

廃 炉 発 官 R 7 第 2 9 号
令 和 7 年 4 月 3 0 日

原 子 力 規 制 委 員 会 殿

東京都千代田区内幸町 1 丁目 1 番 3 号
東京電力ホールディングス株式会社
代表執行役社長 小早川 智明

福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画 変更認可申請書

核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第 6 4 条の 3 第 2 項の規定に基づき、別紙の通り、「福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画」の変更認可の申請をいたします。

以 上

「福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画」について、下記の箇所を別添の通りとする。

変更箇所、変更理由及びその内容は以下の通り。

○福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画

2号機使用済燃料プールからの燃料取り出しに伴い、使用済燃料の取り出し及び構内用輸送容器を使用した共用プールへの輸送に関して、以下の通り変更を行う。

Ⅱ 特定原子力施設の設計、設備

2 特定原子力施設の構造及び設備、工事の計画

2.11 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備

本文

- ・ 2号燃料取り出しに用いる構内用輸送容器の記載の追加
- ・ 2号機燃料取り出しの実施に伴う記載の見直し

添付資料－1－3

- ・ 2号機燃料取り出しの実施に伴う記載の追加
- ・ 記載の適正化

添付資料－2－1－4

- ・ 2号機燃料取り出しの実施に伴い新規記載

添付資料－2－2－3

- ・ 2号機燃料取り出しの実施に伴い新規記載

添付資料－2－3－3

- ・ 2号機燃料取り出しの実施に伴い新規記載

添付資料－8

- ・ 別冊7の記載内容を添付資料へ移行

Ⅲ 特定原子力施設の保安

第1編（1号炉，2号炉，3号炉及び4号炉に係る保安措置）

第5章 燃料管理

第34条

- ・ 2号機燃料取り出しに伴う変更

第36条

- ・ 2号機燃料取り出しに伴う変更

第37条

- ・ 2号機燃料取り出しに伴う変更

附則

- ・ 2号機燃料取り出しに伴う変更

○福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画 別冊集
目次

- ・添付資料へ移行することによる別冊 7 の削除

別冊 7

- ・添付資料への移行による記載削除

以上

別添

2.11 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備

2.11.1 基本設計

2.11.1.1 設置の目的

使用済燃料プールからの燃料取り出しは、燃料取り出し用カバー（構台及び換気設備含む）の設置による作業環境の整備、燃料等を取り扱う燃料取扱設備の設置を行い、燃料を使用済燃料プール内の使用済燃料貯蔵ラックから取り出し原子炉建屋から搬出することを目的とする。

使用済燃料プールからの燃料取り出し設備（以下、「燃料取り出し設備」という。）は、燃料取扱設備、構内用輸送容器、燃料取り出し用カバーで構成される。燃料取扱設備は、燃料取扱機、クレーンで構成され、燃料取り出し用カバーにより支持される。なお、燃料の原子炉建屋外への搬出には、構内用輸送容器を使用する。

また、クレーンはオペレーティングフロア上での資機材運搬や揚重等にも使用する。

2.11.1.2 要求される機能

(1) 燃料取扱設備

燃料取扱設備は、二重のワイヤなどにより落下防止を図る他、駆動源喪失時にも燃料集合体を落下させない設計とする。

また、遮蔽、臨界防止を考慮した設計とする。

(2) 構内用輸送容器

構内用輸送容器は、除熱、密封、遮蔽、臨界防止を考慮した設計とする。また、破損燃料集合体を収納して輸送する容器については、燃料集合体の破損形態に応じて輸送中に放射性物質の飛散・拡散を防止できる設計とする。

(3) 燃料取り出し用カバー

燃料取り出し用カバーは、燃料取扱設備の支持、作業環境の整備及び放射性物質の飛散・拡散防止ができる設計とする。

2.11.1.3 設計方針

燃料取り出し設備は、「特定原子力施設への指定に際し東京電力株式会社福島第一原子力発電所に対して求める措置を講ずべき事項について（平成24年11月7日原子力規制委員会決定。以下、「措置を講ずべき事項」という。）」等の規制基準を満たす設計とする。

その上で、燃料取り出し設備の設計において特に留意すべき点は、以下のとおり。

(1) 燃料取扱設備

a. 落下防止

(a) 使用済燃料貯蔵ラック上には、重量物を吊ったクレーンを通過できないようにインターロックを設け、貯蔵燃料への重量物の落下を防止できる設計とする。

(b) 燃料取扱機の燃料把握機は、二重のワイヤや種々のインターロックを設け、また、

クレーンの主要要素は、二重化を施すことなどにより、燃料移送操作中の燃料集合体等の落下を防止できる設計とする。

b. 遮蔽

燃料取扱設備は、使用済燃料プールから構内用輸送容器への燃料集合体の収容操作を、燃料の遮蔽に必要な水深を確保した状態で、水中で行うことができる設計とするか、放射線防護のための適切な遮蔽を設けて行う設計とする。

c. 臨界防止

燃料取扱設備は、燃料集合体を一体ずつ取り扱う構造とすることにより、燃料の臨界を防止する設計とする。

d. 放射線モニタリング

燃料取扱エリアの放射線モニタリングのため、放射線モニタを設け放射線レベルを測定し、これを免震重要棟集中監視室に表示すると共に、過度の放射線レベルを検出した場合には警報を発し、放射線業務従事者に伝える設計とする。

e. 単一故障

- (a) 燃料取扱機の燃料把握機は、二重のワイヤや燃料集合体を確実につかんでいない場合には吊上げができない等のインターロックを設け、圧縮空気等の駆動源が喪失した場合にも、フックから燃料集合体が外れない設計とする。
- (b) 燃料取扱機の安全運転に係わるインターロックは電源喪失、ケーブル断線で安全側になる設計とする。
- (c) クレーンの主要要素は、二重化を施すことなどにより、移送操作中の構内用輸送容器等の落下を防止できる設計とする。

f. 試験検査

燃料取扱設備のうち安全機能を有する機器は、適切な定期的試験及び検査を行うことができる設計とする。

また、破損燃料を取り扱う場合、燃料取扱設備は、破損形態に応じた適切な取扱手法により、移送中の放射性物質の飛散・拡散を防止できる設計とする。

(2) 構内用輸送容器

a. 除熱

使用済燃料の健全性及び構内用輸送容器構成部材の健全性が維持できるように、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去できる設計とする。

b. 密封

周辺公衆及び放射線業務従事者に対し、放射線被ばく上の影響を及ぼすことのないよう、使用済燃料が内包する放射性物質を適切に閉じ込める設計とする。

c. 遮蔽

内部に燃料を入れた場合に放射線障害を防止するため、使用済燃料の放射線を適切に遮蔽する設計とする。

d. 臨界防止

想定されるいかなる場合にも、燃料が臨界に達することを防止できる設計とする。

また、破損燃料集合体を収納して輸送する容器は燃料集合体の破損形態に応じて輸送中に放射性物質の飛散・拡散を防止できる設計とする。

(3) 燃料取り出し用カバー

a. 燃料取り出し作業環境の整備

燃料取り出し用カバーは、燃料取り出し作業に支障が生じることのないよう、風雨を遮る設計とする。

また、必要に応じ燃料取り出し用カバー内にローカル空調機を設置し、カバー内の作業環境の改善を図るものとする。

b. 放射性物質の飛散・拡散防止

燃料取り出し用カバーは、原子炉建屋から大気への開放部分を低減するとともに、換気設備を設け、排気はフィルタユニットを通じて大気へ放出することにより、カバー内の放射性物質の大気への放出を抑制し、敷地周辺の線量への影響を達成できる限り低減できる設計とする。

(4) 大型カバー（燃料取り出し用カバー）

大型カバーは、その必要な安全機能について、十分に高い信頼性を確保し、かつ、維持し得る設計とする。

大型カバーは、その健全性及び能力を確認するため、適切な方法により、その必要な安全機能を検査ができる設計とする。

2.11.1.4 供用期間中に確認する項目

(1) 燃料取扱設備

燃料取扱設備は、動力源がなくなった場合においても吊り荷を保持し続けること。

(2) 構内用輸送容器

構内用輸送容器は、除熱、密封、遮蔽、臨界防止の安全機能が維持されていること。

(3) 燃料取り出し用カバー

対象外とする。

2.11.1.5 主要な機器

(1) 燃料取扱設備

燃料取扱設備は、燃料取扱機、クレーンで構成する。なお、2号機の燃料取扱設備には、これらに加えてジブクレーンを備える。

a. 燃料取扱機

燃料取扱機は、使用済燃料プール及びキャスクピット上を水平に移動するブリッジ並びにその上を移動するトロリで構成する。なお、2号機の燃料取扱機は、低床ジブクレーンとし、原子炉建屋オペレーティングフロア、燃料取り出し用カバー間を水平に移動する走行台車とその上に設置する旋回体で構成する。

b. クレーン

クレーンは、オペレーティングフロア上部を水平に移動するガーダ及びその上を移動するトロリで構成する。なお、2号機のクレーンは、低床ジブクレーンとし、原子炉建屋オペレーティングフロア、燃料取り出し用カバー間を水平に移動する走行台車とその上に設置する旋回体で構成する。

(2) 構内用輸送容器

構内用輸送容器は、容器本体、蓋、バスケット等で構成する。

(3) 燃料取り出し用カバー

燃料取り出し用カバーは、2号機を除き使用済燃料プールを覆う構造としており、必要により、燃料取扱機支持用架構及びクレーン支持用架構を有する。

なお、2号機については、燃料取扱機支持用架構及びクレーン支持用架構を有する燃料取り出し用構台を新設し、既存の原子炉建屋に新たに設ける開口部から、燃料取扱設備を出し入れする構造とする。

また、燃料取り出し用カバーは換気設備及びフィルタユニットを有する。

1号機の燃料取り出し用カバーは、大型カバーとその内部に設ける内部カバーで構成する。

なお、換気設備の運転状態やフィルタユニット出入口で監視する放射性物質濃度等の監視状態は現場制御盤及び免震重要棟集中監視室に表示され、異常時は警報を発するなどの管理を行う。

2.11.1.6 自然災害対策等

(1) 津波

燃料取扱設備は、東北地方太平洋沖地震津波相当の津波が到達しないと考えられる原子炉建屋オペレーティングフロア上（地上からの高さ約30m）に設置する。

燃料取り出し用カバーは鉄骨構造と鋼製の外装材により構成されているが、閉空間になっておらず、津波襲来時には、水は燃料取り出し用カバーの裏側に回り込み、津波による影響を受けない。

(2) 豪雨，台風，竜巻，落雷

燃料取り出し用カバーは，建築基準法及び関係法令に基づいた風圧力に対し耐えられるよう設計する。

燃料取扱設備は，建築基準法及び関係法令に基づいた風圧力に対し耐えられるよう設計している燃料取り出し用カバー内に設置する。

燃料取出し用カバーは外装材で覆うことにより風雨を遮る設計とする。燃料取扱設備は，風雨を遮る設計である燃料取出し用カバー内に設置する。

燃料取扱設備および燃料取り出し用構台は建築基準法及び関連法令に従い必要に応じて避雷設備を設ける。

(3) 外部人為事象

外部人為事象に対する設計上の考慮については，Ⅱ.1.14 参照。

(4) 火災

燃料取り出し用カバー及び燃料取り出し用カバー内外の主要構成部材は不燃性のものを使用し，電源盤については不燃性又は難燃性，ケーブルについては難燃性のものを可能な限り使用し，火災が発生することを防止する。火災の発生が考えられる箇所について，火災の早期検知に努めるとともに，消火器を設置することで初期消火活動を可能にし，火災による影響を軽減する。

(5) 環境条件

燃料取扱設備については，燃料取り出し用カバーに換気設備を設け，排気はフィルタユニットを通じて大気へ放出することとしている。

燃料取り出し用カバーの外部にさらされている鉄骨部及び機器等は，劣化防止を目的に，塗装を施す。

(6) 被ばく低減対策

放射線業務従事者が立ち入る場所の外部放射線に係る線量率を把握し，作業時間等を管理することで，作業時の被ばく線量が法令に定められた線量限度を超えないようにする。

また，放射線業務従事者の被ばく線量低減策として，大組した構造物をクレーンにてオペレーティングフロアへ吊り込むことにより，オペレーティングフロア上での有人作業の削減を図る。

2.11.1.7 運用

(1) 燃料集合体の健全性確認

使用済燃料プールに貯蔵されている燃料集合体について，移送前に燃料集合体の機械的健全性を確認する。

(2) 破損燃料の取り扱い

燃料集合体の機械的健全性確認において，破損が確認された燃料集合体を移送する

場合には、破損形態に応じた適切な取扱手法及び収納方法により、放射性物質の飛散・拡散を防止する。

2.11.1.8 構造強度及び耐震性

(1) 構造強度

a. 燃料取扱設備

燃料取扱設備は、設計、材料の選定、製作及び検査について、適切と認められる規格及び基準による。

燃料取扱設備は、地震荷重等の適切な組合せを考慮しても強度上耐え得る設計とする。

b. 構内用輸送容器

構内用輸送容器は取扱中における衝撃、熱等に耐え、かつ、容易に破損しない設計とする。

構内用輸送容器は、設計、材料の選定、製作及び検査について適切と認められる規格及び基準によるものとする。

c. 燃料取り出し用カバー

燃料取り出し用カバーは、設計、材料の選定、製作及び検査について、適切と認められる規格及び基準を原則とするが、特殊な環境下での設置となるため、必要に応じ解析や試験等を用いた評価により確認する。

燃料取り出し用カバーは、燃料取扱設備を支持するために必要な構造強度を有する設計とする。

(2) 耐震性

a. 燃料取扱設備

(a) 燃料取扱機

燃料取扱機は、2021年9月8日及び2022年11月16日の原子力規制委員会で示された耐震設計の考え方を踏まえ、その安全機能の重要度、地震によって機能の喪失を起こした場合の安全上の影響（公衆への被ばく影響）や廃炉活動への影響等を考慮した上で、核燃料物質を非密封で扱う燃料加工施設や使用施設等における耐震クラス分類を参考にして適切な耐震設計上の区分を行うとともに、適切と考えられる設計用地震力に十分耐えられる設計とする。

ただし、2021年9月8日以前に認可された設備については、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」を参考にして耐震クラスを分類している。

(b) クレーン

クレーンは、2021年9月8日及び2022年11月16日の原子力規制委員会で示された耐震設計の考え方を踏まえ、その安全機能の重要度、地震によって機能の喪失を起こした場合の安全上の影響（公衆への被ばく影響）や廃炉活動への影響等

を考慮した上で、核燃料物質を非密封で扱う燃料加工施設や使用施設等における耐震クラス分類を参考にして適切な耐震設計上の区分を行うとともに、適切と考えられる設計用地震力に十分耐えられる設計とする。

ただし、2021 年 9 月 8 日以前に認可された設備については、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」を参考にして耐震クラスを分類している。

b. 燃料取り出し用カバー

燃料取り出し用カバーは、2021 年 9 月 8 日及び 2022 年 11 月 16 日の原子力規制委員会で示された耐震設計の考え方を踏まえ、その安全機能の重要度、地震によって機能の喪失を起こした場合の安全上の影響（公衆への被ばく影響）や廃炉活動への影響等を考慮した上で、核燃料物質を非密封で扱う燃料加工施設や使用施設等における耐震クラス分類を参考にして適切な耐震設計上の区分を行うとともに、適切と考えられる設計用地震力に十分耐えられる設計とする。

ただし、2021 年 9 月 8 日以前に認可された設備については、「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」を参考にして耐震クラスを分類している。

2.11.2 基本仕様

2.11.2.1 主要仕様

(1) 燃料取扱設備

(2号機, 3号機及び4号機を除く)

a. 燃料取扱機

個数	1 式
----	-----

b. クレーン

個数	1 式
----	-----

(4号機)

a. 燃料取扱機

型式	燃料把握機付移床式
----	-----------

基数	1 基
----	-----

定格荷重	燃料把握機	: 450kg
	補助ホイス	: 450kg

b. クレーン

型式	天井走行式
----	-------

基数	1 基
----	-----

定格荷重	主巻	: 100t
	補巻	: 5t
	ホイス	: 10t

c. エリア放射線モニタ

検出器の種類	半導体検出器
--------	--------

計測範囲	$10^{-3} \sim 10\text{mSv/h}$
------	-------------------------------

個数	2 個
----	-----

取付箇所	4号機 原子炉建屋 5FL (燃料取り出し用カバーオペフロ階)
------	---------------------------------

(3号機)

a. 燃料取扱機

型式	燃料把握機付移床式		
基数	1 基		
定格荷重	燃料把握機	:	1t
	西側補助ホイスト	:	4.9t
	東側補助ホイスト	:	4.9t
	テンシルトラス	:	1.5t

b. クレーン

型式	床上走行式		
基数	1 基		
定格荷重	主巻	:	50t
	補巻	:	5t

c. エリア放射線モニタ

検出器の種類	半導体検出器		
計測範囲	$10^{-2} \sim 10^2 \text{mSv/h}$		
個数	2 個		
取付箇所	3号機 燃料取り出し用カバー 燃料取り出し作業フロア		

(2号機)

a. 燃料取扱機

型式	低床ジブクレーン		
基数	1 基		
定格荷重	: 1t		

b. クレーン

型式	低床ジブクレーン		
基数	1 基		
定格荷重	: 47t		

c. ジブクレーン

型式	低床ジブクレーン		
基数	1 基		
定格荷重	: 3.9t		

d. エリア放射線モニタ

検出器の種類	半導体検出器
計測範囲	$10^{-2} \sim 10^2 \text{mSv/h}$
個数	2 個
取付箇所	2 号機 燃料取り出し用構台作業エリア

(2) 構内用輸送容器

(2 号機, 3 号機及び 4 号機を除く)

基数	1 式
----	-----

(4 号機)

型式	NFT-22B 型
収納体数	22 体
基数	2 基

型式	NFT-12B 型
収納体数	12 体
基数	2 基

(3 号機)

種類	密封式円筒形
収納体数	7 体
基数	2 基

種類	密封式円筒形
収納体数	2 体
基数	1 基

(2 号機) ※

種類	密封式円筒形
収納体数	7 体
基数	2 基

※ 3 号機と兼用

(3) 燃料取り出し用カバー（構台及び換気設備含む）

（4号機）

a. 燃料取り出し用カバー

種類	鉄骨造
寸法	約 69m（南北）×約 31m（東西）×約 53m（地上高） （作業環境整備区画） 約 55m（南北）×約 31m（東西）×約 23m（オペレーティングフロア上部高さ）
個数	1 個

b. 送風機（給気フィルタユニット）

種類	遠心式
容量	25,000m ³ /h
台数	3 台

c. プレフィルタ（給気フィルタユニット）

種類	中性能フィルタ（袋型）
容量	25,000m ³ /h
台数	3 台

d. 高性能粒子フィルタ（給気フィルタユニット）

種類	高性能粒子フィルタ
容量	25,000m ³ /h
効率	97%（粒径 0.3 μm）以上
台数	3 台

e. 排風機（排気フィルタユニット）

種類	遠心式
容量	25,000m ³ /h
台数	3 台

f. プレフィルタ（排気フィルタユニット）

種類	中性能フィルタ（袋型）
容量	25,000m ³ /h
台数	3 台

g. 高性能粒子フィルタ（排気フィルタユニット）

種類	高性能粒子フィルタ
容量	25,000m ³ /h
効率	97%（粒径 0.3 μm）以上
台数	3 台

h. 放射性物質濃度測定器（排気フィルタユニット出入口）

(a) 排気フィルタユニット入口

検出器の種類	シンチレーション検出器
計測範囲	10 ⁰ ～10 ⁴ s ⁻¹
台数	1 台

(b) 排気フィルタユニット出口

排気フィルタユニット出口については、Ⅱ2.15 放射線管理関係設備等参照

i. ダクト

(a) カバー内ダクト

種類	長方形はぜ折りダクト／鋼板ダクト
材質	溶融亜鉛めっき鋼板（SGCC 又は SGHC）／SS400

(b) 屋外ダクト

種類	長方形はぜ折りダクト／鋼板ダクト
材質	溶融亜鉛めっき鋼板 （SGCC 又は SGHC，ガルバニウム付着）／SS400

(c) 柱架構ダクト

種類	柱架構
材質	鋼材

（3号機）

a. 燃料取り出し用カバー

種類	鉄骨造
寸法	約 19m（南北）×約 57m（東西）×約 54m（地上高） （作業環境整備区画） 約 19m（南北）×約 57m（東西）×約 24m（オペレーテ ィングフロア上部高さ）
個数	1 個

b. 排風機

種類	遠心式
容量	30,000m ³ /h
台数	2 台

c. プレフィルタ（排気フィルタユニット）

種類	中性能フィルタ
容量	10,000m ³ /h
台数	4 台

d. 高性能粒子フィルタ（排気フィルタユニット）

種類	高性能粒子フィルタ
容量	10,000m ³ /h
効率	97%（粒径 0.3 μm）以上
台数	4 台

e. 放射性物質濃度測定器（排気フィルタユニット出入口）

(a) 排気フィルタユニット入口

検出器の種類	シンチレーション検出器
計測範囲	10 ⁻¹ ～10 ⁵ s ⁻¹
台数	1 台

(b) 排気フィルタユニット出口

排気フィルタユニット出口については、Ⅱ2.15 放射線管理関係設備等参照

f. ダクト

種類	はぜ折りダクト／鋼板ダクト
材質	ガルバリウム鋼板／SS400

(2号機)

a. 燃料取り出し用構台

種類	鉄骨造
寸法	約 33m（南北）×約 27m（東西）×約 45m（地上高） （作業環境整備区画） 約 33m（南北）×約 27m（東西）×約 17m（オペレーティングフロア上部高さ）
個数	1 個

b. 排風機

種類	遠心式
容量	30,000m ³ /h
台数	2 台

c. プレフィルタ（排気フィルタユニット）

種類	中性能フィルタ
容量	10,000m ³ /h
台数	4 台

d. 高性能粒子フィルタ（排気フィルタユニット）

種類	高性能粒子フィルタ
容量	10,000m ³ /h
効率	97%（粒径 0.3 μm）以上
台数	4 台

e. 放射性物質濃度測定器（排気フィルタユニット出入口）

(a) 排気フィルタユニット入口

検出器の種類	シンチレーション検出器
計測範囲	10 ⁻¹ ～10 ⁵ s ⁻¹
台数	4 台

(b) 排気フィルタユニット出口

排気フィルタユニット出口については、Ⅱ2.15 放射線管理関係設備等参照

f. ダクト

種類	はぜ折りダクト／鋼板ダクト
材質	ガルバリウム鋼板／SS400

（1号機）

a. 大型カバー

種類 鉄骨造

寸法 約 66m（南北）×約 56m（東西）×約 68m（地上高）

（作業環境整備区画）

約 66m（南北）×約 56m（東西）×約 40m（オペレーティングフロア上部高さ）

個数 1 個

b. 排風機

種類	遠心式
容量	30,000m ³ /h
台数	2 台（うち 1 台予備）

c. プレフィルタ（排気フィルタユニット）

種類	中性能フィルタ
容量	30,000m ³ /h
台数	2 台（うち 1 台予備）

d. 高性能粒子フィルタ（排気フィルタユニット）

種類	高性能粒子フィルタ
容量	30,000m ³ /h
効率	97%（粒径 0.3 μm）以上
台数	2 台（うち 1 台予備）

e. 放射性物質濃度測定器（排気フィルタユニット出入口）

(a) 排気フィルタユニット入口

検出器の種類	シンチレーション検出器
計測範囲	10 ⁰ ～10 ⁴ s ⁻¹
台数	2 台

(b) 排気フィルタユニット出口

排気フィルタユニット出口については、Ⅱ2.15 放射線管理関係設備等参照

f. ダクト

種類	はぜ折りダクト／鋼板ダクト
材質	ガルバリウム鋼板／SS400

2.11.3 添付資料

添付資料－１ 燃料取扱設備の設計等に関する説明書

添付資料－１－１ 燃料の落下防止，臨界防止に関する説明書※¹

添付資料－１－２ 放射線モニタリングに関する説明書※¹

添付資料－１－３ 燃料の健全性確認及び取り扱いに関する説明書※¹

添付資料－２ 構内用輸送容器の設計等に関する説明書

添付資料－２－１ 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書※¹

添付資料－２－２ 破損燃料用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書※¹

添付資料－２－３ 構内輸送時の措置に関する説明書※¹

添付資料－３ 燃料取り出し用カバーの設計等に関する説明書

添付資料－３－１ 放射性物質の飛散・拡散を防止するための機能に関する説明書

添付資料－３－２ 移送操作中の燃料集合体の落下※¹

添付資料－４ 構造強度及び耐震性に関する説明書

添付資料－４－１ 燃料取扱設備の構造強度及び耐震性に関する説明書※¹

添付資料－４－２ 燃料取り出し用カバーの構造強度及び耐震性に関する説明書

添付資料－４－３ 燃料取り出し用カバー換気設備の構造強度及び耐震性に関する説明書

添付資料－５ 使用済燃料プールからの燃料取り出し工程表※¹

添付資料－６ 福島第一原子力発電所第１号機原子炉建屋カバーに関する説明書

添付資料－７ 福島第一原子力発電所第２号機原子炉建屋外壁の開口設置について

添付資料－７－１ 福島第一原子力発電所第２号機原子炉建屋西側外壁の開口設置について

添付資料－７－２ 福島第一原子力発電所第２号機原子炉建屋南側外壁の開口設置について

添付資料－８ 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備に係る補足説明

※¹（２号機，３号機及び４号機を除く）の説明書については，別途申請する。

燃料の健全性確認及び取り扱いに関する説明書

1. 概要

福島第一１～４号機 使用済燃料プール（以下、ＳＦＰ）に貯蔵されている燃料は、海水注入等による水質環境変化、原子炉建屋爆発に伴うがれきの落下を経験しており、燃料を使用済燃料共用プール（４号機ＳＦＰに貯蔵されている新燃料については、一部６号機ＳＦＰ）へ搬出する前に、取り扱いに必要な機能を有していることを確認しておく必要がある。

燃料健全性を確認するための検査としてはシッピング検査や外観検査といった検査が考えられるが、燃料検査装置が損傷していること、ＳＦＰ周辺は空間線量が高いことから、通常行われている検査を行うことは困難な状況にある。このため、海水注入等による水質環境変化についてはＳＦＰ水質を模擬した燃料部材の腐食試験等により、がれきの落下についてはがれきが衝突する上部タイププレート（以下、ＵＴＰ）の変形程度を確認することにより、燃料健全性への影響について確認する。

燃料健全性への影響がない燃料集合体は２号機においては２号機構内用輸送容器、３号機においては３号機構内用輸送容器、４号機においては既存のＮＦＴ－２２Ｂ型構内輸送容器に収納し、燃料健全性への影響が疑われる燃料集合体は燃料被覆管の破損を考慮した容器に収納し、使用済燃料共用プール（４号機ＳＦＰに貯蔵されている新燃料については、一部６号機ＳＦＰ）へ搬出する。

2. 震災時のＳＦＰの状況

福島第一１～４号機は地震後の津波によりプール水の冷却機能が喪失し、使用済燃料からの崩壊熱によりプール水が蒸発したが、放水車や既設のＦＰＣ配管を用いた注水によりＳＦＰ内の燃料が冠水した状態を維持することができた。１号機、３号機、４号機は水素爆発により建屋が損傷しており、水中カメラを用いて３号機、４号機のＳＦＰ内を調査したところ、がれきが散乱していることを確認している。

水質分析の結果、塩化物イオン濃度は４号機で約２５００ppm、pHは３号機で１１．２が確認された。以下に福島第一１～４号機の震災時のＳＦＰの水質について記載する。

2.1. １号機ＳＦＰの状況

震災発生時に１号機のＳＦＰには使用済燃料２９２体、新燃料１００体が貯蔵されていた。震災に伴う全交流電源喪失により、平成２３年３月１１日にＳＦＰの冷却機能及び補給水機能が喪失したが、コンクリートポンプ車による放水（淡水）やＦＰＣ配管による注水（淡水）により、図２－１に示すとおり燃料が冠水した状態を維持することができた。平成２３年８月１０日に代替冷却系によるＳＦＰ冷却を開始した。冷却開始時の水温は約４７℃（代替冷却系入口温度）だったが、平成２３年８月２７日頃には安定した状態になった。

なお、1号機SFPには海水注入を行っていない。

2.2. 2号機SFPの状況

震災発生時に2号機のSFPには使用済燃料587体、新燃料28体が貯蔵されていた。震災に伴う全交流電源喪失により、平成23年3月11日にSFPの冷却機能及び補給水機能が喪失したが、FPC配管を用いた注水（海水又は淡水）により、図2-2に示すとおり燃料が冠水した状態を維持することができた。平成23年5月31日に代替冷却系によるSFP水冷却を開始した。冷却開始時の水温は70℃（SFP温度計指示値）だったが、平成23年6月5日頃には安定した状態になった。また、平成24年1月から塩分除去作業を開始した。塩分除去開始前の塩化物イオン濃度は1600ppmであったが、平成24年7月に十分低い濃度に達したことから、塩分除去作業を完了した（保安規定制限値：100ppm）。塩分濃度の推移を図2-3に示す。

2.3. 3号機SFPの状況

震災発生時に3号機のSFPには使用済燃料514体、新燃料52体が貯蔵されていた。震災に伴う全交流電源喪失により、平成23年3月11日にSFPの冷却機能及び補給水機能が喪失したが、放水車、屈折放水塔車、コンクリートポンプ車による放水（海水又は淡水）や既設のFPC配管を用いた注水により図2-4に示すとおり燃料が冠水した状態を維持することができた。

SFP水を分析したところ、落下したコンクリートからカルシウム等が溶出し、SFP水がアルカリ性を示すことが確認された。このため、SFP内の設備の腐食を防止するためにホウ酸水を注水して中和した。注水前には強アルカリ性（pH11.2、平成23年5月8日測定）であったが、注水後には弱アルカリ性（pH9.0、平成23年7月7日測定）になった。

平成23年6月30日に代替冷却系によるSFP水冷却を開始した。冷却開始時の水温は約62℃（代替冷却系入口温度）だったが、平成23年7月7日頃には安定した状態になった。また、平成24年4月から塩分除去作業を開始した。塩分除去開始前の塩化物イオン濃度は1600ppmであったが、平成25年3月に十分低い濃度に達したことから塩分除去作業を完了した。塩分濃度の推移を図2-5に示す。

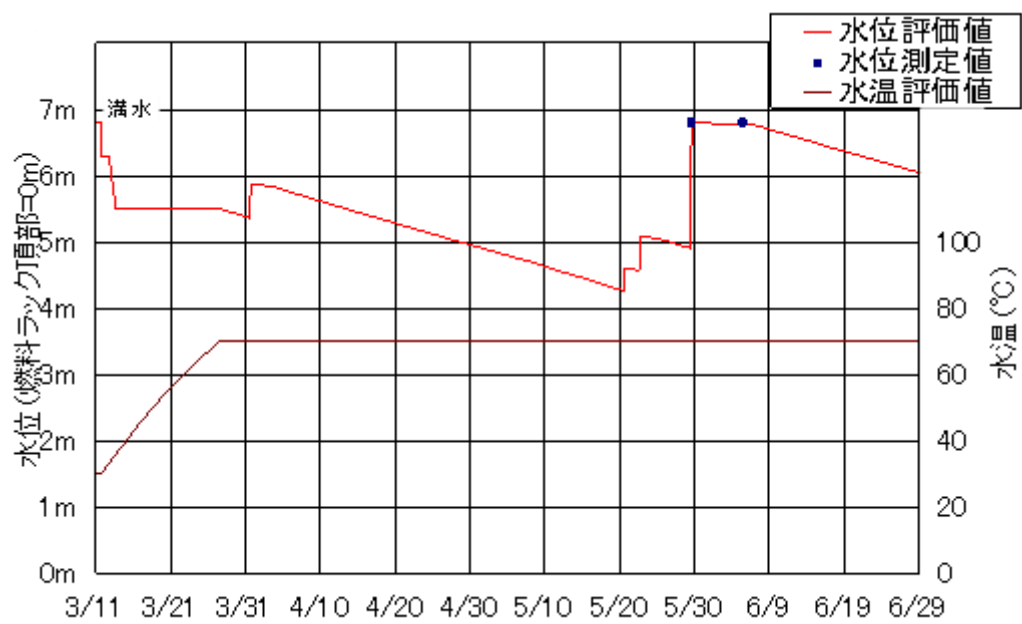
2.4. 4号機SFPの状況

震災発生時に4号機のSFPには使用済燃料1331体、新燃料204体が貯蔵されていた。震災に伴う全交流電源喪失により、平成23年3月11日にSFPの冷却機能及び補給水機能が喪失したが、高圧放水車、コンクリートポンプ車を用いた放水（海水又は淡水）により図2-6に示すとおり燃料が冠水した状態を維持することができた。

福島第一1～4号機SFPの中で最も発熱量が高い4号機では、平成23年3月22日より海水注水を実施しており、平成23年5月7日には約2500ppmの塩化物イオン濃度が測定され

た。淡水に切替えた以降は、約2000～2500ppmの塩化物イオン濃度で推移した。

平成23年7月31日に代替冷却系による S F P 水冷却を開始した。冷却開始前の水温は90℃程度と評価されているが、冷却開始後は夏場でも40℃程度で安定的に推移した。また、平成23年8月から塩分除去作業を開始した。塩分除去開始前の塩化物イオン濃度は1944ppmであったが、平成24年10月に塩化物イオン濃度9ppm程度と十分低い濃度に達したことから塩分除去作業を完了した。塩分濃度の推移を図2-7に示す。



日付は平成 23 年の月/日を示す

図 2 - 1 1 号機 S F P の評価結果

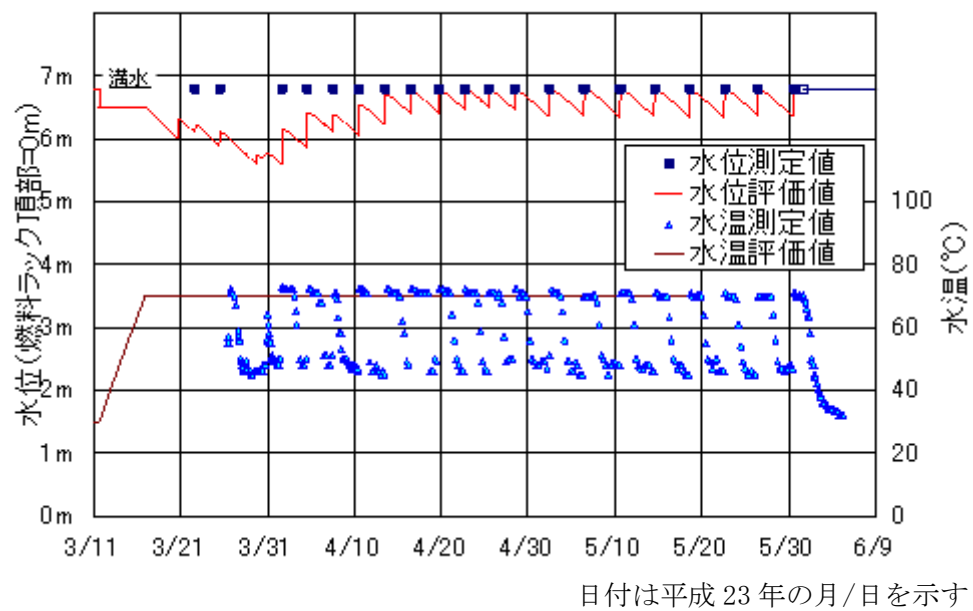


図 2-2 2号機SFPの評価結果

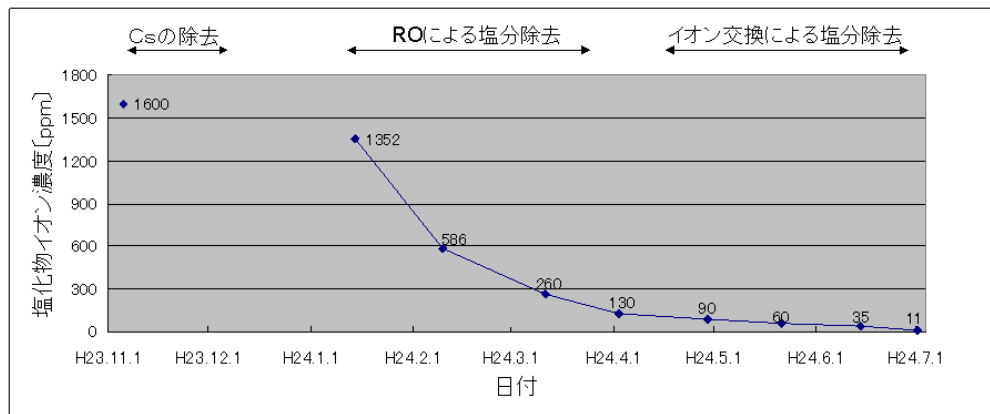
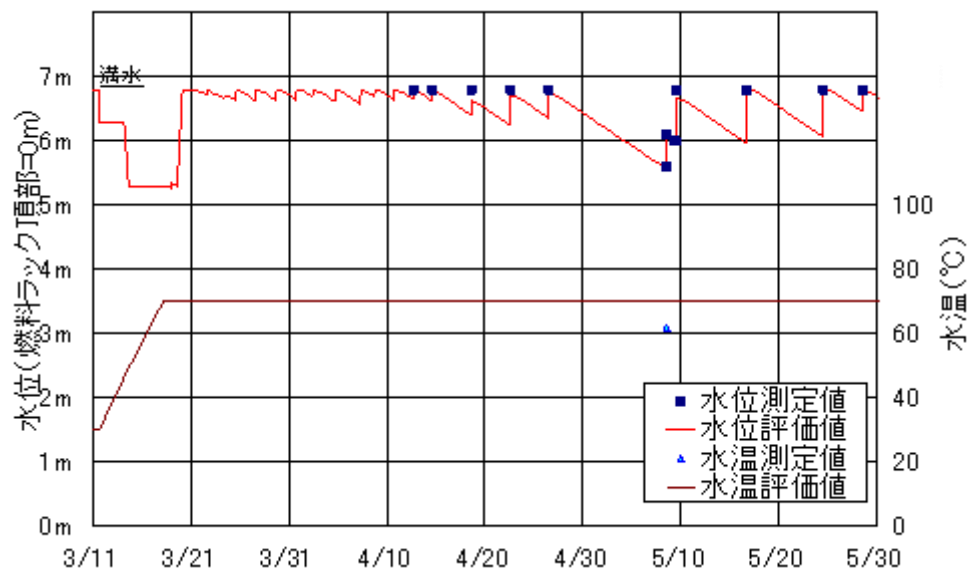


図 2-3 2号機SFP塩化物イオン濃度の評価結果



日付は平成 23 年の月/日を示す

図 2－4 3号機S F Pの評価結果

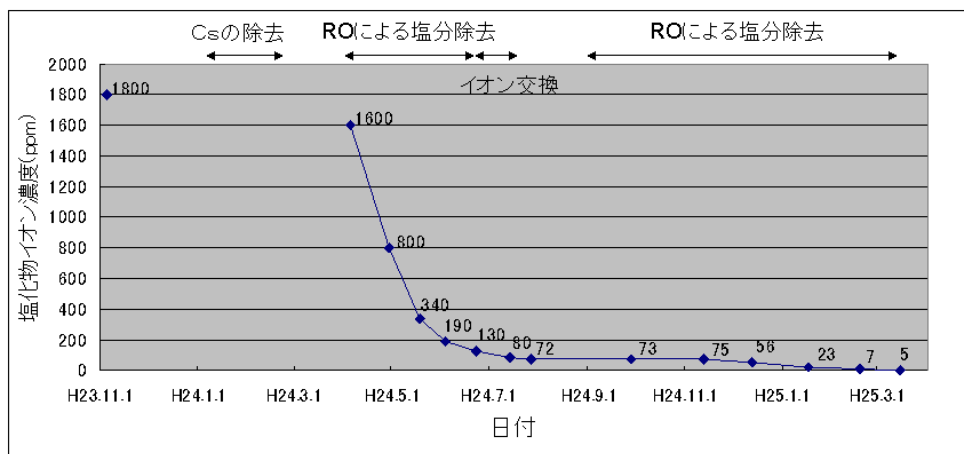
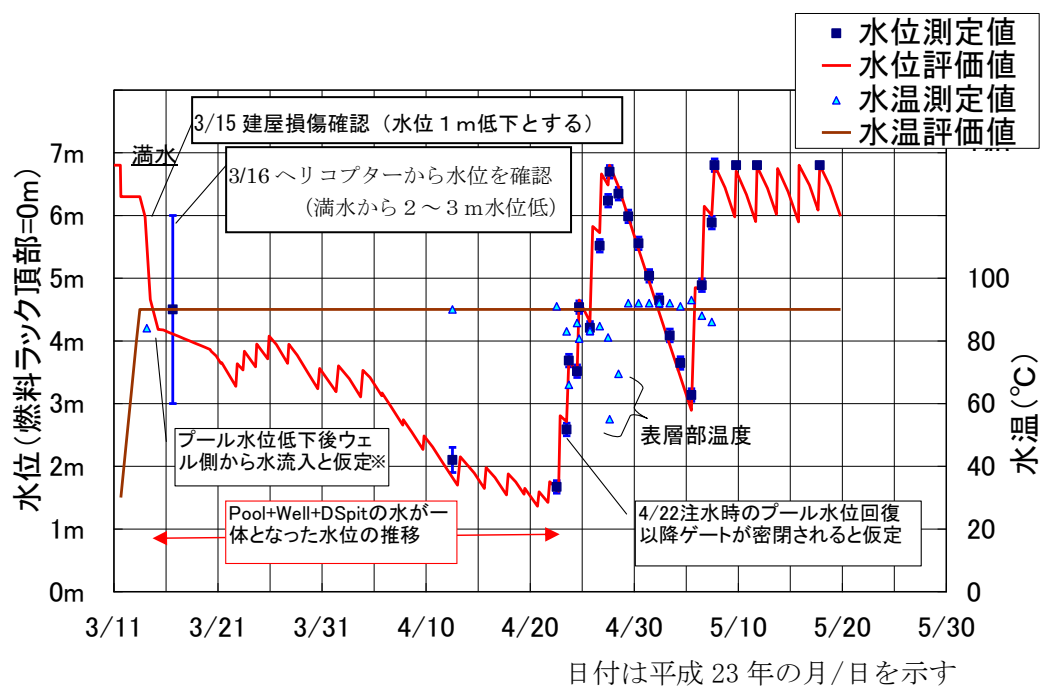


図 2－5 3号機S F P塩化物イオン濃度の評価結果



※ 地震発生時、原子炉ウェル側は満水状態であったため、水位評価値においては、ウェル・DSピット側からプール側への水の流入を考慮している。

図 2-6 4号機SFPの評価結果

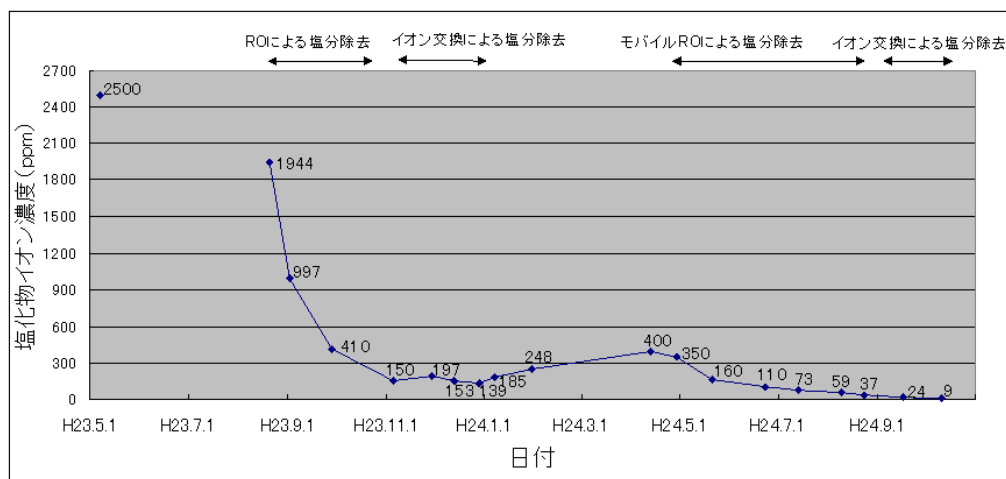


図 2-7 4号機SFP塩化物イオン濃度の評価結果

3. 燃料取り扱いに必要な機能

福島第一1～4号機SFPに保管されている燃料集合体は、原子炉に装荷して使用する計画はないが、使用済燃料共用プール（4号機SFPに貯蔵されている新燃料については、一部6号機SFP）へ搬出するための取り扱いに必要な機能を有している必要がある。

3.1. 燃料集合体の吊上げ

燃料取扱機は、燃料集合体のUTPのハンドルを把持する。UTPは8本の結合燃料棒とナットを介して結合され、結合燃料棒の下端は下部タイプレート（以下、LTP）に結合されている。結合燃料棒以外の燃料棒は、UTPとLTPの間に挟まれているが、結合されていない。

結合燃料棒の引張強度は1本あたり500kg以上であり、UTP、結合燃料棒1本（端栓、燃料被覆管及びナット）及びLTPが健全であれば、燃料集合体（約300kg）を吊上げることができる。

3.2. 構内用輸送容器の収納条件

2号機、3号機及び4号機SFPに貯蔵されている震災以前から存在する漏えい燃料等やハンドル部が変形し燃料健全性への影響が疑われる燃料の輸送で用いる構内用輸送容器を除く、構内用輸送容器は、燃料ペレットが燃料被覆管に密封されていることを前提として安全評価を行っている。このため、構内用輸送容器に収納する前に、燃料被覆管健全性を確認する必要がある。

4. 海水注入等による燃料構造材の腐食

燃料を構成する材料であるジルカロイ2、ステンレス鋼は腐食に強い材料であり、腐食する可能性は低い。しかしながら、念のため、SFPの水質（海水注水、pH、水温）を模擬した腐食試験と4号機SFPに保管されていた新燃料の外観点検を行った。その結果、燃料健全性に影響を与えるような腐食は確認されなかった。

このため、福島第一1～4号機SFPに貯蔵されている燃料において燃料健全性に影響する腐食はないと考える。

4.1. 腐食試験

福島第一1～4号機SFPの水質環境の影響を評価するため、腐食試験を行った。海水注水の影響確認は、最も多くの海水を注水した4号機SFPの水質環境を試験条件とした。pHは最も多くのコンクリートが混入した3号機SFPの水質環境を試験条件とした。

4.1.1. 試験条件

腐食試験の試験条件を表4-1に、試験片の形状を表4-2、表4-3、各部材の材質を

表 4-4 に示す。

4.1.1.1. 海水注水による影響の確認

試験片は燃料の吊り上げに必要な部材である結合燃料棒及び結合燃料棒と U T P または L T P との結合部（ナットと膨張スプリングを含む）とした。

試験時間は 4 号機の温度履歴を考慮し 3500 時間とした。3500 時間は 4 号機の S F P に海水注入してから代替冷却系による冷却を開始するまでの期間を包絡している。また、時間に対する腐食程度の傾向を把握するために、2000 時間についても実施した。

水質環境は、4 号機の水質環境を模擬して 3 つのフェーズに分割した。

(1) フェーズ 1：平成 23 年 3 月 22 日～平成 23 年 5 月 7 日までの環境条件

平成 23 年 5 月 7 日には塩化物イオン濃度 2500ppm が測定されている。しかしながら、水位が低かった時にはこれより濃度が高かったと考えられる。よって、保守的に人工海水の約 3 倍希釈とし、塩化物イオン濃度 6000ppm で 1200 時間浸漬し、その後 2500ppm で浸漬した。水温は冷却前の水温である 90℃とした。

(2) フェーズ 2：平成 23 年 5 月 7 日以降の環境条件

平成 23 年 5 月 7 日には塩化物イオン濃度 2500ppm が測定され、図 2-7 に示すとおり平成 23 年 8 月 20 日には 1944ppm が測定された。この間、海水注入は行われていないことから、平成 23 年 5 月 7 日以降の環境条件を塩化物イオン濃度 2500ppm、温度 90℃とした。

(3) フェーズ 3：環境改善後の環境条件

図 2-7 に示すとおり試験条件を検討した時期（平成 24 年 4 月）に塩化物イオン濃度 400ppm が測定されたため、塩化物イオン濃度 400ppm、温度 40℃を環境改善後の環境条件に設定した。

現在は 100ppm 以下で管理されている。

4.1.1.2. アルカリ化による影響の確認

コンクリートがれきによるアルカリ化の影響を確認するため、コンクリートから溶出するアルカリ金属（Ca 等）として、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の薬剤で pH11.2 に調整した。

塩化物イオン濃度及び水温は、測定データ及び海水注水による影響評価試験の条件を考慮して 2500ppm、また 3 号機 S F P の水温 70℃を設定した。試験時間は、海水注水による影響評価試験の条件を考慮して、2000 時間及び 3500 時間とした。

4.1.1.3. 照射影響の確認

照射材と未照射材との差異を確認するため、比較試験を実施した。照射材は、福島第二原子力発電所 1 号機で 5 サイクル照射した後に取り出した 9×9 燃料 A 型少数体装荷燃料

(集合体平均燃焼度：53GWd/t) の上部端栓，下部端栓（燃料被覆管を含む）及びLTPとした。

環境条件は，海水注水による影響評価試験の条件を考慮して，温度 90℃，塩化物イオン濃度 2500ppm，中性の環境を選定した。試験時間は 2000 時間とした。

4.1.2. 試験結果

図4-1～図4-5に腐食試験の代表的な結果を示す。

燃料吊り上げ時の荷重負担部位のうち，ジルカロイ製部材（端栓，被覆管）については，有意な腐食は見られなかった。図4-1ではニッケル基合金の膨張スプリングに腐食が見られるが，詳細観察の結果，膨張スプリング近傍の上部端栓，UTPの減肉は見られない。なお，膨張スプリングは吊り上げ時の荷重負担部位ではないため，吊上げ機能には影響しない。また，ジルカロイ製部材（上部端栓）とステンレス製部材（ナット）との接触部（ねじ山）に有意な腐食は見られなかった。

一方，ステンレス製の荷重負担部材（UTP，LTP及びナット）については，表面の軽微な腐食を示す着色が観察され，一部の試験片では部材内部に及ぶ孔食が観察された。図4-5にUTPに観察された孔食を示す。孔食は単発的に発生しており，偶発的で発生頻度は限定的なものと考えられるため，腐食の集中により荷重負担部材の強度が低下する可能性は小さく，吊上げ機能には影響しないと考える。また，漏えい流制御板の押さえ板と押さえねじの接触部で腐食が観察されているが，腐食はねじ部近傍に限定されており吊上げ機能には影響しない。

図4-6，図4-7に引張試験の結果について示す。図に示すとおり，浸漬後の試験片でも浸漬していない試験片でも最大荷重に有意な差はなく，強度劣化は確認されなかった。

4.2. 4号機使用済燃料プール内に保管された新燃料の外観点検

平成24年7月に4号機SFPから未照射の新燃料を2体取り出し，うち1体について詳細な外観点検を実施した。UTP，結合燃料棒（端栓，被覆管及びナット）及びLTPに顕著な腐食は確認されなかった。

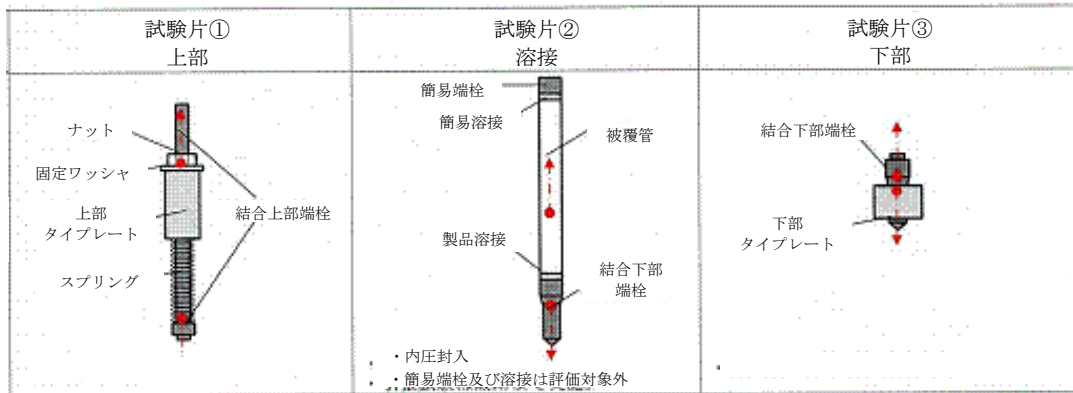
図4-8，図4-9にジルカロイ製部材（上部端栓）とステンレス製部材（ナット）の接触部を示す。ジルカロイ製部材とステンレス製部材の接触部にも腐食は確認されなかった。図4-10にLTPの観察結果を示す。LTPの一部分に僅かな錆が見られたが，全体的に有意なキズも腐食もない状況であった。尚，錆は限定的であり，腐食の集中による荷重負担部材の強度が低下する可能性は小さく，吊上げ機能には影響しないと考える。

表 4-1 腐食試験の試験条件

想定項目		試験条件, 温度, 塩化物イオン濃度	燃料 タイプ	予備 酸化膜	試験 片 ①	試験 片 ②	試験 片 ③	備考
海水注水による影響の確認	フェーズ 1	90℃, 6000 ppm で 1200h の浸漬後, 90℃, 2500ppm で浸漬	9×9 燃料 (A 型) 未照射材	無	○	△	○	
				有	○	△	○	
			9×9 燃料 (B 型) 未照射材	無	○	—	○	
				有	○	—	○	
	フェーズ 2	90℃, 2500ppm	9×9 燃料 (A 型) 未照射材	無	○	—	○	
				有	○	—	○	
			9×9 燃料 (B 型) 未照射材	無	○	—	○	
				有	○	—	○	
	フェーズ 3	40℃, 400ppm	9×9 燃料 (A 型) 未照射材	無	○	—	○	
				有	○	—	○	
			9×9 燃料 (B 型) 未照射材	無	○	—	○	
				有	○	—	○	
アルカリ化による影響の確認		70℃, 2500ppm	9×9 燃料 (A 型) 未照射材	無	○	—	○	高 pH
					○	—	○	比較材
照射影響の確認		90℃, 2500ppm (照射影響比較試験)	9×9 燃料 (A 型) 照射材	照射により有	▲	—	▲	
			9×9 燃料 (A 型) 未照射材	無	▲	—	▲	比較材

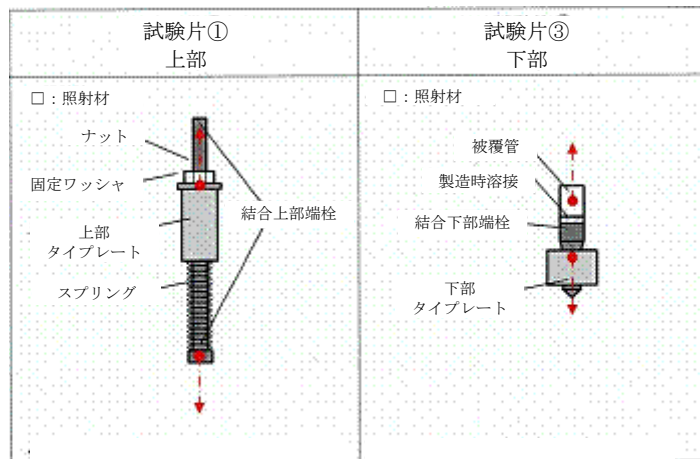
○は試験時間 2 条件 (2000 h, 3500 h), △は試験時間 1 条件 (3500 h), ▲は試験時間 1 条件 (2000 h) を示す。

表 4－2 未照射材用腐食試験片の形状



*一点鎖線矢印（）は、引張試験での荷重作用方向を表わす。

表 4－3 照射材用腐食試験片の形状



*一点鎖線矢印（）は、引張試験での荷重作用方向を表わす。

表 4－4 各部材の材質

	部材	材質
1	結合燃料棒 （上部端栓，下部端栓）	ジルカロイ 2
2	U T P	ステンレス鋼
3	L T P	ステンレス鋼
4	ナット	ステンレス鋼
5	膨張スプリング	ニッケル基合金
6	固定ワッシャ	ステンレス鋼

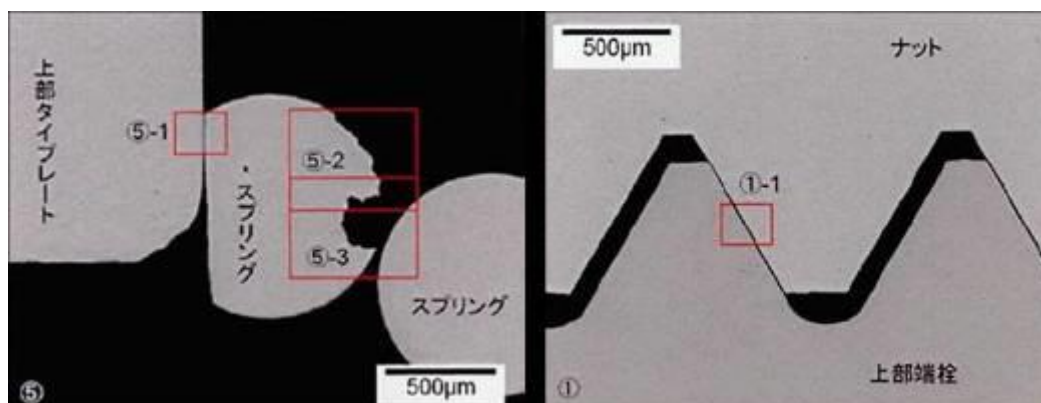
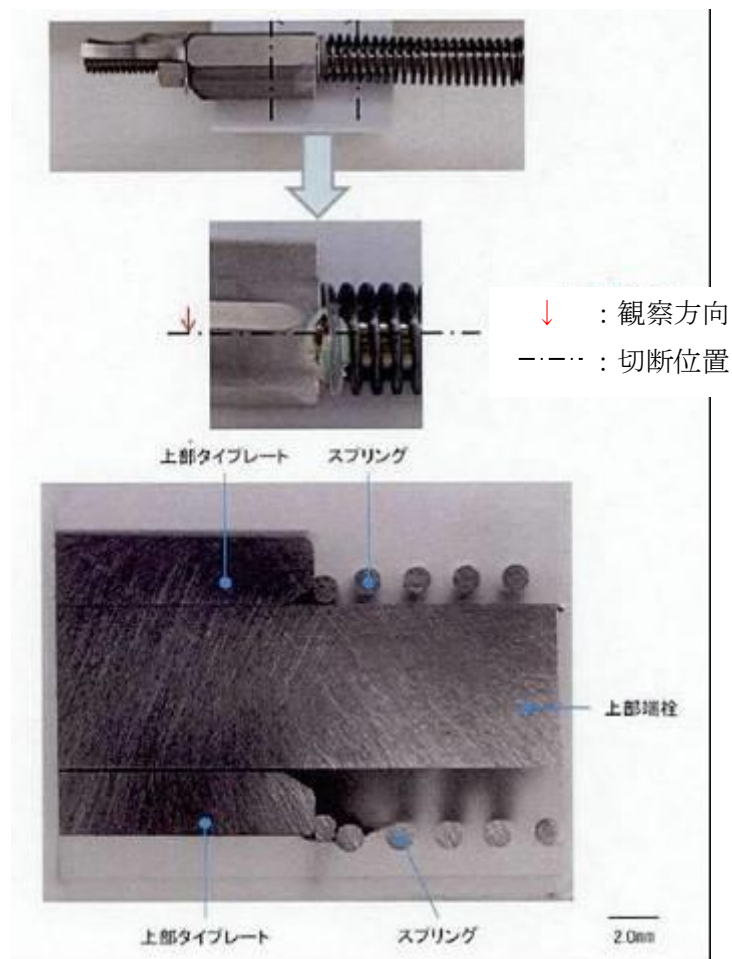


図 4-1 腐食試験結果（試験片①，未照射材）：フェーズ 1
 (90℃ 塩化物イオン濃度：6000ppm(1200 時間)，2500ppm，3500 時間浸漬)
 【予備酸化無し】

浸漬試験前



(a) C65U6CZ02-全体写真

3500 時間浸漬試験後



(b) C65U6CZ02-全体写真

図 4-2 腐食試験結果（試験片②，未照射材）：フェーズ 1
(90℃ 塩化物イオン濃度：6000ppm(1200 時間)，2500ppm, 3500 時間浸漬)
【予備酸化無し】

浸漬試験前



(a) C65U7CZ11, C65U8CZ11
－全体写真

3500 時間浸漬試験後



(c) C65U7CZ11, C65U8CZ11
－全体写真

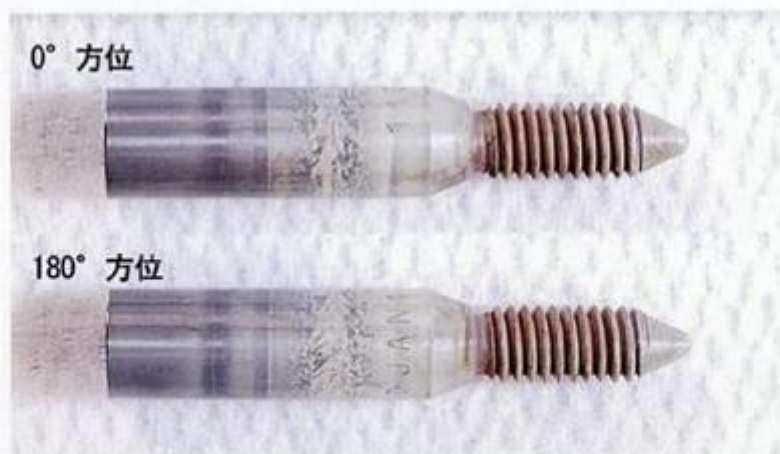
図 4－3 腐食試験結果（試験片③，未照射材）：フェーズ 1
(90℃ 塩化物イオン濃度：6000ppm(1200 時間)，2500ppm，3500 時間浸漬)
【予備酸化無し】

浸漬試験前



(a) C65C7CZ01－全体写真

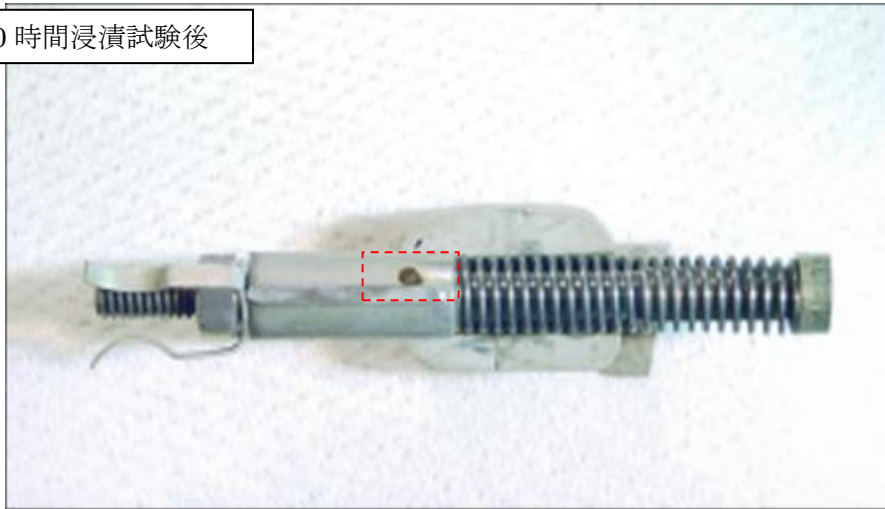
2000 時間浸漬試験後



(b) C65C7CZ01－全体写真

図 4－4 腐食試験結果（被覆管付下部端栓）：照射影響の確認
（90℃ 塩化物イオン濃度：2500ppm, 2000 時間浸漬）
【照射により予備酸化有り】

2000 時間浸漬試験後



2000 時間浸漬試験後（詳細）



図 4－5 腐食試験結果（試験片①，照射材）：照射影響の確認
（90℃ 塩化物イオン濃度：2500ppm，2000 時間浸漬）
（上部端栓は照射材，その他は未照射材）

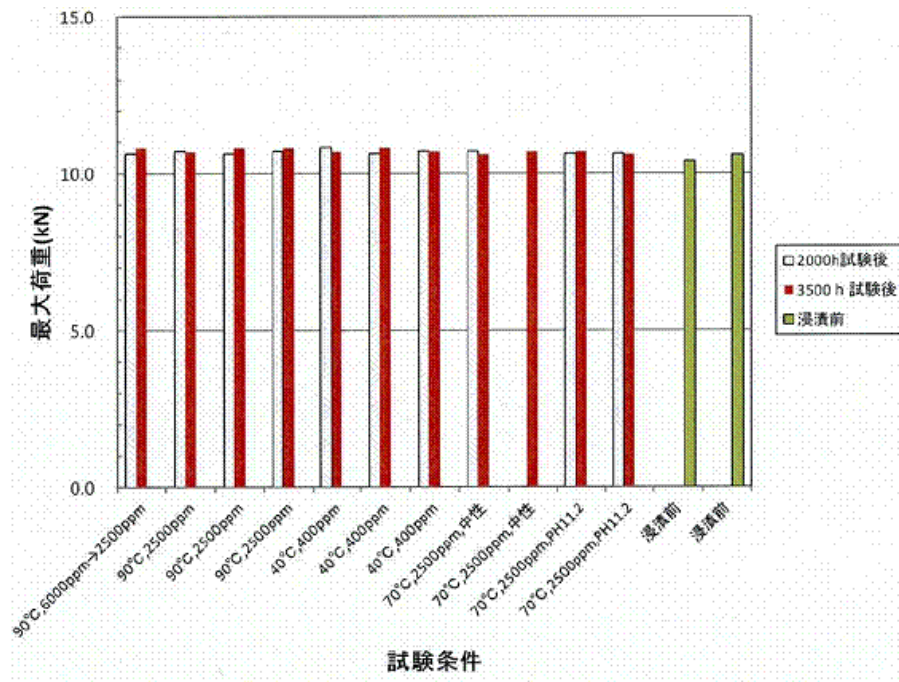


図 4－6 浸漬試験後引張試験時の最大荷重比較
(未照射試験片① 予備酸化無し)

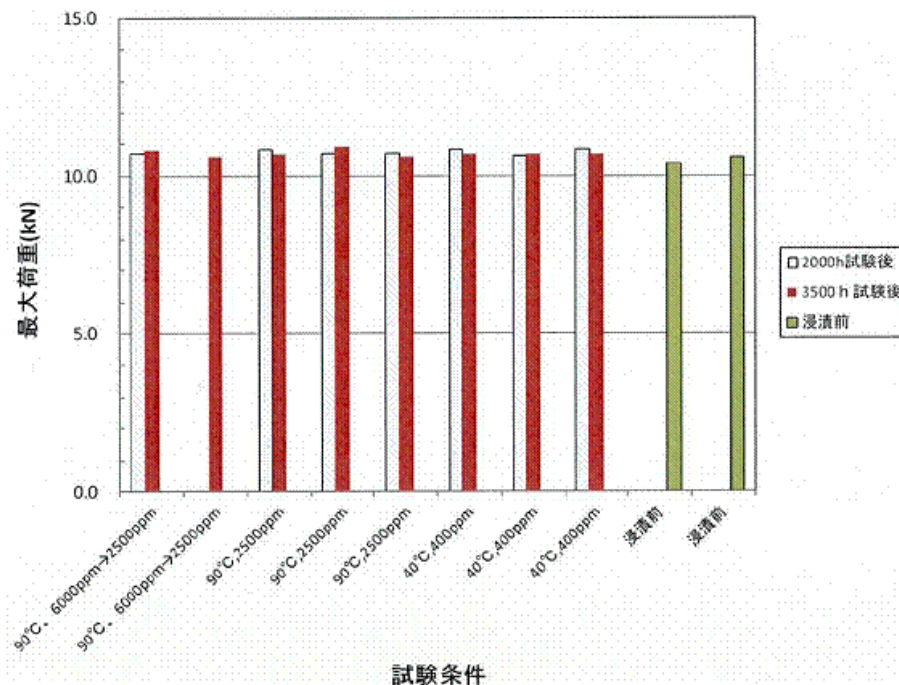


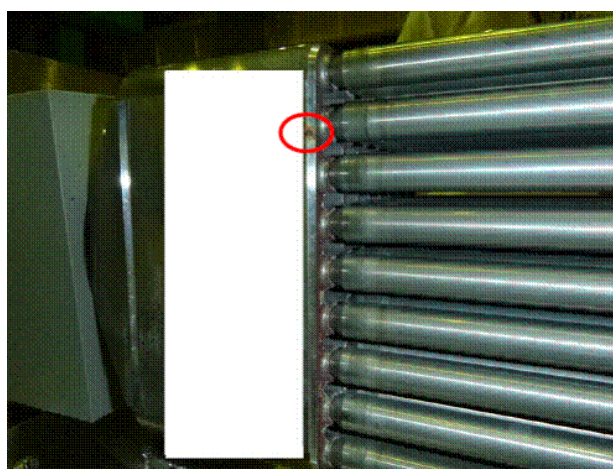
図 4－7 浸漬試験後引張試験時の最大荷重比較
(未照射試験片① 予備酸化有り)



図 4－8 4号機新燃料点検結果（ナット）：平成 24 年 8 月



図 4－9 4号機新燃料点検結果（結合燃料棒上部端栓）：平成 24 年 8 月



白色部はメー
カ機密情報
が含まれるため
非公開

図 4－10 4号機新燃料点検結果（下部タイプレート）：平成 24 年 8 月

5. 落下がれきによる影響

福島第一1, 3, 4号機は原子炉建屋爆発に伴うがれきの落下を経験している。これまでに3号機, 4号機のSFP内の調査を実施しており, 3号機SFPではハンドル部の変形が認められる燃料集合体が一部確認されている。

5.1. がれき落下衝撃試験

5.1.1. 試験概要

3号機SFP内には数多くのがれきが確認されており燃料集合体へのがれき衝撃の影響を確認するためにがれき衝突を模擬したがれき落下衝撃試験として9×9燃料(A型)を用いたハンドル部衝撃試験を行った。

5.1.2. 試験条件

がれき落下衝撃試験の試験条件を以下に示す。

試験体型式	: 9×9燃料(A型)
衝撃位置	: ハンドル部
落下高さ	: 5 m
落下体重量	: 約100 kg

5.1.3. 試験結果

衝突後の燃料集合体を図5-1に示す。試験の結果, ハンドルは大きく変形し燃料棒は湾曲したものの, 吊り上げ性能, 燃料被覆管の密封性は確保されることを確認した。また, 各測定データから, 落下体がUTPに衝突し, その衝撃荷重が膨張スプリングを介して全ての燃料棒に伝達すること, 燃料被覆管が塑性変形するような大きな荷重が付加された場合にはUTPが塑性変形した後に燃料被覆管が塑性変形することを確認した。

したがって, 燃料被覆管への影響程度はUTPの変形程度から把握することが出来る。

5.2. 3号機及び4号機におけるがれき落下影響に関する解析評価

4号機SFPでは落下がれき等が少ない状況が確認されており, 観察した燃料集合体ではUTP ハンドルには著しい変形は観察されておらず, 大部分の燃料についてはUTP ハンドルを把持した通常の取り扱いが可能であると考えられる。このため, 4号機SFP内の大部分の燃料は, 使用済燃料共用プール(新燃料については, 一部6号機SFP)へ搬出するにあたって, 従来と同等設計の燃料取扱機での取り扱い, 既存のNFT-22B型構内輸送容器の使用ができると考えられる。なお, 構内用輸送容器で搬出する燃料については燃料被覆管が健全であることが要求される。

3号機SFPでは大型のがれきを含めて多量のがれきが落下しており, ハンドル部の変形が認められる燃料集合体が一部確認されている。一方, これまで確認できた範囲では, 水

中カメラによる映像上ハンドル部が有意に変形している燃料は一部に留まり、大多数は従来通りの取り扱いが可能であると考えられる。なお、「3.2. 構内用輸送容器の収納条件」に記載の通り、構内用輸送容器で搬出する燃料については燃料被覆管が健全であることが要求される。

燃料被覆管が塑性変形していなければ、燃料被覆管健全性は維持されと考えられることから、UTPの変形程度を観察することにより、燃料健全性を判別する方法について以下のとおり検討した。なお、ハンドル部が有意に変形している燃料等、本評価手法により設定される判定基準を超過する燃料は、燃料被覆管の破損を考慮した容器に収納する。

また、3号機SFPに存在する燃料タイプと、4号機SFPに存在する燃料タイプの一覧を表5-1に示す。9×9燃料が4号機はB型であることに對し、3号機はA型であることが4号機と3号機の差異である。

5.2.1. 燃料健全性の評価方針

がれきの衝突によりUTPが下降すると、燃料被覆管は圧縮荷重によりたわむと考えられるが、燃料集合体には複数の燃料被覆管が配置されているため、照射伸長している燃料被覆管が先行してたわんだとしても、残りの複数の燃料被覆管で圧縮荷重を支えることができる。一方、5.1.3に示す試験結果からも明らかなように、燃料被覆管よりも先にUTPにおいて塑性変形が発生する。したがって、燃料被覆管に発生する応力が降伏応力に達し塑性変形する場合、UTPに発生する塑性変形量を評価し、そのUTPに残留する塑性変形量を測定することにより燃料被覆管の塑性変形の有無を評価できる。

なお、燃料被覆管が塑性変形したとしても直ちに燃料健全性に影響を与えることはないが、本燃料健全性評価においては、塑性変形に至らない降伏応力(0.2%耐力)以下であることを評価基準とした。

図5-2にUTPに残留する塑性変形量の解析フロー、図5-3に解析モデルの概要、図5-4にUTPの概要図を示す。解析モデルは、UTP、燃料被覆管(ばね要素)及びがれき(剛体)で構成される。がれき(剛体)に下向き荷重を負荷すると、UTP及び燃料被覆管(ばね要素)は上下から圧縮荷重を受ける。燃料被覆管(ばね要素)が降伏応力に達する直前のUTP下降量を算出するとともにUTPに残留する塑性変形量を定量評価する。

本解析は汎用有限要素強度解析コードANSYSを用いる。ANSYSコードでの解析の妥当性を評価するためにUTPの単体試験を実施し、図5-7のとおりの試験データと解析との比較を行い、解析結果が試験データを再現できることを確認した。また、本解析において用いた照射材の物性値を表5-2、図5-5、図5-6に示す。

5.2.1.1. UTP塑性変形量の評価位置

図5-8及び図5-9に典型的なUTP塑性変形の外観図を示す。以下にそれぞれの塑性変形の考え方について示す。

(1) チャンネルボックス上端に対するハンドル上端の沈み込み量

がれきがハンドルに衝突すると、ハンドルが幅を広げながら沈み込むとともに、ハンドルポスト直下部分のネットワークが沈み込むように変形する。

チャンネルボックス（以下、CB）は、ネットワーク上のハンドルポストと異なるコーナー部に固定されている。このため、CB上端に対するハンドル上端の沈み込み量を検出することで、ハンドル変形とネットワーク変形を評価することが出来る。

(2) ハンドル幅拡大量

がれきがハンドルに衝突すると、ハンドル幅が広がるようにハンドルが変形する。このため、ハンドル幅を検出することで、ハンドル変形を評価することが出来る。

(3) CB上端に対するコーナーポスト上端の沈み込み量（9×9燃料（B型）のみ）

9×9燃料（B型）はハンドルポスト付近に機械加工されたコーナーポストがあり、ハンドル上端と比較して誤差の少ない測定が可能である。このため、CB上端に対するコーナーポスト沈み込み量を検出することで、ネットワーク変形を評価することが出来る。

5.2.1.2. 燃料被覆管を模擬したばね要素のばね定数と圧縮荷重

(1) 解析方法

UTP下面は水平に下降し一番長い燃料被覆管に最初に圧縮荷重が作用する。UTP下降初期には、長い燃料被覆管から短い燃料被覆管へ順番に圧縮荷重が作用する。燃料被覆管は長いと圧縮荷重によりたわむ。

燃料被覆管を模擬したばね要素のばね定数と圧縮荷重の定量評価を以下のとおり実施した。

① UTP下降開始時

燃料被覆管の等価ばね定数（K）を算出し、燃料被覆管上端の軸方向変位（X）を用いて、個々の燃料被覆管が負担できる圧縮荷重（F）を $F=K \cdot X$ により算出する。

② たわみ発生直前

たわみ発生直前に燃料被覆管が負担できる圧縮荷重（Pcr）をオイラーの式 $P_{cr}=n \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I / (L_{sp8})^2$ より、またその時の燃料被覆管上端の軸方向変位（Xcr）を $X_{cr}=P_{cr}/K$ により算出する。

③ たわみ発生以降

たわみ発生以降は、個々の燃料被覆管が負担できる圧縮荷重（F）は弾性たわみの範囲において②で算出したPcrが維持される。

$$K = \frac{E \cdot A}{L}$$

$$P_{cr} = \frac{n \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{(L_{sp8})^2}$$

$$X_{cr} = \frac{P_{cr}}{K}$$

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A}$$

ここで

K	: 燃料被覆管等価ばね定数[N/mm]
E	: ジルカロイのヤング率[N/mm ²] (91300[N/mm ²] @100℃)
A	: 燃料被覆管断面積[mm ²]
L	: 燃料被覆管全長[mm]
P _{cr}	: たわみ発生直前に燃料被覆管が負担できる圧縮荷重[N]
n	: 固定定数（端末条件とたわみ形に応じて 1～4 の値となり，本定量評価では 1 次モードとして扱い保守的に n=1 とする。）
I	: 断面二次モーメント[mm ⁴]
L _{sp8}	: UTP/最上部スペーサ間長さ[mm]（膨張スプリング縮み代を考慮）
X _{cr}	: たわみ発生直前の燃料被覆管上端の軸方向変位[mm]
σ _{cr}	: たわみ発生直前の発生応力[N/mm ²]

(2) 解析結果

表 5－3 と表 5－4 に 8×8 燃料，新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料，高燃焼度 8×8 燃料，9×9 燃料（B 型）及び 9×9 燃料（A 型）の燃料被覆管について評価した結果を示す。

5.2.1.3. 燃料被覆管に発生する応力

(1) 解析方法

5.2.1.2 で示した燃料被覆管を模擬したばね要素のばね定数と圧縮荷重の定量評価に沿って，最大発生応力の定量評価を実施した。

① UTP 下降開始時

5.2.1.2① で算出した圧縮荷重（F）に基づいて，燃料被覆管の発生応力（σ_c）を σ_c=F/A により算出する。

② たわみ発生直前

5.2.1.2② で算出したたわみ発生直前に燃料被覆管が負担できる圧縮荷重（P_{cr}）に基づいて，燃料被覆管の発生応力（σ_{cr}）を σ_{cr}=P_{cr}/A により算出する。

③ たわみ発生以降

図 5－1 0 にたわみの幾何学的評価の模式図を示す。円弧状にたわむことを仮定して、燃料被覆管上端の軸方向変位（ X_a ）に対するたわみ量（ B ）を幾何学的に定量評価する。

$$B = R \cdot \{1 - \cos(\theta/2)\}$$

$$X_a = 2 \cdot R \cdot \{\pi \cdot (\theta/360^\circ) - \sin(\theta/2)\}$$

$$\text{円弧長さ} = L_{sp8} = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot (\theta/360^\circ)$$

ここで

B : たわみ量[mm]

X_a : たわみによる燃料被覆管上端の軸方向変位[mm]

R : たわみ半径[mm]

θ : 円弧角度[°]

図 5－1 1 にたわみの材料力学的評価の模式図を示す。最大発生応力（ σ_a ）は、圧縮応力であり、スパン中央高さのたわみ内側位置に生じる。

$$M = P_{cr} \cdot B$$

$$\sigma_b = \frac{M}{Z}$$

$$\sigma_a = \sigma_b + \sigma_{cr}$$

ここで

σ_b : たわみによる曲げ応力[N/mm²]

M : 曲げモーメント[N・mm]

Z : 断面係数[mm³]

σ_a : たわみ発生以降の最大発生応力（曲げ+圧縮）[N/mm²]

(2) 解析結果

図 5－1 2 に燃料被覆管上端の軸方向変位（ $X_{cr}+X_a$ ）に対する燃料被覆管発生応力（ σ_a ）（高燃焼度 8×8 燃料）を示す。燃料被覆管の発生応力が照射材の降伏応力 710[N/mm²]に達する燃料被覆管上端の軸方向変位（ $X_{cr}+X_a$ ）は、7.7[mm]となった。

図 5－1 3 に燃料被覆管上端の軸方向変位（ $X_{cr}+X_a$ ）に対する燃料被覆管発生応力（ σ_a ）（9×9 燃料（B 型））を示す。燃料被覆管の発生応力が照射材の降伏応力 710[N/mm²]に達する燃料被覆管上端の軸方向変位（ $X_{cr}+X_a$ ）は、9.4[mm]となった。

図 5－1 4 に燃料被覆管上端の軸方向変位（ $X_{cr}+X_a$ ）に対する燃料被覆管発生応力（ σ_a ）（9×9 燃料（A 型））を示す。燃料被覆管の発生応力が照射材の降伏応力 710[N/mm²]に達する燃料被覆管上端の軸方向変位（ $X_{cr}+X_a$ ）は、9.4[mm]となった。

5.2.2. 評価結果

図5-3に示した解析モデルに従い、5.2.1.2で評価した燃料被覆管のばね特性（たわみ発生まではばね定数に基づき算出、たわみ発生以降は一定荷重負担）を基に燃料被覆管に発生する応力を評価した。

5.2.1.3で燃料被覆管上端の軸方向変位が7.7mm（高燃焼度8×8燃料）、9.4mm（9×9燃料（B型））、9.4mm（9×9燃料（A型））となった時に燃料被覆管の発生応力が照射材の降伏応力710[N/mm²]に達すると評価された。すなわち、燃料被覆管上端の軸方向変位が上記変位に至らなければ、燃料被覆管は塑性変形に至らないことが確認された。一方、図5-15、図5-16に示すとおり燃料棒は照射により3mm^{[1] [2]}程度の照射伸び差があるため、燃料集合体においては、UTPがそれぞれ4.7mm（高燃焼度8×8燃料）、6.4mm（9×9燃料（B型））、6.4mm（9×9燃料（A型））下降した場合に、燃料集合体中の燃料棒に塑性変形が生じるものと想定する。

上記のUTP下降量が発生する荷重が付加された場合に、UTPの各部位に残留する塑性変形量を評価した。また、UTPハンドルへのがれきの衝突位置として、①ハンドル上面全体に剛体接触、②ハンドル上面右半分に剛体接触、③ハンドル上面中央45mmに剛体接触の3ケースを解析対象とした。解析の一例として、図5-17に高燃焼度8×8燃料について「②ハンドル上面右半分に剛体接触」の評価結果を示す。

燃料被覆管の健全性判定に用いるUTPの塑性変形量（CB上端に対するハンドル上端の沈み込み量、ハンドル幅拡大量、CB上端に対するコーナーポスト上端の沈み込み量）を評価した結果を表5-5に示す。9×9燃料（A型）については、高燃焼度8×8燃料及び9×9燃料（B型）の結果を踏まえ、②ハンドル上面右半分に剛体接触のケースを解析対象とした。結果を表5-6及び図5-18に示す。燃料健全性検査は、塑性変形量が最も小さい「②ハンドル上面右半分に剛体接触」を基に検査方法を策定する。

5.2.3. まとめ

膨張スプリングが縮みきった後に燃料被覆管に圧縮荷重が作用する場合について、燃料体上部変形を観察して燃料被覆管を健全と判別する方法を検討した。

燃料被覆管が降伏応力を超える前にUTPに検知可能な塑性変形が生じることから、燃料被覆管の健全性を判別するためのUTP変形量を評価した。

5.3. 3号機におけるハンドル変形燃料の吊り上げに関する評価

3号機SFPではハンドル部の変形が認められる燃料（以下、ハンドル変形燃料）が確認されている。また、ハンドル変形燃料のうち1体は、CB及びチャンネルファスナ（以下、CF）の有意な変形が見られる（以下、CB変形燃料）。

燃料取扱機によるハンドル変形燃料の取り扱い可否を確認するため、燃料吊り上げ時の荷重負担部材である結合燃料棒及びハンドルの健全性が保たれる吊り上げ条件を、ハンド

ル変形燃料を模擬した解析や試験より評価する。

ハンドルの外観確認を行い、燃料取扱機によるハンドル把持ができる燃料は、評価より確認された吊り上げ条件で取り扱いを行う。また、通常の燃料取扱機の掴み具によるハンドル把持ができない燃料は、大変形用掴み具にて把持する。なお、ハンドル把持ができない燃料が見つかった場合は別途評価を行い、今後本実施計画に記載した上で取り扱うこととする。

5.3.1. がれき衝突時の結合燃料棒の健全性

(1) 解析方法

燃料ハンドル部へのがれき衝突を模擬した解析をLS-DYNAコードを用いて行い、ハンドル変形燃料の吊り上げに寄与する燃料棒への影響を確認する。

3号機のハンドル変形燃料は、CF側又は反CF側にハンドルが変形しており、がれきが斜めに衝突したと考えられる。そのため、斜め衝突のケース（斜め45°）で衝突解析を主として行い、保守的にハンドルが90°近くまで変形するよう重量・速度条件を調整したうえで、燃料棒の塑性歪分布の傾向を確認する。解析条件を表5-7に示す。

評価燃料は9×9燃料（A型）及び新型8×8ジルコニウムライナ燃料の2種類とし、8×8燃料及び高燃焼度8×8燃料は燃料棒、UTPの幾何形状の違いから保守的に新型8×8ジルコニウムライナ燃料で代表することとした。なお、本燃料健全性評価においては、塑性歪2.8%^{※1}未満であることを評価基準とした。

本解析に用いた未照射材及び照射材の物性値を表5-2に示す。なお、結合燃料棒の上部端栓部の中性子照射量は他の部位に比べて少ないことから、保守的に未照射材の物性値を使用した。

(2) 解析結果

がれき衝突解析の結果を図5-19に示す。いずれの条件においても燃料棒の上部端栓部にのみ塑性歪が発生し、被覆管部、下部端栓部に塑性歪は見られなかった。

CF側と反CF側の結合燃料棒（上部端栓部）4本の塑性歪はいずれも2.8%^{※1}未満であることから、実力的には吊り上げ時に荷重を負担できるものとする。この場合、中性子照射による結合燃料棒の伸びのバラツキを考慮したとしても、少なくとも3点以上でバランスを保ち吊り上げるため、結合燃料棒全体では1tは問題なく吊り上げられる^{※2}ものとする。

また、5.1のがれき落下衝撃試験で上部端栓近傍に発生した塑性歪の測定結果を図5-20に示す。測定の結果、ハンドルポスト直下近傍の結合燃料棒4本に発生した塑性歪と比較して、残りのCF側、反CF側の結合燃料棒に発生した塑性歪は小さい値となり、がれき衝突解析と同様な傾向であった。

- ※1 これまでに実施された燃料被覆管（未照射材，照射材）の軸方向の引張試験に係る知見のうち破断に至った塑性歪の最小値。そのため，この値に達した場合でも必ずしも破断するわけではない。
- ※2 浸漬試験後引張試験の結果（図4－6，図4－7）より結合燃料棒の垂直方向の引張強度は未照射材，照射材ともに1本あたり1 t 以上。

5.3.2. 吊り上げ時のハンドルの健全性

(1) 試験概要

燃料吊り上げ時の荷重負担箇所として，変形したハンドルについても同様に，実機相当の吊り上げ荷重負荷時の健全性を確認する必要がある。このため，3号機SFP内に保管されている燃料と同タイプのハンドルに，がれき衝突を模擬した変形を付与したうえで引張試験を行い，有意なき裂が発生しないことを確認した。

また，ハンドルに2本あるハンドルポストの片側を模擬した引張試験を行い，有意なき裂が発生しないことを確認した。

(2) 試験条件

引張試験の試験体として，9×9燃料（A型）のUTPを用意した。引張試験に先立って，図5－21に示す変形付与装置を用いて初期変形（動的荷重，静的荷重）を付与した。引張荷重は，ハンドル変形の無い燃料と同様な吊り上げ荷重として1 tで吊り上げることを想定し，試験では燃料取扱機荷重計誤差等を考慮して13 kNとした。また，荷重上限の2倍（引張試験装置の上限）として燃料取扱機荷重計誤差等を考慮して26 kNの試験を実施した。なお，引張回数は，実機で想定されるハンドル変形燃料の吊り上げ回数を考慮して10回とした。ハンドルの引張試験装置を図5－22に示す。

ハンドルポスト模擬試験体については，13kN及び26kN試験に加えて，試験片が破断するまで荷重を付与した。

(3) 試験結果

試験の一例として，図5－23に9×9燃料（A型）のハンドルの引張試験前後の外観写真，また，図5－24に浸透探傷試験結果を示す。これらの結果から，引張試験前後で有意なき裂が発生していないことを確認した。また，図5－25に引張試験中の引張荷重－引張変位図を示す。本図から，引張荷重を繰り返し負荷した場合であっても，引張変位の異常な増加は無いことから，引張試験中に有意なき裂の発生及びその進展は無かったものと考えられる。

ハンドルポスト模擬についても，引張荷重を繰り返し負荷した場合であっても，引張変位の異常な増加は無いことから，引張試験中に有意なき裂の発生及びその進展は無かったものと考えられる。また，破断試験結果を表5－8に示す。破断に至るまでの最大荷重は約8.5

t ～ 9.3 t の範囲となり、実機で想定している吊り上げ荷重（1 t）に対して十分な余裕があることを確認した。

5.3.3. CB変形燃料について

CB変形燃料はハンドルだけでなく、CF及びCFポストがハンドル側に傾倒するように変形しており、CFポスト近傍の標準燃料棒、結合燃料棒は、上部タイプレートを介して曲げ応力が発生している可能性がある。そのため、CB変形燃料について水中カメラによる確認によりがれき衝突に伴う影響を確認した。

CFポスト近傍の結合燃料棒の上部端栓部は破損している可能性があるため、水中カメラ映像によりCB変形燃料の結合燃料棒の状態を確認した。CB変形燃料の結合燃料棒の状態を図5-26に示す。

CB変形燃料は、水中カメラ映像から少なくとも4本の結合燃料棒は有意な変形のない状況であり、吊り上げ時に荷重を負担できるものとする。

この場合、中性子照射による結合燃料棒の伸びのバラツキを考慮したとしても少なくとも3点以上でバランスを保ち吊り上げるため、結合燃料棒全体では1 tは問題なく吊り上げられるものとする。

なお、水中カメラ映像に基づき、CFの変形状態を踏まえた解析モデルを作成しCFポスト近傍の燃料棒に発生する塑性歪の有無をANSYSコードを用いて評価した。また、解析条件を表5-9に示す。

解析の結果、CFポスト近傍の標準燃料棒、結合燃料棒は、いずれも上部端栓部において細径部で歪が大きくなり、曲げ角度30°では塑性歪2.8%を超過した。一方、被覆管部において歪は発生しなかった。したがって、いずれも上部端栓部は破損している可能性はあるものの、被覆管部に破損はないため、燃料棒からのFPガスのリークやペレット脱落リスクは無いと考える。

5.3.4. 評価結果

ハンドル変形燃料については、がれき衝突解析結果から、少なくとも4本の結合燃料棒が吊り上げに寄与できる。また、CB変形燃料については、CFポスト近傍の結合燃料棒の上部端栓部は破損している可能性はあるが、水中カメラ映像による確認結果から少なくとも4本の結合燃料棒が吊り上げに寄与できる。したがって、少なくとも3点以上で吊り上げるため、結合燃料棒全体では1 tは問題なく吊り上げられるものとする。

ハンドル部については、引張試験結果から吊り上げ荷重の2倍（2 t）であっても機械的な強度に有意な影響が無い。

以上より、ハンドル変形燃料及びCB変形燃料はハンドル変形の無い燃料と同様の吊り上げ荷重1 tで吊り上げ可能と評価する。

表 5－1 3号機 S F P と 4号機 S F P の貯蔵燃料の差異

	7×7 燃料	8×8 燃料	新型 8×8 ジルコニウム ライナ燃料	高燃焼度 8×8 燃料	9×9 燃料 (B 型)	9×9 燃料 (A 型)
3 号機	—	○	○	○	—	○
4 号機	○※1	○	○	○	○	—

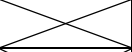
※1 4号機 S F P の 7×7 燃料は過去の取り扱い中に変形を生じた燃料であるため、解析評価の対象外

表 5－2 ジルコニウム合金の物性値^{[3][4]}

項目	単位	物性値			
未照射／照射	—	未照射材	照射材		
照射量	n/m ²	0	2×10 ²⁵ — 14×10 ²⁵		
温度	℃	室温	室温	100	300
0.2%耐力	N/mm ²	380	760	710 ^{*1}	600
引張り強さ	N/mm ²	546	860	800 ^{*1}	650

*1：20℃及び 300℃のデータからの内挿値

表 5－3 燃料被覆管の等価ばね定数

項目	単位	記号	式	8×8 燃料	新型 8×8 ジルコニウムライ 燃料	高燃焼度 8×8 燃料	9×9 燃料 (B 型)	9×9 燃料 (A 型)
ヤング率	N/mm ²	E		91300	91300	91300	91300	91300
酸化減肉 *1 (EOL)	mm	oxd		0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
等価ばね 定数	N/mm	K	E*A/L	698	686	687	500	516

*1：酸化膜厚さ約 15 μm^[3]の酸化減肉に相当

表 5－4 たわみ発生直前に燃料被覆管が負担できる圧縮荷重

項目	単位	記号	式	8×8 燃料	新型 8×8 ジルコニウムライ 燃料	高燃焼度 8×8 燃料	9×9 燃料 (B 型)	9×9 燃料 (A 型)
圧縮荷重	kN	P _{cr}	$\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(L_{sp8})^2}$	1.7	1.7	1.7	0.9	1.0
UTP 下 降量	mm	X _{cr}	P _{cr} /K	2.5	2.5	2.4	1.9	1.9
発生応力	N/mm ²	σ _{cr}	P _{cr} /A	55	55	55	42	42

表 5 - 5 UTP に残留する塑性変形量

[単位 : mm]

がれき衝突位置	塑性変形評価位置	9 × 9 燃料 (B 型)	高燃焼度 8 × 8 燃料	新型 8 × 8 ^{*1} ジルコニウムライ付燃料
①ハンドル上面 全体に剛体接触	CB 上端に対するハンドル上 端の沈み込み量	4.5	7.1	8.4
	ハンドル幅拡大量 (両側)	2.1	4.8	8.1
	CB 上端に対するコーナーポ スト上端の沈み込み量	4.5		
②ハンドル上面 右半分に剛体接 触	CB 上端に対するハンドル上 端の沈み込み量	3.5	5.5	
	ハンドル幅拡大量 (両側)	1.8	4.2	
	CB 上端に対するコーナーポ スト上端の沈み込み量	3.8		
③ハンドル上面 中央 45mm に剛 体接触	CB 上端に対するハンドル上 端の沈み込み量	8.4	10.1	
	ハンドル幅拡大量 (両側)	5.4	8.5	
	CB 上端に対するコーナーポ スト上端の沈み込み量	4.7		

*1 : 新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料以前の燃料は、高燃焼度 8 × 8 燃料と比較してハンドルバーが薄くハンドルポストがコーナーポストと連結していないため塑性変形量が大きい。このため、①を除く一連の解析は高燃焼度 8 × 8 燃料の結果を代表としている。

表 5 - 6 UTP に残留する塑性変形量 (9 × 9 燃料 (A 型))

[単位 : mm]

がれき衝突位置	塑性変形評価位置	9 × 9 燃料 (A 型)
②ハンドル上面 右半分に剛体接 触	CB 上端に対するハンドル上 端の沈み込み量	5.5
	ハンドル幅拡大量 (両側)	4.0

表 5－7 がれき衝突時の結合燃料棒の健全性評価における解析条件

	がれき重量 (t)	がれき衝突 速度(m/s)	がれき衝突 角度	燃料型式
条件①	1	21	斜め 45°	9×9 燃料 (A型)
条件②	1	21	垂直	9×9 燃料 (A型)
条件③	4.5	12	垂直	9×9 燃料 (A型)
条件④	1	21	垂直	新型 8×8 ジルコニウムライナ 燃料

表 5－8 ハンドルポスト引張試験結果(破断試験)

初期変形時の 荷重付与方法	燃料型式	破断に至るまでの 最大荷重
動的荷重	高燃焼度 8×8 燃料, 9×9 燃料 (A型)	91.5 kN (9.33t)
	新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料	89.7 kN (9.15t)
静的荷重	高燃焼度 8×8 燃料, 9×9 燃料 (A型)	91.1 kN (9.29t)
	新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料	83.4 kN (8.50t)

表 5－9 C B 変形燃料における解析条件

項目	条件	備考
評価温度	70℃	プール水の設計温度の包絡条件として設定
C F 部の傾き	30°	C B 変形燃料の水中カメラ映像では, C F 部の傾き 角は 27 度となることから, 包絡条件として設定
物性値	未照射材	照射により耐力及び引張強さが高くなる傾向がある ことから, 保守側の試験結果が得られる

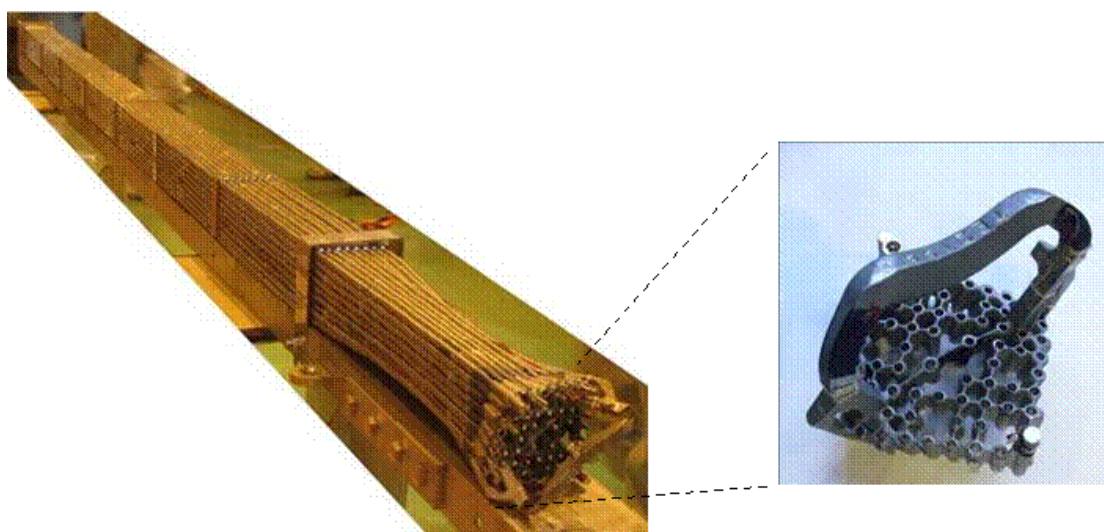


図 5 - 1 がれき落下衝撃試験の結果

＜解析の基本方針＞

- ・ UTPに大きな荷重が付加された場合にはUTPが下降（UTP下方向への移動量+UTP変形量（塑性+弾性））する。
- ・ UTP下降による燃料被覆管の発生応力が降伏応力に達する場合には，燃料被覆管が塑性変形する。（その場合，UTPが塑性変形した後に燃料被覆管が塑性変形する。）
- ・ 燃料被覆管への影響程度はUTPの塑性変形の程度から把握できる。

【STEP 1】 燃料被覆管が降伏応力に達する直前の条件を評価する。

【STEP 2】 その場合のUTP塑性変形量を算出する。

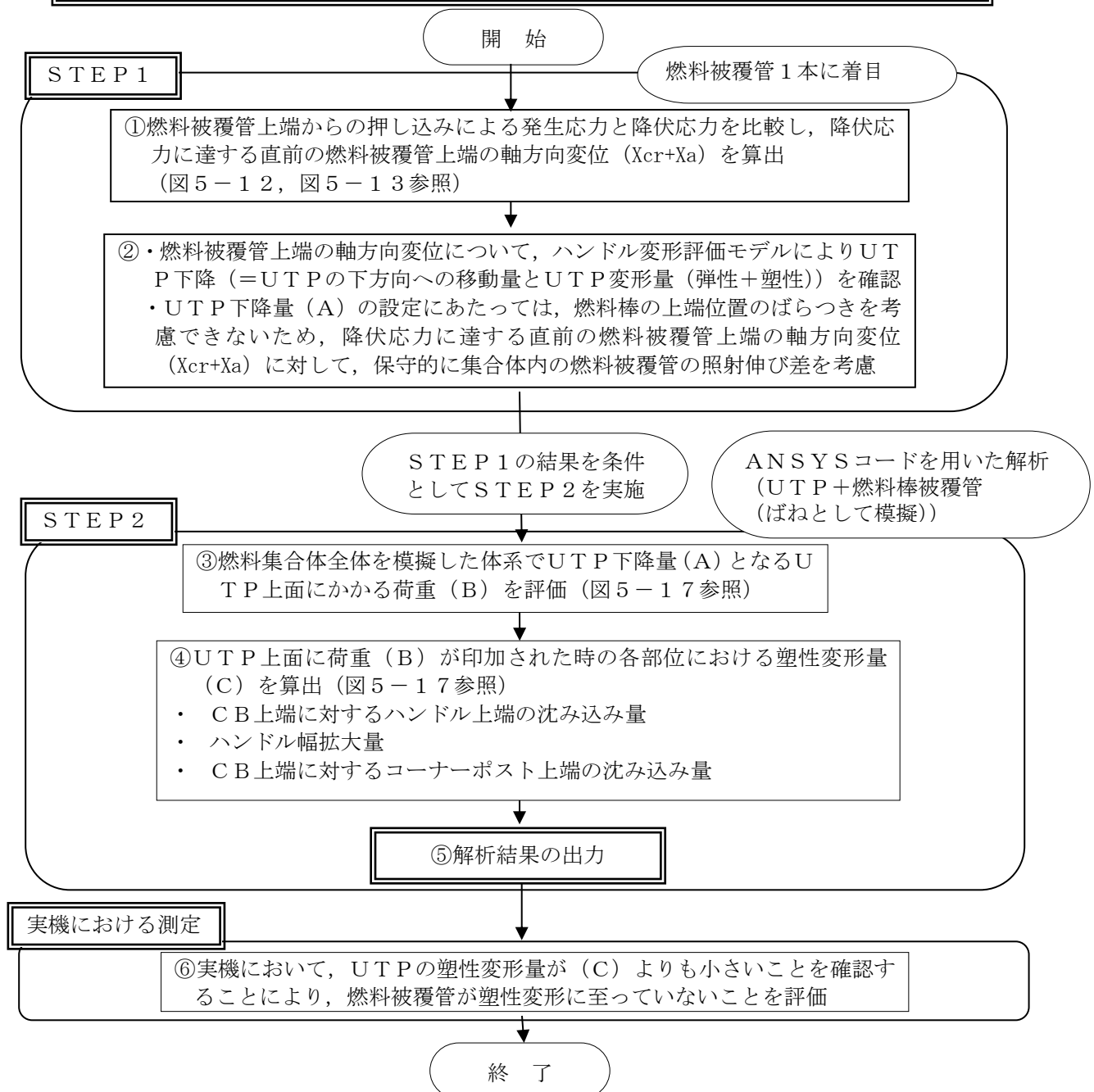


図5-2 UTPに残留する塑性変形量の解析フロー図

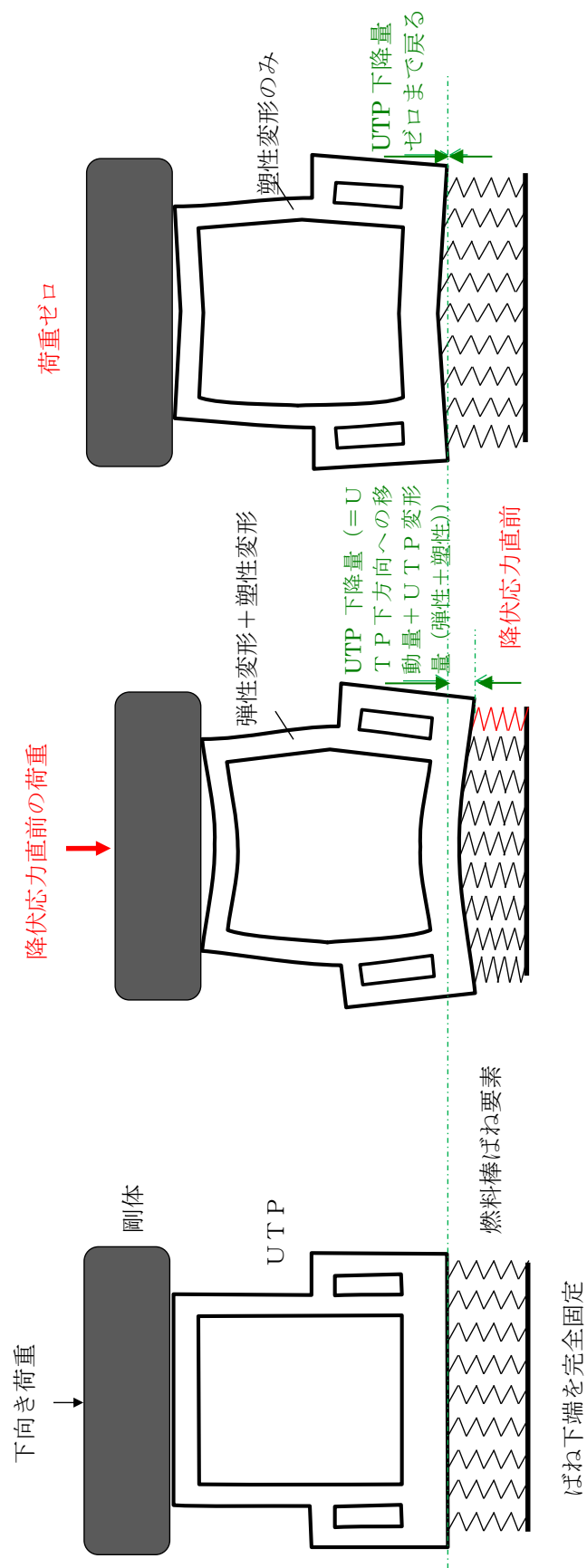
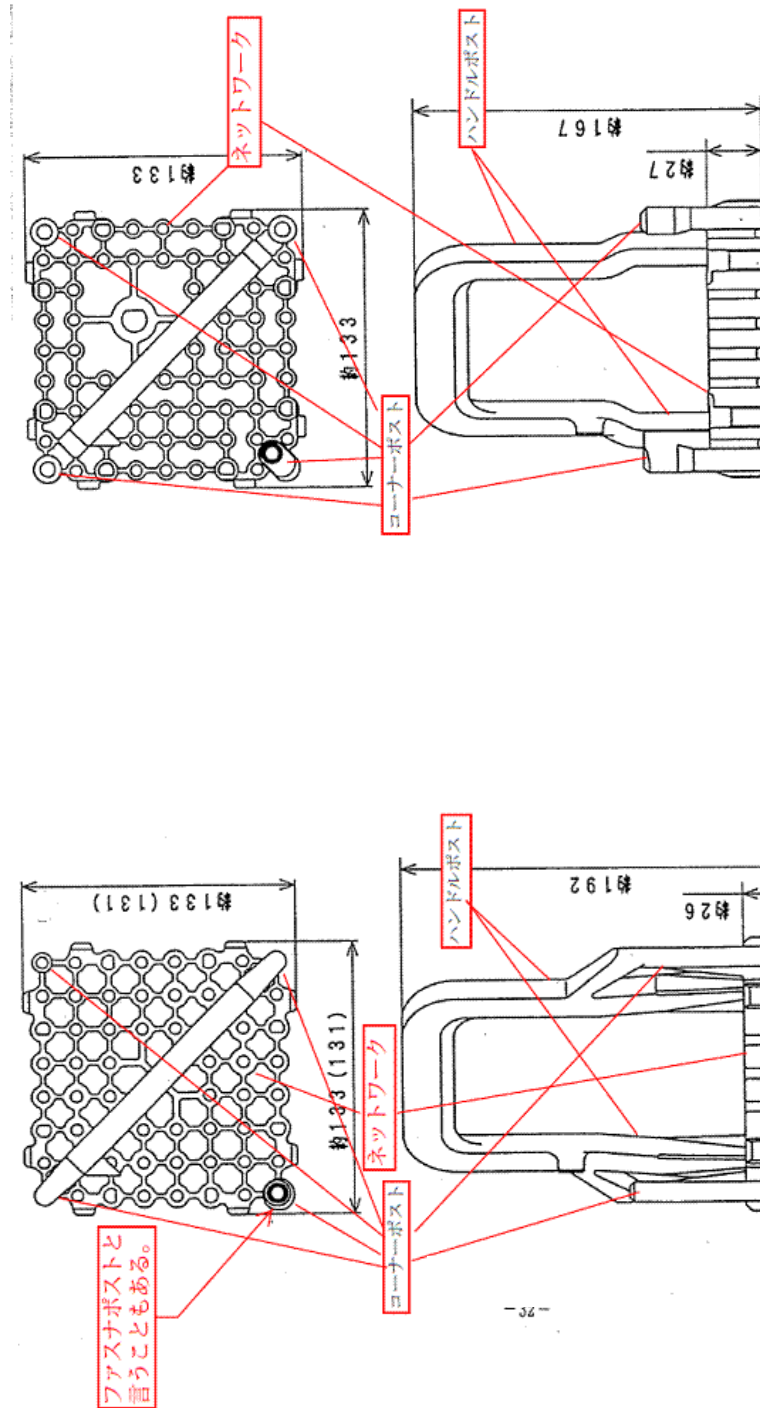


図 5 - 3 解析モデルの概要



高燃焼度 8 × 8 燃料

9 × 9 燃料 (B 型) (D 格子)

() は S 格子
(単位 : mm)

図 5-4 UTP の概要図

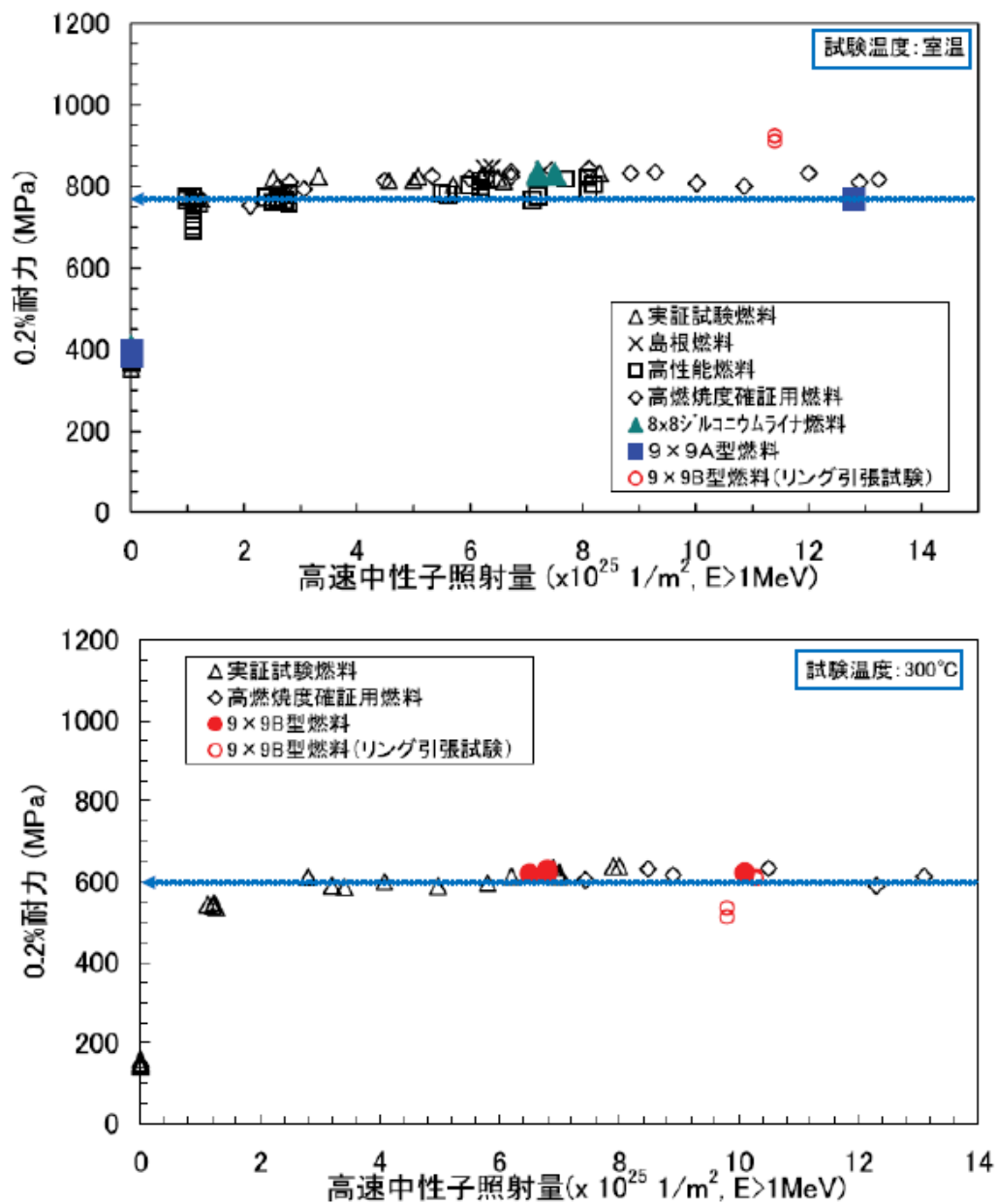


図 5-5 ジルコニウム合金の降伏応力 (0.2%耐力) 評価^[3]

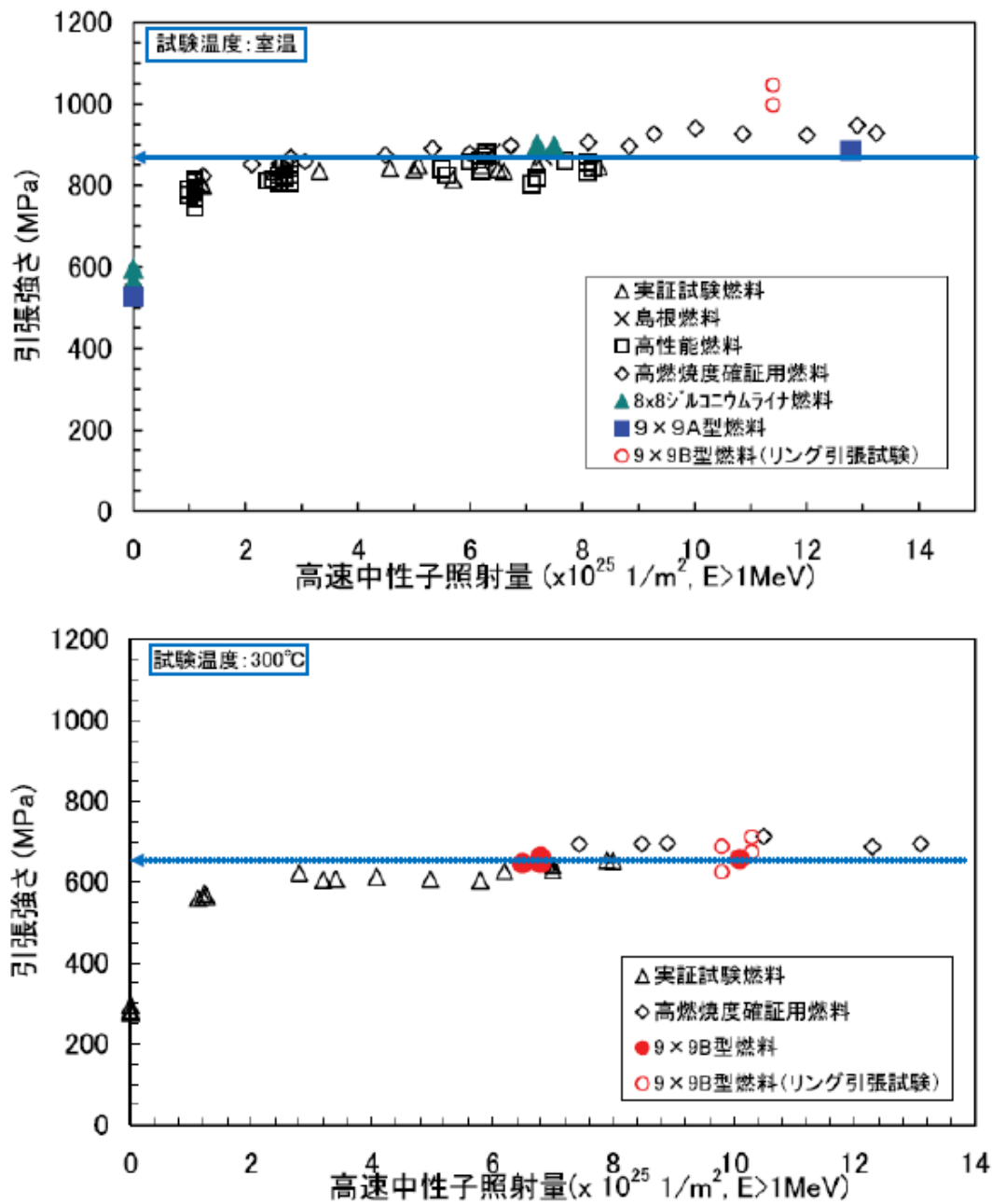
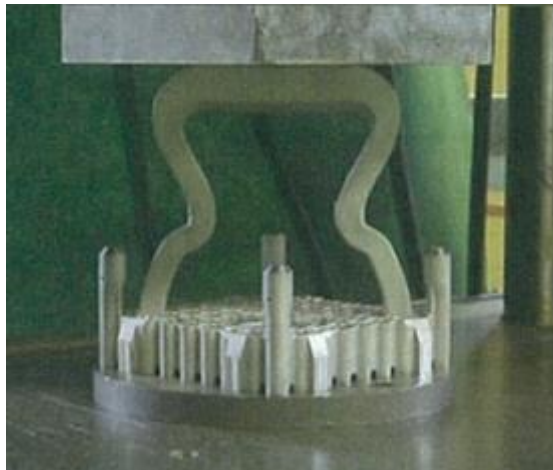
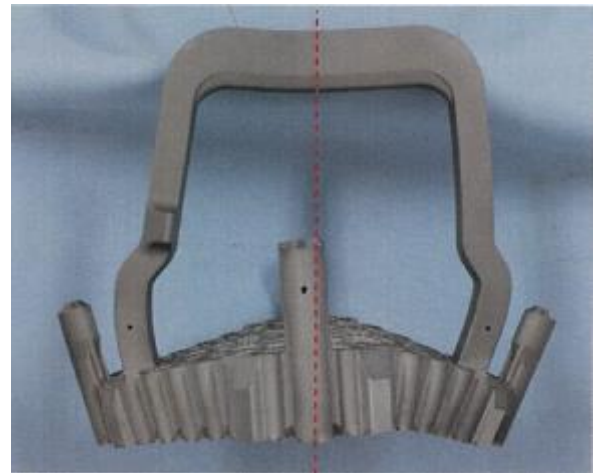


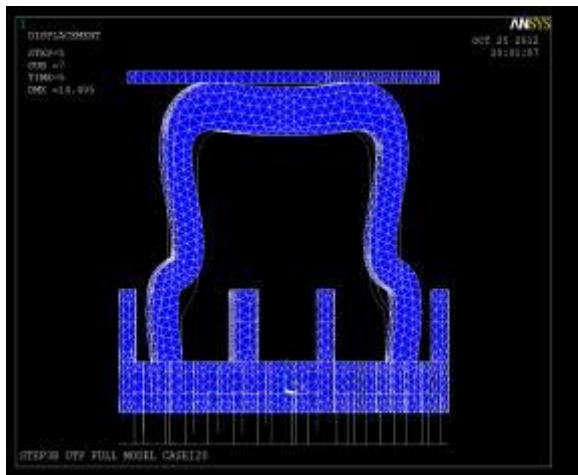
図 5-6 ジルコニウム合金の引張り強さ評価^[3]



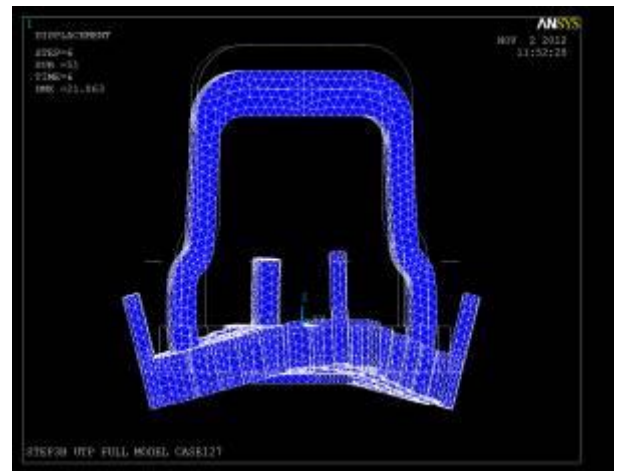
ハンドルを変形させる試験



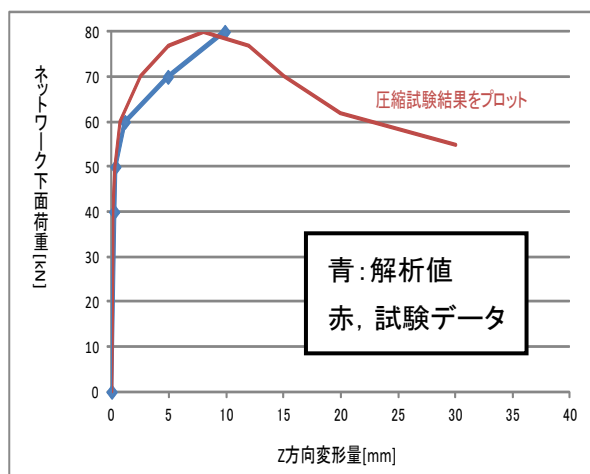
ネットワークを変形させる試験



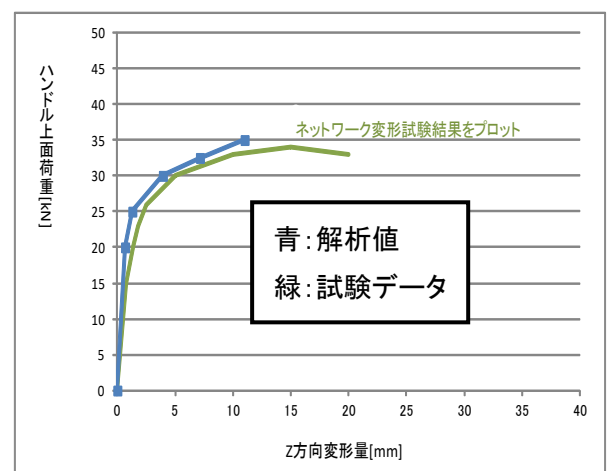
ハンドルを変形させる解析



ネットワークを変形させる解析



単体試験と解析の比較



単体試験と解析の比較

図 5-7 単体試験とANSYSコード解析との比較

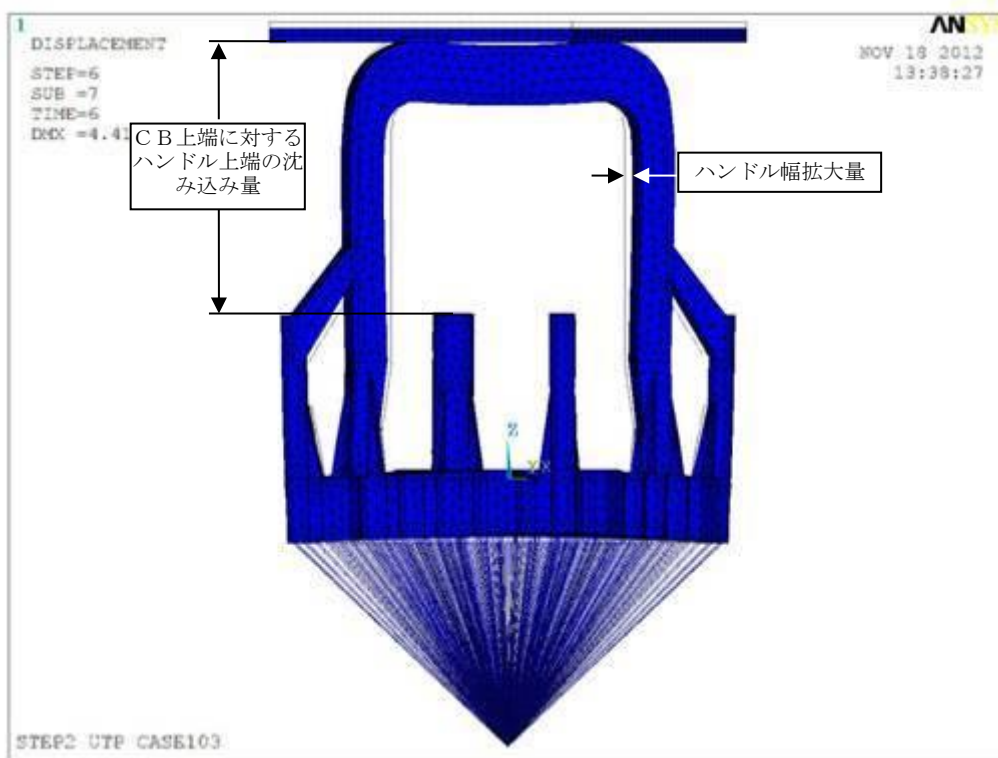


図 5－8 典型的なUTP塑性変形の外観図（高燃焼度 8×8 燃料）

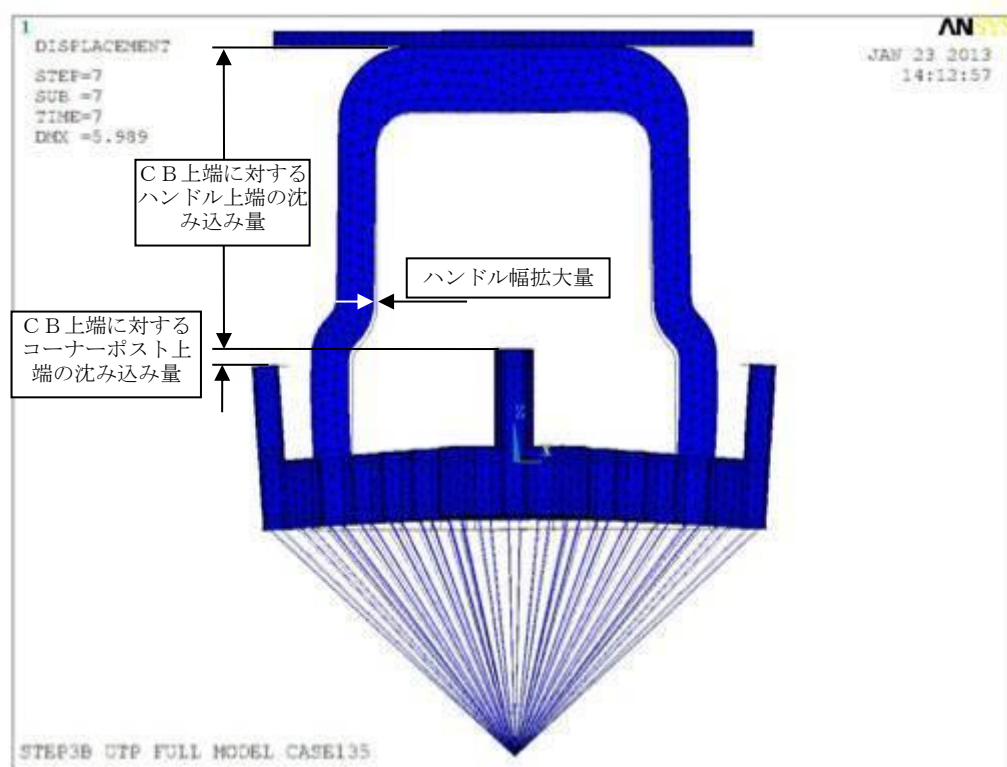


図 5－9 典型的なUTP塑性変形の外観図（ 9×9 燃料（B型））

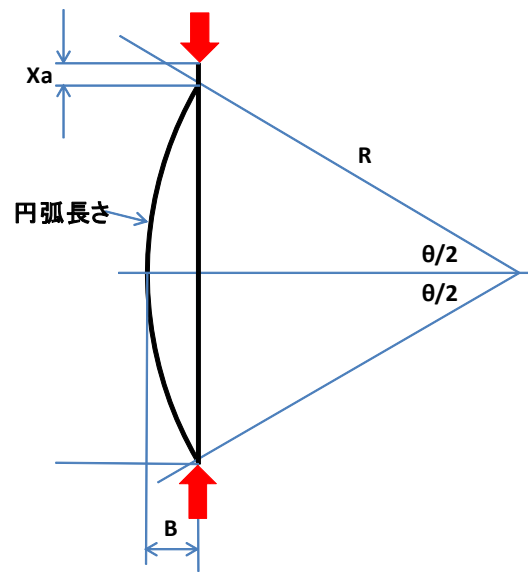


図 5 - 1 0 たわみの幾何学的評価の模式図

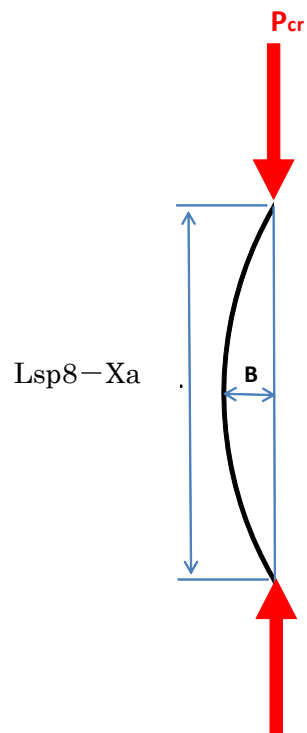


図 5 - 1 1 たわみの材料力学的評価の模式図

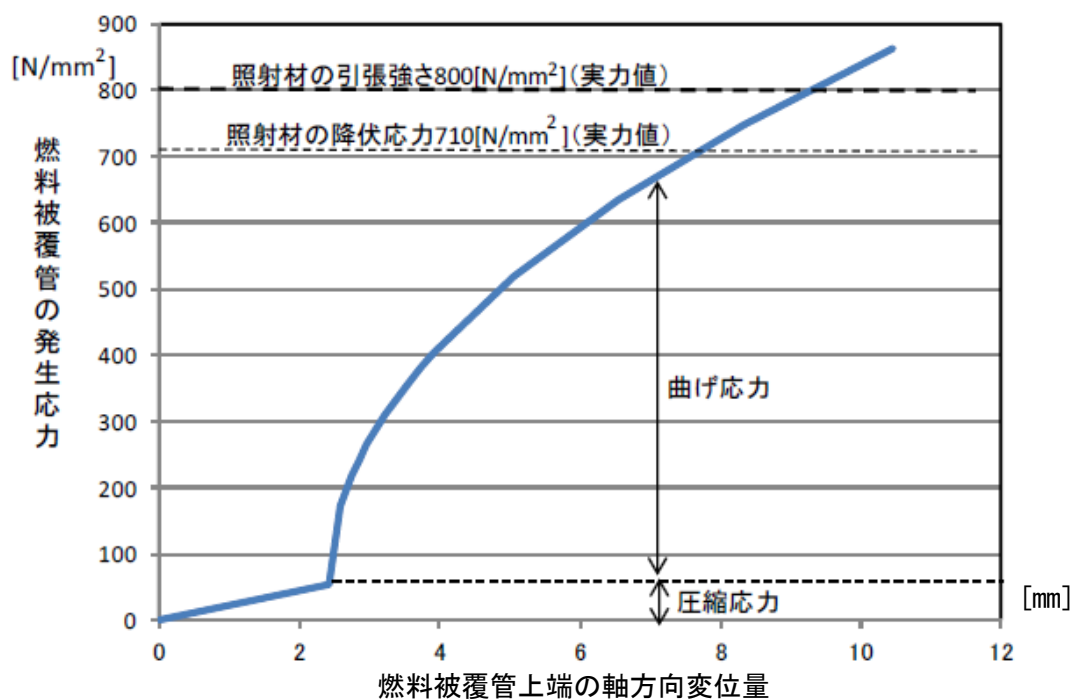


図 5 - 1 2 燃料被覆管上端の軸方向変位 ($X_{cr}+X_a$) による燃料被覆管発生応力 (σ_a)
(高燃焼度 8×8 燃料)

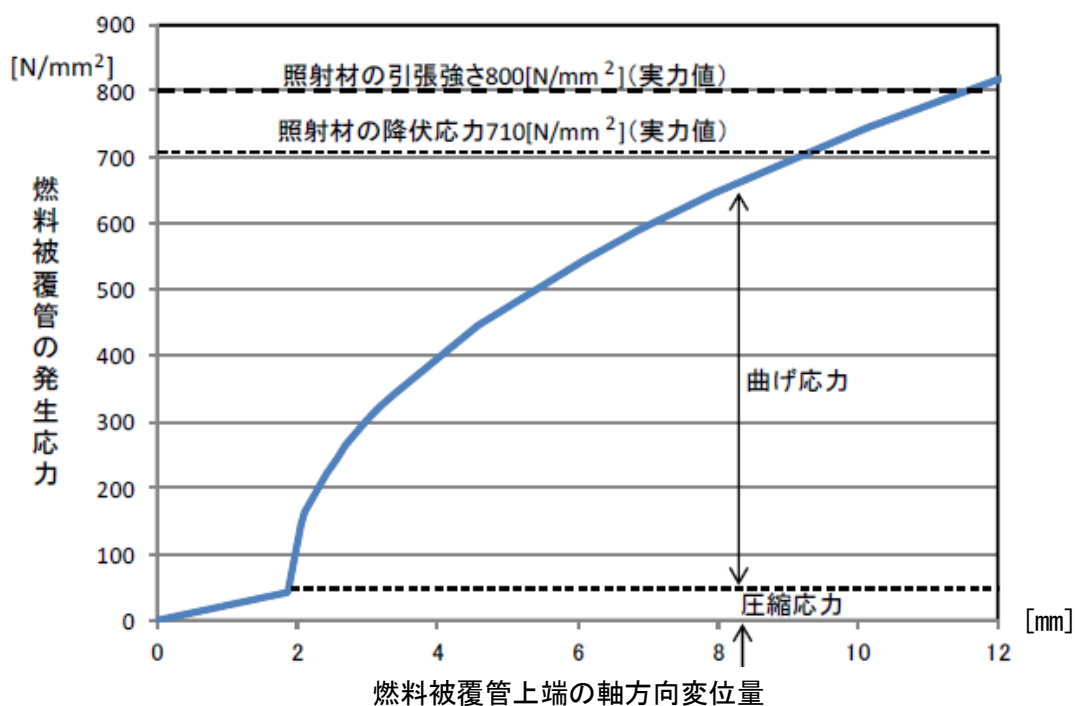


図 5 - 1 3 燃料被覆管上端の軸方向変位 ($X_{cr}+X_a$) による燃料被覆管発生応力 (σ_a)
(9×9 燃料 (B 型))

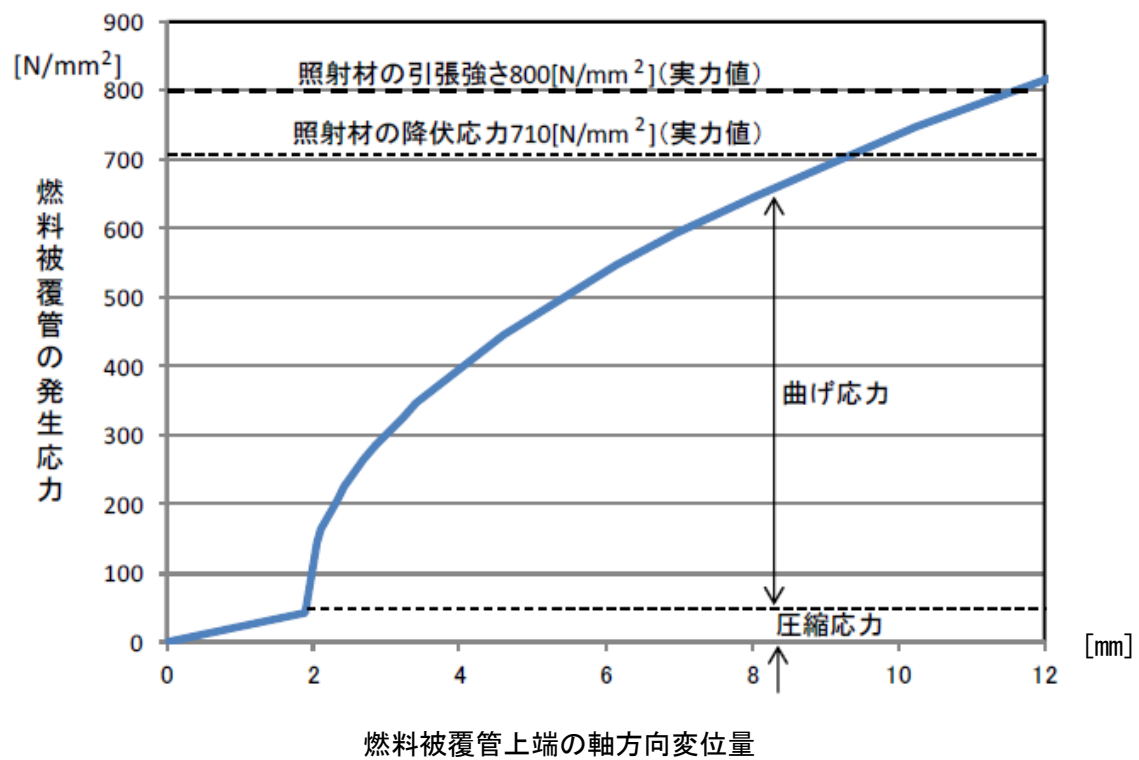
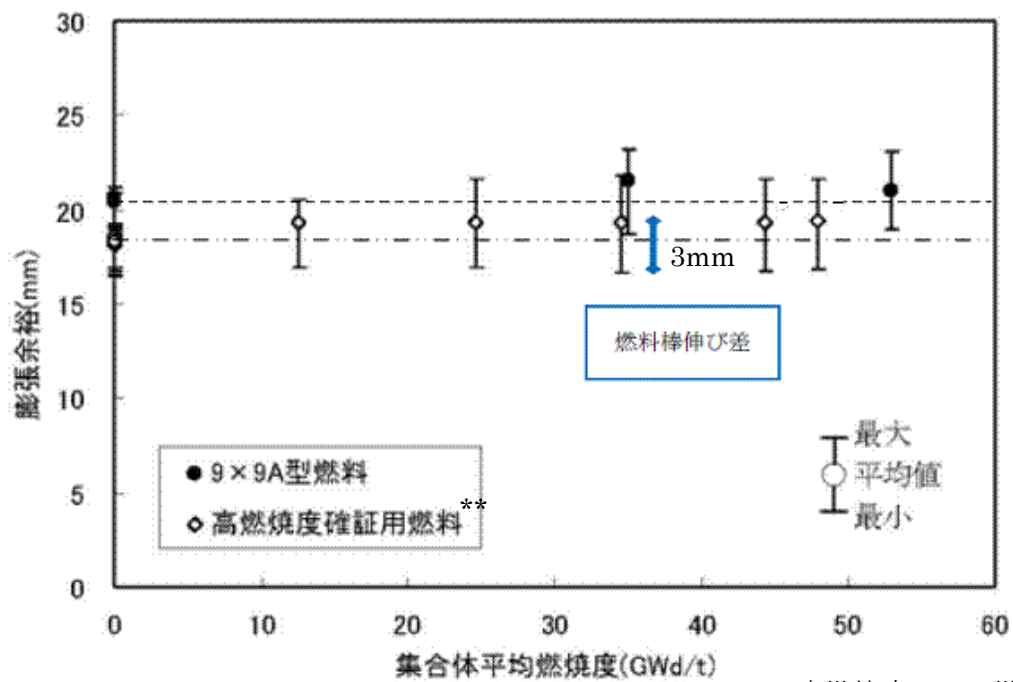


図 5 - 1 4 燃料被覆管上端の軸方向変位 ($X_{cr}+X_a$) による燃料被覆管発生応力 (σ_a)
(9 × 9 燃料 (A 型))



**高燃焼度8×8燃料のデータ

図5-15 燃料棒伸び差の燃焼変化（膨張スプリングのデータから評価）
（9×9燃料（A型）及び高燃焼度8×8燃料）^[1]

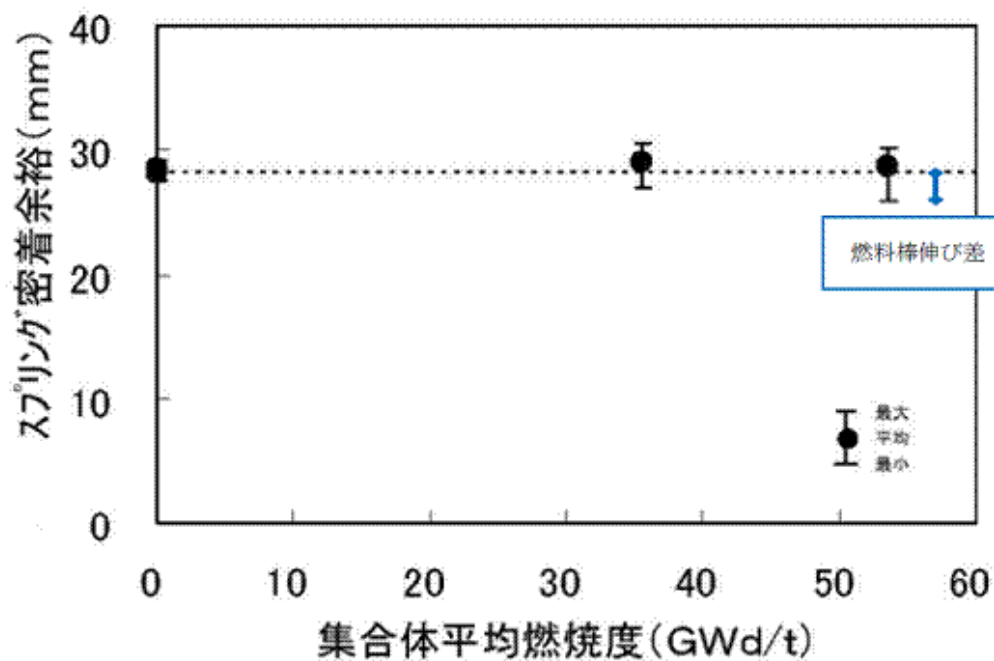
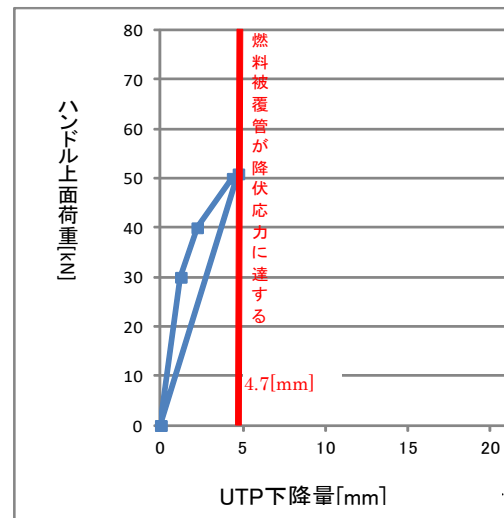
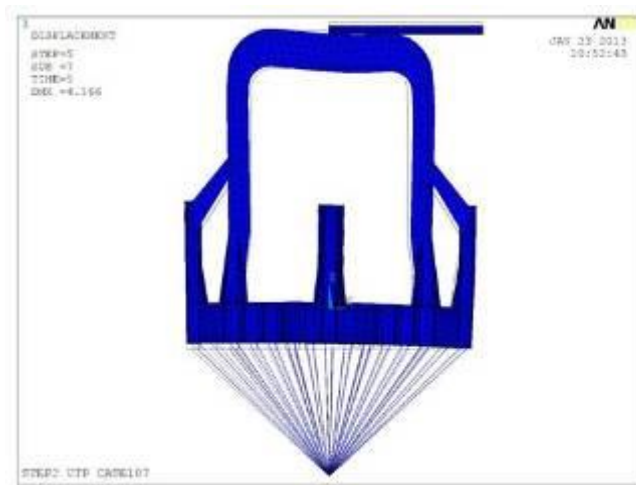
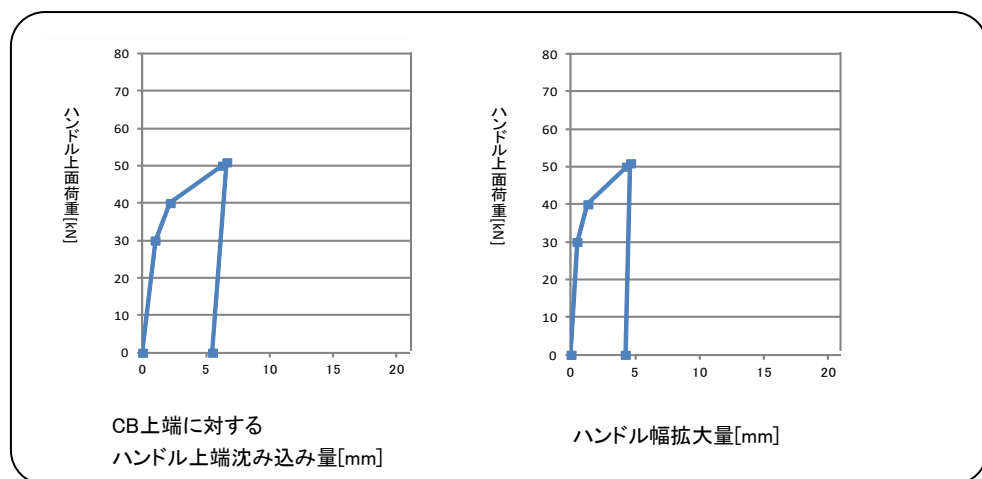
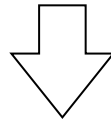


図5-16 燃料棒伸び差の燃焼変化（膨張スプリングのデータから評価）
（9×9燃料（B型））^[2]

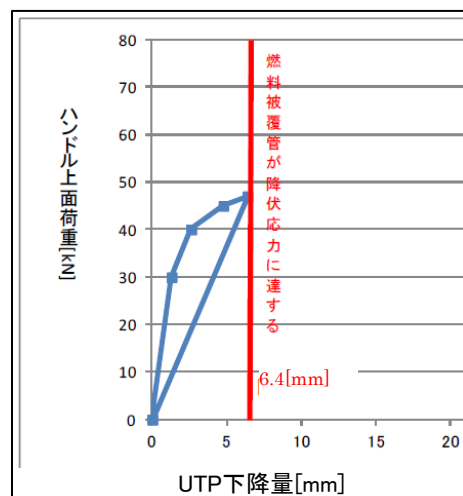
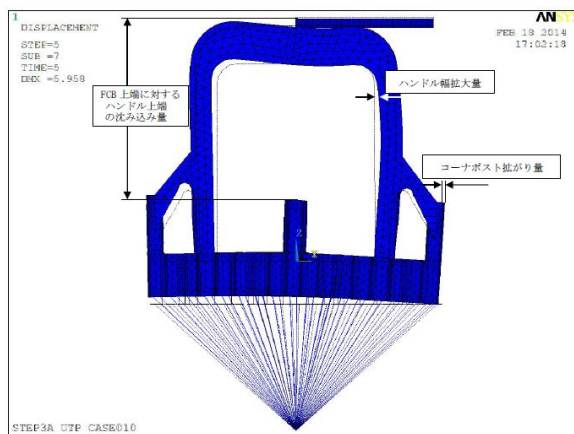


燃料被覆管が降伏応力を与えるUTP下降量に達する際にハンドル上面に付加される荷重を評価

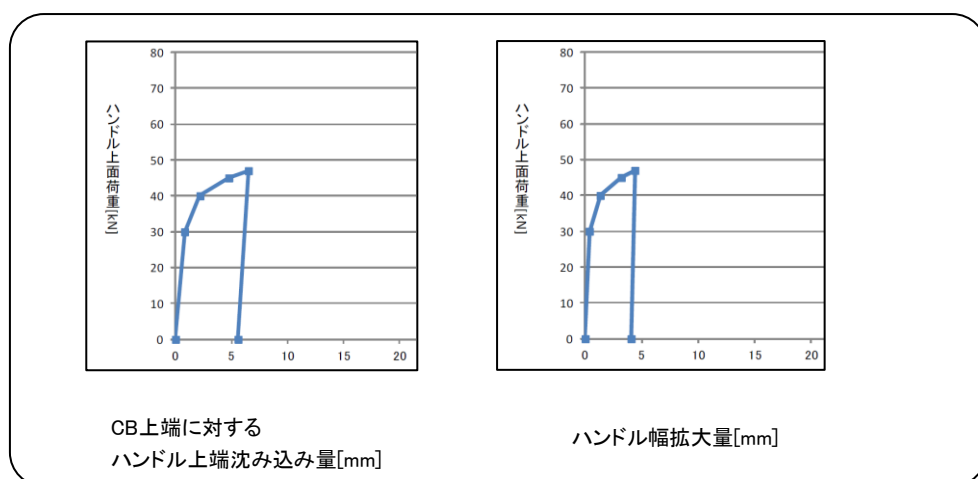
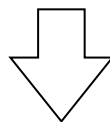


上記荷重が付加された場合のUTP各部の塑性変形を評価

図5-17 UTPに残留する塑性変形量の評価例
(高燃焼度8×8燃料 ②ハンドル上面右半分に剛体接触)



燃料被覆管が降伏応力を与える U T P 下降量に達する際にハンドル上面に付加される荷重を評価



上記荷重が付加された場合の U T P 各部の塑性変形を評価

図 5-18 UTPに残留する塑性変形量の評価例
(9×9燃料 (A型) ②ハンドル上面右半分に剛体接触)

CF側

位置	A	B	C	D	E	F	G	H	J
1	1.9	1.2	1.7	1.5	1.6	1.4	1.6	1.7	1.9
2	1.4		1.3	1.2		1.5	1.7		1.9
3	2.0	1.6	1.3	1.1	1.2	1.3	1.7	1.7	1.4
4	3.2	1.9	1.4	0.9		WR 1.1	1.7	1.8	1.8
5	3.2		1.8				1.5		1.3
6	4.2	4.2	2.3	WR 1.9		1.5	1.4	1.0	0.8
7	4.5	4.7	4.6	3.6	2.2	1.6	1.3	0.7	0.3
8	5.3		4.6	4.4		1.7	1.0		0.4
9	5.5	4.9	3.9	4.4	3.4	1.5	0.5	0.5	0.3

反CF側

上部端栓の塑性歪分布（条件①）

(1t, 21m/s, 斜め 45°, 9×9燃料 (A型))

■：結合燃料棒

CF側

位置	A	B	C	D	E	F	G	H	J
1	1.5	1.8	2.6	3.5	4.0	4.7	5.0	5.6	5.7
2	1.8		1.8	2.1		4.5	5.5		5.1
3	2.5	1.8	1.8	1.8	2.4	2.6	4.7	4.8	13.9
4	3.4	2.1	1.8	1.3		WR 2.9	3.9	4.4	4.9
5	4.0		2.4				2.5		3.7
6	4.3	4.5	2.5	WR 2.9		1.9	1.7	1.6	1.4
7	4.9	5.3	4.7	3.9	2.5	1.7	1.4	0.9	0.3
8	5.6		4.8	4.4		1.6	0.9		0.3
9	5.6	5.2	14.2	4.8	3.7	1.4	0.3	0.3	0.1

反CF側

上部端栓の塑性歪分布（条件②）

(1t, 21m/s, 垂直, 9×9燃料 (A型))

■：結合燃料棒

CF側

位置	A	B	C	D	E	F	G	H	J
1	1.7	1.3	2.1	2.8	3.6	4.1	4.0	4.7	5.2
2	1.3		1.3	1.4		4.3	4.5		4.4
3	2.1	1.3	1.3	1.1	1.6	1.8	4.4	4.0	13.5
4	2.8	1.4	1.2	0.8		WR 1.9	3.2	3.9	4.0
5	3.5		1.5				1.6		2.8
6	3.9	4.1	1.8	WR 1.9		1.1	1.0	0.9	0.8
7	3.8	4.3	4.2	3.1	1.6	1.0	0.8	0.5	0.2
8	4.7		4.0	3.7		0.9	0.5		0.3
9	5.2	4.3	14.5	3.9	2.7	0.8	0.3	0.3	0.2

反CF側

上部端栓の塑性歪分布（条件③）

(4.5t, 12m/s, 垂直, 9×9燃料 (A型))

■：結合燃料棒

CF側

位置	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0.1	0.2	0.1	0.7	1.3	3.4	4.4	6.9
2	0.2	1.2	0.3	0.7	1.0	1.9	1.7	2.1
3	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	2.1	0.5	2.5
4	0.7	0.9	0.4	0.1	2.8	0.2	3.7	0.1
5	1.7	1.5	0.6	3.3	0.0	0.1	0.2	1.6
6	4.1	2.6	2.1	0.1	0.1	0.2	0.2	1.0
7	5.5	2.2	1.3	3.8	1.7	0.2	0.3	0.2
8	9.9	4.0	4.4	1.5	2.9	0.3	0.2	0.2

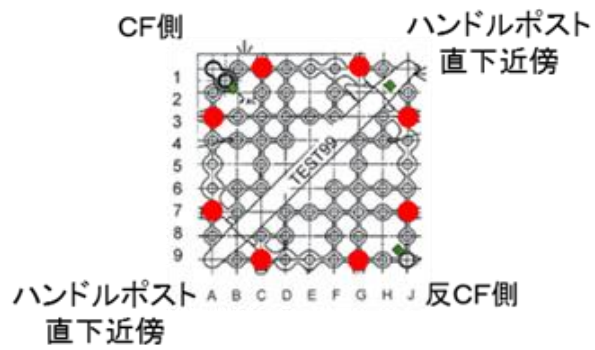
反CF側

上部端栓の塑性歪分布（条件④）

(1t, 21m/s, 垂直,
新型 8×8 ジルコニウムライナ燃料)

■：結合燃料棒

図 5-19 がれき衝突解析における上部端栓の塑性歪分布



位置	A	B	C	D	E	F	G	H	J
1	0.1		0.0				0.3		1.0
2		X			X			X	
3	0.1								0.5
4					X				
5		X		X	X	X		X	
6					X				
7	0.2								0.0
8		X			X			X	
9	0.6		0.4				0.0		0.0

図5-20 がれき落下衝撃試験で得られた上部端栓近傍における歪ゲージによる測定結果（単位：％ ●：結合燃料棒）

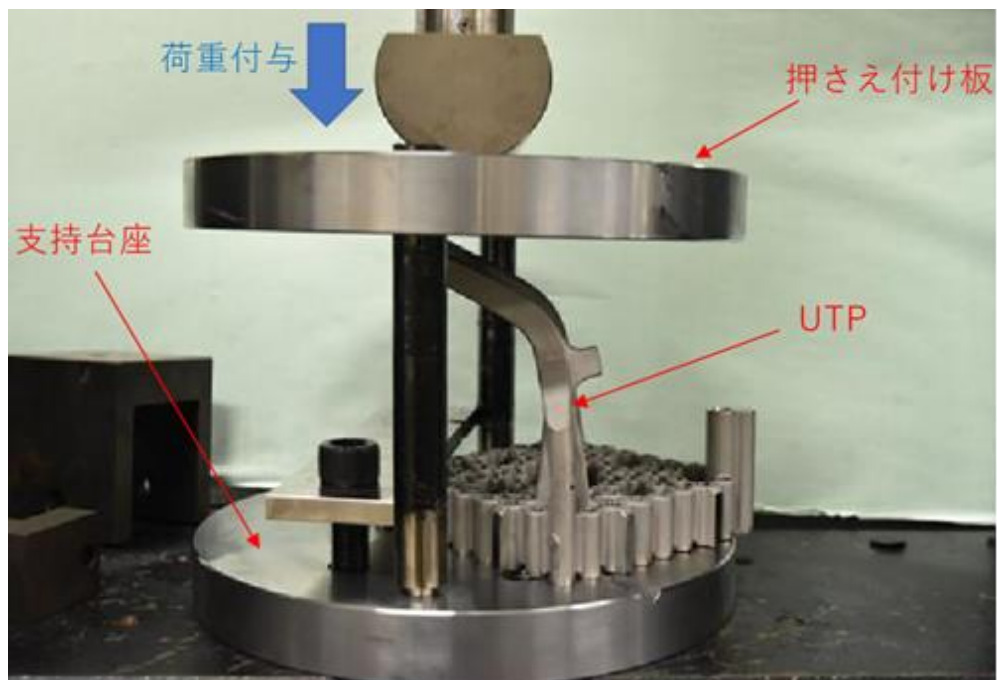


図 5 - 2 1 ハンドルへの変形付与装置

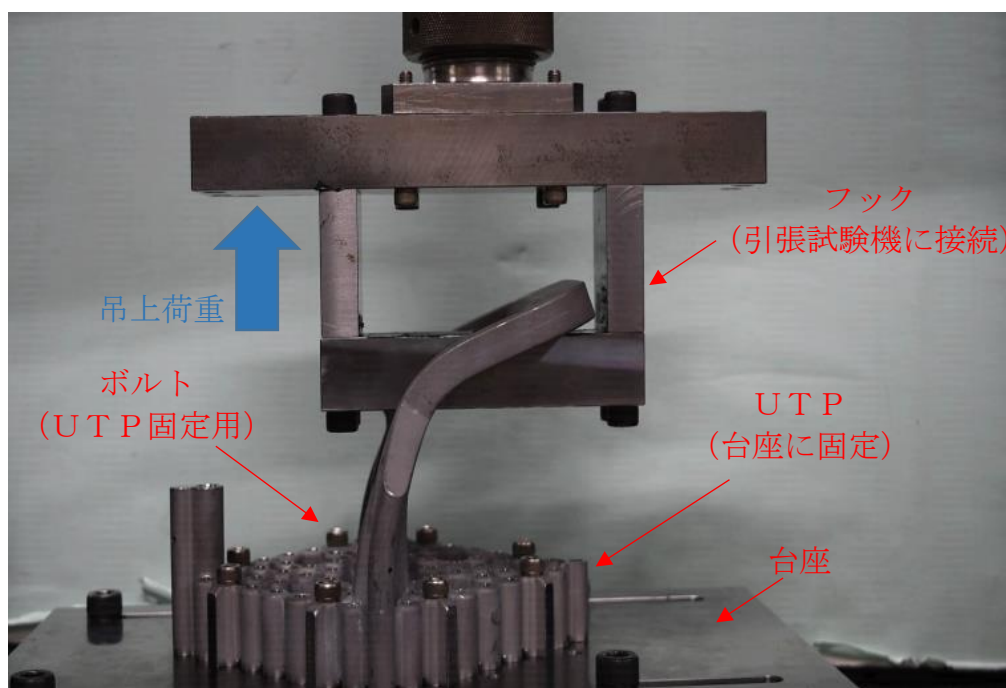


図 5 - 2 2 ハンドルの引張試験装置

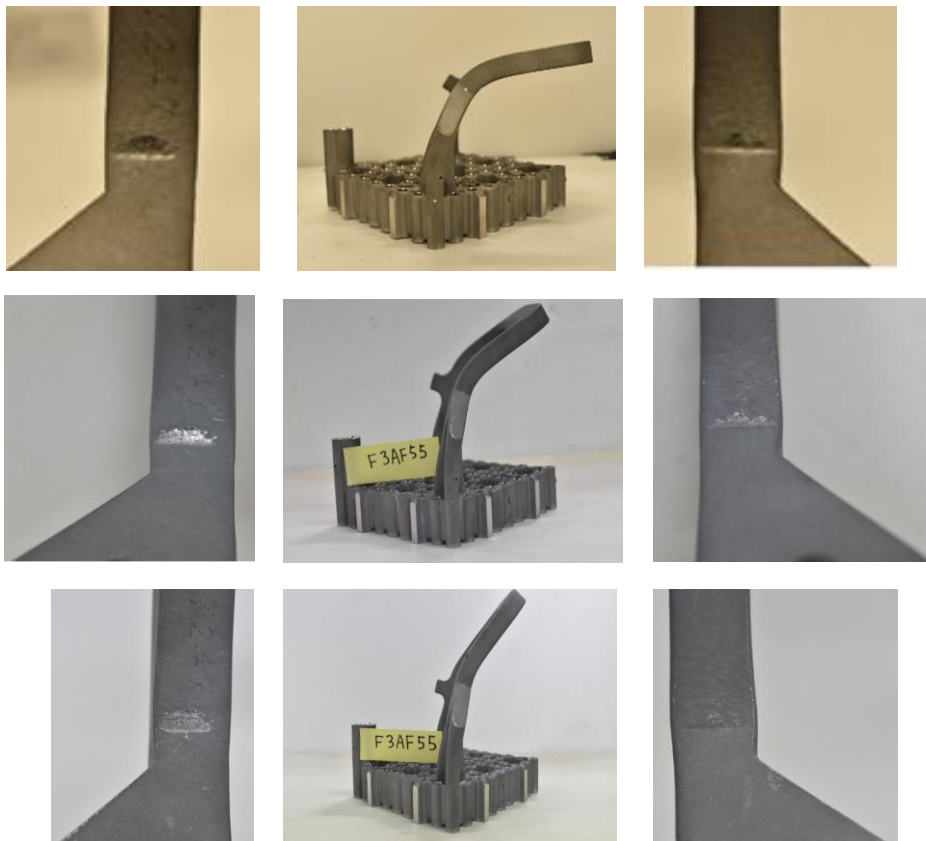
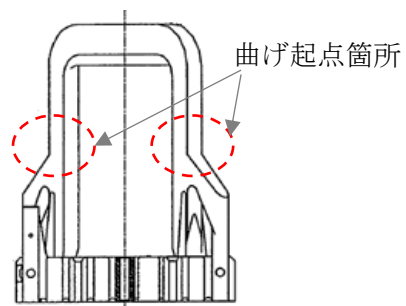


