

廃炉・汚染水対策事業費補助金

圧力容器/格納容器の耐震性・影響評価手法の開発

2017年度最終報告

2018年4月17日

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構 (IRID)

目次

1. 研究の背景・目的
 - 1.1 本研究が必要な理由
 - 1.2 本研究の成果の反映先と寄与
2. 目標
3. 実施項目とその関連、他研究との関連
 - 3.1 本研究の実施項目
 - 3.2 実施項目間の関連性
 - 3.3 他研究との関連性
4. 実施スケジュール
5. 実施体制図
6. 実施内容
 - (1)大規模地震時における安全シナリオの構築
 - (2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発
 - ①【1号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:0.68m)のS/C脚部検討結果
 - ②【2/3号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:1.5m)のS/C脚部検討結果
 - ③【2/3号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:0.745m)のS/C脚部検討結果
 - ④地震応答解析手法の開発及び検証
 - ④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価
 - ⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験
 - (3)安全シナリオの高度化
7. まとめ

1. 研究の背景・目的

No.3

1.1 本研究が必要な理由

- 今後想定される廃炉作業の各プロセスについて、腐食による経年劣化や燃料デブリ落下の影響を考慮した耐震強度評価に基づき、RPV/PCVの構造健全性を評価し、燃料デブリ取り出しやPCVの補修（止水）等の工法成立性を評価する。

【昨年度までの研究で残された課題】

<S/C脚部の耐震性>

- S/C脚部補強を行うと、滞留水と地下水の水位逆転のリスクが生じる。
- 一方、S/C脚部補強をしないと、S/C満水状態またはS/C内充填止水※では弾塑性解析をしても許容荷重を上回るリスクが残る。

<RPVペDESTALの耐震性>

- 事故時に落下した高温の燃料デブリからの熱影響及び侵食によるペDESTALの耐震性の低下が懸念される。

<大規模地震時の対応>

- 大規模地震時に、万一重要機器が損傷した場合の波及的影響が評価されていない。また、その場合の対策（防止・抑制策）が未検討。

※：ダウンコマ+真空破壊弁止水

本事業では、以下の耐震評価手法の開発を計画している。

- a) S/C脚部 : PCV補修を行った状態での耐震評価手法
- b) ペDESTAL : 事故による損傷・熱影響を受けた状態での耐震評価手法

1. 研究の背景・目的

1.2 本研究の成果の反映先と寄与

- 平成29年度の燃料デブリ取り出し方針の決定に向け、RPV/PCV機器の耐震強度評価による構造健全性の確認により、燃料デブリ取り出し工法の成立性を評価

本研究の成果

- ①国プロで開発中の止水技術を適用した状態での耐震性評価手法の確立
- ②大規模地震によるリスクを把握するために必要な情報(耐震評価結果)の取得
- ③大型機器損傷時の安全シナリオに関わる設備の最適化を図るための情報(耐震評価結果)の取得



PCV補修PJ, 燃料デブリ取り出しPJ等

各項目に以下の目標を設定する。

1)大規模地震時における安全シナリオの構築	
大規模地震によりペDESTAL・圧力抑制室脚部が損傷したと仮定した場合に、圧力容器・格納容器等の大型機器及びそれに接続する設備に及ぼす波及的影響を整理し、その防止・抑制策を検討する。	
2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発	
①ペDESTAL部、圧力抑制室脚部の耐震性・影響評価手法の開発	<p>ペDESTALについて、事故時の格納容器内温度や燃料デブリの拡がり状況に関する最新の知見を反映した健全性評価を実施する。</p> <p>圧力抑制室脚部について、極限解析(弾塑性解析)による耐震性の評価を実施する。</p>
②耐力評価及び地震荷重評価手法の検証	<p>ペDESTALについて、地震応答解析により地震荷重の評価手法を検証する。</p> <p>圧力抑制室脚部補強後のS/C、ベント管等の耐震性評価を実施する。</p>
③地震応答解析手法の開発及び検証	時刻歴応答解析等による圧力抑制室脚部の耐震評価を実施する。
3)安全シナリオの高度化	
圧力抑制室脚部の耐力をより合理的に評価・検証する手法を検討する。	

3. 実施項目とその関連、他研究との関連

No.6

3.1 本研究の実施項目

(1)大規模地震時における安全シナリオの構築

長期にわたる燃料デブリ取り出し作業に向けて、取り出し状態における大規模地震による大型機器への影響評価を行い、万一、当該機器が損傷した場合の波及的影響について評価を行う。また、その場合の対策（防止策、緩和策）案を考察する。さらに冷却・閉じ込め等への波及的影響の防止・抑制に関する評価を行う。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

①S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

S/C脚部の地震応答を実際に想定し得る地震荷重で評価するため、地震応答解析手法の開発を行う。また、S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発を行う。このため、時刻歴解析等を実施しS/C脚部に作用する荷重をより現実的に算出するとともに、S/C脚部について、極限解析(弾塑性解析)による耐震性評価を行う。

②ペDESTAL部の耐震性・影響評価手法の開発

圧力容器、スタビライザー等を一体とした大型機器連成モデルを用いた地震応答解析を行い、実際に想定し得る地震荷重を算出し、評価を実施する。

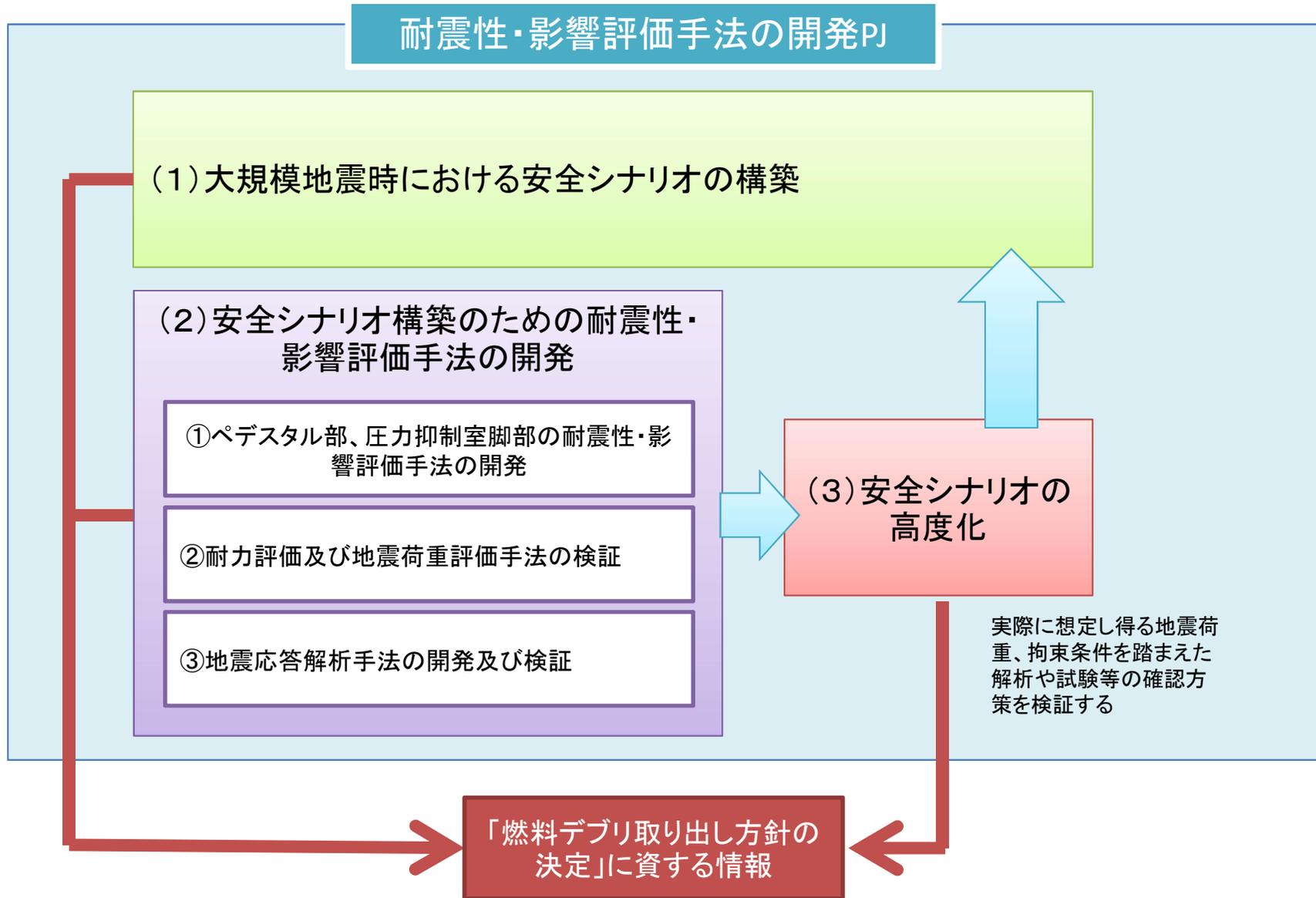
ペDESTALについて、事故時の格納容器内温度や燃料デブリの拡がりに関する最新知見を踏まえたペDESTALの耐震性・影響評価手法を開発し、耐震性評価を行う。コンクリート内の鉄筋の高温腐食試験を行い、強度低下の評価手法を検証する。

(3)安全シナリオの高度化

上記(2)において開発した評価手法の更なる高度化を図るために、実際に想定し得る地震荷重、拘束条件を踏まえた解析や試験等の確認方策を検証する。必要に応じて、詳細解析や材料試験を実施し、安全シナリオの見直しを行う。

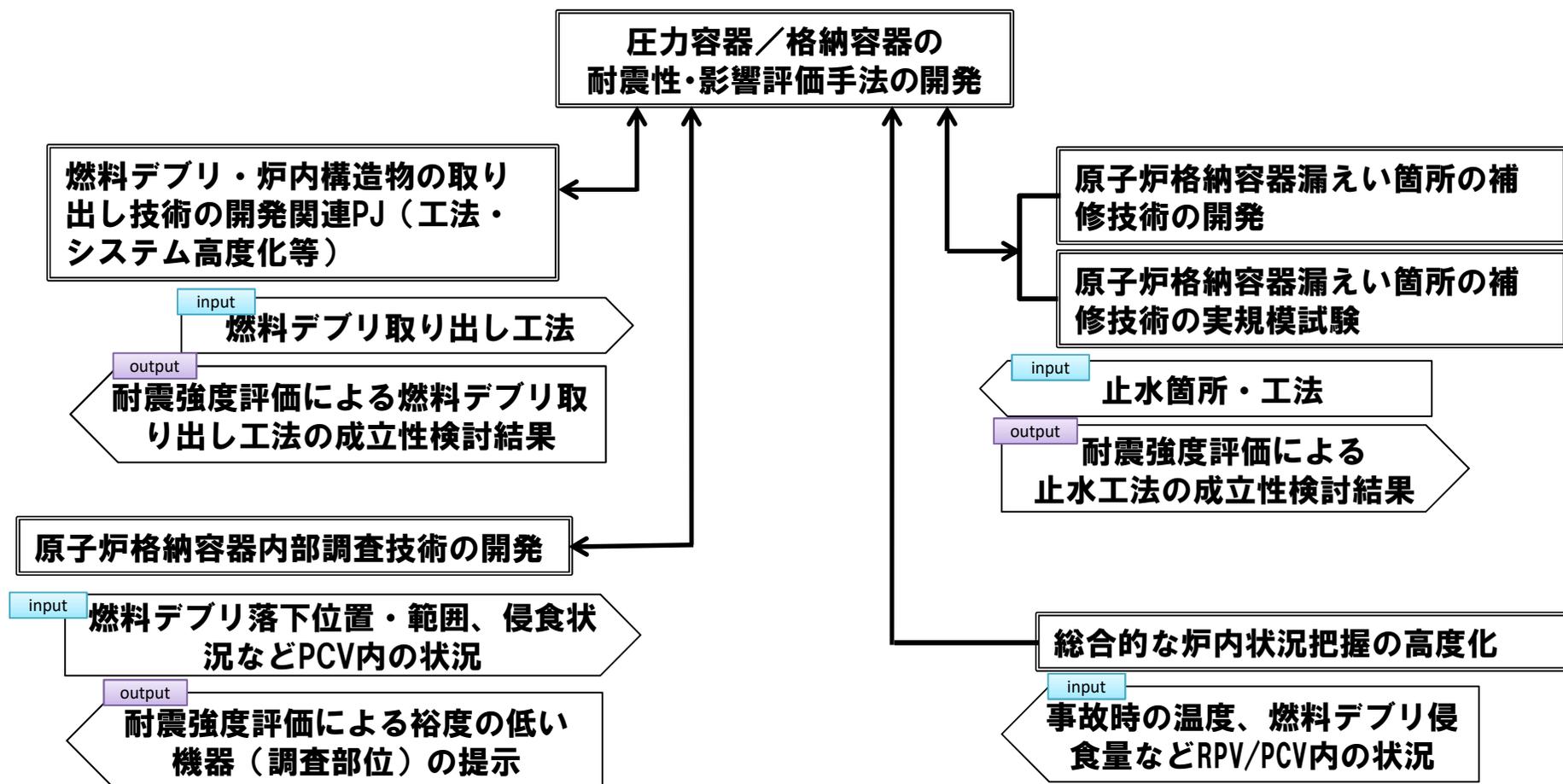
3. 実施項目とその関連、他研究との関連

3.2 実施項目間の関連性

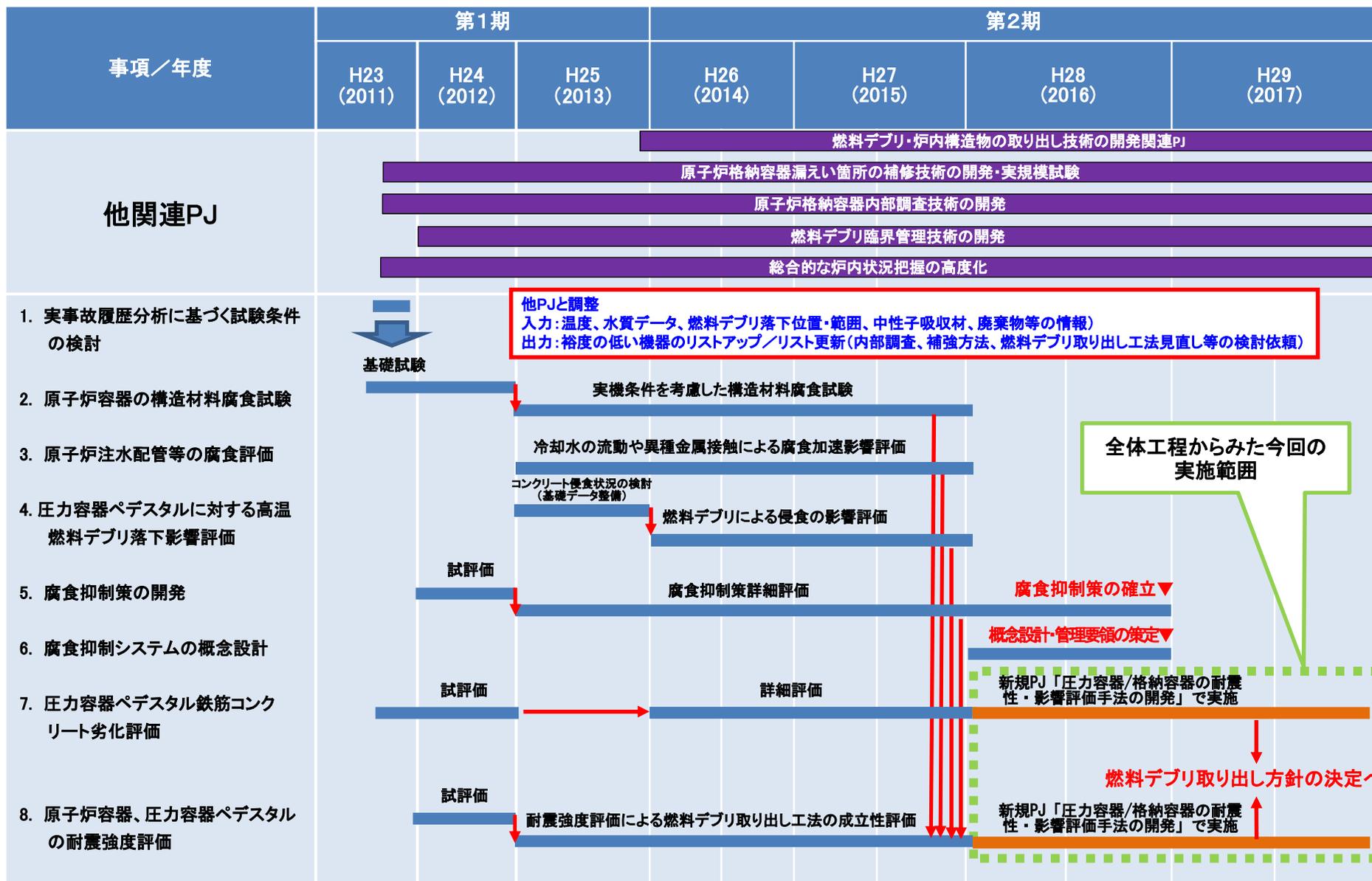


3. 実施項目とその関連、他研究との関連

3.3 他研究との関係性(1/3)

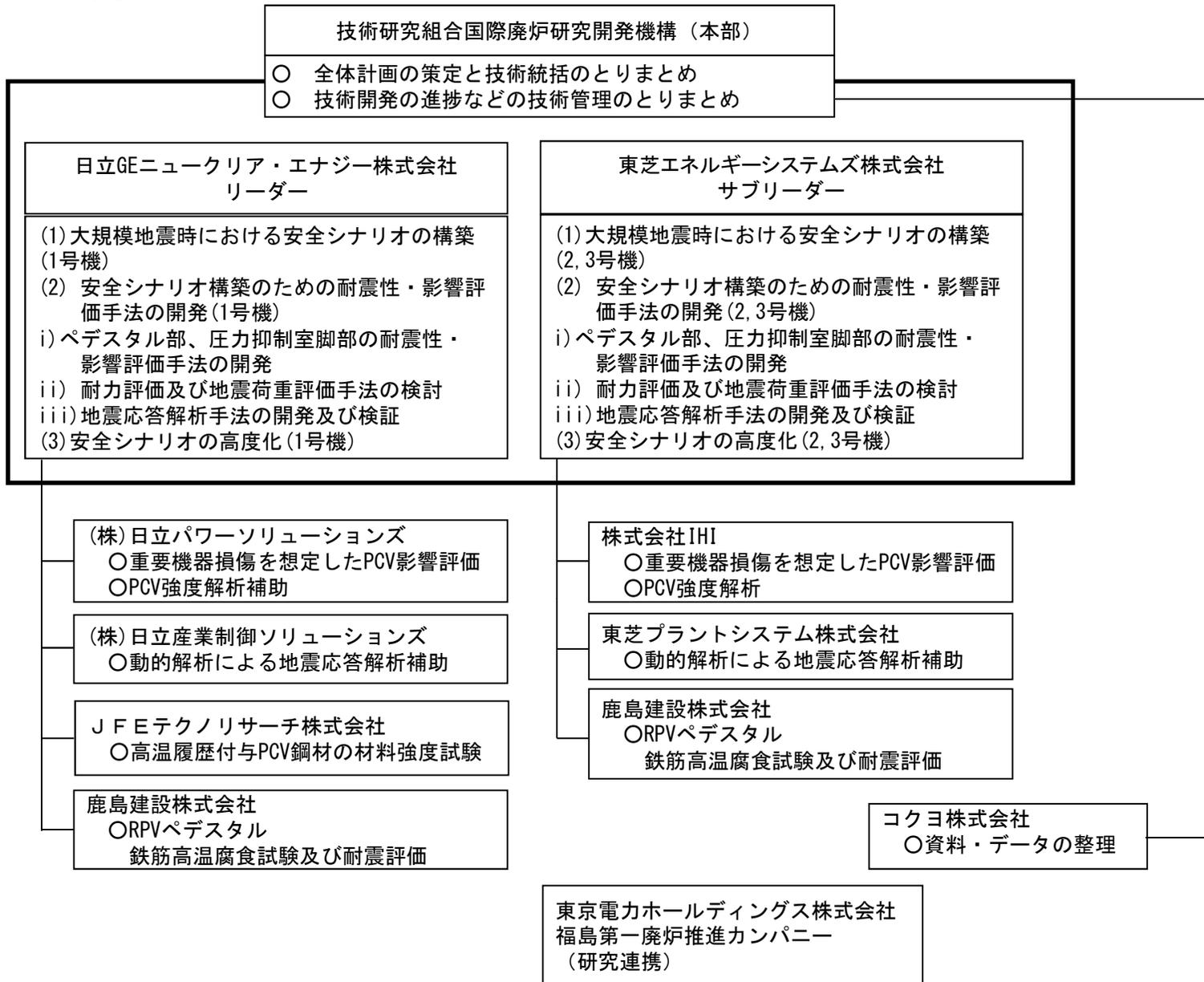


4. 実施スケジュール(全体工程)



全体工程からみた今回の実施範囲

5. 実施体制図



6. 実施内容

(1)大規模地震時における安全シナリオの構築

- ①大規模地震時における安全確保の考え方
- ②大規模地震に起因する大型機器損傷の想定
- ③大型機器損傷による波及的影響の検討
- ④大規模地震時における安全シナリオの構築

【実施概要】

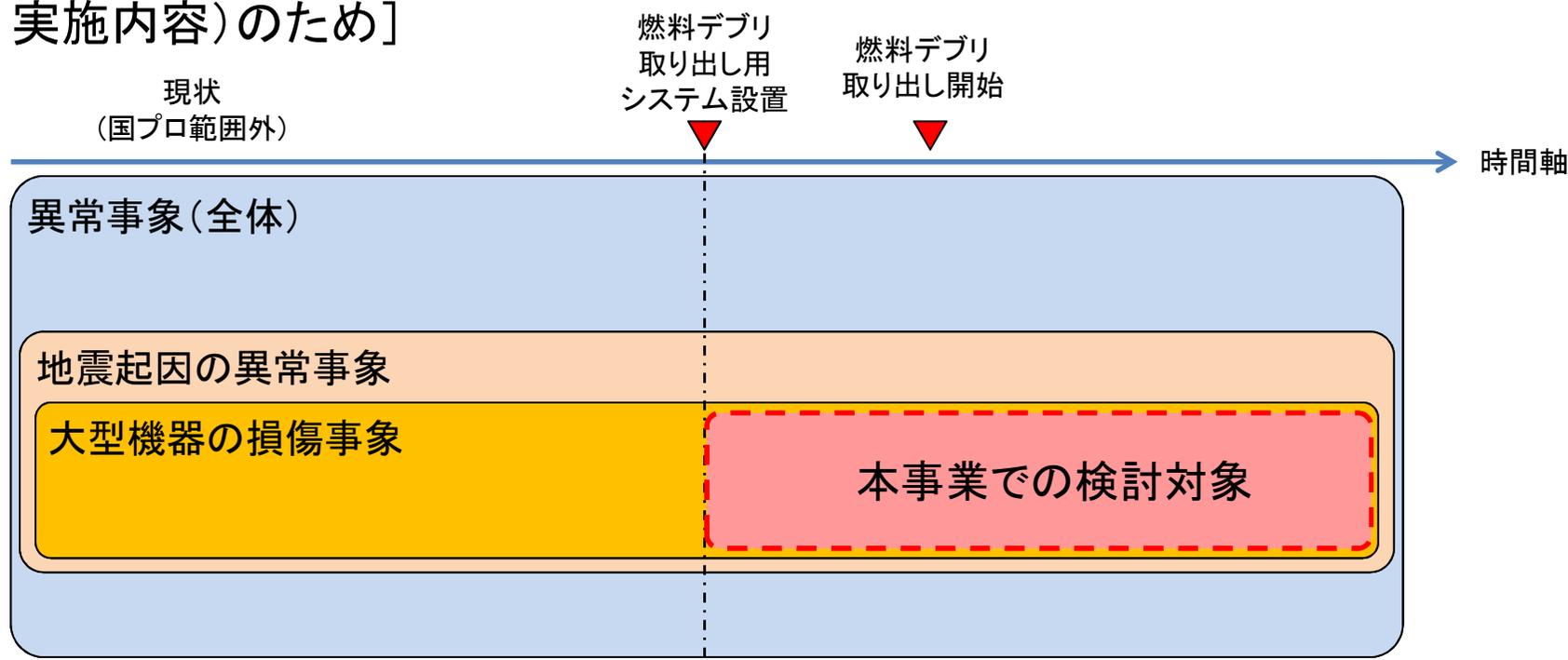
本プロジェクトでは、大規模地震による大型機器への影響評価と並行して、大規模地震による大型機器の損傷を起因とする潜在的なリスクに対しての安全シナリオ[安全機能の維持または事故収束における対応の流れ]を構築する。

【目的】

燃料デブリ取り出し時における地震の潜在的なリスクへの対応を図るため、燃料デブリ取り出し開始までに実施すべき設備対策および準備すべき機動的対応を纏めることで燃料デブリ取り出し計画(工法選定)に資することを目的とする。

< 検討対象 >

- 燃料デブリ取り出しに向けた種々の取組みにおけるリスクについては、各事業(PCV補修PJ、サンプリングPJ、燃料デブリ取り出しPJなど)を中心に検討を進めている。
- 本事業では、地震起因の大型機器損傷事象について、事故収束のための設備が現状から変化する、燃料デブリ取り出し用の設備設置以降の安全シナリオについて検討する。[現状のリスク把握・対処は国プロ範囲外(事業者実施内容)のため]



①大規模地震時における安全確保の考え方

- (i) 地震による大型建造物の損傷に対しては、敷地境界での被ばく線量を基準値以下とすることを目的とした安全シナリオを検討する。
安全シナリオについては、地震時の有効性を考慮し、常設設備と機動的対応の組み合わせを検討する。^[*1]
- (ii) 大型建造物損傷の損傷について、波及的な影響を整理し、各事象に対して影響度(被ばく線量)を踏まえた設備を検討する。^[*2]
- (iii) 安全シナリオの構築においては、1F固有の状況を考慮する。
[例]・PCVおよび建屋については、過度な被ばく無しに完全止水する(静的バウンダリとする)ことが技術的に困難である^{[*3] [*4]}。
 - ・放射性物質の減衰により、大規模な公衆被ばくに繋がるリスクが低下している。

[*1] 燃料デブリ取り出し工法・システム、耐震・被ばく評価の結果を踏まえ、安全シナリオは適宜見直しを行う。

[*2] 最終的に(実機設計段階では)、リスク[事象の発生頻度×影響度(被ばく線量)]に応じた設備の信頼性を確保することが理想ではあるが、現時点では地震ハザード等の不確実性が大きいことから確率的な議論の前段階として、被ばく量による重みづけを検討。

[*3] 軽水炉では閉じ込め機能を静的なバウンダリにより達成しているが、1Fでの静的バウンダリ構築には多大な被ばくを要する見込みであることから、動的な機器による信頼性確保(多重性や多様性の確保)を含めて検討する。

[*4] 現状、安全機能[冷却(注水)/臨界管理(未臨界監視)/閉じ込め(地下の水位差管理)]は、動的機器により確保している。

(1)大規模地震時における安全シナリオの構築

②大規模地震に起因する大型機器損傷の想定

大規模地震により損傷の可能性がある大型機器として、以下を想定。

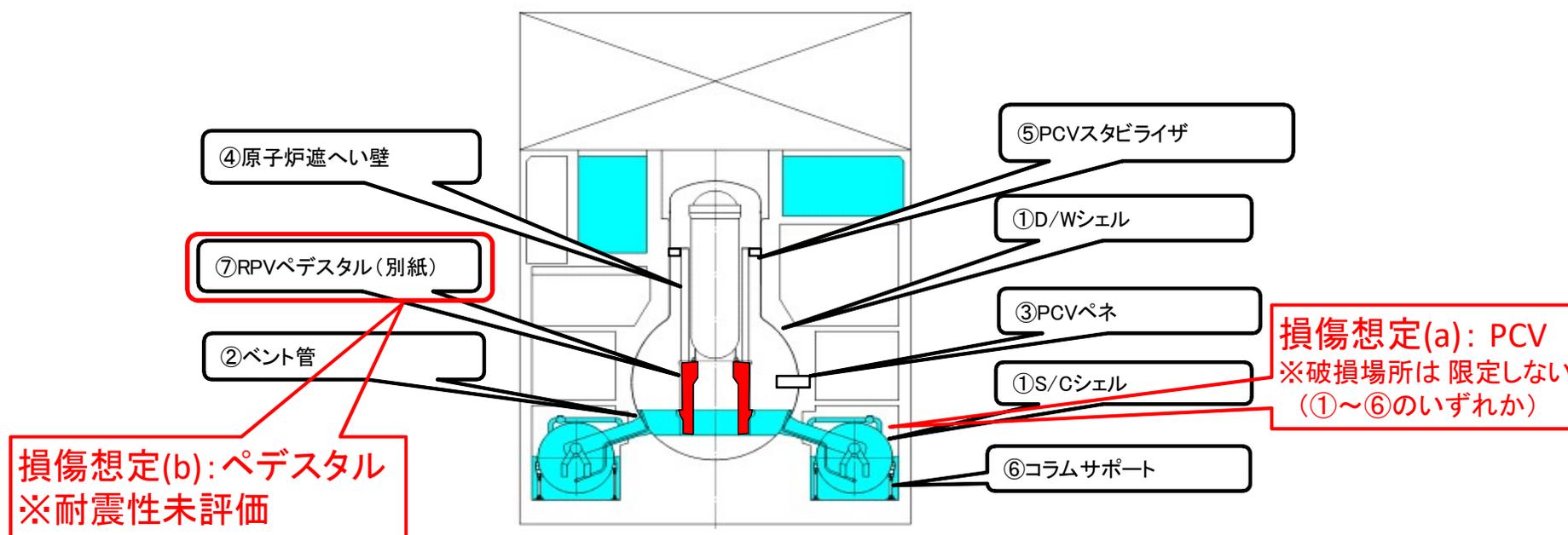
[損傷を想定する大型機器]

(a) PCV

昨年度までのPCV耐震評価により、耐震裕度が比較的低い結果となった箇所はS/C脚部であるが、1～3号機の実機状態に不確かさがあることから、破損箇所を限定せず安全シナリオを構築する。

(b) ペDESTAL

現時点で耐震裕度が把握されていない箇所(本事業にて耐震評価を実施)



昨年度までのPCV耐震評価対象部位

②大規模地震に起因する大型機器損傷の想定 [(a) PCV]

- ・1～3号機のPCVは事故により損傷しており、気密容器(静的バウンダリ)としての機能は喪失している。また、完全な気密性を確保するための補修は現実的に(線量面で)困難な状態である。
- ・上述の状況を踏まえ、PCVについては以下の安全に関わる機能が要求されると考えている。

機能1:PCV開口(気相)の増加を防止し、動的機器(排気ファン等)による
差圧管理^[*1]を可能とする。

機能2:PCV開口(液相)の増加を防止し、動的機器(排水ポンプ等)による
水位制御^[*2]を維持可能とする。

[*1] 現状 : 正圧(～数kPa)
燃料デブリ取り出し時 : 負圧(100Pa以上)

[*2] 現状 : トーラス室水位を制御
燃料デブリ取り出し時 : D/W, S/C, トーラス室水位を制御

⇒PCV(S/C)に関連する機能は、気相／液相によって相違することから、S/C脚部損傷によって開口が生じる箇所(『気相』／『液相』)毎に波及的影響を検討する。

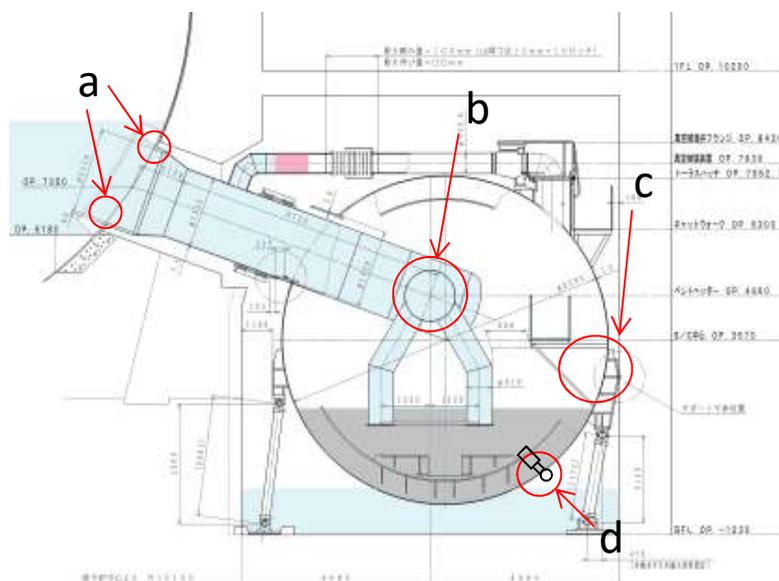
項目	想定	備考
破損モード	地震荷重によりS/C脚部が損傷し、PCVバウンダリのうち許容変位(応力)が小さい箇所に開口が発生(拡大)	
開口箇所	開口の場所は限定せず、PCVバウンダリのいずれか(気相／液相)に生じることを想定	耐震裕度の低いS/C脚部が損傷した場合の推定損傷箇所は次紙参照
開口面積	最大想定: ベント管ギロチン破断	耐震解析から開口面積の評価は困難

②大規模地震に起因する大型機器損傷の想定[(a) PCV]

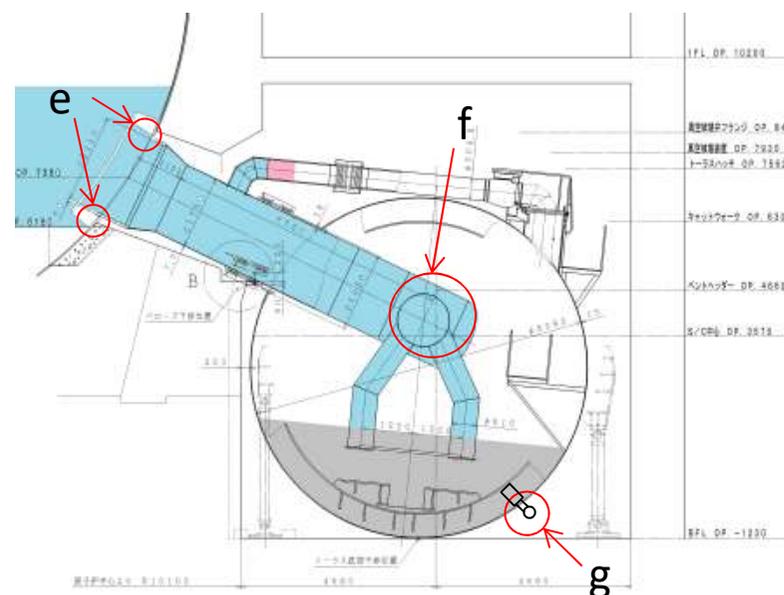
<参考>

S/C脚部損傷に伴う開口想定箇所[1号機]

S/C脚部が損傷した場合の移動量(最大想定)に基づき、
バウンダリの損傷(開口)が想定される箇所を下図に示す。



水平方向移動想定
移動量458mm



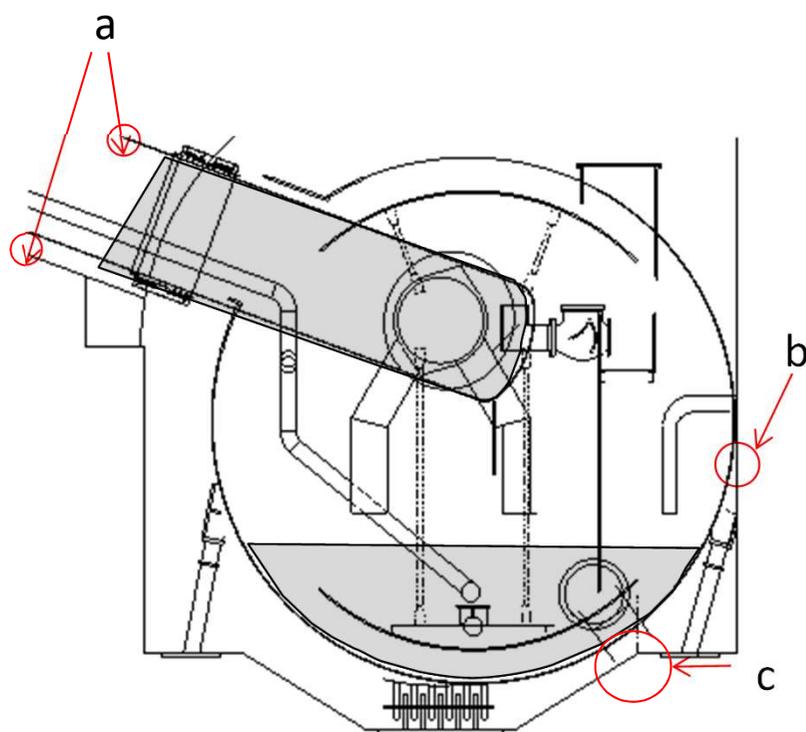
鉛直方向移動想定
移動量745mm

②大規模地震に起因する大型機器損傷の想定[(a) PCV]

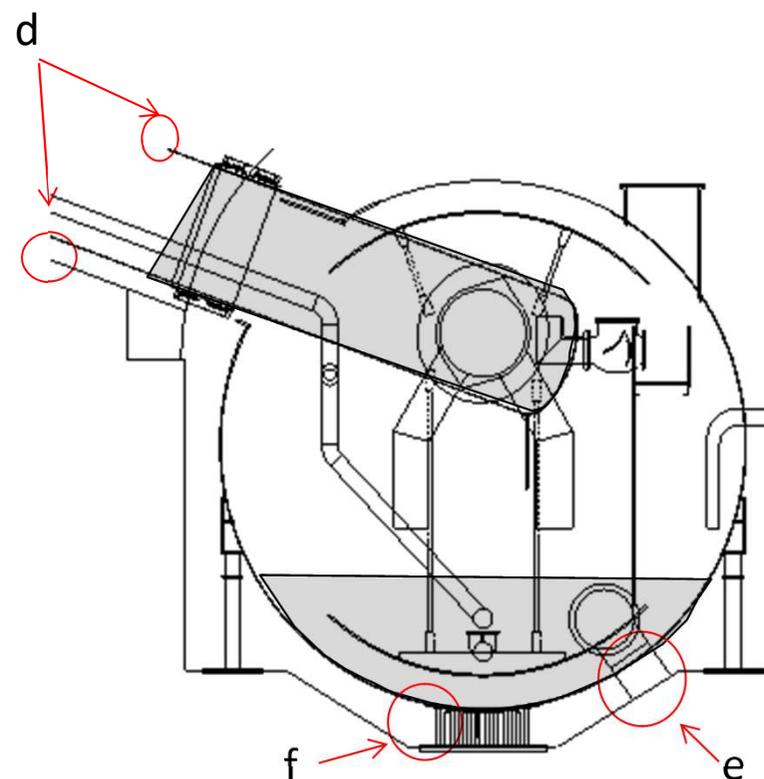
<参考>

S/C脚部損傷に伴う開口想定箇所[2/3号機]

S/C脚部が損傷した場合の移動量(最大想定)に基づき、
バウンダリの損傷(開口)が想定される箇所を下図に示す。



水平方向最大移動想定
移動量557mm



鉛直方向移動想定
移動量159mm

(1)大規模地震時における安全シナリオの構築

②大規模地震に起因する大型機器損傷の想定 [(b) ペDESTAL]

ペDESTALはRPVの支持機能を有した設備である。また、ペDESTAL損傷により落下物（コンクリート片など）が発生する場合には、これによるPCV内の安全機能を有した機器への影響を考慮する必要がある。

機能1：RPVの支持機能（RPVの変位を制限）

機能2：自身の損傷による落下物（コンクリート片）による安全系設備^[*1]への影響防止

[*1] 燃料デブリ取り出し時の安全系設備の構成例は次紙参照。

⇒『RPVの移動』および『コンクリート片の落下』による波及的影響を検討する。

項目	想定	備考
破損モード	地震荷重によりペDESTALに亀裂が発生、一部コンクリート片が落下、強度不足となった場合にはRPVが移動	
RPV移動量	— (PCV内で移動することを想定)	RPV移動により、接続配管（ペネを含む）の損傷を想定 [影響範囲の想定は次紙参照]
コンクリート片落下量	— (D/W下部[ペDESTAL内外]に落下することを想定)	コンクリート片の落下により、D/W下部の機器に衝突・損傷することを想定 [影響範囲の想定は次紙参照]

(1)大規模地震時における安全シナリオの構築

②大規模地震に起因する大型機器損傷の想定[(b) ペDESTAL]

ペDESTALの損傷による機器の損傷を想定する範囲を以下に示す。

＜燃料デブリ取り出し時の設備構成案＞

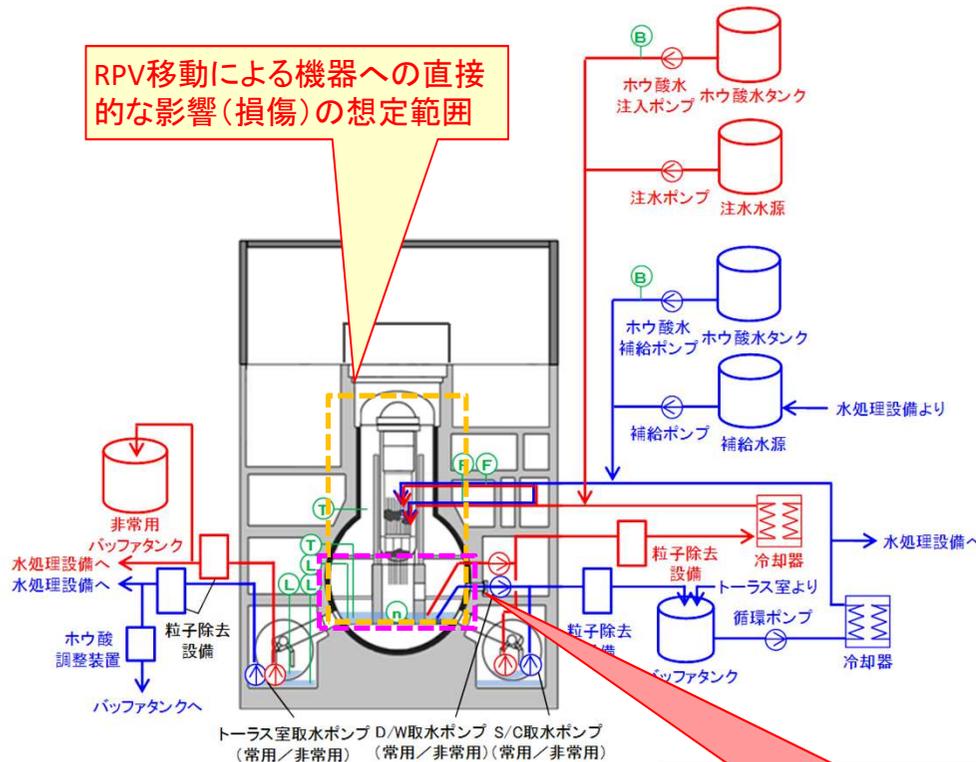
液体系システム
(全体イメージ図)※

気体系システム
(全体イメージ図)※

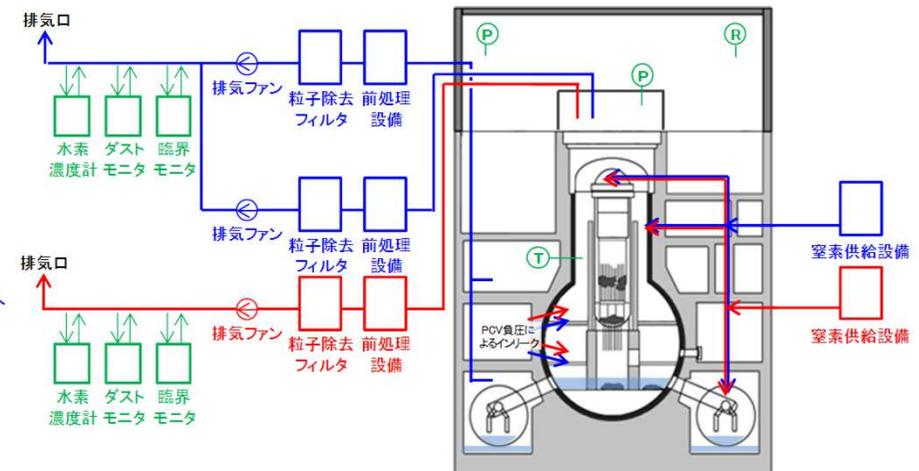
【凡例】
青字:常用の対処設備
赤字:非常用の対処設備
緑字:監視設備

監視計器略号
L:水位計
T:温度計
P:圧力計
F:流量計
n:中性子モニター
R:線量モニター

RPV移動による機器への直接的な影響(損傷)の想定範囲



コンクリート片の落下による機器への直接的な影響(損傷)の想定範囲

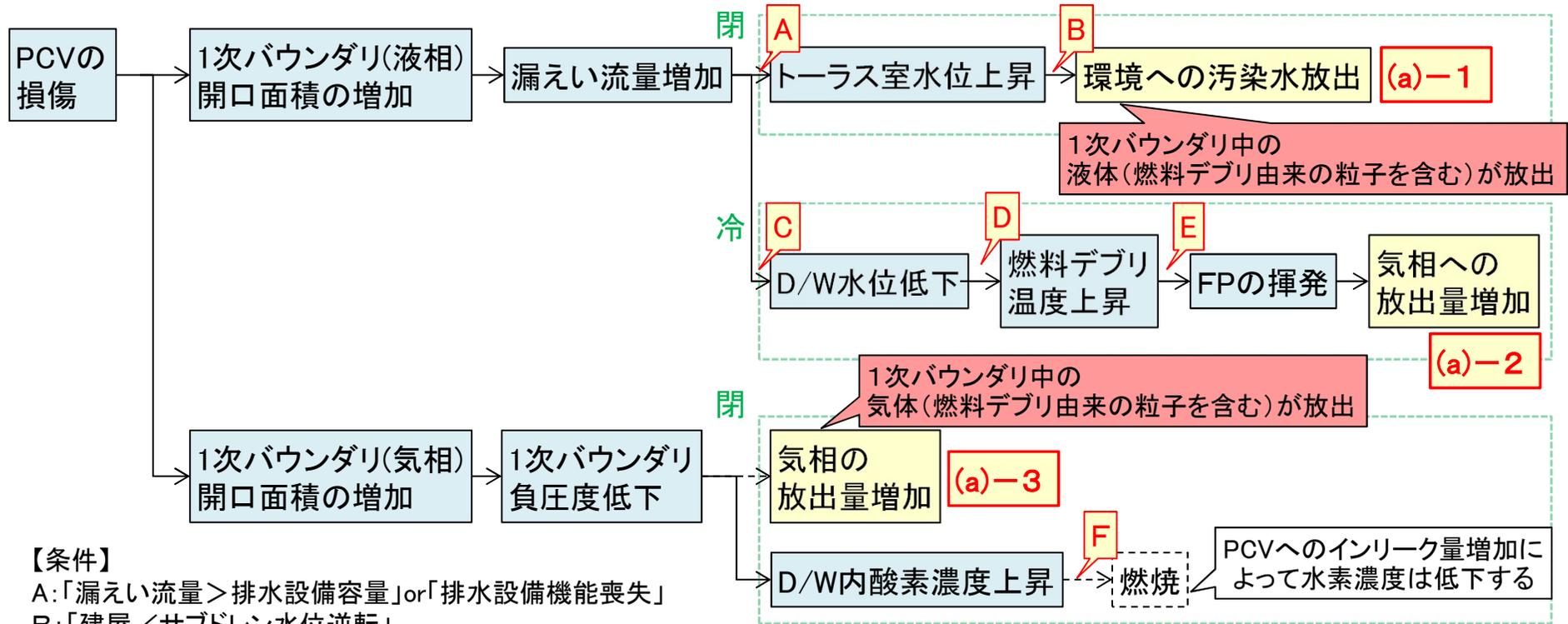


※本図は、機能要求を満足するための実施形態の一例であり、設備の設置位置(R/Bの内外)や機器の型式を特定するものではない。

(1)大規模地震時における安全シナリオの構築

③大型機器損傷による波及的影響の検討[(a) PCVの損傷]

PCVの損傷に伴う波及的影響を検討し、現時点で影響が大きいと考えられる事象を抽出((a)-1, 2)。各事象の影響については、関連PJでの検討を反映する。



【条件】

A:「漏えい流量 > 排水設備容量」or「排水設備機能喪失」

B:「建屋／サブドレン水位逆転」

[短期]「1次バウンダリ保有水量 > 地下階バッファ容量」かつ「漏えい流量 > 排水設備容量」or「排水設備機能喪失」

[長期]排水設備機能喪失(長期)

C:「漏えい流量」>「注水流量」

D:「D/W水位が冷却の必要水位以下」

E:「セシウム融点(約200°C)以上」

F:水素濃度は減少、時間的猶予大

閉:放射性物質の閉じ込め機能に関わる事象

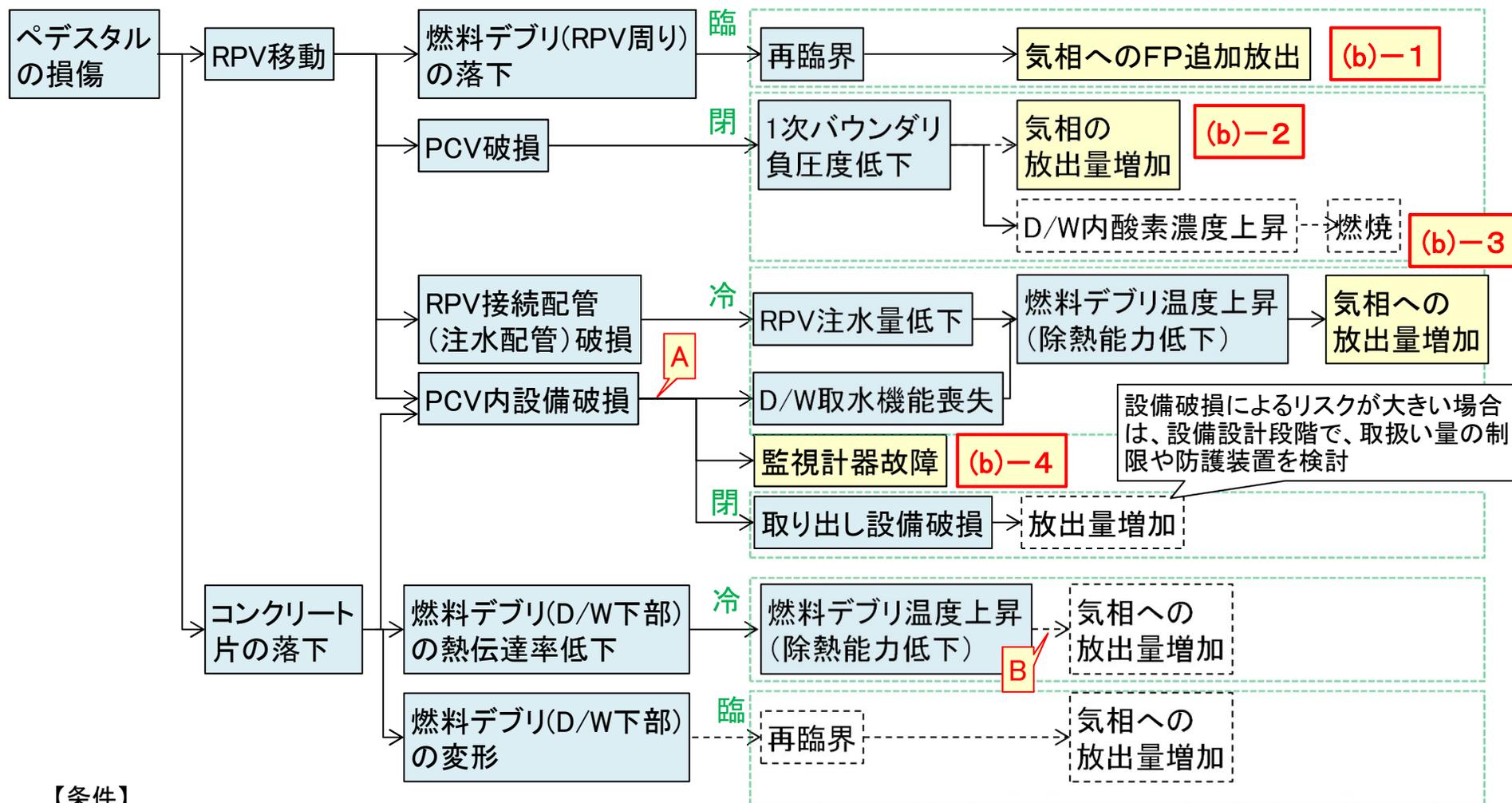
冷:崩壊熱の除去機能に関わる事象

臨:未臨界維持機能に関わる事象

※破線は、現時点で可能性が少ないと推定される条件／事象 (プラント状態に関する知見を反映し、適宜見直しが必要。)

(1)大規模地震時における安全シナリオの構築

③大型機器損傷による波及的影響の検討[(b) ペデスタル]



【条件】

- A: 破損モードとして、配管の破損、設備の故障を想定。
[配管の閉塞(PCV排気ラインなど)の考慮していない。]
- B: D/W底部については、注水している限り冷却可能と想定。

※破線は、現時点で可能性が少ないと推定される条件/事象
(プラント状態に関する知見を反映し、適宜見直しが必要。)

(1)大規模地震時における安全シナリオの構築

④安全シナリオの検討[(a) PCVの損傷] (1/2)

影響が大きいと想定される事象に対する、波及的影響への対処(安全シナリオ)の検討結果を示す。設備については、燃料デブリ取り出しPJなどと連携し、適宜見直しを行う。

No.	対処すべき事象	検知設備[案]	対処設備[案]			備考
			通常	異常時	機動的対応	
(a)-1	環境への汚染水放出 (PCV漏えい量増加による建屋/サブドレン水位逆転)	トーラス室水位計 D/W水位計 S/C水位計	常用トーラス室 排水設備	非常用トーラス室 排水設備	可搬式トーラス室 排水設備	1次バウンダリ保有水量 ≤地下階バッファ容量 [気中工法]
				非常用トーラス室 排水設備 地下バッファタンク		1次バウンダリ保有水量 >地下階バッファ容量 [冠水工法]
(a)-2	気相への放出量増加 (燃料デブリの温度上昇)	ダストモニタ PCV温度計	常用注水設備	非常用注水設備 or 常用注水設備 (注水流量増加)	可搬式注水設備	かけ流しの流量は確保可能 漏えい量によってD/W 水位は低下

<説明(例)>事象(a)-1の安全シナリオ

- ・S/C脚部損傷により、PCVからトーラス室への漏えい量が増加した場合には、トーラス室の水位上昇(またはD/W, S/C水位計の変化)により検知する。
- 対処設備(異常時)*によりトーラス室からの排水を実施し、トーラス室の水位上昇を防止する。
※対処設備(異常時)は、1次バウンダリの保有水量による。
- ・上記対応で収束しない場合には、対処設備(機動的対応)により、トーラス室からの排水を実施し、建屋とサブドレンの水位逆転を防止する。

(1)大規模地震時における安全シナリオの構築

④安全シナリオの検討[(a) PCVの損傷] (2/2)

No.	対処すべき事象	検知設備[案]	対処設備[案]			備考
			通常	異常時	機動的対応	
(a)-3	気相への放出量増加 (PCV負圧度低下)	PCV圧力計 建屋内モニタリン グ設備	常用1次バウンダ リ排気設備(PCVの 負圧維持)	非常用2次バウン ダリ排気設備(建 屋の負圧維持) ※補足	可搬式2次バウン ダリ排気設備 ※補足	

※補足

地震によりPCV(1次バウンダリ)が負圧を維持できないほど大規模に損傷するような事象に対し、事象発生後にシステム側で対処するためには、以下のような課題がある。

- ・2次バウンダリを利用するため、設備規模が過大となる。
- ・2次バウンダリの耐震健全性が必要となる。
(特に、R/Bの開口が負圧を維持不可能となるほど増加しないこと)
- ・機動的対応については、時間的猶予が短く対応が困難な可能性がある。

事故後の対処が困難な場合には、事象発生前(取り出し作業中)の段階で、PCV内の放射能濃度の制限する方法(他プロジェクト検討中)が有効と考えられる。

- 例) 燃料デブリを加工する近傍に浄化設備を設置 [基盤技術PJ]
- PCV排気を循環運転 [工法・システム高度化PJ]
- 燃料デブリ加工量を制限 [工法・システム高度化PJ/基盤技術PJ]

(1)大規模地震時における安全シナリオの構築

④安全シナリオの検討[(b) ペDESTAL損傷]

No.	対処すべき事象	検知設備[案]	対処設備[案]			備考
			通常	異常時	機動的対応	
(b)－1	気相へのFP追加放出 (再臨界)	中性子モニタ 臨界モニタ ダストモニタ	常用ホウ酸水注水 設備 or 非溶解性中性子 吸収材	非常用ホウ酸注水 設備 or 注水量低下 (D/W水位低下)	可搬式ホウ酸注水 設備 or D/W排水設備 (D/W水位低下)	臨界監視設備のうち、 希ガスモニタはペDESTAL 損傷の影響なし
(b)－2	気相への放出量増加 (PCV負圧度低下)	PCV圧力計 建屋内モニタリン グ設備	常用1次バウンダ リ排気設備(PCVの 負圧維持)	非常用2次バウン ダリ排気設備(建 屋の負圧維持) ※補足(前頁)	可搬式2次バウン ダリ排水設備 ※補足(前頁)	
(b)－3	気相への放出量増加 (燃料デブリの温度上 昇)	中性子モニタ 臨界モニタ ダストモニタ	常用注水設備	非常用注水設備 or 常用注水設備 (注水流量増加)	可搬式注水設備	D/W水位は維持された 状態(D/W取水設備が使用 出来ない場合、注水 は不可)
(b)－4	監視計器異常	－ ※異常信号 (例:中性子 モニタ)	当該監視計器 (例:中性子 モニタ)	代替監視計器 (例:非常用臨 界モニタ)	代替評価方法 (例:建屋外のガス モニタリング)	当該事象による直接的 な被ばく量の増加はない

(1)大規模地震時における安全シナリオの構築

④安全シナリオの検討[耐震評価結果概要]

本事業では、安全シナリオの検討と並行して、耐震評価手法の開発を行った。評価手法の開発に合わせて実施した解析の結果(概要)を下表に示す。

表. 耐震評価結果概要^[*1]

評価対象	条件	1号機	2号機	3号機
PCV(S/C脚部以外)	気中工法～冠水工法	○ (前期国プロ)	○ (前期国プロ)	○ (前期国プロ)
PCV (S/C脚部)	S/C内充填止水条件 ^[*1] でのS/C脚部等の弾性時刻歴解析	△(15年後) △(40年後)	△(40年後)	△(40年後)
	S/C内充填止水条件 ^[*1] でのS/C支持部の極限解析(弾塑性解析)	○	○	○
	詳細解析(1号機:時刻歴弾塑性解析) (2/3号機:ベント系の詳細解析)	○(40年後)	○	○
ペDESTAL	コンクリートと鉄筋の強度劣化を考慮 MCCIによる浸食影響を考慮 ^[*2]	○	○	○

[*1] いずれも600gal(Ss地震動)で、S/C内充填量低減ケースでの解析結果。△はS/C内機器一部×でS/Cシェルは○。

[*2] 600gal(Ss地震動)で、MCCI浸食影響考慮ケースの解析結果。

- S/C脚部については、基準地震動Ss(600gal)条件での耐震性を確認した。
- ペDESTALについては、事故時高温履歴および燃料デブリによる浸食を想定した1号機について、想定条件に対する耐震性を確認した。
- 但し、S/C脚部、ペDESTALいずれの解析は、実機条件の不確かさを伴う解析結果であることに注意が必要である。

④安全シナリオの検討(影響のまとめ[現状])

No.29

現時点での被ばく評価結果およびシステム検討状況に基づき、大型機器損傷に起因する事象の相対的な影響を以下に示す。被ばく評価については、手法を含めて検討中の段階(工法・システム高度化PJ、臨界管理PJ)ではあるが、No.(a)-1水位逆転による汚染水放出の潜在的な影響が大きい可能性があり、設備の信頼性確保については特に注意が必要となる見込み。

損傷機器	No.	対処すべき事象	発生頻度		影響(被ばく量) 大:事故時基準を 超える可能性あり 中:事故時基準以下 小:事故時基準より 十分小さい	備考 (被ばく評価 の枠組み)
			大型機器 損傷	対処設備 機能喪失		
PCV	(a)-1	環境への汚染水放出 (建屋/サブドレン水位逆転)	評価技術 を開発中		公衆:小~大 ^[*2] 作業員:小~大 ^[*2]	
	(a)-2	気相への放出量増加 (燃料デブリの温度上昇)	(詳細設 計段階で 評価)	詳細設計 段階で 評価 ^[*1]	公衆:小(<<1mSv) 作業員:小	工法システム 高度化PJ
	(a)-3	気相への放出量増加 (差圧喪失による漏えい)	(詳細設 計段階で 評価)		公衆:中(≒5mSv) 作業員:中	
ペデス タル	(b)-1	気相へのFP追加放出 (再臨界)	評価技術 を開発中			公衆:小(<<1mSv) 作業員:中
	(b)-2	気相への放出量増加 (差圧喪失による漏えい)	(詳細設 計段階で 評価)		公衆:中(≒5mSv) 作業員:中	工法システム 高度化PJ
	(b)-3	気相への放出量増加 (燃料デブリの温度上昇)	(詳細設 計段階で 評価)		公衆:小(<<1mSv) 作業員:小	
	(b)-4	監視計器異常			— (直接の増加なし)	—

[*1] 今後設置する設備のため、設備信頼性は調整可能(耐震補強、多重化/多様化など)。現時点では有意な差がないと仮定。

[*2] 汚染水漏えい時の被ばく評価手法については類似の実績ある評価手法がないため、評価の不確かさは大きい。

(現状は保守側の想定を記載しているが、現実的な評価手法が確立されれば、影響が小さくなる可能性もある。)

