

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密に属しますので公開できません。

| | |
|-----------------------|---------------|
| 柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉審査資料 | |
| 資料番号 | KK67-0020 改05 |
| 提出年月日 | 平成26年7月15日 |

柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉

確率論的リスク評価について
(内部事象 運転時レベル1.5)

平成26年7月

東京電力株式会社

目 次

1. 事故シーケンスグループ等の抽出における PRA の実施範囲と評価対象
2. 「PRA の説明における参照事項」に基づく構成について
3. レベル 1PRA
 - 3.1 内部事象 PRA
 - 3.1.1 出力運転時 PRA
 - 3.1.1.a 対象プラント
 - 3.1.1.b 起回事象
 - 3.1.1.c 成功基準
 - 3.1.1.d 事故シーケンス
 - 3.1.1.e システム信頼性
 - 3.1.1.f 信頼性パラメータ
 - 3.1.1.g 人的過誤
 - 3.1.1.h 炉心損傷頻度
 - 3.1.2 停止時 PRA
 - 3.1.2.a 対象プラント
 - 3.1.2.b 起回事象
 - 3.1.2.c 成功基準
 - 3.1.2.d 事故シーケンス
 - 3.1.2.e システム信頼性
 - 3.1.2.f 信頼性パラメータ
 - 3.1.2.g 人的過誤
 - 3.1.2.h 炉心損傷頻度
 - 3.2 外部事象 PRA
 - 3.2.1 地震 PRA
 - 3.2.1.a 対象プラントと対象シナリオ
 - 3.2.1.b 地震ハザード
 - 3.2.1.c 建屋・機器のフラジリティ
 - 3.2.1.d 事故シーケンス
 - 3.2.2 津波 PRA
 - 3.2.2.a 対象プラントと対象シナリオ
 - 3.2.2.b 津波ハザード
 - 3.2.2.c 建屋・機器のフラジリティ
 - 3.2.2.d 事故シーケンス

4. レベル 1.5PRA

4.1 内部事象 PRA

4.1.1 出力運転時 PRA

4.1.1.a プラントの構成・特性

4.1.1.b プラント損傷状態の分類及び発生頻度

4.1.1.c 格納容器破損モード

4.1.1.d 事故シーケンス

4.1.1.e 事故進展解析

4.1.1.f 格納容器破損頻度

4.1.1.g 不確かさ解析及び感度解析

 今回のご説明範囲

4.2 外部事象 PRA

4.2.1 地震 PRA

3. レベル 1PRA

3.1 内部事象 PRA

3.1.1 出力運転時 PRA

3.1.2 停止時 PRA

3.2 外部事象 PRA

3.2.1 地震 PRA

3.2.2 津波 PRA

4. レベル 1.5PRA

4.1 内部事象 PRA

4.1.1 出力運転時 PRA

添付資料 4.1.1.a-1 内部事象運転時レベル 1.5PRA のシーケンス選定における
福島第一原子力発電所事故の知見の考慮

添付資料 4.1.1.c-1 炉内溶融燃料-冷却材相互作用(炉内 FCI)に関する知見の整理

添付資料 4.1.1.c-2 「水素燃焼」及び「溶融物直接接触(シェルアタック)」を
格納容器破損モードの評価対象から除外する理由

添付資料 4.1.1.d-1 柏崎刈羽原子力発電所 6/7 号機内の事象出力運転時レベル 1.5 PRA イ
ベントツリー集

添付資料 4.1.1.f-1 格納容器イベントツリーにおける物理化学現象の発生頻度の設定方法

添付資料 4.1.1.f-2 炉内溶融物保持(IVR)に関する知見と実プラントへの適用性

添付資料 4.1.1.f-3 余裕時間の設定方法

添付資料 4.1.1.f-4 格納容器隔離失敗の分岐確率の根拠

4.2 外部事象 PRA

4.2.1 地震 PRA

4. レベル 1.5PRA

4.1 内部事象 PRA

4.1.1 出力運転時 PRA

出力運転時 PRA は、(社)日本原子力学会が発行した「原子力発電所の出力運転状態を対象とした確率論的安全評価に関する実施基準(レベル 2PSA 編): 2008」を参考に評価を実施し、各実施項目については「PRA の説明における参照事項」(原子力規制庁 平成 25 年 9 月)の記載事項への適合性を確認した。評価フローを図 4.1.1-1 に示す。

4.1.1.a プラントの構成・特性

① 対象プラントに関する説明

(1) 機器・システムの配置及び形状・設備容量

主要な機器・システムの配置及び形状・設備容量は 3.レベル 1PRA に用いた情報と同じである。また、レベル 1.5PRA では格納容器損傷頻度等を評価することから、格納容器の特性を考慮している。この格納容器の仕様を第 4.1.1.a-1 表に示す。また、格納容器及び格納容器下部ドライウェル(ペDESTAL部)の構造の詳細を第 4.1.1.a-1 図に示す。また、格納容器の限界圧力及び限界温度の設定に際しては、福島第一原子力発電所事故において 1~3 号機の格納容器が閉じ込め機能の喪失に至った事実を考慮し、その知見の反映について検討した。検討結果を添付資料 4.1.1.a-1 に示す。

(2) 事故の緩和操作

プラント運転開始時より備えている手段・設備による事故の緩和操作として以下を考慮する。

- ・ 原子炉手動減圧及び低圧注水操作
- ・ PCV スプレー手動起動操作
- ・ 外部電源復旧操作
- ・ 高圧電源融通操作

(3) 燃料及びデブリの移動経路

事故時の燃料及びデブリなどの熱源の移動は、IVR、水素発生、熔融炉心・コンクリート相互作用(MCCI)及び格納容器内の熱水力挙動、FP 移行挙動に影響する。燃料及びデブリの移動経路を第 4.1.1.a-2 表に示す。

4.1.1.b プラント損傷状態の分類及び発生頻度

内部事象レベル 1PRA(出力運転時)で得られた、炉心損傷に至るすべての事故シーケンスについて、事象の進展及び緩和操作の類似性からプラント損傷状態(PDS)を定義し、PDS の分類及び発生頻度を評価する。

① PDS の一覧

(1) PDS の考え方、定義

PDS の分類は、炉心損傷に至る事故シーケンスグループを、熱水力挙動の類似性及び事故後の緩和設備・緩和操作の類似性から、以下の 5 項目に着目して実施する。

a. 格納容器破損時期

炉心損傷後に格納容器破損が生じる場合と、格納容器破損後に炉心損傷が生じる場合とを分類する。この前後関係によって、事故の防止手段及び緩和手段の種類が大きく異なる。

b. 原子炉圧力容器圧力

原子炉圧力容器破損時の原子炉圧力容器内雰囲気、高圧状態か低圧状態かで分類する。この圧力状態の違いにより、原子炉圧力容器破損時の格納容器雰囲気の圧力上昇の程度、デブリの飛散の程度、デブリと格納容器バウンダリとの直接接触の可能性など、原子炉圧力容器破損後の事故進展が異なる。

c. 炉心損傷時期

炉心損傷時期が早期か後期かで分類する。この時期の違いにより、原子炉圧力容器の破損時期、格納容器雰囲気の圧力及び温度上昇の時期が大きく変化し、格納容器破損時期が影響を受ける。このため、事故の緩和操作の時間余裕が大きく異なる。

なお、早期・後期の分類は、事象発生後の原子炉への注水の有無を考慮したものであり、結果として後期には長期 TB と TW を分類している。事象発生後に注水に成功する長期 TB 及び TW、事象発生が即ち格納容器の機能喪失(破損)となる ISLOCA、事象発生後速やかに格納容器先行破損に至る TC を除き、他のシナリオは全て注水に失敗するシナリオであり、概ね 1 時間前後で炉心損傷に至る。

長期 TB では事象発生後、一定時間の RCIC の運転に期待しており、電源が直流(バッテリー)に限られていることを考慮すると、RCIC の運転継続時間は 8 時間程度と考えられる。これを考慮し、炉心損傷時期の早期・後期の 1 つの目安として、RCIC の運転継続時間を参考に炉心損傷時期後期を 8 時間後と整理した。また、TW は注水に期待し続けることができるシナリオであり、格納容器先行破損までに十数時間程

度の時間余裕がある。

d. 電源確保

電源が確保されている場合と、電源が喪失している場合で分類する。電源が喪失している場合には、電源を復旧することで防止手段及び緩和手段が達成される可能性がある。

第 4.1.1.b-1 表に炉心損傷に至る事故シーケンスの概要、第 4.1.1.b-1 図に上記分類を踏まえた PDS 分類の考え方を示す。

(2) レベル 1PRA の事故シーケンスグループの PDS への分類結果

炉心損傷に至る事故シーケンスグループを、上記(1)の考え方に基いて PDS として分類した結果を第 4.1.1.b-2 表に示す。BWR プラントでは炉心損傷に至る事故シーケンスグループを、上記(1)の考え方に基いて分類して PDS としているため、炉心損傷に至る事故シーケンスグループと PDS が一致することとなる。

② PDS ごとの発生頻度

PDS ごとに炉心損傷頻度(CDF)を整理した結果を第 4.1.1.b-3 表に示す。崩壊熱除去機能喪失の PDS が支配的となっているが、これは、全 CDF に占める崩壊熱除去機能喪失(TW)の CDF の割合が大きいこと及び、TW には有効な緩和策が無く、TW の CDF がそのまま格納容器破損頻度(CFF)に反映されるためである。

- ・崩壊熱除去機能喪失 : TW (寄与 : 約 99.8%)
- ・LOCA 時注水機能喪失 : LOCA(寄与 : 約 0.1%)
- ・上記以外の PDS (寄与 : 約 0.1%)

4.1.1.c 格納容器破損モード

① 格納容器破損モードの一覧と各破損モードに関する説明

炉心損傷から格納容器破損に至るまでの事故シーケンスは、次章 4.1.1.d でイベントツリーによって分析するが、このイベントツリーの最終状態となる格納容器破損モードは、炉心損傷後の格納容器内の物理化学的挙動を分析することで抽出する。本章では格納容器破損モードを網羅的に抽出し、本 PRA でイベントツリーの最終状態として設定すべき格納容器破損モードを選定する。

BWR のシビアアクシデントで考えられる事故進展を第 4.1.1.c-1 図に示す。第 4.1.1.c-1 図では、炉心損傷後の格納容器内の物理化学的挙動を網羅

的に考慮し、事故進展に応じて想定される、格納容器の健全性に影響を与える負荷を、発生時期に沿って示している。

格納容器の健全性に影響を与える負荷の抽出結果と、本 PRA で想定する格納容器破損モードを第 4.1.1.c-1 表に示す。なお、第 4.1.1.c-1 表には物理化学現象に起因する負荷の他に、格納容器バイパス事象(ISLOCA 及び格納容器隔離失敗事象)も含めて示した。また、格納容器の健全性に影響を与える負荷としては抽出したものの、本 PRA で想定する格納容器破損モードの設定からは除外した負荷については、その除外理由を示した。

4.1.1.d 事故シーケンス

① 格納容器イベントツリー構築の考え方及びプロセス

一般的なシビアアクシデントでは、事故進展の各フェーズにおいて格納容器の健全性を脅かす物理化学現象が異なるため、事故進展フェーズ毎に、重要な物理化学現象、緩和設備の作動状況及び運転員操作の因果関係を分析して、これらの組合せから事故の進展を樹形図で分類する格納容器イベントツリーを構築する。

本評価では格納容器イベントツリー構築にあたって、以下に示す 3 つの事故進展フェーズを定義している。

- T1：炉心損傷から原子炉圧力容器破損直前
- T2：原子炉圧力容器破損直後
- T3：原子炉圧力容器破損後長期間経過後

② 格納容器イベントツリー

(1) 格納容器イベントツリー構築に当たって検討した重要な物理化学現象、対処設備の作動・不作動、運転員操作、ヘディング間の従属性

a. 重要な物理化学現象、対処設備の作動・不作動

格納容器イベントツリーの構築に際し、炉心損傷から格納容器破損に至るまでの事故進展の各フェーズで発生する重要な物理化学現象について、各 PDS を考慮して抽出し、その発生条件及び発生後の事象進展を検討した。

第 4.1.1.d-1 表に示す検討結果に基づき、PDS ごとに事故進展フェーズを考慮して緩和設備の作動状態及び物理化学現象の発生状況を分析し、格納容器イベントツリーのヘディングとその定義を第 4.1.1.d-2 表のとおり選定した。

b. 運転員操作

4.1.1.a ① (2)に記載の操作を考慮している。

c. ヘディング間の従属性

第 4.1.1.d-2 表で定義したヘディングの状態が発生する確率は、他の複数のヘディングの状態に従属して決定される場合があるため、ヘディングの順序及び分岐確率の設定に際してヘディング間の従属性を整理した結果を第 4.1.1.d-3 表に示す。

(2) 格納容器イベントツリー

選定したヘディングについてヘディング間の従属性を考慮して順序付けて、格納容器イベントツリーを作成した。作成した格納容器イベントツリーを添付資料 4.1.1.d-1 に示す。

4.1.1.e 事故進展解析

格納容器破損頻度を評価するための事故進展解析の目的は、以下の 2 つがある。

- ・ 緩和系の復旧操作等のための時間余裕の評価
- ・ 物理化学現象の発生の有無と格納容器への負荷

このうち後者の物理化学現象の発生と格納容器への負荷については、現象の不確定性などを考慮した分岐確率を評価しているため、ここでは緩和系の復旧操作等のための時間余裕を評価することを目的とする。したがって、緩和系が機能しない状態で物理化学現象が発生せずに、格納容器が過圧または過温破損に至る事故シーケンスを評価する。

① 解析対象とした事故シーケンスと対象事故シーケンスの説明

プラントの熱水力的挙動及び炉心損傷、原子炉圧力容器破損などの事象の発生時期、事象の緩和手段に係る運転員操作の余裕時間、シビアアクシデント現象による格納容器負荷を解析すると共に、格納容器イベントツリーのヘディングの分岐確率の計算に必要なデータを得る事を目的として、各 PDS を代表する事故進展解析を実施する。

(1) 解析対象事故シーケンスの選定

a. 解析対象 PDS の選定

解析対象 PDS は、事故進展の類似性の観点及び炉心損傷に至る際に期待可能な緩和系の類似性を考慮して選定する。

事故進展の類似性の観点として、格納容器破損時期や炉心損傷時の原子炉圧力容器の圧力等によってプラント損傷状態を分類した結果を第 4.1.1.b-1 図に示す。

第 4.1.1.b-1 図の分類結果に対し、期待可能な緩和系の類似性の観点から、一部の解析対象事故シーケンスを整理した。整理した結果を第

4.1.1.e-1 図に示す。

TQUX、TBU 及び TBD は、いずれも高圧注水及び減圧ができないまま炉心損傷に至るシーケンスであり、事故進展解析上の相違は見られないと考えられることから、解析については TQUX で代表することとした。

TQUV 及び TBP は、いずれも原子炉は減圧されるものの、高圧及び低圧注水ができないまま炉心損傷に至るシーケンスであり、事故進展解析上の相違は見られないと考えられることから、解析については TQUV で代表することとした。

TQUV と LOCA はそれぞれ解析対象とした。これは、炉心損傷後の電源復旧等を受けて原子炉注水に成功した場合を考えると、LOCA では冷却水の一部が流出する可能性があること等、影響緩和手段に対する両者の応答の違いを考慮したためである。

また、AE、S1E、S2E は LOCA として1つのプラント損傷状態とした。これは、事故進展解析の結果(第 4.1.1.e-3 表参照)、AE と TQUV の RPV 破損までの時間の差が約 0.4 時間であるため、冷却材の流出口の大きさは、炉心損傷後の事象の進展速度に大きな影響は及ぼすものではないと考えたためである。

格納容器先行破損(レベル 1PRA 評価の範囲)である TC、TW、ISLOCA については、炉心損傷の前に格納容器が破損しているモードであり、レベル 1.5PRA における緩和手段が存在しないことから、イベントツリーの作成対象から除外した。これは、TC、TW 及び ISLOCA については、レベル 1PRA 側で格納容器破損防止対策を講じなければならないということを意味している。

以上の検討の結果、以下の事故シーケンスグループを解析対象として選定した。

- ・ TQUV
- ・ TQUX
- ・ LOCA
- ・ 長期 TB

b. 解析対象事故シーケンスの選定

解析対象事故シーケンスの選定にあたっては、操作余裕時間が厳しくなる観点、発生頻度が大きくなる観点等を考慮する。

LOCA 以外の PDS については、選定する過渡事象の違いによる操作余裕時間に対する影響はほとんど無いと考えられるため、事故シーケンスの発生頻度の観点から、CDF に占める割合が最も大きい起因事象

として隔離事象(MSIV 閉鎖を伴う過渡事象)を選定する。

また、LOCA については、操作余裕時間の観点から事故進展が早い大 LOCA を選定し、破断想定箇所としては従来設置許可申請の安全解析で想定している HPCF 配管破断とする。

以上から、解析対象として選定した事故シーケンスを第 4.1.1.e-1 表に示す。

(2) 事故進展解析の解析条件

プラント構成・特徴の調査より、全ての事故シーケンスに対し共通するプラント構成・特徴に依存した基本解析条件を第 4.1.1.e-2 表に示す。

なお、事故進展解析には、事故シーケンスに含まれる物理化学現象、機器・システムの動作を模擬することができる MAAP コードを使用した。

② 事故シーケンスの解析結果

選定した各事故シーケンスについて、プラントの熱水力挙動の解析を実施した。解析結果を第 4.1.1.e-2 図に、原子炉圧力容器内および格納容器内の熱水力挙動の事象進展における主要事象発生時刻を第 4.1.1.e-3 表に示す。

4.1.1.f 格納容器破損頻度

① 格納容器破損頻度の評価方法

格納容器イベントツリーの分岐に分岐確率を設定、又はフォールトツリーをリンクし、プラント損傷状態ごとに格納容器破損頻度を算出した。

② 格納容器イベントツリーヘディングの分岐確率

ヘディングの分岐確率は、次の通りに設定した。格納容器イベントツリーの分岐確率の設定について第 4.1.1.f-1 表に示す。

(1) 物理化学現象に関する分岐確率の設定

シビアアクシデント現象のヘディングにおいて、不確実さが大きい現象に対しては、当該現象の支配要因、不確実さ幅及び格納容器の構造健全性への影響の因果関係を明らかにし、分解イベントツリー(DET)手法等を用いて、分岐確率を設定した。なお、物理化学現象に関する分岐確率の具体的な設定方法については、添付資料 4.1.1.f-1 に示す。このうち IVR に関しては、過去の様々な知見にもとづき、評価のモデルが構築されているが IVR 事象の解析について、その実機ベースでの適用性について確認した。確認結果を添付資料 4.1.1.f-2 に示す。

(2) 事故の緩和手段に関する分岐確率の設定

レベル 1PRA のフォールトツリーを基に、フォールトツリーを作成することにより、緩和手段の非信頼度(分岐確率)をモデル化した。

モデル化にあたっては、緩和手段に対する運転員の操作性及び事故時の条件を考慮するとともに、4.1.1.e の事故進展解析の結果から機器・系統の回復操作を含めた運転員の時間余裕を分析した。事故進展解析の結果から、緩和手段実施までの時間余裕を設定した結果を第 4.1.1.f-2 表に示す。なお、時間余裕の設定の考え方を添付資料 4.1.1.f-3 に示す。

また、格納容器隔離の分岐確率は過去の文献をもとに設定した。詳細を添付資料 4.1.1.f-4 に示す。

③ 格納容器破損頻度の評価結果

定量化の結果、全格納容器破損頻度(CFF)は $3.3E-06$ /炉年、条件付格納容器破損確率(CCFP)は 1.0 となった。

PDS 別の CDF 及び CFF を第 4.1.1.f-3 表及び第 4.1.1.f-1 図に、PDS 別の CDF の円グラフを第 4.1.1.f-2 図に、PDS 別の CFF の円グラフを第 4.1.1.f-3 図に示す。割合としては、全 CFF の約 99%が格納容器除熱機能喪失から過圧破損に至るシーケンスとなった。本評価では殆どの AM 策を考慮していないことから、電源の復旧により ECCS が使用可能となる PDS 及び原子炉減圧の再実施により低圧 ECCS が使用可能となる PDS(TBU、TBP、長期 TB、TQUX)では格納容器破損を回避できる場合がある(CCFP が 0.54 ~ 0.80)が、上記以外 PDS(TQUV、LOCA、TBD、TW、TC、ISLOCA)の CCFP は 1 となり、上述の通り PDS 別の CFF で TW シーケンスが大部分を占めるため、全体の CCFP は 1.0 となっている。

また、格納容器破損モード別の CFF を第 4.1.1.f-4 表に、格納容器破損モード別の CFF の円グラフを第 4.1.1.f-4 図に示す。全 CFF のうち、「水蒸気(崩壊熱)による過圧破損」の寄与が約 99.8%、「過温破損」の寄与が約 0.2% を占め、以下、「ISLOCA」、「格納容器隔離失敗」の寄与が続くが、「水蒸気(崩壊熱)による過圧」および「過温破損」以外の格納容器破損モードの寄与は 0.1%以下であった。

④ 重要度評価について

レベル 1.5PRA として重要度評価は実施していないが、レベル 1PRA で算出された炉心損傷頻度を PDS として整理して格納容器破損頻度評価の入力としており、特に重大事故等防止対策等を考慮しない(条件付格納容器破損確率(CCFP)が大きい)条件下では、レベル 1PRA の結果に強く依存する。レベル 1PRA にて実施した表 3.1.1.h-5 に示す FV 重要度評価では、補機冷

却系、残留熱除去系の重要度が高くなっていることから、レベル 1.5PRA においてもこれらの機能の重要度が高くなっているものと考えられる。

以下に示す通り、**CFF** に占める割合が大きい格納容器破損モードは補機冷却系又は残留熱除去系の機能喪失に関連したものとなっていることが分かる。

- ・「水蒸気(崩壊熱)による過圧破損」では **CFF** の約 100%が「崩壊熱除去機能喪失(TW)」シーケンスであり、これは、格納容器先行破損シーケンスであるため、**PDS** 別 **CDF** で約 99.8%を占める **TW** の寄与が大きくなっている。これについては、代替原子炉補機冷却系を用いた残留熱除去系による除熱または格納容器圧力逃がし装置又は耐圧強化ベント系による除熱により格納容器破損頻度を低減することができると思われる。

4.1.1.g 不確実さ解析及び感度解析

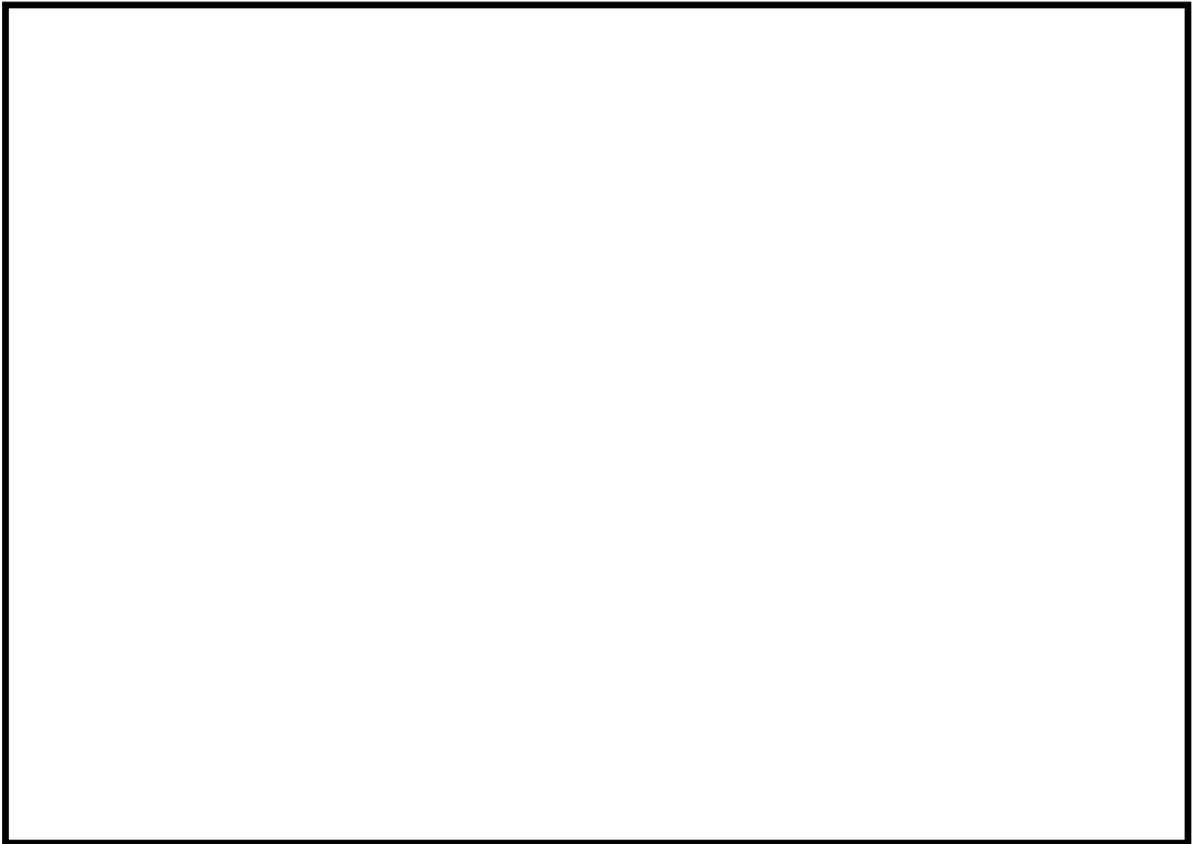
① 不確実さ解析

格納容器破損モード別の格納容器破損頻度の不確実さ解析結果を第 4.1.1.g-1 表及び第 4.1.1.g-1 図に示す。

不確実さ解析の結果、格納容器破損モード別の点推定値は不確実さ分布内にあり、格納容器破損モード別の点推定値と不確実さ解析結果の傾向に大きな差はなく、「水蒸気(崩壊熱)による過圧破損」が支配的であることが確認できた。したがって、格納容器破損モード別の格納容器破損頻度の特徴について、不確実さが有意に影響することは考えにくい。

② 感度解析





第 4.1.1.a-1 表 格納容器の主要仕様

| 項 目 | | 仕 様 |
|--------|---------------------|------------------------------------|
| 型 式 | | 圧力抑制型 (鉄筋コンクリート製格納容器 (RCCV)) |
| 容 積 | ドライウエル空間部(ベント管とも) | 約 7,400 m ³ |
| | サプレッションチェンバ空間部 | 約 6,000 m ³ |
| | サプレッションチェンバ保有水量(最小) | 約 3,600 m ³ |
| 最高使用圧力 | ドライウエル | 310 kPa[gage] |
| | サプレッションチェンバ | |
| 最高使用温度 | ドライウエル | 171℃ |
| | サプレッションチェンバ | 104℃ |
| 限界圧力 | | 620 kPa[gage] |
| 限界温度 | | 200℃ |

第 4.1.1.a-2 表 燃料及びデブリの移動経路

| | 放出先 | 放出先からの移動 |
|-------------------|------------------------------|------------------------|
| 重力による移動 | 【RPV 破損前】 RPV 下鏡 | 移動なし |
| | 【RPV 破損後】 原子炉下部 ドライウエル | 移動なし |
| 1 次系圧力による 分散放出 | 【RPV 破損後】 原子炉下部 ドライウエル | 連通孔を通じて上部ドライ ウエルに移動 |

第 4.1.1.b-1 表 炉心損傷に至る事故シーケンスの概要(1/2)

| 事故シーケンス | 概要 |
|--|--|
| TQUV | <p>高圧及び低圧の炉心への注水系が故障している事故シーケンスである。原子炉の減圧に成功し、RPV の雰囲気は低圧状態で事故が進展する。炉心損傷は事故後早期に生じる。</p> |
| TQUX | <p>高圧の炉心への注水系が故障していて、さらに原子炉の減圧に失敗している事故シーケンスである。RPV の雰囲気は高圧状態で事故が進展する。炉心損傷は事故後早期に生じる。</p> |
| 長期 TB | <p>全交流電源が喪失し、RCIC などの作動後、直流電源の枯渇によって、RCIC などが機能喪失し炉心損傷に至る事故シーケンスである。RPV の雰囲気は高圧状態で事故が進展する。直流電源が枯渇するまでには RCIC などによる炉心への注入が可能なため、炉心損傷は事故後後期に生じる。</p> |
| TBU | <p>全交流電源が喪失し、RCIC の故障などによって、炉心への注水ができない事故シーケンスである。RPV の雰囲気は高圧状態で事故が進展する。炉心損傷は事故後早期に生じる</p> |
| TBP | <p>全交流電源が喪失し、S/R 弁が開固着するため、RPV 内が減圧され、RCIC が使用できないなど、原子炉注水ができない事故シーケンスである。RPV の雰囲気は低圧状態で事故が進展する。炉心損傷は事故後早期に生じる。</p> |
| TBD | <p>外部電源の喪失後、直流電源の喪失によって、原子炉注水ができない事故シーケンスである。RPV の雰囲気は高圧状態で事故が進展する。炉心損傷は事故後早期に生じる。</p> |
| <p>LOCA</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ AE(大 LOCA) ・ S1E(中 LOCA) ・ S2E(小 LOCA) | <p>原子炉冷却材喪失事故(LOCA)後、原子炉注水機能が喪失する事故シーケンスである。大 LOCA においては事象発生後、RPV の雰囲気は低圧状態で事故が進展する。中小 LOCA においては ADS により低圧状態となる。炉心損傷は事故後早期に生じる。</p> |

第 4.1.1.b-1 表 炉心損傷に至る事故シーケンスの概要(2/2)

| 事故シーケンス | 概要 |
|---------|--|
| TW | 事故後、炉心への注水には成功するものの、崩壊熱の除去に失敗する事故シーケンスである。PCV 内に蓄積する水蒸気によって、炉心損傷前に PCV が過圧破損する。その後、原子炉注水機能が喪失して炉心損傷に至る。炉心損傷は事故後後期に生じる。 |
| TC | 事故後、原子炉の未臨界確保に失敗する事故シーケンスである。TW シーケンスと同様に、PCV 内に蓄積する水蒸気によって、炉心損傷前に PCV が過圧破損する。その後、RPV の雰囲気は高圧状態で事故が進展する。炉心損傷は事故後早期に生じる。 |
| ISLOCA | 事故後、RHR と ECCS を隔離する多重の弁の故障等に伴う LOCA により、冷却水の原子炉建屋への流出が継続し、炉心損傷に至る事故シーケンスである。炉心損傷は事故後早期に生じる。 |

第 4.1.1.b-2 表 プラント損傷状態の分類結果

| PDS | PCV 破損 時期 | RPV 圧力 | 炉心損傷 時期 | 電源確保 |
|--|--------------|-----------|------------|--------------------------|
| TQUV | 炉心損傷後 | 低圧 | 早期 | 電源確保 |
| TQUX | 炉心損傷後 | 高圧 | 早期 | 電源確保 |
| 長期 TB | 炉心損傷後 | 高圧 | 後期 | DC 電源確保 |
| TBU | 炉心損傷後 | 高圧 | 早期 | DC 電源確保 AC 電源復旧 必要 |
| TBP | 炉心損傷後 | 低圧 | 早期 | 電源復旧必要 |
| TBD | 炉心損傷後 | 高圧 | 早期 | DC 電源復旧 必要 |
| LOCA ・ AE(大 LOCA) ・ S1E(中 LOCA) ・ S2E(小 LOCA) | 炉心損傷後 | 低圧 | 早期 | 電源確保 |
| TW | 炉心損傷前 | — | 後期 | 電源確保 |
| TC | 炉心損傷前 | — | 早期 | 電源確保 |
| ISLOCA | 炉心損傷前 | — | 早期 | 電源確保 |

— : PDS の分類に際して考慮不要であることを示す。

第 4.1.1.b-3 表 プラント損傷状態毎の炉心損傷頻度発生頻度

| プラント損傷状態 | 炉心損傷頻度(/炉年) | 割合 |
|----------|-------------|-------|
| TQUX | 6.8E-10 | 0.0% |
| TQUV | 6.9E-10 | 0.0% |
| 長期 TB | 4.8E-10 | 0.0% |
| TBU | 5.3E-10 | 0.0% |
| TBP | 1.2E-10 | 0.0% |
| TBD | 8.1E-11 | 0.0% |
| LOCA | 4.4E-09 | 0.1% |
| TW | 3.3E-06 | 99.8% |
| TC | 4.9E-12 | 0.0% |
| ISLOCA | 9.5E-11 | 0.0% |
| 合計 | 3.3E-06 | 100% |

