

東海第二発電所
ペDESTALでの物理現象発生に対する対応方針
(審査会合における指摘事項の回答)

平成29年6月15日
日本原子力発電株式会社

本資料のうち、は商業機密又は核物質防護上の観点から公開できません。

目次

1. 前回の審査会合(平成29年4月27日)におけるご説明内容
2. 対策の概要
 - (1) 対策の位置付け
 - (2) SE※¹影響抑制対策
 - (3) MCCI※²影響抑制対策
3. 前回の審査会合で頂いた指摘事項
4. 指摘事項の回答

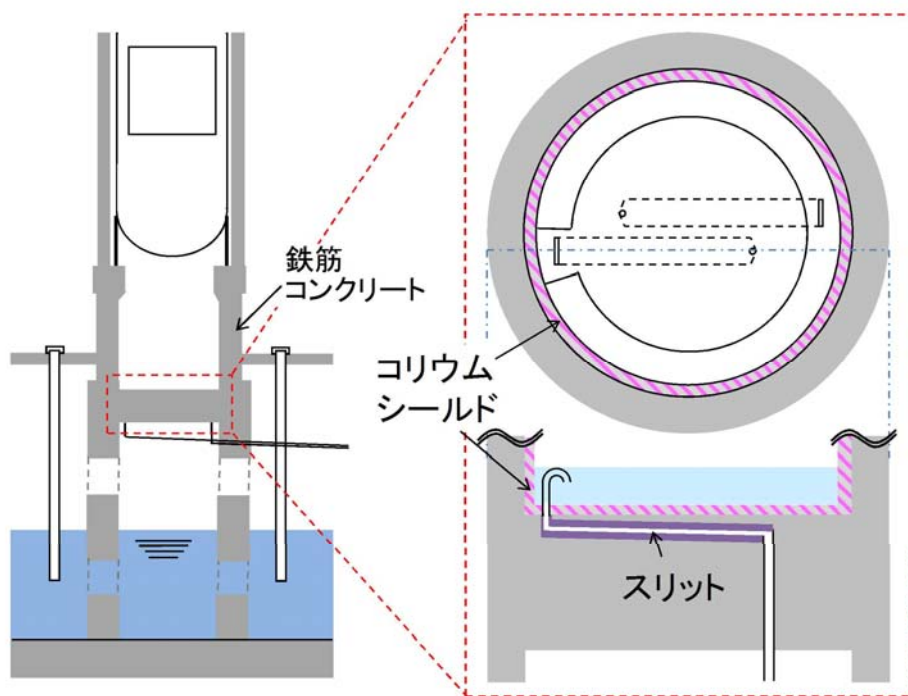
※1: SE (Steam Explosion: 水蒸気爆発)

※2: MCCI (Molten Core Concrete Interaction: 溶融炉心・コンクリート相互作用)

1. 前回の審査会合におけるご説明内容

○東海第二発電所(Mark-II型格納容器)の特徴を踏まえ、格納容器の熱的負荷の低減、MCCI及びSE時のRPV支持機能並びに床スラブでのデブリ保持機能確保の観点から、以下の具体的対応を行う方針とする

※:RPV(Reactor Pressure Vessel:原子炉圧力容器)



<MCCIの影響抑制>

- 耐侵食性を有するコリウムシールド(ZrO_2 製)設置
- 床スラブ平坦化による局所的なデブリ侵食抑制
- ペDESTALサンプル排水流路変更(スリット形状)によるサプレッション・プールへのデブリ移行防止

<格納容器の熱的負荷低減, MCCI・SEの影響抑制>

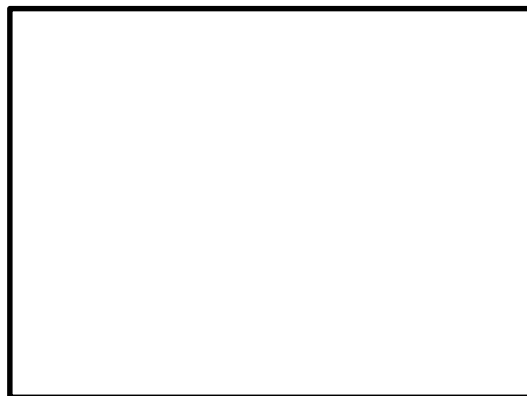
- RPV破損時のペDESTAL水位を1mと設定
- RPV破損後の注水開始までデブリが冠水維持されることを確認
- コリウムシールド厚さ□の場合, MCCIに対して, ペDESTAL浸食なし確認。厚さは今後決定
- 1m水位でのSEに対してペDESTALの構造健全性を確認