<まとめ>

- 大型機器(S/C脚部、ペDESTAL)の損傷事象に伴う波及的影響のうち、影響(被ばく量)の大きい事象について、それぞれの対処方法を検討。基本的に他事業[工法・システム高度化PJ]で検討を進めている燃料デブリ取り出し時のシステムでの不足はないという結果。(大型機器が損傷した場合でも、公衆・作業者の防護のための手段がある。但し、システムの地震時の有効性を確保する必要がある。)
- 想定される影響(被ばく量)が比較的大きい可能性がある「PCV(液相部)損傷による漏水量増加」に対処する設備は、地震時の有効性に加えて設備信頼性の確保(設備多重性など)の面での注意が必要と考えられる。
- 「PCV(気相部)損傷による放出量増加」については、事故後にシナリオ側で対処する場合の課題が大きい(設備規模、成立性など)ことから、燃料デブリ取り出し時のPCV放射能濃度の制限することが有効と考える。
- 耐震評価の結果、大型構造物(PCV,ペDESTAL)について、一定条件(600gal)^{※1}での耐震性が確認された。そのため、地震に起因する大型機器損傷に対処する設備や損傷を防止するための耐震補強技術を導入する場合^{※2}には、有効性を示すために同等以上の耐震性が求められる。

※1: S/C脚部補強無しでダウンカマ止水する場合には、S/C水位現状以下およびダウンカマ止水材高さ0.68m以下(1号機)0.745m(2/3号機)が条件。(関連:PCV補修PJ)

また、実機状態(特にペDESTAL浸食状態)については不確実性があることは注意が必要。

※2: 現在開発中の技術としては、工法・システム高度化PJでのペDESTAL補強工法 [1号機]

(2)安全シナリオ構築のための耐震性影響評価手法の開発

- ①【1号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:0.68m)のS/C脚部検討結果
- ②【2/3号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:1.5m)のS/C脚部検討結果
【2/3号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:0.745m)のS/C脚部検討結果
- ③地震応答解析手法の開発及び検証
- ④RPVペデスタルの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価
- ⑤RPVペデスタルの鉄筋高温腐食試験

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

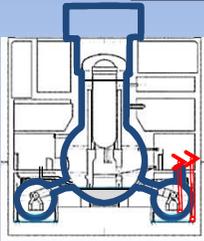
燃料デブリ取り出し時の想定PCV水位と必要な止水範囲[1号機の例]

「原子炉格納容器漏えい箇所の補修技術の開発PJ」にて検討している燃料デブリ取り出し時の想定PCV水位レベルおよび止水範囲として、ケース2-2に示すS/C脚部の耐震性評価を実施する。

S/C脚部補強無し想定ケース

ケース1 DW水位T.P.5031
(ベント管付根下端レベル)

・気中-上アクセス工法
・気中-横アクセス工法



・止水なし
・S/C脚部補強無し

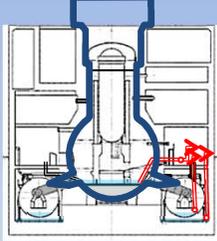
耐震性○(弾性解析評価OK)

課題

- ・かけ流しでの燃料デブリ取り出し方法
- ・D/Wからの取水方法

ケース2-1 DW水位T.P.5864
(真空破壊ライン付根レベル)

・気中-上アクセス工法
・気中-横アクセス工法



・ベント管止水
・S/C脚部補強無し

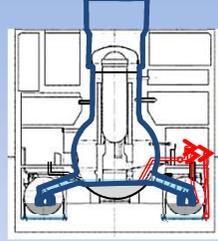
耐震性○(弾塑性解析評価OK)*1

課題

- ・ベント管止水方法
- ・D/Wからの取水方法

ケース2-2 DW水位T.P.5864
(真空破壊ライン付根レベル)

・気中-上アクセス工法
・気中-横アクセス工法



・ストレーナ+クエンチャ+ダウンカマ止水
・真空破壊ライン止水
・S/C脚部補強無し

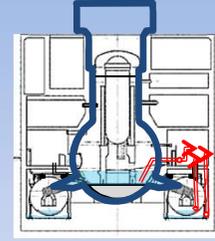
耐震性未評価

課題

- ・ストレーナ・ダウンカマ止水方法
- ・D/Wからの取水方法

ケース3 DW水位T.P.7564
(トラス室天井面レベル)

・気中-上アクセス工法
・気中-横アクセス工法



・ベント管+真空破壊ライン止水
・S/C脚部補強無し

耐震性○(弾塑性解析評価OK)*1

課題

- ・ベント管止水方法
- ・D/Wからの取水方法

異常時の影響

建屋内水位<地下水水位

建屋内水位<地下水水位

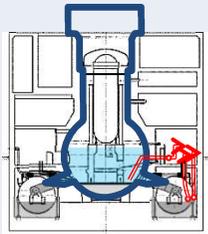
建屋内水位<地下水水位

建屋内水位<地下水水位

S/C脚部補強有り想定ケース

ケース4 DW水位T.P.12564
(電気配線貫通部より下のレベル)

・気中-上アクセス工法



・ベント管+真空破壊ライン+クエンチャ+ストレーナ止水
・S/C脚部補強有り

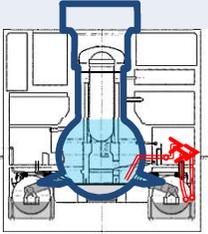
耐震性○(弾性解析評価OK
(ケース7代表))

課題

- ・上部補修止水が困難
- ・ベント管止水方法
- ・D/Wからの取水方法

ケース5 DW水位T.P.18564
(炉心支持板上面レベル)

・気中-上アクセス工法



・ベント管+真空破壊ライン+クエンチャ+ストレーナ止水
・S/C脚部補強有り

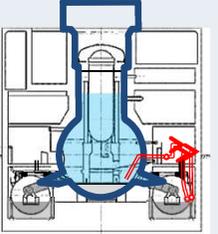
耐震性○(弾性解析評価OK
(ケース7代表))

課題

- ・上部補修止水が困難
- ・ベント管止水方法
- ・D/Wからの取水方法

ケース6 DW水位T.P.22564
(上部格子板上面レベル)(シアラグより下)

・水中-上アクセス工法



・ベント管+真空破壊ライン+クエンチャ+ストレーナ止水
・S/C脚部補強有り

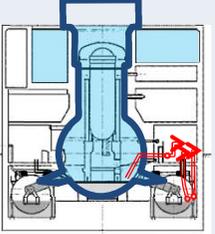
耐震性○(弾性解析評価OK
(ケース7代表))

課題

- ・上部補修止水が困難
- ・ベント管止水方法
- ・D/Wからの取水方法

ケース7 DW水位T.P.37159
(ウェル満水)

・水中-上アクセス工法



・ベント管+真空破壊ライン+クエンチャ+ストレーナ止水
・S/C脚部補強有り

耐震性○(弾性解析評価OK)

課題

- ・上部補修止水が困難
- ・ベント管止水方法
- ・D/Wからの取水方法

異常時の影響

建屋内水位>地下水水位

建屋内水位>地下水水位

建屋内水位>地下水水位

建屋内水位>地下水水位

ケース4
~7のS/C
脚部補強
有の場合
は地下水
水位逆転
のリスク有

注)耐震性評価はS/C脚部の耐震性評価結果を示す。15年後の腐食量を想定した結果である。

*1:1.2倍勾配法(設計・建設規格JISME S NC1-2005)を適用、耐震条件は600gal

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

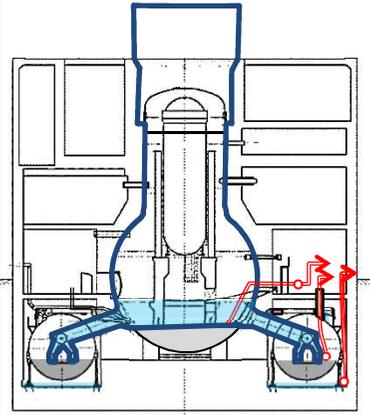
①【1号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:0.68m)のS/C脚部検討結果

<目的>

- ・S/C脚部の耐震性評価は、昨年度、事故15年後時点での評価を実施。その結果、ダウンカマを1.5m埋設した場合、コラムサポートは許容荷重を満足せず、ダウンカマを0.68m埋設した場合は許容荷重以内であることがわかった。
- ・このため、燃料デブリ取り出し作業の継続性を確認するため、事故40年後腐食を考慮したダウンカマ0.68m埋設でのS/C脚部の耐震性評価を実施する。

解析実施ケース

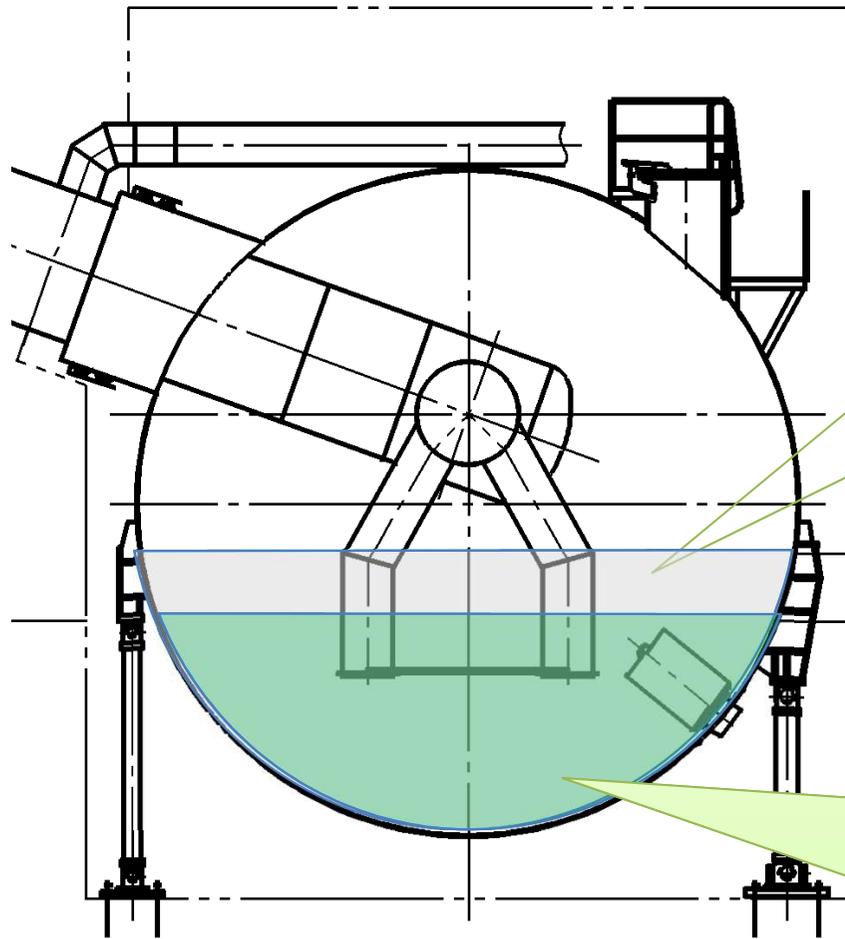
今年度解析実施

	H28-1①	H28-1②	H29①
(DW水位:T.P.7564) (トーラス室天井面レベル) 	<ul style="list-style-type: none"> ・将来想定: 15年後 ・建屋損傷モデル ・D/W水位 : T.P.7564 ・S/C内 : コンクリートT.P.1524 (ダウンカマかぶり厚さ1500mmの場合) ・トーラス室: T.P.-2366 ・ベント管内: 満水 ・真空破壊管内: 補修考慮 ・オペフロ階付加設備: その他付加荷重(セル、燃料取り出し装置等): 約6100ton ・小部屋埋設: なし ・減衰定数: コンクリート5%、鋼材1% (建設時設計用) ・地震波: 現行Ss (600gal) 	<ul style="list-style-type: none"> ・将来想定: 15年後 ・建屋損傷モデル ・D/W水位 : T.P.7564 ・S/C内 : コンクリートT.P.704 (ダウンカマかぶり厚さ680mmの場合) ・トーラス室: T.P.-2366 ・ベント管内: 満水 ・真空破壊管内: 補修考慮 ・オペフロ階付加設備: その他付加荷重(セル、燃料取り出し装置等): 約6100ton ・小部屋埋設: なし ・減衰定数: コンクリート5%、鋼材1% (建設時設計用) ・地震波: 現行Ss (600gal) 	<ul style="list-style-type: none"> ・将来想定: 40年後 ・建屋損傷モデル ・D/W水位 : T.P.7564 ・S/C内 : コンクリートT.P.704 (ダウンカマかぶり厚さ680mmの場合) ・トーラス室: T.P.-2366 ・ベント管内: 満水 ・真空破壊管内: 補修考慮 ・オペフロ階付加設備: その他付加荷重(セル、燃料取り出し装置等): 約6100ton ・小部屋埋設: なし ・減衰定数: コンクリート5%、鋼材1% (建設時設計用) ・地震波: 現行Ss (600gal)
<ul style="list-style-type: none"> ・ストレナ+クエンチャ+ダウンカマ止水 ・真空破壊ライン止水 ・S/C脚部補強無し 	H26-1の床応答加速度の時刻歴波 <ul style="list-style-type: none"> ・事故15年後腐食を考慮 ・弾性解析ではSu値を超える ・コラムサポート部について2倍勾配法でも許容荷重を満足せず。 ⇒S/C脚部補強が必要 	同左 <ul style="list-style-type: none"> ・事故15年後腐食を考慮 ・弾性解析ではSu値を超える ・コラムサポート部について2倍勾配法で許容荷重を満足した。 	H28-2-3の床応答加速度の時刻歴波形を用いて評価する <ul style="list-style-type: none"> ・事故40年後腐食を考慮したダウンカマ0.68m埋設でのS/C脚部の耐震性評価を実施。

①【1号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:0.68m)のS/C脚部検討結果

1F-1

S/C(サブレーションチェンバー)内コンクリート埋設量想定ケース



■T.P.1524埋設

ダウンカマを**1.5m**埋設した場合は、大規模地震時にS/C脚部を含む**S/C各部破損の可能性あり**。(事故15年後腐食想定の前年度解析結果)(PCV補修開発での要素試験では止水性を確認済み)

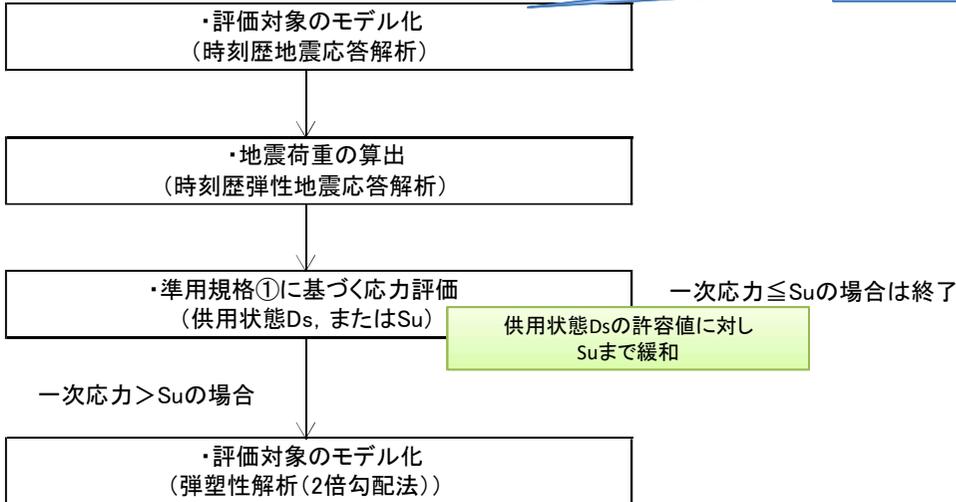
■T.P.704埋設

埋設量を軽減(ダウンカマ**0.68m**埋設)した場合は、事故15年後腐食想定の前年度解析では、コラムサポートは許容荷重以内である。このため、今年度は、事故40年後の腐食想定の前年度解析を実施する。(ダウンカマ**0.68m**埋設)

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

①【1号機】S/C内充填止水(ダウンコマ埋設:0.68m)のS/C脚部検討結果

1F-1 ・1号機の評価フロー 今年度事故40年後腐食想定解析実施



1号機 ドライウェル推定減肉量(片面) (mm)

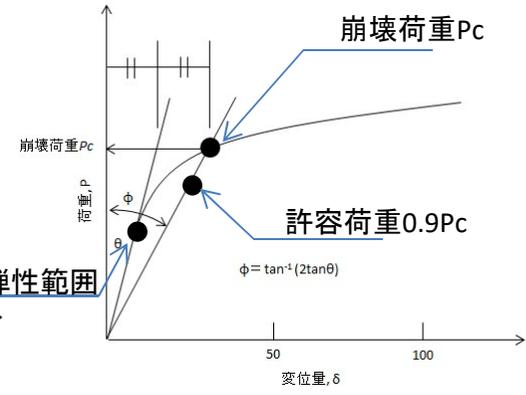
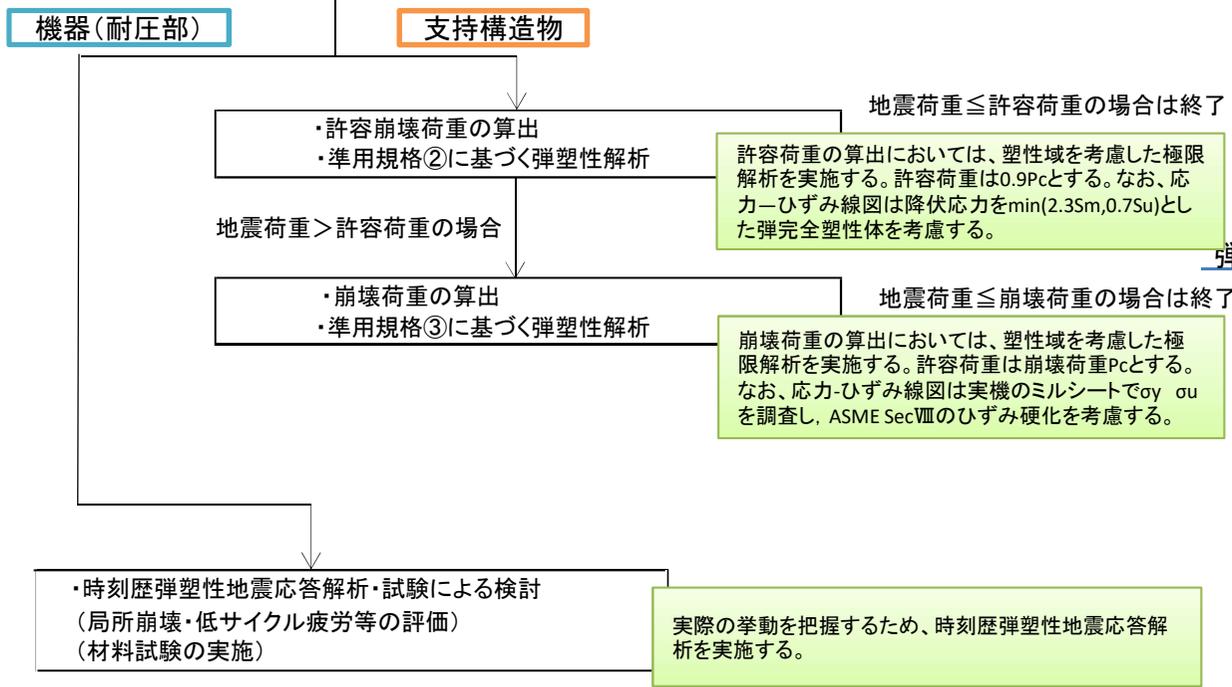
事故後	10年	15年	40年
推定減肉量	2.15	2.44	3.40

1号機 サプレッションチェンバ
推定減肉量(片面) (mm)

事故後	10年	15年	40年
推定減肉量	1.09	1.36	2.30

準用規格

- ①JEAC 4601-2008 耐震設計技術規程
- ②JSME SNC1-2005 設計・建設規格
- ③JSME SNA1-2012 維持規格



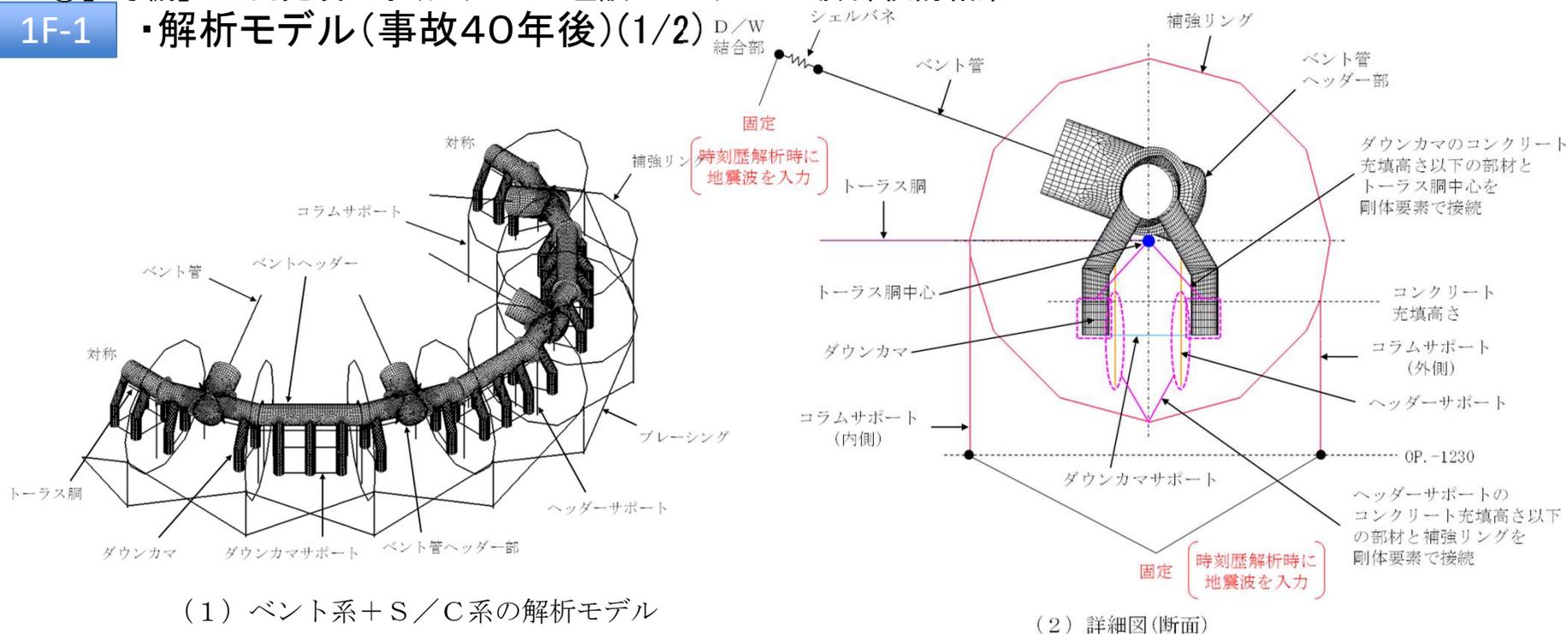
Sm	設計応力強さ
Sy	設計降伏点
Su	設計引張強さ
σ_y	降伏応力
σ_u	引張強さ

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

①【1号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:0.68m)のS/C脚部検討結果

1F-1

・解析モデル(事故40年後)(1/2)



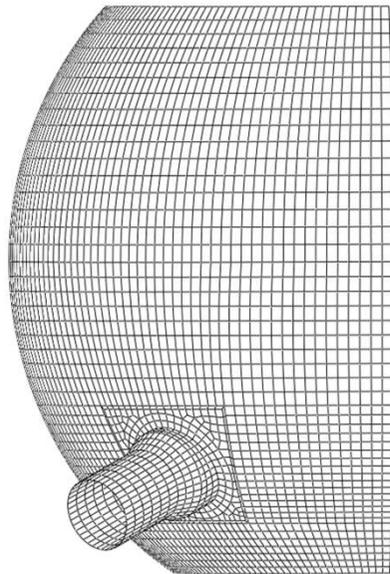
- ・ベント管に作用する地震荷重及びコラムサポートに作用する地震荷重を算出するため、ベント管とS/C系はビーム要素でモデル化する。
- ・S/C内コンクリート埋設によりダウンカマ取付部の地震時応力が厳しくなると予想されるため、ダウンカマとベントヘッダはシェル要素でモデル化する。
- ・時刻歴地震応答弾性解析は、固定部より時刻歴加速度を入力して解析モデルを強制加振させる。
- ・弾塑性解析(2倍勾配法)は、各要素に加速度を静的に負荷する。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

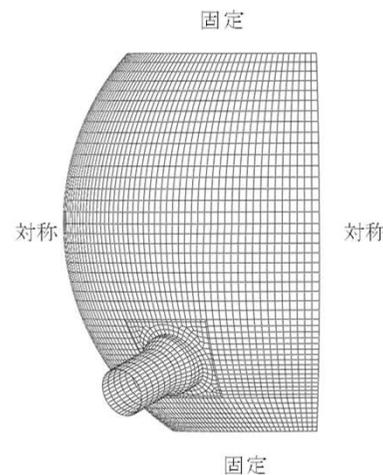
No.37

①【1号機】S/C内充填止水(ダウンカメラ埋設:0.68m)のS/C脚部検討結果

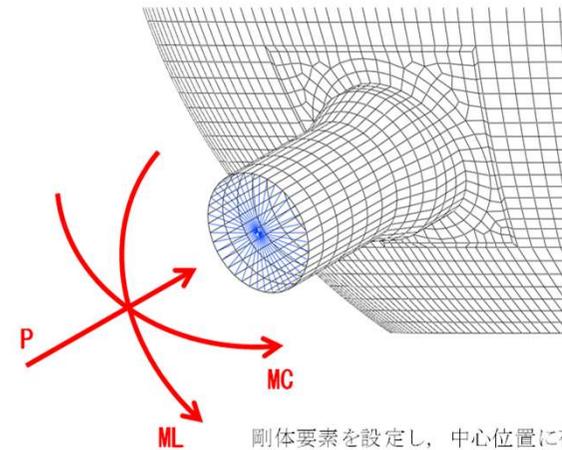
1F-1 ・解析モデル(事故40年後)(2/2)



(1) ベント管とドライウェルとの結合部のFEMモデル



(2) 境界条件



剛体要素を設定し、中心位置に荷重を負荷

(3) 荷重負荷方法

ベント管取付部のシェルモデル

・ベント管取付部の応力評価は、時刻歴地震応答解析で得られたベント管取付部の荷重を上図に示すシェルモデルに負荷して評価する。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.38

①【1号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:0.68m)のS/C脚部検討結果

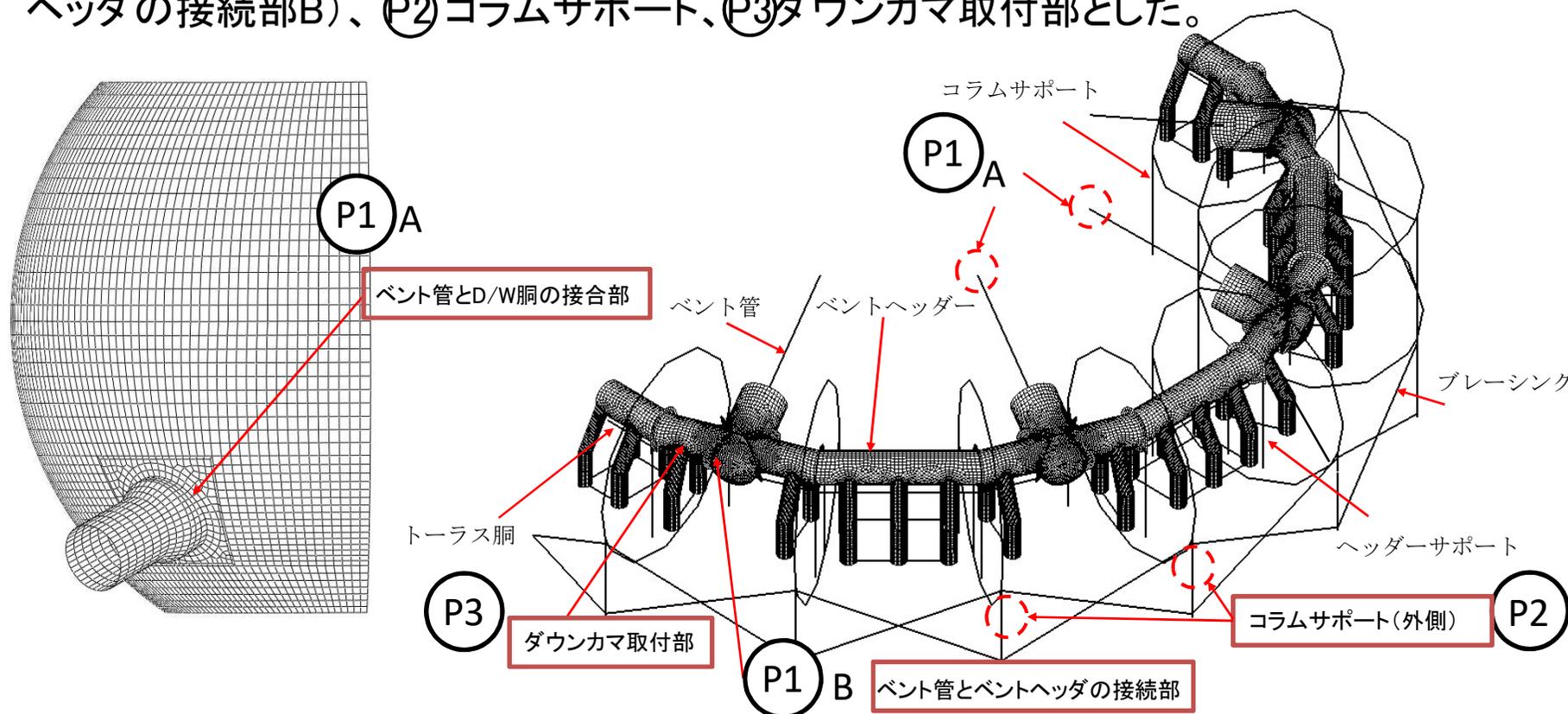
1F-1

PCV構造健全性評価結果(1F-1 準用規格①に基づく応力評価)

・汚染水の建屋外への漏えい抑制の観点から、S/C脚部補強なしの評価ケースとして事故40年後腐食を考慮した部分冠水状態(D/W水位T.P.7.564mレベル)で、ダウンカマを0.68m埋設した場合についての応力評価を実施した。

評価では「JEAC4601-2008 原子力発電所耐震設計技術規程」を準用し、時刻歴弾性地震応答解析による応力評価を実施した。

・応力評価点は、**①** ベント管取付部(ベント管とD/W胴の接合部A、ベント管とベントヘッダの接続部B)、**②** コラムサポート、**③** ダウンカマ取付部とした。



(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.39

①【1号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:0.68m)のS/C脚部検討結果

1F-1		H28-1②			H29①			
(弾性解析結果)					今回解析結果			
対象機器	対象機器		①ベント管(SGV410相当)			①ベント管		
	D/Wシェル(SGV480相当)					D/Wシェル		
	③ダウンカマ取付部					③ダウンカマ取付部		
	②コラムサポート					②コラムサポート		
	D/Wシェル(SGV480相当)					D/Wシェル		
廃食年数(年)		15年後相当			40年後相当			
減衰定数		建設時設計値 (コンクリート5%、鋼材1%)			建設時設計値 (コンクリート5%、鋼材1%)			
S/C内コンクリート		T.P.704			T.P.704			
オペフロ階付加設備		6100 ton			6100 ton			
評価部位		応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	
P1 ベント管取付部	ベント管とD/W層の 接合部A(D/Wシェル)	SGV480相当	152	423	2.78	179	423	2.36
	ベント管とベントヘッダの 接続部B	SGV410相当	418	360 (400)	0.86 (0.96)	436	360 (400)	0.83 (0.92)
P2 コラムサポート	外側コラムサポート	STK490相当	2.247 (1.670)	1	0.45 (0.60)	2.275 (1.696)	1	0.44 (0.59)
	ダウンカマと ベントヘッダの接合部	SGV410相当	319	400	1.25	405	400	0.99

注)・ベント管取付部の一次応力の許容値は、設計・建設規格より、供用状態Dsにおける温度50°Cの値とし、()内の値はSuとする。

・コラムサポートの応力強さは、組合せ応力(圧縮+曲げ) $\sigma_c/f_c + \sigma_b/f_b$ とした。()内は許容値(f_c 及び f_b)に常温でF値をSu値として評価(圧縮に対してはF値を1.2Syとした)した値。

・ダウンカマ取付部の一次応力の許容値は温度50°CにおけるSu値とする。

「S/C内コンクリート(T.P.704)」において、今年度解析実施の「40年後相当」は、ベント管取付部(ベント管とベントヘッダとの接続部)及びコラムサポートは15年後相当と同じようにSu値を超えている。また、ダウンカマ取付部もSu値を超えている。ここで、Suを超えたコラムサポートの変形挙動を把握するため、次頁に述べる弾塑性解析(2倍勾配法)を実施した。上取り出し(D/W水位T.P.7.564m)を考慮した大型機器系連成モデルの地震荷重による応力評価では、許容値を超える部位があることが分かった。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

①【1号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:0.68m)のS/C脚部検討結果

PCV構造健全性評価結果(1F-1 準用規格②に基づく弾塑性解析)

前項において許容値を満足しなかったコラムサポートについて、「JSME設計・建設規格」を準用し、弾塑性解析(2倍勾配法)による評価を実施した。

1F-1		H28-1②				H29①				今回解析結果
対象機器										
	腐食年数(年)	15年後相当				40年後相当				
	減衰定数	建設時設計値 (コンクリート5%、鋼材1%)				建設時設計値 (コンクリート5%、鋼材1%)				
	S/C内コンクリート	T.P.704				T.P.704				
	オベフロ増付加設備	6100 ton				6100 ton				
評価部位	地震荷重*1 水平震度 (G)	弾塑性解析結果*3 水平震度(G) 崩壊荷重Pc (2倍勾配点)	許容荷重*2 Pcr(G)	裕度	地震荷重*1 水平震度 (G)	弾塑性解析結果 水平震度(G) 崩壊荷重Pc (2倍勾配点)	許容荷重*2 Pcr(G)	裕度		
⑥コラムサポート	外側コラムサポート	1.22	1.44	1.30	1.06	1.13	1.22	1.10	0.97	

注記: * 1) 水平震度は、ベント系モデルとS/C系モデルを連成させた解析モデルの弾性時刻歴解析から得られたトラス胴中心の最大応答加速度を示す。

* 2) 許容荷重Pcrは、崩壊荷重Pcに0.9を乗じた値を示す。

コラムサポートは、クラスMC支持構造物であるが、JSME設計・建設規格の炉心支持構造物の規定であるCSS-3160を準用して、極限解析(弾塑性解析)による評価を実施した。応力-ひずみ曲線は弾完全塑性体とし、降伏応力をmin(2.3Sm, 0.7Su)とした。

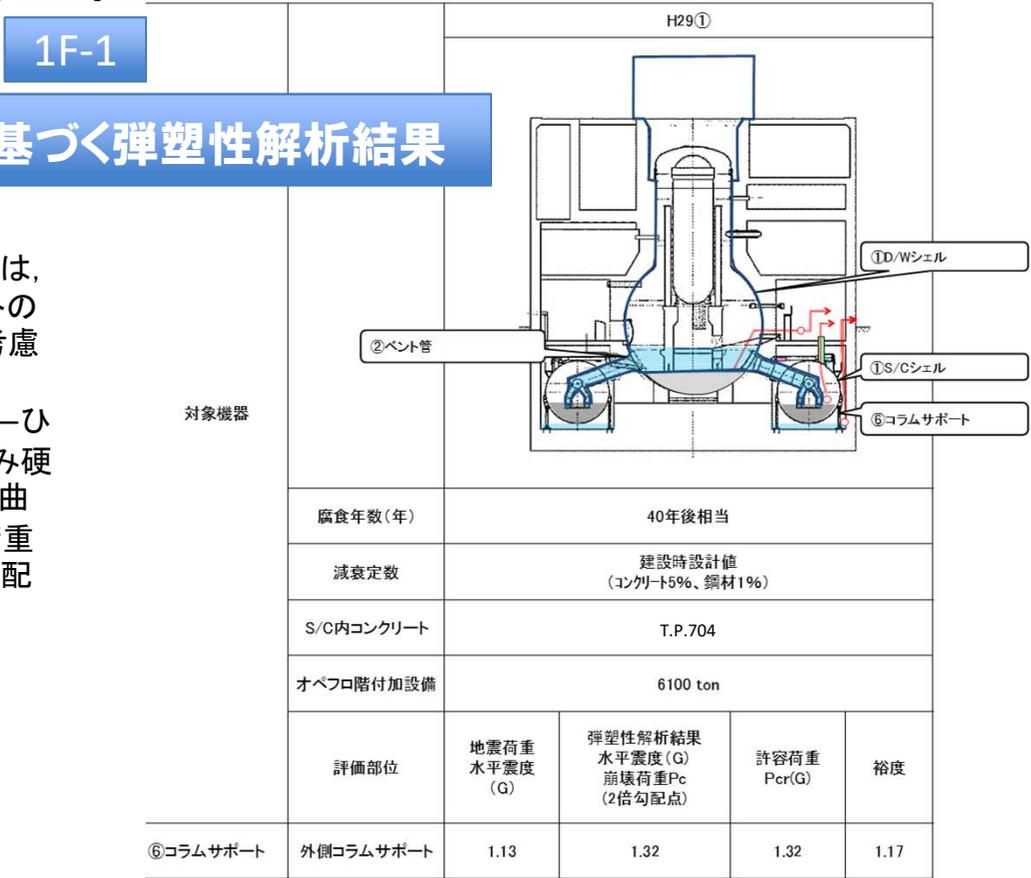
崩壊荷重Pc及び許容荷重Pcrは、JSME設計・建設規格のCSS-3160を準用して定めた。崩壊荷重Pcは、荷重-変位量の曲線(弾塑性解析結果)において、弾性範囲の荷重軸に対する2倍の勾配の直線を求め、この直線と荷重-変位曲線の交点を定めた。この交点を崩壊荷重Pcと定義した。許容荷重Pcrは、崩壊荷重Pcに0.9を乗じた値とした。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

①【1号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:0.68m)のS/C脚部検討結果

PCV構造健全性評価結果(1F-1 準用規格③に基づく弾塑性解析)

コラムサポートについて、「JSME維持規格」を準用した弾塑性解析(2倍勾配法)による評価を実施した。



維持規格を準用した評価では、S/C脚部の実機ミルシートの降伏点 σ_y と引張強さ σ_u を考慮し、ASME SEC.VIII Div.2 ANEX3-Dで定義される応力-ひずみ曲線を参照して、ひずみ硬化を考慮した応力-ひずみ曲線を用いた。ここで、許容荷重Pcrは崩壊荷重と同じ2倍勾配点を用いた。

弾塑性解析(2倍勾配法)の結果、「40年後相当、S/C内コンクリート(T.P.704)」の弾完全塑性体を用いた解析ケースでは、コラムサポートは崩壊荷重以下であったが、0.9倍した許容荷重を満足しないことがわかった。また、維持規格を準用したひずみ硬化を考慮した弾塑性解析結果から、崩壊荷重(=許容荷重)以下であることがわかった。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.42

①【1号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:0.68m)のS/C脚部検討結果

1F-1(ダウンカマ埋設0.68m)のまとめ

<時刻歴地震応答弾性解析結果>

・S/C内充填水(ダウンカマ埋設:かぶり厚さ0.68m)での事故40年後では、コラムサポート、ベント管とベントヘッダーとの接続部及びダウンカマ付根部でSu値を超えることがわかった。

<弾塑性解析結果(2倍勾配法)>

・時刻歴地震応答弾性解析で許容値を満足しなかったコラムサポートについて、弾塑性解析(2倍勾配法)を実施した結果、「JSME設計・建設規格」(弾完全塑性体)を用いた場合には、許容荷重(0.9×崩壊荷重)を満足しなかったが、「JSME維持規格」(ひずみ硬化)を準用した場合には、許容荷重(=崩壊荷重)以下に収まることがわかった。

<S/C内機器(ベント管とベントヘッダーとの接続部及びダウンカマ付根部)破損想定の影響評価>

・大規模地震時に、万一S/C内機器が破損することを想定した場合、D/W底部冠水がS/C内に漏水する可能性があることがわかった。もし、S/C内に漏水した場合はS/C内バッファ容量が十分大きいため(次頁参照)Ss地震後に機動的対応が可能と思われる。

以上のことから、S/C脚部を補強しないでダウンカマを埋設する場合は、埋設深さを0.68mとすることが必要である。⇒PCV補修止水PJに提示

・また、S/C内において、Ss地震時、止水材とダウンカマの密着が悪くなり止水性能が劣化する場合を想定した場合、S/C内に漏水する可能性があるが、S/C内バッファ容量が十分大きいため(次頁参照)Ss地震後に機動的対応が可能と思われる。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.43

①【1号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:0.68m)のS/C脚部検討結果

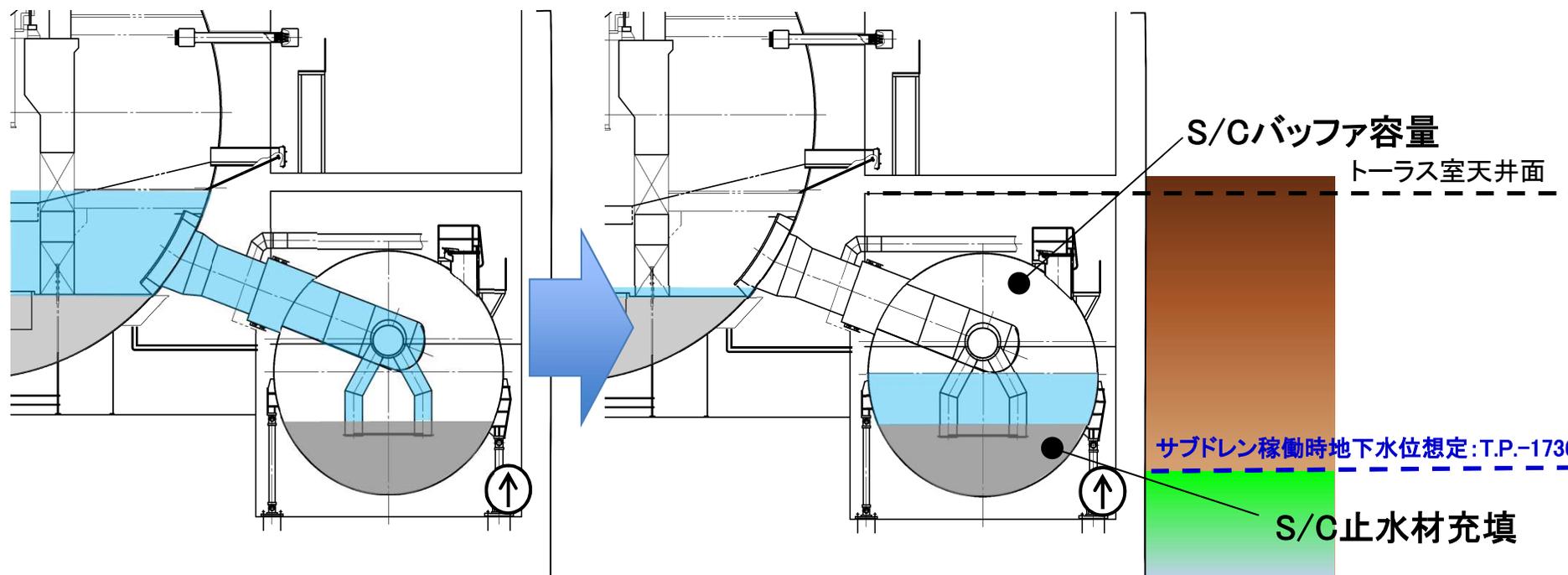
PCV冠水量とS/Cバッファ容量(1号機)

参考資料

1F-1

冠水状態	冠水量(m ³)	S/Cバッファ容量(m ³)
D/W底部冠水※	540	3000

※:T.P.7622



(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

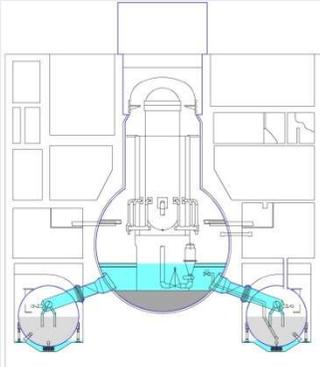
No.44

②【2/3号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:1.5m)のS/C脚部検討結果

1F-2/3

・目的

- ・昨年度は、コンクリートをT.P.2964(S/C内機器が全て埋設される位置)まで充填させた場合の評価を実施した結果、S/C脚部に許容値を上回る荷重が発生することを確認した。
- ・今年度は、コンクリートをT.P.389(ダウンカマが1.5m埋設される位置)まで充填させた場合の評価を実施する。

解析実施ケース	
	H29-1
(DW水位T.P.7564) (トールラス室天井面レベル) 	・将来想定:40年後 ・建屋損傷モデル ・D/W水位:T.P.7564 ・S/C内:コンクリートT.P.389 (ダウンカマかぶり厚さ 1500mmの場合) ・トールラス室:T.P.-3196 ・ベント管内:満水 ・オペフロ階付加設備: その他付加荷重(セル、 燃料取り出し装置等):約4710ton ・小部屋埋設:なし ・減衰定数: コンクリート 5%、鋼材 1% (建設時設計用) ・地震波:現行Ss
・ストレナ+クエンチャ+ダウンカマ止水 ・S/C脚部補強無し	
備考	H25-2の床応答スペクトルを用いて評価する。

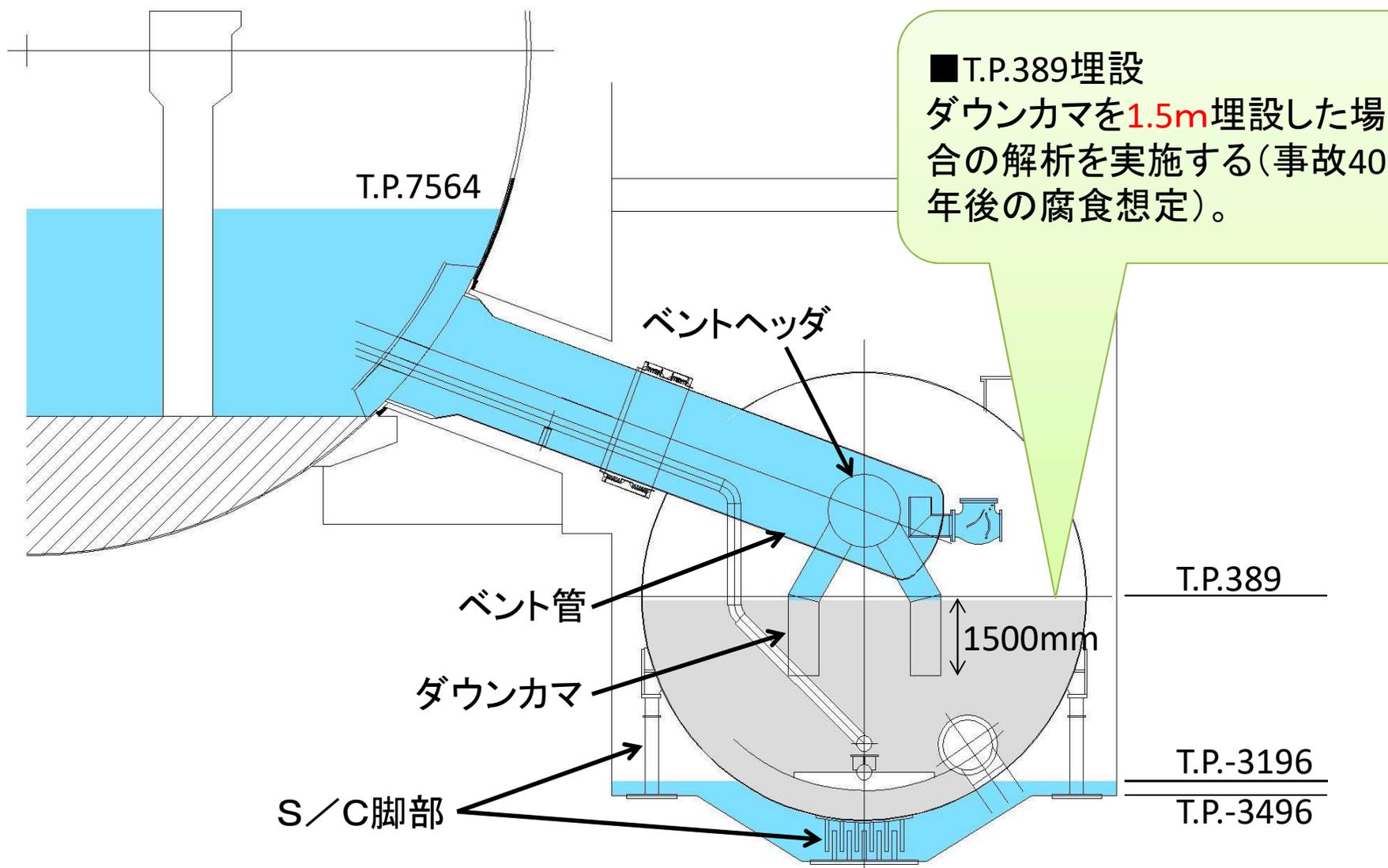
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.45

②【2/3号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:1.5m)のS/C脚部検討結果

1F-2/3

S/C(サブプレッションチェンバー)内コンクリート埋設量想定ケース

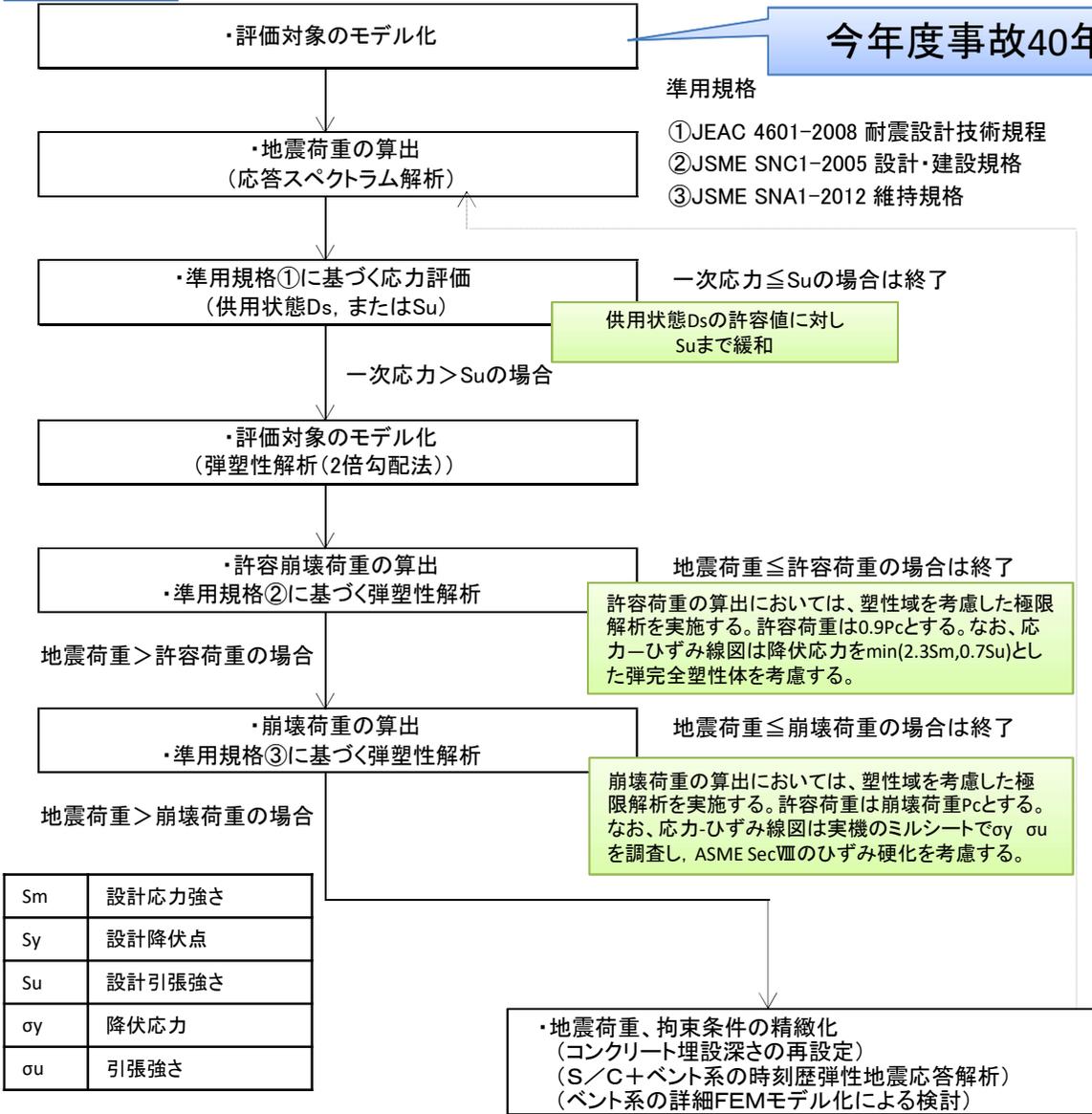


(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

②【2/3号機】S/C内充填止水(ダウンコマ埋設:1.5m)のS/C脚部検討結果

1F-2/3 ・評価フロー

今年度事故40年後腐食想定解析実施

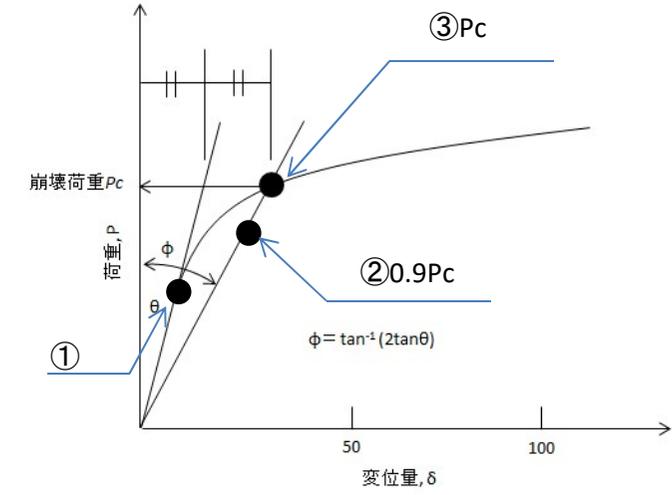


ドライウェル推定減肉量(片面) (mm)

事故後	10年	15年	40年
2号機推定減肉量	1.35	1.64	2.61
3号機推定減肉量	1.32	1.61	2.57

サプレッションチェンバ

事故後	10年	15年	40年
2号機推定減肉量	1.23	1.50	2.45
3号機推定減肉量	1.01	1.28	2.22



(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.47

②【2/3号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:1.5m)のS/C脚部検討結果

1F-2/3

PCV構造健全性評価結果(1F-2/3 準用規格①に基づく応力評価)

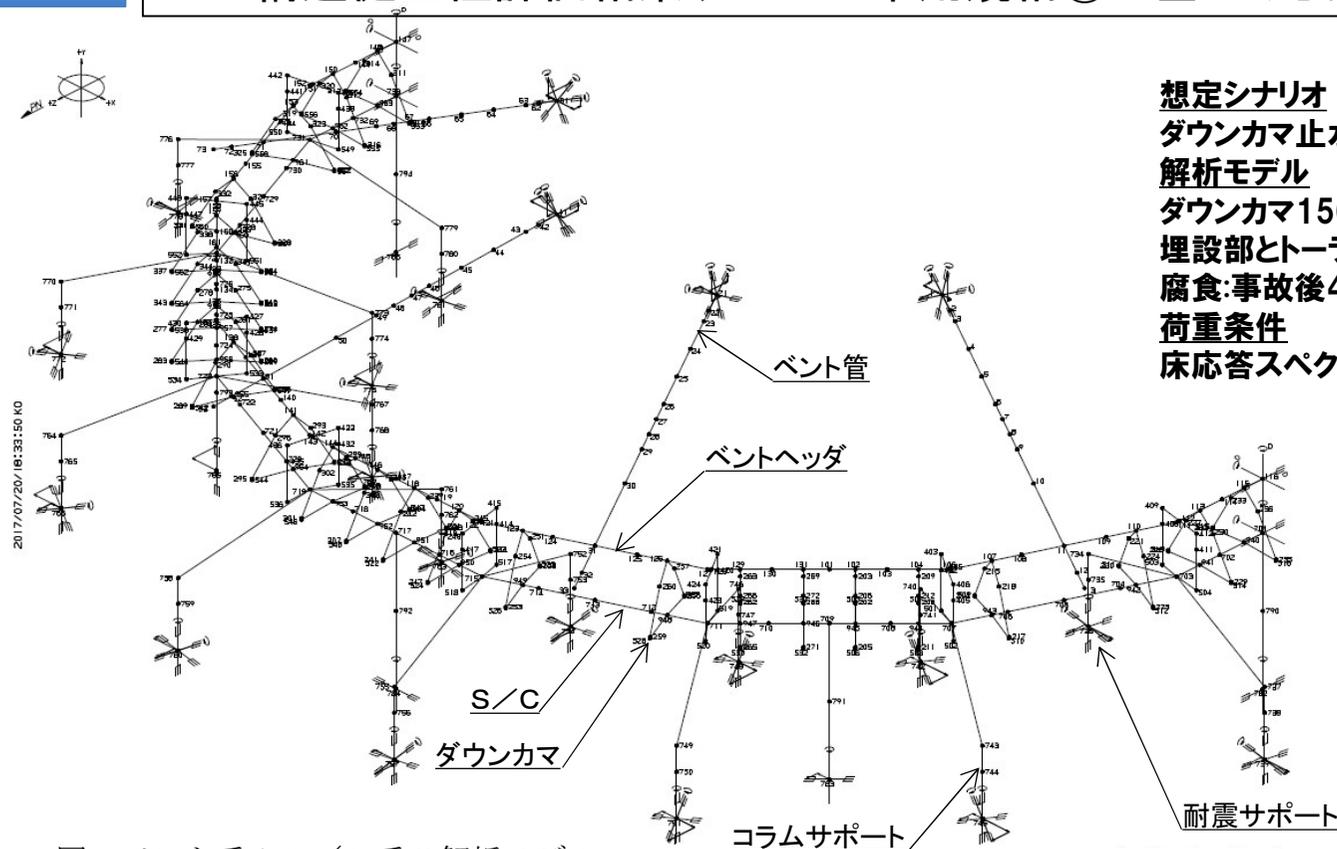


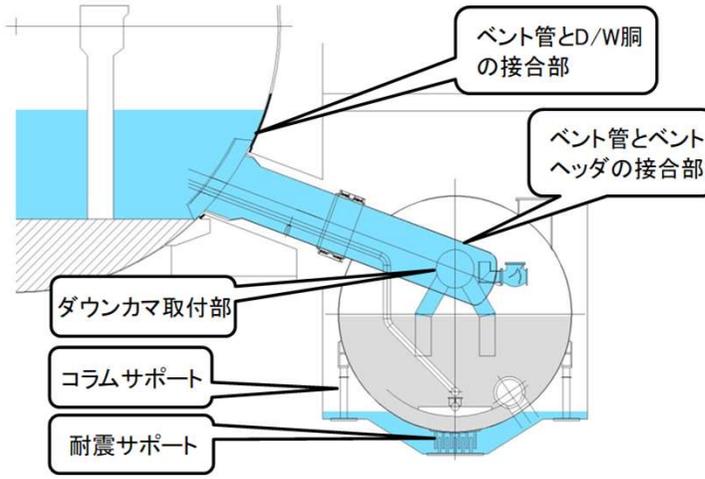
図 ベント系+S/C系の解析モデル

- ・S/C系及びベント系をビーム要素でモデル化し、応答スペクトラム解析により各部材に作用する地震時反力を算出する。
- ・算出された地震時反力をもとに建設時工認手法により各部材に生じる応力を算出する。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.48

②【2/3号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:1.5m)のS/C脚部検討結果

1F-2/3		ケース		H29-1(1F-2)		
対象機器	(弾性解析結果)					
	腐食年数(年)		40年後相当			
	減衰定数		建設時設計値 (コンクリート5%, 鋼材1%)			
	S/C内コンクリート		T.P.389			
	オペフロ階付加設備		4710 ton			
	評価部位		応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	
	ベント管取付部	ベント管とD/W胴の接合部(D/Wシェル)	SGV480相当	195	471	2.42
ベント管とベントヘッダの接続部		SGV410相当	548	400	0.73	
コラムサポート	クレビス	SM490相当	595	490	0.82	
耐震サポート	シアピン	SS400相当	608	400	0.66	
ダウンカマ取付部	ダウンカマとベントヘッダの接合部	SGV410相当	2433	400	0.16	

注)・対象機器の一次応力の許容値は温度50℃におけるSu値とする。

ダウンカマを埋設1.5mした場合、ベント管取付部、コラムサポート、耐震サポート、ダウンカマ取付部については発生応力がSu値を上回る結果となった。⇒より現実的な荷重を算出するため前頁のモデルを用いた弾性時刻歴解析を実施し、応力の厳しいダウンカマとベントヘッダについては個別モデルによる解析・評価も実施する。
また、Su値を超えたコラムサポート及び耐震サポートの変形挙動を把握するため、次頁に述べる弾塑性解析(2倍勾配法)を実施した。