図 5 - 2 3 9 × 9 燃料 (A 型) ハンドルの引張試験前後の比較
(上段：引張試験前 中段：13kN 引張試験後 下段：26kN 引張試験後)

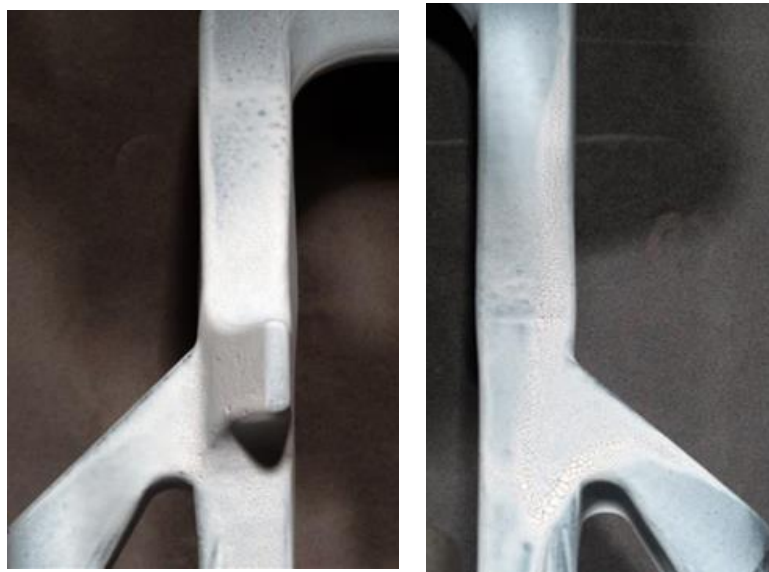


図 5 - 2 4 (1) ハンドル引張試験後の浸透探傷試験結果
(9 × 9 燃料 (A 型) 引張荷重 13kN)

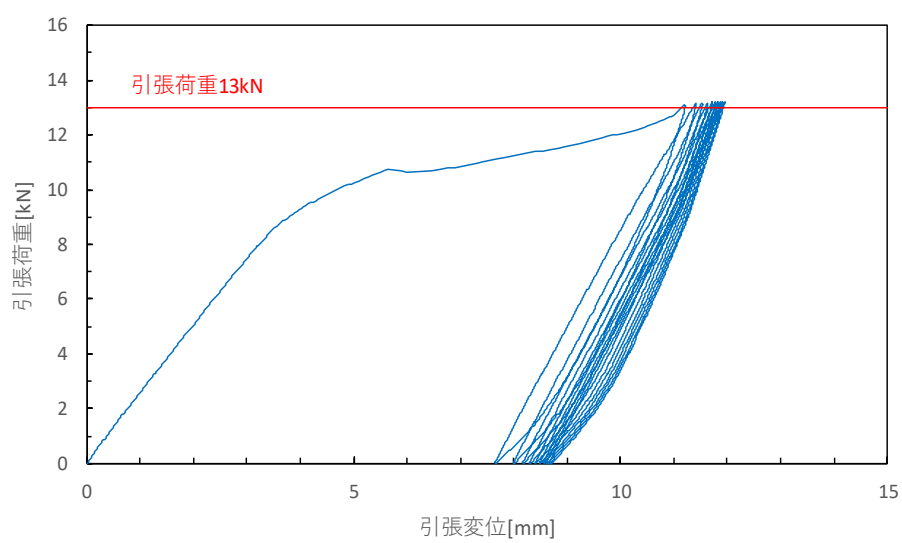


図 5 - 2 5 (1) ハンドル引張試験中の引張荷重—引張変位
(9 × 9 燃料 (A 型) 引張荷重 13kN)

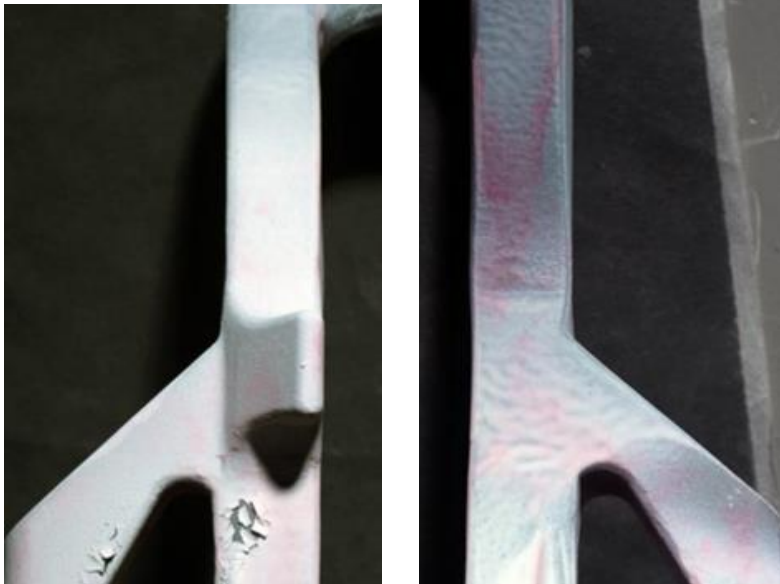


図 5 - 2 4 (2) ハンドル引張試験後の浸透探傷試験結果
(9 × 9 燃料 (A 型) 引張荷重 26kN)

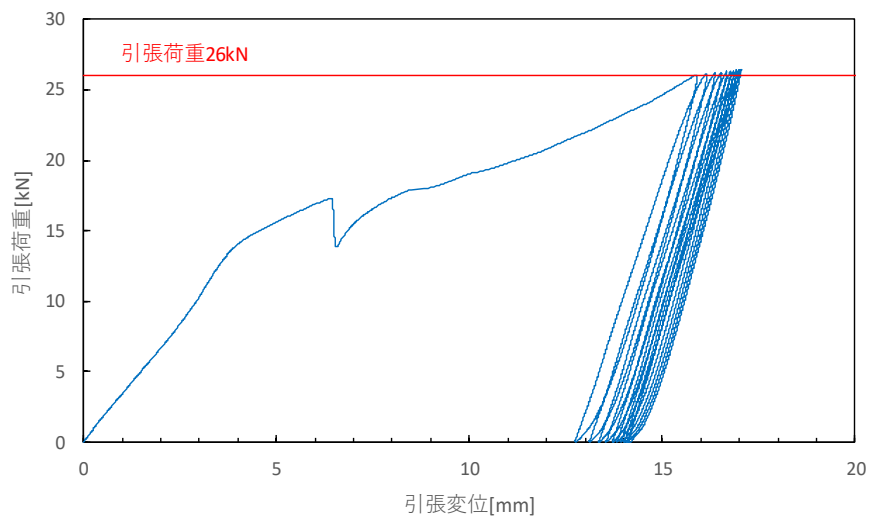


図 5 - 2 5 (2) ハンドル引張試験中の引張荷重—引張変位
(9 × 9 燃料 (A 型) 引張荷重 26kN)

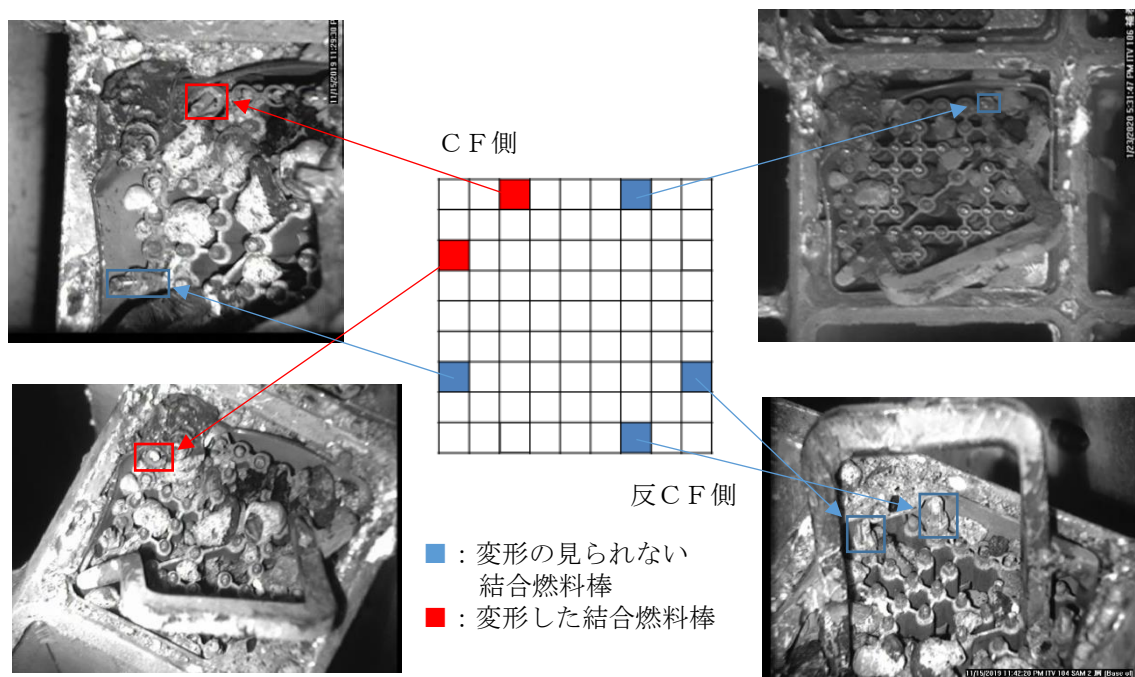


図 5 - 2 6 C B 変形燃料の結合燃料棒状況

6. 燃料の取り扱い

6.1. 4号機における燃料の取り扱い

6.1.1. 燃料取り出し手順の概要

燃料取り扱いに支障となるがれきを撤去した後、がれき落下による燃料健全性への影響を確認し、燃料取扱機又はクレーンを用いて燃料の取り出しを行う。燃料の取り出しにあたってはがれきによる固着の発生防止に努めるとともに固着発生時には必要な対応を行う。がれきによる燃料健全性への影響がない燃料集合体は既存のNF T-22B型構内輸送容器に収納し、燃料健全性への影響が疑われる燃料集合体は燃料被覆管の破損を考慮した容器に収納し、使用済燃料共用プール（新燃料については、一部6号機SFP）へ搬出する。なお、燃料取扱機又はクレーンを用いて燃料の取り出しを行うにあたっては、実施体制を確立し、事前にトレーニングを行った上で対応する。

6.1.2. 燃料健全性確認

6.1.2.1. 燃料健全性確認手順

図6-1、図6-2に水中カメラで撮影した4号機のプール内のがれき散乱状況を示す。これまでの調査からSFP水中には様々ながれきが落下しているものの、がれきで確認できない一部の燃料集合体を除いては、UTPハンドルの変形は確認されていない。

図6-5に4号機SFP内のがれきマップ及び表6-1には4号機SFP内で確認されたがれきのリストを示す。燃料取り出し作業に先立って、がれきを撤去した後、水中カメラにてUTPハンドルの変形状況をあらためて確認し、燃料健全性確認治具を用いての確認は、SFP内で最も燃料健全性への影響があると考えられるがれき周辺の燃料に対して行う。

燃料取り出し作業は水中カメラにより作業状況を確認しつつ実施することとし、作業中に燃料集合体やCBに傷、変形、腐食等の顕著な異常が確認された場合には、取り出し作業を中止し、水中カメラにて傷の大きさ等について観察し健全性への影響について評価する。また、4号機SFP内から使用済燃料共用プール（新燃料については、一部6号機SFP）に移送した後、燃料集合体はNF T-22B型構内輸送容器から燃料を取り出す際に、CBに傷、変形、腐食等の顕著な異常がないことを確認する。

6.1.2.2. 燃料健全性確認用治具

燃料健全性確認用治具の概念図を図6-3、図6-4に示す。

燃料健全性確認用治具は、5.2.2 評価結果の中で、燃料被覆管が塑性変形し、かつ、UTP塑性変形量が最も小さいがれき衝突条件「②ハンドル上面右半分に剛体接触」を基準に製作する。また、健全性確認治具による検出性を考慮し、高燃焼度8×8燃料以前の燃料に対しては「CB上端に対するハンドル上端の沈み込み量」、9×9燃料（B型）に対しては、「CB上端に対するコーナーポスト上端の沈み込み量」を検出ポイントとする。

6.1.3. 取り出し後の確認

使用済燃料共用プール（新燃料については、一部6号機SFP）における長期的な健全性の確認や輸送・保管方法の検討のため、今後、別途点検を計画する。

6.1.4. がれきによるCBの固着

6.1.4.1. 固着の発生防止

燃料集合体を使用済燃料ラックから引き抜く際に、使用済燃料ラック内に落下したのがれきとCBが干渉して、CBが固着する可能性がある。

このため、燃料取り出しに先立ち、燃料上部にあるがれきを除去する。また、燃料ラックとCBの隙間にあるがれきも可能な範囲で除去する。

燃料取り出しにあたっては、燃料取扱機に設置されている荷重計を確認しながら最大450kgまでの荷重でゆっくり吊り上げるにより、固着の発生防止を図る。

6.1.4.2. 固着発生時の対応

図6-6に固着発生時の対応フローを示す。クレーンを用いた燃料の再吊上げにおいても固着が解消しない場合等に一時的に落下防止治具を取り付け燃料の落下を防止するとともに、必要に応じて固着状況の調査及び固着原因となるがれきの除去等を実施する。固着した燃料に落下防止治具を取り付けた状態で他の燃料の取り出し作業を実施する場合は、未臨界を確保するとともに固着した燃料が作業の支障とならないよう、燃料取り出し順序を見直す。

なお、CBの固着した状態が長期間に亘ると判断される場合には、当該燃料集合体をワイヤ等によりオペレーティングフロア上の固定した箇所と接続することにより、安定した状態で保持する。その上で、固着状況について詳細確認を行い、燃料集合体を安全に着座させる対応について検討する。（対応例 上部タイプレートの手柄部を吊った状態で、チャンネルファスナをはずし、CBと燃料集合体を分離して燃料集合体のみをラックに吊り降ろす。）

6.1.4.3. 固着解消時に使用済燃料が落下した場合の被覆管の健全性評価

万一固着が自然解消し使用済燃料が使用済燃料貯蔵ラック内で落下した場合を想定し、燃料被覆管の健全性評価を実施した。燃料集合体が落下した場合、LTPの燃料棒との嵌合部が変形し、燃料棒が曲がることで燃料棒に応力が発生する。ここでは保守的に落下による位置エネルギーは全て燃料棒及びLTPの歪みエネルギーに使用されるとして評価を行った。なお、被覆管の肉厚が薄い9×9燃料（B型）を代表として評価を実施した。

評価結果を図6-7及び図6-8に示す。燃料棒の変形が弾性範囲内で収まるLTPと燃料棒嵌合部の傾き角度は約14度、その際の落下高さは約34cmと評価された。

落下高さ約34cm以内であれば、燃料被覆管は弾性範囲内であり破損しないと考えられる

ため、落下防止治具は約 34cm よりも十分低い位置（約 15mm）でも取り付けできるようにすることで、燃料集合体落下時の安全を担保する。

6.1.4.4. 落下防止治具の特徴

図 6－9 に燃料集合体の落下防止治具の概念図を示す。落下防止治具は、治具トップから突出した治具アームで燃料自重を受ける構造となっており、燃料自重を受けた状態で転倒を防止する構造となっている。治具トップ及び高さ調整管は接続用ボルトによりベース 2 と結合される。ベース 2 はベース 1 の固定ピンでベース 1 と、ベース 1 は燃料貯蔵ラックのリフティングラグで燃料貯蔵ラックと嵌合されており、また嵌合部は極力クリアランスを排除した設計となっている。

6.1.5. クレーン又は天井クレーンを用いた燃料集合体の取り扱い

4 号機 S F P 及び使用済燃料共用プールにおいて燃料取扱機又は燃料取扱装置での取扱いが困難な燃料集合体は、クレーン主巻フックに支持されたチェンブロックを用いて吊上げる。装置の概要を図 6－10 に示す。

クレーン又は天井クレーンで燃料集合体を取り扱う場合においては、表 6－2 に示す安全対策を行う。尚、燃料集合体 U T P に作用する吊り上げ荷重は燃料を損傷させることのないように 1 t までとする。燃料吊り上げ時の荷重は結合燃料棒等に印加されるが、結合燃料棒の耐荷重は 9 t 程度あるので、1 t は余裕をみた値となっている。

燃料貯蔵ラックと C B の間のがれきによって固着が発生した場合については、C B の断面で吊り上げ荷重を受けることになるが、C B の材質（ジルコニウム合金）の機械的強度から、側面長さ（一面）の 1／10 程度の断面で 1 t の荷重を受けた場合であっても、C B を損傷させることはなく、燃料に対して影響はない。また、通常の燃料取扱機の吊り上げ荷重を上回る荷重を燃料集合体に付加する場合には、ファイバースコープ等により固着の状況を確認し、燃料集合体や C B の側面に局所的に過大な荷重がかかる状況でないことを確認する。また、燃料貯蔵ラックの材質はステンレス材であり十分な強度と重量を有していることから、吊り上げ荷重 1 t が燃料貯蔵ラックに付加されたとしても影響はない。仮にがれきによって燃料貯蔵ラックに変形が生じた場合であっても、燃料集合体は C B によって囲まれていることから、燃料健全性には影響が生じないものと考えられる。

6.1.6. 4 号機における燃料集合体取り扱い時に放射線モニタに異常が確認された場合

仮に 4 号機オペレーティングフロア上での作業中に、線量率が予想より高くなった場合には、エリア放射線モニタで検知できる。異常を検知した場合は退避し、線量率が十分下がった後に作業を再開する運用により放射線業務従事者の放射線被ばくを低く抑えることが可能である。

6.2. 3号機における燃料の取り扱い

6.2.1. 燃料取り出し手順の概要

燃料取り扱いに支障となるがれきを撤去した後、がれき落下による燃料健全性への影響を確認し、燃料取扱機を用いて燃料の取り出しを行う。燃料の取り出しにあたってはがれきによる固着の発生防止に努めるとともに固着発生時には必要な対応を行う。がれきによる燃料健全性への影響がない燃料集合体は構内用輸送容器に収納し、燃料健全性への影響が疑われる燃料集合体は燃料被覆管の破損を考慮した容器に収納し、使用済燃料共用プールへ搬出する。なお、燃料取扱機を用いて燃料の取り出しを行うにあたっては、実施体制を確立し、事前にトレーニングを行った上で対応する。

3号機における燃料取扱機の操作は、原則として遠隔操作室から遠隔操作にて行う。

6.2.2. 燃料健全性確認

6.2.2.1. 燃料健全性確認手順

図6-11に水中カメラで撮影した大型のがれき撤去後の3号機のプール内のがれき散乱状況を示す。これまでの調査からSFP水中には様々ながれきが落下しており、また図6-12に示すとおりハンドル変形燃料が一部確認されている。

燃料取り出し作業に先立って、がれきを撤去した後、水中カメラにてUTPハンドルの変形状況をあらためて確認する。また、燃料健全性確認用治具を用いての確認を、原則として全燃料に対して行う。ただし、明らかにUTPハンドルに大きな変形がある燃料は除く。

燃料健全性確認用治具により、判定基準を超過することが確認された燃料、または、水中カメラで明らかにUTPハンドルに大きな変形が確認された燃料は、いずれもハンドル変形燃料として扱う。

燃料取り出し作業は水中カメラにより作業状況を確認しつつ実施することとし、作業中に燃料集合体やCBに傷、変形、腐食等の異常が確認された場合には、必要に応じて取り出し作業を中止し、水中カメラにて傷の大きさ等について観察し健全性への影響について評価する。また、3号機SFP内から使用済燃料共用プールに移送した後、燃料集合体は構内用輸送容器から燃料を取り出す際に、CBに傷、変形、腐食等の顕著な異常がないことを確認する。

6.2.2.2. 燃料健全性確認用治具

燃料健全性確認用治具を図6-13に示す。

燃料健全性確認用治具は、5.2.2 評価結果の中で、燃料被覆管が塑性変形し、かつ、UTP塑性変形量が最も小さいがれき衝突条件「②ハンドル上面右半分に剛体接触」を基準に製作する。また、全ての燃料タイプに対して、「CB上端に対するハンドル上端の沈み込み量」を検出ポイントとする。

6.2.3. 取り出し後の確認

使用済燃料共用プールにおける長期的な健全性の確認や輸送・保管方法の検討のため、今後、別途点検を計画する。

6.2.4. がれきによるC Bの固着

6.2.4.1. 固着発生の防止

燃料集合体を使用済燃料ラックから引き抜く際に、使用済燃料ラック内に落下したのがれきとC Bが干渉して、C Bが固着する可能性がある。このため、燃料取り出しに先立ち、燃料上部にあるがれきを除去する。また、燃料ラックとC Bの隙間にあるがれきも可能な範囲で除去する。燃料取り出しにあたっては、燃料取扱機に設置されている荷重計を確認しながら、最大450kgまでの荷重でゆっくり吊り上げることで、固着の発生防止を図る。

6.2.4.2. 固着発生時の対応

図6-14に3号機における固着発生時の対応フローを示す。燃料ラックからの吊り上げ時にがれきとの干渉により最大450kgの荷重で吊り上げができない場合、当該燃料は着座させ、他の燃料の取り出しを実施する。その後、必要に応じて固着状況の調査及びがれきとの干渉を解除する措置を行った上で、3号機燃料取扱機の定格荷重である最大1tの荷重までゆっくり吊り上げを行う。なお、最大1tの荷重で吊り上げる高さはチャンネルファスナが燃料ラックから抜ける範囲までとする。最大1tの荷重で吊り上げができない場合、がれきとの干渉を解除する措置を行う。なお、燃料集合体UTPに作用する吊り上げ荷重は燃料を損傷させることのないように1tまでとする。燃料吊り上げ時の荷重は結合燃料棒等に印加されるが、結合燃料棒の耐荷重は9t程度あるので、1tは余裕をみた値となっている。燃料ラックとC Bの間のがれきによって固着が発生した場合については、C Bの断面で吊り上げ荷重を受けることになるが、C Bの材質（ジルコニウム合金）の機械的強度から、側面長さ（一面）の1/10程度の断面で1tの荷重を受けた場合であっても、C Bを損傷させることはなく、燃料に対して影響はない。

6.2.5. 震災以前から存在する漏えい燃料等について

3号機SFPには、表6-3に示すとおり、運転中に漏えいした燃料や、過去の取り扱い中に部材の一部に変形等を生じた燃料が存在する。これらの燃料は、他の燃料と同様に震災以前は燃料取り扱い機を用いて取り扱いを行っており、他の燃料と比べて取り扱い上の相違は無い。

一方、運転中に漏えいした燃料は、被覆管の密封性が失われているため、燃料被覆管の破損を考慮した構内用輸送容器に収納する。

スペーサが一部損傷した燃料のうち1体は、C Bが装着されていないため、燃料ラックから燃料を引き抜く際に燃料ラック内に混入したのがれきと燃料被覆管が接触することが懸念

される。このため、運転中に漏えいした燃料と同様、C Bが装着されていない燃料は燃料被覆管の破損を考慮した構内用輸送容器に収納する。

6.2.6. ハンドル変形燃料の取り扱い

ハンドル変形燃料は、健全燃料と同様に燃料取扱機を用いて取り出しを行う。ただし、ハンドルの著しい変形等により燃料取扱機にて取り扱いができない燃料が確認された場合は、今後本実施計画に記載した上で取り扱うこととする。

燃料取扱機を用いて取り出したハンドル変形燃料は、ハンドル変形の外観確認結果に応じて、構内用輸送容器内に予め装荷された使用済燃料収納缶（小）または使用済燃料収納缶（大）に収納し、使用済燃料共用プールへ搬出する。なお、使用済燃料収納缶（大）に収納する燃料は、使用済燃料収納缶（小）に入らない燃料を対象とする。

6.2.7. ハンドル変形燃料の吊り上げ

ハンドル変形燃料については、事前に吊り上げ試験を実施し、吊り上げ試験の結果に応じて燃料と燃料ラックまたはがれきとの干渉を解除した状態にした後に取り出す。ハンドル変形燃料の吊り上げ荷重は、5.3.4 評価結果より、ハンドル変形の無い燃料と同様に最大1 tとする。

6.3. 2号機における燃料の取り扱い

6.3.1. 燃料取り出し手順の概要

燃料取り扱いに支障となる干渉物を撤去した後、燃料取扱機を用いて燃料の取り出しを行う。燃料集合体は構内用輸送容器に収納し、使用済燃料共用プールへ搬出する。なお、燃料取扱機を用いて燃料の取り出しを行うにあたっては、実施体制を確立し、事前にトレーニングを行った上で対応する。

2号機における燃料取扱機の操作は、原則として遠隔操作室から遠隔操作にて行う。

6.3.2. 燃料健全性確認

図6-15に水中カメラで撮影した2号機のプール内調査の状況を示す。これまでの調査から、プール内への瓦礫の落下等機械的健全性に影響を与えるような事象は発生しておらず、燃料被覆管は震災前の状態を保っている。

燃料取り出し作業は水中カメラにより作業状況を確認しつつ実施することとし、作業中に燃料集合体やC Bに傷、変形、腐食等の異常が確認された場合には、必要に応じて取り出し作業を中止し、水中カメラにて傷の大きさ等について観察し健全性への影響について評価する。また、2号機SFP内から使用済燃料共用プールに移送した後、燃料集合体は構内用輸送容器から燃料を取り出す際に、C Bに傷、変形、腐食等の顕著な異常がないことを確認する。

6.3.3. 取り出し後の確認

6.3.2. に示す通り、2号機SFPには事故により燃料健全性に影響する瓦礫の落下等は確認されていない。燃料取り出し作業で通常と異なる事象が発生した場合は、使用済燃料共用プールにおける長期的な健全性の確認や輸送・保管方法の検討のため、今後、別途点検を計画する。

6.3.4. 震災以前から存在する漏えい燃料等について

2号機SFPには、表6-4に示すとおり、運転中に漏えいした燃料や、過去の取り扱い中に部材の一部に変形等を生じた燃料が存在する。これらの燃料は、他の燃料と同様に震災以前は燃料取り扱い機を用いて取り扱いを行っており、他の燃料と比べて取り扱い上の相違は無い。

一方、運転中に漏えいした燃料は、被覆管の密封性が失われているため、燃料被覆管の破損を考慮した構内用輸送容器に収納する。

ワイヤ修復燃料は、外観点検等により被覆管の密封性には影響ないことが確認されているが、吊り上げ時の荷重を負担するステンレス製ワイヤが海水注水の影響を受けている可能性があるため、取り扱いについては、今後本実施計画に記載した上で取り扱うこととする。

6.4. 破損燃料を使用済燃料共用プールへ受け入れた場合の放射線被ばく影響

ここでは、被覆管が損傷した燃料が使用済燃料共用プールへ搬入された場合の放射線被ばくについて記載する。

6.4.1. 液相

使用済燃料共用プールへ搬入された燃料の被覆管に損傷があった場合には、水溶性の核分裂生成物がSFP内に溶出する。また、構内輸送容器の搬入によりSFP内の放射性物質が使用済燃料共用プールへ持ち込まれる。しかしながら、水溶性の核分裂生成物及び放射性物質は使用済燃料共用プール冷却浄化系により除去されるため、構内輸送容器の蓋開放後に使用済燃料共用プール水面上で線量率が一時的に上昇する場合でも、時間の経過とともに線量率は低下する。なお、使用済燃料共用プール冷却浄化系の浄化性能を図6-16に示す。放射能濃度を1/10にするために有する時間は、約24時間程度（2系統運転時）と評価している。

仮に使用済燃料共用プール水面上での線量率が予想より高くなったとしても、エリア放射線モニタで検知でき、検知した場合は退避し、線量率が十分下がった後に作業を再開する運用により放射線業務従事者の放射線被ばくを低く抑えることが可能である。

6.4.2. 気相

SFPに保管されている燃料の被覆管に損傷があった場合、気体の核分裂生成物は既にSFP内で十分放出されているものと考えられる。このため、使用済燃料共用プールで放出される可能性は低く、気相に起因する被ばく影響はないものと考えられる。

表 6－1 4号機SFP内で確認されたがれき

名称	数量	備考
作業台車用階段	1 個	約 2000mm×600mm×1000mm, 約 200kg
デッキプレート	2 枚	約 10000mm×600mm×50mm, 約 200kg 約 300mm×600mm×50mm, 約 6kg
手摺りプレート	6 枚	約 2500mm×800mm×2mm (最大), 約 20kg (最大)
足場板	1 枚	約 1500mm×50mm×200mm, 約 10kg
コンクリートがれき	－	約 0～400mm 程度 (最大), 約 10kg (最大)
その他	－	燃料取り出しに影響のある照明等の単品落下物

表 6－2 クレーン又は天井クレーンでの燃料取り扱いに関する安全対策

安全対策	構造概要
動力源喪失時の保持機能	巻上装置は手動チェーンブロックとする。 クレーン主巻フックは電源断時においても保持する構造となっている
吊り具の二重化	二重のワイヤロープで燃料集合体を保持する構造とする (クレーンの主巻フックを使用)
外れ防止	フックは外れ止め装置を有する把持具構造とする
過荷重防止	荷重計により荷重の監視を行う 燃料集合体UTPに作用する吊上げ荷重は 1t までとする 巻上装置は手動とし、荷重を監視しながら巻上げる
臨界防止	燃料集合体を 1 体ずつ取り扱う把持具構造とする
遮へい	吊り上げ設備には、吊り上げ上限以上への吊り上げを阻止するロック機構を有する構造とする

表 6－3 3号機SFPに震災以前から存在する漏えい燃料等

状態	数量	概要
漏えい燃料	1 体	SHIPPING 検査により漏えいを確認
スペーサ一部損傷	2 体	第 4, 5 スペーサがコーナー部で切損、第 3 スペーサは同じコーナー部で下方に傾いた状態
		第 1 スペーサコーナー部の溶接個所がはずれて少し変形 CB が装着されていない
スペーサずれ	1 体	第 2 スペーサが第 1 スペーサ位置までずれた状態

表 6－4 2号機SFPに震災以前から存在する漏えい燃料等

状態	数量	概要
漏えい燃料	1 体	SHIPPING 検査により漏えいを確認
下部タイプレート変形燃料	1 体	下部タイプレート側面の部材（フィンガースプリング）が変形した状態
ワイヤ修復燃料	1 体	結合燃料棒（8 本）の下部端栓の折損により吊り上げ不可となったため、ワイヤで燃料を一体化して修復している状態



図 6－1 4号機S F P内の状況（その1）



図 6－2 4号機S F P内の状況（その2）

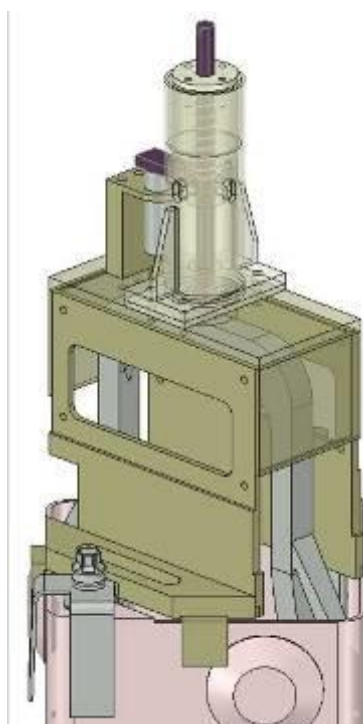


図 6 - 3 燃料健全性確認用治具（概念図）：高燃焼度 8×8 燃料用

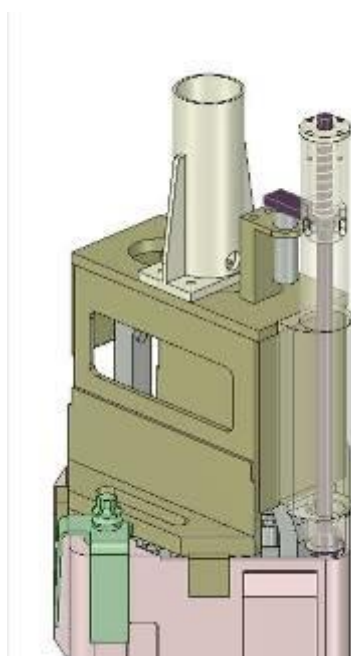


図 6 - 4 燃料健全性確認用治具（概念図）： 9×9 燃料（B型）用

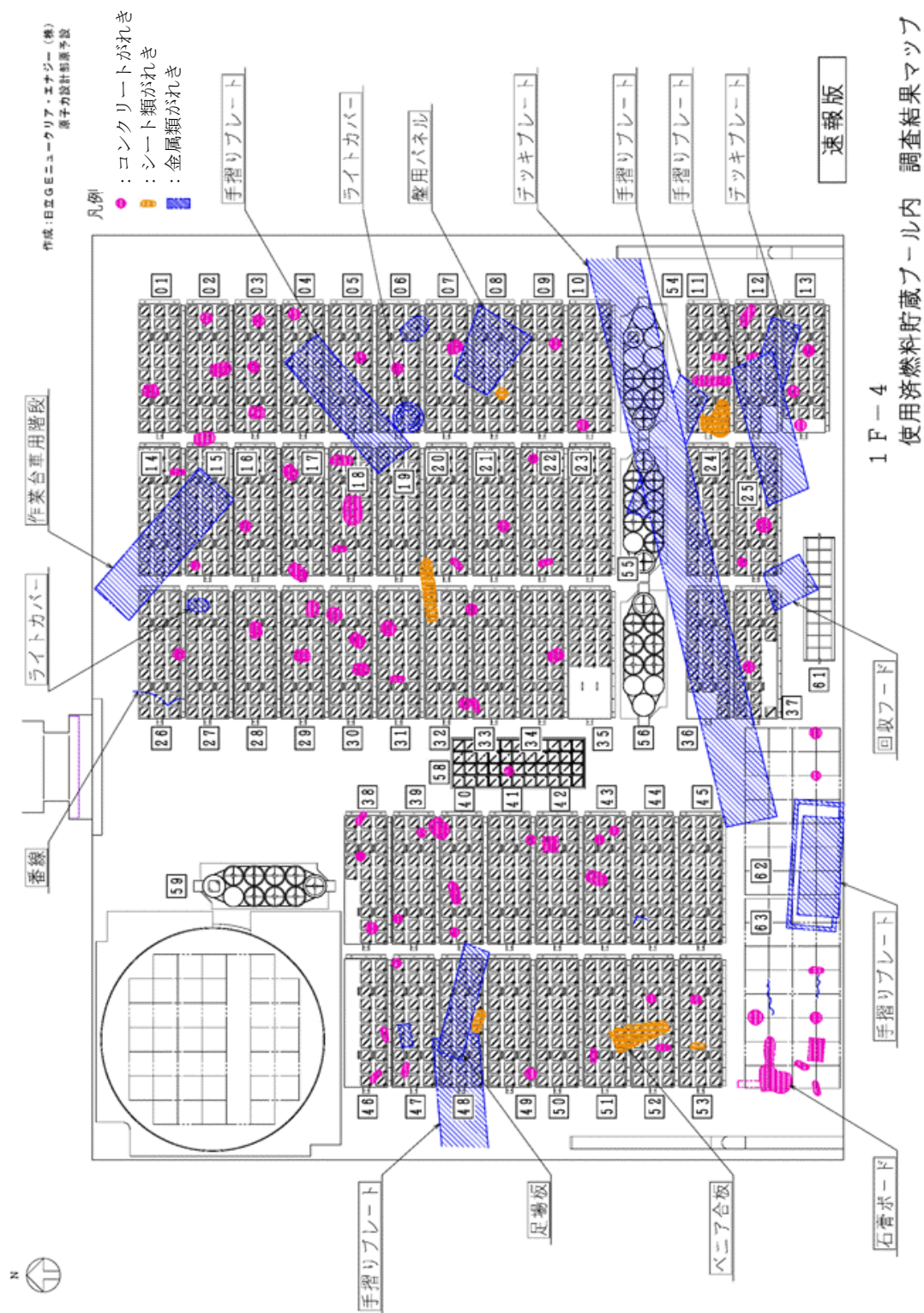
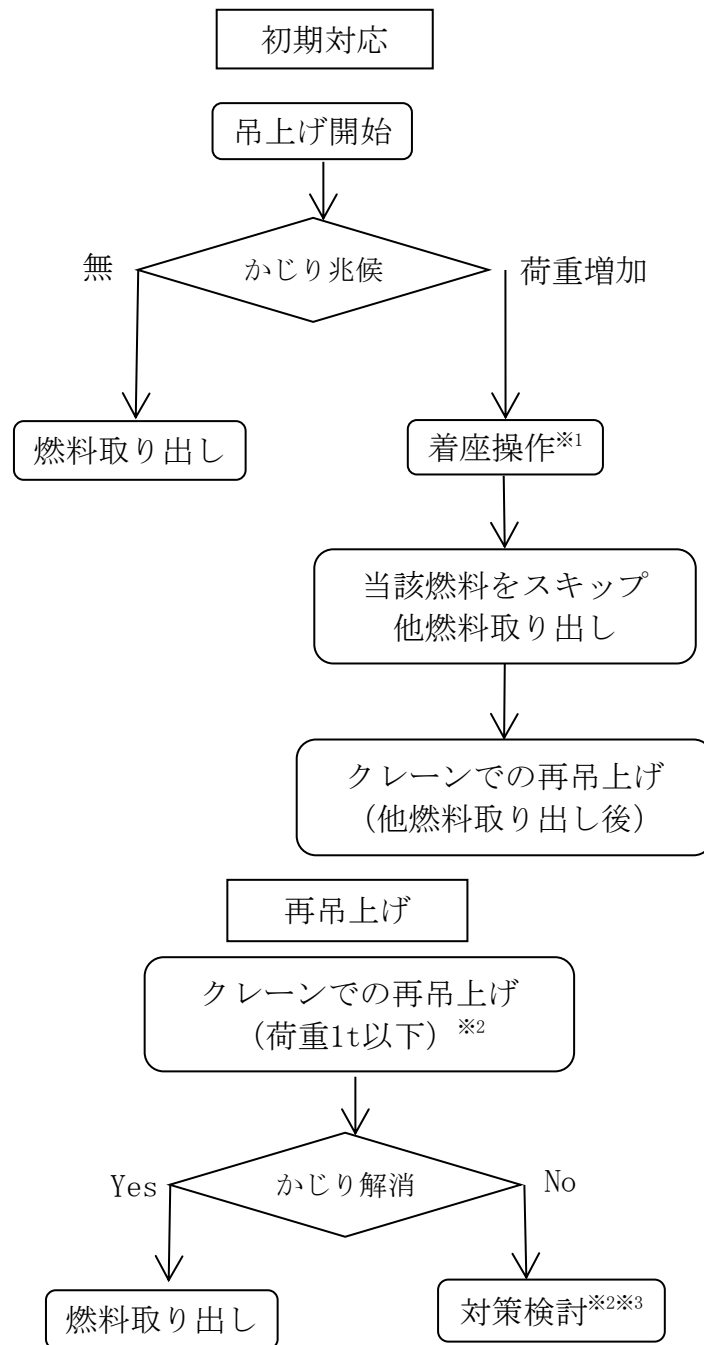


図6-5 4号機SFP内がれきマップ



※1 燃料取扱機での燃料取り出し中に固着により吊上げ/着座操作ができなくなった場合，その位置でクレーンに吊替える。

※2 必要に応じてファイバースコープ等による固着状況の調査・がれきの除去等を実施。

※3 燃料の落下防止のため必要に応じて落下防止治具を設置。固着した状態が長期間に亘ると判断される場合には，燃料集合体を安定した状態で保持。

図 6－6 固着発生時の対応フロー

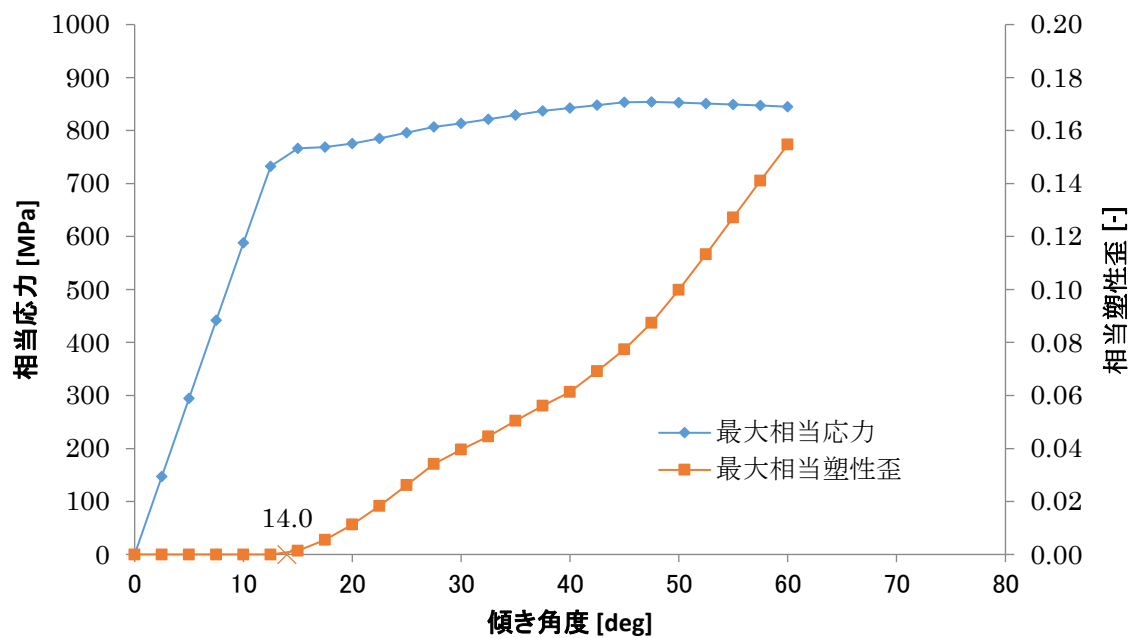


図 6－7 L T P と燃料棒との嵌合部傾き角度－発生応力及び塑性歪

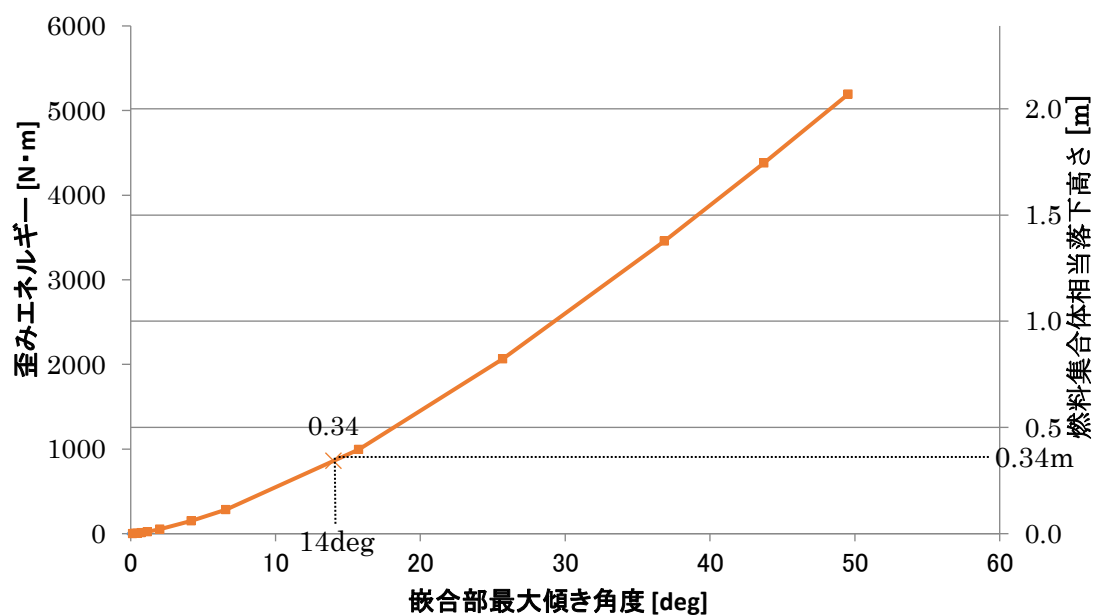


図 6－8 L T P と燃料棒との嵌合部最大傾き角度－歪みエネルギー及び落下高さ

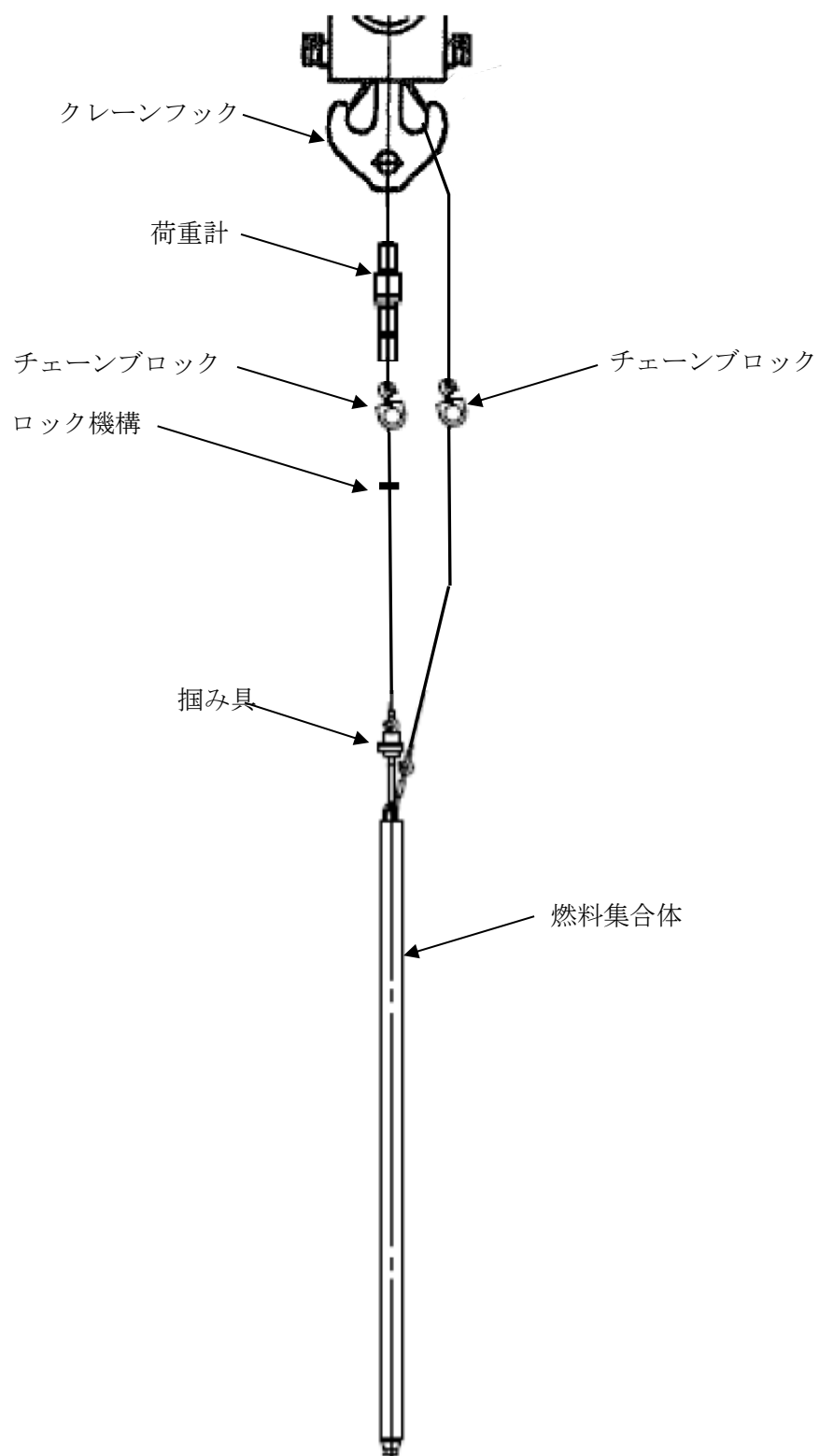


図 6 - 1 0 クレーンを用いた燃料集合体の取り扱い（概念図）

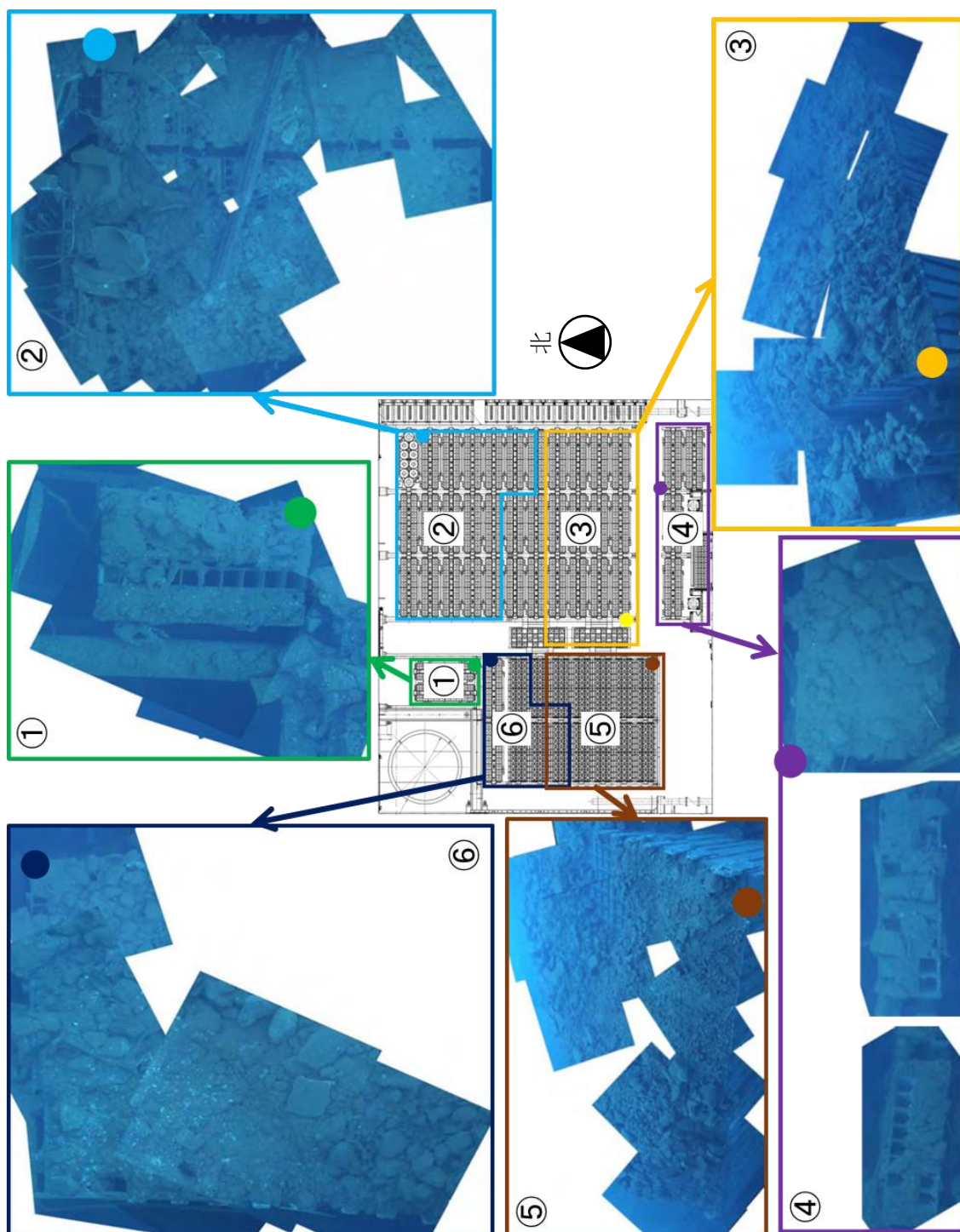
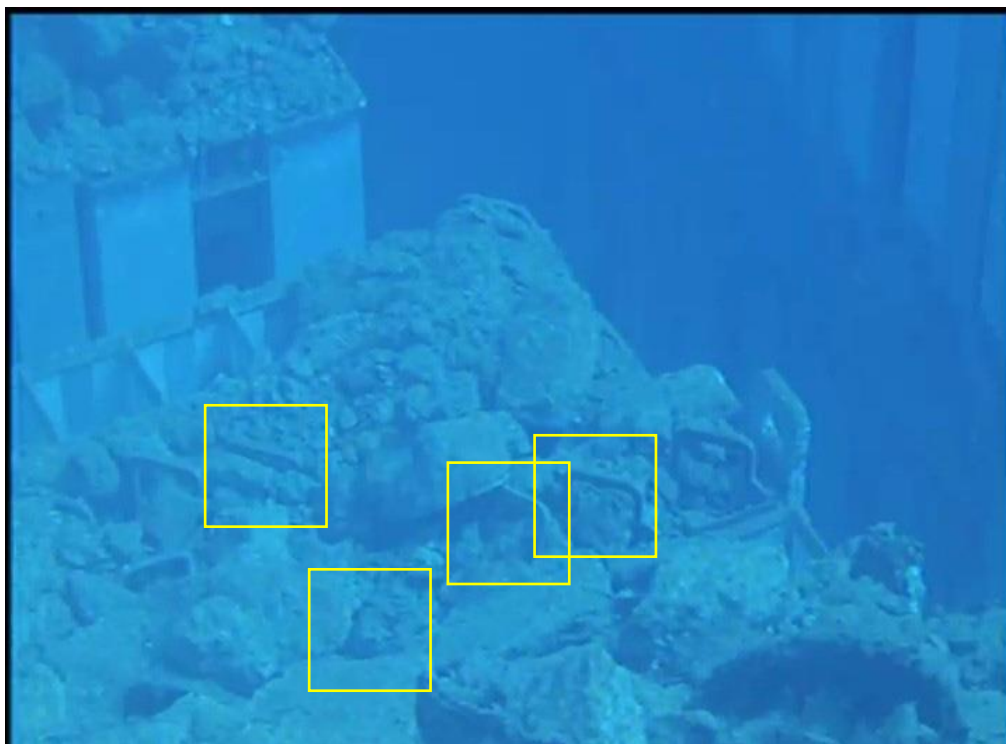


図 6 - 1 1 3 号機 S F P 内の状況（大型のがれき撤去後）



FHM 落下箇所



CUW ハッチ落下箇所

図 6 - 1 2 ハンドル部の変形が認められる燃料（3号機）

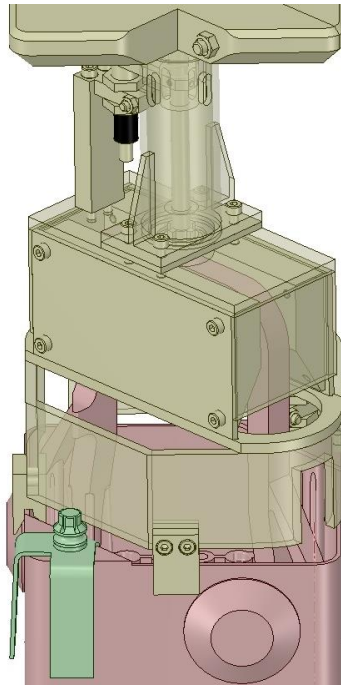
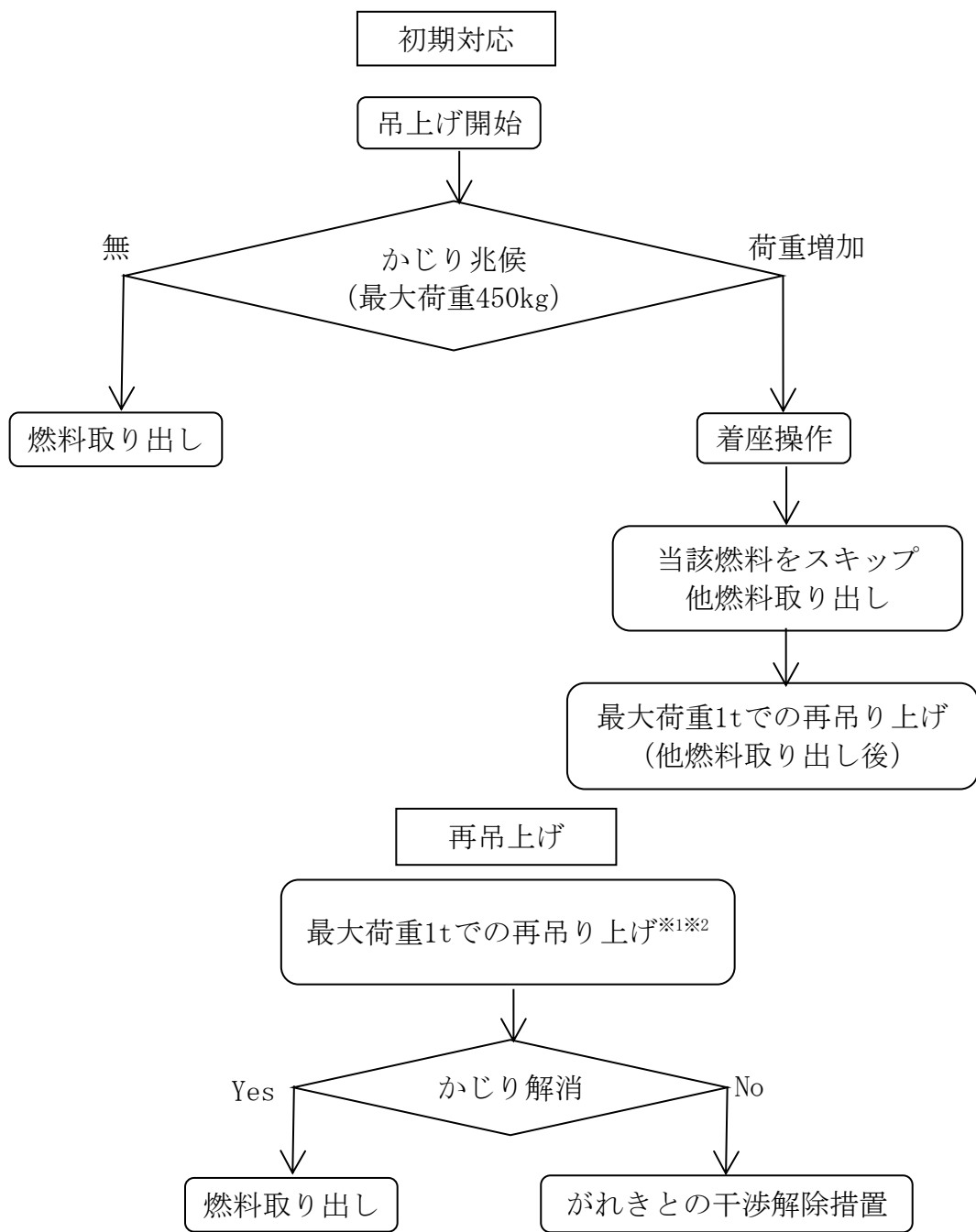


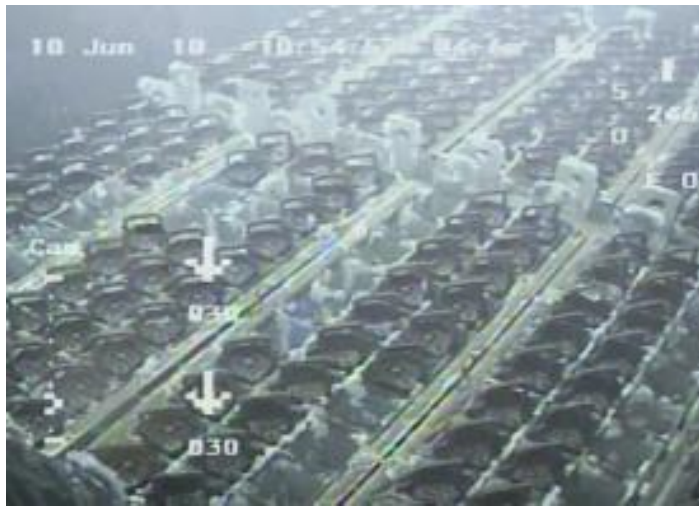
図 6 - 1 3 燃料健全性確認用治具（概念図）



※1 必要に応じて固着状況の調査及びがれきとの干渉解除措置を行う。

※2 チャンネルファスナが燃料ラックから抜ける範囲まで。

図 6－1 4 固着発生時の対応フロー（3号機）



燃料ハンドルの様子

図 6 - 1 5 2 号機 S F P 内の状況

放射能濃度変化* * 初期濃度を 100 とした場合の相対値

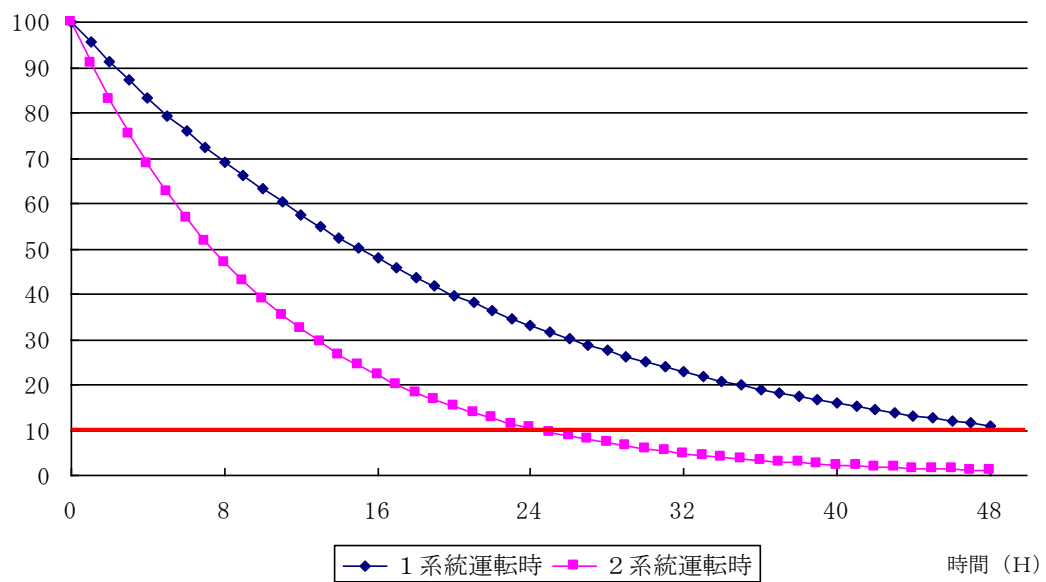


図 6 - 1 6 使用済燃料共用プール冷却浄化系ろ過脱塩装置での放射能除去評価

7. 参考資料

- (1) 汎用有限要素解析コード (ANSYS) について
- (2) がれき衝突解析に用いるコード (LS-DYNA) について

8. 参考文献

- [1] 「平成18年度 高燃焼度9×9型燃料信頼性実証成果報告書 付録1 (9×9 A型燃料照射後試験結果)」, 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 平成19年12月
- [2] 「平成18年度 高燃焼度9×9型燃料信頼性実証成果報告書 付録2 (9×9 B型燃料照射後試験結果)」, 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 平成19年12月
- [3] 「平成18年度 高燃焼度9×9型燃料信頼性実証成果報告書 (総合評価編)」, 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 平成19年12月
- [4] T.Yasuda et al. Deformation and Fracture Properties of Neutron-Irradiated Recrystallized Zircaloy-2 Cladding under Uniaxial Tension, Zirconium in the Nuclear Industry ASTM STP 939, 734 (1987)

以上

汎用有限要素解析コード（ANSYS）について

（１） 概要

ANSYSコードは、米国 Swanson Analysis Systems, Inc.（現在の ANSYS, Inc.）で開発された有限要素法に基づく伝熱・構造解析等の汎用解析コードであり、自動車業界や航空宇宙業界、建築・土木業界等、幅広い分野において設計開発に用いられている。

（２） 機能

ANSYSコードは、構造解析に際して以下の機能を有している。

- ① 材料の非線形性（弾塑性）を扱うことが可能である。
- ② 材料特性として時間依存、ひずみの履歴依存並びに等方性・異方性等を考慮することが可能である。
- ③ モデルの形状は１次元～３次元について取扱うことが可能である。
- ④ 伝熱解析結果をそのまま境界条件として引き継いで熱応力の評価を行う等、伝熱・構造の連成解析も可能である。
- ⑤ 荷重条件として集中荷重、分布荷重、モーメント等の力学的荷重の他に温度分布等の熱荷重も取扱うことが可能である。

（３） 解析フロー

ANSYSコードの解析フローを図１に示す。

（４） 使用実績及び検証

ANSYSコードは、原子力分野では、原子炉設置（変更）許可申請書添付資料八における燃料被覆管端栓部の応力解析等、これまで多くの伝熱・構造解析に対し使用実績がある。

また、ANSYSコードの検証は、開発元のリリースノートの例題集において、多くの解析例に対する理論解と解析結果との比較が実施されている。

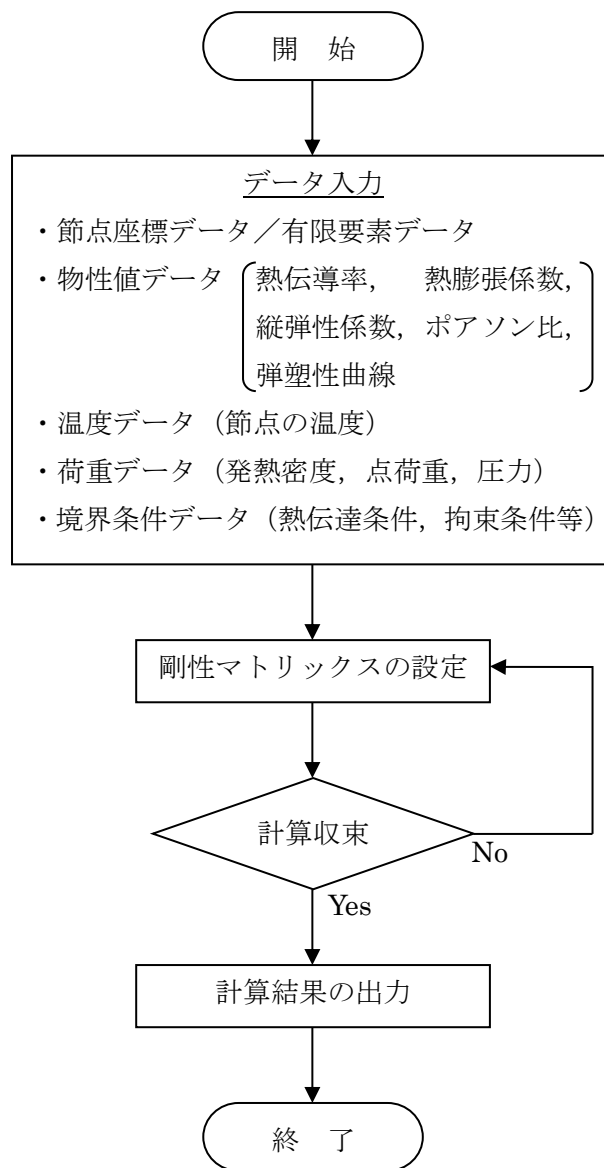


図1 ANSYSコードの解析フロー図

がれき衝突解析に用いるコード（L S－D Y N A）について

（１） 概要

L S－D Y N Aコードは米国 Livermore Software Technology Corporation (LSTC 社) からリリースされた汎用陽解法有限要素解析に基づく 3 次元非線形衝撃応答解析コードであり、輸送キャスクの衝撃解析等に広く利用されている。

（２） 機能

L S－D Y N Aコードは、衝撃解析に際して以下の機能を有している。

- ① 材料の非線形性を取り扱いできるため、衝撃吸収材が衝撃時に降伏応力を超え、塑性変形することによって衝撃エネルギーを吸収することを考慮できる。
- ② 20 を超える接触オプションが有効であり、接触面には固着、剥離、接触、滑り、摩擦などの条件が設定できる。
- ③ 面と面の接触状態だけでなく、辺と辺、節点と面の接触も可能である。
- ④ 要素の消滅などの特殊な条件も扱うことができる。
- ⑤ 多数の金属、非金属材料モデルを有している。

（３） 解析フロー

L S－D Y N Aコードの解析フローを図 1 に示す。

（４） 使用実績

L S－D Y N Aコードは、これまで自動車分野をはじめ、多くの分野の衝撃解析に対して使用実績がある。

原子力分野では、返還ガラス固化体輸送用キャスクの核燃料輸送物設計承認書において、構造解析の解析コードとして使用されている実績がある。

（５） 検証方法

実験との比較による検証が実施されていることを確認している。

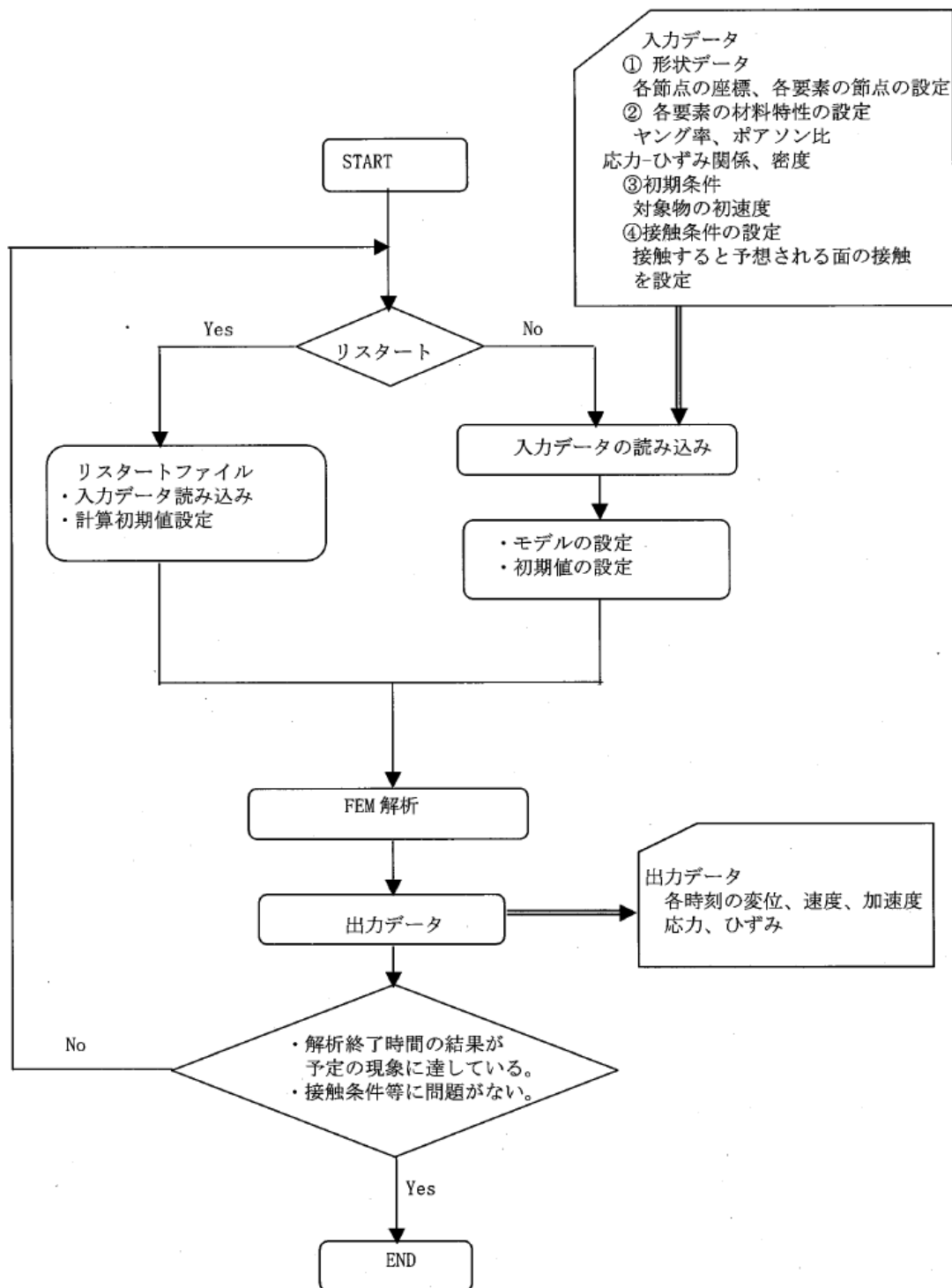


図1 LS-DYNAコードの解析フロー図

構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（4号機）

1. 構内用輸送容器の概要

構内用輸送容器は、福島第一原子力発電所4号機使用済燃料プールに貯蔵されている使用済燃料及び新燃料（以下「燃料」という。）を共用プール、新燃料の一部を6号機へ構内輸送する際に使用する。

構内用輸送容器は、福島第一原子力発電所で使用済燃料運搬用容器として設置され、これまで3号機から6号機の使用済燃料を共用プールへ構内輸送する際に使用している使用済燃料輸送容器（NFT-22B型）である。

使用済燃料輸送容器（NFT-22B型）は、使用済燃料を再処理工場へ輸送するために設計された容器であり、容器の安全機能は核燃料輸送物設計承認書により確認されている。

1.1. 構内用輸送容器の構成

構内用輸送容器は、容器本体、蓋、バスケット及びトラニオンにより構成される。なお、構外輸送においては容器本体の前後に緩衝体を装着するが、構内輸送においては、作業時間を短縮して放射線業務従事者の放射線被ばくを可能な限り低減するために、緩衝体を装着しない運用とする。

構内輸送においては、従来と同様に輸送車両への構内用輸送容器の固縛、輸送車両の徐行等の措置を講じて、輸送車両からの構内用輸送容器の落下防止を図る。

1.2. 設備仕様

1.2.1. 構内用輸送容器の仕様

構内用輸送容器の仕様を表1-1に、鳥瞰図を図1-1に示す。

表 1-1 構内用輸送容器の仕様

項 目	数 値 等
重量 (t) (燃料を含む)	約 91
全長 (m)	約 5.5
外径 (m)	約 2.1
収納体数 (体)	22 以下
基数 (基)	2

1.2.2. 燃料仕様

構内用輸送容器の収納可能な燃料の仕様を表 1-2 に示す。

表 1-2 構内用輸送容器 1 基に収納可能な燃料の仕様

項目	燃料仕様
燃料の種類	7×7 燃料 (燃焼度 31,500MWd/t 以下) 8×8 燃料 (燃焼度 38,000MWd/t 以下) 新型 8×8 燃料 (燃焼度 40,000MWd/t 以下) 新型 8×8 シルコニウムラッパ燃料 (燃焼度 40,000MWd/t 以下) 高燃焼度 8×8 燃料 (燃焼度 50,000MWd/t 以下) 9×9 燃料 (燃焼度 55,000MWd/t 以下)
収納体数	22 体以下
崩壊熱量	25kW 以下
放射能強度	2.04×10^{17} Bq 以下

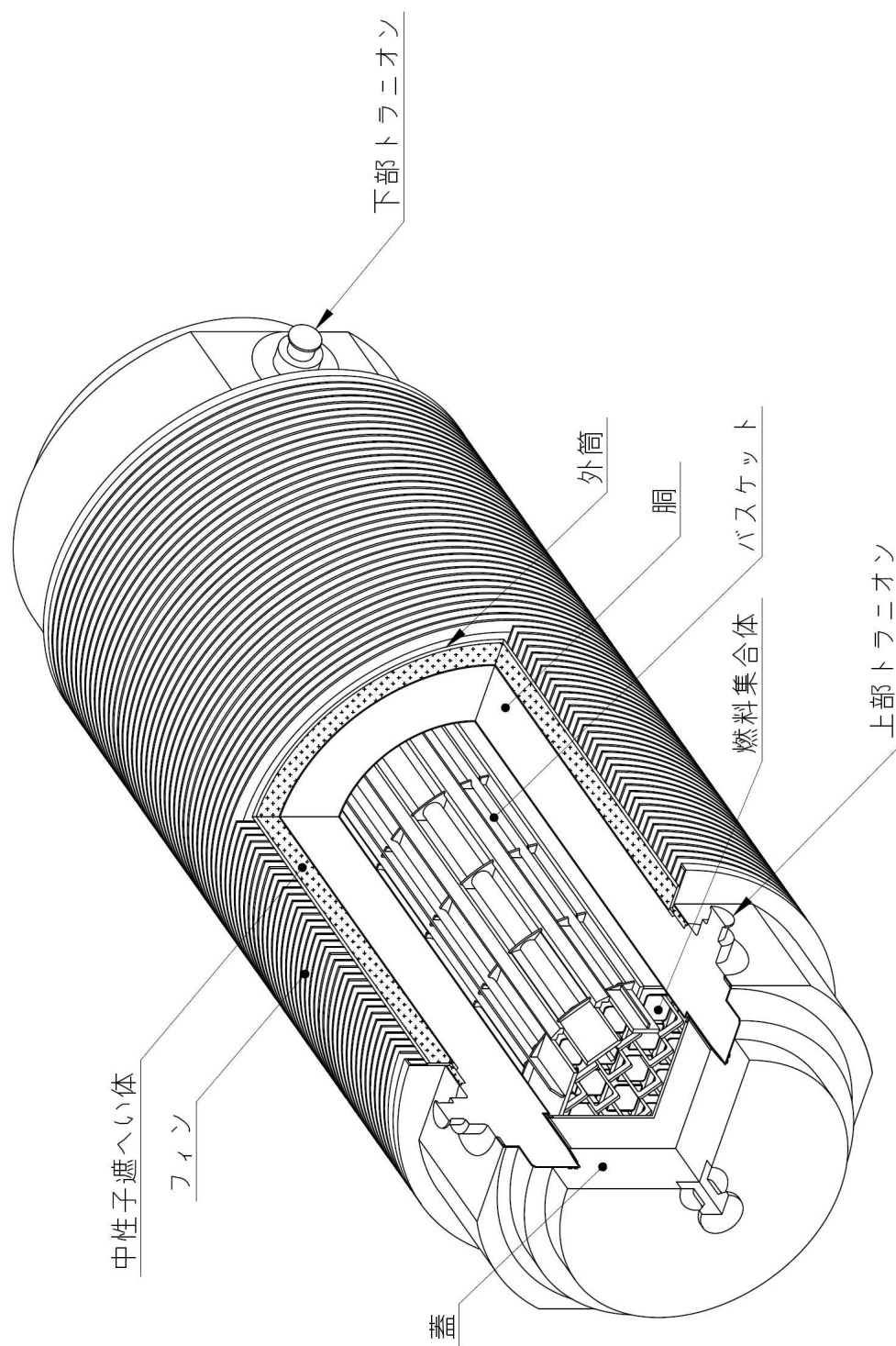


図1-1 構内用輸送容器全体図（鳥瞰図）

2. 評価の基本方針

2.1. 設計方針

2.1.1. 基本的安全機能

構内用輸送容器は、これまで同発電所における使用済燃料の構内輸送に使用していた使用済燃料輸送容器（NFT-22B 型）であり、本文 2.11.1.3 項の設計方針に示される除熱、密封、遮へい及び臨界防止の安全機能を有するとともに、本文 2.11.1.8 項の構造強度及び耐震性に示される構造強度を有する設計であることを確認する。

2.1.2. 構内用輸送容器の安全機能について

使用済燃料輸送容器（NFT-22B 型）の安全機能は、以下の書類にて評価されている。既存評価は緩衝体を装着した状態を評価しているが、構内輸送では緩衝体を装着しない運用とすることから、既存評価を引用可能な項目は引用し、新規評価が必要な項目は新規評価を実施することとする。

- ・核燃料輸送物設計変更承認申請書（NFT-22B 型）
（平成 22 年 10 月 28 日申請，原燃輸送株式会社）
- ・核燃料輸送物設計変更承認申請書の一部補正について（NFT-22B 型）
（平成 24 年 1 月 13 日申請，原燃輸送株式会社）

なお、構内用輸送容器は同発電所で使用済燃料運搬用容器として設置され、以下の書類において安全機能は評価されている。しかし、4 号機使用済燃料プールに貯蔵されている 9×9 燃料の輸送については評価していないことから、既存評価として引用しない。

- ・福島第一原子力発電所 第 1 号機使用済燃料輸送容器（第 1～第 6 号機共用）工事計画認可申請書本文及び添付書類（平成 19 年 2 月 21 日申請，東京電力株式会社）

2.2. 安全設計・評価方針

表 2-1 に評価すべき各安全機能に関する既存評価内容と構内用輸送容器での安全設計・評価の方針を示す。

なお、4 号機の使用済燃料プールに貯蔵されている燃料については、平均燃焼度が既存評価に用いた平均燃焼度を僅かに上回るものがある。表 2-2 に 4 号機の使用済燃料プールに貯蔵中の燃料の種類ごとの性状と既存評価に用いられた燃料仕様との比較を示す。これらの燃料は冷却期間が十分にあるため崩壊熱量及び放射能強度が既存評価を超えることはなく、既存評価に包絡されている。

また、構内用輸送容器に収納する燃料の健全性については、「添付資料－1－3 燃料の健全性確認及び取り扱いに関する説明書」で説明する。

表2-1 構内用輸送容器安全評価の基本方針

項目	中期安全確保の考え方	評価対象	既存評価 を引用	新評価 実施	評価方針	備考
除熱機能	使用済燃料の健全性及び構成部材の健全性が維持できるように、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去できる設計とする。	燃料被覆管	○	—	収納する燃料の崩壊熱量が25kW以下となることをもって評価条件が既存評価と同等であると言えるため、既存評価を引用して評価を行う。	緩衝体がない状態では、緩衝体がある状態と比較して各部の温度は低くなる。
		構内用輸送容器	○	—		
密封機能	周辺公衆及び放射線業務従事者に対し、放射線被ばく上の影響を及ぼすことのないよう、使用済燃料が内包する放射性物質を適切に閉じ込める設計とする。	構内用輸送容器	○	—	構造強度及び除熱機能の評価結果から、設計事象において、容器の密封部が健全性を維持することを確認する。	構造強度の評価にて密封部の構造健全性を説明する。
遮へい機能	内部に燃料を入れた場合に放射線障害を防止するため、使用済燃料の放射線を適切に遮へいする設計とする。	構内用輸送容器	—	○	線源強度は既存評価に包絡されるが、緩衝体を装着しないため、緩衝体がない状態での遮へい評価を実施する。なお、線源強度は安全側に既存評価の値を用いる。	
臨界防止機能	想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止できる設計とする。	構内用輸送容器	○	—	収納する燃料の初期濃縮度が4.19wt%以下となることをもって評価条件が既存評価と同等であると言え、既存評価においては容器配列、バスケット内の燃料配置等最も厳しい状態を想定し評価しており、構内輸送での条件と比較して、十分安全側であることから、既存評価を引用して評価を行う。	
構造強度	構内用輸送容器は取扱中における衝撃、熱等に耐え、かつ、容易に破損しない設計とする。 構内用輸送容器は、設計、材料の選定、製作及び検査について適切と認められる規格及び基準によるものとする。	構内用輸送容器	○	—	容器本体、蓋、バスケット及びトラニオンにおける設計事象の荷重条件が既存評価における荷重条件に包絡されることをもって評価条件が既存評価に包絡されることを確認した上で、既存評価を引用して評価を行う。	

表 2-2 貯蔵中の燃料仕様と既存評価の燃料仕様との比較

燃料の種類	項目	4号機貯蔵中の 燃料の性状	既存評価の 燃料仕様
9×9 燃料	最高燃焼度 (MWd/t)	50,600 ^{*1}	55,000
	平均燃焼度 (MWd/t)	49,700 ^{*2}	50,000
	初期濃縮度 (wt%)	約 3.8	4.19
	冷却期間 (日)	1,035 ^{*3}	820
	崩壊熱量 (kW)	19 ^{*4}	24
	放射能強度 (Bq)	1.63×10^{17} ^{*4}	2.04×10^{17}
高燃焼度 8×8 燃料	最高燃焼度 (MWd/t)	45,400 ^{*1}	50,000
	平均燃焼度 (MWd/t)	45,200 ^{*2}	44,000
	初期濃縮度 (wt%)	約 3.6	3.67
	冷却期間 (日)	2,012 ^{*3}	780
	崩壊熱量 (kW)	10 ^{*4}	22
	放射能強度 (Bq)	9.40×10^{16} ^{*4}	1.92×10^{17}
新型 8×8 ジルコニウムライ 燃料	最高燃焼度 (MWd/t)	34,000 ^{*1}	40,000
	平均燃焼度 (MWd/t)	32,300 ^{*2}	38,000
	初期濃縮度 (wt%)	約 3.0	3.3
	冷却期間 (日)	4,884 ^{*3}	690
	崩壊熱量 (kW)	4 ^{*4}	22
	放射能強度 (Bq)	4.70×10^{16} ^{*4}	1.98×10^{17}
8×8 燃料	最高燃焼度 (MWd/t)	37,400 ^{*1}	38,000
	平均燃焼度 (MWd/t)	36,700 ^{*5}	36,000
	初期濃縮度 (wt%)	約 2.7	2.9
	冷却期間 (日)	9,890 ^{*3}	1,440
	崩壊熱量 (kW)	4 ^{*6}	11
	放射能強度 (Bq)	3.76×10^{16} ^{*6}	1.08×10^{17}

*1 最高燃焼度は 4 号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料の最高値

*2 平均燃焼度は 4 号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料のうち上位 22 体の平均値

*3 冷却期間は 2013 年 9 月 30 日における 4 号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料の最短の冷却期間

*4 崩壊熱量及び放射能強度は平均燃焼度及び冷却期間から ORIGEN2 コードにより求めた容器 1 基あたり（燃料 22 体あたり）の値

*5 8×8 燃料は 4 体しか貯蔵されていないため、平均燃焼度は 4 体の平均値

*6 8×8 燃料は 4 体しか貯蔵されていないため、崩壊熱量及び放射能強度は平均値の 22 倍の値

3. 安全評価

3.1. 構造強度

(1) 基本的な考え方

構内用輸送容器の構造強度については、既存評価の結果を基に、構内用輸送容器の構造強度が想定すべき事象（設計事象）において設計基準に適合していることを確認する。

評価部位は、安全上重要な部位として容器本体、蓋、バスケット並びに支持機能を有するトラニオンとする。また、設計基準は、構外用輸送容器としての安全評価に用いられている基準を適用する。

(2) 設計事象の抽出

JSME S FA1-2007 金属キャスク構造規格の考え方に基づいて、構内用輸送容器の設計事象として以下を抽出した。

なお、設計事象の抽出にあたっては、図 3.1-1 に示すハンドリングフローに基づき、構内用輸送容器の取扱い並びに、共用プール及び6号機までの輸送において想定される起因事象に着目し、発生防止対策を考慮して事象の発生の可能性を検討した。設計事象の抽出結果を表 3.1-1 に示す。

なお、従来と同様の構内用輸送容器の取扱いが可能となるよう、4号機は燃料取り出し用カバー及びクレーンを設置し、共用プールは震災前の状態に復旧する計画である。

1) 設計事象 I

容器本体及び蓋には、収納する燃料の発熱により内圧及び熱による応力が発生する。また、取扱い時及び構内輸送時の加速度により収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

バスケットには、取扱い時及び構内輸送時の加速度により収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

トラニオンには取扱い時の吊上げ等による応力、及び構内輸送時における固縛荷重による応力が発生する。

2) 設計事象Ⅱ

容器本体及び蓋には、輸送架台へのトラニオン衝突（取扱いモード No. 1-2, 2-2）、構内用輸送容器を積載した輸送架台の搬送台車への衝突（取扱いモード No. 1-6）、構内用輸送容器の転倒防止台座への衝突（取扱いモード No. 1-8, 2-6）及びキャスクピットへの衝突（取扱いモード No. 1-9, 2-7）の加速度における収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

バスケットには、輸送架台へのトラニオン衝突（取扱いモード No. 1-2, 2-2）、構内用輸送容器を積載した輸送架台の搬送台車への衝突（取扱いモード No. 1-6）、構内用輸送容器の転倒防止台座への衝突（取扱いモード No. 1-8, 2-6）及びキャスクピットへの衝突（取扱いモード No. 1-9, 2-7）の加速度における収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

トラニオンには、輸送架台へのトラニオン衝突（取扱いモード No. 1-2, 2-2）及び構内用輸送容器を積載した輸送架台の搬送台車への衝突（取扱いモード No. 1-6）の加速度における荷重がかかり、応力が発生する。

3) 設計事象Ⅲ及び設計事象Ⅳ

構内用輸送容器を取扱う設備及び運用においては、クレーンワイヤの二重化、始業前の機器の点検を実施することから、ハンドリングフローから抽出される事象のうち、構内用輸送容器の安全機能を著しく損なう事象であって、一般公衆の放射線被ばくの観点からみて重要と考えられる事象はない。

No.	取扱いモード (共用プールへの輸送)	No.	取扱いモード (共用プールへの輸送)
1-1	輸送容器の搬出 	1-2	輸送容器の吊下ろし
1-3	輸送車両への積載 	1-4	構内輸送 (徐行)
1-5	共用プール建屋への搬入 	1-6	搬送台車への積載

図 3.1-1 構内用輸送容器のハンドリングフロー (1/3)

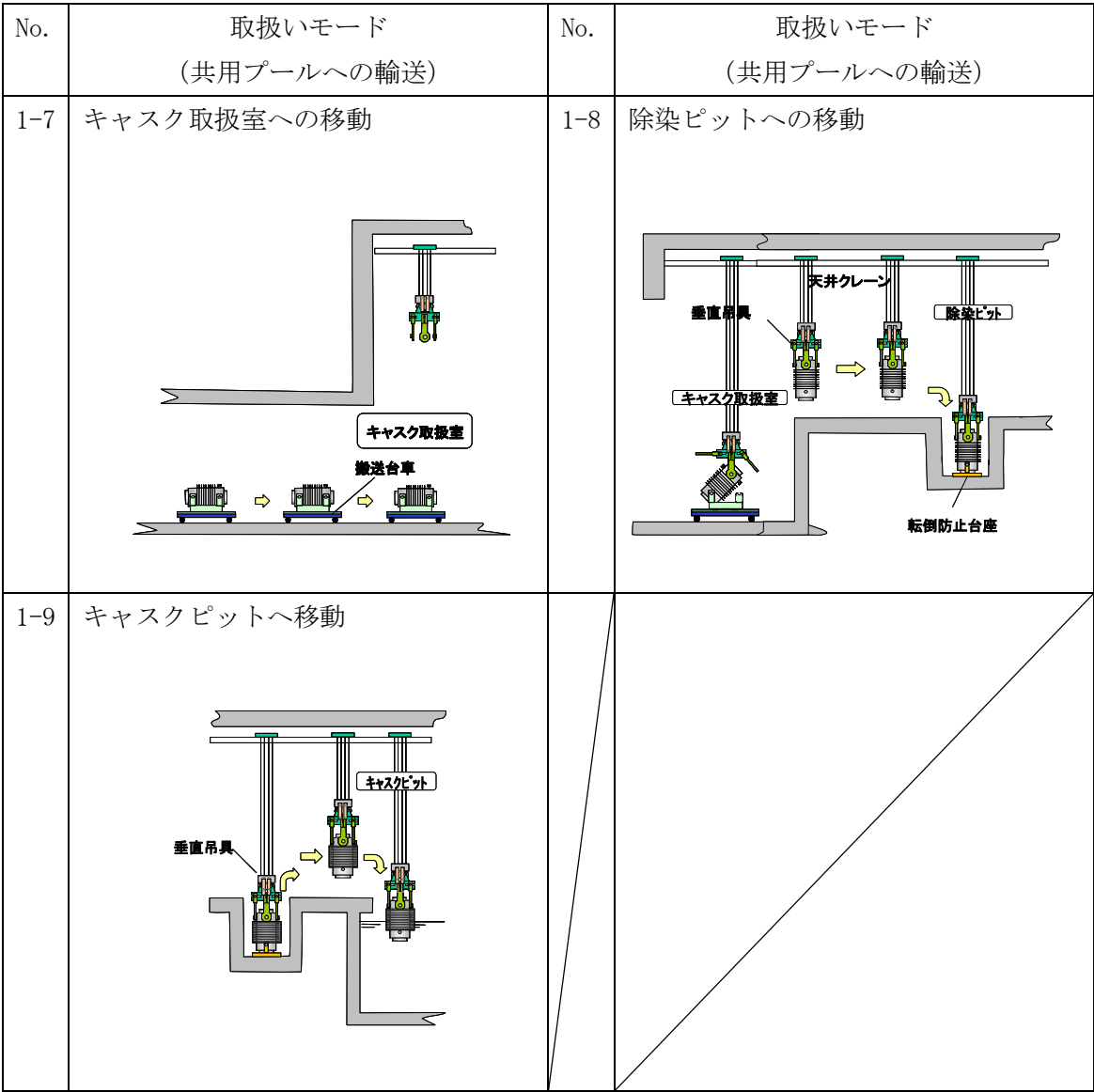


図 3. 1-1 構内用輸送容器のハンドリングフロー (2/3)

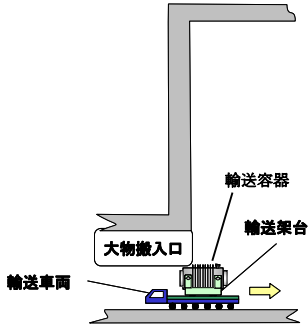
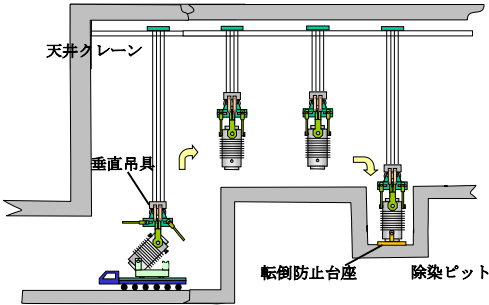
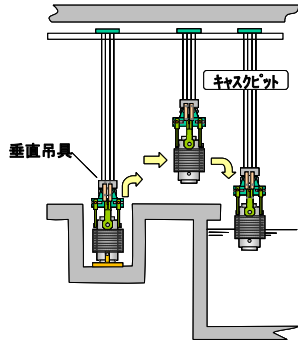
No.	取扱いモード (6号機への輸送)	No.	取扱いモード (6号機への輸送)
2-1 ～ 2-4	「輸送容器の搬出」, 「輸送容器の吊下ろし」, 「輸送車両への積載」, 「構内輸送」はNo. 1-1～1-4と同じ	2-5	6号機への搬入 
2-6	輸送容器の吊上げ, 除染ピットへの移動 	2-7	キャスクピットへ移動 

図 3. 1-1 構内用輸送容器のハンドリングフロー (3/3)

表 3.1-1 設計事象の抽出

起因事象 (ハэндロンドリグフロ- No.)	原因	発生の可能性	発生の有無	想定シナリオ	抽出の要否
構内用輸送容 器の落下	輸送車両取扱い時の落下 (No. 1-4, 2-4)	固定ボルトの取付け不良	×	構内用輸送容器は、輸送車両に複数のボルトで固縛されていることを確認する。また、構内用輸送容器は輸送車両で徐行して輸送すること、輸送経路は輸送に関係する人及び車両以外の立入を制限することから、落下しない。	×
	搬送台車取扱い時の落下 (No. 1-7)	固定ボルトの取付け不良	×	構内用輸送容器は、搬送台車に複数のボルトで固縛されていることを確認する。また、搬送台車はレール上を走行し、走行範囲インタ-ロック及び障害物検知装置を有していることから他の構築物等に衝突はしないため、落下しない。	×
	クレーン取扱時の落下 (No. 1-1, 1-2, 1-3, 1-6, 1-8, 1-9, 2-1, 2-2, 2-3, 2-6, 2-7)	吊具の取付け不良	×	吊具の二重化、始業前の吊具点検、取付け後の外れ止めを施すため、構内用輸送容器は落下しない。	×
		ワイヤーロープの切断	×	ワイヤーロープの二重化、始業前のワイヤーロープ点検を行うため、構内用輸送容器は落下しない。	×
	クレーン移動時(走行、横行)の衝突 (No. 1-1, 1-2, 1-3, 1-6, 1-8, 1-9, 2-1, 2-2, 2-3, 2-6, 2-7)	ブレーキの故障	×	移動前に移動経路に障害物がないことを確認し、構内用輸送容器と移動経路の芯あわせを行い、走行及び横行それぞれにインバータによる停止機能に加えてブレーキによる停止機能により二重化しているため、構内用輸送容器は他の構築物等へ衝突しない。	×
		操作員の誤操作	×	クレーンの横行走行範囲に制限機能を設ける。また、移動前に移動経路に障害物がないことの確認、構内用輸送容器と移動経路の芯あわせを行うため、構内用輸送容器は他の構築物等へ衝突しない。	×
	クレーン吊下げ時の衝突(垂直吊り)(異常着床) (No. 1-2, 1-8, 1-9, 2-2, 2-6, 2-7)	ブレーキの故障	×	巻上げ装置ブレーキを二重化しているため、構内用輸送容器は輸送台、転倒防止台座あるいはキャスクピットへ衝突(異常着床)しない。	×
		操作員の誤操作	○	吊下げ時の誤操作により、構内用輸送容器は巻下げ速度で輸送台、転倒防止台座あるいはキャスクピットに異常着床する可能性がある。	○
	クレーン吊下げ時の衝突(水平吊り)(異常着床) (No. 1-6)	ブレーキの故障	×	巻上げ装置ブレーキを二重化しているため、構内用輸送容器は搬送台車へ衝突(異常着床)しない。	×
		操作員の誤操作	○	吊下げ時の誤操作により、輸送架台に積載された状態で構内用輸送容器は巻下げ速度で搬送台車に異常着床する可能性がある。	○

(3) 設計事象の荷重条件

前項で抽出した設計事象について、構内用輸送容器に発生する加速度を導出し、荷重条件が既存評価条件に包絡されることを確認する。

1) 設計事象の加速度の導出

事象発生時に構内用輸送容器が有する運動エネルギーを被衝突物（輸送架台、転倒防止台座、キャスクピット床面）の弾性により吸収するとして、発生する衝撃加速度を計算した。衝撃加速度の計算方法と結果を以下に示す。

①輸送架台への衝突（垂直姿勢：取扱いモード No. 1-2, 2-2）

対象部位：容器本体及び蓋，バスケット，トラニオン

垂直姿勢で、構内用輸送容器の下部トラニオンが輸送架台のトラニオン受けにクレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合について評価する。

構内用輸送容器の有する運動エネルギーを輸送架台後部支持脚のひずみエネルギーで吸収するとして、（1）式で構内用輸送容器に生じる衝撃加速度を求める。

$$\alpha = 1 + \sqrt{1 + \frac{K \cdot V^2}{m \cdot g^2}} \quad (1)$$

ただし、 α ：衝撃加速度（G）

K：輸送架台後部支持脚の圧縮変形バネ定数（ $3.01 \times 10^{10} \text{N/m}$ ）

V：クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）

m：構内用輸送容器の質量（ $9.1 \times 10^4 \text{kg}$ ）

g：重力加速度（ 9.8m/s^2 ）

発生する衝撃加速度は2.78Gとなり、余裕をみて3.0Gを評価加速度とする。

②構内用輸送容器を載せた輸送架台の搬送台車への衝突（水平姿勢：取扱いモード No. 1-6）

対象部位：容器本体及び蓋，バスケット，トラニオン

構内用輸送容器を載せた輸送架台を搬送台車に積載する際に、輸送架台が搬送台車に共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合について評価する。

搬送台車を剛体として、構内用輸送容器の有する運動エネルギーを輸送架台支持脚のひずみエネルギーで吸収するとして、（1）式で構内用輸送容器に生じる衝撃加速度を求める。

ただし、K：輸送架台前後部支持脚の圧縮変形バネ定数（ $6.16 \times 10^{10} \text{N/m}$ ）

V：共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）

発生する衝撃加速度は3.32Gとなり、余裕をみて4.0Gを評価加速度とする。

③転倒防止台座への衝突（垂直姿勢：取扱いモード No. 1-8 No. 2-6）

対象部位：容器本体及び蓋，バスケット

垂直姿勢で構内用輸送容器が転倒防止台座に共用プール及び6号機の天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合について評価する。

床面を剛体として，構内用輸送容器の有する運動エネルギーを転倒防止台座のひずみエネルギーで吸収するとして，（1）式で構内用輸送容器に生じる衝撃加速度を求める。

ただし，K：共用プール転倒防止台座の圧縮変形バネ定数（ $8.81 \times 10^{11} \text{N/m}$ ）

6号機転倒防止台座の圧縮変形バネ定数（ $9.48 \times 10^{11} \text{N/m}$ ）

V：共用プール及び6号機の天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）

発生する衝撃加速度は共用プールが9.00G，6号機が9.29Gとなり，余裕をみて10.0Gを評価加速度とする。

④キャスクピット床面への衝突（垂直姿勢：取扱いモード No. 1-9，No. 2-7）

対象部位：容器本体及び蓋，バスケット

垂直姿勢で構内用輸送容器がキャスクピット床面に共用プール及び6号機の天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合について評価する。

構内用輸送容器の有する運動エネルギーをキャスクピット床面のひずみエネルギーで吸収するとして，（1）式で構内用輸送容器に生じる衝撃加速度を求める。

ただし，K：共用プールキャスクピット床面のバネ定数（ $5.43 \times 10^{10} \text{N/m}$ ）

6号機キャスクピット床面のバネ定数（ $6.71 \times 10^{10} \text{N/m}$ ）

V：共用プール及び6号機の天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）

発生する衝撃加速度は共用プールが3.21G，6号機が3.41Gとなり，余裕をみて4.0Gを評価加速度とする。

2) 評価結果

構内用輸送容器の設計事象における荷重条件と既存評価の荷重条件の比較を表 3.1-2～表 3.1-4 に示す。なお、構内用輸送容器の設計事象及び荷重条件については、抽出された事象のうち最大の荷重が作用する場合について示す。

表 3.1-2～表 3.1-4 に示すとおり、設計事象における「容器本体及び蓋」、「バスケット」及び「トラニオン」に作用する荷重条件は既存評価の荷重条件に包絡されており、評価条件は既存評価に包絡される。

表 3.1-2 荷重条件の比較（容器本体及び蓋）

構内用輸送容器の評価事象及び荷重条件				既存評価の事象及び荷重条件	
設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件	事象	荷重条件
I	構内輸送時	—	容器内圧力：0.9 MPa ボルト初期締付け力 構内輸送時荷重 上方向*1：2.0G 下方向*1：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G 熱荷重	一般の試験条件 0.3m 頭部 垂直落下	容器内圧力：0.9MPa ボルト初期締付け力 落下時荷重：52.4G 熱荷重
				一般の試験条件 0.3m 底部 垂直落下	容器内圧力：0.9MPa ボルト初期締付け力 落下時荷重：55.5G 熱荷重
				一般の試験条件 0.3m 水平落下	容器内圧力：0.9MPa ボルト初期締付け力 落下時荷重：27.6G 熱荷重
	容器の吊上げ 吊下げ，移動	—	容器内圧力：0.9 MPa ボルト初期締付け力 吊上げ荷重 下方向*2：3.0G （自重を考慮） 熱荷重	一般の試験条件 0.3m 底部 垂直落下	容器内圧力：0.9MPa ボルト初期締付け力 落下時荷重：55.5G 熱荷重
II	輸送架台の搬送 台車への衝突 （取扱いモード No. 1-6）	—	容器内圧力：0.9 MPa ボルト初期締付け力 輸送架台の搬送台車 への衝突時荷重 下方向*1：4.0G （自重を考慮） 熱荷重	一般の試験条件 0.3m 水平落下	容器内圧力：0.9MPa ボルト初期締付け力 落下時荷重：27.6G 熱荷重
	転倒防止台座 への衝突 （取扱いモード No. 1-8, 2-6）	輸送架台への トラニオン衝突 （取扱いモード No. 1-2, 2-2） キャスクピットへの衝突 （取扱いモード No. 1-9, 2-7）	容器内圧力：0.9 MPa ボルト初期締付け力 転倒防止台座への 衝突時荷重 下方向*2：10.0G （自重を考慮） 熱荷重	一般の試験条件 0.3m 底部 垂直落下	容器内圧力：0.9MPa ボルト初期締付け力 落下時荷重：55.5G 熱荷重

*1 構内用輸送容器軸と直角な方向

*2 構内用輸送容器軸方向

表 3.1-3 荷重条件の比較（バスケット）

構内用輸送容器の評価事象及び荷重条件				既存評価の事象及び荷重条件	
設計事象	代表事象	包絡される事象	荷重条件	事象	荷重条件
I	構内輸送時	—	構内輸送時荷重 上方向*1：2.0G 下方向*1：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G	特別の試験条件 9m 頭部垂直落下	落下時荷重：89.3G
				特別の試験条件 9m 底部垂直落下	落下時荷重：95.5G
				特別の試験条件 9m 水平落下	落下時荷重：98.8G
	容器の吊上げ 吊下げ，移動	—	吊上げ荷重 下方向*2：3.0G （自重を考慮）	特別の試験条件 9m 底部垂直落下	落下時荷重：95.5G
II	輸送架台の搬送台車への衝突 （取扱いモード No. 1-6）	—	輸送架台の搬送台車への衝突時荷重 下方向*1：4.0G （自重を考慮）	特別の試験条件 9m 水平落下	落下時荷重：98.8G
	転倒防止台座への衝突 （取扱いモード No. 1-8, 2-6）	輸送架台へのトラニオン衝突 （取扱いモード No. 1-2, 2-2） キャスクピットへの衝突 （取扱いモード No. 1-9, 2-7）	転倒防止台座への衝突時荷重 下方向*2：10.0G （自重を考慮）	特別の試験条件 9m 底部垂直落下	落下時荷重：95.5G

*1 構内用輸送容器軸と直角な方向

*2 構内用輸送容器軸方向

表 3.1-4 荷重条件の比較（トラニオン）

構内用輸送容器の評価事象及び荷重条件				既存評価の事象及び荷重条件	
設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件	事象	荷重条件
I	構内輸送時	—	構内輸送時荷重 上方向*1：2.0G 下方向*1：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G	通常輸送 条件 （固縛装置）	構内輸送時荷重 上方向*1：2.0G 下方向*1：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G
	容器の吊上げ 吊下げ、移動	—	吊上げ荷重 下方向*2：3.0G （自重を考慮）	通常輸送 条件 （吊上装置）	吊上げ荷重 下方向*2：3.0G （自重を考慮）
II	輸送架台への トラニオン衝突 （取扱いモード No. 1-2, 2-2）	輸送架台の搬送 台車への衝突 （取扱いモード No. 1-6）*3	輸送架台へのトラニオン 衝突時荷重 下方向*2：3.0G （自重を考慮）	通常輸送 条件 （吊上装置）	吊上げ荷重 下方向*2：3.0G （自重を考慮）

*1 構内用輸送容器軸と直角な方向

*2 構内用輸送容器軸方向

*3 輸送架台への衝突（取扱いモード No. 1-2, 2-2）は垂直姿勢で衝突するためトラニオンの荷重負担本数は2本であるのに対して、輸送架台の搬送台車への衝突（取扱いモード No. 1-6）では水平姿勢で衝突するためトラニオンの荷重負担本数は4本である。このため、構内用輸送容器への荷重は取扱いモード No. 1-6の方が大きいものの、トラニオンあたりに作用する荷重は取扱いモード No. 1-2, 2-2の方が大きくなる。以上から、設計事象としては取扱いモード No. 1-2, 2-2が抽出される。

(4) 設計基準

既存評価に用いられている設計基準を表 3. 1-5 に示す。

表 3. 1-5 設計基準

評価条件等	評価部位	設計基準	設計基準の考え方
一般の試験条件	容器本体（胴） 容器本体（底板） 蓋	・発生応力を分類し、各応力強さが以下の基準値以下であること。 $P_m \leq S_m$ $P_L \leq 1.5 S_m$ $P_L + P_b \leq 1.5 S_m$ $P_L + P_b + Q \leq 3 S_m$ ここで、P_m：一次一般膜応力強さ P_L：一次局部膜応力強さ P_b：一次曲げ応力強さ Q：二次応力強さ S_m：設計・建設規格付録 材料図表 Part 5 表 1 に示される設計 応力強さ	旧通産省告示第 501号による
	蓋ボルト	・以下の基準値以下であること。 $\sigma_m \leq 2 S_m$ $\sigma_m + \sigma_b \leq 3 S_m$ ここで、σ_m：平均引張応力 σ_b：曲げ応力 S_m：設計・建設規格付録 材料図表 Part 5 表 2 に示される設計応力強さ	
特別の試験条件	バスケット	・膜応力強さが降伏応力、（膜＋曲げ） 応力強さが降伏応力の1.5倍以下であること。	臨界評価上影響のある塑性変形が生じない
通常の輸送条件	トラニオン	・応力強さが降伏応力以下であること。 ここで、応力強さとは主応力の差の絶対値をいう。	旧科技厅 核燃料輸送物設計承認申請書記載要綱（第2版）による

(5) 評価条件及び評価方法

既存評価の評価条件及び評価方法の内容を以下に示す。

1) 容器本体（胴）、容器本体（底板）、蓋及び蓋ボルト

構内用輸送容器の容器本体及び蓋部の構造強度評価は、想定される圧力荷重、機械的荷重、熱荷重を基に、容器の実形状をモデル化し、構造解析コードABAQUS を用いて容器本体（胴）、容器本体（底板）、蓋及び蓋ボルトの応力評価を行う。

主な構造部材の応力評価箇所を図 3. 1-2 に示す。荷重条件は表 3. 1-2 に示したとおりである。

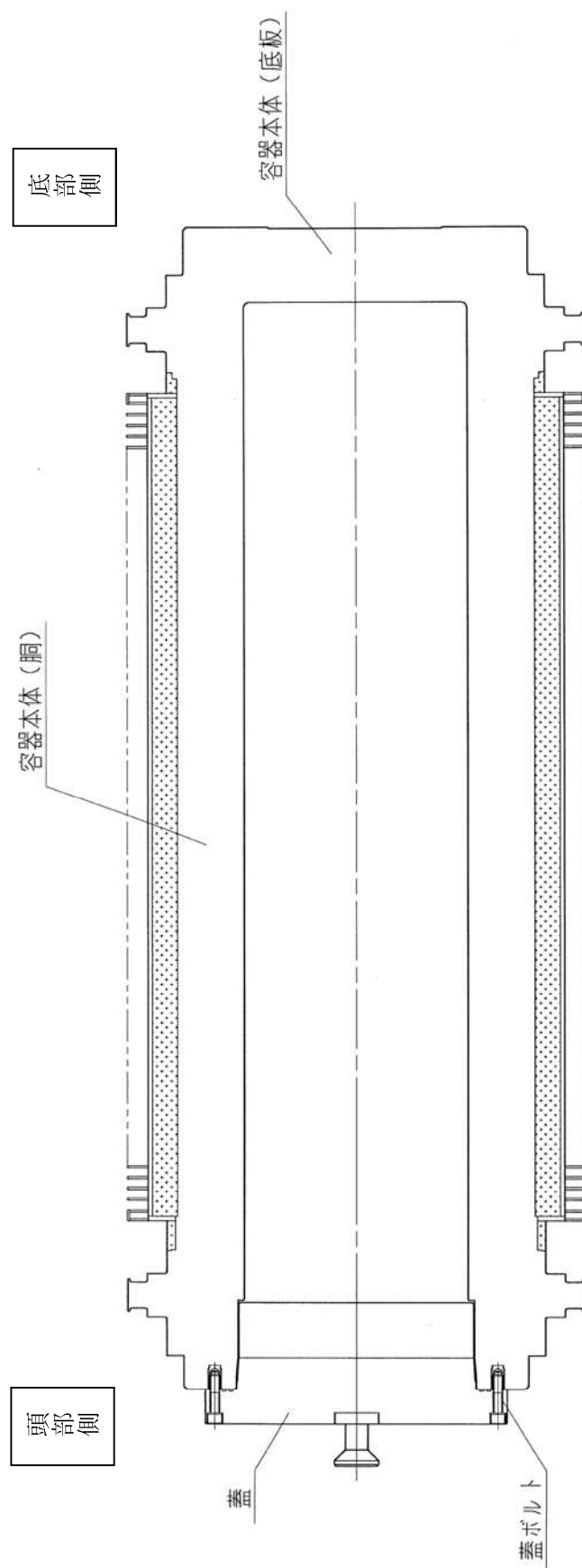


図 3. 1-2 容器本体 (胴), 容器本体 (底板), 蓋及び蓋ボルトの応力評価箇所

2) バスケット

バスケットの構造強度評価は、想定される機械的荷重を基に応力評価式を用いて評価する。頭部垂直落下時及び底部垂直落下時には上下部のスペーサに慣性力による圧縮応力が生じる。また、水平落下時に、チャンネルの横板には、慣性力により曲げ応力が生じ、チャンネルの縦板には圧縮応力が生じる。これらの応力評価箇所を図 3. 1-3 に示す。荷重条件は表 3. 1-3 に示したとおりである。

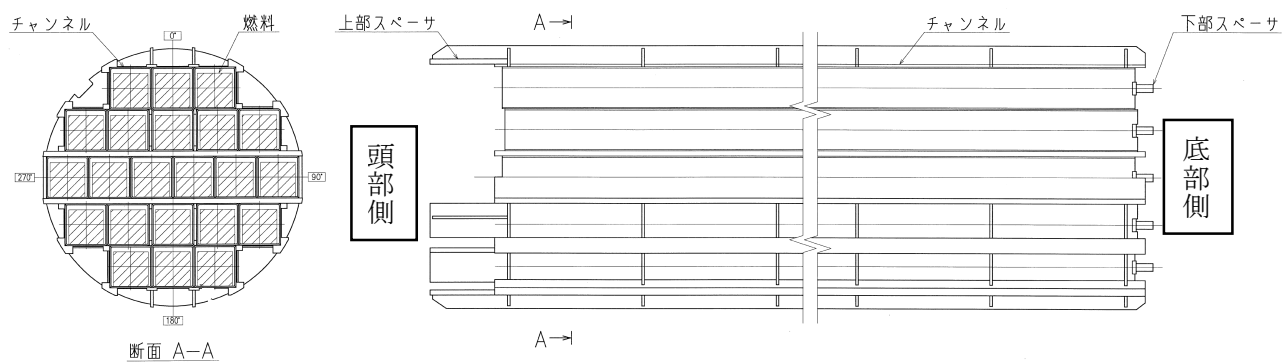


図 3. 1-3 バスケットの応力評価箇所

3) トラニオン

トラニオンの構造強度評価は、吊上げ時及び固縛時に想定される機械的荷重を基に応力評価式を用いて評価する。吊上げ時及び固縛時のトラニオンへの荷重点を図 3.1-4 に示す。荷重条件は表 3.1-4 に示したとおりである。

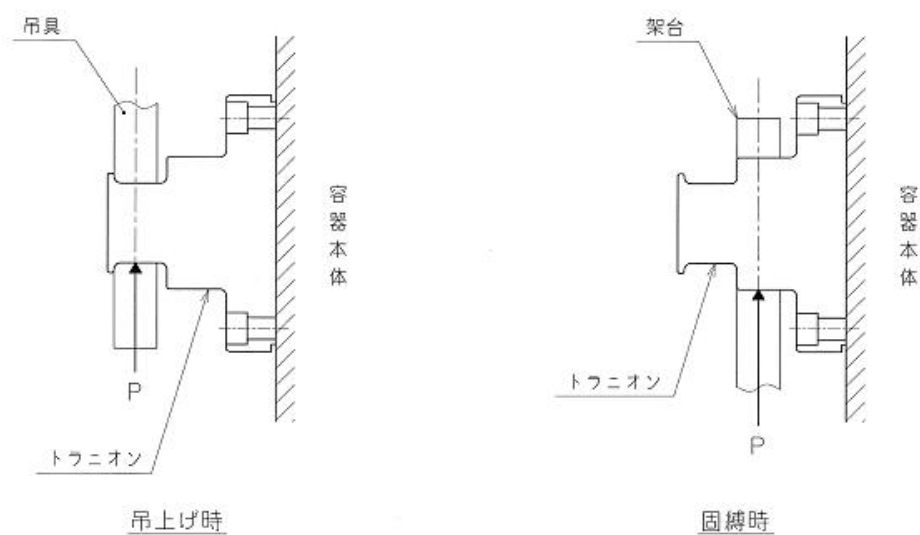


図3.1-4 トラニオンへの荷重点

(6) 評価結果

評価結果を表3.1-6～表3.1-8に示す。いずれも、解析基準値に対して十分に余裕がある。
このため、構内用輸送容器の構造健全性は維持される。

表3.1-6 容器本体及び蓋の構造強度評価結果

部位	材料	事象	応力分類	解析基準 *1	解析基準値 (MPa) *2	解析結果 (MPa)
容器本体 (胴)	炭素鋼	頭部 垂直落下	一次応力 (P _m)	S _m	124	15.7
			一次応力 (P _L)	1.5 S _m	185	25.9
			(一次+二次)応力	3 S _m	371	66.6
		底部 垂直落下	一次応力 (P _m)	S _m	124	16.9
			一次応力 (P _L)	1.5 S _m	185	35.8
			(一次+二次)応力	3 S _m	371	39.3
		水平落下	一次応力 (P _m)	S _m	124	31.1
			一次応力 (P _L)	1.5 S _m	185	89.5
			(一次+二次)応力	3 S _m	371	133
容器本体 (底板)	炭素鋼	頭部 垂直落下	一次応力 (P _L +P _b)	1.5 S _m	187	2.90
			(一次+二次)応力	3 S _m	373	11.8
		底部 垂直落下	一次応力 (P _L +P _b)	1.5 S _m	187	39.2
			(一次+二次)応力	3 S _m	373	43.6
		水平落下	一次応力 (P _L +P _b)	1.5 S _m	187	25.6
			(一次+二次)応力	3 S _m	373	66.0
蓋	ステンレス鋼	頭部 垂直落下	一次応力 (P _L +P _b)	1.5 S _m	206	67.4
			(一次+二次)応力	3 S _m	411	105
		底部 垂直落下	一次応力 (P _L +P _b)	1.5 S _m	206	2.56
			(一次+二次)応力	3 S _m	411	16.0
		水平落下	一次応力 (P _L +P _b)	1.5 S _m	206	21.4
			(一次+二次)応力	3 S _m	411	89.8
蓋ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼	頭部 垂直落下	平均引張応力	2 S _m	562	74.3
			平均引張応力+曲げ応力	3 S _m	844	126
		底部 垂直落下	平均引張応力	2 S _m	562	127
			平均引張応力+曲げ応力	3 S _m	844	214
		水平落下	平均引張応力	2 S _m	562	135
			平均引張応力+曲げ応力	3 S _m	844	357

*1 旧通産省告示第501号による

*2 設計・建設規格より引用

表 3.1-7 バスケットの構造強度評価結果

部位	材料	事象	応力分類	解析基準 *1	解析基準値 (MPa)	解析結果 (MPa)
バスケット 上部スパーサ	ステンレ ス鋼	頭部 垂直落下	膜応力	Sy	158 *2	127
バスケット 下部スパーサ	ステンレ ス鋼	底部 垂直落下	膜応力	Sy	158 *2	109
バスケット チャンネル	ボロン入 りステン レス鋼	水平落下	(膜＋曲げ)応力	1.5 σ_y	356 *3	290
			膜応力	σ_y	237 *3	59.9

*1 臨界評価上影響のある塑性変形が生じない

*2 設計・建設規格より引用

*3 既存評価の材料試験データ

表 3.1-8 トラニオンの構造強度評価結果

部位	材料	事象	応力分類	解析基準 *1	解析基準値 (MPa) *2	解析結果 (MPa)
トラニオン	析出硬 化型ス テンレ ス鋼	吊上げ	(膜＋曲げ)応力	Sy	650	444
		固縛	(膜＋曲げ)応力	Sy	650	175

*1 旧科技庁 核燃料輸送物設計承認申請書記載要綱（第2版）による

*2 設計・建設規格より引用

構造強度計算に用いるコード（ABAQUS）について

（１）概要

ABAQUS コードは米国 Hibbitt, Karlsson&Sorensen, Ins. (HKS 社) で開発された有限要素法に基づく応力・座屈解析等の汎用解析コードであり，輸送容器の応力解析等に広く利用されている。

（２）機能

ABAQUS コードは，応力解析に際して以下の機能を有している。

- ① 定常，非定常の弾性，弾塑性のいずれの解も得ることができる。
- ② 材料特性として時間依存，歪の履歴依存並びに等方性・異方性等を考慮することができる。
- ③ モデルの形状は一次元～三次元，又は連続体についても取り扱うことができる。
- ④ 伝熱解析結果をそのまま境界条件として熱応力解析に用いることが可能である。
- ⑤ 荷重条件として集中荷重，分布荷重，モーメント，加速度力（慣性力），圧力，遠心力及びコリオリ力等が取り扱える。また，これらの条件の時間依存，線形変化に対しても対応可能である。

（３）解析フロー

ABAQUS コードの解析フローを図 3.1-5 に示す。

（４）使用実績

ABAQUS コードは，これまで多くの応力解析に対し使用実績がある。

（５）検証方法

理論値との比較による検証が実施されていることを確認している。

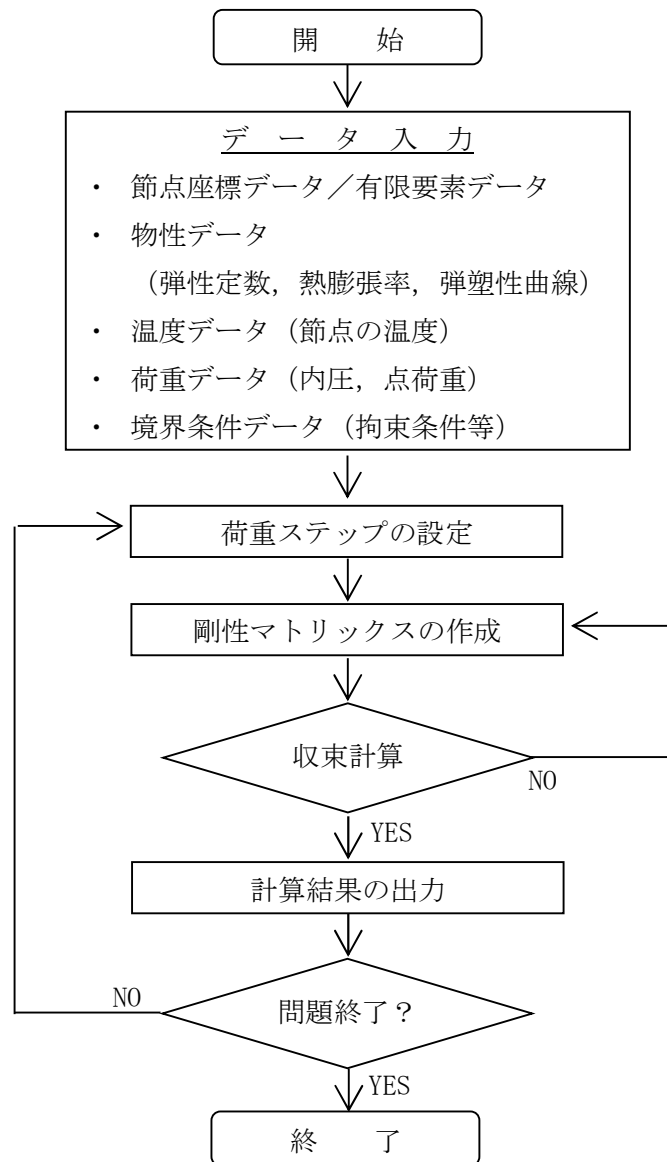


図 3.1-5 ABAQUS コードの応力解析フロー図

3.2. 除熱機能

(1) 基本的な考え方

除熱設計にあたっては、燃料の健全性及び構内用輸送容器の安全機能を有する構成部材の健全性が維持できるよう、以下のとおり設計する。

- a. 収納された使用済燃料より発生する崩壊熱は、胴内に充填した水及び空気の自然対流及び伝導により容器本体胴に伝える。
- b. 容器本体胴に伝えられた熱は主として中性子遮へい部のレジン中に設けた伝熱フィンにより外筒に伝える。
- c. 外筒に伝えられた熱は外筒及び外筒に設置したフィンにより大気に放散する。

除熱機能の評価においては、収納する使用済燃料の最大崩壊熱量を考慮し、環境条件には構外用輸送容器としての安全評価に用いられている条件を用い、自然冷却により冷却されるものとして各部の温度を求め、各部材料の制限温度を超えないことを評価する。

構内輸送では緩衝体を装着しない運用とするが、除熱設計において緩衝体は断熱の効果を有していることから、緩衝体を装着しない運用は除熱性能が向上し、容器本体の温度は既存評価における各部温度に比べて低くなる。また、表 2-2 に示したように、構内用輸送容器に収納する燃料仕様は既存評価に用いている燃料仕様に包絡されており、既存評価に比べて使用済燃料の崩壊熱量は十分低いものとなっている。このため、評価結果は既存評価書の内容を引用する。

(2) 設計基準

設計基準を表 3. 2-1 に示す。

表 3. 2-1 設計基準

対象部位	材質	設計基準	設計基準 温度 (°C)	備考
構内用 輸送容器	レジン	使用可能温度	149	中性子遮へい材
	ふっ素ゴム	使用可能温度	300	Oリング
	炭素鋼	構造強度が確保される制限 温度	375	胴
	ステンレス鋼	構造強度が確保される制限 温度	425	蓋
	ボロン入り ステンレス鋼	構造強度が確保される制限 温度	200	バスケット
燃料 被覆管	ジルカロイ-2	照射硬化回復現象により燃 料被覆管の機械的特性が著 しく低下しない温度及び水 素化物の再配向による被覆 管の機械的特性の低下が生 じない温度以下となる温度 *1, *2	200	8×8 燃料
			300	新型 8×8 ジルコニウムライフ燃料, 高燃焼度 8×8 燃料, 9×9 燃料

*1 平成 18 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料長期健全性等確証試験に関する試験最終報告書)(06 基炉
報-0006, 独立行政法人原子力安全基盤機構)

*2 平成 19 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料健全性等調査に関する試験成果報告書)(07 基炉報-0004,
独立行政法人原子力安全基盤機構)

(3) 燃料仕様

既存評価では最大崩壊熱量（25kW）で評価を実施しており，本構内輸送で収納を予定している燃料の崩壊熱量(最大 19kW)を包絡している。

(4) 評価条件

既存評価の内容を以下に示す。

構内用輸送容器の除熱評価は以下の 2 種類の解析モデルを用いて行う。

- a. 半径方向輪切り軸方向フィン半ピッチモデル

（以下「輪切り半ピッチモデル」という。）

- b. 軸方向二次元軸対称全体モデル

（以下「全体モデル」という。）

輪切り半ピッチモデル形状図を図 3. 2-1 に，全体モデル形状図を図 3. 2-2 に示す。

また，評価条件を表 3. 2-2 に示す。

表 3. 2-2 評価条件

項目		評価条件
収納体数	(体)	22
崩壊熱量	(kW)	25
周囲温度	(℃)	38
太陽熱放射 (W/m ²)	垂直に輸送される表面及び水平 に輸送されない下向きの表面	200
	その他の表面（曲面）	400

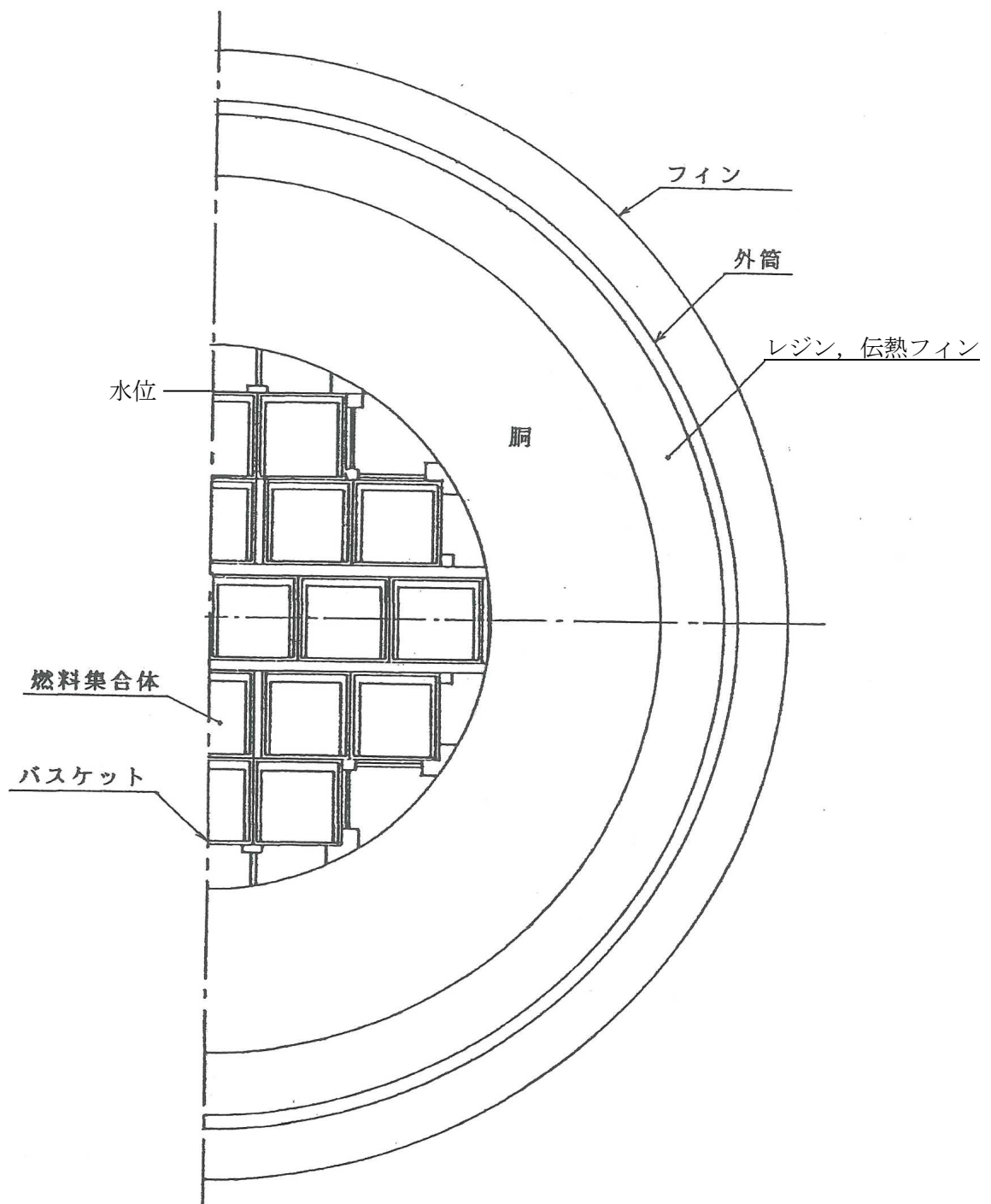
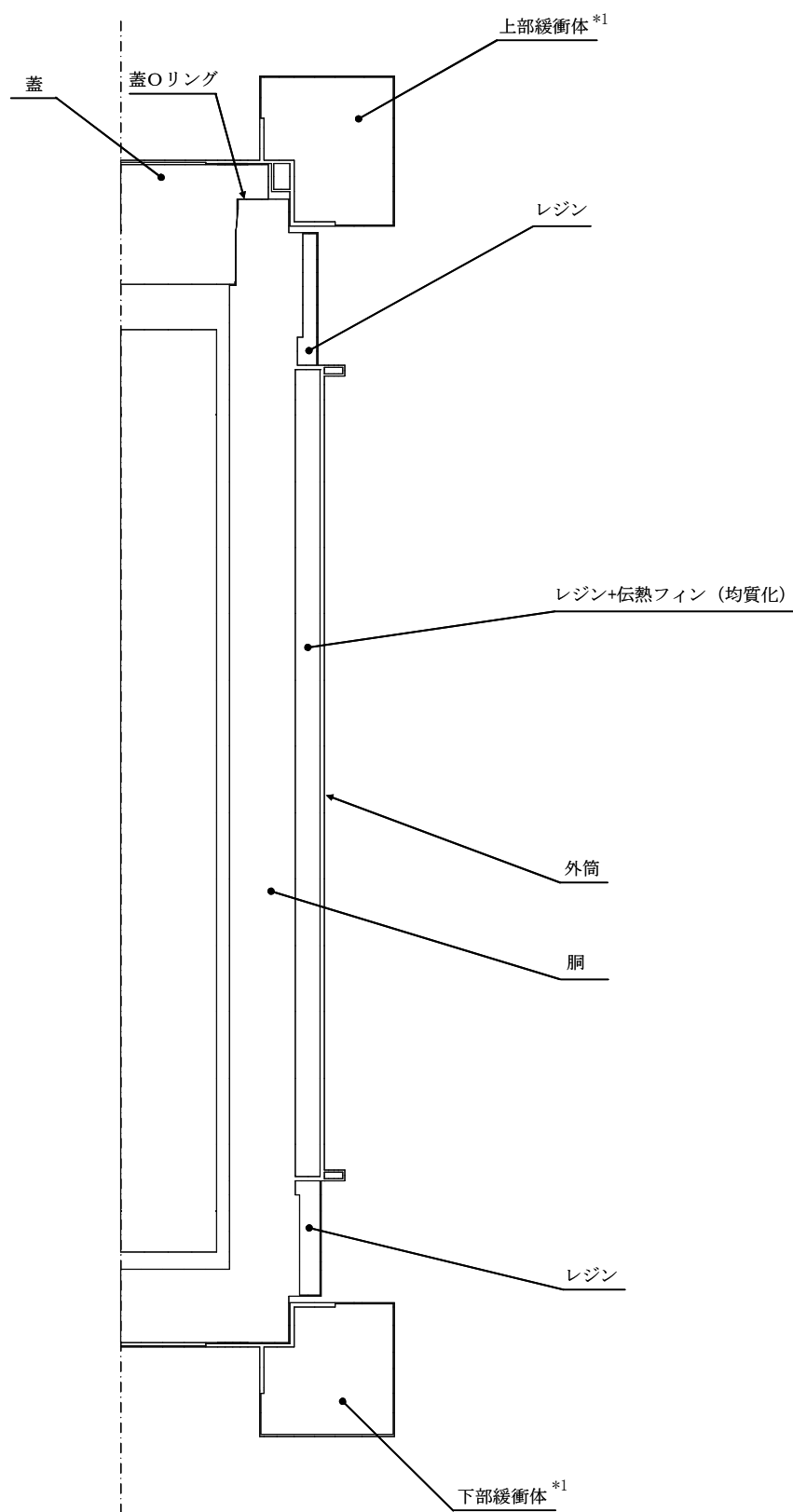


図 3.2-1 輪切り半ピッチモデル形状図



*1 構内輸送では、上部緩衝体及び下部緩衝体は装着しない。

図 3.2-2 全体モデル形状図

(5) 評価方法

軸方向を断熱とした輪切り半ピッチモデルで構内用輸送容器中央部断面の各部温度を評価する。輪切り半ピッチモデルで評価できない部位については、軸方向の温度分布が求められる全体モデルで評価する。

解析には ABAQUS コードを用いる。

(6) 評価結果

評価結果を表 3. 2-3 に示す。本表に示すとおり、構内用輸送容器を構成する部材はいずれも設計基準温度を下回っており、熱的健全性は維持される。

また、燃料被覆管の温度は 134℃であり、水素化物の再配向による機械特性の低下が生じる温度を大きく下回っており、燃料の健全性は維持される。

表 3. 2-3 評価結果（各部温度）

対象部位	材質	評価結果 (℃)	設計基準 温度 (℃)	備考
構内用 輸送容器	レジン	112	149	中性子遮へい材
	ふっ素ゴム	115	300	Oリング
	炭素鋼	127	375	胴
	ステンレス鋼	119	425	蓋
	ボロン入りステンレス鋼	132	200	バスケット
燃料 被覆管	ジルカロイ-2	134	200	8×8 燃料
			300	新型 8×8 ジルコニウムライフ燃料, 高燃焼度 8×8 燃料, 9×9 燃料

除熱解析に用いるコード（ABAQUS）について

（１） 概要

ABAQUS コードは、米国 Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.（HKS 社）で開発された有限要素法に基づく伝熱解析等の汎用解析コードであり、輸送容器の伝熱解析などに広く利用されている。

（２） 機能

ABAQUS コードは、伝熱解析に際して以下の機能を有している。

- ① 定常、非定常のいずれの解も得ることができる。
- ② 一次元～三次元の任意形状の構造に対して解くことが可能である。
- ③ 初期条件（温度）は要素ごとに変化させることができ、計算ステップの自動決定も可能である。
- ④ 境界条件として、時間に依存する熱流束、温度、伝導、対流及び放射が考慮できる。
- ⑤ 構成物質の相変態が考慮できる。

（３） 解析フロー

ABAQUS コードの解析フローを図 3.2-3 に示す。

（４） 使用実績

ABAQUS コードは、多くの伝熱解析に使用された実績がある。

（５） 検証方法

貯蔵容器の定常伝熱試験に対して ABAQUS コードによる解析結果と試験結果を比較・検討し、本コードの妥当性が検証されている*1。

*1 山川秀次，五味義雄，尾崎幸男，尾崎明朗「使用済燃料キャスク貯蔵技術の確立—キャスクの伝熱特性評価—」，電中研報告書，U92038，（1993）

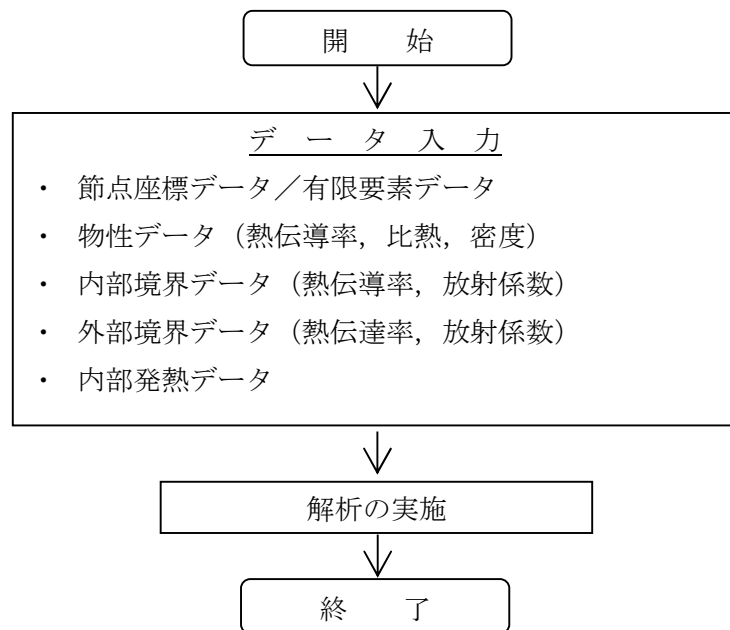


図 3. 2-3 ABAQUS コードの伝熱解析フロー図

除熱解析に用いるコード（ORIGEN2）について

（１） 概要

ORIGEN2 コードは、米国オークリッジ国立研究所（ORNL）で開発された炉内中性子束の 1 点近似による燃焼計算コードである。ORIGEN2 コードは汎用解析コードであり、輸送容器の崩壊熱計算等に広く利用されている。

（２） 機能

ORIGEN2 コードは、燃焼解析に際して以下の機能を有している。

- ① 燃料の炉内での燃焼計算，炉取出し後の減衰計算により，冷却期間に対応した崩壊熱，放射線の強度，各核種の放射エネルギー等が求められる。
- ② 原子炉の炉型と燃料の組合せに対し，中性子エネルギースペクトルの違いにより重みをつけた断面積ライブラリが内蔵されており，任意に選択できる。
- ③ 計算結果は，放射化生成物，アクチニド，核分裂生成物に分類して出力される。
- ④ 燃焼計算に必要な放射性核種データ（崩壊熱，ガンマ線のエネルギー分布，自発核分裂と（ α ， n ）反応により発生する中性子源強度等）に関しては，ORIGEN2 コード専用のライブラリがあり，これを用いる。

（３） 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを図 3.2-4 に示す。

（４） 使用実績

ORIGEN2 コードは，輸送容器，核燃料施設の崩壊熱計算に広く使用されている*1。

（５） 検証方法

汎用コードの導入評価*1 が実施されていることが確認されている。

大型実験/ベンチマーク試験による検証*2 が実施されていることが確認されている。

*1 ORNL, “ORIGEN2 Isotope Generation and Depletion Code MATRIX EXPONENTIAL METHOD”, CCC-371

*2 (社)日本原子力学会 “原子炉崩壊熱とその推奨値”，1989 年 8 月

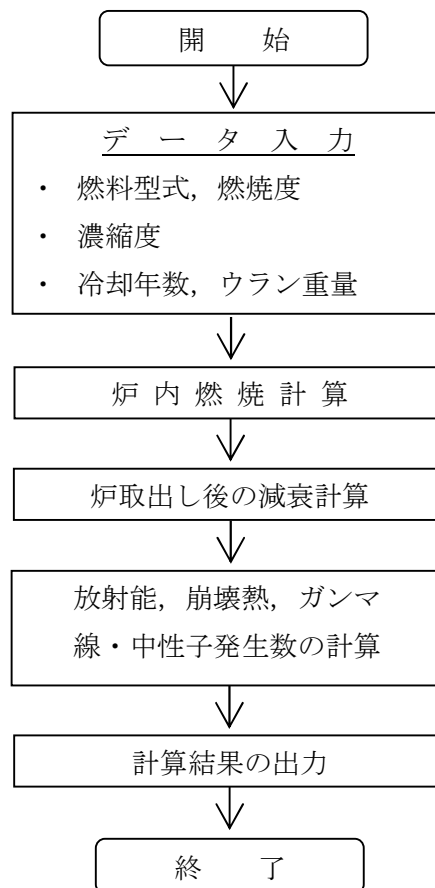


図 3.2-4 ORIGEN2 コードの計算フロー図

3.3. 密封機能

(1) 基本的な考え方

構内用輸送容器の密封装置は容器本体及び蓋より構成される密封容器とこれに付属するバルブから構成される。容器本体と蓋の間、及びバルブのガスケットにはＯリングが使用されている。構内用輸送容器の密封境界を図 3.3-1 に示す。

密封機能の評価にあたっては、構造強度評価及び除熱機能評価の結果から、構内用輸送容器の密封性能が維持されることを確認する。

(2) 評価結果

3.1 項に示したとおり、構造強度評価から蓋、蓋ボルト、胴及び底板は構内輸送における荷重条件に対して十分な強度を有しており、密封装置の構造健全性に問題がないことが確認されている。

また、3.2 項に示したとおり、除熱機能評価から構内輸送時のＯリングの温度は 115℃以下であり、設計基準温度である 300℃を大きく下回ることから、熱的健全性に問題ないことが確認されている。

以上から、構内用輸送容器の密封性能は維持される。

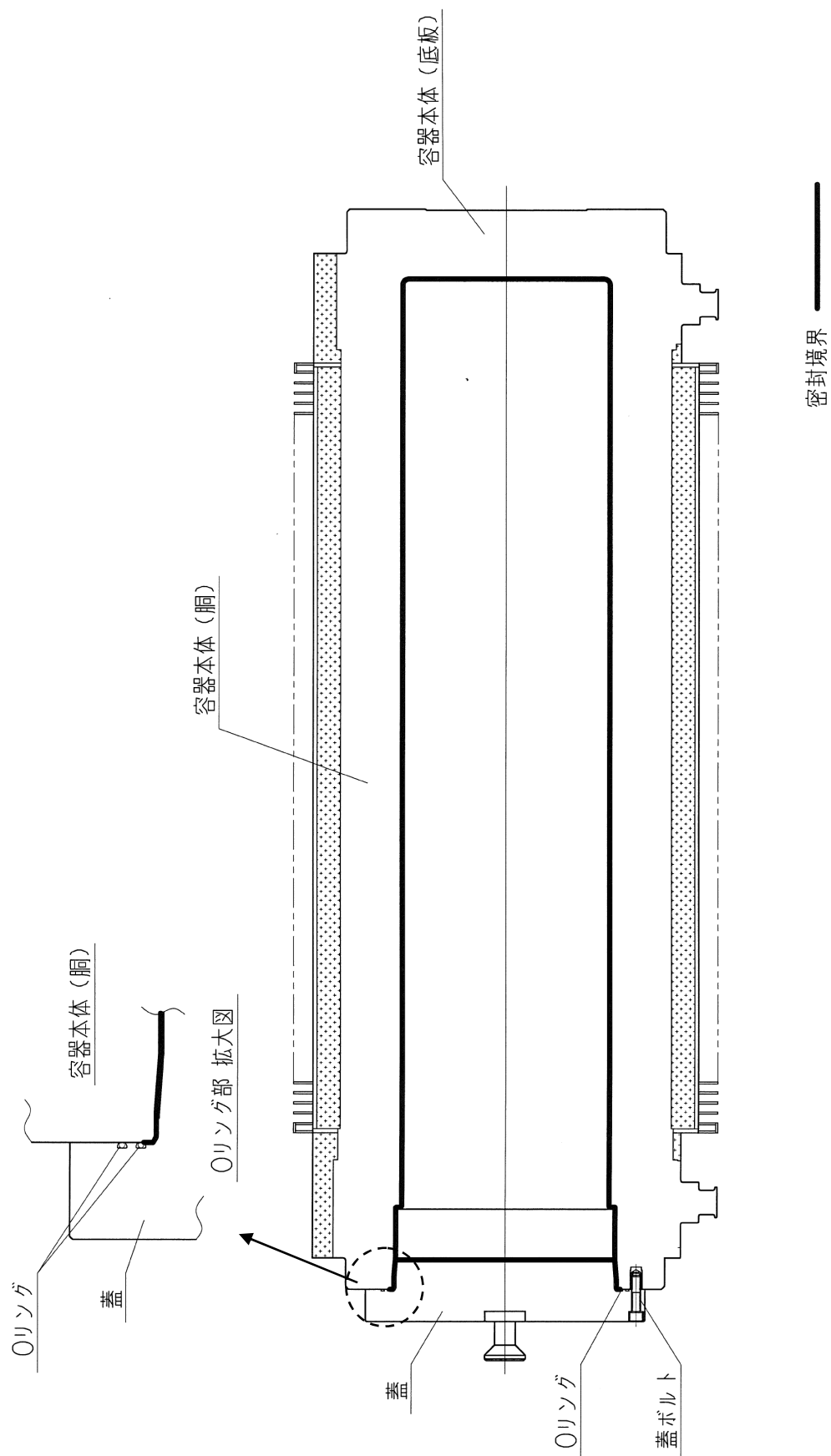


図 3. 3-1 密封境界

3.4. 遮へい機能

(1) 基本的な考え方

遮へい設計にあたっては、周辺公衆及び放射線業務従事者に対し、放射線被ばく上影響を及ぼすことのないよう、使用済燃料の放射線を適切に遮へいする能力を有するよう以下のとおり設計する。

- a. 構内用輸送容器はガンマ線遮へいと中性子遮へいの機能を有する。
- b. 主要なガンマ線遮へい材は、胴、底板及び外筒の炭素鋼と蓋のステンレス鋼である。
- c. 主要な中性子遮へい材は、胴内水及び胴と外筒間のレジンである。

遮へい機能の評価においては、収納する使用済燃料の線源強度を考慮し、構外用輸送容器としての安全評価に用いられている評価手法を用い、構内用輸送容器表面及び表面から1 mにおける線量当量率が制限値を超えないことを評価する。

なお、表 2-2 に示したように、構内用輸送容器に収納する燃料仕様は既存評価に用いている燃料仕様に包絡されるが、構内輸送では緩衝体がない状態で運用することから、再評価を実施する。ただし、緩衝体がない解析モデルである事以外は既存評価と同じとし、既存評価書の内容を引用する。

(2) 設計基準

設計基準を表 3.4-1 に示す。

表 3.4-1 設計基準

(単位： $\mu\text{Sv/h}$)

	設計基準
構内用輸送容器 表面	2000 以下
構内用輸送容器 表面から 1 m	100 以下

(3) 評価条件

1) 遮へい厚さ

構内用輸送容器の遮へい厚さを表 3.4-2 に示す。

表 3.4-2 遮へい厚さ

(単位：mm)

	炭素鋼	ステンレス鋼	レジン
側部 方向	307	—	115
頭部軸方向	—	305	—
底部軸方向	338	—	—

2) 線源条件

表 2-2 に示すように、構内輸送においては 9×9 燃料を収納する場合は、最も放射能強度が大きく、遮へい上厳しい線源条件となる。なお、遮へい機能の評価においては、既存評価の燃料の線源条件で評価する。

構内用輸送容器の収納物の線源条件を表 3.4-3 に示す。

表 3.4-3 線源条件

項目	線源条件
平均燃焼度 (MWd/t)	50,000
冷却期間 (日)	820
収納体数 (体)	22
放射能強度 (Bq)	2.04×10^{17}

3) 線源強度及びエネルギー

a. ガンマ線源強度

燃料有効部のガンマ線源強度の計算は ORIGEN2 コードにより行う。得られたガンマ線源強度を表 3.4-4 に示す。また、構造材の放射化によるガンマ線源強度は次式で計算する。構造材の放射化によるガンマ線源強度を表 3.4-5 に示す。

$$A = N_0 \cdot \sigma \cdot \phi \cdot \{1 - \exp(-\lambda \cdot T_1)\} \cdot \exp(-\lambda \cdot T_2)$$

ここで、A：放射化核種 (^{60}Co) の放射能 (Bq)

N_0 ：ターゲット核種 (^{59}Co) の個数 (atoms)

σ ：2200m/s の中性子による (^{59}Co) の (n, γ) 反応断面積 (cm^2)

ϕ ：炉内照射熱中性子束 ($\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$)

λ ： ^{60}Co の崩壊定数 (/日)

T_1 ：照射期間 (日)

T_2 ：冷却期間 (日)

表3.4-4 ガンマ線源強度

(輸送容器 1 基あたり)

エネルギー 群 数	平均エネルギー (MeV)	線源強度 (photons/s)
1	0.01	5.449×10^{16}
2	0.025	1.247×10^{16}
3	0.0375	1.258×10^{16}
4	0.0575	1.118×10^{16}
5	0.085	7.725×10^{15}
6	0.125	8.303×10^{15}
7	0.225	6.758×10^{15}
8	0.375	3.839×10^{15}
9	0.575	6.581×10^{16}
10	0.85	2.387×10^{16}
11	1.25	3.830×10^{15}
12	1.75	2.132×10^{14}
13	2.25	1.937×10^{14}
14	2.75	5.750×10^{12}
15	3.5	7.341×10^{11}
16	5.0	5.153×10^8
17	7.0	5.943×10^7
18	9.5	6.828×10^6
合 計		2.113×10^{17}

表 3.4-5 構造材の放射化によるガンマ線源強度

(輸送容器 1 基あたり)

	^{60}Co 線源強度 (Bq)
ハンドル部	3.52×10^{12}
上部グリッド部	4.70×10^{13}
上部プレナム部	2.62×10^{14}
下部タイプレート部	9.59×10^{13}

b. 中性子線源強度

中性子線源強度の計算は ORIGEN2 コードにより行う。得られた中性子線源強度を表 3.4-6 に示す。また、評価に用いる中性子エネルギースペクトルを表 3.4-7 に示す。

表 3.4-6 中性子線源強度 (輸送容器 1 基あたり)

		中性子線源強度 (n/s)
1 次中性子源	自発核分裂によるもの	1.177×10^{10}
	(α , n) 反応によるもの	1.489×10^8
	合計	1.192×10^{10}
増倍効果を考慮した全中性子線源強度		2.785×10^{10}

表3.4-7 中性子線源スペクトル

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル
1	1.492×10^7	5.72×10^{-4}
2	1.220×10^7	2.02×10^{-3}
3	1.000×10^7	6.07×10^{-3}
4	8.180×10^6	2.00×10^{-2}
5	6.360×10^6	4.12×10^{-2}
6	4.960×10^6	5.27×10^{-2}
7	4.060×10^6	1.10×10^{-1}
8	3.010×10^6	8.74×10^{-2}
9	2.460×10^6	2.28×10^{-2}
10	2.350×10^6	1.15×10^{-1}
11	1.830×10^6	2.07×10^{-1}
12	1.110×10^6	1.89×10^{-1}
13	5.500×10^5	1.31×10^{-1}
14	1.110×10^5	1.59×10^{-2}
15	3.350×10^3	8.12×10^{-5}
16	5.830×10^2	5.89×10^{-6}
17	1.010×10^2	3.89×10^{-7}
18	2.900×10^1	5.53×10^{-8}
19	1.070×10^1	1.33×10^{-8}
20	3.060×10^0	1.88×10^{-9}
21	1.120×10^0	4.19×10^{-10}
22	4.140×10^{-1}	1.20×10^{-10}

(4) 評価方法

遮へい計算は、ガンマ線、中性子共に DOT3.5 コードを用いて計算し、構内用輸送容器表面及び表面から 1 m の線量当量率を求める。

遮へい解析モデルを図 3.4-1～図 3.4-3 に示す。解析モデルは、構内用輸送容器の実形状を考慮した上で、構内用輸送容器の底部トラニオン周辺について中性子遮へい材の遮へい厚さが水位方向とトラニオン方向で異なることから、頭部方向、底部水位方向及び底部トラニオン方向に分けてモデル化する。

ライブラリとしては、DLC-23/CASK データを用い、線量当量率への変換は ICRP Publ. 74 に従う。

解析モデルでは既存評価と同様に以下の条件を考慮する。

- ・ 胴内での燃料の軸方向の移動を考慮し、安全側に頭部方向評価モデルでは蓋方向に、底部方向評価モデルでは底方向に移動したモデルとする。
- ・ 胴内水温度は、収納物の崩壊熱量 25kW における水温（127℃）より高い 150℃ に設定する。
- ・ 胴内水位は、安全側に水の膨張を考慮しない場合の水位とする。
- ・ バスケットの最外周部は、遮へい体として考慮し、他の部分については、水没部は燃料領域に均質化し、非水没部はボイドに置換え、均質化領域から除外する。
- ・ フィンは、空気に置換え、距離のみ考慮する。
- ・ チャンネルボックスはボイドに置換え、均質化領域から除外する。
- ・ 各部寸法はすべてノミナル値とし、公差は密度係数として考慮する。

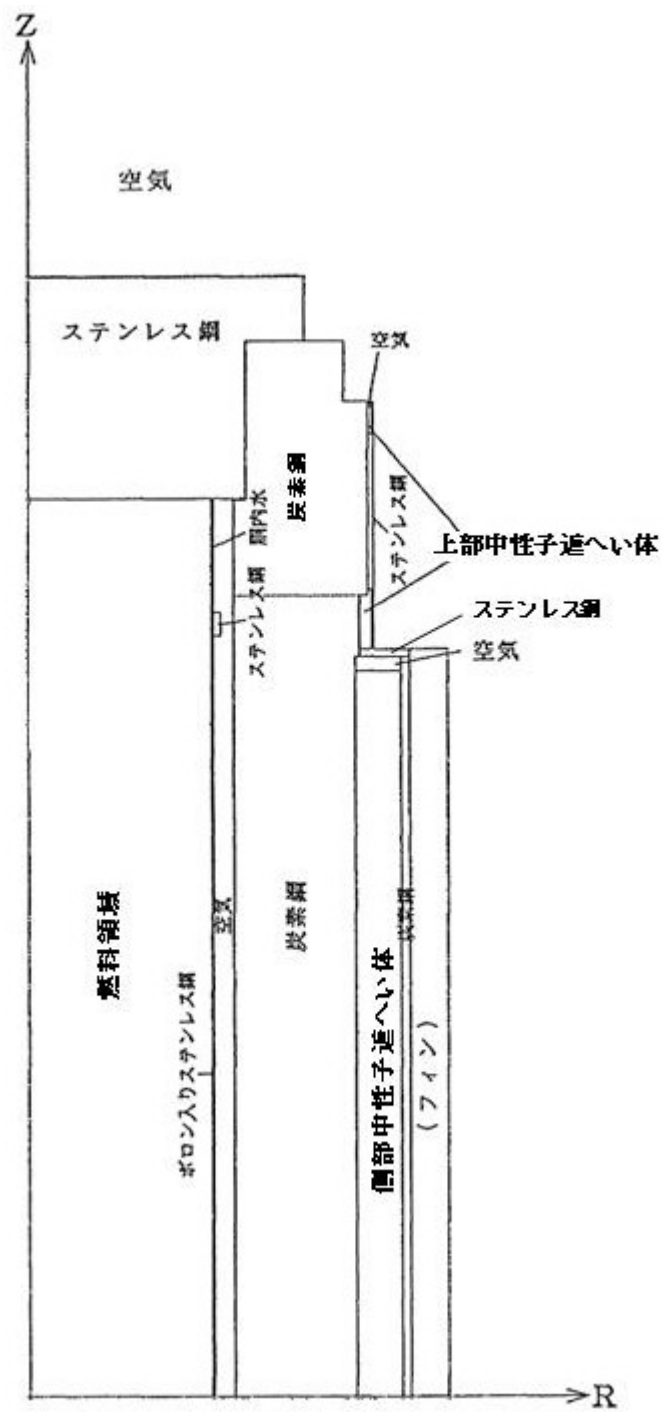


図 3.4-1 遮へい解析モデル (頭部方向)

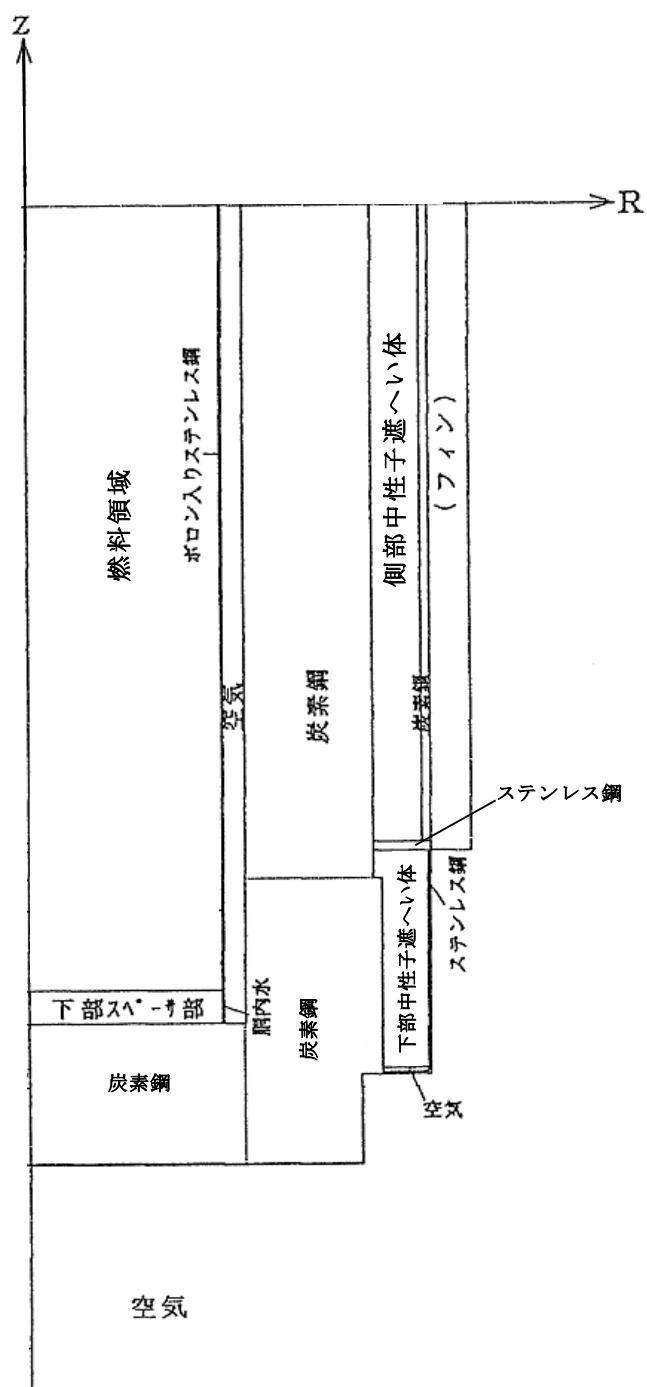


図 3.4-2 遮へい解析モデル (底部水位方向)

