

本資料のうち、枠囲みの内容は、
営業秘密又は防護上の観点から
公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-139 改 24
提出年月日	平成 30 年 8 月 16 日

V-1-8-1 原子炉格納施設的设计条件に関する説明書

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	2
3. 原子炉格納施設の設計条件	5
3.1 設計基準事故時における設計条件	5
3.1.1 最高使用圧力及び最高使用温度	5
3.1.2 漏えい率に対する設計条件	6
3.1.3 最低使用温度	6
3.1.4 使用材料	6
3.1.5 耐圧試験圧力	8
3.1.6 開口部	8
3.1.7 配管貫通部	8
3.1.8 電気配線貫通部	8
3.1.9 原子炉格納容器隔離弁	9
3.1.10 原子炉格納容器体積	20
3.1.11 原子炉格納容器安全設備	20
3.1.12 許容外圧	20
3.1.13 圧力抑制効果を得るために必要な構造及び寸法	20
3.1.14 ダイヤフラム・フロアの設計差圧及び設計温度差	22
3.1.15 真空破壊装置	22
3.1.16 原子炉建屋原子炉棟	23
3.1.17 可燃性ガス濃度制御設備	23
3.1.18 放射性物質濃度制御設備	23
3.1.19 原子炉格納容器調気設備	23
3.1.20 原子炉冷却材喪失時の荷重	24
3.1.21 逃がし安全弁作動時の荷重	31
3.1.22 荷重の組合せ	33
3.2 重大事故等時における設計条件	35
3.2.1 重大事故等時の評価温度，評価圧力	35
3.2.2 重大事故等時における原子炉格納容器の熱の輸送機能	38
3.2.3 重大事故等時における原子炉格納容器冷却機能	39
3.2.4 重大事故等時における原子炉格納容器の過圧破損防止機能	40
3.2.5 重大事故等時における原子炉格納容器下部の熔融炉心冷却機能	41
3.2.6 重大事故等時における水素爆発による原子炉格納容器の破損防止機能	44
3.2.7 重大事故等時における水素爆発による原子炉建屋等の損傷防止機能	44

3.2.8	原子炉格納容器外面への放水設備等	45
3.2.9	重大事故等時の動荷重	46
3.2.10	荷重の組合せ	47
4.	重大事故等時における原子炉格納容器の放射性物質閉じ込め機能評価及びその他影響確認	49
4.1	重大事故等時における原子炉格納容器の放射性物質閉じ込め機能評価	49
4.1.1	評価方針	49
4.1.2	評価対象部位及び評価対象部位における機能喪失要因	49
4.1.3	評価方法	52
4.1.4	評価結果	56
4.2	その他原子炉格納容器評価温度，圧力に対する影響確認	64
4.2.1	確認内容	64
4.2.2	確認結果	64
別添1	原子炉格納容器の重大事故等時の閉じ込め機能健全性について	
別添2	<u>コリウムシールド及びペデスタル排水系の設計</u>	
別添3	格納容器圧力逃がし装置の設計	
別添4	代替循環冷却系の設計	

下線：本日説明

別添2 コリウムシールド及びペデスタル排水系の設計

目 次

1. ペDESTAL（ドライウエル部）に係る設備対策の概要について…………… 別添 2-1
2. コリウムシールドの設計について…………… 別添 2-5
3. ペDESTAL（ドライウエル部）水位管理に係る対策設備の設計について…………… 別添 2-12
4. ペDESTAL（ドライウエル部）内の水位管理方法について…………… 別添 2-16
5. 溶融炉心の排水流路内での凝固停止評価について…………… 別添 2-32
6. 原子炉圧力容器破損時の溶融炉心の冠水評価について…………… 別添 2-45
7. コリウムシールドを考慮した溶融炉心・コンクリート相互作用による侵食量評価について…………… 別添 2-48
8. 溶融炉心による熱影響評価について…………… 別添 2-71
9. ペDESTAL排水系の排水機能評価について…………… 別添 2-97
10. コリウムシールドの施工性について…………… 別添 2-112
11. コリウムシールドの選択的侵食について…………… 別添 2-124

1. ペDESTAL（ドライウエル部）に係る設備対策の概要について

東海第二発電所における、熔融燃料－冷却材相互作用及び熔融炉心・コンクリート相互作用の影響抑制を考慮したペDESTAL(ドライウエル部)(以下「ペDESTAL」という。)に係る設備対策の概要を以下に示す。

東海第二発電所のペDESTALの概要図を図 1-1 及び図 1-2 に示す。

ペDESTAL内の底面及び側面には、原子炉圧力容器（以下「R P V」という。）が破損し熔融炉心（以下「デブリ」という。）が落下した際のペDESTAL構造健全性確保のため、Z r O₂製のコリウムシールドを設置する。コリウムシールド内は格納容器床ドレンサンプとして用いるために、コリウムシールド表面にS U S製のライナを敷設し通常運転中の水密性を確保するとともに、その内側に格納容器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と、格納容器機器ドレンサンプを冷却するための原子炉補機冷却系の冷却水は、図 1-1 及び図 1-2 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。これらの配管には、事故時にペDESTAL内への流入水を制限するため、ペDESTAL側壁の外側に制限弁を設ける。