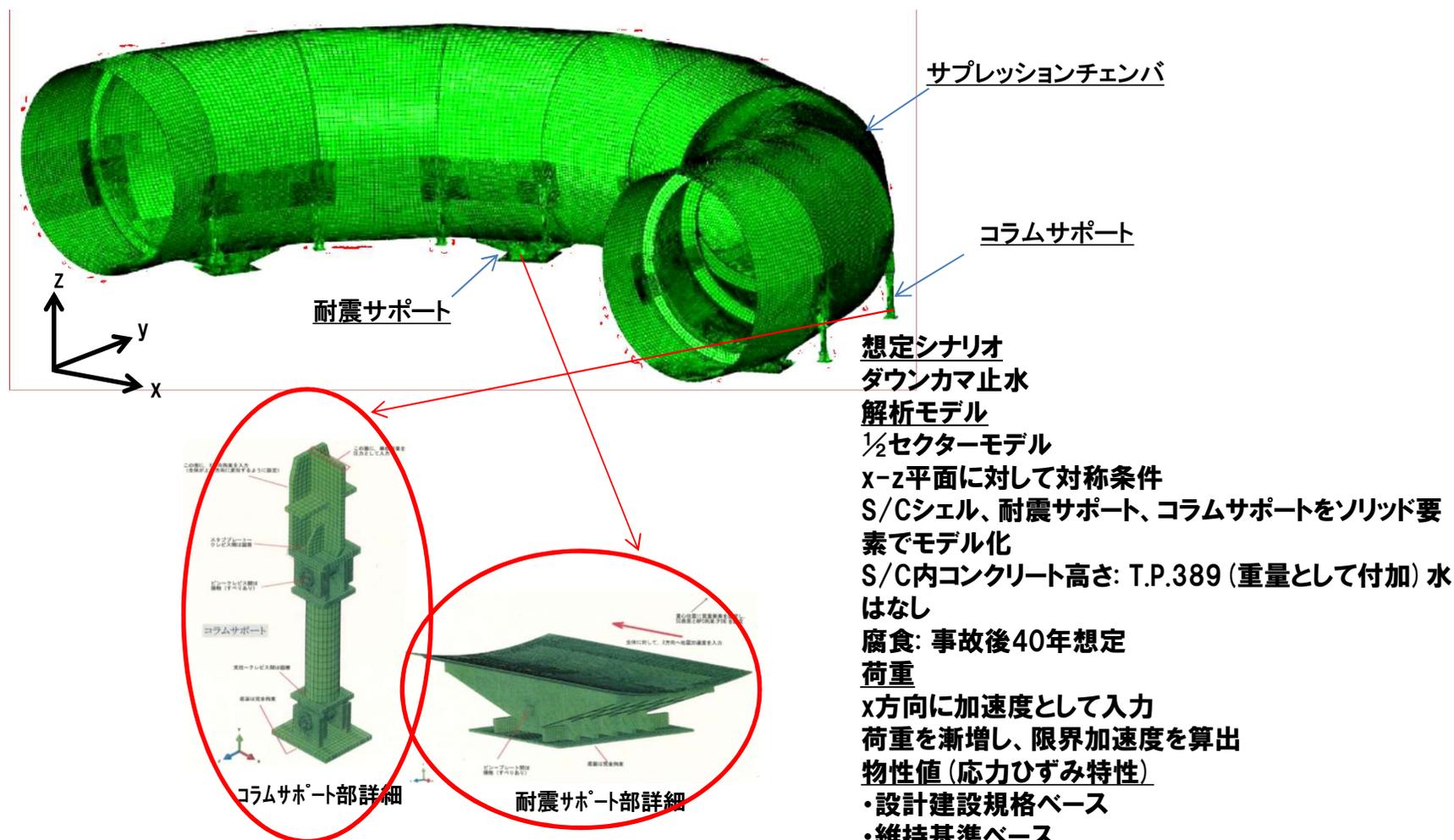
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

②【2/3号機】S/C内充填止水(ダウンコマ埋設:1.5m)のS/C脚部検討結果

1F-2/3

PCV構造健全性評価結果(1F-2/3 準用規格②、③に基づく弾塑性解析)

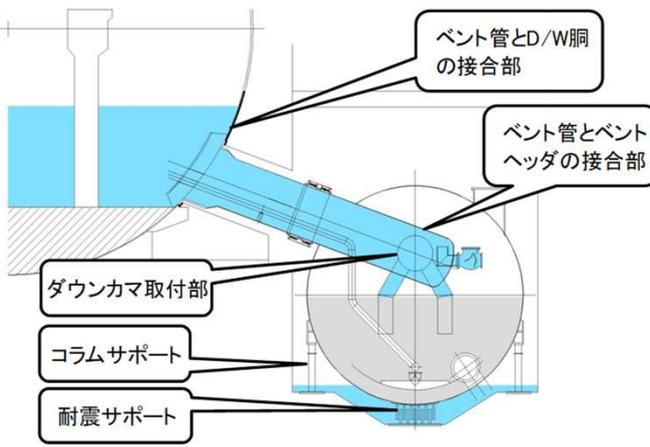
前項において許容値を満足しなかったS/C脚部について、「JSME設計・建設規格」及び「JSME維持規格」を準用し、弾塑性解析(2倍勾配法)による評価を実施する。



(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.50

②【2/3号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:1.5m)のS/C脚部検討結果

1F-2/3 ケース		H29-1(1F-2)			
対象機器	(弾塑性解析結果)				
	腐食年数(年)	40年後相当			
	減衰定数	建設時設計値 (コンクリート5%, 鋼材1%)			
	S/C内コンクリート	T.P.389			
	オベフロ階付加設備	4710 ton			
	評価部位	地震荷重*1 水平震度 (G)	弾塑性解析結果*3 水平震度(G) 崩壊荷重Pc (2倍勾配点)	許容荷重*2 Pcr(G)	裕度
S/C脚部	耐震サポート	1.56	1.06	0.95	0.61

注記: * 1) 水平震度は、S/C系解析モデルで固有値解析を実施し、床応答スペクトルから得られた加速度を示す。

* 2) 許容荷重Pcrは、崩壊荷重Pcに0.9を乗じた値を示す。

* 3) ()内はASME SecⅦのひずみ硬化を考慮した準用規格③に基づく結果を示す。

弾塑性解析(2倍勾配法)の結果、コンクリートをT.P.389(ダウンカマが1.5m埋設される位置)まで充填させた場合の評価では、S/C脚部に許容値を上回る荷重が発生することを確認した。このため、ダウンカマ先端のコンクリート埋設深さを浅くした場合の評価を実施する。

1F-2/3 (ダウンカマ埋設:1.5m)のまとめ

<弾性解析結果(応答スペクトラム解析)>

・S/C内充填水(ダウンカマ埋設:かぶり厚さ1.5m)での事故40年後では、S/C脚部、ベント管とベントヘッダーとの接続部及びダウンカマ付根部でSu値を超えることがわかった。

<弾塑性解析結果(2倍勾配法)>

・弾性解析(応答スペクトラム解析)で許容値を満足しなかったS/C脚部について、弾塑性解析(2倍勾配法)を実施した結果、「JSME設計・建設規格」(弾完全塑性体)および「JSME維持規格」(ひずみ硬化)を準用した場合のいずれの評価においても、許容荷重を超えることがわかった。

以上のことから、S/C脚部を補強しないでダウンカマを埋設する場合は、下記の検討を実施していく必要がある。

- ・ダウンカマ先端のコンクリート埋設深さを浅くした場合の評価を実施する。
- ・弾性解析については、より現実的な荷重を算出するため弾性時刻歴解析を実施し、応力の厳しいダウンカマとベントヘッダについては個別モデルにより解析・評価を実施する。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

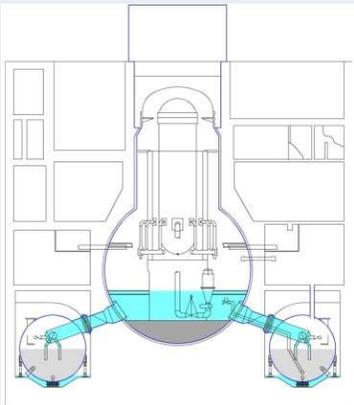
②【2/3号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:0.745m)のS/C脚部検討結果

<目的>

・これまでの評価では、S/C内部にコンクリートを充填(ダウンカマ先端より1500mm上まで充填)した場合、S/C脚部に許容値を上回る荷重が発生することを確認している。

・今回の評価においては、ダウンカマ先端より745mm(注1)上まで充填する場合の**弾性時刻歴地震応答解析**を実施する。

(注1: ベント管に接続されるドレン配管先端を埋設可能な高さとして設定(設定方針は1号機と同様))

解析実施ケース		今回解析条件
	H29-1	H29-2
(DW水位T.P.7564) (トーラス室天井面レベル) 	<ul style="list-style-type: none"> ・将来想定:40年後 ・建屋損傷モデル ・D/W水位:T.P.7564 ・S/C内:コンクリートT.P.389 (ダウンカマかぶり厚さ1500mmの場合) ・トーラス室:T.P.-3196 ・ベント管内:満水 ・オペフロ階付加設備: その他付加荷重(セル、燃料取り出し装置等):約4710ton ・小部屋埋設:なし ・減衰定数: コンクリート5%、鋼材1% (建設時設計用) ・地震波:現行Ss(600gal) 	<ul style="list-style-type: none"> ・将来想定:40年後 ・建屋損傷モデル ・D/W水位:T.P.7564 ・S/C内:コンクリートT.P.-366 (ダウンカマかぶり厚さ745mmの場合) ・トーラス室:T.P.-3196 ・ベント管内:満水 ・オペフロ階付加設備: その他付加荷重(セル、燃料取り出し装置等):約4710ton ・小部屋埋設:なし ・減衰定数: コンクリート5%、鋼材1% (建設時設計用) ・地震波:現行Ss(600gal)
<ul style="list-style-type: none"> ・ストレナ+クエンチャ+ダウンカマ止水 ・S/C脚部補強無し 	H25-2の床応答スペクトルを用いて評価する。	H25-2の床応答加速度の時刻歴波形を用いて評価する。
	<ul style="list-style-type: none"> ・ダウンカマ埋設高さ1500mmを考慮 ・弾性解析ではSu値を超える ・2倍勾配法でも許容荷重を満足せず。 ⇒S/C脚部補強が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・ダウンカマ埋設高さ745mmを考慮 ・弾性時刻歴地震応答解析を実施。

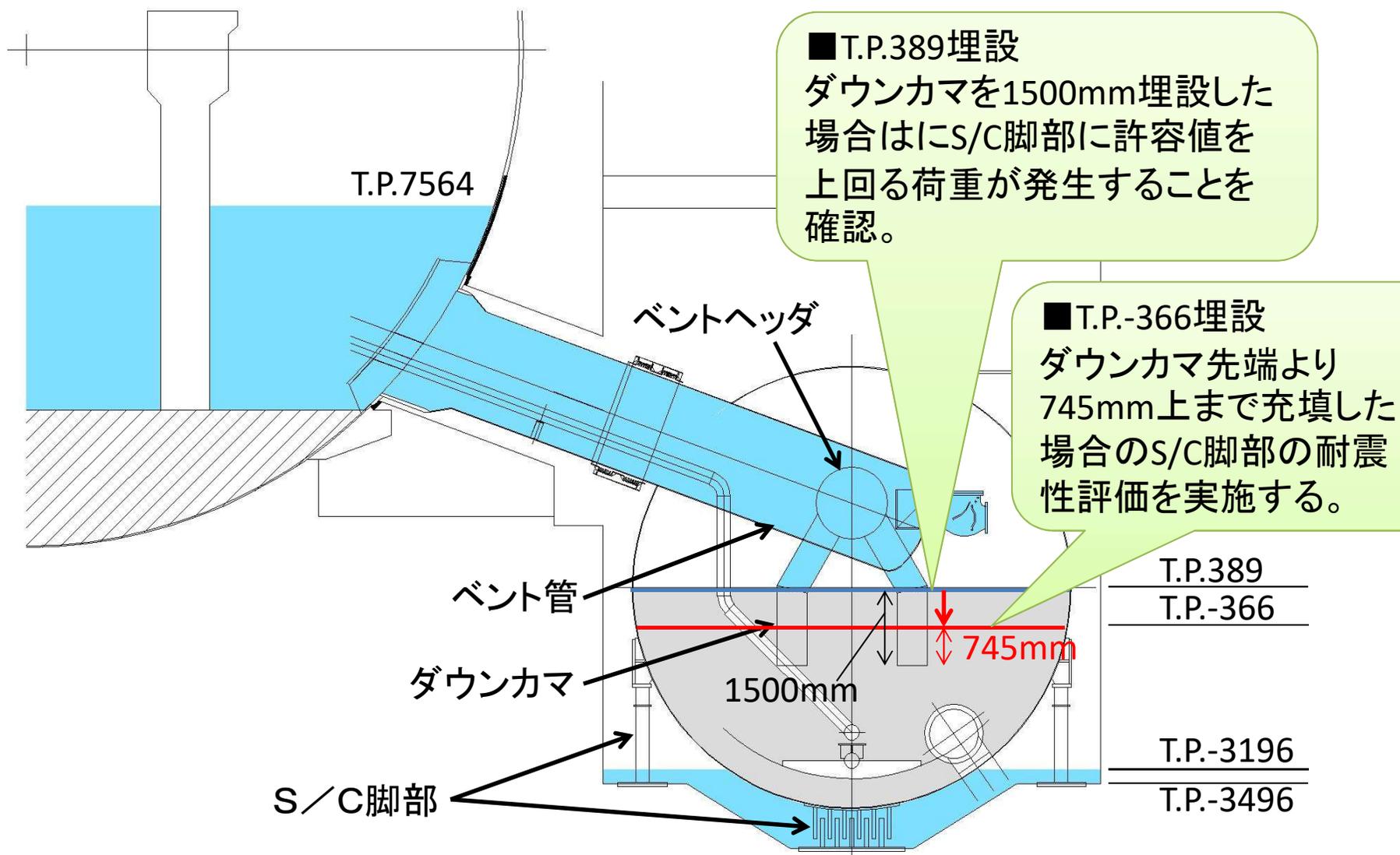
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.53

②【2/3号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:0.745m)のS/C脚部検討結果

1F-2/3

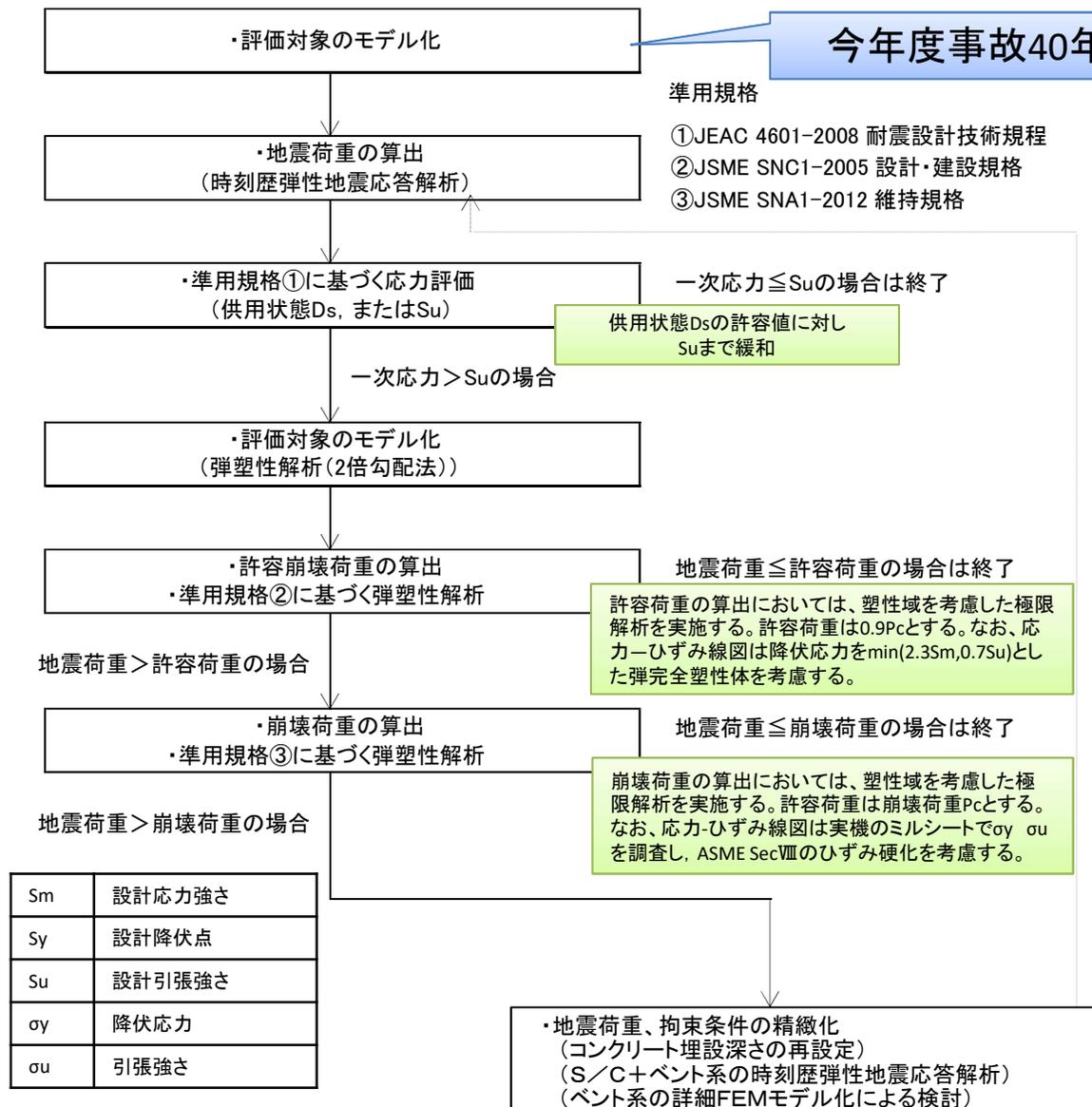
S/C(サブプレッションチェンバー)内コンクリート埋設量想定ケース



(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

②【2/3号機】S/C内充填止水(ダウンコマ埋設:0.745m)のS/C脚部検討結果

1F-2/3 ・評価フロー



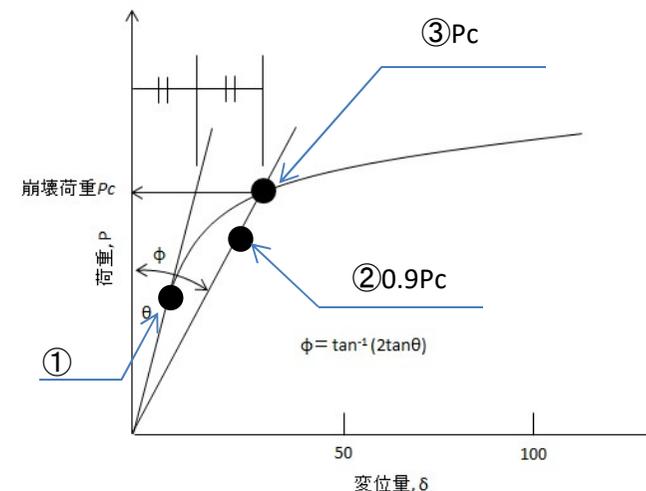
ドライウェル推定減肉量(片面) (mm)

事故後	10年	15年	40年
2号機推定減肉量	1.35	1.64	2.61
3号機推定減肉量	1.32	1.61	2.57

サプレッションチェンバ

推定減肉量(片面) (mm)

事故後	10年	15年	40年
2号機推定減肉量	1.23	1.50	2.45
3号機推定減肉量	1.01	1.28	2.22



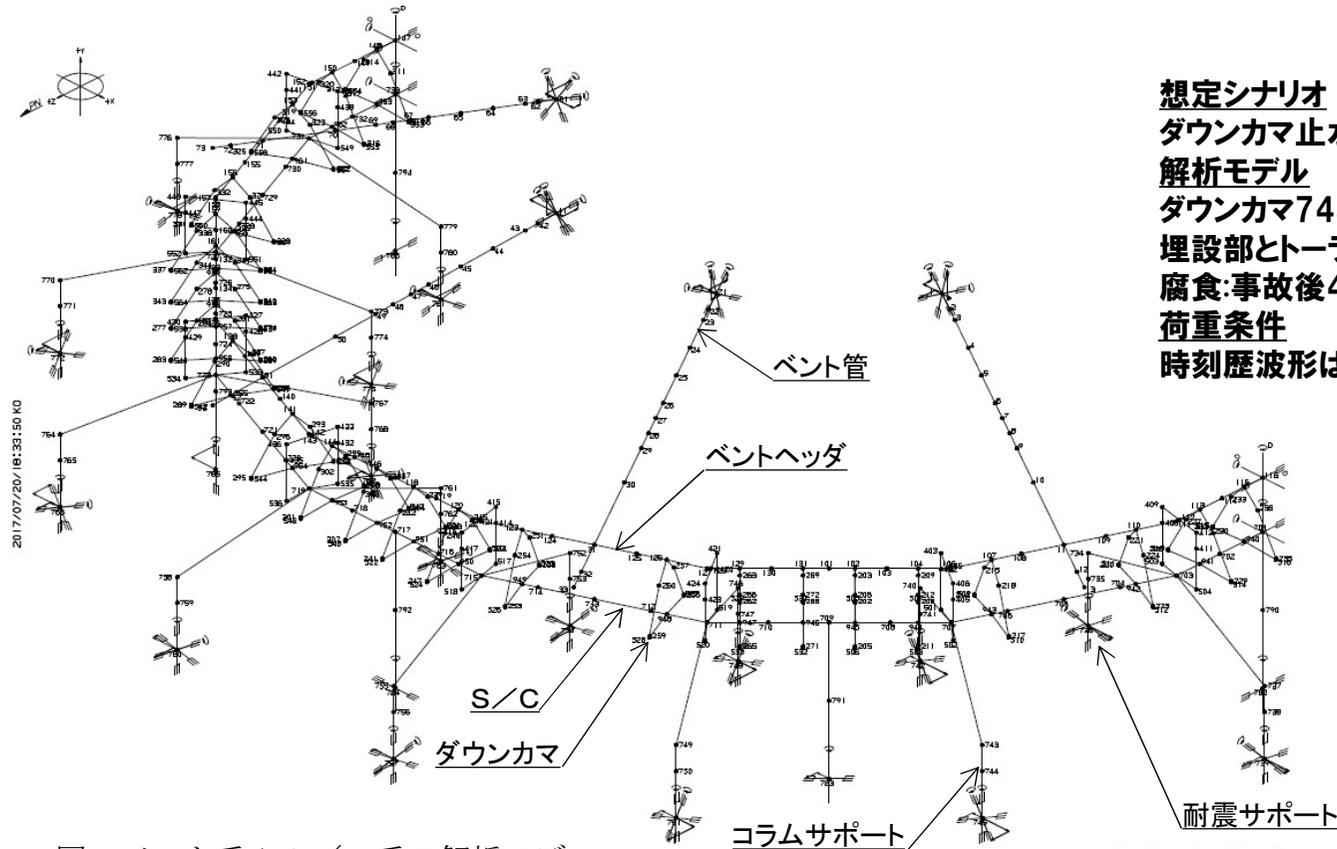
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.55

②【2/3号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:0.745m)のS/C脚部検討結果

1F-2/3

PCV構造健全性評価結果(1F-2/3 準用規格①に基づく応力評価)



想定シナリオ
ダウンカマ止水
解析モデル
ダウンカマ745mm埋設を考慮しダウンカマの埋設部とトラス中心を剛体要素で接続
腐食:事故後40年を考慮
荷重条件
時刻歴波形はH25-2の結果を流用

図 ベント系+S/C系の解析モデル

- ・S/C系及びベント系をビーム要素でモデル化し、**弾性時刻歴地震応答解析**により各部材に作用する地震時反力を算出する。
- ・算出された地震時反力をもとに建設時工認手法により各部材に生じる応力を算出する。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.56

②【2/3号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:0.745m)のS/C脚部検討結果

今回解析結果

1F-2/3 ケース		H29-1(1F-2)			H29-2(1F-2)			
対象機器	(弾性解析結果)							
	腐食年数(年)		40年後相当			40年後相当		
	減衰定数		建設時設計値 (コンクリート5%, 鋼材1%)			建設時設計値 (コンクリート5%, 鋼材1%)		
	S/C内コンクリート		T.P.389			T.P.-366		
	オペフロ階付加設備		4710 ton			4710 ton		
	評価手法		応答スペクトル解析			時刻歴地震応答解析		
	評価部位		応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度
	ベント管取付部	ベント管とD/W胴の接合部(D/Wシェル)	SGV480相当	195	471	2.42	154	471
	ベント管とベントヘッダの接続部	SGV410相当	548	400	0.73	178	400	2.24
コラムサポート	クレビス	SM490相当	595	490	0.82	315	490	1.55
耐震サポート	シアピン	SS400相当	608	400	0.66	146	400	2.73
ダウンカマ取付部	ダウンカマとベントヘッダの接合部	SGV410相当	2433	400	0.16	587	400	0.68

注)・対象機器の一次応力の許容値は温度50℃におけるSu値とする。

- ・S/C内部コンクリートをダウンカマ先端より745mm上まで充填する条件で弾性時刻歴地震応答解析を行った結果、S/C脚部(コラムサポート、耐震サポート)及びベント管取付部は許容値に収まることを確認した。
- ・ダウンカマ取付部については発生値が許容値を上回ることを確認した。「(3)安全シナリオの高度化」において、実際に想定し得る地震荷重、拘束条件を踏まえた評価を実施するため、ベント系の詳細FEM解析を実施する。

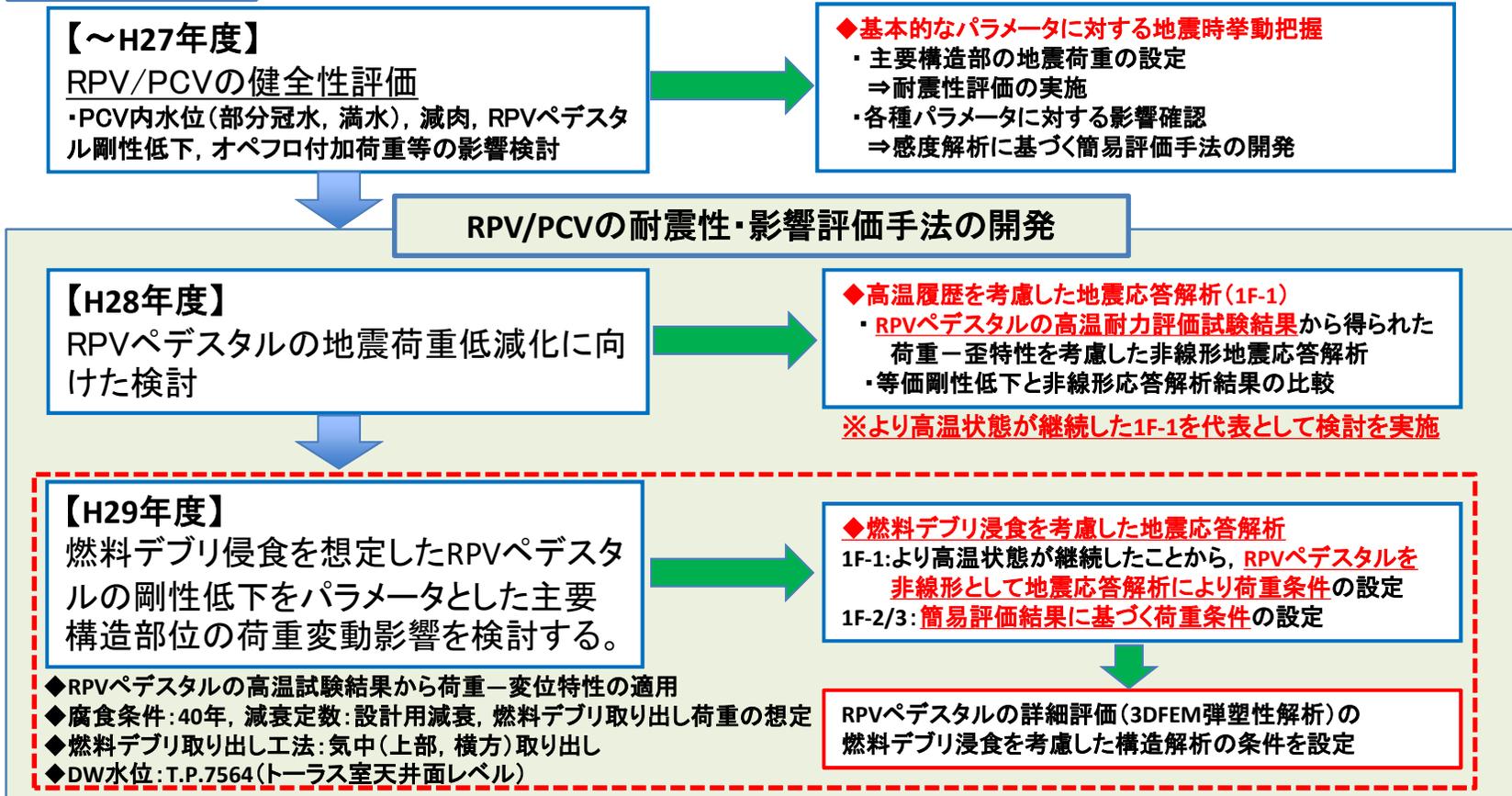
③地震応答解析手法の開発及び検証

H29年度地震応答解析実施検討結果の概要

目的

RPV系の支持構造物として、地震時の主要大型機器の振動性状に大きな影響を及ぼすRPVペDESTALに対して、実現象を考慮した地震応答解析を実施し、燃料デブリ取り出しに向けた検討条件を算出する。

検討概要



H29年度地震応答解析実施検討結果の概要

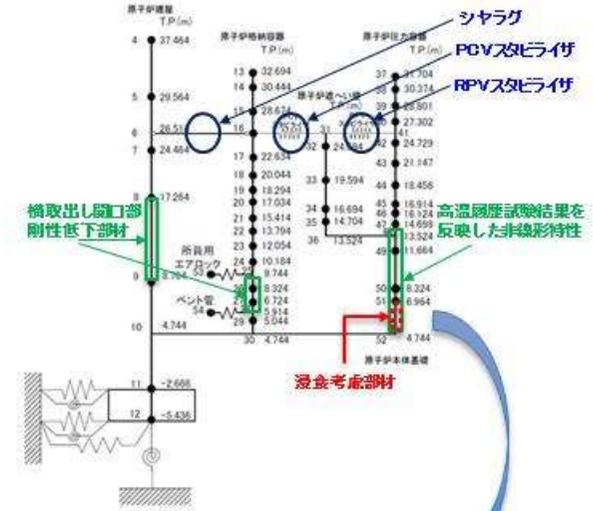
まとめ

(解析結果については、添付資料を参照)

- (a)RPVペDESTALの高温履歴にともなう剛性低下, 及び燃料デブリ浸食を想定した現行S_s地震(最大600Gal)では, RPVペDESTAL基部の地震荷重, 及びRPVスカート部の地震荷重は低下する傾向にある。
- (b)地震時の限界荷重(目安値)を実力ベースで設定すると地震による主要大型機器の発生荷重は目安値を超えないことを確認。
- (c)一方, RPVスタビライザ, PCVスタビライザ及びシヤラグの反力は増加する傾向にあるが, その相対変位は小さいことを確認。
- (d)したがって, 今回の解析条件では, 地震時に現状状態を大きく逸脱することはないと想定される。

今後の課題

- ◆本地震応答解析は, 現状知見に基づくものであり, 詳細な調査状況を踏まえたものではない。
したがって, 建屋内部, 格納容器内部等の調査進捗状況, 瓦礫撤去工事・除染処理状況を踏まえ, 関連事業者間の調整により, 地震観測等を実施し, 損傷状態の振動性状への影響確認を実施し, 解析モデルの妥当性評価を, 燃料取り出しPJで, 現実的な検討を実施する必要がある。
次頁に地震応答解析モデルの妥当性検証計画案を示す。

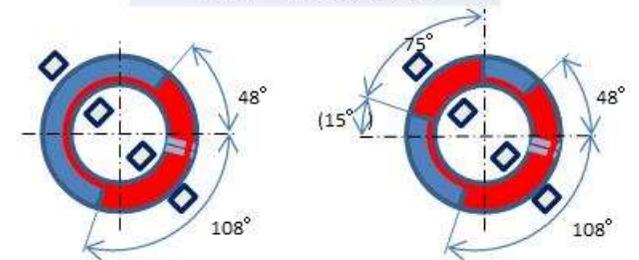


1F-1地震応答解析モデル例

RPVペDESTALの浸食状態

浸食考慮部材の剛性で模擬

パラメータ: 1/1,1/2,1/3



侵食A (片側156°欠損)
ペDESTAL表面にデブリが接触した箇所は欠損されていると仮定した場合

侵食B (両側156°+75°欠損)
ペDESTAL表面にデブリが接触した箇所は欠損されていると仮定

RPVペDESTAL侵食想定例(1F-1)

※浸食部位を等価剛性の低下としてパラメータとして設定

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.60

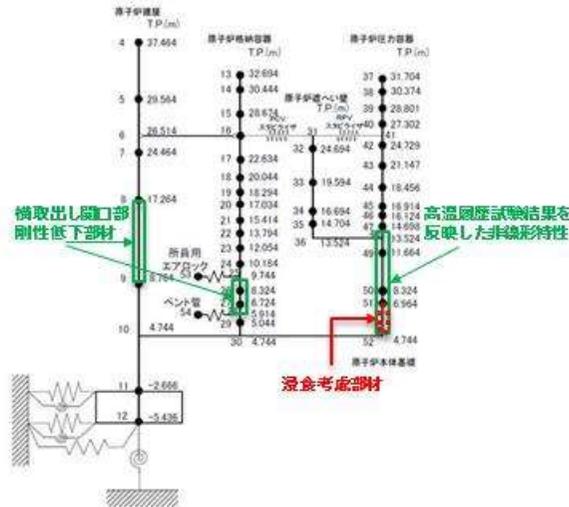
③地震応答解析手法の開発及び検証

H29年度地震応答解析実施検討結果の概要

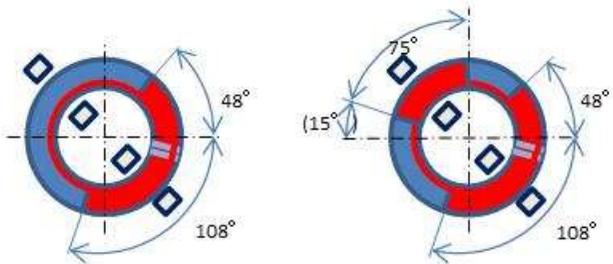
1F-1

・RPVペDESTALの燃料デブリ侵食を想定した地震荷重の変動に関する影響検討

◆ 目的:RPV系の支持構造物として、振動性状に大きな影響を及ぼすRPVペDESTALに対して、燃料デブリ侵食を想定した剛性低下をパラメータとした主要構造部位の荷重変動影響を検討する。



1F-1地震応答解析モデル例



侵食A (片側156°欠損)
ペDESTAL表面にデブリが溶融した箇所は欠損されていると仮定した場合

侵食B (両側156°+75°欠損)
ペDESTAL表面にデブリが溶融した箇所は欠損されていると仮定

RPVペDESTAL侵食想定例(1F-1)

※浸食部位を等価剛性の低下としてパラメータとして設定

地震応答解析モデルの設定

条件整備

燃料デブリ侵食状態の想定

ペDESTAL剛性低下率の検討

ペDESTAL剛性低下率をパラメータとした地震応答荷重の変動及び影響把握

◆現状燃料デブリの浸食状況が不明なため、想定侵食状態を参考に燃料デブリ侵食部の剛性低下をパラメータとして設定

【解析条件】:先年度実施(気中取り出し)モデルをベース

◆RPVペDESTAL

RPVペDESTALの高温耐力評価試験結果から得られた荷重-歪特性を考慮した非線形解析(弾塑性解析)を用いて、RPVペDESTALの想定侵食状態を参考にパラメータを設定。(剛性:1/1、1/2、1/3)

◆その他の条件

- ①腐食条件:40年後
- ②減衰定数:設計用減衰定数
- ③オペフロ付加重量(想定値):
 - ・燃料デブリ取り出し設備(取り出し装置、セル等):約6100ton
- ④上部取り出し/横取り出し条件を想定

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

③地震応答解析手法の開発及び検証

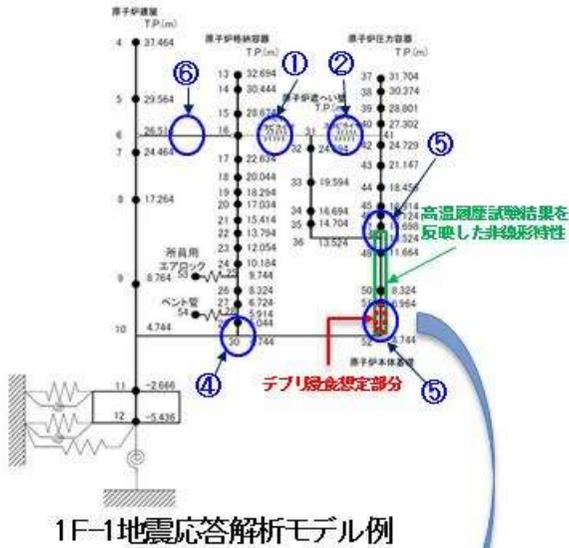
1F-1 ◆RPVペDESTALの燃料デブリ侵食を想定した地震荷重の変動に関する影響検討結果(1)

【上部取り出し】(現行Ss(最大600Gal))

◇燃料デブリ侵食を想定したパラメータ解析により、RPVペDESTAL基部の地震荷重は低下する傾向。

一方で、RPVスタビライザ、PCVスタビライザ、シヤラグの反力は増加する傾向。

◇現行Ss条件では、限界荷重(目安値)以内であり、現状状態を大きく逸脱することはないと想定。



1F-1地震応答解析モデル例

RPVペDESTALの浸食状態
 浸食考慮部材の剛性で模擬
 パラメータ: 1/1, 1/2, 1/3

構造物名	地震荷重	解析条件				限界荷重 (目安値)
		H28-2-4 (ベース)	H29-1-1	H29-1-2	(参考:H29-1-0)	
		オペフロ付加設備:6100(t)		オペフロ付加設備 0(t)		
		40年後				
		RPVペDESTAL外:非線形				
		減衰定数:建設時検討用				
		デブリ上取出し				
		MCCI考慮条件 :考慮なし	MCCI考慮条件: PED基部剛性1/2	MCCI考慮条件: PED基部剛性1/3	MCCI考慮条件 :考慮なし	
		現行Ss(Ss-1,Ss-2), MAX:600Gal				
①原子炉格納容器 スタビライザ	ばね反力 [kN]	3930	5060	5790	4200	11900
②原子炉圧力容器 スタビライザ	ばね反力 [kN]	1960	2490	2920	2030	4200
③原子炉圧力容器 支持スカート	せん断力 [kN]	2330	2290	2130	2220	7000
	モーメント [kN・m]	22900	25000	26200	23400	80000
④原子炉格納容器 基部	せん断力 [kN]	7470	7550	7590	6260	12000
	モーメント [kN・m]	54100	55300	56000	45200	130000
⑤原子炉本体基礎 (RPVペDESTAL)	せん断力 [kN]	7550	7300	7210	7390	10300
	モーメント [kN・m]	74800	65300	57200	70600	150000
⑥シヤラグ	ばね反力 [kN]	3340	4250	4930	3830	11900

注1: RPVペDESTALの非線形特性は、RPVペDESTALの高温耐力評価試験から得られた荷重-歪特性を考慮し、JEAC4601の評価式からスケルトンカーブを設定

注2: 燃料デブリ侵食部材は、侵食状態が特定できていないため、弾性部材として剛性を低下して設定

注3: 限界荷重(目安値)は、一次応力が概ねSu値となる簡易評価ベースの検討による。なお、RPVペDESTALの簡易評価では、MCCI条件は考慮していないので参考値とする。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

③地震応答解析手法の開発及び検証

1F-1

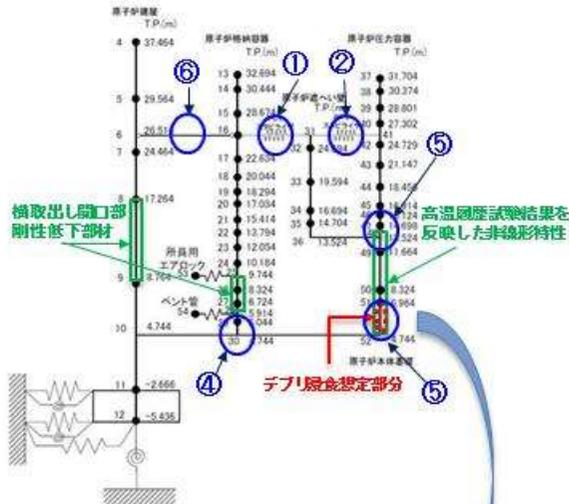
◆RPVペDESTALの燃料デブリ侵食を想定した地震荷重の変動に関する影響検討結果(2)

【上部+横取り出し】(現行Ss(最大600Gal))

◇燃料デブリ侵食を想定したパラメータ解析により、RPVペDESTAL基部の地震荷重は低下する傾向。

一方で、RPVスタビライザ、PCVスタビライザ、シヤラグの反力は増加する傾向。(上部取り出しと同様な傾向)

◇現行Ss条件では、限界荷重(目安値)以内であり、現状状態を大きく逸脱することはないと想定。



1F-1地震応答解析モデル例

RPVペDESTALの浸食状態
 浸食考慮部材の剛性で模擬
 パラメータ: 1/1, 1/2, 1/3

構造物名	地震荷重	解析条件				限界荷重 (目安値)
		H28-2-4 (ベース)	H29-2-1	H29-2-2	(参考:H29-2-0)	
		オペフロ付加設備:6100(t)		オペフロ付加設備 0(t)		
		40年後				
		RPVペDESTAL:非線形				
		減衰定数:建設時検討用				
		デブリ上取出し	デブリ上部+横取出し			
		MCCI考慮条件: :考慮なし	MCCI考慮条件: PED基部剛性1/2	MCCI考慮条件: PED基部剛性1/3	MCCI考慮条件: :考慮なし	
		現行Ss(Ss-1,Ss-2), MAX:600Gal				
①原子炉格納容器 スタビライザ	ばね反力 [kN]	3930	5030	5760	4190	11900
②原子炉圧力容器 スタビライザ	ばね反力 [kN]	1960	2470	2880	2030	4200
③原子炉圧力容器 支持スカート	せん断力 [kN]	2330	2300	2130	2230	7000
	モーメント [kN・m]	22900	24900	26100	23500	80000
④原子炉格納容器 基部	せん断力 [kN]	7470	7630	7670	6270	12000
	モーメント [kN・m]	54100	56300	56700	45400	130000
⑤原子炉本体基礎 (RPVペDESTAL)	せん断力 [kN]	7550	7320	7230	7430	10300
	モーメント [kN・m]	74800	65800	57600	70900	150000
⑥シヤラグ	ばね反力 [kN]	3340	4230	4890	3820	11900

注1: RPVペDESTALの非線形特性は、RPVペDESTALの高温耐力評価試験から得られた荷重-歪特性を考慮し、JEAC4601の評価式からスケルトンカーブを設定

注2: 燃料デブリ浸食部材は、浸食状態が特定できていないため、弾性部材として剛性を低下して設定

注3: 限界荷重(目安値)は、一次応力が概ねSu値となる簡易評価ベースの検討による。なお、RPVペDESTALの簡易評価では、MCCI条件は考慮していないので参考値とする。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

③地震応答解析手法の開発及び検証

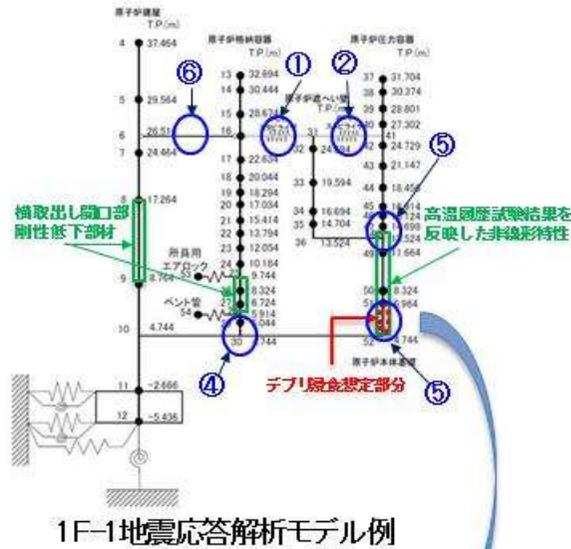
1F-1

◆RPVペDESTALの燃料デブリ侵食を想定した地震荷重の変動に関する影響検討結果(3)

【上部+横取り出し、1.5×Ss検討結果】

◇全体的な地震荷重の増加及び減少傾向は基準地震動Ssと同様な傾向。

◇1.5×Ss条件では、現状状態を大きく逸脱することはないと想定。



RPVペDESTALの侵食状態
 侵食考慮部材の剛性で模擬
 パラメータ: 1/1, 1/2, 1/3

構造物名	地震荷重	解析条件		
		H29-3-0	H29-3-1	H29-3-2
オペロ付加設備:6100(t)				
40年後				
RPVペDESTAL:非線形				
減衰定数:建設時検討用				
デブリ上部+横取り出し				
MCCI考慮条件:考慮なし		MCCI考慮条件:PED基部剛性1/2		MCCI考慮条件:PED基部剛性1/3
Ss-2×1.5				
①原子炉格納容器スタビライザ	ばね反力 [kN]	4970	6040	6750
②原子炉圧力容器スタビライザ	ばね反力 [kN]	2690	3130	3390
③原子炉圧力容器支持スカート	せん断力 [kN]	3530	3250	2880
	モーメント [kN・m]	37800	37500	32200
④原子炉格納容器基部	せん断力 [kN]	9790	9740	10200
	モーメント [kN・m]	103000	104000	107000
⑤原子炉本体基礎 (RPVペDESTAL)	せん断力 [kN]	10300	10200	9520
	モーメント [kN・m]	106000	93700	79600
⑥シヤラゲ	ばね反力 [kN]	3440	4530	5570

注1: RPVペDESTALの非線形特性は、RPVペDESTALの高温耐力評価試験から得られた荷重-歪特性を考慮し、JEAC4601の評価式からスケルトンカーブを設定
 注2: 燃料デブリ侵食部材は、侵食状態が特定できていないため、弾性部材として剛性を低下して設定

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

③地震応答解析手法の開発及び検証

1F-1

◆RPVペDESTALの燃料デブリ侵食を想定した地震荷重の変動に関する影響検討結果(4)

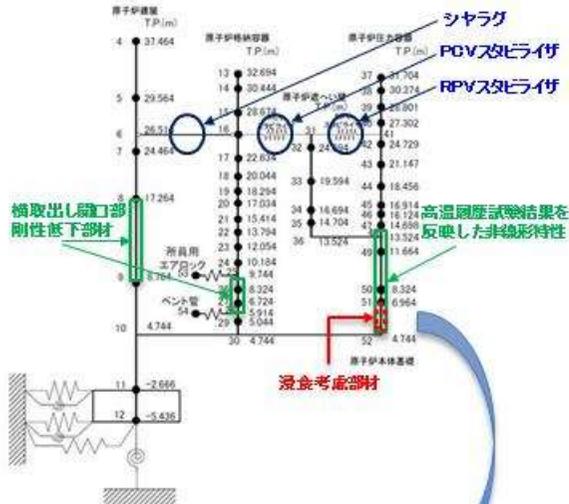
【シヤラグ及びスタビライザの相対変位】

◇RPVペDESTALの燃料デブリ浸食考慮により大型機器上部の変形量が大きくなるため、その程度を確認した。

・Ss地震:シヤラグで0.5mm、PCVスタビライザで1.4mm、RPVスタビライザで4.2mm程度。

・検討用地震相当:シヤラグで0.6mm、PCVスタビライザで1.6mm、RPVスタビライザで4.9mm程度。

◇燃料デブリ浸食を考慮しても、シヤラグで1mm以下、PCVスタビライザで2mm以下、RPVスタビライザで5mm以下の相対変位であり、現状状態を大きく逸脱することはないと想定。



1F-1地震応答解析モデル例

RPVペDESTALの浸食状態

浸食考慮部材の剛性で模擬

パラメータ: 1/1,1/2,1/3

シヤラグ及びスタビライザの相対変位

構造物	変位 (mm)								
	水平方向 (NS及びEW包絡)								
	デブリ上取出し (現行Ss)			デブリ上部+横取出し (現行Ss)			デブリ上部+横取出し (1.5×Ss)		
	H28-2-4 (ヘースケース)	H29-1-1	H29-1-2	H28-2-4 (ヘースケース)	H29-2-1	H29-2-2	H29-3-0	H29-3-1	H29-3-2
	MCCI 考慮なし	PED基部 剛性1/2	PED基部 剛性1/3	MCCI 考慮なし	PED基部 剛性1/2	PED基部 剛性1/3	MCCI 考慮なし	PED基部 剛性1/2	PED基部 剛性1/3
シヤラグ	0.4	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.4	0.5	0.6
PCVスタビライザ	0.9	1.2	1.4	0.9	1.2	1.4	1.2	1.4	1.6
RPVスタビライザ	2.8	3.6	4.2	2.8	3.6	4.1	3.9	4.5	4.9

【今後の課題】

本地震応答解析は、現状知見に基づくものであり、詳細な調査状況を踏まえたものではない。したがって、建屋内部、格納容器内部等の調査進捗状況、瓦礫撤去工事・除染処理状況を踏まえ、関連事業者間の調整により、地震観測等を実施し、損傷状態の振動性状への影響確認を実施し、解析モデルの妥当性評価を、燃料取り出しPJで、現実的な検討をする実施する必要がある。

参考資料-1 1F国プロにおけるR/B地震応答解析モデル(1)

原子炉建屋モデル及び入力地震動

号機	公開資料	建屋モデル	地震動	備考
1F-1	「福島第一原子力発電所の原子炉建屋の現状の耐震安全性および補強等に関する検討に係る報告書(その1)」 平成23年5月 東京電力株式会社	<ul style="list-style-type: none"> ・水素爆発による損傷を考慮 ・水平:NS&EW ・鉛直:UD 	<ul style="list-style-type: none"> ・Ss-1 :450Gal ・Ss-2_1F :600Gal ・Ss-1V :300Gal ・Ss-2V_1F:400Gal 	*:公開資料のベースとなった原子炉建屋地震応答解析結果
1F-2	福島第一原子力発電所「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価結果中間報告書 平成22年4月 東京電力株式会社	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋健全モデル ・水平:NS&EW ・鉛直:UD 	<ul style="list-style-type: none"> ・Ss-1H :450Gal ・Ss-2H :600Gal ・Ss-3H :450Gal ・Ss-1V :300Gal ・Ss-2V :400Gal ・Ss-3V :300Gal 	同上
1F-3	福島第一原子力発電所「特定安全施設に係る実施計画」 平成24年12月(平成25年8月一部補正) 東京電力株式会社	<ul style="list-style-type: none"> ・水素爆発による損傷を考慮 ・水平:NS&EW 	<ul style="list-style-type: none"> ・Ss-1H :450Gal ・Ss-2H :600Gal ・Ss-3H :450Gal 	同上
	福島第一原子力発電所「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価結果中間報告書 平成22年4月 東京電力株式会社	<ul style="list-style-type: none"> ・建屋健全モデル ・鉛直:UD 	<ul style="list-style-type: none"> ・Ss-1V :300Gal ・Ss-2V :400Gal ・Ss-3V :300Gal 	同上

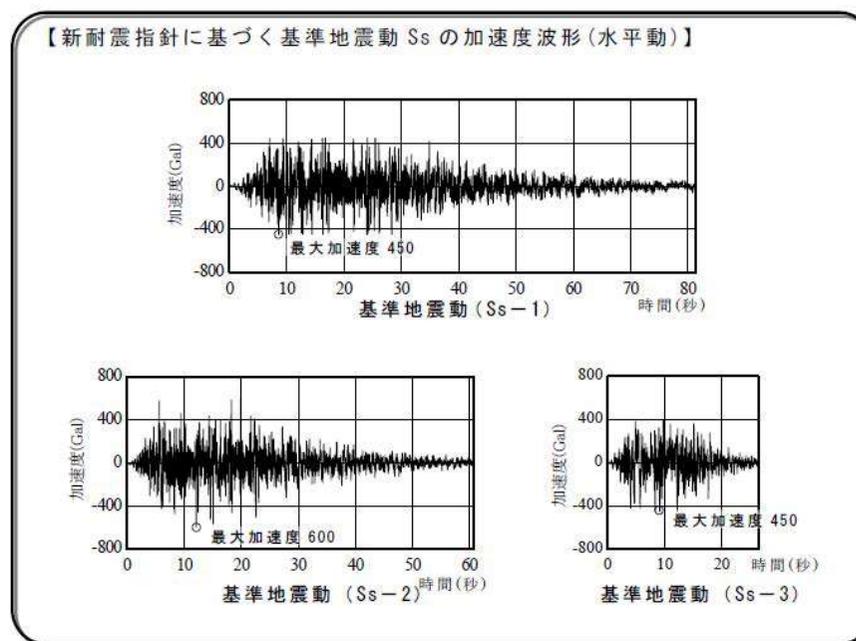
参考資料-1 1F国プロにおけるR/B地震応答解析モデル(2)

◆基準地震動 S_s (水平方向)

現行基準地震動は、地震動評価結果に基づき、次の三種類の基準地震動 S_s を策定している。

- ・基準地震動 S_s-1 (最大加速度450ガル):内陸地殻内地震とプレート間地震の評価結果を上回るように設定
- ・基準地震動 S_s-2 (最大加速度600ガル):海洋プレート内地震の評価結果を上回るように設定
- ・基準地震動 S_s-3 (最大加速度450ガル):震源を特定せず策定する地震動

◆鉛直地震動は、上記水平方向の基準地震動を2/3倍して設定している。



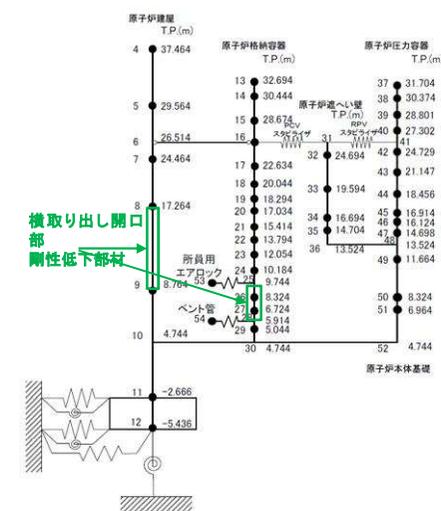
参考資料-2 燃料デブリ横取り出しにおける地震応答解析の検討概念

【1F-1燃料デブリ横取り出し検討案の例】

1号機	
配置案	
建屋開口検討案	<p>A 生体遮蔽壁 X-6ペネ周辺 : 幅 2.5m × 高さ 3.5m程度</p> <p>B 北側建屋壁 : 幅 5m × 高さ 4m程度</p>

R/B、PCV貫通部の剛性低下

R/B 1階部分の付加質量(セル、遮蔽設備等)

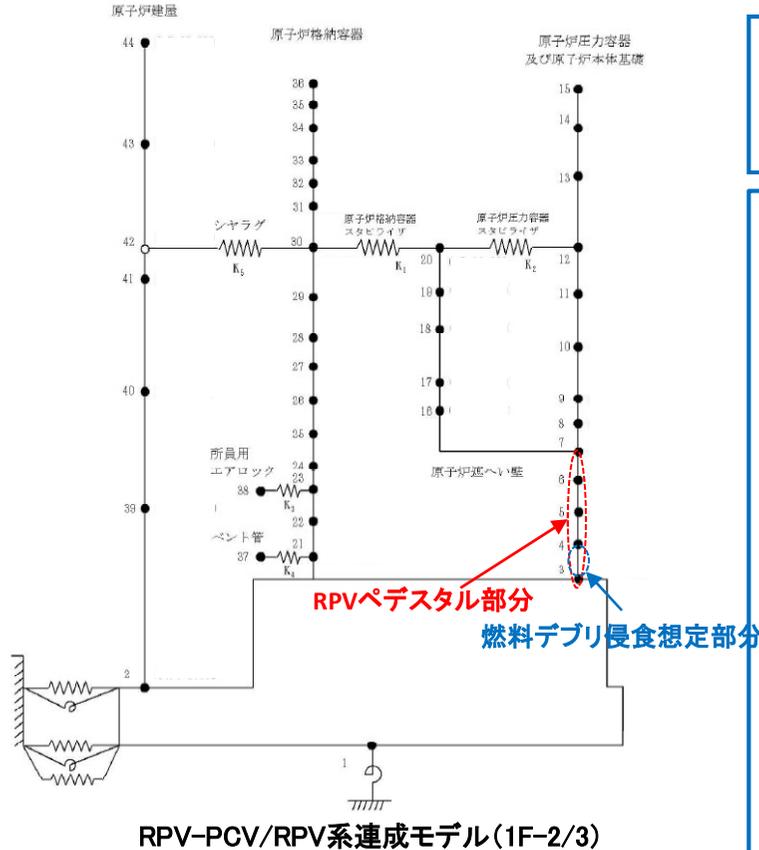


1F-1地震応答解析モデル例

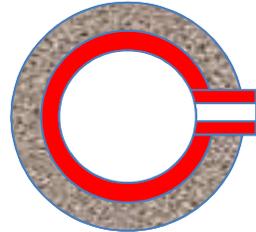
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

③地震応答解析手法の開発及び検証【2/3号機】

・RPVペDESTALの燃料デブリ侵食を想定した地震荷重の算出

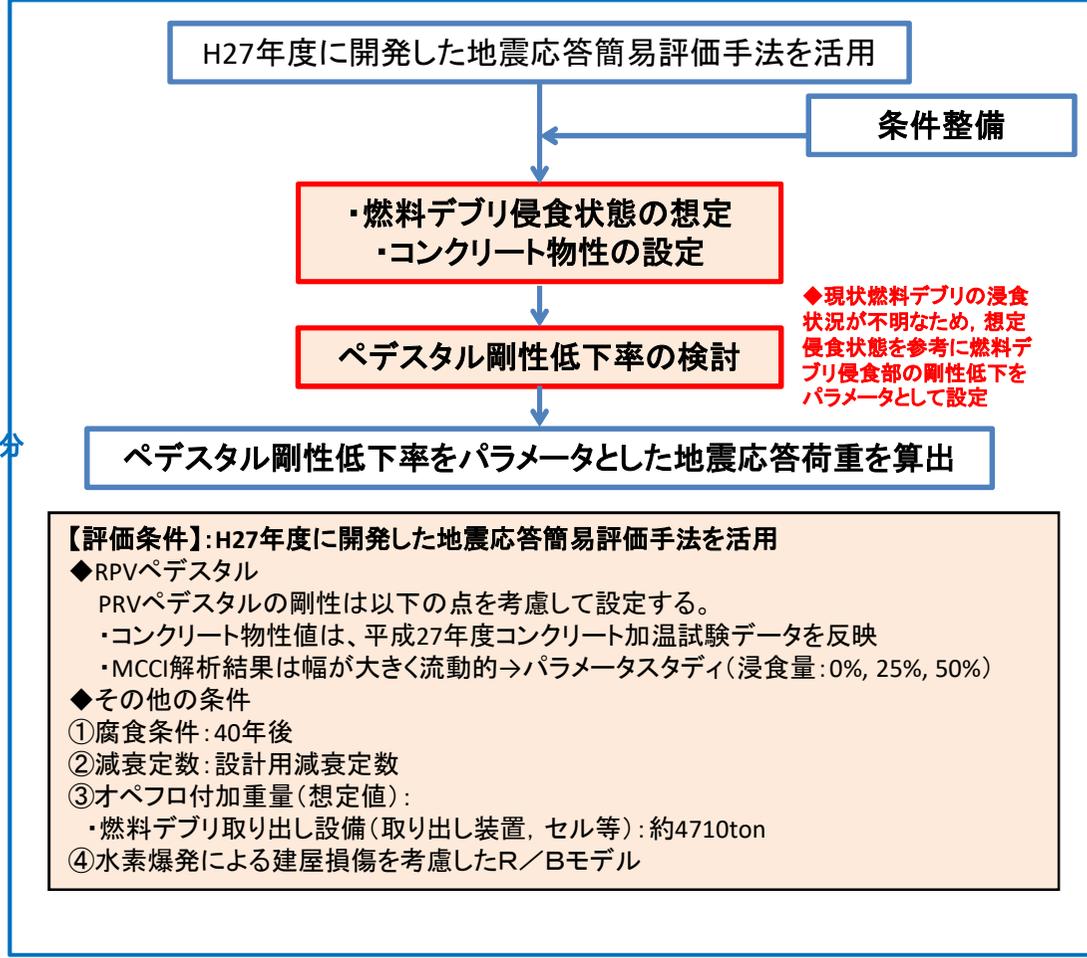


RPV-PCV/RPV系連成モデル(1F-2/3)



RPVペDESTAL侵食想定例(1F-2/3)

◆ 目的:RPVペDESTALの燃料デブリ侵食の状況を想定した剛性低下をパラメータとしたRPVペDESTAL評価用の地震荷重を算出する。



【評価条件】:H27年度に開発した地震応答簡易評価手法を活用

- ◆RPVペDESTAL
 - PRVペDESTALの剛性は以下の点を考慮して設定する。
 - ・コンクリート物性値は、平成27年度コンクリート加温試験データを反映
 - ・MCCI解析結果は幅が大きく流動的→パラメータスタディ(浸食量:0%, 25%, 50%)
- ◆その他の条件
 - ①腐食条件:40年後
 - ②減衰定数:設計用減衰定数
 - ③オペフロ付加重量(想定値):
 - ・燃料デブリ取り出し設備(取り出し装置,セル等):約4710ton
 - ④水素爆発による建屋損傷を考慮したR/Bモデル

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

③地震応答解析手法の開発及び検証【2/3号機】

◆RPVペDESTALの燃料デブリ侵食を想定した地震荷重の変動に関する影響検討結果

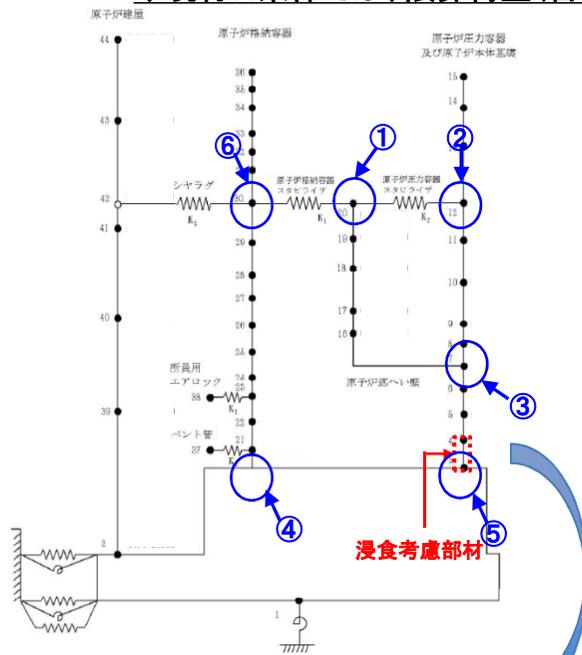
1F-2/3

【上部取り出し】(現行Ss(最大600Gal))