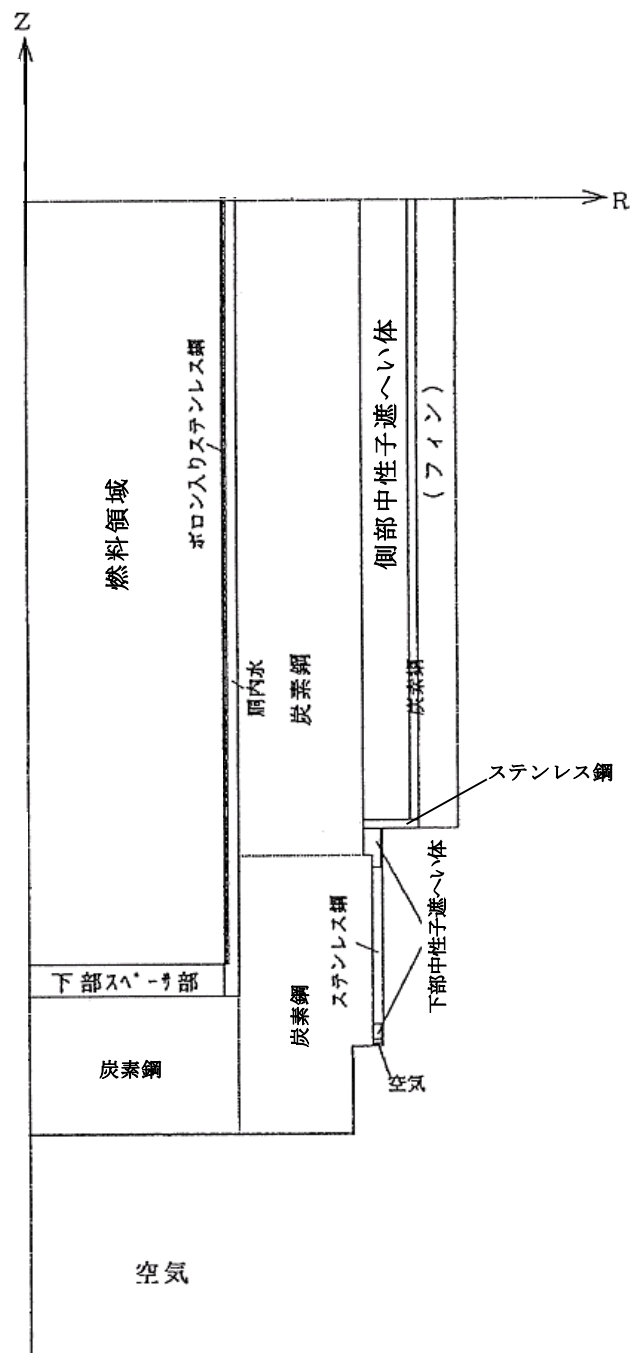


図 3.4-3 遮へい解析モデル (底部トラニオン方向)

(5) 評価結果

構内用輸送容器の線量当量率評価位置を図 3.4-4 に，評価結果を表 3.4-8 に示す。なお，評価結果は頭部軸方向，頭部径方向，側部，底部径方向，底部軸方向における線量当量率の最大値を示している。

本表に示すとおり，構内用輸送容器は設計基準値を満足している。

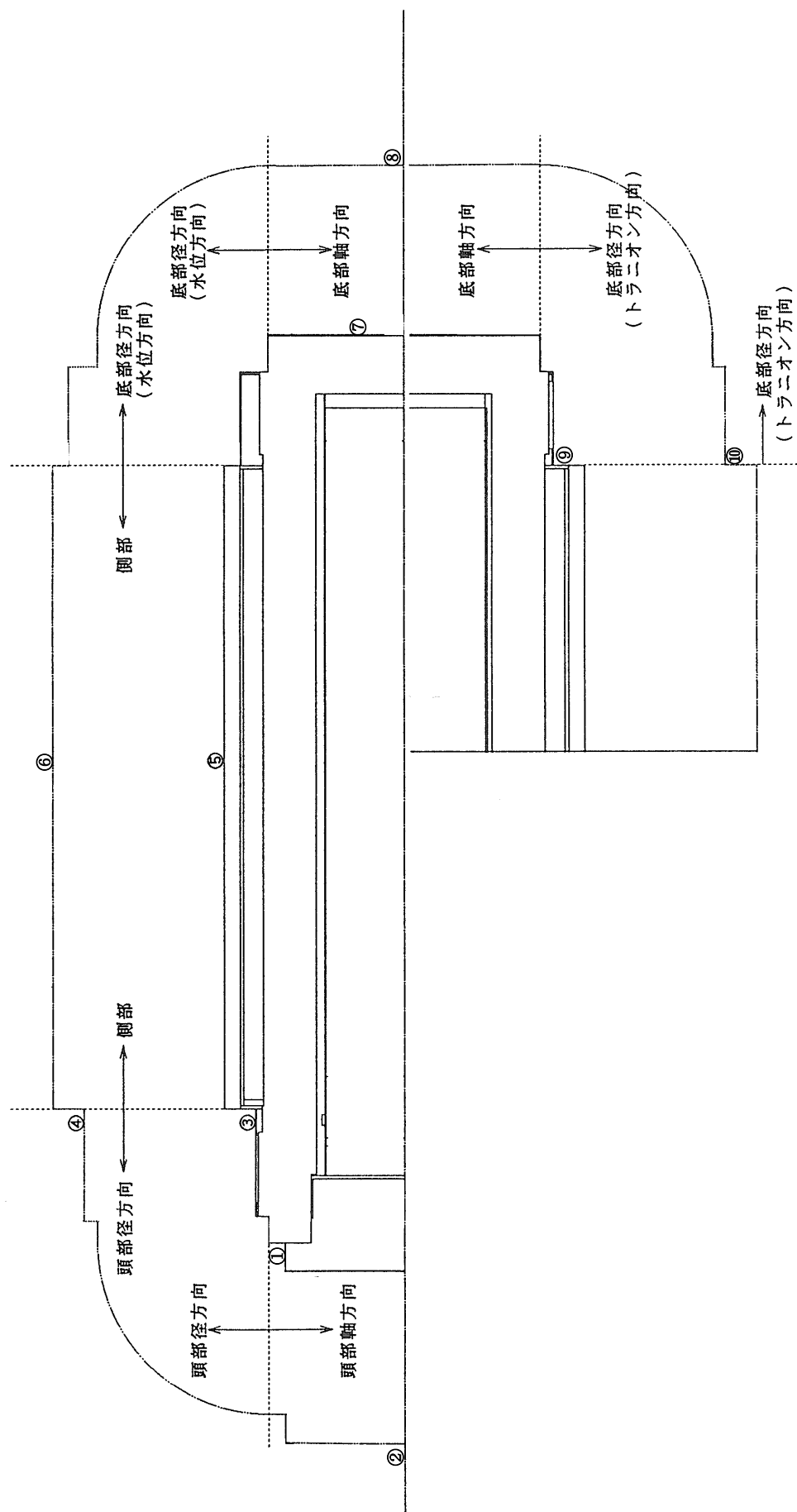


図3.4-4 線量当量率評価位置

図3.4-4

表3.4-8 最大線量当量率の計算結果

(単位： μ Sv/h)

		頭部		側 部	底部	
		軸方向	径方向		軸方向	径方向
評価点		①	③	⑤	⑦	⑨
表面	計算結果	1628.2	416.3	225.0	137.2	631.2
	設計基準値	2000				
評価点		②	④	⑥	⑧	⑩
表面から 1 m	計算結果	72.1	45.1	84.2	39.8	50.1
	設計基準値	100				

遮へい解析に用いるコード (ORIGEN2) について

(1) 概要

ORIGEN2 コードは、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された炉内中性子束の 1 点近似による燃焼計算コードである。ORIGEN2 コードは汎用解析コードであり、輸送容器の放射線源強度計算等に広く利用されている。

(2) 機能

ORIGEN2 コードは、燃焼解析に際して以下の機能を有している。

- ① 燃料の炉内での燃焼計算、炉取出し後の減衰計算により、冷却期間に対応した崩壊熱、放射線の強度、各核種の放射エネルギー等が求められる。
- ② 原子炉の炉型と燃料の組合せに対し、中性子エネルギースペクトルの違いにより重みをつけた断面積ライブラリが内蔵されており、任意に選択できる。
- ③ 計算結果は、放射化生成物、アクチニド、核分裂生成物に分類して出力される。
- ④ 燃焼計算に必要な放射性核種データ（崩壊熱、ガンマ線のエネルギー分布、自発核分裂と (α , n) 反応により発生する中性子源強度等) に関しては、ORIGEN2 コード専用のライブラリがあり、これを用いる。

(3) 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを図 3.4-5 に示す。

(4) 使用実績

ORIGEN2 コードは、輸送容器、核燃料施設の放射線源強度計算に広く使用されている*1。

(5) 検証方法

汎用コードの導入評価*1 が実施されていることが確認されている。

大型実験/ベンチマーク試験による検証*2 が実施されていることが確認されている。

*1 ORNL, “ORIGEN2 Isotope Generation and Depletion Code MATRIX EXPONENTIAL METHOD”, CCC-371

*2 (社)日本原子力学会 “原子炉崩壊熱とその推奨値”, 1989 年 8 月

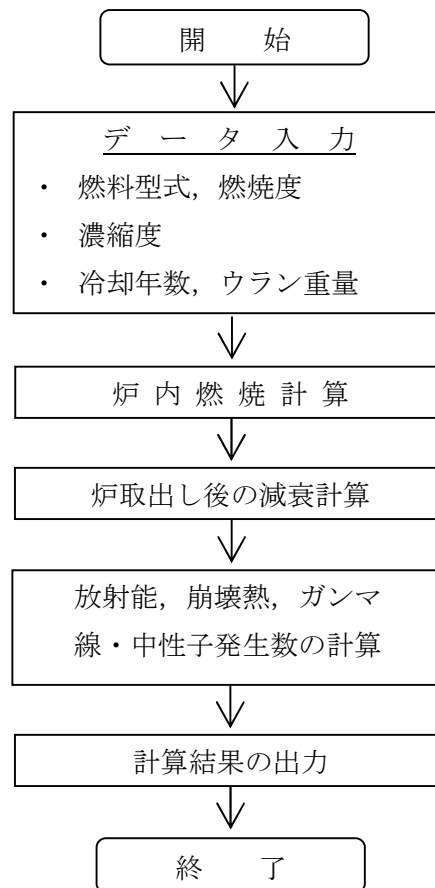


図 3.4-5 ORIGEN2 コードの計算フロー図

遮へい解析に用いるコード (DOT3.5 コード) について

(1) 概要

DOT3.5 コード (以下「DOT コード」という。) は二次元輸送コードであり, 米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された汎用解析コードである。

(2) 機能

DOT コードは, 遮へい解析に際して以下の機能を有する。

- ① ガンマ線や中性子線に対するボルツマン輸送方程式を解くことによる数値解析法であり, 放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性が表現できる。
- ② DOT コードは, 二次元の体系を扱うことができる。

(3) 解析フロー

DOT コードの解析フローを図 3.4-6 に示す。

(4) 使用実績

DOT コードは, 原子力施設の遮へい計算に広く用いられており, 輸送容器の遮へい解析に豊富な実績がある。

(5) 検証

汎用コードの導入評価*1 が実施されていることが確認されている。

大型実験/ベンチマーク試験による検証*2 が実施されていることが確認されている。

*1 W. A. Rhoades, “DOT3.5 TWO DIMENSIONAL DISCRETE ORDINATES RADIATION TRANSPORT CODE”,
CCC-276, 1978 年 10 月

*2 (社) 日本原子力学会 “中性子遮蔽設計ハンドブック”, 1993 年 4 月

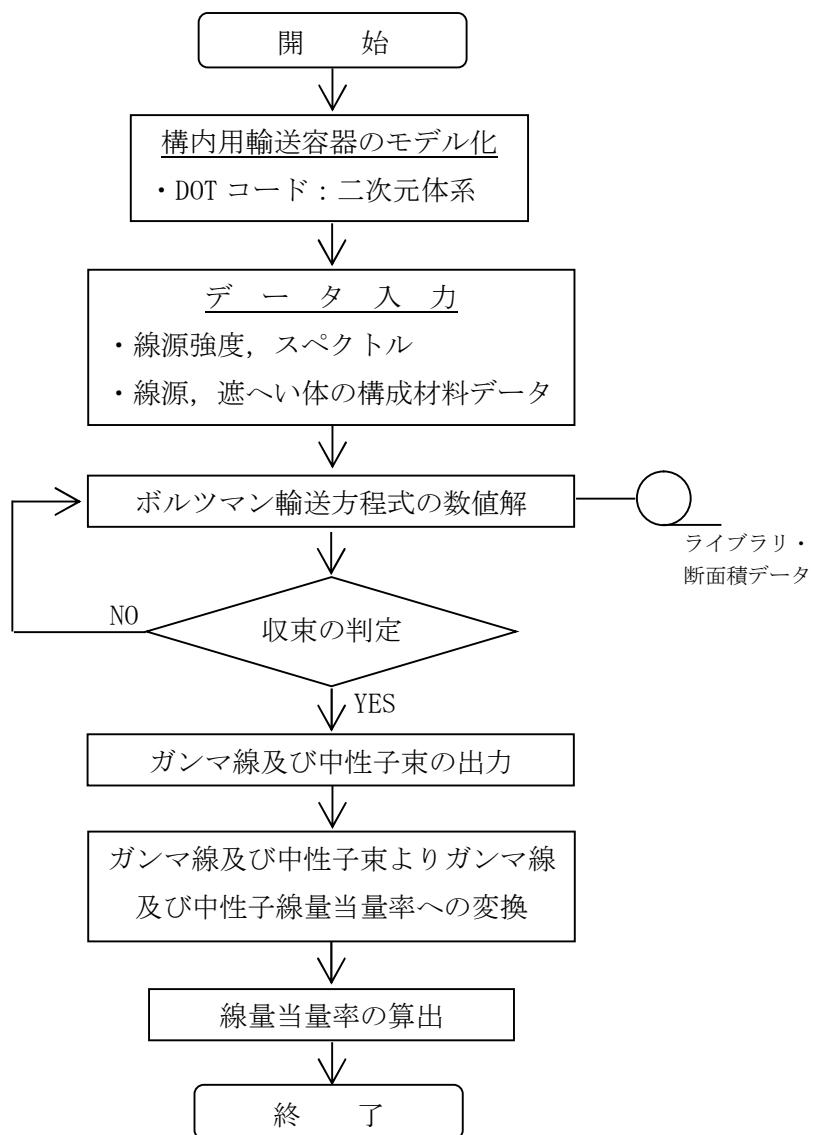


図 3.4-6 DOT コードの解析フロー図

3.5. 臨界防止機能

(1) 基本的な考え方

臨界防止にあたっては、想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止するため以下のとおり設計する。

- a. 燃料を収納するバスケットは格子構造として、燃料を所定の幾何学的配置に維持する設計とする。
- b. バスケットの主要材料には、中性子を吸収するボロン入りステンレス鋼を使用する。

なお、臨界防止機能の評価においては、表 2-2 に示したとおり、構内用輸送容器に収納する燃料の初期濃縮度（約 3.8wt%）は既存評価に用いている初期濃縮度（4.19wt%）に包絡されるため、評価結果は既存評価書の内容を引用する。

(2) 設計基準

想定されるいかなる場合も実効増倍率が 0.95 以下であること。

(3) 評価条件

既存評価の内容を以下に示す。また、臨界解析モデルを図 3.5-1 及び図 3.5-2 に示す。

- ・評価は初期濃縮度の高い 9×9 燃料について行う。
- ・燃料のウラン-235 の濃縮度は未照射のままの減損していない値(初期濃縮度)とする。
- ・燃料集合体には可燃性毒物としてガドリニウムを添加した燃料棒が含まれるが、中性子吸収断面積の大きいガドリニウムの存在を無視し、安全側にガドリニウムを添加していない燃料棒に置換える。
- ・燃料が構内用輸送容器の中心寄りに配置された状態とする。また、燃料集合体の変形を考慮し、臨界評価上安全側の仮定となるように収納される全燃料について一部領域の燃料棒ピッチを変化させた配列とする。
- ・バスケット材料のボロン入りステンレス鋼材中の ^{10}B 含有量は、製造下限値とする。
- ・チャンネルボックスを水に置換える。
- ・胴内における燃料として実在する部分は燃料有効長に相当する部分のみとし、上・下部タイプレート部などを水に置換える。
- ・胴内の燃料有効長の範囲外の構造物は水に置換える。
- ・中性子遮へい体及びフィンは無いものとする。
- ・輸送容器外部の雰囲気は安全側に真空とする。

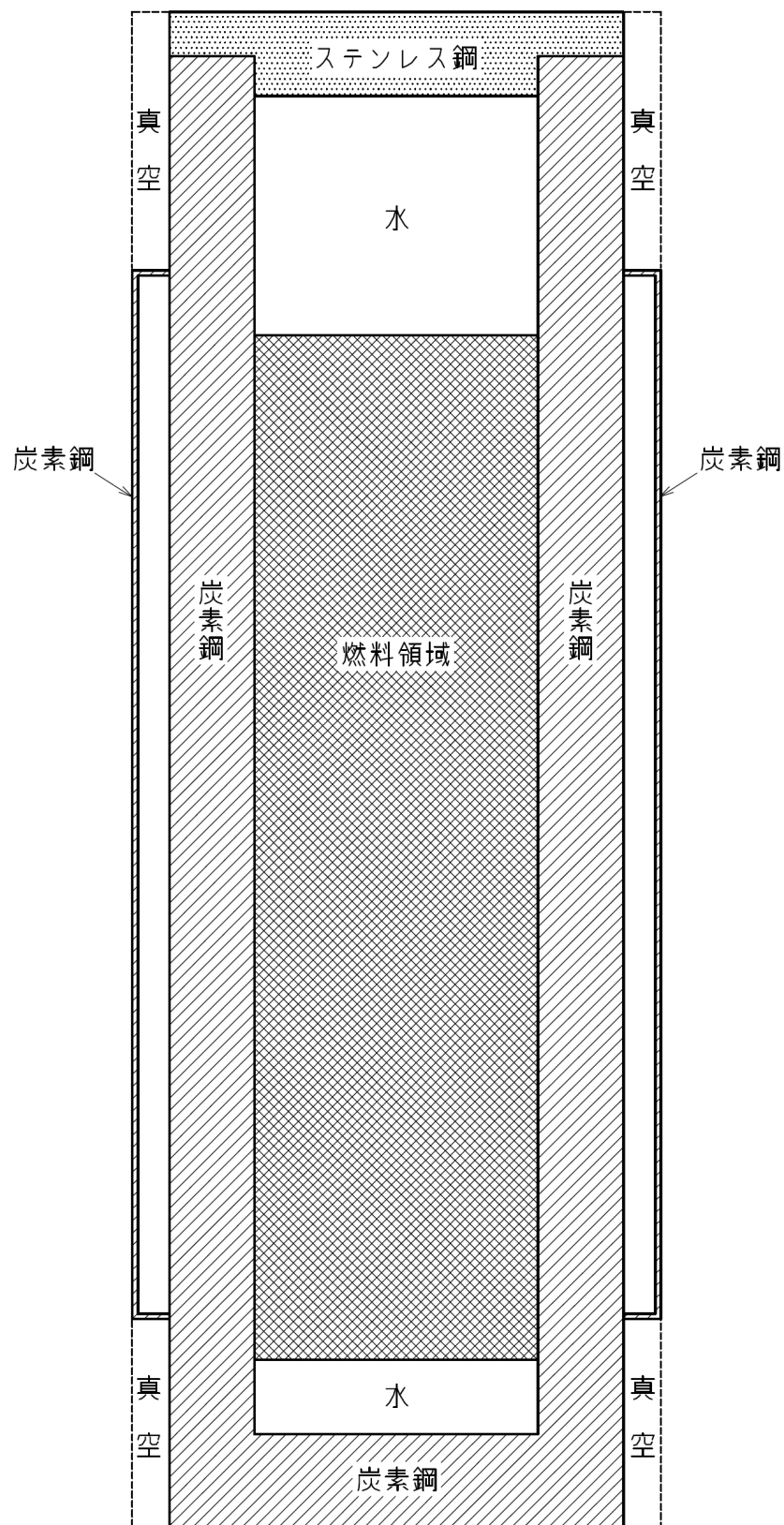
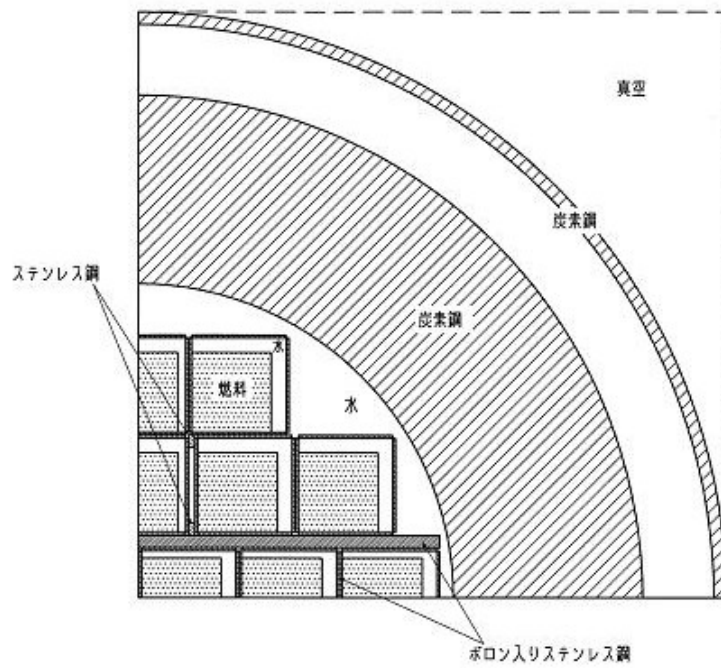
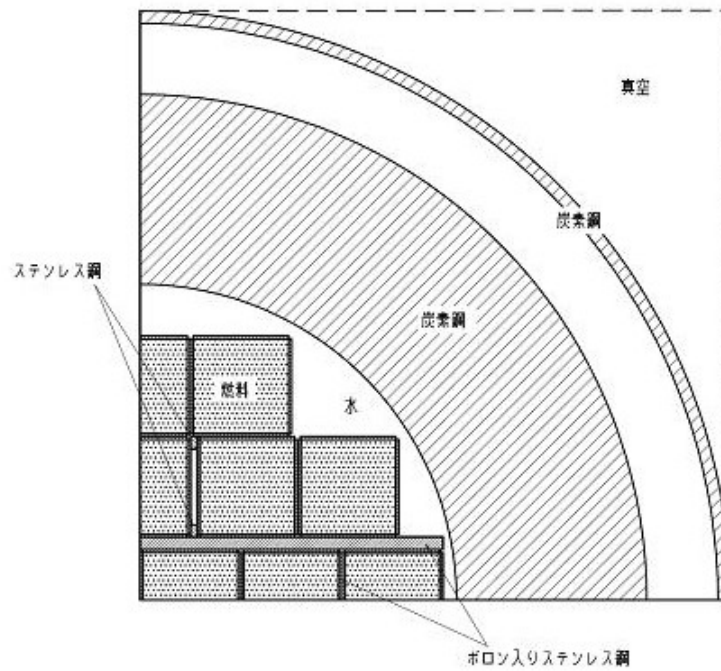


図 3.5-1 臨界解析モデル（縦断面図）



燃料棒ピッチの変化のない領域



燃料棒ピッチの変化のある領域

図 3.5-2 臨界解析モデル（燃料領域部横断面図）

(4) 評価方法

構内用輸送容器の実効増倍率は、燃料のウラン-235 の濃縮度は未照射のままの減損していない値をとる安全側の仮定で、構内用輸送容器の実形状をモデル化し、臨界解析コード KENO-V.a を使用して求める。

(5) 評価結果

評価結果を表 3.5-1 に示す。本表に示すとおり、構内用輸送容器の実効増倍率は設計基準を満足している。

表 3.5-1 評価結果

評価対象	実効増倍率	設計基準
構内用輸送容器	0.91 ^{*1}	0.95

*1 モンテカルロ計算の統計誤差 (3 σ) を考慮した値

臨界解析に用いるコード (KENO-V.a) について

(1) 概要

KENO-V.a コードは、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発されたモンテカルロ法に基づく公開の臨界解析コードであり、輸送容器の臨界解析などに利用されている。

(2) 機能

KENO-V.a コードは、臨界解析に際して以下の機能を有している。

- ① 実際に中性子が出会う物理現象を確率理論を用いて模擬するため、どのような物理的問題にも適用できる。なお、統計的な手法を用いるため、計算結果には統計誤差が付随する。
- ② 一次元～三次元の任意形状の体系を扱うことができる。

(3) 解析フロー

KENO-V.a コードの解析フローを図 3.5-3 に示す。

(4) 使用実績

KENO-V.a コードは、国内外で輸送容器の臨界解析をはじめ、核燃料施設の臨界解析に使用されている。

(5) 検証

米国のバットル研究所 (パシフィック ノースウエスト研究所, PNL) で行われた臨界実験^{*1}の中から 16 種類の臨界体系をベンチマーク試験^{*2}として選び、検証を行った。

*1 S. R. Bierman and E. D. Clayton, “Criticality Experiments with Subcritical Clusters of 2.35 Wt% and 4.31 Wt% ²³⁵U Enriched UO₂ Rods in Water with Steel Reflecting Walls”, NUREG/CR-1784(PNL-3602), U.S. Nuclear Regulatory Commission, April 1981.

*2 “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments”, LEU-COMP-THERM-010, LEU-COMP-THERM-013, LEU-COMP-THERM-017, LEU-COMP-THERM-042, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2009.

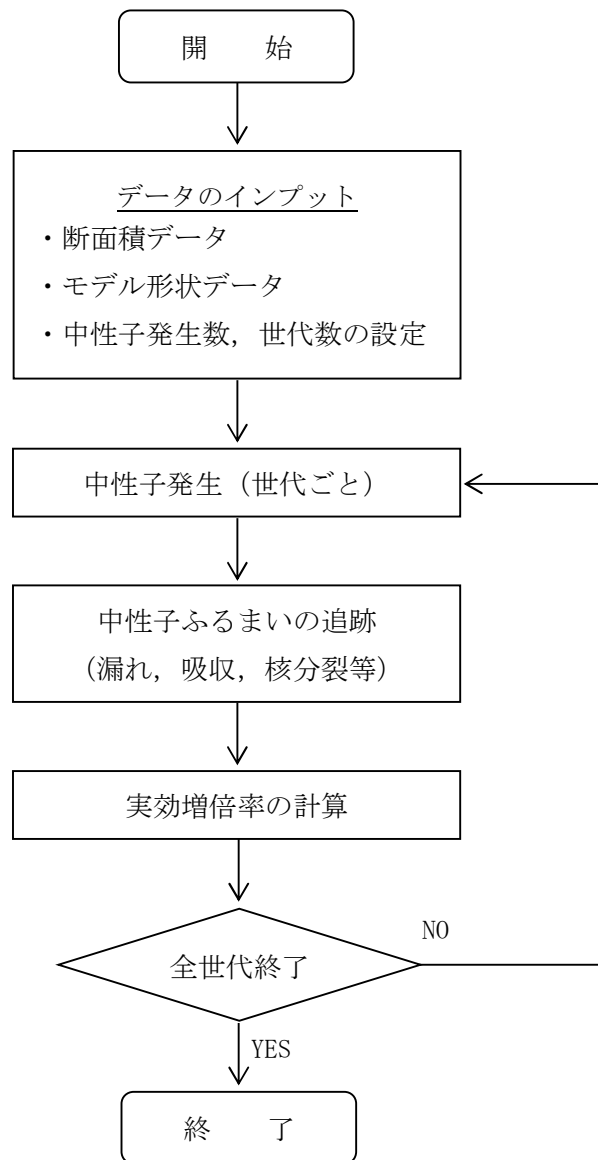


図 3.5-3 KENO-V.a コードの解析フロー図

4. 構内用輸送容器の落下

4.1. 原因

構内用輸送容器の取り扱い中に、何らかの原因で構内用輸送容器が落下して密封境界が破損し、放射性物質が環境に放出される。

4.2. 発生防止対策

構内用輸送容器の落下を防止するために、次のような設計及び運転上の対策を講じる。

- (1) クレーン主巻フックは二重のワイヤーロープで保持する構造とする。
- (2) クレーン巻上装置は電源断時に電動油圧押上機ブレーキで保持する構造とする。
- (3) クレーン主巻フックと吊具、吊具と構内用輸送容器の取付けを二重化する。
- (4) 取付け作業後の取付け状態を確認し、外れ止めを取り付ける。
- (5) 作業開始前にクレーン及び吊具の事前点検を実施する。
- (6) 作業手順書を整備し、作業員への教育周知を行う。
- (7) 有資格者による設備操作、作業管理を行う体制とする。

4.3. 核分裂生成物の放出量及び線量の評価

4.3.1. 核分裂生成物の放出量

(1) 破損燃料棒の評価

破損する燃料棒の本数の評価は、次の仮定に基づいて行う。

- a. 構内用輸送容器の取り扱い作業に際し、構内用輸送容器が落下して、構内用輸送容器に収納された燃料集合体が破損するものと仮定する。
- b. 落下による燃料集合体の破損体数は、構内用輸送容器の収納体数 22 体とする。

(2) 評価条件

核分裂生成物の移行と放出量の評価は、次の仮定に基づいて行う。

- a. 燃料ギャップ内の核分裂生成物の量は、表 2-2 に記載のとおり燃焼度 50,000MWd/t の 9×9 燃料集合体について行う。
- b. 燃料集合体の冷却期間は表 2-2 に記載のとおり 820 日とする。
なお、表 2-2 に記載のとおり、4 号機に貯蔵中の燃料集合体の冷却期間は最短で 1035 日である。
- c. 破損した燃料棒のギャップ内核分裂生成物の全量が構内用輸送容器内に放出されるものとする。破損した燃料棒のギャップ内核分裂生成物の存在量については、半減期の長い核種の放出が支配的であることを考えて、破損した燃料棒内の全蓄積量に対して希ガス (Kr-85) 及びよう素 (I-129) それぞれ 30% とする。
- d. 放出された希ガスは、全量が構内用輸送容器から大気中へ移行するものとする。
- e. 放出されたよう素は、全量が構内用輸送容器から大気中へ移行するものとし、構内

用輸送容器に内包する水による除去は無いものとする。

(3) 評価結果

上記の評価条件に基づいて計算した核分裂生成物の大気中への放出量は表 4.1 の通りである。

表 4.1 核分裂生成物の大気中への放出量

核分裂生成物	放出量
希ガス	約 4.5×10^{14} Bq
よう素	約 2.0×10^9 Bq

4.3.2. 線量当量の評価

(1) 評価の前提

大気中へ放出される核分裂生成物は、地上放出されるものとし、これによる実効線量の計算は、次の仮定に基づいて行う。

- a. 敷地境界外の地表空气中濃度は、設置許可申請書添付書類六の「5.5 安全解析に使用する気象条件」に記述される相対濃度に核分裂生成物の全放出量を乗じて求める。

なお、相対濃度 (χ/Q) は設置許可申請書記載の主蒸気管破断（地上放出）の値 3.4×10^{-5} S/m³ を適用する。

- b. 敷地境界外の希ガスによる γ 線空気吸収線量は、設置許可申請書添付書類六の「5.5 安全解析に使用する気象条件」に記述される相対線量に希ガスの全放出量を乗じて求める。

なお、相対線量 (D/Q) は設置許可申請書記載の主蒸気管破断（地上放出）の値 3.4×10^{-19} Gy/Bq を適用する。

(2) 評価方法

敷地境界外における実効線量は、次に述べる内部被ばくによる実効線量及び外部被ばくによる実効線量の和として計算する。

よう素の内部被ばくによる実効線量 H_I (Sv) は、(4.1)式で計算する。

$$H_I = R \cdot H \cdot \chi / Q \cdot Q_I \cdots \cdots \cdots (4.1)$$

ここで、

- R : 呼吸率 (m³/s) 「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」の活動中の呼吸率を秒当たりに換算して用いる。
(小児 : 0.31m³/h, 成人 : 1.2m³/h)
- H : よう素 (I-129) を 1Bq 吸入した場合の実効線量は ICRP Publ. 72 の値を用いる。
(小児 : 2.0×10^{-7} Sv/Bq, 成人 : 9.6×10^{-8} Sv/Bq)

χ/Q : 相対濃度 (s/m³)
 Q_I : よう素の大気放出量 (Bq)

希ガスの γ 線外部被ばくによる実効線量 H_γ (Sv) は, (4.2)式で計算する。

$$H_\gamma = K \cdot D/Q \cdot Q_K \cdot E_\gamma / 0.5 \cdots \cdots \cdots (4.2)$$

ここで,

K : 空気吸収線量から実効線量への換算係数 (1Sv/Gy)
 D/Q : 相対線量 (Gy/Bq)
 Q_K : 希ガスの大気放出量 (Bq)
 E_γ : γ 線実効エネルギー「被ばく計算に用いる放射線エネルギー等について」を用いる。(0.0022MeV)

また, 希ガスの β 線外部被ばくによる実効線量 H_β (Sv) は, (4.3)式で計算する。

$$H_\beta = 6.2 \times 10^{-14} \cdot \chi/Q \cdot Q_K \cdot E_\beta \cdot W_{TS} \cdots \cdots \cdots (4.3)$$

ここで,

χ/Q : 相対濃度 (s/m³)
 Q_K : 希ガスの大気放出量 (Bq)
 E_β : β 線実効エネルギー「被ばく計算に用いる放射線エネルギー等について」を用いる。(0.251MeV)
 W_{TS} : 皮膚の組織荷重係数は ICRP Publ.60 の値を用いる。(0.01)

(3) 評価結果

上記の評価前提及び方法に基づき敷地境界外の実効線量を評価した結果は表 4.2 の通りである。

表 4.2 構内用輸送容器の落下時の実効線量

	小児	成人
よう素の γ 線による実効線量	約 1.2×10^{-3} mSv	約 2.2×10^{-3} mSv
希ガスの γ 線による実効線量	約 6.7×10^{-4} mSv	約 6.7×10^{-4} mSv
希ガスの β 線による実効線量	約 2.4×10^{-3} mSv	約 2.4×10^{-3} mSv
実効線量 (合計)	約 4.3×10^{-3} mSv	約 5.3×10^{-3} mSv

上記の値から判断して, 本事象による周辺の公衆に与える放射線被ばくのリスクは十分に小さいものと考えられる。

構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（３号機）

1. ３号機の構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度

1.1. 構内用輸送容器の概要

構内用輸送容器は、福島第一原子力発電所３号機使用済燃料プールに貯蔵されている使用済燃料及び新燃料（以下、「燃料」という。）の共用プールへの輸送に使用する。

これまで、３号機から共用プールへの燃料輸送には、NFT-22B 型容器を使用してきたが、３号機に新設するクレーン（定格荷重：50ton）では NFT-22B 型容器（総重量：約 91ton）を取扱えないことから、新たに設計・製造する容器である。

1.1.1. 構内用輸送容器の構成

構内用輸送容器は、容器本体、蓋、バスケット及びトラニオンにより構成される。構内用輸送容器の概要図を図1-1-1に示す。

（１）容器本体

容器本体は胴、底板、中性子遮へい体、外筒で構成される。低合金鋼の胴及び底板と蓋で放射性物質を閉じ込める耐圧バウンダリを構成する。

また、主に胴及び底板の低合金鋼がガンマ線遮へい機能を有し、胴と外筒の間および底板の底部に配置されたレジンが中性子遮へい機能を有する。

（２）蓋

蓋は一次蓋及び二次蓋で構成する。

一次蓋はステンレス鋼であり、複数本のボルトで容器本体フランジ面に取り付けられる。一次蓋にはゴム製のＯリングを設け容器本体フランジ面との密封性を確保する構造となっている。一次蓋のステンレス鋼がガンマ線遮へい機能を有する。

二次蓋もステンレス鋼であり、一次蓋の上から複数本のボルトで容器本体フランジ面に取り付けられる。二次蓋にもゴム製のＯリングを設け、容器本体フランジ面との密封性を確保できる構造となっている。

（３）バスケット

バスケットは容器内において燃料集合体を所定の位置に保持するための構造物である。また、未臨界確保のためバスケットにボロン添加ステンレス鋼を使用し、バスケット外周にボロン添加アルミニウム合金板を設置している。

燃料集合体はバスケット内に装填したステンレス鋼製の使用済燃料収納缶（小）に収

納する。

(4) トラニオン

トラニオンは容器のクレーンでの取扱い（吊上げ）及び、構内輸送時の固縛のために容器上部及び下部にボルトで取付ける。

取扱い時（縦姿勢）は容器と吊具との接続を二重化して落下を防止するために、上部トラニオンは二対（4 個）設ける。

構内輸送時（横姿勢）では上部トラニオンと下部トラニオンで架台等に固定するため、下部トラニオンは一对（2 個）設ける。

1.1.2. 設備仕様

1.1.2.1. 構内用輸送容器の仕様

構内用輸送容器の仕様を表1-1-1に示す。

表 1-1-1 構内用輸送容器の仕様

項目	数値等
重量（t） （燃料を含む）	約 46.3
全長（m）	約 5.6
外径（m）	約 1.4
収納体数（体）	7
基数（基）	2※1

※1：バスケット（7体収納）は3個有する

1.1.2.2. 構内用輸送容器に収納する燃料仕様

1.1.1.(3)に記載のとおり、バスケットに装填したステンレス鋼製の使用済燃料収納缶（小）（内寸153mm）に燃料を装填して共用プールに輸送する。

収納対象とする燃料は、3号機使用済燃料プールに貯蔵されている表1-1-2に示す燃料とする。

なお、3号機使用済燃料プールには瓦礫等が落下しており、燃料が破損している可能性があることから、破損燃料については燃料の破損状態に応じて別途検討する。

また、燃料の健全性確認及び取り扱いについては燃料取り出し開始までに、「添付資料－1－3 燃料の健全性確認及び取り扱いに関する説明書」で説明する。

表1-1-2 3号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料の仕様

	使用済燃料				新燃料
燃料タイプ	8×8燃料	新型 8×8 ジルコニウムライ 燃料	高燃焼度 8×8 燃料	9×9燃料 (A型)	9×9燃料 (A型)
貯蔵体数	6	36	148	324	52
最高燃焼度 (MWd/t)	34, 100	39, 300	43, 900	51, 300	—
最短冷却日 数(日)※ ²	10, 642	6, 488	2, 738	1, 716	—

※2：平成27年3月1日時点での冷却期間

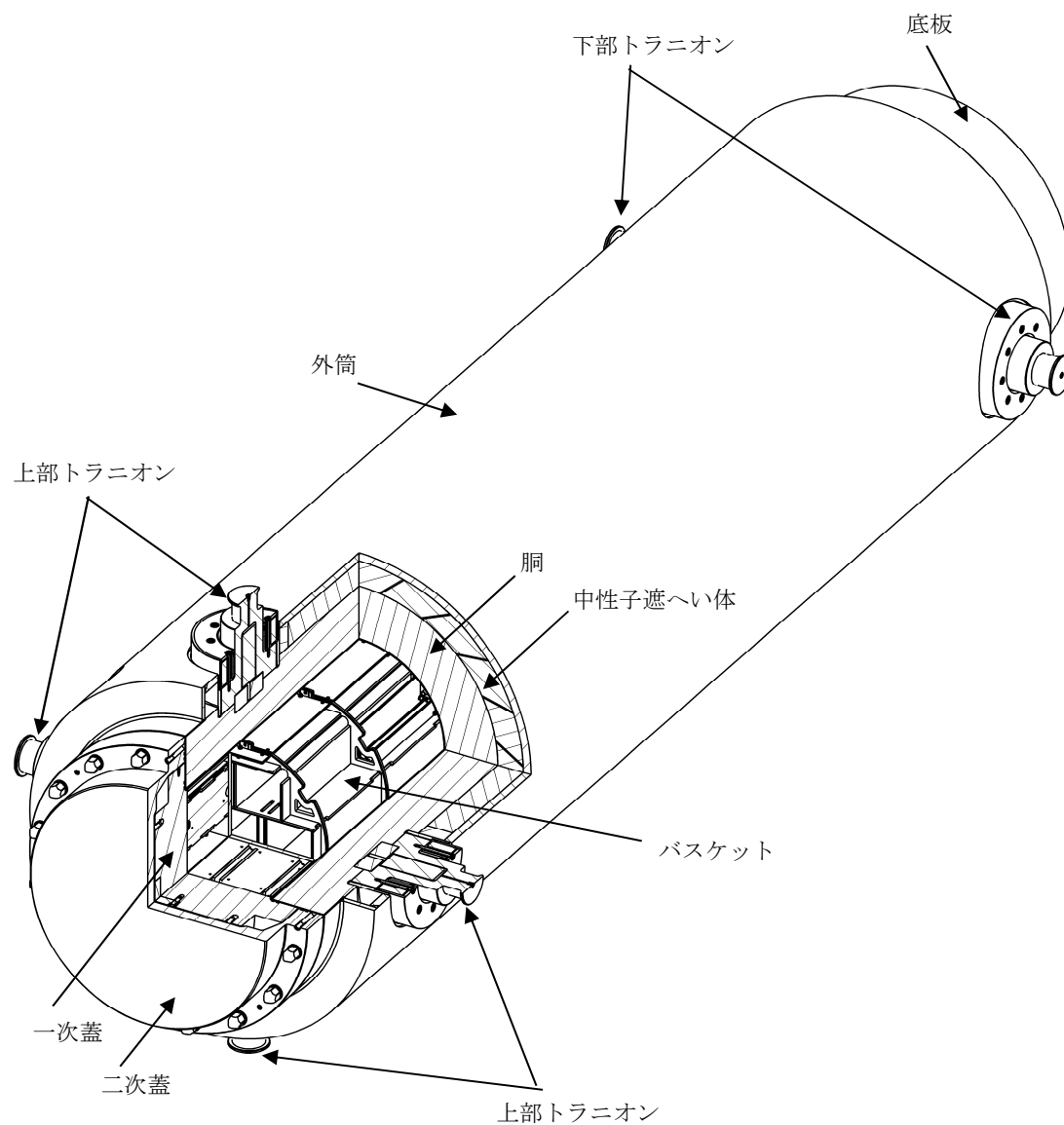


図 1-1-1 構内用輸送容器 概要図

1.2. 評価の基本方針

構内用輸送容器が本文 2.11.1.3 項の設計方針に示される除熱，密封，遮へい及び臨界防止の安全機能を有するとともに，本文 2.11.1.8 項の構造強度及び耐震性に示される構造強度を有する設計であることを確認する。

表 1-2-1 に評価すべき各安全機能に対する安全設計・評価の方針を示す。

表1-2-1 構内用輸送容器安全評価の基本方針

項目	設計方針	評価対象	評価方針	備考
構造強度	構内用輸送容器は取扱中における衝撃、熱等に耐え、かつ、容易に破損しない設計とする。 構内用輸送容器は、設計、材料の選定、製作及び検査について適切と認められる規格及び基準によるものとする。	構内用輸送容器	構内用輸送容器の取扱手順から設計事象を抽出し、その荷重条件で発生する応力を評価する。 構造強度評価手法は、JSME S NC1-2005/2007設計・建設規格を準用する。	
除熱機能	使用済燃料の健全性及び構成部材の健全性が維持できるように、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去できる設計とする。	燃料被覆管	収納する燃料から発生する最大崩壊熱量で容器各部及び燃料の温度を評価する。	
		構内用輸送容器		
密封機能	周辺公衆及び放射線業務従事者に対し、放射線被ばく上の影響を及ぼすことのないよう、使用済燃料が内包する放射性物質を適切に閉じ込める設計とする。	構内用輸送容器	構造強度及び除熱機能の評価結果から、設計事象において、容器密封部の健全性が維持されることを評価する。	
遮へい機能	内部に燃料を入れた場合に放射線障害を防止するため、使用済燃料の放射線を適切に遮へいする設計とする。	構内用輸送容器	収納する燃料から発生する線源強度で容器表面及び表面から1 mの線量当量率を評価する。	
臨界防止機能	想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止できる設計とする。	構内用輸送容器	収納する燃料の濃縮度等の条件を保守的に設定して実効増倍率を評価する。	

1.3. 構造強度評価

1.3.1. 基本的な考え方

構内用輸送容器の構造強度の評価部位は、安全上重要な部位として容器本体（胴及び底板）、蓋、バスケット及び支持機能を有するトラニオンとする。

構造強度評価手法は、JSME S NC1-2005/2007 設計・建設規格（以下、「設計・建設規格」という。）を準用する。各評価対象部位の適用基準・規格を表 1-3-1 に示す。

表 1-3-1 構造強度に係る適用基準・規格

評価対象 部位	設計・建設規格 機器区分	構造強度 評価方法	考え方
容器本体、蓋	クラス 3 容器	クラス 1 容器の規定を 準用	容器本体及び蓋は設計・建設規格 GNR-1210 及び GNR-1220 の機器等の区分の定義より、クラス 3 容器に区分されると考えられる。 圧力荷重についてはクラス 3 容器における規格計算式で評価することができるが、熱荷重や取扱時の衝撃荷重等の各種の負荷荷重が発生することから、これらの荷重については、応力解析によって発生応力を求めて評価する必要がある。 したがって、構造強度評価手法は、同様な「解析による設計」の考え方が採用されているクラス 1 容器を準用する。
バスケット	ノンクラス	炉心支持構造物の規定 を準用	バスケットは設計・建設規格 GNR-1210 及び GNR-1220 の機器等の区分の定義に該当しないと考えられる。 しかし、容器内において燃料を支持する部材であるため、構造強度評価手法は、炉心支持構造物を準用する。
トラニオン	クラス 3 支持構 造物	クラス 1 支持構造物の 規定を準用	トラニオンは容器をクレーンで取扱うための部位であり、輸送時は容器を支持することから、設計・建設規格 GNR-1210 及び GNR-1220 の機器等の区分の定義より、クラス 3 支持構造物に区分されると考えられる。 しかし、容器本体との整合を取り、構造強度評価手法はクラス 1 支持構造物を準用する。

1.3.2. 設計事象の抽出

JSME S FA1-2007 金属キャスク構造規格の考え方に基づいて、構内用輸送容器の設計事象として以下を抽出した。

なお、設計事象の抽出にあたっては、図 1-3-1 に示すハンドリングフローに基づき、構内用輸送容器の取扱い及び共用プールまでの輸送において想定される起因事象に着目し、発生防止対策を考慮して事象の発生の可能性を検討した。設計事象の抽出結果を表 1-3-2 に示す。

1) 設計事象Ⅰ

容器本体及び蓋には、収納する燃料の発熱により内圧及び熱による応力が発生する。また、取扱い時及び構内輸送時の加速度により収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

バスケットには、取扱い時及び構内輸送時の加速度により収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

トラニオンには取扱い時の吊上げによる応力、及び構内輸送時における固縛荷重による応力が発生する。

2) 設計事象Ⅱ

容器本体及び蓋には、輸送架台への衝突（取扱いモード No. 3）、搬送架台への衝突（取扱いモード No. 7）、転倒防止台座への衝突（取扱いモード No. 9）及びキャスクピットへの衝突（取扱いモード No. 10）の加速度における収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

バスケットには、輸送架台への衝突（取扱いモード No. 3）、搬送架台への衝突（取扱いモード No. 7）、転倒防止台座への衝突（取扱いモード No. 9）及びキャスクピットへの衝突（取扱いモード No. 10）の加速度における収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

トラニオンには、輸送架台への衝突（取扱いモード No. 3）及び搬送架台への衝突（取扱いモード No. 7）の加速度における荷重がかかり、応力が発生する。

3) 設計事象Ⅲ及び設計事象Ⅳ

構内用輸送容器を取扱う設備及び運用においては、クレーンワイヤ及び吊具の二重化、始業前の機器の点検を実施することから、ハンドリングフローから抽出される事象のうち、構内用輸送容器の安全機能を著しく損なう事象であって、一般公衆の放射線被ばくの観点からみて重要と考えられる事象はない。

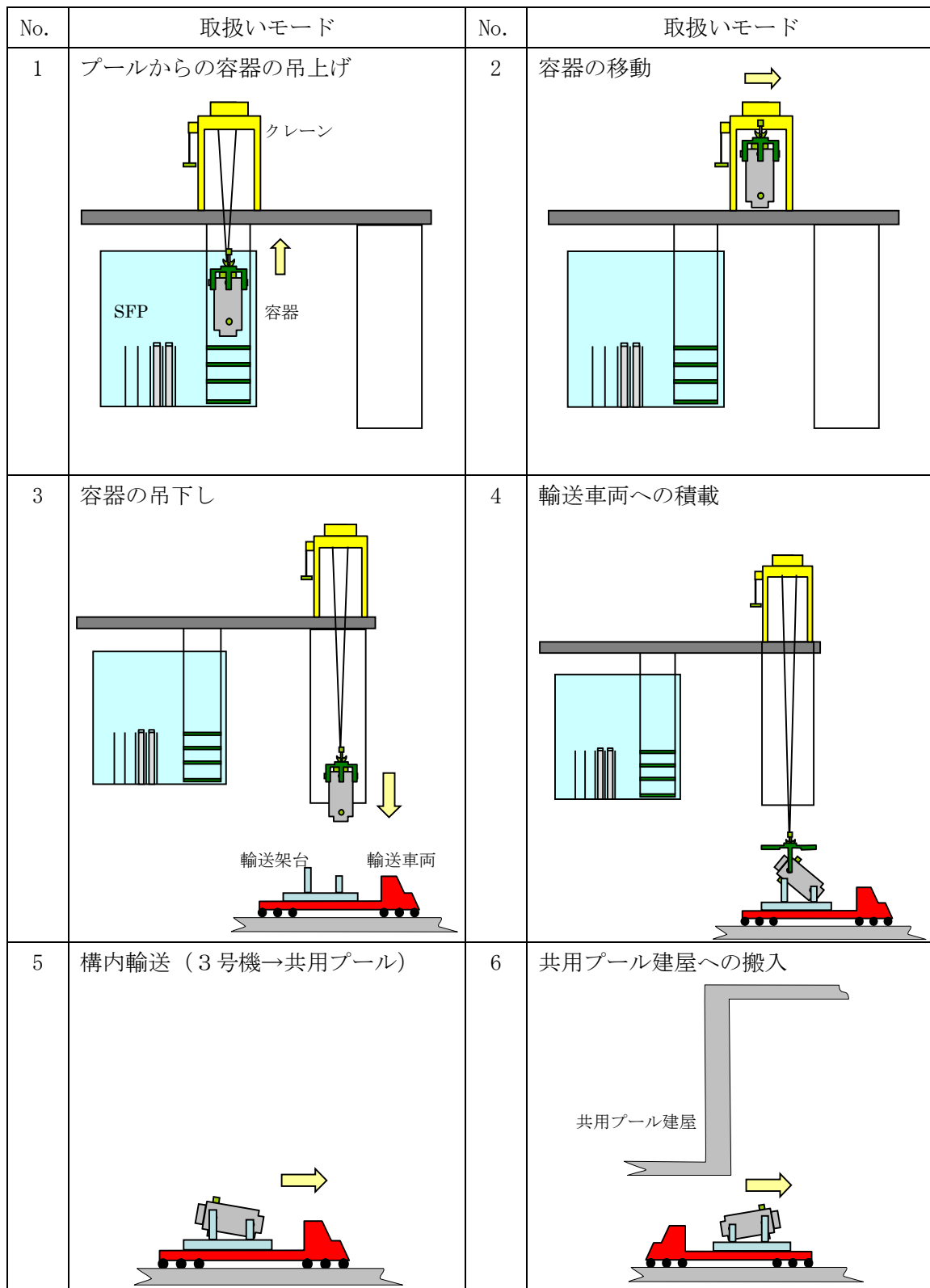


図 1-3-1 構内用輸送容器のハンドリングフロー (1/2)

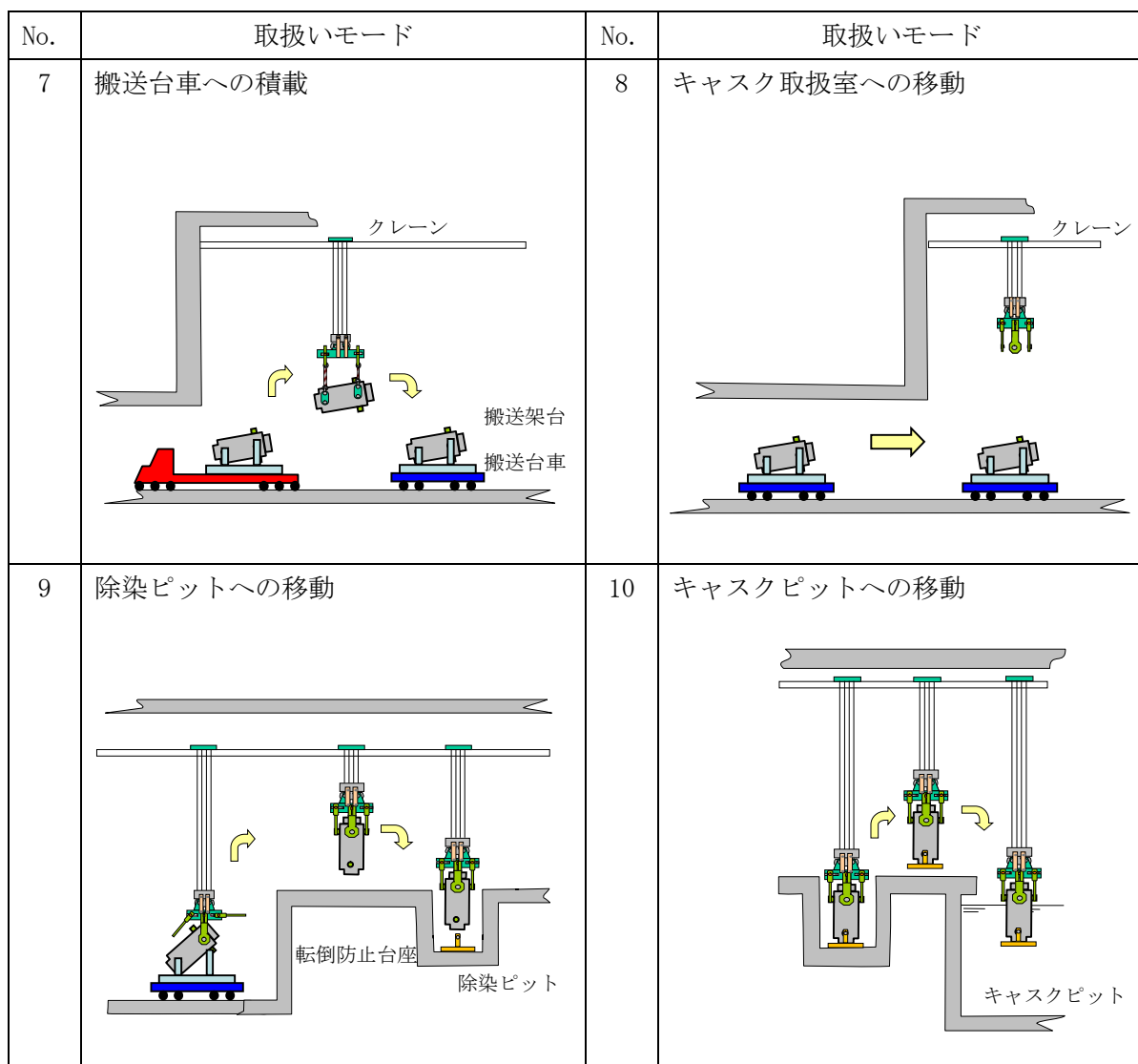


図 1-3-1 構内用輸送容器のハンドリングフロー (2/2)

表 1-3-2 設計事象の抽出 (1/2)

起因事象		原因	発生の可能性・防止策	発生の有無	想定シナリオ	抽出の要否
構内用 輸送容器 の落下	輸送車両取扱い時の落下 (No. 5)	固定ボルトの取付け不良	以下の対策，設計により容器の落下を防止する ● 容器は輸送車両に複数のボルトで固縛されていることを確認 ● 容器は輸送車両で徐行して輸送 ● 輸送経路は輸送に関係する人及び車両以外の立入を制限	×		×
	搬送台車取扱い時の落下 (No. 8)	固定ボルトの取付け不良	以下の対策，設計により容器の落下を防止する ● 容器は搬送台車に複数のボルトで固縛されていることを確認 ● 搬送台車はレール上を走行し，走行範囲インターロック及び障害物検知装置を有している	×		×
	クレーン取扱時の落下 (No. 1, 2, 3, 4, 7, 9, 10)	吊具の取付け不良 (3号機)	以下の対策，設計により容器の落下を防止する ● 吊具の二重化 ● 始業前の吊具点検 ● 取付け後の外れ止めを設置 ● 取付け状態の ITV による目視確認 ● 取付け状態の吊具アーム部のリミットスイッチによる確認 ● 地切り後の ITV による取付け状態の確認，クレーンの荷重確認	×		×
		吊具の取付け不良 (共用プール)	以下の対策，設計により容器の落下を防止する ● 吊具の二重化 ● 始業前の吊具点検 ● 取付け後の外れ止めを設置 ● 取付け状態の作業員による確認	×		×
		ワイヤーロープ及び吊具の破断 (3号機)	以下の対策，設計により容器の落下を防止する ● ワイヤーロープ及び吊具の二重化 ● 始業前のワイヤーロープ，吊具点検	×		×
		ワイヤーロープ及び吊具の破断 (共用プール)	以下の対策，設計により容器の落下を防止する ● ワイヤーロープ及び吊具の二重化 ● 始業前のワイヤーロープ，吊具点検	×		×

表 1-3-2 設計事象の抽出 (2/2)

起回事象		原因	発生の可能性・防止策	発生の有無	想定シナリオ	抽出の要否
構内用 輸送容器 の衝突	クレーン移動時 (走行, 横行) の衝突 (No. 2, 7, 9, 10)	ブレーキの故障 (3号機)	以下の対策, 設計により容器は他の構築物等へ衝突を防止する ● I T Vにより移動経路に障害物がないことの確認 ● 走行及び横行それぞれの制御盤 (シーケンサ、インバータ等) による停止機能の作動	×		×
		ブレーキの故障 (共用プール)	以下の対策, 設計により容器は他の構築物等へ衝突を防止する ● 容器移動前に移動経路に障害物がないことの確認 ● 走行及び横行それぞれの制御盤 (シーケンサ、インバータ等) による停止機能の作動	×		×
		操作員の誤操作 (3号機)	以下の対策, 設計により構内輸送容器は他の構築物等へ衝突を防止する ● クレーンの横行走行範囲に制限機能を設定 ● I T Vにより移動経路に障害物がないことの確認	×		×
		操作員の誤操作 (共用プール)	以下の対策, 設計により構内輸送容器は他の構築物等へ衝突を防止する ● クレーンの横行走行範囲に制限機能を設定 ● 容器移動前に移動経路に障害物がないことの確認	×		×
	クレーン吊下げ 時の衝突 (垂直 吊り) (No. 3, 4, 9, 10)	ブレーキの 故障	以下の設計により容器の輸送架台, 転倒防止台座あるいはキャスクピットへ衝突を防止する ● 巻上げ装置ブレーキを二重化	×		×
		操作員の 誤操作	吊下げ時の誤操作により, 容器は巻下げ速度で輸送架台, 転倒防止台座あるいはキャスクピットに衝突する可能性がある。	○	クレーンの最大巻下げ速度 0.025m/s で, 構内用輸送容器が輸送架台, 転倒防止台座, キャスクピットに衝突する場合を, 設計事象として抽出。	○
	クレーン吊下げ 時の衝突 (水平 吊り) (No. 7)	ブレーキの 故障	以下の設計により容器の搬送架台へ衝突を防止する ● 巻上げ装置ブレーキを二重化	×		×
		操作員の 誤操作	吊下げ時の誤操作により, 容器は巻下げ速度で搬送架台に衝突する可能性がある。	○	クレーンの最大巻下げ速度 0.025m/s で, 容器が搬送架台に衝突する場合を, 設計事象として抽出。	○

1.3.3. 設計事象の荷重条件

前項で抽出した設計事象について、構内用輸送容器に発生する荷重を評価する。

1) 内圧

内圧は、除熱評価結果から設定した容器内部水の温度（℃）から、下記の通り設定した。

① 容器内部水及び気体の熱膨張を考慮した場合の内圧

(a) 容器本体及び一次蓋の内圧

容器本体及び一次蓋の内圧は 0.6 (MPa) とする。

(b) 二次蓋の内圧

二次蓋の内圧は 0.45 (MPa) とする。

② 容器内部水及び気体の熱膨張に加えて、燃料破損による燃料棒内のガス放出を考慮した場合の内圧（最高使用圧力）

(a) 容器本体及び一次蓋の最高使用圧力

容器本体及び一次蓋の最高使用圧力は 2.0 (MPa) とする。

(b) 二次蓋の最高使用圧力

二次蓋の最高使用圧力は 1.4 (MPa) とする。

③ 試験時圧力

(a) 容器本体及び一次蓋の試験時圧力

容器本体及び一次蓋の試験時圧力は 3.0 (MPa) とする。

(b) 二次蓋の試験時圧力

二次蓋の試験時圧力は 2.1 (MPa) とする。

2) 熱荷重

構内用輸送容器に発生する熱応力は除熱評価結果より得られた温度分布を用いて評価する。

3) 設計事象Ⅰの加速度

取扱い時及び構内輸送時の加速度

①取扱い時（吊上げ時）

構内用輸送容器を吊り上げる際に発生する加速度は以下のとおり。なお、吊上げ時の姿勢は縦姿勢である。

- ・容器軸方向加速度：1.32 (G)

②構内輸送時

構内用輸送容器を構内輸送する際に発生する加速度は以下のとおり。なお、構内輸送時の姿勢は横姿勢である。

- ・前後方向加速度：2.0 (G)

- ・上方向加速度：2.0 (G)
- ・下方向加速度：3.0 (G) (自重を考慮)
- ・左右方向加速度：1.0 (G)

4) 設計事象Ⅱの加速度の導出

事象発生時に構内用輸送容器が有する運動エネルギーを被衝突物（輸送架台、搬送架台、転倒防止台座）の弾性により吸収するとして、発生する衝撃加速度を計算した。衝撃加速度の計算方法と結果を以下に示す。

①輸送架台への衝突（取扱いモード No. 3）

縦姿勢で構内用輸送容器の下部トラニオンが輸送架台後部支持脚にクレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合について評価する。

構内用輸送容器の有する運動エネルギーを輸送架台後部支持脚のひずみエネルギーで吸収するとして、（1）式で構内用輸送容器に生じる衝撃加速度を求める。

$$\alpha = 1 + \sqrt{1 + \frac{K \cdot V^2}{m \cdot g^2}} \quad (1)$$

ただし、 α ：衝撃加速度 (G)

K ：輸送架台後部支持脚の圧縮変形バネ定数 ($2.882 \times 10^{10} \text{N/m}$)

V ：クレーンの巻下げ速度 (0.025m/s)

m ：構内用輸送容器の質量 ($4.63 \times 10^4 \text{kg}$)

g ：重力加速度 (9.8m/s^2)

発生する衝撃加速度は 3.25G となり、余裕をみて 4.0G を評価加速度とする。

②構内用輸送容器の搬送台車上の搬送架台への衝突（取扱いモード No. 7）

横姿勢で構内用輸送容器を搬送台車上の搬送架台に積載する際に、構内用輸送容器が搬送台車上の搬送架台に共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合について評価する。

構内用輸送容器を剛体として、構内用輸送容器の有する運動エネルギーを搬送架台支持脚のひずみエネルギーで吸収するとして、（1）式で構内用輸送容器に生じる衝撃加速度を求める。

ただし、 K ：搬送架台前後部支持脚の圧縮変形バネ定数 ($5.738 \times 10^{10} \text{N/m}$)

V ：共用プールの天井クレーンの巻下げ速度 (0.025m/s)

発生する衝撃加速度は 4.01G となり、余裕をみて 5.0G を評価加速度とする。

③転倒防止台座への衝突及びキャスクピット床面への衝突（取扱いモード No. 9, 10）

縦姿勢で構内用輸送容器が転倒防止台座に共用プールの天井クレーンの巻下げ速

度 (0.025m/s) で衝突する場合及び、転倒防止台座を取り付けた構内用輸送容器がキャスクピット床面に共用プールの天井クレーンの巻下げ速度 (0.025m/s) で衝突する場合について評価する。

床面を剛体として、容器の有する運動エネルギーを転倒防止台座のひずみエネルギーで吸収するとして、(1) 式で構内用輸送容器に生じる衝撃加速度を求める。

ただし、 K ：転倒防止台座の圧縮変形バネ定数 ($4.407 \times 10^{11} \text{N/m}$)

V ：共用プールの天井クレーンの巻下げ速度 (0.025m/s)

発生する衝撃加速度は 8.93G となり、余裕をみて 9.0G を評価加速度とする。

5) 各設計事象における荷重条件

構内用輸送容器の各設計事象における荷重条件を表 1-3-3～表 1-3-5 に示す。なお、構内用輸送容器の設計事象及び荷重条件については、抽出された事象のうち最大の荷重が作用する場合について示す。

表 1-3-3 荷重条件（容器本体及び蓋）（1/2）

設計事象	代表事象	包絡される事象	荷重条件
設計条件	設計時	—	最高使用圧力：2.0MPa （二次蓋は 1.4MPa） ボルト初期締付け力 以下の荷重のうち最大となるもの ・ 構内輸送時荷重 ・ 吊上げ時荷重 ・ 搬送架台への衝突時荷重 ・ 転倒防止台座への衝突時荷重
I	構内輸送時	—	内圧：0.6MPa （二次蓋は 0.45MPa） ボルト初期締付け力 構内輸送時荷重 上方向：2.0G 下方向：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G 熱荷重
	吊上げ時	—	内圧：0.6MPa （二次蓋は 0.45MPa） ボルト初期締付け力 吊上げ荷重 下方向：1.32G （自重を考慮） 熱荷重

表 1-3-3 荷重条件（容器本体及び蓋）（2/2）

設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件
Ⅱ	搬送架台への衝突 （取扱いモード No. 7）	—	内圧：0.6MPa （二次蓋は 0.45MPa） ボルト初期締付け力 搬送架台への衝突時荷重 下方向：5.0G （自重を考慮） 熱荷重
	転倒防止台座への衝突 （取扱いモード No. 9） キャスクピットへの衝突 （取扱いモード No. 10）	輸送架台への衝突 （取扱いモード No. 3）	内圧：0.6MPa （二次蓋は 0.45MPa） ボルト初期締付け力 転倒防止台座への衝突時荷重 下方向：9.0G （自重を考慮） 熱荷重
試験 状態	試験時	—	試験時圧力：3.0MPa （二次蓋は 2.1MPa） ボルト初期締付け力

表 1-3-4 荷重条件（バスケット）

設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件
設計 条件	設計時	—	搬送架台への衝突時荷重*1 下方向：5.0G （自重を考慮）
I	構内輸送時	吊上げ時	構内輸送時荷重 上方向：2.0G 下方向：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G
II	搬送架台への衝突 （取扱いモード No. 7）	—	搬送架台への衝突時荷重 下方向：5.0G （自重を考慮）
	転倒防止台座への衝突 （取扱いモード No. 9） キャスクピットへの衝突 （取扱いモード No. 10）	輸送架台への衝突 （取扱いモード No. 3）	転倒防止台座への衝突時荷重 下方向：9.0G （自重を考慮）

*1 設計時のうち荷重条件が最も厳しいのは搬送架台への衝突荷重である

表 1-3-5 荷重条件（トラニオン）

構内用輸送容器の評価事象及び荷重条件			
設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件
Ⅰ	構内輸送時	—	構内輸送時荷重 上方向：2.0G 下方向：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G
	吊上げ時	—	吊上げ荷重 下方向：1.32G （自重を考慮）
Ⅱ	輸送架台への衝突 （取扱いモード No. 3）	搬送架台への衝突 （取扱いモード No. 7） ^{*1}	輸送架台への衝突時荷重 下方向：4.0G （自重を考慮）

*1 輸送架台への衝突（取扱いモード No. 3）は垂直姿勢で衝突するためトラニオンの荷重負担本数は2本であるのに対して、搬送架台への衝突（取扱いモード No. 7）では横姿勢で衝突するためトラニオンの荷重負担本数は4本である。このため、構内用輸送容器への荷重は取扱いモード No. 7の方が大きいものの、トラニオンあたりに作用する荷重は取扱いモード No. 3の方が大きくなる。以上から、設計事象としては取扱いモード No. 3が抽出される。

1.3.4. 設計基準

1) 容器本体及び蓋

容器本体及び蓋は設計・建設規格 クラス 1 容器に関する規定 PVB-3000 に準じて評価を実施する。容器本体及び蓋の許容応力を表 1-3-6～表 1-3-11 に示す。

① 設計条件における許容応力

設計条件における一次応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 一次一般膜応力 (P_m)

$$P_m \leq S_m$$

(b) 一次局部膜応力 (P_L)

$$P_L \leq 1.5S_m$$

(c) 一次膜＋一次曲げ応力 (P_L+P_b)

$$P_L+P_b \leq 1.5S_m$$

(d) ボルトの平均引張応力 (σ_m)

$$\sigma_m \leq S_m$$

② 設計事象 I, II における許容応力

設計事象 I, II における応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 一次＋二次応力 (P_L+P_b+Q)

$$P_L+P_b+Q \leq 3S_m$$

(b) 平均せん断応力 (τ)

$$\tau \leq 0.6S_m$$

(c) 平均支圧応力 (σ_b)

$$\sigma_b \leq S_y$$

(d) 圧縮応力 (σ_c)

$$\sigma_c \leq B$$

(e) ボルトの平均引張応力 (σ_m)

$$\sigma_m \leq 2S_m$$

(f) ボルトの平均引張応力＋曲げ応力 ($\sigma_m + \sigma_b$)

$$\sigma_m + \sigma_b \leq 3S_m$$

③ 試験状態における許容応力

試験状態における一次応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 一次一般膜応力 (P_m)

$$P_m \leq 0.9S_y$$

(b) 一次局部膜応力 (P_L)

$$P_L \leq 1.5(0.9S_y)$$

- (c) 一次一般膜＋一次曲げ応力 (P_m+P_b)

$$P_m+P_b \leq 1.5 (0.9S_y)$$

2) バスケット

バスケットは設計・建設規格 炉心支持構造物に関する規定 CSS-3000 に準じて評価を実施する。バスケットの許容応力を表 1-3-12 に示す。

① 設計条件における許容応力

設計条件における一次応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

- (a) 一次一般膜応力 (P_m)

$$P_m \leq S_m$$

- (b) 一次一般膜＋一次曲げ応力 (P_m+P_b)

$$P_m+P_b \leq 1.5S_m$$

② 設計事象 I，II における許容応力

設計事象 I，II における応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

- (a) 一次＋二次応力 (P_m+P_b+Q)

$$P_m+P_b+Q \leq 3S_m$$

- (b) 平均せん断応力 (τ)

$$\tau \leq 0.6S_m$$

- (c) 平均支圧応力 (σ_b)

$$\sigma_b \leq S_y$$

- (d) 軸圧縮応力 (σ_c)

$$\sigma_c \leq f_c$$

3) トラニオン

トラニオン及びトラニオン取付けボルトは以下に示すとおり，設計・建設規格 クラス 1 支持構造物に関する規定 SSB-3000 に準じて評価を実施する。

設計事象 I，II におけるトラニオン及びトラニオン取付けボルトの許容応力を表 1-3-13，表 1-3-14 に示す。

① トラニオンの一次応力の許容応力

一次応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

- (a) 引張応力 (σ_t)

$$\sigma_t \leq f_t$$

- (b) せん断応力 (σ_s)

$$\sigma_s \leq f_s$$

(c) 圧縮応力 (σ_c)

$$\sigma_c \leq f_c$$

(d) 曲げ応力 (σ_b)

$$\sigma_b \leq f_b$$

(e) 組合せ応力 (σ_T)

$$\sigma_T \leq f_t$$

② トラニオンの一次＋二次応力の許容応力

一次＋二次応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 引張応力及び圧縮応力 (σ_t)

$$\sigma_t \leq 3f_t$$

(b) せん断応力 (σ_s)

$$\sigma_s \leq 3f_s$$

(c) 曲げ応力 (σ_b)

$$\sigma_b \leq 3f_b$$

③ トラニオン取付けボルトの許容応力

応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 引張応力 (σ_t)

$$\sigma_t \leq f_t$$

表 1-3-6 胴及び底板の許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	一次一般膜応力	P_m	123	
	一次局部膜応力	P_L	184	
	一次膜＋曲げ応力	P_L+P_b	184	
設計事象 I , II	一次＋二次応力	P_L+P_b+Q	369	
	平均せん断応力	τ	73	
	平均支圧応力	σ_b	184	
	圧縮応力	σ_c	95	
試験状態	一次一般膜応力	P_m	165	
	一次局部膜応力	P_L	247	
	一次一般膜＋曲げ応力	P_m+P_b	247	

材質： GLF1 相当材 (ASTM A350M Gr. LF5 Cl. 1)

設計温度： 135 (°C)

表 1-3-7 一次蓋の許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	一次一般膜応力	P_m	137	
	一次局部膜応力	P_L	205	
	一次膜＋曲げ応力	P_L+P_b	205	
設計事象 I , II	一次＋二次応力	P_L+P_b+Q	411	
試験状態	一次一般膜応力	P_m	153	
	一次局部膜応力	P_L	229	
	一次一般膜＋曲げ応力	P_m+P_b	229	

材質： SUSF304

設計温度： 100 (°C)

表 1-3-8 ポートカバーの許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	一次一般膜応力	P_m	137	
	一次局部膜応力	P_L	205	
	一次膜＋曲げ応力	P_L+P_b	205	
設計事象 I , II	一次＋二次応力	P_L+P_b+Q	411	
試験状態	一次一般膜応力	P_m	143	
	一次局部膜応力	P_L	214	
	一次一般膜＋曲げ応力	P_m+P_b	214	

材質： SUS304

設計温度： 135 (°C)

表 1-3-9 二次蓋，二次蓋ポートカバーの許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	一次一般膜応力	P_m	137	
	一次局部膜応力	P_L	205	
	一次膜＋曲げ応力	P_L+P_b	205	
設計事象 I , II	一次＋二次応力	P_L+P_b+Q	411	
試験状態	一次一般膜応力	P_m	155	
	一次局部膜応力	P_L	232	
	一次一般膜＋曲げ応力	P_m+P_b	232	

材質： SUSF304

設計温度： 95 (°C)

表 1-3-10 一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルトの許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	平均引張応力	σ_m	216	
設計事象 I , II	平均引張応力	σ_m	432	
	平均引張応力＋曲げ応力	$\sigma_m + \sigma_b$	648	

材質： SUS630 H1150

設計温度： 135 (°C)

表 1-3-11 二次蓋ポートカバーボルトの許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	平均引張応力	σ_m	223	
設計事象 I, II	平均引張応力	σ_m	446	
	平均引張応力+曲げ応力	$\sigma_m + \sigma_b$	669	

材質： SUS630 H1150

設計温度： 95 (°C)

表 1-3-12 バスケットの許容応力

設計事象	応力分類		記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	一次一般膜応力		P_m	133	
	一次一般膜+曲げ応力		P_m+P_b	199	
設計事象 I, II	一次+二次応力		P_m+P_b+Q	399	
	平均せん断応力		τ	79	
	平均支圧応力		σ_b	150	
	軸圧縮 応力	バスケット 長手方向	σ_c	34	
		上記以外		84	

材質： ボロン添加ステンレス鋼

設計温度： 170 (°C)

表 1-3-13 トラニオンの許容応力

設計事象	応力分類		記号	許容値 [MPa]	備考
設計事象Ⅰ，Ⅱ	一次応力	引張応力	σ_t	394	
		せん断応力	σ_s	227	
		圧縮応力	σ_c	383	
		曲げ応力	σ_b	537	
		組合せ応力 (垂直応力とせん断応力)	σ_T	394	
	一次＋ 二次応力	引張応力及び圧縮応力	σ_t	1182	
		せん断応力	σ_s	681	
		曲げ応力	σ_b	1611	

材質： SUS630 H1150

設計温度： 135 (°C)

表 1-3-14 トラニオン取付けボルトの許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計事象Ⅰ，Ⅱ	引張応力	σ_t	318	

材質： SNB23-3

設計温度： 135 (°C)

1.3.5. 評価方法及び評価モデル

1.3.5.1. 容器本体及び蓋

容器本体及び蓋の主な構造部材の応力評価箇所を図 1-3-2～1-3-3 に示す。荷重条件は表 1-3-3 に示したとおりである。

1) 設計条件

① 胴，底板，一次蓋，二次蓋

(a) 最高使用圧力，ボルト初期締付け力，機械的荷重による応力

容器の実形状をモデル化し構造解析コード ABAQUS を用いて応力評価を行う。

② ポートカバー，二次蓋ポートカバー

(a) 最高使用圧力による応力

最高使用圧力により発生する一次一般膜応力(P_m)及び，一次膜＋曲げ応力(P_L+P_b)は(2)式で計算する。なお，一次局部膜応力(P_L)は発生しない。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{1.24 \cdot P \cdot r^2}{t^2} \\ \sigma_y &= \sigma_x \\ \sigma_z &= -P \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで，

- P : 最高使用圧力
- r : ポートカバーＯリング平均半径
二次蓋ポートカバーは締付けボルトピッチ円半径
- t : ポートカバー最小板厚

③ 一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルト，二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力及びガスケット締付による平均引張応力

最高使用圧力におけるボルト荷重及びガスケット（Ｏリング）締付時のボルト荷重により発生する平均引張応力（ σ_{m1} ）は(3)式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{m1} &= \frac{W_{m1}}{A} \\ W_{m1} &= H + H_p \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで，

- W_{m1} : 必要な最小ボルト荷重
- A : 全数のボルト最小断面積
- H : フランジに加わる最高使用圧力による全荷重
- H_p : 気密を十分保つために，Ｏリング又は継手接触面にかける圧縮

力（ゴム製Ｏリングのため $H_p=0N$ ）

また，ガスケット（Ｏリング）締付け時の平均引張応力（ σ_{m2} ）は(4)式で計算する。

$$\sigma_{m2} = \frac{W_{m2}}{A} \dots\dots\dots (4)$$

ここで，

W_{m2} : ガスケット締付け時に必要な最小ボルト荷重（ゴム製Ｏリングのため $W_{m2}=0N$ ）

2) 設計事象Ⅰ 構内輸送時

① 胴，底板，一次蓋，二次蓋

(a) 内圧，ボルト初期締付け力，構内輸送時の機械的荷重，熱荷重による応力
容器の実形状をモデル化し構造解析コード ABAQUS を用いて応力評価を行う。

(b) 平均せん断応力

平均せん断応力（ τ ）が発生する箇所はない。

(c) 平均支圧応力

底板とバスケット底面との接触部に発生する平均支圧応力（ σ_b ）は(5)式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{m_b \cdot G_z}{A_b} \dots\dots\dots (5)$$

ここで，

m_b : バスケットの質量

G_z : 後方向加速度

A_b : 接触面積

(d) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力（ σ_c ）は(6)式で計算する。

$$\sigma_c = \frac{m_c \cdot G_z}{A_c} \dots\dots\dots (6)$$

ここで，

m_c : 容器の質量

G_z : 後方向加速度

A_c : 胴の断面積

② ポートカバー，二次蓋ポートカバー

最高使用圧力による応力を除き，構内輸送時の機械的荷重及び熱荷重による応力は無視できる。

一次＋二次応力 (P_L+P_b+Q) は，(2)式で計算する最高使用圧力により発生する一次膜＋曲げ応力 (P_L+P_b) となる。

③ 一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルト，二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力による平均引張応力

最高使用圧力により発生する平均引張応力 (σ_{m1}) は(3)式で計算する。

(b) ボルト初期締付け力による平均引張応力

ボルト初期締付け力により発生する平均引張応力 (σ_{m3}) は(7)式で計算する。

$$\sigma_{m3} = \frac{F_s}{A_s} \dots\dots\dots (7)$$

ここで，

F_s : ボルト初期締付け力

A_s : ボルト最小断面積

(c) 構内輸送時に作用する加速度による平均引張応力

構内輸送時に作用する加速度により発生する平均引張応力 (σ_{m4}) は(8)式で計算する。

$$\sigma_{m4} = \frac{mG}{A} \dots\dots\dots (8)$$

ここで，

m : 作用する質量

G : 加速度

A : 全数のボルト最小断面積

(d) 構内輸送時に作用する加速度による曲げ応力

構内輸送時に作用する加速度によって発生する曲げ応力 (σ_b) は(9)式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{1}{n} \cdot \frac{mG\ell_b}{8Z} \dots\dots\dots (9)$$

ここで，

n : ボルト本数

m : 作用する質量

G : 加速度

l_b : ボルト長さ

Z : ボルトの断面係数

なお、二次蓋ポートカバーボルトには取付け構造上、曲げ応力は発生しない。

3) 設計事象Ⅰ 吊上げ時

① 胴、底板、一次蓋、二次蓋

(a) 内圧、ボルト初期締付け力、吊上げ時の機械的荷重、熱荷重による応力
容器の実形状をモデル化し構造解析コード ABAQUS を用いて応力評価を行う。

(b) 平均せん断応力

平均せん断応力(τ)が発生する箇所はない。

(c) 平均支圧応力

底板とバスケット底面との接触部に発生する平均支圧応力(σ_b)は(5)式で計算する。

(d) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力(σ_c)は(6)式で計算する。

② ポートカバー、二次蓋ポートカバー

最高使用圧力による応力を除き、吊上げ時の機械的荷重及び熱荷重による応力は無視できる。

一次＋二次応力(P_L+P_b+Q)は、(2)式で計算する最高使用圧力により発生する一次膜＋曲げ応力(P_L+P_b)となる。

③ 一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、ポートカバーボルト、二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力による平均引張応力

最高使用圧力により発生する平均引張応力(σ_{m1})は(3)式で計算する。

(b) ボルト初期締付け力による平均引張応力

ボルト初期締付け力により発生する平均引張応力(σ_{m3})は(7)式で計算する。

(c) 吊上げ時に作用する加速度による平均引張応力

吊上げ時に作用する加速度による平均引張応力(σ_{m4})は発生しない。

(d) 吊上げ時に作用する加速度による曲げ応力

吊上げ時に作用する加速度による曲げ応力(σ_b)は発生しない。

4) 設計事象Ⅱ 搬送架台への衝突（横姿勢）

① 胴，底板，一次蓋，二次蓋

(a) 内圧，ボルト初期締付け力，搬送架台への衝突による機械的荷重，熱荷重による応力
容器の実形状をモデル化し構造解析コード ABAQUS を用いて応力評価を行う。

(b) 平均せん断応力

平均せん断応力 (τ) が発生する箇所はない。

(c) 平均支圧応力

底板とバスケット底面との接触部に発生する平均支圧応力 (σ_b) は(5)式で計算する。

(d) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力 (σ_c) は(6)式で計算する。

② ポートカバー，二次蓋ポートカバー

最高使用圧力による応力を除き，搬送架台への衝突による機械的荷重及び熱荷重による応力は無視できる。

一次＋二次応力 (P_L+P_b+Q) は，(2)式で計算する最高使用圧力により発生する一次膜＋曲げ応力 (P_L+P_b) となる。

③ 一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルト，二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力による平均引張応力

最高使用圧力により発生する平均引張応力 (σ_{m1}) は(3)式で計算する。

(b) ボルト初期締付け力による平均引張応力

ボルト初期締付け力により発生する平均引張応力 (σ_{m3}) は(7)式で計算する。

(c) 搬送架台への衝突時に作用する加速度による平均引張応力

搬送架台への衝突時に作用する加速度により発生する平均引張応力 (σ_{m4}) は(8)式で計算する。

なお，一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルトには，搬送架台への衝突時に作用する加速度による平均引張応力 (σ_{m4}) は発生しない。

(d) 搬送架台への衝突時に作用する加速度による曲げ応力

搬送架台への衝突時に作用する加速度により発生する曲げ応力 (σ_b) は(9)式で計算する。

なお、二次蓋ポートカバーボルトには、搬送架台への衝突時に作用する加速度により曲げ応力 (σ_b) は発生しない。

5) 設計事象Ⅱ 転倒防止台座への衝突 (縦姿勢)

① 胴、底板、一次蓋、二次蓋

(a) 内圧、ボルト初期締付け力、転倒防止台座への衝突による機械的荷重、熱荷重による応力

容器の実形状をモデル化し構造解析コード ABAQUS を用いて応力評価を行う。

(b) 平均せん断応力

平均せん断応力 (τ) が発生する箇所はない。

(c) 平均支圧応力

底板とバスケット底面との接触部に発生する平均支圧応力 (σ_b) は(5)式で計算する。

(d) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力 (σ_c) は(6)式で計算する。

② ポートカバー、二次蓋ポートカバー

最高使用圧力による応力を除き、転倒防止台座への衝突による機械的荷重及び熱荷重による応力は無視できる。

一次+二次応力 (P_L+P_b+Q) は、(2)式で計算する最高使用圧力により発生する一次膜+曲げ応力 (P_L+P_b) となる。

③ 一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、ポートカバーボルト、二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力による平均引張応力

最高使用圧力により発生する平均引張応力 (σ_{m1}) は(3)式で計算する。

(b) ボルト初期締付け力による平均引張応力

ボルト初期締付け力により発生する平均引張応力 (σ_{m3}) は(7)式で計算する。

(c) 転倒防止台座への衝突時に作用する加速度による平均引張応力

転倒防止台座への衝突時に作用する加速度による平均引張応力 (σ_{m4}) は発生しない。

(d) 転倒防止台座への衝突時に作用する加速度による曲げ応力

転倒防止台座への衝突時に作用する加速度による曲げ応力 (σ_b) は発生しない。

6) 試験状態

① 胴，底板，一次蓋，二次蓋

(a) 試験時圧力，ボルト初期締付け力による応力

容器の実形状をモデル化し構造解析コード ABAQUS を用いて応力評価を行う。

② ポートカバー，二次蓋ポートカバー

(a) 試験時の圧力による応力

試験時圧力により発生する一次一般膜応力(P_m)及び，一次一般膜+曲げ応力(P_m+P_b)は(2)式で計算する。なお，一次局部膜応力(P_L)は発生しない。

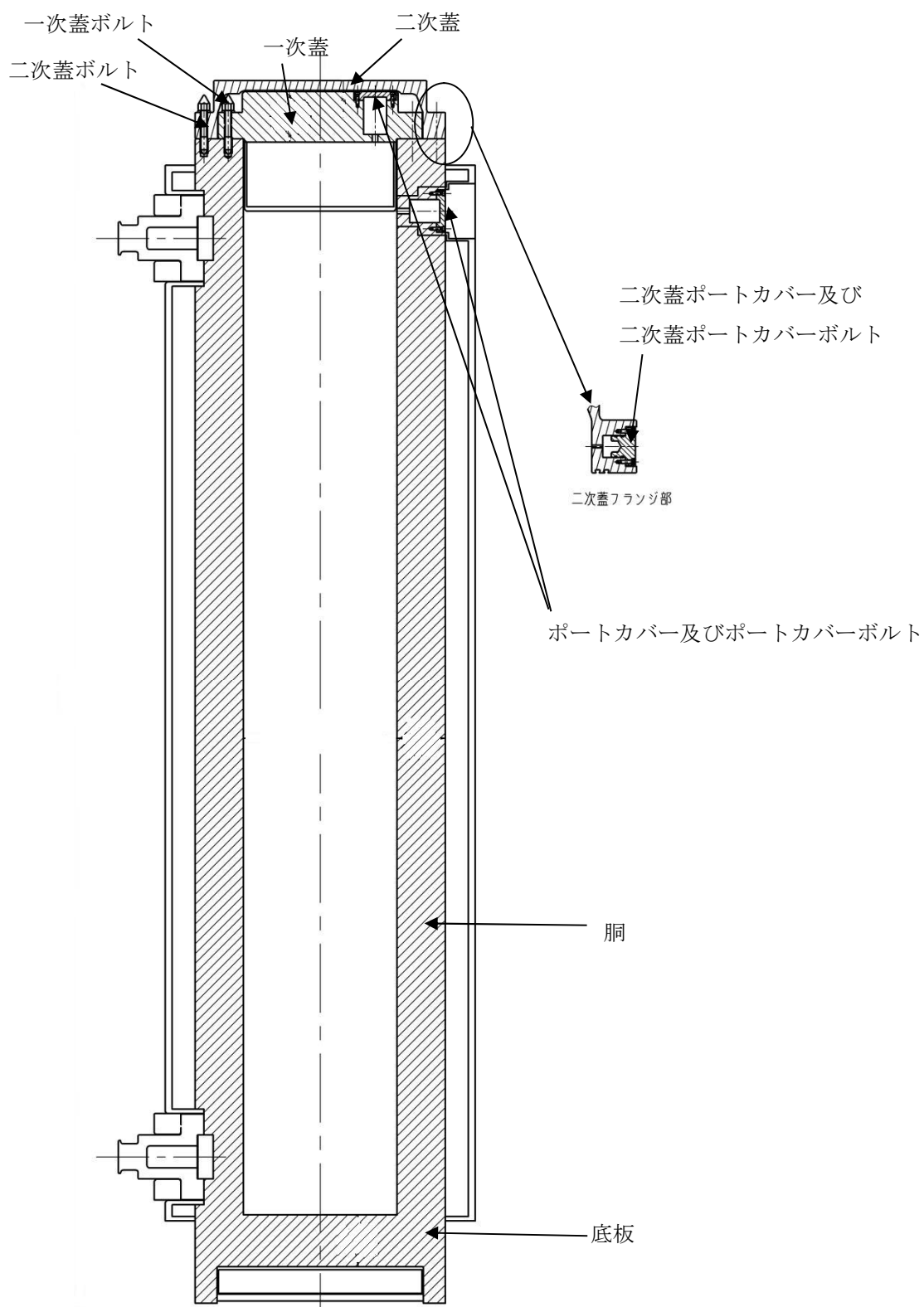


図1-3-2 容器本体及び蓋の応力評価箇所

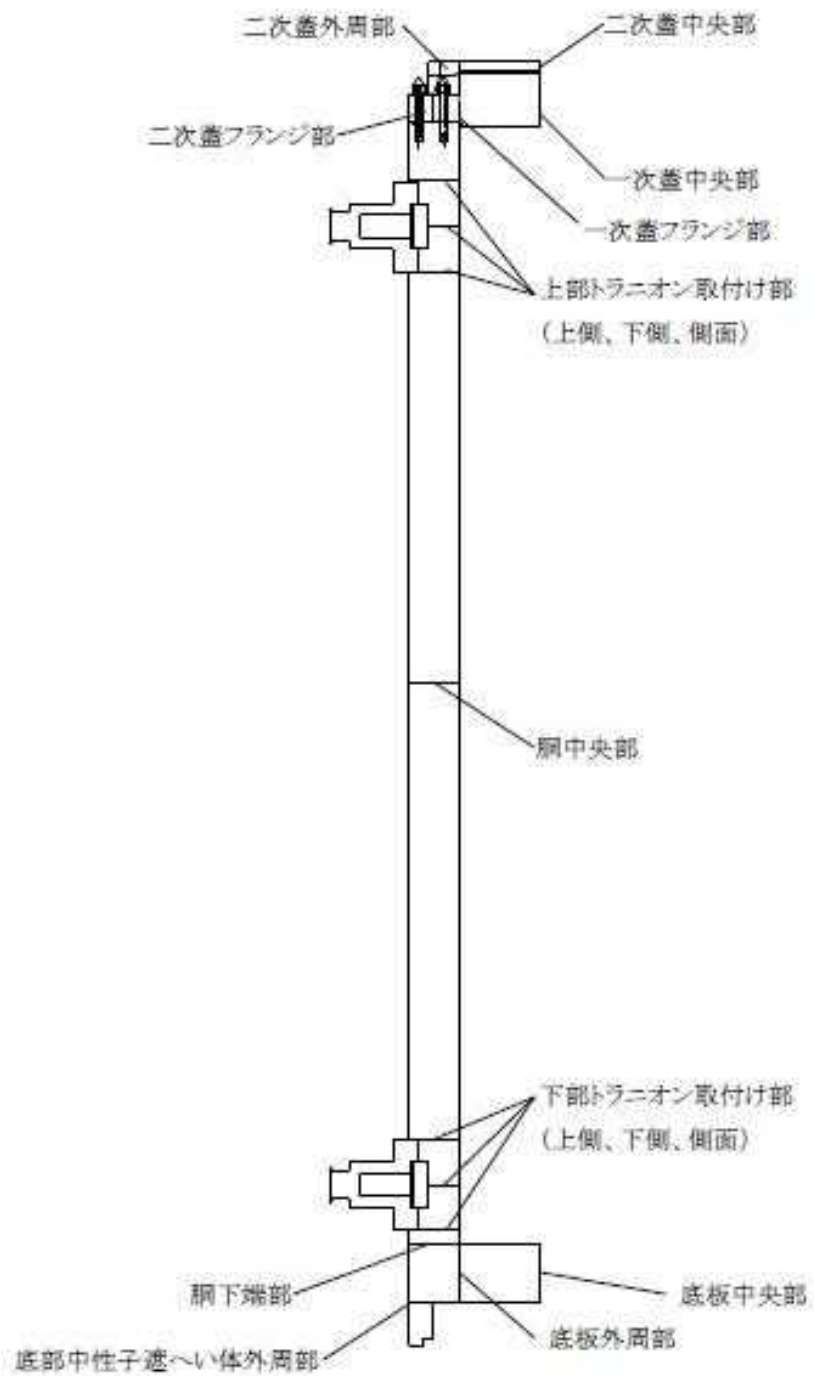


図1-3-3 容器本体及び蓋の応力評価箇所（胴，底板，蓋の詳細）

1.3.5.2. バスケット

バスケットの応力評価箇所を図1-3-4に示す。荷重条件は表1-3-4に示したとおりである。

1) 設計条件

①一次一般膜応力

最大応力が発生する箇所は、搬送架台への衝突時の図1-3-4の評価点②である。評価点

②の一次一般膜応力(P_m)は、(10)式で計算する。

$$P_m = \frac{m_2 G_X}{A_2} \dots\dots\dots (10)$$

m_2 : 評価点②に作用する質量
 A_2 : 評価点②の断面積
 G_X : 加速度

② 一次膜応力＋一次曲げ応力

最大応力が発生する箇所は、搬送架台への衝突時の図1-3-4の評価点③である。

評価点③の一次一般膜＋一次曲げ応力($P_m + P_b$)は、(11)式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} P_m &= \frac{m_3 G_X}{A_3} \\ P_b &= \frac{M_3}{Z_3} \\ M_3 &= \frac{m_3 G_X l_3}{8} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、

m_3 : 評価点③に作用する質量
 G_X : 加速度
 A_3 : 評価点③の断面積
 M_3 : 評価点③に生じる曲げモーメント
 Z_3 : 評価点③における枠板の断面係数
 l_3 : 格子支持板のピッチ

2) 設計事象Ⅰ 構内輸送時

① 一次＋二次応力

熱荷重は発生しないため、一次＋二次応力(P_m+P_b+Q)は、(11)式で計算する一次一般膜＋一次曲げ応力(P_m+P_b)である。

② 平均せん断応力

最大応力が発生する箇所は、図 1-3-4 の評価点⑤(桹板の組合せ部)である。

左右方向加速度により発生する平均せん断応力(τ)は、(12)式で計算する。

$$\tau = \frac{m_5 G_Y}{A_5} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、

m_5 : 評価点⑤に作用する質量
 A_5 : 評価点⑤の断面積
 G_Y : 加速度

③ 平均支圧応力

最大応力が発生する箇所は図 1-3-4 の評価点②である。平均支圧応力(σ_b)は(10)式で計算する。

④ 軸圧縮応力

最大応力が発生する箇所は図 1-3-4 の評価点②である。軸圧縮応力(σ_c)は(10)式で計算する。

3) 設計事象Ⅱ 搬送架台への衝突(横姿勢)

① 一次＋二次応力

熱荷重は発生しないため、一次＋二次応力(P_m+P_b+Q)は、(11)式で計算する一次一般膜＋一次曲げ応力(P_m+P_b)である。

② 平均せん断応力

平均せん断応力(τ)は発生しない。

③ 平均支圧応力

最大応力が発生する箇所は図 1-3-4 の評価点②である。平均支圧応力(σ_b)は(10)式で計算する。

④ 軸圧縮応力

最大応力が発生する箇所は図 1-3-4 の評価点②である。軸圧縮応力(σ_c)は(10)式で計算する。

4) 設計事象Ⅱ 転倒防止台座への衝突(縦姿勢)

① 一次＋二次応力

転倒防止台座への衝突時の荷重は桙板断面に均等に加わるため桙板には圧縮応力が発生する。また、熱荷重は発生しない。

転倒防止台座への衝突に発生する一次＋二次応力(P_m+P_b+Q)は(13)式で計算する。

$$P_m + P_b + Q = \frac{m_A G_Z}{A_A} \dots\dots\dots (13)$$

ここで,

m_A : バスケットの質量
 A_A : 桙板の総断面積
 G_Z : 加速度

② 平均せん断応力

平均せん断応力(τ)は発生しない。

③ 平均支圧応力

平均支圧応力(σ_b)は①一次＋二次応力と同じである。

④ 軸圧縮応力

軸圧縮応力(σ_c)は①一次＋二次応力と同じである。

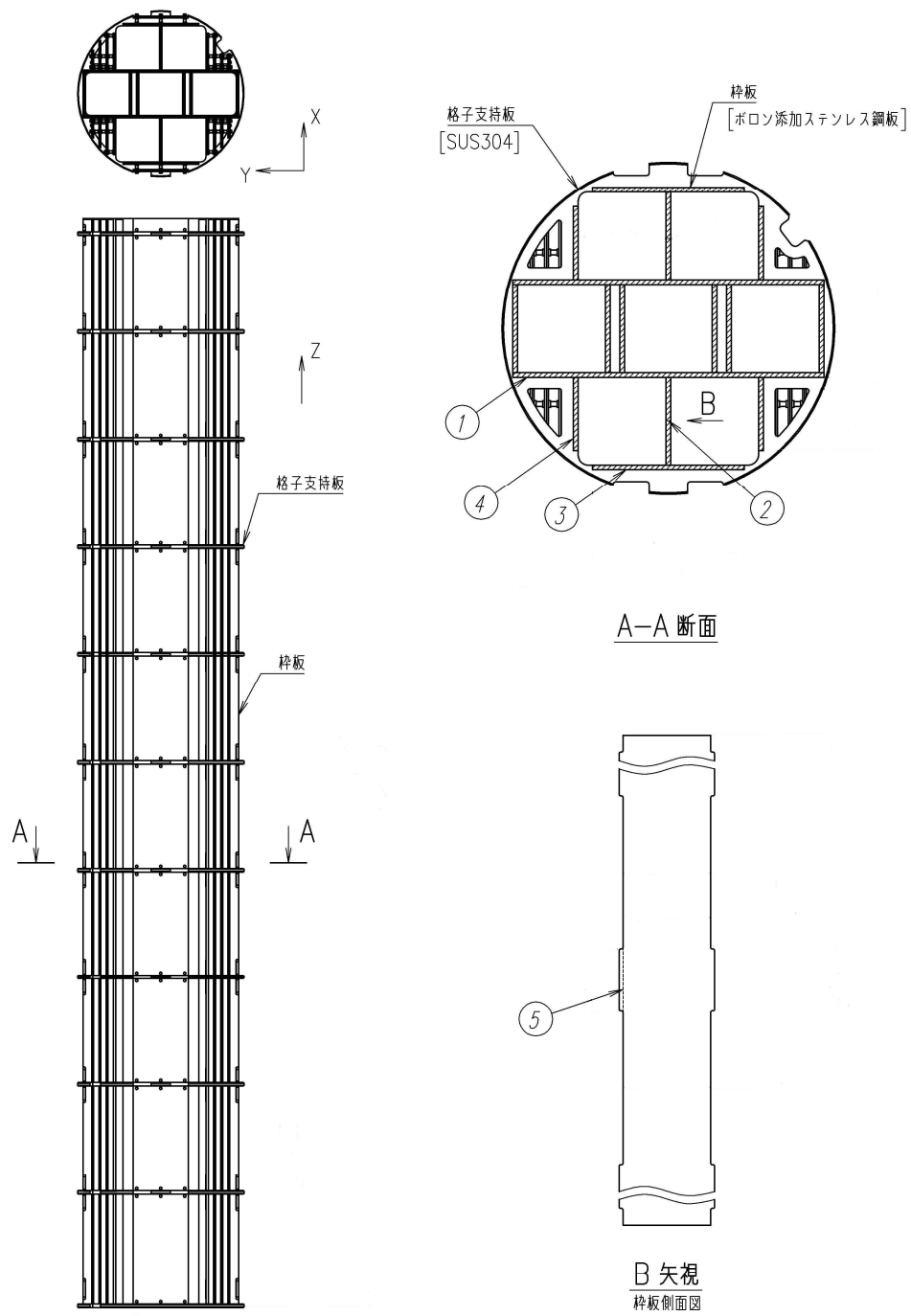


図1-3-4 バスケットの応力評価箇所

1.3.5.3. トラニオン

トラニオン応力評価箇所を図 1-3-5 に示す。荷重条件は表 1-3-5 に示したとおりである。

1) 設計事象Ⅰ 構内輸送時

① トラニオン

(a) セン断応力

最大応力が発生する箇所は、図 1-3-5 の下部トラニオンの評価点②である。

前後方向加速度及び下方向加速度により発生するせん断応力(σ_s)は、(14)式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_s &= \frac{F_m}{A_2} \\ F_m &= \sqrt{\left(\frac{m}{4} \cdot G_X\right)^2 + \left(\frac{m}{2} \cdot G_Z\right)^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

ここで、

- F_m : 構内輸送時に下部トラニオンに作用する荷重
- m : 容器の質量
- A_2 : 評価点の断面積
- G_X : 下方向加速度
- G_Z : 前後方向加速度

(b) 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は、図 1-3-5 の下部トラニオンの評価点②である。前後方向加速度及び下方向加速度により発生する曲げ応力(σ_b)は、(15)式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_b &= \frac{M_2}{Z_2} \\ M_2 &= F_m \cdot L_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (15)$$

ここで、

- M_2 : 評価点に生じる曲げモーメント
- Z_2 : 評価点の断面係数
- F_m : 構内輸送時に下部トラニオンに作用する荷重 (14)式のとおり
- L_2 : 評価点と荷重作用位置との距離

(c) 引張応力及び圧縮応力

構内輸送時は図 1-3-5 の上部及び下部トラニオンと輸送架台間の摩擦力により左右方向加速度による荷重を支持する。したがって引張応力と圧縮応力が発生する箇所は、図 1-3-5 の評価点②である。左右方向加速度により発生する評価点②の引張応力(σ_t)及び圧縮応力(σ_c)は、(16)式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_t = \sigma_c &= \frac{F_{m2}}{A_2} \\ F_{m2} &= \frac{m}{4} \cdot G_Y \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

F_{m2} : 構内輸送時に上部及び下部トラニオンに作用する荷重
 m : 容器の質量
 A_2 : 評価点の断面積
 G_Y : 左右方向加速度

(d) 組合せ応力

垂直応力(σ)とせん断応力(σ_s)との組合せ応力(σ_T)は、(17)式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_T &= \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \sigma_s^2} \\ \sigma &= \sigma_b + \sigma_t = \sigma_b + \sigma_c \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

ここで、

σ : 評価点における垂直応力
 σ_b : 評価点における曲げ応力
 σ_t, σ_c : 評価点における引張応力及び圧縮応力
 σ_s : 評価点におけるせん断応力

また、圧縮応力(σ_c)と曲げ応力(σ_b)との組合せ応力は、(18)式で計算する。

$$\frac{|\sigma_c|}{f_c} + \frac{|\sigma_b|}{f_b} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|\sigma_b| - |\sigma_c|}{f_t} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (18)$$

ここで、 $|\sigma_b| = |\sigma_b| = \sigma_b, |\sigma_c| = \sigma_c$ である。

また、引張応力(σ_t)と曲げ応力(σ_b)との組合せ応力は、(19)式で計算する。

$$\frac{|\sigma_t| + |\sigma_b|}{f_t} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{|\sigma_b| - |\sigma_t|}{f_b} \leq 1 \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここで、 $|\sigma_b| = |\sigma_b| = \sigma_b, |\sigma_t| = \sigma_t$ である。

(e) 一次＋二次応力

容器の熱膨張による応力は無視できるため、トラニオンに発生する一次＋二次応力は (a)せん断応力(σ_s)、(b)曲げ応力(σ_b)、(c)引張応力(σ_t)及び圧縮応力(σ_c)と同じである。

② トラニオン取付けボルト

最大応力が発生する箇所は、図 1-3-5 の下部トラニオンの評価点③である。

トラニオンにモーメント荷重及び引張荷重が作用する場合にトラニオン取付けボルトに発生する引張応力(σ_t)は、(20)式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_t &= \frac{M_3}{Z_b} + \frac{1}{16} \cdot \frac{F_{m2}}{S_b} \\ M_3 &= F_m \cdot L_3 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (20)$$

ここで、

- F_m : 構内輸送時に下部トラニオンに作用する荷重 (14)式のとおり
- F_{m2} : 構内輸送時に上部及び下部トラニオンに作用する荷重
- L_3 : 評価点と荷重作用位置との距離
- Z_b : トラニオン取付けボルトの断面係数
- S_b : トラニオン取付けボルトの最小断面積

2) 設計事象Ⅰ 吊上げ時

① トラニオン

(a) せん断応力

最大応力が発生する箇所は、図 1-3-5 の上部トラニオンの評価点①である。

吊上げ荷重により発生するせん断応力(σ_s)は、(21)式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_s &= \frac{F_{m3}}{A_1} \\ F_{m3} &= \frac{m}{2} \cdot G_z \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

ここで、

- F_{m3} : 吊上げ時に上部トラニオンに作用する荷重
- m : 容器の質量
- A_1 : 評価点の断面積
- G_z : 吊上げ加速度

(b) 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は、図 1-3-5 の上部トラニオンの評価点①である。吊上げ荷重により発生する曲げ応力(σ_b)は、(15)式で計算する。

(c) 引張応力及び圧縮応力

吊上げ時には引張応力(σ_t)及び圧縮応力(σ_c)は発生しない。

(d) 組合せ応力

垂直応力(σ)と曲げ応力(σ_b)との組合せ応力(σ_T)は、(17)式で計算する。

(e) 一次＋二次応力

容器の熱膨張による応力は無視できるため、トラニオンに発生する一次＋二次応力は(a)せん断応力(σ_s)、(b)曲げ応力(σ_b)と同じである。

② トラニオン取付けボルト

最大応力が発生する箇所は、図 1-3-5 の上部トラニオンの評価点③である。

トラニオンにモーメント荷重が作用する場合にトラニオン取付けボルトに発生する引張応力(σ_t)は、(22)式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_t &= \frac{M_3}{Z_b} \\ M_3 &= F_{m3} \cdot L_3 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

ここで、

- M_3 : 評価点に生じる曲げモーメント
- L_3 : 評価点と荷重作用位置との距離
- Z_b : トラニオン取付けボルトの断面係数

3) 設計事象Ⅱ 輸送架台への衝突

① トラニオン

(a) せん断応力

最大応力が発生する箇所は、図 1-3-5 の下部トラニオンの評価点②である。

衝突荷重により発生するせん断応力(σ_s)は、(21)式で計算する。

(b) 曲げ応力

最大応力が発生する箇所は、図 1-3-5 の下部トラニオンの評価点②である。衝突荷重により発生する曲げ応力(σ_b)は、(15)式で計算する。

(c) 引張応力及び圧縮応力

輸送架台への衝突時には引張応力(σ_t)及び圧縮応力(σ_c)は発生しない。

(d) 組合せ応力

垂直応力(σ)とせん断応力(σ_s)との組合せ応力(σ_T)は、(17)式で計算する。

(e) 一次＋二次応力

容器の熱膨張による応力は無視できるため、トラニオンに発生する一次＋二次応力は(a)せん断応力(σ_s)、(b)曲げ応力(σ_b)と同じである。

② トラニオン取付けボルト

最大応力が発生する箇所は、図 1-3-5 の下部トラニオンの評価点③である。

トラニオンにモーメント荷重が作用する場合にトラニオン取付けボルトに発生する引張応力(σ_t)は、(22)式で計算する。

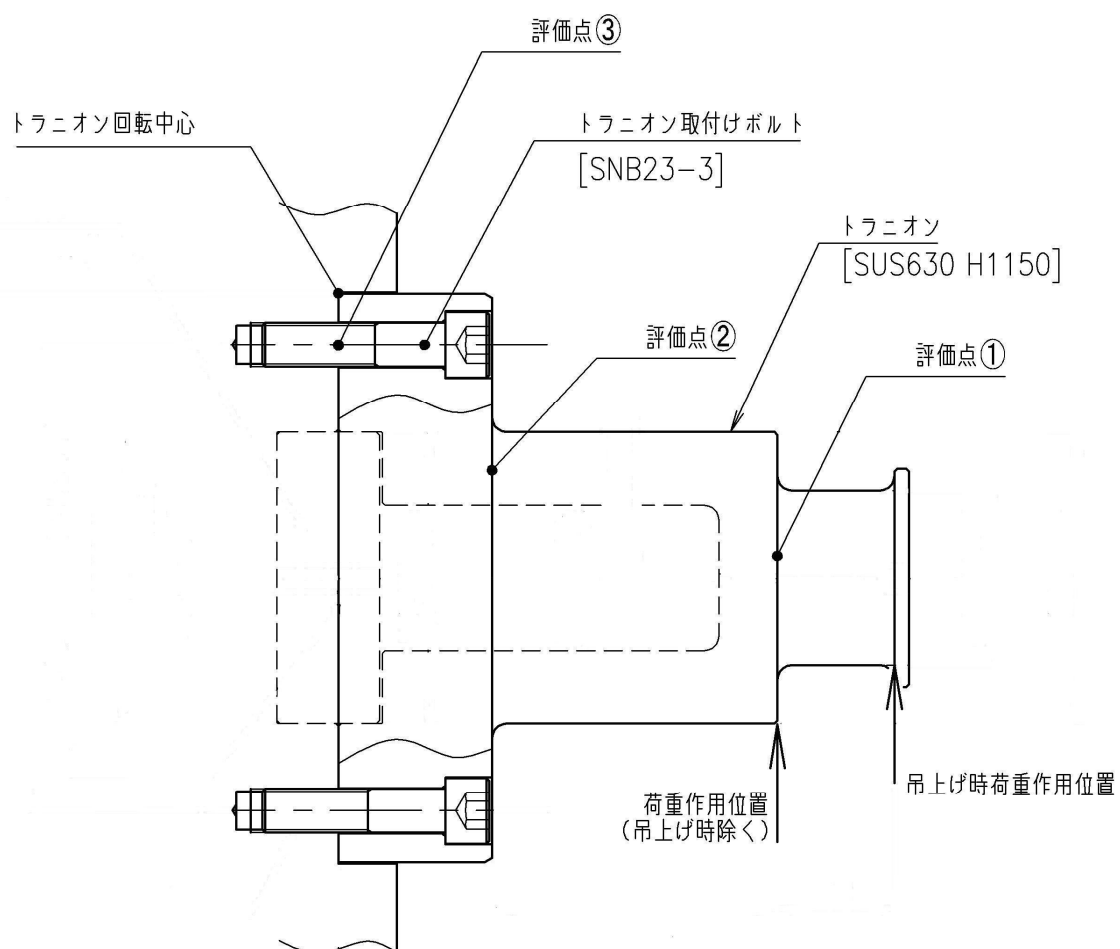


図1-3-5 トラニオンの応力評価箇所

1.3.6. 評価結果

評価結果を表1-3-15～表1-3-23に示す。いずれも、許容応力に対して十分に余裕がある。
このため、構内用輸送容器の構造健全性は維持される。

表 1-3-15 容器本体及び蓋の評価結果（胴、底板、蓋） 1/2

(単位：MPa)

部位	材料	設計事象	一次一般膜応力 (P _m)		一次局部膜応力 (P _L)		一次膜＋曲げ応力 (P _L ＋P _b)		一次一般膜＋曲げ応力 (P _m ＋P _b)		一次＋二次応力 (P _L ＋P _b ＋Q)	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
胴中央部	ASTM A350M Gr. LF5 Cl. 1	設計条件	8	123	—	—	9	184	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	9	369
		試験状態	7	165			—	—	9	247	—	—
底板中央部		設計条件	5	123	—	—	10	184	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	21	369
		試験状態	3	165	—	—	—	—	6	247	—	—
底板外周部		設計条件	—	—	5	184	11	184	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	10	369
		試験状態	—	—	3	247	—	—	6	247	—	—
胴下端部		設計条件	—	—	13	184	23	184	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	17	369
		試験状態	—	—	5	247	—	—	10	247	—	—
底部中性子遮 へい体外周部		設計条件	—	—	10	184	13	184	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	25	369
		試験状態	—	—	6	247	—	—	10	247	—	—
上部トラニオン 取付け部		設計条件			11	184	22	184	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	21	369
		試験状態	—	—	7	247	—	—	10	247	—	—

表 1-3-15 容器本体及び蓋の評価結果（胴、底板、蓋） 2/2

(単位：MPa)

部位	材料	設計事象	一次一般膜応力 (P _m)		一次局部膜応力 (P _L)		一次膜＋曲げ応力 (P _L ＋P _b)		一次一般膜＋曲げ応力 (P _m ＋P _b)		一次＋二次応力 (P _L ＋P _b ＋Q)	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
下部トラニ オン取付け 部	ASTM A350M Gr. LF5 Cl. 1	設計条件	—	—	18	184	32	184	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	32	369
		試験状態	—	—	7	247	—	—	9	247	—	—
一次蓋 中央部	SUSF304	設計条件	3	137	—	—	9	205	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	4	411
		試験状態	3	153	—	—	—	—	10	229	—	—
一次蓋 フランジ部		設計条件	—	—	7	205	9	205	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	8	411
		試験状態	—	—	8	229	—	—	8	229	—	—
二次蓋 中央部		設計条件	61	137			102	205	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	34	411
		試験状態	92	155	—	—	—	—	154	232	—	—
二次蓋 外周部		設計条件	—	—	36	205	64	205	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	25	411
		試験状態	—	—	46	232	—	—	95	232	—	—
二次蓋フラ ンジ部		設計条件			9	205	18	205	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	9	411
		試験状態	—	—	13	232	—	—	27	232	—	—

表 1-3-16 容器本体及び蓋の評価結果（ポートカバー）

（単位：MPa）

部位	材質	設計事象	一次一般膜応力 (P_m)		一次膜＋曲げ応力 ($P_L + P_b$)		一次一般膜＋曲げ応力 ($P_m + P_b$)		一次＋二次応力 ($P_L + P_b + Q$)	
			計算値	許容値	計算値	許容値	計算値	許容値	計算値	許容値
ポートカバー	SUS304	設計条件	2	137	17	205	—	—	—	—
		I，II	—	—	—	—	—	—	17	411
		試験状態	3	143	—	—	26	214		
二次蓋 ポートカバー	SUSF304	設計条件	2	137	7	205	—	—	—	—
		I，II	—	—	—	—	—	—	7	411
		試験状態	3	155	—	—	11	232	—	—

表 1-3-17 容器本体及び蓋の評価結果（ボルト）

（単位：MPa）

部位	材料	設計事象	平均引張応力(σ_m)		平均引張応力＋曲げ応力 ($\sigma_m + \sigma_b$)	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力
一次蓋 ボルト	SUS630 H1150	設計条件	101	216	－	－
		I , II	320	432	350	648
二次蓋 ボルト		設計条件	125	216	－	－
		I , II	334	432	352	648
ポートカバー ボルト		設計条件	39	216	－	－
		I , II	227	432	229	648
二次蓋ポート カバーボルト		設計条件	21	223	－	－
		I , II	216	446	216	669

表 1-3-18 容器本体及び蓋の評価結果（平均支圧応力及び圧縮応力）

（単位：MPa）

部位	設計事象	平均支圧応力 (σ_b)		圧縮応力 (σ_c)	
		計算値	許容応力	計算値	許容応力
底板	I, II	2	184	—	—
胴	I, II	—	—	7	95

表 1-3-19 バスケットの評価結果

(単位：MPa)

部 位	応力の種類		設計条件		設計事象Ⅰ		設計事象Ⅱ				許容 応力
					構内輸送時		搬送架台への 衝突		転倒防止台座への 衝突		
			計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	
バス ケ ット	一次一般膜応力 (Pm)		52	②	—	—	—	—	—	—	133
	一次一般膜＋一次曲げ 応力 (Pm+Pb)		159	③	—	—	—	—	—	—	199
	一次＋二次応力 (Pm+Pb+Q)		—	—	103	③	159	③	5	—	399
	平均せん断応力 (τ)		—	—	1	⑤	—	—	—	—	79
	平均支圧応力 (σ b)		—	—	34	②	52	②	5	—	150
	軸圧縮 応力 (σ c)	バスケット 長手方向	—	—	—	—	—	—	5	—	34
		上記以外	—	—	34	②	52	②	—	—	84

表 1-3-20 トラニオンの評価結果

(単位：MPa)

部 位	応力の種類		設計事象Ⅰ				設計事象Ⅱ		許容 応力
			構内輸送時		吊上げ時		輸送架台への 衝突		
			計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	
トラニオン	一次 応力	引張応力 (σ_t)	5	②	—	—	—	—	394
		せん断応力 (σ_s)	27	②	27	①	39	②	227
		曲げ応力 (σ_b)	165	②	143	①	243	②	537
		圧縮応力 (σ_c)	5	②	—	—	—	—	383
		組合せ応力 (σ_T)	177	②	151	①	253	②	394
	一次十二次 応力	引張応力及び 圧縮応力 (σ_t)	5	②	—	—	—	—	1182
		せん断応力 (σ_s)	27	②	27	①	39	②	681
		曲げ応力 (σ_b)	165	②	143	①	243	②	1611

表 1-3-21 トラニオンの評価結果

評価点②の組合せ応力（圧縮応力＋曲げ応力）

評価式	σ_c (MPa)	σ_b * (MPa)	計算値	基準値
$\frac{ \sigma_c }{f_c} + \frac{ _c\sigma_b }{f_b}$	5	165	0.32	≤ 1
$\frac{ _t\sigma_b - \sigma_c }{f_t}$	5	165	0.41	≤ 1

注記 *： $|_c\sigma_b| = |_t\sigma_b| = \sigma_b$ である。

表 1-3-22 トラニオンの評価結果
評価点②の組合せ応力（引張応力＋曲げ応力）

評価式	σ_t (MPa)	σ_b * (MPa)	計算値	基準値
$\frac{ \sigma_t + \sigma_b }{f_t}$	5	165	0.44	≤ 1
$\frac{ \sigma_b - \sigma_t }{f_b}$	5	165	0.30	≤ 1

注記 *： $|\sigma_b| = |\sigma_t| = \sigma_b$ である。

表 1-3-23 トラニオン取付けボルトの評価結果

(単位：MPa)

部 位	応力の種類		設計事象Ⅰ		設計事象Ⅱ	許容応力
			構内輸送時	吊上げ時	輸送架台への衝突	
			計算値	計算値	計算値	
トラニオン取付けボルト	一次応力	引張応力	168	96	228	318

構造強度計算に用いるコード（ABAQUS）について

（１）概要

ABAQUS コードは米国 Hibbitt, Karlsson&Sorensen, Ins. (HKS 社) で開発された有限要素法に基づく応力・座屈解析等の汎用解析コードであり，輸送容器の応力解析等に広く利用されている。

（２）機能

ABAQUS コードは，応力解析に際して以下の機能を有している。

- ① 定常，非定常の弾性，弾塑性のいずれの解も得ることができる。
- ② 材料特性として時間依存，歪の履歴依存並びに等方性・異方性等を考慮することができる。
- ③ モデルの形状は一次元～三次元，又は連続体についても取り扱うことができる。
- ④ 伝熱解析結果をそのまま境界条件として熱応力解析に用いることが可能である。
- ⑤ 荷重条件として集中荷重，分布荷重，モーメント，加速度力（慣性力），圧力，遠心力及びコリオリ力等が取り扱える。また，これらの条件の時間依存，線形変化に対しても対応可能である。

（３）解析フロー

ABAQUS コードの解析フローを図 1-3-6 に示す。

（４）使用実績

ABAQUS コードは，これまで多くの応力解析に対し使用実績がある。

（５）検証方法

理論値との比較による検証が実施されていることを確認している。

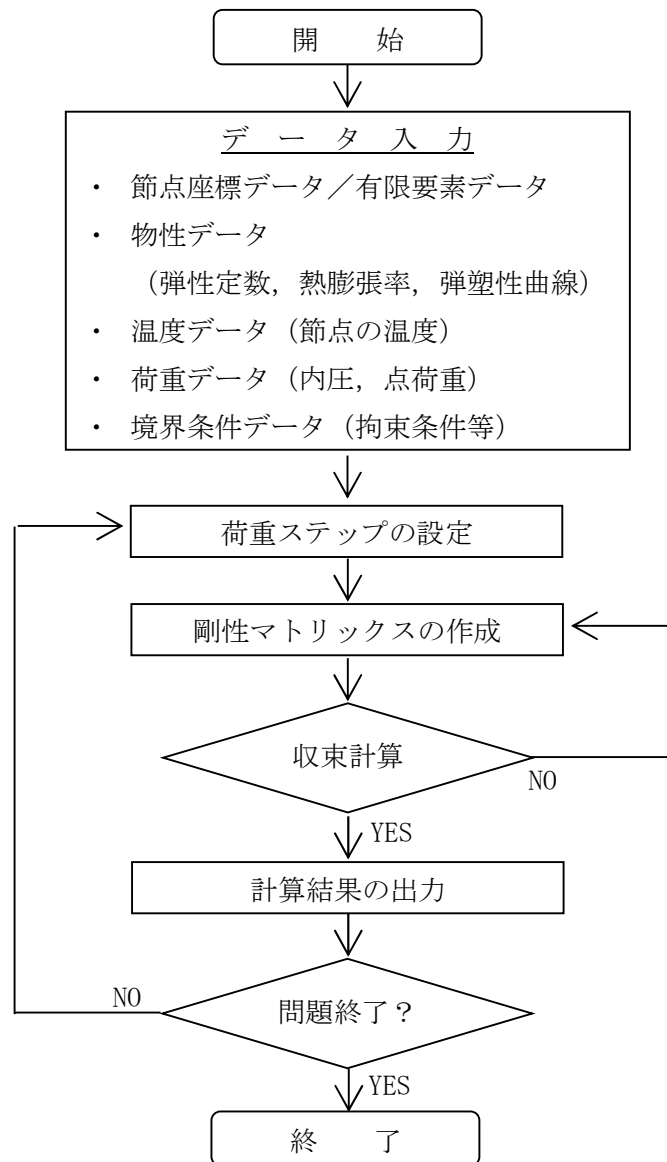


図 1-3-6 ABAQUS コードの応力解析フロー図

容器内水の放射線分解による水素ガス発生について

1. 容器内水の放射線分解による水素ガス発生

本構内用輸送容器のような密閉した槽内での容器内水の放射線分解により発生する水素ガスの水中濃度はある飽和値に達する。ここでは、水素ガス発生評価を以下に示す。

2. 評価方法

「添付資料－2－1－3 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（4号機）」（NFT-12B 型）と同じく、類似の環境下における水の放射線分解による水素ガス定常濃度評価^{*1}をベースに、液相定常水素ガス濃度が照射線量率の平方根に比例する^{*2}として、水素ガス濃度の評価を行う。

3. 評価結果および4号機構内用輸送容器(NFT-12B 型)との比較

水素ガス濃度の評価結果および、4号機構内用輸送容器(NFT-12B 型)との比較を以下に示す。

	ガンマ線照射線量	水素ガス濃度
3号機 構内用輸送容器	0.29Gy/s	1.24%
4号機 構内用輸送容器(NFT-12B)	1Gy/s	2.4%

3号機 構内用輸送容器のガンマ線照射量は、4号機構内用輸送容器(NFT-12B 型)のガンマ線照射量より低く、水素ガス濃度も低くなっている。

水素ガス濃度 1.24%は、水素の爆発下限である空気との混合比 4%に対して十分低い値であり問題ない。

*1 Sunaryo, 1993, “A Study on Yields and Chemical Behavior of Radiolysis Products of High Temperature Water”, University of Tokyo.

*2 Y.Fujita, M.Ebihara, “EVALUATION OF HYDROGEN YIELD IN SPENT FUEL TRANSPORT PACKAGE” The 16th International Symposium on the Packaging and Transportation of radioactive Materials (PATRAM 2010), October 3-8 2010, London, UK Poster Session 210 (2010)

1.4. 除熱機能

1.4.1. 基本的な考え方

除熱設計にあたっては、燃料の健全性及び構内用輸送容器の安全機能を有する構成部材の健全性が維持できるよう、以下のとおり設計する。

- a. 収納された使用済燃料より発生する崩壊熱は、容器内に充填した水及び空気の自然対流及び熱伝導により胴に伝える。
- b. 胴に伝えられた熱は主として中性子遮へい部のレジン中に設けた伝熱フィンにより外筒に伝える。
- c. 外筒に伝えられた熱は外筒から大気に放散する。

除熱機能の評価においては、収納する使用済燃料の最大崩壊熱量を考慮し、自然冷却により冷却されるものとして、除熱条件が厳しくなる横姿勢（輸送時）の各部の温度を求め、各部材料の制限温度を超えないことを評価する。

1.4.2. 設計基準

設計基準を表 1-4-1 に示す。

表 1-4-1 設計基準

対象部位		材質	設計基準	設計基準 温度 (℃)	備考
構内用 輸送容器	中性子遮へ い材	レジン	使用可能温度	149	
	Oリング	ふっ素ゴム	使用可能温度	300	
	胴	低合金鋼	構造強度が確保される 制限温度	350	
	蓋	ステンレス鋼	構造強度が確保される 制限温度	425	
	バスケット	ボロン添加 ステンレス鋼	構造強度が確保される 制限温度	200	
燃料被覆管		ジルカロイ-2	照射硬化回復現象により 燃料被覆管の機械的 特性が著しく低下しな い温度及び水素化物の 再配向による被覆管の 機械的特性の低下が生 じない温度以下となる 温度 ^{*1, *2}	200	8×8 燃料
				300	新型 8×8 ジルコニウム ライク燃料, 高燃焼度 8×8 燃 料, 9×9 燃料

*1 平成 18 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料長期健全性等確認試験に関する試験最終報告書)(06 基炉報-0006, 独立行政法人原子力安全基盤機構)

*2 平成 19 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料健全性等調査に関する試験成果報告書)(07 基炉報-0004, 独立行政法人原子力安全基盤機構)

1.4.3. 燃料仕様および崩壊熱量

表 1-1-2 に示す 3 号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料を包絡する条件で崩壊熱量を ORIGEN2 コードにより評価する。燃料条件及び崩壊熱量を表 1-4-2 に示す。

表 1-4-2 燃料条件及び崩壊熱量

燃料タイプ	9 × 9 燃料
燃焼度 (MWd/t)	52,000
冷却期間 (日)	1716
収納体数 (体)	7
崩壊熱量 (kW)	3.91

1.4.4. 評価条件

構内用輸送容器の除熱評価は以下の 2 種類の解析モデルを用いて行う。

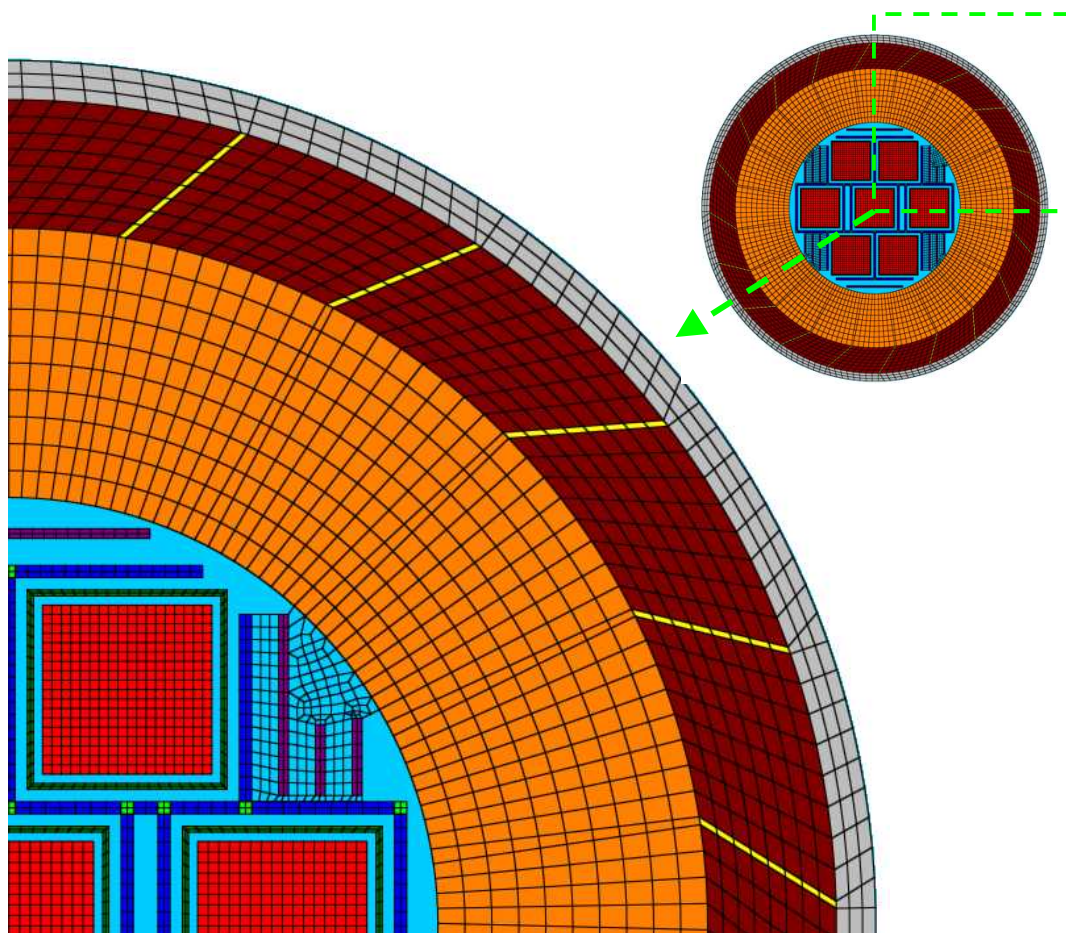
- ・ 輪切り断面モデル
- ・ 軸対称断面モデル

輪切り断面モデル形状図を図 1-4-1 に、軸対称断面モデル形状図を図 1-4-2 に示す。
また、評価条件を表 1-4-3 に示す。

表 1-4-3 評価条件

項目		横姿勢 (輸送時)
収納体数	(体)	7
崩壊熱量	(kW)	3.91
周囲温度	(℃)	38
太陽熱放射 (W/m ²) *1	垂直に輸送される表面	200
	その他の表面 (曲面)	400

*1 : 太陽熱放射は 1 日につき 1 2 時間ごと、7 日間受ける



■	： 外筒
■	： 中性子遮へい体
■	： 伝熱フィン
■	： 胴体
■	： バスケット
■	： バスケット交差部
■	： 中性子吸収材
■	： 水
■	： 使用済燃料収納缶（小）
■	： 燃料領域（均質化）

図 1-4-1 輪切り断面モデル形状図

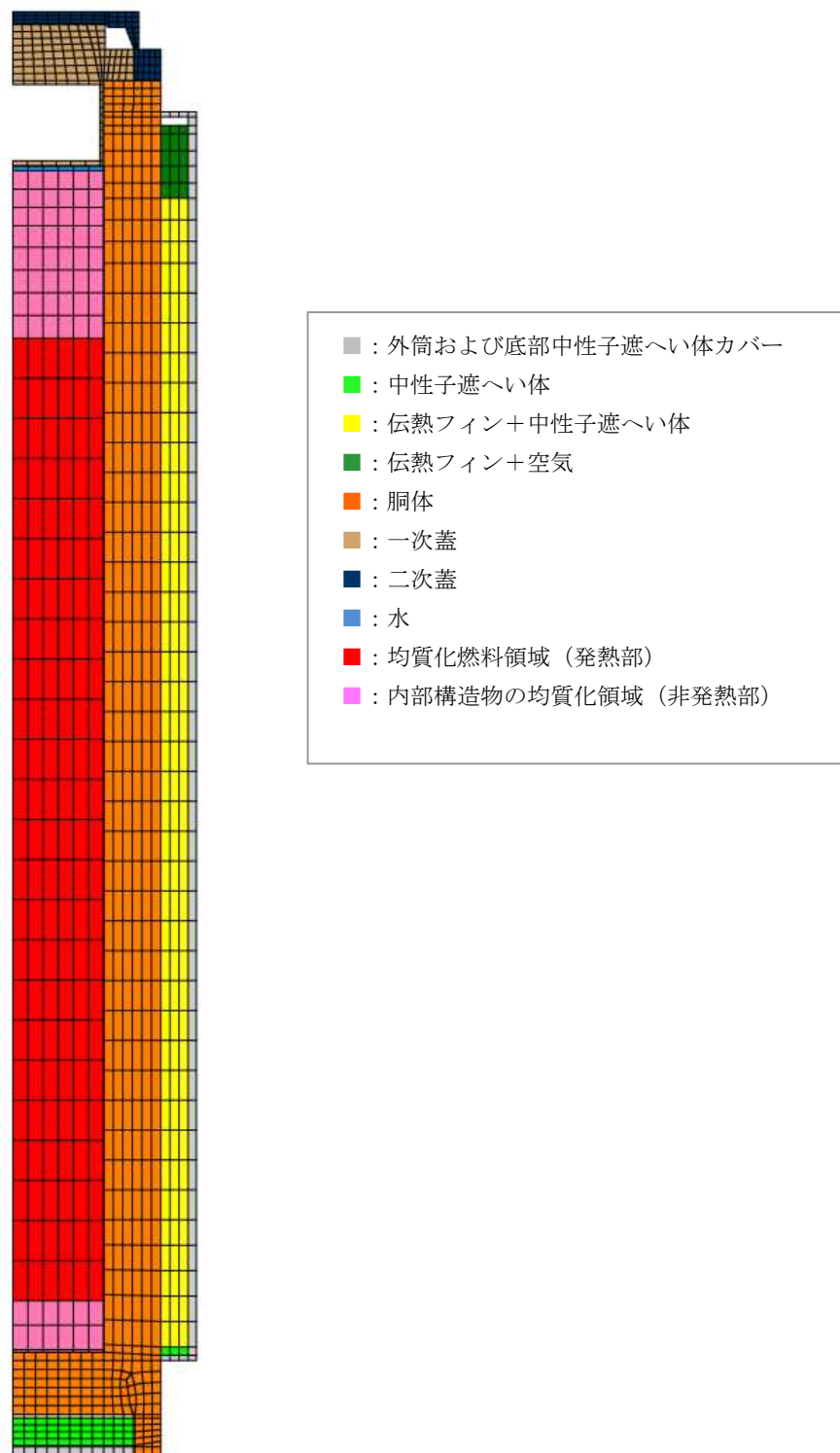


図 1-4-2 軸対称断面モデル形状図

1.4.5. 評価方法

輪切り断面モデルで容器中央部断面の燃料，バスケット，胴，中性子遮へい体の温度を評価する。輪切り断面モデルで評価できない部位については，軸方向の温度分布が求められる軸対称断面モデルで評価する。解析にはABAQUS コードを用いる。

1.4.6. 評価結果

評価結果を表 1-4-4 に示す。表 1-4-4 に示すとおり，構内用輸送容器を構成する部材はいずれも設計基準温度を下回っており，熱的健全性は維持される。

また，燃料被覆管の温度は 169℃であり，水素化物の再配向による機械特性の低下が生じる温度を大きく下回っており，燃料の健全性は維持される。

表 1-4-4 評価結果（各部温度）

対象部位		材質	評価結果 (℃)	設計基準 温度 (℃)	備考
構内用 輸送容器	中性子遮へ い材	レジン	96	149	
	Oリング	ふっ素ゴム	82	300	
	胴	低合金鋼	100	350	
	蓋	ステンレス鋼	96	425	
	バスケット	ボロン添加 ステンレス鋼	152	200	
燃料被覆管		ジルカロイ－ 2	169	200	8×8 燃料
				300	新型 8×8 ジルコニウムライ 燃料 高燃焼度 8×8 燃料， 9×9 燃料

除熱解析に用いるコード（ABAQUS）について

（１） 概要

ABAQUS コードは、米国 Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. (HKS 社) で開発された有限要素法に基づく伝熱解析等の汎用解析コードであり、輸送容器の伝熱解析などに広く利用されている。

（２） 機能

ABAQUS コードは、伝熱解析に際して以下の機能を有している。

- ① 定常、非定常のいずれの解も得ることができる。
- ② 一次元～三次元の任意形状の構造に対して解くことが可能である。
- ③ 初期条件（温度）は要素ごとに変化させることができ、計算ステップの自動決定も可能である。
- ④ 境界条件として、時間に依存する熱流束、温度、伝導、対流及び放射が考慮できる。
- ⑤ 構成物質の相変態が考慮できる。

（３） 解析フロー

ABAQUS コードの解析フローを図 1-4-3 に示す。

（４） 使用実績

ABAQUS コードは、多くの伝熱解析に使用された実績がある。

（５） 検証方法

貯蔵容器の定常伝熱試験に対して ABAQUS コードによる解析結果と試験結果を比較・検討し、本コードの妥当性が検証されている^{*1}。

^{*1} 山川秀次，五味義雄，尾崎幸男，尾崎明朗「使用済燃料キャスク貯蔵技術の確立—キャスクの伝熱特性評価—」，電中研報告書，U92038，（1993）

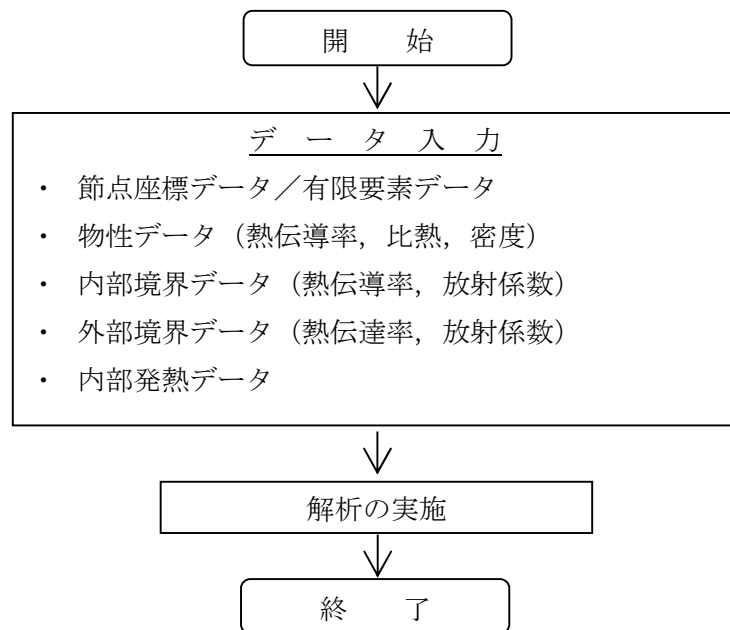


図 1-4-3 ABAQUS コードの伝熱解析フロー図

除熱解析に用いるコード（ORIGEN2）について

（１） 概要

ORIGEN2 コードは、米国オークリッジ国立研究所（ORNL）で開発された炉内中性子束の 1 点近似による燃焼計算コードである。ORIGEN2 コードは汎用解析コードであり、輸送容器の崩壊熱計算等に広く利用されている。

（２） 機能

ORIGEN2 コードは、燃焼解析に際して以下の機能を有している。

- ① 燃料の炉内での燃焼計算，炉取出し後の減衰計算により，冷却期間に対応した崩壊熱，放射線の強度，各核種の放射エネルギー等が求められる。
- ② 原子炉の炉型と燃料の組合せに対し，中性子エネルギースペクトルの違いにより重みをつけた断面積ライブラリが内蔵されており，任意に選択できる。
- ③ 計算結果は，放射化生成物，アクチニド，核分裂生成物に分類して出力される。
- ④ 燃焼計算に必要な放射性核種データ（崩壊熱，ガンマ線のエネルギー分布，自発核分裂と（ α ， n ）反応により発生する中性子線源強度等）に関しては，ORIGEN2 コード専用のライブラリがあり，これを用いる。

（３） 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを図 1-4-4 に示す。

（４） 使用実績

ORIGEN2 コードは，輸送容器，核燃料施設の崩壊熱計算に広く使用されている*1。

（５） 検証方法

汎用コードの導入評価*1 が実施されていることが確認されている。

大型実験/ベンチマーク試験による検証*2 が実施されていることが確認されている。

*1 ORNL, “ORIGEN2 Isotope Generation and Depletion Code MATRIX EXPONENTIAL METHOD”, CCC-371

*2 (社)日本原子力学会 “原子炉崩壊熱とその推奨値”，1989 年 8 月

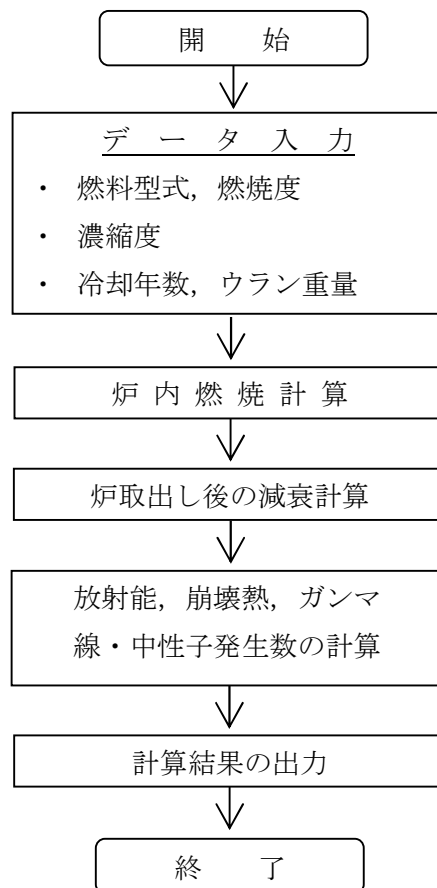


図 1-4-4 ORIGEN2 コードの計算フロー図

1.5. 密封機能

1.5.1. 基本的な考え方

構内用輸送容器の密封は容器本体及び一次蓋より構成される密封容器とこれに付属するポート部のカバーから構成される。容器本体と一次蓋、各ポートカバーのガスケットにはゴム製Ｏリングが使用されている。一次蓋で構成される構内用輸送容器の密封境界を図1-5-1に示す。

また、一次蓋を覆う形で二次蓋を容器本体に取付ける構造となっており、容器本体と二次蓋のガスケットはゴム製Ｏリングが使用され、一次蓋に漏えいが発生しても二次蓋で密封を確保できる構造となっている。二次蓋で構成される構内用輸送容器の密封境界を図1-5-2に示す。

密封機能の評価にあたっては、構造強度評価結果、除熱機能評価結果、容器構造から、構内用輸送容器の密封機能が維持されることを確認する。

1.5.2. 評価結果

(1) 構造強度評価結果

1.3項に示したとおり、構造強度評価から構内用輸送容器の密封境界を構成する胴、底板、一次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋、二次蓋ボルト、ポートカバー及びポートカバーボルトは想定される荷重条件に対して十分な強度を有しており、密封境界の構造健全性に問題がないことが確認されている。

(2) 除熱評価結果

1.4項に示したとおり、除熱機能評価からＯリングの最高温度は82℃で、設計基準温度である300℃を大きく下回ることから、密封境界の熱的健全性に問題ないことが確認されている。

(3) 容器構造

構内用輸送容器の密封境界を構成する一次蓋及び各ポートカバーは、ガスケットにゴム製のＯリングを使用し、複数のボルトで容器本体に締付ける構造であり、締付けトルクの管理により密封機能を担保する。

各ポートカバーは3号機に空の容器を移動する前に、共用プールで締付けトルクを管理し、密封機能を担保する。

一次蓋は3号機で燃料装填後に容器本体に締付ける際に、締付けトルクを管理し、密封機能を担保する。

二次蓋も一次蓋と同様にガスケットにゴム製のＯリングを使用し、複数のボルトで容器本体に締付けトルクを管理して締付ける構造であり、万が一、一次蓋の密封機能が喪失した場合でも、二次蓋で密封機能を担保する。

(4) まとめ

以上から，構内用輸送容器の密封性能は維持される。

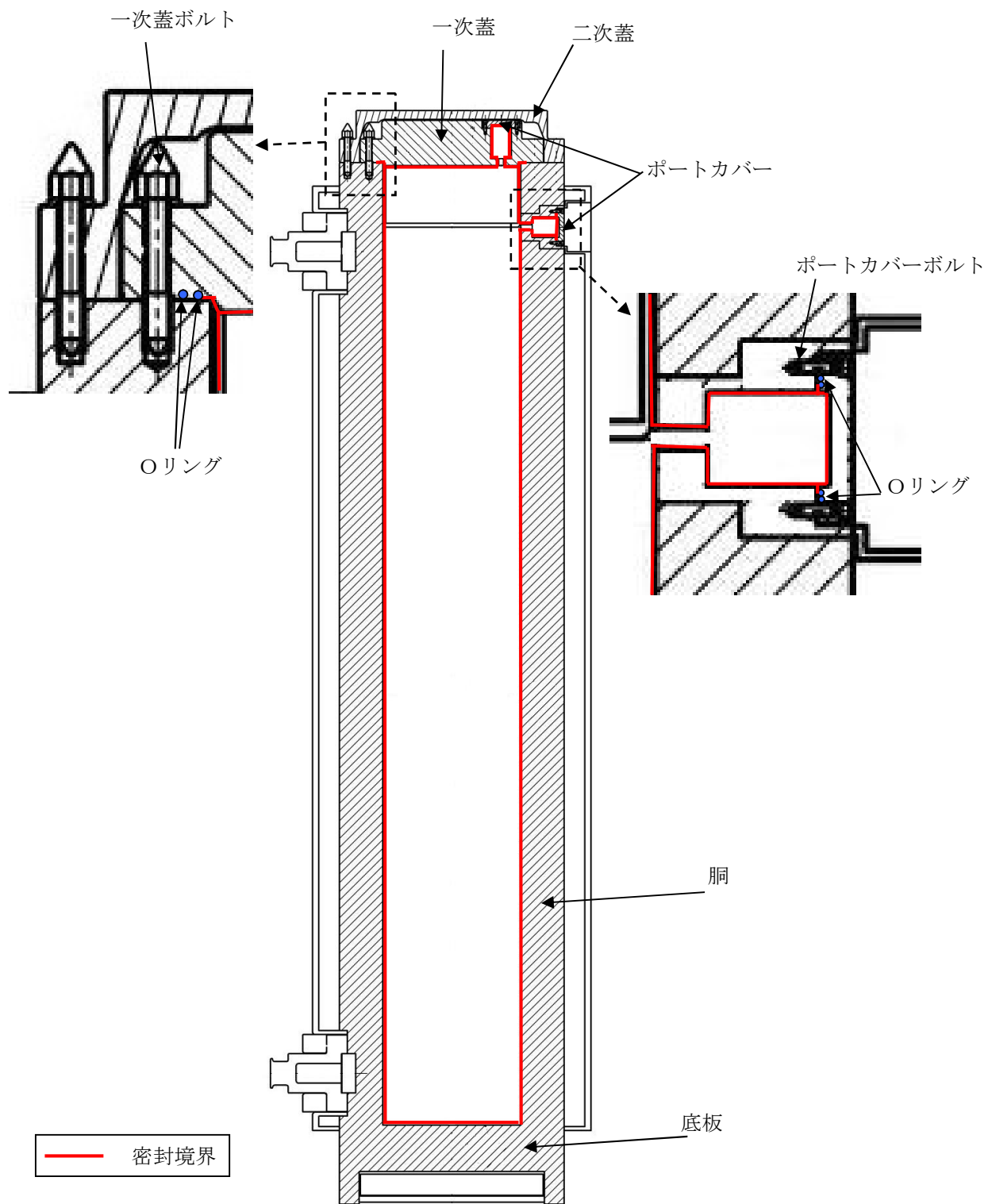
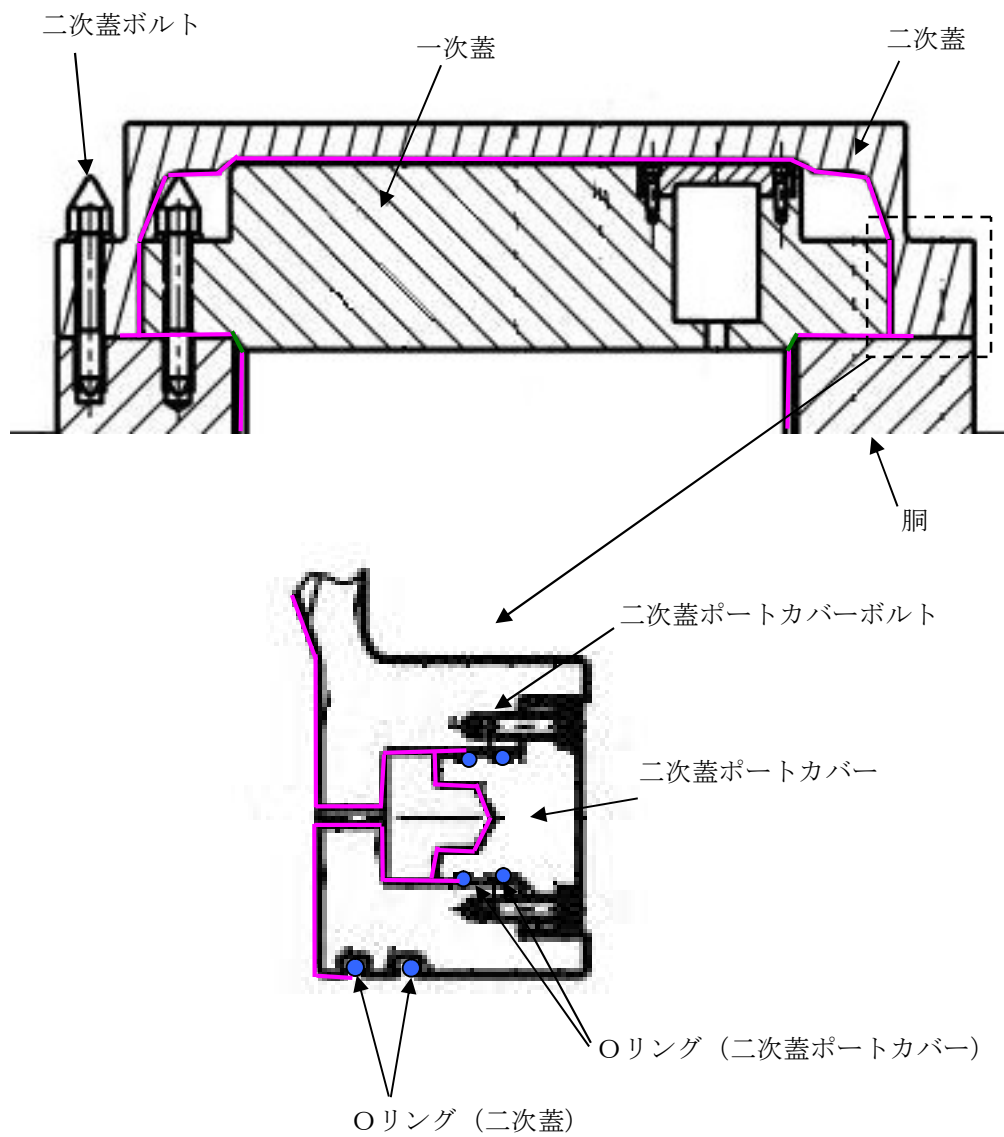


図 1-5-1 一次蓋で構成する容器密封境界



— 二次蓋で構成する密封境界

図 1-5-2 二次蓋で構成する密封境界

1.6. 遮へい機能

1.6.1. 基本的な考え方

収納した使用済燃料から発生する放射線を遮へいするための構内用輸送容器の遮へい設計の基本的な考え方は以下のとおりである。

- 使用済燃料から発生するガンマ線及び中性子を遮へいするために、構内用輸送容器はガンマ線遮へいと中性子遮へいの機能を有するものとする
- 主要なガンマ線遮へい材は、胴及び底板の低合金鋼、外筒の炭素鋼、蓋のステンレス鋼とする
- 主要な中性子遮へい材は、内水及び胴と外筒間、底板底部のレジンとする

1.1 に記載のとおり、構内用輸送容器は3号機に新設するクレーン（定格荷重：50ton）で取扱えるよう、収納する燃料を含む総重量を 46.3ton として設計した容器であり、容器の取扱作業に従事する放射線業務従事者の作業環境からの被ばく低減を図るため、収納体数を7体として遮へい厚さを設定している。

遮へい機能の評価においては、収納する使用済燃料の線源強度を考慮し、構内用輸送容器表面及び表面から1mにおける線量当量率を評価する。

1.6.2. 評価条件

1) 遮へい厚さ

構内用輸送容器の遮へい厚さを表 1-6-1 に示す。

表 1-6-1 遮へい厚さ

(単位：cm)

	低合金鋼・炭素鋼	ステンレス鋼	レジン
側面方向	約 25	—	約 10
上部方向	—	約 23	—
下部方向	約 28	—	約 10

2) 線源条件

遮へい評価の線源条件は表 1-1-2 に示す 3 号機使用済燃料プールに保管されている燃料の条件を包絡する条件とする。線源条件を表 1-6-2 に示す。

表 1-6-2 線源条件

項目	線源条件
燃料タイプ	9×9 燃料
平均燃焼度 (MWd/t)	52,000
冷却期間 (日)	1716
収納体数 (体)	7

3) 線源強度及びエネルギー

① ガンマ線源強度

燃料有効部のガンマ線源強度の計算は ORIGEN2 コードにより行う。得られたガンマ線源強度を表 1-6-3 に示す。また、構造材の放射化によるガンマ線源強度は次式で計算する。構造材の放射化によるガンマ線源強度を表 1-6-4 に示す。

$$A = N_0 \cdot \sigma \cdot \phi \cdot \{1 - \exp(-\lambda \cdot T_1)\} \cdot \exp(-\lambda \cdot T_2)$$

ここで、A：放射化核種 (^{60}Co) の放射能 (Bq)

N_0 ：ターゲット核種 (^{59}Co) の個数 (atoms)

σ ：2200m/s の中性子による (^{59}Co) の (n, γ) 反応断面積 (cm^2)

ϕ ：炉内照射熱中性子束 ($\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$)

λ ： ^{60}Co の崩壊定数 (/日)

T_1 ：照射期間 (日)

T_2 ：冷却期間 (日)

表1-6-3 ガンマ線源強度

(容器1基あたり)

光子エネルギー群		集合体7体あたり (ph/s/7体)
群	代表エネルギー (MeV)	
1	1.00E-02	5.9E+15
2	2.50E-02	1.3E+15
3	3.75E-02	1.5E+15
4	5.75E-02	1.2E+15
5	8.50E-02	7.7E+14
6	1.25E-01	8.3E+14
7	2.25E-01	6.4E+14
8	3.75E-01	3.6E+14
9	5.75E-01	1.1E+16
10	8.50E-01	3.1E+15
11	1.25E+00	5.9E+14
12	1.75E+00	1.9E+13
13	2.25E+00	6.7E+12
14	2.75E+00	2.9E+11
15	3.50E+00	3.7E+10
16	5.00E+00	1.3E+08
17	7.00E+00	1.5E+07
18	9.50E+00	1.7E+06

表 1-6-4 構造材の放射化によるガンマ線源強度

(容器1基あたり)

	⁶⁰ Co 線源強度 (Bq)
ハンドル部	1.2×10^{12}
上部グリッド部	5.2×10^{12}
上部端栓部	5.0×10^{11}
下部タイプレート部	2.3×10^{13}

② 中性子線源強度

中性子線源強度の計算は ORIGEN2 コードにより行う。得られた中性子線源強度を表 1-6-5 に示す。また、評価に用いる中性子エネルギースペクトルは Pu-239 の核分裂スペクトルとし、表 1-6-6 に示す。

表 1-6-5 中性子線源強度

(容器 1 基あたり)

		中性子線源強度 (n/s)
1 次中性子源	自発核分裂によるもの	3.0×10^9
	(α , n) 反応によるもの	3.6×10^7
実効増倍率		0.95
実効増倍効果を考慮した全中性子線源強度		6.0×10^{10}

表1-6-6 中性子線源スペクトル

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル
1	1.492×10^7	5.72×10^{-4}
2	1.220×10^7	2.02×10^{-3}
3	1.000×10^7	6.07×10^{-3}
4	8.180×10^6	2.00×10^{-2}
5	6.360×10^6	4.12×10^{-2}
6	4.960×10^6	5.27×10^{-2}
7	4.060×10^6	1.10×10^{-1}
8	3.010×10^6	8.74×10^{-2}
9	2.460×10^6	2.28×10^{-2}
10	2.350×10^6	1.15×10^{-1}
11	1.830×10^6	2.07×10^{-1}
12	1.110×10^6	1.89×10^{-1}
13	5.500×10^5	1.31×10^{-1}
14	1.110×10^5	1.59×10^{-2}
15	3.350×10^3	8.12×10^{-5}
16	5.830×10^2	5.89×10^{-6}
17	1.010×10^2	3.89×10^{-7}
18	2.900×10^1	5.53×10^{-8}
19	1.070×10^1	1.33×10^{-8}
20	3.060×10^0	1.88×10^{-9}
21	1.120×10^0	4.19×10^{-10}
22	4.140×10^{-1}	1.20×10^{-10}

1.6.3. 評価モデル

遮へい評価のモデルを図 1-6-1～図 1-6-2 に示す。計算モデルは、構内用輸送容器の実形状を模擬して 2 次元 R-Z 体系で評価する。また、トランニオン取付け部は局所的な中性子遮へい体の欠損が生じるため詳細評価を行う。

評価モデルは以下の条件を考慮する。

- ・ 主要な遮へい体の厚さは製造公差を考慮した寸法とし、遮へい体の密度はノミナル値とする。

1.6.4. 評価方法

遮へい計算は、ガンマ線、中性子共に DOT3.5 コードを用いて計算し、構内用輸送容器表面及び表面から 1 m の線量当量率を求める。

ライブラリとしては、DLC-23/CASK データを用い、線量当量率への変換は ICRP Publ. 74 に基づく 1cm 線量当量率への換算係数を用いる。

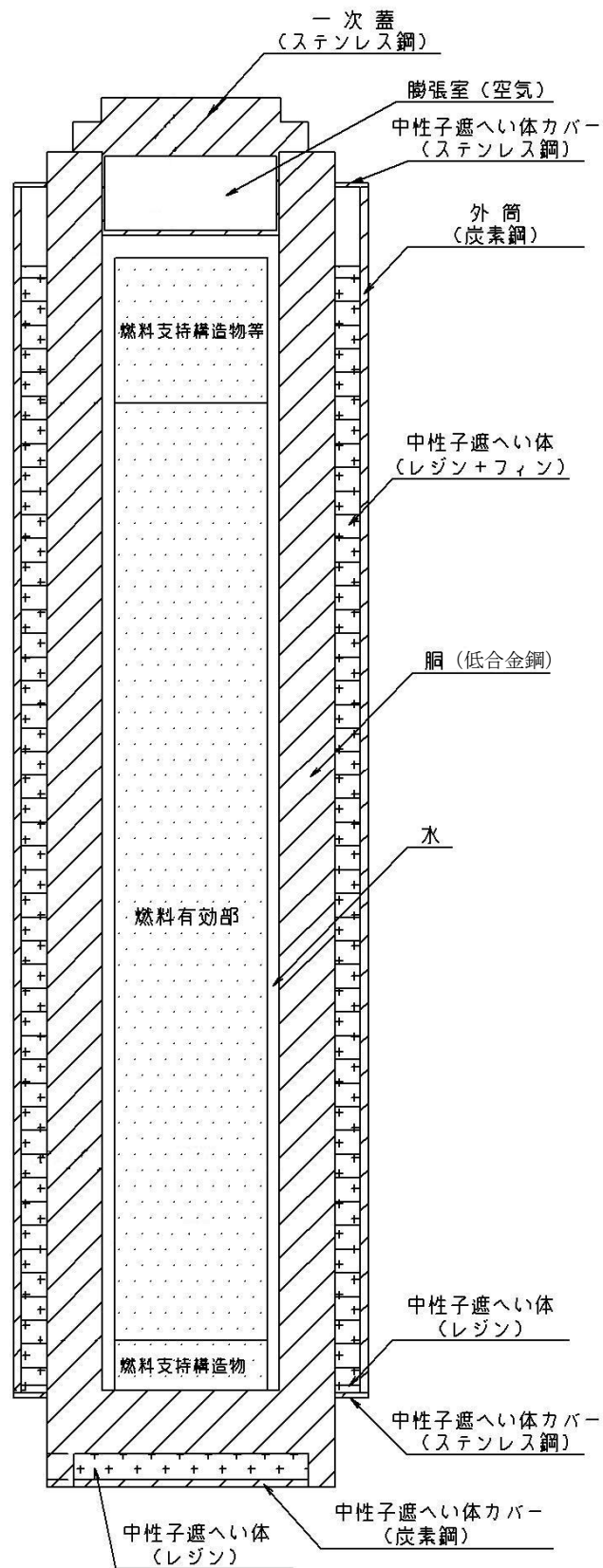


図 1-6-1 遮へい解析モデル (全体 R-Z 体系)

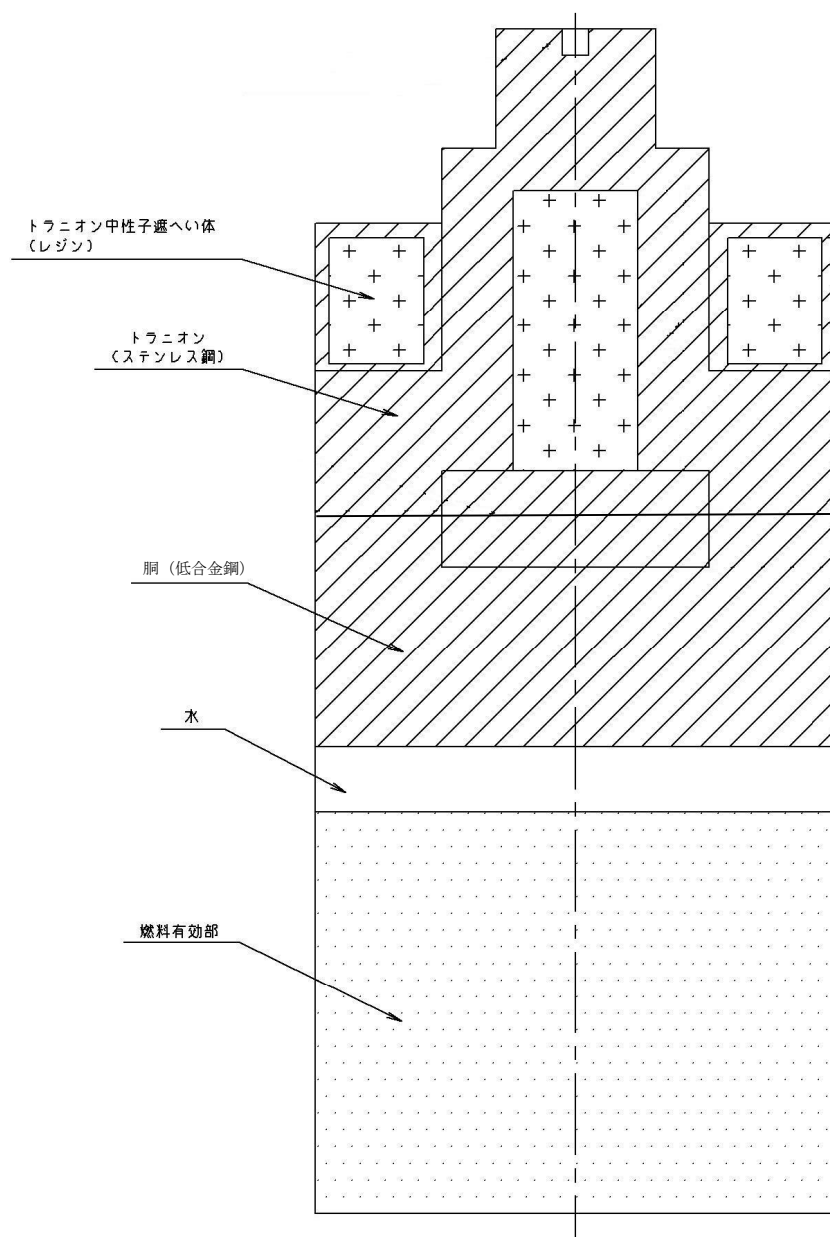


図 1-6-2 遮へい解析モデル (トラニオン部 R-Z 体系)

1.6.5. 評価結果

構内用輸送容器の線量当量率評価位置を図 1-6-3 に、評価結果を表 1-6-7 に示す。評価結果は容器上部、上部中性子遮へい体欠損部、容器側面、下部中性子遮へい体欠損部、容器下部における線量当量率の最大値を示しており、容器表面の線量当量率は容器側面で最大 1.5mSv/h、容器表面から 1m の線量当量率は容器側面で最大 0.34mSv/h となっている。

線量当量率が最大となるのは容器側面であり、容器取扱時には追加遮へい体設置等の放射線業務従事者の被ばく低減対策を講じる計画としている。

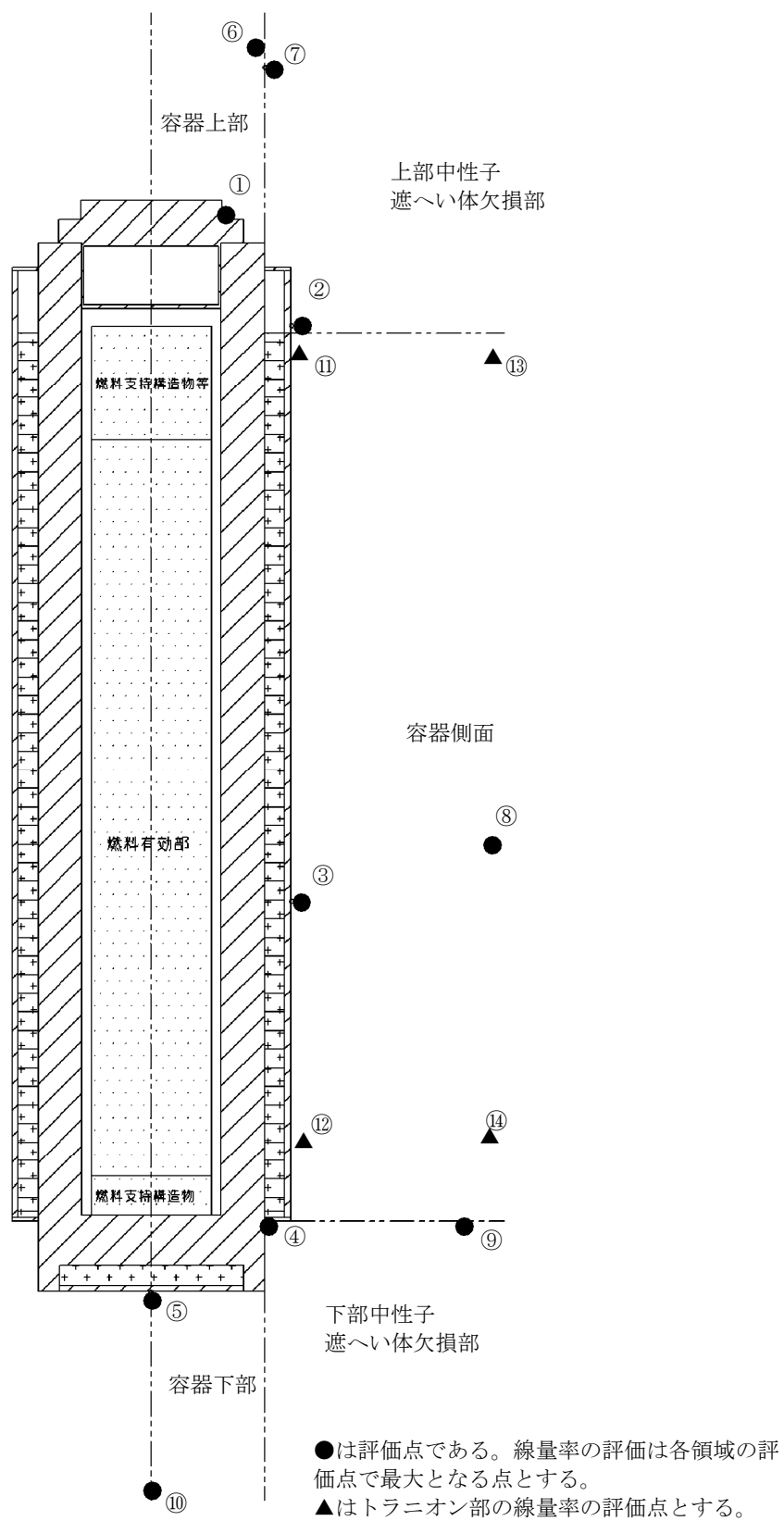


図 1-6-3 線量評価点（容器全体）

表 1-6-7 最大線量当量率の評価結果

(単位：mSv/h)

		容器上部	上部中性子 遮へい体欠 損部	容器側面	下部中性子 遮へい体欠 損部	容器下部
表面	評価点	①	②	③	④	⑤
	結果	1.4	5.1E-2	1.5	1.1	1.7E-1
表面から 1 m	評価点	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
	結果	4.6E-2	5.2E-2	3.4E-1	1.0E-1	2.1E-2

(単位：mSv/h)

		上部トラニオン	下部トラニオン
表面	評価点	⑪	⑫
	結果	5.4E-2	7.5E-1
表面から 1 m	評価点	⑬	⑭
	結果	6.4E-2	1.9E-1

遮へい解析に用いるコード（ORIGEN2）について

（１） 概要

ORIGEN2 コードは、米国オークリッジ国立研究所（ORNL）で開発された炉内中性子束の 1 点近似による燃焼計算コードである。ORIGEN2 コードは汎用解析コードであり、輸送容器の放射線源強度計算等に広く利用されている。

（２） 機能

ORIGEN2 コードは、燃焼解析に際して以下の機能を有している。

- ① 燃料の炉内での燃焼計算，炉取出し後の減衰計算により，冷却期間に対応した崩壊熱，放射線の強度，各核種の放射能量等が求められる。
- ② 原子炉の炉型と燃料の組合せに対し，中性子エネルギースペクトルの違いにより重みをつけた断面積ライブラリが内蔵されており，任意に選択できる。
- ③ 計算結果は，放射化生成物，アクチニド，核分裂生成物に分類して出力される。
- ④ 燃焼計算に必要な放射性核種データ（崩壊熱，ガンマ線のエネルギー分布，自発核分裂と（ α ， n ）反応により発生する中性子線源強度等）に関しては，ORIGEN2 コード専用のライブラリがあり，これを用いる。

（３） 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを図 1-6-4 に示す。

（４） 使用実績

ORIGEN2 コードは，輸送容器，核燃料施設の放射線源強度計算に広く使用されている*1。

（５） 検証方法

汎用コードの導入評価*1 が実施されていることが確認されている。

大型実験/ベンチマーク試験による検証*2 が実施されていることが確認されている。

*1 ORNL, “ORIGEN2 Isotope Generation and Depletion Code MATRIX EXPONENTIAL METHOD”, CCC-371

*2 (社)日本原子力学会 “原子炉崩壊熱とその推奨値”，1989 年 8 月

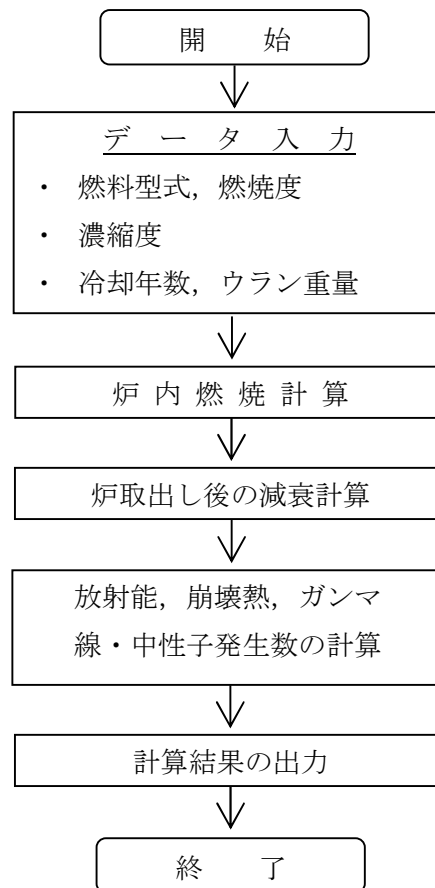


図 1-6-4 ORIGEN2 コードの計算フロー図

遮へい解析に用いるコード (DOT3.5 コード) について

(1) 概要

DOT3.5 コード (以下「DOT コード」という。) は二次元輸送コードであり, 米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された汎用解析コードである。

(2) 機能

DOT コードは, 遮へい解析に際して以下の機能を有する。

- ① ガンマ線や中性子に対するボルツマン輸送方程式を解くことによる数値解析法であり, 放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性が表現できる。
- ② DOT コードは, 二次元の体系を扱うことができる。

(3) 解析フロー

DOT コードの解析フローを図 1-6-5 に示す。

(4) 使用実績

DOT コードは, 原子力施設の遮へい計算に広く用いられており, 輸送容器の遮へい解析に豊富な実績がある。

(5) 検証

汎用コードの導入評価*1 が実施されていることが確認されている。

大型実験/ベンチマーク試験による検証*2 が実施されていることが確認されている。

*1 W. A. Rhoades, “DOT3.5 TWO DIMENSIONAL DISCRETE ORDINATES RADIATION TRANSPORT CODE”,
CCC-276, 1978 年 10 月

*2 (社) 日本原子力学会 “中性子遮蔽設計ハンドブック”, 1993 年 4 月

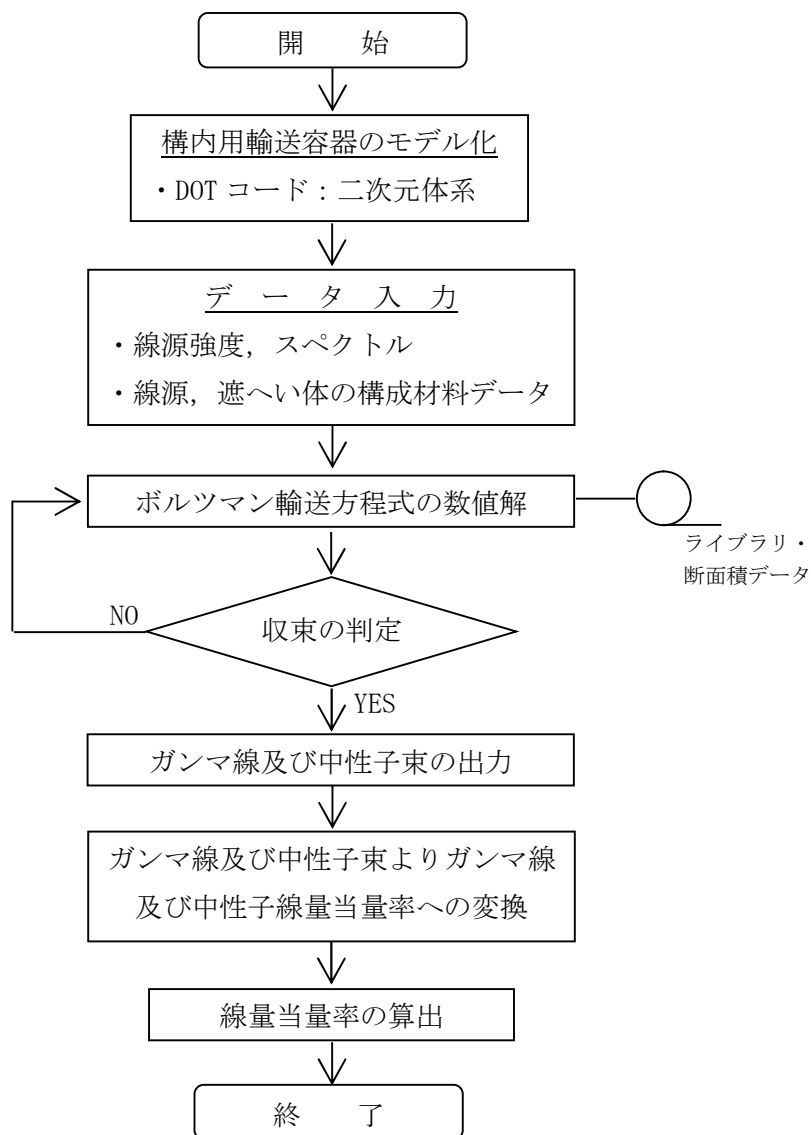


図 1-6-5 DOT コードの解析フロー図

1.7. 臨界防止機能

1.7.1. 基本的な考え方

臨界防止にあたっては、想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止するため以下のとおり設計する。

- 燃料を収納するバスケットは格子構造として、燃料を所定の幾何学的配置に維持する設計とする。
- バスケットの主要材料には、中性子を吸収するボロン添加ステンレス鋼を使用し、バスケット外周部にボロン添加アルミニウム合金板を配置する。

1.7.2. 設計基準

想定されるいかなる場合も実効増倍率が 0.95 以下であること。

1.7.3. 評価条件

1) 燃料条件，評価モデル

以下の保守的な燃料条件で評価を行うものとする。臨界評価モデルを図 1-7-1 に示す。

- ・燃料タイプは表 1-1-2 に示す燃料条件を包絡する条件として、最も U-235 の濃縮度の高い 9 × 9 燃料とする
- ・U-235 の濃縮度は未照射のまま減損しない値とし、9 × 9 燃料の集合体平均値 3.9wt% とする。
- ・燃料には可燃性毒物として Gd を添加した燃料が含まれるが、中性子吸収断面積の大きい Gd を無視する。
- ・燃料の変形を考慮して使用済燃料収納缶（小）内で燃料棒が最適な状態に広がった配列とする。
- ・燃料を装填した使用済燃料収納缶（小）がバスケット内で最適に偏心した状態とする。
- ・バスケット材料のボロン添加ステンレス鋼材中及びバスケット外周に配置したボロン添加アルミニウム合金の ^{10}B 含有量は、製造下限値とする。
- ・評価に使用する各部の寸法は製造公差を考慮した寸法とする。
- ・チャンネルボックス及びウォーターロッドは水に置換える。
- ・中性子遮へい体部（レジン）は真空とする。
- ・構内用輸送容器外部の雰囲気は安全側に真空、完全反射とする。
- ・評価モデルは 2 次元体系とする。

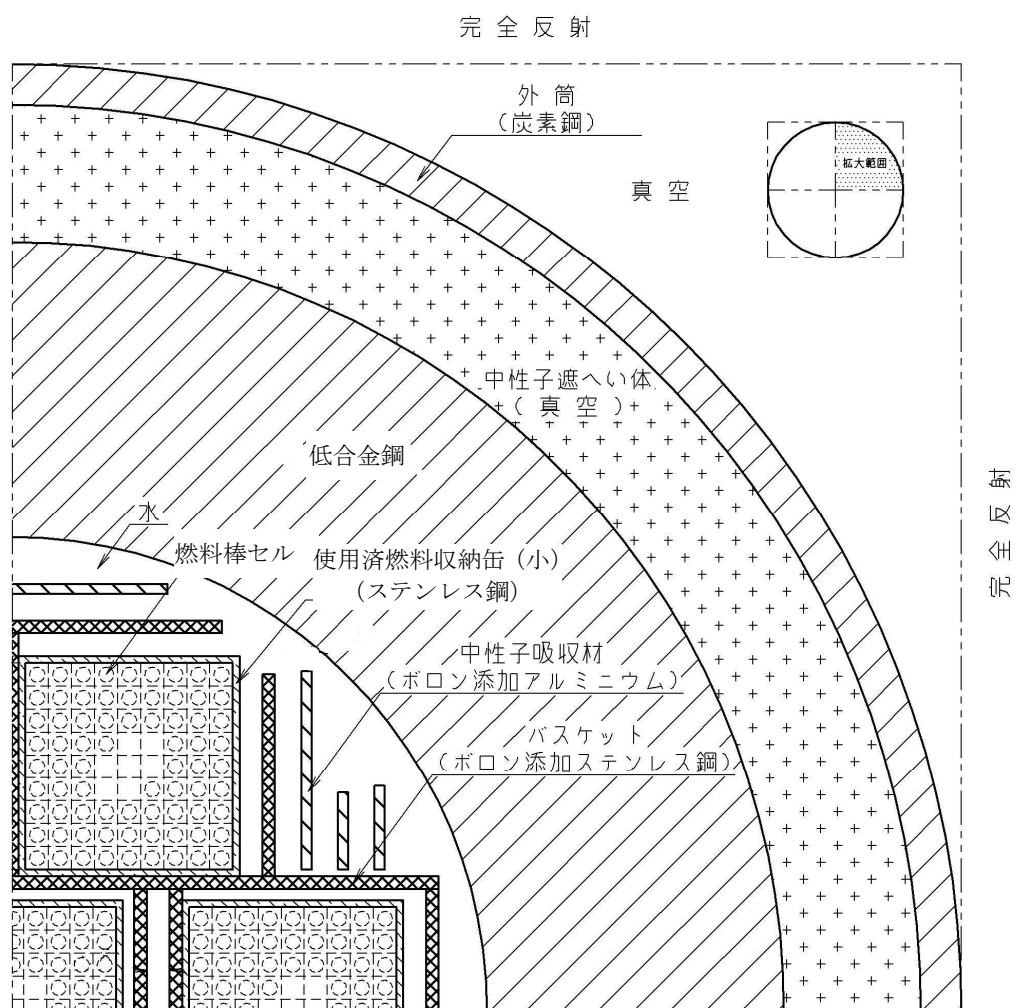


図 1-7-1 臨界評価体系

1.7.4. 評価方法

構内用輸送容器の実形状をモデル化し，臨界解析コード KENO-V.a を使用して求める。

1.7.5. 評価結果

評価結果を表 1-7-1 に示す。表 1-7-1 に示すとおり，構内用輸送容器の実効増倍率は設計基準を満足している。

表 1-7-1 評価結果

実効増倍率*1	設計基準
0.77	0.95

*1 モンテカルロ計算の統計誤差 (3σ) を考慮した値

臨界解析に用いるコード (KENO-V.a) について

(1) 概要

KENO-V.a コードは、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発されたモンテカルロ法に基づく公開の臨界解析コードであり、輸送容器の臨界解析などに利用されている。

(2) 機能

KENO-V.a コードは、臨界解析に際して以下の機能を有している。

- ① 実際に中性子が出会う物理現象を確率理論を用いて模擬するため、どのような物理的問題にも適用できる。なお、統計的な手法を用いるため、計算結果には統計誤差が付随する。
- ② 一次元～三次元の任意形状の体系を扱うことができる。

(3) 解析フロー

KENO-V.a コードの解析フローを図 1-7-2 に示す。

(4) 使用実績

KENO-V.a コードは、国内外で輸送容器の臨界解析をはじめ、核燃料施設の臨界解析に使用されている。

(5) 検証

米国のバットル研究所 (パシフィック ノースウエスト研究所, PNL) で行われた臨界実験^{*1}の中から 16 種類の臨界体系をベンチマーク試験^{*2}として選び、検証を行った。

*1 S. R. Bierman and E. D. Clayton, “Criticality Experiments with Subcritical Clusters of 2.35 Wt% and 4.31 Wt% ²³⁵U Enriched UO₂ Rods in Water with Steel Reflecting Walls”, NUREG/CR-1784(PNL-3602), U.S. Nuclear Regulatory Commission, April 1981.

