

廃炉発官R2第129号
令和2年9月29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64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

3号機使用済燃料プール内の変形燃料に関する取り扱い及び使用済燃料収納缶の取り扱いについて、下記の通り変更を行う。

併せて、1号機原子炉建屋周辺の作業エリア整備における解体撤去対象の追加に伴う変更並びに工業標準化法の改正に伴う記載の適正化を行う。

Ⅱ 特定原子力施設の設計、設備

2.11 使用済燃料プールからの燃料取り出し設備

本文

- ・解体撤去の対象となる干渉物追加に伴う記載の適正化

添付資料－1－1

- ・大変形用掴み具の導入に伴う記載の追加及び構造図の追加

添付資料－1－3

- ・3号機ハンドル変形燃料の取り扱いに関して記載の追加
- ・がれき衝突解析に用いるコード（L S－D Y N A）について新規記載
- ・その他記載の適正化

添付資料－8

- ・解体撤去の対象となる干渉物追加に伴う記載の適正化
- ・その他記載の適正化

添付資料－9

- ・工業標準化法の改正に伴う記載の適正化
- ・その他記載の適正化

2.12 使用済燃料共用プール設備

本文

- ・変更なし

添付資料－9－1

- ・使用済燃料収納缶（小）取り扱い概念図の追加

添付資料－9－2

- ・使用済燃料収納缶（大）の落下防止機能及び落下防止措置について記載の追加
- ・使用済燃料収納缶（大）取り扱い概念図の追加

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（又はコンテナ）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、遮へい、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、遮へい、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

(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. 遮へい

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、燃料の遮へい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へい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. 遮へい

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。

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、隙間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、遮へい、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。

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。

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。

(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、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。

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。

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

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。

(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の主要構成機器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、火災により安全性を損なうことのないようにする。

(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、使用済燃料プール、使用済燃料貯蔵ラックへの波及的影響を考慮することとし、検討に用いる地震動として基準地震動 S_s により使用済燃料プール、使用済燃料貯蔵ラックへ落下しないことの確認を行う。

耐震性に関する評価にあたっては、「JEAG4601 原子力発電所耐震設計技術指針」に準拠することを基本とするが、必要に応じて試験結果等を用いた現実的な評価を行う。

(b) クレーン

クレーンは、使用済燃料プール、使用済燃料貯蔵ラックへの波及的影響を考慮する。クレーンは、「JEAG4601・補-1984 原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編」に基づき、通常時は使用済燃料プール上にはなく、基準地震動 S_s が発生して使用済燃料プール、使用済燃料貯蔵ラックを損傷させる可能性は少ないため、検討に用いる地震動として弾性設計用地震動 S_d により使用済燃料プール、使用済燃料貯蔵ラックへ落下しないことの確認を行う。

耐震性に関する評価にあたっては、「JEAG4601 原子力発電所耐震設計技術指針」に準拠することを基本とするが、必要に応じて試験結果等を用いた現実的な評価を行う。

b. 燃料取り出し用カバー

燃料取り出し用カバーは、その損傷による原子炉建屋、使用済燃料プール、使用済燃料貯蔵ラックへの波及的影響を考慮することとし、基準地震動 S_s により確認を行う。

耐震性に関する評価にあたっては、「JEAG4601 原子力発電所耐震設計技術指針」に準拠することを基本とするが、必要に応じて試験結果等を用いた現実的な評価を行う。

2.11.2 基本仕様

2.11.2.1 主要仕様

(1) 燃料取扱設備

(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

補助ホイスト : 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

ホイスト : 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} ~10mSv/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	: 4.9t
	東側補助ホイス	: 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) 構内用輸送容器

(3号機及び4号機を除く)

個数	1式
----	----

(4号機)

型式	NFT-22B型
収納体数	22体
個数	2基

型式	NFT-12B型
収納体数	12体
個数	2基

(3号機)

種類	密封式円筒形
収納体数	7体
個数	3基

(3) 燃料取り出し用カバー (換気設備含む)

(3号機及び4号機を除く)

個数	1式
----	----

(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	長方形はげ折りダクト／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	長方形はげ折りダクト／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、Ⅱ 2. 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※³

添付資料－1－2 放射線モニタリングに関する説明書※³

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※²

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※³

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※²

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※³

添付資料－3－2 がれき撤去等の手順に関する説明書

添付資料－3－3 移送操作中の燃料集合体の落下※³

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※³

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※³

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※³

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※³

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1号機原子炉建屋カバー解体について

添付資料－8 福島第一原子力発電所第1・2号機原子炉建屋作業エリア整備に伴う 干渉物解体撤去について

添付資料－9 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－10 福島第一原子力発電所1号機原子炉建屋オペレーティングフロアのガ レキの撤去について

添付資料－10－1 福島第一原子力発電所1号機原子炉建屋オペレーティングフロ
ア北側のガレキの撤去について

添付資料－10－2 福島第一原子力発電所1号機原子炉建屋オペレーティングフロ
ア中央および南側のガレキの一部撤去について

添付資料－10－3 福島第一原子力発電所1号機原子炉建屋オペレーティングフロ
ア外周鉄骨の一部撤去について

添付資料－10－4 福島第一原子力発電所1号機原子炉建屋オペレーティングフロ
ア床上のガレキの一部撤去について

※1，※2（3号機及び4号機を除く）及び※3（3号機及び4号機を除く）の説明書については，現地工事開始前ま
でに報告を行い，確認を受けることとする。

燃料の落下防止，臨界防止に関する説明書

1. 4号機燃料取り扱いに関する概要

1.1. 概要

燃料取扱設備は，燃料取扱機及びクレーンで構成し，新燃料及び使用済燃料を使用済燃料貯蔵プールから取り出し，燃料取り出し用カバーから搬出するまでの取り扱いを行うものである。

なお，燃料の搬出には構内用輸送容器を使用する。

また，燃料取扱機は燃料集合体を 1 体ずつ取り扱う構造とすることにより，燃料の臨界を防止できる設計とし，燃料集合体の構内用輸送容器への収容操作が使用済燃料の遮へい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。

さらに，燃料取扱設備は地震荷重等の適切な組み合わせを考慮しても強度上耐え得る設計とするとともに，燃料取扱機は二重のワイヤロープや種々のインターロック等を設け，クレーンの主要要素は種々の二重化を行うこと等により，移送操作中の燃料集合体の落下を防止する設計とする。

また，燃料取扱設備はその機能の健全性を確認するため，定期的に試験及び検査を行う。

燃料取り扱いに使用する燃料取扱機及びクレーンの概要を以下に示す。

(1) 4号機 燃料取扱機

燃料取扱機は使用済燃料貯蔵プール，キャスクピット上を走行し，ブリッジ，トロリ，燃料把握機，補助ホイストで構成されている。

トロリには運転台及び 1 体の燃料集合体をつかむ燃料把握機があり，燃料集合体を使用済燃料貯蔵プール内の適当な位置に移送することができる。

燃料把握機のフックは空気作動式であり，燃料集合体をつかんだ状態で空気源が喪失しても，フックが開とにならないようにする機械的機構を有しているため，燃料集合体を確実に保持できる。また，燃料把握機は二重のワイヤロープで保持する構造である。さらに燃料取扱中に過荷重となった場合に上昇を阻止するため，燃料把握機にインターロックを設ける。

本装置は走行，横行，昇降を安全かつ確実にを行うため，各装置にインターロックを設ける。

また，地震時にも転倒することがない構造であり，走行部はレールを抱え込む構造である。

なお，燃料取扱機は崩壊熱により燃料が溶融しないよう，使用済燃料を使用済燃料貯蔵プール水中で取り扱う設計とする。

(2) 4号機 クレーン

クレーンは、燃料取り出し用カバー内及びオペレーションフロア上で構内用輸送容器の移送を行うものである。

本クレーンは、地震時にも落下することがない構造であり、構内用輸送容器の移送中において駆動源が喪失しても確実に保持できる。

また重量物を移送する主巻フックは二重のワイヤロープで保持する構造である。

フックは玉掛け用ワイヤロープ等が当該フックから外れることを防止するための装置を設ける。

さらに、重量物を吊った状態で使用済燃料貯蔵ラック上を通過できないようインターロックを設ける。

1.2. 4号機 燃料落下防止対策

燃料取り扱いに使用する燃料取扱機及びクレーンは、以下に示す落下防止対策により燃料集合体を安全かつ確実に取り扱うことができる設計とする。

燃料集合体の落下防止対策を表 1.2-1 に示す。

表 1.2-1 燃料集合体の落下防止対策

機器名称	落下防止対策
燃料取扱機	(1) ホイストは電源断時に電磁ブレーキで保持する構造 (2) 燃料把握機は空気源喪失時にフックが開かない構造 (3) 燃料把握機の機械的インターロック (4) 燃料把握機の過荷重時に上昇を阻止するインターロック (5) 燃料把握機は二重のワイヤロープで保持する構造
クレーン	(1) 巻上装置は電源断時に電動油圧押し上げ機ブレーキで保持する構造 (2) 主巻フックは二重のワイヤロープで保持する構造 (3) 主巻フックは外れ止め装置を有する構造

上記の落下防止対策の概要を次紙以降に示す

1.3. 4号機 燃料取扱設備の未臨界性

燃料取扱機は、燃料集合体を1体ずつ取り扱う構造とすることにより、未臨界性は確保される。

また、クレーンは未臨界性について評価されている構内用輸送容器に燃料集合体を収納して取り扱う。

機器名称	落下防止対策
燃料取扱機	(1) ホイストは電源断時に電磁ブレーキで保持する構造 (2) 燃料把握機は空気源喪失時にフックが開かない構造 (3) 燃料把握機の機械的インターロック (4) 燃料把握機の過荷重時に上昇を阻止するインターロック (5) 燃料把握機は二重のワイヤロープで保持する構造
クレーン	(1) 巻上装置は電源断時に電動油圧押し機で保持する構造 (2) 主巻フックは二重のワイヤロープで保持する構造 (3) 主巻フックは外れ止め装置を有する構造

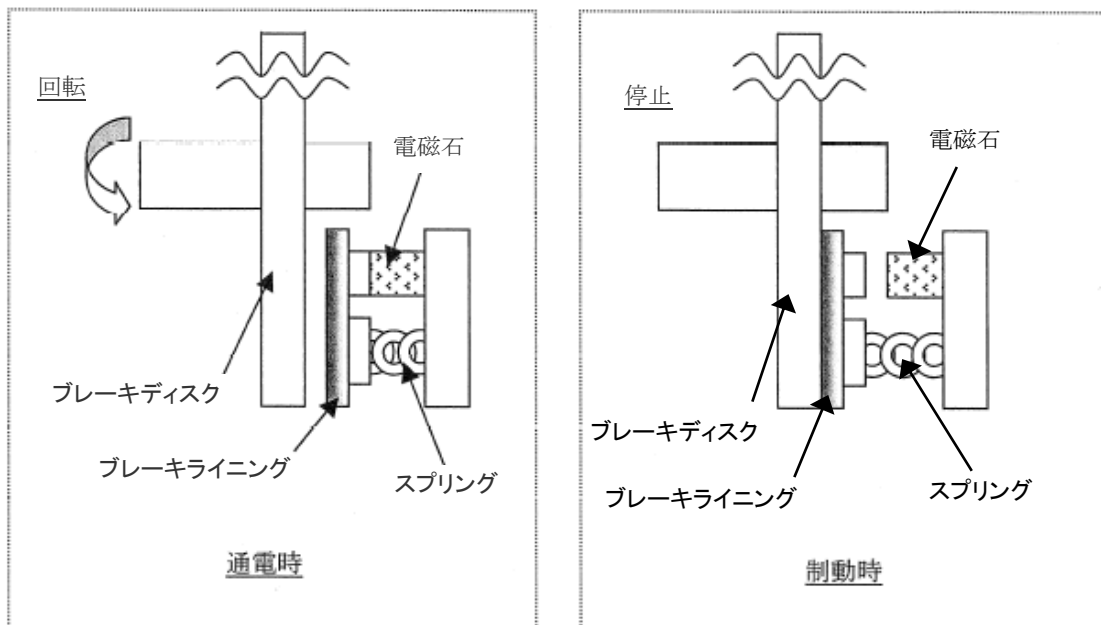
電磁ブレーキは、電源断時にバネによりブレーキがかかり保持できる機構を持っている。

○電磁ブレーキ（電磁ディスクブレーキ）の動作原理

電磁ディスクブレーキは、スプリング力によってブレーキライニングをブレーキディスクに押しつけて電動機の回転を制動している。電動機に通電すると、電磁コイルに電流が流れ、電磁石がスプリングの力に逆らってブレーキを解放する。

電動機を停止させると、再びスプリング力によってブレーキライニングがブレーキディスクを押しつけて制動する。電磁ディスクブレーキは、ホイストの巻上装置等に使用されている。

以下に通電（回転）時と、制動時の模式図を示す。



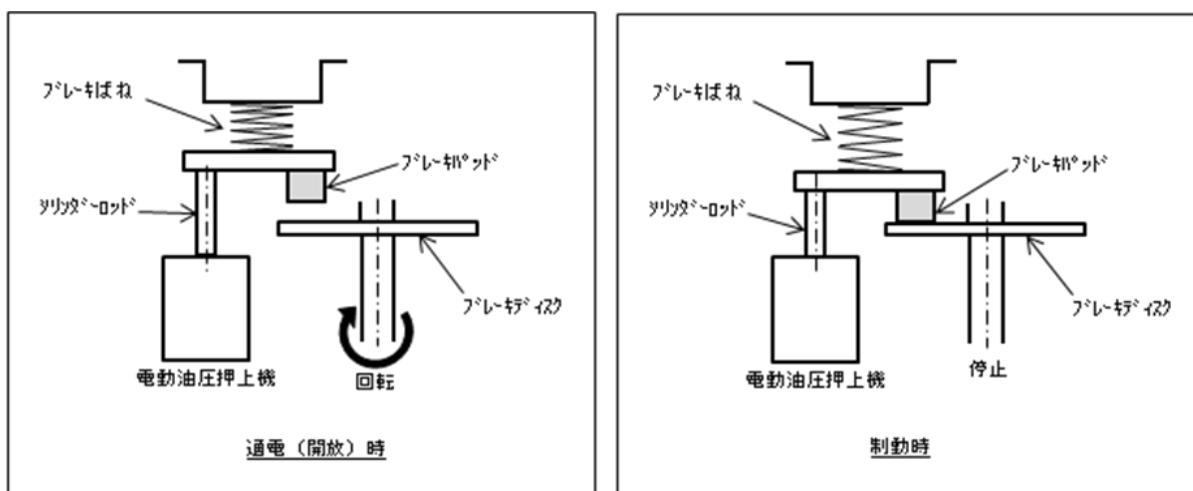
電動油圧押し上げ機ブレーキは、電源断時にブレーキばねによりブレーキがかかり保持できる機構を持っている。

○電動油圧押し上げ機ブレーキ（電動油圧押し上げ機ディスクブレーキ）の動作原理

電動油圧押し上げ機ブレーキは、ブレーキばねの力によってブレーキパッドをブレーキディスクに押しつけて電動機の回転を制動している。巻上モータに通電すると、同時に電動油圧押し上げ機にも通電され、内蔵モータにより油圧が発生し、シリンダーロッドを押し上げ、ブレーキばねを縮めることによりブレーキを開放する。

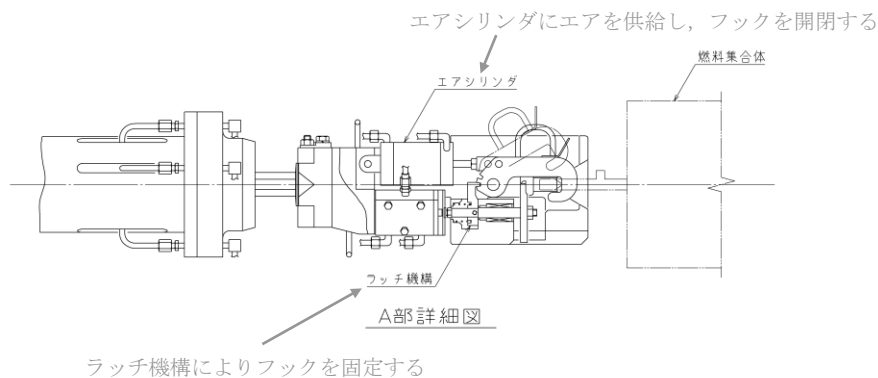
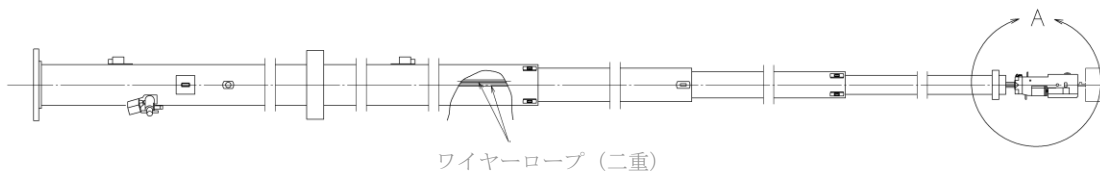
巻上モータを停止させると、電動油圧押し上げ機も停止するため、再びブレーキばねの力によってブレーキパッドがブレーキディスクを押しつけて制動する。

以下に通電(開放)時と、制動時の模式図を示す。



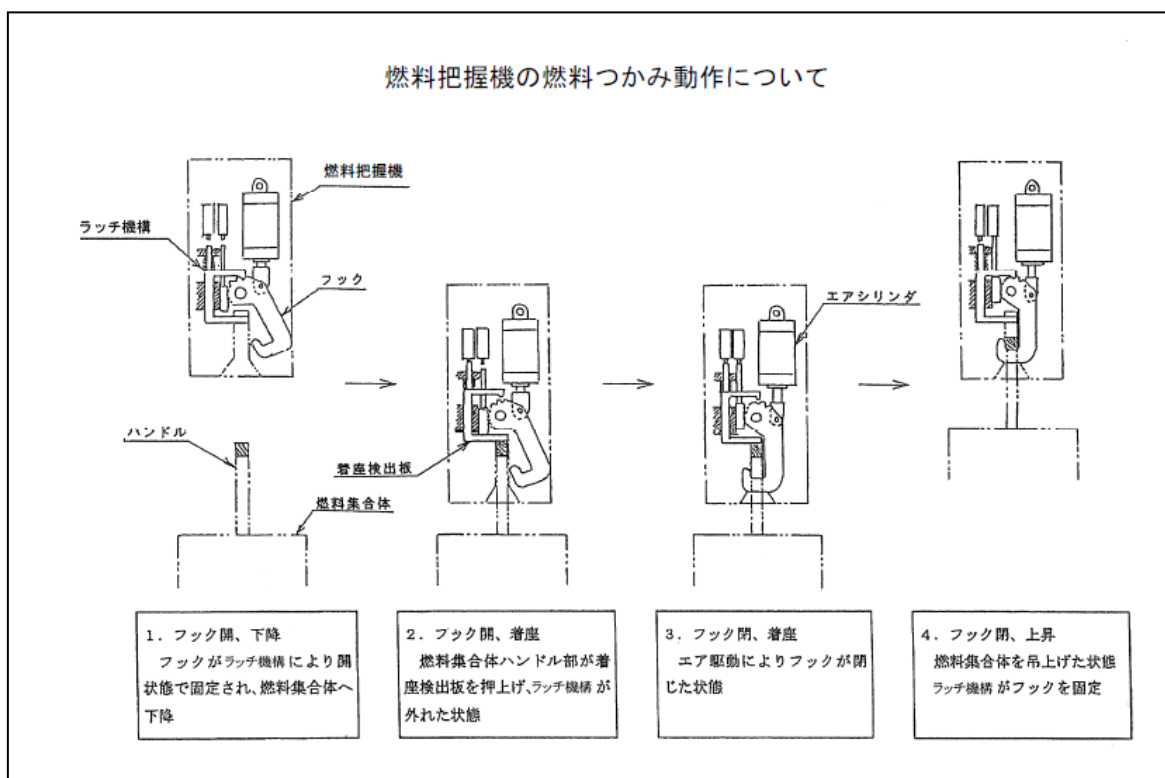
機器名称	落下防止対策
燃料取扱機	(1) ホイストは電源断時に電磁ブレーキで保持する構造 (2) 燃料把握機は空気源喪失時にフックが開かない構造 (3) 燃料把握機の機械的インターロック (4) 燃料把握機の過荷重時に上昇を阻止するインターロック (5) 燃料把握機は二重のワイヤロープで保持する構造
クレーン	(1) 巻上装置は電源断時に電動油圧押し上げ機ブレーキで保持する構造 (2) 主巻フックは二重のワイヤロープで保持する構造 (3) 主巻フックは外れ止め装置を有する構造

燃料把握機は、フックの駆動に用いる空気源が喪失しても、ラッチ機構によりフックが開かないような設計としている。



機器名称	落下防止対策
燃料取扱機	(1) ホイストは電源断時に電磁ブレーキで保持する構造 (2) 燃料把握機は空気源喪失時にフックが開かない構造 (3) 燃料把握機の機械的インターロック (4) 燃料把握機の過荷重時に上昇を阻止するインターロック (5) 燃料把握機は二重のワイヤロープで保持する構造
クレーン	(1) 巻上装置は電源断時に電動油圧押し上げ機ブレーキで保持する構造 (2) 主巻フックは二重のワイヤロープで保持する構造 (3) 主巻フックは外れ止め装置を有する構造

燃料集合体を吊った状態においては、燃料把握機はラッチ機構により固定されフックを開くことができない。また、燃料把握時には燃料集合体ハンドル部が着座検出板を押し上げるとラッチ機構が外れる機械的インターロックを備えている。

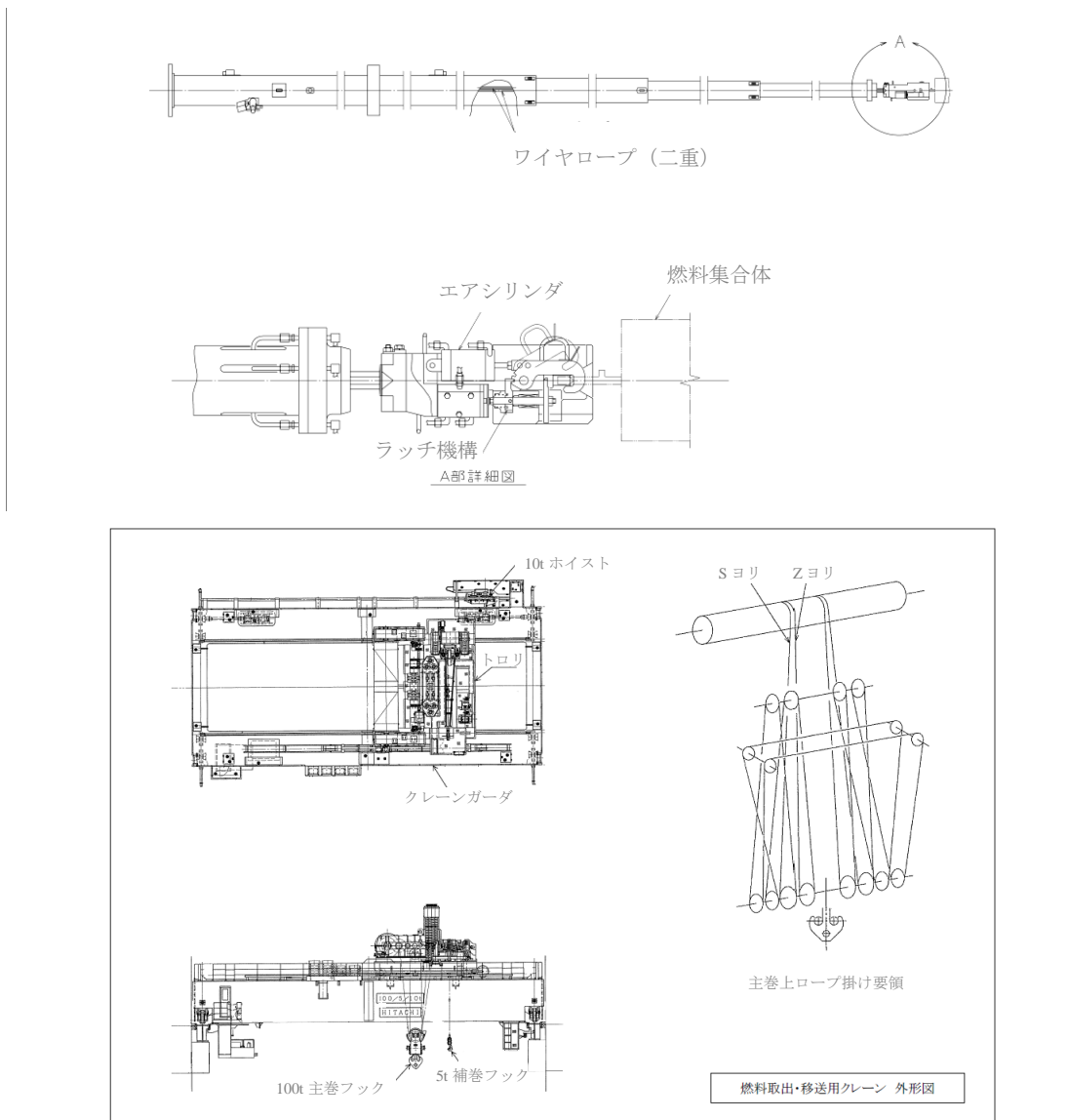


機器名称	落下防止対策
燃料取扱機	<ul style="list-style-type: none"> (1) ホイストは電源断時に電磁ブレーキで保持する構造 (2) 燃料把握機は空気源喪失時にフックが開かない構造 (3) 燃料把握機の機械的インターロック <li style="border: 2px solid black;">(4) 燃料把握機の過荷重時に上昇を阻止するインターロック (5) 燃料把握機は二重のワイヤロープで保持する構造
クレーン	<ul style="list-style-type: none"> (1) 巻上装置は電源断時に電動油圧押し上げ機ブレーキで保持する構造 (2) 主巻フックは二重のワイヤロープで保持する構造 (3) 主巻フックは外れ止め装置を有する構造

燃料把握機のワイヤロープに必要な以上の張力が加わらないように、必要以上の荷重を検出した場合に、燃料把握機を上昇することができないインターロックを備えている。

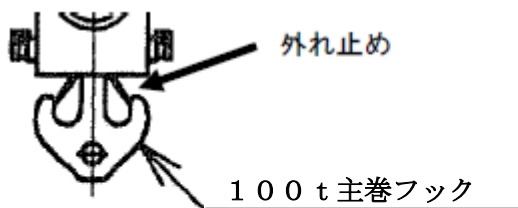
機器名称	落下防止対策
燃料取扱機	(1) ホイストは電源断時に電磁ブレーキで保持する構造 (2) 燃料把握機は空気源喪失時にフックが開かない構造 (3) 燃料把握機の機械的インターロック (4) 燃料把握機の過荷重時に上昇を阻止するインターロック (5) 燃料把握機は二重のワイヤロープで保持する構造
クレーン	(1) 巻上装置は電源断時に電動油圧押し機ブレーキで保持する構造 (2) 主巻フックは二重のワイヤロープで保持する構造 (3) 主巻フックは外れ止め装置を有する構造

燃料把握機及びクレーンの主巻フックは、ワイヤロープを二重化し、万一ワイヤロープが1本切断したとしても落下を防止できる設計としている。



機器名称	落下防止対策
燃料取扱機	(1) ホイストは電源断時に電磁ブレーキで保持する構造 (2) 燃料把握機は空気源喪失時にフックが開かない構造 (3) 燃料把握機の機械的インターロック (4) 燃料把握機の過荷重時に上昇を阻止するインターロック (5) 燃料把握機は二重のワイヤロープで保持する構造
クレーン	(1) 巻上装置は電源断時に電動油圧押し上げ機ブレーキで保持する構造 (2) 主巻フックは二重のワイヤロープで保持する構造 (3) 主巻フックは外れ止め装置を有する構造

主巻フックは、両釣形フックとし、外れ止めを有する。



2. 3号機燃料取り扱いに関する概要

2.1. 概要

燃料取扱設備は、燃料取扱機及びクレーンで構成し、新燃料及び使用済燃料を使用済燃料貯蔵プールから取り出し、燃料取り出し用カバーから搬出するまでの取り扱いを行うものである。

なお、燃料の搬出には構内用輸送容器を使用する。

また、燃料取扱機は燃料集合体を1体ずつ取り扱う構造とすることにより、燃料の臨界を防止できる設計とし、燃料集合体の構内用輸送容器への収容操作が燃料の遮へい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。

さらに、燃料取扱設備は地震荷重等の適切な組み合わせを考慮しても強度上耐え得る設計とするとともに、燃料取扱機は二重のワイヤロープや種々のインターロック等を設け、クレーンの主要要素は種々の二重化を行うこと等により、移送操作中の燃料集合体の落下を防止する設計とする。

また、燃料取扱設備はその機能の健全性を確認するため、定期的に試験及び検査を行う。

燃料取り扱いに使用する燃料取扱機及びクレーンの概要を以下に示す。

(1) 3号機 燃料取扱機

燃料取扱機は、使用済燃料プール、キャスクピット上を走行し、ブリッジ、トロリ、燃料把握機、西側補助ホイスト、東側補助ホイスト、テンシルトラスで構成されている。

燃料把握機トロリには1体の燃料集合体をつかむ燃料把握機があり、燃料集合体を使用済燃料プール内の適切な位置に移動することができる。

燃料把握機のフックは水圧作動式であり、燃料集合体をつかんだ状態で水圧源が喪失しても、フックが開とならないようにする機械的機構を有しているため、燃料集合体を確実に保持できる。また、燃料把握機は二重のワイヤロープで保持する構造である。さらに燃料取扱中に過荷重となった場合に上昇を阻止するため、燃料把握機にインターロックを設ける。

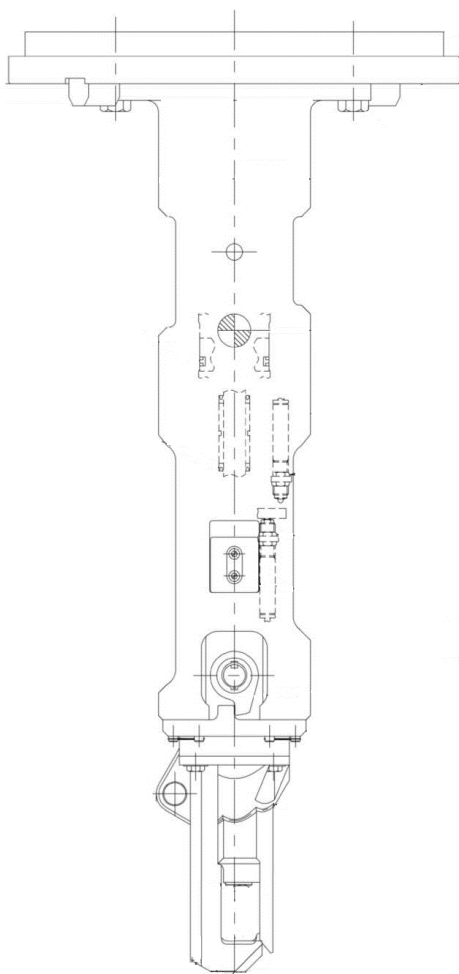
がれき落下によるハンドル部の変形が認められる燃料集合体の一部は、通常の燃料把握機のフック（掴み具）では取り扱えないため、ハンドル部の変形状況に応じて専用の大変形用掴み具を用いる。

燃料取扱機は、運転員の誤操作を防止するため、走行、横行、昇降のそれぞれの操作について2段階の動作が必要なスイッチを設けるとともに、走行、横行、昇降を安全かつ確実にを行うため各装置にインターロックを設ける。さらに、荷重計（ロードセル）を設け遠隔操作を行う運転員が荷重を確認できる設計とし、仮に過荷重となった場合にはインターロックにより上昇を阻止する設計とする。

また、燃料集合体の移送作業中における地震時においても転倒・落下することがな

い構造であり、走行部はレールを抱え込む構造である。

なお、燃料取扱機は崩壊熱により燃料が溶融しないよう、燃料を使用済燃料貯蔵プール水中で取り扱う設計とする。



大変形用掴み具 構造図

(2) 3号機 クレーン

クレーンは、燃料取り出し用カバー内で構内用輸送容器の移送を行うものである。

本クレーンは、構内用輸送容器の移送作業中における地震時においても転倒・落下することがない構造であり、構内用輸送容器の移送中において駆動源が喪失しても確実に保持できる。

また、重量物を移送する主巻フックは二重のワイヤロープで保持する構造である。

主巻フックは玉掛け用ワイヤロープ等が当該フックから外れることを防止するための装置を設ける。

さらに、重量物を吊った状態で使用済燃料貯蔵ラック上を通過できないようインターロックを設ける。

クレーンは、運転員の誤操作を防止するため、走行、横行、昇降のそれぞれの操作について2段階の動作が必要なスイッチを設ける。さらに、荷重計（ロードセル）を設け遠隔操作を行う運転員が荷重を確認できる設計とし、仮に過荷重となった場合にはインターロックにより上昇を阻止する設計とする。

2.2. 3号機 燃料落下防止対策

燃料取り扱いに使用する燃料取扱機及びクレーンは、以下に示す落下防止対策により燃料集合体を安全かつ確実に取り扱うことができる設計とする。

燃料集合体の落下防止対策を表 2.2-1 に示す。

表 2.2-1 燃料集合体の落下防止対策

機器名称	落下防止対策
燃料取扱機	(1) ホイストは電源断時に電磁ブレーキで保持する構造 (2) 燃料把握機は水圧源喪失時にフックが開かない構造 (3) 燃料把握機の機械的インターロック (4) 燃料把握機の過荷重時に上昇を阻止するインターロック (5) 燃料把握機は二重のワイヤロープで保持する構造
クレーン	(1) 巻上装置は電源断時に電動油圧押し上げ機ブレーキで保持する構造 (2) 主巻フックは二重のワイヤロープで保持する構造 (3) 主巻フックは外れ止め装置を有する構造

上記の落下防止対策の概要を次紙以降に示す

2.3. 3号機 燃料取扱設備の未臨界性

燃料取扱機は、燃料集合体を1体ずつ取り扱う構造とすることにより、燃料の未臨界性を確保する。

また、クレーンは、燃料集合体の搬出にあたって、燃料の未臨界性について評価されている構内用輸送容器に燃料集合体を収納して取り扱う。

機器名称	落下防止対策
燃料取扱機	(1) ホイストは電源断時に電磁ブレーキで保持する構造 (2) 燃料把握機は水圧源喪失時にフックが開かない構造 (3) 燃料把握機の機械的インターロック (4) 燃料把握機の過荷重時に上昇を阻止するインターロック (5) 燃料把握機は二重のワイヤロープで保持する構造
クレーン	(1) 巻上装置は電源断時に電動油圧押し上げ機ブレーキで保持する構造 (2) 主巻フックは二重のワイヤロープで保持する構造 (3) 主巻フックは外れ止め装置を有する構造

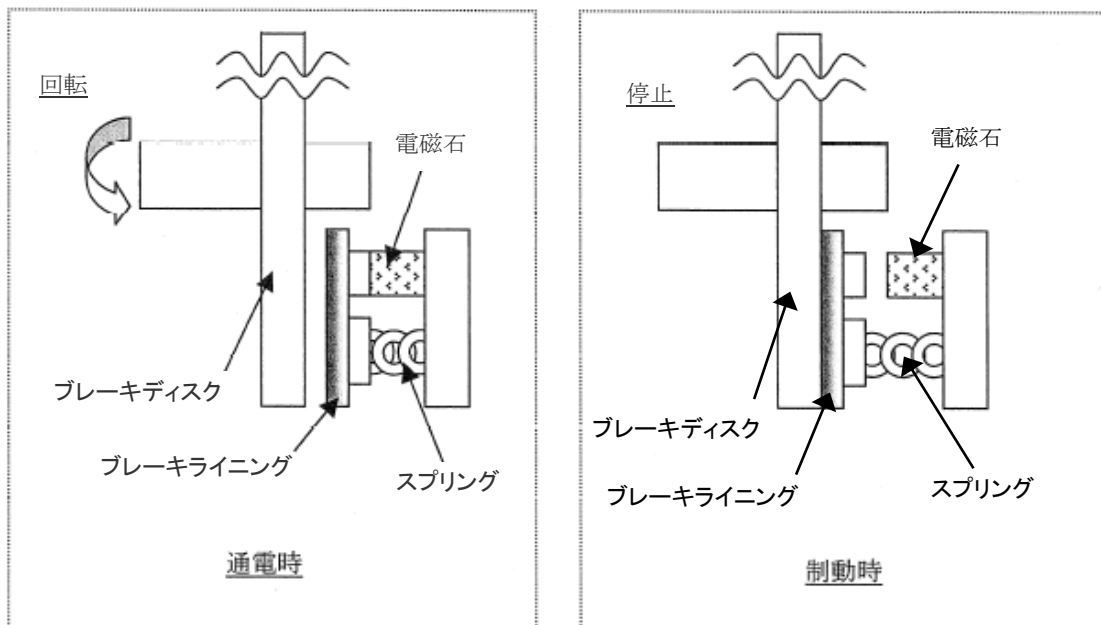
燃料取扱機の電磁ブレーキは、電源断時にバネによりブレーキがかかり保持できる機構を持っている。

○電磁ブレーキ（電磁ディスクブレーキ）の動作原理

電磁ディスクブレーキは、スプリング力によってブレーキライニングをブレーキディスクに押しつけて電動機の回転を制動している。電動機に通電すると、電磁コイルに電流が流れ、電磁石がスプリングの力に逆らってブレーキを解放する。

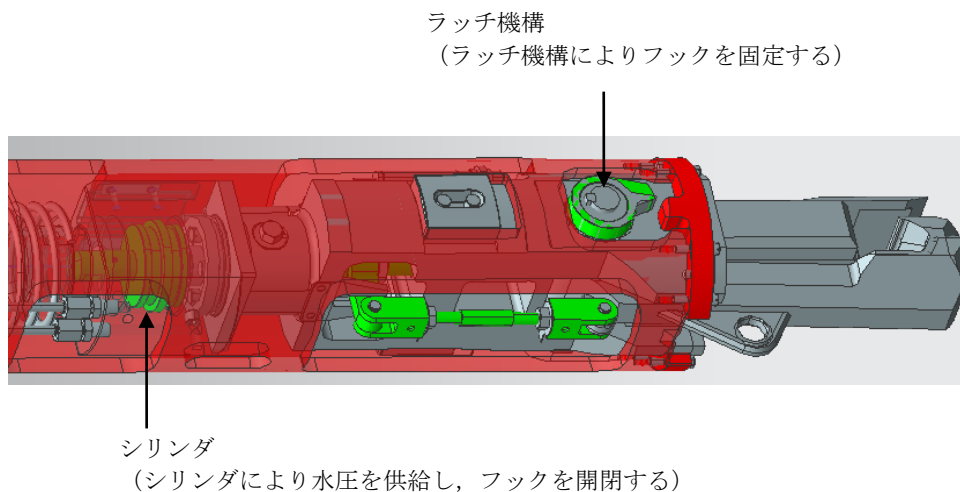
電動機を停止させると、再びスプリング力によってブレーキライニングがブレーキディスクを押しつけて制動する。電磁ディスクブレーキは、ホイストの巻上装置等に使用されている。

以下に通電（回転）時と、制動時の模式図を示す。



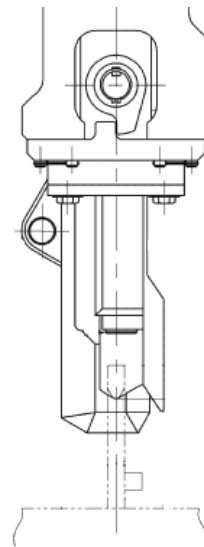
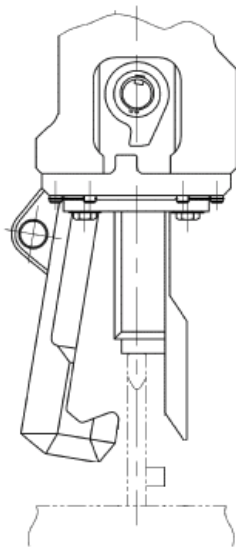
機器名称	落下防止対策
燃料取扱機	(1) ホイストは電源断時に電磁ブレーキで保持する構造 (2) 燃料把握機は水圧源喪失時にフックが開かない構造 (3) 燃料把握機の機械的インターロック (4) 燃料把握機の過荷重時に上昇を阻止するインターロック (5) 燃料把握機は二重のワイヤロープで保持する構造
クレーン	(1) 巻上装置は電源断時に電動油圧押し機ブレーキで保持する構造 (2) 主巻フックは二重のワイヤロープで保持する構造 (3) 主巻フックは外れ止め装置を有する構造

燃料把握機は、フックの駆動に用いる水圧源が喪失しても、ラッチ機構によりフックが開かないような設計としている。



機器名称	落下防止対策
燃料取扱機	(1) ホイストは電源断時に電磁ブレーキで保持する構造 (2) 燃料把握機は水圧源喪失時にフックが開かない構造 (3) 燃料把握機の機械的インターロック (4) 燃料把握機の過荷重時に上昇を阻止するインターロック (5) 燃料把握機は二重のワイヤロープで保持する構造
クレーン	(1) 巻上装置は電源断時に電動油圧押し機ブレーキで保持する構造 (2) 主巻フックは二重のワイヤロープで保持する構造 (3) 主巻フックは外れ止め装置を有する構造

燃料集合体を吊った状態においては、燃料把握機はラッチ機構により固定されフックを開くことができない。また、燃料着座時には燃料集合体荷重がフックに負荷されなくなることで、フックが押し上がり、ラッチ機構が外れる機械的インターロックを備えている。



1. フック開 下降～着座
フックが開状態にて、燃料集合体へ下降，着座。

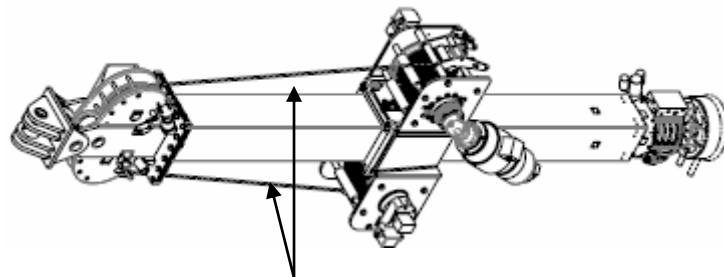
2. フック閉 着座～上昇
水圧駆動にてフックが閉じた後、燃料集合体を吊上げ。ラッチ機構がフックを固定。

機器名称	落下防止対策
燃料取扱機	<ul style="list-style-type: none"> (1) ホイストは電源断時に電磁ブレーキで保持する構造 (2) 燃料把握機は水圧源喪失時にフックが開かない構造 (3) 燃料把握機の機械的インターロック <li style="border: 2px solid black;">(4) 燃料把握機の過荷重時に上昇を阻止するインターロック (5) 燃料把握機は二重のワイヤロープで保持する構造
クレーン	<ul style="list-style-type: none"> (1) 巻上装置は電源断時に電動油圧押し機ブレーキで保持する構造 (2) 主巻フックは二重のワイヤロープで保持する構造 (3) 主巻フックは外れ止め装置を有する構造

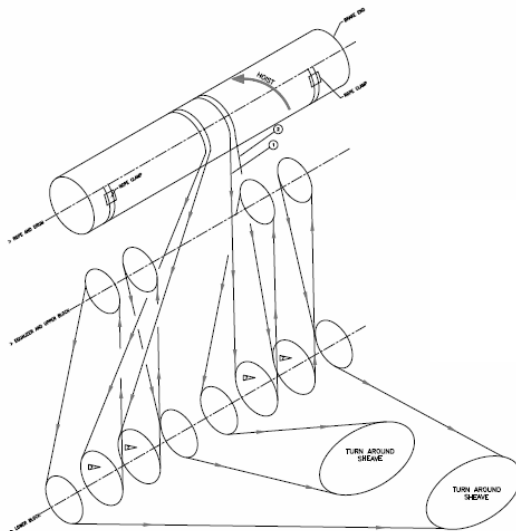
燃料把握機のワイヤロープに必要な以上の張力が加わらないように、必要以上の荷重を検出した場合に、燃料把握機を上昇することができないインターロックを備えている。

機器名称	落下防止対策
燃料取扱機	(1) ホイストは電源断時に電磁ブレーキで保持する構造 (2) 燃料把握機は水圧源喪失時にフックが開かない構造 (3) 燃料把握機の機械的インターロック (4) 燃料把握機の過荷重時に上昇を阻止するインターロック (5) 燃料把握機は二重のワイヤロープで保持する構造
クレーン	(1) 巻上装置は電源断時に電動油圧押し機ブレーキで保持する構造 (2) 主巻フックは二重のワイヤロープで保持する構造 (3) 主巻フックは外れ止め装置を有する構造

燃料把握機及びクレーンの主巻フックは、ワイヤロープを二重化し、万が一ワイヤロープが1本切断したとしても落下を防止できる設計としている。



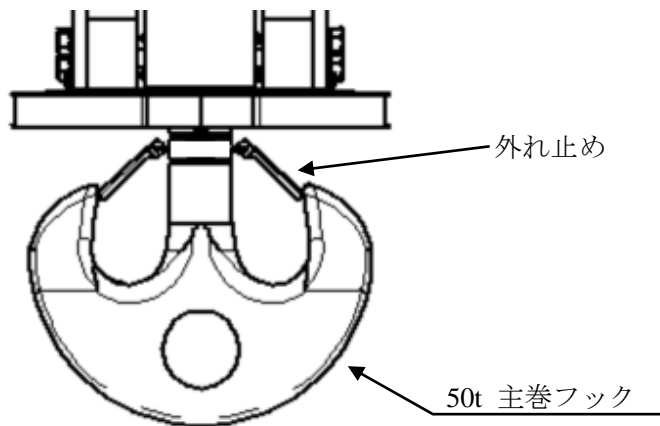
ワイヤロープ（二重）



主巻上ロープ掛け要領

機器名称	落下防止対策
燃料取扱機	(1) ホイストは電源断時に電磁ブレーキで保持する構造 (2) 燃料把握機は水圧源喪失時にフックが開かない構造 (3) 燃料把握機の機械的インターロック (4) 燃料把握機の過荷重時に上昇を阻止するインターロック (5) 燃料把握機は二重のワイヤロープで保持する構造
クレーン	(1) 巻上装置は電源断時に電動油圧押し上げ機ブレーキで保持する構造 (2) 主巻フックは二重のワイヤロープで保持する構造 (3) 主巻フックは外れ止め装置を有する構造

主巻フックは、両釣形フックとし、外れ止めを有する。



3. 別添

別添－1 4号機燃料取扱設備の機能に係る確認事項

別添－2 3号機燃料取扱設備の機能に係る確認事項

4号機燃料取扱設備の機能に係る確認事項

4号機燃料取扱設備の機能に係る主要な確認事項を表－ 1 及び表－ 2 に示す。

表－ 1 4号機燃料取扱設備の機能に係る確認事項（燃料取扱機）

確認事項	確認項目		確認内容	判定基準
落下防止	機能確認		単一故障において燃料集合体を落下させないことを確認する。	動力源が喪失した場合においても燃料集合体を保持し続ける構造であること。 動力源断時に電磁ブレーキで保持する構造であること。
				空気喪失時にフックが開かない構造であること。
				ラッチ機構により固定されフックを開くことができない構造であること。
				過荷重時に上昇を阻止すること。
				二重のワイヤロープで保持する構造であること。
臨界防止	機能確認		燃料集合体取り扱い時の臨界防止機能について確認する。	燃料集合体を1体ずつ取り扱う構造であること。
遮へい	機能確認		燃料集合体取り扱い時の遮へい機能について確認する。	遮へい水深を確保した状態で取り扱えること。
性能	機能確認	容量確認	容量及び所定の動作について確認する。	実施計画通りの荷重が吊り上げ可能なこと。 横行、走行、巻き上げ、巻き下げが可能なこと。

表－2 4号機燃料取扱設備の機能に係る確認事項（クレーン）

確認事項	確認項目		確認内容	判定基準
落下防止	機能確認		単一故障において構内用輸送容器を落下させないことを確認する。	動力源が喪失した場合においても構内用輸送容器を保持し続ける構造であること。 動力源断時に電動油圧押し上げ機ブレーキで保持する構造であること。
				重量物を吊った状態で使用済燃料貯蔵ラック上を通過させない構造であること。
				二重のワイヤロープで保持する構造であること。
				フックは外れ防止装置を有する構造であること。
性能	機能確認	容量確認	容量及び所定の動作について確認する。	実施計画通りの荷重が吊り上げ可能なこと。 横行、走行、巻き上げ、巻き下げが可能なこと。

3号機燃料取扱設備の機能に係る確認事項

3号機燃料取扱設備の機能に係る主要な確認事項を表－ 1 及び表－ 2 に示す。

表－ 1 3号機燃料取扱設備の機能に係る確認事項（燃料取扱機）

確認事項	確認項目		確認内容	判定基準
落下防止	機能確認		単一故障において燃料集合体を落下させないことを確認する。	動力源が喪失した場合においても燃料集合体を保持し続ける構造であること。 動力源断時に電磁ブレーキで保持する構造であること。
				駆動水圧喪失時にフックが開かない構造であること。
				ラッチ機構により固定されフックを開くことができない構造であること。
				過荷重時に上昇を阻止すること。
				二重のワイヤロープで保持する構造であること。
臨界防止	機能確認		燃料集合体取り扱い時の臨界防止機能について確認する。	燃料集合体を1体ずつ取り扱う構造であること。
遮へい	機能確認		燃料集合体取り扱い時の遮へい機能について確認する。	遮へい水深を確保した状態で取り扱えること。
性能	機能確認	容量確認	容量及び所定の動作について確認する。	実施計画通りの荷重が吊り上げ可能なこと。 横行、走行、巻き上げ、巻き下げが可能なこと。

表－２ ３号機燃料取扱設備の機能に係る確認事項（クレーン）

確認事項	確認項目		確認内容	判定基準
落下防止	機能確認		単一故障において構内用輸送容器を落下させないことを確認する。	動力源が喪失した場合においても構内用輸送容器を保持し続ける構造であること。 動力源断時に電動油圧押し上げブレーキで保持する構造であること。
				重量物を吊った状態で使用済燃料貯蔵ラック上を通過させない構造であること。
				二重のワイヤロープで保持する構造であること。
				フックは外れ防止装置を有する構造であること。
性能	機能確認	容量確認	容量及び所定の動作について確認する。	実施計画通りの荷重が吊り上げ可能なこと。 横行、走行、巻き上げ、巻き下げが可能なこと。

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。

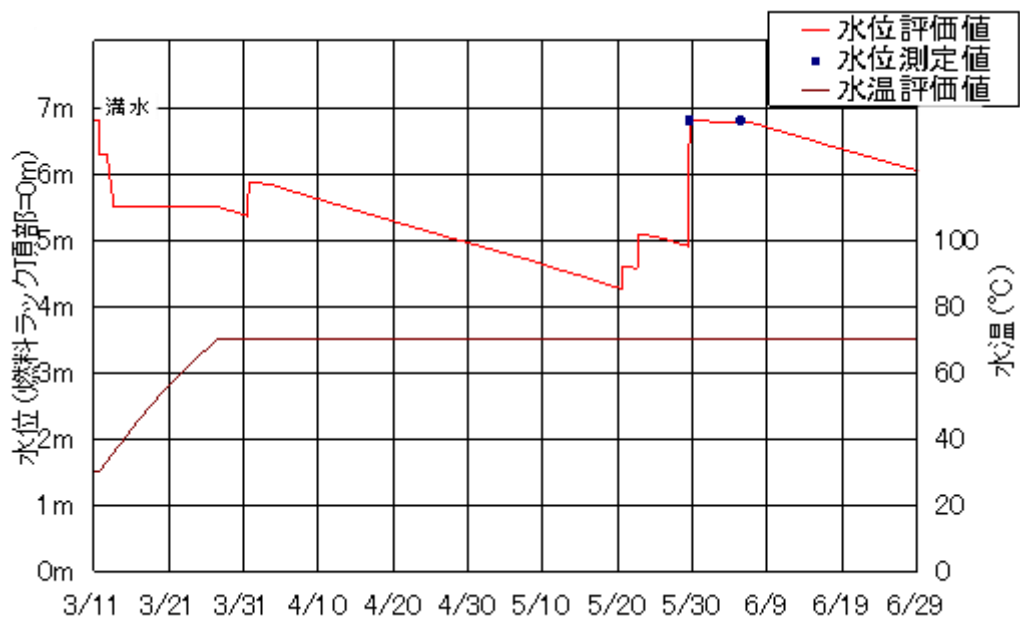
2.4. 4号機SFPの状況

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SFP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

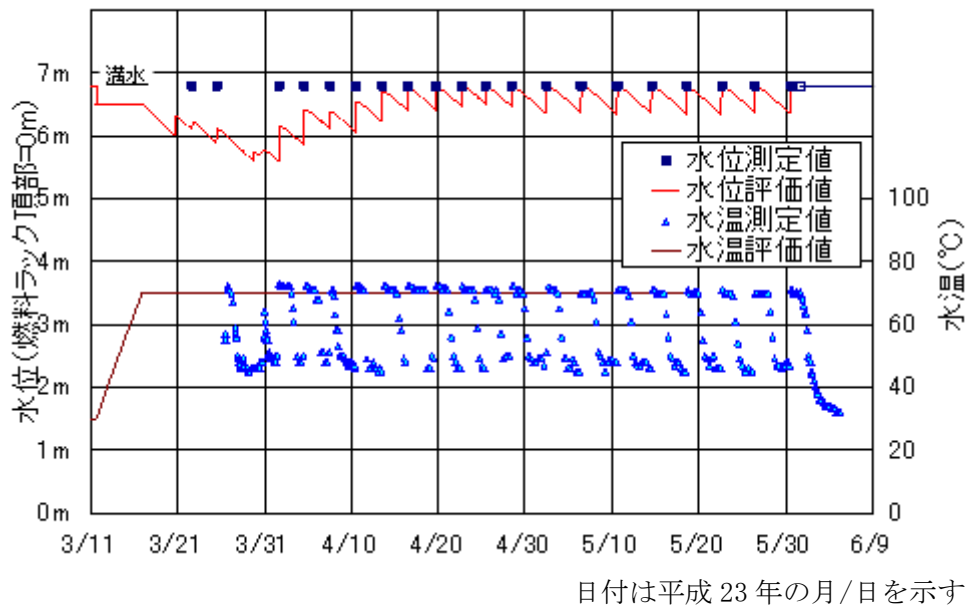


図 2-2 2号機SFPの評価結果

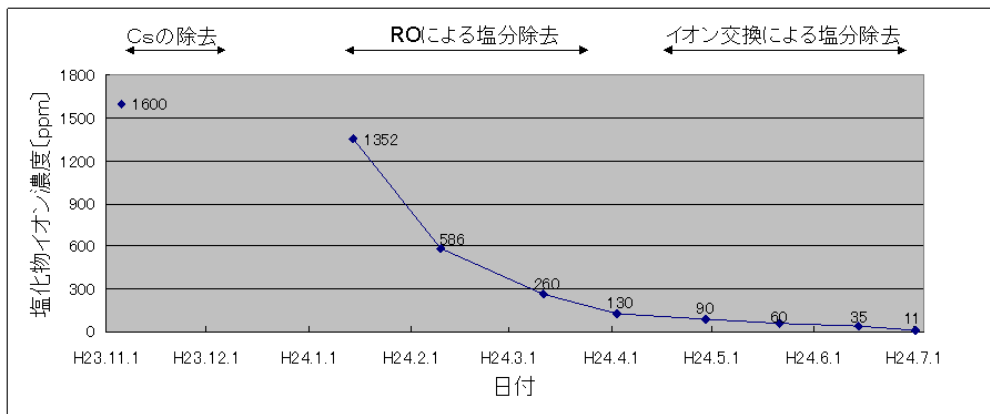
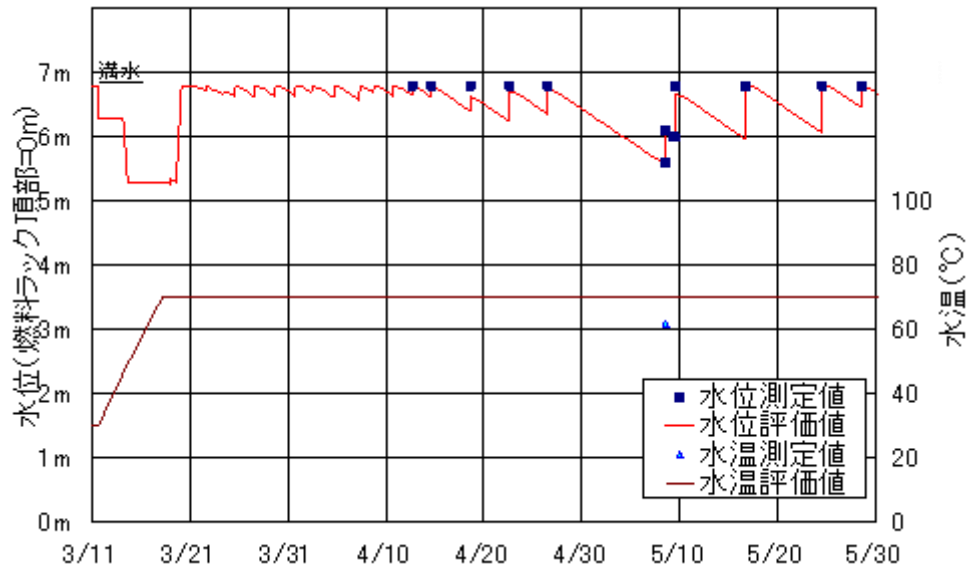


