

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	PS-2-10 改2
提出年月日	平成29年5月26日

## 東海第二発電所

ペDESTALでの物理現象発生を想定した

場合の格納容器の健全性について

(添付資料)

平成29年5月

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

下線部：今回提出資料

添付 1.	原子炉圧力容器外の溶融燃料－冷却材相互作用（炉外 F C I）に関する知見の整理について……………	添付 1-1
添付 2.	格納容器・ペDESTAL機能確保のための対応方針……………	添付 2-1
<u>別添 1</u>	<u>R P V破損時のデブリの冠水評価について……………</u>	<u>添付 2 別添 1-1</u>
<u>別紙 1</u>	<u>デブリとして考慮するペDESTAL内構造物について……………</u>	<u>添付 2 別添 1-6</u>
<u>別紙 2</u>	<u>粒子化割合の算出……………</u>	<u>添付 2 別添 1-8</u>
<u>別紙 3</u>	<u>デブリの拡がりに関する不確かさについて……………</u>	<u>添付 2 別添 1-9</u>
<u>補足 1</u>	<u>E P Rコアキャッチャの溶融物拡がりに関わる実験……………</u>	<u>添付 2 別添 1-17</u>
<u>補足 2</u>	<u>P D S実験について……………</u>	<u>添付 2 別添 1-21</u>
<u>補足 3</u>	<u>主要解析条件……………</u>	<u>添付 2 別添 1-25</u>
<u>別紙 4</u>	<u>デブリ落下時に機器ドレンサンプが健全な場合の影響について……………</u>	<u>添付 2 別添 1-26</u>
添付 3.	R P V破損後の注水開始時間について……………	添付 3-1
<u>別添 1</u>	<u>事象進展を踏まえたR P V破損判断の成立性……………</u>	<u>添付 3-5</u>
<u>別添 2</u>	<u>R P V破損時における対応操作の成立性評価……………</u>	<u>添付 3-9</u>
添付 4.	コリウムシールド材料の選定について……………	添付 4-1
添付 5.	Z r O <sub>2</sub> 耐熱材の侵食開始温度の設定について……………	添付 5-1
<u>別添 1</u>	<u>不確かさを考慮した侵食量評価……………</u>	<u>添付 5-3</u>
添付 6.	コリウムシールド厚さ，高さの設定について……………	添付 6-1
添付 7.	ペDESTAL内の水位管理方法について……………	添付 7-1
<u>別添 1</u>	<u>ペDESTAL注水開始後のS E発生の可能性及びS E発生抑制の考え</u>	

	方について……………	添付 7-6
別紙	<u>デブリ少量落下時の S E 発生可能性を考慮したペDESTAL 注水管</u>	
	<u>理について……………</u>	添付 7-10
別添 2	<u>ペDESTAL 排水設備対策について……………</u>	添付 7-12
別紙	<u>事故発生から R P V 破損までのペDESTAL 流入水の排水評価につ</u>	
	<u>いて……………</u>	添付 7-22
参考 1	<u>ボトムドレン L O C A を想定した場合の排水評価 ……</u>	添付 7-27
参考 2	<u>ペDESTAL 床ドレンサンプ改造に伴う、位置を特定できない漏</u>	
	<u>えい水の検知性について……………</u>	添付 7-30
別添 3	<u>ペDESTAL 内に設置する計器について……………</u>	添付 7-31
添付 8.	溶融デブリによる熱影響評価について……………	添付 8-1
添付 9.	溶融デブリの排水流路内での凝固停止評価について……………	添付 9-1
別添	Flemings モデルの適用性について……………	添付 9-18
添付 10.	J A S M I N E 解析について……………	添付 10-1
添付 11.	水蒸気爆発評価の解析モデルについて……………	添付 11-1
別添	運動エネルギーから圧力として伝わる時の考え方について	
	……………	添付 11-17
添付 12.	<u>S E の発生を想定した場合の格納容器の健全性への影響評価</u>	
	<u>……………</u>	添付 12-1
別添 1	<u>側壁の終局面外せん断応力度……………</u>	添付 12-11
別添 2	<u>床スラブの終局面外せん断応力度……………</u>	添付 12-14
別添 3	<u>S E 発生時の面外せん断応力度の算定方法……………</u>	添付 12-17
別添 4	<u>ペDESTAL に作用する圧力について……………</u>	添付 12-25
別添 5	<u>S E 後のコンクリートの残留ひび割れの影響 (参考)</u>	
	……………	添付 12-29

参考 1	SE時のコリウムシールドへの影響	参考 1-1
別紙	ジルコニアの圧縮強度について	参考 1-3

## 添付 2. 別添 1 R P V 破損時のデブリの冠水評価について

### 1. はじめに

R P V 破損により落下したデブリは事前に水張りされていたペDESTAL の水中に落下し、冠水する。その後、R P V 破損から 7 分後に格納容器下部注水系（常設）を用いた格納容器下部注水を実施することとしているが、7 分の間に水が蒸発することから、デブリの冠水状態の評価を実施する。

また、ポロシテイが冠水状態に与える影響についても評価した。

### 2. 評価対象事故シーケンス

R P V 破損する有効性評価の評価事故シーケンスとして、過渡事象時に注水機能が喪失する事象（以下「過渡事象」という）を選定している。ここでは、有効性評価のベースケースとなる過渡事象について、デブリの冠水状態の評価を実施する。

また、起因事象を L O C A とした場合には事象進展が異なることから、R P V 破損時間が早くなる大破断 L O C A 時に注水機能が喪失する事象（以下「L O C A 事象」という）についても、同様にデブリの冠水状態の評価を実施する。

### 3. デブリ冠水評価

デブリの堆積形状を第 1 図に示す。ポロシテイを考慮したデブリ堆積高さ  $H_{\text{debri}}$  は式(1)で評価する。

$$H_{\text{debri}} = (V_m \times (1 - \Phi_{\text{ent}}) + V_s + V_m \times \Phi_{\text{ent}} \div (1 - P)) \div S_{fz} \quad (1)$$

$V_m$  : 溶融物体積

$V_s$  : ペDESTAL 内構造物体積  (別紙 1 参照)

$\Phi_{ent}$ : Ricou-Spalding 相関式に基づく粒子化割合 [0.171] (別紙 2 参照)

P: ポロシティ [0.5] P U L i M S 実験の知見 (0.29~0.37) から保守的に設定

$S_{fz}$ : コリウムシールドの設置を考慮した床面積

また、粒子化したデブリの間隙に冷却水が浸入するため、デブリの冠水維持評価の観点から粒子化したデブリの範囲を除いた水プール水深  $H_{pool-ent}$  について式(2)で評価する。ここで、デブリ堆積範囲より上の領域にはコリウムシールドが敷設されていないものとする。

$$H_{pool-ent} = (H_{pool} - (V_m \times \Phi_{ent} \div (1-P) \times P \div S_{fz})) \times (S_{fz} / S_f) \quad (2)$$

$H_{pool}$ : 水プール初期水深 [1m]

$S_f$ : コリウムシールドが設置されていない範囲の断面積

式(1)からデブリ堆積高さ  $H_{debr}$  は約 1.70m となる。また、式(2)から粒子化したデブリの範囲を除いた水プール水深  $H_{pool-ent}$  は約 0.69m となる。

MAAP コードを用いた有効性評価の結果 (デブリから水プールへの限界熱流束を  $800\text{kW/m}^2$  (圧力依存性あり) と設定) から、R P V 破損によるデブリ落下から格納容器下部注水開始までの 7 分間におけるペDESTAL 水プールの水位低下量は、過渡事象の場合は約 37cm、L O C A 事象の場合は約 48cm であり、デブリの冠水は維持される。なお、格納容器下部注水の開始が遅れた場合でも、過渡事象の場合は約 23 分間、L O C A 事象の場合は約 17 分間デブリは冠水維持可能と評価した。

#### 4. ポロシティが冠水評価に与える影響

水位低下量評価にポロシティの効果を検討していないことから、その影響

を評価した。

粒子状デブリベッドのドライアウト熱流束に関する相関式である  $Lipinski-0D$  モデルでは、ポロシティの増加によってドライアウト熱流束が上昇する結果が得られており、第2図においてポロシティ 0.48 の場合、ドライアウト熱流束は、約  $3,300\text{kW}/\text{m}^2$  となる。これは、水位低下量評価で、デブリから水プールへの熱流束として設定している  $800\text{kW}/\text{m}^2$  と比較して大きな値となるが、ポロシティを形成するデブリの粒子化割合は約 17% と小さく、粒子化したデブリはクエンチしていることから、ポロシティによるドライアウト熱流束増加の影響は小さい。

よって、ポロシティを考慮しても水位低下量評価への影響は小さく、冠水評価に影響はない。

#### 5. デブリ堆積形状の不確かさ評価（別紙3参照）

水プール水位に対してデブリ落下量が多く粒子化割合が小さいことから、落下したデブリは均一に堆積すると考えられる。ここでは、デブリが均一に堆積しない場合にデブリ冠水維持に与える影響について評価する（第3図）。

PULiMS 実験において確認されたデブリ堆積高さ と 拡がり距離のアスペクト比を適用してデブリ堆積形状を山状と想定し、均一化した場合と比較して堆積高さが高くなり、露出までの水深が低くなる場合の評価を実施した結果、水プール水位は約 52cm となった。水プールとの接触面積増加の影響を考慮した場合における水位低下量は、過渡事象の場合は約 38cm、LOCA 事象の場合は約 49cm であり、デブリの冠水が維持されることを確認した。

#### 6. 機器ドレンサンプが溶融しない場合の不確かさ評価（別紙4参照）

ペDESTAL 内に設置された機器ドレンサンプは、デブリ落下時には溶融し

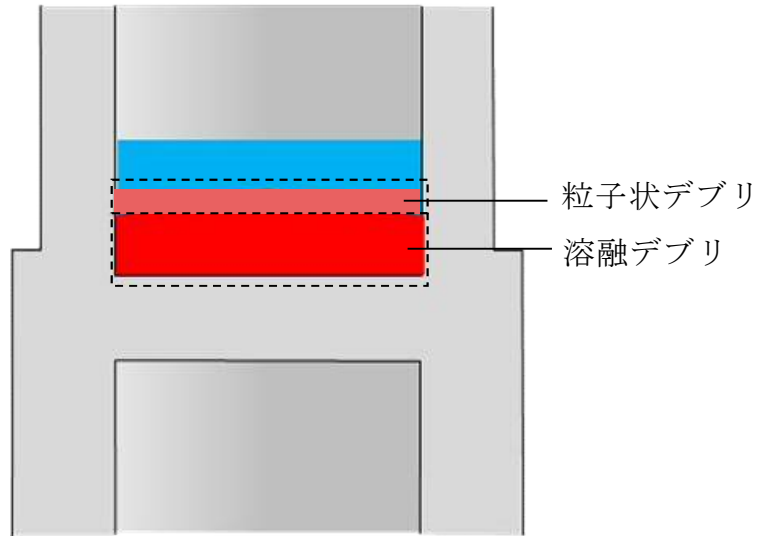
デブリに取り込まれることで溶融デブリとして堆積すると考えられる。ここでは、機器ドレンサンプが溶融しないと仮定した場合にデブリ冠水維持に与える影響について評価する。

新設する機器ドレンサンプの体積を既設と同等として評価した結果、水プール水位は約 58cm となった。水位低下量は、過渡事象の場合は約 37cm, L O C A 事象の場合は約 48cm であり, デブリの冠水が維持されることを確認した。

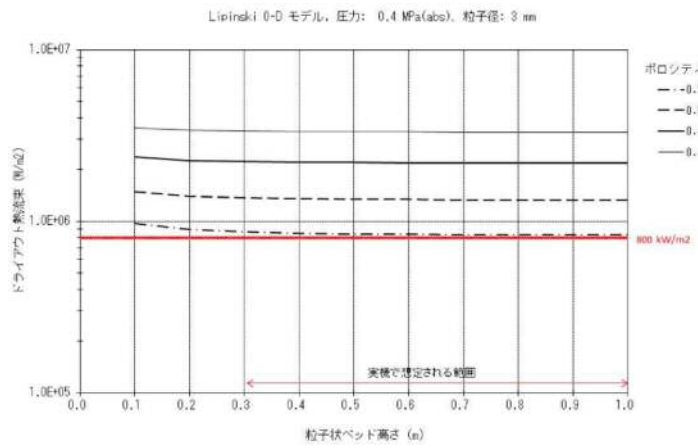
## 7. まとめ

以上の評価から、過渡事象及び L O C A 事象いずれにおいても、R P V 破損から 7 分の間において、デブリの冠水状態が維持されることを確認した。

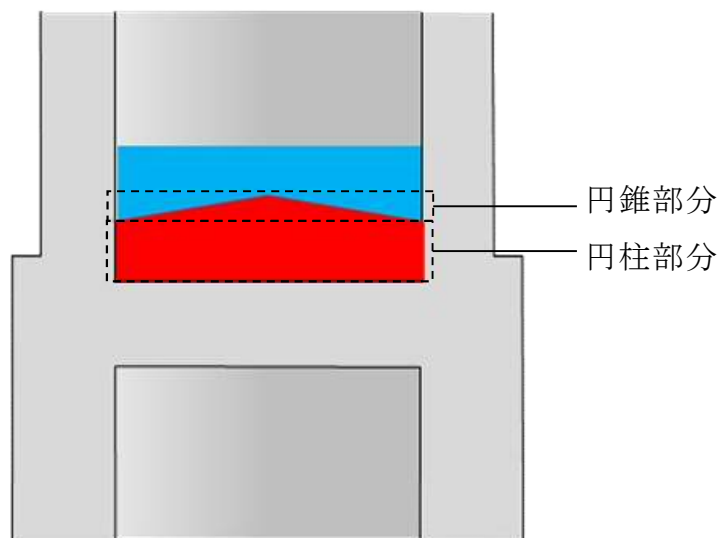




第3図 デブリ堆積形状




第2図 粒子状ベッド高さ とドライアウト熱流束の関係



第3図 デブリ堆積形状 (不確かさ考慮)

### デブリとして考慮するペDESTAL内構造物について

デブリ堆積高さの計算においては、第1表に示すペDESTAL内構造物の総体積を保守的に切り上げ、として考慮した。構造物の一例として、ターンテーブルの写真を第1図に示す。

なお、ペDESTAL内構造物の総体積の算出に当たっては、以下のとおり一部保守的な条件としている。

- ・一部のサポート類やケーブル類等についてはデブリ堆積高さより高いペDESTAL壁面に設置されており、デブリになる可能性は低いが、デブリ量を多く見積もる観点からデブリとして考慮する構造物に含めている
- ・ケーブル類等については、今後撤去予定の構造物も含めている

第1表 デブリとして考慮したペDESTAL内構造物

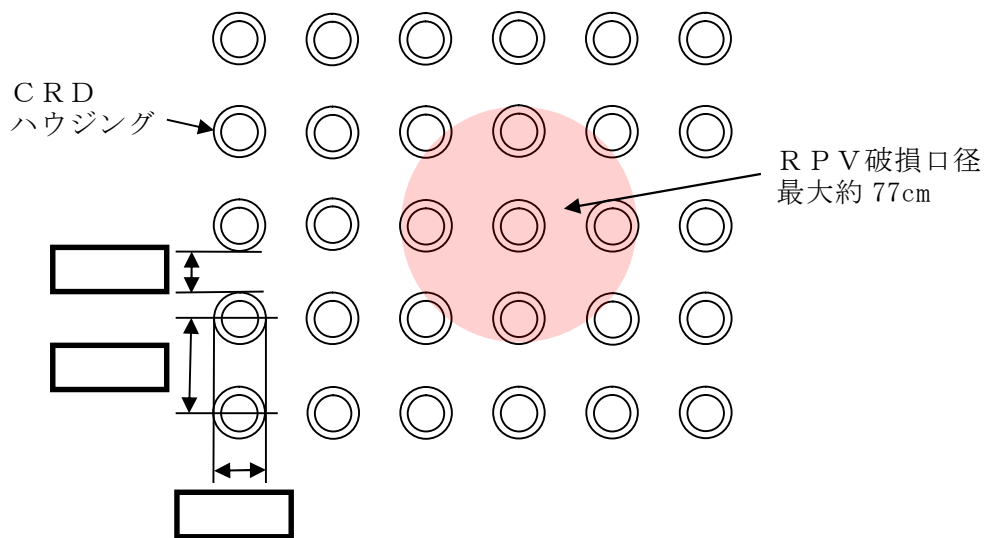
構造物	体積 m <sup>3</sup>
ターンテーブル	
CRDハウジング (9本) ※	
CRD機構 (9本) ※	
CRDハウジングサポート	
ターンテーブル動力機構	
ドレン配管	
床・機器ドレンサンプ構造	
サポート類	
その他 (ケーブル類等)	
合計	

※：MAAP解析結果におけるRPV破損口径の最大値より、デブリとなり得る最大本数として9本を設定 (第2図)



第1図 ターンテーブルの現場写真

(溶融炉心の落下部及びその周囲のみが溶融しデブリに加わると考えられるため、評価においては一辺1mの正方形の範囲が溶融すると想定)



第2図 CRD配置とRPV破損口径の関係

## 粒子化割合の算出

粒子化割合は以下の Ricou-Spalding 相関式により求めた。

$$\Phi_{ent} = \frac{d_{dj,0}^2 - d_{dj}^2}{d_{dj,0}^2}$$

$$d_{dj} = d_{dj,0} - 2E_0 \left( \frac{\rho_w}{\rho_{dj}} \right)^{1/2} \Delta H_{pool}$$

ここで、

$\Phi_{ent}$  : 粒子化割合 [-]

$E_0$  : エントレインメント係数 [-]

$\Delta H_{pool}$  : プール水深 [m]

$d_{dj}$  : プール底部におけるデブリジェット径 [m]

$d_{dj,0}$  : 気相部落下を考慮した水面におけるデブリジェット径 [m]

$\rho_{dj}$  : ジェット密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\rho_w$  : 水密度 [kg/m<sup>3</sup>]

評価条件は以下のとおり。

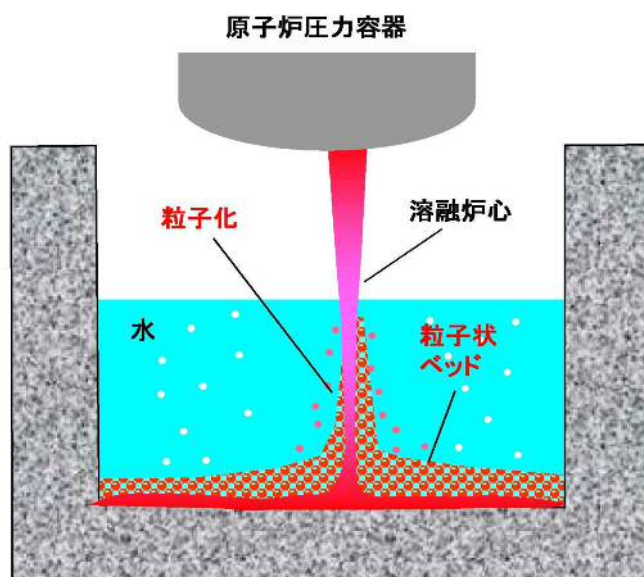
項目	設定値	設定根拠
ペDESTAL水位	1m	対策後の水位
デブリ密度	<input type="text"/>	MAAP 計算結果
初期デブリジェット径	0.15m	CRD 案内管径
エントレインメント係数	<input type="text"/>	MAAP 推奨範囲の最確値

以上により評価した結果、粒子化割合は約 17.1%となる。

## デブリの拡がりに関する不確かさについて

### 1. はじめに

事前水張りされたペDESTALのプール水中に落下するデブリは、一部が粒子化した後に固化し、残りが熔融状態のまま床面に到達して床面上を拡がり、固化したデブリ粒子が床上の連続層の上に堆積して粒子状ベツドを形成するものと想定される（第1図）。このようなデブリの拡がりにおいて、熔融物の拡がり距離と粒子状ベツドの堆積形状に不確かさが想定される。



第1図 ペDESTALにおけるデブリ挙動の概念

### 2. デブリの拡がりに関する知見

#### (1) 熔融物

PULiMS 実験では、水中での熔融物の拡がり挙動が観察されるとともに、水中での熔融物の拡がり距離を求めるスケーリング則が提案されている。PULiMS 実験結果を元に妥当性が確認されているスケーリング則に、BW

Rの溶融炉心落下条件を適用して、水中での溶融物の拡がり距離を評価すると、約18mとなる（重大事故等対策の有効性評価に係るシビアアクシデント解析コードについて（以下、「解析コード資料」という。） 付録4(5)b参照）。コリウムシールドを設置した場合のペDESTAL半径が であることを考慮すると、溶融炉心は床全面に拡がる可能性が高いと考えられる。これは、溶融物の拡がりに影響する因子のうち、主に溶融炉心落下流量が大きい（全炉心相当の溶融炉心が1分程度で落下することを想定）ことによるものと考えられる。PULiMS実験条件と実機条件を比較した場合、以下の観点から実機条件の方が拡がりが促進されることが考えられる（第1表）。

- ・溶融物重量の PULiMS／実機値に対して冷却材重量の PULiMS／実機値は大きく、実機条件では相対的に溶融物量が多くなる
- ・溶融物過熱度及び比熱は実機条件の方が高く、実機において溶融物は崩壊熱によって継続的な加熱がある
- ・サブクール度については実機条件の方が高いが、溶融物落下後にはサブクール度がすぐに低下することから、拡がりに対する影響は小さいと考えられる
- ・水深／ブレイクアップ長さについては、実機において水中でより細粒化しにくい傾向であり、溶融物の着床時の温度は高い傾向となることから、床面上での拡がりにおいても拡がり易い傾向となる。
- ・溶融物密度は実機条件の方が大きく、慣性による拡がり効果が大きい
- ・粘性係数については、実験と同程度か小さいものと考えられ、実機条件ではより拡がり易いと考えられる。
- ・表面張力については不確かさが大きいパラメータであるが、表面張力が大きいほど床面上を広がりにくくなる一方で、床面到達までの細粒

化に伴う冷却・固化が生じにくいいため、床面での溶融物温度が高めになり拡がり易くなることから、両者の相殺により表面張力が拡がりを与える影響は小さいと考えられる。

- ・ 輻射率については、特に実験データの不確かさ幅が大きく実験条件と実機条件の大小関係が明確ではないが、溶融物から冷却材への伝熱量と比較すると輻射の影響は相対的に小さいと考えられることから、拡がり挙動に与える影響は小さいと考えられる。
- ・ 床面熱伝達については、実機では床スラブの形状変更に合わせてペDESTAL床表面にSUS板を設置することで実験と同じ材質となるため床面熱伝達量は同等であり、また、実機解析から溶融物除熱は冷却材伝熱が支配的であることから、床面熱伝達が拡がり挙動に与える影響はない。また、EPRコアキャッチャの溶融物拡がりに関わる実験では、床の材質の差異によらず同様な拡がり挙動になることが確認されている（補足1参照）。

したがって、溶融物の拡がり距離については、不確かさを考慮しても床全面に拡がるものと想定される。

第 1 表 PULiMS 実験条件と実機条件の比較

分類	項目	実機条件	PULiMS (E4)	PULiMS/実機
初期条件	溶融物	UO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub> -SUS 等	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -WO <sub>3</sub>	-
	溶融物重量[kg]	約 300×10 <sup>3</sup>	約 47	約 0.16×10 <sup>-3</sup>
	溶融物融点[K]		1,143	-
	溶融物過熱度[K]		約 70	
	比熱[J/kg/K]		250~310	
	崩壊熱	あり	なし	-
	冷却材重量[kg]	約 30×10 <sup>3</sup>	約 40	約 1.3×10 <sup>-3</sup>
	サブクール度[K]		約 23	
溶融物冷却材中挙動	L/L <sub>br</sub> (水深/ブレイクアップ長さ※)  ※Taylor 関連式	約 0.08~約 0.23	0.35	約 1.5~4.4
溶融物床面上挙動	溶融物密度[kg/m <sup>3</sup> ]		7,811	
	粘性係数[Pa・s]	0.004	0.003~0.03	約 0.75~7.5
	表面張力[N/m]		0.2~0.6	
	輻射率[-]		0.4~1.0	
	床面熱伝達	SUS 材	SUS 材	-

(2) 粒子状ベッド

ANL で実施されたセルフレベリング実験では、粒子状ベッド内の沸騰による粒子の吹き上げと再堆積によるセルフレベリング効果により、2~3分程度で堆積厚さが均一化されている（解析コード資料 付録4(4)参照）。

PDS 実験では、沸騰等の冷却水の流動による粒子状ベッドの拡散挙動の観察を行っている（補足2参照）。均一化に係る時間は、デブリ密度、ポロシティ、拡がり面積に加え、粒子状ベッドを流れる空気又は蒸気の気相流体速度に依存することが示されており、気相流体速度が相対的に



小さい PDS-E 実験では粒子状ベッドの均一化に要する時間が数分～数十分であるが、気相流体速度がより大きい PDS-C 実験では数秒～数十秒と早く均一化が進むことが確認されている。実機においては、デブリが落下した直後は高温のデブリから急激に伝熱が進むことから発生蒸気速度は十分速いものと考えられるため、落下直後に十分な均一化が進むと考えられる。

したがって、粒子状デブリベッドの堆積形状については、崩壊熱を発生するデブリ粒子では、粒子状ベッド内の継続的沸騰による粒子の攪拌によるセルフレベルング効果により、時間と共に堆積厚さが均一化することが想定される。

### 3. デブリの拡がりに関する不確かさ評価

これまでの知見によれば、溶融物は床全面に拡がると想定され、粒子状ベッドについても短時間で均一化される。よって、デブリの拡がりに関する不確かさはないものと考えられるが、デブリの堆積高さに対して厳しい評価を実施する観点から、PULiMS 実験において確認されたデブリ堆積高さとの拡がり距離のアスペクト比を適用し、均一化した場合と比較して堆積高さが高くなる場合の評価を行う。PULiMS 実験は溶融物を水中に落下した実験であり、溶融物と粒子状デブリベッドを含めたデブリ全体としての堆積高さに関する知見として適用できるものである。

#### (1) アスペクト比

PULiMS 実験のうち、溶融物量が比較的大きい E4 実験において、平均堆積高さ 41mm に対して、拡がり距離は 740mm×560mm となっている（第 2 図, 第 2 表）。アスペクト比としては 1:18～1:14 となっており、おお

よそ 1:16 程度の拡がり挙動を示している。従って、アスペクト比として 1:16 を適用し評価を行う。

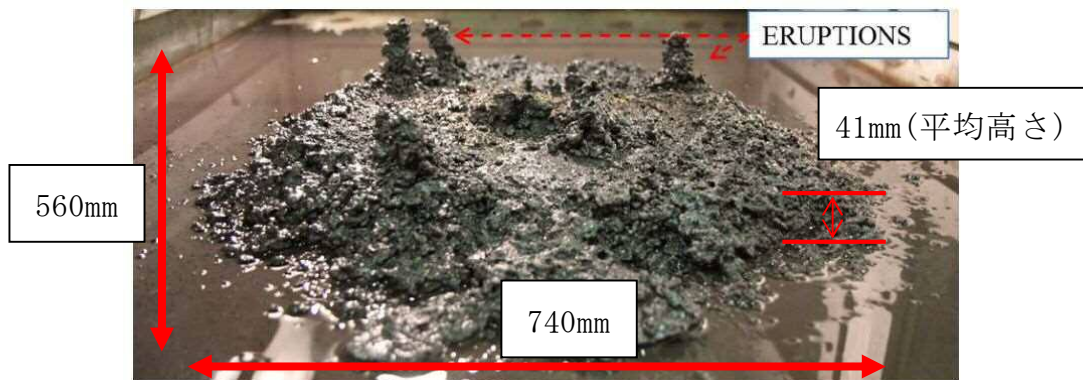
第 2 表 PULiMS 実験条件と結果

Table 1. PULiMS-E test matrix with initial conditions.

Parameter	PULiMS tests				
	E1	E2	E3	E4	E5
Melt material	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -WO <sub>3</sub>	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -CaO	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -WO <sub>3</sub>	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -WO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub> -WO <sub>3</sub>
Melt mass composition, %	42.64-57.36 eutectic	30-70 non-eutectic	42.64-57.36 eutectic	42.64-57.36 eutectic	15.74-84.26 eutectic
Melt jet diameter, mm	20	20	20	20	20
Jet free fall height, mm	400	400	400	400	400
Initial melt volume, L	3	3	10	6	6
Initial melt mass, kg	23.4	7.5	78.1	46.9	41.2
T <sub>sol</sub> , °C	870	1027	870	870	1231
T <sub>liq</sub> , °C	870	1027	870	870	1231
Melt temperature in the funnel upon pouring, °C	1006	1350	1076	940	1531
Water pool depth, mm	200	200	200	200	200
Water temperature, °C	79	78	75	77	72

Table 2. Measured and estimated properties of the debris beds in PULiMS-E tests.

