

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	PS-2-10 改3
提出年月日	平成29年6月2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6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.	<u>R P V 破損時のデブリの冠水評価について……………</u>	<u>添付 2-1</u>
別添 1	<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 2-6</u>
別添 2	<u>粒子化割合の算出……………</u>	<u>添付 2-8</u>
別添 3	<u>デブリの拡がりに関する不確かさについて……………</u>	<u>添付 2-9</u>
別紙 1	<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 2-17</u>
別紙 2	<u>P D S 実験について……………</u>	<u>添付 2-23</u>
別紙 3	<u>主要解析条件……………</u>	<u>添付 2-27</u>
別添 4	<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 2-28</u>
添付 3.	<u>R P V 破損後の注水開始時間について……………</u>	<u>添付 3-1</u>
別添 1	<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 3-7</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.	<u>溶融デブリによる M C C I 侵食量評価について……………</u>	<u>添付 5-1</u>
別添 1	<u>Z r O₂ 耐熱材の侵食開始温度の設定について……………</u>	<u>添付 5-3</u>
別添 2	<u>不確かさを考慮したコリウムシールド侵食量評価……………</u>	<u>添付 5-5</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
別添 1	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	添付 7-6
別紙	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	添付 7-10
別添 2	ペDESTAL排水設備対策について	添付 7-13
別紙	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	添付 7-24
参考 1	ボトムドレンL O C Aを想定した場合の排水評価	添付 7-35
参考 2	ペDESTAL床ドレンサンパ改造に伴う、位置を特定できない漏えい水の検知性について	添付 7-40
別添 3	ペDESTAL内に設置する計器について	添付 7-41
別添 4	ペDESTAL内計器の設置概念について	添付 7-48
添付 8.	溶融デブリによる熱影響評価について	添付 8-1
別添 1	デブリからの伝熱によるペDESTALの温度評価	添付 8-5
別添 2	R P V支持に必要なペDESTAL側壁厚さ評価	添付 8-16
別添 3	デブリ保持に必要な床スラブ厚さ評価	添付 8-21
別添 4	デブリ保持に必要な床スラブ鉄筋量評価	添付 8-23
別添 5	熱影響を考慮した側壁コンクリートの構造評価	添付 8-26
別添 6	熱影響を考慮した床スラブのコンクリート及び鉄筋の構造評価	添付 8-30
別添 7	鉄筋コンクリート内に発生する熱応力の取り扱いについて	添付 8-34
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>	
	添付 12-1
別添 1	<u>側壁の終局面外せん断応力度</u>	添付 12-12
別添 2	<u>床スラブの終局面外せん断応力度</u>	添付 12-15
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 12-18
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 12-30
参考 1	S E 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
参考 2	<u>解析コードにおけるコリウムシールドの模擬について</u>	参考 2-1

添付 2. 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_{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 (別添 1 参照)

Φ_{ent} : Ricou-Spalding 相関式に基づく粒子化割合 [0.171] (別添 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_{debrl} 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 800kW/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考慮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（別添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（別添4参照）

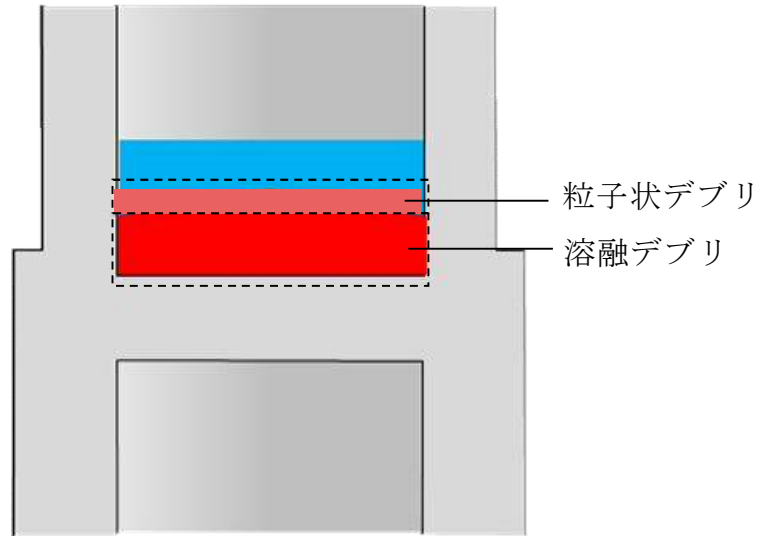
ペDESTAL 内に設置された機器ドレンサンプは、デブリ落下時には溶融し

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。

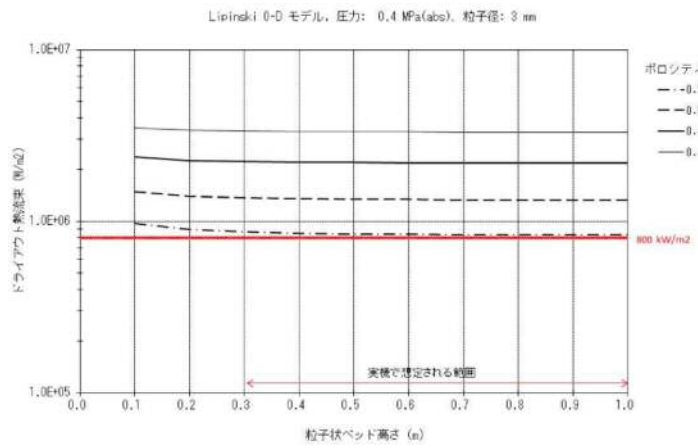
新設する機器ドレンサンプの体積を既設と同等として評価した結果、水プール水位は約 58cm となった。水位低下量は、過渡事象の場合は約 37cm、L O C A 事象の場合は約 48cm であり、デブリの冠水が維持されることを確認した。

7. まとめ

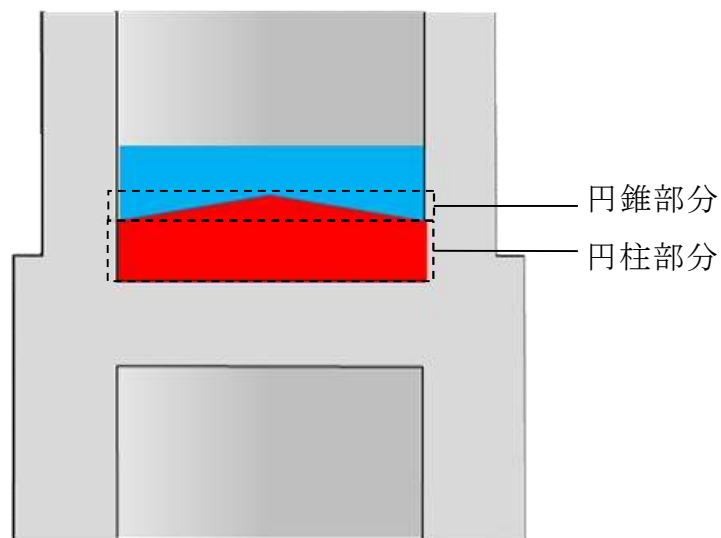
以上の評価から、過渡事象及びL O C A 事象いずれにおいても、R P V 破損から 7 分の間において、デブリの冠水状態が維持されることを確認した。



第1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

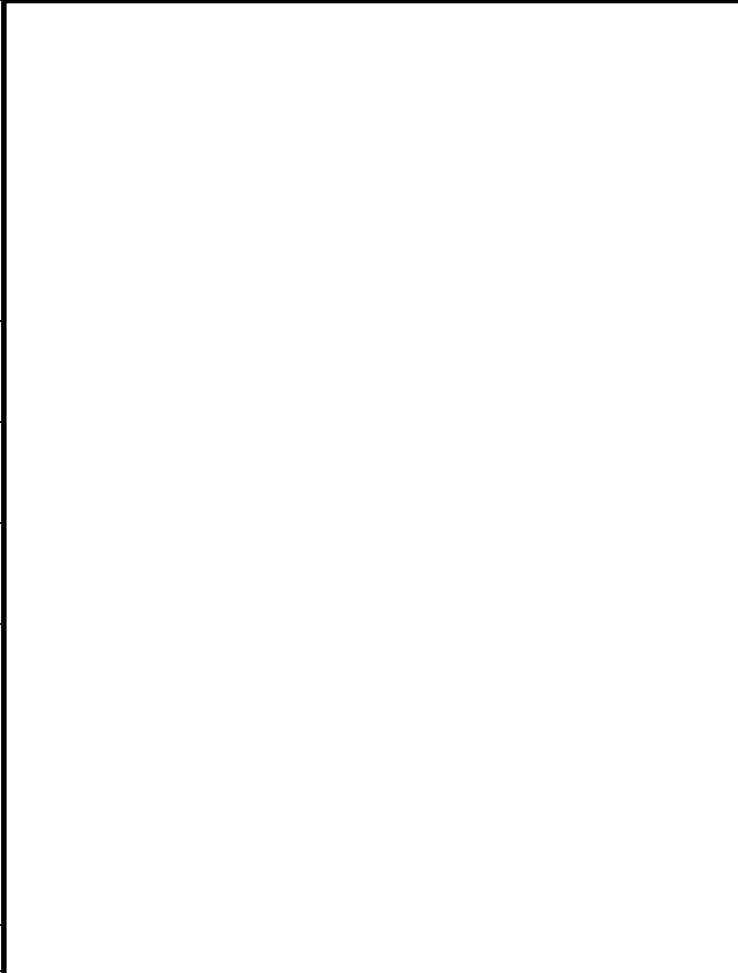


第3図 デブリ堆積形状 (不確かさ考慮)

デブリとして考慮するペDESTAL内構造物について

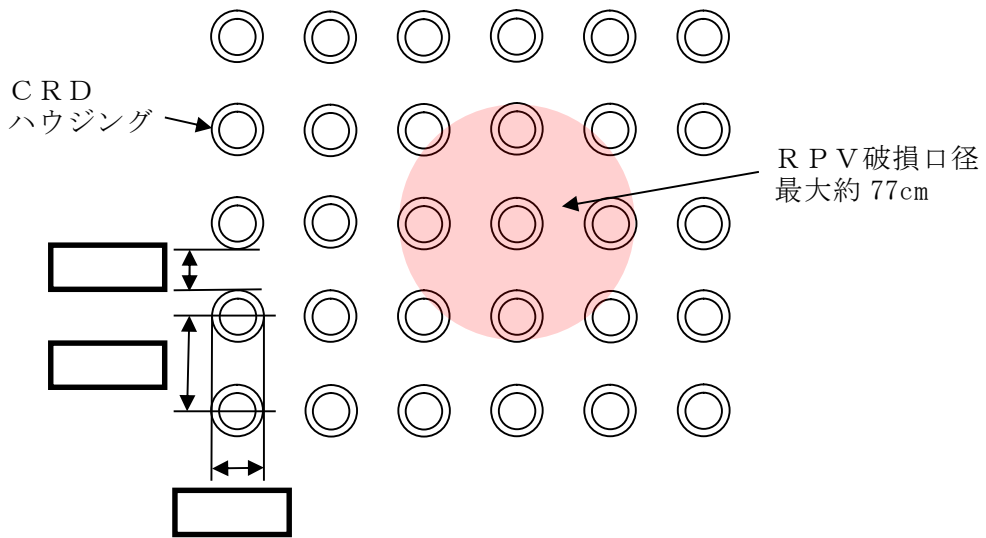
デブリ堆積高さの計算においては、第1表及び第2表に示すペDESTAL内構造物の総体積を保守的に切り上げ、として考慮した。なお、逸出するCRD本数として、MAAP解析結果におけるRPV破損口径の最大値より、デブリとなり得る最大本数として9本を設定し、総体積を算定している。

第1表 デブリとして考慮したペDESTAL内構造物（既設）

構造物	体積[m ³]	外観図
ターンテーブル (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)		
CRDハウジング (9本)		
CRD機構 (9本)		
CRDハウジングサポート		
その他 (ケーブル, サポート, 配管等の構造物)		
合計		

第2表 デブリとして考慮したペDESTAL内構造物（新設）

構造物	体積[m ³]
ペDESTAL水位計	
ペDESTAL水温計	
機器ドレンサンプ（配管等含む）	
床ドレンサンプ配管等	
コリウムシールド支持構造物（ライナ含む）	
合計	



第1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、

Φ_{ent} : 粒子化割合 [-]

E_0 : エントレインメント係数 [-]

ΔH_{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]

ρ_{dj} : ジェット密度 [kg/m³]

ρ_w : 水密度 [kg/m³]

評価条件は以下のとおり。

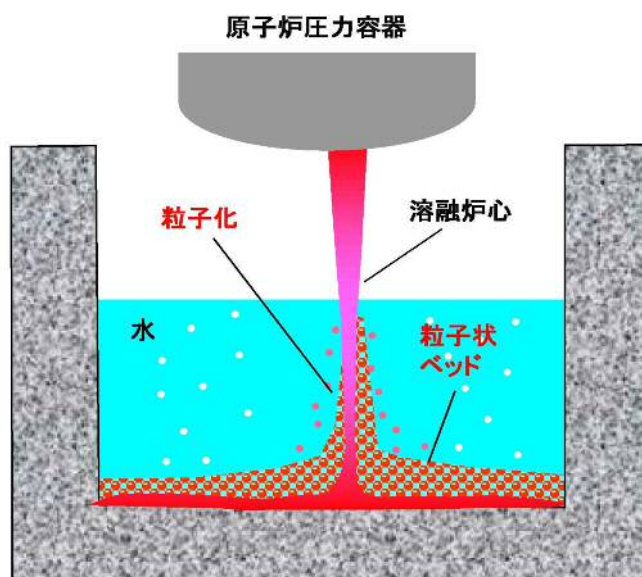
項目	設定値	設定根拠
ペDESTAL水位	1m	対策後の水位
デブリ密度	<input type="text"/>	MAAP 計算結果
初期デブリジェット径	0.15m	CRD 案内管径
エントレインメント係数	<input type="text"/>	MAAP 推奨範囲の最確値

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、残りが溶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ッ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、溶融物の拡がり距離と粒子状ベッ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) 溶融物

PULiMS 実験では、水中での溶融物の拡がり挙動が観察されるとともに、水中での溶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。なお、表面のSUS板が溶融した場合においても、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（別紙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	熔融物	UO ₂ -ZrO ₂ -SUS 等	Bi ₂ O ₃ -WO ₃	-
	熔融物重量[kg]	約 300×10 ³	約 47	約 0.16×10 ⁻³
	熔融物融点[K]		1,143	-
	熔融物過熱度[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 ³	約 40	約 1.3×10 ⁻³
	サブクール度[K]		約 23	
熔融物冷却材中挙動	L/L _{br} (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
熔融物床面上挙動	熔融物密度[kg/m ³]		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	ZrO ₂ (表面に 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（別紙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リング効果により、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。

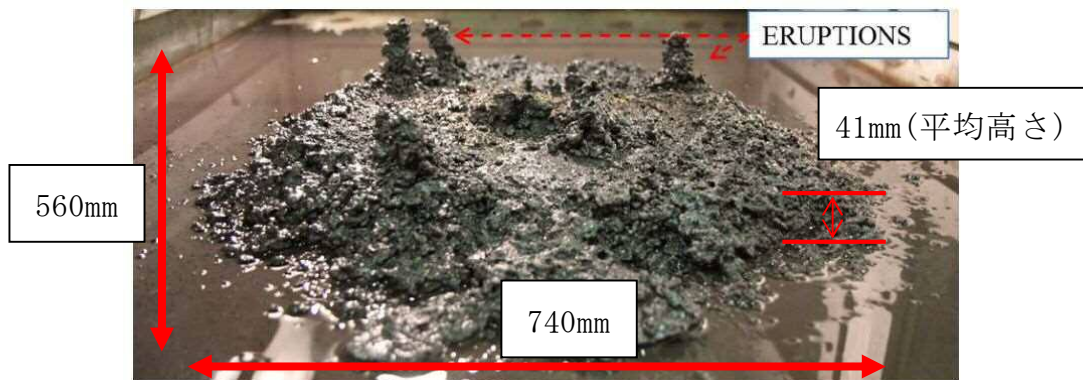
第 2 表 PULiMS 実験条件と結果

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

Parameter	PULiMS tests				
	E1	E2	E3	E4	E5
Melt material	Bi ₂ O ₃ -WO ₃	B ₂ O ₃ -CaO	Bi ₂ O ₃ -WO ₃	Bi ₂ O ₃ -WO ₃	ZrO ₂ -WO ₃
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 _{sol} , °C	870	1027	870	870	1231
T _{liq} , °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.

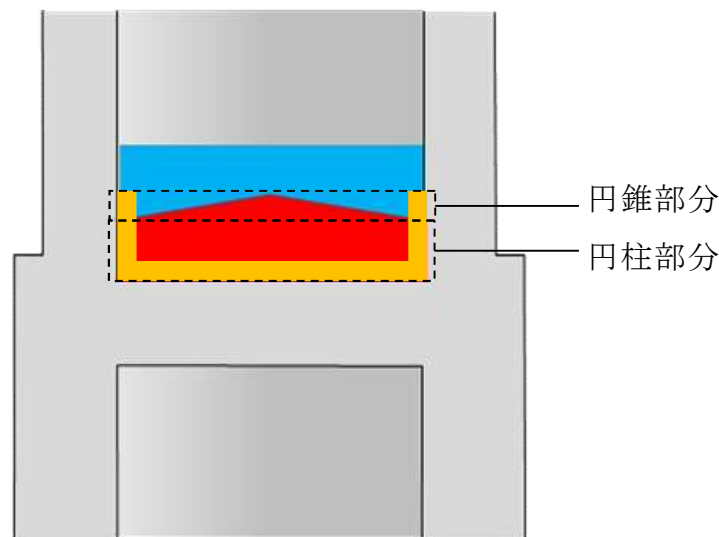
Parameter	Exploratory PULiMS tests			
	E1	E3	E4	E5
Melt release time, (sec)	10	15	12	~8.7
Total size $x \times y$, mm	460x440	~750x750	740x560	-
Cake size $x \times y$, mm	~430x320	~750x750	711x471	~400x420
Max debris height, mm	93	unknown	106	50
Area averaged debris bed height, mm	31	~30	30	22
Volume 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 ²	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（別紙 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。

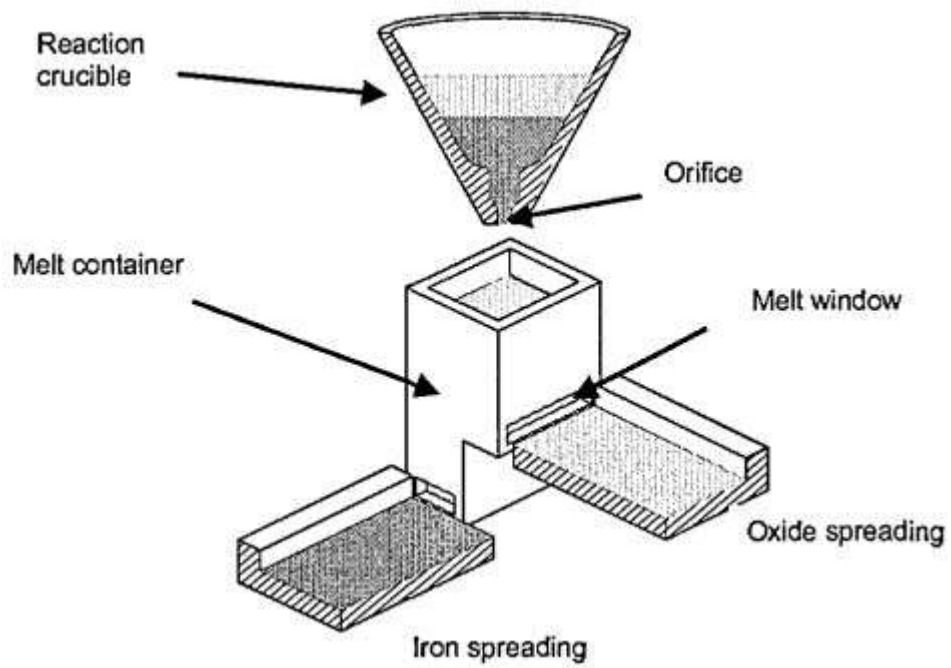
EPR コアキャッチャの溶融物拡がりに関わる実験

CEA/DRN/DTP で行われた CORINE 実験^[1]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^{[2][3][4]}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は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。

仏原子力・代替エネルギー庁（CEA）で実施された VULCANO^{[5][6]}実験では、溶融物として酸化物溶融物が使用され、溶融物の組成、放出速度や温度、床の材質（コンクリート、セラミック）をパラメータに溶融物の拡がり実験が行われ

ている。VE-U7 実験では、酸化物溶融物（56wt%UO₂, 32wt%ZrO₂, 5wt%FeO, 2wt%CaSiO₃, 2wt%SiO₂, 1wt%Fe, 1wt%CaO, 1wt%Al₂O₃）を用いて、コンクリート床とセラミック（高密度ジルコニア）床での拡がりを実験している。実験装置を第5図に示す。装置の中央にマグネシア煉瓦の分離板を設置し、コンクリート床とセラミック床に40.8kgの酸化物溶融物を4.3kg/sの速度で同時に放出する条件となっている。両者の拡がり結果を第6図に示す。7.7秒間はほぼ同じ拡がり挙動を示しており、その後はセラミック床で若干拡がりが継続する結果となっている。



第 1 図 KATS 実験装置の概要図 [2]



(1D)



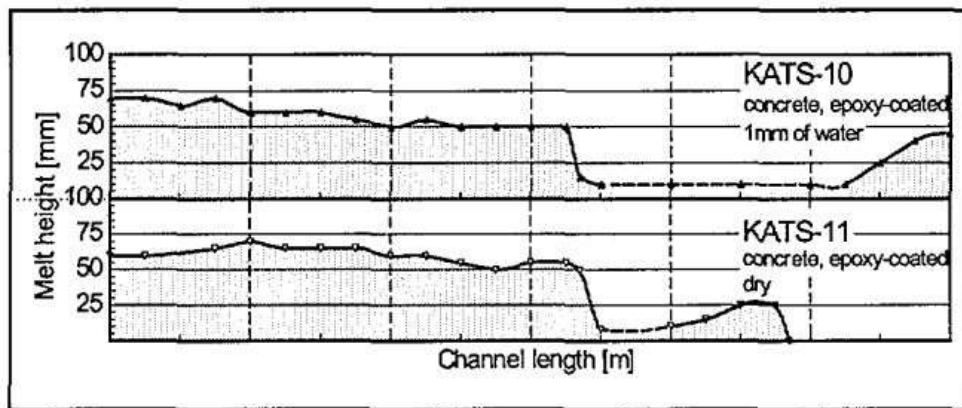
(2D)

第 2 図 KATS 実験の 1D と 2D の拡がり形状の写真 [3]

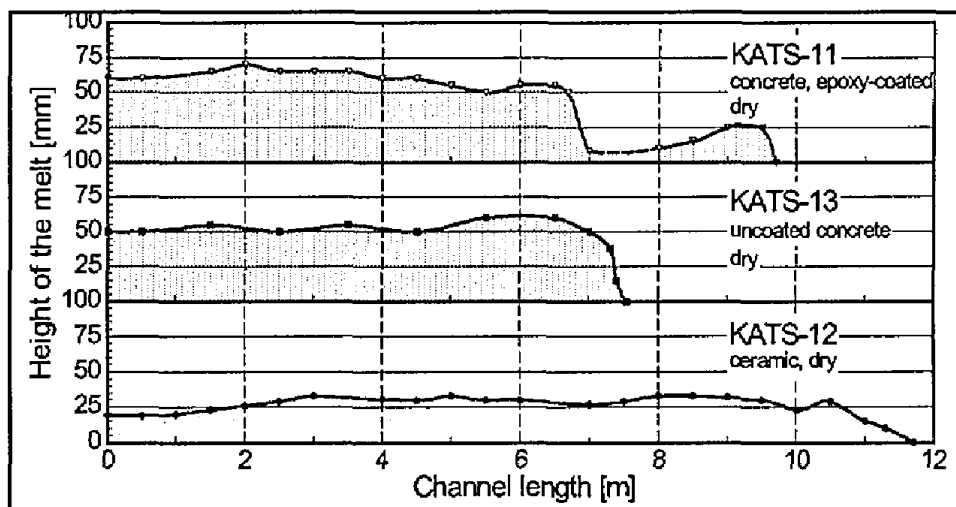
第 1 表 KATS 実験条件と拡がり距離（酸化物溶融物，1D 拡がり）^[2]

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

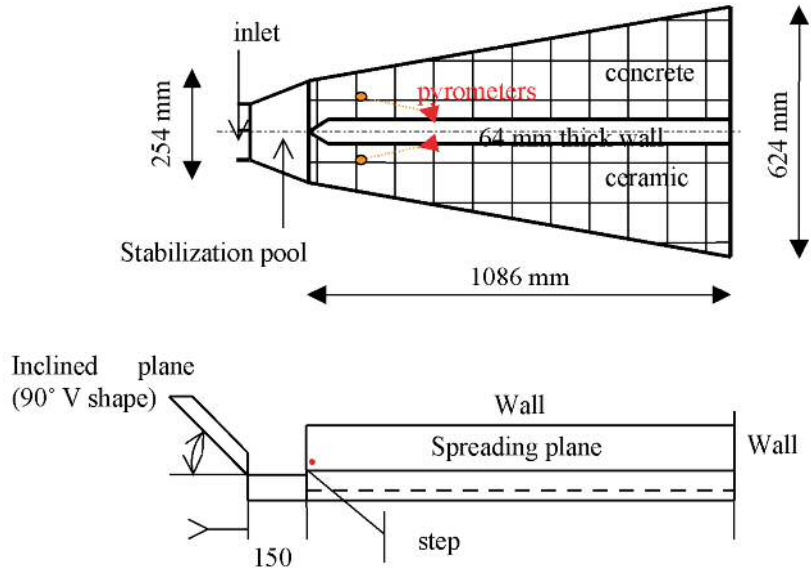
*) Cordierite (Al₂O₃ 37 wt%, SiO₂ 52 wt%, MgO 6,5 wt%)



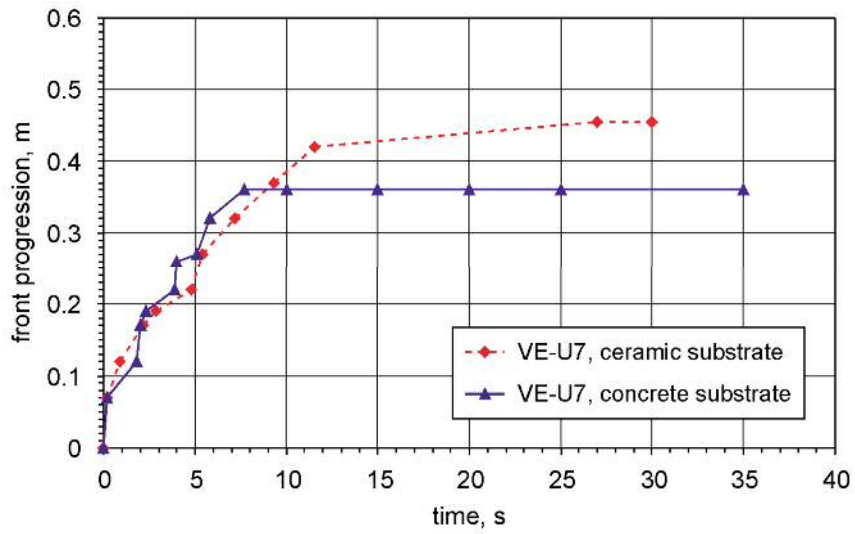
第 3 図 KATS 実験の水の有無の影響（酸化物溶融物，1D 拡がり）^[2]



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



第 5 図 VULCANO 実験装置の概要図^[6]



第 6 図 VULCANO 実験の床の材質の影響^[6]

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).
- [5] C. Journeau, et al., "Ex-Vessel corium spreading: result from the CULCANO spreading tests," Nucl. Eng. Design, 223 75-102 (2003).
- [6] C. Journeau, et al., "The VULCANO VE-U7 Corium spreading benchmark," Progress in Nuclear Energy, Vol. 48, p215-234, 2006.

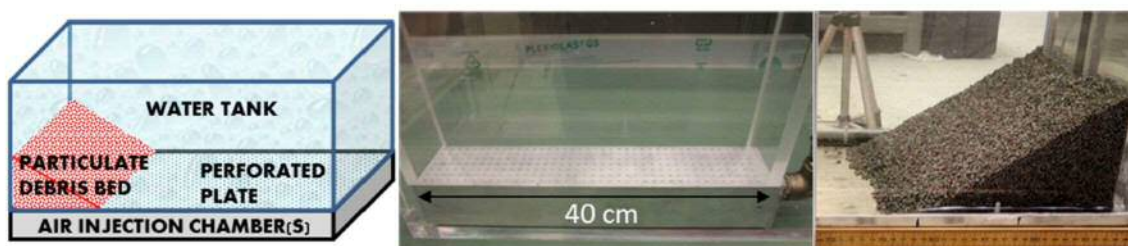
PDS 実験について

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。

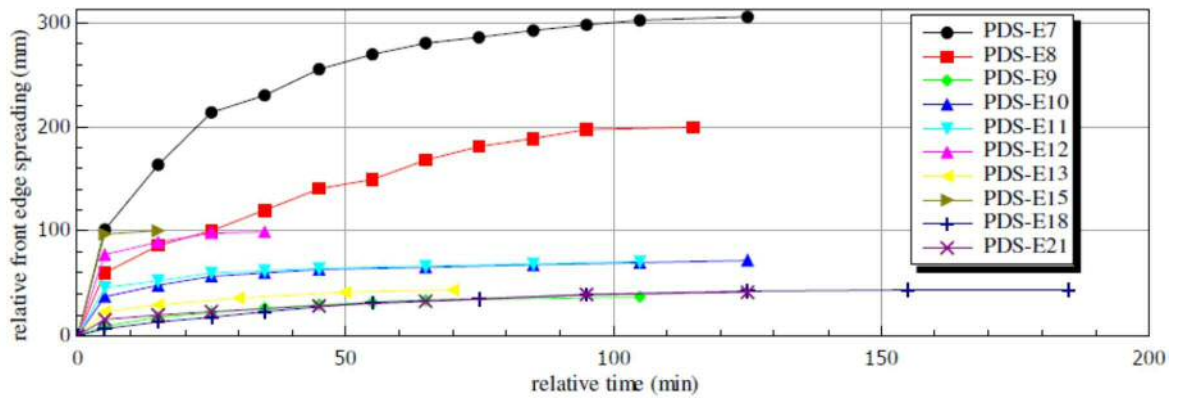
第 1 表 PDS 実験におけるパラメータ設定

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)

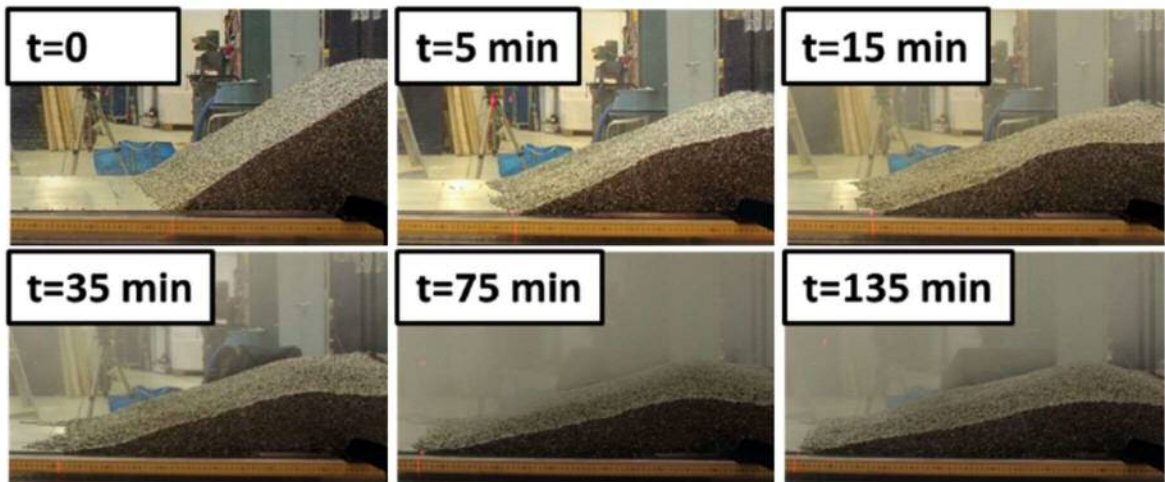
3. 実験結果

(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 ³)				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.