図 2-3 2号機SFP塩化物イオン濃度の評価結果



日付は平成 23 年の月/日を示す

図 2-4 3号機SFPの評価結果

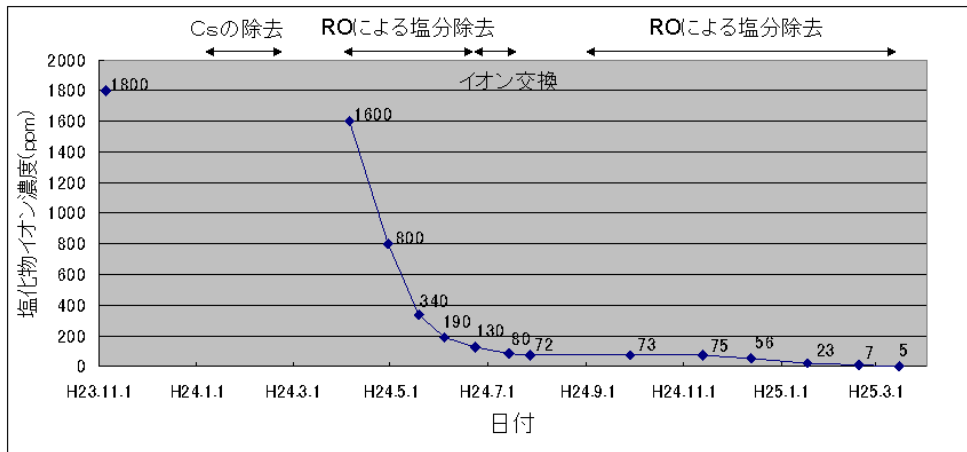
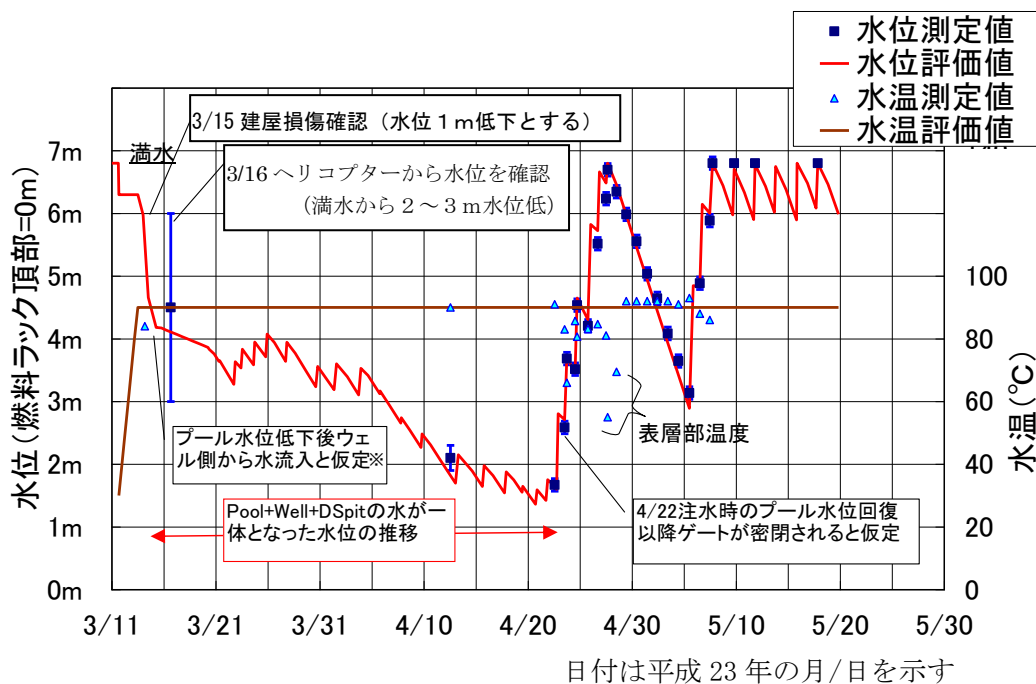


図 2-5 3号機SFP塩化物イオン濃度の評価結果



※ 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

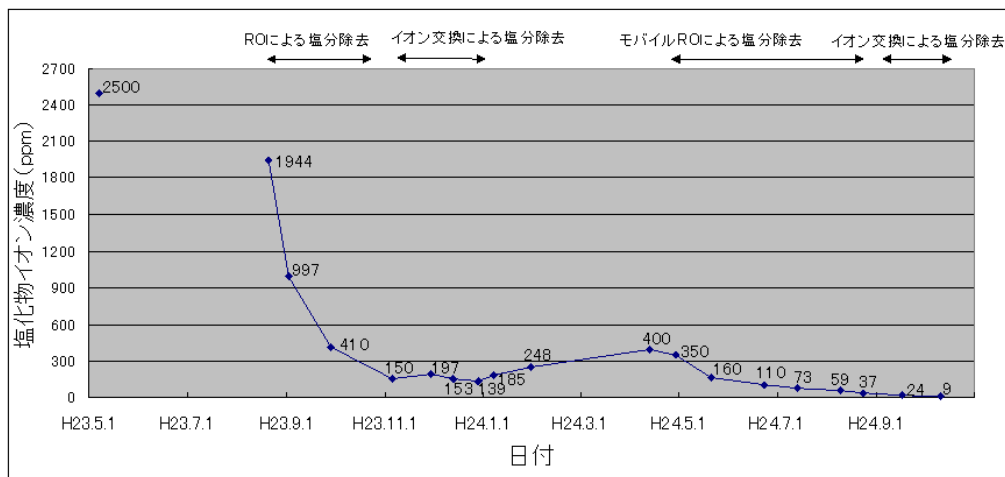


図 2-7 4号機 SFP 塩化物イオン濃度の評価結果

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、結合されてはいない。

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

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UTPまたはLTP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SFP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、 Ca(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SFP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。

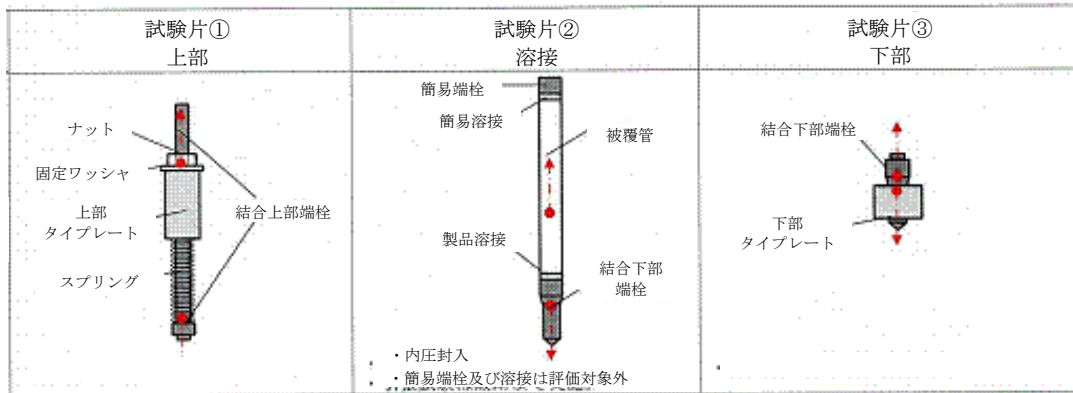
図4-8，図4-9にジルカロイ製部材（上部端栓）とステンレス製部材（ナット）の接触部を示す。ジルカロイ製部材とステンレス製部材の接触部にも腐食は確認されなかった。図4-10にLTPの観察結果を示す。LTPの一部分に僅かな錆が見られたが，全体的に有意なキズも腐食もない状況であった。尚，錆は限定的であり，腐食の集中による荷重負担部材の強度が低下する可能性は小さく，吊上げ機能には影響しないと考える。

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	
					有	○	—	○	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			

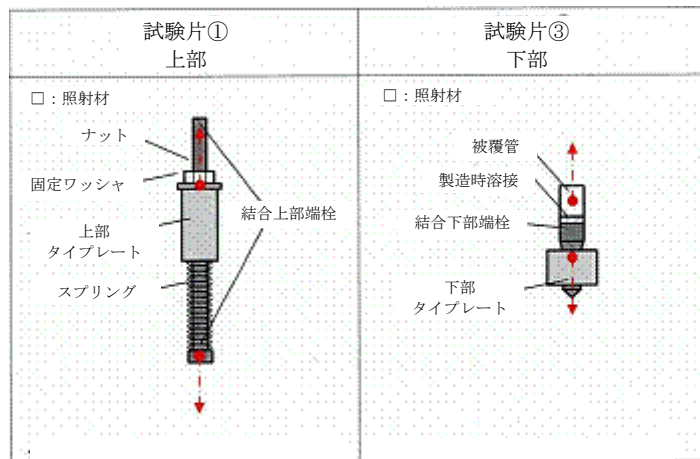
○は試験時間 2 条件 (2000h, 3500h), △は試験時間 1 条件 (3500h), ▲は試験時間 1 条件 (2000h) を示す。

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 UTP	ステンレス鋼
3 LTP	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

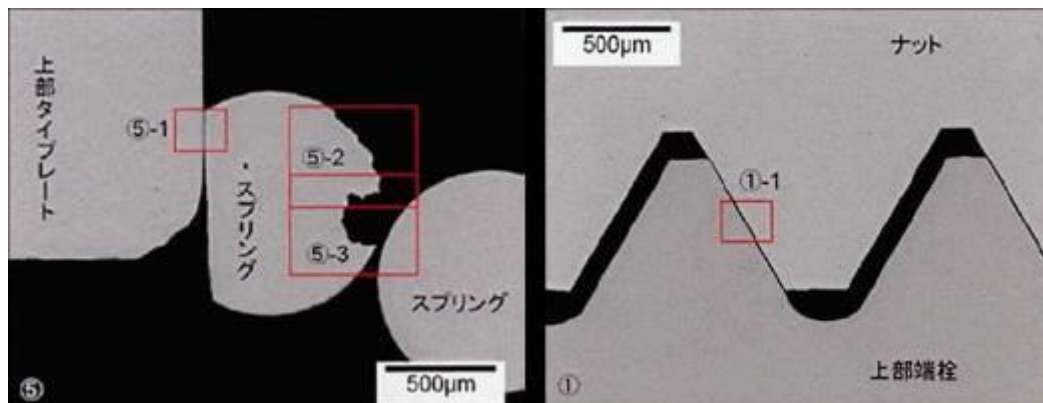
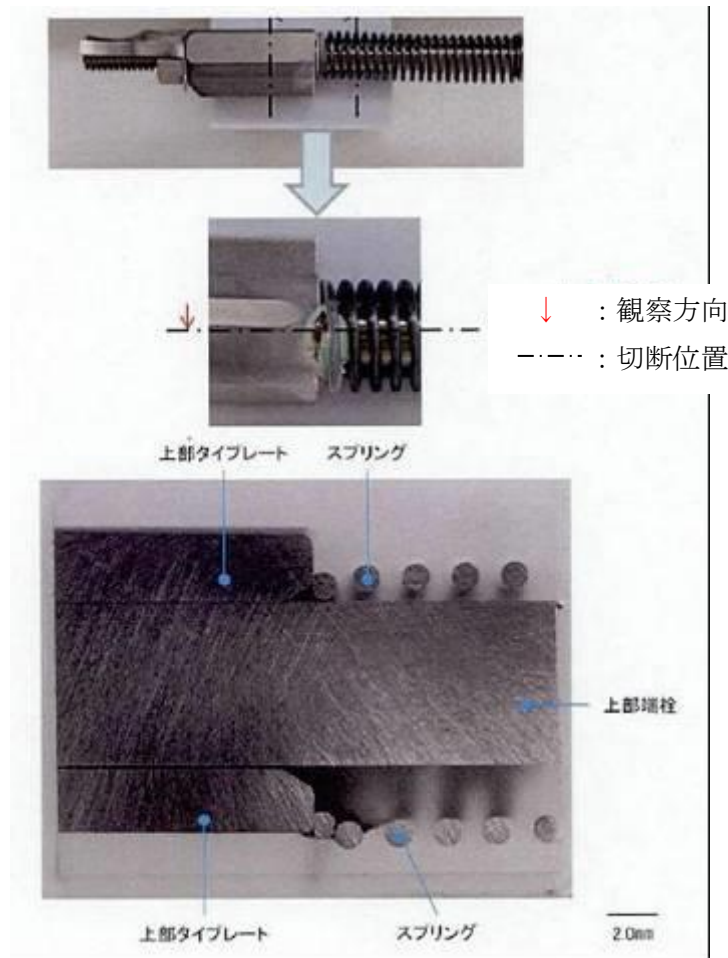


図4-1 腐食試験結果（試験片①，未照射材）：フェーズ1
 (90℃ 塩化物イオン濃度：6000ppm(1200時間)，2500ppm，3500時間浸漬)
 【予備酸化無し】

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

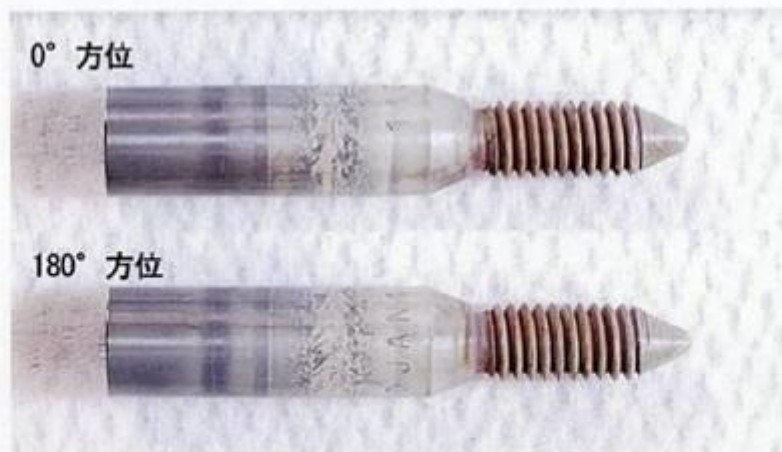
図4-3 腐食試験結果 (試験片③, 未照射材) : フェーズ1
(90℃ 塩化物イオン濃度 : 6000ppm(1200 時間), 2500ppm, 3500 時間浸漬)
【予備酸化無し】

浸漬試験前



(a) C65C7CZ01-全体写真

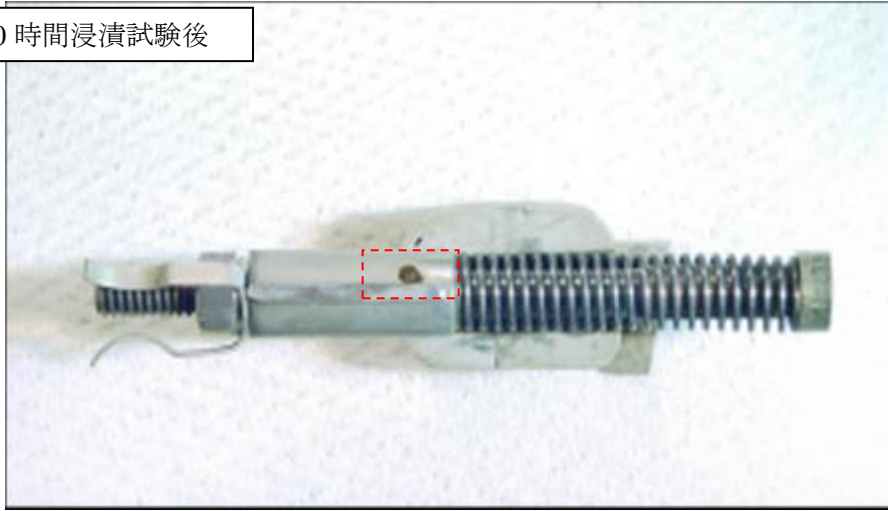
2000 時間浸漬試験後



(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°C 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°C 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)

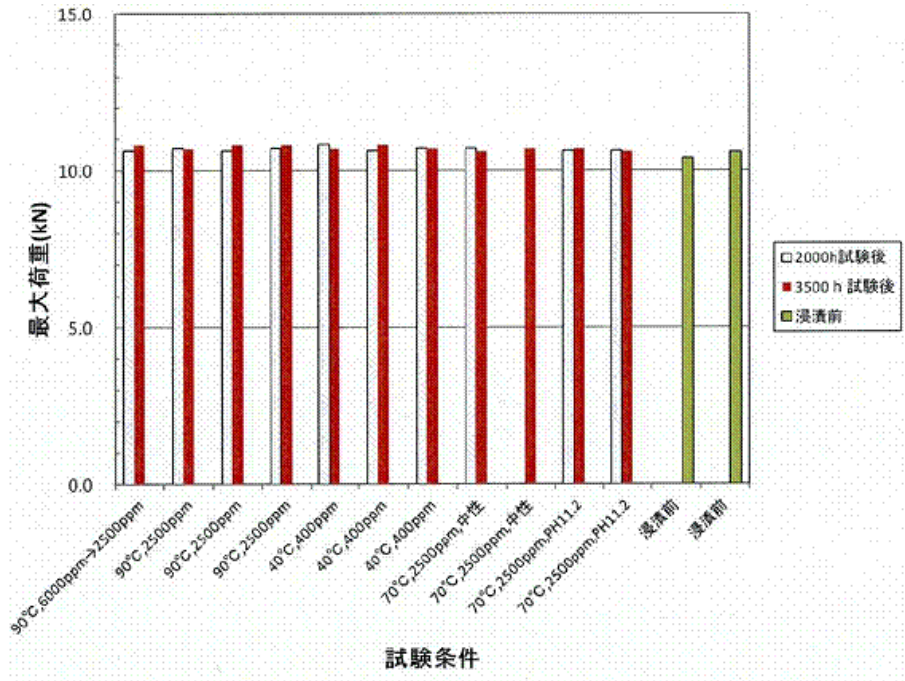


図4-6 浸漬試験後引張試験時の最大荷重比較
(未照射試験片① 予備酸化無し)

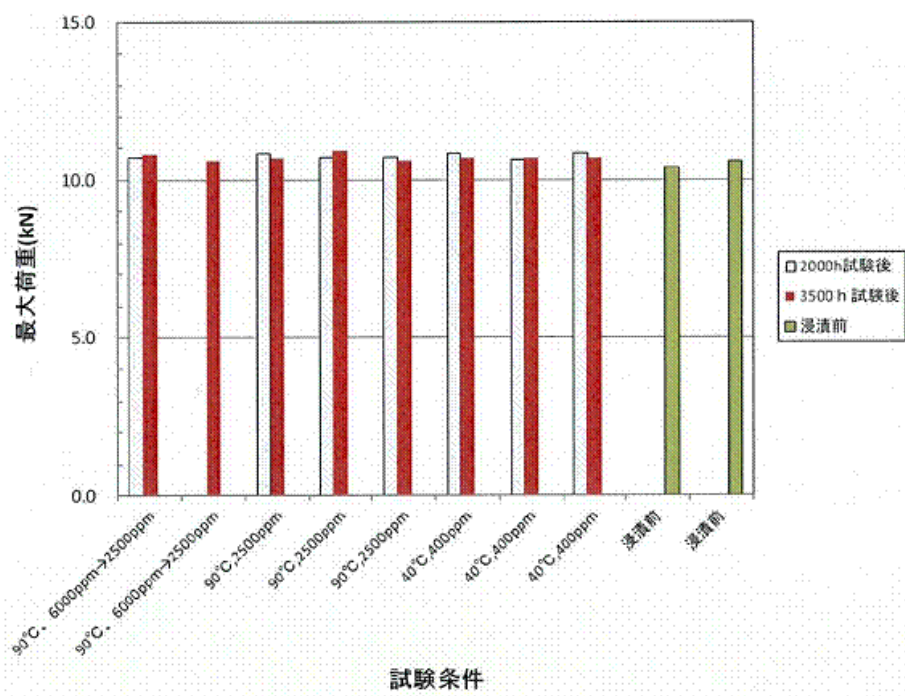


図4-7 浸漬試験後引張試験時の最大荷重比較
(未照射試験片① 予備酸化有り)

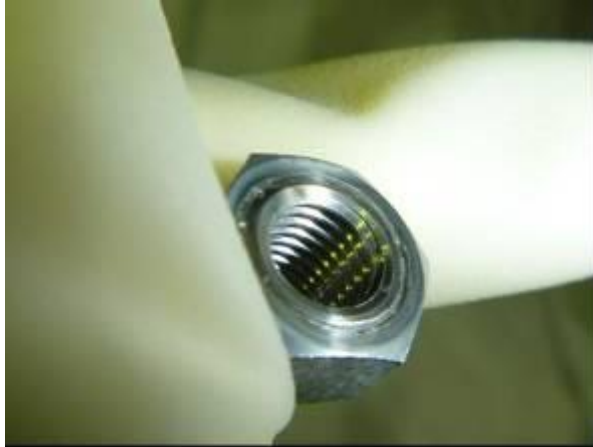
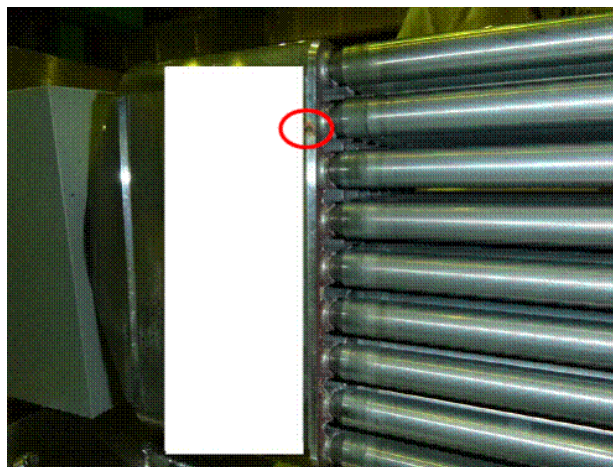


図4-8 4号機新燃料点検結果（ナット）：平成24年8月



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



白色部はメーカー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を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	: 5m
落下体重量	: 約100kg

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则认为ることから、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。燃料被覆管は長いいため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/mm²] (91300[N/mm²] @100°C)
- A : 燃料被覆管断面積[mm²]
- 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[mm⁴]
- 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/mm²]

(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5-10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5-11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/mm ²]
M	: 曲げモーメント[N・mm]
Z	: 断面係数[mm ³]
σ_a	: たわみ発生以降の最大発生応力（曲げ+圧縮）[N/mm ²]

(2) 解析結果

図5-12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5-13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5-14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な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SFPと4号機SFP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SFP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 ライナ燃料	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15μm^[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 ライナ燃料	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	Pcr	$\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(Lsp8)^2}$	1.7	1.7	1.7	0.9	1.0
UTP 下降 量	mm	Xcr	Pcr/K	2.5	2.5	2.4	1.9	1.9
発生応力	N/mm ²	σ_{cr}	Pcr/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ジルコニウムライ付燃料以前の燃料は、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 CB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
CF部の傾き	30°	CB変形燃料の水中カメラ映像では、CF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

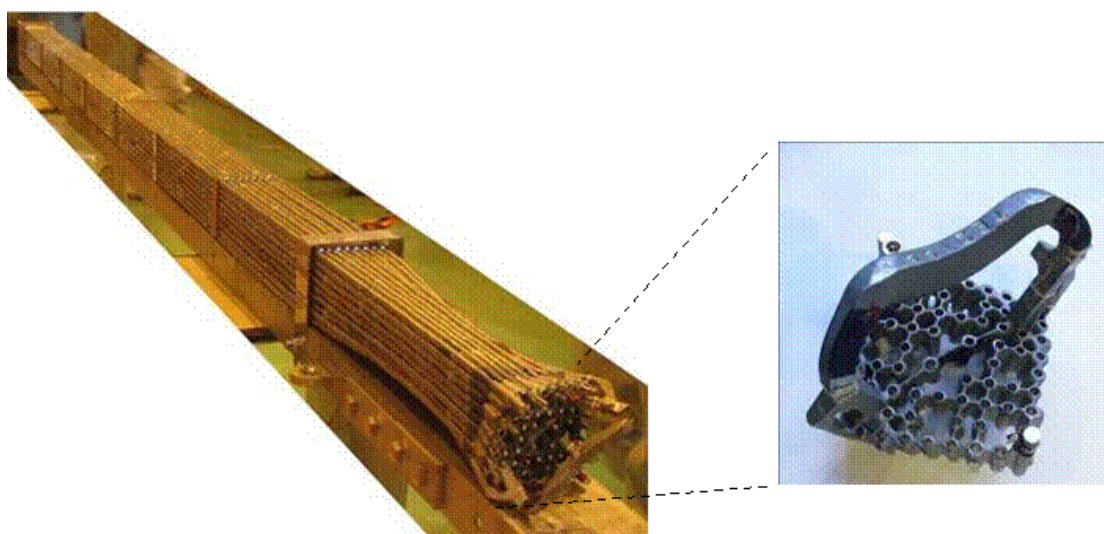


図 5 - 1 がれき落下衝撃試験の結果

<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。

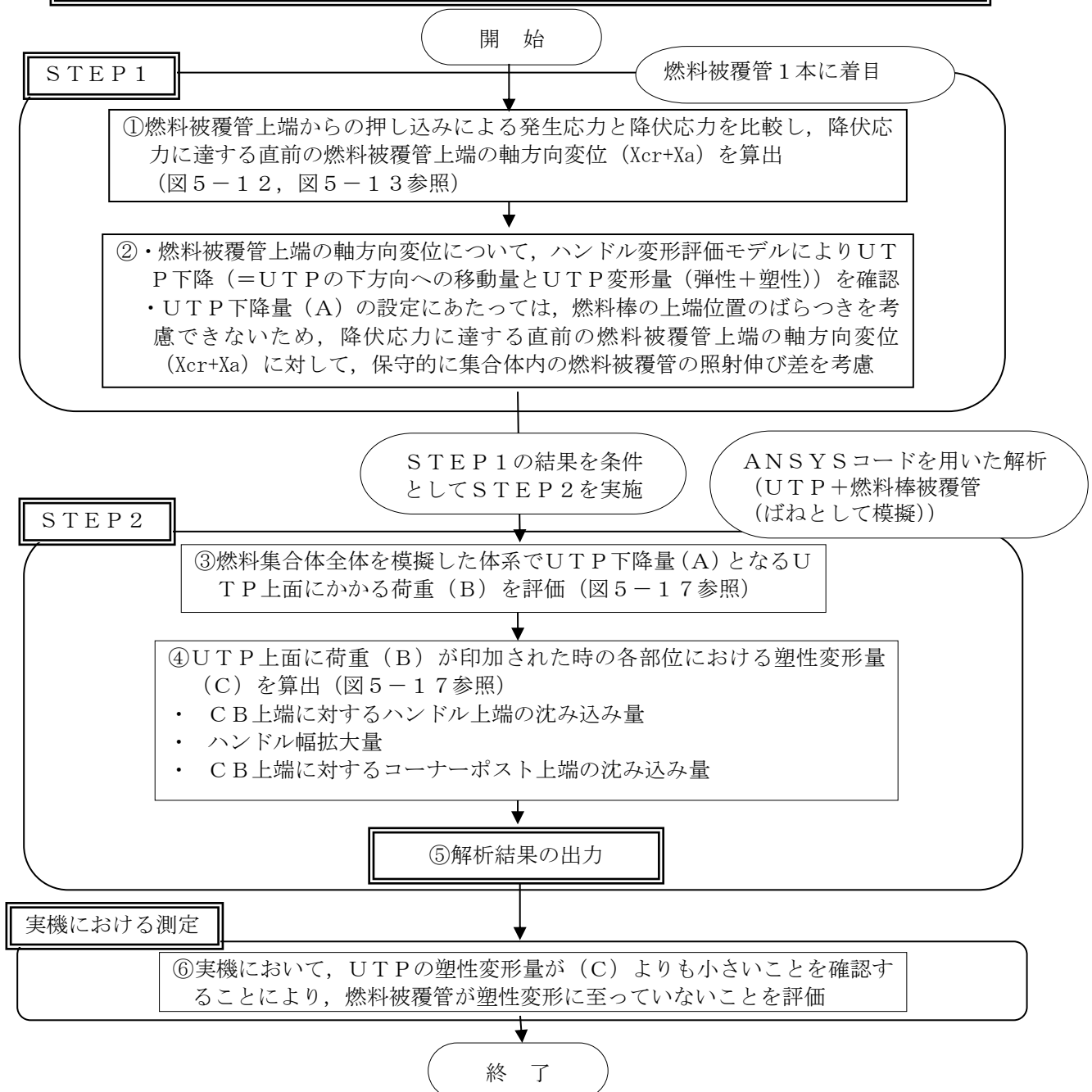


図5-2 UTPに残留する塑性変形量の解析フロー図

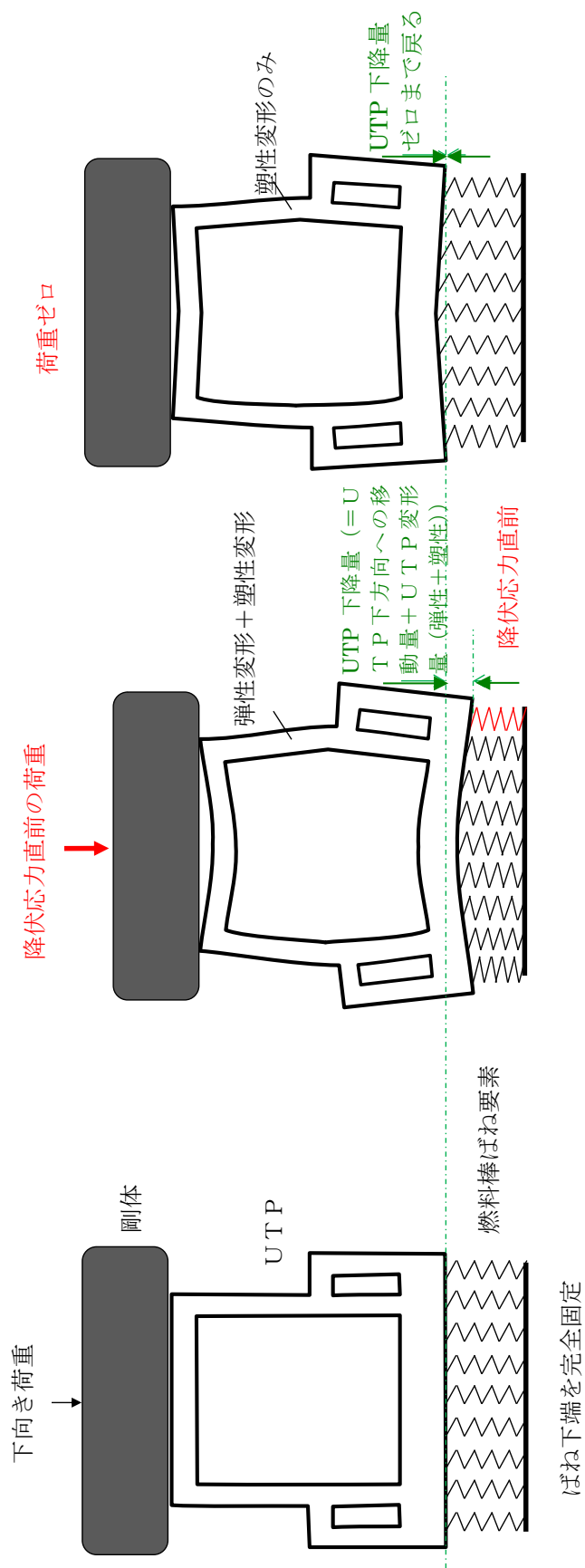
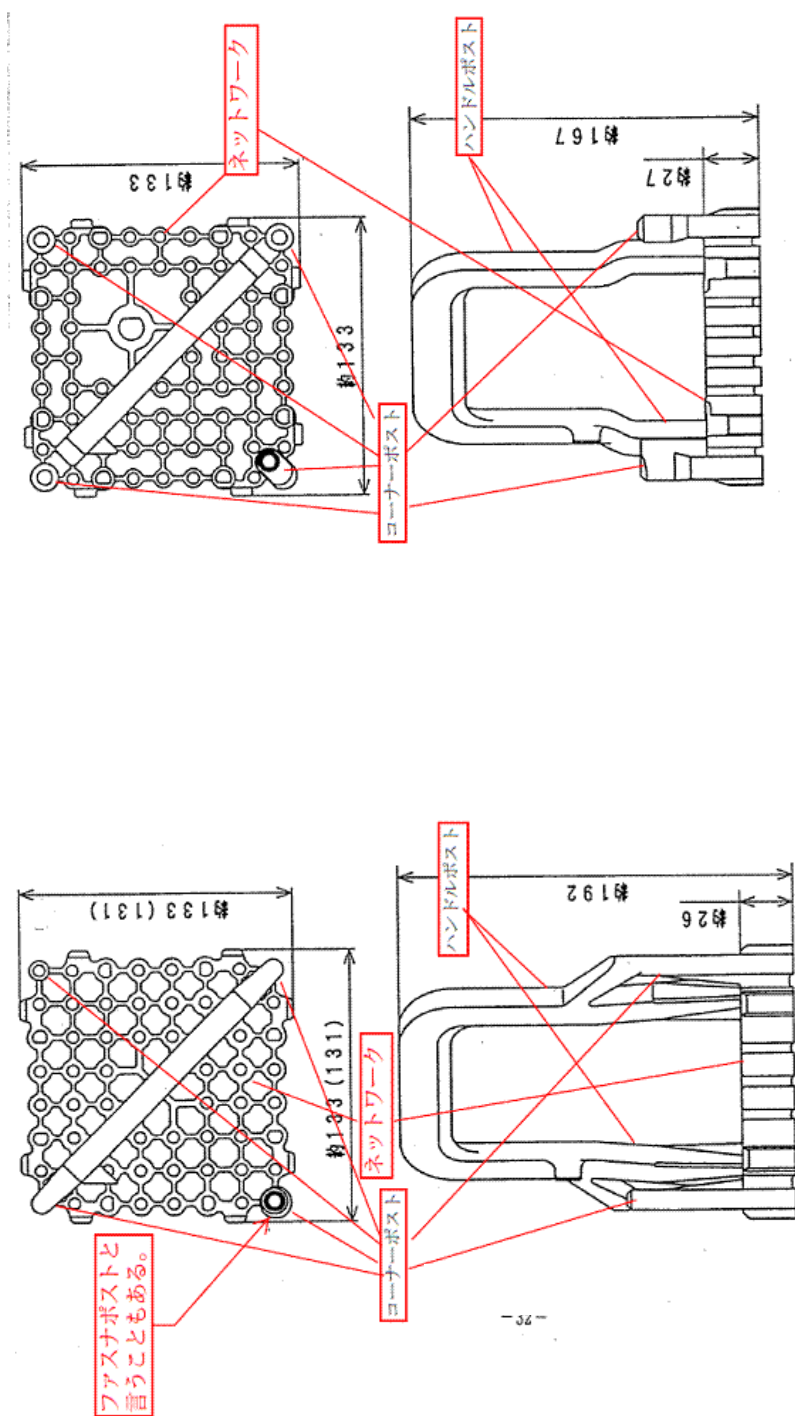


図 5-3 解析モデルの概要



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

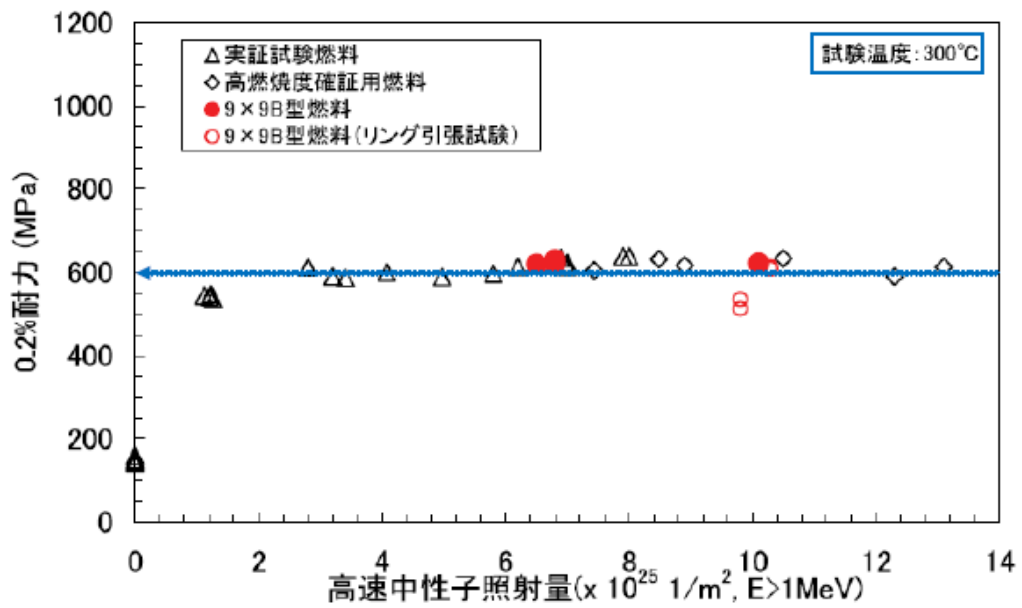
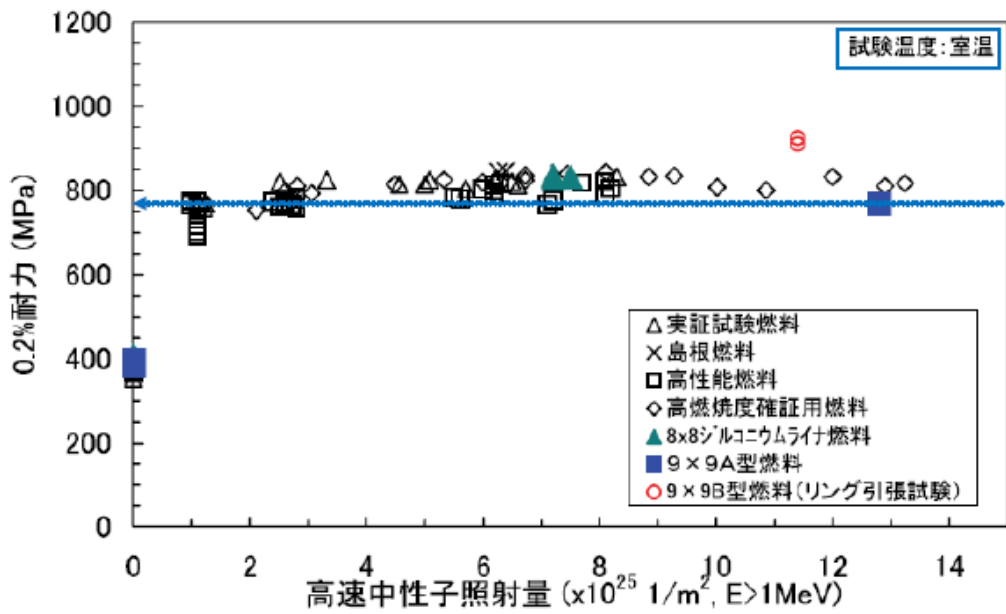


図 5-5 ジルコニウム合金の降伏応力 (0.2%耐力) 評価^[3]

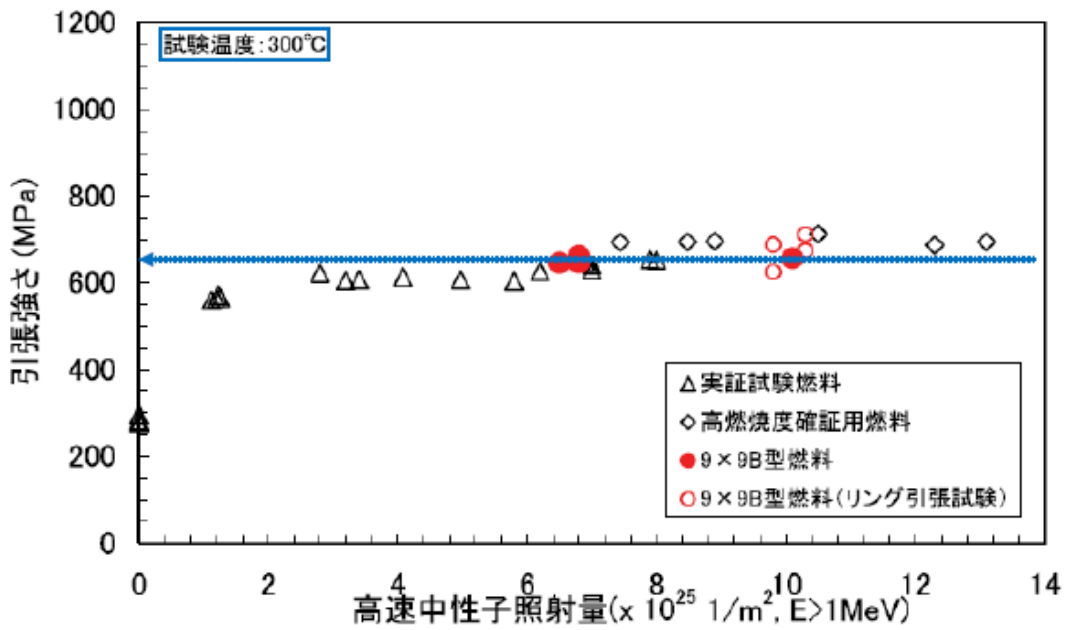
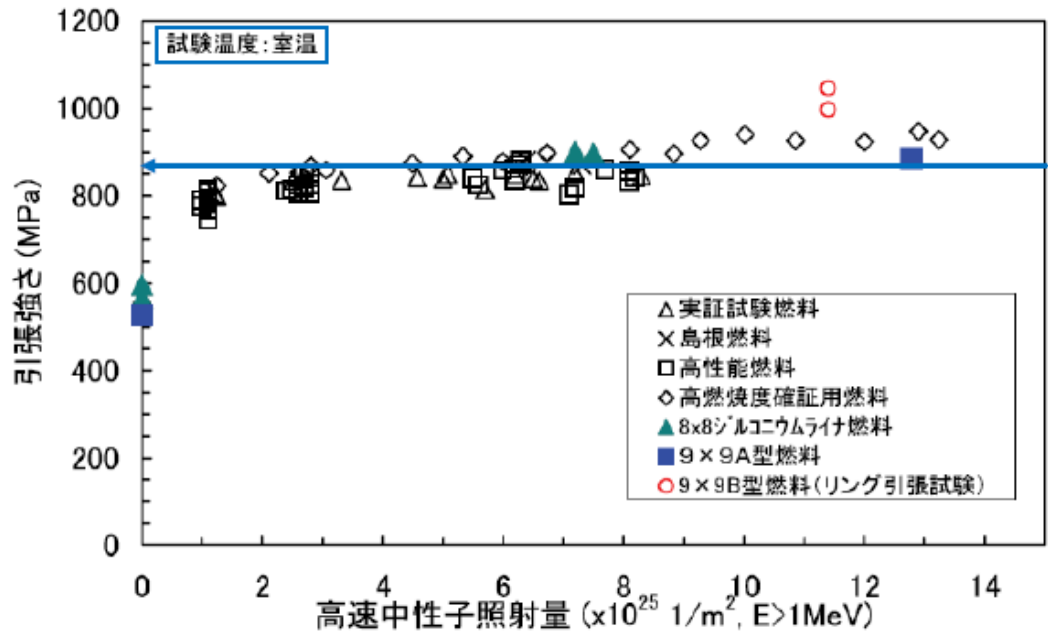
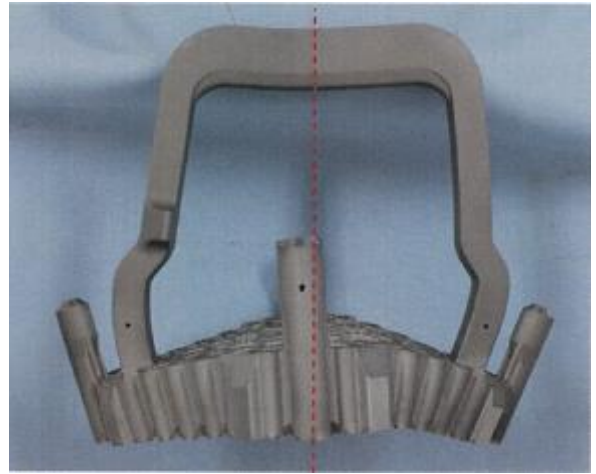


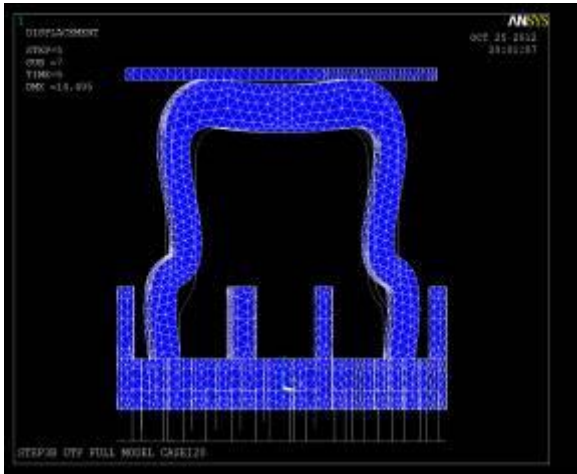
図5-6 ジルコニウム合金の引張り強さ評価^[3]



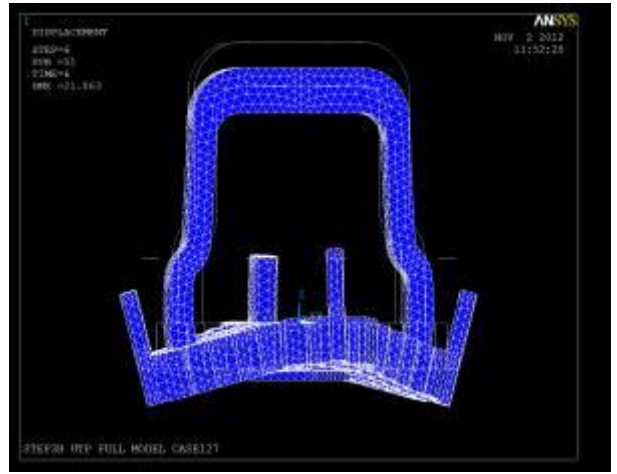
ハンドルを変形させる試験



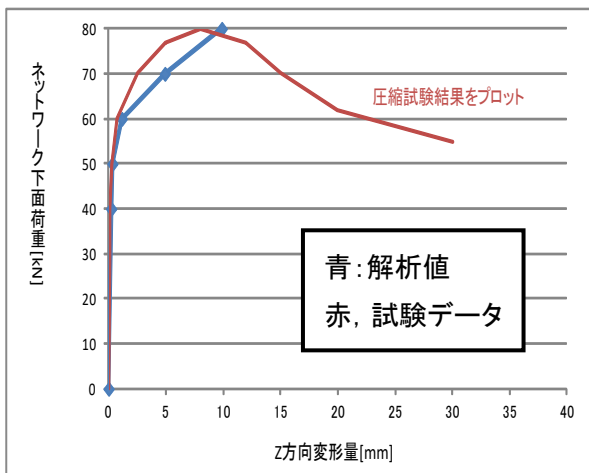
ネットワークを変形させる試験



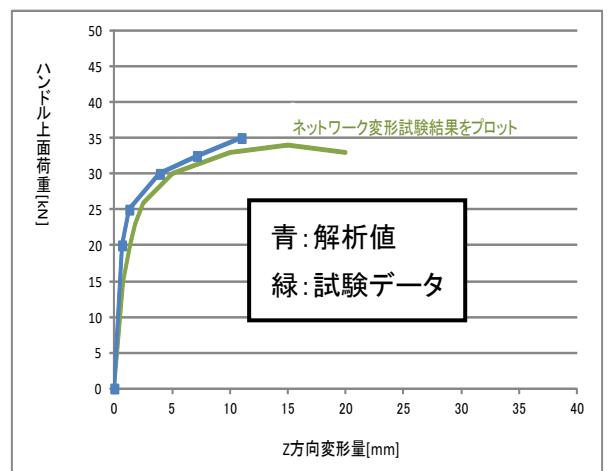
ハンドルを変形させる解析



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

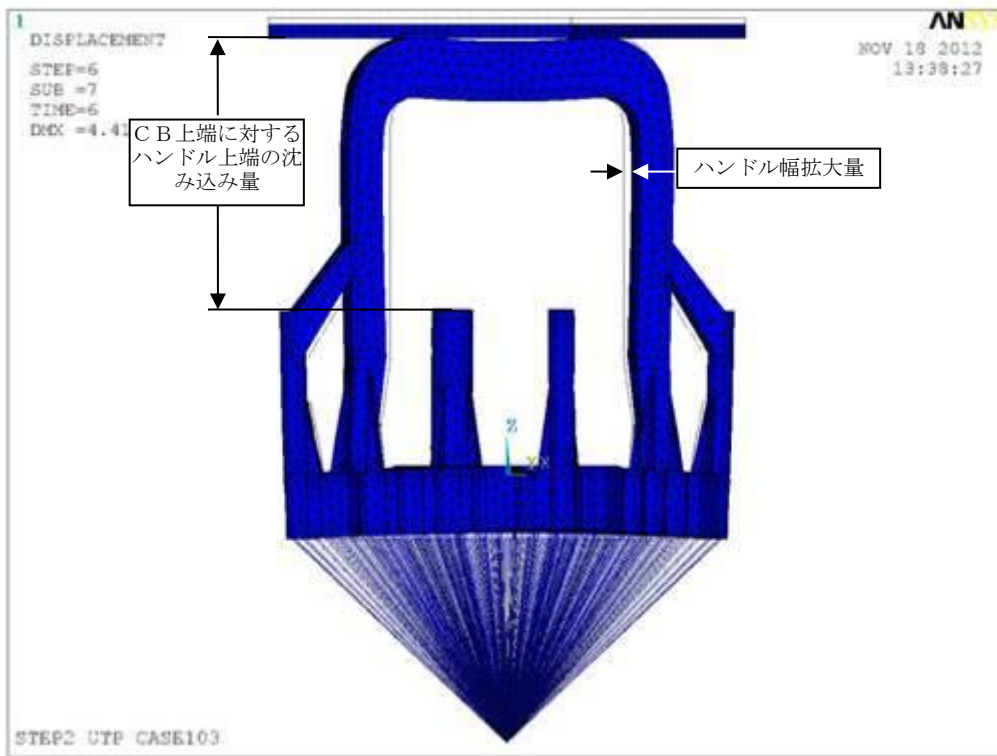


図 5 - 8 典型的なUTP塑性変形の外観図（高燃焼度8×8燃料）

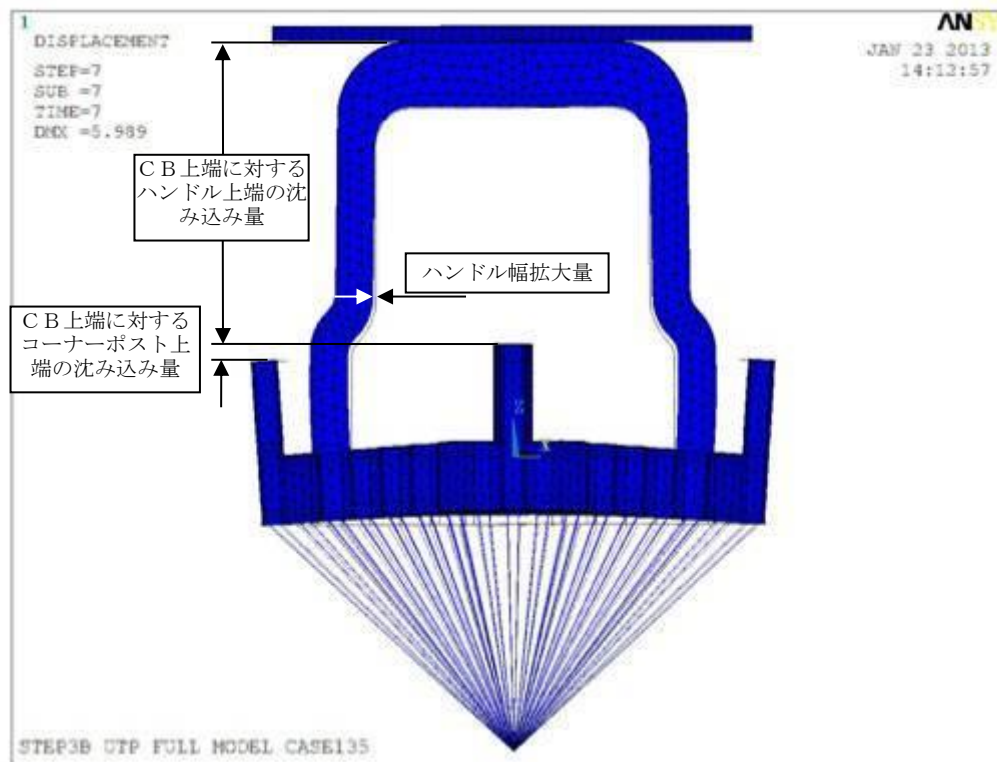


図 5 - 9 典型的なUTP塑性変形の外観図（9×9燃料（B型））

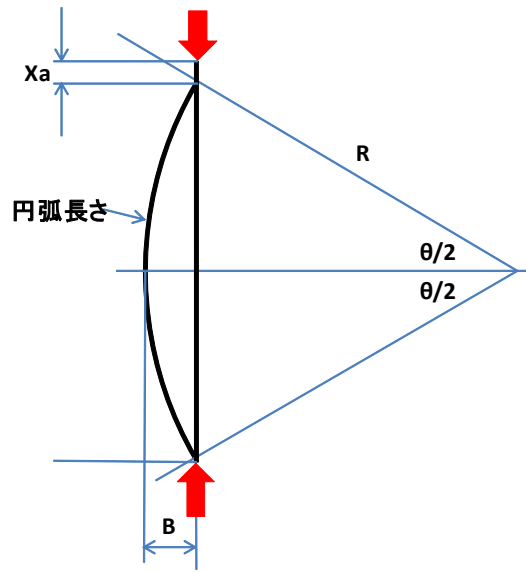


図 5 - 1 0 たわみの幾何学的評価の模式図

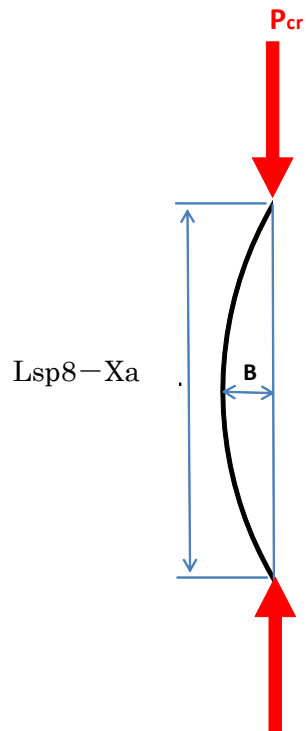


図 5 - 1 1 たわみの材料力学的評価の模式図

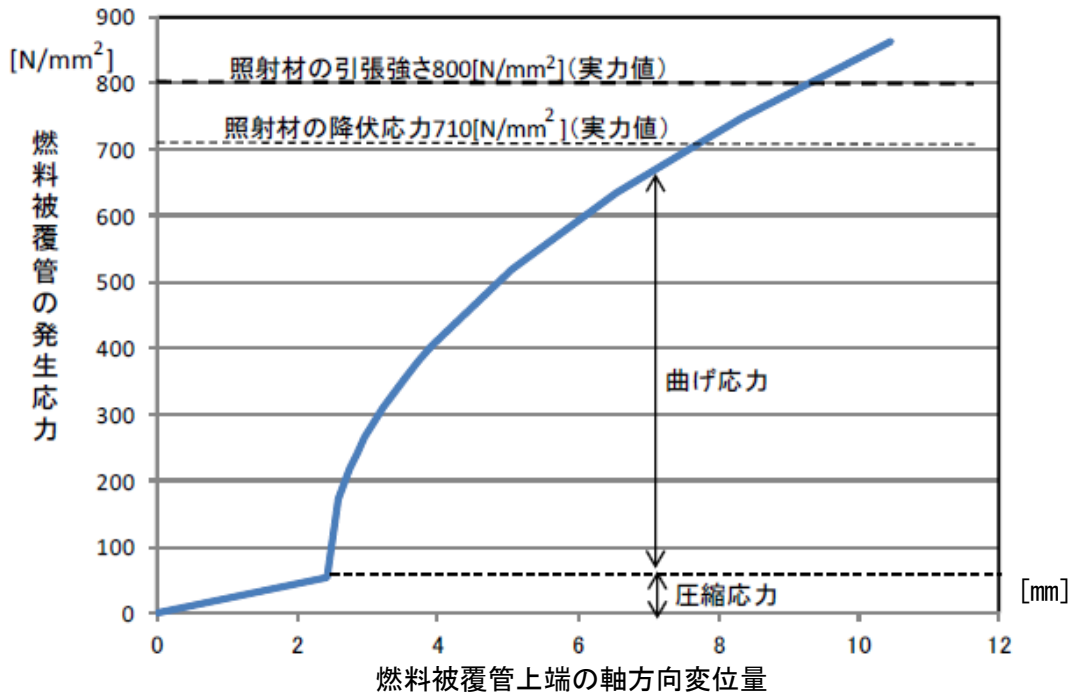


図5-12 燃料被覆管上端の軸方向変位 ($X_{cr}+X_a$) による燃料被覆管発生応力 (σ_a)
(高燃焼度 8×8 燃料)

