

平成26年度補正予算 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

平成28年度成果報告

平成29年7月

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)

目次

1. 目的
2. 実施概要
3. 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
 - ①S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発
 - ②ペデスタル部の耐震性・影響評価手法の開発
 - ③RPVペデスタルの高温鉄筋腐食試験等の実施
 - ④地震応答解析手法の開発及び検証
4. まとめ
5. 実施体制

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
OP.	Onahama Peil	小名浜港平均海面 (Peil (オランダ語) は水準線、基準面のこと)
XRD	X-ray diffraction	X線回折法
EPMA	Electron Probe Micro Analyzer	電子線マイクロアナライザ
SEM	Scanning Electron Microscope	走査型電子顕微鏡

1. 目的

【プロジェクトのゴール】

燃料デブリ取り出し時の大規模地震発生で万一重要機器が損傷したとしても、**原子力安全(放射性物質の閉じ込め、冷却、未臨界)が確保**され、なおかつ**事故収束ができるよう防止・抑制策を前もって準備**しておくこと。

【達成すべき安全要求】

- **放射性物質の閉じ込め:目標 敷地境界1mSv/年**
 - ・PCVからR/Bへの汚染水漏えい量が管理可能なこと
 - ・負圧維持による放射性物質の管理が可能なこと
- **冷却:大規模地震時においても冷却機能が喪失しないこと**
 - ・デブリ冷却に必要な水位を維持すること→注水システムの維持
- **未臨界:大規模地震時においても再臨界の抑制**
 - ・未臨界維持のための水位制御が必要

【プロジェクトの目的】

- 燃料デブリ取り出し方針決定や方法確定に資するため、**大規模地震時の重要機器の安全シナリオを構築**し、その影響を防止・抑制する対策案を検討する。
- 今後想定される廃炉作業の各プロセスにおいて、事故後の温度や燃料デブリの状況の最新知見を考慮した、**RPV/PCVの耐震性影響評価技術を開発**する。

2. 実施概要

(1)大規模地震時における安全シナリオの構築

号機別に燃料デブリ取り出し状態(中間状態を含む)における大規模地震による大型機器への影響評価を行う。また万一、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い、その場合の対策(防止策、緩和策)案を考察する。2016年度末及び2017年度の第1四半期(2017年6月)までに、それまでの検討結果をまとめ、安全シナリオとして中間評価において提示する。

(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

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、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。

S/C脚部について、詳細解析(弾塑性解析)が必要となるものを選定し、耐震性評価を行う。

②RPVペデスタル部の耐震性・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する。

RPVペデスタルについて、事故時の格納容器内温度やデブリの拡がりに関する最新知見を反映した耐震性評価を行う。

2. 実施概要(安全シナリオの構築について)

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。

【イベントツリー作成と安全シナリオの構築】

燃料デブリ取り出し時における大規模地震を起因事象とするイベントツリーを作成し、

地震による潜在的なリスクを整理する^[*]。また、イベントツリーに基づきリスクの比較検討を行うことで、対策を強化すべき事象を抽出し、安全シナリオの高度化(前述の”対策を強化すべき事象”への対応の検討)を図る指標とする。

上述のイベントツリー作成および安全シナリオ構築については、関連プロジェクトの被ばく評価およびシステム検討の進捗を反映し、適宜見直しを行う。

[*] 影響度(公衆被ばく量など)については、関連プロジェクト(燃料デブリ取り出しPJ、臨界管理PJ)での評価を参考とする。

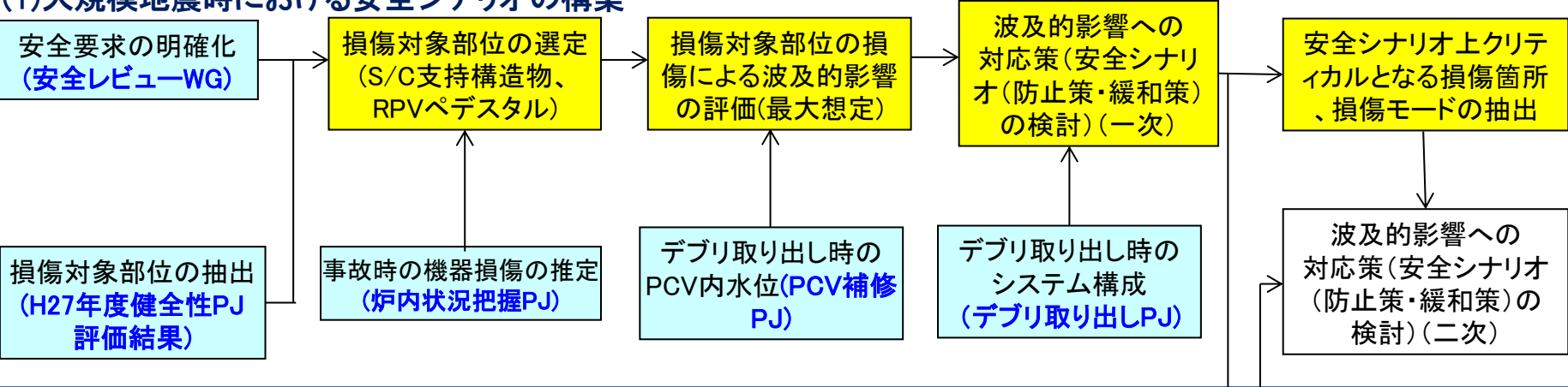
2. 実施概要(安全シナリオの構築について)

【大規模地震時における安全確保の考え方】

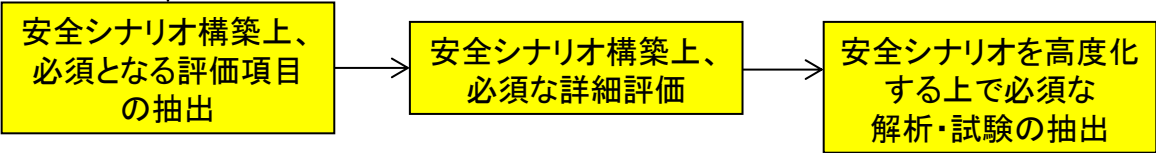
- ① 原子力安全を確保するための基本的な方針を以下に示す。
 - リスク[事象の発生頻度×影響度(被ばく線量)]に応じた設備の信頼性を確保する。
 - ALARA(As Low As Reasonably Achievable)の観点での合理性に配慮する。
- ② 安全シナリオの構築においては、1F固有の状況を考慮する。
- ③ 大規模地震(600Gal)に対しては、敷地境界での被ばく線量を基準値以下とすることを目的とした安全シナリオを検討する。
 - ⇒事象の発生頻度を踏まえた安全シナリオとするため、耐震評価上裕度が低い箇所(S/C脚部、RPVペデスタル)については、耐震評価を実施する。
- ④ 600Galを超える地震に対しては、公衆の被ばく量低減を目的とし、機動的対応を中心とした安全シナリオを検討する。

2. 実施概要(全体検討フロー)

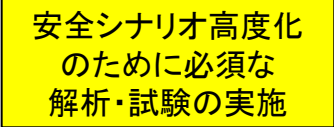
(1)大規模地震時における安全シナリオの構築



(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



(3) 安全シナリオの高度化



2. 実施概要(中長期ロードマップにおける位置付け)

- 燃料デブリ取り出しに向けた環境整備の一環
- 平成29年度(2017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

東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃止措置等に向けた主要な目標工程

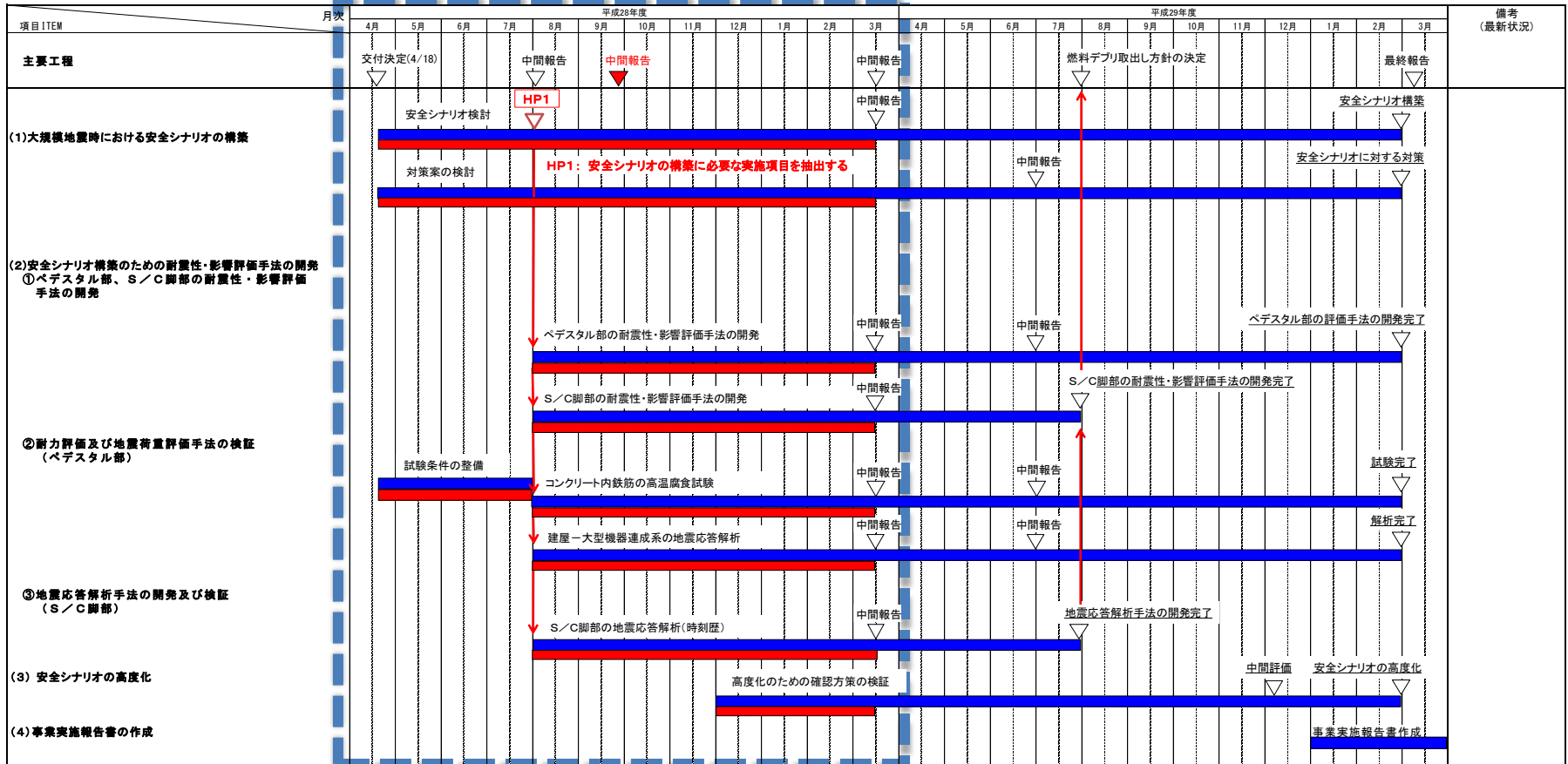
2015年6月

分野	これまでの主な取組	今後の取組					
		第2期(燃料デブリ取り出し開始まで)				第3期(廃止措置完了まで)	
		現在	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度
							第2期終了(2021年12月)
汚染水対策							
取り除く	多核種除去設備による汚染水浄化等			敷地境界の追加的な実効線量を1mSv/年まで低減完了 多核種除去設備等で処理した水の長期的取扱いの決定に向けた準備の開始			
近づけない	地下水バイパスによる地下水の汲み上げ等			陸側遮水壁の凍結閉合完了/予定箇所の9割超のフェーシング完了 建屋流入量を100m3/日未満に抑制			
漏らさない	タンクの増設等			高濃度汚染水を処理した水の貯水は全て溶接型タンクで実施			
滞留水処理	各建屋の滞留水状況の調査等		建屋水位の引下げ/循環注水ラインからの切り離し/滞留水の浄化・除去			建屋内滞留水の処理完了 滞留水の放射性物質量の半減	
燃料取り出し	4号機は取り出し完了(2014.12)					取り出した燃料の処理・保管方法の決定	
1号機	建屋カバー解体等		ガレキ撤去等	カバー設置等		燃料取り出し	
2号機	準備工事		建屋上部解体・改造等				格納容器上部補修(止水方法確定)
			解体・改造範囲の決定	プランの選択	プラン① コンテナ設置等	燃料取り出し	
				プラン② カバー設置等		燃料取り出し	
3号機	ガレキ撤去等		カバー設置等			燃料取り出し	
燃料デブリ取り出し			取り出し方針の決定		初号機の取り出し方法の確定		初号機の取り出し開始
			原子炉格納容器内の状況把握/燃料デブリ取り出し工法の検討等				燃料デブリの取り出し/処理・処分方法の検討等
廃棄物対策							
保管管理	線量率に応じた分類保管/保管管理計画の策定等		保管管理計画に沿った保管管理の実施 減容処理焼却炉の設置		固体廃棄物貯蔵庫第9棟の設置		
処理・処分					処理・処分に関する基本的な考え方の取りまとめ		処理処分の技術的見通し
			性状把握の実施、既存技術の調査/固体廃棄物の性状把握等を通じた研究開発等				

燃料デブリ取り出し方針の決定

2. 実施概要(進捗状況)

圧力容器／格納容器の耐震性・影響評価技術の開発



H28年度実施スケジュール

3. 実施内容

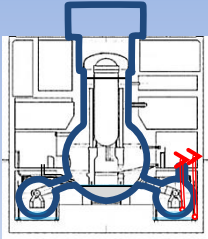
3. (1)大規模地震時における安全シナリオの構築

①1F-1 燃料デブリ取り出し時の想定PCV水位レベルと止水範囲シナリオ

「原子炉格納容器漏えい箇所の補修技術の開発PJ」

S/C脚部補強無し想定ケース

ケース1 DW水位OP.6467
(ベント管付根下端レベル)

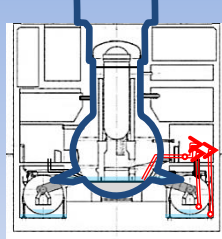


- ・止水なし
- ・S/C脚部補強無し

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OP.7300
(真空破壊ライン付根レベル)

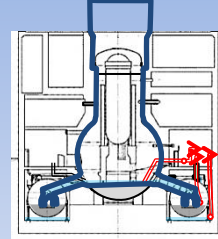


- ・ベント管止水
- ・S/C脚部補強無し

耐震性○(弾塑性解析評価OK)*1

課題
・ベント管止水方法の開発要
・D/Wからの取水方法

ケース2-2 DW水位OP.7300
(真空破壊ライン付根レベル)

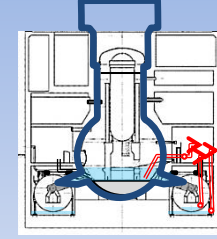


- ・ストレーナ+クエンチャ+ダウンカム止水
- ・真空破壊ライン止水
- ・S/C脚部補強無し

耐震性未評価

課題
・ストレーナ・ダウンカム止水方法の開発要
・D/Wからの取水方法

ケース3 DW水位OP.9000
(トラス室天井面レベル)



- ・ベント管+真空破壊ライン止水
- ・S/C脚部補強無し

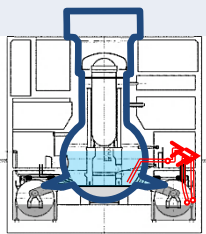
耐震性○(弾塑性解析評価OK)*1

課題
・ベント管止水方法の開発要
・D/Wからの取水方法

耐震性未評価のケース2-2(DW水位はトラス室天井面レベル)について、評価を実施する。

S/C脚部補強有り想定ケース

ケース4 DW水位OP.14000
(電気配線貫通部より下のレベル)

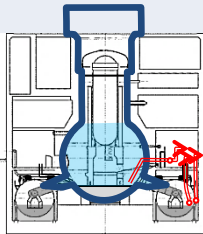


- ・ベント管+真空破壊ライン+クエンチャ+ストレーナ止水
- ・S/C脚部補強有り

耐震性○(弾性解析評価OK
(ケース7代表))

課題
・上部補修止水法の開発要
・ベント管止水方法の開発要
・D/Wからの取水方法

ケース5 DW水位OP.20000
(炉心支持板上面レベル)

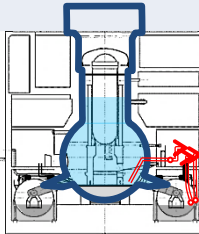


- ・ベント管+真空破壊ライン+クエンチャ+ストレーナ止水
- ・S/C脚部補強有り

耐震性○(弾性解析評価OK
(ケース7代表))

課題
・上部補修止水法の開発要
・ベント管止水方法の開発要
・D/Wからの取水方法

ケース6 DW水位OP.24000
(上部格子板上面レベル)(シアラグより下)

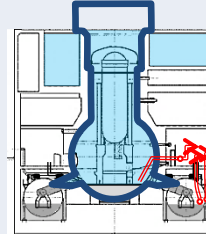


- ・ベント管+真空破壊ライン+クエンチャ+ストレーナ止水
- ・S/C脚部補強有り

耐震性○(弾性解析評価OK
(ケース7代表))

課題
・上部補修止水法の開発要
・ベント管止水方法の開発要
・D/Wからの取水方法

ケース7 DW水位OP.38595
(ウェル満水)



- ・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
・上部補修止水法の開発要
・ベント管止水方法の開発要
・D/Wからの取水方法

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

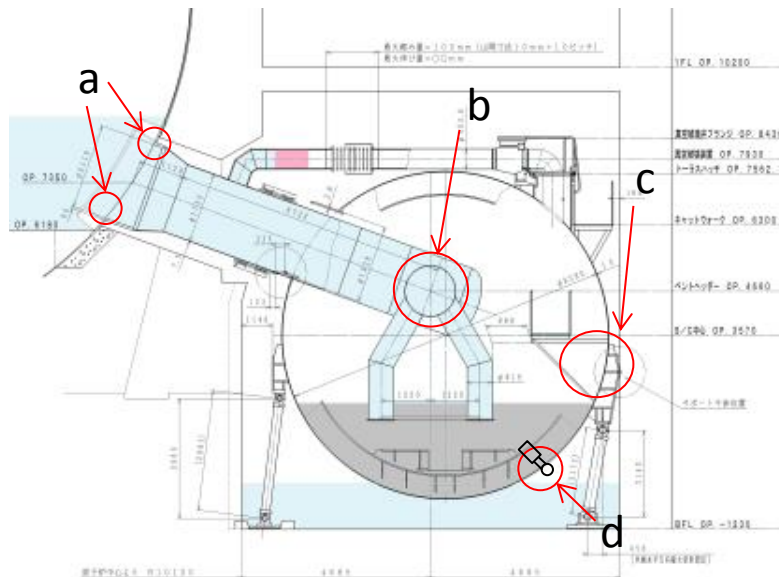
注)耐震性評価はS/C脚部の耐震性評価結果を示す。15年後の腐食量を想定した結果である。詳細評価結果については補足資料に示す。

*1: 2倍勾配法(設計・建設規格JSME S NC1-2005)を適用、耐震条件は600gal

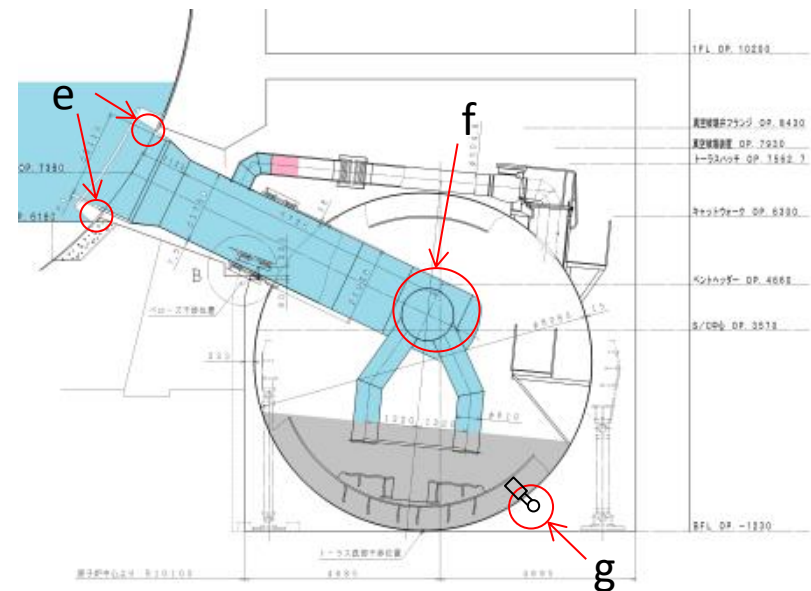
3. (1)大規模地震時における安全シナリオの構築

②1F-1 S/C脚部損傷に伴う開口想定条件

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

3.(1)大規模地震時における安全シナリオの構築

③ 1F-1 S/C脚部損傷時波及的影響評価

想定	想定事象	波及的影響	備考
水平方向移動	【影響a】 ベント管とPCVシェルの接合部の破損を想定	・トーラス室内水位上昇する。	
	【影響b】 ダウンカム付根部の破損を想定	【影響bのみの場合】 ・PCV外に汚染水の漏えいはない。	
	【影響c】 S/C脚部とシェルの接合部の破損を想定	【影響cのみの場合】 ・ストレーナ止水しているため、PCV外に漏えいしない。	
	【影響d】 接続配管・貫通部の破損を想定	【影響bとcが同時に起きた場合】 ・トーラス室内水位上昇する。	
		・ストレーナ止水しているため、PCV外に漏えいしない。	
鉛直方向移動	【影響e】 ベント管とPCVシェルの接合部の破損を想定	・トーラス室内水位上昇する。	
	【影響f】 ダウンカム付根部の破損を想定	・PCV外に汚染水の漏えいはない。	
	【影響g】 接続配管・接続配管貫通部の破損を想定	・ストレーナ止水しているため、PCV外に漏えいしない。	

S/C脚部が損傷すると、波及的影響によりトーラス室内水位が上昇するリスクが生じるが、水位制御により回避できるため安全シナリオ上問題はない。しかしながら**S/C脚部の耐震性を確保することが望ましい。**

3. (1)大規模地震時における安全シナリオの構築

④ 1F-2 燃料デブリ取り出し時の想定PCV水位レベルと止水範囲シナリオ

PCV補修PJの代表ケース3について、安全シナリオを検討する

ケース1-1 DW水位OP.5830 (ベント管付根下端レベル) ・止水なし ・S/C脚部補強無し 耐震性○(弾性解析評価OK) 課題 かけ流しでのデブリ取り出し工法	ケース2-1 DW水位OP.7300 (SRV排気ライン真空破壊弁下端レベル) ・ベント管止水 ・S/C脚部補強無し 耐震性○(弾性解析評価OK)*1 課題 S/Cの健全性確認 D/Wからの取水方法	ケース2-2 DW水位OP.7300 (SRV排気ライン真空破壊弁下端レベル) ・ベント管+ストレーナ止水 ・S/C脚部補強無し 耐震性○(弾塑性解析評価OK)*1 課題 S/Cの健全性確認 D/Wからの取水方法	ケース3-1 DW水位OP.9600 (トラス室天井面レベル) ・ベント管+クエンチャ+ストレーナ止水 ・S/C脚部補強無し 耐震性○(弾塑性解析評価OK)*1 課題 S/Cの健全性確認 D/Wからの取水方法	ケース3-2 DW水位OP.9600 (トラス室天井面レベル) ・ダウンカマ+真空破壊弁+クエンチャ+ストレーナ止水 ・S/C脚部補強無し 耐震性未評価 (弾塑性解析未評価) 課題 S/Cの健全性確認 D/Wからの取水方法	ケース3-3 DW水位OP.9600 (トラス室天井面レベル) ・ダウンカマ+クエンチャ+ストレーナ止水 ・S/C脚部補強無し 耐震性未評価 (弾塑性解析未評価) 課題 S/Cの健全性確認 D/Wからの取水方法
ケース4 DW水位OP.14000 (電気配線貫通部より下のレベル) ・ベント管+クエンチャ+ストレーナ止水 ・S/C脚部補強なし 耐震性○(弾塑性解析評価OK)*1 課題 上部補修止水法の開発要 S/Cの健全性確認 D/Wからの取水方法	ケース5 DW水位OP.20000 (炉心支持板上面レベル) ・ベント管+クエンチャ+ストレーナ止水 ・S/C脚部補強なし 耐震性○(弾塑性解析評価OK)*1 課題 上部補修止水法の開発要 S/Cの健全性確認 D/Wからの取水方法	ケース6 DW水位OP.24000 (上部格子板上面レベル)(シアラグより下) ・ベント管+エンチャ+ストレーナ止水 耐震性○(弾塑性解析評価OK)*1 課題 上部補修止水法の開発要 S/Cの健全性確認 D/Wからの取水方法	ケース7 DW水位OP.39920 (ウェル満水) ・ベント管+エンチャ+ストレーナ止水 ・S/C脚部補強なし 耐震性○(弾塑性解析評価OK)*1 課題 上部補修止水法の開発要 S/Cの健全性確認 D/Wからの取水方法	ベント管止水状態でのベント管付根部の評価は未実施 止水材重量考慮 ダウンカマ側の支持なし	

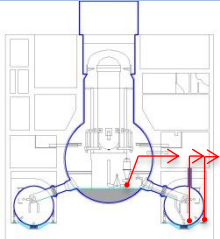
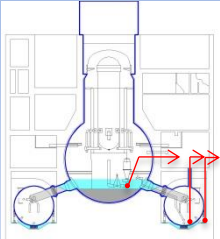
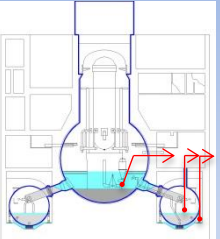
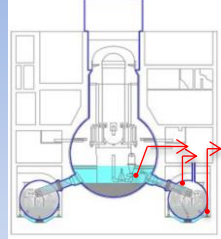
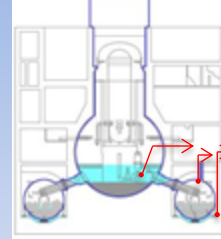
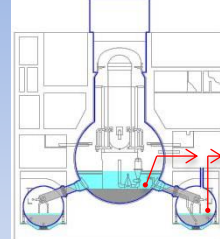
ケース3～7の場合は地下水水位逆転のリスク有