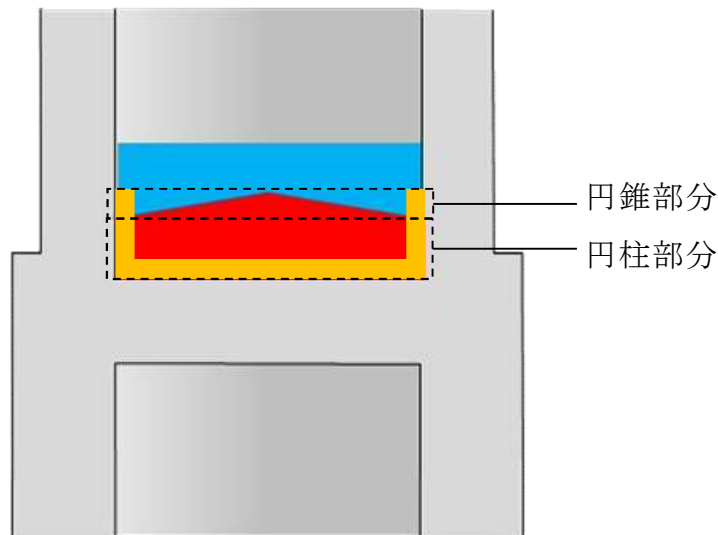
Parameter	Exploratory PULiMS tests			
	E1	E3	E4	E5
Melt release time, (sec)	10	15	12	~8.7
Total size $x \times y$ , mm	460x440	~750x750	740x560	-
Cake size $x \times y$ , mm	~430x320	~750x750	711x471	~400x420
Max debris height, mm	93	unknown	106	50
Area averaged debris bed height, mm	31	~30	30	22
Volume averaged debris bed height, mm	50	unknown	41	28
Debris height under injection point, mm	48	unknown	50	39
Total area occupied by cake, m <sup>2</sup>	0.14	~0.44	0.30	0.14
Measured particulate debris mass, kg	~4	unknown	2.9	-
Measured particulate debris mass fraction, %	~20%	unknown	~6.8%	-
Solidified cake mass, kg	~20	unknown	39.5	13.6
Measured debris bed volume, L	~4.2	unknown	8.9	~3.1
Estimated total cake porosity	0.29	-	0.36	0.37
Symmetry of the spread	non-sym.	unknown	non-sym.	symmetric
Steam explosion	no	yes	no	yes
Cake formation	cake	no cake	cake	cake
Measured melt superheat, °C	136	206	70	300
Measured melt superheat in the pool, °C	121	77	48	90
Estimated loss of melt superheat due to jet interaction with coolant, °C	15	129	22	210



第 2 図 PULiMS 実験結果 (E4)

## (2) 堆積高さ評価

アスペクト比を考慮した場合、デブリの堆積形状は第3図のように円柱上に円錐が堆積した形状となる。円錐部分については、堆積高さが最大となるのは床全面に拡がった場合であり、コリウムシールド厚さを考慮したペDESTAL直径 [ ] にアスペクト比を考慮すると、堆積高さは約 [ ] となる。円柱部分については、円錐部分の体積を除いたデブリ全量が円柱状に堆積するため、堆積高さは約 1.36m となる。以上から、デブリの堆積高さは円錐部分の体積高さと円柱部分の体積高さの合計となることから、約 1.73m となる。



第3図 デブリ堆積形状（アスペクト比考慮）

## (2) デブリの冠水維持に対する評価

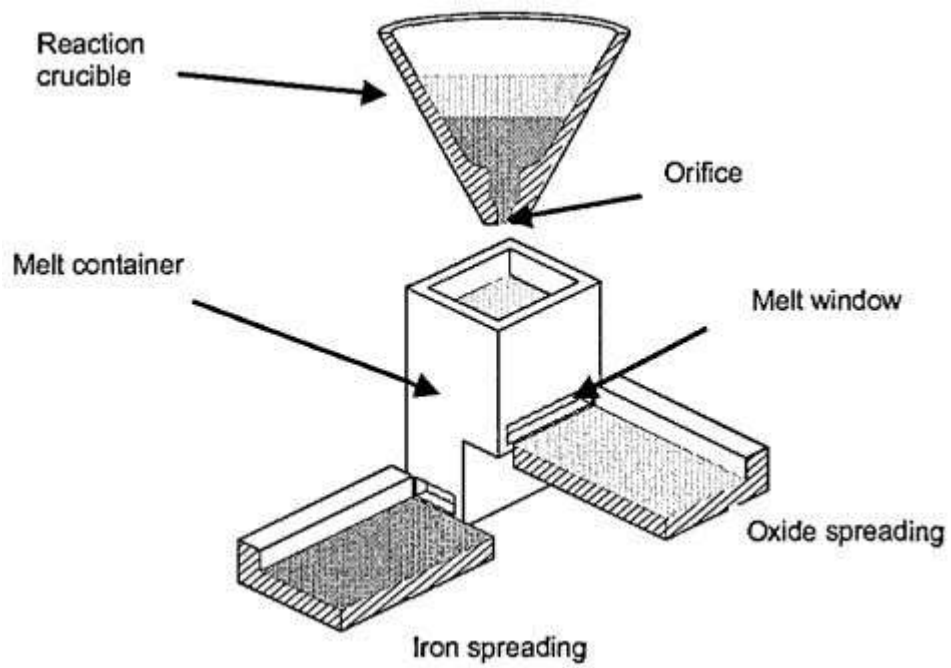
粒子化割合 0.171 のデブリ量に対してポロシティ 0.5 で全ての間隙に浸水していると仮定した場合、円錐部分の頂部から水面までの水深は約 52cm である。また、円錐状に堆積することで水プールとの接触面積が増え、蒸発量が増加するが、一様に堆積した場合の水プールとの接触面積からの増加割合は 1% 未満であり、蒸発量に対して有意な影響を与えない。有効性評価（補足 3

参照)に基づく, R P V破損によるデブリ落下から格納容器下部注水までの期間における水位低下量は, 過渡事象の場合は約 37cm, L O C A事象の場合は約 48cm であり, 蒸発量の増加として保守的に 1%を見込んだ場合でも水位低下量は, 過渡事象の場合は約 38cm, L O C A事象の場合は約 49cm となるため, デブリの冠水は維持される。

## EPR コアキャッチャの溶融物拡がりに関わる実験

CEA/DRN/DTP で行われた CORINE 実験<sup>[1]</sup>では、低融点物質（グリセロール他）を模擬物質として使用して、水中での拡がり挙動を調べる実験が実施され、拡がり先端の移動速度や底部に形成されるクラストの影響が調べられた。

独カールスルーエ研究センター（FZK）で実施された KATS 実験<sup>[2][3][4]</sup>では、溶融物としてテルミット（ $Al_2O_3$  約 150kg, Fe 約 150kg）が使用され、溶融物の放出速度や温度、拡がり形状（1D, 2D）、床の材質（コンクリート、セラミック、コーティング）、水の有無をパラメータに溶融物の拡がり実験が行われている。実験装置を第 1 図及び第 2 図に示す。 $Al_2O_3$  と Fe では密度が異なり成層化するため、溶融物の出口を 2 箇所設け、最初に  $Al_2O_3$  が放出し、最後に Fe を放出することにより酸化物溶融物の拡がり と 金属溶融物の拡がりを分けて実験が可能となっている。実験条件を第 1 表に示す。KATS-10 と KATS-11 の実験条件はほぼ同様であるが、KATS-10 の方は 1mm の水張りをしてあり、KATS-11 の方はドライ条件となっている。両者の拡がり結果を第 3 図に示すが、両ケースのように溶融物の放出速度が比較的高い場合は、冷却材の有無によらず同様な拡がり挙動になる結果となっている。また、KATS-12 と KATS-13 の実験条件はほぼ同様であるが、KATS-12 の方が床の材質がセラミックであり、KATS-13 の方はコンクリートである。両者の拡がり結果を第 4 図に示すが、両ケースのように溶融物の放出速度が比較的高い場合は、床の材質の差異によらず同様な拡がり挙動になる結果となっている。



第 1 図 KATS 実験装置の概要図 [2]



(1D)



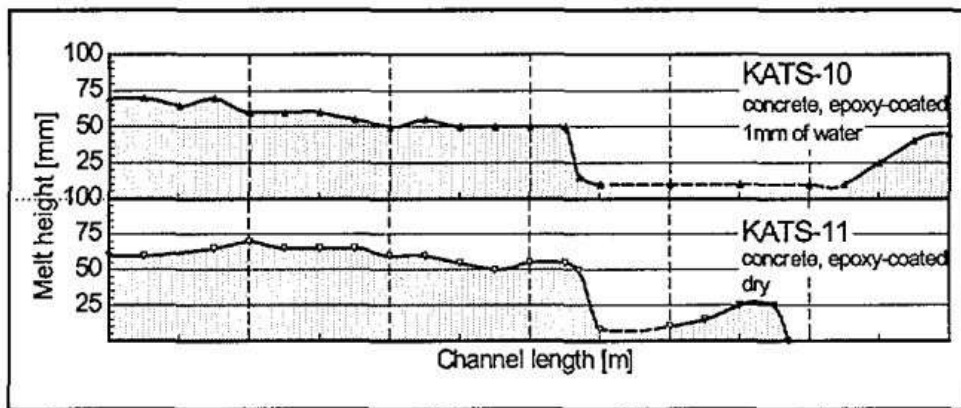
(2D)

第 2 図 KATS 実験の 1D と 2D の拡がり形状の写真 [3]

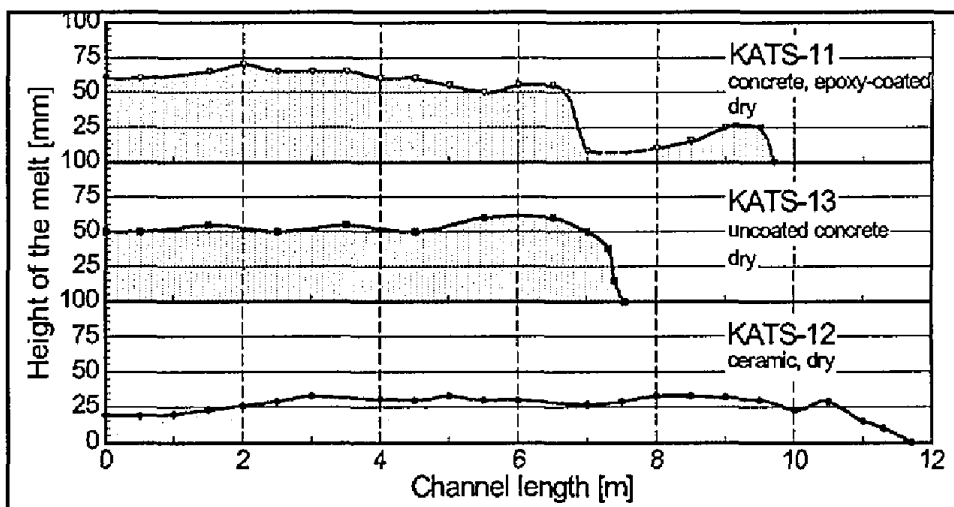
第 1 表 KATS 実験条件と拡がり距離（酸化物溶融物，1D 拡がり）<sup>[2]</sup>

Test #	Substratum	Mass in channel (kg)	Temperature Melt (°C)	Pouring rate (l/s) / Length in Time(s)	Spreading length (m)
KATS-12	Ceramics*)	186	2027	12.7 → 0 l/s in 10 s	11.7
KATS-14	Ceramics*)	176	1967	2 → 1.2 l/s in 37 s	7.2
KATS-10	Concrete 1mm Water (Epoxy)	179	2037	12.4 → 0 l/s in 10s	>12 first front 6.5 m main front
KATS-11	Concrete Dry (Epoxy)	183	2062	12.7 → 0 l/s in 10s	9.5 m first Front 6.8 m main front
KATS-13	Concrete Dry	185	2052	12.7 → 0 l/s in 10s	7.5

\*) Cordierite (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 37 wt%, SiO<sub>2</sub> 52 wt%, MgO 6,5 wt%)



第 3 図 KATS 実験の水の有無の影響（酸化物溶融物，1D 拡がり）<sup>[2]</sup>



第 4 図 KATS 実験の床の材質の影響（酸化物溶融物，1D 拡がり）<sup>[2]</sup>

## 参考文献

- [1] J.M. Veteau and R. Wittmaack., "CORINE Experiments and Theoretical Modeling," Proceedings of FISA-95, Luxemburg EUR 16896 EN, pp. 271-285 (1996).
- [2] Proceedings of the Second OECD(NEA) CSNI Specialist Meeting on Molten Core Debris-Concrete Interactions, NEA/CSNI/R(92)10, Karlsruhe, Germany (1992).
- [3] B. Eppinger, et al., "KATS Experiments to Simulate Corium Spreading in the EPR Core Catcher Concept," FzK, Karlsruhe, Germany.
- [4] B. Eppinger, et al., "Simulationsexperimente zum Ausbreitungsverhalten von Kernschmelzen: KATS-8 bis KATS-17," FZKA 6589 (2001).



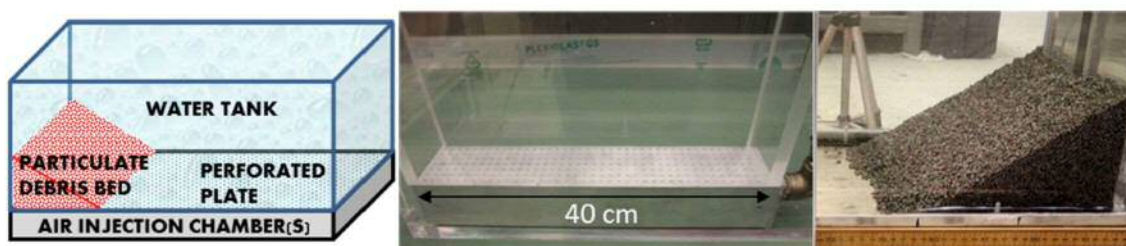
## PDS 実験について

## 1. はじめに

スウェーデン王立工科大学 (KTH) で実施された PDS 実験は、沸騰等の冷却水の流動による細粒状デブリベッドの拡散挙動について観察を行っている。

## 2. 実験条件

実験装置概要図を第 1 図に示す。水槽の壁面に沿って粒子状デブリを堆積させ、下部に設置した注入用チャンバーから水蒸気又は空気を注入し、粒子状デブリベッドの拡散挙動を観察する。



a) 装置概要

b) PDS-C 試験

c) PDS-E7~23 試験

第 1 図 実験装置概要図

また、PDS 実験では種々のパラメータを感度として複数の実験が実施されている。各実験において感度として設定したパラメータを第 1 表に示す。

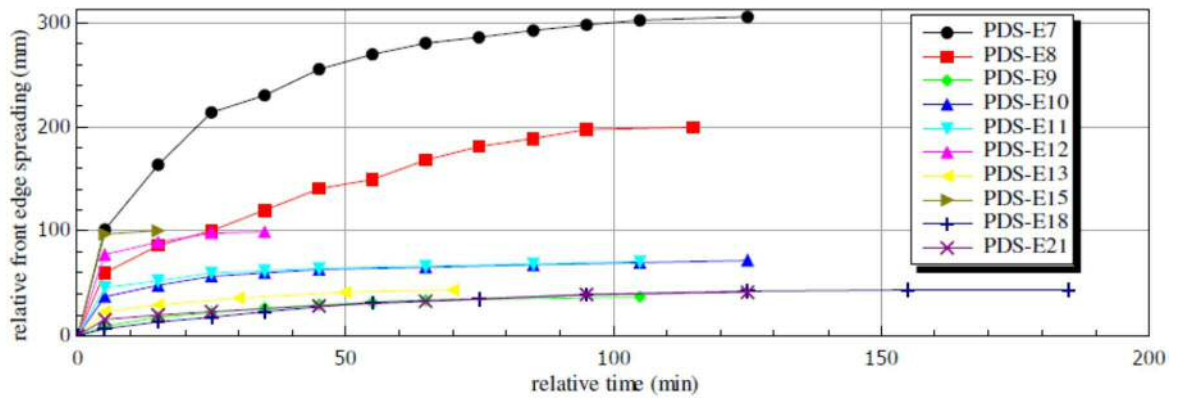
第 1 表 PDS 実験におけるパラメータ設定

Group	Tests	Effect studied
A.	E2-E3; E7-E8;	Injected gas (air) flow rate influence
B.	E2-E4	Particle density and size
C.	E5-E6; E7-E9	Leading edge gas injection (turned on/off) influence
D.	E10-E12	Roughness of the spreading surface with help of friction net
E.	E12-E14	Influence of the water presence
F.	E12-E15	Mixture of particles with dissimilar morphology
G.	E18-E23	Influence of inclined spreading surface (0°-15°)
H.	E10-E11	Reproducibility tests
I.	C1-C12	Tests on PDS-C facility at high superficial velocities (up to 1.2 m/s)

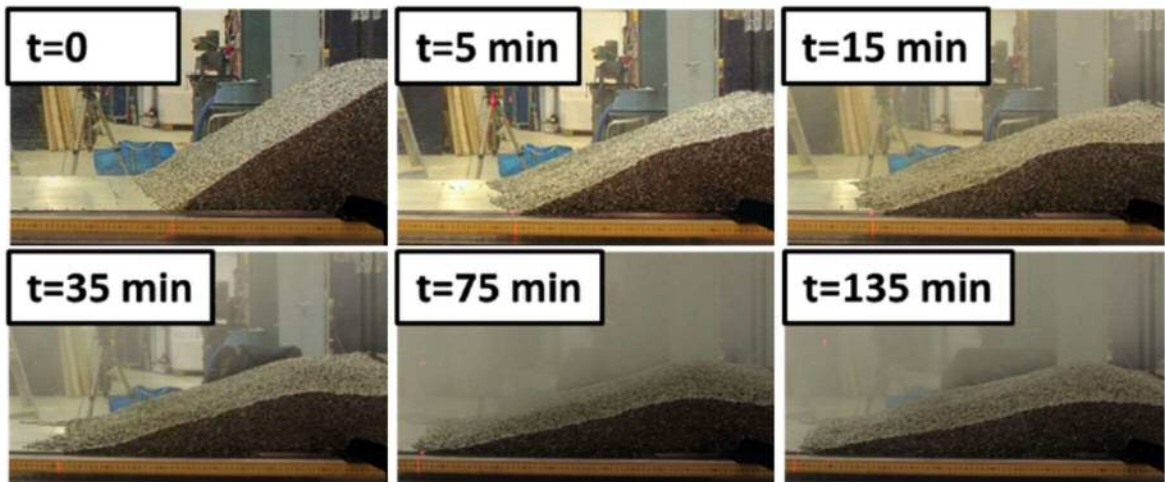
### 3. 実験結果

#### (1) PDS-E 実験

実験マトリックスを第2表, 実験結果を第2図及び第3図に示す。PDS-E 実験における気相流体速度は最大でも 0.122m/s 程度であり, 粒子状デブリベッドの拡がりに数分~数十分の時間を要している。



第2図 PDS-E 実験結果



第3図 PDS-E7 実験結果

第2表 PDS-E 実験マトリックス

Test No.	Facility	Particulate debris			Total air flow rate (L/s)	Study group	Remarks*	Relative bed front propagation, (mm)	
		Material†	Mass (kg)	Volume (dm <sup>3</sup> )				After 1h	Final
E2	PDS-1	Gravel	~13	10	2.8	A, B, F	O	130	170
E3	PDS-1	Gravel	~13	10	5.7	A, B, F	O	270	300
E4	PDS-1	SS cylinders	30.4	6	2.8	B	O	70	135
E5	PDS-1	SS cylinders	30.4	6	2.8	C	O	43	120
E6	PDS-1	SS cylinders	30.4	6	2.8	C		12	25
E7	PDS-2	SS cylinders	200	38.5	20	A, C	O	270	315
E8	PDS-2	SS cylinders	200	38.5	12	A, C	O	165	205
E9	PDS-2	SS cylinders	200	38.5	12	C		32	38
E10	PDS-2	SS cylinders	200	38.5	18	D, H	N	65	72
E11	PDS-2	SS cylinders	200	38.5	18	D, H	N	67	71
E12	PDS-2	SS cylinders	200	38.5	18	D, E, F		99	99
E13	PDS-2	SS cylinders	200	38.5	9	E, F		43	44
E14	PDS-2	SS cylinders	200	38.5	18	E, F	no water	0	0
E15	PDS-2	SS cylinders	160	~37	18	F		100	100
		SS spheres	40						
E18	PDS-2	SS cylinders	181	34.6	20	D, G	N, i0	32	44
E19	PDS-2	SS cylinders	181	34.6	20	D, G	N, i10	89	89
E20	PDS-2	SS cylinders	93	17.9	20	D, G	N, i15	71	71
E21	PDS-2	SS cylinders	176	33.5	22	D, G	N, i0	33	41
E22	PDS-2	SS cyl.	122	23.3	22	D, G	N, i10	30	40
E23	PDS-2	SS cyl.	93	17.7	22	D, G	N, i15	44	57

\*O=open leading edge chamber; N=friction net is used; i=inclination angle in degrees.

†SS=stainless steel.

(2) PDS-C 実験

実験マトリックスを第3表に示す。PDS-C 実験の気相流体速度は 0.34 ~ 2.09m/s と大きく、粒子状デブリベッドの拡がりに要する時間は数秒 ~ 数百秒オーダーであり、極めて短時間で均一化される結果となっている。

第3表 PDS-C 実験マトリックス

Test No.	Initial debris bed triangle type	Air injection			Water level (cm)	Debris bed settling time (sec)	Initial air injection method
		Flow rate, $Q_g$ (liter/s)	Superficial velocity, $v_{air}$ (m/s)	Ratio $\frac{v_{air}}{v_{mf}^{air}}$			
C1	right	10	0.34	0.13	55	~480	Instant
C1B	right	10	0.34	0.13	45.5	~480	Gradual
C2	right	20	0.69	0.26	45.5	~390	Gradual
C3	right	30	1.04	0.39	45.5	~240	Gradual
C4	right	40	1.39	0.53	45.5	~60	Gradual
C5	right	50	1.74	0.66	45.5	~10	Gradual
C6	right	60	2.09	0.80	45.5	~2	Gradual
C7	isosceles	20	0.69	0.26	45.5	~60	Gradual
C8	isosceles	10	0.34	0.13	45.5	~130	Gradual
C9	isosceles	30	1.04	0.39	45.5	~40	Gradual
C10	isosceles	40	1.39	0.53	45.5	~6	Gradual
C11	isosceles	40	1.39	0.53	45.5	~3	Gradual
C12	isosceles	30	1.04	0.39	45.5	~4	Gradual

(3) 結論

気相流体速度が相対的に小さい PDS-E 実験では、粒子状デブリベッドの均一化に要する時間が数分~数十分に及ぶが、気相流体速度が大きい PDS-C 実験では数秒~数百秒と早く均一化が進む頃が確認されている。

実機においては、溶融炉心が落下した直後は、高温の溶融炉心から冷却材に急激に伝熱が進むことから発生蒸気速度は十分に大きいものと考えられるため、落下直後に十分な均一化が進むと期待できる。

参考文献

- [1] A. Konovalenko et al., Experimental and Analytical Study of Particulate Debris Bed Self-Leveling, NUTHOS-9, Kaohsiung, Taiwan, September 9-13, 2012.
- [2] P. Kudinov et al., Investigation of Debris Bed Formation, Spreading and Coolability, NKS-287, Royal Institute of Technology, KTH, Sweden, August 2013.

## 主要解析条件 (RPV 破損後のデブリ冠水維持に関連するもの)

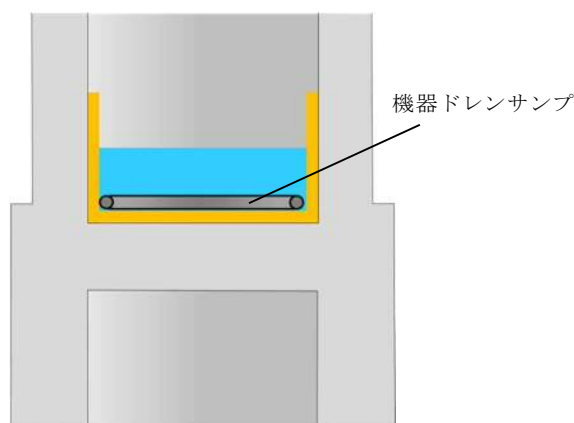
項目	主要解析条件	条件設定の考え方	
解析コード	MAAP	—	
初期条件	原子炉停止後の崩壊熱	ANSI/ANS-5.1-1979 燃焼度 33GWd/t	崩壊熱が大きい方が原子炉水位低下及び格納容器圧力上昇の観点で厳しい設定となるため、崩壊熱が大きくなる燃焼度の高い条件として、1サイクルの運転期間(13ヶ月)に調整運転期間(約1ヶ月)を考慮した運転期間に対応する燃焼度を設定
	格納容器圧力	5kPa[gage]	格納容器圧力の観点で厳しい高めの設定として、通常運転時の圧力を包含する値を設定
	ドライウェル雰囲気温度	57℃	ドライウェル内ガス冷却装置の設計温度を設定
	外部水源の温度	35℃	格納容器スプレイによる圧力抑制効果の観点で厳しい高めの水温として、年間の気象条件変化を包含する高めの水温を設定
	サプレッション・プール水温度	32℃	サプレッション・プールでの圧力抑制効果が厳しくなる高めの水温として、保安規定の運転上の制限における上限値を設定
	溶融炉心からプール水への熱流束	800kW/m <sup>2</sup> 相当 (圧力依存性あり)	過去の知見に基づき事前水張りの効果を考慮して設定
事故条件	起因事象	給水流量の全喪失	原子炉水位低下の観点で厳しい事象を設定
機器条件	格納容器下部注水系 (常設)	RPV 破損から7分後に 80m <sup>3</sup> /h で注水開始	溶融炉心の冷却及び冠水維持に必要な注水量として設定



## デブリ落下時に機器ドレンサンプが健全な場合の影響について

### 1. はじめに

ペDESTAL内には金属製の機器ドレンサンプを設置する（第1図）。デブリ落下時には機器ドレンサンプは溶融して溶融デブリに取り込まれ、ペDESTAL内に均一に拡がる。ここで、デブリ落下時に機器ドレンサンプが溶融せず健全であると仮定した場合に、プール水深及びMCCIによる侵食量に与える影響を評価する。

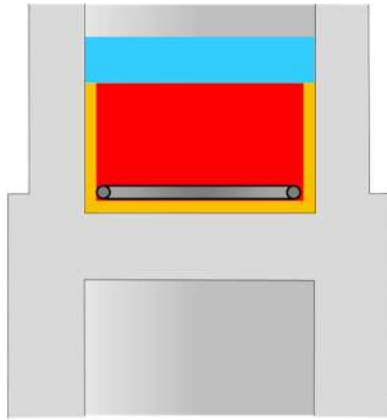


第1図 機器ドレンサンプ設置イメージ

### 2. プール水深に与える影響

機器ドレンサンプの体積を既設の機器ドレンサンプと同等の  として評価した場合、機器ドレンサンプが健全な場合のデブリ堆積高さは約0.12m上昇する。また、機器ドレン水は機器ドレンサンプ内に維持されることから、デブリ上の水プールの水深は約0.11m低下し、粒子化したデブリの範囲を除いた水プール水深は約0.58mとなる（第2図）。有効性評価の結果から、RPV破損によるデブリ落下から格納容器下部注水開始までのペDESTAL水プールの水位低下量は、過渡事象の場合は約37cm、LOCA事象の場

合は約 48cm であり，デブリの冠水は維持される。



第 2 図 機器ドレンサンプが健全な場合のデブリ堆積形状

### 3. MCCI による侵食量に与える影響

機器ドレンサンプが溶融した場合と健全な場合において，デブリ上のプール水，ペDESTAL 側面及び床面コンクリート並びに機器ドレンサンプが，それぞれデブリと接触する面積は第 1 表のとおりである。

第 1 表 デブリとの接触面積の比較

	デブリとの接触面積	
	①機器ドレンサンプが溶融した場合	②機器ドレンサンプが健全な場合
デブリ上の プール水		
ペDESTAL 側面及び床面		
機器ドレン サンプ		

機器ドレンサンプが健全な場合（②）は、デブリ堆積高さ上昇による側面の接触面積増加の影響により，機器ドレンサンプが溶融した場合（①）に比べて接触面積が大きくなる。さらに，機器ドレンサンプの接触面積も加わる

ことから、ペDESTAL側面及び床面への熱流束よりも機器ドレンサンプ（ステンレス製であり、内部には水が存在）への熱流束の方が大きく、②は①に比べてデブリの冷却がより進むと考えられる。

なお、②は一時的な期間であり、機器ドレンサンプはデブリにより溶融するため、長期的な物理挙動であるMCCIによる侵食量への影響はほとんどないと考えられる。

#### 4. まとめ

機器ドレンサンプが健全な場合、デブリ上のプール水深は低下するもののデブリの冠水は維持されるとともに、MCCIによる侵食量は低減すると考えられる。以上から、機器ドレンサンプが溶融せず健全な場合においても、デブリ露出や侵食量増加の観点での悪影響はないと考えられる。