2. 対策の概要

(1) 対策の位置付け

①東海第二発電所におけるSE対策の位置付け

- 代表的なFCI実験の結果より、実機において大規模なSEが発生する可能性は極めて低い
 - RPV下部より流出したデブリは複数の構造物に接触・分散すると想定され、実機では、SEが発生した場合でも、その発生エネルギーは限定的(写真参照)
 - ただし、東海第二発電所のペDESTALは床スラブを有する鉄筋コンクリート造構造物であり、SE影響抑制のためにRPV破損時のペDESTAL水位を1mと設定。水位1mは、“格納容器への熱的負荷”及び“MCCI”の観点も満足。
 - 水位を1m達成(SE影響抑制対策)のため、ペDESTAL内への流入水を制限する弁、排水配管設置等を採用
- ⇒ SEの影響を十分抑制する観点から、SE影響抑制対策は重大事故等対処設備として整備



グレーチング上部中央付近



グレーチング上部側壁付近



グレーチング下部中央付近

2. 対策の概要

(1) 対策の位置付け

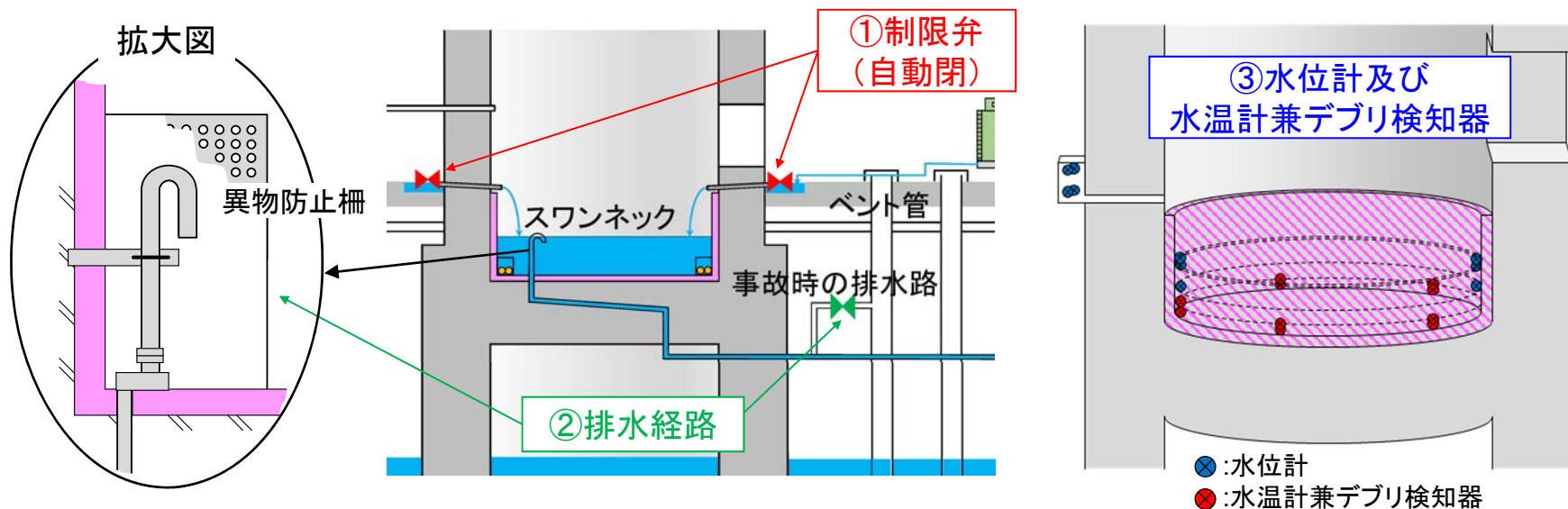
②東海第二発電所におけるMCCI対策の位置付け

- RPV破損後に必ず発生する“MCCI”に対し，その影響抑制対策としてコリウムシールド設置，床スラブ平坦化，ペDESTALサンプ排水流路変更を採用
 - ⇒ 設置許可基準規則第51条（格納容器下部の溶融炉心冷却のための設備）の要求事項を踏まえ，MCCI影響抑制対策は重大事故等対処設備として整備

2. 対策の概要

(2) SE影響抑制対策

- ① ペDESTAL内への流入配管に対してペDESTAL外側に設置した制限弁を事故時に自動閉止する設計とし、水の流入を制限
- ② 排水路は、ペDESTAL内に水が流入し得る事象に対して十分な排水量を確保することで、RPV破損時のペDESTAL内水位1mを確実に達成するとともに、スワンネック周囲に柵を設置し異物混入・落下物による閉塞を防止
- ③ ペDESTAL内に設置する水位計及び水温計兼デブリ検知器により、ペDESTAL水の飽和状態を維持し、SE発生を抑制。この水位計及び水温計兼デブリ検知器は、デブリ落下状態の不確かさ(少量のデブリがペDESTALに落下する場合)を考慮しても対応できるよう配置。