第 4.1.1.c-1 表 格納容器の健全性に影響を与える負荷と本 PRA で設定した格納容器破損モード(1/2)

| 抽出した負荷 | 負荷の概要 | 格納容器破損モード (除外事象の場合は除外理由を示す。) |
|--------------------------|---|--|
| ISLOCA | 格納容器バイパス事象であり、発生と同時に格納容器の閉じ込め機能を喪失する。 | ISLOCA 発生後、冷却材の流出が継続して炉心損傷に至り、格納容器をバイパスして放射性物質等が原子炉建屋内に放出されるモードとして分類。 |
| 格納容器隔離失敗 | 格納容器バイパス事象であり、炉心損傷時点で格納容器の隔離に失敗している状態。 | 炉心損傷時点で格納容器の隔離に失敗しており、隔離失敗箇所から放射性物質等が原子炉建屋内に放出されるモードとして分類。 |
| 未臨界確保失敗時の水蒸気による過圧 | 原子炉の未臨界確保に失敗した場合に、炉心から生じ続ける多量の蒸気で格納容器圧力が早期に上昇する。 | 左記の事象により、格納容器が過圧破損に至るモードとして分類。 |
| 崩壊熱除去に伴って発生する水蒸気による過圧 | 炉心又は格納容器に注入した水が崩壊熱によって蒸発し、発生する蒸気によって格納容器圧力が緩やかに上昇する。 | 左記の事象により格納容器が過圧破損に至るモードとして分類。 なお、圧力容器破損後の格納容器圧力上昇の要因には、コア・コンクリート反応継続による非凝縮性ガスの蓄積も含まれる。 |
| 圧力容器内での水蒸気爆発 (炉内 FCI) | 炉心溶融後、溶融物が圧力容器内下部の冷却水中に落下した場合、水蒸気爆発が発生する可能性がある。その際のエネルギーによって、圧力容器の蓋が持ち上げられると、格納容器に衝突する場合は考えられる。 | 【除外事象】 圧力容器の蓋の衝突によって格納容器が破損するモードが考えられるが、圧力容器内での水蒸気爆発は、過去の知見から極めて生じにくいと事象と考えられることから、本 PRA で想定する格納容器破損モードから除外した。圧力容器内での水蒸気爆発についての詳細は添付資料 4.1.1.c-1 に示す。 |
| 圧力容器外での水蒸気爆発 (炉外 FCI) | 圧力容器破損後、溶融物が格納容器下部のペDESTAL部の水中に落下した場合、水蒸気爆発が発生する可能性がある。 | 左記の水蒸気爆発に伴うペDESTAL部の損傷や水蒸気による圧カスパイクによって格納容器損傷に至るモードとして分類。 |
| 格納容器雰囲気直接加熱(DCH) | 高圧状態で圧力容器が破損した場合に、溶融物が格納容器雰囲気中を飛散する過程で微粒子化し、雰囲気ガスとの直接的な熱伝達等によって急激に加熱され、格納容器内圧力が急上昇する場合は考えられる。 | 左記の急激な圧力上昇により、格納容器が破損に至るモードとして分類。 |

第 4.1.1.c-1 表 格納容器の健全性に影響を与える負荷と本 PRA で設定した格納容器破損モード(2/2)

| 抽出した負荷 | 負荷の概要 | 格納容器破損モード (除外事象の場合は除外理由を示す。) |
|-------------------------|--|--|
| 溶融物直接接触 (シェルアタック) | 圧力容器破損後、溶融物が格納容器下部のペDESTAL部へ落下、ペDESTAL部の外側のドライウエルの床に流出、高温のデブリがドライウエル壁に接触し、壁面を浸食する場合は考えられる。 | 【除外事象】 ドライウエル壁の一部が浸食され、溶融貫通して破損するモードが考えられるが、本破損モードは Mark-I 型格納容器特有であり、柏崎刈羽原子力発電所 6,7 号機では、格納容器の構造上、ペDESTAL部に落下した溶融物が直接ドライウエル壁(格納容器バウンダリ)と接触することは無い。このため、本破損モードは本 PRA で想定する格納容器破損モードから除外した。除外理由の詳細は添付資料 4.1.1.c-2 に示す。 |
| 貫通部過温 | 圧力容器破損後、溶融物が冷却されない場合、溶融物から発生する崩壊熱の輻射や対流により、格納容器内部が加熱される。 | 左記の事象により、格納容器貫通部等が熱的に損傷し、格納容器が過温破損に至るモードとして分類。 |
| コア・コンクリート 反応継続(MCCI) | 圧力容器破損後、溶融物が冷却されない場合、下部ドライウエル側壁又は格納容器床面のコンクリートを浸食する。 | 左記の下部ドライウエル側壁の浸食による圧力容器支持機能の喪失又は格納容器床面が浸食により貫通し、格納容器の破損に至るモードとして分類。 |
| 水素燃焼 | 燃料棒が露出し、高温となった場合にジルコニウムと水蒸気が反応して発生する水素や、MCCI で発生する水素が、格納容器内に大量に蓄積され、燃焼する場合は考えられる。 | 【除外事象】 柏崎刈羽原子力発電所 6,7 号機では、運転中、格納容器内を窒素で置換し、酸素濃度を低く管理しているため、水素が可燃限界に至る可能性が十分小さい。このため、本破損モードは本 PRA で想定する格納容器破損モードから除外した。除外理由の詳細は添付資料 4.1.1.c-2 に示す。 |

第 4.1.1.c-2 表 格納容器破損モードの選定

| 格納容器の状態 | | 破損モード | 概要 |
|-----------|----------|---------------------|---|
| 格納容器健全 | | 格納容器健全 | 格納容器が健全に維持されて事故が収束 |
| 格納容器バイパス | | インターフェイスシステム LOCA | インターフェイスシステム LOCA による格納容器バイパス |
| 格納容器隔離失敗 | | 格納容器隔離失敗 | 炉心損傷時点で格納容器の隔離に失敗 |
| 格納容器物理的破損 | 早期格納容器破損 | 原子炉未臨界確保失敗時の過圧破損 | 水蒸気蓄積による準静的な加圧による格納容器先行破損(原子炉未臨界確保失敗) |
| | | 水蒸気爆発(FCI) | 格納容器内での水蒸気爆発又は水蒸気スパイクで格納容器が破損 |
| | | 格納容器雰囲気直接加熱(DCH) | 格納容器雰囲気直接加熱による格納容器破損 |
| | 後期格納容器破損 | 過温破損 | 格納容器貫通部が過温により破損 |
| | | 水蒸気(崩壊熱)による過圧破損 | 水蒸気・非凝縮性ガス蓄積による準静的な加圧で格納容器が破損 |
| | | コア・コンクリート反応継続(MCCI) | デブリによる下部 D/W 壁のコンクリート浸食による原子炉圧力容器支持機能喪失又はベースマットの溶融貫通による格納容器破損 |

第 4.1.1.d-1 表 物理化学現象と設備及び操作との関係の整理

| 物理化学現象 | 発生条件 | 発生後の事故進展 | 防止又は緩和設備 | 防止又は緩和操作 |
|----------|--|------------------------|---------------|--|
| RPV 破損 | | | ECCS | 損傷炉心注水 |
| 高圧溶融物放出 | ・ RPV 高圧で破損 | 格納容器雰囲気直接加熱による格納容器破損 | S/R 弁 ECCS | RPV 減圧(RPV 高圧破損回避) 損傷炉心注水(RPV 破損回避) |
| 水蒸気爆発 | ・ RPV 破損時にデブリが落下 ・ デブリへの注水 | 水蒸気爆発による格納容器破損 | ECCS | 損傷炉心注水(RPV 破損回避) |
| PCV 過温破損 | ・ RPV 破損 ・ 格納容器内に水なし | 貫通部過温による格納容器破損 | ECCS | 損傷炉心注水(RPV 破損回避) |
| コンクリート浸食 | ・ RPV 破損 ・ 格納容器内に水なし(不確かさが大きい ため、水ありの場合でも現象が進む可能性あり) | コア・コンクリート反応継続による格納容器破損 | ECCS | 損傷炉心注水(RPV 破損回避) |
| PCV 過圧破損 | ・ 崩壊熱による水蒸気生成 ・ 非凝縮性ガス生成 | 水蒸気(崩壊熱)による過圧による格納容器破損 | RHR | 格納容器スプレイ |

第 4.1.1.d-2 表 ヘディングの選定および定義(1/2)

| No | ヘディング | ヘディングの定義 |
|-------------------|--------------------|--|
| 炉心損傷～RPV 破損直前(T1) | 1 PCV 隔離 | 事故後の PCV 隔離が正常に実施されなかった場合、失敗とする。 |
| | 2 原子炉減圧操作 | RPV が高圧のプラント状態において、RPV の減圧操作が正常に実施されなかった場合、失敗とする。 |
| | 3 非常用交流電源復旧 | 電源喪失のプラント状態において、RPV 破損前までに非常用交流電源が復旧されなかった場合、失敗とする。 |
| | 4 減圧後の損傷炉心注水 | 原子炉減圧操作後の炉心注水が正常に実施されなかった場合、失敗とする。 |
| | 5 RPV 破損 | 熔融炉心が下部プレナム部へ落下した場合に、熔融炉心の冷却ができず、RPV 内に保持できない場合、失敗とする。 |
| RPV 破損直後(T2) | 6 水蒸気爆発による破損 | 水蒸気爆発によって格納容器が破損する場合、有とする |
| | 7 格納容器雰囲気直接加熱による破損 | 格納容器雰囲気直接加熱によって格納容器が破損する場合、有とする。 |

第 4.1.1.d-2 表 ヘディングの選定および定義(2/2)

| No | ヘディング | ヘディングの定義 |
|---------------|---------------------------|--|
| RPV 破損後長期(T3) | 8 交流電源復旧 | 電源喪失のプラント状態において、PCV 破損前までに非常用交流電源が復旧されなかった場合、失敗とする。 |
| | 9 下部 D/W 注水(RPV 破断口からの注水) | RPV 破損後の RPV 注水により RPV 破損口からの水の流出が無い場合、失敗とする。 |
| | 10 上部 D/W スプレー | 上部 D/W スプレーが正常に実施されなかった場合、失敗とする。 |
| | 11 デブリ冷却(コア・コンクリート反応継続) | 下部 D/W 床面および側壁においてコア・コンクリート反応が継続し、ベースマットが溶融貫通または側壁が RPV 支持機能喪失する場合、有とする。 |

第 4.1.1.d-3 表 ヘディング間の従属性

| ヘディング(影響を与える側) ヘディング(影響を受ける側) | | 炉心損傷～RPV 破損直前(T1) | | | | | RPV 破損直後(T2) | | RPV 破損後長期(T3) | | | |
|----------------------------------|------------------------|-------------------|----------------------|--------------------------|------------|-----------------|--------------|--------------------------|---------------|------------------------|----------------------|-----------------|
| | | PCV 隔離 | RPV 減圧 | 電源復旧 | 損傷 炉心注水 | RPV 破損 (IVR) | 炉外 FCI | 格納容器雰囲気直 接加熱(DCH) | 電源復旧 | 下部 D/W 注水 (RPV 破損口) | 上部 D/W スプ レイ(RHR) | デブリ冷却 (MCCI) |
| 炉心損傷～RPV 破損直前(T1) | PCV 隔離 | | | | | | | | | | | |
| | RPV 減圧 | — | | | | | | | | | | |
| | 電源復旧 | — | — | | | | | | | | | |
| | 損傷 炉心注水 | — | ○ | ○ 電源喪失時、注水 には復旧が必要 | | | | | | | | |
| | RPV 破損 (IVR) | — | — | — | ○ | | | | | | | |
| RPV 破損 直後(T2) | 炉外 FCI | — | — | — | ○ | — | | | | | | |
| | 格納容器雰囲気直 接加熱(DCH) | — | ○ 減圧により DCH 防止 | — | — | — | — | | | | | |
| RPV 破損後長期(T3) | 電源復旧 | — | — | — (T1 で復旧して いれば不要) | — | — | — | — | | | | |
| | 下部 D/W 注水 (RPV 破損口) | — | — | ○ 電源喪失時、注水 には復旧が必要 | — | — | — | ○ 電源喪失時の注水 には復旧が必要 | | | | |
| | 上部 D/W スプ レイ(RHR) | — | — | ○ 電源喪失時、注水 には復旧が必要 | — | — | — | ○ 電源喪失時、注水 には復旧が必要 | — | | | |
| | デブリ冷却 (MCCI) | — | — | — | — | — | — | — | ○ | — | | |

第 4.1.1.e-1 表 事故進展解析の対象とした代表事故シーケンス

| PDS | 選定した事故シーケンス | 備考 |
|-------|--|---------------------------------|
| TQUV | MSIV 閉鎖を伴う過渡事象→高圧注水系失敗→ADS 手動起動による減圧→低圧注水系失敗→RPV 低圧破損→PCV 破損 | TBP も同様であるため、本事故シーケンスで代表させる。 |
| TQUX | MSIV 閉鎖を伴う過渡事象→高圧注水系失敗→原子炉減圧失敗→RPV 高圧破損→PCV 破損 | TBU、TBD も同様であるため本事故シーケンスで代表させる。 |
| 長期 TB | 全交流電源喪失→RCIC 作動→事故後 8h で DC バッテリ枯渇・RCIC 機能喪失→RPV 高圧破損→PCV 破損 | — |
| LOCA | HPCF 配管破断→高圧注水系失敗→低圧注水系失敗→RPV 低圧破損→PCV 破損 | 破断口は大 LOCA の破断口で代表させる。 |

第 4.1.1.e-2 表 解析コードの基本解析条件

| 項目 | 解析条件 |
|-------------|---|
| 原子炉出力 | 3926 MW |
| 原子炉圧力 | 7.07MPa[gage] |
| 原子炉水位 | 通常水位 |
| 格納容器空間容積 | D/W : 7350 m ³ W/W : 9540 m ³ |
| 炉心損傷 | 被覆管破損温度 : 1500 K 炉心ノード融点 : 2500 K |
| 原子炉圧力容器破損 | 下部ヘッド CRD 貫通部の破損 |
| 格納容器破損モード | 過圧破損条件 2Pd(約 620kPa[gage]) 過温破損条件 200°C(格納容器内壁面温度にて判定) |
| DC バッテリ継続時間 | 8 時間 |

第 4.1.1.e-3 表 事故進展解析結果

| PDS | 炉心溶融 | RPV 下部プレナムリロケーション※ | RPV 破損 | PCV 破損 |
|-------|------|--------------------|--------|--------|
| TQUV | | | | |
| TQUX | | | | |
| 長期 TB | | | | |
| LOCA | | | | |

※ RPV 下部プレナムリロケーションとは、RPV 下部プレナムへのデブリの移行を意味する。

第 4.1.1.f-1 表 格納容器イベントツリー分岐確率の設定(2/3)

| 現象・機能等 | 発生条件 | 分岐確率 | 分岐確率の考え方 |
|----------------------------|---|----------|----------|
| RPV 破損 (IVR) | TQUV+代替注水系 相当 <input type="text"/> の注 水 | | |
| RPV 破損時 水蒸気爆発 (FCI) | RPV 破損シーケ ンス | | |
| DCH による PCV 破損 (DCH) | 早期 RPV 高圧破損 シーケンス (TQUX) 後期 RPV 高圧破損 シーケンス (長期 TB) | | |
| AC 電源復旧 (PCV 破損前) | TBU、TBP、TBD、 長期 TB | FT により設定 | |

第 4.1.1.f-1 表 格納容器イベントツリー分岐確率の設定(3/3)

| 現象・機能等 | 発生条件 | 分岐確率 | 分岐確率の考え方 |
|------------------------|----------------------------------|----------|---------------------------------|
| 下部 D/W 注水 (RPV 破損口) | RPV 破損時において LPFL による RPV 注水成功の場合 | FT により設定 | レベル 1PRA の FT をベースとして以下をモデル化する。 |
| 上部 D/W スプレイ (RHR) | RHR 使用可能な場合 | FT により設定 | レベル 1PRA の FT をベースとして以下をモデル化する。 |
| デブリ冷却 (MCCI) | RPV 破損シナリオ | | |

第 4.1.1.f2 表 時間余裕の設定

| ヘディング | タイミング | 時間余裕 |
|--------------|----------|------|
| 原子炉減圧 | RPV 破損まで | |
| 損傷炉心注水 | RPV 破損まで | |
| 非常用交流／直流電源復旧 | | |
| 非常用交流／直流電源復旧 | PCV 破損まで | |

第 4.1.1.f-3 表 プラント損傷状態別の炉心損傷頻度及び格納容器破損頻度

| PDS | 炉心損傷頻度 (/炉年) | 割合 | 条件付き格納 容器破損確率 (-) | 格納容器破損頻 度(/炉年) | 割合 |
|--------|-----------------|-------|-------------------------|-------------------|-------|
| TQUX | 6.8E-10 | 0.0% | 0.54 | 3.7E-10 | 0.0% |
| TQUV | 6.9E-10 | 0.0% | 1.00 | 6.9E-10 | 0.0% |
| 長期 TB | 4.8E-10 | 0.0% | 0.80 | 3.8E-10 | 0.0% |
| TBU | 5.3E-10 | 0.0% | 0.60 | 3.2E-10 | 0.0% |
| TBP | 1.2E-10 | 0.0% | 0.59 | 7.1E-11 | 0.0% |
| TBD | 8.1E-11 | 0.0% | 1.00 | 8.1E-11 | 0.0% |
| LOCA | 4.4E-09 | 0.1% | 1.00 | 4.4E-09 | 0.1% |
| TW | 3.3E-06 | 99.8% | 1.00 | 3.3E-06 | 99.8% |
| TC | 4.9E-12 | 0.0% | 1.00 | 4.9E-12 | 0.0% |
| ISLOCA | 9.5E-11 | 0.0% | 1.00 | 9.5E-11 | 0.0% |
| 合計 | 3.3E-06 | 100% | 1.00 | 3.3E-06 | 100% |

※炉心損傷頻度、格納容器破損頻度への寄与が大きい PDS における代表的な事故シーケンスは以下のとおり。

TW：崩壊熱除去機能喪失

LOCA：LOCA 時注水機能喪失

第 4.1.1.f-4 表 格納容器破損モード別の格納容器破損頻度

| 格納容器破損モード | 格納容器破損頻度(/炉年) | 割合 |
|-----------------|---------------|-------|
| 未臨界確保失敗時の過圧破損 | 4.9E-12 | 0.0% |
| 水蒸気爆発 | 2.7E-13 | 0.0% |
| 格納容器雰囲気直接加熱 | 1.1E-12 | 0.0% |
| 過温破損 | 6.1E-09 | 0.2% |
| 水蒸気(崩壊熱)による過圧破損 | 3.3E-06 | 99.8% |
| コア・コンクリート反応継続 | 4.5E-12 | 0.0% |
| 格納容器隔離失敗 | 3.5E-11 | 0.0% |
| ISLOCA | 9.5E-11 | 0.0% |
| 合計 | 3.3E-06 | 100% |

第 4.1.1.g-1 表 格納容器破損モード別格納容器破損頻度不確かさ解析

| 破損モード | 格納容器破損頻度(/炉年) | | | | |
|---------------------|---------------|---------|---------|---------|---------|
| | 5%値 | 95%値 | 中央値 | 平均値 | 点推定値 |
| 未臨界確保失敗時の 過圧破損 | 1.4E-13 | 1.3E-11 | 1.2E-12 | 4.0E-12 | 4.9E-12 |
| 水蒸気爆発 | 5.2E-16 | 3.8E-13 | 1.1E-14 | 1.4E-13 | 2.7E-13 |
| 格納容器雰囲気 直接加熱 | 3.2E-15 | 3.9E-12 | 1.1E-13 | 1.2E-12 | 1.1E-12 |
| 過温破損 | 4.2E-10 | 1.8E-08 | 1.9E-09 | 9.0E-09 | 6.1E-09 |
| 水蒸気(崩壊熱)による 過圧破損 | 4.5E-07 | 1.1E-05 | 1.7E-06 | 3.8E-06 | 3.3E-06 |
| コア・コンクリート 反応継続 | 0.0E-00 | 1.4E-11 | 2.8E-13 | 4.4E-12 | 4.5E-12 |
| 格納容器隔離失敗 | 1.0E-12 | 1.1E-10 | 9.0E-12 | 4.0E-11 | 3.5E-11 |
| ISLOCA | 2.8E-13 | 2.9E-10 | 8.3E-12 | 7.7E-11 | 9.5E-11 |
| 合計 | 4.5E-07 | 1.1E-05 | 1.7E-06 | 3.9E-06 | 3.3E-06 |

第 4.1.1.g-2 表 IVR の失敗確率に関する感度解析結果

| 格納容器破損モード | 格納容器破損頻度(/炉年) | |
|-----------------|-------------------|-------|
| | ケース 1 (ベースケース) | ケース 2 |
| 未臨界確保失敗時の過圧破損 | 4.9E-12 | |
| 水蒸気爆発 | 2.7E-13 | |
| 原子炉格納容器雰囲気直接加熱 | 1.1E-12 | |
| 過温破損 | 6.1E-09 | |
| 水蒸気(崩壊熱)による過圧破損 | 3.3E-06 | |
| コア・コンクリート反応継続 | 4.5E-12 | |
| 格納容器隔離失敗 | 3.5E-11 | |
| ISLOCA | 9.5E-11 | |
| 合計 | 3.3E-06 | |

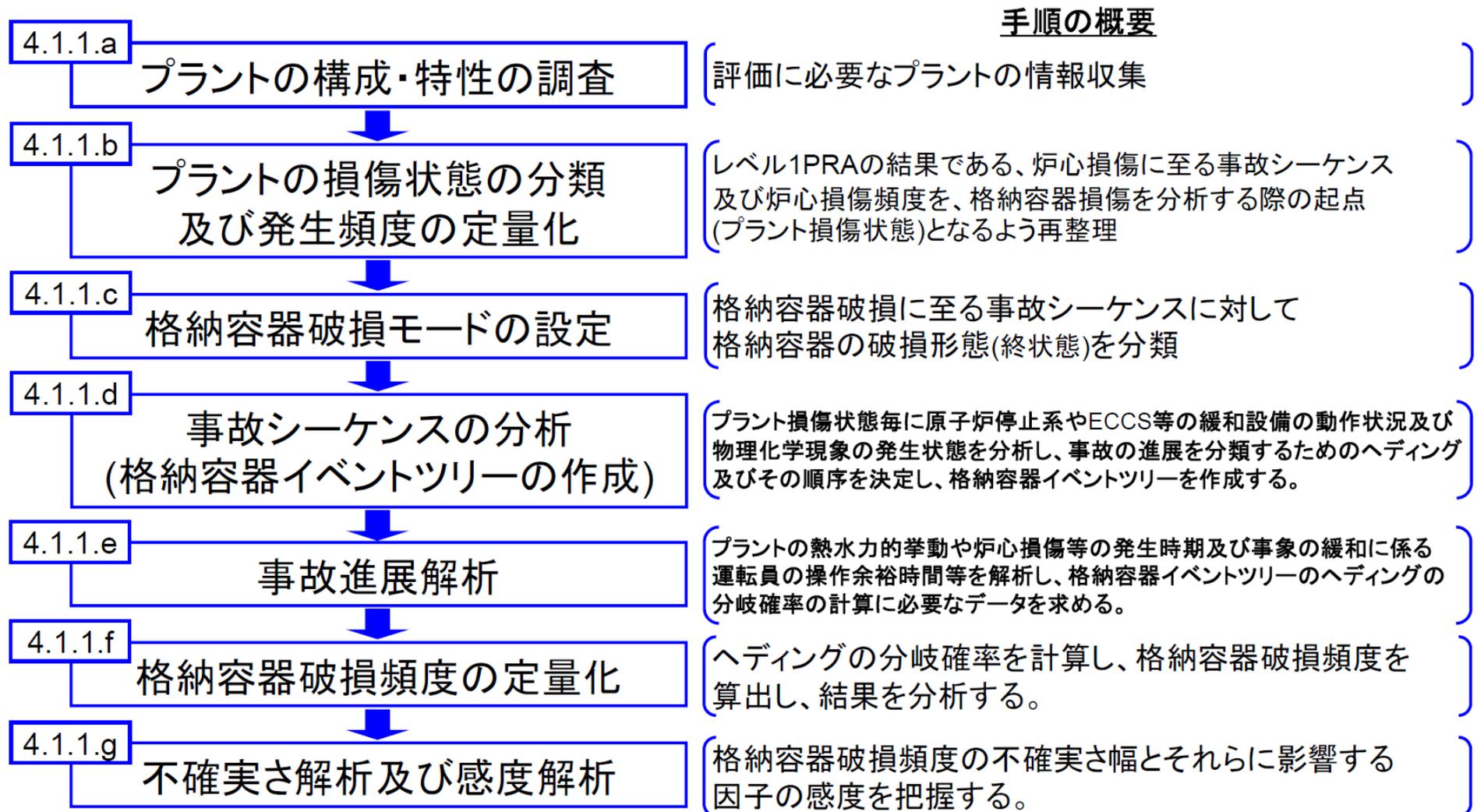
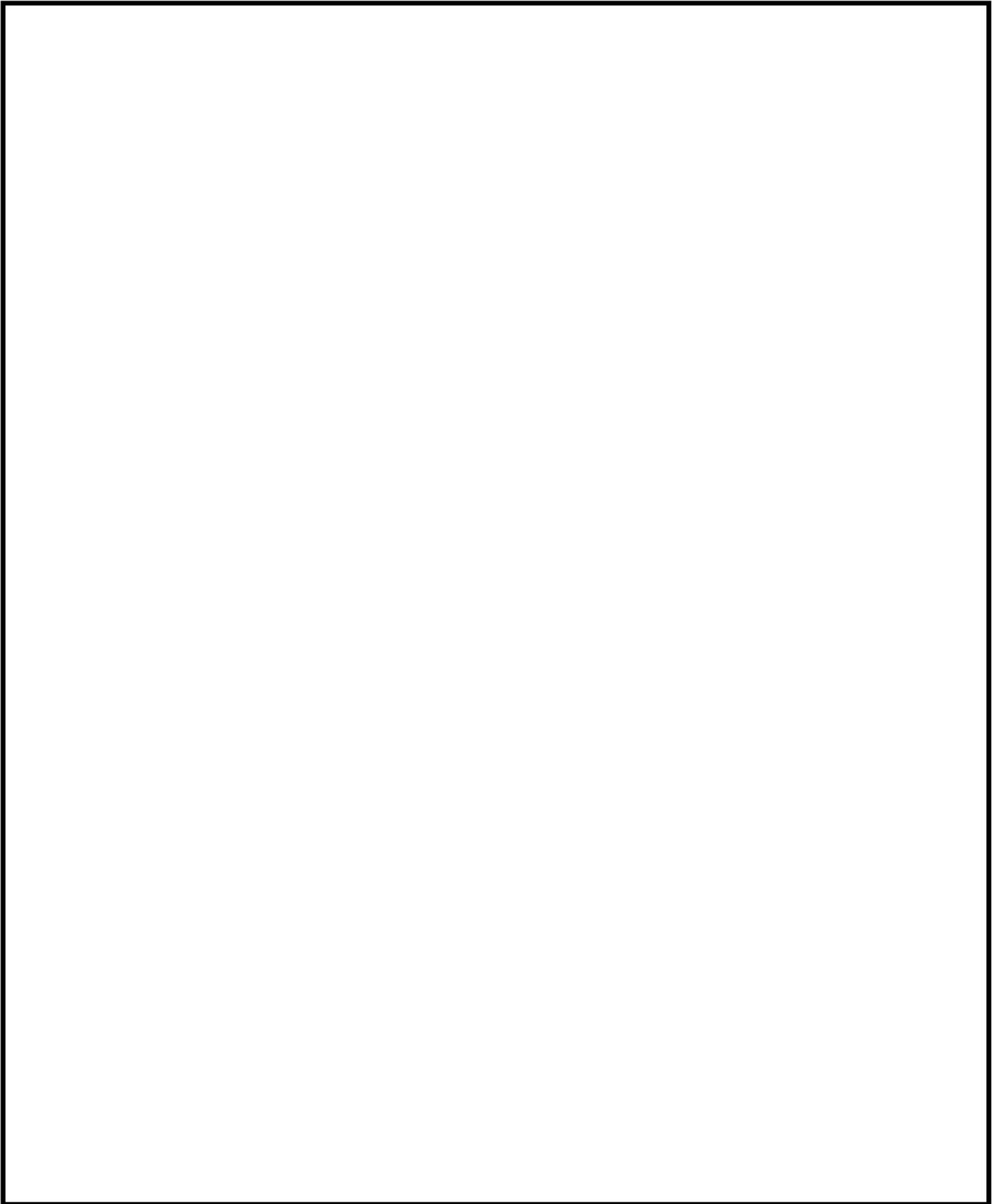


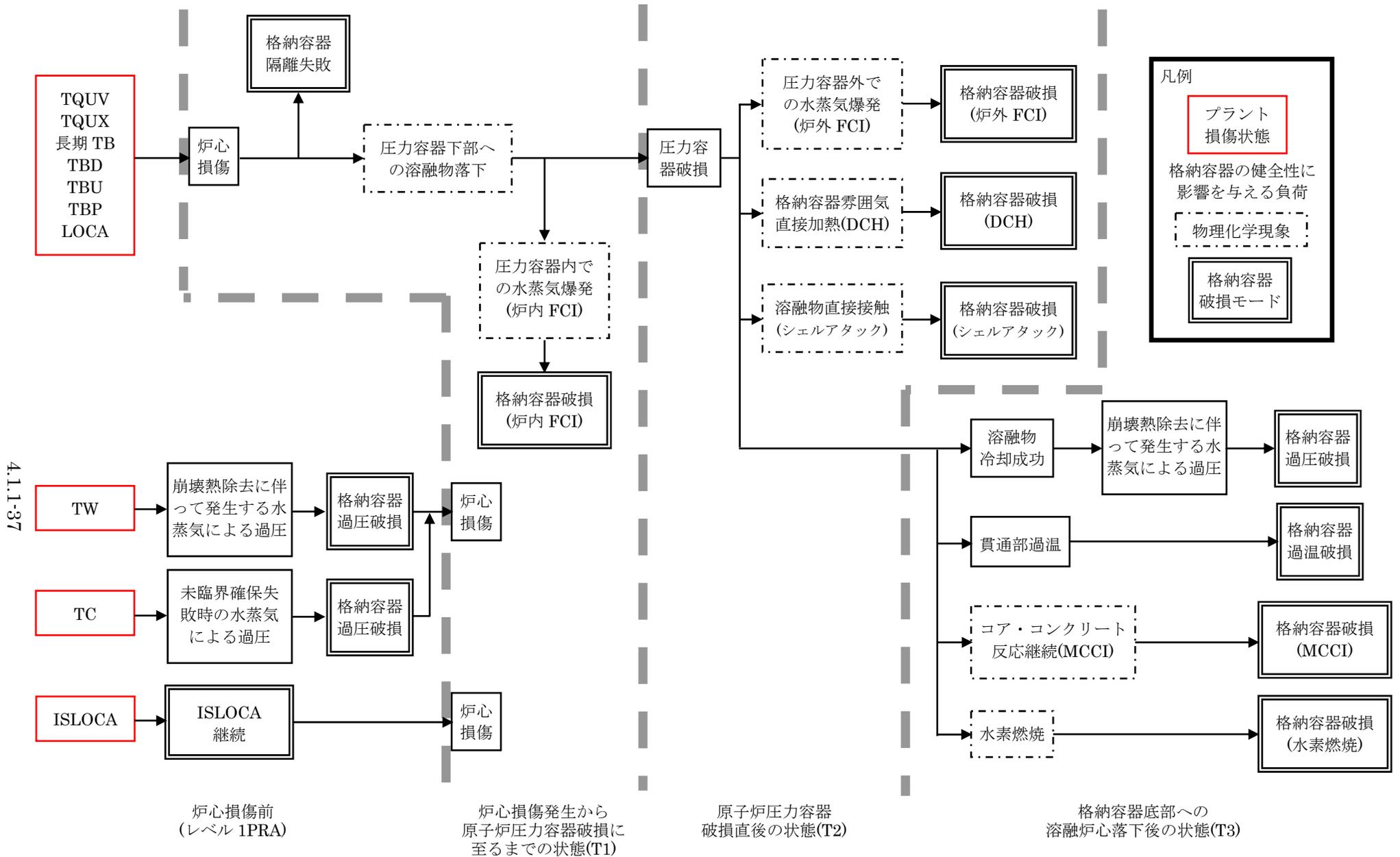
図 4.1.1-1 内部事象運転時レベル 1.5PRA の評価フロー



第 4.1.1.a-1 図 格納容器及び下部ドライウェル(ペデスタル部)の構造の詳細

| 炉心損傷 事故シーケンス | PCV破損時期 | RPV圧力 | 炉心損傷時期 | 電源確保 | プラント損傷状態 |
|---|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|
| | 炉心損傷前 TW TC ISLOCA | | 後期 TW | | TW |
| | | | 早期 TC ISLOCA | | TC ISLOCA |
| TQUX TQUV AE S1E S2E TBU TBP TBD 長期TB TW TC ISLOCA | 炉心損傷後 | 高圧 TQUX TBU TBD 長期TB | 後期 長期TB | 電源確保 | 長期TB TQUX |
| | | | 早期 TQUX TBU TBD | 直流電源確保 交流電源復旧要 | TBU |
| | | | | 直流電源復旧要 | TBD |
| | | | | 電源確保 | TQUV AE S1E S2E |
| | | 低圧 TQUV AE S1E S2E TBP | | 電源復旧要 | TBP |