### 添付 3. R P V 破損後の注水開始時間について

#### 1. R P V 破損判断パラメータについて

R P V 破損の判断は、非常時運転手順書Ⅲ及びアクシデントマネジメントガイドに従い、中央制御室において監視できるパラメータを用いることとし、下記の判断基準を用いる。

以下の複数のパラメータの変化傾向を確認することにより判断する。

##### ① 過渡事象

###### 【破損徴候パラメータ（破損の徴候を検知するパラメータ）】

- ・原子炉水位の「低下（喪失）」
- ・制御棒位置の指示値の「喪失数増加」
- ・R P V 下鏡部温度の指示値の「喪失数増加」

###### 【破損判断パラメータ（破損により変化するパラメータ）】

- ・ペDESTAL 水温の「上昇」又は「指示喪失」
- ・原子炉圧力の「低下」
- ・ドライウエル圧力の「上昇」
- ・ペDESTAL 雰囲気温度の「上昇」
- ・ドライウエル雰囲気温度の「上昇」

###### 【破損判断の参考パラメータ（破損の可能性を示すパラメータ）】

- ・サプレッション・プール水温の「上昇」
- ・ドライウエル水素濃度の「低下」

##### ② L O C A 事象

###### 【破損徴候パラメータ（破損の徴候を検知するパラメータ）】

- ・原子炉水位の「低下（喪失）」

- ・制御棒位置の指示値の「喪失数増加」
- ・R P V下鏡部温度の指示値の「喪失数増加」

**【破損判断パラメータ（破損により変化するパラメータ）】**

- ・ペDESTAL水温の「上昇」又は「指示喪失」
- ・ペDESTAL雰囲気温度の「上昇」
- ・ドライウエル雰囲気温度の「上昇」

**【破損判断の参考パラメータ（破損の可能性を示すパラメータ）】**

- ・原子炉圧力の「上昇」
- ・ドライウエル圧力の「上昇」
- ・サプレッション・プール水温の「上昇」
- ・ドライウエル水素濃度の「低下」

それぞれのパラメータは次の理由により選定している。

- ・破損徴候パラメータ（破損の徴候を検知するパラメータ）は、R P V破損前の徴候として確認できる可能性があるパラメータを選定
- ・破損判断パラメータ（破損により変化するパラメータ）は、R P V破損時の変化が顕著で、破損判断の確実性が高いと考えられるパラメータを選定
- ・破損判断の参考パラメータ（破損の可能性を示すパラメータ）は、R P V破損時のあるパラメータの副次的な変化として確認されるパラメータやR P V破損時の変化幅が小さいパラメータ等を選定

2. 破損徴候パラメータによるR P V破損徴候の検知について

炉心損傷時には、原子炉水位の低下による炉心露出が発生し、その後、溶融炉心のR P V下部プレナム部への移行が起こる。「破損徴候パラメータ」は、それらを踏まえたパラメータとして設定されている。

R P V下部プレナム部に溶融炉心が移行すると、R P V下鏡部温度の指示値は上昇し、その後、溶融炉心からの熱影響により徐々に指示値の喪失が発生するものと考えられる。また、制御棒位置の指示値についても同様に、溶融炉心からの熱影響により徐々に指示値が喪失してくるものと考えられる。

このようなR P V下部プレナム部に移行した溶融炉心による影響の拡大について、運転員は「破損徴候パラメータ」に基づき継続的に監視していくこととなる。

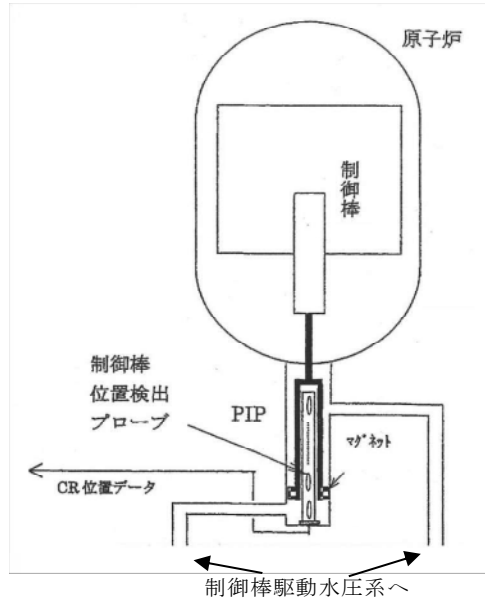
### 3. R P V破損の判断時間について

運転員は、「破損徴候パラメータ」によりR P V下部プレナムへの溶融炉心への移行・影響拡大を検知した後は、「破損判断パラメータ」及び「破損判断の参考パラメータ」により、R P Vの健全性を継続的に監視していくこととなる。このため、R P V破損発生時には、これらの監視パラメータの変化により速やかにR P V破損を判断することが可能であり、この判断に大幅な時間遅れはないと考えられる。

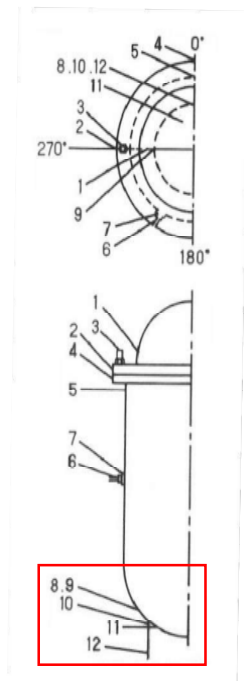
以上を考慮し、有効性評価においては、1.に示すR P V破損判断に必要なパラメータに基づくR P V破損の認知に係る時間として、R P V破損後のパラメータ確認開始までの時間遅れを考慮せず、各パラメータの確認に必要な時間を保守的に積み上げ、5分と想定している。さらに、代替格納容器スプレイ冷却系（常設）の操作時間1分、格納容器下部注水系（常設）の操作時間1分を加え、原子炉圧力容器破損から7分後にペDESTALへの注水を開始する設定としている。

なお、東海第二発電所では、デブリ冠水維持の観点でR P V破損の認知が重要であることに鑑み、ペDESTAL内に水温計を設置しR P V破損判断パラメータと位置付けることで、R P V破損の認知に係る信頼性を向上し、デブ

リ冠水維持の確実性を向上させることとする。



第1図 制御棒位置検出器概要図



No	測定名称
1	VESSEL TOP HEAD ADJAC FLANGE (B22-N028B)
2	VESSEL TOP HEAD FLANGE (B22-N028D)
3	VESSEL HEAD STUD (B22-N029B)
4	VESSEL FLANGE (B22-N050A)
5	VESSEL WALL ADJ. TO FLANGE (B22-N030A)
6	FEEDWATER NOZZLE (B22-N030F)
7	FEEDWATER NOZZLE (B22-N030G)
8	VESSL BOTTOM ABOVE SKTJCT (B22-N030H)
9	VESSL BOTTOM ABOVE SKTJCT (B22-N030K)
10	SUPPORT SKIRT TOP (B22-N030L)
11	VESSEL BOTTOM HEAD (B22-N030P)
12	SUPPORT SKIRT AT MTG FLANGE (B22-N030T)

第2図 R P V下鏡温度計検出位置

## 事象進展を踏まえた R P V 破損判断の成立性

## 1. はじめに

R P V 破損判断に用いる各パラメータは、R P V 破損以外の事象進展においても変動しうるため、想定される事象進展とそれに伴う R P V 破損判断への影響について整理し、R P V 破損判断の成立性を示す。

## 2. 事象進展

## 2.1 過渡事象

格納容器破損防止対策の有効性評価の代表シーケンスである「給水流量の全喪失＋全交流動力電源喪失」を想定する。プラント挙動に影響を与える事象進展は「逃がし安全弁開」「リロケーション」「R P V 破損」である。なお、これらの事象進展は他の事故シーケンスについても同様の傾向を示すと考えられる。

## 2.2 L O C A

格納容器破損防止対策の有効性評価の代表シーケンスである「大破断 L O C A＋注水機能喪失」を想定する。プラント挙動に影響を与える事象進展は「破断口からの蒸気流出」「リロケーション」「R P V 破損」である。なお、これらの事象進展は他の事故シーケンスについても同様の傾向を示すと考えられる。

### 3. 事象進展とパラメータ変動の関係

各シーケンスにおいて、事象進展とパラメータ変動の関係をまとめた結果を第1表及び第2表に示す。同様の傾向を示すパラメータはあるものの、R P V破損時特有の挙動を示すパラメータがあること、また、R P V破損時にはこれらのパラメータが同時に変動するという特徴があることから、プラント挙動に影響を与える事象進展時のパラメータ変動を考慮しても、R P V破損判断の成立性に影響はない。

なお、第1表及び第2表に示すパラメータについて、制御棒位置を除く全てのパラメータは重大事故等対処設備により計測されるため、重大事故時にパラメータ変動が確認可能である。制御棒位置の指示については、S B O時等、重大事故時にパラメータ変動が確認できない可能性はあるが、その他の破損徴候パラメータ（原子炉水位及びR P V下鏡部温度）によりR P V破損の徴候が確認できれば、その後運転員はR P Vの健全性を継続的に監視していくこととなる。したがって、重大事故時に制御棒位置の指示が確認でない場合でも、R P V破損判断の成立性に与える影響はない。

以上より、重大事故時の事象進展等を考慮しても、R P V破損の判断は可能と考えられる。

第1表 事象進展とパラメータ変動（過渡事象）

パラメータ※	逃がし安全弁開	リロケーション	R P V破損	判 断
<b>【破損徴候パラメータ（破損の徴候を検知するパラメータ）】</b>				
<u>原子炉水位</u>	低下	低下	低下（喪失）	傾向は同様であるが、R P V破損に近い方がより水位が低下した状態である可能性が高い
制御棒位置	—	—	喪失数増加	下部プレナムに熔融炉心が落下してから発生する事象であり、R P V破損時のみ該当
<u>R P V下鏡部温度</u>	—	—	喪失数増加	下部プレナムに熔融炉心が落下してから発生する事象であり、R P V破損時のみ該当
<b>【破損判断パラメータ（破損により変化するパラメータ）】</b>				
<u>ペDESTAL水温</u>	有意な変化なし	有意な変化なし	上昇又は喪失	ペDESTAL水温指示の喪失により確実にR P V破損を検知可能
<u>原子炉圧力</u>	有意な変化なし	上昇	低下	低下を示すのはR P V破損時のみ
<u>D/W圧力</u>	有意な変化なし	有意な変化なし	上昇	R P V破損前の発生蒸気は逃がし安全弁からS/P経路で排出されるためD/W圧力に有意な変化はない
<u>ペDESTAL雰囲気温度</u>	有意な変化なし	有意な変化なし	上昇	ペDESTAL内にデブリが落下する前には有意な変化はない
<u>D/W雰囲気温度</u>	有意な変化なし	有意な変化なし	上昇	R P V破損前の発生蒸気は逃がし安全弁からS/P経路で排出されるためD/W雰囲気温度に有意な変化はない
<b>【破損判断の参考パラメータ（破損の可能性を示すパラメータ）】</b>				
<u>S/P水温</u>	上昇	上昇	上昇	傾向は同様であるがR P V破損時の変化は軽微
<u>D/W水素濃度</u>	有意な変化なし	有意な変化なし	低下	R P V破損前の発生蒸気は逃がし安全弁からS/P経路で排出されるためD/W水素濃度に有意な変化はない

※下線は主要パラメータ（重大事故等対処設備），それ以外は補助パラメータ

第2表 事象進展とパラメータ変動（LOCA）

パラメータ※	破断口からの蒸気流出	リロケーション	R P V破損	判 断
<b>【破損徴候パラメータ（破損の徴候を検知するパラメータ）】</b>				
<u>原子炉水位</u>	低下	低下	低下（喪失）	傾向は同様であるが、R P V破損に近い方がより水位が低下した状態である可能性が高い
制御棒位置	—	—	喪失数増加	下部プレナムに溶融炉心が落下してから発生する事象であり、R P V破損時のみ該当
<u>R P V下鏡部温度</u>	—	—	喪失数増加	下部プレナムに溶融炉心が落下してから発生する事象であり、R P V破損時のみ該当
<b>【破損判断パラメータ（破損により変化するパラメータ）】</b>				
<u>ペDESTAL水温</u>	有意な変化なし	有意な変化なし	上昇又は喪失	ペDESTAL水温指示の喪失により確実にR P V破損を検知可能
<u>ペDESTAL雰囲気温度</u>	上昇	上昇	上昇	同様の傾向を示すが、R P V破損後は溶融炉心からの放熱影響により雰囲気温度の上昇がより顕著であると考えられる
<u>D/W雰囲気温度</u>	上昇	上昇	上昇	同様の傾向を示す
<b>【破損判断の参考パラメータ（破損の可能性を示すパラメータ）】</b>				
原子炉圧力	低下	上昇	上昇	破断口からの蒸気流出時は低下するが、それ以降は原子炉圧力とD/W圧力はほぼ同様の傾向を示す
<u>D/W圧力</u>	上昇	上昇	上昇	同様の傾向を示す
<u>S/P水温</u>	上昇	上昇	上昇	同様の傾向を示す
<u>D/W水素濃度</u>	低下	低下	低下	同様の傾向を示す

※下線は主要パラメータ（重大事故等対処設備），それ以外は補助パラメータ



## R P V 破損時における対応操作の成立性評価

## 1. はじめに

R P V が破損する事故シーケンスに対して必要な運転員操作を整理し、R P V 破損時における対応操作の成立性を評価する。

## 2. 評価対象とする事故シーケンス

R P V 破損する有効性評価の評価事故シーケンスとして、過渡事象時に注水機能が喪失する事象（以下「過渡事象」という）を選定している。ここでは、有効性評価のベースケースとなる過渡事象について、R P V 破損時における対応操作の成立性を評価する。

また、起因事象を L O C A とした場合には事象進展が異なることから、R P V 破損時間が早くなる大破断 L O C A 時に注水機能が喪失する事象（以下「L O C A 事象」という）についても、同様に R P V 破損時の対応操作の成立性を評価する。

なお、過渡事象及び L O C A 事象のいずれの場合も、電源復旧など必要な運転員操作が多くなる観点で全交流動力電源喪失を想定している。

## 3. 必要な運転員操作及び R P V 破損時における対応操作の成立性

事故発生から R P V 破損後までに必要な運転員操作について、第 1 図及び第 2 図に過渡事象及び L O C A 事象における作業と所要時間について示す。

事故発生から R P V 破損までに必要な運転員操作は、「常設代替高圧電源装置による緊急用母線及び非常用母線の受電操作」、「緊急用海水系を用いた代替循環冷却系の起動操作」、「逃がし安全弁 2 弁による原子炉急速減圧

操作」（過渡事象のみ）、「代替格納容器スプレイ冷却系（常設）にかかる格納容器冷却操作」（L O C A 事象のみ）、「格納容器下部注水系（常設）によるペデスタル（ドライウエル部）水位調整」、「原子炉建屋ガス処理系及び中央制御室換気系の起動操作」がある。また、「早期の電源回復不能の確認」等、プラント状態の監視に関する項目が複数存在する。これらの操作は運転員 A 及び運転員 B により分担して操作を実施可能であり、事象発生から 2 時間以内に操作完了する。

事象発生から 90 分以降、運転員 A は中央制御室に設置する重大事故等対処設備操作盤<sup>※1</sup>（以下「S A 盤」という）により、重大事故等対処設備における操作及び状態監視を専従して対応することにしており、R P V 破損判断及び R P V 破損判断後の対応操作は実施可能である。

※1 中央制御室内に設置するタッチパネル式の操作盤であり、プラント挙動の監視及び重大事故等対処設備の操作盤である。R P V 破損判断及び R P V 破損に伴う対応操作についても S A 盤で実施する。

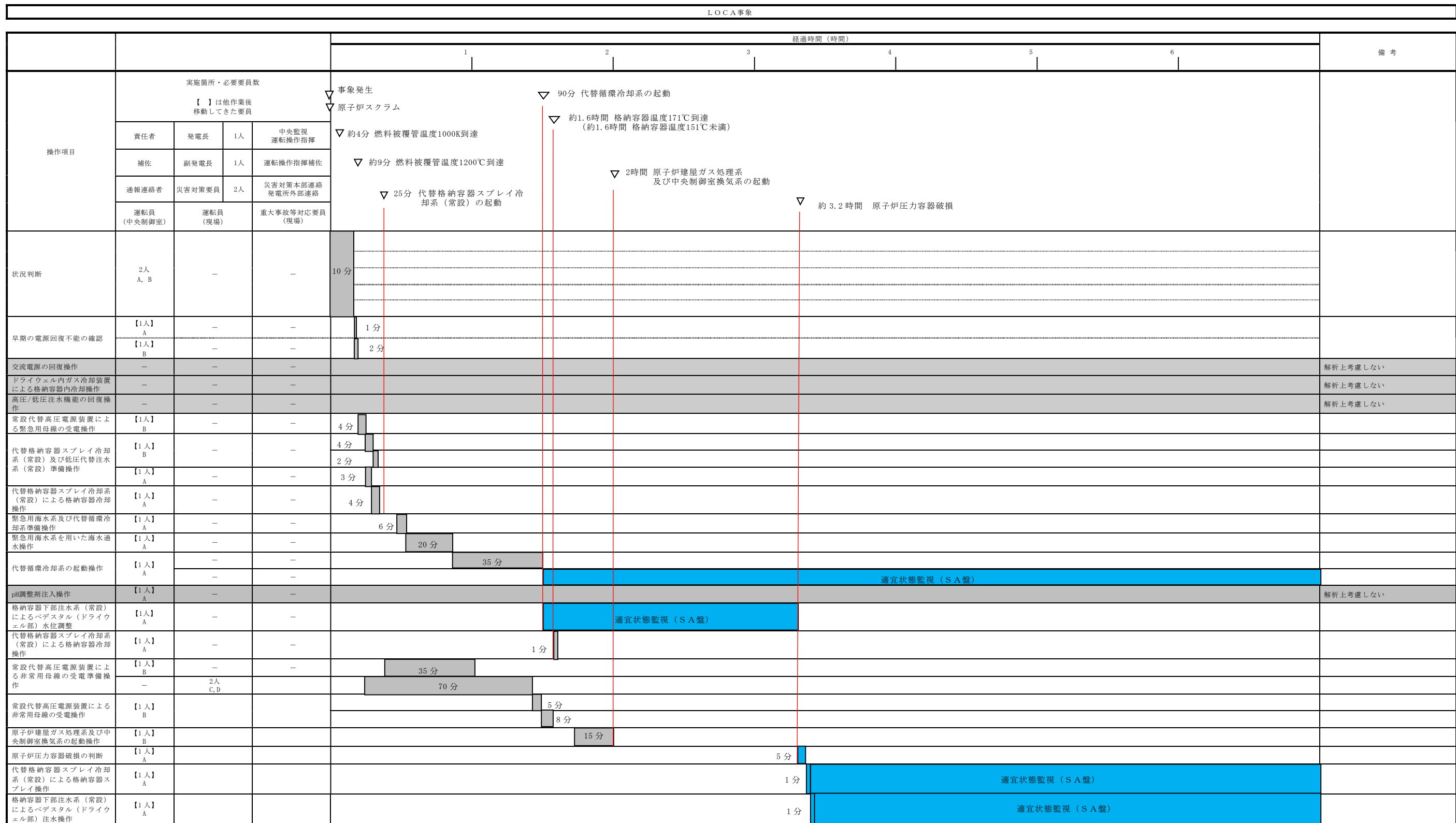
#### 4. まとめ

R P V 破損前に必要な運転員操作は運転員 A 及び運転員 B によって対応完了しており、R P V 破損時点では運転員 A によって対応操作が可能である。

以上から、R P V 破損時における対応操作について成立性を確認した。

過渡事象					経過時間 (時間)						備考	
操作項目	実施箇所・必要要員数				1	2	3	4	5	6		
		【 】は他作業後移動してきた要員				事象発生 原子炉スクラム 約 39 分 原子炉水位が燃料有効長底部から燃料有効長の 20%高い位置に到達 2時間 原子炉建屋ガス処理系及び中央制御室換気系の起動 90分 代替循環冷却系の起動 約 4.4 時間 原子炉圧力容器破損						
責任者	発電長	1人	中央監視 運転操作指揮									
補佐	副発電長	1人	運転操作指揮補佐									
通報連絡者	災害対策要員	2人	災害対策本部連絡 発電所外部連絡									
運転員 (中央制御室)	運転員 (現場)		重大事故等対応要員 (現場)									
状況判断	2人 A, B	-	-	10分								
早期の電源回復不能の確認	【1人】 A	-	-	1分								
	【1人】 B	-	-	2分								
高圧注水機能喪失の判断	【1人】 A	-	-	2分								
交流電源の回復操作	-	-	-									解析上考慮しない
ドライウェル内ガス冷却装置による格納容器内冷却操作	-	-	-									解析上考慮しない
高圧/低圧注水機能の回復操作	-	-	-									解析上考慮しない
常設代替高圧電源装置による緊急用母線の受電操作	【1人】 B	-	-	4分								
低圧代替注水系(常設)準備操作	【1人】 B	-	-	4分								
	【1人】 A	-	-	2分								
緊急用海水系及び代替循環冷却系準備操作	【1人】 A	-	-	3分								
緊急用海水系を用いた海水通水操作	【1人】 A	-	-	6分								
代替循環冷却系の起動操作	【1人】 A	-	-	20分								
				35分								
逃がし安全弁2弁による原子炉急速減圧操作	【1人】 B	-	-									
炉心損傷の確認	1人 B	-	-	1分								
pH調整剤注入操作	【1人】 A	-	-	2分								解析上考慮しない
格納容器下部注水系(常設)によるベデスタル(ドライウェル部)水位調整	【1人】 A	-	-									
				35分								
常設代替高圧電源装置による非常用母線の受電準備操作	【1人】 B	2人 C, D	-	70分								
常設代替高圧電源装置による非常用母線の受電操作	【1人】 B	-	-	8分								
				5分								
原子炉建屋ガス処理系及び中央制御室換気系の起動操作	【1人】 B	-	-	15分								
原子炉圧力容器破損の判断	【1人】 A	-	-							5分		
代替格納容器スプレー冷却系(常設)による格納容器スプレー操作	【1人】 A	-	-							1分		適宜状態監視 (SA盤)
格納容器下部注水系(常設)によるベデスタル(ドライウェル部)注水操作	【1人】 A	-	-							1分		適宜状態監視 (SA盤)

第1図 過渡事象における作業と所要時間



第2図 LOCA事象における作業と所要時間

## 添付 7. ペDESTAL内の水位管理方法について

東海第二発電所における，FCI及びMCCIの影響抑制を考慮したペDESTAL内水位管理対策の内容を以下に示す。

### 1. ペDESTALの構造及び設備概要

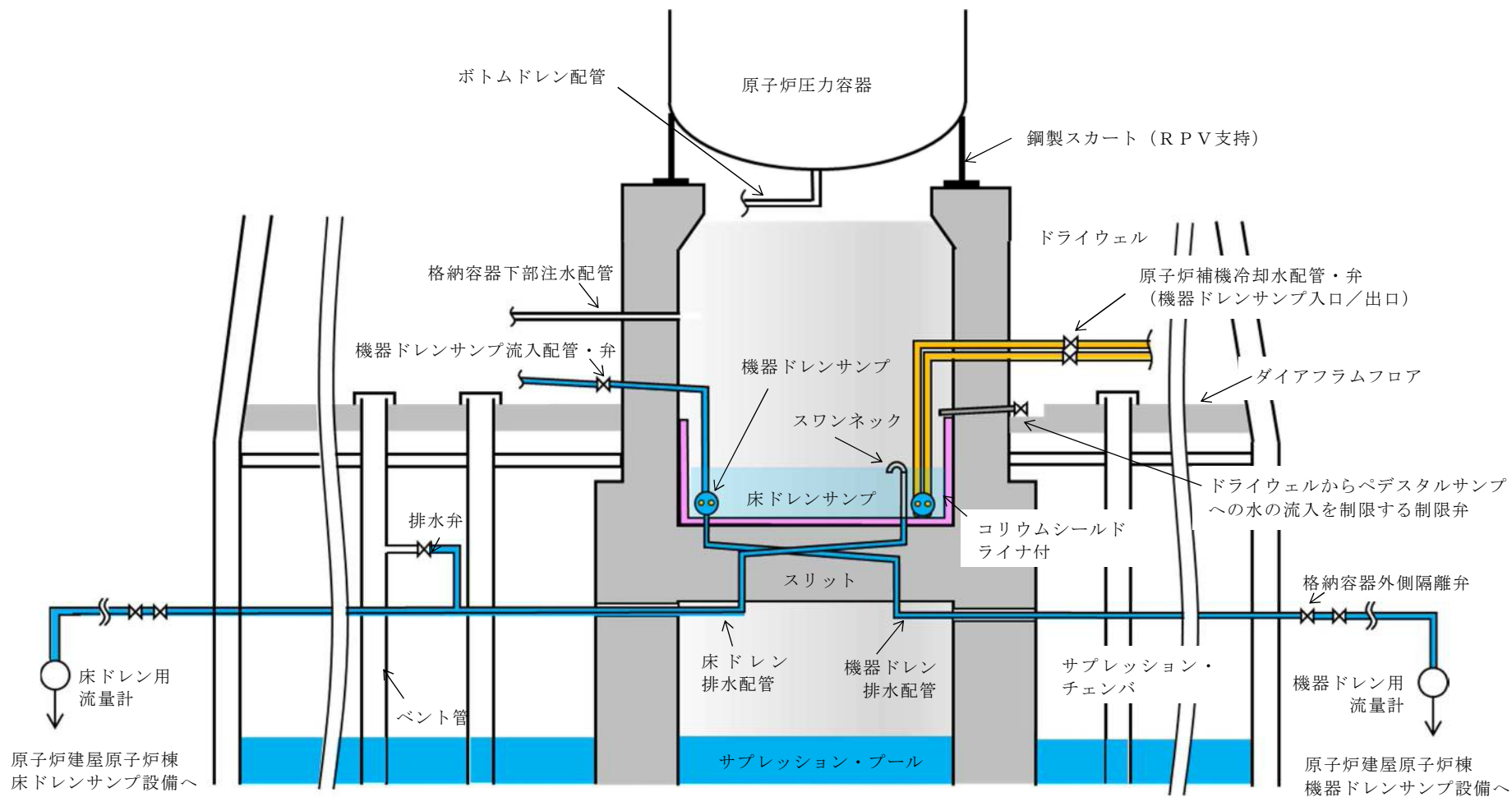
東海第二発電所のペDESTALの概要図を第1図 (a) (b) に示す。

ペDESTAL内の底面及び側面には，RPVが破損しデブリが落下した際のペDESTAL構造健全性確保のため，ZrO<sub>2</sub>製のコリウムシールドを設置する。また，コリウムシールド表面には鋼製のライナを敷設し床ドレンサンプとして用いるとともに，その内側に機器ドレンサンプを設置する。

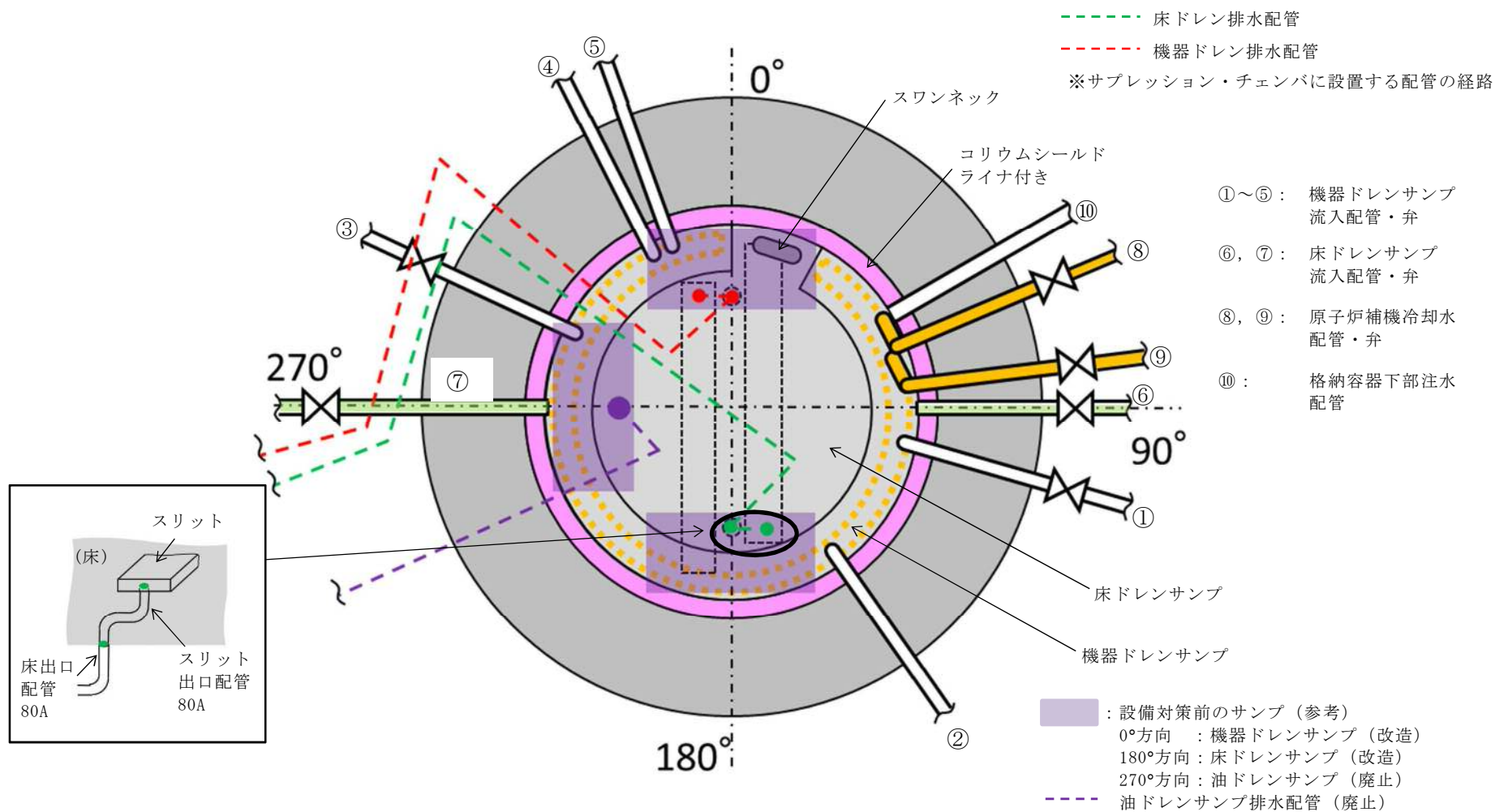
ドライウエルにて生じる床ドレン及び機器ドレン並びに機器ドレンサンプを冷却するための冷却水は，第1図 (a) (b) のようにペDESTAL側壁の貫通孔を通る配管により各ドレンサンプへ導かれる。これらの配管はコリウムシールドの側壁部より高い位置からペDESTAL内へ接続し，コリウムシールド内に堆積したデブリが配管へ流入しない設計とする。