*2 “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments”, LEU-COMP-THERM-010, LEU-COMP-THERM-013, LEU-COMP-THERM-017, LEU-COMP-THERM-042, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2009.

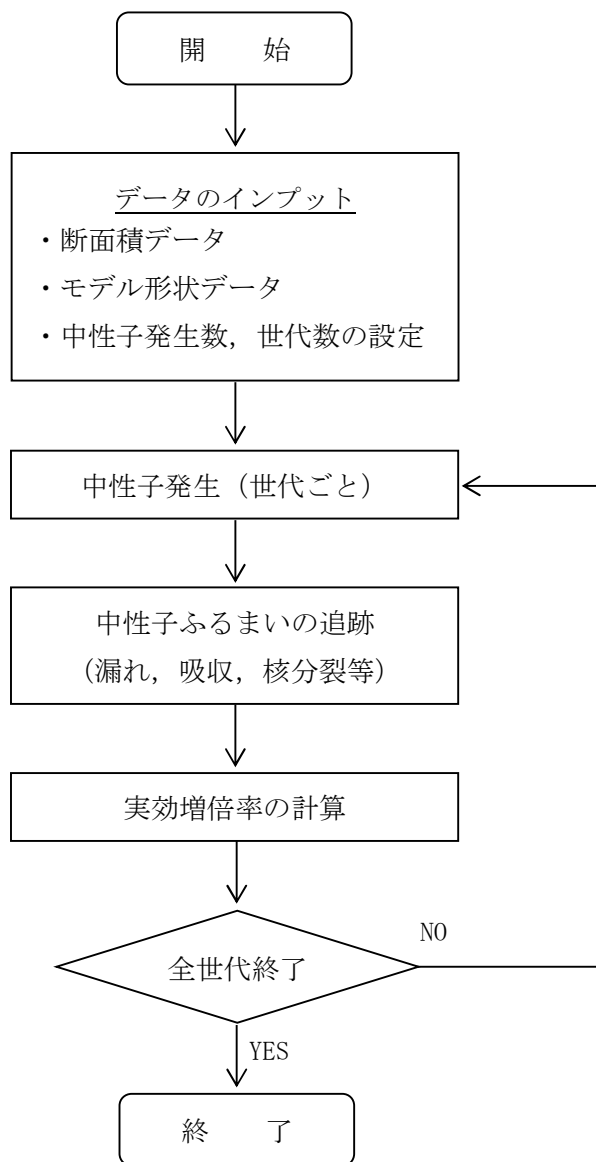


図 1-7-2 KENO-V. a コードの解析フロー図

1.8. 構内用輸送容器の落下

1.8.1. 原因

構内用輸送容器の取扱い中に、何らかの原因で構内用輸送容器が落下して密封境界が破損し、放射性物質が環境に放出される。

1.8.2. 発生防止対策

構内用輸送容器の落下を防止するために、次のような設計及び手順の対策を講じる。

- (1) クレーン主巻フックは二重のワイヤーロープで保持する構造とする。
- (2) クレーン巻上装置は電源断時に電動油圧押上機ブレーキで保持する構造とする。
- (3) クレーン主巻フックと吊具、吊具と構内用輸送容器の取付けを二重化する。
- (4) 取付け作業後の取付け状態を ITV にて確認し、外れ止めを取り付ける。
- (5) 作業開始前にクレーン及び吊具の事前点検を実施する。
- (6) 作業手順書を整備し、作業員への教育訓練を行う。

1.8.3. 核分裂生成物の放出量及び線量の評価

1.8.3.1. 核分裂生成物の放出量

(1) 破損燃料棒の評価

破損する燃料棒の本数の評価は、次の仮定に基づいて行う。

- a. 構内用輸送容器の取り扱い作業に際し、構内用輸送容器が落下して、構内用輸送容器に収納された燃料集合体が破損するものと仮定する。
- b. 落下による燃料集合体の破損体数は、構内用輸送容器の収納体数 7 体とする。

(2) 評価条件

核分裂生成物の移行と放出量の評価は、次の仮定に基づいて行う。

- a. 燃料ギャップ内の核分裂生成物の量は、表 1-1-2 の燃料条件を包絡する条件として 燃焼度 52,000MWd/t の 9×9 燃料集合体について行う。
- b. 燃料集合体の冷却期間は表 1-1-2 の燃料条件を包絡する条件として 1716 日とする。
- c. 破損した燃料棒のギャップ内核分裂生成物の全量が構内用輸送容器内に放出されるものとする。破損した燃料棒のギャップ内核分裂生成物の存在量については、半減期の長い核種の放出が支配的であることを考えて、破損した燃料棒内の全蓄積量に対して希ガス (Kr-85) 及びよう素 (I-129) それぞれ 30% とする。
- d. 放出された希ガスは、全量が構内用輸送容器から大気中へ移行するものとする。
- e. 放出されたよう素は、全量が構内用輸送容器から大気中へ移行するものとし、構内用輸送容器に内包する水による除去は無いものとする。

(3) 評価結果

上記の評価条件に基づいて計算した核分裂生成物の大気中への放出量は表 1-8-1 の通りである。

表 1-8-1 核分裂生成物の大気中への放出量

核分裂生成物	放出量
希ガス	約 1.3×10^{14} Bq
よう素	約 6.6×10^8 Bq

1.8.3.2. 線量当量の評価

(1) 評価の前提

大気中へ放出される核分裂生成物は、地上放出されるものとし、これによる実効線量の計算は、次の仮定に基づいて行う。

a. 敷地境界外の地表空气中濃度は、設置許可申請書添付書類六の「5.5 安全解析に使用する気象条件」に記述される相対濃度に核分裂生成物の全放出量を乗じて求める。

なお、相対濃度 (χ/Q) は保守的な評価となる設置許可申請書記載の 4 号機の主蒸気管破断 (地上放出) の値 3.4×10^{-5} s/m³ を適用する。

b. 敷地境界外の希ガスによる γ 線空気吸収線量は、設置許可申請書添付書類六の「5.5 安全解析に使用する気象条件」に記述される相対線量に希ガスの全放出量を乗じて求める。

なお、相対線量 (D/Q) は保守的な評価となる設置許可申請書記載の 4 号機の主蒸気管破断 (地上放出) の値 3.4×10^{-19} Gy/Bq を適用する。

(2) 評価方法

敷地境界外における実効線量は、次に述べる内部被ばくによる実効線量及び外部被ばくによる実効線量の和として計算する。

よう素の内部被ばくによる実効線量 H_I (Sv) は、(1) 式で計算する。

$$H_I = R \cdot H \cdot \chi / Q \cdot Q_I \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここで、

R : 呼吸率 (m³/s) 「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」の活動中の呼吸率を秒当たりに換算して用いる。
(小児 : 0.31m³/h, 成人 : 1.2m³/h)

H : よう素 (I-129) を 1Bq 吸入した場合の実効線量は ICRP Publ. 72 の値を用いる。
(小児 : 2.0×10^{-7} Sv/Bq, 成人 : 9.6×10^{-8} Sv/Bq)

χ / Q : 相対濃度 (s/m³)

Q_I : よう素の大気放出量 (Bq)

希ガスの γ 線外部被ばくによる実効線量 H_γ (Sv) は, (2)式で計算する。

$$H_\gamma = K \cdot D / Q \cdot Q_K \cdot E_\gamma / 0.5 \cdots \cdots \cdots (2)$$

ここで,

- K : 空気吸収線量から実効線量への換算係数 (1Sv/Gy)
- D / Q : 相対線量 (Gy/Bq)
- Q_K : 希ガスの大気放出量 (Bq)
- E_γ : γ 線実効エネルギー「被ばく計算に用いる放射線エネルギー等について」を用いる。(0.0022MeV)

また, 希ガスの β 線外部被ばくによる実効線量 H_β (Sv) は, (3)式で計算する。

$$H_\beta = 6.2 \times 10^{-14} \cdot \chi / Q \cdot Q_K \cdot E_\beta \cdot W_{TS} \cdots \cdots \cdots (3)$$

ここで,

- χ / Q : 相対濃度 (s/m³)
- Q_K : 希ガスの大気放出量 (Bq)
- E_β : β 線実効エネルギー「被ばく計算に用いる放射線エネルギー等について」を用いる。(0.251MeV)
- W_{TS} : 皮膚の組織荷重係数は ICRP Publ.60 の値を用いる。(0.01)

(3) 評価結果

上記の評価前提及び方法に基づき敷地境界外の実効線量を評価した結果は表 1-8-2 の通りである。

表 1-8-2 構内用輸送容器の落下時の実効線量

	小児	成人
よう素の γ 線による実効線量	約 3.9×10^{-4} mSv	約 7.1×10^{-4} mSv
希ガスの γ 線による実効線量	約 1.9×10^{-4} mSv	約 1.9×10^{-4} mSv
希ガスの β 線による実効線量	約 6.7×10^{-4} mSv	約 6.7×10^{-4} mSv
実効線量 (合計)	約 1.3×10^{-3} mSv	約 1.6×10^{-3} mSv

上記の値から判断して, 本事象による周辺の公衆に与える放射線被ばくのリスクは十分に小さいものと考えられる。

2. 別添

別添－1 3号機構内用輸送容器に係る確認事項について

別添－2 3号機構内用輸送容器の保守について

３号機 構内用輸送容器に係る確認事項について

３号機 構内用輸送容器の設置工事および溶接に係る主要な確認項目を表－１～表－２に示す。

表－１ 安全機能及び構造強度に関する確認事項

確認事項	確認項目		確認内容	判定基準
構造強度	材料確認		実施計画に記載されている主な材料について確認する。	実施計画のとおりであること。
	強度・漏えい確認	耐圧・漏えい確認	確認圧力で保持した後、確認圧力に耐えていることを確認する。 耐圧確認終了後、耐圧部分からの漏えいの有無を確認する。	確認圧力に耐え、かつ構造物の変形等がないこと。 また、耐圧部から著しい漏えいがないこと。
構造強度 遮へい 機能	構造確認	寸法確認	実施計画に記載されている主要寸法を確認する。	寸法が許容範囲内であること。
		外観確認	各部の外観を確認する。	有意な欠陥がないこと。
除熱機能	機能確認	伝熱確認	代表１基について容器内部に使用済燃料を模擬するヒータを挿入して発熱させ、温度を確認する。	周囲温度を補正した容器各部の温度が最高使用温度を超えないこと。
密封機能	機能確認	取合確認	密封境界を構成する蓋等が容器と取合い密封境界の構成に問題が無いことを確認する。	密封境界を構成する蓋等が容器と取合うこと。
臨 界 防 止 機能	機能確認	材料確認 寸法確認 外観確認	バスケットの材料及び主要寸法が、実施計画評価の前提条件となっている値を満足していることを確認し、バスケットの外観に異常のないことを確認する。	・材料が実施計画どおりであり、寸法が許容範囲内であること。 ・有意な変形、破損等の異常がないこと。

表－2 溶接部に関する確認事項

確認項目	確認内容	判定基準
材料確認	使用材料を材料証明書により確認する。	実施計画に記載の材料が使用されていること。
開先確認	開先面の溶接に悪影響を及ぼす欠陥，付着物の有無を確認する。	開先面の溶接に悪影響を及ぼす傷，欠陥，付着物がないこと。
	開先形状，寸法について確認する。	開先形状，寸法が溶接規格に適合していること。
溶接作業 確認	溶接施工法が，溶接規格第２部に定める溶接施工法認証標準に基づく確認試験を実施し合格したものであることを確認する。	溶接施工法が，溶接規格第２部に定める溶接施工法認証標準に基づく確認試験を実施し合格したものであること。
	溶接士は，実機作業が可能となる資格を有し，同資格が有効期限内であることを確認する。	溶接士は，実機作業が可能となる資格を有し，同資格が有効期限内であること。
	溶接設備が溶接施工法に適したものであることを確認する。	溶接設備が溶接施工法に適したものであること。
	溶接が，あらかじめ決められた溶接施工法によって，溶接士が保有する資格の作業範囲内で行われていることを確認する。	溶接が，あらかじめ決められた溶接施工法で行われていること。 溶接士が保有する資格の作業範囲内で行われていること。
溶接後熱 処理確認	溶接後熱処理の方法，熱処理設備の種類及び容量が溶接規格に適合するものであることを確認する。	溶接後熱処理の方法，熱処理設備の種類及び容量が溶接規格に適合するものであること。
非破壊 確認	放射線透過試験または浸透探傷試験を実施し，溶接規格に規定する判定基準に適合することを確認する。	放射線透過試験または浸透探傷試験を実施し，溶接規格に規定する判定基準に適合すること。
機械確認	機械試験を実施し，溶接規格に規定する判定基準に適合することを確認する。	機械試験を実施し，溶接規格に規定する判定基準に適合すること。
耐圧確認	溶接規格に規定する試験圧力で，一定時間以上保持した後，試験圧力に耐え，かつ，漏えいのないことを確認する。	目視により各溶接部を検査し，漏えいのないこと。
外観確認	溶接部の形状，外観及び状態について溶接規格に適合することを目視で確認する。	目視により溶接部の仕上がり形状を確認し，溶接規格に適合していること。

３号機構内用輸送容器の保守について

３号機構内用輸送容器は、本文 2.11.1.4 供用期間中に確認する項目に記載のとおり、「除熱、密封、遮へい、臨界防止の安全機能が維持されていること」を供用期間中、確認する。

輸送容器は、共用プールにおいて、輸送毎に以下の検査を実施する。なお、合格基準は、表－３に示す。また、検査の結果、必要に応じて消耗品の交換、補修を実施する。

（１）外観検査

輸送容器の外表面を目視で確認する。

（２）気密漏えい検査

輸送容器密封部の圧力降下を測定し、漏えい率を算出する。

（３）遮へい検査

収納物を収納した状態で、輸送容器表面の線量当量率を測定する。

（４）未臨界検査

輸送容器内に収納されたバスケットの外観を目視で確認する。

（５）吊上検査

輸送容器を吊り上げた後の状態において、上部トラニオン部の外観を目視で確認する。

（６）作動確認検査

バルブの開閉を行い、作動性を確認する。

（７）熱検査

収納物を収納した状態で、輸送容器表面の温度を測定する。

表－3 検査項目，検査方法及び合格基準

検査項目	検査方法	合格基準
外観検査	輸送容器の外表面を目視で確認する。	輸送容器の形状に異常な傷又は割れがないこと。
気密漏えい検査	輸送容器密封部に 0.9MPaG 以上の圧力を加え，圧力降下を測定し，漏えい率を算出する。	一次蓋，二次蓋及びポートカバーの各部の漏えい率が 9×10^{-1} ref cm ³ /s を超えないこと。
遮へい検査	収納物を収納した状態で，輸送容器表面の線量当量率を測定する。	実施計画記載の評価値を超えないこと。
未臨界検査	輸送容器内に収納されたバスケットの外観を目視で確認する。	バスケットに異常な変形又は破損がないこと。
吊上検査	輸送容器を吊り上げた後の状態において，上部トラニオン部の外観を目視で確認する。	トラニオン部など吊上部等に異常な変形又は破損がないこと。
作動確認検査	バルブの開閉を行い，作動性を確認する。	作動性に異常のないこと。
熱検査	収納物を収納した状態で，輸送容器表面の温度を測定する。	実施計画記載の評価値を超えないこと。

構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（４号機）

1. 構内用輸送容器の概要

構内用輸送容器は、福島第一原子力発電所第４号機使用済燃料プールに貯蔵されている使用済燃料及び新燃料（以下「燃料」という。）を共用プールへ構内輸送する際に使用する。

構内用輸送容器は、福島第一原子力発電所で使用済燃料運搬用容器として設置され、これまで第１号機から第２号機の使用済燃料を共用プールへ構内輸送する際に使用している使用済燃料輸送容器（NFT-12B 型）を用いる。

使用済燃料輸送容器（NFT-12B 型）は、使用済燃料を再処理工場へ輸送するために設計された容器であり、容器の安全機能は核燃料輸送物設計承認書により確認されている。

本構内用輸送容器は、震災前の原子炉運転中に被覆管から放射性物質の漏えいのあった燃料（以下「漏えい燃料」という。）（２体）、及び震災前の取り扱い中にハンドル及びチャンネルボックスが変形した燃料（以下「変形燃料」という。）（１体）を輸送する。これらの燃料を輸送するにあたって既存の核燃料輸送物設計承認書の条件に該当しない事項については、新たに評価を行う。

また、構内用輸送容器は上記漏えい燃料、変形燃料以外の健全と確認された燃料についても合わせて輸送する。

なお、本構内用輸送容器は、核燃料輸送物としての設計承認及び容器承認を取得しており、容器の仕様を長期にわたって保証できる保守条件を定め（核燃料輸送物設計変更承認申請書別紙二章 輸送容器の保守及び核燃料物質の取扱方法、平成２４年１月承認）、定期点検※を実施している。

※定期点検については、平成２６年６月に実施し異常の無いことを確認している。

1.1. 構内用輸送容器の構成

構内用輸送容器は、容器本体、蓋、バスケット及びトラニオンにより構成される。なお、構外輸送においては容器本体の前後に緩衝体を装着するが、構内輸送においては、作業時間を短縮して放射線業務従事者の放射線被ばくを可能な限り低減するために、緩衝体を装着しない運用とする。

構内輸送においては、従来と同様に輸送車両への構内用輸送容器の固縛、輸送車両の徐行等の措置を講じて、輸送車両からの構内用輸送容器の落下防止を図る。

1.2. 設備仕様

1.2.1. 構内用輸送容器の仕様

構内用輸送容器の仕様を表－1に，鳥瞰図を図－1に示す。

表－1 構内用輸送容器の仕様

項 目	数 値 等
重量（t） （燃料を含む）	約 68
全長（m）	約 5.5
外径（m）	約 1.8
収納体数（体）	12 以下
基数（基）	2

1.2.2. 燃料仕様

構内用輸送容器の収納可能な燃料の仕様は，核燃料輸送物設計承認書に示されている。

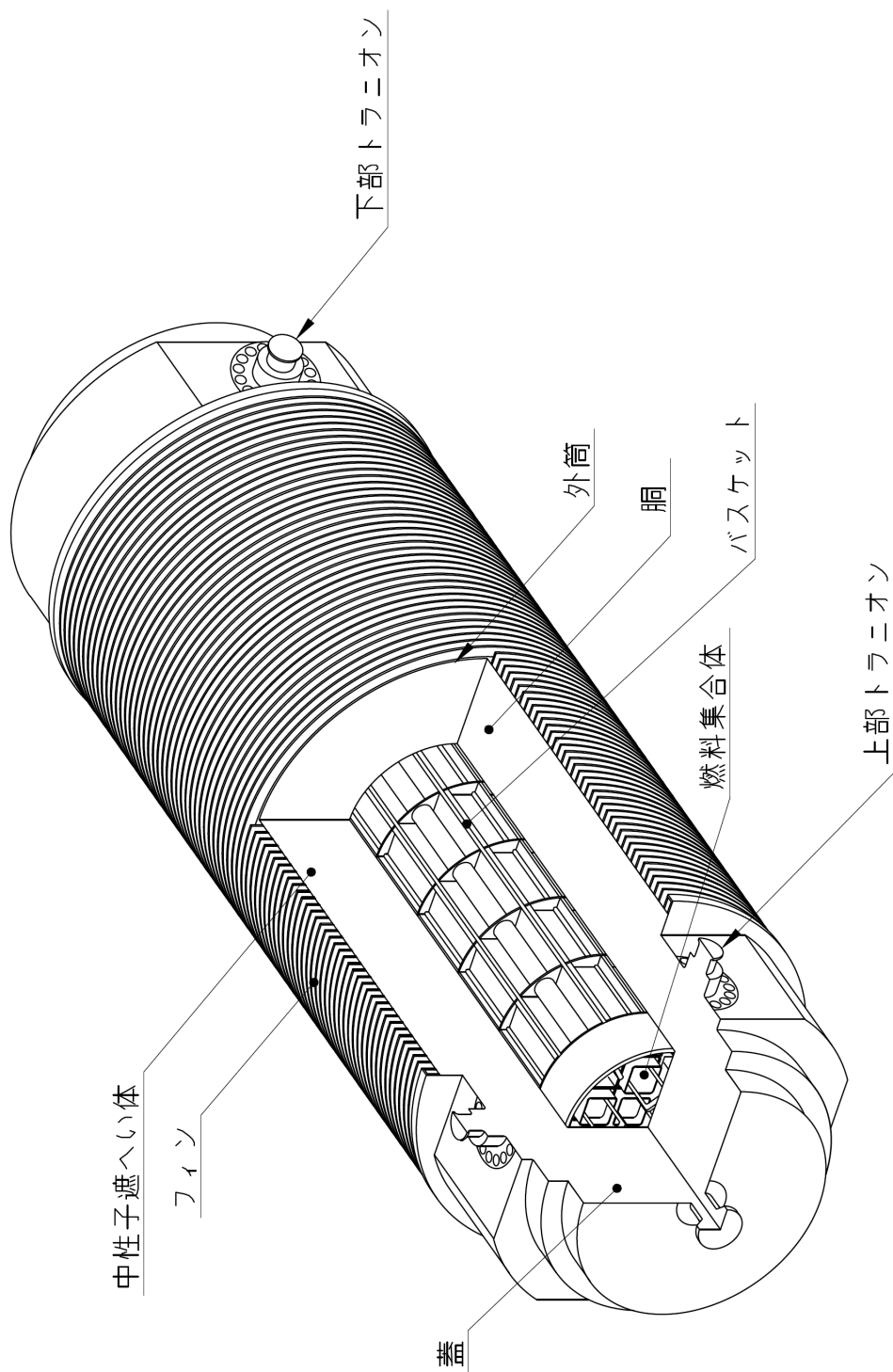


図-1 構内用輸送容器全体図（鳥瞰図）

2. 評価の基本方針

2.1. 設計方針

2.1.1. 基本的安全機能

構内用輸送容器は、これまで同発電所における使用済燃料の構内輸送に使用していた使用済燃料輸送容器（NFT-12B 型）であり、本文 2.11.1.3 項の設計方針に示される除熱、密封、遮へい及び臨界防止の安全機能を有するとともに、本文 2.11.1.8 項の構造強度及び耐震性に示される構造強度を有する設計であることを確認する。

2.1.2. 構内用輸送容器の安全機能について

使用済燃料輸送容器（NFT-12B 型）の安全機能は、以下の書類にて評価されている。既存評価は緩衝体を装着した状態を評価しているが、構内輸送では緩衝体を装着しない運用とすることから、既存評価を引用可能な項目は引用し、新規評価が必要な項目は新規評価を実施することとする。

- ・核燃料輸送物設計変更承認申請書（NFT-12B 型）
（平成 22 年 10 月 28 日申請，原燃輸送株式会社）
- ・核燃料輸送物設計変更承認申請書の一部補正について（NFT-12B 型）
（平成 24 年 1 月 13 日申請，原燃輸送株式会社）

なお、構内用輸送容器は同発電所で使用済燃料運搬用容器として設置され、以下の書類において安全機能は評価されている。しかし、4 号機使用済燃料プールに貯蔵されている 9×9 燃料の輸送については評価していないことから、既存評価として引用しない。

- ・福島第一原子力発電所 第 1 号機使用済燃料輸送容器（第 1～第 6 号機共用）工事計画認可申請書本文及び添付書類（平成 19 年 2 月 21 日申請，東京電力株式会社）

2.2. 安全設計・評価方針

表 2 に評価すべき各安全機能に関する既存評価内容と構内用輸送容器での安全設計・評価の方針を示す。

なお、4 号機の使用済燃料プールに貯蔵されている燃料については、平均燃焼度が既存評価に用いた平均燃焼度を僅かに上回るものがある。4 号機の使用済燃料プールに貯蔵中の燃料の種類ごとの性状と既存評価に用いられた燃料仕様を比較し、4 号機の燃料は冷却期間が十分のため崩壊熱量及び放射能強度が既存評価を超えることはなく、既存評価に包絡されていることを確認している。

また、4 号機の使用済燃料プールに貯蔵されている燃料には、漏えい燃料及び変形燃料がある。

構内用輸送容器には健全燃料のみを収納する場合と、健全燃料と漏えい燃料及び変形燃料を同時に収納する場合があります。変形燃料については、通常の燃料輸送時に用いる大口格子に設置されている燃料収納スペーサを抜き取り、大口格子にスツールと共に収納する。燃料を混載する場合には、必要に応じ新規評価を実施することとする。

3. 構内用輸送容器に収納する燃料

構内用輸送容器に収納する燃料は、漏えい燃料（２体）、変形燃料（１体）、及び健全と確認された燃料である。なお、燃料の健全性の確認方法等については、「添付資料１－３ 燃料の健全性確認及び取り扱いに関する説明書」に記載している。

3.1. 漏えい燃料（２体）

漏えい燃料は、原子炉停止後 SHIPPING 検査により漏えいが確認された燃料である*1。２体とも震災前に使用済燃料プールにおいて超音波装置を用いて漏えい燃料棒が特定されている。ファイバースコープ装置による漏えい燃料棒の観察の結果、漏えい燃料棒の漏えい孔及び被覆管の亀裂は２体とも確認されていないが、水素化による被覆管の膨れが一部に確認されており、また２体のうち１体は漏えいの原因と推定される金属らしき異物が確認されている。

3.2. 変形燃料（１体）

変形燃料は、過去の震災前の取り扱いによりチャンネルボックス及びハンドルが変形した燃料である*2。2013 年 12 月に当該燃料について吊上げチャンネルボックスの曲がり状況を確認し、チャンネルボックスの曲がりを考慮した最大寸法は測定誤差を加味し 156mm であることを確認している*3。

*1 報告書番号 2006-東京-M006, 2007-東京-M015（ニューシア（原子力施設情報公開ライブラリー））

*2 報告書番号 1982-東京-T003（ニューシア（原子力施設情報公開ライブラリー））

*3 福島第一原子力発電所 4 号機使用済燃料プール内の変形が確認されている燃料集合体の調査結果について（平成 26 年 1 月 30 日，東京電力株式会社）

表－２ 構内用輸送容器安全評価の基本方針

項目	設計方針	評価対象	既存評価 を引用	新評価 実施	評価方針	備考
除熱機能	使用済燃料の健全性及び構成部材の健全性が維持できるように、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去できる設計とする。	燃料被覆管	○	－	収納する燃料の崩壊熱量が既存評価以下であるため、既存評価を引用して評価を行う。	緩衝体がない状態では、緩衝体がある状態と比較して各部の温度は低くなる。
		構内用輸送容器	○	－		
密封機能	周辺公衆及び放射線業務従事者に対し、放射線被ばく上の影響を及ぼすことのないよう、使用済燃料が内包する放射性物質を適切に閉じ込める設計とする。	構内用輸送容器	○	－	構造強度及び除熱機能の評価結果から、設計事象において、容器の密封部が健全性を維持することを確認する。	構造強度の評価にて密封部の構造健全性を説明する。
遮へい機能	内部に燃料を入れた場合に放射線障害を防止するため、使用済燃料の放射線を適切に遮へいする設計とする。	構内用輸送容器	－	○	線源強度は既存評価に包絡されるが、緩衝体を装着しないため、緩衝体がない状態での遮へい評価を実施する。なお、線源強度は安全側に既存評価の値を用いる。漏えい燃料については、ペレット放出を考慮した評価を実施する。	
臨界防止機能	想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止できる設計とする。	構内用輸送容器	○	○	収納する燃料の初期濃縮度は既存評価以下である。既存評価においては容器配列、バスケット内の燃料配置等最も厳しい状態を想定し評価しており、構内輸送での条件と比較して、十分安全側であることから、既存評価を引用して評価を行う。漏えい燃料については、保守的にペレットが容器内に放出された状態での評価を実施する。変形燃料については、保守的に燃料棒の変形を考慮した状態での評価を実施する。	
構造強度	構内用輸送容器は取り扱い中における衝撃、熱等に耐え、かつ、容易に破損しない設計とする。構内用輸送容器は、設計、材料の選定、製作及び検査について適切と認められる規格及び基準によるものとする。	構内用輸送容器	○	－	容器本体、蓋、バスケット及びトラニオンにおける設計事象の荷重条件が既存評価における荷重条件に包絡されることをもって評価条件が既存評価に包絡されることを確認した上で、既存評価を引用して評価を行う。	
		大口格子用スツール	－	○	変形燃料輸送時には大口格子にスツールを装荷するため、スツールの強度評価を行う。	

核燃料輸送物設計変更承認申請書に記載の輸送容器の保守について

核燃料輸送物設計変更承認申請書に記載の輸送容器の保守について，該当箇所の抜粋を以下に記載する。

B. 保守条件

輸送容器の仕様を長期にわたって保証できる保守条件について定める。

輸送容器は、定期点検として、(ニ)ー第B. 1 表の項目に示す定期自主検査、定常検査、基本検査及び総合検査を実施する。また、定期点検の結果、必要に応じて補修を実施する。なお、1 年以上使用する計画のない輸送容器については、保管状態に置くことができる。

(1) 定期自主検査

外観検査(Ⅰ)、気密漏えい検査、未臨界検査(Ⅰ)、吊上検査(Ⅰ)、作動確認検査を1年に1回以上実施する。なお、保管期間中には、外観検査(Ⅲ)のみを実施する。

但し、年間使用回数が10回を超えるものにあつては、使用回数10回に1回以上実施する。

(2) 定常検査

外観検査(Ⅰ)、気密漏えい検査、未臨界検査(Ⅰ)、吊上検査(Ⅰ)、作動確認検査を輸送前毎に実施する。

(3) 基本検査

外観検査(Ⅰ)・(Ⅱ)、気密漏えい検査、未臨界検査(Ⅰ)、吊上検査(Ⅰ)・(Ⅱ)、作動確認検査を5年に1回実施する。

但し、前回の検査から使用回数が30回を超えるものにあつては、使用回数30回に1回実施する。

(4) 総合検査

外観検査(Ⅰ)・(Ⅱ)、耐圧検査、気密漏えい検査、遮蔽検査、未臨界検査(Ⅰ)・(Ⅱ)・(Ⅲ)、熱検査、吊上検査(Ⅰ)・(Ⅱ)、作動確認検査を10年に1回実施する。

但し、前回の検査から使用回数が60回を超えるものにあつては、使用回数60回に1回実施する。なお、遮蔽検査及び熱検査については検査期限を過ぎた場合、期限を過ぎた初回の燃料輸送時(燃料装荷から燃料取出)に実施する。

(5) 定期点検の期限管理

定期点検の有効期間は、前回の各々の定期点検終了日を起点とし、有効期間内に次の定期点検を開始する。

基本検査及び総合検査の有効期間の期限が輸送容器の保管期間中になる場合は、各々の検査を省略することができる。

(6) 補修

(1)・(2)・(3)・(4)の検査の結果、補修が必要と判定された部位については、補修を行う。

(7) 輸送容器保管状態の管理

輸送容器を保管状態に置くに当たっては、定期自主検査を実施する。輸送容器は必要な養生を行った上で保管する。

(8) 保管期間終了後の検査

保管期間終了後に輸送容器を再使用する前に、定期自主検査に加え、保管期間中に省

略した他の定期点検を行う。

(9) 記録の保管

製作時検査記録、定期自主検査記録、定常検査記録、基本検査記録及び総合検査記録などの定期点検記録（補修記録や部品交換履歴を含む）は、当該輸送容器存続中保存する。

(二)ー第B. 1表 定期点検の項目、検査方法、合格基準及び検査区分

検査項目	検査方法	合格基準	検査区分			
			定期自主検査	定常検査	基本検査	総合検査
外観検査 (Ⅰ)	輸送容器の外表面を目視で検査する。	輸送容器の形状に異常な傷又は割れがないこと。	○	○	○	○
外観検査 (Ⅱ)	輸送容器の構成部品である蓋部、バルブ及びシール面について外観を目視で検査する。	表面の形状に異常な傷又は割れがないこと。	—	—	○	○
外観検査 (Ⅲ)	輸送容器の外表面を目視で検査する。	輸送容器の形状に異常な傷又は割れがないこと。	○*1	—	—	—
耐圧検査	0.75MPaGの水圧（輸送容器製作時の耐圧検査圧力）を加え、輸送容器の外表面を目視で検査する。	異常な変形、ひび、割れ等がないこと。	—	—	—	○
気密漏えい検査	輸送容器密封部に 0.66MPaG 以上の圧力を加え、圧力降下を測定し、漏えい率を算出する。	各部の漏えい率の合計が 3×10^{-2} ref cm ³ /s を超えないこと。	○	○	○	○
遮蔽検査	収納物を収納した状態で、輸送容器表面の各部の線量当量率測定を行い、測定結果と収納物仕様相当の線源強度で行った評価結果を比較する。	遮蔽能力に劣化のないこと。				○*2
未臨界検査 (Ⅰ)	輸送容器内に収納されたバスケットの外観を目視で検査する。	バスケットに異常な変形又は破損がないこと。	○	○	○	○
未臨界検査 (Ⅱ)	バスケットの格子枠について、寸法確認用スルーゲージを挿入する。	スルーゲージが支障なく挿入できること。	—	—	—	○
未臨界検査 (Ⅲ)	中性子吸収による中性子吸収材の減損について計算により評価する。	臨界防止性能に影響を及ぼす減損がないこと。	—	—	—	○
熱検査	収納物を収納した状態で、輸送容器表面の各部の温度測定を行い、測定結果と収納物仕様相当の発熱量で行った評価結果を比較する。	伝熱性能に劣化のないこと。	—	—	—	○*2
吊上検査 (Ⅰ)	輸送容器を吊り上げた後の状態において、上部トラニオン部の外観を目視で検査する。	トラニオン部など吊上部等に異常な変形又は破損がないこと。	○	○	○	○
吊上検査 (Ⅱ)	上部トラニオン部について浸透探傷試験を行う。	有害な傷による浸透指示模様のないこと。	—	—	○	○
作動確認検査	バルブの開閉を行い、作動性を検査する。	作動性に異常がないこと。	○	○	○	○

*1：外観検査（Ⅲ）は、保管期間中に実施する。

*2：総合検査の有効期間 10 年を過ぎた場合には、初回の燃料輸送時（燃料装荷から燃料取出）に実施する。

B. 1 外観検査

外観検査（Ⅰ）は、輸送容器の外表面を目視で検査する。

外観検査（Ⅱ）は、輸送容器の構成部品である蓋部、バルブ及びシール面について外観を目視で検査する。

外観検査（Ⅲ）は、保管状態の輸送容器の外表面を目視で検査する。

B. 2 耐圧検査

0.75MPaGの水圧（輸送容器製作時の耐圧検査圧力）を加えて、輸送容器の外表面を目視で検査する。

B. 3 気密漏えい検査

輸送容器密封部に0.66MPaG以上の圧力を加え、圧力降下を測定し、漏えい率を算出する。

B. 4 遮蔽検査

収納物を収納した状態で、輸送容器表面の各部の線量当量率測定を行い、測定結果と収納物仕様相当の線源強度で行った評価結果を比較する。

B. 5 未臨界検査

未臨界検査（Ⅰ）は、輸送容器内に収納されたバスケットの外観を目視で検査する。

未臨界検査（Ⅱ）は、バスケットの格子枠について、寸法確認用スルーゲージを挿入する。

未臨界検査（Ⅲ）は、中性子吸収による中性子吸収材の減損について計算により評価する。

B. 6 熱検査

収納物を収納した状態で、輸送容器表面の各部の温度測定を行い、測定結果と収納物仕様相当の発熱量で行った評価結果を比較する。

B. 7 吊上検査

吊上検査（Ⅰ）は、輸送容器を吊り上げた後の状態において、上部トラニオン部の外観を目視で検査する。

吊上検査（Ⅱ）は、上部トラニオン部について浸透探傷試験を行う。

B. 8 作動確認検査

バルブの開閉を行い、作動性を検査する。

B. 9 補助系の保守

該当なし。

B. 10 密封装置の弁、ガスケット等の保守

輸送容器の弁の保守は、分解点検を原則として1年に1回実施する。また、輸送容器の弁、Oリング及びボルトは、定期点検及び輸送物発送前検査においても交換が必要となった場合に、その都度新品と取り替える。なお、輸送容器が保管期間中の場合は、輸送容器の弁の保守を省略することができる。

上記に係わらず、(三)－第B. 2表に示す部品については同表の交換頻度で無条件に交換する。部品交換又は補修後は、当該部位の再検査を行う。定期点検の実績、部品交換や安全機能に係る部位の補修については、記録し、輸送容器存続中保存する。

(三)－第B. 2表 部品交換頻度

部 品 名	交換頻度	備考
Oリング	実使用期間（燃料装荷期間） の合計で1年に1回以上	密封境界に係る部位とする

B. 11 輸送容器の保管

B. 11. 1 保管状態の管理

輸送容器を保管状態に置くに当たっては、定期自主検査を実施する。輸送容器は必要な養生を行った上で保管する。

B. 11. 2 保管期間終了後の検査・補修

保管期間終了後に輸送容器を再使用する場合は、保管開始前に行った定期点検から再使用までの保管状況に応じて、定期点検及び補修を行う。

B. 12 記録の保管

製作時検査記録、定期自主検査記録、定常検査記録、基本検査記録及び総合検査記録などの定期点検記録（補修記録や部品交換履歴を含む）は、当該輸送容器存続中保存する。

B. 13 その他

該当なし。

4. 安全評価

4.1. 構造強度

(1) 基本的な考え方

構内用輸送容器の構造強度については、既存評価の結果を基に、構内用輸送容器の構造強度が想定すべき事象（設計事象）において設計基準に適合していることを確認する。

評価部位は、安全上重要な部位として容器本体、蓋、バスケット及び支持機能を有するトラニオン、並びに大口格子用スツールとする。また、設計基準は、構外用輸送容器としての安全評価に用いられている基準を適用する。

(2) 設計事象の抽出

JSME S FA1-2007 金属キャスク構造規格の考え方に基づいて、構内用輸送容器の設計事象として以下を抽出した。

なお、設計事象の抽出にあたっては、図－2に示すハンドリングフローに基づき、構内用輸送容器の取り扱い及び共用プールまでの輸送において想定される起因事象に着目し、発生防止対策を考慮して事象の発生の可能性を検討した。設計事象の抽出結果を表－3に示す。

a. 設計事象 I

容器本体及び蓋には、収納する燃料の発熱により内圧及び熱による応力が発生する。また、取り扱い時及び構内輸送時の加速度により収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

バスケットには、取り扱い時及び構内輸送時の加速度により収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

トラニオンには取り扱い時の吊上げ等による応力、及び構内輸送時における固縛荷重による応力が発生する。

大口格子用スツールには、取り扱い時及び構内輸送時の加速度により収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

b. 設計事象Ⅱ

容器本体及び蓋には、輸送架台へのトラニオン衝突（取り扱いモード No. 2）、構内用輸送容器を積載した輸送架台の搬送台車への衝突（取り扱いモード No. 6）、構内用輸送容器の転倒防止台座への衝突（取り扱いモード No. 8）及びキャスクピットへの衝突（取り扱いモード No. 9）の加速度における収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

バスケットには、輸送架台へのトラニオン衝突（取り扱いモード No. 2）、構内用輸送容器を積載した輸送架台の搬送台車への衝突（取り扱いモード No. 6）、構内用輸送容器の転倒防止台座への衝突（取り扱いモード No. 8）及びキャスクピットへの衝突（取り扱いモード No. 9）の加速度における収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

トラニオンには、輸送架台へのトラニオン衝突（取り扱いモード No. 2）及び構内用輸送容器を積載した輸送架台の搬送台車への衝突（取り扱いモード No. 6）の加速度における荷重がかかり、応力が発生する。

大口格子用スツールには、輸送架台へのトラニオン衝突（取り扱いモード No. 2）、構内用輸送容器を積載した輸送架台の搬送台車への衝突（取り扱いモード No. 6）、構内用輸送容器の転倒防止台座への衝突（取り扱いモード No. 8）及びキャスクピットへの衝突（取り扱いモード No. 9）の加速度における収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

c. 設計事象Ⅲ及び設計事象Ⅳ

構内用輸送容器を取り扱う設備及び運用においては、ワイヤーロープの二重化、始業前の機器の点検を実施することから、ハンドリングフローから抽出される事象のうち、構内用輸送容器の安全機能を著しく損なう事象であって、一般公衆の放射線被ばくの観点からみて重要と考えられる事象はない。

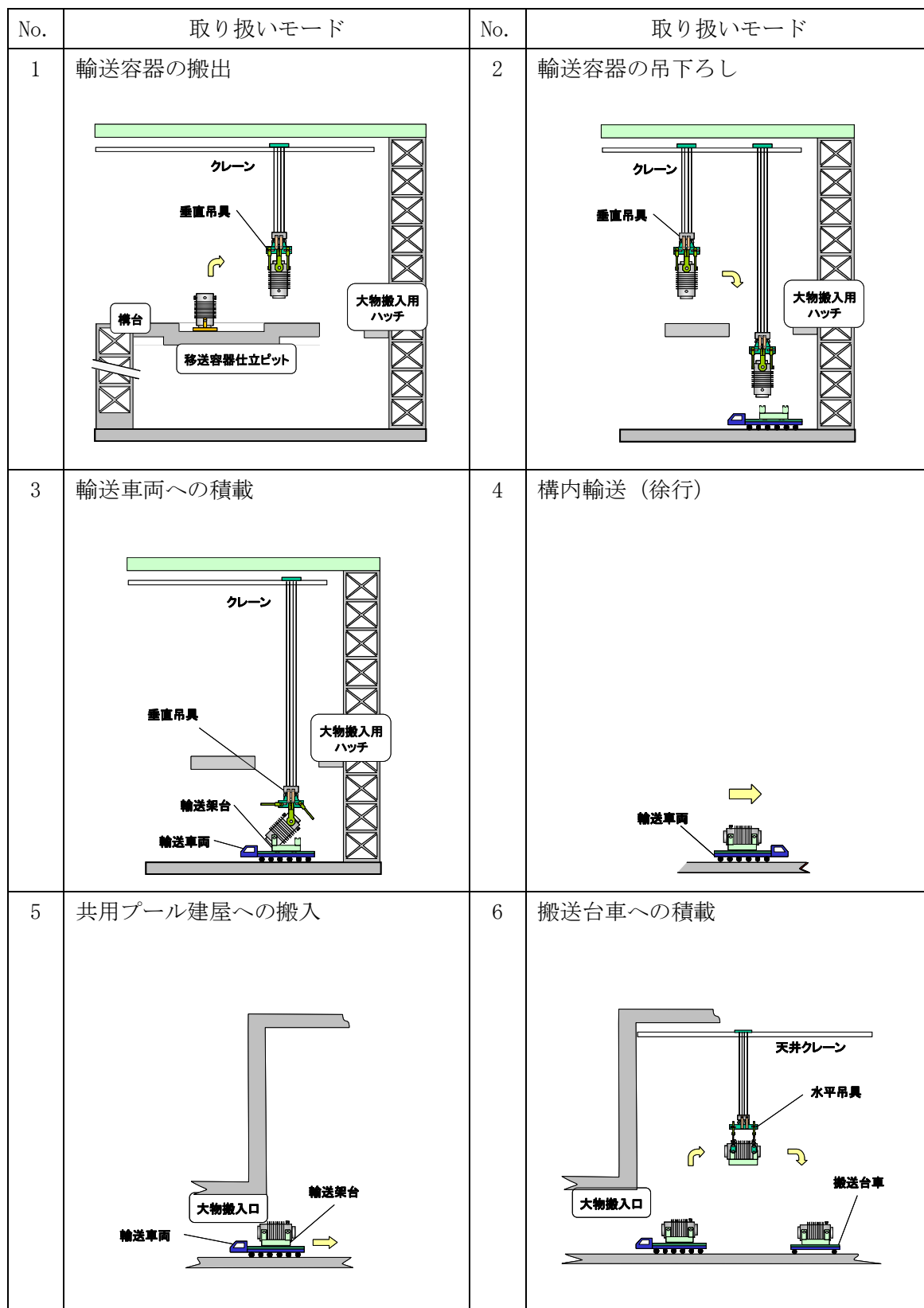
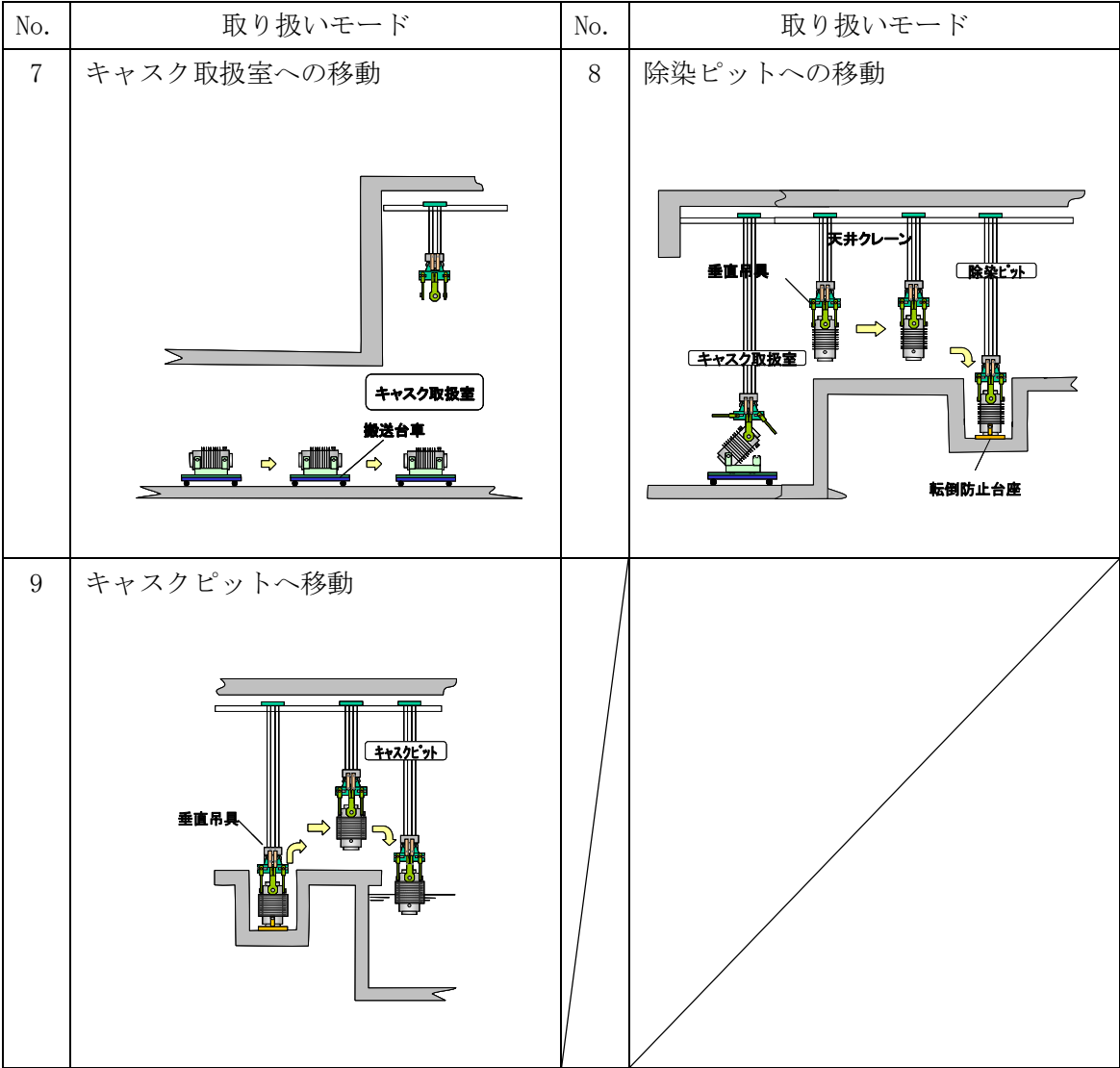


図-2 構内用輸送容器のハンドリングフロー (1/2)



図ー 2 構内用輸送容器のハンドリングフロー (2/2)

表ー3 設計事象の抽出

起回事象 (ハンドリングフローNo.)	原因	発生の可能性	発生の有無	想定シナリオ	抽出の要否
構内用 輸送容器 の落下	輸送車両取り扱い時の落下 (No. 4)	固定ボルトの取付け不良	×		×
	搬送台車取り扱い時の落下 (No. 7)	固定ボルトの取付け不良	×		×
	クレーン取り扱い時の落下 (No. 1, 2, 3, 6, 8, 9)	吊具の取付け不良 ワイヤーロープの切断	×		×
	クレーン移動時（走行、横行）の衝突 (No. 1, 2, 3, 6, 8, 9)	ブレーキの故障	×		×
		操作員の誤操作	×		×
構内用 輸送容器 の衝突	クレーン吊下げ時の衝突（垂直吊り） （異常着床） (No. 2, 8, 9)	ブレーキの故障 操作員の誤操作	×	クレーンの最大巻下げ速度 0.025m/s で、構内用輸送容器が輸送架台、転倒防止台座あるいはキャスクピットに異常着床する場合を、設計事象として抽出。	×
	クレーン吊下げ時の衝突（水平吊り） （異常着床） (No. 6)	ブレーキの故障 操作員の誤操作	×	クレーンの最大巻下げ速度 0.025m/s で、輸送架台に積載された状態で構内用輸送容器が搬送台車に異常着床する場合を、設計事象として抽出。	×
			○		○
			×		×

(3) 設計事象の荷重条件

前項で抽出した設計事象について、構内用輸送容器に発生する加速度を導出し、容器本体及び蓋、バスケット、トラニオンについては荷重条件が既存評価条件に包絡されることを確認し、大口格子用スツールについては設計加速度を設定する。

a. 設計事象の加速度の導出

事象発生時に構内用輸送容器が有する運動エネルギーを被衝突物（輸送架台、転倒防止台座、キャスクピット床面）の弾性により吸収するとして、発生する衝撃加速度を計算した。衝撃加速度の計算方法と結果を以下に示す。

(a) 輸送架台への衝突（垂直姿勢：取り扱いモード No. 2）

対象部位：容器本体及び蓋、バスケット、トラニオン、大口格子用スツール

垂直姿勢で、構内用輸送容器の下部トラニオンが輸送架台のトラニオン受けにクレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合について評価する。

構内用輸送容器の有する運動エネルギーを輸送架台後部支持脚のひずみエネルギーで吸収するとして、(1)式で構内用輸送容器に生じる衝撃加速度を求める。ここで、(1)式より衝撃加速度は質量が小さいほうが保守的な結果となる。また、変形燃料混載時の質量は燃料収納スペーサを抜くため健全燃料輸送時よりも小さい。よって、構内用輸送容器の質量は、変形燃料混載時の質量を用いる。

$$\alpha = 1 + \sqrt{1 + \frac{K \cdot V^2}{m \cdot g^2}} \quad (1)$$

ただし、 α ：衝撃加速度（G）

K：輸送架台後部支持脚の圧縮変形バネ定数（ $2.17 \times 10^{10} \text{N/m}$ ）

V：クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）

m：構内用輸送容器の質量（ $6.87 \times 10^4 \text{kg}$ ）

g：重力加速度（ 9.8m/s^2 ）

発生する衝撃加速度は2.75Gとなり、余裕をみて3.0Gを評価加速度とする。

- (b) 構内用輸送容器を載せた輸送架台の搬送台車への衝突（水平姿勢：取り扱いモード No. 6）

対象部位：容器本体及び蓋，バスケット，トラニオン，大口格子用スツール

構内用輸送容器を載せた輸送架台を搬送台車に積載する際に，輸送架台が搬送台車に共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合について評価する。

搬送台車を剛体として，構内用輸送容器の有する運動エネルギーを輸送架台支持脚のひずみエネルギーで吸収するとして，（１）式で構内用輸送容器に生じる衝撃加速度を求める。

ただし， K ：輸送架台前後部支持脚の圧縮変形バネ定数（ $4.54 \times 10^{10} \text{N/m}$ ）

V ：共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）

発生する衝撃加速度は 3.30G となり，余裕をみて 4.0G を評価加速度とする。

- (c) 転倒防止台座への衝突（垂直姿勢：取り扱いモード No. 8）

対象部位：容器本体及び蓋，バスケット，大口格子用スツール

垂直姿勢で構内用輸送容器が転倒防止台座に共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合について評価する。

床面を剛体として，構内用輸送容器の有する運動エネルギーを転倒防止台座のひずみエネルギーで吸収するとして，（１）式で構内用輸送容器に生じる衝撃加速度を求める。

ただし， K ：転倒防止台座の圧縮変形バネ定数（ $8.81 \times 10^{11} \text{N/m}$ ）

V ：共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）

発生する衝撃加速度は 10.2G となり，余裕をみて 11.0G を評価加速度とする。

- (d) キャスクピット床面への衝突（垂直姿勢：取り扱いモード No. 9）

対象部位：容器本体及び蓋，バスケット，大口格子用スツール

垂直姿勢で構内用輸送容器がキャスクピット床面に共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合について評価する。

構内用輸送容器の有する運動エネルギーをキャスクピット床面のひずみエネルギーで吸収するとして，（１）式で構内用輸送容器に生じる衝撃加速度を求める。

ただし， K ：キャスクピット床面のバネ定数（ $4.33 \times 10^{10} \text{N/m}$ ）

V ：共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）

発生する衝撃加速度は 3.26G となり，余裕をみて 4.0G を評価加速度とする。

b. 評価結果

(a) 容器本体及び蓋, バスケット, トラニオン

構内用輸送容器の設計事象における荷重条件と既存評価の荷重条件の比較を表－4～表－6に示す。なお、構内用輸送容器の設計事象及び荷重条件については、抽出された事象のうち最大の荷重が作用する場合について示す。

表－4～表－6に示すとおり、設計事象における「容器本体及び蓋」, 「バスケット」及び「トラニオン」に作用する荷重条件は既存評価の荷重条件に包絡されており、評価条件は既存評価に包絡される。また、構造強度評価における設計基準、評価条件、評価方法は既存評価と同様である。従って、構内用輸送容器の構造健全性は維持される。

(b) 大口格子用スツール

構内用輸送容器の設計事象における荷重条件を表－7に、設計加速度を表－8に示す。大口格子用スツールは既存評価がないため、以降で構造健全性を確認する。

表－４ 荷重条件の比較（容器本体及び蓋）

構内用輸送容器の評価事象及び荷重条件				既存評価の事象及び荷重条件	
設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件	事象	荷重条件
I	構内輸送時	－	容器内圧力：0.6 MPa ボルト初期締付け力 構内輸送時荷重 上方向*1：2.0G 下方向*1：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G 熱荷重	一般の試験条件 0.3m 頭部 垂直落下	容器内圧力：0.6MPa ボルト初期締付け力 落下時荷重：56.2G 熱荷重
				一般の試験条件 0.3m 底部 垂直落下	容器内圧力：0.6MPa ボルト初期締付け力 落下時荷重：56.9G 熱荷重
				一般の試験条件 0.3m 水平落下	容器内圧力：0.6MPa ボルト初期締付け力 落下時荷重：27.7G 熱荷重
	容器の吊上げ， 吊下げ，移動	－	容器内圧力：0.6 MPa ボルト初期締付け力 吊上げ荷重 下方向*2：3.0G （自重を考慮） 熱荷重	一般の試験条件 0.3m 底部 垂直落下	容器内圧力：0.6MPa ボルト初期締付け力 落下時荷重：56.9G 熱荷重
II	輸送架台の搬 送台車への衝 突 （取り扱いモ ード No. 6）	－	容器内圧力：0.6 MPa ボルト初期締付け力 輸送架台の搬送台車 への衝突時荷重 下方向*1：4.0G （自重を考慮） 熱荷重	一般の試験条件 0.3m 水平落下	容器内圧力：0.6MPa ボルト初期締付け力 落下時荷重：27.7G 熱荷重
	転倒防止台座 への衝突 （取り扱いモ ード No. 8）	輸送架台への トラニオン衝 突 （取り扱いモ ード No. 2） キャスクピッ トへの衝突 （取り扱いモ ード No. 9）	容器内圧力：0.6 MPa ボルト初期締付け力 転倒防止台座への 衝突時荷重 下方向*2：11.0G （自重を考慮） 熱荷重	一般の試験条件 0.3m 底部 垂直落下	容器内圧力：0.6MPa ボルト初期締付け力 落下時荷重：56.9G 熱荷重

*1 構内用輸送容器軸と直角な方向

*2 構内用輸送容器軸方向

表－５ 荷重条件の比較（バスケット）

構内用輸送容器の評価事象及び荷重条件				既存評価の事象及び荷重条件	
設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件	事象	荷重条件
Ⅰ	構内輸送時	—	構内輸送時荷重 上方向*1：2.0G 下方向*1：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G	特別の試験条件 9m 頭部垂直落下	落下時荷重：93.0G
				特別の試験条件 9m 底部垂直落下	落下時荷重：89.1G
				特別の試験条件 9m 水平落下	落下時荷重：89.5G
	容器の吊上げ， 吊下げ，移動	—	吊上げ荷重 下方向*2：3.0G （自重を考慮）	特別の試験条件 9m 底部垂直落下	落下時荷重：89.1G
Ⅱ	輸送架台の搬 送台車への衝 突 （取り扱いモ ード No. 6）	—	輸送架台の搬送台車 への衝突時荷重 下方向*1：4.0G （自重を考慮）	特別の試験条件 9m 水平落下	落下時荷重：89.5G
	転倒防止台座 への衝突 （取り扱いモ ード No. 8）	輸送架台へのト ラニオン衝突 （取り扱いモ ード No. 2） キャスクピット への衝突 （取り扱いモ ード No. 9）	転倒防止台座への 衝突時荷重 下方向*2：11.0G （自重を考慮）	特別の試験条件 9m 底部垂直落下	落下時荷重：89.1G

*1 構内用輸送容器軸と直角な方向

*2 構内用輸送容器軸方向

表－6 荷重条件の比較（トラニオン）

構内用輸送容器の評価事象及び荷重条件				既存評価の事象及び荷重条件	
設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件	事象	荷重条件
I	構内輸送時	—	構内輸送時荷重 上方向*1：2.0G 下方向*1：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G	通常の輸送条件 （固縛装置）	構内輸送時荷重 上方向*1：2.0G 下方向*1：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G
	容器の吊上げ， 吊下げ，移動	—	吊上げ荷重 下方向*2：3.0G （自重を考慮）	通常の輸送条件 （吊上装置）	吊上げ荷重 下方向*2：3.0G （自重を考慮）
II	輸送架台への トラニオン衝突 （取り扱いモー ド No. 2）	輸送架台の搬 送台車への衝 突（取り扱いモ ード No. 6）*3	輸送架台へのトラニ オン衝突時荷重 下方向*2：3.0G （自重を考慮）	通常の輸送条件 （吊上装置）	吊上げ荷重 下方向*2：3.0G （自重を考慮）

*1 構内用輸送容器軸と直角な方向

*2 構内用輸送容器軸方向

*3 輸送架台への衝突（取り扱いモード No. 2）は垂直姿勢で衝突するためトラニオンの荷重負担本数は2本であるのに対して、輸送架台の搬送台車への衝突（取り扱いモード No. 6）では水平姿勢で衝突するためトラニオンの荷重負担本数は4本である。

このため、構内用輸送容器への荷重は取り扱いモード No. 6の方が大きいものの、トラニオンあたりに作用する荷重は取り扱いモード No. 2の方が大きくなる。

以上から、設計事象としては取り扱いモード No. 2が抽出される。

表－７ 荷重条件（大口格子用スツール）

構内用輸送容器の評価事象及び荷重条件			
設計事象	代表事象	包絡される事象	荷重条件
I	構内輸送時	—	構内輸送時荷重 上方向*1：2.0G 下方向*1：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G
	容器の吊上げ， 吊下げ，移動	—	吊上げ荷重 下方向*2：3.0G （自重を考慮）
II	輸送架台の 搬送台車への衝突 （取り扱いモード No. 6）	—	輸送架台の搬送台車への 衝突時荷重 下方向*1：4.0G （自重を考慮）
	転倒防止台座 への衝突 （取り扱いモード No. 8）	輸送架台への トラニオン衝突 （取 り 扱 い モ ー ド No. 2） キャスクピットへの 衝突 （取 り 扱 い モ ー ド No. 9）	転倒防止台座への 衝突時荷重 下方向*2：11.0G （自重を考慮）

*1 構内用輸送容器軸と直角な方向

*2 構内用輸送容器軸方向

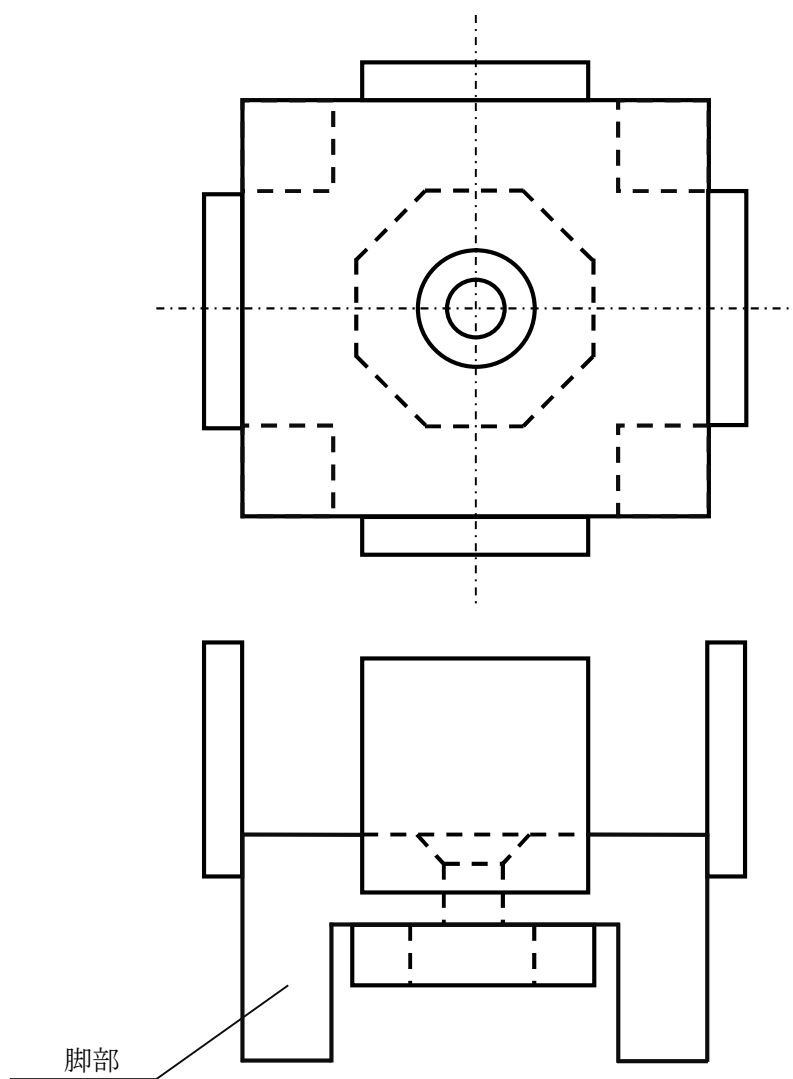
表－８ 設計加速度（大口格子用スツール）

方向	設計加速度	備考
構内用輸送容器 軸方向	11.0G (108m/s ²)	以下の荷重の最大値 ・ 構内輸送時荷重：前後方向 ・ 吊上げ荷重：下方向 ・ 転倒防止台座への衝突時荷重：下方向

(4) 大口格子用スツールの構造強度評価

大口格子用スツールの設計基準は、既存評価のスツールに用いられている設計基準を用いる。塑性変形が生じないように、膜応力強さが降伏応力以下であることとする。

大口格子用スツールの構造強度評価は、想定される機械的荷重を基に応力評価式を用いて評価する。構内用輸送容器軸方向に慣性力が作用した場合には大口格子用スツールの脚部に慣性力による圧縮応力が生じる。これらの応力評価箇所を図－3に示す。



図－3 大口格子用スツールの応力評価箇所

構内用輸送容器軸方向に慣性力が作用した場合に大口格子用スツールの脚部に作用する圧縮応力（ σ_c ）は、次のようになる。

$$\begin{aligned}\sigma_c &= W \cdot G_v / A \\ &= 9.93 \text{MPa}\end{aligned}$$

ただし、 W ：燃料（チャンネルボックス含む）重量（320 kg）＋大口格子用
スツール重量

G_v ：構内用輸送容器軸方向の設計加速度（ 108m/s^2 ）

A ：大口格子用スツール脚部の全断面積

130℃におけるステンレス鋼の設計降伏点 S_y は 161MPa であるので、大口格子用スツールは塑性変形しない。また、脚部は細長比が小さいので座屈することもない。

構造強度計算に用いるコード（ABAQUS）について

（１）概要

ABAQUS コードは米国 Hibbitt, Karlsson&Sorensen, Ins. (HKS 社) で開発された有限要素法に基づく応力・座屈解析等の汎用解析コードであり，輸送容器の応力解析等に広く利用されている。

（２）機能

ABAQUS コードは，応力解析に際して以下の機能を有している。

- ① 定常，非定常の弾性，弾塑性のいずれの解も得ることができる。
- ② 材料特性として時間依存，歪の履歴依存並びに等方性・異方性等を考慮することができる。
- ③ モデルの形状は一次元～三次元，又は連続体についても取り扱うことができる。
- ④ 伝熱解析結果をそのまま境界条件として熱応力解析に用いることが可能である。
- ⑤ 荷重条件として集中荷重，分布荷重，モーメント，加速度力（慣性力），圧力，遠心力及びコリオリ力等が取り扱える。また，これらの条件の時間依存，線形変化に対しても対応可能である。

（３）解析フロー

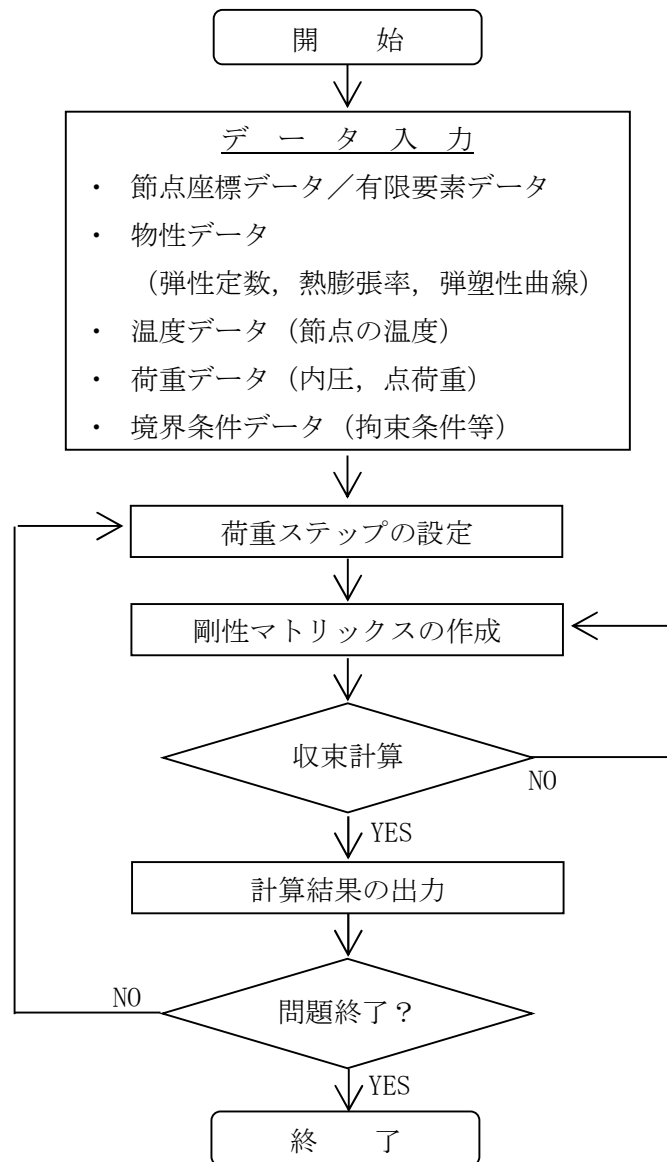
ABAQUS コードの解析フローを図－４に示す。

（４）使用実績

ABAQUS コードは，これまで多くの応力解析に対し使用実績がある。

（５）検証方法

理論値との比較による検証が実施されていることを確認している。



図－４ ABAQUS コードの応力解析フロー図

容器内水の放射線分解による圧力上昇について

本構内用輸送容器（NFT-12B 型）の核燃料輸送物設計変更承認書別紙（以下、「SAR」という。）には、NFT-14P 型及び NFT-38B 型を例として、実輸送後の輸送容器内の水素ガス濃度の測定結果及び容器内のガンマ線照射線量から求めた評価結果が示されている。

SAR（参考資料 ロ章 B 容器内水の放射線分解による圧力上昇について）では、ガンマ線照射量を保守的に NFT-12B 型を含む NFT 型輸送物を包含する $1\text{Gy/s}(3,600\text{Gy/h})$ を仮定しても、水素ガス濃度の評価値は小さく（2.4%と評価）、容器内圧の上昇として無視できるものであることが示されている。

NFT-12B 型は 4 号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料を対象にしており、容器内のガンマ線照射量は SAR の燃料仕様に基づくガンマ線照射線量（約 $0.8\text{Gy/s}(2,910\text{Gy/h})$ ）に比べてさらに小さくなると考えられることから、SAR において評価された水素発生量を超えることは無く、新規に水素発生対策を追加する必要はないと考えられる。

また、SAR の該当箇所の抜粋を以下に記載する。

B. 2 容器内水の放射線分解による圧力上昇について

輸送容器内のような密閉した槽内での水の放射線分解により発生するガスの水中濃度はある飽和値に達する。ここでは、NFT-14P型及びNFT-38B型を例として、実輸送後に輸送容器内の水素ガス濃度を測定した結果¹⁾及びNFT型輸送物の評価を以下に示す。

1. NFT型輸送容器内の水素ガス濃度測定結果

(1) 測定対象輸送容器

測定対象輸送容器は、PWR燃料輸送用のNFT-14P型及びBWR燃料用のNFT-38B型とし、各1基の測定を行った。収納物は、漏えいのない健全な使用済燃料であり、ガンマ照射線量はそれぞれ640Gy/h及び844Gy/hである（中性子による照射線量は全照射線量の 10^{-6} 程度であるため評価の上で無視した）。

(2) 輸送容器内ガスのサンプリング

NFT型輸送容器の内部ガスは、蓋膨張室内とキャビティ内に分かれているため、それぞれからガスのサンプリングを行なった。サンプリングは、NFT型輸送容器からの使用済燃料の取り出し作業の過程で行った。

まず、輸送容器縦起し状態にて、蓋のバルブを通して、蓋膨張室内のガスをサンプリングタンクに回収し、検知器にガスを吸入して測定した（(ロ)－第B. 参1図）。

次に、輸送容器縦起し状態にて、輸送容器をプールに入水し、蓋を取り外す際に、輸送容器にガス捕集フードを取付け、サンプリングラインを通してサンプリングバッグに回収し、サンプリングバッグから検知器にキャビティ内のガスを吸入して測定した（(ロ)－第B. 参2図）。

(3) 水素ガス濃度測定

水素濃度の測定は、ガス検知管により行った。実測結果を(ロ)－第B. 参1表に示す。NFT-14P型及びNFT-38B型の水素濃度測定値は、いずれも発火下限の水素濃度4%を下回る結果であった。

(ロ)－B－2

(ロ)－第B． 参1表 水素ガス濃度測定結果¹⁾

輸送物	水素ガス濃度	
	蓋膨張室	キャビティ
N F T－1 4 P型	0.50%	1.24%
N F T－3 8 B型	0.14%	0.43%

2. N F T型輸送容器内の水素ガス濃度評価

(1) 水素ガス濃度を測定したN F T型輸送容器に対する評価

参考文献(1)では、計算評価値として、類似の環境下における水の放射線分解による水素定常濃度評価結果をベースに、水中定常濃度が照射線量の平方根に比例するとして、水素ガス濃度の概算計算を行っている。その評価結果を(ロ)－第B． 参2表に示す。N F T－1 4 P型では計算値が実験値を若干下回っており、N F T－3 8 B型では計算値が実験値を上回っているが、比較的良好一致を示している。

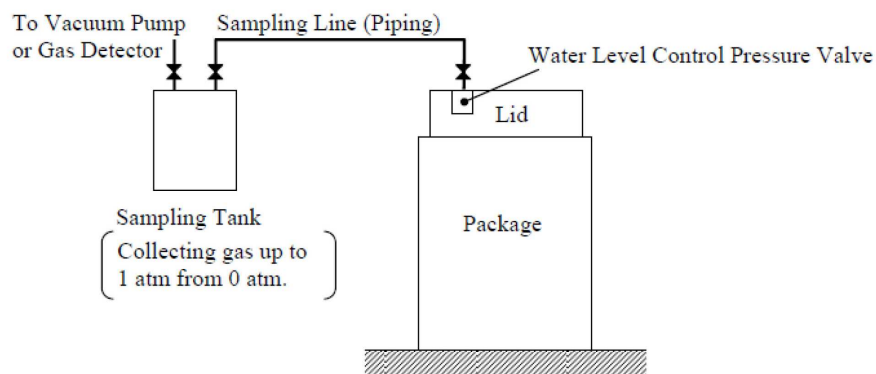
(ロ)－第B． 参2表 水素ガス濃度評価結果¹⁾

輸送物	ガンマ線照射線量	水素ガス濃度
N F T－1 4 P型	640Gy/h	0.99%
N F T－3 8 B型	844Gy/h	1.14%

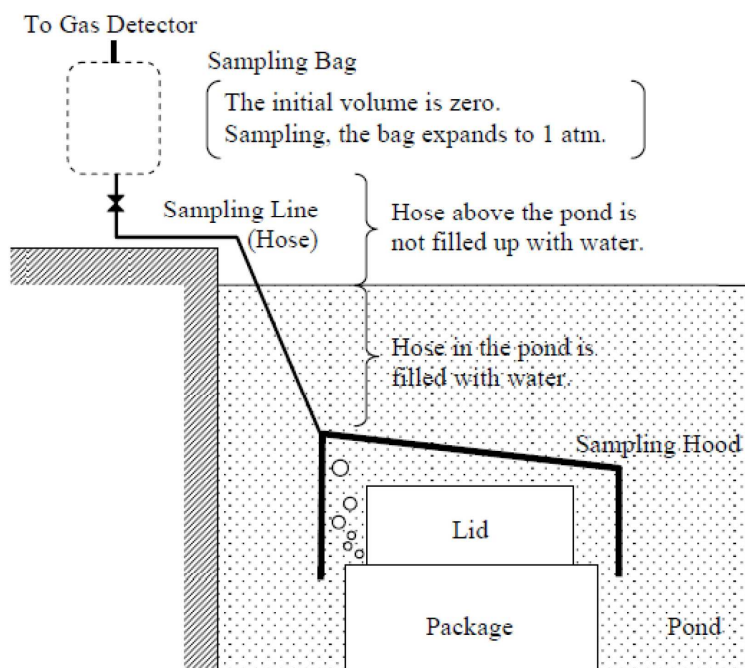
(2) N F T型輸送物における線源条件に対する評価

N F T型輸送物において、最もガンマ線源強度が大きいN F T－1 4 P型においても、ガンマ線照射量は約0.7Gy/sであるが、仮にガンマ線照射線量を保守側に1Gy/s(3600Gy/h)としても、(1)で示した値を同様に水中定常濃度が照射線量の平方根に比例するとして補正すると、水素ガス濃度は2.4%となる。この値は、水素ガスの爆発下限である空気との混合比4%に対して十分小さい値であり、容器内圧の上昇としても無視できるものである。

(ロ)－B－3



(ロ)－第B. 参1図 蓋膨張室内ガスのサンプリング方法¹⁾



(ロ)－第B. 参2図 輸送容器キャビティ内ガスのサンプリング方法¹⁾

(ロ)－B－4

<参考文献>

- 1) Y.Fujita, M.Ebihara, “Evaluation of Hydrogen Yield in Spent Fuel Transport Package” ,
The 16th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive
Materials (PATRAM 2010), October 3-8, 2010, London, UK, Poster Session 210 (2010).

(口)－B－5

4.2. 除熱機能

4.2.1. 健全燃料輸送時

(1) 基本的な考え方

除熱設計にあたっては、燃料の健全性及び構内用輸送容器の安全機能を有する構成部材の健全性が維持できるよう、以下のとおり設計する。

- a. 収納された使用済燃料より発生する崩壊熱は、胴内に充填した水及び空気の自然対流及び伝導により容器本体胴に伝えられる。
- b. 容器本体胴に伝えられた熱は主として中性子遮へい部のレジン中に設けた伝熱フィンにより外筒に伝えられる。
- c. 外筒に伝えられた熱は外筒及び外筒に設置したフィンにより大気に放散される。

除熱機能の評価においては、収納する使用済燃料の最大崩壊熱量を考慮し、環境条件には構外用輸送容器としての安全評価に用いられている条件を用い、自然冷却により冷却されるものとして各部の温度を求め、各部材料の制限温度を超えないことを評価する。

構内輸送では緩衝体を装着しない運用とするが、既存評価の除熱設計において緩衝体は断熱の効果を有していることから、緩衝体を装着しない運用は除熱性能が向上し、容器本体の温度は既存評価における各部温度に比べて低くなる。また、構内用輸送容器に収納する燃料仕様は既存評価に用いている燃料仕様に包絡されており、既存評価に比べて使用済燃料の崩壊熱量は十分低いものとなっている。このため、評価結果は既存評価書の内容を引用する。

(2) 設計基準

設計基準を表－9 に示す。

表－9 設計基準

対象部位	材質	設計基準	設計基準 温度 (℃)	備考
構内用 輸送容器	レジン	使用可能温度	149	中性子遮へい材
	ふっ素ゴム	使用可能温度	300	Oリング
	炭素鋼	構造強度が確保される制限 温度	375	胴
	ステンレス鋼	構造強度が確保される制限 温度	425	蓋
	ボロン入り ステンレス鋼	構造強度が確保される制限 温度	200	バスケット
燃料 被覆管	ジルカロイ－2	照射硬化回復現象により燃料被覆管の機械的特性が著しく低下しない温度及び水素化物の再配向による被覆管の機械的特性の低下が生じない温度以下となる温度 *1, *2	200	7×7 燃料, 8×8 燃料
			300	新型 8×8 ジルコニウムライ付燃料, 高燃焼度 8×8 燃料, 9×9 燃料

*1 平成 18 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料長期健全性等確認試験に関する試験最終報告書)(06 基炉報-0006, 独立行政法人原子力安全基盤機構)

*2 平成 19 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料健全性等調査に関する試験成果報告書)(07 基炉報-0004, 独立行政法人原子力安全基盤機構)

(3) 燃料仕様

既存評価では最大崩壊熱量（15kW）で評価を実施しており，本構内輸送で収納を予定している燃料の崩壊熱量（最大 8kW）を包絡している。

(4) 評価条件

既存評価の内容を以下に示す。

構内用輸送容器の除熱評価は，以下の２種類の解析モデルを用いて行う。

a. 半径方向輪切り軸方向フィン半ピッチモデル

（以下「輪切り半ピッチモデル」という。）

b. 軸方向二次元軸対称全体モデル

（以下「全体モデル」という。）

評価条件を表－１０に示す。

表－１０ 評価条件

項目		評価条件
収納体数	(体)	12
崩壊熱量	(kW)	15
周囲温度	(℃)	38
太陽熱放射 (W/m ²)	垂直に輸送される表面及び水平 に輸送されない下向きの表面	200
	その他の表面（曲面）	400

(5) 評価方法

軸方向を断熱とした輪切り半ピッチモデルで構内用輸送容器中央部断面の各部温度を評価する。輪切り半ピッチモデルで評価できない部位については、軸方向の温度分布が求められる全体モデルで評価する。

解析には ABAQUS コードを用いる。

(6) 評価結果

評価結果を表－１１に示す。本表に示すとおり、構内用輸送容器を構成する部材はいずれも設計基準温度を下回っており、熱的健全性は維持される。

また、燃料被覆管の温度は 123℃であり、水素化物の再配向による機械特性の低下が生じる温度を大きく下回っており、燃料の健全性は維持される。

表－１１ 評価結果（各部温度）

対象部位	材質	評価結果 (℃)	設計基準 温度 (℃)	備考
構内用 輸送容器	レジン	104	149	中性子遮へい材
	ふっ素ゴム	106	300	Oリング
	炭素鋼	116	375	胴
	ステンレス鋼	110	425	蓋
	ボロン入りステンレス鋼	120	200	バスケット
燃料 被覆管	ジルカロイ－２	123	200	7×7 燃料，8×8 燃料
			300	新型 8×8 ジルコニウムライフ燃料， 高燃焼度 8×8 燃料， 9×9 燃料

4.2.2. 漏えい・変形燃料混載時

構内用輸送容器に収納する漏えい・変形燃料の燃料仕様は既存評価に用いている燃料仕様に包絡されており、既存評価に比べて使用済燃料の崩壊熱量は十分低いものとなっている。このため、評価結果は前項の健全燃料輸送時の評価に包絡される。

なお、万が一輸送容器の取り扱い中に漏えい燃料棒が破損し、漏えい燃料棒からペレットが放出されたとしても、放出ペレットの発熱量は設計発熱量の 0.1%未満であり、構内用輸送容器の構成部材及び燃料の健全性に影響はない。

また、既存評価の解析モデルには燃料収納スぺーサをモデル化しているが、燃料収納スぺーサがない場合でも上記と同様に崩壊熱量は十分低いものとなっていることから、構内用輸送容器の構成部材及び燃料の健全性に影響はない。

除熱解析に用いるコード (ABAQUS) について

(1) 概要

ABAQUS コードは、米国 Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. (HKS 社) で開発された有限要素法に基づく伝熱解析等の汎用解析コードであり、輸送容器の伝熱解析などに広く利用されている。

(2) 機能

ABAQUS コードは、伝熱解析に際して以下の機能を有している。

- ① 定常、非定常のいずれの解も得ることができる。
- ② 一次元～三次元の任意形状の構造に対して解くことが可能である。
- ③ 初期条件 (温度) は要素ごとに変化させることができ、計算ステップの自動決定も可能である。
- ④ 境界条件として、時間に依存する熱流束、温度、伝導、対流及び放射が考慮できる。
- ⑤ 構成物質の相変態が考慮できる。

(3) 解析フロー

ABAQUS コードの解析フローを図－5 に示す。

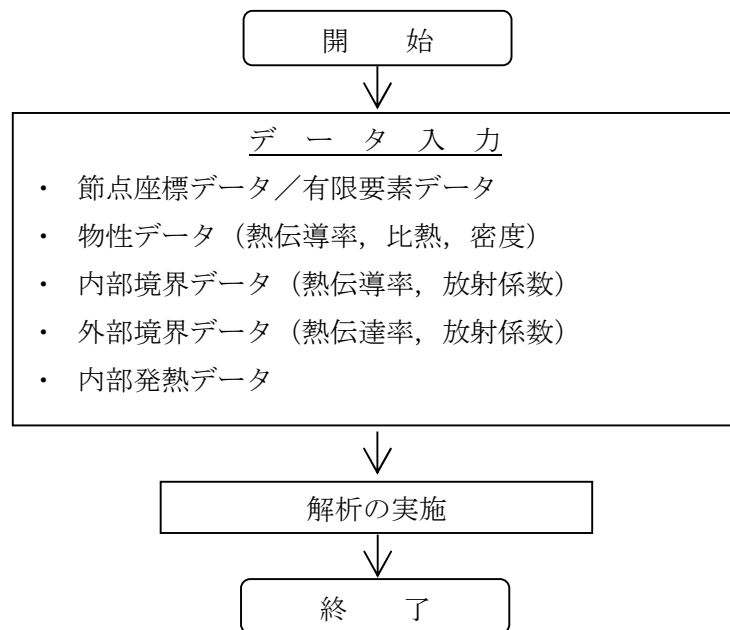
(4) 使用実績

ABAQUS コードは、多くの伝熱解析に使用された実績がある。

(5) 検証方法

貯蔵容器の定常伝熱試験に対して ABAQUS コードによる解析結果と試験結果を比較・検討し、本コードの妥当性が検証されている^{*1}。

^{*1} 山川秀次, 五味義雄, 尾崎幸男, 尾崎明朗「使用済燃料キャスク貯蔵技術の確立—キャスクの伝熱特性評価—」, 電中研報告書, U92038, (1993)



図－5 ABAQUS コードの伝熱解析フロー図

除熱解析に用いるコード（ORIGEN2）について

（１） 概要

ORIGEN2 コードは、米国オークリッジ国立研究所（ORNL）で開発された炉内中性子束の 1 点近似による燃焼計算コードである。ORIGEN2 コードは汎用解析コードであり、輸送容器の崩壊熱計算等に広く利用されている。

（２） 機能

ORIGEN2 コードは、燃焼解析に際して以下の機能を有している。

- ① 燃料の炉内での燃焼計算，炉取出し後の減衰計算により，冷却期間に対応した崩壊熱，放射線の強度，各核種の放射エネルギー等が求められる。
- ② 原子炉の炉型と燃料の組合せに対し，中性子エネルギースペクトルの違いにより重みをつけた断面積ライブラリが内蔵されており，任意に選択できる。
- ③ 計算結果は，放射化生成物，アクチニド，核分裂生成物に分類して出力される。
- ④ 燃焼計算に必要な放射性核種データ（崩壊熱，ガンマ線のエネルギー分布，自発核分裂と（ α ， n ）反応により発生する中性子線源強度等）に関しては，ORIGEN2 コード専用のライブラリがあり，これを用いる。

（３） 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを図－6 に示す。

（４） 使用実績

ORIGEN2 コードは，輸送容器，核燃料施設の崩壊熱計算に広く使用されている*1。

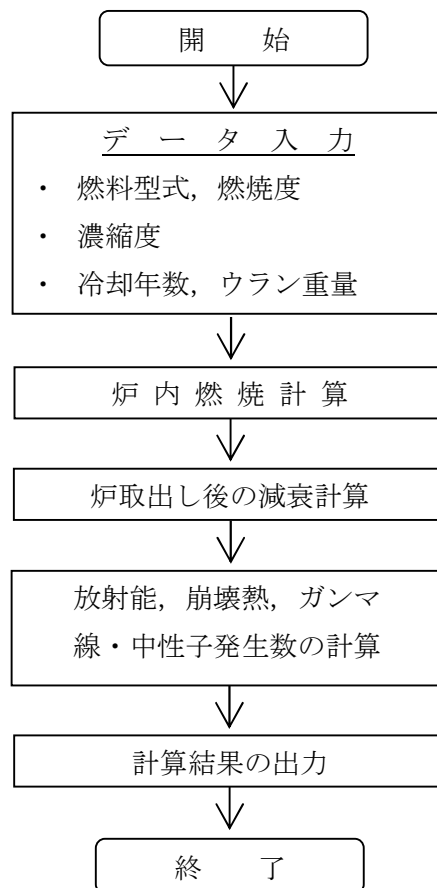
（５） 検証方法

汎用コードの導入評価*1 が実施されていることが確認されている。

大型実験/ベンチマーク試験による検証*2 が実施されていることが確認されている。

*1 ORNL, “ORIGEN2 Isotope Generation and Depletion Code MATRIX EXPONENTIAL METHOD”, CCC-371

*2 (社)日本原子力学会 “原子炉崩壊熱とその推奨値”，1989 年 8 月



図－6 ORIGEN2 コードの計算フロー図

4.3. 密封機能

(1) 基本的な考え方

構内用輸送容器の密封装置は、容器本体及び蓋より構成される密封容器とこれに付属するバルブから構成される。容器本体と蓋の間、及びバルブのガスケットにはＯリングが使用されている。

密封機能の評価にあたっては、構造強度評価及び除熱機能評価の結果から、構内用輸送容器の密封性能が維持されることを確認する。

(2) 評価結果

4.1. 項に示したとおり、構造強度評価から蓋、蓋ボルト、胴及び底板は構内輸送における荷重条件に対して十分な強度を有しており、密封装置の構造健全性に問題がないことが確認されている。

また、4.2. 項に示したとおり、除熱機能評価から構内輸送時のＯリングの温度は 106℃以下であり、設計基準温度である 300℃を大きく下回ることから、熱的健全性に問題ないことが確認されている。

以上から、構内用輸送容器の密封性能は維持される。

4.4. 遮へい機能

4.4.1. 健全燃料輸送時

(1) 基本的な考え方

遮へい設計にあたっては、内部に燃料を入れた場合に放射線障害を阻止するため、使用済燃料の放射線を適切に遮へいする能力を有するよう以下のとおり設計する。

- a. 構内用輸送容器はガンマ線遮へいと中性子遮へいの機能を有する。
- b. 主要なガンマ線遮へい材は、胴、底板及び外筒の炭素鋼と蓋のステンレス鋼である。
- c. 主要な中性子遮へい材は、胴内水及び胴と外筒間のレジンである。

遮へい機能の評価においては、収納する使用済燃料の線源強度を考慮し、構外用輸送容器としての安全評価に用いられている評価手法を用い、構内用輸送容器表面及び表面から 1 m における線量当量率が設計基準を超えないことを評価する。

なお、構内用輸送容器に収納する燃料仕様は既存評価に用いている燃料仕様に包絡されるが、構内輸送では緩衝体がない状態で運用することから、再評価を実施する。ただし、緩衝体がない解析モデルである事以外は既存評価と同じとし、既存評価書の内容を引用する。

(2) 設計基準

設計基準を表－12 に示す。

表－12 設計基準

(単位： $\mu\text{Sv/h}$)

	設計基準
構内用輸送容器 表面	2000 以下
構内用輸送容器 表面から 1 m	100 以下

(3) 評価条件

評価条件は既存評価と同一である。

(4) 評価方法

遮へい計算は、既存評価と同様に、ガンマ線、中性子共に DOT3.5 コードを用いて計算し、構内用輸送容器表面及び表面から 1 m の線量当量率を求める。

遮へい解析モデルは既存評価モデルから、緩衝体のないモデルに変更する。その他の条件は、既存評価と同様である。

ライブラリとしては、DLC-23/CASK データを用い、線量当量率への変換は ICRP Publ. 74 に従う。

(5) 評価結果

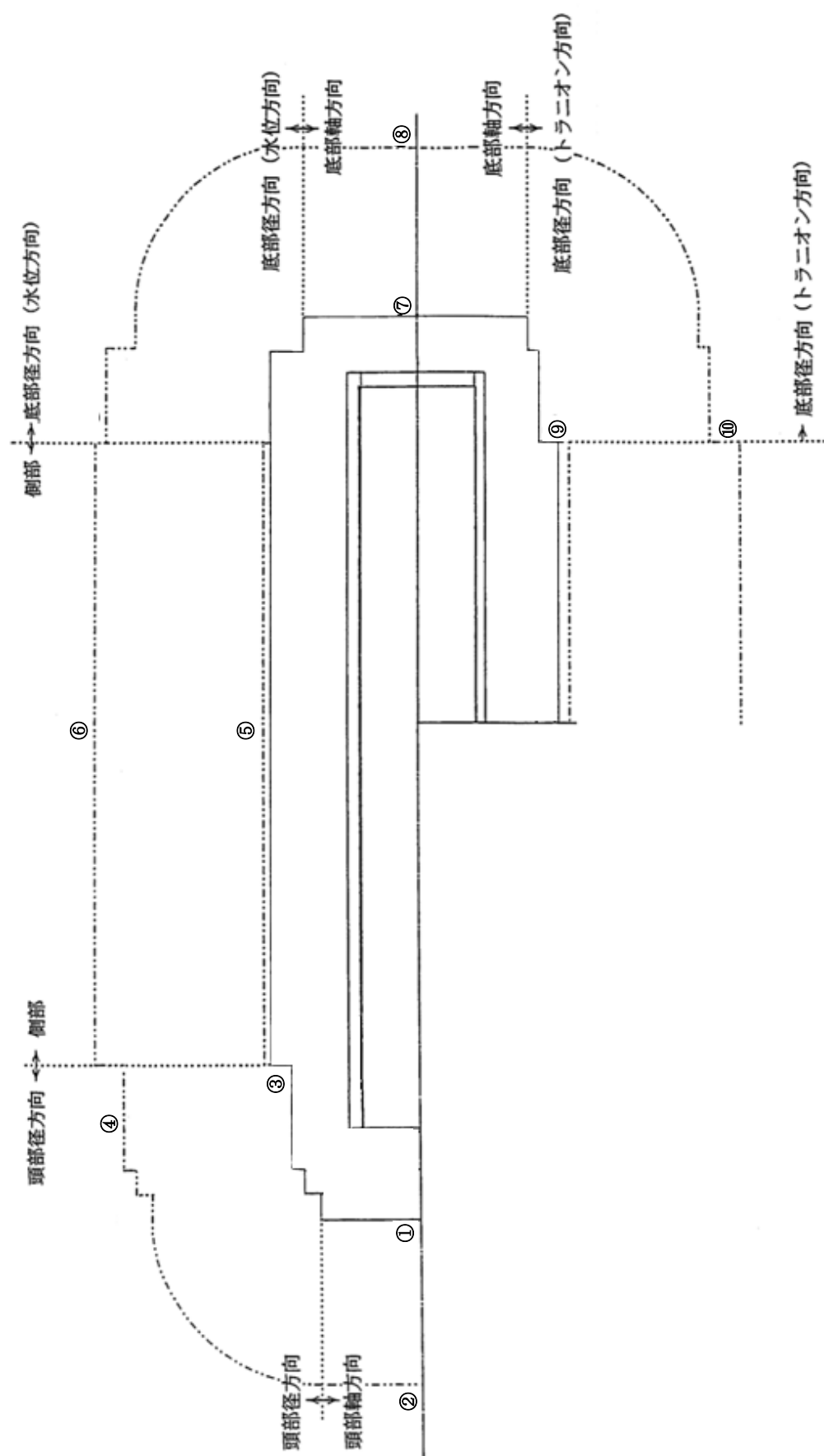
構内用輸送容器の線量当量率評価位置を図－7 に、評価結果を表－13 に示す。なお、評価結果は頭部軸方向、頭部径方向、側部、底部径方向、底部軸方向における線量当量率の最大値を示している。

本表に示すとおり、構内用輸送容器は設計基準値を満足している。

表－13 最大線量当量率の計算結果

(単位： $\mu\text{Sv/h}$)

		頭部		側部	底部	
		軸方向	径方向		軸方向	径方向
評価点		①	③	⑤	⑦	⑨
表面	計算結果	984.6	549.9	236.9	165.1	928.8
	設計基準値	2000				
評価点		②	④	⑥	⑧	⑩
表面から 1 m	計算結果	38.3	44.5	79.5	31.5	57.6
	設計基準値	100				



図一 7 線量当量率評価位置

4.4.2. 漏えい・変形燃料混載時

(1) 基本的な考え方

漏えい・変形燃料混載時の遮へい機能の評価においては、構外用輸送容器としての安全評価（漏えい燃料収納時）に用いられている評価手法を用い、構内用輸送容器表面及び表面から 1 m における線量当量率が設計基準を超えないことを評価する。

なお、構内輸送では燃料収納缶を用いずに運用することから、再評価を実施する。ただし、燃料収納缶がない解析モデルである事以外は既存評価と同じとし、既存評価書の内容を引用する。

(2) 設計基準

設計基準は健全燃料と同様であり、表－12 に示すとおりである。

(3) 評価条件

漏えい燃料 2 体については、漏えい燃料の冷却期間、平均燃焼度により放射能強度を求め、評価を行う。

なお、変形燃料については冷却期間、平均燃焼度は既存評価の条件に包絡されるため、本評価では変形燃料は安全側に健全燃料として扱うこととする。

(4) 評価方法

漏えい燃料については、安全側に漏えい燃料棒の破損を仮定し、漏えい燃料棒 2 本分のペレットが容器内の任意の位置に存在するものとして線量当量率を求める。

遮へい計算は、ガンマ線、中性子共に ANISN コードを用いて燃料棒 2 本分のペレットに対する線量当量率を求め、安全側に健全燃料（変形燃料含む）のみ収納時の線量当量率に加算して、構内用輸送容器表面及び表面から 1 m の線量当量率を求める。

解析モデルは一次元球モデルとし、健全燃料の解析モデルにおける遮へい解析結果が厳しい位置に存在すると仮定する。

なお、ライブラリは、健全燃料と同様に DLC-23/CASK データを用い、線量当量率への変換は ICRP Publ. 74 に従う。

(5) 評価結果

漏えい・変形燃料混載時の評価結果を表－１４に示す。なお、評価結果は頭部軸方向、頭部径方向、側部、底部径方向、底部軸方向における線量当量率の最大値を示している。

本表に示すとおり、漏えい・変形燃料混載時においても構内用輸送容器は設計基準値を満足している。

なお、線量当量率評価位置については、健全燃料収納時と同様であり、図－７に示すとおりである。

表－１４ 最大線量当量率の計算結果（漏えい・変形燃料混載時）

（単位： $\mu\text{Sv/h}$ ）

		頭部		側部	底部	
		軸方向	径方向		軸方向	径方向
評価点		①	③	⑤	⑦	⑨
表面	計算結果	1010.0	607.7	238.3	237.2	986.6
	設計基準値	2000				
評価点		②	④	⑥	⑧	⑩
表面から 1 m	計算結果	40.7	47.7	79.8	35.4	60.8
	設計基準値	100				

遮へい解析に用いるコード（ORIGEN2）について

（１） 概要

ORIGEN2 コードは、米国オークリッジ国立研究所（ORNL）で開発された炉内中性子束の 1 点近似による燃焼計算コードである。ORIGEN2 コードは汎用解析コードであり、輸送容器の放射線源強度計算等に広く利用されている。

（２） 機能

ORIGEN2 コードは、燃焼解析に際して以下の機能を有している。

- ① 燃料の炉内での燃焼計算，炉取出し後の減衰計算により，冷却期間に対応した崩壊熱，放射線の強度，各核種の放射エネルギー等が求められる。
- ② 原子炉の炉型と燃料の組合せに対し，中性子エネルギースペクトルの違いにより重みをつけた断面積ライブラリが内蔵されており，任意に選択できる。
- ③ 計算結果は，放射化生成物，アクチニド，核分裂生成物に分類して出力される。
- ④ 燃焼計算に必要な放射性核種データ（崩壊熱，ガンマ線のエネルギー分布，自発核分裂と（ α ， n ）反応により発生する中性子線源強度等）に関しては，ORIGEN2 コード専用のライブラリがあり，これを用いる。

（３） 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを図－８に示す。

（４） 使用実績

ORIGEN2 コードは，輸送容器，核燃料施設の放射線源強度計算に広く使用されている*1。

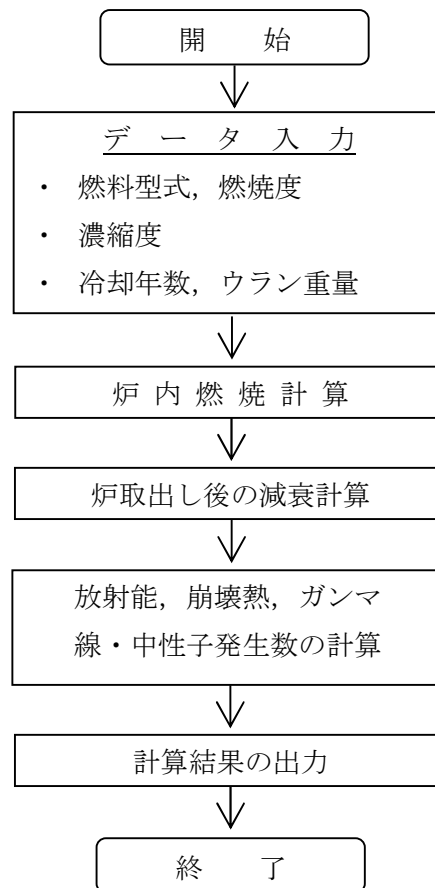
（５） 検証方法

汎用コードの導入評価*1 が実施されていることが確認されている。

大型実験/ベンチマーク試験による検証*2 が実施されていることが確認されている。

*1 ORNL, “ORIGEN2 Isotope Generation and Depletion Code MATRIX EXPONENTIAL METHOD”, CCC-371

*2 (社)日本原子力学会 “原子炉崩壊熱とその推奨値”，1989 年 8 月



図－8 ORIGEN2 コードの計算フロー図

遮へい解析に用いるコード (DOT3.5) について

(1) 概要

DOT3.5 コード (以下「DOT コード」という。) は二次元輸送コードであり, 米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された汎用解析コードである。

(2) 機能

DOT コードは, 遮へい解析に際して以下の機能を有する。

- ① ガンマ線や中性子線に対するボルツマン輸送方程式を解くことによる数値解析法であり, 放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性が表現できる。
- ② DOT コードは, 二次元の体系を扱うことができる。

(3) 解析フロー

DOT コードの解析フローを図-9に示す。

(4) 使用実績

DOT コードは, 原子力施設の遮へい計算に広く用いられており, 輸送容器の遮へい解析に豊富な実績がある。

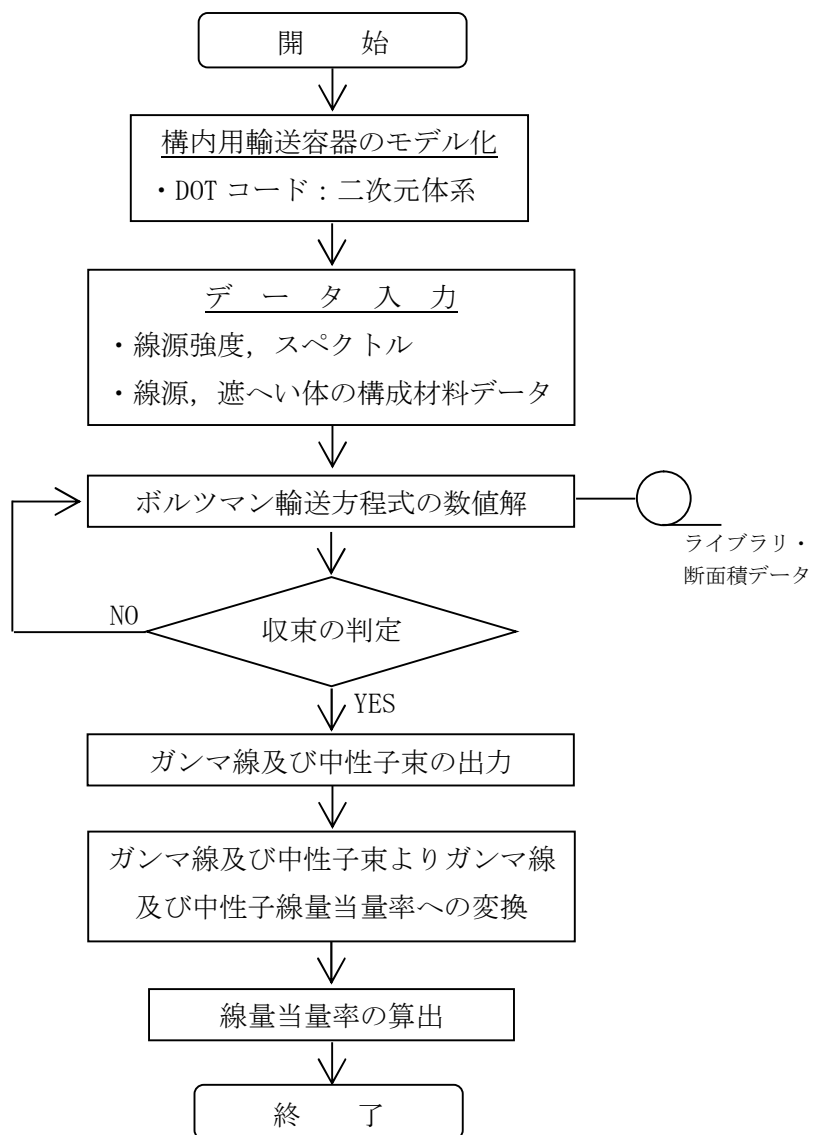
(5) 検証

汎用コードの導入評価*1が実施されていることが確認されている。

大型実験/ベンチマーク試験による検証*2が実施されていることが確認されている。

*1 W. A. Rhoades, “DOT3.5 TWO DIMENSIONAL DISCRETE ORDINATES RADIATION TRANSPORT CODE”, CCC-276, 1978
年 10 月

*2 (社)日本原子力学会 “中性子遮蔽設計ハンドブック”, 1993 年 4 月



図－9 DOT コードの解析フロー図

4.5. 臨界防止機能

4.5.1. 健全燃料輸送時

(1) 基本的な考え方

臨界防止にあたっては、想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止するため以下のとおり設計する。

- a. 燃料を収納するバスケットは格子構造として、燃料を所定の幾何学的配置に維持する設計とする。
- b. バスケットの主要材料には、中性子を吸収するボロン入りステンレス鋼を使用する。

なお、臨界防止機能の評価においては、構内用輸送容器に収納する健全燃料の初期濃縮度（約 3.8wt%）は既存評価に用いている初期濃縮度（約 4.2wt%）に包絡されるため、評価結果は既存評価書の内容を引用する。

(2) 設計基準

想定されるいかなる場合も実効増倍率が 0.95 以下であること。

(3) 評価条件

既存評価の内容を以下に示す。

- ・評価は初期濃縮度の高い 9×9 燃料について行う。
- ・燃料のウラン-235 の濃縮度は未照射のままの減損していない値（初期濃縮度）とする。
- ・燃料集合体には可燃性毒物としてガドリニウムを添加した燃料棒が含まれるが、中性子吸収断面積の大きいガドリニウムの存在を無視し、安全側にガドリニウムを添加していない燃料棒に置換える。
- ・燃料は反応度が最も高くなるように配置された状態とする。また、燃料集合体の変形を考慮し、臨界評価上安全側の仮定となるように収納される全燃料について一部領域の燃料棒ピッチを変化させた配列とする。
- ・バスケット材料のボロン入りステンレス鋼材中の ^{10}B 含有量は、製造下限値とする。
- ・チャンネルボックスを水に置換える。
- ・胴内における燃料として実在する部分は燃料有効長に相当する部分のみとし、上・下部タイプレート部などを水に置換える。
- ・胴内の燃料有効長の範囲外の構造物は水に置換える。
- ・中性子遮へい体及びフィンはないものとする。
- ・輸送容器外部の雰囲気は安全側に真空とする。

(4) 評価方法

構内用輸送容器の実効増倍率は、燃料のウラン-235 の濃縮度は未照射のままの減損していない値をとる安全側の仮定で、構内用輸送容器の実形状をモデル化し、KENO-V. a コードを使用して求める。

(5) 評価結果

評価結果を表－15に示す。本表に示すとおり、構内用輸送容器の実効増倍率は設計基準を満足している。

表－15 評価結果

評価対象	実効増倍率	設計基準
構内用輸送容器	0.900 ^{*1}	0.95

^{*1} モンテカルロ計算の統計誤差（3σ）を考慮した値

4.5.2. 漏えい・変形燃料混載時

4.5.2.1. 健全燃料及び漏えい燃料輸送時

(1) 基本的な考え方

臨界防止にあたっては、想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止するため以下のとおり設計する。

- a. 燃料を収納するバスケットは格子構造として、燃料を所定の幾何学的配置に維持する設計とする。
- b. バスケットの主要材料には、中性子を吸収するボロン入りステンレス鋼を使用する。

なお、臨界防止機能の評価においては、構内用輸送容器に収納する健全燃料及び漏えい燃料の初期濃縮度は既存評価に用いている初期濃縮度（約 4.2wt%）に包絡されるため、健全燃料及び漏えい燃料は既存評価に用いている燃料と同じ仕様として評価する。さらに、安全側に漏えい燃料棒の破損を仮定し、漏えい燃料棒 2 本分のペレットが構内用輸送容器内に放出されるものとして、既存評価の条件に追加する。

(2) 設計基準

想定されるいかなる場合も実効増倍率が 0.95 以下であること。

(3) 評価条件

評価の内容として、ペレットの放出を考慮する以外は健全燃料輸送時と同様とする。

放出されたペレットはペレットと水が混ざった状態とし、燃料領域以外の水領域に存在するものと仮定する。また、ペレットと水は水／ウラン比及びペレット粒径が最適な状態とする。

(4) 評価方法

構内用輸送容器の実効増倍率は、燃料及びペレットのウラン-235 の濃縮度は未照射のままの減損していない値をとる安全側の仮定で、構内用輸送容器の実形状をモデル化し、KENO-V.a コードを使用して求める。

(5) 評価結果

評価結果を表－16 に示す。本表に示すとおり、構内用輸送容器の実効増倍率は設計基準を満足している。

表－16 評価結果

評価対象	実効増倍率	設計基準
構内用輸送容器	0.903 ^{*1}	0.95

*1 モンテカルロ計算の統計誤差（3 σ ）を考慮した値

4.5.2.2. 健全燃料及び変形燃料輸送時

(1) 基本的な考え方

臨界防止にあたっては、想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止するため以下のとおり設計する。

- a. 燃料を収納するバスケットは格子構造として、燃料を所定の幾何学的配置に維持する設計とする。
- b. バスケットの主要材料には、中性子を吸収するボロン入りステンレス鋼を使用する。

なお、臨界防止機能の評価においては、構内用輸送容器に収納する健全燃料は既存評価に用いている初期濃縮度（約 4.2wt%）に包絡されるため、健全燃料は既存評価に用いている燃料と同じ仕様として評価する。また、安全側に変形燃料の燃料棒の変形を考慮して評価する。

(2) 設計基準

想定されるいかなる場合も実効増倍率が 0.95 以下であること。

(3) 評価条件

評価の内容として、9×9 燃料 11 体、7×7 燃料 1 体について行うこと及び燃料収納スパーサを無視すること以外は健全燃料輸送時と同様とする。

変形燃料は大口格子に収納し、反応度が最も高くなるように配置された状態とする。また、燃料集合体の変形を考慮し、臨界評価上安全側の仮定となるように収納される変形燃料について全領域の燃料棒ピッチを変化させた配列とする。

(4) 評価方法

構内用輸送容器の実効増倍率は、燃料のウラン-235 の濃縮度は未照射のままの減損していない値をとる安全側の仮定で、構内用輸送容器の実形状をモデル化し、KENO-V. a コードを使用して求める。

(5) 評価結果

評価結果を表－１７に示す。本表に示すとおり、構内用輸送容器の実効増倍率は設計基準を満足している。

表－１７ 評価結果

評価対象	実効増倍率	設計基準
構内用輸送容器	0.895 ^{*1}	0.95

*1 モンテカルロ計算の統計誤差（3 σ ）を考慮した値

4.5.2.3. 健全燃料、漏えい燃料及び変形燃料混載時

(1) 基本的な考え方

臨界防止にあたっては、想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止するため以下のとおり設計する。

- a. 燃料を収納するバスケットは格子構造として、燃料を所定の幾何学的配置に維持する設計とする。
- b. バスケットの主要材料には、中性子を吸収するボロン入りステンレス鋼を使用する。

なお、臨界防止機能の評価においては、4.5.2.1.と同様に健全燃料及び漏えい燃料は既存評価に用いている燃料と同じ仕様として評価する。また、4.5.2.2.と同様に安全側に変形燃料の燃料棒の変形を考慮して評価する。さらに、安全側に漏えい燃料棒の破損を仮定し、漏えい燃料棒2本分のペレットが構内用輸送容器内に放出されるものとして、4.5.2.2.の条件に追加する。

(2) 設計基準

想定されるいかなる場合も実効増倍率が0.95以下であること。

(3) 評価条件

評価の内容として、ペレットの放出を考慮する以外は健全燃料及び変形燃料輸送時と同様とする。

放出されたペレットは健全燃料及び漏えい燃料輸送時と同様にペレットと水が混ざった状態とし、燃料領域以外の水領域に存在するものと仮定する。また、ペレットと水は水／ウラン比及びペレット粒径が最適な状態とする。

(4) 評価方法

構内用輸送容器の実効増倍率は、燃料及びペレットのウラン-235 の濃縮度は未照射のままの減損していない値をとる安全側の仮定で、構内用輸送容器の実形状をモデル化し、KENO-V. a コードを使用して求める。

(5) 評価結果

評価結果を表－１８に示す。本表に示すとおり、構内用輸送容器の実効増倍率は設計基準を満足している。

表－１８ 評価結果

評価対象	実効増倍率	設計基準
構内用輸送容器	0.898 ^{*1}	0.95

*1 モンテカルロ計算の統計誤差（3 σ ）を考慮した値

臨界解析に用いるコード（KENO-V.a）について

（1）概要

KENO-V.a コードは、米国オークリッジ国立研究所（ORNL）で開発されたモンテカルロ法に基づく公開の臨界解析コードであり、輸送容器の臨界解析などに利用されている。

（2）機能

KENO-V.a コードは、臨界解析に際して以下の機能を有している。

- ① 実際中性子が出会う物理現象を確率理論を用いて模擬するため、どのような物理的問題にも適用できる。なお、統計的な手法を用いるため、計算結果には統計誤差が付随する。
- ② 一次元～三次元の任意形状の体系を扱うことができる。

（3）解析フロー

KENO-V.a コードの解析フローを図－10に示す。

（4）使用実績

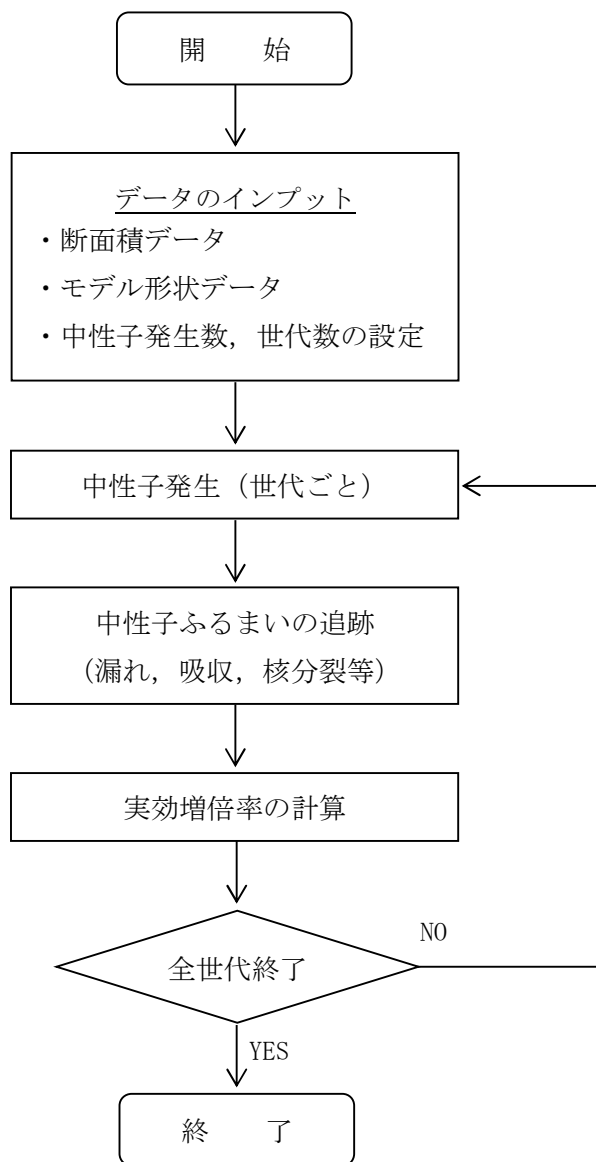
KENO-V.a コードは、国内外で輸送容器の臨界解析をはじめ、核燃料施設の臨界解析に使用されている。

（5）検証

米国のバットル研究所（パシフィック ノースウエスト研究所，PNL）で行われた臨界実験^{*1}の中から16種類の臨界体系をベンチマーク試験^{*2}として選び、検証を行った。

^{*1} S. R. Bierman and E. D. Clayton, “Criticality Experiments with Subcritical Clusters of 2.35 Wt% and 4.31 Wt% ²³⁵U Enriched UO₂ Rods in Water with Steel Reflecting Walls”, NUREG/CR-1784(PNL-3602), U. S. Nuclear Regulatory Commission, April 1981.

^{*2} “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments”, LEU-COMP-THERM-010, LEU-COMP-THERM-013, LEU-COMP-THERM-017, LEU-COMP-THERM-042, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2009.



図－１０　KENO-V.a コードの解析フロー図

5. 構内用輸送容器の落下

5.1. 原因

構内用輸送容器の取り扱い中に、何らかの原因で構内用輸送容器が落下して密封境界が破損し、放射性物質が環境に放出される。

5.2. 発生防止対策

構内用輸送容器の落下を防止するために、次のような設計及び運転上の対策を講じる。

- (1) クレーン主巻フックは二重のワイヤーロープで保持する構造とする。
- (2) クレーン巻上装置は電源断時に電動油圧押上機ブレーキで保持する構造とする。
- (3) クレーン主巻フックと吊具、吊具と構内用輸送容器の取付けを二重化する。
- (4) 取付け作業後の取付け状態を確認し、外れ止めを取り付ける。
- (5) 作業開始前にクレーン及び吊具の事前点検を実施する。
- (6) 作業手順書を整備し、作業員への教育周知を行う。
- (7) 有資格者による設備操作、作業管理を行う体制とする。

5.3. 核分裂生成物の放出量及び線量の評価

本構内用輸送容器は、最大 12 体の燃料を輸送することが可能な容器である。これは既に構内用輸送容器として用いている NFT-22B 型の燃料収納体数 22 体より少ない。

従って、核分裂生成物の放出量及び線量の評価は「添付資料－2－1 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（4号機）」の評価に包絡される。

4号機 構内用輸送容器（NFT-12B 型）に係る確認事項について

4号機 構内用輸送容器（NFT-12B 型）の確認事項を表―1～表―2 に示す。

表―1 確認事項（構内用輸送容器（NFT-12B 型））

確認項目	確認内容	判定基準
寸法確認	変形燃料を収納する大口格子の内寸を確認する。	実施計画のとおりであること。
挿入確認	変形燃料を収納する大口格子に挿入ゲージ※が円滑に挿入, 取出しできることを確認する。	挿入ゲージの挿入, 取出しが円滑に行えること。

※2013 年 12 月に当該燃料について吊上げチャンネルボックスの曲がり状況を確認し、チャンネルボックスの曲がり考慮した最大寸法は測定誤差を加味し 156mm であることを確認している。このため、挿入ゲージは1辺 156mm 以上とする。

表―2 確認事項（構内用輸送容器（NFT-12B 型）のうち、大口格子用ツール）

確認項目	確認内容	判定基準
寸法確認	実施計画に記載されている主な寸法について確認する。	実施計画のとおりであること。
材料確認	実施計画に記載されている主な材料について確認する。	実施計画のとおりであること。
外観確認	外観を確認する。	有意な欠陥がないこと。

構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（２号機）

構内用輸送容器は、福島第一原子力発電所２号機使用済燃料プールに貯蔵されている使用済燃料及び新燃料を共用プールへ構内輸送する際に使用する。

安全機能及び構造強度に関する説明は、「添付資料－２－２－３ 破損燃料用輸送容器（７体）に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（２号機）」を参照。

破損燃料用輸送容器（７体）に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（３号機）

1. ３号機の破損燃料用輸送容器（７体）に係る安全機能及び構造強度

1.1. 破損燃料用輸送容器（７体）の概要

３号機使用済燃料プールには、「添付資料－１－３ 燃料の健全性確認及び取り扱いに関する説明書 6.2. ３号機における燃料の取り扱い」に示すとおり、震災以前から存在する漏えい燃料等やハンドル部が変形し燃料健全性への影響が疑われる燃料（以下、「破損燃料」という。）が存在し、がれき落下衝撃試験及びがれき衝突解析の結果からペレットが燃料被覆管内に保持されていると想定する。破損燃料用輸送容器は、これらの破損燃料を共用プールへ輸送する際に使用する。

破損燃料用輸送容器は、既存の３号機構内用輸送容器に対して破損燃料を評価条件とした安全評価を行い、安全機能及び構造強度を確認した上で破損燃料用輸送容器として使用する。

また、破損燃料用輸送容器は、収納する燃料のハンドル部の変形の程度に応じて、バスケットを取り替えることにより、変形が小さい燃料を７体収納できる容器（以下、「破損燃料用輸送容器（７体）」という。）と、変形が大きい燃料を２体収納できる容器（以下、「破損燃料用輸送容器（２体）」という。）に使い分けることが可能である。

なお、後者の破損燃料用輸送容器（２体）に係る安全機能及び構造強度については、「添付資料２－２－２ 破損燃料用輸送容器（２体）に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（３号機）」で説明する。

1.1.1. 破損燃料用輸送容器（７体）の構成

「添付資料－２－１－２ 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（３号機） 1.1.1. 構内用輸送容器の構成」を参照。

1.1.2. 設備仕様

1.1.2.1. 破損燃料用輸送容器（７体）の仕様

「添付資料－２－１－２ 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（３号機） 1.1.2.1. 構内用輸送容器の仕様」を参照。

1.1.2.2. 破損燃料用輸送容器（７体）に収納する燃料仕様

バスケットに装填したステンレス鋼製の使用済燃料収納缶（小）（内寸153mm）に燃料を装填して共用プールに輸送する。

収納対象とする燃料は、震災以前から存在する漏えい燃料、チャンネルボックスが装

着されていないスペーサー一部損傷燃料及びハンドル部の変形が小さい燃料，並びに健全燃料とする。

なお，破損燃料用輸送容器（7体）で輸送可能な3号機の破損燃料は，がれき落下衝撃試験及びがれき衝突解析の結果からペレットが燃料被覆管内に保持されていると想定される燃料に限る。

3号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料の仕様を表1-1-1に示す。

表1-1-1 3号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料の仕様

	使用済燃料				新燃料
燃料タイプ	8×8燃料	新型 8×8 ジルコニウムライ 燃料	高燃焼度 8×8 燃料	9×9燃料 (A型)	9×9燃料 (A型)
貯蔵体数	6	36	148	324	52
最高燃焼度 (MWd/t)	34, 100	39, 300	43, 900	51, 300	—
最短冷却日 数(日) ^{※1}	12, 133	7, 979	4, 229	3, 207	—

※1：平成31年3月31日時点での冷却期間

1.2. 評価の基本方針

破損燃料用輸送容器（7体）が本文2.11.1.3項の設計方針に示される除熱，密封，遮へい及び臨界防止の安全機能を有するとともに，本文2.11.1.8項の構造強度及び耐震性に示される構造強度を有する設計であることを確認する。

なお，既存の3号機構内用輸送容器の安全機能及び構造強度は「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3号機）」（以下，「既存評価」という。）で確認されているため，1.1.2.2.項に示す3号機の破損燃料が既存評価の評価条件に該当しない事項について，新たに評価を行う。

表1-2-1に評価すべき各安全機能に対する安全設計・評価の方針を示す。

表1-2-1 破損燃料用輸送容器（7体）安全評価の基本方針

項目	設計方針	評価対象	新評価実施要否	評価方針
構造強度	構内用輸送容器は取扱中における衝撃、熱等に耐え、かつ、容易に破損しない設計とする。 構内用輸送容器は、設計、材料の選定、製作及び検査について適切と認められる規格及び基準によるものとする。	破損燃料用輸送容器（7体）	—	震災以前から存在する漏えい燃料等は、燃料被覆管の軽微な損傷または損傷の可能性があるが、ペレットは燃料被覆管内に保持されると想定する。また、ハンドル部が変形した燃料についても落下がれきにより燃料上部が損傷している可能性があるが、ペレットは燃料被覆管内に保持されると想定する。このことから、設計事象の荷重条件が既存評価と同等であると言えるため、新評価は不要。
除熱機能	使用済燃料の健全性及び構成部材の健全性が維持できるように、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去できる設計とする。	燃料被覆管	—	構造強度と同様にペレットは燃料被覆管内に保持されると想定する。このことから、評価条件が既存評価と同等であると言えるため、新評価は不要。
		破損燃料用輸送容器（7体）	—	
密封機能	周辺公衆及び放射線業務従事者に対し、放射線被ばく上の影響を及ぼすことのないよう、使用済燃料が内包する放射性物質を適切に閉じ込める設計とする。	破損燃料用輸送容器（7体）	—	構造強度及び除熱機能の評価結果が既存評価と同等であり、容器構造も同一であるため、新評価は不要。
遮へい機能	内部に燃料を入れた場合に放射線障害を防止するため、使用済燃料の放射線を適切に遮へいする設計とする。	破損燃料用輸送容器（7体）	—	構造強度と同様にペレットは燃料被覆管内に保持されると想定する。このことから、評価条件が既存評価と同等であると言えるため、新評価は不要。
臨界防止機能	想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止できる設計とする。	破損燃料用輸送容器（7体）	○	構造強度と同様にペレットは燃料被覆管内に保持されると想定するが、万一臨界に至った場合の影響緩和が困難であることから、保守的に燃料棒の形状が維持されていないと仮定して実効増倍率を評価する。

1.3. 臨界防止機能

1.3.1. 基本的な考え方

臨界防止にあたっては、想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止するため以下のとおり設計する。

- 燃料を収納するバスケットは格子構造として、燃料を所定の幾何学的配置に維持する設計とする。
- バスケットの主要材料には、中性子を吸収するボロン添加ステンレス鋼を使用し、バスケット外周部にボロン添加アルミニウム合金板を配置する。

1.3.2. 設計基準

想定されるいかなる場合も実効増倍率が 0.95 以下であること。

1.3.3. 評価条件

1) 燃料条件，評価モデル

以下の保守的な燃料条件で評価を行うものとする。臨界評価モデルを図 1-3-1 に示す。

- ・燃料棒の形状が維持されていないと仮定し、以下の条件を設定する。
 - ・燃料被覆管が破損しペレットが使用済燃料収納缶（小）内に放出され、さらに使用済燃料収納缶（小）外にペレットが漏えいすることを仮定し、容器内にペレットと水が非均質に混ざった状態とする。
 - ・水／ウラン比，ペレット粒径が最適な状態とする。
 - ・U-235 の濃縮度は未照射のまま減損しない値とし，9 × 9 燃料のペレット最高濃縮度 4.9wt%とする。また，中性子吸収断面積の大きい Gd は無視する。
- ・バスケット内の使用済燃料収納缶（小）配置は，格子間の範囲で偏心配置（バスケット中心寄り）を考慮する。
- ・バスケット材料のボロン添加ステンレス鋼材中及びバスケット外周に配置したボロン添加アルミニウム合金の ^{10}B 含有量は，製造下限値とする。
- ・評価に使用する各部の寸法は製造公差を考慮した寸法とする。
- ・チャンネルボックス及びウォーターロッドは水に置換える。
- ・中性子遮へい体部（レジン）は真空とする。
- ・破損燃料用輸送容器（7 体）外部の雰囲気は安全側に真空，完全反射とする。
- ・評価モデルは 3 次元体系とする。

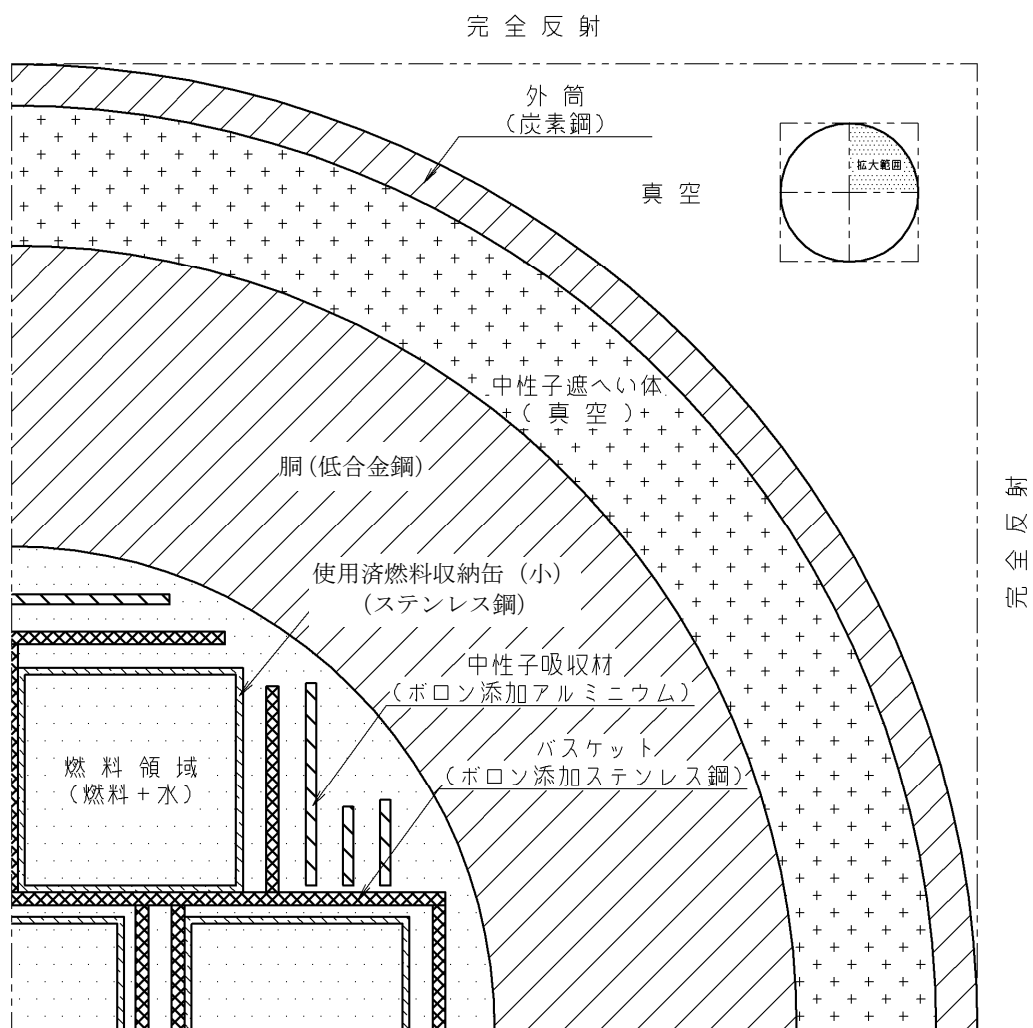


図 1-3-1 臨界評価体系

1.3.4. 評価方法

破損燃料用輸送容器（7 体）の実形状をモデル化し，臨界解析コード KENO-V.a を使用して求める。

1.3.5. 評価結果

評価結果を表 1-3-1 に示す。表 1-3-1 に示すとおり，破損燃料用輸送容器（7 体）の実効増倍率は設計基準を満足している。

表 1-3-1 評価結果

実効増倍率*1	設計基準
0.94	0.95

*1 モンテカルロ計算の統計誤差（ 3σ ）を考慮した値

臨界解析に用いるコード（KENO-V.a）について

（１） 概要

KENO-V.a コードは、米国オークリッジ国立研究所（ORNL）で開発されたモンテカルロ法に基づく公開の臨界解析コードであり、輸送容器の臨界解析などに利用されている。

（２） 機能

KENO-V.a コードは、臨界解析に際して以下の機能を有している。

- ① 実際に中性子が出会う物理現象を確率理論を用いて模擬するため、どのような物理的問題にも適用できる。なお、統計的な手法を用いるため、計算結果には統計誤差が付随する。
- ② 一次元～三次元の任意形状の体系を扱うことができる。

（３） 解析フロー

KENO-V.a コードの解析フローを図 1-3-2 に示す。

（４） 使用実績

KENO-V.a コードは、国内外で輸送容器の臨界解析をはじめ、核燃料施設の臨界解析に使用されている。

（５） 検証

米国のバットル研究所（パシフィック ノースウエスト研究所，PNL）で行われた臨界実験^{*1}の中から 16 種類の臨界体系をベンチマーク試験^{*2}として選び、検証を行った。

*1 S. R. Bierman and E. D. Clayton, “Criticality Experiments with Subcritical Clusters of 2.35 Wt% and 4.31 Wt% ²³⁵U Enriched UO₂ Rods in Water with Steel Reflecting Walls”, NUREG/CR-1784(PNL-3602), U.S. Nuclear Regulatory Commission, April 1981.

*2 “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments”, LEU-COMP-THERM-010, LEU-COMP-THERM-013, LEU-COMP-THERM-017, LEU-COMP-THERM-042, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2009.