格納容器床ドレンサンプ内に流入した水は、1 mに立ち上げた格納容器床ドレンサンプの導入管（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、格納容器機器ドレンサンプにも導入管を設け、事故発生後にペDESTAL内の水位が1.2 mを超えた場合には、格納容器床ドレンサンプの導入管と併せて排水が可能な設計とする。それぞれの導入管の周囲には、ペDESTAL内での落下物や異物による悪影響を防止するための導入管カバーを設置する。

それぞれの排水配管の下流には格納容器外側隔離弁が設置されており、これらの弁は事故発生時に自動閉止する。これに対して、各排水配管を分岐させベント管へ接続することで、事故発生後においてペDESTALからサプレッション・チェンバへ排水する経路を設けるとともに、排水完了後にペDESTALからの冷却水の流出を防止するための排水弁を設ける。さらに、R P Vが破損しデブリがスリット内へ流入した際に、下流側の配管内で圧力上昇が生じる可能性を考慮し、安全弁を設ける。

R P Vが破損しデブリがペDESTAL内に落下した場合には、格納容器下部注水配管から注水を行うことでデブリを継続的に冷却する。また、R P V破損（ペDESTAL内へのデブリ落下）の検知及びペDESTAL内水位管理のために、ペDESTAL内には温度計及び水位計（格納容器下部水温及び格納容器下部水位）を設置する。

ペDESTALの側壁は鋼製スカートを介してR P Vを支持しており、R P V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とともに、ペDESTAL内には制御棒駆動水圧系配管が敷設されている。

また、熔融炉心・コンクリート相互作用（M C C I）に係る設備のD B・S Aの区分について図 1-3 に示す。

- 弁の閉止タイミング
- ※1 (図中○) : 格納容器隔離信号発信時
 - ※2 (図中○) : ドライウエル圧力高信号及び原子炉水位異常低下 (L1) 信号発信時
 - ※3 (図中○) : 炉心損傷後のペDESTAL水の排水完了時