床ドレンサンプ内に流入した水は，1mに立ち上げた排水配管（スワンネック）から流出させ，スリット及び配管を通じて原子炉建屋原子炉棟床ドレンサンプ設備へ排水する。また，排水配管を分岐させベント管へ接続することで，事故時においてペDESTALからサブプレッション・チェンバへ排水する経路を設ける。

ペDESTALの側壁は鋼製スカートを介してRPVを支持しており，RPV下部プレナムの中心付近には原子炉冷却材浄化系のボトムドレン配管が接続されている。



第1図 (a) ペDESTAL概要図 (断面図)



第1図 (b) ペデスタル概要図 (平面図)

## 2. 水位管理方法

通常運転時及び事故時におけるペDESTAL内水位の管理方法を以下に示す。

### (1) 通常運転時

ペDESTAL床ドレンサンプの機能として、排水配管から 1m の水深を超えた流入水を原子炉建屋原子炉棟の床ドレンサンプ設備へ排水し、ペDESTAL内水位を 1m に維持する。

### (2) 事故発生から R P V破損まで

格納容器圧力高信号及び原子炉水位異常低 (L1) 信号により、ペDESTAL内へ流入する配管 (床ドレン配管、機器ドレン配管及び原子炉補機冷却水配管) に対してペDESTAL外側に設置した制限弁を自動閉止し、ペDESTALへの流入水を制限する。

制限弁閉止前の流入水等により水位が 1m を超えた場合には、ベント管に接続された床ドレン排水配管及び排水弁を経由してサプレッション・プールへ排水され、R P V破損までにペDESTAL内水位は 1m まで低下する。

事故が発生し炉心が損傷した場合、格納容器下部注水配管から水位 1m を超過するまで注水を実施し、その後排水することにより、R P V破損時に確実に水位 1m を確保する運用とする。

ベント管に接続する排水弁はR P V破損前に閉とし、R P V破損後のペDESTAL水のサプレッション・プールへの流出を防止する。

### (3) R P V破損後

R P V破損及びデブリ落下後、ペDESTAL内にて 0.2m 以上のデブリ堆積を検知後に、 $80\text{m}^3/\text{h}$  でペDESTAL満水相当まで水位を上昇させるとと



もに、その後は満水近傍にて水位を維持する（別添 1）。

また、上記(1)～(3)の水位管理を実現するための設備対策について別添 2 に、ペDESTAL内（ペDESTAL）に設置する計器類について別添 3 にそれぞれ示す。

ペDESTAL注水開始後のS E発生の可能性及びS E発生抑制の考え方について

## 1. はじめに

東海第二発電所では、S EによるペDESTAL構造への影響抑制のため、R P V破損時のペDESTAL水位を1mと設定し、S E影響評価を実施している。しかし、R P Vの破損を判断した場合には、格納容器下部注水系（常設）によるペDESTAL注水を実施する手順としており、注水開始後には1mを超える水位がペDESTAL内に形成されることとなり、S E影響評価の想定を上回る規模のS Eが発生する可能性がある。

これに対して、R P V破損及びペDESTAL注水開始後のペDESTAL内の状況を推定し、S Eの発生可能性及びこれを考慮した水位管理について検討した。以下に検討の内容を示す。

## 2. R P V破損時のデブリ落下挙動

有効性評価における損傷炉心冷却に失敗しR P Vが破損するシーケンスにおいては、S A設備を含む全ての原子炉注水機能がR P V破損までの間使用できないものと仮定し、R P V破損に至るものとしている。この際、R P Vの破損形態としては、F C IやM C C IによるP C Vへの負荷を厳しく評価する観点から、C R D案内管の逸出を想定している。この場合、R P V破損口はアブレーションにより拡大しながら、R P Vの内圧及びデブリの堆積ヘッドにより、約300tonの熔融デブリが約30秒間でペDESTALへ全量落下する結果となっている。

### 3. R P V破損後のペDESTAL内の水の状態とS E発生抑制の考え方

ペDESTAL内の初期水量及びペDESTAL注水量と、R P Vから落下するデブリの保有熱の関係より、ペDESTAL内の水が飽和温度に到達する条件を評価し、その結果よりS Eの発生可能性について検討した。第1表及び第2表に、評価条件を示す。

まず、R P V破損時にペDESTAL内に存在する水量(水深1m)は約  であり、この水量を飽和温度まで昇温させるデブリ量は、約11tonと評価される。これは、デブリ全体に対して4%未満の落下量である。また、ペDESTALを満水(水深約2.8m)とする水量は約81m<sup>3</sup>であり、この水量を飽和温度まで昇温させるデブリ量は、約31tonと評価される。このデブリ量がペDESTAL内に堆積した場合、その堆積高さは約0.15mとなる。よって、これに余裕を考慮し、0.2mまでのデブリ堆積を検知後に満水までの注水を行うことで、ペDESTAL内を満水とした場合でも水の飽和状態は維持される。

なお、先述のとおり、R P V破損時には約300tonのデブリが約30秒間で落下する結果となっていることから、デブリ堆積高さはR P V破損後速やかに0.2m以上となると考えられる。

次に、R P V破損後のペDESTAL注水は80m<sup>3</sup>/hにて実施するが、デブリからペDESTAL水への伝熱速度の観点からは、熱流束を800kW/m<sup>2</sup>一定※、伝熱面積をデブリ拡がり面積である  とすると、180m<sup>3</sup>/h以上の水を飽和温度まで昇温する熱移行率となる。

※：MAAPコードを用いた有効性評価においてデブリから上面水への限界熱流束として小さめに設定している値。

以上より、R P V破損後にはペDESTAL内の水は速やかに飽和状態に至るとともに、0.2mまでのデブリ堆積を検知後に注水開始することにより、その

後の注水過程でもペDESTAL内の水は飽和状態に維持されるため、SEの発生は抑制されると考えられる。

さらに、ペDESTAL満水相当（水位 2.75m）まで注水を実施した後は、2.25m 及び 2.75m 高さの水位計を用いて水位 2.25m 未満を検知した場合に水位 2.75m までペDESTALへ注水する間欠注水を実施することで、サブクール度を小さく保ちSEの発生を抑制しながら、デブリの冷却を継続する。

加えて、RPV破損後にRPV内の残存デブリ冷却のための注水を実施した場合、注水の一部がRPVの破損口からペDESTALへ落下しペDESTAL内が常に満水状態となることが考えられるが、以下の理由によりSEの発生は抑制されると考えられる。

- ・ RPVからペDESTALへの落下水はRPV内に残存するデブリにより加熱され、また、ペDESTAL内の水はペDESTALに落下したデブリにより加熱されているため、ペDESTAL内の水は飽和状態を維持する
- ・ RPVからペDESTALへの流入水のサブクール度が大きい場合、RPV内の残存デブリは冷却されており、ペDESTALへ落下する可能性は低い  
 なお、ペDESTAL注水手順は、RPV破損後にごく少量ずつデブリがペDESTALへ落下してくる場合でもSEの発生を抑制できるよう整備する（別紙参照）。

第1表 デブリの評価条件

項目	値	備考
デブリ密度 (kg/m <sup>3</sup> )		MAAP計算結果（RPV破損時の値）を、デブリ保有熱が小さくなるように丸めた値
デブリ比熱 (J/kgK)		
デブリ溶融潜熱 (J/kg)		
デブリ初期温度 (°C)		
デブリ冷却後温度 (°C)	500	デブリ保有熱を小さめに評価する観点から、高めに設定

第2表 ペDESTAL水の評価条件

項目	値	備考
ペDESTAL水密度 (kg/m <sup>3</sup> )	1,000	概略値を使用
ペDESTAL水比熱 (J/kgK)	4,180	
ペDESTAL水初期温度 (°C)	35	外部水源温度
ペDESTAL水飽和温度 (°C)	135	R P V破損時のD/W圧力の包絡値 (0.3MPa) における飽和温度
ペDESTAL水半径 (m)		コリウムシールド厚さを [ ] とした場合の、コリウムシールド内半径

## デブリ少量落下時のS E発生可能性を考慮したペDESTAL注水管理について

原子炉注水機能が喪失しR P V破損に至るような状況においては、デブリが継続的に落下することによりペDESTAL内の水は飽和状態となりS Eは発生しないと考えられることから、R P V破損の検知後には、確実なデブリ冠水及び冷却のため、ペDESTAL満水相当まで連続して注水を行うとともに、その後もデブリの冷却に必要な量の注水を継続することとしている。その手順は以下のとおりである。

## (a) R P V破損前

ペDESTALへの事前注水及び排水配管からの排水により、水位は1mに維持される。

## (b) R P V破損後

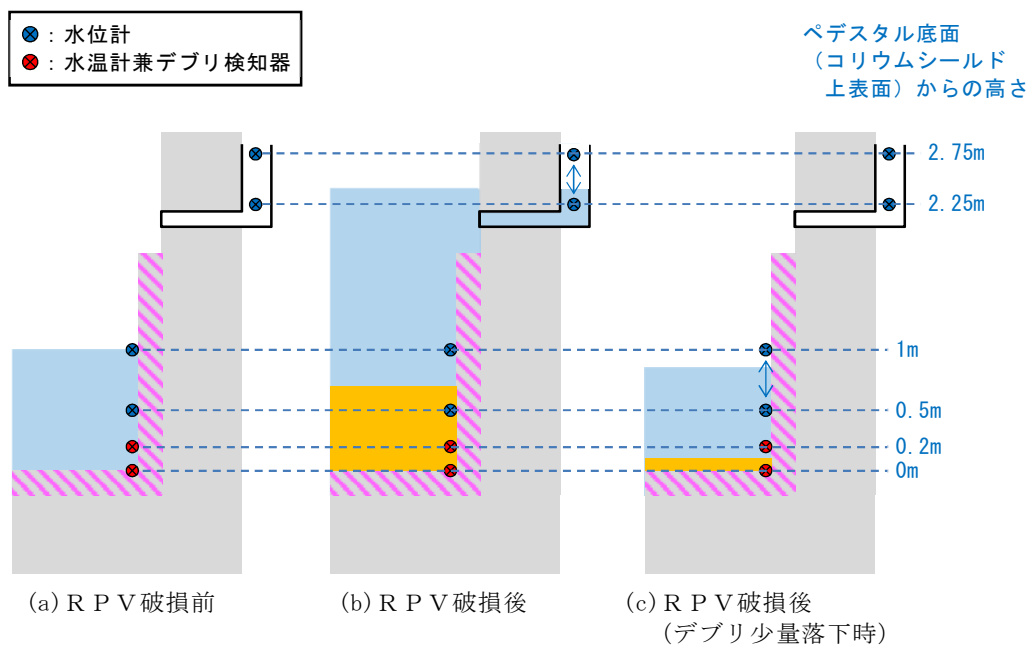
R P V破損を判断した場合には、ペDESTAL満水相当の水位2.75mまで注水を実施する。その後は、2.25m及び2.75m高さの水位計を用いて水位2.25m未満を検知した場合に水位2.75mまでペDESTALへ注水する間欠注水を実施し、サブクール度を小さく保ちS Eの発生を抑制する。

一方、R P V破損前に原子炉注水機能が復旧した場合等、少量のデブリがペDESTALに落下し、残りの大部分がR P V内に残存するといった可能性も考えられ、デブリ落下挙動には不確かさが存在する。したがって、このような場合において、ペDESTAL注水により水深が深く、サブクール度の大きい水プールが形成され、その後R P V内に残存したデブリが落下した際に万が一S Eが発生する可能性についても考慮し、上記(a)及び(b)の手順に加え、以下(c)の手順によりペDESTALへの注水を管理することとする。

(c) R P V破損後（デブリの落下量が少量の場合）

ペDESTAL満水（水深約  ，約 81ton）の水を飽和温度に到達させる  
デブリ量は約 31ton（全体の約 11%）であり，その堆積高さは約 0.15m と  
なる。これより，ペDESTAL底面から 0.2m 高さにデブリ検知器を設置し，  
R P V破損判断後においても 0.2m 高さまでのデブリ堆積が検知されない  
場合には，0.5m 及び 1m 高さの水位計を用いて水位 0.5m 未満を検知した場  
合に水位 1m までペDESTALへ注水する間欠注水を行うことにより，1m 以  
上の水深形成を防止し S Eの発生を抑制する。

これにより，ペDESTAL注水開始後においても水深及びサブクール度の大き  
い水プールの形成を防止し，S Eの発生を抑制できると考えられる。第 1 図に，  
ペDESTAL内計器設置及びペDESTAL水位管理の概念図を示す。



第 1 図 ペDESTAL水位管理の概念図

## ペDESTAL排水設備対策について

## 1. はじめに

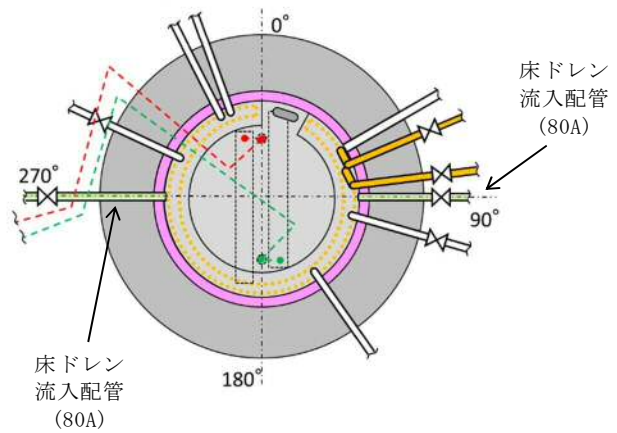
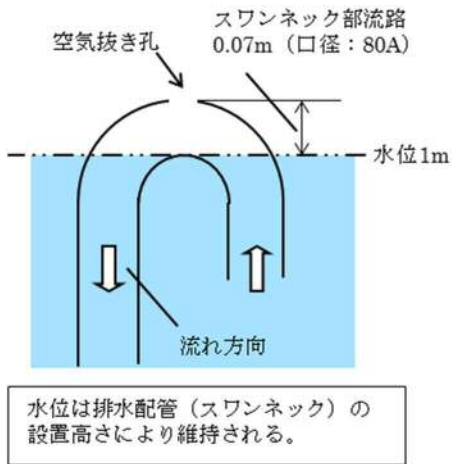
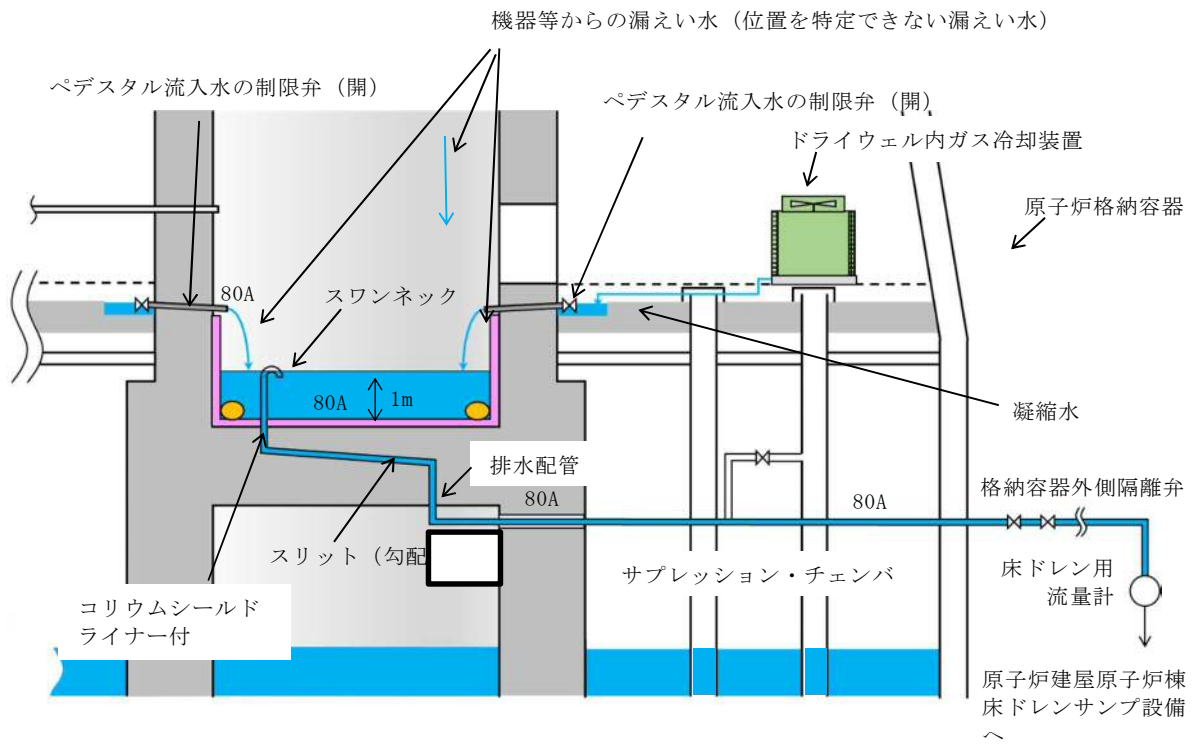
通常運転中，事故発生からR P V破損まで及びR P V破損後について，水位管理に必要な排水設備対策の方針を各々記載する。

## 1) 通常運転時

## ①ペDESTAL内床ドレンサンプ

- ・ドライウエル内ガス冷却装置から発生する凝縮水，漏えい位置を特定できない格納容器内の漏えい水が流入する設計とする。（第1図）
- ・サンプの水位は，サンプから排水する排水配管の入口（スワンネック）高さを床面から1mに設定することで，常時1mの水位を保つことが可能な設計とする。（第1図）
- ・サンプへの流入水は，高さ1mに設置する排水配管の入口（スワンネック）から，排水配管内を通じてサブプレッション・チェンバを経由し，格納容器外の原子炉建屋原子炉棟床ドレンサンプ設備へ全量排水される設計とする。（第1図）
- ・サンプからの排水は，原子炉建屋原子炉棟床ドレンサンプ設備に至る過程で，床ドレン用流量計により排水量を計測し，1時間以内に $0.23\text{m}^3$ の排水（漏えい量）を検出することが可能な設計とする。（第1図）
- ・排水配管水平部の勾配は，通常運転中の排水性を確保する観点及びR P V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，スリットの勾配を□に制限した設計とする。（第1図） なお，R P V破損までの排水性に対しては，スリットの勾配は影響しない。



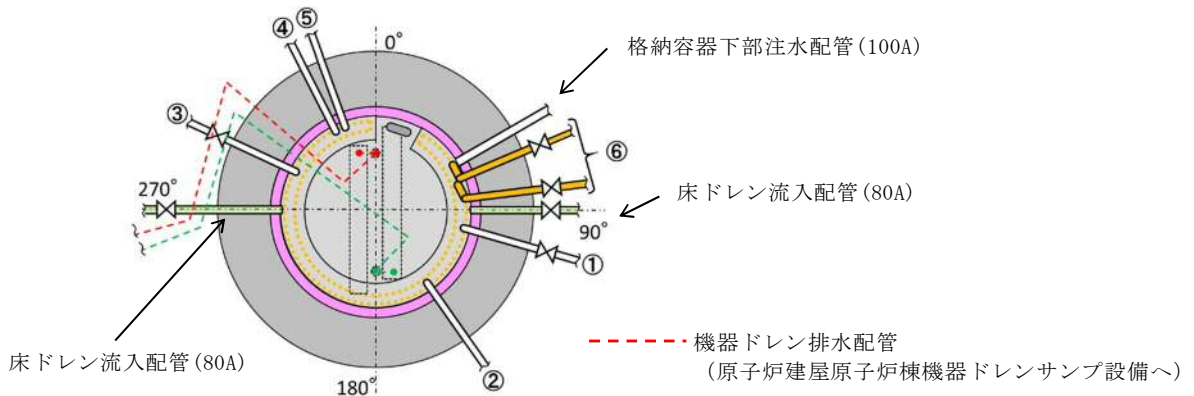
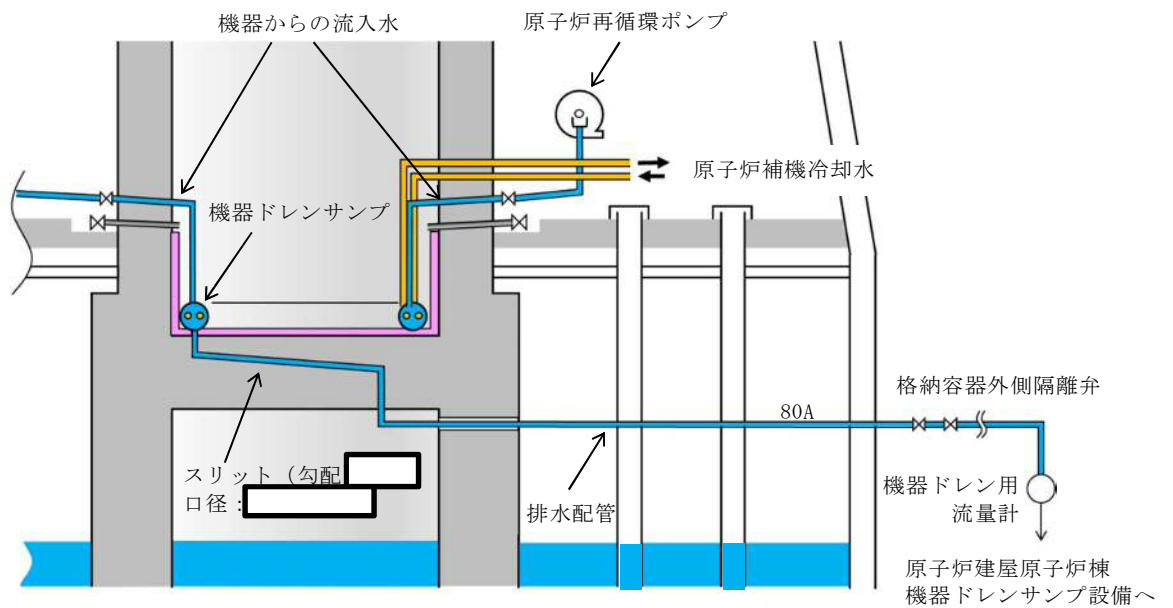


--- 床ドレン排水配管（80A）  
（原子炉建屋原子炉棟床ドレンサンプ設備へ）

第1図 ペDESTAL床ドレンサンプの通常運転時流入水及び排水経路図

## ②ペDESTAL内機器ドレンサンプ

- ・原子炉再循環ポンプグランド部からの排水，機器からのリーク水及び機器点検時のドレン水が流入する設計とする。（第2図）
- ・ドレン水は，サンプ内で冷却（原子炉補機冷却水配管により）され，原子炉建屋原子炉棟機器ドレンサンプへ全量排出される設計とする。（第2図）
- ・原子炉補機冷却水配管をサンプ内部に通し，高温のドレン水を冷却することができる設計とする。（第2図）
- ・サンプからの排水は，原子炉建屋原子炉棟機器ドレンサンプ設備に至る過程で，機器ドレン用流量計により排水量を計測し， $5.70\text{m}^3/\text{h}$ の排水（漏えい量）を検出することが可能な設計とする。（第2図）
- ・排水配管水平部の勾配は，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必要な距離（スリット全長は約□）を短くする観点から，スリットの勾配を□に制限した設計とする。（第2図）



NO.	流入元	運転中の状態
①	原子炉再循環ポンプ(A) グランド部排水, 機器からのリーク水 (*1), 機器点検時のドレン水 (50A) (*2)	常時排水有
②	原子炉再循環ポンプ(A) 点検時のドレン (50A) (*2)	常時排水なし
③	原子炉再循環ポンプ(B) グランド部排水, 機器からのリーク水 (*1), 機器点検時のドレン水 (50A) (*2)	常時排水有
④	機器点検時のドレン水 (80A) (*2)	常時排水なし
⑤	原子炉再循環ポンプ(B) 点検時のドレン (50A) (*2)	常時排水なし
⑥	原子炉補機冷却水配管 (50A)	常時流入

\*1 : 弁グランド部からのリーク水 (運転中)

\*2 : 通常閉の弁を開にし排水 (定検時のみ)

第2図 ペDESTAL機器ドレンサンブの運転中流入水及び排水概要図

## 2) 事故発生から R P V 破損前まで

### ① R P V 破損前までに達成すべき条件

- ・デブリ落下までの間、ペDESTAL床ドレンサンプの水位を 1m に維持すること。

### ② 条件を達成するための設備対策

#### a. ドライウェルからの流入水の遮断

- ・ペDESTAL床ドレンサンプへの流入水を遮断するため、格納容器圧力高の信号及び原子炉水位異常低(L1)の信号により、ペDESTAL流入水の制限弁(床ドレン)を閉にする設計とする。(第3図(a)(b)(c))
- ・制限弁を閉にすることにより、格納容器スプレイ水等のペDESTALへ流入する可能性のある水は、ベント管を介してサブプレッション・プールへ排水される設計とする。(第3図(a)(b)(c))

#### b. ペDESTALへの流入水の排出

- ・事故発生により格納容器外側隔離弁は開から閉状態となり、ペDESTAL床ドレンサンプへの流入水の格納容器外への排水は遮断されるが、通常運転中から排水弁を開の状態にしておくことで、ベント管を介してサブプレッション・プールへ自然排水される設計とする。(第3図(a)(b)(c))
- ・事故時のペDESTAL床ドレンサンプへの流入水により、ペDESTAL床ドレンサンプの水位は上昇するが、R P V破損までの間に、ペDESTAL床ドレンサンプの水位が、1m まで排水可能な設計とする。(別紙)
- ・以下を考慮し、排水配管のベント管への接続高さをペDESTAL床のコンクリート表面より約  下の位置に設置する設計とする。(第2図)
  - ▶ ペDESTAL床ドレンサンプへの流入水の排水流量を少しでも確保