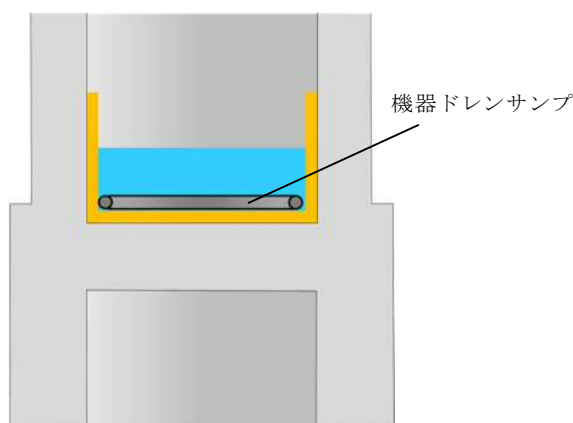
主要解析条件 (RPV 破損後のデブリ冠水維持に関連するもの)

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 ² 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 ³ /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。

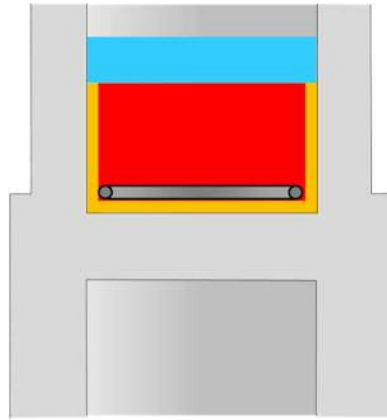


第1図 機器ドレンサンプ設置イメージ

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. M C C I 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破損による操作の判断パラメータの考え方

炉心損傷後に原子炉へ注水されない場合、熔融炉心が原子炉压力容器の下部プレナムに落下（リロケーション）し、その後R P Vが破損することとなるが、リロケーション後のR P V破損のタイミングには不確かさが存在する。R P V破損後は、ペDESTALにデブリが落下することにより、格納容器圧力が上昇及びペDESTAL水が蒸発することから、格納容器スプレイ及びペDESTAL注水を実施するために、即座にR P V破損を判断する必要がある。

このため、R P V破損前に、R P V破損の可能性（R P V水位低下、下部プレナムへの熔融炉心落下）を検知できる【破損徴候パラメータ】によって、R P V破損の徴候を検知し、その後R P V破損に至るまでの間はR P V破損を検知可能なパラメータ【破損判断パラメータ】を継続的に監視することによって、R P V破損判断の迅速性向上を図ることとする。

なお、従来の非常時運転手順書Ⅲ及びアクシデントマネジメントガイドでは、R P V破損による操作の判断パラメータとして、破損徴候パラメータ及び破損判断パラメータ以外に破損判断の参考パラメータ（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）を定め、パラメータの挙動から総合的にR P V破損を判定することとしていた。しかし、R P V破損後のデブリ落下を直接的に検知できる計器をペDESTALに設置することにより、R P V破損検知の確実性が向上することから、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である参考パラメータは、迅速な判断に支障を来す可能性があることから、R P V破損の判断パラメータから除外する。

2. 個別パラメータ設定の考え方

破損徴候パラメータ及び破損判断パラメータに用いるパラメータは、一つのパラメータの変化では、他の事象と同様の傾向を示すこともあるため、複数のパラメータの変化によって検知することとする。破損徴候のパラメータ、破損判断のパラメータは、その際に生じる物理現象による変化量が比較的多く、かつ、物理現象を直接的に捉えるパラメータを選定する（第1表）。

なお、R P V破損判断の迅速性を確保する観点から、これらパラメータは中央制御室で確認できるものから選定した。

①過渡事象

【破損徴候パラメータ】

- ・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（第1図）の指示値が「300℃到達」

【破損判断パラメータ】

- ・ペDESTAL水温の「上昇」又は「指示喪失」
- ・ドライウェル圧力の「上昇」
- ・ペDESTAL雰囲気温度の「上昇」
- ・ドライウェル雰囲気温度の「上昇」

②L O C A事象

【破損徴候パラメータ】

- ・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（第1図）の指示値が「300℃到達」

【破損判断パラメータ】

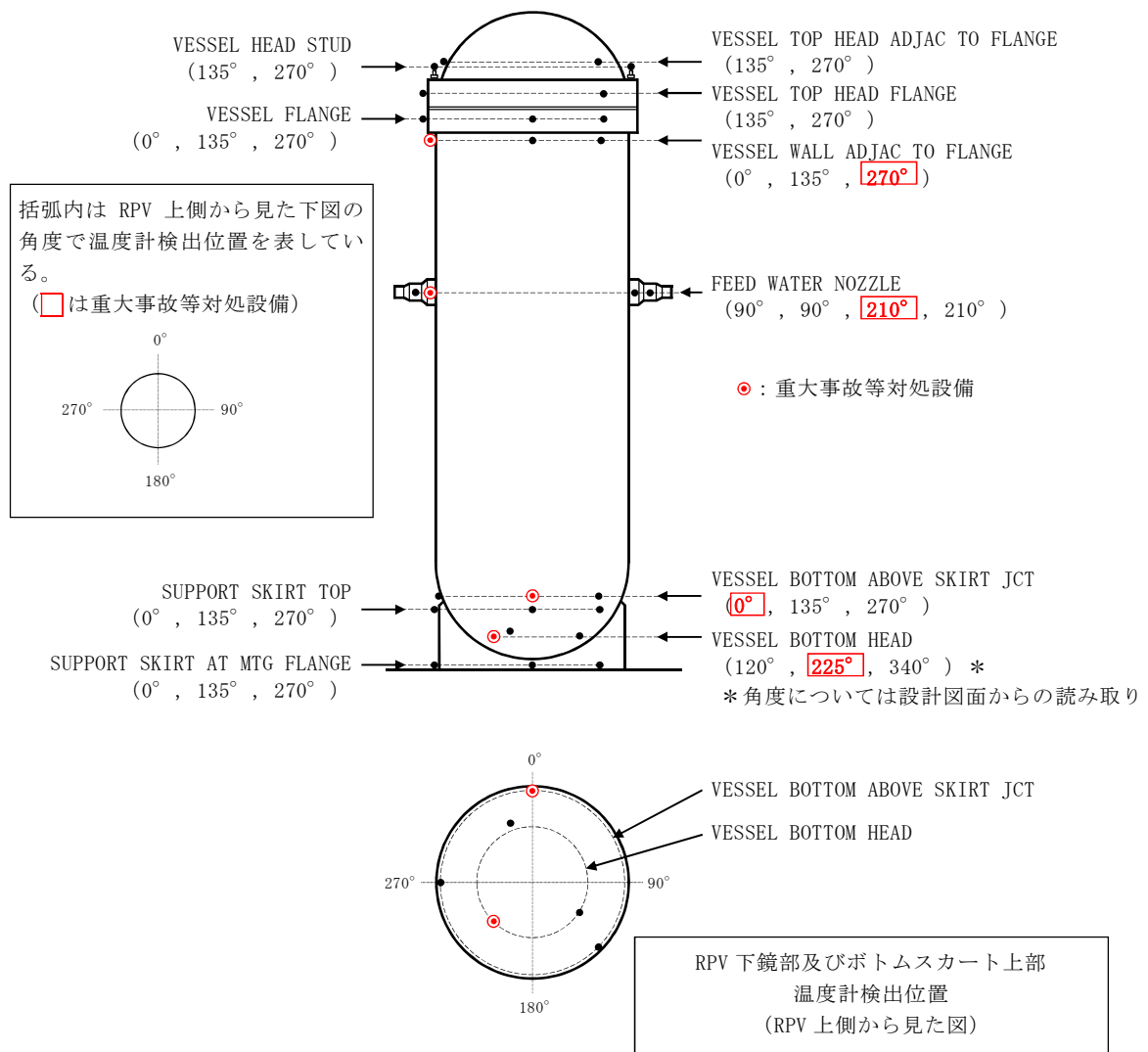
- ・ペDESTAL水温の「上昇」又は「指示喪失」
- ・ドライウェル圧力の「上昇」
- ・ペDESTAL雰囲気温度の「上昇」
- ・ドライウェル雰囲気温度の「上昇」

3. R P V破損の判断時間について

有効性評価においては、1. に示す破損徴候からの継続的な監視を前提に、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、2. に示す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、原子炉压力容器破損から 7 分後にペDESTALへの注水を開始する設定としている。

第1表 過渡事象及びLOCA時のRPV破損判断パラメータ選定の理由

パラメータ	選定の理由
【破損徴候パラメータ】	
RPV水位	RPV破損は、RPV内冷却水喪失→炉心損傷→リロケーションの後に生じるため、RPV水位が低下し喪失することにより、RPV破損の徴候を検知可能である。
制御棒位置	RPV下部に制御棒位置検出のためのケーブルが設置されており、リロケーション時に熔融炉心がケーブルに接触し、指示値が喪失することにより、RPV破損の徴候を検知可能である。
RPV下鏡部温度	リロケーション時にRPV下鏡部温度が上昇し、300℃以上になることから、RPV破損の徴候を検知可能である。なお、RPV内が300℃以上の状態は、逃がし安全弁（安全弁機能）最高吹出圧力に対する飽和温度を超えており、リロケーション前に下部プレナムに水がある状態では発生しない。
【破損判断パラメータ】	
ペDESTAL水温	RPV破損時、ペDESTAL水へのデブリ落下によりペDESTAL水温計の指示値が上昇又は喪失することから、RPV破損を判断可能である。
D/W圧力	RPV破損時、ペDESTAL水へのデブリ落下により大量の蒸気が発生し、D/W圧力が上昇することから、RPV破損を判断可能である。
ペDESTAL雰囲気温度	RPV破損時、ペDESTAL水へのデブリ落下によりペDESTAL雰囲気温度が上昇することから、RPV破損を判断可能である。
D/W雰囲気温度	RPV破損時、ペDESTAL水へのデブリ落下により大量の蒸気が発生し、D/W雰囲気温度が上昇することから、RPV破損を判断可能である。



第 58 条で重大事故等対処設備とする温度計の検出位置は代表性を考慮して RPV 上部、中部、下鏡部及びボトムスカート上部各々 1 箇所としている。

なお、東海第二発電所では下部炉心支持板で炉心を支えており、炉心損傷が進んで下部炉心支持板が崩壊すれば、全量の熔融炉心が下部プレナムに落下するとともに、下鏡部の温度が上昇し、いずれは RPV 破損に至る。このように RPV 破損前には、下部プレナムに全量の熔融炉心が落下することを考慮すると、RPV 破損の徴候を検知するには下鏡部の 1 つの温度計で十分と考えられるが、東海第二発電所では高さ方向及び径方向ともに位置的に分散された 2 箇所の温度計を重大事故等対処設備とし、RPV 破損徴候の検知性の向上を図っている。

第 1 図 RPV 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

過渡事象以外に R P V 破損に至る L O C A 事象のうち、事象進展の早い「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、破損判断パラメータは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（R P V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きない場合でも、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
【破損徴候パラメータ】				
<u>R P V水位</u>	低下	低下（喪失）	低下（喪失）	R P V水位喪失により，破損への進展の可能性（破損徴候）を検知可能
制御棒位置	—	喪失数増加	喪失数増加	制御棒位置の喪失数増加は，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，破損徴候を検知可能
<u>R P V下鏡部温度</u>	—	300℃到達	300℃到達	R P V下鏡部温度 300℃到達は，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，破損徴候を検知可能
【破損判断パラメータ】				
<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>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

※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
【破損徴候パラメータ】				
<u>原子炉水位</u>	低下	低下（喪失）	低下（喪失）	R P V水位喪失により，破損への進展の可能性（破損徴候）を検知可能
制御棒位置	—	喪失数増加	喪失数増加	制御棒位置の喪失数増加は，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，破損徴候を検知可能
<u>R P V下鏡部温度</u>	—	300℃到達	300℃到達	R P V下鏡部温度 300℃到達は，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，破損徴候を検知可能
【破損判断パラメータ】				
<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>D/W圧力</u>	上昇	上昇	上昇	同様の傾向を示す
<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

※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

添付 5. 溶融デブリによるMCCI 侵食量評価について

R P Vが破損し溶融デブリがペDESTALへ落下した場合におけるMCCI 侵食量評価を、SA解析コードMAAPにより実施している。以下にその内容を示す。

(1) 評価条件

評価条件を第1表に示す。

第1表 侵食量評価条件

項目	ベースケース	保守的ケース
対象シーケンス	過渡事象時に損傷炉心冷却に失敗し、R P Vが破損するシーケンス	大破断LOCA時に損傷炉心冷却に失敗し、R P Vが破損するシーケンス
デブリから水プールへの熱流束	800kW/m ² (圧力依存性あり)	800kW/m ² (一定* ¹)
ペDESTAL初期水位	1m	
ペDESTAL注水	R P V破損7分後から80m ³ /h	
コリウムシールド厚さ	□	
コリウムシールド侵食開始温度	2,100°C* ²	
R P V破損時の溶融デブリ温度	MAAP解析結果に基づく	

※1 侵食の不均一性等の影響を考慮して設定

※2 ZrO₂耐熱材の侵食試験結果に基づき設定 (別添1)

(2) 評価結果

評価結果を第2表に示す。MAAP評価において、ペDESTALのプール水中に落下したデブリ温度は2,100°C未満であり、耐熱性及び耐侵食性に優れたZrO₂製コリウムシールドを敷設することにより、MCCIによる侵食が生じないことを確認した。

また、不確かさ評価として、熔融デブリが均一に混合せず局所的に高温の部分が残存すると仮定した場合の評価を行い、侵食量はコリウムシールド 厚さ未満であることを確認した（別添 2 参照）。

第 2 表 侵食量評価結果

項目	ベースケース	保守的ケース
コリウムシールド侵食量 (側面)	0cm	0cm
コリウムシールド侵食量 (床面)	0cm	0cm

ZrO₂耐熱材の侵食開始温度の設定について

ZrO₂耐熱材の侵食量評価においては、耐熱材の侵食開始温度として2,100℃を設定している。その設定の考え方を以下に示す。

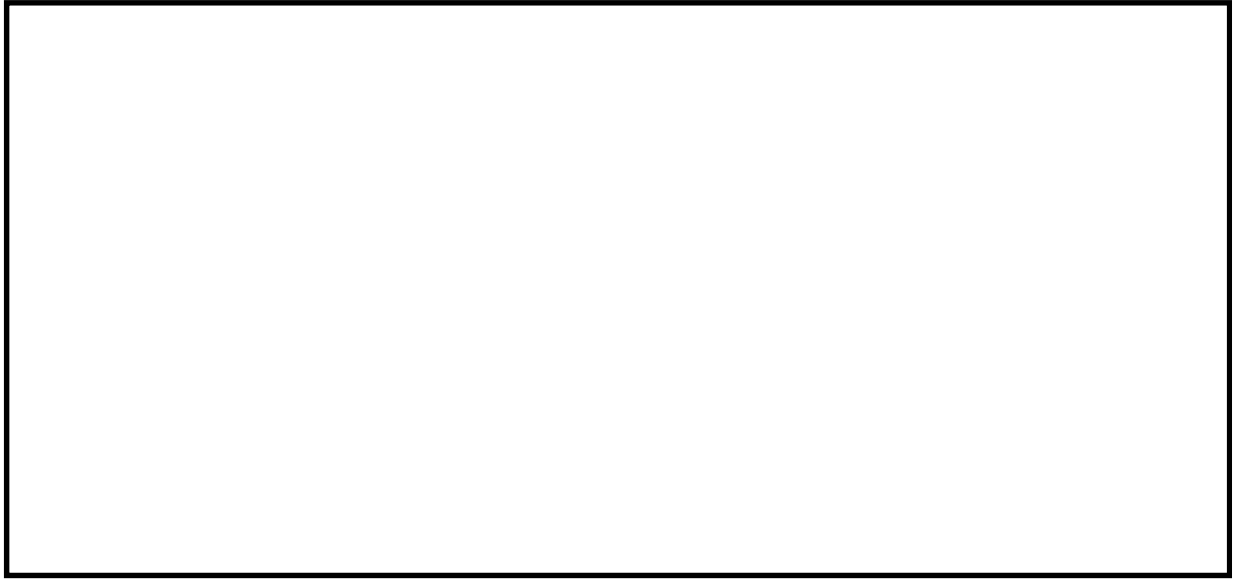
ZrO₂単体での融点は約2,700℃であるが、溶融炉心に含まれるZr等の金属との化学反応により、ZrO₂耐熱材の侵食開始温度は2,700℃より低下する。

これに対して、化学反応による耐熱材の侵食影響を確認するため、ZrO₂試験片の各種溶融金属への浸透試験が実施されており、溶融金属中のZrの割合が大きいほど耐熱材の侵食量が大きくなる傾向が確認されている。

第1図*に、極めて耐熱材の侵食が大きくなる100mol%Zrの条件で実施された侵食試験後のZrO₂耐熱材試験片の断面写真を示す。試験結果より、2,150℃以上の条件では数分で耐熱材試験片が大きく侵食されているのに対し、2,100℃では30分保持した場合でもほとんど侵食されていない。

なお、本試験は100mol%Zrという極めて厳しい条件で実施されているが、実機における溶融炉心では、UO₂、SUS及び金属-水反応で生成されたZrO₂等が含まれるため、100mol%Zrという条件は考え難く、ZrO₂耐熱材は試験条件より侵食されにくくなると考えられる。

以上より、ZrO₂耐熱材の侵食量評価においては、極めて厳しい試験条件でも侵食量がわずかであった2,100℃を侵食開始温度として設定した。



第 1 図 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。

不確かさを考慮したコリウムシールド侵食量評価

1. はじめに

MAAP 評価においては、コリウムシールドの侵食開始温度は、化学反応等の影響を考慮した保守的な温度条件として 2,100°C と設定しており、ペDESTAL 水中に落下したデブリ温度は 2100°C 未満であることからコリウムシールドは侵食されない結果となっている。しかし、熔融デブリが均一に混合せず局所的に高温の部分が残存することで、コリウムシールドが局所的に侵食される可能性も考えられる。そこで、熔融デブリの不均一性の不確かさを仮定した場合の侵食量評価を行う。

2. 解析条件

主要な解析条件を第 1 表に示す。熔融デブリは金属成分（低温）と酸化物成分（高温）の混合物であるが、熔融デブリが均一に混合せず局所的に高温の酸化物成分が残存すると仮定し、保守的に熔融デブリ全体を酸化物成分の温度で設定した解析を行う。

第1表 主要な解析条件

項目	ベースケース	備考
対象シーケンス	大破断LOCA時に損傷炉心冷却に失敗し、RPVが破損するシーケンス	保守的ケースにおける評価条件（p.添付5-1, 第1表参照）と同じ
デブリから水プールへの熱流束	800kW/m ² (一定)	
ペDESTAL初期水位	1m	
ペDESTAL注水	RPV破損7分後から80m ³ /h	
コリウムシールド厚さ	<input type="text"/>	
コリウムシールド侵食開始温度	2,100℃	
RPV破損時の溶融デブリ温度	<input type="text"/>	酸化物成分の液相線温度相当

3. 解析結果

解析の結果、侵食量は側壁で約7cm、床スラブで約9cmであり、コリウムシールドの厚さ未満の侵食量であることを確認した。

4. まとめ

不確かさとして溶融デブリが均一に混合せず局所的に高温の酸化物成分が残存すると仮定し、保守的に溶融デブリ全体を酸化物成分の温度で設定した解析を実施した結果、コリウムシールド厚さ未満の侵食量であることを確認した。なお、実機において局所的に高温の部分が生じたとしても、高温の溶融デブリと接触するコリウムシールドの範囲はわずかであり、その範囲においてもコリウムシールドの厚さ未満の侵食量であることから、コリウムシールドの健全性を損なうような侵食は発生しないと考えられる。

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

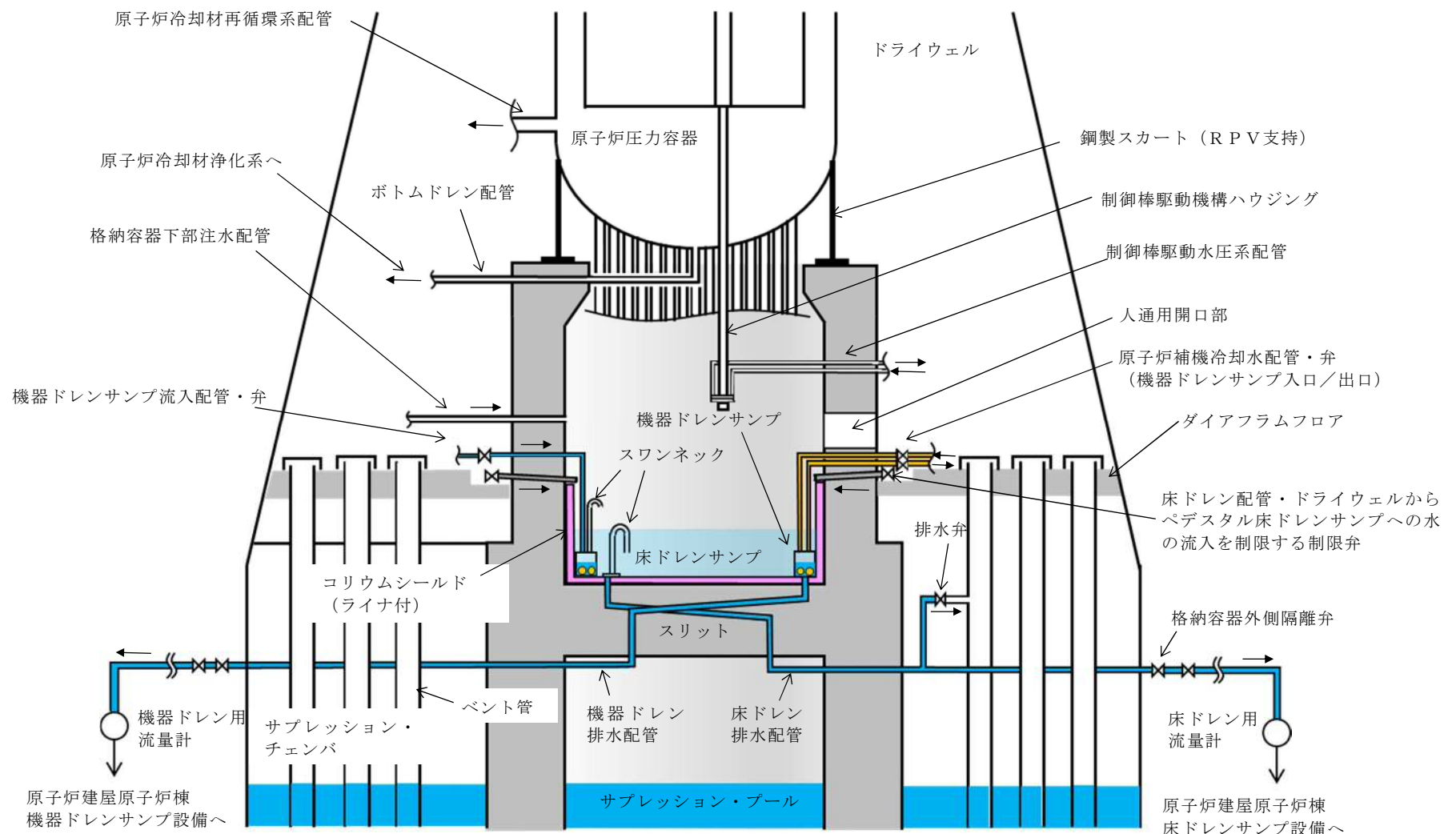
東海第二発電所のペDESTALの概要図を第1図 (a) (b) に示す。

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，ZrO₂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。

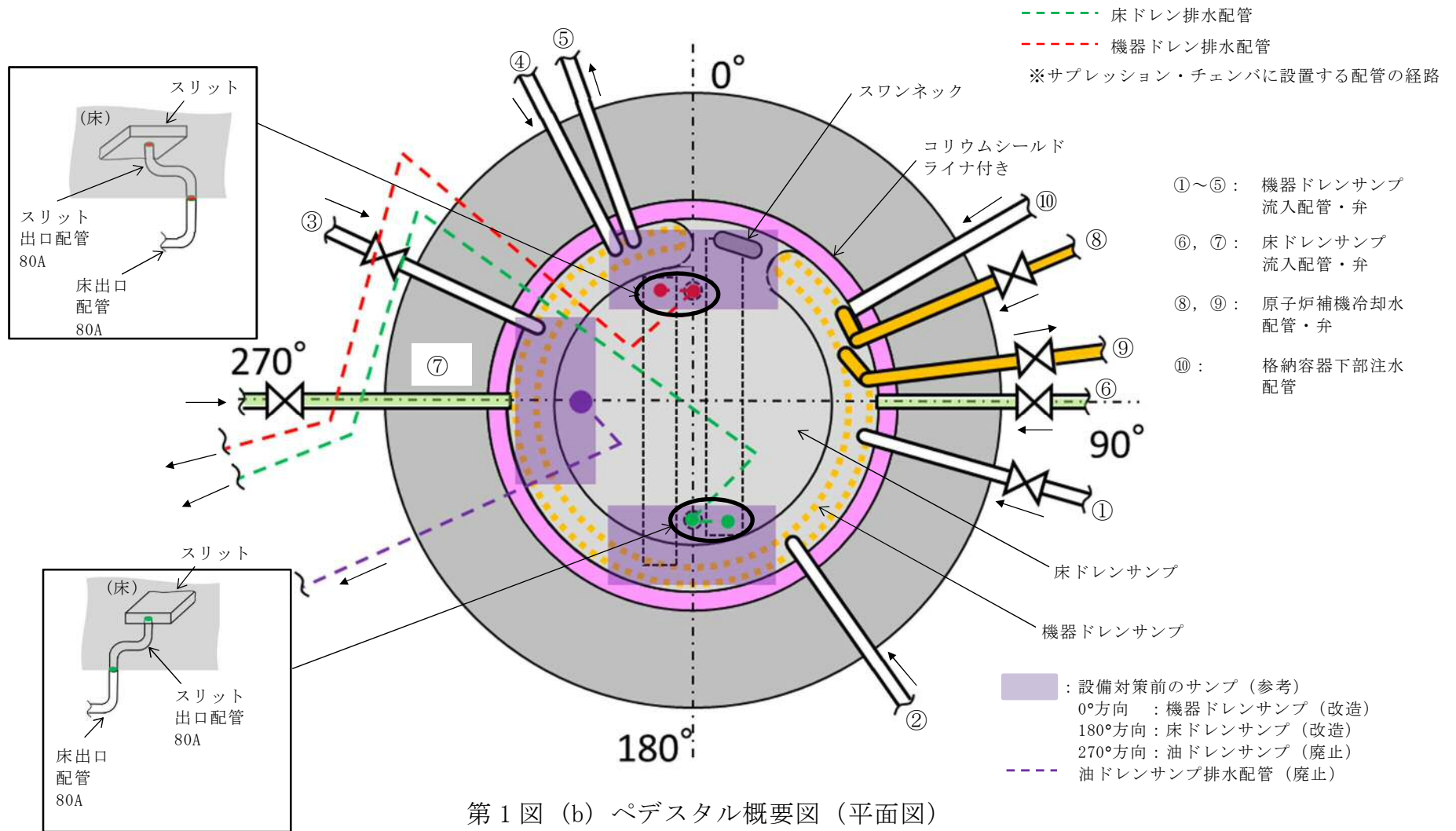
ドライウエルにて生じる床ドレン及び機器ドレン並びに機器ドレンサンプを冷却するための冷却水は，第1図 (a) (b) のようにペDESTAL側壁の貫通孔を通る配管により各ドレンサンプへ導かれる。これらの配管はコリウムシールドの側壁部より高い位置からペDESTAL内へ接続し，コリウムシールド内に堆積したデブリが配管へ流入しない設計とする。

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)



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下 (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。これに要する時間は 10 分程度 (水位 10cm 分の注水に要する時間 (約 2 分) 及び 5cm 分の排水に要する時間 (約 5 分) に余裕を加味した時間) と想定される。

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ハウジング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の溶融デブリが約30秒間でペDESTALへ全量落下する結果となっている。

現実的には、C R DハウジングはペDESTAL内において外部サポートにより支持されていることから、C R Dハウジングの逸出が生じることは考えに

くく、R P V貫通部の溶接破損によって生じた間隙からデブリが放出されるような形態になると考えられる。ただし、この場合にも、R P Vが破損するような状況においては有効性評価における想定と同様に原子炉注水機能が喪失していることが考えられ、R P V破損時にはデブリの大部分が下部ヘッドに堆積し、アブレーションによる破損口の拡大を伴いながら継続的にペDESTALへ落下するものと考えられる。

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□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□）とする水量は約81m³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。

また、R P V破損後のペDESTAL注水は80m³/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/m²一定※、伝熱面積をデブリ拡がり面積である□とすると、180m³/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ペDESTAL満水相当(水位 2.75m)までの注水を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、S Eの発生は抑制されることが考えられる。

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S Eの発生を抑制しながら、デブリの冷却を継続する。

また、R P V破損後にR P V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R P V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S Eの発生は抑制されることが考えられる。

- ・ R P VからペDESTALへの落下水はR P V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
- ・ R P VからペDESTALへの流入水のサブクール度が大きい場合、R P V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
ただし、ペDESTAL注水手順は、先述のR P V破損口の拡大が生じない場合のような、デブリが少量ずつペDESTALへ落下してくる可能性を考慮しても、S E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 ³)		M A A P 計算結果 (R P V 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 ³)	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 <input type="text"/> 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 の発生は抑制される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に、少量のデブリがペDESTALに落下し残りの大部分が R P V 内に残存する可能性や、デブリの落下速度が小さくなる可能性も考えられ、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）

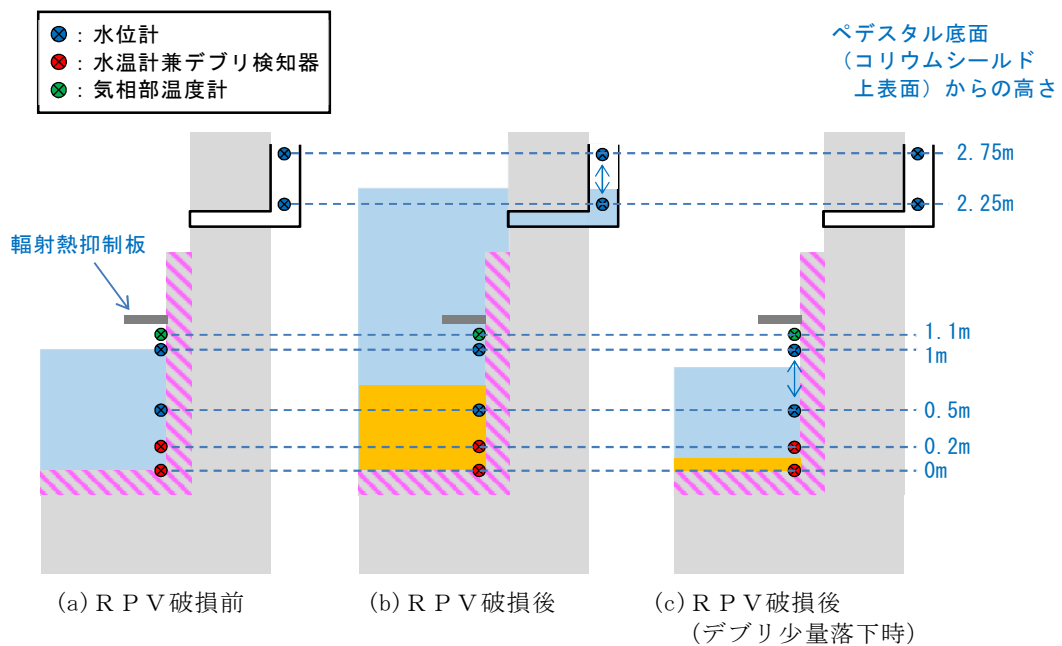
ペDESTAL満水（水深 , 約 81ton）の水を飽和温度に到達させるデブリ量は約 31ton（全体の約 11%）であり、その堆積高さは約 0.15m となる。これより、ペDESTAL底面から 0.2m 高さにデブリ検知器を設置し、R P V破損判断後においても 0.2m 高さまでのデブリ堆積が検知されない場合には、0.5m 及び約 1m 高さの水位計を用いて、水位 0.5m 未満を検知した場合に水位約 1m までペDESTALへ注水する間欠注水を行うことにより、深い水プールの形成を防止し S Eの発生を抑制する。

また、上記水位管理時においてデブリは冠水状態を維持すると考えられるが、万が一堆積形状等の不確かさによりデブリが露出する可能性を考慮し、自主設備として 1m より上部に気相部温度計を設置する。デブリ露出を検知した際は、デブリ冷却の観点でペDESTAL満水相当の水位 2.75m まで注水し、その後は(b)と同様に間欠注水を実施する運用とする^{*}。なお、気相部温度計は蒸気密度が高い水面付近（ペDESTAL底面から 1.1m）に設置するとともに、気相部温度計の上部に輻射熱抑制板を設置することにより、人通用開口部下端（ペDESTAL底面から約 2.8m 高さ）付近に設置されているターンテーブル等のペDESTAL上部にデブリが付着した際の輻射熱の影響を抑制することとする。