◇燃料デブリ侵食を想定したパラメータ解析により、RPVペDESTAL基部の地震荷重は低下する傾向。

一方で、RPVスタビライザ、PCVスタビライザ、シヤラグの反力は増加する傾向。

◇現行Ss条件では、限界荷重(目安値)以内であり、現状状態を大きく逸脱することはないと想定。



RPVペDESTALの浸食状態
浸食考慮部材の剛性で模擬
 パラメータ: 燃料デブリ接触時、浸食25%、浸食50%

構造物名	地震荷重	解析条件			参考	備考 (目安値) (H25年度評価用荷重(H25-3))
		H29.1.1	H29.1.2	H29.1.3	ベース(H26)	
		オベフロ付加設備 4710(t)			考慮なし	
		40年後			考慮なし	
		RPVペDESTAL 弾性			同左	
		減衰定数 建設時検討用			同左	
		浸食考慮条件 : デブリ接触時 (PED基部剛性0.40)	浸食考慮条件 : 25%浸食 (PED基部剛性0.39)	浸食考慮条件 : 50%浸食 (PED基部剛性0.38)	浸食考慮条件 : 考慮なし	
		現行Ss			同左	
①原子炉格納容器スタビライザ	ばね反力 [kN]	7000	7000	7100	3210	7440 (8600(注3))
②原子炉圧力容器スタビライザ	ばね反力 [kN]	3800	3800	3800	1580	4620
③原子炉圧力容器支持スカート	せん断力 [kN]	3800	3800	3800	3690	6280
	モーメント [kN・m]	18600	18400	18200	23300	52300
④原子炉格納容器基部	せん断力 [kN]	6600	6600	6600	7040	29000
	モーメント [kN・m]	112500	112500	112500	121000	209000 (400000(注3))
⑤原子炉本体基礎 (RPVペDESTAL)	せん断力 [kN]	9000	9000	9000	8950	13300
	モーメント [kN・m]	72000	71100	70100	92300	141000
⑥シヤラグ	ばね反力 [kN]	2200	2200	2200	2150	12000

注1: 平成26・27年度「圧力容器／格納容器の健全性評価技術の開発」に実施したパラメータ解析による地震荷重簡易算定手法に基づいて簡易的に算出した。

注2: 目安値は、平成25年度「圧力容器／格納容器の健全性評価技術の開発」で使用したドライウェル冠水状態(対象部位に与える荷重が大きくなる状態)における地震荷重(H25-3)を示す。

注3: 平成26・27年度にて使用した地震荷重(H26-2)に応力評価結果の裕度を考慮して設定した。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

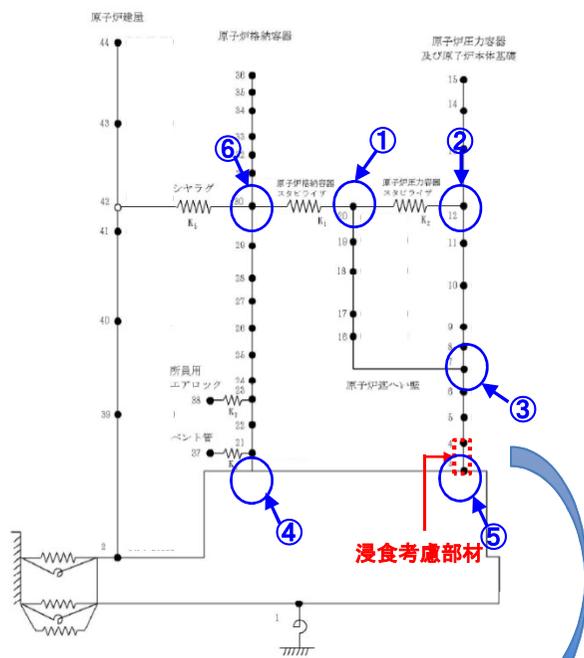
③地震応答解析手法の開発及び検証【2/3号機】

◆RPVペDESTALの燃料デブリ侵食を想定した地震荷重の変動に関する影響検討結果

【900Gal相当検討結果】

◇全体的な地震荷重の増加及び減少傾向は基準地震動 S_s と同様な傾向。

特に、RPVペDESTAL及びRPV支持スカート \rightarrow の地震荷重は低減化される。



RPVペDESTALの浸食状態
浸食考慮部材の剛性で模擬
 パラメータ: 燃料デブリ接触時、浸食25%、浸食50%

構造物名	地震荷重	解析条件		
		H29.1.1	H29.1.2	H29.1.3
		オペフロ付加設備 4710(t)		
		40年後		
		RPVペDESTAL 弾性		
		減衰定数 建設時検討用		
		浸食考慮条件 :デブリ接触時 (PED基部剛性0.40)	浸食考慮条件 :25%浸食 (PED基部剛性0.39)	浸食考慮条件 :50%浸食 (PED基部剛性0.38)
		現行 S_s		
①原子炉格納容器スタビライザ	ばね反力 [kN]	8203	8203	8320
②原子炉圧力容器スタビライザ	ばね反力 [kN]	4473	4473	4473
③原子炉圧力容器支持スカート	せん断力 [kN]	5138	5138	5138
	モーメント [kN・m]	22947	22700	22454
④原子炉格納容器基部	せん断力 [kN]	8777	8777	8777
	モーメント [kN・m]	212302	212302	212302
⑤原子炉本体基礎 (RPVペDESTAL)	せん断力 [kN]	11851	11851	11851
	モーメント [kN・m]	99500	98256	96874
⑥シヤラダ	ばね反力 [kN]	2506	2506	2506

注: 前述の1号機で実施した S_s 600Galと900Galの地震応答解析の応答比率を用いて簡易的に主要部位の地震荷重を示す。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発ー構造解析・評価

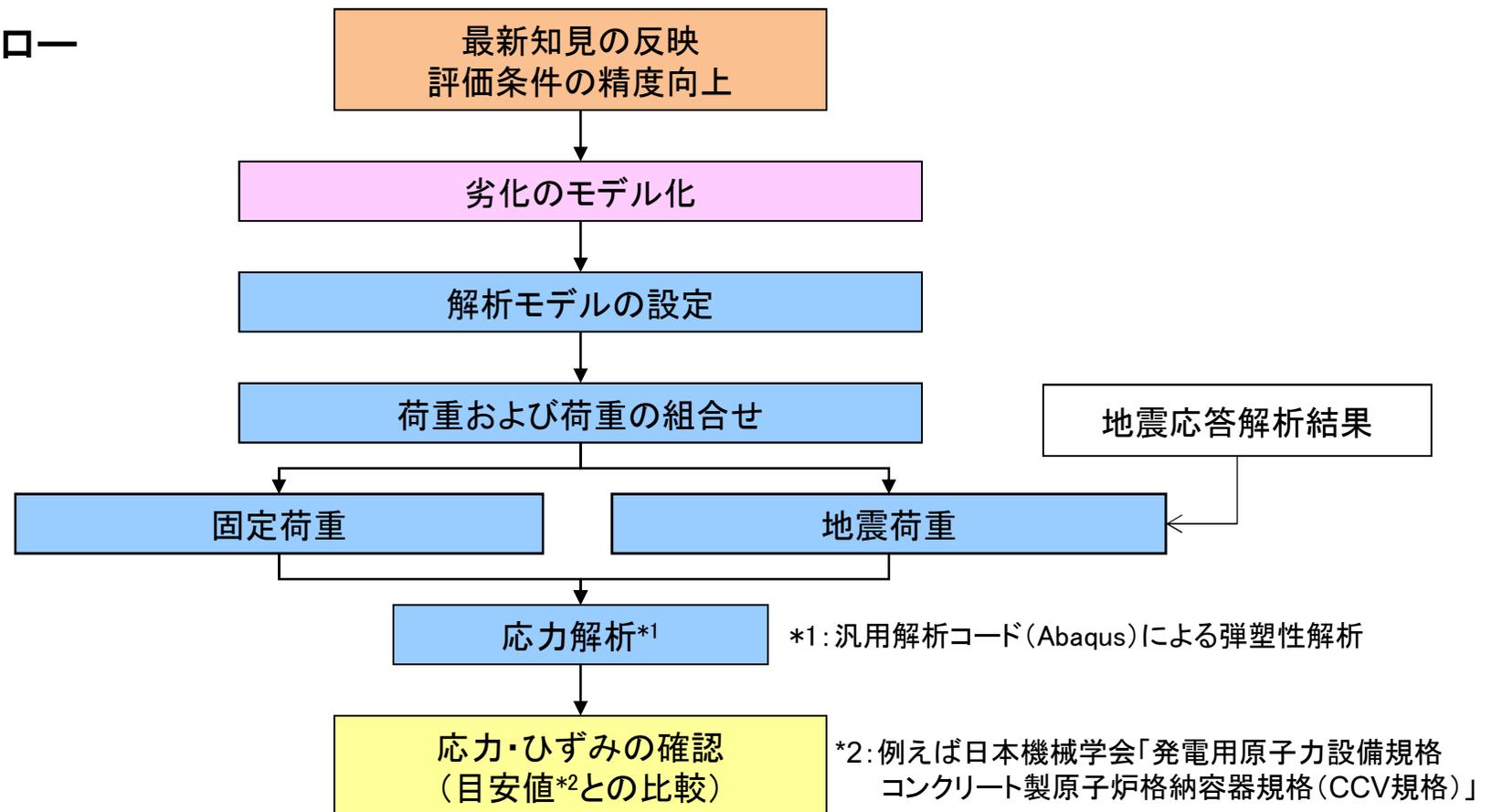
(i)1号機

1. 詳細評価

■ 目的

- 1F-1号機を対象に、最新の知見を反映して、燃料デブリの侵食パターンを変えた詳細評価(3次元FEM弾塑性解析による評価)を実施し、各ケースが評価結果に与える感度を評価する。

■ 評価フロー



(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

1. 詳細評価

■ 解析ケースと解析条件

- 最新の事象進展解析(MAAP、SAMPSONなど)に基づく温度条件、燃料デブリによる侵食条件を考慮した3次元FEM弾塑性解析を2ケース実施する。
- 平成27年度に実施したコンクリートの高温加熱後曝露試験の結果に基づき、コンクリートおよび鉄筋の構成則を設定する。ただし1000℃以上の試験は未実施のため、外挿し1100℃で強度・剛性をゼロとする。
- 鉄筋の高温腐食量は、事故進展解析結果を用いたFEMによる伝熱解析を実施し、鉄筋が受けた温度履歴に対し、中森-EPRIの回帰式を基に評価する。
- 熔融燃料デブリによる侵食は、MCCI解析結果より、①脚部2要素の内側300mmの欠損、および②侵食部における脚部の境界条件をフリーとすることで考慮する。
- 荷重条件は気中取り出しベースで設定されたH29地震荷重を採用する。

No.	燃料デブリ侵食	温度条件	鉄筋の高温腐食量	荷重条件
3A-4	パターンA-4	内側1227℃ 外側625℃	事象進展解析結果の 温度履歴に基づき評価	H29地震荷重: 脚部モーメント:75,000kN・ m 脚部せん断力:7,600kN 鉛直震度:0.46
4B-1	パターンB-1	〃	〃	

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

1. 詳細評価

劣化要因	劣化事象	モデル化項目	モデル化方法	設定根拠
高温	強度・剛性低下	コンクリート	圧縮・引張強度の低減 応力ひずみ関係の軟化	平成27年度 円柱試験より設定 (1F1: 普通コン加熱後4ヶ月水中)
		鉄筋	降伏点の低減	AII耐火性ガイドおよび平成29年度加熱後鉄筋引張試験より設定
		付着	テンションスティフニング 効果は低減しない	平成27年度 縮小模型試験のシミュレーション解析を参考に設定
塩分浸透	鉄筋腐食	鉄筋 (高温腐食)	腐食量に応じた 断面積(鉄筋比)の減少	中森-EPRIの回帰式により設定
		鉄筋 (長期腐食)		平成27年度 鉄筋腐食試験より設定
		付着	テンションスティフニング 効果は低減しない	平成27年度 縮小模型試験のシミュレーション解析を参考に設定
燃料デブリ	侵食	表層欠損 境界条件	脚部内側表層の欠損 侵食部における脚部境界 条件フリー	安全側に設定

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

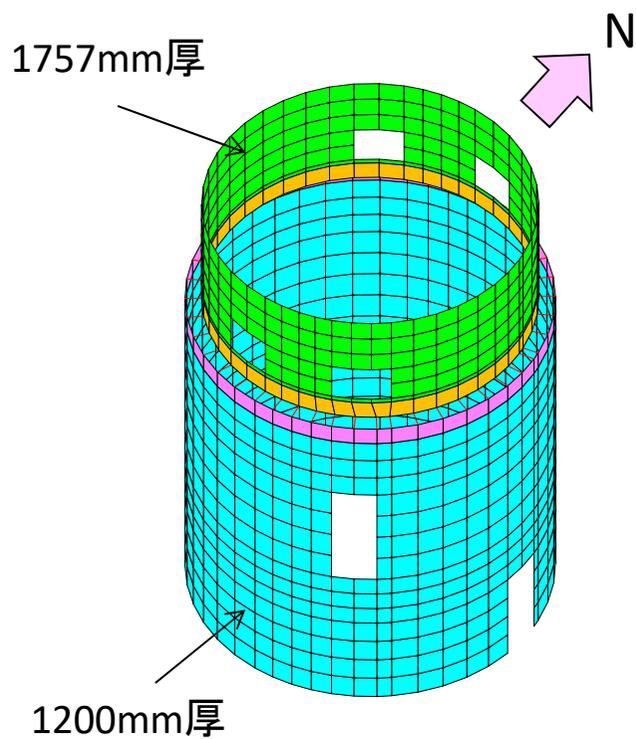
④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

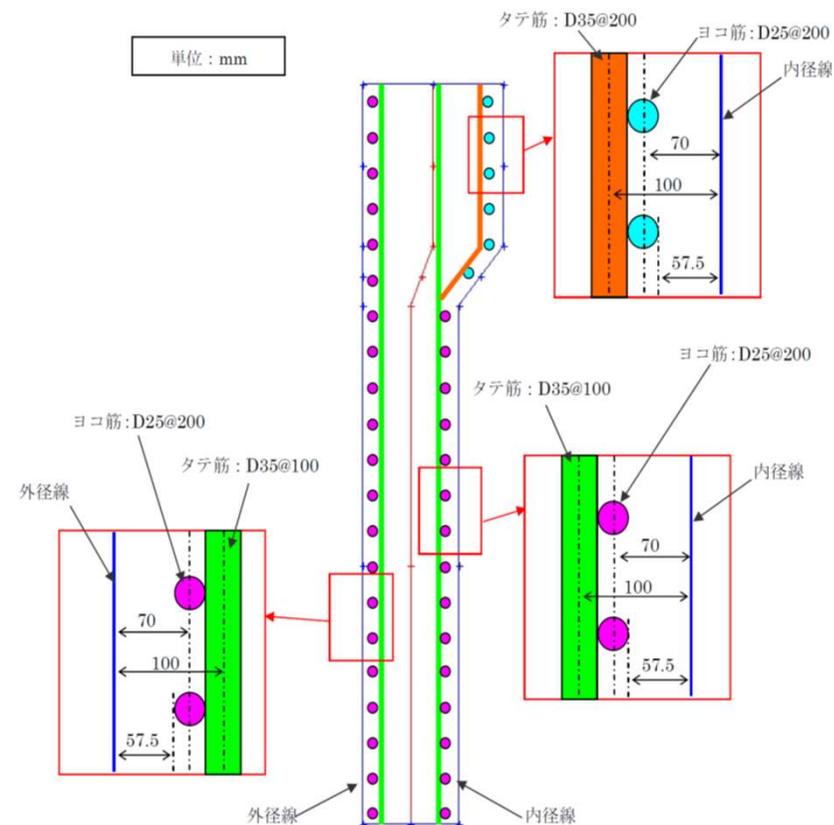
1. 詳細評価

■ 解析モデル

※実際の解析モデルでは、鉄筋は均一厚さの補強層として定義されます。



解析モデル図



配筋概要図

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

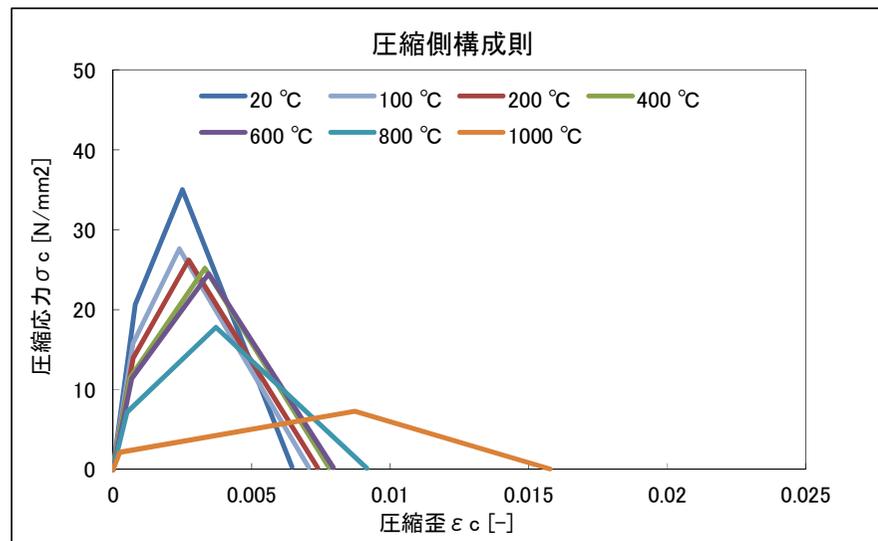
④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

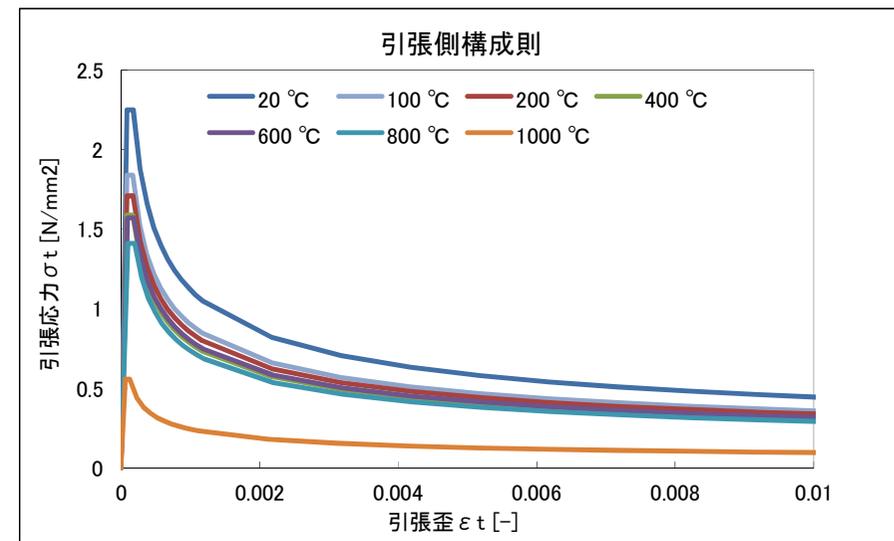
1. 詳細評価

■ コンクリート材料構成則

- 平成27年度成果である円柱試験を用いた加熱後曝露試験をベースとして、縮小模型試験のシミュレーションによって妥当性の確認された構成則を用いる。
- ただし1000℃超の試験は未実施のため、外挿し1100℃で強度・剛性をゼロとする。



(圧縮側)



(引張側)

コンクリートの応力ひずみ関係

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

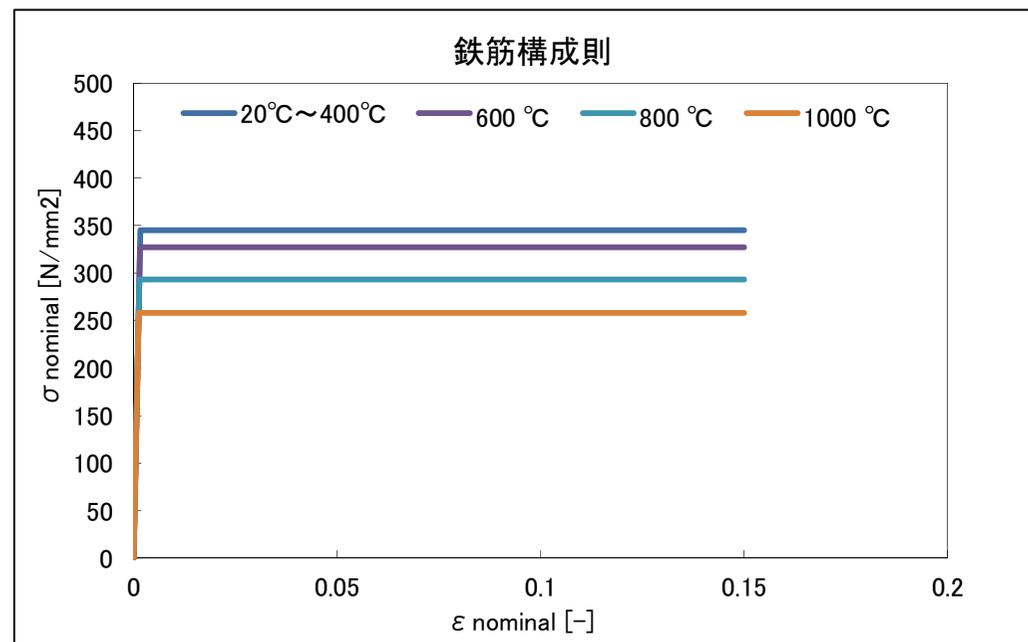
(i)1号機

1. 詳細評価

■ 鉄筋材料構成則

- 鉄筋の加熱による降伏点の低下は既往の文献^[1]および平成29年度成果である加熱後鉄筋引張試験より設定し、縮小模型試験のシミュレーションによって妥当性の確認された構成則を用いる。
- ただし1000°C超の試験は未実施のため、外挿し1100°Cで強度・剛性をゼロとする。

[1] 構造材料の耐火性ガイドブック(AIJ)



鉄筋の応力ひずみ関係

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

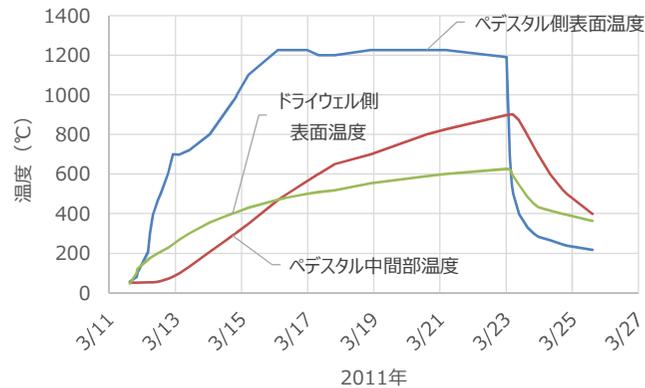
④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

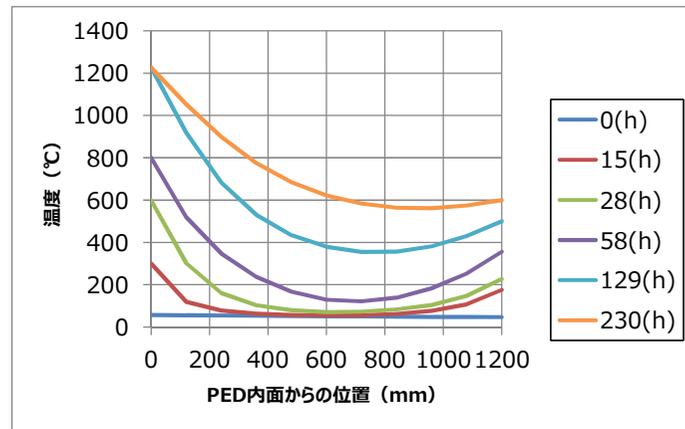
1. 詳細評価

■ 事故進展解析結果に基づく鉄筋の高温腐食量の評価

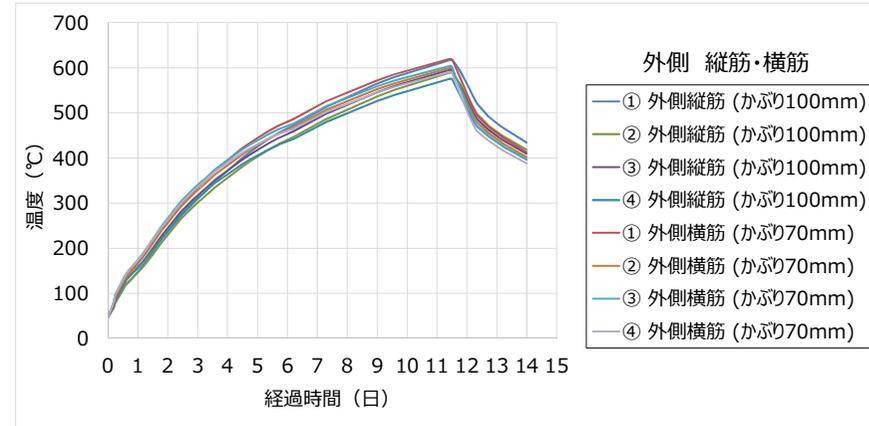
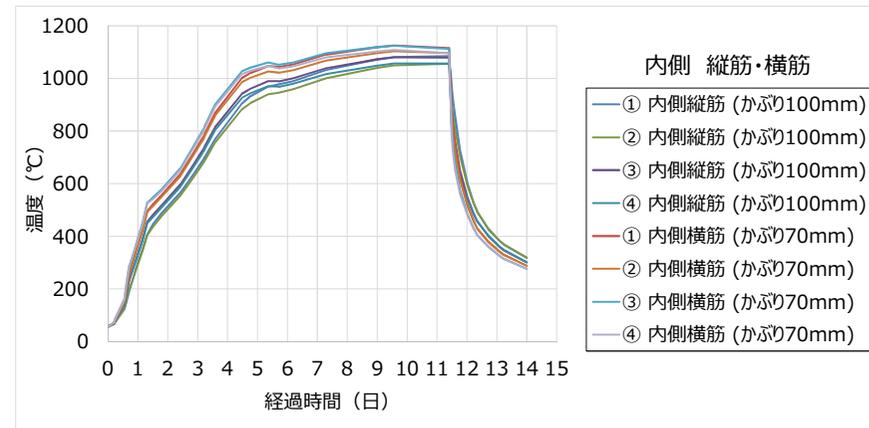
- 事故進展解析結果を境界条件とした3次元FEMモデルによる伝熱解析を実施し、得られた鉄筋位置での温度履歴より、中森-EPRIの回帰式に基づき評価



事故進展解析結果(表面の温度境界として設定)



3DFEMモデルによる伝熱解析結果(断面内の温度分布)



鉄筋位置での温度履歴(上:内側鉄筋、下:外側鉄筋)

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

1. 詳細評価

■ 鉄筋の腐食量の評価結果

- 事故時高温による腐食と、その後40年までの長期腐食を考慮

腐食による断面減少を考慮した配筋量(一般部)

号機	温度条件	鉄筋	腐食前	高温腐食 考慮後*1	40年長期腐食 考慮後*2
1F-1	内側1227°C 外側625°C	内側 タテ筋	0.73% (1-D35@100)	0.007% [0.01]	0.007% [0.01]
		内側 ヨコ筋	0.19% (1-D25@200)	0.00% [0.00]	0.00% [0.00]
		外側 タテ筋	0.87% (1-D35@100)	0.80% [0.92]	0.75% [0.86]
		外側 ヨコ筋	0.23% (1-D25@200)	0.20% [0.89]	0.19% [0.81]

*1: 400°C以上の高温腐食量は、以下の中森-EPRIの回帰式に基づき算定 []は腐食前に対する比を示す。

$$D = \{10^u \times 3600 \times t\}^{0.5} \times 10$$

$$u = -9.93 \times (1/T \times 10^3) + 1.03$$

D: 腐食量(mm)、t: 酸化時間(h)、u: 鋼種係数、T: 酸化温度(K)

*2: 長期腐食量は平成27年度の鉄筋の長期浸漬腐食試験より算定

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

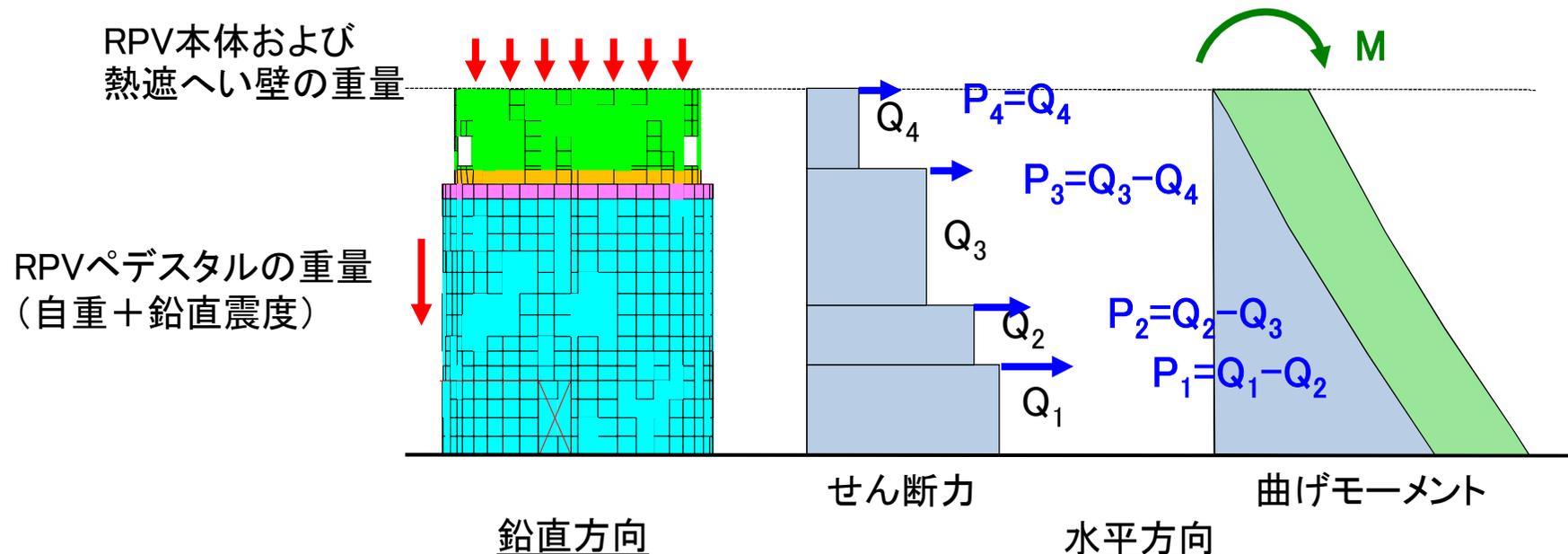
④RPVペダスタルの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

1. 詳細評価

■ 荷重および境界条件

- 固定荷重
 - ・RPV本体および遮へい壁の重量
 - ・ペダスタル本体の自重
- 地震荷重
 - ・基準地震動 S_s による地震荷重
 - ・水平方向:せん断力と曲げモーメントを作用
 - ・鉛直方向:震度として解析モデルに一律に作用



- ペダスタル脚部境界条件は固定とする。ただし、燃料デブリ侵食を考慮したケースは侵食エリアを固定しないことで、影響を考慮する。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.80

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発ー構造解析・評価

(i)1号機

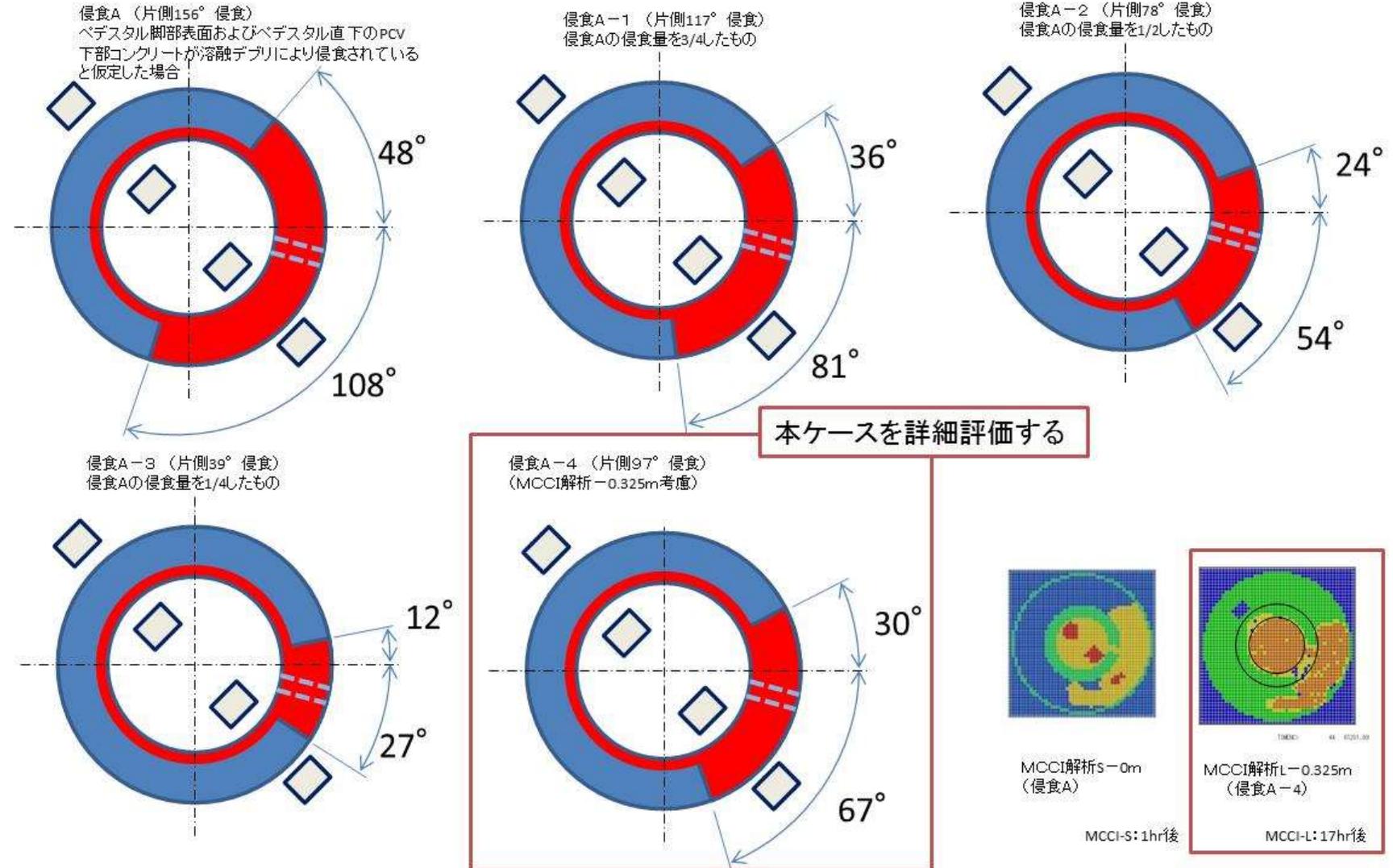
燃料デブリ侵食パターンA-4

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

2-1. 燃料デブリ侵食パターンA

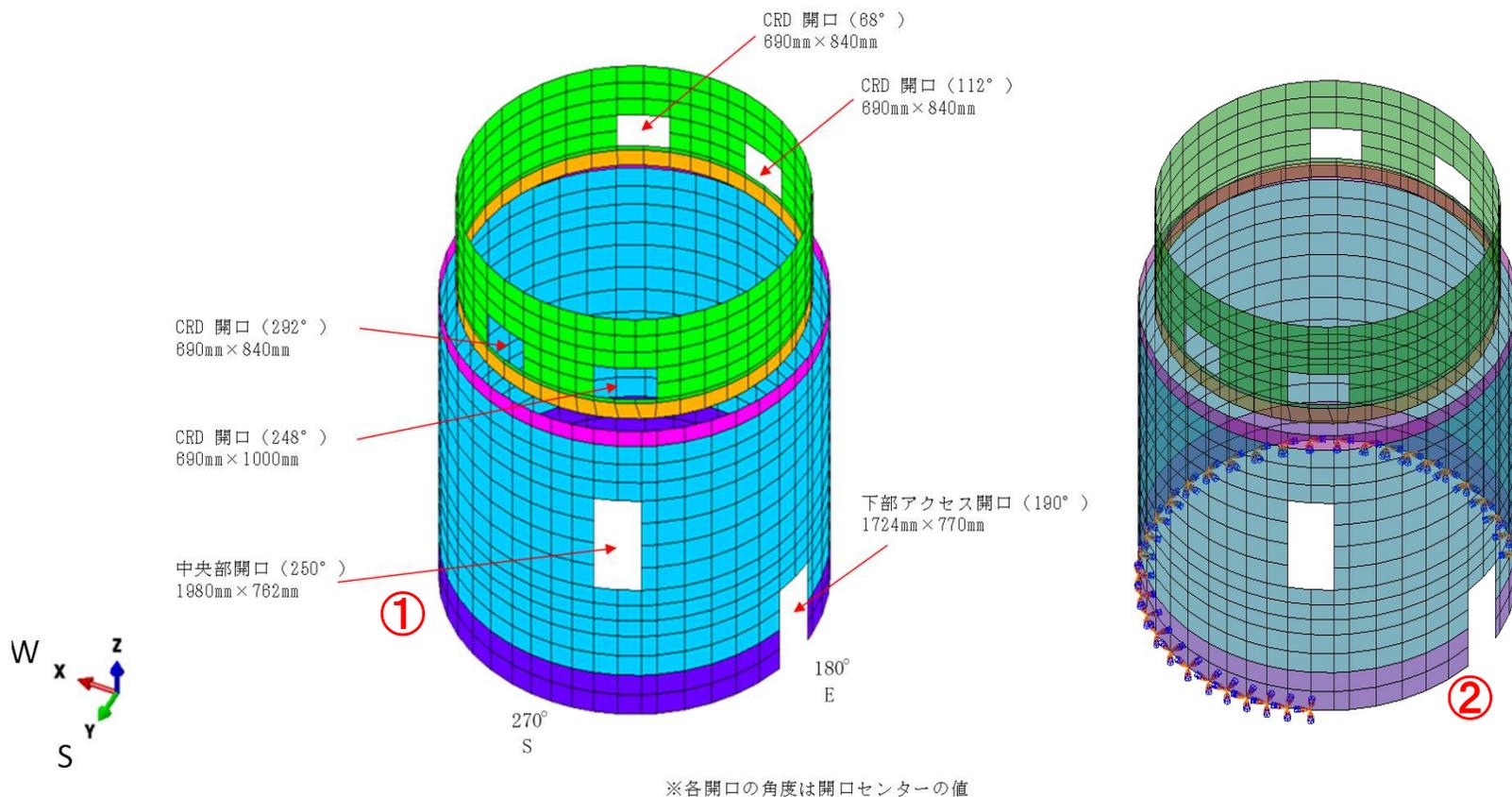


(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

2-2. 解析モデル(燃料デブリ侵食パターンA-4)



- ・燃料デブリ侵食の解析における扱い: ①および②を考慮 (MCCI解析結果より設定)
- ①脚部2要素について内側300mm欠損考慮 (1200mm厚⇒900mm厚)
- ②燃料デブリ侵食の範囲を脚部境界条件フリー

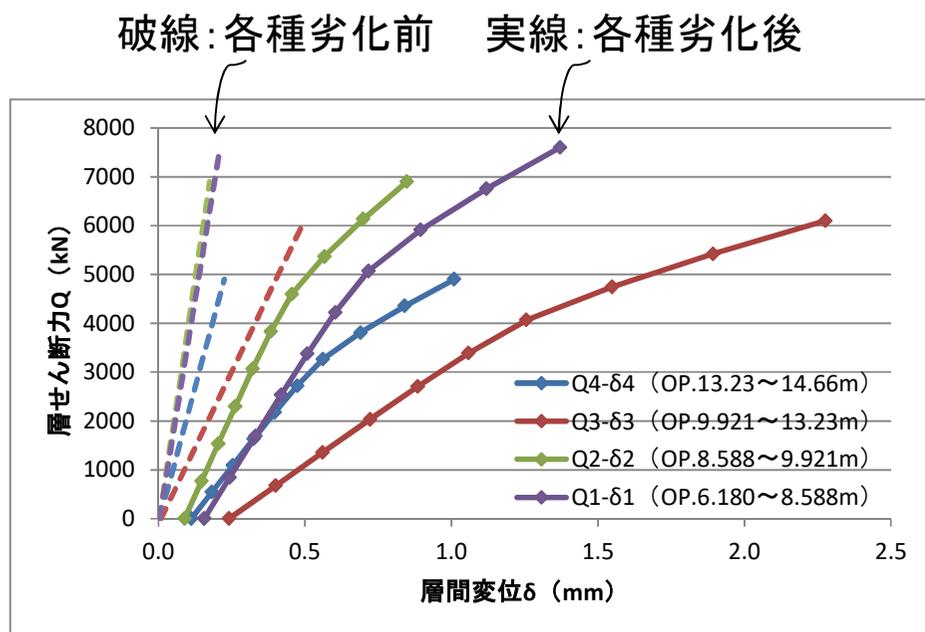
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

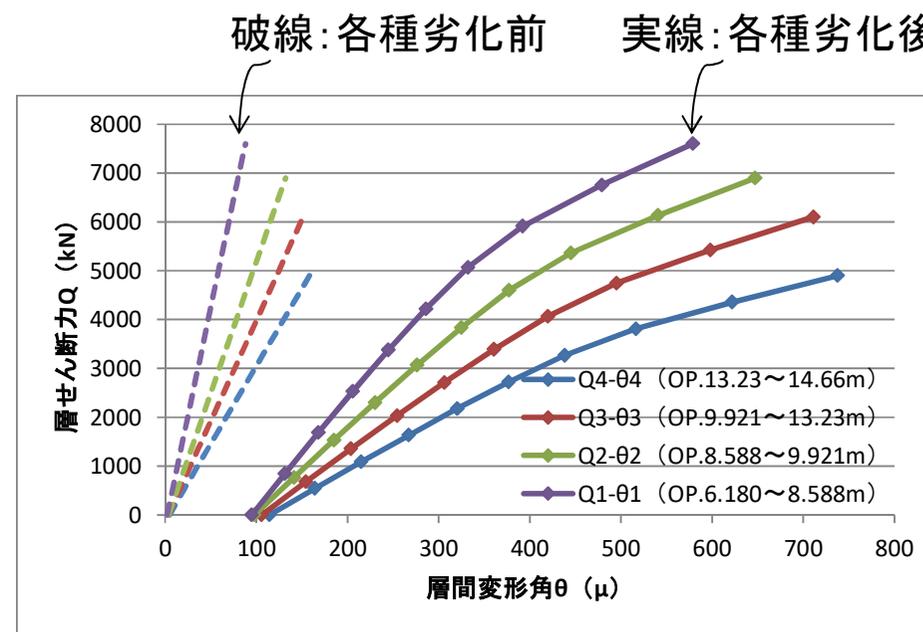
(i)1号機

2-3. 詳細評価(3次元FEM弾塑性解析による評価)

■ 解析結果(No.3A-4: 侵食パターンA-4: 内側1227°C, 外側625°C)



層せん断力Q—層間変位 δ 関係



層せん断力Q—層間変形角 θ 関係

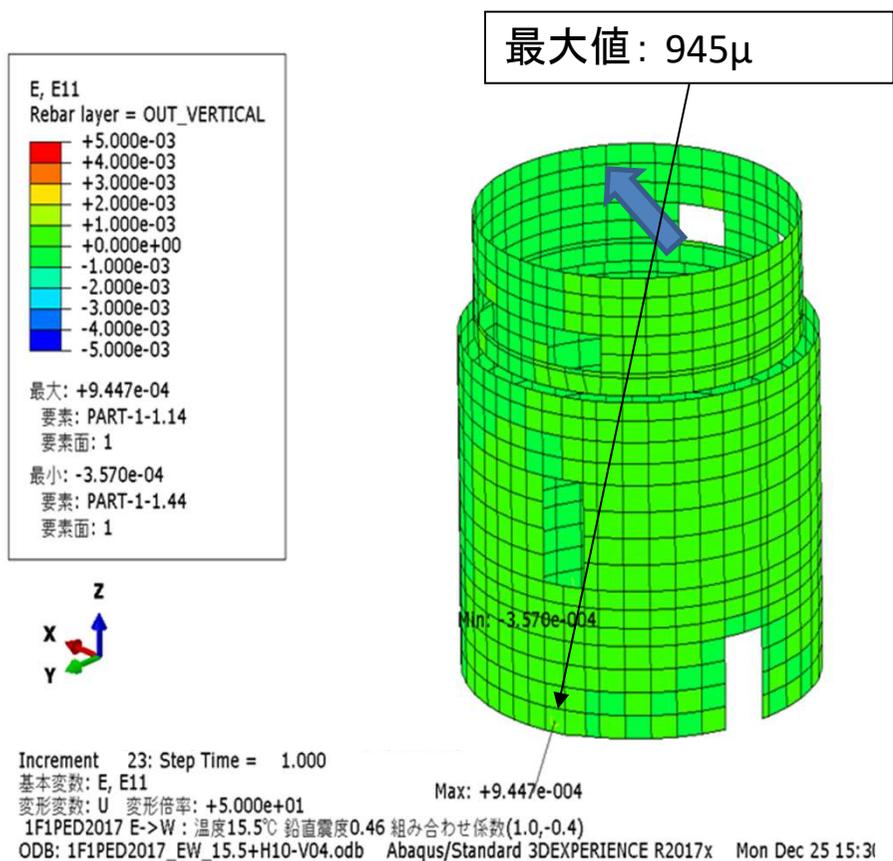
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

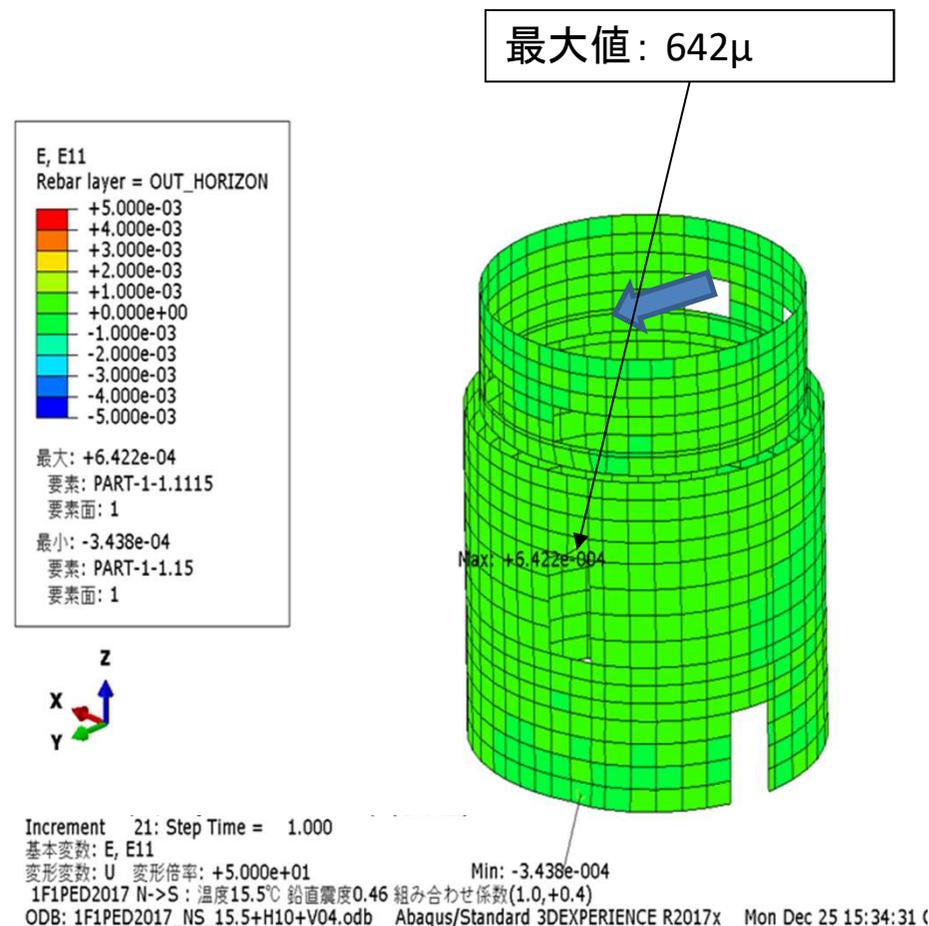
(i)1号機

2-3. 詳細評価(3次元FEM弾塑性解析による評価)

■ 解析結果(No.3A-4: 侵食パターンA-4: 内側1227°C,外側625°C)



タテ筋ひずみ分布



ヨコ筋ひずみ分布

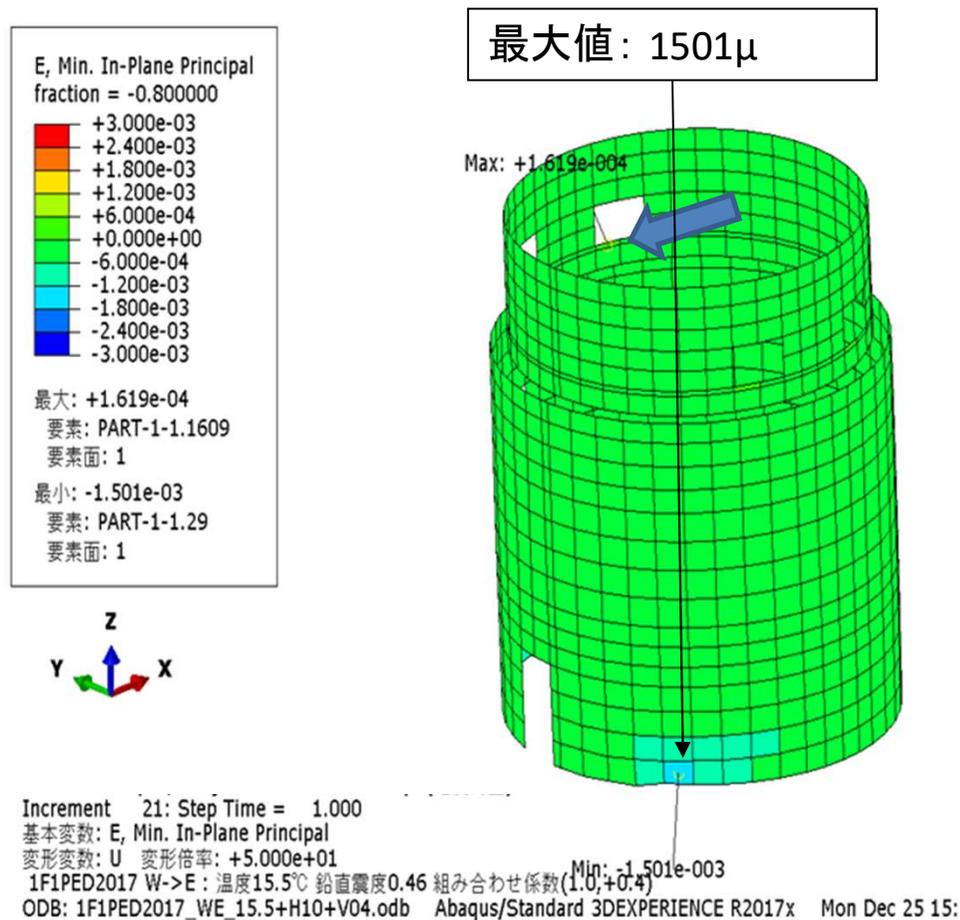
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

2-3. 詳細評価(3次元FEM弾塑性解析による評価)

■ 解析結果 (No.3A-4: 侵食パターンA-4: 内側1227°C, 外側625°C)



コンクリート圧縮ひずみ分布

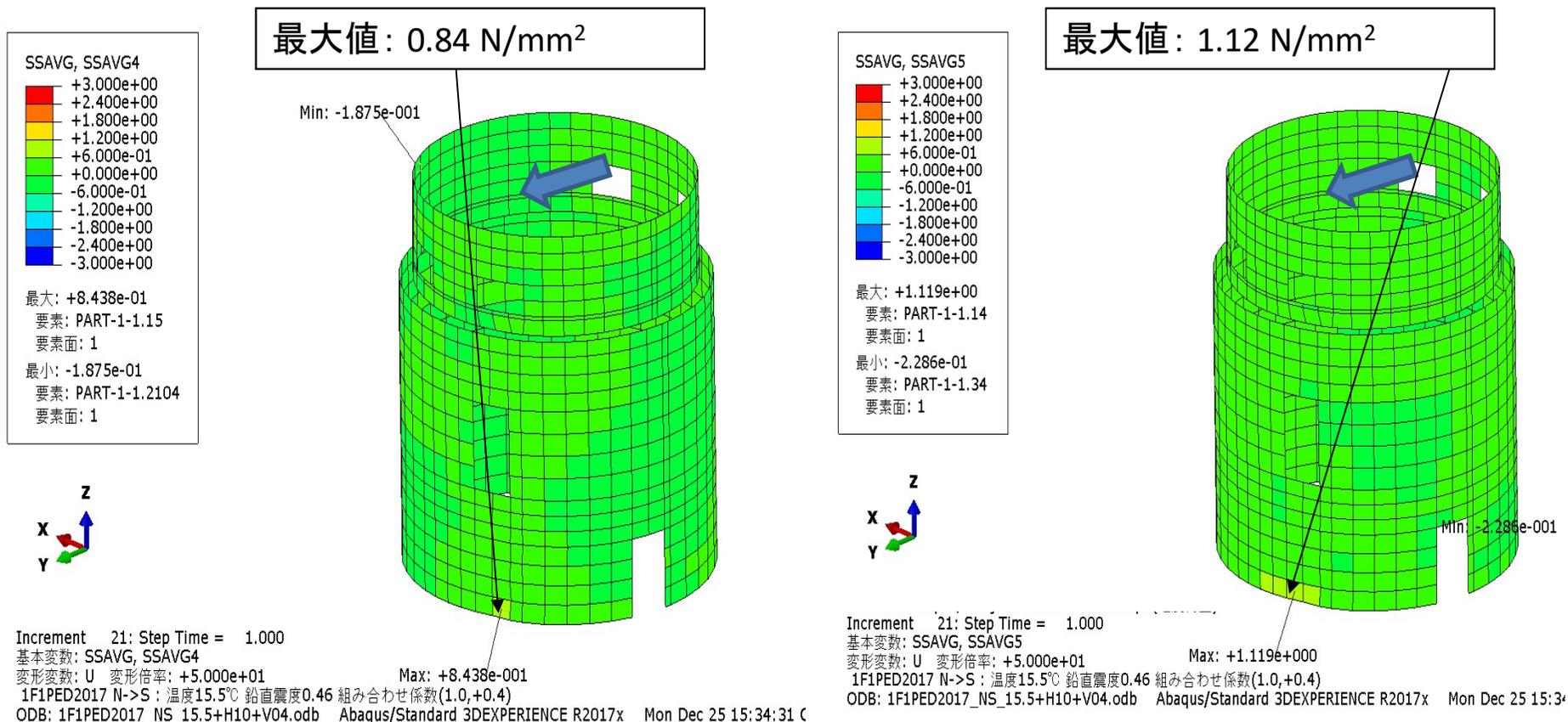
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

2-3. 詳細評価(3次元FEM弾塑性解析による評価)

■ 解析結果 (No.3A-4: 侵食パターンA-4: 内側1227°C, 外側625°C)



面外せん断応力分布
(円周方向)

面外せん断応力分布
(子午線方向)

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.87

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発ー構造解析・評価

(i)1号機

燃料デブリ侵食パターンB-1

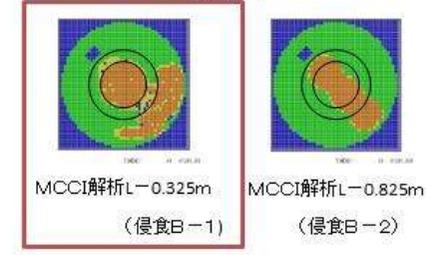
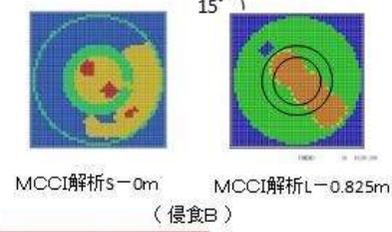
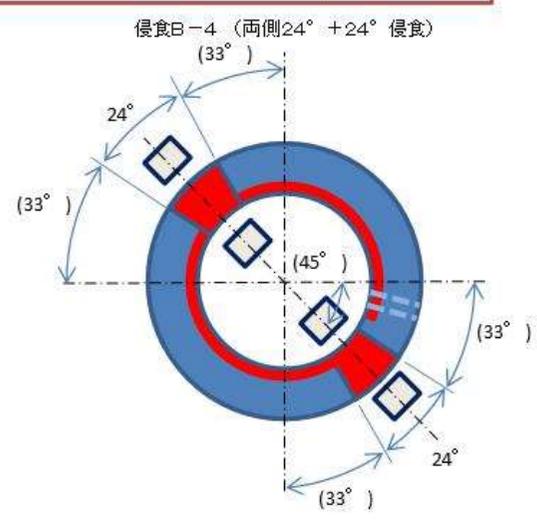
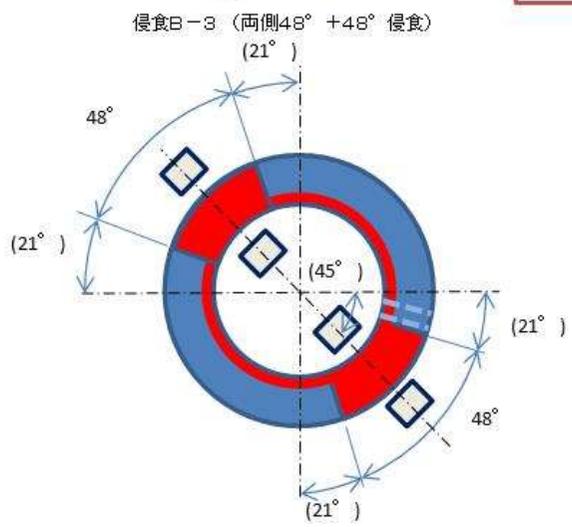
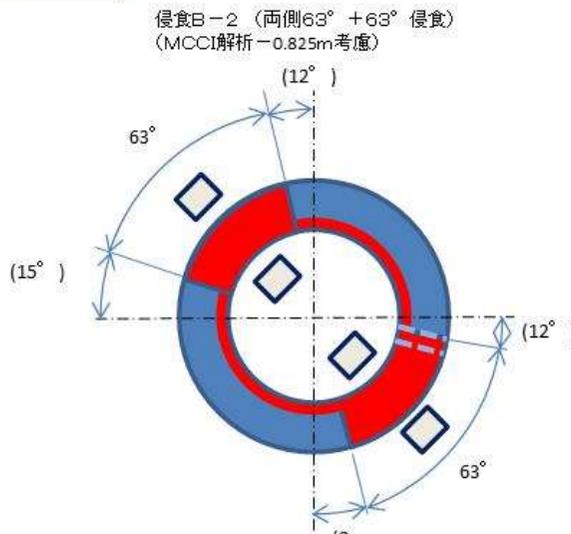
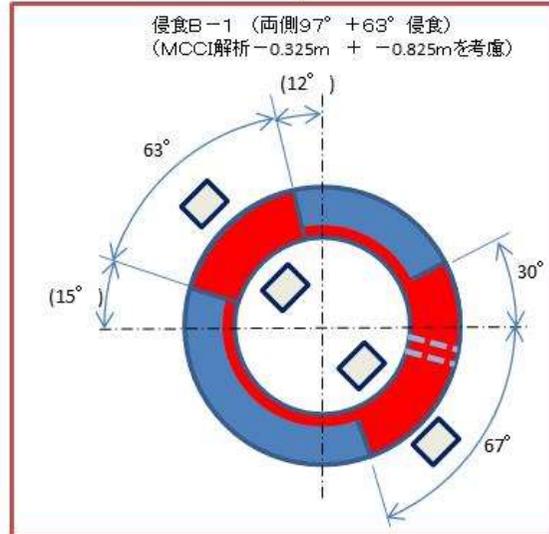
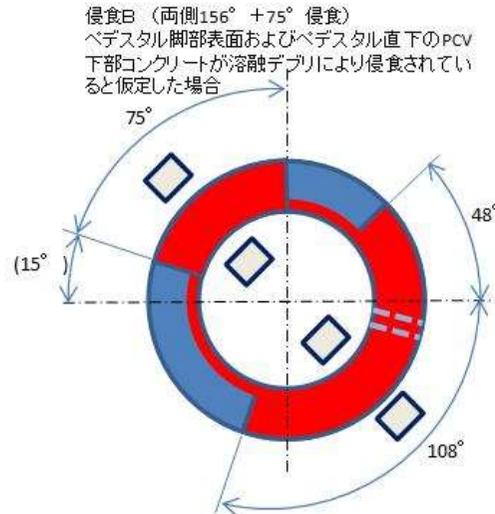
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