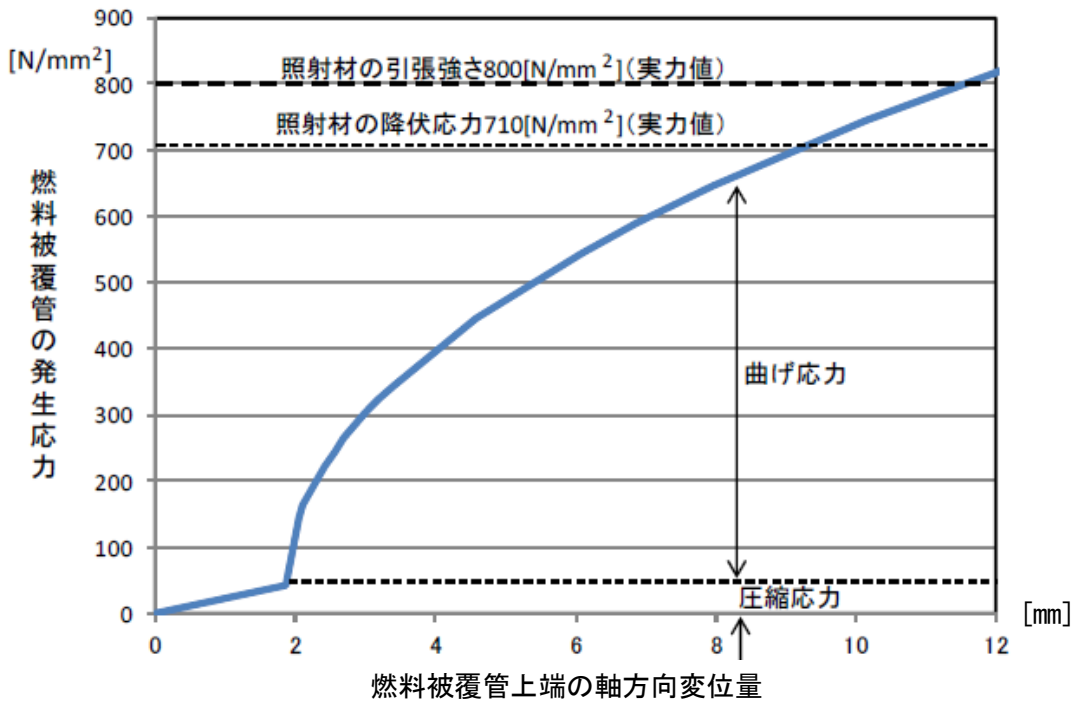


図5-13 燃料被覆管上端の軸方向変位 ($X_{cr}+X_a$) による燃料被覆管発生応力 (σ_a)
(9×9 燃料 (B型))

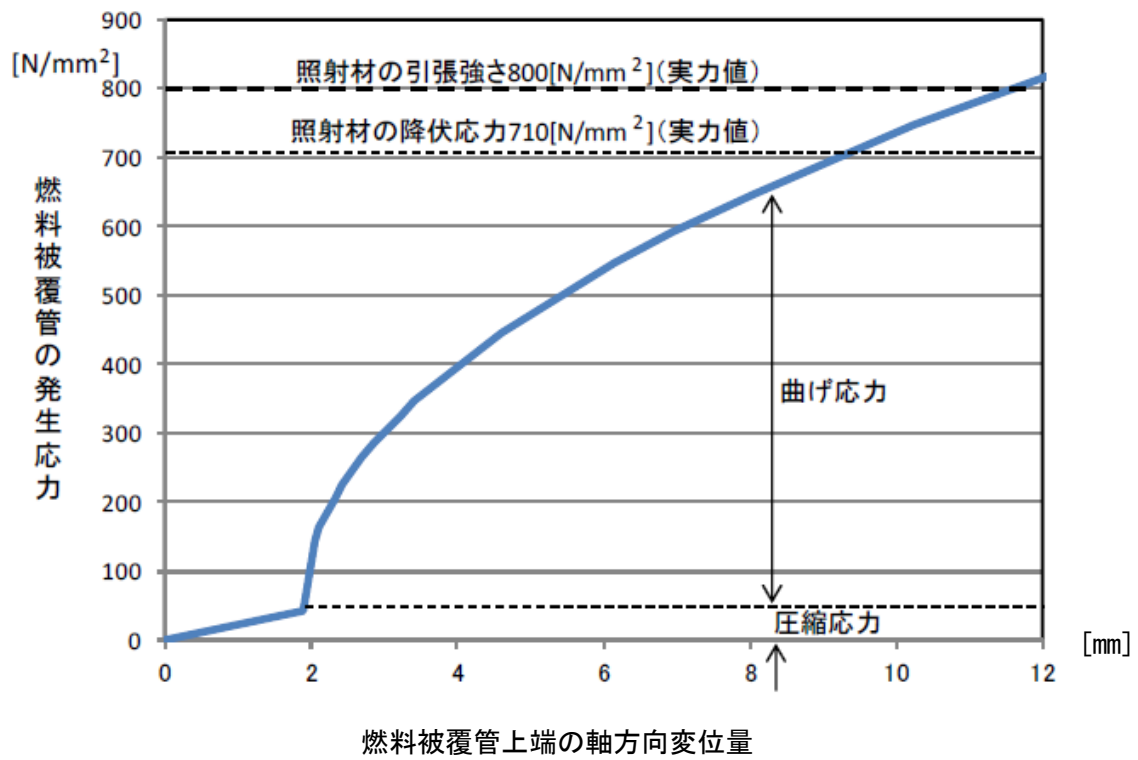
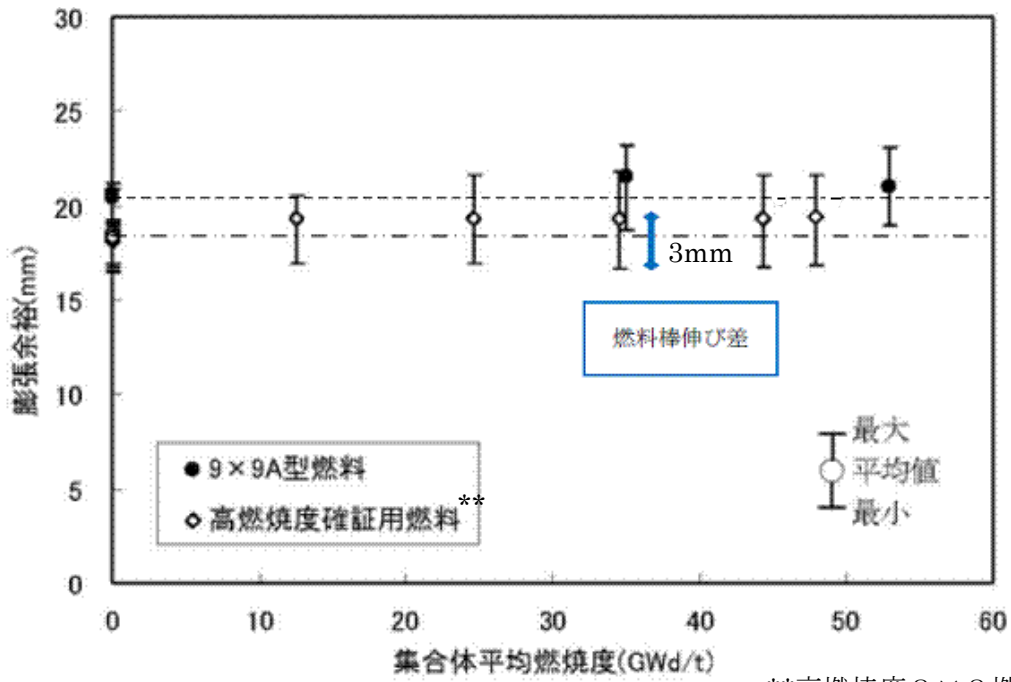


図 5 - 1 4 燃料被覆管上端の軸方向変位 ($X_{cr}+X_a$) による燃料被覆管発生応力 (σ_a)
(9 × 9 燃料 (A 型))



**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]

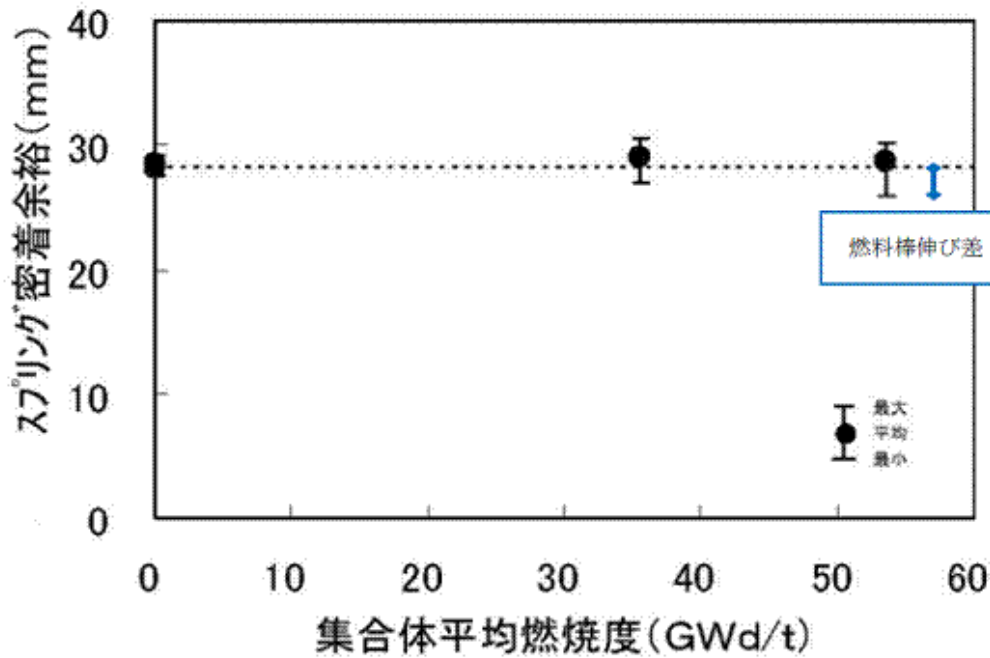
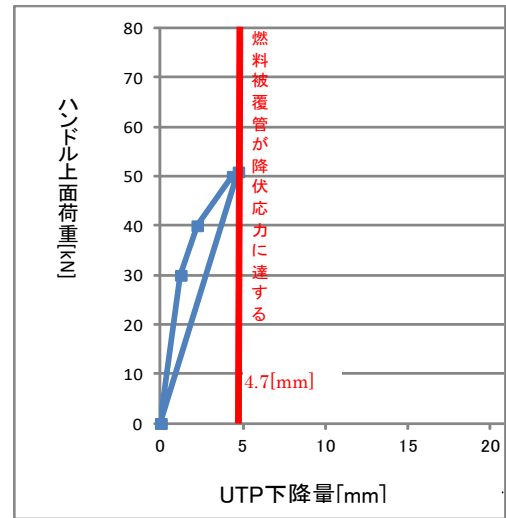
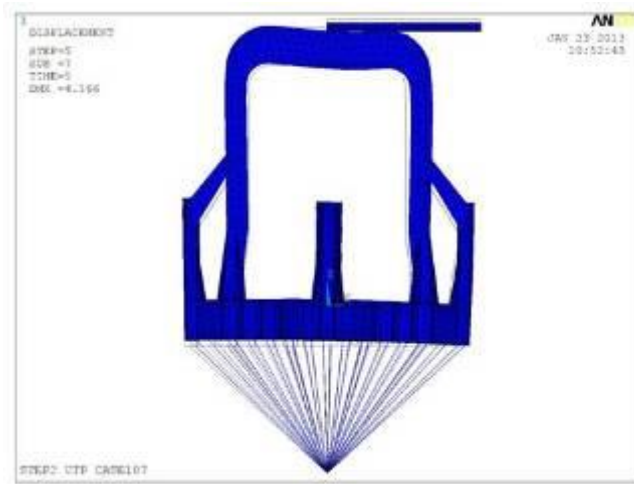
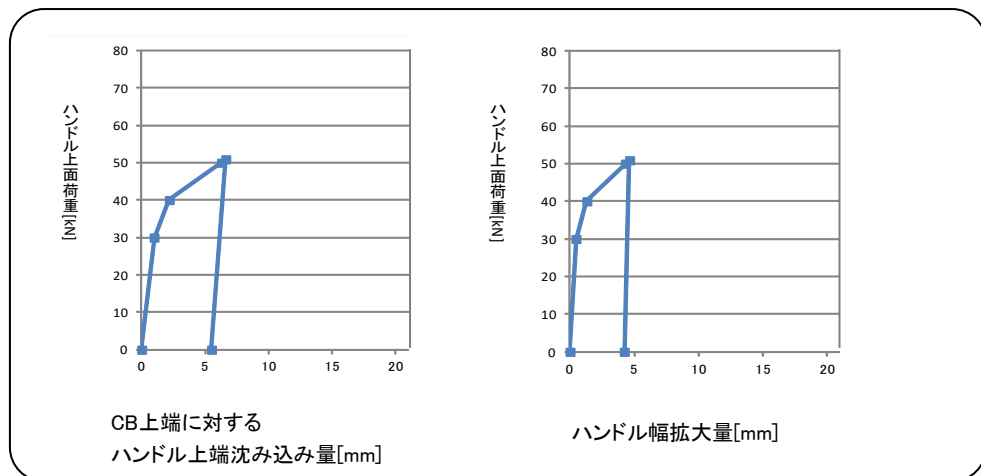
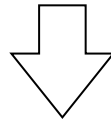


図 5-16 燃料棒伸び差の燃焼変化 (膨張スプリングのデータから評価)
(9 × 9 燃料 (B型)) [2]

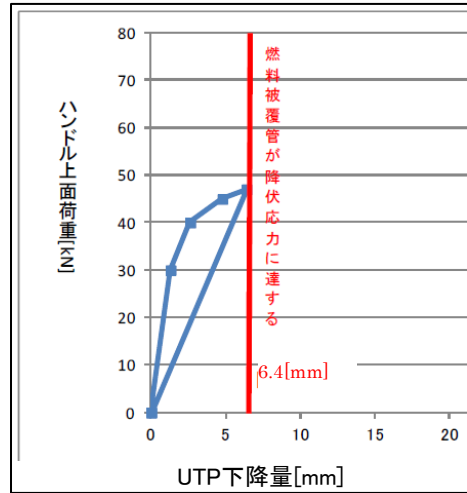
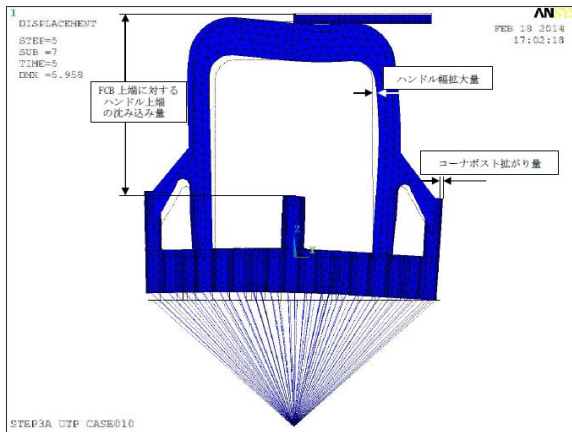


燃料被覆管が降伏応力を与える UTP 下降量に達する際にハンドル上面に付加される荷重を評価

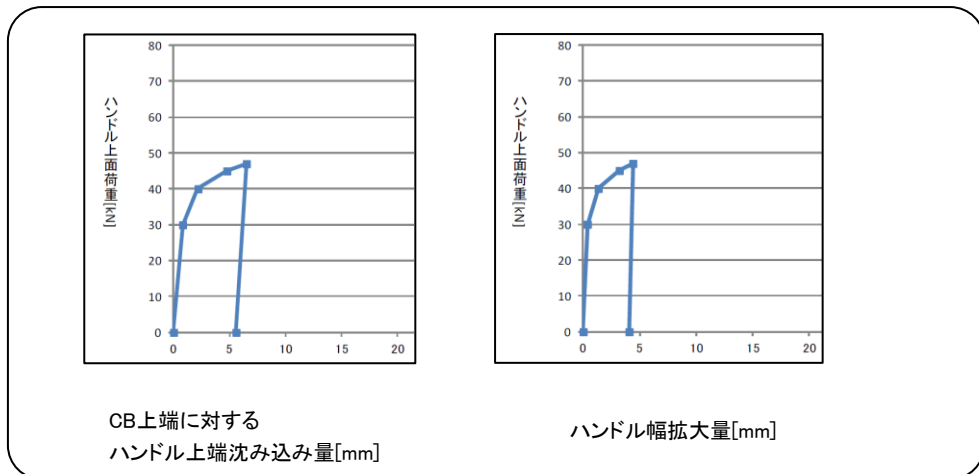
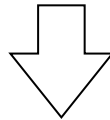


上記荷重が付加された場合の UTP 各部の塑性変形を評価

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 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 5-18 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
(単位%)

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

C F側
(単位%)

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C F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
(単位%)

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
(単位%)

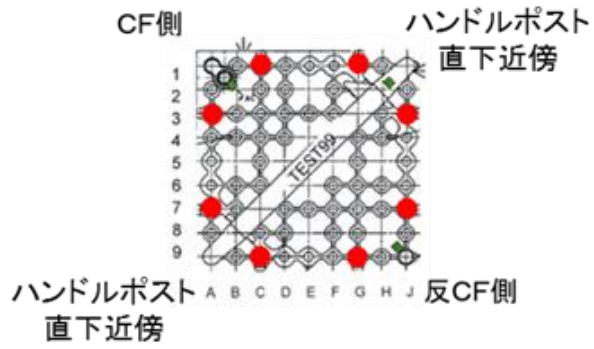
位置	A	B	C	D	E	F	G	H
1	0.1	0.2	0.1	0.7	1.3	3.4	4.4	6.9
2	0.2	1.2	0.3	0.7	1.0	1.9	1.7	2.1
3	0.3	0.4	0.5	0.4	0.3	2.1	0.5	2.5
4	0.7	0.9	0.4	0.1	2.8	0.2	3.7	0.1
5	1.7	1.5	0.6	3.3	0.0	0.1	0.2	1.6
6	4.1	2.6	2.1	0.1	0.1	0.2	0.2	1.0
7	5.5	2.2	1.3	3.8	1.7	0.2	0.3	0.2
8	9.9	4.0	4.4	1.5	2.9	0.3	0.2	0.2

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）

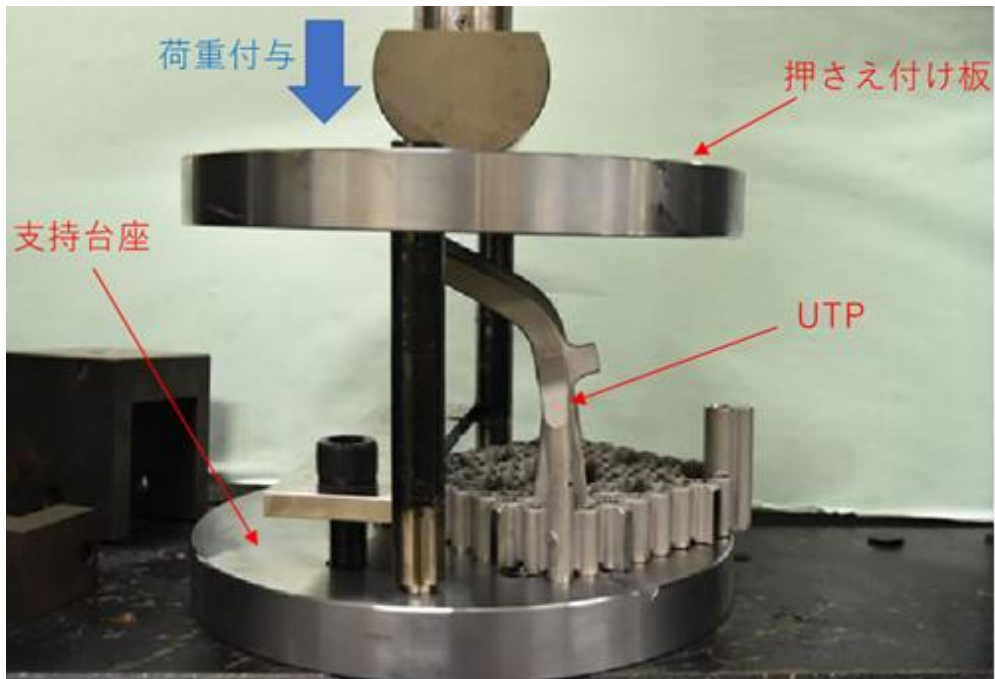


図 5 - 2 1 ハンドルへの変形付与装置

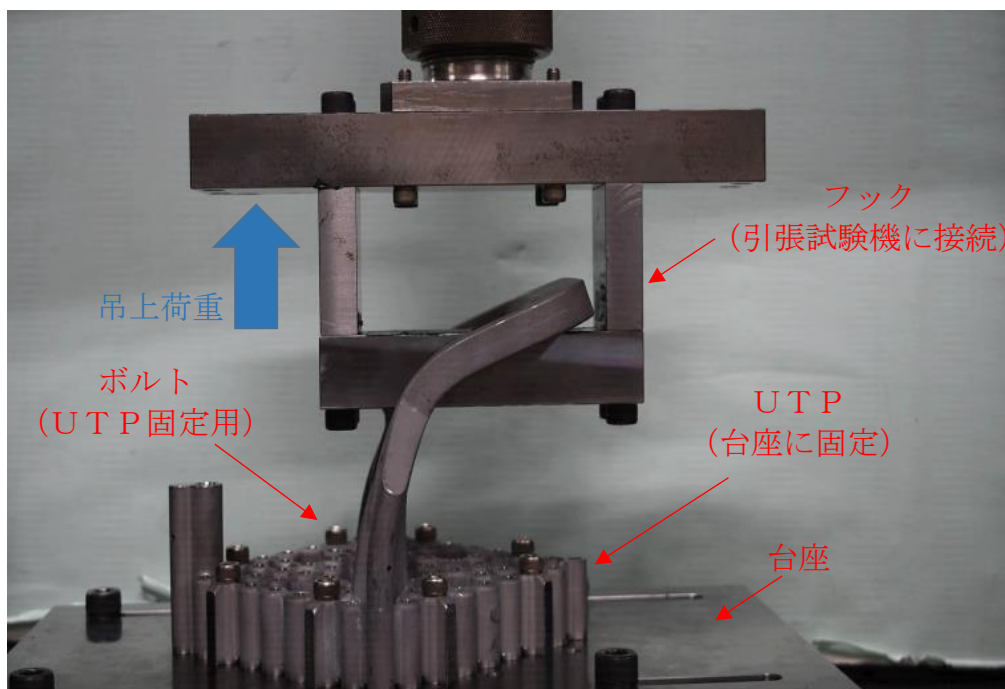


図 5 - 2 2 ハンドルの引張試験装置

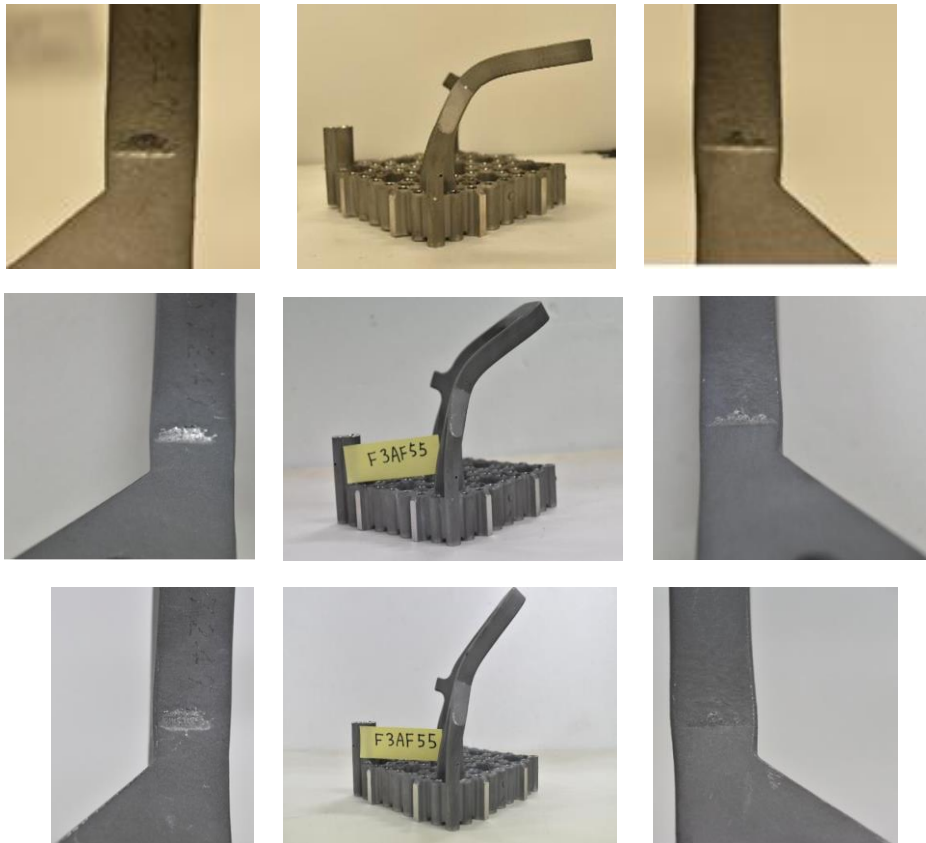
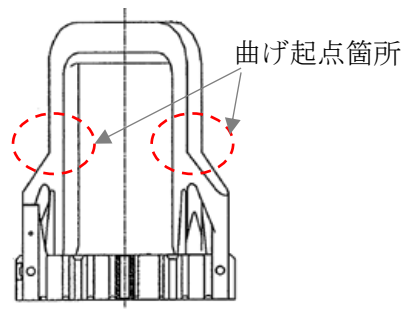


図5-23 9×9燃料（A型）ハンドルの引張試験前後の比較
 （上段：引張試験前 中段：13kN引張試験後 下段：26kN引張試験後）

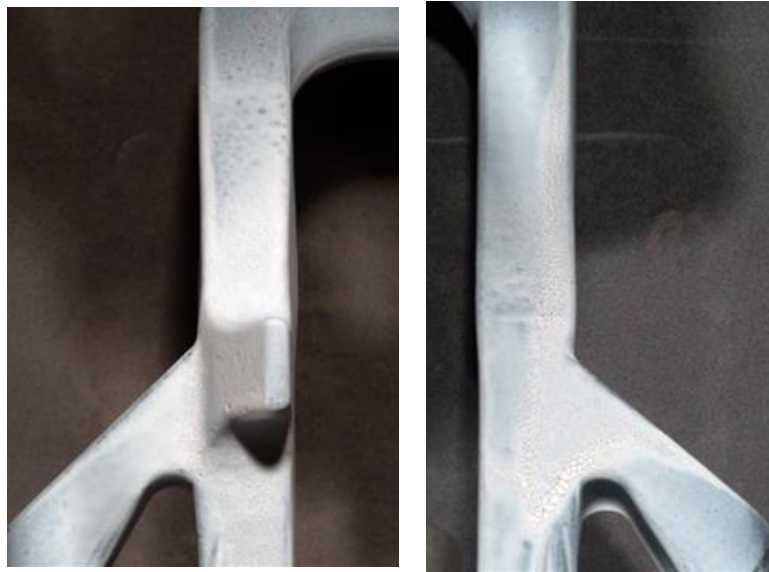


図 5-24 (1) ハンドル引張試験後の浸透探傷試験結果
(9×9燃料 (A型) 引張荷重 13kN)

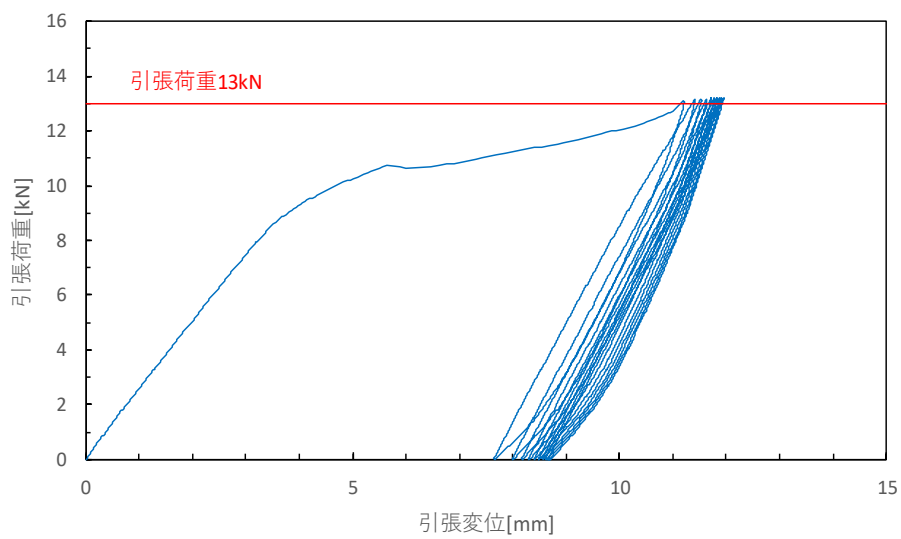


図 5-25 (1) ハンドル引張試験中の引張荷重—引張変位
(9×9燃料 (A型) 引張荷重 13kN)

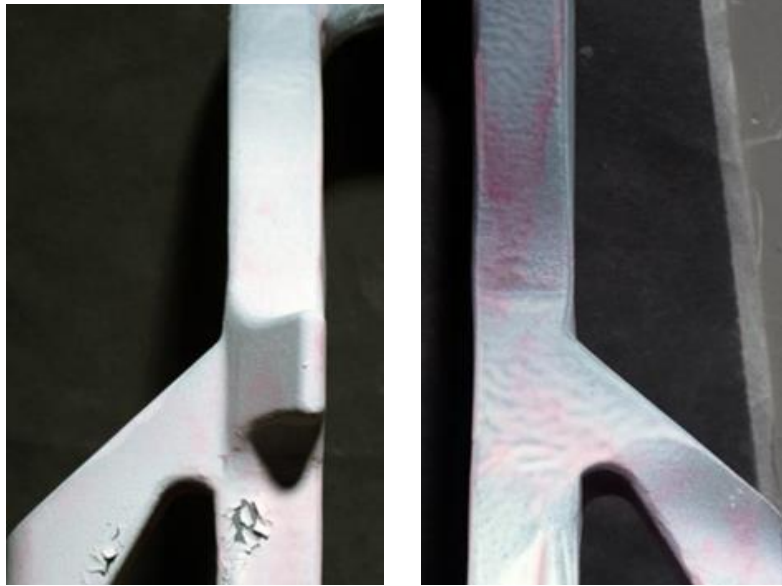


図 5 - 2 4 (2) ハンドル引張試験後の浸透探傷試験結果
(9 × 9 燃料 (A 型) 引張荷重 26kN)

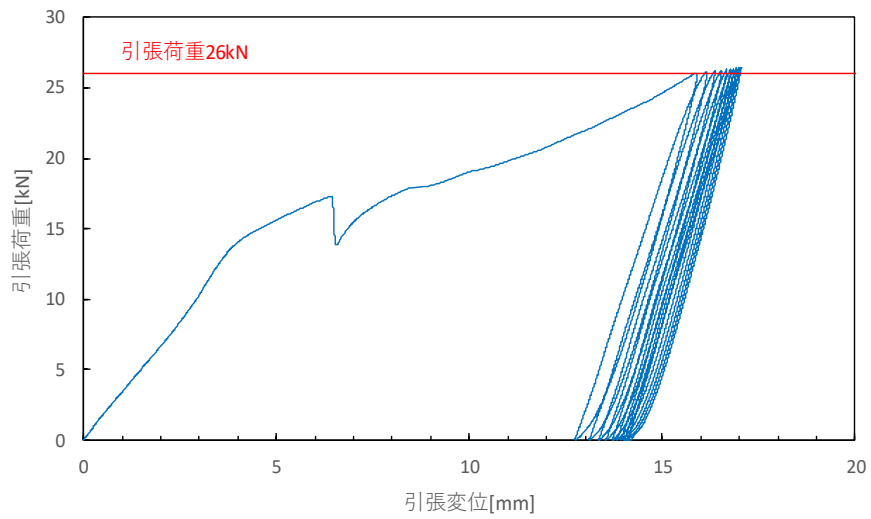


図 5 - 2 5 (2) ハンドル引張試験中の引張荷重—引張変位
(9 × 9 燃料 (A 型) 引張荷重 26kN)

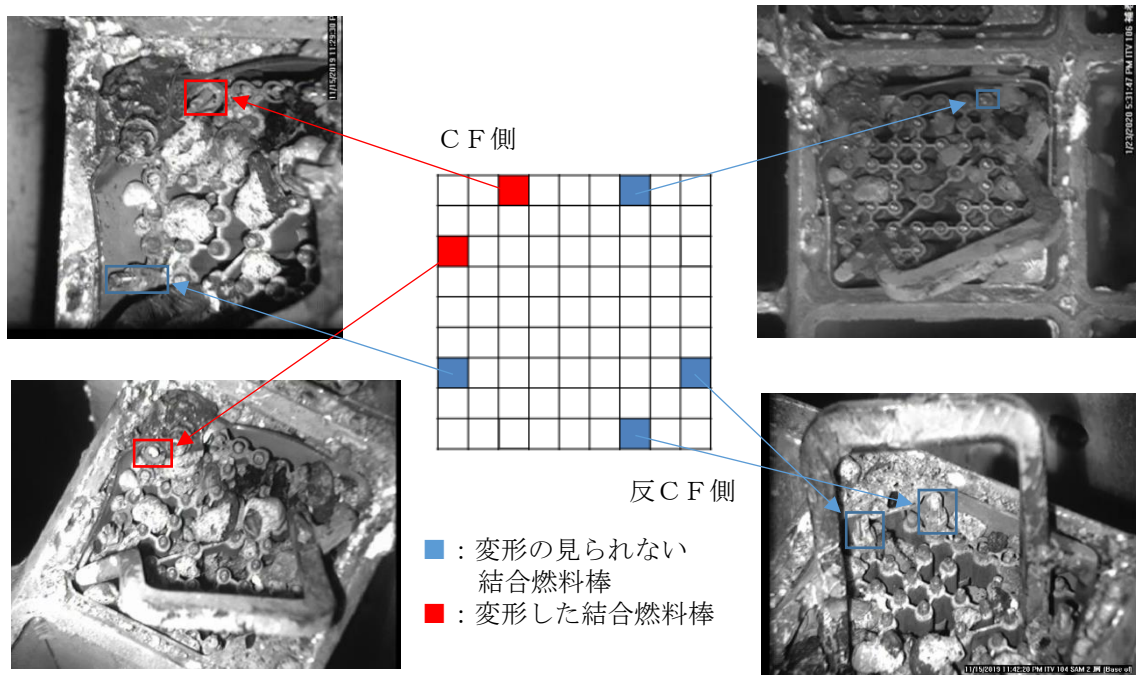


図 5 - 2 6 C B 変形燃料の結合燃料棒状況

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-22 B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-22 B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ことにより、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ハンドル部を吊った状態で、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CB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ことにより、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CBの間のがれきによって固着が発生した場合については、CBの断面で吊り上げ荷重を受けることになるが、CB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、CB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、CB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、CB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. 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。

6.3.1. 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6-15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。

6.3.2. 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



図6-1 4号機SFP内の状況（その1）



図6-2 4号機SFP内の状況（その2）

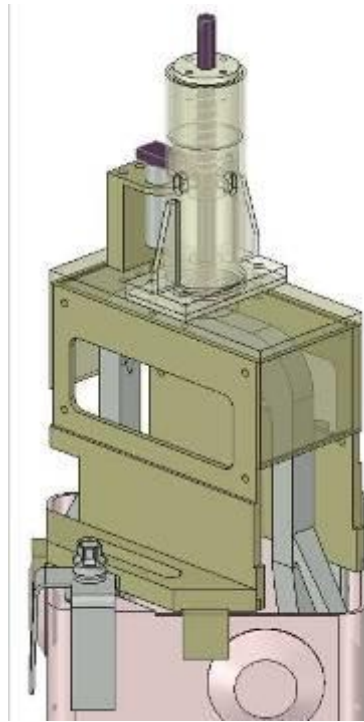


図 6 - 3 燃料健全性確認用治具（概念図）：高燃焼度 8×8 燃料用

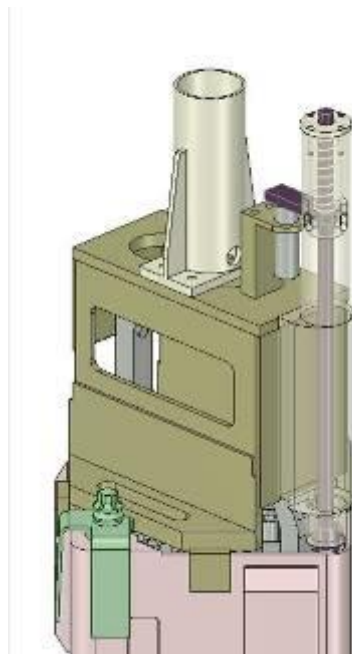


図 6 - 4 燃料健全性確認用治具（概念図）： 9×9 燃料（B型）用

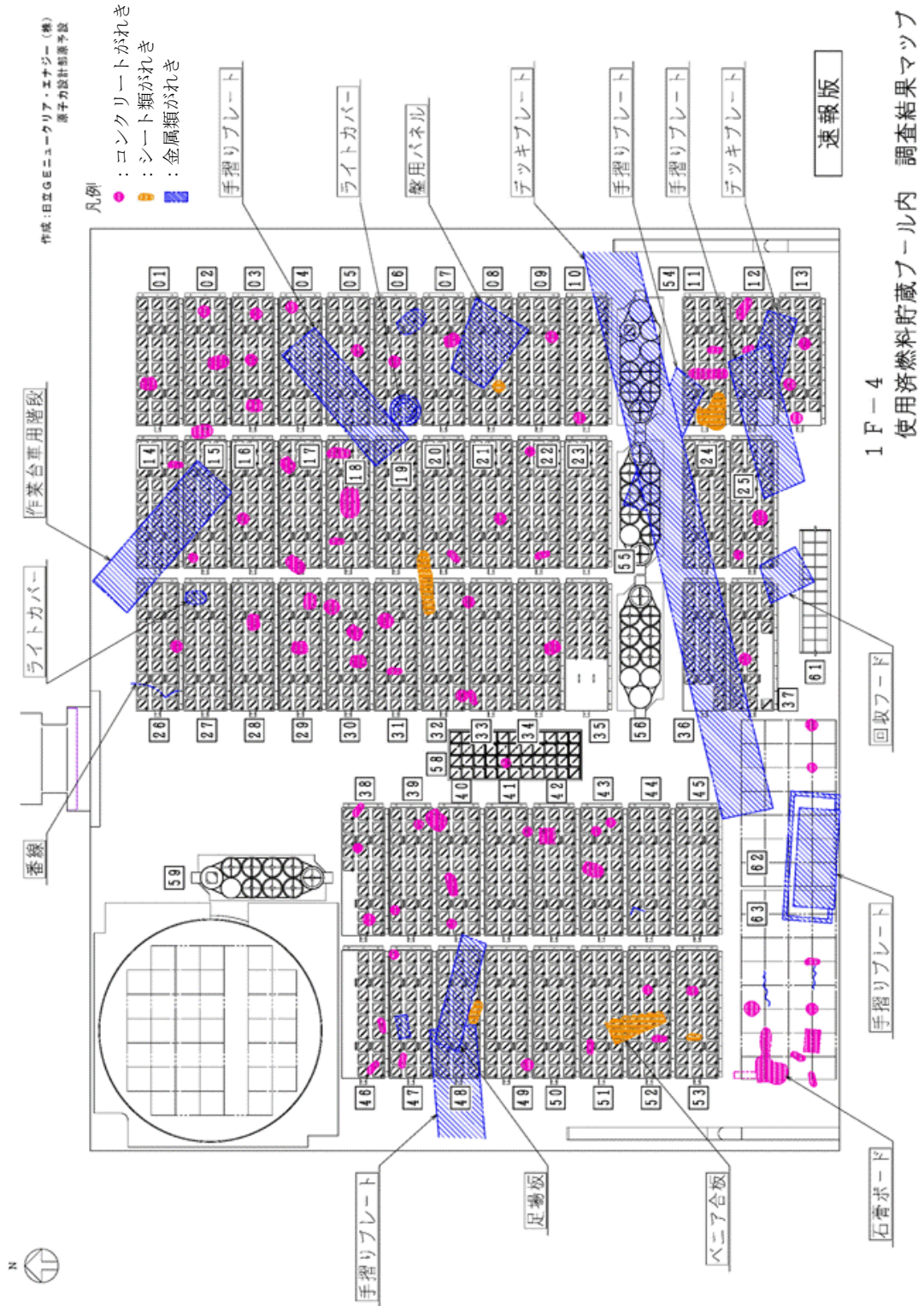
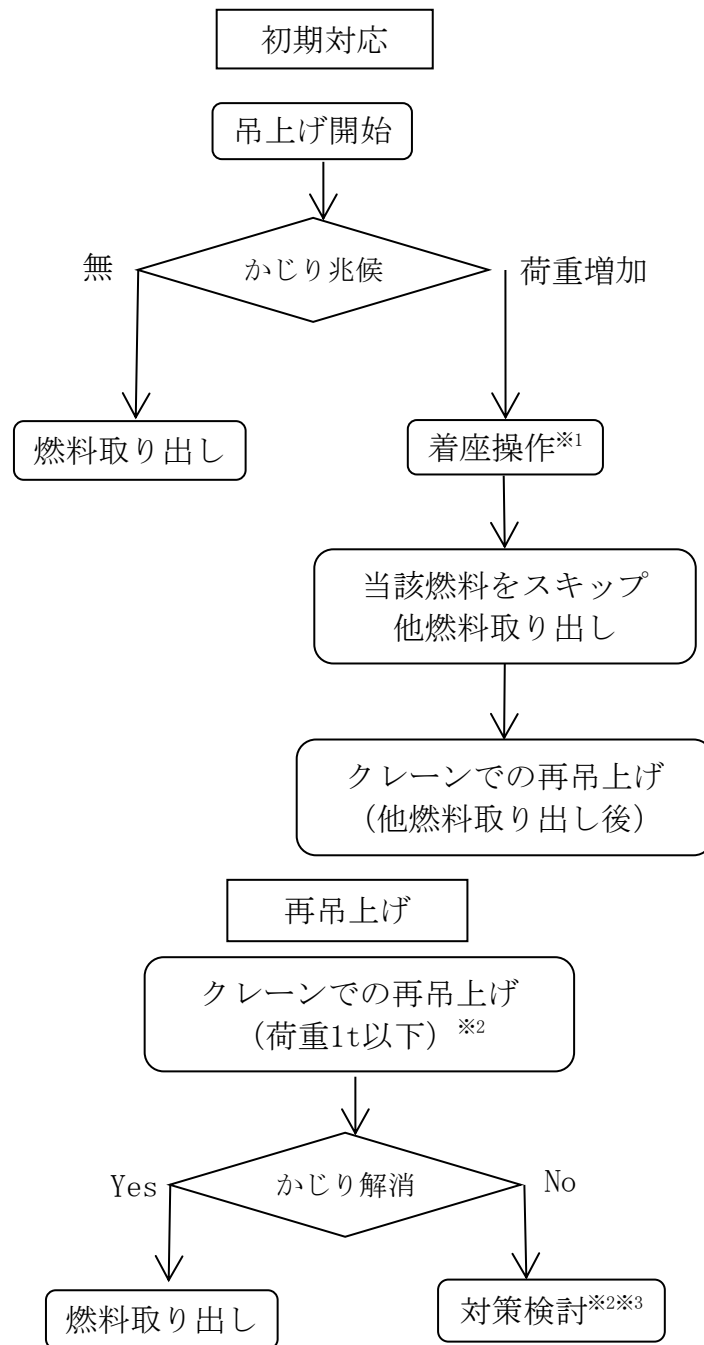


図6-5 4号機SFP内がれきマップ



- ※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

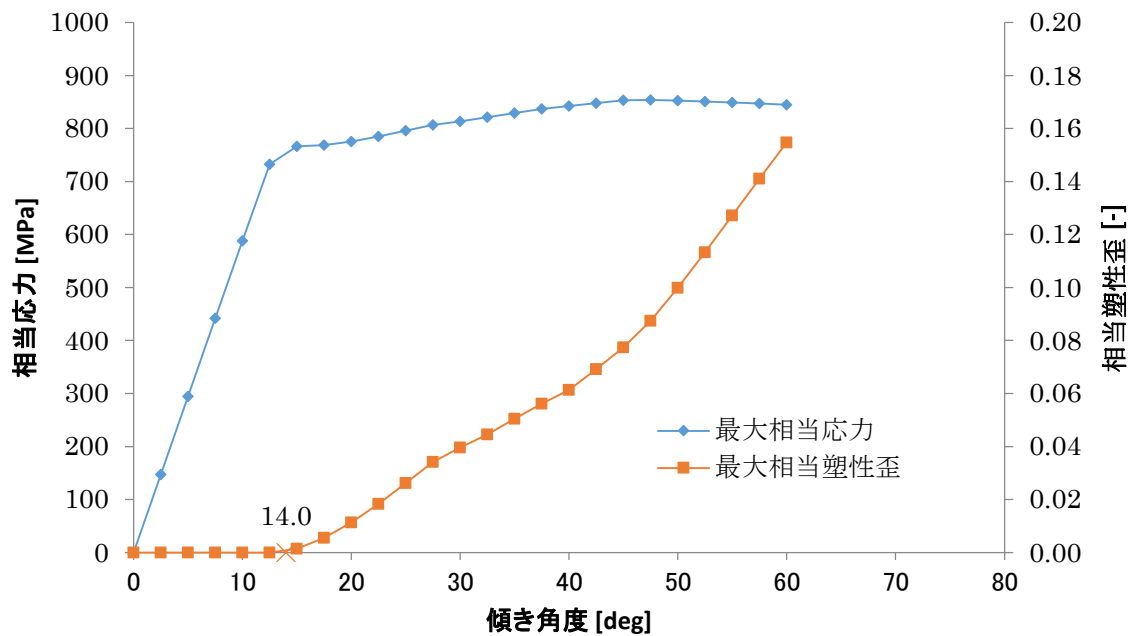


図 6-7 LTP と燃料棒との嵌合部傾き角度-発生応力及び塑性歪

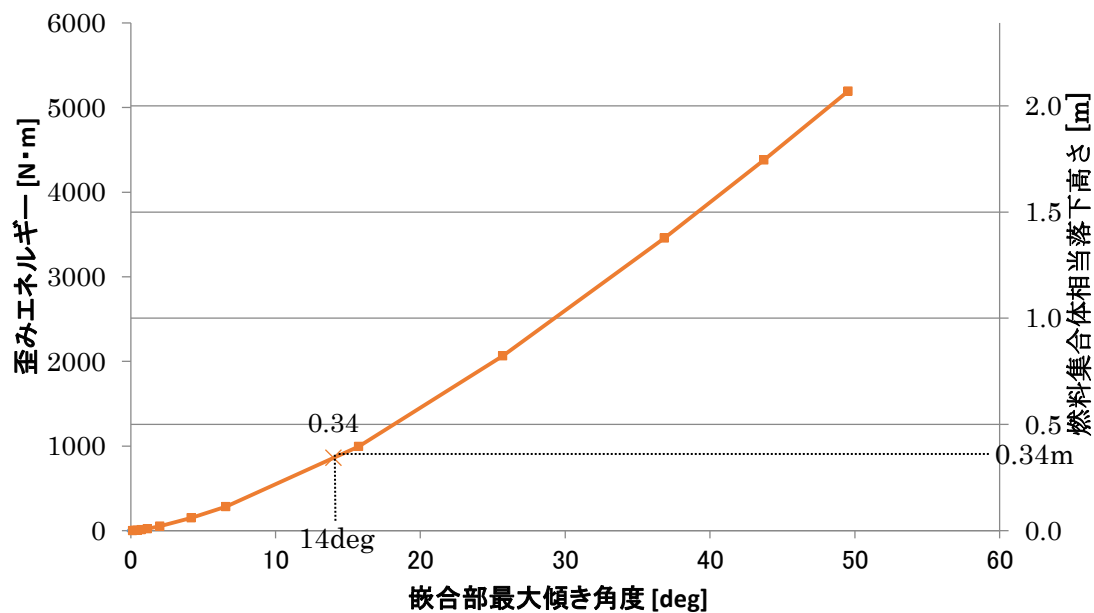


図 6-8 LTP と燃料棒との嵌合部最大傾き角度-歪みエネルギー及び落下高さ

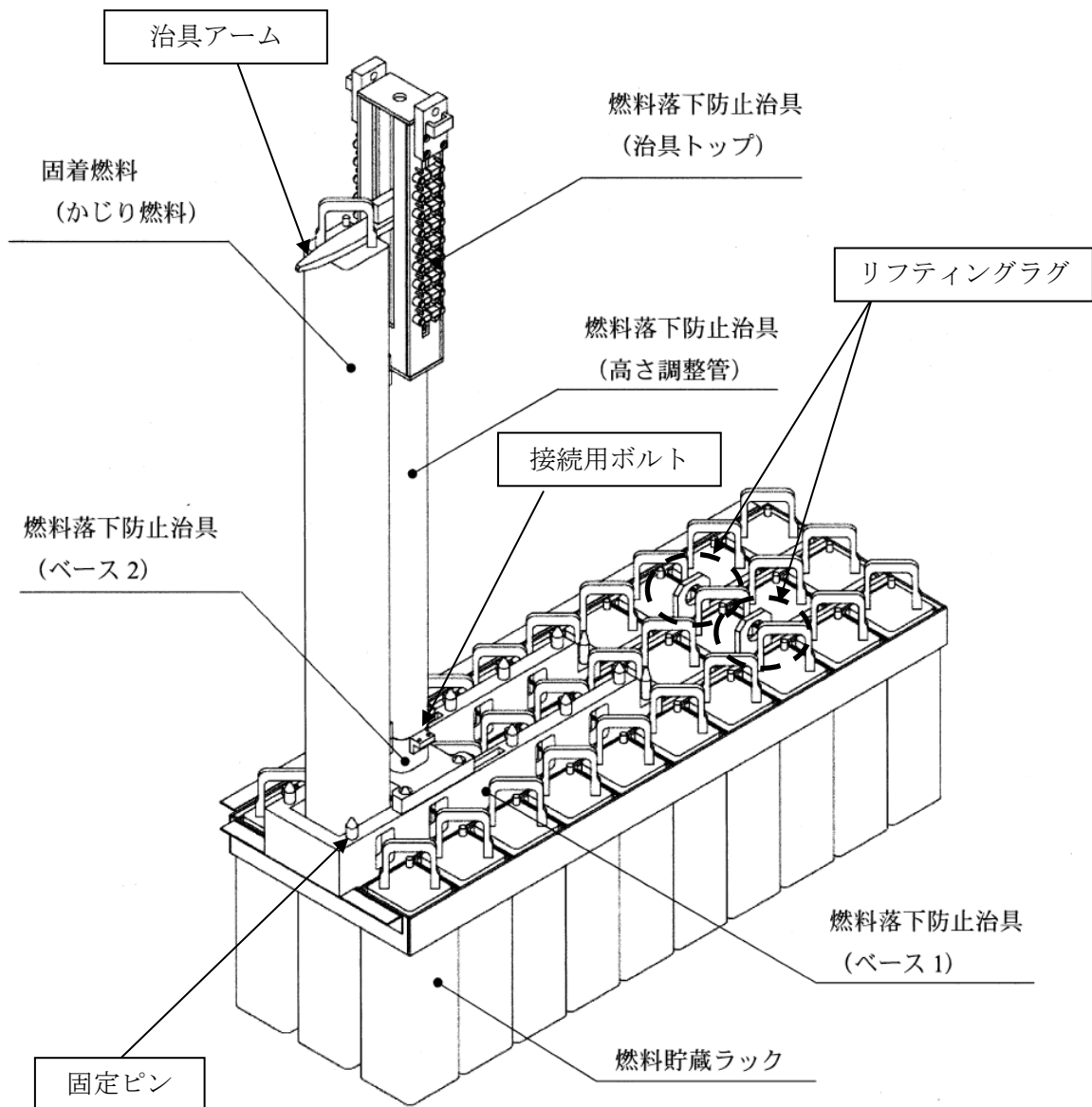


図 6 - 9 落下防止治具概念図

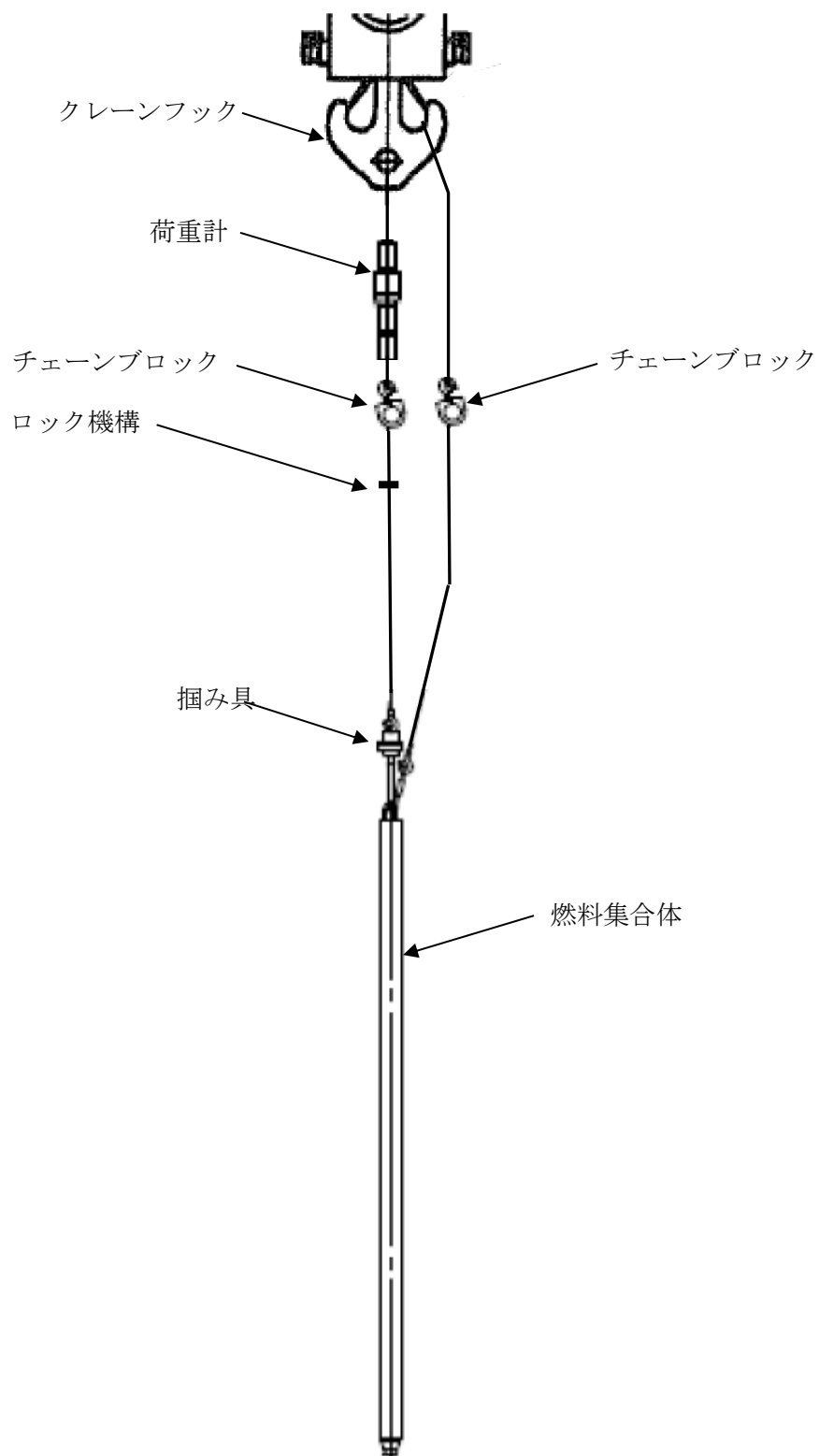


図 6 - 1 0 クレーンを用いた燃料集合体の取り扱い (概念図)