※：PULiMS 実験結果に基づくデブリ堆積形状の不確かさ（堆積高さと拡がり距離の比が 1 : 16）を考慮すると、水位 0.5m でデブリが露出する堆積形状は、高さ約 0.13m の円柱上に約 0.37m の円錐が堆積した形状となる。このデブリ堆積量は高さ 0.25m の円柱状に相当するた

め、ペDESTAL満水相当までの注水を実施してもペDESTAL内の水は飽和状態を維持し、SE発生は抑制される。

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、SE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

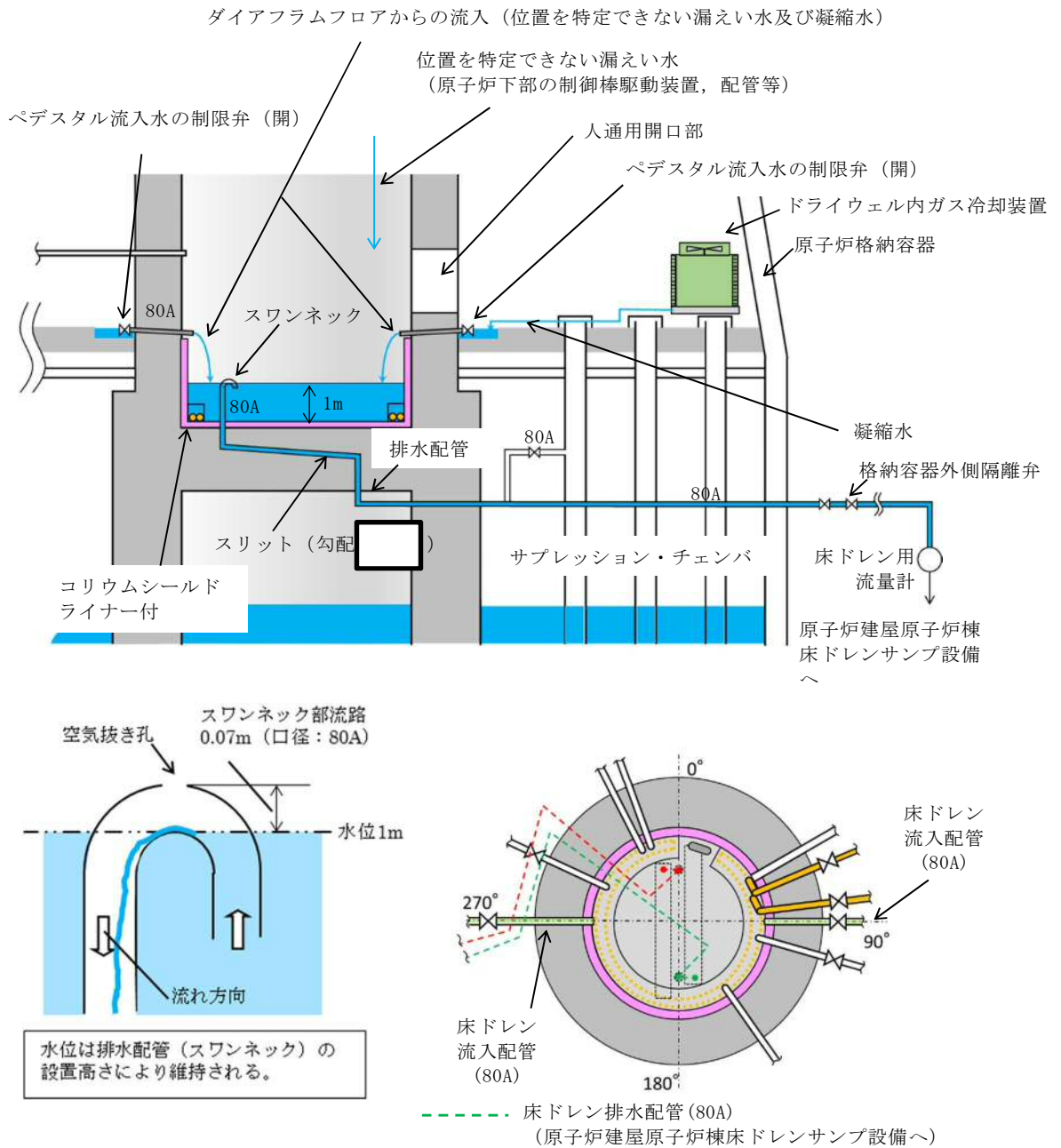
通常運転中，事故発生からR P V破損まで及びR P V破損後について，水位管理に必要な排水設備対策の方針を各々記載する。

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（以下「漏えい水」という。）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）
- ・漏えい水は，運転中に生じるドライウエル内ガス冷却装置からの凝縮水の流入によってサンプ水位は常時1mに維持されているため，サンプに流入する全量が排水され，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 $0.23\text{m}^3/\text{h}$ 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

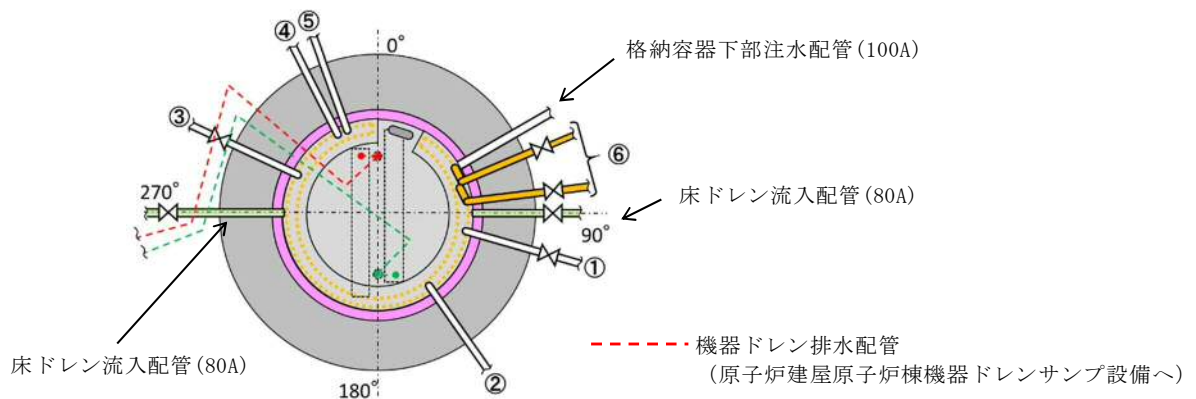
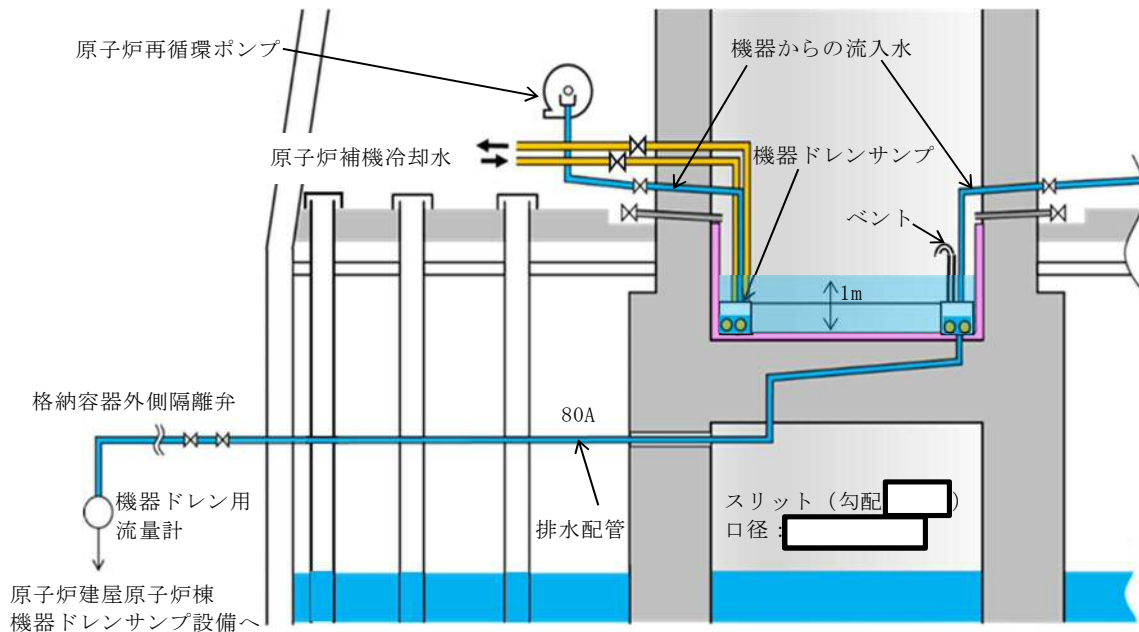
全長は約□)を短くする観点から、スリットの勾配を□に制限した設計とする。(第1図) なお、RPV破損までの排水性に対しては、スリットの勾配は影響しない。



第1図 ペダスタル床ドレンサンブ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機器ドレンサンプ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)(c)(d))
- ・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)(c)(d))

b. ペDESTALへの流入水の排出

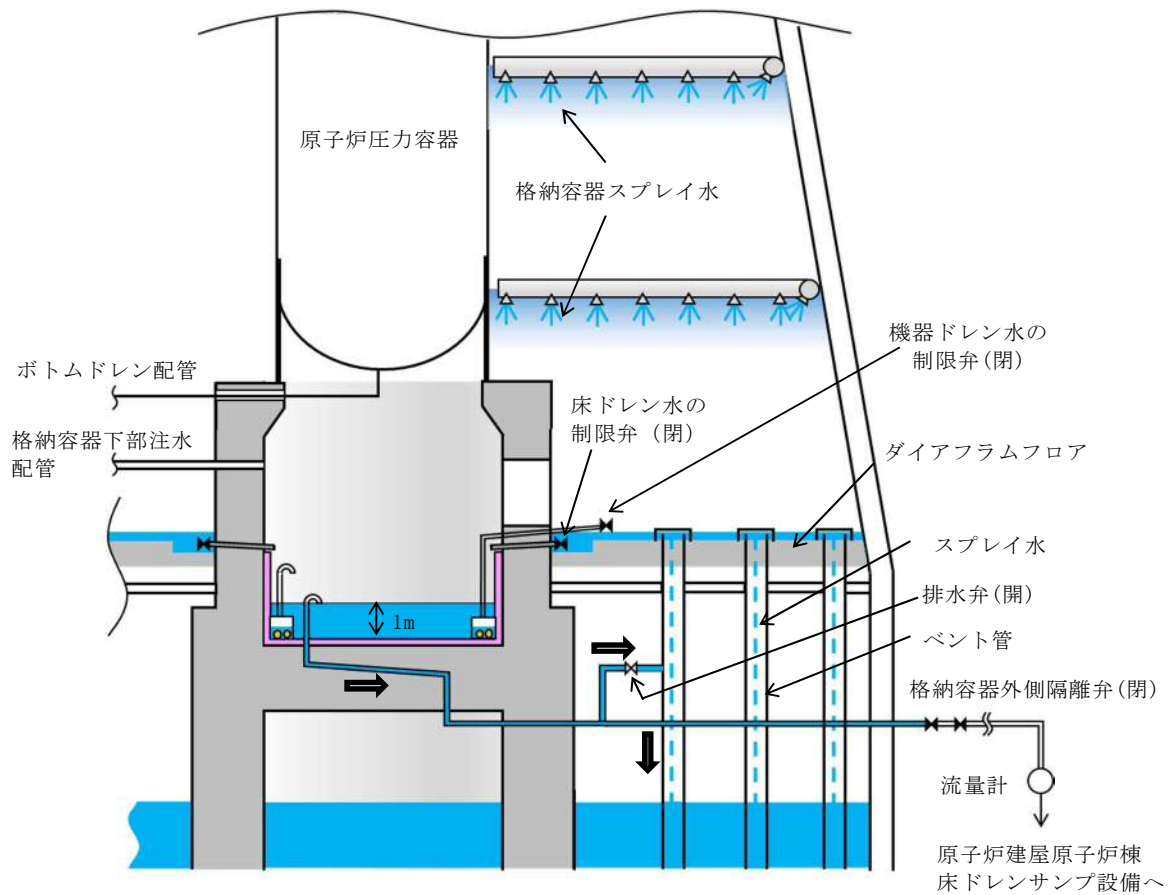
- ・事故発生により格納容器外側隔離弁は開から閉状態となり、ペDESTAL床ドレンサンプへの流入水の格納容器外への排水は遮断されるが、通常運転中から排水弁を開の状態にしておくことで、ベント管を介してサブプレッション・プールへ自然排水される設計とする。(第3図(a)(c)(d))
- ・事故時のペDESTAL床ドレンサンプへの流入水により、ペDESTAL床ドレンサンプの水位は上昇するが、R P V破損までの間に、ペDESTAL床ドレンサンプの水位が、1m まで排水可能な設計とする。(別紙)
- ・以下を考慮し、排水配管のベント管への接続高さをペDESTAL床のコンクリート表面より約 下の位置に設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

▶ 排水配管のベント管への接続高さは、サンプへの流入水の排水流量

を確保する観点からは低い方が望ましいが、スリット内部でのデブリ凝固の確実性向上の観点からは、スリット内に水を保有させるためスリットより高くする必要がある。このため、排水配管のベント管への接続高さは、排水配管の下端位置がスリット高さ方向の流路（10mm）の上端の位置になるように設置する設計とする。（第3図（a））

▶ 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（d））
- ・ 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、RPV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。

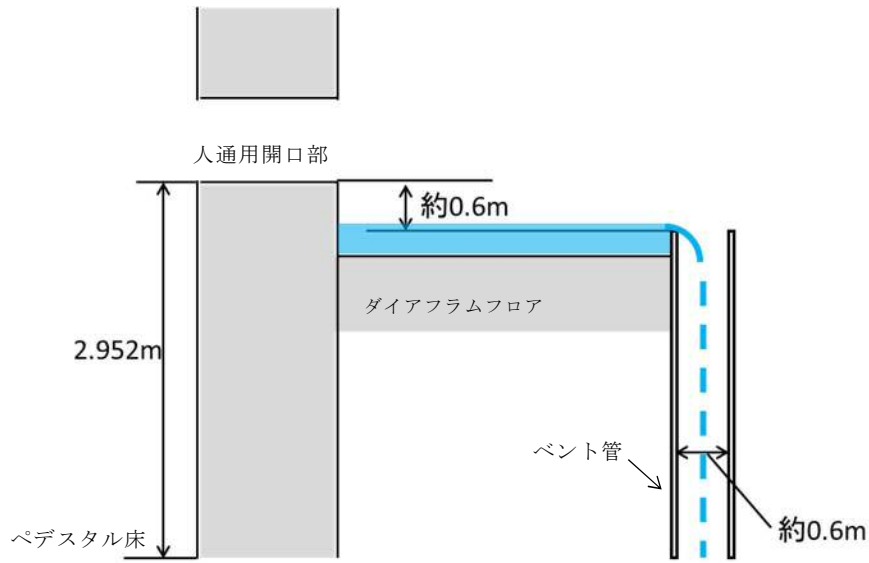


ペDESTALに流入した水はベント管（真空破壊弁が設置されていないもの）を介してサプレッション・プールへ排水される。ベント管は、格納容器スプレイ水等の流入も考えられるが、ベント管は個数が108本あり、約0.6mの直径を有していることから、ベント管の単位面積あたり流れる格納容器スプレイ水等の流量はわずかであり、ペDESTALへの流入水の排水性に影響はないと考えられる。

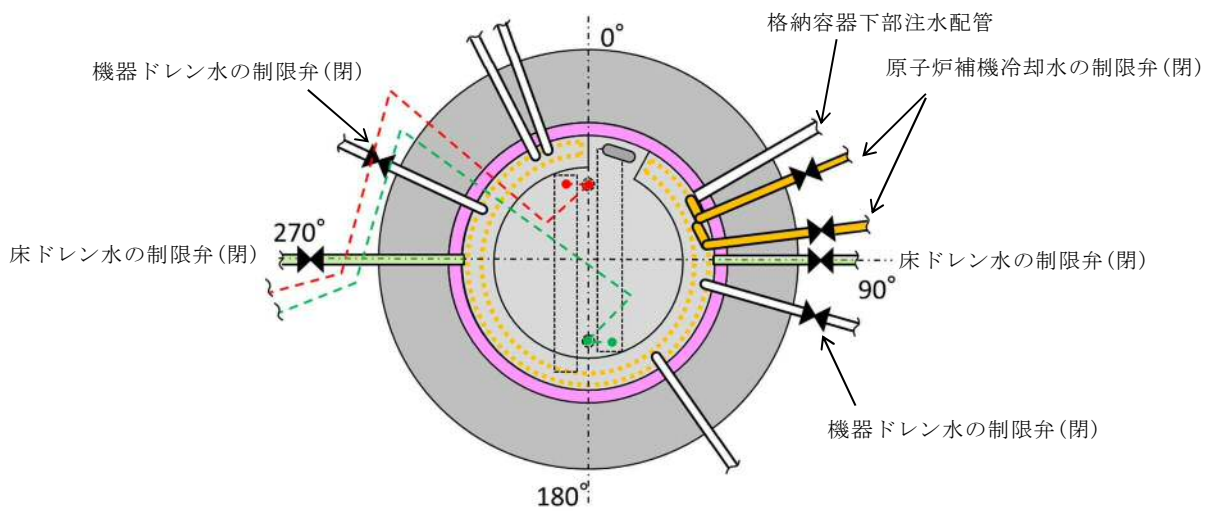
サプレッション・チェンバからの格納容器ベント用の配管下端は、ペDESTAL床のコンクリート表面より約 下であり、排水配管のベント管への接続高さよりも高い位置に設置されている。ただし、格納容器ベント中のサプレッション・プール水の最高水位は、ペDESTAL床のコンクリート表面より約0.62m下であり、排水配管のベント管への接続高さよりも低い位置となるため、格納容器ベント中でも排水配管が水没することは無い。（第3図（b））

【参考】最も高い位置の真空破壊弁はペDESTAL床のコンクリート表面より約0.47m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DESTAL床のコンクリート表面より約1.36m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DESTAL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



第3図 (c) 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 (d) ペDESTAL床ドレンサンプの水位1m維持対策概要

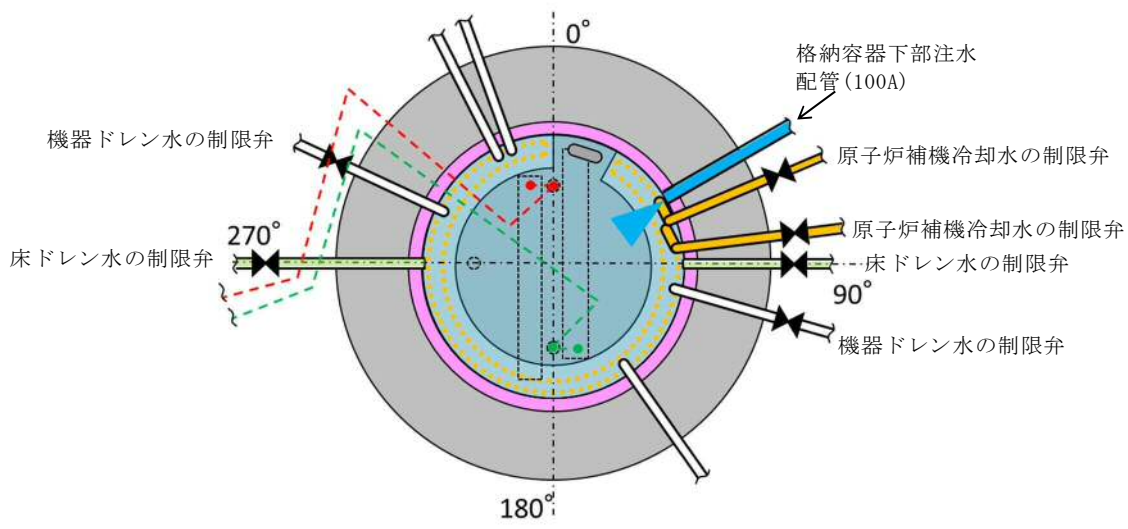
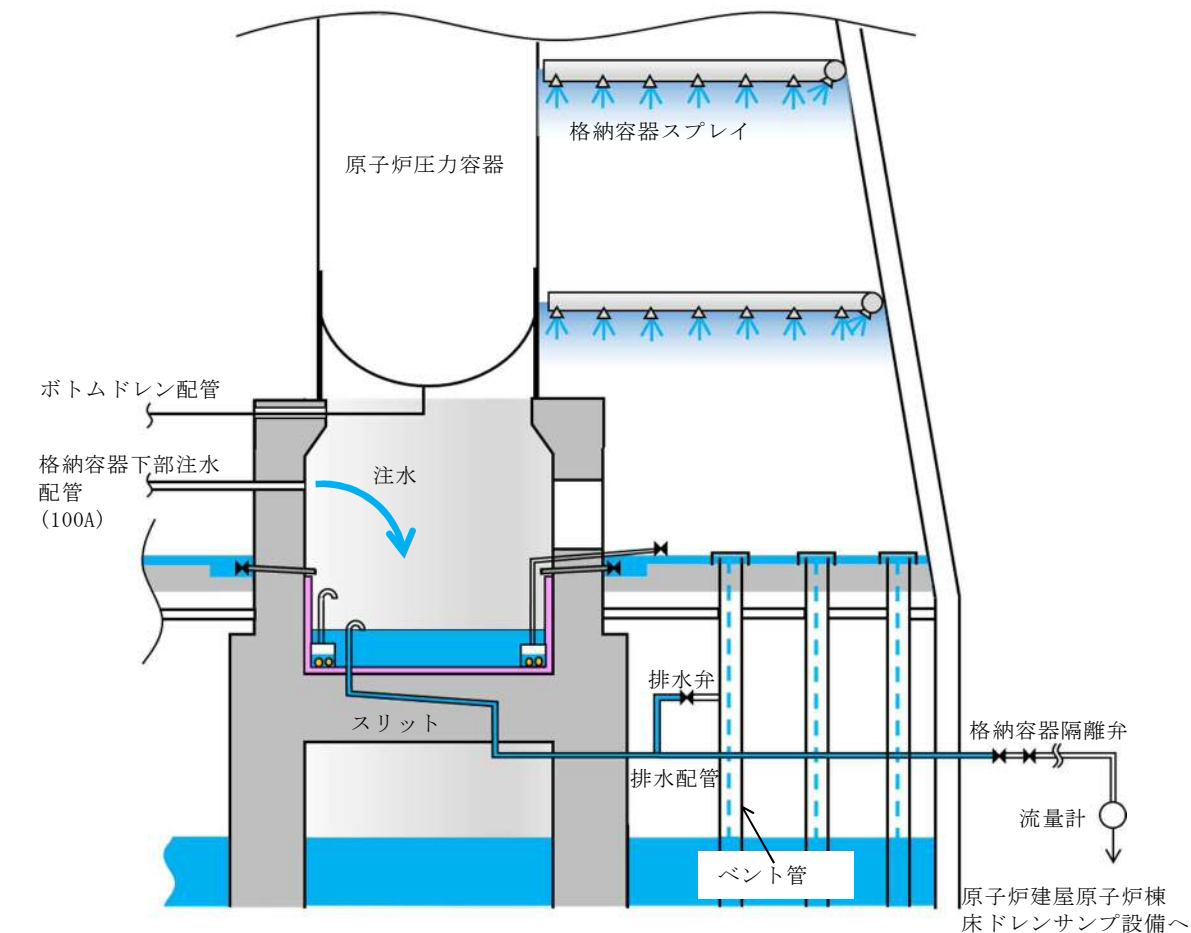
3) R P V破損後

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samp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

東海第二発電所のペDESTAL内構造（添付7本文第1図参照）をもとに、事故発生からR P V破損までの間にペDESTAL内へ水が流入し得る事象を選定し、それぞれに対して排水評価の要否を検討する。

(1) 大破断L O C A

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ない。一方、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、排水評価の対象とする。

(2) ボトムドレンL O C A

R P V破損を想定する評価事故シーケンスのうち、ペDESTAL内におけるボトムドレンL O C Aが生じた場合、R P VからペDESTALへ多量の原子炉冷却材が流入する。しかし、この流入水は飽和状態であるため、水深が深い場合でもS Eの発生可能性は極めて低く、万一S Eが発生した場合

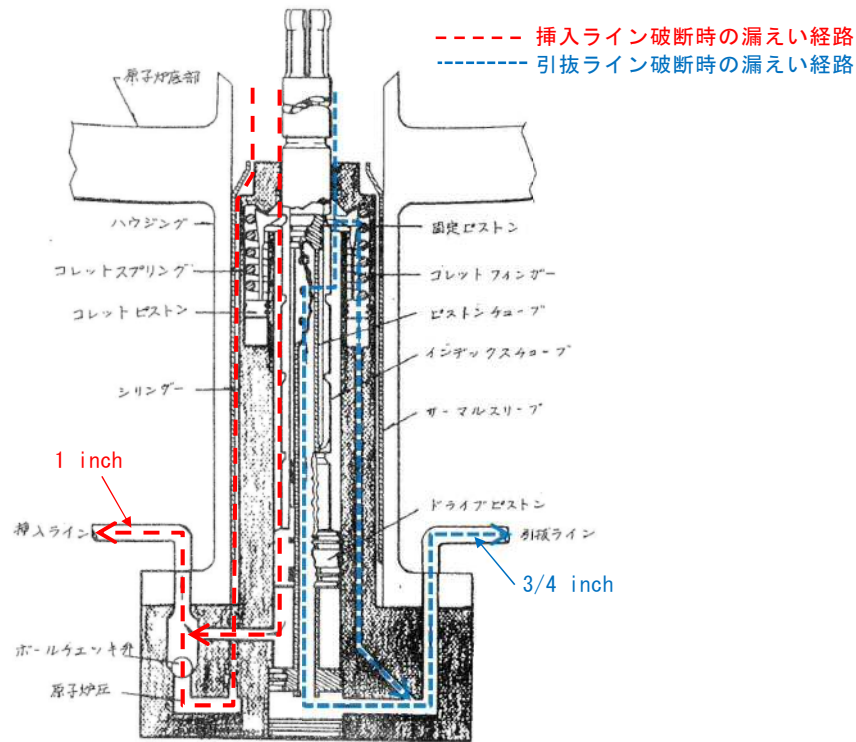
の発生エネルギーも小さいと考えられることから、排水評価の対象事象とする必要はないと考える。ただし、排水性能の保守性を確認する観点から参考として排水可能性を評価する（参考1）。

(3) その他のペDESTAL内への流入事象

ペDESTAL内において制御棒駆動水圧系配管が破断した場合、R P V及び制御棒駆動水圧系からペDESTAL内に漏えい水が流入する。しかし、事象確認後に制御棒駆動水ポンプを停止することで、制御棒駆動水圧系からペDESTALへの流入は停止する。また、第1図のとおり、当該配管は1インチ以下の細さであることに加えR P Vからの漏えいは制御棒駆動機構のシール部を介するため、その漏えい量はごく少量であり、R P V破損に至ることは考えにくく、排水評価の対象外とする。

また、ペDESTAL内において機器ドレン配管や原子炉補器冷却水配管が破断した場合にもペDESTAL内へ冷却水が流入するが、上記と同様にこれらの事象に起因してR P V破損に至ることは考えにくく、排水評価の対象外とする。

以上より、排水評価において想定する事象としてL O C A事象を選定する。



第 1 図 制御棒駆動水圧系配管破断時の R P V からの漏えい経路

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 R P V 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 [m³] , v_{in} : 流入速度 [m/s] ,

A : 流入口面積 [約 8.6×10^{-3} m²]

(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/s²] ,

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。
- ・排水配管の長さ、内径、エルボや弁等に相当する長さ等考慮し、下記式によりある排水流量を想定した場合の排水流路の圧力損失を算出する。本評価では、まず任意の流量 (22m³/h : ボトムドレン L O C A 時の平均必要排水流量) の場合の圧力損失 (1.8m) を算出し、その際に求まる圧損係数 (K) を基に、以降の流量と圧力損失の関係を算出している。圧力損失はペDESTAL 水位と排水口の水頭差に等しいことから、排水開始する初期水位時の排水口との水頭差及び圧損係数 (K) を基に初期排水流量を算出し、初期排水流量である時間ステップ幅だけ排水された場合の水位及び当該水位での排水流量を算出し、これを繰り返すことによって水位 1m までの排出時間を算出している。また、下式に示す圧損 H は、エルボの数を 2 倍程度見込む等、保守的な値としている。

圧損損失計算式

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

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/s²] , λ : 管摩擦係数, K : 圧損係数,

Q : 流量 [m³/h]

第1表 圧力損失計算要素

	単位	スワンネック入口～出口(*1)	スリット入口～出口(*2)	スリット下流配管(*3)
配管内径 : D	m			
流量 *4	m ³ /h			
流速	m/s			
管摩擦係数 : λ	—			
配管長	m			
配管 L/D	—			
90°ショートエルボ (L' /D = <input type="text"/>)	個			
弁 (L' /D = <input type="text"/>)	個			
管入口 (λ · (L' /D) = <input type="text"/>)	個			
開放端 (λ · (L' /D) = <input type="text"/>)	個			

(補足) 上記計算要素の具体的な数値等は設計進捗により、妥当性を損なわない範囲で変更があるものとする。

*1: スワンネック部は、90° ショートエルボ (個), 直管 相当とし、管入口と管出口 (開放端) の係数を考慮。

*2: スリット部は、断面積が等しい円管, 90° ショートエルボ (個) とし、管入口と管出口 (開放端) の係数を考慮。圧損は円管の とする。

*3: スリット下流配管は、配管長 , 90° ショートエルボ (個), 弁 個) と想定し、 を考慮。

*4: 流量は とした。表1は流量を とした場合の例を記載。

上表を基に、圧力損失を計算した結果を以下に示す。

H1 =



K =

(流量 における配管圧損は、 $K \cdot Q^2 =$)

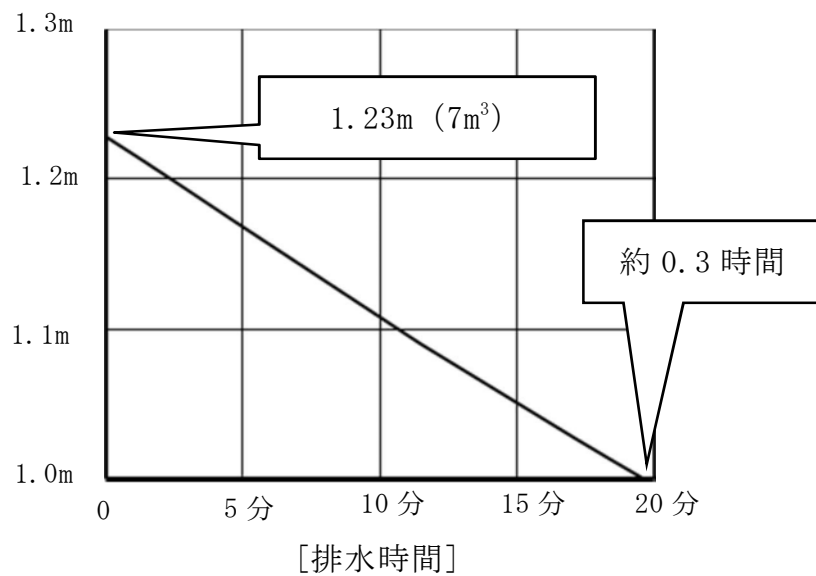
3. 評価結果

評価結果は第2表及び第2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2表 必要排水量と排水時間

項目	評価結果
必要排水量	約 7m ³
排水時間	約 0.3 時間

[水位]



第2図 ペDESTAL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2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。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。また、異物落下に対して破損等がないよう、サポート等で固定する。

このスワンネックの構造を考慮した上で、スワンネック構造への落下物の影響、ペDESTAL内に流入する異物による排水性への影響を評価する。

事故時に発生する落下物によりスワンネック構造が損傷しないこと、異物がペDESTAL床ドレンサンプに流入したと仮定し評価しても、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3表に示す。