3-1. 燃料デブリ侵食パターンB

本ケースを詳細評価する

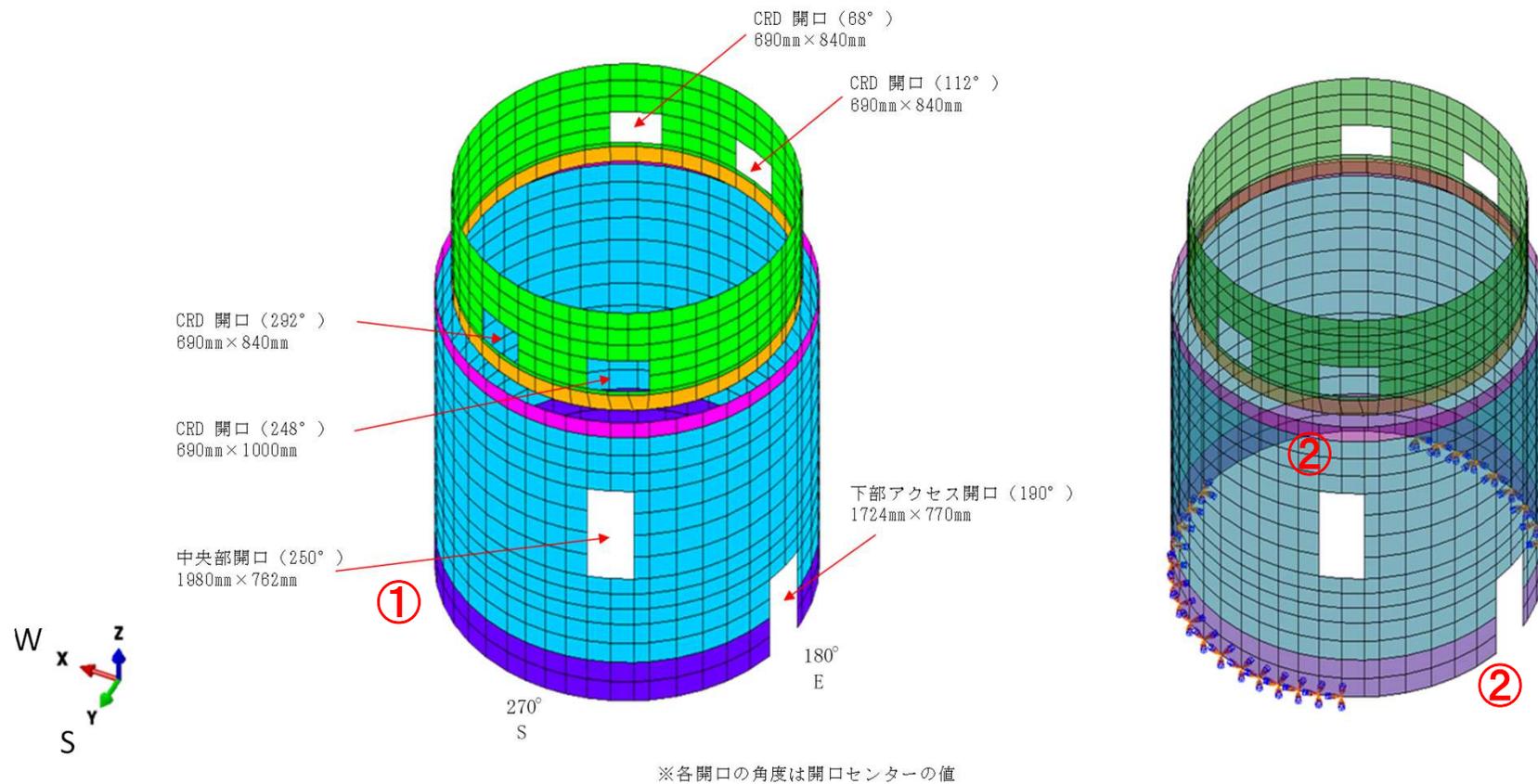


(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

3-2. 解析モデル(燃料デブリ侵食パターンB-1)



- ・燃料デブリ侵食の解析における扱い: ①および②を考慮(MCCI解析結果より設定)
 - ①脚部2要素について内側300mm欠損考慮(1200mm厚⇒900mm厚)
 - ②燃料デブリ侵食の範囲を脚部境界条件フリー

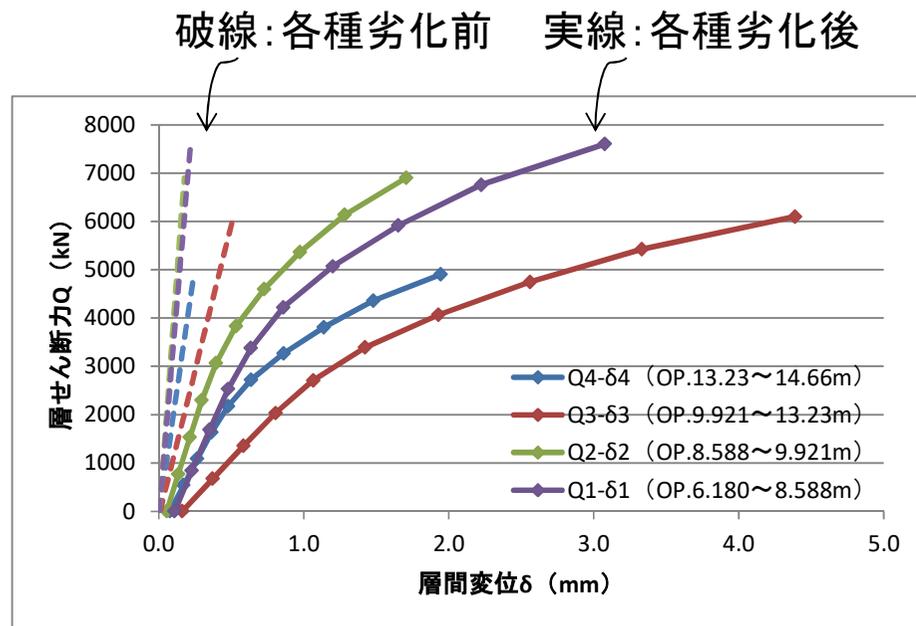
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

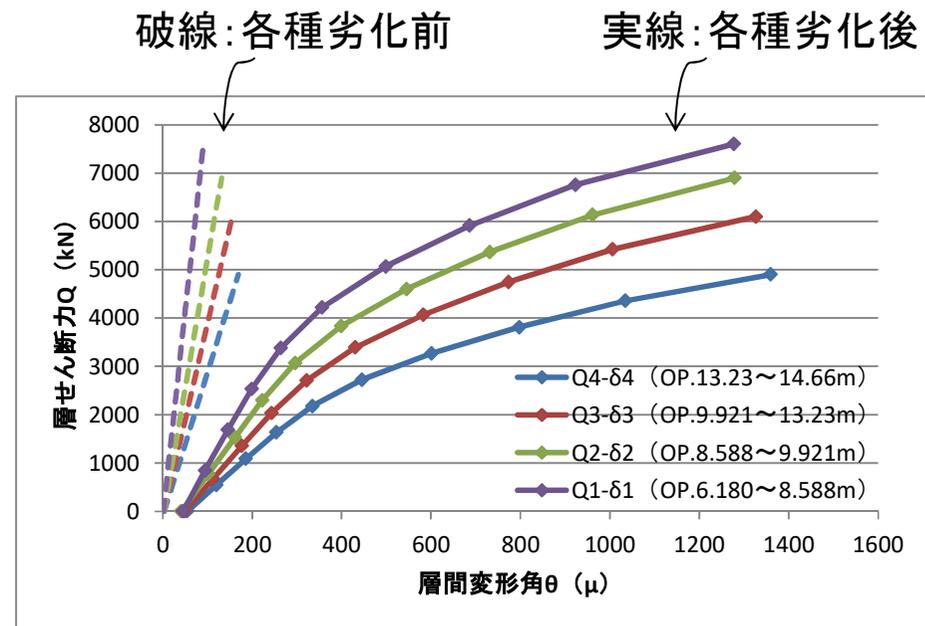
(i)1号機

3-3. 詳細評価(3次元FEM弾塑性解析による評価)

■ 解析結果(No.4B-1:侵食パターンB-1:内側1227°C,外側625°C)



層せん断力Q—層間変位 δ 関係



層せん断力Q—層間変形角 θ 関係

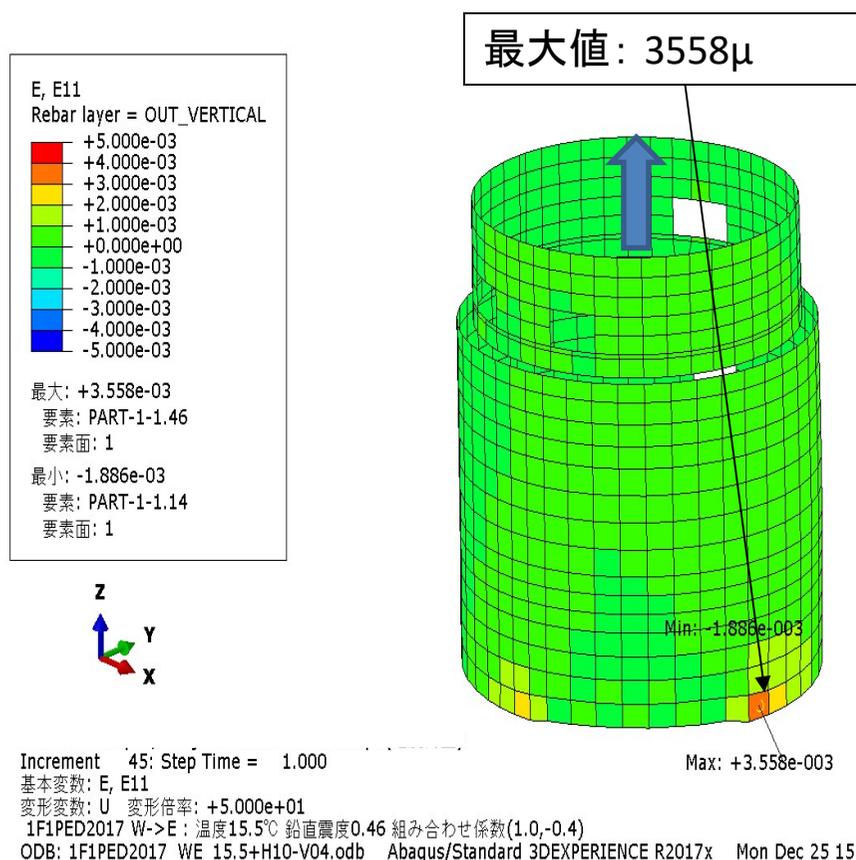
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

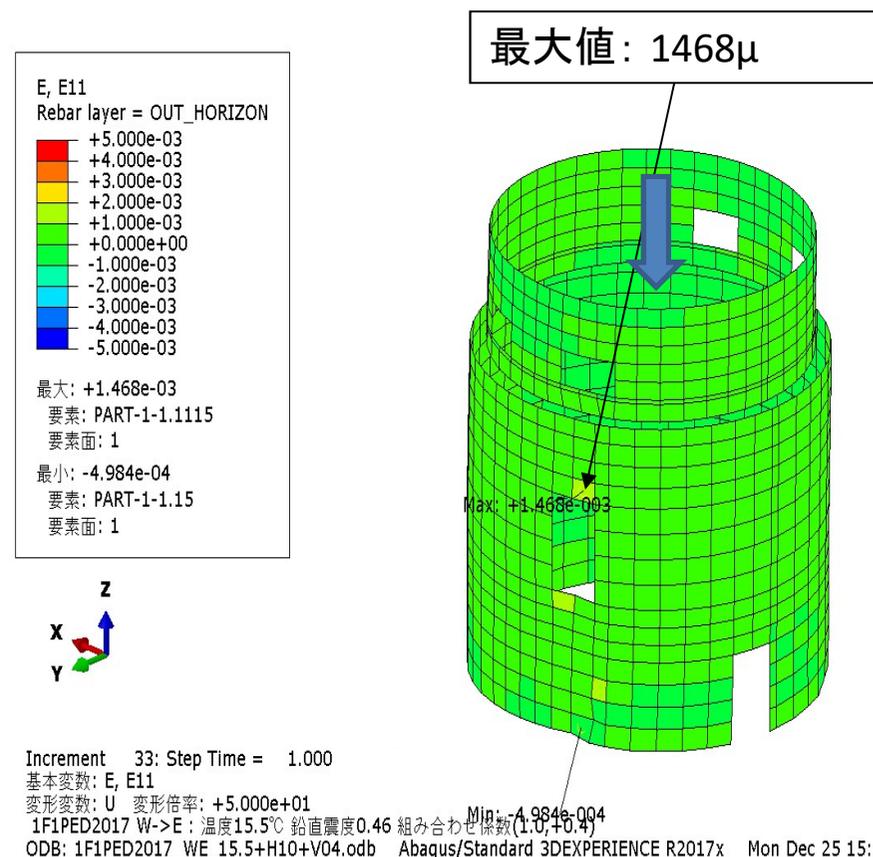
(i)1号機

3-3. 詳細評価(3次元FEM弾塑性解析による評価)

■ 解析結果 (No.4B-1: 侵食パターンB-1: 内側1227°C, 外側625°C)



タテ筋ひずみ分布



ヨコ筋ひずみ分布

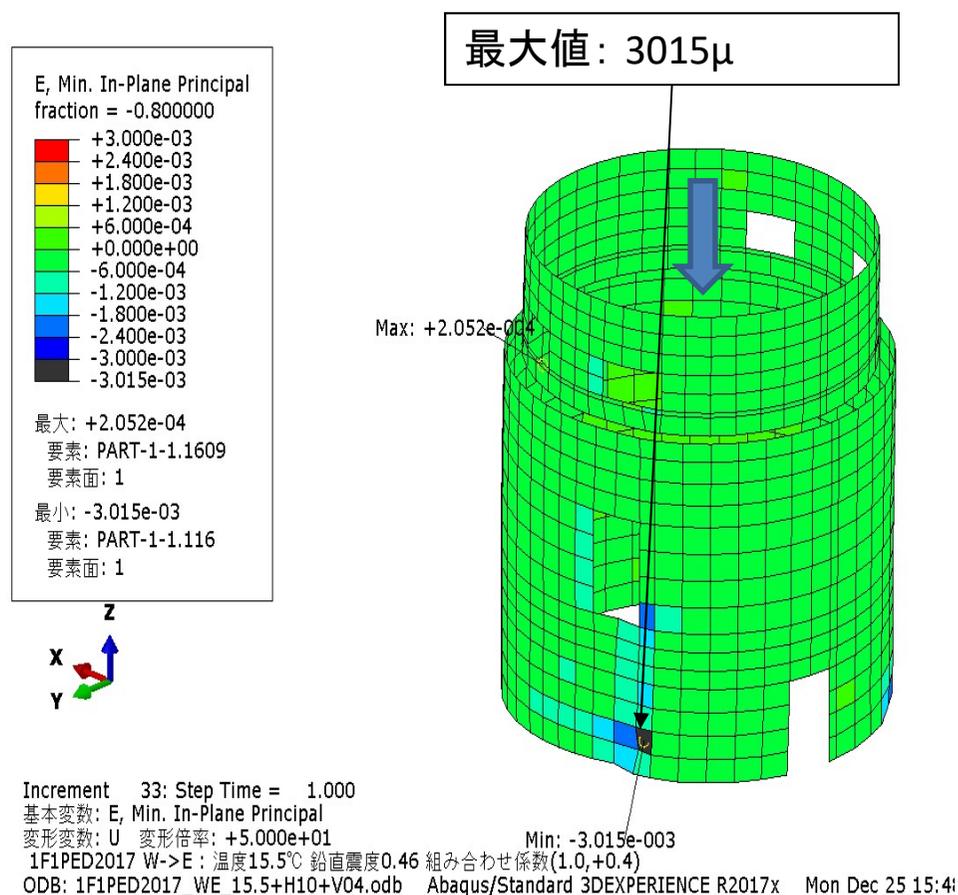
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

3-3. 詳細評価(3次元FEM弾塑性解析による評価)

■ 解析結果(No.4B-1: 侵食パターンB-1: 内側1227°C, 外側625°C)



コンクリート圧縮ひずみ分布

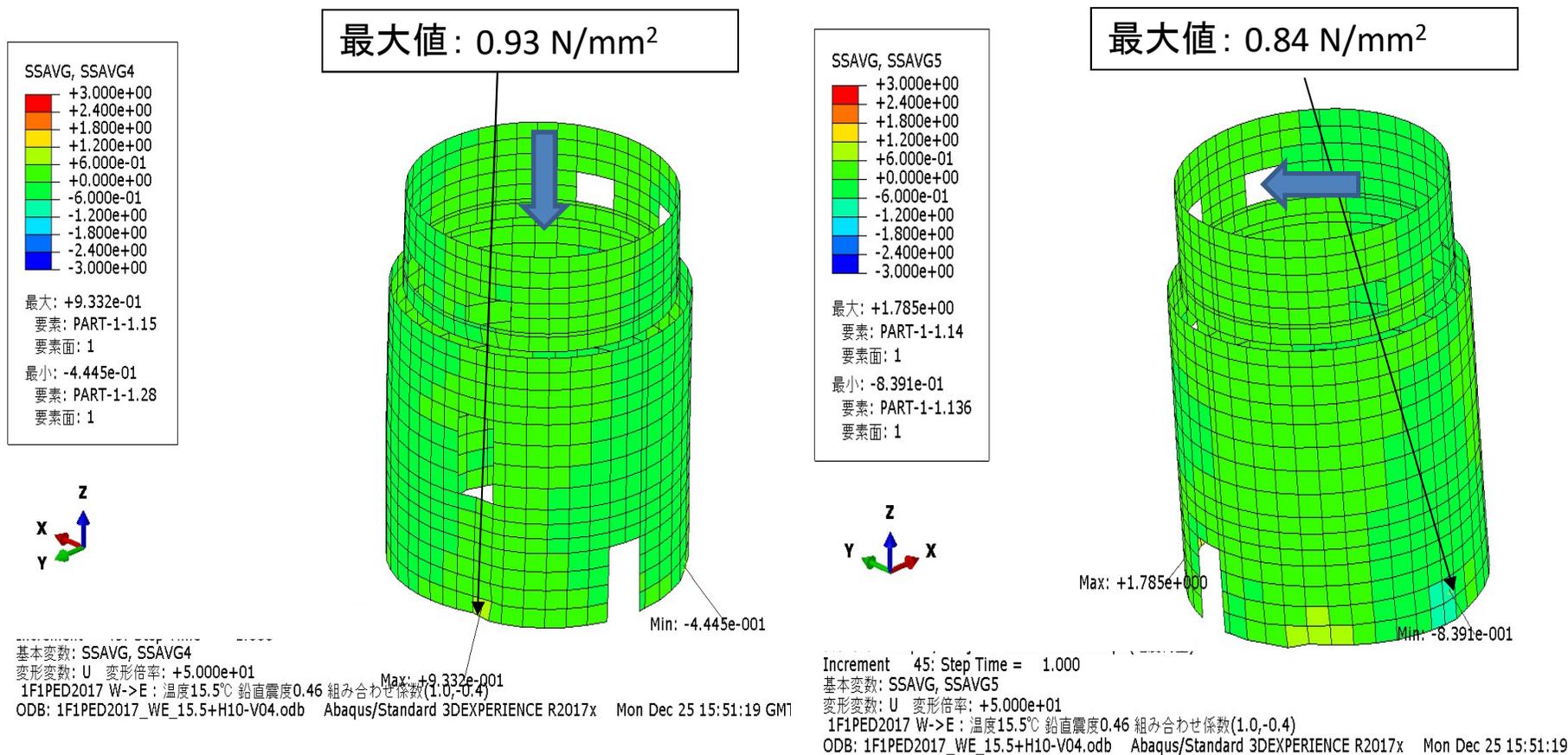
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

3-3. 詳細評価(3次元FEM弾塑性解析による評価)

■ 解析結果(No.4B-1:侵食パターンB-1:内側1227°C,外側625°C)



面外せん断応力分布
(円周方向)

面外せん断応力分布
(子午線方向)

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.94

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発ー構造解析・評価

(i)1号機

解析結果の評価

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペダスタルの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

■ 評価方法

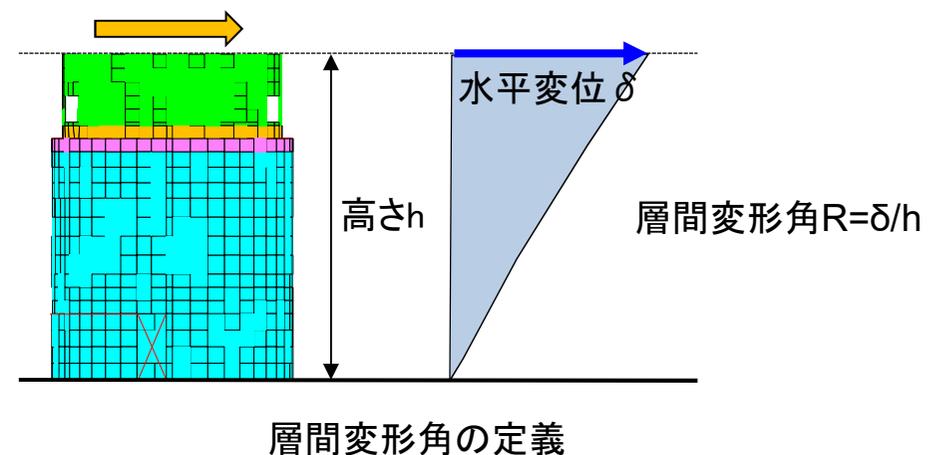
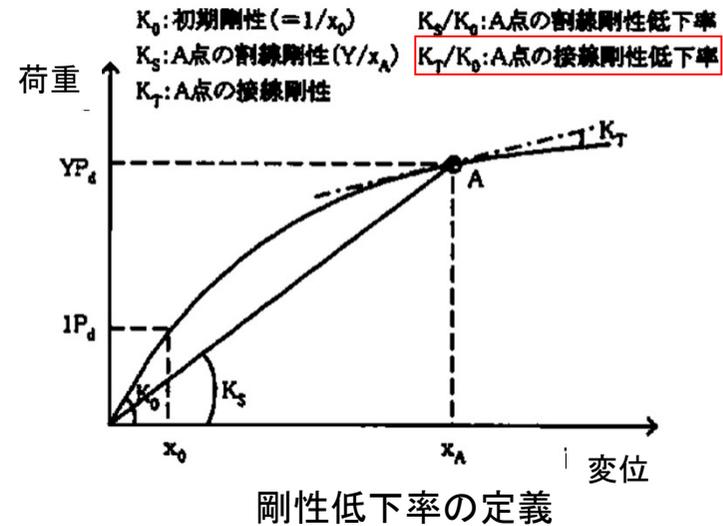
- 1F-RPVペダスタルの3D-FEM解析の評価は、構造体全体に対する評価と局所的な評価に対して、以下の4つの指標を用いて行う。

■ 全体応答の評価

- ①剛性低下率
- ②層間変形角

■ 局部応答の評価

- ③コンクリートひずみ
- ④鉄筋ひずみ



(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

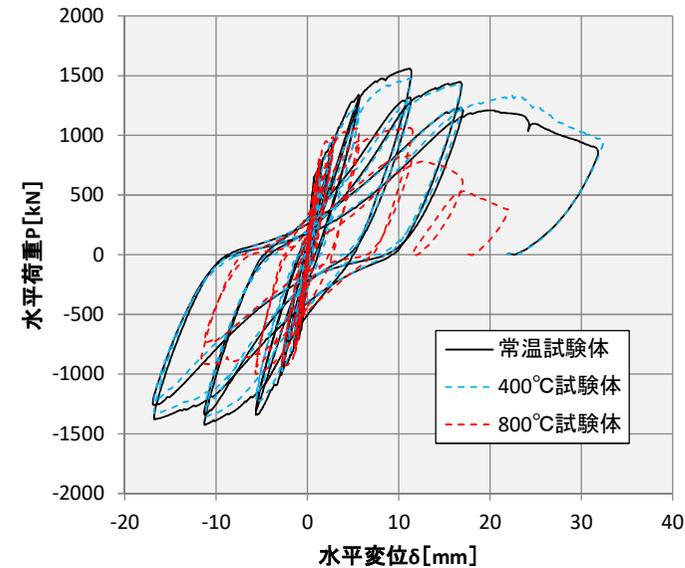
■剛性低下率および層間変形角の目安

- ・事故時の劣化を模擬した縮小模型試験体の水平加力試験における最大耐力時の剛性低下率と部材角(層間変形角)から目安値を設定

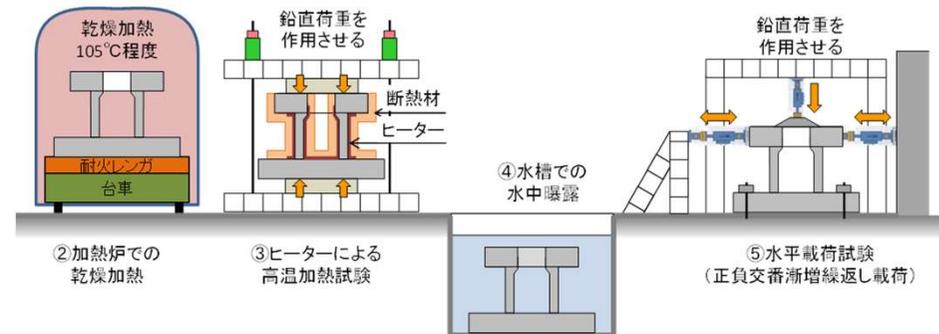
縮小模型試験体最大耐力時の剛性低下率および部材角に基づく目安値

		剛性低下率*1	部材角
縮小模型試験	常温	2.3%	1/124
	400°C	2.1%	1/124
	800°C	0.8%	1/124
目安値		2.5%	1/125

*1: 常温試験体初期剛性に対する値



水平荷重P—水平変位δ関係



(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

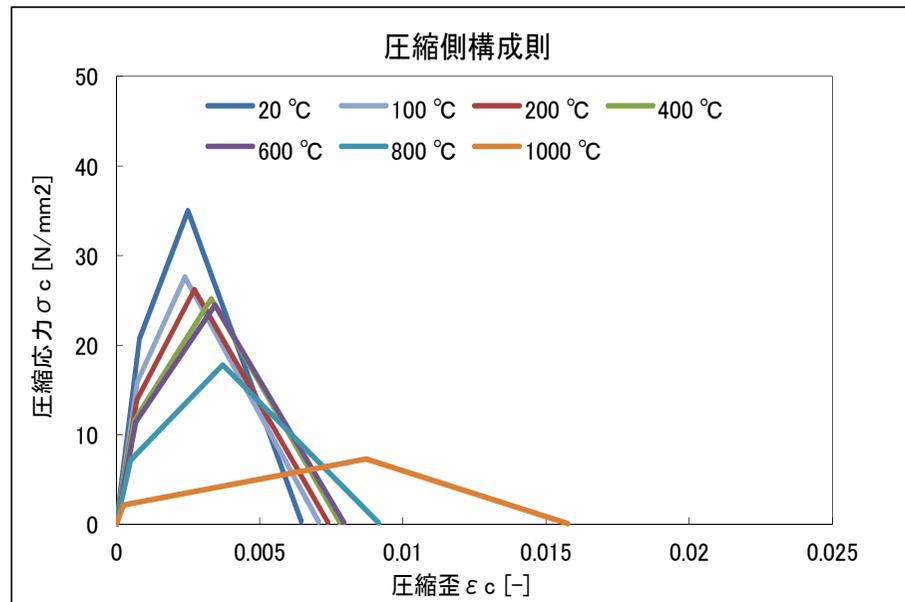
(i)1号機

■コンクリートおよび鉄筋ひずみの目安

・SAガイドライン^[1]を参考に、コンクリートひずみと鉄筋ひずみの目安値を設定

評価項目	目安値
コンクリートひずみ	事故時に経験した温度に応じた圧縮限界ひずみ ^{*1}
鉄筋ひずみ	80000 μ

[1]日本機械学会「発電用原子炉設備規格 シビアアクシデント時の構造健全性評価ガイドライン (BWR鉄筋コンクリート製格納容器編)」



*1: 圧縮強度が85%に軟化した時点相当のコンクリートひずみ

温度	限界ひずみ
20°C	3100 μ
100°C	3093 μ
200°C	3431 μ
400°C	3992 μ
600°C	4125 μ
800°C	4533 μ
1000°C	9792 μ

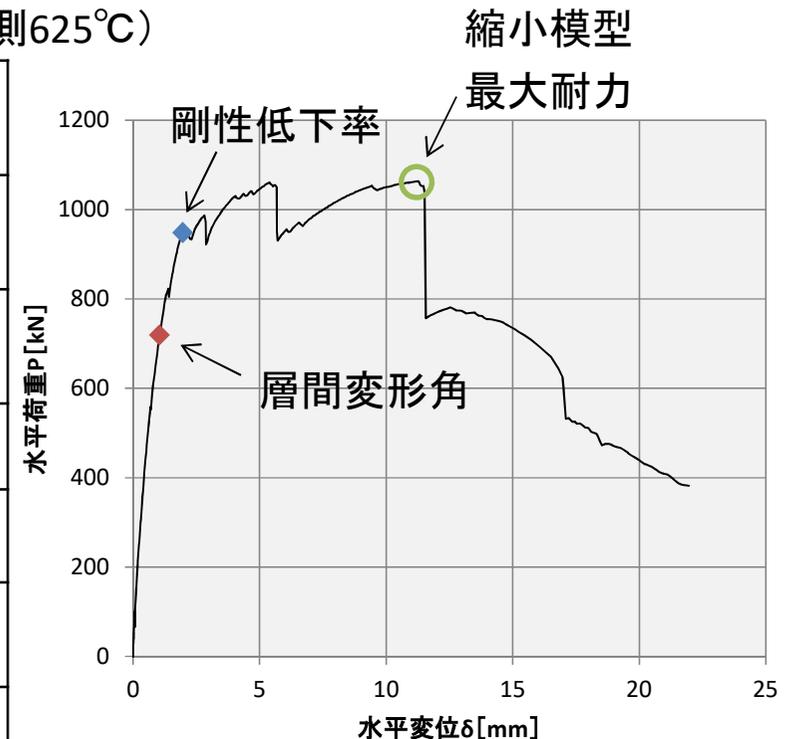
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

■評価結果 (No.3A-4: 侵食パターンA-4: 内側1227°C, 外側625°C)

評価項目	発生値 (A)	目安値 (B)	比率*5
剛性低下率*1 (T.P.4.744~7.152m)	9.2%	2.5%*2以上	0.27
層間変形角 (T.P.4.744~7.152m)	1/1727	1/125*2以下	0.07
コンクリートひずみ	1501 μ	4125 μ *3*4以下	0.36
鉄筋ひずみ	945 μ	80000 μ *3以下	0.01
面外せん断力 (円周方向)	0.84N/mm2	0.83N/mm2	1.01
面外せん断力 (子午線方向)	1.12N/mm2	1.15N/mm2	0.97



剛性低下率および層間変形角評価結果と縮小模型実験結果(800°C)との対応

- *1: 高温・腐食・燃料デブリ侵食等の劣化前の初期剛性に対する接線剛性低下率
- *2: 事故時の劣化を模擬した縮小模型試験体の水平加力試験における最大耐力時の値
- *3: 日本機械学会「発電用原子炉設備規格シビアアクシデント時の構造健全性評価ガイドライン(BWR鉄筋コンクリート製格納容器編)」
- *4: 600°Cコンクリートの応力ひずみ線図における0.85F_c時のひずみ
- *5: 剛性低下率はB/A、層間変形角・コンクリートひずみ・鉄筋ひずみ・面外せん断力はA/B

➤ 剛性低下率、層間変形角、コンクリートひずみ、および鉄筋ひずみは目安値に収まるが、円周方向の面外せん断力が目安値をやや上回る結果となった。

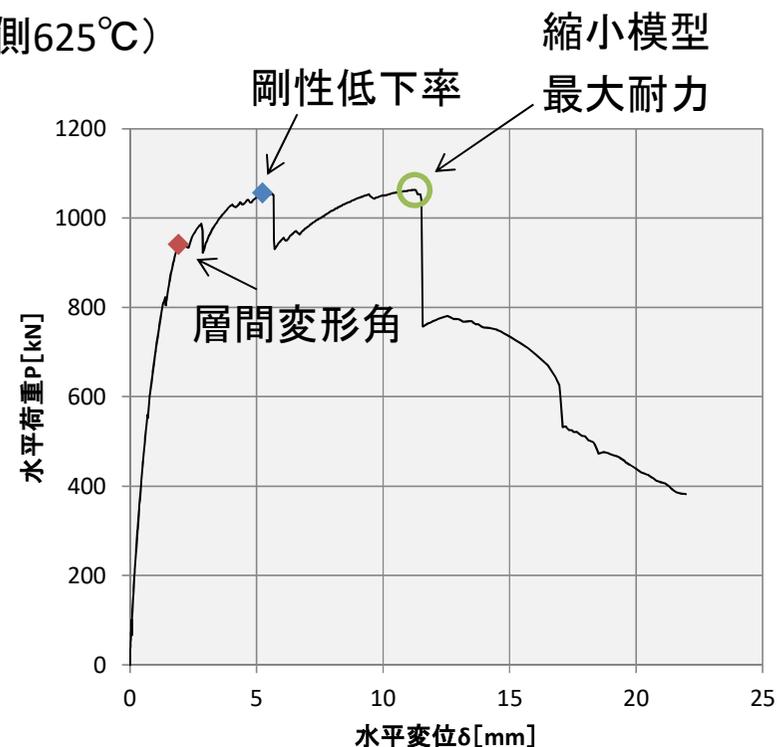
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

■評価結果 (No.4B-1: 侵食パターンB-1: 内側1227°C, 外側625°C)

評価項目	発生値 (A)	目安値 (B)	比率*5
剛性低下率*1 (T.P.4.744~7.152m)	2.8%	2.5%*2以上	0.89
層間変形角 (T.P.4.744~7.152m)	1/783	1/125*2以下	0.16
コンクリートひずみ	3015 μ	4125 μ *3*4以下	0.73
鉄筋ひずみ	3558 μ	80000 μ *3以下	0.04
面外せん断力 (円周方向)	0.93N/mm2	0.90N/mm2	1.03
面外せん断力 (子午線方向)	0.84N/mm2	0.54N/mm2	1.56



剛性低下率および層間変形角評価結果と縮小模型実験結果(800°C)との対応

- *1: 高温・腐食・燃料デブリ侵食等の劣化前の初期剛性に対する接線剛性低下率
 *2: 事故時の劣化を模擬した縮小模型試験体の水平加力試験における最大耐力時の値
 *3: 日本機械学会「発電用原子炉設備規格 シビアアクシデント時の構造健全性評価ガイドライン (BWR鉄筋コンクリート製格納容器編)」
 *4: 600°Cコンクリートの応力ひずみ線図における0.85F_c時のひずみ
 *5: 剛性低下率はB/A、層間変形角・コンクリートひずみ・鉄筋ひずみ・面外せん断力はA/B

➤ 剛性低下率、層間変形角、コンクリートひずみ、および鉄筋ひずみは目安値に収まるが、面外せん断力が目安値を上回る結果となった。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(ii)2/3号機

1. 概略評価

■ 目的

- 1F-3号機を対象として、燃料デブリの侵食パターンを変えた概略評価(曲げおよびせん断に対する検討)を実施し、各ケースが評価結果に与える感度を評価する。

■ 実施項目

- ①ファイバーモデルを用いた軸力・曲げに対する断面検討
- ②原子力発電所耐震設計技術規程JEAC4601-2008のせん断スケルトン終局点に基づく、せん断に対する検討

■ 概略評価

- 全てのケースが目安値に収まっていたため、詳細評価は実施せず。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発ー構造解析・評価

(ii)2/3号機

1. 概略評価

■ 実施ケース

➤ 全3ケースを実施する。パラメータは、燃料デブリ侵食である。

No.	解析概要	温度条件	燃料デブリ侵食	水平地震荷重	
				脚部モーメント	脚部せん断力
1	侵食なし	内側1200℃ 外側400℃	侵食なし	72,000 kN・m	9,000 kN
2	侵食25%	〃	侵食25%	71,100 kN・m	
3	侵食50%	〃	侵食50%	70,100 kN・m	

※ 概略評価では、断面内で変化する材料物性を定義できないので、一律700℃の温度による劣化を考慮する。
また、燃料デブリ侵食表面を1200℃とし、線形温度分布で1000℃以上の領域のコンクリート及び鉄筋はないものとする。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

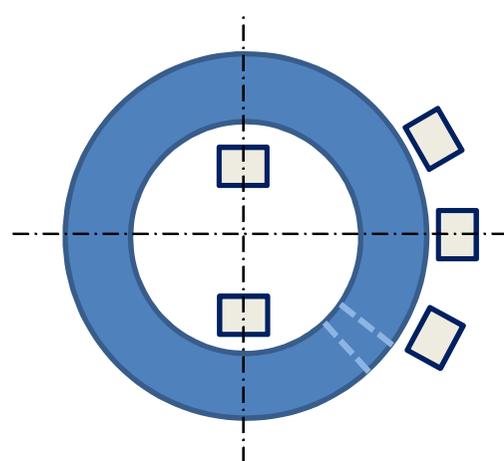
④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発ー構造解析・評価

(ii)2/3号機

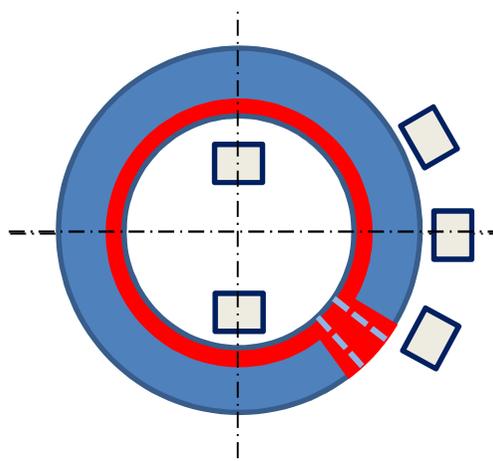
1. 概略評価

■ 燃料デブリ侵食パターン(1F-3号機)

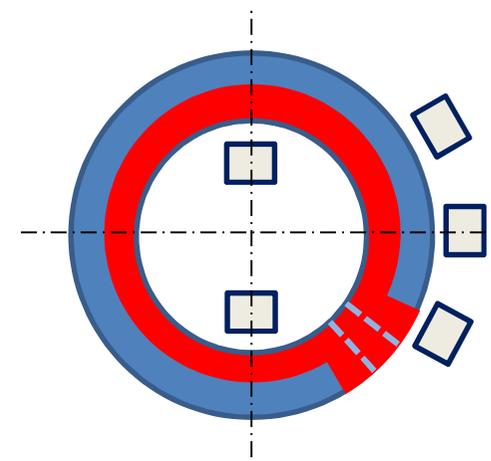
- 燃料デブリ侵食パターンを示す。
- 厚さ方向への侵食を考慮する。



侵食なし



侵食25%



侵食50%

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

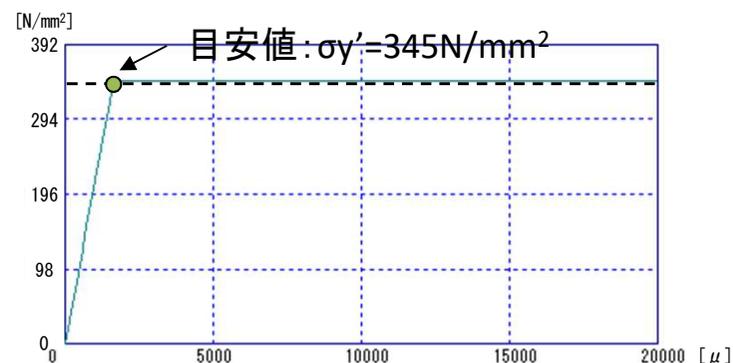
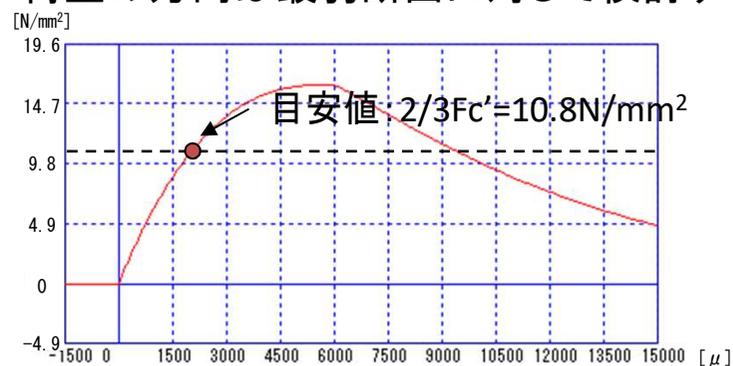
④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(ii)2/3号機

2. ファイバーモデルによる曲げに対する断面解析

■ 手法

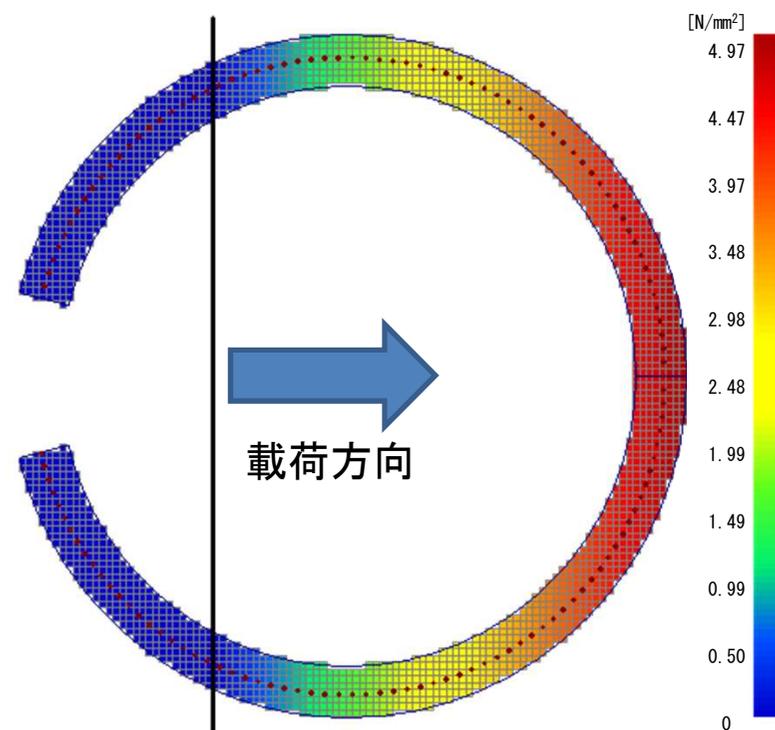
- ファイバーモデルを用いて、曲げおよび軸力に対する断面解析を実施する。
- 平面保持仮定に基づく解析であり、評価の目安値は以下の図の通りとする。
- 荷重の方向は最弱断面に対して検討する。上向きおよび下向きを実施する。



F_c' : 高温を考慮したコンクリートの圧縮強度 (=16.25N/mm²)

σ_y' : 鉄筋の降伏点強度 (=345N/mm²)

応力ひずみ特性(上:コンクリート、下:鉄筋)



解析結果の一例(コンクリートの圧縮応力度)

[ケースNo.2D: 侵食25%、下向き]

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(ii)2/3号機

2. ファイバーモデルによる曲げに対する断面解析

■ 曲げおよび軸力に対する概略検討結果

➤ 全てのケースで目安値以内となった。

No.	解析概要	鉛直地震方向	燃料デブリ侵食	圧縮側コンクリートの応力		引張側鉄筋の応力	
				発生値 σ_b (N/mm ²)	応力度比* ¹ σ_b/f_c * ²	発生値 σ_t (N/mm ²)	応力度比* ¹ σ_t/f_t * ³
1U	燃料デブリ接触時、上向き	上向き	無し	3.90	0.37	115	0.34
1D	燃料デブリ接触時、下向き	下向き		4.18	0.39	51.3	0.15
2U	侵食25%、上向き	上向き	侵食25%	4.56	0.43	127	0.37
2D	侵食25%、下向き	下向き		4.97	0.47	59.5	0.18
3U	侵食50%、上向き	上向き	侵食50%	5.52	0.52	139	0.41
3D	侵食50%、下向き	下向き		6.14	0.57	67.7	0.20

*1 応力度比=発生応力度/目安値

*2 $f_c=2/3F_c'=10.8\text{N/mm}^2$ *3 $f_t=\sigma_y'=345\text{N/mm}^2$

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(ii)2/3号機

3. JEAC4601-2008に基づく、せん断に対する検討

■ 手法

- 評価の目安とするせん断力 Q_a は、JEAC4601-2008のせん断スケルトン終局点に基づき、以下の値とする。

$$Q_a = 1/\alpha \cdot A \cdot \tau_3 \times 10^3$$

$$\tau_3 = (1 - \tau_s / 1.4\sqrt{F_c}) \cdot \tau_0 + \tau_s \quad (\tau_s \leq 1.4\sqrt{F_c})$$

$$= 1.4\sqrt{F_c} \quad (\tau_s \geq 1.4\sqrt{F_c})$$

$$\tau_0 = (0.94 - 0.56M/QD) \cdot \sqrt{F_c} \quad \text{ただし、} M/QD > 1 \text{のとき} M/QD = 1$$

$$\tau_s = (P_V + P_H) \cdot \sigma_y / 2 + (\sigma_V + \sigma_H) / 2$$

ここで、	Q_a	: 許容せん断力 (kN)
	A	: 燃料デブリによる侵食を考慮したコンクリート断面積 (m ²)
	α	: 形状係数 (2.0もしくは1.0)
	τ_3	: せん断終局応力度 (N/mm ²)
	F_c	: コンクリートの圧縮強度 (N/mm ²)
	M/QD	: シアスパン比
	P_V, P_H	: 腐食を考慮した縦、横筋比 (実数)
	σ_V, σ_H	: 縦、横軸応力度 (N/mm ²) (圧縮を正)
	σ_y	: 鉄筋降伏応力度 (N/mm ²)

- 荷重の方向は最弱断面に対して検討する。(ウェブ壁断面積が少なくなる方向)

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

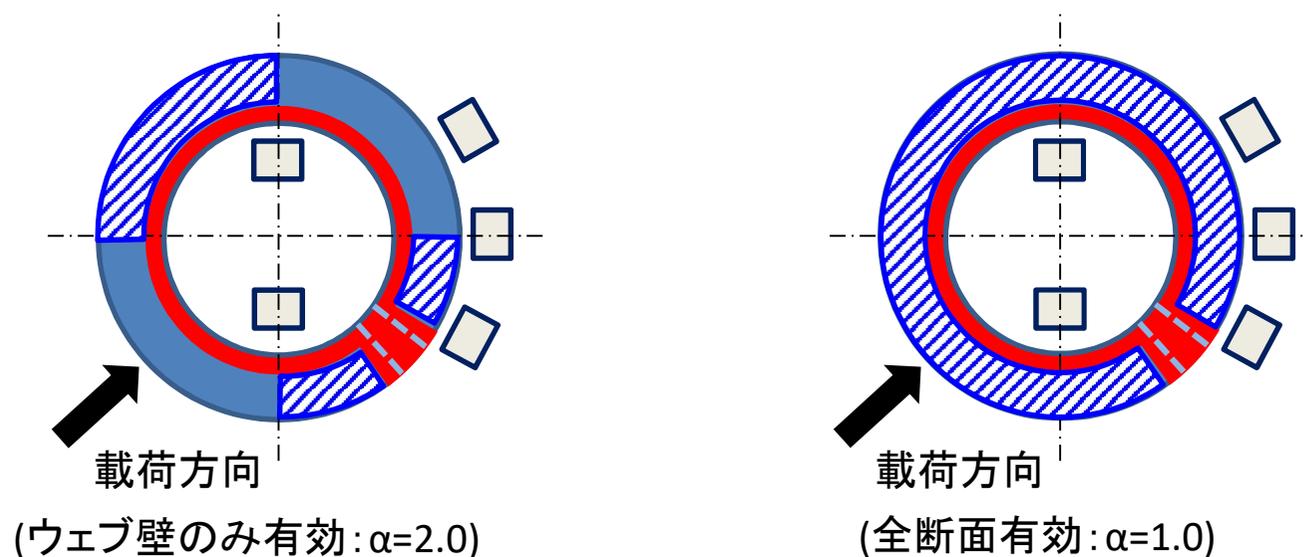
④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(ii)2/3号機

3. JEAC4601-2008に基づく、せん断に対する検討

■ 有効せん断断面積の考え方

- 円筒壁の有効せん断断面積は、基本的にウェブ壁のみ有効
- ウェブ壁のみ有効の場合($\alpha=2.0$)と、全断面有効の場合($\alpha=1.0$)を実施

 有効せん断断面積の範囲を示す


侵食25%における有効せん断断面積の例

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(ii)2/3号機

3. JEAC4601-2008に基づく、せん断に対する検討

■ 概略検討結果

- ウェブ壁のみ有効・全断面有効、いずれのケースも目安値以内に収まった。

(ウェブ壁のみ有効: $\alpha=2.0$)

No.	解析概要	鉛直地震方向	燃料デブリ侵食	終局せん断応力 τ_3 (N/mm ²)	終局せん断力 Q_a (kN)	せん断応力比 Q/Q_a
1U	燃料デブリ接触時、上向き	上向き	無し	5.15	35084	0.26
1D	燃料デブリ接触時、下向き	下向き		5.45	37126	0.25
2U	侵食25%、上向き	上向き	侵食25%	5.31	26580	0.34
2D	侵食25%、下向き	下向き		5.64	28274	0.32
3U	侵食50%、上向き	上向き	侵食50%	5.60	18743	0.49
3D	侵食50%、下向き	下向き		5.64	18878	0.48

※ 脚部発生せん断力 $Q=9,000$ kN

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(ii)2/3号機

3. JEAC4601-2008に基づく、せん断に対する検討

■ 概略検討結果

- ウェブ壁のみ有効・全断面有効、いずれのケースも目安値以内に収まった。

(全断面有効: $\alpha=1.0$)

No.	解析概要	鉛直地震方向	燃料デブリ侵食	終局せん断応力 τ_3 (N/mm ²)	終局せん断力 Q_a (kN)	せん断応力比 Q/Q_a
1U	燃料デブリ接触時、上向き	上向き	無し	5.15	75060	0.12
1D	燃料デブリ接触時、下向き	下向き		5.45	79428	0.12
2U	侵食25%、上向き	上向き	侵食25%	5.31	58094	0.16
2D	侵食25%、下向き	下向き		5.64	61797	0.15
3U	浸食50%、上向き	上向き	浸食50%	5.60	41689	0.22
3D	浸食50%、下向き	下向き		5.64	41988	0.22

※ 脚部発生せん断力 $Q=9,000$ kN

⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

鉄筋の高温腐食試験 概要

■ 背景・目的

- 実機ペDESTALの耐震性影響評価では、文献*1の式(中森-EPRI回帰式と呼ぶ)を用いて鉄筋の高温腐食量を評価している。
- しかし、本式はガスボイラーの水蒸気酸化に基づく式であり、鉄筋の高温腐食量評価への適用性は不明である。
- 実機ペDESTAL評価の信頼性向上のため、鉄筋を用いた高温腐食試験を実施し、中森-EPRI回帰式の適用性を確認する。

*1:ボイラ燃焼ガスによる高温腐食事例とその対策(2012、テクノシステム)

$$D = \{10^u \times 3600 \times t\}^{0.5} \times 10$$

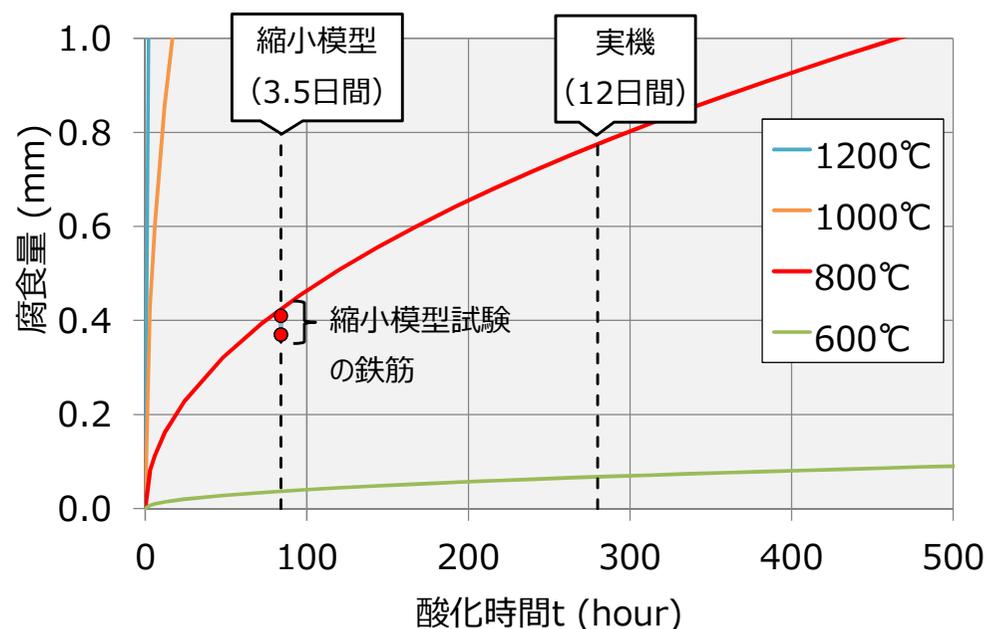
$$u = -9.93 \times \left(1/T \times 10^3\right) + 1.03$$

D:腐食量(mm) = 表面からの減肉量

t:酸化時間(hours)

u:鋼種係数

T:酸化温度(K)



中森-EPRI回帰式

(縮小模型試験(800°C加熱後)における鉄筋の腐食量(赤丸)をプロット)

⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

試験計画

■ パラメータ設定の基本的な考え方

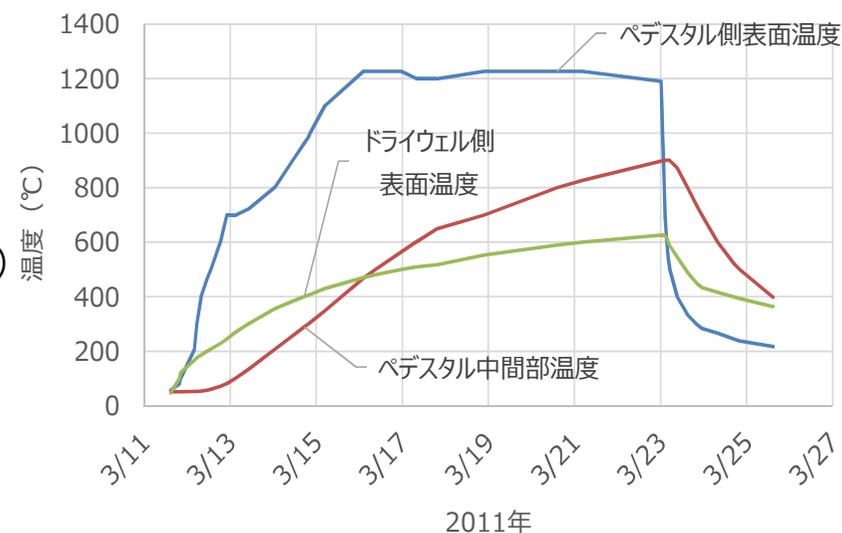
- 事故時の温度条件は、最新の事故進展解析に基づくペDESTAL部の温度履歴(右下グラフ)を参考に設定する。
- 実機ペDESTALの耐震性影響評価では、1000°Cを超える範囲において、コンクリートおよび鉄筋の強度・剛性は期待しない設定としていることから、腐食試験における温度範囲は強度・剛性が期待できる範囲までとし、上限を1000°Cとする。
- 高温時のガス環境は、最新のMAAP解析による検討状況を参考に、水蒸気、酸素、窒素を考慮する。

■ 試験パラメータ

- 加熱温度:600°C、800°C、1000°C
- 加熱期間:1、4、8、12日間
- ガス環境:水蒸気・酸素・窒素の割合
- コンクリート:有無、かぶり厚さ
- 試験体形状:D19、D35(実機縦筋)、平板(参考)

■ 使用する材料

- SD345材(実機相当材)



事故進展解析結果例(1F-1)

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.111

⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

各試験の位置付け

- ステップ1: 高温腐食に及ぼす「ガス環境」および「かぶりコンクリートの厚さ」の影響を、A試験およびB試験で確認する。
- ステップ2: ステップ1の結果を踏まえて設定した条件でC試験を実施し、中森-EPRIの回帰式の適用性を確認する。

試験名	試験の位置付け	試験体	加熱温度(°C)	加熱期間(日)	ガス環境	かぶりコンクリート
A試験	鉄筋単体試験体を用いてガス環境による影響を確認	鉄筋単体(D19, D35)平板	1000	1	水蒸気・酸素・窒素の割合を変化	無し
B試験	鉄筋コンクリート試験体を用いてかぶり厚さによる影響を確認	コンクリート付き(D19)	1000	4 8 12	大気下	かぶり厚さを変化
C試験	A試験・B試験の結果を踏まえて設定した条件で実施する総合試験	鉄筋単体(D19, D35)	600* 800* 1000	1 4* 8* 12	A試験の結果に基づき設定	無し
		コンクリート付き(D19, D35)	600 800 1000	12	A試験の結果に基づき設定	B試験の結果に基づき設定

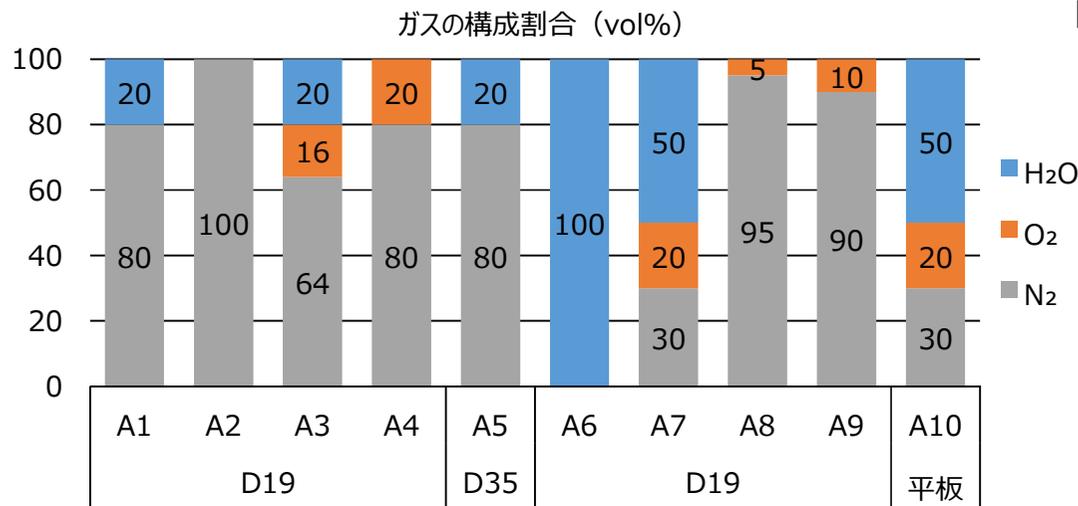
*:D19のみ実施

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.112

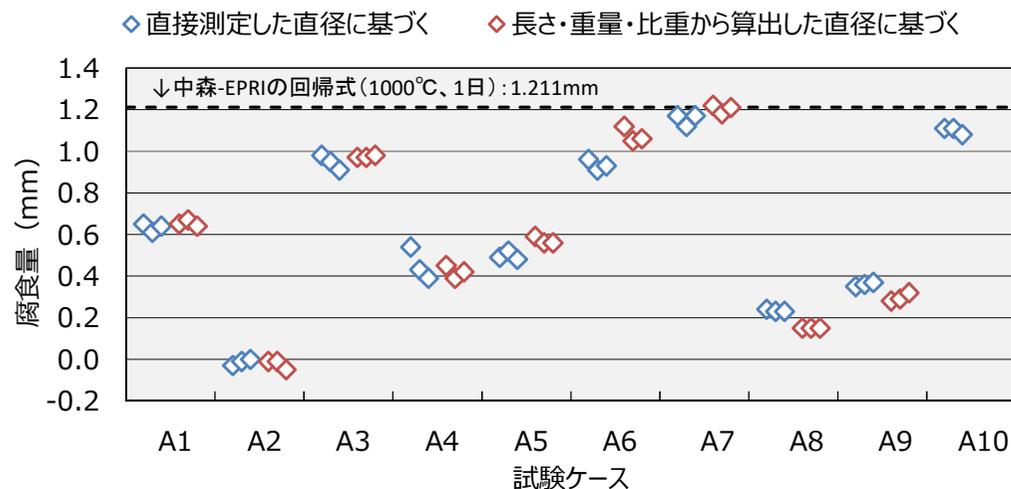
⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

A試験(ガス環境による影響の確認)



■ 試験結果

- 鉄筋単体D19に対して、ガス環境を変えて、1000°C×1日の高温腐食試験を実施した。
- 高温腐食には、水蒸気と酸素が寄与し、それぞれの割合が増えると腐食量も増大した。
- A試験の中では、A7が最も腐食量が多く、中森-EPRI回帰式と同等であった
- D19(A1)に対して、D35(A5)の腐食量はやや減少した。
- D19(A7)に対して、平板(A10)の腐食量は同等であった。

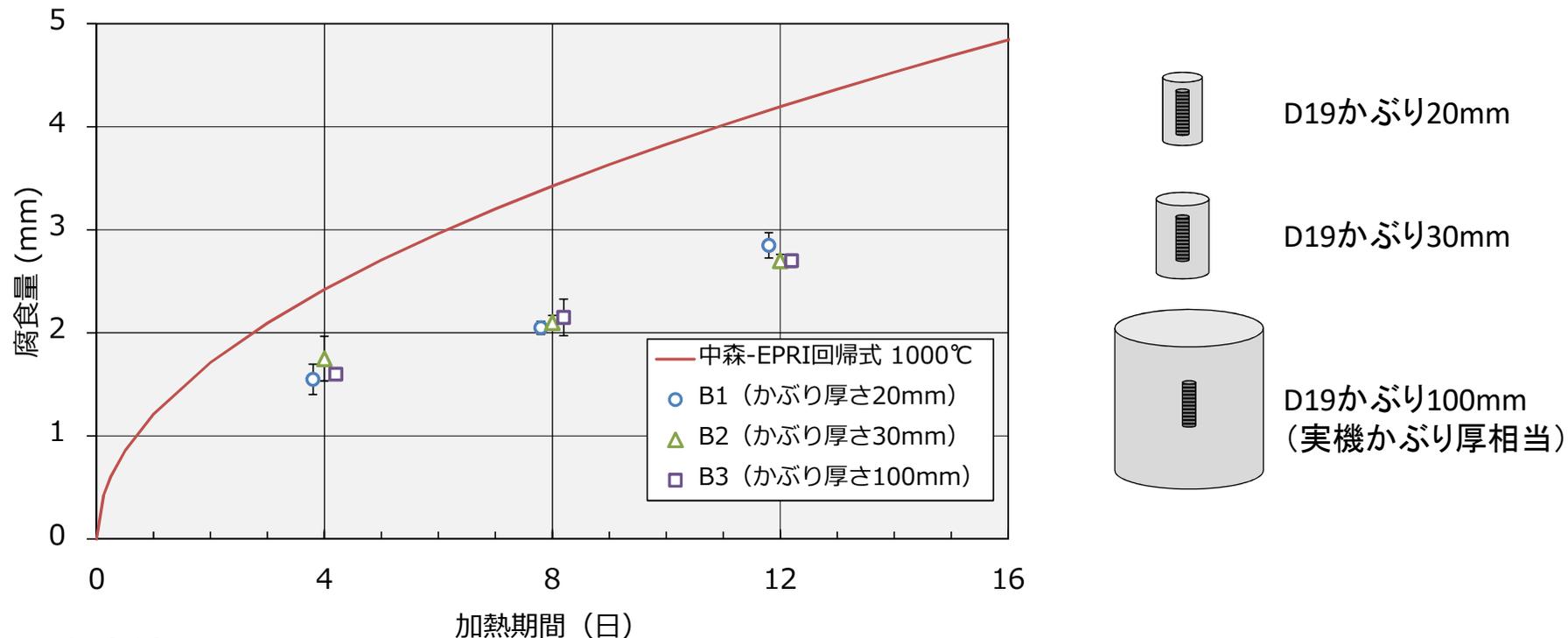


※各ケースで、3本の試験結果をプロット

➡ C試験のガス環境を、最も腐食量が多かったA7と同じ条件(水蒸気50%、酸素20%、窒素30%)に選定した。

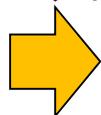
⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