し、R P V破損までの排水の確実性を向上する観点からは、排水配管のベント管への接続高さは低い方が望ましい。

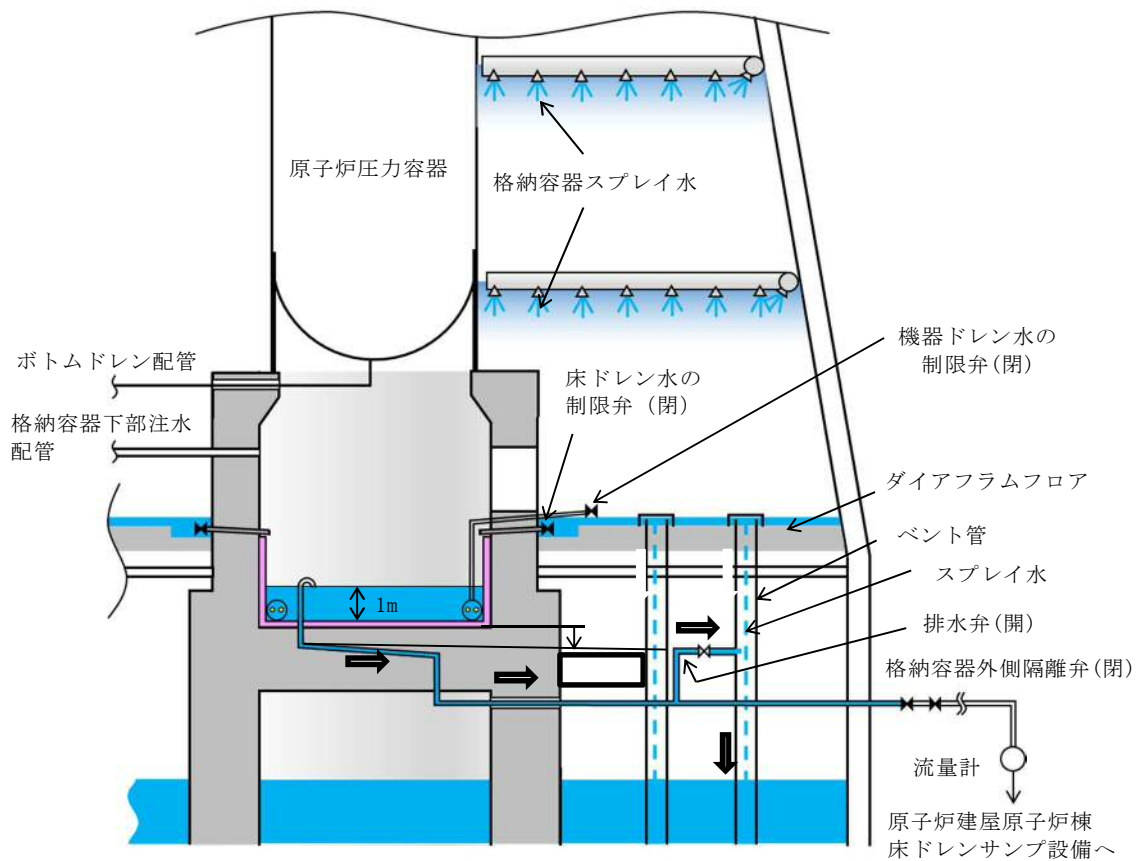
▶ スリット内部でのデブリ凝固の確実性向上のため、ペDESTAL床ドレンサンプへの流入水が排水された場合でもスリット内に水が存在するよう、排水配管のベント管への接続高さはスリットよりも高い位置に設置する。

▶ スリットの設置高さを低くする場合、スリット内でデブリが凝固した際に、床スラブ鉄筋コンクリートの温度上昇による強度低下が懸念される。そこで、コリウムシールド無しの条件において温度による強度低下を考慮しても床スラブの健全性が確保されるスリット高さ（ペDESTAL床のコンクリート表面から約  下）にスリットを設置する。（第3図（a））

▶ 排水配管のベント管への接続高さはスリットの設置高さより若干高い位置とするため、ペDESTAL床のコンクリート表面から約  下となる。

・排水配管を接続するベント管については、真空破壊弁作動時のベント管内のサプレッション・チェンバからドライウエルへの上昇流が排水に影響することがないように、真空破壊弁が設置されていないベント管を対象とする設計とする。（第3図（c））

・ベント管に接続する排水弁は、ペDESTAL水位が1mを超えて上昇し、その後水位約1mまで排水されたことを水位計にて検知した後、自動閉止する設計とする。これにより、R P V破損後のペDESTAL水のサプレッション・プールへの流出を防止する。

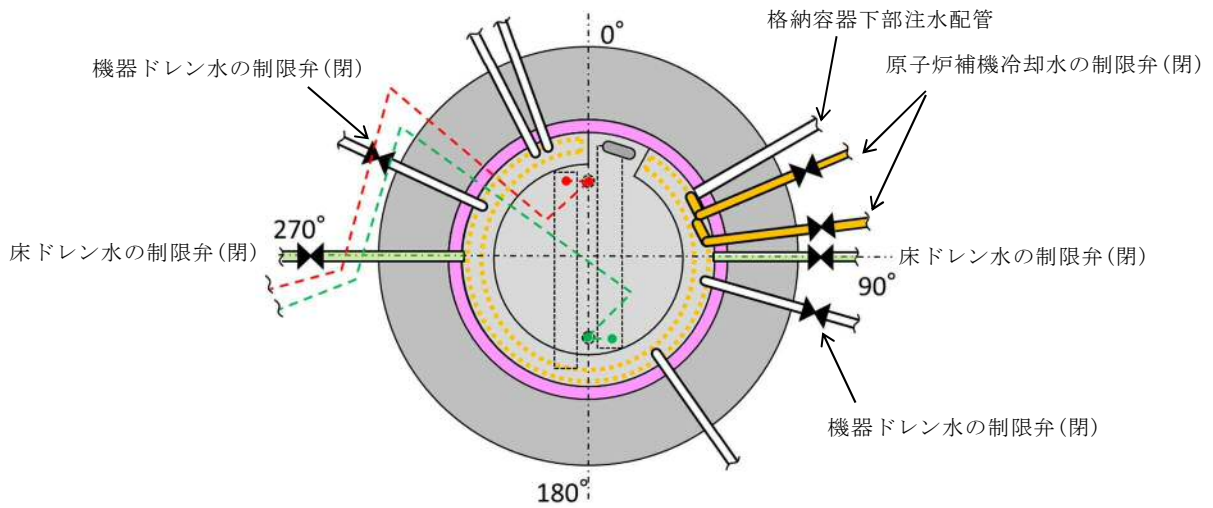


ペデスタルに流入した水はベント管（真空破壊弁が設置されていないもの）を介してサブプレッション・プールへ排水される。ベント管は、格納容器スプレイ水等の流入も考えられるが、ベント管は個数が108本あり、約0.6mの直径を有していることから、ベント管の単位面積あたり流れる格納容器スプレイ水等の流量はわずかであり、ペデスタルへの流入水の排水性に影響はないと考えられる。

サブプレッション・チェンバからの格納容器ベント用の配管下端は、ペデスタル床のコンクリート表面より約  下であり、排水配管のベント管への接続高さよりも高い位置に設置されている。ただし、格納容器ベント中のサブプレッション・プール水の最高水位は、ペデスタル床のコンクリート表面より約0.62m下であり、排水配管のベント管への接続高さよりも低い位置となるため、格納容器ベント中でも排水配管が水没することは無い。

【参考】最も高い位置の真空破壊弁はペデスタル床のコンクリート表面より約  下であり、排水配管のベント管への接続高さよりも高い位置であるが、その他の真空破壊弁はペデスタル床のコンクリート表面より約  下であり、排水配管のベント管への接続高さよりも低い位置に設置されている。

第3図 (a) ペデスタル床ドレンサンプの水位1m維持対策概要



第3図 (b) ペDESTAL床ドレンサンプの水位 1m 維持対策概要



- - - 機器ドレン排水配管(80A)  
(原子炉建屋原子炉棟機器ドレンサンプ設備へ)
- - - 床ドレン排水配管(80A)  
(原子炉建屋原子炉棟床ドレンサンプ設備へ)
- ベント管 ペDESTAL床ドレンの排水経路となるもの(真空破壊弁なし 1か所)
- (赤) ベント管 真空破壊弁付き(11か所)
- (白) ベント管 真空破壊弁なし(96か所)

第3図 (c) ペDESTAL床ドレンサンプの水位 1m 維持対策概要

### 3) R P V破損後

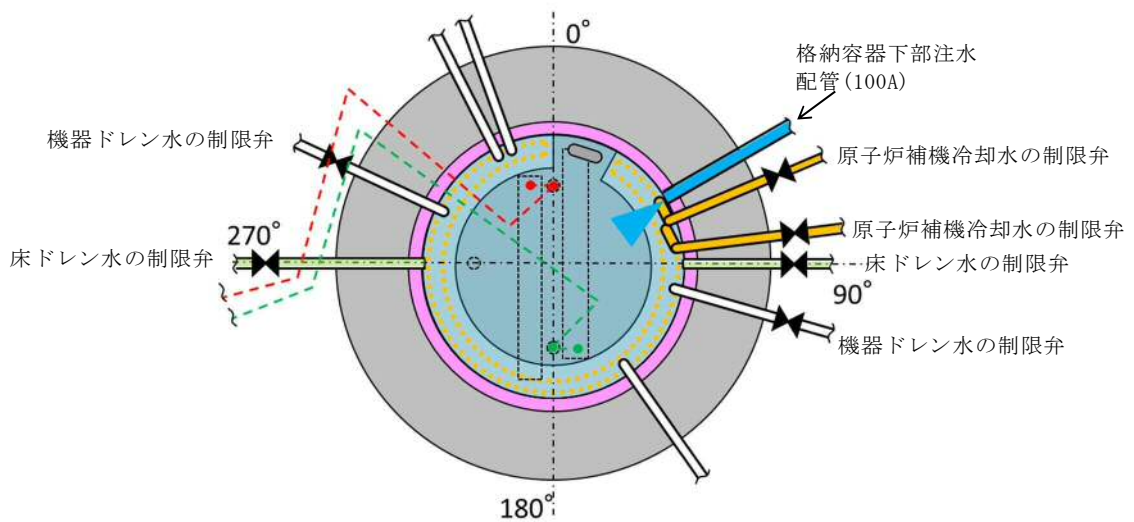
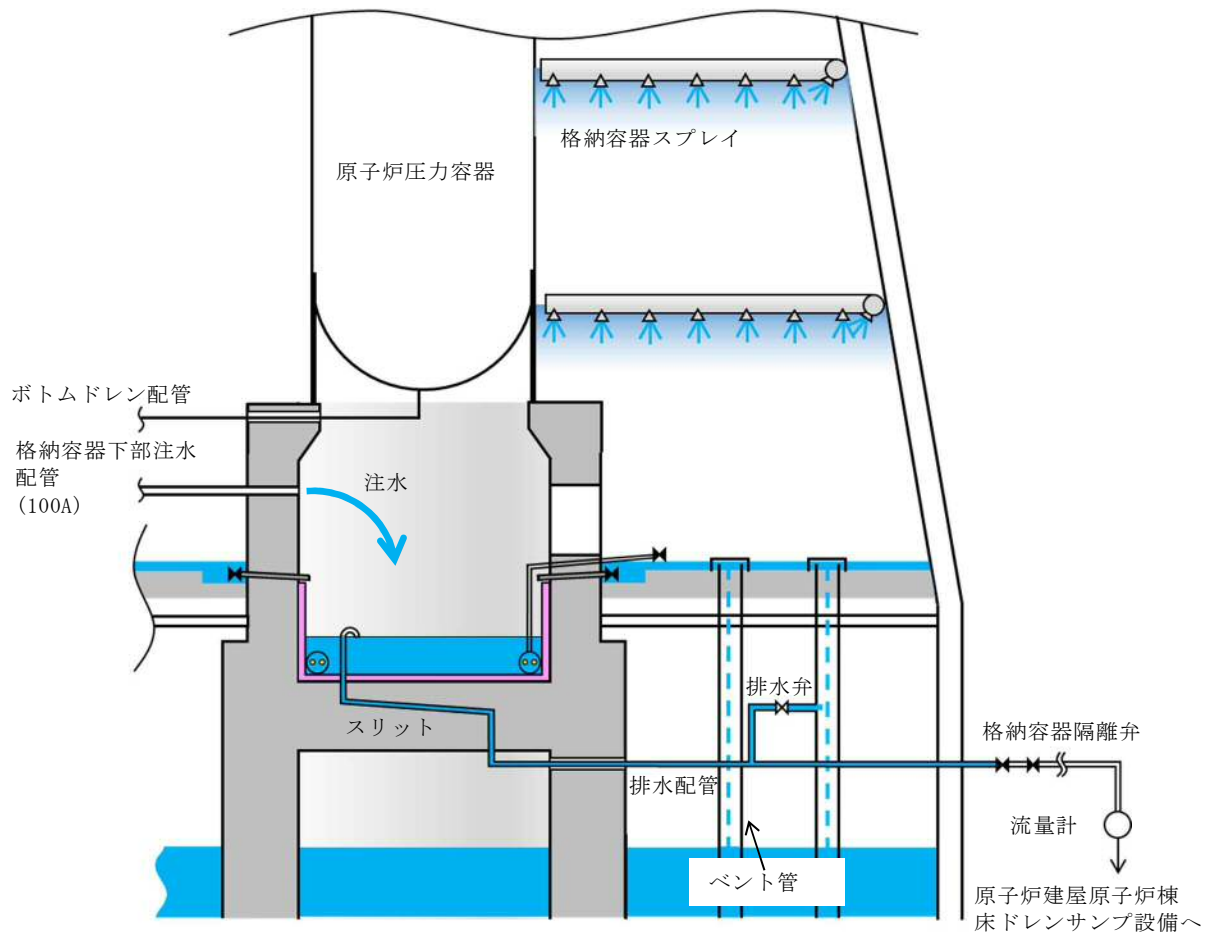
#### ①R P V破損後に達成すべき条件

- ・ペDESTAL床ドレンサンプへ落下したデブリを冷却するために、注水できること。
- ・ペDESTAL床ドレンサンプの水位を管理できること。

#### ②条件を達成するための設備対策

- ・R P V破損後、デブリが機器ドレン配管及び原子炉補機冷却水配管を溶融することにより、当該配管からペDESTAL内へ内包水が流入することを防止するため、格納容器圧力高の信号及び原子炉水位異常低(L1)の信号により、ペDESTAL流入水の制限弁（機器ドレン及び原子炉補機冷却水）を閉にする設計とする。（第4図）
- ・R P V破損後のデブリ落下後に、格納容器下部注水系から注水を行う設計とする。（第4図）





第4図 ペDESTAL床ドレンサンプ注水概要図

## 事故発生からR P V破損までのペDESTAL流入水の排水評価について

R P Vが破損しデブリがペDESTALへ落下する際には、S Eの影響を抑制するためペDESTAL内水位を1mとすることとしている。これに対して、事故発生後にペDESTAL内への水の流入があった場合でも、R P V破損までにペDESTAL内水位が1mまで排水されることを確認した。以下にその内容を示す。

## 1. 評価において想定する事象

R P V破損する場合の有効性評価の評価事故シーケンスとしては、過渡事象時に注水機能が喪失する事象（以下「過渡事象」という）を選定しているが、過渡事象ではドライウエル内に水が流出することは無く、R P V破損までに格納容器スプレイを実施することはない。一方で、大破断L O C A時に注水機能が喪失する事象（以下「L O C A事象」という）では、ドライウエル内への水の流出やR P V破損までの格納容器スプレイの実施により、ペDESTAL内への水の流入が生じるため、L O C A事象を評価において想定する。

なお、ペDESTAL内におけるボトムドレンL O C A時については、R P VからペDESTALへ流入する水が飽和状態であり、水深が深い場合でもS Eの発生可能性は極めて低いと考えられること、また、万が一S Eが発生した場合の発生エネルギーも小さいと考えられるから、ここではL O C A事象を対象に排水評価を実施する。

## 2. 評価条件

- ・ペDESTAL流入水の制限弁を事故後早期（「格納容器圧力高及び原子炉水位異常低（L1）」信号）に閉止することから、格納容器スプレイ水等によ

るドライウエルからの流入水は制限されるが、ここでは事故発生後5分間においてペDESTALへの流入が継続すると仮定する。また、ドライウエルからの流入量を多く評価する観点から、ダイアフラムフロア上に溜まる水の水位は、物理上最も高くなるベント管高さとする。このとき、ドライウエルからペDESTALへの流入量は、以下のように計算され、これをRPV破損までの必要排水量とする。

$$V = v_{in} \times A \times t = (2gh)^{1/2} \times A \times t$$

$V$  : 必要排水量 [m<sup>3</sup>] ,  $v_{in}$  : 流入速度 [m/s] ,

$A$  : 流入口面積 [約 8.6 × 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>]

(床ドレン配管内径 73.9mm × 2本分) ,

$t$  : 流入継続時間 [5min = 300s] ,  $g$  : 重力加速度 [9.8m/s<sup>2</sup>] ,

$h$  : 流入水水頭 [約 0.36m]

(ベント管上端高さ  - 流入配管高さ )

- ・ 設備対策より配置されるコリウムシールド等の構造物については、評価上その体積を除外することで必要排水量を増やし、保守的な評価とする。
- ・ 排水配管はドライウエル気相部に接続され、圧力差はないため、排水量を評価する上で、ドライウエル及びサブプレッション・プール内圧は考慮しない。
- ・ 排水配管の口径は80Aで、流路となるスリット等の圧力損失は、排水中の水位によって変化する流速を考慮している。

圧損損失計算式

$$H = \lambda \cdot (L/D) \cdot (v^2/2g) + \Sigma \lambda \cdot (L'/D) \cdot (v^2/2g)$$

$H$  : 配管圧損 (m) ,  $L$  : 配管長さ (m) ,  $D$  : 配管内径 (m) ,

$L'$  : エルボや弁等に相当する長さ (m) ,  $v$  : 流速 (m/s) ,

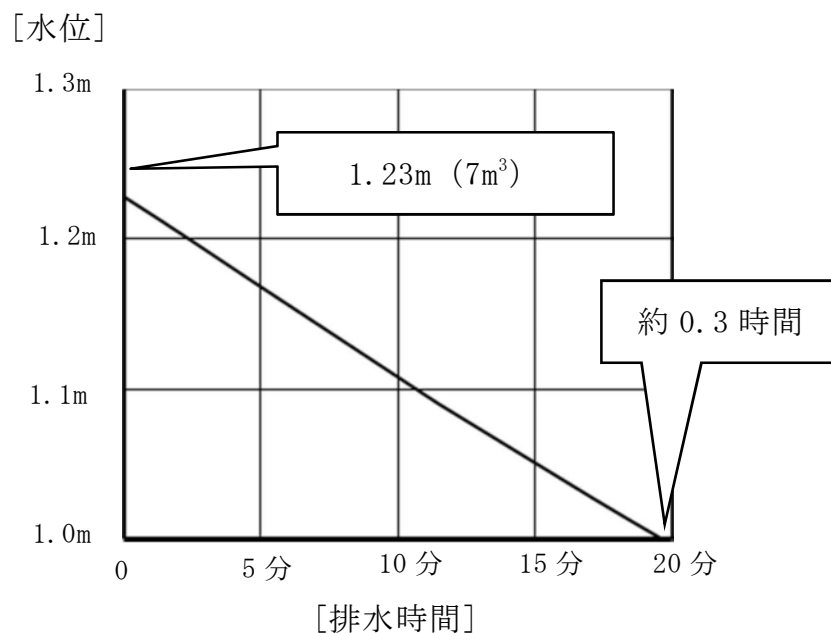
$g$  : 重力加速度 (m/s<sup>2</sup>) ,  $\lambda$  : 管摩擦係数

### 3. 評価結果

評価結果は第1表及び第1図のとおりであり、RPV破損までの時間が最も短い大破断LOCA（事象発生からRPV破損まで約3.3時間）を想定しても、水位1mまで排水可能である。

第1表 必要排水量と排水時間

項目	評価結果
必要排水量	約7m <sup>3</sup>
排水時間	約0.3時間



第1図 ペデスタル水位1.23mから水位1mまでの排水時間

#### 4. 評価結果に対する裕度

- ・必要排水量

必要排水量はコリウムシールド等の構造物を考慮していないことから、必要排水量は内部構造物の体積分保守的な評価としている。

- ・排水時間

排水時間については、排水に伴って低下する水位並びに流路の形状及び長さ等（圧力損失）を考慮して計算し算出している。（第1図）

- ・排水流量


計算過程で使用する圧力損失は、配管長さやエルボの数等に余裕を持たせており、平均排水流量約  時の圧力損失は合計約  である。

#### 5. 異物による影響

ペDESTAL内に設ける排水の流入口は、スワンネック構造とする。スワンネックは、逆U字形の形状をしているため、水面付近の浮遊物は排水口から流入し難い構造上の利点がある。空気孔は、逆U字形部からの排水性を確実にするために設ける設計とする。また、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設計とする。

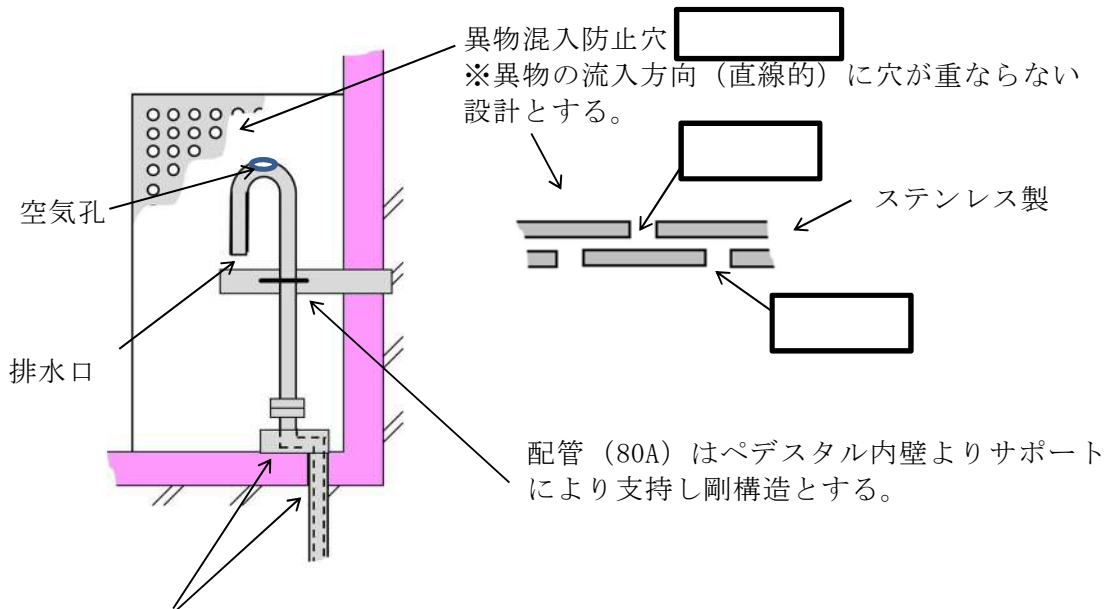
このスワンネックの構造を考慮した上で、ペDESTAL内に流入し、排水性に悪影響を与える可能性のある異物の影響を評価する。

事故時に発生し、異物となる可能性があるものが、ペDESTAL床ドレンサンブに流入したと仮定し評価した結果、これら異物により排水性に悪影響が生じる可能性が低いことを第2表に示す。

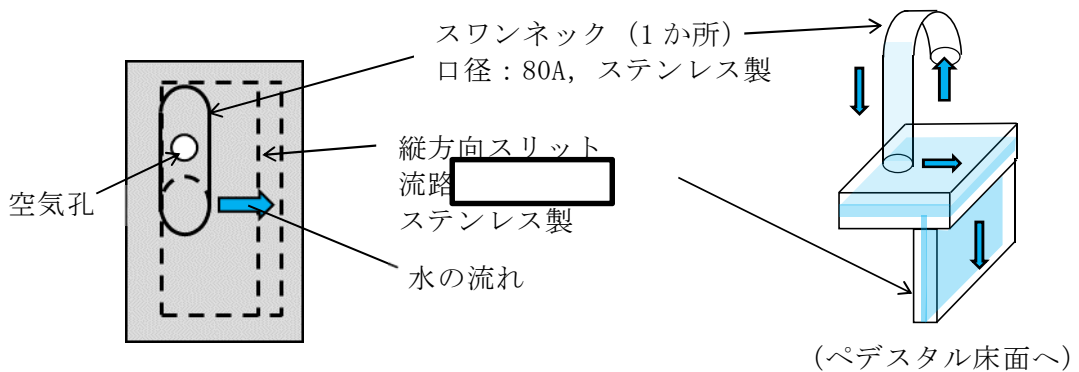
これら異物がスワンネック及び排水配管の排水性に対して悪影響を及ぼさないこと及び想定されない異物が排水性に悪影響を及ぼさないことをより確実にするため、排水配管（ペDESTAL床上的排水配管）周囲に柵を設ける設計とする。柵は、スリットの短辺  よりも小さい開口径を有し、開口が重ならないよう2重に配置した設計とする。仮に、スリット部で固着し堆積する可能性がある線状の異物を想定しても、柵の2重部分で流入を防ぐ構造の設計とする。（第2図）

第2表 想定異物と影響評価

異物になる可能性がある構造物	異物による排水性への影響
核計装用及び照明用等のケーブル（管路含む）	【発生源】ペDESTAL内 万一、床ドレンサンプに流入しても、底に沈下する。以上から、排水性への影響はない。
保温材	【発生源】ペDESTAL外 ペDESTAL床ドレンサンプ周辺に保温材はないが、万一、ペDESTAL床ドレンサンプに流入しても水に浮くことから、排水性への影響はない。
スラッジ（鉄錆）	【発生源】ペDESTAL外 ペDESTALへの流入を制限弁の閉止により抑制することから、流入の可能性は低い。万一、ペDESTAL床ドレンサンプに流入しても底に沈下し、浮遊することは考えにくい。仮に床に沈下したスラッジが浮遊した場合でも、スワンネックの入口高さが床面より十分高いため、排水性に影響を及ぼすほどスラッジがスワンネックに流入しないと考えられる。以上から、排水性への影響はない。
サポート	【発生源】ペDESTAL内 ペDESTAL内のサポートは、十分な耐震性を有する設計とすることから、落下の可能性はない。以上から、排水性への影響はない。
照明	【発生源】ペDESTAL内 万一、床ドレンサンプに流入しても、底に沈下する。以上から、排水性への影響はない。



スリット構造（流路：高さ方向  の流路に排水配管を接続する。ペDESTAL床からコンクリート部への流路（水平方向のスリット部まで）は、スリット構造（流路：  ）の設計とする。



第2図 排水配管に対する異物対策

## ボトムドレン L O C A を想定した場合の排水評価

ボトムドレン L O C A 時に R P V からペデスタルへ流入する水は飽和状態であることから、R P V 破損及びデブリ落下時の S E の発生可能性は極めて低く、また、万が一 S E が発生した場合の発生エネルギーも小さいと考えられる。

しかし、ペデスタル内の水位が最も高くなる事象として、ボトムドレン L O C A を想定した場合についても、参考として排水可能性を確認する。

## 1. 評価条件

- ・ペデスタル内におけるボトムドレン L O C A 時には、ペデスタル床ドレン サンプに上部から漏えい水が流入し、著しく水位が上昇するため、水位は人通用開口部まで達することが想定される。
- ・排水評価は人通用開口部下端から水位 1m までの水量（必要排水量）とする。また、設備対策より配置されるコリウムシールド等の構造物については、評価上その体積を除外することで必要排水量を増やし、保守的な評価とする。
- ・排水配管はドライウェル気相部に接続され、圧力差はないため、排水量を評価する上で、ドライウェル及びサブプレッション・プール内圧は考慮しない。
- ・排水配管の口径は 80A で、流路となるスリット等の圧力損失は、排水中の水位によって変化する流速を考慮している。

## 2. 評価結果

評価結果は第 1 表及び第 1 図のとおりであり、ペデスタル内のボトムドレ

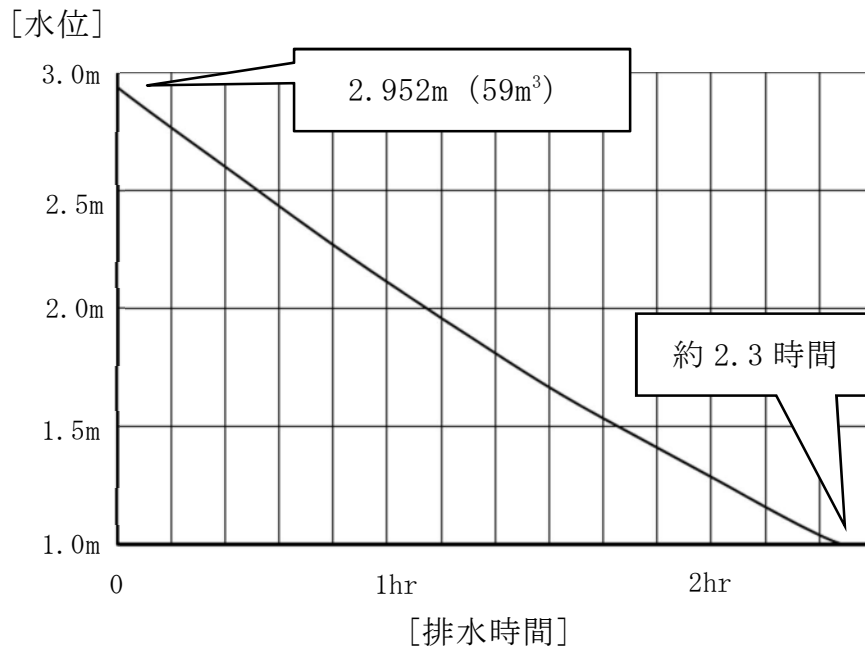


ン配管破断時に流入した水を，R P Vからペデスタルへの流入停止（事象発生後約 0.3 時間）からR P V破損（事象発生後約 3 時間）までの約 2.7 時間以内に，水位 1m まで排水可能である。

第 1 表 必要排水量と排水時間

項目	評価結果
必要排水量	約 59m <sup>3</sup> ※
排水時間	約 2.3 時間

※：必要排水範囲の水量（内径  ，高さ  m の水の体積）



第 1 図 ペデスタル水位満水から水位 1m までの排水時間

### 3. 評価結果に対する裕度

- ・必要排水量

必要排水量はコリウムシールド等の構造物を考慮していないことから、必要排水量は内部構造物の体積分保守的な評価としている。

- ・排水時間

排水時間については、排水に伴って低下する水位並びに流路の形状及び長さ等（圧力損失）を考慮して計算し算出している。

- ・排水流量

必要排水流量は、評価上の容量約 59m<sup>3</sup> に対して、約 2.7 時間で排水する必要があることから全量排水する場合には平均約 22m<sup>3</sup>/h の流量が必要である。これに対して、排水時の水位による圧力損失を考慮した平均排水流量は約  であり、必要排水量を上回っている。