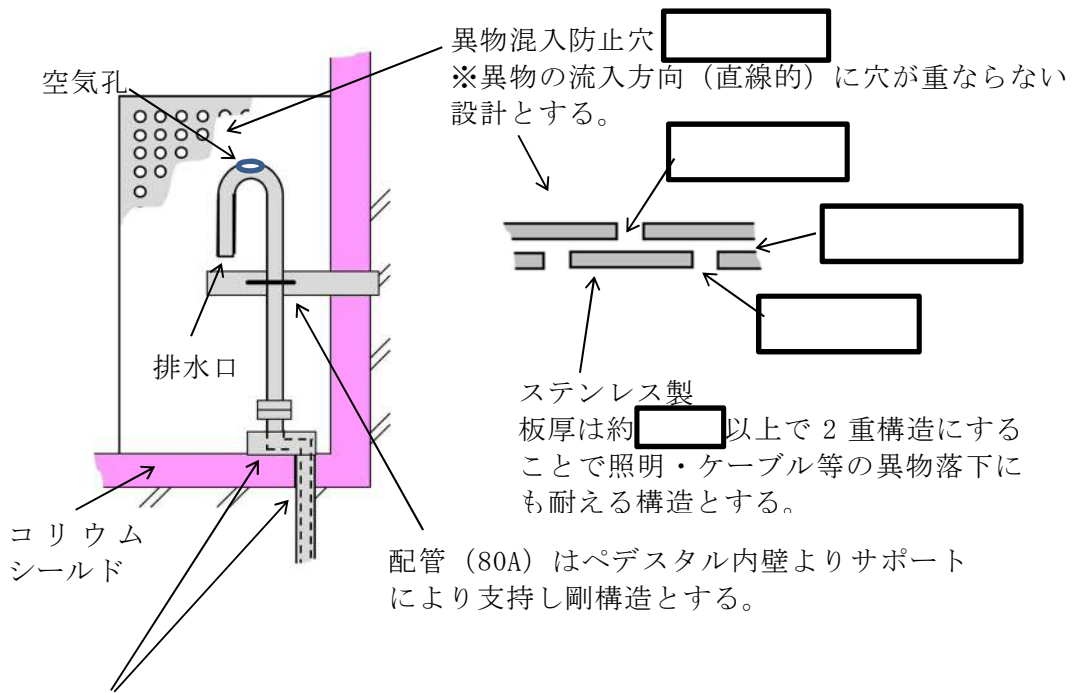
落下物により、スワンネック構造が影響を受けないことを確実にするため、スワンネック構造の周囲に柵を設置する設計とする。

この柵は、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、異物混入防止機能を有した設計とする。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3図)

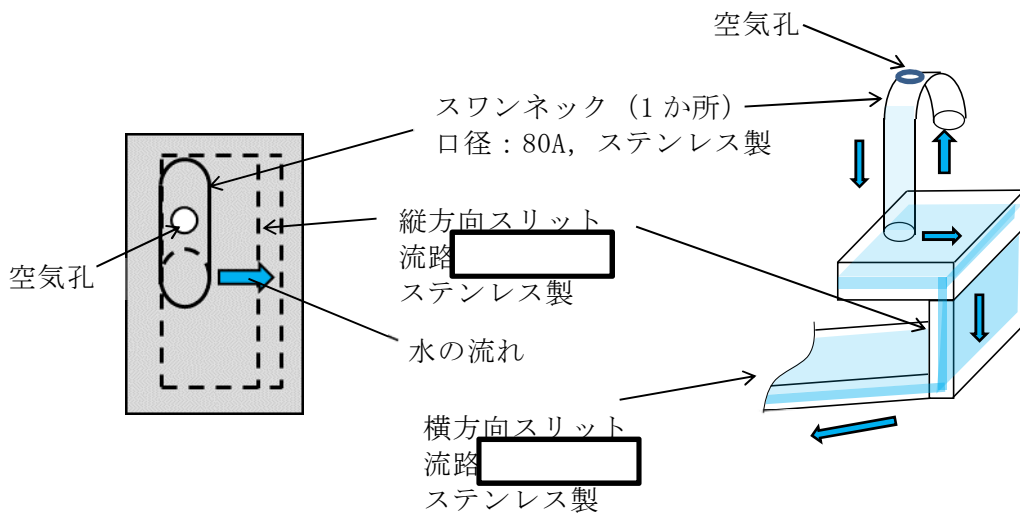
第3表 想定異物と影響評価

想定異物	異物による排水性への影響
核計装用及び照明等のケーブル (管路含む)	<p>【発生源】 ペDESTAL内</p> <p>【スワンネックへの落下/床ドレンへの流入】 落下あり/流入あり ペDESTAL上部には、ケーブルが設置されており、落下の可能性がある。</p> <p>【影響評価】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・落下による影響 スワンネックは鋼製でサポートに固定されているため破損・転倒する恐れはない。また、周囲に鋼製の柵を設置することから、スワンネックに直接接触することもない。 ・流入による影響 ケーブルは、床に沈降することから、排水性に影響はない。
保温材	<p>【発生源】 ペDESTAL外</p> <p>【スワンネックへの落下/床ドレンへの流入】 落下なし/流入あり ペDESTAL床ドレンサンプ内に保温材はない。 重大事故時にドライウェルから格納容器スプレイ水等によって床ドレンの流入経路から持ち込まれる可能性がある。</p> <p>【影響評価】 床ドレン流入経路の弁を事故後早期に閉に流入を制限することから、排水経路を閉塞させる等、排水性への影響はない。</p>
塗料片	<p>【発生源】 ペDESTAL内・外</p> <p>【スワンネックへの落下/床ドレンへの流入】 落下あり/流入あり ペDESTAL内・外の構造物には塗装が施されていることからスワンネックへの落下、床ドレンへ流入する可能性がある。</p> <p>【影響評価】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・落下による影響 スワンネックを損傷する程の重量はなくスワンネックが破損・転倒する恐れはない。 ・流入による影響 塗料片は、底に堆積若しくは水面に浮遊することが考えられるが、スワンネックの排水口を水位1mの中間位置に設定するため、これらの異物がスワンネックの排水口に流入するとは考え難い。ま

	<p>た、重大事故時は格納容器スプレイ水等によってペDESTAL外から床ドレンの流入経路を通じて塗料片が多く持ち込まれる可能性があるが、床ドレン流入経路の弁を事故後早期に閉にし、流入を制限することから、排水経路を閉塞させる等、排水性への影響はない。</p>
スラッジ（鉄錆）	<p>【発生源】 ペDESTAL外 【スワンネックへの落下／床ドレンへの流入】 落下なし／流入あり スラッジ（鉄錆）は、床ドレン水によって床ドレンサンプ内に流入し底に堆積する可能性がある。</p> <p>【影響評価】 スワンネックの排水口を水位 1m の中間位置に設定するため、底に堆積した異物が積極的に排水経路に流入するとは考え難い。また、重大事故時は格納容器スプレイ水等によってペDESTAL外から床ドレンの流入経路を通じてスラッジが多く持ち込まれる可能性があるが、床ドレン流入経路の弁を事故後早期に閉にし、流入を制限することから、排水経路を閉塞させる等、排水性への影響はない。</p>
サポート	<p>【発生源】 ペDESTAL内 【スワンネックへの落下／床ドレンへの流入】 落下なし／流入なし ペDESTAL内にはサポートが設置されているが、十分な耐震性を有する設計とすることから、落下しない。</p> <p>【影響評価】 排水性への影響はない。</p>
照明	<p>【発生源】 ペDESTAL内 【スワンネックへの落下／床ドレンへの流入】 落下あり／流入あり ペDESTAL内には照明が設置されているため、落下の可能性がある。</p> <p>【影響評価】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・落下による影響 スワンネックは鋼製でサポートに固定されているため破損・転倒する恐れはない。また、周囲に鋼製の柵を設置することから、スワンネックに直接接触することもない。 ・流入による影響 照明は、床に沈降することから、排水性に影響はない。



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3図 排水配管に対する異物対策概要

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DESTAL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、排水性能の保守性を確認する観点から、ペDESTAL内の水位が最も高くなる事象であるボトムドレン 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実施する。

1. 評価条件

- ・ペDESTAL内におけるボトムドレン L O C A 時には、ペDESTAL床ドレンサンプル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プレッション・プール内圧は考慮しない。
- ・排水配管の長さ、内径、エルボや弁等に相当する長さ等考慮し、下記式によりある排水流量を想定した場合の排水流路の圧力損失を算出する。本評価では、まず任意の流量（ $22\text{m}^3/\text{h}$ ：ボトムドレン L O C A 時の平均必要排水流量）の場合の圧力損失（1.8m）を算出し、その際に求まる圧損係数（K）を基に、以降の流量と圧力損失の関係を算出している。圧力損失はペDES

タル水位と排水口の水頭差に等しいことから、排水開始する初期水位時の排水口との水頭差及び圧損係数 (K) を基に初期排水流量を算出し、初期排水流量である時間ステップ幅だけ排水された場合の水位及び当該水位での排水流量を算出し、これを繰り返すことによって水位 1m までの排出時間を算出している。また、下式に示す圧損 H は、エルボの数を 2 倍程度見込む等、保守的な値としている。

圧力損失計算式

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

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/s²) , λ : 管摩擦係数 , K : 圧損係数

Q : 流量 [m³/h]

第 1 表 圧力損失計算要素

	単位	スワンネック入口～出口(*1)	スリット入口～出口(*2)	スリット下流配管(*3)
配管内径 : D	m			
流量 *4	m ³ /h			
流速	m/s			
管摩擦係数 : λ	—			
配管長	m			
配管 L/D	—			
90°ショートエルボ (L' /D= <input type="text"/>)	個			
弁 (L' /D= <input type="text"/>)	個			
管入口 (λ · (L' /D)= <input type="text"/>)	個			
開放端 (λ · (L' /D)= <input type="text"/>)	個			

(補足) 上記計算要素の具体的な数値等は設計進捗により、妥当性を損なわない範囲で変更があるものとする。

*1: スワンネック部は、90° ショートエルボ () 個), 直管 () とし、管入口と管出口 (開放端) の係数を考慮。

*2: スリット部は、断面積が等しい円管, 90° ショートエルボ () 個) とし、管入口と管出口 (開放端) の係数を考慮。圧損は円管の () とする。

*3: スリット下流配管は、配管長 (), 90° ショートエルボ (), 弁 () と想定し、 () を考慮。

*4: 必要排水量約 59m³ を約 2.7 時間で排出した場合の流量 () とした。

上表を基に、圧力損失を計算した結果を以下に示す。

H1= ()

K= ()

(流量 () における配管圧損は、 $K \cdot v^2 =$ ())

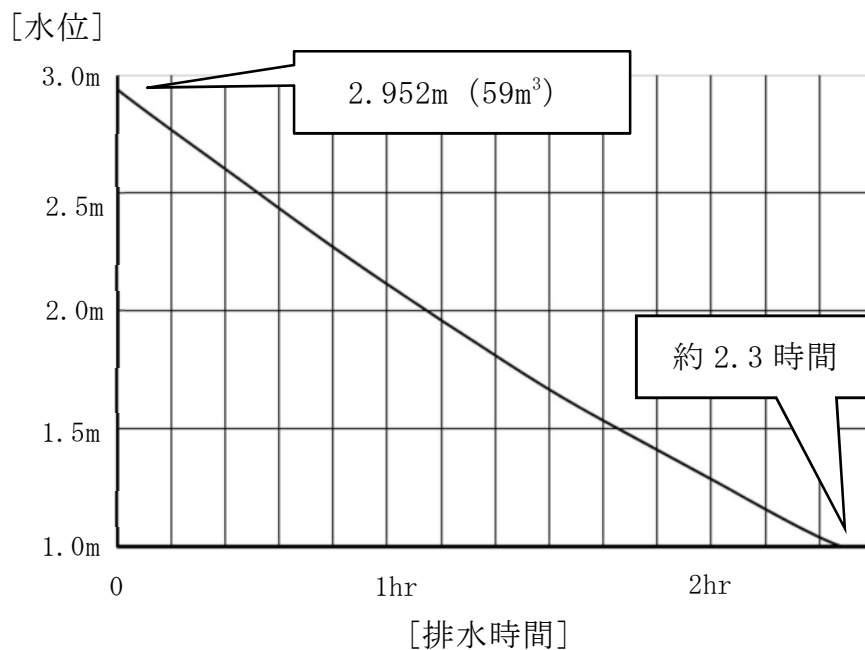
2. 評価結果

評価結果は第 2 表及び第 1 図のとおりであり、ペDESTAL内のボトムドレン配管破断時に流入した水を、RPVからペDESTALへの流入停止 (事象発生後約 0.3 時間) からRPV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2表 必要排水量と排水時間

項目	評価結果
必要排水量	約 59m ³ ※
排水時間	約 2.3 時間

※：必要排水範囲の水量（内径 ，高さ の水の体積）



第1図 ペDESTAL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。

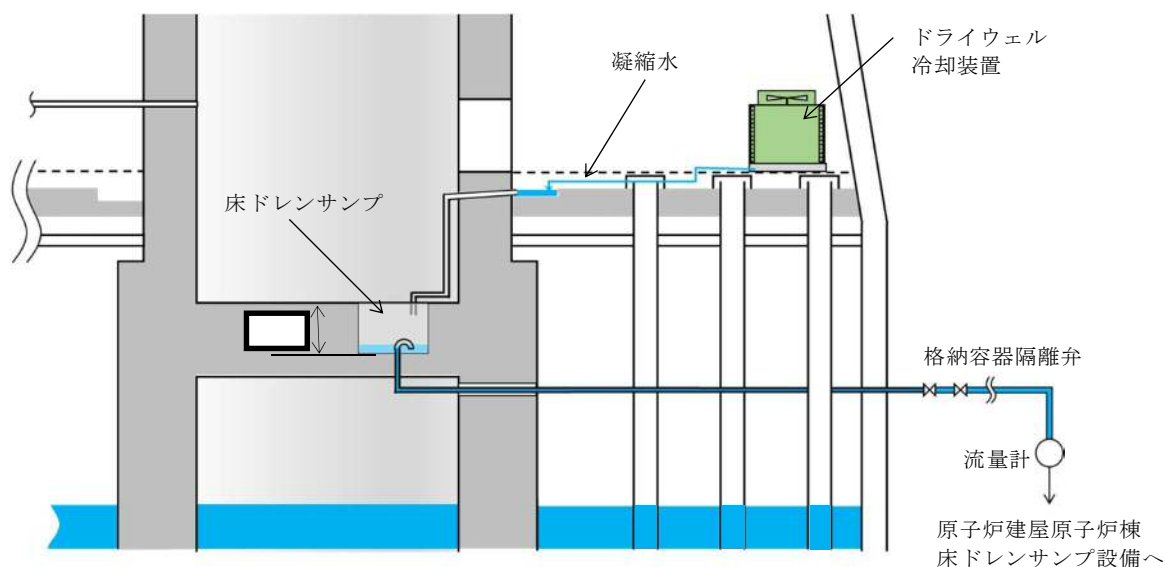
・排水流量

必要排水流量は、評価上の容量約 59m³ 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 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 25m³/h 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。

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に、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。

⑦気相部温度計

自主設備としてペDESTAL底面から 1.1m の高さに温度計を設置し、デブリの少量落下時にペDESTAL水位を 0.5m～1m の範囲に管理している間において、万が一デブリが露出した場合にそれを検知し、ペDESTAL満水までの注水を判断する。

約 180° 間隔で計 2 個設置し、1 個以上が露出したデブリからの輻射熱等により上昇した場合に注水を判断する。

第1表 ペデスタル内計器の概要

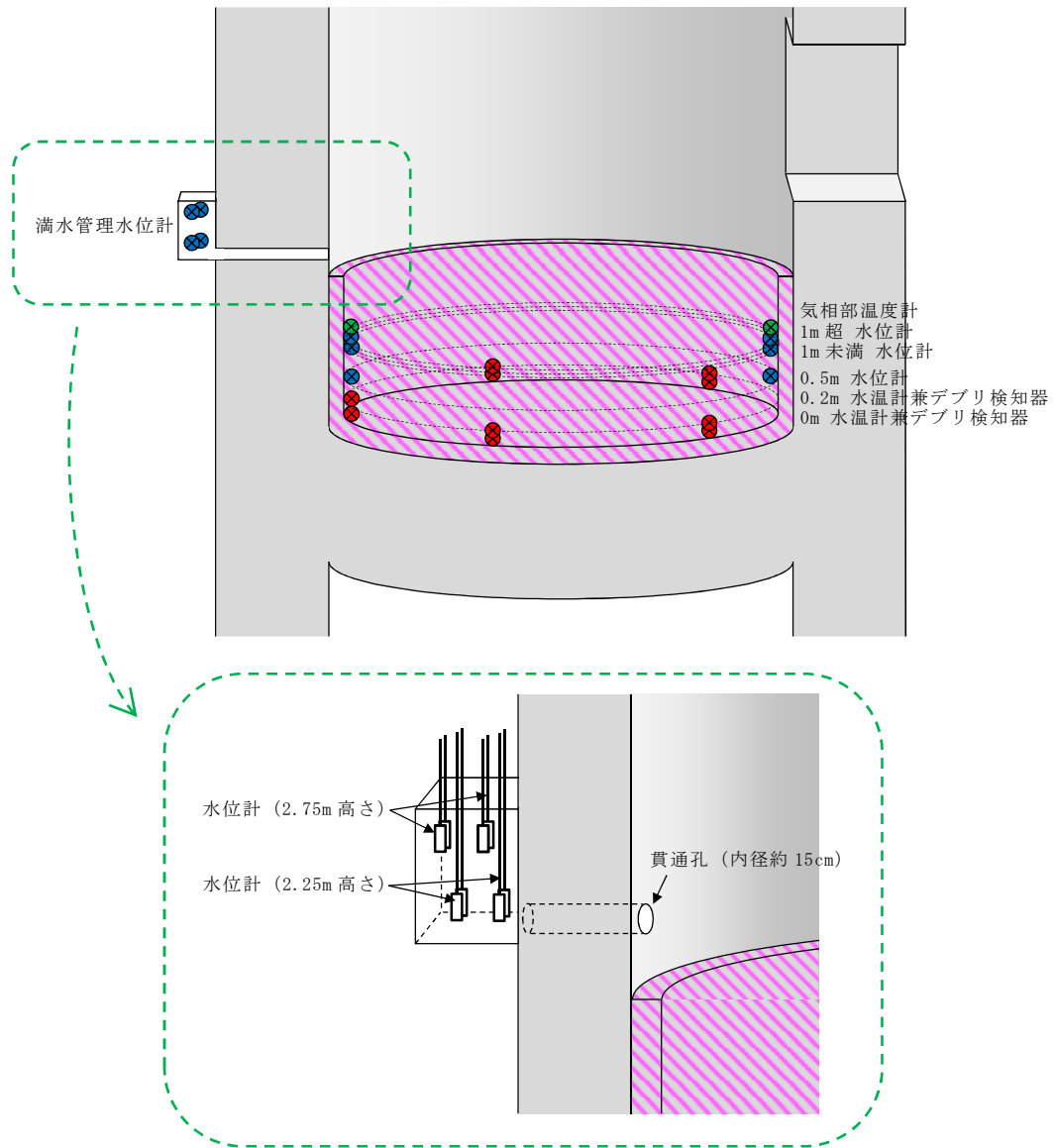
	設置高さ ^{※1}	設置数	計器種別
0m 水温計兼 デブリ検知器	0m	各高さに5個	測温抵抗体式 温度計
0.2m 水温計兼 デブリ検知器	0.2m		
0.5m 水位計	0.5m	各高さに2個	電極式 水位計
1m 未満水位計	1m-測定誤差		
1m 超水位計	1m+測定誤差		
満水管理水位計	2.25m 2.75m		

※1：ペデスタル底面（コリウムシールド上表面）からの高さ

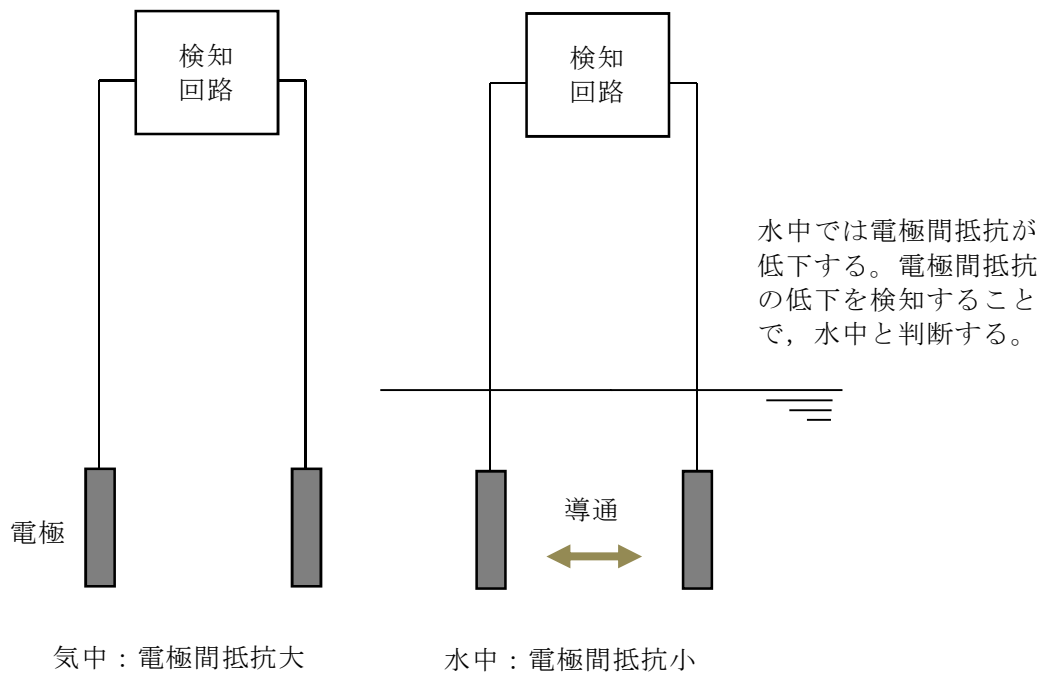
第2表 検出部の仕様等

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：- ^{※2}
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：- ^{※2}

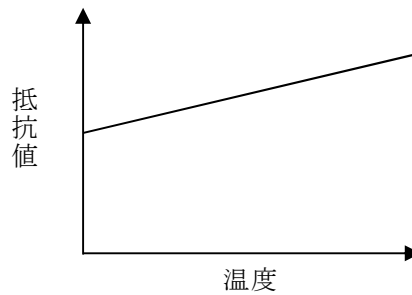
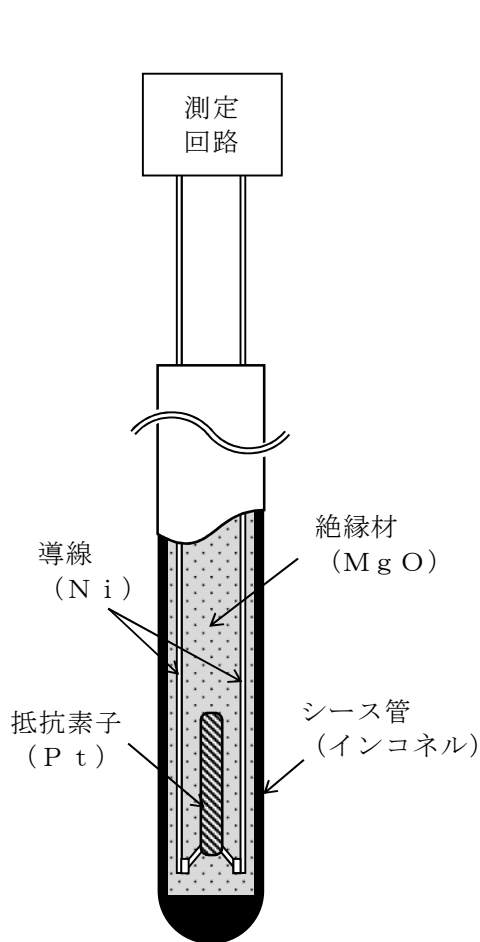
※2：検出部は無機物で構成しており，放射線による影響はない



第 1 図 ペDESTAL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。

- ・シース管の熔融、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熔融、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、熔融又は蒸発する。

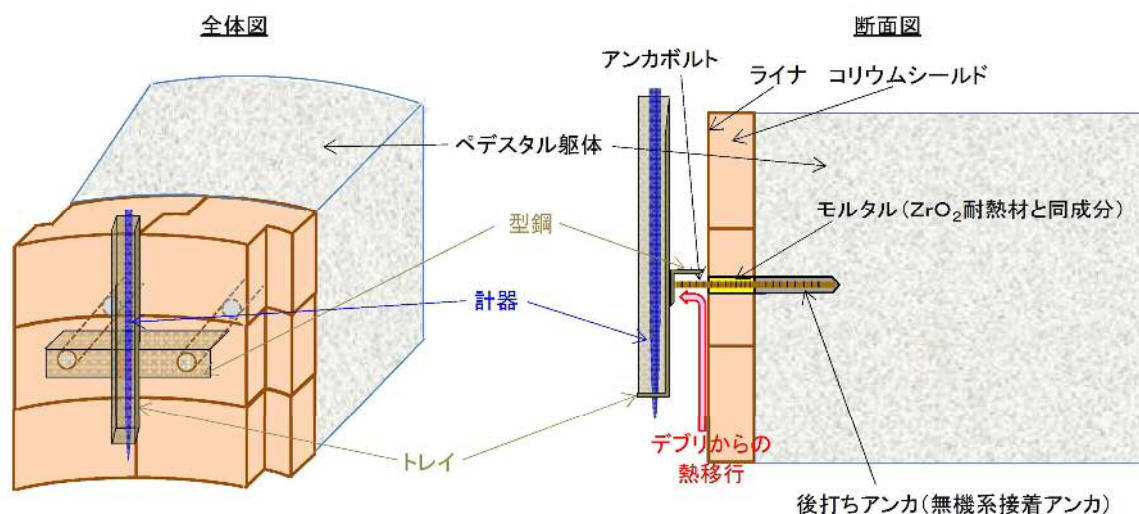
第3図 测温抵抗体式温度計の動作原理

ペDESTAL内計器の設置概念について

ペDESTAL内の水位管理のために設置する計器について、設置概念を第1図に示す。

第1図のとおり、計器はペDESTAL側壁のコンクリートに埋め込むアンカボルト、型鋼、トレイにより固定することとしている。

ここで、計器の下部にデブリが堆積した場合、コリウムシールド表面のライナを介してアンカボルト、型鋼、トレイ及び計器に熱が移行することが考えられる。しかし、ライナとアンカボルトの間は ZrO_2 耐熱材と同成分のモルタルで埋めるため熱が選択的に移行することはないこと、デブリを冠水維持することでデブリ上部の計器は水没していることを考慮すると、デブリからの熱移行により計器の健全性が損なわれることはないと考えられる。



第1図 ペDESTAL内計器の設置概念図

添付 8. 溶融デブリによる熱影響評価について

1. 評価目的

東海第二発電所におけるペDESTAL構造の特徴を踏まえた対策として、MCCI影響抑制のためのコリウムシールドを設置するとともに、デブリ冠水及びSE影響抑制の観点からRPV破損時のペDESTAL内水位を1mに維持する対策、さらに、床スラブ内の排水流路をスリット形状としてデブリを凝固させる対策を講じることとしている。

これら東海第二発電所の特徴を踏まえた対策を考慮した上で、RPV破損時にペDESTALへ落下したデブリからの熱影響によってペ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評価する。

2. 評価方針

RPV破損後にデブリからの伝熱によって高温となる鉄筋コンクリートの物性変化を考慮した上で、RPV支持機能及びデブリ保持機能の維持に必要な構造強度が保持されることを評価する。

3. 評価方法

(1) 荷重条件

構造強度の評価にあたり、RPV支持機能の評価ではRPV、遮へい壁等の自重（以下、「RPV等の自重」という。）を考慮する。また、デブリ保持機能の評価では、デブリ、コリウムシールド、床スラブ躯体等の自重（以下、「デブリ等の自重」という。）を考慮する。

(2) 評価部位及び項目

a. 側壁（R P V 支持機能）

R P V 等の自重により，側壁コンクリートには圧縮軸力が作用し，側壁コンクリート基部には面外方向のせん断力が作用する。

このため，高温によるコンクリート圧縮強度の低下を考慮した等価壁厚を評価し，R P V 等の自重による圧縮軸力及び面外せん断に対して必要な壁厚と比較する。

b. 床スラブ（デブリ保持機能）

デブリ等の自重により，床スラブのコンクリートには面外せん断力が作用し，鉄筋には曲げ応力が作用する。

このため，高温によるコンクリートの圧縮強度の低下を考慮した等価板厚を評価し，デブリ等の自重によるせん断力に対して必要な板厚と比較する。また，高温による鉄筋の強度低下を考慮した等価鉄筋量を評価し，デブリ等の自重による曲げ応力に対して必要な鉄筋量と比較する。

(3) 温度条件

別添 1 にペDESTALの温度評価を示す。デブリからの伝熱によるペDESTALの側壁及び床スラブの温度は，M A A P 解析に結果に基づき，汎用有限解析コード A B A Q U S による熱伝導解析にて評価する。なお，コリウムシールド設置によって，ペDESTALの侵食抑制効果及び温度低減効果が見込まれるが，本評価では保守的な取扱いとしてコリウムシールドを設置しない条件での M A A P 解析の侵食量及び温度履歴を参照する。

(4) 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が維持されることを確認する観点

より、判断基準は終局限界状態に至らないこととする。具体的には、側壁コンクリートの必要壁厚、床スラブコンクリートの必要板厚、床スラブの必要鉄筋量の算定において、終局強度又は短期許容応力度を適用する。別添 2 に R P V 支持に必要な側壁厚さを、別添 3 にデブリ保持に必要な床スラブ厚さを、別添 4 にデブリ保持に必要な床スラブ鉄筋量を示す。

4. 評価結果

以下に R P V 支持機能及びデブリ保持機能に対する評価結果を示す。評価結果はいずれも判断基準を満足し、デブリからの熱影響によってもペDESTAL に要求される機能は損なわれることはない。

(1) 側壁（R P V 支持機能）

a. コンクリートに対する圧縮軸力

別添 5 に熱影響を考慮した側壁コンクリートの構造評価を示す。側壁コンクリートの等価壁厚は約 684mm であり、R P V 等の自重によってコンクリートに作用する圧縮軸力に対して必要な壁厚 133mm (別添 2) を上回る。

b. 基部コンクリートに対する面外せん断力

別添 5 に示したとおり、側壁コンクリートの等価壁厚は約 710mm であり、R P V 等の自重によって基部コンクリートに作用する面外せん断力に対して必要な壁厚 192mm (別添 2) を上回る。

(2) 床スラブ（デブリ保持機能）

a. コンクリートに対する面外せん断力

別添 6 に熱影響を考慮した床スラブのコンクリート及び鉄筋の評価を示す。床スラブコンクリートの等価板厚は約 618mm であり、デブリ等の

自重によってコンクリートに作用する面外せん断力に対して必要な板厚
□ (別添 3) を上回る。

b. 鉄筋に対する曲げ応力

別添 6 に示したとおり、床スラブ配筋層の幅 1m あたりの等価鉄筋量は約 □ であり、デブリ等の自重によって鉄筋に作用する曲げ応力に対して必要な鉄筋量 □ (別添 4) を上回る。

5. まとめ

東海第二発電所におけるペDESTAL構造の特徴を踏まえた対策による影響を考慮し、デブリからの熱影響に対するペDESTALの構造健全性を評価した。

その結果、高温による鉄筋コンクリートの物性変化を考慮しても、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した。

デブリからの伝熱によるペDESTALの温度評価

1. SA解析コードMAAPによるMCCI評価

ABAQUSによる熱伝導解析の入力条件となる、侵食量及びペDESTALとデブリの接触面温度をSA解析コードMAAPにより評価する。

解析ケースは、デブリから水プールへの熱流束の不確かさを考慮し、 $800\text{kW}/\text{m}^2$ 圧力依存ありの条件（ベースケース）、及び $800\text{kW}/\text{m}^2$ 一定の条件（感度ケース）の2ケースを考慮する。また、評価の対象とする事故シーケンスは、崩壊熱が大きくなりスリット内デブリの温度を厳しくする観点から、ベースケース及び感度ケースともに、LOCAシーケンスを選定する。

なお、コリウムシールド設置によってペDESTALの侵食抑制効果及び温度低減効果が期待できるが、本評価では熱影響を保守的に評価する観点よりコリウムシールドを設置しない条件を考慮する。

第1表に解析条件、第2表に侵食量評価結果を示す。また、ペDESTALとデブリ接触面温度を第1図及び第2図に示す。

2. 汎用有限解析コードABAQUSによるペDESTAL熱伝導解析

(1) 評価モデル

第3図に熱伝導解析モデルを示す。デブリからの熱影響による側壁及び床スラブの温度は、2次元体系有限要素法解析により評価する。本評価では、解析体系を縦横のメッシュで区切り、以下に示す2次元体系における非定常熱伝導の支配方程式次式に基づき、各部の温度変化を計算している。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q$$