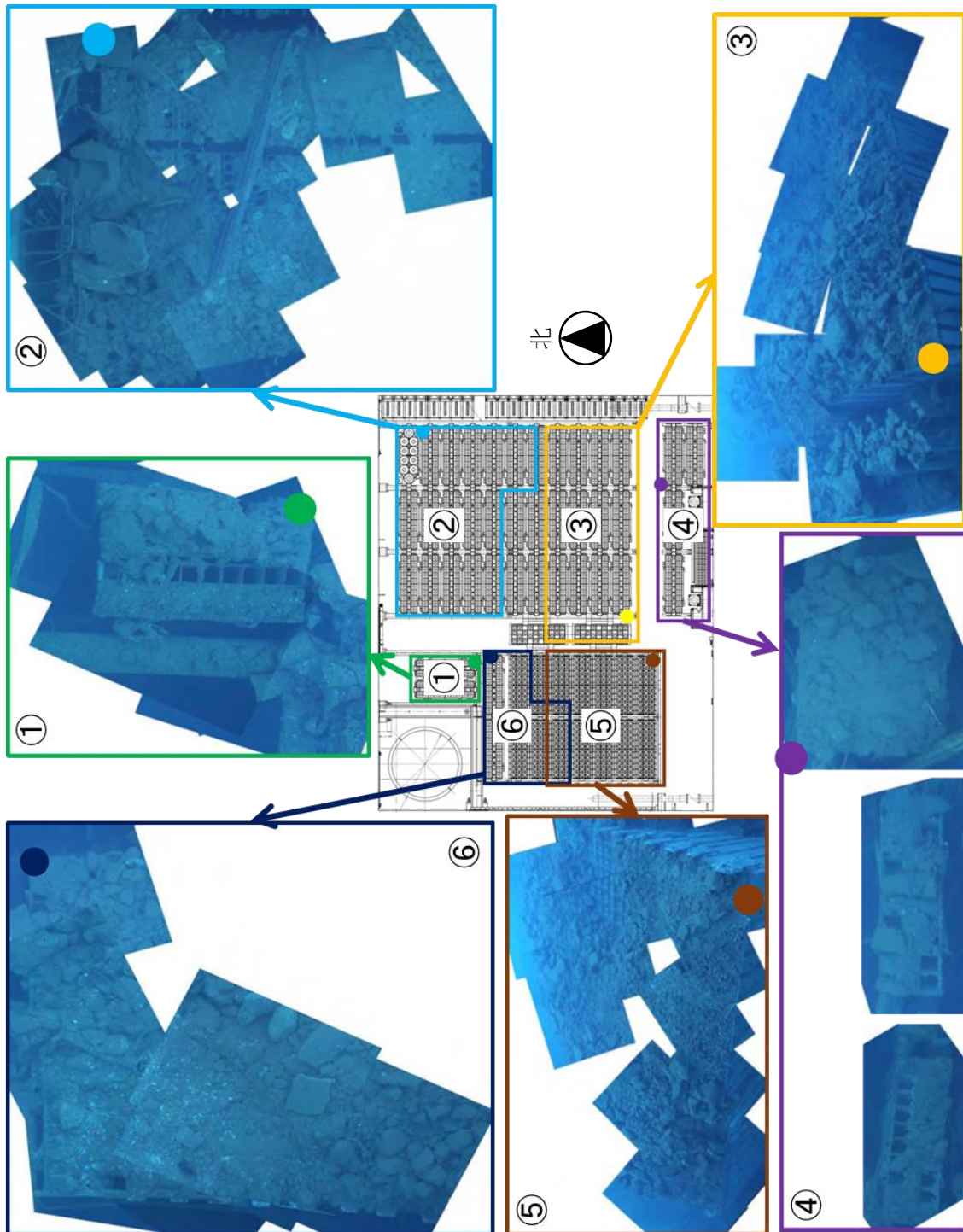


図6-11 3号機SFP内の状況（大型のがれき撤去後）



FHM 落下箇所



CUW ハッチ落下箇所

図6-12 ハンドル部の変形が認められる燃料（3号機）

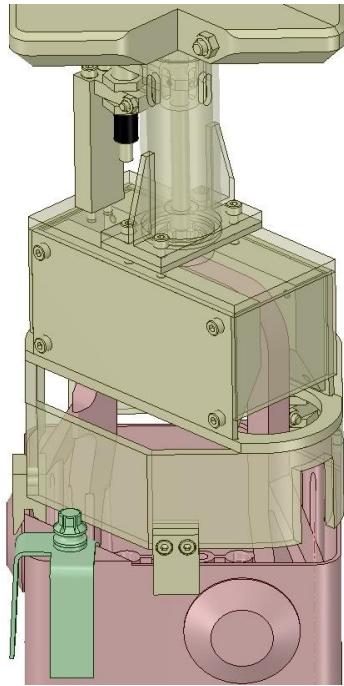
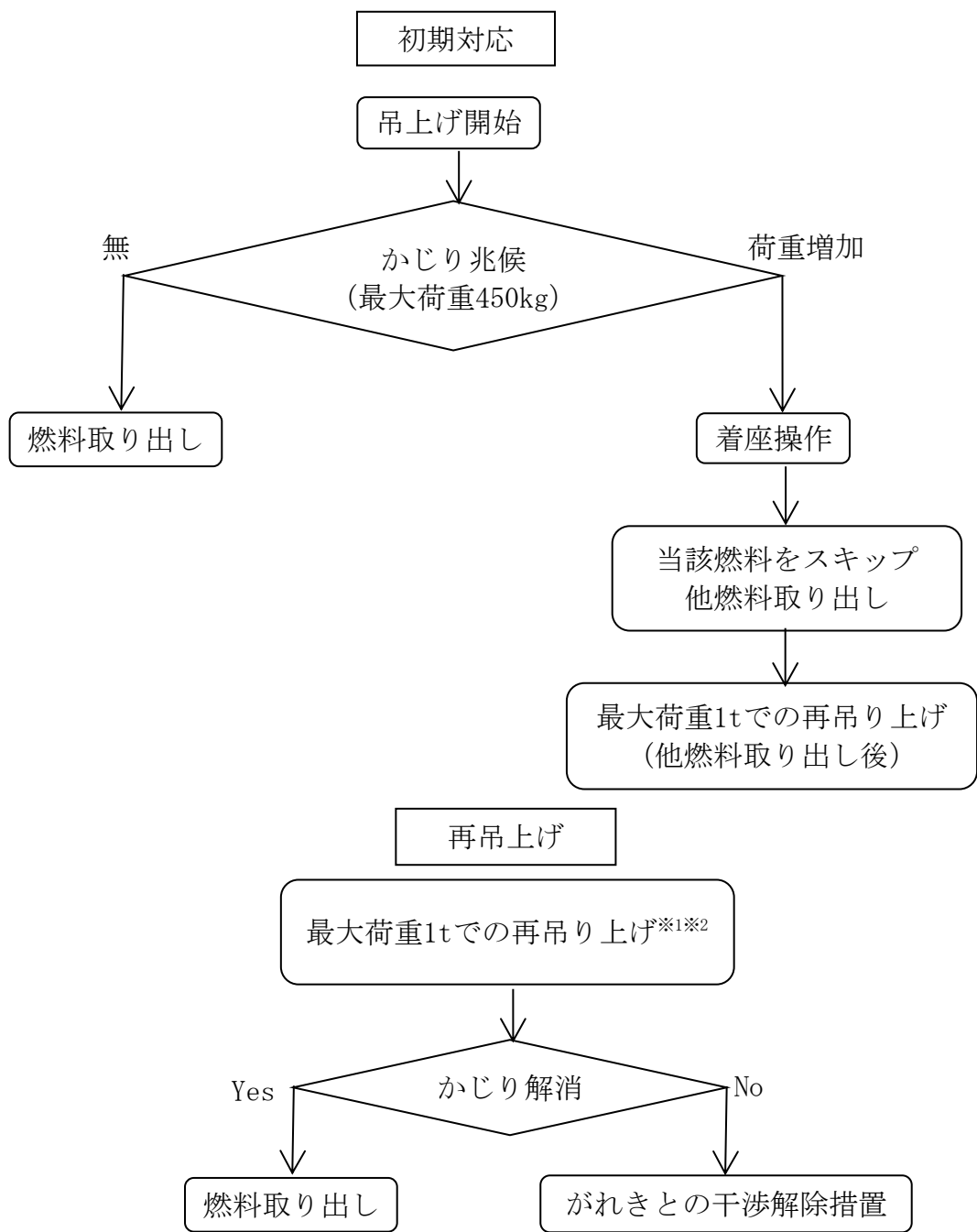


図 6 - 1 3 燃料健全性確認用治具 (概念図)



※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6-14 固着発生時の対応フロー（3号機）

放射能濃度変化* *初期濃度を100とした場合の相対値

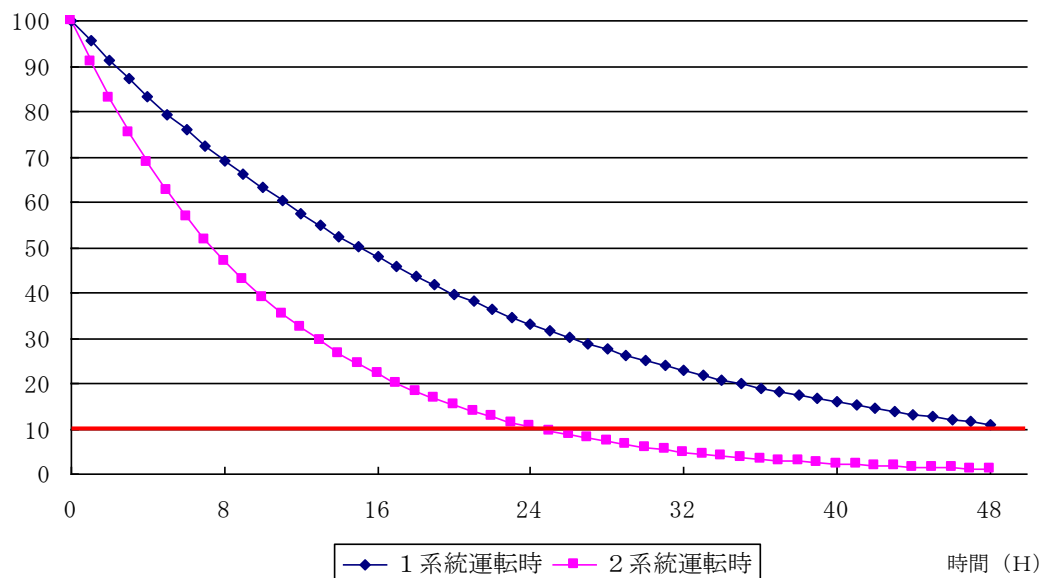


図6-15 使用済燃料共用プール冷却浄化系ろ過脱塩装置での放射能除去評価

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。

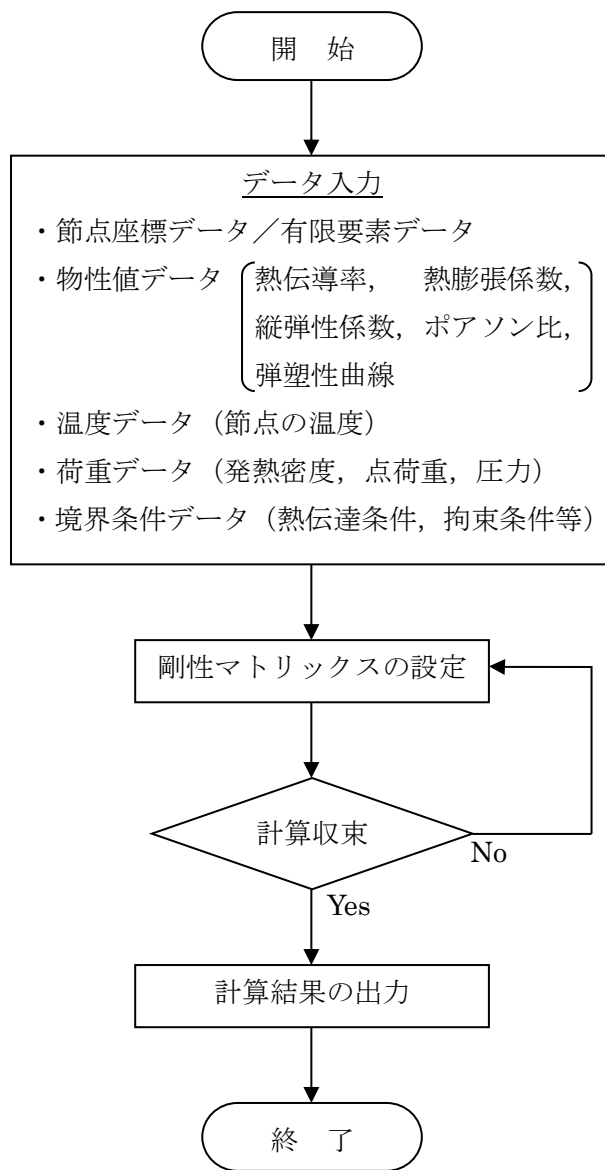


図1 ANSYSコードの解析フロー図

がれき衝突解析に用いるコード（LS-DYNA）について

(1) 概要

LS-DYNA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

LS-DYNA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

LS-DYNAコードの解析フローを図1に示す。

(4) 使用実績

LS-DYNA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。

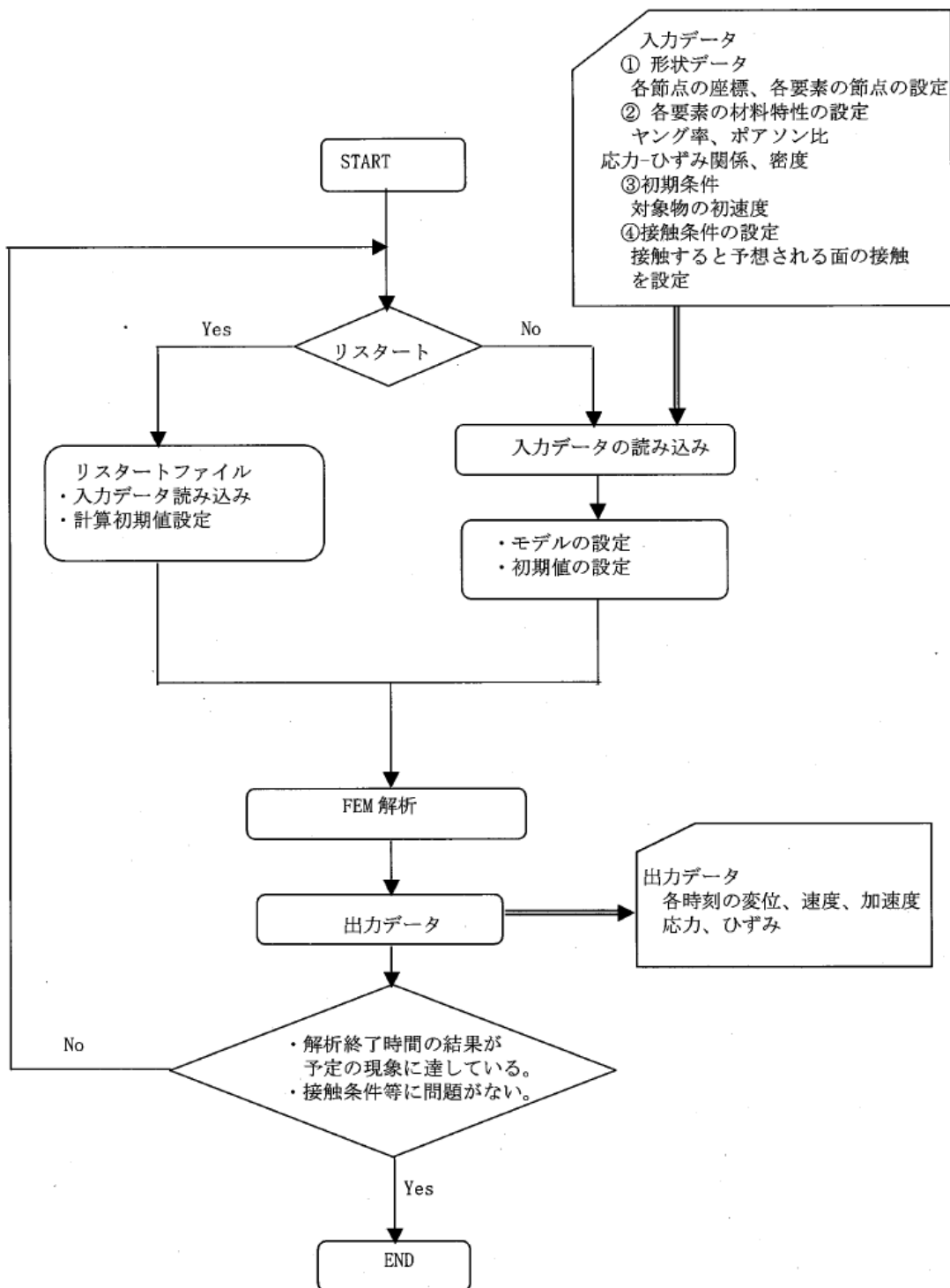


図1 LS-DYNAコードの解析フロー図

福島第一原子力発電所第1・2号機原子炉建屋
作業エリアの整備に伴う干渉物解体撤去について

1. 干渉物解体撤去の目的

1・2号機原子炉建屋使用済燃料プール内の燃料取り出しに要する燃料取り出し用カバー（又はコンテナ）および燃料取扱設備を設置するには、1・2号機原子炉建屋周辺に作業エリアを整備するとともに、作業エリアの線量低減を図る必要がある。しかし、現在、1・2号機原子炉建屋の周辺は既存建屋等が干渉して作業エリアを整備できない状況にあるため、当該干渉物を解体撤去する。

2. 解体撤去の対象となる干渉物

作業エリアを整備するために解体撤去を要する干渉物は以下の通り。なお、解体撤去には各干渉物に付帯する設備も含む。

(1) 2号機原子炉建屋西側作業エリア

- a. 廃液サージタンク（2号機）
- b. ドラム缶搬出入室
- c. MS/SRV^{*1}窒素ガスポンベ室
- d. HCU^{*2}窒素ガスポンベ室
- e. 補助ボイラー窒素ガスポンベ室
- f. セメントブロアー室

※1：主蒸気/逃し安全弁

※2：制御棒駆動水圧系制御ユニット

(2) 2号機原子炉建屋南側作業エリア

- g. 電気品室
- h. 1～4号機共用所内ボイラー建屋

(3) 1号機原子炉建屋西側作業エリア

- i. 液体窒素貯蔵タンク
- j. 液体窒素蒸発器
- k. 廃液サージタンク（1号機）

3. 計画工程

計画工程は以下の通り。工程は現場状況や他工事との調整により変動する可能性がある。

2015年8月～2016年2月（2. 解体撤去の対象となる干渉物：a～g）

2019年6月～2020年6月 (2. 解体撤去の対象となる干渉物：h)

2020年2月～2023年3月 (2. 解体撤去の対象となる干渉物：i～k)

4. 干渉物の解体撤去方法

干渉物の解体撤去にあたり、干渉物に付帯する設備等を図面や現場調査により確認し、安全を確保した計画を立案する。この計画に基づき、解体重機等による干渉物の解体撤去を実施する。

廃液サージタンクに貯蔵している廃液は、平成23年3月以前に液体廃棄物処理設備にて処理済の機器ドレンである。廃液サージタンク（2号機）の廃液は、解体撤去前に2号機放射性廃棄物処理建屋地下まで仮設ホースを敷設し、仮設ポンプを用いて、2号機の滞留水へ移送する。また、廃液サージタンク（1号機）の廃液は、解体撤去前に、プロセス主建屋地下まで吸引車で移送する。

なお、廃液移送前には当該廃液の全放射能の測定を行う。

解体撤去作業における留意事項を下記に示す。

- ・ 干渉物の付帯設備を撤去しても、稼働中の周辺設備に影響を与えないことを図面および現場調査にて確認し、適切な処置を施す。
- ・ 解体撤去作業周辺の稼働中の設備が解体撤去作業に伴い損傷しないために、現場状況に応じて設備の移設や防護を施す。
- ・ 解体撤去作業においては、火災リスクを低減するため、火気を使用する機材を原則として選定しない。（ただし、現場状況に応じて火気を使用する機材を選定する場合は、十分な防護対策を施した上で使用する）
- ・ 2. 解体撤去の対象となる干渉物 h. 1～4号機共用所内ボイラ建屋については、建屋内に設置されている稼働中の2号機原子炉建屋排気設備が解体撤去作業に伴い損傷しないために、現場状況に応じて適切な防護を施す。

廃液サージタンクに貯蔵している廃液の移送作業の留意事項を下記に示す。

- ・ 廃液移送に用いる仮設ホースの連結部は、図1のように養生を行い、受けパンの中には漏えい検知器を設置する、または常時専任監視員を設ける。
- ・ 漏えい検知器が発報した場合は、速やかに廃液移送に用いている仮設ポンプを停止する。
- ・ 廃液移送に用いる仮設ホースは、現場状況に応じて損傷防止対策を行う。

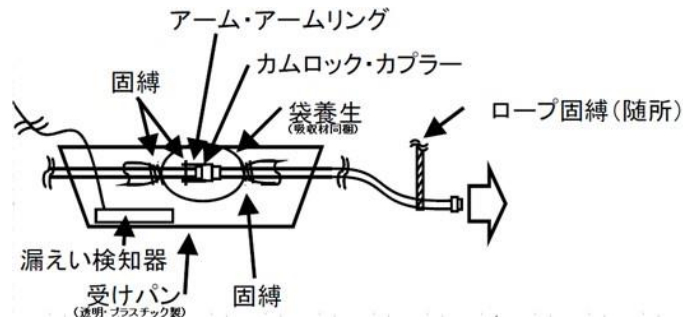


図1 仮設ホース連結部養生

5. 解体撤去作業に伴う放射性物質の飛散抑制策

干渉物の解体撤去時に、放射性物質が付着した粉じんが飛散しないよう、下記の対策を実施する。

(1) 通常の解体撤去作業時の対策

a. 作業開始前

当日の解体撤去予定範囲に対して飛散防止剤を散布する。

b. 作業中

2. 解体撤去の対象となる干渉物 a～g, i～k については、作業対象部およびその周辺に対して散水し、湿潤状態を維持する。散水により発生する水は、吸水マット等で可能な限り回収し、廃棄物として処理する。なお、雨天時は、吸水マット等による水の回収が困難であると判断した場合、散水を伴う作業については実施しない。

2. 解体撤去の対象となる干渉物 h. 1～4号機共用所内ボイラ建屋については、鉄骨造であり、ダスト飛散の恐れが低いことから、作業中の散水は実施しない。

c. 作業完了後

当日の解体撤去実施範囲に対して飛散防止剤を散布する。

(2) 放射性物質の飛散が確認された場合の対策

解体撤去作業中に、万が一、構内の空气中放射性物質濃度の異常を検知した場合は、速やかに作業を中断し、解体撤去対象物の周囲の空間に対し広範囲に散水または飛散

防止剤の散布を行う。

6. 解体撤去作業に伴う放射性物質の環境影響

解体する干渉物の表面線量率や表面積から気中へ放出される放射性物質の放出量を保守的な値を用いて概略評価を行い、本作業に伴う放射性物質の放出量が、敷地境界における管理目標値 0.03mSv/年に相当する放出量と比較して、非常に小さな値であることを確認した。

また、本作業に伴う放射性物質の放出量と解体作業期間から想定した放射性物質の放出率は、敷地境界の近傍に設置されたダストモニタの警報設定値に影響を与える範囲ではないことを確認した。

なお、放射性物質の放出量の評価は、粉じんの飛散抑制策の抑制効果は見込んでおらず、安全側に評価している。

7. 廃棄物の保管

2. 解体撤去の対象となる干渉物 a～g, i～k については、干渉物の解体撤去に伴い発生する固体廃棄物の発生量は約 570 m³（コンクリート約 230 m³，金属類約 340 m³），線量率は 1～30 mSv/h と想定しており、「Ⅲ章第 3 編 2.1.1 放射性固体廃棄物等の管理」に従い、覆土式一時保管施設（エリア L）または仮設保管設備（エリア A1・A2），固体廃棄物貯蔵庫に保管・管理する。なお、2. 解体撤去の対象となる干渉物 i. 液体窒素貯蔵タンクについては、共用プール建屋西側整備ヤードに一時的に移動・保管した後、解体撤去を実施する。

2. 解体撤去の対象となる干渉物 h. 1～4号機共用所内ボイラ建屋については、干渉物の解体撤去に伴い発生する固体廃棄物の発生量は約 270 m³（コンクリート約 70 m³，金属類約 200 m³），線量率は 1～30mSv/h と想定している。解体後、解体対象物の線量測定を行い、線量区分に応じて、下記の通り保管・管理する。

「Ⅲ章第 3 編 2.1.1 放射性固体廃棄物等の管理」に従い、1～30mSv/h の瓦礫類は固体廃棄物貯蔵庫に保管・管理する。1mSv/h 以下の瓦礫類のうち、0.1～1mSv/h 以下の瓦礫類は一時保管エリア（E1, P2, W, X）及び固体廃棄物貯蔵庫第 9 棟に、0.1mSv/h 以下の瓦礫類は一時保管エリア（P1）に保管・管理する。

8. 作業者の被ばく線量の管理

放射線業務従事者が立ち入る場所では、外部放射線に係わる線量率を把握し、放射線業務従事者等の立入頻度や滞在時間等を管理することで、作業時における放射線業務従事者が受ける線量が労働安全衛生法およびその関連法令に定められた線量限度を超えないようにする。

1・2号機原子炉建屋使用済燃料プール内の燃料取り出しに関連する今後の工事に

における放射線業務従事者の被ばく線量低減策として、以下の対策を実施する。

- ・ 放射性物質により汚染している干渉物の撤去による線量低減
- ・ 路盤面の整備による線量低減
- ・ 作業に応じて遮へいベストを着用することにより、作業員の被ばく量を低減
- ・ 作業エリア近傍に遮へい効果のある退避場所を設置し、不要な被ばく量を低減
- ・ 作業エリアに当該場所の空間線量率を表示することによる注意喚起

高線量エリアにおける施工であるため、現場状況を踏まえ、今後継続的に被ばく線量低減に向けた線源の把握と除去、線源からの遮へい、作業区域管理等を行い、更なる被ばく線量低減に努める。

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

1. 西側外壁開口の目的

第2号機原子炉建屋（以下、原子炉建屋という）の使用済燃料プール内の燃料取り出しに要する燃料取り出し用カバー（またはコンテナ）及び燃料取扱設備を設置するために、原子炉建屋上部を解体する計画である。

原子炉建屋上部解体に先立ち、オペレーティングフロア（5階）内で準備作業として片付け、清掃及び使用済燃料プールへの養生設置を行う計画である。そのため、原子炉建屋の西側外壁の5階部分に作業搬出入用の前室及び開口を設置する。

なお、原子炉建屋上部解体に関しては、工事開始前までに報告し、確認を受ける。

2. 前室、開口概要

(1) 原子炉建屋の西側に設ける前室概要は以下の通りとする。

- ・ 構造 : 鉄骨造
- ・ 屋根外壁材 : 鋼製折板
- ・ 大きさ : 高さ方向 約10m, 東西方向 約16m, 南北方向 約22m

(2) 原子炉建屋の西側外壁に設ける開口概要は以下の通りとする。

- ・ 位置 : 原子炉建屋の西側外壁
- ・ 高さ : 原子炉建屋の5階（開口下端レベル 地上約30m）
- ・ 大きさ : 高さ約7m, 幅約5m

3. 開口設置方法

開口位置に附帯する設備等を図面や現場調査により確認し、安全を確保した計画を立案する。この計画に基づき、解体機械等により開口を設置する。

4. 開口設置作業に伴う放射性物質の飛散抑制策

- ・ 開口を設置する原子炉建屋西側に構台を設置し、開口全体を覆う前室を設置する。
- ・ 開口設置作業開始前及び終了後に、飛散防止剤を散布する。
- ・ 前室の外部にダストモニタを設置し、放射性物質の有意な変化を確認した場合は、速やかに作業を中断する。
- ・ 前室空気中の放射性物質を低減するため、前室内の空気を換気空調設備により吸気する。吸気した空気はフィルタユニットにより除塵し、前室に戻す。また、換気空調設備入口にダストモニタを設置し、前室空気中の放射性物質濃度を計測する。

5. 津波・台風・竜巻・豪雨の影響

前室及び開口は、15m 級津波が到達しないと考えられる地上約 30m の高さに設置する。前室は、建築基準法及び関係法令に基づく風圧力に対し耐えられるよう設計し、開口は、建築基準法及び関係法令に基づく風圧力に対し耐えられるよう設計している前室内に設置する。前室は、鋼製折板にて覆うことにより風雨を遮る設計とし、開口は、風雨を遮る設計としている前室内に設置する。

6. 耐震安全性

(1) 適用規格

耐震安全性の検討は、下記に準拠して行う。

- ・ 建築基準法及び関連法令
- ・ 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（日本建築学会，2013 年）
- ・ 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（日本建築学会，2010 年）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1987）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1991 補）
- ・ 原子力発電所耐震設計技術規程（JEAC4601-2008）
- ・ 鋼構造設計規準（日本建築学会，2005 年）
- ・ 鋼構造接合部設計指針（日本建築学会，2006 年）
- ・ 日本産業規格（JIS）

(2) 原子炉建屋の検討結果

開口（せん断断面積及び断面二次モーメントを低減）並びに構台及び使用済燃料プールへの養生の重量を考慮した原子炉建屋の解析モデルを用い、基準地震動 S_s による地震応答解析を実施した。その結果、耐震壁のせん断ひずみが評価基準値 4.0×10^{-3} を下回っており、耐震安全性を確保していることを確認した。（最大値： 0.17×10^{-3} （5 階， S_s-1 ，EW 方向））（詳細は別添－1 を参照）

(3) 前室の検討結果

主要な鉄骨部材からなる立体架構モデルを用い、原子力発電所耐震設計技術指針に定める C クラス相当の地震力に対して、断面検討を実施した。その結果、全ての部材に対する検定比（作用応力度/許容応力度）が 1 を下回っており、耐震安全性を確保していることを確認した。（最大値：0.21）

7. 開口設置に伴う放射性物質の環境影響

燃料取り出しに向け原子炉建屋西側外壁に開口を設置した場合、開口部からの放射性物質の飛散が懸念される。このため、放射性物質の放出量について評価を行った結果、敷地

境界における被ばく評価への影響は少ないと評価される。(詳細は別添-2を参照)

8. 廃棄物の保管

解体撤去に伴い発生する固体廃棄物の発生量は約 31 m³ (コンクリート約 26 m³, 金属類約 5 m³), 線量率は 1~30mSv/h と想定しており, 「Ⅲ章第 3 編 2. 1. 1 放射性固体廃棄物等の管理」に従い, 構内一時保管エリアにて保管・管理する。

9. 作業員の被ばく線量の管理

放射線業務従事者が立ち入る場所では, 外部放射線に係わる線量率を把握し, 放射線業務従事者等の立入頻度や滞在時間等を管理することで, 作業時における放射線業務従事者が受ける線量が労働安全衛生法及びその関連法令に定められた線量限度 (100mSv/5 年及び 50mSv/年) を超えないようにする。

開口設置作業における放射線業務従事者の被ばく線量低減策として, 以下の対策を実施する。

- ・省人化を目的とした遠隔操作設備の設置による作業員被ばく量の低減
- ・遮蔽した退避場所の設置による作業員被ばく量の低減
- ・必要に応じ作業員の被ばく量を低減させるための遮蔽ベストの着用
- ・作業時間管理による作業員被ばくの低減

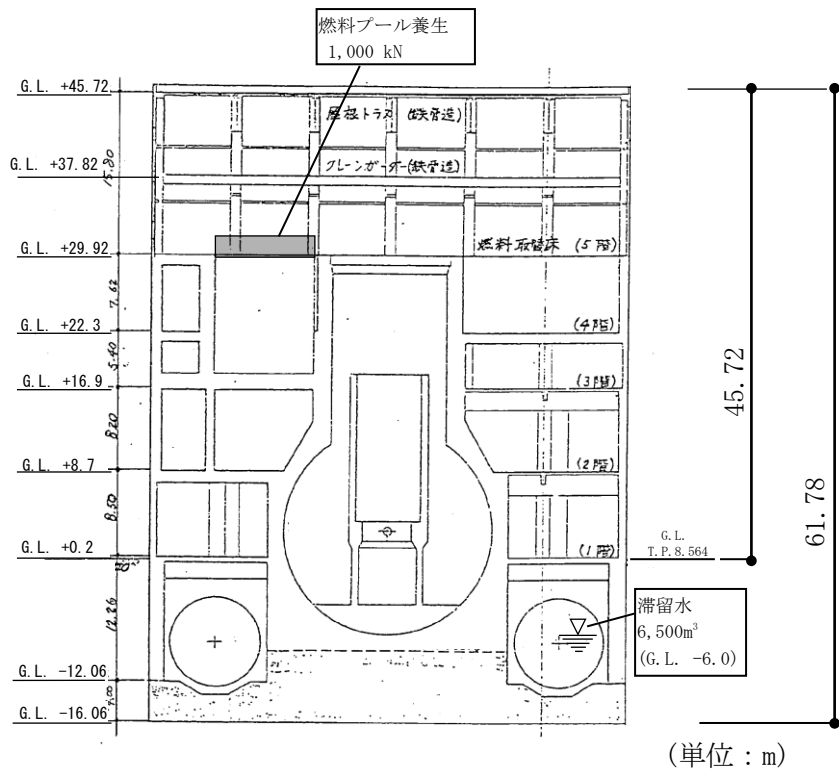
高線量エリアにおける施工であるため, 現場状況を踏まえ, 今後継続的に被ばく線量低減に向けた線源の把握と除去, 線源に対する遮蔽, 作業区域管理の検討を行い, 更なる被ばく線量低減に努める。

第2号機原子炉建屋西側外壁開口設置後の原子炉建屋の耐震安全性

1. はじめに

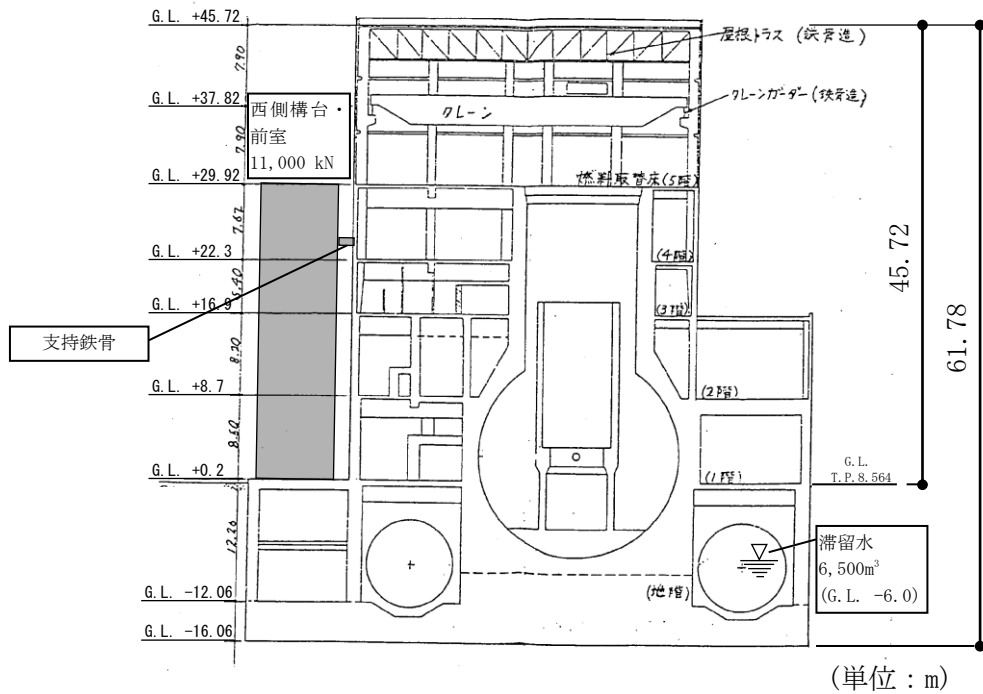
本書は、「Ⅱ章 2.6 添付資料－2 構造強度及び耐震性（地下滞留水を考慮した建屋の耐震安全性評価）」で用いた解析モデルを基本に、西側外壁開口、西側構台・前室及び燃料プール落下防止養生の重量を考慮した解析モデルを用いて基準地震動 S_s に対する評価を行う。なお、評価に用いる地震動（基準地震動 S_s ）及び地盤定数は「Ⅱ章 2.6 添付資料－2 構造強度及び耐震性（地下滞留水を考慮した建屋の耐震安全性評価）」で用いたものと同じである。

建屋の概要図を図1－1に示す。



(a) NS 方向断面

西側外壁開口：高さ約 7m×幅 約 5m



(b) EW 方向断面

図 1-1 原子炉建屋の概略断面図

添付資料 9 に記載の標高は、震災後の地盤沈下量(-709mm)と O.P. から T.P. への読替値(-727mm)を用いて、下式に基づき換算している。
 <換算式> T.P. = 旧 O.P. - 1,436mm

2. 解析に用いる入力地震動

原子炉建屋への入力地震動は、解放基盤表面レベルに想定する基準地震動 S_s を用いる。

地震応答解析に用いる入力地震動の概念図を図 2-1 に示す。この原子炉建屋の解析モデルに入力する地震動は、一次元波動論に基づき、解放基盤表面レベルに想定する基準地震動 S_s に対する建屋基礎底面レベルの地盤応答として評価する。また、建屋基礎底面レベルにおけるせん断力を入力地震動に付加することにより、地盤の切欠き効果を考慮する。

解放基盤表面位置 (G. L. -206m (震災前 O. P. -196.0m)) における基準地震動 S_s の加速度波形については、図 2-2 に示す。

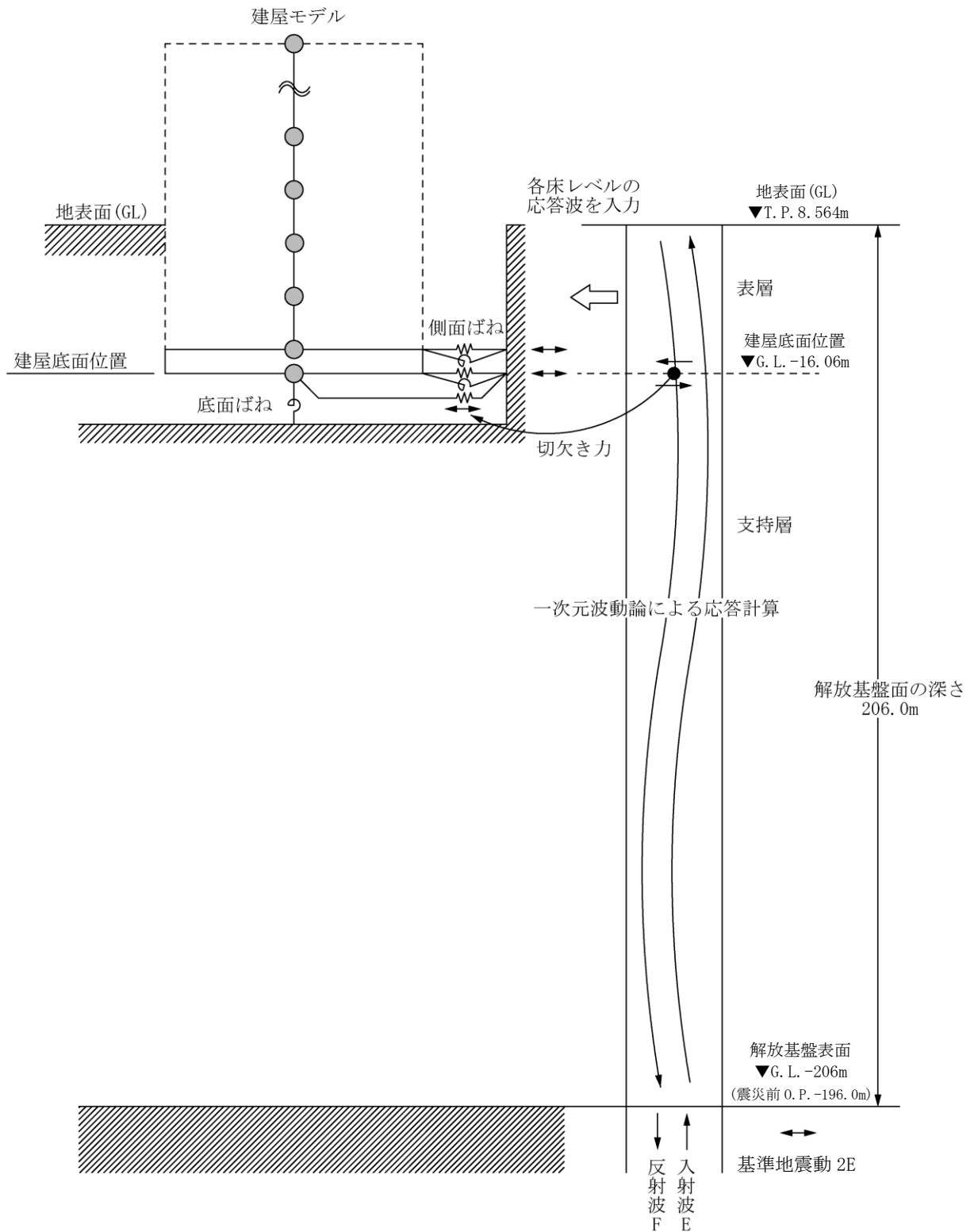


図 2 - 1 地震応答解析に用いる入力地震動の概念図 (水平方向)

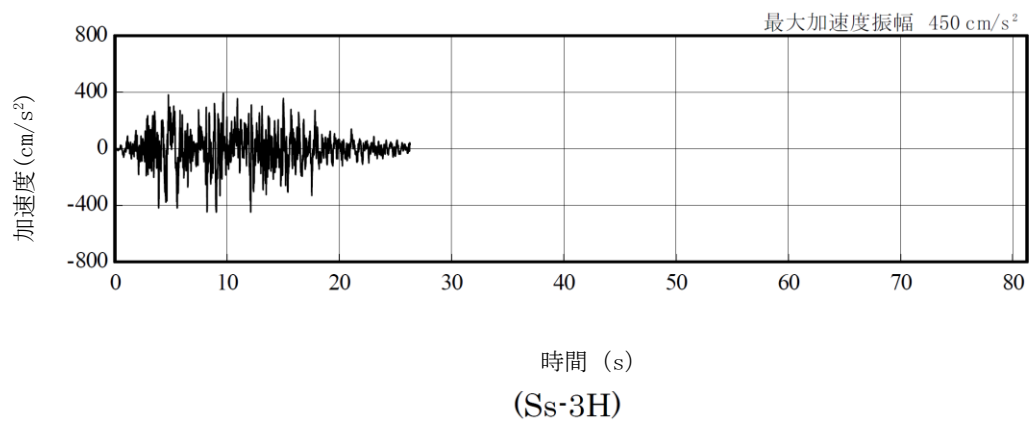
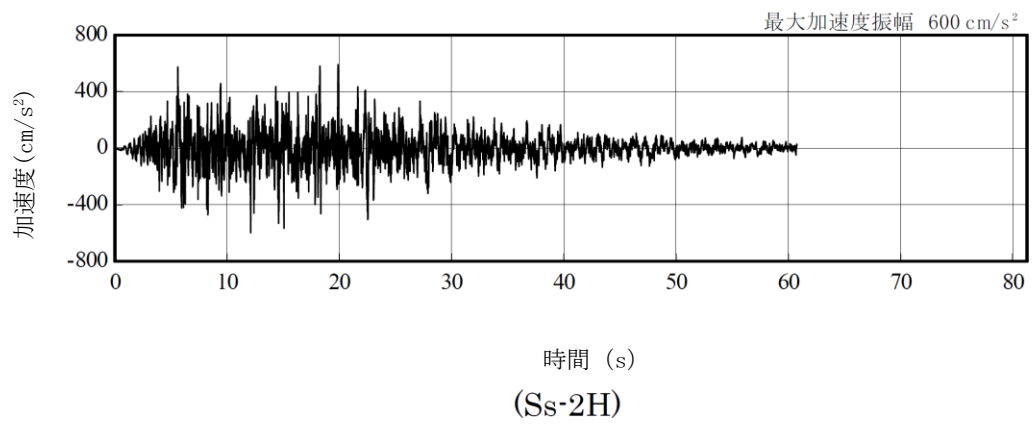
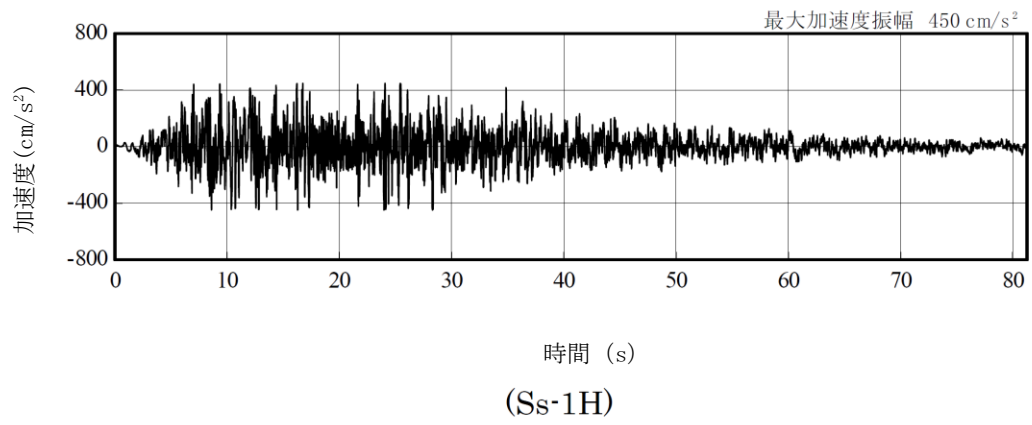


図 2 - 2 解放基盤表面位置における地震動の加速度時刻歴波形（水平方向）

3. 地震応答解析モデル

基準地震動 S_s に対する原子炉建屋の地震応答解析は、「2. 解析に用いる入力地震動」で算定した入力地震動を用いた動的解析による。

地震応答解析モデルは、図 3-1 に示すように、建屋を曲げ変形とせん断変形をする質点系とし、地盤を等価ばねで評価した建屋-地盤連成系モデルとする。建屋-地盤連成系としての効果は地盤ばね及び入力地震動によって評価される。建屋解析モデルの諸元は、滞留水を貯留している建屋の耐震安全性を評価した諸元に、オペレーティングフロア階に設けた西側外壁開口、西側構台・前室の重量及び燃料プール落下防止養生の重量を考慮する。建屋解析モデルの諸元に追加した重量を表 3-1 に、建屋モデル諸元を表 3-2 に示す。

表 3-1 建屋解析モデル追加重量

	質点	G. L. (m)	重量 (kN)
燃料プール落下防止養生	3	+29.92	1,000
西側構台・前室	4	+22.3	9,000
	7	+0.2	2,000
合計			12,000

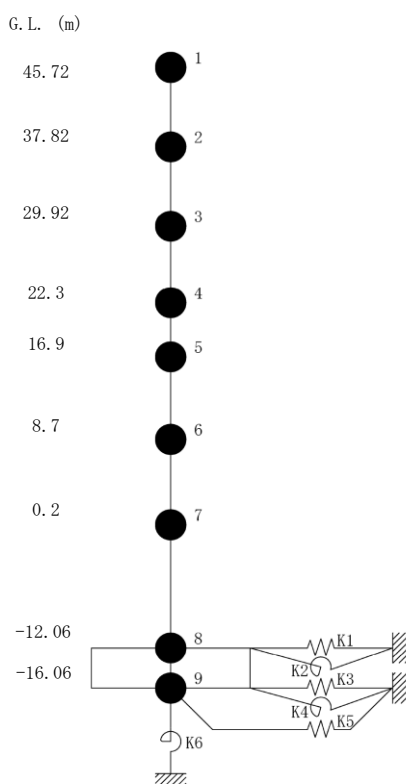
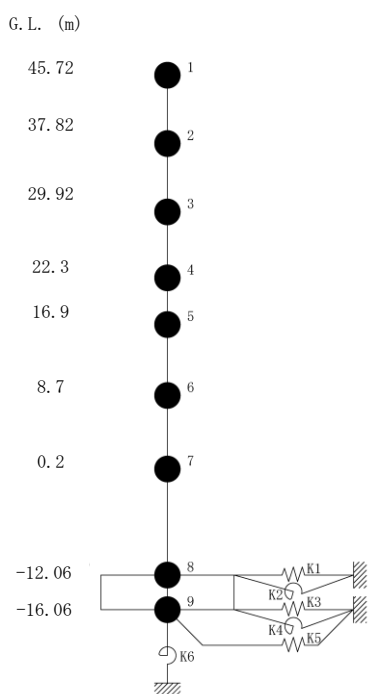


図 3-1 原子炉建屋 地震応答解析モデル (NS, EW 方向)

表 3-2 建屋解析モデルの諸元
(NS 方向)

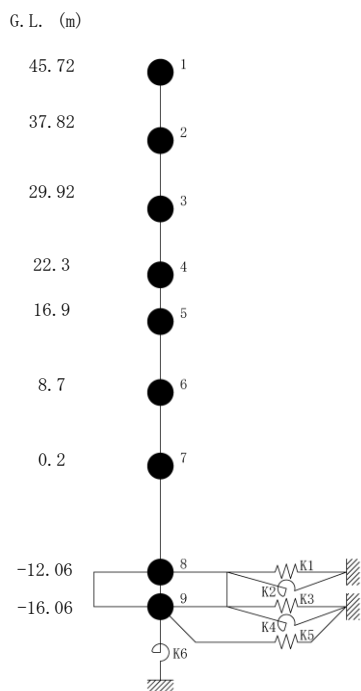


質点番号	質点重量 W(kN)	回転慣性重量 $I_G (\times 10^5 \text{kN}\cdot\text{m}^2)$	せん断断面積 $A_S (\text{m}^2)$	断面2次モーメント $I (\text{m}^4)$
1	14,380	25.99		
2	10,220	18.53	18.6	10,154
3	59,470 [1,000]	107.62 [1.81]	17.4 {1.2}	10,650 {25}
4	79,440 <9,000>	143.78 <16.29>	184.3	22,551
5	107,720	194.96	166.8	24,629
6	116,670	211.14	249.3	44,401
7	201,190 <2,000>	364.11 <3.62>	157.1	40,661
8	341,290 (63,750)	617.55 (115.35)	456.8	110,444
9	125,030	226.24	2,656.2	480,675
合計	1,055,410			

注 () 内は滞留水による付加重量分を示す。
 [] 内は燃料プール養生による付加重量分を示す。
 < > 内は燃料取り出し用西側構台による付加重量分を示す。
 { } 内は耐震壁開口による減少分を示す。

ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m²)
 せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m²)
 ポアソン比 ν 0.20
 減衰 h 5%
 基礎形状 46.60m(NS方向) × 57.00m(EW方向)

(EW 方向)



質点番号	質点重量 W(kN)	回転慣性重量 $I_G (\times 10^5 \text{kN}\cdot\text{m}^2)$	せん断断面積 $A_S (\text{m}^2)$	断面2次モーメント $I (\text{m}^4)$
1	14,380	14.71		
2	10,220	10.40	14.0	5,941
3	59,470 [1,000]	60.74 [1.02]	14.0	6,307
4	79,440 <9,000>	81.06 <9.18>	108.2	11,927
5	107,720	194.96	117.3	14,199
6	116,670	211.14	185.7	33,796
7	201,190 <2,000>	544.79 <5.42>	173.1	41,960
8	341,290 (63,750)	923.98 (172.59)	418.1	132,121
9	125,030	338.53	2,656.2	719,166
合計	1,055,410			