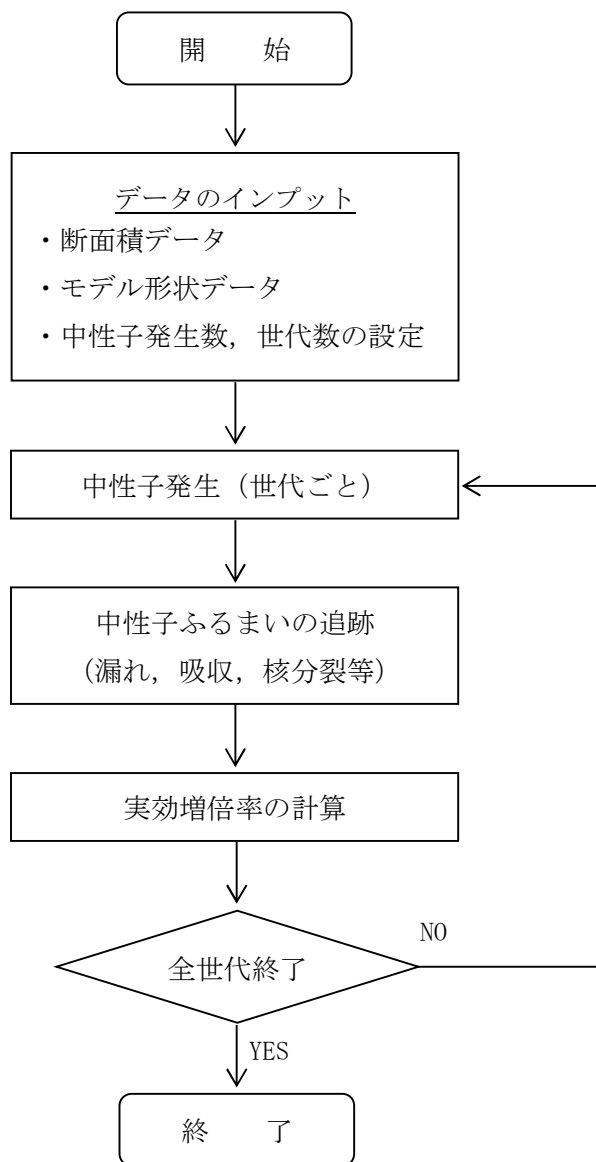


図 1-3-2 KENO-V.a コードの解析フロー図

1.4. 破損燃料用輸送容器（7 体）の落下

「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3号機） 1.8. 構内用輸送容器の落下」を参照。

破損燃料用輸送容器（２体）に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（３号機）

1. ３号機の破損燃料用輸送容器（２体）に係る安全機能及び構造強度

1.1. 破損燃料用輸送容器（２体）の概要

３号機使用済燃料プールにあるハンドル部の変形が認められる燃料のうち、ハンドル部の変形が大きく破損燃料用輸送容器（７体）に収納できない燃料については、内のりの大きいバスケット（２体収納）に取り替えた破損燃料用輸送容器（２体）を使用して、共用プールへ輸送する。なお、バスケット（２体収納）は３基ある３号機構内用輸送容器のいずれに対しても取り替えることができる。

1.1.1. 破損燃料用輸送容器（２体）の構成

破損燃料用輸送容器（２体）は、容器本体、蓋、バスケット及びトラニオンにより構成される。なお、バスケット以外の構成部材は破損燃料用輸送容器（７体）から流用して用いる。破損燃料用輸送容器（２体）の概要図を図 1-1-1 に示す。

（１）容器本体

容器本体は胴、底板、中性子遮へい体、外筒で構成される。低合金鋼の胴及び底板と蓋で放射性物質を閉じ込める耐圧バウンダリを構成する。

また、主に胴及び底板の低合金鋼がガンマ線遮へい機能を有し、胴と外筒の間および底板の底部に配置されたレジンが中性子遮へい機能を有する。

（２）蓋

蓋は一次蓋及び二次蓋で構成する。

一次蓋はステンレス鋼であり、複数本のボルトで容器本体フランジ面に取付けられる。一次蓋にはゴム製のＯリングを設け容器本体フランジ面との密封性を確保する構造となっている。一次蓋のステンレス鋼がガンマ線遮へい機能を有する。

二次蓋もステンレス鋼であり、一次蓋の上から複数本のボルトで容器本体フランジ面に取付けられる。二次蓋にもゴム製のＯリングを設け、容器本体フランジ面との密封性を確保できる構造となっている。

（３）バスケット

バスケットは容器内において燃料集合体を所定の位置に保持するための構造物である。また、未臨界確保のためバスケット外周にボロン添加アルミニウム合金板を設置している。

燃料集合体はバスケット内に装填したステンレス鋼製の使用済燃料収納缶（大）に収納する。

（４）トラニオン

トラニオンは容器のクレーンでの取扱い（吊上げ）及び、構内輸送時の固縛のために容器上部及び下部にボルトで取付ける。

取扱い時（縦姿勢）は容器と吊具との接続を二重化して落下を防止するために、上部トラニオンは二対（４個）設ける。

構内輸送時（横姿勢）では上部トラニオンと下部トラニオンで架台等に固定するため、下部トラニオンは一对（２個）設ける。

1.1.2. 設備仕様

1.1.2.1. 破損燃料用輸送容器（２体）の仕様

破損燃料用輸送容器（２体）の仕様を表1-1-1に示す。

表 1-1-1 破損燃料用輸送容器（２体）の仕様

項目	数値等
重量（ｔ） （燃料を含む）	約 44.3
全長（m）	約 5.6
外径（m）	約 1.4
収納体数（体）	2
基数（基）	1※ ¹

※１：バスケット（２体収納）は１個有する

1.1.2.2. 破損燃料用輸送容器（２体）に収納する燃料仕様

1.1.1.(3)に記載のとおり、バスケットに装填したステンレス鋼製の使用済燃料収納缶（大）（内寸209mm）に燃料を装填して共用プールに輸送する。

収納対象とする燃料は、破損燃料用輸送容器（７体）に収納できない破損燃料，並びに健全燃料とする。

なお、破損燃料用輸送容器（２体）で輸送可能な３号機の破損燃料は、がれき落下衝撃試験及びがれき衝突解析の結果からペレットが燃料被覆管内に保持されていると想定される燃料に限る。

３号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料の仕様を表1-1-2に示す。

表1-1-2 3号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料の仕様

	使用済燃料				新燃料
燃料タイプ	8×8燃料	新型 8×8 ジルコニウムライ 燃料	高燃焼度 8×8 燃料	9×9燃料 (A型)	9×9燃料 (A型)
貯蔵体数	6	36	148	324	52
最高燃焼度 (MWd/t)	34, 100	39, 300	43, 900	51, 300	—
最短冷却日 数(日)※ ²	12, 133	7, 979	4, 229	3, 207	—

※2：平成31年3月31日時点での冷却期間

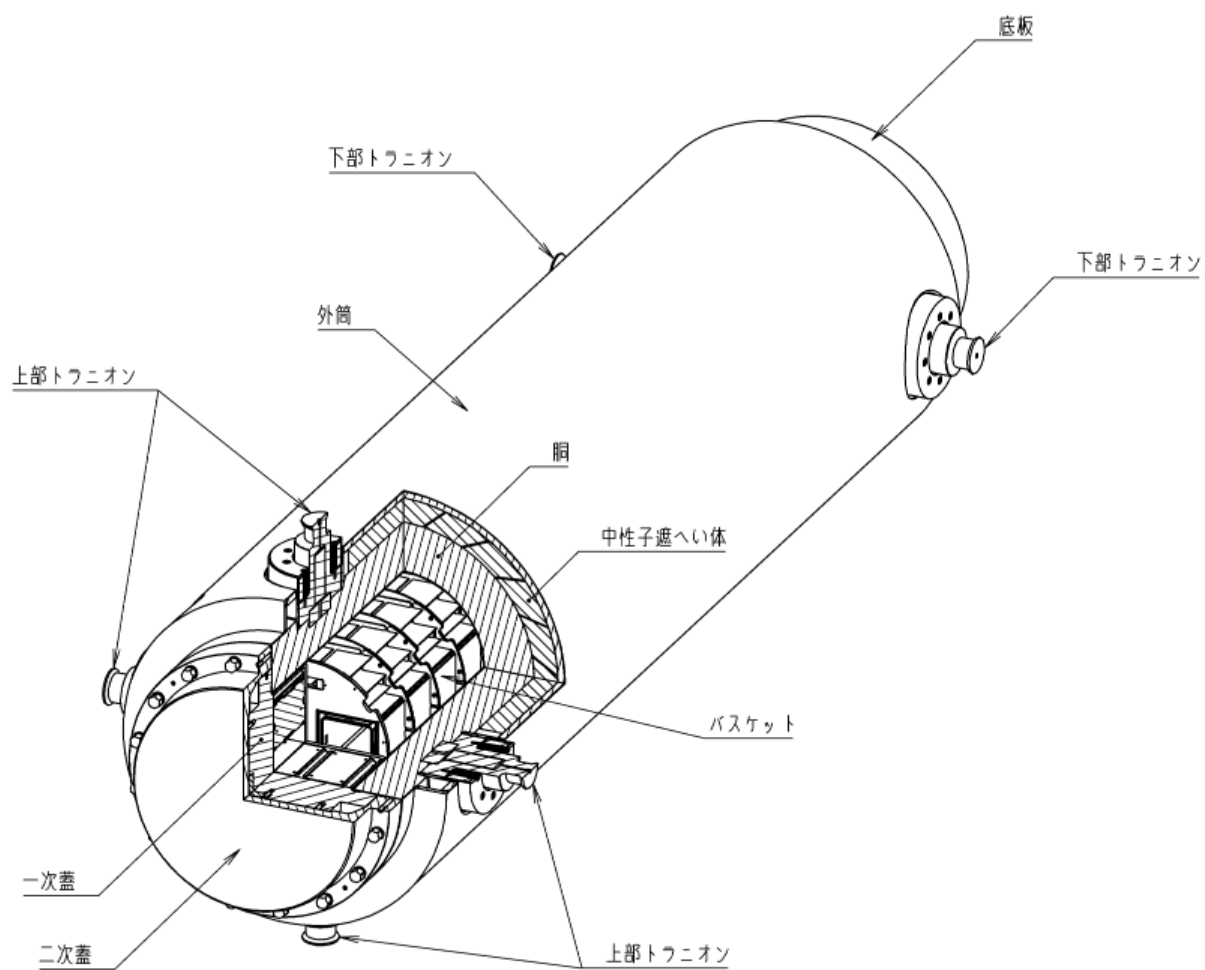


図 1-1-1 破損燃料用輸送容器（2 体） 概要図

1.2. 評価の基本方針

破損燃料用輸送容器（2 体）が，本文 2.11.1.3 項の設計方針に示される除熱，密封，遮へい及び臨界防止の安全機能を有するとともに，本文 2.11.1.8 項の構造強度及び耐震性に示される構造強度を有する設計であることを確認する。

表 1-2-1 に評価すべき各安全機能に関する安全設計・評価の方針を示す。

表1-2-1 破損燃料用輸送容器（2体）安全評価の基本方針

項目	設計方針	評価対象	評価方針
構造強度	構内用輸送容器は取扱中における衝撃，熱等に耐え，かつ，容易に破損しない設計とする。 構内用輸送容器は，設計，材料の選定，製作及び検査について適切と認められる規格及び基準によるものとする。	破損燃料用輸送容器（2体）	落下がれきにより燃料上部が損傷している可能性があるが，ペレットは燃料被覆管内に保持されると想定する。 3号機構内用輸送容器の取扱手順から設計事象を抽出し，その荷重条件で発生する応力を評価する。 構造強度評価手法は，JSME S NC1-2005/2007設計・建設規格を準用する。
除熱機能	使用済燃料の健全性及び構成部材の健全性が維持できるように，使用済燃料の崩壊熱を適切に除去できる設計とする。	燃料被覆管	構造強度と同様にペレットは燃料被覆管内に保持されると想定し，収納する燃料から発生する最大崩壊熱量で容器各部及び燃料の温度を評価する。
		破損燃料用輸送容器（2体）	
密封機能	周辺公衆及び放射線業務従事者に対し，放射線被ばく上の影響を及ぼすことのないよう，使用済燃料が内包する放射性物質を適切に閉じ込める設計とする。	破損燃料用輸送容器（2体）	構造強度及び除熱機能の評価結果から，設計事象において，容器密封部の健全性が維持されることを評価する。
遮へい機能	内部に燃料を入れた場合に放射線障害を防止するため，使用済燃料の放射線を適切に遮へいする設計とする。	破損燃料用輸送容器（2体）	構造強度と同様にペレットは燃料被覆管内に保持されると想定し，収納する燃料から発生する線源強度で容器表面及び表面から1 mの線量当量率を評価する。
臨界防止機能	想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止できる設計とする。	破損燃料用輸送容器（2体）	構造強度と同様にペレットは燃料被覆管内に保持されると想定するが，万一臨界に至った場合の影響緩和が困難であることから，保守的に燃料棒の形状が維持されていないと仮定して実効増倍率を評価する。

1.3. 構造強度評価

1.3.1. 基本的な考え方

破損燃料用輸送容器（2 体）の構造強度の評価部位は、安全上重要な部位として容器本体（胴及び底板）、蓋、バスケット、支持機能を有するトラニオンとする。

ただし、バスケットを除く構成部材は 3 号機構内用輸送容器と同一であり、収納体数は 3 号機構内用輸送容器の 7 体より少ないため容器質量は小さい。よって、容器の支持部材であるトラニオンについては、「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3 号機） 1.3. 構造強度評価」に包絡される。

従って、容器本体（胴及び底板）、蓋、バスケットの各部の構造強度を評価する。

構造強度評価手法は、JSME S NC1-2005/2007 設計・建設規格（以下、「設計・建設規格」という。）を準用する。各評価対象部位の適用基準・規格を表 1-3-1 に示す。

表 1-3-1 構造強度に係る適用基準・規格

評価対象 部位	設計・建設規格 機器区分	構造強度 評価方法	考え方
容器本体, 蓋	クラス 3 容器	クラス 1 容器の規定を 準用	容器本体及び蓋は設計・建設規格 GNR-1210 及び GNR-1220 の機器等の区分の定義より, クラス 3 容器に区分されると考えられる。 圧力荷重についてはクラス 3 容器における規格計算式で評価することができるが, 熱荷重や取扱時の衝撃荷重等の各種の負荷荷重が発生することから, これらの荷重については, 応力解析によって発生応力を求めて評価する必要がある。 したがって, 構造強度評価手法は, 同様な「解析による設計」の考え方が採用されているクラス 1 容器を準用する。
バスケット	ノンクラス	炉心支持構造物の規定 を準用	バスケットは設計・建設規格 GNR-1210 及び GNR-1220 の機器等の区分の定義に該当しないと考えられる。 しかし, 容器内において燃料を支持する部材であるため, 構造強度評価手法は, 炉心支持構造物を準用する。

1.3.2. 設計事象の抽出

JSME S FA1-2007 金属キャスク構造規格の考え方に基づいて、破損燃料用輸送容器（2体）の設計事象として以下を抽出した。

なお、設計事象の抽出にあたっては、図 1-3-1 に示すハンドリングフローに基づき、破損燃料用輸送容器（2体）の取扱い及び共用プールまでの輸送において想定される起因事象に着目し、発生防止対策を考慮して事象の発生の可能性を検討した。設計事象の抽出結果を表 1-3-2 に示す。

1) 設計事象Ⅰ

容器本体及び蓋には、収納する燃料の発熱により内圧及び熱による応力が発生する。また、取扱い時及び構内輸送時の加速度により収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

バスケットには、取扱い時及び構内輸送時の加速度により収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

2) 設計事象Ⅱ

容器本体及び蓋には、輸送架台への衝突（取扱いモード No. 3）、搬送架台への衝突（取扱いモード No. 7）、転倒防止台座への衝突（取扱いモード No. 9）及びキャスクピットへの衝突（取扱いモード No. 10）の加速度における収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

バスケットには、輸送架台への衝突（取扱いモード No. 3）、搬送架台への衝突（取扱いモード No. 7）、転倒防止台座への衝突（取扱いモード No. 9）及びキャスクピットへの衝突（取扱いモード No. 10）の加速度における収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

3) 設計事象Ⅲ及び設計事象Ⅳ

破損燃料用輸送容器（2体）を取扱う設備及び運用においては、クレーンワイヤ及び吊具の二重化、始業前の機器の点検を実施することから、ハンドリングフローから抽出される事象のうち、破損燃料用輸送容器（2体）の安全機能を著しく損なう事象であって、一般公衆の放射線被ばくの観点からみて重要と考えられる事象はない。

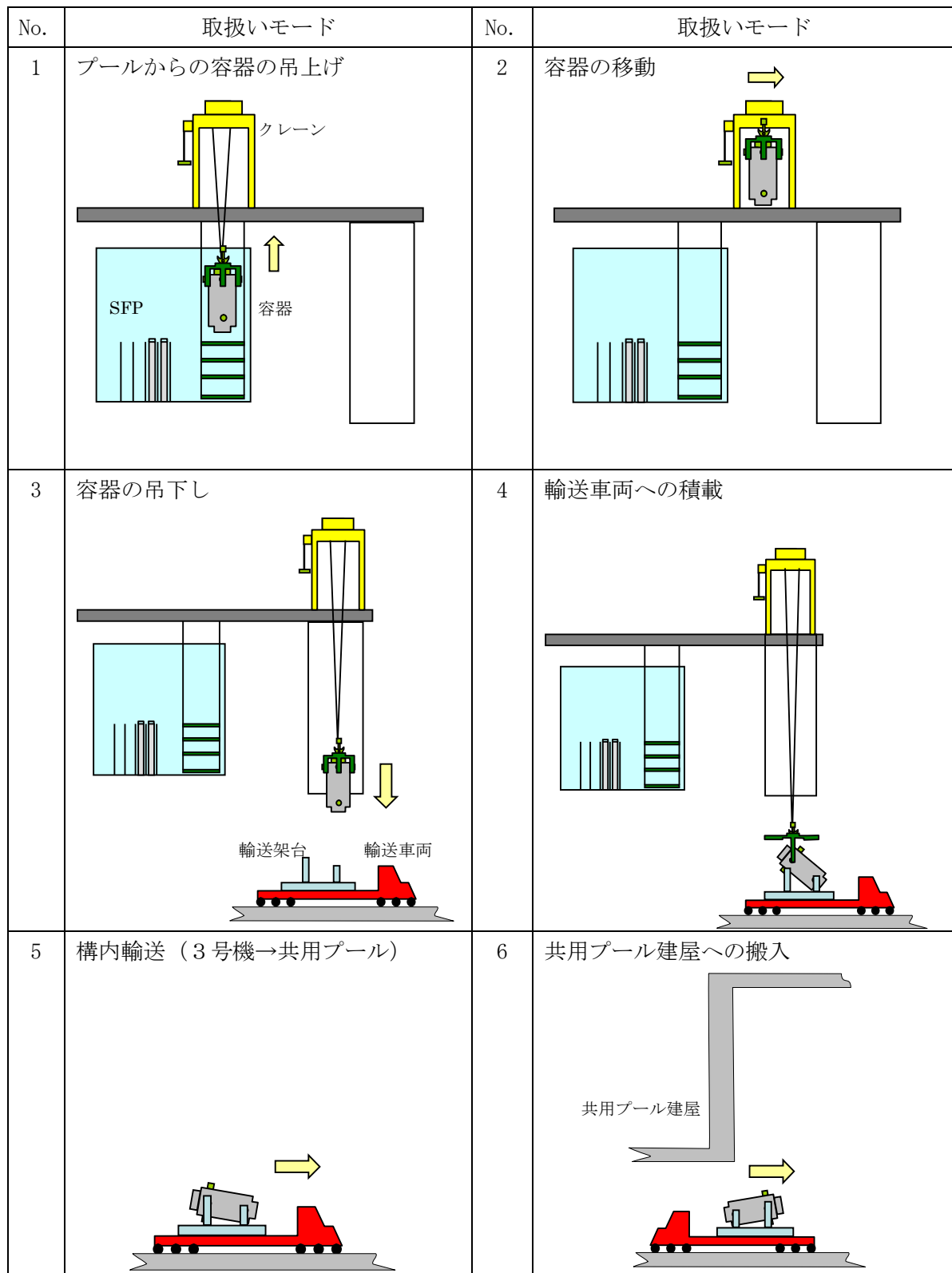


図 1-3-1 構内用輸送容器のハンドリングフロー (1/2)

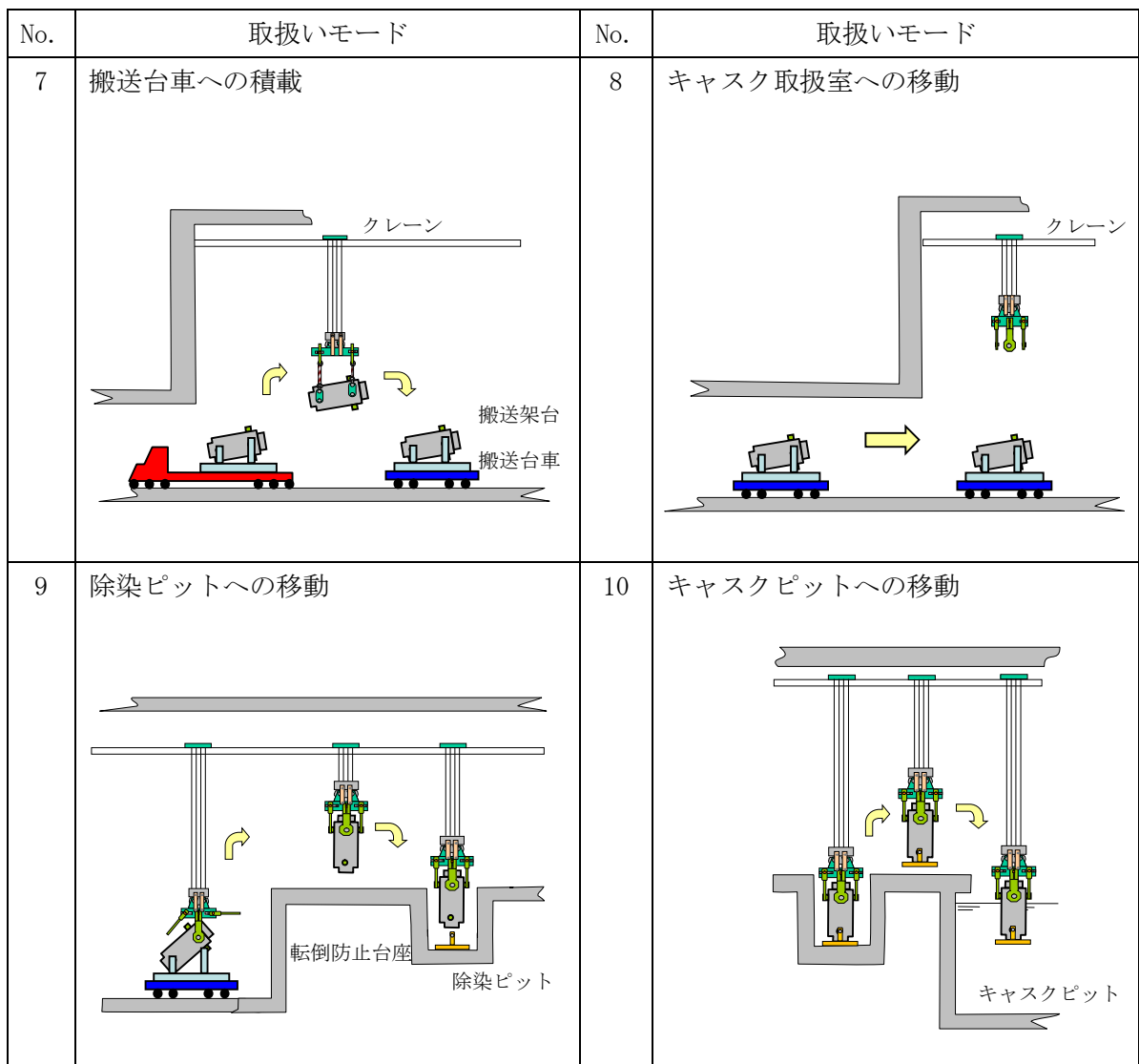


図 1-3-1 構内用輸送容器のハンドリングフロー (2/2)

表 1-3-2 設計事象の抽出 (1/2)

起回事象		原因	発生の可能性・防止策	発生の有無	想定シナリオ	抽出の要否
破損燃料用輸送容器 (2 体) の落下	輸送車両取扱い時の落下 (No. 5)	固定ボルトの取付け不良	以下の対策, 設計により容器の落下を防止する ● 容器は輸送車両に複数のボルトで固縛されていることを確認 ● 容器は輸送車両で徐行して輸送 ● 輸送経路は輸送に関係する人及び車両以外の立入を制限	×		×
	搬送台車取扱い時の落下 (No. 8)	固定ボルトの取付け不良	以下の対策, 設計により容器の落下を防止する ● 容器は搬送台車に複数のボルトで固縛されていることを確認 ● 搬送台車はレール上を走行し, 走行範囲インターロック及び障害物検知装置を有している	×		×
	クレーン取扱時の落下 (No. 1, 2, 3, 4, 7, 9, 10)	吊具の取付け不良 (3 号機)	以下の対策, 設計により容器の落下を防止する ● 吊具の二重化 ● 始業前の吊具点検 ● 取付け後の外れ止めを設置 ● 取付け状態の ITV による目視確認 ● 取付け状態の吊具アーム部のリミットスイッチによる確認 ● 地切り後の ITV による取付け状態の確認, クレーンの荷重確認	×		×
		吊具の取付け不良 (共用プール)	以下の対策, 設計により容器の落下を防止する ● 吊具の二重化 ● 始業前の吊具点検 ● 取付け後の外れ止めを設置 ● 取付け状態の作業員による確認	×		×
		ワイヤーロープ及び吊具の破断 (3 号機)	以下の対策, 設計により容器の落下を防止する ● ワイヤーロープ及び吊具の二重化 ● 始業前のワイヤーロープ, 吊具点検	×		×
		ワイヤーロープ及び吊具の破断 (共用プール)	以下の対策, 設計により容器の落下を防止する ● ワイヤーロープ及び吊具の二重化 ● 始業前のワイヤーロープ, 吊具点検	×		×

表 1-3-2 設計事象の抽出 (2/2)

起回事象		原因	発生の可能性・防止策	発生の有無	想定シナリオ	抽出の要否
破損燃料用輸送容器 (2 体) の衝突	クレーン移動時 (走行, 横行) の衝突 (No. 2, 7, 9, 10)	ブレーキの故障 (3 号機)	以下の対策, 設計により容器は他の構築物等へ衝突を防止する ● I T V により移動経路に障害物がないことの確認 ● 走行及び横行それぞれの制御盤 (シーケンサ、インバータ等) による停止機能の作動	×		×
		ブレーキの故障 (共用プール)	以下の対策, 設計により容器は他の構築物等へ衝突を防止する ● 容器移動前に移動経路に障害物がないことの確認 ● 走行及び横行それぞれの制御盤 (シーケンサ、インバータ等) による停止機能の作動	×		×
		操作員の誤操作 (3 号機)	以下の対策, 設計により構内輸送容器は他の構築物等へ衝突を防止する ● クレーンの横行走行範囲に制限機能を設定 ● I T V により移動経路に障害物がないことの確認	×		×
		操作員の誤操作 (共用プール)	以下の対策, 設計により構内輸送容器は他の構築物等へ衝突を防止する ● クレーンの横行走行範囲に制限機能を設定 ● 容器移動前に移動経路に障害物がないことの確認	×		×
	クレーン吊下げ時の衝突 (垂直吊り) (No. 3, 4, 9, 10)	ブレーキの故障	以下の設計により容器の輸送架台, 転倒防止台座あるいはキャスクピットへ衝突を防止する ● 巻上げ装置ブレーキを二重化	×		×
		操作員の誤操作	吊下げ時の誤操作により, 容器は巻下げ速度で輸送架台, 転倒防止台座あるいはキャスクピットに衝突する可能性がある。	○	クレーンの最大巻下げ速度 0.025m/s で, 構内用輸送容器が輸送架台, 転倒防止台座, キャスクピットに衝突する場合を, 設計事象として抽出。	○
	クレーン吊下げ時の衝突 (水平吊り) (No. 7)	ブレーキの故障	以下の設計により容器の搬送架台へ衝突を防止する ● 巻上げ装置ブレーキを二重化	×		×
		操作員の誤操作	吊下げ時の誤操作により, 容器は巻下げ速度で搬送架台に衝突する可能性がある。	○	クレーンの最大巻下げ速度 0.025m/s で, 容器が搬送架台に衝突する場合を, 設計事象として抽出。	○

1.3.3. 設計事象の荷重条件

前項で抽出した設計事象について、破損燃料用輸送容器（2 体）に発生する荷重を評価する。

1) 内圧

内圧は、除熱評価結果から設定した容器内部水の温度（℃）から、下記の通り設定した。

① 容器内部水及び気体の熱膨張を考慮した場合の内圧

(a) 容器本体及び一次蓋の内圧

容器本体及び一次蓋の内圧は 0.6 (MPa) とする。

(b) 二次蓋の内圧

二次蓋の内圧は 0.45 (MPa) とする。

② 容器内部水及び気体の熱膨張に加えて、燃料破損による燃料棒内のガス放出を考慮した場合の内圧（最高使用圧力）

(a) 容器本体及び一次蓋の最高使用圧力

容器本体及び一次蓋の最高使用圧力は 2.0 (MPa) とする。

(b) 二次蓋の最高使用圧力

二次蓋の最高使用圧力は 1.4 (MPa) とする。

③ 試験時圧力

(a) 容器本体及び一次蓋の試験時圧力

容器本体及び一次蓋の試験時圧力は 3.0 (MPa) とする。

(b) 二次蓋の試験時圧力

二次蓋の試験時圧力は 2.1 (MPa) とする。

2) 熱荷重

破損燃料用輸送容器（2 体）に発生する熱応力は、3 号機構内用輸送容器における除熱評価で得られた温度分布を用いて評価する。

3) 設計事象 I の加速度

取扱い時及び構内輸送時の加速度

①取扱い時（吊上げ時）

破損燃料用輸送容器（2 体）を吊り上げる際に発生する加速度は以下のとおり。なお、吊上げ時の姿勢は縦姿勢である。

- ・ 容器軸方向加速度：1.32 (G)

②構内輸送時

破損燃料用輸送容器（2 体）を構内輸送する際に発生する加速度は以下のとおり。な

お、構内輸送時の姿勢は横姿勢である。

- ・前後方向加速度：2.0 (G)
- ・上方向加速度：2.0 (G)
- ・下方向加速度：3.0 (G) (自重を考慮)
- ・左右方向加速度：1.0 (G)

4) 設計事象Ⅱの加速度の導出

事象発生時に破損燃料用輸送容器 (2 体) が有する運動エネルギーを被衝突物 (輸送架台, 搬送架台, 転倒防止台座) の弾性により吸収するとして, 発生する衝撃加速度を計算した。衝撃加速度の計算方法と結果を以下に示す。

①輸送架台への衝突 (取扱いモード No. 3)

縦姿勢で破損燃料用輸送容器 (2 体) の下部トラニオンが輸送架台後部支持脚にクレーンの巻下げ速度 (0.025m/s) で衝突する場合について評価する。

破損燃料用輸送容器 (2 体) の有する運動エネルギーを輸送架台後部支持脚のひずみエネルギーで吸収するとして, (1) 式で破損燃料用輸送容器 (2 体) に生じる衝撃加速度を求める。

$$\alpha = 1 + \sqrt{1 + \frac{K \cdot V^2}{m \cdot g^2}} \quad (1)$$

ただし, α : 衝撃加速度 (G)

K : 輸送架台後部支持脚の圧縮変形バネ定数 ($2.882 \times 10^{10} \text{N/m}$)

V : クレーンの巻下げ速度 (0.025m/s)

m : 破損燃料用輸送容器 (2 体) の質量 ($4.43 \times 10^4 \text{kg}$)

g : 重力加速度 (9.8m/s^2)

発生する衝撃加速度は 3.29G となり, 余裕をみて 4.0G を評価加速度とする。

②破損燃料用輸送容器 (2 体) の搬送台車上の搬送架台への衝突 (取扱いモード No. 7)

横姿勢で破損燃料用輸送容器 (2 体) を搬送台車上の搬送架台に積載する際に, 破損燃料用輸送容器 (2 体) が搬送台車上の搬送架台に共用プールの天井クレーンの巻下げ速度 (0.025m/s) で衝突する場合について評価する。

破損燃料用輸送容器 (2 体) を剛体として, 破損燃料用輸送容器 (2 体) の有する運動エネルギーを搬送架台支持脚のひずみエネルギーで吸収するとして, (1) 式で破損燃料用輸送容器 (2 体) に生じる衝撃加速度を求める。

ただし, K : 搬送架台前後部支持脚の圧縮変形バネ定数 ($5.738 \times 10^{10} \text{N/m}$)

V : 共用プールの天井クレーンの巻下げ速度 (0.025m/s)

発生する衝撃加速度は 4.07G となり, 余裕をみて 5.0G を評価加速度とする。

③転倒防止台座への衝突及びキャスクピット床面への衝突（取扱いモード No. 9, 10）

縦姿勢で破損燃料用輸送容器（2 体）が転倒防止台座に共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合及び、転倒防止台座を取り付けた破損燃料用輸送容器（2 体）がキャスクピット床面に共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合について評価する。

床面を剛体として、容器の有する運動エネルギーを転倒防止台座のひずみエネルギーで吸収するとして、(1)式で破損燃料用輸送容器（2 体）に生じる衝撃加速度を求める。

ただし、 K ：転倒防止台座の圧縮変形バネ定数（ $4.407 \times 10^{11} \text{N/m}$ ）

V ：共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）

発生する衝撃加速度は 9.10G となり、余裕をみて 10G を評価加速度とする。

5) 各設計事象における荷重条件

破損燃料用輸送容器（2 体）の各設計事象における荷重条件を表 1-3-3、表 1-3-4 に示す。なお、破損燃料用輸送容器（2 体）の設計事象及び荷重条件については、抽出された事象のうち最大の荷重が作用する場合について示す。

表 1-3-3 荷重条件（容器本体及び蓋）（1/2）

設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件
設計 条件	設計時	—	最高使用圧力：2.0MPa （二次蓋は 1.4MPa） ボルト初期締付け力 以下の荷重のうち最大となるもの ・ 構内輸送時荷重 ・ 吊上げ時荷重 ・ 搬送架台への衝突時荷重 ・ 転倒防止台座への衝突時荷重
I	構内輸送時	—	内圧：0.6MPa （二次蓋は 0.45MPa） ボルト初期締付け力 構内輸送時荷重 上方向：2.0G 下方向：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G 熱荷重
	吊上げ時	—	内圧：0.6MPa （二次蓋は 0.45MPa） ボルト初期締付け力 吊上げ荷重 下方向：1.32G （自重を考慮） 熱荷重

表 1-3-3 荷重条件（容器本体及び蓋）（2/2）

設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件
Ⅱ	搬送架台への衝突 （取扱いモード No. 7）	—	内圧：0.6MPa （二次蓋は 0.45MPa） ボルト初期締付け力 搬送架台への衝突時荷重 下方向：5.0G （自重を考慮） 熱荷重
	転倒防止台座への衝突 （取扱いモード No. 9） キャスクピットへの衝突 （取扱いモード No. 10）	輸送架台への衝突 （取扱いモード No. 3）	内圧：0.6MPa （二次蓋は 0.45MPa） ボルト初期締付け力 転倒防止台座への衝突時荷重 下方向：10G （自重を考慮） 熱荷重
試験 状態	試験時	—	試験時圧力：3.0MPa （二次蓋は 2.1MPa） ボルト初期締付け力

表 1-3-4 荷重条件（バスケット）

設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件
設計 条件	設計時	—	転倒防止台座への衝突時荷重*1 下方向：10G （自重を考慮）
I	構内輸送時	吊上げ時	構内輸送時荷重 上方向：2.0G 下方向：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G
II	搬送架台への衝突 （取扱いモード No. 7）	—	搬送架台への衝突時荷重 下方向：5.0G （自重を考慮）
	転倒防止台座への衝突 （取扱いモード No. 9） キャスクピットへの衝突 （取扱いモード No. 10）	輸送架台への衝突 （取扱いモード No. 3）	転倒防止台座への衝突時荷重 下方向：10G （自重を考慮）

*1 設計時のうち荷重条件が最も厳しいのは転倒防止台座への衝突荷重である

1.3.4. 設計基準

1) 容器本体及び蓋

容器本体及び蓋は設計・建設規格 クラス 1 容器に関する規定 PVB-3000 に準じて評価を実施する。容器本体及び蓋の許容応力を表 1-3-5～表 1-3-10 に示す。

① 設計条件における許容応力

設計条件における一次応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 一次一般膜応力 (P_m)

$$P_m \leq S_m$$

(b) 一次局部膜応力 (P_L)

$$P_L \leq 1.5S_m$$

(c) 一次膜＋一次曲げ応力 (P_L+P_b)

$$P_L+P_b \leq 1.5S_m$$

(d) ボルトの平均引張応力 (σ_m)

$$\sigma_m \leq S_m$$

② 設計事象 I, II における許容応力

設計事象 I, II における応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 一次＋二次応力 (P_L+P_b+Q)

$$P_L+P_b+Q \leq 3S_m$$

(b) 平均せん断応力 (τ)

$$\tau \leq 0.6S_m$$

(c) 平均支圧応力 (σ_b)

$$\sigma_b \leq S_y$$

(d) 圧縮応力 (σ_c)

$$\sigma_c \leq B$$

(e) ボルトの平均引張応力 (σ_m)

$$\sigma_m \leq 2S_m$$

(f) ボルトの平均引張応力＋曲げ応力 ($\sigma_m + \sigma_b$)

$$\sigma_m + \sigma_b \leq 3S_m$$

③ 試験状態における許容応力

試験状態における一次応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 一次一般膜応力 (P_m)

$$P_m \leq 0.9S_y$$

(b) 一次局部膜応力 (P_L)

$$P_L \leq 1.5(0.9S_y)$$

(c) 一次一般膜＋一次曲げ応力 (P_m+P_b)

$$P_m+P_b \leq 1.5 (0.9S_y)$$

2) バスケット

バスケットは設計・建設規格 炉心支持構造物に関する規定 CSS-3000 に準じて評価を実施する。バスケットの許容応力を表 1-3-11 に示す。

① 設計条件における許容応力

設計条件における一次応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 一次一般膜応力 (P_m)

$$P_m \leq S_m$$

(b) 一次一般膜＋一次曲げ応力 (P_m+P_b)

$$P_m+P_b \leq 1.5S_m$$

② 設計事象Ⅰ，Ⅱにおける許容応力

設計事象Ⅰ，Ⅱにおける応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 一次＋二次応力 (P_m+P_b+Q)

$$P_m+P_b+Q \leq 3S_m$$

(b) 平均せん断応力 (τ)

$$\tau \leq 0.6S_m$$

(c) 平均支圧応力 (σ_b)

$$\sigma_b \leq S_y$$

(d) 軸圧縮応力 (σ_c)

$$\sigma_c \leq f_c$$

表 1-3-5 胴及び底板の許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	一次一般膜応力	P_m	123	
	一次局部膜応力	P_L	184	
	一次膜＋曲げ応力	P_L+P_b	184	
設計事象 I , II	一次＋二次応力	P_L+P_b+Q	369	
	平均せん断応力	τ	73	
	平均支圧応力	σ_b	184	
	圧縮応力	σ_c	95	
試験状態	一次一般膜応力	P_m	165	
	一次局部膜応力	P_L	247	
	一次一般膜＋曲げ応力	P_m+P_b	247	

材質： GLF1 相当材 (ASTM A350M Gr. LF5 Cl. 1)

設計温度： 135 (°C)

表 1-3-6 一次蓋の許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	一次一般膜応力	P_m	137	
	一次局部膜応力	P_L	205	
	一次膜＋曲げ応力	P_L+P_b	205	
設計事象 I , II	一次＋二次応力	P_L+P_b+Q	411	
試験状態	一次一般膜応力	P_m	153	
	一次局部膜応力	P_L	229	
	一次一般膜＋曲げ応力	P_m+P_b	229	

材質： SUSF304

設計温度： 100 (°C)

表 1-3-7 ポートカバーの許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	一次一般膜応力	P_m	137	
	一次局部膜応力	P_L	205	
	一次膜＋曲げ応力	P_L+P_b	205	
設計事象 I , II	一次＋二次応力	P_L+P_b+Q	411	
試験状態	一次一般膜応力	P_m	143	
	一次局部膜応力	P_L	214	
	一次一般膜＋曲げ応力	P_m+P_b	214	

材質： SUS304

設計温度： 135 (°C)

表 1-3-8 二次蓋，二次蓋ポートカバーの許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	一次一般膜応力	P_m	137	
	一次局部膜応力	P_L	205	
	一次膜＋曲げ応力	P_L+P_b	205	
設計事象 I , II	一次＋二次応力	P_L+P_b+Q	411	
試験状態	一次一般膜応力	P_m	155	
	一次局部膜応力	P_L	232	
	一次一般膜＋曲げ応力	P_m+P_b	232	

材質： SUSF304

設計温度： 95 (°C)

表 1-3-9 一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルトの許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	平均引張応力	σ_m	216	
設計事象 I , II	平均引張応力	σ_m	432	
	平均引張応力＋曲げ応力	$\sigma_m + \sigma_b$	648	

材質： SUS630 H1150

設計温度： 135 (°C)

表 1-3-10 二次蓋ポートカバーボルトの許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	平均引張応力	σ_m	223	
設計事象 I, II	平均引張応力	σ_m	446	
	平均引張応力+曲げ応力	$\sigma_m + \sigma_b$	669	

材質： SUS630 H1150

設計温度： 95 (°C)

表 1-3-11 バスケットの許容応力

設計事象	応力分類		記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	一次一般膜応力		P_m	133	
	一次一般膜+曲げ応力		P_m+P_b	199	
設計事象 I, II	一次+二次応力		P_m+P_b+Q	399	
	平均せん断応力		τ	79	
	平均支圧応力		σ_b	150	
	軸圧縮 応力	枠板 長手方向	σ_c	96	
		枠板 長手方向以外		88	
		格子支持板外周部 0° -180° 方向		56	
		格子支持板外周部 90° -270° 方向		129	
		スペーサ		129	

材質： SUS304

設計温度： 170 (°C)

1.3.5. 評価方法及び評価モデル

1.3.5.1. 容器本体及び蓋

容器本体及び蓋の主な構造部材の応力評価箇所を図 1-3-2, 図 1-3-3 に示す。荷重条件は表 1-3-3 に示したとおりである。

1) 設計条件

① 胴, 底板, 一次蓋, 二次蓋

(a) 最高使用圧力, ボルト初期締付け力, 機械的荷重による応力

容器の実形状をモデル化し構造解析コード ABAQUS を用いて応力評価を行う。

② ポートカバー, 二次蓋ポートカバー

(a) 最高使用圧力による応力

最高使用圧力により発生する一次一般膜応力(P_m)及び, 一次膜+曲げ応力(P_L+P_b)は(2)式で計算する。なお, 一次局部膜応力(P_L)は発生しない。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{1.24 \cdot P \cdot r^2}{t^2} \\ \sigma_y &= \sigma_x \\ \sigma_z &= -P \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで,

- P : 最高使用圧力
- r : ポートカバーＯリング平均半径
二次蓋ポートカバーは締付けボルトピッチ円半径
- t : ポートカバー最小板厚

③ 一次蓋ボルト, 二次蓋ボルト, ポートカバーボルト, 二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力及びガスケット締付による平均引張応力

最高使用圧力におけるボルト荷重及びガスケット (Ｏリング) 締付時のボルト荷重により発生する平均引張応力 (σ_{m1}) は(3)式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{m1} &= \frac{W_{m1}}{A} \\ W_{m1} &= H + H_p \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで,

- W_{m1} : 必要な最小ボルト荷重
- A : 全数のボルト最小断面積
- H : フランジに加わる最高使用圧力による全荷重
- H_p : 気密を十分保つために, Ｏリング又は継手接触面にかける圧縮

力（ゴム製Ｏリングのため $H_p=0N$ ）

また，ガスケット（Ｏリング）締付け時の平均引張応力（ σ_{m2} ）は(4)式で計算する。

$$\sigma_{m2} = \frac{W_{m2}}{A} \dots\dots\dots (4)$$

ここで，

W_{m2} : ガスケット締付け時に必要な最小ボルト荷重（ゴム製Ｏリングのため $W_{m2}=0N$ ）

2) 設計事象Ⅰ 構内輸送時

① 胴，底板，一次蓋，二次蓋

(a) 内圧，ボルト初期締付け力，構内輸送時の機械的荷重，熱荷重による応力
容器の実形状をモデル化し構造解析コード ABAQUS を用いて応力評価を行う。

(b) 平均せん断応力

平均せん断応力（ τ ）が発生する箇所はない。

(c) 平均支圧応力

底板とバスケット底面との接触部に発生する平均支圧応力（ σ_b ）は(5)式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{m_b \cdot G_z}{A_b} \dots\dots\dots (5)$$

ここで，

m_b : バスケットの質量

G_z : 後方向加速度

A_b : 接触面積

(d) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力（ σ_c ）は(6)式で計算する。

$$\sigma_c = \frac{m_c \cdot G_z}{A_c} \dots\dots\dots (6)$$

ここで，

m_c : 容器の質量

G_z : 後方向加速度

A_c : 胴の断面積

② ポートカバー，二次蓋ポートカバー

最高使用圧力による応力を除き，構内輸送時の機械的荷重及び熱荷重による応力は無視できる。

一次＋二次応力 (P_L+P_b+Q) は，(2)式で計算する最高使用圧力により発生する一次膜＋曲げ応力 (P_L+P_b) となる。

③ 一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルト，二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力による平均引張応力

最高使用圧力により発生する平均引張応力 (σ_{m1}) は(3)式で計算する。

(b) ボルト初期締付け力による平均引張応力

ボルト初期締付け力により発生する平均引張応力 (σ_{m3}) は(7) 式で計算する。

$$\sigma_{m3} = \frac{F_s}{A_s} \dots\dots\dots (7)$$

ここで，

F_s : ボルト初期締付け力

A_s : ボルト最小断面積

(c) 構内輸送時に作用する加速度による平均引張応力

構内輸送時に作用する加速度により発生する平均引張応力 (σ_{m4}) は(8)式で計算する。

$$\sigma_{m4} = \frac{mG}{A} \dots\dots\dots (8)$$

ここで，

m : 作用する質量

G : 加速度

A : 全数のボルト最小断面積

(d) 構内輸送時に作用する加速度による曲げ応力

構内輸送時に作用する加速度によって発生する曲げ応力 (σ_b) は(9)式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{1}{n} \cdot \frac{mG\ell_b}{8Z} \dots\dots\dots (9)$$

ここで，

n : ボルト本数

m : 作用する質量

G : 加速度

l_b : ボルト長さ
 Z : ボルトの断面係数

なお、二次蓋ポートカバーボルトには取付け構造上、曲げ応力は発生しない。

3) 設計事象Ⅰ 吊上げ時

① 胴、底板、一次蓋、二次蓋

(a) 内圧、ボルト初期締付け力、吊上げ時の機械的荷重、熱荷重による応力
容器の実形状をモデル化し構造解析コード ABAQUS を用いて応力評価を行う。

(b) 平均せん断応力

平均せん断応力(τ)が発生する箇所はない。

(c) 平均支圧応力

底板とバスケット底面との接触部に発生する平均支圧応力(σ_b)は(5)式で計算する。

(d) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力(σ_c)は(6)式で計算する。

② ポートカバー、二次蓋ポートカバー

最高使用圧力による応力を除き、吊上げ時の機械的荷重及び熱荷重による応力は無視できる。

一次＋二次応力(P_L+P_b+Q)は、(2)式で計算する最高使用圧力により発生する一次膜＋曲げ応力(P_L+P_b)となる。

③ 一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、ポートカバーボルト、二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力による平均引張応力

最高使用圧力により発生する平均引張応力(σ_{m1})は(3)式で計算する。

(b) ボルト初期締付け力による平均引張応力

ボルト初期締付け力により発生する平均引張応力(σ_{m3})は(7)式で計算する。

(c) 吊上げ時に作用する加速度による平均引張応力

吊上げ時に作用する加速度による平均引張応力(σ_{m4})は発生しない。

(d) 吊上げ時に作用する加速度による曲げ応力

吊上げ時に作用する加速度による曲げ応力(σ_b)は発生しない。

4) 設計事象Ⅱ 搬送架台への衝突（横姿勢）

① 胴，底板，一次蓋，二次蓋

(a) 内圧，ボルト初期締付け力，搬送架台への衝突による機械的荷重，熱荷重による応力
容器の実形状をモデル化し構造解析コード ABAQUS を用いて応力評価を行う。

(b) 平均せん断応力

平均せん断応力 (τ) が発生する箇所はない。

(c) 平均支圧応力

底板とバスケット底面との接触部に発生する平均支圧応力 (σ_b) は(5)式で計算する。

(d) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力 (σ_c) は(6)式で計算する。

② ポートカバー，二次蓋ポートカバー

最高使用圧力による応力を除き，搬送架台への衝突による機械的荷重及び熱荷重による応力は無視できる。

一次＋二次応力 (P_L+P_b+Q) は，(2)式で計算する最高使用圧力により発生する一次膜＋曲げ応力 (P_L+P_b) となる。

③ 一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルト，二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力による平均引張応力

最高使用圧力により発生する平均引張応力 (σ_{m1}) は(3)式で計算する。

(b) ボルト初期締付け力による平均引張応力

ボルト初期締付け力により発生する平均引張応力 (σ_{m3}) は(7)式で計算する。

(c) 搬送架台への衝突時に作用する加速度による平均引張応力

搬送架台への衝突時に作用する加速度により発生する平均引張応力 (σ_{m4}) は(8)式で計算する。

なお，一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルトには，搬送架台への衝突時に作用する加速度による平均引張応力 (σ_{m4}) は発生しない。

(d) 搬送架台への衝突時に作用する加速度による曲げ応力

搬送架台への衝突時に作用する加速度により発生する曲げ応力 (σ_b) は(9)式で計算する。

なお、二次蓋ポートカバーボルトには、搬送架台への衝突時に作用する加速度により曲げ応力 (σ_b) は発生しない。

5) 設計事象Ⅱ 転倒防止台座への衝突 (縦姿勢)

① 胴、底板、一次蓋、二次蓋

(a) 内圧、ボルト初期締付け力、転倒防止台座への衝突による機械的荷重、熱荷重による応力

容器の実形状をモデル化し構造解析コード ABAQUS を用いて応力評価を行う。

(b) 平均せん断応力

平均せん断応力 (τ) が発生する箇所はない。

(c) 平均支圧応力

底板とバスケット底面との接触部に発生する平均支圧応力 (σ_b) は(5)式で計算する。

(d) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力 (σ_c) は(6)式で計算する。

② ポートカバー、二次蓋ポートカバー

最高使用圧力による応力を除き、転倒防止台座への衝突による機械的荷重及び熱荷重による応力は無視できる。

一次+二次応力 (P_L+P_b+Q) は、(2)式で計算する最高使用圧力により発生する一次膜+曲げ応力 (P_L+P_b) となる。

③ 一次蓋ボルト、二次蓋ボルト、ポートカバーボルト、二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力による平均引張応力

最高使用圧力により発生する平均引張応力 (σ_{m1}) は(3)式で計算する。

(b) ボルト初期締付け力による平均引張応力

ボルト初期締付け力により発生する平均引張応力 (σ_{m3}) は(7)式で計算する。

(c) 転倒防止台座への衝突時に作用する加速度による平均引張応力

転倒防止台座への衝突時に作用する加速度による平均引張応力 (σ_{m4}) は発生しない。

(d) 転倒防止台座への衝突時に作用する加速度による曲げ応力

転倒防止台座への衝突時に作用する加速度による曲げ応力 (σ_b) は発生しない。

6) 試験状態

① 胴，底板，一次蓋，二次蓋

(a) 試験時圧力，ボルト初期締付け力による応力

容器の実形状をモデル化し構造解析コード ABAQUS を用いて応力評価を行う。

② ポートカバー，二次蓋ポートカバー

(a) 試験時の圧力による応力

試験時圧力により発生する一次一般膜応力(P_m)及び，一次一般膜＋曲げ応力(P_m+P_b)は(2)式で計算する。なお，一次局部膜応力(P_L)は発生しない。

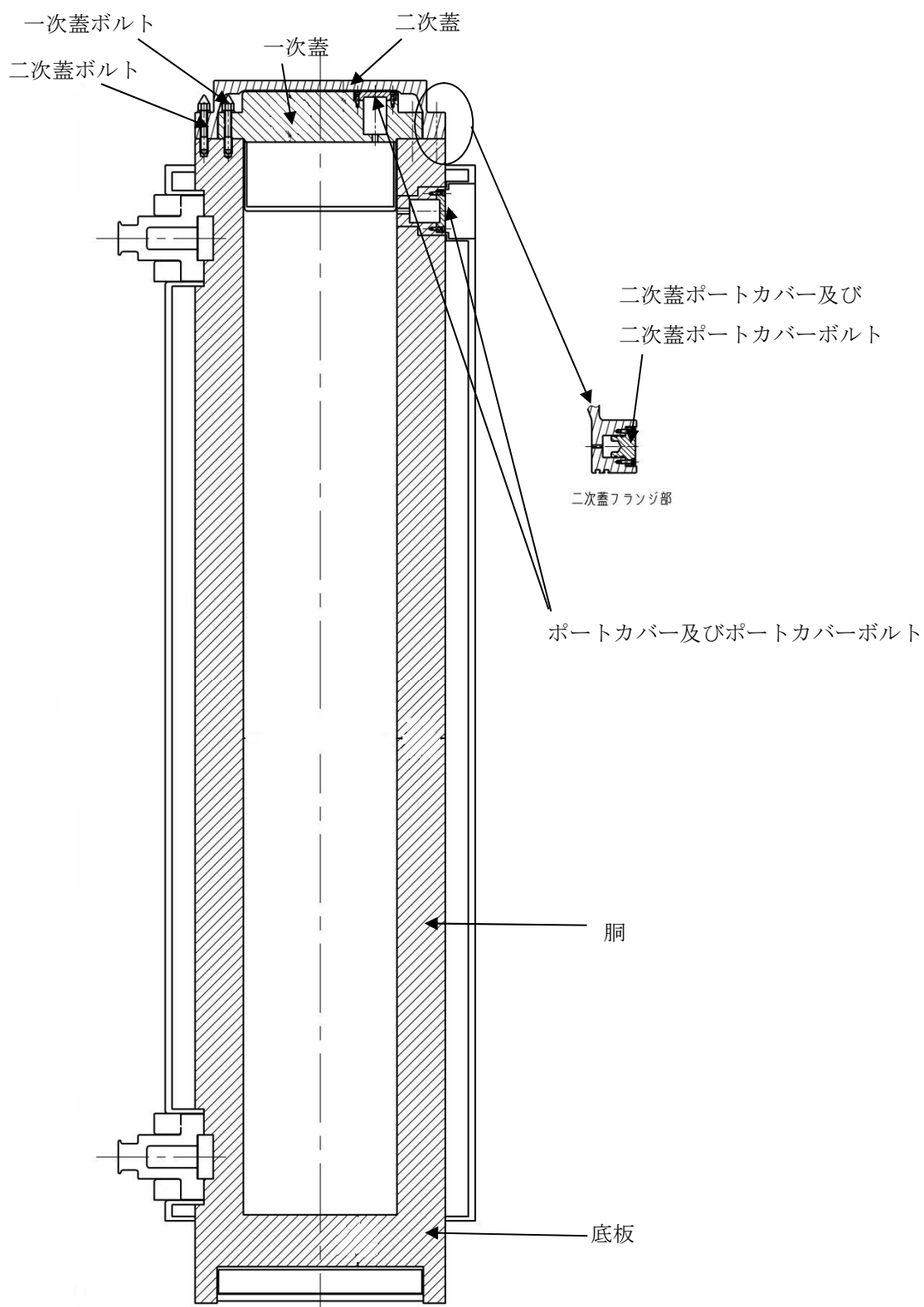


図1-3-2 容器本体及び蓋の応力評価箇所

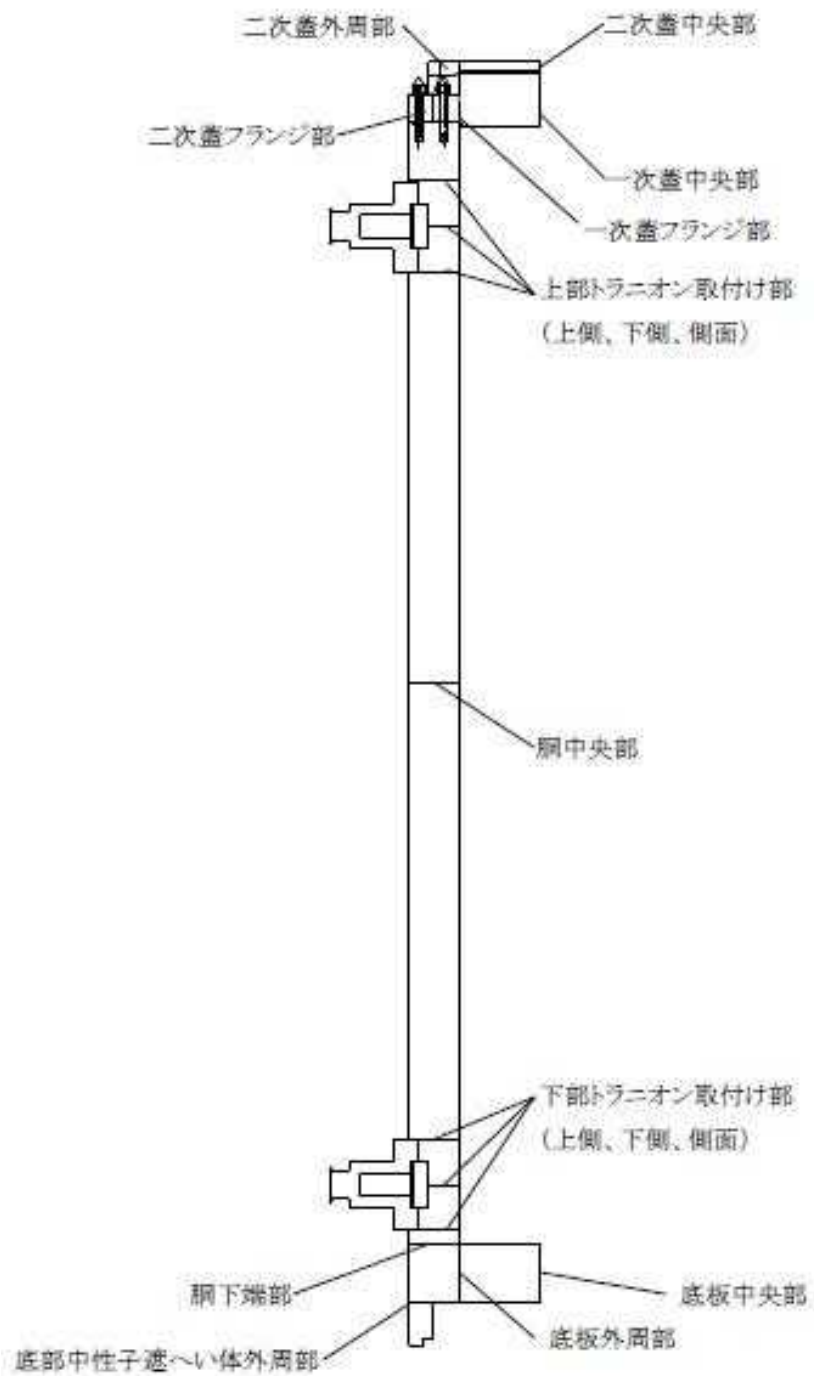


図1-3-3 容器本体及び蓋の応力評価箇所（胴，底板，蓋の詳細）

1.3.5.2. バスケット

バスケットの応力評価箇所を図1-3-4に示す。荷重条件は表1-3-4に示したとおりである。

1) 設計条件

①一次一般膜応力

最大応力が発生する箇所は、転倒防止台座への衝突時の図1-3-4の評価点①及び⑦である。評価点①及び⑦の一次一般膜応力(P_m)は、(10)式で計算する。

$$P_m = \frac{m_{1,7} G_Z}{A_{1,7}} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、

$m_{1,7}$: 評価点①及び⑦に作用する総質量
 $A_{1,7}$: 評価点①及び⑦の総断面積
 G_Z : 加速度

② 一次膜応力＋一次曲げ応力

最大応力が発生する箇所は、転倒防止台座への衝突時の図1-3-4の評価点④である。

評価点④の一次一般膜＋一次曲げ応力(P_m+P_b)は、(11)式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} P_m + P_b &= \frac{M_4}{Z_4} \\ M_4 &= \frac{m_4 G_Z l_4}{24} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、

m_4 : 評価点④に作用する質量
 G_Z : 加速度
 M_4 : 評価点④に生じる曲げモーメント
 Z_4 : 評価点④における枠板の断面係数
 l_4 : 評価点④における等分布荷重が作用する長さ

2) 設計事象Ⅰ 構内輸送時

① 一次＋二次応力

最大応力が発生する箇所は、図1-3-4の評価点①である。

熱荷重は発生しないため、一次＋二次応力(P_m+P_b+Q)は、(12)式で計算する一次一般膜＋一次曲げ応力(P_m+P_b)である。

$$\left. \begin{aligned} P_m &= \frac{m_{1,7} G_Z}{A_{1,7}} \\ P_b &= \frac{1}{n_{\text{span}}} \cdot \frac{m_1 G_X l_{\text{pitch}}}{12 Z_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

ここで,

- $m_{1,7}$: 評価点①及び⑦に作用する総質量
- m_1 : 評価点①に作用する質量
- $A_{1,7}$: 評価点①及び⑦の総断面積
- G_X, G_Z : 加速度
- Z_1 : 評価点①における枠板の断面係数
- n_{span} : 格子支持板によって支持されるスパンの数
- l_{pitch} : 枠板の支持ピッチ

② 平均せん断応力

最大応力が発生する箇所は、図 1-3-4 の評価点④である。

左右方向加速度により発生する平均せん断応力(τ)は、(13)式で計算する。

$$\tau = \frac{m_4 G_Y}{A_4} \dots\dots\dots (13)$$

ここで,

- m_4 : 評価点④に作用する質量
- A_4 : 評価点④の断面積
- G_Y : 加速度

③ 平均支圧応力

最大応力が発生する箇所は図 1-3-4 の評価点①, ③及び⑦である。平均支圧応力(σ_b)は(10)式で計算する。

④ 軸圧縮応力

最大応力が発生する箇所は図 1-3-4 の評価点①及び⑦である。軸圧縮応力(σ_c)は(10)式で計算する。

3) 設計事象Ⅱ 搬送架台への衝突（横姿勢）

① 一次＋二次応力

最大応力が発生する箇所は，図 1-3-4 の評価点①である。

熱荷重は発生しないため，一次＋二次応力 ($P_m + P_b + Q$) は，(14)式で計算する一次一般膜＋一次曲げ応力 ($P_m + P_b$) である。

$$\left. \begin{aligned} P_m &= \frac{m_1 G_X}{A_1} , \quad \frac{m_{1,7} G_Z}{A_{1,7}} \\ P_b &= \frac{1}{n_{\text{span}}} \cdot \frac{m_1 G_X l_{\text{pitch}}}{12 Z_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

ここで，

- $m_{1,7}$: 評価点①及び⑦に作用する総質量
- m_1 : 評価点①に作用する質量
- $A_{1,7}$: 評価点①及び⑦の総断面積
- A_1 : 評価点①の断面積
- G_X, G_Z : 加速度
- Z_1 : 評価点①における柵板の断面係数
- n_{span} : 格子支持板によって支持されるスパンの数
- l_{pitch} : 柵板の支持ピッチ

② 平均せん断応力

最大応力が発生する箇所は，図 1-3-4 の評価点⑦である。

前後方向加速度により発生する平均せん断応力 (τ) は，(15)式で計算する。

$$\tau = \frac{m_7 G_X}{A_7} \dots\dots\dots (15)$$

ここで，

- m_7 : 評価点⑦に作用する質量
- A_7 : 評価点⑦の断面積
- G_X : 加速度

③ 平均支圧応力

最大応力が発生する箇所は図 1-3-4 の評価点①及び④である。平均支圧応力 (σ_b) は (16)式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{m_1 G_X}{A_1} \dots\dots\dots (16)$$

ここで,

- m_1 : 評価点①に作用する質量
- A_1 : 評価点①の断面積
- G_X : 加速度

④ 軸圧縮応力

最大応力が発生する箇所は図 1-3-4 の評価点①である。軸圧縮応力(σ_c)は(10)式で計算する。

4) 設計事象Ⅱ 転倒防止台座への衝突(縦姿勢)

① 一次＋二次応力

最大応力が発生する箇所は、図 1-3-4 の評価点④である。

熱荷重は発生しないため、転倒防止台座への衝突に発生する一次＋二次応力(P_m+P_b+Q)は(11)式で計算する。

② 平均せん断応力

平均せん断応力(τ)は発生しない。

③ 平均支圧応力

最大応力が発生する箇所は図 1-3-4 の評価点①、③及び⑦である。平均支圧応力(σ_b)は(10)式で計算する。

④ 軸圧縮応力

最大応力が発生する箇所は図 1-3-4 の評価点①及び⑦である。軸圧縮応力(σ_c)は(10)式で計算する。

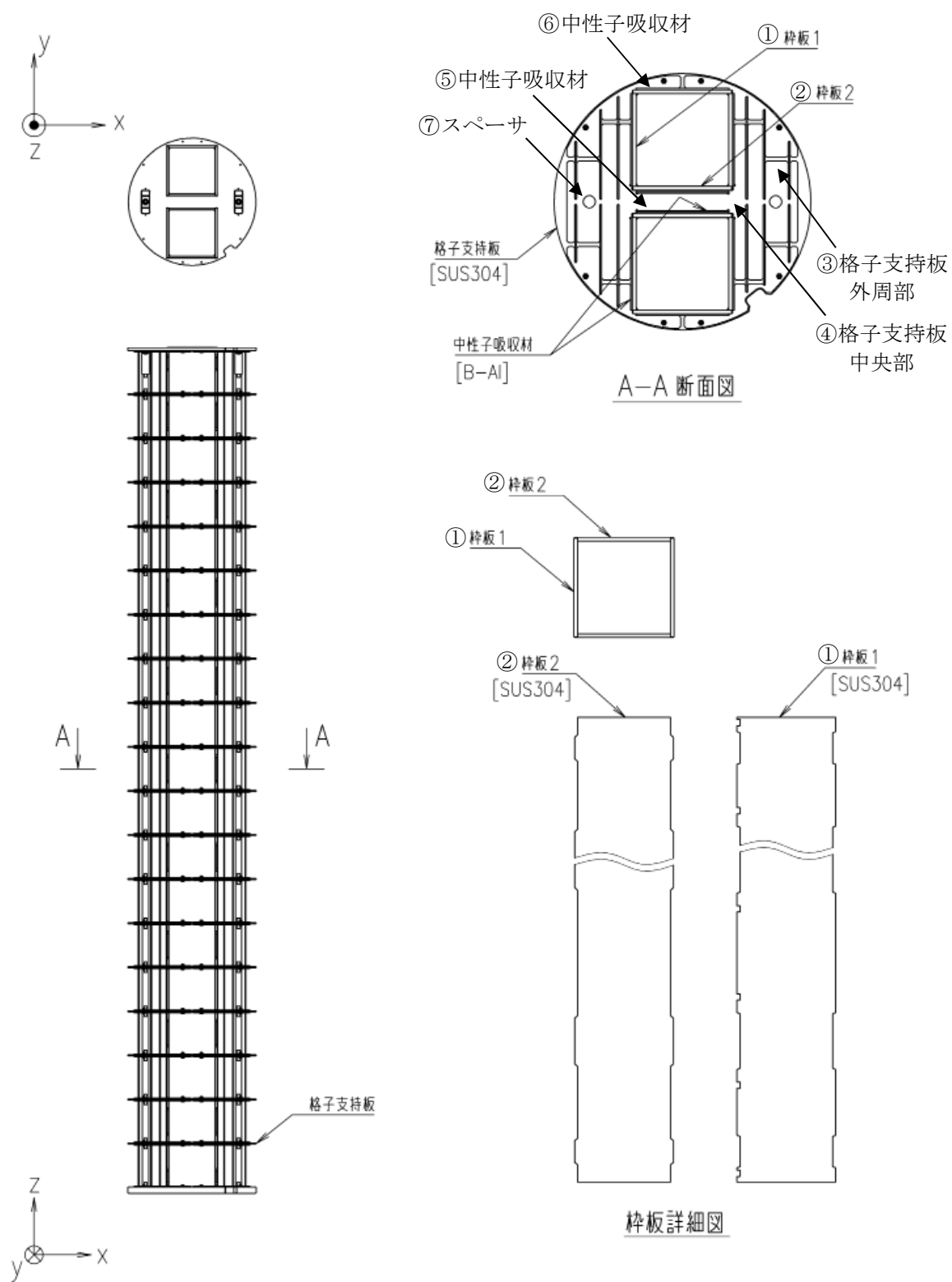


図1-3-4 バスケットの応力評価箇所

1.3.6. 評価結果

評価結果を表1-3-12～表1-3-16に示す。いずれも、許容応力に対して十分に余裕がある。
このため、破損燃料内用輸送容器（2体）の構造健全性は維持される。

表 1-3-12 容器本体及び蓋の評価結果（胴、底板、蓋） 1/2

(単位：MPa)

部位	材料	設計事象	一次一般膜応力 (P _m)		一次局部膜応力 (P _L)		一次膜＋曲げ応力 (P _L ＋P _b)		一次一般膜＋曲げ応力 (P _m ＋P _b)		一次＋二次応力 (P _L ＋P _b ＋Q)	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
胴中央部	ASTM A350M Gr. LF5 Cl. 1	設計条件	8	123	—	—	9	184	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	9	369
		試験状態	7	165			—	—	9	247	—	—
底板中央部		設計条件	5	123	—	—	9	184	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	21	369
		試験状態	3	165	—	—	—	—	6	247	—	—
底板外周部		設計条件	—	—	5	184	10	184	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	10	369
		試験状態	—	—	3	247	—	—	6	247	—	—
胴下端部		設計条件	—	—	12	184	22	184	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	16	369
		試験状態	—	—	5	247	—	—	10	247	—	—
底部中性子遮 へい体外周部		設計条件	—	—	10	184	13	184	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	25	369
		試験状態	—	—	6	247	—	—	10	247	—	—
上部トラニオン 取付け部		設計条件			11	184	22	184	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	20	369
		試験状態	—	—	7	247	—	—	10	247	—	—

表 1-3-12 容器本体及び蓋の評価結果（胴、底板、蓋） 2/2

（単位：MPa）

部位	材料	設計事象	一次一般膜応力 (P _m)		一次局部膜応力 (P _L)		一次膜＋曲げ応力 (P _L ＋P _b)		一次一般膜＋曲げ応力 (P _m ＋P _b)		一次＋二次応力 (P _L ＋P _b ＋Q)	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
下部トラニオン取付け部	ASTM A350M Gr. LF5 Cl. 1	設計条件	－	－	18	184	31	184	－	－	－	－
		I，Ⅱ	－	－	－	－	－	－	－	－	30	369
		試験状態	－	－	7	247	－	－	9	247	－	－
一次蓋 中央部	SUSF304	設計条件	3	137	－	－	8	205	－	－	－	－
		I，Ⅱ	－	－	－	－	－	－	－	－	4	411
		試験状態	3	153	－	－	－	－	10	229	－	－
一次蓋 フランジ部		設計条件	－	－	7	205	8	205	－	－	－	－
		I，Ⅱ	－	－	－	－	－	－	－	－	7	411
		試験状態	－	－	8	229	－	－	8	229	－	－
二次蓋 中央部		設計条件	61	137			102	205	－	－	－	－
		I，Ⅱ	－	－	－	－	－	－	－	－	34	411
		試験状態	92	155	－	－	－	－	154	232	－	－
二次蓋 外周部		設計条件	－	－	36	205	64	205	－	－	－	－
		I，Ⅱ	－	－	－	－	－	－	－	－	25	411
		試験状態	－	－	46	232	－	－	95	232	－	－
二次蓋フランジ部		設計条件			9	205	18	205	－	－	－	－
		I，Ⅱ	－	－	－	－	－	－	－	－	9	411
		試験状態	－	－	13	232	－	－	27	232	－	－

表 1-3-13 容器本体及び蓋の評価結果（ポートカバー）

（単位：MPa）

部位	材質	設計事象	一次一般膜応力 (P_m)		一次膜＋曲げ応力 ($P_L + P_b$)		一次一般膜＋曲げ応力 ($P_m + P_b$)		一次＋二次応力 ($P_L + P_b + Q$)	
			計算値	許容値	計算値	許容値	計算値	許容値	計算値	許容値
ポートカバー	SUS304	設計条件	2	137	17	205	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	17	411
		試験状態	3	143	—	—	26	214		
二次蓋 ポートカバー	SUSF304	設計条件	2	137	7	205	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	7	411
		試験状態	3	155	—	—	11	232	—	—

表 1-3-14 容器本体及び蓋の評価結果（ボルト）

（単位：MPa）

部位	材料	設計事象	平均引張応力(σ_m)		平均引張応力＋曲げ応力 ($\sigma_m + \sigma_b$)	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力
一次蓋 ボルト	SUS630 H1150	設計条件	101	216	－	－
		I , II	316	432	346	648
二次蓋 ボルト		設計条件	125	216	－	－
		I , II	325	432	343	648
ポートカバー ボルト		設計条件	39	216	－	－
		I , II	227	432	229	648
二次蓋ポート カバーボルト		設計条件	21	223	－	－
		I , II	216	446	216	669

表 1-3-15 容器本体及び蓋の評価結果（平均支圧応力及び圧縮応力）

（単位：MPa）

部位	設計事象	平均支圧応力 (σ_b)		圧縮応力 (σ_c)	
		計算値	許容応力	計算値	許容応力
底板	I, II	1	184	—	—
胴	I, II	—	—	7	95

表 1-3-16 バスケットの評価結果

(単位：MPa)

部 位	応力の種類		設計条件		設計事象Ⅰ		設計事象Ⅱ				許容 応力
					構内輸送時		搬送架台への 衝突		転倒防止台座への 衝突		
			計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	
バスケット	一次一般膜応力 (Pm)		13	①, ⑦	—	—	—	—	—	—	133
	一次一般膜＋一次曲げ応力 (Pm+Pb)		31	④	—	—	—	—	—	—	199
	一次＋二次応力 (Pm+Pb+Q)		—	—	13	①	16	①	31	④	399
	平均せん断応力 (τ)		—	—	1	④	1	⑦	0	④, ⑦	79
	平均支圧応力 (σ b)		—	—	3	①, ③, ⑦	2	①, ④	13	①, ③, ⑦	150
	軸圧縮 応力 (σ c)	桹板 長手方向	—	—	3	①	1	①	13	①	96
		桹板 長手方向以外	—	—	2	①	2	①	0	①, ②	88
		格子支持板外周部 0° -180° 方向	—	—	2	③	2	③	0	③	56
		格子支持板外周部 90° -270° 方向	—	—	1	③	0	③	0	③	129
		スペーサ	—	—	3	⑦	1	⑦	13	⑦	129

構造強度計算に用いるコード（ABAQUS）について

（１）概要

ABAQUS コードは米国 Hibbitt, Karlsson&Sorensen, Ins. (HKS 社) で開発された有限要素法に基づく応力・座屈解析等の汎用解析コードであり，輸送容器の応力解析等に広く利用されている。

（２）機能

ABAQUS コードは，応力解析に際して以下の機能を有している。

- ① 定常，非定常の弾性，弾塑性のいずれの解も得ることができる。
- ② 材料特性として時間依存，歪の履歴依存並びに等方性・異方性等を考慮することができる。
- ③ モデルの形状は一次元～三次元，又は連続体についても取り扱うことができる。
- ④ 伝熱解析結果をそのまま境界条件として熱応力解析に用いることが可能である。
- ⑤ 荷重条件として集中荷重，分布荷重，モーメント，加速度力（慣性力），圧力，遠心力及びコリオリ力等が取り扱える。また，これらの条件の時間依存，線形変化に対しても対応可能である。

（３）解析フロー

ABAQUS コードの解析フローを図 1-3-5 に示す。

（４）使用実績

ABAQUS コードは，これまで多くの応力解析に対し使用実績がある。

（５）検証方法

理論値との比較による検証が実施されていることを確認している。

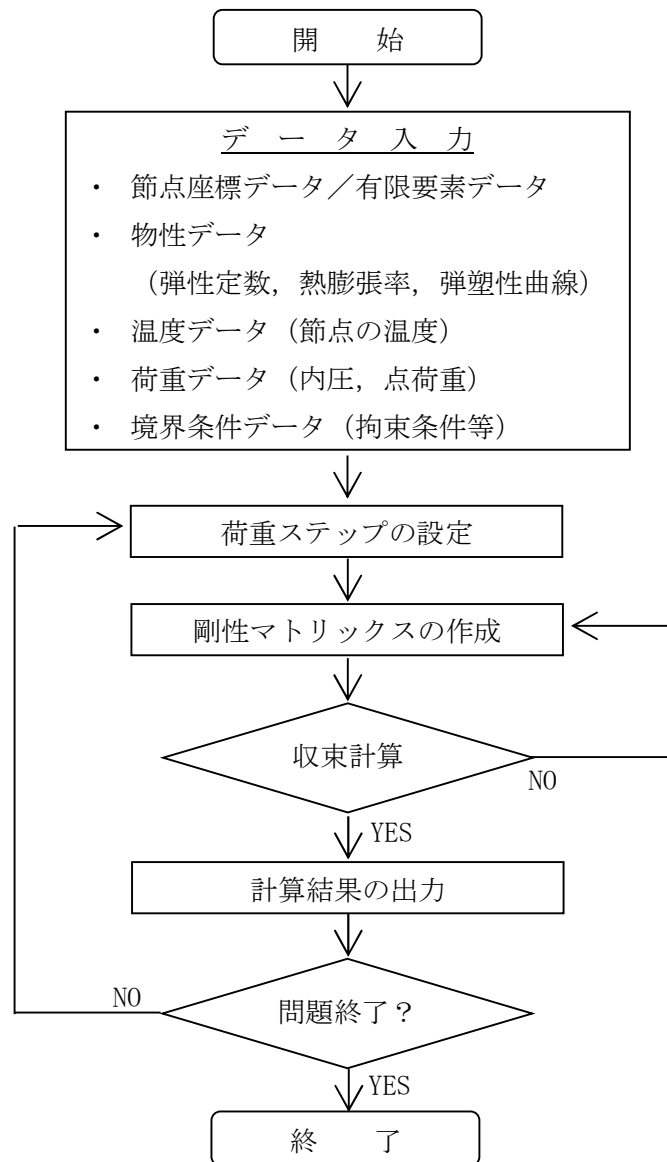


図 1-3-5 ABAQUS コードの応力解析フロー図

容器内水の放射線分解による水素ガス発生について

1. 容器内水の放射線分解による水素ガス発生

本破損燃料用輸送容器のような密閉した槽内での容器内水の放射線分解により発生する水素ガスの水中濃度はある飽和値に達する。ここでは、水素ガス発生評価を以下に示す。

2. 評価方法

「添付資料－2－1－3 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（4号機）」と同じく、類似の環境下における水の放射線分解による水素ガス定常濃度評価^{*1}をベースに、液相定常水素ガス濃度が照射線量率の平方根に比例する^{*2}として、水素ガス濃度の評価を行う。

3. 評価結果

破損燃料用輸送容器（2 体）は 3 号機構内用輸送容器より燃料収納体数が少ないことから、照射線量率は 3 号機構内用輸送容器より小さい。

従って、水素ガスの水中濃度は「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3号機）」の評価に包絡されるため、水素の爆発下限である空気との混合比 4%に対して十分低い値であり問題ない。

*1 Sunaryo, 1993, “A Study on Yields and Chemical Behavior of Radiolysis Products of High Temperature Water”, University of Tokyo.

*2 Y.Fujita, M.Ebihara, “EVALUATION OF HYDROGEN YIELD IN SPENT FUEL TRANSPORT PACKAGE” The 16th International Symposium on the Packaging and Transportation of radioactive Materials (PATRAM 2010), October 3-8 2010, London, UK Poster Session 210 (2010)

1.4. 除熱機能

1.4.1. 基本的な考え方

除熱設計にあたっては、燃料の健全性及び破損燃料用輸送容器（2 体）の安全機能を有する構成部材の健全性が維持できるよう、以下のとおり設計する。

- a. 収納された使用済燃料より発生する崩壊熱は、容器内に充填した水及び空気の自然対流及び熱伝導により胴に伝える。
- b. 胴に伝えられた熱は主として中性子遮へい部のレジン中に設けた伝熱フィンにより外筒に伝える。
- c. 外筒に伝えられた熱は外筒から大気に放散する。

除熱機能の評価においては、収納する使用済燃料の最大崩壊熱量を考慮し、自然冷却により冷却されるものとして、除熱条件が厳しくなる横姿勢（輸送時）の各部の温度を求め、各部材料の制限温度を超えないことを評価する。

ただし、バスケットを除く構成部材は 3 号機構内用輸送容器と同一であり、収納体数は 3 号機構内用輸送容器の 7 体より少なく崩壊熱量は小さい。また、軸方向の評価対象部位である O リング及び蓋については、3 号機構内用輸送容器の評価において最も保守的な条件で評価しているため、「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3 号機） 1.4. 除熱機能」の評価に包絡される。

従って、径方向の評価対象部位である燃料、バスケット、胴、中性子遮へい体の各部の温度を評価する。

1.4.2. 設計基準

設計基準を表 1-4-1 に示す。

表 1-4-1 設計基準

対象部位		材質	設計基準	設計基準 温度 (°C)	備考
破損燃料 用輸送容 器 (2 体)	中性子遮へ い材	レジン	使用可能温度	149	
	胴	低合金鋼	構造強度が確保される 制限温度	350	
	バスケット	ステンレス鋼	構造強度が確保される 制限温度	425	
燃料被覆管		ジルカロイ-2	照射硬化回復現象により燃料被覆管の機械的 特性が著しく低下しない 温度及び水素化物の 再配向による被覆管の 機械的特性の低下が生 じない温度以下となる 温度 ^{*1, *2}	200	8×8 燃料
				300	新型 8×8 ジルコニウム ライ付燃料, 高燃焼度 8×8 燃 料, 9×9 燃料

*1 平成 18 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料長期健全性等確認試験に関する試験最終報告書)(06 基炉
報-0006, 独立行政法人原子力安全基盤機構)

*2 平成 19 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料健全性等調査に関する試験成果報告書)(07 基炉報-0004,
独立行政法人原子力安全基盤機構)

1.4.3. 燃料仕様および崩壊熱量

表 1-1-2 に示す 3 号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料を包絡する条件で崩壊熱量を ORIGEN2 コードにより評価する。燃料条件及び崩壊熱量を表 1-4-2 に示す。

表 1-4-2 燃料条件及び崩壊熱量

燃料タイプ	9 × 9 燃料
燃焼度 (MWd/t)	52, 000
冷却期間 (日)	3, 207
収納体数 (体)	2
崩壊熱量 (kW)	1. 18

1.4.4. 評価条件

破損燃料用輸送容器（2 体）の除熱評価は輪切り断面モデルを用いて行う。輪切り断面モデル形状図を図 1-4-1 に示す。

また、評価条件を表 1-4-3 に示す。

表 1-4-3 評価条件

項目		横姿勢 (輸送時)
収納体数	(体)	2
崩壊熱量	(kW)	1. 18
周囲温度	(°C)	38
太陽熱放射 (W/m ²) *1	水平に輸送される表面 (曲面)	400

*1：太陽熱放射は 1 日につき 1 2 時間ごと，7 日間受ける

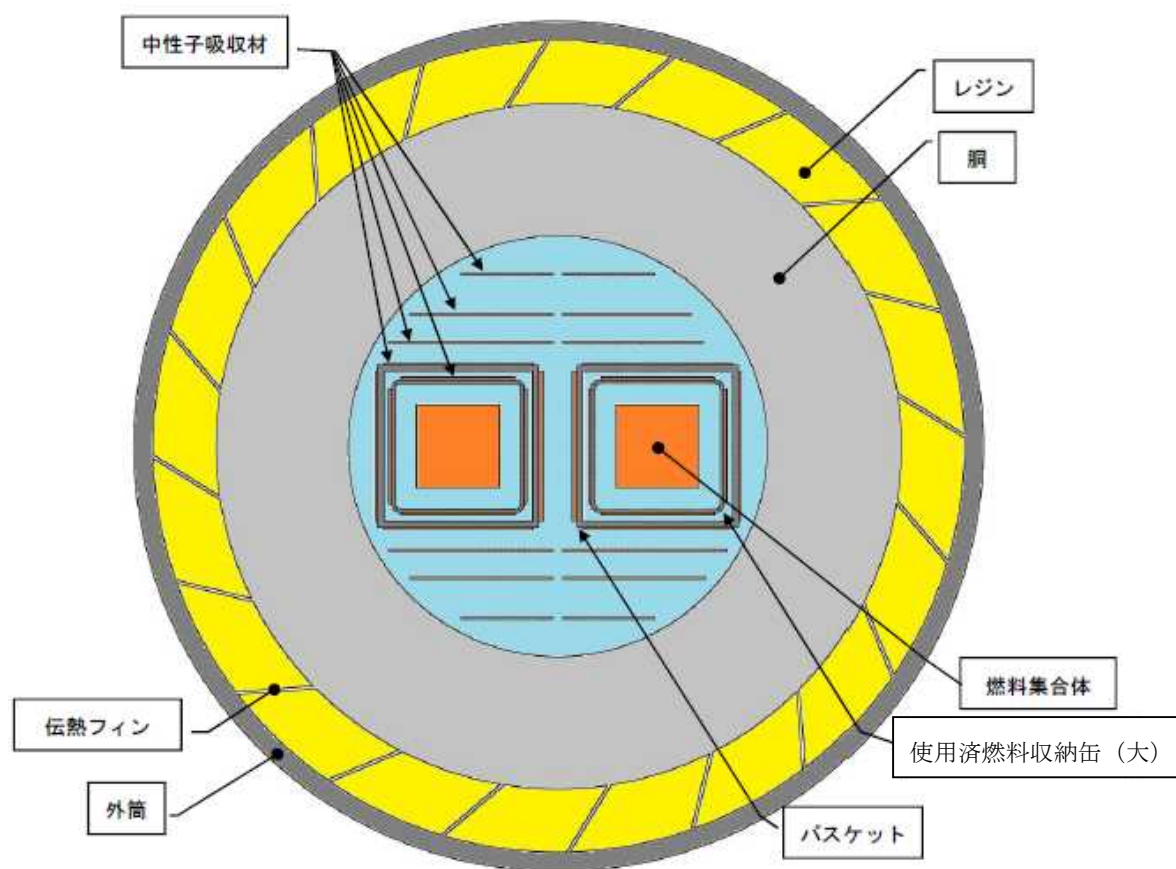


図 1-4-1 輪切り断面モデル形状図

1.4.5. 評価方法

輪切り断面モデルで容器中央部断面の燃料，バスケット，胴，中性子遮へい体の温度を評価する。解析には ABAQUS コードを用いる。

1.4.6. 評価結果

評価結果を表 1-4-4 に示す。表 1-4-4 に示すとおり，破損燃料用輸送容器（2 体）を構成する部材はいずれも設計基準温度を下回っており，熱的健全性は維持される。

また，燃料被覆管の温度は 110℃であり，水素化物の再配向による機械特性の低下が生じる温度を大きく下回っており，燃料の健全性は維持される。

表 1-4-4 評価結果（各部温度）

対象部位		材質	評価結果 (℃)	設計基準 温度 (℃)	備考
破損燃料 用輸送容 器（2 体）	中性子遮へ い材	レジン	72	149	
	胴	低合金鋼	71	350	
	バスケット	ステンレス鋼	89	425	
燃料被覆管		ジルカロイ－ 2	110	200	8×8 燃料
				300	新型 8×8 ジルコニウムライ 燃料 高燃焼度 8×8 燃料， 9×9 燃料

除熱解析に用いるコード (ABAQUS) について

(1) 概要

ABAQUS コードは、米国 Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. (HKS 社) で開発された有限要素法に基づく伝熱解析等の汎用解析コードであり、輸送容器の伝熱解析などに広く利用されている。

(2) 機能

ABAQUS コードは、伝熱解析に際して以下の機能を有している。

- ① 定常、非定常のいずれの解も得ることができる。
- ② 一次元～三次元の任意形状の構造に対して解くことが可能である。
- ③ 初期条件（温度）は要素ごとに変化させることができ、計算ステップの自動決定も可能である。
- ④ 境界条件として、時間に依存する熱流束、温度、伝導、対流及び放射が考慮できる。
- ⑤ 構成物質の相変態が考慮できる。

(3) 解析フロー

ABAQUS コードの解析フローを図 1-4-2 に示す。

(4) 使用実績

ABAQUS コードは、多くの伝熱解析に使用された実績がある。

(5) 検証方法

貯蔵容器の定常伝熱試験に対して ABAQUS コードによる解析結果と試験結果を比較・検討し、本コードの妥当性が検証されている^{*1}。

^{*1} 山川秀次，五味義雄，尾崎幸男，尾崎明朗「使用済燃料キャスク貯蔵技術の確立—キャスクの伝熱特性評価—」，電中研報告書，U92038，(1993)

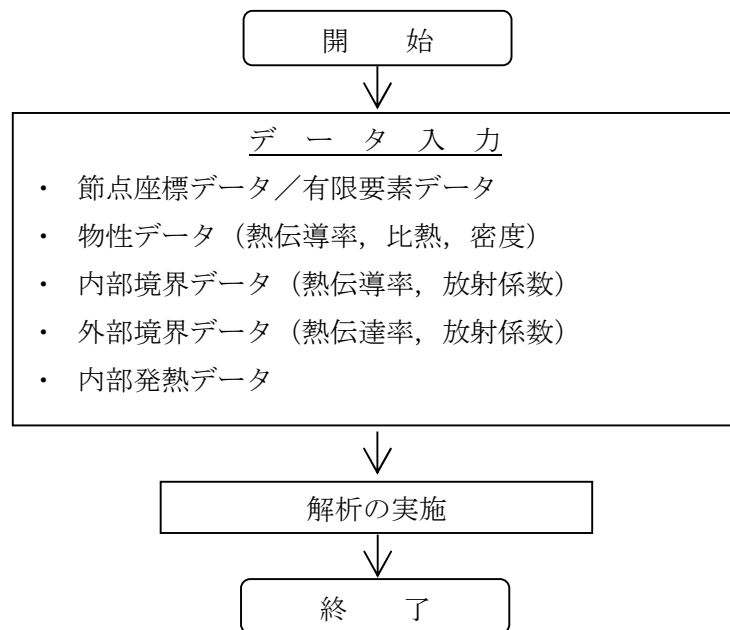


図 1-4-2 ABAQUS コードの伝熱解析フロー図

除熱解析に用いるコード（ORIGEN2）について

（１） 概要

ORIGEN2 コードは、米国オークリッジ国立研究所（ORNL）で開発された炉内中性子束の 1 点近似による燃焼計算コードである。ORIGEN2 コードは汎用解析コードであり、輸送容器の崩壊熱計算等に広く利用されている。

（２） 機能

ORIGEN2 コードは、燃焼解析に際して以下の機能を有している。

- ① 燃料の炉内での燃焼計算，炉取出し後の減衰計算により，冷却期間に対応した崩壊熱，放射線の強度，各核種の放射エネルギー等が求められる。
- ② 原子炉の炉型と燃料の組合せに対し，中性子エネルギースペクトルの違いにより重みをつけた断面積ライブラリが内蔵されており，任意に選択できる。
- ③ 計算結果は，放射化生成物，アクチニド，核分裂生成物に分類して出力される。
- ④ 燃焼計算に必要な放射性核種データ（崩壊熱，ガンマ線のエネルギー分布，自発核分裂と（ α ， n ）反応により発生する中性子線源強度等）に関しては，ORIGEN2 コード専用のライブラリがあり，これを用いる。

（３） 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを図 1-4-3 に示す。

（４） 使用実績

ORIGEN2 コードは，輸送容器，核燃料施設の崩壊熱計算に広く使用されている*1。

（５） 検証方法

汎用コードの導入評価*1 が実施されていることが確認されている。

大型実験/ベンチマーク試験による検証*2 が実施されていることが確認されている。

*1 ORNL, “ORIGEN2 Isotope Generation and Depletion Code MATRIX EXPONENTIAL METHOD”, CCC-371

*2 (社)日本原子力学会 “原子炉崩壊熱とその推奨値”，1989 年 8 月

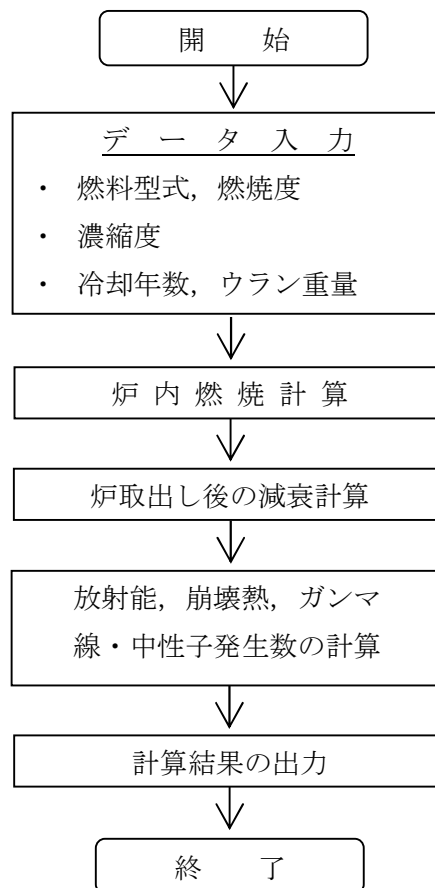


図 1-4-3 ORIGEN2 コードの計算フロー図

1.5. 密封機能

1.5.1. 基本的な考え方

破損燃料用輸送容器（2 体）の密封は容器本体及び一次蓋より構成される密封容器とこれに付属するポート部のカバーから構成される。容器本体と一次蓋、各ポートカバーのガスケットにはゴム製Ｏリングが使用されている。一次蓋で構成される破損燃料用輸送容器（2 体）の密封境界を図 1-5-1 に示す。

また、一次蓋を覆う形で二次蓋を容器本体に取付ける構造となっており、容器本体と二次蓋のガスケットはゴム製Ｏリングが使用され、一次蓋に漏えいが発生しても二次蓋で密封を確保できる構造となっている。二次蓋で構成される破損燃料用輸送容器（2 体）の密封境界を図 1-5-2 に示す。

密封機能の評価にあたっては、構造強度評価結果、除熱機能評価結果、容器構造から、破損燃料用輸送容器（2 体）の密封機能が維持されることを確認する。

1.5.2. 評価結果

(1) 構造強度評価結果

1.3 項に示したとおり、構造強度評価から破損燃料用輸送容器（2 体）の密封境界を構成する胴、底板、一次蓋、一次蓋ボルト、二次蓋、二次蓋ボルト、ポートカバー及びポートカバーボルトは想定される荷重条件に対して十分な強度を有しており、密封境界の構造健全性に問題がないことが確認されている。

(2) 除熱評価結果

1.4 項に示したとおり、除熱機能評価からＯリングの最高温度は 82℃以下で、設計基準温度である 300℃を大きく下回ることから、密封境界の熱的健全性に問題ないことが確認されている。

(3) 容器構造

破損燃料用輸送容器（2 体）の密封境界を構成する一次蓋及び各ポートカバーは、ガスケットにゴム製のＯリングを使用し、複数のボルトで容器本体に締付ける構造であり、締付けトルクの管理により密封機能を担保する。

各ポートカバーは 3 号機に空の容器を移動する前に、共用プールで締付けトルクを管理し、密封機能を担保する。

一次蓋は 3 号機で燃料装填後に容器本体に締付ける際に、締付けトルクを管理し、密封機能を担保する。

二次蓋も一次蓋と同様にガスケットにゴム製のＯリングを使用し、複数のボルトで容器本体に締付けトルクを管理して締付ける構造であり、万が一、一次蓋の密封機能が喪失した場合でも、二次蓋で密封機能を担保する。

(4)まとめ

以上から，破損燃料用輸送容器（2 体）の密封性能は維持される。

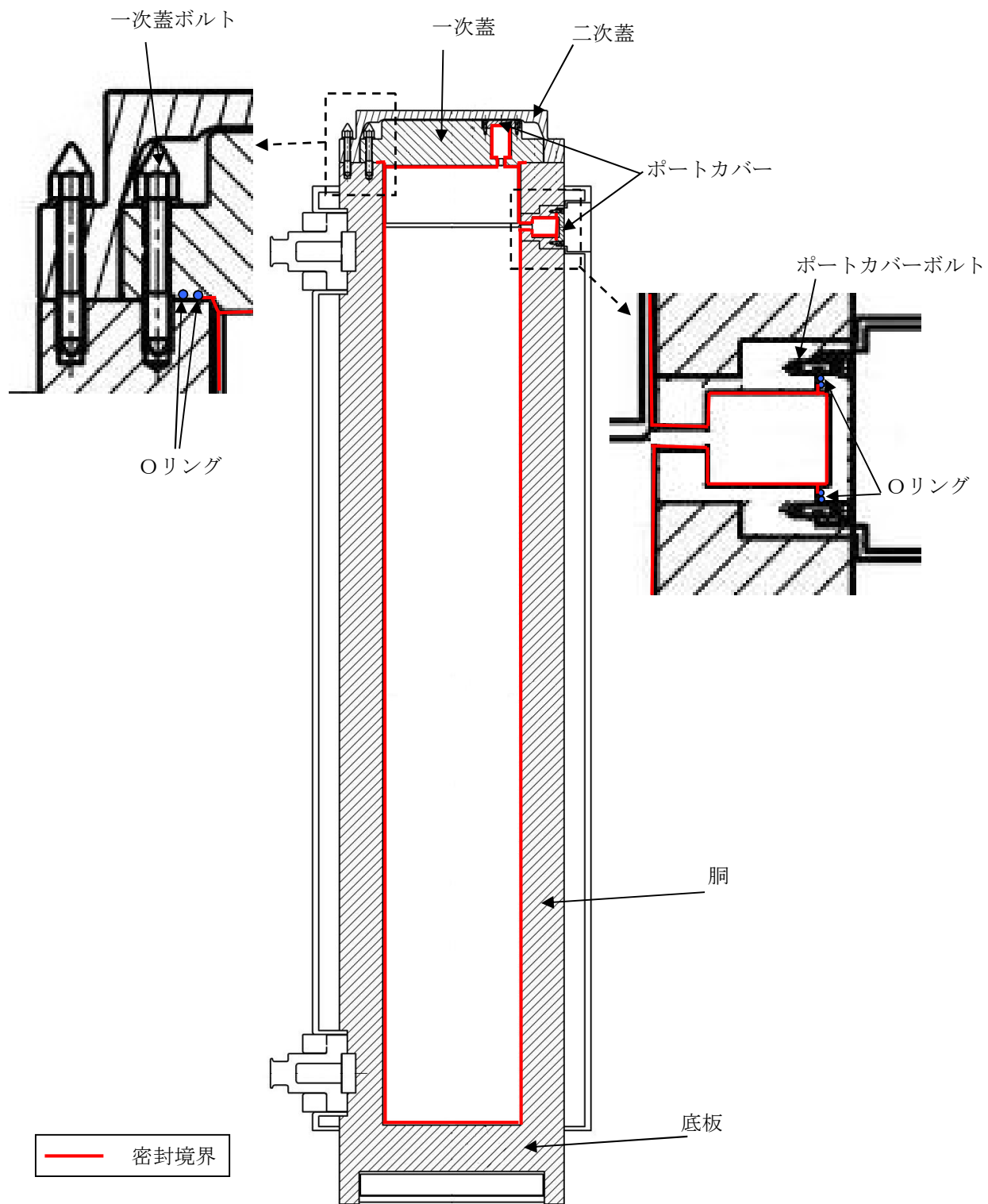
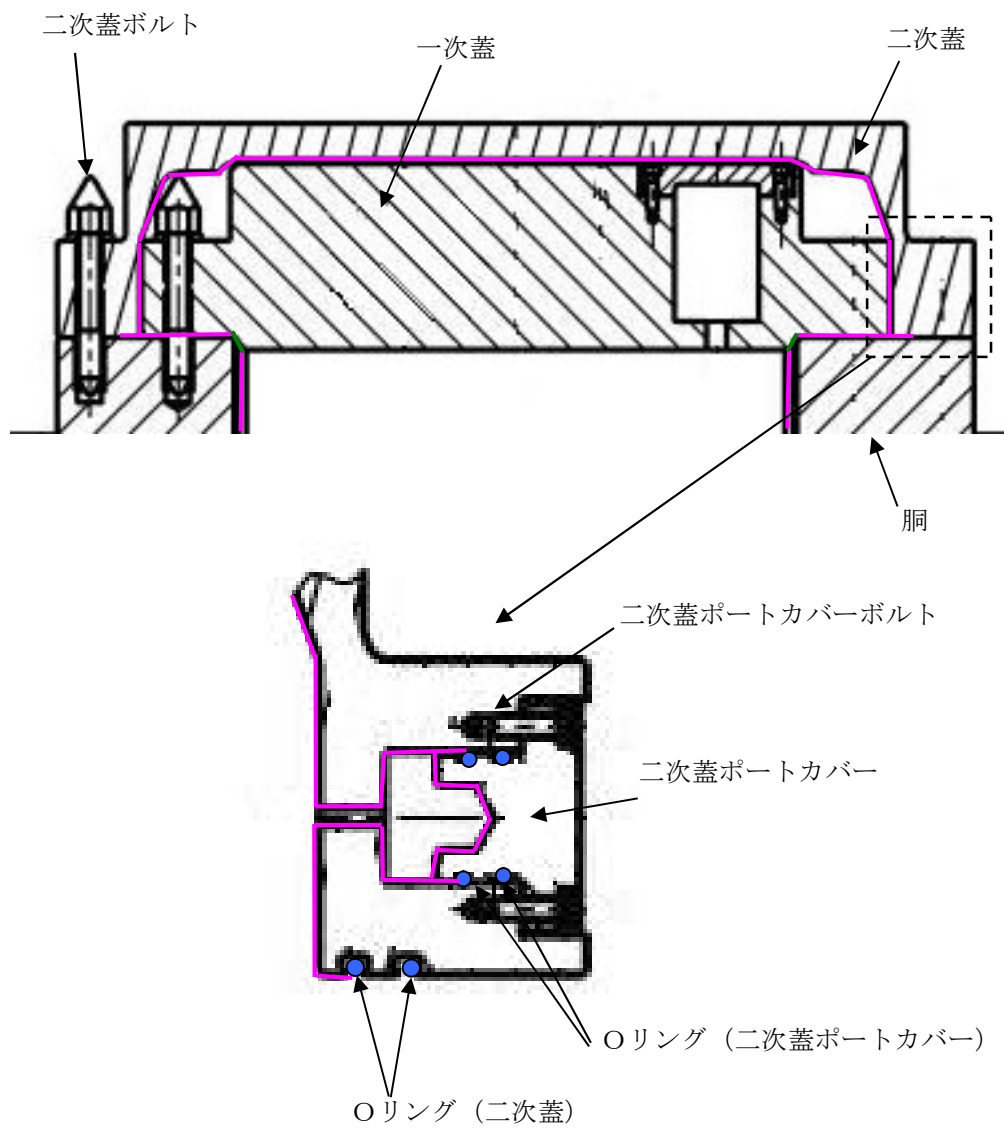


図 1-5-1 一次蓋で構成する容器密封境界



— 二次蓋で構成する密封境界

図 1-5-2 二次蓋で構成する密封境界

1.6. 遮へい機能

1.6.1. 基本的な考え方

収納した使用済燃料から発生する放射線を遮へいするための破損燃料用輸送容器(2体)の遮へい設計の基本的な考え方は以下のとおりである。

- 使用済燃料から発生するガンマ線及び中性子を遮へいするために、破損燃料用輸送容器(2体)はガンマ線遮へいと中性子遮へいの機能を有するものとする
- 主要なガンマ線遮へい材は、胴及び底板の低合金鋼、外筒の炭素鋼、蓋のステンレス鋼とする
- 主要な中性子遮へい材は、内水及び胴と外筒間、底板底部のレジンとする

遮へい機能の評価においては、収納する使用済燃料の線源強度を考慮し、破損燃料用輸送容器(2体)表面及び表面から1mにおける線量当量率を評価する。

ただし、破損燃料用輸送容器(2体)の構成部材はバスケットを除いて3号機構内用輸送容器と同一である。また、線源条件について、冷却期間は3号機構内用輸送容器の条件よりも長く、収納体数は3号機構内用輸送容器の7体より少ないため、「添付資料-2-1-2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書(3号機) 1.6. 遮へい機能」の評価に包絡されることを確認する。

収納燃料は3号機構内用輸送容器と同一であるため、軸方向の燃焼度分布も同一である。

従って、軸方向の燃焼度分布が最大となる高さにおける水平断面の径方向の線量分布が3号機構内用輸送容器に包絡されていれば、いずれの高さ方向における評価点位置についても包絡されていることがわかる。以上から、径方向の線量評価を行う。

1.6.2. 評価条件

1) 遮へい厚さ

破損燃料用輸送容器(2体)の遮へい厚さを表1-6-1に示す。

表 1-6-1 遮へい厚さ (単位: cm)

	低合金鋼・炭素鋼	ステンレス鋼	レジン
側面方向	約 25	—	約 10
上部方向	—	約 23	—
下部方向	約 28	—	約 10

2) 線源条件

遮へい評価の線源条件は表1-1-2に示す3号機使用済燃料プールに保管されている燃料の条件を包絡する条件とする。線源条件を表1-6-2に示す。

表 1-6-2 線源条件

項目	線源条件
燃料タイプ	9×9 燃料
平均燃焼度 (MWd/t)	52, 000
冷却期間 (日)	3, 207
収納体数 (体)	2

3) 線源強度及びエネルギー

① ガンマ線源強度

燃料有効部のガンマ線源強度の計算は ORIGEN2 コードにより行う。得られたガンマ線源強度を表 1-6-3 に示す。また、構造材の放射化によるガンマ線源強度は次式で計算する。破損燃料用輸送容器 (2 体) では、冷却期間及び収納体数が 3 号機構内用輸送容器よりも小さいため、構造材の放射化によるガンマ線源強度は包絡される。

$$A = N_0 \cdot \sigma \cdot \phi \cdot \{1 - \exp(-\lambda \cdot T_1)\} \cdot \exp(-\lambda \cdot T_2)$$

ここで、A : 放射化核種 (^{60}Co) の放射能 (Bq)

N_0 : ターゲット核種 (^{59}Co) の個数 (atoms)

σ : 2200m/s の中性子による (^{59}Co) の (n, γ) 反応断面積 (cm^2)

ϕ : 炉内照射熱中性子束 ($\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$)

λ : ^{60}Co の崩壊定数 (/日)

T_1 : 照射期間 (日)

T_2 : 冷却期間 (日)

表1-6-3 ガンマ線源強度

(容器1基あたり)

光子エネルギー群		集合体2体あたり (ph/s/2体)
群	代表エネルギー(MeV)	
1	1.00E-02	1.3E+15
2	2.50E-02	2.6E+14
3	3.75E-02	3.6E+14
4	5.75E-02	2.4E+14
5	8.50E-02	1.5E+14
6	1.25E-01	1.7E+14
7	2.25E-01	1.2E+14
8	3.75E-01	5.8E+13
9	5.75E-01	2.6E+15
10	8.50E-01	3.6E+14
11	1.25E+00	1.1E+14
12	1.75E+00	3.0E+12
13	2.25E+00	8.6E+10
14	2.75E+00	6.8E+09
15	3.50E+00	9.6E+08
16	5.00E+00	5.6E+07
17	7.00E+00	6.4E+06
18	9.50E+00	7.4E+05

② 中性子線源強度

中性子線源強度の計算は ORIGEN2 コードにより行う。得られた中性子線源強度を表 1-6-4 に示す。また、評価に用いる中性子エネルギースペクトルは Pu-239 の核分裂スペクトルとし、表 1-6-5 に示す。

表 1-6-4 中性子線源強度

(容器 1 基あたり)

		中性子線源強度 (n/s)
1 次中性子源	自発核分裂によるもの	1.3×10^9
	(α , n) 反応によるもの	1.5×10^7
実効増倍率		0.95
実効増倍効果を考慮した全中性子線源強度		2.6×10^{10}

表1-6-5 中性子線源スペクトル

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル
1	1.492×10^7	5.72×10^{-4}
2	1.220×10^7	2.02×10^{-3}
3	1.000×10^7	6.07×10^{-3}
4	8.180×10^6	2.00×10^{-2}
5	6.360×10^6	4.12×10^{-2}
6	4.960×10^6	5.27×10^{-2}
7	4.060×10^6	1.10×10^{-1}
8	3.010×10^6	8.74×10^{-2}
9	2.460×10^6	2.28×10^{-2}
10	2.350×10^6	1.15×10^{-1}
11	1.830×10^6	2.07×10^{-1}
12	1.110×10^6	1.89×10^{-1}
13	5.500×10^5	1.31×10^{-1}
14	1.110×10^5	1.59×10^{-2}
15	3.350×10^3	8.12×10^{-5}
16	5.830×10^2	5.89×10^{-6}
17	1.010×10^2	3.89×10^{-7}
18	2.900×10^1	5.53×10^{-8}
19	1.070×10^1	1.33×10^{-8}
20	3.060×10^0	1.88×10^{-9}
21	1.120×10^0	4.19×10^{-10}
22	4.140×10^{-1}	1.20×10^{-10}

1.6.3. 評価モデル

破損燃料用輸送容器（2 体）の実形状を模擬して 2 次元 $R - \theta$ 体系で評価する。

評価モデルは以下の条件を考慮する。

- ・ 主要な遮へい体の厚さは製造公差を考慮した寸法とし、遮へい体の密度はノミナル値とする。

1.6.4. 評価方法

遮へい計算は、ガンマ線、中性子共に DOT3.5 コードを用いて計算し、破損燃料用輸送容器（2 体）表面及び表面から 1 m の線量当量率を求める。

ライブラリとしては、DLC-23/CASK データを用い、線量当量率への変換は ICRP Publ. 74 に基づく 1cm 線量当量率への換算係数を用いる。

1.6.5. 評価結果

破損燃料用輸送容器（2 体）の容器側面における評価結果を表 1-6-6 に示す。評価結果から，3 号機構内用輸送容器に包絡されることを確認できる。

また，容器側面以外の評価点（容器上部，上部中性子遮へい体欠損部，下部中性子遮へい体欠損部，容器下部，上部トラニオン，下部トラニオン）についても，破損燃料用輸送容器（2 体）の構成部材はバスケットを除いて 3 号機構内用輸送容器と同一であり，遮へい効果も同じとなるため線量の大小関係は変わらず，容器側面と同様に包絡される。

3 号機構内用輸送容器と同様に，容器取扱時には追加遮へい体設置等の放射線業務従事者の被ばく低減対策を講じる計画としている。

表 1-6-6 最大線量当量率の評価結果

（単位：mSv/h）

		容器側面
表面	7体収納	1.5
	2体収納	8.5E-1
表面から 1 m	7体収納	3.4E-1
	2体収納	1.6E-1

遮へい解析に用いるコード (ORIGEN2) について

(1) 概要

ORIGEN2 コードは、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された炉内中性子束の 1 点近似による燃焼計算コードである。ORIGEN2 コードは汎用解析コードであり、輸送容器の放射線源強度計算等に広く利用されている。

(2) 機能

ORIGEN2 コードは、燃焼解析に際して以下の機能を有している。

- ① 燃料の炉内での燃焼計算、炉取出し後の減衰計算により、冷却期間に対応した崩壊熱、放射線の強度、各核種の放射能量等が求められる。
- ② 原子炉の炉型と燃料の組合せに対し、中性子エネルギースペクトルの違いにより重みをつけた断面積ライブラリが内蔵されており、任意に選択できる。
- ③ 計算結果は、放射化生成物、アクチニド、核分裂生成物に分類して出力される。
- ④ 燃焼計算に必要な放射性核種データ（崩壊熱、ガンマ線のエネルギー分布、自発核分裂と (α , n) 反応により発生する中性子線源強度等) に関しては、ORIGEN2 コード専用のライブラリがあり、これを用いる。

(3) 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを図 1-6-1 に示す。

(4) 使用実績

ORIGEN2 コードは、輸送容器、核燃料施設の放射線源強度計算に広く使用されている*1。

(5) 検証方法

汎用コードの導入評価*1 が実施されていることが確認されている。

大型実験/ベンチマーク試験による検証*2 が実施されていることが確認されている。

*1 ORNL, “ORIGEN2 Isotope Generation and Depletion Code MATRIX EXPONENTIAL METHOD”, CCC-371

*2 (社)日本原子力学会 “原子炉崩壊熱とその推奨値”, 1989 年 8 月

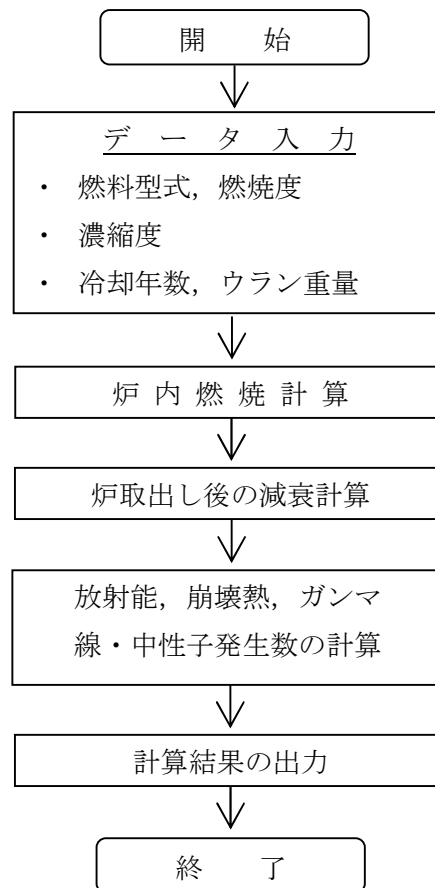


図 1-6-1 ORIGEN2 コードの計算フロー図

遮へい解析に用いるコード（DOT3.5 コード）について

（１）概要

DOT3.5 コード（以下「DOT コード」という。）は二次元輸送コードであり，米国オークリッジ国立研究所（ORNL）で開発された汎用解析コードである。

（２）機能

DOT コードは，遮へい解析に際して以下の機能を有する。

- ① ガンマ線や中性子に対するボルツマン輸送方程式を解くことによる数値解析法であり，放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性が表現できる。
- ② DOT コードは，二次元の体系を扱うことができる。

（３）解析フロー

DOT コードの解析フローを図 1-6-2 に示す。

（４）使用実績

DOT コードは，原子力施設の遮へい計算に広く用いられており，輸送容器の遮へい解析に豊富な実績がある。

（５）検証

汎用コードの導入評価*1 が実施されていることが確認されている。

大型実験/ベンチマーク試験による検証*2 が実施されていることが確認されている。

*1 W. A. Rhoades, “DOT3.5 TWO DIMENSIONAL DISCRETE ORDINATES RADIATION TRANSPORT CODE”,
CCC-276, 1978 年 10 月

*2 (社)日本原子力学会 “中性子遮蔽設計ハンドブック”，1993 年 4 月

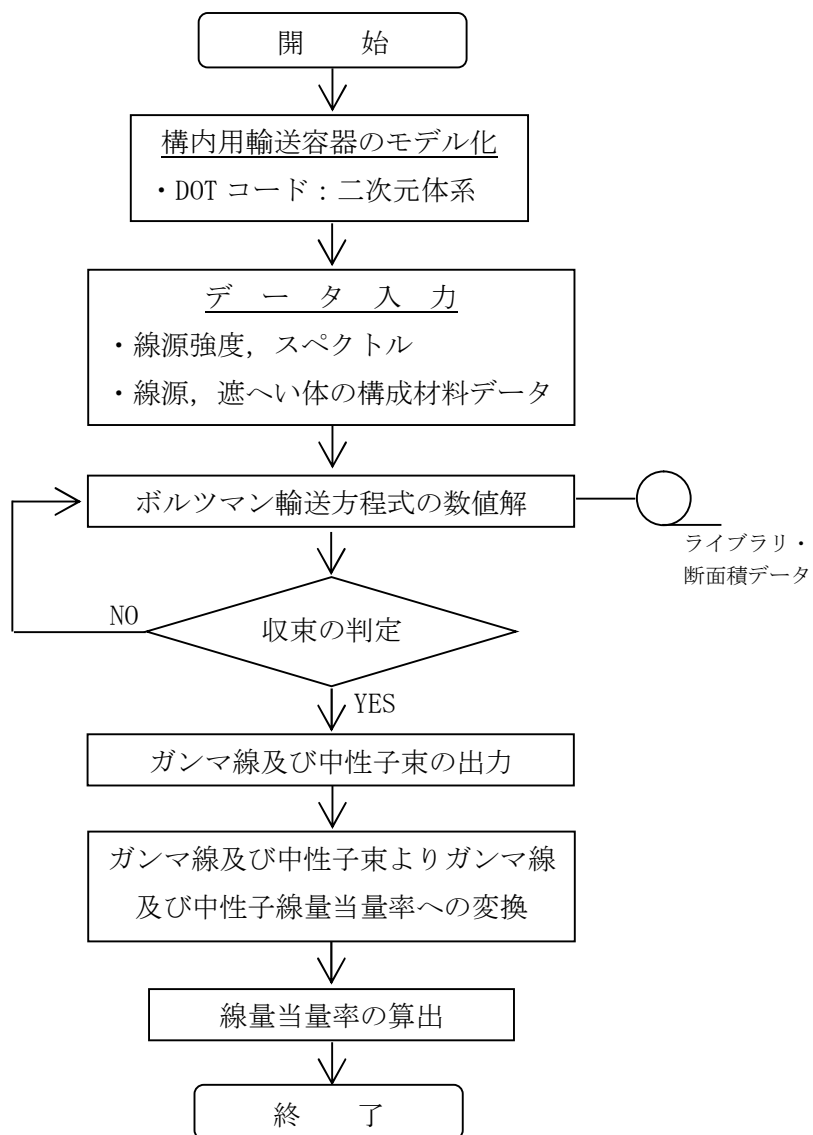


図 1-6-2 DOT コードの解析フロー図

1. 7. 臨界防止機能

1. 7. 1. 基本的な考え方

臨界防止にあたっては、想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止するため以下のとおり設計する。

- 燃料を収納するバスケットは格子構造として、燃料を所定の幾何学的配置に維持する設計とする。
- バスケット外周部及び使用済燃料収納缶（大）側面には、中性子を吸収するボロン添加アルミニウム合金板を配置する。

1. 7. 2. 設計基準

想定されるいかなる場合も実効増倍率が 0.95 以下であること。

1. 7. 3. 評価条件

1) 燃料条件，評価モデル

以下の保守的な燃料条件で評価を行うものとする。

- ・燃料棒の形状が維持されていないと仮定し、以下の条件を設定する。
 - ・燃料被覆管が破損しペレットが使用済燃料収納缶（大）内に放出され、さらに使用済燃料収納缶（大）外にペレットが漏えいすることを仮定し、容器内にペレットと水が非均質に混ざった状態とする。
 - ・水／ウラン比，ペレット粒径が最適な状態とする。
 - ・U-235 の濃縮度は未照射のまま減損しない値とし，9 × 9 燃料のペレット最高濃縮度 4.9wt%とする。また，中性子吸収断面積の大きい Gd は無視する。
- ・バスケット内の使用済燃料収納缶（大）配置は，格子間の範囲で偏心配置（バスケット内側の格子隅角部寄り）を考慮する。
- ・バスケット外周部及び使用済燃料収納缶（大）側面に配置したボロン添加アルミニウム合金の ^{10}B 含有量は，製造下限値とする。
- ・評価に使用する各部の寸法は製造公差を考慮した寸法とする。
- ・チャンネルボックス及びウォーターロードは水に置換える。
- ・中性子遮へい体部（レジン）は真空とする。
- ・破損燃料用輸送容器（2 体）外部の雰囲気は安全側に真空，完全反射とする。
- ・評価モデルは 3 次元体系とする。

1.7.4. 評価方法

破損燃料用輸送容器（2 体）の実形状をモデル化し，臨界解析コード KENO-V.a を使用して求める。

1.7.5. 評価結果

評価結果を表 1-7-1 に示す。表 1-7-1 に示すとおり，破損燃料用輸送容器（2 体）の実効増倍率は設計基準を満足している。

表 1-7-1 評価結果

実効増倍率*1	設計基準
0.93	0.95

*1 モンテカルロ計算の統計誤差（ 3σ ）を考慮した値

臨界解析に用いるコード (KENO-V.a) について

(1) 概要

KENO-V.a コードは、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発されたモンテカルロ法に基づく公開の臨界解析コードであり、輸送容器の臨界解析などに利用されている。

(2) 機能

KENO-V.a コードは、臨界解析に際して以下の機能を有している。

- ① 実際に中性子が出会う物理現象を確率理論を用いて模擬するため、どのような物理的問題にも適用できる。なお、統計的な手法を用いるため、計算結果には統計誤差が付随する。
- ② 一次元～三次元の任意形状の体系を扱うことができる。

(3) 解析フロー

KENO-V.a コードの解析フローを図 1-7-1 に示す。

(4) 使用実績

KENO-V.a コードは、国内外で輸送容器の臨界解析をはじめ、核燃料施設の臨界解析に使用されている。

(5) 検証

米国のバットル研究所 (パシフィック ノースウエスト研究所, PNL) で行われた臨界実験^{*1}の中から 16 種類の臨界体系をベンチマーク試験^{*2}として選び、検証を行った。

*1 S. R. Bierman and E. D. Clayton, “Criticality Experiments with Subcritical Clusters of 2.35 Wt% and 4.31 Wt% ²³⁵U Enriched UO₂ Rods in Water with Steel Reflecting Walls”, NUREG/CR-1784(PNL-3602), U.S. Nuclear Regulatory Commission, April 1981.

*2 “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments”, LEU-COMP-THERM-010, LEU-COMP-THERM-013, LEU-COMP-THERM-017, LEU-COMP-THERM-042, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2009.

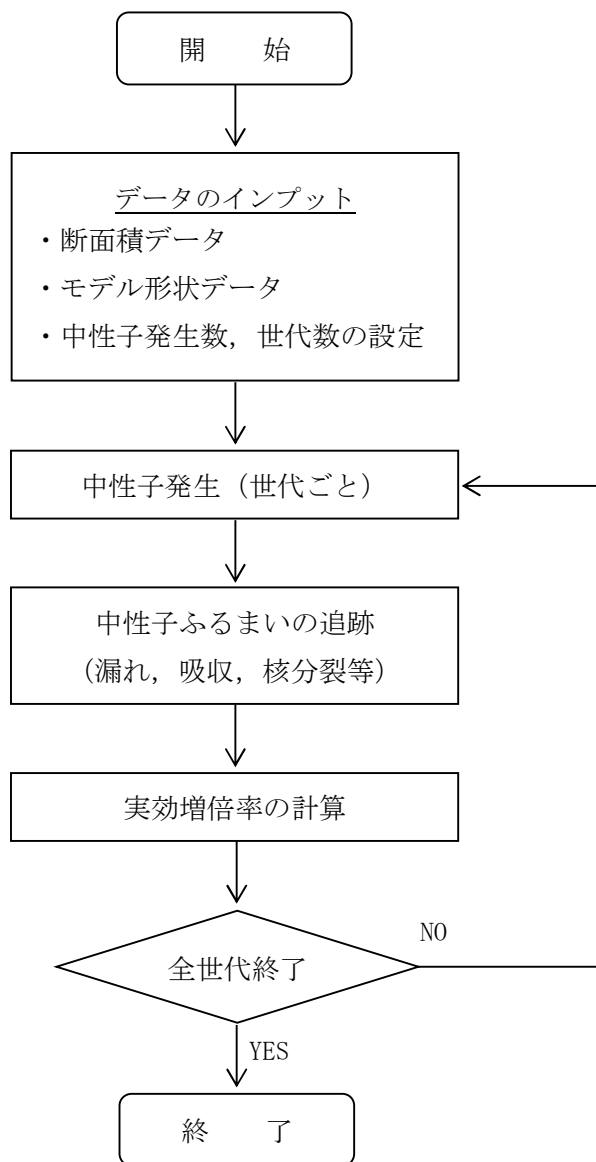


図 1-7-1 KENO-V.a コードの解析フロー図

1.8. 破損燃料用輸送容器（2 体）の落下

1.8.1. 原因

破損燃料用輸送容器（2 体）の取扱い中に、何らかの原因で破損燃料用輸送容器（2 体）が落下して密封境界が破損し、放射性物質が環境に放出される。

1.8.2. 発生防止対策

破損燃料用輸送容器（2 体）の落下を防止するために、次のような設計及び手順の対策を講じる。

- （1）クレーン主巻フックは二重のワイヤーロープで保持する構造とする。
- （2）クレーン巻上装置は電源断時に電動油圧押上機ブレーキで保持する構造とする。
- （3）クレーン主巻フックと吊具、吊具と破損燃料用輸送容器（2 体）の取付けを二重化する。
- （4）取付け作業後の取付け状態を ITV にて確認し、外れ止めを取り付ける。
- （5）作業開始前にクレーン及び吊具の事前点検を実施する。
- （6）作業手順書を整備し、作業員への教育訓練を行う。

1.8.3. 核分裂生成物の放出量及び線量の評価

本破損燃料用輸送容器は、最大 2 体の燃料を輸送することが可能な容器である。これは既に構内輸送に用いている 3 号機構内用輸送容器の燃料収納体数 7 体より少ない。

従って、核分裂生成物の放出量及び線量の評価は「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3 号機） 1.8. 構内用輸送容器の落下」の評価に包絡される。

2. 別添

別添－1 破損燃料用輸送容器（2 体）に係る確認事項について

別添－2 破損燃料用輸送容器（2 体）の保守について

破損燃料用輸送容器（２体）に係る確認事項について

破損燃料用輸送容器（２体）の設置工事に係る主要な確認項目を表－１に示す。

表－１ 安全機能及び構造強度に関する確認事項

確認事項	確認項目		確認内容	判定基準
構造強度	材料確認		実施計画に記載されているバスケットの主な材料について確認する。	実施計画のとおりであること。
構造強度 遮へい 機能	構造 確認	寸法確認	実施計画に記載されているバスケットの主要寸法を確認する。	寸法が許容範囲内であること。
		外観確認	バスケットの各部の外観を確認する。	有意な欠陥がないこと。
密封機能	機能 確認	取合確認	密封境界を構成する蓋等が容器と取合い密封境界の構成に問題が無いことを確認する。	密封境界を構成する蓋等が容器と取合うこと。
臨 界 防 止 機 能	機能 確認	材料確認 寸法確認 外観確認	バスケットの材料及び主要寸法が、実施計画評価の前提条件となっている値を満足していることを確認し、バスケットの外観に異常のないことを確認する。	・材料が実施計画どおりであり、寸法が許容範囲内であること。 ・有意な変形、破損等の異常がないこと。

破損燃料用輸送容器（２体）の保守について

破損燃料用輸送容器（２体）は、本文 2.11.1.4 供用期間中に確認する項目に記載のとおり、「除熱，密封，遮へい，臨界防止の安全機能が維持されていること」を供用期間中，確認する。

輸送容器は、共用プールにおいて、輸送毎に以下の検査を実施する。なお、合格基準は、表－２に示す。また、検査の結果、必要に応じて消耗品の交換，補修を実施する。

（１）外観検査

輸送容器の外表面を目視で確認する。

（２）気密漏えい検査

輸送容器密封部の圧力降下を測定し，漏えい率を算出する。

（３）遮へい検査

収納物を収納した状態で，輸送容器表面の線量当量率を測定する。

（４）未臨界検査

輸送容器内に収納されたバスケットの外観を目視で確認する。

（５）吊上検査

輸送容器を吊り上げた後の状態において，上部トラニオン部の外観を目視で確認する。

（６）作動確認検査

バルブの開閉を行い，作動性を確認する。

（７）熱検査

収納物を収納した状態で，輸送容器表面の温度を測定する。

表－2 検査項目，検査方法及び合格基準

検査項目	検査方法	合格基準
外観検査	輸送容器の外表面を目視で確認する。	輸送容器の形状に異常な傷又は割れがないこと。
気密漏えい検査	輸送容器密封部に 0.9MPaG 以上の圧力を加え，圧力降下を測定し，漏えい率を算出する。	一次蓋，二次蓋及びポートカバーの各部の漏えい率が 9×10^{-1} ref cm ³ /s を超えないこと。
遮へい検査	収納物を収納した状態で，輸送容器表面の線量当量率を測定する。	実施計画記載の評価値を超えないこと。
未臨界検査	輸送容器内に収納されたバスケットの外観を目視で確認する。	バスケットに異常な変形又は破損がないこと。
吊上検査	輸送容器を吊り上げた後の状態において，上部トラニオン部の外観を目視で確認する。	トラニオン部など吊上部等に異常な変形又は破損がないこと。
作動確認検査	バルブの開閉を行い，作動性を確認する。	作動性に異常のないこと。
熱検査	収納物を収納した状態で，輸送容器表面の温度を測定する。	実施計画記載の評価値を超えないこと。

破損燃料用輸送容器（７体）に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（２号機）

1. ２号機の破損燃料用輸送容器（７体）に係る安全機能及び構造強度

1.1. 破損燃料用輸送容器（７体）の概要

２号機使用済燃料プールには、「添付資料－１－３ 燃料の健全性確認及び取り扱いに関する説明書 6.3. ２号機における燃料の取り扱い」に示すとおり、震災以前から存在する漏えい燃料や下部タイプレート側面の部材（フィンガースプリング）が変形した状態の燃料（以下、「下部タイプレート変形燃料」という。）が存在する。下部タイプレート変形燃料は燃料被覆管の損傷はなく、漏えい燃料は燃料被覆管に軽微な損傷はあるものの、定期検査時に漏えいが発見されその後炉内に装填していない燃料であるため、破損の程度は進展しておらずペレットは燃料被覆管内に保持されていると想定する。破損燃料用輸送容器は、漏えい燃料ならびに下部タイプレート変形燃料と健全燃料を共用プールへ輸送する際に使用する。なお、破損燃料用輸送容器は、３号機破損燃料用輸送容器（７体）と同じ容器である。

２号機破損燃料用輸送容器（７体）は既存の３号機破損燃料用輸送容器（７体）に対して２号機漏えい燃料を評価条件とした安全評価を行い、安全機能及び構造強度を確認した上で使用する。

1.1.1. 破損燃料用輸送容器（７体）の構成

「添付資料－２－１－２ 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（３号機） 1.1.1. 構内用輸送容器の構成」を参照。

1.1.2. 設備仕様

1.1.2.1. 破損燃料用輸送容器（７体）の仕様

「添付資料－２－１－２ 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（３号機） 1.1.2.1. 構内用輸送容器の仕様」を参照。

1.1.2.2. 破損燃料用輸送容器（７体）に収納する燃料仕様

バスケットに装填したステンレス鋼製の使用済燃料収納缶（小）（内寸 153mm）に燃料を装填して共用プールに輸送する。

収納対象とする燃料は、震災以前から存在する漏えい燃料、下部タイプレート変形燃料及び健全燃料とする。

２号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料の仕様を表 1－1－1 に示す。

表 1－1－1 2号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料の仕様

	使用済燃料			新燃料
燃料タイプ	7×7 燃料	高燃焼度 8×8 燃料	9×9 燃料 (B 型)	9×9 燃料 (B 型)
貯蔵体数	3	248	336	28
最高燃焼度 (MWd/t)	24, 500	43, 800	48, 100	—
最短冷却 日数(日)※	15, 548	5, 864	4, 946	—

※：2024 年 4 月 1 日時点での冷却期間

1. 2. 評価の基本方針

破損燃料用輸送容器（7 体）が，本文 2. 11. 1. 3 項の設計方針に示される除熱，密封，遮蔽及び臨界防止の安全機能を有するとともに，本文 2. 11. 1. 8 項の構造強度及び耐震性に示される構造強度を有する設計であることを確認する。

なお，既存の 3 号機破損燃料用輸送容器（7 体）の安全機能及び構造強度は「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3 号機）」及び「添付資料－2－2－1 破損燃料用輸送容器（7 体）に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3 号機）」（以下，「既存評価」という。）で確認されているため，破損燃料用輸送容器（7 体）の取扱い及び 1. 1. 2. 2. 項に示す 2 号機の燃料が既存評価の評価条件に該当しない事項について，新たに評価を行う。

表 1－2－1 に評価すべき各安全機能に対する安全設計・評価の方針を示す。

表 1－2－1 破損燃料用輸送容器（7体）安全評価の基本方針

項目	設計方針	評価対象	新評価実施要否	評価方針
構造強度	破損燃料用輸送容器（7体）は取扱中における衝撃、熱等に耐え、かつ、容易に破損しない設計とする。 破損燃料用輸送容器（7体）は、設計、材料の選定、製作及び検査について適切と認められる規格及び基準によるものとする。	破 損 燃 料 用 輸 送 容 器 （7体）	○	震災以前から存在する漏えい燃料等は、燃料被覆管等の軽微な損傷があるが、ペレットは燃料被覆管内に保持されると想定する。 破損燃料用輸送容器（7体）の取扱手順から設計事象を抽出し、その荷重条件で発生する応力を評価する。 構造強度評価手法は、JSME S NC1-2005/2007 設計・建設規格を準用する。
除熱機能	使用済燃料の健全性及び構成部材の健全性が維持できるように、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去できる設計とする。	燃料被覆管	—	構造強度と同様にペレットは燃料被覆管内に保持されると想定する。 既存評価の評価条件に包絡されることから新評価は不要。
		破損燃料用輸送容器（7体）	—	
密封機能	周辺公衆及び放射線業務従事者に対し、放射線被ばく上の影響を及ぼすことのないよう、使用済燃料が内包する放射性物質を適切に閉じ込める設計とする。	破損燃料用輸送容器（7体）	○	構造強度及び除熱機能の評価結果から、設計事象において、容器密封部の健全性が維持されることを評価する。 構造強度評価を新たに実施するため、密封機能についても評価を実施する。
遮蔽機能	内部に燃料を入れた場合に放射線障害を防止するため、使用済燃料の放射線を適切に遮蔽する設計とする。	破損燃料用輸送容器（7体）	—	構造強度と同様にペレットは燃料被覆管内に保持されると想定する。 既存評価の評価条件に包絡されることから新評価は不要。
臨界防止機能	想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止できる設計とする。	破損燃料用輸送容器（7体）	—	構造強度と同様にペレットは燃料被覆管内に保持されると想定するが、万一臨界に至った場合の影響緩和が困難であることから、保守的に燃料棒の形状が維持されていないと仮定する。 既存評価の評価条件に包絡されることから新評価は不要。

1.3. 構造強度評価

1.3.1. 基本的な考え方

2号機燃料取り出しは破損燃料用輸送容器（7体）のハンドリングフローが3号機燃料取り出し時と異なるため，新たに構造強度評価を行う。ただし，既存評価が適用可能である場合は評価を省略する。

破損燃料用輸送容器（7体）の構造強度の評価部位は，安全上重要な部位として容器本体（胴及び底板），蓋，バスケット及び支持機能を有するトラニオンとする。

構造強度評価手法は，JSME S NC1-2005/2007 設計・建設規格（以下，「設計・建設規格」という。）を準用する。各評価対象部位の適用基準・規格を表1－3－1に示す。

表 1－3－1 構造強度に係る適用基準・規格

評価対象部位	設計・建設規格 機器区分	構造強度 評価方法	考え方
容器本体， 蓋	クラス 3 容器	クラス 1 容器の規定を 準用	容器本体及び蓋は設計・建設規格 GNR-1210 及び GNR-1220 の機器等の区分の定義より，クラス 3 容器に区分されると考えられる。 圧力荷重についてはクラス 3 容器における規格計算式で評価することができるが，熱荷重や取扱時の衝撃荷重等の各種の負荷荷重が発生することから，これらの荷重については，応力解析によって発生応力を求めて評価する必要がある。 したがって，構造強度評価手法は，同様な「解析による設計」の考え方が採用されているクラス 1 容器を準用する。
バスケット	ノンクラス	炉心支持構造物の規定 を準用	バスケットは設計・建設規格 GNR-1210 及び GNR-1220 の機器等の区分の定義に該当しないと考えられる。 しかし，容器内において燃料を支持する部材であるため，構造強度評価手法は，炉心支持構造物を準用する。
トラニオン	クラス 3 支持構造物	クラス 1 支持構造物の 規定を準用	トラニオンは容器をクレーンで取扱うための部位であり，輸送時は容器を支持することから，設計・建設規格 GNR-1210 及び GNR-1220 の機器等の区分の定義より，クラス 3 支持構造物に区分されると考えられる。 しかし，容器本体との整合を取り，構造強度評価手法はクラス 1 支持構造物を準用する。

1.3.2. 設計事象の抽出

JSME S FA1-2007 金属キャスク構造規格の考え方に基づいて、破損燃料用輸送容器（7 体）の設計事象として以下を抽出した。

なお、設計事象の抽出にあたっては、図 1－3－1 に示すハンドリングフローに基づき、破損燃料用輸送容器（7 体）の取扱い及び共用プールまでの輸送において想定される起因事象に着目し、発生防止対策を考慮して事象の発生の可能性を検討した。設計事象の抽出結果を表 1－3－2 に示す。

(1) 設計事象Ⅰ

設計事象Ⅰに該当する通常の実態とは、「取扱い時（吊上げ時）」及び「構内輸送時」であり、それぞれの荷重条件は既存評価と同等であることから、既存評価が適用可能であるため評価を省略する。

(2) 設計事象Ⅱ

ハンドリングフローのうち、取扱いモード No. 7～No. 12 で示される共用プールまでの輸送について、3 号機燃料取り出しと輸送方法は同一であることから、既存評価が適用可能であるため評価を省略する。

容器本体及び蓋には、キャスク固定治具への衝突（取扱いモード No. 2）、除染ピットへの衝突（取扱いモード No. 4）及び輸送車両上の輸送架台への衝突（取扱いモード No. 6）の加速度における収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

バスケットには、キャスク固定治具への衝突（取扱いモード No. 2）、除染ピットへの衝突（取扱いモード No. 4）及び輸送車両上の輸送架台への衝突（取扱いモード No. 6）の加速度における収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

トラニオンには、キャスク固定治具への衝突（取扱いモード No. 2）及び輸送車両上の輸送架台への衝突（取扱いモード No. 6）の加速度における荷重がかかり、応力が発生する。

(3) 設計事象Ⅲ及び設計事象Ⅳ

破損燃料用輸送容器（7 体）を取扱う設備及び運用においては、クレーンワイヤ及び吊具の二重化、始業前の機器の点検を実施することから、ハンドリングフローから抽出される事象のうち、破損燃料用輸送容器（7 体）の安全機能を著しく損なう事象であって、一般公衆の放射線被ばくの観点からみて重要と考えられる事象はない。

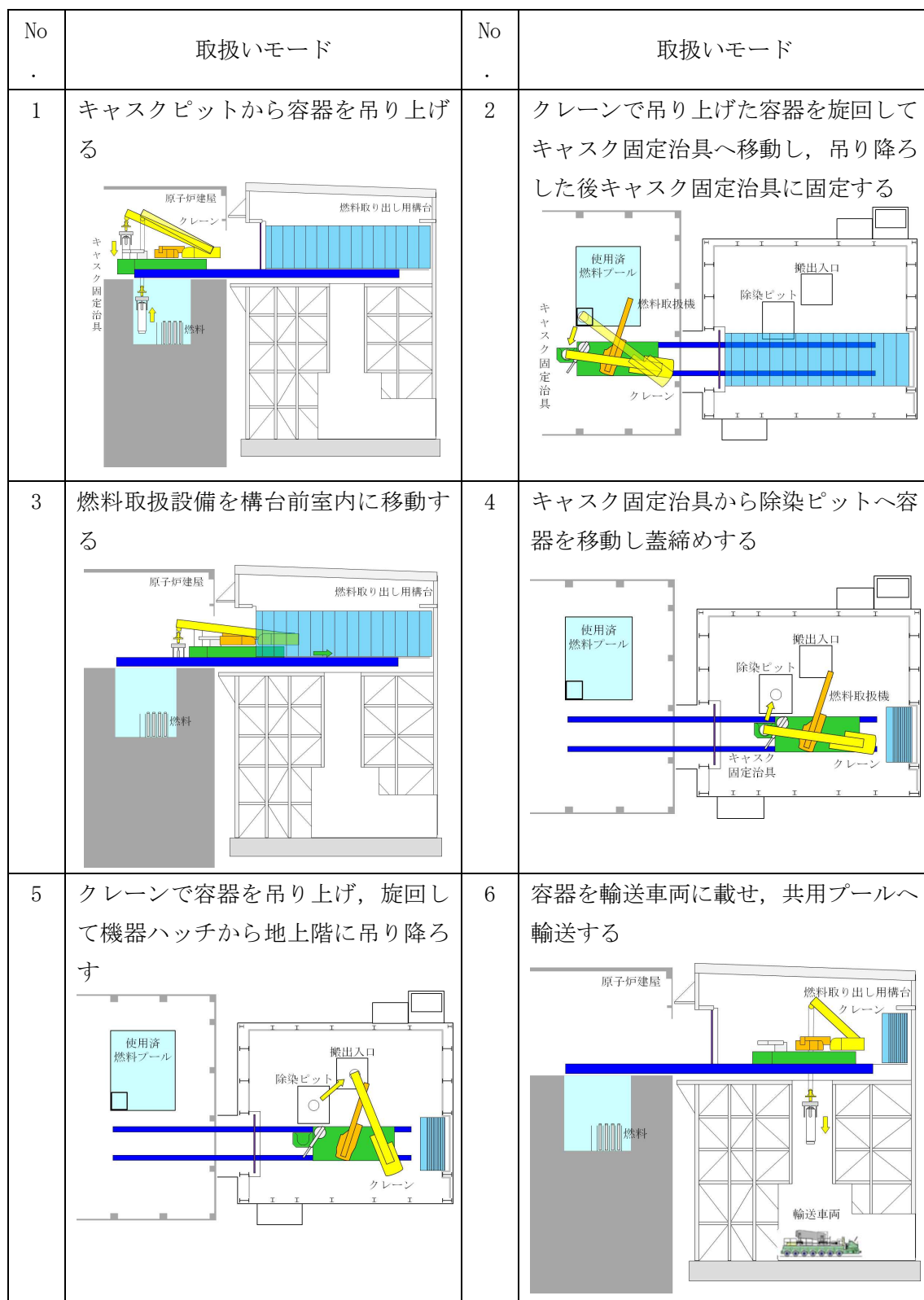


図 1 - 3 - 1 破損燃料用輸送容器（7 体）のハンドリングフロー（1/2）

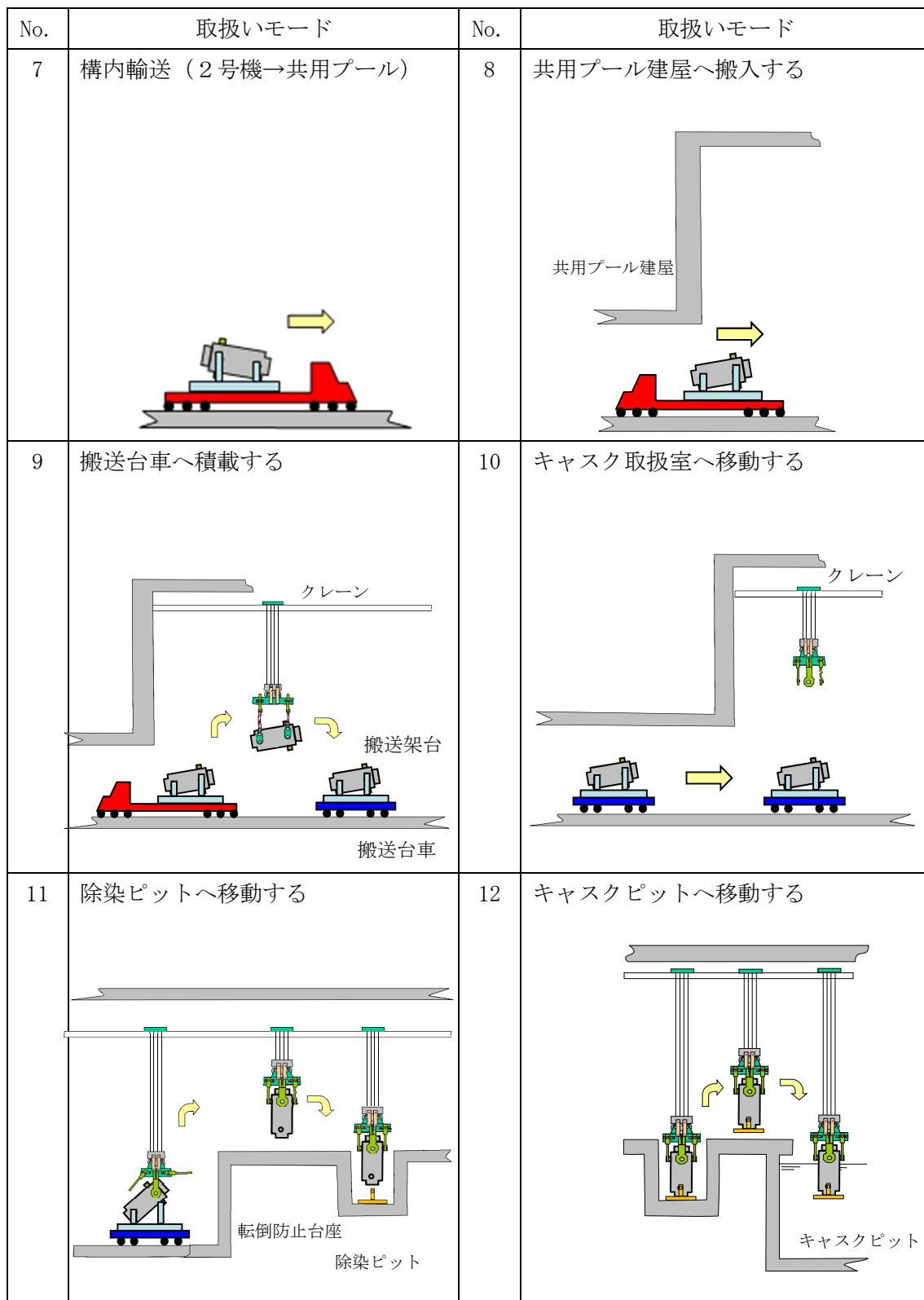


図 1 - 3 - 1 破損燃料用輸送容器（７体）のハンドリングフロー（2/2）

表 1-3-2 設計事象の抽出 (1/3)

起因事象		原因	発生の可能性・防止策	発生の有無	想定シナリオ	抽出の要否
キャスクピットからの吊上げ (No. 1)	重量物の落下 (垂直吊具落下)	ワイヤーロープの破断 (2号機) 駆動源の喪失 (2号機)	以下の対策, 設計により重量物及び容器の落下を防止する	×		×
	容器の落下		● 吊上げ用ワイヤの二重化 ● 駆動源喪失時においても保持する構造	×		×
キャスク固定治具への移動 (No. 2)	キャスク固定治具と容器の衝突	操作員の誤操作 (2号機)	以下の対策, 設計により容器の衝突を防止する ● インターロックによるクレーン旋回角度の制限	×		×
	キャスク固定治具台座部分と容器の衝突	操作員の誤操作 (2号機)	吊下げ時の誤操作により, 微速で巻き下げるところ最大速度で容器を巻き下げ, 台座部分に衝突する可能性がある。	○	クレーンの最大巻下げ速度 [] で, 容器がキャスク固定治具台座に衝突する場合を, 設計事象として抽出する。	○
	キャスク固定治具旋回受け保護バンパと容器の衝突	操作員の誤操作 (2号機)	旋回時の誤操作により, 微速で旋回するところ最大旋回速度で旋回し衝突させる可能性がある。	○	クレーンの最大旋回速度 [] で, 容器がキャスク固定治具旋回受け保護バンパに衝突する場合を, 設計事象として抽出する。	○
	キャスク固定治具トラニオンガイドとトラニオンの衝突	操作員の誤操作 (2号機)	回転時の誤操作により, 微速で回転するところ最大吊具回転速度で回転し衝突させる可能性がある。	○	回転吊具の最大回転速度 [] で, トラニオンがキャスク固定治具トラニオンガイドに衝突する場合を, 設計事象として抽出する。	○

表 1－3－2 設計事象の抽出 (2/3)

起因事象		原因	発生の可能性・防止策	発生の有無	想定シナリオ	抽出の要否
燃料取扱設備の構台への移動 (No. 3)	容器の転倒	動力源の喪失 (2 号機)	以下の対策，設計により容器の転倒を防止する ● 動力源喪失時用の容器転倒防止治具の設置	×		×
キャスク固定治具からの吊上げ (No. 4)	重量物の落下 (垂直吊具落下)	ワイヤーロープの破断 (2号機)	以下の対策，設計により重量物及び容器の落下を防止する	×		×
	容器の落下	駆動源の喪失 (2 号機)	● 吊上げ用ワイヤの二重化 ● 駆動源喪失時においても保持する構造	×		×
除染ピットへの移動 (No. 4)	除染ピット内の台座と容器の衝突	操作員の誤操作 (2 号機)	吊下げ時の誤操作により，微速で巻き下げるところ最大速度で容器を巻き下げ，台座部分に衝突する可能性がある。	○	クレーンの最大巻下げ速度 [REDACTED] で，容器が台座に衝突する場合を，設計事象として抽出する。	○
	容器の落下	ワイヤーロープの破断 (2号機) 駆動源の喪失 (2 号機)	以下の対策，設計により重量物及び容器の落下を防止する ● 吊上げ用ワイヤの二重化 ● 駆動源喪失時においても保持する構造	×		×

表 1－3－2 設計事象の抽出 (3/3)

起因事象		原因	発生の可能性・防止策	発生の有無	想定シナリオ	抽出の要否
機器ハッチから地上階への吊り降ろし (No. 5)	容器の落下	ワイヤーロープの破断 (2号機) 駆動源の喪失 (2 号機)	以下の対策，設計により重量物及び容器の落下を防止する ● 吊上げ用ワイヤの二重化 ● 駆動源喪失時においても保持する構造	×		×
容器を輸送車両に搭載 (No. 6)	容器を垂直吊りした状態での下部トラニオンと輸送架台の衝突	操作員の誤操作 (2 号機)	吊下げ時の誤操作により，微速で巻き下げるところ最大速度で容器を巻下げ，輸送架台部分に衝突する可能性がある。	○	クレーンの最大巻下げ速度 [REDACTED]で，下部トラニオンが輸送架台に衝突する場合を，設計事象として抽出する。	○

1.3.3. 設計事象の荷重条件

前項で抽出した設計事象について、破損燃料用輸送容器（7 体）に発生する荷重を評価する。

(1) 内圧

「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3 号機） 1.3.3. 1) 内圧」を参照。

(2) 熱荷重

破損燃料用輸送容器（7 体）に発生する熱応力は、3 号機の評価条件における除熱評価結果（既存評価）より得られた温度分布を用いて評価する。

(3) 設計事象Ⅱの加速度の導出

事象発生時に破損燃料用輸送容器（7 体）が有する運動エネルギーを被衝突物（キャスク固定治具台座部分、キャスク固定治具旋回受け保護バンパ及びキャスク固定治具トラニオンガイド）の弾性により吸収するとして、発生する衝撃加速度を計算した。衝撃加速度の計算方法と結果を以下に示す。

① 加速度の算出式

破損燃料用輸送容器（7 体）の衝突ケースにより加速度の算出式が異なるため、以下の通り算出する。

- a. キャスク固定治具台座部分と破損燃料用輸送容器（7 体）の衝突、除染ピット内の容器台座と破損燃料用輸送容器（7 体）の衝突及び破損燃料用輸送容器（7 体）を垂直吊りした状態での下部トラニオンと輸送架台の衝突（取扱いモード No. 2, 4, 6）破損燃料用輸送容器（7 体）底面が重力方向に衝突する場合、破損燃料用輸送容器（7 体）の運動エネルギーが衝突対象の弾性変形エネルギーで吸収されると仮定し、エネルギーつり合い式から下記で表す。

$$\frac{1}{2}mV^2 + mg\delta = \frac{1}{2}k\delta^2$$

ここで、

m：破損燃料用輸送容器（7 体）の質量()※

※：事象発生時は二次蓋未装着であるため二次蓋分を減じた質量

V：クレーンの最大巻き下げ速度()

g：重力加速度(=9.80665m/s²)

δ：衝突対象の変形量(m)

k：衝突対象のばね定数(N/m)

加速度 α は次の式で表される。

$$\alpha = \frac{F}{m} = \frac{k\delta}{m} = g + \sqrt{g^2 + \frac{k}{m} \cdot V^2} \quad (1)$$

ここで,

F : 衝突時の荷重 (N)

- b. キャスク固定治具旋回受け保護バンパと破損燃料用輸送容器 (7 体) の衝突 (取扱いモード No. 2)

破損燃料用輸送容器 (7 体) が旋回によって水平方向に衝突する場合, 破損燃料用輸送容器 (7 体) の運動エネルギーが衝突対象の弾性変形エネルギーで吸収されると仮定すると, エネルギーつり合いから次の式で表される。

$$\frac{1}{2}mV^2 = \frac{1}{2}k\delta^2$$

$$\alpha = \frac{F}{m} = \frac{k\delta}{m} = \sqrt{\frac{k}{m} \cdot V^2} \quad (2)$$

ここで,

V : クレーンの最大旋回速度 ()

- c. キャスク固定治具トラニオンガイドとトラニオンの衝突 (取扱いモード No. 2)

破損燃料用輸送容器 (7 体) が回転吊具の回転動作によって, 破損燃料用輸送容器 (7 体) の回転エネルギーが衝突対象の弾性変形エネルギーで吸収されると仮定すると, エネルギーつり合いから次の式で表される。

$$\frac{1}{2}J\omega^2 = \frac{1}{2}k\delta^2$$

$$\alpha = \frac{F}{m} = \frac{k\delta}{m} = \frac{k\omega}{m} \sqrt{\frac{J}{k}} \quad (3)$$

$$J = \frac{1}{2}mr^2 \quad (4)$$

ここで,

J : 慣性モーメント (kg・m²)

r : 破損燃料用輸送容器 (7 体) の半径 ()

ω : 角速度 ()

② ばね定数

ばね定数 k の式は下記で表される。

衝突対象物の圧縮で荷重を受ける場合は(5)式を用いる。

$$k = \frac{F}{\delta} = \frac{E \cdot A}{\ell} \quad (5)$$

ここで、

E : 衝突対象物の縦弾性係数 (N/m^2)

A : 破損燃料用輸送容器 (7体) の荷重を受ける断面積 (m^2)

ℓ : 衝突対象物における衝撃方向の代表長さ (m)

衝突対象物の曲げで荷重を受ける場合(6)式を用いる。

$$k = \frac{F}{\delta} = \frac{3EI}{(\ell_1^3)} \quad (6)$$

ここで、

I : 断面二次モーメント (m^4)

ℓ_1 : 固定端から荷重位置までの距離 (m)

③ 加速度の算出

- a. キャスク固定治具台座部分と破損燃料用輸送容器 (7 体) の衝突 (取扱いモード No. 2)

キャスク固定治具の構造が複雑であることから、簡易モデル化を行う。キャスク固定治具は箱型の構造体であり、側面がボルトにより走行台車に固定されているため、図 1-3-2 に示すような片持ち梁として図心を通る断面二次モーメントを求める。

$$I = \blacksquare$$

ばね定数は(6)式で求める。

このとき $E = \blacksquare$, $\ell_1 = \blacksquare$ とすると、

$$k = 4.156 \times 10^{10} \text{N/m}$$

加速度は(1)式で計算し、事象発生時は二次蓋未装着につき破損燃料用輸送容器 (7 体) の質量 m から二次蓋分を減じる。

$$\alpha = 43.71 \text{m/s}^2 = 4.46\text{G}$$

余裕を見て 5.0G を評価加速度とする。

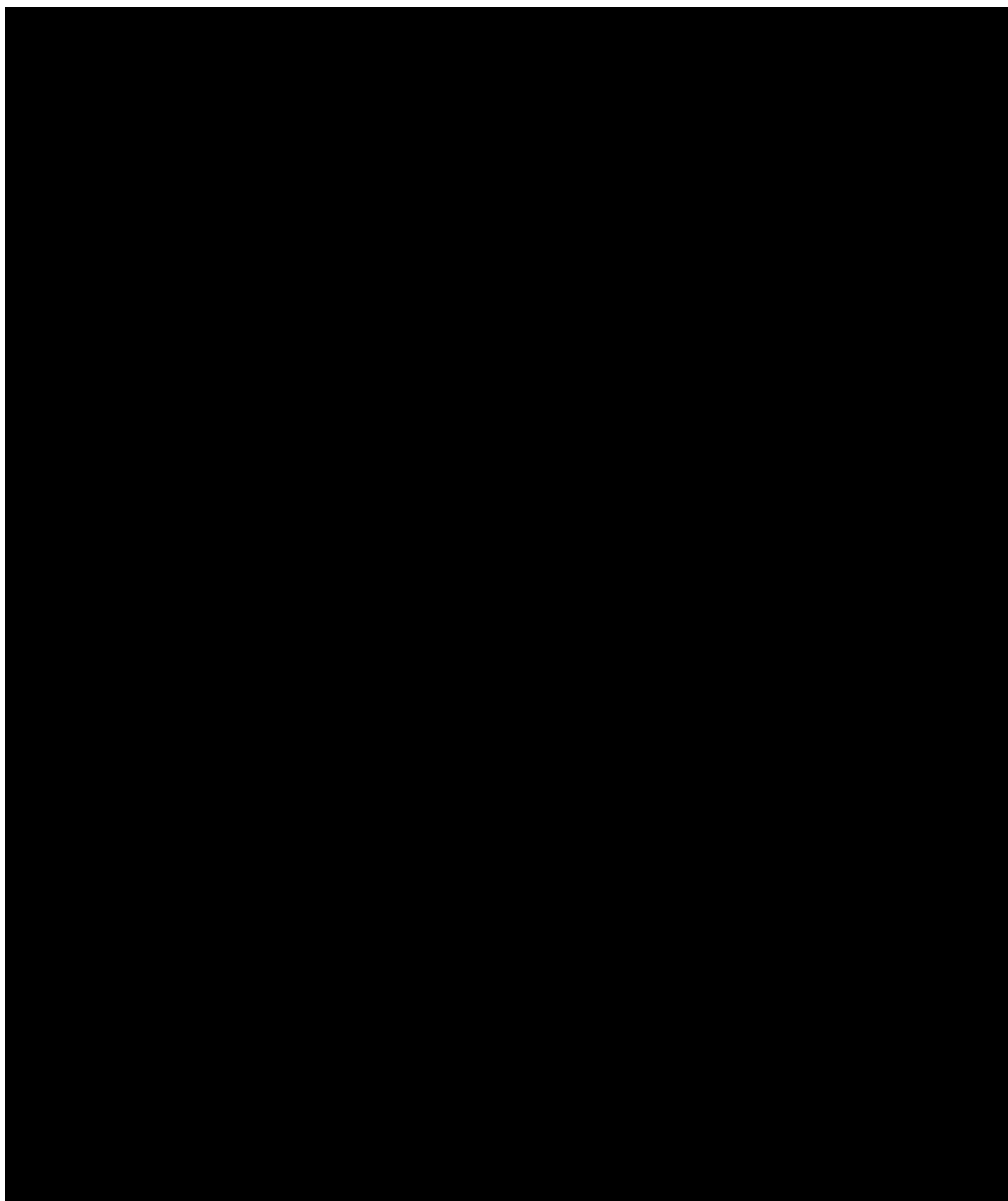


図 1－3－2 仮置台の簡易計算モデル
(上図：実形状，下図：断面二次モーメント算出モデル)

- b. キャスク固定治具旋回受け保護バンパと破損燃料用輸送容器（7 体）の衝突（取扱いモード No. 2）

旋回受け保護バンパの衝突は防振ゴムの衝撃吸収機能を見做し炭素鋼のフレームに破損燃料用輸送容器（7 体）が衝突することを考慮する。図 1－3－3 に示すような底面を固定端とした片持ち梁として簡易モデル化する。曲げモーメントとたわみの式よりばね定数を求める。

ここで、

$$\begin{aligned} I_1 &= \text{ } \\ I_2 &= \text{ } \\ l_1 &= \text{ } \\ l_2 &= \text{ } \end{aligned}$$

として、ばね定数は

$$k = 1.177 \times 10^9 \text{ N/m}$$

ここで旋回速度は により、加速度を(2)式で計算する。事象発生時に二次蓋を取り外していることを考慮し破損燃料用輸送容器（7 体）質量 m は二次蓋分を減じる。

$$\alpha = 20.56 \text{ m/s}^2 = 2.10 \text{ G}$$

余裕を見て 3.0G を評価加速度とする。

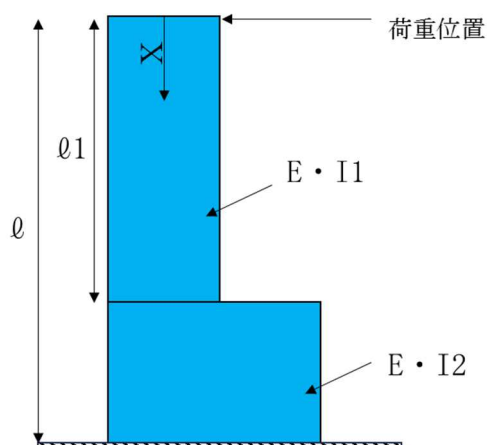


図 1－3－3 旋回受け保護バンパの炭素鋼フレーム簡易モデル化

- c. キャスク固定治具トラニオンガイドとトラニオンの衝突（取扱いモード No. 2）

(a) ばね定数算出

キャスク固定治具トラニオンガイドと計算のため簡易化させたモデルを図 1-3-4 に示す。

梁のたわみ δ を算出し (6) 式よりばね定数を求める。断面二次モーメント I は図 1-3-4 の構造として求める。

$$I = \text{[redacted]}$$

ここで,

$$E = \text{[redacted]}$$

$$l_1 = \text{[redacted]}$$

として, (6) 式より

$$k = 3.779 \times 10^9 \text{ N/m}$$

(b) 慣性モーメント算出

円柱の慣性モーメントは (4) 式より求める。R は破損燃料用輸送容器 (7 体) 外筒半径 [redacted], 事象発生時に二次蓋を取り外していることを考慮し破損燃料用輸送容器 (7 体) の質量 m は二次蓋分を減じると, $J = \text{[redacted]}$ となる。

(c) 加速度算出

加速度は (3) 式を用い, 角速度は 0.5rpm より, $\pi/60 \text{ rad/s}$ を用いると,

$$\alpha = 7.54 \text{ m/s}^2 = 0.77G$$

余裕を見て 1.0G を評価加速度とする。

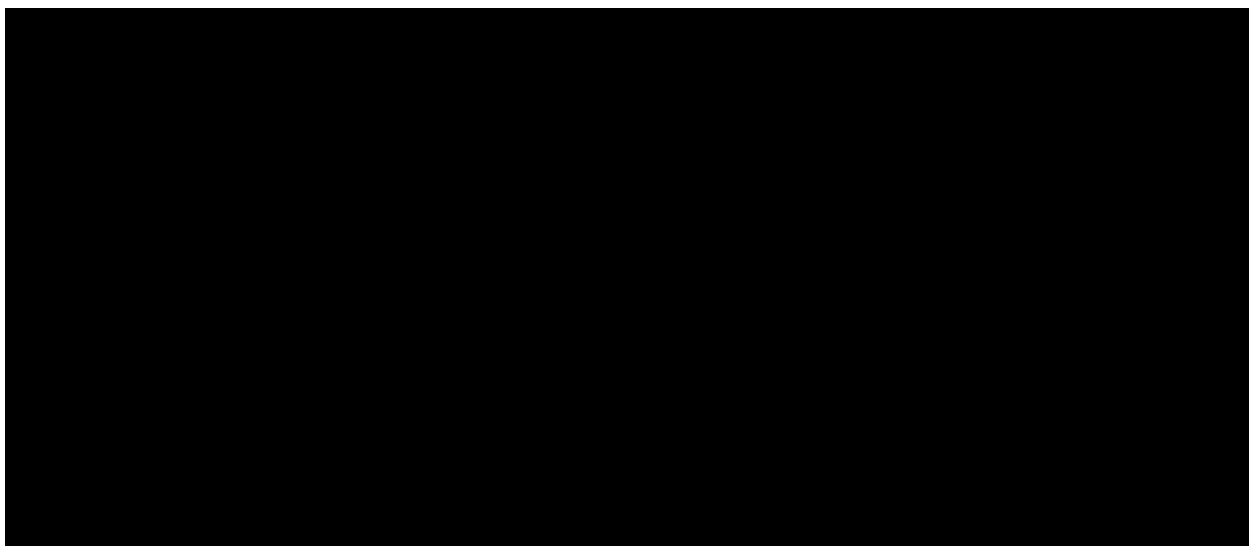


図 1-3-4 キャスク固定治具トラニオンガイド(左),
簡易はりモデル(中), ガイドの断面形状(右)

d. 除染ピット内の容器台座と破損燃料用輸送容器(7体)の衝突(取扱いモードNo.4)

(a) ばね定数算出

本事象ではピット内の容器台座に底面が着座する。台座の構造を図1-3-5に示す。ばね定数の算出にあたり、形鋼材のフランジ及びウェブと、平板要素に分解し、それぞれのばね定数を算出の上フックの法則による直列ばねとして合成してばね定数を求める。

$$k=3.045 \times 10^{10} \text{N/m}$$

(b) 加速度算出

(1)式を用いて加速度を計算する。事象発生時に二次蓋を取り外していることを考慮し中型容器質量 m は二次蓋分を減じる。

$$\alpha = 39.27 \text{m/s}^2 = 4.00\text{G}$$

余裕を見て5.0Gを評価加速度とする。

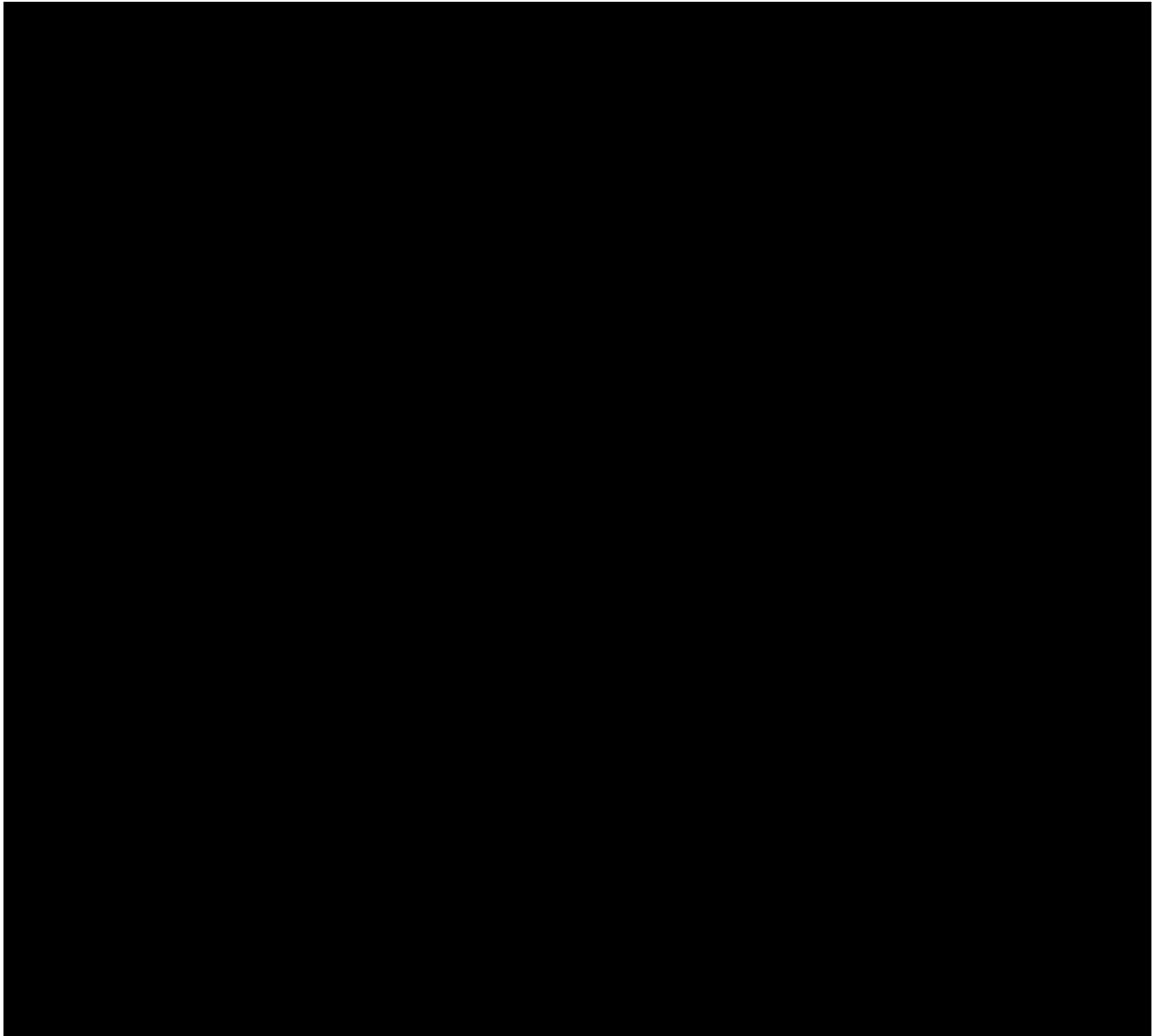


図 1－3－5 除染ピット容器台座

- e. 破損燃料用輸送容器（7 体）を垂直吊りした状態での下部トラニオンと輸送架台の衝突（取扱いモード No. 6）

3 号機と同一の輸送架台を使用するため，ばね定数は 3 号機と同一となり，加速度は(1)式で計算する。

ただし， k ：衝突対象のばね定数($=2.882 \times 10^{10} \text{N/m}$)