ここで、 T ：温度， ρ ：密度， c ：比熱， k_x, k_y ：x 方向及び y 方向の熱伝導率， Q ：物体の内部発熱量である。

(2) 評価条件

第 3 表に熱伝導解析条件を示す。床スラブ上のデブリによるコンクリート侵食量は、コンクリートが侵食されない場合（ベースケース）と、侵食量が大きくなる場合（感度ケース）の 2 ケースを考慮し、侵食部は熱伝導解析開始時点で侵食されているものと仮定し評価する。また、横スリット部の温度評価は、侵食量が最大となる場合と 0cm の場合の両方で評価する。

(3) 評価結果

第 7 図に横スリット部温度評価点の位置を示す。また、第 8 図及び第 9 図にベースケース及び感度ケースの横スリット部の温度変化をそれぞれ示す。横スリット部の最高温度は、ベースケースで約 708℃、感度ケースで約 995℃であり、スリット内で凝固したデブリは再溶融する温度に至らない。第 8 図に示すとおり、ベースケースではペDESTAL 床上に堆積するデブリからの熱影響が小さく初期の温度上昇は見られないが、堆積デブリのクエンチ後のペDESTAL 床面方向への熱移行が小さくなるため、スリット部に崩壊熱が蓄熱しやすく、長期にわたり温度が高く推移する。一方、第 9 図に示すとおり、感度ケースではペDESTAL 床上に堆積するデブリからの熱影響により初期の温度上昇が大きくなるが、堆積デブリのクエンチ後は、ペDESTAL 床面方向への熱移行により比較的短時間で温度が低下する。

第 10 図に感度ケースにおける側壁の温度変化を、第 11 図にベースケー

スにおける床スラブ鉄筋コンクリート部の温度変化をそれぞれ示す。

側壁の最高温度は，デブリ接触面ではコンクリートの融点に達しているが，外側に向かうにつれ低くなっている。また，床スラブ鉄筋コンクリート部の最高温度は，上端部で約 459℃となっている。

第1表 M A A P解析条件

項目	ベースケース	感度ケース
対象シーケンス	大破断 L O C A時に損傷炉心冷却に失敗し, R P Vが破損するシーケンス	
デブリから水プールへの熱流束	800kW/m ² (圧力依存性あり)	800kW/m ² (一定※)
ペDESTAL初期水位	1m	

※ 侵食の不均一性等の影響を考慮して設定

第2表 M A A P解析侵食量評価結果

項目	ベースケース	感度ケース
側壁侵食量	約 9cm	約 42cm
床スラブ侵食量	約 9cm	約 48cm

第3表 評価条件

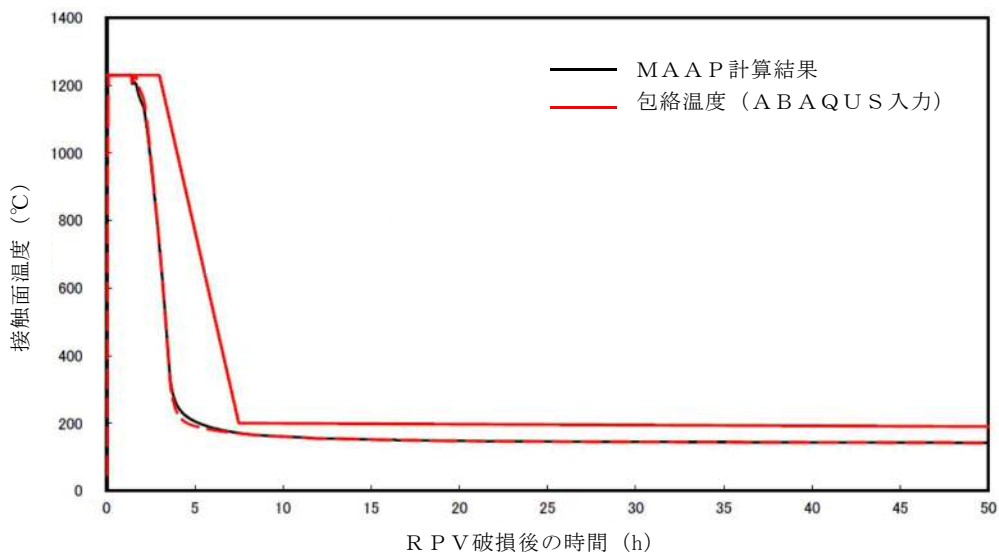
項目	条件	備考
デブリ密度 (kg/m ³)		M A A P 計算結果 (R P V 破損時の値)
デブリ熱伝導率 (W/mK)		
デブリ比熱 (J/kgK)		
デブリ溶融潜熱 (J/kg)		
デブリ内部発熱密度 (W/m ³)	第4図	M A A P 計算結果 (希ガス・揮発性 F P による減衰 (32%) を考慮)
鋼材密度 (kg/m ³)	温度依存 第4表	伝熱工学資料第5版より
鋼材熱伝導率 (W/mK)		
鋼材比熱 (J/kgK)		
コンクリート密度 (kg/m ³)	2,345	鉄筋コンクリート構造計算規準・ 同解説 2010 より
コンクリート熱伝導率 (W/mK)	温度依存 第5表	E u r o c o d e より
コンクリート比熱 (J/kgK)		
スリット内デブリ初期温度 (°C)		R P V 破損時のデブリ平均温度 (M A A P 計算結果) に対し、 保守的に液相線温度を設定
構造材初期温度 (°C)	第5図	M A A P 計算結果を包絡する温度 変化を設定
ペDESTAL周辺雰囲気温度 (°C)	第6図	
ペDESTAL-デブリ接触面温度 (°C)	第1図, 第2図	

第4表 鋼材物性値

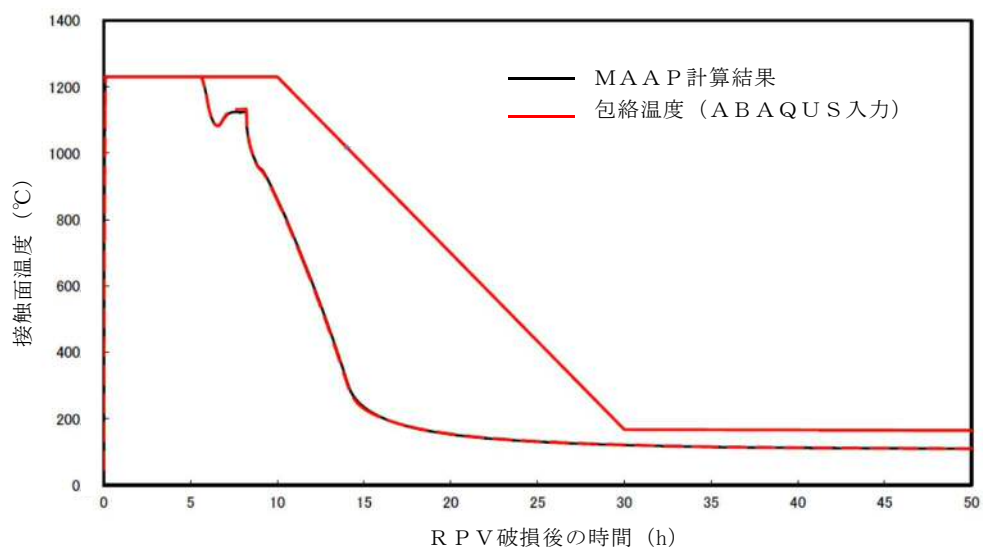
温度 (K)	密度 (kg/m ³)	熱伝導率 (W/mK)	比熱 (J/kgK)
300	7,920	16.0	499
400	7,890	16.5	511
600	7,810	19.0	556
800	7,730	22.5	620
1,000	7,640	25.7	644

第5表 コンクリート物性値

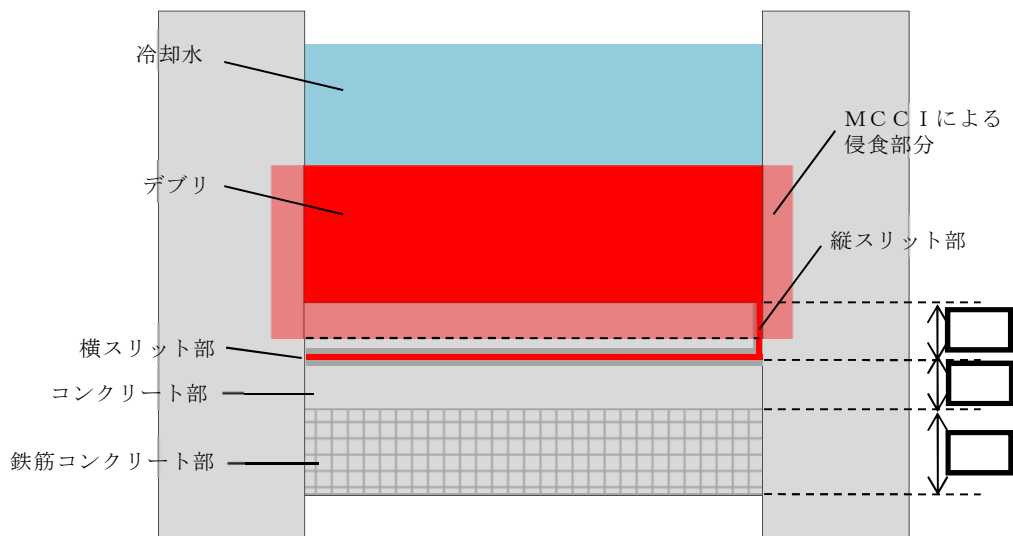
温度 (°C)	熱伝導率 (W/mK)	比熱 (J/kgK)	温度 (°C)	熱伝導率 (W/mK)	比熱 (J/kgK)
20	1.951	901.1	650	0.859	1,111.7
50	1.880	917.3	675	0.833	1,114.4
75	1.822	930.2	700	0.809	1,116.8
100	1.766	942.8	725	0.785	1,118.7
125	1.710	954.9	750	0.764	1,120.3
150	1.656	966.7	775	0.743	1,121.3
175	1.604	977.9	800	0.724	1,122.0
200	1.553	988.8	825	0.706	1,122.2
225	1.503	999.2	850	0.690	1,122.1
250	1.454	1,009.3	875	0.675	1,121.4
275	1.407	1,018.8	900	0.661	1,120.4
300	1.361	1,028.0	925	0.648	1,118.9
325	1.316	1,036.7	950	0.637	1,117.1
350	1.273	1,045.1	975	0.627	1,114.7
375	1.231	1,052.9	1,000	0.619	1,112.0
400	1.191	1,060.4	1,025	0.612	1,108.8
425	1.152	1,067.4	1,050	0.606	1,105.3
450	1.114	1,074.1	1,075	0.602	1,101.2
475	1.077	1,080.2	1,100	0.599	1,096.8
500	1.042	1,086.0	1,125	0.597	1,091.9
525	1.008	1,091.3	1,150	0.596	1,086.7
550	0.976	1,096.3	1,175	0.597	1,080.9
575	0.944	1,100.7	1,200	0.600	1,074.8
600	0.915	1,104.8	1,225	0.600	1,068.2
625	0.886	1,108.4	1,250	0.600	1,061.3



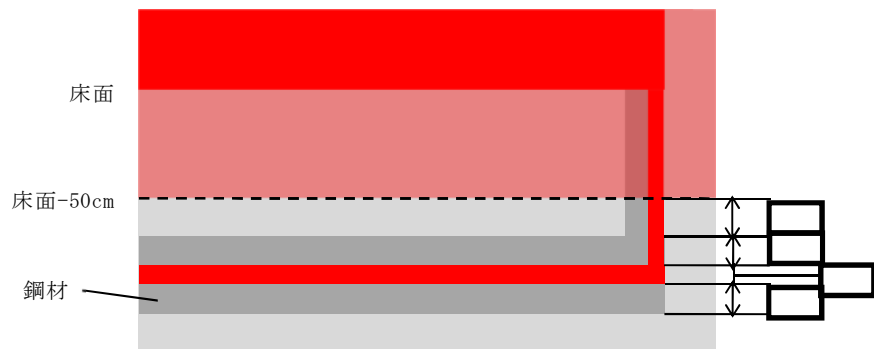
第 1 図 ペDESTALルーデブリ接触面温度 (ベースケース)



第 2 図 ペDESTALルーデブリ接触面温度 (感度ケース)

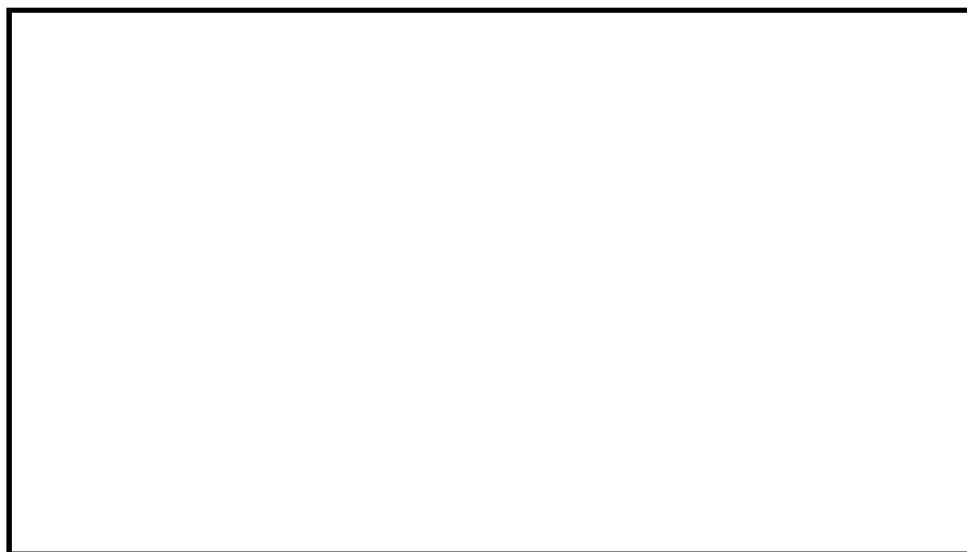


(a) 全体概要

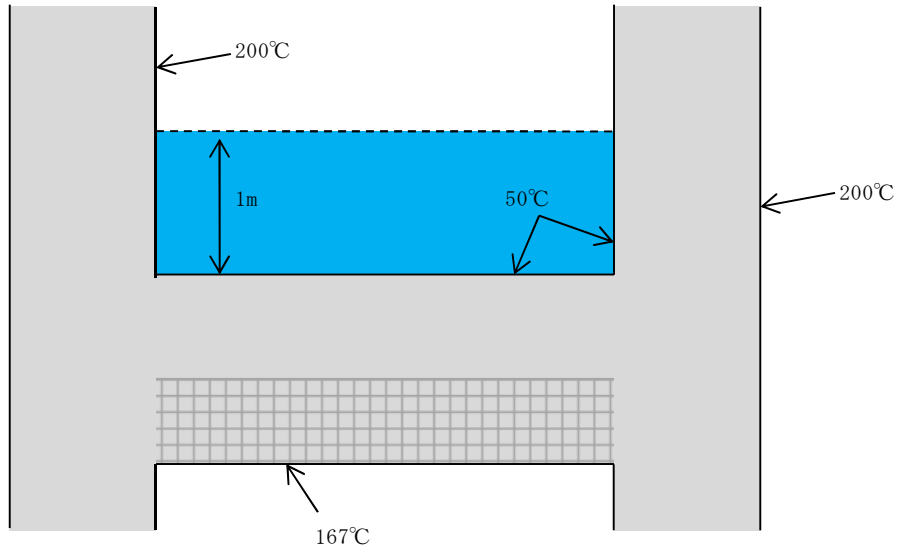


(b) スリット部拡大

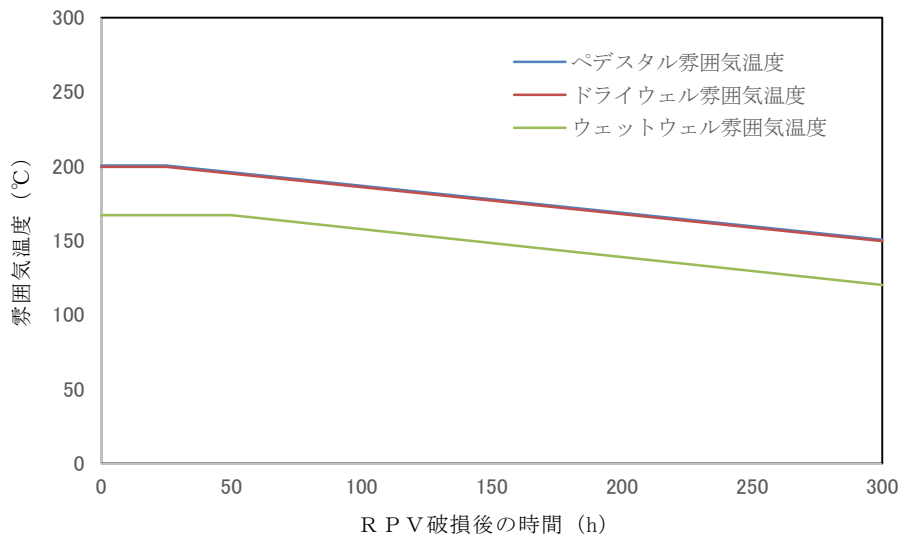
第3図 熱伝導解析モデル



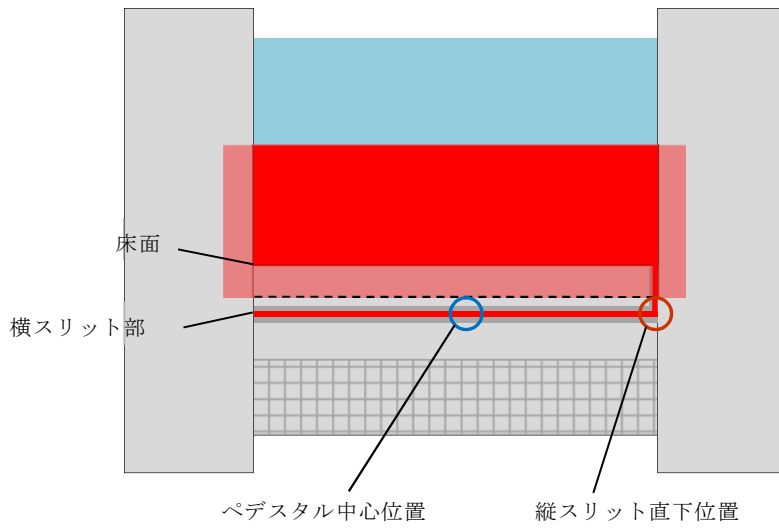
第4図 デブリ内部発熱密度



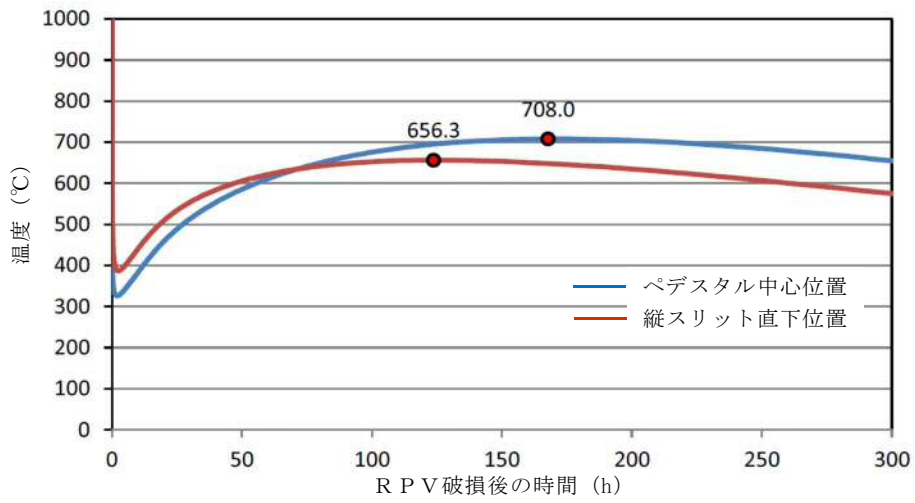
第 5 図 構造材の初期温度条件



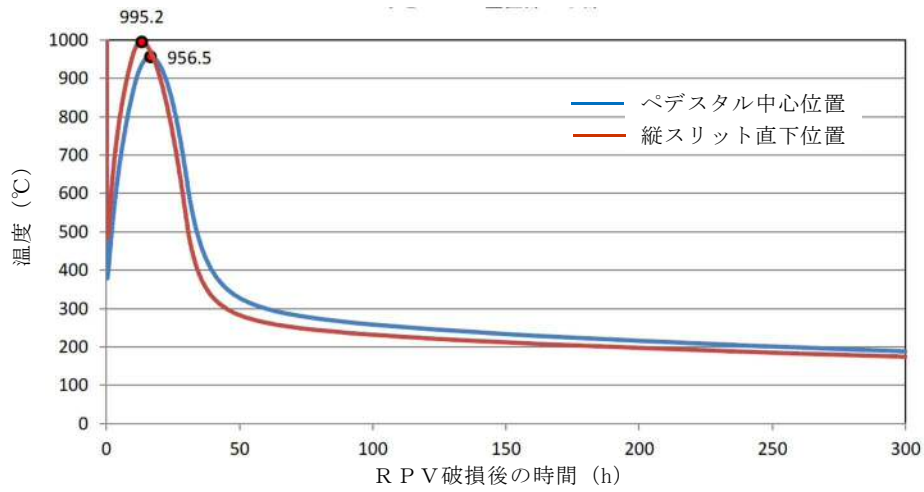
第 6 図 ペデスタル周辺雰囲気温度



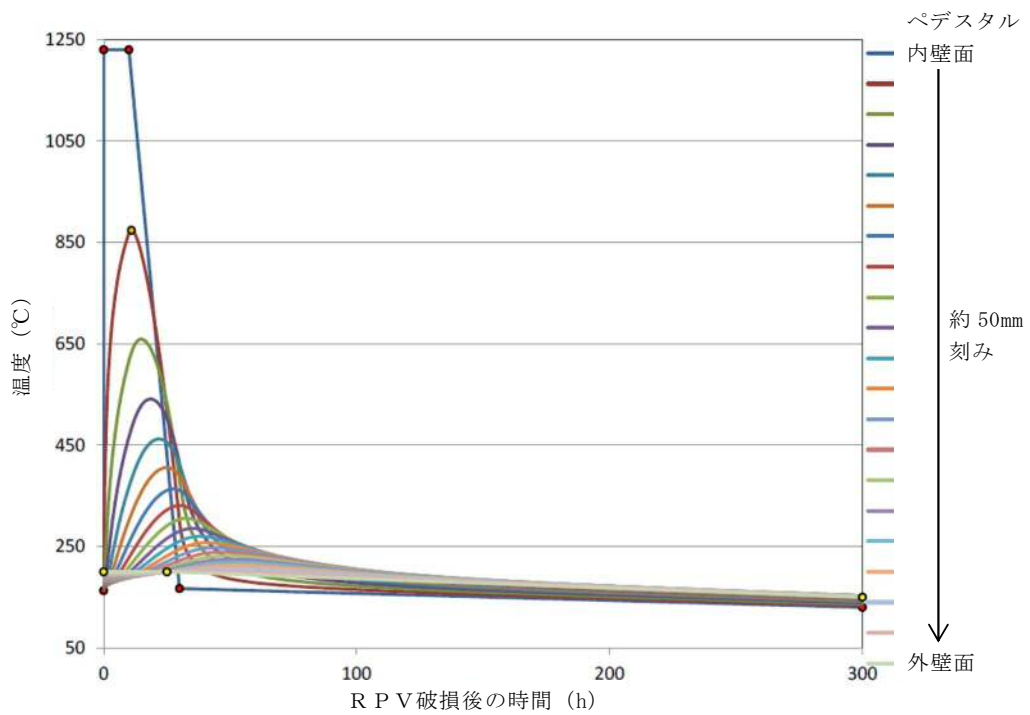
第7図 横スリット部温度評価位置



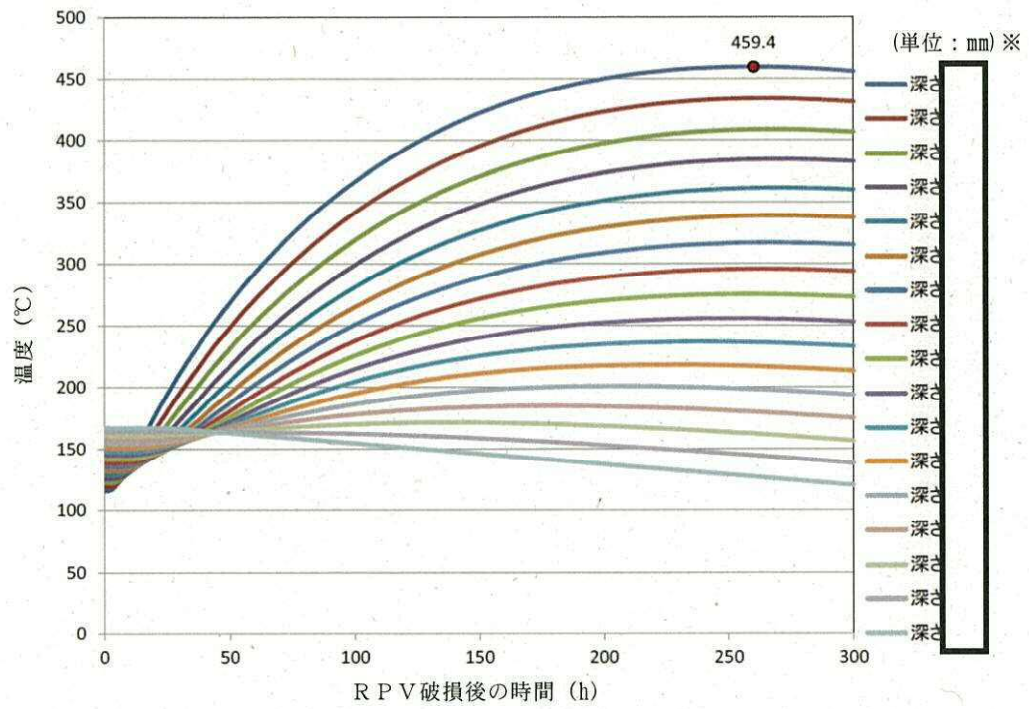
第8図 横スリット部の温度変化 (ベースケース)



第 9 図 横スリット部の温度変化 (感度ケース)



第 10 図 側壁の温度変化 (感度ケース)



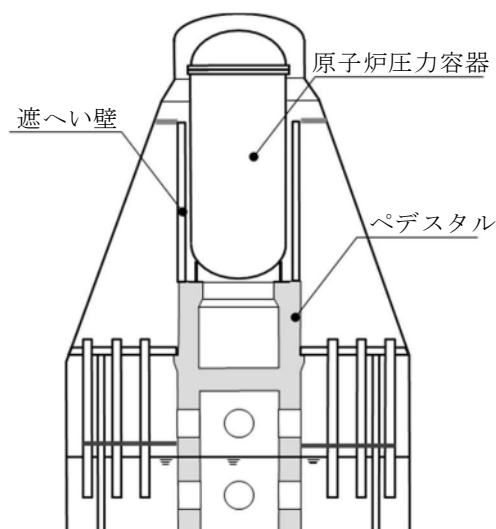
第 11 図 床スラブ鉄筋コンクリート部の温度変化 (ベースケース)

※: 鉄筋コンクリート部上端からの深さ

R P V 支持に必要なペDESTAL側壁厚さ評価

1. 概要

格納容器内のペDESTAL等配置図を第1図に示す。ペDESTALは、原子炉圧力容器、遮へい壁等を支持する構造物である。MCC I によるペDESTAL側壁部の侵食を踏まえて、これら構造物を支持するために必要となるペDESTAL側壁部の壁厚（以下「必要壁厚」という。）を算出する。



第1図 格納容器内ペDESTAL等配置図

2. ペDESTAL側壁部に生じる荷重算定

2.1 荷重の算定方針

必要壁厚の算出のために必要となるペDESTAL側壁部の荷重は、今回工認におけるペDESTAL（原子炉本体の基礎）の構造健全性評価に用いる解析モデルを適用し、ペDESTALにて支持される構造物の重量を考慮した解析により算定する。

2.2 解析方法

解析モデル図を第2図に、解析条件等の概要について第1表に示す。解析モデルは、第2図に示すとおり、ペDESTAL構造をシェル要素にて3次元的にモデル化したものを用いる。

ペDESTALは、原子炉压力容器及び遮へい壁等を支持する構造物であるため、解析における各構造物の重量の模擬については、ペDESTAL上面に等分布荷重として負荷させる。また、MCCIに至る過程を踏まえれば、原子炉压力容器内の燃料集合体等はデブリ化し、ペDESTAL床面上に落下していることになるが、ペDESTAL側壁部の必要壁厚を保守的に算定するために、原子炉压力容器内に燃料集合体が残存することを前提に評価した。



第2図 ペDESTAL 3次元FEMモデル図

第1表 解析条件等の概要

項目	内容
解析モデル	<ul style="list-style-type: none"> ・ 3次元FEMモデル ・ シェル要素
解析コード	<ul style="list-style-type: none"> ・ NASTRAN
重量模擬	<ul style="list-style-type: none"> ・ 原子炉圧力容器：$955 \times 10^3 \text{ kg}$ (圧力容器内構造物を含む) ・ 遮へい壁：$656 \times 10^3 \text{ kg}$
コンクリートの材料物性等	<ul style="list-style-type: none"> ・ 設計基準強度 22 N/mm^2 ・ ヤング係数 $2.2 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ・ せん断弾性係数 $0.918 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ・ 単位体積重量 23 kN/m^3

3 必要壁厚の算定

3.1 解析結果

必要壁厚の算定に用いる荷重は、構造物の重量によるペDESTAL鉛直方向に発生する荷重（圧縮軸力）に加えて、ペDESTAL側壁部の壁厚変化に伴う構造不連続形状部に発生する面外せん断力についても考慮する。

構造物の重量を付加させた解析結果として、MCCIによる侵食が想定されるペDESTAL側壁部における圧縮軸力及び面外せん断力を第2表に示す。

第2表 ペDESTAL側壁部に生じる荷重

部位	圧縮軸力 (kN/m)	面外せん断力 (kN/m)
MCCIによる 侵食想定部位	1,940	178

3.2 コンクリートの応力度

必要壁厚の算定にあたってはコンクリートの短期許容応力度を用いた。なお、SEに対する構造健全性評価にあたっては、終局状態に至らないことを判断基準としているが、短期許容応力度を用いることは保守的な取扱いとなる。第3表に必要壁厚算定に用いた許容応力度を示す。

第3表 必要壁厚算定に用いた許容応力度（短期）

圧縮 (N/mm ²)	せん断 (N/mm ²)
14.6	1.06

注 日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」の許容応力度（短期）を適用

- ・圧縮： $2/3 F_c$
- ・せん断： $1/30 F_c$ かつ $(0.49 + 1/100 \times F_c)$ 以下の1.5倍

3.3 必要壁厚の算定結果

ペDESTAL側壁部に生じる荷重，短期許容応力度から必要壁厚を圧縮軸力及び面外せん断力に対して算定した。

(1) 圧縮軸力による評価

ペDESTAL側壁部に生じる圧縮軸力と短期許容応力度が等しくなるときの壁厚を必要壁厚として算定する。必要壁厚は下式のとおり算定され，圧縮軸力による評価においては，必要壁厚は133 mmとなる。

$$1.940 \times 10^3 \text{ (N/mm)} \div 14.6 \text{ (N/mm}^2\text{)} = 133 \text{ mm}$$

(2) 面外せん断力による評価

面外せん断力を用いた必要壁厚の算定については，日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」の断面算定に用いる評価式を適用する。

$$Q = b \cdot j \cdot f_s$$

<p>Q：発生荷重 b：部材の有効幅 j：柱の中心間距離 $j = d \times 7/8$ d：有効せい（必要壁厚） f_s：短期許容応力度</p>
--

必要壁厚は、解析により生じる面外せん断力、短期許容応力から下式のとおり算定され、面外せん断力による評価としての必要壁厚は 192 mmとなる。

$$d = 8 / 7 \times (Q \div b) \div f_s$$
$$= 8 / 7 \times 178 (\text{N/mm}) \div 1.06 (\text{N/mm}^2) = 192\text{mm}$$

4. まとめ

圧縮軸力による評価及び面外せん断力による評価から算定した必要壁厚を第 4 表に整理する。必要壁厚は、大きい値を用いることになるため、ペDESTAL側壁部の必要壁厚は 192 mmとなる。

第 4 表 必要壁厚の算定結果

	圧縮軸力による評価	面外せん断力による評価
必要壁厚	133mm	192mm

デブリ保持に必要な床スラブ厚さ評価

床スラブに係る荷重を評価し，コンクリートのせん断耐力から必要床スラブ厚さを算出する。なお，本評価におけるコンクリートのせん断耐力は，終局限界に対して保守的な短期許容応力度を用いる。