注 () 内は滞留水による付加重量分を示す。
 [] 内は燃料プール養生による付加重量分を示す。
 < > 内は燃料取り出し用西側構台による付加重量分を示す。

ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m²)
 せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m²)
 ポアソン比 ν 0.20
 減衰 h 5%
 基礎形状 46.60m(NS方向) × 57.00m(EW方向)

4. 耐震安全性評価結果（耐震壁のせん断ひずみの確認）

地震応答解析により得られた耐震壁のせん断ひずみ一覧を表4-1に示す。せん断ひずみは基準地震動 Ss による解析でも、最大で 0.17×10^{-3} であり、評価基準値 (4.0×10^{-3}) 以下である。

表4-1 耐震壁のせん断ひずみ一覧

(NS 方向)

(単位： $\times 10^{-3}$)

G. L. (m)	Ss-1H		Ss-2H		Ss-3H		評価基準
	今回	参考*1	今回	参考*1	今回	参考*1	
45.72~37.82	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	4.0 以下
37.82~29.92	0.15	0.14	0.13	0.12	0.12	0.11	
29.92~22.3	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	
22.3~16.9	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	
16.9~8.7	0.07	0.07	0.08	0.07	0.07	0.06	
8.7~0.2	0.15	0.15	0.16	0.15	0.14	0.13	
0.2~-12.06	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07	0.07	

*1: 「西側外壁開口, 西側構台及び燃料プール落下防止養生の重量」を考慮しない場合

(EW 方向)

(単位： $\times 10^{-3}$)

G. L. (m)	Ss-1H		Ss-2H		Ss-3H		評価基準
	今回	参考*1	今回	参考*1	今回	参考*1	
45.72~37.82	0.11	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	4.0 以下
37.82~29.92	0.17	0.17	0.16	0.16	0.15	0.15	
29.92~22.3	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	
22.3~16.9	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	
16.9~8.7	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.08	
8.7~0.2	0.14	0.14	0.15	0.14	0.12	0.12	
0.2~-12.06	0.08	0.08	0.09	0.08	0.07	0.07	

*1: 「西側外壁開口, 西側構台及び燃料プール落下防止養生の重量」を考慮しない場合

第2号機原子炉建屋西側外壁開口設置後の放射性物質の放出量評価

1. 放出量評価方法の考え方

原子炉建屋西側外壁開口設置後の放出量評価は、従前の放出箇所であるブローアウトパネルの隙間・原子炉建屋排気設備出口・原子炉格納容器ガス管理設備に加え、新たに設置する開口を考慮して評価を行った。

本評価は、開口設置前に採取した平成27年8月～平成29年2月の期間において、原子炉建屋排気設備入口で最大濃度であった平成27年9月のダスト濃度を評価に適用した。

開口設置に際し、放射性物質の飛散抑制のために開口全体を覆う前室を設置する。そのため、新たに設置する開口の面積については、前室と開口の間に生ずる隙間（以下「開口の隙間」という）を開口面積として評価に適用した。

なお、大物搬入口、二重扉、非常用扉については、実態にあわせた開口面積を評価に適用した。

2. 放出量評価

開口の隙間及びブローアウトパネルの隙間・原子炉建屋排気設備出口・原子炉格納容器ガス管理設備の各放出箇所において、下記のとおりの評価を行った。

① 開口の隙間及びブローアウトパネルの隙間

開口の隙間及びブローアウトパネルの隙間に関しては、外部の風による流量の変動幅が大きいため、変動幅を考慮して評価を行った。

開口の隙間及びブローアウトパネルの隙間からの放出量（最大）

$$\begin{aligned}
 &= \text{原子炉建屋排気設備入口のダスト濃度 (Cs-134+Cs-137)} \\
 &\quad \times \text{流量 (開口の隙間の流量+ブローアウトパネルの隙間の流量)} \\
 &= 4.6 \times 10^{-5} [\text{Bq/cm}^3] \times (9.6 \times 10^3 + 1.5 \times 10^4) [\text{m}^3/\text{h}] \times 10^6 [\text{cm}^3/\text{m}^3] \\
 &= \text{約 } 1.1 \times 10^6 [\text{Bq/h}] \quad = \text{約 } 1.1 \times 10^{-2} [\text{億 Bq/h}]
 \end{aligned}$$

開口の隙間及びブローアウトパネルの隙間からの放出量（最小）

$$\begin{aligned}
 &= \text{原子炉建屋排気設備入口のダスト濃度 (Cs-134+Cs-137)} \\
 &\quad \times \text{流量 (開口の隙間の流量+ブローアウトパネルの隙間の流量)} \\
 &= 4.6 \times 10^{-5} [\text{Bq/cm}^3] \times (3.8 \times 10^3 + 7.9 \times 10^3) [\text{m}^3/\text{h}] \times 10^6 [\text{cm}^3/\text{m}^3]
 \end{aligned}$$

$$= \text{約 } 5.4 \times 10^5 \text{ [Bq/h]} \quad = \text{約 } 5.4 \times 10^{-3} \text{ [億 Bq/h]}$$

② 原子炉建屋排気設備

原子炉建屋排気設備からの放出量

= 原子炉建屋排気設備出口の月間平均ダスト濃度 (Cs-134+Cs-137)

× 原子炉建屋排気設備の流量

$$= 4.9 \times 10^{-7} \text{ [Bq/cm}^3\text{]} \times 1.0 \times 10^4 \text{ [m}^3\text{/h]} \times 10^6 \text{ [cm}^3\text{/m}^3\text{]}$$

$$= \text{約 } 4.9 \times 10^3 \text{ [Bq/h]} \quad = \text{約 } 4.9 \times 10^{-5} \text{ [億 Bq/h]}$$

③ 原子炉格納容器ガス管理設備

原子炉格納容器ガス管理設備からの放出量

= 原子炉格納容器ガス管理設備出口の月間平均ダスト濃度 (Cs-134+Cs-137)

× 原子炉格納容器ガス管理設備の流量

$$= 1.2 \times 10^{-5} \text{ [Bq/cm}^3\text{]} \times 1.9 \times 10^1 \text{ [m}^3\text{/h]} \times 10^6 \text{ [cm}^3\text{/m}^3\text{]}$$

$$= \text{約 } 2.2 \times 10^2 \text{ [Bq/h]} \quad = \text{約 } 2.2 \times 10^{-6} \text{ [億 Bq/h]}$$

※計算に引用した数値 (ダスト濃度・流量) は以下のとおり。

・ダスト濃度

平成 27 年 9 月の原子炉建屋排気設備入口のダスト濃度, 原子炉建屋排気設備出口及び原子炉格納容器ガス管理設備出口の月間平均ダスト濃度を適用した。

・開口の隙間及びブローアウトパネルの隙間の流量

外部の風による運動エネルギーにより建物風上側と風下側に圧力差が発生し, 圧力差により建屋開口部から空気の流出入が発生する。この圧力差による建屋開口部からの流出入量をベルヌーイの定理を用いて流量を評価した。各前提については, 以下のとおり。

開口の隙間及びブローアウトパネルの隙間の前提

開口の隙間及びブローアウトパネルの隙間の開口面積を縮小せず, 二重扉を全開, 非常用扉を全開及び大物搬入口を全閉した場合を想定。

風速の前提

昭和 54 年 4 月～昭和 55 年 3 月の 1 年間における福島第一原子力発電所の露場の平均風速 (3.1[m/s]) を適用した。(原子炉設置変更許可申請書添付書類 6)

上記の風速を入力条件として 16 方位毎に開口の隙間及びブローアウトパネルの隙間からの流量を評価し、最大と最小の流量をそれぞれ以下のとおり評価した。

	合計	開口の隙間	ブローアウトパネルの隙間
最大流量[m ³ /h]	約 2.4×10 ⁴	9.6×10 ³	1.5×10 ⁴
最小流量[m ³ /h]	約 1.2×10 ⁴	3.8×10 ³	7.9×10 ³

- ・原子炉建屋排気設備の流量

原子炉建屋排気設備の容量 (1.0×10⁴ [m³/h]) を適用した。

- ・原子炉格納容器ガス管理設備の流量

ダスト濃度と同様に平成 27 年 9 月の値を適用した。

上記 3 箇所の放出箇所からの放出量の評価より、開口設置後の原子炉建屋からの放出量合計値は以下のとおり。

開口設置後の放出量評価 (最大)

$$= \text{約 } 1.1 \times 10^{-2} \text{ [億 Bq/h]} + \text{約 } 4.9 \times 10^{-5} \text{ [億 Bq/h]} + \text{約 } 2.2 \times 10^{-6} \text{ [億 Bq/h]}$$

$$= \text{約 } 0.011 \text{ [億 Bq/h]}$$

開口設置後の放出量評価 (最小)

$$= \text{約 } 5.4 \times 10^{-3} \text{ [億 Bq/h]} + \text{約 } 4.9 \times 10^{-5} \text{ [億 Bq/h]} + \text{約 } 2.2 \times 10^{-6} \text{ [億 Bq/h]}$$

$$= \text{約 } 0.0054 \text{ [億 Bq/h]}$$

よって、開口設置後の放出量は、約 0.0054～0.011 億 Bq/h と評価した。

なお、開口設置前の原子炉建屋の平成 27 年 8 月～平成 29 年 2 月の平均の放出量は、約 0.0013 億 Bq/h である。

3. 被ばく評価

以下の計算条件で、開口が設置された場合の放出量による被ばく評価を行った。

① 気象条件

被ばく評価に用いる気象条件は、昭和 54 年 4 月～昭和 55 年 3 月の 1 年間における風向、風速、日射量、放射収支量の観測データを統計処理して用い、統計処理は「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」に基づいて行った。

② 実効線量の計算方法

放射性セシウムによる実効線量の計算は、「発電用軽水型原子炉施設周辺の線量目標値に対する評価指針」及び「発電用軽水型原子炉施設の安全審査における一般公衆の線量評価について」を準用する。

外部被ばく及び吸入摂取による実効線量は、原子炉施設周辺でそれぞれ最大の被ばくを与える地点に居住する人を対象とし、外部被ばくについては放射性雲からのγ線による実効線量と地表に沈着した放射性物質からのγ線による実効線量を考慮する。

具体的な計算方法等については、Ⅲ章第3編（保安に係る補足事項）2.2 線量評価に準じる。

③ 計算地点

計算地点は、1. 2号機共用排気筒を中心として16方位に分割した陸側9方位の敷地境界外について行う。

上記の評価方法で、評価した結果は、以下のとおり。

敷地境界における被ばく量は年間約0.0012～0.0025 [mSv]

4. 評価

第2号機原子炉建屋西側外壁開口設置後の放出量評価は、約0.0054～0.011 億 Bq/h であり、開口設置前と比較して約0.0042～0.0099 億 Bq/h 増加することとなる。これによる敷地境界における被ばく量は年間約0.0016～0.0029 mSv となる。（表参照）

なお、気体廃棄物の管理については、Ⅲ章第3編（保安に係る補足事項）2.1.3 放射性気体廃棄物等の管理に準じる。

放出量 [単位：億 Bq/h]	第2号機開口設置前	第2号機開口設置後 (評価値)
第1号機	約0.000027 ^{※1}	
第2号機	約0.0013 ^{※1}	約0.0054～0.011
第3号機	約0.0012 ^{※1}	
第4号機	約0.00022 ^{※1}	
合計	0.0027 ^{※2}	0.0068～0.013 ^{※2}
敷地境界線量 [単位：mSv/y]	0.0007	0.0016～0.0029

※1 平成27年8月～平成29年2月の平均値を用いている。

※2 数値処理の都合上、合計が一致しない。

2.12 使用済燃料共用プール設備

2.12.1 基本設計

2.12.1.1 設置の目的

使用済燃料共用プール設備は、燃料の適切な貯蔵を目的として運用補助共用施設内に設け、燃料貯蔵設備と燃料取扱設備等で構成する。

燃料貯蔵設備は、使用済燃料共用プール（以下、「共用プール」という。）、共用プール冷却浄化系、共用プール補機冷却系、共用プール補給水系等で構成する。

共用プール冷却浄化系は、ポンプ、熱交換器、ろ過脱塩装置、補助機器等で構成する。

燃料取扱設備は、燃料取扱装置及び共用プールで取り扱う構内用輸送容器、使用済燃料乾式貯蔵容器（以下、「乾式貯蔵キャスク」という。）及び使用済燃料輸送貯蔵兼用容器（以下、「輸送貯蔵兼用キャスク」という。）で構成する。なお、これら容器については、「Ⅱ.2.11」、「Ⅱ.2.13」及び「Ⅱ.2.31」に記載する。

その他設備として天井クレーン、使用済燃料輸送容器除染設備、共用プール建屋廃液移送系等がある。

また、共用プールに、1～4号機原子炉建屋内の使用済燃料プールに貯蔵中の使用済燃料及び新燃料、5,6号機原子炉建屋内の使用済燃料プール及び炉内に貯蔵中の使用済燃料（合計5,936体※）の受け入れを計画している。

その中には、震災前から使用済燃料プールに貯蔵されている変形燃料や破損燃料、震災時に破損した可能性のある燃料が含まれている。変形燃料の貯蔵にあたっては、変形の程度に対して、物理的に貯蔵できるとともに、臨界を防止することが必要である。また破損燃料の貯蔵にあたっては、破損形態に応じて、放射性物質の拡散を抑制するとともに、燃料の形状が維持されていない場合でも臨界を防止することが必要である。

このため、上記の燃料の貯蔵を目的とした使用済燃料貯蔵ラックを設置する。

なお、5,6号機原子炉建屋内の使用済燃料プールに貯蔵中の使用済燃料及び新燃料を除く炉内燃料の共用プールへの受け入れ計画を踏まえて、使用済燃料乾式キャスク仮保管設備（「Ⅱ.2.13」に記載）の増設を計画している。

※ 5,6号機原子炉建屋内に貯蔵中の新燃料は含まない

2.12.1.2 要求される機能

原則、「発電用軽水型原子炉施設に関する安全設計審査指針」指針49から51に適合すること。

2.12.1.3 設計方針

(1) 未臨界性

共用プールは、容量いっぱい燃料集合体を収容した場合でも、通常時はもちろん、予想される外的条件が加わっても未臨界性を確保できる設計とする。

(2) 冷却及び浄化能力

共用プール冷却浄化系は、共用プール内に貯蔵する使用済燃料から発生する崩壊熱を除き、かつ共用プール水の不純物を除去できる能力を持つ設計とする。

使用済燃料の崩壊熱は、共用プール冷却浄化系の熱交換器によって、共用プール補機冷却系へ伝えられ、同系の空気冷却器によって大気に伝えられる設計とする。

(3) 非常用補給能力

津波等により外部電源が喪失した場合にも、共用プール補給水系を用いて共用プール水の補給ができる設計とする。

(4) 貯蔵容量

炉心全装荷量（1～6号機炉心全装荷量の合計）の約200%貯蔵できる容量を超えない容量とする。

(5) 遮へい

共用プール及びキャスク・ピット内の壁面及び底部はコンクリート壁による遮へいを施すとともに、使用済燃料の上部には十分な水深を保つことにより、遮へい効果を有する設計とする。

燃料取扱装置は、構内用輸送容器、乾式貯蔵キャスクまたは輸送貯蔵兼用キャスクと共用プール間の使用済燃料の移送操作及び収容操作が、使用済燃料の遮へい及び熱除去を考慮して、水面下で行うことができる設計とする。

(6) 漏えい防止及び漏えい検知

共用プール水の漏えいを防止するため、共用プール及びキャスク・ピットには排水口を設けない設計としている。また、共用プールに接続された配管が破損しても、共用プール水が流出しない設計としている。

また、万一の共用プール・ライニングの想定される破損による漏えいを検知するため漏えい水検出計及び水位警報装置を設ける。

(7) 構造強度

燃料取扱装置及び貯蔵設備は、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ように設計する。

また、共用プールのライニングは、万一の燃料集合体の落下時にも共用プールの機能を失うような損傷を生じない設計とする。

(8) 落下防止

使用済燃料貯蔵ラック上には、重量物を吊った天井クレーンは通過させないようにし、重量物の貯蔵燃料への落下を防止できる設計とする。

燃料取扱装置の燃料つかみ機は、二重のワイヤや種々のインター・ロックを設け、また天井クレーンの主要要素は種々の二重化を施すことにより移送中の燃料集合体等の落下を防止できる設計とする。

(9) 除染

構内用輸送容器等の除染ができるようにする。

(10) 被ばく低減

燃料取扱装置及び燃料貯蔵設備は、放射線業務従事者の被ばくを合理的に達成できる限り低くするため、運用補助共用施設の建屋内に設置し、換気空調設備を有する設計とする。

(11) 燃料取扱場所のモニタリング

燃料取扱場所は、崩壊熱の除去能力の喪失に至る状態及び過度の放射線レベルを検出できるとともに、これを適切に放射線業務従事者に伝える設計とする。

(12) 格納及び空気浄化

貯蔵設備は運用補助共用施設の建屋内に設置し、換気空調設備を有する設計とする。

(13) 試験可能性

燃料取扱装置及び燃料貯蔵設備のうち安全機能を有する構築物、系統及び機器は、定期的に試験及び検査ができる設計とする。

(14) 火災防護

共用プール施設は、火災により共用プール施設の安全性が損なわれないようにする。

2.12.1.4 供用期間中に確認する項目

- (1) 共用プール水温が 65℃以下であること。
- (2) 共用プールへ冷却水を補給できること。
- (3) 共用プールがオーバーフロー水位付近にあること。

2.12.1.5 主要な機器

運用補助共用施設平面図を図 2.12-1～5 に、共用プール概要図を図 2.12-6, 7 に示す。

(1) 共用プール

- a. 共用プールは、鉄筋コンクリート造の設備で運用補助共用施設内にあり、1～6 号機原子炉建屋内の使用済燃料プールまたは炉内で 19 ヶ月以上冷却された使用済燃料（7×7 燃料※1, 8×8 燃料, 新型 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 燃料及び 9×9 燃料）及び 1～4 号機原子炉建屋内の使用済燃料プール内の新燃料（9

×9 燃料※2) を貯蔵し、貯蔵容量は炉心全装荷量 (1~6 号機炉心全装荷量の合計) の約 200%である。なお、乾式貯蔵キャスク仕立て時に発生するチャンネルボックス等も共用プールに貯蔵する。

※1 共用プール内の使用済燃料貯蔵ラックにおける未臨界性の評価は、使用済燃料の中性子無限増倍率を新燃料およびいかなる燃焼度の燃料を貯蔵しても十分安全側の評価を得るように 1.30 を仮定している。7×7 燃料の炉心内装荷状態における燃料未照射状態から燃料寿命末期において最も大きい中性子無限増倍率は 1.30 を下回るため、既存の評価に包含される。従って、7×7 燃料を燃料貯蔵ラックに貯蔵した場合でも臨界にはならない。なお、4 号機の使用済燃料貯蔵プールに存在する 7×7 燃料は、チャンネルボックス等の変形により使用済燃料貯蔵ラック (90 体) に貯蔵する事は適さないため、使用済燃料貯蔵ラック (49 体) に貯蔵する。

※2 使用済 9×9 燃料を共用プール内の燃料貯蔵ラックに貯蔵した場合の未臨界性は既存の設置許可において確認されている。使用済 9×9 燃料の未臨界評価においては、燃料未照射状態から燃料寿命末期において最も反応度が高い状態を包絡するような評価を行っていることから、新燃料を燃料貯蔵ラックに貯蔵した場合でも臨界にはならない。

- b. 使用済燃料貯蔵ラックは、ステンレス鋼を使用するとともに、適切な燃料間距離を保持することにより、容量いっぱい燃料を収容し、共用プール水温及びラック内燃料貯蔵位置等について想定される厳しい状態を仮定しても実効増倍率が 0.95 以下となる設計としている。また、使用済燃料貯蔵ラックの一部については、使用済燃料収納缶に入れた燃料を使用済燃料収納缶ごと貯蔵できる設計とする。使用済燃料収納缶は、変形、または破損燃料を使用済燃料収納缶内に収納して取扱うための吊上げ機能を持ち、また燃料の形状が維持されていない場合でも放射性物質の拡散を抑制する。
- c. 共用プール、キャスク・ピット壁の厚さ及び水深は遮へいを考慮して十分確保し、内面はステンレス鋼でライニングするとともに排水口を設けないことにより漏えいを防止している。また、万一の共用プール・ライニング及びキャスク・ピット・ライニングの想定される破損による漏えいを検知するため、漏えい水検出計及び水位警報装置を設ける。
- d. 燃料取扱場所においてガンマ線レベルを連続的に監視し、線量率が設定値を超えた場合には燃料取扱場所に警報を発するエリア放射線モニタを設ける。
- e. キャスク・ピットは、共用プールの横に別個に設け、万一のキャスクの落下事故の場合にも、共用プールの機能を喪失しない設計としている。また、万一の燃料集合体の落下時にも共用プールのライニングは機能を喪失しない設計としている。

(2) 共用プール冷却浄化系

共用プール冷却浄化系は、使用済燃料からの崩壊熱を共用プール補機冷却系により熱交換器で除去して共用プール水を冷却するとともに、ろ過脱塩装置で共用プール水をろ過脱塩して、共用プール及びキャスク・ピット水の純度及び透明度を維持する。

共用プール冷却浄化系は、1~6 号機原子炉建屋内の使用済燃料プールまたは炉内に 19

ヶ月以上冷却された使用済燃料及び炉内燃料を年間 900 体ずつ貯蔵容量いっぱいまで受入れた場合の使用済燃料から発生する崩壊熱の合計として定義する通常最大熱負荷を、この系の熱交換器で除去し、1 系列で共用プール水温がコンクリートの制限温度 65°C を超えない、また 2 系列で共用プール水温が現場作業環境を考慮した温度 52°C を超えない設計としている。

共用プールからスキマせきを越えてスキマ・サージ・タンクに流出する共用プール水は、ポンプで昇圧し、ろ過脱塩装置、熱交換器を通した後、共用プールのディフューザから吐出する設計としている。

共用プールに入る配管には逆止弁を設け、サイフォン効果により共用プール水が流出しない設計としている。

共用プール冷却浄化系は、スキマせきを越えてスキマ・サージ・タンクに流出する水をポンプで循環させるので、この系の破損時にも燃料プール水位はスキマせきより低下することはない。

なお、ろ過脱塩装置より発生する使用済イオン交換樹脂は、運用補助共用施設内の本設の沈降分離タンク（共用プールの設備寿命を 40 年として、発生する使用済イオン交換樹脂を収容できる容量として設計されている）で保管する。

また、本系統の電源は、外部電源喪失時に非常用所内電源からの受電が可能となっている。

(3) 共用プール補機冷却系

共用プール補機冷却系は、共用プールで発生する崩壊熱等を共用プール冷却浄化系の熱交換器等によって冷却除去するとともに、この系の空気冷却器によって大気へ伝える。

また、本系統の電源は、外部電源喪失時に非常用所内電源からの受電が可能となっている。

(4) 共用プール補給水系

共用プール補給水系は、通常時及び異常時に共用プール補給水貯蔵槽から共用プール補給水ポンプで昇圧し、共用プール水を補給する。

外部電源が喪失した場合にも、共用プール補給水系を用いて、共用プールへ水の補給ができる。また、長期停止した場合も消防車により共用プールへ水の補給が可能である。

なお、消防車については、ろ過水タンク等（ろ過水タンク：T.P. 約 39m、純水タンク：T.P. 約 8m）の真水を水源とする。

(5) 燃料取扱装置

燃料取扱装置は、共用プール及びキャスク・ピットの上に設けるレール上を水平に移動するブリッジと、その上を移動するトロリで構成する。

また、燃料つかみ機は、二重のワイヤや種々のインター・ロックを設ける。燃料取扱作業による放射線業務従事者の被ばくを低減するため、燃料取扱装置は、遠隔自動で運転できるようにしている。

(6) 天井クレーン

天井クレーンは、構内用輸送容器、乾式貯蔵キャスクまたは輸送貯蔵兼用キャスクの運搬等に使用する。

また、天井クレーンの主要要素は、種々の二重化（主巻装置のワイヤーロープ、ドラム等）を施しており、使用済燃料貯蔵ラック上には、重量物を通過させないように、天井クレーンにインター・ロックが設けられている。

(7) 使用済燃料輸送容器除染設備

使用済燃料輸送容器除染設備は、構内用輸送容器、乾式貯蔵キャスクまたは輸送貯蔵兼用キャスクの除染を行うため、共用プールに隣接して設けている。

(8) 燃料貯蔵区域換気空調系

燃料貯蔵区域換気空調系は、送・排風機、フィルタ等で構成する。共用プールの管理区域に供給された空気は、フィルタを通した後、排風機により排気口から大気に放出する。

(9) 使用済燃料輸送容器保管エリア

使用済燃料装填前あるいは装填後の構内用輸送容器、乾式貯蔵キャスク及び輸送貯蔵兼用キャスクを必要に応じて一時保管するため、運用補助共用施設内に使用済燃料輸送容器保管エリアを設けている。

(10) 電源

使用済燃料共用プール設備の電源は所内高圧母線から受電できる構成とする。また、外部電源喪失の場合でも、非常用所内電源からの供給が可能な構成とする。

なお、全交流電源喪失の場合でも電源車（「Ⅱ.2.7」に記載）により、使用済燃料共用プール注水機能を維持する機器に対して電源を供給できる構成とする。

(11) 共用プール建屋廃液移送系

共用プール建屋廃液移送系はポンプ、タンク、配管等で構成され、運用補助共用施設内で発生する廃液を雑固体廃棄物減容処理建屋（以下、高温焼却炉建屋）へ移送する。

2.12.1.6 自然災害対策等

(1) 津波

東北地方太平洋沖地震では、共用プール冷却浄化系、共用プール補機冷却系及び共用プール補給水系について、地下階に設置されていた電源設備以外のポンプ等の設備は床面より高い位置に設置されていたことにより被害は生じなかったが、地下階に設置されていた電源盤等が浸水による被害を生じたため冷却機能を喪失した。

このため、余震により想定される津波対策としての仮設防潮堤の設置に加え、建屋の防水性向上対策等を行う。

まずは地下階の防水性向上対策としてトレンチ開口部を閉塞し、地下階の電源盤等の浸水による電源喪失リスクを低減させることで、冷却機能喪失リスクを低減している。また、建屋の浸水を抑えるために床・壁等の開口部の防水性向上対策を行っている。

屋外に設置している共用プール建屋廃液移送系の一部配管は仮設防潮堤内に設置する。また、仮設防潮堤の高さを上回る津波の襲来に備え、大津波警報が出た際は廃液移送設備を停止することにより、設備損傷による影響が最小限になるよう対策を図る。

(2) 火災

復旧した火災報知設備及び消火設備により、火災の早期検知、消火活動の円滑化を図る。

(3) 台風・竜巻

使用済燃料共用プール設備（共用プール建屋廃液移送系を除く）は、屋内に設置してあるため、台風・竜巻の影響を受けない。共用プール建屋廃液移送系は配管の一部を屋外に設置しているため、台風・竜巻時は移送設備の停止等を行い、設備損傷による影響が最小限になるよう対策を図る。

(4) 環境条件

使用済燃料共用プール設備は基本的に東北地方太平洋沖地震において被災した設備を復旧する計画としている。復旧後は以下の保守管理を実施し、設備の維持を図る。

- ・燃料取扱装置、天井クレーンについては使用前の点検及び定期的な点検を実施する。
- ・共用プール冷却浄化系、共用プール補機冷却系、共用プール補給水系、共用プール建屋廃液移送系、建屋躯体等については、当面は、定期的な巡視点検において状態を監視し、異常の兆候が確認された場合に対応を行うこととしている。

2.12.1.7 構造強度及び耐震性

使用済燃料共用プール設備の構造強度及び耐震性は以下の工事計画認可申請書等により確認している。ただし、共用プール建屋廃液移送系の一部配管を除く（添付資料-11参照）。

工事計画認可申請書（6資庁第2935号 平成6年4月27日認可）

工事計画届出書（総文発官5第1218号 平成6年4月13日届出）

運用補助共用施設共用プール棟の耐震壁および使用済燃料共用プール躯体について、基準地震動 S_s による耐震安全性評価を実施し、問題のないことを確認している。

2.12.1.8 機器の故障への対応

(1) 共用プール冷却浄化系の機器の単一故障

a. 共用プール冷却浄化系又は共用プール補機冷却系ポンプ故障

共用プール冷却浄化系又は共用プール補機冷却系ポンプが故障した場合は、現場に移動し、待機ポンプの起動を行い、使用済燃料共用プールの循環冷却を再開する。

b. 電源喪失

共用プール冷却浄化系の電源が外部電源喪失や所内電源喪失により喪失した場合、電

源の復旧に長時間を要しない場合は、電源の復旧により使用済燃料共用プールの循環冷却を再開する。

共用プール冷却浄化系ポンプ及び共用プール補給水ポンプの電源の復旧に長時間を要する場合は、予め免震重要棟付近（T.P. 約 35m）に待機している電源車を用いて共用プール補給水系の電源を復旧し、使用済燃料共用プールへの注水を行うと共に、必要に応じて予め免震重要棟西側（T.P. 約 35m）に待機している消防車の配備を行い、直接プールに注水を行うことにより、プール水位の異常な低下を防止する。

(2) 共用プール冷却浄化系の複数の系統・機器の同時機能喪失

地震、津波等により、万が一、共用プール冷却機能の複数の系統や機器の機能が同時に喪失した場合には、現場状況に応じて、予め免震重要棟西側（T.P. 約 35m）に待機している消防車の配備を行い、プール水位の異常な低下を防止する。共用プール冷却機能が停止してから、燃料の露出を確実に防止でき且つ水遮へいが有効とされる使用済燃料の有効燃料頂部の上部 2m に至るまでは最短でも約 19 日であることから、使用済燃料プールの冷却を確保することは可能である。

(3) 冷却機能喪失事象に対する評価

共用プール冷却機能の喪失評価を添付資料—6 に示す。

(4) 燃料集合体の落下

燃料集合体の落下評価を添付資料—7 に示す。

2.12.2 基本仕様

2.12.2.1 要求仕様

以下に要求仕様を示す。なお、福島第一原子力発電所 原子炉設置許可申請書に機器仕様を記載されているものは機器名称に※を記載する。

(1) 使用済燃料共用プール

容 量 6734 体

(使用済燃料共用プールについては、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

(2) 使用済燃料貯蔵ラック

容 量 90 体

個 数 74

(使用済燃料貯蔵ラックについては、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

(3) 使用済燃料貯蔵ラック

容 量 49 体

個 数 1

(4) 使用済燃料貯蔵ラック

容 量 25 体

個 数 1

(5) 使用済燃料収納缶 (小)

個 数 48

(6) 使用済燃料収納缶 (大)

個 数 25

(7) 共用プール冷却浄化系

a. ポンプ※

台 数 3 (うち 1 台は予備)

容 量 約 500m³/h/台

(ポンプについては、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

b. 熱交換器※

基 数 2

交換熱量 約 3.3MW/基 (約 2.8×10^6 kcal/h/基)

(熱交換器については、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

c. ろ過脱塩装置※

形 式 圧力プリコート形

基 数 2

容 量 約 200m³/h/基

(ろ過脱塩装置については、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

表2. 12-1 共用プール冷却浄化系 主要配管仕様

名 称	仕 様	
スキマ・サージ・タンクから共用プール冷却浄化系ポンプまで	外径／厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	267.4／9.3 SUS304TP／STS42 静水頭／14.0 66
共用プール冷却浄化系ポンプから共用プール冷却浄化系熱交換器まで	外径／厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	165.2／7.1 216.3／8.2 267.4／9.3 SUS304 TP／STS42 14.0 66
共用プール冷却浄化系熱交換器から使用済燃料共用プールへ	外径／厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	267.4／9.3 SUS304 TP 14.0 66
ポンプ出口配管から共用プール冷却浄化系ろ過脱塩器まで	外径／厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	165.2／7.1 SUS304TP／STS42／STPT38 14.0 66
共用プール冷却浄化系ろ過脱塩器からポンプ出口配管まで	外径／厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	139.8／6.6 165.2／7.1 SUS304TP 14.0 66

(主要配管については、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

(8) 共用プール補給水系

a. 共用プール補給水貯蔵槽※

基 数 1
容 量 約 430m³
主要部材質 ステンレス鋼ライニング

b. ポンプ※

台 数 2
容 量 約 30m³/h/台

(9) 共用プール補機冷却系

a. ポンプ※

台 数 3 (うち1台は予備)

容 量 約 650m³/h/台

(ポンプについては、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

b. 空気冷却器※

基 数 2

交換熱量 約 3.3MW/基 (約 2.9×10⁶kcal/h/基)

(空気冷却器については、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

表 2. 1 2 - 2 共用プール補機冷却系 主要配管仕様

名 称	仕 様	
共用プール補機冷却ポンプ から共用プール冷却浄化系 熱交換器まで	外径/厚さ (mm)	216.3/8.2 267.4/9.3 318.5/10.3
	材質	STS42
	最高使用圧力 (kg/cm ²)	12.0
	最高使用温度 (°C)	70
共用プール冷却浄化系熱交 換器から共用プール補機冷 却系空気冷却器まで	外径/厚さ (mm)	114.3/6.0 165.2/7.1 267.4/9.3 318.5/10.3
	材質	STS42
	最高使用圧力 (kg/cm ²)	12.0
	最高使用温度 (°C)	70
共用プール補機冷却系空気 冷却器から共用プール補機 冷却系ポンプまで	外径/厚さ (mm)	114.3/6.0 165.2/7.1 318.5/10.3
	材質	STS42
	最高使用圧力 (kg/cm ²)	12.0
	最高使用温度 (°C)	70

(主要配管については、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

(10) 燃料取扱装置

型 式 燃料把握機付移床式

基 数 1

定格荷重 燃料把握機 460kg 補助ホイス ト 460kg

(燃料取扱装置については、以下の工事計画届出書により確認している。

工事計画届出書 (総文発官 5 第 1218 号 平成 6 年 4 月 13 日届出))

(11) 天井クレーン

a. 共用プールエリア天井クレーン

型 式 天井走行式

基 数 1

定格荷重 主巻 125t 補巻 5t

(共用プールエリア天井クレーンについては、以下の工事計画届出書により確認している。

工事計画届出書 (総文発官 5 第 1218 号 平成 6 年 4 月 13 日届出))

b. キャスク搬出入エリア天井クレーン

型 式 天井走行式

基 数 1

定格荷重 主巻 140t 補巻 5t

(キャスク搬出入エリア天井クレーンについては、以下の工事計画届出書により確認している。

工事計画届出書 (総文発官 5 第 1218 号 平成 6 年 4 月 13 日届出))

(12) 燃料貯蔵区域換気空調系

a. 共用プールエリア送風機

台 数 2 (うち 1 台は予備)

容 量 約 93,000m³/h/台

形 式 遠心式

静 圧 180mmAq

(共用プールエリア送風機については、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

b. 共用プールエリア排風機

台数	2 (うち1台は予備)
容量	約 93,000m ³ /h/台
形式	遠心式
静圧	250mmAq

(共用プールエリア排風機については、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可))

(13) 温度計

形式	熱電対
計測範囲	0~100°C
個数	1

(14) エリア放射線モニタ

検出器の種類	計測範囲	取付箇所
半導体式	10 ⁻⁴ ~1mSv/h	<ul style="list-style-type: none"> ・ 3F 1チャンネル ・ 2F 1チャンネル ・ 1F 3チャンネル ・ B1F 1チャンネル (合計 6 チャンネル)
	1~10 ⁴ mSv/h	<ul style="list-style-type: none"> ・ 3F 1チャンネル (合計 1 チャンネル)

(エリア放射線モニタについては、以下の工事計画届出書により確認している。

工事計画届出書 (総文発官 5 第 1218 号 平成 6 年 4 月 13 日届出))

(15) プロセス放射線モニタ

a. 運用補助共用施設排気放射線モニタ (以下「排気放射線モニタ」という)

検出器の種類	計測範囲	取付箇所
シンチレーション	10 ⁻¹ ~10 ⁶ s ⁻¹	<ul style="list-style-type: none"> ・ 3F 2チャンネル

(排気放射線モニタについては、以下の工事計画届出書により確認している。工事計画届出書 (総文発官 5 第 1218 号 平成 6 年 4 月 13 日届出))

b. 共用プール補機冷却系放射線モニタ（以下「補機冷却系放射線モニタ」という）

検出器の種類	計測範囲	取付箇所
シンチレーション	$10^{-1} \sim 10^6 \text{ s}^{-1}$	・B1F 2チャンネル

（補機冷却系放射線モニタについては、以下の工事計画届出書により確認している。工事計画届出書（総文発官 5 第 1218 号 平成 6 年 4 月 13 日届出））

(16) 使用済燃料輸送容器保管エリア

保管容量（構内用輸送容器，乾式貯蔵キャスク，輸送貯蔵兼用キャスクの合計）
10 基

(17) 消防車

基 数 1※
規格放水圧力 0.7MPa 以上
放水性能 60m³/h 以上
高圧放水圧力 1.0MPa 以上
放水性能 36m³/h 以上
燃料タンク容量，消費量 約 63ℓ（参考値），約 37ℓ/h（参考値）
※使用済燃料プール設備と共用

(18) ろ過水タンク等

a. ろ過水タンク

基 数 1
容 量 約 8,000m³/基

b. 純水タンク

基 数 2
容 量 約 2,000m³/基

(19) 共用プール建屋廃液移送系

a. 運用補助共用施設沈降分離タンク※

基 数 2
容 量 約 100m³/基

（運用補助共用施設沈降分離タンクについては、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書（6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可））

b. 運用補助共用施設デカントポンプ

台数	2 (うち1台は予備)
容量	約 10m ³ /h/台

(運用補助共用施設デカントポンプについては、以下の工事計画認可申請書により確認している。)

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可)

c. 運用補助共用施設機器ドレン廃液受タンク※

基数	2
容量	約 50m ³ /基

(運用補助共用施設機器ドレン廃液受タンクについては、以下の工事計画認可申請書により確認している。)

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可)

d. 運用補助共用施設機器ドレン廃液移送ポンプ

台数	2 (うち1台は予備)
容量	約 35m ³ /h/台

(運用補助共用施設機器ドレン廃液移送ポンプについては、以下の工事計画認可申請書により確認している。)

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可)

e. 運用補助共用施設高電導度ドレンサンプタンク

基数	2
容量	約 4m ³ /基

(運用補助共用施設高電導度ドレンサンプタンクについては、以下の工事計画認可申請書により確認している。)

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可)

f. 運用補助共用施設高電導度ドレンサンプポンプ

台数	4 (うち2台は予備)
容量	約 10m ³ /h/台

(運用補助共用施設高電導度ドレンサンプポンプについては、以下の工事計画認可申請書により確認している。)

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可)

表 2. 1 2 - 3 共用プール建屋廃液移送系 主要配管仕様

名 称	仕 様	
運用補助共用施設高電導度 ドレンサンプポンプ(A), (C) から運用補助共用施設高電 導度ドレンサンプポンプ出 口配管合流部下流まで (*)	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	60.5/3.9 76.3/5.2 89.1/5.5 SUS316LTP 10.0 66
運用補助共用施設高電導度 ドレンサンプポンプ(B), (D) から運用補助共用施設高電 導度ドレンサンプポンプ (A), (C)出口配管まで (*)	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	60.5/3.9 76.3/5.2 SUS304TP/SUS316LTP 10.0 66
運用補助共用施設高電導度 ドレンサンプポンプ出口配 管合流部下流から高温焼却 炉建屋地下滞留水貯留エリ アまで (鋼管)	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (MPa) 最高使用温度 (°C)	89.1/5.5 SUS304TP 0.98 66
(ポリエチレン管)	呼び径 材質 最高使用圧力 (MPa) 最高使用温度 (°C)	80A 相当 ポリエチレン 0.98 40
(耐圧ホース)	呼び径 材質 最高使用圧力 (MPa) 最高使用温度 (°C)	80A 相当 ポリ塩化ビニル 0.98 40
運用補助共用施設沈降分離 タンクから運用補助共用施 設デカントポンプまで (*)	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	60.5/3.9 SUS304TP 静水頭/10.0 66

(*の記載が有る配管は、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可)

表2. 12-3 共用プール建屋廃液移送系 主要配管仕様

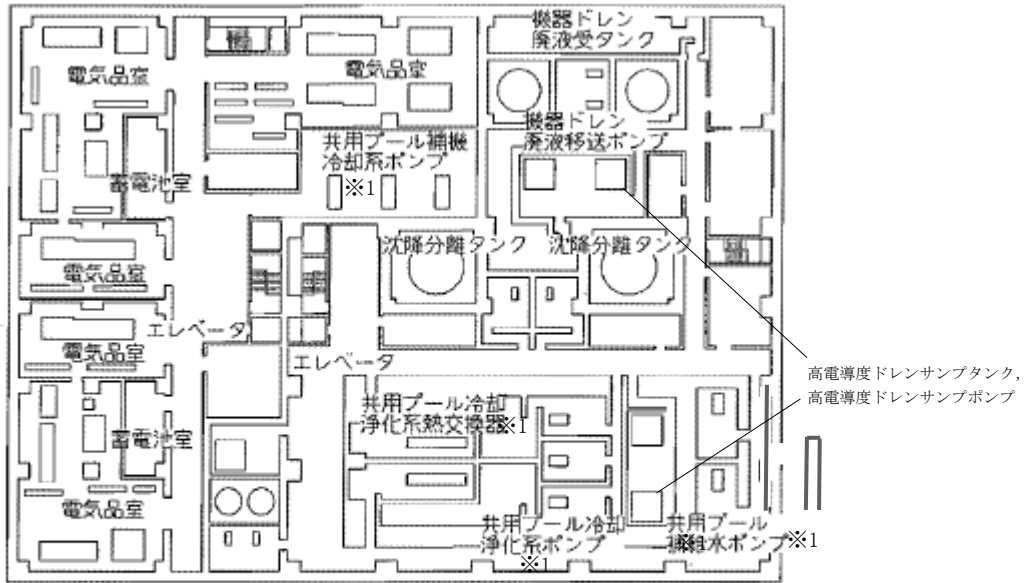
名 称	仕 様	
運用補助共用施設デカントポンプから運用補助共用施設機器ドレン廃液受タンク集合管まで (*)	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	34.0/3.4 60.5/3.9 60.5/5.5 SUS304TP/STPT38 10.0 66
運用補助共用施設機器ドレン廃液受タンク集合管 (*)	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	114.3/6.0 STPT38/SUS304TP 10.0 66
運用補助共用施設建屋デカントポンプ出口配管分岐点から運用補助共用施設高電導度ドレンサンプポンプ(B), (D)出口配管まで	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	60.5/3.9 SUS304TP 10.0 66
運用補助共用施設機器ドレン廃液受タンクから運用補助共用施設機器ドレン廃液移送ポンプまで (*)	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	114.3/6.0 SUS304TP/STPT38 静水頭/10.0 66
運用補助共用施設機器ドレン廃液移送ポンプから運用補助共用施設機器ドレン廃液移送ポンプ出口配管分岐点まで (*)	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	60.5/5.5 89.1/5.5 76.3/5.2 STPT38 10.0 66
運用補助共用施設機器ドレン廃液移送ポンプ出口配管分岐点から運用補助共用施設高電導度ドレンサンプポンプ(B), (D)出口配管まで	外径/厚さ (mm) 材質 最高使用圧力 (kg/cm ²) 最高使用温度 (°C)	76.3/5.2 STPT38/SUS304TP 10.0 66

(*の記載が有る配管は、以下の工事計画認可申請書により確認している。

工事計画認可申請書 (6 資庁第 2935 号 平成 6 年 4 月 27 日認可)

2.12.3 添付資料

- 添付資料—1 系統概略図
- 添付資料—2 現在の設備状況
- 添付資料—3 有効燃料頂部+2m での線量率評価
- 添付資料—4 「共用プール冷却浄化系及び共用プール補機冷却系」1 系列運転時の共用プール水温度評価
- 添付資料—5 運用補助共用施設共用プール棟の耐震安全評価について
- 添付資料—6 共用プール冷却機能の喪失評価
- 添付資料—7 燃料集合体の落下評価
- 添付資料—8 使用済燃料共用プール設備の耐震安全性について
- 添付資料—9 使用済燃料貯蔵ラックについて
 - 添付資料—9—1 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）について
 - 添付資料—9—2 使用済燃料貯蔵ラック（25 体）について
- 添付資料—10 使用済燃料共用プール設備に係る確認事項について
- 添付資料—11 共用プール建屋廃液移送系について

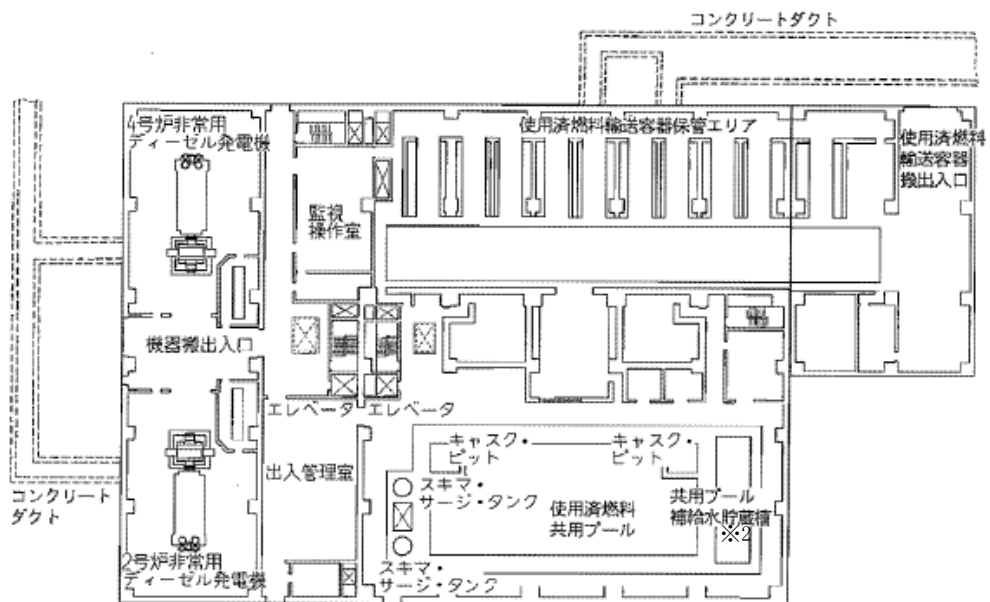


2.12では、G.L. ±0m= T.P. 8.5m^(※)とする。
 (※) 震災後の地盤沈下量(-709mm)と O.P.
 から T.P. への換算値(-727mm)を用いて、下
 式に基づき換算している。
 <換算式> T.P.=旧 O.P.-1,436mm

※1: 共用プール冷却浄化系ポンプ、共用プール補機冷却系ポンプ、共用プール補給水ポンプ、共用プール冷却浄化系熱交換器は、床面から高い位置に設置。

G.L. -7.3m

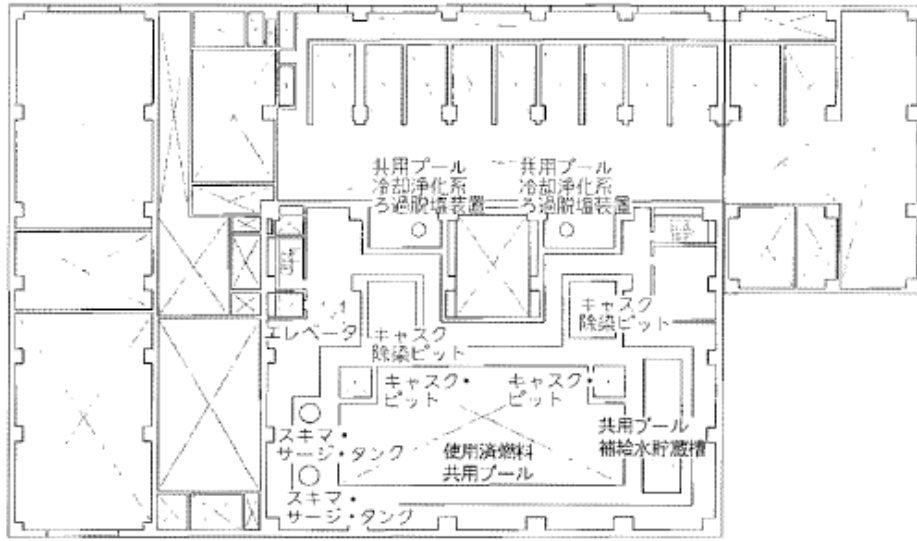
図2. 12-1 運用補助共用施設平面図 (その1)



G.L. +0.2m

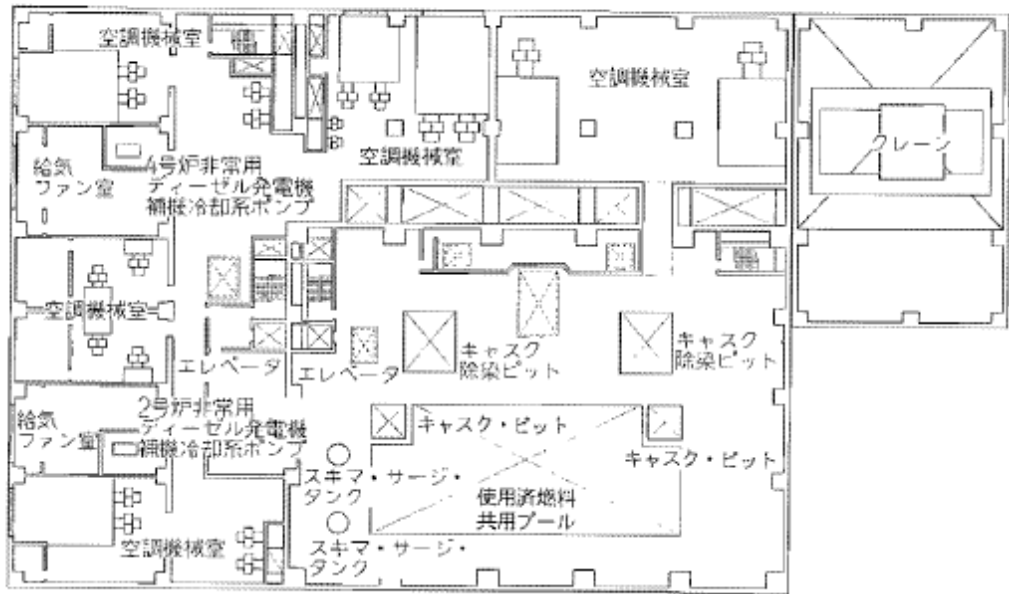
※2: 共用プール補給水貯蔵槽は、共用プール同様、鉄筋コンクリート造の設備。

図2. 12-2 運用補助共用施設平面図 (その2)



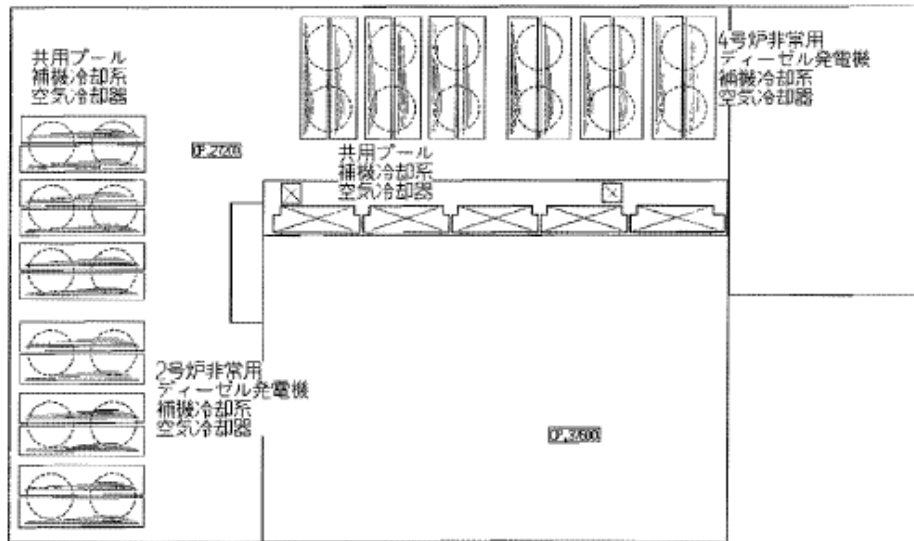
G. L. +5.7m

図 2. 1 2 - 3 運用補助共用施設平面図 (その 3)



G. L. +9.2m, G. L. +10.2m

図 2. 1 2 - 4 運用補助共用施設平面図 (その 4)



G. L. +17.2m, G. L. +27.6m

図2. 12-5 運用補助共用施設平面図 (その5)

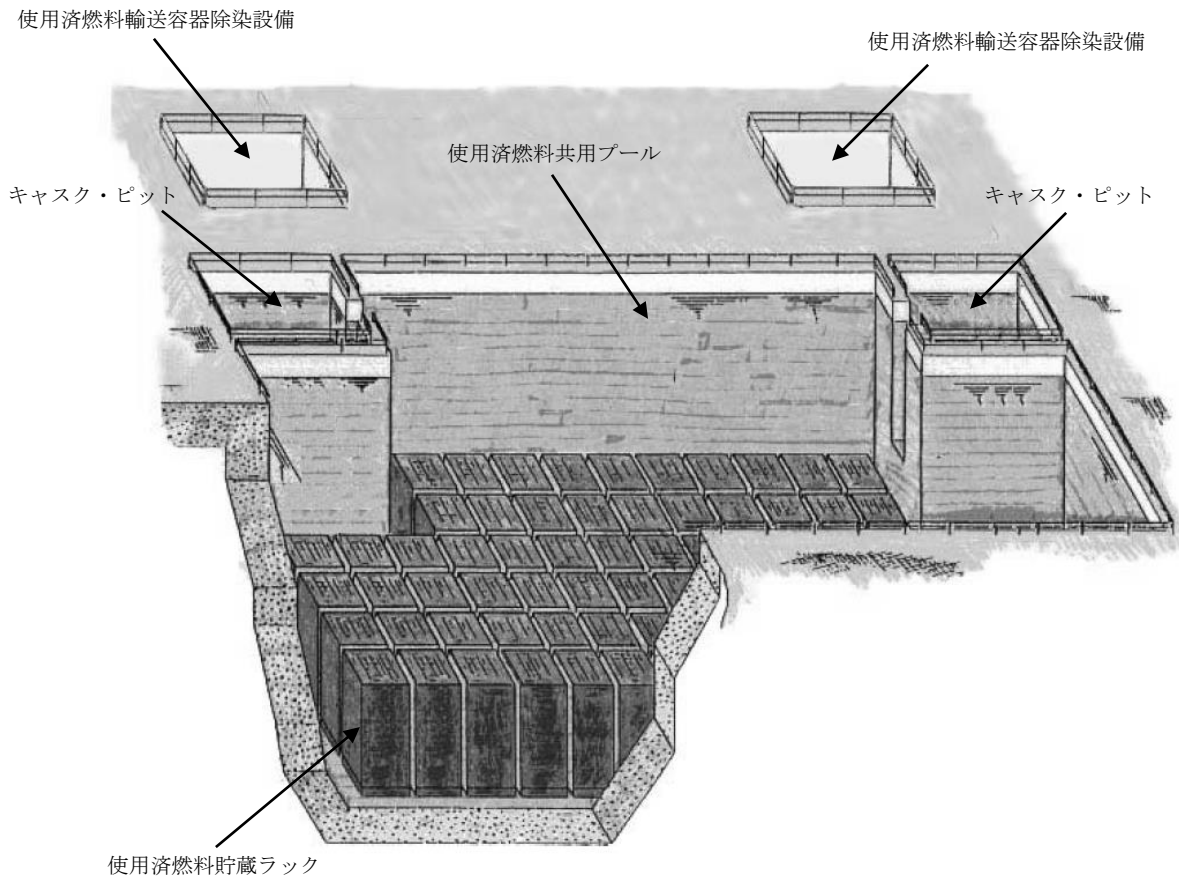


図 2. 1 2 - 6 共用プール概要図

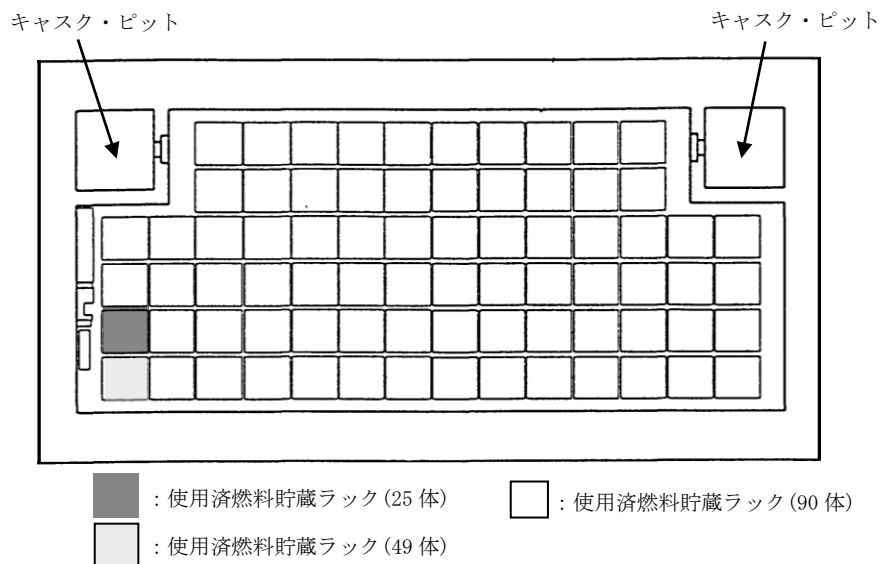


図 2. 1 2 - 7 共用プール概要図 (平面)