B試験(かぶり厚さによる影響の確認)



■ 試験結果

- かぶり厚さ(20mm, 30mm, 100mm)を変えたコンクリート付きの鉄筋D19に対して、大気下で1000°C×4日、8日、12日の高温腐食試験を実施した。
- 加熱期間が長くなると腐食量は増大するが、いずれも中森-EPRI回帰式を下回った。
- かぶり厚さ20~100mmの間では、腐食量に違いは見られなかった。
- いずれの試験体もコンクリートにひび割れは生じるが、コンクリートの剥落は見られなかった。



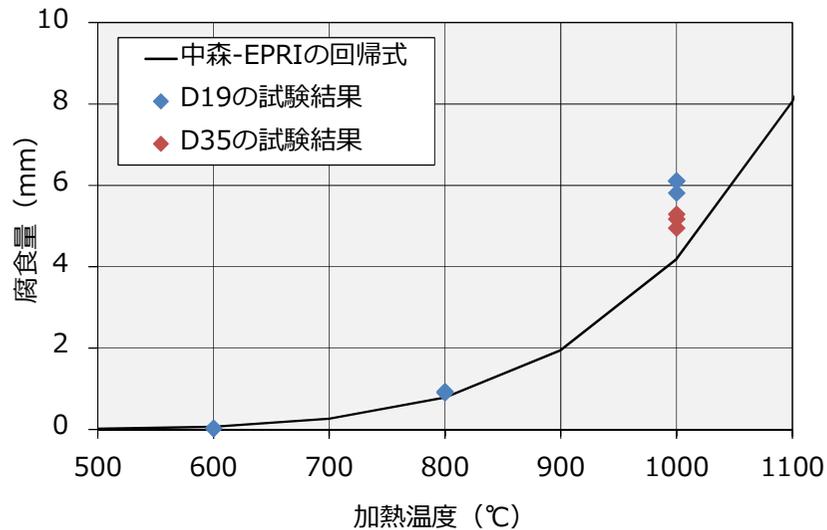
C試験のコンクリート付き試験体のかぶり厚さを20mmに選定した。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

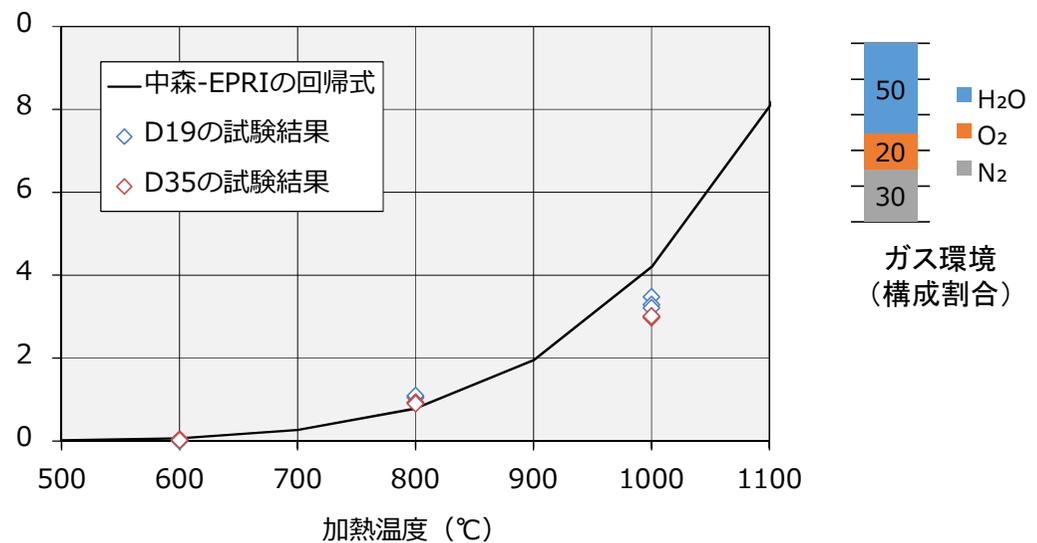
No.114

⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

C試験



鉄筋単体の腐食量(12日の試験結果)
と中森-EPRI回帰式との比較

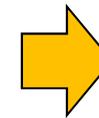


コンクリート付き鉄筋の腐食量(12日の試験結果)
と中森-EPRI回帰式との比較

※各ケース、鉄筋3本の
結果をプロット

■ 試験結果

- 鉄筋単体およびコンクリート付き(かぶり厚さ20mm)の鉄筋D19およびD35(1F-1実機縦筋と同径)に対して、ガス環境を固定して、600, 800, 1000°C × 1, 4, 8, 12日の高温腐食試験を実施した。
- コンクリート付きの鉄筋の腐食試験の結果、600°C、800°Cの腐食量は中森-EPRI回帰式と同等であり、1000°Cでは中森-EPRI回帰式を下回った。



1000°C以下、12日以下に対しては、中森-EPRI回帰式で評価可能と考えられる。

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.115

⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

C試験(1000°C、コンクリート付きのケース:C2(D19)、C3(D35)) 腐食前後の外観

	腐食前	腐食後
D19 1000°C × 12日		
D35 1000°C × 12日		

コンクリート付きのD19、D35いずれの試験体についても、高温腐食試験後にコンクリートの剥落は見られなかった。

⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

まとめ

- 実機ペDESTAL内の鉄筋の高温腐食量について、実機ペDESTALの耐震性影響評価で用いている中森-EPRI回帰式の適用性の確認のために、鉄筋単体およびコンクリート付き試験体の高温腐食試験を実施した。
- 様々なガス環境に対する鉄筋単体の腐食試験(A試験)の結果から、水蒸気と酸素の割合が増加すると腐食量は増加することを確認した。
- 腐食量が最大となるガス環境(水蒸気50%、酸素20%、窒素30%)における腐食量は、中森-EPRI回帰式と同等であった。
- かぶり厚さを変数(20、30、100mm)にしたコンクリート付き試験体の大気下での腐食試験(B試験)では、いずれの結果も中森-EPRI回帰式を下回った。
- また、かぶり厚さの違いによる腐食量に違いは見られなかった。
- ガス環境を固定(水蒸気50%、酸素20%、窒素30%)し、温度(600、800、1000°C)を変数にしたコンクリート付き試験体の腐食試験(C試験)の結果から、600°C、800°Cの腐食量は中森-EPRI回帰式と同等、1000°Cの腐食量は中森-EPRI回帰式を下回った。
- コンクリート付き試験体はいずれも、コンクリートの剥落は見られなかった。
- 以上の結果から、1000°C以下、12日以下での、コンクリート中の鉄筋の高温腐食量は、中森-EPRI回帰式で概ね評価可能であると考えられる。

(3)安全シナリオの高度化

①【1号機】S/C脚部の地震応答解析手法の高度化

S/C脚部等の耐力をより合理的に評価するため、実際に想定し得る地震荷重、拘束条件を踏まえた詳細解析として、PCV 補修として、S/C内にコンクリート充填作業(ダウンカマ埋設)を実施してS/C脚部補強モルタルを埋設しない場合について、S/C脚部の時刻歴弾塑性地震応答解析を実施する。

②【2/3号機】ベント系の詳細FEM解析

評価条件・手法の更なる高度化を目的として、実際に想定し得る地震荷重、拘束条件を踏まえた評価を実施するため、ベント系の詳細FEM解析を実施する。

③温度履歴を考慮したPCVの材料試験

S/C脚部等の検討のために、事故時の温度履歴を考慮したPCVの材料試験を実施する。(付録6に示す温度履歴を考慮したPCV材料試験を参照。)

①【1号機】S / C脚部の地震応答解析手法の高度化

時刻歴地震応答弾塑性解析(事故40年後)による耐震性影響評価

1F-1

[目的]

・長期に亘る燃料デブリ取り出し作業を継続するために、地震時におけるP C V等の重要機器等の構造評価が必要である。

・このため、実際に想定し得る地震荷重、拘束条件を踏まえた詳細解析として、P C V補修として、S / C内にコンクリート充填作業（ダウンカマ埋設）を実施してS / C脚部補強モルタルを埋設しない場合について、S/C脚部の時刻歴弾塑性地震応答解析を実施することにより、耐震性影響評価手法の更なる高度化を図る。

[内容]

- S/C内をコンクリート埋設することによりコンクリートによってS/Cとダウンカマが拘束されるため、ベント系モデルとS/C系モデルを連成させた180°モデルによって時刻歴弾塑性地震応答解析を実施する。
- ベント管に作用する地震荷重及びコラムサポートに作用する地震荷重等を算出するため、弾性解析と同様にベント管とS/C系はビーム要素でモデル化する。
- S/C内コンクリート埋設によりダウンカマ取付部の地震時応力や地震時ひずみが厳しくなることが予想されるため、ダウンカマとベントヘッドはシェル要素でモデル化する。

(3)安全シナリオの高度化

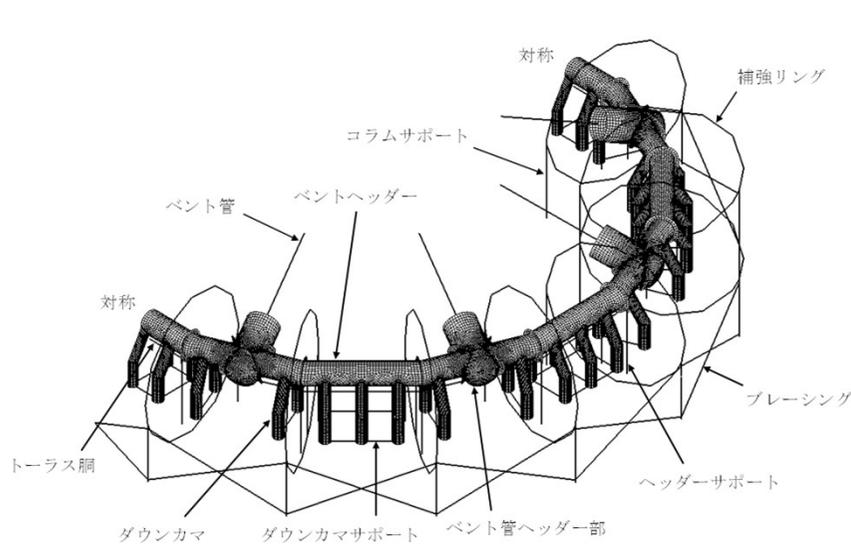
①【1号機】S / C脚部の地震応答解析手法の高度化

No.119

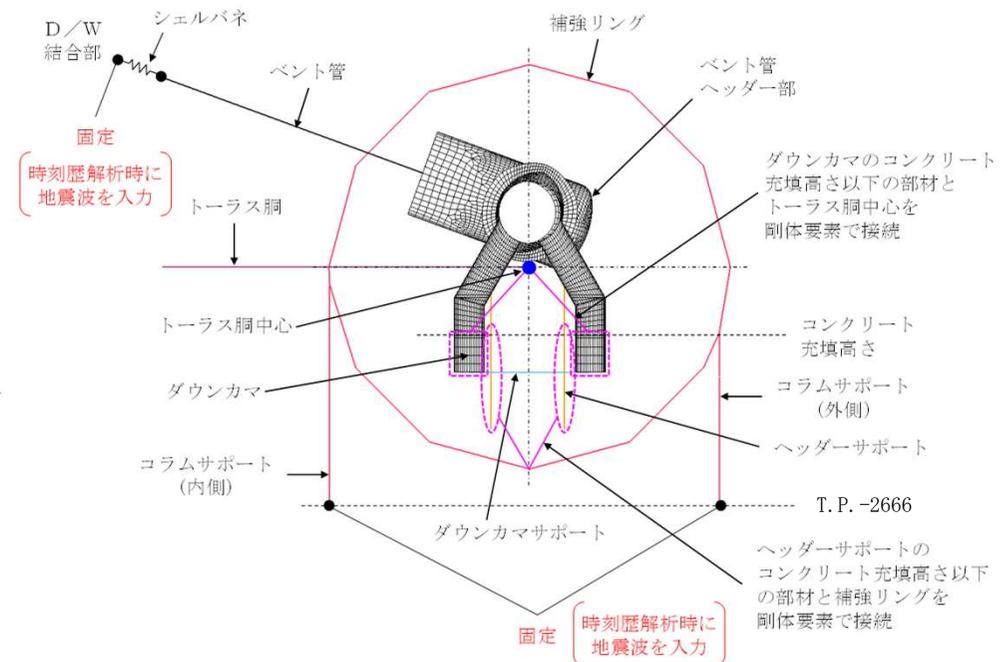
1F-1

時刻歴弾塑性地震応答解析

- 時刻歴弾塑性地震応答解析は、固定部より時刻歴加速度を入力して解析モデルを強制加振させて、各評価部位の累積塑性ひずみや変形挙動等を把握する。
- 過酷事故を受けたP C V地震時破損モードとして局所崩壊、低サイクル疲労を評価する。
- この解析による変形挙動と、S/C脚部の崩壊荷重評価で実施した弾塑性解析による変形挙動との比較による検討も実施し、S / C脚部等の耐震性を評価する。



ベント系+S/C系の解析モデル



詳細図 (断面)

(3)安全シナリオの高度化

①【1号機】S/C脚部の地震応答解析手法の高度化

1) 局所崩壊評価(累積相当塑性ひずみ)

1F-1

時刻歴弾塑性地震応答解析
[局所崩壊評価]

対象機器			H29①				
			腐食年数(年)	40年後相当			
			減衰定数	建設時設計値 (コンクリート5%、鋼材1%)			
			S/C内コンクリート	T.P.704			
			オペフロ階付加設備	6100 ton			
			評価部位	相当塑性ひずみの累積値 *1	目安値 *2	裕度	
			① ベント管取付部	ベント管とベントヘッダの接続部	SGV410相当	0.00094	0.08
③ ダウンカマ取付部	ダウンカマとベントヘッダの結合部	SGV410相当	0.00405	0.08	20		

注) *1) シェル要素の板厚中心の相当塑性ひずみの累積値(要素中心解)を示す。

*2) ASME Sec.VIII、JSME S NX2-2014、JANTI BWR配管損傷防止ガイドラインから限界ひずみを検討し、設定した。

時刻歴弾塑性地震応答解析の結果、局所崩壊評価(累積相当塑性ひずみ)の累積値は、目安値に収まることがわかった。

(3)安全シナリオの高度化

①【1号機】S/C脚部の地震応答解析手法の高度化

2)低サイクル疲労評価 (最大相当ひずみ振幅による評価)

1F-1		H29①				
<div style="background-color: #0056b3; color: white; padding: 5px; text-align: center;"> 時刻歴弾塑性地震応答解析 [低サイクル疲労評価 (最大相当ひずみ振幅による評価)] </div>						
対象機器	腐食年数(年)	40年後相当				
	減衰定数	建設時設計値 (コンクリート5%、鋼材1%)				
	S/C内コンクリート	T.P.704				
	オペフロ階付加設備	8100 ton				
	評価部位	相当ひずみ振幅の最大値 *1	累積損傷係数 *2	目安値	裕度	
Ⓐ ベント管取付部	ベント管とベントヘッダの接続部	SGV410相当	2.79E-03	0.061	1.00	16
Ⓑ ダウンカマ取付部	ダウンカマとベントヘッダの結合部	SGV410相当	4.61E-03	0.240	1.00	4

注) *1) シェル要素表面の相当ひずみ振幅の最大値は、ASME SecVIIIのピークカウント法を準用して算出した。

*2) 相当ひずみ振幅最大値の現行設計用等価繰返し回数を60回とし、許容繰返し回数をJIS 設計・建設規格の疲労線図を準用して算出した値を示す。

時刻歴弾塑性地震応答解析の結果、低サイクル疲労評価では、最大相当ひずみ振幅の繰返し回数を60回とした評価では、累積損傷係数が目安値に収まることがわかった。

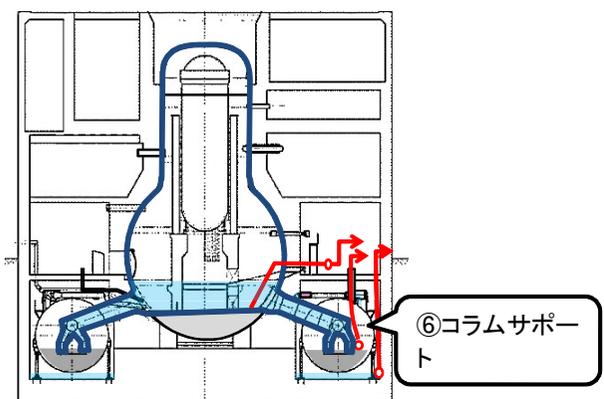
(3)安全シナリオの高度化

①【1号機】S/C脚部の地震応答解析手法の高度化

1F-1

3)コラムサポートの耐震性評価(水平方向最大応答変位)

時刻歴弾塑性地震応答解析
コラムサポートの耐震性評価

対象機器	H29①			
				
	腐食年数(年)	40年後相当		
	減衰定数	建設時設計値 (コンクリート5%、鋼材1%)		
	S/C内コンクリート	T.P.704		
	オペフロ階付加設備	6100 ton		
評価部位	地震荷重*1 水平変位 (mm)	目安変位*2 (mm)	裕度	
⒫ コラムサポート	外側コラムサポート	16.5	35.5	2.15

注) *1) 水平変位は、ベント系+S/C系モデルの弾塑性時刻歴解析から得られたトラス胴中心の最大応答変位を示す。

*2) 設計・建設規格を準用した極限解析(弾塑性解析)結果の2倍勾配点での目安変位を示す。

時刻歴弾塑性地震応答解析によるトラス胴中心の最大応答水平変位は、目安変位以下であることがわかった。

(3)安全シナリオの高度化

①【1号機】S/C脚部の地震応答解析手法の高度化

1F-1 弾完全塑性体を用いた2倍勾配法による目安荷重の算出結果

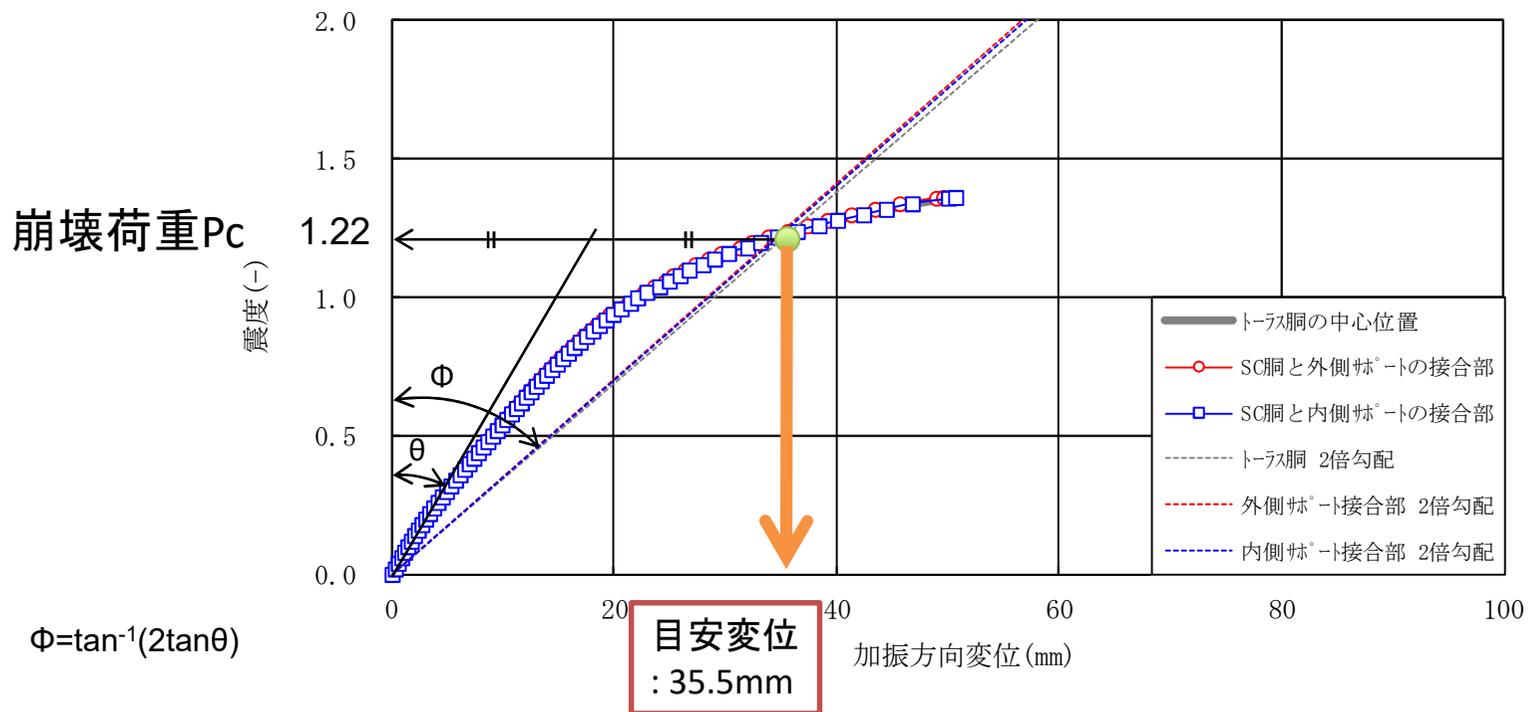


図 2倍勾配法による崩壊荷重

ケース:H29① 腐食年数:40年後 減衰定数:設計用 オペフロ階付加設備:6100ton

(3) 安全シナリオの高度化

No.124

②【2/3号機】ベント系の詳細FEM解析

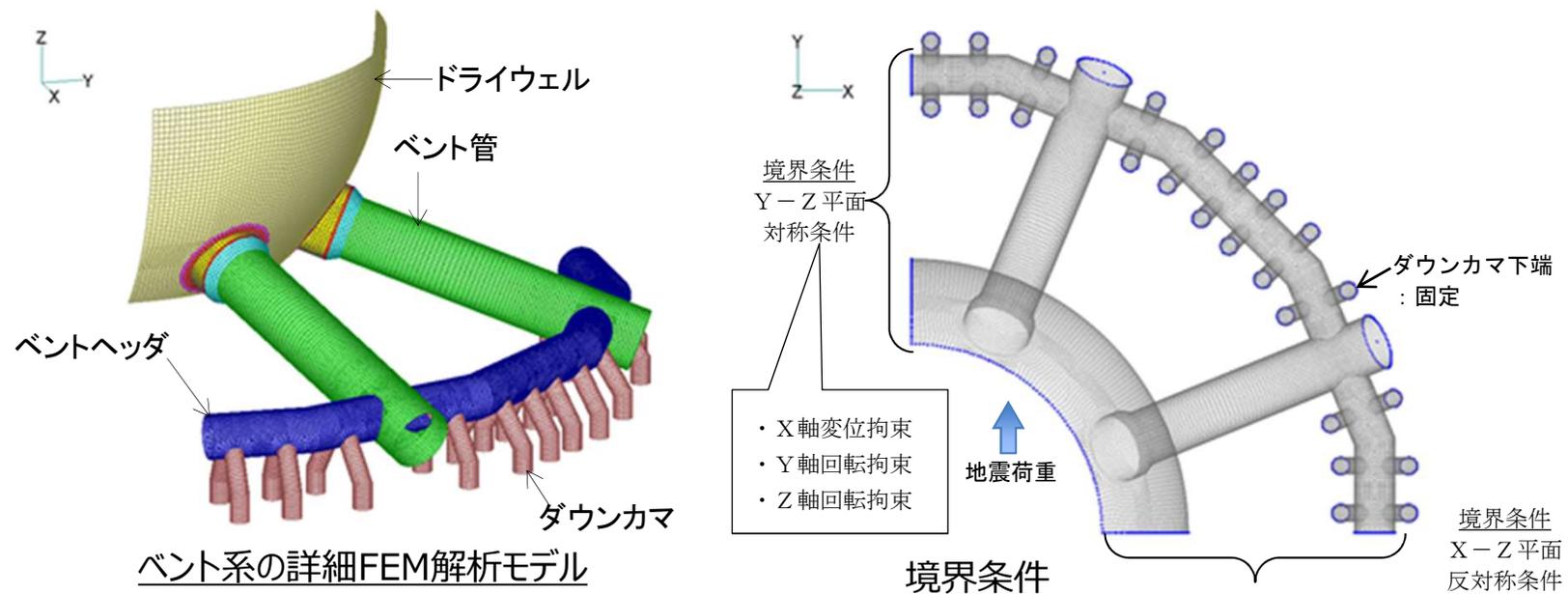
1F-2/3

[目的]

評価条件・手法の更なる高度化を目的として、実際に想定し得る地震荷重、拘束条件を踏まえた評価を実施するため、ベント系の詳細FEM解析を実施する。

[内容]

- ドライウェル、ベント管、ベントヘッド、ダウンカマをシェル要素にてモデル化する。
- 弾塑性解析(2倍勾配法):ドライウェルへ荷重を静的に漸増入力し、ベントヘッドとダウンカマ接合部の変位を確認する。

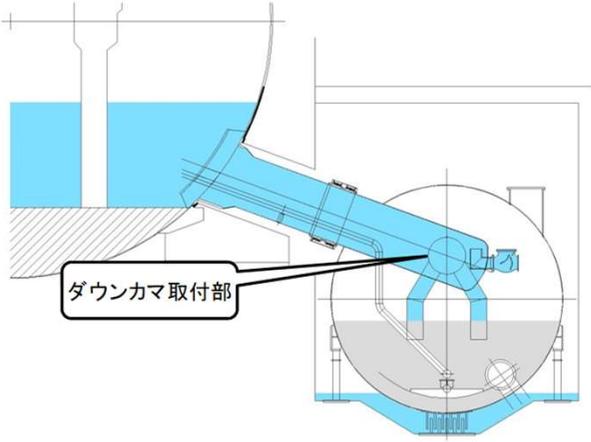


(3) 安全シナリオの高度化

No.125

②【2/3号機】ベント系の詳細FEM解析

1F-2/3

ケース		H29-4			
対象機器					
	腐食年数(年)	40年後相当			
	減衰定数	建設時設計値 (コンクリート5%, 鋼材1%)			
	S/C内コンクリート	T.P.-366			
	オペフロ階付加設備	4710 ton			
	評価手法	弾塑性解析(2倍勾配法)			
	評価部位	地震荷重(*1) 水平変位(mm)	弾塑性解析結果 2倍勾配点変位(*2) (mm)	許容変位(*3) (mm)	裕度
ダウンカマ取付部	ダウンカマとベントヘッドの接合部 SGV410相当	5	16	10	2.00

注) * 1: 水平変位は、ベント系+S/C系梁モデルの弾性時刻歴解析から得られたダウンカマのコンクリート埋設点とダウンカマとベントヘッドの接合部との最大相対変位を示す。

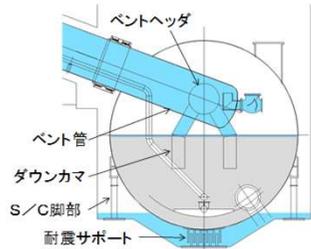
* 2: 弾塑性解析結果の2倍勾配点におけるダウンカマのコンクリート埋設点とダウンカマとベントヘッドの接合部との相対変位を示す。

* 3: 2倍勾配点の崩壊荷重×0.9に相当する変位を示す。

ベント系の詳細FEM解析(弾塑性解析(2倍勾配法))の結果、ダウンカマ取付部に生じる地震時変位は許容変位以下に収まることを確認した。

燃料デブリ取り出し期間を想定し、事故後40年後腐食を考慮した耐震性評価結果のまとめを示す。

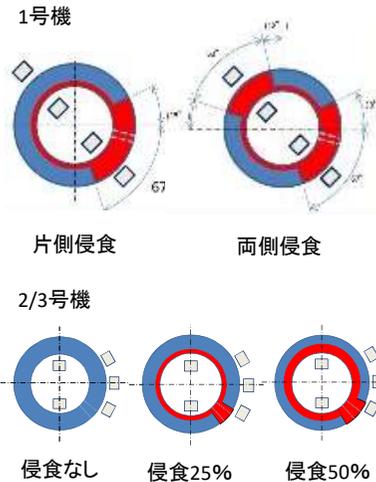
注：○：目安値に収まる ×：目安値を超える



	1号機			2/3号機			
	S/C内充填止水 (ダウンカマ埋設:0.68m)			S/C内充填止水 (ダウンカマ埋設:1.5m)		S/C内充填止水 (ダウンカマ埋設:0.745m)	
評価手法	時刻歴弾性地震応答解析	弾塑性解析 (2倍勾配法)	時刻歴弾性地震応答解析	応答スペクトラム解析	弾塑性解析 (2倍勾配法)	時刻歴弾性地震応答解析	弾塑性解析 (2倍勾配法)
評価対象機器	○ベント管取付部	×	—	○	×	—	○
	○コラムサポート	×	○	○	×	○	—
	○耐震サポート	—	—	—	×	○	—
	○ダウンカマ取付部	×	—	○	×	×	○

S/C内充填止水で事故40年後を想定した場合、1号機はダウンカマ埋設0.68m、2/3号機についてはダウンカマ埋設0.745mであれば、評価対象機器として選定したPCV機器の耐震性について、本PJで開発した評価手法を適用した場合、目安値に収まることを確認した。

注：○：目安値に収まる ×：目安値を超える



評価手法	ペDESTALに関する検討									
	簡易評価					詳細評価				
	ファイバーモデルによる曲げに対する断面解析 せん断に対する検討					3次元FEM弾塑性解析による評価				
	1号機		2/3号機			1号機		2/3号機		
侵食パターン	片側侵食	両側侵食	侵食なし	侵食25%	侵食50%	片側侵食	両側侵食	侵食なし	侵食25%	侵食50%
RPVペDESTAL	○ (平成28年度実施)	△*1 (平成28年度実施)	○	○	○	○	○	—	—	—

*1：引張側鉄筋の応力が目安値を超えたケース。

1号機では、片側侵食を考慮した場合のケースで評価の結果目安値に収まることを確認した。また、両側を侵食されたケースを想定した場合も、目安値に収まることを確認した。2/3号機では各パターンで目安値に収まることを確認した。

(1) 大規模地震時における安全シナリオの構築

地震起因の大型機器損傷事象について、事故収束のための設備が現状から変化する、燃料デブリ取り出し用の設備設置以降の安全シナリオを構築した。

(2) 安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

・S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

S/C脚部の弾塑性解析(2倍勾配法)を用いた評価手法を開発した。

・地震応答解析手法の開発及び検証

燃料デブリ取り出し状態および燃料デブリ侵食等による建屋・機器の状態の変化に対応する

建屋—大型機器連成系の地震応答解析手法を開発した。

・RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発

最新の事故時の温度状況や燃料デブリの広がり状況の知見を踏まえた耐力評価手法を開発した。

(3) 安全シナリオの高度化

S/C脚部の時刻歴弾塑性地震応答解析を用いた評価手法を開発した。

7. まとめ

No.128

目標達成度(1/2)

各目標に照らした達成度を以下に示す。

1)大規模地震時における安全シナリオの構築		達成度・・・100%
大規模地震によりペDESTAL・圧力抑制室脚部が損傷したと仮定した場合に、圧力容器・格納容器等の大型機器及びそれに接続する設備に及ぼす波及的影響を整理し、その防止・抑制策が検討されていること。		大規模地震によりペDESTAL・圧力抑制室脚部が損傷したと仮定した場合に、圧力容器・格納容器等の大型機器及びそれに接続する設備に及ぼす波及的影響を整理し、その防止・抑制策を検討し、完了した。
2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発		達成度・・・100%
①ペDESTAL部、圧力抑制室脚部の耐震性・影響評価手法の開発	ペDESTALについて、事故時の格納容器内温度や燃料デブリの拡がり状況に関する最新の知見を反映した健全性評価が完了していること。 圧力抑制室脚部について、極限解析(弾塑性解析)による耐震性の評価が完了していること。	1号機ペDESTALについて、事故時の格納容器内温度や燃料デブリの拡がり状況に関する最新の知見を反映した耐震性評価を実施し、完了した。 2/3号機ペDESTALについて、燃料デブリの侵食パターンを変えた耐震性評価を実施し、完了した。 圧力抑制室脚部について、極限解析(弾塑性解析)による評価を実施し、完了した。

7. まとめ

No.129

目標達成度(2/2)

各目標に照らした達成度を以下に示す。

②耐力評価及び地震荷重評価手法の検証	ペDESTALについて、地震応答解析により地震荷重の評価手法を検証が完了していること。 圧力抑制室脚部補強後のS/C、ベント管等の耐震性評価が完了していること。	1号機ペDESTALについて地震応答解析により地震荷重の評価手法を検証し、地震荷重を設定し、完了した。 2/3号機ペDESTALについて地震応答簡易評価手法を活用し、地震荷重を設定し、完了した。 圧力抑制室内の充填量低減ケースについて、S/C、ベント管等の耐震性評価を実施し、完了した。
③地震応答解析手法の開発及び検証	時刻歴応答解析等による圧力抑制室脚部の耐震評価が完了していること。	1号機および2/3号機について、時刻歴応答解析による圧力抑制室脚部の耐震評価を実施し、完了した。
3)安全シナリオの高度化		達成度・・・100%
圧力抑制室脚部の耐力をより合理的に評価・検証する手法の検討が完了していること。	1号機については時刻歴弾塑性解析およびPCV鋼材の温度履歴を考慮した材料試験を実施し、2/3号機についてはベント系の詳細解析を実施し、圧力抑制室脚部の耐力をより合理的に評価検証する手法を検討し、完了した。	

今後の課題を以下に示す。

1. S/C脚部補強無しでダウンコマ止水を実施する場合、実力評価としては、1号機はダウンコマ埋設深さを0.68m、2/3号機は0.745mとする耐震評価結果を示したものであり、この埋設深さでの止水材の止水性能・耐震性は確認されていない。このため、この埋設深さでの止水材の止水性能・耐震性を確認する必要があると考えられる。
2. RPVペDESTアルの燃料デブリ侵食を想定した地震応答解析は、現状知見に基づくものであり、詳細な調査状況を踏まえたものではない。このため、1F事故後の建屋内部、格納容器内部等の調査進捗状況、瓦礫撤去工事状況を踏まえ、関連事業者間等の調整により、地震観測等を実施し、解析モデルの妥当性を検討していきたい。
3. RPVペDESTアルの解析評価を行う際、今後進められる格納容器内調査や事故時進展解析高度化の結果を、以下に示す解析条件に適宜反映し、より実状に近い条件で解析・評価を行う必要がある。特に、評価結果に与える影響の大きさから、燃料デブリによるペDESTアル浸食状況の把握が重要である。
 - ①事故時にペDESTアルが曝された温度履歴
 - ②燃料デブリによるペDESTアルの浸食状況

付録

- 付録1 ダウンカムと止水材の密着性が失われた場合の解析結果への影響
- 付録2 2倍勾配法による崩壊荷重の算出結果
- 付録3 地震応答解析における補足資料
- 付録4 RPVペデスタルの鉄筋高温腐食試験実施前後の外観
- 付録5 時刻歴弾塑性地震応答解析 低サイクル疲労詳細評価
- 付録6 温度履歴を考慮したPCV材料試験
- 付録7 本PJから他PJなどへの引き継ぎ事項

ダウンカマと止水材の密着性が失われた場合の解析結果への影響について

1号機について、ダウンカマと止水材(コンクリート)との密着性が失われた場合を想定し、ダウンカマとコンクリートを接続している部分について、鉛直方向と鉛直軸回りをフリーにした条件で固有値解析と極限解析(2倍勾配法)の結果を比較し、解析結果への影響度合いが数%程度であることを確認した。(次頁のベント系+S/C系の解析モデル参照。)

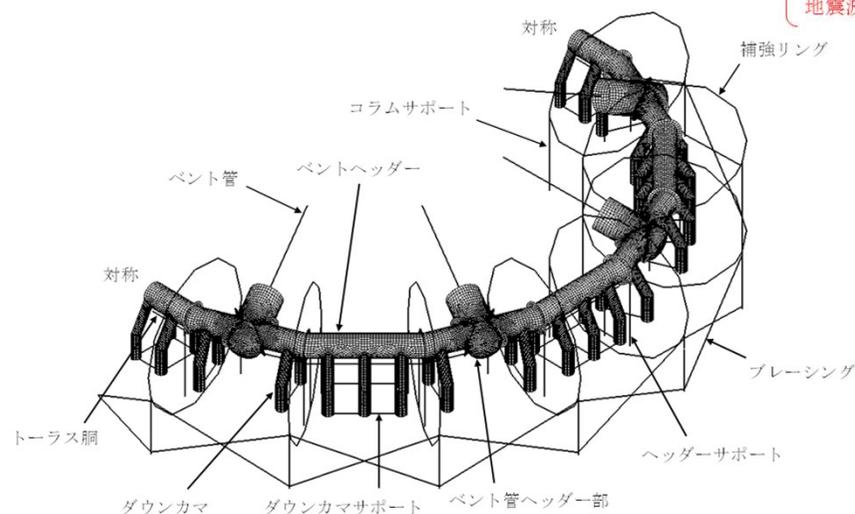
ケース	コンクリート 充填高さ	項目	A:全自由度拘束 の場合	B:鉛直方向とその 軸回りの自由度を フリーにした場合	影響度合い B/Aの比率
15年後	ダウンカマ下端 から0.68m	固有振動数(Hz)	3.71	3.69	0.99
		水平方向震度(G)	1.22	1.24	1.02
		2倍勾配点震度(G)	1.44	1.42	0.99
40年後	ダウンカマ下端 から0.68m	固有振動数(Hz)	3.52	3.51	1.00
		水平方向震度(G)	1.13	1.14	1.01
		2倍勾配点震度(G)	1.22	1.20	0.98

【1号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:0.68m)の解析モデル

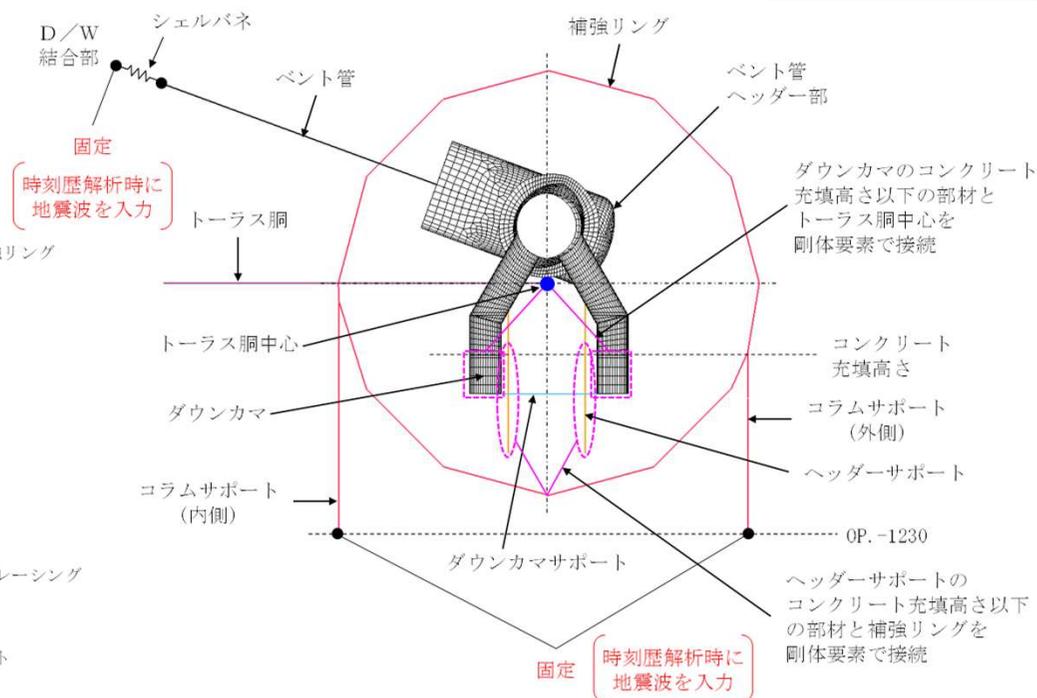
付録1-2

1号機 サプレッションチェンバ
 推定減肉量(片面) (mm)

事故後	15年	40年
推定減肉量	1.36	2.30



ベント系+S/C系の解析モデル



(2) 詳細図(断面)

- ・S/C内コンクリート埋設によりダウンカマ取付部の地震時応力が厳しくなると予想されるため、ダウンカマとベントヘッダはシェル要素でモデル化し、ベント管とS/C系はビーム要素でモデル化する。
- ・ダウンカマとコンクリートを接続している部分について、全自由度を拘束した場合(基本解析ケース)と鉛直方向と鉛直軸回りをフリーにした条件(付録解析ケース)の場合を比較するため、固有値解析と極限解析(2倍勾配法)を実施する。

(2) ①【1号機】S/C内充填止水(ダウンカメラ埋設:0.68m)のS/C脚部検討結果 No.134

付録2-1

1F-1 弾完全塑性体を用いた2倍勾配法による目安荷重の算出結果(40年後)

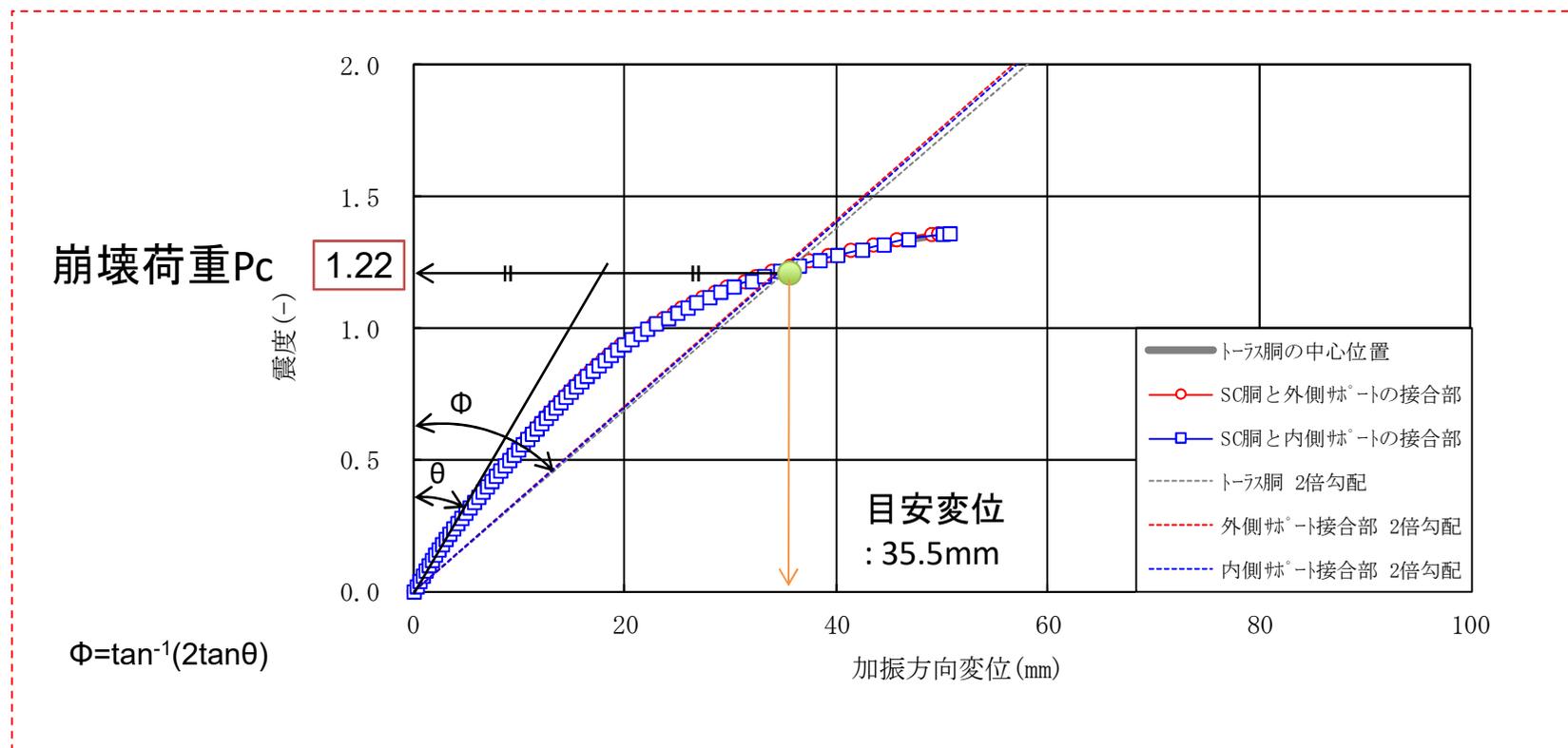


図 2倍勾配法による崩壊荷重

ケース:H29① 腐食年数:40年後 減衰定数:設計用 オペフロ階付加設備:6100ton

(2) ①【1号機】S/C内充填止水(ダウンカメラ埋設:0.68m)のS/C脚部検討結果 No.135

付録2-2

1F-1

維持規格準用による2倍勾配法による目安荷重の算出結果(40年後)

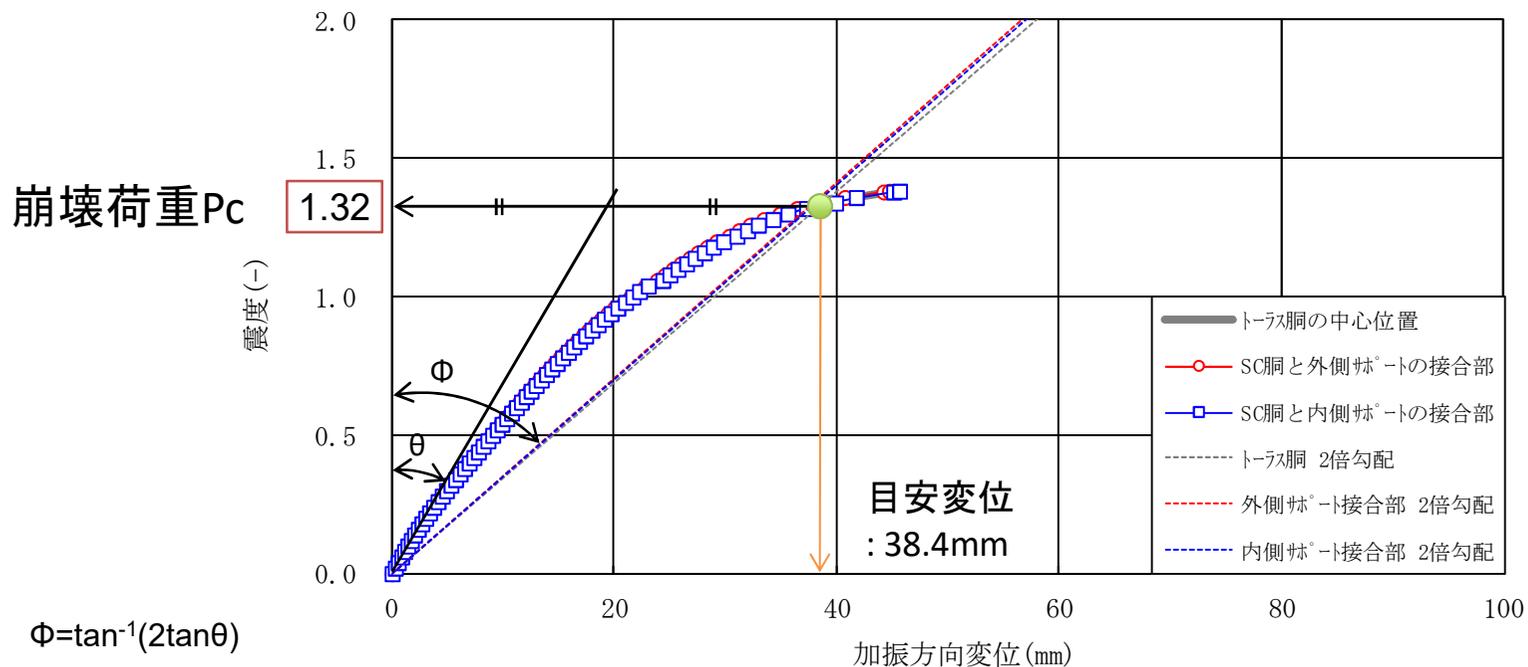


図 2倍勾配法による崩壊荷重

ケース:H29① 腐食年数:40年後 減衰定数:設計用 オペフロ階付加設備:6100ton

(2) ②【2/3号機】S/C内充填止水(ダウンカマ埋設:1.5m)のS/C脚部検討結果 No.136

付録2-3

1F-2/3 2倍勾配法による崩壊荷重の算出結果(40年後)

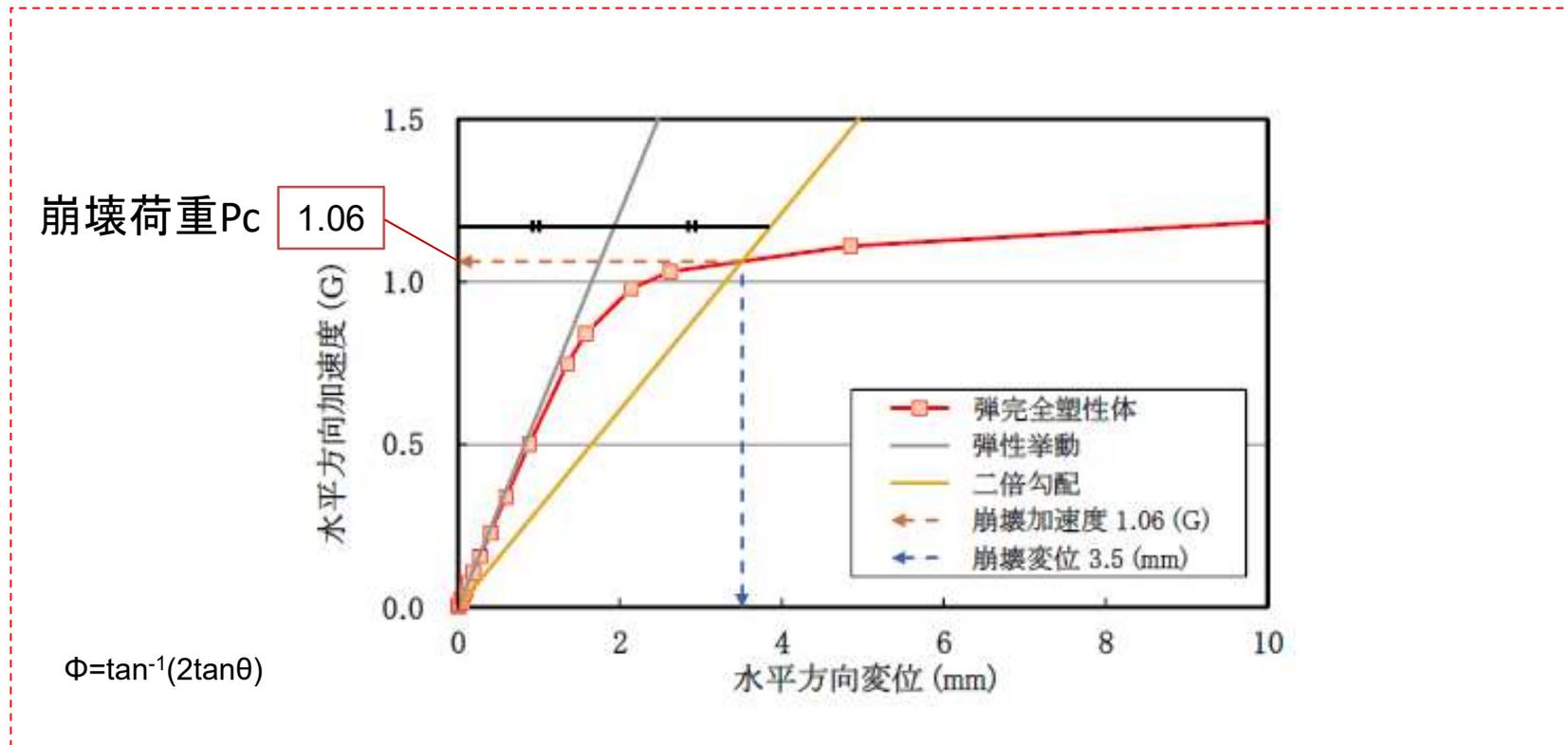
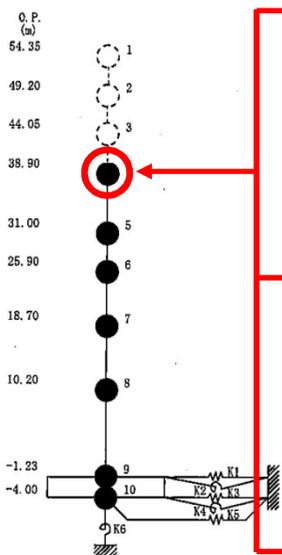


図 2倍勾配法による崩壊荷重

ケース:H29-1 腐食年数:40年後 減衰定数:設計用 オペフロ階付加設備:4710ton

燃料デブリ取り出しに向けたオペフロ荷重として考慮した設備概要 付録3-1

- ①水中+気中取り出し工法 上部コンテナにおける構造検討条件から、部分冠水モデルのオペフロ重量を想定
- ②オペフロへの機器系付加荷重としては、作業ハウス、天井クレーン等の大型主要機器
- ③上記構造部に加え、遮蔽構造等を想定し重量を設定し、既評価の展開性を考慮して検討を実施



1F-1建屋モデル例

【H25年度解析条件】:10年、15年後

- ・作業エリアの重量及び搬出ボックス:約4650tonと想定
- ・クレーン荷重:約485ton
(計:5135ton) ⇒ 付加荷重約5100ton と設定
- ・オペフロ質点(建屋):5985ton
⇒ オペフロ階総重量:約11100ton (カバー相当)

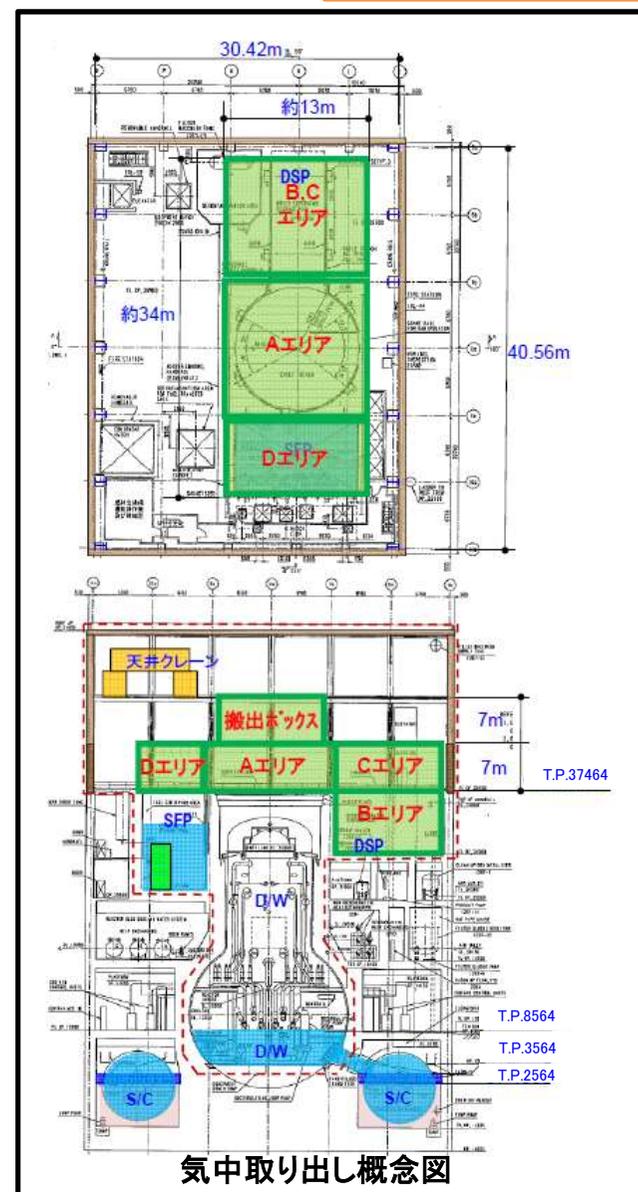
【H26~27年度解析条件】:10年、15年、40年後

- ・H25年度荷重に約1000tonを増加(遮蔽体を追加)
⇒ 付加荷重約6100ton (パラスタ:約7000ton)
- ・オペフロ質点(建屋):5985ton
⇒ オペフロ階総重量:約12100ton(約13000ton)

【H28年度解析条件】:40年後(燃料取り出し時)

- ・H27年度荷重に約7000tonを増加
⇒ 付加荷重約6100ton、13300ton
 - ・オペフロ質点(建屋):5985ton
⇒ オペフロ階総重量:約12100、約19300ton
- ※オペフロ荷重の増減が大型機器系基礎部への影響が大きい
ため(H27年度パラスタ結果)、コンテナ相当の重量を想定

注記:オペフロ階に設置される設備は、既往検討等を考慮して想定したものであり、今後、設計・検討の進捗に応じて見直しが必要である。

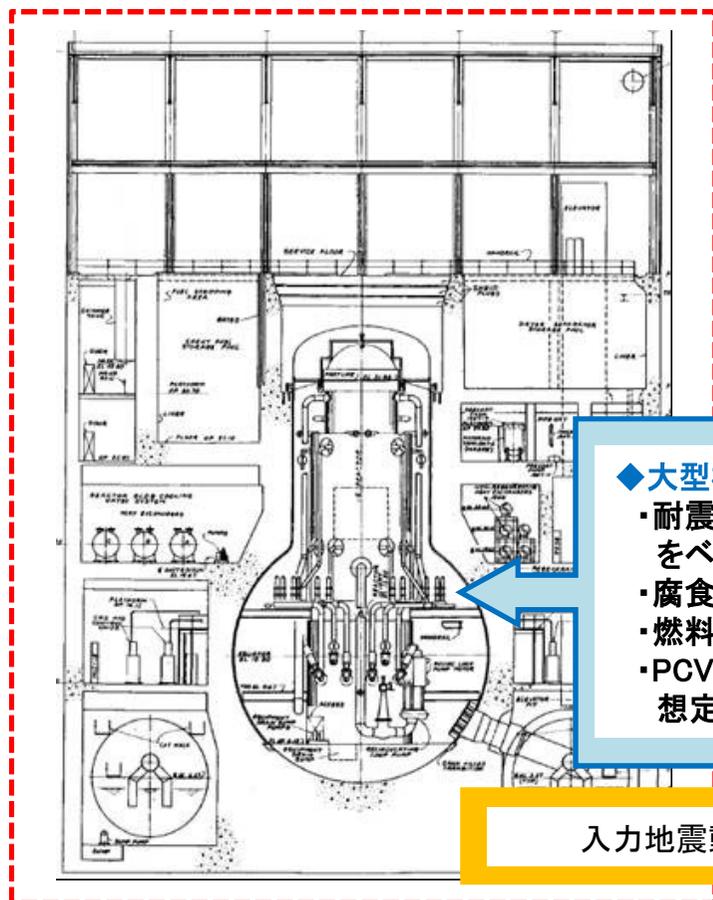


気中取り出し概念図

事故後の大型機器連成地震応答解析の検討概念

◆建屋損傷状態を想定して評価

- ①建屋損傷調査の反映及びオペフロ上部階の削除
- ②建屋モデル既往検討質点モデルに変更

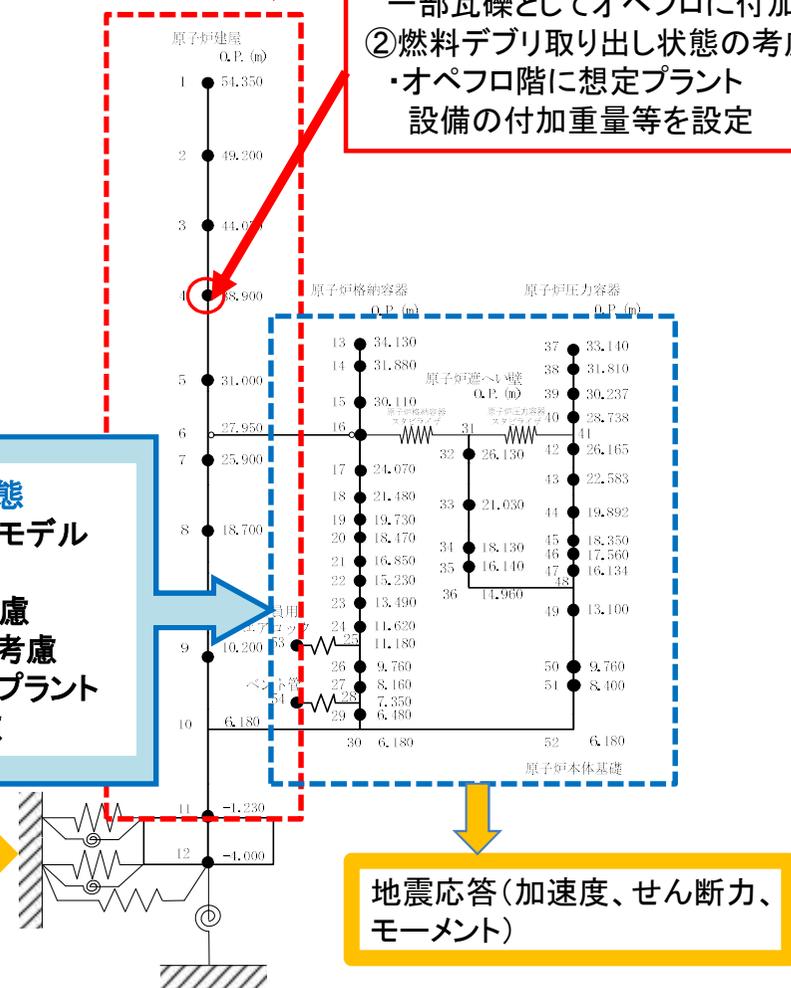


◆大型機器系の状態

- ・耐震バッチェックモデルをベース
- ・腐食減肉量の考慮
- ・燃料溶融状態を考慮
- ・PCV内水位等のプラント想定条件の考慮

入力地震動

- ①オペフロから上部を削除し、一部瓦礫としてオペフロに付加
- ②燃料デブリ取り出し状態の考慮
・オペフロ階に想定プラント設備の付加重量等を設定



地震応答(加速度、せん断力、モーメント)