2. 対策の概要

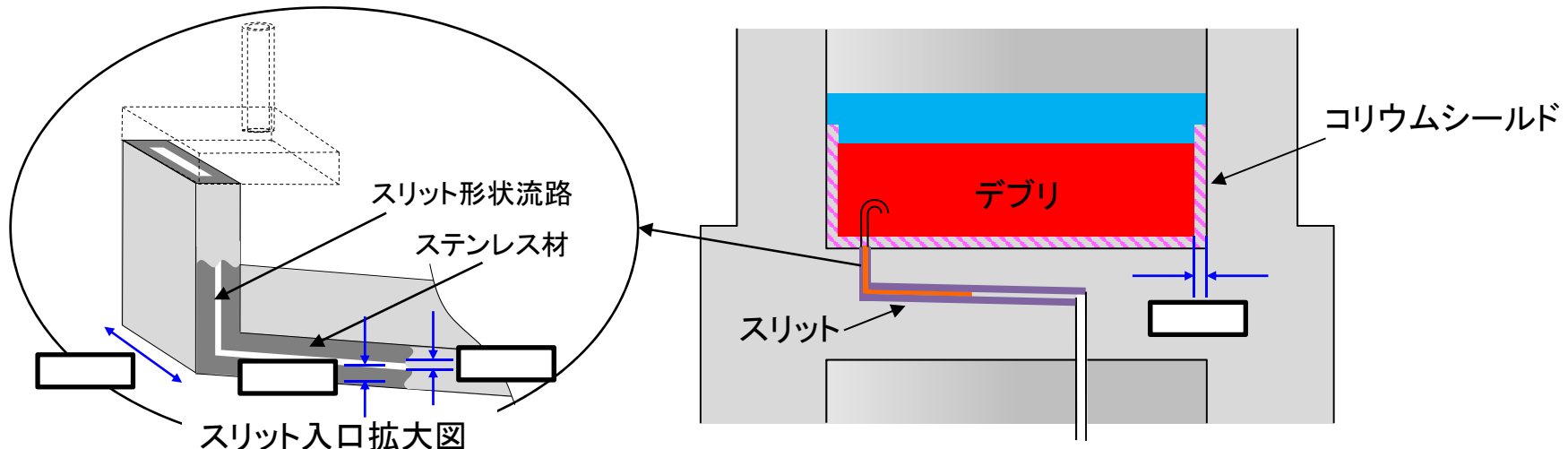
(3) MCCI影響抑制対策

【コリウムシールドの設置】

- コリウムシールドについては、MCCIの影響抑制のために可能な限り厚さを確保する観点だけでなく、コリウムシールド厚さの増加によるデブリ保有可能量の減少及び水プールとの接触面積の減少によるデブリ冷却性への影響を考慮し、 に設定（添付6）

【その他のMCCI影響抑制対策】

- 床スラブを平坦化し、局所的な侵食を抑制
- ペDESTALサンプル排水流路のスリット形状への変更（スリット内でのデブリ凝固）により、サプレッション・プールへのデブリの移行を防止



3. 前回の審査会合で頂いた指摘事項

番号	指摘事項の内容	分類
0427-1	ペDESTAL水位管理について、通常運転時、事故時からデブリ落下までにおいて、ペDESTALへの流入する可能性のある流入水の種類や経路、排出経路の配管・弁等を含めて、1mに維持することができることを整理した資料を提示すること。また、排出経路の配管・弁等については、圧損等を考慮しても、確実に排出することができる配管勾配や口径等を整理した資料を提示すること。また、排出経路の閉塞の可能性について整理した資料を提示すること。	ペDESTAL 水位管理
0427-2	ペDESTAL水位管理について、水位が1mを下回っている場合等、その検知及び対応について整理した資料を提示すること。また、検知で用いる水位計の動作原理について整理した資料を提示すること。	
0427-3	ペDESTAL内に設置するとしている水温計について、設置目的・位置・当該計器を用いた運用について整理した資料を提示すること。	
0427-4	RPV破損の判断基準について、当該パラメータの変動を伴う他の事象も考えられることから、それらの事象を整理し、その上で、確実にRPV破損が判断できることを整理した資料を提示すること。また、デブリの落ち方の不確かさを踏まえ、SE防止の観点で、RPV破損の判断が適切にできることを整理した資料を提示すること。	RPV破損 判断
0427-5	SA発生時のプラント状態や中央制御室の状態を踏まえても、確実にRPV破損の判断ができ、ペDESTAL注水が実施できることを整理した資料を提示すること。	
0427-6	RPV破損時のデブリの冠水評価におけるデブリの堆積の不確かさについて、実験結果から実機への適用について、整理した資料を提示すること。	デブリ堆積 の不確かさ
0427-7	コリウムシールドの侵食開始温度2,100℃の設定の考え方について、化学反応の観点も含めて整理した資料を提示すること。	MCCI対策
0427-8	SE発生時、ペDESTAL中心部での爆発源圧力がペDESTAL側壁や床面までどのように減衰され、どの程度の圧力がかかるか整理した資料を提示すること。	SE評価