使用済燃料貯蔵ラック（49 体）について

1. 背景

共用プールに、1～4 号機原子炉建屋内の使用済燃料プールに貯蔵中の使用済燃料及び新燃料、5, 6 号機原子炉建屋内の使用済燃料プール及び炉内に貯蔵中の使用済燃料(合計 5, 936 体)の受け入れを計画している。その中には、震災前から使用済燃料プールに貯蔵されている変形燃料や破損燃料、震災時に破損した可能性のある燃料が含まれている。変形燃料の貯蔵にあたっては、変形の程度に対して、物理的に貯蔵できるとともに、臨界を防止することが必要である。また破損燃料の貯蔵にあたっては、破損形態に応じて、使用済燃料収納缶に収納することにより放射性物質の拡散を抑制するとともに、臨界を防止することが必要である。

このため、上記の燃料の貯蔵を目的とした使用済燃料貯蔵ラックを設置する。

2. 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）および使用済燃料収納缶（小）について

- 使用済燃料収納缶（小）とは、燃料ハンドル部の変形が小さい燃料、または使用済燃料プールに貯蔵されている破損燃料（破損の疑いがある燃料を含む）を収納する缶であり、使用済燃料収納缶（小）ごと使用済燃料貯蔵ラック（49 体）に貯蔵することが可能である。なお、健全燃料についても使用済燃料収納缶（小）に収納し、使用済燃料貯蔵ラック（49 体）に貯蔵することが可能である。
- 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）には使用済燃料収納缶（小）に収納しない燃料集合体 1 体、および使用済燃料収納缶（小）に収納された燃料集合体 48 体を貯蔵する。なお、使用済燃料収納缶（小）に収納しない燃料集合体とは、4 号機において震災前の取扱中にチャンネルボックスおよびハンドルの変形が認められた使用済燃料（7×7 燃料）である。

3. 安全機能の維持の確認

使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の安全機能は以下の別添— 1 ～ 4 にて確認している。

- 別添— 1 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の核燃料物質が臨界に達しないことを説明する書類
- 別添— 2 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の耐震設計の基本方針
- 別添— 3 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の耐震性についての計算書
- 別添— 4 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）設置後の使用済燃料共用プールの水深の遮へい能力に関する説明書
- 別添— 5 使用済燃料収納缶（小）についての説明書

使用済燃料貯蔵ラック (49 体) の核燃料物質が臨界に達しないことを説明する書類

1.1 基本的考え方

使用済燃料共用プールの使用済燃料貯蔵ラック (49 体) は、想定される厳しい状態において貯蔵する燃料が臨界に達することを防止する設計とする。また、使用済燃料貯蔵ラック (49 体) は、臨界防止のため以下の配慮を行う。

- 貯蔵する燃料の中心間距離をラックの格子および格子内のスペーサで確保する。
- ラック構造材にはステンレス鋼を使用する。

1.2 設計基準

想定される厳しい状態において、実効増倍率 (k_{eff}) を 0.95 以下とすることを設計基準とする。

1.3 評価条件

以下の 2 通りの条件で評価を行うものとする。

- ①燃料棒の形状が維持されているが、取扱いを考慮して使用済燃料収納缶 (小) を用いる場合
- ②燃料棒の形状が維持されていないと仮定した場合

各評価条件を以下に示す。

- ①燃料棒の形状が維持されているが、取扱いを考慮して使用済燃料収納缶 (小) を用いる場合

臨界解析モデルを図-1 に示す。実効増倍率を大きく見積るため、評価条件を下記の通りとした。

- 使用済燃料貯蔵ラック (49 体) には使用済燃料収納缶 (小) に収納しない燃料集合体 1 体、および使用済燃料収納缶 (小) に収納された燃料集合体 48 体を貯蔵する。なお、使用済燃料収納缶 (小) に収納しない燃料集合体とは、4 号機において震災前の取り扱い中にチャンネルボックスおよびハンドルの変形が認められた使用済燃料 (7×7 燃料) である。
- 使用済燃料収納缶 (小) に収納しない燃料集合体の U-235 の濃縮度は未照射のまま減損しない値とし、7×7 燃料の集合体平均値 2.5wt% とする。また、中性子吸収断面積の大きい Gd は無視する。

- 使用済燃料収納缶（小）に収納しない燃料集合体のチャンネルボックスの変形による燃料棒間隔の変位の可能性を考慮し、実効増倍率が高くなるようラック格子内で燃料棒間隔を最適間隔に広げた評価とする。なお、当該格子には燃料集合体を保持する筒およびスペーサを設置する予定であるが、燃料棒間隔を最大限広げる場合が保守的であり、考慮しない。
- 使用済燃料収納缶（小）に収納された燃料集合体の 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。また、中性子吸収断面積の大きい Gd は無視する。
- 使用済燃料収納缶（小）に収納された燃料集合体は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。
- ラックおよび使用済燃料収納缶（小）の板厚は、製造公差を考慮した最小値とする。
- ラックの貯蔵ピッチは、製造公差を考慮した最小値とする。
- ラック内の使用済燃料収納缶（小）配置は、スペーサ間の範囲で偏心配置（ラック中心寄り）を考慮する。
- ラックが無限に並んだ状態として、高さ方向無限、かつラック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を水に置き換える。
- 水温は 100°C とする。

②燃料棒の形状が維持されていないと仮定した場合

臨界解析モデルを図-2に示す。実効増倍率を大きく見積るため、評価条件を下記の通りとした。

- 使用済燃料貯蔵ラック（49 体）には使用済燃料収納缶（小）に収納しない燃料集合体 1 体、および使用済燃料収納缶（小）に収納された燃料集合体 48 体を貯蔵する。なお、使用済燃料収納缶（小）に収納しない燃料集合体とは、4号機において震災前の取り扱い中にチャンネルボックスおよびハンドルの変形が認められた使用済燃料（ 7×7 燃料）である。
- 使用済燃料収納缶（小）に収納しない燃料集合体の U-235 の濃縮度は未照射のまま減損しない値とし、 7×7 燃料の集合体平均値 2.5wt%とする。また、中性子吸収断面積の大きい Gd は無視する。
- 使用済燃料収納缶（小）に収納しない燃料集合体のチャンネルボックスの変形による燃料棒間隔の変位の可能性を考慮し、実効増倍率が高くなるようラック格子内で燃料棒間隔を最適間隔に広げた評価とする。なお、当該格子には燃料集合体を保持する筒およびスペーサを設置する予定であるが、燃料棒間隔を最大限広げる場合が保守的であり、考慮しない。

- 使用済燃料収納缶（小）に収納された燃料集合体は、燃料集合体の形状維持を前提としないため、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）内に放出されたことを仮定し、使用済燃料収納缶（小）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，燃料粒子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。
- ラックおよび使用済燃料収納缶（小）の板厚は，製造公差を考慮した最小値とする。
- ラックの貯蔵ピッチは，製造公差を考慮した最小値とする。
- ラック内の使用済燃料収納缶（小）配置は，スペーサ間の範囲で偏心配置（ラック中心寄り）を考慮する。
- ラックが無限に並んだ状態として，高さ方向無限，かつラック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を水に置き換える。
- 水温は 100℃とする。

1.4 評価方法

使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の実効増倍率は，使用済燃料収納缶（小），ラックの形状を模擬した計算モデルを用い，計算には KENO-V.a コードを用いる。

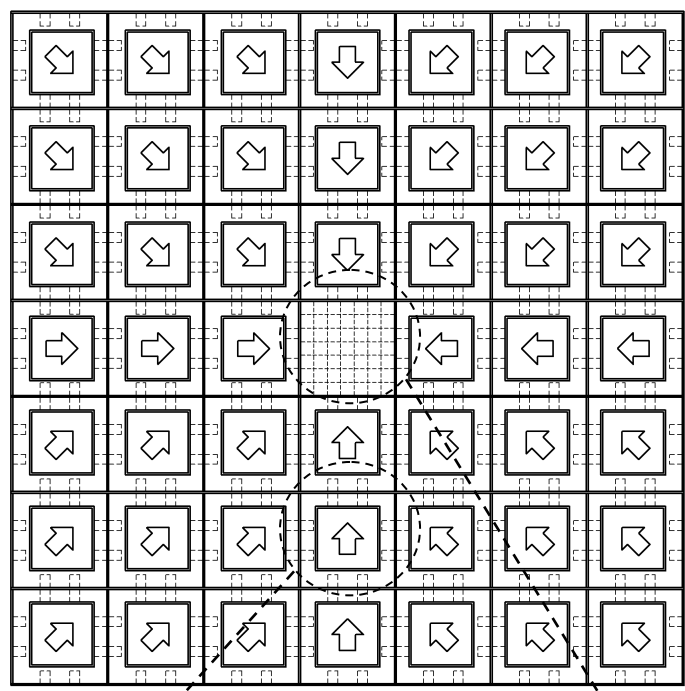
1.5 評価結果

使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の実効増倍率は，表-1 に示す通り設計基準を満足している。

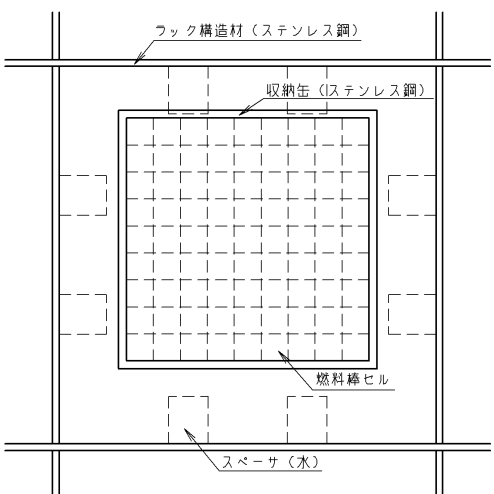
表-1 評価結果

使用済燃料収納缶（小）内の燃料条件	実効増倍率 ^{※1}	設計基準
①燃料棒の形状が維持された燃料	0.84	0.95
②燃料棒の形状が維持されていない燃料	0.93	

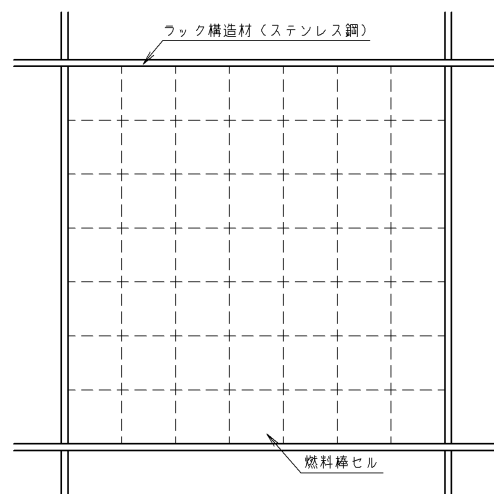
※1 モンテカルロ計算の統計誤差（3σ）を考慮した値



【ラック全体図】

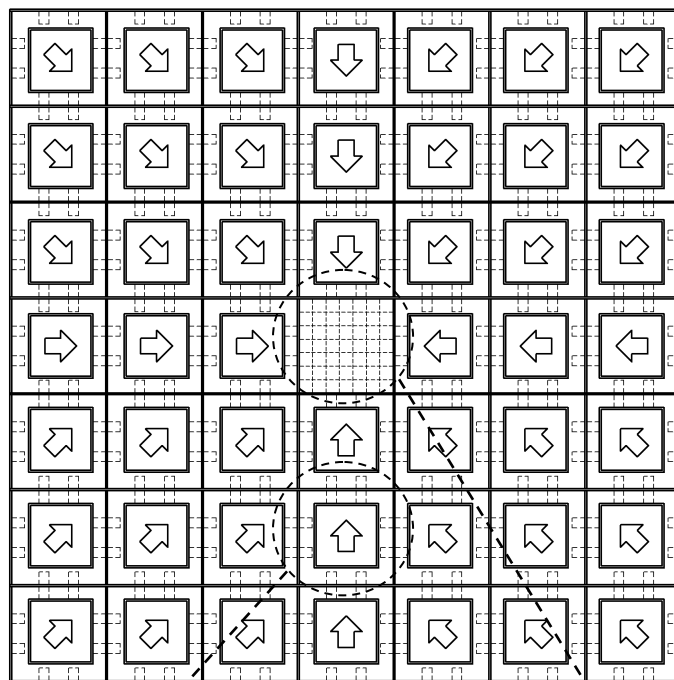


【使用済燃料収納缶 (小) に
収納された燃料集合体の詳細】

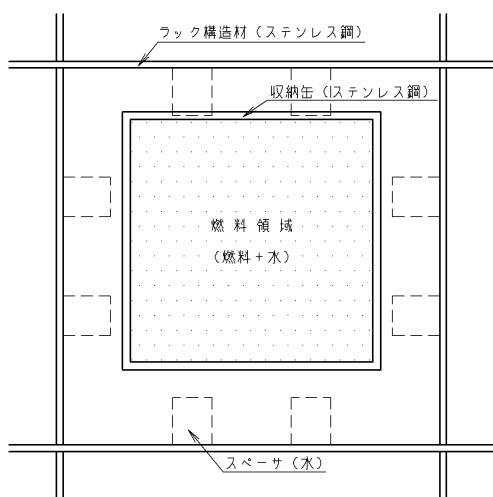


【使用済燃料収納缶 (小) に
収納しない燃料集合体の詳細】

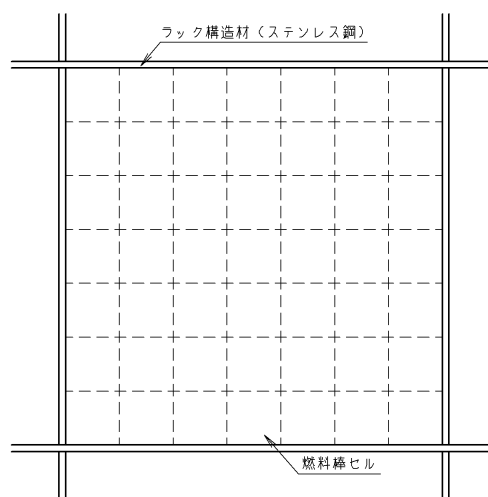
図-1 臨界解析モデル
(燃料棒の形状が維持されているが、取扱いを考慮して
使用済燃料収納缶 (小) を用いる場合)



【ラック全体図】



【使用済燃料収納缶 (小) に
収納された燃料集合体の詳細】



【使用済燃料収納缶 (小) に
収納しない燃料集合体の詳細】

図-2 臨界解析モデル
(燃料棒の形状が維持されていないと仮定した場合)

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、使用済燃料貯蔵ラックや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.

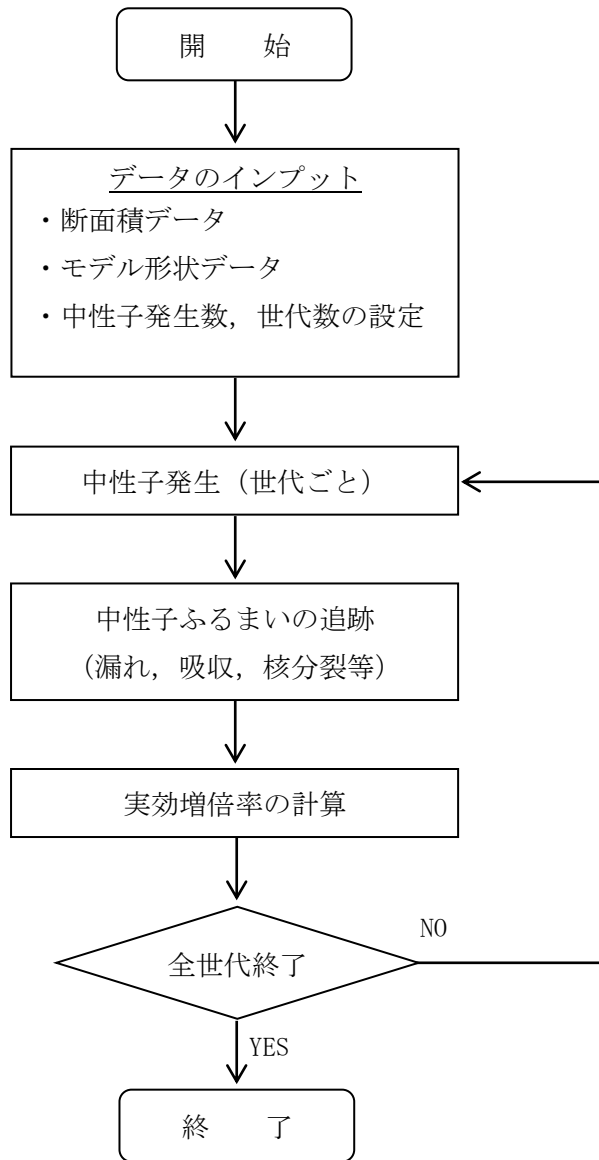


図-3 KENO-V.a コードの解析フロー図

使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の耐震設計の基本方針

使用済燃料貯蔵ラック（49 体）の耐震設計は、次の基本方針に基づいて行う。

1. 設備の重要度による耐震クラス分類

耐震クラス	S
-------	---

2. 構造計画

主要区分	計画の概要		概略構造図	摘要
	基礎・支持構造物	主体構造		
(1) 使用済燃料貯蔵ラック (49体)	使用済燃料貯蔵ラック(49体)は、縦置型で共用プールの床に置かれたコモンベース上に設置されラック取付ボルトで固定している。コモンベースは、共用プール床に取り付けられてある基礎ボルトにより固定している。	ステンレス鋼製角形枠組構造		・使用済燃料貯蔵ラック(49体)

3. 設計用地震力

耐震クラス	設計用地震波	動的解析法	適用する地震動等		設計用地震力
			水平	鉛直	
S	基準地震動 S_s	モーダル解析による 応答スペクトル法	S_s	S_s	水平地震力，鉛直地震力は動的解析により得られた地震力とする。

4. 荷重の組合せと許容限界

記号の説明

- D : 死荷重
- P_D : 地震と組合わすべきプラントの運転状態Ⅰ及びⅡ（運転状態Ⅲがある場合はこれを含む）における圧力荷重又は当該設備に設計上定められた最高使用圧力による荷重
- M_D : 地震と組合わすべきプラントの運転状態Ⅰ及びⅡ（運転状態Ⅲがある場合はこれを含む）における機械的荷重又は当該設備に設計上定められた機械的荷重
- S_s : 基準地震動 S_s により定まる地震力
- $f_t^{(注)}$: ボルト材以外の支持構造物に対しては設計・建設規格SSB-3121.1, ボルト材に対しては設計・建設規格SSB-3131により規定される供用状態A及びBでの許容引張応力
- $f_s^{(注)}$: ボルト材以外の支持構造物に対しては設計・建設規格SSB-3121.1, ボルト材に対しては設計・建設規格SSB-3131により規定される供用状態A及びBでの許容せん断応力
- $f_c^{(注)}$: ボルト材以外の支持構造物に対して設計・建設規格SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容圧縮応力
- $f_b^{(注)}$: ボルト材以外の支持構造物に対して設計・建設規格SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容曲げ応力
- $f_t^*, f_s^*, f_c^*, f_b^*$: 供用状態D s に対する許容応力算定に用いる応力であって、上記の f_t, f_s, f_c, f_b の値を算出する際、以下の読み替えを行って算出した値。その他の支持構造物の場合、下記（注）の S_y を $1.2S_y$ と読み替える。ただし、ステンレス鋼及び高ニッケル合金を除く。
- τ_b : 基礎ボルトに生じるせん断応力

（注）

クラス3支持構造物及びその他支持構造物に対する f_t, f_s, f_c, f_b の値の算出において、 F 値は次の値を用いる。

$$F = \text{Min}[S_y, 0.7S_u]$$

ただし、使用温度が40℃を超えるオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金にあつては、

$$F = \text{Min}[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT)]$$

ここで、

F : 許容応力算定用基準値、材料の許容応力を決定する場合の基準値

(1) 支持構造物

耐震クラス	荷重組合せ	供用状態	許容限界 (ボルト等以外)					許容限界 (ボルト等)			適用範囲
			一次応力					一次応力			
			引張	せん断	圧縮	曲げ	組合せ	引張	せん断	組合せ	
S	$D+P_D+M_D+S_S$	D s	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$1.5f_c^*$	$1.5f_b^*$	$1.5f_t^*$	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$\text{Min}\{1.5f_t^*, (2.1f_t^* - 1.6\tau_b)\}$	<ul style="list-style-type: none"> ・使用済燃料貯蔵ラック (49 体) ・ラック取付ボルト ・基礎ボルト ・スペーサ ・スペーサ下部支持部材

使用済燃料貯蔵ラック(49体)の耐震性についての計算書

1. 一般事項

本計算書は、使用済燃料貯蔵ラック(49体)(以下「ラック」という。)の耐震性についての計算方法と計算結果を示す。

1.1 計算条件

- (1) ラックは、使用済燃料共用プール(以下「共用プール」という。)の底部に基礎ボルトを介して据え付けられたコモンベース上にラック取付ボルトで固定されるものとする。
- (2) ラックの質量には、使用済燃料収納缶(小)及びこれに収納されている使用済燃料の質量とラック自身の質量のほか、使用済燃料収納缶(小)とラックに含まれる水の質量及びラック外形の排除水質量*を考慮する。
尚、49ヶ所の貯蔵セルのうち、中央のセル1ヶ所については、使用済燃料収納缶(小)ではなく変形した使用済燃料を貯蔵するものとする。
- (3) 水平方向地震動と鉛直方向地震動を解析モデルへ別々に入力して地震荷重、応力を求め、それらを適切に組み合わせて評価を行う。
構造概要図を図1-1に示す。

注記*：排除水質量とは、水中の機器の容積により排除される機器の周囲の流体の質量である。

1.2 準拠基準等

本検討は原則として下記に準拠して行う。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG 4601・補-1984)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG 4601-1987)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG 4601-1991 追補版)
- ・原子力発電所耐震設計技術規程(JEAC 4601-2008)
- ・発電用原子力設備規格 設計・建設規格(JSME S NC1-2005/2007)
- ・鋼構造設計規準—許容応力度設計法—(社団法人 日本建築学会(2005年9月))
- ・日本産業規格(JIS)

P. N

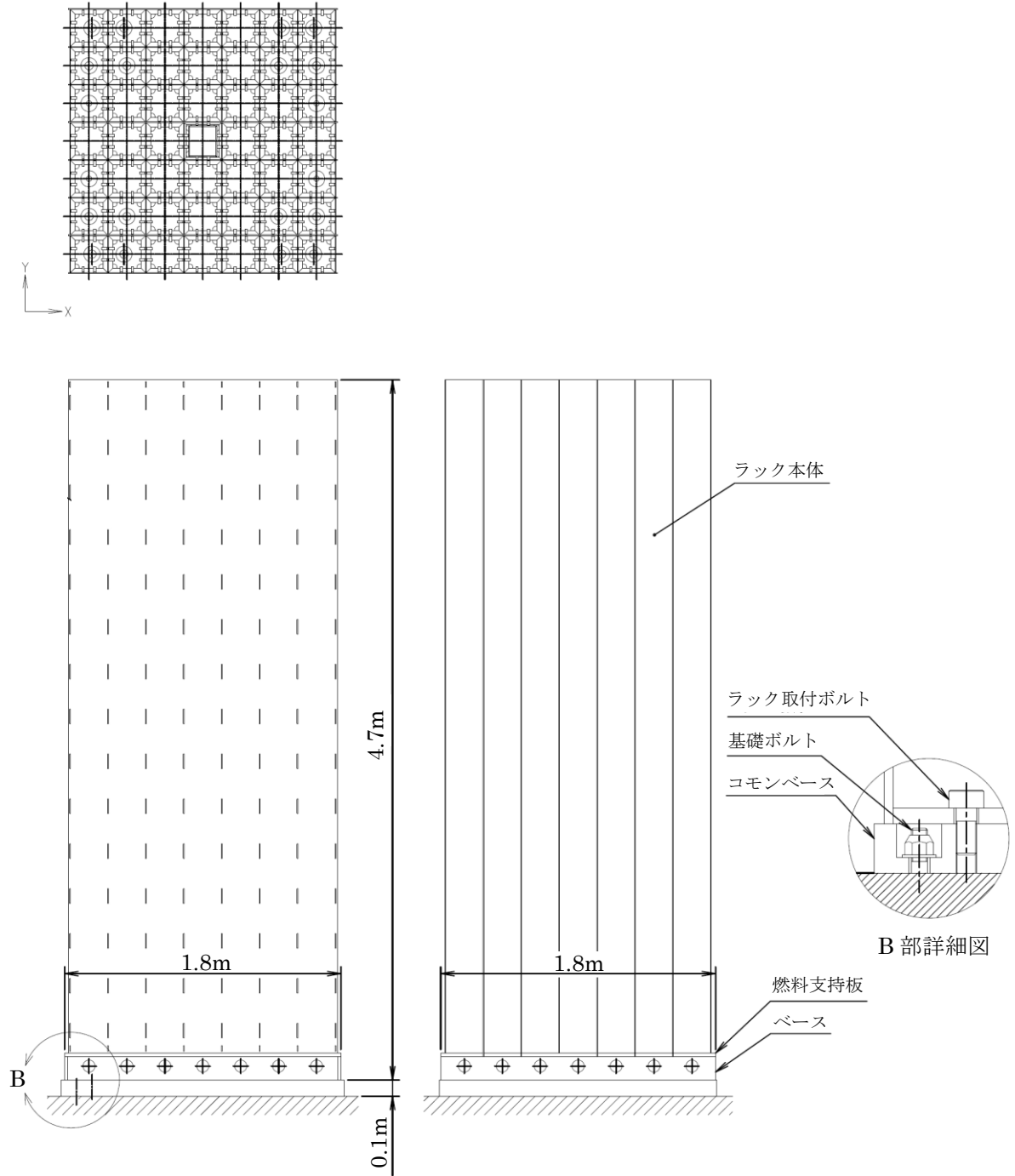


図1-1 構造概要図 (使用済燃料貯蔵ラック (49体))

1.3 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A	スペーサ下部支持部材の断面積	mm ²
Ab	ラック取付ボルト又は基礎ボルトの軸断面積	mm ²
Af	圧縮フランジの断面積	mm ²
As	スペーサの面積	mm ²
Ch	水平方向設計震度	—
Cv	鉛直方向設計震度	—
E	縦弾性係数	MPa
F*	設計・建設規格 SSB-3121.3 又は SSB-3133 に定める値	MPa
Fi	ベース又はコモンベース底部に作用するせん断力	N
fj	ベース又はコモンベース端から l_j の位置にあるラック取付ボルト又は基礎ボルトに作用する引張力（1本当り）	N
f _o	スペーサ下部支持部材の許容組合せ応力	MPa
f _{c b}	スペーサ下部支持部材の許容曲げ応力	MPa
f _c	スペーサの許容圧縮応力	MPa
f _s	部材の許容せん断応力	MPa
f _{s b}	せん断力のみを受けるラック取付ボルト又は基礎ボルトの許容せん断応力	MPa
f _{s s}	スペーサ下部支持部材の許容せん断応力	MPa
f _t	部材の許容引張応力	MPa
f _{t o}	引張力のみを受けるラック取付ボルト又は基礎ボルトの許容引張応力	MPa
f _{t s}	引張力とせん断力を同時に受けるラック取付ボルト又は基礎ボルトの許容引張応力	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
H	スペーサ下部支持部材の高さ	mm
L	支点間の距離	mm
L ₁	スペーサ下部支持部材とセル壁面との距離	mm
l_{ig}	ベース又はコモンベース端から重心までの距離	mm
l_j	ベース又はコモンベース端からラック取付ボルト又は基礎ボルトまでの距離	mm
M	曲げモーメント	N・mm
M _i	ベース又はコモンベース底部の転倒モーメント	N・mm
m	使用済燃料収納缶（小）貯蔵時のラック全質量	kg

記号	記号の説明	単位
n	ラック取付ボルト又は基礎ボルトの全本数	—
n_j	ベース又はコモンベース端から l_j の位置にあるラック取付ボルト又は基礎ボルトの本数	—
P	スペーサおよびスペーサ下部支持部材への荷重	N
S_u	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9に定める値	MPa
S_y	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める値	MPa
Z	スペーサ下部支持部材の断面係数	mm^3
Λ	スペーサの限界細長比	—
λ	スペーサの有効細長比	—
σ_0	スペーサ下部支持部材に生じる組合せ応力	MPa
σ_b	ラック取付ボルト又は基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
σ_c	スペーサに生じる圧縮応力	MPa
σ_{cb}	スペーサ下部支持部材に生じる曲げ応力	MPa
σ_{fa}	部材に生じる組合せ応力	MPa
σ_x, σ_y	部材に生じる引張応力	MPa
τ_b	ラック取付ボルト又は基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
τ_s	スペーサ下部支持部材に作用するせん断応力	MPa
τ_{xy}	部材に生じるせん断応力	MPa

注記

- 1) 添字 i の意味は、以下のとおりとする。また、添字 j は 1 ～ 12 までの数字を示すものとする。

$i = X$: X方向

$i = Y$: Y方向

2. 計算方法

2.1 固有周期の計算方法

ラックはシェル要素を用いた有限要素モデルとする。

ラックの計算モデルを図 2-1 に示す。固有周期は、計算機コード「NASTRAN」を用いて求める。

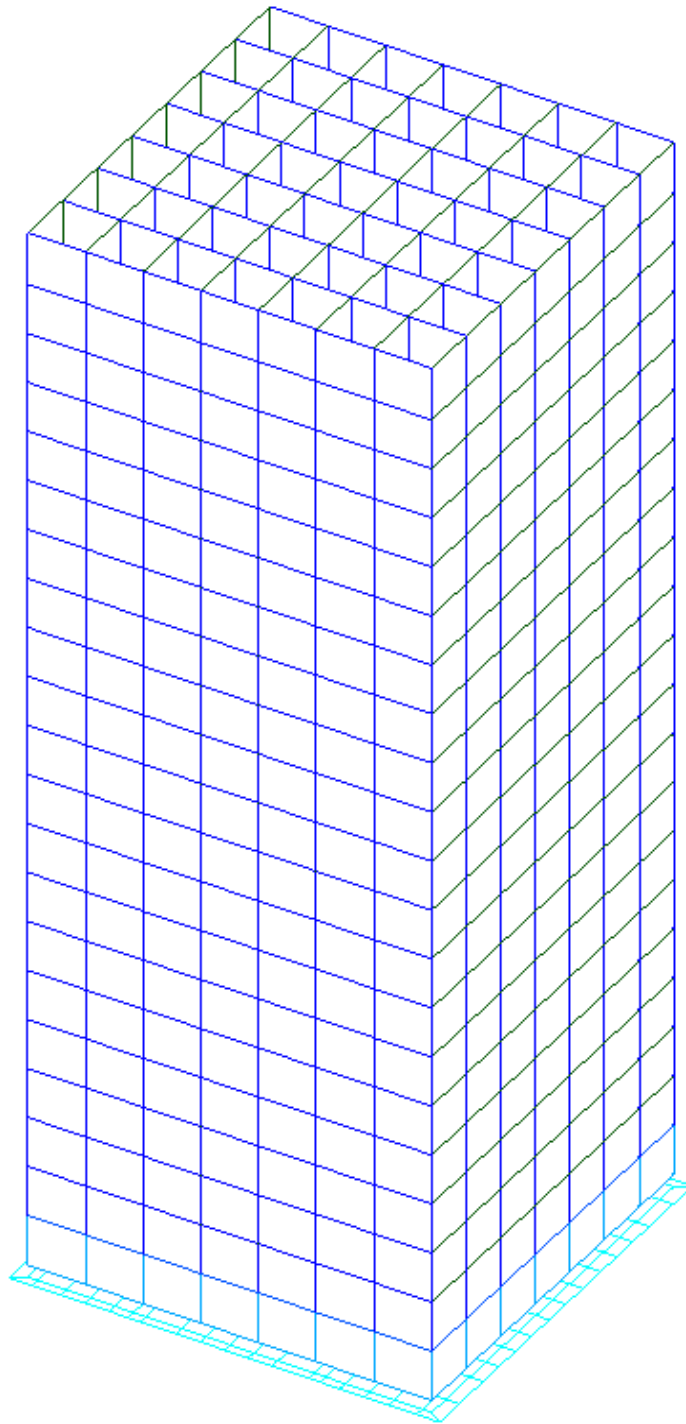


図 2-1 使用済燃料貯蔵ラック (49 体) 計算モデル

2.2 応力の計算方法

2.2.1 部材の応力

部材についての応力計算は、図2-1の計算モデルにて計算機コードを使用を行い、引張応力、せん断応力を求め、本項に示す計算方法に従って組合せ応力を計算する。

計算機コード内では、各部材の局所座標系及びせん断応力 τ_{xy} 、引張応力 σ_x 、 σ_y の作用する向きを、図2-2に示すように設定している。

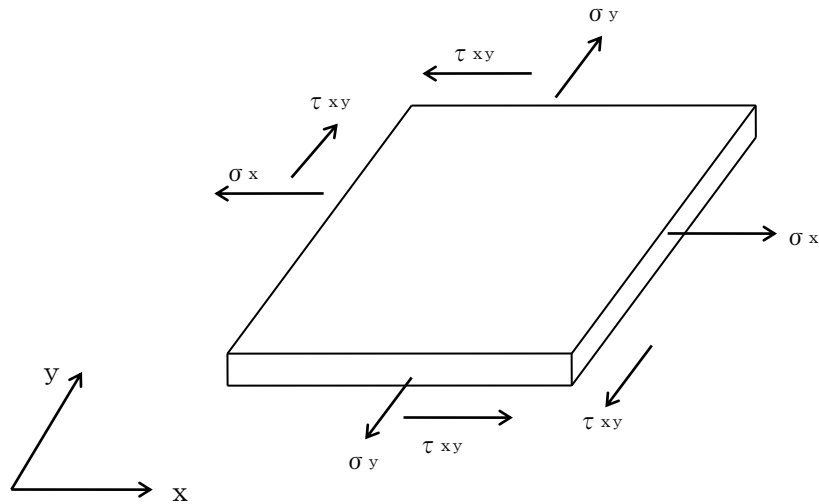


図2-2 部材の応力

各部材の組合せ応力 σ_{fa} は、上記で計算したせん断応力 τ_{xy} 、引張応力 σ_x 、 σ_y を用いて、次式より求める。

$$\sigma_{fa} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2}$$

2.2.2 ボルトの応力

図2-1の計算モデルにて荷重計算を計算機コードを使用して行い、求められた地震時にラックに作用する転倒モーメント M_x 及びベース底部に作用するせん断力 F_x が、ラックに図2-3のように負荷されるものとしてラック取付ボルトおよび基礎ボルトの応力を求める。

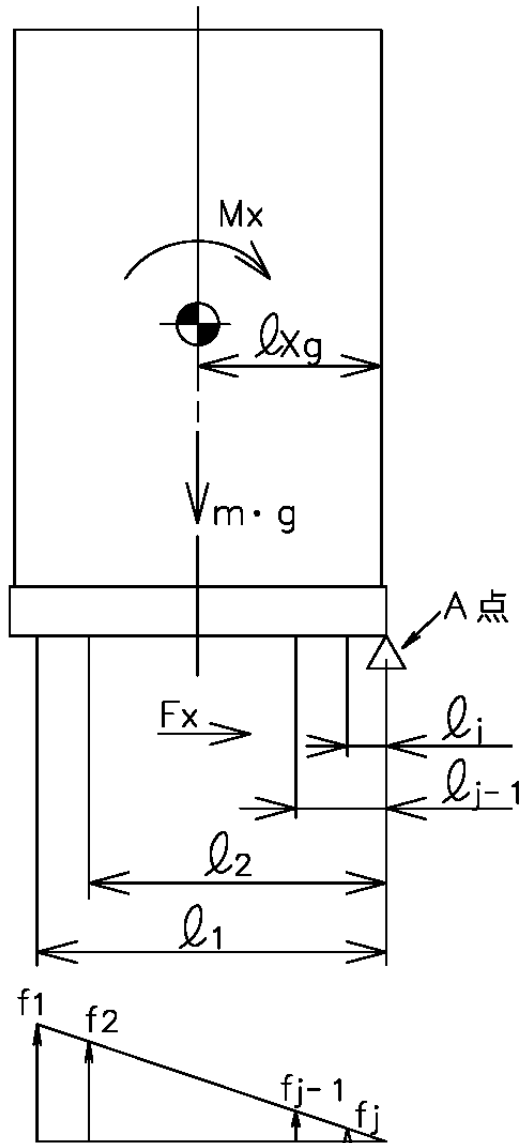


図2-3 ラック取付ボルトおよび基礎ボルトの応力

(1) 引張応力

A点まわりのモーメントの平衡によりラック取付ボルトおよび基礎ボルト1本当たりの引張力 f_j を求める。

$f_1 > f_2 > \dots > f_{j-1} > f_j$ の関係にあるので f_1 のみを求める。

$$f_1 = \frac{l_1(M_x - (1 - C_v) \cdot m \cdot g \cdot l_{xg})}{n_1 \cdot l_1^2 + n_2 \cdot l_2^2 + \Lambda + n_{j-1} \cdot l_{j-1}^2 + n_j \cdot l_j^2}$$

引張力 f_1 によりラック取付ボルトおよび基礎ボルトに生じる引張応力 σ_b は、次式により求める。

$$\sigma_b = \frac{f_1}{A_b}$$

ただし、 f_1 の値が負のときはラック取付ボルトおよび基礎ボルトに引張力が生じないので、引張応力の計算は行わない。

(2) せん断応力

ラック取付ボルトおよび基礎ボルトに対するせん断力はボルト全本数で受けるものとして計算する。

せん断力 F_x によりラック取付ボルトおよび基礎ボルトに生じるせん断応力 τ_b は、次式により求める。

$$\tau_b = \frac{F_x}{n \cdot A_b}$$

2.2.3 スペーサ及びスペーサ下部支持部材の応力

使用済燃料貯蔵ラック(49体)セル内の上下端に取付けるスペーサおよびスペーサ下部支持部材の条件は図2-4のa部もしくはa'部のどちらかに属すると考えられる。

a部とa'部の部位を比較すると、図2-4の矢印方向から荷重を受けたとき、a'部は隣り合うセルのスペーサおよびスペーサ下部支持部材も強度部材として寄与するが、a部は隣り合うセルが無いいため、a'部に比べ、強度上不利である。

したがって、代表してa部を評価する。

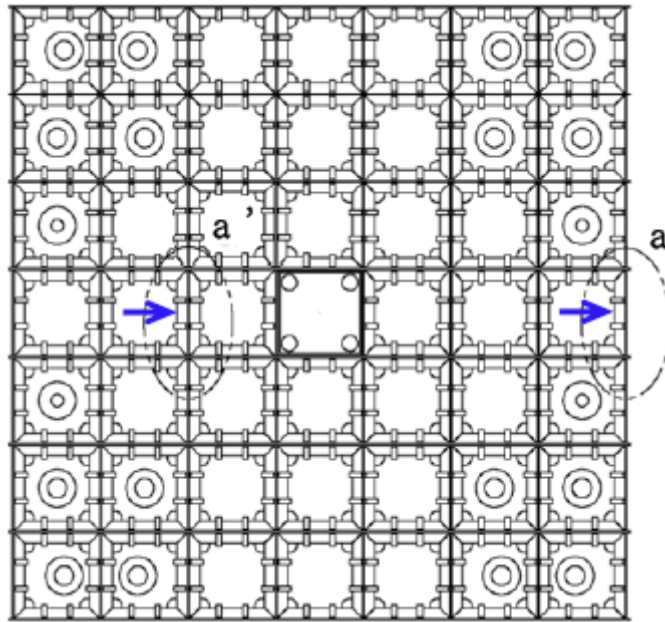


図2-4 使用済燃料貯蔵ラック(49体)上面図

(1) 作用荷重

使用済燃料収納缶(小)に働く地震力が、セル1面の上下部スペーサ部に作用するものとする。

$$P = \frac{1}{4} \cdot C_H \cdot m \cdot g$$

(2) スペーサに生じる圧縮応力

$$\sigma_c = \frac{P}{A_s}$$

(3) スペーサ下部支持部材に生じる曲げ応力

$$M = P \cdot L_1$$

$$\sigma_{cb} = \frac{M}{Z}$$

(4) スペーサ下部支持部材に生じるせん断応力

$$\tau_s = \frac{P}{A}$$

(5) スペーサ下部支持部材に生じる組合せ応力

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_{cb}^2 + 3 \cdot \tau_s^2}$$

3. 評価方法

3.1 固有周期の評価

2.1 項で求めた固有周期から「添付資料－9－1 別添－2 使用済燃料貯蔵ラック (49 体) の耐震設計の基本方針」に基づき、水平方向設計震度を求める。

3.2 応力の評価

3.2.1 部材の応力評価

2.2.1 項で求めた各部材の引張応力 σ_x 、 σ_y 及び組合せ応力 σ_{fa} が、許容引張応力 f_t 以下であること。

また、2.2.1 項で求めた各部材のせん断応力 τ_{xy} が、許容せん断応力 f_s 以下であること。

ただし、 f_t 及び f_s は下表による。

地震力の種類	基準地震動 S_s
許容引張応力 f_t	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_s	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

3.2.2 ラック取付ボルト及び基礎ボルトの応力評価

2.2.2 項で求めたラック取付ボルト及び基礎ボルトの引張応力 σ_b が、次式より求めた許容引張応力 f_{ts} 以下であること。

また、2.2.2 項で求めたラック取付ボルト及び基礎ボルトのせん断応力 τ_b が、せん断力のみを受けるボルトの許容せん断応力 f_{sb} 以下であること。

$$f_{ts} = 1.4 f_{to} - 1.6 \tau_b$$

かつ、

$$f_{ts} \leq f_{to}$$

ただし、 f_{to} 及び f_{sb} は下表による。

地震力の種類	基準地震動 S_s
許容引張応力 f_{to}	$\frac{F^*}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_{sb}	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

3.2.3 スペーサおよびスペーサ下部支持部材の応力評価

2.2.3 項で求めたスペーサの圧縮応力が次式で求めた許容圧縮応力 f_c 以下であること。2.2.3 項で求めたスペーサ下部支持部材に生じる曲げ応力，せん断応力，組合せ応力がそれぞれ，次式で求めた許容曲げ応力 f_{cb} ，許容せん断応力 f_{ss} ，許容組合せ応力 f_o 以下であること。

地震力の種類	基準地震動 S_s
許容圧縮応力 f_c	$\left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F^*}{\nu} \times 1.5$
許容曲げ応力 f_{cb}	$\min \left\{ 1.5 \times \frac{0.433 \cdot E \cdot Af}{L \cdot H}, 1.5 \times \frac{F^*}{1.5} \right\}$
許容せん断応力 f_{ss}	$1.5 \times \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}}$
許容組合せ応力 f_o	$1.5 \times \frac{F^*}{1.5}$

4. 評価条件

機器名称	耐震設計上の重要度分類	据付場所及び床面高さ (m)	次数	基準地震動 S_s		最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)
				水平方向 ^{*5} 設計震度	鉛直方向設計震度		
使用済燃料貯蔵ラック (49 体)	S	運用補助共用施設 G. L. -1.3 ^{*1}	1 次	*2	$C_v = 0.49$	66	—
			2 次	*3			
			3 次	*4			

注記 *1：基準床レベルを示す。

*2：基準地震動 S_s に基づく動的解析より得られる応答値（1 次固有周期： $C_H = 0.84$ ）

*3：基準地震動 S_s に基づく動的解析より得られる応答値（2 次固有周期： $C_H = 0.89$ ）

*4：基準地震動 S_s に基づく動的解析より得られる応答値（3 次固有周期： $C_H = 0.89$ ）

*5：基準地震動 S_s により定まる動的震度（ $C_H = 0.67$ ）についても考慮する。

添付資料-9 では、G. L. $\pm 0m = T. P. 8.5m$ (※)とする。

(※) 震災後の地盤沈下量 (-709mm) と O. P. から T. P. への読替値 (-727mm) を用いて、下式に基づき換算している。

〈換算式〉 $T. P. = \text{旧 } O. P. - 1,436\text{mm}$

5. 評価結果

(1) 部材に生じる応力 (単位：MPa)

ラック	部 材	材 料	応 力	基準地震動 S s	
				算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	ラック本体	SUS304	組合せ	$\sigma_{fa} = 29$	$f_t = 205$

許容応力以下である。

(2) ラック取付ボルトに生じる応力 (単位：MPa)

ラック	部 材	材 料	応 力	基準地震動 S s	
				算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	ラック 取付ボルト	SUS630 H1150	引張り	$\sigma_b = 33$	$f_{ts} = 455$

許容応力以下である。

(3) 基礎ボルトに生じる応力 (単位：MPa)

ラック	部 材	材 料	応 力	基準地震動 S s	
				算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	基礎ボルト	SUS630 H1150	引張り	$\sigma_b = 63$	$f_{ts} = 455$

許容応力以下である。

(4) スペーサおよびスペーサ下部支持部材に生じる応力 (単位：MPa)

ラック	部 材	材 料	応 力	基準地震動 S s	
				算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵 ラック (49 体)	スペーサ	SUS304	圧縮	$\sigma_c = 2$	$f_c = 200$
	スペーサ 下部支持部材	SUS304	組合せ	$\sigma_0 = 23$	$f_0 = 205$

許容応力以下である。

参考資料

参考 計算機コード「NASTRAN」の概要

1. 一般事項

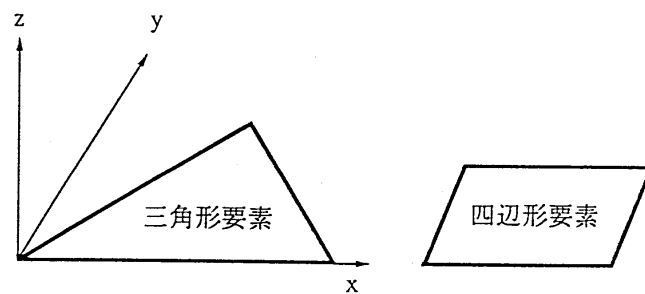
米国NASA (National Aeronautics and Space Administration)作成の有限要素法による構造解析用汎用計算機コード「NASTRAN」の概要である。

2. 本計算機コードの特徴

(1) 適用範囲が広く、以下の問題を解析できる。

- 静的構造問題
- 弾性安定問題
- 動的構造問題
- 熱伝導問題
- マトリックス問題一般

(2) 多くの要素が用意されており、種々のタイプの構造物の解析を行うことができる。



(3) 多自由度を有する大規模問題を効率よく解析することができる。

(4) 大規模問題を取り扱うために、入力データが簡単化されている。

(5) プロットングの機能が準備されており、モデルの確認、解析結果の図形処理を簡単に行うことができる。

(6) 解析する座標系、拘束方法は、取り扱う問題にあったものを選ぶことができる。

3. 理論式

3.1 有限要素法による評価

有限要素法による評価は、次の手順で行われる。

- (1) 要素内の変位を仮定し、節点変位を使って要素内任意点の変位を表現する。

$$\{u\} = [N]\{u_e\} \quad (3.1)$$

ここで、

- $\{u\}$: 要素内任意点の変位
 $[N]$: 形状関数マトリックス
 $\{u_e\}$: 節点変位

- (2) 上記の変位を微分して、要素内任意点のひずみを節点変位により表す。

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u_e\} \quad (3.2)$$

ここで、

- $\{\varepsilon\}$: 要素内任意点のひずみ
 $[B]$: ひずみマトリックス

- (3) 材料物性から求められる応力とひずみの関係式 ((3.3)式参照) より定められる弾性係数マトリックスを用いて、要素剛性マトリックスを (3.4) 式により計算する。

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (3.3)$$

$$[K] = \int [B]^T [D] [B] dvol \quad (3.4)$$

ここで、

- $\{\sigma\}$: 要素内任意点の応力
 $[D]$: 弾性係数マトリックス
 $[K]$: 要素剛性マトリックス

- (4) 全体の剛性マトリックスを要素剛性マトリックスの重ね合わせによって求め、力の釣合いより静的変位は(3.5)式、また動の変位は(3.6)式より求める。

$$\{f\} = [k]\{\gamma\} \quad (3.5)$$

$$\{f\} = [m]\{\ddot{\gamma}\} + [k]\{\gamma\} \quad (3.6)$$

ここで、

- $\{f\}$: 荷重ベクトル
 $\{\gamma\}$: 構造全体の変位

$$= \begin{Bmatrix} u_{e1} \\ u_{e2} \\ \vdots \\ u_{en} \end{Bmatrix}$$

$u_{e1}, u_{e2}, \dots, u_{en}$: 各節点の節点変位

[m] : 質量マトリックス

[k] : 剛性マトリックス

(5) 変位が求めれば, (3.2) 式, (3.3) 式より各要素の応力が求められる。

以上が有限要素法の評価手順であるが, この中で要素剛性マトリックスの算定及び動的解析における運動方程式の解法等の詳細について以下に述べる。

3.2 要素剛性マトリックスの算定

3.2.1 座標変換

解析で用いている要素は, 平面応力 (面内) 及び板の曲げ (面外) を考慮したシェル要素で, 各節点における変位成分は面内 2 方向 (u, v), 面外 1 方向 (w) 及び回転 2 方向 (α , β) の合計 5 つであり, 部材剛性は面内方向及び面外方向をそれぞれ独立に加算して求めるとともに, 算定に当たっては図 3-1 に示すような次の座標変換を行う。

$$\begin{aligned} x &= N_1 \cdot x_1 + N_2 \cdot x_2 + N_3 \cdot x_3 + N_4 \cdot x_4 \\ y &= N_1 \cdot y_1 + N_2 \cdot y_2 + N_3 \cdot y_3 + N_4 \cdot y_4 \end{aligned} \quad (3.7)$$

ここで,

$$N_1 = \frac{1}{4} \cdot (1 - \xi) \cdot (1 - \eta)$$

$$N_2 = \frac{1}{4} \cdot (1 + \xi) \cdot (1 - \eta)$$

$$N_3 = \frac{1}{4} \cdot (1 + \xi) \cdot (1 + \eta)$$

$$N_4 = \frac{1}{4} \cdot (1 - \xi) \cdot (1 + \eta)$$

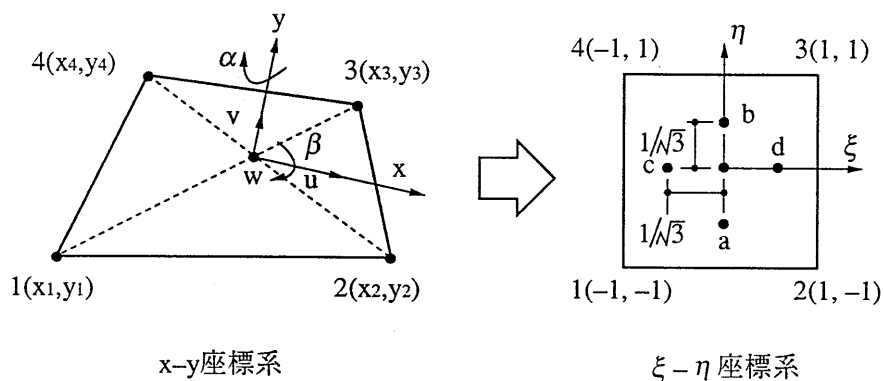


図 3 - 1 座標系

3.2.2 面内剛性の計算

要素内任意点の変位を、図 3-1 で示した (ξ, η) と節点変位を使って次のように仮定する。

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{N}_1 \cdot \mathbf{u}_1 + \mathbf{N}_2 \cdot \mathbf{u}_2 + \mathbf{N}_3 \cdot \mathbf{u}_3 + \mathbf{N}_4 \cdot \mathbf{u}_4 \\ \mathbf{v} &= \mathbf{N}_1 \cdot \mathbf{v}_1 + \mathbf{N}_2 \cdot \mathbf{v}_2 + \mathbf{N}_3 \cdot \mathbf{v}_3 + \mathbf{N}_4 \cdot \mathbf{v}_4 \end{aligned} \quad (3.8)$$

すなわち、次のようになる。

$$\{\mathbf{u}^m\} = [\mathbf{N}^m] \{\mathbf{u}_e^m\} \quad (3.9)$$

(3.8)式を用いて要素内任意点のひずみを次のように求め、面内応力に対するひずみマトリックス $[\mathbf{B}^m]$ を求める。

$$\{\varepsilon^m\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} = [\mathbf{B}^m] \{\mathbf{u}_e^m\} \quad (3.10)$$

一方、面内応力に対する応力とひずみの関係は次のように表される。

$$\{\sigma^m\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [\mathbf{D}^m] \{\varepsilon^m\} \quad (3.11)$$

ここで、

E : 縦弾性係数

ν : ポアソン比

したがって、面内応力に対する要素剛性マトリックス $[\mathbf{K}_m]$ は次のように計算される。

$$[\mathbf{K}_m] = \int [\mathbf{B}^m]^T [\mathbf{D}^m] [\mathbf{B}^m] \, d\text{vol} \quad (3.12)$$

3.2.3 面外剛性の計算

面外剛性は、面外曲げに対するものと面外せん断に対するものをそれぞれ別個に計算して求める。

(1) 面外曲げ剛性の計算

要素内任意点の面外方向変位(w)と回転角(α, β)を図 3-1 に示す ξ - η 座標系で次のように仮定する。

$$\begin{aligned} w &= w_{00} + w_{10} \cdot \xi + w_{01} \cdot \eta + w_{11} \cdot \xi \cdot \eta \\ \alpha &= \alpha_{00} + \alpha_{10} \cdot \xi + \alpha_{01} \cdot \eta + \alpha_{11} \cdot \xi \cdot \eta \\ \beta &= \beta_{00} + \beta_{10} \cdot \xi + \beta_{01} \cdot \eta + \beta_{11} \cdot \xi \cdot \eta \end{aligned} \quad (3.13)$$