別添 2-2

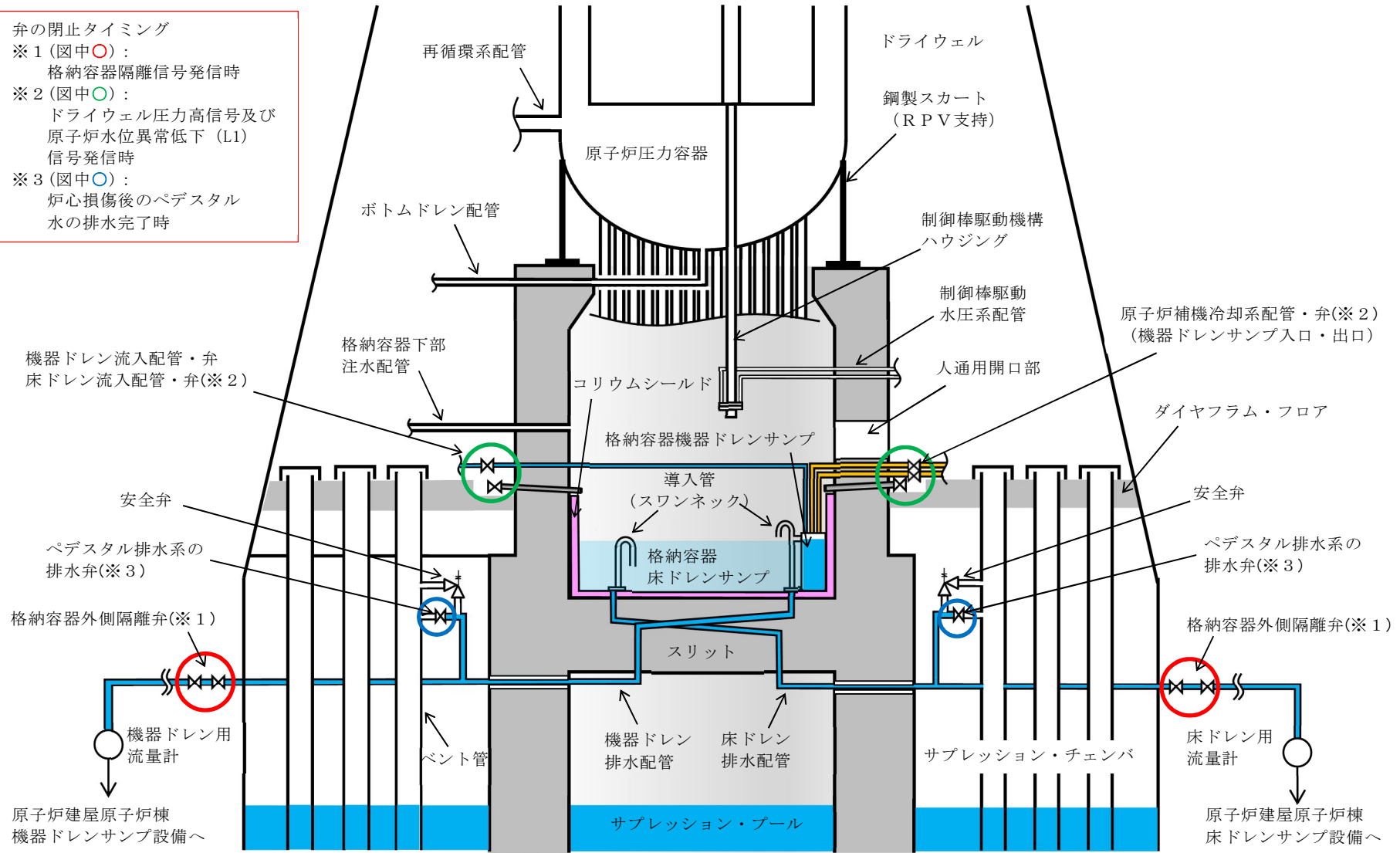


図 1-1 ペDESTAL概要図 (断面図)