4. 指摘事項の回答

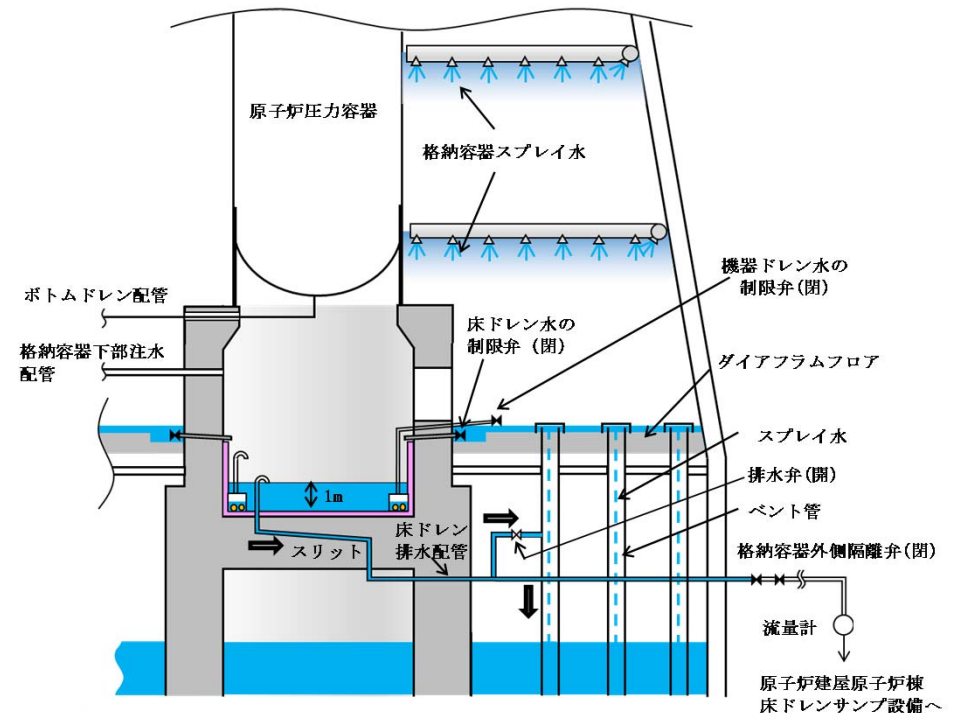
No.0427-1

(1) 指摘事項

- ペDESTAL水位管理について、通常運転時、事故時からデブリ落下までにおいて、ペDESTALへの流入する可能性のある流入水の種類や経路、排出経路の配管・弁等を含めて、1mに維持することができることを整理した資料を提示すること。

(2) 回答

- ペDESTAL内へ流入する配管に設置する制限弁を自動閉止し、水の流入をしゃ断。
- 制限弁閉止前の流入水等は、スワンネック、スリット、床ドレン排水配管及び排水弁を經由してサプレッション・プールへ排水することで、RPV破損までに水位1mを確保可能であることを評価。



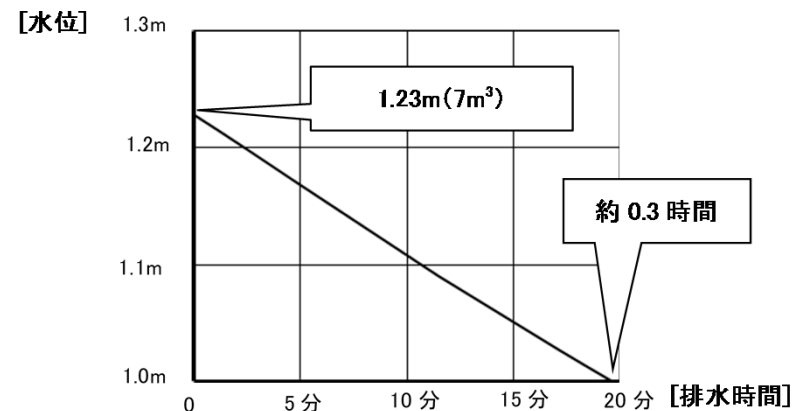
1m水位維持のための設備イメージ図

(1) 指摘事項(つづき)