図1-1 1F-1R/B断面(健全状態)

図1-2 1F-1大型機器系連成モデル例

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

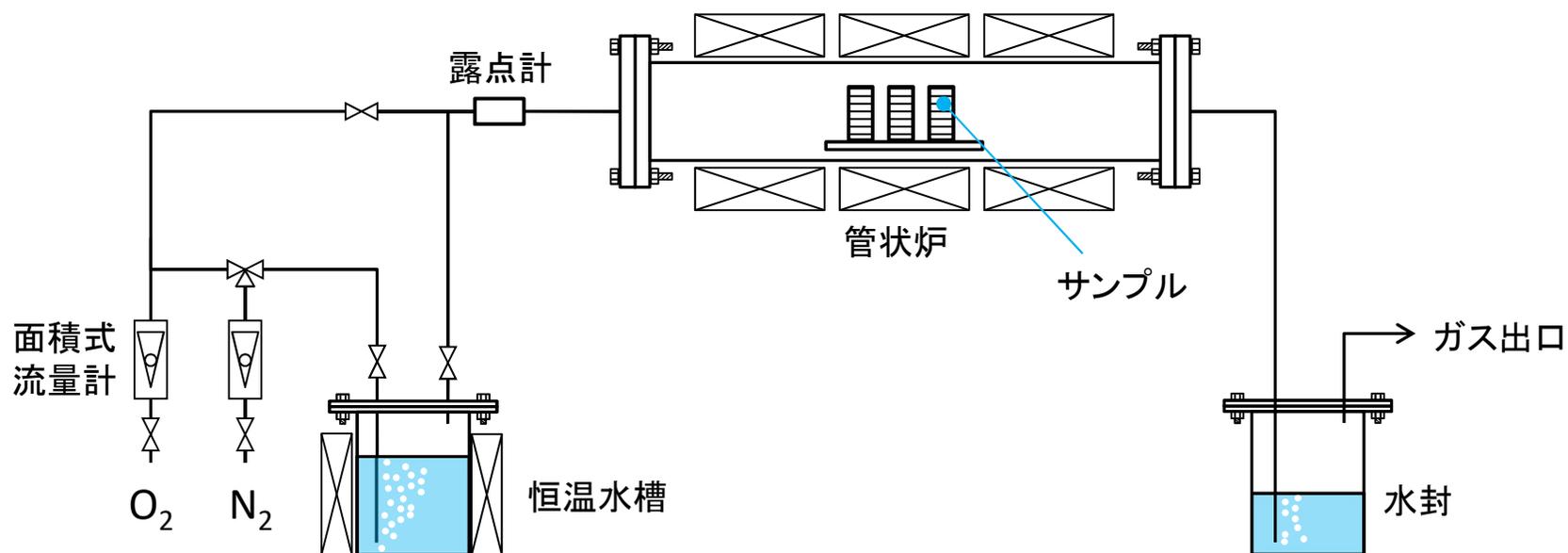
No.139

付録4-1

実験装置 A試験・C試験(1)

■ 実験装置(水蒸気割合0%および20%のケース)

- 管状炉(内径:138mm、長さ:1400mm、均熱帯長さ:150mm)を使用
- 試験条件に応じて、 O_2 (純度99.6%、露点 $-68^{\circ}C$ 以下)と N_2 (純度99.998%、露点 $-68^{\circ}C$ 以下)の2種類のガスを使用
- 昇降温時は N_2 のみを供給
- 水蒸気添加条件では N_2 を恒温水槽に曝気させて加湿
- 室温での混合ガスの流量:1000mL/min
- 試験体は各3体とする



腐食試験装置の概略図(水槽曝気の場合)

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

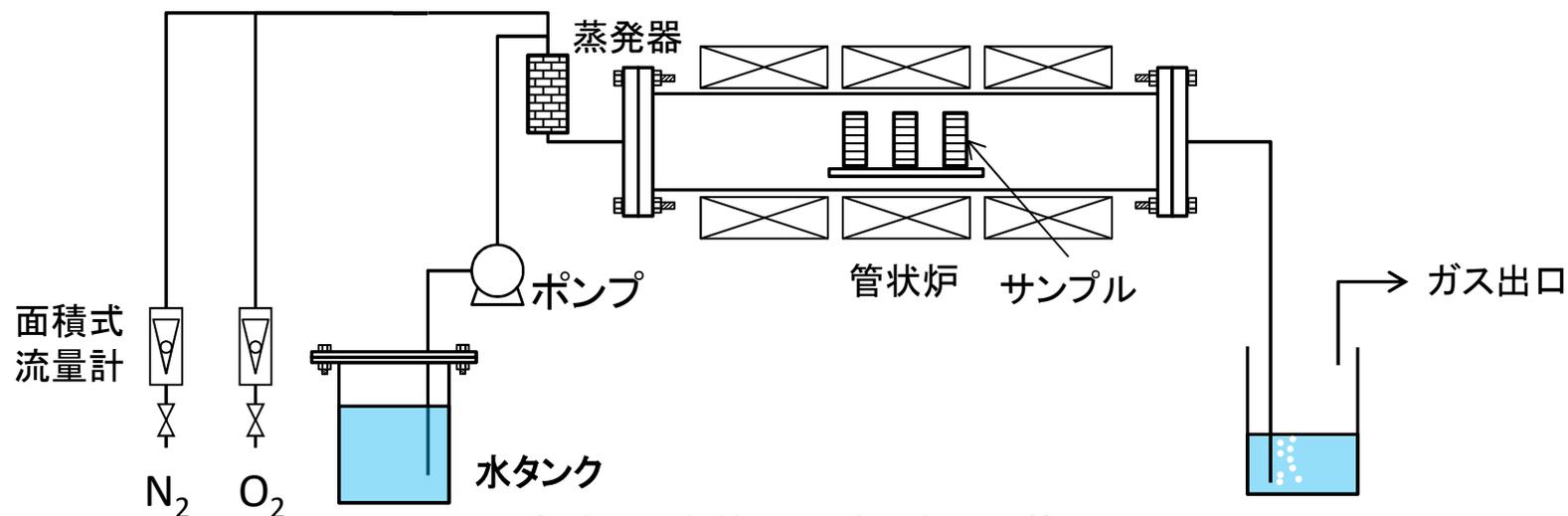
No.140

付録4-2

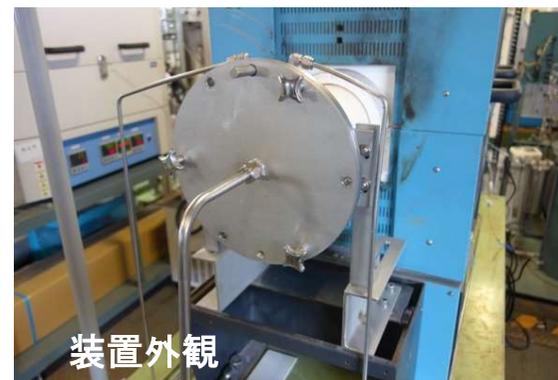
実験装置 A試験・C試験(2)

■ 実験装置(水蒸気割合50%および100%のケース)

- 水蒸気添加を水槽曝気による方法でなく、蒸発器で水蒸気を発生させて管状炉内に導入する方法を採用



腐食試験装置の概略図(蒸発器の場合)



(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

No.141

付録4-3

実験装置 B試験

■ 実験装置

- 電気炉(炉内寸法:700mm角)を使用
- 雰囲気環境は大気下
- L型アングルと鋼製の網の上に試験体を設置し、試験体の接地面を極力小さくしている



1000°C加熱用電気炉



試験体設置状況

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

No.142

付録4

A試験(ガス環境による影響の確認) 腐食前後の外観

腐食前	D19	D35	平板	ガスの構成割合 (vol%)																																															
				<table border="1"> <caption>ガスの構成割合 (vol%)</caption> <thead> <tr> <th>Specimen</th> <th>H₂O (vol%)</th> <th>O₂ (vol%)</th> <th>N₂ (vol%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A1 (D19)</td> <td>20</td> <td>0</td> <td>80</td> </tr> <tr> <td>A2 (D19)</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>A3 (D19)</td> <td>20</td> <td>16</td> <td>64</td> </tr> <tr> <td>A4 (D19)</td> <td>0</td> <td>20</td> <td>80</td> </tr> <tr> <td>A5 (D35)</td> <td>20</td> <td>0</td> <td>80</td> </tr> <tr> <td>A6 (D19)</td> <td>100</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>A7 (D19)</td> <td>50</td> <td>20</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>A8 (D19)</td> <td>0</td> <td>5</td> <td>95</td> </tr> <tr> <td>A9 (D19)</td> <td>0</td> <td>10</td> <td>90</td> </tr> <tr> <td>A10 (平板)</td> <td>50</td> <td>20</td> <td>30</td> </tr> </tbody> </table>					Specimen	H ₂ O (vol%)	O ₂ (vol%)	N ₂ (vol%)	A1 (D19)	20	0	80	A2 (D19)	0	0	100	A3 (D19)	20	16	64	A4 (D19)	0	20	80	A5 (D35)	20	0	80	A6 (D19)	100	0	0	A7 (D19)	50	20	30	A8 (D19)	0	5	95	A9 (D19)	0	10	90	A10 (平板)	50	20
Specimen	H ₂ O (vol%)	O ₂ (vol%)	N ₂ (vol%)																																																
A1 (D19)	20	0	80																																																
A2 (D19)	0	0	100																																																
A3 (D19)	20	16	64																																																
A4 (D19)	0	20	80																																																
A5 (D35)	20	0	80																																																
A6 (D19)	100	0	0																																																
A7 (D19)	50	20	30																																																
A8 (D19)	0	5	95																																																
A9 (D19)	0	10	90																																																
A10 (平板)	50	20	30																																																
腐食後	A1 (D19)	A2 (D19)	A3 (D19)	A4 (D19)	A5 (D35)																																														
	A6 (D19)	A7 (D19)	A8 (D19)	A9 (D19)	A10 (平板)																																														

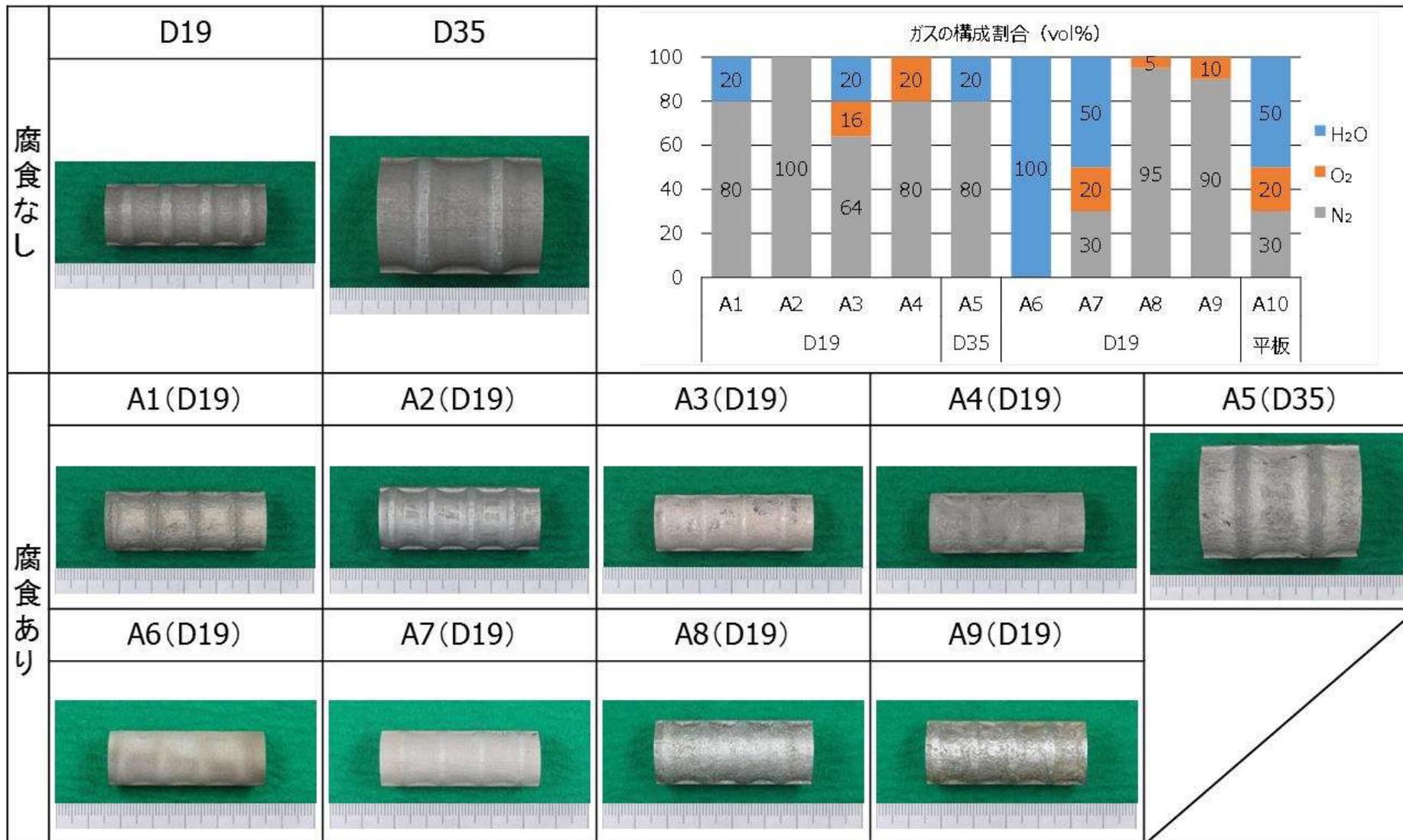
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.143

⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

付録4

A試験(ガス環境による影響の確認) 脱スケール後の外観



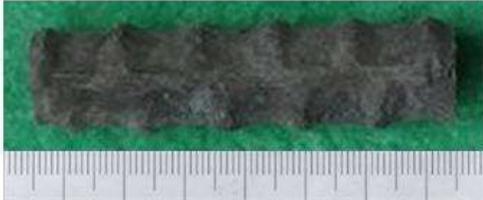
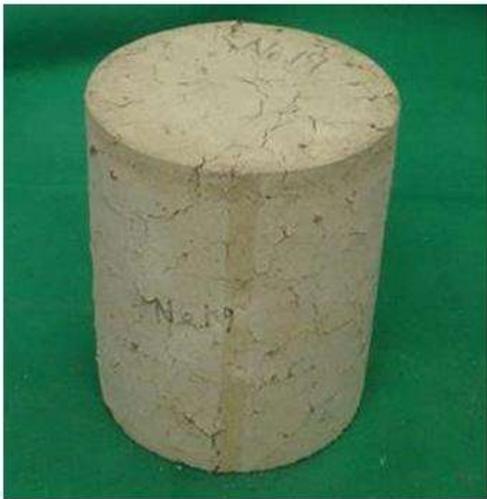
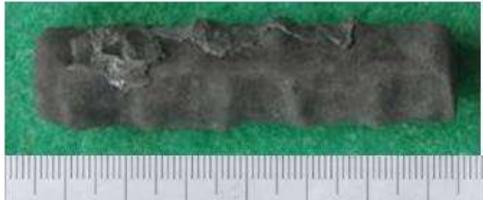
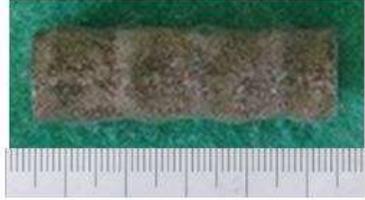
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

No.144

付録4

B試験(かぶり厚さによる影響の確認) 外観(4日間)

	腐食前 (コンクリート)	腐食後 (鉄筋)	脱スケール後 (鉄筋)
D19C20			
D19C30			
D19C100			

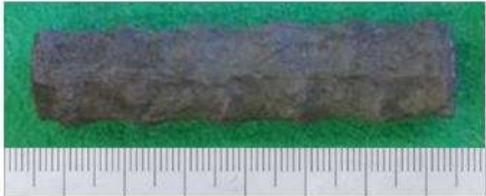
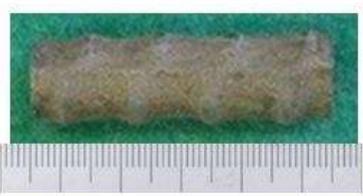
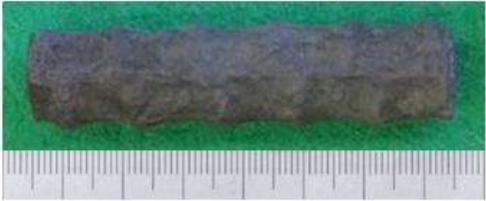
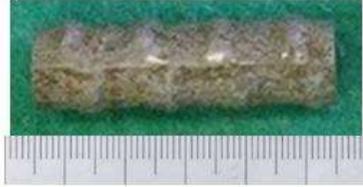
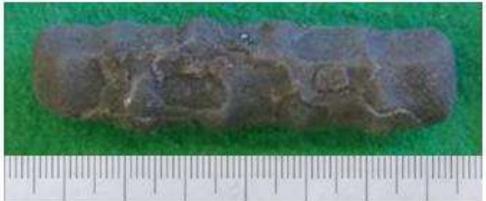
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

No.145

付録4

B試験(かぶり厚さによる影響の確認) 外観(8日間)

	腐食前 (コンクリート)	腐食後 (鉄筋)	脱スケール後 (鉄筋)
D19C20			
D19C30			
D19C100			

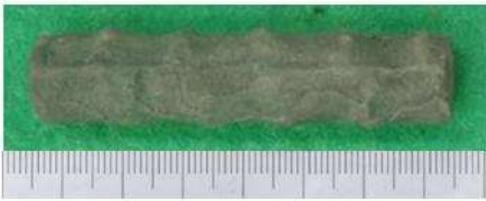
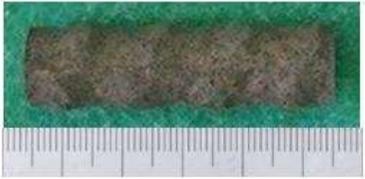
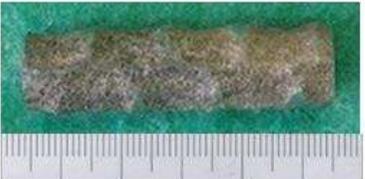
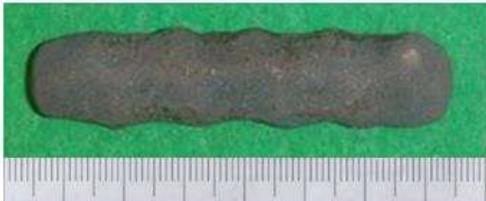
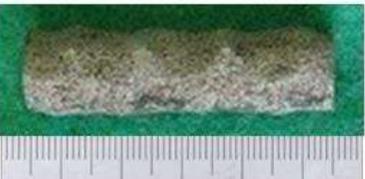
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

No.146

付録4

B試験(かぶり厚さによる影響の確認) 外観(12日間)

	腐食前 (コンクリート)	腐食後 (鉄筋)	脱スケール後 (鉄筋)
D19C20			
D19C30			
D19C100			

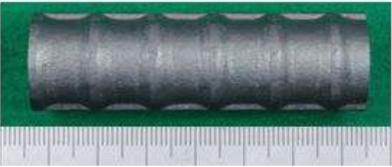
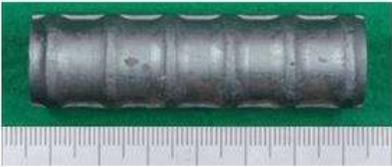
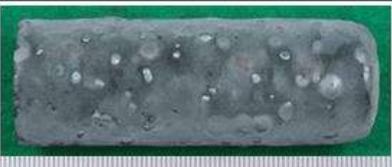
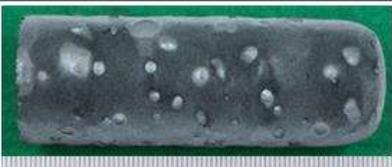
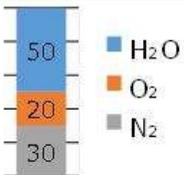
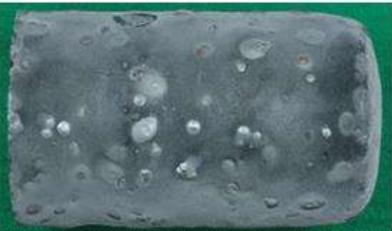
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

No.147

付録4

C試験(鉄筋単体のケース:C1(D19)、C4(D35)) 腐食前後の外観

腐食前		腐食後		
D19 (C1)		600°C-1日	600°C-4日	600°C-12日
				
		800°C-1日	800°C-4日	800°C-12日
				
		1000°C-4日	1000°C-8日	1000°C-12日
				
D35 (C4)		1000°C-1日	1000°C-12日	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> C試験のガス環境  </div>
				

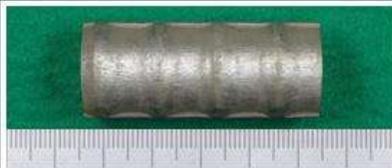
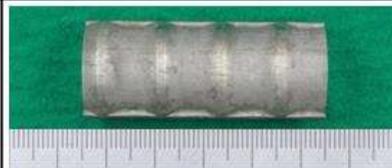
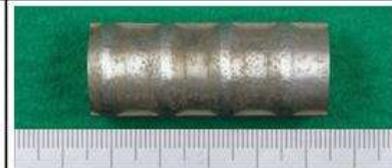
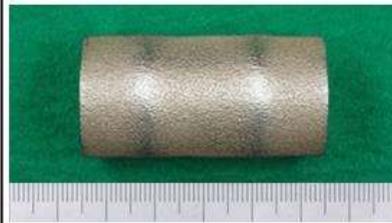
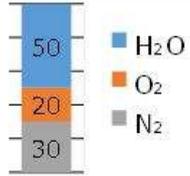
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

No.148

付録4

C試験(鉄筋単体のケース:C1(D19)、C4(D35)) 脱スケール後の外観

		腐食なし	腐食あり					
D19 (C1)		600°C-1日		600°C-4日		600°C-12日		
		800°C-1日		800°C-4日		800°C-12日		
		1000°C-4日		1000°C-8日		1000°C-12日		
		D35 (C4)	1000°C-1日		1000°C-12日		<div data-bbox="1646 1157 1915 1204" style="border: 1px solid black; padding: 2px;">C試験のガス環境</div> 	

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

No.149

付録4

C試験(コンクリート付きのケース:C2(D19)) 腐食前後の外観

	腐食前 (コンクリート)	腐食後 (コンクリート)	腐食後 (鉄筋)	脱スケール後 (鉄筋)
600°C				
800°C				
1000°C				
			腐食 なし⇒	

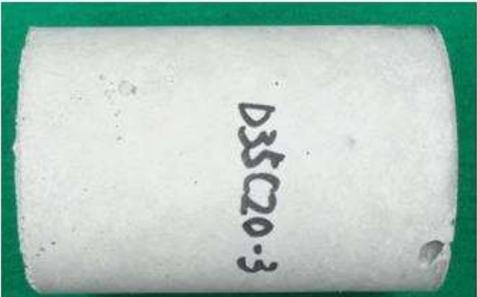
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

⑤RPVペDESTALの鉄筋高温腐食試験

No.150

付録4

C試験(コンクリート付きのケース:C3(D35)) 腐食前後の外観

	腐食前 (コンクリート)	腐食後 (コンクリート)	腐食後 (鉄筋)	脱スケール後 (鉄筋)
600°C				
800°C				
1000°C				
				腐食なし⇒ 

(3)安全シナリオの高度化

①【1号機】S/C脚部の地震応答解析手法の高度化

No.151

付録5

1F-1

低サイクル疲労の詳細評価

時刻歴弾塑性地震応答解析 [低サイクル疲労評価]

対象機器			H29①			
腐食年数(年)			40年後相当			
減衰定数			建設時設計値 (コンクリート5%、鋼材1%)			
S/C内コンクリート			T.P.704			
オペフロ階付加設備			6100 ton			
評価部位			疲労累積係数 *1 (-)	目安値	裕度	
Ⓐ ベント管取付部	ベント管とベントヘッダの接続部	SGV410相当	3.72E-03	1.00	269	
Ⓑ ダウンカマ取付部	ダウンカマとベントヘッダの結合部	SGV410相当	4.66E-02	1.00	21	

注) *1) 疲労累積係数は、ASME SecVIIIのピークカウント法を準用して算出した。

時刻歴弾塑性地震応答解析の結果、ASME Sec.VIIIのピークカウント法を準用した低サイクル疲労評価では、疲労累積係数が目安値に収まることがわかった。

(3)安全シナリオの高度化

③温度履歴を考慮したPCVの材料試験

1F-1

No.152

付録6-1

・事故後約2週間(3/25)までのMAAP解析(平成27年度炉内状況把握PJ)による1号機のPCVドライウエル(D/W)側の表面温度変化を図1に示す。

・PCV D/W側表面温度は約620°Cと評価しており、この事故後約2週間の温度履歴をPCVの材料試験で考慮する。なお、3/23の注水系切替後(注水あり)では、燃料デブリが有効に冷却され、PCV表面温度が低下していることがわかる。

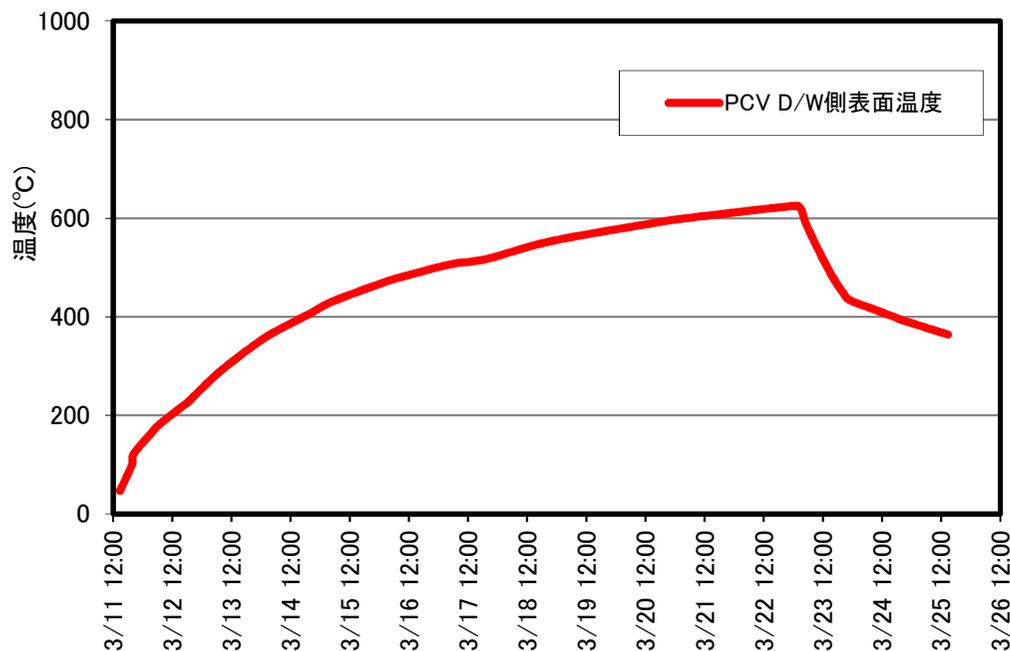


図1 3/23まで注水なしとした場合の1F1 PCV表面温度変化

(3)安全シナリオの高度化

③温度履歴を考慮したPCVの材料試験

1F-1

No.153

付録6-2

・温度履歴付与時の電気炉内PCV鋼材表面の温度計測状況を図2に示す。

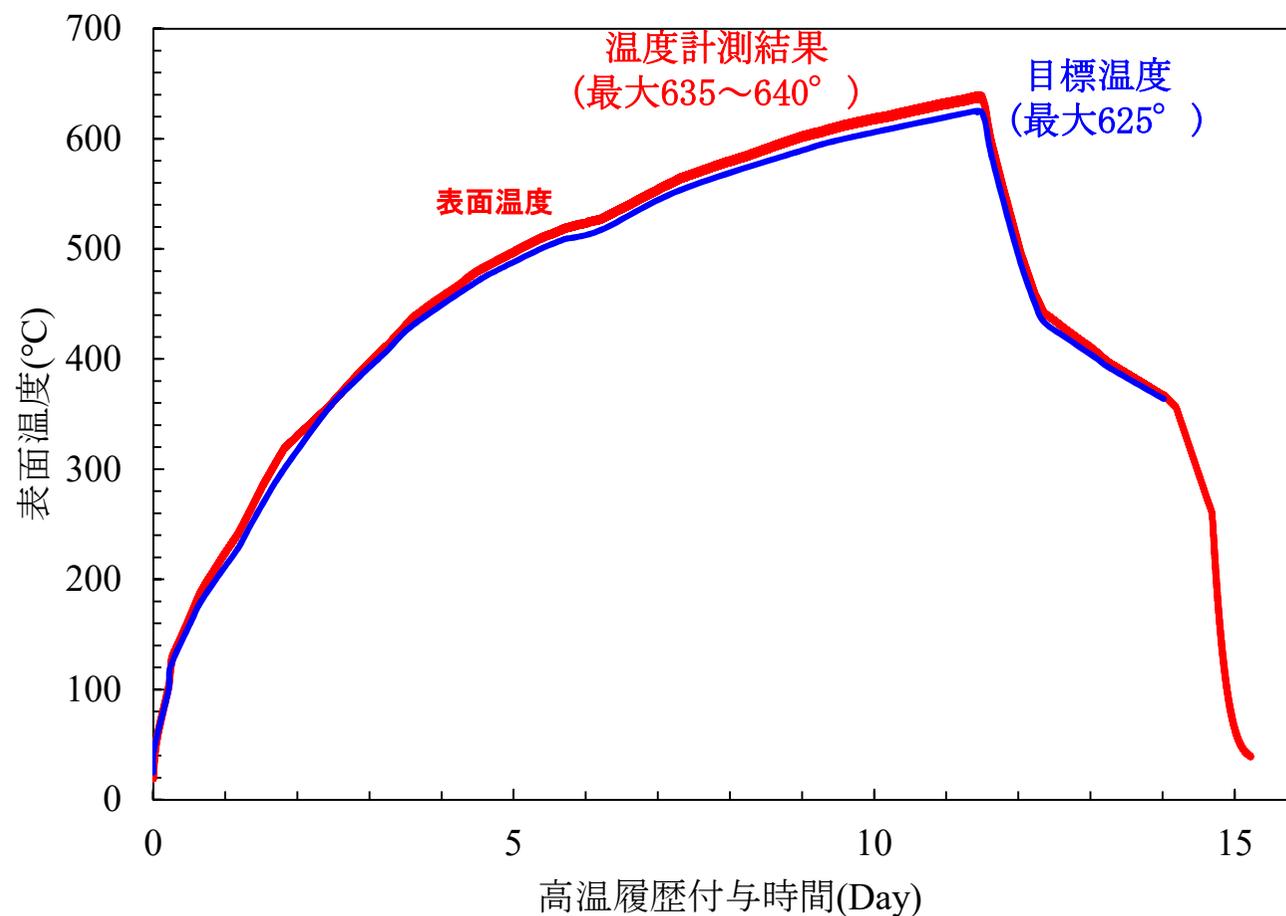


図2 PCV鋼材表面の温度計測状況

(3)安全シナリオの高度化

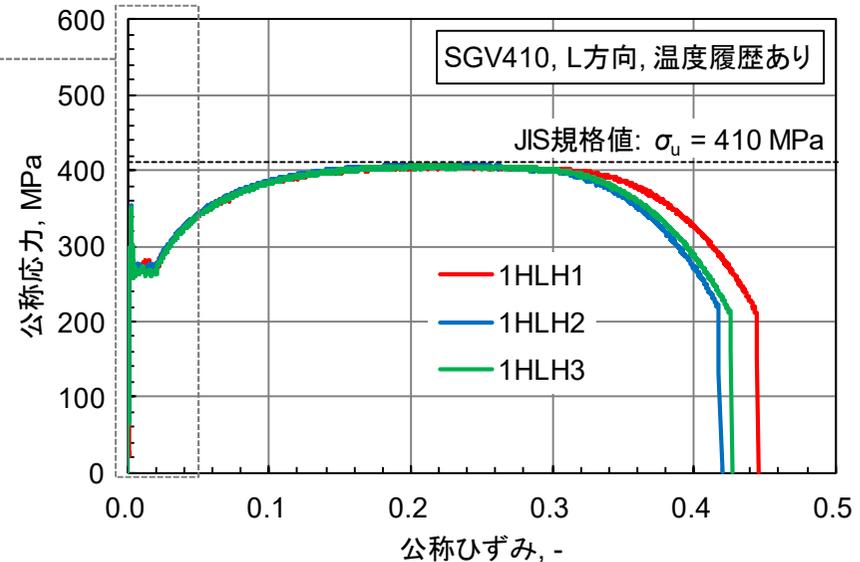
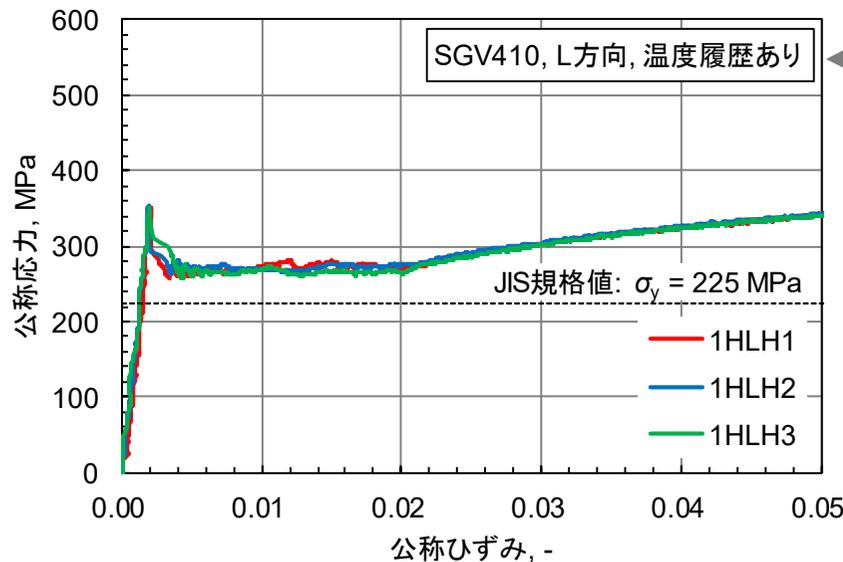
③温度履歴を考慮したPCVの材料試験

1F-1 No.154

付録6-3

- SGV410材の引張試験結果
(ベント管相当材、ベントヘッド相当材、ダウンカマ相当材等)
温度履歴を付与したSGV410材(厚さ16mm)の材料試験においても降伏応力 σ_y および破断伸びはJISの規格値を満足している。
引張強さ σ_u は温度履歴の付与によりJIS規格値から若干低下した。

SGV410材 引張試験条件		降伏応力 σ_y , MPa		引張強さ σ_u , MPa		破断伸び, %	
		測定値	平均値	測定値	平均値	測定値	平均値
温度履歴なし	L方向	308	326	440	440	38	41
		337		440		43	
		333		440		43	
	C方向	321	319	439	439	40	41
		328		440		42	
		309		439		42	
温度履歴あり	L方向	267	274	406	406	44	42
		267		407		41	
		288		406		42	
	C方向	264	267	407	406	42	41
		275		406		41	
		263		406		40	
JIS要求値		≥ 225		≥ 410		≥ 21	



引張試験による公称応力-公称ひずみ関係(SGV410相当材、温度履歴あり、L方向)

(3)安全シナリオの高度化

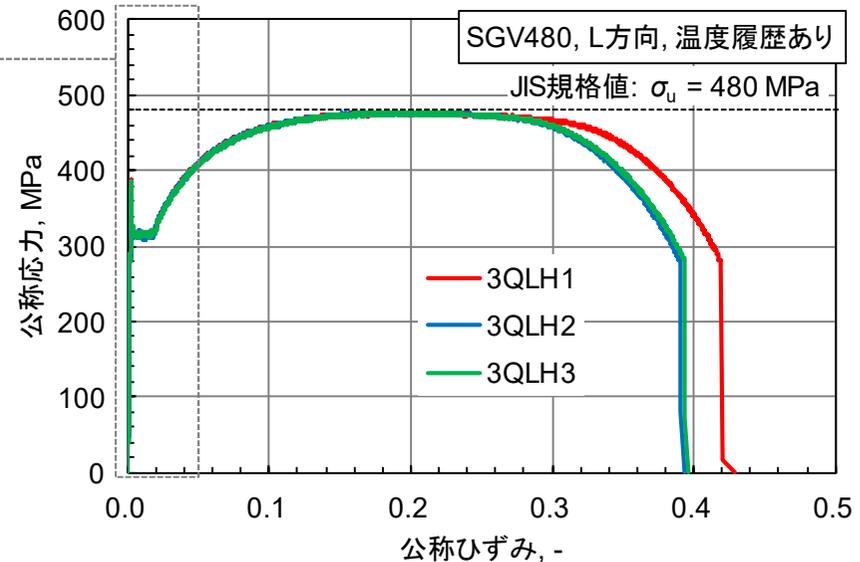
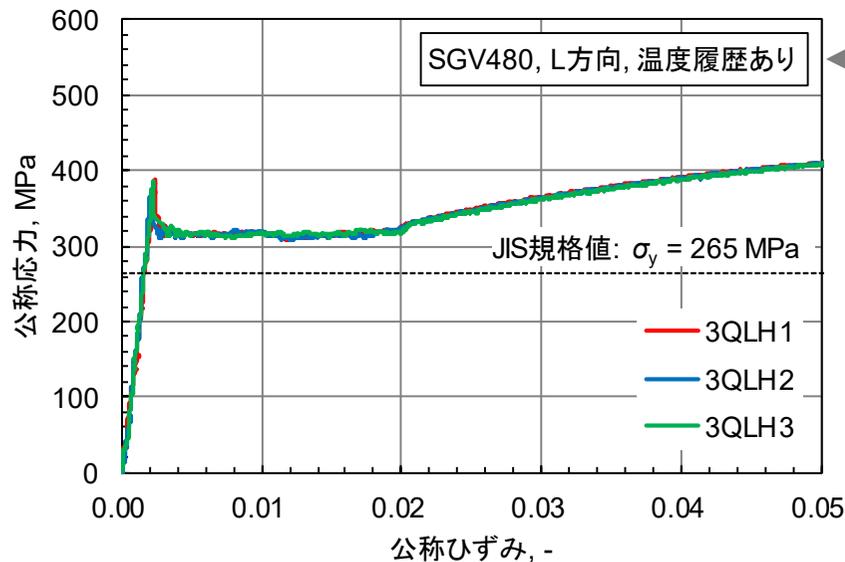
③温度履歴を考慮したPCVの材料試験

1F-1 No.155

付録6-4

- SGV480材の引張試験結果
(PCV D/Wシェル相当材、S/Cシェル相当材等)
温度履歴を付与したSGV480材(厚さ38mm)の材料試験においても降伏応力 σ_y および破断伸びはJISの規格値を満足している。
引張強さ σ_u は温度履歴の付与によりJIS規格値から若干低下した。

SGV480材 引張試験条件		降伏応力 σ_y , MPa		引張強さ σ_u , MPa		破断伸び, %	
		測定値	平均値	測定値	平均値	測定値	平均値
温度履歴なし	L方向	367	361	533	532	38	36
		354		532		34	
		362		532		35	
	C方向	352	356	533	532	36	35
		355		532		35	
		360		532		35	
温度履歴あり	L方向	313	313	477	477	42	40
		313		478		40	
		314		477		39	
	C方向	315	313	478	477	39	39
		311		477		38	
		314		476		40	
JIS要求値		≥ 265		≥ 480		≥ 17	



引張試験による公称応力-公称ひずみ関係(SGV480相当材、温度履歴あり、L方向)

(3)安全シナリオの高度化

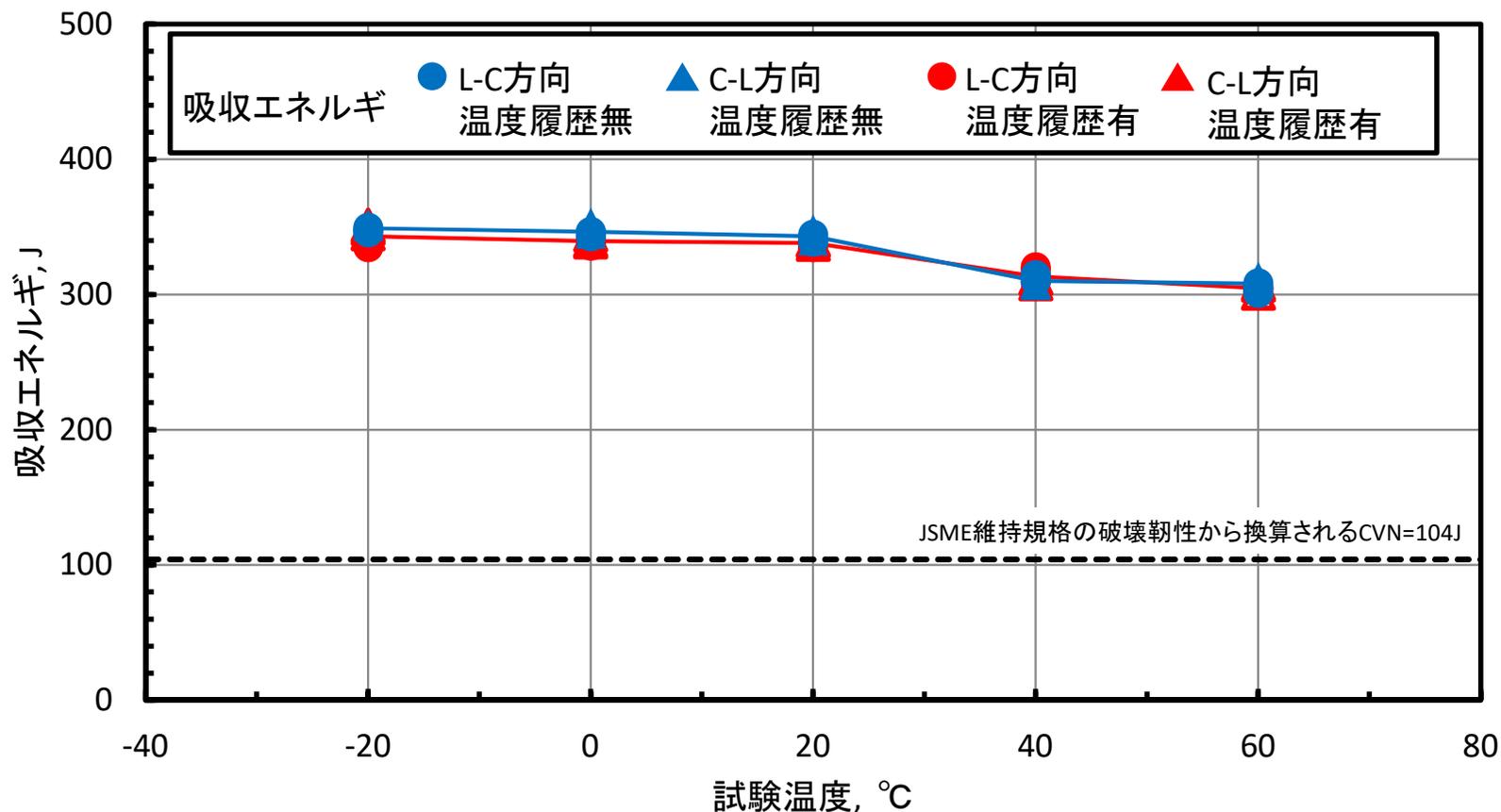
③温度履歴を考慮したPCVの材料試験

No.156

付録6-5

- SGV410材(16mm)のシャルピー(CVN)試験結果(ベント管、ベントヘッド、ダウンカマ相当材等)

SGV410材では、温度履歴の付与による吸収エネルギーの低下は確認されず、吸収エネルギーの最小値は301Jであり、JSME維持規格の破壊靱性 J_{Ic} から換算される $CVN=104J$ を上回った。



シャルピー試験による吸収エネルギーの変化(SGV410材(16mm))

(3)安全シナリオの高度化

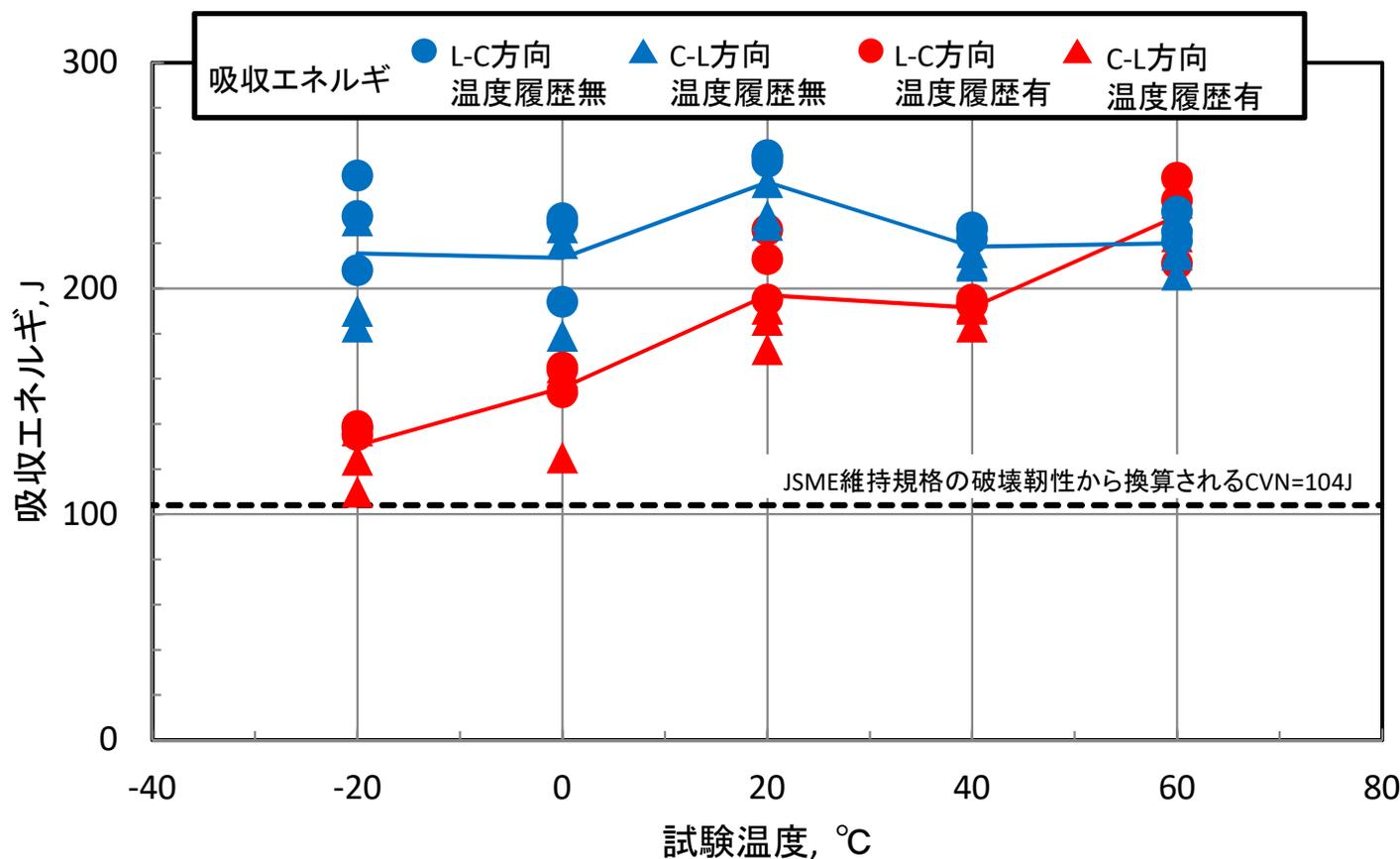
③温度履歴を考慮したPCVの材料試験

No.157

付録6-6

- SGV480材(38mm)のシャルピー(CVN)試験結果(PCV D/Wシェル、S/Cシェル相当材等)

SGV480材は、温度履歴の付与により吸収エネルギーの低下が確認されたが、吸収エネルギーの最小値は110Jであり、JSME維持規格の破壊靱性 J_{IC} から換算される $CVN=104 J$ を上回った。



シャルピー試験による吸収エネルギーの変化(SGV480材(38mm))

(全般) 本PJから他PJなどへの引き継ぎ事項

No.	引き継ぎ先 (関連PJなど)	項目	引き継ぎ事項 (本事業の成果および課題)	備考
1	工法・システム高度化PJ	大型構造物損傷による波及的影響	<ul style="list-style-type: none"> PCV/ペDESTALの損傷に伴う波及的影響については本PJでの検討結果を確認のこと。(波及的影響のうち、代表的なものを備考欄に記載。詳細は報告書参照) 	<ul style="list-style-type: none"> PCV損傷時には、1次バウンダリの負圧を維持困難な開口の発生を想定。(面積の評価は困難) ペDESTAL損傷時には、RPV移動/コンクリート片落下によりPCV内全域への影響を想定。
2	工法・システム高度化PJ	安全シナリオ(大型構造物損傷時の対処設備の耐震性)	<ul style="list-style-type: none"> PCV/ペDESTALについて、600galに対する耐震性が確認された。 地震時の波及的対応に対処する設備については、有効性確保のため600gal以上の耐震性が求められる。 	<ul style="list-style-type: none"> 実機状態には不確かさがあり、600galに対してPCV/ペDESTALの損傷が発生しないということではない点に注意が必要。
3	工法・システム高度化PJ	安全シナリオ(PCV破損時の対策)	<ul style="list-style-type: none"> 事象発生時の被ばく量低減の手段として、燃料デブリ加工中のPCV内濃度制限する手法を検討のこと。 	<ul style="list-style-type: none"> 大型機器損傷時の波及的影響を考慮すると事象発生後のシステムでの対処が困難と考えられることから、代替の手段として、PCV内濃度制限を提案。
4	工法・システム高度化PJ	ペDESTAL補強	<ul style="list-style-type: none"> 補強技術(効果)の有効性を説明する観点では、600gal以上の耐震性が求められる。 	<ul style="list-style-type: none"> 現状のペDESTALが、600galに対する耐震性が確認された。
5	PCVH補修PJ	ダウンコマ止水高さ	<ul style="list-style-type: none"> S/C脚部補強を行わない条件で、600galに対する耐震性を確保するためには、止水高さを制限する必要がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 評価上、600galに対する耐震性が確認された止水高さの条件は以下。 1号機:0.68m埋設 2/3号機:0.745m埋設
6	PCV内部調査PJ	ペDESTALの状態調査における優先確認事項	<ul style="list-style-type: none"> 本事業の耐震評価モデルでの想定以上のペDESTAL浸食の有無。 	<ul style="list-style-type: none"> 事故時温度上昇に対しては、要素試験で得た鉄筋強度低下のデータを考慮しても一定の耐震性が確認された。
7	事業者	耐震評価手法	<ul style="list-style-type: none"> 耐震評価手法全般 地震応答解析モデルの妥当性の検証 	<ul style="list-style-type: none"> 実機エンジニアリングでの活用を想定。

参考資料

- ①平成28年度実施 S/C脚部耐震性評価内容
- ②平成28年度実施 地震応答解析手法の開発実施内容
- ③平成28年度実施 RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発
—構造解析・評価(概略評価)
- ④略語説明

①平成28年度実施 S/C脚部耐震性評価内容

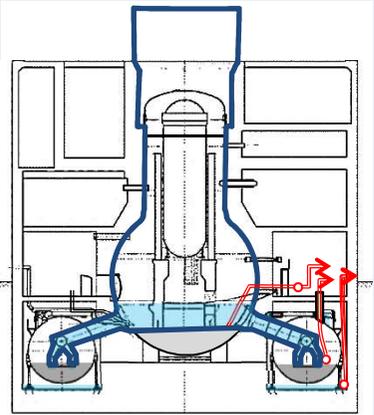
3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.161

①S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

参考資料①

1F-1 汚染水拡大防止の観点から、S/C脚部の耐震性を確認する必要があり、下記ケースのストレナ+クエンチャ止水状態での評価を実施する。

解析実施ケース		
	H28-1①	H28-1②
<p>(DW水位T.P.7564) (トラス室天井面レベル)</p>  <p>・ストレナ+クエンチャ+ダウンカマ止水 ・真空破壊ライン止水 ・S/C脚部補強無し</p>	<p>・将来想定: 15年後 ・建屋損傷モデル ・D/W水位: T.P.7564 ・S/C内: コンクリートT.P.1524 (ダウンカマかぶり厚さ1500mmの場合) ・トラス室: T.P.-2366 ・ベント管内: 満水 ・真空破壊管内: 補修考慮 ・オペフロ階付加設備: その他付加荷重(セル、燃料取り出し装置等): 約6100ton ・小部屋埋設: なし ・減衰定数: コンクリート5%、鋼材1% (建設時設計用) ・地震波: 現行Ss</p>	<p>・将来想定: 15年後 ・建屋損傷モデル ・D/W水位: T.P.7564 ・S/C内: コンクリートT.P.704 (ダウンカマかぶり厚さ680mmの場合) ・トラス室: T.P.-2366 ・ベント管内: 満水 ・真空破壊管内: 補修考慮 ・オペフロ階付加設備: その他付加荷重(セル、燃料取り出し装置等): 約6100ton ・小部屋埋設: なし ・減衰定数: コンクリート5%、鋼材1% (建設時設計用) ・地震波: 現行Ss</p>
備考	H26-1の床応答加速度の時刻歴波形を用いて評価する。	同左

3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

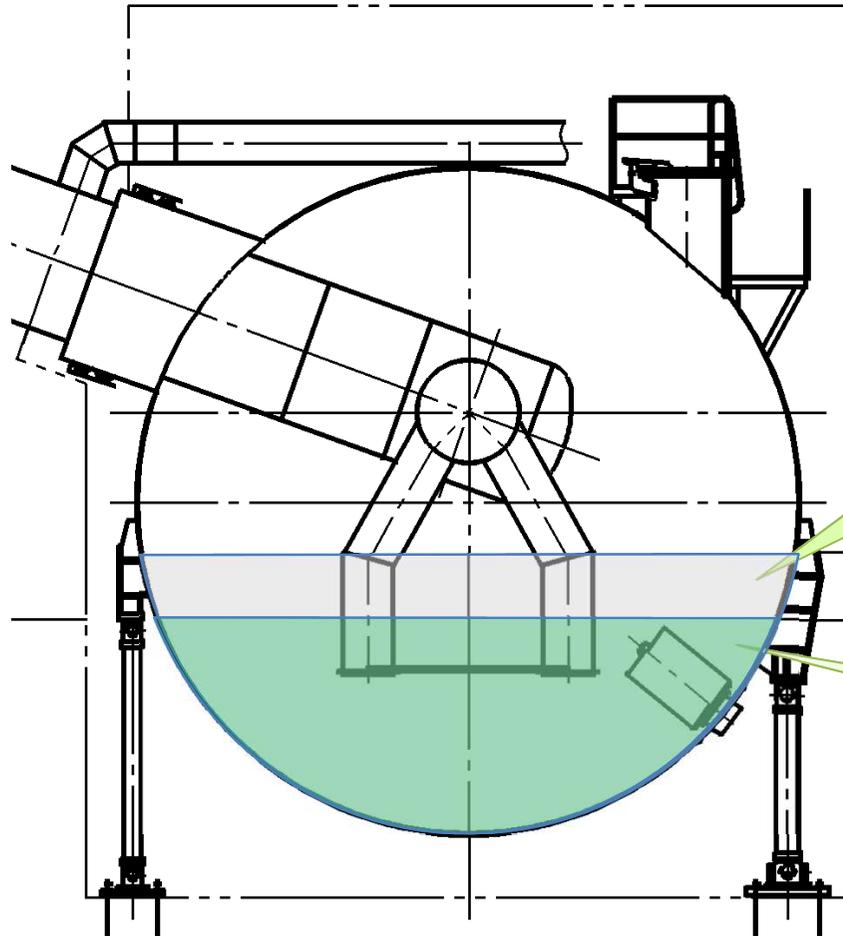
No.162

① S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

参考資料①

1F-1

S/C(サプレッションチェンバー)内コンクリート埋設量想定ケース



■ T.P.1524埋設

ダウンカメラを1.5m埋設したケースを想定(要素試験で止水確認済み)

■ T.P.704埋設

埋設量軽減したケースを想定(ダウンカメラ0.68m埋設)

3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

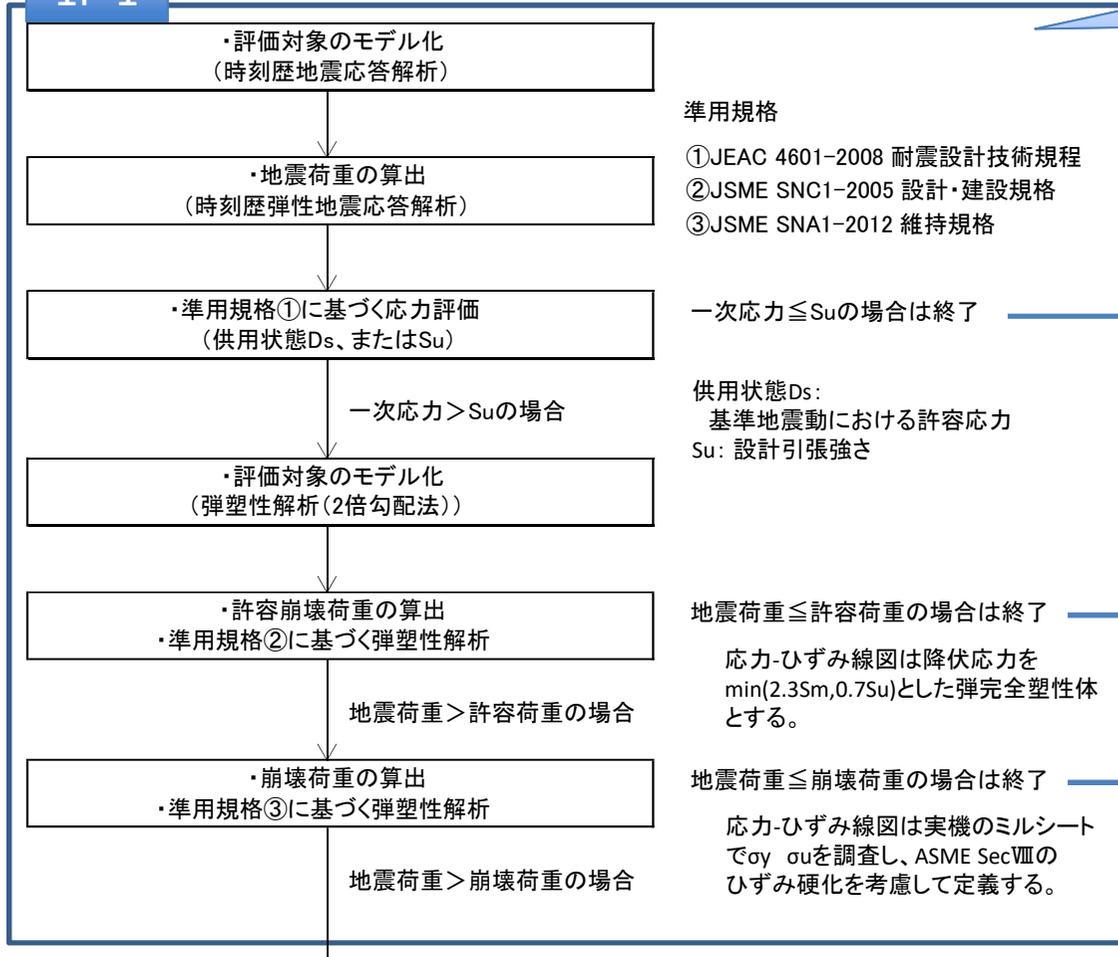
No.163

①S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

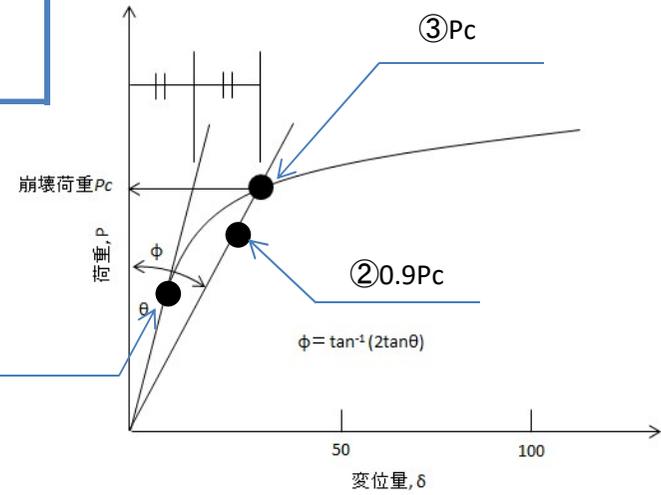
参考資料①

1F-1

平成28年度解析実施



安全シナリオで
検討した最大想定を
より現実的に見直す



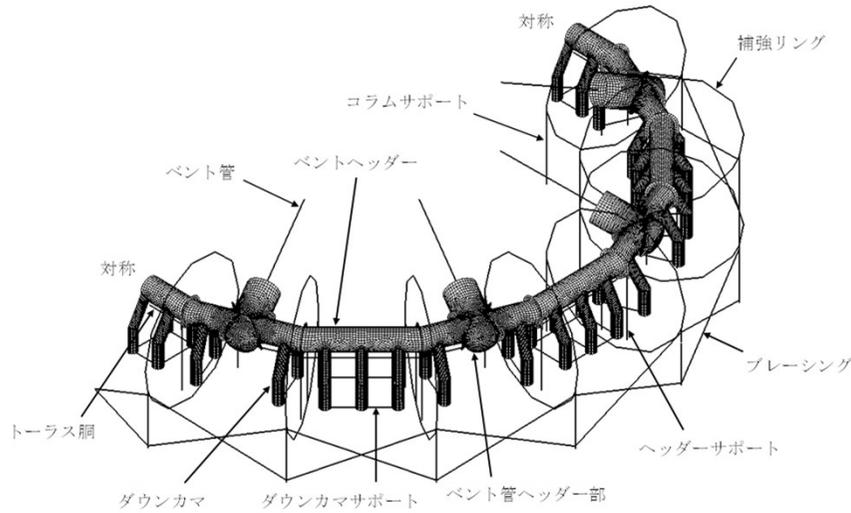
3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.164