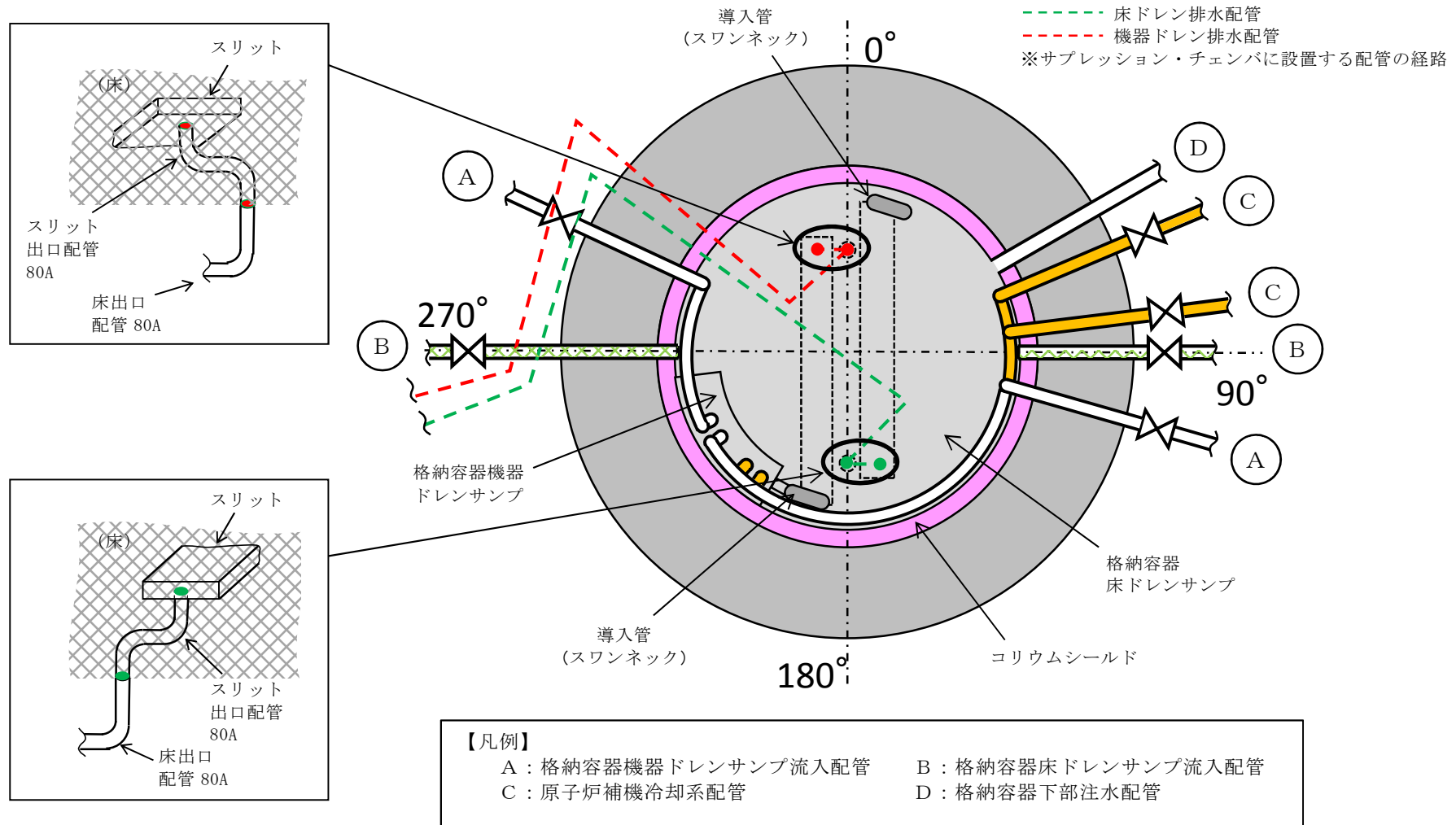
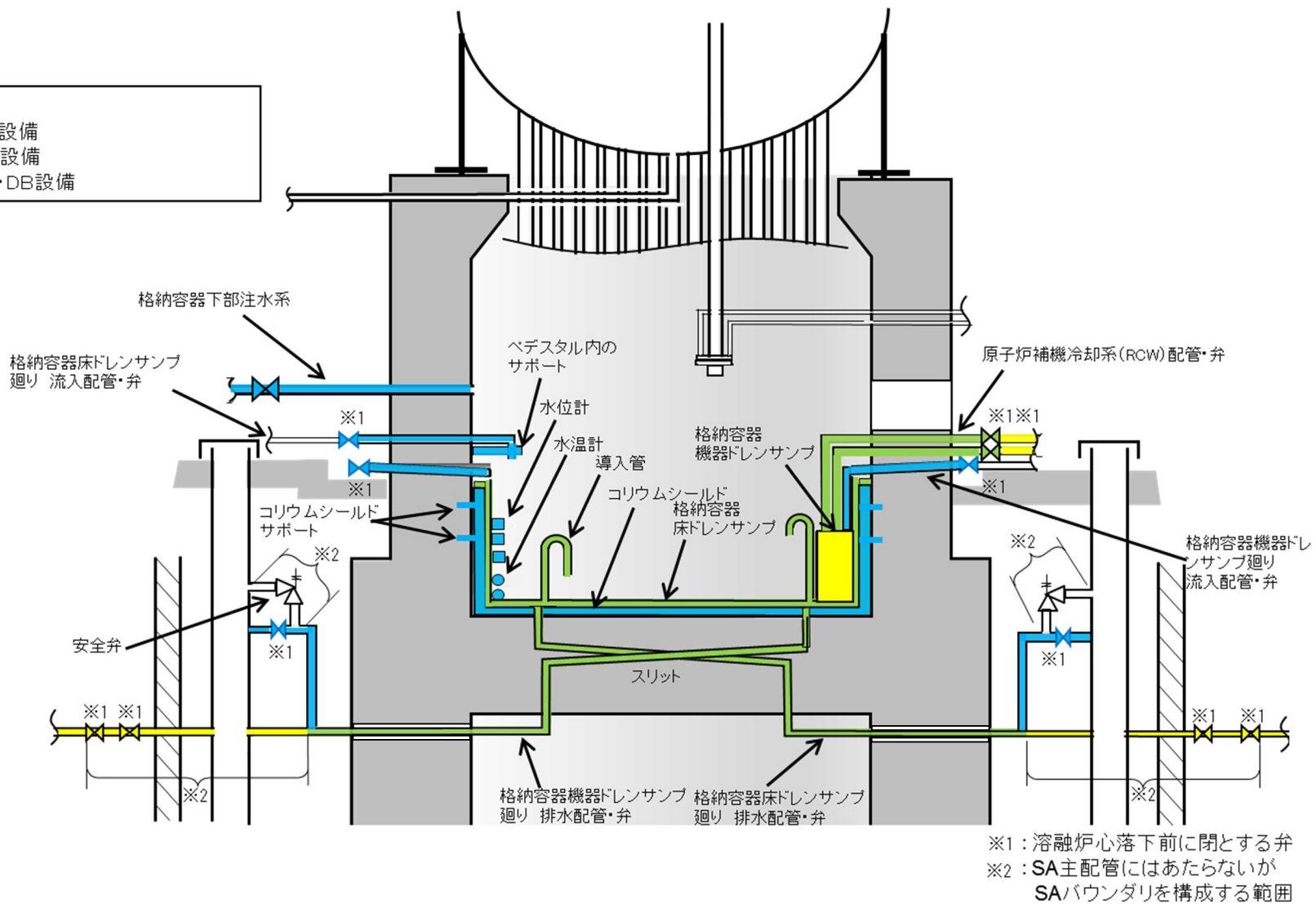


図 1-2 ペDESTAL概要図 (平面図)