1. 床スラブ荷重

床スラブ荷重として，床スラブ自重及びデブリ等の床スラブ積載荷重を評価する。

(1) 床スラブ自重

床スラブ自重は，

- ・床スラブのコンクリート体積：約 53.85m^3
- ・鉄筋コンクリートの単位体積重量： $24\text{kN}/\text{m}^3$

より，床スラブ自重による荷重は約 $1.30 \times 10^3\text{kN}$ となる。

(2) 床スラブ積載荷重

床スラブ積載荷重は，デブリ，冷却水，コリウムシールド及びペDESTアル内構造物等の総重量を保守的に切り上げた値として 500ton を使用し，約 $4.90 \times 10^3\text{kN}$ となる。

以上から，床スラブ荷重として約 $6.20 \times 10^3\text{kN}$ を用いる。

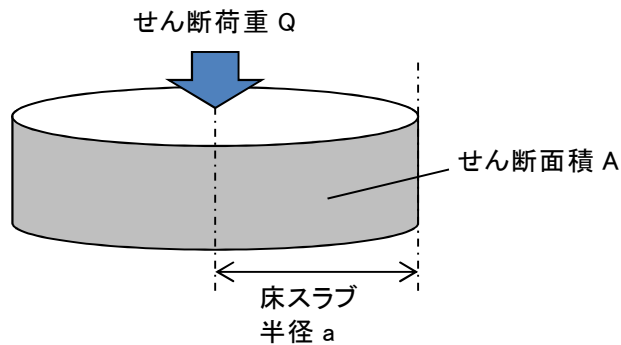
2. せん断応力による必要床スラブ厚さ

床スラブ端部の必要厚さは次のとおり算出される（第1図）。

必要せん断面積＝床スラブ荷重／短期許容せん断応力度

必要床スラブ厚さ＝必要せん断面積／床スラブ円周長

短期許容せん断応力度として「日本建築学会 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」（第2図）に基づき 1.06N/mm^2 を使用すると、必要床スラブ厚さは と算定される。



第1図 床スラブのせん断荷重

表 6.1 コンクリートの許容応力度 (N/mm²)

	長 期			短 期		
	圧縮	引張	せん断	圧縮	引張	せん断
普通コンクリート			$\frac{1}{30} F_c$ かつ $(0.49 + \frac{1}{100} F_c)$ 以下			
軽量コンクリート 1種および2種	$\frac{1}{3} F_c$	—	普通コンクリートに対する値の0.9倍	長期に対する値の2倍	—	長期に対する値の1.5倍

[注] F_c は、コンクリートの設計基準強度 (N/mm²) を表す。

F_c : コンクリートの設計基準強度 約 $22.1(\text{N/mm}^2)$

第2図 コンクリートの許容応力度

デブリ保持に必要な床スラブ鉄筋量評価

床スラブに係る荷重を評価し、鉄筋の終局曲げ強度から曲げ応力に対する必要鉄筋量を算出する。

1. 床スラブ荷重

床スラブ荷重は別添 3 と同様に約 $6.20 \times 10^3 \text{ kN}$ を用いる。

分布荷重は床スラブ荷重を床面積で除した値であり約 となる。

2. 曲げ応力による必要鉄筋量

「機械工学便覧 基礎編 a3 材料力学」(第 1 図)に基づき、等分布荷重を受ける周辺単純支持の円板に作用するモーメント M を以下のとおり算出する。

$$M = (3 + \nu) \cdot p \cdot a^2 / 16 = \text{約 }$$

ここで、

ν : ポアソン比 0.2

p : 分布荷重

a : 床スラブ半径

算出したモーメント及び「建築物の構造関係技術規準解説書」に基づく終局曲げ強度算出式より，床スラブ本体部の幅 1m 当たりの必要鉄筋量を算出する。

$$\text{必要鉄筋量} = M / (\sigma_y \cdot d) = \text{約} \boxed{}$$

ここで，

$$\sigma_y : \text{鉄筋の降伏強度 (345N/mm}^2) \text{ の 1.1 倍}^{*1} = \boxed{}$$

$$d : \text{床スラブの有効せい}^{*2} = \boxed{}$$

※1 国土交通省ほか「建築物の構造関係技術規準解説書」では，終局強度算出にあたり J I S 規格品の鉄筋の基準強度を 1.1 倍以下の数値とすることができるとされている

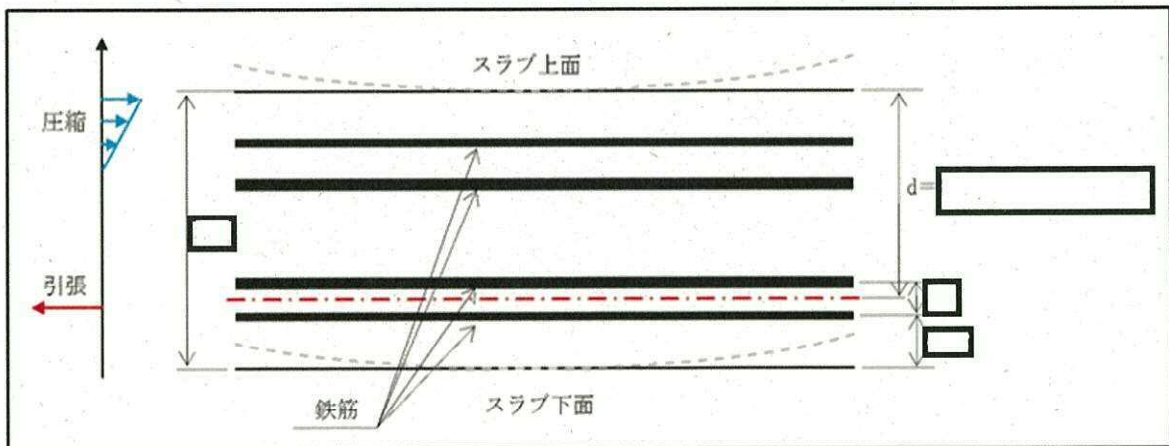
※2 圧縮縁から引張側鉄筋の重心までの距離（第 2 図）

表 5-1 円板のたわみと曲げ応力 (その1)
 (図中の印は最大応力を示す。応力式の複号は、上が上面、下が下面を表す。ln は自然対数、*印はポアソン比 $\nu=0.3$ のときの値を表す)

No.	荷重状態とたわみ形および下表面の応力分布	たわみ w , w_{max} および応力 σ , σ_{max}
1	円板, 周辺単純支持, 等分布荷重 	$w = \frac{pa^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right) \left(\frac{5+\nu}{1+\nu} - \frac{r^2}{a^2}\right)$ $w_{max} = (w)_{r=0} = \frac{(5+\nu)pa^4}{64(1+\nu)D} = 0.696 \frac{pa^4}{Eh^3}$ $\sigma_r = \mp \frac{3pa^2}{8h^2} (3+\nu) \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)$ $\sigma_\theta = \mp \frac{3pa^2}{8h^2} \left\{ (3+\nu) - (1+3\nu) \frac{r^2}{a^2} \right\}$ <div style="border: 1px solid red; padding: 2px; display: inline-block;"> $\sigma_{max} = (\sigma_r)_{r=0} = (\sigma_\theta)_{r=0} = \mp \frac{3(3+\nu)pa^2}{8h^2} = \mp 1.24 \frac{pa^2}{h^2}$ </div>
2	円板, 周辺固定, 等分布荷重 	$w = \frac{pa^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2$ $w_{max} = (w)_{r=0} = \frac{pa^4}{64D} = 0.171 \frac{pa^4}{Eh^3}$ $\sigma_r = \mp \frac{3pa^2}{8h^2} \left\{ (1+\nu) - (3+\nu) \frac{r^2}{a^2} \right\}$ $\sigma_\theta = \mp \frac{3pa^2}{8h^2} \left\{ (1+\nu) - (1+3\nu) \frac{r^2}{a^2} \right\}$ $\sigma_{max} = (\sigma_r)_{r=0} = \pm \frac{3pa^2}{4h^2} = \pm 0.750 \frac{pa^2}{h^2}$ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 10px;"> $M_{max} = \sigma_{max} \cdot Z$ $\text{断面係数 } Z = h^2/6 \text{ のため}$ $M_{max} = (3(3+\nu)p \cdot a^2/8h^2) \times [h^2/6]$ $= (3+\nu)p \cdot a^2/16$ </div>

高温による影響を考慮した場合でも、床スラブの周辺固定が完全に失われることはないが、保守的に周辺単純支持条件での評価を実施

第 1 図 等分布荷重を受ける円板の応力計算式



第 2 図 床スラブの有効せい

熱影響を考慮した側壁コンクリートの構造評価

1. 側壁コンクリートの圧縮軸力に対する評価

(1) 評価方法

以下に熱影響を考慮した側壁コンクリートの構造評価の方法を示す。

- ・ R P V等の重量はペデスタル側壁に圧縮荷重としてかかることから、コンクリートを対象として評価し、鉄筋については考慮しない。
- ・ 側壁部の A B A Q U Sによる熱伝導解析結果は、健全な壁厚を保守的に小さく評価する観点から、第 1 図に示す侵食量が最大となる感度ケースを参照する（側壁侵食量として 45cm を設定）。
- ・ 熱伝導解析結果における側壁での径方向各厚さの温度に対して、第 2 図に示すとおり包絡温度を設定する。
- ・ 各厚さ部分の包絡温度に対して、第 3 図に示す構造材料の耐火性ガイドブック（（社）日本建築学会 2017）（以下、「耐火性ガイドブック」という。）に示される加熱冷却後の圧縮強度残存比を参照し、M C C I 侵食後の残存壁厚に対し健全なコンクリートとしてみなせる等価壁厚を算定する。
- ・ 上記手順により算定した等価壁厚と別添 2 に示す R P Vを支持するために必要な壁厚である 133mm とを比較し、等価壁厚が必要壁厚を上回ることを確認する。

(2) 評価結果

等価壁厚は約 684mm となり， R P V 支持に必要な壁厚 133mm を上回ることから，側壁の圧縮軸力に対して R P V 支持機能は維持される。

2. 側壁基部コンクリートの面外せん断に対する評価

(1) 評価方法

以下に熱影響を考慮した側壁コンクリートの構造評価の方法を示す。

- ・第 4 図に示すコンクリート面外せん断の短期許容応力度に，1. の圧縮軸力に対する評価にておいて設定した側壁部各厚さにおける包絡温度（第 2 図）を考慮した圧縮強度残存比（第 3 図）を乗じて，高温影響を考慮したコンクリート強度を求める。
- ・日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」の断面算定評価式に基づいて，面外せん断に対する等価壁厚を算定する。

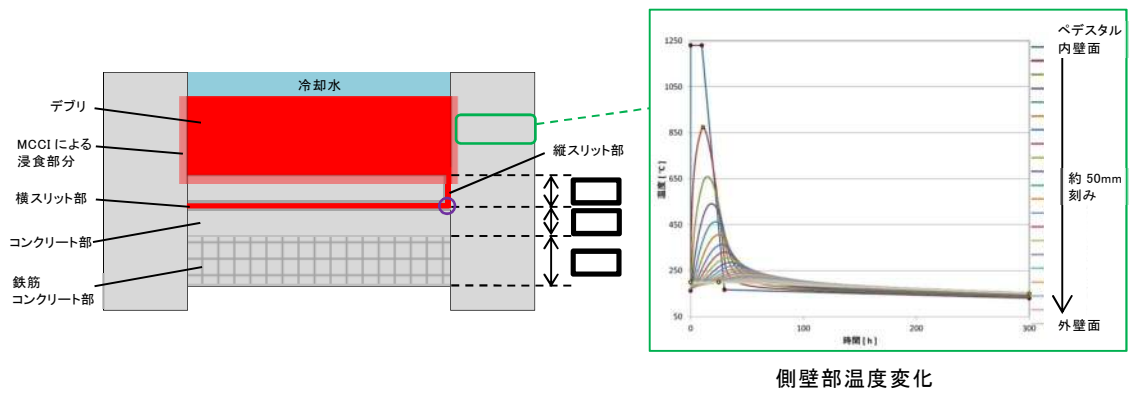
$$Q = b \cdot j \cdot f_s$$

Q : 発生荷重
b : 部材の有効幅
j : 柱の中心間距離 j = d × 7 / 8
d : 有効せい (必要壁厚)
f _s : 短期許容応力度

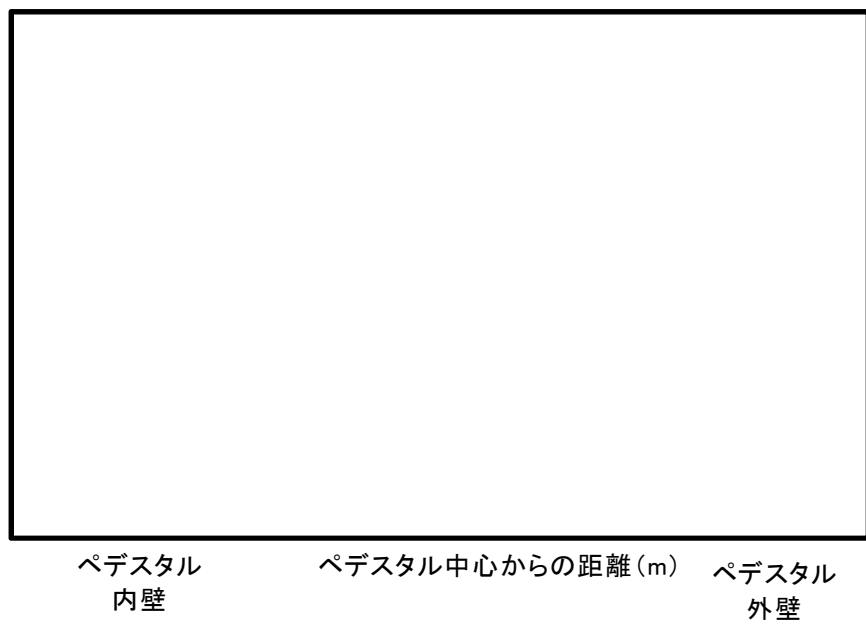
- ・上記手順により算定した等価壁厚と別添 2 に示す R P V を支持するために必要な壁厚である 192mm とを比較し，等価壁厚が必要壁厚を上回ることを確認する。

(2) 評価結果

等価壁厚は約 710mm となり， R P V 支持に必要な壁厚 192mm を上回ることから，側壁基部の面外せん断に対して R P V 支持機能は維持される。



第 1 図 側壁部の熱伝導解析結果



第 2 図 ペデスタル側壁における包絡温度の設定

表 2.4.1.4 圧縮強度残存比の提案値

加熱温度 T, T_r (°C)	高温時		加熱冷却後	
	Eurocode ⁶⁹⁾ (normal weight concrete)	提案値 $\kappa_c(T)$	Eurocode ⁶⁹⁾ (normal weight concrete)	提案値 $\kappa_c(T_r)$
20	1.00 [1.00]*	1.00	1.00	1.00
100	1.00 [0.95]*	$0.09 \times W/B + 0.74$	0.95	0.97
200	0.95 [0.90]*	$0.27 \times W/B + 0.78$	0.86	0.93
300	0.85 [0.85]*	$0.21 \times W/B + 0.80$	0.77	0.77
400	0.75 [0.75]*	$0.32 \times W/B + 0.64$	0.68	0.61
500	0.60 [0.60]*	$0.31 \times W/B + 0.48$	0.54	0.45
600	0.45 [0.45]*	$0.41 \times W/B + 0.24$	0.41	0.35
700	0.30 [0.30]*	$0.40 \times W/B + 0.14$	0.27	0.25
800	0.15 [0.15]*	0.15	0.14	0.15

*: 表中の[]は、本ガイドブック 2009 年版の記載値である。
2005 年の Eurocode⁶⁹⁾ 修正に伴い、修正した。

出典：日本建築学会，構造材料の耐火性ガイドブック，2017

第 3 図 コンクリートの圧縮強度残存比

表 6.1 コンクリートの許容応力度 (N/mm²)

	長 期			短 期		
	圧縮	引張	せん断	圧縮	引張	せん断
普通コン クリート			$\frac{1}{30} F_c$ かつ $(0.49 + \frac{1}{100} F_c)$ 以下			
軽量コン クリート 1 種およ び 2 種	$\frac{1}{3} F_c$	—	普通コンクリートに対する値の 0.9 倍	長期に対す る値の 2 倍	—	長期に対する 値の 1.5 倍

[注] F_c は、コンクリートの設計基準強度 (N/mm²) を表す。

第 4 図 コンクリートの許容応力度

熱影響を考慮した床スラブのコンクリート及び鉄筋の構造評価

1. 床スラブコンクリートの面外せん断に対する評価

(1) 評価方法

以下に熱影響を考慮した床スラブコンクリートの構造評価の方法を示す。

- ・デブリ等の重量によるせん断応力は床スラブにせん断荷重として掛かることから、コンクリートを対象にせん断応力を評価し、鉄筋については考慮しない。
- ・床スラブ部の A B A Q U S による熱伝導解析結果は、M A A P 解析結果における侵食量並びに床スラブ上のデブリ及び横スリット内デブリの温度変化等を入力し、鉄筋コンクリート部の温度を厳しくする観点から侵食量を 0cm^{*}として評価した第 1 図に示すベースケースの結果を参照する。
- ・熱伝導解析結果におけるにおける床スラブ鉄筋コンクリート部の高さ方向の温度に対して、第 2 図に示すとおり包絡温度を設定する。
- ・床スラブ鉄筋コンクリート部の各高さ方向の包絡温度に対して、耐火性ガイドブックに示される加熱冷却後の圧縮強度残存比を参照し、健全なコンクリートとしてみなせる等価壁厚を算定する。
- ・上記手順により算定した等価板厚と別添 3 に示すデブリ保持に必要な板厚である とを比較し、等価壁厚が必要壁厚を上回ることを確認する。

※：侵食量が小さいと、スリット内デブリから冷却水及び冷却水によりクエンチしたデブリまでの距離が長く、スリット内デブリの崩壊熱が除熱されにくいいため、鉄筋コンクリート部の温度が高くなる。

(2) 評価結果

等価壁厚は約 618mm となり、デブリ保持に必要な板厚である [] を上回るため、床スラブコンクリートの面外せん断に対してデブリ保持機能は維持される。

2. 床スラブ鉄筋の曲げ応力に対する評価

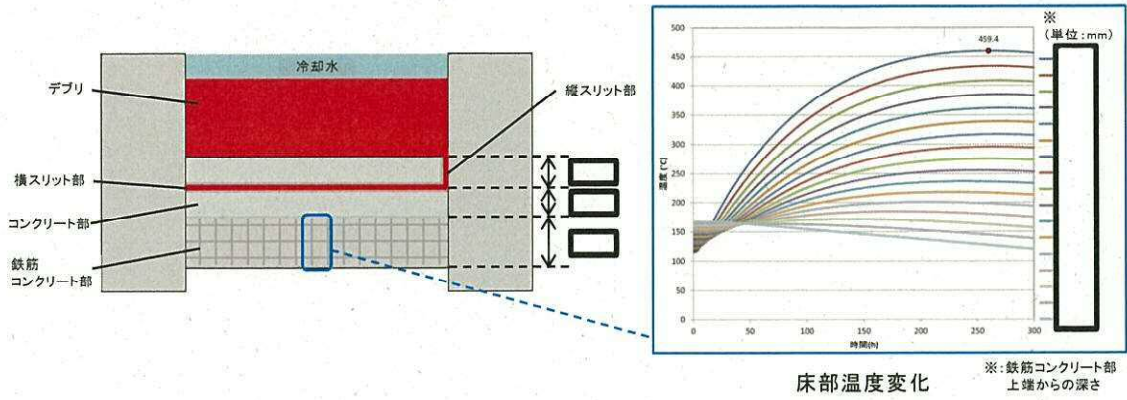
(1) 評価方法

以下に熱影響を考慮した床スラブ鉄筋の構造評価の方法を示す。

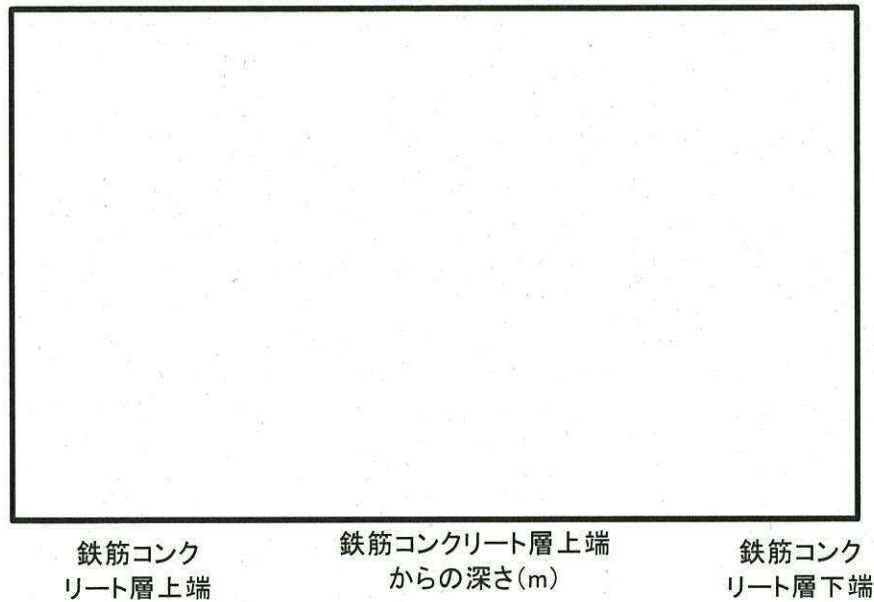
- ・デブリ等の重量による曲げ応力は床スラブの鉄筋コンクリート部に引張荷重として掛かることから、図 3 に示す鉄筋を対象に曲げ応力を評価し、コンクリートについては考慮しない。
- ・ A B A Q U S による熱伝導解析結果より、下端筋位置では最大 220℃程度まで温度上昇するため、第 4 図に示す耐火性ガイドブックの高温時の鉄筋強度を参考に強度低下割合として 4 割を設定する。
- ・実機の床スラブ本体部の幅 1m あたりの鉄筋量 [] に対し上記の鉄筋強度劣化度合いを考慮し、健全な状態とみなせる鉄筋量を評価する。
- ・上記手順により算定した強度低下を考慮した鉄筋量と別添 3 に示すデブリ等の重量保持に必要な鉄筋量である幅 1m あたり [] とを比較し、等価壁厚が必要壁厚を上回ることを確認する。

(2) 評価結果

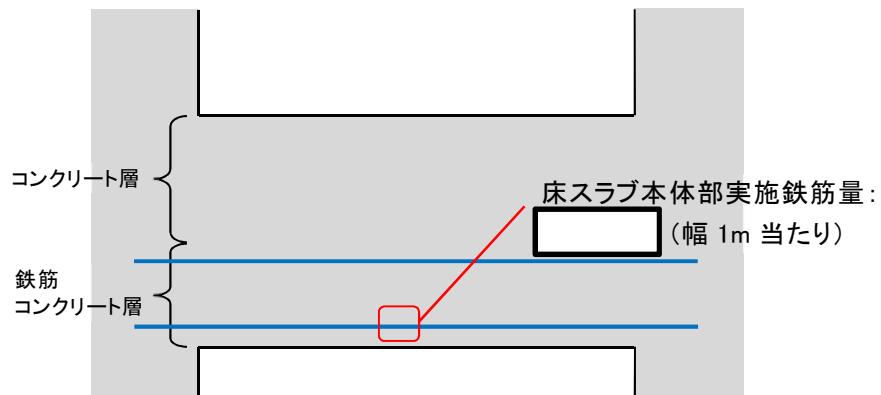
強度低下を考慮した鉄筋量は約 [] となる。デブリ等の重量保持に必要な鉄筋量は幅 1m あたり [] であり、必要な鉄筋量を上回ることから、曲げ応力に対してデブリ保持機能は確保される。



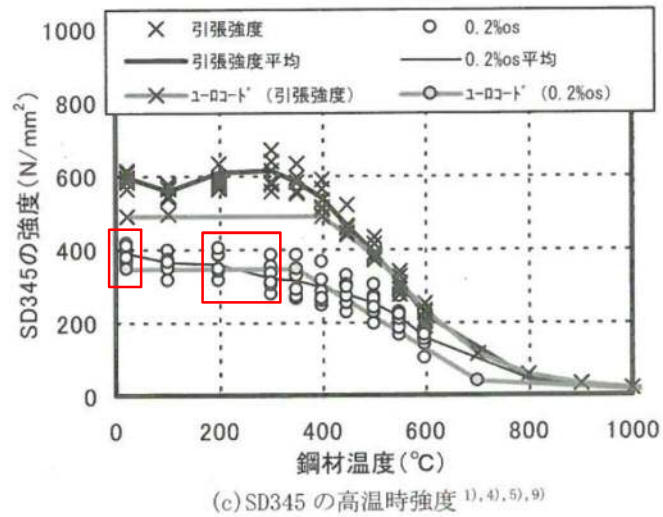
第1図 ペDESTAL温度評価結果



第2図 床スラブ鉄筋コンクリート部における包絡温度の設定



第3図 床スラブの鉄筋コンクリート範囲



出典：日本建築学会，構造材料の耐火性ガイドブック，2017

第4図 鉄筋強度の低下割合

鉄筋コンクリート内に発生する熱応力の取扱いについて

1. はじめに

東海第二発電所のMCC I対策を踏まえ、RPV破損時にペDESTALへ落下したデブリからの熱影響による鉄筋コンクリートの材料強度低下を考慮した構造健全性評価を行い、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ている。

一方、本事象は終局状態であることから、デブリからの伝熱によって鉄筋コンクリート内に発生する熱応力は考慮しないこととしており、この取扱いの考え方について説明する。

2. 発生する熱応力（自己拘束的な応力）の解放について

第1図に鉄筋コンクリート構造物に発生する熱応力の解放原理について示す。RPVの破損後にデブリが落下・堆積し、その非常に高温な熱により、ペDESTAL内側が高温状態となり膨張するが、周囲の拘束によって膨張は抑えられるため、ペDESTAL内側には圧縮力が生ずる。一方、ペDESTAL外側は、内側よりも温度が低いため熱膨張に対する反作用として引張力が生ずる。次に、躯体の温度上昇に伴って熱膨張が進むと高温側（内側）には圧縮力が加算され、低温側（外側）には引張力が加算される。このように、定常状態からの温度上昇により、躯体内で熱応力（自己拘束的な応力）が発生する。更に温度が上昇し、熱応力がコンクリートの許容引張力を上回るとコンクリートにひび割れが発生する。熱応力は自己拘束的な応力であるため、ひび割れを生ずると、その部位の熱応力は解放される。終局状態は、ひび割れが多

数発生している状態であるため、熱応力のほとんどが解放されていると考えられる。

3. C C V規格における熱応力の取扱いについて

第2図及び第3図にC C V規格における熱力応力の扱いを示す。ペDESTALと同様の円筒形状構築物の設計規格であるC C V規格では、各荷重状態における熱応力の取り扱いについて示されており、荷重状態Ⅰ～Ⅲでは、コンクリート部材の剛性、ひび割れ等を考慮して適切に評価することにより算定することとされている。また、荷重状態Ⅳでは熱応力は無視してよいこととされている。

解説中では熱応力を算定する際の手法が示されており、荷重状態Ⅰ、Ⅱでは弾性剛性を $1/2$ に、荷重状態Ⅲでは $1/3$ に一律に低減して算定する方法（一律低減法）が示されている。これはひび割れ等による部材剛性の低下により、鉄筋コンクリート部材の熱応力が低減するという性質を考慮したものであり、熱応力実験結果に基づいている。なお、C C V規格では外力や熱応力に対する部材の塑性剛性（ひび割れ後のコンクリートの剛性等）を考慮した部材断面の釣合いを評価して応力を算定する方法（ひび割れ断面法）についても示されている。

4. ペDESTALにおける熱的影響を考慮した解析的検討（参考）

前述のとおり、終局状態において躯体に生じる熱応力は解放されるが、ここでは、熱的影響による躯体材料の強度劣化を考慮した上で、外力や熱応力に対する部材の塑性剛性を考慮した部材断面の釣合いを算定し、応力と変形について評価することで、終局限界に対する健全性を検討する。

(1) 評価方法

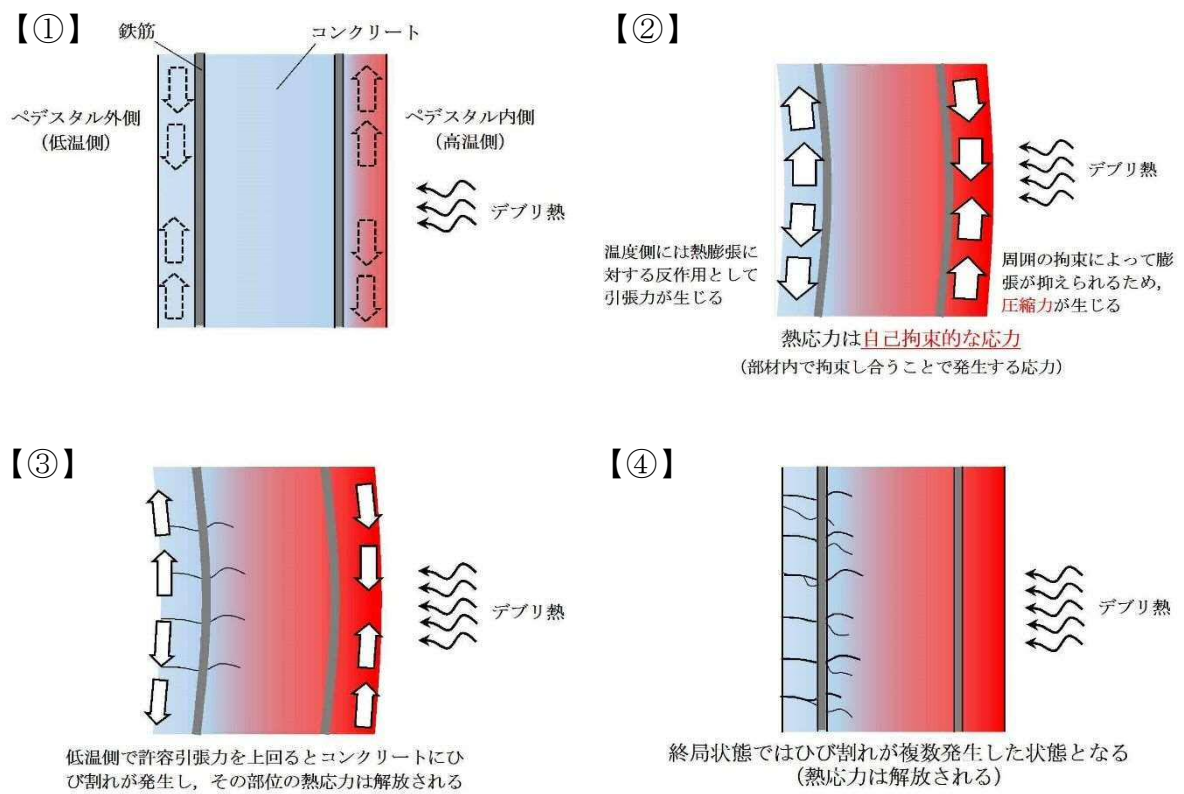
第3図にRC-N規準に記載されているひび割れ断面法による設計フローを、第4図に評価対象部位を示す。本検討では、第3図に示す評価フローに準じて、デブリからの熱影響を受けた際の熱応力として曲げモーメントが発生する上部側壁を対象に評価する。

温度荷重に対しては、NASTRANコードを用いて弾性剛性での温度応力解析にて曲げモーメントを評価し、断面の曲率を曲げ剛性（EI）を用いて求める。なお、NASTRANコードに入力した温度条件はコリウムシールド（15cm）設置を仮定したMAAP解析に基づき設定する。温度以外の荷重（固定荷重積載荷重）についても同様にNASTRANコードにより応力を評価する。

次に両者で得られた曲率を加算し、温度を含む応力組合せ時の断面の釣合い状態を評価（中立軸位置の算定）し応力度を算定する。なお、この時に断面に作用する軸力は積載されるRPV自重を含む通常運転時の軸力とし、曲げモーメントが終局状態に達するまで漸次増加させていく。また、仮定する断面の釣合い計算においては、最も温度勾配が高い時点での断面内の温度分布に対応した材料強度低減を考慮し復元力特性（M- ϕ 関係）を算定する。

(2) 評価結果

第4図にペDESTAL上部側壁の曲げモーメントが最大になる断面におけるM- ϕ 関係図を示す。評価の結果、ペDESTALは十分な塑性変形性能を備えており、発生する熱応力と曲率は終局限界に対して十分に小さいことを確認した。