- また、排出経路の配管・弁等については、圧損等を考慮しても、確実に排出することができる配管勾配や口径等を整理した資料を提示すること。

(2) 回答(つづき)

- スリットは、通常運転中の排水性を確保する観点及びRPV破損後にスリット内でデブリが凝固するための必要な距離(スリット全長は約□)を短くする観点から、勾配を□に制限した設計。
- 排水評価においては、配管口径、配管長さ、エルボや弁数等考慮し、圧損評価におけるエルボの数を2倍程度見込む等の保守性を考慮した上で、以下を確認。
 - RPV破損までの時間が短い大破断LOCA時において、RPV破損まで(約3.2時間)に十分な余裕をもって水位1mまで排水可能
 - ペDESTALへの流入水が飽和状態であり、SEの影響が抑制されるボトムドレンLOCA時においても、RPV破損までに水位1mまで排水可能



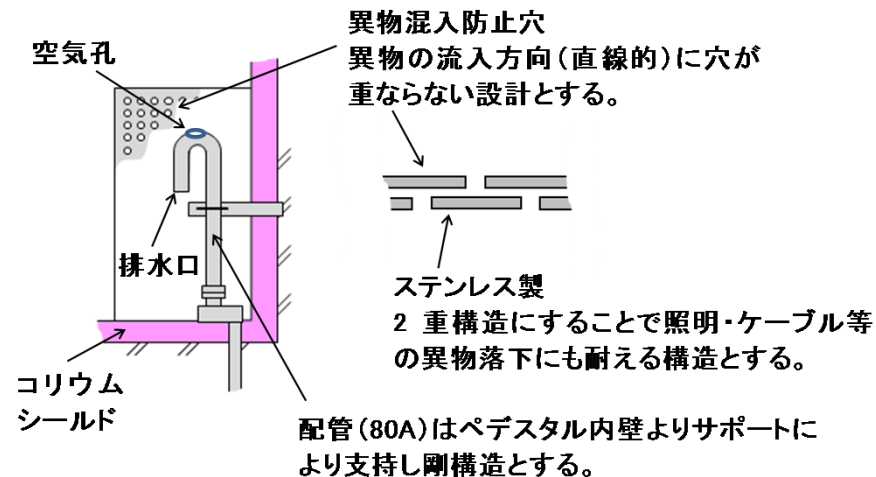
大破断LOCA時の排水時間評価結果

(1) 指摘事項(つづき)

- また、排出経路の閉塞の可能性について整理した資料を提示すること。

(2) 回答(つづき)

- RPV破損前の1m水位達成までの期間において、落下物としてはケーブル類及び照明、異物としては落下物に加え、保温材、塗料片及びスラッジを対象
- 排水口の高さ方向の位置は、水面の浮遊物や床面の異物を持ち込ませないために適切な位置で設定するため、異物により排水性に悪影響が生じる可能性が低いと評価。
- さらに、落下物による排水性への影響を防止するため及び想定されない異物による排水性への悪影響を確実に防止するため、柵をスワンネック構造周囲に設置。



排水配管に対する異物対策イメージ図

(3) 資料

資料1-2 ペDESTALでの物理現象発生に対する対応方針(添付資料)

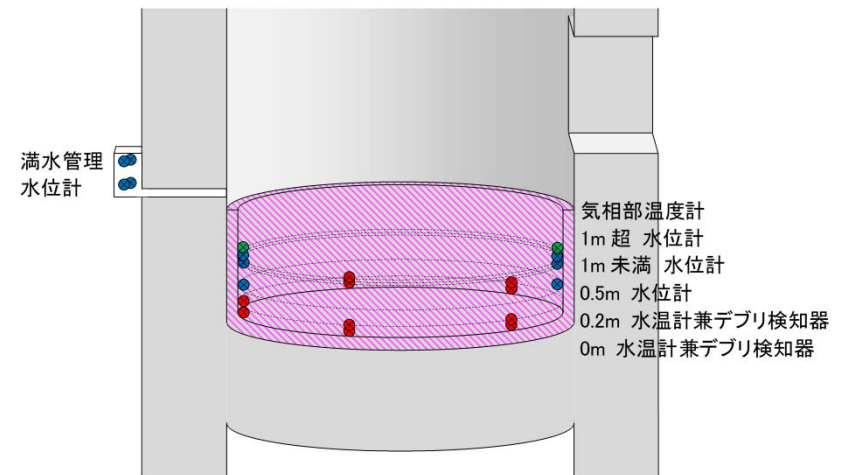
添付7別添2 「ペDESTAL排水設備対策について」

(1) 指摘事項

- ペDESTAL水位管理について、水位が1mを下回っている場合等、その検知及び対応について整理した資料を提示すること。
- ペDESTAL内に設置するとしている水温計について、設置目的・位置・当該計器を用いた運用について整理した資料を提示すること。