- 【凡例】
- : SA設備
 - : DB設備
 - : SA・DB設備



別添2-4

図 1-3 MCC I 対策に係る DB・SA設備範囲図（断面図）

2. コリウムシールドの設計について

2.1 コリウムシールド材料の選定

コリウムシールドの材料としては、模擬熔融炉心を用いた種々の試験結果を基に、高融点でかつ化学的安定性に優れており、熔融炉心に対して高い耐性を有していることが確認された ZrO_2 を選定した。表 2-1 に、試験の概要を示す。

表 2-1 コリウムシールド材料の選定に係る試験の概要*1

試験の種類	概要
熔融 Zr による耐熱材侵食試験	<p>試験目的：耐熱材の各候補材の耐侵食性を確認。</p> <p>模擬熔融炉心として、侵食量が大きくなる 100 mol% Zr をるつぼ内で 2000 °C ~ 2200 °C の所定温度に昇温・熔融し、、、ZrO_2 の耐熱材試験片を上部から挿入し 5 分間保持した後、取り出して残存状態を確認。</p> <p>侵食量は > > ZrO_2 となり、ZrO_2、、 の順に耐侵食性に優れていることを確認 (図 2-1)。</p>
模擬熔融炉心による耐熱材侵食試験	<p>試験目的：ZrO_2 耐熱材の侵食開始温度として設定している 2100 °C *2 までの熔融炉心温度範囲における耐熱材の耐侵食性を確認。</p> <p>るつぼ内に円柱状に加工した ZrO_2 耐熱材と模擬熔融炉心粒子 ($UO_2 - ZrO_2 - Zr$: 30 mol% - 30 mol% - 40 mol%) を装荷し、模擬熔融炉心を 2000 °C ~ 2100 °C に昇温・熔融し 10 分間保持した後、るつぼを切断し断面を確認。</p> <p>ZrO_2 耐熱材の厚さは試験前から変化せず、模擬熔融炉心による ZrO_2 耐熱材の有意な侵食がないことを確認 (図 2-2)。</p>
耐熱材への模擬熔融炉心落下試験	<p>試験目的：耐熱材に熔融炉心が接触した際の短期的な相互作用を確認。</p> <p>ZrO_2 耐熱材を内張りしたコンクリートトラップに、2450 °C 以上に加熱した模擬熔融炉心 ($UO_2 - ZrO_2 - Zr$: 30 mol% - 30 mol% - 40 mol%) を落下させ、耐熱材の侵食状況等を確認。</p> <p>模擬熔融炉心接触部から最大約 1 cm の範囲で ZrO_2 耐熱材が黒色化し、その周辺部が白色化していることが確認されたものの、顕著な耐熱材の侵食及び耐熱材の割れが生じていないことを確認 (図 2-3)。</p> <p>黒色化した部分について X 線回折分析を行った結果、耐熱材表面の組成に有意な変化がないことを確認。</p>