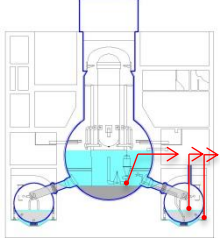
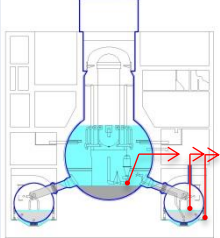
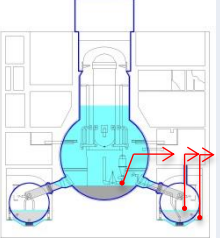
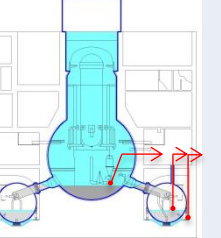
注) 耐震性評価はS/C脚部の耐震性評価結果を示す。15年後の腐食量を想定した結果である。詳細評価結果については補足資料に示す。
* 1: 2倍勾配法(設計・建設規格JSME S NC1-2005)を適用、耐震条件は600gal

3. (1)大規模地震時における安全シナリオ構築(検討条件②-2) No.16

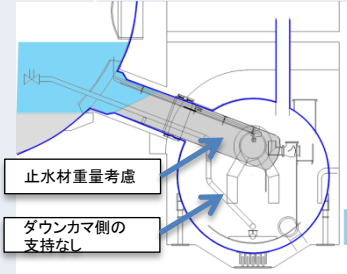
⑤ 1F-3 燃料デブリ取り出し時の想定PCV水位レベルと止水範囲シナリオ

PCV補修PJの代表検討ケース3について、安全シナリオを検討する

ケース1 DW水位OP.5830 (ベント管付根下端レベル)	ケース2 DW水位OP.7300 (真空破壊ライン付根レベル)	ケース3-1 DW水位OP.9600 (トラス室天井面レベル)	ケース3-2 DW水位OP.9600 (トラス室天井面レベル)	ケース3-3 DW水位OP.9600 (トラス室天井面レベル)	ケース4 DW水位OP.12000 (現状水位レベル)
					
・止水なし ・S/C脚部補強無し	・ベント管止水 ・S/C脚部補強無し	・ベント管+クエンチャ+ストレーナ止水 ・S/C脚部補強無し	・ダウンカマ+真空破壊弁+クエンチャ+ストレーナ止水 ・S/C脚部補強無し	・ダウンカマ+クエンチャ+ストレーナ止水 ・S/C脚部補強無し	・ベント管+クエンチャ+ストレーナ止水 ・S/C脚部補強無し
耐震性○(弾性解析評価OK)	耐震性○(弾性解析評価OK)*1	耐震性○(弾塑性解析評価OK)*1	耐震性未評価 (弾塑性解析未実施)	耐震性未評価 (弾塑性解析未実施)	耐震性○(弾塑性解析評価OK)*1
課題 かけ流しでのデブリ取り出し工法	課題 D/Wからの取水方法	課題 D/Wからの取水方法	課題 S/Cの健全性確認 D/Wからの取水方法	課題 S/Cの健全性確認 D/Wからの取水方法	課題 D/Wからの取水方法

ケース5 DW水位OP.14000 (電気配線貫通部より下のレベル)	ケース6 DW水位OP.19000 (炉心支持板上面レベル)	ケース7 DW水位OP.24000 (上部格子板上面レベル、シアラグより下)	ケース8 DW水位OP.39920 (ウェル満水)
			
・ベント管+クエンチャ+ストレーナ止水 ・S/C脚部補強なし	・ベント管+クエンチャ+ストレーナ止水 ・S/C脚部補強なし	・ベント管+クエンチャ+ストレーナ止水 ・S/C脚部補強なし	・ベント管+クエンチャ+ストレーナ止水 ・S/C脚部補強なし
耐震性○(弾塑性解析評価OK)*1	耐震性○(弾塑性解析評価OK)*1	耐震性○(弾塑性解析評価OK)*1	耐震性○(弾塑性解析評価OK)*1
課題 上部補修止水法の開発要 D/Wからの取水方法	課題 上部補修止水法の開発要 D/Wからの取水方法	課題 上部補修止水法の開発要 D/Wからの取水方法	課題 上部補修止水法の開発要 D/Wからの取水方法

ベント管止水状態(3-1)でのベント管付根部の評価は未実施



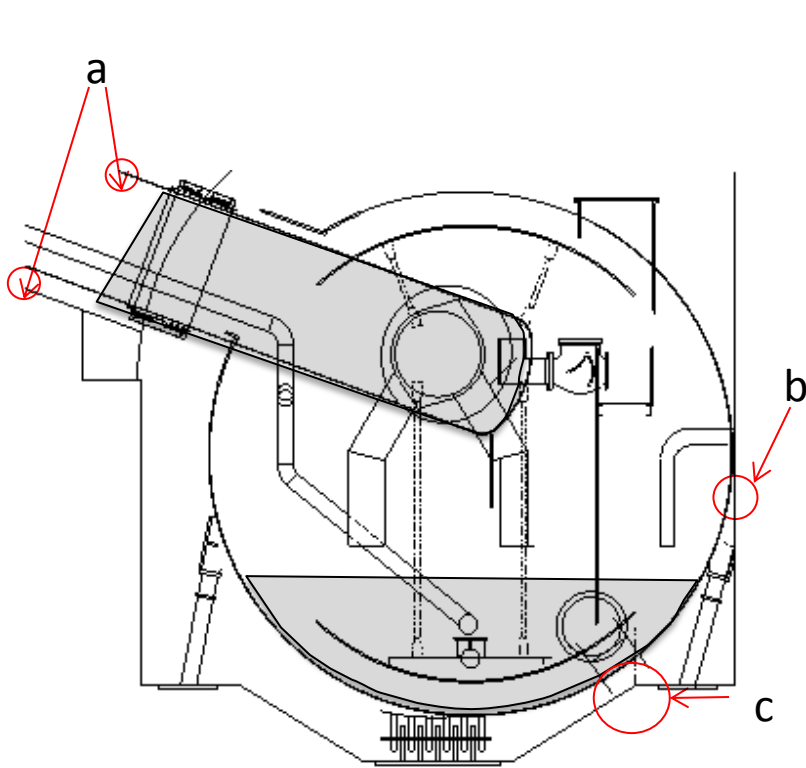
ケース3~8の場合は地下水水位逆転のリスク有

注)耐震性評価は15年後を想定した結果である。詳細評価結果については補足資料に示す。
* 1: 2倍勾配法(設計・建設規格JSME S NC1-2005)を適用

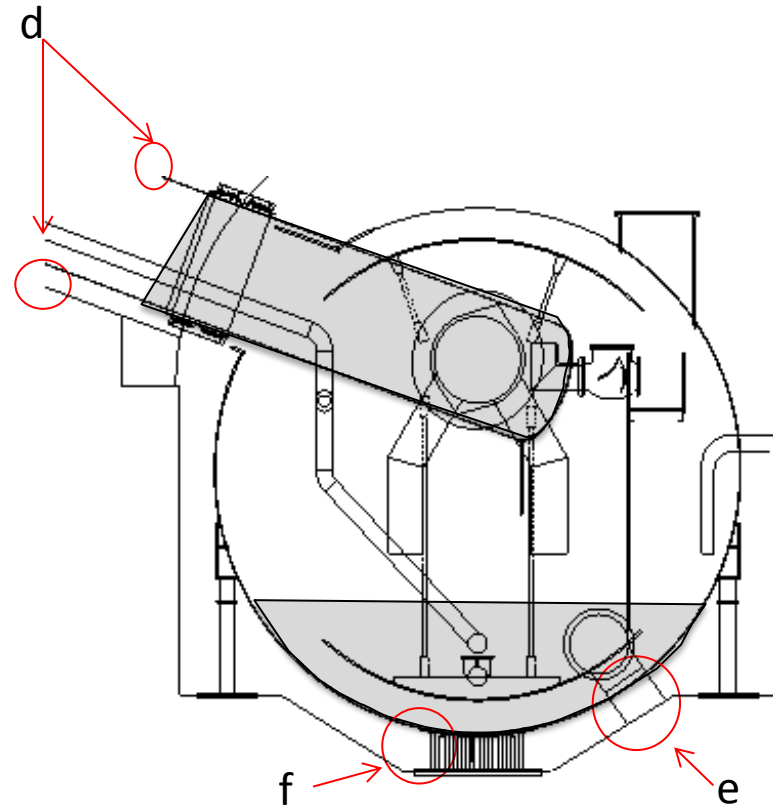
3. (1)大規模地震時における安全シナリオの構築

⑥1F-2/3 S/C脚部損傷に伴う開口想定条件

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

3.(1)大規模地震時における安全シナリオの構築

⑦ 1F-2/3 S/C脚部損傷時波及的影響評価

想定	想定事象	波及的影響
水平方向移動	【影響a】 ベント管とPCVシェルの接合部の破損を想定	D/W内の汚染水がトーラス室へ流出することによりトーラス室内水位が上昇する
	【影響b】 S/C脚部とPCVシェルの接合部の破損を想定	S/C内の汚染水がトーラス室へ流出することによりトーラス室内水位が上昇する
	【影響c】 接続配管・貫通部の破損を想定	ストレーナ止水しているため、PCV外に漏えいしない
鉛直方向移動	【影響d】 ベント管とPCVシェルの接合部の破損を想定	D/W内の汚染水がトーラス室へ流出することによりトーラス室内水位が上昇する
	【影響e】 接続配管・接続配管貫通部の破損を想定	ストレーナ止水しているため、PCV外に漏えいしない
	【影響f】 S/Cシェルの下降を想定	トーラス室が低下することによりトーラス室内水位が上昇する

s/c脚部が損傷すると、波及的影響によりトーラス室内水位が上昇するリスクが生じるため、**s/c脚部の耐震性を確保するなどの対策案を検討中である。**

対策案

- ①: S/C脚部の詳細評価による健全性の確認
- ②: S/C脚部補強によるS/C過大変位の抑制
- ③: 排水ポンプ等による漏えい水の回収
- ④: PCV内保有水量をトーラス室バッファ容量以下に抑制

3. (1)大規模地震時における安全シナリオの構築

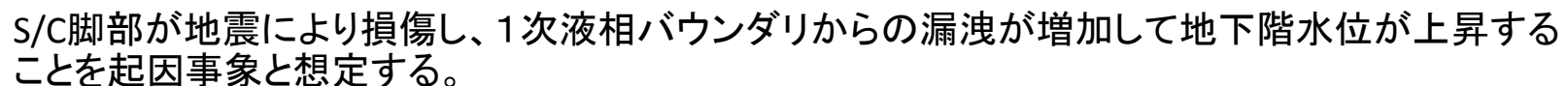
⑧S/C脚部損傷の安全シナリオ検討結果

影響が大きいと想定される事象について、波及的影響への対処(安全シナリオ)を検討する。対処設備については、燃料デブリ取り出しPJなどの関連PJと連携し、適宜見直しを行う。

No.	対処すべき事象	対処設備(1次)(案)	対処設備(2次)(案)	備考
1	環境への汚染水放出 (建屋／サブドレン水位 逆転)	非常用排水設備(常設)	非常用排水設備(可搬)	1次バウンダリ保有水量 ≤地下階バッファ容量
		非常用排水設備(常設) 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
2	気相への放出量増加 (燃料デブリの温度上昇)	注水流量増加	非常用注水設備	かけ流しの流量は確保された状態(漏えい量によっては、D/W水位の維持は不可)

各想定事象に対する安全シナリオの信頼性(脆弱性)を評価(比較評価)する方法として、イベントツリーを活用し、対策の補強等を検討する。

1次液相バウンダリからの漏洩増加による地下階水位上昇事象

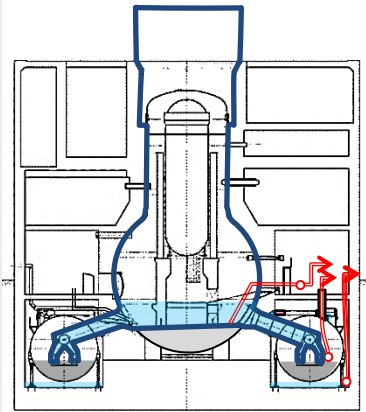
**IRID**

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.21

①S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

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
(DW水位OP.9000) (トーラス室天井面レベル)  ・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	・将来想定: 15年後 ・建屋損傷モデル ・D/W水位: OP.9000 ・S/C内: コンクリートOP.2960 (ダウンカマかぶり厚さ1500mmの場合) ・トーラス室: OP.-930 ・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	・将来想定: 15年後 ・建屋損傷モデル ・D/W水位: OP.9000 ・S/C内: コンクリートOP.2140 (ダウンカマかぶり厚さ680mmの場合) ・トーラス室: OP.-930 ・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
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

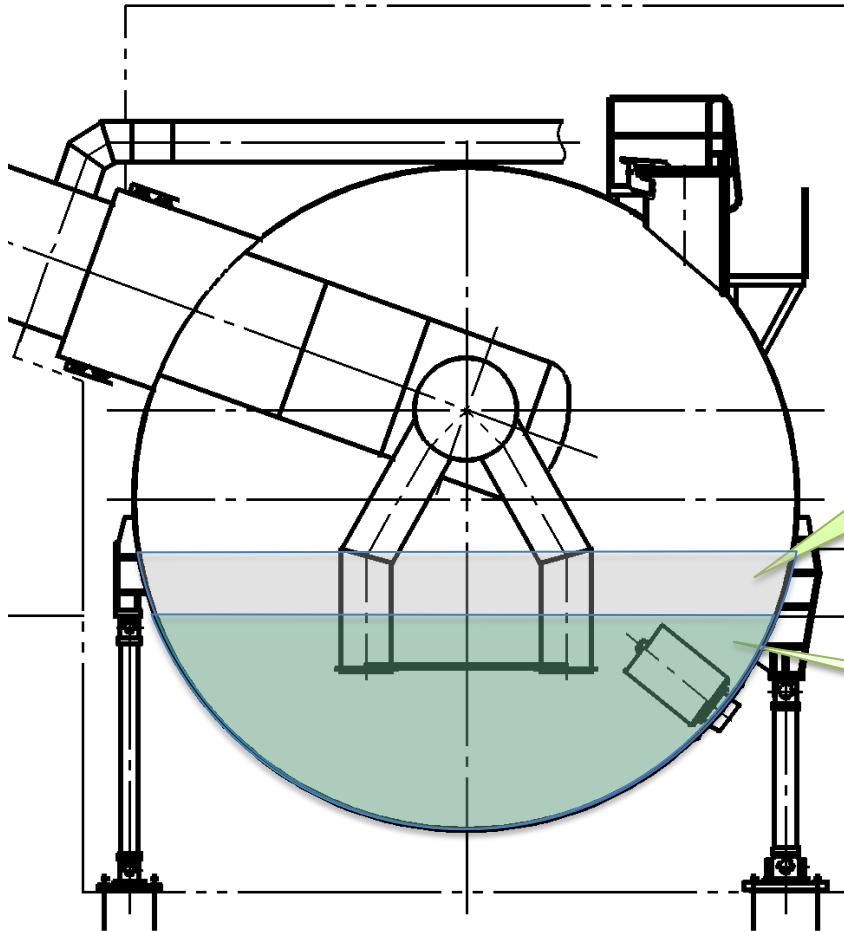
3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.22

① S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

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



■ O.P.2960埋設

ダウンカマを1.5m埋設したケースを想定(要素試験で止水確認済み)

■ O.P.2140埋設

埋設量軽減したケースを想定
(ダウンカマ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.23

①S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

1F-1

本年度解析実施

・評価対象のモデル化
(時刻歴地震応答解析)

・地震荷重の算出
(時刻歴弾性地震応答解析)

・準用規格①に基づく応力評価
(供用状態Ds、またはSu)

一次応力 $>$ Suの場合

・評価対象のモデル化
(弾塑性解析(2倍勾配法))

・許容崩壊荷重の算出
・準用規格②に基づく弾塑性解析

地震荷重 $>$ 許容荷重の場合

・崩壊荷重の算出
・準用規格③に基づく弾塑性解析

地震荷重 $>$ 崩壊荷重の場合

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

一次応力 $\leq$ Suの場合は終了

供用状態Ds:
基準地震動における許容応力
Su: 設計引張強さ

地震荷重 $\leq$ 許容荷重の場合は終了

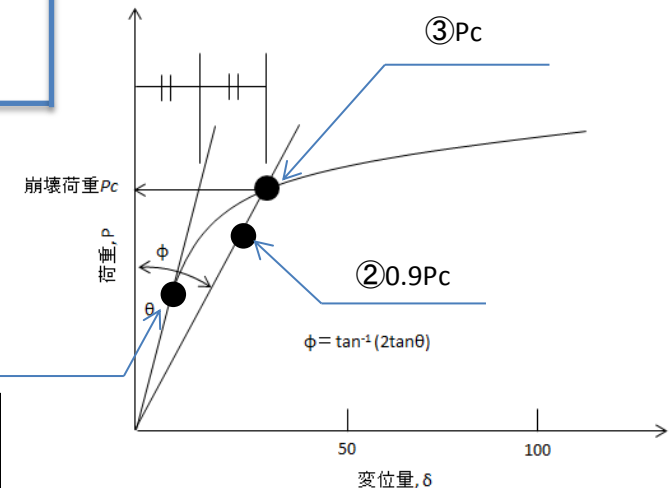
応力-ひずみ線図は降伏応力を
 $\min(2.35\sigma_y, 0.7\sigma_u)$ とした弾完全塑性体とする。

地震荷重 $\leq$ 崩壊荷重の場合は終了

応力-ひずみ線図は実機のミルシートで
 σ_y σ_u を調査し、ASME SecⅧの
ひずみ硬化を考慮して定義する。

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

・時刻歴弾塑性地震応答解析・試験による検討
(残留塑性変位量等の検討)
(材料試験の実施)

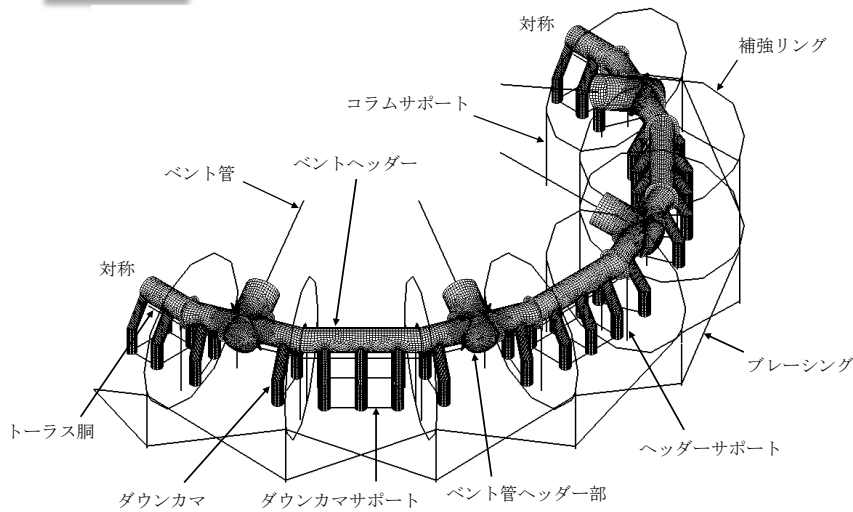


3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

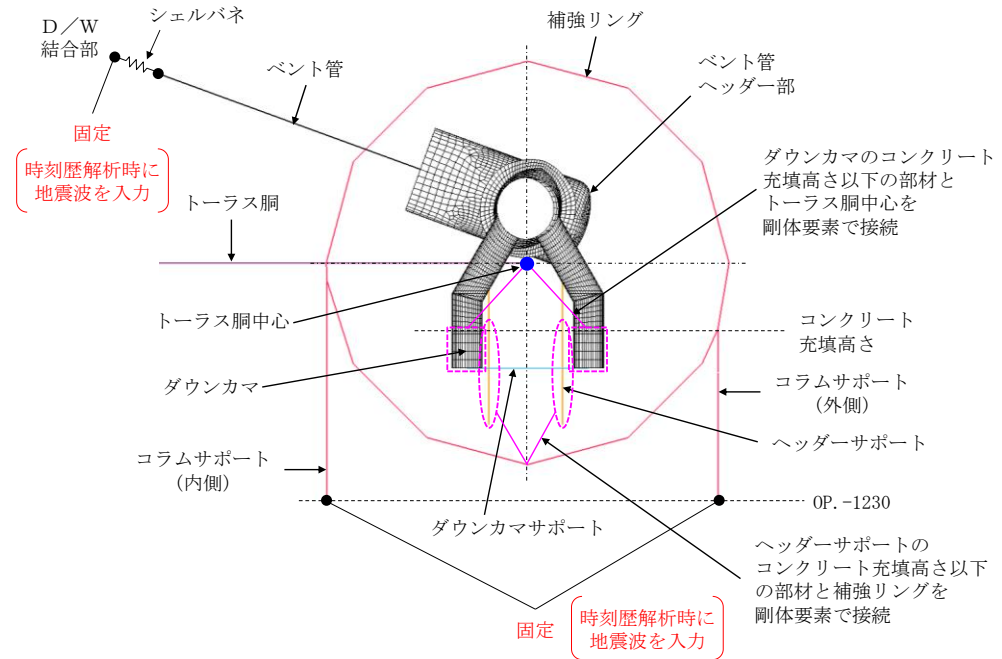
No.24

① S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

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)

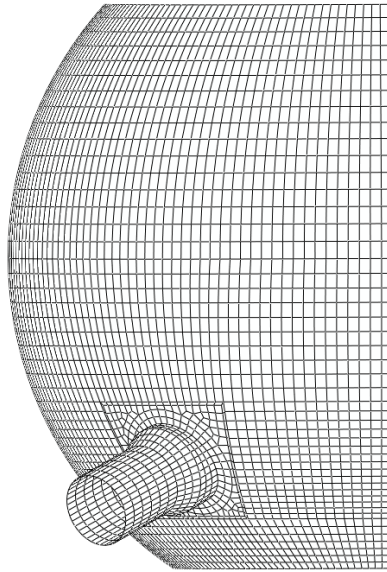
- ・ベント管に作用する地震荷重及びコラムサポートに作用する地震荷重を算出するため、ベント管とS/C系はビーム要素でモデル化する。
- ・S/C内コンクリート埋設によりダウンカマ取付部の地震時応力が厳しくなることが予想されるため、ダウンカマとベントヘッダはシェル要素でモデル化する。
- ・時刻歴地震応答解析は、固定部より時刻歴加速度を入力して解析モデルを強制加振させる。
- ・弾塑性解析(2倍勾配法)は、各要素に加速度を静的に負荷する。

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

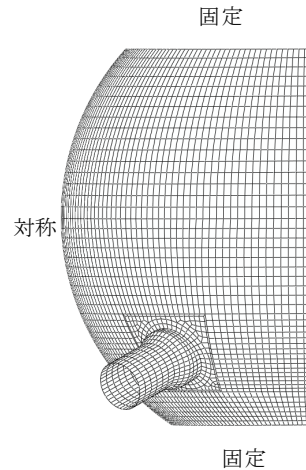
No.25

① S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

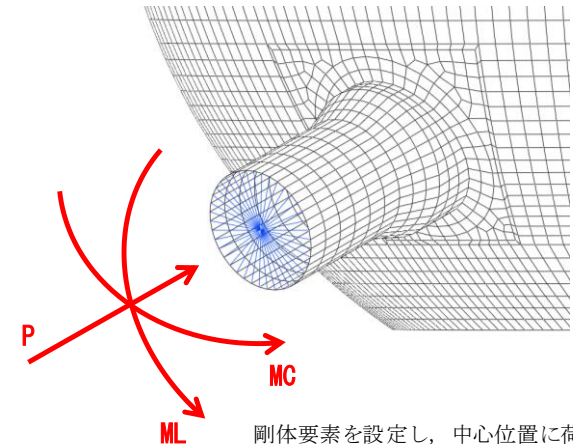
1F-1 解析モデル



(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



(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

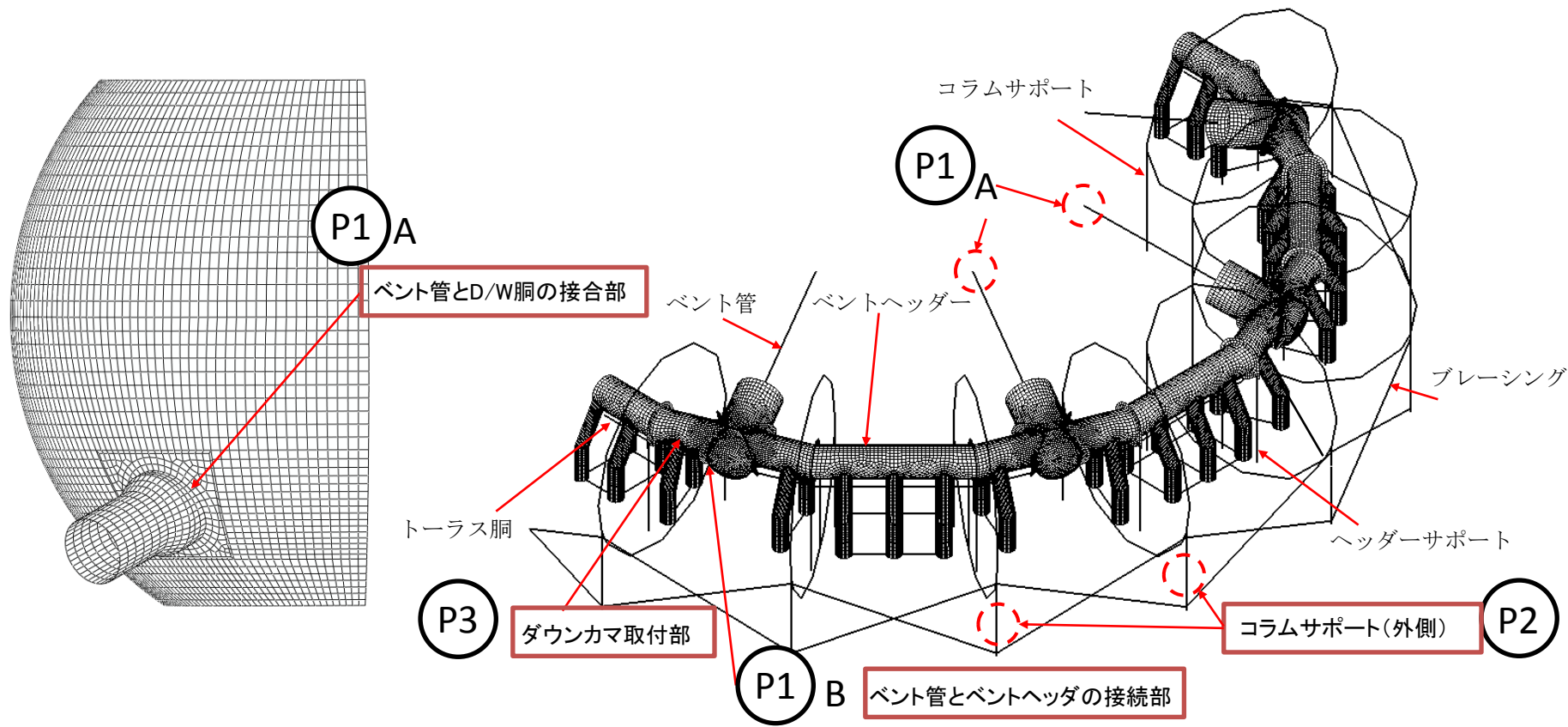
No.26

① S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

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、**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