(2) 回答

- RPV破損前に水位が1mを下回っている場合は、1m超水位計まで注水した上で1m水位まで排水する運用。
- 水温計兼デブリ検知器の目的は次のとおりであり、ペDESTAL床と床から0.2m高さに設置。
 - RPV破損時：デブリ落下による水温上昇又はデブリ堆積時の指示喪失によるRPV破損判断
 - RPV破損後：床から0.2m位置までのデブリの堆積量の検知
- 運用としては、次のとおり。
 - 床から0.2m未満のデブリ堆積時：0.5～1mの範囲で水位維持
 - 0.2m以上のデブリ堆積時：満水まで注水後、満水管理水位計にて水位維持



ペDESTALの計器設置イメージ図

4. 指摘事項の回答

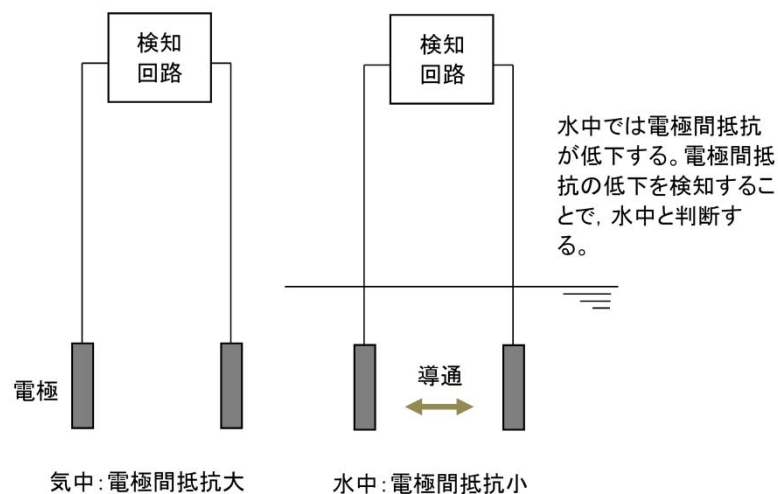
No.0427-2,3

(1) 指摘事項(つづき)

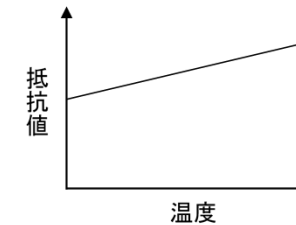
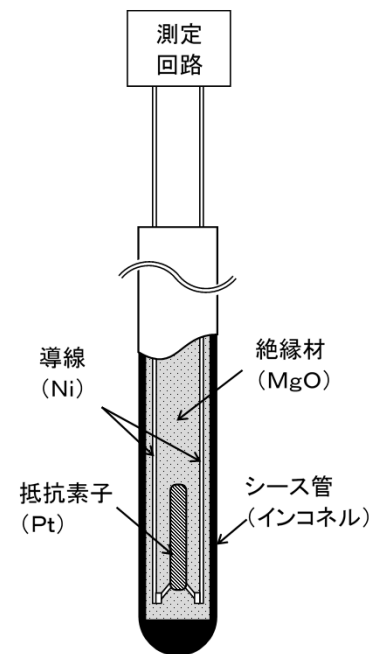
- ・また、検知で用いる水位計の動作原理について整理した資料を提示すること。

(2) 回答(つづき)

- ・ペDESTALに追設する水位計は電極式水位計とする。また、水温計兼デブリ検知器は測温抵抗体式温度計とする。



電極式水位計の動作原理



金属の電気抵抗が温度に比例する性質を利用し、抵抗素子の抵抗値をもとに温度測定を行う。

高温のデブリが接触すると、温度指示値は急上昇しオーバースケールとなる。
また、以下の過程の中で導線間の絶縁性が失われ短絡又は導通すると、抵抗値が低下し温度指示値がダウンスケールとなる。