ここで、

$$w_{00} \sim w_{11}, \alpha_{00} \sim \alpha_{11}, \beta_{00} \sim \beta_{11} : \text{未定係数}$$

四辺形の各節点の(ξ, η)を(3.13)式に代入することによって、要素内任意点の面外方向変位及び回転角は、(ξ, η)と節点変位を使って表されることになる。面外曲げに対するひずみマトリックス $[B^b]$ を次のように求める。

$$\{\varepsilon^b\} = \begin{Bmatrix} x_x \\ x_y \\ x_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \alpha}{\partial x} \\ \frac{\partial \beta}{\partial y} \\ \frac{\partial \alpha}{\partial y} + \frac{\partial \beta}{\partial x} \end{Bmatrix} = [B^b] \{u_e^b\} \quad (3.14)$$

一方、面外曲げ応力に対する応力とひずみの関係は次のように表される。

$$\{\sigma^b\} = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \begin{Bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu}{2} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} x_x \\ x_y \\ x_{xy} \end{Bmatrix} = [D^b] \{\varepsilon^b\} \quad (3.15)$$

ここで、

t : 板厚

したがって、面外曲げ応力に対する要素剛性マトリックス $[K_b]$ は次のように

計算される。

$$[K_b] = \int [B^b]^T [D^b] [B^b] dvol \quad (3.16)$$

(2) 面外せん断剛性の計算

x 方向のせん断ひずみを図 3-1 の a, b 点で, y 方向を c, d 点で代表させることとする。せん断ひずみを次のように定義し, これに(3.13)式を代入すると節点変位によりせん断ひずみが表され, ひずみマトリックス[B^s]を求める。

$$\{\varepsilon^s\} = \begin{Bmatrix} y_x \\ y_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial w}{\partial x} - \alpha \\ \frac{\partial w}{\partial y} - \beta \end{Bmatrix} = [B^s] \{u_e^s\} \quad (3.17)$$

一方, 面外せん断応力に対する応力とひずみの関係は次のように表される。

$$\{\sigma^s\} = \frac{G}{1.2} \begin{Bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} y_x \\ y_y \end{Bmatrix} = [D^s] \{\varepsilon^s\} \quad (3.18)$$

ここで,

G : せん断弾性係数

したがって, 面外せん断応力に対する要素剛性マトリックス[K_s]は次のように計算される。

$$[K_s] = \int [B^s]^T [D^s] [B^s] dvol \quad (3.19)$$

3.3 動的解析

有限要素法による構造物の動的解析は(3.6)式の運動方程式を基本としている。

しかし、実際の構造物では常に減衰がある。有限要素系にも減衰力を導入する。減衰力が速度に比例する場合には粘性減衰といわれる。

この場合の運動方程式は減衰マトリックスを[c]とすれば、

$$[m]\{\ddot{\gamma}\} + [c]\{\dot{\gamma}\} + [k]\{\gamma\} = \{R(t)\} \quad (3.20)$$

となる。ただし、

$\{R(t)\}$: 時間に依存する外力

$\{\gamma\}$: 構造全体の変位

3.3.1 固有振動数解析

拘束のある構造物の自由振動を考える。減衰がない場合の運動方程式は、

$$[m]\{\ddot{\gamma}\} + [k]\{\gamma\} = \{0\} \quad (3.21)$$

自由振動は調和振動であるから $\{\gamma\}$ は、

$$\{\gamma\} = \{x\}e^{i\omega t} \quad (3.22)$$

$\{x\}$: 変位 $\{\gamma\}$ の振幅 (mode)

ω : 円振動数

(3.21)式に(3.22)式を代入すると、

$$(-\omega^2[m] + [k])\{x\}e^{i\omega t} = \{0\} \quad (3.23)$$

又は、

$$([k] - \omega^2[m])\{x\} = \{0\} \quad (3.24)$$

$$[k]\{x\} = \omega^2[m]\{x\} \quad (3.25)$$

となる。この式は固有値問題にほかならない。

NASTRANには固有値の解法として種々の方法が準備されている。

例えば、インバースパワー法(inverse power method)等がある。

インバースパワー法は大次元のマトリックスで小数の固有値を求める場合に有効である。

3.3.2 運動方程式の解法（モーダル解析）

モーダル解析(modal analysis)は複雑な構造物の全体の運動が非連成な1自由度の運動の重ね合わせであると考える点に基礎をおいている。この方法は大次元の連成微分方程式を直接解くよりもはるかに経済的であり、有効な方法として広く採用されている。

構造全体の変位 $\{\gamma\}$ を構造が有している固有モードの1次結合と仮定する。

$$\{\gamma\} = [\mathbf{X}]\{q\} \quad (3.26)$$

ただし、

$$[\mathbf{X}] = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

x_i : i 次のモード

$$\{q\} = [q_1, q_2, \dots, q_n]$$

q_i : i 次のモード x_i の重みを決定する係数

(3.20)式に(3.26)式を代入すると、

$$[\mathbf{m}][\mathbf{X}]\{\ddot{q}\} + [\mathbf{c}][\mathbf{X}]\{\dot{q}\} + [\mathbf{k}][\mathbf{X}]\{q\} = \{\mathbf{R}(t)\} \quad (3.27)$$

さらに、左から $[\mathbf{X}]^T$ を掛けると、

$$[\mathbf{X}]^T[\mathbf{m}][\mathbf{X}]\{\ddot{q}\} + [\mathbf{X}]^T[\mathbf{c}][\mathbf{X}]\{\dot{q}\} + [\mathbf{X}]^T[\mathbf{k}][\mathbf{X}]\{q\} = [\mathbf{X}]^T\{\mathbf{R}(t)\} \quad (3.28)$$

(3.25)式より、

$$[\mathbf{X}]^T[\mathbf{k}][\mathbf{X}] = [\omega^2][\mathbf{X}]^T[\mathbf{m}][\mathbf{X}] \quad (3.29)$$

と表される。ただし、

$$[\omega^2] = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & 0 \\ & \omega_2^2 & \\ 0 & & \omega_n^2 \end{bmatrix}$$

また、

$$[\mathbf{X}]^T[\mathbf{c}][\mathbf{X}] = 2[\mathbf{h}][\omega][\mathbf{X}]^T[\mathbf{m}][\mathbf{X}] \quad (3.30)$$

となると仮定する。ただし、

$$[\mathbf{h}] = \begin{bmatrix} h_1 & & 0 \\ & h_2 & \\ 0 & & h_n \end{bmatrix}, \quad [\omega] = \begin{bmatrix} \omega_1 & & 0 \\ & \omega_2 & \\ 0 & & \omega_n \end{bmatrix}$$

h_i : i 次のモードに対する減衰比

(3.28)式に(3.29)式, (3.30)式を代入すると,

$$\begin{aligned} & [\mathbf{X}]^T[\mathbf{m}][\mathbf{X}]\{\ddot{\mathbf{q}}\} + 2[\mathbf{h}][\boldsymbol{\omega}][\mathbf{X}]^T[\mathbf{m}][\mathbf{X}]\{\dot{\mathbf{q}}\} \\ & + [\boldsymbol{\omega}^2][\mathbf{X}]^T[\mathbf{m}][\mathbf{X}]\{\mathbf{q}\} = [\mathbf{X}]^T\{\mathbf{R}(t)\} \end{aligned} \quad (3.31)$$

となる。

ここで, モードの直交性により,

$$\begin{aligned} \{\mathbf{x}_i\}^T[\mathbf{m}]\{\mathbf{x}_j\} &= 1.0 \quad (i=j) \\ \{\mathbf{x}_i\}^T[\mathbf{m}]\{\mathbf{x}_j\} &= 0.0 \quad (i \neq j) \end{aligned} \quad (3.32)$$

(3.31)式は(3.32)式を適用することによって各々独立な n 個の運動方程式 (非連成) になる。

$$\ddot{q}_i + 2 \cdot h_i \cdot \omega_i \cdot \dot{q}_i + \omega_i^2 \cdot q_i = P_i(t) \quad (3.33)$$

ただし,

$$i = 1 \sim n$$

$$P_i(t) = \{\mathbf{x}_i\}^T \{\mathbf{R}(t)\}$$

(3.33)式を各々解けば, 各モード \mathbf{x}_i の重みを決定する q_i が個々に求まり, さらにこれを(3.26)式に代入すれば構造全体の変位 $\{\boldsymbol{\gamma}\}$ が求められる。

4. 解析フローチャート

本計算機コードの解析フローチャートを図4-1に示す。

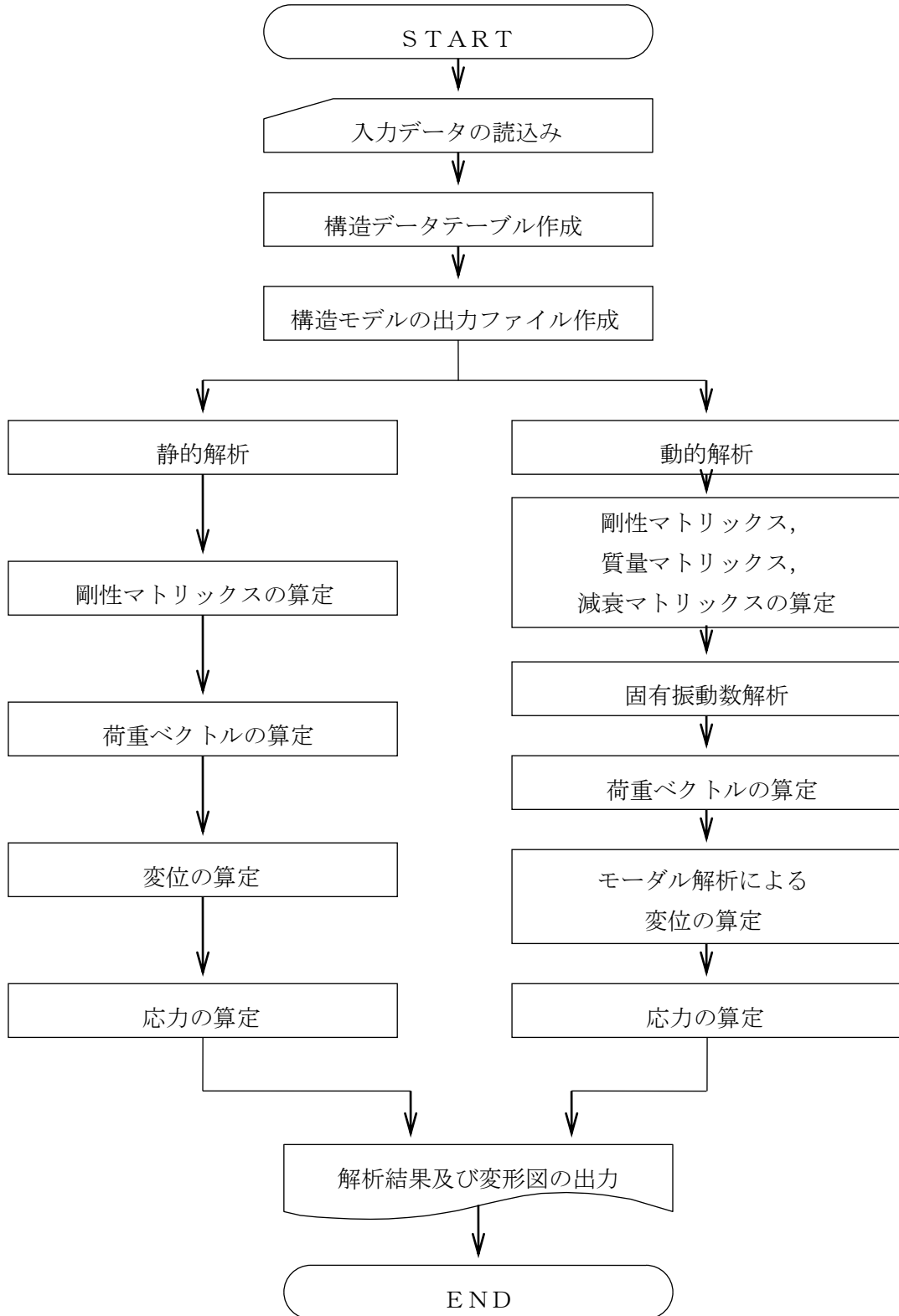


図4-1 解析フローチャート

使用済燃料貯蔵ラック(49体)設置後の使用済燃料共用プールの水深の遮へい能力に関する
説明書

1.1 概要

使用済燃料共用プールの使用済燃料貯蔵ラック(49体)の設置に伴い、設置後の使用済燃料共用プールの水深の遮へい能力について以下に示す。

放射線業務従事者等の立入る可能性のある区域の線量率については、表-1の設計基準が達成されるように遮へい設計を実施するものとする。遮へい設計の区分について表-1に示す。

表-1 基準線量率

区 分		設計基準線量率
非管理区域	A	0.006mSv/h 以下
管理区域	B	0.01mSv/h 以下
	C	0.06mSv/h 以下
	D	0.12mSv/h 以下
	E	0.5mSv/h 以下
	F	0.5mSv/h より大

ただし、立入りに対する制限は、線量率、作業時間、個人の線量等を考慮して定める。

1.2 使用済燃料共用プールの線源強度

使用済燃料共用プールの線源強度として、ラックに収納されている使用済燃料を線源として考える。使用済燃料の照射時間は 1×10^6 時間とし、原子炉停止後 1×10^4 時間経過したものが全てのラックに収納されているものとする。なお、原子炉運転中における燃料集合体1体あたりの出力は4.3MWとする。

使用済燃料の線源強度について、表-2に示す。

表-2 使用済燃料の線源強度

ガンマ線エネルギー (MeV)	線源強度 (MeV/(W・s))
1.0	1.2×10^9
2.0	3.6×10^6
3.0	6.4×10^6

※1 REACTOR HANDBOOK Vol. III Part B より

これより、各ガンマ線エネルギーの単位体積あたりの線源強度Sは次式により求められる。

$$S (s^{-1} \cdot mm^{-3}) = \frac{\text{線源強度 (MeV/(W \cdot s))} \times \text{燃料集合体 1 体あたりの出力 (W)}}{\text{各ガンマ線エネルギー (MeV)} \times \text{燃料集合体 1 体あたりの線源領域体積 (mm}^3\text{)}}$$

1.3 評価方法

前項の線源強度から、図-1 に示す評価点における線量率を計算機コード「QAD-CGGP2R」(概要を参考資料に示す。)を用いて計算する。

なお、遮へい計算に用いる前提条件は以下のとおりとする。

- 線源形状は、ラック配置面積、燃料有効長より算出した直方体モデルとする。なお、ラックによる遮へい効果は考慮しない。
- 線量率の評価点は、直方体モデルの中心位置延長上とする。計算モデルを図-2 に示す。

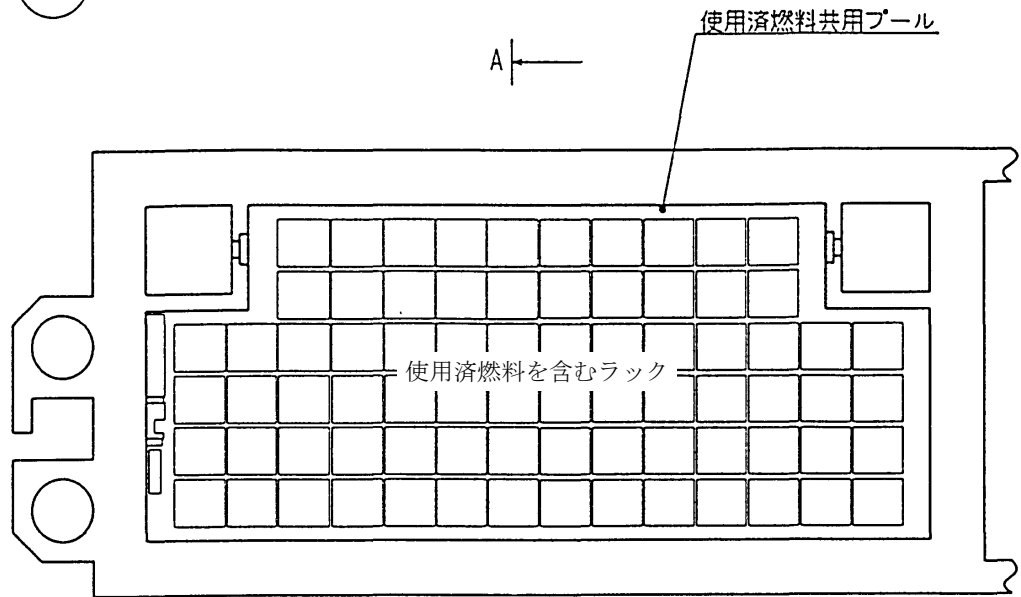
1.4 評価結果

計算結果について表-3 に示す。評価点における線量率は、当該区分に対する基準値を満足しており、水深の遮へい能力は十分確保される。

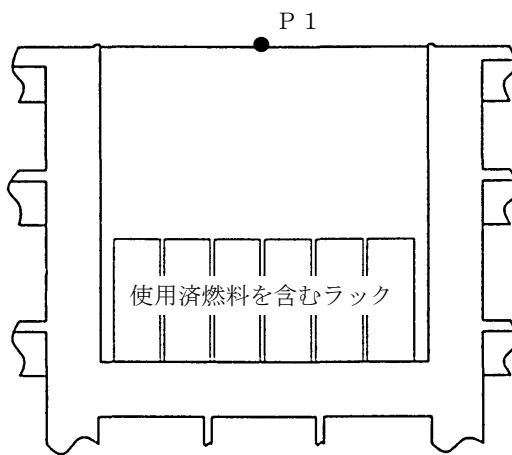
表-3 計算結果

評価点	区分	線量率 (mSv/h)
P1 (プール水面)	F	1.0×10^{-8}

P.N. 

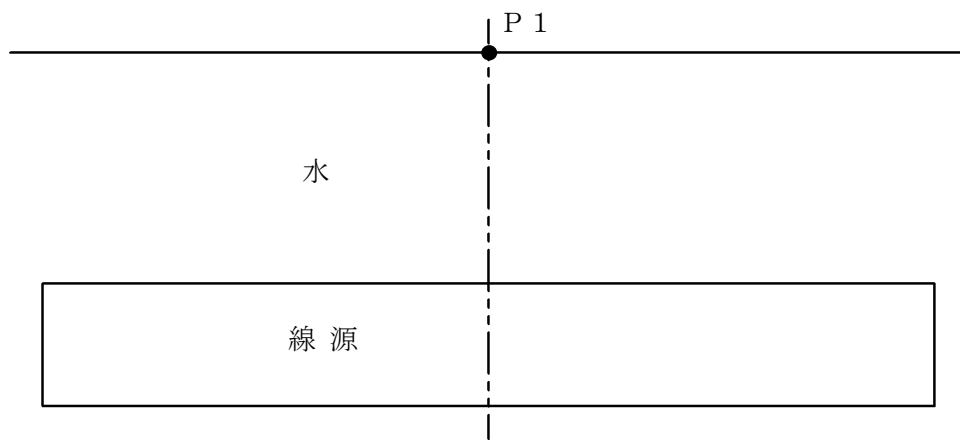
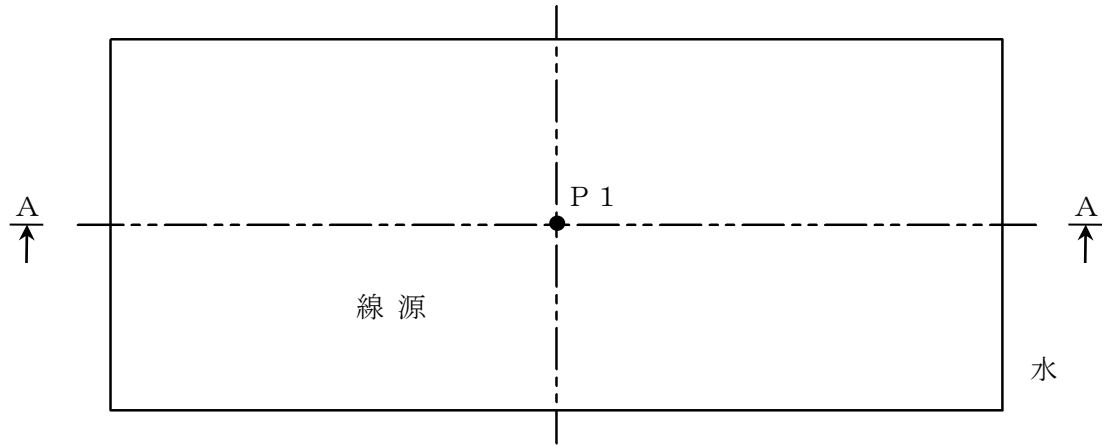


A




A-A断面

図-1 評価点



A-A断面

 計算に用いた線源

※1 評価においては、高さを使用済燃料の有効長とし、縦、横を使用済燃料貯蔵ラック設置エリアを包含する寸法とした直方体を線源として考慮する。

図-2 計算モデル (評価点P1)

計算機コード「QAD-CGGP2R」の概要

(1) 概要

QAD-CGGP2Rコードは、米国ロスアラモス国立研究所で開発された、ガンマ線の物質透過を計算するための点減衰核積分コード「QAD」をベースとし、日本原子力研究所がICRP1990年勧告の国内関連法令・規則への取入れに合わせて、実効線量を計算できるように改良した汎用遮へい解析コードである。

(2) 機能

QAD-CGGP2Rコードは、遮へい解析に際して以下の機能を有する。

- 線源を直方体，円筒，球の形状に構成できる。
- 任意の遮へい体で構成される体系のガンマ線実効線量率を計算する。

(3) 使用実績

QAD-CGGP2Rコードは、使用済燃料貯蔵プールのガンマ線遮へい解析に豊富な実績を有する。

(4) 検証

大型実験／ベンチマーク試験による検証^{※1}が実施されていることを確認した。

※1 以下の文献を確認し，検証されたコードであることを確認した。

- ガンマ線遮蔽設計ハンドブック（1988年1月，（社）日本原子力学会）
- 放射線輸送計算コードを用いた「むつ」船用炉の遮蔽解析法と実験解析に基づく評価（日本原子力学会誌 1984 Vol.26 No.2）

使用済燃料収納缶（小）についての説明書

1. 概要

使用済燃料貯蔵ラック（49 体）に貯蔵する変形燃料，および破損燃料は，燃料の取扱いを可能にするため，また破損燃料については放射性物質の拡散を抑制するとともに，燃料の形状が維持されていない場合でも臨界を防止するため，使用済燃料収納缶（小）内に収納した状態で貯蔵する。

2. 使用済燃料収納缶（小）の構造

使用済燃料収納缶（小）はステンレス鋼製の角缶構造である。

3. 使用済燃料収納缶（小）の機能

(1) 使用済燃料収納缶（小）は，燃料取扱装置を用いて使用済燃料収納缶（小）内に収納した燃料の取扱いが可能になるよう，使用済燃料収納缶（小）上部に燃料の上部タイププレートハンドル部と同等の形状を有する吊具を取り付け，吊具を燃料取扱装置の把握機で把持する。なお，吊具は落下防止措置を施した着脱式の機構とする。

(2) 使用済燃料収納缶（小）は，燃料棒の形状が維持されていない場合でも放射性物質の拡散を抑制する。

4. 使用済燃料収納缶（小）の取扱い及び落下防止措置

- ・使用済燃料収納缶（小）上部には吊具を取り付けるための接続部（窓）を設け，接続部に吊具を取り付ける。接続部は使用済燃料収納缶（小）に4箇所設け，吊具を4箇所に取り付けることにより，吊上げ時の落下を防止する。
- ・吊具は燃料取扱装置の把握機で把持することから，以下の燃料取扱装置の落下防止機能により吊上げ時の落下を防止する。
 - ・ホイストは電源断時に電磁ブレーキで保持する構造
 - ・ホイストは二重のワイヤロープで保持する構造
 - ・把握機は空気喪失時にフックが開かない構造
 - ・把握機の機械的インターロック

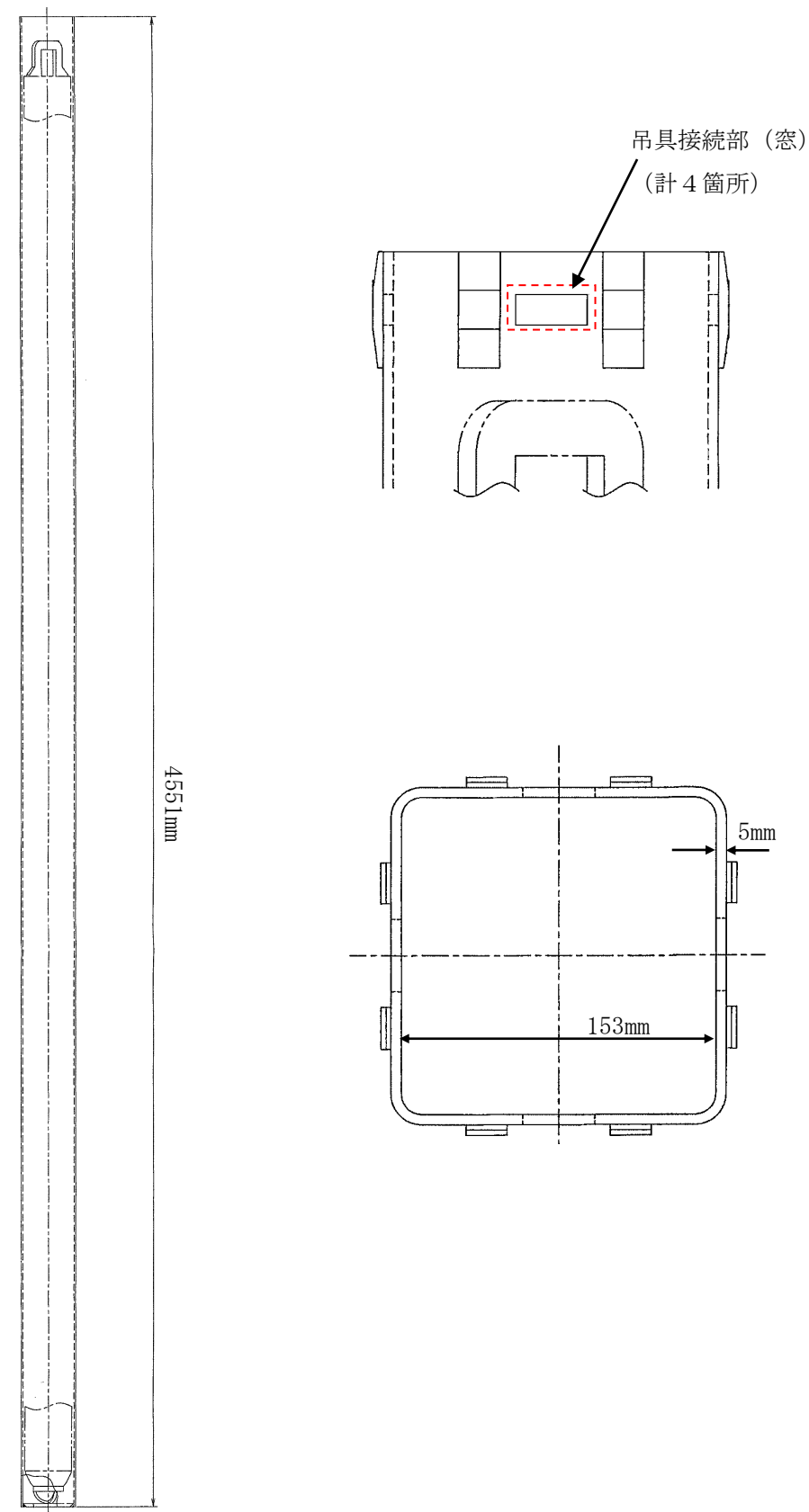


図-1 使用済燃料収納缶 (小) 構造図

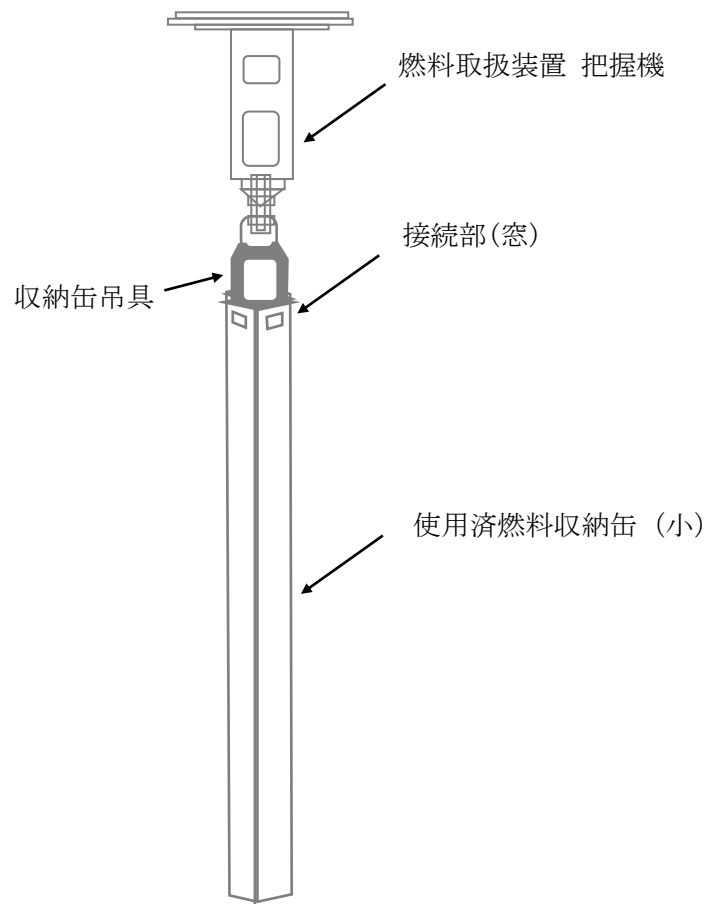


図-2 使用済燃料収納缶 (小) 取り扱い概念図

使用済燃料貯蔵ラック（25 体）について

1. 背景

共用プールに、1～3 号機原子炉建屋内の使用済燃料プールに貯蔵中の使用済燃料及び新燃料、5,6 号機原子炉建屋内の使用済燃料プールに貯蔵中の使用済燃料（合計 4,403 体）の受け入れを計画している。その中には、震災前から使用済燃料プールに貯蔵されている変形燃料や破損燃料、震災時に破損した可能性のある燃料が含まれている。変形燃料の貯蔵にあたっては、変形の程度に対して、物理的に貯蔵できるとともに、臨界を防止することが必要である。また破損燃料の貯蔵にあたっては、破損形態に応じて、使用済燃料収納缶に収納することにより放射性物質の拡散を抑制するとともに、臨界を防止することが必要である。

このため、上記の燃料の貯蔵を目的とした使用済燃料貯蔵ラックを設置する。

2. 使用済燃料貯蔵ラック（25 体）および使用済燃料収納缶（大）について

- 使用済燃料収納缶（大）とは、使用済燃料収納缶（小）に入らない変形、または破損燃料を収納する缶であり、使用済燃料収納缶（大）ごと使用済燃料貯蔵ラック（25 体）に貯蔵することが可能である。なお、健全燃料についても使用済燃料収納缶（大）に収納し、使用済燃料貯蔵ラック（25 体）に貯蔵することが可能である。
- 使用済燃料収納缶（大）は、燃料ハンドル部が幾何形状的に最も変形した場合でも収納することが可能な内寸としている。
- 使用済燃料貯蔵ラック（25 体）には使用済燃料収納缶（大）に収納された燃料集合体 25 体を貯蔵する。

3. 安全機能の維持の確認

使用済燃料貯蔵ラック（25 体）の安全機能は以下の別添—1～3，5にて確認し、使用済燃料収納缶（大）の安全機能は以下の別添—4にて確認している。

- 別添—1 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
- 別添—2 使用済燃料貯蔵ラック（25 体）の耐震設計の基本方針
- 別添—3 使用済燃料貯蔵ラック（25 体）の耐震性についての計算書
- 別添—4 使用済燃料収納缶（大）の耐震性についての計算書
- 別添—5 使用済燃料貯蔵ラック（25 体）設置後の使用済燃料共用プールの水深の遮へい能力に関する説明書
- 別添—6 使用済燃料収納缶（大）についての説明書

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

1.1 基本的考え方

使用済燃料共用プールの使用済燃料貯蔵ラック (25 体) は、想定される厳しい状態において貯蔵する燃料が臨界に達することを防止する設計とする。また、使用済燃料貯蔵ラック (25 体) は、臨界防止のため以下の配慮を行う。

- 貯蔵する燃料の中心間距離をラックの格子および格子内のスペーサで確保する。
- ラック構造材にはステンレス鋼を使用する。

1.2 設計基準

想定される厳しい状態において、実効増倍率 (k_{eff}) を 0.95 以下とすることを設計基準とする。

1.3 評価条件

燃料棒の形状が維持されていないと仮定した条件で評価を行うものとする。

臨界解析モデルを図-1 に示す。実効増倍率を大きく見積るため、評価条件を下記の通りとした。

- 使用済燃料貯蔵ラック (25 体) には使用済燃料収納缶 (大) に収納された燃料集合体 25 体を貯蔵する。
- 使用済燃料収納缶 (大) に収納された燃料集合体は、燃料集合体の形状維持を前提としないため、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) 内に放出されたことを仮定し、使用済燃料収納缶 (大) 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、燃料粒子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。
- 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。
- ラックの貯蔵ピッチ及び内のりは、製造公差を考慮した最小値とする。なお、ラックの板厚は、貯蔵ピッチと内のりによって決まるため、公称値とする。
- ラック内の使用済燃料収納缶 (大) 配置は、スペーサ間の範囲で偏心配置 (ラック中心寄り) を考慮する。
- ラックが無限に並んだ状態として、高さ方向無限、かつラック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は水に置き換え，中性子吸収材を使用済燃料収納缶（大）に固定するボルト穴は溝として水に置き換える。
- 水温は 4℃とする。

1.4 評価方法

使用済燃料貯蔵ラック（25 体）の実効増倍率は，使用済燃料収納缶（大），ラックの形状を模擬した計算モデルを用い，計算には KENO-V.a コードを用いる。

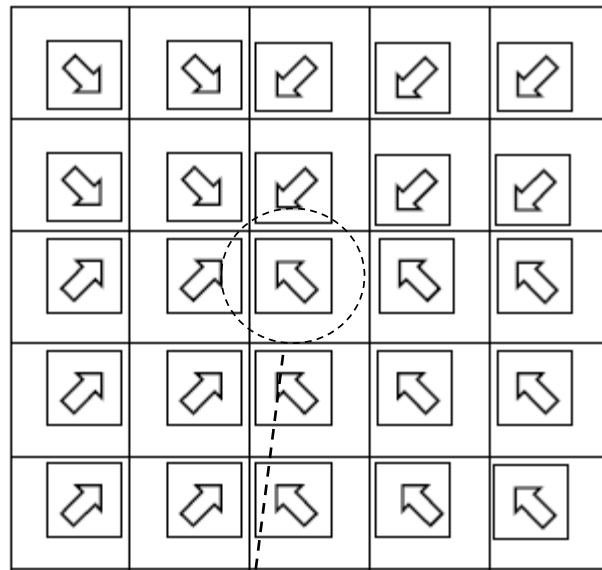
1.5 評価結果

使用済燃料貯蔵ラック（25 体）の実効増倍率は，表-1 に示す通り設計基準を満足している。

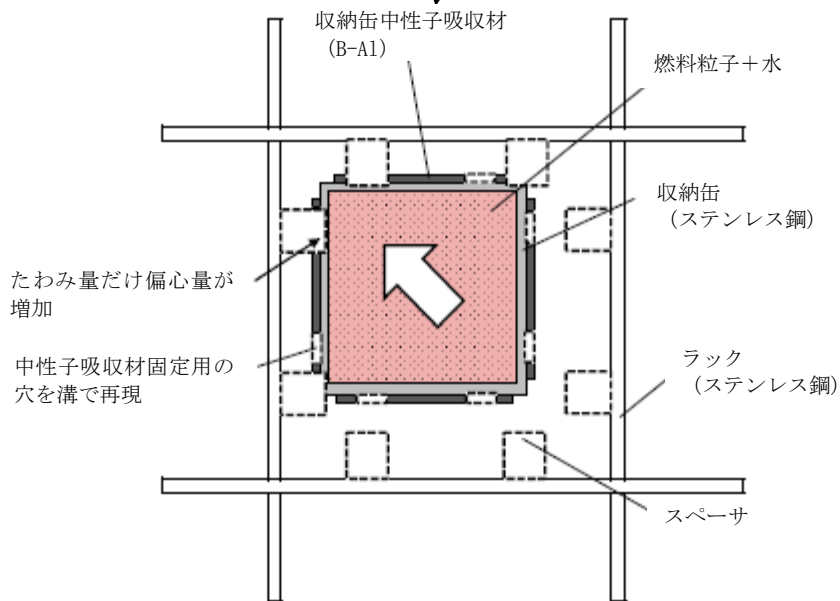
表-1 評価結果

使用済燃料収納缶（大）内の燃料条件	実効増倍率 ^{※1}	設計基準
燃料棒の形状が維持されていない燃料	0.91	0.95

※1 モンテカルロ計算の統計誤差（3σ）を考慮した値



【ラック全体図】



【使用済燃料収納缶（大）に収納された燃料集合体の詳細】

図-1 臨界解析モデル
(燃料棒の形状が維持されていないと仮定)

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-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、使用済燃料貯蔵ラックや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.

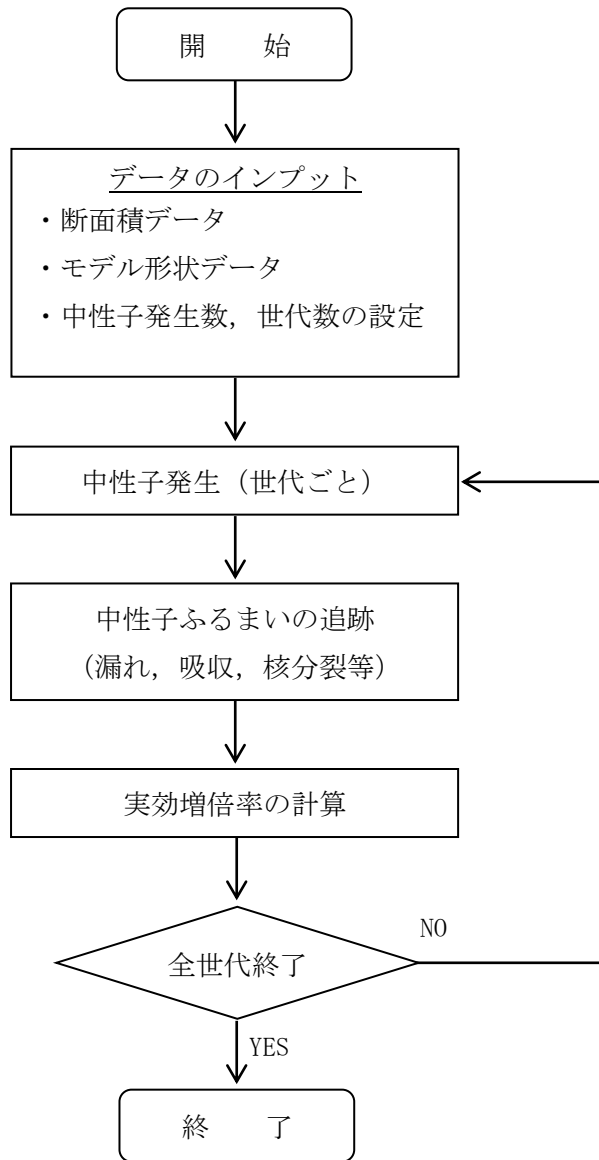


図-2 KENO-V.a コードの解析フロー図

使用済燃料貯蔵ラック（25 体）の耐震設計の基本方針

使用済燃料貯蔵ラック（25 体）の耐震設計は、次の基本方針に基づいて行う。

1. 設備の重要度による耐震クラス分類

耐震クラス	S
-------	---

2. 構造計画

主要区分	計画の概要		概略構造図	摘要
	基礎・支持構造物	主体構造		
(1) 使用済燃料貯蔵ラック (25体)	使用済燃料貯蔵ラック(25体)は、縦置型で共用プールの床に置かれたコモンベース上に設置されラック取付ボルトで固定している。コモンベースは、共用プール床に取り付けられてある基礎ボルトにより固定している。	ステンレス鋼製角形枠組構造		・使用済燃料貯蔵ラック(25体)

3. 設計用地震力

耐震クラス	設計用地震波	動的解析法	適用する地震動等		設計用地震力
			水平	鉛直	
S	基準地震動 S_s	モーダル解析による 応答スペクトル法	S_s	S_s	水平地震力，鉛直地震力は動的解析により得られた地震力とする。

4. 荷重の組合せと許容限界

記号の説明

- D : 死荷重
- P_D : 地震と組合わすべきプラントの運転状態Ⅰ及びⅡ（運転状態Ⅲがある場合はこれを含む）における圧力荷重又は当該設備に設計上定められた最高使用圧力による荷重
- M_D : 地震と組合わすべきプラントの運転状態Ⅰ及びⅡ（運転状態Ⅲがある場合はこれを含む）における機械的荷重又は当該設備に設計上定められた機械的荷重
- S_s : 基準地震動 S_s により定まる地震力
- $f_t^{(注)}$: ボルト材以外の支持構造物に対しては設計・建設規格SSB-3121.1, ボルト材に対しては設計・建設規格SSB-3131により規定される供用状態A及びBでの許容引張応力
- $f_s^{(注)}$: ボルト材以外の支持構造物に対しては設計・建設規格SSB-3121.1, ボルト材に対しては設計・建設規格SSB-3131により規定される供用状態A及びBでの許容せん断応力
- $f_c^{(注)}$: ボルト材以外の支持構造物に対して設計・建設規格SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容圧縮応力
- $f_b^{(注)}$: ボルト材以外の支持構造物に対して設計・建設規格SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容曲げ応力
- $f_t^*, f_s^*, f_c^*, f_b^*$: 供用状態D s に対する許容応力算定に用いる応力であって、上記の f_t, f_s, f_c, f_b の値を算出する際、以下の読み替えを行って算出した値。その他の支持構造物の場合、下記（注）の S_y を $1.2S_y$ と読み替える。ただし、ステンレス鋼及び高ニッケル合金を除く。
- τ_b : 基礎ボルトに生じるせん断応力

（注）

クラス3支持構造物及びその他支持構造物に対する f_t, f_s, f_c, f_b の値の算出において、 F 値は次の値を用いる。

$$F = \text{Min}[S_y, 0.7S_u]$$

ただし、使用温度が40℃を超えるオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金にあつては、

$$F = \text{Min}[1.35S_y, 0.7S_u, S_y(RT)]$$

ここで、

F : 許容応力算定用基準値、材料の許容応力を決定する場合の基準値

(1) 支持構造物

耐震クラス	荷重組合せ	供用状態	許容限界（ボルト等以外）					許容限界（ボルト等）			適用範囲
			一次応力					一次応力			
			引張	せん断	圧縮	曲げ	組合せ	引張	せん断	組合せ	
S	$D+P_D+M_D+S_S$	D s	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$1.5f_c^*$	$1.5f_b^*$	$1.5f_t^*$	$1.5f_t^*$	$1.5f_s^*$	$\text{Min}\{1.5f_t^*, (2.1f_t^* - 1.6\tau_b)\}$	<ul style="list-style-type: none"> ・使用済燃料貯蔵ラック (25 体) ・ラック取付ボルト ・基礎ボルト ・スペーサ ・スペーサ下部支持部材

使用済燃料貯蔵ラック(25体)の耐震性についての計算書

1. 一般事項

本計算書は、使用済燃料貯蔵ラック(25体)(以下「ラック」という。)の耐震性についての計算方法と計算結果を示す。

1.1 計算条件

- (1) ラックは、使用済燃料共用プール(以下「共用プール」という。)の底部に基礎ボルトを介して据え付けられたコモンベース上にラック取付ボルトで固定されるものとする。
- (2) ラックの質量には、使用済燃料収納缶(大)及びこれに収納されている使用済燃料の質量とラック自身の質量のほか、使用済燃料収納缶(大)とラックに含まれる水の質量及びラック外形の排除水質量*を考慮する。
- (3) 水平方向地震動と鉛直方向地震動を解析モデルへ別々に入力して地震荷重、応力を求め、それらを適切に組み合わせて評価を行う。
構造概要図を図1-1に示す。

注記*：排除水質量とは、水中の機器の容積により排除される機器の周囲の流体の質量である。

1.2 準拠基準等

本検討は原則として下記に準拠して行う。

- ・原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG 4601・補-1984)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG 4601-1987)
- ・原子力発電所耐震設計技術指針(JEAG 4601-1991 追補版)
- ・原子力発電所耐震設計技術規程(JEAC 4601-2008)
- ・発電用原子力設備規格 設計・建設規格(JSME S NC1-2005/2007)
- ・鋼構造設計規準—許容応力度設計法—(社団法人 日本建築学会(2005年9月))
- ・日本産業規格(JIS)

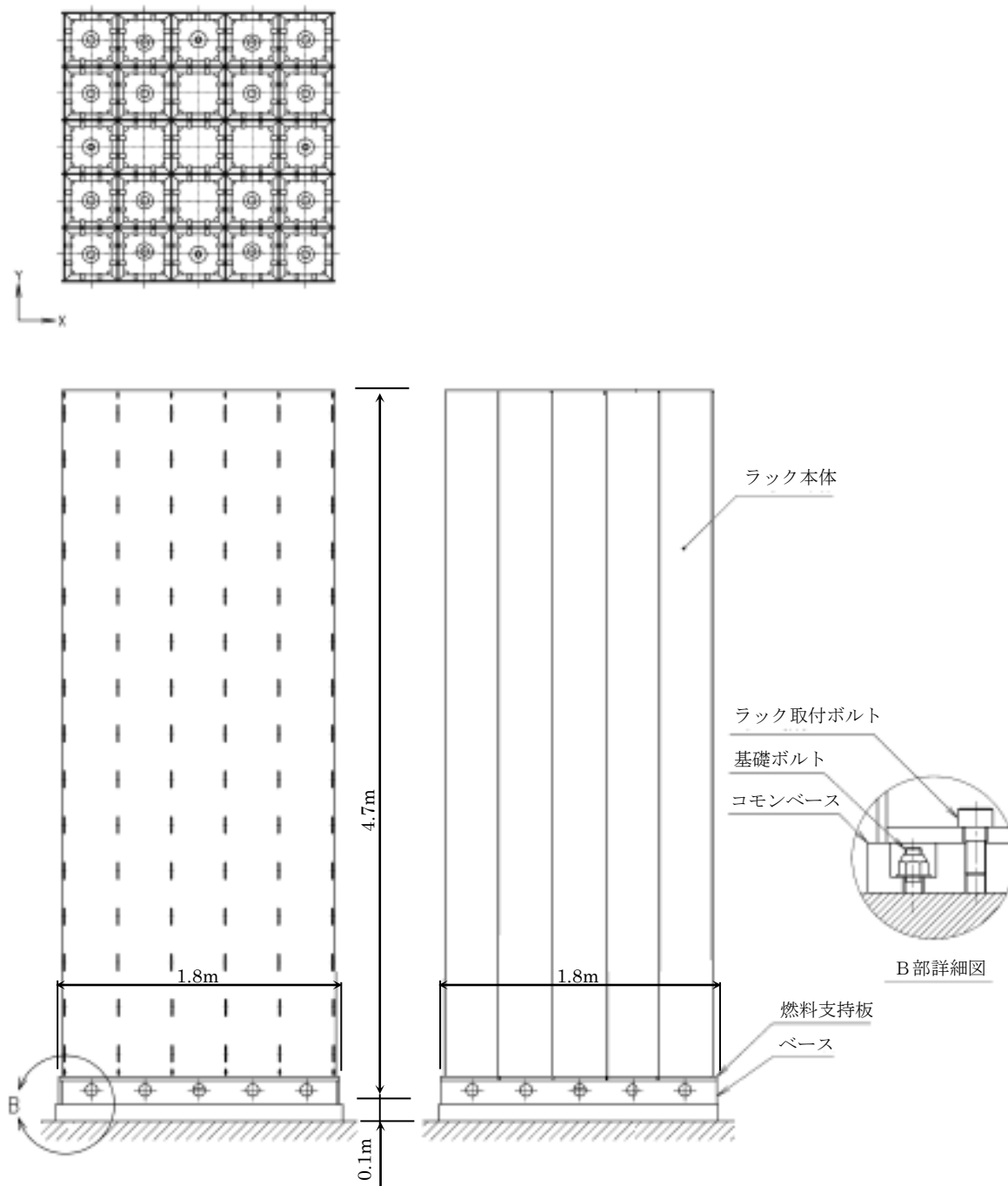


図1-1 構造概要図 (使用済燃料貯蔵ラック (25体))

1.3 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A	スペーサ下部支持部材の断面積	mm ²
Ab	ラック取付ボルト又は基礎ボルトの軸断面積	mm ²
Af	圧縮フランジの断面積	mm ²
As	スペーサの面積	mm ²
Ch	水平方向設計震度	—
Cv	鉛直方向設計震度	—
E	縦弾性係数	MPa
F*	設計・建設規格 SSB-3121.3 又は SSB-3133 に定める値	MPa
Fi	ベース又はコモンベース底部に作用するせん断力	N
fj	ベース又はコモンベース端から l_j の位置にあるラック取付ボルト又は基礎ボルトに作用する引張力（1本当り）	N
f _o	スペーサ下部支持部材の許容組合せ応力	MPa
f _{c b}	スペーサ下部支持部材の許容曲げ応力	MPa
f _c	スペーサの許容圧縮応力	MPa
f _s	部材の許容せん断応力	MPa
f _{s b}	せん断力のみを受けるラック取付ボルト又は基礎ボルトの許容せん断応力	MPa
f _{s s}	スペーサ下部支持部材の許容せん断応力	MPa
f _t	部材の許容引張応力	MPa
f _{t o}	引張力のみを受けるラック取付ボルト又は基礎ボルトの許容引張応力	MPa
f _{t s}	引張力とせん断力を同時に受けるラック取付ボルト又は基礎ボルトの許容引張応力	MPa
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s ²
H	スペーサ下部支持部材の高さ	mm
L	支点間の距離	mm
L ₁	スペーサ下部支持部材とセル壁面との距離	mm
l_{ig}	ベース又はコモンベース端から重心までの距離	mm
l_j	ベース又はコモンベース端からラック取付ボルト又は基礎ボルトまでの距離	mm
M	曲げモーメント	N・mm
M _i	ベース又はコモンベース底部の転倒モーメント	N・mm
m	使用済燃料収納缶（大）貯蔵時のラック全質量	kg

記号	記号の説明	単位
n	ラック取付ボルト又は基礎ボルトの全本数	—
n_j	ベース又はコモンベース端から l_j の位置にあるラック取付ボルト又は基礎ボルトの本数	—
P	スペーサおよびスペーサ下部支持部材への荷重	N
S_u	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9に定める値	MPa
S_y	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8に定める値	MPa
Z	スペーサ下部支持部材の断面係数	mm^3
Λ	スペーサの限界細長比	—
λ	スペーサの有効細長比	—
σ_0	スペーサ下部支持部材に生じる組合せ応力	MPa
σ_b	ラック取付ボルト又は基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
σ_c	スペーサに生じる圧縮応力	MPa
σ_{cb}	スペーサ下部支持部材に生じる曲げ応力	MPa
σ_{fa}	部材に生じる組合せ応力	MPa
σ_x, σ_y	部材に生じる引張応力	MPa
τ_b	ラック取付ボルト又は基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
τ_s	スペーサ下部支持部材に作用するせん断応力	MPa
τ_{xy}	部材に生じるせん断応力	MPa

注記

- 1) 添字 i の意味は、以下のとおりとする。また、添字 j は 1 ～ 10 までの数字を示すものとする。

$i = X$: X方向

$i = Y$: Y方向

2. 計算方法

2.1 固有周期の計算方法

ラックはシェル要素を用いた有限要素モデルとする。

ラックの計算モデルを図 2-1 に示す。固有周期は、計算機コード「NASTRAN」を用いて求める。

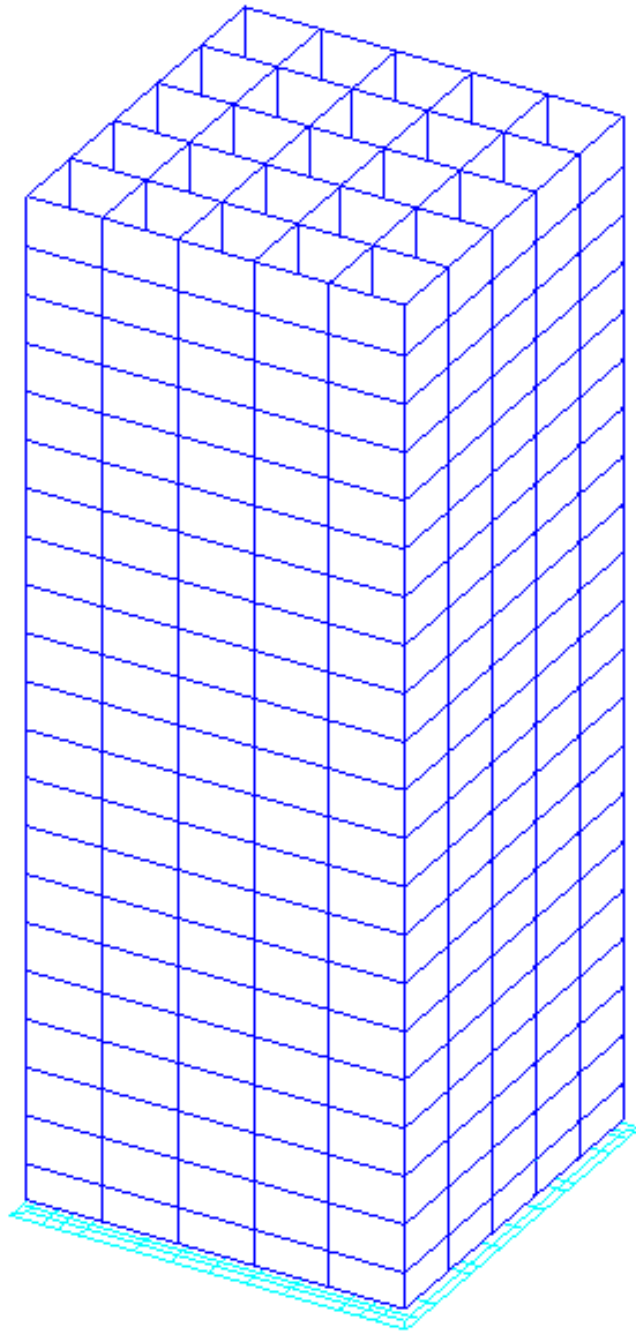


図 2-1 使用済燃料貯蔵ラック (25 体) 計算モデル

2.2 応力の計算方法

2.2.1 部材の応力

部材についての応力計算は、図2-1の計算モデルにて計算機コードを使用を行い、引張応力、せん断応力を求め、本項に示す計算方法に従って組合せ応力を計算する。

計算機コード内では、各部材の局所座標系及びせん断応力 τ_{xy} 、引張応力 σ_x 、 σ_y の作用する向きを、図2-2に示すように設定している。

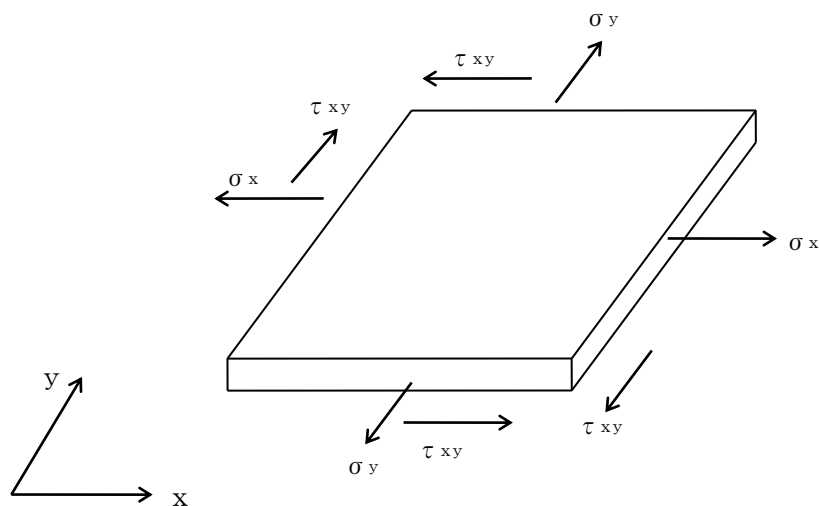


図2-2 部材の応力

各部材の組合せ応力 σ_{fa} は、上記で計算したせん断応力 τ_{xy} 、引張応力 σ_x 、 σ_y を用いて、次式より求める。

$$\sigma_{fa} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau_{xy}^2}$$

2.2.2 ボルトの応力

図2-1の計算モデルにて荷重計算を計算機コードを使用して行い、求められた地震時にラックに作用する転倒モーメント M_x 及びベース底部に作用するせん断力 F_x が、ラックに図2-3のように負荷されるものとしてラック取付ボルトおよび基礎ボルトの応力を求める。