① S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

(弾性解析)			H28-1①			H28-1②		
対象機器			15年後相当			15年後相当		
	腐食年数(年)		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%)		
	減衰定数		OP.2960			OP.2140		
	S/C内コンクリート		6100 ton			6100 ton		
	オブフロ階付加設備							
	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胴の 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 1	0.29 (0.39)	2,247 (1,670)	1 1	0.45 (0.60)
			778	400	0.51	319 (2152)※	400 (440)※	1.25 (0.20)※
P3 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						

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℃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℃におけるSu値とする。
※部()内の応力強さは、地震荷重のみによる一次+二次の応力振幅を示す。また、この許容値は温度50℃における2Syとする。

「15年後相当、S/C内コンクリート(OP.2960)」および「15年後相当、S/C内コンクリート(OP.2140)」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、ダウンカマ取付部の一次+二次応力は2Syを大幅に超えている。このように、上取り出し(D/W水位OP.9m)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.28

① S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

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。

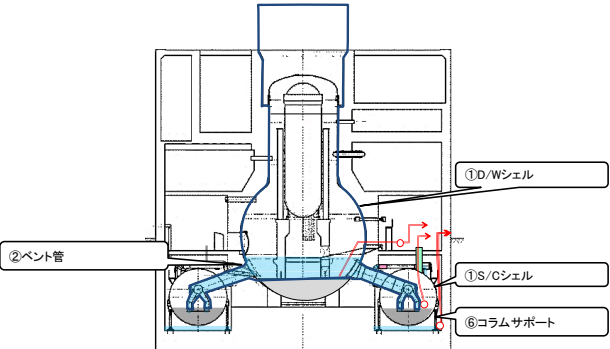
コラムサポートは、クラスMC支持構造物であるが、JSME設計・建設規格の炉心支持構造物の規定であるCSS-3160を準用して、極限解析(弾塑性解析)による評価を実施した。

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			
(弾塑性解析)									
対象機器									
	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	OP.2960				OP.2140			
	オペフロ階付加設備	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	1.50	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(OP.2960)」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(OP.2140)」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

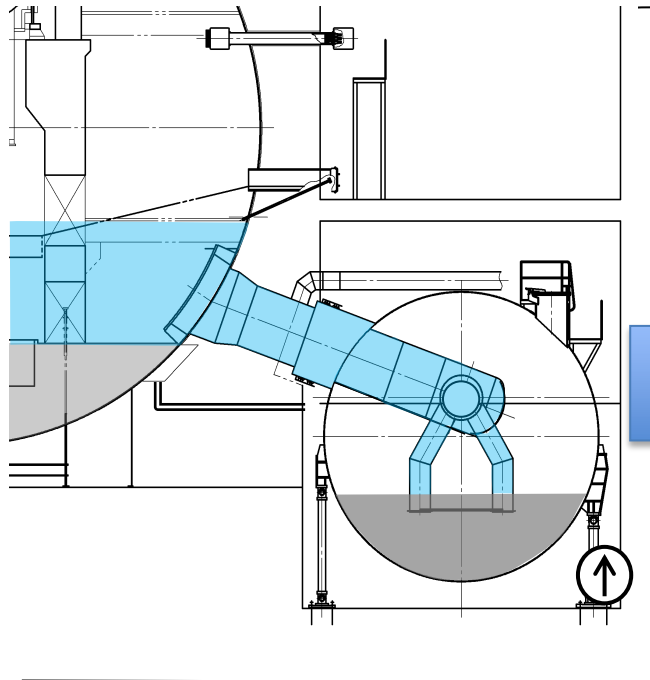
No.29

①S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

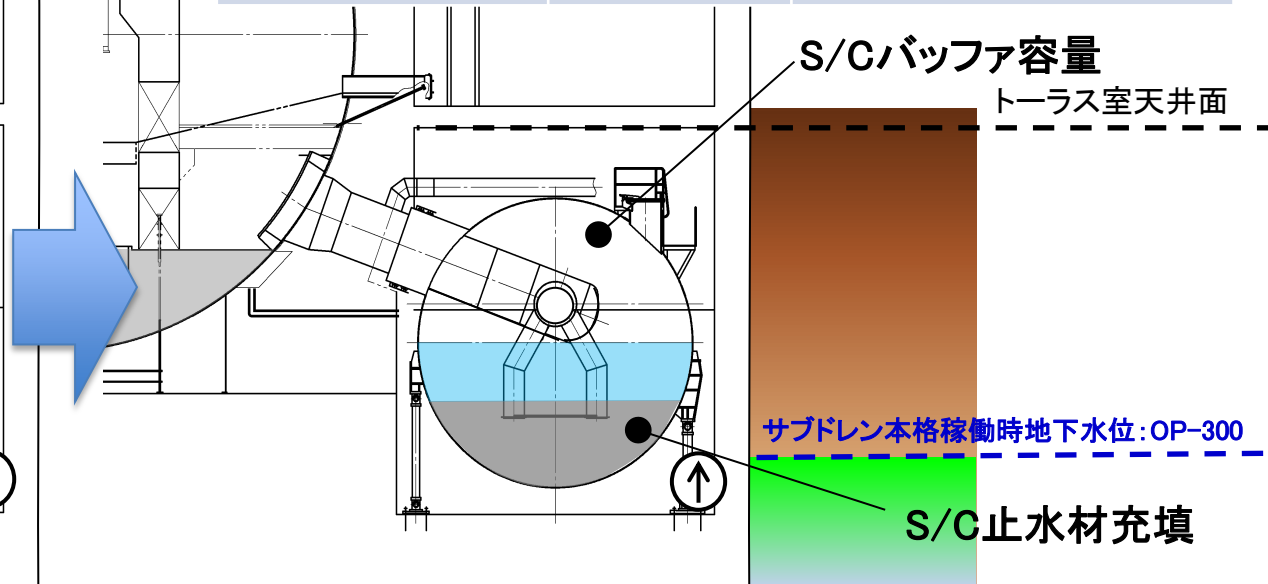
ダウンカム取付部破損想定の影響評価

- ・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カム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。

※: OP.9058



冠水状態	冠水量(m3)	S/Cバッファ容量(m3)
D/W底部冠水※	540	3000



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.30

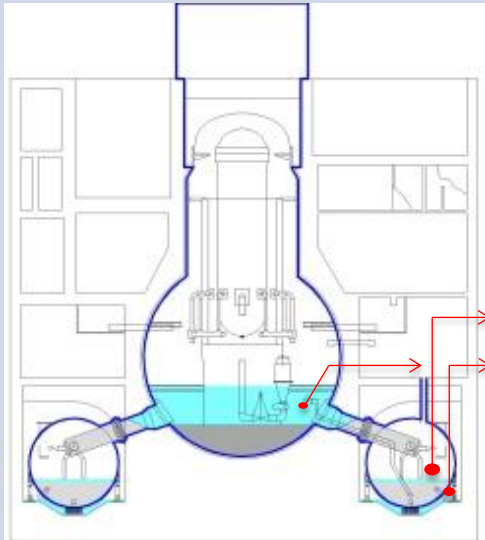
①S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

1F-2/3

1F-2 ケース3-1(D/W水位 OP.9600)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OP.9600(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：OP.9600
- ・S/C内：コンクリートOP.-200
- ・トーラス室：OP.-1740
- ・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

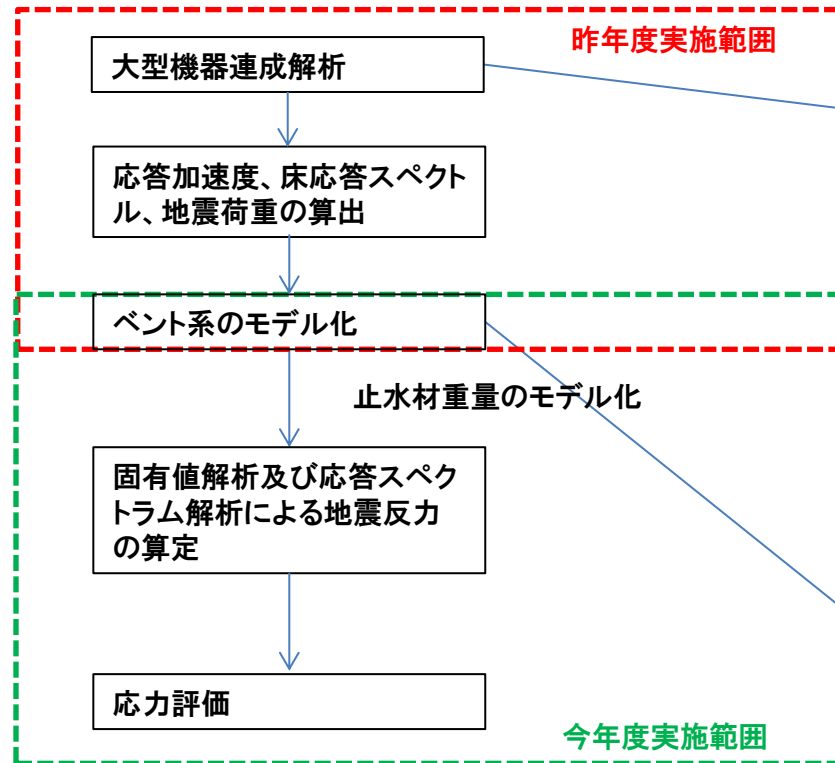
3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.31

①S/C脚部の耐震性・影響評価手法の開発

1F-2/3

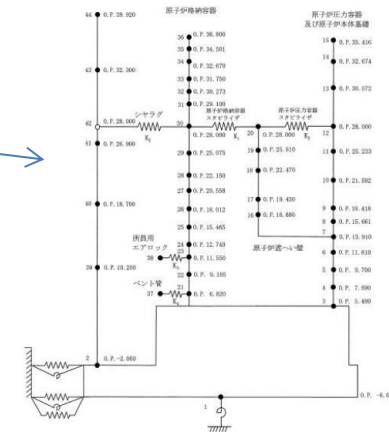
ベント管止水状態でのベント管の耐震性影響評価フロー



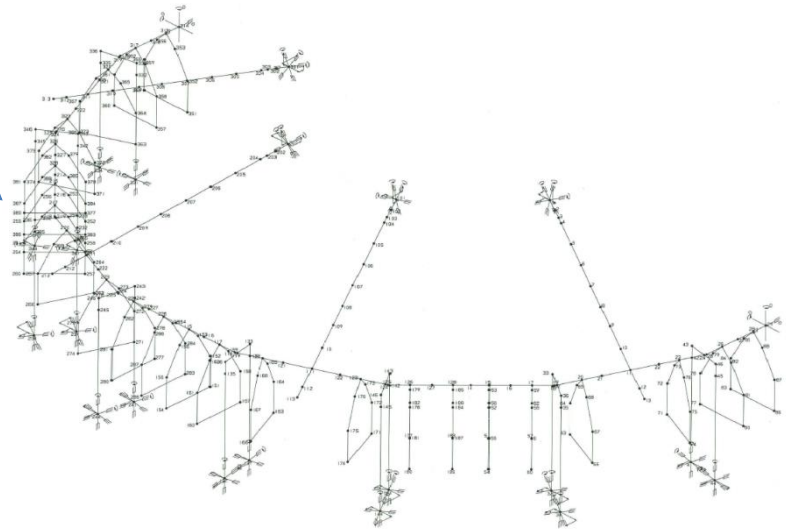
昨年度実施範囲

止水材重量のモデル化

今年度実施範囲



大型機器連成解析モデル



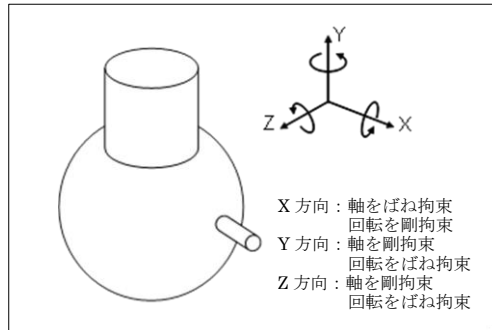
ベント系モデル

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

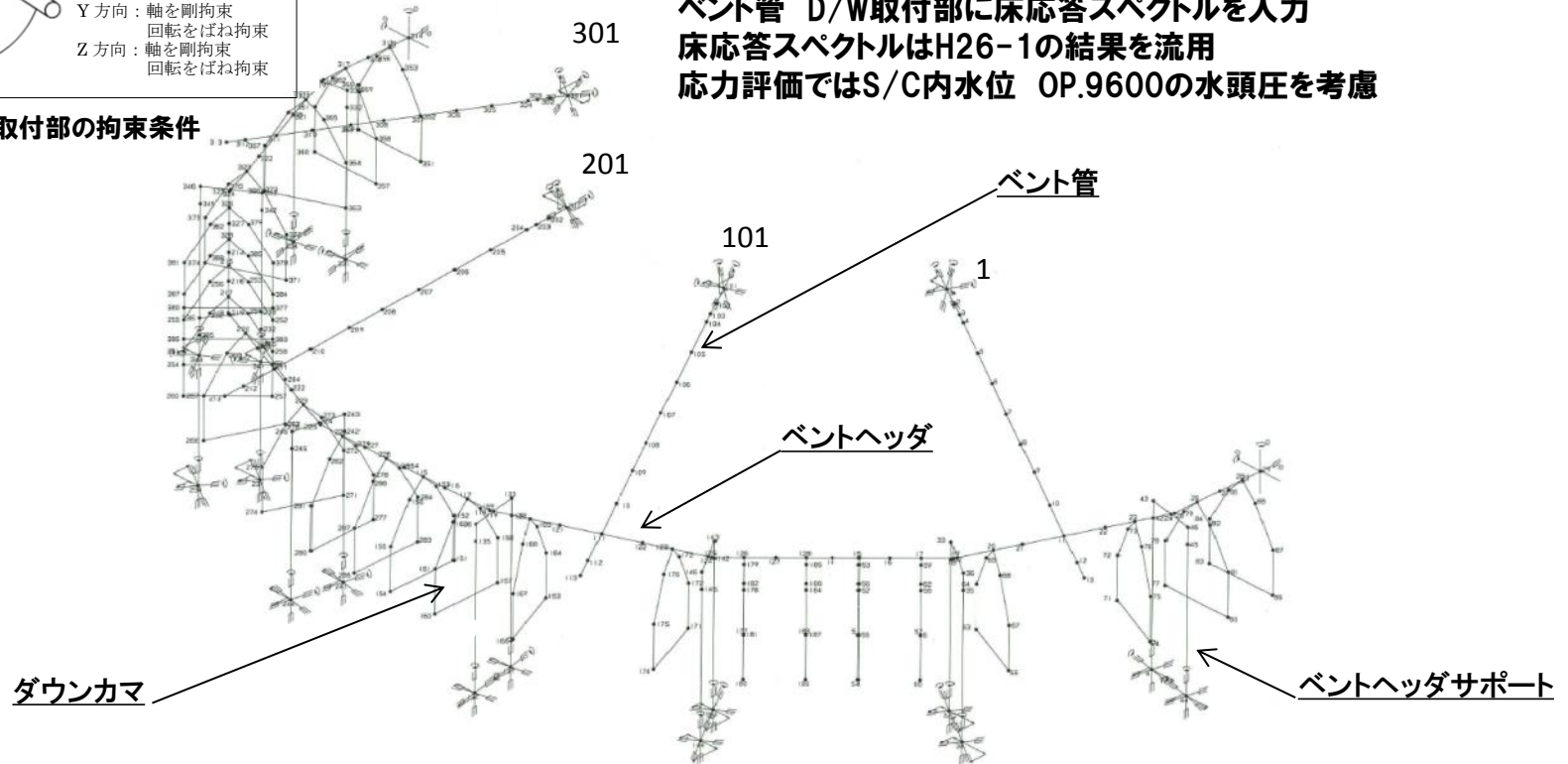
No.32

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 OP.9600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

No.33

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

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	
			471	2.78	Su 値
	一次+二次応力 PL+Pb+Q	330	393	1.19	
			471	1.42	Su 値
応力評価点 E (Node 101, 201)	一次膜+曲げ応力 PL+Pb	174	424	2.43	
			471	2.70	Su 値
	一次+二次応力 PL+Pb+Q	371	393	1.05	
			471	1.26	Su 値
応力評価点 F (Node 1, 301)	一次膜+曲げ応力 PL+Pb	180	424	2.35	
			471	2.61	Su 値
	一次+二次応力 PL+Pb+Q	378	393	1.03	
			471	1.24	Su 値
応力評価点 F (Node 101, 201)	一次膜+曲げ応力 PL+Pb	186	424	2.27	
			471	2.53	Su 値
	一次+二次応力 PL+Pb+Q	428	393	0.91	
			471	1.10	Su 値
応力評価点 G/G'	一次膜+曲げ応力 PL+Pb	36	424	11.77	
			471	13.08	Su 値
	一次+二次応力 PL+Pb+Q	126	393	3.11	
			471	3.73	Su 値
応力評価点 H/H'	一次膜+曲げ応力 PL+Pb	58	424	7.31	
			471	8.12	Su 値
	一次+二次応力 PL+Pb+Q	245	393	1.60	
			471	1.92	Su 値

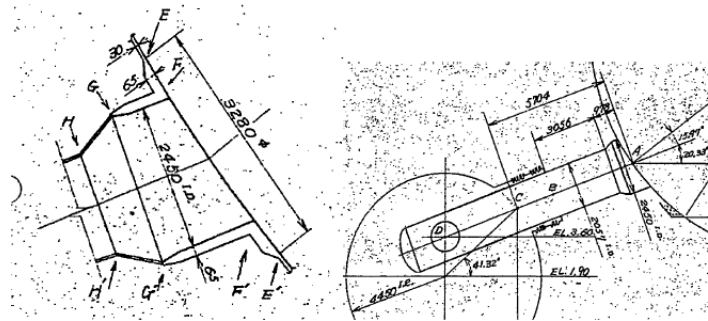


表 3.2.1 応力評価点

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。

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

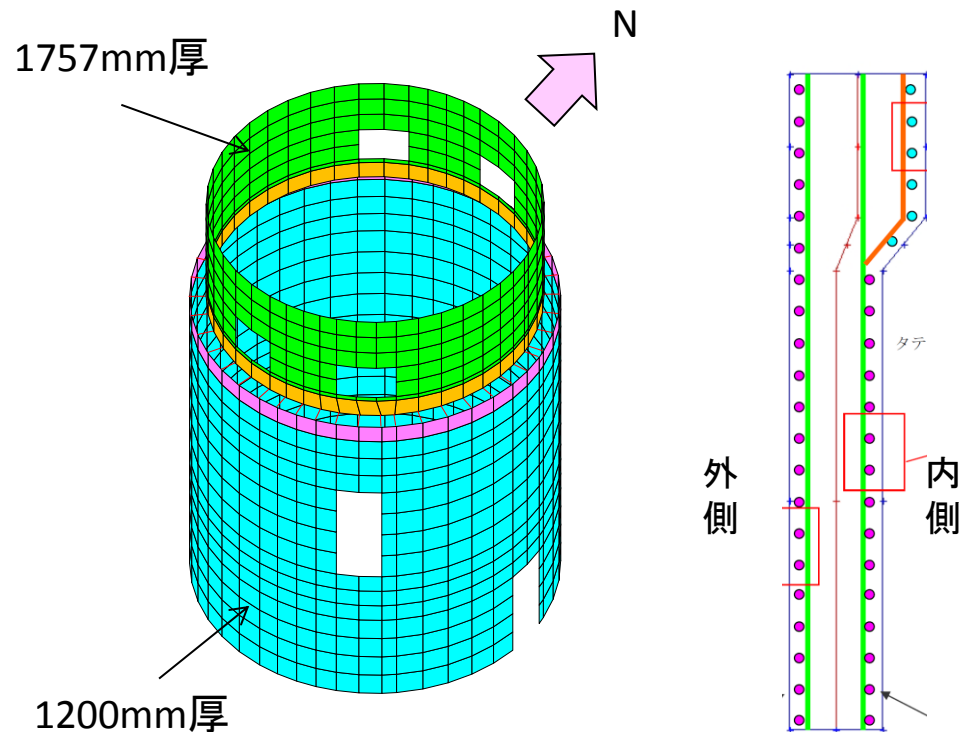
No.34

②ペDESTAL部の耐震性・影響評価手法の開発

3次元FEM弾塑性解析による評価

■ 目的

- 最新の知見に基づいた条件に対し、平成26-27年度に妥当性を確認した3次元FEMモデル(積層シェル要素、既存開口考慮、脚部完全固定)を基に、解析により事故後のペDESTALの耐震性を評価する。



1F-1解析モデル

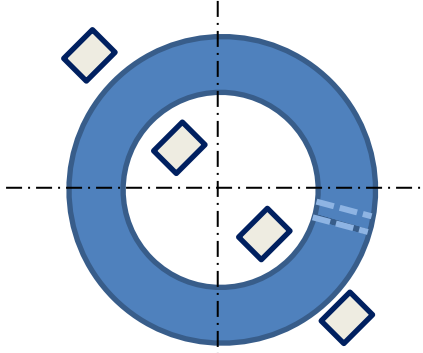
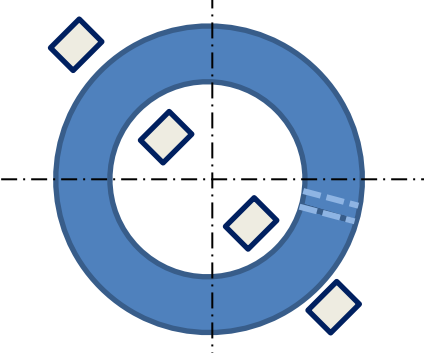
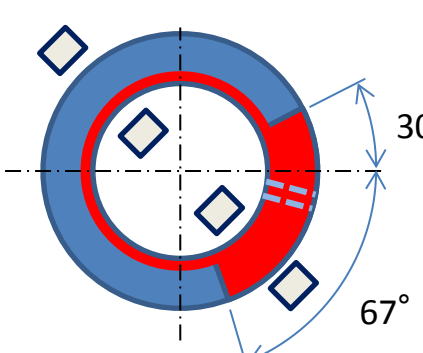
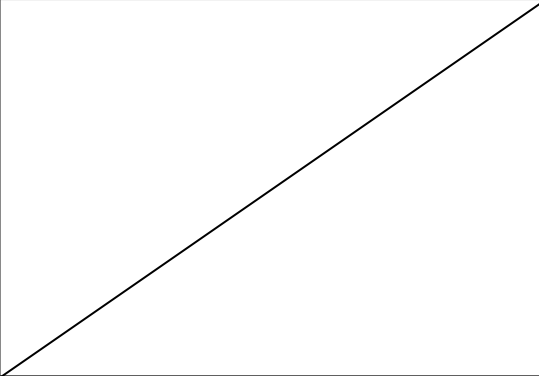
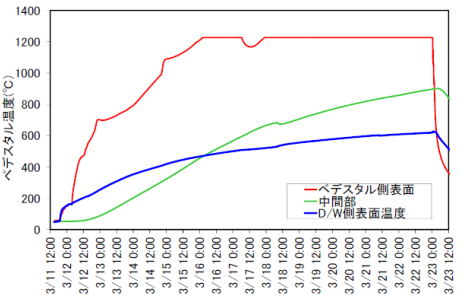
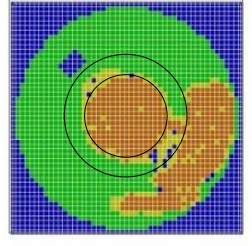
3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.35

②ペDESTAL部の耐震性・影響評価手法の開発

1F-1RPVペDESTALの燃料デブリによる劣化・損傷を想定した、FEMモデルによる構造解析

最新の事象進展解析(MAAP)に基づく温度条件、デブリによる侵食条件を考慮した下記3ケースの3次元弾塑性解析を実施する。

ケース	No.1	No. 2	No.3
解析モデル	 温度条件: 内側800℃ 外側800℃ 280hr	 温度条件: 内側1200℃ 外側600℃	 RPVペDESTAL部と溶融デブリが接触している箇所が欠損していると仮定
最新事故進展解析結果			 MAAP解析による温度履歴を考慮
			 MCCI解析による床面デブリ分布を考慮

- 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結果(No.51参照)に基づき、材料構成則を設定する。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。
- No.2、3の高温腐食量は、事故進展解析結果を用いたFEMI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(No.41参照)を基に評価する。
- 荷重条件は気中取り出しベースで設定されたH28地震荷重(No.56、57)を採用する。