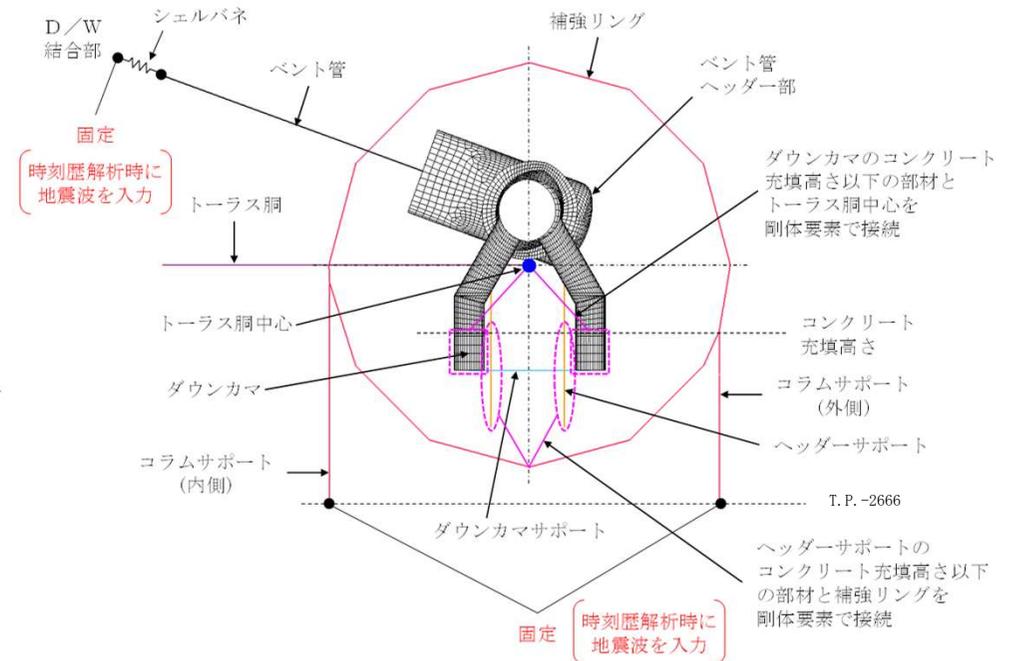
① S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

参考資料①

1F-1 解析モデル



(1) ベント系+S/C系の解析モデル



(2) 詳細図(断面)

- ・ベント管に作用する地震荷重及びコラムサポートに作用する地震荷重を算出するため、ベント管とS/C系はビーム要素でモデル化する。
- ・S/C内コンクリート埋設によりダウンカマ取付部の地震時応力が厳しくなることが予想されるため、ダウンカマとベントヘッダはシェル要素でモデル化する。
- ・時刻歴地震応答解析は、固定部より時刻歴加速度を入力して解析モデルを強制加振させる。
- ・弾塑性解析(2倍勾配法)は、各要素に加速度を静的に負荷する。

3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

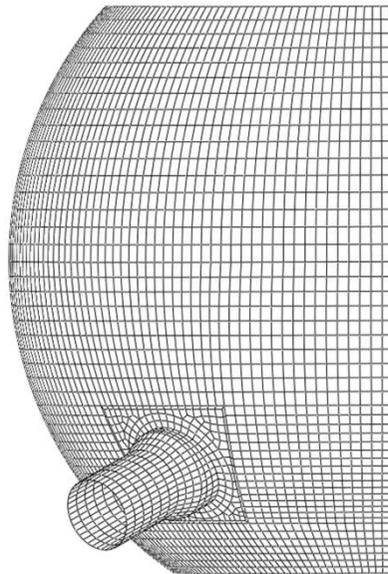
No.165

① S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

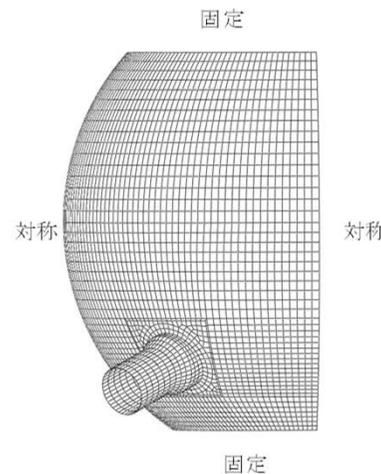
参考資料①

1F-1

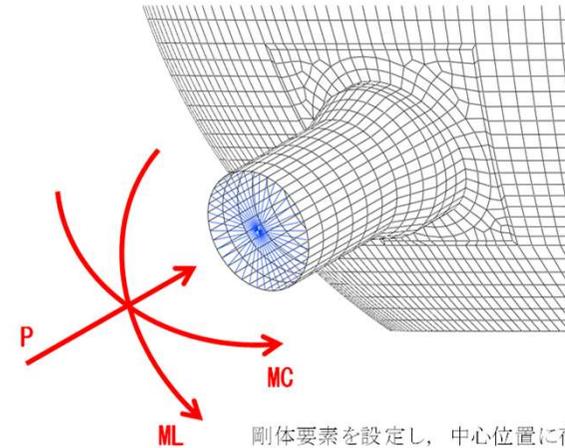
解析モデル



(1) ベント管とドライウェルとの結合部のFEMモデル



(2) 境界条件



剛体要素を設定し、中心位置に荷重を負荷

(3) 荷重負荷方法

ベント管取付部のシェルモデル

・ベント管取付部の応力評価は、時刻歴地震応答解析で得られたベント管取付部の荷重を上図に示すシェルモデルに負荷して評価する。

3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.166

① S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

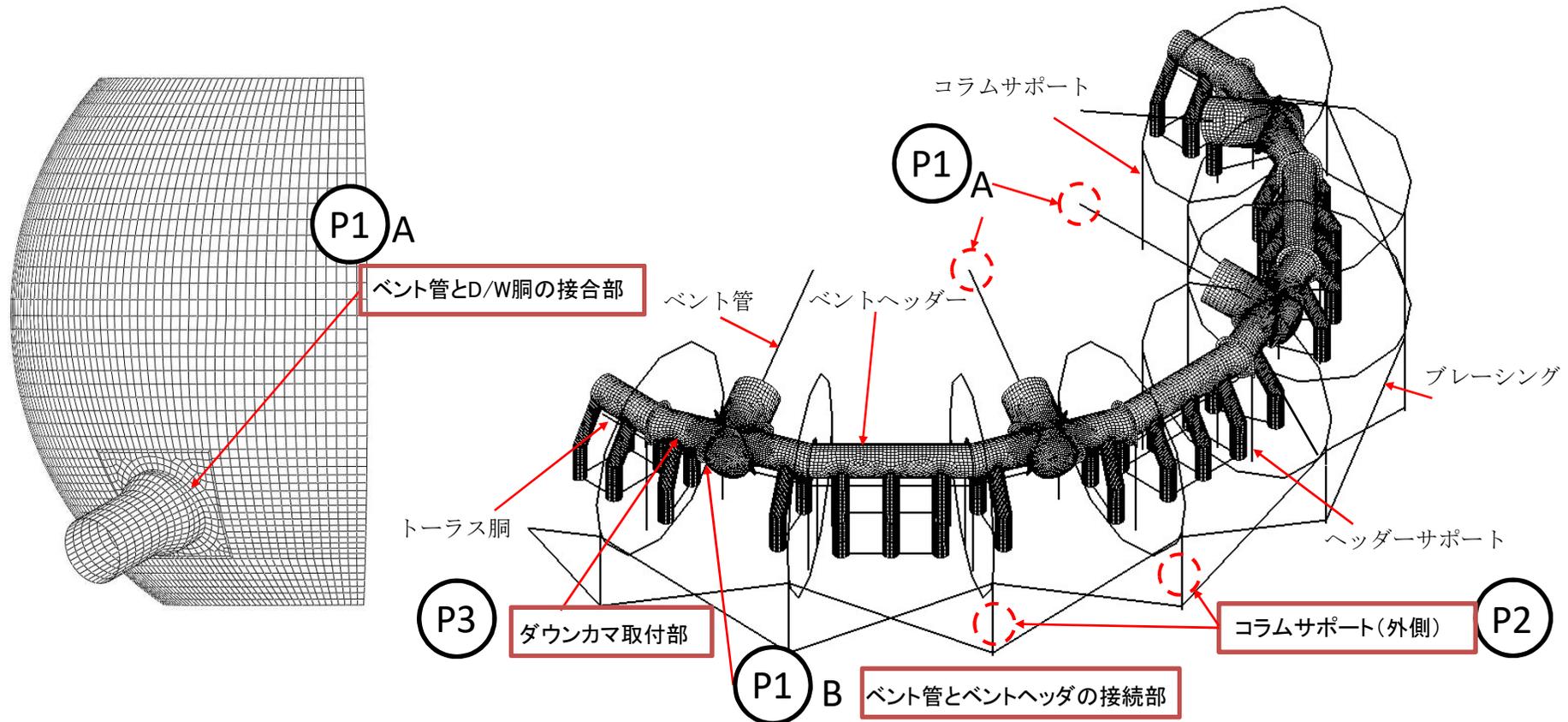
参考資料①

1F-1

PCV構造健全性評価結果(1F-1 準用規格①に基づく応力評価)

S/C脚部補強の実施を想定していたが、汚染水の建屋外への漏えい抑制の観点から、S/C脚部補強なしの評価ケースとして3ケースを選定し、そのうち2ケースの評価を実施した。評価では「JEAC4601-2008 原子力発電所耐震設計技術規程」を準用し、時刻歴弾性地震応答解析による応力評価を実施した。

応力評価点は、(P1) ベント管取付部(ベント管とD/W胴の接合部A, ベント管とベントヘッダの接続部B), (P2) コラムサポート, (P3) ダウンカム取付部とした。



3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.167

① S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

参考資料①

(弾性解析)		H28-1①			H28-1②			
		①ベント管(SGV410相当)	D/Wシェル(SGV480相当)	③ダウンカム取付部	②コラムサポート	①ベント管	D/Wシェル	③ダウンカム取付部
対象機器		15年後相当			15年後相当			
減衰定数		建設時設計値 (コンクリート5%、鋼材1%)			建設時設計値 (コンクリート5%、鋼材1%)			
S/C内コンクリート		T.P.1524			T.P.704			
オペフロ階付加設備		6100 ton			6100 ton			
	評価部位	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	
P1 ベント管取付部	ベント管とD/W側の 接合部A(D/Wシェル)	SGV480相当	199	423	2.13	152	423	2.78
	ベント管とベントヘッダの 接続部B	SGV410相当	669	360 (400)	0.54 (0.60)	418	360 (400)	0.86 (0.96)
P2 コラムサポート	外側コラムサポート	STK490相当	3.437 (2.539)	1	0.29 (0.39)	2.247 (1.670)	1	0.45 (0.60)
	ダウンカムと ベントヘッダの結合部	SGV410相当	778	400	0.51	319	400	1.25

注)・ベント管取付部の一次応力の許容値は、設計・建設規格より、供用状態Dsにおける温度50°Cの値とし、()内の値はSuとする。
 ・コラムサポートの応力強さは、組合せ応力(圧縮+曲げ) $\sigma_c/f_c + \sigma_b/f_b$ とした。()内は許容値(f_c 及び f_b)に常温でF値をSu値として評価(圧縮に対してはF値を1.2Syとした)した値。
 ・ダウンカム取付部の一次応力の許容値は温度50°CにおけるSu値とする。

「15年後相当、S/C内コンクリート(T.P.1524)」および「15年後相当、S/C内コンクリート(T.P.704)」において、ベント管取付部(ベント管とベントヘッダとの接続部)及びコラムサポートはSu値を超えている。ここで、Suを超えたコラムサポートの変形挙動を把握するため、次頁に述べる弾塑性解析(2倍勾配法)を実施した。また、上取り出し(D/W水位T.P.7.564m)を考慮した大型機器系連成モデルの地震荷重による応力評価では許容値を超えることが分かった。

3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.168

① S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

参考資料①

PCV構造健全性評価結果(1F-1 準用規格②)に基づく弾塑性解析

前項において許容値を満足しなかった2ケースについて、「JSME SNC1-2005 発電用原子力設備規格 設計・建設規格」を準用し、弾塑性解析(2倍勾配法)による評価を実施した。

コラムサポートは、クラスMC支持構造物であるが、JSME設計・建設規格の炉心支持構造物の規定であるCSS-3160を準用して、極限解析(弾塑性解析)による評価を実施した。

応力-ひずみ曲線は弾完全塑性体とし、降伏応力を $\min(2.3S_m, 0.7S_u)$ とした。

崩壊荷重 P_c 及び許容荷重 P_{cr} は、JSME設計・建設規格のCSS-3160を準用して定めた。

崩壊荷重 P_c は、荷重-変位量の曲線(弾塑性解析結果)において、弾性範囲の荷重軸に対する2倍の勾配の直線を求め、この直線と荷重-変位曲線の交点を定めた。この交点を崩壊荷重 P_c と定義した。

許容荷重 P_{cr} は、崩壊荷重 P_c に0.9を乗じた値とした。

		H28-1①				H28-1②			
対象機器	(弾塑性解析)								
	腐食年数(年)	15年後相当				15年後相当			
	減衰定数	建設時設計値 (コンクリート5%、鋼材1%)				建設時設計値 (コンクリート5%、鋼材1%)			
	S/C内コンクリート	T.P.1524				T.P.704			
	オベフロ階付加設備	6100 ton				6100 ton			
評価部位	地震荷重*1 水平震度 (g)	弾塑性解析結果*3 水平震度(g) 崩壊荷重 P_c (2倍勾配点)	許容荷重*2 P_{cr} (g)	裕度	地震荷重*1 水平震度 (g)	弾塑性解析結果 水平震度(g) 崩壊荷重 P_c (2倍勾配点)	許容荷重*2 P_{cr} (g)	裕度	
◎コラムサポート	外側コラムサポート	1.50	0.78 (0.84)	0.70	0.47	1.22	1.44	1.30	1.06

注記: *1) 水平震度は、ベント系モデルとS/C系モデルを連成させた解析モデルの弾性時刻歴解析から得られたトラス胴中心の最大応答加速度を示す。

*2) 許容荷重 P_{cr} は、崩壊荷重 P_c に0.9を乗じた値を示す。

*3) ()内はASME SecVIIIのひずみ硬化を考慮した準用規格③に基づく結果を示す。

弾塑性解析(2倍勾配法)の結果、「15年後相当、S/C内コンクリート(T.P.1524)」のケースは許容荷重を満足せず、「15年後相当、S/C内コンクリート(T.P.704)」では、コラムサポートは許容荷重以内であることがわかった。

3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.169

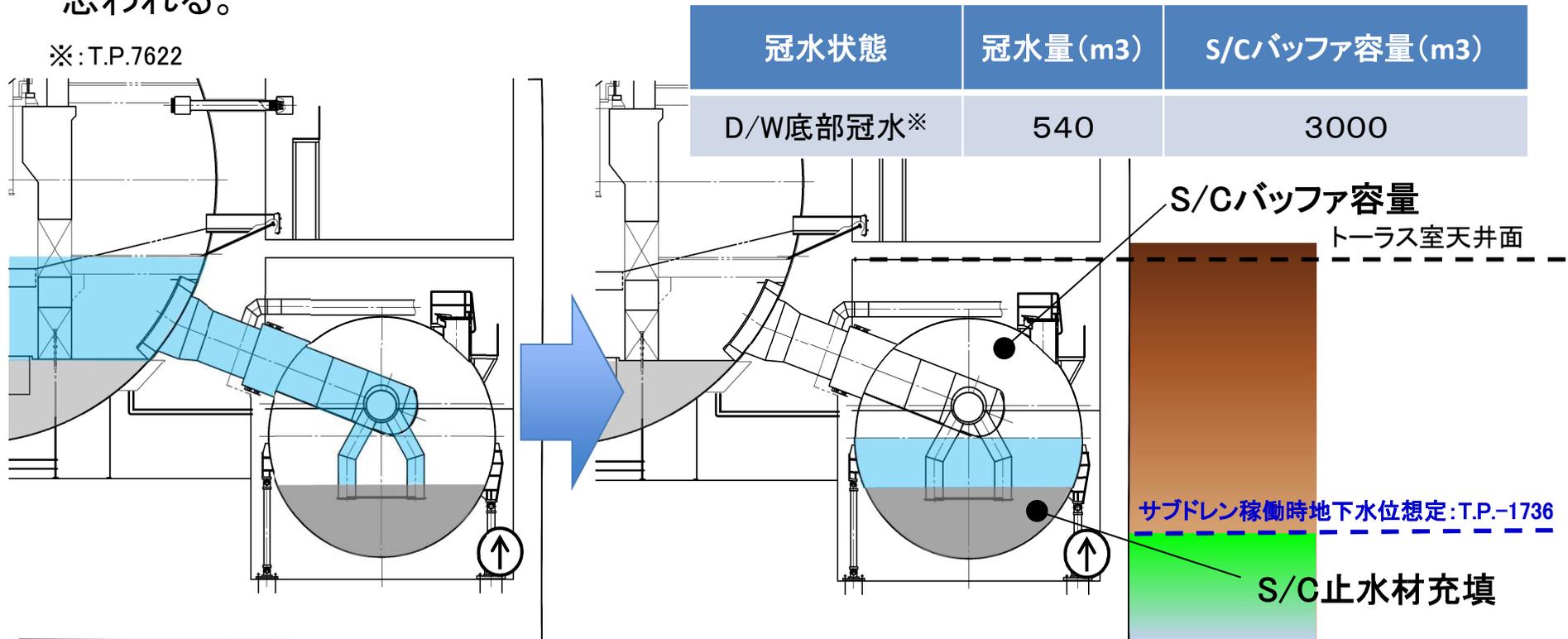
①S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

参考資料①

ダウンコマ取付部破損想定の影響評価

- ・S/C脚部を補強しない場合、Ss地震時に、万一、ベント管とベントヘッダ接続部やダウンコマ取付部が破損することを想定すると、D/W底部冠水がS/C内に漏水する可能性がある。
- ・ここで、S/C内バッファ容量が十分大きいため、Ss地震後に機動的対応が可能と思われる。

※: T.P.7622



3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.170

①S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

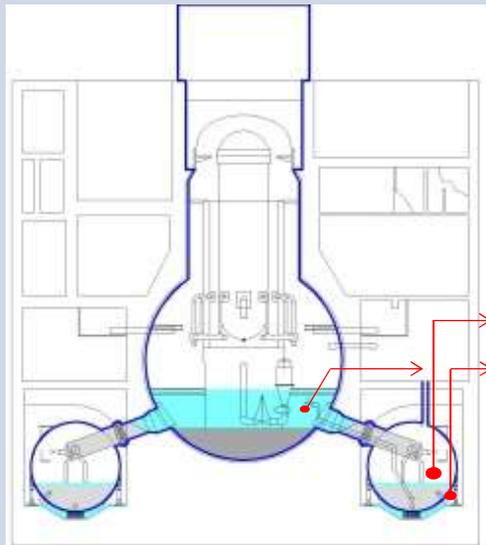
参考資料①

1F-2/3

1F-2 ケース3-1(D/W水位 T.P.8164)について、ベント管止水状態でのベント管付根部耐震性評価を実施する。

解析実施ケース

1F-2 ケース3-1 DW水位T.P.8164(トーラス室天井レベル)



- ・ベント管+クエンチャ+ストレーナ止水
- ・S/C脚部補強無し

- ・将来想定：40年後
- ・建屋損傷モデル
- ・D/W水位：T.P.8164
- ・S/C内：コンクリートT.P.-1636
- ・トーラス室：T.P.-3176
- ・ベント管内：止水材考慮
- ・オペフロ付加設備：
その他付加荷重(セル、燃料取り出し装置等)：
約4710ton
- ・小部屋埋設：なし
- ・減衰定数：
コンクリート5%、鋼材1%
(建設時設計用)
- ・地震波：現行Ss

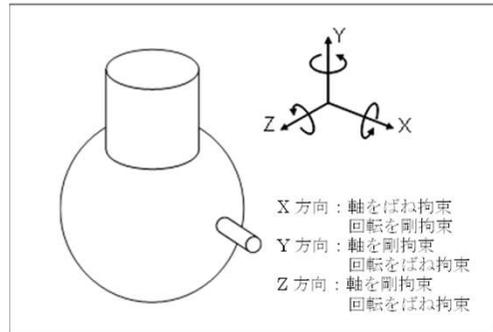
3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.172

①S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

参考資料①

ベント管止水状態でのベント管の耐震性影響モデル



ベント管 D/W取付部の拘束条件

想定シナリオ

ベント管止水

解析モデル

ベント管先端にベント管止水時重量 (閉止補助材、止水材) を付加

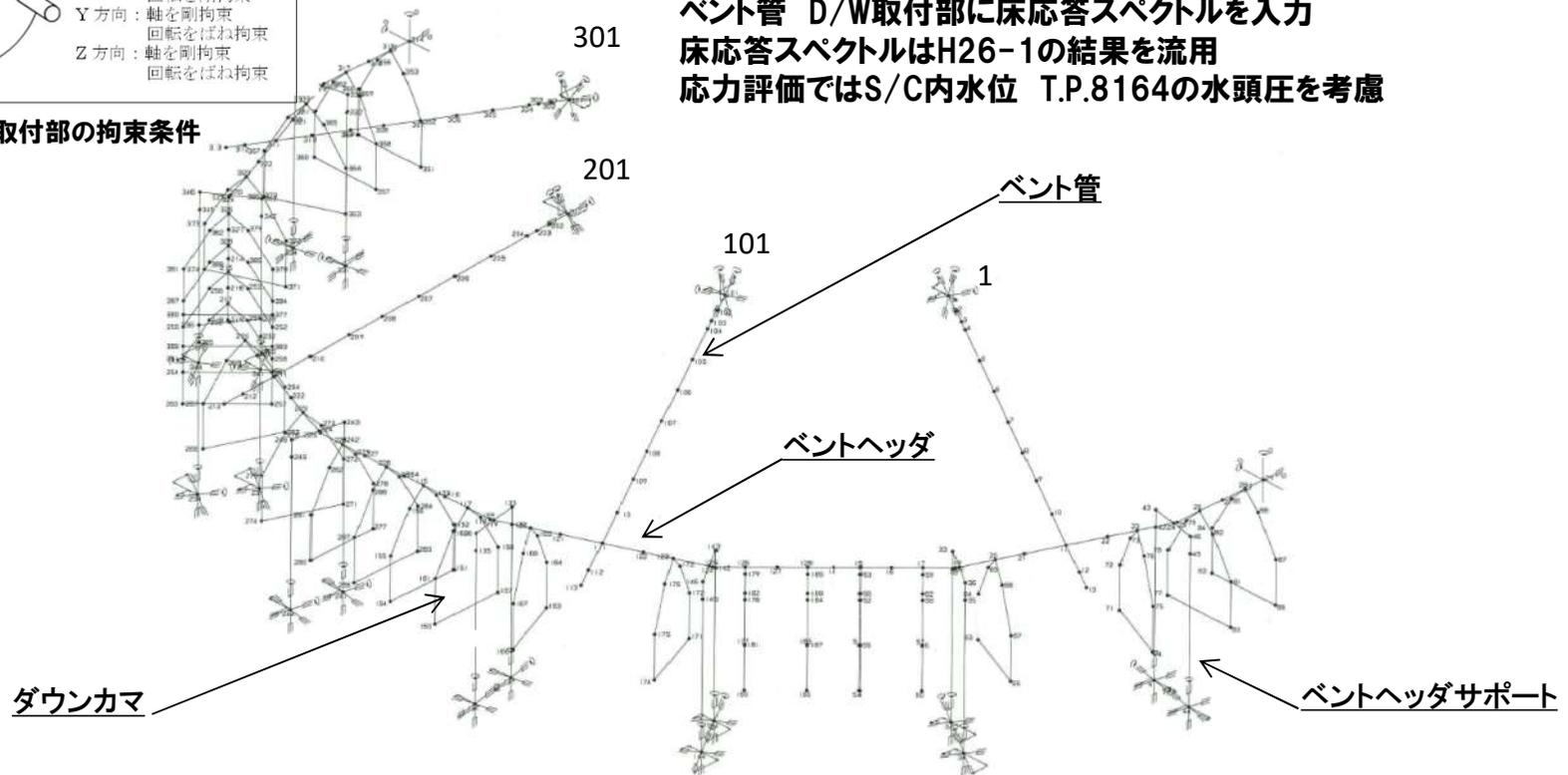
腐食:事故後40年を考慮

荷重条件

ベント管 D/W取付部に床応答スペクトルを入力

床応答スペクトルはH26-1の結果を流用

応力評価ではS/C内水位 T.P.8164の水頭圧を考慮



3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

①S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

ベント管止水状態でのベント管の耐震性評価結果

表 ベント管応力評価結果のまとめ

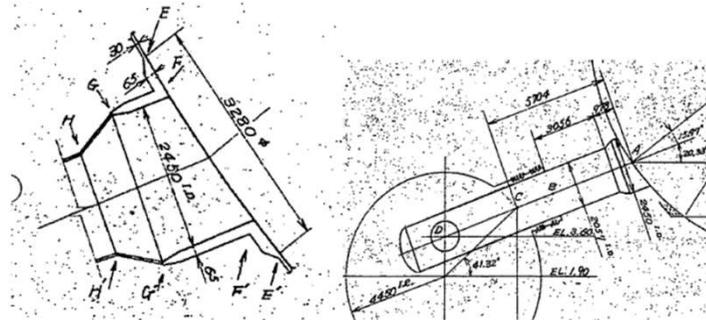


表 3.2.1 応力評価点

応力評価点	評価部位	材料
評価点E	インサートプレートのドライウェル取付部	SGV480 相当
評価点F	ベント管のドライウェル取付部 (胴側)	SGV480 相当
評価点G	円錐管とベントノズルとの境界	SGV480 相当
評価点H	短管と円錐管との境界	SGV480 相当

図 応力評価点

応力評価点F(ベント管のドライウェル取付部)の一次+二次応力において設計・建設規格の許容応力を上回るが、Su値以下の値となっている。

それ以外の部位では、発生応力は設計・建設規格の許容応力を下回る。

評価箇所	評価項目	発生応力値 MPa	許容応力値 MPa	裕度	備考
応力評価点 E (Node 1, 301)	一次膜+曲げ応力 PL+Pb	169	424	2.50	
	一次+二次応力 PL+Pb+Q	330	471	1.42	Su 値
	一次+二次応力 PL+Pb+Q	330	393	1.19	
応力評価点 E (Node 101, 201)	一次膜+曲げ応力 PL+Pb	174	424	2.43	
	一次+二次応力 PL+Pb+Q	371	471	1.26	Su 値
	一次+二次応力 PL+Pb+Q	371	393	1.05	
応力評価点 F (Node 1, 301)	一次膜+曲げ応力 PL+Pb	180	424	2.35	
	一次+二次応力 PL+Pb+Q	378	471	1.24	Su 値
	一次+二次応力 PL+Pb+Q	378	393	1.03	
応力評価点 F (Node 101, 201)	一次膜+曲げ応力 PL+Pb	186	424	2.27	
	一次+二次応力 PL+Pb+Q	428	471	1.10	Su 値
	一次+二次応力 PL+Pb+Q	428	393	0.91	
応力評価点 G/G'	一次膜+曲げ応力 PL+Pb	36	424	11.77	
	一次+二次応力 PL+Pb+Q	126	471	3.73	Su 値
	一次+二次応力 PL+Pb+Q	126	393	3.11	
応力評価点 H/H'	一次膜+曲げ応力 PL+Pb	58	424	7.31	
	一次+二次応力 PL+Pb+Q	245	471	1.92	Su 値
	一次+二次応力 PL+Pb+Q	245	393	1.60	

②平成28年度実施 地震応答解析手法の開発実施内容

3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

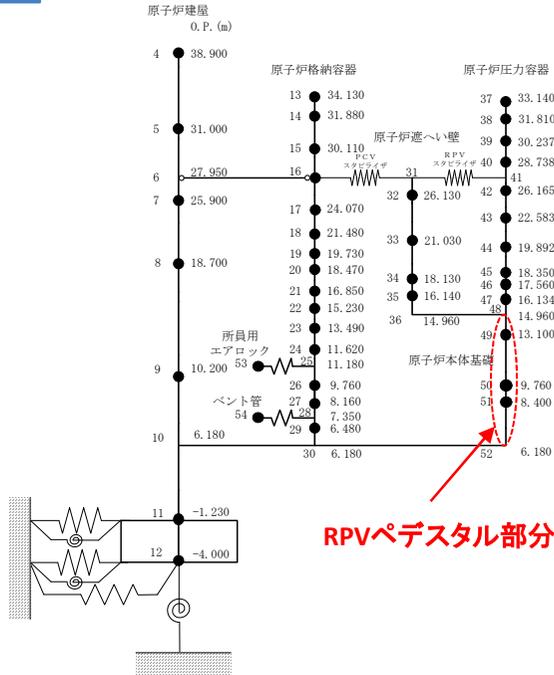
No.175

参考資料②

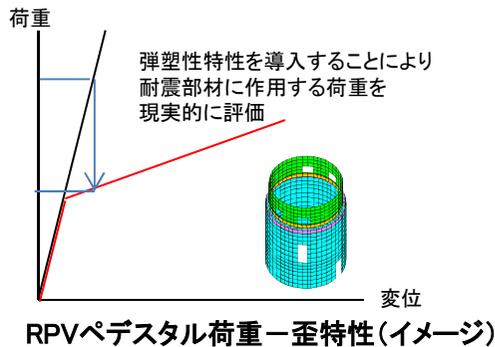
④地震応答解析手法の開発及び検証

1F-1

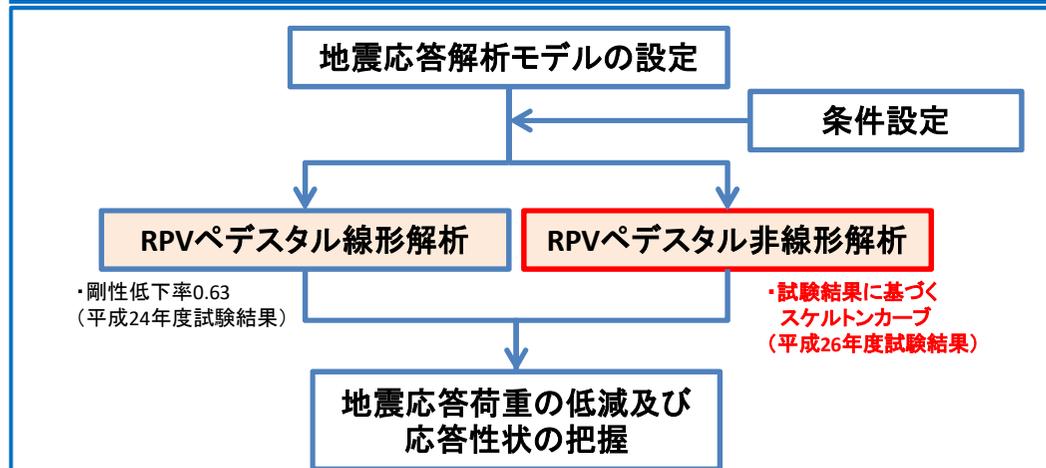
・RPVペDESTAL非線形解析手法の適用に対する地震荷重低減化に向けた検討



RPV-PCV/RPV系連成モデル(1F-1)



◆ 目的: RPVペDESTALの高温耐力評価試験結果から得られた荷重-歪特性を考慮した地震応答解析を実施し、耐震裕度の小さな設備に対する地震荷重低減に向けた検討を行う。



【解析条件】: 先年度実施(気中取り出し)モデルをベース

◆ RPVペDESTAL

i) ベースケース: 高温履歴を考慮した剛性低下(0.63)を考慮した **線形解析(弾性解析)**

ii) 高温試験剛性評価ケース: RPVペDESTALの高温耐力評価試験結果から得られた荷重-歪特性を考慮した **非線形解析(弾塑性解析)**

◆ その他の条件

- ① 腐食条件: 40年後
- ② 減衰定数: 設計用減衰定数
- ④ オペフロ付加重量(想定値):
 - ・燃料デブリ取り出しコンテナ(遮蔽設備等を含む): 約7000ton
 - ・燃料デブリ取り出し設備(取り出し装置、セル等): 約6100ton

3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④地震応答解析手法の開発及び検証

参考資料②

地震荷重の低減に向けた地震応答解析結果

1F-1

◇RPVペダスタルの高温耐力評価試験結果を考慮したスケルトンカーブの初期勾配と等価剛性低下率の勾配は、
ほぼ同程度であり、発生地震荷重も同等であることを確認。

◇現行Ssでは第一折れ点以内で応答がとどまり、1.5Ss条件では第一折れ点を超過することを確認。

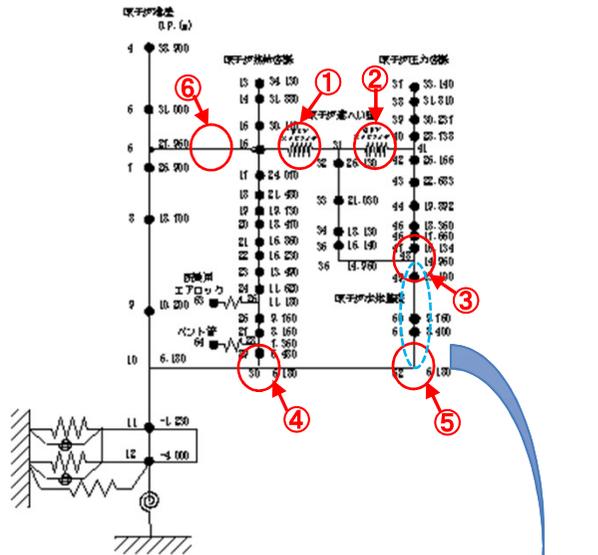


図 1F-1地震応答解析モデル例

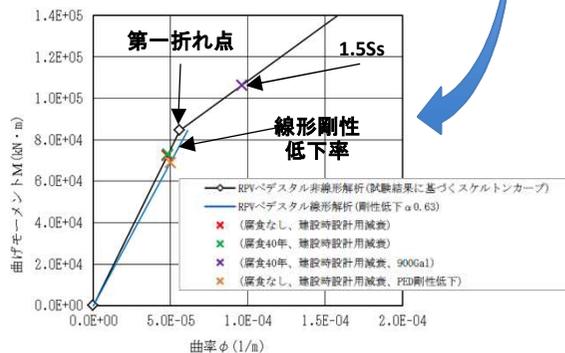


図 1F-1RPVペダスタル基部のスケルトンカーブ(M-φ)

構造物名	地震荷重	解析条件				
		①H28-2-1	②H28-2-2	③H28-2-3 (ベース)	④H28-2-4	⑤H28-2-5
		オベフロ付加設備 6100(t)				
		腐食なし		40年後		
		RPVペダスタル 剛性低下 (0.63)	RPVペダスタル 非線形	RPVペダスタル 剛性低下 (0.63)	RPVペダスタル 非線形	
		減衰定数 建設時検討用				
		現行Ss			現行Ss × 1.5	
①原子炉格納容器 スタビライザ	ばね反力 [kN]	4280	3930	4280	3930	5020
②原子炉圧力容器 スタビライザ	ばね反力 [kN]	2070	1970	2080	1960	2610
③原子炉圧力容器 支持スカート	せん断力 [kN]	2280	2320	2310	2330	3540
	モーメント [kN・m]	22300	22600	22400	22900	36800
④原子炉格納容器 基部	せん断力 [kN]	7720	7690	7490	7470	10200
	モーメント [kN・m]	68100	67800	54300	54100	107000
⑤原子炉本体基礎 (RPVペダスタル)	せん断力 [kN]	7490	7510	7540	7550	10300
	モーメント [kN・m]	72100	74100	72700	74800	107000
⑥シヤラグ	ばね反力 [kN]	3080	2870	3560	3340	3600

注: RPVペダスタルの非線形特性は、RPVペダスタルの高温耐力評価試験結果から得られた荷重-歪特性を考慮し、JEAC4601の評価式からスケルトンカーブを設定

3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.177

参考資料②

1F-1

④地震応答解析手法の開発及び検証

燃料デブリ取り出し工法と上部構造物の荷重増加に伴う地震応答解析結果

◇燃料デブリ取り出しに係る上部構造物の重量が大きくなると主要構造物の地震荷重は増加することを確認。

⇒機器側への地震荷重低減のためには、オペフロ階の上部構造重量の低減化が必要

◇40年後、最大積載上部構造荷重を想定しても、燃料デブリ取り出し工法の地震応答解析結果に与える影響は小。

⇒燃料デブリ取り出し工法の差において、地震応答に与える影響は小さい

目的: 燃料デブリ取り出し工法と上部構造の影響

◆先年度までの確認事項(オペフロ付加荷重6100t)

- ・オペフロ付加荷重は地震応答に影響大
- ・燃料デブリ取り出し工法による地震応答の差は小

◆今年度解析内容

- ・上部構造をコンテナ等の積載荷重を考慮した荷重増加条件での燃料デブリ取り出し工法の地震応答への影響

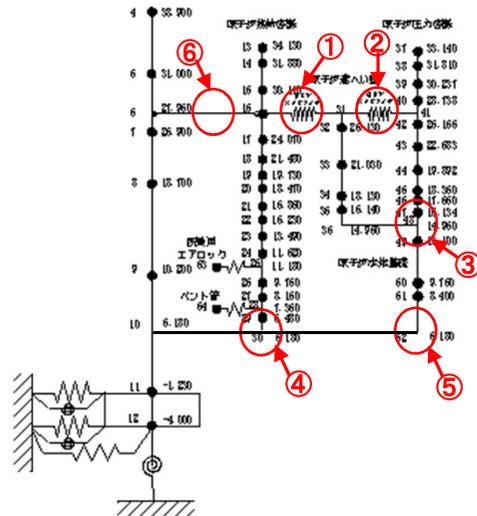


図 1F-1地震応答解析モデル例

構造物名	地震荷重	解析条件		
		①H28-3-1	②H28-3-2	③H28-2-3 (ベース)
		オペフロ付加設備 (6100(t)+7200(t))		オペフロ付加設備 (6100(t))
		40年後		
RPVヘッドスル 剛性低下(0.63)				
		燃料デブリ上取り出し	燃料デブリ横取り出し	燃料デブリ上取り出し
①原子炉格納容器スタビライザ	ばね反力 [kN]	4480	4470	4280
②原子炉圧力容器スタビライザ	ばね反力 [kN]	2570	2570	2080
③原子炉圧力容器支持スカート	せん断力 [kN]	2510	2540	2310
	モーメント [kN・m]	28800	29000	22400
④原子炉格納容器基部	せん断力 [kN]	7650	7620	7490
	モーメント [kN・m]	81200	83600	54300
⑤原子炉本体基礎 (RPVベDESTAL)	せん断力 [kN]	8020	7880	7540
	モーメント [kN・m]	81700	83300	72700
⑥シヤラグ	ばね反力 [kN]	3490	3570	3560

注: 燃料デブリ取り出し工法は、気中取り出し・上部取り出し工法を主とし、横取り出し工法においても、将来的に上部からの解体撤去を念頭において、設備撤去はしていない。

③平成28年度実施 RPVペDESTALの
耐震性影響評価手法の開発
—構造解析・評価(概略評価)

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発ー構造解析・評価

(i)1号機

概略評価(平成28年度実施)

■ 目的

- 詳細評価(3次元FEM弾塑性解析による評価)での実施ケースの選定に資するため、事前に燃料デブリの侵食パターンを変えた概略評価(曲げおよびせん断に対する検討)をパラメトリックに実施し、各ケースが評価結果に与える感度を評価する。

■ 実施項目

- ①ファイバーモデルによる曲げに対する断面解析
- ②鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(日本建築学会, 2010)19条に基づく、せん断に対する検討

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

概略評価(平成28年度実施)

■ 実施ケース

- 全12ケースを実施する。
- パラメータは、温度条件・鉄筋の高温腐食量・燃料デブリ侵食である。

No.	解析概要	温度条件	鉄筋の高温腐食量	燃料デブリ侵食	荷重条件
1	標準ケース	内側800℃ 外側800℃	800℃280時間の 腐食量を考慮	無し	H28地震荷重: 気中(現状水位) 脚部モーメント: 73,000kN・m 脚部せん断力: 7,500kN
2	高温のみ考慮	内側1200℃ 外側600℃※	事象進展解析結果の 温度履歴に基づき評価	〃	
3	高温+侵食A	〃	〃	パターンA	
3A-1	高温+侵食A-1	〃	〃	パターンA-1	
3A-2	高温+侵食A-2	〃	〃	パターンA-2	
3A-3	高温+侵食A-3	〃	〃	パターンA-3	
3A-4	高温+侵食A-4	〃	〃	パターンA-4	
4	高温+侵食B	〃	〃	パターンB	
4B-1	高温+侵食B-1	〃	〃	パターンB-1	
4B-2	高温+侵食B-2	〃	〃	パターンB-2	
4B-3	高温+侵食B-3	〃	〃	パターンB-3	
4B-4	高温+侵食B-4	〃	〃	パターンB-4	

※ 概略評価では、断面内で変化する材料物性を定義できないので、一律800℃の温度による劣化を考慮する。
また、内側から400mmの断面(線形温度分布で1000℃以上の領域)のコンクリート及び鉄筋はないものとする。

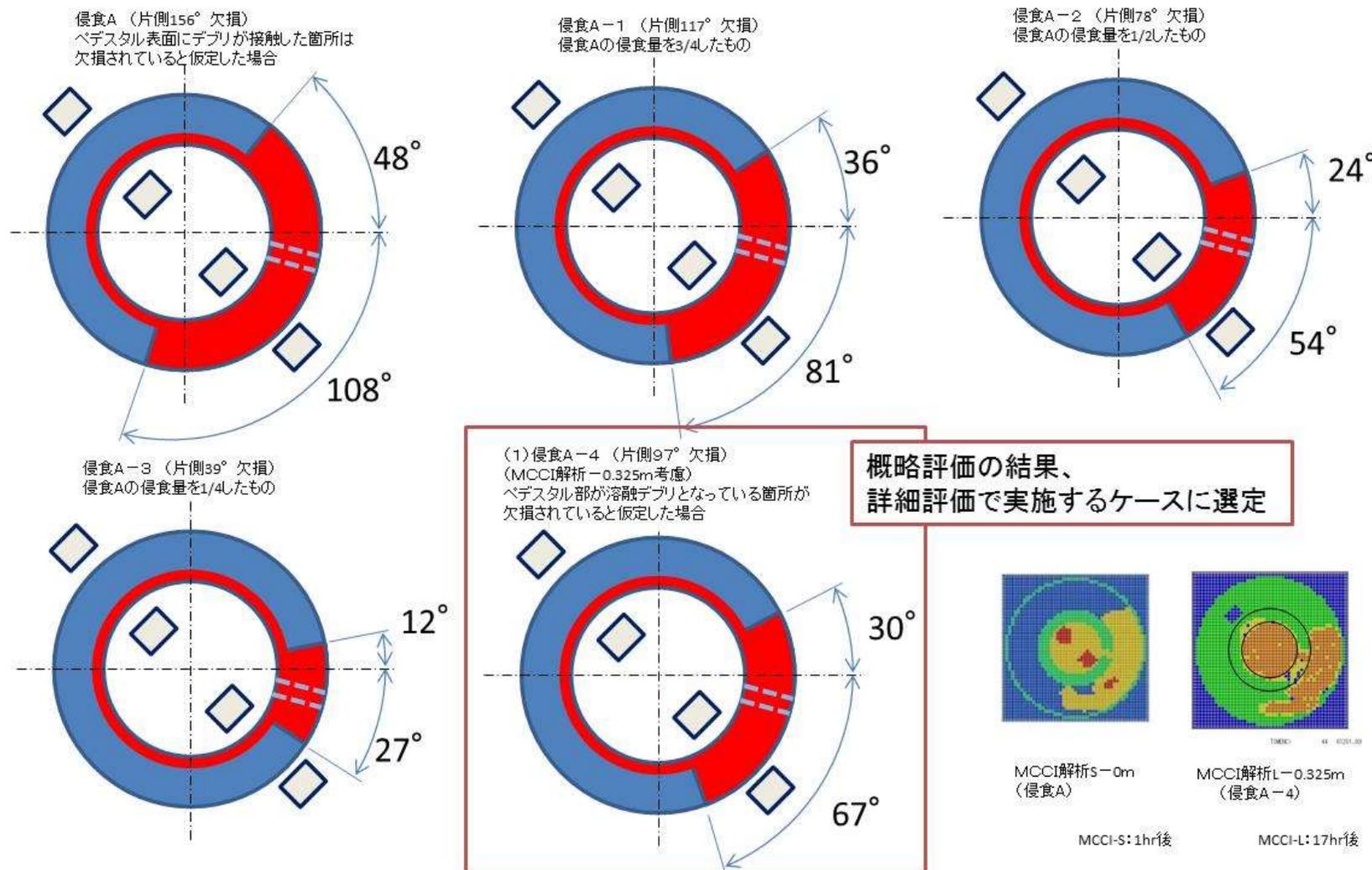
(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

概略評価(平成28年度実施)

■ 燃料デブリ侵食パターンA



(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.182

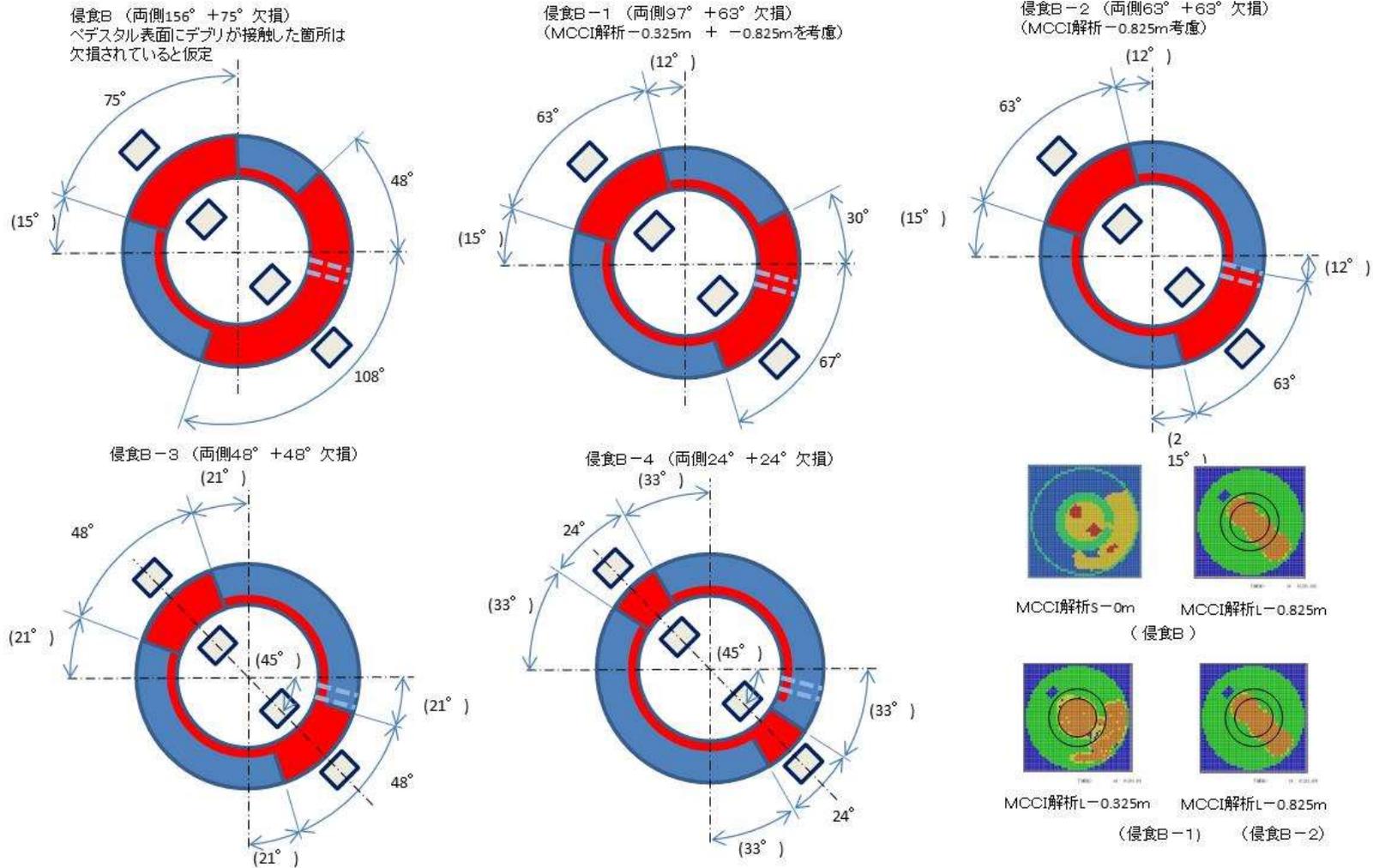
④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

参考資料③

(i)1号機

概略評価(平成28年度実施)

■ 燃料デブリ侵食パターンB



(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

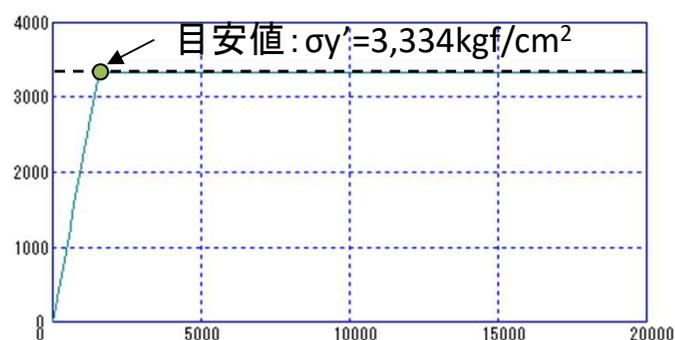
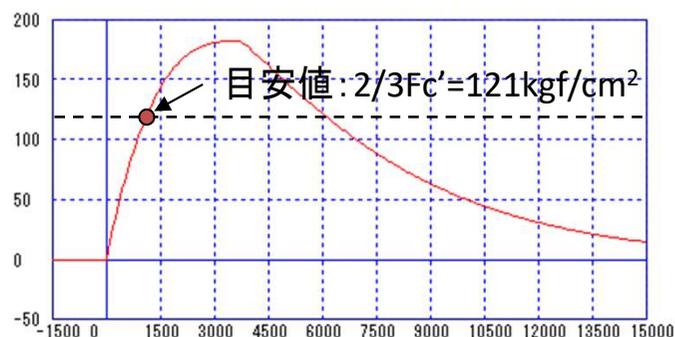
④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

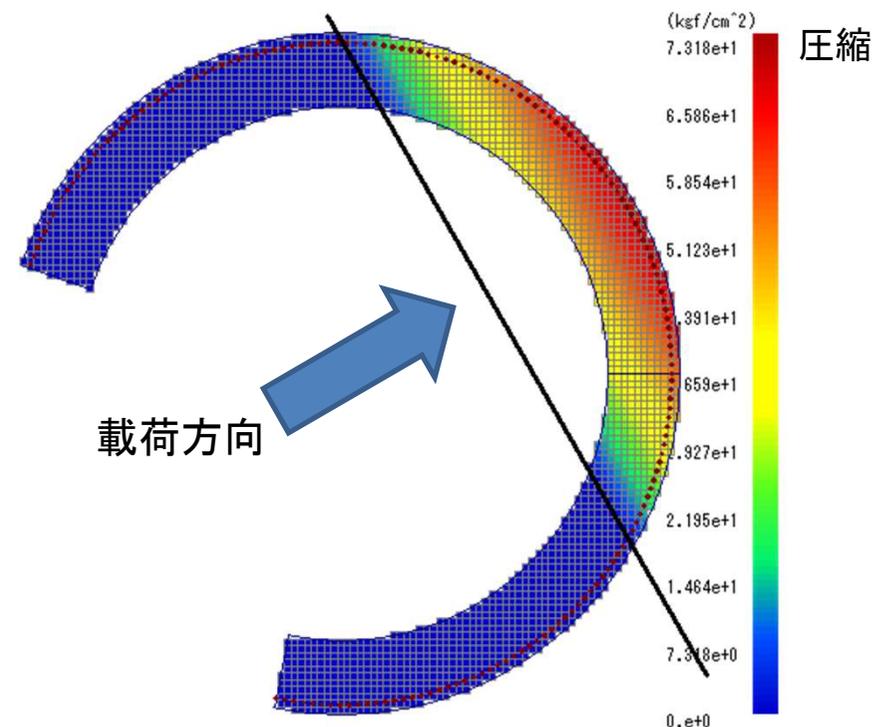
概略評価(平成28年度実施)

■ 曲げおよび軸力に対する概略検討

- ファイバーモデルを用いて、曲げおよび軸力に対する断面解析を実施する。
- 平面保持仮定に基づく解析であり、評価の目安値は以下とする。
- 荷重の方向は最弱断面に対して検討する。軸力は上向きのみ検討する。



応力ひずみ特性
(上:コンクリート、下:鉄筋)



解析結果の一例(コンクリートの応力度)

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.184

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

参考資料③

(i)1号機

概略評価(平成28年度実施)

■ 曲げおよび軸力に対する概略検討結果

- ケース1とケース2は目安値以内となった。
- ケース3とケース4は保有可能な曲げモーメントが地震力を下回ったため、目安値を上回った。追加ケース(3A-1~4、4B-1~4)については、3A-1と4B-1以外は目安値以内となった。

【凡例】

黄色:評価基準値を上回る

No.	解析概要	燃料デブリ侵食	圧縮側コンクリートの応力		引張側鉄筋の応力	
			発生値 σ_b (kgf/cm ²)	応力度比*1 σ_b/f_c	発生値 σ_t (kgf/cm ²)	応力度比*1 σ_t/f_t
1	標準ケース	無し	32.9	0.27	686	0.23
2	高温のみ考慮	〃	41.4	0.34	867	0.26
3	高温+侵食A	パターンA	121以上	1.00以上	3334以上	1.00以上
3A-1	高温+侵食A-1	パターンA-1	86.9	0.72	3334以上	1.00以上
3A-2	高温+侵食A-2	パターンA-2	63.5	0.52	2145	0.64
3A-3	高温+侵食A-3	パターンA-3	49.8	0.41	1339	0.40
3A-4	高温+侵食A-4	パターンA-4	73.2	0.60	2737	0.82
4	高温+侵食B	パターンB	121以上	1.00以上	3334以上	1.00以上
4B-1	高温+侵食B-1	パターンB-1	111.9	0.92	3334以上	1.00以上
4B-2	高温+侵食B-2	パターンB-2	89.3	0.74	2438	0.73
4B-3	高温+侵食B-3	パターンB-3	73.1	0.60	1780	0.53
4B-4	高温+侵食B-4	パターンB-4	53.7	0.44	1198	0.36

*1 応力度比=発生応力度/目安値

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

概略評価(平成28年度実施)

■ せん断に対する概略検討

- 評価の目安とするせん断力 Q_a は、鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(2010) 19条に従い、以下のいずれか大きい方とする。

$$Q_{a1} = 1/\alpha \cdot A \cdot f_s$$

$$Q_{a2} = 1/\alpha \cdot A \cdot P_s \cdot f_t$$

ここで、	Q_{a1}, Q_{a2}	: 許容せん断力(KN)
	A	: 燃料デブリによる侵食を考慮したコンクリート断面積(m ²)
	α	: 形状係数(2.0)
	P_s	: 腐食を考慮した配筋比(%)
	f_s	: コンクリートの短期許容せん断応力度(N/mm ²)
	f_t	: 鉄筋の短期許容せん断応力度(N/mm ²)

- 荷重の方向は最弱断面に対して検討する。(ウェブ壁断面積が少なくなる方向)
- ウェブ壁のみ有効の場合($\alpha=2.0$)と、全断面有効の場合($\alpha=1.0$)を実施

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.186

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発ー構造解析・評価

参考資料③

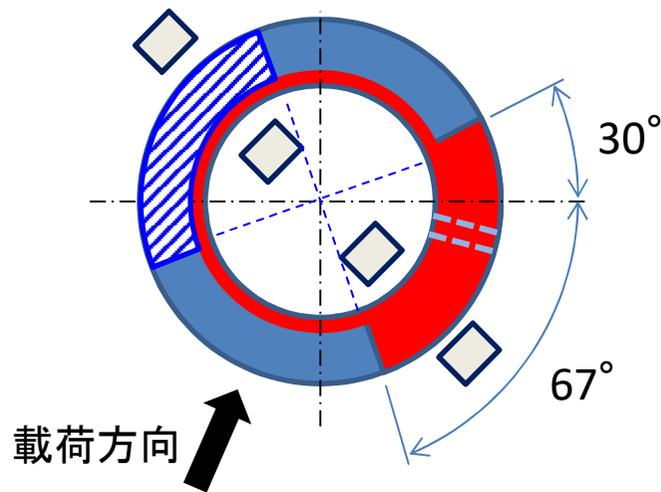
(i)1号機

概略評価(平成28年度実施)

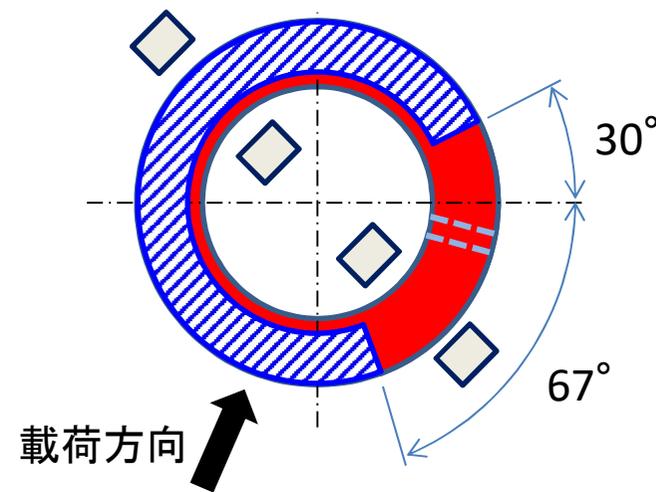
■ 有効せん断断面積の考え方

- RC規準によれば、円筒壁の有効せん断断面積はウェブ壁のみ有効
- ウェブ壁のみ有効の場合($\alpha=2.0$)と、全断面有効の場合($\alpha=1.0$)を実施

 有効せん断断面積の範囲を示す



(ウェブ壁のみ有効: $\alpha=2.0$)



(全断面有効: $\alpha=1.0$)

侵食パターン3A-4における有効せん断断面積の例

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

概略評価(平成28年度実施)

■ せん断に対する概略検討結果(ウェブ壁のみ有効: $\alpha=2.0$)

- ウェブ壁のみ有効とすると、ケース1のみ目安値以内となった。
- 侵食のないケース2についても目安値を上回った。

【凡例】
黄色: 目安値を上回る

No.	解析概要	燃料デブリ侵食	コンクリート&鉄筋のせん断応力比※	コンクリート&鉄筋のせん断応力比※
1	標準ケース	無し	0.20	0.76
2	高温のみ考慮	〃	0.43	1.06
3	高温+侵食A	パターンA	0.85	2.12
3A-1	高温+侵食A-1	パターンA-1	0.85	2.12
3A-2	高温+侵食A-2	パターンA-2	0.75	1.87
3A-3	高温+侵食A-3	パターンA-3	0.55	1.36
3A-4	高温+侵食A-4	パターンA-4	0.85	2.12
4	高温+侵食B	パターンB	5.08	12.68
4B-1	高温+侵食B-1	パターンB-1	1.70	4.24
4B-2	高温+侵食B-2	パターンB-2	1.42	3.53
4B-3	高温+侵食B-3	パターンB-3	0.91	2.27
4B-4	高温+侵食B-4	パターンB-4	0.58	1.45

※ せん断応力比=脚部発生せん断力 Q /目安値 $\max(Q_{a1}, Q_{a2})$

(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

④RPVペDESTALの耐震性影響評価手法の開発—構造解析・評価

(i)1号機

概略評価(平成28年度実施)

■ せん断に対する概略検討結果(全断面有効: $\alpha=1.0$)

- ケース1以外について侵食部を除く全断面有効とした場合を参考として実施
- ケース4以外は目安値以内となった。

【凡例】
黄色: 目安値を上回る

No.	解析概要	燃料デブリ侵食	コンクリート&鉄筋のせん断応力比*	コンクリート&鉄筋のせん断応力比*
1	標準ケース	無し	0.20	0.76
2	高温のみ考慮	〃	0.22	0.53
3	高温+侵食A	パターンA	0.38	0.94
3A-1	高温+侵食A-1	パターンA-1	0.32	0.79
3A-2	高温+侵食A-2	パターンA-2	0.28	0.68
3A-3	高温+侵食A-3	パターンA-3	0.24	0.60
3A-4	高温+侵食A-4	パターンA-4	0.29	0.73
4	高温+侵食B	パターンB	0.60	1.48
4B-1	高温+侵食B-1	パターンB-1	0.39	0.96
4B-2	高温+侵食B-2	パターンB-2	0.33	0.82
4B-3	高温+侵食B-3	パターンB-3	0.29	0.73
4B-4	高温+侵食B-4	パターンB-4	0.25	0.62

* せん断応力比 = 脚部発生せん断力 Q / 目安値 $\max(Q_{a1}, Q_{a2})$

参考資料④ 略語説明

略語	英語	日本語
1F-1,2,3	Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Unit No.1,2,3	福島第1原子力発電所 第1, 2, 3号機
S/C	Suppression Chamber	サプレッションチャンバ
PCV	Primary Containment Vessel	原子炉格納容器
RPV	Reactor Pressure Vessel	原子炉圧力容器
R/B	Reactor Building	原子炉建屋
D/W	Drywell	ドライウェル
MAAP	Modular Accident Analysis Program	モジュール事故解析プログラム
T.P.	Tokyo Peil	東京湾平均海面 (Peil(オランダ語)は水準線、基準面のこと)