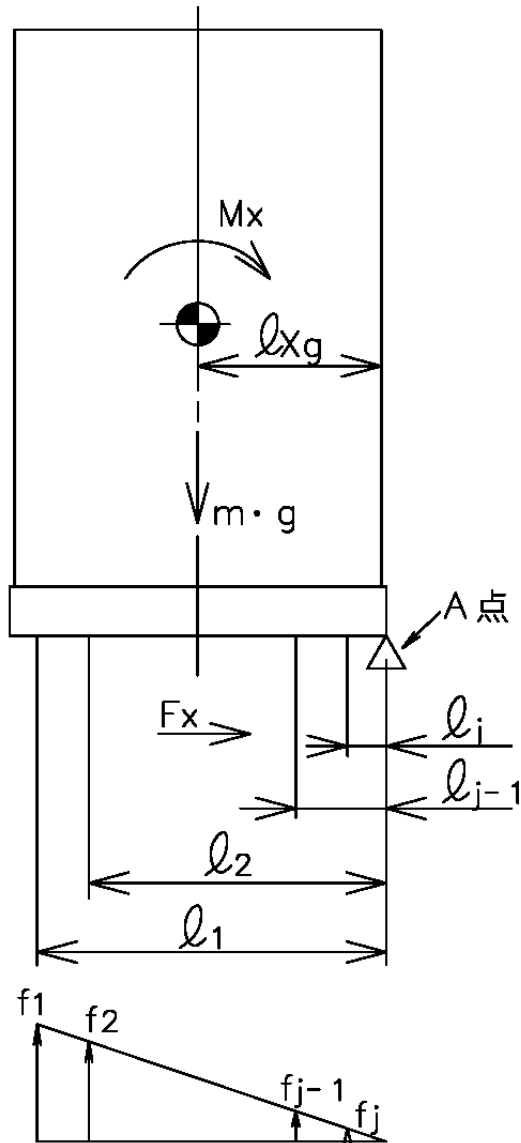


図2-3 ラック取付ボルトおよび基礎ボルトの応力

(1) 引張応力

A点まわりのモーメントの平衡によりラック取付ボルトおよび基礎ボルト1本当たりの引張力 f_j を求める。

$f_1 > f_2 > \dots > f_{j-1} > f_j$ の関係にあるので f_1 のみを求める。

$$f_1 = \frac{l_1(M_x - (1 - C_v) \cdot m \cdot g \cdot l_{xg})}{n_1 \cdot l_1^2 + n_2 \cdot l_2^2 + \Lambda + n_{j-1} \cdot l_{j-1}^2 + n_j \cdot l_j^2}$$

引張力 f_1 によりラック取付ボルトおよび基礎ボルトに生じる引張応力 σ_b は、次式により求める。

$$\sigma_b = \frac{f_1}{A_b}$$

ただし、 f_1 の値が負のときはラック取付ボルトおよび基礎ボルトに引張力が生じないので、引張応力の計算は行わない。

(2) せん断応力

ラック取付ボルトおよび基礎ボルトに対するせん断力はボルト全本数で受けるものとして計算する。

せん断力 F_x によりラック取付ボルトおよび基礎ボルトに生じるせん断応力 τ_b は、次式により求める。

$$\tau_b = \frac{F_x}{n \cdot A_b}$$

2.2.3 スペーサ及びスペーサ下部支持部材の応力

使用済燃料貯蔵ラック (25 体)セル内の上下端に取付けるスペーサおよびスペーサ下部支持部材の条件は図 2-4 の a 部もしくは a' 部のどちらかに属すると考えられる。

a 部と a' 部の部位を比較すると、図 2-4 の矢印方向から荷重を受けたとき、a' 部は隣り合うセルのスペーサおよびスペーサ下部支持部材も強度部材として寄与するが、a 部は隣り合うセルが無いいため、a' 部に比べ、強度上不利である。

したがって、代表して a 部を評価する。

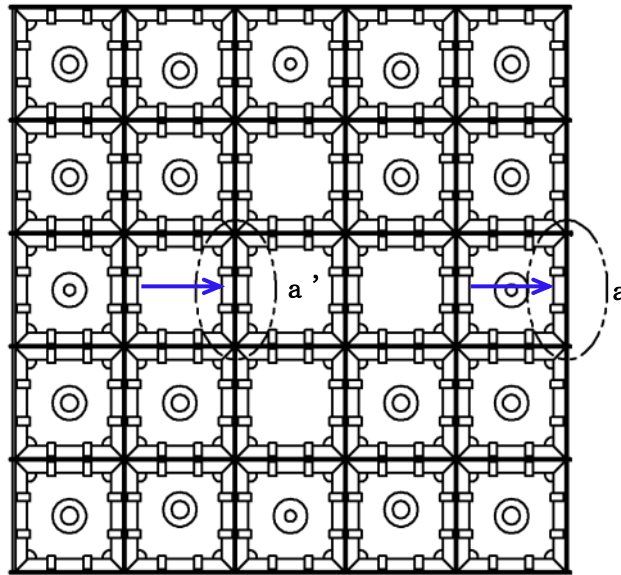


図 2-4 使用済燃料貯蔵ラック (25 体) 上面図

(1) 作用荷重

使用済燃料収納缶 (大) に働く地震力が、セル 1 面の上下部スペーサ部に作用するものとする。

$$P = \frac{1}{4} \cdot C_H \cdot m \cdot g$$

(2) スペーサに生じる圧縮応力

$$\sigma_c = \frac{P}{A_s}$$

(3) スペーサ下部支持部材に生じる曲げ応力

$$M = P \cdot L_1$$

$$\sigma_{cb} = \frac{M}{Z}$$

(4) スペーサ下部支持部材に生じるせん断応力

$$\tau_s = \frac{P}{A}$$

(5) スペーサ下部支持部材に生じる組合せ応力

$$\sigma_0 = \sqrt{\sigma_{cb}^2 + 3 \cdot \tau_s^2}$$

3. 評価方法

3.1 固有周期の評価

2.1 項で求めた固有周期から「添付資料－9－2 別添－2 使用済燃料貯蔵ラック (25 体) の耐震設計の基本方針」に基づき、水平方向設計震度を求める。

3.2 応力の評価

3.2.1 部材の応力評価

2.2.1 項で求めた各部材の引張応力 σ_x 、 σ_y 及び組合せ応力 σ_{fa} が、許容引張応力 f_t 以下であること。

また、2.2.1 項で求めた各部材のせん断応力 τ_{xy} が、許容せん断応力 f_s 以下であること。

ただし、 f_t 及び f_s は下表による。

地震力の種類	基準地震動 S_s
許容引張応力 f_t	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_s	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

3.2.2 ラック取付ボルト及び基礎ボルトの応力評価

2.2.2 項で求めたラック取付ボルト及び基礎ボルトの引張応力 σ_b が、次式より求めた許容引張応力 f_{ts} 以下であること。

また、2.2.2 項で求めたラック取付ボルト及び基礎ボルトのせん断応力 τ_b が、せん断力のみを受けるボルトの許容せん断応力 f_{sb} 以下であること。

$$f_{ts} = 1.4 f_{to} - 1.6 \tau_b$$

かつ、

$$f_{ts} \leq f_{to}$$

ただし、 f_{to} 及び f_{sb} は下表による。

地震力の種類	基準地震動 S_s
許容引張応力 f_{to}	$\frac{F^*}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_{sb}	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

3.2.3 スペーサおよびスペーサ下部支持部材の応力評価

2.2.3 項で求めたスペーサの圧縮応力が次式で求めた許容圧縮応力 f_c 以下であること。2.2.3 項で求めたスペーサ下部支持部材に生じる曲げ応力，せん断応力，組合せ応力がそれぞれ，次式で求めた許容曲げ応力 f_{cb} ，許容せん断応力 f_{ss} ，許容組合せ応力 f_o 以下であること。

地震力の種類	基準地震動 S_s
許容圧縮応力 f_c	$\left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F^*}{\nu} \times 1.5$
許容曲げ応力 f_{cb}	$\min \left\{ 1.5 \times \frac{0.433 \cdot E \cdot A f}{L \cdot H}, 1.5 \times \frac{F^*}{1.5} \right\}$
許容せん断応力 f_{ss}	$1.5 \times \frac{F^*}{1.5\sqrt{3}}$
許容組合せ応力 f_o	$1.5 \times \frac{F^*}{1.5}$

4. 評価条件

機器名称	耐震設計上の重要度分類	据付場所及び床面高さ (m)	次数	基準地震動 S_s		最高使用温度 (°C)	周囲環境温度 (°C)
				水平方向*5 設計震度	鉛直方向 設計震度		
使用済燃料貯蔵ラック (25 体)	S	運用補助共用施設 G. L. -1.3 *1	1 次	*2	$C_v = 0.49$	66	—
			2 次	*3			
			3 次	*4			

注記 *1：基準床レベルを示す。

*2：基準地震動 S_s に基づく動的解析より得られる応答値（1 次固有周期： $C_H = 0.89$ ）

*3：基準地震動 S_s に基づく動的解析より得られる応答値（2 次固有周期： $C_H = 0.70$ ）

*4：基準地震動 S_s に基づく動的解析より得られる応答値（3 次固有周期： $C_H = 0.70$ ）

*5：基準地震動 S_s により定まる動的震度（ $C_H = 0.67$ ）についても考慮する。

添付資料-9 では、G. L. $\pm 0m = T. P. 8.5m$ (※) とする。

(※) 震災後の地盤沈下量 (-709mm) と O. P. から T. P. への読替値 (-727mm) を用いて、下式に基づき換算している。

〈換算式〉 $T. P. = \text{旧 } O. P. - 1,436\text{mm}$

5. 評価結果

(1) 部材に生じる応力 (単位：MPa)

ラック	部 材	材 料	応 力	基準地震動 S _s	
				算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵ラック (25 体)	ラック本体	SUS304	組合せ	$\sigma_{fa} = 14$	$f_t = 205$

許容応力以下である。

(2) ラック取付ボルトに生じる応力 (単位：MPa)

ラック	部 材	材 料	応 力	基準地震動 S _s	
				算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵ラック (25 体)	ラック取付ボルト	SUS630 H1150	引張り	$\sigma_b = 21$	$f_{ts} = 455$

許容応力以下である。

(3) 基礎ボルトに生じる応力 (単位：MPa)

ラック	部 材	材 料	応 力	基準地震動 S _s	
				算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵ラック (25 体)	基礎ボルト	SUS630 H1150	引張り	$\sigma_b = 36$	$f_{ts} = 455$

許容応力以下である。

(4) スペーサおよびスペーサ下部支持部材に生じる応力 (単位：MPa)

ラック	部 材	材 料	応 力	基準地震動 S _s	
				算出応力	許容応力
使用済燃料貯蔵ラック (25 体)	スペーサ	SUS304	圧縮	$\sigma_c = 1$	$f_c = 202$
	スペーサ下部支持部材	SUS304	組合せ	$\sigma_o = 29$	$f_o = 205$

許容応力以下である。

参考資料

参考 計算機コード「NASTRAN」の概要

1. 一般事項

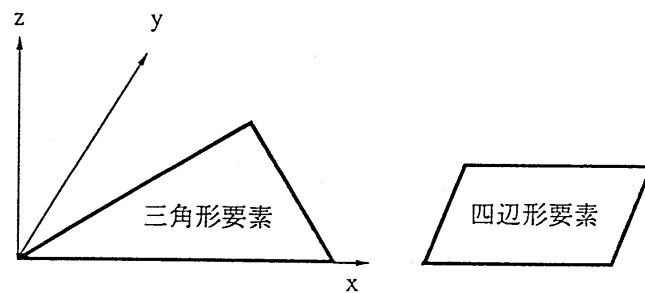
米国NASA (National Aeronautics and Space Administration)作成の有限要素法による構造解析用汎用計算機コード「NASTRAN」の概要である。

2. 本計算機コードの特徴

(1) 適用範囲が広く、以下の問題を解析できる。

- 静的構造問題
- 弾性安定問題
- 動的構造問題
- 熱伝導問題
- マトリックス問題一般

(2) 多くの要素が用意されており、種々のタイプの構造物の解析を行うことができる。



(3) 多自由度を有する大規模問題を効率よく解析することができる。

(4) 大規模問題を取り扱うために、入力データが簡単化されている。

(5) プロットINGの機能が準備されており、モデルの確認、解析結果の図形処理を簡単に行うことができる。

(6) 解析する座標系、拘束方法は、取り扱う問題にあったものを選ぶことができる。

3. 理論式

3.1有限要素法による評価

有限要素法による評価は、次の手順で行われる。

- (1) 要素内の変位を仮定し、節点変位を使って要素内任意点の変位を表現する。

$$\{u\} = [N]\{u_e\} \quad (3.1)$$

ここで、

- $\{u\}$: 要素内任意点の変位
 $[N]$: 形状関数マトリックス
 $\{u_e\}$: 節点変位

- (2) 上記の変位を微分して、要素内任意点のひずみを節点変位により表す。

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u_e\} \quad (3.2)$$

ここで、

- $\{\varepsilon\}$: 要素内任意点のひずみ
 $[B]$: ひずみマトリックス

- (3) 材料物性から求められる応力とひずみの関係式 ((3.3)式参照) より定められる弾性係数マトリックスを用いて、要素剛性マトリックスを (3.4) 式により計算する。

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (3.3)$$

$$[K] = \int [B]^T [D] [B] dvol \quad (3.4)$$

ここで、

- $\{\sigma\}$: 要素内任意点の応力
 $[D]$: 弾性係数マトリックス
 $[K]$: 要素剛性マトリックス

- (4) 全体の剛性マトリックスを要素剛性マトリックスの重ね合わせによって求め、力の釣合いより静的変位は(3.5)式、また動の変位は(3.6)式より求める。

$$\{f\} = [k]\{\gamma\} \quad (3.5)$$

$$\{f\} = [m]\{\ddot{\gamma}\} + [k]\{\gamma\} \quad (3.6)$$

ここで、

- $\{f\}$: 荷重ベクトル
 $\{\gamma\}$: 構造全体の変位

$$= \begin{Bmatrix} u_{e1} \\ u_{e2} \\ \vdots \\ u_{en} \end{Bmatrix}$$

$u_{e1}, u_{e2}, \dots, u_{en}$: 各節点の節点変位

[m] : 質量マトリックス

[k] : 剛性マトリックス

(5) 変位が求まれば, (3.2) 式, (3.3) 式より各要素の応力が求められる。

以上が有限要素法の評価手順であるが, この中で要素剛性マトリックスの算定及び動的解析における運動方程式の解法等の詳細について以下に述べる。

3.2 要素剛性マトリックスの算定

3.2.1 座標変換

解析で用いている要素は, 平面応力 (面内) 及び板の曲げ (面外) を考慮したシェル要素で, 各節点における変位成分は面内 2 方向 (u, v), 面外 1 方向 (w) 及び回転 2 方向 (α , β) の合計 5 つであり, 部材剛性は面内方向及び面外方向をそれぞれ独立に加算して求めるとともに, 算定に当たっては図 3-1 に示すような次の座標変換を行う。

$$\begin{aligned} x &= N_1 \cdot x_1 + N_2 \cdot x_2 + N_3 \cdot x_3 + N_4 \cdot x_4 \\ y &= N_1 \cdot y_1 + N_2 \cdot y_2 + N_3 \cdot y_3 + N_4 \cdot y_4 \end{aligned} \quad (3.7)$$

ここで,

$$N_1 = \frac{1}{4} \cdot (1 - \xi) \cdot (1 - \eta)$$

$$N_2 = \frac{1}{4} \cdot (1 + \xi) \cdot (1 - \eta)$$

$$N_3 = \frac{1}{4} \cdot (1 + \xi) \cdot (1 + \eta)$$

$$N_4 = \frac{1}{4} \cdot (1 - \xi) \cdot (1 + \eta)$$

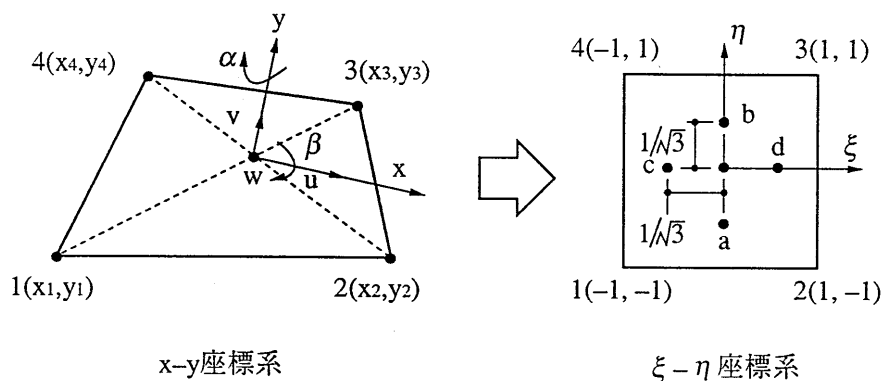


図 3 - 1 座標系

3.2.2 面内剛性の計算

要素内任意点の変位を、図 3-1 で示した(ξ, η)と節点変位を使って次のように仮定する。

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{N}_1 \cdot \mathbf{u}_1 + \mathbf{N}_2 \cdot \mathbf{u}_2 + \mathbf{N}_3 \cdot \mathbf{u}_3 + \mathbf{N}_4 \cdot \mathbf{u}_4 \\ \mathbf{v} &= \mathbf{N}_1 \cdot \mathbf{v}_1 + \mathbf{N}_2 \cdot \mathbf{v}_2 + \mathbf{N}_3 \cdot \mathbf{v}_3 + \mathbf{N}_4 \cdot \mathbf{v}_4 \end{aligned} \quad (3.8)$$

すなわち、次のようになる。

$$\{\mathbf{u}^m\} = [\mathbf{N}^m] \{\mathbf{u}_e^m\} \quad (3.9)$$

(3.8)式を用いて要素内任意点のひずみを次のように求め、面内応力に対するひずみマトリックス $[\mathbf{B}^m]$ を求める。

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}^m\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} = [\mathbf{B}^m] \{\mathbf{u}_e^m\} \quad (3.10)$$

一方、面内応力に対する応力とひずみの関係は次のように表される。

$$\{\boldsymbol{\sigma}^m\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [\mathbf{D}^m] \{\boldsymbol{\varepsilon}^m\} \quad (3.11)$$

ここで、

E : 縦弾性係数

ν : ポアソン比

したがって、面内応力に対する要素剛性マトリックス $[\mathbf{K}_m]$ は次のように計算される。

$$[\mathbf{K}_m] = \int [\mathbf{B}^m]^T [\mathbf{D}^m] [\mathbf{B}^m] \, d\text{vol} \quad (3.12)$$

3.2.3 面外剛性の計算

面外剛性は、面外曲げに対するものと面外せん断に対するものをそれぞれ別個に計算して求める。

(1) 面外曲げ剛性の計算

要素内任意点の面外方向変位(w)と回転角(α, β)を図 3-1 に示す ξ - η 座標系で次のように仮定する。

$$\begin{aligned} w &= w_{00} + w_{10} \cdot \xi + w_{01} \cdot \eta + w_{11} \cdot \xi \cdot \eta \\ \alpha &= \alpha_{00} + \alpha_{10} \cdot \xi + \alpha_{01} \cdot \eta + \alpha_{11} \cdot \xi \cdot \eta \\ \beta &= \beta_{00} + \beta_{10} \cdot \xi + \beta_{01} \cdot \eta + \beta_{11} \cdot \xi \cdot \eta \end{aligned} \quad (3.13)$$

ここで、

$$w_{00} \sim w_{11}, \alpha_{00} \sim \alpha_{11}, \beta_{00} \sim \beta_{11} : \text{未定係数}$$

四辺形の各節点の(ξ, η)を(3.13)式に代入することによって、要素内任意点の面外方向変位及び回転角は、(ξ, η)と節点変位を使って表されることになる。面外曲げに対するひずみマトリックス $[B^b]$ を次のように求める。

$$\{\varepsilon^b\} = \begin{Bmatrix} x_x \\ x_y \\ x_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \alpha}{\partial x} \\ \frac{\partial \beta}{\partial y} \\ \frac{\partial \alpha}{\partial y} + \frac{\partial \beta}{\partial x} \end{Bmatrix} = [B^b] \{u_e^b\} \quad (3.14)$$

一方、面外曲げ応力に対する応力とひずみの関係は次のように表される。

$$\{\sigma^b\} = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \begin{Bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu}{2} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} x_x \\ x_y \\ x_{xy} \end{Bmatrix} = [D^b] \{\varepsilon^b\} \quad (3.15)$$

ここで、

t : 板厚

したがって、面外曲げ応力に対する要素剛性マトリックス $[K_b]$ は次のように

計算される。

$$[K_b] = \int [B^b]^T [D^b] [B^b] dvol \quad (3.16)$$

(2) 面外せん断剛性の計算

x 方向のせん断ひずみを図 3-1 の a, b 点で, y 方向を c, d 点で代表させることとする。せん断ひずみを次のように定義し, これに(3.13)式を代入すると節点変位によりせん断ひずみが表され, ひずみマトリックス[B^s]を求める。

$$\{\varepsilon^s\} = \begin{Bmatrix} y_x \\ y_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial w}{\partial x} - \alpha \\ \frac{\partial w}{\partial y} - \beta \end{Bmatrix} = [B^s] \{u_e^s\} \quad (3.17)$$

一方, 面外せん断応力に対する応力とひずみの関係は次のように表される。

$$\{\sigma^s\} = \frac{G}{1.2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_x \\ y_y \end{Bmatrix} = [D^s] \{\varepsilon^s\} \quad (3.18)$$

ここで,

G : せん断弾性係数

したがって, 面外せん断応力に対する要素剛性マトリックス[K_s]は次のように計算される。

$$[K_s] = \int [B^s]^T [D^s] [B^s] dvol \quad (3.19)$$

3.3 動的解析

有限要素法による構造物の動的解析は(3.6)式の運動方程式を基本としている。

しかし、実際の構造物では常に減衰がある。有限要素系にも減衰力を導入する。減衰力が速度に比例する場合には粘性減衰といわれる。

この場合の運動方程式は減衰マトリックスを[c]とすれば、

$$[m]\{\ddot{\gamma}\} + [c]\{\dot{\gamma}\} + [k]\{\gamma\} = \{R(t)\} \quad (3.20)$$

となる。ただし、

$\{R(t)\}$: 時間に依存する外力

$\{\gamma\}$: 構造全体の変位

3.3.1 固有振動数解析

拘束のある構造物の自由振動を考える。減衰がない場合の運動方程式は、

$$[m]\{\ddot{\gamma}\} + [k]\{\gamma\} = \{0\} \quad (3.21)$$

自由振動は調和振動であるから $\{\gamma\}$ は、

$$\{\gamma\} = \{x\}e^{i\omega t} \quad (3.22)$$

$\{x\}$: 変位 $\{\gamma\}$ の振幅 (mode)

ω : 円振動数

(3.21)式に(3.22)式を代入すると、

$$(-\omega^2[m] + [k])\{x\}e^{i\omega t} = \{0\} \quad (3.23)$$

又は、

$$([k] - \omega^2[m])\{x\} = \{0\} \quad (3.24)$$

$$[k]\{x\} = \omega^2[m]\{x\} \quad (3.25)$$

となる。この式は固有値問題にほかならない。

NASTRANには固有値の解法として種々の方法が準備されている。

例えば、インバースパワー法(inverse power method)等がある。

インバースパワー法は大次元のマトリックスで小数の固有値を求める場合に有効である。

3.3.2 運動方程式の解法（モーダル解析）

モーダル解析(modal analysis)は複雑な構造物の全体の運動が非連成な1自由度の運動の重ね合わせであると考える点に基礎をおいている。この方法は大次元の連成微分方程式を直接解くよりもはるかに経済的であり、有効な方法として広く採用されている。

構造全体の変位 $\{\gamma\}$ を構造が有している固有モードの1次結合と仮定する。

$$\{\gamma\} = [\mathbf{X}]\{q\} \quad (3.26)$$

ただし、

$$[\mathbf{X}] = [x_1, x_2, \dots, x_n]$$

x_i : i 次のモード

$$\{q\} = [q_1, q_2, \dots, q_n]$$

q_i : i 次のモード x_i の重みを決定する係数

(3.20)式に(3.26)式を代入すると、

$$[\mathbf{m}][\mathbf{X}]\{\ddot{q}\} + [\mathbf{c}][\mathbf{X}]\{\dot{q}\} + [\mathbf{k}][\mathbf{X}]\{q\} = \{\mathbf{R}(t)\} \quad (3.27)$$

さらに、左から $[\mathbf{X}]^T$ を掛けると、

$$[\mathbf{X}]^T[\mathbf{m}][\mathbf{X}]\{\ddot{q}\} + [\mathbf{X}]^T[\mathbf{c}][\mathbf{X}]\{\dot{q}\} + [\mathbf{X}]^T[\mathbf{k}][\mathbf{X}]\{q\} = [\mathbf{X}]^T\{\mathbf{R}(t)\} \quad (3.28)$$

(3.25)式より、

$$[\mathbf{X}]^T[\mathbf{k}][\mathbf{X}] = [\omega^2][\mathbf{X}]^T[\mathbf{m}][\mathbf{X}] \quad (3.29)$$

と表される。ただし、

$$[\omega^2] = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & & 0 \\ & \omega_2^2 & \\ 0 & & \omega_n^2 \end{bmatrix}$$

また、

$$[\mathbf{X}]^T[\mathbf{c}][\mathbf{X}] = 2[\mathbf{h}][\omega][\mathbf{X}]^T[\mathbf{m}][\mathbf{X}] \quad (3.30)$$

となると仮定する。ただし、

$$[\mathbf{h}] = \begin{bmatrix} h_1 & & 0 \\ & h_2 & \\ 0 & & h_n \end{bmatrix}, \quad [\omega] = \begin{bmatrix} \omega_1 & & 0 \\ & \omega_2 & \\ 0 & & \omega_n \end{bmatrix}$$

h_i : i 次のモードに対する減衰比

(3.28)式に(3.29)式, (3.30)式を代入すると,

$$\begin{aligned} & [\mathbf{X}]^T[\mathbf{m}][\mathbf{X}]\{\ddot{\mathbf{q}}\} + 2[\mathbf{h}][\boldsymbol{\omega}][\mathbf{X}]^T[\mathbf{m}][\mathbf{X}]\{\dot{\mathbf{q}}\} \\ & + [\boldsymbol{\omega}^2][\mathbf{X}]^T[\mathbf{m}][\mathbf{X}]\{\mathbf{q}\} = [\mathbf{X}]^T\{\mathbf{R}(t)\} \end{aligned} \quad (3.31)$$

となる。

ここで, モードの直交性により,

$$\begin{aligned} \{\mathbf{x}_i\}^T[\mathbf{m}]\{\mathbf{x}_j\} &= 1.0 \quad (i=j) \\ \{\mathbf{x}_i\}^T[\mathbf{m}]\{\mathbf{x}_j\} &= 0.0 \quad (i \neq j) \end{aligned} \quad (3.32)$$

(3.31)式は(3.32)式を適用することによって各々独立な n 個の運動方程式 (非連成) になる。

$$\ddot{q}_i + 2 \cdot h_i \cdot \omega_i \cdot \dot{q}_i + \omega_i^2 \cdot q_i = P_i(t) \quad (3.33)$$

ただし,

$$i = 1 \sim n$$

$$P_i(t) = \{\mathbf{x}_i\}^T \{\mathbf{R}(t)\}$$

(3.33)式を各々解けば, 各モード \mathbf{x}_i の重みを決定する q_i が個々に求まり, さらにこれを(3.26)式に代入すれば構造全体の変位 $\{\boldsymbol{\gamma}\}$ が求められる。

4. 解析フローチャート

本計算機コードの解析フローチャートを図4-1に示す。

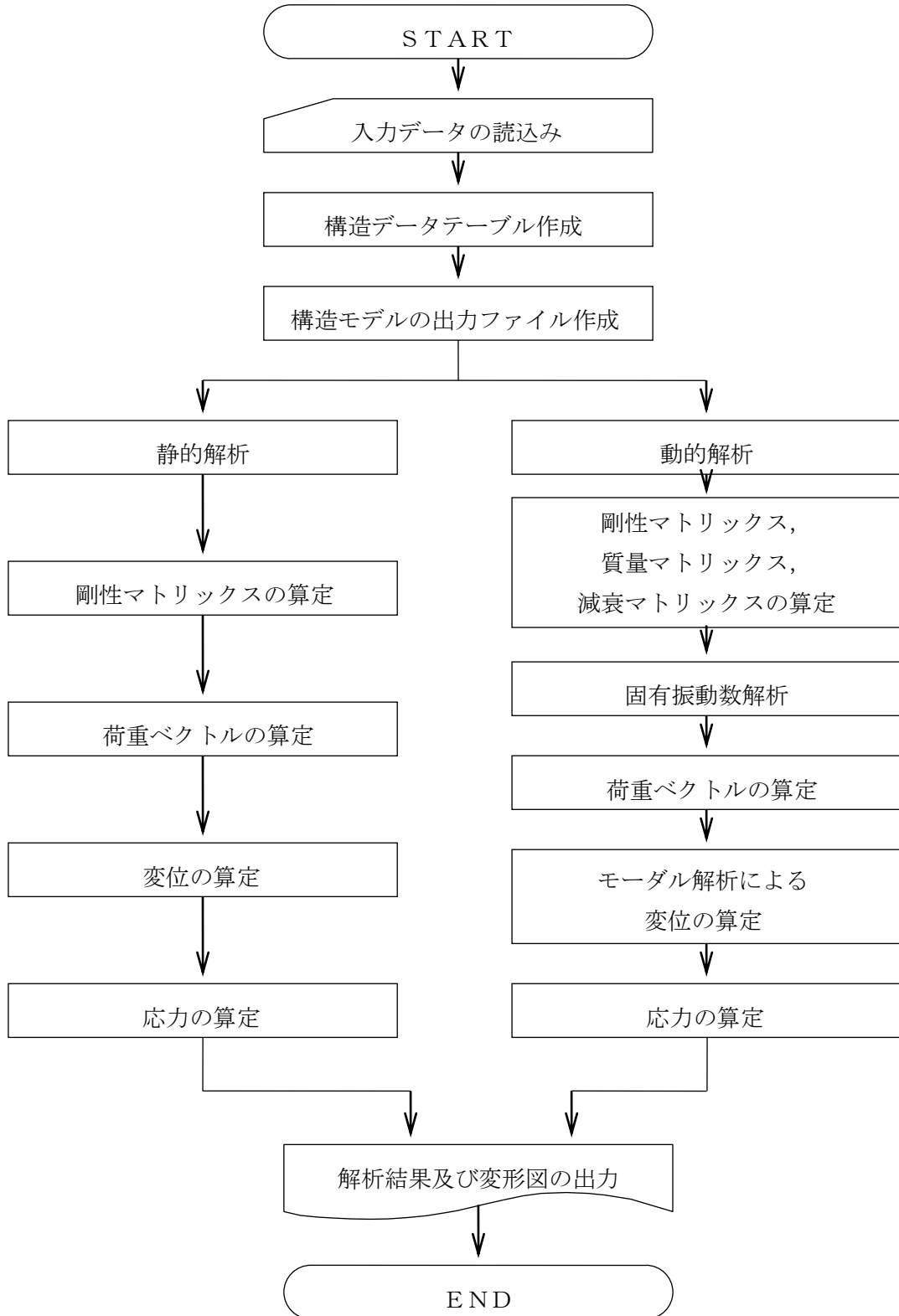


図4-1 解析フローチャート

使用済燃料収納缶（大）の耐震性についての計算書

1. 評価の基本方針

使用済燃料収納缶（大）に対して基準地震動 S_s を考慮しても強度上耐え得ることを以下の考え方に基づき評価する。

使用済燃料収納缶（大）および使用済燃料収納缶（大）内の燃料はラック内に貯蔵された状態で水平方向には構造的に拘束されておらず、ラックセル内・使用済燃料収納缶（大）内は水で満たされているため、ラックと使用済燃料収納缶（大）・燃料は、流体を介して相互作用により振動する（連成振動）。使用済燃料収納缶（大）は四方をラックセルに、燃料は四方を使用済燃料収納缶（大）に狭い隙間で囲まれているため流体連成力（流体連成効果）が大きく、ラック内の使用済燃料収納缶や燃料はラックと一体で振動すると考えられる。

以上より、使用済燃料収納缶（大）・燃料はラックと同一の加速度が作用するものとして耐震性を評価する。

2. 準拠基準等

本検討は原則として下記に準拠して行う。

- ・原子力発電所耐震設計技術規程（JEAC 4601-2008）
- ・発電用原子力設備規格 設計・建設規格（JSME S NC1-2005/2007）
- ・日本産業規格（JIS）

3. 評価部位

使用済燃料収納缶（大）の耐震評価は、構造部材である収納缶胴及び底板について実施する。評価箇所については、図-1に示す。

4. 荷重条件

使用済燃料収納缶（内部水を含む）及び燃料に、以下に示す自重及び地震による加速度が付加されることによる荷重が発生する。

G_x : 図-1に示すX方向の加速度（=0.89 g）

G_y : 図-1に示すY方向の加速度（=0.89 g）

G_z : 図-1に示すZ方向の加速度（=(1+0.49) g =1.49 g）

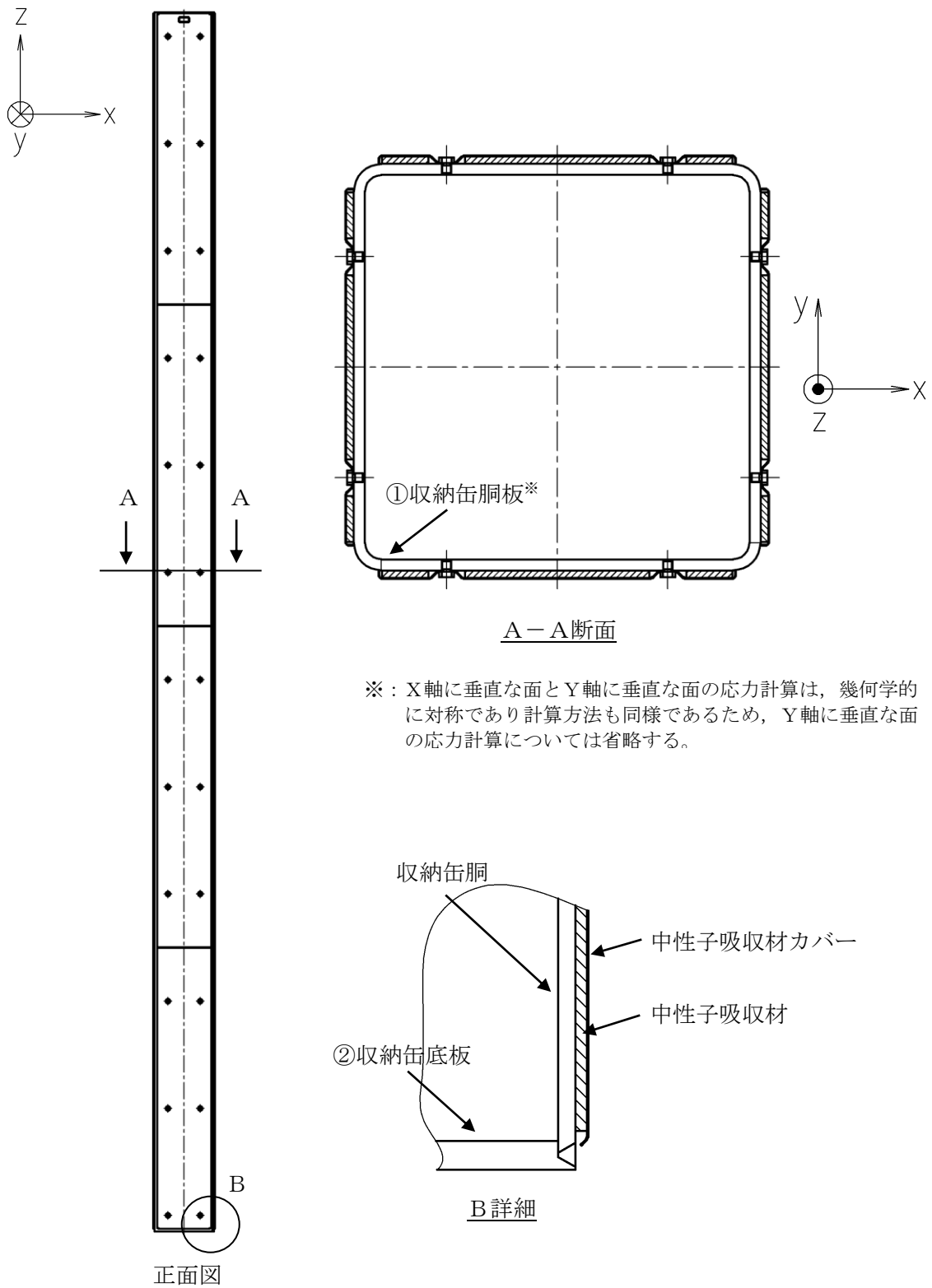


図-1 使用済燃料収納缶（大）の応力評価箇所

5. 応力の計算方法

5. 1 収納缶胴

(1) X方向の荷重による応力

評価点①には、X方向荷重によりX方向の垂直応力（圧縮応力） σ_{x1x} が発生し、次式により求める。

$$\sigma_{x1x} = \frac{m_{\text{can}} \cdot G_x}{A_{x1}}$$

ここで、

m_{can} : 使用済燃料収納缶（大）1体の質量

G_x : X方向の加速度

A_{x1} : 評価点①のX方向荷重支持面積

(2) Y方向の荷重による応力

①垂直応力（平均支圧応力）

評価点①には、Y方向荷重によりY方向の垂直応力（平均支圧応力） σ_{y1y} が発生し、次式により求める。

$$\sigma_{y1y} = \frac{(m_{\text{can}} + m_{\text{fuel}} + m_w) \cdot G_y}{A_{y1}}$$

ここで、

m_{fuel} : 使用済燃料1体の質量

m_w : 使用済燃料収納缶（大）1体に含まれる内部水の質量

G_y : Y方向の加速度

A_{y1} : 評価点①のY方向荷重支持面積（使用済燃料収納缶（大）とスペーサの接触面積）

②垂直応力（曲げ応力）

評価点①には、Y方向荷重によりZ方向の垂直応力（曲げ応力） σ_{z1y} が発生し、次式により求める。

$$\sigma_{z1y} = \frac{M_{z1y}}{Z_{z1x}}$$

$$M_{z1y} = \frac{F_{y1} \times L}{8}$$

ここで、

M_{z1y} : 評価点①に作用する曲げモーメント

Z_{z1x} : 評価点①のX軸まわりの断面係数

L : ラックの収納缶支持ピッチ（上下のスペーサ間の距離）

(3) Z方向の荷重による応力

評価点①には、Z方向の荷重によりZ方向の垂直応力（圧縮応力） σ_{z1z} が発生し、次式により求める。

$$\sigma_{z1z} = \frac{m_{can} \cdot G_z}{A_{z1}}$$

ここで、

G_z : Z方向の加速度

A_{z1} : 評価点①のZ方向荷重支持面積

(4) 平均せん断応力

評価点①には、平均せん断応力は発生しない。

5. 2 収納缶底板

(1) X方向の荷重による応力

評価点②に発生するX方向荷重による応力は、収納缶底板の自重によるもののみであり、無視できる。

(2) Y方向の荷重による応力

評価点②に発生するY方向荷重による応力は、収納缶底板の自重によるもののみであり、無視できる。

(3) Z方向の荷重による応力

評価点②には、Z方向荷重によりZ方向垂直応力（平均支圧応力） σ_{z2z} が発生し、次式により求める。

$$\sigma_{z2z} = \frac{(m_{can} + m_{fuel} + m_w) \cdot G_z}{A_{z2}}$$

ここで、

A_{z2} : 評価点②のZ方向荷重支持面積

(4) 平均せん断応力

評価点②には、平均せん断応力は発生しない。

(5) 圧縮応力

評価点②には、圧縮応力は発生しない。

6. 許容応力

使用済燃料収納缶（大）の耐震評価における許容応力は、「日本機械学会 発電用原子力設備規格 設計・建設規格」（JSME S NC1-2005/2007）（以下、設計・建設規格という。）の炉心支持構造物の設計に関する規定及び「日本電気協会 原子力発電所耐震設計技術規程」（JEAC4601-2008）の炉心支持構造物の許容応力に関する規定を準用する。なお、許容応力を算出する際の温度は、共用プールの最高使用温度である 66℃とする。

許容応力の算出に用いる設計応力強さ（ S_m ）、設計降伏点（ S_y ）及び設計引張強さ（ S_u ）等は、設計・建設規格の付録材料図表の値を使用する。

6. 1 一次応力の許容応力

供用状態D sにおいて生じる応力解析による一次応力強さの許容応力は次の通りである。

(1) 一次一般膜応力強さ（ P_m ）

$$P_m \leq \min \left[2.4S_m, \frac{2}{3}S_u \right]$$

(2) 一次一般膜応力＋一次曲げ応力強さ（ $P_m + P_b$ ）

$$P_m + P_b \leq 1.5 \min \left[2.4S_m, \frac{2}{3}S_u \right]$$

6. 2 特別な応力の許容応力

(1) 供用状態D sにおける平均せん断応力（ τ ）

純せん断荷重を受ける部分において生じる平均せん断応力の許容応力は次の通りである。

$$\tau \leq 2 \times 0.6S_m$$

(2) 供用状態D sにおける平均支圧応力（ σ_b ）

支圧荷重を受ける部分の平均支圧応力の許容応力は次の通りである。（安全側に、支圧荷重の作用端から自由端までの距離が支圧荷重の作用幅より大きい場合以外の許容応力とする。）

$$\sigma_b \leq 2S_y$$

(3) 供用状態D sにおける圧縮応力 (σ_c)

①圧縮材の有効細長比 (λ) が限界細長比 (Λ) 以下の場合の圧縮応力 (σ_c)

$$\sigma_c \leq 1.5f_c^* = 1.5 \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} \frac{F^*}{v}$$

$$F^* = \min[1.35S_y, 0.7S_u, 1.2S_y(RT)]$$

$$\lambda = \frac{l_k}{i}$$

$$\Lambda = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6F^*}}$$

$$v = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2$$

ここで,

l_k : 座屈長さ

i : 座屈軸についての断面二次半径

E : 縦弾性係数

②圧縮材の有効細長比 (λ) が限界細長比 (Λ) を超える場合の圧縮応力 (σ_c)

$$\sigma_c \leq 1.5f_c^* = 1.5 \times 0.277 \times F^* \left(\frac{\Lambda}{\lambda} \right)^2$$

7. 評価結果

使用済燃料収納缶（大）に生じる応力

（単位：MPa）

部 位	材 料	応 力	基準地震動 S_s		
			算出応力	許容応力	
①収納缶胴板	SUS304TP	一次一般膜応力 P_m	1	319	
		一次一般膜＋一次曲げ応力 $P_m + P_b$	11	478	
		平均支圧応力 σ_b	1	376	
		圧縮応力 σ_c	長手方向	1	205
			長手方向以外	0	79
②収納缶底板	SUS304	一次一般膜応力 P_m	1	319	
		一次一般膜＋一次曲げ応力 $P_m + P_b$	1	478	
		平均支圧応力 σ_b	1	376	

すべて許容応力以下である。

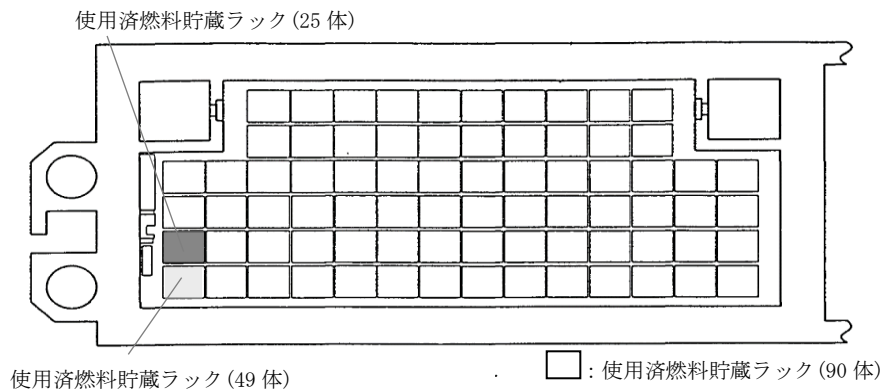
使用済燃料貯蔵ラック(25体)設置後の使用済燃料共用プール水深の遮へい能力に関する
説明書

使用済燃料貯蔵ラック(90体)に替えて使用済燃料貯蔵ラック(49体)と同じ高さの使用済燃料貯蔵ラック(25体)を設置し、設置により使用済燃料共用プール貯蔵容量は減少することから、既存の使用済燃料貯蔵ラック(49体)の評価に包絡されることを確認した。

使用済燃料貯蔵ラック(49体)は、使用済燃料貯蔵ラック(90体)と比べてラックの高さが高く、貯蔵体数が減っている。49体ラックの線量率評価については、ラックの高さにあわせて水深の条件を変更しているが、線源強度については保守的に90体ラックと同じ条件(実際の貯蔵体数よりも多い)で評価している。

使用済燃料貯蔵ラック(25体)は、使用済燃料貯蔵ラック(49体)と比べてラックの高さは同じで、貯蔵体数が減っている。そのため、25体ラックの線量率評価については、ラックの高さは49体ラックと同じ条件、線源強度についても49体ラックと同じ条件に設定することで保守的な評価となる。

従って、ラックに収納されている使用済燃料を線源とするプール水面の線量率は「添付資料—9—1 別添—4 使用済燃料貯蔵ラック(49体)設置後の使用済燃料共用プール水深の遮へい能力に関する説明書」の評価に包絡されるため、水深の遮へい能力は十分確保される。



図—1 使用済燃料貯蔵ラック配置図

使用済燃料収納缶（大）についての説明書

1. 概要

使用済燃料貯蔵ラック（25 体）に貯蔵する変形燃料，および破損燃料は，燃料の取扱いを可能にするため，また破損燃料については放射性物質の拡散を抑制するとともに，燃料の形状が維持されていない場合でも臨界を防止するため，使用済燃料収納缶（大）に収納した状態で貯蔵する。

2. 使用済燃料収納缶（大）の構造

使用済燃料収納缶（大）はステンレス鋼製の角缶構造である。また，未臨界確保のため側面に中性子吸収材を配置している。なお，中性子吸収材は，輸送容器や使用済燃料貯蔵ラック向けのボロン添加アルミニウム合金を使用している。

3. 使用済燃料収納缶（大）の機能

- (1) 使用済燃料収納缶（大）は，天井クレーンを用いて使用済燃料収納缶（大）内に収納した燃料の取扱いが可能になるよう，使用済燃料収納缶（大）上部に燃料の上部タイププレートハンドル部と同等の形状を有する吊具を取り付け，ワイヤロープ等により吊具と天井クレーンの主巻フックを取り付ける。なお，吊具は落下防止措置を施した着脱式の機構とする。
- (2) 使用済燃料収納缶（大）は，燃料棒の形状が維持されていない場合でも放射性物質の拡散を抑制する。

4. 使用済燃料収納缶（大）の取扱い及び落下防止措置

使用済燃料収納缶（大）上部には吊具を取り付けるための接続部（窓）を設け，接続部に吊具を取り付ける。接続部は使用済燃料収納缶（大）に4箇所設け，吊具を4箇所に取り付けることにより，吊上げ時の落下を防止する。

吊具は天井クレーン主巻フックを用いて取扱うことから，以下の天井クレーンの落下防止機能及び落下防止措置により吊上げ時の落下を防止する。

- ・天井クレーン主巻フックは電源断時に電磁ブレーキで保持する構造
- ・主巻フックは二重のワイヤロープで保持する構造
- ・主巻フックは外れ止めを有する構造
- ・主巻フックと吊具を取り付けるワイヤロープ等を二重化する
- ・取り付け作業後に取り付け状態を確認する

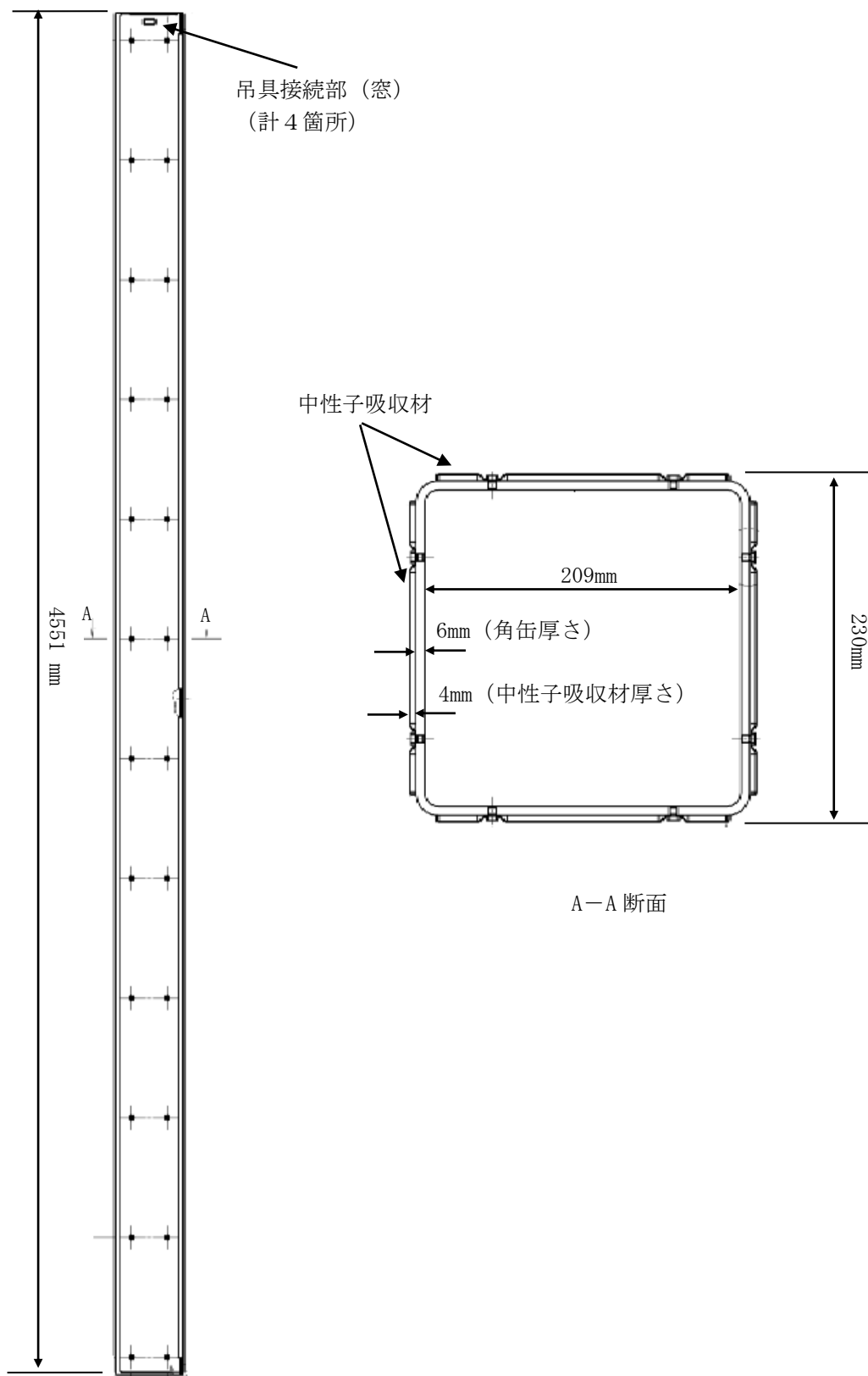
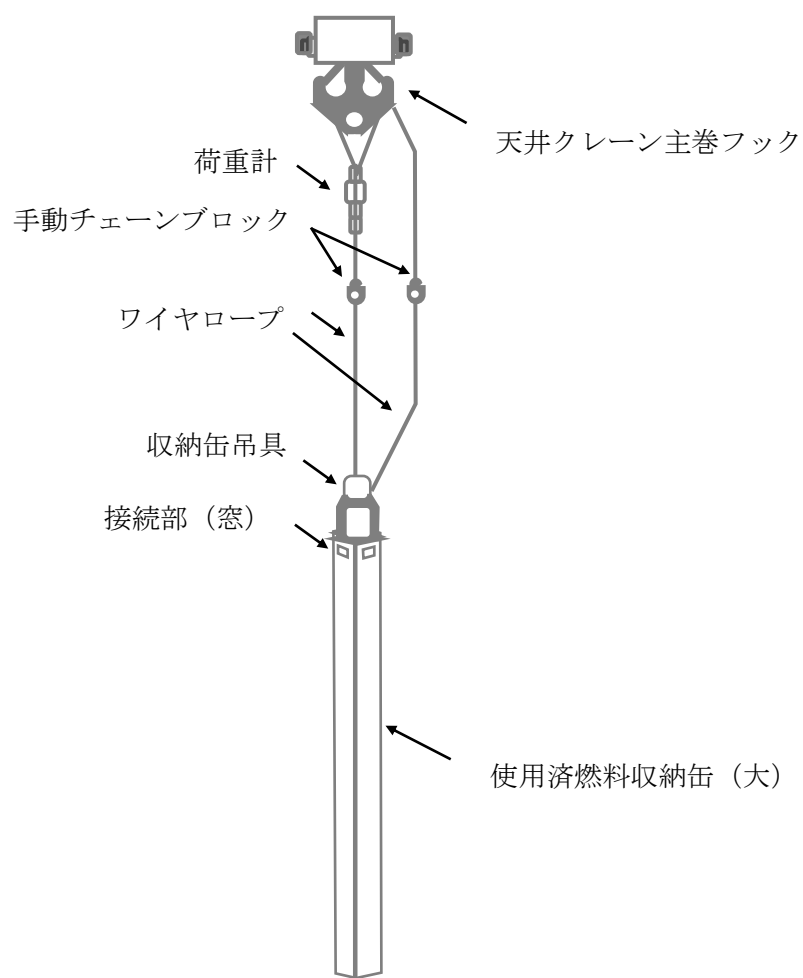


図-1 使用済燃料収納缶 (大) 構造図



図ー２ 使用済燃料収納缶（大）取り扱い概念図