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.36

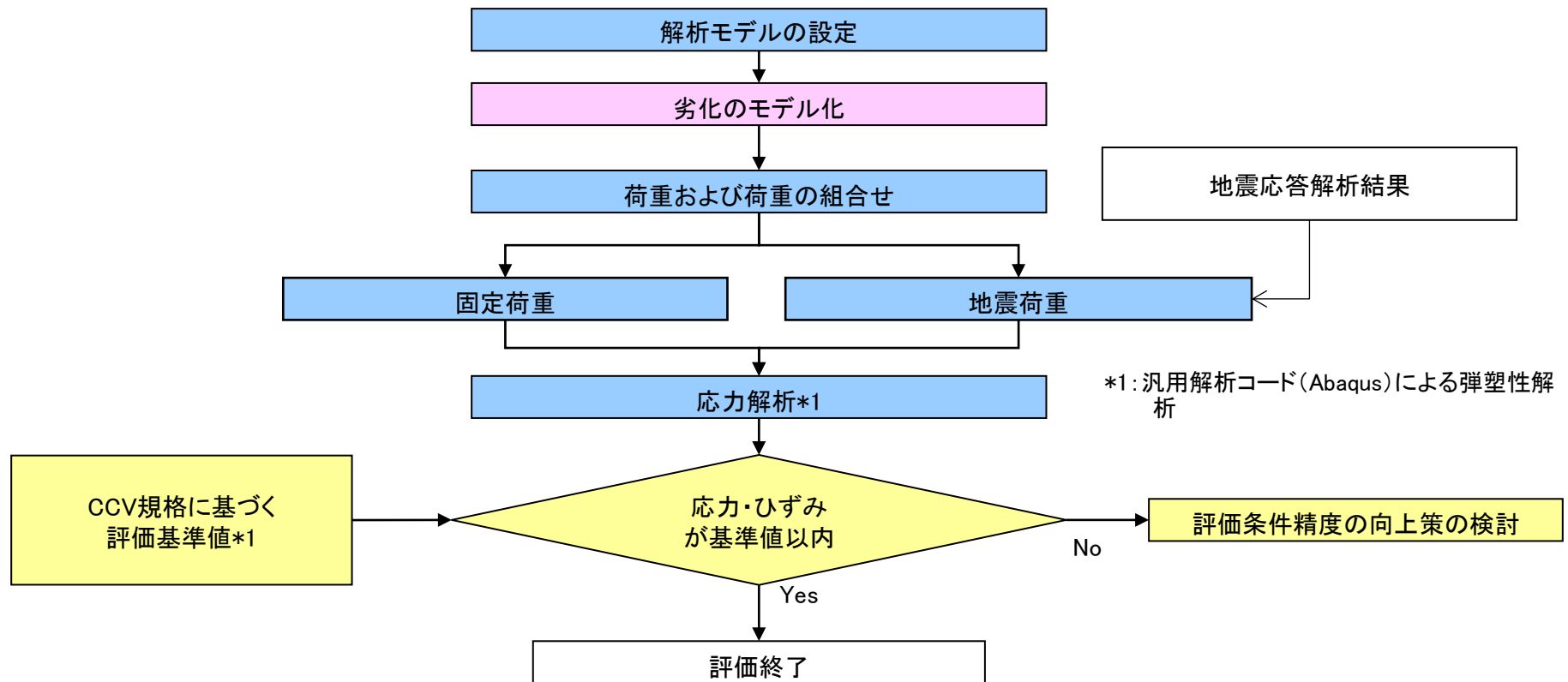
②ペデスタル部の耐震性・影響評価手法の開発

3次元FEM弾塑性解析による評価

■ 解析フロー

- 基準地震動 S_s 時に発生する断面の応力・ひずみを計算
- CCV規格等^{*1}に基づく評価基準値との比較を実施し、健全性を評価

^{*1}: 日本機械学会 「発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格」



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.37

②ペDESTAL部の耐震性・影響評価手法の開発

3次元FEM弾塑性解析による評価

■ 劣化のモデル化方法

劣化	モデル化項目		モデル化方法	設定根拠
高温	材料	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	AIJ耐火性ガイドを参考に設定 ※800℃までのデータしかないため試験を実施(No.48)
		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
	形状	温度の 空間分布	温度分布解析を実施	熱物性の妥当性を、平成27年度 ブロック試験を参考に設定
鉄筋 腐食	材料	コンクリート	—	—
		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 ※上記式の適用性確認のため試験を実施中(No.42-46)
		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
	形状	腐食の 空間分布	全面腐食と仮定	安全側に設定
デブリ 侵食	境界条件		デブリ侵食範囲の脚部境界 条件をフリーにする	安全側に設定

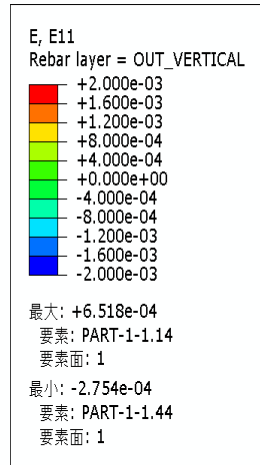
3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.38

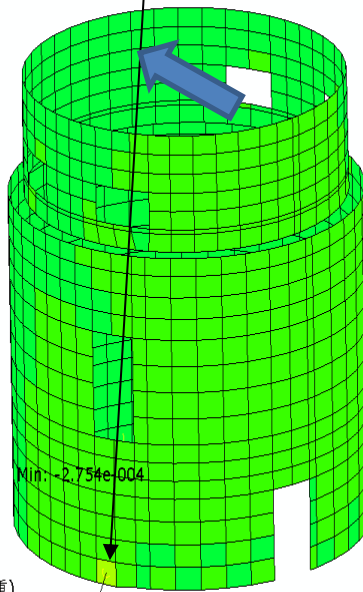
②ペデスタル部の耐震性・影響評価手法の開発

3次元FEM弾塑性解析による評価

■ 解析結果 (No.3: 高温+侵食: 内側1200℃, 外側600℃、侵食あり)

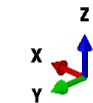


最大値: 652μ



Max: +6.518e-004

Min: -2.754e-004



ステップ: Step-2, kajima 1f1 all model step1(地震荷重)

Increment 21: Step Time = 1.000

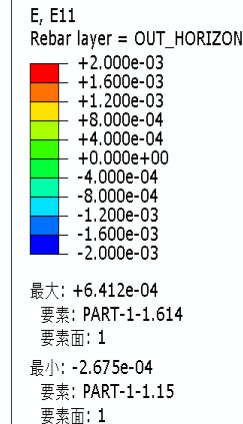
基本変数: E, E11

変形変数: U 変形倍率: +1.000e+02

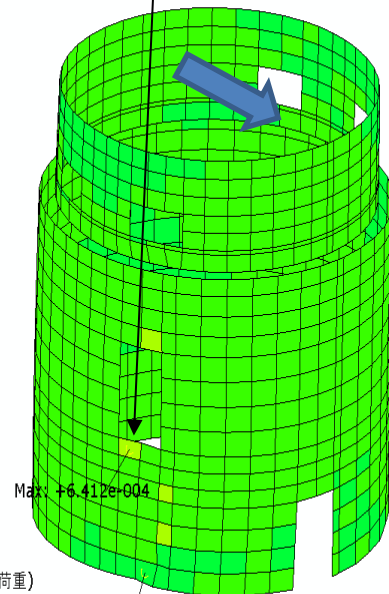
1F1PED2016 E->W: 温度15.5℃ 鉛直震度0.46 組み合わせ係数(1.0,-0.4)

ODB: 1F1PED2016_EW_15.5+H10-V04.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2016x HotFix 4 Fri Jan 13 18:25:55 G

タテ筋ひずみ分布

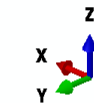


最大値: 641μ



Max: +6.412e-004

Min: -2.675e-004



ステップ: Step-2, kajima 1f1 all model step1(地震荷重)

Increment 23: Step Time = 1.000

基本変数: E, E11

変形変数: U 変形倍率: +1.000e+02

1F1PED2016 W->E: 温度15.5℃ 鉛直震度0.46 組み合わせ係数(1.0,-0.4)

ODB: 1F1PED2016_WE_15.5+H10+V04.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2016x HotFix 4 Fri Jan 13 18:43:31 G

ヨコ筋ひずみ分布

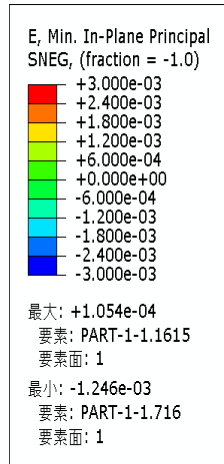
3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.39

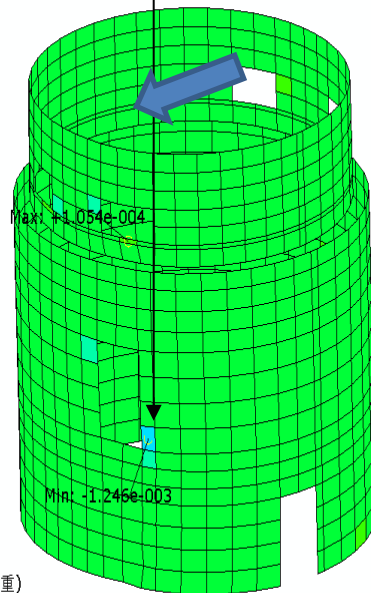
②ペデスタル部の耐震性・影響評価手法の開発

3次元FEM弾塑性解析による評価

■ 解析結果 (No.3: 高温+侵食: 内側1200℃, 外側600℃、侵食あり)



最大値: 1246μ



ステップ: Step-2, kajima 1f1 all model step1(地震荷重)

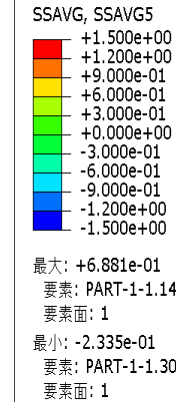
Increment 21: Step Time = 1.000

基本変数: E, Min. In-Plane Principal

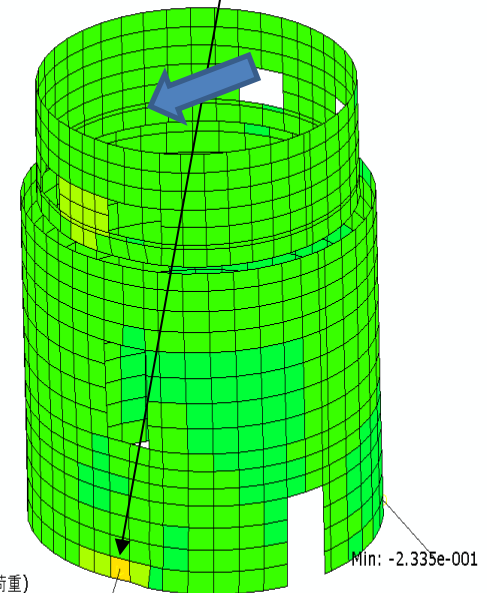
変形変数: U 変形倍率: +1.000e+02

1F1PED2016 N->S : 温度15.5℃ 鉛直震度0.46 組み合わせ係数(1.0,+0.4)

ODB: 1F1PED2016_NS_15.5+H10+V04.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2016x HotFix 4 Fri Jan 13 18:30:42 G



裕度最大要素の応力:
0.69N/mm²



ステップ: Step-2, kajima 1f1 all model step1(地震荷重)

Increment 21: Step Time = 1.000

基本変数: SSAVG, SSAVG5

変形変数: U 変形倍率: +1.000e+02

1F1PED2016 N->S : 温度15.5℃ 鉛直震度0.46 組み合わせ係数(1.0,+0.4)

ODB: 1F1PED2016_NS_15.5+H10+V04.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2016x HotFix 4 Fri Jan 13 18:30:42 G

コンクリート圧縮ひずみ分布

面外せん断応力分布

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.40

②ペDESTAL部の耐震性・影響評価手法の開発

3次元FEM弾塑性解析による評価

■ 詳細評価まとめ

検討結果まとめ

ケース	温度	デブリ 侵食	評価項目	発生応力・ ひずみ(A)	評価 基準値(B)	A/B
No.1	内側800℃ 外側800℃	なし	コンクリートひずみ	305μ	3000μ	0.10
			鉄筋ひずみ	155μ	5000μ	0.03
			面外せん断応力	0.23 N/mm ²	1.28 N/mm ²	0.18
No.2	内側1200℃ 外側600℃	〃	コンクリートひずみ	671μ	3000μ	0.22
			鉄筋ひずみ	286μ	5000μ	0.06
			面外せん断応力	0.39 N/mm ²	1.20 N/mm ²	0.33
No.3	〃	あり	コンクリートひずみ	1246μ	3000μ	0.42
			鉄筋ひずみ	652μ	5000μ	0.13
			面外せん断応力	0.69 N/mm ²	1.44 N/mm ²	0.48

- 最新の知見に基づいた条件に対し、3次元FEM解析により事故後のRPVペDESTALの耐震性を評価を実施し、いずれのケースにおいても、CCV規格の評価基準値を下回ることを確認した。

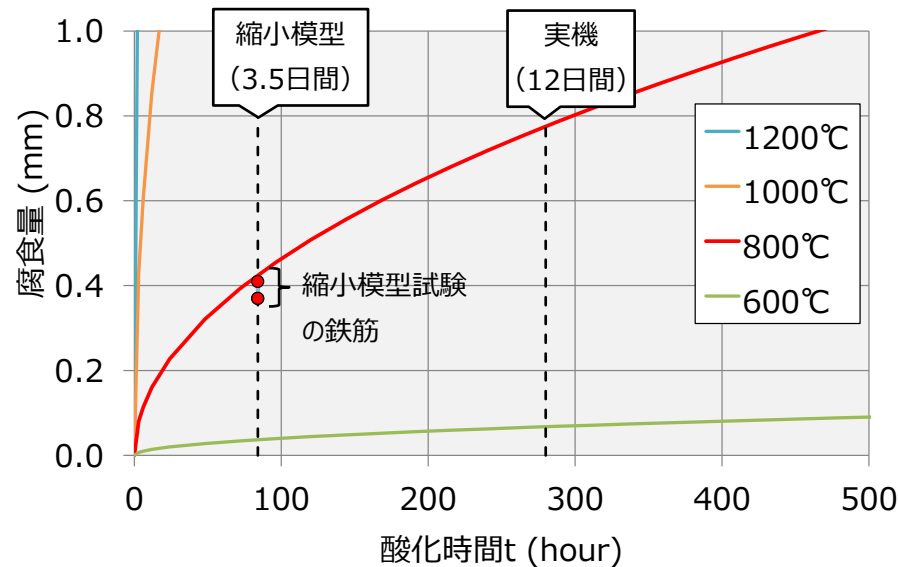
3.(2)安全シナリオ構築のための耐震性・影響評価手法の開発

No.41

③RPVペデスタルの高温鉄筋腐食試験等の実施

RPVペデスタルの耐震性評価

RPVペデスタルに対する課題



【800°C加熱時間】

- ・縮小模型800°C
試験体: 3.5日間
- ・実機(想定): 280時間

*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)

- 縮小模型800°C試験体の鉄筋の腐食生成物は、中森-EPRIの回帰式*1によると、800°C、3.5日間(84時間)の加熱で、表面からの断面欠損深さは0.425mmと算定され、800°C試験体から取り出した鉄筋の腐食量の実測値0.37~0.41mmに対して、ほぼ同じ値となっている。
- しかし、中森-EPRIの回帰式の適用範囲(材料、温度、時間、環境など)が十分確認できていないことから、試験を実施し、本式の適用性を確認する必要がある。
- 鉄筋断面積の減少は構造体の挙動や耐力に影響を与えるため、高温に対する腐食量の把握は重要である。また、コンクリート中という一定量の水分が存在する一方、酸素の供給が制限される環境の中における高温時の鉄筋の腐食については、さらなる検討が必要と考えられる。

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.42

③ RPVペデスタルの高温鉄筋腐食試験等の実施

鉄筋の高温腐食試験

- 鉄筋の高温腐食に関する調査より、以下のことがわかった。
 - ・ 鉄筋のように耐熱性がない炭素鋼に関する知見はほとんどない。
 - ・ コンクリート中の鉄筋の高温腐食に関する知見がない。
- 参考となるデータが少ないことから、まずH28年度にA試験とB試験（一部H29年度）を実施し、鉄筋の高温腐食の程度や傾向、試験パラメータによる影響度合いを把握し、その結果を踏まえてH29年度にC試験を実施する。

試験名	試験の位置付け	試験体	加熱温度 (°C)		加熱期間 (日)				試験パラメータ		
			400 600 800	1000	1	4	8	12	環境条件 (水蒸気、 酸素)	鉄筋の かぶりコンク リートの厚さ	鉄筋 径
A 試験	鉄筋単体を用いた環境条件 による影響程度確認試験	鉄筋 単体	—	○	○	—	—	—	○	—	○
B 試験	鉄筋コンクリートを用いたかぶり 厚さによる影響程度確認試験	鉄筋コン クリート	—	○	—	○	○	○	—	○	—
C 試験	鉄筋コンクリートを用いた 総合試験	鉄筋コン クリート	○	○	○	○	○	—	○	○	○

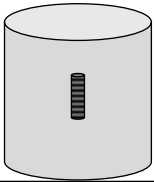
今年度は、A試験は完了し、B試験は高温加熱まで、C試験は試験体作製まで実施した。

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.43

③ RPVペデスタルの高温鉄筋腐食試験等の実施

鉄筋の高温腐食試験

試験体名		D19	D35	D19C20	D19C30	D19C100	D25C20	D35C20
イメージ図								
鉄筋		異形鉄筋D19	異形鉄筋D35	異形鉄筋D19	異形鉄筋D19	異形鉄筋D19	異形鉄筋D25	異形鉄筋D35
		(SD345)	(SD345)	(SD345)	(SD345)	(SD345)	(SD345)	(SD345)
		長さ70mm	長さ70mm	長さ70mm	長さ70mm	長さ70mm	長さ70mm	長さ70mm
コンクリート	寸法 (mm)	無し	無し	Φ60×110	Φ80×130	Φ225×270	Φ65×110	Φ75×110
	かぶり厚さ			20mm	30mm	約100mm	20mm	20mm
試験ケース名 および 影響を確認する試験パラメータ	A試験	A1：基本ケース A2：水蒸気無し A3：酸素有り A4：水蒸気無し＋ 酸素有り	A5：実機（縦筋）の鉄筋径					
	B試験			B1： かぶり厚さ小	B2： かぶり厚さ中	B3： かぶり厚さ大 （実機相当）		
	C試験	C8： コンクリート無し		C1：基本ケース C2：水蒸気無し C3：酸素有り C4：水蒸気無し＋ 酸素有り	C5： かぶり厚さ中		C6：実機（横筋）の鉄筋径	C7：実機（縦筋）の鉄筋径

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.44

③ RPVペDESTALの高温鉄筋腐食試験等の実施

鉄筋の高温腐食試験 A試験

■ 概要

鉄筋単体を用いた環境条件による影響程度確認試験

- A試験では、鉄筋単体の試験体に対して環境を変えた高温環境で腐食させ、鉄筋の腐食量を測定するとともに、環境条件が腐食に与える影響を評価する。
- 高温加熱装置の仕様を考慮し鉄筋はD19を使用し、鉄筋径の違いによる影響確認のため、D35についても試験を行う。
- 加熱温度と時間は、1000℃で1日間の1水準とする。
- 本試験で得られた結果に基づき、C試験の計画を見直す。

試験 ケース	試験条件					水準数 (加熱温度、 時間)	備考
	試験体名	鉄筋	水蒸気	フローさせる ガスの種類	コンクリート		
A1	D19	異型鉄筋 D19	有り	不活性ガス (N ₂)	無し	1水準	基本ケース
A2	D19	異型鉄筋 D19	無し	不活性ガス (N ₂)	無し	1水準	水蒸気無しによる影響確認
A3	D19	異型鉄筋 D19	有り	模擬空気 (0.8N ₂ +0.2O ₂)	無し	1水準	酸素O ₂ による影響確認
A4	D19	異型鉄筋 D19	無し	模擬空気 (0.8N ₂ +0.2O ₂)	無し	1水準	水蒸気無し+酸素O ₂ による影響確認
A5	D35	異形鉄筋 D35	有り	不活性ガス (N ₂)	無し	1水準	鉄筋径の違い(実機縦筋)による影響確認

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

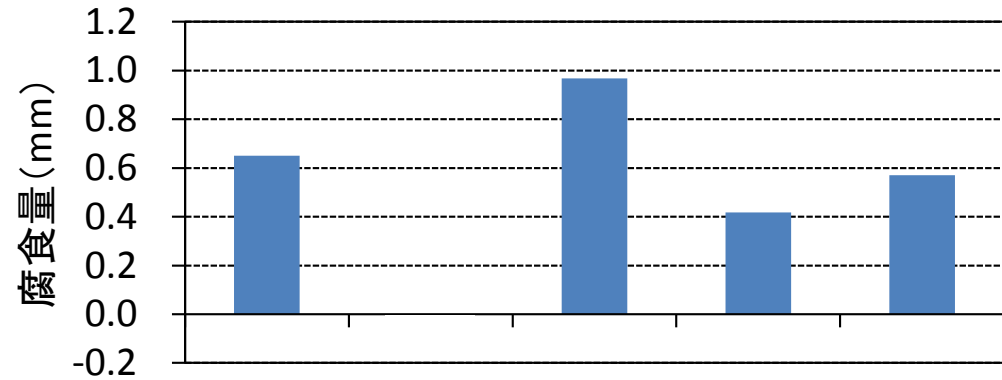
No.45

③ RPVペデスタルの高温鉄筋腐食試験等の実施

鉄筋の高温腐食試験 A試験

■ 実験結果

- 鉄筋の減肉量の順位は、 $A3 > A1 > A5 > A4 > A2$ であった。
- 鉄筋腐食には水蒸気と O_2 の両方が関与していることが示唆され、これらが同時に存在した場合により腐食が促進されることが明らかになった。
- 鉄筋径による違いは確認されなかった。



	A1	A2	A3	A4	A5
酸素	×	×	○	○	×
水蒸気	○	×	○	×	○

○: 有り、×: 無し



曝露後の鉄筋の外観

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

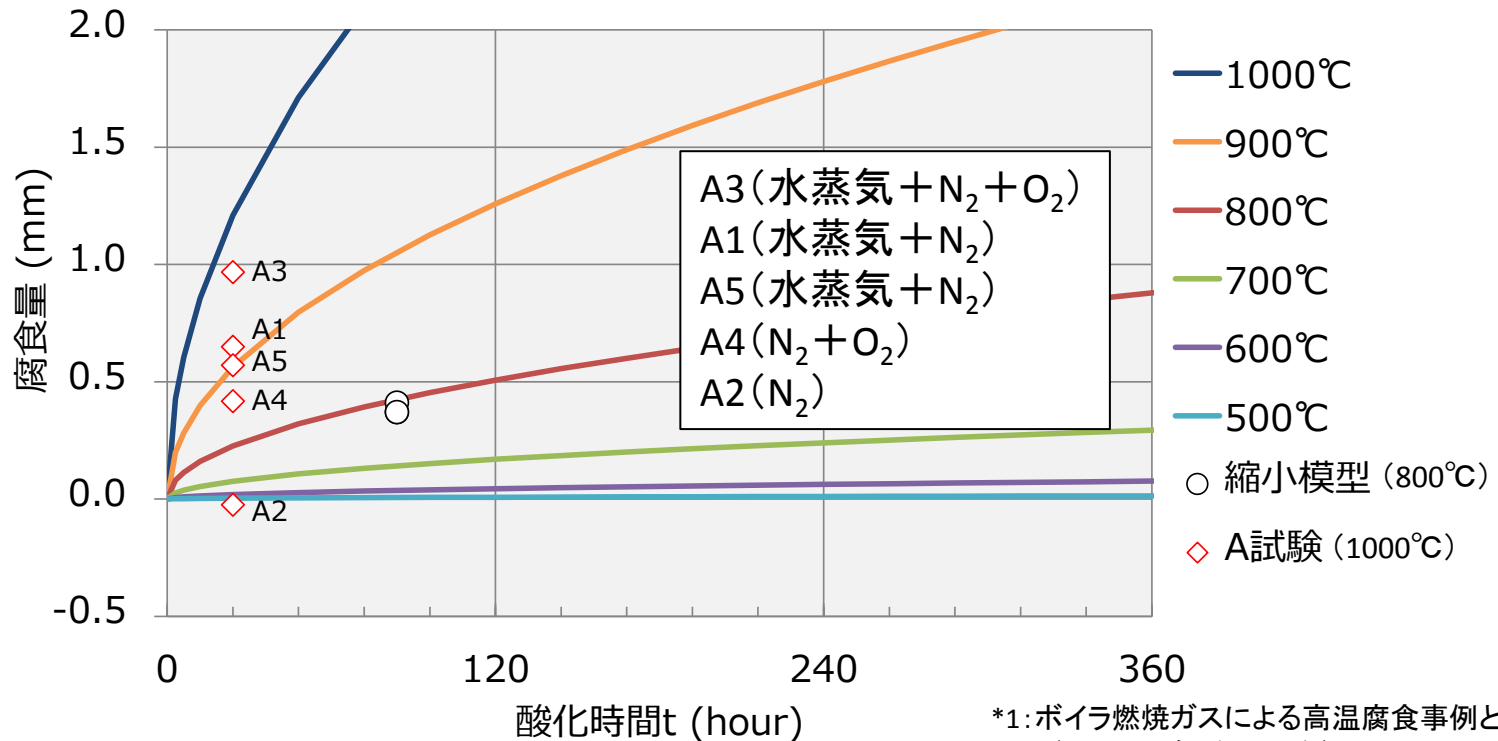
No.46

③ RPVペDESTALの高温鉄筋腐食試験等の実施

鉄筋の高温腐食試験 A試験

■ 実験結果

- 中森-EPRIの回帰式^{*1}は、水蒸気 + O₂環境 (A3) の場合と比較的良好な対応を示した。
 - 他の水準はいずれも、中森-EPRIの回帰式よりも少ない腐食量となった。
- ⇒ B, C試験にて、コンクリートかぶりが有る場合および長期加熱のデータを取得予定。



*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)

中森-EPRIの回帰式^{*1}とA試験結果の比較

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.47

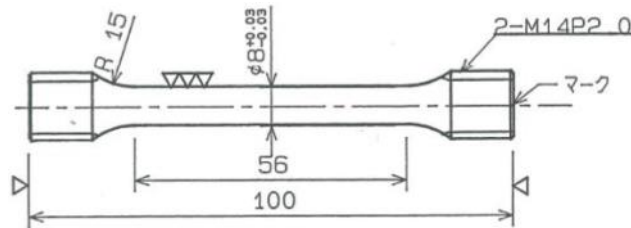
③ RPVペDESTALの高温鉄筋腐食試験等の実施 高温を経験した鉄筋の常温での引張試験