- ・シース管の溶融、水及びデブリの浸入
- ・水との反応による絶縁材の膨張、剥離
- ・デブリとの反応に伴う絶縁材の溶融、蒸発

測温抵抗体式温度計の動作原理

(3) 資料

資料1-2 ペDESTALでの物理現象発生に対する対応方針(添付資料)

添付7別添3 「ペDESTAL内に設置する計器について」

(1) 指摘事項

- RPV破損の判断基準について、当該パラメータの変動を伴う他の事象も考えられることから、それらの事象を整理し、その上で、確実にRPV破損が判断できることを整理した資料を提示すること。また、デブリの落ち方の不確かさを踏まえ、SE防止の観点で、RPV破損の判断が適切にできることを整理した資料を提示すること。

(2) 回答

- RPV破損の徴候を検知可能な破損徴候パラメータ及びRPV破損を検知可能な破損判断パラメータを整理した上で、他の事象を考慮してもRPV破損が可能であることを考察。
- デブリの落ち方の不確かさを踏まえても、ペDESTAL内に設置する計器を活用し、SE防止を図りつつ、デブリの冷却を継続可能な手順を検討(p.12参照)。

(3) 資料

資料1-2 ペDESTALでの物理現象発生に対する対応方針(添付資料)

添付3 「RPV破損後の注水開始時間について」

添付7別添1 「ペDESTAL注水開始後のSE発生の可能性及びSE発生抑制の考え方について」

(1) 指摘事項

- SA発生時のプラント状態や中央制御室の状態を踏まえても、確実にRPV破損の判断ができ、ペデスタル注水が実施できることを整理した資料を提示すること。

(2) 回答

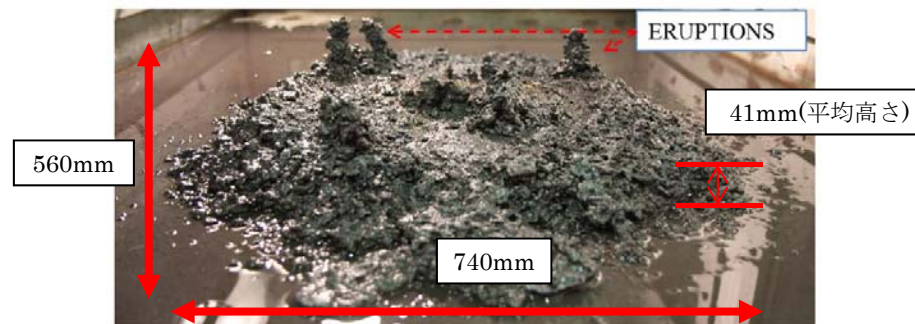
- SA時運転操作成立性については、格納容器破損防止対策の有効性評価においてご説明する。

(1) 指摘事項

- RPV破損時のデブリの冠水評価におけるデブリの堆積の不確かさについて、実験結果から実機への適用について、整理した資料を提示すること。

(2) 回答

- デブリの堆積の不確かさは、PULiMS実験におけるデブリの堆積高さと同様か、それ以上の拡がり挙動となることを確認。
- PULiMS実験条件と実機条件を比較した結果、実機条件においては実験条件と同等か、それ以上の拡がり挙動となることを確認。



PULiMS実験結果(E4)

(3) 資料

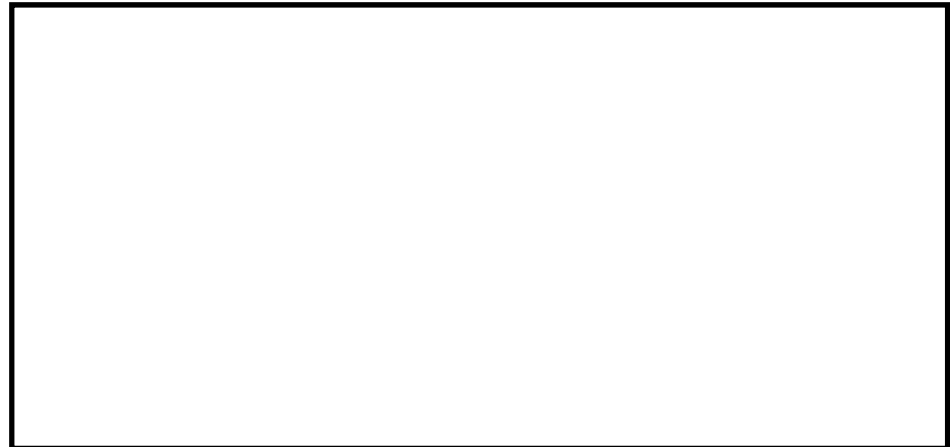
- 資料1-2 ペDESTALでの物理現象発生に対する対応方針(添付資料)
- 添付2 「RPV破損時のデブリの冠水評価について」