第1図 熱応力が解放する原理

CVE-3330 熱応力の扱い

温度荷重により発生する応力である熱応力の扱いは、次の(1)および(2)によるものとする。

- (1) 荷重状態Ⅰ、荷重状態Ⅱおよび荷重状態Ⅲにおける熱応力は、コンクリート部材の剛性を、ひびわれ等を考慮して適切に評価することにより算定することとする。
- (2) 荷重状態Ⅳにおける熱応力は無視してよいこととする。

(解説 CVE-3330) 熱応力の扱い

温度荷重により発生する熱応力は、自己拘束的な応力であって、コンクリート部材の剛性に左右される性質を持っているので、コンクリート部材の剛性を適切に評価することによって熱応力を算定する。

また、自己拘束的な応力は、十分な塑性変形能力がある場合、理論的にも実験的にも終局耐力に影響しないことから、部材の終局状態に相当する荷重状態Ⅳにおける評価では、熱応力を無視してよいこととした。

熱応力の算定にあたっては、コンクリート断面の厚さ方向に曲線状となっている温度分布を等価な応力を与える直線分布に換算することが一般的である。

参考：American Concrete Institute, Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures (ACI 349-06) APPENDIX E, 2006

なお、熱応力の算定は次のいずれかによるのが一般的である。

(1) 弾性剛性を一律に低減する方法

熱応力は、荷重状態Ⅰおよび荷重状態Ⅱにおいては弾性剛性を $1/2$ に、荷重状態Ⅲにおいては弾性剛性を $1/3$ にそれぞれ一律に低減して算定する。

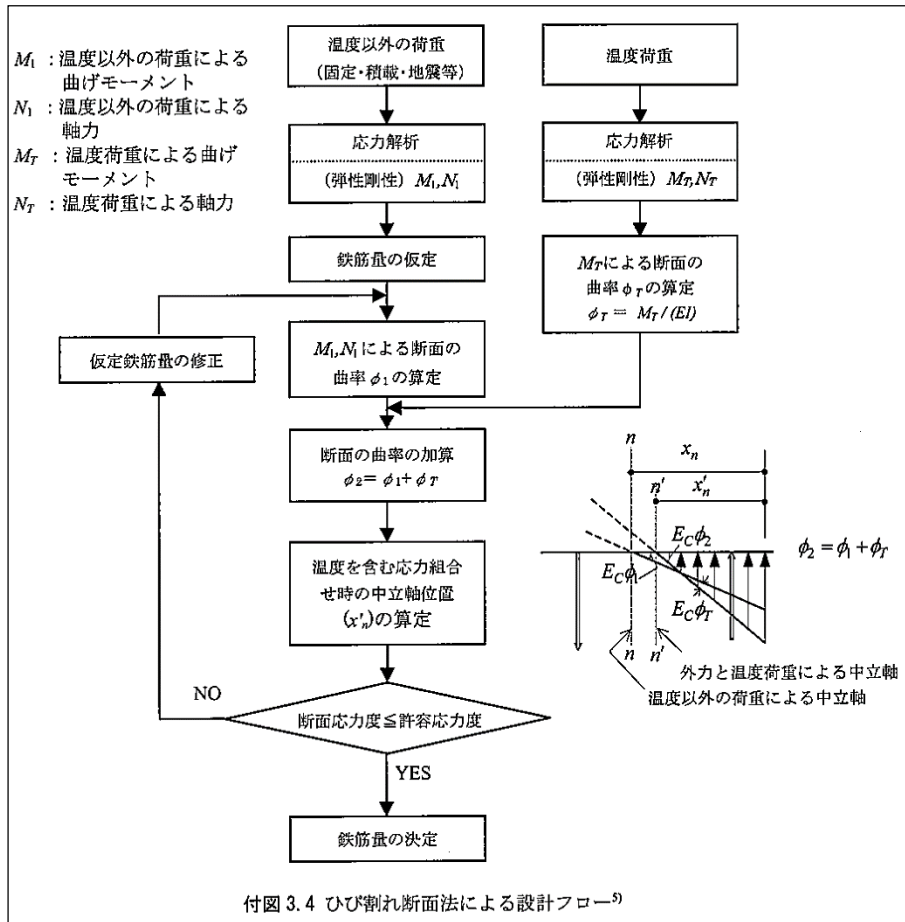
この方法は、熱応力を他の外的荷重（死荷重、圧力、地震荷重等）による応力と直接加算できる利点がある。この場合、他の外的荷重に対しては原則として剛性を低下させない。

熱応力の算定に用いる温度荷重に対する剛性低減係数は、次に基づいて定めている。

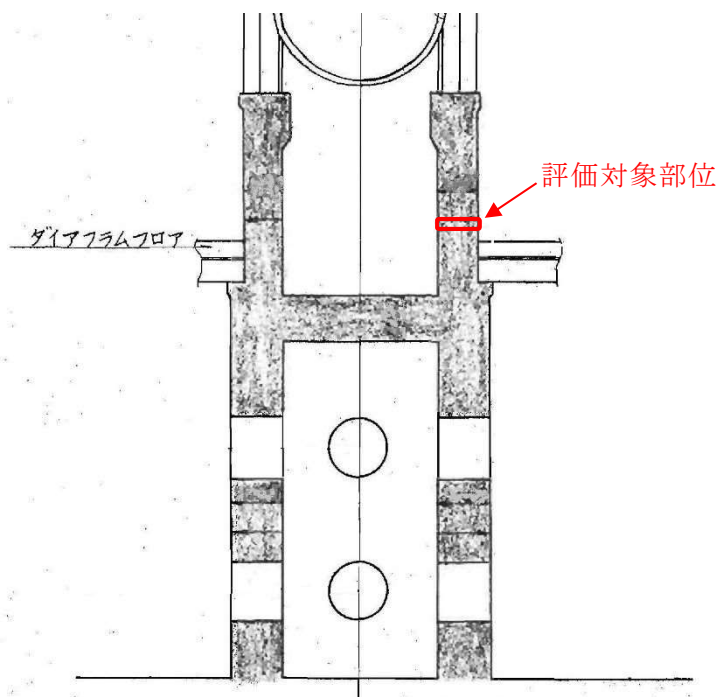
荷重状態Ⅰおよび荷重状態Ⅱでは、鉄筋の許容引張応力度は 195 N/mm^2 程度で、この時の鉄筋コンクリート部材の剛性残存率（部材の剛性を初期弾性剛性で除した値）は、実験的には $1/3$ から $2/3$ の範囲にある（解説図 CVE-3330-1 および解説図 CVE-3330-2 参照）。また、長期にわたる荷重による材料のクリープの影響によっても部材の剛性は低下することから、熱応力の算定には、弾性剛性の $1/2$ の剛性を用いる。

荷重状態Ⅲでは、鉄筋の許容応力度 345 N/mm^2 程度に対して剛性残存率は 0.3 から 0.45 の範囲にあり、上記と同じ理由により熱応力の算定には、弾性剛性の $1/3$ の剛性を用いる。

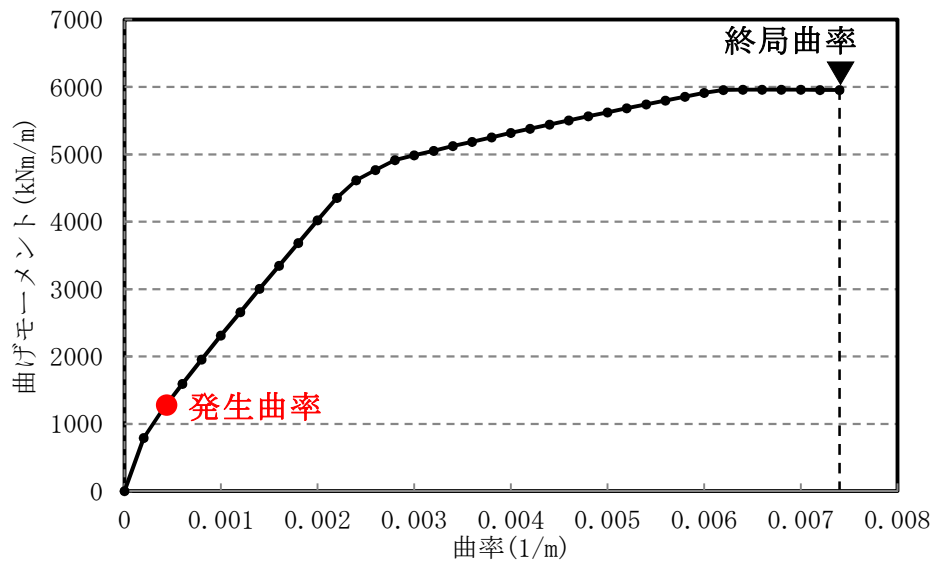
第2図 C C V規格における熱応力の扱い



第 3 図 ひび割れ断面法による設計フロー (RC-N 規準)



第 4 図 評価対象部位



第 5 図 曲げモーメントー曲率関係 (M- ϕ 関係)

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 3.09N/mm^2 ，下部側壁で 2.65N/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〔構造性能照査編〕（（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 0.16mm 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 184μ 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 2.0mm 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 364μ 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 3.70N/mm^2 であり，終局面外せん断応力度 4.33N/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 μ ）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 ² ，下部側壁 2.65N/mm ² ）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 μ ）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 μ ）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 ² ）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 μ ）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 ²	3.09 N/mm ²	○
側壁下部	約 0.77 N/mm ²	2.65 N/mm ²	○

※：「○」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

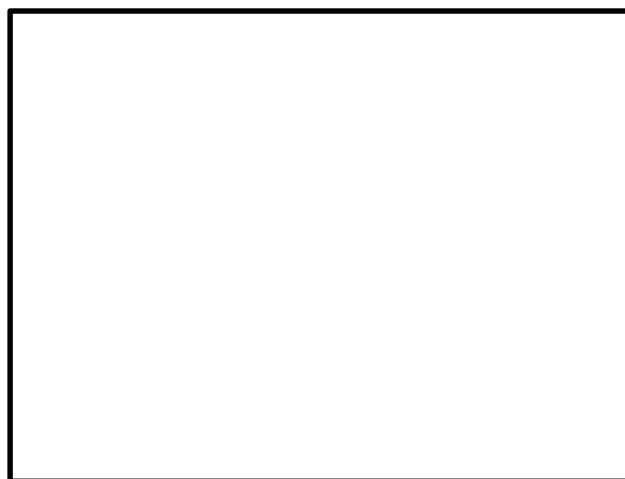
評価部位	発生応力度	判断基準	評価※
床スラブ	約 3.70 N/mm ²	4.33 N/mm ²	○

※：「○」解析結果の発生応力度が判断基準を満足する

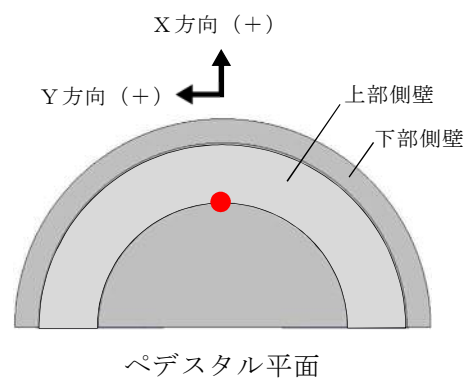
第4表 ペデスタル構造健全性評価の評価結果のまとめ

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 μ ）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 ² ，下部側壁2.65N/mm ² ）を超えない	上部側壁：約0.93N/mm ² 下部側壁：約0.77N/mm ²	○
	鉄筋	引張ひずみ	許容ひずみ（5,000 μ ）を超えない	約184 μ	○	
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 μ ）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 ² ）を超えない	約3.70N/mm ²	○
	鉄筋	引張ひずみ	許容ひずみ（5,000 μ ）を超えない	約364 μ	○	

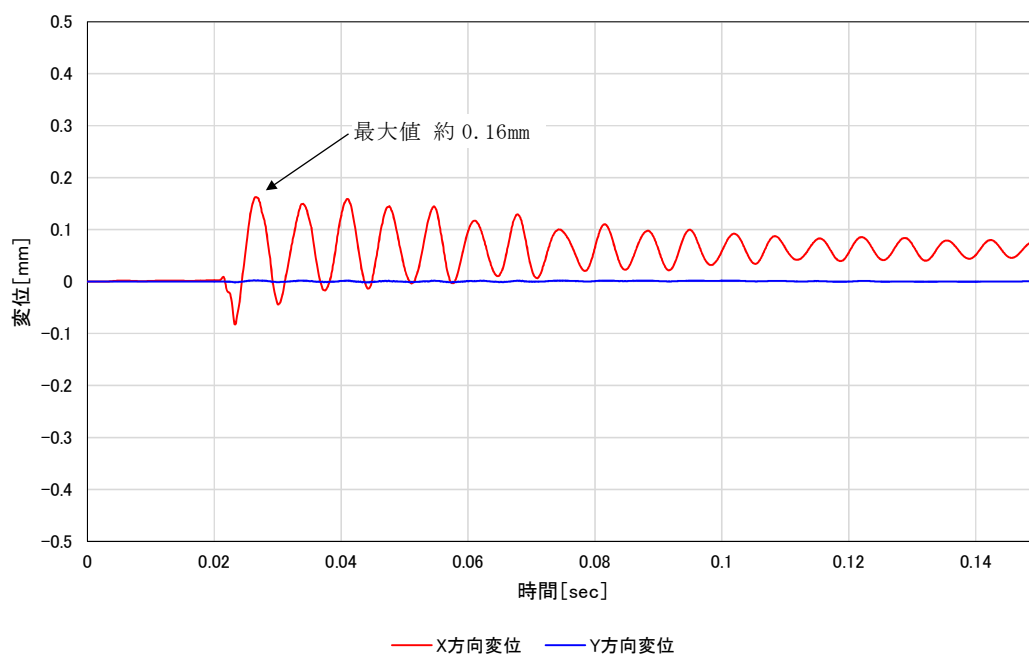
※：「○」解析結果が判断基準を満足する



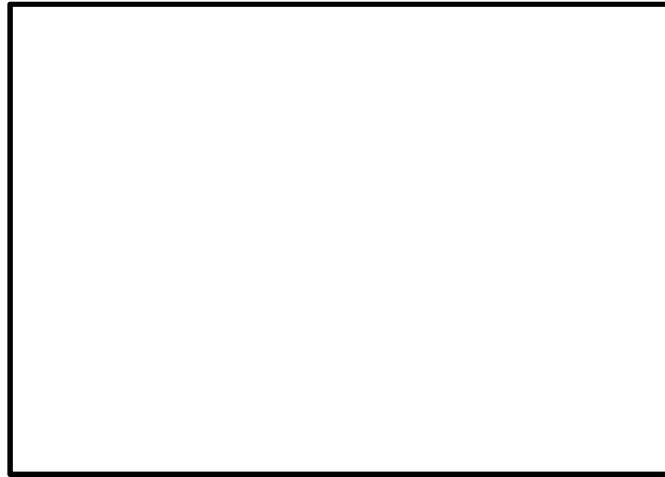
ペDESTAL断面



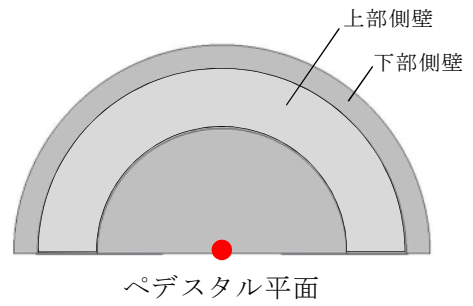
● 対象部位



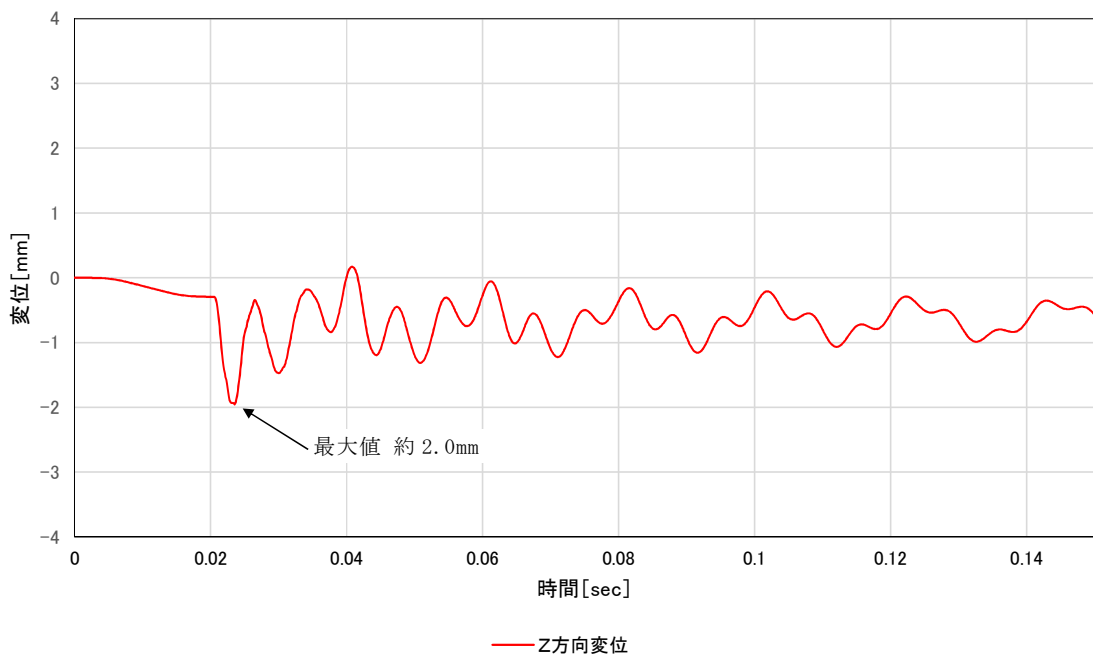
第 1 図 ペDESTAL側壁の半径方向変位時刻歴



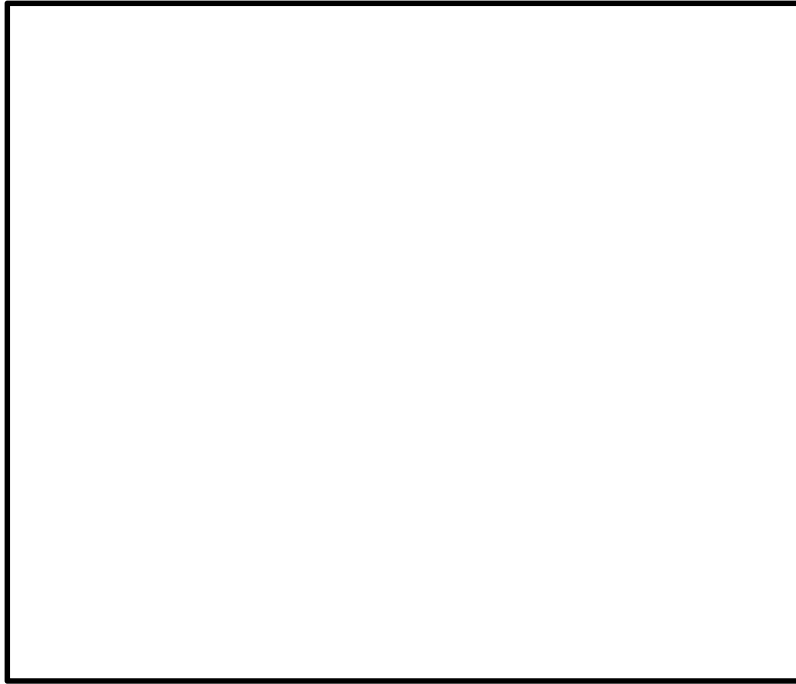
ペDESTAL断面



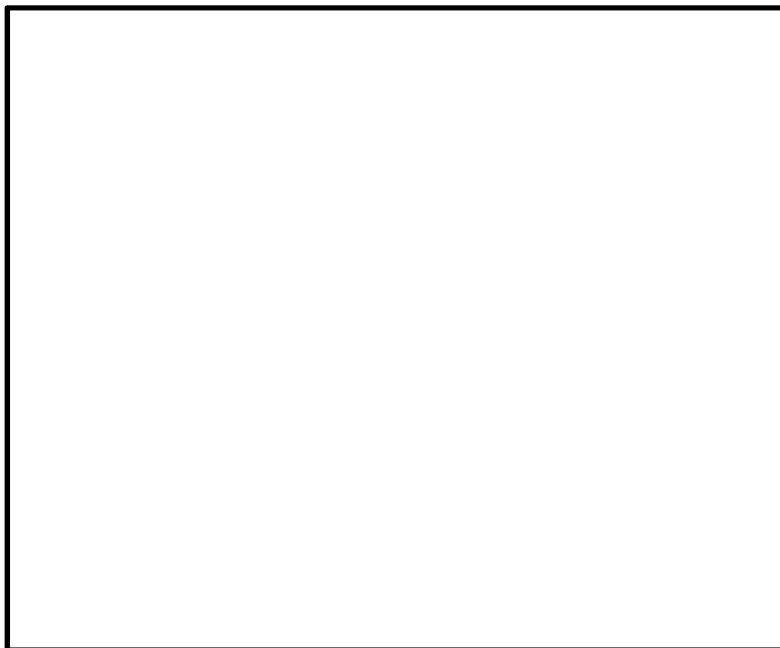
● 対象部位



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、

τ_H : 終局面外せん断応力度 (N/mm²)

$p_{t\theta}$: 円周方向主筋の鉄筋比 (-)

f_y : 鉄筋の許容引張応力度 (N/mm²)

β : 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)

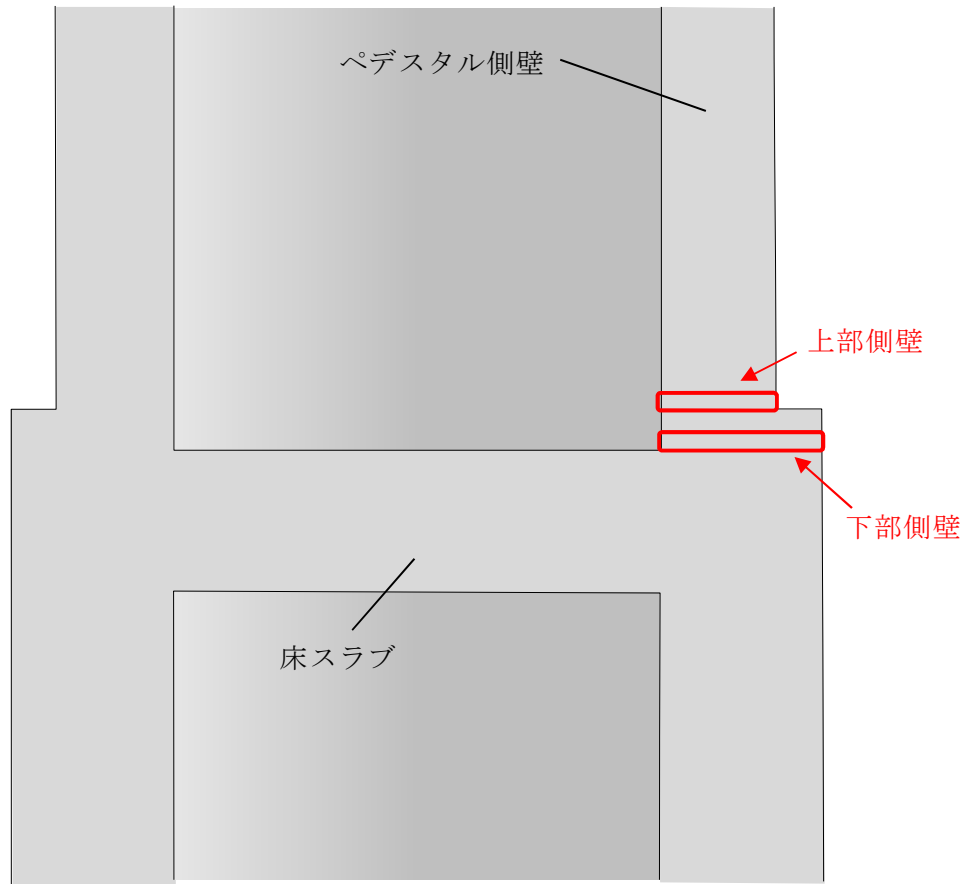
t : シェル部の胴の厚さ(mm)

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 ²
	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 ²
	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/mm²，下部側壁で 2.65N/mm²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/mm²)

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)

γ_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 ²
コンクリートの設計基準強度	22.06N/mm ²
圧縮強度動的増倍率 [*]	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	
γ_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 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

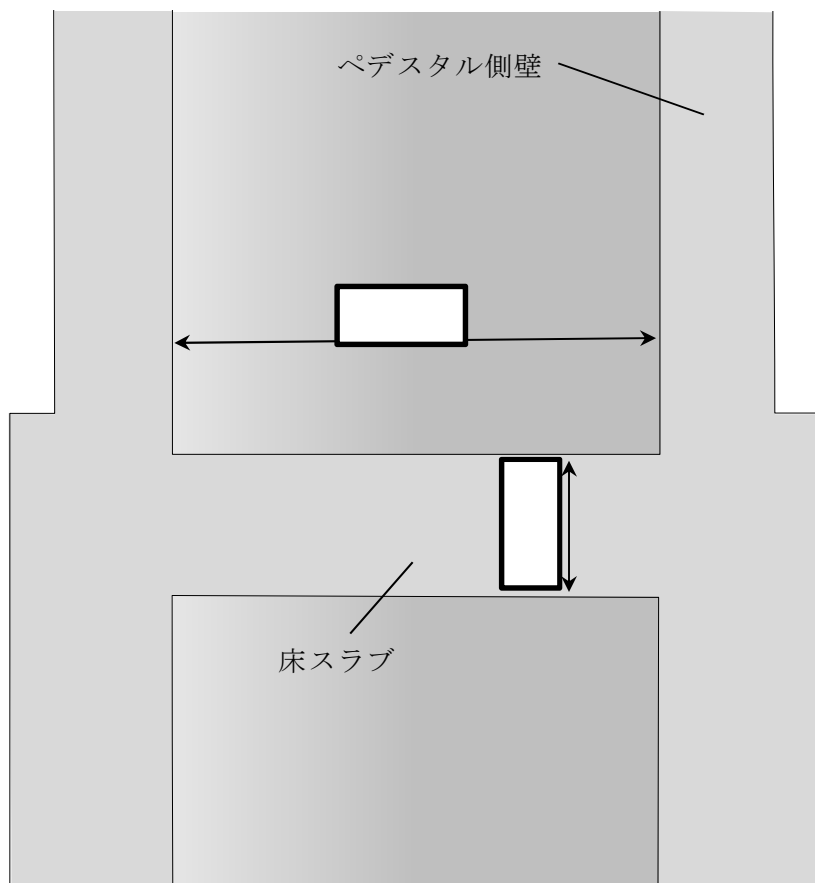
面外せん断応力度の算定について，床スラブを例に説明する。なお，側壁についても床スラブと同様に面外せん断応力度を算定している。

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 τ_{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。

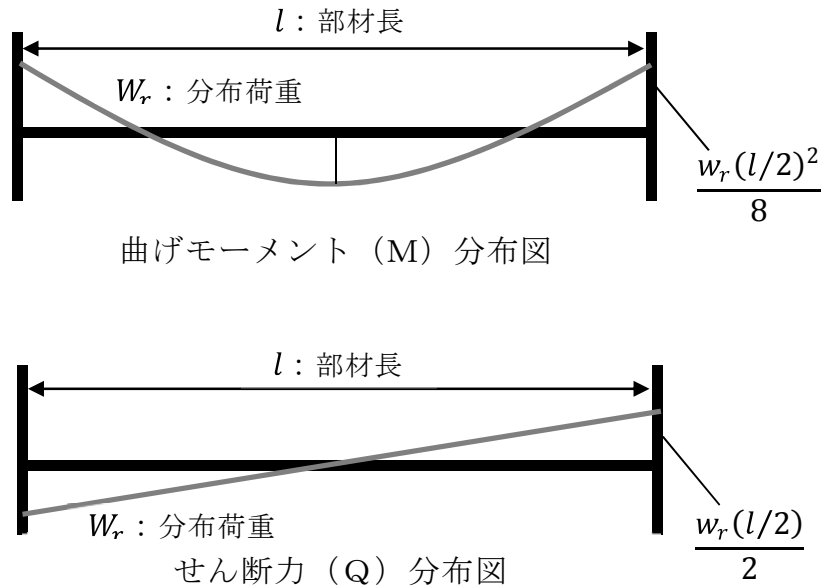
床スラブ端部の1列目の要素幅あたりの面外せん断応力度は、スラブの厚さ方向(1~j行目)の各要素のせん断力(Q(1,1)~Q(1,j))を合算した値($\sum_{i=1}^j Q_{(1,i)}$)に1列目のせん断断面積($\sum_{i=1}^j A_{(1,i)}$)で除して、スラブ端部1列目の面外せん断応力度(τ_1)を算定する。したがって、k列目の面外せん断応力度(τ_k)は、 $\tau_k = \sum_{i=1}^j Q_{(k,i)} / \sum_{i=1}^j A_{(k,i)}$ で表すことができる。次に、列毎の面外せん断応力度($\tau_1 \sim \tau_k$)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

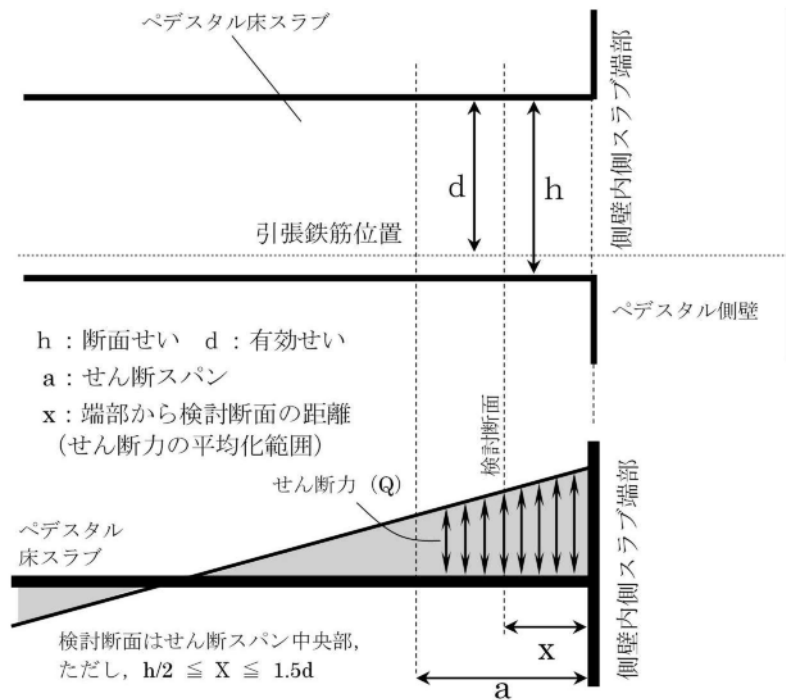
評価対象部位		発生応力度
側壁	上部	約 0.93 N/mm ²
	下部	約 0.77 N/mm ²
床スラブ		約 3.70 N/mm ²