発生する加速度は 3.93G となり，余裕を見て 4.0G を評価加速度とする。

(4) 既存評価への包絡性検討

(3)の加速度算出結果より既存評価への包絡性を検討し、検討結果を表 1－3－3 に示す。

評価対象部位の容器本体及び蓋並びにバスケットについて、事象 a, c, d 及び e は既存評価と同等または既存評価に包絡されることから、既存評価が適用可能であるため評価を省略し、事象 b のみ評価する。

また、評価対象部位のトラニオンについて、事象 a, b 及び d ではトラニオンは衝撃発生箇所には該当せず、事象 c 及び e は既存評価に包絡される。したがって、評価対象部位のうちトラニオンは既存評価が適用可能であるため評価を省略する。

表 1－3－3 既存評価への包絡性検討結果と新評価要否

設計事象Ⅱ	衝撃発生箇所	加速度	既存評価への包絡性	
			容器本体及び蓋並びにバスケット	トラニオン
a. キャスク固定治具台座部分と破損燃料用輸送容器（7 体）の衝突 （取扱いモード No. 2）	容器底面	5. 0G	－ 既存評価の「転倒防止台座への衝突」及び「キャスクピット床面への衝突」と衝撃発生箇所が同一かつ、評価加速度 9. 0G に加速度が包絡される	－ 衝撃発生箇所がトラニオンではないため、評価を省略
b. キャスク固定治具旋回受け保護バンパと破損燃料用輸送容器（7 体）の衝突 （取扱いモード No. 2）	容器底板側面	3. 0G	○ 衝撃発生箇所が同等となる既存評価が存在しないため、新評価を実施する	
c. キャスク固定治具トラニオンガイドとトラニオンの衝突 （取扱いモード No. 2）	トラニオン	1. 0G	－ 設計事象Ⅰの「構内輸送時」における左右方向加速度 1. 0G と同等	
d. 除染ピット内の容器台座と破損燃料用輸送容器（7 体）の衝突 （取扱いモード No. 4）	容器底面	5. 0G	－ 既存評価の「転倒防止台座への衝突」及び「キャスクピット床面への衝突」と衝撃発生箇所が同一かつ、評価加速度 9. 0G に加速度が包絡される	－ 衝撃発生箇所がトラニオンではないため、評価を省略
e. 破損燃料用輸送容器（7 体）を垂直吊りした状態での下部トラニオンと輸送架台の衝突 （取扱いモード No. 6）	トラニオン	4. 0G	－ 既存評価の「輸送架台への衝突」と衝撃発生箇所が同一かつ、評価加速度 4. 0G に加速度が包絡される	

○：既存評価への包絡性が確認できないため、新評価が必要

－：既存評価に包絡されるため既存評価が適用可能である、または評価対象外のため、評価を省略する。

(5) 各設計事象における荷重条件

破損燃料用輸送容器（7 体）の各設計事象における荷重条件を表 1－3－4，表 1－3－5 に示す。なお，設計条件及び設計事象Ⅰ，Ⅱは既存評価が適用可能な評価を省略することから，新評価の荷重条件のみを示す。また，容器本体及び蓋における試験状態での荷重条件は既存評価と同一であり評価結果は包絡されることから，既存評価が適用可能であるため評価を省略する。

表 1－3－4 荷重条件（容器本体及び蓋）

設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件
設計 条件	設計時	—	最高使用圧力：2.0MPa （二次蓋は 1.4MPa） ボルト初期締付け力 キャスク固定治具旋回受け保護バン パへの衝突時荷重 下方向：1.0G（自重を考慮） 横方向：3.0G
Ⅱ	キャスク固定治具旋回受 け保護バンパへの衝突 （取扱いモード No. 2）	—	内圧：0.6MPa （二次蓋は 0.45MPa） ボルト初期締付け力 キャスク固定治具旋回受け保護バン パへの衝突時荷重 下方向：1.0G（自重を考慮） 横方向：3.0G 熱荷重

表 1－3－5 荷重条件（バスケット）

設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件
設計 条件	設計時	—	キャスク固定治具旋回受け保護バン パへの衝突時荷重 下方向：1.0G（自重を考慮） 横方向：3.0G
Ⅱ	キャスク固定治具旋回受 け保護バンパへの衝突 （取扱いモード No. 2）	—	キャスク固定治具旋回受け保護バン パへの衝突時荷重 下方向：1.0G（自重を考慮） 横方向：3.0G 熱荷重

1.3.4. 設計基準

「添付資料－２－１－２ 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（３号機） 1.3.4. 設計基準」を参照。

1.3.5. 評価方法及び評価モデル

1.3.5.1. 容器本体及び蓋

容器本体及び蓋の主な構造部材の応力評価箇所を図 1－３－６ に示す。荷重条件は表 1－３－４ に示したとおりである。

(1) 設計条件

設計時における荷重は次に示す組合せとする。

最高使用圧力＋ボルト初期締付け力＋設計事象により発生する機械的荷重（自重含む）

① 胴，底板，一次蓋

容器の実形状をモデル化し構造解析コード ABAQUS を用いて応力評価を行う。

a. 最高使用圧力，ボルト初期締付け力

解析コード ABAQUS の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図 1－３－７ に示す。ただし、キャスク固定治具旋回受け保護バンパへの衝突時は二次蓋を取り外した状態であるため、二次蓋を考慮しない解析モデルとする。

b. 機械的荷重による応力

(a) キャスク固定治具旋回受け保護バンパへの衝突時

解析コード ABAQUS の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図 1－３－８（自重作用時）及び図 1－３－９（衝突時荷重作用時）に示す。

② ポートカバー

a. 最高使用圧力による応力

「添付資料－２－１－２ 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（３号機） 1.3.5.1. 1) ② (a) 最高使用圧力による応力」を参照。

③ 一次蓋ボルト，ポートカバーボルト

a. 最高使用圧力及びガasket 締付による平均引張応力

「添付資料－２－１－２ 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（３号機） 1.3.5.1. 1) ③ (a) 最高使用圧力及びガasket 締付による平均引張応力」を参照。

④ 二次蓋，二次蓋ボルト，二次蓋ポートカバー，二次蓋ポートカバーボルト

キャスク固定治具旋回受け保護バンパへの衝突時は二次蓋が取り付けしていない状態であるため，応力は発生しない。

(2) 設計事象Ⅱ キャスク固定治具旋回受け保護バンパへの衝突

キャスク固定治具旋回受け保護バンパ衝突時における荷重は次に示す組合せとする。
容器内圧＋ボルト初期締付け力＋熱荷重＋衝突時荷重（自重を含む）

① 胴，底板，一次蓋

a. 内圧，ボルト初期締付け力

内圧及びボルト初期締付け力の計算方法は「(1) ① a. 最高使用圧力，ボルト初期締付け力」と同様である。ただし，燃料健全時の内圧を用いて計算する。

b. 機械的荷重による応力

機械的荷重による応力の計算方法は「(1) ① b. (a) キャスク固定治具旋回受け保護バンパへの衝突時」と同様である。

c. 熱荷重による応力

容器の実形状をモデル化し構造解析コード ABAQUS を用いて応力評価を行う。解析コード ABAQUS の軸対称固体（連続体）要素による解析モデルを図 1－3－10 に示す。熱荷重として，図 1－3－11 に示す吊上げ時（縦置き時，健全燃料時）での熱解析の結果（既存評価）から得られた破損燃料用輸送容器（7 体）に生じる温度勾配による荷重を用いる。ただし，本事象において二次蓋は取り付けしていない状態であるため，二次蓋の応力は計算結果によらずゼロとする。

d. 平均せん断応力

平均せん断応力が発生する箇所は存在しないため評価を省略する。

e. 平均支圧応力

底板とバスケット底面との接触部に発生する平均支圧応力（ σ_b ）は次式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{m_G \cdot G_z}{A}$$

ここで，

m_G ：バスケットの質量（ ）

G_z ：後方向加速度（＝9.807m/s²）

A：接触面積 ()

f. 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力(σ_c)は次式で計算する。

$$\sigma_c = \frac{m_G \cdot G_Z}{A}$$

ここで、

m_G ：破損燃料用輸送容器（7 体）の質量（=46300kg）

G_Z ：後方向加速度（=9.807m/s²）

A：胴の断面積 ()

② ポートカバー

キャスク固定治具旋回受け保護バンパへの衝突時において、圧力による応力を除きポートカバーに生じる応力は無視できる。

③ 一次蓋ボルト，ポートカバーボルト

キャスク固定治具旋回受け保護バンパへの衝突時の荷重による引張応力は発生しないため、計算及び評価を省略する。

衝突時の荷重による曲げ応力は以下の通り計算する。

a. 一次蓋ボルト

衝突時に作用する加速度によって発生する曲げ応力(σ_b)は次式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{1}{n} \cdot \frac{m \cdot G_x \cdot l_b}{8 \cdot Z}$$

ここで、

n：ボルト本数 ()

m：一次蓋の質量 ()

G_x ：加速度 ()

l_b ：ボルト長さ ()

Z：ボルトの断面係数 ()

b. ポートカバーボルト

計算方法は「a. 一次蓋ボルト」と同様である。

ただし、

n：ボルト本数 ()

m：ポートカバーの質量 ()

l_b ：ボルト長さ ()

Z：ボルトの断面係数 ()

④ 二次蓋，二次蓋ボルト，二次蓋ポートカバー，二次蓋ポートカバーボルト

キャスク固定治具旋回受け保護バンパへの衝突時は二次蓋が取り付いていない状態であるため，応力は発生しない。

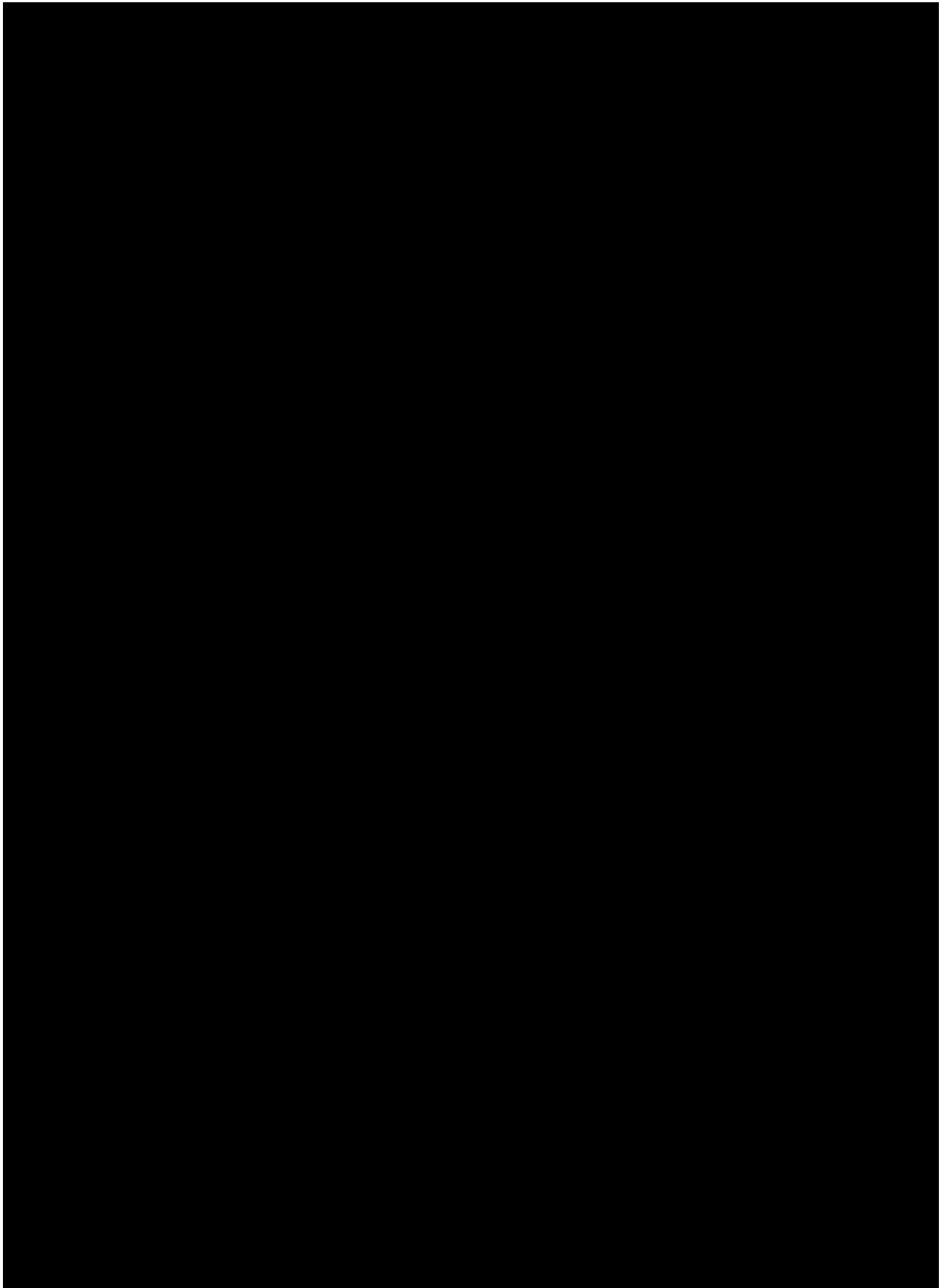


図 1 - 3 - 6 容器本体及び蓋の応力評価箇所

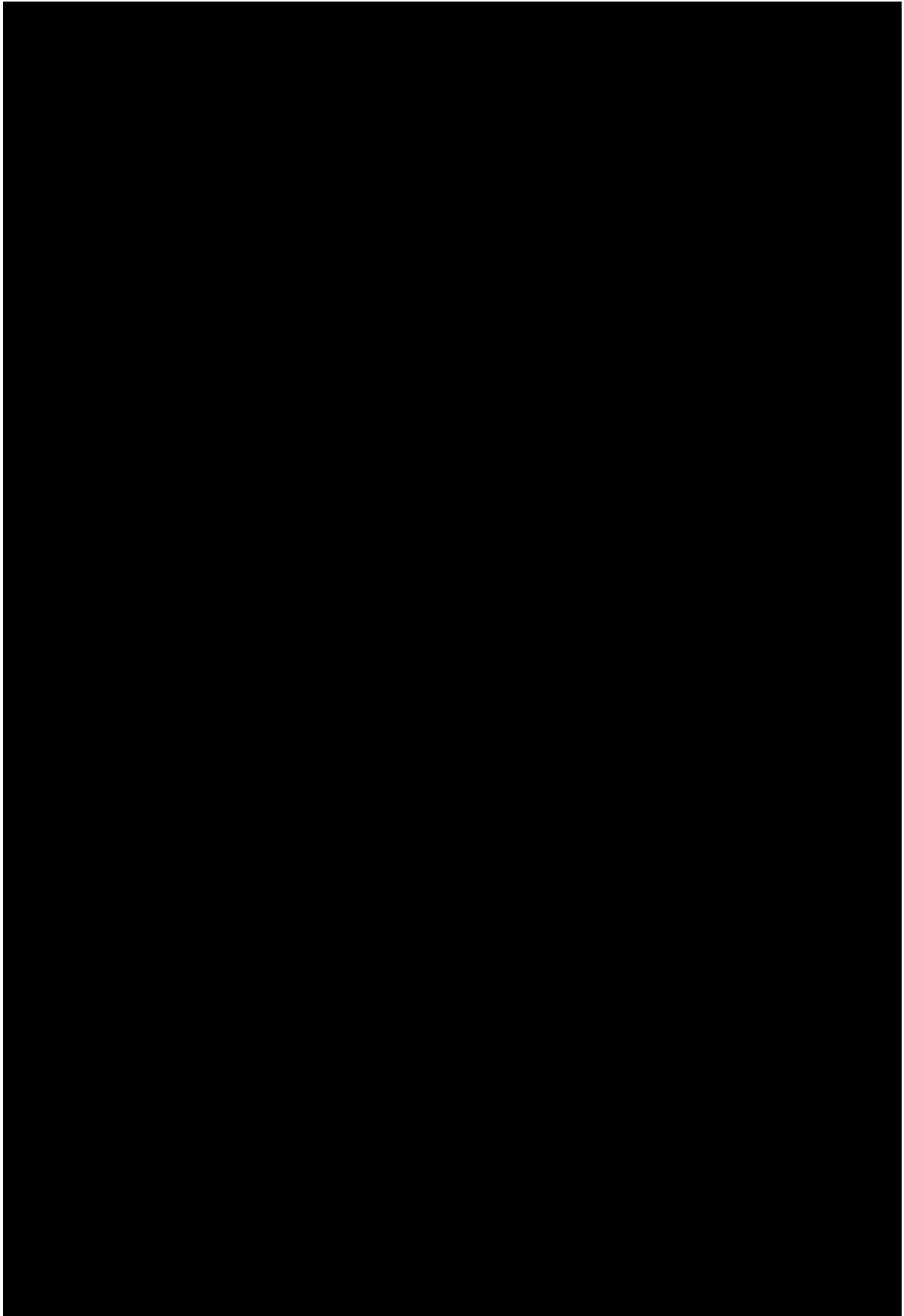


図 1－3－7 破損燃料用輸送容器（7体）の解析モデル
（容器内圧＋ボルト初期締付け力作用時）

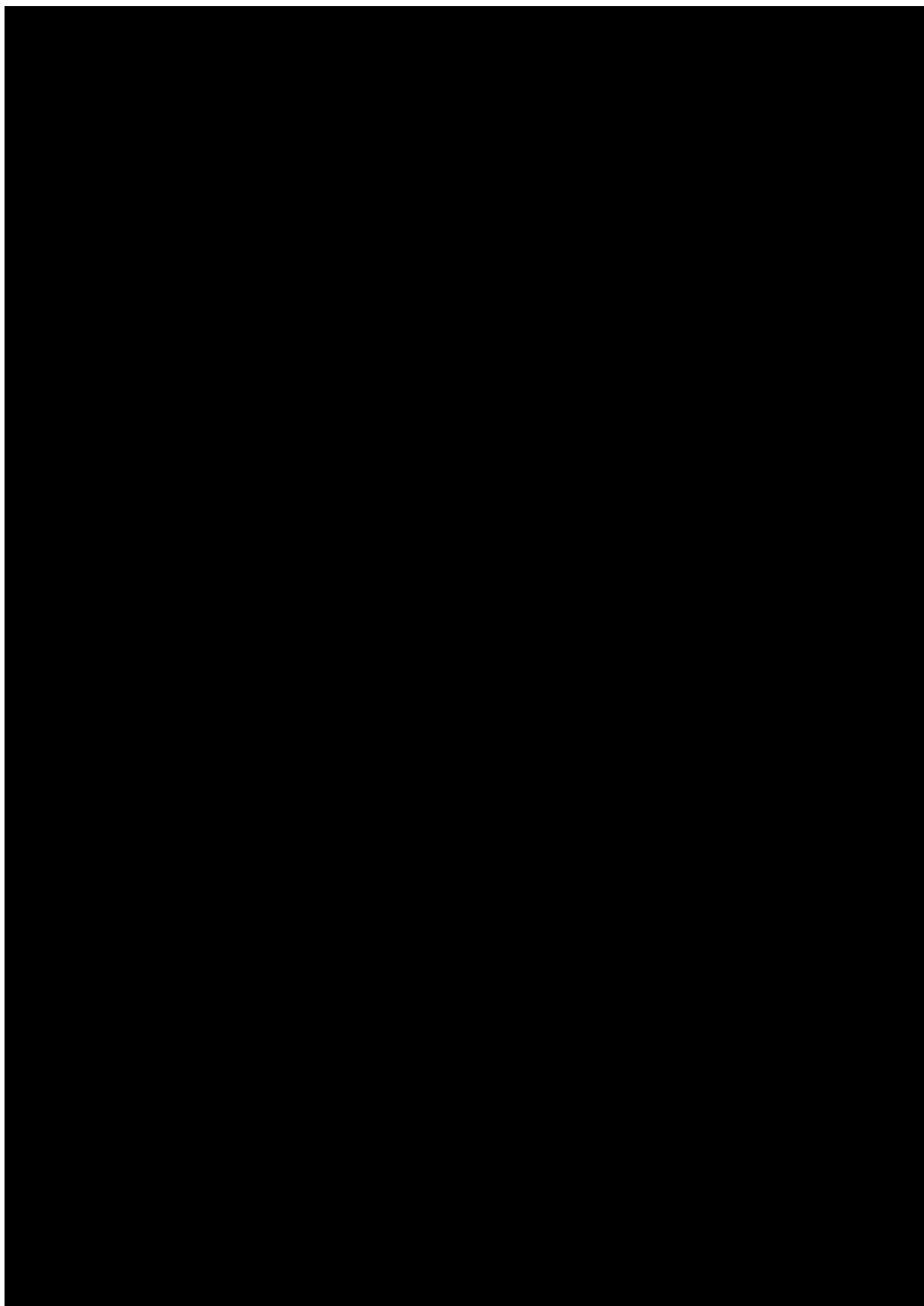


図 1－3－8 破損燃料用輸送容器（7体）の解析モデル
（キャスク固定治具旋回受け保護バンパへの衝突時：自重作用時）

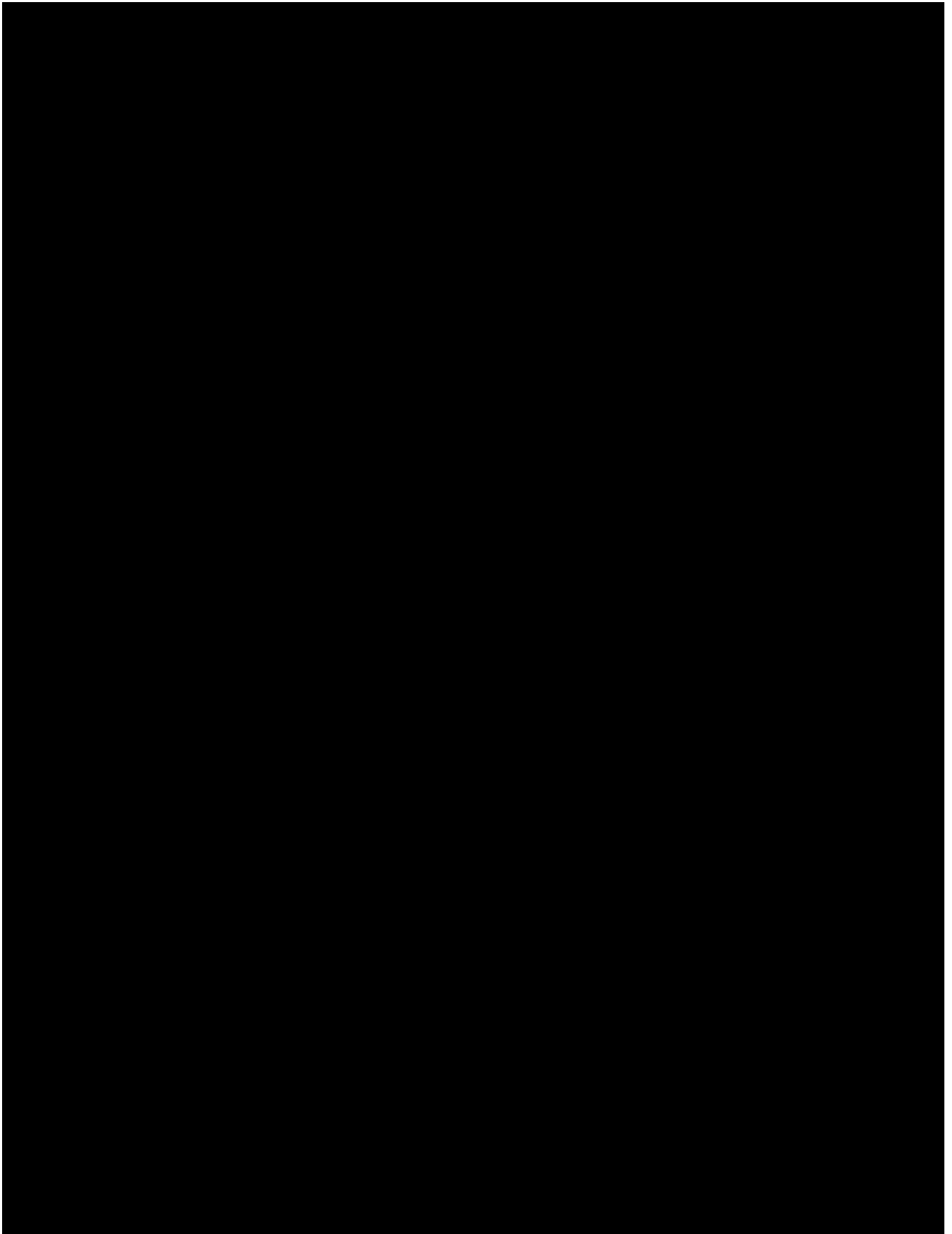


図 1－3－9 破損燃料用輸送容器（7 体）の解析モデル
（キャスク固定治具旋回受け保護バンパへの衝突時：衝突時荷重作用時）

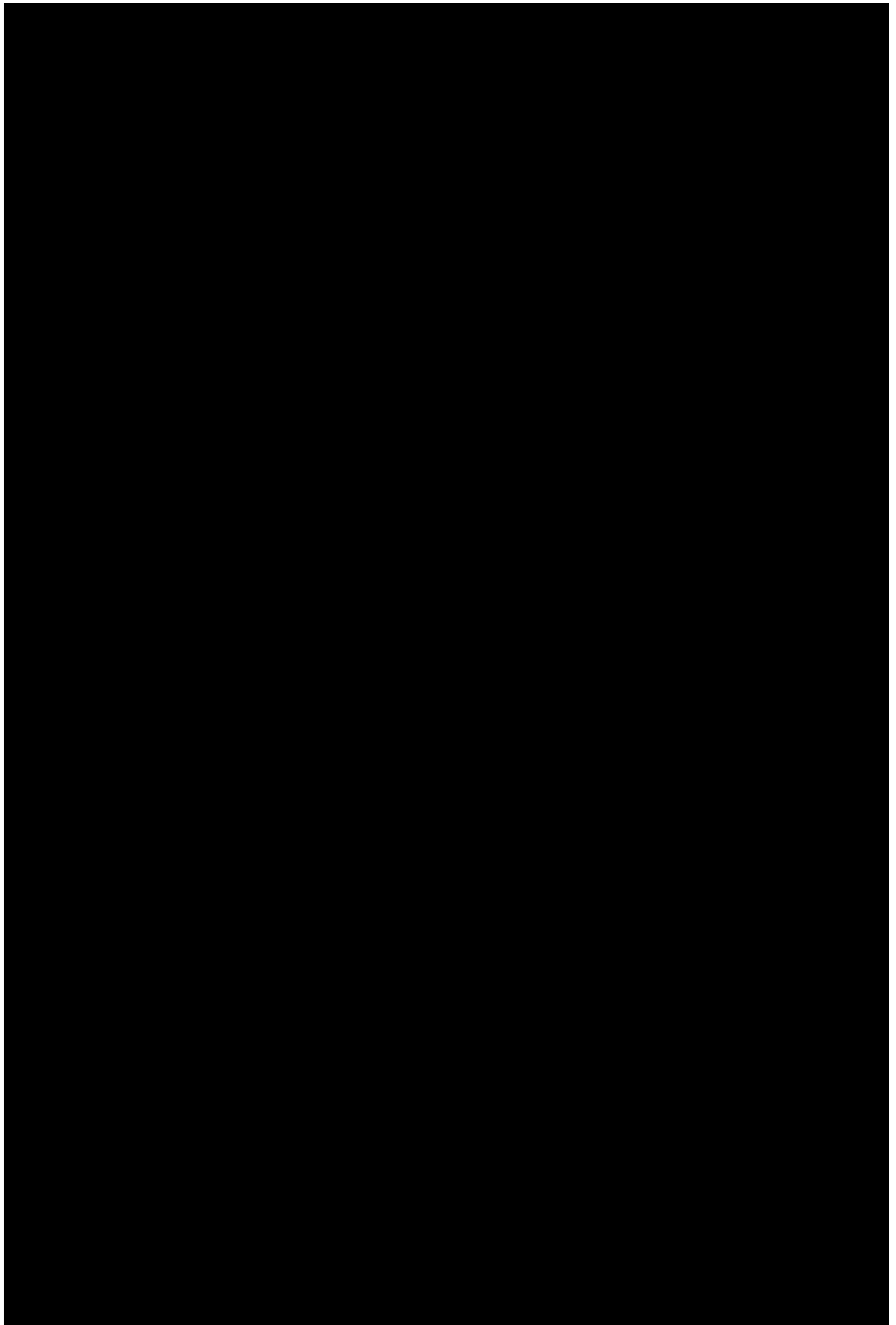


図 1－3－10 破損燃料用輸送容器（7 体）の解析モデル
（熱荷重作用時，燃料健全時）

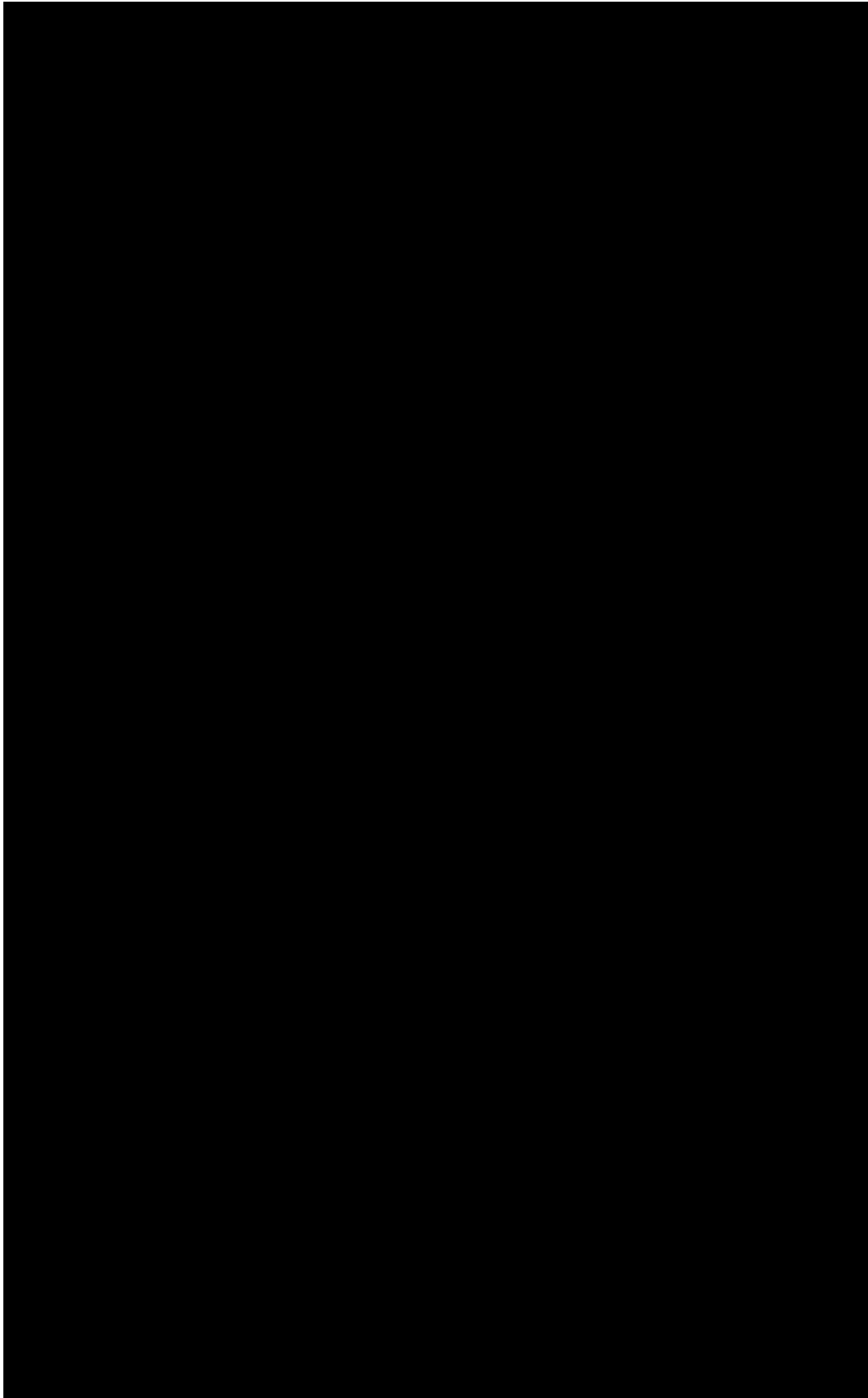


図 1－3－1 1 破損燃料用輸送容器（7体）の温度分布（縦置き時，燃料健全時）

1.3.5.2. バスケット

バスケットの応力評価箇所を図 1-3-12 に示す。荷重条件は表 1-3-5 に示したとおりである。

(1) 設計条件

バスケットには、バスケット、収納缶、使用済燃料集合体及びバスケット格子内部の水の質量に、キャスク固定治具旋回受け保護バンパの衝突時の加速度、

G_x : 図 1-3-12 に示す x 方向の加速度 ($=0\text{m/s}^2$)

G_y : 図 1-3-12 に示す y 方向の加速度 ($=29.42\text{m/s}^2$)

G_z : 図 1-3-12 に示す z 方向の加速度 ($=9.807\text{m/s}^2$)

が付加されることによる荷重が発生する。

① 一次一般膜応力

最大応力が発生する箇所は、バスケットの応力評価箇所の図 1-3-12 の評価点①である。評価点①の一次一般膜応力(P_m)は、次式で計算する。

$$P_m = \frac{m_1 \cdot G_y}{A_1}$$

ここで、

m_1 : 評価点①に作用する質量 ()

A_1 : 評価点①の断面積 ()

② 一次膜応力+一次曲げ応力

最大応力が発生する箇所は、バスケットの応力評価箇所の図 1-3-12 の評価点④である。

(a) x 方向の荷重による応力

x 方向加速度 (G_x) により発生する応力は、評価点④における枠板の自重による圧縮応力のみであり無視できる。

(b) y 方向の荷重による応力

評価点④には、y 方向の荷重により y 方向の垂直応力（支圧応力） σ_{y4y} が発生し、次式で計算される。

$$\sigma_{y4y} = -\frac{m_{y4} \cdot G_y}{A_{y4}}$$

ここで、

m_{y4} : y 方向加速度作用時に評価点④で支持する質量 ()

A_{y4} : 評価点④の y 方向荷重支持面積 ()

$$\sigma_{z4y} = \frac{M_{y4}}{Z_{y4}}$$
$$M_{y4} = \frac{m_{y4} \times G_y \times \ell_{4s}}{8}$$
$$\sigma_{z4z} = -\frac{m_{z4} \cdot G_z}{A_{z4}}$$

である。評価点⑤の平均せん断応力(τ)は、次式で計算する。

$$\tau = \frac{m_5 \cdot G_y}{A_5}$$

ここで、

m_5 ：評価点⑤に作用する質量 ()

A_5 ：評価点⑤の断面積 ()

③ 平均支圧応力

最大応力が発生する箇所はバスケットの応力評価箇所の図 1-3-12 の評価点①である。評価点①の平均支圧応力(σ_b)の計算方法は、一次応力と同様である。

④ 軸圧縮応力

(a) バスケット長手方向

最大応力が発生する箇所はバスケットの応力評価箇所の図 1-3-12 の評価点①～④である。評価点①～④の軸圧縮応力(σ_c)の計算方法は、「(1) ② (c) z 方向の荷重による応力」と同様である。

(b) バスケット長手方向以外

最大応力が発生する箇所はバスケットの応力評価箇所の図 1-3-12 の評価点①である。評価点①の軸圧縮応力(σ_b)の計算方法は、一次応力と同様である。

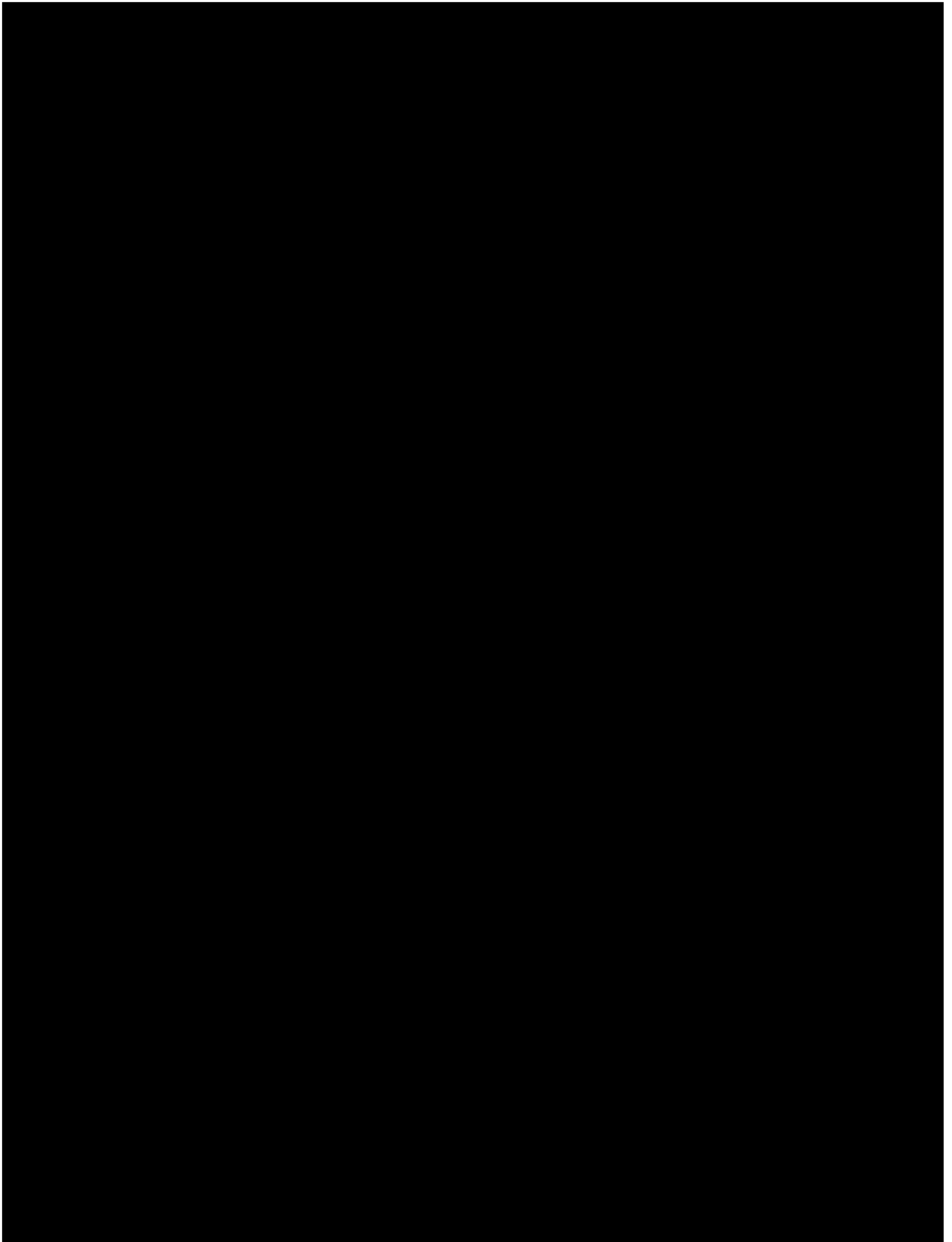


図 1－3－1 2 バスケットの応力評価箇所

1.3.6. 評価結果

評価結果を表1-3-6～表1-3-10に示す。なお、評価結果は「添付資料-2-1-2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書(3号機) 1.3.6. 評価結果 表1-3-15～表1-3-19」の計算値と比較し最大となるものを採用し記載している。いずれも、許容応力に対して十分に余裕がある。このため、破損燃料用輸送容器(7体)の構造健全性は維持される。

表 1－3－6 容器本体及び蓋の評価結果（胴、底板、蓋）（1/2）

（単位：MPa）

部位	材料	設計事象	一次一般膜応力 (P _m)		一次局部膜応力 (P _L)		一次膜＋曲げ応力 (P _L ＋P _b)		一次一般膜＋曲げ応力 (P _m ＋P _b)		一次＋二次応力 (P _L ＋P _b ＋Q)	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
胴 中央部	ASTM A350M Gr. LF5 Cl. 1	設計条件	8※ ¹	123	—	—	9※ ¹	184	—	—	—	—
		I，Ⅱ	—	—	—	—	—	—	—	—	9※ ¹	369
底板 中央部		設計条件	5※ ¹	123	—	—	10※ ¹	184	—	—	—	—
		I，Ⅱ	—	—	—	—	—	—	—	—	21※ ¹	369
底板 外周部		設計条件	—	—	7	184	20	184	—	—	—	—
		I，Ⅱ	—	—	—	—	—	—	—	—	25	369
胴 下端部		設計条件	—	—	13※ ¹	184	23※ ¹	184	—	—	—	—
		I，Ⅱ	—	—	—	—	—	—	—	—	17※ ¹	369
底部中性子 遮蔽体外周部		設計条件	—	—	29	184	63	184	—	—	—	—
		I，Ⅱ	—	—	—	—	—	—	—	—	73	369
上部トラニオン 取付け部		設計条件	—	—	12	184	22※ ¹	184	—	—	—	—
		I，Ⅱ	—	—	—	—	—	—	—	—	21※ ¹	369
下部トラニオン 取付け部		設計条件	—	—	18※ ¹	184	32※ ¹	184	—	—	—	—
		I，Ⅱ	—	—	—	—	—	—	—	—	32※ ¹	369

※1：「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3号機） 1.3.6. 評価結果 表1－3－15～表1－3－19」を採用

表 1－3－6 容器本体及び蓋の評価結果（胴，底板，蓋）（2/2）

（単位：MPa）

部位	材料	設計事象	一次一般膜応力 (P _m)		一次局部膜応力 (P _L)		一次膜＋曲げ応力 (P _L ＋P _b)		一次一般膜＋曲げ応力 (P _m ＋P _b)		一次＋二次応力 (P _L ＋P _b ＋Q)	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
一次蓋 中央部	SUSF304	設計条件	3※ ¹	137	—	—	9※ ¹	205	—	—	—	—
		I，Ⅱ	—	—	—	—	—	—	—	—	4※ ¹	411
一次蓋 フランジ部		設計条件	—	—	7	205	9※ ¹	205	—	—	—	—
		I，Ⅱ	—	—	—	—	—	—	—	—	8※ ¹	411

※ 1：「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3号機） 1.3.6. 評価結果 表 1－3－1 5
～表 1－3－1 9」を採用

表 1-3-7 容器本体及び蓋の評価結果（ポートカバー）

（単位：MPa）

部位	材料	設計事象	一次一般膜応力 (P_m)		一次膜＋曲げ応力 (P_L+P_b)		一次一般膜＋曲げ応力 (P_m+P_b)		一次＋二次応力 (P_L+P_b+Q)	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
ポートカバー	SUS304	設計条件	2 ^{※1}	137	17 ^{※1}	205	—	—	—	—
		I, II	—	—	—	—	—	—	17 ^{※1}	411

※1：「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3号機） 1.3.6. 評価結果 表1-3-15～表1-3-19」を採用

表 1-3-8 容器本体及び蓋の評価結果（ボルト）

（単位：MPa）

部位	材料	設計事象	平均引張応力(σ _m)		平均引張応力+曲げ応力(σ _m +σ _b)	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力
一次蓋ボルト	SUS630 H1150	設計条件	101※ ¹	216	—	—
		I , II	322※ ²	432	352※ ²	648
ポートカバーボルト		設計条件	39※ ¹	216	—	—
		I , II	227※ ¹	432	229※ ¹	648

※1：「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3号機） 1.3.6. 評価結果 表1-3-15～表1-3-19」を採用

※2：「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3号機）」の評価事象も含めた評価を行い、かつボルト初期締付力を変更した計算値である。

表 1－3－9 容器本体及び蓋の評価結果（平均支圧応力及び圧縮応力）

（単位：MPa）

部位	設計事象	平均支圧応力（ σ_b ）		圧縮応力（ σ_c ）	
		計算値	許容応力	計算値	許容応力
底板	I，Ⅱ	2※ ¹	184	—	—
胴	I，Ⅱ	—	—	7※ ¹	95

※ 1：「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3号機） 1.3.6. 評価結果
表 1－3－15～表 1－3－19」を採用

表 1-3-10 バスケットの評価結果

(単位：MPa)

部 位	応力の種類		設計事象				許容応力
			設計条件		Ⅰ，Ⅱ		
			計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	
バス ケ ット	一次一般膜応力 (P _m)		52※ ¹	②	—	—	133
	一次一般膜＋一次曲げ応力 (P _m +P _b)		159※ ¹	③	—	—	199
	一次＋二次応力 (P _m +P _b +Q)		—	—	159※ ¹	③	399
	平均せん断応力 (τ)		—	—	1	⑤	79
	平均支圧応力 (σ _b)		—	—	52※ ¹	②	150
	軸圧縮応力 (σ _c)	バスケット 長手方向	—	—	5※ ¹	—	34
		上記以外	—	—	52※ ¹	②	84

※1：「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3号機） 1.3.6. 評価結果 表 1-3-15～表 1-3-19」を採用

構造強度計算に用いるコード（ABAQUS）について

1. 概要

ABAQUS コードは米国 Hibbitt, Karlsson&Sorensen, Ins. (HKS 社) で開発された有限要素法に基づく応力・座屈解析等の汎用解析コードであり，輸送容器の応力解析等に広く利用されている。

2. 機能

ABAQUS コードは，応力解析に際して以下の機能を有している。

- ① 定常，非定常の弾性，弾塑性のいずれの解も得ることができる。
- ② 材料特性として時間依存，歪の履歴依存並びに等方性・異方性等を考慮することができる。
- ③ モデルの形状は一次元～三次元，又は連続体についても取り扱うことができる。
- ④ 伝熱解析結果をそのまま境界条件として熱応力解析に用いることが可能である。
- ⑤ 荷重条件として集中荷重，分布荷重，モーメント，加速度力（慣性力），圧力，遠心力及びコリオリ力等が取り扱える。また，これらの条件の時間依存，線形変化に対しても対応可能である。

3. 解析フロー

ABAQUS コードの解析フローを図 1－3－13 に示す。

4. 使用実績

ABAQUS コードは，これまで多くの応力解析に対し使用実績がある。

5. 検証方法

理論値との比較による検証が実施されていることを確認している。

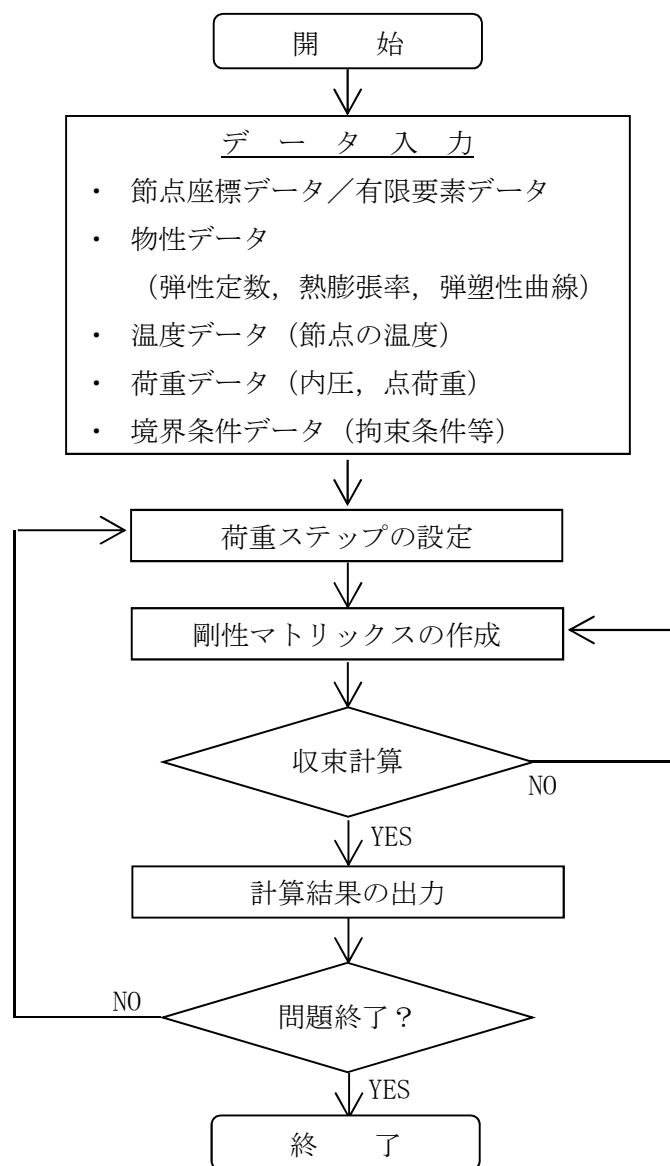


図 1-3-13 ABAQUS コードの応力解析フロー図

1.4. 密封機能

1.4.1. 基本的な考え方

破損燃料用輸送容器（7 体）の密封は容器本体及び一次蓋より構成される密封容器とこれに付属するポート部のカバーから構成される。容器本体と一次蓋，各ポートカバーのガスケットにはゴム製Ｏリングが使用されている。一次蓋で構成される破損燃料用輸送容器（7 体）の密封境界を図 1－4－1 に示す。

また，一次蓋を覆う形で二次蓋を容器本体に取付ける構造となっており，容器本体と二次蓋のガスケットはゴム製Ｏリングが使用されている。

密封機能の評価にあたっては，構造強度評価結果，除熱機能評価結果，容器構造から，破損燃料用輸送容器（7 体）の密封機能が維持されることを確認する。

1.4.2. 評価結果

(1) 構造強度評価結果

1.3 項に示したとおり，構造強度評価から破損燃料用輸送容器（7 体）の密封境界を構成する胴，底板，一次蓋，一次蓋ボルト，ポートカバー及びポートカバーボルトは想定される荷重条件に対して十分な強度を有しており，密封境界の構造健全性に問題がないことが確認されている。

(2) 除熱評価結果

表 1－4－1 に示すとおり，2 号機燃料を包絡する燃料条件は，既存評価の「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3 号機） 1.4. 除熱機能」に示される 3 号機燃料を包絡する燃料条件に対して燃焼度が小さく，冷却期間が長いことから，既存評価の評価条件に包絡され，既存評価が適用可能であり密封境界の熱的健全性に問題ないことが確認されている。

表 1－4－1 既存評価における燃料条件の比較

	既存評価	本評価
燃料タイプ	9×9 燃料（A 型）	9×9 燃料（B 型）
燃焼度(MWd/t)	52,000	49,000
冷却期間（日）	1,716	4,946※
収納体数（体）	7	7

※：2024 年 4 月 1 日時点での冷却期間

(3) 容器構造

破損燃料用輸送容器（7 体）の密封境界を構成する一次蓋及び各ポートカバーは，ガスケットにゴム製のＯリングを使用し，複数のボルトで容器本体に締付ける構造である。

各ポートカバーは燃料装填前に規定のトルクで締付け、一次蓋は燃料装填後に容器本体に仮締めして除染ピットに移動し、規定のトルクで締付け後、気密漏えい試験を実施して密封機能を担保する。

(4) まとめ

以上から、破損燃料用輸送容器（7 体）の密封機能は維持される。

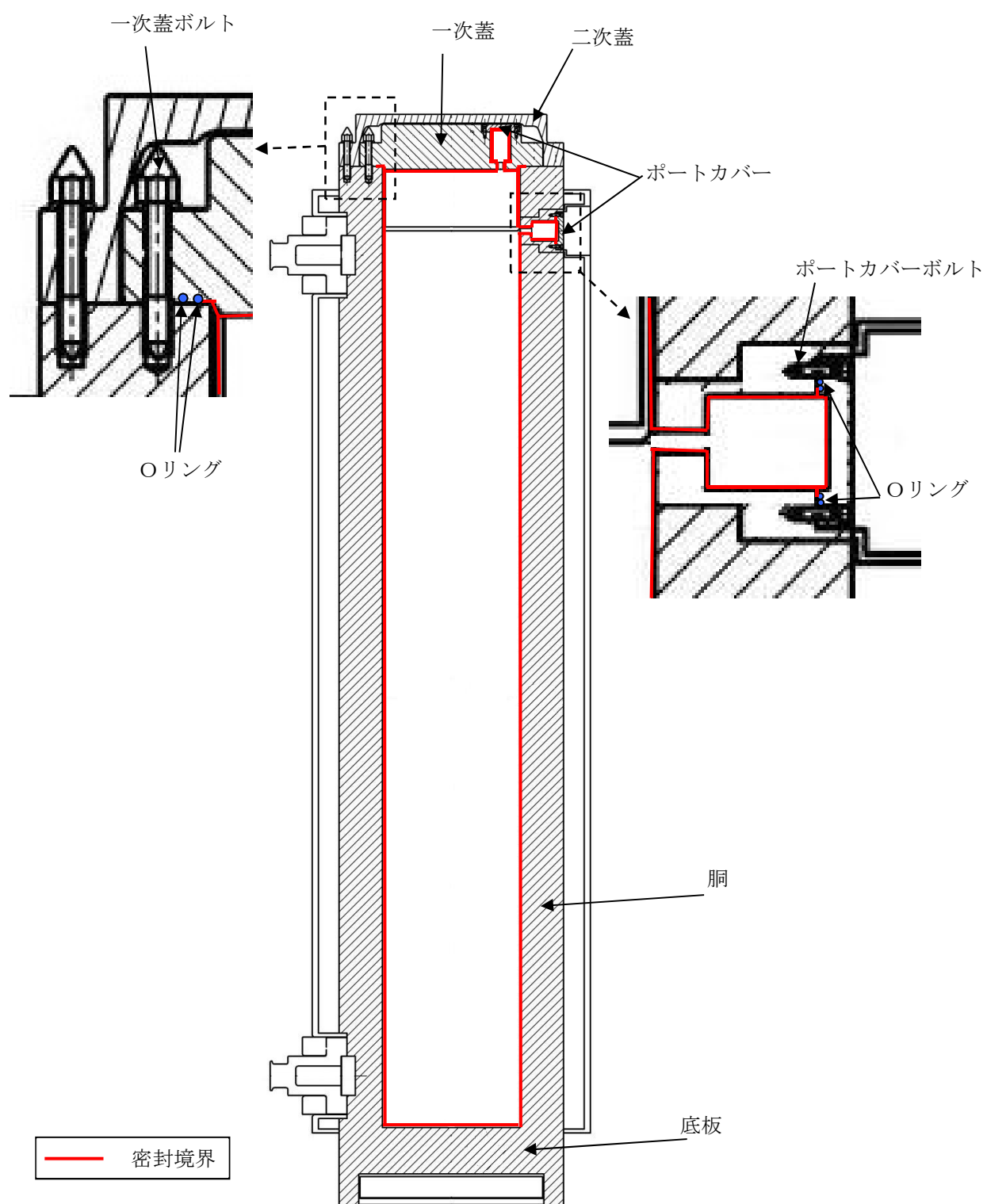


図 1 - 4 - 1 一次蓋で構成する容器密封境界

1.5. 破損燃料用輸送容器（7 体）の落下

1.5.1. 原因

破損燃料用輸送容器（7 体）の取扱い中に、何らかの原因で破損燃料用輸送容器（7 体）が落下して密封境界が破損し、放射性物質が環境に放出される。

1.5.2. 発生防止対策

破損燃料用輸送容器（7 体）の落下を防止するために、次のような設計及び手順の対策を講じる。

- (1) クレーン主巻フックは二重のワイヤーロープで保持する構造とする。
- (2) クレーン巻上装置は電源断時にスプリングリターン式ブレーキで保持する構造とする。
- (3) クレーン主巻フックと吊具，吊具と構内用輸送容器の取付けを二重化する。
- (4) 取付け作業後の取付け状態を ITV にて確認し，外れ止めを取り付ける。
- (5) 作業開始前にクレーン及び吊具の事前点検を実施する。
- (6) 作業手順書を整備し，作業員への教育訓練を行う。

1.5.3. 核分裂生成物の放出量及び線量の評価

核分裂生成物の放出量及び線量の評価は「別冊 2 8 2 号機 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備に係る補足説明」を参照。

2. 別添

別添－1 破損燃料用輸送容器（7 体）の保守について

「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3 号機）別添－2 3 号機構内用輸送容器の保守について」を参照。

構内輸送時の措置に関する説明書（4号機）

1. 構内輸送の概要

第4号機の使用済燃料プールに貯蔵されている燃料は、使用済燃料プールで燃料取扱機またはクレーンを使用して構内用輸送容器に装填する。燃料を装填した構内用輸送容器はクレーンを使用して燃料取り出し用カバーから吊り下ろし、輸送車両に積載し、共用プールに向けて構内輸送する。構内用輸送容器は、福島第一原子力発電所に使用済燃料運搬用容器として設置され、これまで第4号機から共用プールへの使用済燃料の構内輸送に使用している使用済燃料輸送容器（NFT-22B 型）、およびこれまで第1号機および2号機から共用プールへの使用済燃料の構内輸送に使用している使用済燃料輸送容器（NFT-12B 型）を用いる。

2. 構内輸送時に講じる措置

「Ⅲ.3.3.1 放射線防護及び管理」において、管理区域と同等の管理を要する区域として管理対象区域を定義しており、保安規定により4号機から共用プールへの輸送経路も管理対象区域に設定されている。

構内輸送時に講じる措置は、「実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則の第88条（工場又は事業所において行われる運搬）」に準じて実施するが、周辺の雰囲気線量や汚染密度が高いことから、周辺環境によっては運搬物の表面及び表面から1メートルの距離における線量当量率及び運搬物の表面の放射性物質の密度に関しては法令に適合していることを確認できない可能性がある。

このため、運搬物の表面及び表面から1メートルの距離における線量当量率及び運搬物の表面の放射性物質の密度に関しては、作業実施時の最新の保安規定、社内マニュアル等に基づき管理する。

構内輸送時の措置に関する説明書（3号機）

1. 構内輸送の概要

第3号機の使用済燃料プールに貯蔵されている燃料は、使用済燃料プールで燃料取扱機を使用して構内用輸送容器に装填する。燃料を装填した構内用輸送容器はクレーンを使用して燃料取り出し用カバーから吊り下ろし、輸送車両に積載し、共用プールに向けて構内輸送する。構内用輸送容器は、新たに設計・製造した容器（密封式円筒形）を用いる。

2. 構内輸送時に講じる措置

「Ⅲ特定原子力施設の保安 第3編 3.1.1 放射線防護及び3.1.2 放射線管理」において、管理区域と同等の管理を要する区域として管理対象区域を定義しており、「Ⅲ特定原子力施設の保安 第1編 45条」により3号機から共用プールへの輸送経路も管理対象区域に設定されている。

構内輸送時に講じる措置は、「東京電力株式会社福島第一原子力発電所原子炉施設の保安及び特定核燃料物質の防護に関する規則の第14条の2（工場又は事業所において行われる運搬）」に準じて実施する。

構内輸送時の措置に関する説明書（２号機）

1. 構内輸送の概要

第２号機の使用済燃料プールに貯蔵されている燃料は、使用済燃料プールで燃料取扱機を使用して構内用輸送容器に装填する。燃料を装填した構内用輸送容器はクレーンを使用して燃料取り出し用構台から吊り下ろし、輸送車両に積載し、共用プールに向けて構内輸送する。構内用輸送容器は、３号機燃料取り出しの際に使用した容器（密封式円筒形）を用いる。

2. 構内輸送時に講じる措置

「Ⅲ特定原子力施設の保安 第３編 3.1.1 放射線防護及び 3.1.2 放射線管理」において、管理区域と同等の管理を要する区域として管理対象区域を定義しており、「Ⅲ特定原子力施設の保安 第１編 45 条」により２号機から共用プールへの輸送経路も管理対象区域に設定されている。

構内輸送時に講じる措置は、「東京電力株式会社福島第一原子力発電所原子炉施設の保安及び特定核燃料物質の防護に関する規則の第 14 条の 2（工場又は事業所において行われる運搬）」に準じて実施する。

添付資料－８

使用済燃料プールからの燃料取り出し設備に係る補足説明

I 燃料取り出し用カバー換気設備の構造強度及び耐震性について

1 構造強度

燃料取り出し用カバー換気設備は、その用途から換気空調設備に類似すると考える。当該設備は、「JSME S NC-1 発電用原子力設備規格 設計・建設規格」に定められた内包する流体の放射性物質の濃度が $37\text{mBq}/\text{cm}^3$ 未満であることから適用除外の設備と位置付けられるが、系統機能試験等を行い、有意な変形や漏えい、運転状態に異常がないことを確認することで、必要な構造強度を有するものと評価する。

2 耐震性

2.1 基本方針

燃料取り出し用カバーの換気設備は、換気空調系であるCクラス相当と位置付けられることから、一般構造物と同等の耐震性を有する設計とする。

2.2 主要設備の耐震構造

「JEAG4601-1987 原子力発電所耐震設計技術指針」等を準用し、静的震度（1.2Ci）に基づく主要機器の転倒等の評価を行い、Cクラス相当の耐震性を有するものと評価する。

2.3 第4号機燃料取り出し用カバー換気設備の耐震性

2.3.1 送風機・排風機の耐震性

送風機・排風機の耐震性評価として、「JEAG4601-1987 原子力発電所耐震設計技術指針」を準用し、送風機・排風機基礎の溶接部の評価を行った。なお、震度については、耐震設計審査指針上の耐震Cクラス設備に適用される静的地震力に余裕を持たせた $0.36G$ を採用した。基礎の溶接部の許容応力については、供用状態Dにおける許容応力を適用し、溶接部の評価温度は 50°C とした。基礎の溶接部のせん断応力を評価した結果、基礎の溶接部に生じるせん断応力は許容応力以下であり、基礎の溶接部の強度が確保されることを確認した（表1-4参照）。

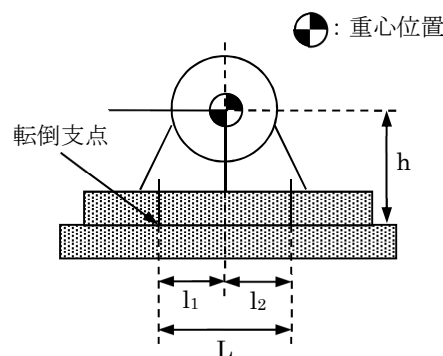


図1-1 送風機・排風機の耐震評価モデル

- ・評価部位：基礎の溶接部
- ・考慮する荷重：地震荷重 / 送風機・排風機振動による荷重
- ・計算に用いる数式

$$\text{鉛直方向のせん断力} \quad Q_v = \frac{W \cdot g \cdot (C_H + C_P) \cdot h + M_p - W \cdot g \cdot (1 - C_P) \cdot l_1}{\frac{1}{2} n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

$$\text{鉛直方向のせん断応力} \quad \tau_v = \frac{Q_v}{A_w}$$

$$\text{水平方向のせん断力} \quad Q_H = W \cdot g \cdot (C_H + C_P)$$

$$\text{水平方向のせん断応力} \quad \tau_H = \frac{Q_H}{n \cdot A_w}$$

W : 据付面に作用する重量

g : 重力加速度 (=9.80665)

h : 据付面から重心までの距離

M_p : 送風機・排風機回転により働くモーメント

※基礎溶接部に M_p は作用しない

l₁ : 送風機・排風機重心と基礎の溶接部間の距離

l₂ : 送風機・排風機重心と基礎の溶接部間の距離 (l₁ ≤ l₂)

n_f : 鉛直方向のせん断力の作用する基礎の溶接部の評価箇所数

n : 基礎の溶接部の箇所数

A_w : 基礎の溶接部の断面積

C_H : 水平方向設計震度

C_P : 送風機・排風機振動による震度

表 1 - 1 送風機緒言

W (kg)	g (m/s ²)	h (mm)	l ₁ (mm)	l ₂ (mm)
2520	9.80665	1068	305	345
n _f	n	A _w (mm ²)	C _H	C _P
2	4	238.6	0.36	0.1
Sy (MPa) ※	Su (MPa) ※	F (MPa) ※		
211	394	114		

※発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) の Sy, Su を 50℃換算による。

表 1－2 排風機緒言

W (kg)	g (m/s ²)	h (mm)	l ₁ (mm)	l ₂ (mm)
3460	9.80665	1130	365	425
n _f	n	A _w (mm ²)	C _H	C _P
2	4	353.6	0.36	0.1
Sy (MPa) ※	Su (MPa) ※	F (MPa) ※		
211	394	114		

※発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) の Sy, Su を 50℃換算による。

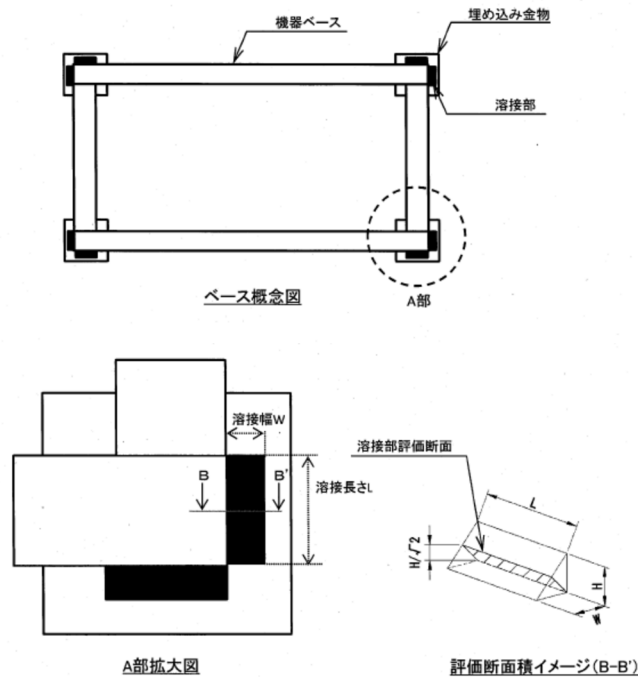


図 1－2 送風機・排風機機器ベース溶接箇所概念図

表 1－3 送風機・排風機機器ベース緒言

機器名称	溶接長さ L (mm)	溶接幅 W (mm)	溶接高さ H (mm)	のど厚 [(H/√2)] (mm)	溶接部 断面積 A _w (mm ²)
送風機	75	4.5	4.5	3.182	238.6
排風機	50	10	10	7.071	353.6

以下に代表として送風機の計算過程を示す。

<算出応力>

$$Q_v = \frac{W \cdot g \cdot (C_H + C_P) \cdot h + M_P - W \cdot g \cdot (1 - C_P) \cdot l_1}{\frac{1}{2} n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

$$= \frac{2520 \times 9.80665 \times (0.36 + 0.0968679) \times 1068 + 0 - 2520 \times 9.80665 \times (1 - 0.0968679) \times 305}{\frac{1}{2} \times 2 \times (305 + 345)} = 8078.40(\text{N})$$

$$\tau_v = \frac{Q_v}{A_w} = \frac{8078.40}{238.649} = 33.8505(\text{MPa}) \rightarrow 34(\text{MPa})$$

$$Q_H = W \cdot g \cdot (C_H + C_P) = 2520 \times 9.80665 \times (0.36 + 0.0968679) = 11290.5(\text{N})$$

$$\tau_H = \frac{Q_H}{n \cdot A_w} = \frac{11290.5}{4 \times 238.649} = 11.8275(\text{MPa}) \rightarrow 12(\text{MPa})$$

鉛直方向のせん断応力 τ_v と水平方向のせん断応力 τ_H の最大値が 34 (MPa) となる。

<許容応力>

許容応力については、発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) による。

F は、1.2Sy と 0.7Su の小さい値の 0.45 倍。

$$\text{許容せん断応力} = \frac{F}{1.5 \times \sqrt{3}} \times 1.5 = \frac{114}{1.5 \times \sqrt{3}} \times 1.5 = 65.8179(\text{MPa}) \rightarrow 65(\text{MPa})$$

表 1－4 送風機・排風機基礎の溶接部の強度評価

評価対象機器	部位	材料	応力種類	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
送風機	基礎の 溶接部	SS400 相当	せん断	34	65
排風機	基礎の 溶接部	SS400 相当	せん断	23	65

2.3.2 フィルタユニットの耐震性

フィルタユニットの耐震性評価として、「JEAG4601-1987 原子力発電所耐震設計技術指針」を準用し、2.3.1 項と同様の方法で基礎の溶接部の評価を行った。なお、震度については、耐震設計審査指針上の耐震 C クラス設備に適用される静的地震力に余裕を持たせた 0.36G を採用した。基礎の溶接部の許容応力については、供用状態 D における許容応力を適用し、溶接部の評価温度は 50℃とした。基礎の溶接部のせん断応力を評価した結果、基礎の溶接部に生じるせん断応力は許容応力以下であり、基礎の溶接部の強度が確保されることを確認した (表 1－9 参照)。

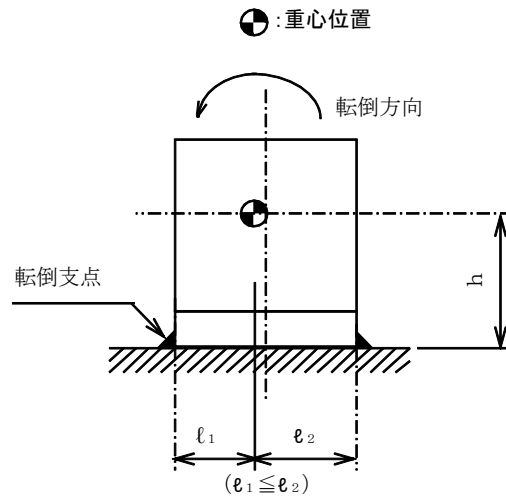


図 1 - 3 フィルタユニットの耐震評価モデル

- ・評価部位：基礎の溶接部
- ・考慮する荷重：地震荷重
- ・計算に用いる数式

$$\text{鉛直方向せん断力 } Q_v = \frac{W \cdot g \cdot C_H \cdot h - W \cdot g \cdot (1 - C_v) \cdot l_1}{n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

$$\text{鉛直方向せん断応力 } \tau_v = \frac{Q_v}{A_w}$$

$$\text{水平方向せん断力 } Q_H = W \cdot g \cdot C_H$$

$$\text{水平方向せん断応力 } \tau_H = \frac{Q_H}{n \cdot A_w}$$

W : 据付面に作用する重量

g : 重力加速度 (=9.80665)

h : 据付面から重心までの距離

l_1 : フィルタユニット重心と基礎の溶接部間の距離

l_2 : フィルタユニット重心と基礎の溶接部間の距離 ($l_1 \leq l_2$)

n_f : 鉛直方向のせん断力の作用する基礎の溶接部の評価箇所数

n : 基礎の溶接部の箇所数

A_w : 基礎の溶接部の断面積

C_H : 水平方向設計震度

C_v : 鉛直方向設計震度

表 1－5 給気フィルタユニット（プレフィルタ）緒言

W(kg)	g(m/s ²)	h(mm)	l ₁ (mm)	l ₂ (mm)
4139	9.80665	1681	1043.4	1856.6
n _f	n	A _w (mm ²)	C _H	C _V
2	4	424.3	0.36	0
Sy(MPa)※	Su(MPa)※	F(MPa)※		
211	394	114		

※発電用原子力設備規格 設計・建設規格（JSME S NC1-2005）の Sy, Su を 50℃換算による。

表 1－6 給気フィルタユニット（高性能粒子フィルタ）緒言

W(kg)	g(m/s ²)	h(mm)	l ₁ (mm)	l ₂ (mm)
3600	9.80665	1567.5	1010	1240
n _f	n	A _w (mm ²)	C _H	C _V
2	4	424.3	0.36	0
Sy(MPa)※	Su(MPa)※	F(MPa)※		
211	394	114		

※発電用原子力設備規格 設計・建設規格（JSME S NC1-2005）の Sy, Su を 50℃換算による。

表 1－7 排気フィルタユニット緒言

W(kg)	g(m/s ²)	h(mm)	l ₁ (mm)	l ₂ (mm)
6215	9.80665	1404	1012	1238
n _f	n	A _w (mm ²)	C _H	C _V
2	4	495.0	0.36	0
Sy(MPa)※	Su(MPa)※	F(MPa)※		
211	394	114		

※発電用原子力設備規格 設計・建設規格（JSME S NC1-2005）の Sy, Su を 50℃換算による。

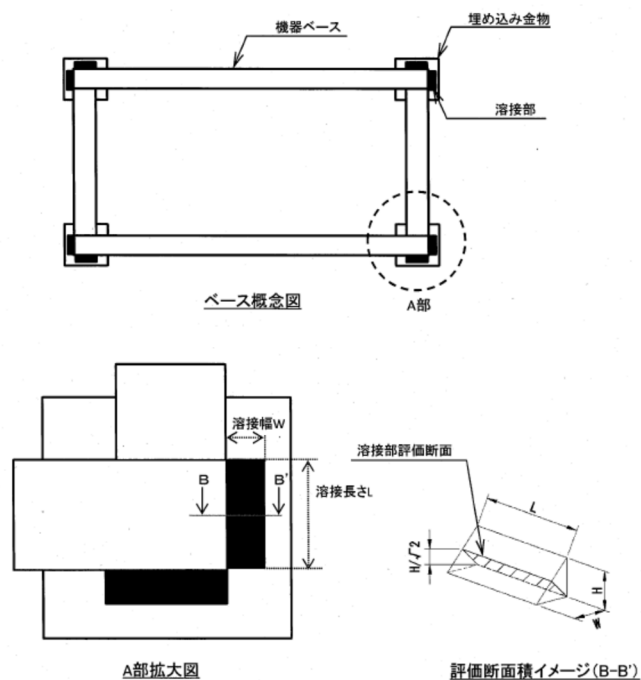


図 1－4 フィルタユニット機器ベース溶接箇所概念図

表 1－8 フィルタユニット機器ベース緒言

機器名称	溶接長さ L (mm)	溶接幅 W (mm)	溶接高さ H (mm)	のど厚 [(H/√2)] (mm)	溶接部 断面積 A _w (mm ²)
給気フィルタユニット (プレフィルタ)	100	6	6	4.243	424.3
給気フィルタユニット (高性能粒子フィルタ)	100	6	6	4.243	424.3
排気フィルタユニット	50	14	14	9.899	495.0

以下に代表として給気フィルタユニット（プレフィルタ）の計算過程を示す。

<計算応力>

$$\begin{aligned}
 Q_v &= \frac{W \cdot g \cdot C_H \cdot h - W \cdot g \cdot (1 - C_v) \cdot l_1}{n_f \cdot (l_1 + l_2)} \\
 &= \frac{4139 \times 9.80665 \times 0.36 \times 1681 - 4139 \times 9.80665 \times (1 - 0) \times 1043.4}{2 \times (1043.4 + 1856.6)} = -3066.9(\text{N})
 \end{aligned}$$

$$\tau_v = \frac{Q_v}{A_w} = \frac{-3066.9}{424.264} = -7.22876(\text{MPa}) \rightarrow -8(\text{MPa})$$

$$Q_H = W \cdot g \cdot C_H = 4139 \times 9.80665 \times 0.36 = 14612.3(\text{N})$$

$$\tau_H = \frac{Q_H}{n \cdot A_w} = \frac{14612.3}{4 \times 424.264} = 8.61039(\text{MPa}) \rightarrow 9(\text{MPa})$$

鉛直方向のせん断応力 τ_v と水平方向のせん断応力 τ_H の最大値が 9 (MPa) となる。

<許容応力>

許容応力については、発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) による。

F は、1.2Sy と 0.7Su の小さい値の 0.45 倍。

$$\text{許容せん断応力} = \frac{F}{1.5 \times \sqrt{3}} \times 1.5 = \frac{114}{1.5 \times \sqrt{3}} \times 1.5 = 65.8179(\text{MPa}) \rightarrow 65(\text{MPa})$$

表 1－9 フィルタユニット基礎の溶接部の強度評価

評価対象機器	部位	材料	応力種類	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
給気フィルタユニット (プレフィルタ)	基礎の 溶接部	SS400 相当	せん断	9	65
給気フィルタユニット (高性能粒子フィルタ)	基礎の 溶接部	SS400 相当	せん断	8	65
排気フィルタユニット	基礎の 溶接部	SS400 相当	せん断	11	65

2.3.3 ダクトの耐震性

ダクトの耐震性評価として、許容座屈曲げモーメント以下となる基準支持間隔の評価を行った。なお、震度については、耐震設計審査指針上の耐震Cクラス設備に適用される静的地震力に余裕を持たせた 0.36G を採用した。ダクトは基準支持間隔(表 1-11)よりも小さい間隔で支持することで耐震性を確保する計画である。

なお、燃料取り出し用カバー内のダクトは、燃料取り出し用カバーのクレーン支持用架構を利用している(添付資料-3-1 図 2.2 参照)。クレーン支持用架構は、添付資料-4-2「燃料取り出し用カバーの構造強度及び耐震性に関する説明書」で、基準地震動 Ss に対する地震応答解析を実施し崩壊しないことを確認していることから、使用済燃料プールへ波及的影響は与えない。

①角ダクトの耐震計算

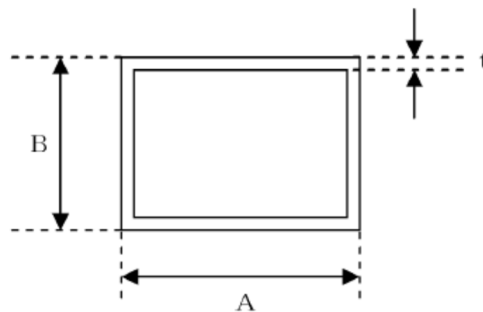


図 1-7 角ダクトの評価モデル

- ・評価部位：角ダクト
- ・考慮する荷重：地震荷重
- ・計算に用いる数式

自重による許容座屈曲げモーメント以下とする基準支持間隔

$$L = \sqrt{\frac{8 \cdot M_X \cdot 1000}{W \cdot g}}$$

地震による許容座屈曲げモーメント以下とする基準支持間隔

$$L = \sqrt{\frac{8 \cdot M_Y \cdot 1000}{W \cdot g} \cdot \frac{1}{C_H}}$$

許容曲げモーメントとの関係は次式となる

$$\frac{M_X}{M_{Xa}} = \frac{M_Y}{M_{Ya}} = 1$$

上記式を解くと

$$\text{基準支持間隔} \quad L = \frac{1}{\sqrt{\frac{W \cdot g}{1000 \cdot 8 \cdot M_{Xa}} + C_H \frac{W \cdot g}{1000 \cdot 8 \cdot M_{Ya}}}}$$

L : 基準支持間隔
 M_x : 水平方向座屈曲げモーメント
 M_{xa} : 水平方向許容座屈曲げモーメント
 M_y : 鉛直方向座屈曲げモーメント
 M_{ya} : 鉛直方向許容座屈曲げモーメント
 W : ダクト単位長さ当たり質量
 g : 重力加速度 (=9.80665)
 C_H : 水平方向設計震度

表 1-10 角ダクトの基準支持間隔

A (mm)	B (mm)	t (mm)	W (kg/m)	M_{xa} (N・mm)	M_{ya} (N・mm)	C_H	L (mm)
1100	1100	1.0	66.3	13371009	13371009	0.36	10998
850	850	1.0	41.0	12835422	12835422	0.36	13703

以下に計算過程の 1 例を示す。

<計算基準支持間隔>

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{1}{\sqrt{\frac{W \cdot g}{1000 \cdot 8 \cdot M_{xa}} + C_H \frac{W \cdot g}{1000 \cdot 8 \cdot M_{ya}}}} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{\frac{66.3 \times 9.80665}{1000 \times 8 \times 13371009} + 0.36 \frac{66.3 \times 9.80665}{1000 \times 8 \times 13371009}}} = 10998.7(\text{mm}) \rightarrow 10998(\text{mm})
 \end{aligned}$$

表 1-11 角ダクトの評価

評価対象ダクト	材料	基準支持間隔 (mm)
1100×1100×1.0t	溶融亜鉛めっき鋼板	10998
850×850×1.0t	溶融亜鉛めっき鋼板	13703

2.4 第3号機燃料取り出し用カバー換気設備の耐震性

2.4.1 排風機の耐震性

排風機の耐震性評価として、「JEAG4601-1987 原子力発電所耐震設計技術指針」を準用し、排風機の基礎ボルト・取付ボルトの評価を行った。なお、震度については、耐震設計審査指針上の耐震Cクラス設備に適用される静的地震力に余裕を持たせた 0.36G を採用した。基礎ボルトの許容荷重及び取付ボルトの許容応力については、評価温度 50℃ とした。基礎ボルト・取付ボルトのせん断・引張を評価した結果、基礎ボルト・取付ボルトに生じる荷重・応力は許容値以下であり、基礎ボルト・取付ボルトの強度が確保されることを確認した（表 1-13, 1-15 参照）。

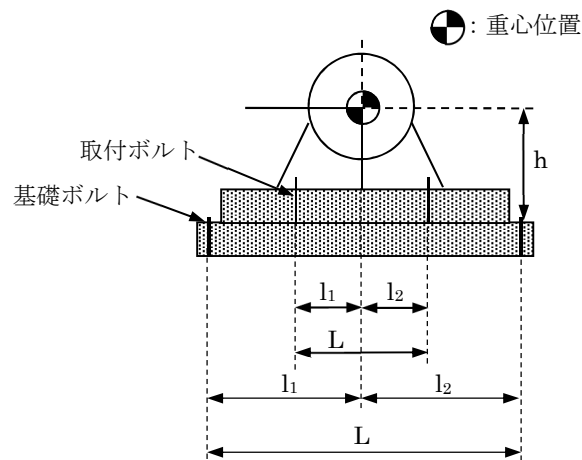


図 1-5 排風機の耐震評価モデル

- ・評価部位：基礎ボルト・取付ボルト
- ・考慮する荷重：地震荷重 / 排風機振動による荷重
- ・計算に用いる数式

$$\text{引張力} \quad Q_v = \frac{W \cdot g \cdot (C_H + C_P) \cdot h + M_p - W \cdot g \cdot (1 - C_P) \cdot l_1}{n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

$$\text{引張応力} \quad \tau_v = \frac{Q_v}{A_b}$$

$$\text{せん断力} \quad Q_H = W \cdot g \cdot (C_H + C_P)$$

$$\text{せん断応力} \quad \tau_H = \frac{Q_H}{n \cdot A_b}$$

W : 据付面に作用する重量

g : 重力加速度 (=9.80665)

h : 据付面から重心までの距離

M_p : 排風機回転により働くモーメント

※基礎ボルト・取付ボルト部に M_p は作用しない

- l_1 : 排風機重心と基礎ボルト・取付ボルト間の距離
 l_2 : 排風機重心と基礎ボルト・取付ボルト間の距離 ($l_1 \leq l_2$)
 n_f : 評価上引張を受けるボルト本数
 n : 全ボルト本数
 A_b : 基礎ボルト・取付ボルトの断面積
 C_H : 水平方向設計震度
 C_P : 排風機振動による震度

①排風機基礎ボルトの耐震計算

表 1－1 2 排風機基礎ボルト緒言

W(kg)	g(m/s ²)	h(mm)	l_1 (mm)	l_2 (mm)
4910	9.80665	2378	1525	1675
n_f	n	A_b (mm ²)	C_H	C_P
1	8	201.1	0.36	0.11

以下に計算過程を示す。

<計算荷重>

$$Q_v = \frac{W \cdot g \cdot (C_H + C_P) \cdot h + M_p - W \cdot g \cdot (1 - C_P) \cdot l_1}{n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

$$= \frac{4910 \times 9.80665 \times (0.36 + 0.11) \times 2378 + 0 - 4910 \times 9.80665 \times (1 - 0.11) \times 1525}{1 \times (1525 + 1675)} = -3605.1 \text{ (N)}$$

$$Q_H = W \cdot g \cdot (C_H + C_P) = 4910 \times 9.80665 \times (0.36 + 0.11) = 22630 \text{ (N)}$$

引張荷重 Q_v はマイナスとなるため作用しない。

せん断荷重 Q_H は 22630 (N) となり、ボルト 8 本で取り付けられていることから、ボルト 1 本当たり荷重は 2829 (N) となる。

<許容荷重>

許容荷重（せん断：21300 (N)，引張：23900 (N)）は設計値

表 1－1 3 排風機の基礎ボルトの強度評価

評価対象 機器	部位※	材料	評価 項目	算出荷重(N)/本		許容荷重(N)/本※	
				せん断	引張	せん断	引張
排風機	基礎 ボルト	SS400	荷重	2829	作用 しない	21300	23900

※基礎ボルトの評価部位及び許容荷重は、ケミカルアンカー部を示す。

②排風機取付ボルトの耐震計算

表 1－1 4 排風機取付ボルト緒言

W (kg)	g (m/s ²)	h (mm)	l ₁ (mm)	l ₂ (mm)
2360	9. 80665	910	532	648
n _f	n	A _b (mm ²)	C _H	C _P
5	10	380. 1	0. 36	0. 11
Sy (MPa) ※	Su (MPa) ※	F (MPa) ※		
231	394	231		

※発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) の Sy, Su を 50℃換算による。

以下に計算過程を示す。

<計算応力>

$$Q_v = \frac{W \cdot g \cdot (C_H + C_P) \cdot h + M_P - W \cdot g \cdot (1 - C_P) \cdot l_1}{n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

$$= \frac{2360 \times 9. 80665 \times (0. 36 + 0. 11) \times 910 + 0 - 2360 \times 9. 80665 \times (1 - 0. 11) \times 532}{5 \times (532 + 648)} = -179. 57 \text{ (N)}$$

$$\tau_v = \frac{Q_v}{A_b} = \frac{-179. 57}{380. 1} = -0. 47245 \text{ (MPa)}$$

$$Q_H = W \cdot g \cdot (C_H + C_P) = 2360 \times 9. 80665 \times (0. 36 + 0. 11) = 10877 \text{ (N)}$$

$$\tau_H = \frac{Q_H}{n \cdot A_b} = \frac{10877}{10 \times 380. 1} = 2. 8617 \text{ (MPa)} \rightarrow 3 \text{ (MPa)}$$

引張応力 τ_v はマイナスとなるため作用しない。

せん断応力 τ_H は、3 (MPa) となる。

<許容応力>

許容応力については、発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (JSME S NC1-2005) による。

F は、Sy と 0. 7Su の小さい値。

$$\text{許容引張応力} = \frac{F}{2} \times 1. 5 = \frac{231}{2} \times 1. 5 = 173. 2 \text{ (MPa)} \rightarrow 173 \text{ (MPa)}$$

$$\text{許容せん断応力} = \frac{F}{1. 5 \times \sqrt{3}} \times 1. 5 = \frac{231}{1. 5 \times \sqrt{3}} \times 1. 5 = 133. 3 \text{ (MPa)} \rightarrow 133 \text{ (MPa)}$$

表 1－15 排風機の取付ボルトの強度評価

評価対象 機器	部位	材料	評価 項目	算出応力 (MPa)		許容応力 (MPa)	
				せん断	引張	せん断	引張
排風機	取付 ボルト	SS400	応力	3	作用 しない	133	173

2.4.2 フィルタユニットの耐震性

フィルタユニットの耐震性評価として、「JEAG4601-1987 原子力発電所耐震設計技術指針」を準用し、2.4.1 項と同様の方法で基礎ボルト・取付ボルトの評価を行った。なお、震度については、耐震設計審査指針上の耐震Cクラス設備に適用される静的地震力に余裕を持たせた 0.36G を採用した。基礎ボルトの許容荷重及び取付ボルトの許容応力については、評価温度 50℃とした。基礎ボルト・取付ボルトのせん断・引張を評価した結果、基礎ボルト・取付ボルトに生じる荷重及び応力は許容値以下であり、基礎ボルト・取付ボルトの強度が確保されることを確認した（表 1－17，1－19 参照）。

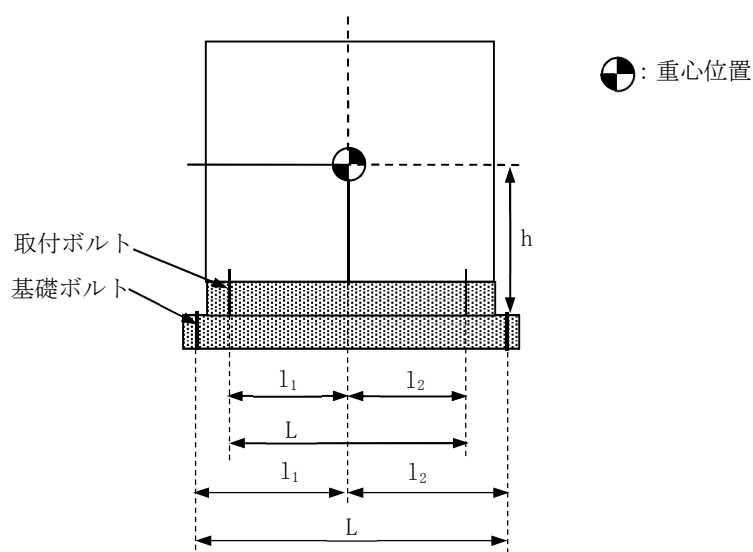


図 1－6 フィルタユニットの耐震評価モデル

- ・評価部位：基礎ボルト・取付ボルト
- ・考慮する荷重：地震荷重
- ・計算に用いる数式

$$\text{引張力} \quad Q_v = \frac{W \cdot g \cdot C_H \cdot h - W \cdot g \cdot (1 - C_v) \cdot l_1}{n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

$$\text{引張応力} \quad \tau_v = \frac{Q_v}{A_b}$$

$$\text{せん断力} \quad Q_H = W \cdot g \cdot C_H$$

$$\text{せん断応力} \quad \tau_H = \frac{Q_H}{n \cdot A_b}$$

W : 据付面に作用する重量

g : 重力加速度 (=9.80665)

h : 据付面から重心までの距離

l_1 : フィルタユニット重心と基礎ボルト・取付ボルト間の距離

l_2 : フィルタユニット重心と基礎ボルト・取付ボルト間の距離

$$(l_1 \leq l_2)$$

n_f : 評価上引張を受けるボルト本数

n : 全ボルト本数

A_b : 基礎ボルト・取付ボルトの断面積

C_H : 水平方向設計震度

C_V : 鉛直方向設計震度

① フィルタユニットの基礎ボルトの耐震計算

表 1-16 フィルタユニットの基礎ボルト緒言

W (kg)	g (m/s ²)	h (mm)	l_1 (mm)	l_2 (mm)
2090	9.80665	1380	509	691
n_f	n	A_b (mm ²)	C_H	C_V
1	5	201.1	0.36	0

以下に計算過程を示す。

<計算荷重>

$$Q_v = \frac{W \cdot g \cdot C_H \cdot h - W \cdot g \cdot (1 - C_v) \cdot l_1}{n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

$$= \frac{2090 \times 9.80665 \times 0.36 \times 1380 - 2090 \times 9.80665 \times (1 - 0) \times 509}{1 \times (509 + 691)} = -208.37 \text{ (N)}$$

$$Q_H = W \cdot g \cdot C_H = 2090 \times 9.80665 \times 0.36 = 7378.5 \text{ (N)}$$

引張荷重 Q_v はマイナスとなるため作用しない。

せん断荷重 Q_H は 7378.5 (N) となり、ボルト 5 本で取り付けられていることから、ボルト 1 本当たり荷重は 1476 (N) となる。

<許容荷重>

許容荷重 (せん断 : 21300 (N), 引張 : 23900 (N)) は設計値

表 1-17 フィルタユニットの基礎ボルトの強度評価

評価対象機器	部位※	材料	評価項目	算出荷重(N)/本		許容荷重(N)/本※	
				せん断	引張	せん断	引張
排気フィルタユニット	基礎ボルト	SS400	荷重	1476	作用しない	21300	23900

※基礎ボルトの評価部位及び許容荷重は、ケミカルアンカー部を示す。

②フィルタユニットの取付ボルトの耐震計算

表 1-18 フィルタユニットの取付ボルト緒言

W(kg)	g(m/s ²)	h(mm)	l ₁ (mm)	l ₂ (mm)
1150	9.80665	1200	272	386
n _f	n	A _b (mm ²)	C _H	C _V
4	8	113.1	0.36	0
Sy(MPa)※	Su(MPa)※	F(MPa)※		
241	394	241		

※発電用原子力設備規格 設計・建設規格(JSME S NC1-2005)のSy, Suを50℃換算による。

以下に計算過程を示す。

<計算応力>

$$Q_v = \frac{W \cdot g \cdot C_H \cdot h - W \cdot g \cdot (1 - C_v) \cdot l_1}{n_f \cdot (l_1 + l_2)}$$

$$= \frac{1150 \times 9.80665 \times 0.36 \times 1200 - 1150 \times 9.80665 \times (1 - 0) \times 272}{4 \times (272 + 386)} = 685.57 \text{ (N)}$$

$$\tau_v = \frac{Q_v}{A_b} = \frac{685.57}{113.1} = 6.0616 \text{ (MPa)} \rightarrow 7 \text{ (MPa)}$$

$$Q_H = W \cdot g \cdot C_H = 1150 \times 9.80665 \times 0.36 = 4059.9 \text{ (N)}$$

$$\tau_H = \frac{Q_H}{n \cdot A_b} = \frac{4059.9}{8 \times 113.1} = 4.4871 \text{ (MPa)} \rightarrow 5 \text{ (MPa)}$$

引張応力 τ_v は、7(MPa)となる。

せん断応力 τ_H は、5(MPa)となる。

<許容応力>

許容応力については、発電用原子力設備規格 設計・建設規格(JSME S NC1-2005)による。

F は、 S_y と $0.7S_u$ の小さい値。

$$\text{許容引張応力} = \frac{F}{2} \times 1.5 = \frac{241}{2} \times 1.5 = 180.7 \text{ (MPa)} \rightarrow 180 \text{ (MPa)}$$

$$\text{許容せん断応力} = \frac{F}{1.5 \times \sqrt{3}} \times 1.5 = \frac{241}{1.5 \times \sqrt{3}} \times 1.5 = 139.1 \text{ (MPa)} \rightarrow 139 \text{ (MPa)}$$

表 1－19 フィルタユニットの取付ボルトの強度評価

評価対象機器	部位	材料	評価項目	算出応力 (MPa)		許容応力 (MPa)	
				せん断	引張	せん断	引張
排気フィルタユニット	取付ボルト	SS400	応力	5	7	139	180

2.4.3 ダクトの耐震性

ダクトの耐震性評価として、許容座屈曲げモーメント以下となる基準支持間隔の評価を行った。なお、震度については、耐震設計審査指針上の耐震Cクラス設備に適用される静的地震力に余裕を持たせた $0.36G$ を採用した。ダクトは基準支持間隔(表 1－21, 1－23 参照) よりも小さい間隔で支持することで耐震性を確保する計画である。

なお、燃料取り出し用カバー内のダクトは、使用済燃料プール上に配置しないことから、使用済燃料プールへ波及的影響は与えない。

①角ダクトの耐震計算

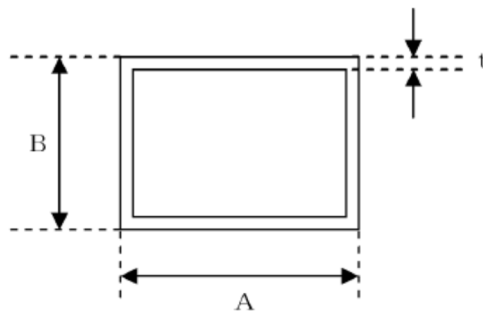


図 1－7 角ダクトの評価モデル

- ・評価部位：角ダクト
- ・考慮する荷重：地震荷重
- ・計算に用いる数式

自重による許容座屈曲げモーメント以下とする基準支持間隔

$$L = \sqrt{\frac{8 \cdot M_x \cdot 1000}{W \cdot g}}$$

地震による許容座屈曲げモーメント以下とする基準支持間隔

$$L = \sqrt{\frac{8 \cdot M_Y \cdot 1000}{W \cdot g} \cdot \frac{1}{C_H}}$$

許容曲げモーメントとの関係は次式となる

$$\frac{M_X}{M_{Xa}} = \frac{M_Y}{M_{Ya}} = 1$$

上記式を解くと

$$\text{基準支持間隔} \quad L = \frac{1}{\sqrt{\frac{W \cdot g}{1000 \cdot 8 \cdot M_{Xa}} + C_H} \sqrt{\frac{W \cdot g}{1000 \cdot 8 \cdot M_{Ya}}}}$$

- L : 基準支持間隔
 M_X : 水平方向座屈曲げモーメント
 M_{Xa} : 水平方向許容座屈曲げモーメント
 M_Y : 鉛直方向座屈曲げモーメント
 M_{Ya} : 鉛直方向許容座屈曲げモーメント
 W : ダクト単位長さ当たり質量
 g : 重力加速度 (=9.80665)
 C_H : 水平方向設計震度

表 1－20 角ダクトの基準支持間隔

A (mm)	B (mm)	t (mm)	W (kg/m)	M_{Xa} (N・mm)	M_{Ya} (N・mm)	C_H	L (mm)
1100	1100	3.2	161.0	380135185	380135185	0.36	37633
900	900	3.2	132.0	364014675	364014675	0.36	40671
650	500	3.2	85.4	262049779	300286615	0.36	43643
1100	1100	2.3	127.7	144288561	144288561	0.36	26033
1300	1300	1.2	148.5	23486326	23486326	0.36	9740
1300	1000	1.2	126.7	22241400	23486326	0.36	10334
1100	1100	1.2	101.2	22662712	22662712	0.36	11589
900	900	1.2	67.9	21816667	21816667	0.36	13882
700	700	1.2	53.3	20975522	20975522	0.36	15364

以下に計算過程の 1 例を示す。

<計算基準支持間隔>

$$L = \frac{1}{\sqrt{\frac{W \cdot g}{1000 \cdot 8 \cdot M_{Xa}} + C_H \frac{W \cdot g}{1000 \cdot 8 \cdot M_{Ya}}}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{\frac{161.0 \times 9.80665}{1000 \times 8 \times 380135185} + 0.36 \frac{161.0 \times 9.80665}{1000 \times 8 \times 380135185}}} = 37633.2 \text{ (mm)} \rightarrow 37633 \text{ (mm)}$$

表 1－2 1 角ダクトの評価

評価対象ダクト	材料	基準支持間隔 (mm)
1100×1100×3.2t	ガルバニウム鋼板	37633
900×900×3.2t	ガルバニウム鋼板	40671
650×500×3.2t	ガルバニウム鋼板	43643
1100×1100×2.3t	ガルバニウム鋼板	26033
1300×1300×1.2t	ガルバニウム鋼板	9740
1300×1000×1.2t	ガルバニウム鋼板	10334
1100×1100×1.2t	ガルバニウム鋼板	11589
900×900×1.2t	ガルバニウム鋼板	13882
700×700×1.2t	ガルバニウム鋼板	15364

①丸ダクトの耐震計算

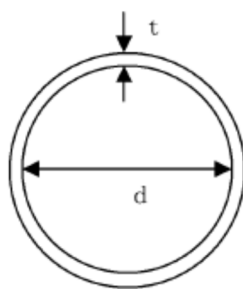


図 1－8 丸ダクトの評価モデル

- ・評価部位：丸ダクト
- ・考慮する荷重：地震荷重
- ・計算に用いる数式

自重と地震を合成した座屈曲げモーメント

$$M = \sqrt{1^2 + C_H^2} \cdot \frac{W \cdot g}{1000 \cdot 8} \cdot \frac{L^2}{8}$$

$$\frac{M}{M_a} = 1$$

上記式を解くと

$$\text{基準支持間隔} \quad L = \sqrt{\frac{8 \cdot M_a}{\frac{W \cdot g}{1000} \sqrt{(1 + C_H^2)}}}$$

L : 基準支持間隔
 M : 座屈曲げモーメント
 M_a : 許容座屈曲げモーメント
 W : ダクト単位長さ当たり質量
 g : 重力加速度 (=9.80665)
 C_H : 水平方向設計震度

表 1-2-2 丸ダクトの基準支持間隔

d (mm)	t (mm)	W (kg/m)	M_a (N・mm)	C_H	L (mm)
1200	3.2	132.2	313826615	0.36	42685
700	3.2	77.6	184113325	0.36	42674

以下に計算過程の 1 例を示す。

<計算基準支持間隔>

$$\begin{aligned}
 L &= \sqrt{\frac{8 \cdot M_a}{\frac{W \cdot g}{1000} \sqrt{(1 + C_H^2)}}} \\
 &= \sqrt{\frac{8 \times 313826615}{\frac{132.2 \times 9.80665}{1000} \times \sqrt{(1 + 0.36^2)}}} = 42685.7 \text{ (mm)} \rightarrow 42685 \text{ (mm)}
 \end{aligned}$$

表 1-2-3 丸ダクトの評価

評価対象ダクト	材料	基準支持間隔 (mm)
1200 ϕ × 3.2t	鋼板	42685
700 ϕ × 3.2t	鋼板	42674

II 燃料の健全性確認及び取り扱いに関する補足書

燃料の健全性確認及び取り扱いに関する説明書「5. 落下がれきによる影響」に記載している式で引用している定数等の条件について示す。

ステップII（高燃焼度8×8燃料）以前の燃料に関する入力条件

項目	単位	記号	式	ステップII	ステップI	8×8
ヤング率	N/mm ²	E		91300	91300	91300
被覆管内径	mm	Di				
被覆管肉厚(BOL)	mm	t				
酸化減肉(EOL)	mm	oxd				
被覆管肉厚(EOL)	mm		t-oxd	0.01	0.01	0.01
被覆管外径	mm	Do	Di+(t-oxd)*2			
被覆管断面積	mm ²	A	$\pi*(Do^2-Di^2)/4$			
被覆管全長	mm	L				
等価ばね定数	N/mm	K	E*A/L	686.6	686.1	697.8

注意：酸化膜厚（寿命末期の平均値）として約15μmを考慮する。

項目	単位	記号	式	ステップII	ステップI	8×8
断面二次モーメント	mm ⁴	I	$\pi*(Do^4-Di^4)/64$			
UTP/最上部スペーサ間長さ	mm	Lsp8				
		Lsp8の数値				
座屈荷重	N	Pcr	π^2*E*I/L_{sp8}^2	1667.7	1688.2	1720.2
UTP下降量	mm	Xcr	Pcr/K	2.43	2.46	2.47
発生応力	N/mm ²	σ_{cr}	Pcr/A	54.8	55.5	55.3

円筒の断面係数[mm³]

$$Z = \frac{\pi}{32} \left(\frac{D_o^4 - D_i^4}{D_o} \right)$$

ステップⅢB（9×9燃料（B型））燃料に関する入力条件

項目	単位	記号	式	ステップⅢB
ヤング率	N/mm ²	E		91300
被覆管内径	mm	Di		
被覆管肉厚(BOL)	mm	t		
酸化減肉(EOL)	mm	oxd		0.01
被覆管外径(BOL)	mm	Do_bol		
被覆管外径(EOL)	mm	Do	Do_bol-oxd*2	
被覆管断面積(EOL)	mm ²	A	$\pi*(Do^2-Di^2)/4$	
被覆管全長	mm	L		
等価ばね定数	N/mm	K	E*A/L	500.2

注意：酸化膜厚（寿命末期の平均値）として約15μmを考慮する。

項目	単位	記号	式	ステップⅢB
断面二次モーメント	mm ⁴	I	$\pi*(Do^4-Di^4)/64$	
UTP/最上部スペーサ 間長さ	mm	Lsp8		
座屈荷重	N	Pcr	$\pi^2*E*I/Lsp8^2$	936.1
UTP下降量	mm	Xcr	Pcr/K	1.87
発生応力	N/mm ²	σ_{cr}	Pcr/A	42.0

円筒の断面係数[mm³]

$$Z = \frac{\pi}{32} \left(\frac{D_o^4 - D_i^4}{D_o} \right)$$

ステップⅢA（9×9燃料（A型））燃料に関する入力条件

項目	単位	記号	式	ステップⅢA
ヤング率	N/mm ²	E		91300
被覆管内径	mm	Di		
被覆管肉厚(BOL)	mm	t		
酸化減肉(EOL)	mm	oxd		
被覆管肉厚(EOL)	mm		t-oxd	0.01
被覆管外径	mm	Do	Di+(t-oxd)*2	
被覆管断面積	mm ²	A	$\pi*(Do^2-Di^2)/4$	
被覆管全長	mm	L		
等価ばね定数	N/mm	K	E*A/L	516.1

注意：酸化膜厚（寿命末期の平均値）として約15μmを考慮する。

項目	単位	記号	式	ステップⅢA
断面二次モーメント	mm ⁴	I	$\pi*(Do^4-Di^4)/64$	
UTP/最上部スペーサ間長さ	mm	Lsp8		
		Lsp8の数値		
座屈荷重	N	Pcr	π^2*E*I/L_{SP8}^2	972.7
UTP下降量	mm	Xcr	Pcr/K	1.88
発生応力	N/mm ²	σ_{cr}	Pcr/A	42.3

円筒の断面係数[mm³]

$$Z = \frac{\pi}{32} \left(\frac{D_o^4 - D_i^4}{D_o} \right)$$

Ⅲ 3号機 構内用輸送容器に関する要目表

3号機 構内用輸送容器の寸法等の要目及び、ボロン添加ステンレス鋼の材料特性について示す。

表 3-1 3号機 構内用輸送容器 要目表

名 称			構内用輸送容器
種類		—	密封式円筒形
収納体数		体	2 または 7
最高使用圧力	二 次 蓋 以 外	MPa	2.0
	二 次 蓋	MPa	1.4
最高使用温度	キャスク容器	℃	135
	バスケット	℃	170
主 要 寸 法	容器	全 長	mm (5570)
		外 径	mm (1414)
		胴 内 径	mm (700)
		胴 板 厚 さ	mm (220)
		底 板 厚 さ	mm (240)
		一 次 蓋 厚 さ	mm (230)
		一 次 蓋 外 径	mm (930)
		二 次 蓋 厚 さ	mm (45)
		二 次 蓋 外 径	mm (1140)
	バスケット (2 体収 納)	全 長	mm (4549)
		内 の り	mm (249)
		厚 さ	mm (10)
		中性子吸収材厚さ	mm (4)
	バスケット (7 体収 納)	全 長	mm (4549)
		内 の り	mm (183)
		厚 さ	mm (10)
材 料	胴 板		— GLF1 相当 (ASTM A350M Gr. LF5 Cl. 1)
	底 板		— GLF1 相当 (ASTM A350M Gr. LF5 Cl. 1)
	一 次 蓋		— SUSF304
	二 次 蓋		— SUSF304
	バスケット (2 体収 納)	枠板, 格子支持板, スペーサ	— SUS304
		中性子吸収材	— ボロン添加アルミニウム なお, ^{10}B の面密度は XXXXXXXXXX g/cm ² 以上
	バスケット (7 体収納)		— ボロン添加ステンレス鋼

放射線遮へい材	種類	主要寸法 (最小厚さ mm)			冷却方法	材料
	構内用輸送容器 (密封式円筒形)	円筒部	胴 板		自然冷却	低合金鋼
			中性子遮蔽材			レジン
			外 筒			炭素鋼
		底部	底 板		自然冷却	低合金鋼
			中性子遮蔽材			レジン
			遮蔽体カバー			炭素鋼
		蓋部	一 次 蓋		自然冷却	ステンレス鋼

() は公称値を示す

表 3 - 2 3 号機 構内用輸送容器の許容寸法 (1/2)

名称			公称値	許容範囲	根拠
容器	全長	mm	5570		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
	外径	mm	1414		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
	胴内径	mm	700		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
	胴板厚さ	mm	220		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
	底板厚さ	mm	240		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
	一次蓋厚さ	mm	230		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
	一次蓋外径	mm	930		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
	二次蓋厚さ	mm	45		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
	二次蓋外径	mm	1140		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
バスケット (2 体収納)	全長	mm	4549		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
	内のり	mm	249		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
	厚さ	mm	10		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
	中性子吸収材厚さ	mm	4		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
バスケット (7 体収納)	全長	mm	4549		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
	内のり	mm	183		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
		mm	183		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
		mm	183		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
	厚さ	mm	10		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値

表 3 - 2 3 号機 構内用輸送容器の許容寸法 (2/2)

名称			公称値	許容範囲	根拠
円筒部	胴板	mm	220		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
	中性子遮蔽材	mm	105		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
	外筒	mm	32		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
底部	底板	mm	240		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
	中性子遮蔽材	mm	105		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
	遮蔽体カバー	mm	32		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
蓋部	一次蓋	mm	230		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値

表 3－3 ボロン添加ステンレス鋼の材料特性

材料	機械的性質		化学成分 (wt%)								
	引張強さ (MPa)	降伏点 (MPa)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	B	N
ボロン添加 ステンレス鋼	520 以上	205 以上									

Ⅳ 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（４号機）

（添付資料－２－１－３）に関する補足書

構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（４号機）（添付資料－２－１－３）について，評価条件，評価モデル等の詳細を示す。

1 構内用輸送容器の概要

構内用輸送容器は、福島第一原子力発電所第4号機使用済燃料プールに貯蔵されている使用済燃料及び新燃料（以下「燃料」という。）を共用プールへ構内輸送する際に使用する。

構内用輸送容器は、福島第一原子力発電所で使用済燃料運搬用容器として設置され、これまで第1号機から第2号機の使用済燃料を共用プールへ構内輸送する際に使用している使用済燃料輸送容器（NFT-12B型）を用いる。

使用済燃料輸送容器（NFT-12B型）は、使用済燃料を再処理工場へ輸送するために設計された容器であり、容器の安全機能は核燃料輸送物設計承認書により確認されている。

本構内用輸送容器は、震災前の原子炉運転中に被覆管から放射性物質の漏えいのあった燃料（以下「漏えい燃料」という。）（2体）、及び震災前の取り扱い中にハンドル及びチャンネルボックスが変形した燃料（以下「変形燃料」という。）（1体）を輸送する。これらの燃料を輸送するにあたって既存の核燃料輸送物設計承認書の条件に該当しない事項については、新たに評価を行う。

また、構内用輸送容器は上記漏えい燃料、変形燃料以外の健全と確認された燃料についても合わせて輸送する。

なお、本構内用輸送容器は、核燃料輸送物としての設計承認及び容器承認を取得しており、容器の仕様を長期にわたって保証できる保守条件を定め（核燃料輸送物設計変更承認申請書別紙ニ章 輸送容器の保守及び核燃料物質の取扱方法、平成24年1月承認）、定期点検※を実施している。

※定期点検については、平成26年6月に実施し異常の無いことを確認している。

1.1. 構内用輸送容器の構成

構内用輸送容器は、容器本体、蓋、バスケット及びトラニオンにより構成される。なお、構外輸送においては容器本体の前後に緩衝体を装着するが、構内輸送においては、作業時間を短縮して放射線業務従事者の放射線被ばくを可能な限り低減するために、緩衝体を装着しない運用とする。

構内輸送においては、従来と同様に輸送車両への構内用輸送容器の固縛、輸送車両の徐行等の措置を講じて、輸送車両からの構内用輸送容器の落下防止を図る。

1.2. 設備仕様

1.2.1. 構内用輸送容器の仕様

構内用輸送容器の仕様を表 4－1 に，鳥瞰図を図 4－1 に示す。

表 4－1 構内用輸送容器の仕様

項 目	数 値 等
重量（t） （燃料を含む）	約 68
全長（m）	約 5.5
外径（m）	約 1.8
収納体数（体）	12 以下
基数（基）	2

1.2.2. 燃料仕様

構内用輸送容器の収納可能な燃料の仕様を表 4－2 に示す。

表 4－2 構内用輸送容器 1 基に収納可能な燃料の仕様

項目	燃料仕様
燃料の種類	7×7 燃料（燃焼度 [] MWd/t 以下） 8×8 燃料（燃焼度 [] MWd/t 以下） 新型 8×8 燃料 （燃焼度 [] MWd/t 以下） 新型 8×8 シルコニウムラッパ燃料 （燃焼度 [] MWd/t 以下） 高燃焼度 8×8 燃料 （燃焼度 [] MWd/t 以下） 9×9 燃料（燃焼度 [] MWd/t 以下）
収納体数	12 体以下
崩壊熱量	15kW 以下
放射能強度	[] Bq 以下

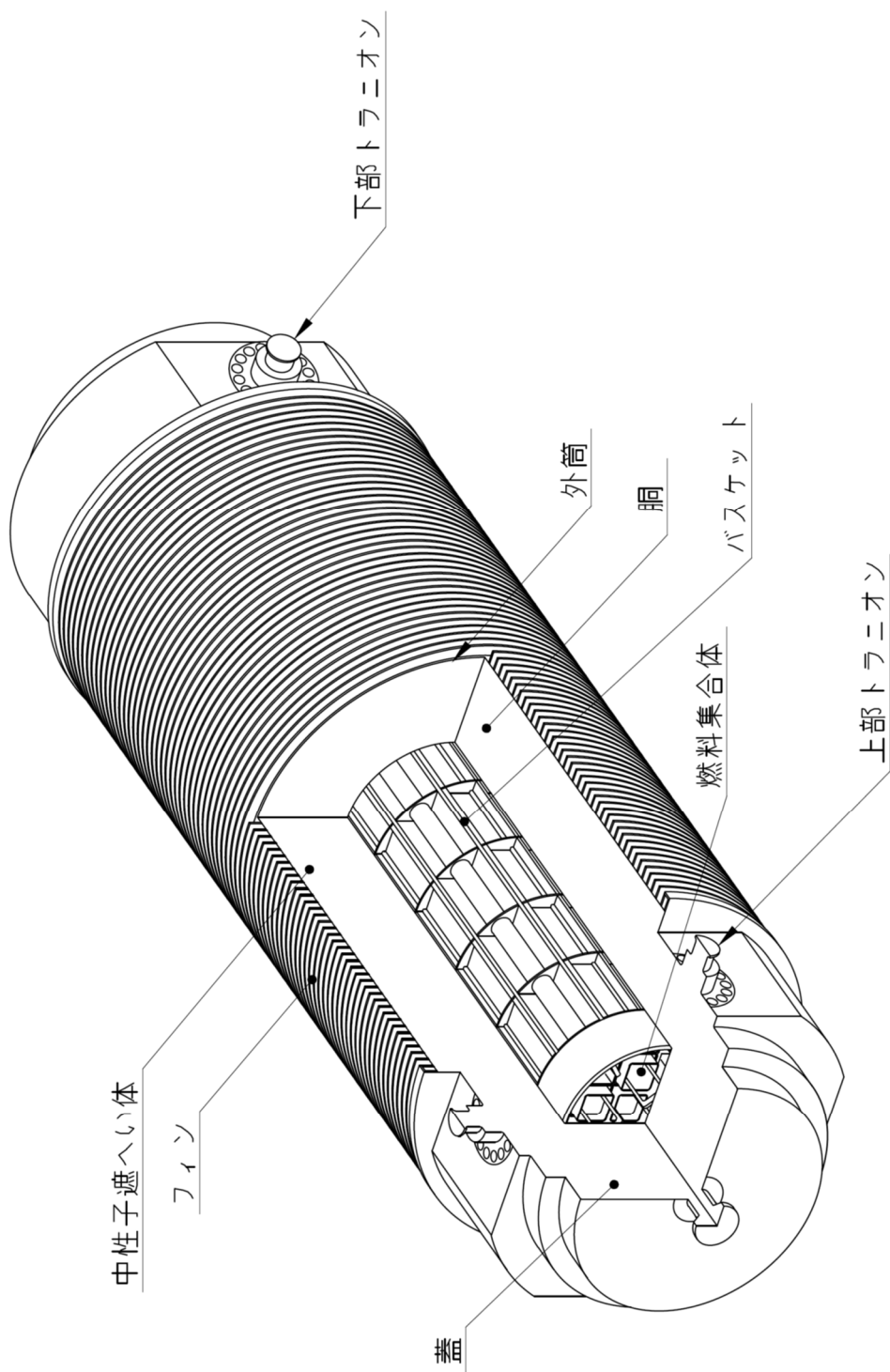


図 4-1 構内用輸送容器全体図（鳥瞰図）

2. 評価の基本方針

2.1. 設計方針

2.1.1. 基本的安全機能

構内用輸送容器は、これまで同発電所における使用済燃料の構内輸送に使用していた使用済燃料輸送容器（NFT-12B 型）であり、本文 2.11.1.3 項の設計方針に示される除熱、密封、遮蔽及び臨界防止の安全機能を有するとともに、本文 2.11.1.8 項の構造強度及び耐震性に示される構造強度を有する設計であることを確認する。

2.1.2. 構内用輸送容器の安全機能について

使用済燃料輸送容器（NFT-12B 型）の安全機能は、以下の書類にて評価されている。既存評価は緩衝体を装着した状態を評価しているが、構内輸送では緩衝体を装着しない運用とすることから、既存評価を引用可能な項目は引用し、新規評価が必要な項目は新規評価を実施することとする。

- ・核燃料輸送物設計変更承認申請書（NFT-12B 型）
（平成 22 年 10 月 28 日申請，原燃輸送株式会社）
- ・核燃料輸送物設計変更承認申請書の一部補正について（NFT-12B 型）
（平成 24 年 1 月 13 日申請，原燃輸送株式会社）

なお、構内用輸送容器は同発電所で使用済燃料運搬用容器として設置され、以下の書類において安全機能は評価されている。しかし、4 号機使用済燃料プールに貯蔵されている 9×9 燃料の輸送については評価していないことから、既存評価として引用しない。

- ・福島第一原子力発電所 第 1 号機使用済燃料輸送容器（第 1～第 6 号機共用）工事計画認可申請書本文及び添付書類（平成 19 年 2 月 21 日申請，東京電力株式会社）

2.2. 安全設計・評価方針

表 4－3 に評価すべき各安全機能に関する既存評価内容と構内用輸送容器での安全設計・評価の方針を示す。

なお、4 号機の使用済燃料プールに貯蔵されている燃料については、平均燃焼度が既存評価に用いた平均燃焼度を僅かに上回るものがある。表 4－4 に 4 号機の使用済燃料プールに貯蔵中の燃料の種類ごとの性状と既存評価に用いられた燃料仕様との比較を示す（変形燃料を除く）。また、4 号機の使用済燃料プールに貯蔵されている燃料には、漏えい燃料及び変形燃料がある。表 4－5 に漏えい燃料及び変形燃料の仕様を示す。

これらの燃料は冷却期間が十分に長いため、崩壊熱量及び放射能強度は 9×9 燃料の燃料仕様に基づいた既存評価に包絡されている。

構内用輸送容器には健全燃料のみを収納する場合と、健全燃料と漏えい燃料及び変形燃料を同時に収納する場合があります。変形燃料については、通常の燃料輸送時に用いる大口格子に設置されている燃料収納スペーサを抜き取り、大口格子にスツールと共に収納する。燃料を混載する場合には、必要に応じ新規評価を実施することとする。

3 構内用輸送容器に収納する燃料

構内用輸送容器に収納する燃料は、漏えい燃料（２体）、変形燃料（１体）、及び健全と確認された燃料である。なお、燃料の健全性の確認方法等については、「添付資料１－３ 燃料の健全性確認及び取り扱いに関する説明書」に記載している。

3.1. 漏えい燃料（２体）

漏えい燃料は、原子炉停止後 SHIPPING 検査により漏えいが確認された燃料である*1。２体とも震災前に使用済燃料プールにおいて超音波装置を用いて漏えい燃料棒が特定されている。ファイバースコープ装置による漏えい燃料棒の観察の結果、漏えい燃料棒の漏えい孔及び被覆管の亀裂は２体とも確認されていないが、水素化による被覆管の膨れが一部に確認されており、また２体のうち１体は漏えいの原因と推定される金属らしき異物が確認されている。

3.2. 変形燃料（１体）

変形燃料は、過去の震災前の取り扱いによりチャンネルボックス及びハンドルが変形した燃料である*2。2013 年 12 月に当該燃料について吊上げチャンネルボックスの曲がり状況を確認し、チャンネルボックスの曲がりを考慮した最大寸法は測定誤差を加味し 156mm であることを確認している*3。

*1 報告書番号 2006-東京-M006, 2007-東京-M015（ニューシア（原子力施設情報公開ライブラリー））

*2 報告書番号 1982-東京-T003（ニューシア（原子力施設情報公開ライブラリー））

*3 福島第一原子力発電所 4 号機使用済燃料プール内の変形が確認されている燃料集合体の調査結果について
（平成 26 年 1 月 30 日、東京電力株式会社）

表 4－3 構内用輸送容器安全評価の基本方針

項目	設計方針	評価対象	既存評価 を引用	新評価 実施	評価方針	備考
除熱機能	使用済燃料の健全性及び構成部材の健全性が維持できるように、使用済燃料の崩壊熱を適切に除去できる設計とする。	燃料被覆管	○	—	収納する燃料の崩壊熱量が既存評価以下であるため、既存評価を引用して評価を行う。	緩衝体がない状態では、緩衝体がある状態と比較して各部の温度は低くなる。
		構内用輸送容器	○	—		
密封機能	周辺公衆及び放射線業務従事者に対し、放射線被ばく上の影響を及ぼすことのないよう、使用済燃料が内包する放射性物質を適切に閉じ込める設計とする。	構内用輸送容器	○	—	構造強度及び除熱機能の評価結果から、設計事象において、容器の密封部が健全性を維持することを確認する。	構造強度の評価にて密封部の構造健全性を説明する。
遮蔽機能	内部に燃料を入れた場合に放射線障害を防止するため、使用済燃料の放射線を適切に遮蔽する設計とする。	構内用輸送容器	—	○	線源強度は既存評価に包絡されるが、緩衝体を装着しないため、緩衝体がない状態での遮蔽評価を実施する。なお、線源強度は安全側に既存評価の値を用いる。漏えい燃料については、ペレット放出を考慮した評価を実施する。	
臨界防止機能	想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止できる設計とする。	構内用輸送容器	○	○	収納する燃料の初期濃縮度が約4.2wt%以下となることをもって評価条件が既存評価と同等であると言え、既存評価においては容器配列、バスケット内の燃料配置等最も厳しい状態を想定し評価しており、構内輸送での条件と比較して、十分安全側であることから、既存評価を引用して評価を行う。漏えい燃料については、保守的にペレットが容器内に放出された状態での評価を実施する。変形燃料については、保守的に燃料棒の変形を考慮した状態での評価を実施する。	
構造強度	構内用輸送容器は取り扱い中における衝撃、熱等に耐え、かつ、容易に破損しない設計とする。構内用輸送容器は、設計、材料の選定、製作及び検査について適切と認められる規格及び基準によるものとする。	構内用輸送容器	○	—	容器本体、蓋、バスケット及びトラニオンにおける設計事象の荷重条件が既存評価における荷重条件に包絡されることをもって評価条件が既存評価に包絡されることを確認した上で、既存評価を引用して評価を行う。	
		大口格子用スツール	—	○	変形燃料輸送時には大口格子にスツールを装荷するため、スツールの強度評価を行う。	

表 4－4 貯蔵中の燃料仕様と既存評価の燃料仕様との比較

燃料の種類	項目	4号機貯蔵中の 燃料の性状	既存評価の 燃料仕様
9×9 燃料	最高燃焼度 (MWd/t)		
	平均燃焼度 (MWd/t)		
	初期濃縮度 (wt%)	約 3.8	約 4.2
	冷却期間 (日)		
	崩壊熱量 (kW)	8 *4	14
	放射能強度 (Bq)		
高燃焼度 8×8 燃料	最高燃焼度 (MWd/t)		
	平均燃焼度 (MWd/t)		
	初期濃縮度 (wt%)	約 3.6	約 3.7
	冷却期間 (日)		
	崩壊熱量 (kW)	5 *4	13
	放射能強度 (Bq)		
新型 8×8 ジルコニウムライネ 燃料	最高燃焼度 (MWd/t)		
	平均燃焼度 (MWd/t)		
	初期濃縮度 (wt%)	約 3.0	3.3
	冷却期間 (日)		
	崩壊熱量 (kW)	3 *4	13
	放射能強度 (Bq)		
8×8 燃料	最高燃焼度 (MWd/t)		
	平均燃焼度 (MWd/t)		
	初期濃縮度 (wt%)	約 2.7	2.9
	冷却期間 (日)		
	崩壊熱量 (kW)	3 *6	6
	放射能強度 (Bq)		

*1 最高燃焼度は 4号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料の最高値

*2 平均燃焼度は 4号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料のうち上位 12 体の平均値

*3 冷却期間は 2014 年 9 月 1 日における 4号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料の最短の冷却期間

*4 崩壊熱量及び放射能強度は平均燃焼度及び冷却期間から ORIGEN2 コードにより求めた容器 1 基あたり（燃料 12 体あたり）の値

*5 8×8 燃料は 4 体しか貯蔵されていないため、平均燃焼度は 4 体の平均値

*6 8×8 燃料は 4 体しか貯蔵されていないため、崩壊熱量及び放射能強度は平均値の 12 倍の値

表 4－5 漏えい燃料及び変形燃料の燃料仕様

項目	漏えい燃料①	漏えい燃料②	変形燃料
燃料タイプ	9×9 型	9×9 型	7×7 型
集合体平均燃焼度			
ウラン重量	172 kg	172 kg	187 kg
集合体平均初期濃縮度	約 3.8 wt%	約 3.8 wt%	約 2.5 wt%
冷却期間*1			
漏えい燃料棒本数	1 本	1 本	—

*1 2014 年 9 月 1 日までの冷却期間

核燃料輸送物設計変更承認申請書に記載の輸送容器の保守について

核燃料輸送物設計変更承認申請書に記載の輸送容器の保守について，該当箇所の抜粋を以下に記載する。

B. 保守条件

輸送容器の仕様を長期にわたって保証できる保守条件について定める。

輸送容器は、定期点検として、(二)－第B. 1 表の項目に示す定期自主検査、定常検査、基本検査及び総合検査を実施する。また、定期点検の結果、必要に応じて補修を実施する。なお、1 年以上使用する計画のない輸送容器については、保管状態に置くことができる。

(1) 定期自主検査

外観検査 (I)、気密漏えい検査、未臨界検査 (I)、吊上検査 (I)、作動確認検査を1 年に1 回以上実施する。なお、保管期間中には、外観検査 (III) のみを実施する。

但し、年間使用回数が10 回を超えるものにあつては、使用回数10 回に1 回以上実施する。

(2) 定常検査

外観検査 (I)、気密漏えい検査、未臨界検査 (I)、吊上検査 (I)、作動確認検査を輸送前毎に実施する。

(3) 基本検査

外観検査 (I)・(II)、気密漏えい検査、未臨界検査 (I)、吊上検査 (I)・(II)、作動確認検査を5 年に1 回実施する。

但し、前回の検査から使用回数が30 回を超えるものにあつては、使用回数30 回に1 回実施する。

(4) 総合検査

外観検査 (I)・(II)、耐圧検査、気密漏えい検査、遮蔽検査、未臨界検査 (I)・(II)・(III)、熱検査、吊上検査 (I)・(II)、作動確認検査を10 年に1 回実施する。

但し、前回の検査から使用回数が60 回を超えるものにあつては、使用回数60 回に1 回実施する。なお、遮蔽検査及び熱検査については検査期限を過ぎた場合、期限を過ぎた初回の燃料輸送時(燃料装荷から燃料取出)に実施する。

(5) 定期点検の期限管理

定期点検の有効期間は、前回の各々の定期点検終了日を起点とし、有効期間内に次の定期点検を開始する。

基本検査及び総合検査の有効期間の期限が輸送容器の保管期間中になる場合は、各々の検査を省略することができる。

(6) 補修

(1)・(2)・(3)・(4) の検査の結果、補修が必要と判定された部位については、補修を行う。

(7) 輸送容器保管状態の管理

輸送容器を保管状態に置くに当たっては、定期自主検査を実施する。輸送容器は必要な養生を行った上で保管する。

(8) 保管期間終了後の検査

保管期間終了後に輸送容器を再使用する前に、定期自主検査に加え、保管期間中に省

略した他の定期点検を行う。

(9) 記録の保管

製作時検査記録、定期自主検査記録、定常検査記録、基本検査記録及び総合検査記録などの定期点検記録（補修記録や部品交換履歴を含む）は、当該輸送容器存続中保存する。

(二)－第B. 1表 定期点検の項目、検査方法、合格基準及び検査区分

検査項目	検査方法	合格基準	検査区分			
			定期自主検査	定常検査	基本検査	総合検査
外観検査 (Ⅰ)	輸送容器の外表面を目視で検査する。	輸送容器の形状に異常な傷又は割れがないこと。	○	○	○	○
外観検査 (Ⅱ)	輸送容器の構成部品である蓋部、バルブ及びシール面について外観を目視で検査する。	表面の形状に異常な傷又は割れがないこと。	—	—	○	○
外観検査 (Ⅲ)	輸送容器の外表面を目視で検査する。	輸送容器の形状に異常な傷又は割れがないこと。	○*1	—	—	—
耐圧検査	0.75MPaGの水圧（輸送容器製作時の耐圧検査圧力）を加え、輸送容器の外表面を目視で検査する。	異常な変形、ひび、割れ等がないこと。	—	—	—	○
気密漏えい検査	輸送容器密封部に 0.66MPaG 以上の圧力を加え、圧力降下を測定し、漏えい率を算出する。	各部の漏えい率の合計が 3×10^{-2} ref cm ³ /s を超えないこと。	○	○	○	○
遮蔽検査	収納物を収納した状態で、輸送容器表面の各部の線量当量率測定を行い、測定結果と収納物仕様相当の線源強度で行った評価結果を比較する。	遮蔽能力に劣化のないこと。	—	—	—	○*2
未臨界検査 (Ⅰ)	輸送容器内に収納されたバスケットの外観を目視で検査する。	バスケットに異常な変形又は破損がないこと。	○	○	○	○
未臨界検査 (Ⅱ)	バスケットの格子枠について、寸法確認用スルーゲージを挿入する。	スルーゲージが支障なく挿入できること。	—	—	—	○
未臨界検査 (Ⅲ)	中性子吸収による中性子吸収材の減損について計算により評価する。	臨界防止性能に影響を及ぼす減損がないこと。	—	—	—	○
熱検査	収納物を収納した状態で、輸送容器表面の各部の温度測定を行い、測定結果と収納物仕様相当の発熱量で行った評価結果を比較する。	伝熱性能に劣化のないこと。	—	—	—	○*2
吊上検査 (Ⅰ)	輸送容器を吊り上げた後の状態において、上部トラニオン部の外観を目視で検査する。	トラニオン部など吊上部等に異常な変形又は破損がないこと。	○	○	○	○
吊上検査 (Ⅱ)	上部トラニオン部について浸透探傷試験を行う。	有害な傷による浸透指示模様のないこと。	—	—	○	○
作動確認検査	バルブの開閉を行い、作動性を検査する。	作動性に異常がないこと。	○	○	○	○

*1：外観検査（Ⅲ）は、保管期間中に実施する。

*2：総合検査の有効期間 10 年を過ぎた場合には、初回の燃料輸送時（燃料装荷から燃料取出）に実施する。

B. 1 外観検査

外観検査（Ⅰ）は、輸送容器の外表面を目視で検査する。

外観検査（Ⅱ）は、輸送容器の構成部品である蓋部、バルブ及びシール面について外観を目視で検査する。

外観検査（Ⅲ）は、保管状態の輸送容器の外表面を目視で検査する。

B. 2 耐圧検査

0.75MPaGの水圧（輸送容器製作時の耐圧検査圧力）を加えて、輸送容器の外表面を目視で検査する。

B. 3 気密漏えい検査

輸送容器密封部に0.66MPaG以上の圧力を加え、圧力降下を測定し、漏えい率を算出する。

B. 4 遮蔽検査

収納物を収納した状態で、輸送容器表面の各部の線量当量率測定を行い、測定結果と収納物仕様相当の線源強度で行った評価結果を比較する。

B. 5 未臨界検査

未臨界検査（Ⅰ）は、輸送容器内に収納されたバスケットの外観を目視で検査する。

未臨界検査（Ⅱ）は、バスケットの格子枠について、寸法確認用スルーゲージを挿入する。

未臨界検査（Ⅲ）は、中性子吸収による中性子吸収材の減損について計算により評価する。

B. 6 熱検査

収納物を収納した状態で、輸送容器表面の各部の温度測定を行い、測定結果と収納物仕様相当の発熱量で行った評価結果を比較する。

B. 7 吊上検査

吊上検査（Ⅰ）は、輸送容器を吊り上げた後の状態において、上部トラニオン部の外観を目視で検査する。

吊上検査（Ⅱ）は、上部トラニオン部について浸透探傷試験を行う。

B. 8 作動確認検査

バルブの開閉を行い、作動性を検査する。

B. 9 補助系の保守

該当なし。

B. 10 密封装置の弁、ガスケット等の保守

輸送容器の弁の保守は、分解点検を原則として1年に1回実施する。また、輸送容器の弁、Oリング及びボルトは、定期点検及び輸送物発送前検査においても交換が必要となった場合に、その都度新品と取り替える。なお、輸送容器が保管期間中の場合は、輸送容器の弁の保守を省略することができる。

上記に係わらず、(三)－第B. 2表に示す部品については同表の交換頻度で無条件に交換する。部品交換又は補修後は、当該部位の再検査を行う。定期点検の実績、部品交換や安全機能に係る部位の補修については、記録し、輸送容器存続中保存する。

(三)－第B. 2表 部品交換頻度

部 品 名	交換頻度	備考
Oリング	実使用期間（燃料装荷期間） の合計で1年に1回以上	密封境界に係る部位とする

B. 11 輸送容器の保管

B. 11. 1 保管状態の管理

輸送容器を保管状態に置くに当たっては、定期自主検査を実施する。輸送容器は必要な養生を行った上で保管する。

B. 11. 2 保管期間終了後の検査・補修

保管期間終了後に輸送容器を再使用する場合は、保管開始前に行った定期点検から再使用までの保管状況に応じて、定期点検及び補修を行う。

B. 12 記録の保管

製作時検査記録、定期自主検査記録、定常検査記録、基本検査記録及び総合検査記録などの定期点検記録（補修記録や部品交換履歴を含む）は、当該輸送容器存続中保存する。

B. 13 その他

該当なし。

4 安全評価

4.1. 構造強度

(1) 基本的な考え方

構内用輸送容器の構造強度については、既存評価の結果を基に、構内用輸送容器の構造強度が想定すべき事象（設計事象）において設計基準に適合していることを確認する。

評価部位は、安全上重要な部位として容器本体、蓋、バスケット及び支持機能を有するトラニオン、並びに大口格子用スツールとする。また、設計基準は、構外用輸送容器としての安全評価に用いられている基準を適用する。

(2) 設計事象の抽出

JSME S FA1-2007 金属キャスク構造規格の考え方に基づいて、構内用輸送容器の設計事象として以下を抽出した。

なお、設計事象の抽出にあたっては、図4-2に示すハンドリングフローに基づき、構内用輸送容器の取り扱い及び共用プールまでの輸送において想定される起因事象に着目し、発生防止対策を考慮して事象の発生の可能性を検討した。設計事象の抽出結果を表4-6に示す。

a. 設計事象 I

容器本体及び蓋には、収納する燃料の発熱により内圧及び熱による応力が発生する。また、取り扱い時及び構内輸送時の加速度により収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

バスケットには、取り扱い時及び構内輸送時の加速度により収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

トラニオンには取り扱い時の吊上げ等による応力、及び構内輸送時における固縛荷重による応力が発生する。

大口格子用スツールには、取り扱い時及び構内輸送時の加速度により収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

b. 設計事象Ⅱ

容器本体及び蓋には、輸送架台へのトラニオン衝突（取り扱いモード No. 2）、構内用輸送容器を積載した輸送架台の搬送台車への衝突（取り扱いモード No. 6）、構内用輸送容器の転倒防止台座への衝突（取り扱いモード No. 8）及びキャスクピットへの衝突（取り扱いモード No. 9）の加速度における収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

バスケットには、輸送架台へのトラニオン衝突（取り扱いモード No. 2）、構内用輸送容器を積載した輸送架台の搬送台車への衝突（取り扱いモード No. 6）、構内用輸送容器の転倒防止台座への衝突（取り扱いモード No. 8）及びキャスクピットへの衝突（取り扱いモード No. 9）の加速度における収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

トラニオンには、輸送架台へのトラニオン衝突（取り扱いモード No. 2）及び構内用輸送容器を積載した輸送架台の搬送台車への衝突（取り扱いモード No. 6）の加速度における荷重がかかり、応力が発生する。

大口格子用スツールには、輸送架台へのトラニオン衝突（取り扱いモード No. 2）、構内用輸送容器を積載した輸送架台の搬送台車への衝突（取り扱いモード No. 6）、構内用輸送容器の転倒防止台座への衝突（取り扱いモード No. 8）及びキャスクピットへの衝突（取り扱いモード No. 9）の加速度における収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

c. 設計事象Ⅲ及び設計事象Ⅳ

構内用輸送容器を取り扱う設備及び運用においては、ワイヤーロープの二重化、始業前の機器の点検を実施することから、ハンドリングフローから抽出される事象のうち、構内用輸送容器の安全機能を著しく損なう事象であって、一般公衆の放射線被ばくの観点からみて重要と考えられる事象はない。

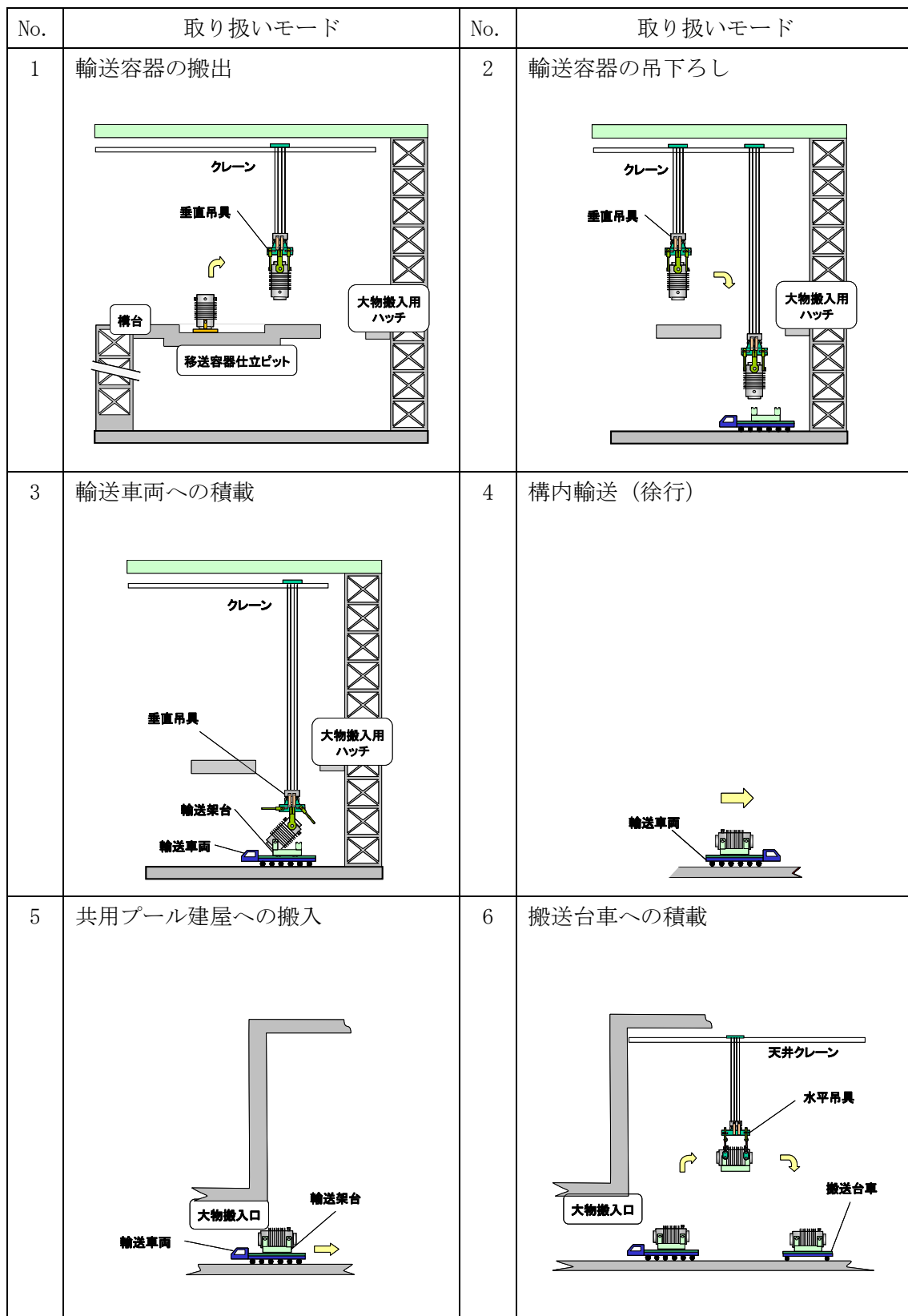


図 4 - 2 構内用輸送容器のハンドリングフロー (1/2)

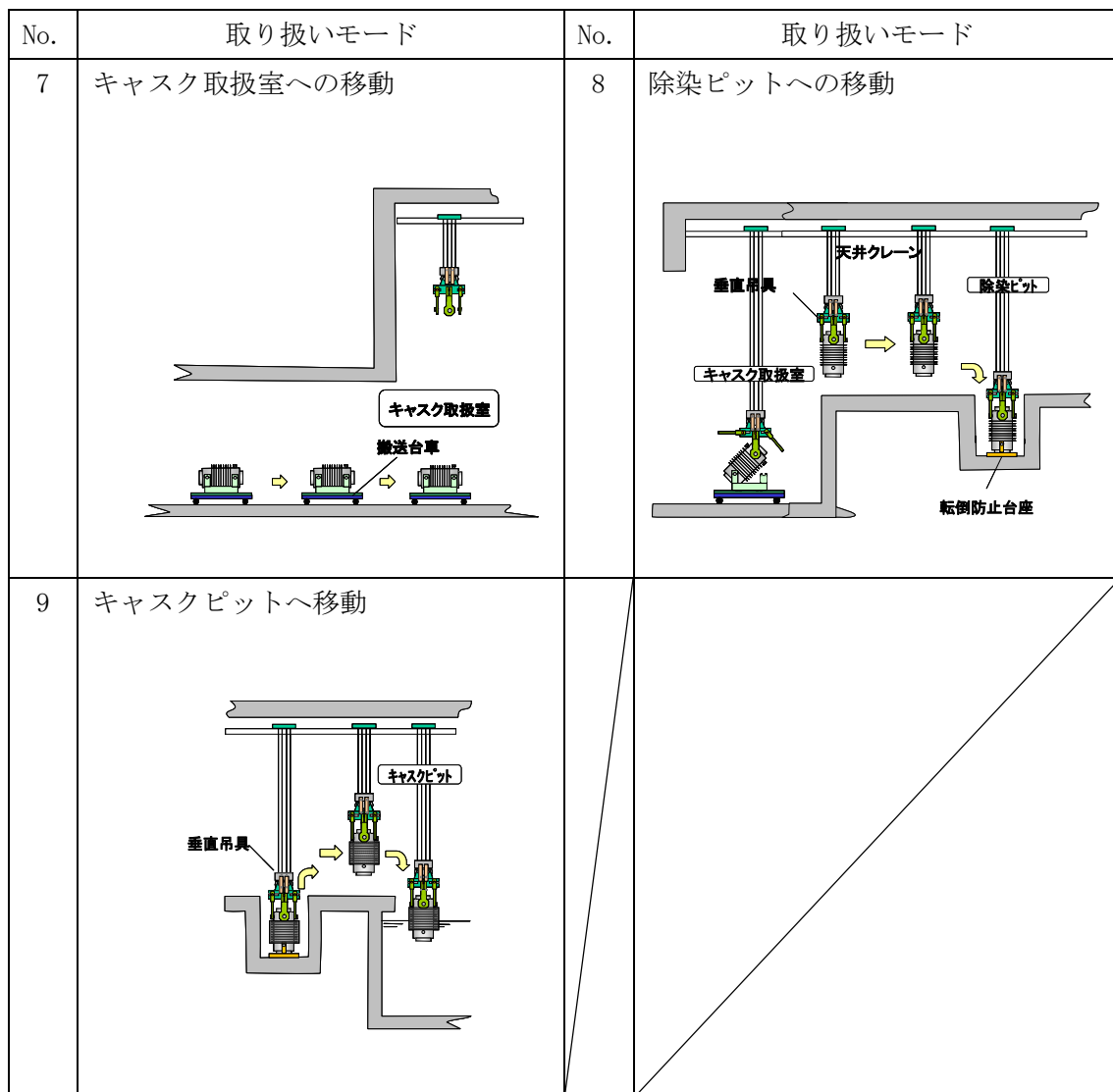


図 4 - 2 構内用輸送容器のハンドリングフロー (2/2)

表 4－6 設計事象の抽出

起回事象 (ハンドリングフローNo.)		原因	発生の可能性	発生の 有無	想定シナリオ	抽出の 要否
構内用 輸送容器 の落下	輸送車両取り扱い 時の落下 (No. 4)	固定ボルト の 取付け不良	構内用輸送容器は、輸送車両に複数のボルトで固縛されていることを確認する。また、構内用輸送容器は輸送車両で徐行して輸送すること、輸送経路は輸送に関係する人及び車両以外の立入を制限することから、落下しない。	×		×
	搬送台車取り扱い 時の落下 (No. 7)	固定ボルト の 取付け不良	構内用輸送容器は、搬送台車に複数のボルトで固縛されていることを確認する。また、搬送台車はレール上を走行し、走行範囲インターロック及び障害物検知装置を有していることから他の構築物等に衝突はしないため、落下しない。	×		×
	クレーン取り扱い 時の落下 (No. 1, 2, 3, 6, 8, 9)	吊具の 取付け不良	吊具の二重化、始業前の吊具点検、取付け後の外れ止めを施すため、構内用輸送容器は落下しない。	×		×
		ワイヤーロープの切断	ワイヤーロープの二重化、始業前のワイヤーロープ点検を行うため、構内用輸送容器は落下しない。	×		×
構内用 輸送容器 の衝突	クレーン移動時 (走行、横行) の 衝突 (No. 1, 2, 3, 6, 8, 9)	ブレーキの 故障	移動前に移動経路に障害物がないことを確認し、構内用輸送容器と移動経路の芯あわせを行い、走行及び横行それぞれにインパータによる停止機能に加えてブレーキによる停止機能により二重化しているため、構内用輸送容器は他の構築物等へ衝突しない。	×		×
		操作員の 誤操作	クレーンの横行走行範囲に制限機能を設ける。また、移動前に移動経路に障害物がないことの確認、構内用輸送容器と移動経路の芯あわせを行うため、構内用輸送容器は他の構築物等へ衝突しない。	×		×
	クレーン吊下げ時 の衝突（垂直吊り）（異常着床） (No. 2, 8, 9)	ブレーキの 故障	巻上げ装置ブレーキを二重化しているため、構内用輸送容器は輸送架台、転倒防止台座あるいはキャスクピットへ衝突（異常着床）しない。	×		×
		操作員の 誤操作	吊下げ時の誤操作により、構内用輸送容器は巻下げ速度で輸送架台、転倒防止台座あるいはキャスクピットに異常着床する可能性がある。	○	クレーンの最大巻下げ速度 0.025m/s で、構内用輸送容器が輸送架台、転倒防止台座あるいはキャスクピットに異常着床する場合を、設計事象として抽出。	○
	クレーン吊下げ時 の衝突（水平吊り）（異常着床） (No. 6)	ブレーキの 故障	巻上げ装置ブレーキを二重化しているため、構内用輸送容器は搬送台車へ衝突（異常着床）しない。	×		×
		操作員の 誤操作	吊下げ時の誤操作により、輸送架台に積載された状態で構内用輸送容器は巻下げ速度で搬送台車に異常着床する可能性がある。	○	クレーンの最大巻下げ速度 0.025m/s で、輸送架台に積載された状態で構内用輸送容器が搬送台車に異常着床する場合を、設計事象として抽出。	○

(3) 設計事象の荷重条件

前項で抽出した設計事象について、構内用輸送容器に発生する加速度を導出し、容器本体及び蓋、バスケット、トラニオンについては荷重条件が既存評価条件に包絡されることを確認し、大口格子用スツールについては設計加速度を設定する。

a. 設計事象の加速度の導出

事象発生時に構内用輸送容器が有する運動エネルギーを被衝突物（輸送架台、転倒防止台座、キャスクピット床面）の弾性により吸収するとして、発生する衝撃加速度を計算した。衝撃加速度の計算方法と結果を以下に示す。

(a) 輸送架台への衝突（垂直姿勢：取り扱いモード No. 2）

対象部位：容器本体及び蓋、バスケット、トラニオン、大口格子用スツール

垂直姿勢で、構内用輸送容器の下部トラニオンが輸送架台のトラニオン受けにクレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合について評価する。

構内用輸送容器の有する運動エネルギーを輸送架台後部支持脚のひずみエネルギーで吸収するとして、(1)式で構内用輸送容器に生じる衝撃加速度を求める。ここで、(1)式より衝撃加速度は質量が小さいほうが保守的な結果となる。また、変形燃料混載時の質量は燃料収納スペースを抜くため健全燃料輸送時よりも小さい。よって、構内用輸送容器の質量は、変形燃料混載時の質量を用いる。

$$\alpha = 1 + \sqrt{1 + \frac{K \cdot V^2}{m \cdot g^2}} \quad (1)$$

ただし、 α ：衝撃加速度（G）

K：輸送架台後部支持脚の圧縮変形バネ定数（ $2.17 \times 10^{10} \text{N/m}$ ）

V：クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）

m：構内用輸送容器の質量（ $6.87 \times 10^4 \text{kg}$ ）

g：重力加速度（ 9.8m/s^2 ）

発生する衝撃加速度は2.75Gとなり、余裕をみて3.0Gを評価加速度とする。

- (b) 構内用輸送容器を載せた輸送架台の搬送台車への衝突（水平姿勢：取り扱いモード No. 6）

対象部位：容器本体及び蓋，バスケット，トラニオン，大口格子用スツール

構内用輸送容器を載せた輸送架台を搬送台車に積載する際に，輸送架台が搬送台車に共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合について評価する。

搬送台車を剛体として，構内用輸送容器の有する運動エネルギーを輸送架台支持脚のひずみエネルギーで吸収するとして，（１）式で構内用輸送容器に生じる衝撃加速度を求める。

ただし， K ：輸送架台前後部支持脚の圧縮変形バネ定数（ $4.54 \times 10^{10} \text{N/m}$ ）

V ：共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）

発生する衝撃加速度は 3.30G となり，余裕をみて 4.0G を評価加速度とする。

- (c) 転倒防止台座への衝突（垂直姿勢：取り扱いモード No. 8）

対象部位：容器本体及び蓋，バスケット，大口格子用スツール

垂直姿勢で構内用輸送容器が転倒防止台座に共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合について評価する。

床面を剛体として，構内用輸送容器の有する運動エネルギーを転倒防止台座のひずみエネルギーで吸収するとして，（１）式で構内用輸送容器に生じる衝撃加速度を求める。

ただし， K ：転倒防止台座の圧縮変形バネ定数（ $8.81 \times 10^{11} \text{N/m}$ ）

V ：共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）

発生する衝撃加速度は 10.2G となり，余裕をみて 11.0G を評価加速度とする。

- (d) キャスクピット床面への衝突（垂直姿勢：取り扱いモード No. 9）

対象部位：容器本体及び蓋，バスケット，大口格子用スツール

垂直姿勢で構内用輸送容器がキャスクピット床面に共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合について評価する。

構内用輸送容器の有する運動エネルギーをキャスクピット床面のひずみエネルギーで吸収するとして，（１）式で構内用輸送容器に生じる衝撃加速度を求める。

ただし， K ：キャスクピット床面のバネ定数（ $4.33 \times 10^{10} \text{N/m}$ ）

V ：共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）

発生する衝撃加速度は 3.26G となり，余裕をみて 4.0G を評価加速度とする。

b. 評価結果

(a) 容器本体及び蓋, バスケット, トラニオン

構内用輸送容器の設計事象における荷重条件と既存評価の荷重条件の比較を表 4-7～表 4-9 に示す。なお, 構内用輸送容器の設計事象及び荷重条件については, 抽出された事象のうち最大の荷重が作用する場合について示す。

表 4-7～表 4-9 に示すとおり, 設計事象における「容器本体及び蓋」, 「バスケット」及び「トラニオン」に作用する荷重条件は既存評価の荷重条件に包絡されており, 評価条件は既存評価に包絡される。

(b) 大口格子用スツール

構内用輸送容器の設計事象における荷重条件を表 4-10 に, 設計加速度を表 4-11 に示す。

表 4-7 荷重条件の比較（容器本体及び蓋）

構内用輸送容器の評価事象及び荷重条件				既存評価の事象及び荷重条件	
設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件	事象	荷重条件
I	構内輸送時	—	容器内圧力：0.6 MPa ボルト初期締付け力 構内輸送時荷重 上方向*1：2.0G 下方向*1：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G 熱荷重	一般の試験条件 0.3m 頭部 垂直落下	容器内圧力：0.6MPa ボルト初期締付け力 落下時荷重：56.2G 熱荷重
				一般の試験条件 0.3m 底部 垂直落下	容器内圧力：0.6MPa ボルト初期締付け力 落下時荷重：56.9G 熱荷重
				一般の試験条件 0.3m 水平落下	容器内圧力：0.6MPa ボルト初期締付け力 落下時荷重：27.7G 熱荷重
	容器の吊上げ， 吊下げ，移動	—	容器内圧力：0.6 MPa ボルト初期締付け力 吊上げ荷重 下方向*2：3.0G （自重を考慮） 熱荷重	一般の試験条件 0.3m 底部 垂直落下	容器内圧力：0.6MPa ボルト初期締付け力 落下時荷重：56.9G 熱荷重
II	輸送架台の搬送台車への衝突 （取り扱いモード No. 6）	—	容器内圧力：0.6 MPa ボルト初期締付け力 輸送架台の搬送台車への衝突時荷重 下方向*1：4.0G （自重を考慮） 熱荷重	一般の試験条件 0.3m 水平落下	容器内圧力：0.6MPa ボルト初期締付け力 落下時荷重：27.7G 熱荷重
	転倒防止台座への衝突 （取り扱いモード No. 8）	輸送架台へのトラニオン衝突 （取り扱いモード No. 2） キャスクピットへの衝突 （取り扱いモード No. 9）	容器内圧力：0.6 MPa ボルト初期締付け力 転倒防止台座への衝突時荷重 下方向*2：11.0G （自重を考慮） 熱荷重	一般の試験条件 0.3m 底部 垂直落下	容器内圧力：0.6MPa ボルト初期締付け力 落下時荷重：56.9G 熱荷重

*1 構内用輸送容器軸と直角な方向

*2 構内用輸送容器軸方向

表 4-8 荷重条件の比較 (バスケット)

構内用輸送容器の評価事象及び荷重条件				既存評価の事象及び荷重条件	
設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件	事象	荷重条件
I	構内輸送時	—	構内輸送時荷重 上方向 ^{*1} : 2.0G 下方向 ^{*1} : 3.0G (自重を考慮) 前後方向 : 2.0G 左右方向 : 1.0G	特別の試験条件 9m 頭部垂直落下	落下時荷重 : 93.0G
				特別の試験条件 9m 底部垂直落下	落下時荷重 : 89.1G
				特別の試験条件 9m 水平落下	落下時荷重 : 89.5G
	容器の吊上げ, 吊下げ, 移動	—	吊上げ荷重 下方向 ^{*2} : 3.0G (自重を考慮)	特別の試験条件 9m 底部垂直落下	落下時荷重 : 89.1G
II	輸送架台の搬 送台車への衝 突 (取り扱いモ ード No. 6)	—	輸送架台の搬送台車 への衝突時荷重 下方向 ^{*1} : 4.0G (自重を考慮)	特別の試験条件 9m 水平落下	落下時荷重 : 89.5G
	転倒防止台座 への衝突 (取り扱いモ ード No. 8)	輸送架台へのト ラニオン衝突 (取り扱いモ ード No. 2) キャスクピット への衝突 (取り扱いモ ード No. 9)	転倒防止台座への 衝突時荷重 下方向 ^{*2} : 11.0G (自重を考慮)	特別の試験条件 9m 底部垂直落下	落下時荷重 : 89.1G

*1 構内用輸送容器軸と直角な方向

*2 構内用輸送容器軸方向

表 4-9 荷重条件の比較（トラニオン）

構内用輸送容器の評価事象及び荷重条件				既存評価の事象及び荷重条件	
設計事象	代表事象	包絡される事象	荷重条件	事象	荷重条件
I	構内輸送時	—	構内輸送時荷重 上方向 ^{*1} ：2.0G 下方向 ^{*1} ：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G	通常の輸送条件 （固縛装置）	構内輸送時荷重 上方向 ^{*1} ：2.0G 下方向 ^{*1} ：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G
	容器の吊上げ、 吊下げ、移動	—	吊上げ荷重 下方向 ^{*2} ：3.0G （自重を考慮）	通常の輸送条件 （吊上装置）	吊上げ荷重 下方向 ^{*2} ：3.0G （自重を考慮）
II	輸送架台への トラニオン衝突 （取り扱いモード No. 2）	輸送架台の搬送台車への衝突 （取り扱いモード No. 6） ^{*3}	輸送架台へのトラニオン衝突時荷重 下方向 ^{*2} ：3.0G （自重を考慮）	通常の輸送条件 （吊上装置）	吊上げ荷重 下方向 ^{*2} ：3.0G （自重を考慮）

*1 構内用輸送容器軸と直角な方向

*2 構内用輸送容器軸方向

*3 輸送架台への衝突（取り扱いモード No. 2）は垂直姿勢で衝突するためトラニオンの荷重負担本数は2本であるのに対して、輸送架台の搬送台車への衝突（取り扱いモード No. 6）では水平姿勢で衝突するためトラニオンの荷重負担本数は4本である。

このため、構内用輸送容器への荷重は取り扱いモード No. 6の方が大きいものの、トラニオンあたりに作用する荷重は取り扱いモード No. 2の方が大きくなる。

以上から、設計事象としては取り扱いモード No. 2が抽出される。

表 4－1 0 荷重条件（大口格子用スツール）

構内用輸送容器の評価事象及び荷重条件			
設計事象	代表事象	包絡される事象	荷重条件
I	構内輸送時	—	構内輸送時荷重 上方向*1：2.0G 下方向*1：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G
	容器の吊上げ， 吊下げ，移動	—	吊上げ荷重 下方向*2：3.0G （自重を考慮）
II	輸送架台の 搬送台車への衝突 （取り扱いモード No. 6）	—	輸送架台の搬送台車への 衝突時荷重 下方向*1：4.0G （自重を考慮）
	転倒防止台座 への衝突 （取り扱いモード No. 8）	輸送架台への トラニオン衝突 （取 り 扱 い モ ー ド No. 2） キャスクピットへの 衝突 （取 り 扱 い モ ー ド No. 9）	転倒防止台座への 衝突時荷重 下方向*2：11.0G （自重を考慮）

*1 構内用輸送容器軸と直角な方向

*2 構内用輸送容器軸方向

表 4－1 1 設計加速度（大口格子用スツール）

方向	設計加速度	備考
構内用輸送容器 軸方向	11.0G (108 m/s ²)	以下の荷重の最大値 ・ 構内輸送時荷重：前後方向 ・ 吊上げ荷重：下方向 ・ 転倒防止台座への衝突時荷重：下方向