■ 背景・目的

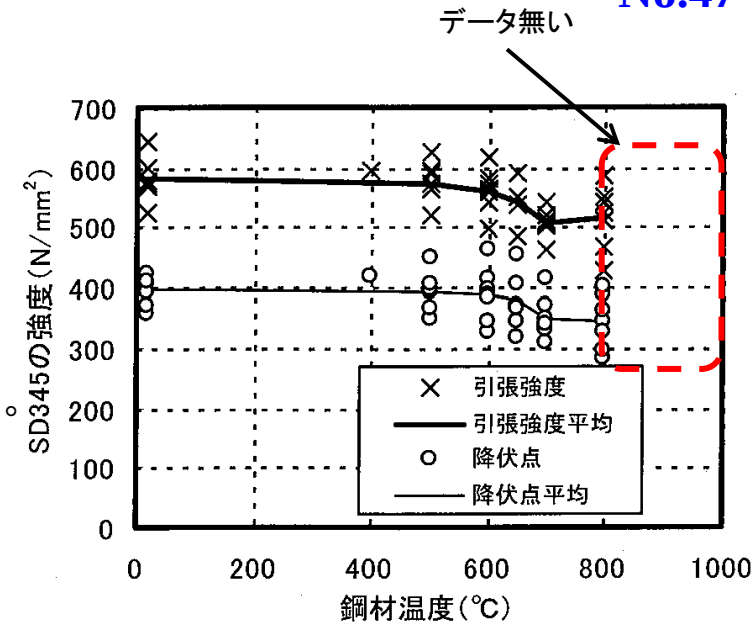
- 最新の事故進展解析の結果によると、1F-1RPVペDESTALが受ける高温 ⇒ 最大1200℃程度
- 一方、構造材料の耐火性ガイドブック(日本建築学会)には、鉄筋の加熱冷却後の常温時強度のデータは、800℃まで示されている。
⇒ 800℃を超える範囲についてのデータが必要

■ 試験概要

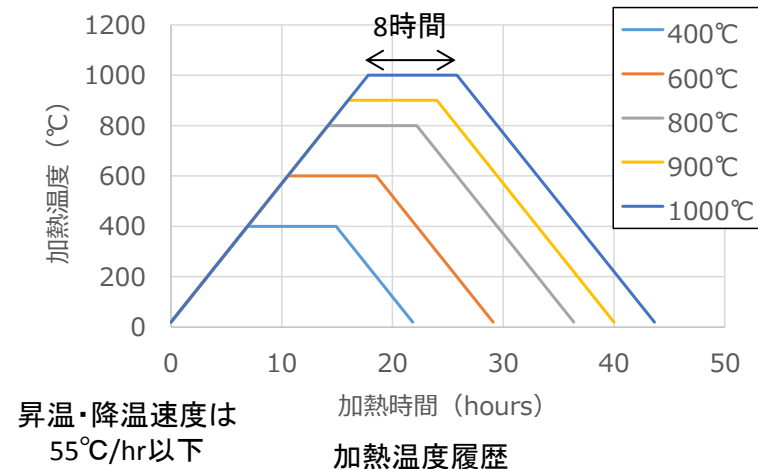
- 鉄筋を所定の温度と時間で加熱(1.1A試験と同じ装置)した後、常温まで冷却し、その鉄筋から下図のような引張試験片を切削加工で作製し、引張試験を実施する。
- 使用する鉄筋:SD345材の異形鉄筋D25、D35
- 温度:常温、400、600、800、900、1000℃
- 取得データ:応力-ひずみ曲線、降伏点、引張強度、伸び、絞り



JIS 14号 引張試験片



SD345の加熱冷却後の常温時強度
(構造材料の耐火性ガイドブックより引用)



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

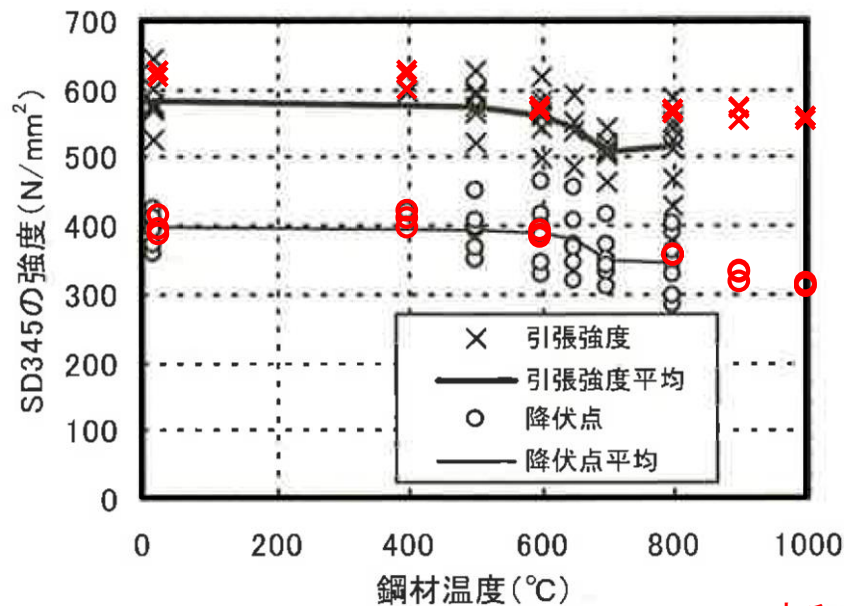
No.48

③ RPVペDESTALの高温鉄筋腐食試験等の実施

高温を経験した鉄筋の常温での引張試験

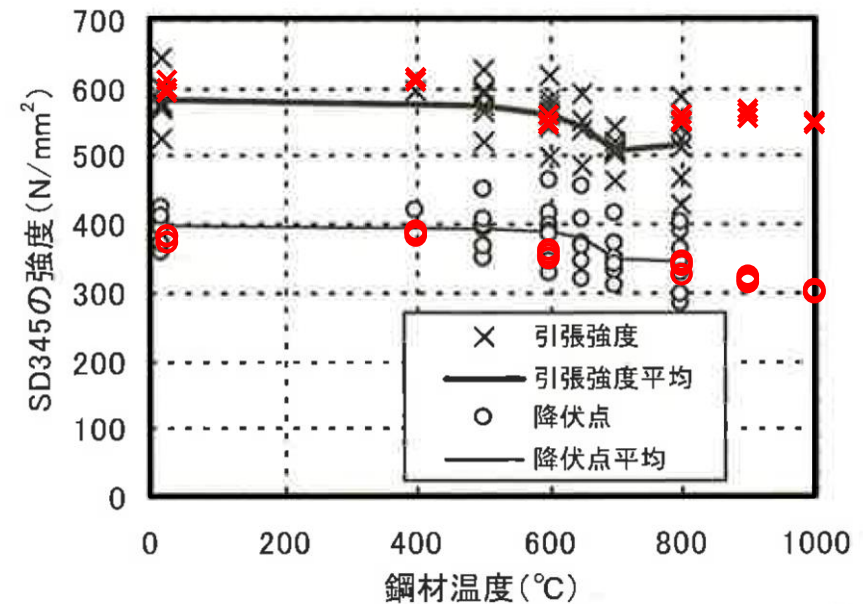
■ 実験結果

- 800℃までは、降伏点および引張強度とも、耐火性ガイドブック(日本建築学会)に示される傾向と概ね同様の傾向を示した。
- 800℃以降1000℃までは、降伏点はやや低下したが、引張強度はほぼ一定値を示した。



D25 (SD345材)

赤印: 今回の実験結果



D35 (SD345材)

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.49

③ RPVペデスタルの高温鉄筋腐食試験等の実施

鉄筋の高温腐食試験 腐食生成物の分析

■ 目的

- H26～27年度に実施した縮小模型800℃試験体から採取した、鉄筋の高温腐食生成物(剥離物の他に、黒皮、コンクリート単体も)を分析し、高温腐食生成物の成分や組織、高温腐食に影響を与える要因などについて評価を行う。
- 実施する分析は以下の通りである。
 - SEM-EDX(エネルギー分散型X線分光法)
 - XRD(X線回折)
 - SEM観察(反射電子像)
 - EPMA(電子線マイクロアナライザ)
 - 断面組織観察

⇒元素の同定
⇒化合物の同定
⇒電子顕微鏡
⇒元素の分布をマッピング
⇒粒界などを観察



上図: はがれた腐食生成物(剥離物)

左図: 横筋D10の腐食状況

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.50

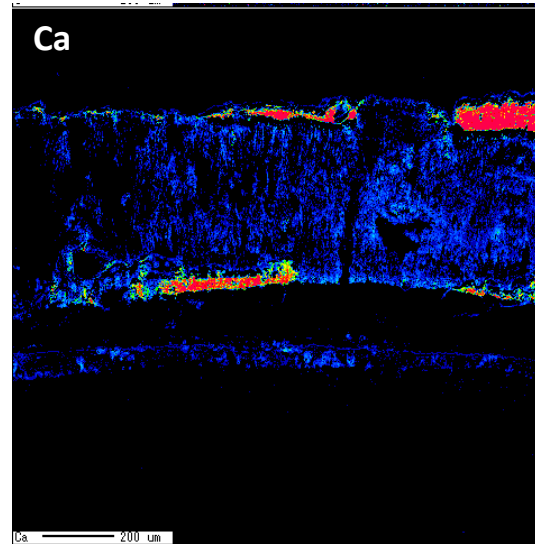
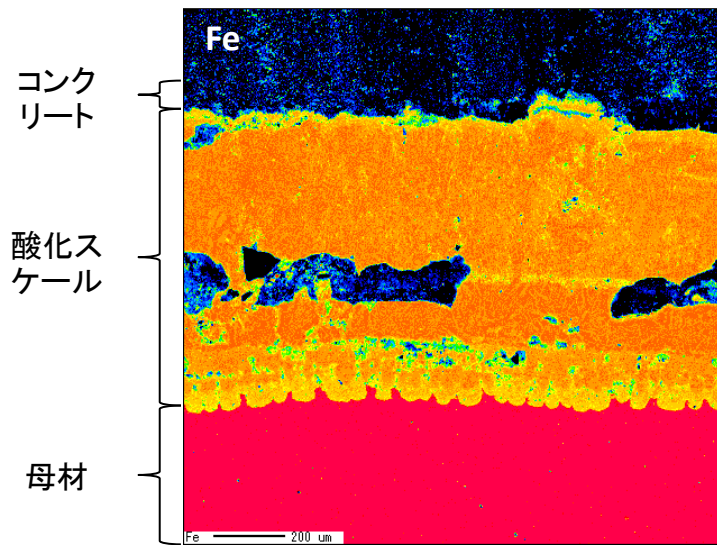
③ RPVペデスタルの高温鉄筋腐食試験等の実施

鉄筋の高温腐食試験 腐食生成物の分析

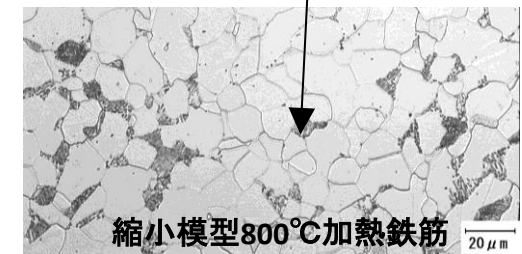
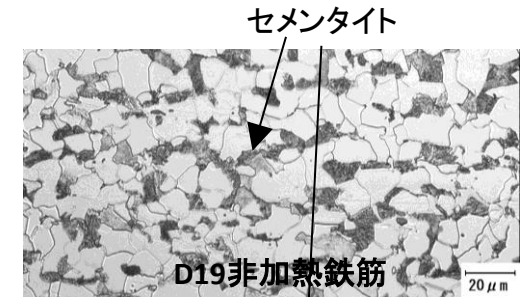
■ 分析結果の例

- SEM/EDX、XRDの結果から、剥離物(腐食物とコンクリート片の混合物)には、黒皮部分(鉄筋由来)およびコンクリート部分(コンクリート由来)から検出された成分以外の新たな化合物は検出されなかった。
- EPMAの結果から、コンクリート層と鉄筋の酸化スケール層は分離しており、酸化スケール中にはコンクリート由来の成分がほとんど存在していなかった。
- 金属の組織観察から、鉄筋が変態点近傍若しくはそれ以上の温度で加熱されていたことを示すセメンタイトの球状化が認められた。

⇒以上の結果から、腐食生成物は、主に鉄筋の加熱による酸化で生成されたものであったと思われる。



EPMA分析結果



金属組織の観察結果

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

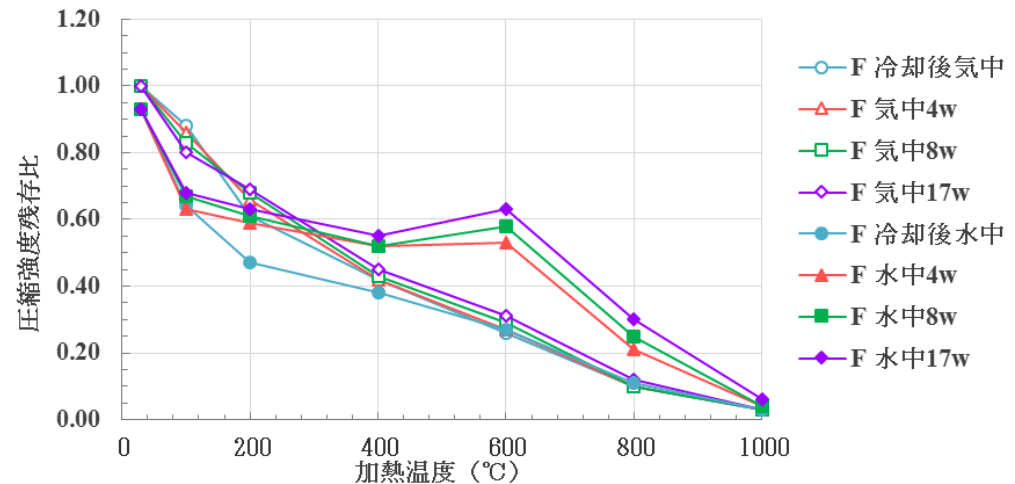
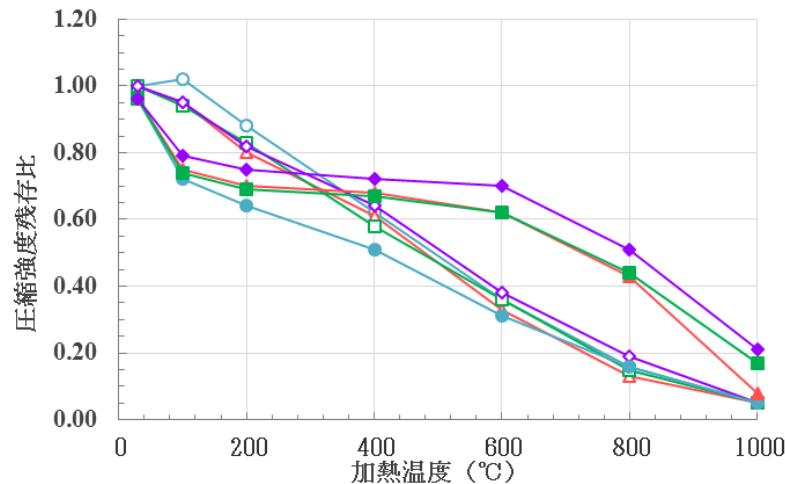
No.51

③ RPVペデスタルの高温鉄筋腐食試験等の実施

円柱試験体による高温加熱・曝露試験結果の分析

■ 背景・目的

- H26～27年度に円柱試験体による高温加熱・曝露試験を実施し、高温加熱・曝露後の普通コンクリートとFA(フライアッシュ)コンクリートの残存強度を評価した。(下図参照)
- 普通コンクリートと比べて、FAコンクリートは全体的に残存比が小さく、特に比較的低温での加熱後気中曝露の範囲で顕著である。
- 本年度は、試験後保管していた試験体を用いて、普通コンクリートとFAコンクリートの圧縮強度残存比の差についての分析を行う。組織の粗密に着目し、分析方法としてはSEM観察と反射電子像を用いた空隙率の評価とする。



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.52

③ RPVペデスタルの高温鉄筋腐食試験等の実施

円柱試験体による高温加熱・曝露試験結果の分析

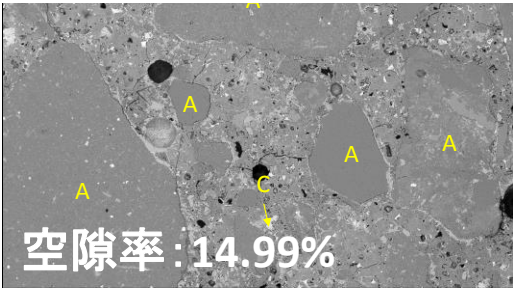
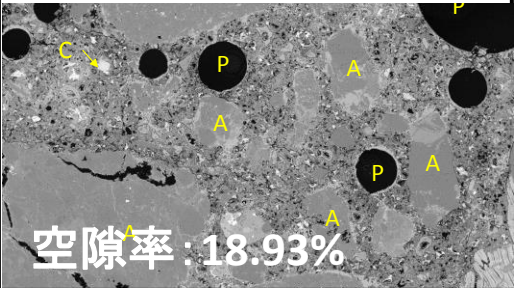
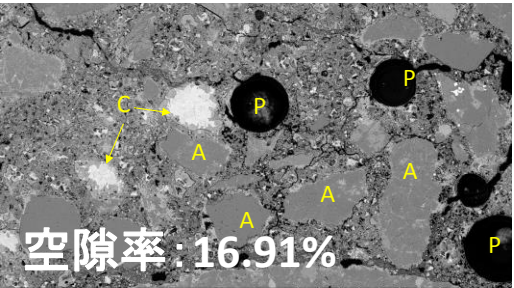
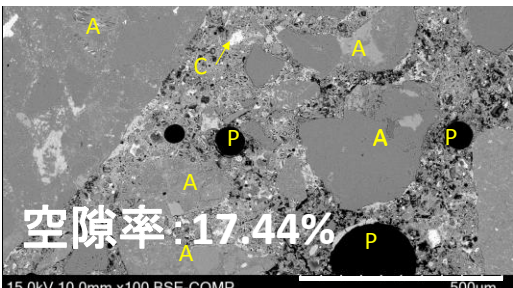
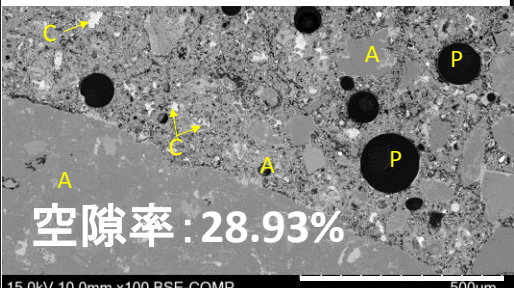
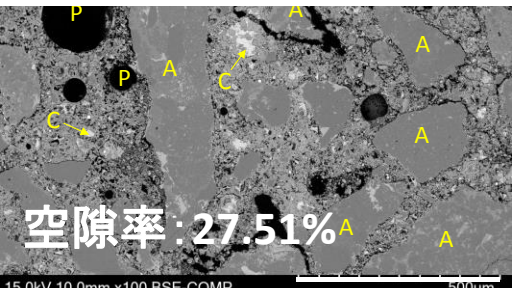
■ 分析結果

➤ セメントペースト部は、普通コンクリート、FAコンクリートとも、常温よりも加熱した方が、全体的にやや暗い色調で表示されており、空隙の増加が推察される。

➤ 空隙率も、加熱した方が大きい。

⇒加熱による空隙の増大は、乾燥による収縮ひび割れ等の発生が原因と考えられる。

⇒FAコンクリートでは、さらに、フライアッシュの反応により生成された水和物が脱水し、粗な組織となったため強度低下が生じたと考えられる。

	常温	100℃	200℃
普通コン クリート	 空隙率: 14.99% 15.0kV 10.0mm x100 BSE-COMP 500μm	 空隙率: 18.93% 15.0kV 10.0mm x100 BSE-COMP 500μm	 空隙率: 16.91% 15.0kV 10.0mm x100 BSE-COMP 500μm
FAコンク リート	 空隙率: 17.44% 15.0kV 10.0mm x100 BSE-COMP 500μm	 空隙率: 28.93% 15.0kV 10.0mm x100 BSE-COMP 500μm	 空隙率: 27.51% 15.0kV 10.0mm x100 BSE-COMP 500μm

SEM画像(反射電子像)

A:骨材
C:セメント
P:気泡、空隙

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

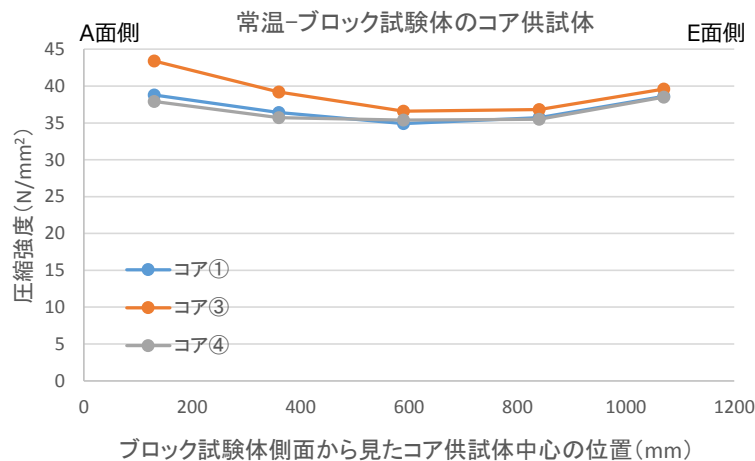
No.53

③ RPVペデスタルの高温鉄筋腐食試験等の実施

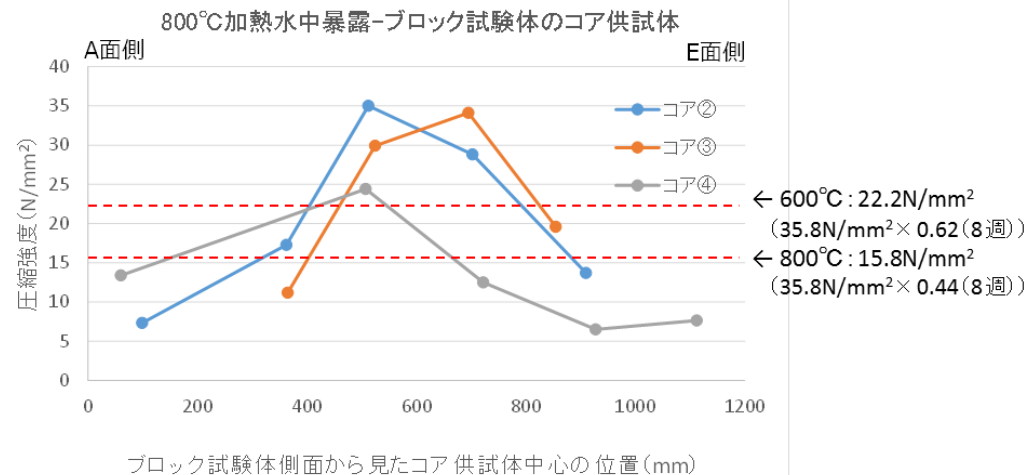
円柱試験体による高温加熱・曝露試験結果の分析

■ 背景・目的

- H26～27年度にブロック試験体による高温加熱・曝露試験を実施し、大断面部材における高温加熱・曝露後の断面内残存強度分布を評価した。(下図参照)
- 断面中央では600℃に達していたが、円柱試験体での600℃加熱後の残存強度比よりも高い結果となっている。
- 本年度は、試験後保管していた試験体を用いて、円柱試験体とブロック試験体の圧縮強度残存比の差についての分析を行う。組織の粗密に着目し、分析方法としてはSEM観察と反射電子像を用いた空隙率の評価とする。



常温試験体



800℃試験体(加熱後水中曝露)

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.54

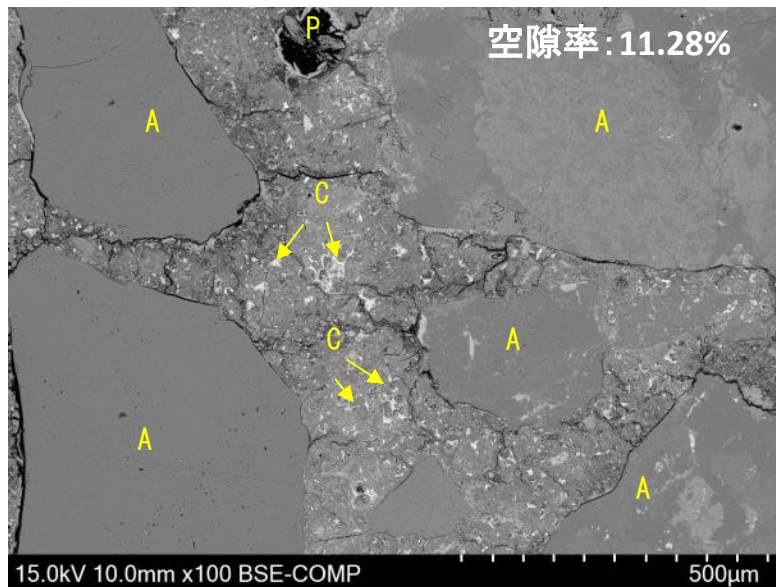
③ RPVペデスタルの高温鉄筋腐食試験等の実施

円柱試験体による高温加熱・曝露試験結果の分析

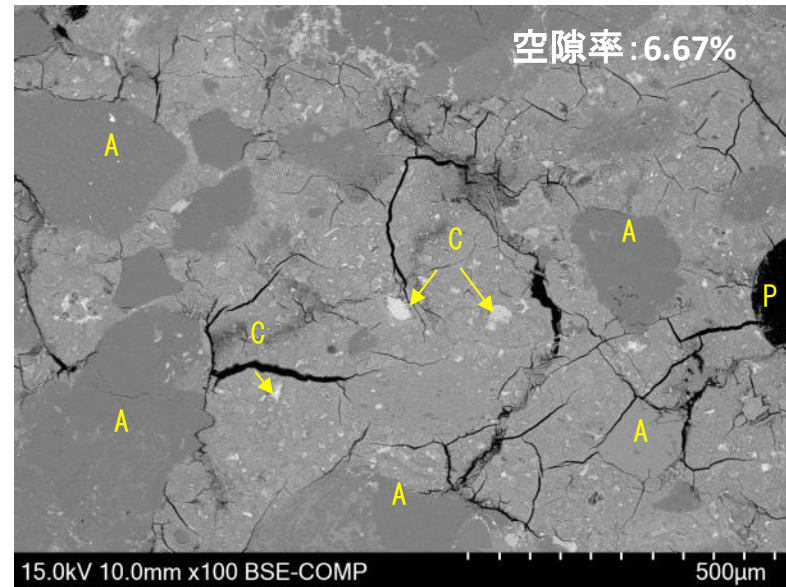
■ 分析結果

- セメントペースト部は、「ブロック試験体」のほうが「円柱試験体」よりも全体的に明るい色調で表示されており、組織の緻密化が推察される。
- 空隙率も、「ブロック試験体」のほうが「円柱試験体」よりも小さい。