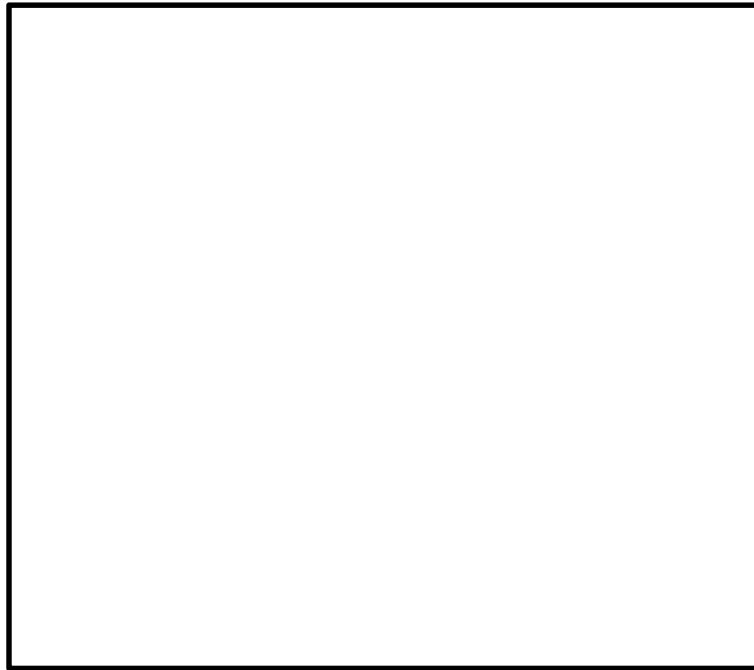
第1図 ペデスタルの床スラブの形状寸法



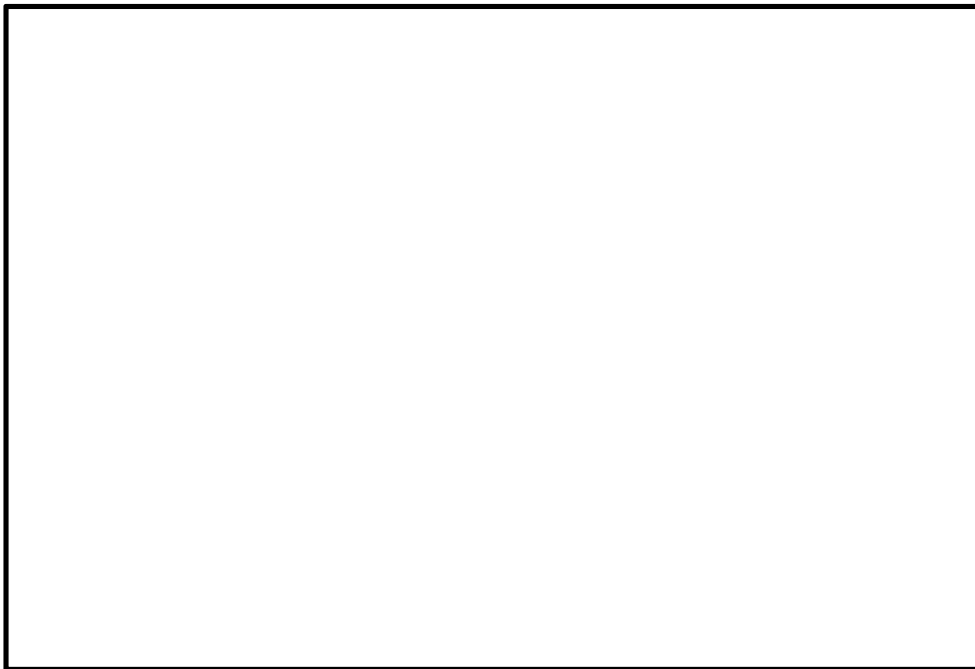
第 2 図 曲げモーメント及びせん断力分布の関係



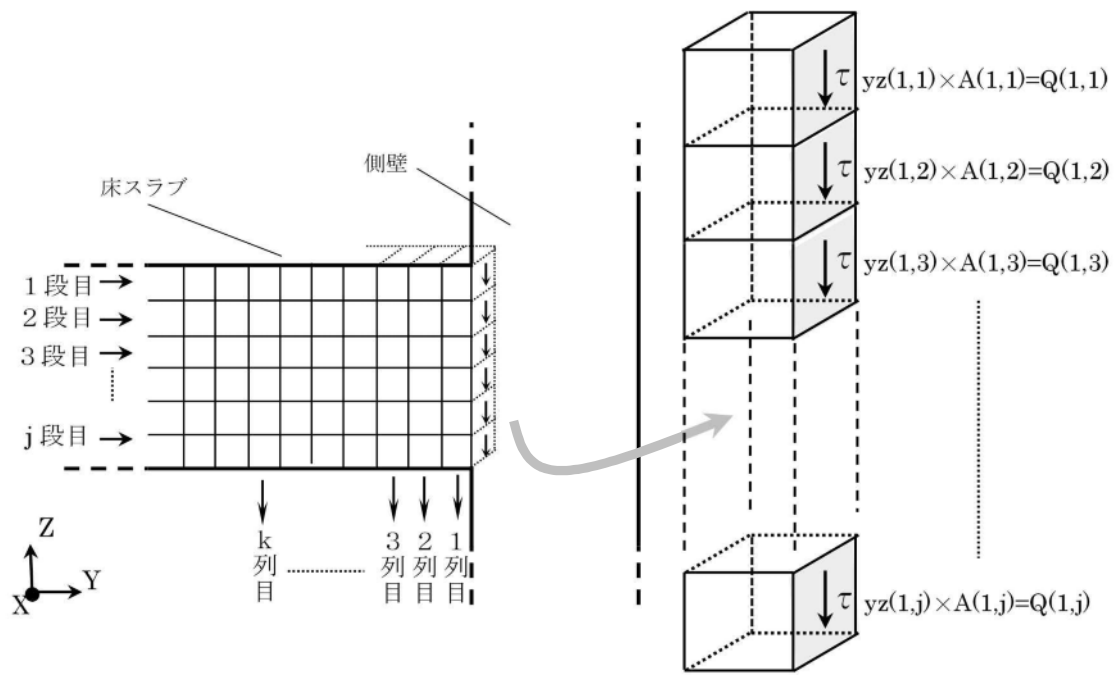
第 3 図 床スラブの形状及び発生するせん断力分布の概念



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

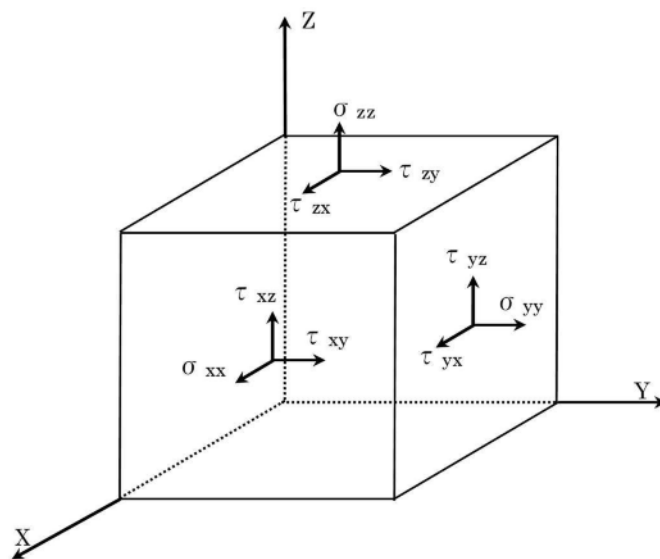


第5図 側壁部解析モデルにおける面外せん断力の検討範囲



<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

水蒸気爆発は、溶融デブリが水中に落下し、融体が膜沸騰状態で分散混合することで粗混合領域が形成され、さらに、この粗混合量領域においてトリガリングが発生することで、融体の細粒化、急速放熱に伴い圧力波が粗混合領域内を伝播し、この相互作用の結果、高圧領域（爆発源）が形成される事象である。ペDESTAL中心でSEが発生すると、高圧領域より生じた圧力波は、水中で減衰（距離減衰）しながら側壁の方向へ進行する。

第1図及び第2図にLS-DYNA解析におけるペDESTAL躯体に作用する圧力の分布を示す。LS-DYNA解析では、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。

なお、LS-DYNAにおける爆発源の調整の結果、側壁及び床スラブの力積がSE解析コードJASMINEの解析結果を包絡していることを確認している（添付11別添1）。

2. 手計算との発生応力の比較

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0.70N/mm²であり、解析結果の約0.77N/mm²と比較して両者はよく一致している。このため、LS-DYNA解析では構造物への影響が適切に考慮されていると判断できる。

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

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) …

b : 外半径 (mm) …

r : 半径方向の座標 (mm) … (下部側壁の壁厚中心)

P_a : 内圧 (MPa)

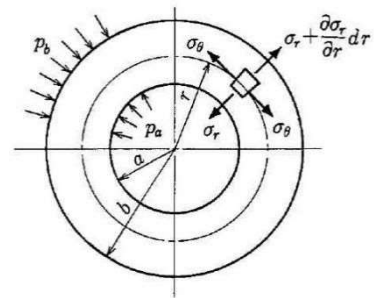
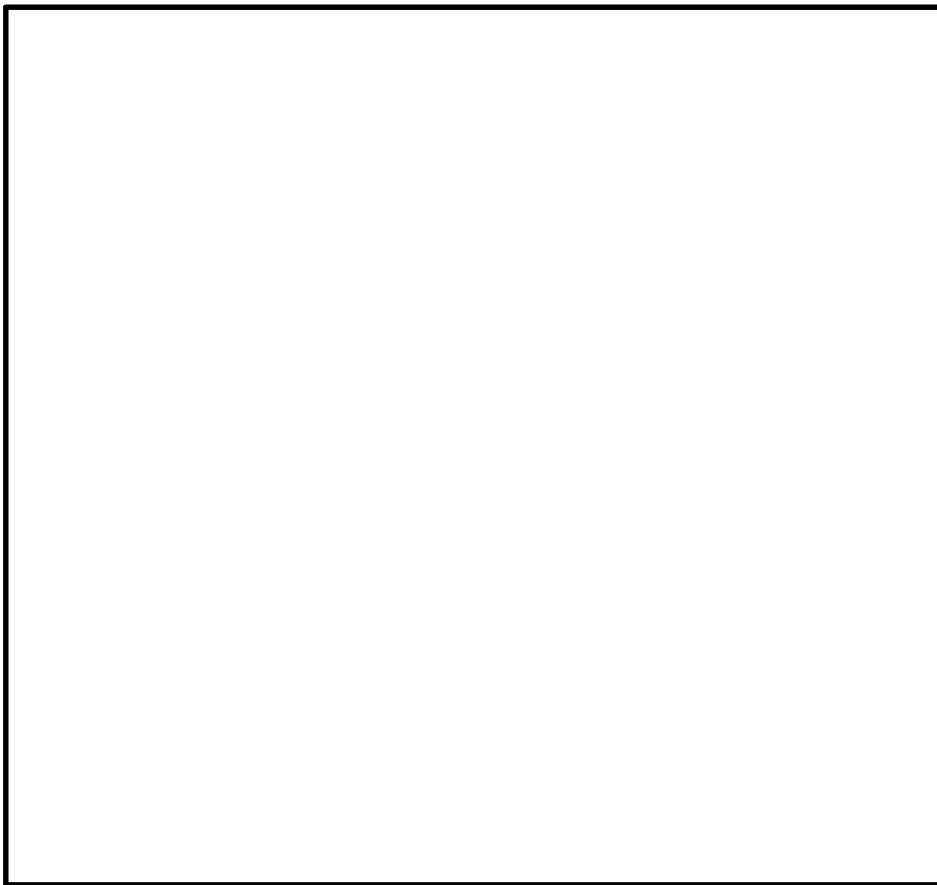
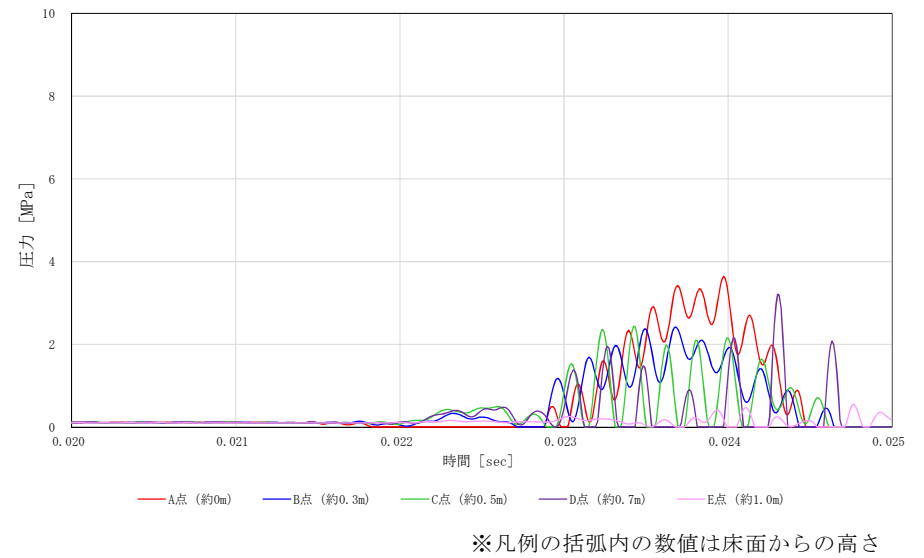
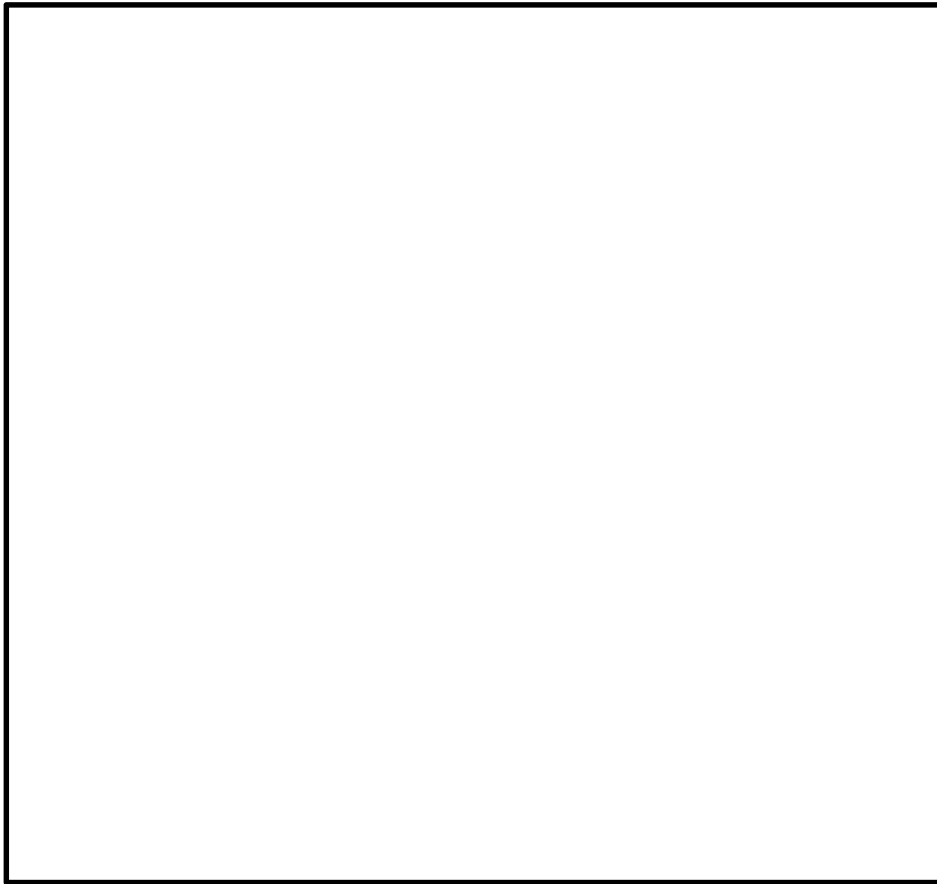


図6・9 内外圧を受ける円筒
(機械工学便覧 基礎編 a3 材料力学)

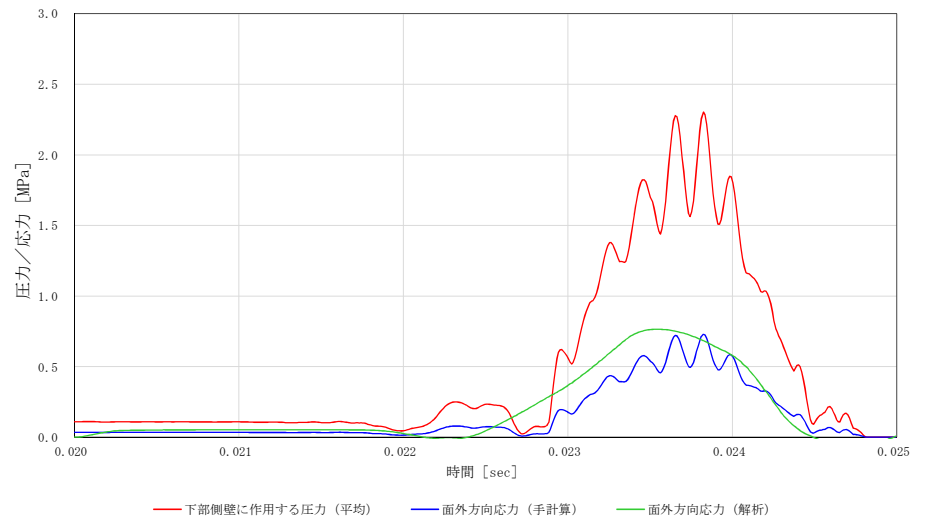
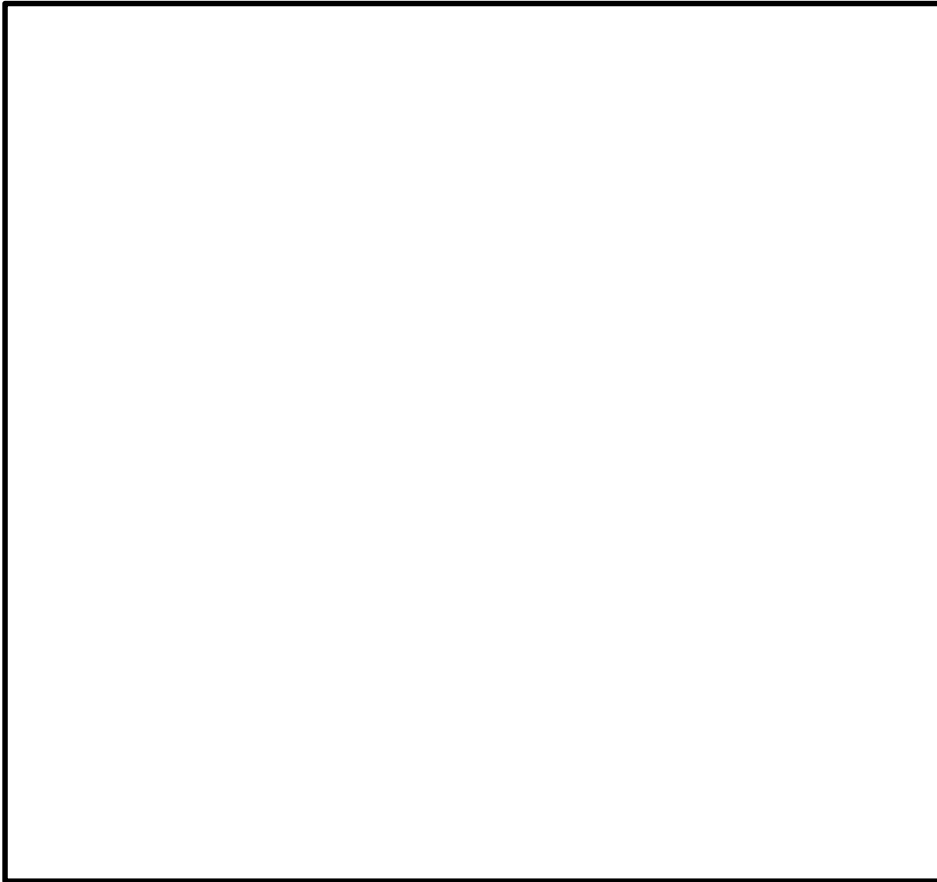


※凡例の括弧内の数値は床スラブ中心からの距離

第 1 図 床スラブに作用する圧力の分布



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

東海第二発電所では、S Eによって残留熱除去系及び代替循環冷却系の水源となるサプレッション・プールに大量のデブリが移行するような経路が形成されないことを確認するため、S EによってペDESTAL床スラブが終局状態に至らないことを評価し、デブリ保持機能が維持されることを確認している。また、ペDESTALの床面に落下したデブリを冷却するための格納容器下部注水系（常設）については、事故収束のために十分な注水容量を有する設計としている。これらのことから、S Eが発生した場合においても、ペDESTALの床面に落下したデブリは適切に冷却されるものと判断している。

しかしながら、S EによってペDESTAL躯体に生じた残留ひび割れより、デブリ冷却のための水が漏えいすることも考えられることから、ペDESTAL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. 検討方法

(1) 残留ひび割れ幅に対する水密性の検討

LS-DYNA解析結果に基づき残留ひび割れ幅を算定し、「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の評価基準値として示されている0.2mmを超えないことを確認する。

(2) 評価基準値の適用の考え方

「コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針—2009—」において，建築物を対象とした漏水実験や実構造物における実態調査がまとめられている。この中で坂本他の検討^{※1}では，10～26cm までの板厚による実験を行っており，板厚が厚くなる方が漏水に対して有利であり，26cm では漏水が生じるひび割れは幅は 0.2m 以上であったと報告されている。

また，一般に，ひび割れ幅が 0.2mm 未満であれば，水質による目詰まりやひび割れ内部のコンクリートの水和反応による固形物の析出等により，漏水流量が時間とともに減少する^{※2}ことが分かっており，更に漏水影響は軽減されると考えられる。

以上のことより，ペDESTALの側壁（厚さ：上部約 1.5m，下部約 2.1m）及び床スラブ（厚さ：約 1.8m）の板厚を踏まえると，ひび割れ幅 0.2mm は，漏水によるデブリの冷却に影響有無の判断に対して，十分に保守的な評価基準値であると判断している。

※1：コンクリート壁体のひびわれと漏水の関係について（その2）（日本建築学会大会学術講演便概集，昭和 55 年 9 月）

※2：沈埋トンネル側壁のひび割れからの漏水と自癒効果の確認実験（コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1 1995）

(3) 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））」（以下，「コンクリート示方書〔設計編〕」という。）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い状態となる。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] 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^2)
 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)
 ϕ : 鋼材径 (mm)
 σ_{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^2)
 E_s : 鉄筋のヤング係数 (N/mm^2)
 ε'_{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 S E によりペデスタル躯体に生じる残留ひび割れ幅を算出する。

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

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 ²
n : 引張鋼材の段数	
c : かぶり	
C_s : 鋼材の中心間隔	
ϕ : 鋼材径	
E_s : 鉄筋のヤング係数	2.05×10^5 N/mm ²
ε'_{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	150×10^{-6}

3. 検討結果

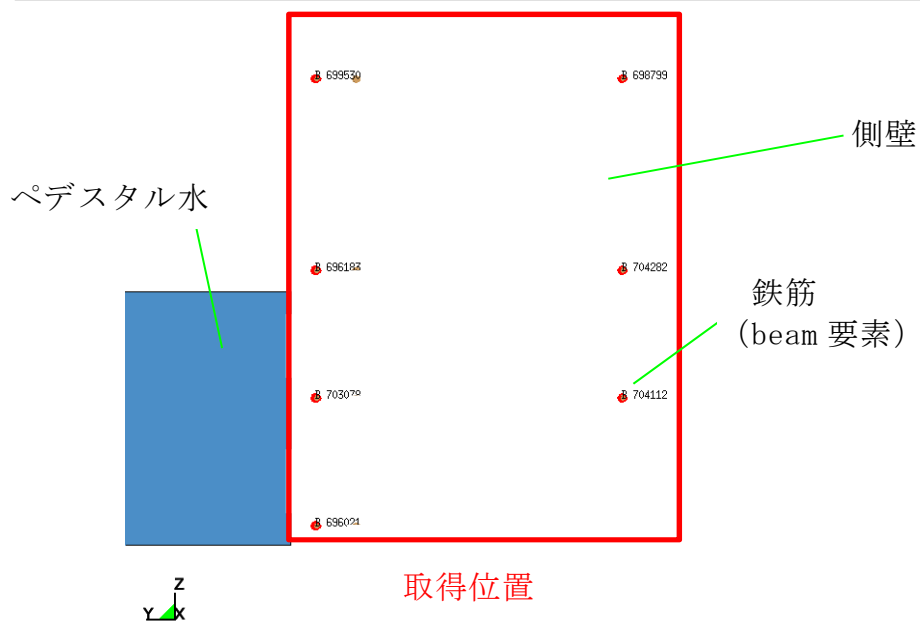
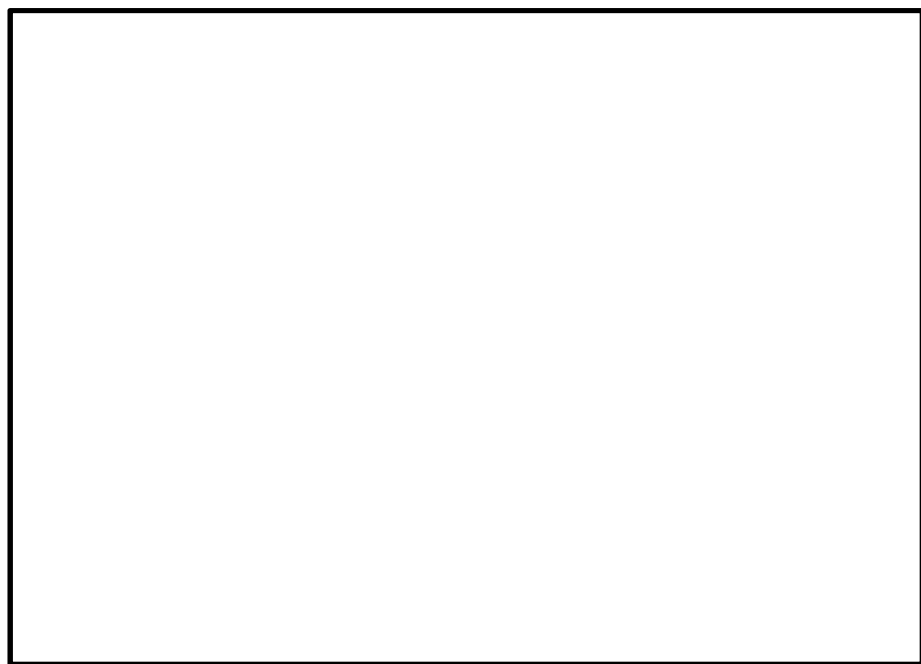
第1図及び第2図に解析終了時刻における鉄筋の軸方向引張応力状態に基づき算定した、側壁部及び床スラブ部での残留ひび割れ幅を示す。取得位置での残留ひび割れ幅の最大値は側壁部で約0.05mm、床スラブ部(最下段鉄筋)で約0.13mmであり、いずれも評価基準値0.2mmを超えていない。

4. 解析結果に基づくひび割れ貫通に対する考察

残留ひび割れによる漏水影響が表れやすいと考えられる床スラブを対象に、ひび割れ貫通の有無について考察する。解析終了時刻における床スラブ下端鉄筋の1段目の軸方向の引張ひずみは200 μ 程度である。これは、鉄筋の荷重-変形関係で表現した場合、ほぼ初期状態あたる長期許容応力度(195N/mm²)の1/5に相当する応力レベルである。第3図に床スラブ断面応力状態を示す。床スラブの自重等により構造的にスラブ中央部の断面内では、中立軸を境に鉄筋が配置される下端側では引張応力が作用するが、上端側には圧縮応力が作用するため、床スラブ上側付近のひび割れは閉鎖するものと考えられる。よって、ひび割れの貫通は生じないものと考えられる。

5. まとめ

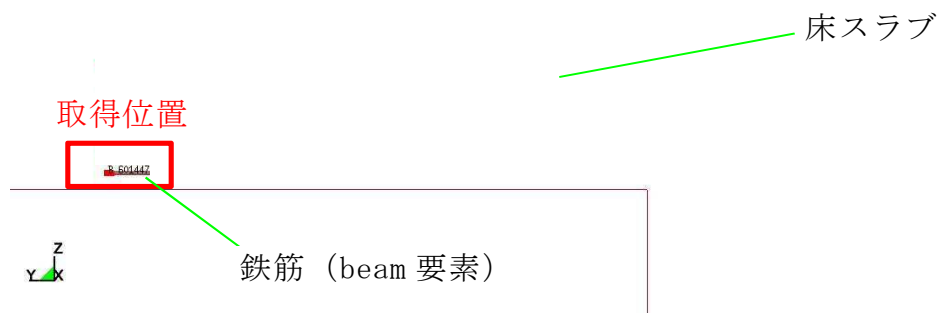
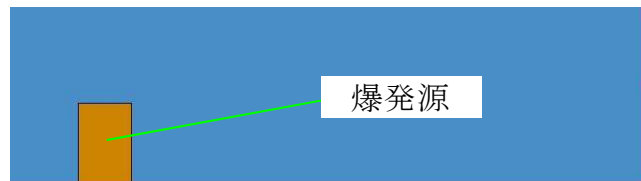
LS-DYNAコードによるSE解析の結果からSE後のペDESTAL躯体に生じる残留ひび割れ幅を算定した。その結果、残留ひび割れ幅の評価結果は評価基準を満足する。また、SE後の応力状態を考慮しても、ひび割れの貫通は生じないものと考えられる。したがって、SEによってもデブリの冷却性に対して影響を与える漏水は生じないと考えられる。



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

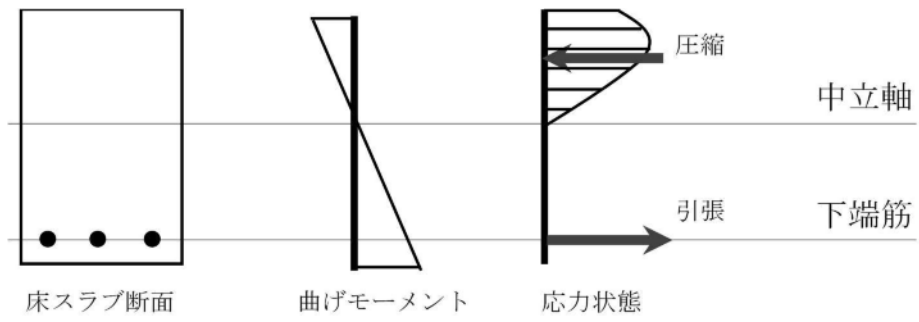
第 1 図 側壁部の鉄筋位置での残留ひび割れ幅



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



第3図 床スラブ断面応力状態

参考 2. 解析コードにおけるコリウムシールドの模擬について

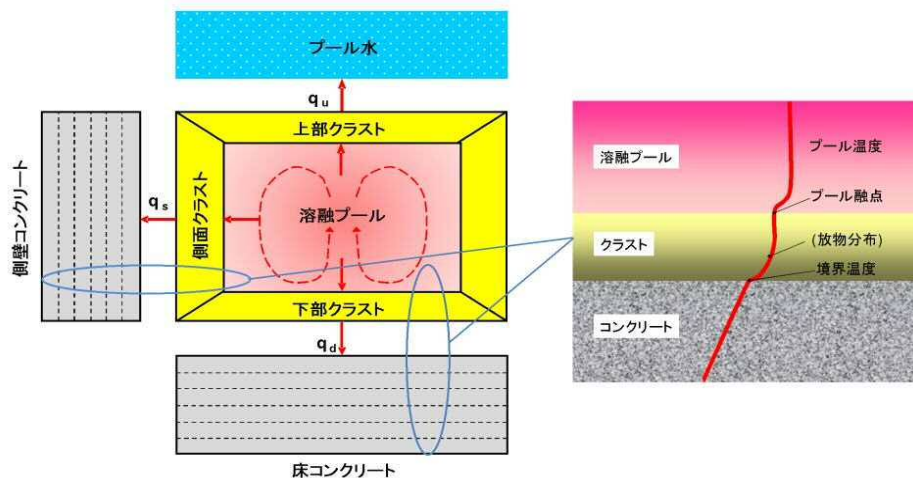
MAAPのコンクリート侵食量評価モデルを第1図に示す。MAAPでは、本モデルに以下のパラメータを設定してコリウムシールドを模擬している。

- ・ 侵食開始温度
- ・ 密度
- ・ 比熱
- ・ 熱伝導率
- ・ 溶融潜熱

侵食開始温度については、化学反応等による侵食開始温度低下を考慮した保守的な設定としている。また、落下後のデブリ温度は侵食開始温度未満であることからコリウムシールドの侵食は発生しない。その他のパラメータについては、 ZrO_2 の物性値を入力値として与えている。

以上から、MAAPにおいてコリウムシールドを適切に模擬している。

なお、溶融炉心－コリウムシールド間の伝熱は別紙1のとおり計算されるため、コリウムシールドを設置した影響はない。



第1図 MAAPにおけるコンクリート侵食量評価モデル

MAAPにおける溶融炉心-コリウムシールド間の伝熱モデル

溶融炉心-コリウムシールド間の伝熱モデルは、以下の溶融炉心-コンクリート間の伝熱モデルと同様のモデルを用いている。溶融プールからクラスト、クラストから構造材への伝熱は、側壁及び床の材質に依存しないモデルとなっているため、コリウムシールドにも適用可能である。

$$\text{床方向の熱流束 } q_d = h_d (T_f - T_{F,m}) + q_v \cdot X_{cd}$$

$$h_d = h_{d0}(1 - f_s)^n$$

$$\text{壁方向の熱流束 } q_s = h_s (T_f - T_{F,m}) + q_v \cdot X_{cs}$$

$$h_s = h_{s0}(1 - f_s)^n$$

ここで、

q_d, q_s : 床方向及び側面方向の熱流束 [W/m²]

h_d, h_s : 溶融プールからクラスト層への対流熱伝達係数 [W/m²-K]

h_{d0}, h_{s0} : 溶融プールが完全な液相の場合の対流熱伝達係数 [W/m²-K]

f_s : 固化割合 [-]

n : 固化効果項の指数 [-]

T_f : 溶融プールの温度 [K]

$T_{F,m}$: デブリ融点 [K]

q_v : 体積発熱率 [W/m³]

X_{cd}, X_{cs} : 床面及び壁面のクラスト厚さ [m]