第 4.1.1.b-1 図 プラント損傷状態の分類



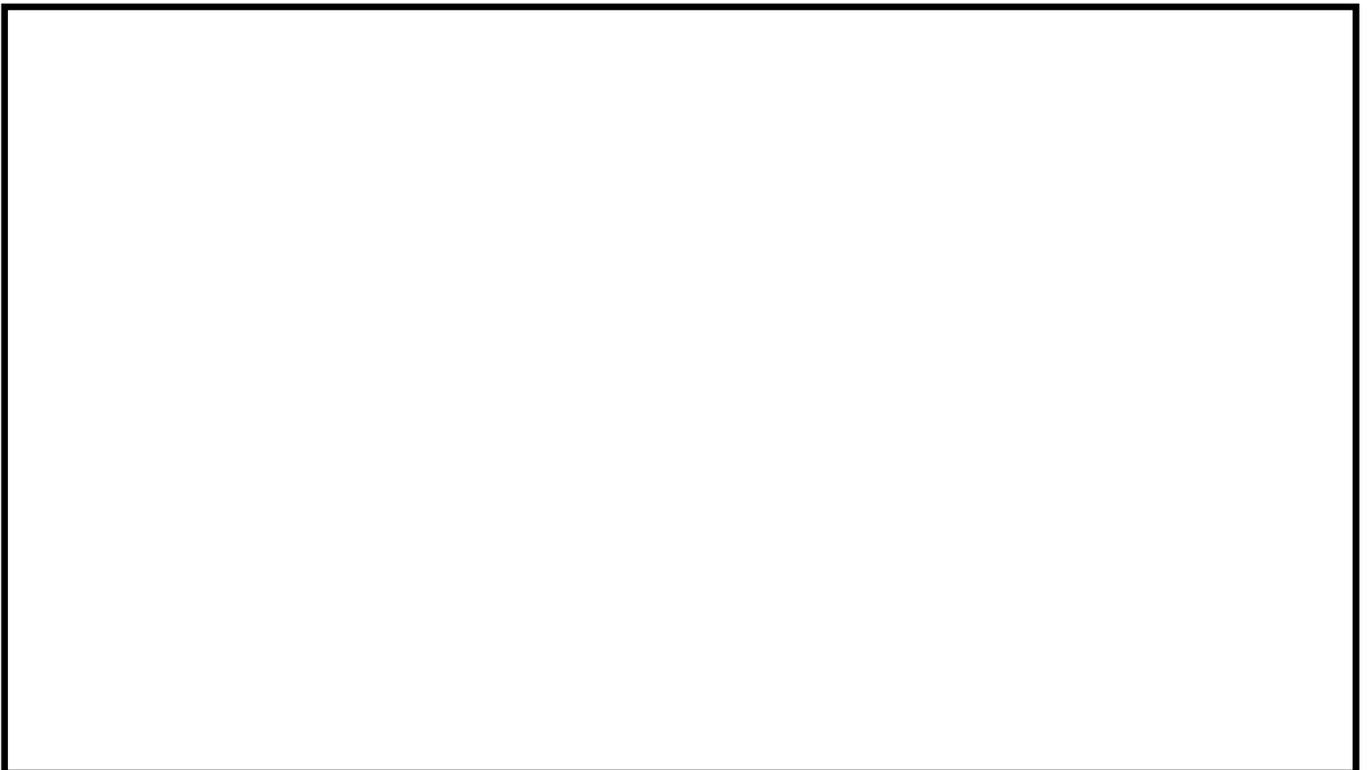
第 4.1.1.c-1 図 BWR のシビアアクシデントで考えられる事故進展

| 炉心損傷 事故シーケンス | PCV 破損時期 | RPV圧力 | 炉心損傷時期 | 起因事象 | PDSグループ化 結果 |
|---|---|----------------------------------|--------------------------|------|---------------------------------------|
| | 炉心損傷前 | | 後期 (TW) | | (TW) |
| | (TW) (TC) (ISLOCA) | | 早期 (TC) (ISLOCA) | | (TC) (ISLOCA) |
| TQUX TQUV AE、S1E、S2E TBU TBP TBD 長期TB | 炉心損傷後 | 高圧 TQUX TBU TBD 長期TB | 後期 長期TB | | 長期TB |
| (TC) (TW) (ISLOCA) | TQUX TQUV AE、S1E、S2E TBU TBP TBD 長期TB | 低圧 TQUV AE、S1E、S2E TBP | 早期 TQUX TBU TBD | 過渡 | TQUX TBU TBD TQUV TBP |
| | | | | 事故 | AE、S1E、S2E |

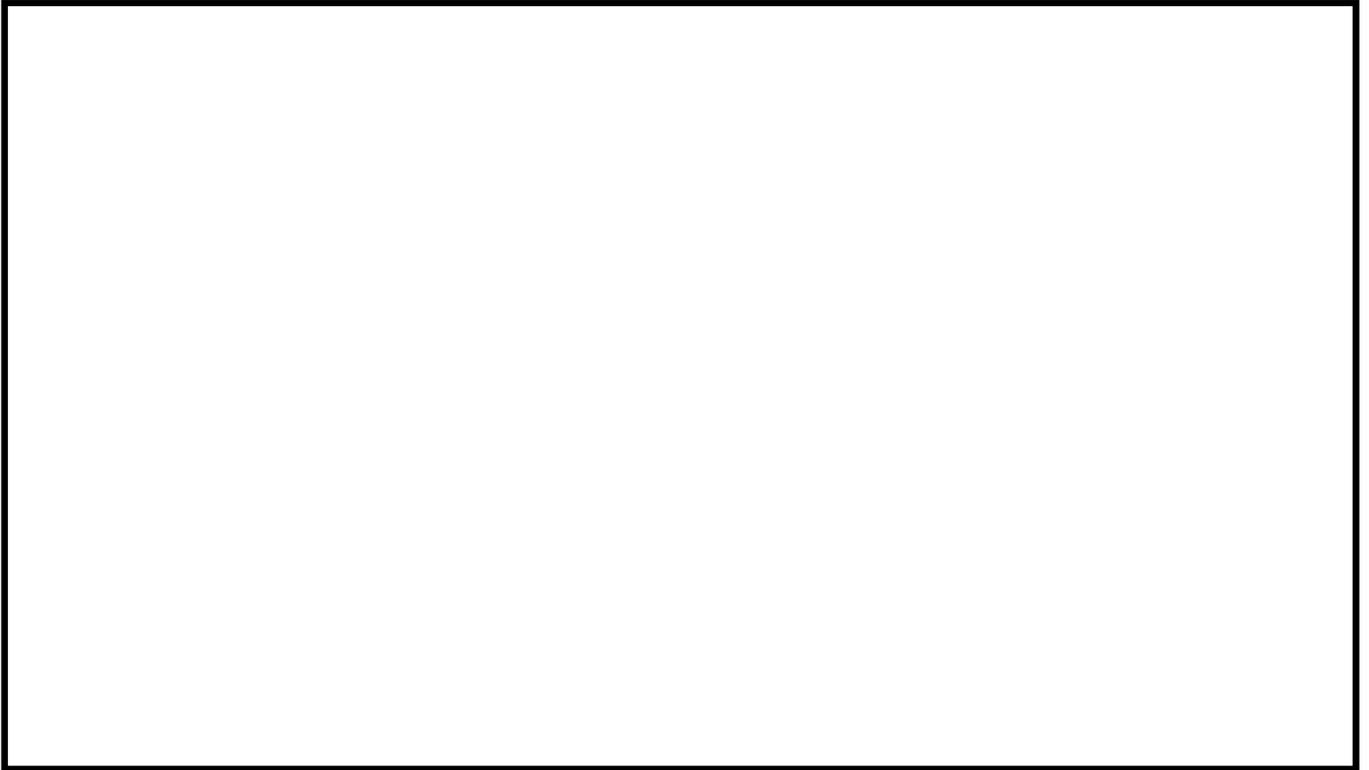
第 4.1.1.e-1 図 解析対象とする PDS 分類



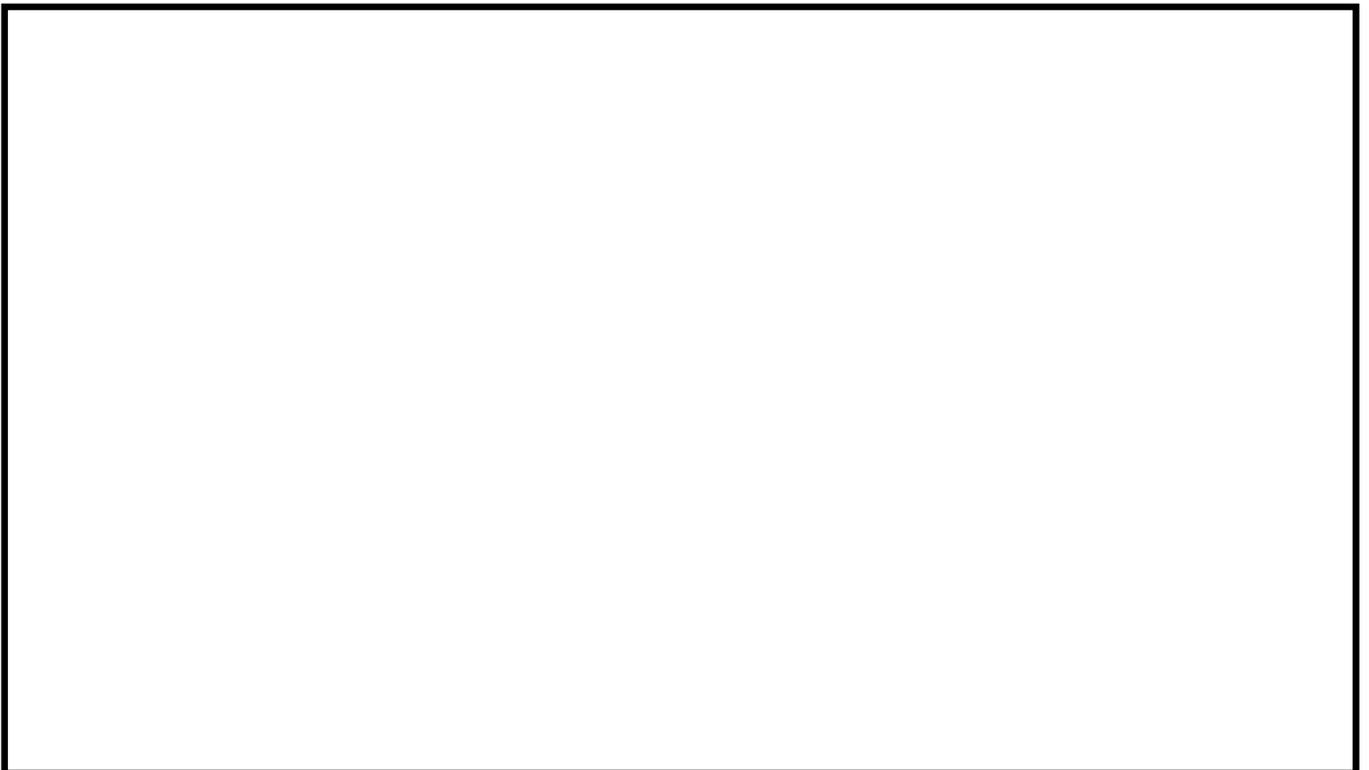
第 4.1.1.e-2 図(1/16) TQUV シーケンスの解析結果(炉心最高温度)



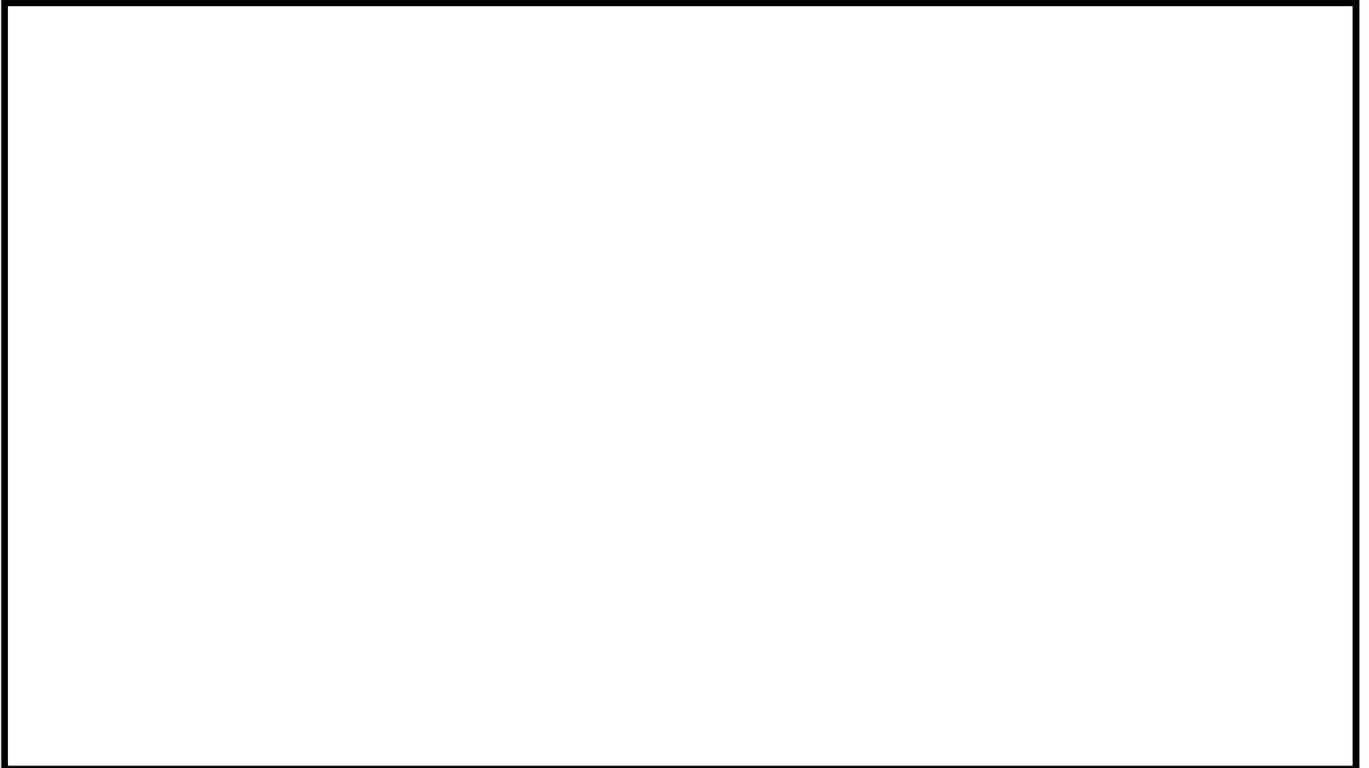
第 4.1.1.e-2 図(2/16) TQUV シーケンスの解析結果(原子炉圧力)



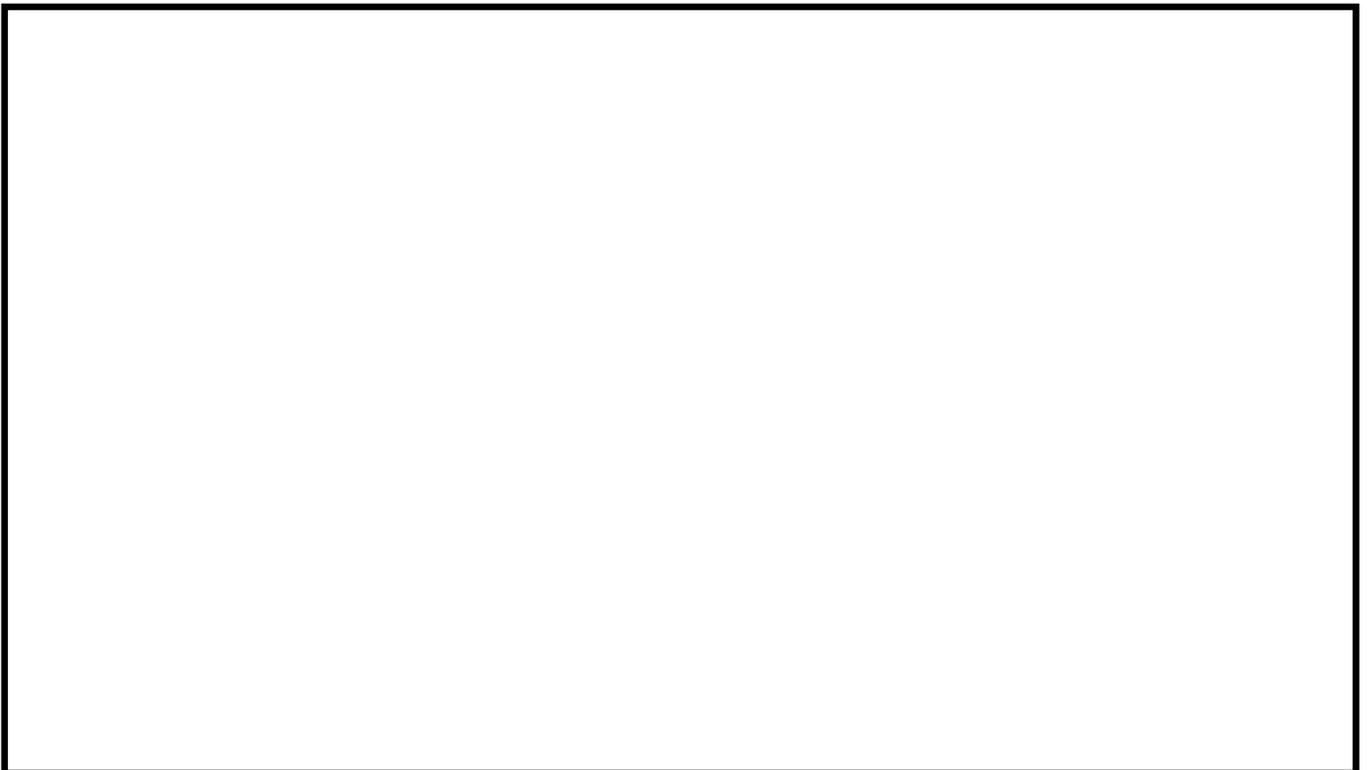
第 4.1.1.e-2 図(3/16) TQUV シーケンスの解析結果(D/W 圧力)



第 4.1.1.e-2 図(4/16) TQUV シーケンスの解析結果(D/W 内壁面温度)



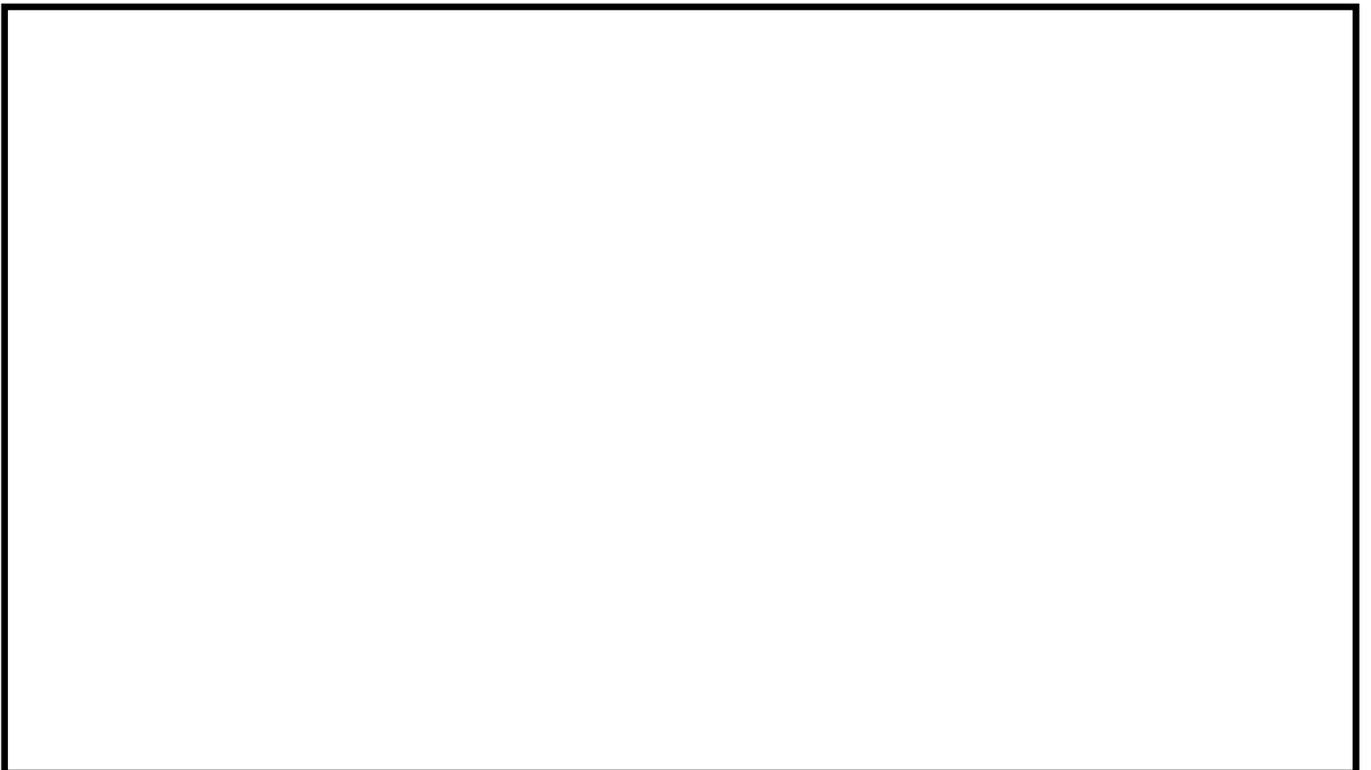
第 4.1.1.e-2 図(5/16) TQUX シーケンスの解析結果(炉心最高温度)



第 4.1.1.e-2 図(6/16) TQUX シーケンスの解析結果(原子炉圧力)



第 4.1.1.e-2 図(7/16) TQUX シーケンスの解析結果(D/W 圧力)

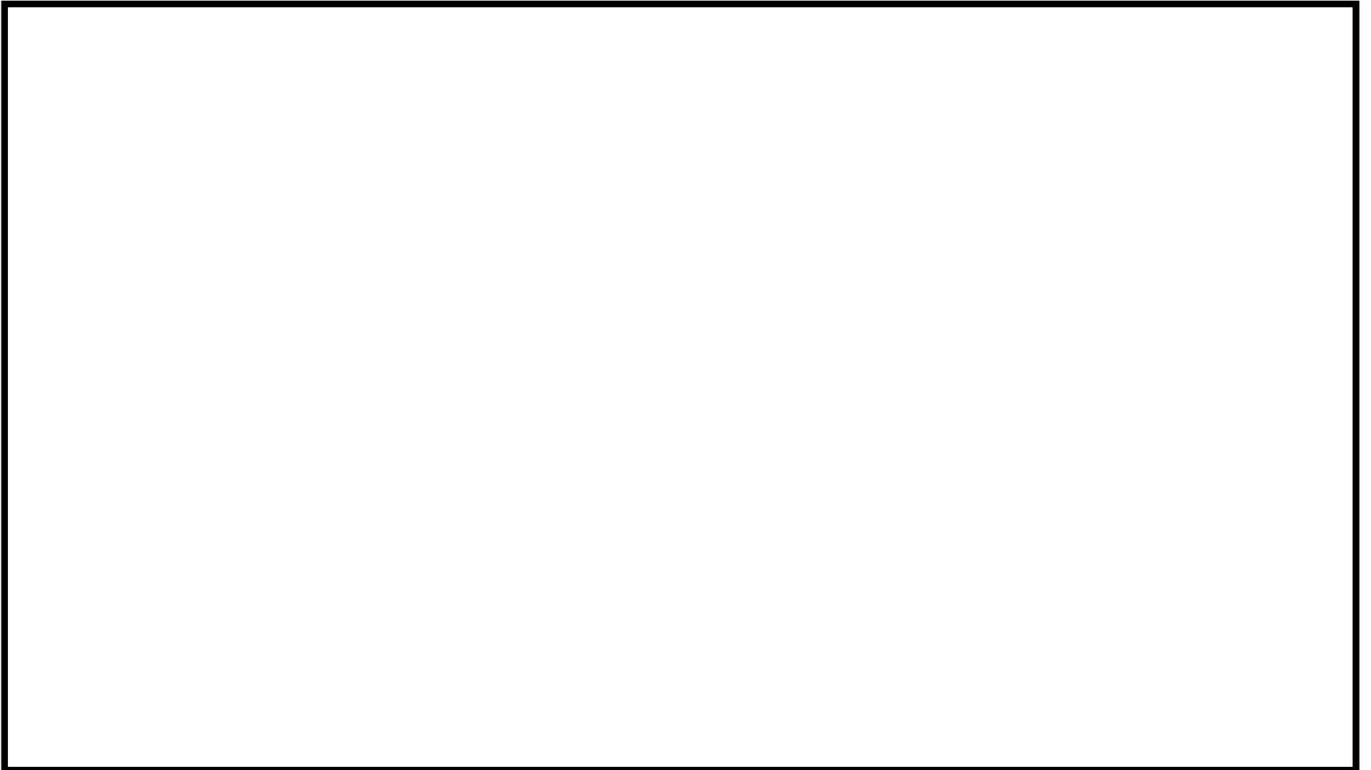


第 4.1.1.e-2 図(8/16) TQUX シーケンスの解析結果(D/W 内壁面温度)



第 4.1.1.e-2 図(9/16) 長期 TB(SBO, 蓄電池枯渇により 8 時間で RCIC 停止)

シーケンスの解析結果(炉心最高温度)

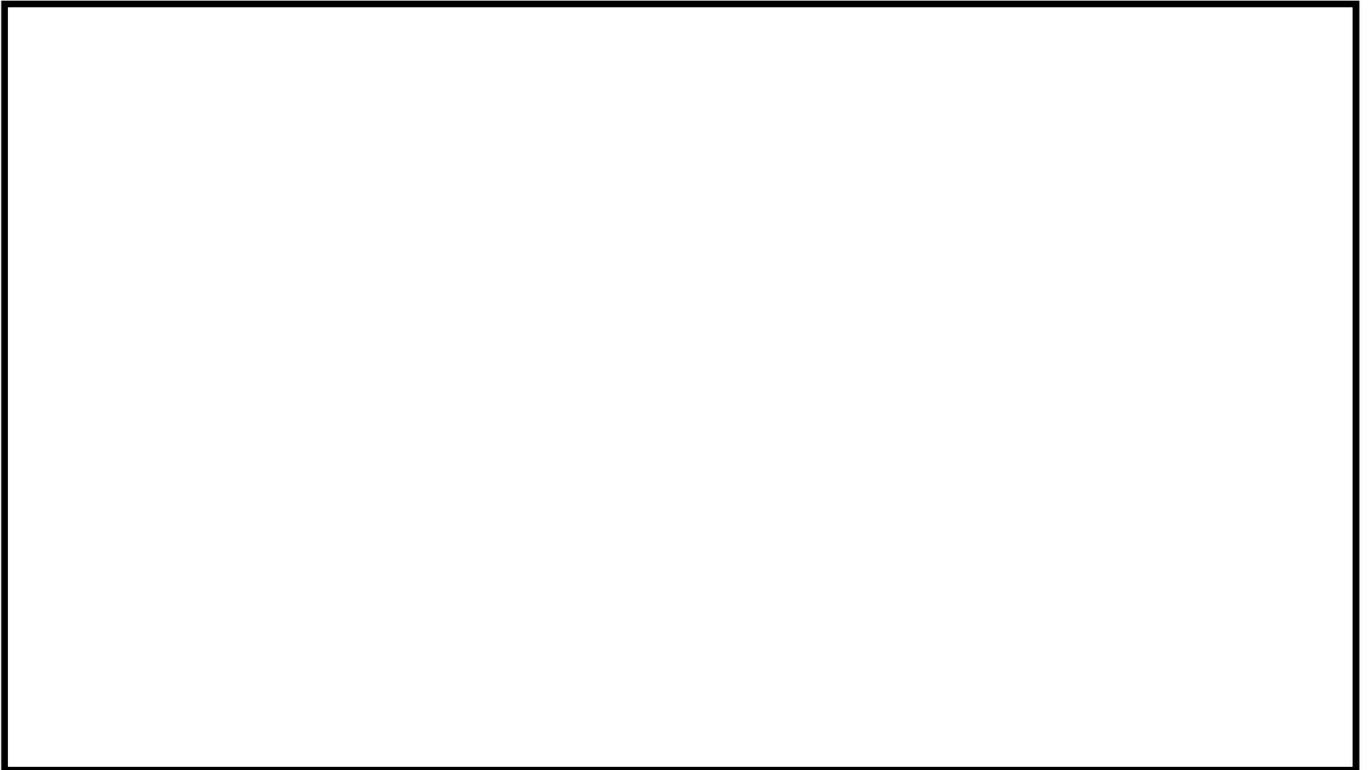


第 4.1.1.e-2 図(10/16) 長期 TB(SBO, 蓄電池枯渇により 8 時間で RCIC 停止)

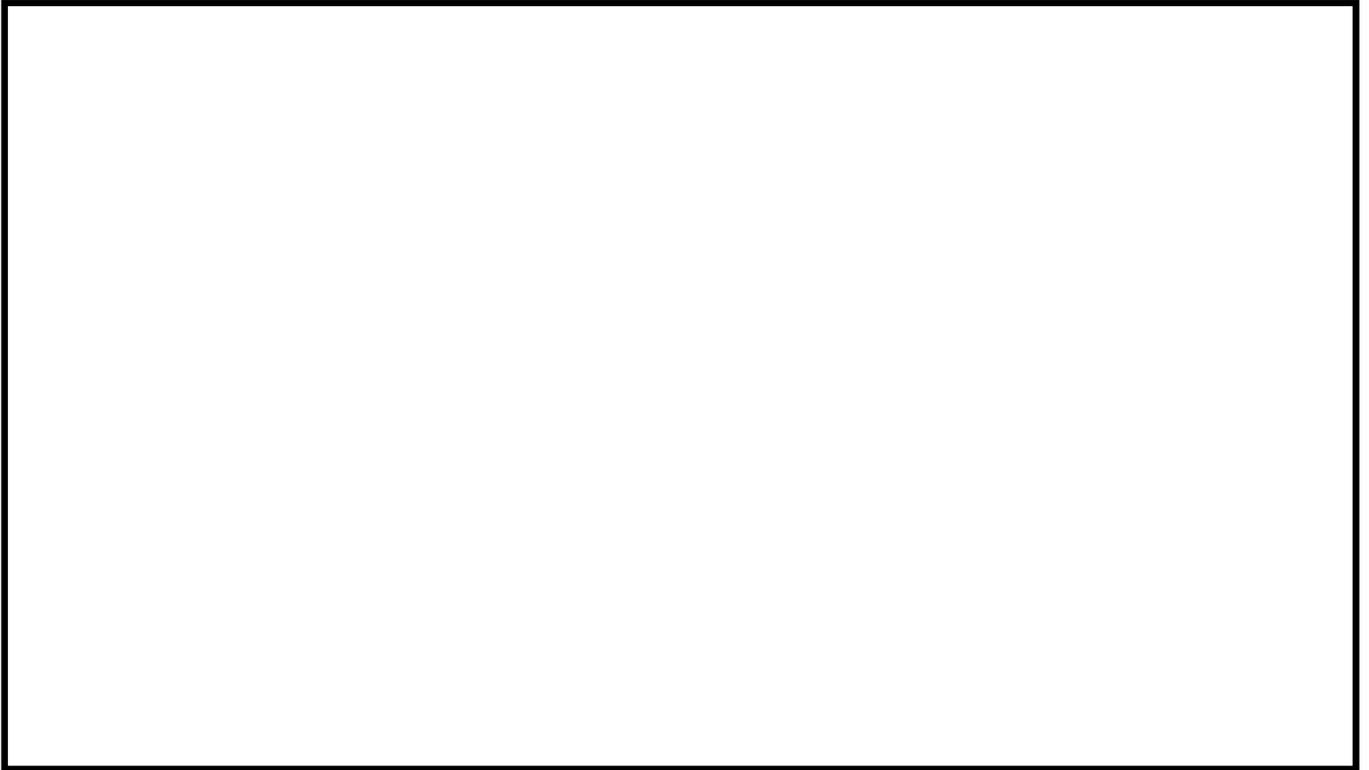
シーケンスの解析結果(原子炉圧力)



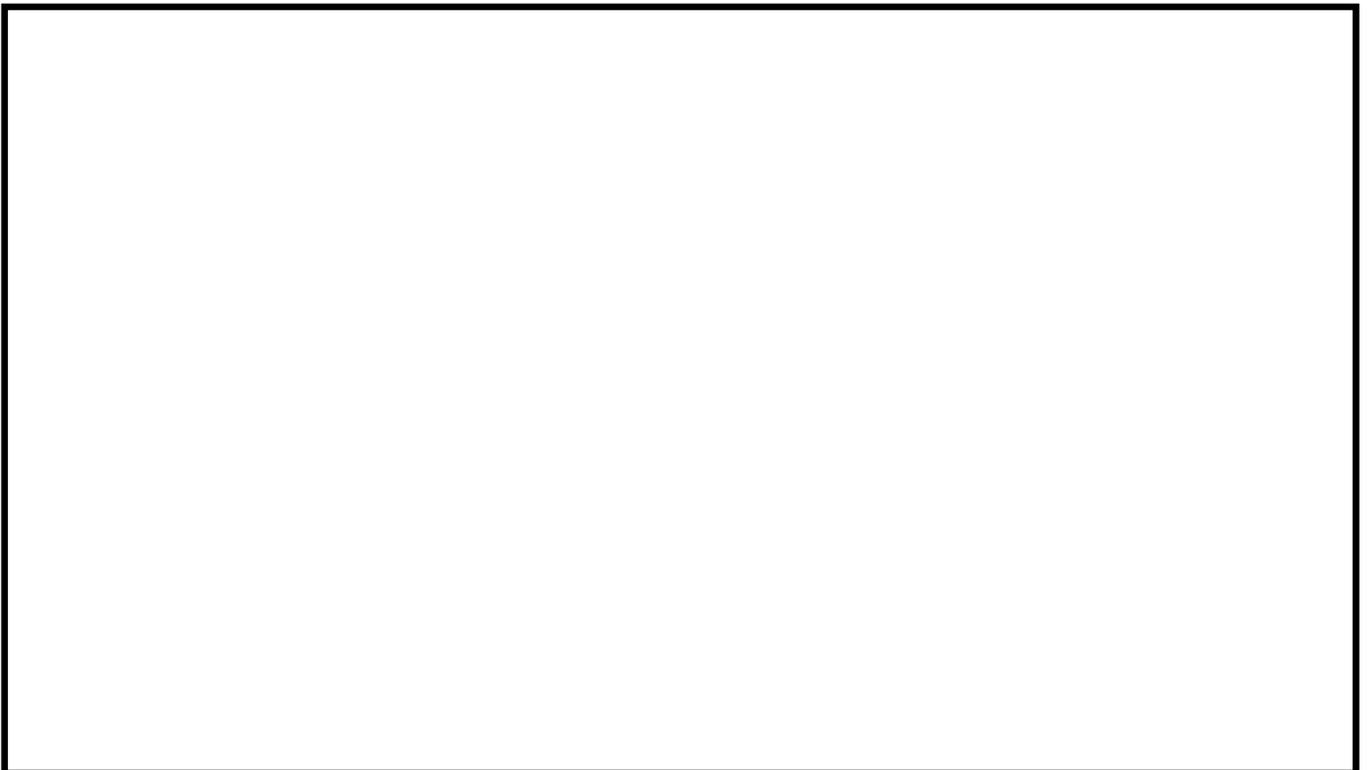
第 4.1.1.e-2 図(11/16) 長期 TB(SBO, 蓄電池枯渇により 8 時間で RCIC 停止)
シーケンスの解析結果(D/W 圧力)