⇒ブロック試験体では、加熱による変形が拘束され、圧縮応力状態になったことで、セメントペーストが圧密するとともに骨材-ペースト界面の剥離によるひび割れが生じにくくなったことが原因と考えられる。



円柱試験体



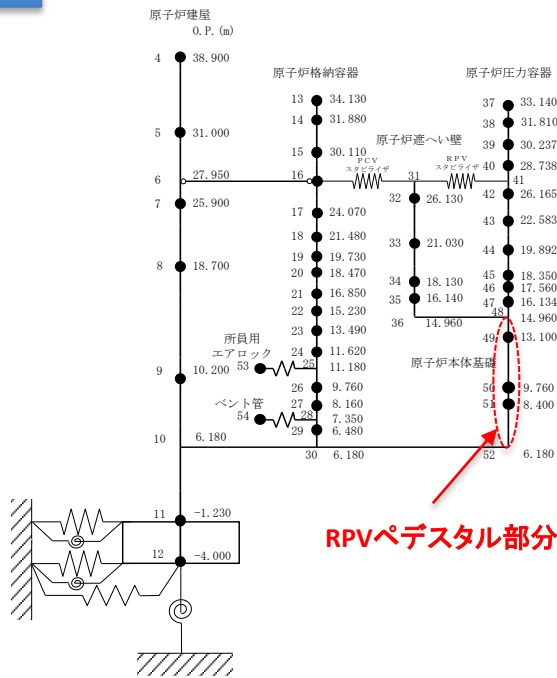
ブロック試験体

SEM画像(反射電子像)

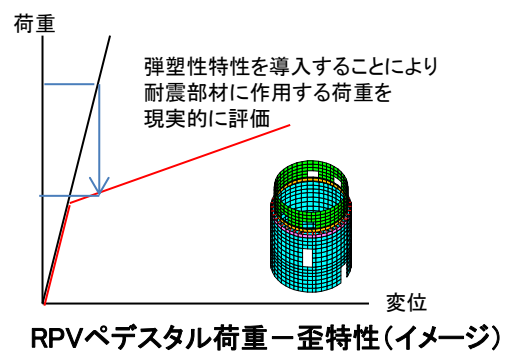
④地震応答解析手法の開発及び検証

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

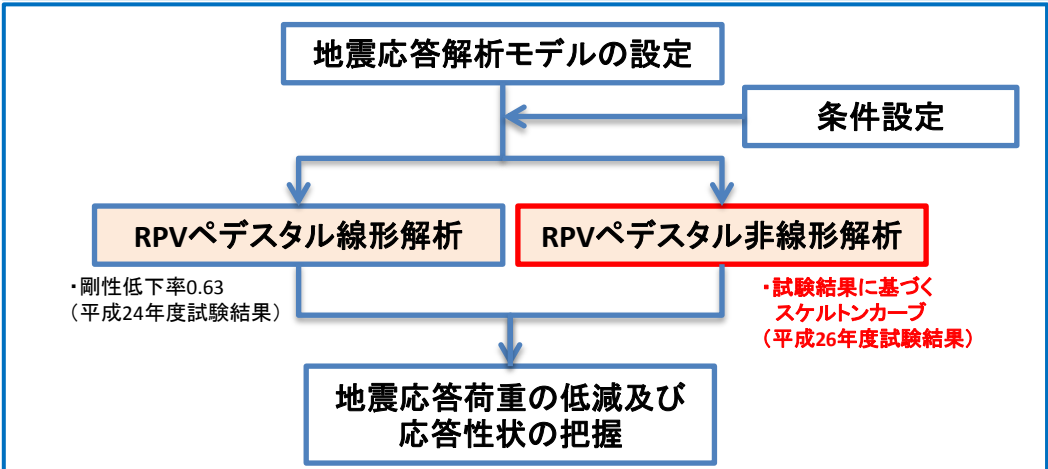


RPV-PCV/RPV系連成モデル(1F-1)



RPVペDESTAL荷重一歪特性(イメージ)

◆ 目的:RPVペDESTALの高温耐力評価試験結果から得られた荷重一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一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):
 - ・デブリ取り出しコンテナ(遮蔽設備等を含む):約7000ton
 - ・デブリ取り出し設備(取り出し装置、セル等):約6100ton

④地震応答解析手法の開発及び検証

地震荷重の低減に向けた地震応答解析結果

1F-1

- ◇RPVペDESTAL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。

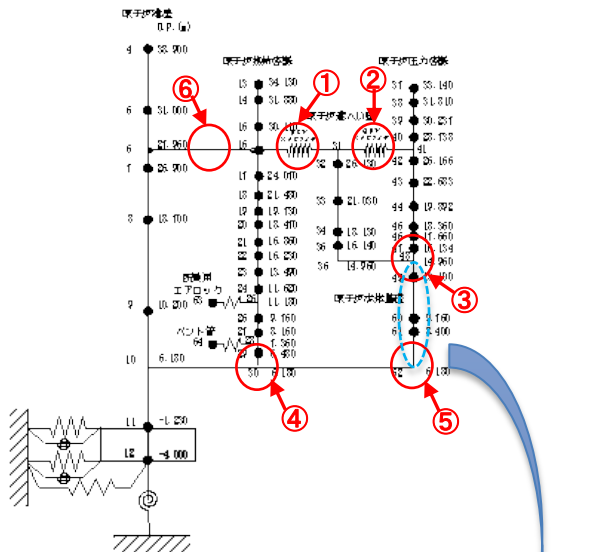


図 1F-1地震応答解析モデル例

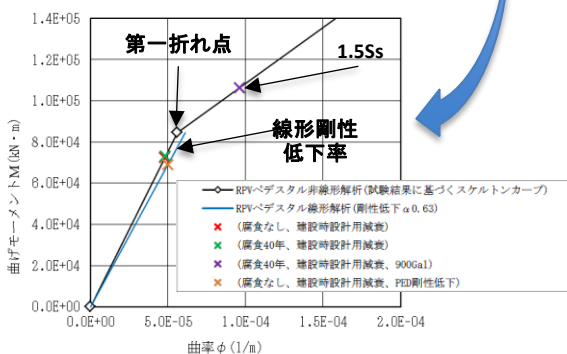


図 1F-1RPVペDESTAL基部のスケルトンカーブ(M-φ)

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ベDESTAL 剛性低下 (0.63)	RPVベDESTAL 非線形	RPVベDESTAL 剛性低下 (0.63)	RPVベDESTAL 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ベDESTAL)	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DESTALの非線形特性は、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、JEAC4601の評価式からスケルトンカーブを設定

1F-1

④地震応答解析手法の開発及び検証

燃料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

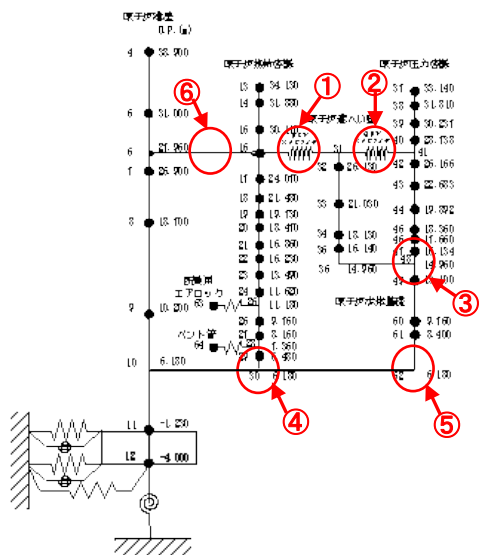


図 1F-1地震応答解析モデル例

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ベデスタル 剛性低下(0.63)		
		デブリ上取り出し	デブリ横取り出し	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ベデスタル)	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。

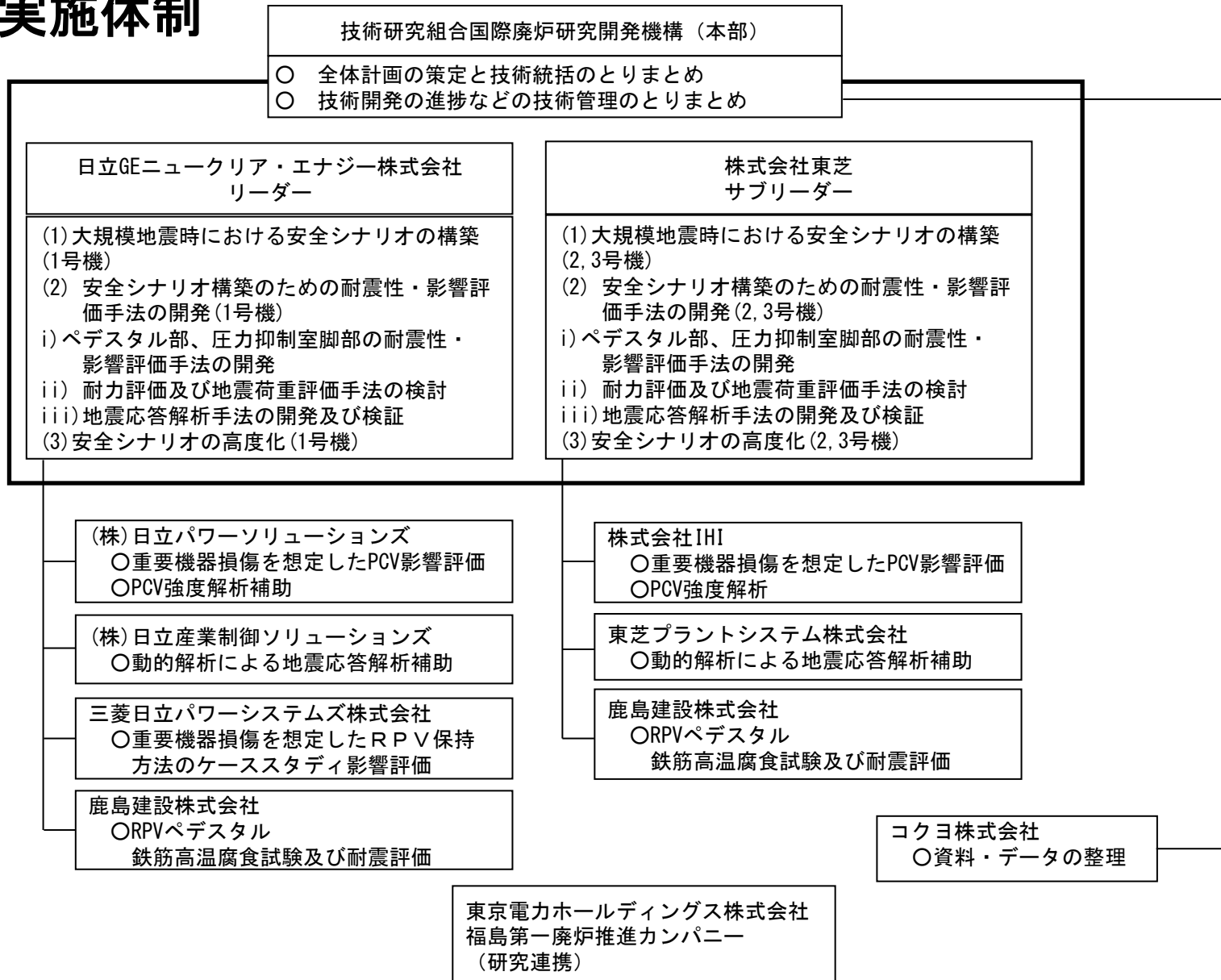
4. まとめ(1/2)

- 大規模地震時における安全シナリオ[安全機能の維持または事故収束における対応の流れ]を構築するため、1次検討用として大規模地震による破損想定箇所の検討およびその波及的影響を整理した。
また、各波及的影響に対処するための安全シナリオを検討し、安全シナリオの高度化を図るための指標としてイベントツリーの作成を開始した。
- S/C脚部について
 - ◇1号機は、ダウンカマ止水を想定した解析モデルにて解析・検討を行った。
その結果、S/C脚部は許容値以内であるが、一方でダウンカマ取付部は許容値を超えることが分かった。なお、万一ダウンカマ取付部が破損することを想定しても、S/C内バッファ容量が十分大きいため機動的対応が可能である。
 - ◇2/3号機は、ベント管止水状態において、ベント管取付け部の1次応力は許容以内であることを確認した。

4. まとめ(2/2)

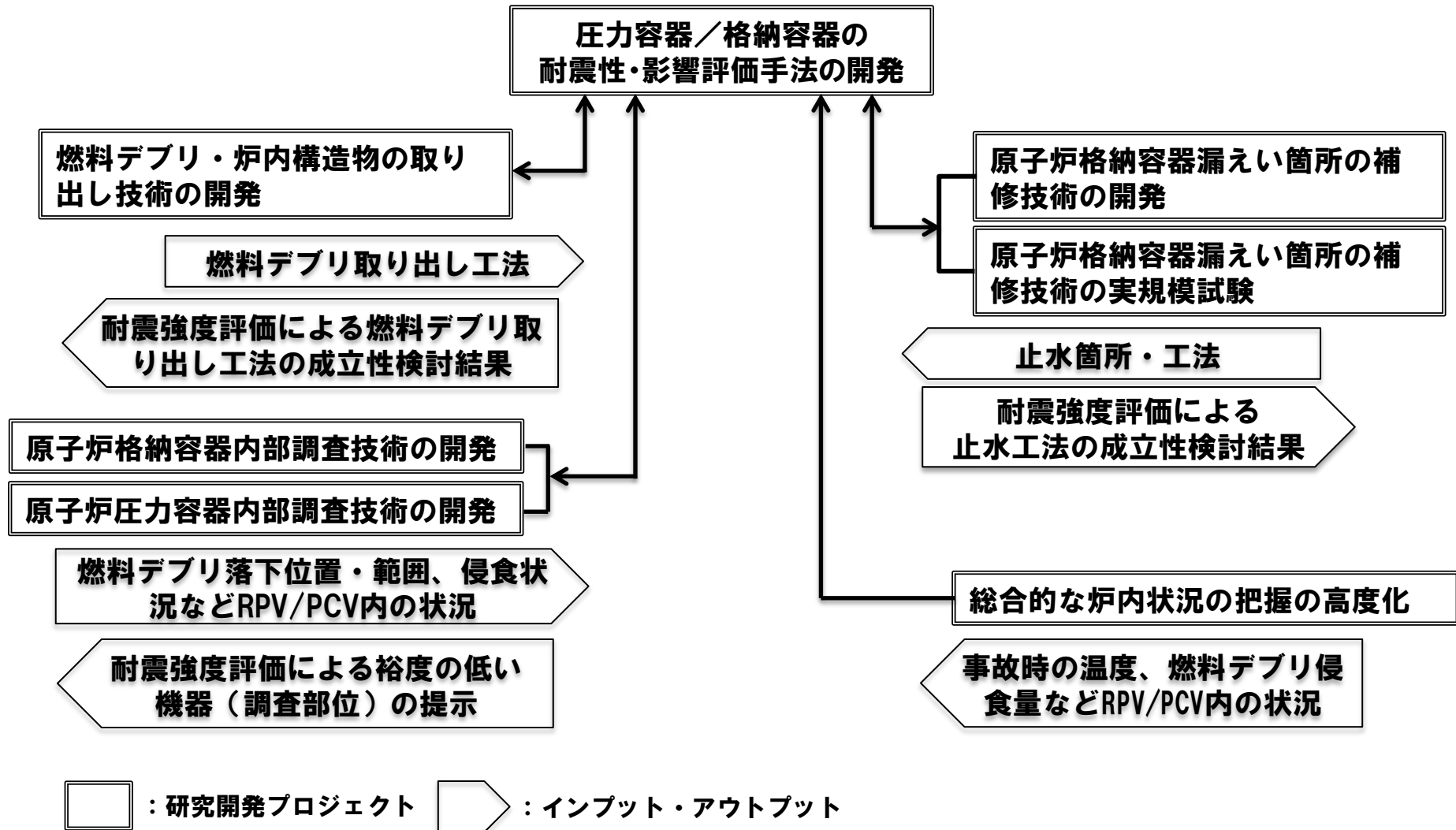
- RPVペデスタルについて、最新の知見に基づいた条件に対し、3次元FEM解析によりSA(シビアアクシデント)後のペデスタルの耐震性の評価を実施し、いずれのケースにおいても、CCV規格の許容値以内であることを確認した。
- 鉄筋コンクリートについて、鉄筋の高温腐食試験を実施し、既往文献の腐食量以下であることを確認した。また、高温履歴を受けた鉄筋の強度試験を実施し、既往文献とほぼ同等であることを確認した。
- 地震荷重の低減に向けた地震応答解析結果
RPVペデスタルの高温耐力評価試験結果を考慮したスケルトンカーブを用いた発生地震荷重とペデスタル剛性低下を考慮した発生地震荷重は、ほぼ同等であることを確認した。
- 燃料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した。

12. 実施体制



12. 実施体制

他研究開発プロジェクトとの連携



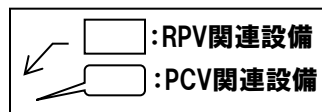
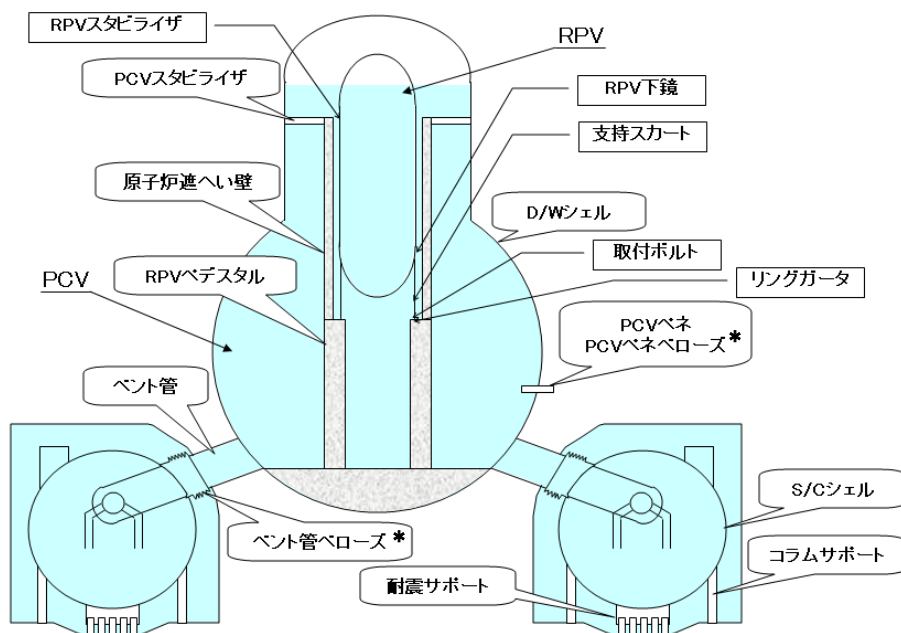
補足資料

**平成27年度までの「圧力容器／格納容器の健全性
評価技術の開発」でのRPV/PCV耐震性評価結果まとめ**

1. 目的

No.63

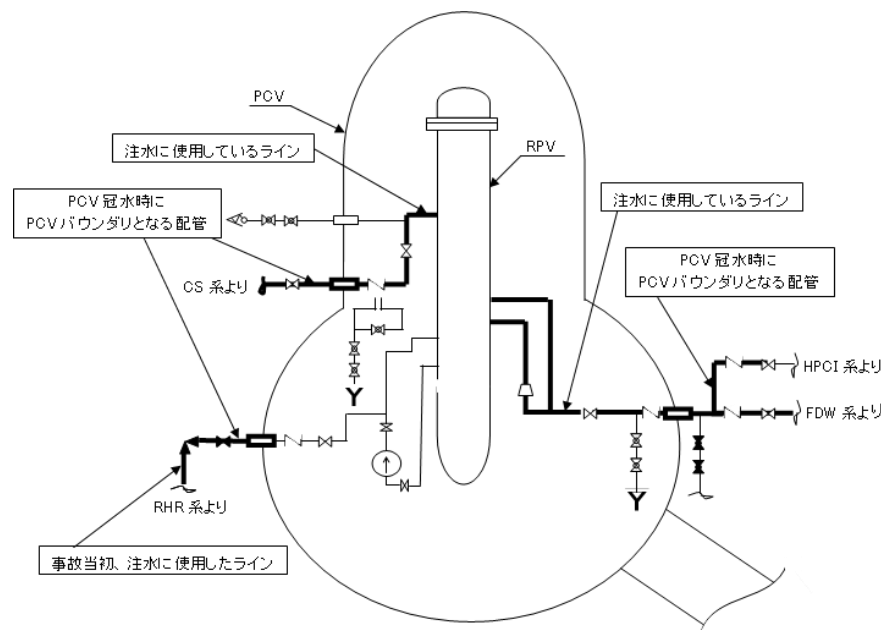
- 今後想定される廃炉作業の各プロセスについて、腐食による経年劣化や燃料デブリ落下の影響を考慮した耐震強度評価に基づき、RPV/PCVの構造健全性を評価し、燃料デブリ取り出しやPCVの補修(止水)等の工法成立性を評価する。
- 燃料デブリ取り出しまでの長期間の経年劣化に伴うリスク低減のための腐食抑制策の開発を行う。



RPV: 原子炉圧力容器
PCV: 原子炉格納容器

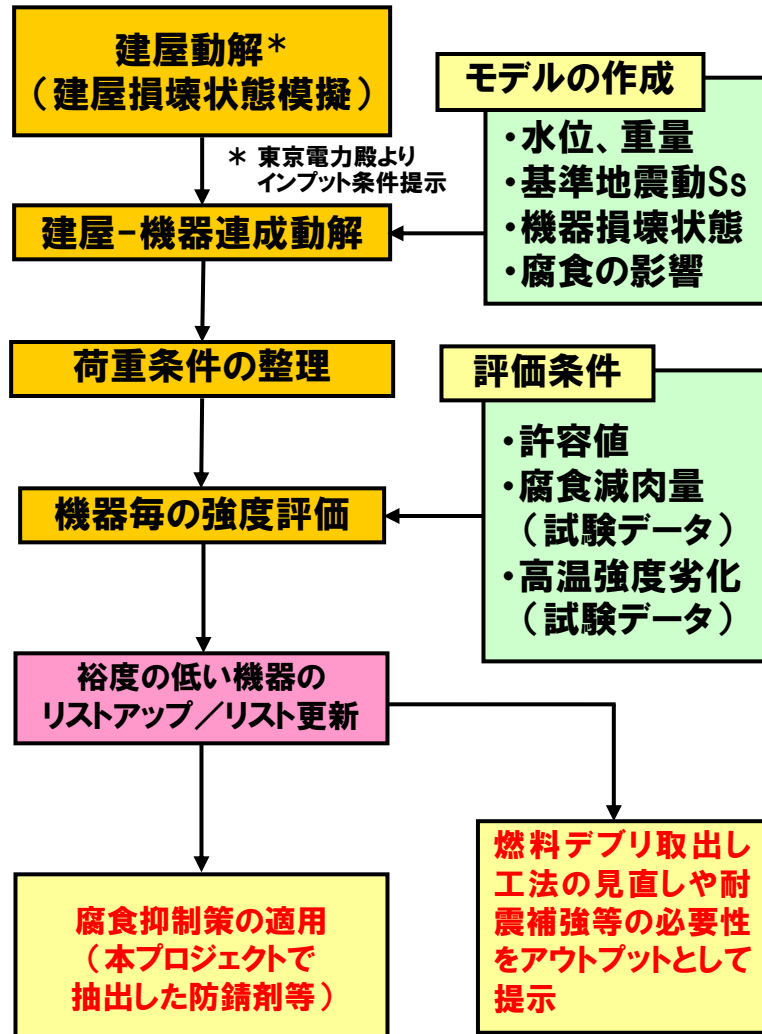
* 当該材質はステンレス鋼であり、すでにSCCによるひびが発生している可能性があるため、補修もしくは冠水パウンダリから除外される工法を検討中であり、評価対象外とする。

健全性評価(余寿命評価)対象部位(例)



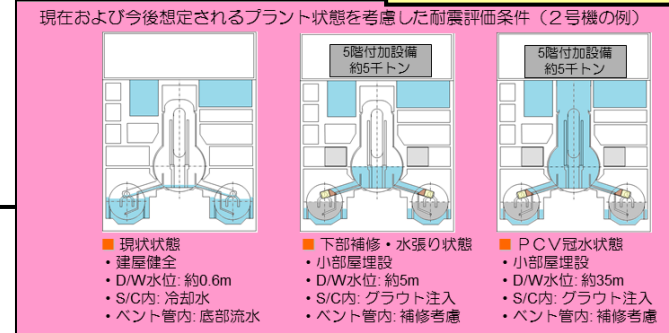
太線範囲: 原子炉注水配管

2. 実施概要



腐食減肉量等を考慮した構造健全性評価
の概略フロー(例)

プラント状態の想定



評価方針:

①評価設備・部位の選定

腐食減肉によって構造強度が低下した場合の「RPV内注水漏えい」、「PCVバウンダリ機能喪失」および「RPV・PCV支持機能喪失」への影響を考慮して選定。各機器が健全な状態(腐食発生前)の既存評価で裕度が小さい部位を代表として評価。

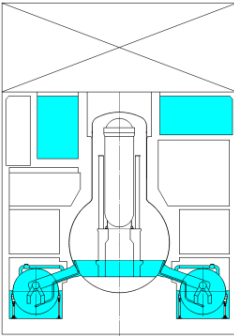
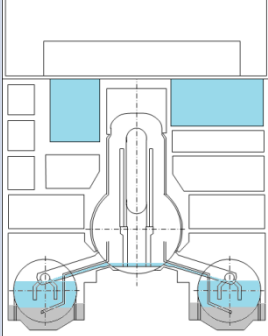
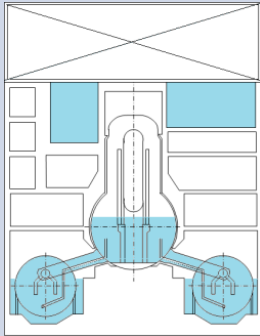
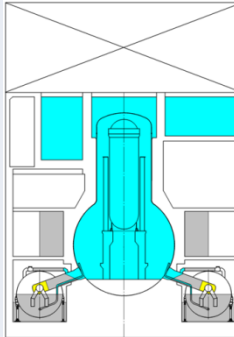
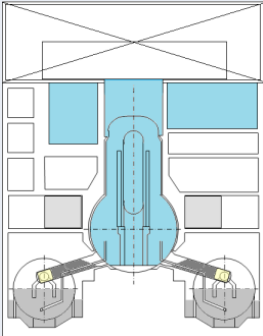
②腐食減肉量の算出