注記 *1：本試験は、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。

*2：「7. コリウムシールドを考慮した熔融炉心・コンクリート相互作用による侵食量評価について」参照

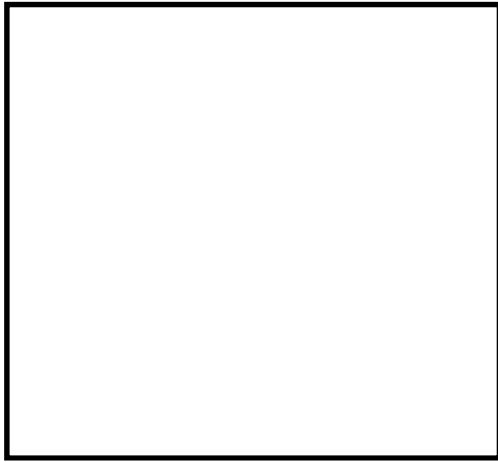


図 2-1 熔融 Zr による耐熱材侵食試験後の断面写真

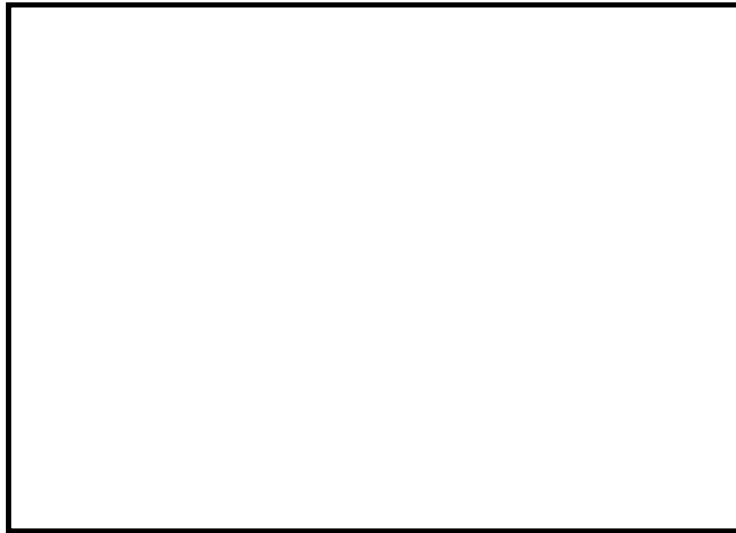


図 2-2 模擬熔融炉心による耐熱材侵食試験後の断面写真



図 2-3 耐熱材への模擬熔融炉心落下試験後の断面写真

2.2 コリウムシールド厚さ、高さの設定

コリウムシールドは、溶融炉心・コンクリート相互作用の影響抑制の目的で設置するが、ペDESTAL内の設備配置上、設置高さに制限があり、これを考慮した上で、原子炉圧力容器から落下するデブリを全量保有でき、かつ、溶融炉心・コンクリート相互作用の影響も抑制できるよう、その厚さを設定する必要がある。これを踏まえ、コリウムシールドは、高さ 1.88 m、厚さ 0.15 m とすることとした。以下にその考え方を示す。

(1) コリウムシールド高さの設定

ペDESTAL内には人通用開口部や床ドレン配管等のドライウエルと通じる経路があるため、デブリ堆積高さがこれらの経路に到達した場合、ペDESTAL外へ流出するおそれがある。そのため、デブリをペDESTAL内に全量保有する観点から、デブリ堆積高さはデブリがペDESTAL外に流出する可能性のある経路よりも低い位置とする必要がある。ペDESTAL床高さに対して最も低い位置となる経路は、ドライウエルからペDESTAL床ドレンサンプへのドレン配管である(図 2-4)。当該配管の下端は、ペDESTAL床から約 1.88 m の位置に存在することから、コリウムシールド設置高さの上限として 1.88 m を設定する。

(2) コリウムシールド厚さの設定

ペDESTALにおけるコンクリート侵食抑制及びコンクリートへの熱影響を抑制する観点からは、コリウムシールドは可能な限り厚さを確保することが望ましい。ただし、コリウムシールドの設置高さには上限があるため、厚さを増加させるとコリウムシールド内に保有可能なデブリ量が減少する。したがって、ある程度の保守性を見込んだデブリ体積を全量保有できる上限の厚さとして、0.15 m を設定する。

以下にコリウムシールド厚さの計算方法を示す。また、計算におけるデブリ体積等の条件の考え方について、表 2-2 に示す。

デブリの堆積高さ $H_{\text{debr i}}$ は、式(1)及び式(2)で算定される。

$$H_{\text{debr i}} = (V_m \times (1 - \Phi_{\text{ent}}) + V_s + V_m \times \Phi_{\text{ent}} \div (1 - P)) \div S_{fz} \quad (2.1)$$

$$S_{fz} = (L_{\text{PD}} / 2 - D_{\text{CS}})^2 \times \pi \quad (2.2)$$

V_m : 溶融物体積 [36 m³]

V_s : ペDESTAL内構造物体積 [4 m³]

Φ_{ent} : 粒子化割合 [0.173]

P : ポロシティ [0.5]

S_{fz} : コリウムシールドの設置を考慮した床面積 [m²]

L_{PD} : ペDESTAL床直径 [6.172 m]

D_{CS} : コリウムシールド厚さ [m]

コリウムシールドの高さは、デブリ堆積高さと床に設置するコリウムシールドの厚さを加えた値となるため、式(1)において H_{deabri} を $(1.88 - D_{cs})m$ として計算した結果、 D_{cs} = 約 0.15 m となる。