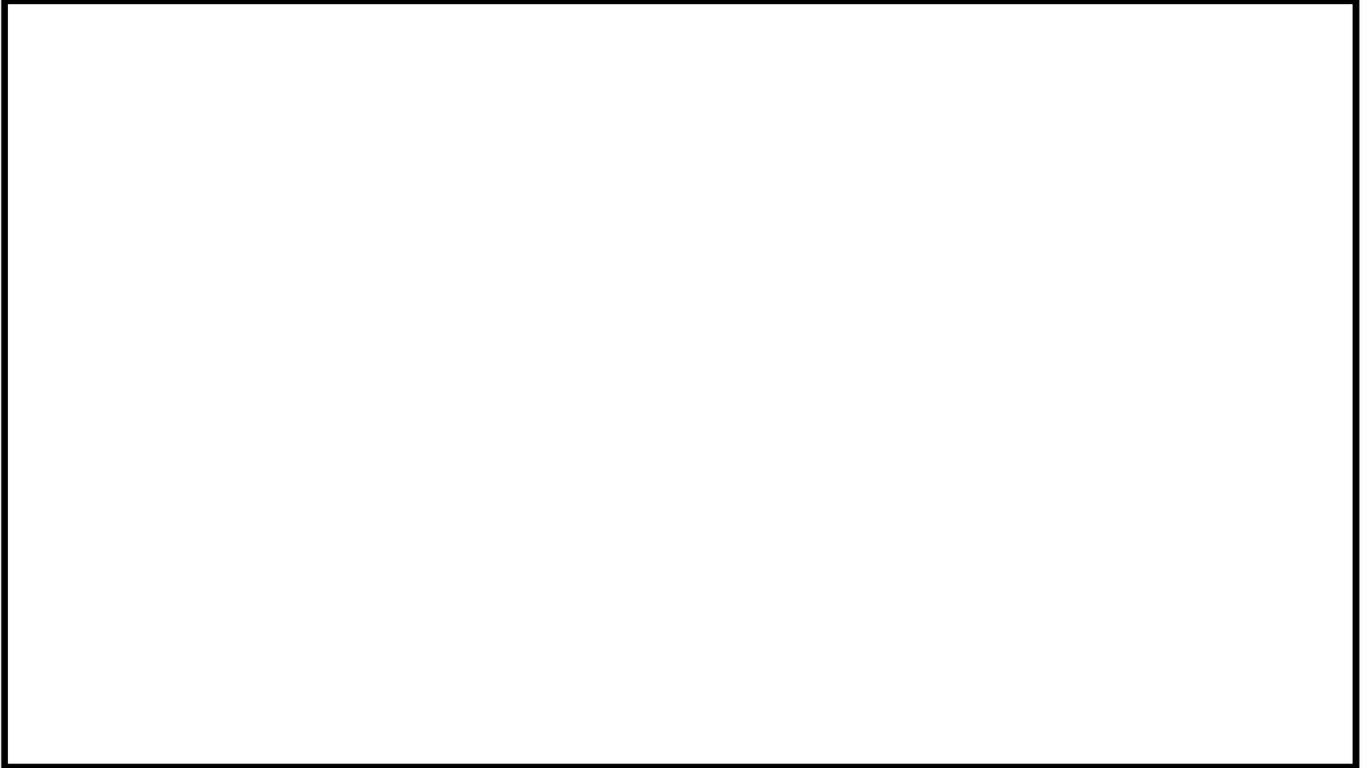
第 4.1.1.e-2 図(12/16) 長期 TB(SBO, 蓄電池枯渇により 8 時間で RCIC 停止)
シーケンスの解析結果(D/W 内壁面温度)



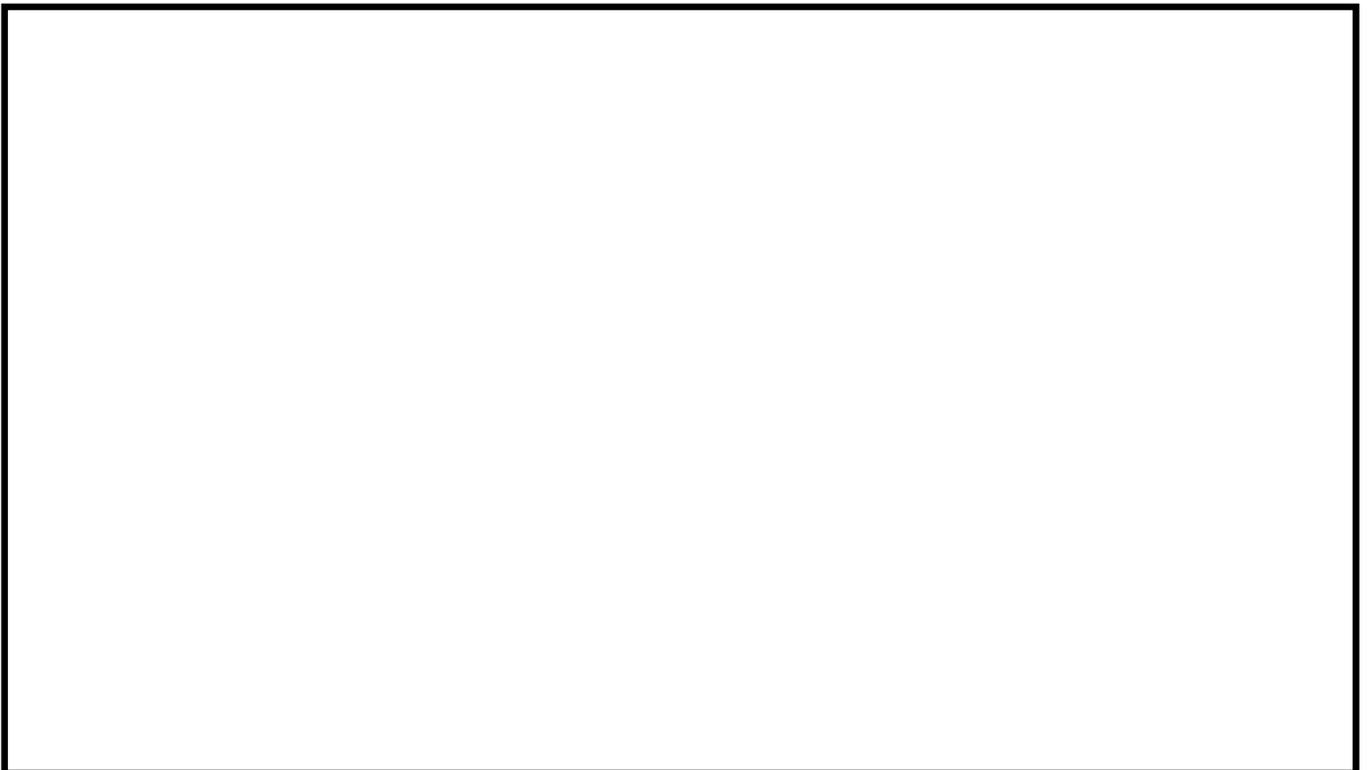
第 4.1.1.e-2 図(13/16) LOCA(大 LOCA+注水失敗)シーケンスの解析結果(炉心最高温度)



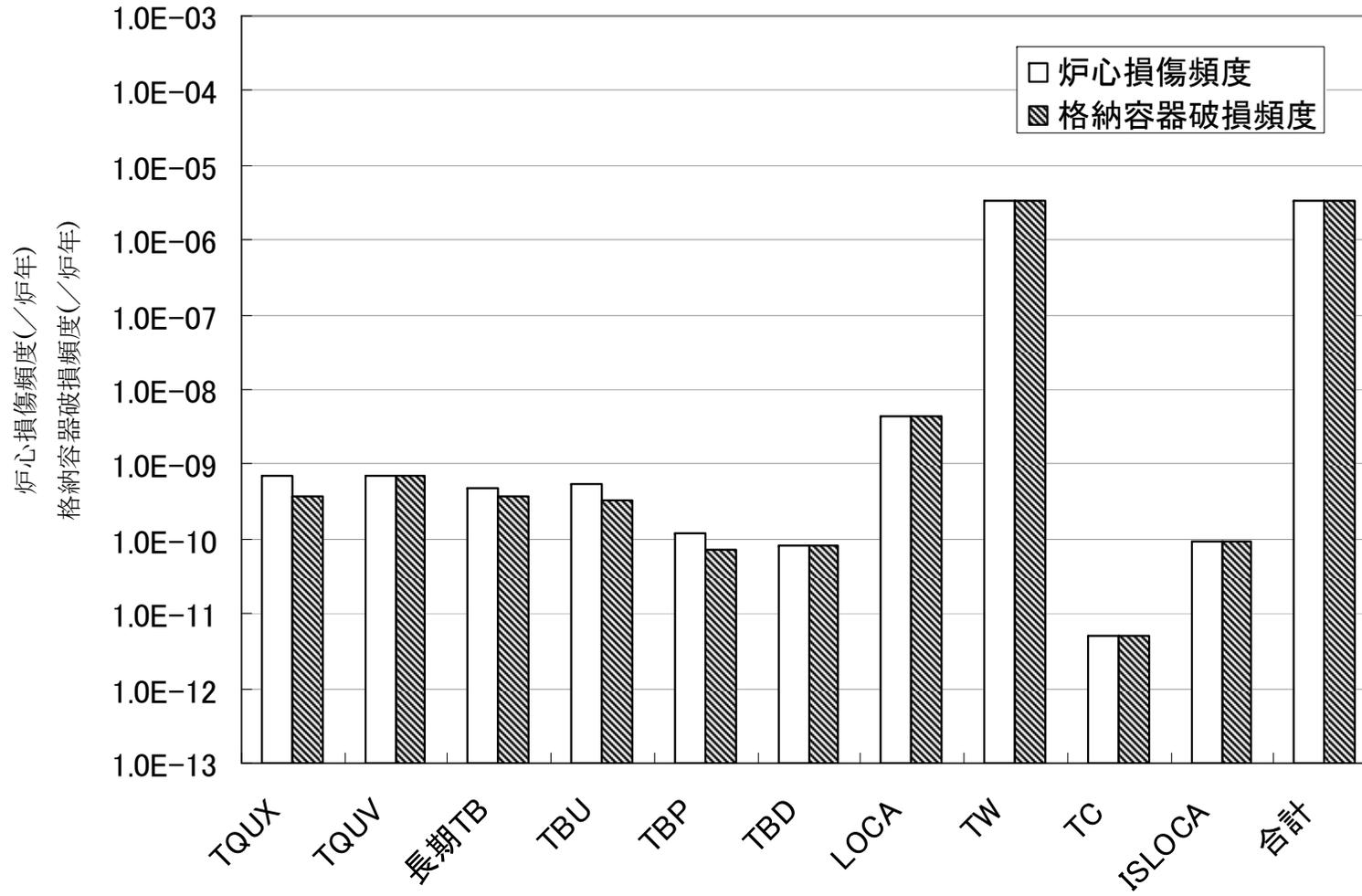
第 4.1.1.e-2 図(14/16) LOCA(大 LOCA+注水失敗)シーケンスの解析結果(原子炉圧力)



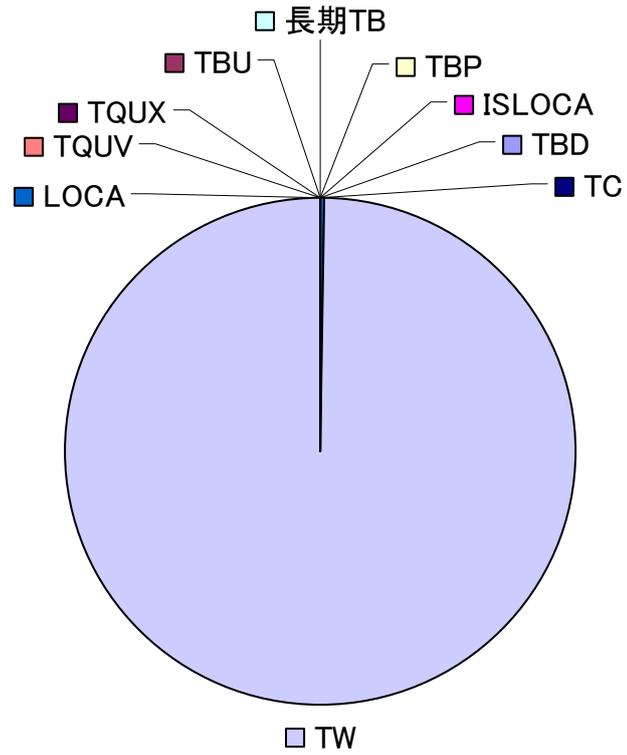
第 4.1.1.e-2 図(15/16) LOCA(大 LOCA+注水失敗)シーケンスの解析結果(D/W 圧力)



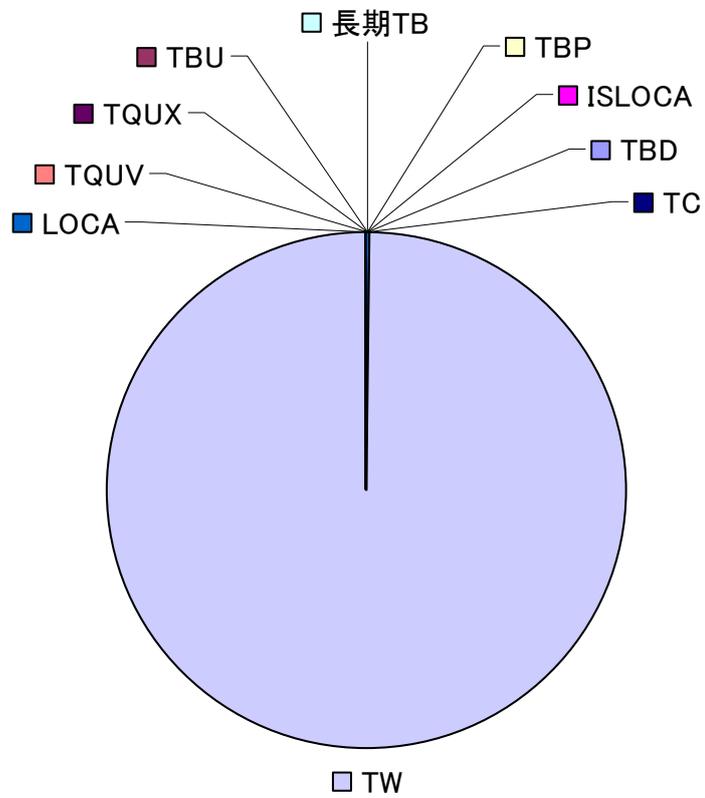
第 4.1.1.e-2 図(16/16) LOCA(大 LOCA+注水失敗)シーケンスの解析結果(D/W 内壁面温度)



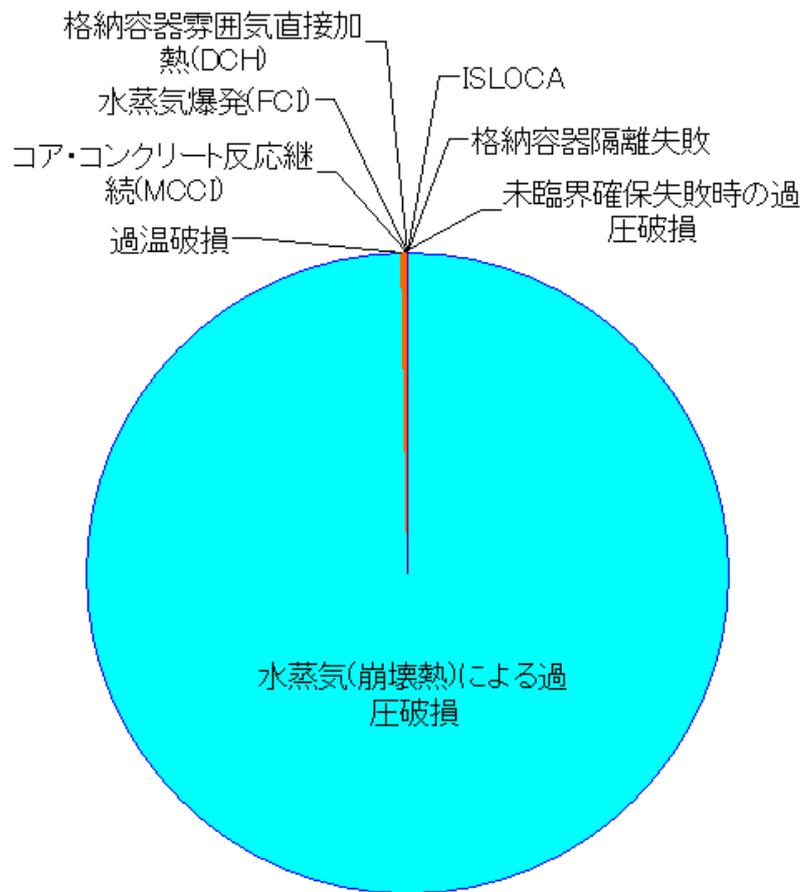
第 4.1.1.f-1 図 プラント損傷状態別の炉心損傷頻度及び格納容器破損頻度 CFF の比較



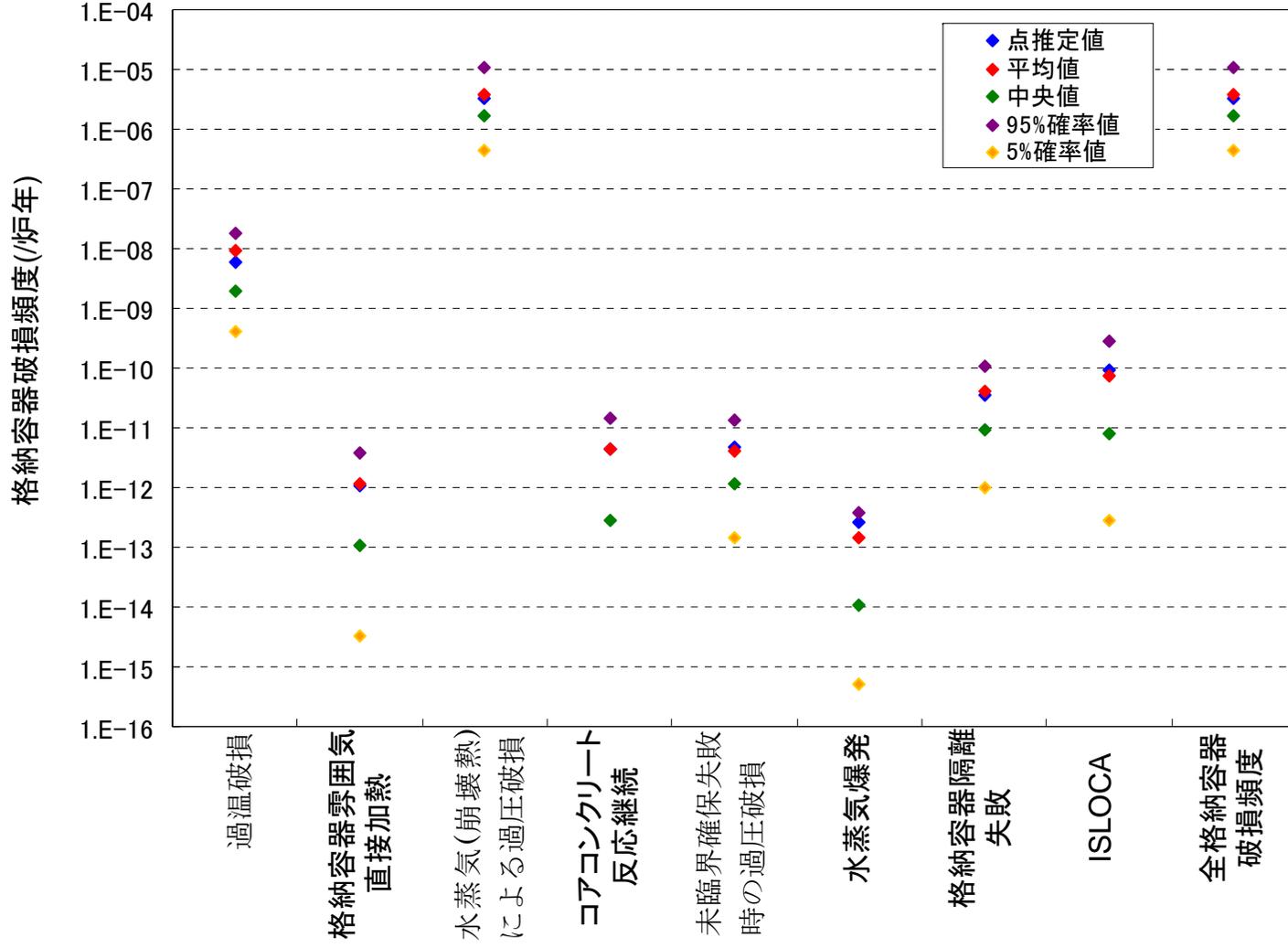
第 4.1.1.f-2 図 プラント損傷状態別の炉心損傷頻度



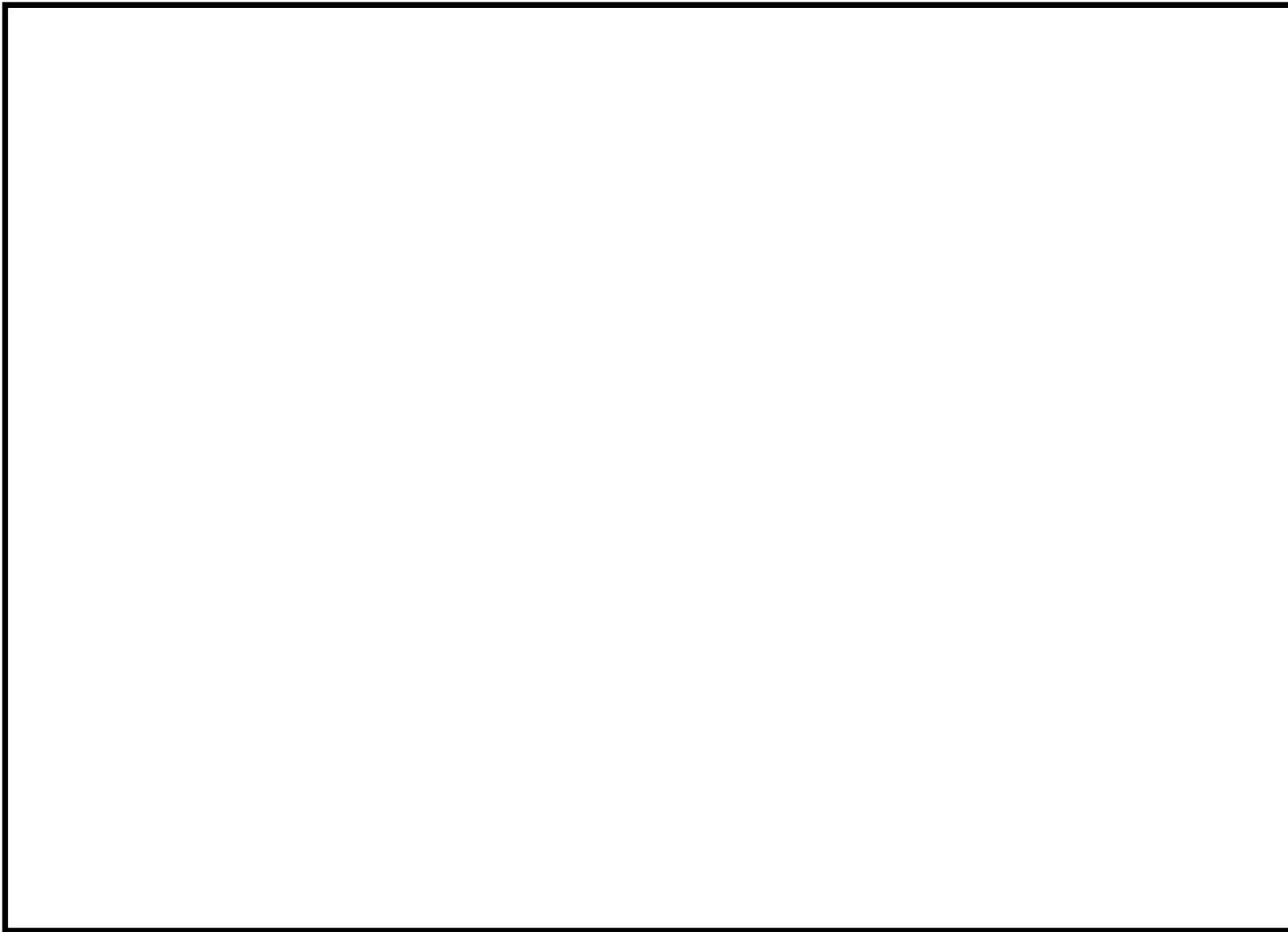
第 4.1.1.f-3 図 プラント損傷状態別の格納容器破損頻度



第 4.1.1.f-4 図 格納容器破損モード別の格納容器破損頻度



第 4.1.1.g-1 図 格納容器破損モード別格納容器破損頻度不確実と解析



第 4.1.1.g-2 図 に関する感度解析

内部事象運転時レベル 1.5PRA のシーケンス選定における 福島第一原子力発電所事故の知見の考慮

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東京電力福島第一原子力発電所事故では、格納容器の閉じ込め機能の喪失に伴い、環境中に放射性物質が放出された。

レベル 1.5PRA では格納容器破損に至るまでの事故シーケンス及び格納容器破損頻度(CFF)等を評価する。この際、物理化学現象の発生による格納容器破損の発生確率や過圧・過温破損に至るまでの時間の評価に格納容器が閉じ込め機能を維持可能な温度及び圧力の限界(限界温度及び限界圧力)を設定する必要がある。

今回の PRA 実施に際して、これまでの福島第一原子力発電所事故の調査結果から、レベル 1.5PRA への反映が可能な知見の有無について確認した。

2. 格納容器破損に関する福島第一原子力発電所事故の知見

福島第一原子力発電所事故の進展のうち、未解明な点については現在も解明を進めている⁴ところである。福島第一原子力発電所 1～3 号機の格納容器はいずれも事故後のどこかのタイミングで破損に至ったと考えられ、その詳細なメカニズムについては、解明に向けた取り組みを進めているところであるが、これまでに得られている知見からも以下の可能性が考えられる。

漏えいの経路については、その可能性の 1 つとして、トップヘッドフランジ等のフランジシール部からの漏えいが考えられる。1～3 号機の中で原子炉建屋での水素爆発が発生しておらず、オペレーティングフロアの形状が維持されている 2 号機に着目すると、原子炉格納容器の圧力低下が確認された 3 月 15 日の朝方にブローアウトパネルから蒸気の放出が確認されていること(後日の調査においてもシールドプラグの隙間から蒸気が放出されていることを確認)及びオペレーティングフロアにおける雰囲気線量率の調査の結果、シールドプラグの近傍における線量率が他の測定点に比べて高いことからその可能性が考えられる。

格納容器圧力については、格納容器ベントによる格納容器の減圧が実施されたと判断している 3 号機を除き、1、2 号機では設計圧力(Pd)の約 1.7 倍程度の測定データが得られている。一方、格納容器温度の炉心損傷後の測定データは得られていない。

格納容器温度に対する現場調査の結果として、1 号機では、格納容器内部調査により格納容器貫通部に設置されていた遮へい用の鉛板が消失していることが確認され、格納容器壁付近で少なくとも鉛の融点(328℃)以上を経験したものと

考えられる。

2号機では、注水機能喪失後に原子炉圧力容器を1 MPa以下に減圧していた。3/14の21時頃から3/15の1時頃にかけて3回の原子炉圧力容器の圧力上昇及びSRVの開放による圧力低下が確認され、これとほぼ同じタイミングで格納容器圧力が約0.7 MPa(約1.7Pd)まで上昇している。この3回の圧力上昇ピークは、炉心での水-ジルコニウム反応に伴う水素の大量発生によるものと推定されており、この際には大量のエネルギーが発生している。

この大量のエネルギーについては、以下のメカニズム及びその重畳によって格納容器頂部の温度を上昇させる可能性が考えられる。

- ・ 過熱された気体がSRVを介して格納容器に移行し、格納容器頂部に上昇して格納容器頂部の温度を上昇させる可能性
- ・ 溶融炉心によって原子炉圧力容器が過熱され、その熱が格納容器内の気体に伝えられ、その対流により格納容器頂部の温度を上昇させる可能性
- ・ 溶融炉心によって過熱された原子炉圧力容器からの熱伝導・輻射によって格納容器頂部の温度を上昇させる可能性

また、MARK-I格納容器の上部円筒部は熱の籠り易い構造であることから、ドライウェルクーラからダクトを介して冷却される設計となっていた。しかしながら、福島第一原子力発電所の事故時はドライウェルクーラの機能も喪失していたことから、格納容器上部が冷却されない状態になっており、RCICの運転中から高温になっていたと考えられる。

炉心損傷後は原子炉圧力容器内が更に過酷な温度条件となると考えると、格納容器の内側頂部は高い温度になっていたと考えられる。

ドライウェルクーラの停止等により元々高い温度となっていた格納容器の内側頂部に水-ジルコニウム反応に伴う大量のエネルギーが何らかの形で伝えられ、格納容器の内側頂部の温度が200℃を大幅に超える状態になっていた可能性は充分にあると考えている。

つまり、従来の知見から福島第一原子力発電所の原子炉格納容器限界温度及び限界圧力は200℃、2Pdとしているが、2号機でも1号機と同様に格納容器の内側頂部の温度が限界温度である200℃を大幅に超える状態になっていた可能性があると考えている。

3. KK6/7のPRAにおける格納容器の扱い

福島第一原子力発電所事故において、格納容器が過酷な環境にさらされたことも考慮し、KK6/7の格納容器の限界温度及び限界圧力に対する機能維持については事故知見も踏まえて改めて確認している(添付資料-4.1.1.a-1-1)。KK6/7号機のレベル1.5PRAでは、物理化学現象の発生確率や過圧・過温破損に至るまでの時間を評価するための格納容器の限界温度及び限界圧力には、重大事故

等防止対策の有効性評価の条件と同じ条件(限界温度 200 °C、限界圧力 620 kPa[gage])を用いている。

4. レベル 1.5PRA における考慮の必要性

福島第一原子力発電所事故については、格納容器内の状況等、未だ確認が困難な点が多く、未解明な問題がある。一方で、これまでの状況からは、現在レベル 1.5PRA で考慮しているモード以外で格納容器が破損に至ったとは考えにくい。このことから、事故シーケンスの抽出という観点では現在の PRA でも網羅的な分析となっているものと考えられる。

今後、格納容器の限界温度及び限界圧力に関する新たな知見が得られた際には、物理化学現象の発生確率や過圧・過温破損に至るまでの時間が変化することとなり、PRA としては炉心損傷から格納容器破損に至るまでの余裕時間を見直す必要がある。なお、全 CFF はレベル 1PRA の結果である全炉心損傷頻度 (CDF) を上回るものではなく、また、現在の評価の CDF のほぼ 100% が TW(崩壊熱除去機能喪失に伴う格納容器先行破損) による炉心損傷であり、CFF のほぼ 100% がこの TW による過圧破損であることを考えると、定量的にも大きく影響を及ぼすものではないと考えられる。

また、物理化学現象の発生確率については、その不確実性が非常に大きく、限界温度及び限界圧力を見直したとしても、発生確率の精度向上に大きく寄与するものではない。

5. 結論

福島第一原子力発電所事故のこれまでの調査・検討結果からは、現在のところ KK6/7 号機の PRA に反映可能な知見は得られていないが、今後、新たな知見が確認された場合には、PRA への反映を検討していく。このため、KK6/7 号機については現在の設計をもとに事象進展解析等を実施し、物理化学現象の発生確率や過圧・過温破損に至るまでの時間を評価している。