震災から燃料取り出しまで10年、15年、40年を想定して試験結果より算出。

③応力評価

②の腐食減肉量を考慮して、一次応力を評価。許容値はJSME設計・建設規格等の供用状態Ds(温度50℃)。

- 1) 補修や最新計画を反映した地震応答解析モデルと評価条件
- ◆各プラント毎に燃料デブリ取出し想定プラント状態2ケースを設定:PCV補修検討状況を考慮
- ⇒完全冠水モデル:優先して検討、気中(現状水位)モデル:冠水以外の状態による評価を念頭に設定
- ◆地震応答解析による荷重から各機器の強度評価の実施:パラメータ解析による評価部位の影響分析
- ⇒PCV内水位(完全、部分冠水)、腐食減肉(15年後、40年後)、減衰定数(建設条件、合理的減衰)

プラント ／ケース	1F-1	1F-2	1F-3
H26-1 (気中(現状 水位))	 ・将来想定:パラメータ(10年後、15年後、40年後) ・建屋損傷モデル ・D/W水位:約2.9m ・S/C内:満水 ・トラス室:OP3680 ・ベント管内:満水 ・真空破壊管内:満水 ・オペフロ階付加設備:パラメータ(なし、約5100t、約6100t) ・小部屋埋設:なし ・減衰定数:パラメータ (1)コンクリート7%、鋼材4%(レギュラリーガイド) (2)コンクリート5%、鋼材1%(建設時設計用) ・地震波:現行Ss	 ・将来想定:パラメータ(15年後、40年後) ・建屋損傷モデル ・D/W水位:約0.6m ・S/C内:コンクリートOP-1050水位OP3100 ・トラス室:コンクリート(コラムサポ-ト上部ピン位置:OP.-100) ・ベント管内:下部流水 ・オペフロ階付加設備:約4710t ・小部屋埋設:なし ・減衰定数:パラメータ (1)コンクリート7%、鋼材4%(レギュラリーガイド) (2)コンクリート5%、鋼材1%(建設時設計用) ・地震波:現行Ss	 ・将来想定:パラメータ(10年後、15年後、40年後) ・建屋損傷モデル ・D/W水位:約6.5m ・S/C内:満水 ・トラス室:OP.3200 ・ベント管内:満水 ・オペフロ階付加設備:パラメータ(なし、約4710t) ・小部屋埋設:なし ・減衰定数:パラメータ (1)コンクリート7%、鋼材4%(レギュラリーガイド) (2)コンクリート5%、鋼材1%(建設時設計用) ・地震波:現行Ss
H26-2 (完全冠水)	 ・将来想定:パラメータ(15年後、40年後) ・建屋損傷モデル ・D/W水位:ウェル満水 ・S/C内:コンクリートOP.3570 ・トラス室:コンクリート(コラムサポ-ト上部ピン位置:OP.2140) ・ベント管内:補修考慮 ・真空破壊管内:補修考慮 ・オペフロ階付加設備:約6100t ・小部屋埋設:有り ・減衰定数:パラメータ (1)コンクリート7%、鋼材4%(レギュラリーガイド) (2)コンクリート5%、鋼材1%(建設時設計用) ・地震波:現行Ss	1F-3で代表  ・将来想定:パラメータ(15年後、40年後) ・建屋損傷モデル ・D/W水位:ウェル満水(約35m, OP39920) ・S/C内:コンクリートOP1900 ・トラス室:コンクリート(コラムサポ-ト上部ピン位置:OP.-100) ・ベント管内:補修考慮 ・オペフロ階付加設備:約4710t ・小部屋埋設:有り ・減衰定数:パラメータ (1)コンクリート7%、鋼材4%(レギュラリーガイド) (2)コンクリート5%、鋼材1%(建設時設計用) ・地震波:現行Ss	

2)RPV構造健全性評価結果(1F-1 評価ケースH26-1)

評価設備:左図参照
 評価条件:耐震条件—Ss波
 評価温度—50℃
 供用状態—Ds
 腐食減肉量—右記表参照

RPV支持スカート(圧縮)

腐食 年数 (年)	座屈評価値 (—)		許容値 (—)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40		0.199	1		5.02
15	0.189	0.191		5.29	5.23
10		0.184			5.43

※:座屈不等式左辺 = $\alpha B(P/A)/fc + \alpha B(M/Z)/fb$
 (出展: JEAC4601-2008)

RPVスタビライザー引張棒(引張)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40		172	520		3.02
15	165	166		3.15	3.13
10		162			3.20

リングガーダー上部フランジ(曲げ)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40		22	253		11.50
15	21	21		12.04	12.04
10		17			14.88

腐食年数 (年)	減肉量—片面 (mm)	
	低合金鋼	炭素鋼
40	2.86	3.40
15	1.80	2.44
10	1.49	2.15

下部鏡板(一次応力)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40		229	540		2.35
15	230	216		2.34	2.50
10		191			2.82

※:本表の応力強さは工認記載の応力強さを基に
 プラント状態を考慮して係数倍した値を示す。

取付ボルト—ボルト(引張)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40		40	416		10.40
15	39	38		10.66	10.94
10		33			12.60

アンカーボルト—ボルト(引張)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40		30	225		7.50
15	29	29		7.75	7.75
10		26			8.65

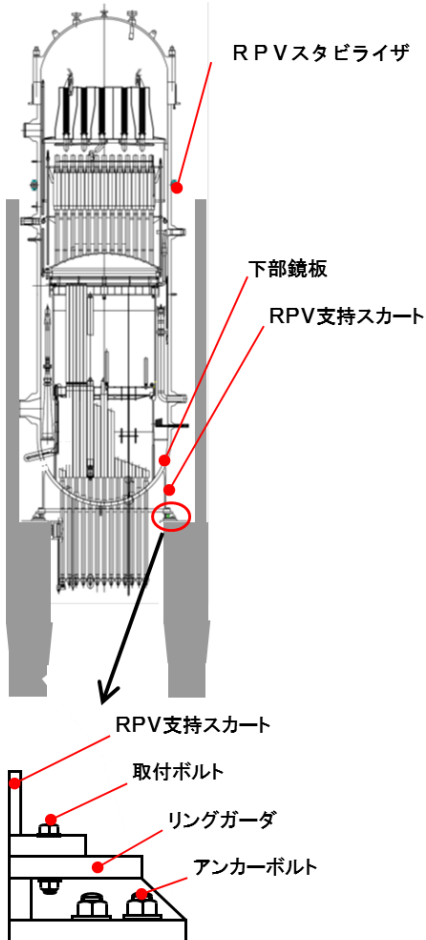


図. 評価対象部位

IRID

設計用:鋼製減衰1% RG(レギュラトリーガイド):鋼製減衰4%

3)RPV構造健全性評価結果(1F-1 評価ケースH26-2)

評価設備:左図参照
 評価条件:耐震条件—Ss波
 評価温度—50℃
 供用状態—Ds
 腐食減肉量—右記表参照

RPV支持スカート(圧縮)

腐食 年数 (年)	座屈評価値 (—)		許容値 (—)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	0.465	0.386	1	2.15	2.59
15	0.446	0.373		2.24	2.68

※:座屈不等式左辺 = $\alpha B(P/A)/f_c + \alpha B(M/Z)/f_b$
 (出展: JEAC4601-2008)

RPVスタビライザー引張棒(引張)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	465	378	520	1.11	1.37
15	446	363		1.16	1.43

リングガードー上部フランジ(曲げ)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	108	81	253	2.34	3.12
15	99	76		2.55	3.32

腐食年数 (年)	減肉量—片面 (mm)	
	低合金鋼	炭素鋼
40	2.86	3.40
15	1.80	2.44
10	1.49	2.15

下部鏡板(一次応力)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	240	229	540	2.25	2.35
15	230	219		2.34	2.46

※:本表の応力強さは工認記載の応力強さを基に
 プラント状態を考慮して係数倍した値を示す。

取付ボルトーボルト(引張)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	186	141	416	2.23	2.95
15	178	137		2.33	3.03

アンカーボルトーボルト(引張)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	128	98	225	1.75	2.29
15	122	95		1.84	2.36

設計用:鋼製減衰1% RG(レギュラトリーガイド):鋼製減衰4%

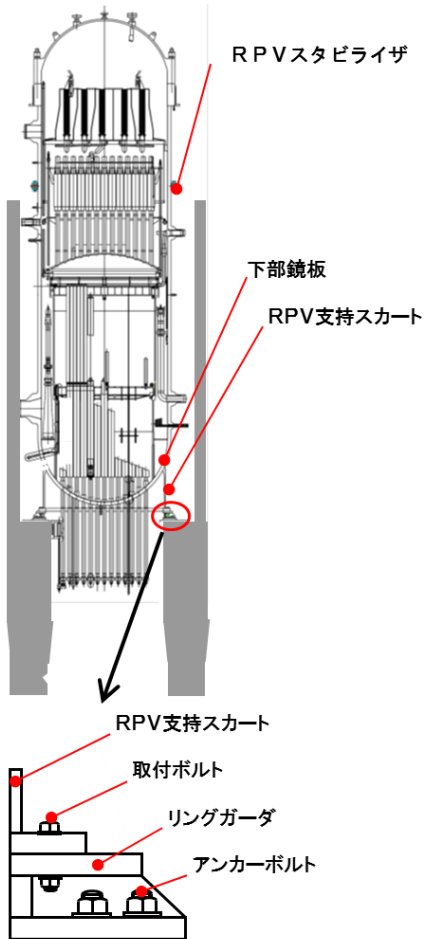


図. 評価対象部位

4)PCV構造健全性評価結果(1F-1 評価ケースH26-1)

評価設備: 図参照

評価条件: 耐震条件 : Ss波
 評価温度 : 50℃
 供用状態 : Ds
 腐食減肉量 : 右記表参照

評価結果:

⑤ PCVスタビライザ(シアラグ)(評価部位:シアラグ取付部)
 一次応力評価結果

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
10	-	107	423	-	3.95
15	105	104	423	4.02	4.06
40	-	118	423	-	3.58

④ 原子炉遮へい壁(評価部位:胴基部)
 一次応力評価結果

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
10	-	111	235	-	2.11
15	127	123	235	1.85	1.91
40	-	168	235	-	1.39

② ベント管(評価部位:ベント管とD/W胴の接合部)
 一次応力評価結果(腐食量両面考慮)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
10	-	111	423	-	3.81
15	142	128	423	2.97	3.30
40	-	171	423	-	2.47

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	

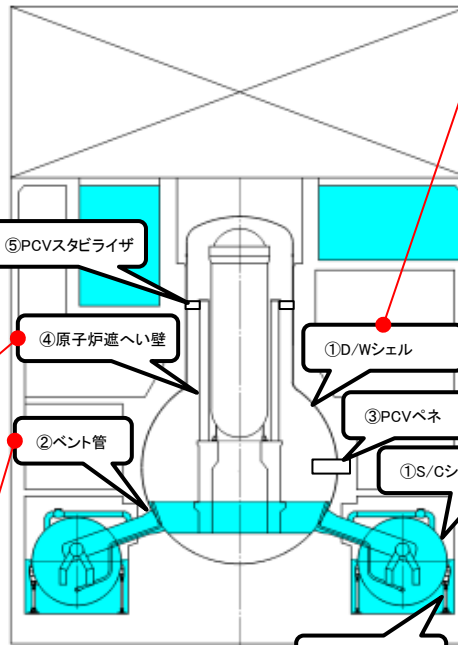


図 評価設備(ケースH26-1)

①-1 D/Wシェル(評価部位:サンドクッション部)
 一次応力評価結果(腐食量両面考慮)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
10	-	122	423	-	3.46
15	143	140	423	2.95	3.02
40	-	167	423	-	2.53

③ PCVペネ<機器ハッチ>(評価部位:補強板と格納容器
 胴との接合部)

一次応力評価結果

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
10	-	47	423	-	9.00
15	52	48	423	8.13	8.81
40	-	57	423	-	7.42

① S/Cシェル(評価部位:一般部)
 一次応力評価結果(腐食量両面考慮)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
10	-	180	282	-	1.56
15	201	174	282	1.40	1.62
40	-	246	282	-	1.14

⑥コラムサポートについては、燃料デブリ取出し時を想定し、S/C脚部補強なしでの評価ケースとして、「S/C内水抜き(気中工法)の場合」、「満水工法でベント管止水、S/C内埋設量低減(クエンチャ止水)の場合」、「気中工法でベント管止水、S/C内埋設量低減(クエンチャ止水)の場合」の3ケースについて詳細評価を実施。(次々頁以降の6)~8)参照)

注)建設時設計用:鋼製減衰1% RG(レギュラトリガイド):鋼製減衰4%

5)PCV構造健全性評価結果(1F-1 評価ケースH26-2)

評価設備: 図参照

評価条件: ・耐震条件 : Ss波
・評価温度 : 50°C
・供用状態 : Ds
・腐食減肉量 : 右記表参照

評価結果:

1号機 ドライウェル

推定減肉量(片面) (mm)

事故後	15年	40年
推定減肉量	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	15年	40年
推定減肉量	1.36	2.30

①-1 D/Wシェル(評価部位: サンドクッション部)
一次応力評価結果(腐食量両面考慮)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
15	274	264	423	1.54	1.60
40	343	325	423	1.23	1.30

③ PCVペネ<機器ハッチ>(評価部位: 補強板と格納容器
胴との接合部)

一次応力評価結果

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
15	186	180	423	2.27	2.35
40	212	203	423	1.99	2.08

① S/Cシェル(評価部位: 一般部)

一次応力評価結果(腐食量両面考慮)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
15	27	27	282	10.44	10.44
40	34	34	282	8.29	8.29

⑥コラムサポート : S/C脚部補強により、評価対象外

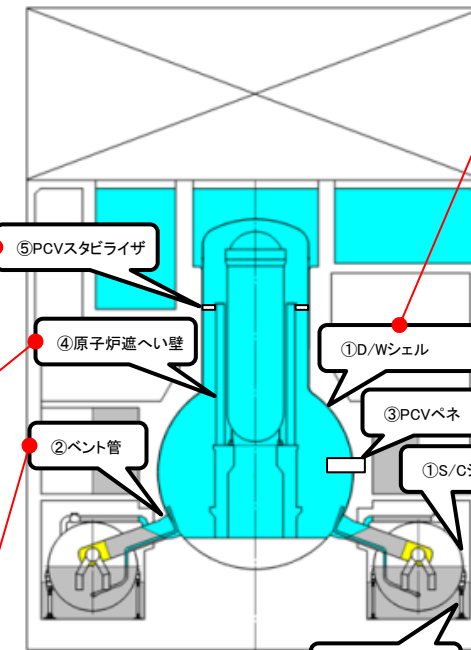


図 評価設備(ケースH26-2)

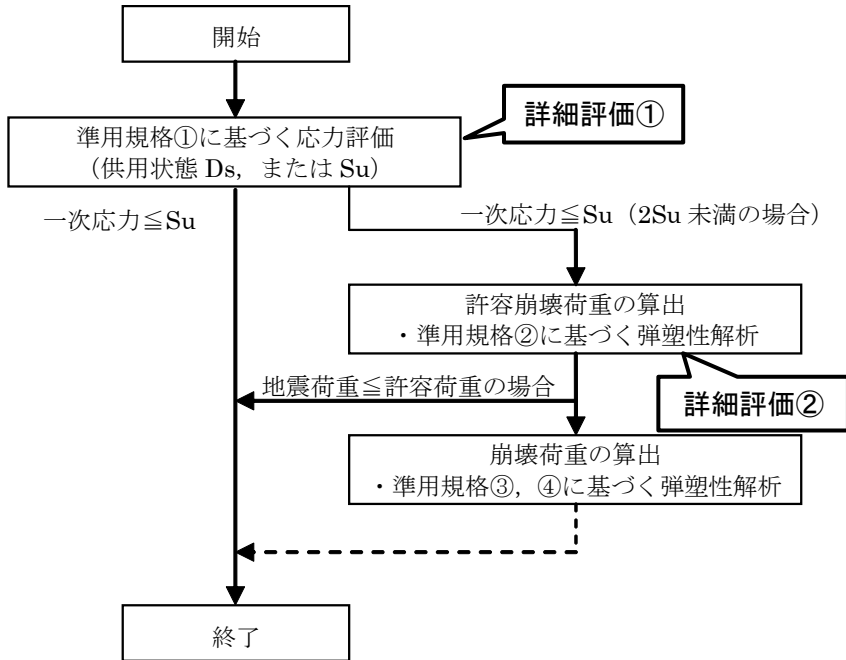
©International Research Institute for Nuclear Decommissioning

注)建設時設計用: 鋼製減衰1% RG(レギュラトリガイド): 鋼製減衰4%

6)PCV構造健全性評価 詳細評価概要 (1F-1)

準用規格

- ① JEAC4601-2008 原子力発電所耐震設計技術規程
- ② JSME SNC1-2005 発電用原子力設備規格 設計・建設規格
- ③ JSME SNA1-2012 発電用原子力設備規格 維持規格
(添付E-16 2倍勾配法を準用し、2倍勾配点を崩壊限界とする。)
- ④ JSME S NX2-2014 発電用原子力設備規格 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 鋼製格納容器編) 弾塑性解析の解が収束しなくなる直前の状態をもって崩壊限界とみなす。



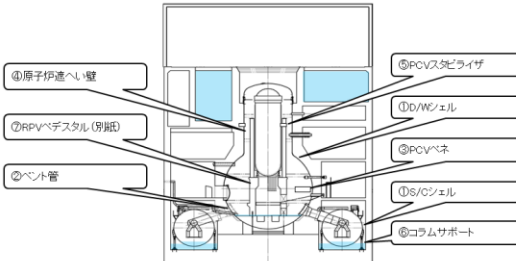
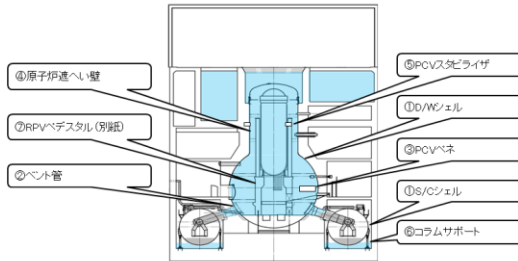
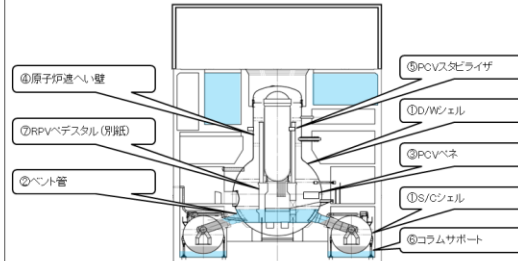
S/C脚部補強なしで実現可能性を確認するため、評価ケースとして、「S/C内水抜き(気中工法)の場合」、「満水工法でベント管止水、S/C内埋設量低減(クエンチャ止水)の場合」および「気中工法でベント管止水、S/C内埋設量低減(クエンチャ止水)の場合」の3ケース(次頁参照)を選定し、詳細評価を実施した。

詳細評価は左図のフローに基づき実施した。ここで、気中工法の評価は、H26-1の地震応答解析による地震荷重を代表させて用いた。また、満水工法の評価は、H26-2の地震応答解析による地震荷重を代表させて用いた。

7)PCV構造健全性評価結果(1F-1 詳細評価①)

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、詳細評価を実施した。詳細評価①では「JEAC4601-2008 原子力発電所耐震設計技術規程」を準用した弾性解析による応力評価を実施した。

弾性解析

対象機器	S/C内水抜き(気中工法)の場合				満水工法でベント管止水、S/C内埋設量低減(クエンチャ止水)の場合						気中工法でベント管止水、S/C内埋設量低減(クエンチャ止水)の場合					
																
	腐食年数				15年後			15年後			40年後			15年後		
	減衰定数				設計用			設計用			設計用			設計用		
	オベフロ附付加設備				6100 ton			6100 ton			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	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度		
②ベント管	ベント管とDW鋼の 接合部	-	-	-	311	423	1.36	422	423	1.00	140	423	3.02			
⑥コラムサポート	外側コラムサポート	0.767	1	1.30	弾塑性解析による評価			弾塑性解析による評価			弾塑性解析による評価					

注)・許容値は、設計・建設規格より、供用状態Dsにおける温度50℃の値とする。

・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。

「S/C内水抜き(気中工法)の場合」では、コラムサポートの発生応力が許容値以内であることがわかった。
 「満水工法でベント管止水、S/C内埋設量低減(クエンチャ止水)の場合」および「気中工法でベント管止水、S/C内埋設量低減(クエンチャ止水)の場合」のケースでは、ベント管の発生応力は許容値以内であることがわかった。ここで、コラムサポートは、次頁に述べる弾塑性解析(極限解析)による評価を実施した。

8)PCV構造健全性評価結果(1F-1 詳細評価②)

コラムサポートについて、「JSME SNC1-2005 発電用原子力設備規格 設計・建設規格」を準用した弾塑性解析を実施し評価した。

弾塑性解析

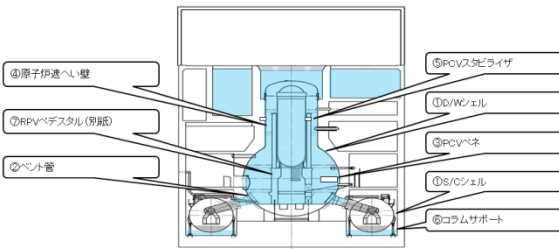
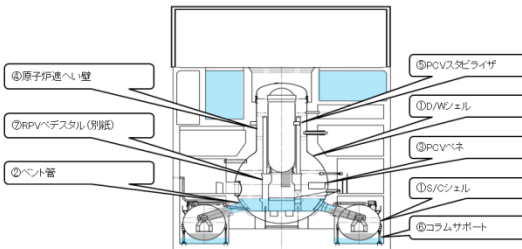
コラムサポートは、クラスMC支持構造物であるが、JSME設計・建設規格の炉心支持構造物の規定であるCSS-3160を準用して、極限解析(弾塑性解析)による評価を実施した。

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。

対象機器		満水工法でベント管止水、S/C内埋設量低減(クエンチャ止水)の場合								気中工法でベント管止水、S/C内埋設量低減(クエンチャ止水)の場合							
																	
	腐食年数	15年後				40年後				15年後							
	減衰定数	設計用				設計用				設計用							
	オベフロ増付加設備	6100 ton				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 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	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					
⑧コラムサポート	外側コラムサポート	1.71	2.30	2.07	1.21	1.70	2.17	1.95	1.15	1.61	2.30	2.07	1.29				

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 P_{cr} は、崩壊荷重 P_c に0.9を乗じた値を示す。

詳細評価②の結果、「満水工法でベント管止水、S/C内埋設量低減(クエンチャ止水)の場合」および「気中工法でベント管止水、S/C内埋設量低減(クエンチャ止水)の場合」のすべてのケースにおいて、許容荷重以内であることがわかった。

補足資料

PCV構造健全性評価 2倍勾配法図

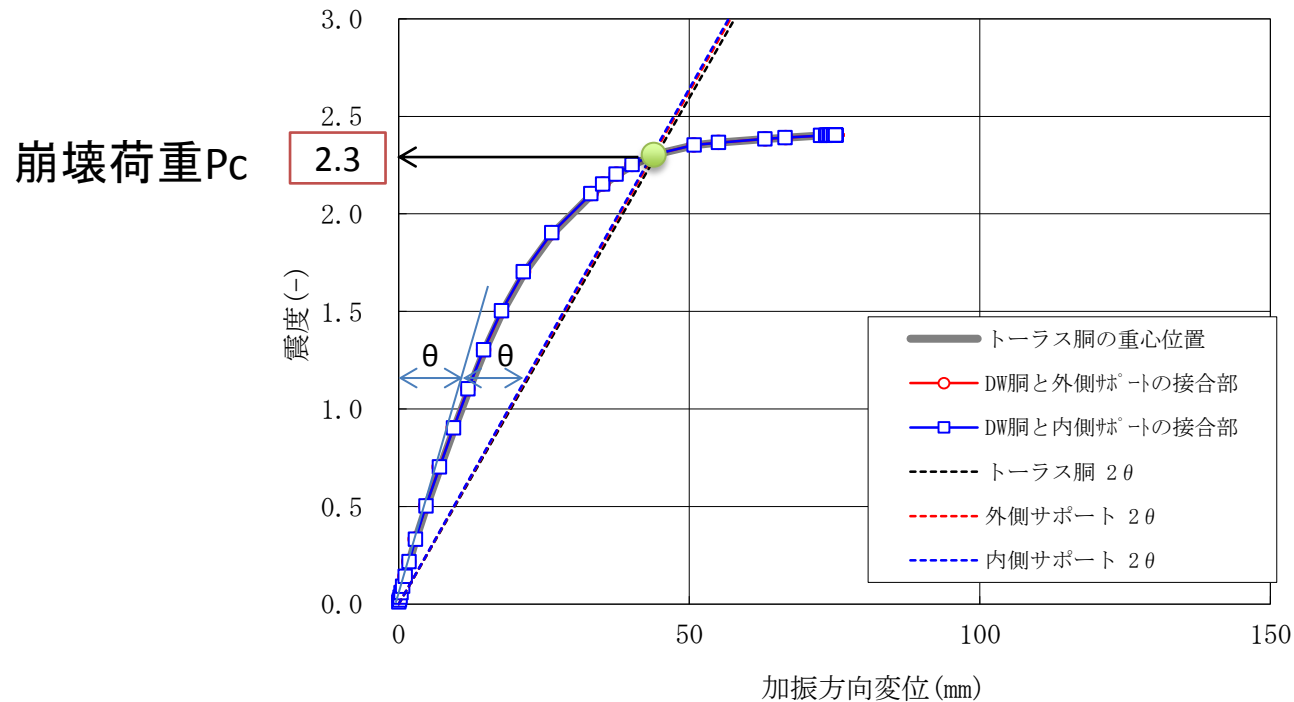
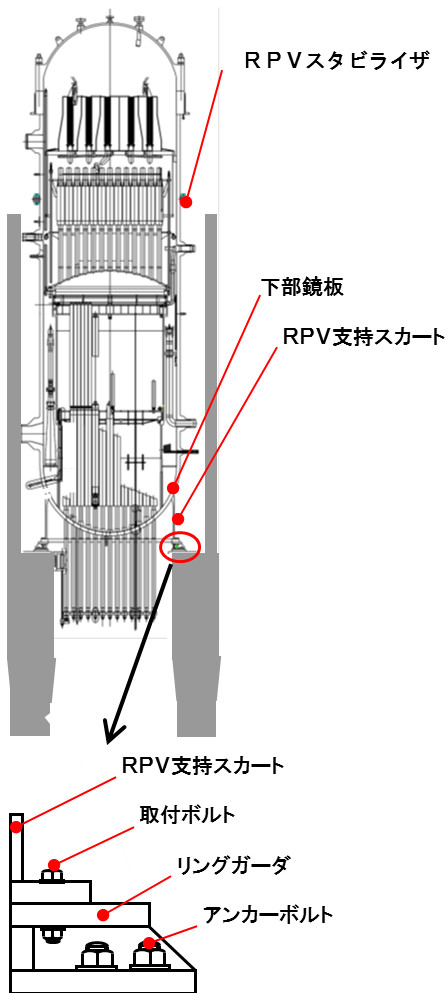