なお、このとき計算過程で使用する圧力損失は、配管長さやエルボの数等に余裕を持たせており、平均排水流量  時の圧力損失は合計約  である。

圧力損失計算式

$$H = \lambda \cdot (L/D) \cdot (v^2/2g) + \Sigma \lambda \cdot (L'/D) \cdot (v^2/2g)$$

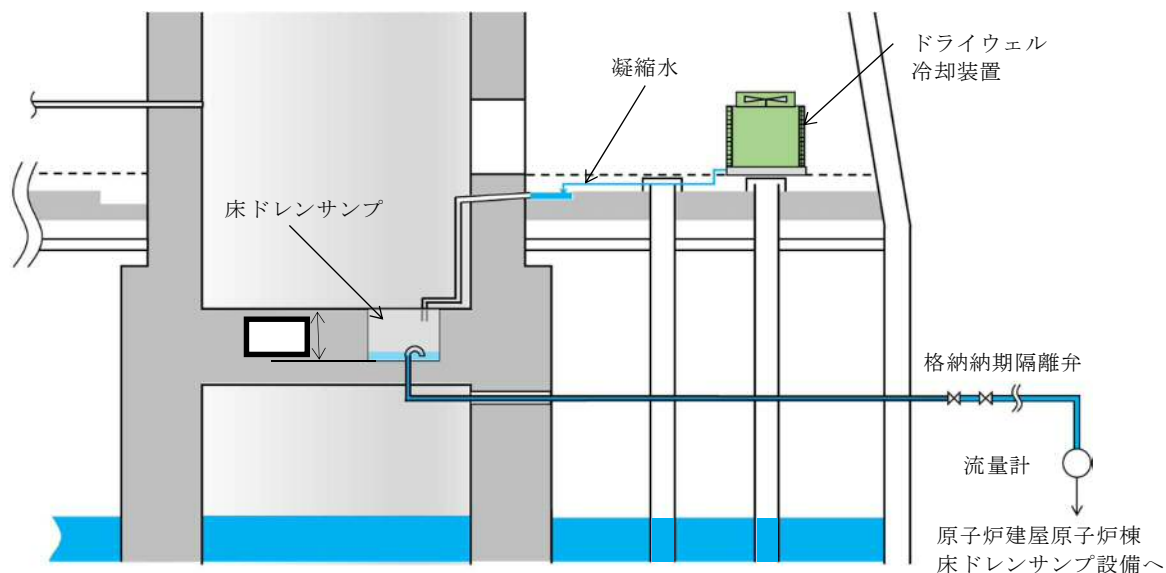
H：配管圧損（m），L：配管長さ（m），D：配管内径（m），

L'：エルボや弁等に相当する長さ（m），v：流速（m/s），

g：重力加速度（m/s<sup>2</sup>），λ：管摩擦係数

ペDESTAL床ドレンサンプ改造に伴う，位置を特定できない漏えい水の検知性について

改造前のペDESTAL床ドレンサンプは，ペDESTAL床下に設置されており，水深約□の深さ及び水面の表面積が約□のサンプである。改造後は，ペDESTAL床ドレンサンプの水深は1m，かつ，表面積は約□であり，漏えい水によるペDESTAL床ドレンサンプの水位は上昇しにくい構造となる。しかし，通常運転中はドライウエル冷却装置のクーラー部より凝縮水が発生するため，常時ペDESTAL床ドレンサンプには少量の流入水があり，水位は満水の1mを常時維持することから，ペDESTALへ流入水は速やかに全量計測することが可能である。



第 1 図 床ドレンサンプ概要図（改造前）

ペDESTAL内に設置する計器について

ペDESTAL内の水位管理のために設置する計器について、概要及び設置位置を第 1 表及び第 1 図に、計器の検出部の仕様等及び測定原理を第 2 表及び第 2 図、第 3 図にそれぞれ示す。また、各計器の設置目的等を以下に示す。

## (1) R P V破損前までの水位管理

## ①高さ 1m 超水位計

ペDESTAL底面 1m 超の水位を検知できるよう、測定誤差を考慮した高さに水位計を設置し、炉心損傷後は当該水位計設置高さまで事前注水を実施する。注水停止後は、排水配管等により R P V破損までに 1m 水位まで排水される。

約 180° 間隔で計 2 個（予備 1 個含む）設置し、1 個以上がこの高さ以上の水位を検知した場合に水張り完了及び注水停止を判断する。

なお、高さ 1m 超水位計高さまで排水されたことを検知した後、水位 1m まで排水される時間遅れを考慮して、排水弁は自動閉止することとする。

## (2) R P V破損及びデブリ落下・堆積検知

## ②高さ 0m 位置水温計兼デブリ検知器

ペDESTAL底部に温度計を設置し、指示値の上昇又は喪失により、その他のパラメータ挙動と併せて R P V破損検知に用いる。測温抵抗体式温度計を採用することにより、ペDESTALにデブリが落下した際の水温上昇や高温のデブリに接触した際に指示値がダウンスケールとなる特性を利用し、R P Vからのデブリ落下検知が可能である。

デブリの落下、堆積挙動の不確かさを考慮して等間隔で計 5 個（予備 1 個

含む) 設置し, R P V破損の早期判断の観点から, 2 個以上が上昇傾向 (デブリの落下による水温上昇) 又はダウンスケール (温度計の溶融による短絡又は導通) となった場合に, その他のパラメータ挙動と併せてR P V破損を判断する。

### ③高さ 0.2m 位置水温計兼デブリ検知器

ペDESTAL底面から 0.2m の高さに測温抵抗体式温度計を設置し, 0.2m 以上のデブリ堆積有無を検知し, ペDESTAL満水までの注水可否を判断する。また, 指示値の上昇又は喪失により, その他のパラメータ挙動と併せてR P V破損検知に用いる。

デブリの落下, 堆積挙動の不確かさを考慮して等間隔で計 5 個 (予備 1 個含む) 設置し, 十分な量のデブリ堆積検知の観点から, 3 個以上がオーバースケール (デブリの接触による温度上昇) 又はダウンスケール (温度計の溶融による短絡又は導通) した場合にペDESTAL満水までの注水を判断する。また, R P V破損の早期判断の観点から, 2 個以上が上昇傾向 (デブリの落下による水温上昇) 又はダウンスケール (温度計の溶融による短絡又は導通) となった場合に, その他のパラメータ挙動と併せてR P V破損を判断する。

## (3) R P V破損後の水位管理 (デブリ堆積高さ $\geq 0.2\text{m}$ の場合)

### ④満水管理水位計

ペDESTAL底面から 2.25m 及び 2.75m の高さに水位計を設置し, デブリの多量落下時 (堆積高さ 0.2m 以上) においてペDESTAL水位を 2.25m~2.75m の範囲に維持するため, 各高さにおける水位の有無を検知しペDESTAL注水開始及び停止を判断する。

ペDESTAL側壁の貫通孔を通じたペDESTAL外側のボックス内に, 各高さに 2 個の水位計 (予備 1 個含む) を設置し, 1 個以上が 2.25m 未満を検知した場合にペDESTAL注水開始, 2.75m 到達を検知した場合にペDESTAL注水

停止を判断する。

(5) R P V破損後の水位管理（デブリ堆積高さ<0.2mの場合）

⑤高さ 0.5m 水位計

ペDESTAL底面から 0.5m の高さに水位計を設置し、デブリの少量落下時（堆積高さ 0.2m 未満）においてペDESTAL水位を 0.5m～1m の範囲に維持するため、水位 0.5m 未満を検知しペDESTAL注水開始を判断する。

約 180° 間隔で計 2 個（予備 1 個含む）設置し、1 個以上が水位 0.5m 未満を検知した場合に注水開始を判断する。

⑥高さ 1m 未満水位計

ペDESTAL底面より 1m の高さから測定誤差を差し引いた高さに水位計を設置し、デブリの少量落下時（堆積高さ 0.2m 未満）においてペDESTAL水位を 0.5m～1m の範囲に維持するため、水位 1m 到達を検知しペDESTAL注水停止を判断する。

約 180° 間隔で計 2 個（予備 1 個含む）設置し、1 個以上が水位 1m 到達を検知した場合に注水停止を判断する。

第 1 表 ペDESTAL内計器の概要

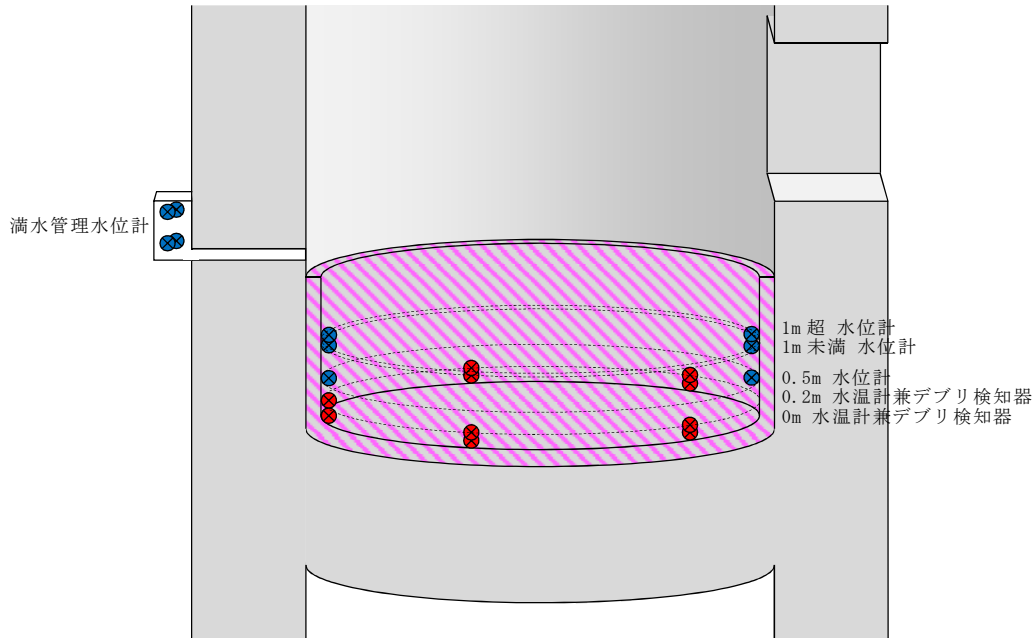
	設置高さ※1	設置数	計器種別
0m 水温計兼 デブリ検知器	0m	各高さに 5 個	測温抵抗体式 温度計
0.2m 水温計兼 デブリ検知器	0.2m		
0.5m 水位計	0.5m	各高さに 2 個	電極式 水位計
1m 未満水位計	1m－測定誤差		
1m 超水位計	1m＋測定誤差		
満水管理水位計	2.25m 2.75m		

※1：ペDESTAL底面（コリウムシールド上表面）からの高さ

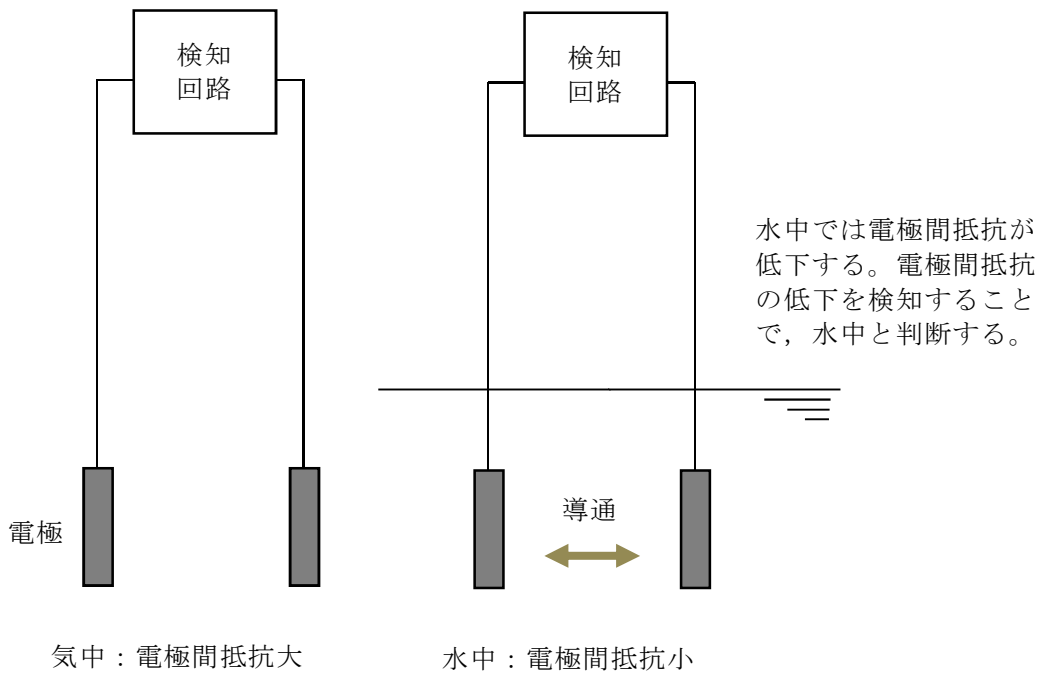
第2表 検出部の仕様等

計器種別	測定レンジ	測定誤差	耐環境性
測温抵抗体式 温度計	-200℃～500℃	$\pm(0.3+0.005 t )$ t: 測定温度	温度: 短期 230℃, 長期 200℃ 圧力: 620kPa [gage] 放射線: -※ <sup>2</sup>
電極式 水位計	— (レベルスイッチ)	±10mm	温度: 短期 230℃, 長期 200℃ 圧力: 620kPa [gage] 放射線: -※ <sup>2</sup>

※2: 検出部は無機物で構成しており, 放射線による影響はない

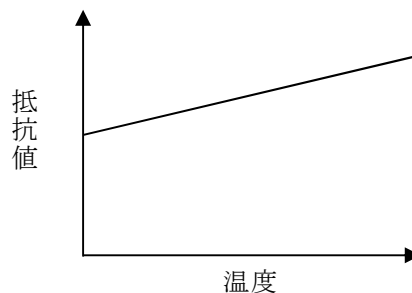
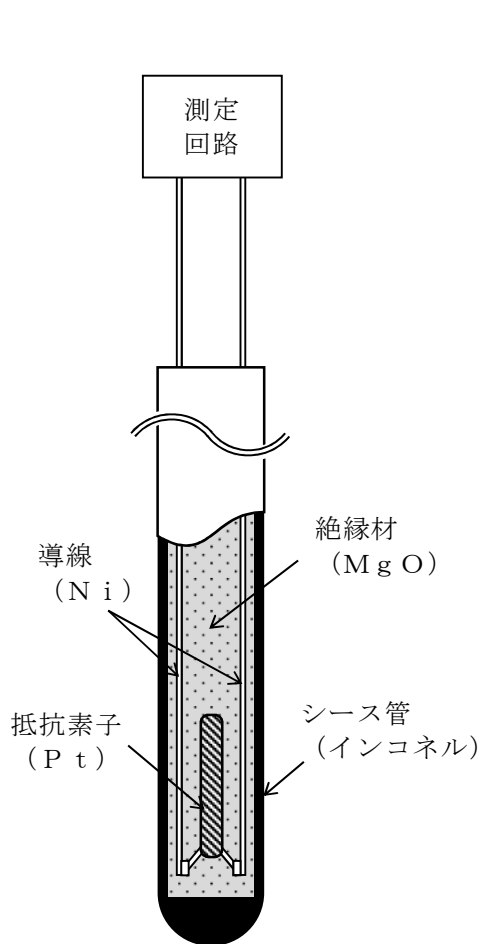


第1図 ペデスタル内の計器設置図



第 2 図 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

测温抵抗体構成材料の融点

	材質	融点
シース管	インコネル (NCF600)	1370℃～1425℃
導線	Ni	1455℃
抵抗素子	Pt	1768℃
絶縁材	MgO*	約 2800℃

\*デブリ中のZr等により還元されると、融点約650℃、沸点約1100℃のMgとなり、溶融又は蒸発する。

第3図 测温抵抗体式温度計の動作原理

## 添付 12. S E の発生を想定した場合の格納容器の健全性への影響評価

### 1. 評価目的

デブリが R P V の破損口から落下した際に S E が発生する可能性はこれまでの知見からも極めて低いと考えられる。しかしながら、S E が発生した場合を考慮し、格納容器の健全性に対する影響を確認しておくことは格納容器下部への水張り等の格納容器破損防止対策の適切性を確認する上でも有益な参考情報になると考える。このため、ここではデブリ落下時の S E 発生を想定し、その際の格納容器健全性を評価した。

### 2. 評価方針

設置許可基準第三十七条（重大事故等の拡大の防止等）解釈の要求事項、及び鉄筋コンクリート造の上下層円筒部の中間に床スラブを有する東海第二発電所のペDESTAL構造を踏まえ、S E の影響に対するペDESTALの構造健全性を評価し、ペDESTALに要求される R P V 支持機能及びデブリ保持機能が損なわれないことを確認する。

### 3. 評価方法

#### (1) 評価条件

S E の影響を評価するにあたっては、S E によって発生するエネルギー、発生エネルギーによる圧力伝播挙動及び構造応答が重要な現象となる。よって、これらの現象を適切に評価することが可能である S E 解析コード J A S M I N E、汎用有限要素解析コード L S - D Y N A を用いてペDESTALの構造健全性を評価した。これらの解析コードに対して構築した評価モデル及び入力の詳細は添付 10 及び添付 11 に示している。なお、ペDESTAL

ルの水位は 1m とし，コリウムシールドは模擬しない条件とした。

## (2) 判断基準

炉心損傷防止に失敗し，重大事故の発生を想定する防護レベルにおいて，格納容器の健全性維持に必要な安全機能である R P V 支持機能及びデブリ保持機能が損なわれないことを確認する観点から，本評価では構造物が終局限界状態に至らないことを確認するための判断基準を設定する。

第 1 表にペDESTAL 構造健全性評価の判断基準を示す。

### a. 側壁（R P V 支持機能に対する判断基準）

ペDESTAL の側壁は上下層円筒構造であることから，同様な円筒形状の構築物の設計規格が示されている，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（（社）日本機械学会，2003）（以下「C C V 規格」という。）を準用して判断基準を設定した。

コンクリートの圧縮ひずみについては，C C V 規格 CVE-3511.2 荷重状態Ⅳのシェル部コンクリートの許容ひずみである  $3,000 \mu$  を基準として，R P V 支持機能に影響を及ぼす範囲の圧壊が生じないこととした。鉄筋の引張ひずみについては，C C V 規格 CVE-3511.2 荷重状態Ⅳの鉄筋の許容ひずみである  $5,000 \mu$  を超えないこととした。S E 時に発生する面外方向のせん断については，C C V 規格 CVE-3514.2 荷重状態Ⅳにおける終局面外せん断応力度を設定し，上部側壁で  $3.09\text{N/mm}^2$ ，下部側壁で  $2.65\text{N/mm}^2$  を超えないこととした。別添 1 に終局面外せん断応力度の算定過程を示す。

また，S E は爆発事象であり衝撃荷重が問題となることから，建築物の耐衝撃設計の考え方（（社）日本建築学会，2015）（以下，「A I J 耐衝撃設計の考え方」という。）において進行性崩壊回避の考え方が

示されていることを参考に、構造物の崩壊に対する健全性を確認する観点より、SEによる側壁の変位が増大しないことを確認することとした。

b. 床スラブ（デブリ保持機能に対する判断基準）

コンクリートの圧縮ひずみについては、側壁と同様にCCV規格を準用することとし、荷重状態IVのコンクリートの許容ひずみである  $3,000\mu$  を基準として、デブリ保持機能に影響を及ぼす範囲の圧壊が生じないこととした。鉄筋についても側壁と同様に荷重状態IVの鉄筋の許容ひずみである  $5,000\mu$  を超えないこととした。

ペデスタルは上下層円筒部の中間に円盤形の床スラブを有する構造であるが、この構造に対する面外せん断の判断基準設定にあたり、CCV規格には適した規定がないことから、コンクリート標準示方書〔構造的能照査編〕（（社）土木学会，2002）（以下、「コンクリート示方書」という。）に基づく終局面外せん断応力度を設定し、 $4.33\text{N}/\text{mm}^2$  を超えないこととした。別添2に終局面外せん断応力度の算定過程を示す。

また、側壁と同様に、AIJ耐衝撃設計の考え方を参考に、構造物の崩壊に対する健全性を確認する観点より、SEによる床スラブの変位（たわみ量）が増大しないことを確認することとした。

#### 4. 評価結果

(1) 側壁（RPV支持機能に対する評価結果）

a. 側壁の変位

第1図に側壁の半径方向変位時刻歴を示す。最大変位はX方向で約  $0.16\text{mm}$  にとどまり、変位は増大していないことから、SE後の構造物の進行性の崩壊はない。

b. コンクリートの圧縮ひずみ

第3図に最小主ひずみ（圧縮ひずみ）分布を示す。側壁にはCCV規格に基づく許容ひずみ  $3,000\mu$  を超える部位は生じないことから、機能に影響を及ぼす圧壊は生じない。

c. 鉄筋の引張ひずみ

第4図に鉄筋の軸ひずみ（引張ひずみ）分布を示す。側壁の鉄筋に発生する軸ひずみは約  $184\mu$  であり、CCV規格に基づく許容ひずみ  $5,000\mu$  を超えない。

d. 側壁の面外せん断

第2表に側壁の面外せん断評価結果を示す。発生するせん断応力度は上部約  $0.93\text{N}/\text{mm}^2$  及び下部約  $0.77\text{N}/\text{mm}^2$  であり、それぞれのCCV規格に基づく終局面外せん断応力度である、 $3.09\text{N}/\text{mm}^2$  及び  $2.65\text{N}/\text{mm}^2$  を超えない。

(2) 床スラブ（デブリ保持機能）

a. 床スラブの変位（たわみ量）

第2図にペDESTAL側壁の鉛直方向変位の時刻歴を示す。最大変位は約  $2.0\text{mm}$  とどまり、変位は増大していないことから、SE後の構造物の進行性の崩壊はない。

b. コンクリートの圧縮ひずみ

第3図に示したとおり、CCV規格に基づく許容ひずみ  $3,000\mu$  を超える部位は、床スラブ上面の僅かな範囲にとどまることから、機能に影響を及ぼす圧壊は生じない。

c. 鉄筋の引張ひずみ

第4図に示したとおり、床スラブの鉄筋に発生する軸ひずみは約  $364\mu$  であり、CCV規格に基づく許容ひずみ  $5,000\mu$  を超えない。

#### d. 床スラブの面外せん断

第3表に床スラブの面外せん断に対する評価結果を示す。発生するせん断応力度は約  $3.70\text{N}/\text{mm}^2$  であり，終局面外せん断応力度  $4.33\text{N}/\text{mm}^2$  を超えない。

第4表にペDESTAL構造健全性評価の評価結果のまとめを示す。

#### 5. まとめ

SE解析コードJASMINNE，汎用有限要素解析コードLS-DYNAにより，SEの発生を想定した場合の格納容器健全性への影響を評価した。その結果，SE時のペDESTALに発生する応力やひずみは判断基準を満足し，SE後においても変位の増大はないことから，ペDESTALに要求されるRPV支持機能及びデブリ保持機能が損なわれないことを確認した。したがって，SEの発生を想定した場合であっても，格納容器の健全性は維持される。

第1表 ペデスタル構造健全性評価の判断基準

機能	評価部位		項目	判断基準	準用規格等
R P V 支持機能	側壁	コンクリート	変位	変位が増大せず，S E後の構造物の進行性の崩壊がない	A I J耐衝撃設計の考え方
			圧縮ひずみ	機能に影響を及ぼす範囲の圧壊（3,000 $\mu$ ）が生じない	C C V規格 CVE-3511.2
			面外せん断	終局面外せん断応力度（上部側壁：3.09 N/mm <sup>2</sup> ，下部側壁 2.65N/mm <sup>2</sup> ）を超えない	C C V規格 CVE-3514.2
		鉄筋	引張ひずみ	許容ひずみ（5,000 $\mu$ ）を超えない	C C V規格 CVE-3511.2
デブリ保持機能	床スラブ	コンクリート	変位	変位が増大せず，S E後の構造物の進行性の崩壊がない	A I J耐衝撃設計の考え方
			圧縮ひずみ	機能に影響を及ぼす範囲の圧壊（3,000 $\mu$ ）が生じない	C C V規格 CVE-3511.2
			面外せん断	終局面外せん断応力度（4.33N/mm <sup>2</sup> ）を超えない	コンクリート示方書
		鉄筋	引張ひずみ	許容ひずみ（5,000 $\mu$ ）を超えない	C C V規格 CVE-3511.2

第2表 側壁の面外せん断に対する評価結果

評価部位	発生応力度	判断基準	評価※
側壁上部	約 0.93 N/mm <sup>2</sup>	3.09 N/mm <sup>2</sup>	○
側壁下部	約 0.77 N/mm <sup>2</sup>	2.65 N/mm <sup>2</sup>	○

※：「○」解析結果の発生応力度が判断基準を満足する

第3表 床スラブの面外せん断に対する評価結果

評価部位	発生応力度	判断基準	評価※
床スラブ	約 3.70 N/mm <sup>2</sup>	4.33 N/mm <sup>2</sup>	○

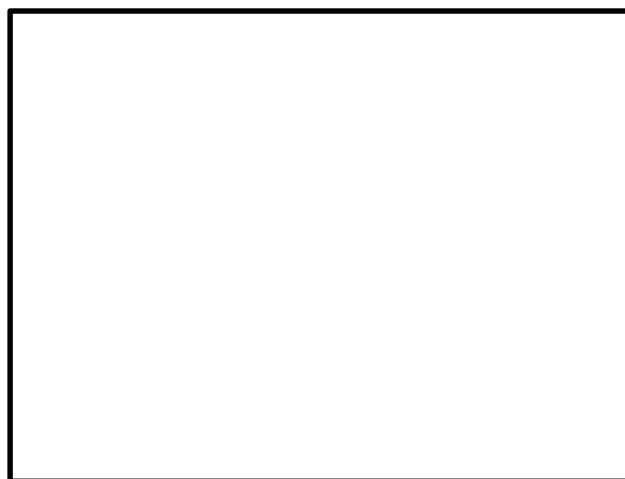
※：「○」解析結果の発生応力度が判断基準を満足する



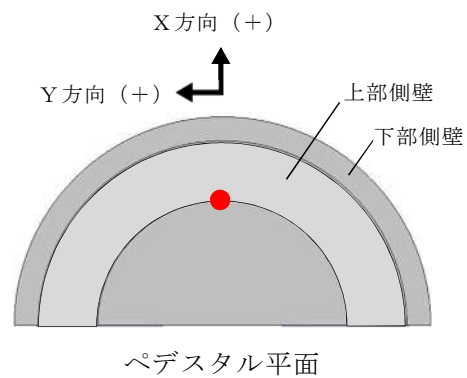
第4表 ペデスタル構造健全性評価の評価結果のまとめ

機能	評価部位		項目	判断基準	解析結果	評価※
R P V 支持機能	側壁	コンクリート	変位	変位が増大せず，S E 後の構造物の進行性の崩壊がない	変位は増大しない	○
			圧縮ひずみ	機能に影響を及ぼす範囲の圧壊（3,000 $\mu$ ）が生じない	圧壊は側壁に生じない	○
			面外せん断	終局面外せん断応力度（上部側壁：3.09N/mm <sup>2</sup> ，下部側壁2.65N/mm <sup>2</sup> ）を超えない	上部側壁：約0.93N/mm <sup>2</sup> 下部側壁：約0.77N/mm <sup>2</sup>	○
	鉄筋	引張ひずみ	許容ひずみ（5,000 $\mu$ ）を超えない	約184 $\mu$	○	
デブリ保持機能	床スラブ	コンクリート	変位	変位が増大せず，S E 後の構造物の進行性の崩壊がない	変位は増大しない	○
			圧縮ひずみ	機能に影響を及ぼす範囲の圧壊（3,000 $\mu$ ）が生じない	圧壊は床スラブ上面の僅かな範囲にとどまる	○
			面外せん断	終局面外せん断応力度（4.33N/mm <sup>2</sup> ）を超えない	約3.70N/mm <sup>2</sup>	○
	鉄筋	引張ひずみ	許容ひずみ（5,000 $\mu$ ）を超えない	約364 $\mu$	○	