[1] 東京電力株式会社「福島第一原子力発電所 1～3 号機の炉心・格納容器の状態の推定と未解明問題に関する検討 第 1 回進捗報告」平成 25 年 12 月 13 日

以 上

柏崎刈羽原子力発電所 6/7 号炉の原子炉格納容器限界温度・圧力について

柏崎刈羽原子力発電所 6/7 号炉の設置変更許可申請における重大事故等対策の有効性評価では、原子炉格納容器限界温度を 200℃、限界圧力を最高使用圧力の 2 倍 (2Pd:620kPa) と設定している。

なお、原子炉格納容器限界温度・限界圧力の設定値根拠は以下のとおりである。

(1) 格納容器限界温度・圧力に関する既往研究について

重大事故時条件下の格納容器閉じ込め機能については、過去に電力会社等による共同研究（以下「電共研」という。）で解析、試験等を実施しており、これをもとに有効性評価の格納容器限界温度・圧力を設定している。また、当時の（財）原子力発電技術機構（以下「NUPEC」という。）による「重要構造物安全評価（原子炉格納容器信頼性実証事業）」の研究成果も取り入れて、格納容器閉じ込め機能に関する新たな知見を踏まえた限界温度・圧力の設定を行っている。図 1 に、電共研で実施した格納容器閉じ込め機能に関する「漏洩、破損圧力－温度線図」を示す。

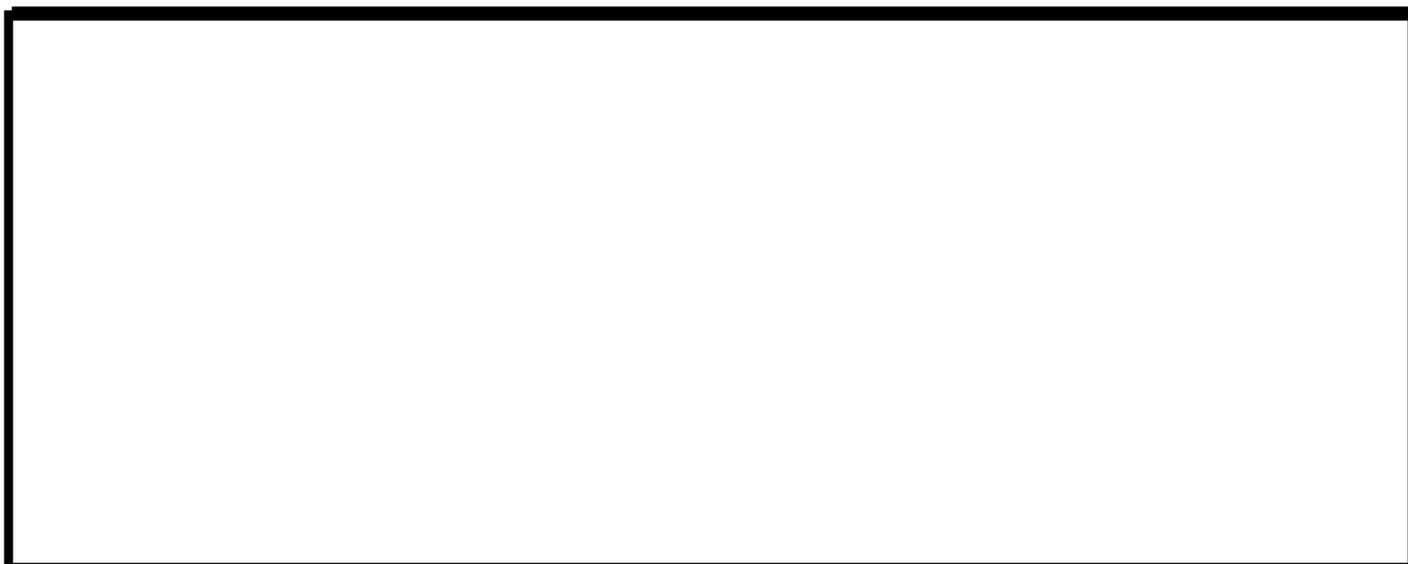


図 1 漏洩、破損圧力－温度線図 (MARK-II 改型**)

※RCCV と MARK-II 改型のトップヘッド・ハッチは同程度の剛性であるため、MARK-II 改型の線図をもとに評価する

(A) 「漏洩、破損圧力－温度線図」について

【線(a)】 飽和蒸気圧曲線

本線は飽和蒸気圧曲線を示すことから、線(a)を境にした①の範囲は、重大事故時では発生する可能性の少ない荷重の範囲である。

【線(b)】格納容器構造部の破損判定解析結果（破損可能性が高い境界）

本線は格納容器全体、トップヘッドフランジ、ハッチフランジ部の構造解析結果から、過圧・過温状態における格納容器の延性破損クライテリアを示したものである。解析評価の破損判定として、塑性不安定荷重（引張試験片がネッキングを起こして不安定破壊するような状態の荷重）を用いており、格納容器延性破損に対する限界の線を引いている。

【線(c)】格納容器構造部の破損判定解析結果（破損すると考えられる境界）

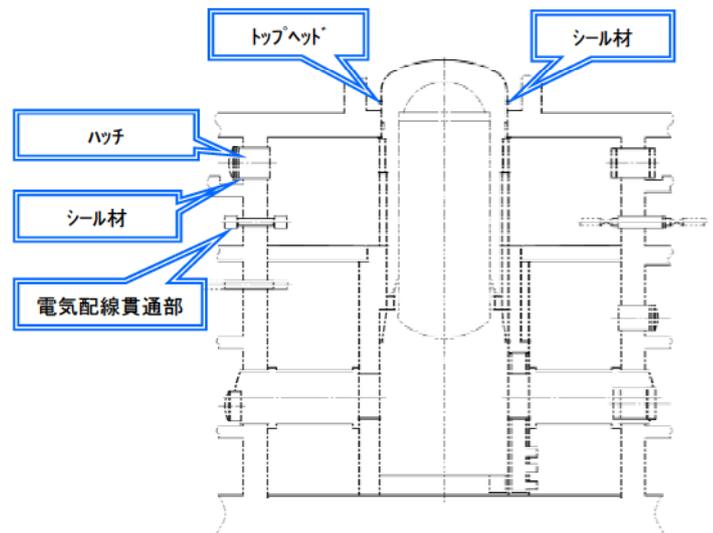
本線は格納容器全体、トップヘッドフランジ、ハッチフランジ部の構造解析結果から、過圧・過温状態における格納容器の延性破損クライテリアを示したものである。解析評価の破損判定として、線(b)で用いた荷重よりも小さい崩壊荷重で評価し、格納容器延性破損に対して保守的な境界を引いている。

【線(d)】格納容器フランジ部の漏洩判定解析結果

本線はトップヘッドフランジ、ハッチフランジ部の構造解析結果からフランジ部の開口量を評価し、過圧・過温状態における格納容器の漏洩発生クライテリアを示したものである。解析で示したフランジ部の開口量がシール材初期締付量に相当する開き量に達した点を漏洩発生点とし、漏洩判定の境界線を引いている。

【線(e)】フランジ部からの漏洩の判定カーブ

本線は格納容器フランジ部シール材の小型モデル試験結果から、過圧・過温状態におけるシール材の漏洩判定を示したものである。小型モデル試験では、格納容器シール部形状を模擬した試験装置で、シール材から漏洩する圧力、温度に関するデータを取得している。試験は、シール材に放射線照射するケース、蒸気曝露するケースも含んでおり、各条件の試験データのばらつきを考慮して、保守的に漏洩点を設定して漏洩判定の境界線を引いている。



(参考図) RCCV 型格納容器

(B) 既往研究のモデル試験について

(a) トップヘッドフランジのモデル試験

電共研でトップヘッドフランジ模擬試験体を用い、常温で水圧により加圧することで漏洩判定と変形挙動を示している。その結果、 まで加圧されたところで漏洩したことを確認している。

(b) ハッチのモデル試験

電共研でハッチ形状を模擬した小型モデルの試験体を用い、常温で水圧により加圧することで漏洩判定と変形挙動を示している。その結果、 まで加圧されても漏洩しないことを確認している。また、NUPEC ではハッチ形状を模擬した実機モデルの試験体を用い、常温で水圧により加圧破損試験を実施しており、約 6.2Pd まで加圧したところで破損が発生している。

(c) 電気配線貫通部のモデル試験

既往研究で電気配線貫通部の過圧・過温状態における耐漏洩性を確認している。電共研では [] の圧力範囲内で [] 程度の状態で漏洩しないことを示し、NUPEC の評価では、最大 1.0MPa (約 3Pd)、約 260℃までの耐漏洩性を示している。

(2) 福島第一事故を踏まえた確認について

福島第一原子力発電所事故で原子炉格納容器内ガスが漏えいした経路として、原子炉格納容器トップヘッドフランジ、機器搬入用ハッチ等のフランジシール部が推定漏えい経路の 1 つであると考えている。原子炉格納容器のフランジシール部は、内圧が低い段階ではボルトの初期締付けにより開口は抑制されているが、内圧の上昇に伴って開口量が増加することにより、外部への漏えい経路を形成する。ただし、フランジ部が開いても、フランジ部の密閉性を担保しているシール材が健全であれば、シール材が開口に追従するため外部への漏えいを防止することができる。しかしながら、福島第一原子力発電所事故のような事故環境に晒されると、原子炉格納容器トップヘッドフランジ等のフランジシール部に使用されているシール材が劣化し、フランジの開口に追従できなくなり格納容器閉じ込め機能を損なう可能性がでてくる。

そこで、KK6/7 原子炉格納容器フランジシール部に使用されているシール材 (シリコンゴム) について、事故時の温度や放射線による劣化特性を試験により確認し、想定される事故シナリオにおけるシール機能を評価した。その結果、原子炉格納容器圧力が 2Pd の状況におけるフランジ部の開口を評価したところ、その開口量はシール材 (シリコンゴム) の追従範囲内であることを確認した。また、原子炉格納容器温度が 200℃の状況におけるシール材 (シリコンゴム) の劣化状況を確認したところ、劣化特性を考慮しても格納容器閉じ込め機能の健全性を確認した。

上記の確認により、従来から使用しているシール材によっても、事故環境下における原子炉格納容器からの漏えいを防止できるものと考えられるが、更なる信頼性向上を達成することが必要であると考えている。これを踏まえ、柏崎刈羽原子力発電所においては、高温蒸気曝露で劣化が進む特性を持つシール材 (シリコンゴム) を補強し、耐漏えい機能を向上させるために、200℃蒸気曝露条件で耐劣化性に優れているバックアップシール材を従来のシール材 (シリコンゴム) に加えて追加塗布し、限界温度及び限界圧力に対する格納容器閉じ込め機能の更なる健全性を確認している。

(3) 限界温度・圧力 (200℃・2Pd) の設定について

既往研究における格納容器の閉じ込め機能の評価から、格納容器の温度・圧力が図 1 に示す②の範囲内であれば、格納容器に漏洩・破損が発生している可能性が少ないと考えられる。これらの結果から少なくとも、温度 200℃、最高使用圧力の 2 倍の圧力であれば格納容器閉じ込め機能が確保できる範囲と考えており、福島第一原子力発電所事故の知見を踏まえても、柏崎刈羽原子力発電所 6/7 号炉の格納容器限界温度・圧力 (200℃、2Pd) は妥当であると考えている。

以上

炉内溶融燃料－冷却材相互作用(炉内 FCI)に関する知見の整理

1. 現象の概要

原子炉容器内水蒸気爆発による格納容器破損は α モード破損と呼ばれ、WASH-1400 から研究が続けられてきた。この現象は、溶融炉心(コリウム)が原子炉压力容器下部ヘッドに溜まっている水中に落下した時に水蒸気爆発が発生し、それにより水塊がミサイルとなって炉内構造物を破壊し、原子炉压力容器上蓋に衝突することで上蓋を固定するボルトを破壊し、上蓋が格納容器に衝突して格納容器破損に至るといった現象である。

炉内での現象は、以下のようなメカニズムであると考えられている。

- ① 炉内の冷却材が喪失し、炉心が溶融して、その溶融炉心が下部プレナムの残存水に落下する。水と接触した溶融炉心は、その界面の不安定性により、溶融炉心の一部もしくは大部分が分裂し、膜沸騰を伴う水との混合状態となる(粗混合)。更に、自発的もしくは外部からの圧力パルスにより、膜沸騰が不安定化し(トリガリング)、二液が直接接触する。
- ② 下部プレナムにおける二液の直接接触により、急速な熱の移動が発生し、急速な蒸気発生・溶融炉心の微細化によって、更に液体どうしの接触を促進し(伝播)、蒸気発生を促進する。この蒸気発生により、圧力波が発生する。
- ③ 発生した圧力波が通過した後の高温高圧領域(元々は粗混合領域)の膨張により運動エネルギーが発生し、上部ヘッドを破壊する。この結果、上部ヘッドはミサイルとなって格納容器に衝突する。

2. 過去の実験結果の整理^[1]

FCI について、過去に実施された比較的大規模な実験概要及び結果を以下に示す。

2.1 FARO 実験

FARO 実験は、イタリアのイスプラ研究所において実施された実験で、压力容器内での FCI を調べることを主な目的とした試験である。多くの実験は高圧・飽和水条件で実施されているが、压力容器外を対象とした低圧・サブクール水条件の実験も実施されている。

図 2.1 に試験装置の概要図を示す。試験装置は主にくつぼと保温容器で構成されている。くつぼ内で溶融させたコリウムを一度リリースベッセルに保持し、その底部にあるフラップを開放することにより溶融コリウムを水プールに落下させる。溶融物落下速度は、リリースベッセルの圧力を調整することにより調整可能である。

実験は、酸化物コリウム(80wt% UO_2 +20wt% ZrO_2)または金属 Zr を含むコリウム(77wt% UO_2 +19wt% ZrO_2 +4wt% Zr)を用いて実施された。

表 2.1 に試験条件及び試験結果を示す。

結果として、いずれの実験においても、水蒸気爆発の発生は確認されなかった。

熔融コリウムの粒子化量について、高圧条件・低サブクール水条件においては水深約 1 m の場合で熔融コリウムの約半分が粒子化し、残りはジェット状でプール底面に衝突し、パンケーキ状に堆積したとの結果が得られている。また、低圧条件・サブクール水条件では、全てのコリウムは粒子化した。

さらに、粒子の質量中央径は 3.2 mm~4.8 mm であり、試験パラメータ(初期圧力、水深、コリウム落下速度、サブクール度)に依存しないことが報告されている。

2.2 COTELS 実験

COTELS 実験は、(財)原子力発電技術機構により実施された実験であり、圧力容器底部が熔融破損して熔融コリウムが格納容器床面上の水プールに落下した場合の水蒸気爆発の発生有無を調べることを目的に実施された。図 2.2 に実験装置の概要図を示す。実験は、シビアアクシデント時の熔融コリウム成分を模擬するため、比較的多くの金属成分を含む模擬コリウム(55wt% UO_2 +5wt% ZrO_2 +25wt% Zr+15wt% SUS)が用いられた。また、多くの実験ケースはプール水深 40 cm、飽和水温度で実施されている

表 2.2 に実験条件及び結果を示す。

結果として、いずれの実験においても、水蒸気爆発の発生は確認されなかった。

プールに落下した熔融コリウムはほとんどが粒子化し、落下速度が大きいケースでは、全てのコリウムが粒子化するとの結果が得られている。

また、コリウム落下速度の大きいケースを除いて、粒径分布に大きな差はなく、質量中央径で 6 mm 程度であり、落下速度が大きいケースでは粒子径は小さくなっている。

2.3 KROTOS 実験

KROTOS 実験はイスプラ研究所で実施された実験であり、FARO 実験が高圧条件を主目的として実施されたのに対して、KROTOS 実験では、低圧・サブクール水を主として実施が行われている。

図 2.3 に実験装置の概要図を示す。本実験では模擬コリウムとして UO_2 混合物(80% UO_2 +20% ZrO_2)またはアルミナを用いた実験を行っている。また、外部トリガ装置によりトリガを与えることで、水蒸気爆発を誘発させる実験も実施されている。

表 2.3 に実験条件及び結果を示す。

アルミナを用いた実験では、サブクール水(ケース 38, 40, 42, 43, 49)の場合、外部トリガ無しで水蒸気爆発が発生、低サブクール水(ケース 41, 44, 50, 51)の場合、外部トリガがある場合(ケース 44)に水蒸気爆発が発生した。一方、 UO_2 混合物を用いた実験では、サブクール度が 4~102 K の場合、外部トリガ無しでは水蒸気爆発が発生せず、外部トリガありの場合でも、溶融物の重量が大きい、または、水プールのサブクール度が高い場合(ケース 52)に水蒸気爆発が観測されている。

これらの差異として、粒子径はアルミナの 8~17 mm に対し UO_2 混合物は 1~1.7 mm であり、 UO_2 混合物の方が小さく、粒子化直後の表面積が大きいため粗混合時に水プールが高ボイド率となり、トリガの伝播を阻害した可能性がある。また、アルミナは比重が小さいことから水面近傍でブレイクアップし、径方向に広がったことによりトリガが伝搬しやすくなったと考えられている。一方、 UO_2 混合物は、粒子表面と水が接触した直後に表面が固化することにより蒸気膜が崩壊した際の微粒子化が起こりにくく、これが一つの要因となって水蒸気爆発の発生を阻害すると考えられる。

2.4 ALPHA 実験

旧原子力研究所(JAERI)で実施された実験であり、シビアアクシデント時の格納容器内の諸現象を明らかにし、格納容器の耐性やアクシデントマネジメント策の有効性を評価することを目的に、1988 年から事故時格納容器挙動試験の一環で実施された。

図 2.4 に実験装置の概要図を示す。実験では、溶融ステンレス鋼または酸化アルミニウムと鉄からなる溶融物を実験装置の模擬格納容器内に設置した水プールに落下させるもので、模擬格納容器の寸法は、内径約 4 m、高さ約 5 m、内容積約 50 m³である。

表 2.4 に実験条件及び結果を示す。

溶融ステンレス鋼の実験ケースでは、水プールのサブクール度が高い場合でも水蒸気爆発の発生は確認されていない。

酸化アルミニウムと鉄の溶融物の実験では、溶融物の重量が 20kg、雰囲気圧力が 0.1 MPa で、サブクール度が 73~90 K において実施されたケース(ケース 2, 3, 5, 9, 17, 18)において水蒸気爆発が発生している。溶融物量を半減させたケース 1, 10, 13 では、ケース 10 のみ水蒸気爆発が確認された。この 3 ケースの条件には有意な差が無いことから、この 3 ケースの条件がこの実験体系における水蒸気爆発の発生の有無の境界近傍であること及びこの結果からは、溶融物の落下量が多い場合に水蒸気爆発が発生し易いことが示されている。水プールを飽和水としたケース 14 では水蒸気爆発は観測されなかった。一方、ケース 8, 12, 15, 25 は雰囲気圧力を 0.5~1.6 MPa の範囲で変化させているが、最も低い

0.5 MPa のケースのみ水蒸気爆発が観測された。

以上の結果から、高雰囲気圧力あるいは低サブクール水の場合に水蒸気爆発発生が抑制される傾向があることが示されている。

ケース 6, 11, 19, 20, 21 は、溶融物を分散させ複数のジェットを形成させたケースであるが、3 ケースで水蒸気爆発が観測されたが、水蒸気爆発の規模は抑制される場合と増大される場合があり、溶融物と冷却水の粗混合状態が FCI の進展に大きな影響を及ぼすことを示していると結論付けられている。

3. 知見のまとめ

上記で示した主な実験結果をまとめると以下のとおりとなる。

- ・ UO_2 を用いた実験では、水蒸気爆発は確認されていない。(FARO 実験、COTELS 実験)
- ・ 高圧力条件、または、低サブクール水条件は、水蒸気爆発を抑制する傾向がある(ALPHA 試験)
- ・ 粒子化割合は、サブクール度に依存し、サブクール度が大きいと粒子化割合は高くなる(FARO 実験)
- ・ 粒子化割合は、デブリ落下速度に依存し、落下速度が大きいと粒子化が促進される(COTELS 実験)
- ・ デブリ落下後の水プールが高ボイド率状態になると、トリガの伝播を阻害する可能性がある(KROTOS 実験)
- ・ 溶融物と水の粗混合状態が、FCI の進展に大きな影響を及ぼす(ALPHA 実験)

BWR 体系に対して、上記の実験結果を踏まえた分析結果を表 3.1 に示す。実験結果からは、水蒸気爆発の発生は不確実さが大きいと考えられるものの、BWR 体系では炉内における水蒸気爆発は発生しにくいと考えられることが分かる。

また、BWR において炉内での自発的水蒸気爆発(外部トリガ無しの状態での水蒸気爆発)が発生しにくい理由として、BWR の炉内の水が低サブクール(飽和水に近い状態)であり、低サブクールであれば溶融炉心を覆う蒸気膜が凝縮効果によって崩壊する可能性が低いことから、蒸気膜の安定性が高く、蒸気膜の崩壊(トリガリング)が生じにくいことが挙げられている。^[1]

炉内 FCI の発生確率低減に対する炉心下部の構造物の効果として考慮される事項としては、以下の事項が考えられる。また、溶融炉心の流路を図 3.1 に示す。

- ・ 水蒸気爆発に寄与する溶融炉心の質量が限られること。

炉心下部の構造物によって、溶融炉心の流路が阻害され、一度に炉水中に落下する溶融炉心の質量が限定(炉水中に移行する溶融炉心のエネルギーが抑制される。)されることにより、水蒸気爆発を仮定してもそのエネルギーが低く抑えられると考えられる。

- ・ 溶融炉心の落下速度が抑えられること。

溶融炉心の落下速度が大きい場合、粗混合時の粒径が小さくなることが報告されている。炉心下部の構造物によって、溶融炉心の落下速度が抑制されれば、粗混合時の粒径が大きくなり、溶融炉心の表面積が小さくなることから、蒸気膜の表面積も小さくなり、トリガリング発生の可能性が小さくなると考えられる。

4. 専門家会議等の知見^[2]

BWR の炉内 FCI の発生確率に関して、専門家の中で議論がなされており、その結果を表 4.1 に示す。

専門家の間での議論の結果として、BWR 体系では下部プレナムに制御棒案内管等が密に存在しており、これらはデブリ落下時の粗混合を制限すると考えられるため、水蒸気爆発の発生確率はプラント全体で見た際に他の要因による格納容器破損頻度に比べて十分小さく無視出来ると結論付けられている。

5. まとめ

これまでに実施された各種実験結果および専門家による工学的判断の結果から、BWR 体系における炉内 FCI 発生の可能性は十分小さいと考えられる。

したがって、BWR における格納容器破損モードとして、炉内 FCI の考慮は不要である。

6. 参考文献

- [1] 社団法人日本原子力学会「シビアアクシデント熱流動現象評価」平成 12 年 3 月
- [2] 財団法人原子力安全研究協会「シビアアクシデント対策評価のための格納容器イベントツリーに関する検討」平成 13 年 7 月

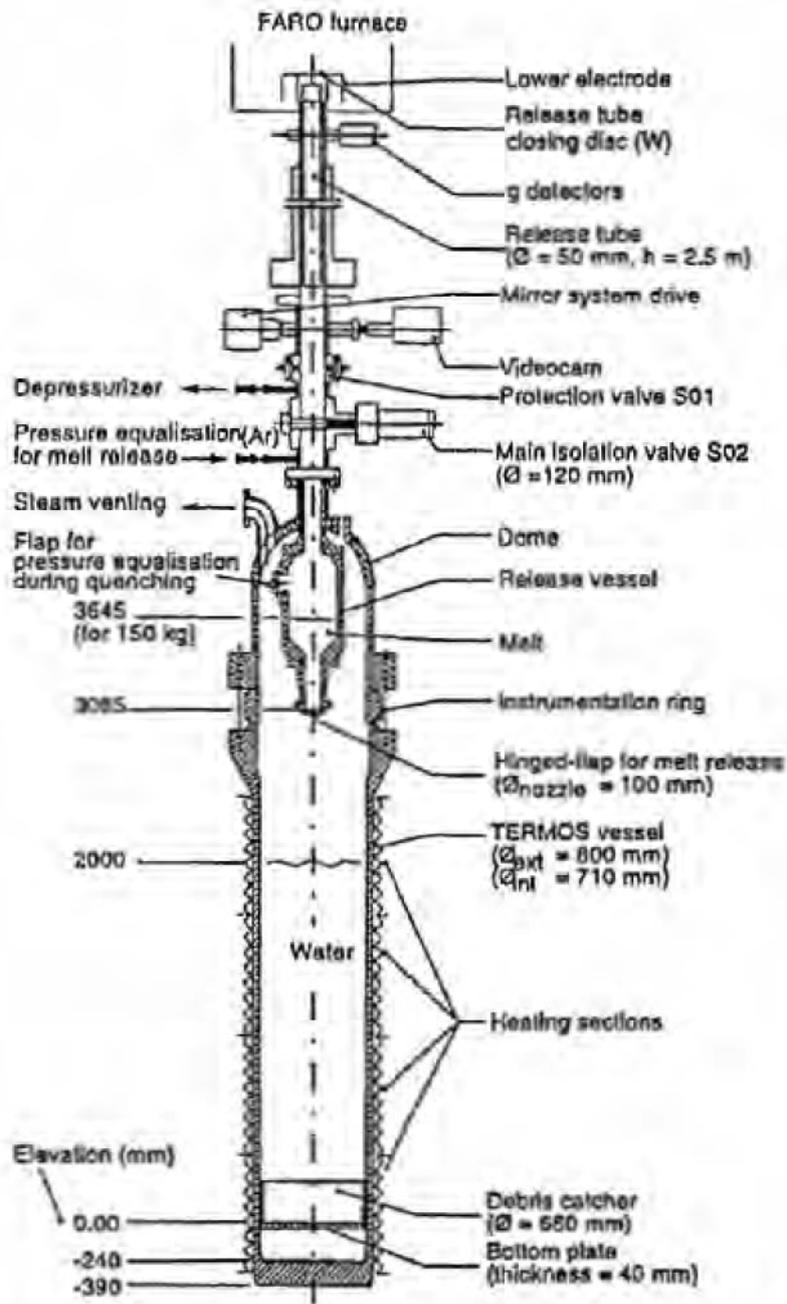


図 2.1 FARO 試験装置

表 2.1 FARO 試験の試験条件及び FCI 発生の有無

| No. | 溶融 コリウム ※ | 溶融物質 質量 [kg] | 溶融物温度 [K] | 溶融物落下 粒径[mm] | 雰囲気圧力 [MPa] | 水深[m] | サブクール度 [K] | FCI発生の 有無 |
|------|-----------------|--------------------|--------------|-----------------|----------------|-------|---------------|--------------|
| L-06 | A | 18 | 2923 | 100 | 5.0 | 0.87 | 0 | 無 |
| L-08 | A | 44 | 3023 | 100 | 5.8 | 1.00 | 12 | 無 |
| L-11 | B | 151 | 2823 | 100 | 5.0 | 2.00 | 2 | 無 |
| L-14 | A | 125 | 3123 | 100 | 5.0 | 2.05 | 0 | 無 |
| L-19 | A | 157 | 3073 | 100 | 5.0 | 1.10 | 1 | 無 |
| L-20 | A | 96 | 3173 | 100 | 2.0 | 1.97 | 0 | 無 |
| L-24 | A | 177 | 3023 | 100 | 0.5 | 2.02 | 0 | 無 |
| L-27 | A | 129 | 3023 | 100 | 0.5 | 1.47 | 1 | 無 |
| L-28 | A | 175 | 3052 | 100 | 0.5 | 1.44 | 1 | 無 |
| L-29 | A | 39 | 3070 | 100 | 0.2 | 1.48 | 97 | 無 |
| L-31 | A | 92 | 2990 | 100 | 0.2 | 1.45 | 104 | 無 |
| L-33 | A | 100 | 3070 | 100 | 0.4 | 1.60 | 124 | 無 |

※ A: 80wt% UO₂+20wt% ZrO₂

B: 77wt% UO₂+19wt% ZrO₂+4wt% Zr

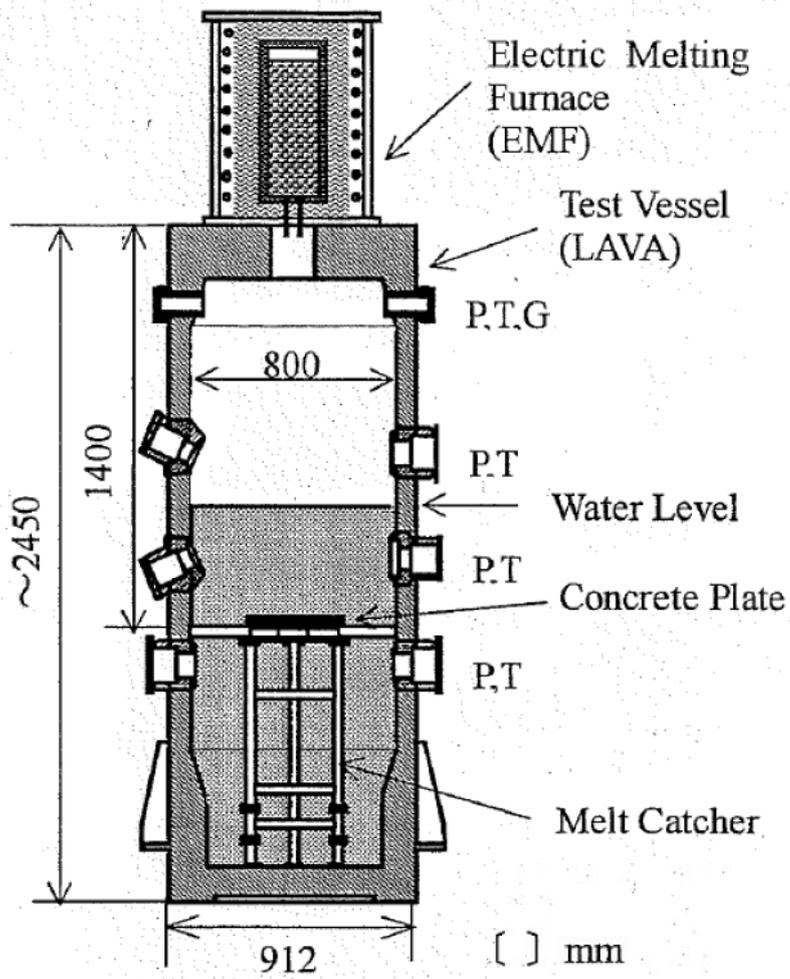


図 2.2 COTELS 試験装置

表 2.2 COTELS 試験の試験条件及び FCI 発生の有無発生の有無

| No. | 溶融 コリウム ※ | 溶融物質 質量 [kg] | 雰囲気圧力 [MPa] | 水深[m] | サブクール度 [K] | FCI発生の 有無 |
|-----|-----------------|--------------------|----------------|-------|---------------|--------------|
| A1 | C | 56.3 | 0.20 | 0.4 | 0 | 無 |
| A4 | C | 27.0 | 0.30 | 0.4 | 8 | 無 |
| A5 | C | 55.4 | 0.25 | 0.4 | 12 | 無 |
| A6 | C | 53.1 | 0.21 | 0.4 | 21 | 無 |
| A8 | C | 47.7 | 0.45 | 0.4 | 24 | 無 |
| A9 | C | 57.1 | 0.21 | 0.9 | 0 | 無 |
| A10 | C | 55.0 | 0.47 | 0.4 | 21 | 無 |
| A11 | C | 53.0 | 0.27 | 0.8 | 86 | 無 |