図 2倍勾配法による崩壊荷重

ケース:S/C内埋設量低減 腐食年数:15年後 減衰定数:設計用 オペフロ階付加設備:6100ton

9)RPV構造健全性評価結果(1F-2 評価ケースH26-1)



評価設備: 左図参照
 評価条件: 耐震条件—Ss波
 評価温度—50℃
 供用状態—Ds
 腐食減肉量—右記表参照

RPV支持スカート(圧縮)

腐食 年数 (年)	座屈評価値 (—)		許容値 (—)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	0.152	0.153	1	6.57	6.53
15	0.146	0.148		6.84	6.75

※: 座屈不等式左辺 = $\alpha B(P/A)/f_c + \alpha B(M/Z)/f_b$
 (出展: JEAC4601-2008)

RPVスタビライザー引張棒(引張)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	170	165	348	2.04	2.10
15	166	158		2.09	2.20

リングガーダー上部フランジ(曲げ)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	29	30	253	8.72	8.43
15	28	28		9.03	9.03

腐食年数 (年)	減肉量一片面 (mm)	
	低合金鋼	炭素鋼
40	2.90	2.61
15	1.82	1.64

下部鏡板(一次応力)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	129	124	540	4.18	4.35
15	125	120		4.32	4.50

※: 本表の応力強さは工認記載の応力強さを基に
 プラント状態を考慮して係数倍した値を示す。

取付ボルトーボルト(引張)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	31	32	505	16.29	15.78
15	30	31		16.83	16.29

アンカーボルトーボルト(引張)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	13	14	225	17.30	16.07
15	13	14		17.30	16.07

図. 評価対象部位

建設時設計用: 鋼製減衰1% RG(レギュラトリガイド): 鋼製減衰4%

10)RPV構造健全性評価結果(1F-3 評価ケースH26-1)

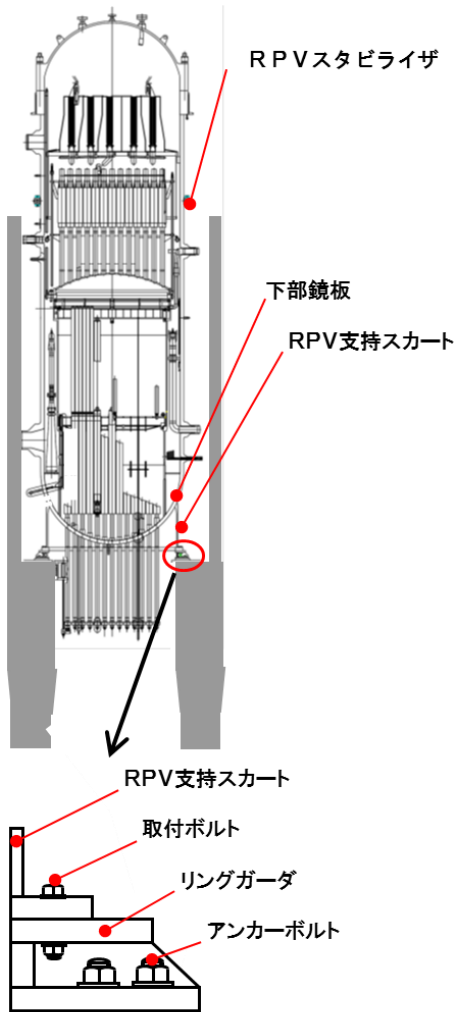


図. 評価対象部位

評価設備: 左図参照

評価条件: 耐震条件—Ss波

評価温度—50℃

供用状態—Ds

腐食減肉量—右記表参照

RPV支持スカート(圧縮)

腐食 年数 (年)	座屈評価値 (—)		許容値 (—)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	0.133	0.136	1	7.51	7.35
15	0.129	0.131		7.75	7.63
10	—	0.115		—	8.69

※: 座屈不等式左辺 = $\alpha B(P/A)/f_c + \alpha B(M/Z)/f_b$

(出展: JEAC4601-2008)

RPVスタビライザー引張棒(引張)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MP a)		許容値 (MP a)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	205	202	634	3.09	3.13
15	194	192		3.26	3.30
10	—	176		—	3.60

リングガーダー上部フランジ(曲げ)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MP a)		許容値 (MP a)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	22	25	253	11.50	10.12
15	23	23		11.00	11.00
10	—	12		—	21.08

腐食年数 (年)	減肉量—片面 (mm)	
	低合金鋼	炭素鋼
40	2.97	2.57
15	1.89	1.61
10	1.57	1.32

下部鏡板(一次応力)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MP a)		許容値 (MP a)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	161	154	540	3.35	3.50
15	156	149		3.46	3.62
10	—	148		—	3.64

※: 本表の応力強さは工認記載の応力強さを基に
プラント状態を考慮して係数倍した値を示す。

取付ボルト—ボルト(引張)

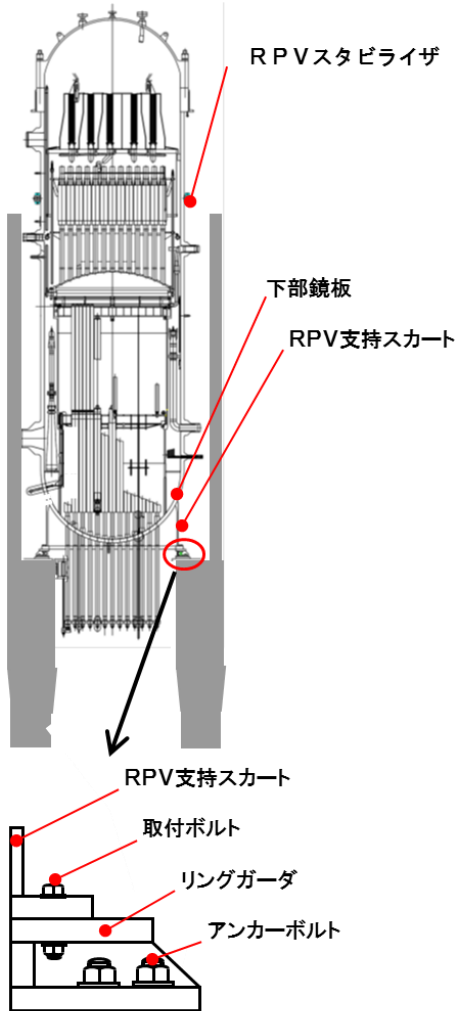
腐食 年数 (年)	応力強さ (MP a)		許容値 (MP a)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	29	33	505	17.41	15.30
15	30	31		16.83	16.29
10	—	15		—	33.66

アンカーボルト—ボルト(引張)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MP a)		許容値 (MP a)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	13	14	225	17.30	16.07
15	13	13		17.30	17.30
10	—	7		—	32.14

建設時設計用: 鋼製減衰1% R G(レギュラトリーガイド): 鋼製減衰4%

11)RPV構造健全性評価結果(1F-3 評価ケースH26-2)



評価設備:左図参照
 評価条件:耐震条件—Ss波
 評価温度—50℃
 供用状態—Ds
 腐食減肉量—右記表参照

RPV支持スカート(圧縮)

腐食 年数 (年)	座屈評価値 (—)		許容値 (—)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	0.168	0.170	1	5.95	5.88
15	0.164	0.163		6.09	6.13

※:座屈不等式左辺 = $\alpha B(P/A)/f_c + \alpha B(M/Z)/f_b$
 (出展: JEAC4601-2008)

RPVスタビライザー引張棒(引張)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MP a)		許容値 (MP a)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	232	228	634	2.73	2.78
15	226	217		2.80	2.92

リングガーダー上部フランジ(曲げ)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MP a)		許容値 (MP a)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	58	59	253	4.36	4.28
15	57	55		4.43	4.60

腐食年数 (年)	減肉量一片面 (mm)	
	低合金鋼	炭素鋼
40	2.97	2.57
15	1.89	1.61

下部鏡板(一次応力)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MP a)		許容値 (MP a)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	154	147	540	3.50	3.67
15	149	142		3.62	3.80

※:本表の応力強さは工認記載の応力強さを基に
 プラント状態を考慮して係数倍した値を示す。

取付ボルトーボルト(引張)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MP a)		許容値 (MP a)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	78	79	505	6.47	6.39
15	76	74		6.64	6.82

アンカーボルトーボルト(引張)

腐食 年数 (年)	応力強さ (MP a)		許容値 (MP a)	裕度	
	設計用	R G		設計用	R G
40	34	35	225	6.61	6.42
15	34	33		6.61	6.81

図. 評価対象部位

建設時設計用:鋼製減衰1% RG(レギュラトリガイド):鋼製減衰4%

12)PCV構造健全性評価結果(1F-2 評価ケースH26-1)

評価設備:図参照

評価条件: ・耐震条件:Ss波
・評価温度:50℃
・供用状態:Ds
・腐食減肉量:右記表参照

評価結果:

⑤PCVスタビライザ(シアラグ) (ドライウェル本体)
一次応力評価結果

腐食 年数	応力強さ(MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	117	116	282	2.41	2.43
15年	104	103	282	2.71	2.73

①-1 PCV(D/Wシェル) (サンドクッション部)
一次応力評価結果

腐食 年数	応力強さ(MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	78	79	424	5.43	5.36
15年	74	76	424	5.72	5.57

②ベント管 (ベント管とD/W胴の接合部)
一次応力評価結果

腐食 年数	応力強さ(MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	153	145	424	2.77	2.92
15年	151	143	424	2.80	2.96

2号機 推定減肉量(片面) (mm)

機器	腐食年数(年)	
	15	40
D/W	1.64	2.61
S/C	1.50	2.45

④原子炉遮蔽壁(基部)
一次応力評価結果

腐食 年数	応力強さ(MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	125	122	235	1.88	1.92
15年	77	74	235	3.05	3.17

③PCVベネ(機器ハッチ) (ドライウェル球形取付部)
一次応力評価結果

腐食 年数	応力強さ(MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	53	53	424	8.00	8.00
15年	48	48	424	8.83	8.83

⑥コラムサポート : S/C脚部補強により、評価対象外

⑦耐震サポート : S/C脚部補強により、評価対象外

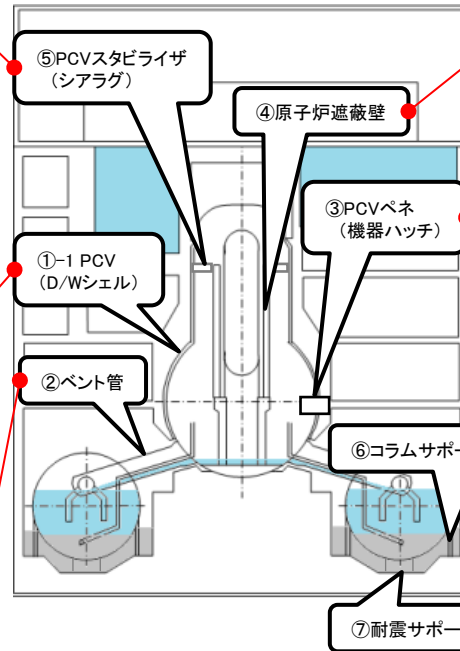


図 評価設備(ケースH26-1)

設計用:鋼製減衰1% RG(レギュラトリガイド):鋼製減衰4%

13)PCV構造健全性評価結果(1F-3 評価ケースH26-1)

評価結果:

⑤PCVスタビライザ(シアラグ) (ドライウェル補強板) 一次応力評価結果

腐食 年数	応力強さ(MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	87	87	282	3.24	3.24
15年	87	87	282	3.24	3.24
10年	—	87	282	—	3.24

①-1 PCV(D/Wシェル) (サンドクッション部) 一次応力評価結果

腐食 年数	応力強さ(MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	95	98	424	4.46	4.32
15年	90	92	424	4.71	4.60
10年	—	92	424	—	4.87

②ベント管 (ベント管とD/W胴の接合部) 一次応力評価結果

腐食 年数	応力強さ(MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	216	199	424	1.96	2.13
15年	209	189	424	2.02	2.24
10年	—	190	424	—	2.23

評価設備: 図参照

評価条件: •耐震条件: Ss波
•評価温度: 50℃
•供用状態: Ds
•腐食減肉量: 右記表参照

3号機 推定減肉量(片面) (mm)

機器	腐食年数(年)		
	10	15	40
D/W	1.32	1.61	2.57
S/C	1.01	1.28	2.22

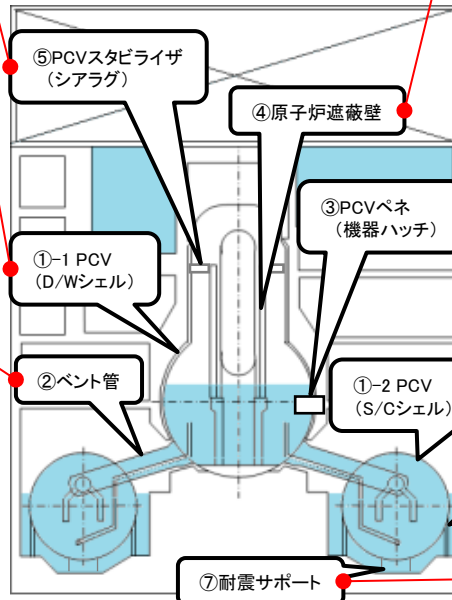


図 評価設備(ケースH26-1)

④原子炉遮蔽壁 (基部) 一次応力評価結果

腐食 年数	応力強さ(MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	125	120	235	1.88	1.95
15年	77	74	235	3.05	3.17
10年	—	65	235	—	3.61

③PCVペネ(機器ハッチ) (ドライウェル球形取付部) 一次応力評価結果

腐食 年数	応力強さ(MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	34	34	424	12.47	12.47
15年	31	31	424	13.67	13.67
10年	—	30	424	—	14.13

①-2 PCV (S/Cシェル) (補強リング) 一次応力評価結果

腐食 年数	応力強さ(MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	447 ^{*1}	368	424 (471)	0.94 (1.05)	1.15
15年	397	325	424	1.06	1.30
10年	—	318	424	—	1.33

注*1: 許容値に()内のSu値を用いた場合、許容値を下回る。

⑥コラムサポート、⑦耐震サポートについては燃料デブリ取出し時を想定し、S/C脚部補強なしでの評価ケースとして、「気中工法でベント管止水なし、S/C内埋設量低減(クエンチャ、ストレーナ止水)の場合」について詳細評価を実施。(次々頁以降の15)~17)参照)

設計用: 鋼製減衰1% RG(レギュラトリーガイド): 鋼製減衰4%

14)PCV構造健全性評価結果(1F-3 評価ケースH26-2)

評価設備: 図参照

評価条件: •耐震条件: Ss波
•評価温度: 50℃

評価結果: •供用状態: Ds
•腐食減肉量: 右記表参照

3号機 推定減肉量(片面) (mm)

機器	腐食年数(年)	
	15	40
D/W	1.61	2.57
S/C	1.28	2.22

⑤PCVスタビライザ(シアラグ) (ガセットプレート溶接部)
一次応力評価結果

腐食 年数	応力強さ(MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	61	60	146	2.39	2.43
15年	59	55	146	2.47	2.65

①-1 PCV(D/Wシェル) (サンドクッション部、*: 球形部)
一次応力評価結果

腐食 年数	応力強さ(MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	192*	196	424	2.20	2.16
15年	183	185	424	2.31	2.29

②ベント管 (ベント管とD/W胴の接合部)
一次応力評価結果

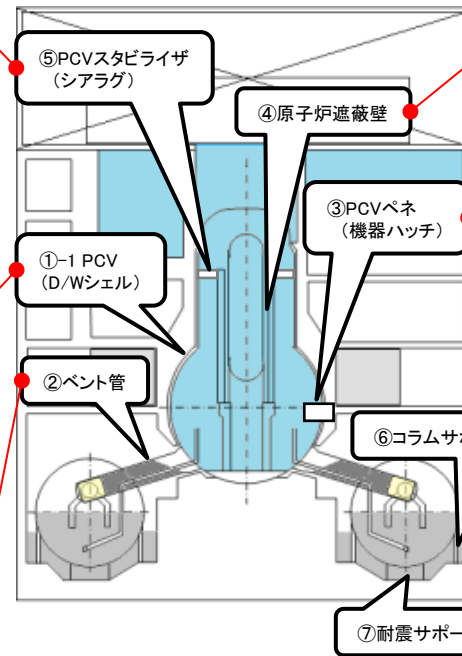
腐食 年数	応力強さ(MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	268	265	424	1.58	1.60
15年	266	263	424	1.59	1.61

④原子炉遮蔽壁(基部)
一次応力評価結果

腐食 年数	応力強さ(MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	168	158	235	1.39	1.48
15年	104	96	235	2.25	2.44

③PCVペネ(機器ハッチ) (ドライウェル球形取付部)
一次応力評価結果

腐食 年数	応力強さ(MPa)		許容値 (MPa)	裕度	
	設計用	RG		設計用	RG
40年	155	153	424	2.73	2.77
15年	142	139	424	2.98	3.05



⑥コラムサポート : S/C脚部補強により、評価対象外

⑦耐震サポート : S/C脚部補強により、評価対象外

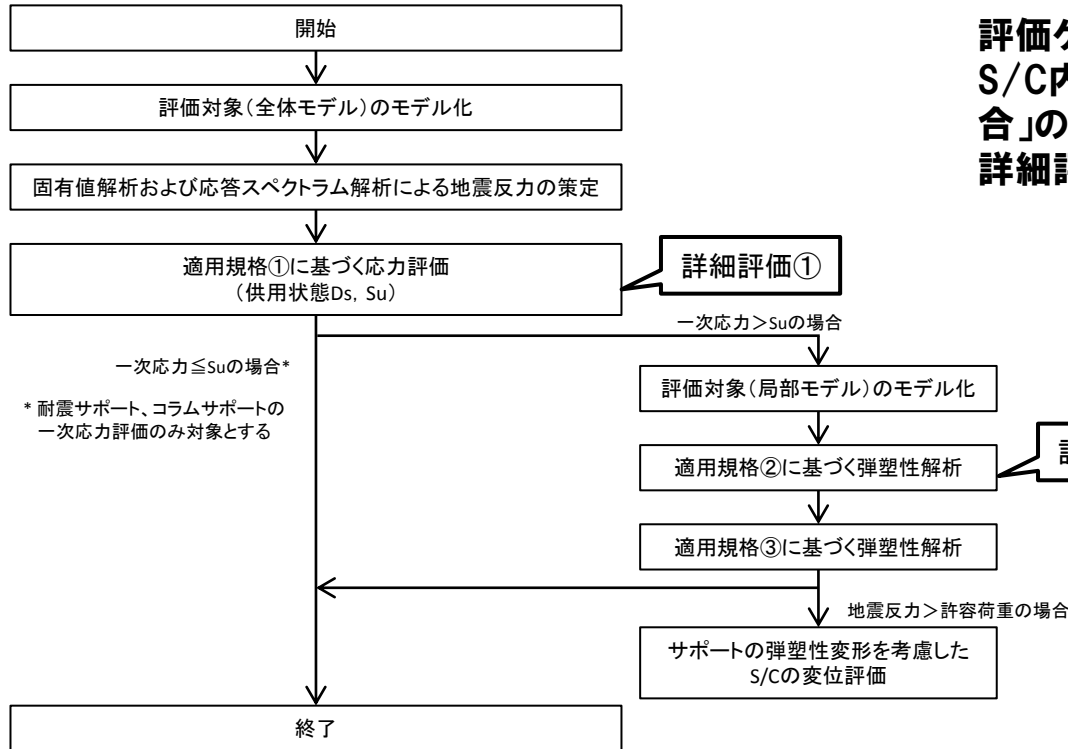
図 評価設備(ケースH26-2)

設計用: 鋼製減衰1% RG(レギュラトリガイド): 鋼製減衰4%

15)PCV構造健全性評価 詳細評価概要（1F-2/3）

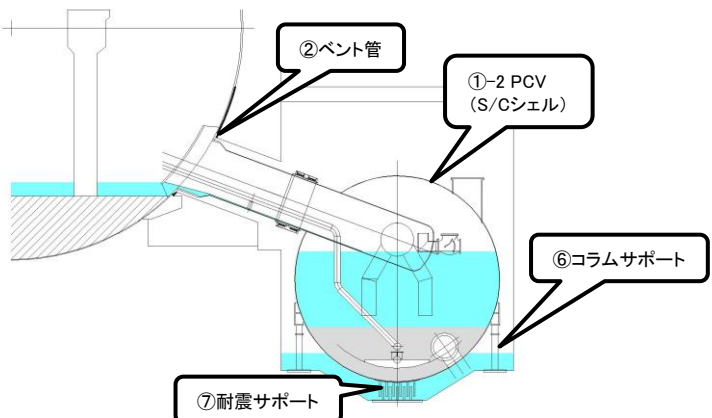
適用規格

- ① JEAC4601-2008 原子力発電所耐震設計技術規程
- ② JSME S NC1-2005 発電用原子力設備規格 設計・建設規格
- ③ JSME S NA1-2012 発電用原子力設備規格 維持規格
- ④ JSME S NX2-2014 発電用原子力設備規格 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鋼製格納容器編）
- ⑤ JSME S NJ1-2012 発電用原子力設備規格 材料規格



評価ケースとして、「気中工法でベント管止水なし、S/C内埋設量低減(クエンチャ、ストレーナ止水)の場合」の詳細評価を実施した。
詳細評価は左図のフローに基づき実施した。

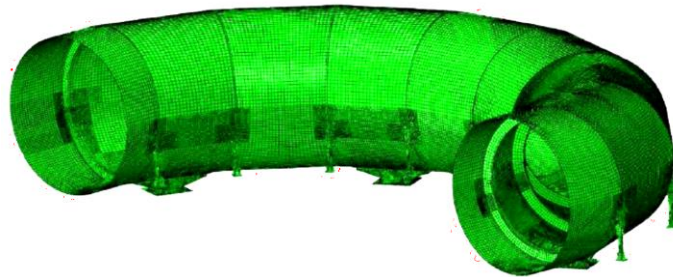
16)PCV構造健全性評価結果(1F-2/3 詳細評価① 応答スペクトラム解析)

対象機器		気中工法でベント管止水なし、S/C内埋設量低減(クエンチャ、ストレーナ止水)の場合		
				
		腐食年数(年)	40年	
		減衰定数	設計用 (コンクリート5%、鋼材1%)	
		オペフロ階付加設備	4710 ton	
①-2 PCV(S/Cシェル)	評価部位	応力強さ (MPa)	許容値 (MPa)	裕度
	補強リング	335	424	1.26
	② ベント管	ベント管とD/W胴の接合部	—	—
	⑥ コラムサポート	クレビス	467	1.06
⑦ 耐震サポート	ラゲプレートピン部(ケース①) シアピン(ケース②, ③)	弾塑性解析による評価		

「気中工法でベント管止水なし、S/C内埋設量低減(クエンチャ、ストレーナ止水)の場合」では、PCV(S/Cシェル)、コラムサポートの発生応力は許容値以内であることがわかった。ここで耐震サポートは次頁に述べる弾塑性解析(極限解析)による評価を実施した。

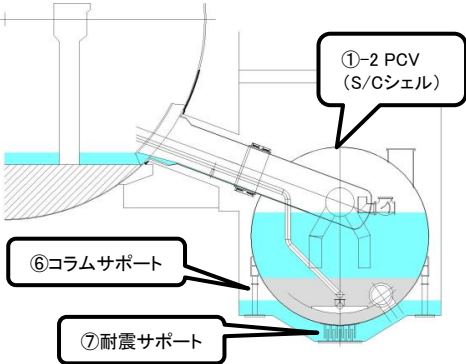
17)PCV構造健全性評価結果(1F-2/3 詳細評価② 弾塑性解析 全体モデル評価)

- ・評価モデル S/Cの1/2セクタを模擬し、局部モデル評価で構築した支持構造物評価モデルを配置
- ・評価手法 全体モデルに水平方向加速度を作用させ、耐震サポート部の変位が局部モデル評価で得られた許容変位に到達する震度を崩壊荷重とした。
- ・評価結果 全体モデルの崩壊震度は3.26(G)となり、地震荷重1.61(G)を上回ることが確認された。



弾塑性解析 モデル図
(S/C+コラムサポート+耐震サポート)

表 詳細評価② 弾塑性解析 全体モデル評価結果

対象機器	気中工法でベント管止水なし、S/C内埋設量低減(クエンチャ、ストレーナ止水)の場合		
			
	腐食年数(年)	40年	
	減衰定数	設計用 (コンクリート5%、鋼材1%)	
	オペフロ階付加設備	4710 ton	
応力-ひずみ特性	地震荷重 (G)	崩壊震度 (G)	
①~2 PCV(S/Cシェル) +⑥コラムサポート +⑦耐震サポート	弾完全塑性体	—	—
	ひずみ硬化考慮	1.61	3.26

詳細評価②の結果、「気中工法でベント管止水なし、S/C内埋設量低減(クエンチャ、ストレーナ止水)の場合」において、許容荷重以内であることがわかった。