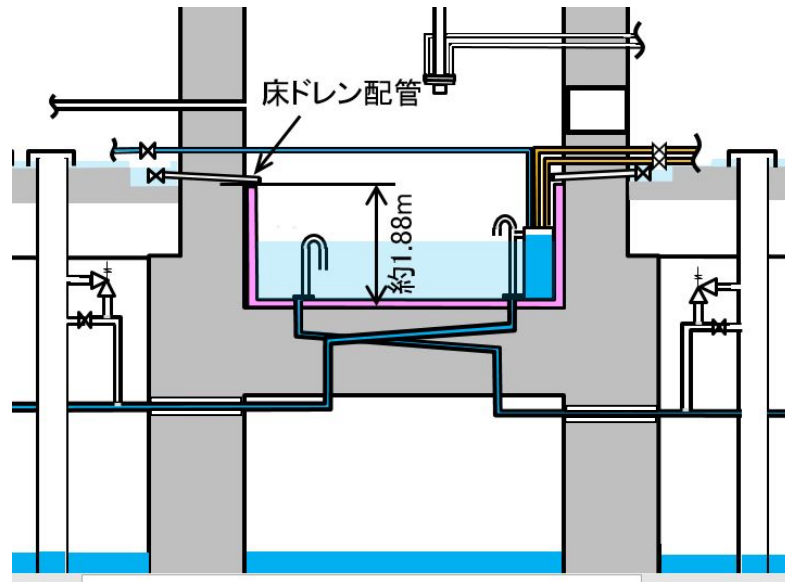


図 2-4 デブリがペDESTAL外へ流出する可能性のある経路

表 2-2 コリウムシールド厚さの計算に係る条件設定の考え方

項目	条件設定根拠
熔融物体積 (36 m ³)	MAAP 計算結果に基づき設定 (RPV内の熔融炉心全量がペDESTALへ落下)
ペDESTAL内構造物体積 (4 m ³)	既設及び新設のペDESTAL内構造物全量を積算し、さらに余裕を考慮した体積を設定
粒子化割合 (0.173)	ペDESTAL水深、デブリジェット径等に基づき、Ricou-Spalding 相関式により計算し設定
ポロシティ (0.5)	各種の粒子状デブリに係る試験結果や、単純立方格子のポロシティ (0.48) を包絡する値を設定

2.3 コリウムシールドを考慮した侵食量評価

格納容器破損防止対策の有効性評価においては、コリウムシールドを考慮したデブリによる侵食量評価を、MAAPコードを用いた解析により実施している。また、デブリから冷却水への熱流束、コリウムシールドの物性値及び侵食量に係る不確かさを踏まえた感度解析を実施し、コリウムシールド及びペDESTALコンクリートに侵食が生じないことを確認している。

ベースケース及び感度ケースの解析条件を表 2-3 に、解析結果を表 2-4 に示す。また、各解析ケースの条件設定の考え方等の詳細について、「7. コリウムシールドを考慮した熔融炉心・コンクリート相互作用による侵食量評価について」に示す。

表 2-3 侵食量評価における解析条件

項目	ベースケース	感度ケース①	感度ケース②
対象シーケンス	過渡事象時に損傷炉心冷却に失敗し、原子炉圧力容器が破損するシーケンス	大破断 L O C A 時に損傷炉心冷却に失敗し、原子炉圧力容器が破損するシーケンス	
溶融炉心から水プールへの限界熱流束	800 kW/m ² (圧力依存性あり)	800 kW/m ² (一定*)	800 kW/m ² (圧力依存性あり)
ペDESTAL 初期水位	1 m		
ペDESTAL 注水	R P V 破損 7 分後から 80 m ³ /h		
コリウムシールド厚さ	15 cm	11 cm	
コリウムシールド熱伝導率			
コリウムシールド比熱			
コリウムシールド侵食開始温度	2100 °C		
R P V 破損時の溶融炉心温度	M A A P 解析結果に基づく		

注記 * : 侵食の不均一性等の影響を考慮して設定

表 2-4 侵食量評価における解析結果

項目	ベースケース	感度ケース①	感度ケース②
コリウムシールド侵食量 (壁面及び床面)	侵食なし	侵食なし	侵食なし
コンクリート侵食量 (壁面及び床面)	侵食なし	侵食なし	侵食なし

2.4 デブリによる熱影響評価

R P V が破損破損しデブリがペDESTAL へ落下した場合、デブリからの熱影響によってペDESTAL の鉄筋やコンクリートの強度が低下することが考えられる。これに対して、コリウムシールド等の対策を考慮した上で、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ている。

評価方法及び評価結果を以下に示す。また、評価条件の考え方等の詳細については、「8. 溶融炉心による熱影響評価について」に示す。

(1) 評価方法

・荷重条件

構造強度の評価に当たり、R P V 支持機能の評価では R P V、遮へい壁等の自重を考慮する。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

躯体等の自重を考慮する。

・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，側壁基部コンクリート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。

・温度条件

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，MAAPコードによる解析結果に基づき，汎用有限解析コードABAQUSによる熱伝導解析にて評価する。

・判断基準

炉心損傷防止に失敗し，重大事故時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。

(2) 評価結果

各評価項目に対する判断基準及び評価結果を，表 2-5 に示す。

表 2-5 デブリによる熱影響評価結果

項 目	判断基準	評価結果	判定
側壁コンクリート 圧縮軸力	必要壁厚 133 mm	熱影響を考慮した等価壁厚 約 1229 mm	○
側壁基部コンクリート 面外せん断力	必要壁厚 192 mm	熱影響を考慮した等価壁厚 約 1276 mm	○
床スラブコンクリート 面外せん断力	必要板厚 □	熱影響を考慮した等価板厚 約 629 mm	○
床スラブ鉄筋 曲げ応力	必要鉄筋量 □	熱影響を考慮した等価鉄筋量 約 □	○

3. ペDESTAL（ドライウエル部）水位管理に係る対策設備の設計について

3.1 ペDESTAL水位管理に係る対策設備の機能

ペDESTAL水位管理に用いる設備について、それぞれの機能を以下に示す。また、各設備を用いた水位管理方法の詳細については、「4. ペDESTAL（ドライウエル部）内の水位管理方法について」に示す。なお、各設備の配置関係については、図 1-1 及び図 1-2 に示したとおりである。