※ C: 55wt% UO₂+5wt% ZrO₂+25wt% Zr+15wt% SUS

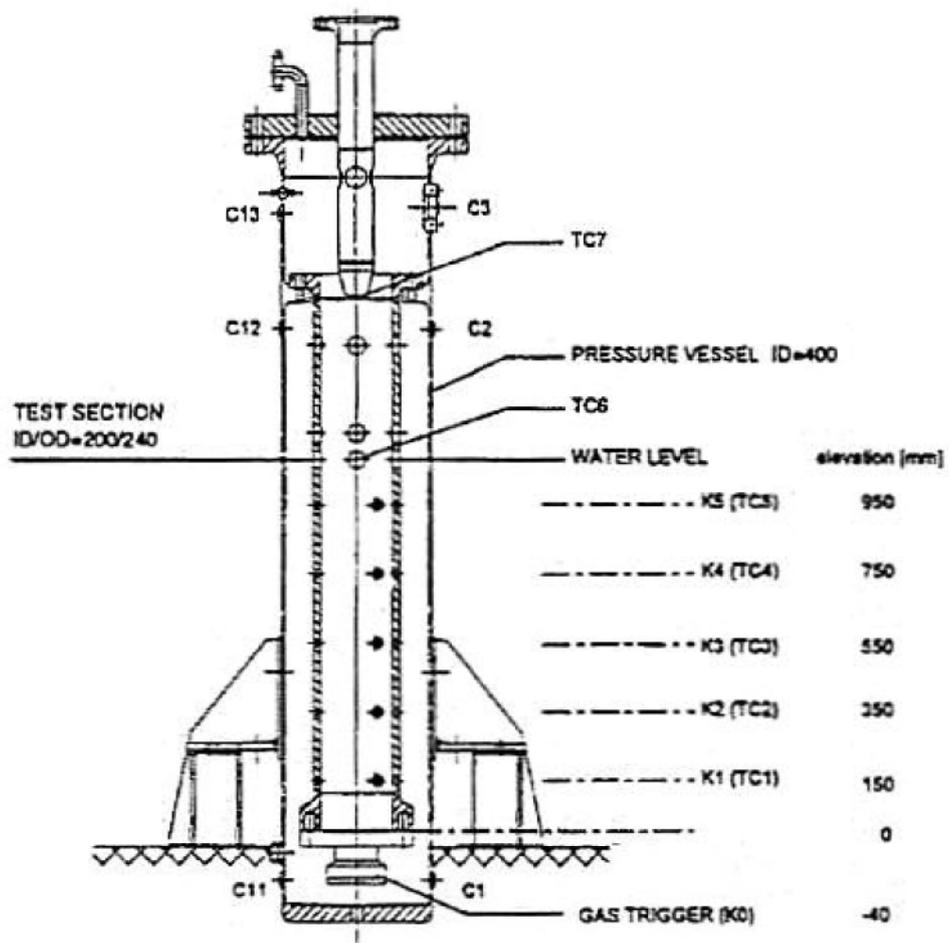


図 2.3 KROTOS 試験装置

表 2.3 KROTOS 試験の試験条件及び FCI 発生の有無

| No. | 溶融 コリウム | 溶融物質量 [kg] | 溶融物温度 [K] | 雰囲気圧力 [MPa] | 水深[m] | サブクール度 [K] | 外部トリガ の有無 | FCI発生の 有無 |
|-----|------------|---------------|--------------|----------------|-------|---------------|--------------|--------------|
| 38 | アルミナ | 1.53 | 2665 | 0.10 | 1.11 | 79 | 無 | 有 |
| 40 | アルミナ | 1.47 | 3073 | 0.10 | 1.11 | 83 | 無 | 有 |
| 41 | アルミナ | 1.43 | 3073 | 0.10 | 1.11 | 5 | 無 | 無 |
| 42 | アルミナ | 1.54 | 2465 | 0.10 | 1.11 | 80 | 無 | 有 |
| 43 | アルミナ | 1.50 | 2625 | 0.21 | 1.11 | 100 | 無 | 有 |
| 44 | アルミナ | 1.50 | 2673 | 0.10 | 1.11 | 10 | 有 | 有 |
| 49 | アルミナ | 1.47 | 2688 | 0.37 | 1.11 | 120 | 無 | 有 |
| 50 | アルミナ | 1.70 | 2473 | 0.10 | 1.11 | 13 | 無 | 無 |
| 51 | アルミナ | 1.79 | 2748 | 0.10 | 1.11 | 5 | 無 | 無 |
| 37 | コリウム※ | 3.22 | 3018 | 0.10 | 1.11 | 77 | 有 | 無 |
| 45 | コリウム※ | 3.09 | 3106 | 0.10 | 1.14 | 4 | 有 | 無 |
| 47 | コリウム※ | 5.43 | 3023 | 0.10 | 1.11 | 82 | 有 | 無 |
| 52 | コリウム※ | 2.62 | 3023 | 0.20 | 1.11 | 102 | 有 | 有 |

※ コリウム：80% UO₂+20% ZrO₂

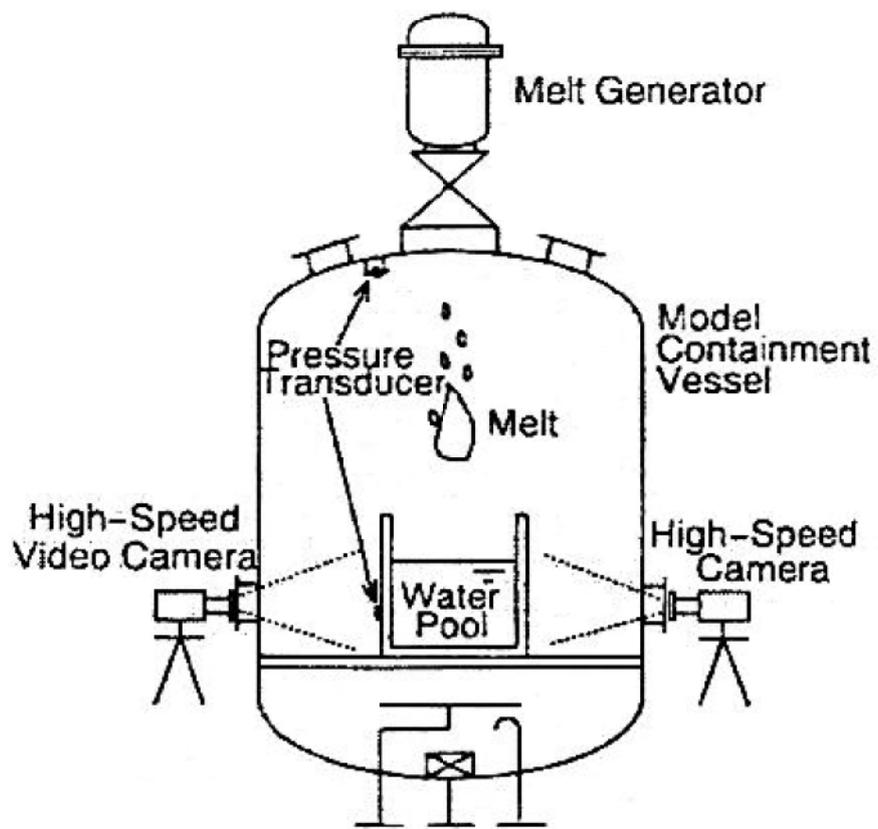


圖 2.4 ALPHA 試驗裝置

表 2.4 ALPHA 試験の試験条件及び FCI 発生の有無

| No. | 溶融 コリウム | 溶融物質 質量 [kg] | 溶融物温度 [K] | 雰囲気圧力 [MPa] | 水深[m] | サブクール度 [K] | FCI発生の 有無 |
|-----|------------|--------------------|--------------|----------------|-------|---------------|--------------|
| 1 | Fe+アルミナ | 10 | 2723 | 0.1 | 1.0 | 80 | 無 |
| 2 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 0.1 | 1.0 | 84 | 有 |
| 3 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 0.1 | 1.0 | 81 | 有 |
| 5 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 0.1 | 1.0 | 73 | 有 |
| 6 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 0.1 | 1.0 | 75 | 有 |
| 8 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 1.6 | 1.0 | 186 | 無 |
| 9 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 0.1 | 1.0 | 84 | 有 |
| 10 | Fe+アルミナ | 10 | 2723 | 0.1 | 1.0 | 80 | 有 |
| 11 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 0.1 | 1.0 | 83 | 有 |
| 12 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 1.6 | 1.0 | 184 | 無 |
| 13 | Fe+アルミナ | 10 | 2723 | 0.1 | 1.0 | 76 | 無 |
| 14 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 0.1 | 1.0 | 1 | 無 |
| 15 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 1.0 | 1.0 | 171 | 無 |
| 16 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 0.1 | 0.9 | 78 | 有 |
| 17 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 0.1 | 0.9 | 87 | 有 |
| 18 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 0.1 | 0.9 | 90 | 有 |
| 19 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 0.1 | 0.9 | 92 | 有 |
| 20 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 0.1 | 1.0 | 92 | 無 |
| 21 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 0.1 | 0.9 | 92 | 有 |
| 22 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 0.1 | 0.8 | 87 | 無 |
| 23 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 0.1 | 0.3 | 140 | 有 |
| 24 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 0.1 | 0.8 | 145 | 有 |
| 25 | Fe+アルミナ | 20 | 2723 | 0.5 | 0.9 | 145 | 有 |

表 3.1 BWR 体系を踏まえた炉内 FCI 発生の整理

| BWR 体系 | FCI 発生への影響 | 備考 |
|-------------------------|---|---|
| 下部プレナム残存水はおおよそ飽和温度 | <ul style="list-style-type: none"> 飽和温度に近いため粒子化割合が少なくなることから、初期粗混合が抑制されることが推測され、FCI 発生は阻害される可能性が考えられる。 飽和温度に違いことからデブリ落下のボイド発生が多くなり、トリガが発生した場合の伝播が妨げられ、FCI 発生は阻害される可能性が考えられる。 | <ul style="list-style-type: none"> FARO 実験 KROTOS 実験 |
| 下部プレナムに残存する水量は少量 | <ul style="list-style-type: none"> 水量が少ないことから熱容量が小さく、デブリ落下時のボイド発生が多くなり、トリガが発生した場合の伝播が妨げられ、FCI 発生は阻害される可能性が考えられる。 | <ul style="list-style-type: none"> KROTOS 実験 |
| プール水面衝突時のデブリ落下速度は比較的遅い | <ul style="list-style-type: none"> 落下速度が遅いためデブリの粒子化割合が少なくなることから、初期粗混合が抑制されることが推測され、FCI 発生は阻害される可能性が考えられる。 | <ul style="list-style-type: none"> COTELS 実験 |
| デブリ落下は単一ジェットではなく、複数ジェット | <ul style="list-style-type: none"> 複数ジェットのため初期のデブリ落下量が多く、ボイド発生が多くなり、トリガが発生した場合の伝播が妨げられ、FCI 発生は阻害される可能性が考えられる。 複数ジェットにより粗混合状態が促進される状態となった場合は、FCI 発生を促進される可能性が考えられる。 | <ul style="list-style-type: none"> KROTOS 実験 ALPHA 実験 |

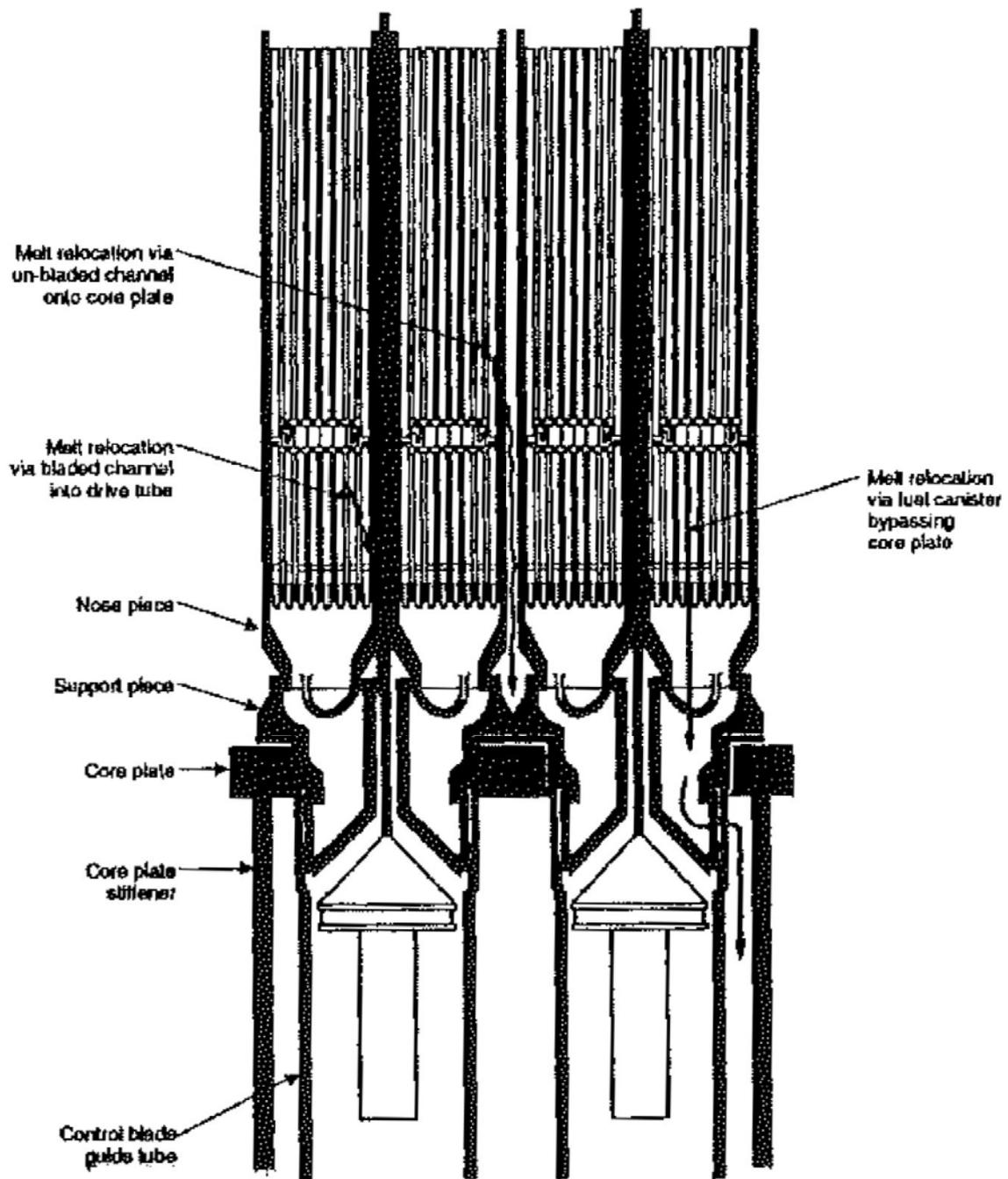


図 3.1 BWR における溶融炉心の流路^[1]

表 4.1 BWR 体系における炉内 FCI 現象の発生確率に関する議論の整理

| 著者 | 会議／文献 | 議論 |
|-----------------------|--|---|
| Okkonen 等 (1993) | OECD/CSNI FCI 専門家会議 (1993) NUREG/CP-0127 | BWR の圧力容器下部プレナムは、制御棒案内管で密に占められている。そして、炉心の広い範囲でのコヒーレントなリロケーションは、炉心支持板があるため起こりにくそうである。これらの特徴は、燃料-冷却材の粗混合のポテンシャルを制限し、水蒸気爆発に起因する水-熔融物スラグの運動エネルギーを消失させる可能性がある。従って、スラグにより破壊された圧力容器ヘッドのミサイルに伴う格納容器破損は、PWR を対象とした研究よりも BWR の方が起こりにくいと評価される。 |
| Theofanous 等(1994) | NUREG/CR-5960 | 下部プレナムには、密に詰められた制御棒案内管があるため、BWR は炉内水蒸気爆発問題の対象とならない。 |
| Corradini (1996) | SERG-2 ワークシ ョップ(1996) NUREG-1524 | 物理的なジオメトリは爆発的事象の発生に貢献しないため、BWR の α モード格納容器破損確率は、おそらく PWR より小さい。 |
| Zuchuat 等 (1997) | OECD/CSNI FCI 専門家会議 (1997) JAERI-Conf 97-011 | 下部プレナム構造物の存在は、水蒸気爆発の影響を緩和する。 一般に、BWR の現在の知見は、炉内水蒸気爆発は格納容器への脅威とならないということである。 (NUREG/CR-5960 を参考文献としている) |

「水素燃焼」及び「溶融物直接接触(シェルアタック)」を
格納容器破損モードの評価対象から除外する理由

「実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器(PCV)破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド」(有効性評価ガイド)では、必ず想定するPCV破損モードの1つとして水素燃焼及び格納容器直接接触(シェルアタック)が挙げられている。

一方、有効性評価ガイドに基づき、格納容器破損モード抽出のための個別プラント評価として実施した、KK6/7号機(ABWR)の内部事象運転時レベル1.5PRAでは、水素燃焼及び格納容器直接接触(シェルアタック)をPCV破損モードの評価対象から除外している。以下に、除外理由の詳細を示す。

○「水素燃焼」の除外理由

有効性評価ガイドにおける、「水素燃焼」の現象の概要は以下の通りである。

原子炉格納容器内に酸素等の反応性のガスが混在していると、水-ジルコニウム反応等によって発生した水素と反応することによって激しい燃焼が生じ、原子炉格納容器が破損する場合がある。

・炉心損傷に伴うPCV内の気体の組成及び存在割合の変化

KK6/7(ABWR)では、運転中はPCV内を常時窒素で置換しており、酸素の濃度は3.5%以下に管理されている。一般に可燃限界とされている濃度は、水素が4%以上かつ酸素が5%以上の場合である。

水-ジルコニウム反応の程度や水蒸気等他の気体の存在割合にも依るが、燃料温度の著しい上昇に伴って水-ジルコニウム反応が生じる状況になれば、水素濃度は4%をほぼ上回る。

一方酸素は、事象発生前からPCV内に存在している量の他には水の放射線分解によって生じるのみである。このため、炉心損傷後のPCV内での水素燃焼の発生を考慮する際には、酸素濃度に着目する必要がある。なお、水の放射線分解による酸素濃度の上昇に対して保守的なシナリオで評価しても、事象発生から7日以内に酸素濃度が5%を超えることは無い。

・内部事象運転時レベル1.5PRAの格納容器破損モードから除外する理由

内部事象運転時レベル1.5PRAにおいて、仮にイベントツリーに水素燃焼に関するヘディングを設けたとしても、上記の通り、7日以内に酸素濃度が5%を超えることは無く、また、7日以上PCVの機能を維持(破損を防止)

しながら酸素濃度の上昇については何も対応しない状況は考え難いことを考えると、水素燃焼に関するヘディングの分岐確率は0となる。

内部事象運転時レベル 1.5PRA は、格納容器破損のシーケンスに加えて格納容器破損頻度(CFF)を求める評価であることから、発生する状況が想定されない水素燃焼を評価対象とすることは適切でないと考える。

上記の理由により、水素燃焼は内部事象運転時レベル 1.5PRA の対象から除外した。但し、有効性評価においては、酸素濃度の観点で最も厳しいシナリオを考慮し、可燃限界に至らないことを示している。

なお、PCV 外部からの空気の流入によって酸素濃度が上昇する場合には、既に PCV の隔離機能が失われている状況であるため、内部事象運転時レベル 1.5PRA の対象外となる。

○「溶融物直接接触(シェルアタック)」の除外理由

有効性評価ガイドにおける、「溶融物直接接触(シェルアタック)」の現象の概要は以下の通りである。

原子炉圧力容器内の溶融炉心が原子炉格納容器内の床上へ流れ出す時に、溶融炉心が床面で拡がり原子炉格納容器の壁に接触することによって原子炉格納容器が破損する場合がある。

・シェルアタックについて

シェルアタックについては、NUREG/CR-6025⁴⁾において、BWR MARK I 型 PCV に対する検討が実施されている。BWR MARK I 型 PCV におけるシェルアタックのメカニズムは次の通り。

炉心損傷後、原子炉圧力容器底部から流出した溶融炉心はペDESTAL 部に落下する。この時、BWR MARK I 型 PCV はペDESTAL 部に切れ込み(図 1)があるため、溶融炉心がペDESTAL 床面に広がった場合、溶融炉心が切れ込みからペDESTAL 部の外側に流出して PCV の壁面(金属製のライナー部分)に接触する可能性(図 2)がある。

この事象は、PCV の構造上、BWR MARK I 型 PCV 特有である。

・内部事象運転時レベル 1.5PRA の格納容器破損モードから除外する理由

KK6/7(ABWR)の RCCV 型 PCV のペDESTAL の側面は、二重の円筒鋼板内部にコンクリートを充填した壁で囲まれており、BWR MARK I 型 PCV の様な切れ込みを持たない構造(図 3, 4)であるため、溶融炉心がペDESTAL 床面で広がった場合でも、ペDESTAL 外側へ溶融炉心が流れ出ることは無い。この様に、ABWR では構造的に発生しない PCV 破損モードであるこ

とから、内部事象運転時レベル 1.5PRA の対象から除外した。なお、同様の理由により、有効性評価の対象からも除外している。

以 上

参考文献

- [1] NUREG/CR-6025, The Provability of Mark-I Containment Failure by Melt-Attack of the Liner, U.S. Nuclear Regulatory Commission (1993)

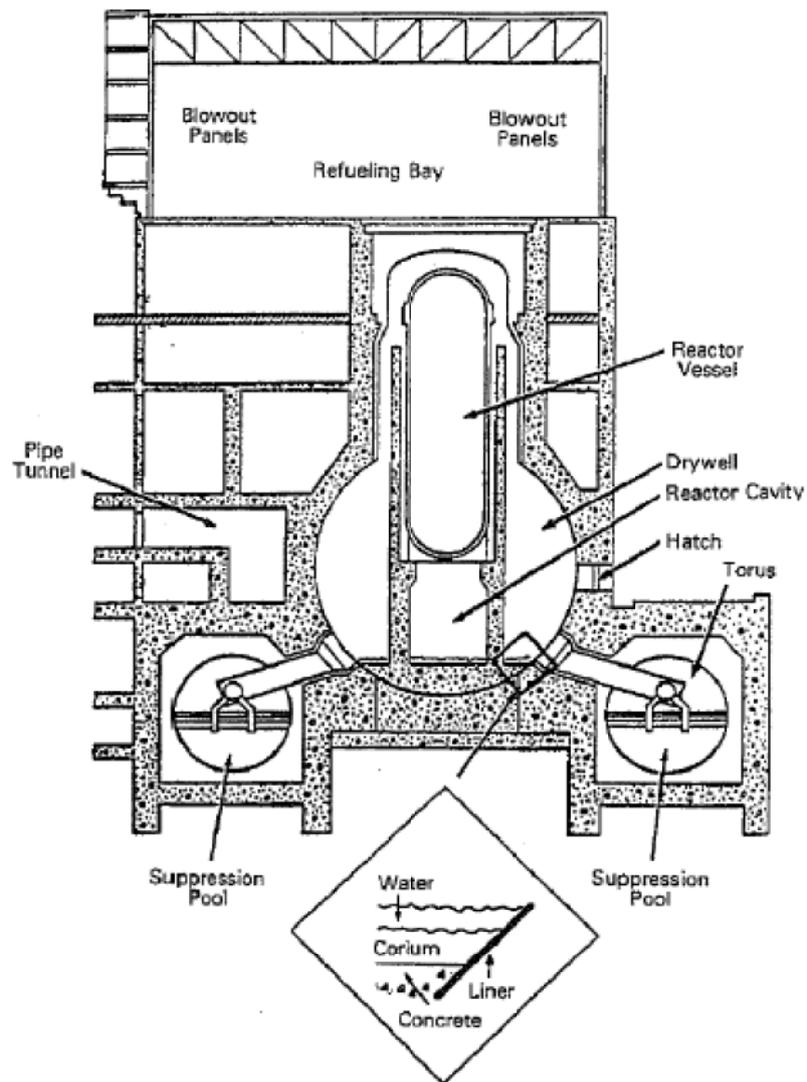


図 1 BWR MARK I 型 PCV におけるシェルアタックのイメージ(側面図)^[1]

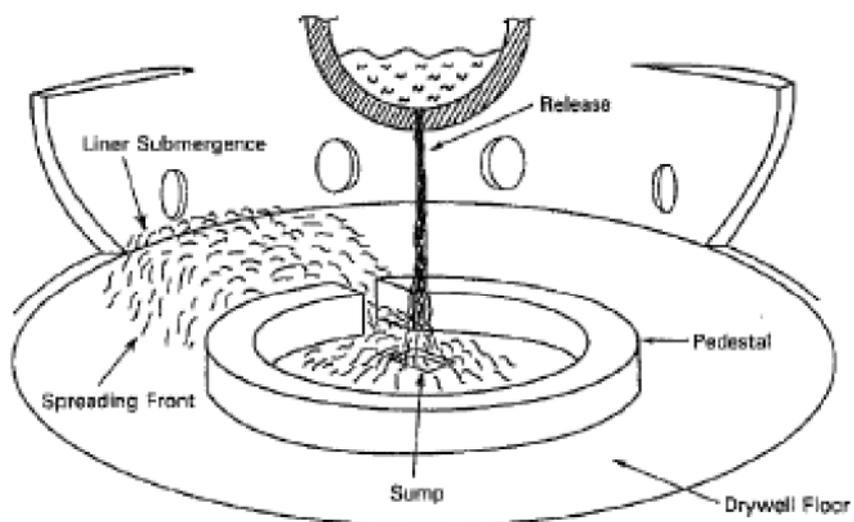


図 2 BWR MARK I 型 PCV における溶融炉心のペDESTAL外側への流出のイメージ^[1]



図 3 RCCV 型格納容器の構造

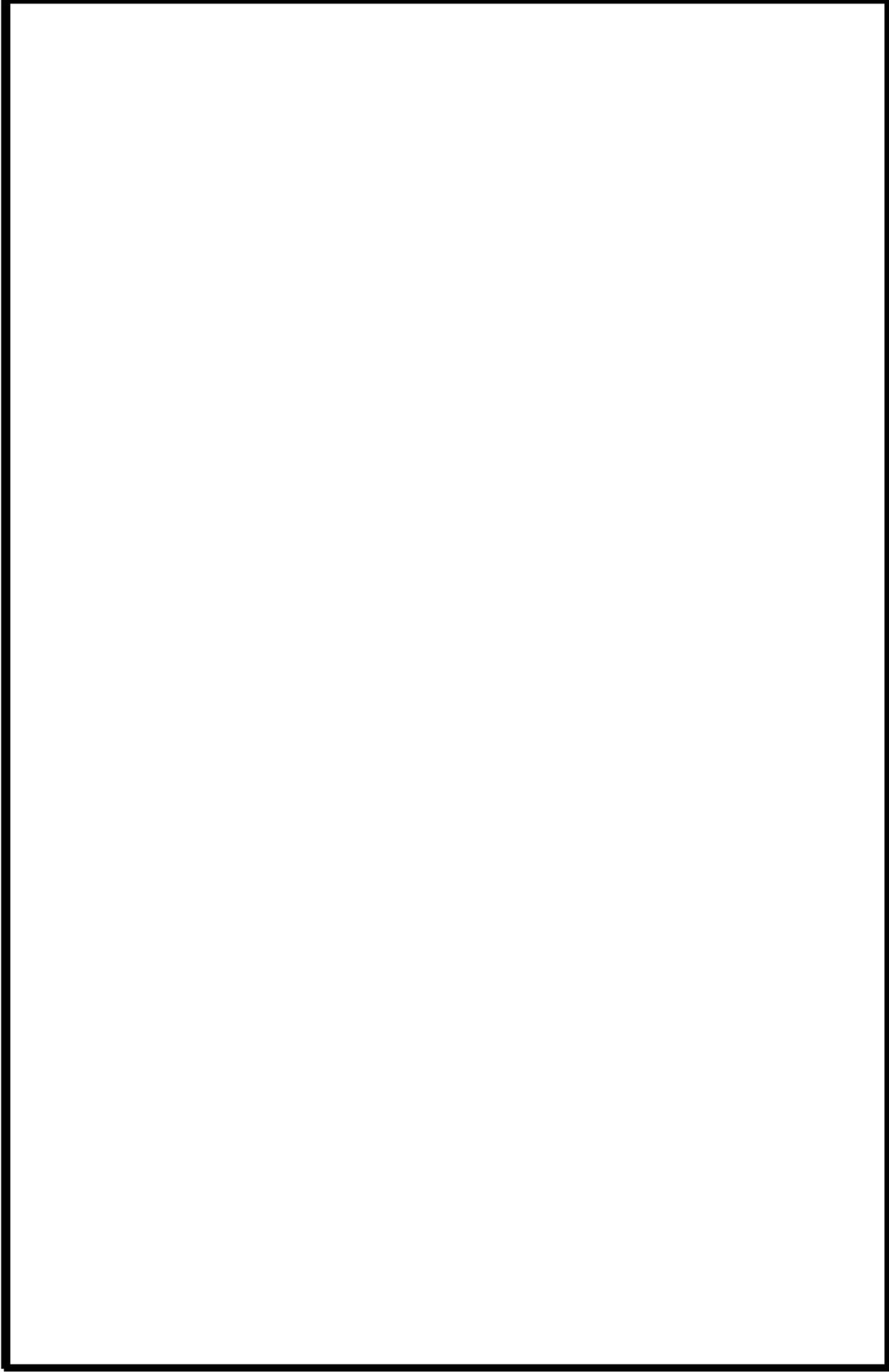


図 4 RCCV 型格納容器のペデスタル部内筒展開図(ペデスタルの内側から見た図)

柏崎刈羽原子力発電所 6 号機及び 7 号機
内の事象出力運転時レベル 1.5PRA イベントツリー集

目 次

1. TQUX P2 ～ P6
2. TQUV P7 ～ P8
3. LOCA P9 ～ P10
4. TBD P11 ～ P12
5. TBU P13 ～ P18
6. TBP P19 ～ P23
7. 長期TB P24 ～ P26

○格納容器イベントツリーの最終状態について

各格納容器イベントツリーの最終状態には、以下の格納容器破損モードの ID を割り付けた。なお、格納容器の健全性が維持される事故シーケンス（圧力容器内で事故収束、格納容器内で事故収束）についても PCV 破損モードの ID を割り付けた。また、一部の ID には、DW、SP という ID が末尾に追加されているが、これはソースターム評価用に設定しているものであり、レベル 1.5 の評価では考慮不要である。

OKV：RPV 内で事象収束

OKP：PCV 内で事象収束

FOP：過圧破損

FOT：過温破損

FPE：水蒸気爆発（FCI）

FCCI：コア・コンクリート反応継続（MCCI）

FDCH：格納容器雰囲気直接加熱（DCH）

PBYP：PCV 隔離失敗

ET名称：TQUX.et//TQUX(*1)

| プラント 損傷状態 TQUX | PCV隔離 | 原子炉減 圧 | 損傷炉心 注水 | RPV破損 なし(IVR) | 下部D/W 事前水張 り | RPV破損 時水蒸気 爆発なし | DCHIによ るPCV破 損なし | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------------|-------|-----------|------------|------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|-------|-----------------------|---------------|------|
| TQUX | CIS | CX | CV | IVR | CLD1 | FCIR | DCH | | | | |
| | | | | | | | | 6-8 | TQUX.et//T3A(*1)(*1)~ | | |
| | | | | | | | | 9-16 | TQUX.et//T3B(*1)(*1)~ | | |
| | | | | | | | | 17 | FPE | | |
| | | | | | | | | 18-25 | TQUX.et//T3B(*2)(*1)~ | | |
| | | | | | | | | 26-33 | TQUX.et//T3B(*3)(*1)~ | | |
| | | | | | | | | 34 | FDCH | | |
| | | | | | | | | 35 | PBYP | | |

[Redacted]

ET名称：TQUX.et//T3A(*1)(*1)

| T1/T2の 後継事象 | 上部D/W スプレイ (RHR) | PCVベン ト | PCV破損 箇所 | 建屋トップ ベント | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------|------------------------|------------|-------------|--------------|-----|-------|---------------|------|
| T3A | CUDR | CWD | HASON | TOPVENT | 6 | OKV | | |
| | | | | | 7 | FOPDW | | |
| | | | | | 8 | FOPSP | | |

ET名称 : TQUX.et//T3B(*1)(*1)

| T1/T2の 後続事象 | 下部D/W 注水(代 替注水) | 下部D/W 注水 (RPV破 損口) | 上部D/W スプレイ (RHR) | PCV注水 時水蒸気 爆発なし | デブリ冷 却(事前 水張り失 敗時) | PCVベン ト | PCV破損 箇所 | 建屋トップ ベント | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------|-------------|--------------|-----|-------|---------------|------|
| T3B | CLD2ALT | CLD2R | CUDR | FCIP | MCCII | CWD | HASON | TOPVENT | | | | |
| | | | | | | | | | 9 | OKP | | |
| | | | | | | | | | 10 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | 11 | FPE | | |
| | | | | | | | | | 12 | FOPDW | | |
| | | | | | | | | | 13 | FOPSP | | |
| | | | | | | | | | 14 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | 15 | FPE | | |
| | | | | | | | | | 16 | FOT | | |

ET名称：TQUX.et//T3B(*2)(*1)

| T1/T2の 後続事象 | 下部D/W 注水(代 替注水) | 下部D/W 注水 (RPV破 損口) | 上部D/W スプレイ (RHR) | PCV注水 時水蒸気 爆発なし | デブリ冷 却(事前 水張り失 敗時) | PCVベン ト | PCV破損 箇所 | 建屋トップ ベント | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------|-------------|--------------|-----|-------|---------------|------|
| T3B | CLD2ALTI | CLD2R | CUDR | FCIP | MCCI1 | CWD | HASON | TOPVENT | | | | |
| | | | | | | | | | 18 | OKP | | |
| | | | | | | | | | 19 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | 20 | FPE | | |
| | | | | | | | | | 21 | FOPDW | | |
| | | | | | | | | | 22 | FOPSP | | |
| | | | | | | | | | 23 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | 24 | FPE | | |
| | | | | | | | | | 25 | FOT | | |

ET名称 : TQUX.et//T3B(*3)(*1)

| T1/T2の 後続事象 | 下部D/W 注水(代 替注水) | 下部D/W 注水 (RPV破 損口) | 上部D/W スプレイ (RHR) | PCV注水 時水蒸気 爆発なし | デブリ冷 却(事前 水張り失 敗時) | PCVペン ト | PCV破損 箇所 | 建屋トップ ベント | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------|-------------|--------------|-----|-------|---------------|------|
| T3B | CLD2ALT | CLD2R | CUDR | FCIP | MCCI1 | CWD | HASON | TOPVENT | | | | |
| | | | | | | | | | 26 | OKP | | |
| | | | | | | | | | 27 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | 28 | FPE | | |
| | | | | | | | | | 29 | FOPDW | | |
| | | | | | | | | | 30 | FOPSP | | |
| | | | | | | | | | 31 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | 32 | FPE | | |
| | | | | | | | | | 33 | FOT | | |

ET名称：TQUV.et//TQUV(*1)

| プラント 損傷状態 TQUV | PCV隔離 | 下部D/W 事前水張り | RPV破損 時水蒸気 爆発なし | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------------|-------|----------------|-----------------------|--------------|-------------------------------|---------------|------|
| TQUV | CIS | CLD1 | FCIR | 8 - 15 16 | TQUV.et//T3B(*1)(*1)へ PBYP | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |

ET名称 : TQUV.et//T3B(*1)(*1)

| T1/T2の 後続事象 | 下部D/W 注水(代 替注水) | 下部D/W 注水 (RPV破 損口) | 上部D/W スプレイ (RHR) | PCV注水 時水蒸気 爆発なし | デブリ冷 却(事前 水張り失 敗時) | PCVベン ト | PCV破損 箇所 | 建屋トップ ベント | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------|-------------|--------------|-----|-------|---------------|------|
| T3B | CLD2ALT | CLD2R | CUDR | FCIP | MCCII | GWD | HASON | TOPVENT | | | | |
| | | | | | | | | | 8 | OKP | | |
| | | | | | | | | | 9 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | 10 | FPE | | |
| | | | | | | | | | 11 | FOPDW | | |
| | | | | | | | | | 12 | FOPSP | | |
| | | | | | | | | | 13 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | 14 | FPE | | |
| | | | | | | | | | 15 | FOT | | |

ET名称 : LOCA.et//LOCA(*1)

| プラント 損傷状態 LOCA | PCV隔離 CIS | 損傷炉心 注水(代 替注水) CV | RPV破損 なし(IVR) IVR | 下部D/W 事前水張 り CLD1 | RPV破損 時水蒸気 爆発なし FCIR | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------------|--------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------------|--------|-----------------------|---------------|------|
| | | | | | | 6 - 13 | LOCA.et//T3B(*2)(*1)へ | | |
| | | | | | | 14 | FPE | | |
| | | | | | | 15 | PBYP | | |

ET名称 : LOCA.et//T3B(*2)(*1)

| T1/T2の 後続事象 | 下部D/W 注水(代 替注水) | 下部D/W 注水 (RPV破 損口) | 上部D/W スプレイ (RHR) | PCV注水 時水蒸気 爆発なし | デブリ冷 却(事前 水張り失 敗時) | PCVベン ト | PCV破損 箇所 | 建屋トップ ベント | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------|-------------|--------------|-----|-------|---------------|------|
| T3B | CLD2ALT | CLD2R | CUDR | FCIP | MCCII | CWD | HASON | TOPVENT | | | | |
| | | | | | | | | | 6 | OKP | | |
| | | | | | | | | | 7 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | 8 | FPE | | |
| | | | | | | | | | 9 | FOPDW | | |
| | | | | | | | | | 10 | FOPSP | | |
| | | | | | | | | | 11 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | 12 | FPE | | |
| | | | | | | | | | 13 | FOT | | |

ET名称：TBD.et//TBD(*1)

| プラント損傷状態 TBD | PCV隔離 | DC電源復旧(RPV破損前) | 原子炉減圧 | AC電源復旧(RPV破損前) | 損傷炉心注水 | RPV破損なし(IVR) | 下部D/W事前水張り | RPV破損時水蒸気爆發なし | DCHIによるPCV破損なし | No. | 最終状態 | 発生頻度(／炉年) | CCFP |
|-----------------|-------|----------------|-------|----------------|--------|--------------|------------|---------------|----------------|-----|----------------------|-----------|------|
| TBD | CIS | DCRR | CX | ACRR | CV | IVR | CLD1 | FCIR | DCH | | | | |
| | | | | | | | | | | 3 | TBD.et//T3E(*1)(*1)へ | | |
| | | | | | | | | | | 4 | FDCH | | |
| | | | | | | | | | | 5 | PBYP | | |

ET名称：TBD.et//T3E(*1)(*1)

| T1/T2の 後続事象 | DC電源 復旧 (PCV破 損前) | AC電源 復旧 (PCV破 損前) | 下部D/W 注水(代 替注水) | 下部D/W 注水 (RPV破 損口) | 上部D/W スプレイ (RHR) | PCV注水 時水蒸気 爆発なし | デブリ冷 却(事前 水張り失 敗時) | PCVベン ト | PCV破損 箇所 | 建屋トップ ベント | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------|-------------|--------------|-----|------|---------------|------|
| T3E | DCRP | ACRP | CLD2ALT | CLD2R | CUDR | FCIP | MCC11 | CWD | HASON | TOPVENT | 3 | FOT | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |

ET名称：TBU.et//TBU(*1)

| プラント 損傷状態 TBU | PCV隔離 | 原子炉減 圧 | AC電源 復旧 (RPV破 損前) | 損傷炉心 注水 | RPV破損 なし(IVR) | 下部D/W 事前水張 り | RPV破損 時水蒸気 爆発なし | DCHIによ るPCV破 損なし | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|---------------------|-------|-----------|----------------------------|------------|------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|-------|-----------------------|---------------|------|
| TBU | CIS | CX | ACRR | CV | IVR | CLD1 | FCIR | DCH | | | | |
| | | | | | | | | | 7-9 | TBU.et//T3A(*1)(*1)^(| | |
| | | | | | | | | | 10-17 | TBU.et//T3B(*1)(*1)^(| | |
| | | | | | | | | | 18 | FPE | | |
| | | | | | | | | | 19-26 | TBU.et//T3B(*2)(*1)^(| | |
| | | | | | | | | | 27-35 | TBU.et//T3D(*1)(*1)^(| | |
| | | | | | | | | | 36-44 | TBU.et//T3D(*2)(*1)^(| | |
| | | | | | | | | | 45 | FDCH | | |
| | | | | | | | | | 46 | PBYP | | |

[Redacted]

ET名称：TBU.et//T3A(*1)(*1)

| T1/T2の 後継事象 | 上部D/W スプレイ (RHR) | PCVベン ト | PCV破損 箇所 | 建屋トップ ベント | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------|------------------------|------------|-------------|--------------|-----|-------|---------------|------|
| T3A | CUDR | CWD | HASON | TOPVENT | | | | |
| | | | | | 7 | OKV | | |
| | | | | | 8 | FOPDW | | |
| | | | | | 9 | FOPSP | | |

ET名称：TBU.et//T3B(*1)(*1)

| T1/T2の 後続事象 | 下部D/W 注水(代 替注水) | 下部D/W 注水 (RPV破 損口) | 上部D/W スプレイ (RHR) | PCV注水 時水蒸気 爆発なし | デブリ冷 却(事前 水張り失 敗時) | PCVベン ト | PCV破損 箇所 | 建屋トップ ベント | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------|-------------|--------------|-----|-------|---------------|------|
| T3B | CLD2ALT | CLD2R | CUDR | FCIP | MCCII | CWD | HASON | TOPVENT | | | | |
| | | | | | | | | | 10 | OKP | | |
| | | | | | | | | | 11 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | 12 | FPE | | |
| | | | | | | | | | 13 | FOPDW | | |
| | | | | | | | | | 14 | FOPSP | | |
| | | | | | | | | | 15 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | 16 | FPE | | |
| | | | | | | | | | 17 | FOT | | |

ET名称 : TBU.et//T3B(*2)(*1)

| T1/T2の 後続事象 | 下部D/W 注水(代 替注水) | 下部D/W 注水 (RPV破 損口) | 上部D/W スプレイ (RHR) | PCV注水 時水蒸気 爆発なし | デブリ冷 却(事前 水張り失 敗時) | PCVベン ト | PCV破損 箇所 | 建屋トップ ベント | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------|-------------|--------------|-----|-------|---------------|------|
| T3B | CLD2ALT | CLD2R | CUDR | FCIP | MCCI1 | CWD | HASON | TOPVENT | | | | |
| | | | | | | | | | 19 | OKP | | |
| | | | | | | | | | 20 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | 21 | FPE | | |
| | | | | | | | | | 22 | FOPDW | | |
| | | | | | | | | | 23 | FOPSP | | |
| | | | | | | | | | 24 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | 25 | FPE | | |
| | | | | | | | | | 26 | FOT | | |

ET名称：TBU.et//T3D(*1)(*1)

| T1/T2の 後続事象 | AC電源 復旧 (PCV破 損前) | 下部D/W 注水(代 替注水) | 下部D/W 注水 (RPV破 損口) | 上部D/W スプレイ (RHR) | PCV注水 時水蒸気 爆発なし | デブリ冷 却(事前 水張り失 敗時) | PCVベン ト | PCV破損 箇所 | 建屋トップ ベント | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------|-------------|--------------|-----|-------|---------------|------|
| T3D | ACRP | CLD2ALT | CLD2R | CUDR | FCIP | MCCII | CWD | HASON | TOPVENT | | | | |
| | | | | | | | | | | 27 | OKP | | |
| | | | | | | | | | | 28 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | | 29 | FPE | | |
| | | | | | | | | | | 30 | FOPDW | | |
| | | | | | | | | | | 31 | FOPSP | | |
| | | | | | | | | | | 32 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | | 33 | FPE | | |
| | | | | | | | | | | 34 | FOT | | |
| | | | | | | | | | | 35 | FOT | | |

ET名称：TBU.et//T3D(*2)(*1)

| T1/T2の 後継事象 | AC電源 復旧 (PCV破 損前) | 下部D/W 注水(代 替注水) | 下部D/W 注水 (RPV破 損口) | 上部D/W スプレイ (RHR) | PCV注水 時水蒸気 爆発なし | デブリ冷却 (事前 水張り失 敗時) | PCVベ ント | PCV破損 箇所 | 建屋ト ップ ベント | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------|-------------|------------------|-----|-------|---------------|------|
| T3D | ACRP | CLD2ALT | CLD2R | CUDR | FCIP | MCCII | CWD | HASON | TOPVENT | | | | |
| | | | | | | | | | | 36 | OKP | | |
| | | | | | | | | | | 37 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | | 38 | FPE | | |
| | | | | | | | | | | 39 | FOPDW | | |
| | | | | | | | | | | 40 | FOPSP | | |
| | | | | | | | | | | 41 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | | 42 | FPE | | |
| | | | | | | | | | | 43 | FOT | | |
| | | | | | | | | | | 44 | FOT | | |

ET名称：TBP.et//TBP(*1)

| プラント 損傷状態 TBP | PCV隔離 | AC電源 復旧 (RPV破 損前) | 損傷炉心 注水 | RPV破損 なし(IVR) | 下部D/W 事前水張 り | RPV破損 時水蒸気 爆発なし | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|---------------------|-------|----------------------------|------------|------------------|--------------------|-----------------------|---------|----------------------|---------------|------|
| TBP | CIS | ACRR | CV | IVR | CLD1 | FCIR | | | | |
| | | | | | | | 6 - 8 | TBP.et//T3A(*1)(*1)~ | | |
| | | | | | | | 9 - 16 | TBP.et//T3B(*1)(*1)~ | | |
| | | | | | | | 17 | FPE | | |
| | | | | | | | 18 - 25 | TBP.et//T3B(*2)(*1)~ | | |
| | | | | | | | 26 - 34 | TBP.et//T3D(*1)(*1)~ | | |
| | | | | | | | 35 | PBYP | | |

[Redacted]

ET名称：TBP.et//T3A(*1)(*1)

| T1/T2の 後続事象 T3A | 上部D/W スプレイ (RHR) CUDR | PCVベン ト CWD | PCV破損 箇所 HASON | 建屋トップ ベント TOPVENT | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|-----------------------|--------------------------------|-------------------|----------------------|-------------------------|-----|-------|---------------|------|
| | | | | | 6 | OKV | | |
| | | | | | 7 | FOPDW | | |
| | | | | | 8 | FOPSP | | |

ET名称：TBP.et//T3B(*1)(*1)

| T1/T2の 後続事象 | 下部D/W 注水(代 替注水) | 下部D/W 注水 (RPV破 損口) | 上部D/W スプレイ (RHR) | PCV注水 時水蒸気 爆発なし | デブリ冷 却(事前 水張り失 敗時) | PCVベン ト | PCV破損 箇所 | 建屋トップ ベント | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------|-------------|--------------|-----|-------|---------------|------|
| T3B | CLD2ALT | CLD2R | CUDR | FCIP | MCC11 | CWD | HASON | TOPVENT | | | | |
| | | | | | | | | | 9 | OKP | | |
| | | | | | | | | | 10 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | 11 | FPE | | |
| | | | | | | | | | 12 | FOPDW | | |
| | | | | | | | | | 13 | FOPSP | | |
| | | | | | | | | | 14 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | 15 | FPE | | |
| | | | | | | | | | 16 | FOT | | |

ET名称：TBP.et//T3B(*2)(*1)

| T1/T2の 後続事象 | 下部D/W 注水(代 替注水) | 下部D/W 注水 (RPV破 損口) | 上部D/W スプレイ (RHR) | PCV注水 時水蒸気 爆発なし | デブリ冷 却(事前 水張り失 敗時) | PCVベン ト | PCV破損 箇所 | 建屋トップ ベント | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------|-------------|--------------|-----|-------|---------------|------|
| T3B | CLD2ALT | CLD2R | GU DR | FCIP | MCCI1 | CWD | HASON | TOPVENT | | | | |
| | | | | | | | | | 18 | OKP | | |
| | | | | | | | | | 19 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | 20 | FPE | | |
| | | | | | | | | | 21 | FOPDW | | |
| | | | | | | | | | 22 | FOPSP | | |
| | | | | | | | | | 23 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | 24 | FPE | | |
| | | | | | | | | | 25 | FOT | | |

ET名称：TBP.et//T3D(*1)(*1)

| T1/T2の 後続事象 | AC電源 復旧 (PCV破 損前) | 下部D/W 注水(代 替注水) | 下部D/W 注水 (RPV破 損口) | 上部D/W スプレイ (RHR) | PCV注水 時水蒸気 爆発なし | デブリ冷 却(事前 水張り失 敗時) | PCVベン ト | PCV破損 箇所 | 建屋トップ ベント | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------|-------------|--------------|-----|-------|---------------|------|
| T3D | ACRP | GLD2ALT | GLD2R | CUDR | FCIP | MCCI1 | CWD | HASON | TOPVENT | | | | |
| | | | | | | | | | | 26 | OKP | | |
| | | | | | | | | | | 27 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | | 28 | FPE | | |
| | | | | | | | | | | 29 | FOPDW | | |
| | | | | | | | | | | 30 | FOPSP | | |
| | | | | | | | | | | 31 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | | 32 | FPE | | |
| | | | | | | | | | | 33 | FOT | | |
| | | | | | | | | | | 34 | FOT | | |

ET名称：TB.et//TB(*1)

| プラント損傷状態 TB | PCV隔離 | DC電源 復旧 (RPV破 損前) | 原子炉減 圧 | AC電源 復旧 (RPV破 損前) | 損傷炉心 注水 | RPV破損 なし(IVR) | 下部D/W 事前水張 り | RPV破損 時水蒸気 爆発なし | DCHIによ るPCV破 損なし | 建屋トッ プベント | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------|-------|----------------------------|-----------|----------------------------|------------|------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|--------------|------|---------------------|---------------|------|
| TB | CIS | DCRR | CX | ACRR | CV | IVR | CLD1 | FCIR | DCH | TOPVEN TI | | | | |
| | | | | | | | | | | | 8-16 | TB.et//T3D(*2)(*1)へ | | |
| | | | | | | | | | | | 17 | FDCH | | |
| | | | | | | | | | | | 18 | TB.et//T3E(*1)(*1)へ | | |
| | | | | | | | | | | | 19 | FDGH | | |
| | | | | | | | | | | | 20 | PBYP | | |

ET名称：TB.et//T3D(*2)(*1)

| T1/T2の 後続事象 | AC電源 確保 (PCV破 損前) | 下部D/W 注水(代 替注水) | 下部D/W 注水 (RPV破 損口) | 上部D/W スプレイ (RHR) | PCV注水 時水蒸気 爆発なし | デブリ冷 却(事前 水張り失 敗時) | PCVベン ト | PCV破損 箇所 | 建屋トップ ベント | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------|-------------|--------------|-----|-------|---------------|------|
| T3D | ACRP | CLD2ALT | CLD2R | CUDR | FCIP | MCCI1 | CWD | HASON | TOPVENT | | | | |
| | | | | | | | | | | 8 | OKP | | |
| | | | | | | | | | | 9 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | | 10 | FPE | | |
| | | | | | | | | | | 11 | FOPDW | | |
| | | | | | | | | | | 12 | FOPSP | | |
| | | | | | | | | | | 13 | FCCI | | |
| | | | | | | | | | | 14 | FPE | | |
| | | | | | | | | | | 15 | FOT | | |
| | | | | | | | | | | 16 | FOT | | |

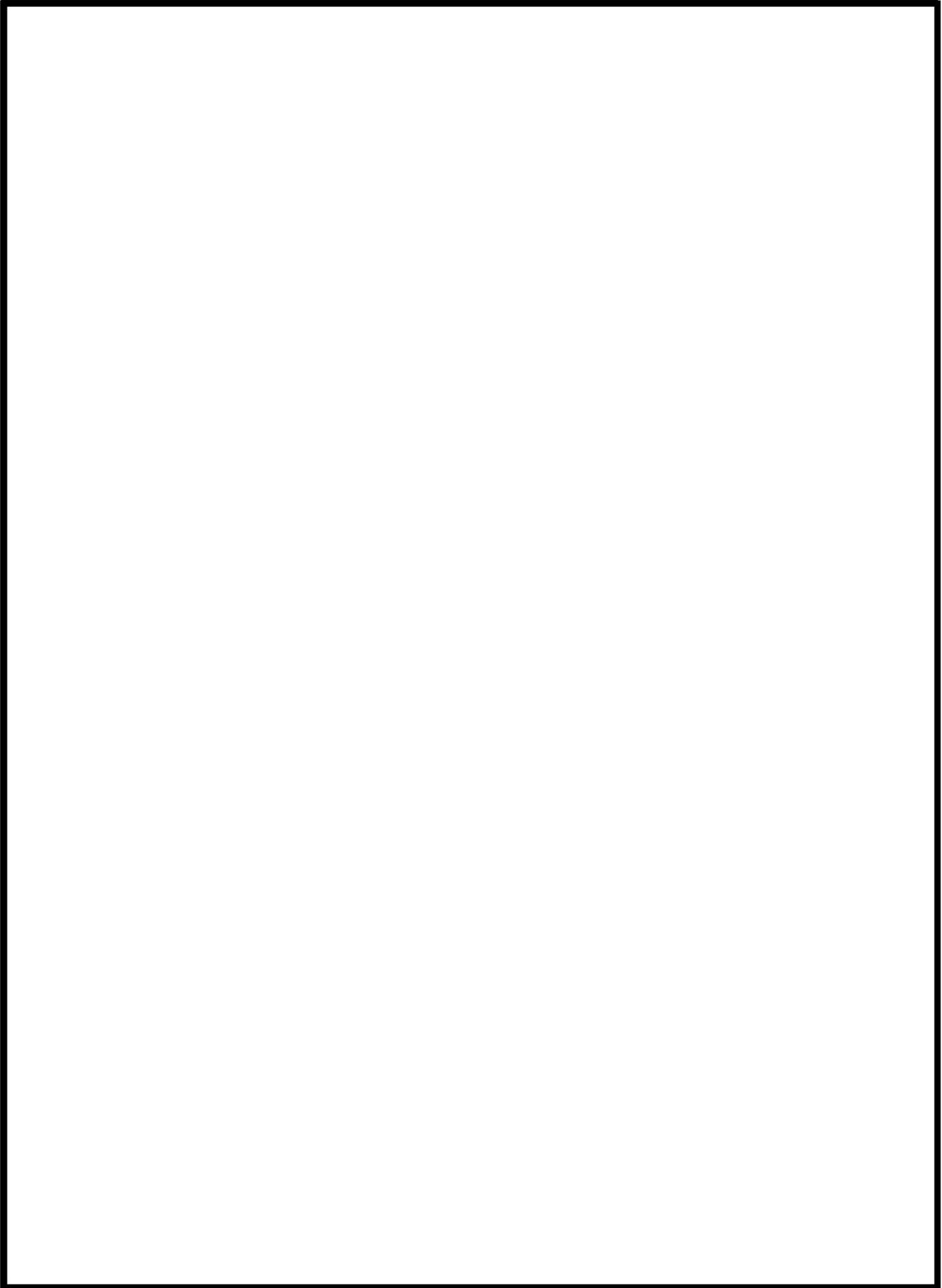
ET名称 : TB.et//T3E(*1)(*1)

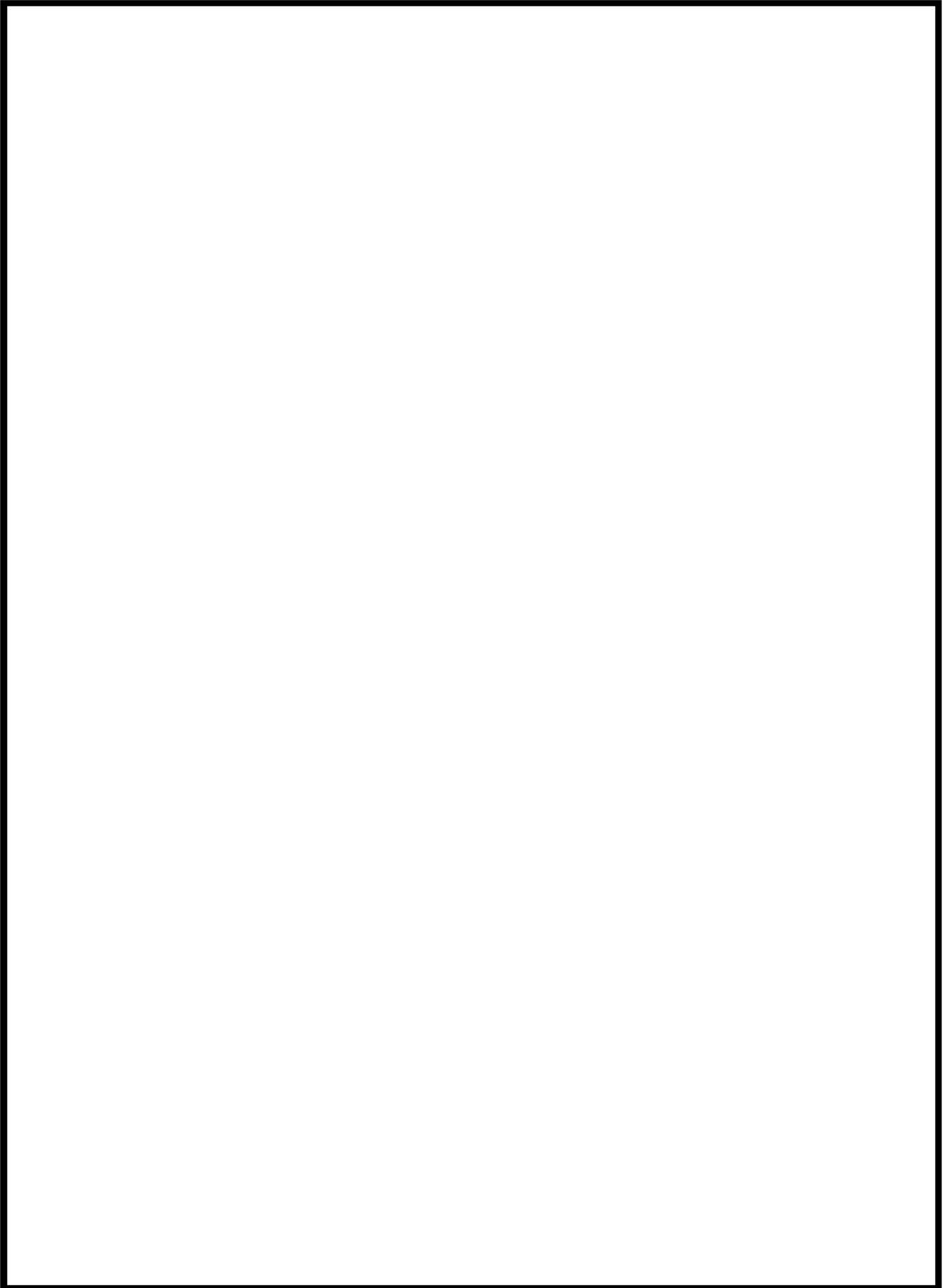
| T1/T2の 後続事象 | DC電源 復旧 (PCV破 損前) | AC電源 復旧 (PCV破 損前) | 下部D/W 注水(代 替注水) | 下部D/W 注水 (RPV破 損口) | 上部D/W スプレイ (RHR) | PCV注水 時水蒸気 爆発なし | デブリ冷 却(事前 水張り失 敗時) | PCVベン ト | PCV破損 箇所 | 建屋トッ プ ベント | No. | 最終状態 | 発生頻度 (/炉年) | CCFP |
|----------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------|-------------|------------------|-----|------|---------------|------|
| T3E | DCRP | ACRP | CLD2ALT | CLD2R | CUDR | FCIP | MCCI1 | CWD | HASON | TOPVENT | 18 | FOT | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |

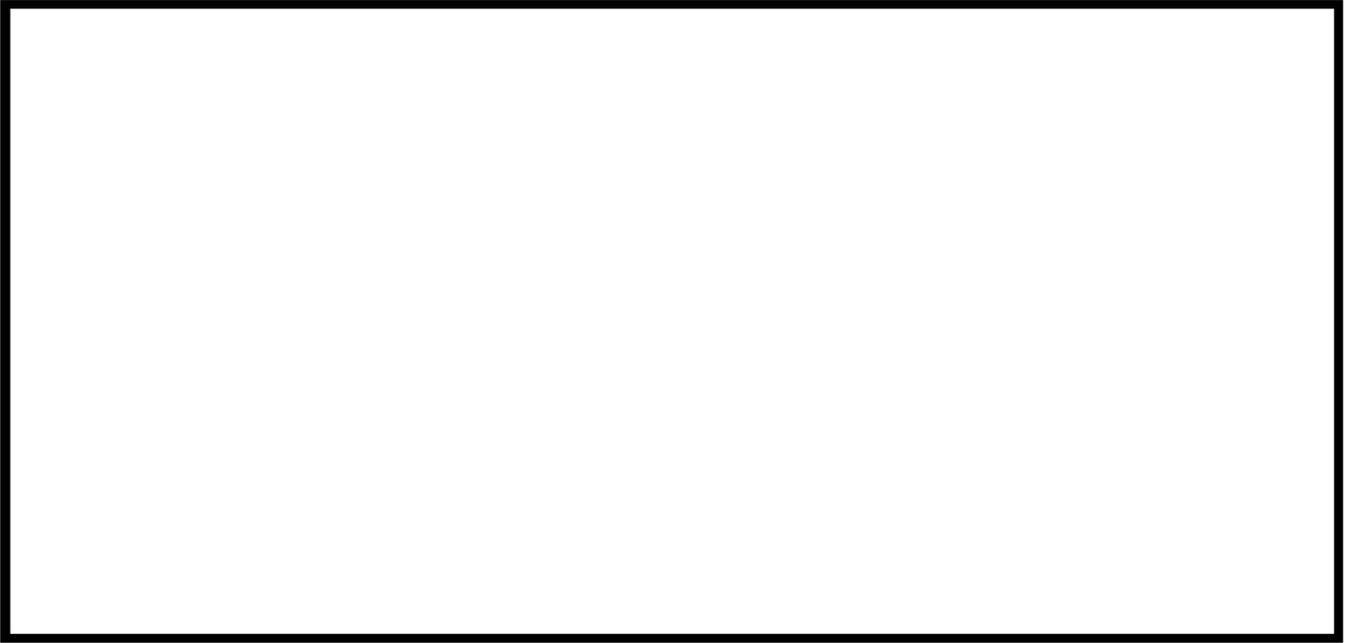
格納容器イベントツリーにおける物理化学現象の発生頻度の設定方法

1. 圧力容器内容融物保持 (IVR)
2. 格納容器雰囲気直接加熱 (DCH)
3. 炉外水蒸気爆発 (FCI)
4. コア・コンクリート相互作用 (MCCI)

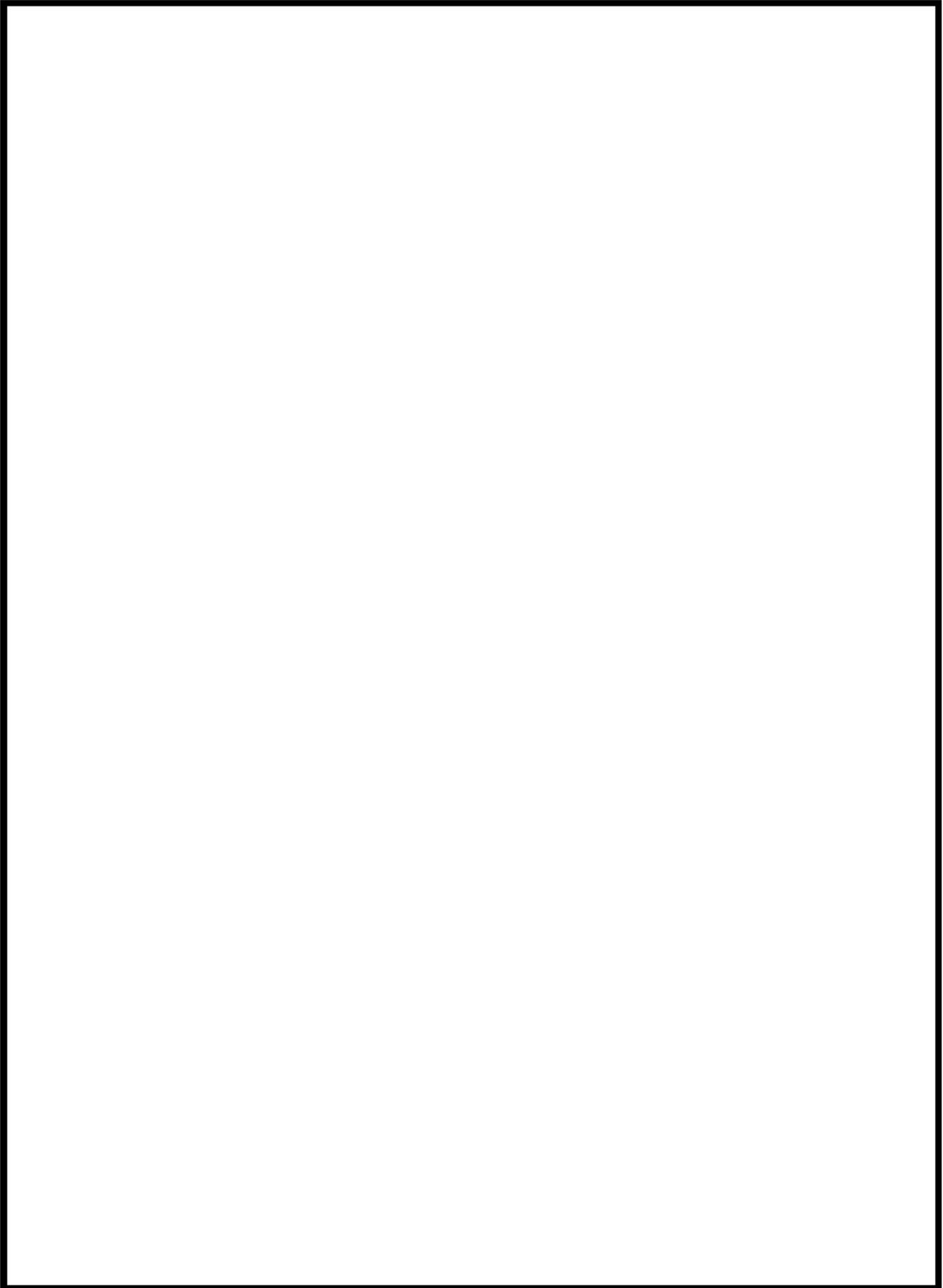
1. 压力容器内容融物保持 (IVR)