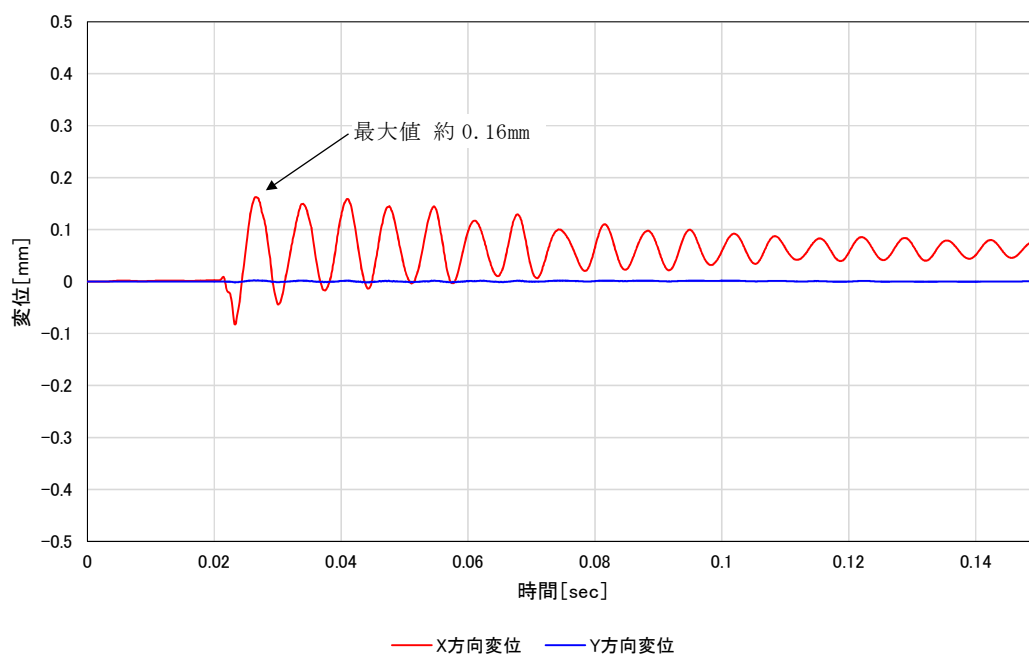
※：「○」解析結果が判断基準を満足する



ペDESTAL断面



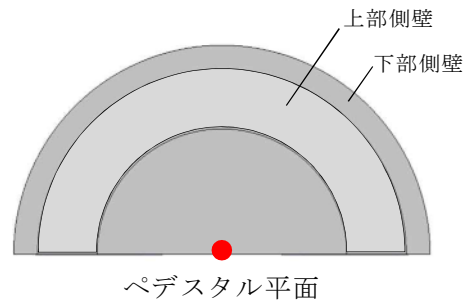
● 対象部位



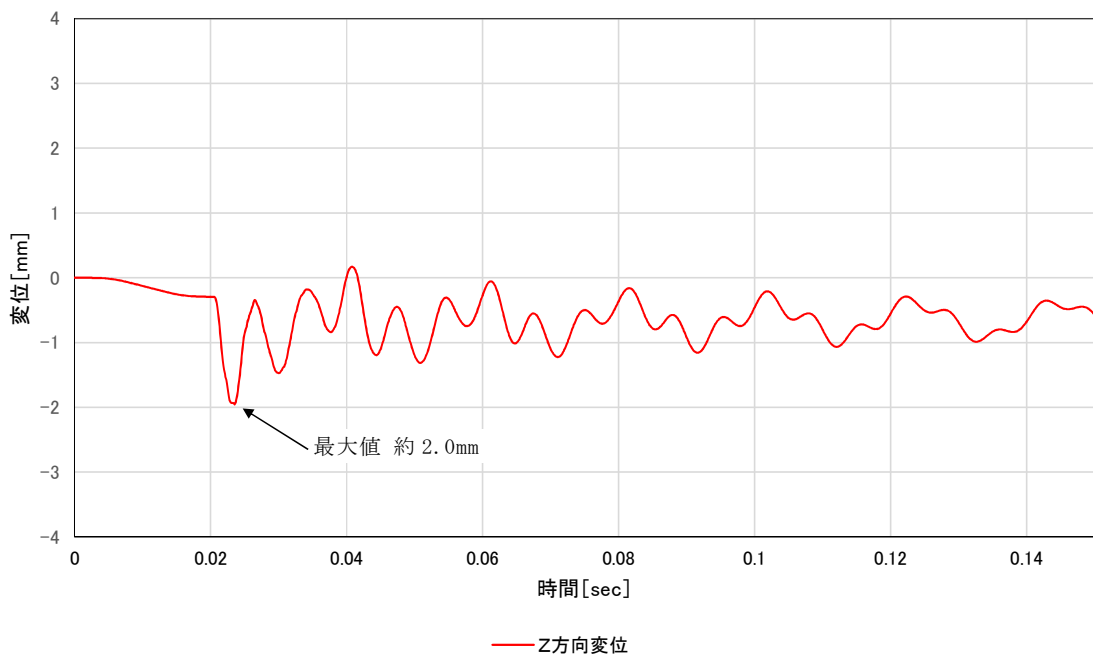
第 1 図 ペDESTAL側壁の半径方向変位時刻歴



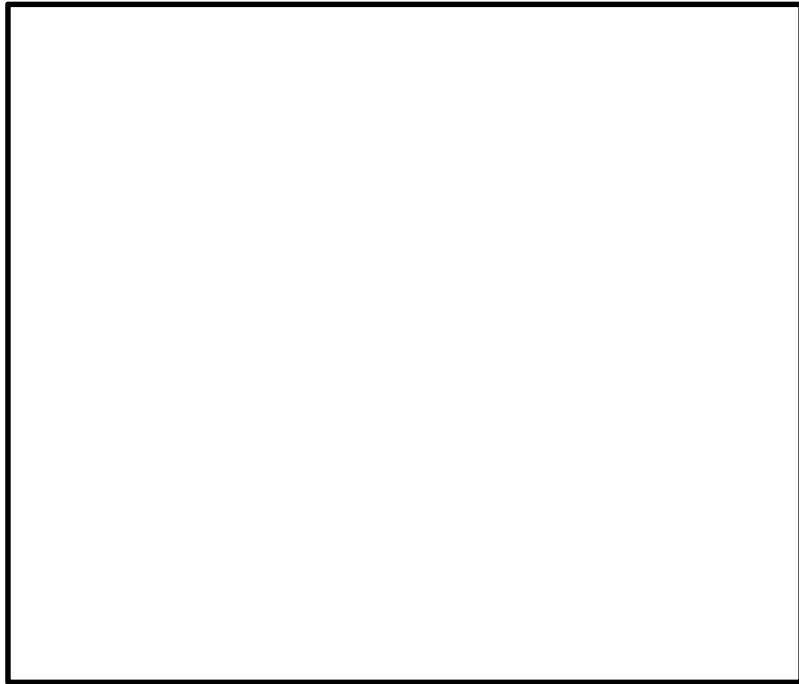
ペDESTAL断面



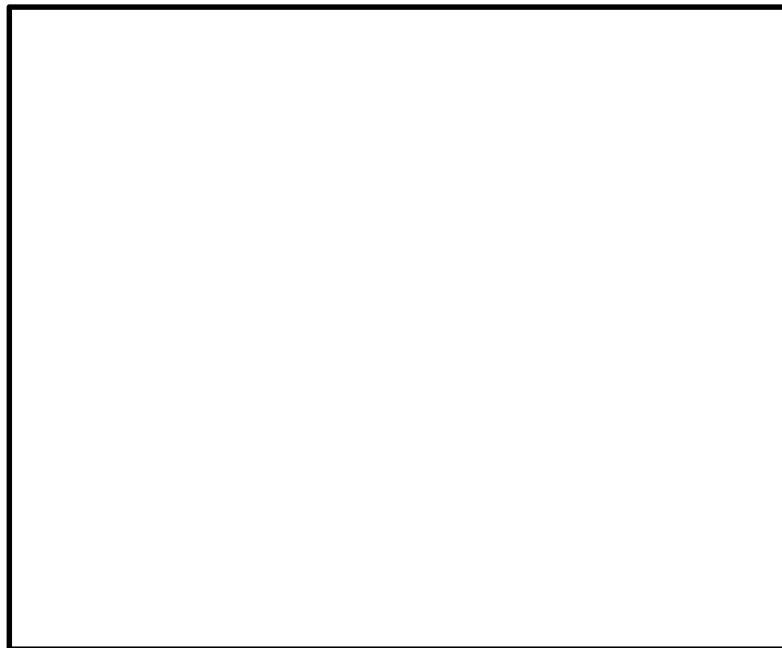
● 対象部位



第2図 ペDESTAL床スラブの鉛直方向変位時刻歴



第3図 コンクリートの最小主ひずみ（圧縮ひずみ）分布



第4図 鉄筋の軸ひずみ分布

## 側壁の終局面外せん断応力度

## 1. 算定条件

ペDESTALの側壁は、円筒形シェル構造であることから、C C V規格 CVE-3514.2 荷重状態IVにおけるシェル部の終局面外せん断応力度の算定式を適用し、側壁の終局面外せん断応力度を算定する。第1図に算定対象部位を示す。

$$\tau_H = 10p_{t\theta} \cdot f_y / (13.2\sqrt{\beta} - \beta)$$

ここで、

$\tau_H$  : 終局面外せん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$p_{t\theta}$  : 円周方向主筋の鉄筋比 (-)

$f_y$  : 鉄筋の許容引張応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$\beta$  : 次の計算式により計算した値  $\beta = r/t$

$r$  : シェル部の胴の厚さの中心までの半径(mm)

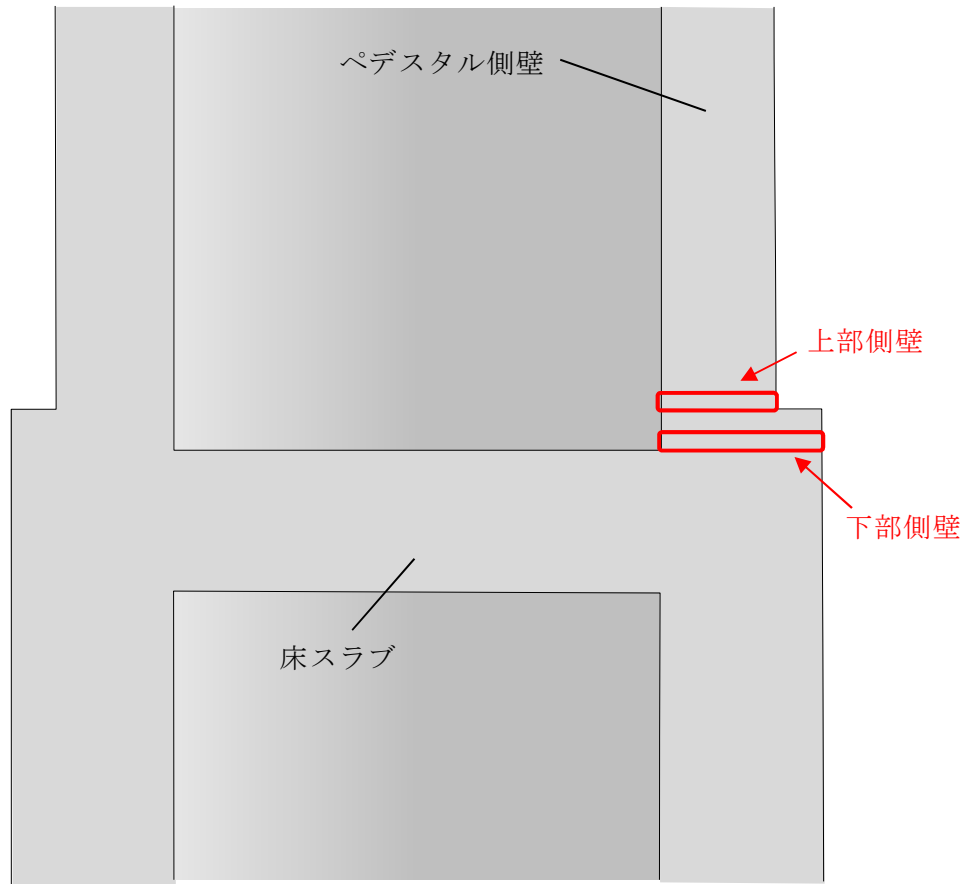
$t$  : シェル部の胴の厚さ(mm)

各項目の数値を下表に示す。

項目		数値
上部側壁	$p_{t\theta}$ : 円周方向主筋の鉄筋比	
	$f_y$ : 鉄筋の許容引張応力度	345N/mm <sup>2</sup>
	$r$ : シェル部の胴の厚さの中心までの半径	
	$t$ : シェル部の胴の厚さ	
下部側壁	$p_{t\theta}$ : 円周方向主筋の鉄筋比	
	$f_y$ : 鉄筋の許容引張応力度	345N/mm <sup>2</sup>
	$r$ : シェル部の胴の厚さの中心までの半径	
	$t$ : シェル部の胴の厚さ	

## 2. 算定結果

算定の結果、側壁の終局面外せん断応力度は上部側壁で 3.09N/mm<sup>2</sup>，下部側壁で 2.65N/mm<sup>2</sup>となる。



第1図 算定対象部位

## 床スラブの終局面外せん断応力度

## 1. 算定条件

S E時の床スラブのせん断力に対する検討は、コンクリート示方書に基づき、終局限界状態に至らないことを確認する。評価対象となる床スラブの形状は円盤形であり、S Eによる分布荷重を受ける。

せん断に対する検討に際して、分布荷重を受ける円盤スラブの部材応力分布について、機械工学便覧を参照し、対象とする部材のせん断力の最大値が生じている断面の曲げモーメント及びせん断力と躯体の形状寸法より、せん断スパン比が1.0以下であることを確認した。一般的に、せん断スパン比が1.0以下である梁部材はディープビームと呼ばれており、本検討では、コンクリート示方書に示されるディープビームの設計せん断耐力式を適用し、床スラブの終局面外せん断応力度を設定する。

$$V_{cda} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{da} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$$

ここで、

$$f_{da} = 0.19 \sqrt{f'_{cd}} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d} \quad \text{ただし、} \beta_p > 1.5 \text{ となる場合は } 1.5 \text{ とする}$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p_w} \quad \text{ただし、} \beta_p > 1.5 \text{ となる場合は } 1.5 \text{ とする}$$

$$\beta_a = \frac{5}{1+(a/d)^2}$$

$f'_{cd}$  : コンクリートの設計圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$d$  : 有効せい (m)

$p_w$  : 引張鉄筋比 (-)

$a/d$  : せん断スパン比 (-)

$b_w$  : 腹部の幅 (mm)

$\gamma_b$  : 部材係数 (-)



各項目の数値を下表に示す。

項目	数値
$f'_{cd}$ : コンクリートの設計圧縮強度	32.86N/mm <sup>2</sup>
コンクリートの設計基準強度	22.06N/mm <sup>2</sup>
圧縮強度動的増倍率 <sup>*</sup>	1.49
d : 有効せい	
$p_w$ : 引張鉄筋比	
$a/d$ : せん断スパン比	0.43
$b_w$ : 腹部の幅	
$\gamma_b$ : 部材係数	1.3

※次項参照

## 2. 圧縮強度動的増倍率の算定

一般に、コンクリートの強度、ヤング係数等の材料特性は、コンクリートに作用する荷重の載荷速度に依存する。その強度とヤング係数は、応力速度又はひずみ速度の対数に比例して増加することが明らかになっていることより、床スラブの終局面外せん断応力度算定においては、圧縮に対する材料強度にひずみ速度効果を考慮することとし、本評価ではコンクリート示方書において具体的計算方法が示されている、CEB-FIP Model Code 1990による圧縮強度動的増倍率を設定した。

LS-DYNAコードによるSE解析では、せん断検討範囲の床スラブのコンクリート要素が経験するひずみ速度が $30s^{-1}$ 以下であるため、その範囲におけるCEB-FIP Model Code 1990の圧縮強度動的増倍率の算定式を以下に示す。

$$f_{c,imp}/f_{cm} = (\dot{\varepsilon}_c/\dot{\varepsilon}_{c0})^{1.026\alpha_s} \quad \text{for } |\dot{\varepsilon}_c| \leq 30s^{-1}$$

with

$$\alpha_s = \frac{1}{5 + 9f_{cm}/f_{cm0}}$$

$f_{c,imp}$  : 衝撃時の圧縮強度

$f_{cm}$  : 圧縮強度 =  $225\text{kg}/\text{cm}^2 \times 0.0980665 \doteq 22.06 \text{ MPa}$

$f_{cm0}$  : 10MPa

$\dot{\varepsilon}_c$  : ひずみ速度\* =  $0.5 \text{ s}^{-1}$

$\dot{\varepsilon}_{c0}$  :  $30 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$

※ : LS-DYNAコードを用いたSE解析における床スラブ端部のひずみ速度に基づき設定

以上より、圧縮強度の動的増倍率は 1.49 となる。

### 3. 算定結果

ディーブビームの設計せん断耐力 $V_{cdd}$ は、約 6,078 kN となり、終局面外せん断応力度として  $4.33 \text{ N}/\text{mm}^2$  となる。

## S E 発生時の面外せん断応力度の算定方法

## 1. 面外せん断に対する検討範囲

## (1) 床スラブの検討範囲

第 1 図にペDESTALの床スラブの形状寸法を示す。ペDESTALの床スラブは直径 、板厚  の円盤形状であり、S E 時には圧力波の伝播による分布荷重を受ける。面外せん断に対する検討に際して、分布荷重を受ける円盤スラブの部材応力分布について、機械工学便覧の円板の応力計算式に基づき、対象とする部材のせん断力 (Q) の最大値が生じている断面の曲げモーメント (M) 及びせん断力 (Q) によりせん断スパン比を確認した。第 2 図に曲げモーメント及びせん断力分布図を示す。せん断力の最大値が生じる断面はスラブ端部であり、曲げモーメントとの関係を算定した結果、せん断スパン比が 1.0 以下であった。一般的にせん断スパン比が 1.0 以下である梁部材は、ディープビームと呼ばれており、本検討では、コンクリート示方書に示されるディープビームの設計せん断耐力式に適用し、終局限界に対する構造健全性を確認する。

前述の通り、東海第二発電所のペDESTALの床スラブは、躯体の形状、寸法及び応力状態より、せん断スパン比が小さい構造物である。本評価に用いる検討範囲及び検討用のせん断力については、原子力発電所耐震設計技術規程 J E A C 4601-2008 ( (社) 日本電気協会, 2008) において、主要な荷重が分布荷重又は多点荷重で、材料非線形解析手法を用いて具体的な部材性能照査を行う場合の参考図書として記載されている原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル ( (社) 土木学会, 1992) を用いて検討範囲及び検討用せん断力の設定を行った。

第 3 図に床スラブの形状及び発生するせん断力分布の概念図を示す。検討断面の位置は側壁内側のスラブ端部からの距離  $x$  に設定する。なお、距離  $x$  の上限値として有効せいの 1.5 倍、下限値として断面せいの  $1/2$  倍と規定されているため、本評価においては、安全側に下限値となる断面せいの  $1/2$  倍である  とし、更に検討用のせん断力についても、スラブ端部から  の位置のせん断力ではなく、距離  $x$  から部材端部までのせん断力分布の平均値を用いた値を検討用のせん断力とした。第 4 図に、解析モデルにおける床スラブ検討範囲（L S - D Y N A 解析結果の評価におけるせん断力の抽出範囲）を示す。

## (2) 側壁の検討範囲

第 5 図に側壁検討範囲を示す。ペDESTALの側壁は EL. 12. 184m にて上部と下部の二階層に分けられている設計である。S E 発生時の水張高さであるペDESTAL床面高さ 1m までの側壁に直接動的荷重が加わることから、側壁の検討断面は上部、下部のそれぞれの水の接する高さの断面とした。

## 2. 面外せん断応力度の算定

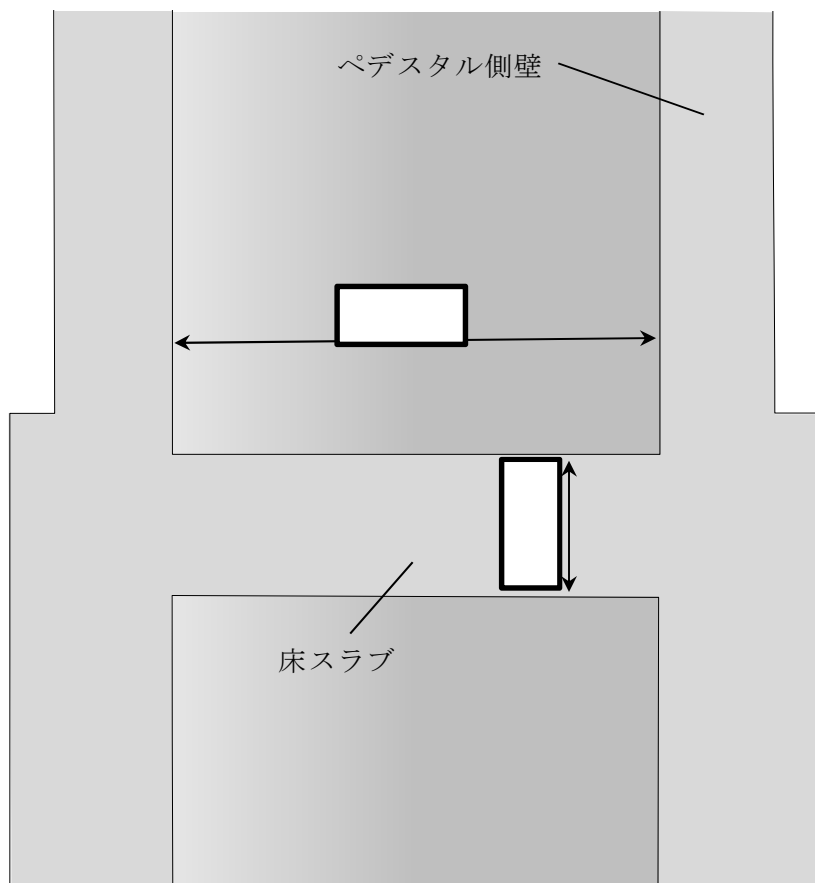
面外せん断応力度の算定について、床スラブを例に説明する。なお、側壁についても床スラブと同様に面外せん断応力度を算定している。

第 6 図にペDESTAL床スラブ端部の躯体形状の概念を示す。また、第 7 図に直交座標系応力成分を示す。床スラブ端部 1 列目の各要素のせん断力 ( $Q(1, 1) \sim Q(1, j)$ ) は、直交座標系における  $\tau_{yz}$  応力成分に相当するせん断応力度 ( $\tau_{yz}(1, 1) \sim \tau_{yz}(1, j)$ ) を要素毎に取り出し、要素毎のせん断断面積 ( $A(1, 1) \sim A(1, j)$ ) をそれぞれ乗じることにより算定する。

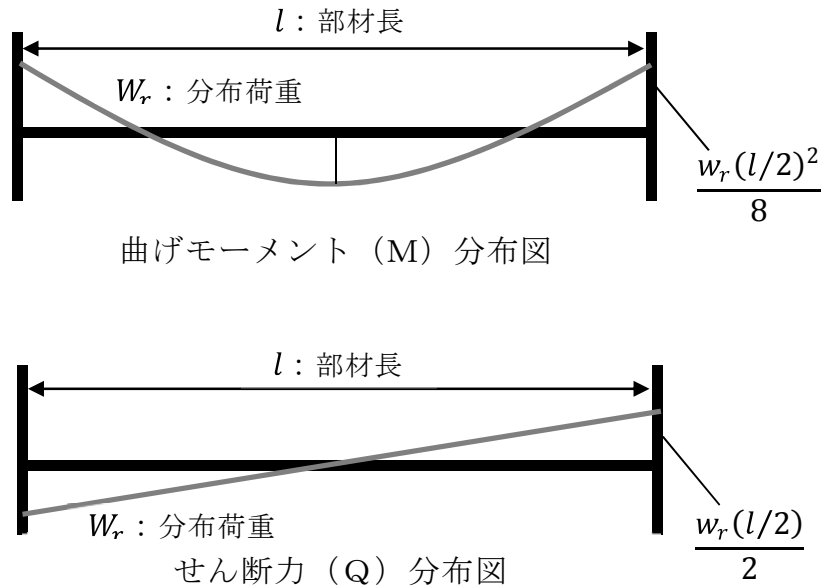
床スラブ端部の1列目の要素幅あたりの面外せん断応力度は、スラブの厚さ方向(1~j行目)の各要素のせん断力(Q(1, 1)~Q(1, j))を合算した値( $\sum_{i=1}^j Q_{(1, i)}$ )に1列目のせん断断面積( $\sum_{i=1}^j A_{(1, i)}$ )で除して、スラブ端部1列目の面外せん断応力度( $\tau_1$ )を算定する。したがって、k列目の面外せん断応力度( $\tau_k$ )は、 $\tau_k = \sum_{i=1}^j Q_{(k, i)} / \sum_{i=1}^j A_{(k, i)}$ で表すことができる。次に、列毎の面外せん断応力度( $\tau_1 \sim \tau_k$ )に、それぞれの半径方向要素幅を乗じて合算した値を検討範囲の幅で除すことにより、検討範囲における面外せん断応力度を算定する。第1表に本手順により算定したSE発生時の面外せん断応力度を示す。

第1表 SE発生時の面外せん断応力度

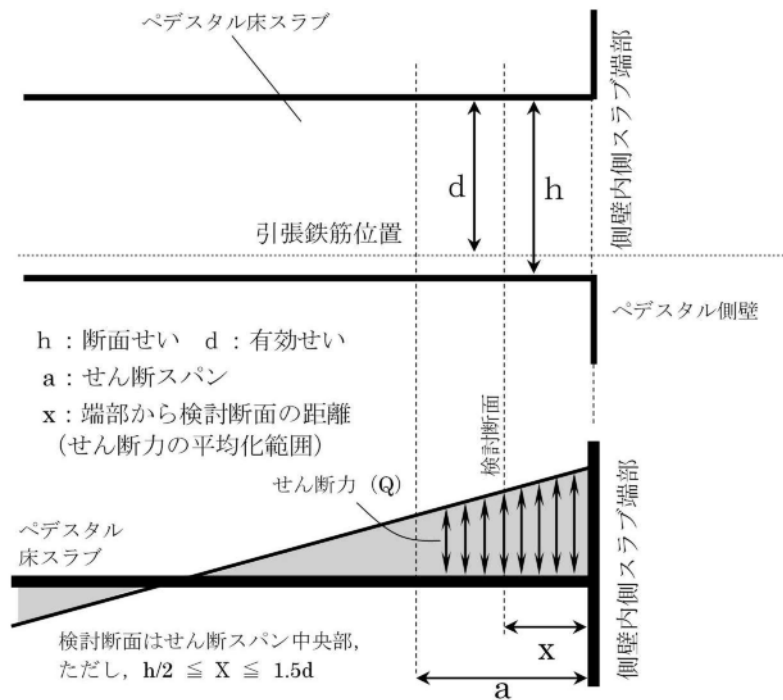
評価対象部位		発生応力度
側壁	上部	約 0.93 N/mm <sup>2</sup>
	下部	約 0.77 N/mm <sup>2</sup>
床スラブ		約 3.70 N/mm <sup>2</sup>