(1) 指摘事項

- ・ コリウムシールドの侵食開始温度 $2,100^{\circ}\text{C}$ の設定の考え方について、化学反応の観点も含めて整理した資料を提示すること。

(2) 回答

- ・ 実機よりも ZrO_2 の還元反応が進む $100\text{mol}\%\text{Zr}$ 条件下での ZrO_2 耐熱材の侵食試験の結果(右図参照)から、 $2,100^{\circ}\text{C}$ ではほとんど侵食が進んでいない。
- ・ 模擬デブリ($\text{UO}_2-\text{ZrO}_2-\text{Zr}$)落下試験時の ZrO_2 耐熱材の黒色化部の組成に有意な変化がなかったこと等から、 ZrO_2 耐熱材表面が還元される影響は軽微。
- ・ 以上より、化学反応の観点を含めても、コリウムシールドの侵食開始温度: $2,100^{\circ}\text{C}$ の設定は妥当。



試験後の断面写真

※本図は、中部電力(株)、東北電力(株)、東京電力ホールディングス(株)、北陸電力(株)、中国電力(株)、日本原子力発電(株)、電源開発(株)、(一財)エネルギー総合工学研究所、(株)東芝、日立GEニュークリア・エナジー(株)が実施した共同研究の成果の一部である。

(3) 資料

資料1-2 ペDESTALでの物理現象発生に対する対応方針(添付資料)

添付4 「コリウムシールド材料の選定について」

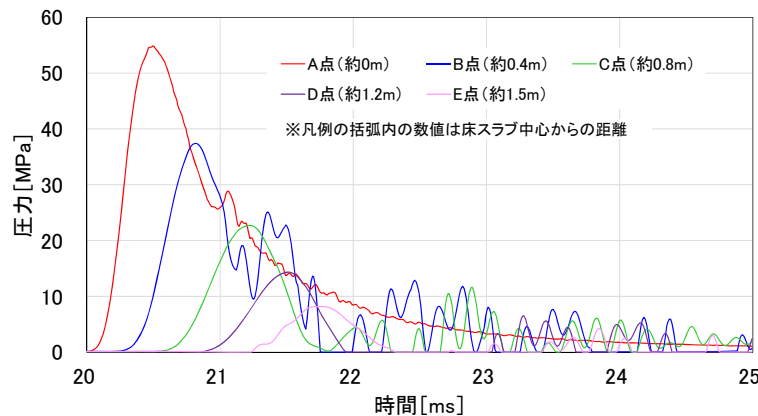
添付5 「溶融デブリによるMCCI侵食量評価について」

(1) 指摘事項

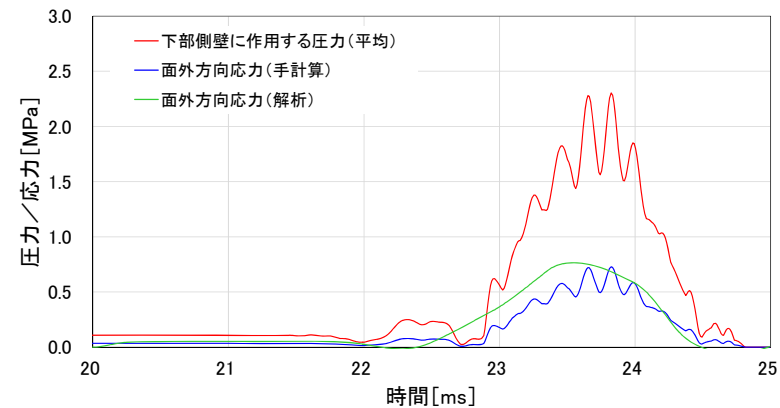
- SE発生時、ペDESTAL中心部での爆発源圧力がペDESTAL側壁や床面までどのように減衰され、どの程度の圧力がかかるか整理した資料を提示すること。

(2) 回答

- ペDESTAL中心でSEが発生すると、圧力波は水中で減衰(距離減衰)しながら側壁の方向へ進行する。この結果、床スラブには最大約55MPa、側壁には最大約4MPaの圧力が作用する。
- また、ペDESTAL躯体に作用する圧力より手計算手法を用いて求めたコンクリートの応力と、解析結果のコンクリート応力とを比較し、解析では構造物の応答が適切に評価されていることを確認。



床スラブに作用する圧力



手計算と解析結果の応力比較(側壁部)

(3) 資料

資料1-2 ペDESTALでの物理現象発生に対する対応方針(添付資料)

添付12別添4 「ペDESTALに作用する圧力について」