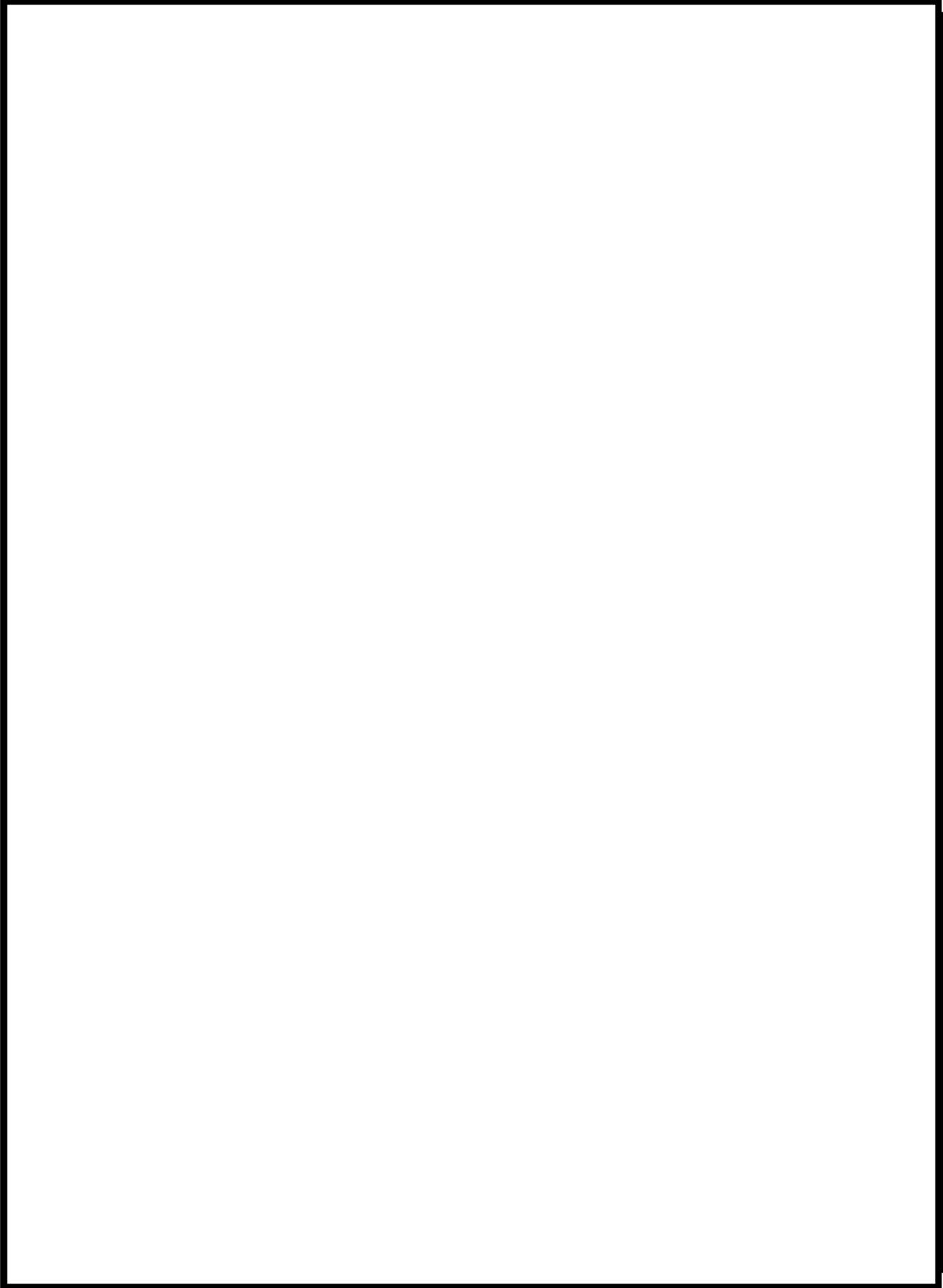




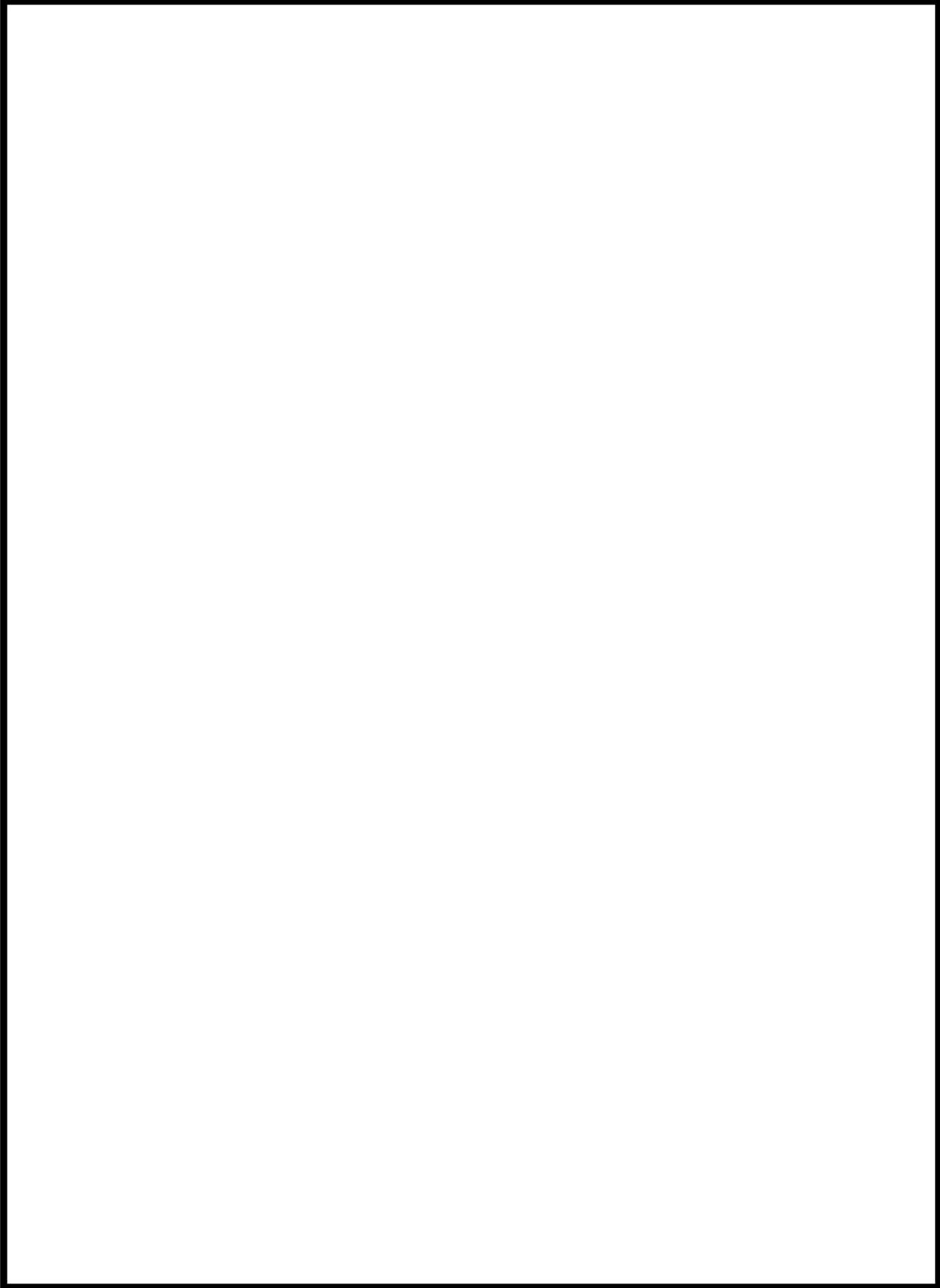


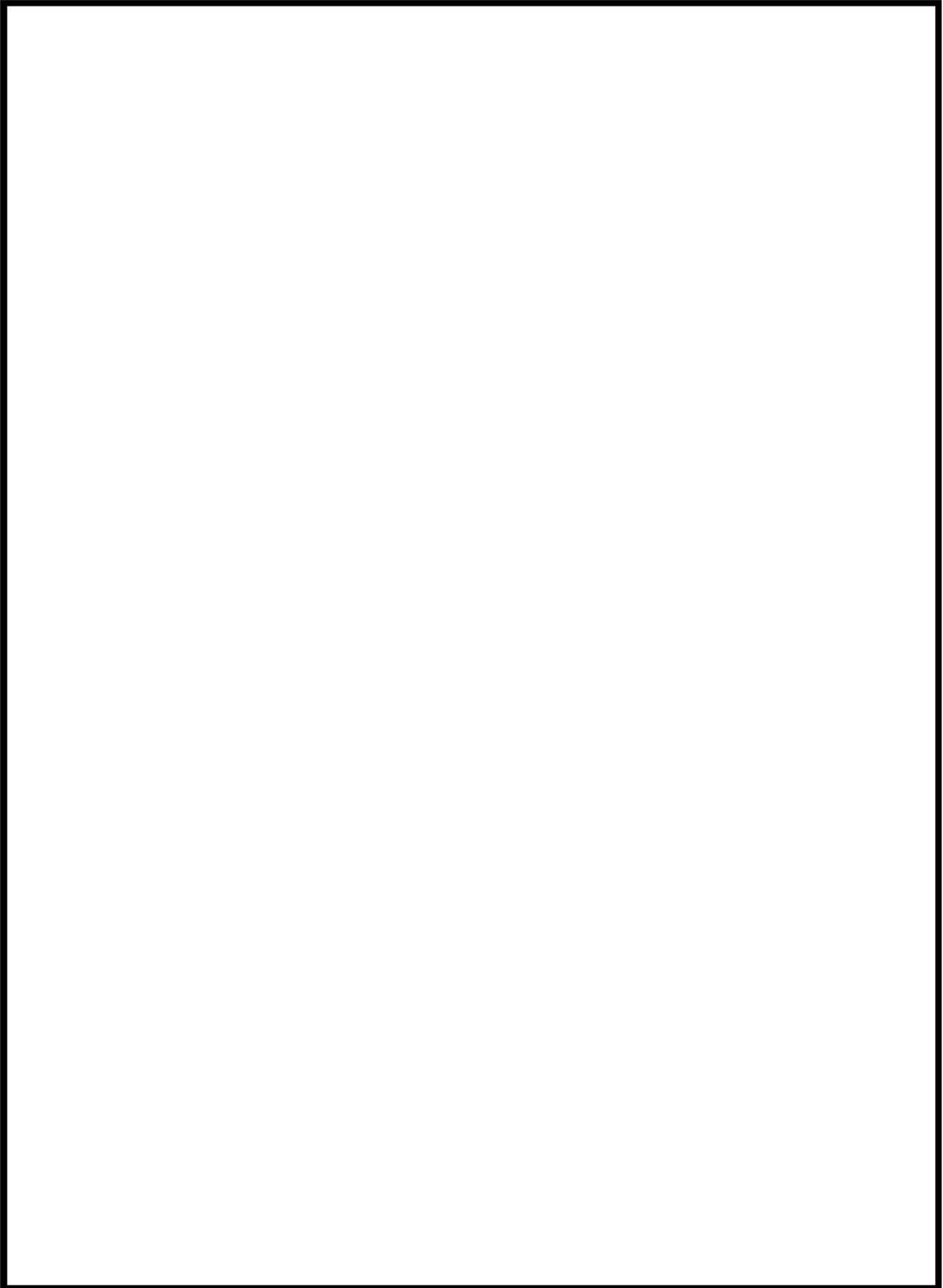
2. 格納容器雰囲気直接加熱 (DCH)



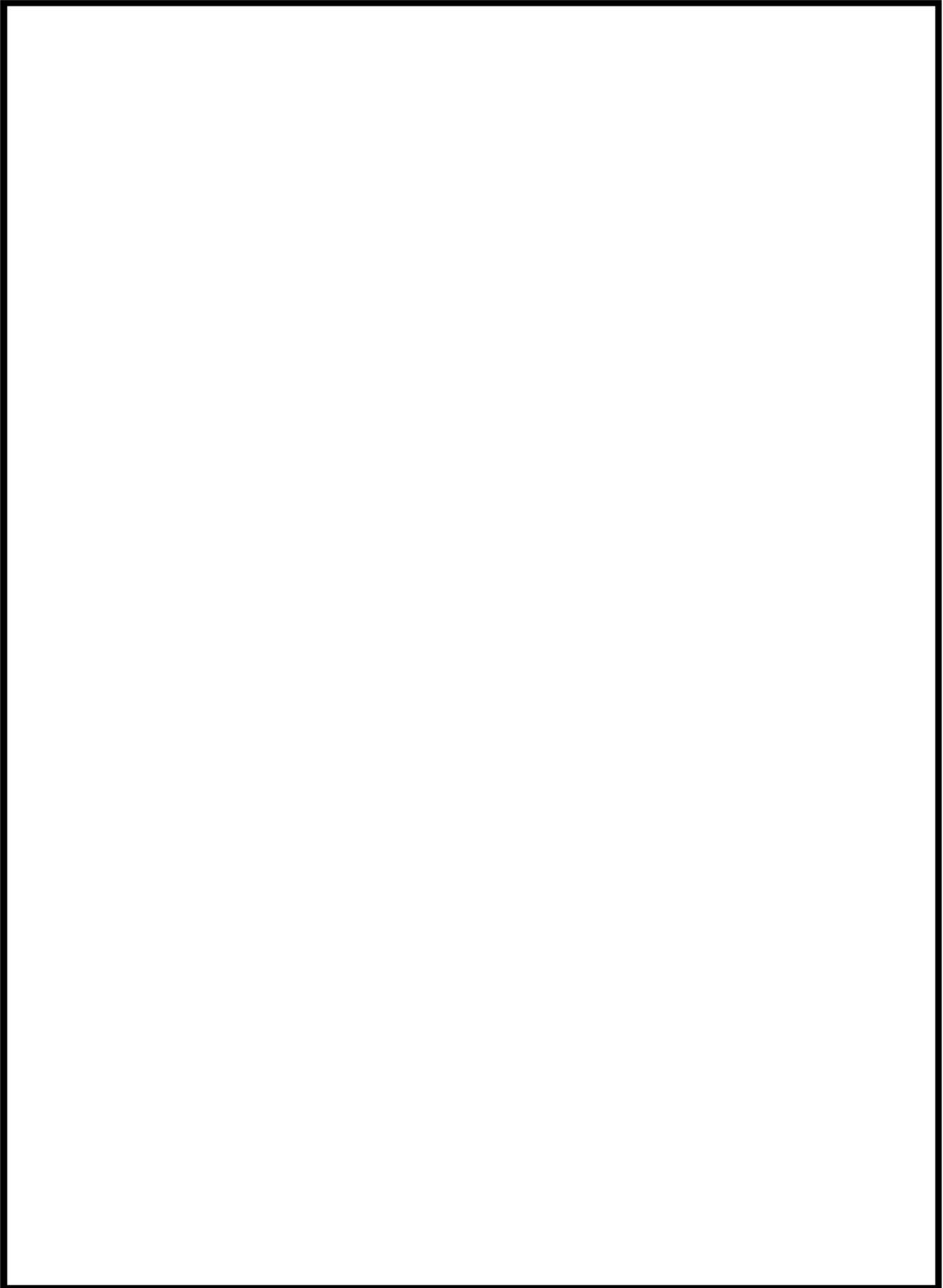


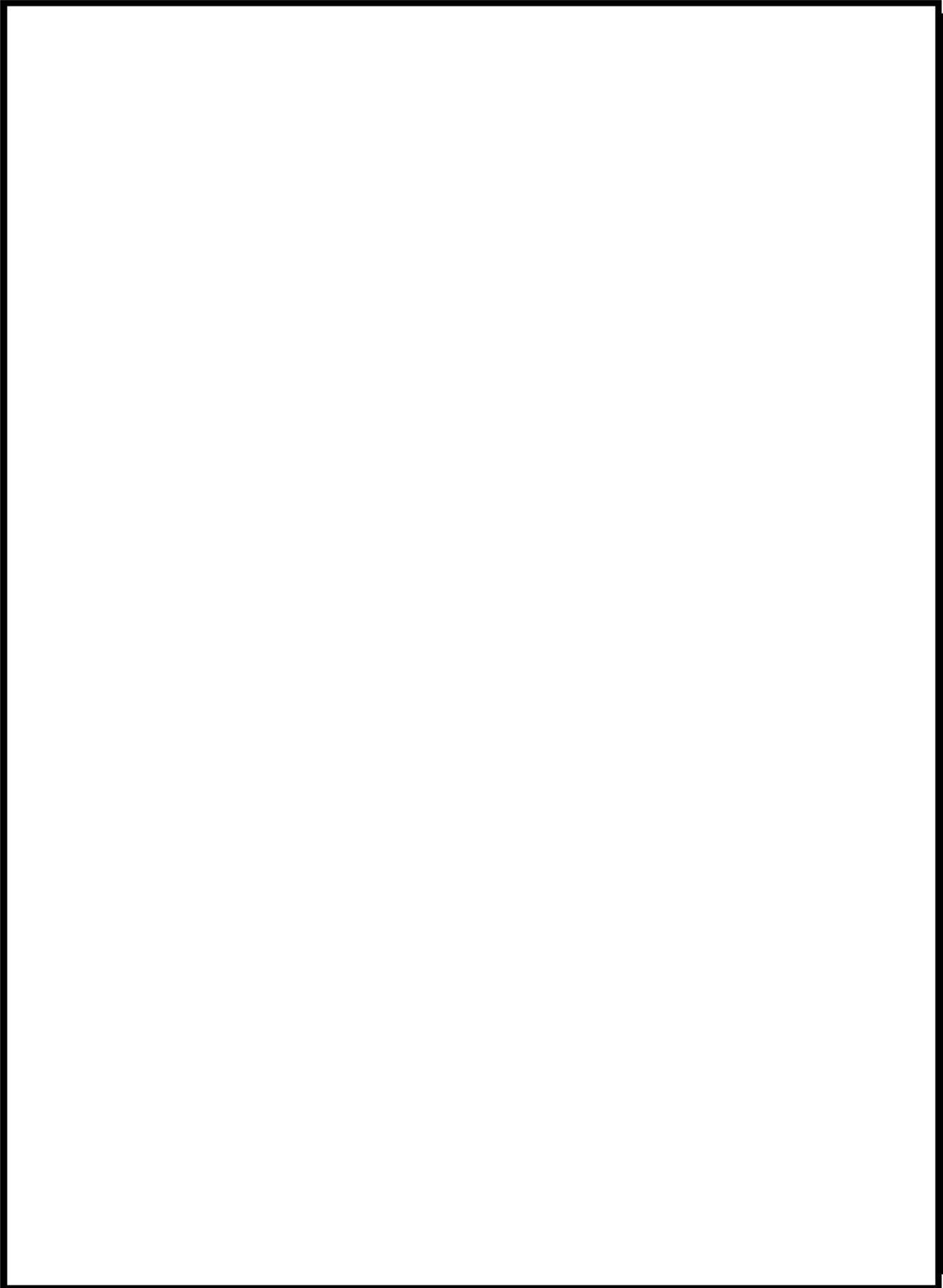
3. 炉外水蒸气爆発 (FCI)





4. コア・コンクリート相互作用 (MCCI)







炉内溶融物保持(IVR)に関する知見と実プラントへの適用性

1. TMI-2 事故において得られた知見と ABWR への適用に際しての特徴

1979年のTMI-2号機の炉心損傷事故では、その後の分析により、原子炉圧力容器の下部ヘッドに約19トン(全炉心の約10数%程度)のデブリが落下し、デブリの最高温度は約3000Kに達したが、下部ヘッドの最高温度は直径約1mの領域(ホットスポット)が約1100℃に達したに止まり、この状態が30分程度継続した後、ホットスポットは10~100K/分の速度で急速に冷却されたことが判明した。このことは溶融炉心が下部ヘッドに到達しても直ちに圧力容器の破損には至らず、圧力容器内溶融炉心保持(IVR)の可能性を示したものであり、特に注目された事象である。

BWRに対するIVRの適用に際し、ABWRとTMI-2の主要諸元の比較を表1に示す。BWRはIVRに関して以下の特徴がある。

- ・信頼性の高い原子炉減圧系を有しているため、容易に圧力容器を低圧状態に移行できる。これにより代替注水系を含む低圧注水系により原子炉圧力容器内に注水できる可能性が高く、また内圧が低いことによりクリーブ破損しにくい。
- ・炉心支持板が破損して溶融炉心が下部プレナムに落下する際には下部プレナムには4m以上の水深の水プールが存在する。水中落下時に溶融炉心は分散し粒子化することにより冷却が促進され、下部ヘッド到達時には溶融炉心の温度は低下していると考えられる。これは、溶融炉心が下部ヘッドに堆積した時の下部ヘッドへの熱負荷を低減する方向に作用する。
- ・プール水があることにより溶融物ジェットが直接下部ヘッド壁に衝突し溶融破損に至る、所謂ジェット・インピンジメントの発生も防止する。
- ・BWRは大型の圧力容器を使用しているため、下部ヘッド自体のヒートシンク効果が大きく、またCRDガイドチューブ及びチューブ内の冷却水も大きなヒートシンク効果があると期待される。
- ・下部ヘッドには計装管やCRD配管の貫通部が多数存在し、これらの貫通部からの放熱の効果も期待される。

2. IVRの主要過程に関するこれまでの知見とIVR評価コードの構築

溶融炉心が炉心部から下部プレナムに落下し下部ヘッド上に堆積する場合に想定される現象は図1に挙げられ、過去の各種研究に基づき、溶融炉心からの熱伝達をモデル化し、IVR評価コードを構築している。

構築した評価コードの妥当性は、TMI-2事故の再現性が確認^[1]されているMAAP4との比較によって確認した。表2の通り、MAAP4ではTMI-2の事

象を模擬できることが確認されている。本評価で用いた評価コードについても、考慮している現象はほぼ同等であり、同じ条件で評価すると、表3の通りにやや保守的ではあるが、同様の結果を示すことから、IVRに関して妥当な評価となっているものとする。

3. 今回の PRA における IVR の扱い

今回、KK6/7号機の内部事象運転時レベル1.5PRAのイベントツリーでは、IVRについての分岐(ヘディング)を設定している。この分岐確率の算出の考え方は、添付資料4.1.1.f-1の通りである。IVRに影響するパラメータを選定すると共に各パラメータの分布を決定し、これらのパラメータの組み合わせ毎に評価コードを用いてIVRの有無を判定し、判定結果を集約することでIVRの発生確率を求めている。

今回のIVRの有無を考慮した理由は、IVRの発生有無を分析する上での知見が組み込まれており、TMI-2事故についての再現性も確認された評価コードを用いることで、実プラントでのIVRの発生有無についても一定の評価が可能であると考えたためである。

一方で、各入力パラメータが不確実さを持つことから、IVRの発生確率についても不確実さが生じる。このため、内的レベル1.5報告書では、IVRの失敗確率を1とした場合の感度解析を実施し、その影響を確認している。

以上

参考文献

- [1] 「シビアアクシデント評価のための格納容器イベントツリーに関する検討」財団法人 原子力安全研究協会 平成13年7月
- [2] 「原子炉压力容器内容融物冷却特性に関する研究」BWR 電力共同研究 平成13年3月

表 1 IVR に関わる主要諸元の比較

| 項目 | TMI-2 | ABWR |
|-----------|---------|--------|
| 下部プレナム水深 | 約 1.5 m | 4 m 以上 |
| 原子炉圧力容器内径 | 4.4 m | 7.1 m |
| 下部ヘッド厚さ | 13 cm | 25 cm |

表 2 TMI-2 事故と MAAP4 再現解析結果の比較^[1]

| |
|--|
| |
|--|

表 3 MAAP4 と IVR 評価コードの解析結果の比較 (ABWR TQUV シーケンス)

| |
|--|
| |
|--|

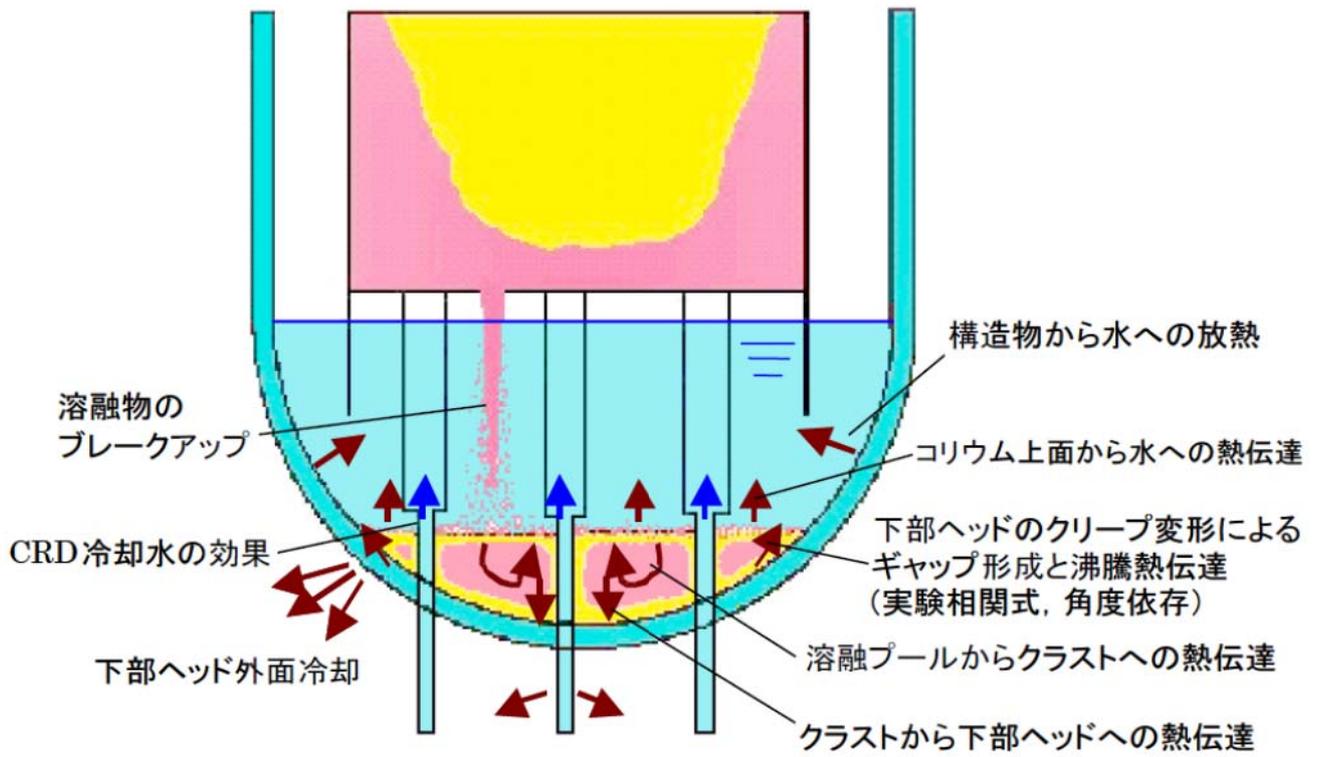


図 1 IVR 評価モデルの概略模式図^[2]

余裕時間の設定方法

格納容器イベントツリー評価において、分岐確率を設定するにあたって、余裕時間を設定する必要がある。余裕時間の設定が必要となる格納容器イベントツリーのヘディングおよび本ヘディングに示す操作の実施目的を下表に示す。

これらのヘディングの分岐確率を設定するために必要となる、運転操作の余裕時間について、実施目的を考慮して、事故進展解析結果から設定する。

| ヘディング | | 実施目的 |
|-------|--------------------|-----------------------------|
| 1 | 原子炉減圧 | RPV 破損防止 |
| 2 | 損傷炉心注水 | |
| 3 | 下部 D/W 注水(RPV 破損口) | PCV 破損防止 |
| 4 | 上部 D/W スプレイ(RHR) | |
| 5 | 非常用交流電源復旧(RPV 破損前) | RPV 破損防止 (1,2 のためのサポート系) |
| 6 | 非常用交流電源復旧(PCV 破損前) | PCV 破損防止 (3,4 のためのサポート系) |

1. 損傷炉心注水の余裕時間

損傷炉心注水の余裕時間は、RPV 内容融物保持(IVR)を達成するために許容される時間と定義され、具体的にはリロケーション開始からの時間によって設定することが出来る。

ここで、表 4.1.1.f-1 に事故進展解析結果を示す。本表からリロケーション開始までの時間は、炉心損傷時期が早期か後期かで大きく異なる。炉心損傷時期の早期/後期を、PDS によって分類すると、以下のようになる。

- ・炉心損傷時期早期：長期 TB 以外
- ・炉心損傷時期後期：長期 TB

したがって、損傷炉心注水の余裕時間は、長期 TB と長期 TB 以外に区別して設定を行う。



① 長期 TB 以外の PDS に対する損傷炉心注水の余裕時間





② 長期 TB に対する損傷炉心注水の余裕時間



2. 残留熱除去系による PCV 除熱の余裕時間



② RPV 破損あり (IVR 失敗時)





3. 交流電源復旧の余裕時間

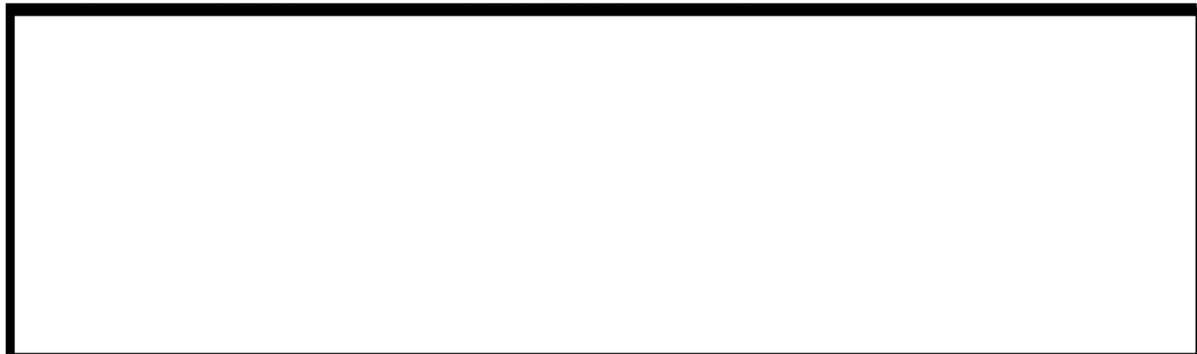
交流電源復旧の目的は、交流電源喪失時における、損傷炉心注水および PCV 除熱であるため、交流電源復旧は、1.および 2.で設定した余裕時間以内に完了する必要がある。

したがって、1.および 2.の余裕時間設定の考え方を基に以下の通り設定した。

① 損傷炉心注水のための交流電源復旧の余裕時間



② PCV 破損防止のための交流電源復旧の余裕時間





PCV 破損前までの交流電源復旧の余裕時間を整理した結果を表 4.1.1.f-6 に示す。

表 4.1.1.f.1 代表炉心損傷シナリオの事故進展解析結果

| PDS | 炉心溶融 | RPV 下部プレナム リロケーション | RPV 破損 | PCV 破損 |
|--------------------|------|-----------------------|--------|--------|
| TQUV (TBP) | | | | |
| TQUX (TBU、TBD) | | | | |
| TQUX (RPV 破損なし) | | | | |
| LOCA | | | | |
| 長期 TB | | | | |
| | | | | |

RPV 下部プレナムリロケーションとは、RPV 下部プレナムへのデブリの移行時間を表す。

表 4.1.1.f-2 代替注水系相当の流量で注水した場合の
注水の遅れ時間と IVR 達成の関係



表 4.1.1.f-3 損傷炉心注水の余裕時間



表 4.1.1.f-4 RPV 破損から PCV 破損までの余裕時間

| |
|--|
| |
|--|

表 4.1.1.f-5 残留熱除去系による PCV 除熱の余裕時間

| |
|--|
| |
|--|

表 4.1.1.f-6 交流電源復旧の余裕時間

| |
|--|
| |
|--|

格納容器隔離失敗の分岐確率の根拠

【分岐確率の根拠】

KK6/7号機の内部事象運転時レベル 1.5PRA では、炉心損傷の時点で原子炉格納容器(PCV)の隔離に失敗している場合を考慮しており、これを「PCV 隔離失敗」のヘディング(分岐確率 5.0×10^{-3})として設定している。

この分岐確率は、PCV 隔離システムの信頼性について評価している NUREG/CR-4220^[1]をもとに設定している。NUREG/CR-4220 では、米国の LER (Licensee Event Report)(1965年～1984年分)を分析し、PCV からの大規模漏洩が生じた事象4件を抽出、これを評価時点での運転炉年(740炉年)で割ることにより、PCV 隔離失敗の発生頻度(5.0×10^{-3} /炉年)を算出している。更に、PCV 隔離失敗の継続時間の情報が無いことから、工学的判断として平均継続時間を1年とし、上記の発生頻度に1年を掛けることにより、「PCV 隔離失敗」の確率としている。

本評価においても、PCV の隔離機能は少なくとも1年に1回程度は確認されるもの(1サイクルに1回程度)と考え、上記の発生頻度に1年を掛けることにより、「PCV 隔離失敗」の確率としている。

なお、NUREG/CR-4220 では、潜在的な漏洩が発生する経路として、ベント弁等の大型弁の故障や PCV 壁に穴が空く事象等の直接的な破損を考えている。

【JNES による検討事例】

PCV の隔離失敗については、独立行政法人 原子力安全基盤機構(JNES)による評価結果^[2]が報告されている。国内 BWR-5MARK II 型格納容器プラントを対象に、フォールトツリー(FT)を用いて PCV 隔離失敗確率を評価しており、PCV 隔離失敗確率は平均値で 8.3×10^{-4} (EF=2.4)と示されている。

PCV の貫通部を抽出した上で、貫通部の弁の構成等を考慮し、リークのパターンを FT でモデル化している。また、FT の基事象には国内機器故障率データを使用している。

【分岐確率の設定について】

NUREG/CR-4220 では米国の運転実績から、JNES による評価では、FT による分析から PCV 隔離失敗の頻度又は確率が評価されている。用いているデータ及び評価方法は異なるものの、いずれも 1.0×10^{-3} 前後の値である。

本評価において、PCV 隔離失敗は他のヘディングとの従属関係を持たない独立のヘディングであり、プラント損傷状態の発生頻度と PCV 隔離失敗確率の積

がそのまま PCV 隔離失敗による PCV 破損頻度となる。また、PCV 隔離の成功確率はほぼ 1 であることから、PCV 隔離以降のイベントツリーの分析結果(CFF)には殆ど影響しない。これらのことから、参照可能と考える評価結果のうち、大きめの値を示している NUREG/CR-4220 の評価結果をもとに分岐確率を 5.0×10^{-3} と設定することに問題は無いものとする。

なお、現状の運転管理として格納容器内の圧力を日常的に監視しているほか、格納容器圧力について 1 日 1 回記録を採取している。仮に今回想定した様な大規模な漏えいが生じた場合、速やかに検知できる可能性が高いと考える。

以 上

参考文献

- [1] NUREG/CR-4220, Reliability Analysis of Containment Isolation Systems., U.S. Nuclear Regulatory Commission (1985)
- [2] 「JNES/SAE06-031, 06 解部報-0031 格納容器健全性に関する機器の重要度評価」独立行政法人 原子力安全基盤機構 (2006)