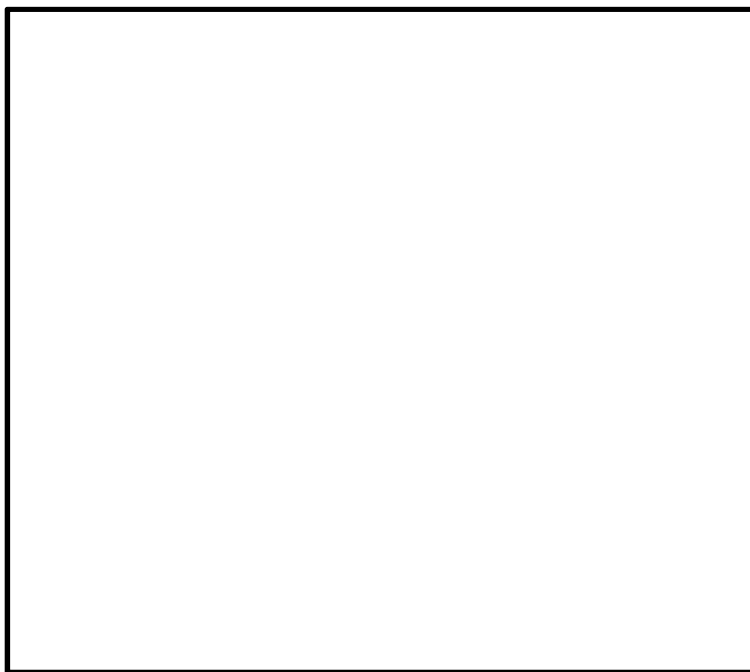
第1図 ペデスタルの床スラブの形状寸法



第 2 図 曲げモーメント及びせん断力分布の関係



第 3 図 床スラブの形状及び発生するせん断力分布の概念

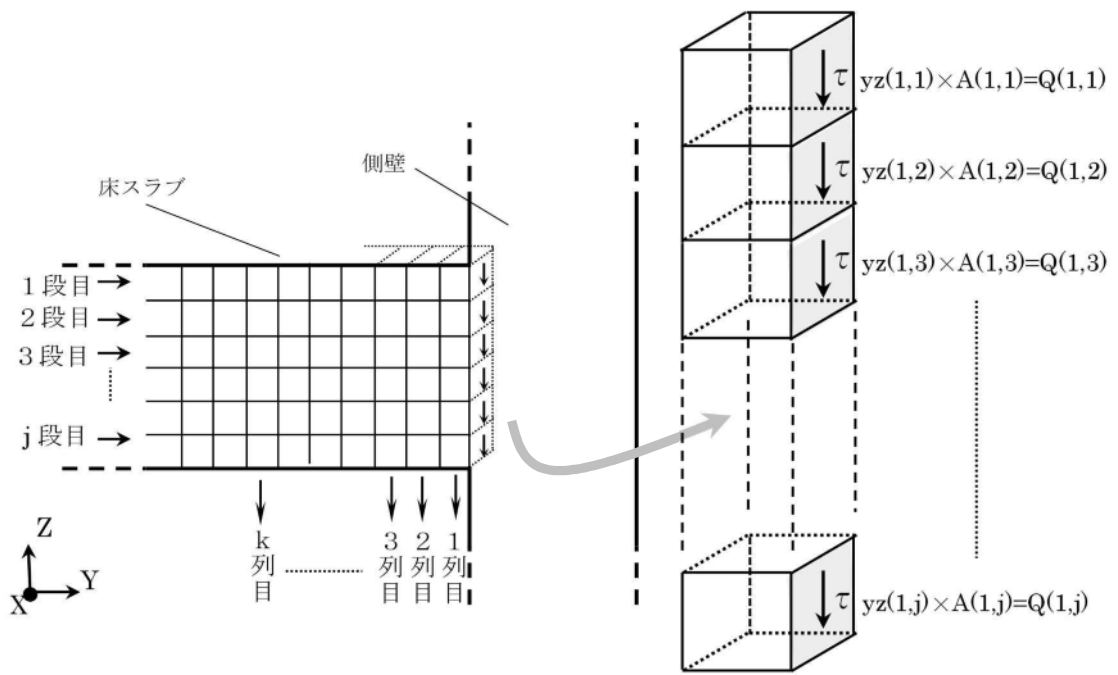


第4図 床スラブ部解析モデルにおける面外せん断力の検討範囲



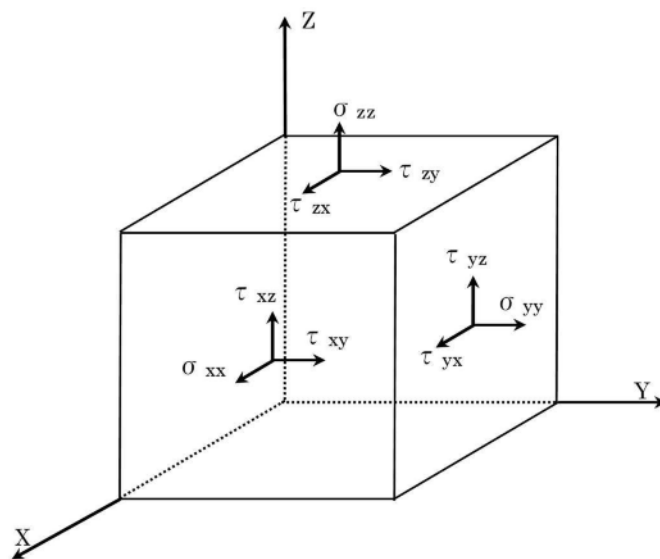
第5図 側壁部解析モデルにおける面外せん断力の検討範囲





<1列目の面外せん断応力の算出>

第6図 床スラブ端部躯体形状概念図



第7図 直交座標系応力成分

## ペDESTALに作用する圧力について

## 1. ペDESTAL躯体に作用する圧力の分布

第1図及び第2図にSEによってペDESTALに作用する圧力の分布を示す。  
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。

## 2. 手計算との発生応力の比較 (参考)

材料力学に基づく手計算手法を用いて、LS-DYNA解析より得られた解析結果との比較を行った。

第3図に手計算と解析結果の比較を示す。下部側壁に作用する圧力の平均値(最大約 2MPa)より機械工学便覧に示されている内圧を受ける円筒の弾性応力算定式にて求めた面外方向応力の平均値は最大約  $0.70\text{N}/\text{mm}^2$  であり、解析結果の約  $0.77\text{N}/\text{mm}^2$  と比較して両者はよく一致している。

$$\sigma_r = -\frac{k^2/R^2 - 1}{k^2 - 1} P_a$$

ここで、

$k$  :  $b/a$  により計算した値

$R$  :  $r/a$  により計算した値

$a$  : 内半径 (mm) …3,086mm

$b$  : 外半径 (mm) …5,144mm

$r$  : 半径方向の座標 (mm) …4,115mm (下部側壁の壁厚中心)

$P_a$  : 内圧 (MPa)

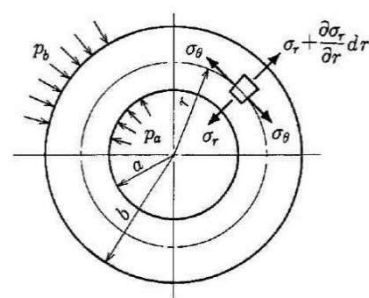
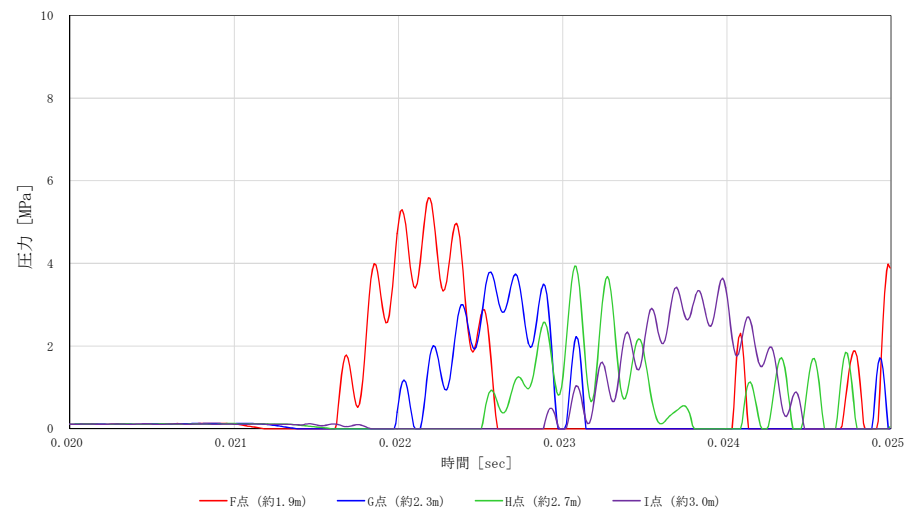
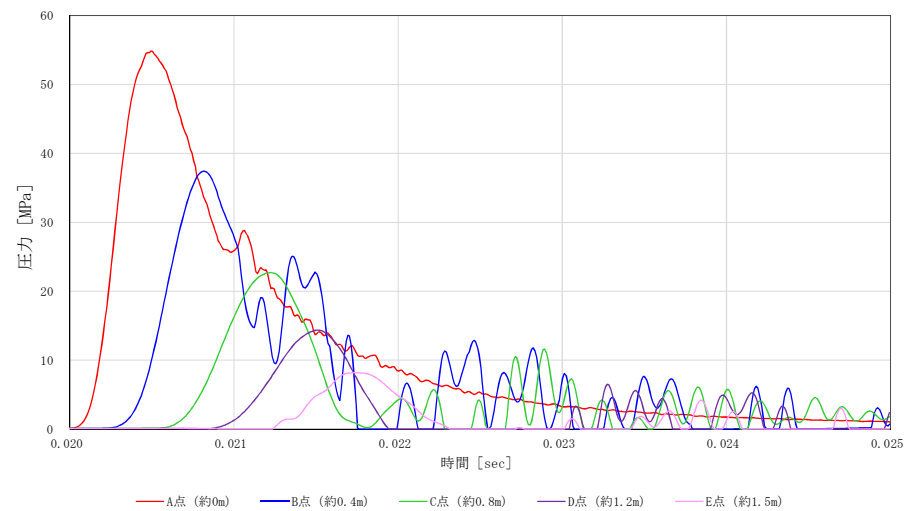
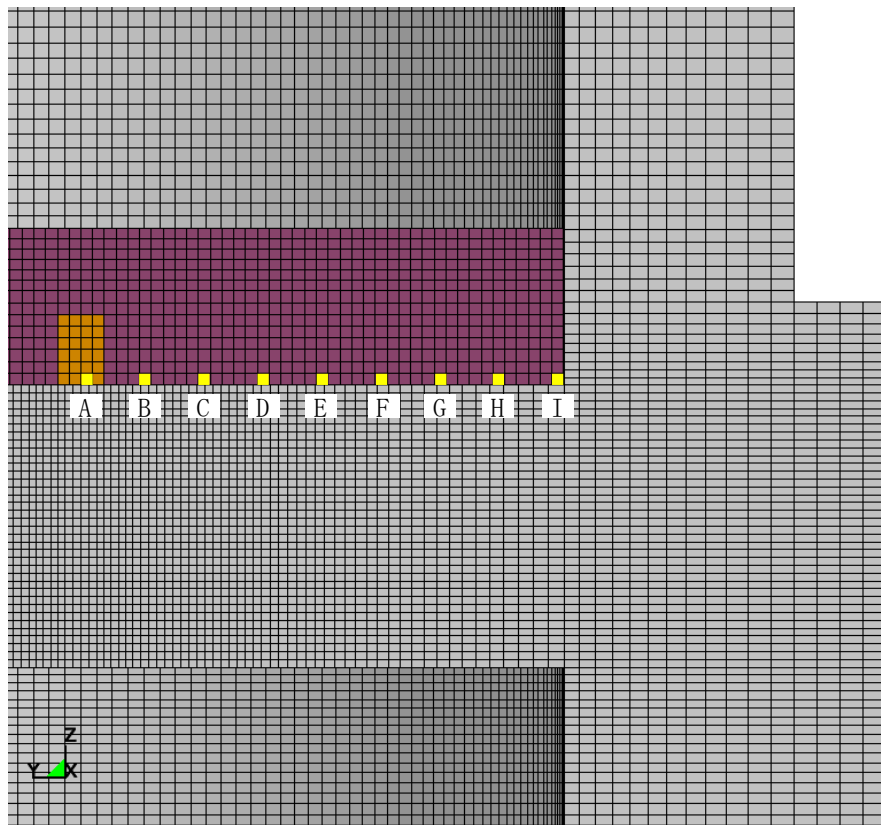
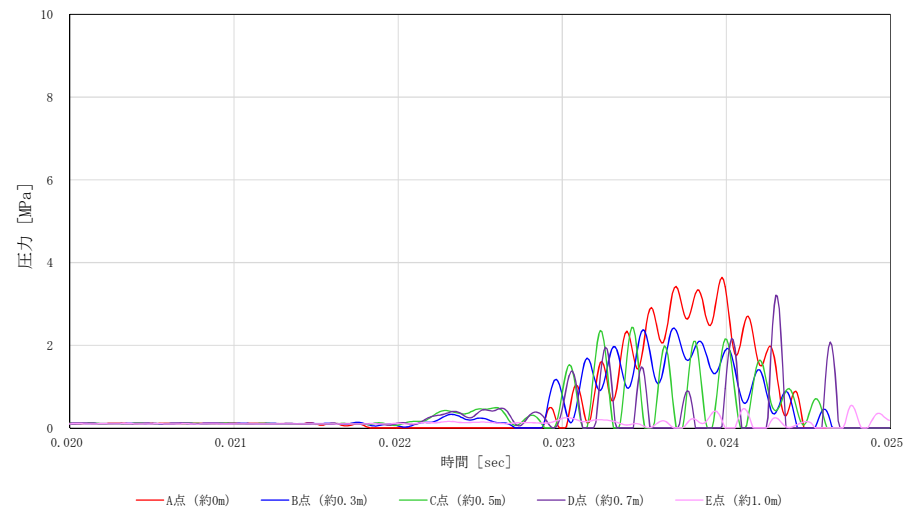
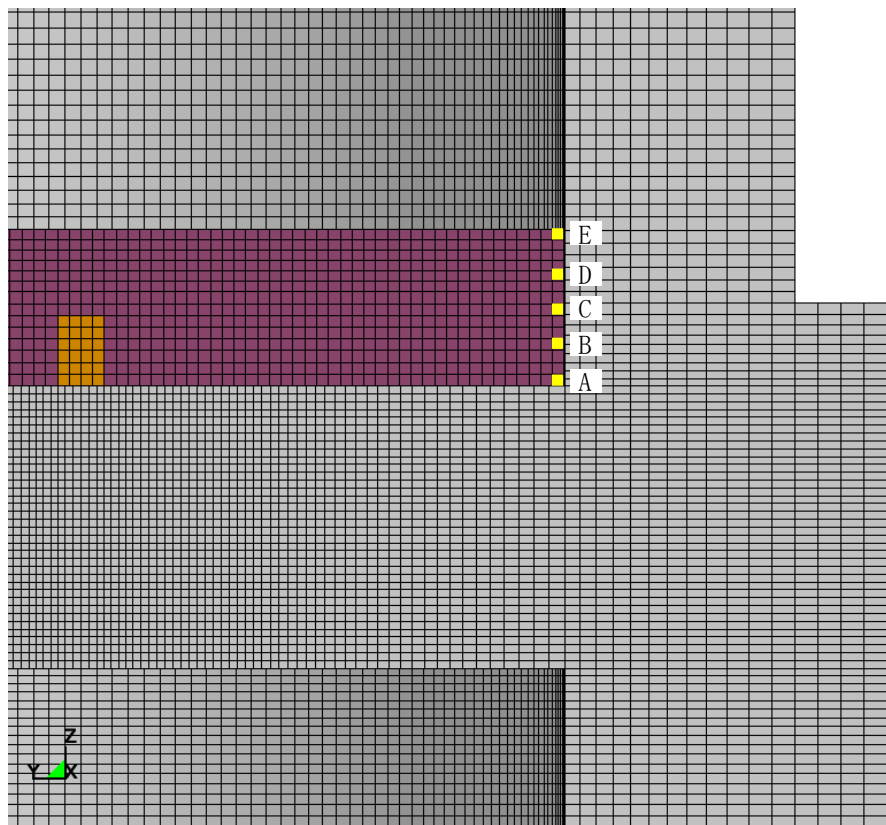


図6・9 内外圧を受ける円筒  
(機械工学便覧 基礎編 a3 材料力学)



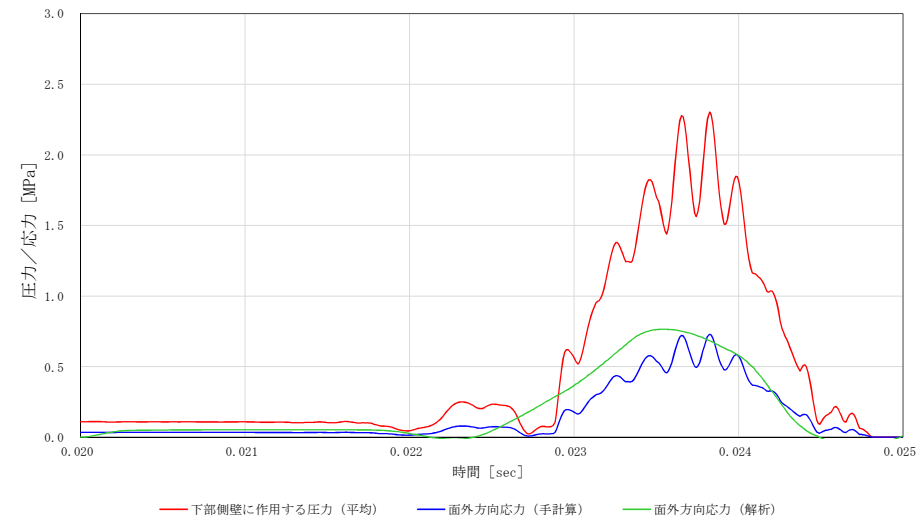
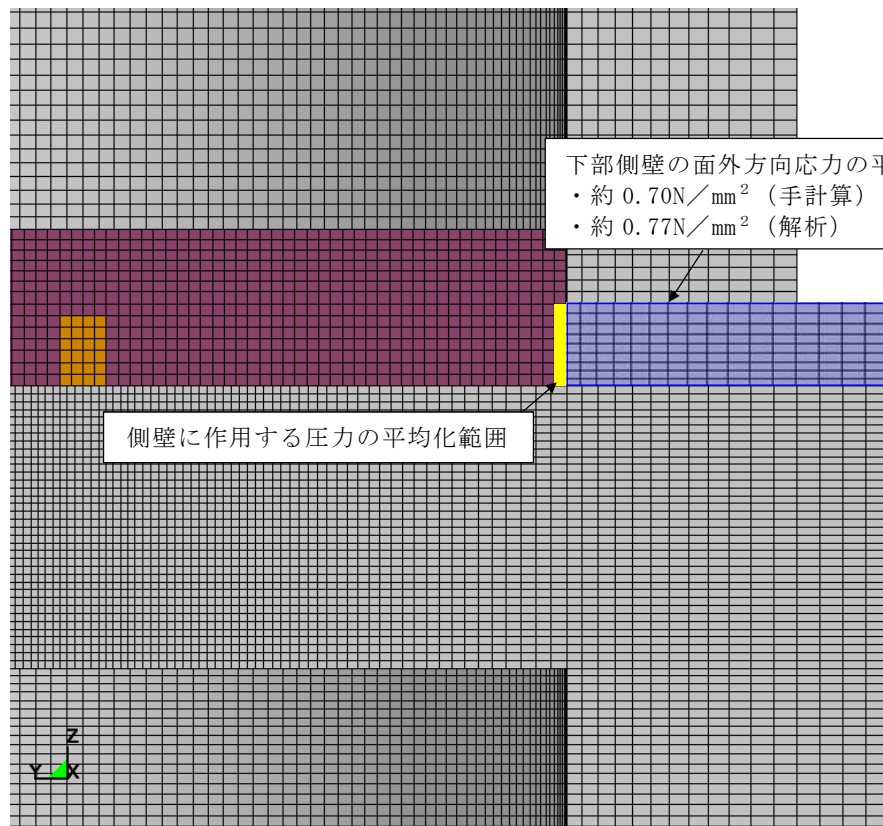
※凡例の括弧内の数値は床スラブ中心からの距離

第 1 図 床スラブに作用する圧力の分布



※凡例の括弧内の数値は床面からの高さ

第 2 図 側壁に作用する圧力の分布



第3図 手計算と解析結果の比較 (下部側壁)

## S E後のコンクリートの残留ひび割れの影響（参考）

## 1. はじめに

S Eを経験したペデスタル躯体に生じる残留ひび割れ幅を算定し、ペデスタルの水密性（ひび割れからの漏えい）の観点での影響を検討する。

## 2. 評価方法

## (1) 評価基準

評価基準については、原子力施設における建築物の維持管理指針・同解説（（社）日本建築学会，2015）において、水密性の観点から補修の検討が必要となるひび割れ幅として0.2 mmが示されていることより、これを参考に評価基準を0.2mmと設定する。

## (2) 残留ひび割れ幅の算定

残留ひび割れ幅は、LS-DYNAコードによるSE解析終了時刻における鉄筋の軸方向の引張応力状態により、コンクリート標準示方書〔設計編〕（（社）土木学会，2012）のひび割れ幅の計算式を用いて算定する。

鉄筋コンクリート部材に曲げモーメントが作用した場合、曲げモーメントの増加と共にひび割れが発生し、その本数が増加することでひび割れ間隔が小さくなっていく。しかし、曲げモーメントがある程度以上大きくなると、新たなひび割れが発生しなくなる状態となる。この時、鉄筋コンクリートのひび割れ幅 ( $W_{cr}$ ) は、一般的に(1)式で表すことができ、鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅は、最大ひび割れ間隔に、ひび割れ間のコンクリートと鉄筋のひずみ差を乗じた値として与えられることになる。

$$W_{cr} = \int_0^{2l_{cr}} (\varepsilon_s - \varepsilon_c) dx \cdots (1)$$

ここで、

- $2l_{cr}$  : ひび割れ間隔  
 $\varepsilon_s - \varepsilon_c$  : 鉄筋とコンクリートのひずみ差

これを基に、コンクリート標準示方書〔設計編〕（（社）土木学会，2012）では、鉄筋のかぶりや鋼材の表面形状等を考慮し、(2) 式のように示されている。

$$W_{cr} = 1.1k_1k_2k_3\{4c + 0.7(C_s - \phi)\} \left( \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right) \cdots (2)$$

ここで、

- $k_1$  : 鉄筋の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数（－）  
 $k_2$  : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数で(3)式による  
 $k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7 \cdots (3)$   
 $f'_c$  : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $k_3$  : 引張鋼材の段数の影響を表す係数で(4)式による  
 $k_3 = \frac{5(n+2)}{7n+8} \cdots (4)$   
 $n$  : 引張鋼材の段数（－）  
 $c$  : かぶり (mm)  
 $C_s$  : 鋼材の中心間隔 (mm)  
 $\phi$  : 鋼材径 (mm)  
 $\sigma_{se}$  : 鋼材位置のコンクリートの応力が0の状態からの鉄筋応力度の増加量 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $E_s$  : 鉄筋のヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $\varepsilon'_{csd}$  : コンクリートの収縮及びクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値（－）

(1) 式及び(2) 式よりSEによりペDESTAL躯体に生じる残留ひび割れ幅を算出する。

$$W = 2l_{cr} \left( \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right) \cdots (5)$$

各項目の数値を下表に示す。

項目	数値
$k_1$ : 鉄筋の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数 (異形鉄筋)	1.0
$f'_c$ : コンクリートの圧縮強度	22.06 N/mm <sup>2</sup>
$n$ : 引張鋼材の段数	2 (側壁) 4 (床スラブ)
$c$ : かぶり	130mm (側壁) 130mm (床スラブ)
$C_s$ : 鋼材の中心間隔	160mm (側壁) 96mm (床スラブ)
$\phi$ : 鋼材径	38mm (側壁) 25mm (床スラブ)
$E_s$ : 鉄筋のヤング係数	$2.05 \times 10^5$ N/mm <sup>2</sup>
$\varepsilon'_{csd}$ : コンクリートの収縮及びクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値	$150 \times 10^{-6}$

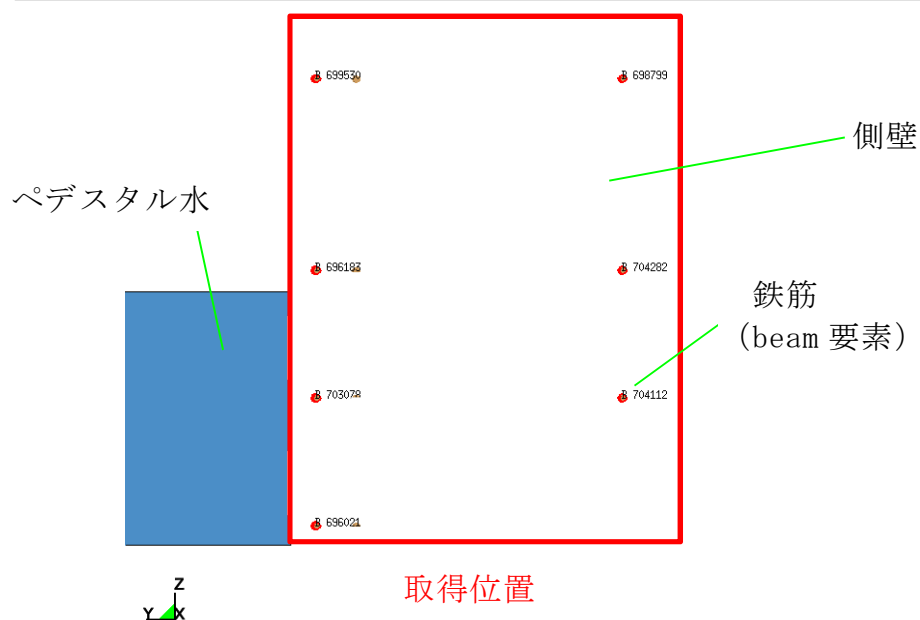
### 3. 評価結果

第1図及び第2図に解析終了時刻における鉄筋の軸方向引張応力状態に基づき算定した、側壁部及び床スラブ部での残留ひび割れ幅を示す。取得位置での残留ひび割れ幅の最大値は側壁部で約0.05mm、床スラブ部(最下段鉄筋)で約0.13mmであり、いずれも評価基準値0.2mmを超えていない。

### 4. まとめ

LS-DYNAコードによるSE解析の結果からSE後のペDESTAL躯体に生じる残留ひび割れ幅を算定した。その結果、残留ひび割れ幅の評価結果は評価基準を満足することから、SE後も水密性の観点で問題となる残留ひび割れは生じない。

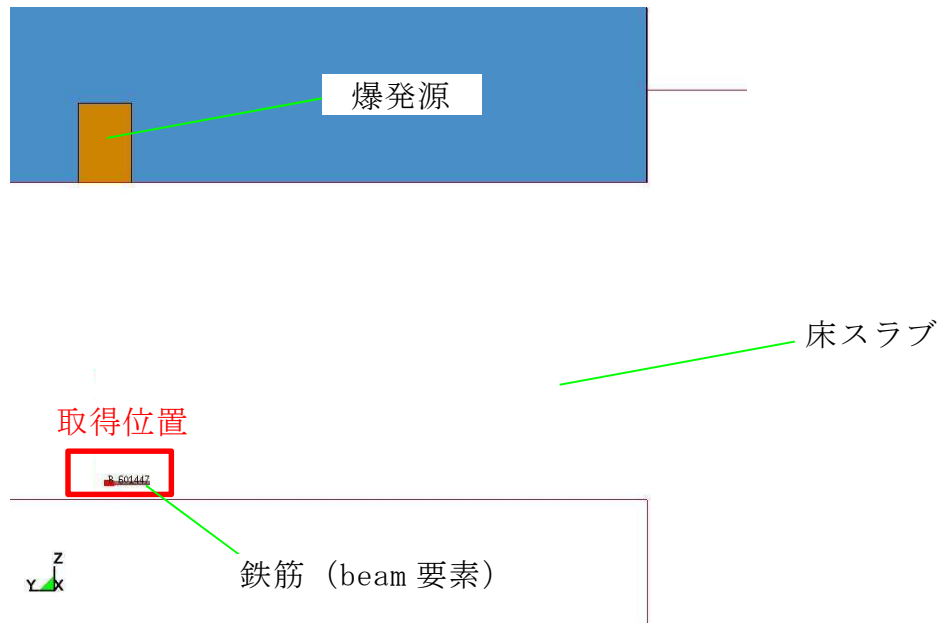
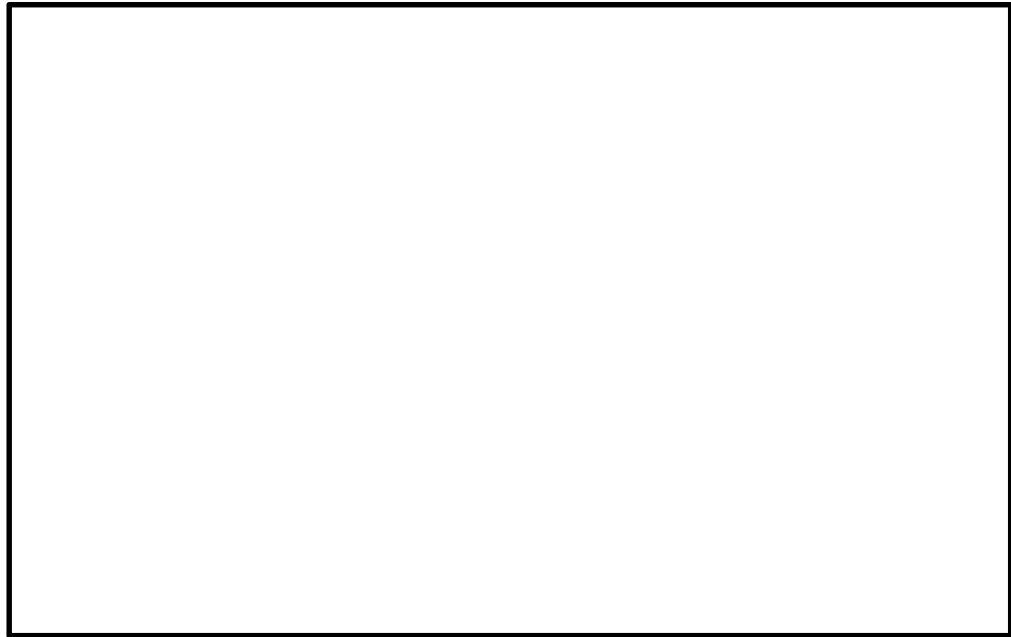




取得位置	残留ひび割れ幅 [mm] ※
B699530	約 0.04
B698799	約 0.04
B696183	約 0.04
B704282	約 0.04
B703078	約 0.04
B704112	約 0.04
B696021	約 0.05

※解析終了時刻における鉄筋の軸方向引張応力より算定

第 1 図 側壁部の鉄筋位置での残留ひび割れ幅



取得位置	残留ひび割れ幅 [mm] ※
B601447	約 0.13

※解析終了時刻における鉄筋の軸方向引張応力より算定

第 2 図 床スラブ部の鉄筋位置での残留ひび割れ幅