(4) 設計基準

a. 容器本体，蓋，バスケット及びトラニオン

既存評価に用いられている設計基準を表 4－1 2 に示す。

表 4－1 2 設計基準

評価条件等	評価部位	設計基準	設計基準の考え方
一般の試験条件	容器本体（胴） 容器本体（底板） 蓋	・発生応力を分類し，各応力強さが以下の基準値以下であること。 $P_m \leq S_m$ $P_L \leq 1.5 S_m$ $P_L + P_b \leq 1.5 S_m$ $P_L + P_b + Q \leq 3 S_m$ ここで，P_m：一次一般膜応力強さ P_L：一次局部膜応力強さ P_b：一次曲げ応力強さ Q：二次応力強さ S_m：設計・建設規格付録材料図表 Part 5 表 1 に示される設計応力強さ	旧通産省告示第 501 号による
	蓋ボルト	・以下の基準値以下であること。 $\sigma_m \leq 2 S_m$ $\sigma_m + \sigma_b \leq 3 S_m$ ここで，σ_m：平均引張応力 σ_b：曲げ応力 S_m：設計・建設規格付録材料図表 Part 5 表 2 に示される設計応力強さ	
特別の試験条件	バスケット	・膜応力強さが降伏応力，（膜＋曲げ）応力強さが降伏応力の 1.5 倍以下であること。	臨界評価上影響のある塑性変形が生じない
通常の輸送条件	トラニオン	・応力強さが降伏応力以下であること。 ここで，応力強さとは主応力の差の絶対値をいう。	旧科技庁 核燃料輸送物設計承認申請書記載要綱（第 2 版）による

b. 大口格子用スツール

既存評価のスツールに用いられている設計基準を用いる。塑性変形が生じないように、膜応力強さが降伏応力以下であることとする。

(5) 評価条件及び評価方法

既存評価の評価条件及び評価方法の内容を以下に示す。

a. 容器本体（胴）、容器本体（底板）、蓋及び蓋ボルト

構内用輸送容器の容器本体及び蓋部の構造強度評価は、想定される圧力荷重、機械的荷重、熱荷重を基に、容器の実形状をモデル化し、ABAQUS コードを用いて容器本体（胴）、容器本体（底板）、蓋及び蓋ボルトの応力評価を行う。

主な構造部材の応力評価箇所を図 4－3 に示す。荷重条件は表 4－7 に示したとおりである。

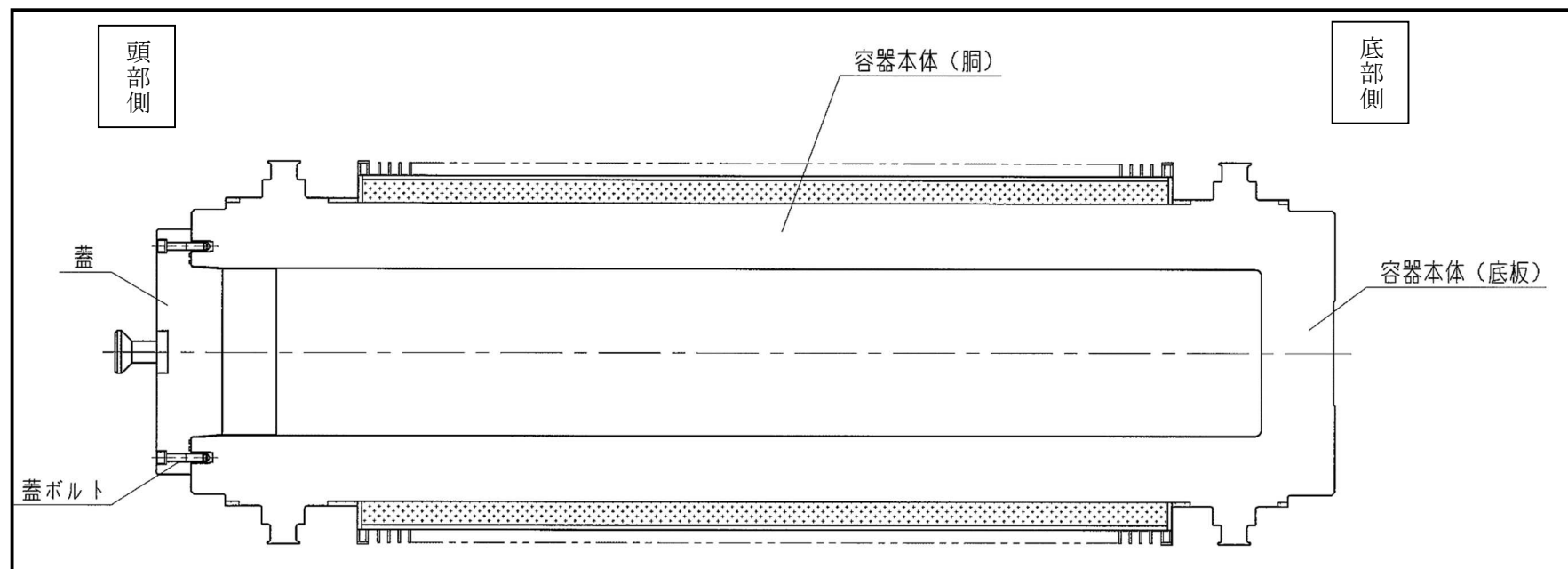


図4-3 容器本体（胴），容器本体（底板），蓋及び蓋ボルトの応力評価箇所

b. バスケット

バスケットの構造強度評価は、想定される機械的荷重を基に応力評価式を用いて評価する。頭部垂直落下時及び底部垂直落下時には上下部のスペーサに慣性力による圧縮応力が生じる。また、水平落下時に、チャンネルの横板には、慣性力により曲げ応力が生じ、チャンネルの縦板には圧縮応力が生じる。これらの応力評価箇所を図4-4に示す。荷重条件は表4-8に示したとおりである。

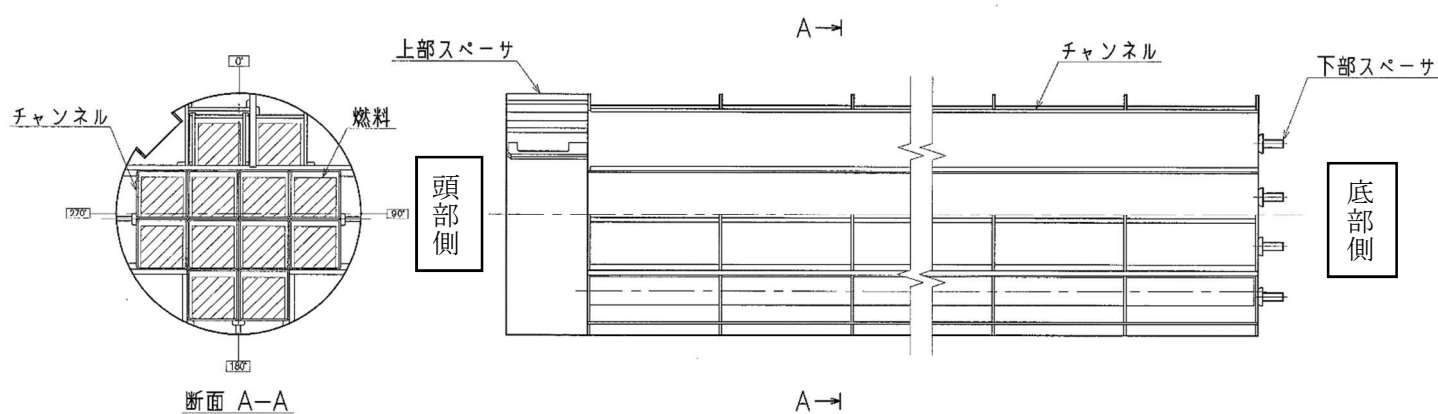


図4-4 バスケットの応力評価箇所

c. トラニオン

トラニオンの構造強度評価は、吊上げ時及び固縛時に想定される機械的荷重を基に応力評価式を用いて評価する。吊上げ時及び固縛時のトラニオンへの荷重点を図4-5に示す。荷重条件は表4-9に示したとおりである。

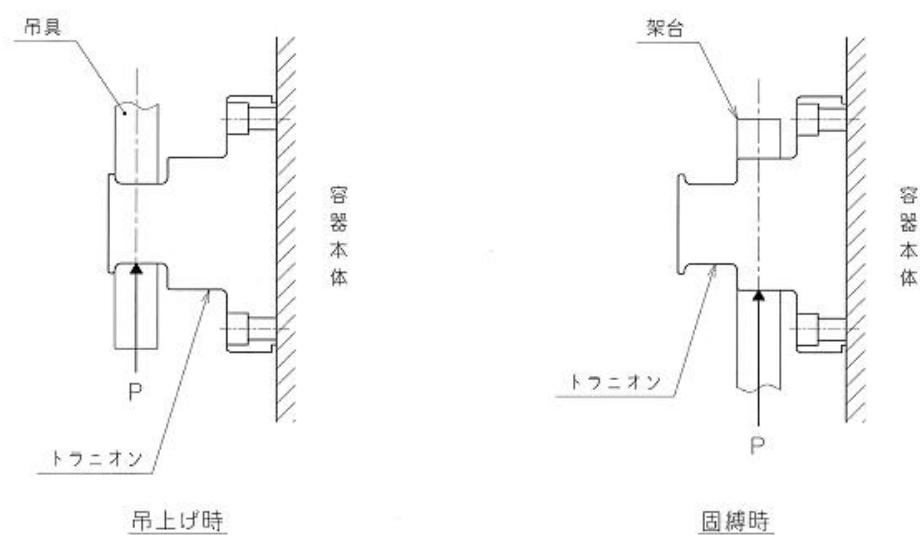


図4-5 トラニオンへの荷重点

d. 大口格子用スツール

大口格子用スツールの構造強度評価は、想定される機械的荷重を基に応力評価式を用いて評価する。構内用輸送容器軸方向に慣性力が作用した場合には大口格子用スツールの脚部に慣性力による圧縮応力が生じる。これらの応力評価箇所を図4-6に示す。

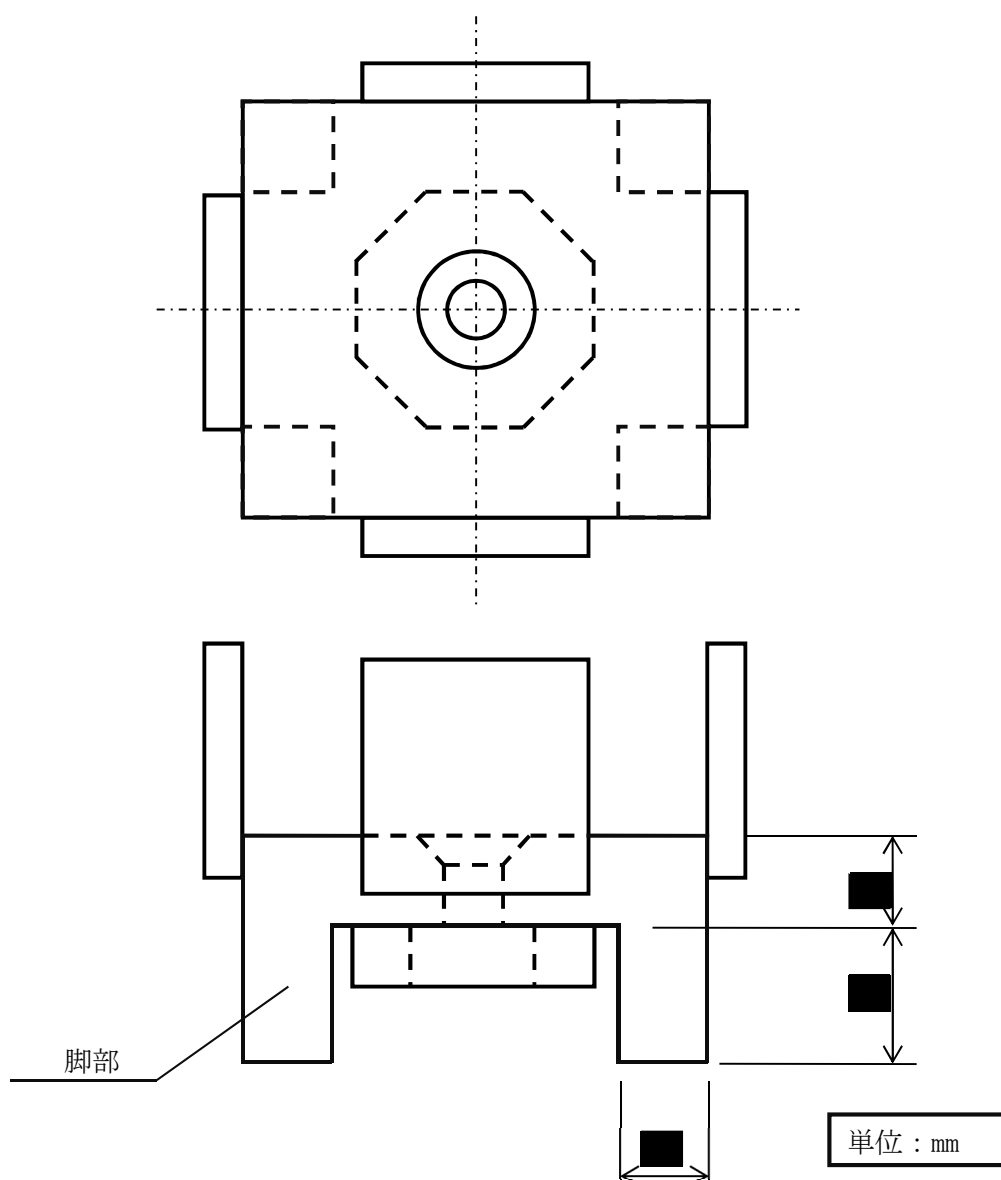


図4-6 大口格子用スツールの応力評価箇所

(6) 評価結果

a. 容器本体及び蓋, バスケット, トラニオン

評価結果を表4-13～表4-15に示す。いずれも, 設計基準値に対して十分に余裕がある。このため, 構内用輸送容器の構造健全性は維持される。

表4-13 容器本体及び蓋の構造強度評価結果

部位	材料	事象	応力分類	設計基準 *1	設計基準値 (MPa) *2	解析結果 (MPa)
容器本体 (胴)	炭素鋼	頭部 垂直落下	一次応力 (Pm)	Sm		15.9
			一次応力 (PL)	1.5		26.8
			(一次+二次) 応力	Sm		57.7
				3 Sm		
		底部 垂直落下	一次応力 (Pm)	Sm		16.1
			一次応力 (PL)	1.5		35.2
		水平落下	(一次+二次) 応力	Sm		38.7
				3 Sm		
容器本体 (底板)	炭素鋼	頭部 垂直落下	一次応力 (PL+Pb)	1.5		2.19
			(一次+二次) 応力	Sm		9.18
				3 Sm		
		底部 垂直落下	一次応力 (PL+Pb)	1.5		35.7
			(一次+二次) 応力	Sm		40.3
				3 Sm		
蓋	ステンレス鋼	頭部 垂直落下	一次応力 (PL+Pb)	1.5		46.8
			(一次+二次) 応力	Sm		79.9
				3 Sm		
		底部 垂直落下	一次応力 (PL+Pb)	1.5		1.77
			(一次+二次) 応力	Sm		12.0
				3 Sm		
		水平落下	一次応力 (PL+Pb)	1.5		10.9
			(一次+二次) 応力	Sm		55.7
				3 Sm		

蓋ボルト	ニッケルクロムモリブデン鋼	頭部 垂直落下	平均引張応力	2 Sm	565	101
			平均引張応力+曲げ応力	3 Sm	848	122
		底部 垂直落下	平均引張応力	2 Sm	565	129
			平均引張応力+曲げ応力	3 Sm	848	191
		水平落下	平均引張応力	2 Sm	565	132
			平均引張応力+曲げ応力	3 Sm	848	389

*1 旧通産省告示第501号による

*2 設計・建設規格より引用

表 4-14 バスケットの構造強度評価結果

部位	材料	事象	応力分類	設計基準 *1	設計基準値 (MPa)	解析結果 (MPa)
バスケット 上部スパーサ	ステンレス鋼	頭部 垂直落下	膜応力	Sy	161 *2	59.0
バスケット 下部スパーサ	ステンレス鋼	底部 垂直落下	膜応力	Sy	161 *2	121
バスケット チャンネル	ボロン入り ステンレス鋼	水平落下	(膜+曲げ)応力	1.5 σ_y	359 *3	262
			膜応力	σ_y	239 *3	39.6

*1 臨界評価上影響のある塑性変形が生じない

*2 設計・建設規格より引用

*3 既存評価の材料試験データ

表 4-15 トラニオンの構造強度評価結果

部位	材料	事象	応力分類	設計基準 *1	設計基準値 (MPa) *2	解析結果 (MPa)
トラニオン	析出硬化型 ステンレス鋼	吊上げ	(膜+曲げ)応力	Sy	656	348
		固縛	(膜+曲げ)応力	Sy	656	127

*1 旧科技庁 核燃料輸送物設計承認申請書記載要綱（第2版）による

*2 設計・建設規格より引用

b. 大口格子用スツール

構内用輸送容器軸方向に慣性力が作用する場合の大口格子用スツールの脚部には燃料の慣性力が作用し、圧縮応力（ σ_c ）が生じる。

$$\sigma_c = W \cdot G_v / A$$

ただし、W：燃料（チャンネルボックス含む）重量（320 kg）＋大口格子用
スツール重量 [REDACTED]

G_v ：構内用輸送容器軸方向の設計加速度（m/s²）

A：大口格子用スツール脚部の全断面積 [REDACTED]

ここで、

W [REDACTED]

$$G_v = 108 \text{ m/s}^2$$

したがって、

$$\sigma_c = [REDACTED] \times 108 [REDACTED]$$

$$= 9.93 \text{ MPa}$$

130℃におけるステンレス鋼の設計降伏点 S_y は 161MPa であるので、大口格子用スツールは塑性変形しない。また、脚部の高さは [REDACTED] mm と細長比が小さいので座屈することもない。

構造強度計算に用いるコード（ABAQUS）について

（１）概要

ABAQUS コードは米国 Hibbitt, Karlsson&Sorensen, Ins. (HKS 社) で開発された有限要素法に基づく応力・座屈解析等の汎用解析コードであり，輸送容器の応力解析等に広く利用されている。

（２）機能

ABAQUS コードは，応力解析に際して以下の機能を有している。

- ① 定常，非定常の弾性，弾塑性のいずれの解も得ることができる。
- ② 材料特性として時間依存，歪の履歴依存並びに等方性・異方性等を考慮することができる。
- ③ モデルの形状は一次元～三次元，又は連続体についても取り扱うことができる。
- ④ 伝熱解析結果をそのまま境界条件として熱応力解析に用いることが可能である。
- ⑤ 荷重条件として集中荷重，分布荷重，モーメント，加速度力（慣性力），圧力，遠心力及びコリオリ力等が取り扱える。また，これらの条件の時間依存，線形変化に対しても対応可能である。

（３）解析フロー

ABAQUS コードの解析フローを図 4－7 に示す。

（４）使用実績

ABAQUS コードは，これまで多くの応力解析に対し使用実績がある。

（５）検証方法

理論値との比較による検証が実施されていることを確認している。

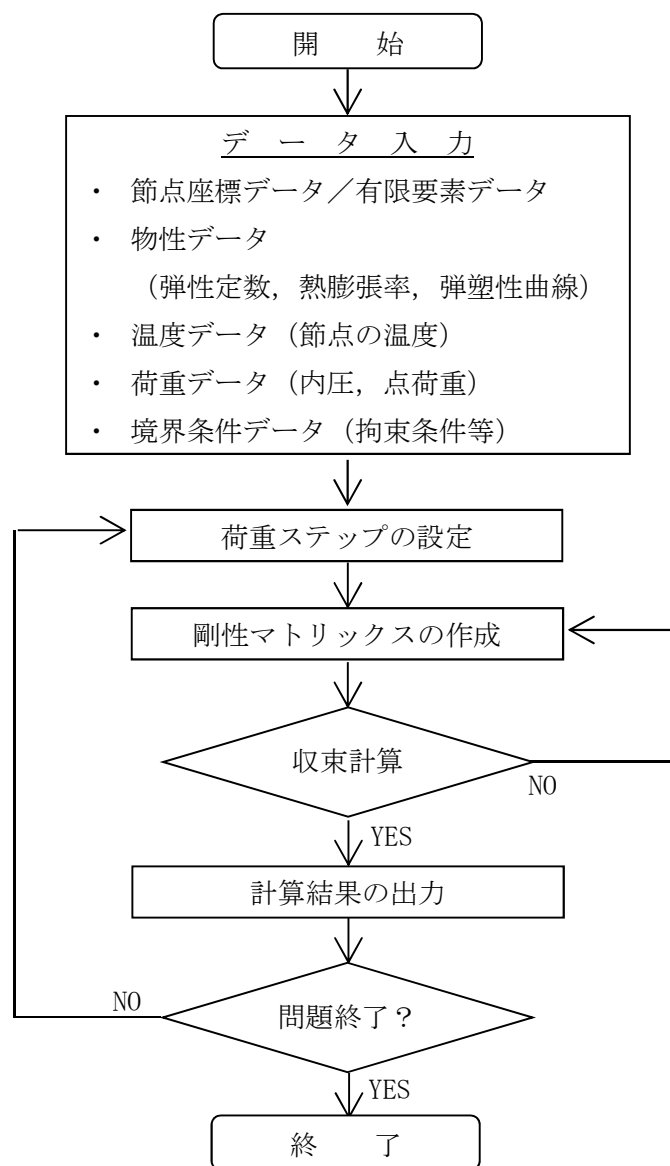


図 4 - 7 ABAQUS コードの応力解析フロー図

容器内水の放射線分解による圧力上昇について

本構内用輸送容器（NFT-12B 型）の核燃料輸送物設計変更承認書別紙（以下、「SAR」という。）には、NFT-14P 型及び NFT-38B 型を例として、実輸送後の輸送容器内の水素ガス濃度の測定結果及び容器内のガンマ線照射線量から求めた評価結果が示されている。

SAR（参考資料 ロ章 B 容器内水の放射線分解による圧力上昇について）では、ガンマ線照射量を保守的に NFT-12B 型を含む NFT 型輸送物を包含する $1\text{Gy/s}(3,600\text{Gy/h})$ を仮定しても、水素ガス濃度の評価値は小さく（2.4%と評価）、容器内圧の上昇として無視できるものであることが示されている。

NFT-12B 型は表—4 および表—5 に示す 4 号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料を対象にしており、容器内のガンマ線照射量は SAR の燃料仕様に基づくガンマ線照射線量（約 $0.8\text{Gy/s}(2,910\text{Gy/h})$ ）に比べてさらに小さくなると考えられることから、SAR において評価された水素発生量を超えることは無く、新規に水素発生対策を追加する必要はないと考えられる。

また、SAR の該当箇所の抜粋を以下に記載する。

B. 2 容器内水の放射線分解による圧力上昇について

輸送容器内のような密閉した槽内での水の放射線分解により発生するガスの水中濃度はある飽和値に達する。ここでは、NFT-14P型及びNFT-38B型を例として、実輸送後に輸送容器内の水素ガス濃度を測定した結果¹⁾及びNFT型輸送物の評価を以下に示す。

1. NFT型輸送容器内の水素ガス濃度測定結果

(1) 測定対象輸送容器

測定対象輸送容器は、PWR燃料輸送用のNFT-14P型及びBWR燃料用のNFT-38B型とし、各1基の測定を行った。収納物は、漏えいのない健全な使用済燃料であり、ガンマ照射線量はそれぞれ640Gy/h及び844Gy/hである（中性子による照射線量は全照射線量の 10^{-6} 程度であるため評価の上で無視した）。

(2) 輸送容器内ガスのサンプリング

NFT型輸送容器の内部ガスは、蓋膨張室内とキャビティ内に分かれているため、それぞれからガスのサンプリングを行なった。サンプリングは、NFT型輸送容器からの使用済燃料の取り出し作業の過程で行った。

まず、輸送容器縦起し状態にて、蓋のバルブを通して、蓋膨張室内のガスをサンプリングタンクに回収し、検知器にガスを吸入して測定した（(ロ)－第B. 参1図）。

次に、輸送容器縦起し状態にて、輸送容器をプールに入水し、蓋を取り外す際に、輸送容器にガス捕集フードを取付け、サンプリングラインを通してサンプリングバッグに回収し、サンプリングバッグから検知器にキャビティ内のガスを吸入して測定した（(ロ)－第B. 参2図）。

(3) 水素ガス濃度測定

水素濃度の測定は、ガス検知管により行った。実測結果を(ロ)－第B. 参1表に示す。NFT-14P型及びNFT-38B型の水素濃度測定値は、いずれも発火下限の水素濃度4%を下回る結果であった。

(ロ)－B－2

(ロ)－第B． 参1表 水素ガス濃度測定結果¹⁾

輸送物	水素ガス濃度	
	蓋膨張室	キャビティ
N F T－1 4 P型	0.50%	1.24%
N F T－3 8 B型	0.14%	0.43%

2. N F T型輸送容器内の水素ガス濃度評価

(1) 水素ガス濃度を測定したN F T型輸送容器に対する評価

参考文献(1)では、計算評価値として、類似の環境下における水の放射線分解による水素定常濃度評価結果をベースに、水中定常濃度が照射線量の平方根に比例するとして、水素ガス濃度の概算計算を行っている。その評価結果を(ロ)－第B． 参2表に示す。N F T－1 4 P型では計算値が実験値を若干下回っており、N F T－3 8 B型では計算値が実験値を上回っているが、比較的良好一致を示している。

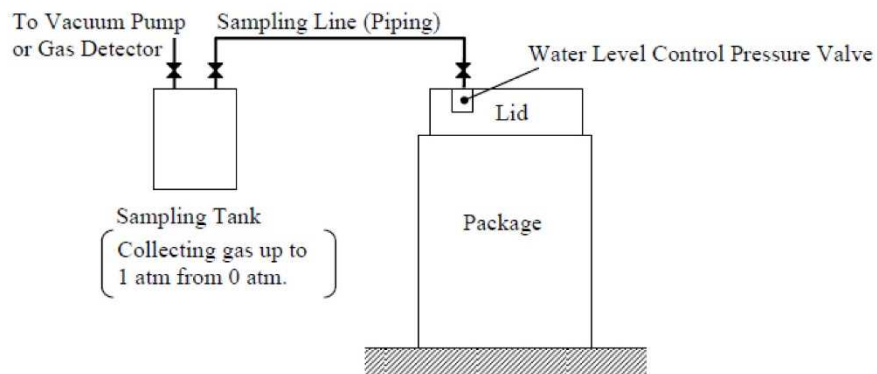
(ロ)－第B． 参2表 水素ガス濃度評価結果¹⁾

輸送物	ガンマ線照射線量	水素ガス濃度
N F T－1 4 P型	640Gy/h	0.99%
N F T－3 8 B型	844Gy/h	1.14%

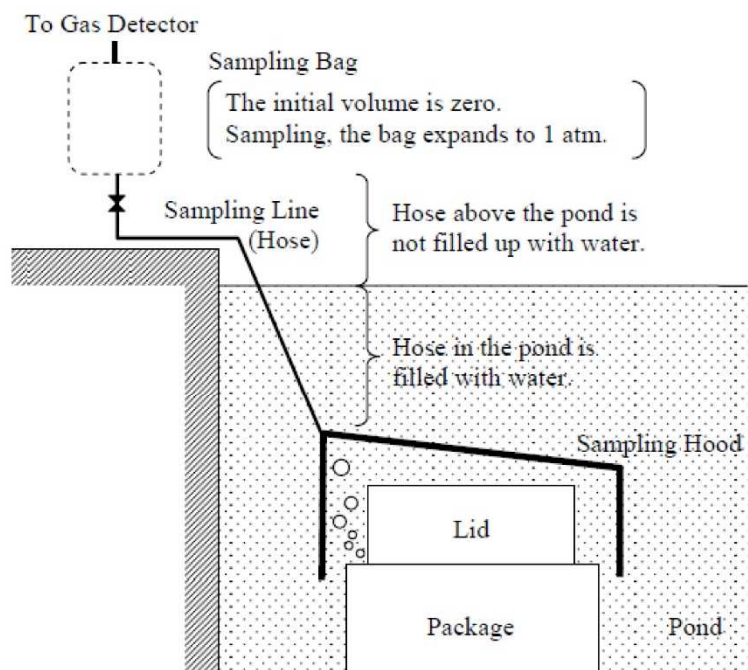
(2) N F T型輸送物における線源条件に対する評価

N F T型輸送物において、最もガンマ線源強度が大きいN F T－1 4 P型においても、ガンマ線照射量は約0.7Gy/sであるが、仮にガンマ線照射線量を保守側に1Gy/s(3600Gy/h)としても、(1)で示した値を同様に水中定常濃度が照射線量の平方根に比例するとして補正すると、水素ガス濃度は2.4%となる。この値は、水素ガスの爆発下限である空気との混合比4%に対して十分小さい値であり、容器内圧の上昇としても無視できるものである。

(ロ)－B－3



(ロ)－第B. 参1図 蓋膨張室内ガスのサンプリング方法¹⁾



(ロ)－第B. 参2図 輸送容器キャビティ内ガスのサンプリング方法¹⁾

(ロ)－B－4

<参考文献>

- 1) Y. Fujita, M. Ebihara, "Evaluation of Hydrogen Yield in Spent Fuel Transport Package",
The 16th International Symposium on the Packaging and Transportation of Radioactive
Materials (PATRAM 2010), October 3-8, 2010, London, UK, Poster Session 210 (2010).

(12)-B-5

4.2. 除熱機能

4.2.1. 健全燃料輸送時

(1) 基本的な考え方

除熱設計にあたっては、燃料の健全性及び構内用輸送容器の安全機能を有する構成部材の健全性が維持できるよう、以下のとおり設計する。

- a. 収納された使用済燃料より発生する崩壊熱は、胴内に充填した水及び空気の自然対流及び伝導により容器本体胴に伝えられる。
- b. 容器本体胴に伝えられた熱は主として中性子遮蔽部のレジン中に設けた伝熱フィンにより外筒に伝えられる。
- c. 外筒に伝えられた熱は外筒及び外筒に設置したフィンにより大気に放散する。

除熱機能の評価においては、収納する使用済燃料の最大崩壊熱量を考慮し、環境条件には構外用輸送容器としての安全評価に用いられている条件を用い、自然冷却により冷却されるものとして各部の温度を求め、各部材料の制限温度を超えないことを評価する。

構内輸送では緩衝体を装着しない運用とするが、既存評価の除熱設計において緩衝体は断熱の効果を有していることから、緩衝体を装着しない運用は除熱性能が向上し、容器本体の温度は既存評価における各部温度に比べて低くなる。また、表4－4に示したように、構内用輸送容器に収納する燃料仕様は既存評価に用いている燃料仕様に包絡されており、既存評価に比べて使用済燃料の崩壊熱量は十分低いものとなっている。このため、評価結果は既存評価書の内容を引用する。

(2) 設計基準

設計基準を表 4－16 に示す。

表 4－16 設計基準

対象部位	材質	設計基準	設計基準 温度 (℃)	備考
構内用 輸送容器	レジン	使用可能温度	149	中性子遮蔽材
	ふっ素ゴム	使用可能温度	300	Oリング
	炭素鋼	構造強度が確保される制限 温度	375	胴
	ステンレス鋼	構造強度が確保される制限 温度	425	蓋
	ボロン入り ステンレス鋼	構造強度が確保される制限 温度	200	バスケット
燃料 被覆管	ジルカロイ-2	照射硬化回復現象により燃料被覆管の機械的特性が著しく低下しない温度及び水素化物の再配向による被覆管の機械的特性の低下が生じない温度以下となる温度 *1, *2	200	7×7 燃料, 8×8 燃料
			300	新型 8×8 ジルコニウム炉燃料, 高燃焼度 8×8 燃料, 9×9 燃料

*1 平成 18 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料長期健全性等確認試験に関する試験最終報告書)(06 基炉報-0006, 独立行政法人原子力安全基盤機構)

*2 平成 19 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料健全性等調査に関する試験成果報告書)(07 基炉報-0004, 独立行政法人原子力安全基盤機構)

(3) 燃料仕様

既存評価では最大崩壊熱量（15kW）で評価を実施しており，本構内輸送で収納を予定している燃料の崩壊熱量（最大 8kW）を包絡している。

(4) 評価条件

既存評価の内容を以下に示す。

構内用輸送容器の除熱評価は，以下の 2 種類の解析モデルを用いて行う。

a. 半径方向輪切り軸方向フィン半ピッチモデル

（以下「輪切り半ピッチモデル」という。）

b. 軸方向二次元軸対称全体モデル

（以下「全体モデル」という。）

輪切り半ピッチモデル形状図を図 4－8 に，全体モデル形状図を図－9 に示す。

また，評価条件を表 4－17 に示す。

表 4－17 評価条件

項目		評価条件
収納体数	（体）	12
崩壊熱量	（kW）	15
周囲温度	（℃）	38
太陽熱放射 （W/m ² ）	垂直に輸送される表面及び水平 に輸送されない下向きの表面	200
	その他の表面（曲面）	400

レジン，伝熱フィン

水位

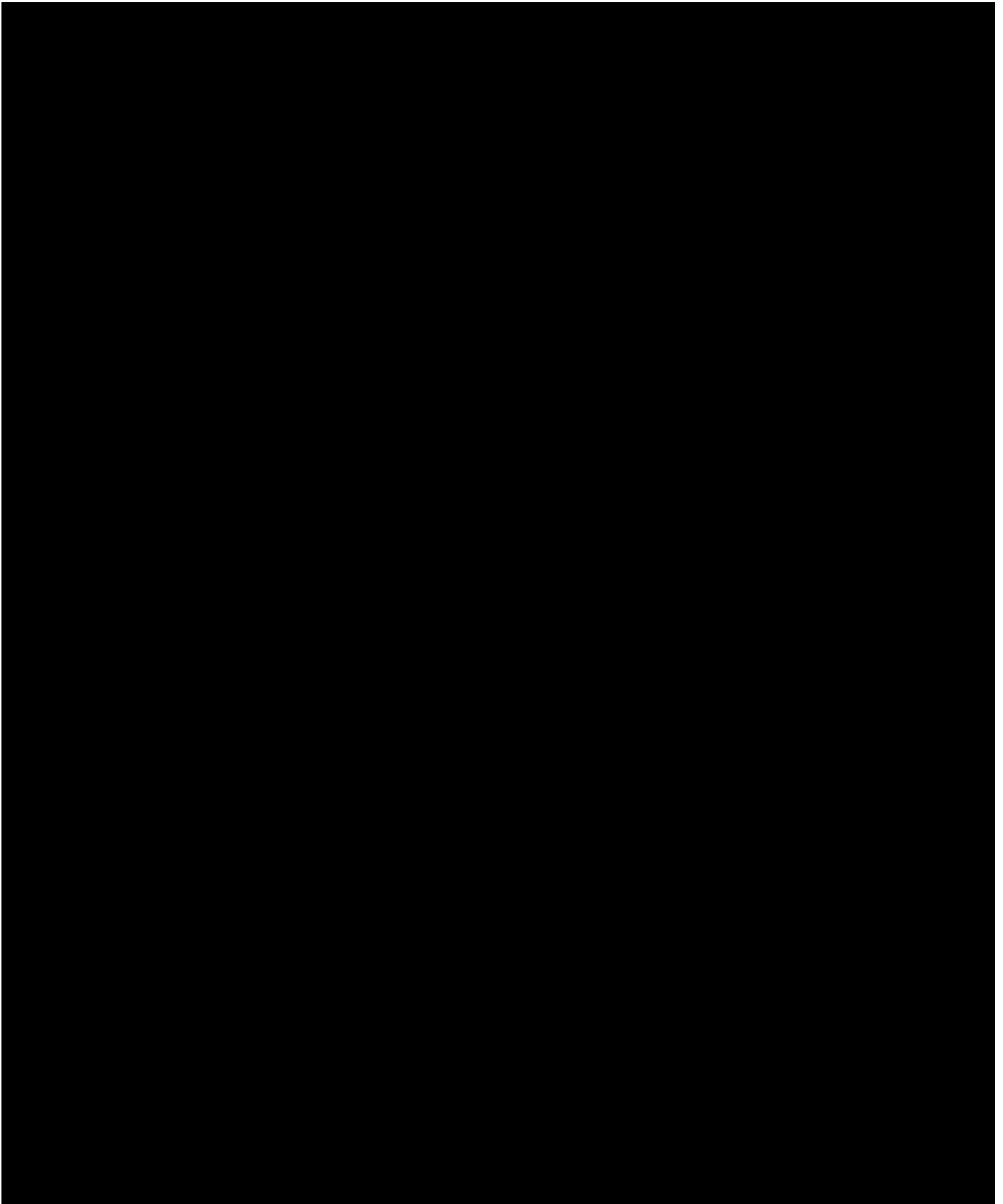


図 4－8 輪切り半ピッチモデル形状図

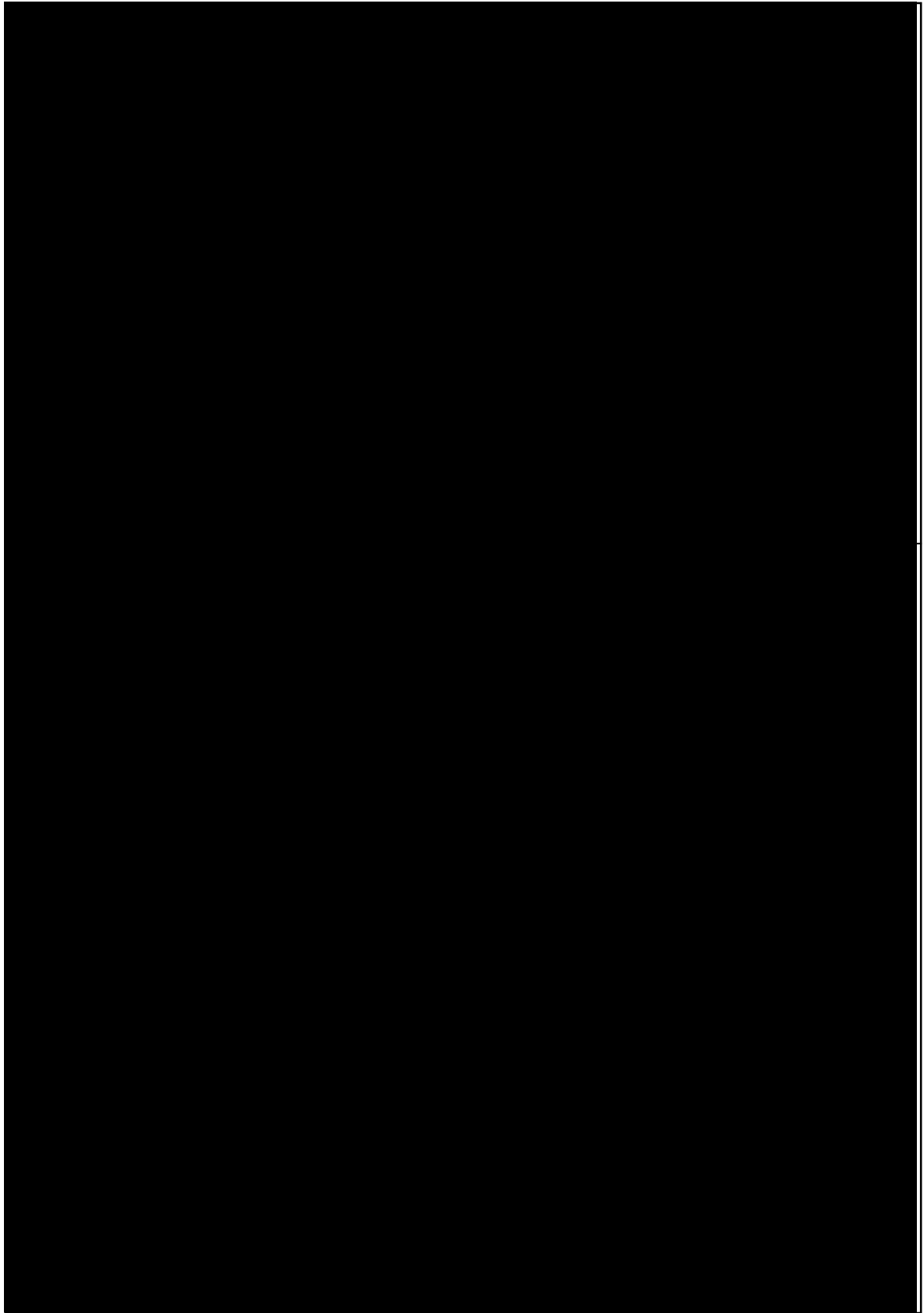


図 4－9 全体モデル形状図

*1 構内輸送では, 上部緩衝体及び下部緩衝体は装着しない。

(5) 評価方法

軸方向を断熱とした輪切り半ピッチモデルで構内用輸送容器中央部断面の各部温度を評価する。輪切り半ピッチモデルで評価できない部位については、軸方向の温度分布が求められる全体モデルで評価する。

解析には ABAQUS コードを用いる。

(6) 評価結果

評価結果を表 4-18 に示す。本表に示すとおり、構内用輸送容器を構成する部材はいずれも設計基準温度を下回っており、熱的健全性は維持される。

また、燃料被覆管の温度は 123℃であり、水素化物の再配向による機械特性の低下が生じる温度を大きく下回っており、燃料の健全性は維持される。

表 4-18 評価結果（各部温度）

対象部位	材質	評価結果 (℃)	設計基準 温度 (℃)	備考
構内用 輸送容器	レジン	104	149	中性子遮蔽材
	ふっ素ゴム	106	300	Oリング
	炭素鋼	116	375	胴
	ステンレス鋼	110	425	蓋
	ボロン入りステンレス鋼	120	200	バスケット
燃料 被覆管	ジルカロイ-2	123	200	7×7 燃料, 8×8 燃料
			300	新型 8×8 ジルコニウムライ付燃料, 高燃焼度 8×8 燃料, 9×9 燃料

4.2.2. 漏えい・変形燃料混載時

構内用輸送容器に収納する漏えい・変形燃料の燃料仕様は既存評価に用いている燃料仕様に包絡されており、既存評価に比べて使用済燃料の崩壊熱量は十分低いものとなっている。このため、評価結果は前項の健全燃料輸送時の評価に包絡される。

なお、万が一輸送容器の取り扱い中に漏えい燃料棒が破損し、漏えい燃料棒2本分のペレットが放出されたとしても、放出ペレットの発熱量は設計発熱量の0.1%未満であり、構内用輸送容器の構成部材及び燃料の健全性に影響はない。

また、既存評価の解析モデルには燃料収納スぺーサをモデル化しているが、燃料収納スぺーサがない場合でも上記と同様に崩壊熱量は十分低いものとなっていることから、構内用輸送容器の構成部材及び燃料の健全性に影響はない。

除熱解析に用いるコード（ABAQUS）について

（１） 概要

ABAQUS コードは、米国 Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. (HKS 社) で開発された有限要素法に基づく伝熱解析等の汎用解析コードであり、輸送容器の伝熱解析等に広く利用されている。

（２） 機能

ABAQUS コードは、伝熱解析に際して以下の機能を有している。

- ① 定常、非定常のいずれの解も得ることができる。
- ② 一次元～三次元の任意形状の構造に対して解くことが可能である。
- ③ 初期条件（温度）は要素ごとに変化させることができ、計算ステップの自動決定も可能である。
- ④ 境界条件として、時間に依存する熱流束、温度、伝導、対流及び放射が考慮できる。
- ⑤ 構成物質の相変態が考慮できる。

（３） 解析フロー

ABAQUS コードの解析フローを図 4-10 に示す。

（４） 使用実績

ABAQUS コードは、多くの伝熱解析に使用された実績がある。

（５） 検証方法

貯蔵容器の定常伝熱試験に対して ABAQUS コードによる解析結果と試験結果を比較・検討し、本コードの妥当性が検証されている*1。

*1 山川秀次, 五味義雄, 尾崎幸男, 尾崎明朗「使用済燃料キャスク貯蔵技術の確立—キャスクの伝熱特性評価—」, 電中研報告書, U92038, (1993)

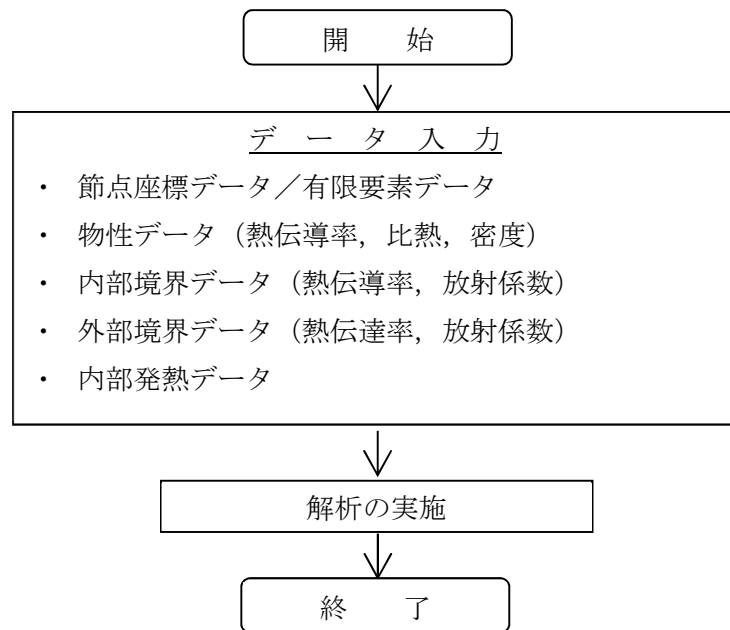


図 4－1 0 ABAQUS コードの伝熱解析フロー図

除熱解析に用いるコード（ORIGEN2）について

（１） 概要

ORIGEN2 コードは、米国オークリッジ国立研究所（ORNL）で開発された炉内中性子束の 1 点近似による燃焼計算コードである。ORIGEN2 コードは汎用解析コードであり、輸送容器の崩壊熱計算等に広く利用されている。

（２） 機能

ORIGEN2 コードは、燃焼解析に際して以下の機能を有している。

- ① 燃料の炉内での燃焼計算，炉取出し後の減衰計算により，冷却期間に対応した崩壊熱，放射線の強度，各核種の放射エネルギー等が求められる。
- ② 原子炉の炉型と燃料の組合せに対し，中性子エネルギースペクトルの違いにより重みをつけた断面積ライブラリが内蔵されており，任意に選択できる。
- ③ 計算結果は，放射化生成物，アクチニド，核分裂生成物に分類して出力される。
- ④ 燃焼計算に必要な放射性核種データ（崩壊熱，ガンマ線のエネルギー分布，自発核分裂と（ α ， n ）反応により発生する中性子線源強度等）に関しては，ORIGEN2 コード専用のライブラリがあり，これを用いる。

（３） 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを図 4-11 に示す。

（４） 使用実績

ORIGEN2 コードは，輸送容器，核燃料施設の崩壊熱計算に広く使用されている*1。

（５） 検証方法

汎用コードの導入評価*1 が実施されていることが確認されている。

大型実験/ベンチマーク試験による検証*2 が実施されていることが確認されている。

*1 ORNL, “ORIGEN2 Isotope Generation and Depletion Code MATRIX EXPONENTIAL METHOD”, CCC-371

*2 (社)日本原子力学会 “原子炉崩壊熱とその推奨値”，1989 年 8 月

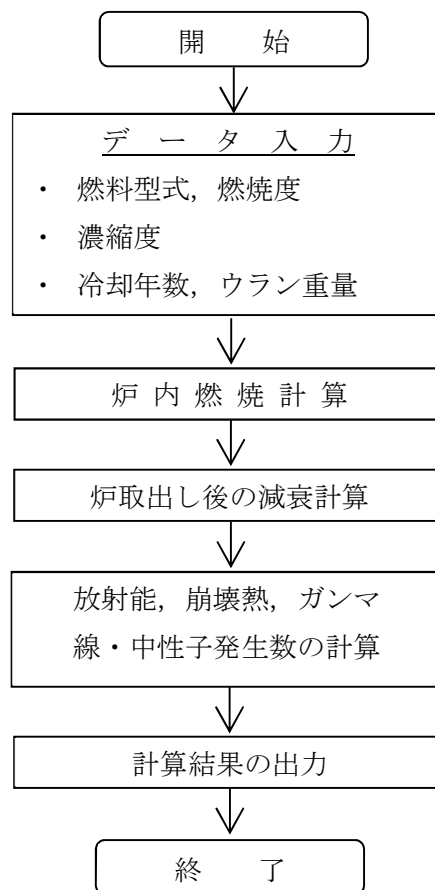


図 4-11 ORIGEN2 コードの計算フロー図

4.3. 密封機能

(1) 基本的な考え方

構内用輸送容器の密封装置は、容器本体及び蓋より構成される密封容器とこれに付属するバルブから構成される。容器本体と蓋の間、及びバルブのガスケットにはＯリングが使用されている。構内用輸送容器の密封境界を図４－１２に示す。

密封機能の評価にあたっては、構造強度評価及び除熱機能評価の結果から、構内用輸送容器の密封性能が維持されることを確認する。

(2) 評価結果

4.1. 項に示したとおり、構造強度評価から蓋、蓋ボルト、胴及び底板は構内輸送における荷重条件に対して十分な強度を有しており、密封装置の構造健全性に問題がないことが確認されている。

また、4.2. 項に示したとおり、除熱機能評価から構内輸送時のＯリングの温度は 106℃以下であり、設計基準温度である 300℃を大きく下回ることから、熱的健全性に問題ないことが確認されている。

以上から、構内用輸送容器の密封性能は維持される。

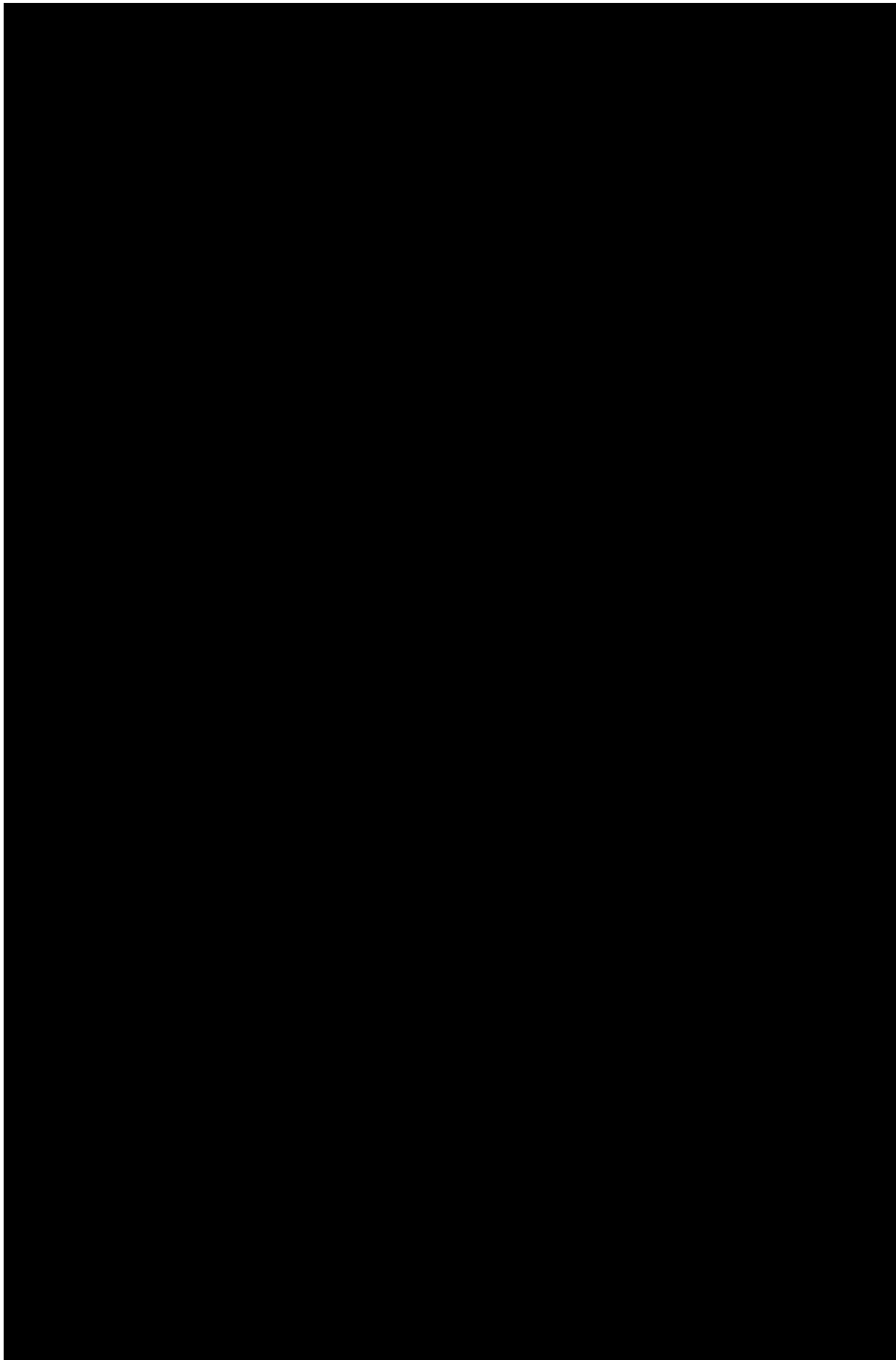


图 4-1-2 密封境界

4.4. 遮蔽機能

4.4.1. 健全燃料輸送時

(1) 基本的な考え方

遮蔽設計にあたっては、内部に燃料を入れた場合に放射線障害を防止するため、使用済燃料の放射線を適切に遮蔽する能力を有するよう以下のとおり設計する。

- a. 構内用輸送容器はガンマ線遮蔽と中性子遮蔽の機能を有する。
- b. 主要なガンマ線遮蔽材は、胴、底板及び外筒の炭素鋼と蓋のステンレス鋼である。
- c. 主要な中性子遮蔽材は、胴内水及び胴と外筒間のレジンである。

遮蔽機能の評価においては、収納する使用済燃料の線源強度を考慮し、構外用輸送容器としての安全評価に用いられている評価手法を用い、構内用輸送容器表面及び表面から 1 m における線量当量率が設計基準を超えないことを評価する。

なお、表 4－4 に示したように、構内用輸送容器に収納する燃料仕様は既存評価に用いている燃料仕様に包絡されるが、構内輸送では緩衝体がない状態で運用することから、再評価を実施する。ただし、緩衝体がない解析モデルである事以外は既存評価と同じとし、既存評価書の内容を引用する。

(2) 設計基準

設計基準を表 4－19 に示す。

表 4－19 設計基準

(単位： $\mu\text{Sv/h}$)

	設計基準
構内用輸送容器 表面	2000 以下
構内用輸送容器 表面から 1 m	100 以下

(3) 評価条件

(a) 遮蔽厚さ

構内用輸送容器の遮蔽厚さを表 4-20 に示す。

表 4-20 遮蔽厚さ

(単位：mm)

	炭素鋼	ステンレス鋼	レジン
側部 方向		—	
頭部軸方向	—		—
底部軸方向		—	—

(b) 線源条件

表 4-4 に示すように、構内輸送においては 9×9 燃料を収納する場合は、最も放射能強度が大きく、遮蔽上厳しい線源条件となる。なお、遮蔽機能の評価においては、既存評価の燃料の線源条件で評価する。

構内用輸送容器の収納物の線源条件を表 4-21 に示す。

表 4-21 線源条件

項目	線源条件
平均燃焼度 (MWd/t)	
冷却期間 (日)	
収納体数 (体)	12
放射能強度 (Bq)	

(c) 線源強度及びエネルギー

a. ガンマ線源強度

燃料有効部のガンマ線源強度の計算は ORIGEN2 コードにより行う。得られたガンマ線源強度を表 4-22 に示す。また、構造材の放射化によるガンマ線源強度は次式で計算する。構造材の放射化によるガンマ線源強度を表 4-23 に示す。

$$A = N_0 \cdot \sigma \cdot \phi \cdot \{1 - \exp(-\lambda \cdot T_1)\} \cdot \exp(-\lambda \cdot T_2)$$

ここで、A：放射化核種 (^{60}Co) の放射能 (Bq)

N_0 ：ターゲット核種 (^{59}Co) の個数 (atoms)

σ ：2200m/s の中性子による ^{59}Co の (n, γ) 反応断面積 (cm^2)

ϕ ：炉内照射熱中性子束 ($\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$)

λ ： ^{60}Co の崩壊定数 (/日)

T_1 ：照射期間 (日)

T_2 ：冷却期間 (日)

表 4－2 2 ガンマ線源強度

(輸送容器1基あたり)

エネルギー 群 数	平均エネルギー (MeV)	線源強度 (photons/s)
1	0.01	
2	0.025	
3	0.0375	
4	0.0575	
5	0.085	
6	0.125	
7	0.225	
8	0.375	
9	0.575	
10	0.85	
11	1.25	
12	1.75	
13	2.25	
14	2.75	
15	3.5	
16	5.0	
17	7.0	
18	9.5	
合 計		

表 4－2 3 構造材の放射化によるガンマ線源強度

(輸送容器 1 基あたり)

	⁶⁰ Co 線源強度 (Bq)
ハンドル部	
上部グリッド部	
上部プレナム部	
下部タイプレート部	

b. 中性子線源強度

中性子線源強度の計算は ORIGEN2 コードにより行う。得られた中性子線源強度を表 4－24 に示す。また、評価に用いる中性子線源スペクトルを表 4－25 に示す。

表 4－24 中性子線源強度 (輸送容器 1 基あたり)

		中性子線源強度 (n/s)
1 次中性子源	(α , n) 反応によるもの	
	自発核分裂によるもの	
	合計	
増倍効果を考慮した全中性子線源強度		

表 4－25 中性子線源スペクトル

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル
1	1.492×10^7	5.72×10^{-4}
2	1.220×10^7	2.02×10^{-3}
3	1.000×10^7	6.07×10^{-3}
4	8.180×10^6	2.00×10^{-2}
5	6.360×10^6	4.12×10^{-2}
6	4.960×10^6	5.27×10^{-2}
7	4.060×10^6	1.10×10^{-1}
8	3.010×10^6	8.74×10^{-2}
9	2.460×10^6	2.28×10^{-2}
10	2.350×10^6	1.15×10^{-1}
11	1.830×10^6	2.07×10^{-1}
12	1.110×10^6	1.89×10^{-1}
13	5.500×10^5	1.31×10^{-1}
14	1.110×10^5	1.59×10^{-2}
15	3.350×10^3	8.12×10^{-5}
16	5.830×10^2	5.89×10^{-6}
17	1.010×10^2	3.89×10^{-7}
18	2.900×10^1	5.53×10^{-8}
19	1.070×10^1	1.33×10^{-8}
20	3.060×10^0	1.88×10^{-9}
21	1.120×10^0	4.19×10^{-10}
22	4.140×10^{-1}	1.20×10^{-10}

(4) 評価方法

遮蔽計算は、ガンマ線、中性子共に DOT3.5 コードを用いて計算し、構内用輸送容器表面及び表面から 1 m の線量当量率を求める。

遮蔽解析モデルを図 4-13～図 4-15 に示す。解析モデルは、構内用輸送容器の実形状を考慮した上で、構内用輸送容器の底部トランニオン周辺について中性子遮蔽材の遮蔽厚さが水位方向とトランニオン方向で異なることから、頭部方向、底部水位方向及び底部トランニオン方向に分けてモデル化する。

ライブラリとしては、DLC-23/CASK データを用い、線量当量率への変換は ICRP Publ. 74 に従う。

解析モデルでは既存評価と同様に以下の条件を考慮する。

- ・ 胴内での燃料の軸方向の移動を考慮し、安全側に頭部方向評価モデルでは蓋方向に、底部方向評価モデルでは底方向に移動したモデルとする。
- ・ 胴内水温度は、収納物の崩壊熱量 15kW における水温（116℃）より高 []℃ に設定する。
- ・ 胴内水位は、安全側に [] 場合の水位とする。
- ・ バスケットの [] ，遮蔽体として考慮し、他の部分については、[] は燃料領域に均質化し、[] に置換え、均質化領域から除外する。
- ・ フィンは、空気に置換え、距離のみ考慮する。
- ・ [] に置換え、均質化領域から除外する。
- ・ 各部寸法はすべてノミナル値とし、公差は密度係数として考慮する。

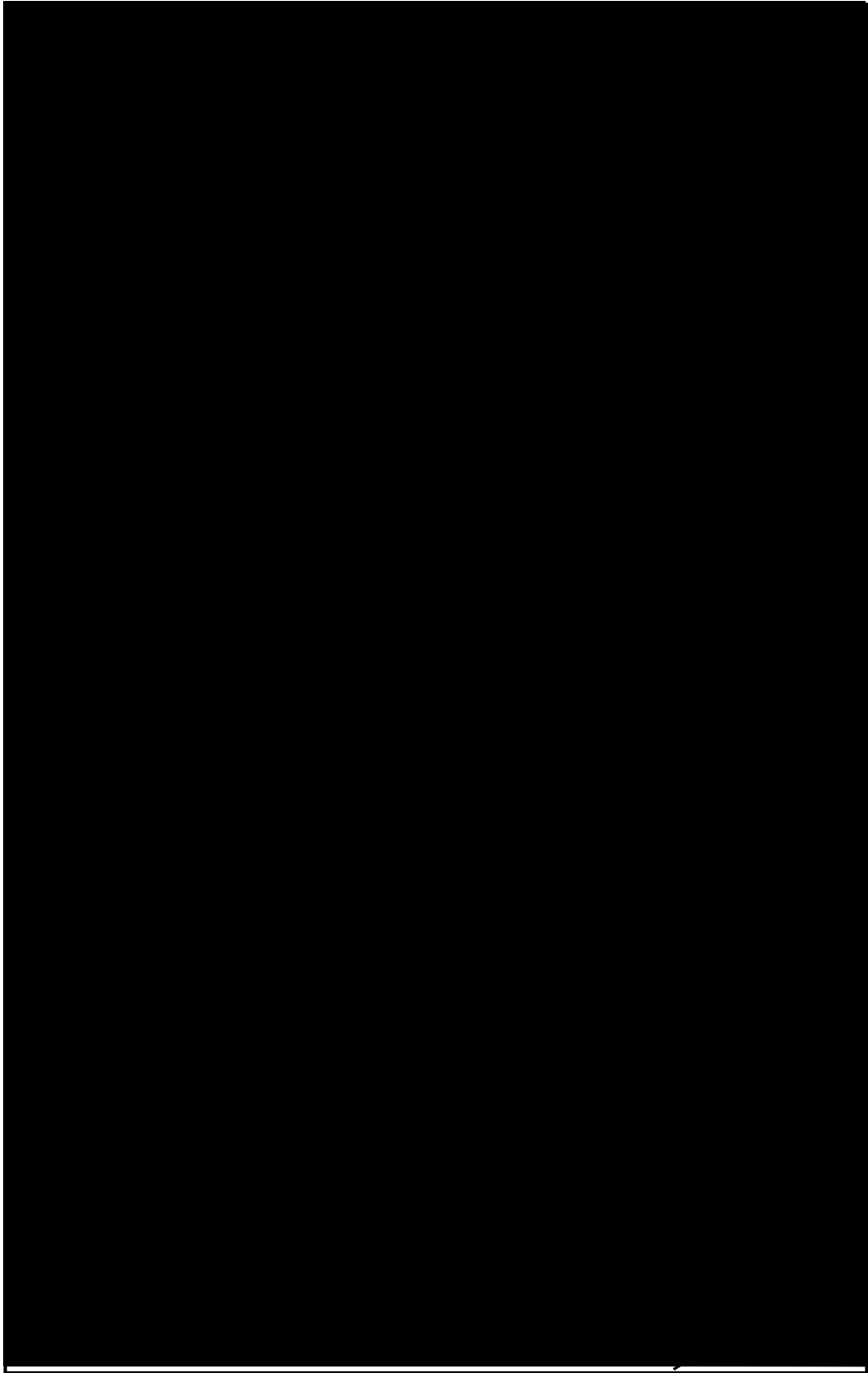


図 4－13 遮蔽解析モデル（頭部方向）

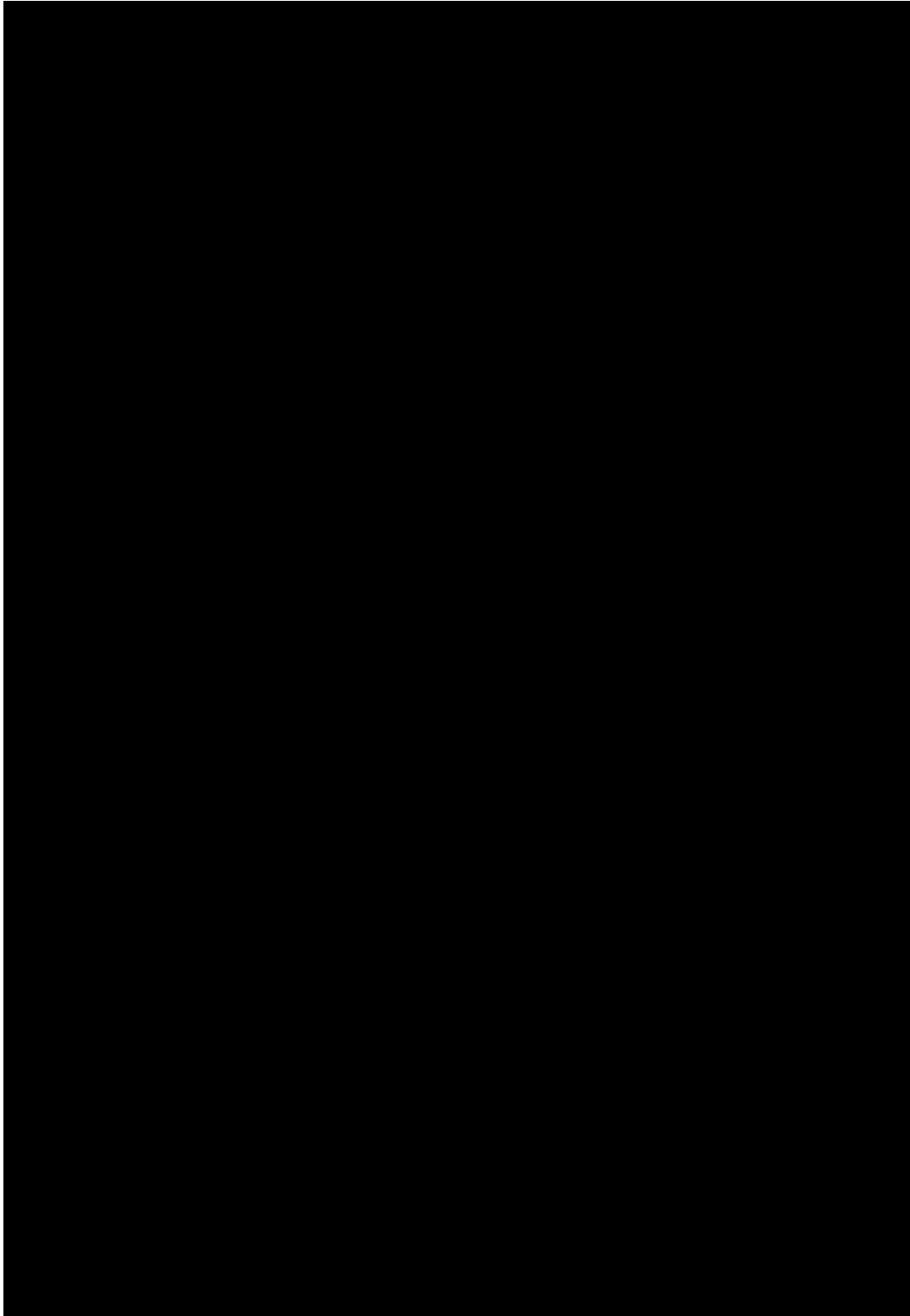


図 4 - 1 4 遮蔽解析モデル（底部水位方向）

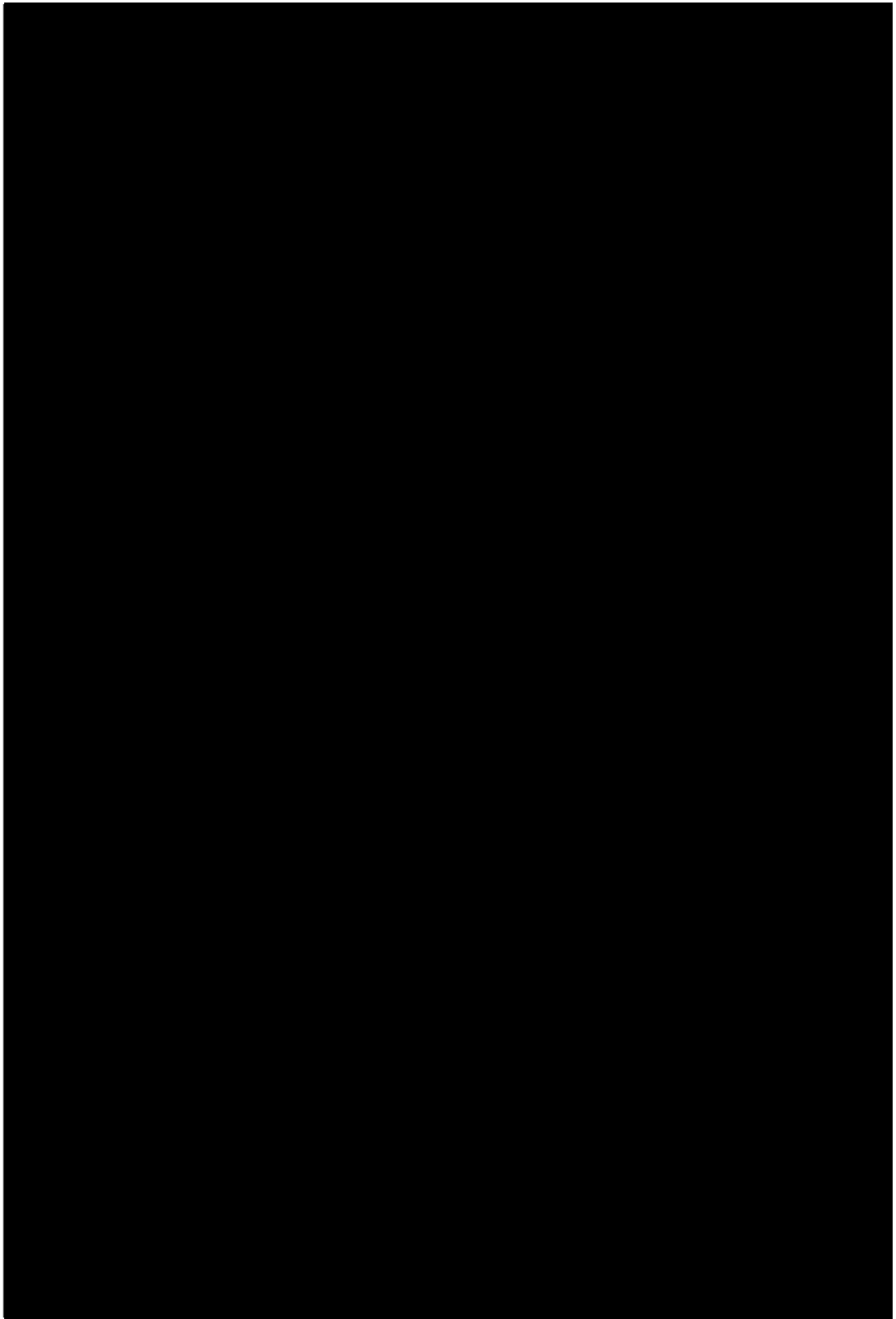


図 4 - 1 5 遮蔽解析モデル（底部トラニオン方向）

(5) 評価結果

構内用輸送容器の線量当量率評価位置を図 4－1 6 に, 評価結果を表 4－2 6 に示す。
なお, 評価結果は頭部軸方向, 頭部径方向, 側部, 底部径方向, 底部軸方向における線
量当量率の最大値を示している。

本表に示すとおり, 構内用輸送容器は設計基準値を満足している。

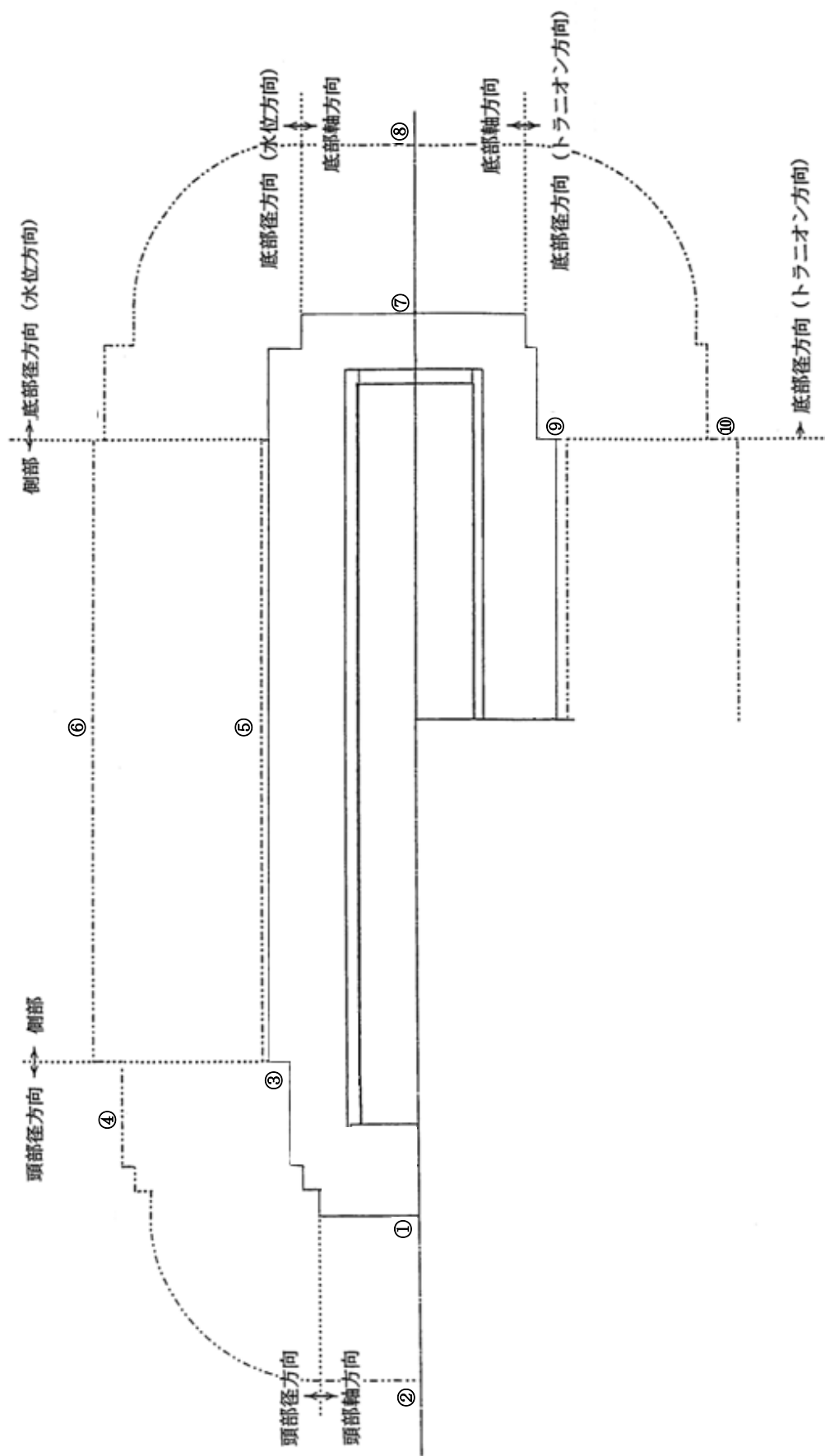


図 4-16 線量当量率評価位置

表 4－2 6 最大線量当量率の計算結果

(単位： $\mu\text{Sv/h}$)

		頭部		側 部	底部	
		軸方向	径方向		軸方向	径方向
評価点		①	③	⑤	⑦	⑨
表面	計算結果	984.6	549.9	236.9	165.1	928.8
	設計基準値	2000				
評価点		②	④	⑥	⑧	⑩
表面から 1 m	計算結果	38.3	44.5	79.5	31.5	57.6
	設計基準値	100				

4.4.2. 漏えい・変形燃料混載時

(1) 基本的な考え方

漏えい・変形燃料混載時の遮蔽機能の評価においては、構外用輸送容器としての安全評価（漏えい燃料収納時）に用いられている評価手法を用い、構内用輸送容器表面及び表面から 1 m における線量当量率が設計基準を超えないことを評価する。

なお、構内輸送では燃料収納缶を用いずに運用することから、再評価を実施する。ただし、燃料収納缶がない解析モデルである事以外は既存評価と同じとし、既存評価書の内容を引用する。

(2) 設計基準

設計基準は健全燃料と同様であり、表 4－19 に示すとおりである。

(3) 評価条件

(a) 線源条件

表 4－5 に示す燃料仕様に基づき求めた、漏えい燃料の線源条件を表 4－27 に示す。

なお、変形燃料については表 4－5 に示すように、冷却期間、平均燃焼度は既存評価の条件に包絡されるため、本評価では変形燃料は安全側に健全燃料として扱うこととする。

表 4－2 7 線源条件

項目		線源条件	
		漏えい燃料①	漏えい燃料②
平均燃焼度	(MWd/t)		
冷却期間	(日)		
収納体数	(体)	1	1

(b) 線源強度及びエネルギー

a. ガンマ線源強度

燃料有効部のガンマ線源強度の計算は ORIGEN2 コードにより行う。得られたガンマ線源強度を表－2 8に示す。

表 4－2 8 ガンマ線源強度

(輸送容器 1 基あたり)

エネルギー 群 数	平均エネルギー (MeV)	線源強度 (photons/s)		
		漏えい燃料①	漏えい燃料②	合計
1	0.01			
2	0.025			
3	0.0375			
4	0.0575			
5	0.085			
6	0.125			
7	0.225			
8	0.375			
9	0.575			
10	0.85			
11	1.25			
12	1.75			
13	2.25			
14	2.75			
15	3.5			
16	5.0			
17	7.0			
18	9.5			
合 計				

b. 中性子線源強度

中性子線源強度の計算は ORIGEN2 コードにより行う。得られた中性子線源強度を表 4-29 に示す。また、評価に用いる中性子線源スペクトルは健全燃料と同様であり、表 4-25 に示すとおりである。

表 4-29 中性子線源強度 (輸送容器 1 基あたり)

		中性子線源強度 (n/s)		
		漏えい燃料①	漏えい燃料②	合計
1 次中性子源	(α , n) 反応によるもの			
	自発核分裂によるもの			
	合計			
増倍効果を考慮した全中性子線源強度				

(4) 評価方法

漏えい燃料については、安全側に漏えい燃料棒の破損を仮定し、漏えい燃料棒 2 本分のペレットが容器内の任意の位置に存在するものとして線量当量率を求める。

遮蔽計算は、ガンマ線、中性子共に ANISN コードを用いて燃料棒 2 本分のペレットに対する線量当量率を求め、安全側に健全燃料 (変形燃料含む) のみ収納時の線量当量率に加算して、構内用輸送容器表面及び表面から 1 m の線量当量率を求める。

解析モデルは一次元球モデルとし、線源位置は図 4-17 に示すとおりである。遮蔽解析モデルを図 4-18 に示す。

なお、ライブラリは、健全燃料と同様に DLC-23/CASK データを用い、線量当量率への変換は ICRP Publ. 74 に従う。

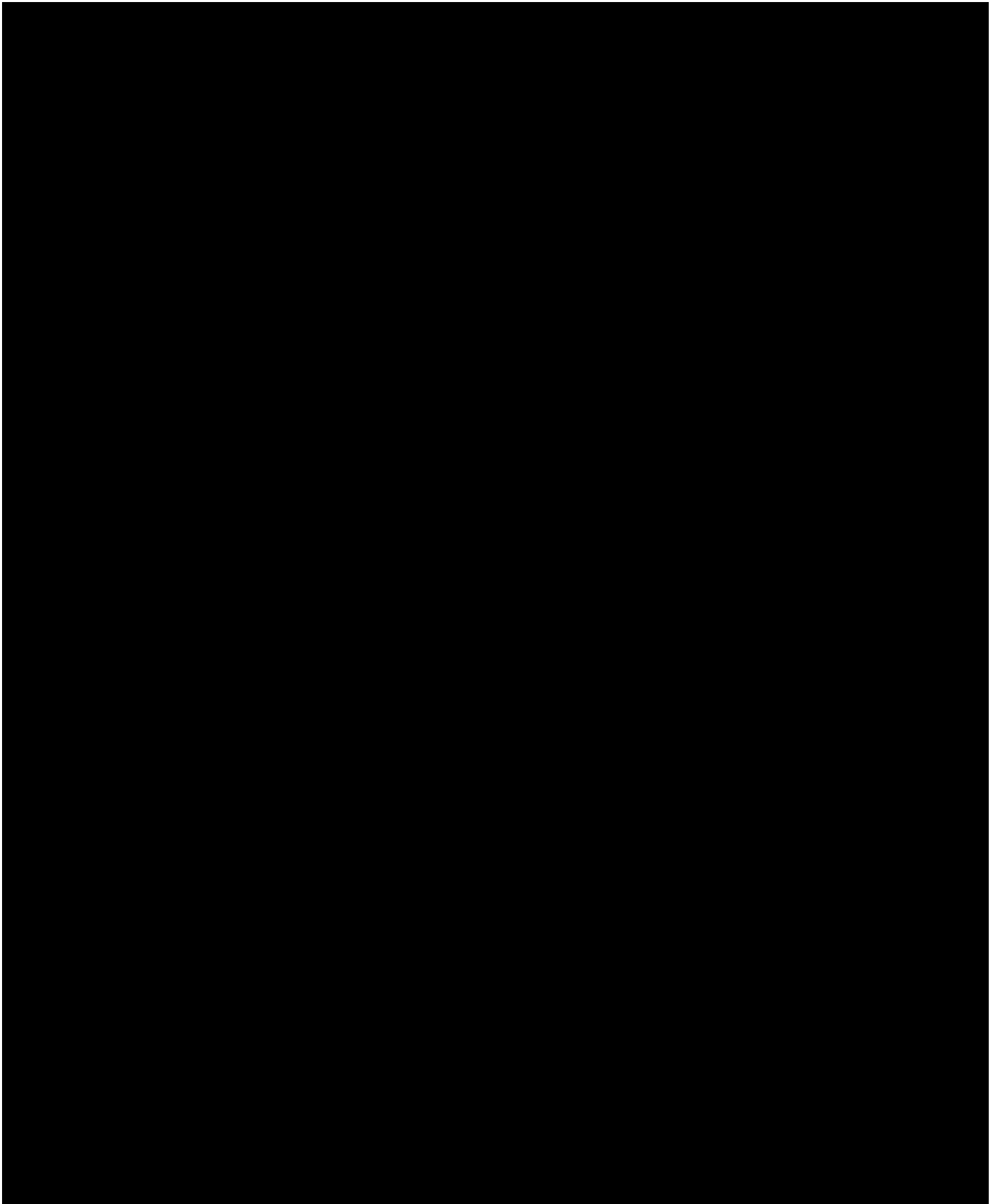
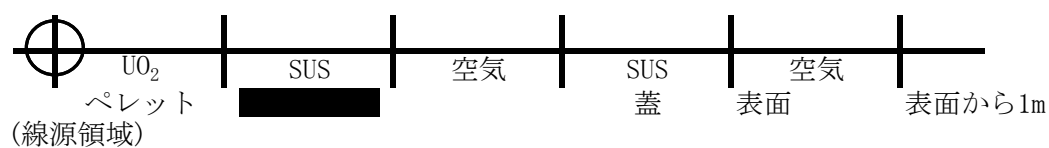
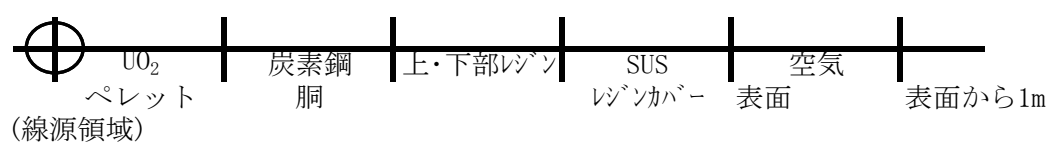


図 4－1 7 漏えい燃料棒 2 本分のペレットに対する遮蔽解析時の線源位置

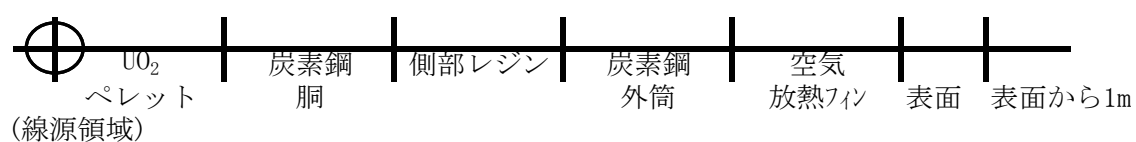
(1) 頭部軸方向



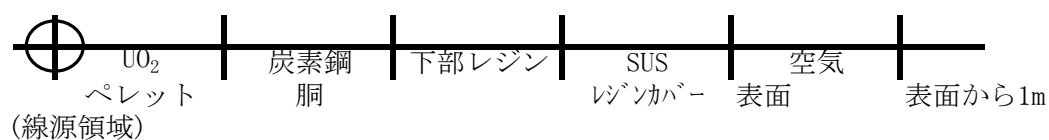
(2) 頭部径方向及び底部トラニオン方向



(3) 側部方向



(4) 底部径方向 (水位方向)



(5) 底部軸方向

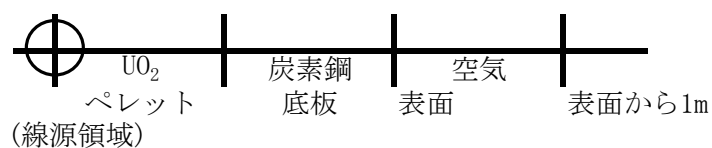


図 4-18 漏えい燃料棒 2 本分のペレットに対する遮蔽解析モデル

(5) 評価結果

漏えい・変形燃料混載時の評価結果を表4-30に示す。なお、評価結果は頭部軸方向，頭部径方向，側部，底部径方向，底部軸方向における線量当量率の最大値を示している。

本表に示すとおり，漏えい・変形燃料混載時においても構内用輸送容器は設計基準値を満足している。

なお，線量当量率評価位置については，健全燃料収納時と同様であり，図4-16に示すとおりである。

表4-30 最大線量当量率の計算結果（漏えい・変形燃料混載時）

（単位： $\mu\text{Sv/h}$ ）

		頭部		側 部	底部	
		軸方向	径方向		軸方向	径方向
評価点		①	③	⑤	⑦	⑨
表面	計算結果	1010.0	607.7	238.3	237.2	986.6
	設計基準値	2000				
評価点		②	④	⑥	⑧	⑩
表面から 1m	計算結果	40.7	47.7	79.8	35.4	60.8
	設計基準値	100				

遮蔽解析に用いるコード (ORIGEN2) について

(1) 概要

ORIGEN2 コードは、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された炉内中性子束の 1 点近似による燃焼計算コードである。ORIGEN2 コードは汎用解析コードであり、輸送容器の放射線源強度計算等に広く利用されている。

(2) 機能

ORIGEN2 コードは、燃焼解析に際して以下の機能を有している。

- ① 燃料の炉内での燃焼計算、炉取出し後の減衰計算により、冷却期間に対応した崩壊熱、放射線の強度、各核種の放射エネルギー等が求められる。
- ② 原子炉の炉型と燃料の組合せに対し、中性子エネルギースペクトルの違いにより重みをつけた断面積ライブラリが内蔵されており、任意に選択できる。
- ③ 計算結果は、放射化生成物、アクチニド、核分裂生成物に分類して出力される。
- ④ 燃焼計算に必要な放射性核種データ（崩壊熱、ガンマ線のエネルギー分布、自発核分裂と (α , n) 反応により発生する中性子線源強度等) に関しては、ORIGEN2 コード専用のライブラリがあり、これを用いる。

(3) 計算フロー

ORIGEN2 コードの計算フローを図 4-19 に示す。

(4) 使用実績

ORIGEN2 コードは、輸送容器、核燃料施設の放射線源強度計算に広く使用されている*1。

(5) 検証方法

汎用コードの導入評価*1 が実施されていることが確認されている。

大型実験/ベンチマーク試験による検証*2 が実施されていることが確認されている。

*1 ORNL, "ORIGEN2 Isotope Generation and Depletion Code MATRIX EXPONENTIAL METHOD", CCC-371

*2 (社)日本原子力学会 “原子炉崩壊熱とその推奨値”, 1989 年 8 月

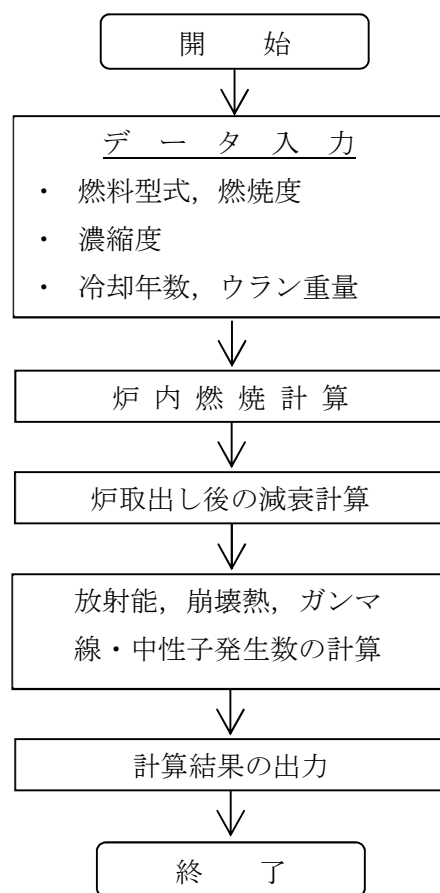


図 4-19 ORIGEN2 コードの計算フロー図

遮蔽解析に用いるコード (DOT3.5) について

(1) 概要

DOT3.5 コード (以下「DOT コード」という。) は二次元輸送コードであり, 米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発された汎用解析コードである。

(2) 機能

DOT コードは, 遮蔽解析に際して以下の機能を有する。

- ① ガンマ線や中性子線に対するボルツマン輸送方程式を解くことによる数値解析法であり, 放射線の挙動を追跡するのに重要な非等方性が表現できる。
- ② DOT コードは, 二次元の体系を扱うことができる。

(3) 解析フロー

DOT コードの解析フローを図 4-20 に示す。

(4) 使用実績

DOT コードは, 原子力施設の遮蔽計算に広く用いられており, 輸送容器の遮蔽解析に豊富な実績がある。

(5) 検証

汎用コードの導入評価*1 が実施されていることが確認されている。

大型実験/ベンチマーク試験による検証*2 が実施されていることが確認されている。

*1 W. A. Rhoades, “DOT3.5 TWO DIMENSIONAL DISCRETE ORDINATES RADIATION TRANSPORT CODE”, CCC-276, 1978 年 10 月

*2 (社)日本原子力学会 “中性子遮蔽設計ハンドブック”, 1993 年 4 月

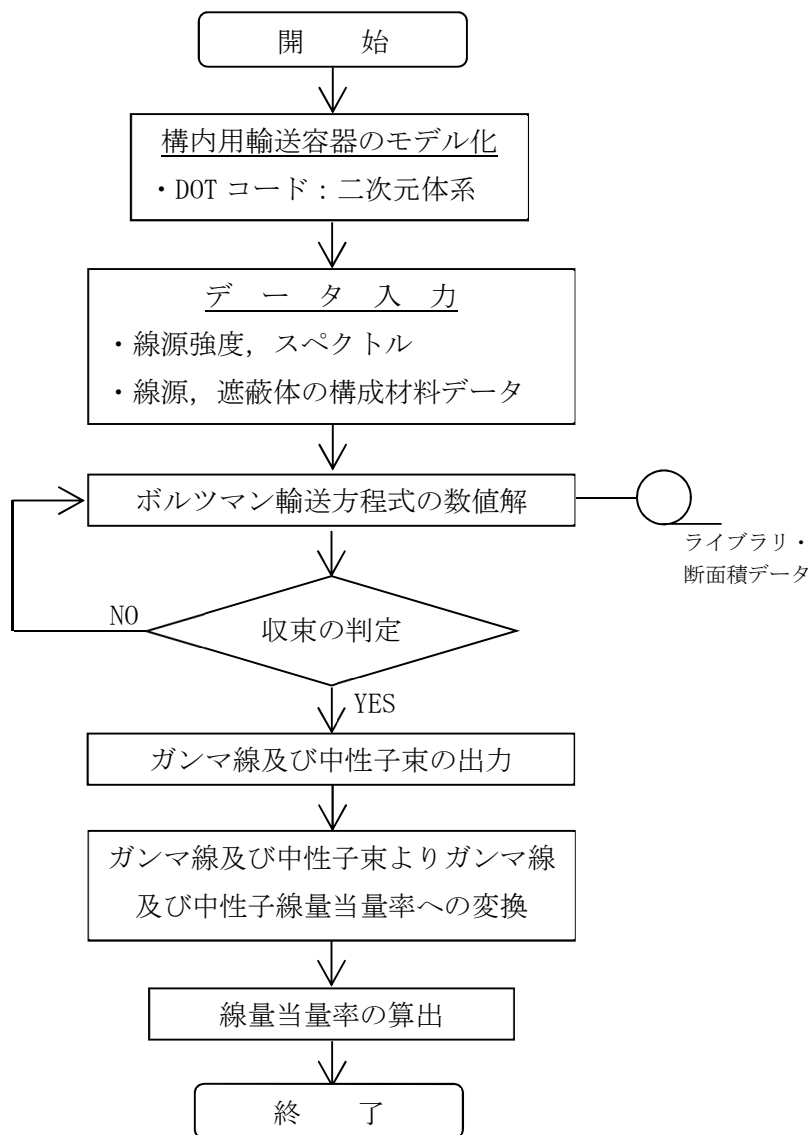


図 4-20 DOT コードの解析フロー図

4.5. 臨界防止機能

4.5.1. 健全燃料輸送時

(1) 基本的な考え方

臨界防止にあたっては、想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止するため以下のとおり設計する。

- a. 燃料を収納するバスケットは格子構造として、燃料を所定の幾何学的配置に維持する設計とする。
- b. バスケットの主要材料には、中性子を吸収するボロン入りステンレス鋼を使用する。

なお、臨界防止機能の評価においては、表4-4に示したとおり、構内用輸送容器に収納する健全燃料の初期濃縮度（約 3.8wt%）は既存評価に用いている初期濃縮度（約 4.2wt%）に包絡されるため、評価結果は既存評価書の内容を引用する。

(2) 設計基準

想定されるいかなる場合も実効増倍率が 0.95 以下であること。

(3) 評価条件

既存評価の内容を以下に示す。また、臨界解析モデルを図4-21及び図4-22に示す。

- ・評価は初期濃縮度の高い9×9燃料について行う。
- ・燃料のウラン-235の濃縮度は未照射のままの減損していない値（初期濃縮度）とする。
- ・燃料集合体には可燃性毒物としてガドリニウムを添加した燃料棒が含まれるが、中性子吸収断面積の大きいガドリニウムの存在を無視し、安全側にガドリニウムを添加していない燃料棒に置換える。
- ・燃料は XXXXXXXXXX 配置された状態とする。また、燃料集合体の変形を考慮し、臨界評価上安全側の仮定となるように収納される全燃料について一部領域の燃料棒ピッチを変化させた配列とする。
- ・バスケット材料のボロン入りステンレス鋼材中の¹⁰B含有量は、製造下限値とする。
- ・チャンネルボックスを水に置換える。
- ・胴内における燃料として実在する部分は燃料有効長に相当する部分のみとし、上・下部タイプレート部等を水に置換える。
- ・胴内の燃料有効長の範囲外の構造物は水に置換える。
- ・中性子遮蔽体及びフィンはないものとする。
- ・輸送容器外部の雰囲気は安全側に真空とする。

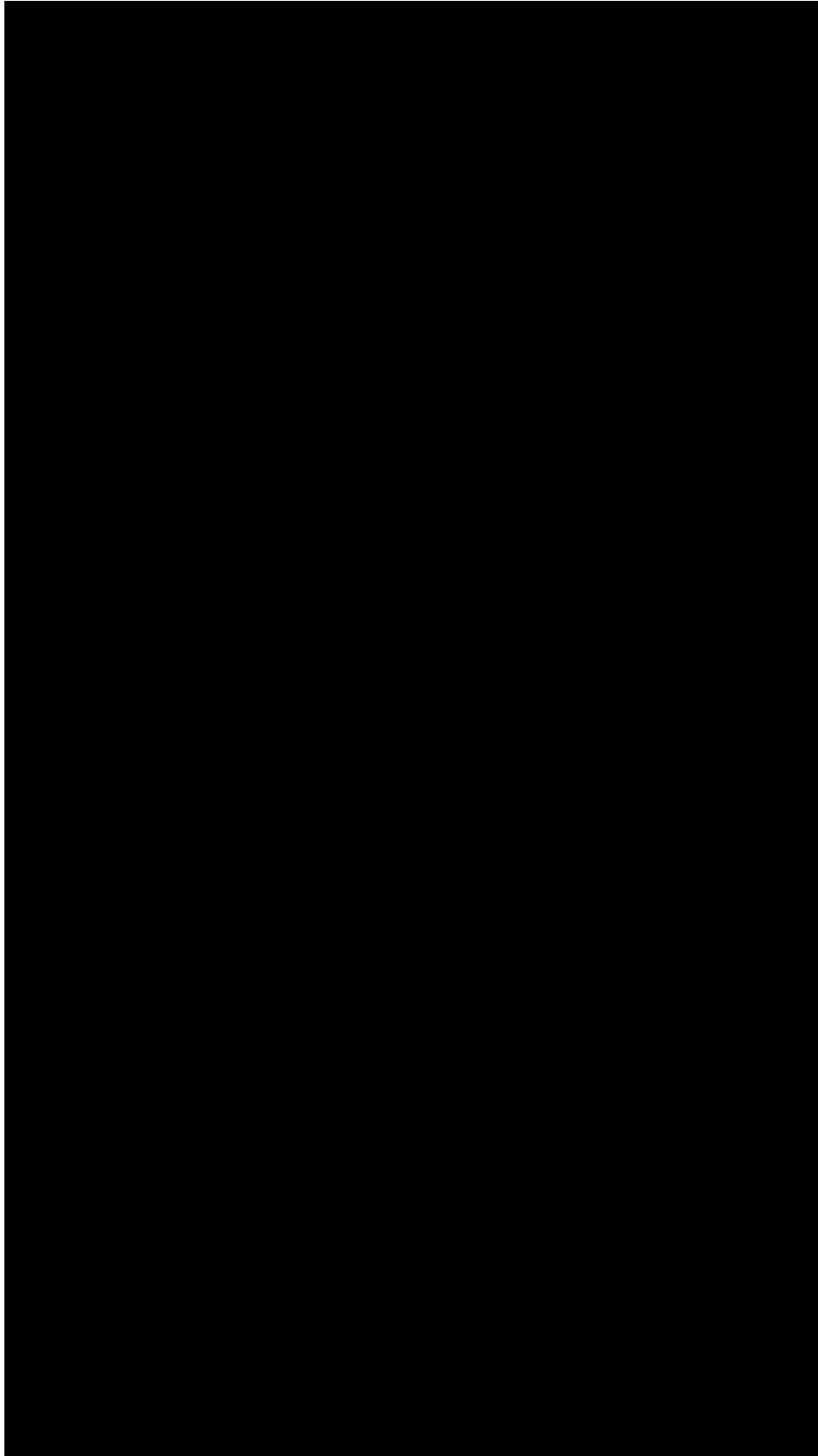


図 4－2 1 臨界解析モデル（縦断面図）

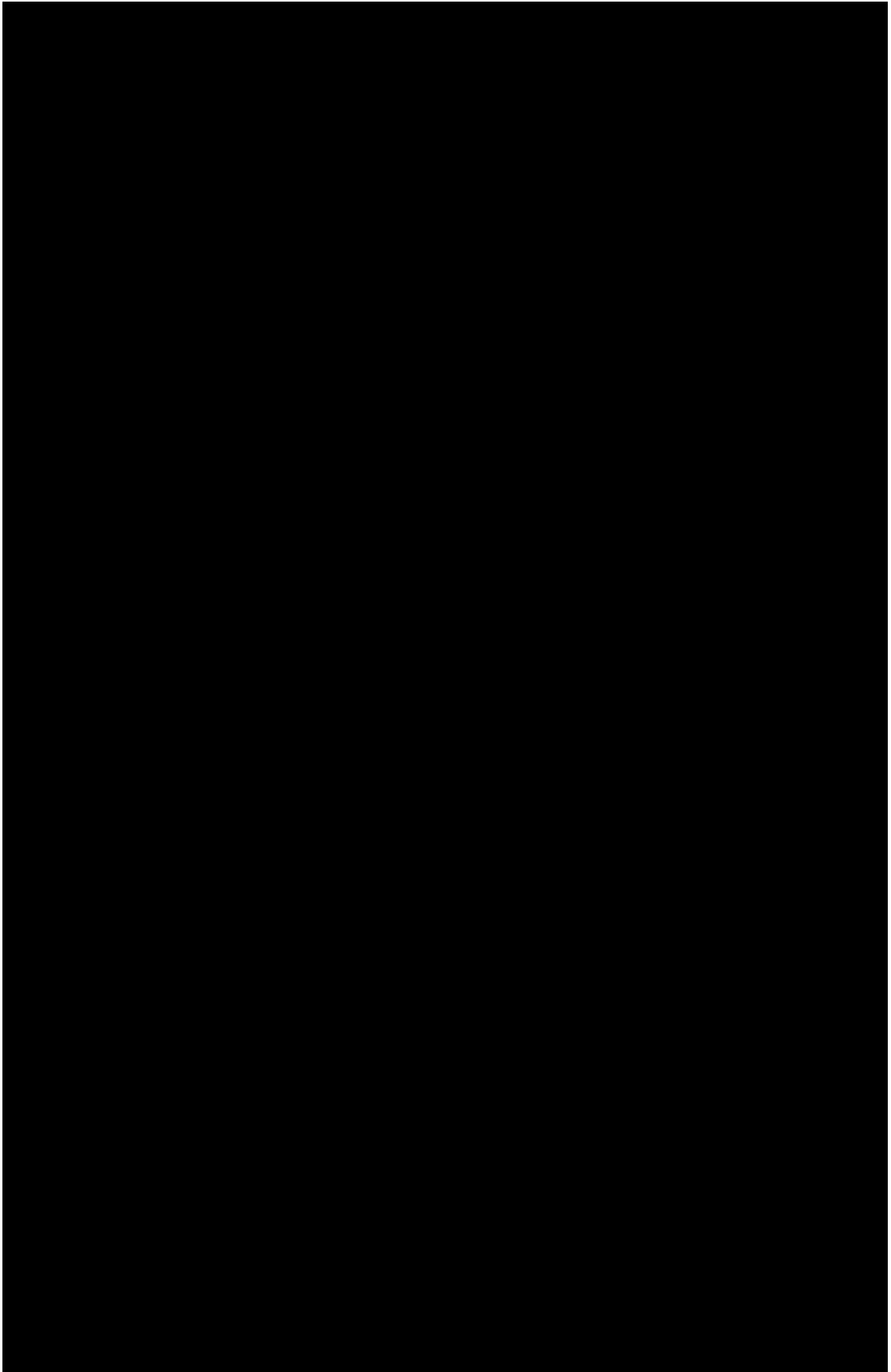


図 4 - 2 2 臨界解析モデル (燃料領域部横断面図)

(4) 評価方法

構内用輸送容器の実効増倍率は、燃料のウラン-235 の濃縮度は未照射のままの減損していない値をとる安全側の仮定で、構内用輸送容器の実形状をモデル化し、KENO-V. a コードを使用して求める。

(5) 評価結果

評価結果を表 4－3 1 に示す。本表に示すとおり、構内用輸送容器の実効増倍率は設計基準を満足している。

表 4－3 1 評価結果

評価対象	実効増倍率	設計基準
構内用輸送容器	0.900 ^{*1}	0.95

^{*1} モンテカルロ計算の統計誤差 (3 σ) を考慮した値

4.5.2. 漏えい・変形燃料混載時

4.5.2.1. 健全燃料及び漏えい燃料輸送時

(1) 基本的な考え方

臨界防止にあたっては、想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止するため以下のとおり設計する。

- a. 燃料を収納するバスケットは格子構造として、燃料を所定の幾何学的配置に維持する設計とする。
- b. バスケットの主要材料には、中性子を吸収するボロン入りステンレス鋼を使用する。

なお、臨界防止機能の評価においては、構内用輸送容器に収納する健全燃料及び漏えい燃料の初期濃縮度は既存評価に用いている初期濃縮度（約 4.2wt%）に包絡されるため、健全燃料及び漏えい燃料は既存評価に用いている燃料と同じ仕様として評価する。さらに、安全側に漏えい燃料棒の破損を仮定し、漏えい燃料棒 2 本分のペレットが構内用輸送容器内に放出されるものとして、既存評価の条件に追加する。

(2) 設計基準

想定されるいかなる場合も実効増倍率が 0.95 以下であること。

(3) 評価条件

評価の内容として、ペレットの放出を考慮する以外は健全燃料輸送時と同様とする。臨界解析モデルを図 4-23 及び図 4-24 に示す。

放出されたペレットはペレットと水が混ざった状態とし、図 4-24 に示した燃料領域以外の水領域に存在するものと仮定する。また、ペレットと水は水／ウラン比及びペレット粒径が最適な状態とする。

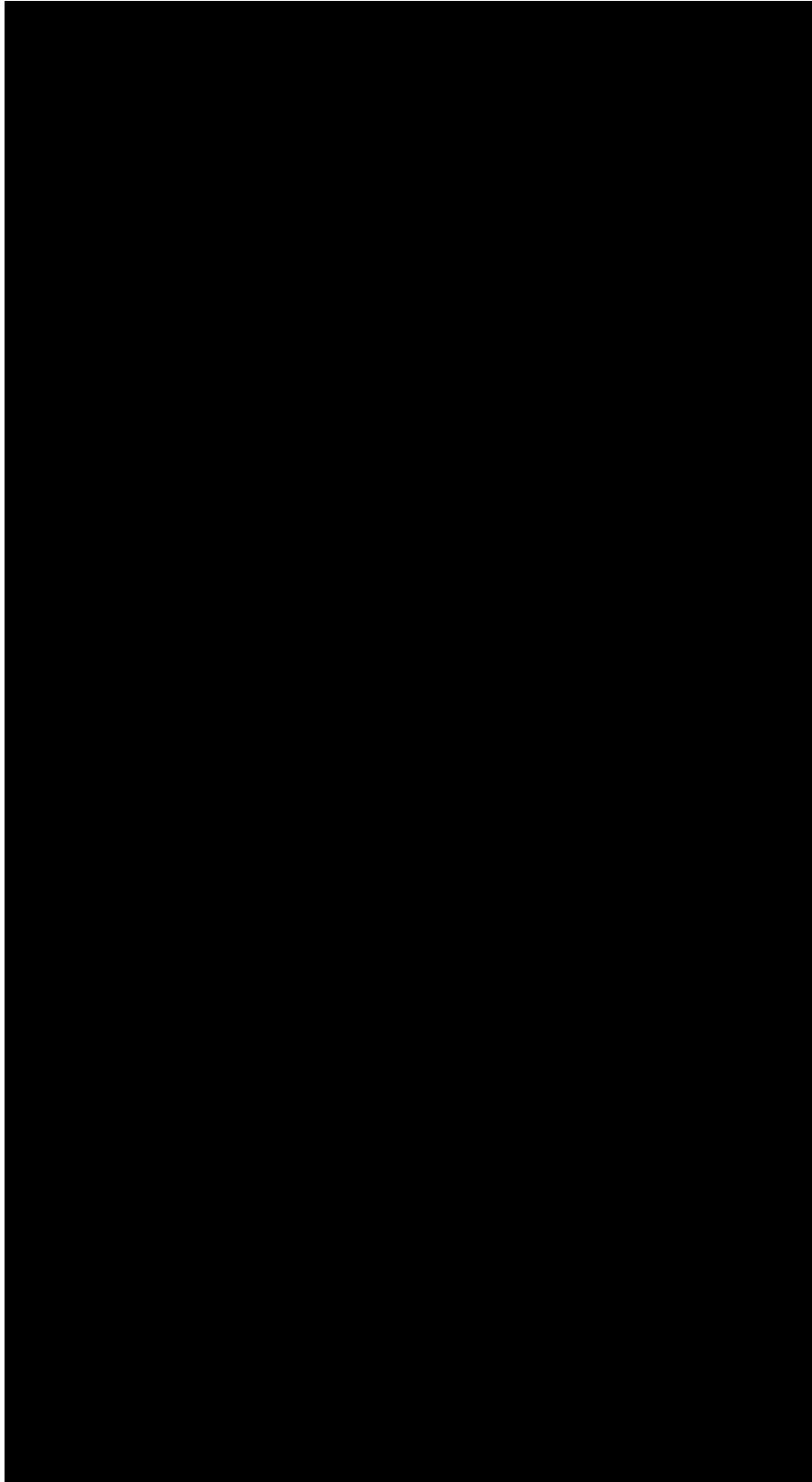


図 4－23 臨界解析モデル（縦断面図）

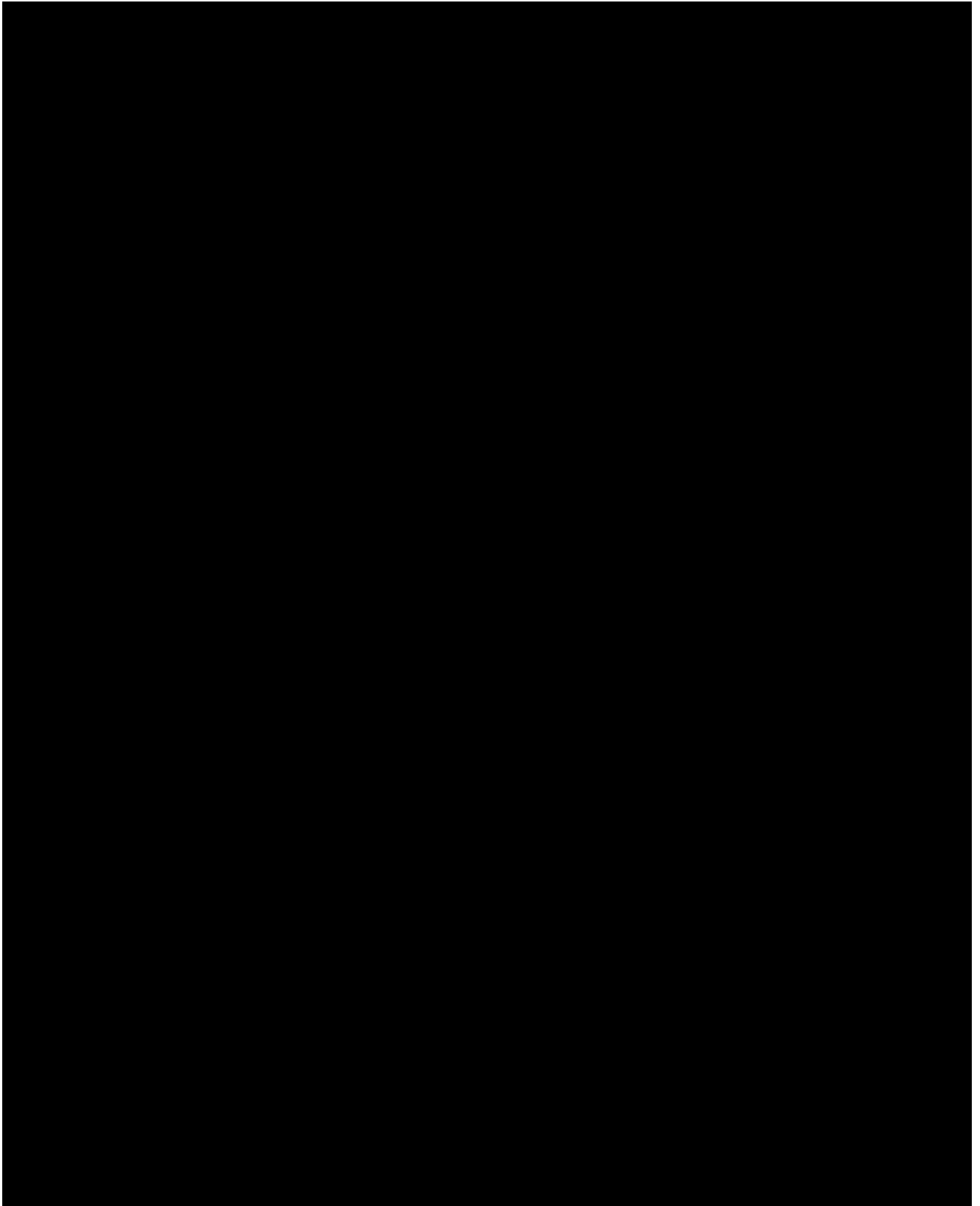


図 4 - 2 4 臨界解析モデル (燃料領域部横断面図)

(4) 評価方法

構内用輸送容器の実効増倍率は、燃料及びペレットのウラン-235 の濃縮度は未照射のままの減損していない値をとる安全側の仮定で、構内用輸送容器の実形状をモデル化し、KENO-V.a コードを使用して求める。

(5) 評価結果

評価結果を表 4－3 2 に示す。本表に示すとおり、構内用輸送容器の実効増倍率は設計基準を満足している。

表 4－3 2 評価結果

評価対象	実効増倍率	設計基準
構内用輸送容器	0.903 ^{*1}	0.95

*1 モンテカルロ計算の統計誤差（3 σ ）を考慮した値

4.5.2.2. 健全燃料及び変形燃料輸送時

(1) 基本的な考え方

臨界防止にあたっては、想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止するため以下のとおり設計する。

- a. 燃料を収納するバスケットは格子構造として、燃料を所定の幾何学的配置に維持する設計とする。
- b. バスケットの主要材料には、中性子を吸収するボロン入りステンレス鋼を使用する。

なお、臨界防止機能の評価においては、表 4－4 に示したとおり、構内用輸送容器に収納する健全燃料は既存評価に用いている初期濃縮度（約 4.2wt%）に包絡されるため、健全燃料は既存評価に用いている燃料と同じ仕様として評価する。また、安全側に変形燃料の燃料棒の変形を考慮して評価する。

(2) 設計基準

想定されるいかなる場合も実効増倍率が 0.95 以下であること。

(3) 評価条件

評価の内容として、9×9 燃料 11 体、7×7 燃料 1 体について行うこと及び燃料収納スパーサを無視すること以外は健全燃料輸送時と同様とする。臨界解析モデルを図 4－25 及び図 4－26 に示す。

変形燃料は図 4－26 に示した箇所に収納し、XXXXXXXXXX 配置された状態とする。また、燃料集合体の変形を考慮し、臨界評価上安全側の仮定となるように収納される変形燃料について全領域の燃料棒ピッチを変化させた配列とする。

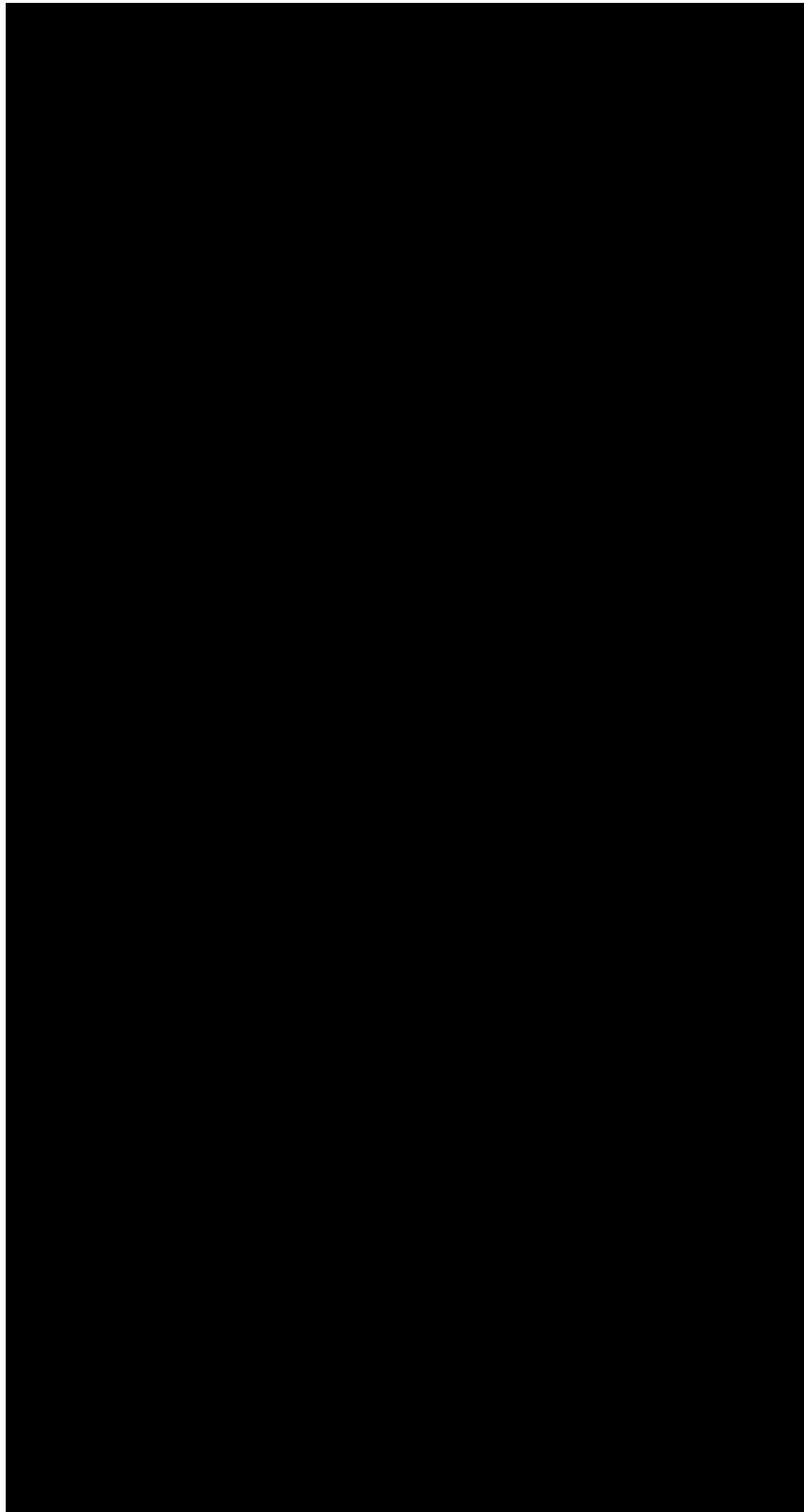


図 4 - 2 5 臨界解析モデル（縦断面図）

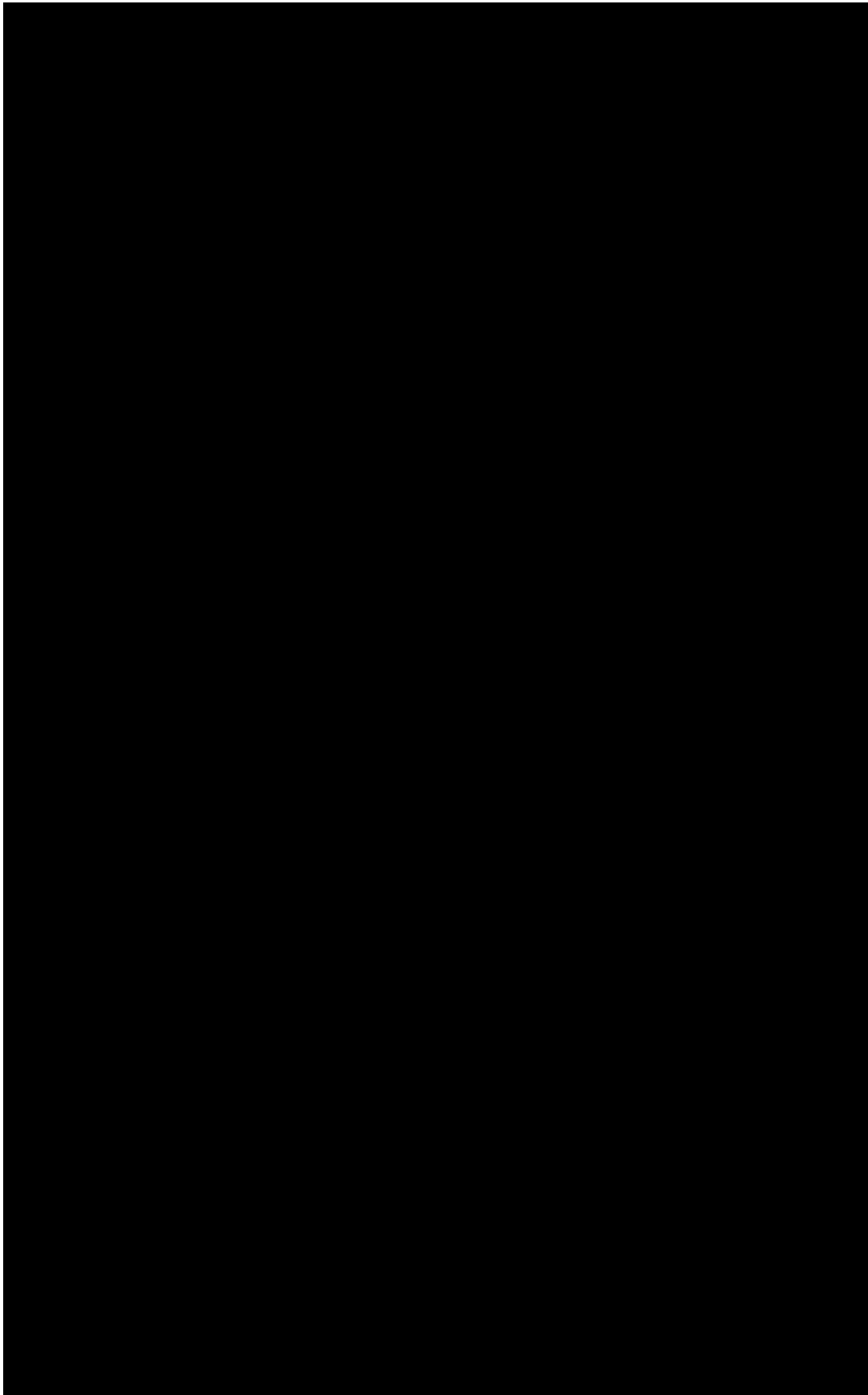


図 4 - 2 6 臨界解析モデル (燃料領域部横断面図)

(4) 評価方法

構内用輸送容器の実効増倍率は、燃料のウラン-235 の濃縮度は未照射のままの減損していない値をとる安全側の仮定で、構内用輸送容器の実形状をモデル化し、KENO-V. a コードを使用して求める。

(5) 評価結果

評価結果を表 4-33 に示す。本表に示すとおり、構内用輸送容器の実効増倍率は設計基準を満足している。

表 4-33 評価結果

評価対象	実効増倍率	設計基準
構内用輸送容器	0.895 ^{*1}	0.95

*1 モンテカルロ計算の統計誤差 (3 σ) を考慮した値

4.5.2.3. 健全燃料，漏えい燃料及び変形燃料混載時

(1) 基本的な考え方

臨界防止にあたっては，想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止するため以下のとおり設計する。

- a. 燃料を収納するバスケットは格子構造として，燃料を所定の幾何学的配置に維持する設計とする。
- b. バスケットの主要材料には，中性子を吸収するボロン入りステンレス鋼を使用する。

なお，臨界防止機能の評価においては，4.5.2.1.と同様に健全燃料及び漏えい燃料は既存評価に用いている燃料と同じ仕様として評価する。また，4.5.2.2.と同様に安全側に変形燃料の燃料棒の変形を考慮して評価する。さらに，安全側に漏えい燃料棒の破損を仮定し，漏えい燃料棒2本分のペレットが構内用輸送容器内に放出されるものとして，4.5.2.2.の条件に追加する。

(2) 設計基準

想定されるいかなる場合も実効増倍率が0.95以下であること。

(3) 評価条件

評価の内容として，ペレットの放出を考慮する以外は健全燃料及び変形燃料輸送時と同様とする。臨界解析モデルを図4-27及び図4-28に示す。

放出されたペレットは健全燃料及び漏えい燃料輸送時と同様にペレットと水が混ざった状態とし，図4-28に示した燃料領域以外の水領域に存在するものと仮定する。また，ペレットと水は水／ウラン比及びペレット粒径が最適な状態とする。

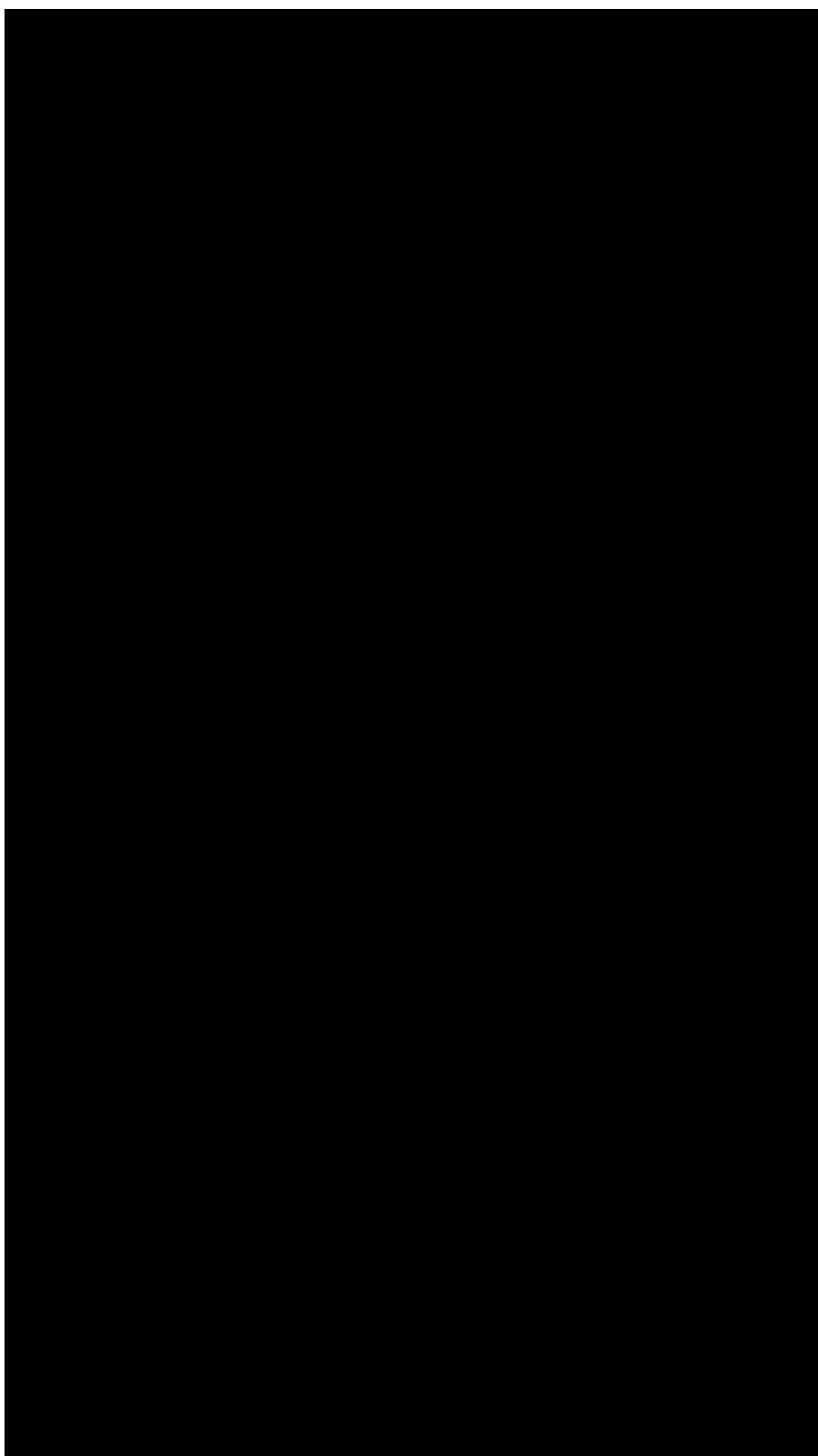


図 4－27 臨界解析モデル（縦断面図）

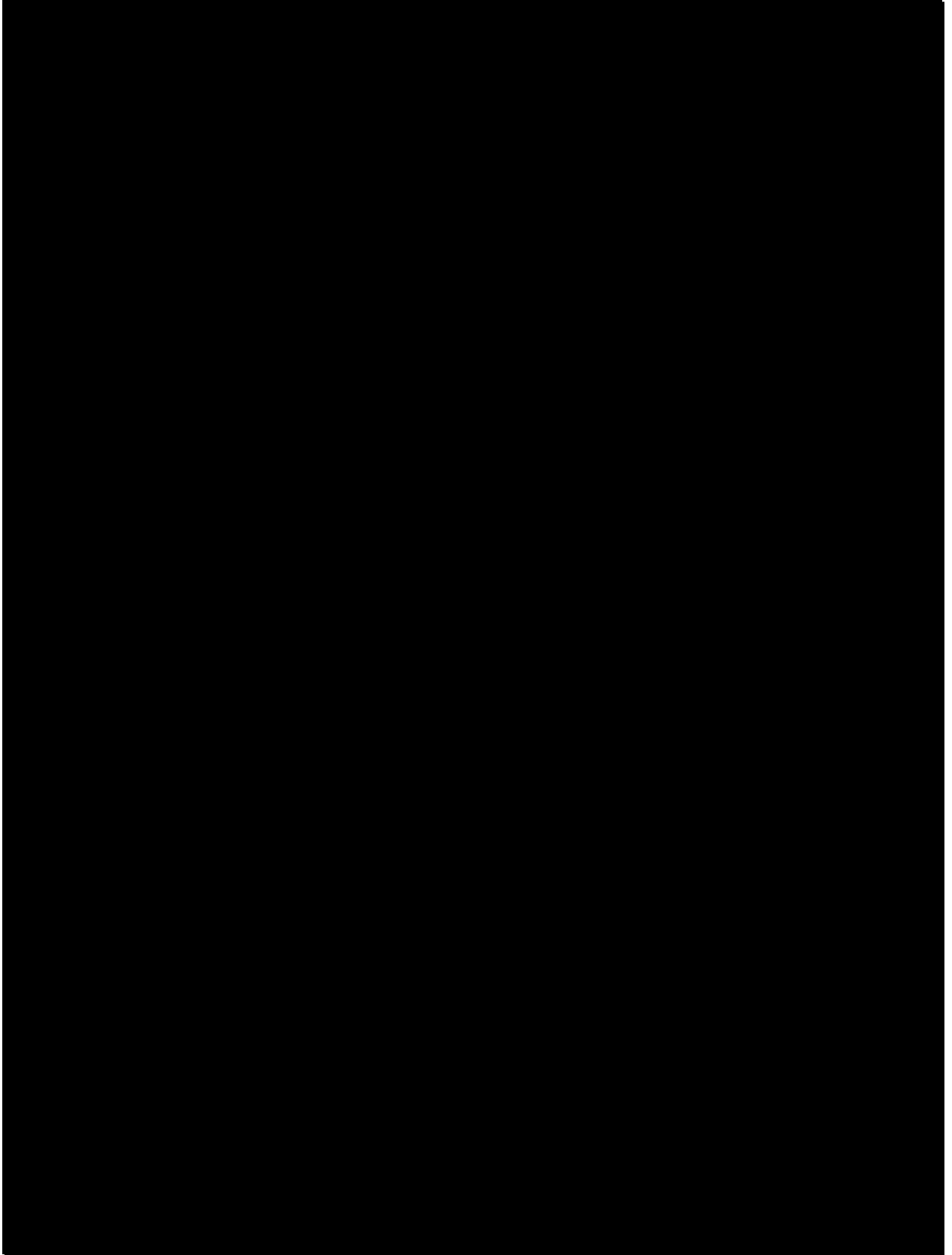


図 4 - 2 8 臨界解析モデル（燃料領域部横断面図）

(4) 評価方法

構内用輸送容器の実効増倍率は、燃料及びペレットのウラン-235 の濃縮度は未照射のままの減損していない値をとる安全側の仮定で、構内用輸送容器の実形状をモデル化し、KENO-V. a コードを使用して求める。

(5) 評価結果

評価結果を表 4－3 4 に示す。本表に示すとおり、構内用輸送容器の実効増倍率は設計基準を満足している。

表 4－3 4 評価結果

評価対象	実効増倍率	設計基準
構内用輸送容器	0.898 ^{*1}	0.95

*1 モンテカルロ計算の統計誤差（3 σ ）を考慮した値

臨界解析に用いるコード (KENO-V.a) について

(1) 概要

KENO-V.a コードは、米国オークリッジ国立研究所 (ORNL) で開発されたモンテカルロ法に基づく公開の臨界解析コードであり、輸送容器の臨界解析等に利用されている。

(2) 機能

KENO-V.a コードは、臨界解析に際して以下の機能を有している。

- ① 実際に中性子が出会う物理現象を確率理論を用いて模擬するため、どのような物理的問題にも適用できる。なお、統計的な手法を用いるため、計算結果には統計誤差が付随する。
- ② 一次元～三次元の任意形状の体系を扱うことができる。

(3) 解析フロー

KENO-V.a コードの解析フローを図 4-29 に示す。

(4) 使用実績

KENO-V.a コードは、国内外で輸送容器の臨界解析をはじめ、核燃料施設の臨界解析に使用されている。

(5) 検証

米国のバットル研究所 (パシフィック ノースウエスト研究所, PNL) で行われた臨界実験^{*1}の中から 16 種類の臨界体系をベンチマーク試験^{*2}として選び、検証を行った。

*1 S. R. Bierman and E. D. Clayton, “Criticality Experiments with Subcritical Clusters of 2.35 Wt% and 4.31 Wt% ²³⁵U Enriched UO₂ Rods in Water with Steel Reflecting Walls”, NUREG/CR-1784(PNL-3602), U.S. Nuclear Regulatory Commission, April 1981.

*2 “International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments”, LEU-COMP-THERM-010, LEU-COMP-THERM-013, LEU-COMP-THERM-017, LEU-COMP-THERM-042, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2009.

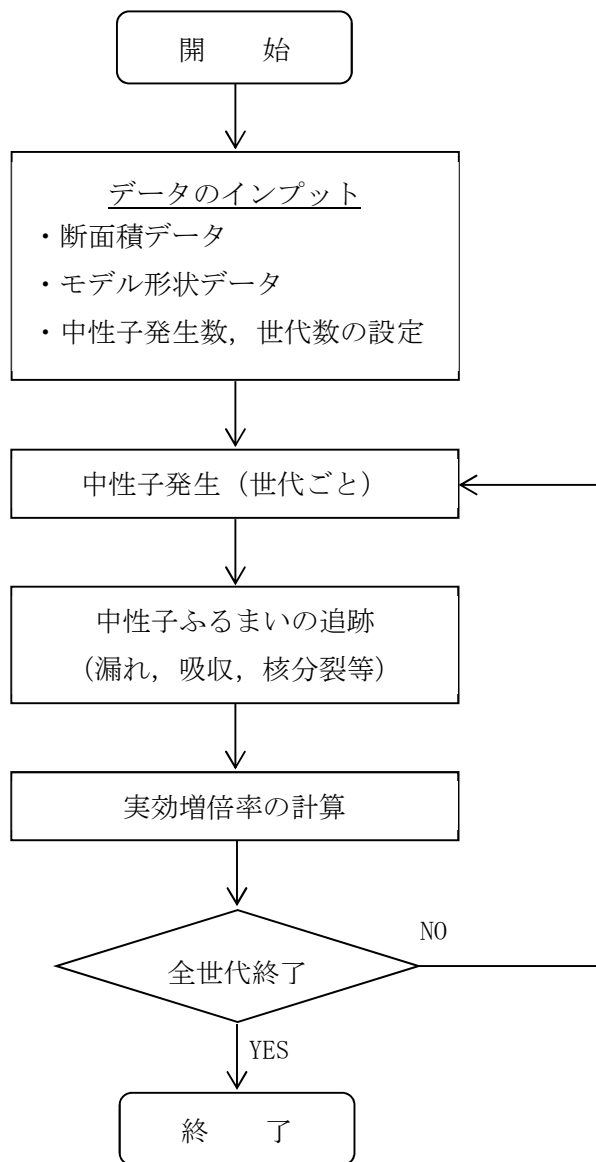


図 4 - 2 9 KENO-V. a コードの解析フロー図

5 構内用輸送容器の落下

5.1. 原因

構内用輸送容器の取り扱い中に、何らかの原因で構内用輸送容器が落下して密封境界が破損し、放射性物質が環境に放出される。

5.2. 発生防止対策

構内用輸送容器の落下を防止するために、次のような設計及び運転上の対策を講じる。

- (1) クレーン主巻フックは二重のワイヤーロープで保持する構造とする。
- (2) クレーン巻上装置は電源断時に電動油圧押上機ブレーキで保持する構造とする。
- (3) クレーン主巻フックと吊具、吊具と構内用輸送容器の取付けを二重化する。
- (4) 取付け作業後の取付け状態を確認し、外れ止めを取り付ける。
- (5) 作業開始前にクレーン及び吊具の事前点検を実施する。
- (6) 作業手順書を整備し、作業員への教育周知を行う。
- (7) 有資格者による設備操作、作業管理を行う体制とする。

5.3. 核分裂生成物の放出量及び線量の評価

本構内用輸送容器は、最大 12 体の燃料を輸送することが可能な容器である。これは既に構内用輸送容器として用いられている NFT-22B 型の燃料収納体数 22 体より少ない。

従って、核分裂生成物の放出量及び線量の評価は、「添付資料－2－1 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（4号機）」の評価に包絡される。

4号機 構内用輸送容器（NFT-12B型）に係る確認事項について

4号機 構内用輸送容器（NFT-12B型）の確認事項を表－1～表－2に示す。

表－1 確認事項（構内用輸送容器（NFT-12B型））

確認項目	確認内容	判定基準
寸法確認	変形燃料を収納する大口格子の内寸を確認する。	実施計画のとおりであること。
挿入確認	変形燃料を収納する大口格子に挿入ゲージ※が円滑に挿入、取出しできることを確認する。	挿入ゲージの挿入、取出しが円滑に行えること。

※2013年12月に当該燃料について吊上げチャンネルボックスの曲がり状況を確認し、チャンネルボックスの曲がり考慮した最大寸法は測定誤差を加味し156mmであることを確認している。このため、挿入ゲージは1辺156mm以上とする。

表－2 確認事項（構内用輸送容器（NFT-12B型）のうち、大口格子用ツール）

確認項目	確認内容	判定基準
寸法確認	実施計画に記載されている主な寸法について確認する。	実施計画のとおりであること。
材料確認	実施計画に記載されている主な材料について確認する。	実施計画のとおりであること。
外観確認	外観を確認する。	有意な欠陥がないこと。

V 構内用輸送容器（NFT-12B 型）の確認項目に係わる寸法及び材料

表 5－1 構内用輸送容器（NFT-12B 型）の大口格子に係わる寸法

主要寸法	公称値	公差	公差の考え方
内寸（短辺）（mm）			－
内寸（長辺）（mm）			－

表 5－2（大口格子用スツールに係わる主要寸法）

主要寸法	公称値	公差	公差の考え方
脚部幅（mm）			製造性を考慮して決定
脚部高さ（mm）			製造性を考慮して決定

表 5－3（大口格子用スツールの構造強度に係わる箇所の材質）

材質	SUS304
----	--------

Ⅵ 破損燃料用輸送容器（7 体）に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3 号機）
（添付資料－2－2－1）に関する補足書

破損燃料用輸送容器（7 体）に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3 号機）（添付資料－2－2－1）について，評価条件，評価モデル等の詳細を示す。

1. 臨界防止機能

1.1. 基本的考え方

臨界防止にあたっては、想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止するため以下のとおり設計する。

- 燃料を収納するバスケットは格子構造として、燃料を所定の幾何学的配置に維持する設計とする。
- バスケットの主要材料には、中性子を吸収するボロン添加ステンレス鋼を使用し、バスケット外周部にボロン添加アルミニウム合金板を配置する。

1.2. 設計基準

想定されるいかなる場合も実効増倍率（ k_{eff} ）が 0.95 以下であること。

1.3. 評価条件

1.3.1. 燃料条件

想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達してはならないため、保守的に燃料被覆管が破損し、燃料粒子（ペレットを含む）が使用済燃料収納缶（小）外にまで放出されることを想定して、輸送容器内の燃料領域は燃料粒子と水が非均質に混ざった状態とする。

臨界防止機能評価で用いる燃料条件（破損燃料）を表 6－1 に示す。

燃料棒の形状が維持されていないと仮定し、以下の条件を設定する。

- ・燃料被覆管が破損しペレットが使用済燃料収納缶（小）内に放出され、さらに使用済燃料収納缶（小）外にペレットが漏えいすることを仮定し、容器内にペレットと水が非均質に混ざった状態とする。
- ・水／ウラン比、ペレット粒径が最も臨界になりやすい状態とする。
- ・U-235 の濃縮度は未照射のまま減損しない値とし、3 号機使用済燃料プールに貯蔵される使用済燃料及び新燃料のうち、ペレット最高濃縮度が最も高い 9 × 9 燃料の 4.9wt% とする。また、中性子吸収断面積の大きい Gd は無視する。

表 6－1 臨界防止機能評価で用いる燃料条件（破損燃料）

項 目		評 価 条 件	備 考
破 損 燃 料	燃料の健全性	燃料被覆管の破損を想定	
	燃料の形態	燃料粒子＋水	燃料粒子と水による非均質燃料粒子セル体系
	ウラン 同位体組成	U-235 : 4.9 wt% U-238 : 95.1 wt%	3 号機使用済燃料プールに貯蔵される燃料におけるペレット最大濃縮度
	核分裂生成物	核分裂生成物、及び アクチニドは考慮しない	
	燃料粒子径	粒子径の変化を考慮	
	燃料質量		燃料集合体 7 体

1.3.2. 収納缶・バスケット等条件

収納缶・バスケット等の製造公差としては、板厚、内のり等があり、これらのパラメータについて安全側に設定する。収納缶・バスケット等の主要寸法と製造公差を考慮した解析使用値を表6－2～表6－4に示す。

(1) 使用済燃料収納缶（小）

- ・使用済燃料収納缶（小）の板厚は、製造公差を考慮した最小値とする。（板厚を薄くすると、板の外側からの中性子の影響を受けやすくなるため keff は大きくなるので保守的な条件となる。）
- ・内のりは、製造公差を考慮した最大値とする。（内のりが大きくなるので燃料物質が増加し、keff が大きくなるため保守的な条件となる。）

(2) バスケット

- ・バスケットの板厚、内のりは、製造公差を考慮した最小値とする。（燃料間隔が近くなるため keff は大きくなるため、保守的な条件となる。）
- ・バスケット材料のボロン添加ステンレス鋼材中及びバスケット外周に配置したボロン添加アルミニウム合金中の ^{10}B 含有量は、製造下限値とする。

表6－2 使用済燃料収納缶（小）の主要寸法

項目	機器仕様		解析使用値
	公称値	製造公差	
板厚(mm)	5		
内のり(mm)	153		

表6－3 バスケットの主要寸法

項目	機器仕様		解析使用値
	公称値	製造公差	
ボロン添加ステンレス鋼板厚(mm)	10		
内のり(mm)	183		
ボロン添加ステンレス鋼材中のボロン添加率(wt%) *1			
ボロン添加アルミニウム合金板厚(mm) *2			
ボロン添加アルミニウム合金中のボロン添加量(g/cm ²) (^{10}B 面密度) *3			

*1

*2 1枚あたりの厚さ。2枚重ねで使用する。

*3

表 6－4 輸送容器の主要寸法

項目	機器仕様		解析使用値
	公称値	製造公差	
外筒厚さ (mm)	32		
中性子遮蔽体厚さ (mm)	105		
胴厚さ (mm)	220		
本体胴内径 (mm)	700		

1.3.3. その他の条件

- ・バスケット内の使用済燃料収納缶（小）配置は，格子間の範囲で偏心配置（バスケット中心寄り）を考慮する。

1.3.4. 計算モデル

輸送容器の計算モデルを図 6－1～図 6－3 に示す。計算モデルは，輸送容器の幾何学形状を模擬して，3次元体系とする。なお，輸送容器が無限に並んだ状態として，輸送容器周囲での境界条件を完全反射とする。

- ・チャンネルボックス及びウォーターロッドは水に置換える。
- ・中性子遮蔽体部（レジン）は真空とする。
- ・破損燃料用輸送容器（7 体）外部の雰囲気は安全側に真空，完全反射とする。
- ・評価モデルは 3 次元体系とする。

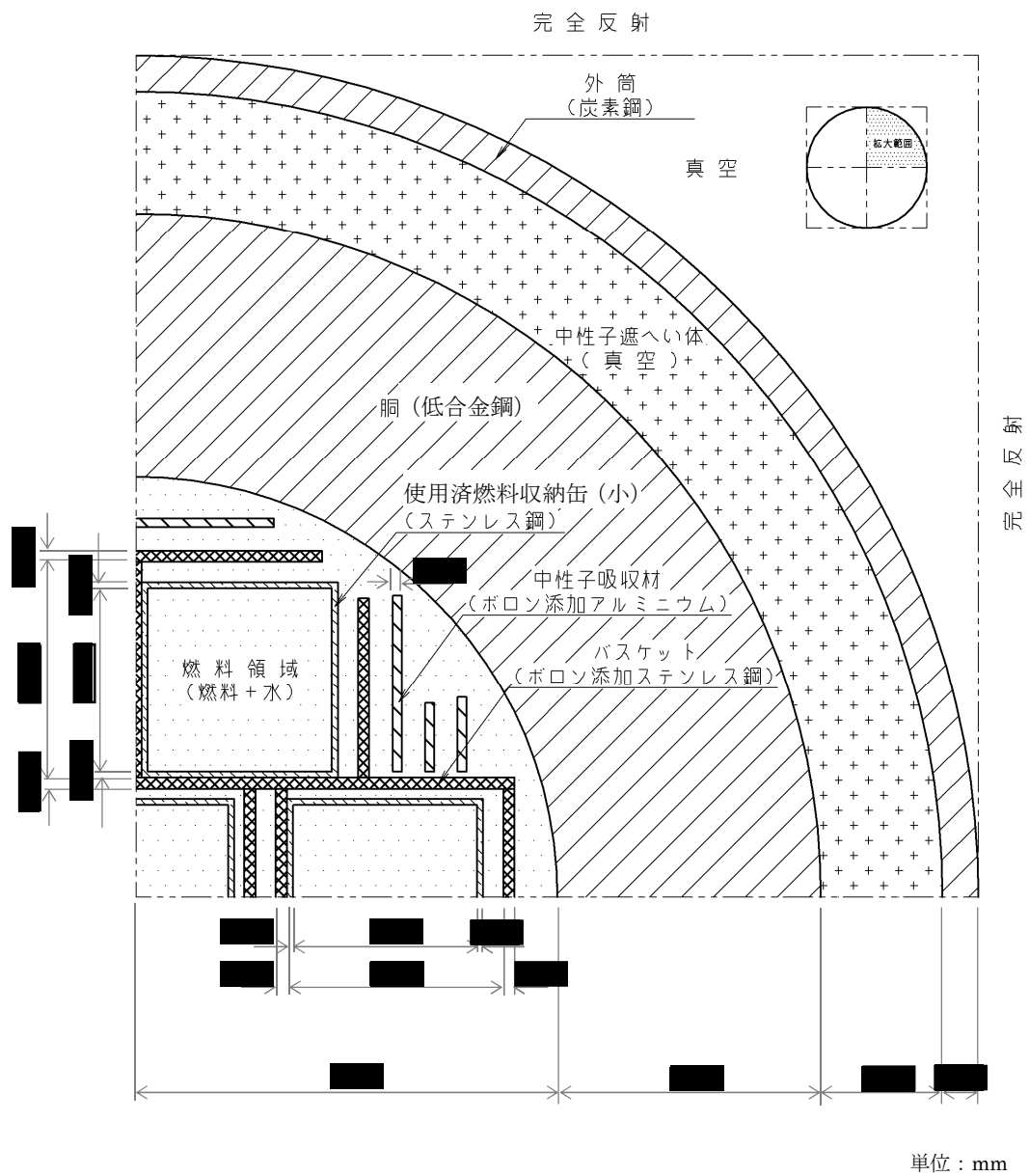


図 6 - 1 臨界評価体系 (平面図)

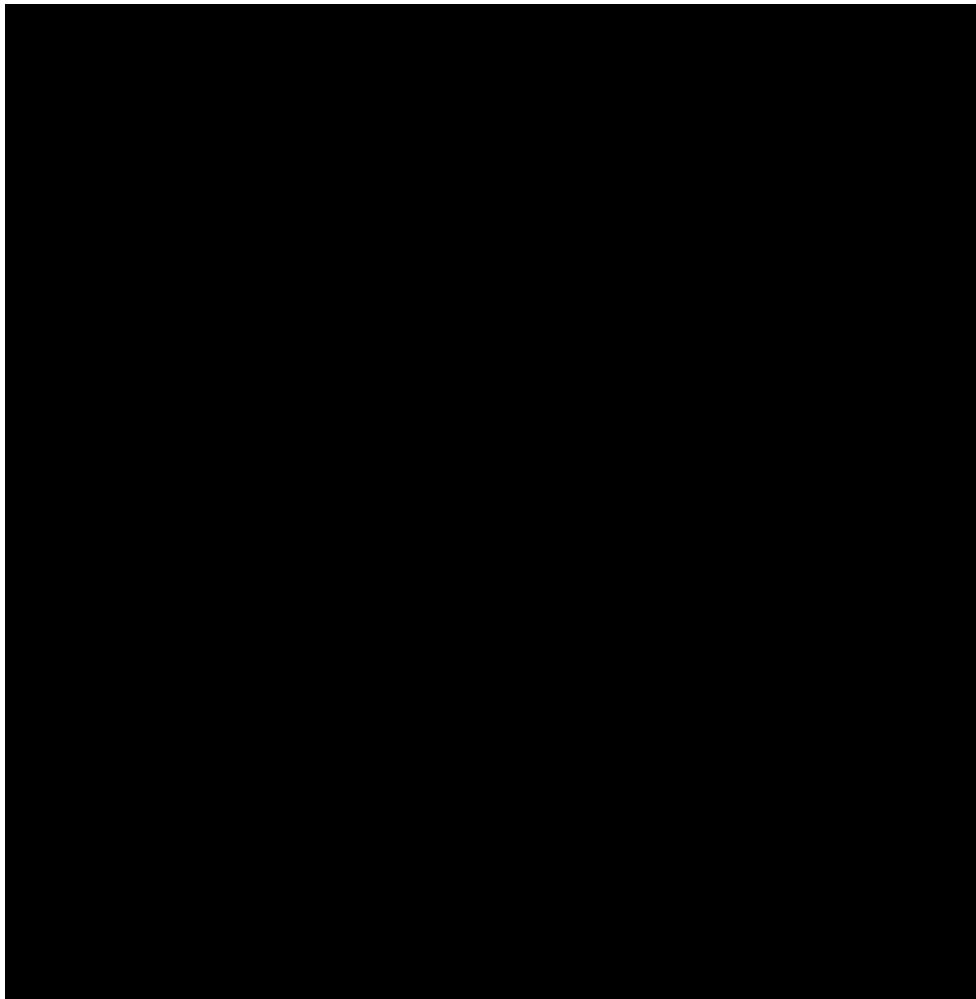


図 6 - 2 臨界評価体系（立体図）

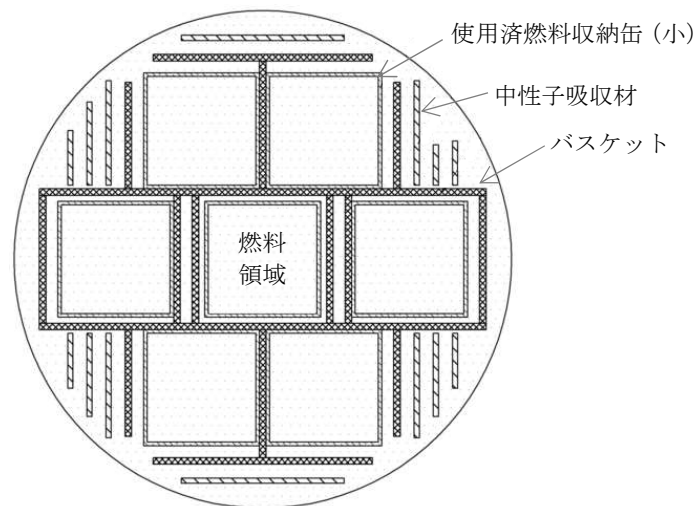


図 6 - 3 臨界評価体系（バスケット詳細）

1.4. 評価方法

破損燃料用輸送容器（7 体）の実形状をモデル化し，臨界解析コード KENO-V.a を使用して求める。

1.5. 評価結果

評価結果を表 6－5，図 6－4 に示す。本図表に示すとおり，破損燃料用輸送容器（7 体）の実効増倍率は設計基準を満足している。

表 6－5 評価結果

燃料粒子径 (mm)	水対燃料体積比	実効増倍率		実施計画 記載値*4	設計 基準値
		keff	keff+3σ		
				0.94	0.95

*4 モンテカルロ計算の統計誤差（3σ）を考慮した値



図 6－4 輸送容器の実効増倍率

VII 破損燃料用輸送容器（2 体）に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3 号機）
（添付資料－2－2－2）に関する補足書

破損燃料用輸送容器（2 体）に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3 号機）（添付資料－2－2－2）について，評価条件，評価モデル等の詳細を示す。

1 構造強度評価

1.1. 破損燃料用輸送容器（2 体）の概要

1.1.1. 破損燃料用輸送容器（2 体）の構成

破損燃料用輸送容器（2 体）は、容器本体、蓋、バスケット及びトラニオンにより構成される。なお、バスケット以外の構成部材は破損燃料用輸送容器（7 体）から流用して用いる。破損燃料用輸送容器（2 体）の概要図を図 1－1 に示す。

（1）容器本体

容器本体は胴、底板、中性子遮蔽体、外筒で構成される。低合金鋼の胴及び底板と蓋で放射性物質を閉じ込める耐圧バウンダリを構成する。

また、主に胴及び底板の低合金鋼がガンマ線遮蔽機能を有し、胴と外筒の間および底板の底部に配置されたレジンが中性子遮蔽機能を有する。

（2）蓋

蓋は一次蓋及び二次蓋で構成する。

一次蓋はステンレス鋼であり、複数本のボルトで容器本体フランジ面に取り付けられる。一次蓋にはゴム製の O リングを設け容器本体フランジ面との密封性を確保する構造となっている。一次蓋のステンレス鋼がガンマ線遮蔽機能を有する。

二次蓋もステンレス鋼であり、一次蓋の上から複数本のボルトで容器本体フランジ面に取り付けられる。二次蓋にもゴム製の O リングを設け、容器本体フランジ面との密封性を確保できる構造となっている。

（3）バスケット

バスケットは容器内において燃料集合体を所定の位置に保持するための構造物である。また、未臨界確保のためバスケット外周にボロン添加アルミニウム合金板を設置している。

燃料集合体はバスケット内に装填したステンレス鋼製の使用済燃料収納缶（大）に収納する。

（4）トラニオン

トラニオンは容器のクレーンでの取扱い（吊上げ）及び、構内輸送時の固縛のために容器上部及び下部にボルトで取付ける。

取扱い時（縦姿勢）は容器と吊具との接続を二重化して落下を防止するために、上部トラニオンは二対（4 個）設ける。

構内輸送時（横姿勢）では上部トラニオンと下部トラニオンで架台等に固定するため、下部トラニオンは一对（2 個）設ける。

1.1.2. 設備仕様

破損燃料用輸送容器（2 体）の仕様を表 7－1 に示す。

表 1－1 破損燃料用輸送容器（2 体）の仕様

項目	数値等
重量（t） （燃料を含む）	約 44.3
全長（m）	約 5.6
外径（m）	約 1.4
収納体数（体）	2
基数（基）	1

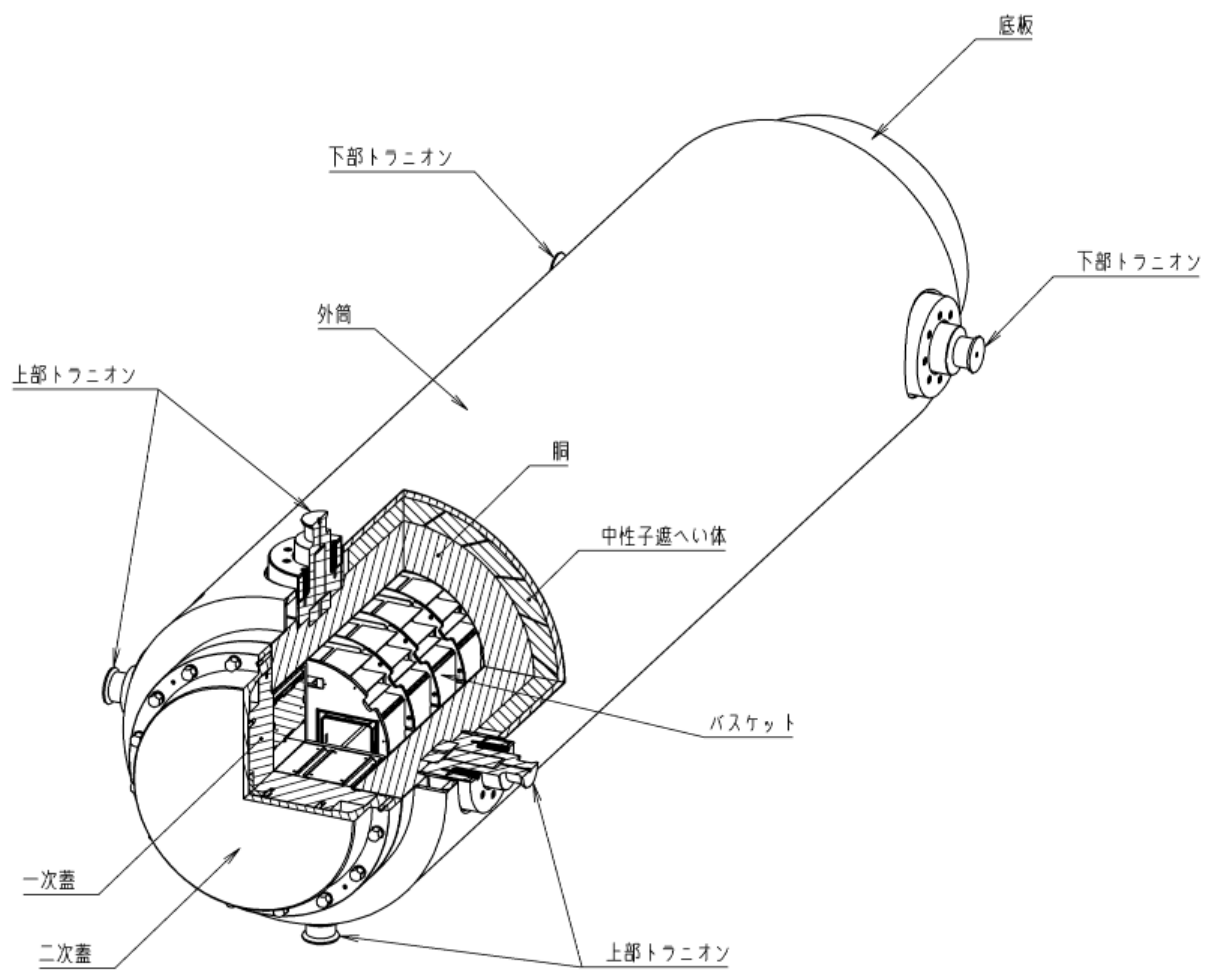


図 1 - 1 破損燃料用輸送容器 (2 体) 概要図

1.1.3. 構造強度評価の基本的な考え方

破損燃料用輸送容器（2 体）の構造強度の評価部位は、安全上重要な部位として容器本体（胴及び底板）、蓋、バスケット、支持機能を有するトラニオンとする。

ただし、バスケットを除く構成部材は 3 号機構内用輸送容器と同一であり、収納体数は 3 号機構内用輸送容器の 7 体より少ないため容器質量は小さい。よって、容器の支持部材であるトラニオンについては、「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3 号機） 1.3. 構造強度評価」に包絡される。

従って、容器本体（胴及び底板）、蓋、バスケットの各部の構造強度を評価する。

構造強度評価手法は、JSME S NC1-2005/2007 設計・建設規格（以下、「設計・建設規格」という。）を準用する。各評価対象部位の適用基準・規格を表 1－2 に示す。

表 1－2 構造強度に係る適用基準・規格

評価対象 部位	設計・建設規格 機器区分	構造強度 評価方法	考え方
容器本体, 蓋	クラス 3 容器	クラス 1 容器の規定を 準用	容器本体及び蓋は設計・建設規格 GNR-1210 及び GNR-1220 の機器等の区分の定義より, クラス 3 容器に区分されると考えられる。 圧力荷重についてはクラス 3 容器における規格計算式で評価することができるが, 熱荷重や取扱時の衝撃荷重等の各種の負荷荷重が発生することから, これらの荷重については, 応力解析によって発生応力を求めて評価する必要がある。 したがって, 構造強度評価手法は, 同様な「解析による設計」の考え方が採用されているクラス 1 容器を準用する。
バスケット	ノンクラス	炉心支持構造物の規定 を準用	バスケットは設計・建設規格 GNR-1210 及び GNR-1220 の機器等の区分の定義に該当しないと考えられる。 しかし, 容器内において燃料を支持する部材であるため, 構造強度評価手法は, 炉心支持構造物を準用する。

1.2. 設計事象の抽出

JSME S FA1-2007 金属キャスク構造規格の考え方に基づいて、破損燃料用輸送容器（2 体）の設計事象として以下を抽出した。

なお、設計事象の抽出にあたっては、図 2－1 に示すハンドリングフローに基づき、破損燃料用輸送容器（2 体）の取扱い及び共用プールまでの輸送において想定される起因事象に着目し、発生防止対策を考慮して事象の発生の可能性を検討した。設計事象の抽出結果を表 2－1 に示す。

(1) 設計事象Ⅰ

容器本体及び蓋には、収納する燃料の発熱により内圧及び熱による応力が発生する。また、取扱い時及び構内輸送時の加速度により収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

バスケットには、取扱い時及び構内輸送時の加速度により収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

(2) 設計事象Ⅱ

容器本体及び蓋には、輸送架台への衝突（取扱いモード No. 3）、搬送架台への衝突（取扱いモード No. 7）、転倒防止台座への衝突（取扱いモード No. 9）及びキャスクピットへの衝突（取扱いモード No. 10）の加速度における収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

バスケットには、輸送架台への衝突（取扱いモード No. 3）、搬送架台への衝突（取扱いモード No. 7）、転倒防止台座への衝突（取扱いモード No. 9）及びキャスクピットへの衝突（取扱いモード No. 10）の加速度における収納物及び自重による荷重がかかり、応力が発生する。

(3) 設計事象Ⅲ及び設計事象Ⅳ

破損燃料用輸送容器（2 体）を取扱う設備及び運用においては、クレーンワイヤ及び吊具の二重化、始業前の機器の点検を実施することから、ハンドリングフローから抽出される事象のうち、破損燃料用輸送容器（2 体）の安全機能を著しく損なう事象であって、一般公衆の放射線被ばくの観点からみて重要と考えられる事象はない。

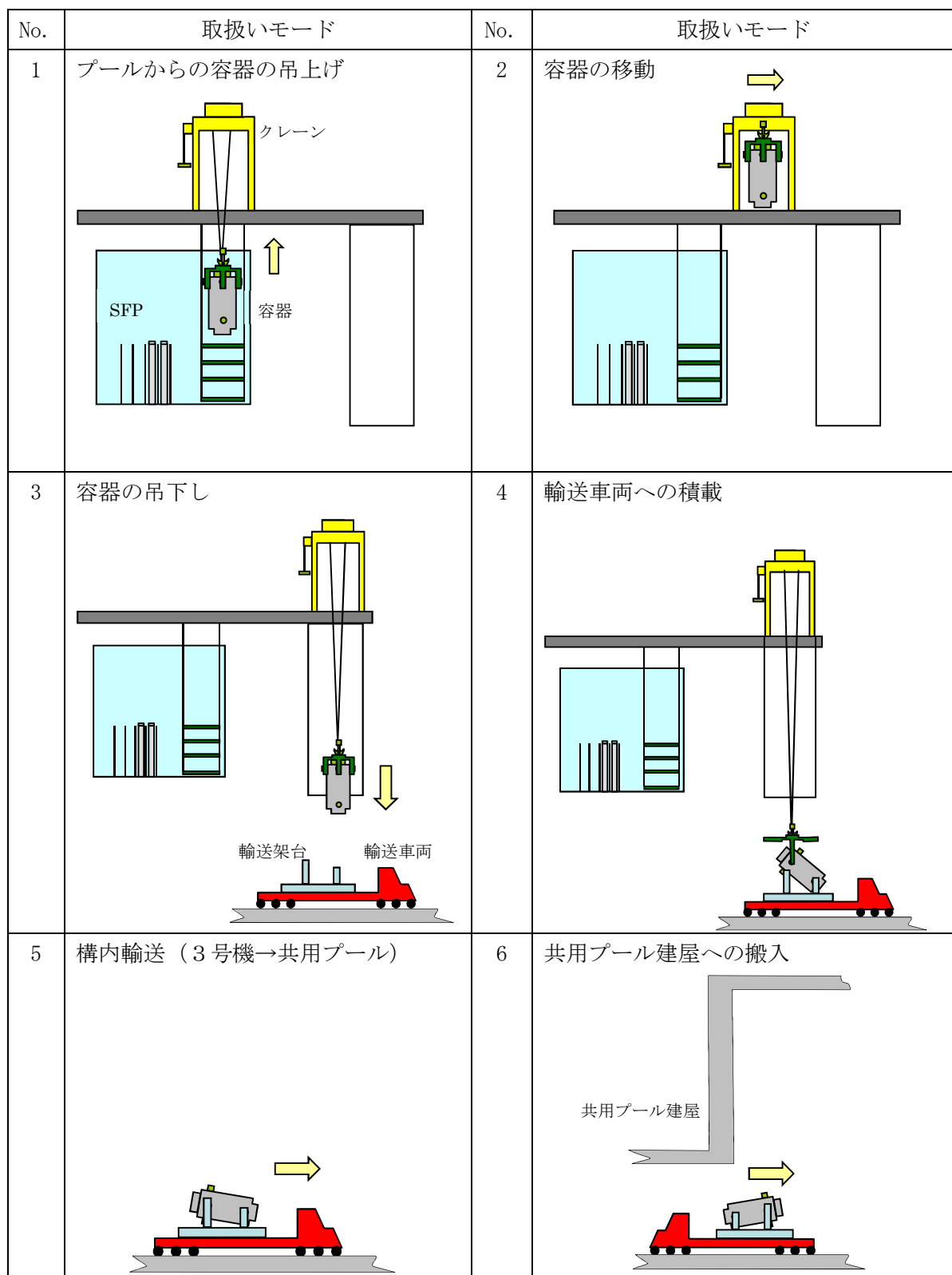


図 2 - 1 構内用輸送容器のハンドリングフロー (1/2)

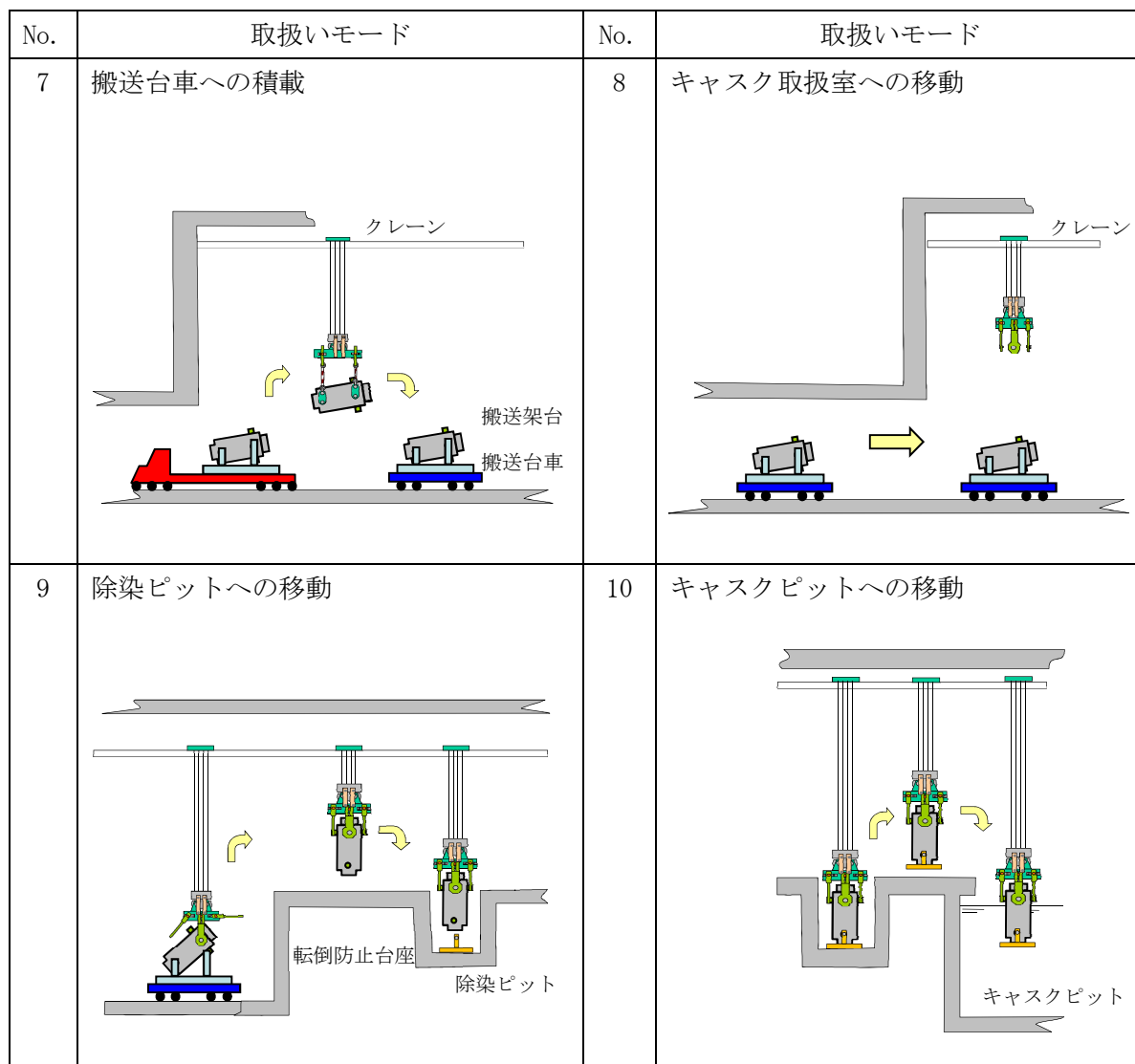


図 2 - 1 構内用輸送容器のハンドリングフロー (2/2)

表 2－1 設計事象の抽出（1/2）

起回事象		原因	発生の可能性・防止策	発生の有無	想定シナリオ	抽出の要否
破損燃料用 輸送容器 (2 体) の 落下	輸送車両取扱い時の落下 (No. 5)	固定ボルトの取付け不良	以下の対策，設計により容器の落下を防止する ● 容器は輸送車両に複数のボルトで固縛されていることを確認 ● 容器は輸送車両で徐行して輸送 ● 輸送経路は輸送に関係する人及び車両以外の立入を制限	×		×
	搬送台車取扱い時の落下 (No. 8)	固定ボルトの取付け不良	以下の対策，設計により容器の落下を防止する ● 容器は搬送台車に複数のボルトで固縛されていることを確認 ● 搬送台車はレール上を走行し，走行範囲インターロック及び障害物検知装置を有している	×		×
	クレーン取扱時の落下 (No. 1, 2, 3, 4, 7, 9, 10)	吊具の取付け不良 (3 号機)	以下の対策，設計により容器の落下を防止する ● 吊具の二重化 ● 始業前の吊具点検 ● 取付け後の外れ止めを設置 ● 取付け状態の ITV による目視確認 ● 取付け状態の吊具アーム部のリミットスイッチによる確認 ● 地切り後の ITV による取付け状態の確認，クレーンの荷重確認	×		×
		吊具の取付け不良 (共用プール)	以下の対策，設計により容器の落下を防止する ● 吊具の二重化 ● 始業前の吊具点検 ● 取付け後の外れ止めを設置 ● 取付け状態の作業員による確認	×		×
		ワイヤーロープ及び吊具の破断 (3 号機)	以下の対策，設計により容器の落下を防止する ● ワイヤーロープ及び吊具の二重化 ● 始業前のワイヤーロープ，吊具点検	×		×
		ワイヤーロープ及び吊具の破断 (共用プール)	以下の対策，設計により容器の落下を防止する ● ワイヤーロープ及び吊具の二重化 ● 始業前のワイヤーロープ，吊具点検	×		×

表 2－1 設計事象の抽出 (2/2)

起因事象		原因	発生の可能性・防止策	発生の有無	想定シナリオ	抽出の要否
破損燃料用 輸送容器 (2 体) の 衝突	クレーン移動時 (走行, 横行) の 衝突 (No. 2, 7, 9, 10)	ブレーキの故障 (3 号機)	以下の対策, 設計により容器は他の構造物等へ衝突を防止する ● I T Vにより移動経路に障害物がないことの確認 ● 走行及び横行それぞれの制御盤(シーケンサ、インバータ等)による停止機能の作動	×		×
		ブレーキの故障 (共用プール)	以下の対策, 設計により容器は他の構造物等へ衝突を防止する ● 容器移動前に移動経路に障害物がないことの確認 ● 走行及び横行それぞれの制御盤(シーケンサ、インバータ等)による停止機能の作動	×		×
		操作員の誤操作 (3 号機)	以下の対策, 設計により構内輸送容器は他の構造物等へ衝突を防止する ● クレーンの横行走行範囲に制限機能を設定 ● I T Vにより移動経路に障害物がないことの確認	×		×
		操作員の誤操作 (共用プール)	以下の対策, 設計により構内輸送容器は他の構造物等へ衝突を防止する ● クレーンの横行走行範囲に制限機能を設定 ● 容器移動前に移動経路に障害物がないことの確認	×		×
	クレーン吊下げ 時の衝突(垂直 吊り) (No. 3, 4, 9, 10)	ブレーキの故障	以下の設計により容器の輸送架台, 転倒防止台座あるいはキャスクピットへ衝突を防止する ● 巻上げ装置ブレーキを二重化	×		×
		操作員の誤操作	吊下げ時の誤操作により, 容器は巻下げ速度で輸送架台, 転倒防止台座あるいはキャスクピットに衝突する可能性がある。	○	クレーンの最大巻下げ速度 0.025m/s で, 構内用輸送容器が輸送架台, 転倒防止台座, キャスクピットに衝突する場合を, 設計事象として抽出。	○
	クレーン吊下げ 時の衝突(水平 吊り) (No. 7)	ブレーキの故障	以下の設計により容器の搬送架台へ衝突を防止する ● 巻上げ装置ブレーキを二重化	×		×
		操作員の誤操作	吊下げ時の誤操作により, 容器は巻下げ速度で搬送架台に衝突する可能性がある。	○	クレーンの最大巻下げ速度 0.025m/s で, 容器が搬送架台に衝突する場合を, 設計事象として抽出。	○

1.3. 設計事象の荷重条件

前項で抽出した設計事象について、破損燃料用輸送容器（2 体）に発生する荷重を評価する。

(1) 内圧

内圧は、除熱評価結果から設定した容器内部水の温度（℃）から、下記の通り設定した。

- a. 容器内部水及び気体の熱膨張を考慮した場合の内圧
 - (a) 容器本体及び一次蓋の内圧
容器本体及び一次蓋の内圧は 0.6（MPa）とする。
 - (b) 二次蓋の内圧
二次蓋の内圧は 0.45（MPa）とする。
- b. 容器内部水及び気体の熱膨張に加えて、燃料破損による燃料棒内のガス放出を考慮した場合の内圧（最高使用圧力）
 - (a) 容器本体及び一次蓋の最高使用圧力
容器本体及び一次蓋の最高使用圧力は 2.0（MPa）とする。
 - (b) 二次蓋の最高使用圧力
二次蓋の最高使用圧力は 1.4（MPa）とする。
- c. 試験時圧力
 - (a) 容器本体及び一次蓋の試験時圧力
容器本体及び一次蓋の試験時圧力は 3.0（MPa）とする。
 - (b) 二次蓋の試験時圧力
二次蓋の試験時圧力は 2.1（MPa）とする。

(2) 熱荷重

破損燃料用輸送容器（2 体）よりも 3 号機構内用輸送容器（7 体）のほうが崩壊熱が大きいため温度勾配も大きく、発生する熱荷重も大きくなるため、安全側に 3 号機構内用輸送容器（7 体）における除熱評価で得られた温度分布を用いて評価する。

(3) 設計事象 I の加速度

取扱い時及び構内輸送時の加速度

a. 取扱い時（吊上げ時）

破損燃料用輸送容器（2 体）を吊り上げる際に発生する加速度^{*3-1}は以下のとおり。
なお、吊上げ時の姿勢は縦姿勢である。

- ・容器軸方向加速度：1.32（G）

*3-1 クレーン構造規格より設定

b. 構内輸送時

破損燃料用輸送容器(2体)を構内輸送する際に発生する加速度^{*3-2}は以下のとおり。
なお、構内輸送時の姿勢は横姿勢である。

- ・前後方向加速度：2.0 (G)
- ・上方向加速度：2.0 (G)
- ・下方向加速度：3.0 (G) (自重を考慮)
- ・左右方向加速度：1.0 (G)

*3-2 金属キャスク構造規格の「荷重の組合せと許容基準」より設定

(4) 設計事象Ⅱの加速度の導出

事象発生時に破損燃料用輸送容器(2体)が有する運動エネルギーを被衝突物(輸送架台、搬送架台、転倒防止台座)の弾性により吸収するとして、発生する衝撃加速度を計算した。衝撃加速度の計算方法と結果を以下に示す。

a. 輸送架台への衝突(取扱いモードNo.3)

縦姿勢で破損燃料用輸送容器(2体)の下部トラニオンが輸送架台後部支持脚にクレーンの巻下げ速度(0.025m/s)で衝突する場合について評価する。

破損燃料用輸送容器(2体)の有する運動エネルギーを輸送架台後部支持脚のひずみエネルギーで吸収するとして、(1)式で破損燃料用輸送容器(2体)に生じる衝撃加速度を求める。

$$\alpha = 1 + \sqrt{1 + \frac{K \cdot V^2}{m \cdot g^2}} \quad (1)$$

ただし、 α ：衝撃加速度 (G)

K：輸送架台後部支持脚の圧縮変形バネ定数 ($2.882 \times 10^{10} \text{N/m}$)

V：クレーンの巻下げ速度 (0.025m/s)

m：破損燃料用輸送容器(2体)の質量 ($4.43 \times 10^4 \text{kg}$)

g：重力加速度 (9.8m/s^2)

発生する衝撃加速度は3.29Gとなり、余裕をみて4.0Gを評価加速度とする。

b. 破損燃料用輸送容器（2 体）の搬送台車上の搬送架台への衝突（取扱いモード No. 7）

横姿勢で破損燃料用輸送容器（2 体）を搬送台車上の搬送架台に積載する際に、破損燃料用輸送容器（2 体）が搬送台車上の搬送架台に共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合について評価する。

破損燃料用輸送容器（2 体）を剛体として、破損燃料用輸送容器（2 体）の有する運動エネルギーを搬送架台支持脚のひずみエネルギーで吸収するとして、(1)式で破損燃料用輸送容器（2 体）に生じる衝撃加速度を求める。

ただし、 K ：搬送架台前後部支持脚の圧縮変形バネ定数（ $5.738 \times 10^{10} \text{N/m}$ ）

V ：共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）

発生する衝撃加速度は 4.07G となり、余裕をみて 5.0G を評価加速度とする。

c. 転倒防止台座への衝突及びキャスクピット床面への衝突（取扱いモード No. 9, 10）

縦姿勢で破損燃料用輸送容器（2 体）が転倒防止台座に共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合及び、転倒防止台座を取り付けた破損燃料用輸送容器（2 体）がキャスクピット床面に共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）で衝突する場合について評価する。

床面を剛体として、容器の有する運動エネルギーを転倒防止台座のひずみエネルギーで吸収するとして、(1)式で破損燃料用輸送容器（2 体）に生じる衝撃加速度を求める。

ただし、 K ：転倒防止台座の圧縮変形バネ定数（ $4.407 \times 10^{11} \text{N/m}$ ）

V ：共用プールの天井クレーンの巻下げ速度（0.025m/s）

発生する衝撃加速度は 9.10G となり、余裕をみて 10G を評価加速度とする。

(5) 各設計事象における荷重条件

破損燃料用輸送容器（2 体）の各設計事象における荷重条件を表 3-1～表 3-3 に示す。なお、破損燃料用輸送容器（2 体）の設計事象及び荷重条件については、抽出された事象のうち最大の荷重が作用する場合について示す。

表 3 - 1 荷重条件（胴，底板及び蓋）（1/2）

設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件
設計 条件	設計時	—	最高使用圧力：2.0MPa （二次蓋は 1.4MPa） ボルト初期締付け力 以下の荷重のうち最大となるもの ・ 構内輸送時荷重 ・ 吊上げ時荷重 ・ 搬送架台への衝突時荷重 ・ 転倒防止台座への衝突時荷重
I	構内輸送時	—	内圧：0.6MPa （二次蓋は 0.45MPa） ボルト初期締付け力 構内輸送時荷重 上方向：2.0G 下方向：3.0G （自重を考慮） 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G 熱荷重
	吊上げ時	—	内圧：0.6MPa （二次蓋は 0.45MPa） ボルト初期締付け力 吊上げ荷重 下方向：1.32G （自重を考慮） 熱荷重

表 3 - 1 荷重条件（胴、底板及び蓋）（2/2）

設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件
Ⅱ	搬送架台への衝突 （取扱いモード No. 7）	—	内圧：0.6MPa （二次蓋は 0.45MPa） ボルト初期締付け力 搬送架台への衝突時荷重 下方向：5.0G （自重を考慮） 熱荷重
	転倒防止台座への衝突 （取扱いモード No. 9） キャスクピットへの衝突 （取扱いモード No. 10）	輸送架台への衝突 （取扱いモード No. 3）	内圧：0.6MPa （二次蓋は 0.45MPa） ボルト初期締付け力 転倒防止台座への衝突時荷重 下方向：10G （自重を考慮） 熱荷重
試験 状態	試験時	—	試験時圧力：3.0MPa （二次蓋は 2.1MPa） ボルト初期締付け力

表 3 - 2 荷重条件（ポートカバー及びボルト）（1/2）

設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件
設計 条件	設計時	—	最高使用圧力：2.0MPa (二次蓋ポートカバー，二次蓋ボルト，二次蓋ポートカバーボルトは1.4MPa)
I	構内輸送時	—	最高使用圧力：2.0MPa (二次蓋ポートカバー，二次蓋ボルト，二次蓋ポートカバーボルトは1.4MPa) ボルト初期締付け力 構内輸送時荷重 上方向：2.0G 下方向：3.0G (自重を考慮) 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G
	吊上げ時	—	最高使用圧力：2.0MPa (二次蓋ポートカバー，二次蓋ボルト，二次蓋ポートカバーボルトは1.4MPa) ボルト初期締付け力 吊上げ荷重 下方向：1.32G (自重を考慮)

表 3 - 2 荷重条件（ポートカバー及びボルト）（2/2）

設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件
Ⅱ	搬送架台への衝突 （取扱いモード No. 7）	—	最高使用圧力：2.0MPa （二次蓋ポートカバー，二次蓋ボ ルト，二次蓋ポートカバーボル トは 1.4MPa） ボルト初期締付け力 搬送架台への衝突時荷重 下方向：5.0G （自重を考慮） 熱荷重
	転倒防止台座への衝突 （取扱いモード No. 9） キャスクピットへの衝突 （取扱いモード No. 10）	輸送架台への衝突 （取扱いモード No. 3）	最高使用圧力：2.0MPa （二次蓋ポートカバー，二次蓋ボ ルト，二次蓋ポートカバーボル トは 1.4MPa） ボルト初期締付け力 転倒防止台座への衝突時荷重 下方向：10G （自重を考慮） 熱荷重
試験 状態	試験時	—	試験時圧力：3.0MPa （二次蓋ポートカバーは 2.1MPa）

表 3-3 荷重条件 (バスケット)

設計 事象	代表事象	包絡される 事象	荷重条件
設計 条件	設計時	—	転倒防止台座への衝突時荷重* 3-3 下方向：10G (自重を考慮)
I	構内輸送時	吊上げ時	構内輸送時荷重 上方向：2.0G 下方向：3.0G (自重を考慮) 前後方向：2.0G 左右方向：1.0G
II	搬送架台への衝突 (取扱いモード No. 7)	—	搬送架台への衝突時荷重 下方向：5.0G (自重を考慮)
	転倒防止台座への衝突 (取扱いモード No. 9) キャスクピットへの衝突 (取扱いモード No. 10)	輸送架台への衝突 (取扱いモード No. 3)	転倒防止台座への衝突時荷重 下方向：10G (自重を考慮)

* 3-3 設計時のうち荷重条件が最も厳しいのは転倒防止台座への衝突荷重である

1.4. 設計基準

(1) 容器本体及び蓋

容器本体及び蓋は設計・建設規格 クラス 1 容器に関する規定 PVB-3000 に準じて評価を実施する。容器本体及び蓋の許容応力を表 4-1～表 4-6 に示す。

a. 設計条件における許容応力

設計条件における一次応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 一次一般膜応力 (P_m)

$$P_m \leq S_m$$

(b) 一次局部膜応力 (P_L)

$$P_L \leq 1.5S_m$$

(c) 一次膜＋一次曲げ応力 (P_L+P_b)

$$P_L + P_b \leq 1.5S_m$$

(d) ボルトの平均引張応力 (σ_m)

$$\sigma_m \leq S_m$$

b. 設計事象 I, II における許容応力

設計事象 I, II における応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 一次＋二次応力 (P_L+P_b+Q)

$$P_L + P_b + Q \leq 3S_m$$

(b) 平均せん断応力 (τ)

$$\tau \leq 0.6S_m$$

(c) 平均支圧応力 (σ_b)

$$\sigma_b \leq S_y$$

(d) 圧縮応力 (σ_c)

$$\sigma_c \leq B$$

(e) ボルトの平均引張応力 (σ_m)

$$\sigma_m \leq 2S_m$$

(f) ボルトの平均引張応力＋曲げ応力 ($\sigma_m + \sigma_b$)

$$\sigma_m + \sigma_b \leq 3S_m$$

c. 試験状態における許容応力

試験状態における一次応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 一次一般膜応力 (P_m)

$$P_m \leq 0.9S_y$$

(b) 一次局部膜応力 (P_L)

$$P_L \leq 1.5(0.9S_y)$$

(c) 一次一般膜＋一次曲げ応力 (P_m+P_b)

$$P_m+P_b \leq 1.5(0.9S_y)$$

(2) バスケット

バスケットは設計・建設規格 炉心支持構造物に関する規定 CSS-3000 に準じて評価を実施する。バスケットの許容応力を表 4－7 に示す。

a. 設計条件における許容応力

設計条件における一次応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 一次一般膜応力 (P_m)

$$P_m \leq S_m$$

(b) 一次一般膜＋一次曲げ応力 (P_m+P_b)

$$P_m+P_b \leq 1.5S_m$$

②設計事象 I, II における許容応力

設計事象 I, II における応力は以下の許容応力を上回らないことを確認する。

(a) 一次＋二次応力 (P_m+P_b+Q)

$$P_m+P_b+Q \leq 3S_m$$

(b) 平均せん断応力 (τ)

$$\tau \leq 0.6S_m$$

(c) 平均支圧応力 (σ_b)

$$\sigma_b \leq S_y$$

(d) 軸圧縮応力 (σ_c)

$$\sigma_c \leq f_c$$

表 4－1 胴及び底板の許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	一次一般膜応力	P_m	123	
	一次局部膜応力	P_L	184	
	一次膜＋曲げ応力	$P_L + P_b$	184	
設計事象Ⅰ，Ⅱ	一次＋二次応力	$P_L + P_b + Q$	369	
	平均せん断応力	τ	73	
	平均支圧応力	σ_b	184	
	圧縮応力	σ_c	95	
試験状態	一次一般膜応力	P_m	165	
	一次局部膜応力	P_L	247	
	一次一般膜＋曲げ応力	$P_m + P_b$	247	

材質： GLF1 相当材 (ASTM A350M Gr. LF5 Cl.1)

設計温度： 135 (°C) * 4－1

* 4－1 除熱評価の結果より余裕を考慮して設定

表 4－2 一次蓋の許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	一次一般膜応力	P_m	137	
	一次局部膜応力	P_L	205	
	一次膜＋曲げ応力	$P_L + P_b$	205	
設計事象Ⅰ，Ⅱ	一次＋二次応力	$P_L + P_b + Q$	411	
試験状態	一次一般膜応力	P_m	153	
	一次局部膜応力	P_L	229	
	一次一般膜＋曲げ応力	$P_m + P_b$	229	

材質： SUSF304

設計温度： 100 (°C) * 4－2

* 4－2 除熱評価の結果より余裕を考慮して設定

表 4-3 ポートカバーの許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	一次一般膜応力	P_m	137	
	一次局部膜応力	P_L	205	
	一次膜＋曲げ応力	$P_L + P_b$	205	
設計事象 I, II	一次＋二次応力	$P_L + P_b + Q$	411	
試験状態	一次一般膜応力	P_m	143	
	一次局部膜応力	P_L	214	
	一次一般膜＋曲げ応力	$P_m + P_b$	214	

材質： SUS304

設計温度： 135 (°C) *4-3

*4-3 胴及び底板に合わせて設定

表 4-4 二次蓋，二次蓋ポートカバーの許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	一次一般膜応力	P_m	137	
	一次局部膜応力	P_L	205	
	一次膜＋曲げ応力	$P_L + P_b$	205	
設計事象 I, II	一次＋二次応力	$P_L + P_b + Q$	411	
試験状態	一次一般膜応力	P_m	155	
	一次局部膜応力	P_L	232	
	一次一般膜＋曲げ応力	$P_m + P_b$	232	

材質： SUSF304

設計温度： 95 (°C) *4-4

*4-4 除熱評価の結果より余裕を考慮して設定

表 4-5 一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルトの許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	平均引張応力	σ_m	216	
設計事象 I, II	平均引張応力	σ_m	432	
	平均引張応力＋曲げ応力	$\sigma_m + \sigma_b$	648	

材質： SUS630 H1150

設計温度： 135 (°C) *4-5

*4-5 胴及び底板に合わせて設定

表 4-6 二次蓋ポートカバーボルトの許容応力

設計事象	応力分類	記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	平均引張応力	σ_m	223	
設計事象 I, II	平均引張応力	σ_m	446	
	平均引張応力+曲げ応力	$\sigma_m + \sigma_b$	669	

材質： SUS630 H1150

設計温度： 95 (°C) *4-6

*4-6 二次蓋に合わせて設定

表 4-7 バスケットの許容応力

設計事象	応力分類		記号	許容値 [MPa]	備考
設計条件	一次一般膜応力		P_m	133	
	一次一般膜+曲げ応力		$P_m + P_b$	199	
設計事象 I, II	一次+二次応力		$P_m + P_b + Q$	399	
	平均せん断応力		τ	79	
	平均支圧応力		σ_b	150	
	軸圧縮 応力	枠板 長手方向	σ_c	96	
		枠板 長手方向以外		88	
		格子支持板外周部 0° -180° 方向		56	
		格子支持板外周部 90° -270° 方向		129	
		スペーサ		129	

材質： SUS304

設計温度： 170 (°C) *4-7

*4-7 除熱評価の結果より余裕を考慮して設定

1.5. 評価方法及び評価モデル

1.5.1. 容器本体及び蓋

容器本体及び蓋の主な構造部材の応力評価箇所を図5-1, 図5-2に示す。荷重条件は表3-1に示したとおりである。

1) 設計条件

① 胴, 底板, 一次蓋, 二次蓋

最高使用圧力及びボルト初期締付け力と下記の設計事象の組合せで各部に発生する最大の応力を評価する。

(a) 最高使用圧力及びボルト初期締付け力が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図5-3に示す。

(b) 設計事象による機械的荷重が作用する場合

i. 構内輸送時

解析コード ABAQUS の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図5-4に示す。構内輸送時は輸送容器に対し上下, 前後及び左右方向の加速度が組み合わさって作用する。

ii. 吊上げ時

解析コード ABAQUS の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図5-5に示す。

iii. 搬送架台への衝突時

解析コード ABAQUS の三次元固体（連続体）要素による解析モデルは図5-4と同様。

iv. 転倒防止台座への衝突時

解析コード ABAQUS の三次元固体（連続体）要素による解析モデルを図5-6に示す。

② ポートカバー, 二次蓋ポートカバー

(a) 最高使用圧力による応力

最高使用圧力により発生する一次一般膜応力(P_m)及び, 一次膜+曲げ応力(P_L+P_b)は(2)式で計算する。なお, ポートカバー, 二次蓋ポートカバーは周囲の構造から独立しているため, 一次局部膜応力(P_L)は発生しない。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{1.24 \cdot P \cdot r^2}{t^2} \\ \sigma_y &= \sigma_x \\ \sigma_z &= -P \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで,

- P : 最高使用圧力
r : ポートカバーOリング平均半径
二次蓋ポートカバーはボルトピッチ円半径
t : ポートカバー最小板厚

③ 一次蓋ボルト, 二次蓋ボルト, ポートカバーボルト, 二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力及びガスケット締付による平均引張応力

最高使用圧力におけるボルト荷重及びガスケット (Oリング) 締付時のボルト荷重により発生する平均引張応力 (σ_{m1}) は(3)式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{m1} &= \frac{W_{m1}}{A} \\ W_{m1} &= H + H_p \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで,

- W_{m1} : 必要な最小ボルト荷重
A : 全数のボルト最小断面積
H : フランジに加わる最高使用圧力による全荷重
 H_p : 気密を十分保つために, Oリング又は継手接触面にかける圧縮力
(ゴム製Oリングのため $H_p=0N$)

また, ガスケット (Oリング) 締付け時の平均引張応力 (σ_{m2}) は(4)式で計算する。

$$\sigma_{m2} = \frac{W_{m2}}{A} \dots\dots\dots (4)$$

ここで,

- W_{m2} : ガスケット締付時に必要な最小ボルト荷重 (ゴム製Oリングのため $W_{m2}=0N$)

2) 設計事象 I 構内輸送時

① 胴, 底板, 一次蓋, 二次蓋

(a) 内圧及びボルト初期締付け力が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルは図 5-3 と同様。

(b) 構内輸送時の機械的荷重が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルは図 5-4 と同様。

(c) 熱荷重が作用する場合

解析コード ABAQUS の軸対称固体（連続体）要素による解析モデルを図 5－7 に示す。
熱荷重は，3 号機構内用輸送容器における除熱評価で得られた温度分布を用いて評価する。

(d) 平均せん断応力

構造上，平均せん断応力（ τ ）が発生する箇所はない。

(e) 平均支圧応力

底板とバスケット底面との接触部に発生する平均支圧応力（ σ_b ）は(5)式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{m_b \cdot G_z}{A_b} \dots\dots\dots (5)$$

ここで，

m_b ：バスケットの質量
 G_z ：後方向加速度
 A_b ：接触面積

(f) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力（ σ_c ）は(6)式で計算する。

$$\sigma_c = \frac{m_c \cdot G_z}{A_c} \dots\dots\dots (6)$$

ここで，

m_c ：容器の質量
 G_z ：後方向加速度
 A_c ：胴の断面積

② ポートカバー，二次蓋ポートカバー

構内輸送時の機械的荷重は最高使用圧力と比べて無視できるほど小さい。また、熱荷重は評価部位の寸法が小さく，温度勾配は緩やかなため無視できるほど小さい。したがって，最高使用圧力による応力のみを考慮する。

一次＋二次応力（ P_L+P_b+Q ）は，(2)式で計算する最高使用圧力により発生する一次膜＋曲げ応力（ P_L+P_b ）となる。

③ 一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルト，二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力による平均引張応力

最高使用圧力により発生する平均引張応力（ σ_{m1} ）は(3)式で計算する。

(b) ボルト初期締付け力による平均引張応力

ボルト初期締付け力により発生する平均引張応力（ σ_{m3} ）は(7)式で計算する。

$$\sigma_{m3} = \frac{F_s}{A_s} \dots\dots\dots (7)$$

ここで，

F_s : ボルト初期締付け力

A_s : ボルト最小断面積

(c) 構内輸送時に作用する加速度による平均引張応力

構内輸送時に作用する加速度により発生する平均引張応力（ σ_{m4} ）は(8)式で計算する。

$$\sigma_{m4} = \frac{mG}{A} \dots\dots\dots (8)$$

ここで，

m : 作用する質量

G : 加速度

A : 全数のボルト最小断面積

(d) 構内輸送時に作用する加速度による曲げ応力

構内輸送時に作用する加速度により発生する曲げ応力（ σ_b ）は(9)式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{1}{n} \cdot \frac{mG\ell_b}{8Z} \dots\dots\dots (9)$$

ここで，

n : ボルト本数

m : 作用する質量

G : 加速度

ℓ_b : ボルト長さ

Z : ボルトの断面係数

なお，二次蓋ポートカバーボルトには取付け構造上，曲げ応力は発生しない。

3) 設計事象Ⅰ 吊上げ時

① 胴, 底板, 一次蓋, 二次蓋

(a) 内圧及びボルト初期締付け力が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルは図 5-3 と同様。

(b) 吊上げ時の機械的荷重が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルは図 5-5 と同様。

(c) 熱荷重が作用する場合

解析コード ABAQUS の軸対称固体 (連続体) 要素による解析モデルは図 5-7 と同様。

熱荷重は, 3 号機構内用輸送容器における除熱評価で得られた温度分布を用いて評価する。

(d) 平均せん断応力

構造上, 平均せん断応力 (τ) が発生する箇所はない。

(e) 平均支圧応力

底板とバスケット底面との接触部に発生する平均支圧応力 (σ_b) は(5)式で計算する。

(f) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力 (σ_c) は(6)式で計算する。

② ポートカバー, 二次蓋ポートカバー

吊上げ時の機械的荷重は最高使用圧力と比べて無視できるほど小さい。また、熱荷重は評価部位の寸法が小さく、温度勾配は緩やかなため無視できるほど小さい。したがって、最高使用圧力による応力のみを考慮する。

一次+二次応力 ($P_L + P_b + Q$) は, (2)式で計算する最高使用圧力により発生する一次膜+曲げ応力 ($P_L + P_b$) となる。

③ 一次蓋ボルト, 二次蓋ボルト, ポートカバーボルト, 二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力による平均引張応力

最高使用圧力により発生する平均引張応力 (σ_{m1}) は(3)式で計算する。

(b) ボルト初期締付け力による平均引張応力

ボルト初期締付け力により発生する平均引張応力 (σ_{m3}) は(7)式で計算する。

(c) 吊上げ時に作用する加速度による平均引張応力

引張方向への加速度がかからないため平均引張応力 (σ_{m4}) は発生しない。

(d) 吊上げ時に作用する加速度による曲げ応力

曲げ方向への加速度がかからないため曲げ応力 (σ_b) は発生しない。

4) 設計事象Ⅱ 搬送架台への衝突 (横姿勢)

① 胴, 底板, 一次蓋, 二次蓋

(a) 内圧及びボルト初期締付け力が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルは図 5-3 と同様。

(b) 搬送架台衝突時の機械的荷重が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体 (連続体) 要素による解析モデルは図 5-4 「上下・前後方向加速度作用時のモデル」と同様。

(c) 熱荷重が作用する場合

解析コード ABAQUS の軸対称固体 (連続体) 要素による解析モデルは図 5-7 と同様。

熱荷重は, 3 号機構内用輸送容器における除熱評価で得られた温度分布を用いて評価する。

(d) 平均せん断応力

構造上, 平均せん断応力 (τ) が発生する箇所はない。

(e) 平均支圧応力

底板とバスケット底面との接触部に発生する平均支圧応力 (σ_b) は (5) 式で計算する。

(f) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力 (σ_c) は (6) 式で計算する。

② ポートカバー, 二次蓋ポートカバー

搬送架台への衝突による機械的荷重は最高使用圧力と比べて無視できるほど小さい。

また, 熱荷重は評価部位の寸法が小さく, 温度勾配は緩やかなため無視できるほど小さい。したがって, 最高使用圧力による応力のみを考慮する。

一次+二次応力 (P_L+P_b+Q) は, (2) 式で計算する最高使用圧力により発生する一次膜+曲げ応力 (P_L+P_b) となる。

③ 一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルト，二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力による平均引張応力

最高使用圧力により発生する平均引張応力 (σ_{m1}) は(3)式で計算する。

(b) ボルト初期締付け力による平均引張応力

ボルト初期締付け力により発生する平均引張応力 (σ_{m3}) は(7)式で計算する。

(c) 搬送架台への衝突時に作用する加速度による平均引張応力

搬送架台への衝突時に作用する加速度により発生する平均引張応力 (σ_{m4}) は(8)式で計算する。

なお，一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルトには引張方向への加速度がかからないため平均引張応力 (σ_{m4}) は発生しない。

(d) 搬送架台への衝突時に作用する加速度による曲げ応力

搬送架台への衝突時に作用する加速度により発生する曲げ応力 (σ_b) は(9)式で計算する。

なお，二次蓋ポートカバーボルトには，曲げ応力がかかる方向へ加速度がかからないため曲げ応力 (σ_b) は発生しない。

5) 設計事象Ⅱ 転倒防止台座への衝突（縦姿勢）

① 胴，底板，一次蓋，二次蓋

(a) 内圧及びボルト初期締付け力が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体（連続体）要素による解析モデルは図 5－3 と同様。

(b) 転倒防止台座衝突時の機械的荷重が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体（連続体）要素による解析モデルは図 5－6 と同様。

(c) 熱荷重が作用する場合

解析コード ABAQUS の軸対称固体（連続体）要素による解析モデルは図 5－7 と同様。

熱荷重は，3号機構内用輸送容器における除熱評価で得られた温度分布を用いて評価する。

(d) 平均せん断応力

構造上，平均せん断応力 (τ) が発生する箇所はない。

(e) 平均支圧応力

底板とバスケット底面との接触部に発生する平均支圧応力 (σ_b) は(5)式で計算する。

(f) 圧縮応力

胴に生じる圧縮応力 (σ_c) は(6)式で計算する。

② ポートカバー，二次蓋ポートカバー

転倒防止台座への衝突による機械的荷重は最高使用圧力と比べて無視できるほど小さい。また、熱荷重は評価部位の寸法が小さく，温度勾配は緩やかなため無視できるほど小さい。したがって，最高使用圧力による応力のみを考慮する。

一次＋二次応力 ($P_L + P_b + Q$) は，(2)式で計算する最高使用圧力により発生する一次膜＋曲げ応力 ($P_L + P_b$) となる。

③ 一次蓋ボルト，二次蓋ボルト，ポートカバーボルト，二次蓋ポートカバーボルト

(a) 最高使用圧力による平均引張応力

最高使用圧力により発生する平均引張応力 (σ_{m1}) は(3)式で計算する。

(b) ボルト初期締付け力による平均引張応力

ボルト初期締付け力により発生する平均引張応力 (σ_{m3}) は(7)式で計算する。

(c) 転倒防止台座への衝突時に作用する加速度による平均引張応力

引張方向への加速度がかからないため平均引張応力 (σ_{m4}) は発生しない。

(d) 転倒防止台座への衝突時に作用する加速度による曲げ応力

曲げ方向への加速度がかからないため曲げ応力 (σ_b) は発生しない。

6) 試験状態

① 胴，底板，一次蓋，二次蓋

(a) 試験時圧力及びボルト初期締付け力が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体（連続体）要素による解析モデルは図 5－3 と同様。

(b) 自重が作用する場合

解析コード ABAQUS の三次元固体（連続体）要素による解析モデルは図 5－6 と同様。
ただし，加速度は 1.0G とする。

② ポートカバー，二次蓋ポートカバー

(a) 試験時の圧力による応力

試験時圧力により発生する一次一般膜応力(P_m)及び，一次一般膜+曲げ応力(P_m+P_b)は(2)式で試験時圧力を用いて計算する。なお，ポートカバー，二次蓋ポートカバーは周囲の構造から独立しているため，一次局部膜応力(PL)は発生しない。

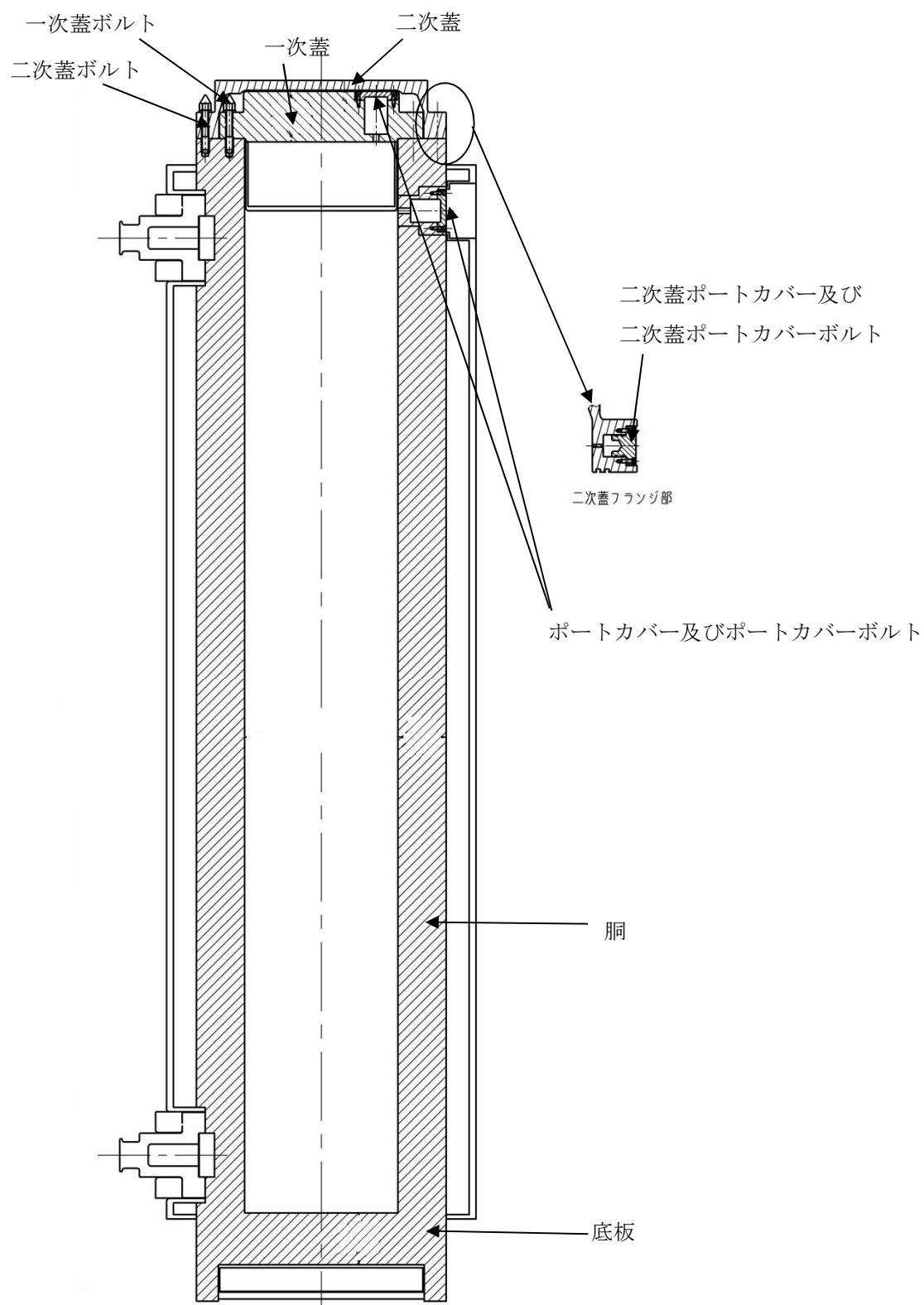


図 5 - 1 容器本体及び蓋の応力評価箇所

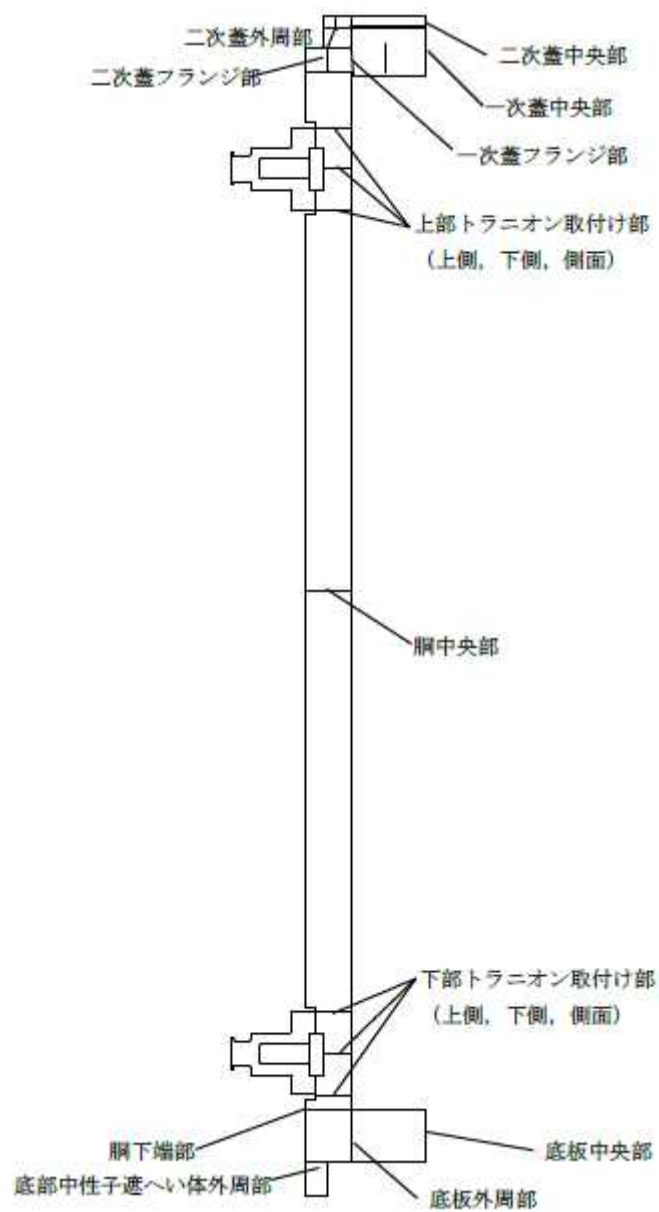


図 5 - 2 容器本体及び蓋の応力評価箇所（胴，底板，蓋の詳細）

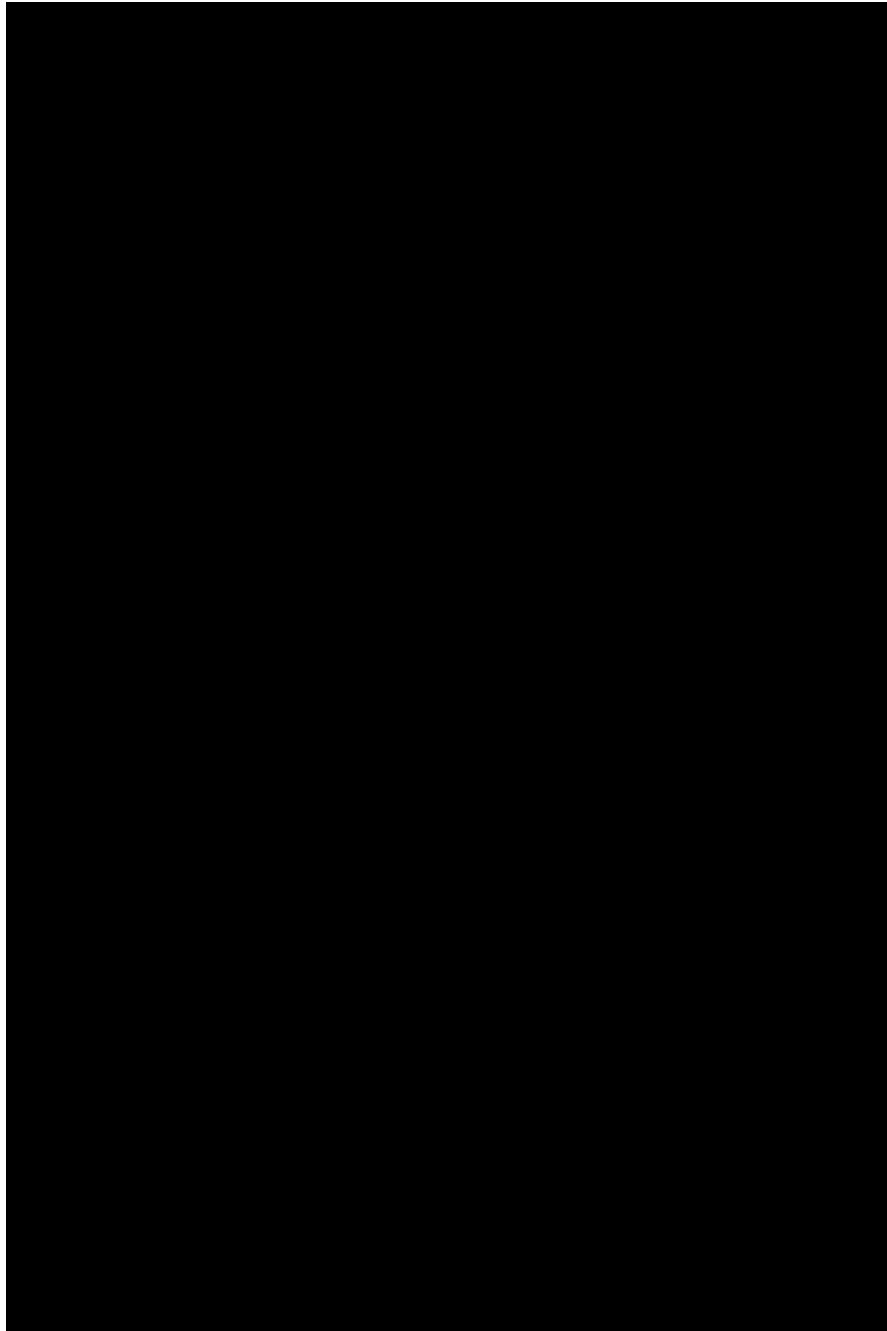
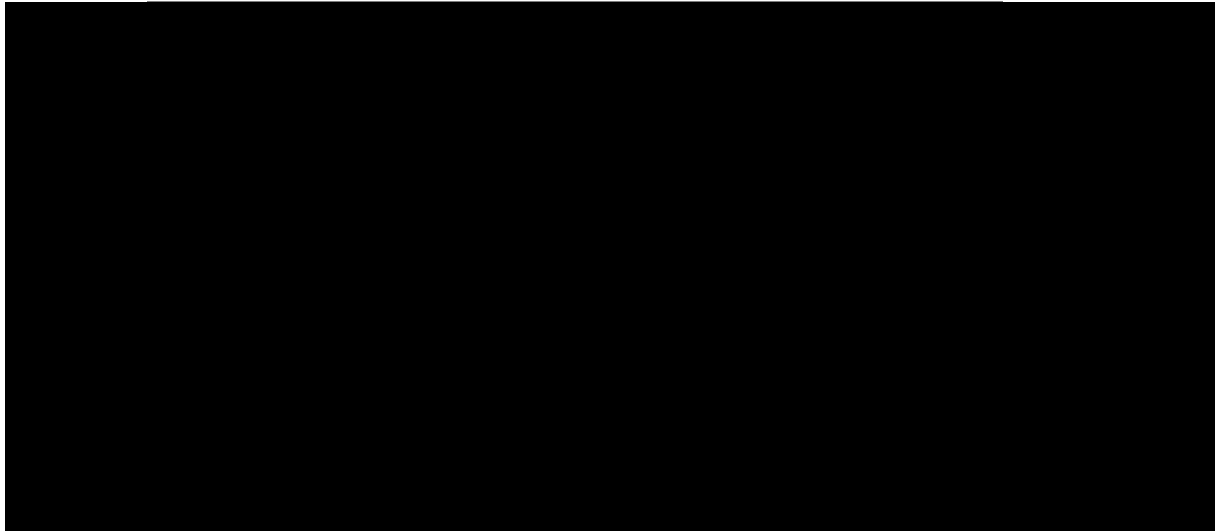


図 5－3 破損燃料用輸送容器（2体）の解析モデル
（設計条件，設計事象 I，II 及び試験状態の内圧並びにボルト初期締付け力作用時）



上下・前後方向加速度作用時のモデル
(設計事象Ⅱの搬送架台衝突時も同様)



左右方向加速度作用時のモデル

図 5－4 破損燃料用輸送容器（2体）の解析モデル
(設計時及び設計事象Ⅰの構内輸送時)

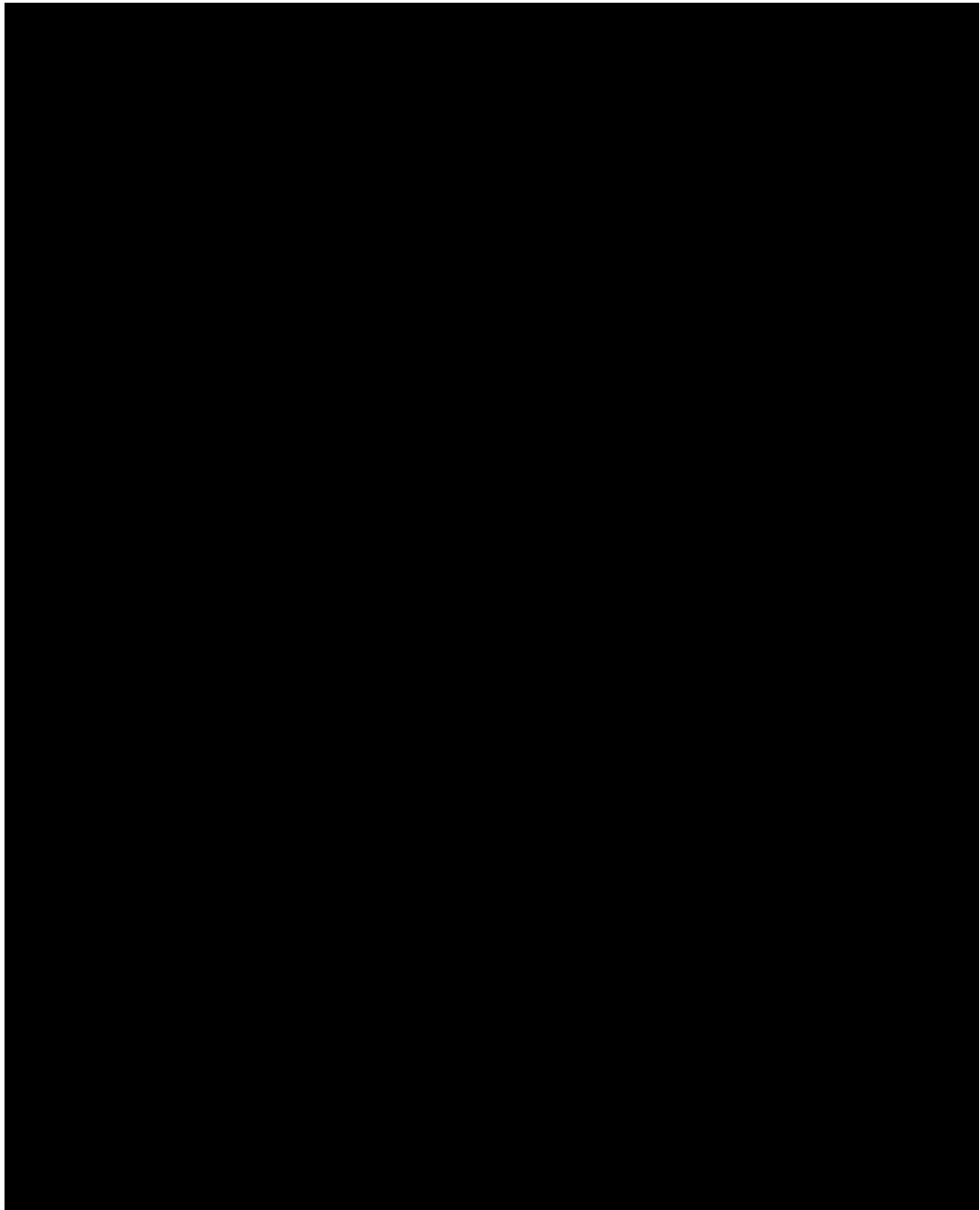


図 5－5 破損燃料用輸送容器（2体）の解析モデル
（設計時及び設計事象Ⅰの吊上げ時）

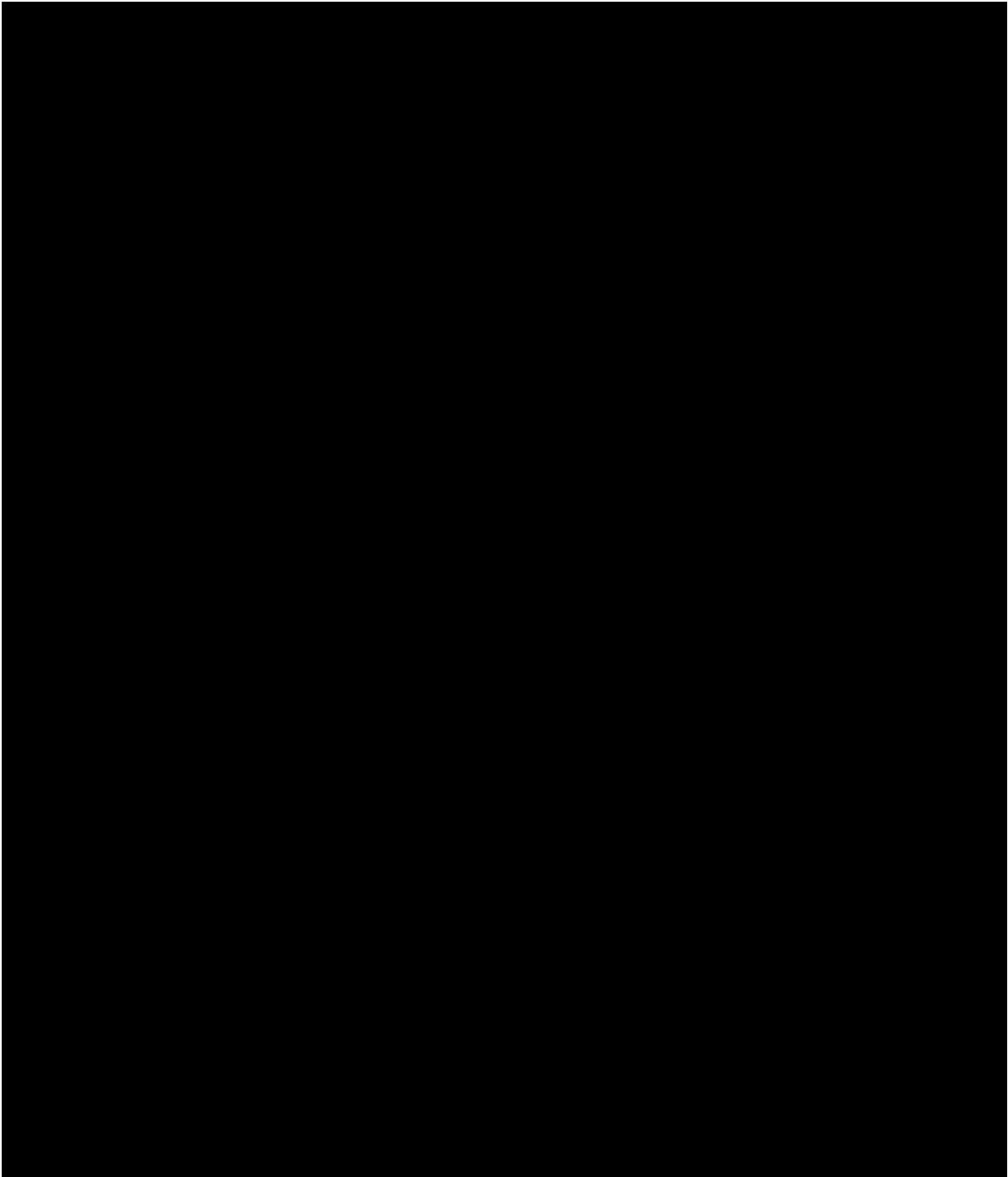


図 5－6 破損燃料用輸送容器（2体）の解析モデル
（設計時及び設計事象Ⅱの転倒防止台座への衝突時並びに試験時）

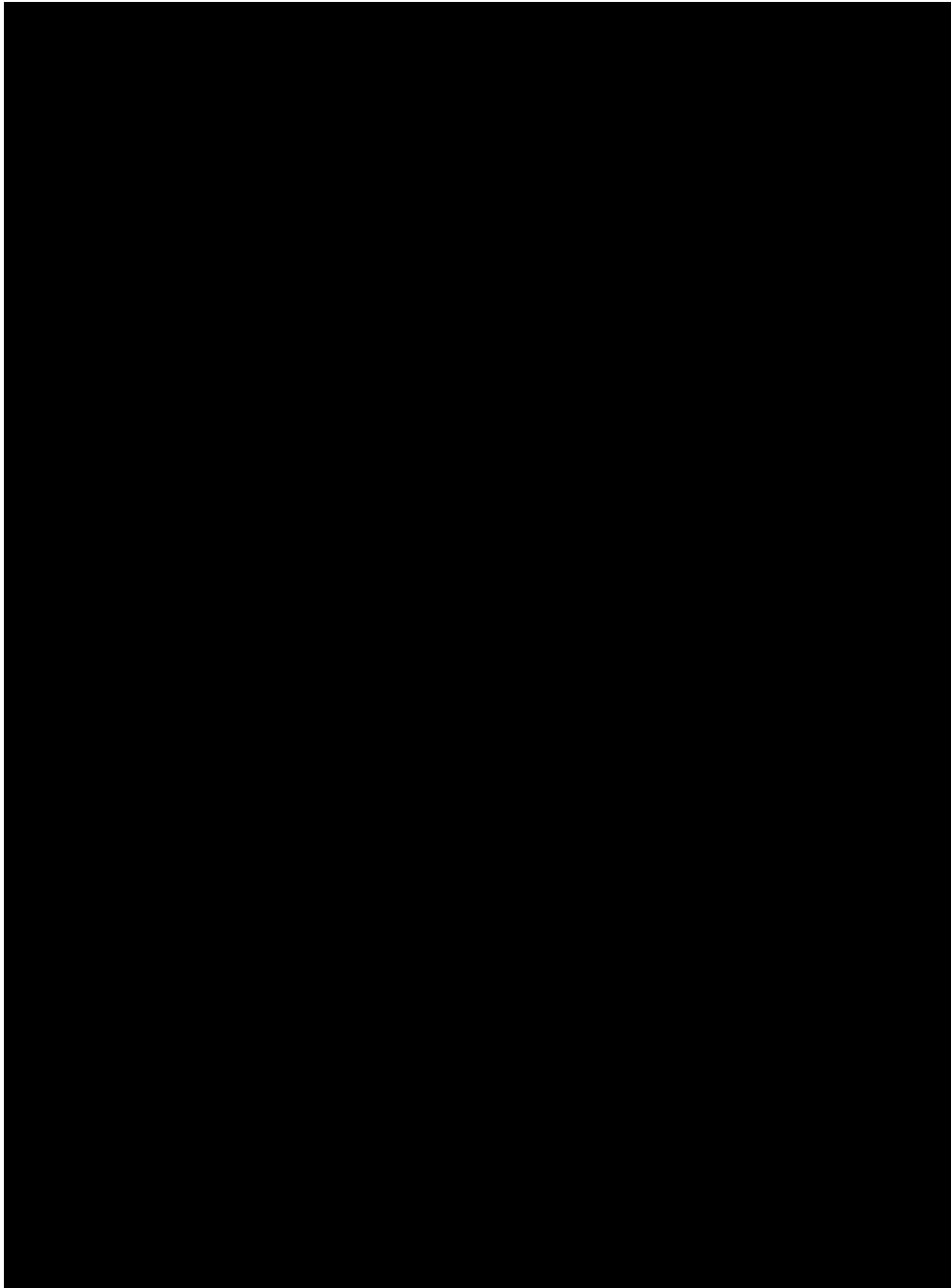


図 5－7 破損燃料用輸送容器（2体）の解析モデル（熱荷重作用時）

1.5.2. バスケット

バスケットの応力評価箇所を図5－8に示す。荷重条件は表3－3に示したとおりである。

1) 設計条件

① 一次一般膜応力

最大応力が発生する箇所は、転倒防止台座への衝突時の図5－8の評価点①及び⑦である。評価点①及び⑦の一次一般膜応力(P_m)は、(10)式で計算する。

$$P_m = \frac{m_{1,7}G_Z}{A_{1,7}} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、

$m_{1,7}$: 評価点①及び⑦に作用する総質量
 $A_{1,7}$: 評価点①及び⑦の総断面積
 G_Z : 加速度

② 一次膜応力＋一次曲げ応力

最大応力が発生する箇所は、転倒防止台座への衝突時の図5－8の評価点④である。評価点④の一次一般膜＋一次曲げ応力(P_m+P_b)は、(11)式で計算する。

$$\left. \begin{aligned} P_m+P_b &= \frac{M_4}{Z_4} \\ M_4 &= \frac{m_4G_Zl_4}{24} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (11)$$

ここで、

m_4 : 評価点④に作用する質量
 G_Z : 加速度
 M_4 : 評価点④に生じる曲げモーメント
 Z_4 : 評価点④における枠板の断面係数
 l_4 : 評価点④における等分布荷重が作用する長さ

2) 設計事象Ⅰ 構内輸送時

① 一次＋二次応力

最大応力が発生する箇所は、図5－8の評価点①である。

熱荷重は発生しないため、一次＋二次応力(P_m+P_b+Q)は、(12)式で計算する一次一般

膜＋一次曲げ応力 ($P_m + P_b$) である。

$$\left. \begin{aligned} P_m &= \frac{m_{1,7} G_Z}{A_{1,7}} \\ P_b &= \frac{1}{n_{\text{span}}} \cdot \frac{m_1 G_X l_{\text{pitch}}}{12 Z_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (12)$$

ここで,

- $m_{1,7}$: 評価点①及び⑦に作用する総質量
- m_1 : 評価点①に作用する質量
- $A_{1,7}$: 評価点①及び⑦の総断面積
- G_X, G_Z : 加速度
- Z_1 : 評価点①における桹板の断面係数
- n_{span} : 格子支持板によって支持されるスパンの数
- l_{pitch} : 桹板の支持ピッチ

② 平均せん断応力

最大応力が発生する箇所は、図 5－8 の評価点④である。

左右方向加速度により発生する平均せん断応力 (τ) は、(13) 式で計算する。

$$\tau = \frac{m_4 G_Y}{A_4} \dots\dots\dots (13)$$

ここで,

- m_4 : 評価点④に作用する質量
- A_4 : 評価点④の断面積
- G_Y : 加速度

③ 平均支圧応力

最大応力が発生する箇所は図 5－8 の評価点①、③及び⑦である。平均支圧応力 (σ_b) は(10) 式で計算する。

④ 軸圧縮応力

最大応力が発生する箇所は図 5－8 の評価点①及び⑦である。軸圧縮応力 (σ_c) は(10) 式で計算する。

3) 設計事象Ⅱ 搬送架台への衝突（横姿勢）

① 一次＋二次応力

最大応力が発生する箇所は，図 5－8 の評価点①である。

熱荷重は発生しないため，一次＋二次応力 ($P_m + P_b + Q$) は，(14)式で計算する一次一般膜＋一次曲げ応力 ($P_m + P_b$) である。

$$\left. \begin{aligned} P_m &= \frac{m_1 G_X}{A_1} \quad , \quad \frac{m_{1,7} G_Z}{A_{1,7}} \\ P_b &= \frac{1}{n_{\text{span}}} \cdot \frac{m_1 G_X l_{\text{pitch}}}{12 Z_1} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

ここで，

- $m_{1,7}$: 評価点①及び⑦に作用する総質量
- m_1 : 評価点①に作用する質量
- $A_{1,7}$: 評価点①及び⑦の総断面積
- A_1 : 評価点①の断面積
- G_X, G_Z : 加速度
- Z_1 : 評価点①における枠板の断面係数
- n_{span} : 格子支持板によって支持されるスパンの数
- l_{pitch} : 枠板の支持ピッチ

② 平均せん断応力

最大応力が発生する箇所は，図 5－8 の評価点⑦である。

前後方向加速度により発生する平均せん断応力 (τ) は，(15)式で計算する。

$$\tau = \frac{m_7 G_X}{A_7} \dots\dots\dots (15)$$

ここで，

- m_7 : 評価点⑦に作用する質量
- A_7 : 評価点⑦の断面積
- G_X : 加速度

③ 平均支圧応力

最大応力が発生する箇所は図 5－8 の評価点①及び④である。平均支圧応力 (σ_b) は

(16)式で計算する。

$$\sigma_b = \frac{m_1 G_X}{A_1} \dots\dots\dots (16)$$

ここで,

m_1 : 評価点①に作用する質量
 A_1 : 評価点①の断面積
 G_X : 加速度

④ 軸圧縮応力

最大応力が発生する箇所は図 5－8 の評価点①である。軸圧縮応力(σ_c)は(10)式で計算する。

4) 設計事象Ⅱ 転倒防止台座への衝突(縦姿勢)

① 一次＋二次応力

最大応力が発生する箇所は、図 5－8 の評価点④である。

熱荷重は発生しないため、転倒防止台座への衝突に発生する一次＋二次応力($P_m + P_b + Q$)は(11)式で計算する。

② 平均せん断応力

構造上、平均せん断応力(τ)は発生しない。

③ 平均支圧応力

最大応力が発生する箇所は図 5－8 の評価点①、③及び⑦である。平均支圧応力(σ_b)は(10)式で計算する。

④ 軸圧縮応力

最大応力が発生する箇所は図 5－8 の評価点①及び⑦である。軸圧縮応力(σ_c)は(10)式で計算する。

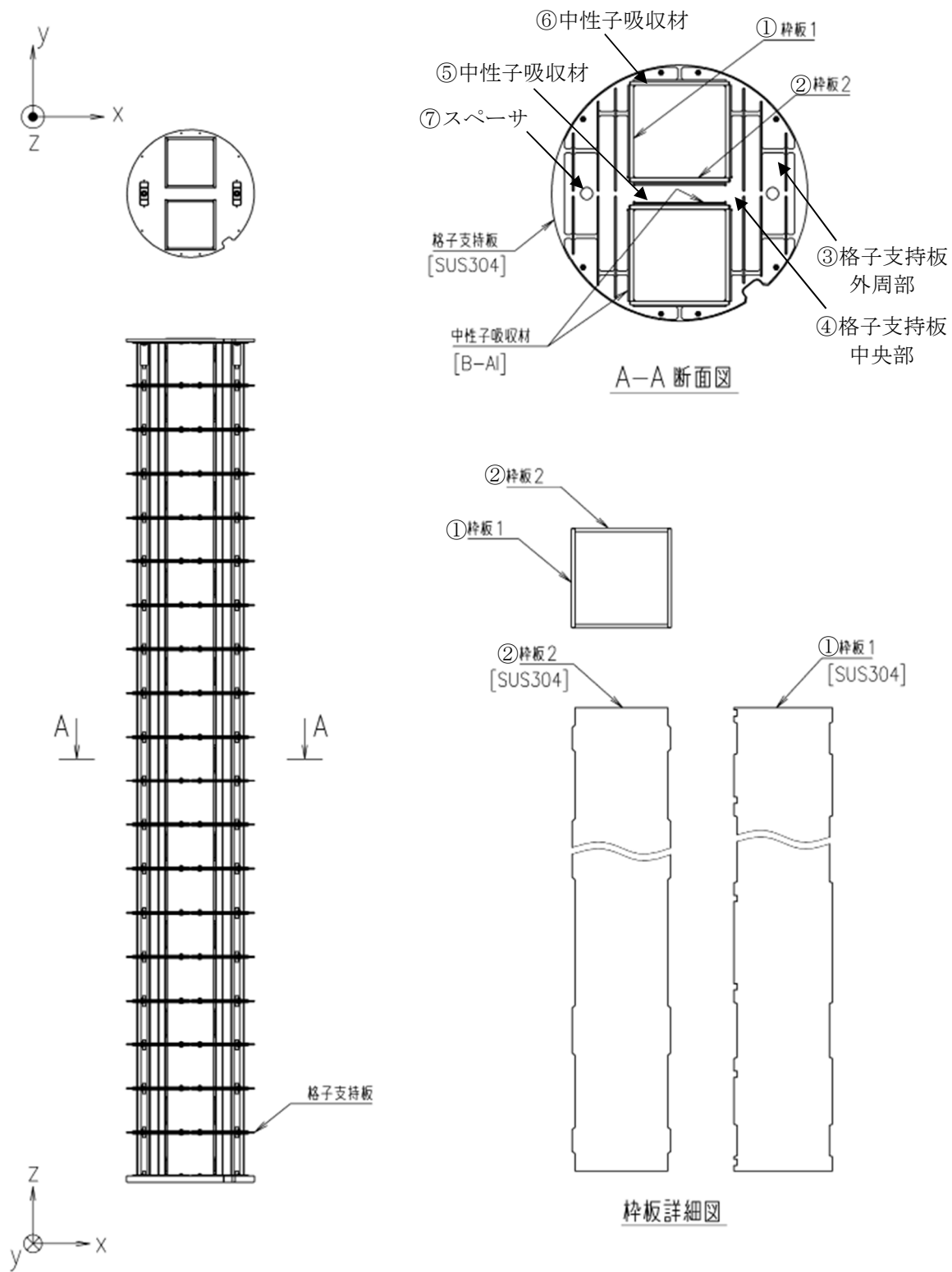


図 5 - 8 バスケットの応力評価箇所

1.6. 評価結果

評価結果を表 6－1～表 6－5 に示す。いずれも，許容応力に対して十分に余裕がある。
このため，破損燃料内用輸送容器（2体）の構造健全性は維持される。

表 6－1 容器本体及び蓋の評価結果（胴、底板、蓋） 1/2

(単位：MPa)

部位	材料	設計事象	一次一般膜応力 (P _m)		一次局部膜応力 (P _L)		一次膜＋曲げ応力 (P _L ＋P _b)		一次一般膜＋曲げ応力 (P _m ＋P _b)		一次＋二次応力 (P _L ＋P _b ＋Q)	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
胴中央部	ASTM A350M Gr. LF5 Cl. 1	設計条件	8	123	—	—	9	184	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	9	369
		試験状態	7	165			—	—	9	247	—	—
底板中央部		設計条件	5	123	—	—	9	184	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	21	369
		試験状態	3	165	—	—	—	—	6	247	—	—
底板外周部		設計条件	—	—	5	184	10	184	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	10	369
		試験状態	—	—	3	247	—	—	6	247	—	—
胴下端部		設計条件	—	—	12	184	22	184	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	16	369
		試験状態	—	—	5	247	—	—	10	247	—	—
底部中性子遮蔽体外周部		設計条件	—	—	10	184	13	184	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	25	369
		試験状態	—	—	6	247	—	—	10	247	—	—
上部トラニオン取付け部		設計条件			11	184	22	184	—	—	—	—
		I , II	—	—	—	—	—	—	—	—	20	369
		試験状態	—	—	7	247	—	—	10	247	—	—

表 6－1 容器本体及び蓋の評価結果（胴、底板、蓋） 2/2

（単位：MPa）

部位	材料	設計事象	一次一般膜応力 (P _m)		一次局部膜応力 (P _L)		一次膜＋曲げ応力 (P _L ＋P _b)		一次一般膜＋曲げ応力 (P _m ＋P _b)		一次＋二次応力 (P _L ＋P _b ＋Q)	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力	計算値	許容応力
下部トラニオン 取付け部	ASTM A350M Gr. LF5 Cl. 1	設計条件	—	—	18	184	31	184	—	—	—	—
		I，Ⅱ	—	—	—	—	—	—	—	—	30	369
		試験状態	—	—	7	247	—	—	9	247	—	—
一次蓋 中央部	SUSF304	設計条件	3	137	—	—	8	205	—	—	—	—
		I，Ⅱ	—	—	—	—	—	—	—	—	4	411
		試験状態	3	153	—	—	—	—	10	229	—	—
一次蓋 フランジ部		設計条件	—	—	7	205	8	205	—	—	—	—
		I，Ⅱ	—	—	—	—	—	—	—	—	7	411
		試験状態	—	—	8	229	—	—	8	229	—	—
二次蓋 中央部		設計条件	61	137			102	205	—	—	—	—
		I，Ⅱ	—	—	—	—	—	—	—	—	34	411
		試験状態	92	155	—	—	—	—	154	232	—	—
二次蓋 外周部		設計条件	—	—	36	205	64	205	—	—	—	—
		I，Ⅱ	—	—	—	—	—	—	—	—	25	411
		試験状態	—	—	46	232	—	—	95	232	—	—
二次蓋フラン ジ部		設計条件			9	205	18	205	—	—	—	—
		I，Ⅱ	—	—	—	—	—	—	—	—	9	411
		試験状態	—	—	13	232	—	—	27	232	—	—

表 6－2 容器本体及び蓋の評価結果（ポートカバー）

（単位：MPa）

部位	材質	設計事象	一次一般膜応力 (P_m)		一次膜＋曲げ応力 ($P_L + P_b$)		一次一般膜＋曲げ応力 ($P_m + P_b$)		一次＋二次応力 ($P_L + P_b + Q$)	
			計算値	許容値	計算値	許容値	計算値	許容値	計算値	許容値
ポートカバー	SUS304	設計条件	2	137	17	205	—	—	—	—
		I，II	—	—	—	—	—	—	17	411
		試験状態	3	143	—	—	26	214		
二次蓋 ポートカバー	SUSF304	設計条件	2	137	7	205	—	—	—	—
		I，II	—	—	—	—	—	—	7	411
		試験状態	3	155	—	—	11	232	—	—

表 6－3 容器本体及び蓋の評価結果（ボルト）

（単位：MPa）

部位	材料	設計事象	平均引張応力(σ_m)		平均引張応力＋曲げ応力 ($\sigma_m + \sigma_b$)	
			計算値	許容応力	計算値	許容応力
一次蓋 ボルト	SUS630 H1150	設計条件	101	216	－	－
		I , II	316	432	346	648
二次蓋 ボルト		設計条件	125	216	－	－
		I , II	325	432	343	648
ポートカバー ボルト		設計条件	39	216	－	－
		I , II	227	432	229	648
二次蓋ポート カバーボルト		設計条件	21	223	－	－
		I , II	216	446	216	669

表 6－4 容器本体及び蓋の評価結果（平均支圧応力及び圧縮応力）

（単位：MPa）

部位	設計事象	平均支圧応力 (σ_b)		圧縮応力 (σ_c)	
		計算値	許容応力	計算値	許容応力
底板	I, II	1	184	—	—
胴	I, II	—	—	7	95

表 6-5 バスケットの評価結果

(単位：MPa)

部 位	応力の種類		設計条件		設計事象Ⅰ		設計事象Ⅱ				許容 応力
					構内輸送時		搬送架台への 衝突		転倒防止台座への 衝突		
			計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	計算値	評価点 (面)	
バス ケ ット	一次一般膜応力 (P _m)		13	①, ⑦	—	—	—	—	—	—	133
	一次一般膜＋一次曲げ応力 (P _m ＋P _b)		31	④	—	—	—	—	—	—	199
	一次＋二次応力 (P _m ＋P _b ＋Q)		—	—	13	①	16	①	31	④	399
	平均せん断応力 (τ)		—	—	1	④	1	⑦	0	④, ⑦	79
	平均支圧応力 (σ _b)		—	—	3	①, ③, ⑦	2	①, ④	13	①, ③, ⑦	150
	軸圧縮 応力 (σ _c)	桹板 長手方向	—	—	3	①	1	①	13	①	96
		桹板 長手方向以外	—	—	2	①	2	①	0	①, ②	88
		格子支持板外周部 0°－180° 方向	—	—	2	③	2	③	0	③	56
		格子支持板外周部 90°－270° 方向	—	—	1	③	0	③	0	③	129
		スぺーサ	—	—	3	⑦	1	⑦	13	⑦	129

設計事象Ⅱの加速度の導出に用いられるバネ定数について

評価書本文では、抽出された代表的な取扱いモードに対して荷重を算出し強度評価を行っている。荷重の算出にあたり設計事象Ⅱでは、設計当初のバネ定数が用いられているため保守性を確認する。

実際の衝突対象のバネ定数を表 1 に示す。いずれのバネ定数も実施計画記載値に包絡されているため保守的な評価と言える。

表 1 衝突対象のバネ定数

取扱いモード	事象	バネ定数[N/m]	
			実施計画 記載値
容器の吊下ろし (No. 3)	3 号機原子炉建屋地上階 床面への衝突	4.402×10^9	2.882×10^{10}
	輸送架台への衝突	2.353×10^{10}	
搬送台車への積載 (No. 7)	搬送架台への衝突	4.075×10^{10}	5.738×10^{10}
除染ピットへの移動及び キャスクピットへの移動 (No. 9, 10)	除染ピット用転倒防止台 座への衝突	4.407×10^{11}	4.407×10^{11}
	キャスクピット用転倒防 止台座への衝突	2.548×10^{11}	

2. 除熱機能

2.1. 基本的考え方

除熱設計にあたっては、燃料の健全性及び破損燃料用輸送容器（2 体）の安全機能を有する構成部材の健全性が維持できるよう、以下のとおり設計する。

- a. 収納された使用済燃料より発生する崩壊熱は、容器内に充填した水及び空気の自然対流及び熱伝導により胴に伝える。
- b. 胴に伝えられた熱は主として中性子遮蔽部のレジン中に設けた伝熱フィンにより外筒に伝える。
- c. 外筒に伝えられた熱は外筒から大気に放散する。

除熱機能の評価においては、収納する使用済燃料の最大崩壊熱量を考慮し、自然冷却により冷却されるものとして、輸送容器側面への太陽熱放射により除熱条件が厳しくなる横姿勢（輸送時）の各部の温度を求め、各部材料の制限温度を超えないことを評価する。

ただし、バスケットを除く構成部材は 3 号機構内用輸送容器と同一であり、収納体数は 3 号機構内用輸送容器の 7 体より少ないため崩壊熱量は小さい。また、軸方向の評価対象部位である O リング及び蓋については、3 号機構内用輸送容器の評価において、軸方向の評価対象部位を安全側に評価されるようにバスケット等の内部構造の熱伝導率を最も保守的な条件を仮定して評価しているため、「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3 号機） 1.4. 除熱機能」の評価に包絡される。

従って、径方向の評価対象部位である燃料、バスケット、胴、中性子遮蔽体の各部の温度を評価する。

2.2. 設計基準

設計基準を表 1 に示す。

表 1 設計基準

対象部位	材質	設計基準	設計基準 温度 (℃)	備考
中性子遮蔽材	レジン	使用可能温度	149	メーカーカタログ
胴	低合金鋼	構造強度が確保される制限温度	350	設計・建設規格
バスケット	ステンレス鋼	構造強度が確保される制限温度	425	設計・建設規格
燃料被覆管	ジルカロイ-2	照射硬化回復現象により燃料被覆管の機械的特性が著しく低下しない温度及び水素化物の再配向による被覆管の機械的特性の低下が生じない温度以下となる温度 ^{*1, *2}	200	8×8 燃料
			300	新型 8×8 ジルコニウムライ付燃料, 高燃焼度 8×8 燃料, 9×9 燃料

*1 平成 18 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料長期健全性等確認試験に関する試験最終報告書)(06 基炉報-0006, 独立行政法人原子力安全基盤機構)

*2 平成 19 年度リサイクル燃料資源貯蔵技術調査等(貯蔵燃料健全性等調査に関する試験成果報告書)(07 基炉報-0004, 独立行政法人原子力安全基盤機構)

2.3. 燃料仕様および崩壊熱量

3 号機使用済燃料プールに貯蔵されている燃料を包絡する条件で崩壊熱量を ORIGEN2 コードにより評価する。燃料条件及び崩壊熱量を表 2 に示す。

表 2 燃料条件及び崩壊熱量

燃料タイプ	9×9 燃料
燃焼度(MWd/t)	52,000
冷却期間(日) ^{*3}	3,207
収納体数(体)	2
崩壊熱量(kW)	1.18

*3 2019 年 3 月 31 日時点での冷却期間

2.4. 評価条件

破損燃料用輸送容器(2 体)の除熱評価は輪切り断面モデルを用いて行う。輪切り断面モデル形状図を図 1 に示す。また、評価条件を表 3 に示す。

表 3 評価条件

項目		横姿勢 (輸送時)
収納体数	(体)	2
崩壊熱量	(kW)	1.18
周囲温度	(℃)	38
太陽熱放射 (W/m^2) *4	水平に輸送される表面 (曲面)	400*5

*4 太陽熱放射は1日につき12時間ごと、7日間受ける。また、輸送時は水平面に対して7°傾斜しているが傾斜角が緩いため、太陽熱放射は角度0°として取り扱う。

*5 「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示別記第四」に基づき設定する。

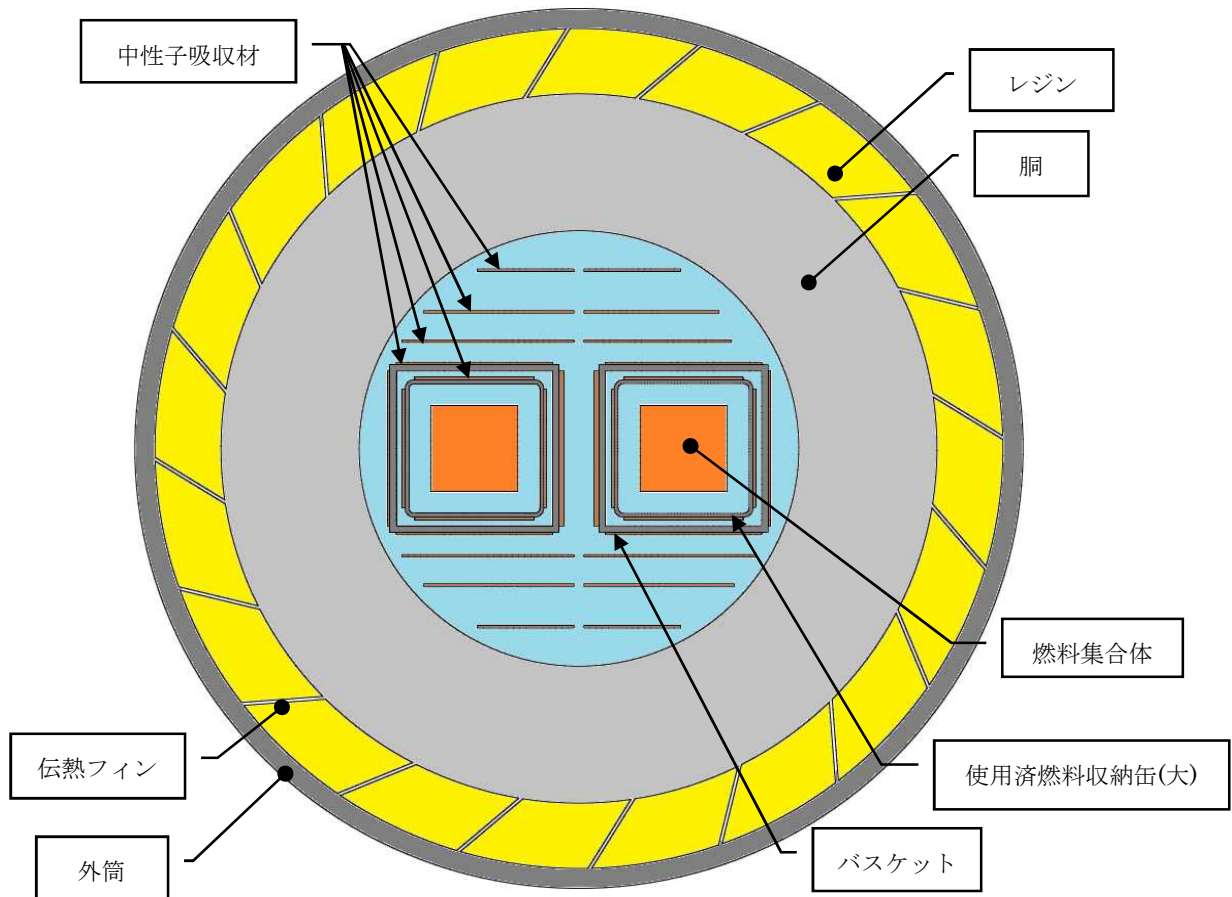


図 1 輪切り断面モデル形状図

2.4.1. 伝熱形態

輸送容器における使用済燃料の崩壊熱の主要な伝熱形態は以下とする。

- ① 崩壊熱は、燃料被覆管からチャンネルボックスへ水の熱伝導および放射により伝わる。
- ② チャンネルボックス表面に伝わった熱は、使用済燃料収納缶（大）へ水の熱伝導で伝わる。
- ③ 使用済燃料収納缶（大）表面に伝わった熱は、バスケットへ水の熱伝導で伝わる。
- ④ バスケット表面に伝わった熱は、輸送容器の本体胴内面へ水の熱伝導で伝わる。
- ⑤ 本体胴内面に伝わった熱は、本体胴外面へ熱伝導により伝わる。
- ⑥ 本体胴外面に伝わった熱は、外筒へ伝熱フィンの熱伝導により伝わる。
- ⑦ 外筒に伝わった熱は、周囲の空気との自然対流および放射により除熱する。

2.4.2. 境界条件

屋外の輸送を考慮し、境界条件は以下のとおりとする。

- ・ 環境温度：38℃*6（太陽熱放射を考慮）
- ・ 運用姿勢：水平面に対して7° 傾斜
- ・ 周辺環境：輸送数は1基とし、周囲に他の発熱体が無いものとし、外表面からの放射を考慮する

太陽熱放射は、輸送法令に定められる一般の試験条件を考慮する。外気温度 38℃の大気中において1 日につき12 時間ごとに太陽熱放射を7 日間受ける。輸送容器表面に負荷する太陽熱放射を図2 *6 に示す。

*6「核燃料物質等の工場又は事業所の外における運搬に関する技術上の基準に係る細目等を定める告示 別記第四」に基づき設定する。

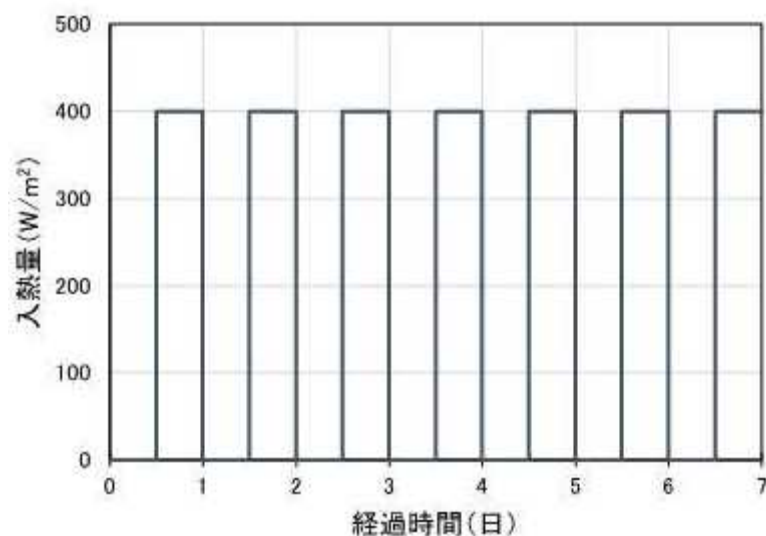


図2 太陽熱放射入熱量の時刻歴

2.4.3. 計算モデル

径方向の評価対象を評価する輪切り断面モデルを使用する。輪切り断面モデルは最も発熱量が高い断面について、燃料集合体、使用済燃料収納缶（大）、バスケット、胴体、レジン、伝熱フィンおよび外筒をモデル化したものである。計算モデルを図3に示す。

計算モデルは以下の条件を考慮する。

- ・ 輸送容器、バスケット、使用済燃料収納缶（大）の寸法は、表4～表6に示すとおり、公称値とする。（除熱解析では、伝熱経路が評価で重要となるため、通例、公称値を用いて評価を行う。保守性については、崩壊熱量や軸方向分布などのその他の条件で確保している。）ただし、評価基準値に対して余裕のない部位や隣接部材間のギャップなどわずかな寸法の相違が温度計算結果に影響を与える場合は、安全側の設定とする。
- ・ 発熱量は、燃焼分布を考慮して中央断面位置に相当する発熱量を用いる。
- ・ 容器外表面からの大気との自然対流による熱伝達率を考慮する。
- ・ 燃料集合体については、燃料集合体断面モデルで求めた等価物性を有する、均一モデルでモデル化を行っている。
- ・ 燃料の配置は、使用済燃料収納缶（大）の中央に配置する。（燃料温度を保守的に評価するため、使用済燃料収納缶（大）から離して配置している。）

表 4 輸送容器の主要寸法

項目	機器仕様 (公称値)	解析使用値
外筒厚さ (mm)	32	
中性子遮蔽体厚さ (mm)	105	
胴厚さ (mm)	220	
本体胴内径 (mm)	700	

表 5 バスケットの主要寸法

項目	機器仕様 (公称値)	解析使用値
板厚 (mm)	10	
内のり (mm)	249	
中性子吸収材厚さ (mm)	4	

表 6 使用済燃料収納缶（大）の主要寸法

項目	機器仕様 (公称値)	解析使用値
板厚 (mm)	6	
内のり (mm)	209	
中性子吸収材カバー厚さ (mm)		
中性子吸収材厚さ (mm)	4	

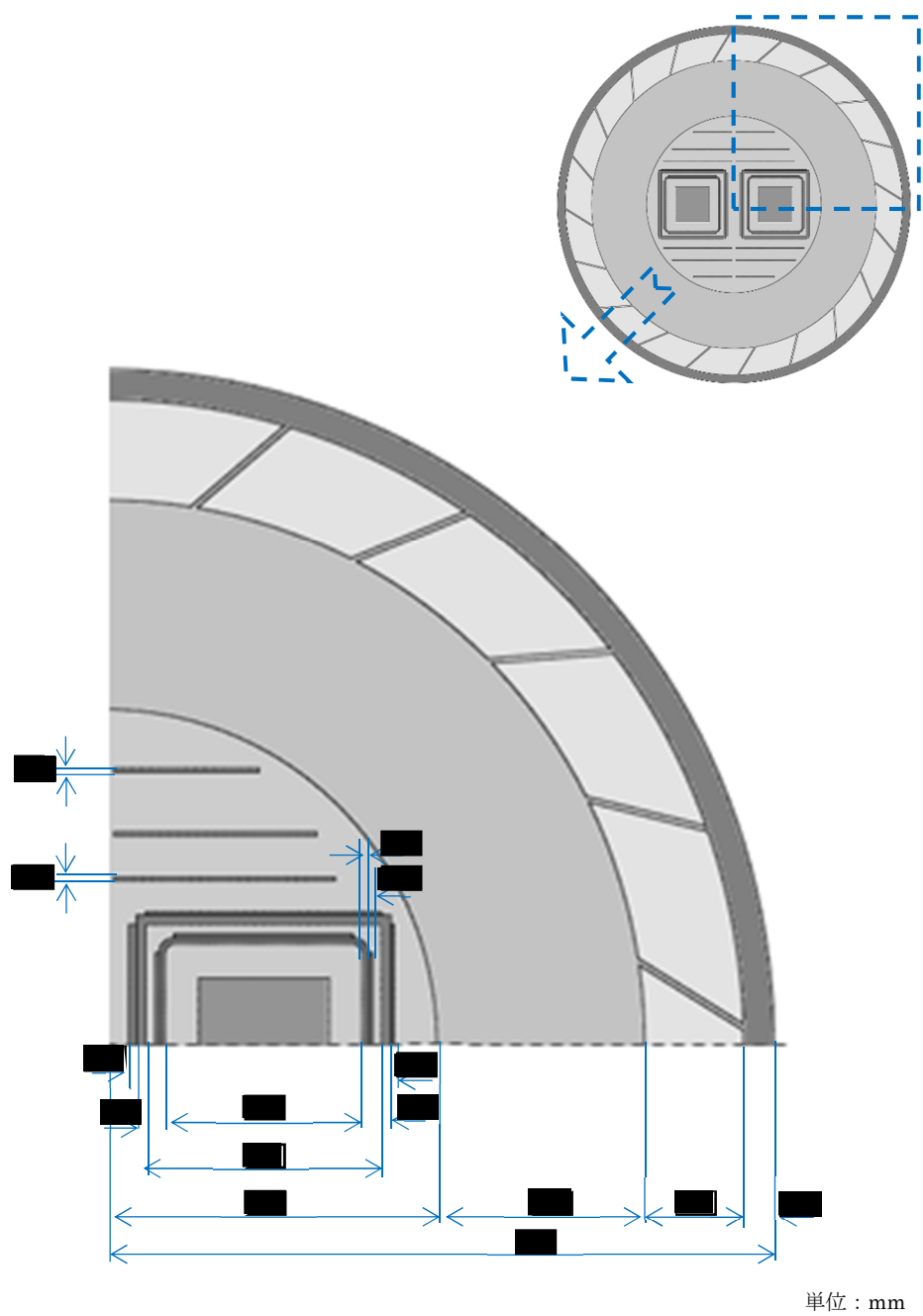


図3 除熱解析モデル（輪切り断面モデル）

2.5. 評価方法

輪切り断面モデルで容器中央部断面の燃料，バスケット，胴，中性子遮蔽体の温度を評価する。解析には ABAQUS コードを用いる。

2.6. 評価結果

評価結果を表 7，図 4 及び図 5 に示す。表 7 に示すとおり，破損燃料用輸送容器（2 体）を構成する部材はいずれも設計基準温度を下回っており，熱的健全性は維持される。

また，燃料被覆管の温度は 110℃であり，水素化物の再配向による機械特性の低下が生じる温度を大きく下回っており，燃料の健全性は維持される。

破損燃料用輸送容器（2 体）と 3 号機構内用輸送容器を比較すると，3 号機構内用輸送容器で 169℃であった燃料中心の温度が本評価では 110℃と大幅に低下した。これは同程度の発熱密度の燃料集合体が 7 体から 2 体に減少しているためである。

よって，破損燃料輸送容器（2 体）は 3 号機構内用輸送容器の評価に包絡される。

表 7 評価結果（各部温度）

対象部位	材質	評価結果 (℃)	設計基準 温度 (℃)	備考
中性子遮蔽材	レジン	72	149	メーカーカタログ
胴	低合金鋼	71	350	設計・建設規格
バスケット	ステンレス鋼	89	425	設計・建設規格
燃料被覆管	ジルカロイ－2	110	200	8×8 燃料
			300	新型 8×8 ジルコニウムライフ 燃料 高燃焼度 8×8 燃料， 9×9 燃料

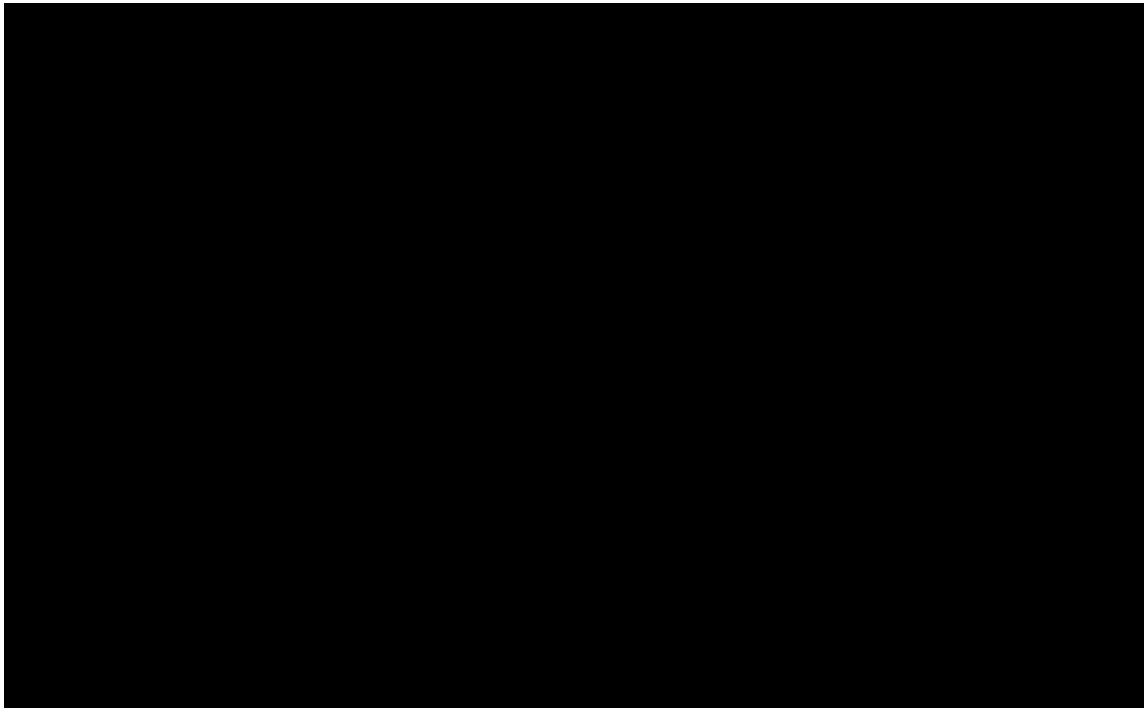


図4 各部の温度評価

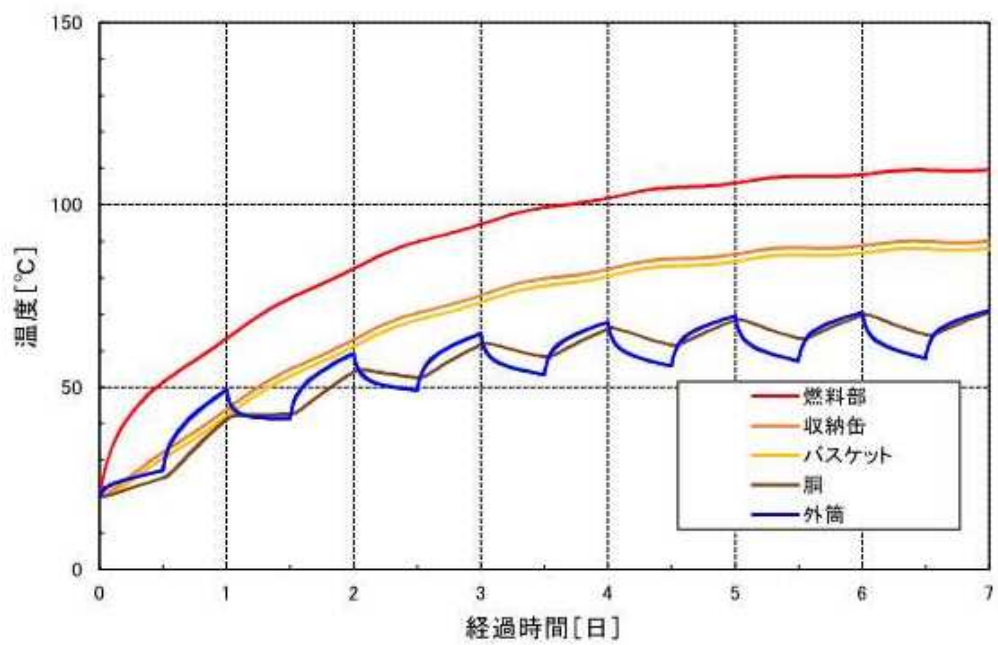


図5 各部の温度評価（時刻歴）

3. 遮蔽機能

3.1. 基本的考え方

収納した使用済燃料から発生する放射線を遮蔽するための破損燃料用輸送容器（2 体）の遮蔽設計の基本的な考え方は以下のとおりである。

- 使用済燃料から発生するガンマ線及び中性子を遮蔽するために、破損燃料用輸送容器（2 体）はガンマ線遮蔽と中性子遮蔽の機能を有するものとする
- 主要なガンマ線遮蔽材は、胴及び底板の低合金鋼、外筒の炭素鋼、蓋のステンレス鋼とする
- 主要な中性子遮蔽材は、内水及び胴と外筒間、底板底部のレジンとする

遮蔽機能の評価においては、収納する使用済燃料の線源強度を考慮し、破損燃料用輸送容器（2 体）表面及び表面から 1 m における線量当量率を評価する。

ただし、破損燃料用輸送容器（2 体）の構成部材はバスケットを除いて 3 号機構内用輸送容器と同一である。また、線源条件について、冷却期間は 3 号機構内用輸送容器の条件よりも長く、収納体数は 3 号機構内用輸送容器の 7 体より少ないため、「添付資料－2－1－2 構内用輸送容器に係る安全機能及び構造強度に関する説明書（3 号機） 1.6. 遮蔽機能」の評価に包絡されることを確認する。

収納燃料は 3 号機構内用輸送容器と同一であるため、軸方向の燃焼度分布も同一である。

従って、軸方向の燃焼度分布が最大となる高さにおける水平断面の径方向の線量分布が 3 号機構内用輸送容器に包絡されていれば、いずれの高さ方向における評価点位置についても包絡されていることがわかる。一方、径方向については、バスケットの形状が 7 体から変更になるため、遮蔽に寄与する水領域や中性子遮蔽材内の伝熱フィンとの幾何学的配置も変わる。以上から、径方向の線量評価を行う。

3.2. 評価条件

3.2.1. 遮蔽厚さ

破損燃料用輸送容器（2 体）の遮蔽厚さを表 1 に示す。

表 1 遮蔽厚さ (単位：cm)

	低合金鋼・炭素鋼	ステンレス鋼	レジン
側面方向	約 25	－	約 10
上部方向	－	約 23	－
下部方向	約 28	－	約 10

3.2.2. 線源条件

遮蔽評価の線源条件は3号機使用済燃料プールに保管されている燃料の条件を包絡する条件とする。線源条件を表2に示す。

表2 線源条件

項目	線源条件
燃料タイプ	9×9 燃料
平均燃焼度 (MWd/t)	52,000
冷却期間*1 (日)	3,207
収納体数 (体)	2

*1 2019年3月31日時点での冷却期間

3.2.3. 線源強度及びエネルギー

① ガンマ線源強度

燃料有効部のガンマ線源強度の計算はORIGEN2コードにより行う。得られたガンマ線源強度を表3に示す。また、構造材の放射化によるガンマ線源強度は次式で計算する。破損燃料用輸送容器(2体)では、3号機構内用輸送容器より冷却期間が長く、収納体数は少ないため、構造材の放射化によるガンマ線源強度は包絡される。

$$A = N_0 \cdot \sigma \cdot \phi \cdot \{1 - \exp(-\lambda \cdot T_1)\} \cdot \exp(-\lambda \cdot T_2)$$

ここで、A : 放射化核種 (^{60}Co) の放射能(Bq)

N_0 : ターゲット核種 (^{59}Co) の個数(atoms)

σ : 2200m/s の中性子による (^{59}Co) の(n, γ)反応断面積(cm^2)

ϕ : 炉内照射熱中性子束($\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$)

λ : ^{60}Co の崩壊定数 (/日)

T_1 : 照射期間 (日)

T_2 : 冷却期間 (日)

表3 ガンマ線源強度
(容器1基あたり)

光子エネルギー群		集合体2体あたり (ph/s/2体)
群	代表エネルギー(MeV)	
1	1.00E-02	1.3E+15
2	2.50E-02	2.6E+14
3	3.75E-02	3.6E+14
4	5.75E-02	2.4E+14
5	8.50E-02	1.5E+14
6	1.25E-01	1.7E+14
7	2.25E-01	1.2E+14
8	3.75E-01	5.8E+13
9	5.75E-01	2.6E+15
10	8.50E-01	3.6E+14
11	1.25E+00	1.1E+14
12	1.75E+00	3.0E+12
13	2.25E+00	8.6E+10
14	2.75E+00	6.8E+09
15	3.50E+00	9.6E+08
16	5.00E+00	5.6E+07
17	7.00E+00	6.4E+06
18	9.50E+00	7.4E+05

② 中性子線源強度

中性子線源強度の計算は ORIGEN2 コードにより行う。得られた中性子線源強度を表 4 に示す。また，評価に用いる中性子エネルギースペクトルは Pu-239 の核分裂スペクトルとし，表 5 に示す。

表 4 中性子線源強度

(容器 1 基あたり)

		中性子線源強度 (n/s)
1 次中性子源	自発核分裂によるもの	1.3×10^9
	(α , n) 反応によるもの	1.5×10^7
実効増倍率		0.95
実効増倍効果を考慮した全中性子線源強度		2.6×10^{10}

表 5 中性子線源スペクトル

エネルギー群数	上限エネルギー (eV)	スペクトル*2
1	1.492×10^7	5.72×10^{-4}
2	1.220×10^7	2.02×10^{-3}
3	1.000×10^7	6.07×10^{-3}
4	8.180×10^6	2.00×10^{-2}
5	6.360×10^6	4.12×10^{-2}
6	4.960×10^6	5.27×10^{-2}
7	4.060×10^6	1.10×10^{-1}
8	3.010×10^6	8.74×10^{-2}
9	2.460×10^6	2.28×10^{-2}
10	2.350×10^6	1.15×10^{-1}
11	1.830×10^6	2.07×10^{-1}
12	1.110×10^6	1.89×10^{-1}
13	5.500×10^5	1.31×10^{-1}
14	1.110×10^5	1.59×10^{-2}
15	3.350×10^3	8.12×10^{-5}
16	5.830×10^2	5.89×10^{-6}
17	1.010×10^2	3.89×10^{-7}
18	2.900×10^1	5.53×10^{-8}
19	1.070×10^1	1.33×10^{-8}
20	3.060×10^0	1.88×10^{-9}
21	1.120×10^0	4.19×10^{-10}
22	4.140×10^{-1}	1.20×10^{-10}

*2 エネルギー群構造に対応するそれぞれの割合

3.2.4. 計算モデル

遮蔽評価のモデルを図1，図2に示す。計算モデルは，破損燃料用輸送容器（2体）の実形状を模擬して図2の2次元R-θ体系で評価する。

計算モデルは以下の条件を考慮する。

- 輸送容器の胴より外側（本体胴，中性子遮蔽体，蓋等）の遮蔽体の厚さは，表6に示すとおり，製造公差を考慮した最小値とする。（遮蔽材が薄い方が厳しいため保守的な設定となる）
- 輸送容器の胴より内側のバスケット及び燃料領域は，表7に示すとおり，公称値とする。（ガンマ線および中性子線のどちらにとっても適切な評価となるように設定した）

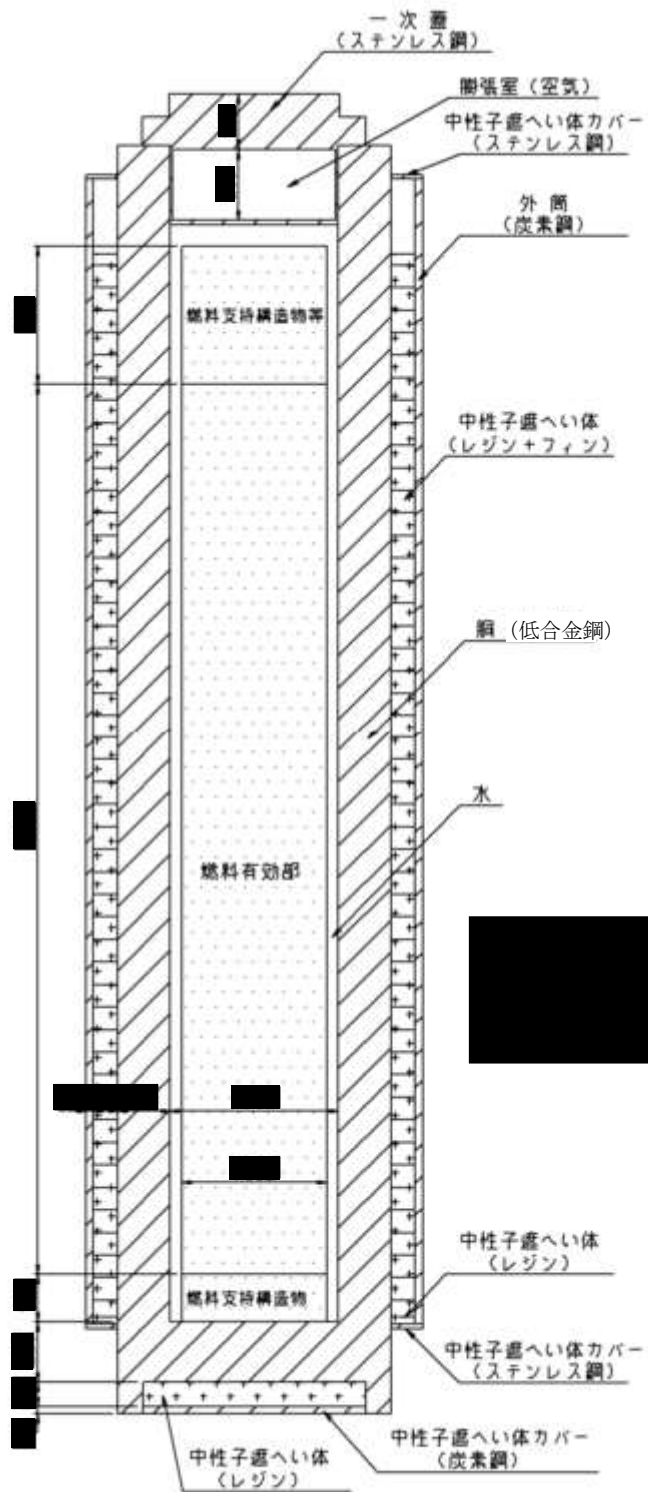
-
-
-

表6 輸送容器の主要寸法

項目	機器仕様		解析使用値
	公称値	製造公差	
外筒厚さ(mm)	32		
中性子遮蔽体厚さ(mm)	105		
胴厚さ(mm)	220		
本体胴内径(mm)	700		

表7 バスケットの主要寸法

項目	機器仕様		解析使用値
	公称値	製造公差	
板厚 (mm)	10		
内のり (mm)	249		



単位:mm

図1 遮蔽解析モデル (全体 R-Z 体系)

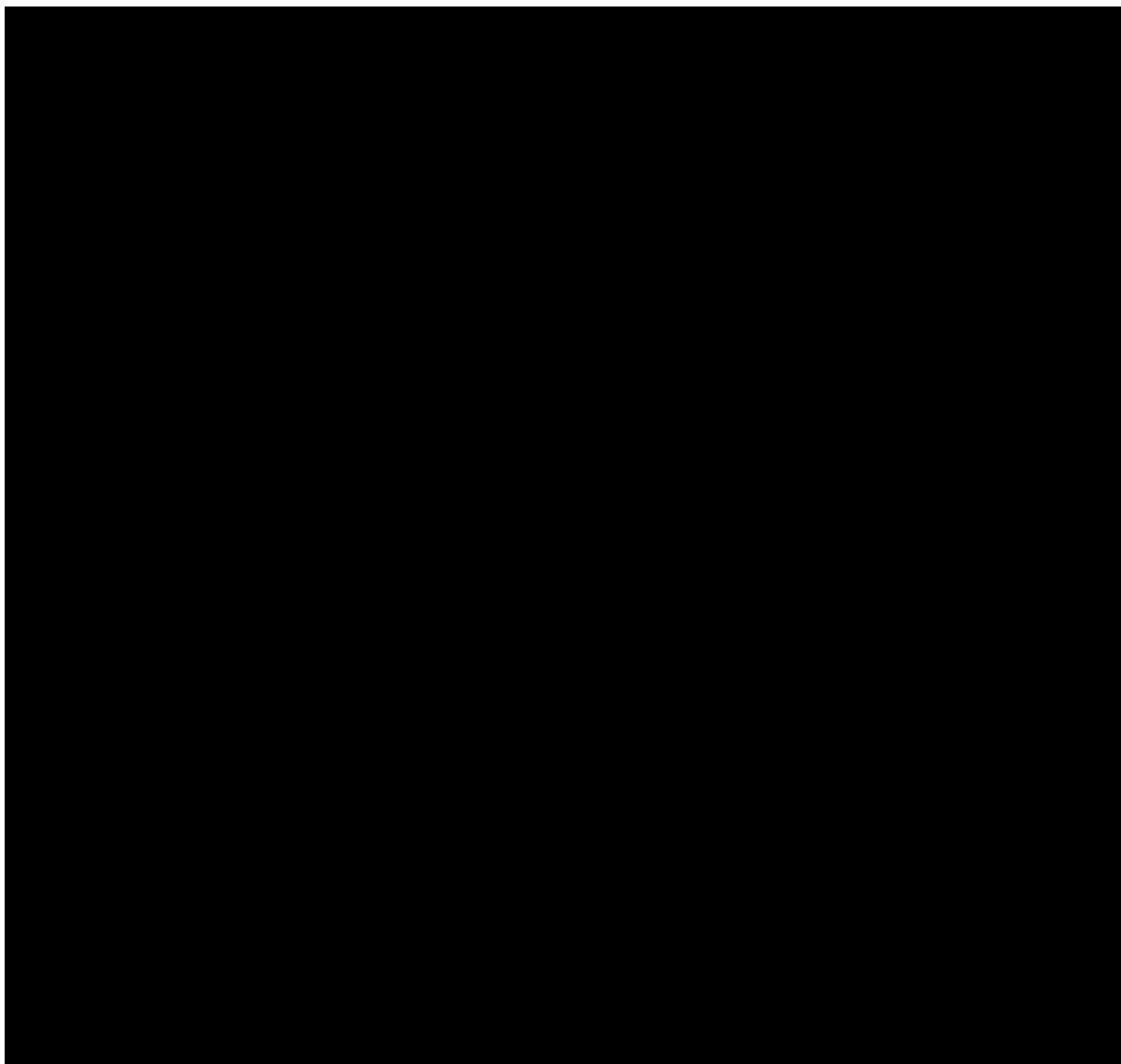


図 2 遮蔽解析モデル（全体 $R - \theta$ 体系）

3.3. 評価方法

遮蔽計算は、ガンマ線、中性子共に D0T3.5 コードを用いて計算し、破損燃料用輸送容器（2 体）表面及び表面から 1 m の線量当量率を求める。

ライブラリとしては、DLC-23/CASK データを用い、線量当量率への変換は ICRP Publ. 74 に基づく 1cm 線量当量率への換算係数を用いる。

3.4. 評価結果

破損燃料用輸送容器（2 体）の容器側面における評価結果を表 8、図 3 及び図 4 に示す。評価結果から、3 号機構内用輸送容器に包絡されることを確認できる。

また、容器側面以外の評価点（容器上部、上部中性子遮蔽体欠損部、下部中性子遮蔽体欠損部、容器下部、上部トランゾン、下部トランゾン）についても、破損燃料用輸送容器（2 体）の構成部材はバスケットを除いて同一であり、遮蔽効果も同じとなるため線量の大小関係は変わらず、容器側面と同様に 3 号機構内用輸送容器の評価結果に包絡される。

3 号機構内用輸送容器と同様に、容器取扱時には追加遮蔽体設置等の放射線業務従事者の被ばく低減対策を講じる計画としている。

表 8 最大線量当量率の評価結果（容器側面）

（単位：mSv/h）

	2 体収納	（参考）7 体収納
表面	8.5E-1	1.5
表面から 1 m	1.6E-1	3.4E-1

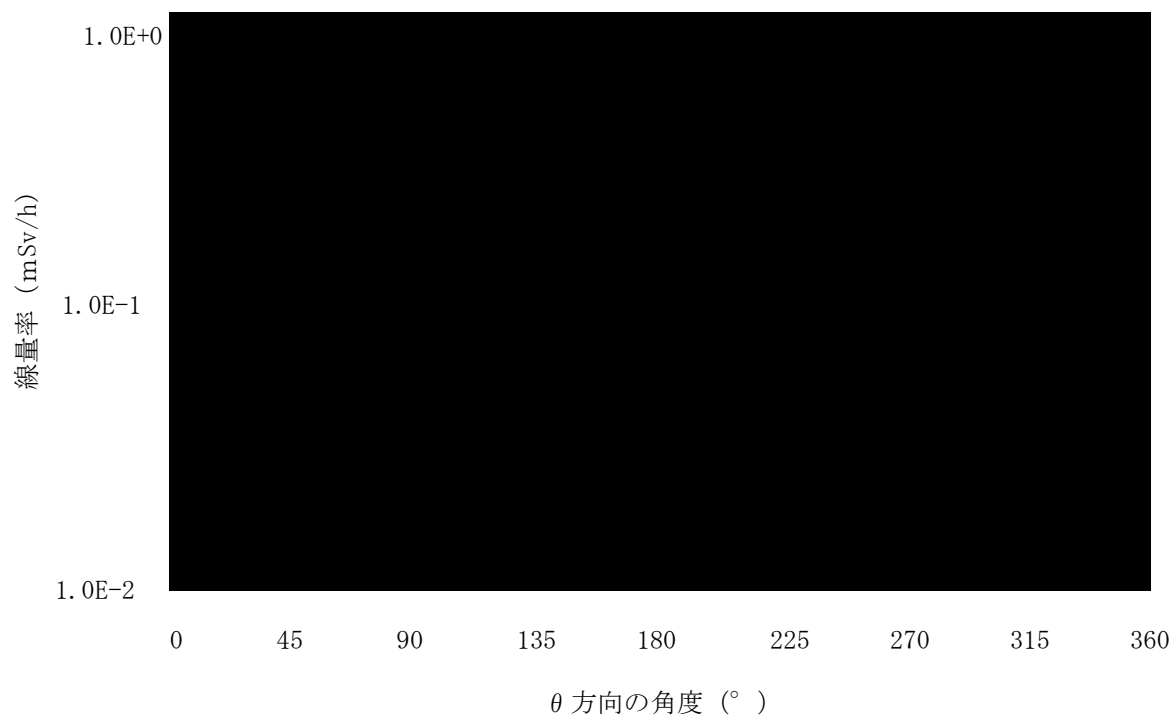


図3 評価結果（容器表面位置）

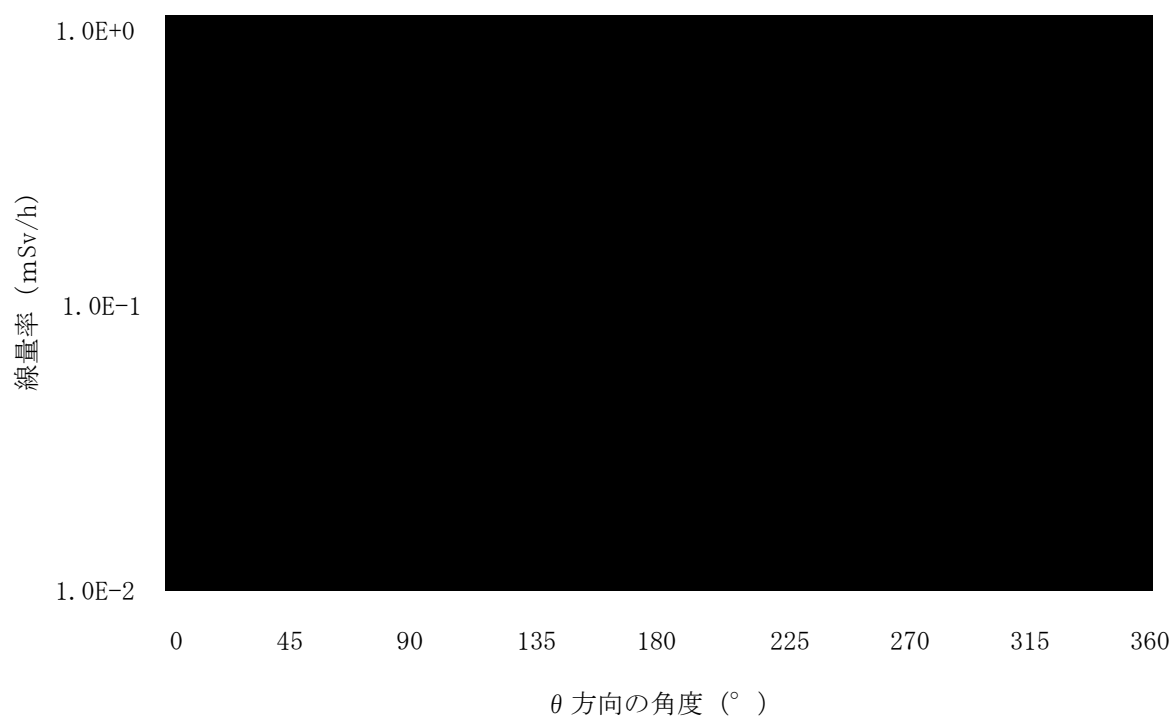


図4 評価結果（容器表面から 1m 離れた位置）

4. 臨界防止機能

4.1. 基本的考え方

臨界防止にあたっては、想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達することを防止するため以下のとおり設計する。

- 燃料を収納するバスケットは格子構造として、燃料を所定の幾何学的配置に維持する設計とする。
- バスケット外周部及び使用済燃料収納缶（大）側面には、中性子を吸収するボロン添加アルミニウム合金板を配置する。

4.2. 設計基準

想定されるいかなる場合も実効増倍率（ k_{eff} ）が 0.95 以下であること。

4.3. 評価条件

4.3.1. 燃料条件

想定されるいかなる場合にも燃料が臨界に達してはならないため、保守的に燃料被覆管が破損し、燃料粒子（ペレットを含む）が使用済燃料収納缶（大）外にまで放出されることを想定して、輸送容器内の燃料領域は燃料粒子と水が非均質に混ざった状態とする。

臨界防止機能評価で用いる燃料条件（破損燃料）を表 1 に示す。

燃料棒の形状が維持されていないと仮定し、以下の条件を設定する。

- ・燃料被覆管が破損しペレットが使用済燃料収納缶（大）内に放出され、さらに使用済燃料収納缶（大）外にペレットが漏えいすることを仮定し、容器内にペレットと水が非均質に混ざった状態とする。
- ・水／ウラン比、ペレット粒径が最も臨界になりやすい状態とする。
- ・U-235 の濃縮度は未照射のまま減損しない値とし、3 号機使用済燃料プールに貯蔵される使用済燃料及び新燃料のうち、ペレット最高濃縮度が最も高い 9 × 9 燃料の 4.9wt%とする。また、中性子吸収断面積の大きい Gd は無視する。

表 1 臨界防止機能評価で用いる燃料条件（破損燃料）

項 目		評 価 条 件	備 考
破 損 燃 料	燃料の健全性	燃料被覆管の破損を想定	
	燃料の形態	燃料粒子＋水	燃料粒子と水による非均質燃料粒子セル体系
	ウラン同位体組成	U-235 : 4.9 wt% U-238 : 95.1 wt%	3 号機使用済燃料プールに貯蔵される燃料におけるペレット最大濃縮度
	核分裂生成物	核分裂生成物、及び アクチニドは考慮しない	
	燃料粒子径	粒子径の変化を考慮	
	燃料質量		燃料集合体 2 体

4.3.2. 収納缶・バスケット等条件

収納缶・バスケット等の製造公差としては、板厚、内のり等があり、これらのパラメータについて安全側に設定する。収納缶・バスケット等の主要寸法と製造公差を考慮した解析使用値を表2～表4に示す。

(1) 使用済燃料収納缶（大）

- ・使用済燃料収納缶（大）の板厚は、製造公差を考慮した最大値とする。（板厚を厚くすると、板の外側にある中性子吸収材が燃料領域の中心から遠ざかるため keff は大きくなるので保守的な条件となる。）
- ・内のりは、製造公差を考慮した最大値とする。（内のりが大きくなるので燃料物質が増加し、keff が大きくなるため保守的な条件となる。）
- ・使用済燃料収納缶（大）側面に配置したボロン添加アルミニウム合金の ^{10}B 含有量は、製造下限値とする。

(2) バスケット

- ・バスケットの板厚、内のりは、製造公差を考慮した最大値とする。（板厚を厚くすると、板の外側にある中性子吸収材が燃料領域の中心から遠ざかるため keff は大きくなるので保守的な条件となる。）
- ・バスケット外周に配置したボロン添加アルミニウム合金の ^{10}B 含有量は、製造下限値とする。

表2 使用済燃料収納缶（大）の主要寸法

項目	機器仕様		解析使用値
	公称値	製造公差	
板厚 (mm)	6		
内のり (mm)	209		
中性子吸収材カバー厚さ (mm)			
中性子吸収材厚さ (mm)	4		
ボロン添加量 (g/cm^2) (^{10}B 面密度) *1			

*1

表3 バスケットの主要寸法

項目	機器仕様		解析使用値
	公称値	製造公差	
板厚 (mm)	10		
内のり (mm)	249		
中性子吸収材厚さ (mm)	4		
ボロン添加量 (g/cm ²) (¹⁰ B 面密度) *2	≧0.0443		0.0443

*2 ボロンに含まれる ¹⁰B の存在比は天然ボロンとする。

表 4 輸送容器の主要寸法

項目	機器仕様		解析使用値
	公称値	製造公差	
外筒厚さ (mm)	32		
中性子遮蔽体厚さ (mm)	105		
胴厚さ (mm)	220		
本体胴内径 (mm)	700		

4.3.3. その他の条件

- ・バスケット内の使用済燃料収納缶（大）配置は、格子間の範囲で偏心配置（バスケット内側の格子隅角部寄り）を考慮する。（燃料間隔が近くなるため keff は大きくなるため、保守的な条件となる。）

4.3.4. 計算モデル

輸送容器の計算モデルを図 1 ～図 3 に示す。計算モデルは、輸送容器の幾何学形状を模擬して、3次元体系とする。なお、輸送容器が無限に並んだ状態として、輸送容器周囲での境界条件を完全反射とする。

- ・チャンネルボックス及びウォーターロードは水に置換える。
- ・中性子遮蔽体部（レジン）は真空とする。
- ・破損燃料用輸送容器（2 体）外部の雰囲気は安全側に真空、完全反射とする。
- ・評価モデルは 3 次元体系とする。

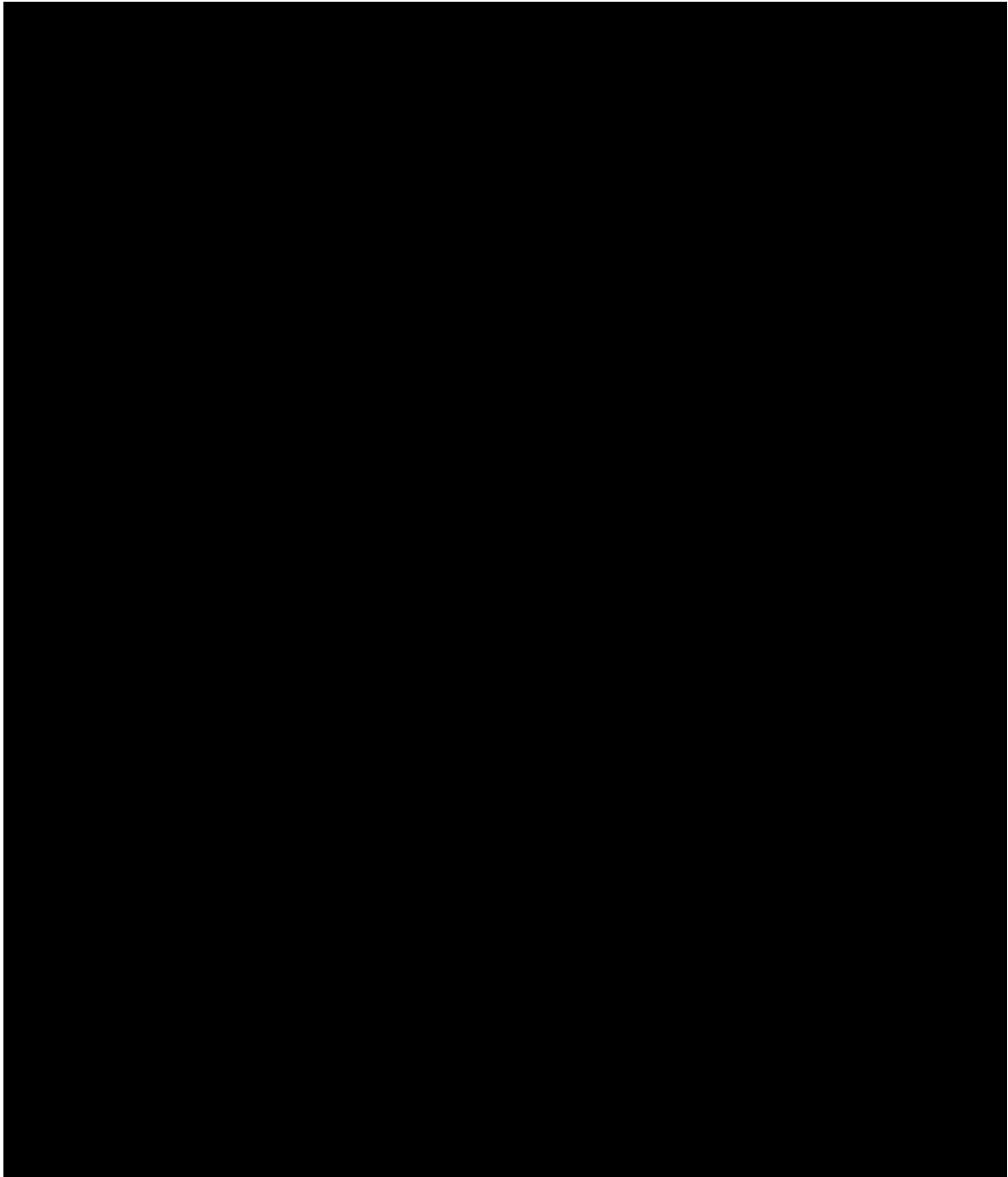


図 1 臨界評価体系（平面図）

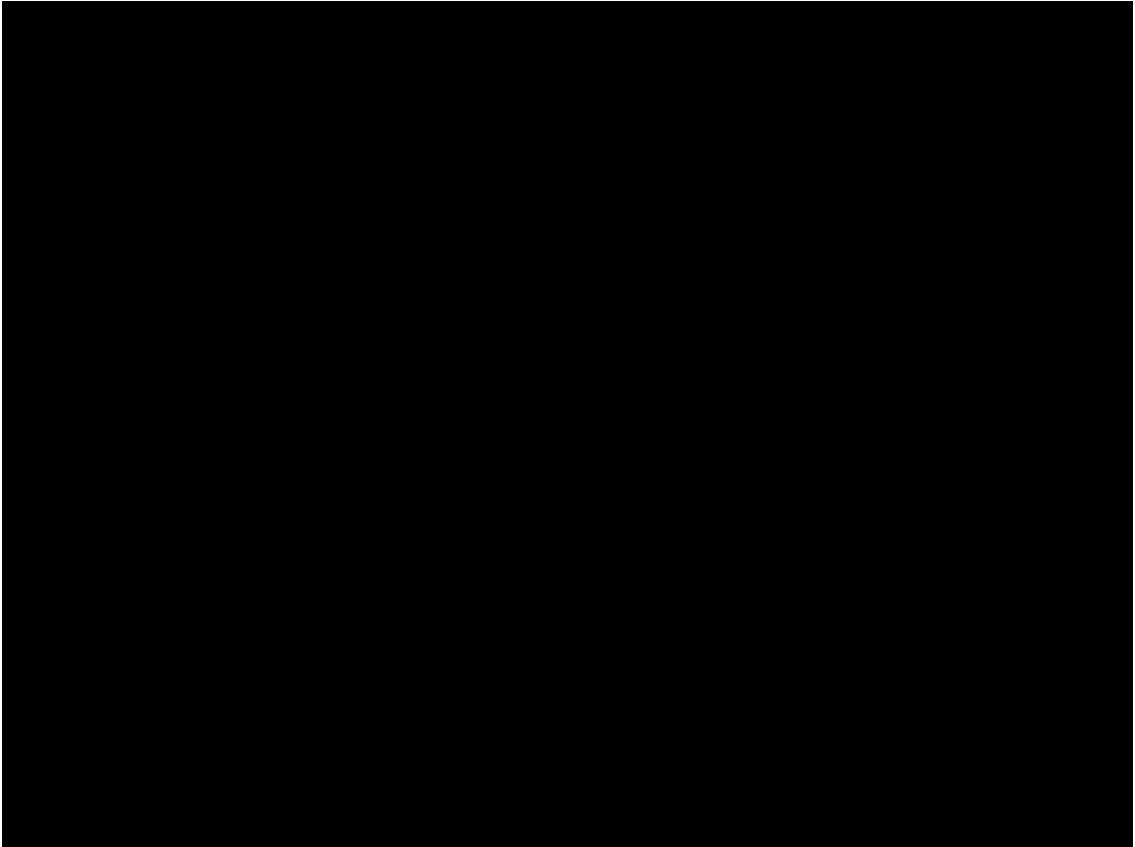


図 2 臨界評価体系（立体図）

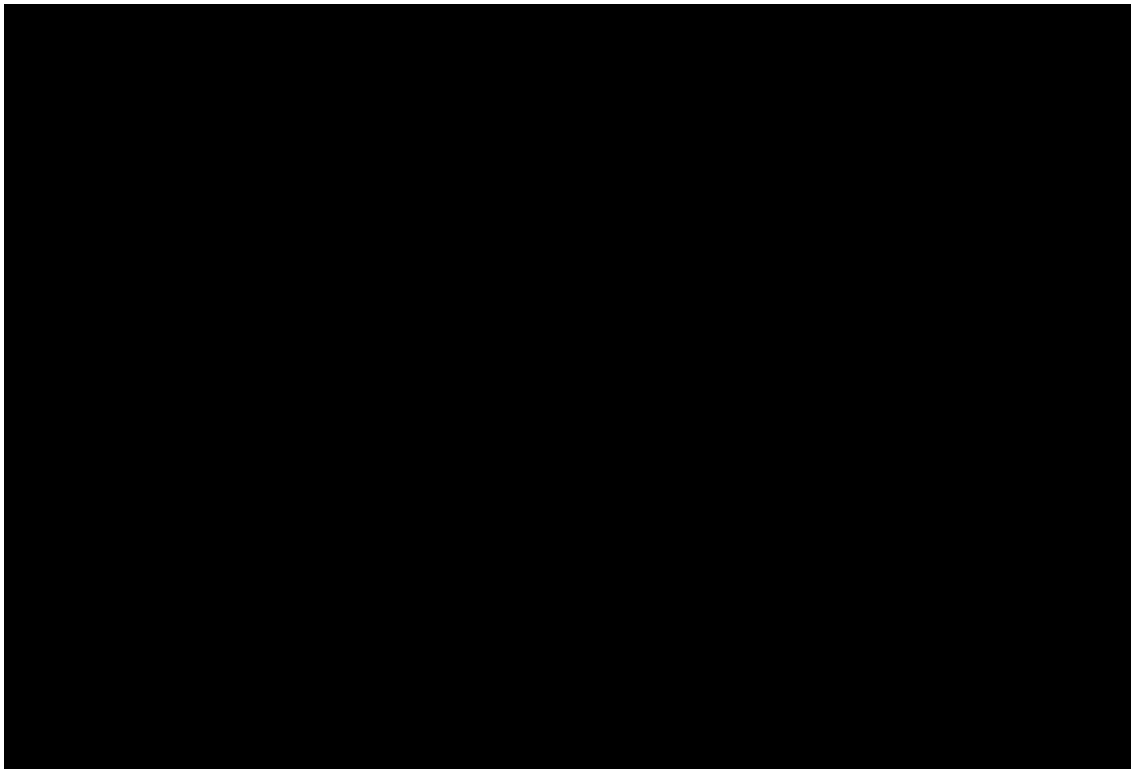


図 3 臨界評価体系（バスケット詳細）

4.4. 評価方法

破損燃料用輸送容器（2 体）の実形状をモデル化し，臨界解析コード KENO-V.a を使用して求める。

4.5. 評価結果

評価結果を表 5，図 4 に示す。本図表に示すとおり，破損燃料用輸送容器（2 体）の実効増倍率は設計基準を満足している。

表 5 評価結果

燃料粒子径 (mm)	水対燃料体積比	実効増倍率		実施計画 記載値*3	設計 基準値
		keff	keff+3σ		
				0.93	0.95

*3 モンテカルロ計算の統計誤差（3σ）を考慮した値



図 4 輸送容器の実効増倍率

第 1 編

(1 号炉， 2 号炉， 3 号炉及び 4 号炉に係る保安措置)

第5章 燃料管理

(新燃料の運搬)

第34条

プール燃料取り出しプログラム部長は、2号炉、3号炉又は4号炉の使用済燃料プールにある新燃料を構内用輸送容器に収納する場合及び構内用輸送容器から取り出す場合には、次の事項を遵守する。

(1) 2号炉及び3号炉の使用済燃料プールにおいては、燃料取扱機を使用し、4号炉の使用済燃料プールにおいては、クレーン又は燃料取扱機を使用すること。

(2) 使用済燃料共用プールにおいては、天井クレーン又は燃料取扱装置を使用すること。

2. プール燃料取り出しプログラム部長は、発電所内において、2号炉、3号炉又は4号炉の使用済燃料プールにある新燃料を運搬する場合は、次の事項を遵守する。

(1) 車両への積付けは、運搬中に移動、転倒又は転落を防止する措置を講じること。

(2) 法令に定める危険物と混載しないこと。

(3) 新燃料が臨界に達しない措置を講じること。

(4) 法令に適合する容器に封入すること。

(5) 容器及び車両の適当な箇所に法令に定める標識を付けること。

(使用済燃料の貯蔵)

第36条

プール燃料取り出しプログラム部長は、1号炉、2号炉、3号炉又は4号炉の使用済燃料を貯蔵する場合は、次の事項を遵守する。

- (1) 表36に定める貯蔵可能な使用済燃料貯蔵施設の使用済燃料プール、使用済燃料共用プール又は使用済燃料乾式キャスク仮保管設備に貯蔵すること。使用済燃料乾式キャスク仮保管設備に貯蔵する場合には、使用済燃料乾式貯蔵容器又は使用済燃料輸送貯蔵兼用容器に収納されていることを確認すること。
- (2) 2号炉及び3号炉の使用済燃料プールにおいては、燃料取扱機を使用し、4号炉の使用済燃料プールにおいては、クレーン又は燃料取扱機を使用し、使用済燃料共用プールにおいては、天井クレーン又は燃料取扱装置を使用すること。
- (3) 使用済燃料共用プールにおいて燃料が臨界に達しない措置を講じること。
- (4) 使用済燃料乾式キャスク仮保管設備において燃料が臨界に達しない措置が講じられていることを確認すること。

2. プール燃料取り出しプログラム部長は、使用済燃料輸送貯蔵兼用容器に1号炉、2号炉、3号炉又は4号炉の使用済燃料を収納する場合は、次の事項を遵守する。

- (1) 福島第一炉規則第15条第2項第2号に基づき、使用済燃料を選定すること。
- (2) 使用済燃料について、貯蔵の終了まで密封し、健全性を維持するよう容器に封入すること。

3. プール燃料取り出しプログラム部長は、使用済燃料共用プール及び使用済燃料乾式キャスク仮保管設備の目につきやすい場所に貯蔵上の注意事項を掲示すること。

4. 当直長は、使用済燃料乾式キャスク仮保管設備に貯蔵している使用済燃料乾式貯蔵容器並びに使用済燃料輸送貯蔵兼用容器の密封性能及び除熱性能が保持されていることを監視するとともに、その結果、異常が認められた場合にはプール燃料取り出しプログラム部長に連絡し、プール燃料取り出しプログラム部長は必要な措置を講じる。ただし、密封性能及び除熱性能の監視を行うための監視設備が設置されるまでの間は、プール燃料取り出しプログラム部長は密封性能及び除熱性能が保持されていることを確認するとともに、その結果、異常が認められた場合には必要な措置を講じる。

表 3 6

各号炉の使用済燃料	貯蔵可能な使用済燃料貯蔵施設
1 号炉	1 号炉の使用済燃料プール，使用済燃料共用プール※ ¹ 又は使用済燃料乾式キャスク仮保管設備※ ²
2 号炉	2 号炉の使用済燃料プール，使用済燃料共用プール※ ¹ 又は使用済燃料乾式キャスク仮保管設備※ ²
3 号炉	3 号炉の使用済燃料プール，使用済燃料共用プール※ ¹ 又は使用済燃料乾式キャスク仮保管設備※ ²
4 号炉	4 号炉の使用済燃料プール，使用済燃料共用プール※ ¹ 又は使用済燃料乾式キャスク仮保管設備※ ²

※ 1：使用済燃料共用プールには，使用済燃料プールで 1 9 ヶ月以上冷却した燃料を貯蔵する。

※ 2：使用済燃料乾式キャスク仮保管設備に貯蔵する使用済燃料乾式貯蔵容器には，使用済燃料プール又は使用済燃料共用プールで既設については 4 年以上，増設については 1 3 年以上冷却され，かつ運転中のデータ， SHIPPING 検査等により健全であることを確認した使用済燃料（8 × 8 燃料，新型 8 × 8 燃料及び新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料）を収納する。ただし，使用済燃料乾式貯蔵容器に収納した燃料を使用済燃料共用プールに貯蔵した燃料と入れ替える場合は，使用済燃料プール又は使用済燃料共用プールで 1 3 年以上冷却された燃料を使用済燃料乾式貯蔵容器に収納する。使用済燃料輸送貯蔵兼用容器には，使用済燃料プール又は使用済燃料共用プールで 1 8 年以上冷却され，かつ運転中のデータ， SHIPPING 検査等により健全であることを確認した使用済燃料（新型 8 × 8 ジルコニウムライナ燃料）を収納するとともに，使用済燃料のタイプ，燃焼度に応じた配置とする。

(使用済燃料の運搬)

第37条

プール燃料取り出しプログラム部長は、発電所内において、2号炉、3号炉若しくは4号炉の使用済燃料プール又は使用済燃料共用プールから使用済燃料を運搬する場合は、次の事項を遵守し、使用済燃料プールにおいては、構内用輸送容器に収納し、使用済燃料共用プールにおいては、使用済燃料乾式貯蔵容器又は使用済燃料輸送貯蔵兼用容器に収納する。

- (1) 法令に適合する容器を使用すること。
- (2) 2号炉及び3号炉の使用済燃料プールにおいては、燃料取扱機を使用し、4号炉の使用済燃料プールにおいては、クレーン又は燃料取扱機を使用し、使用済燃料共用プールにおいては、天井クレーン又は燃料取扱装置を使用すること。
- (3) 使用済燃料が臨界に達しない措置を講じること。
- (4) 収納する使用済燃料のタイプ、冷却期間及び配置が、容器の収納条件に適合していること。

2. プール燃料取り出しプログラム部長は、発電所内において、使用済燃料を収納した構内用輸送容器、使用済燃料乾式貯蔵容器又は使用済燃料輸送貯蔵兼用容器を運搬する場合は、次の事項を遵守する。

- (1) 容器の車両への積付けは、運搬中に移動、転倒又は転落を防止する措置を講じること。
- (2) 法令に定める危険物と混載しないこと。
- (3) 運搬経路に標識を設けること等の方法により、関係者以外の者及び他の車両の立入りを制限するとともに、誘導車を配置すること。
- (4) 車両を徐行させること。
- (5) 核燃料物質の取扱いに関し、相当の知識及び経験を有する者を同行させ、保安のために必要な監督を行わせること。
- (6) 容器及び車両の適当な箇所に法令に定める標識を付けること。

3. プール燃料取り出しプログラム部長は、2号炉及び3号炉の使用済燃料プールにおいて構内用輸送容器から使用済燃料を取り出す場合、燃料取扱機を使用し、4号炉の使用済燃料プールにおいて構内用輸送容器から使用済燃料を取り出す場合、クレーン又は燃料取扱機を使用し、使用済燃料共用プールにおいて構内用輸送容器、使用済燃料乾式貯蔵容器又は使用済燃料輸送貯蔵兼用容器から使用済燃料を取り出す場合、天井クレーン又は燃料取扱装置を使用する。

附 則

附則（ ）

（施行期日）

第 1 条

この規定は、原子力規制委員会の認可を受けた日から 10 日以内に施行する。

附則（令和 7 年 3 月 28 日 原規規発第 2503282 号）

（施行期日）

第 1 条

2. 添付 1（管理区域図）の全体図及び添付 2（管理対象区域図）の全体図については、それぞれの区域の変更をもって適用することとし、それまでの間は従前の例による。

附則（令和 6 年 12 月 18 日 原規規発第 24121811 号）

（施行期日）

第 1 条

2. 第 5 条及び第 42 条の 2 については、放射性物質分析・研究施設第 2 棟の運用を開始した時点から適用することとし、それまでの間は従前の例による。

附則（令和 6 年 5 月 21 日 原規規発第 2405211 号）

（施行期日）

第 1 条

2. 第 4 条及び第 5 条については、原子力規制委員会の認可を受けた後、当社が定める日から適用することとし、それまでの間は従前の例による。

附則（令和 6 年 4 月 22 日 原規規発第 2404223 号）

（施行期日）

第 1 条

2. 添付 1（管理区域図）の全体図及び添付 2（管理対象区域図）の全体図の変更は、化学分析棟の増床部の運用開始をもって適用することとし、それまでの間は従前の例による。

附則（令和 5 年 3 月 7 日 原規規発第 2303075 号）

（施行期日）

第 1 条

2. 添付2（管理対象区域図）の全体図における瓦礫類一時保管エリアの変更は、それぞれの区域の変更をもって適用することとし、それまでの間は従前の例による。

附則（令和5年2月21日 原規規発第2302212号）

（施行期日）

第1条

2. 第42条の2の表42の2-1における固体廃棄物貯蔵庫第10棟排気口から放出される放射性気体廃棄物の管理については、固体廃棄物貯蔵庫第10棟の運用を開始した時点から適用することとし、それまでの間は従前の例による。
3. 添付1（管理区域図）の全体図及び固体廃棄物貯蔵庫第10棟の管理区域図面並びに添付2（管理対象区域図）の全体図及び固体廃棄物貯蔵庫第10棟の管理対象区域図面の変更は、それぞれの区域の区域区分の変更をもって適用することとし、それまでの間は従前の例による。

附則（令和4年10月27日 原規規発第2210277号）

（施行期日）

第1条

2. 第42条については、1号大型カバー換気設備の運用を開始した時点から適用することとし、それまでの間は従前の例による。

附則（令和4年4月22日 原規規発第2204221号）

（施行期日）

第1条

2. 第42条の表42-1及び表42-2における2号炉原子炉建屋オペレーティングフロア及び燃料取り出し用構台換気設備から放出される気体廃棄物の管理については、2号炉原子炉建屋オペレーティングフロア及び燃料取り出し用構台換気設備の運用を開始した時点から適用することとし、それまでの間は従前の例による。
3. 第60条及び第61条については、2号炉燃料取り出し用構台におけるエリアモニタの運用を開始した時点から適用することとし、それまでの間は従前の例による。

附則（令和3年4月6日 原規規発第2104063号）

（施行期日）

第1条

2. 第5条、第38条、第39条及び第42条の2については、減容処理設備の運用を開始した時点から適用することとし、それまでの間は従前の例による。

附則（令和 2 年 8 月 3 日 原規規発第 2008037 号）

（施行期日）

第 1 条

2. 添付 1（管理区域図）の全体図における免震重要棟及び入退域管理棟，添付 2（管理対象区域図）の全体図における免震重要棟及び入退域管理棟並びに免震重要棟及び入退域管理棟の管理対象区域図面の変更は，それぞれの区域の区域区分の変更をもって適用することとし，それまでの間は従前の例による。

附則（令和 2 年 5 月 2 7 日 原規規発第 2005271 号）

（施行期日）

第 1 条

2. 第 5 条，第 4 0 条及び第 4 2 条の 2 については，大型廃棄物保管庫の運用を開始した時点から適用することとし，それまでの間は従前の例による。
3. 添付 1（管理区域図）の全体図及び大型廃棄物保管庫の管理区域図面並びに添付 2（管理対象区域図）の全体図及び大型廃棄物保管庫の管理対象区域図面の変更は，それぞれの区域の区域区分の変更をもって適用することとし，それまでの間は従前の例による。

附則（平成 2 8 年 1 2 月 2 7 日 原規規発第 1612276 号）

（施行期日）

第 1 条

2. 第 4 0 条の 2 における水位の監視については，水位計の設置が完了した貯留設備から順次適用する。

附則（平成 2 5 年 8 月 1 4 日 原規福発第 1308142 号）

（施行期日）

第 1 条

2. 第 1 7 条第 3 項及び第 4 項の 1 号炉復水貯蔵タンク水については，運用開始時点から適用する。

福島第一原子力発電所 特定原子力施設に係る実施計画

別冊集

本資料は、「福島第一原子力発電所特定原子力施設に係る実施計画」の内容を補足するものです。

本資料は、東京電力ホールディングス株式会社またはその他の企業の秘密情報が含まれている可能性があります。当社の許可なく本資料の内容を本来の目的以外に使用すること、ならびに第三者に開示、公開する行為を禁止します。

東京電力ホールディングス株式会社

目次

別冊 1 原子炉压力容器・格納容器注水設備に係る補足説明

I 原子炉压力容器・格納容器注水設備の構造強度及び耐震性について

別冊 2 原子炉格納容器内窒素封入設備に係る補足説明

I 原子炉格納容器内窒素封入設備の構造強度及び耐震性について

別冊 3 使用済燃料プール設備に係る補足説明

I 使用済燃料プール設備の構造強度及び耐震性について

別冊 4 原子炉压力容器・格納容器ホウ酸水注入設備に係る補足説明

I 原子炉压力容器・格納容器ホウ酸水注入設備の構造強度及び耐震性について

別冊 5 汚染水処理設備等に係る補足説明

I 汚染水処理設備等の構造強度及び耐震性について

II 2.5 汚染水処理設備等の寸法許容範囲について

別冊 6 原子炉格納容器ガス管理設備に係る補足説明

I 原子炉格納容器ガス管理設備の構造強度及び耐震性について

別冊 8 使用済燃料乾式キャスク仮保管設備に係る補足説明

I 乾式キャスク仮保管設備の構造強度及び耐震性について

II 乾式キャスク仮保管設備に関する要目表

別冊 9 放射性液体廃棄物処理施設及び関連施設に係る補足説明

I 放射性液体廃棄物処理施設及び関連施設の構造強度及び耐震性について

別冊 12 サブドレン他水処理施設に係る補足説明

I サブドレン他水処理施設の耐震性に係る補足説明

II サブドレン集水設備の強度に係る補足説明

III サブドレン他浄化設備の強度に係る補足説明

IV サブドレン他移送設備の強度に係る補足説明

V 地下水ドレン集水設備の強度に係る補足説明

別冊 1 3 放射性固体廃棄物等の管理施設及び関連施設（雑固体廃棄物焼却設備）に係る
補足説明

- I 雑固体廃棄物焼却設備の耐震性に係る補足説明
- II 雑固体廃棄物焼却設備の強度に係る補足説明
- III 雑固体廃棄物焼却設備の公称値の許容範囲について

別冊 1 4 雨水処理設備等に係わる補足説明

- I 雨水処理設備等の構造強度・耐震性に係る補足説明
- II 雨水処理設備等の寸法許容範囲について
- III 雨水処理設備等の耐圧検査条件について

別冊 1 5 使用済燃料共用プール設備に係る補足説明

- I 使用済燃料貯蔵ラックおよび使用済燃料収納缶に係る要目表
- II 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の耐震性について
- III 使用済燃料貯蔵ラック（25 体）の核燃料物質が臨界に達しないことを説明する書類に係る補足説明
- IV 使用済燃料貯蔵ラック（25 体）の耐震性について

別冊 1 6 建屋内 R0 循環設備および追設する関連機器に係る補足説明

- I 建屋内 R0 循環設備の構造強度評価に係る補足説明
- II 建屋内 R0 循環設備の耐震性評価に係る補足説明
- III 追設する関連機器の構造強度・耐震性評価に係る補足説明

別冊 1 7 5・6 号機 燃料取扱系及び燃料貯蔵設備に係る補足説明

- I 燃料の取扱い・耐震性について

別冊 1 8 R0 濃縮水処理設備に係る補足説明

- I R0 濃縮水処理設備の構造強度及び耐震性について

別冊 1 9 大型機器除染設備に係る補足説明

- I 大型機器除染設備の強度に係る補足説明
- II 大型機器除染設備の公称値の許容範囲について

別冊 2 0 電気系統設備に係る補足説明

- I 所内共通 M/C5A/B の耐震性評価結果
- II 所内共通 M/C6A/B の耐震性評価結果

Ⅲ 所内共通 M/C7A/B の耐震性評価結果

別冊 2 1 放射性物質分析・研究施設 第 1 棟に係る補足説明

- Ⅰ 放射性物質分析・研究施設 第 1 棟の構造強度について
- Ⅱ 放射性物質分析・研究施設 第 1 棟の耐震性について
- Ⅲ 第 1 棟の設備の公称値の許容範囲について

別冊 2 2 油処理装置に係る補足説明

- Ⅰ 油処理装置の耐震性に関する補足説明
- Ⅱ 油処理装置の強度に係る補足説明
- Ⅲ 油処理装置の公称値の許容範囲について

別冊 2 3 増設雑固体廃棄物焼却設備に係る補足説明

- Ⅰ ．増設雑固体廃棄物焼却設備の耐震性に係る補足説明
- Ⅱ ．増設雑固体廃棄物焼却設備の強度に係る補足説明
- Ⅲ ．増設雑固体廃棄物焼却設備の公称値の許容範囲について

別冊 2 4 5・6 号機 放射性液体廃棄物処理系に係る補足説明

- Ⅰ 5・6 号機 放射性液体廃棄物処理系のうち、仮設備（滞留水貯留設備）の構造強度及び耐震性について

別冊 2 6 3 号機原子炉格納容器内取水設備に係る補足説明

- Ⅰ 3 号機原子炉格納容器内取水設備の構造強度及び耐震性について

別冊 2 7 ALPS 処理水希釈放出設備に係る補足説明

- Ⅰ ALPS 処理水希釈放出設備の構造強度について
- Ⅱ ALPS 処理水希釈放出設備の公称値の許容範囲について

別冊 2 8 2 号機 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備に係る補足説明

- Ⅰ 燃料取り出し用構台 補足説明資料
- Ⅱ 換気設備 換気風量について
- Ⅲ 原子炉建屋オペレーティングフロア床面に設置する遮蔽体の耐震性についての計算書
- Ⅳ 2 号機燃料取扱設備及び燃料取り出し用構台に対する 1/2Ss450 評価について
- Ⅴ 2 号機燃料取扱設備破損時の被ばく評価についての計算書
- Ⅵ 燃料取扱設備の耐震性についての計算書