(1) 格納容器床ドレン制限弁，格納容器機器ドレン制限弁及び原子炉補器冷却水制限弁

ドライウエルからペDESTAL内の格納容器床ドレンサンプ及び格納容器機器ドレンサンプへ流入する配管に対して、ペDESTAL外側に制限弁を設置する。

事故時においてペDESTAL内水位を制御するため、ドライウエル圧力高信号及び原子炉水位異常低下（レベル 1）信号が同時に発信した場合に自動閉止し、ペDESTAL内への流入水を遮断する設計とする。

(2) 格納容器床ドレンサンプ導入管及び格納容器機器ドレンサンプ導入管

格納容器床ドレンサンプからの排水配管の入口に、格納容器床ドレンサンプ底部から 1 m 高さのスワンネック形状の導入管を設置する。これにより、通常運転中からペDESTAL内水位は約 1 m で維持されるとともに、事故発生後にペDESTAL内への流入水が生じた場合、**R P V破損までに**ペDESTAL内水位が 1 m となるまで排水可能な設計とする（「9. ペDESTAL排水系の排水機能評価について」参照）。

また、格納容器機器ドレンサンプについても、格納容器床ドレンサンプ底部から 1.2 m 高さ*のスワンネック形状の導入管を設置する。これにより、事故発生後の流入水によりペDESTAL内水位が 1.2 m 以上となった場合には、格納容器床ドレンサンプ導入管と併せてペDESTALからの排水が可能となり、排水機能の信頼性が向上する。

注記 *：通常運転中に格納容器床ドレンと機器ドレンが混合することを防止するため、格納容器床ドレンサンプ導入管に対して高低差をもった設計とする。

各ドレンサンプ導入管は、排水性の確保及び意図した水位で排水を停止させるため、スワンネック形状の頂部付近に空気抜き孔を有する設計とする（図 3-1）。

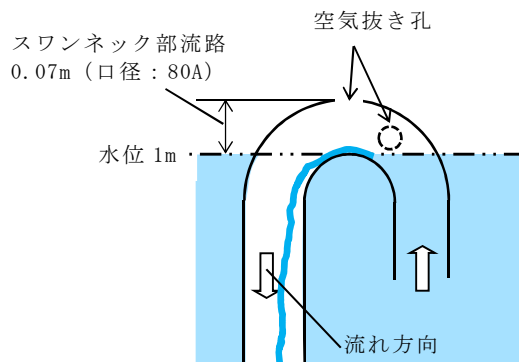


図 3-1 ドレンサンプル導入管の構造

(3) ドレンサンプル導入管カバー

ペDESTAL内での落下物により、格納容器床/機器ドレンサンプル導入管が損傷すること、また、異物の流入により排水流路が閉塞することを防止するため、各ドレンサンプル導入管の周囲にカバーを設置する。

カバーは、排水流路のスリット部の短辺 よりも小さい開口径を多数有する板を用い、これを開口が重ならないよう二重に配置することで、線状の異物についても流入を防止する設計とする（図 3-2）。

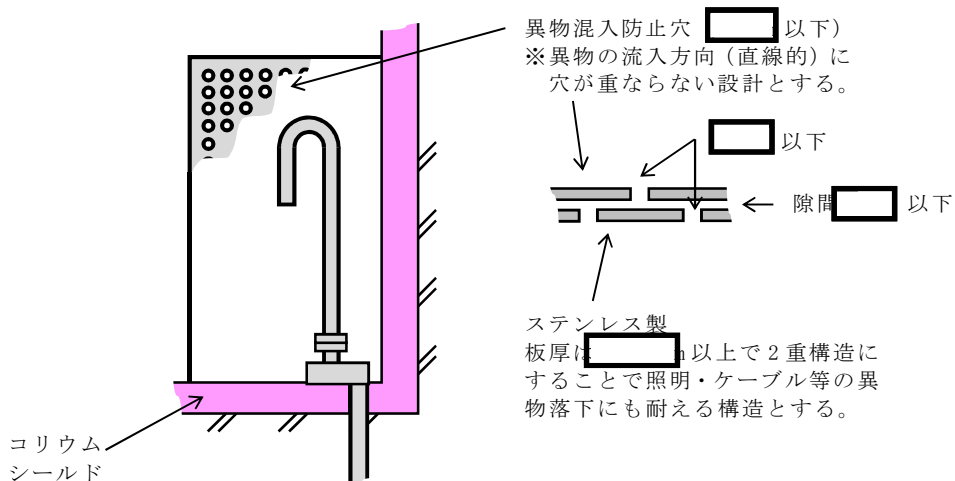


図 3-2 ドレンサンプル導入管カバーの構造

(4) ドレンサンプル排水流路スリット部

R P V破損時にペDESTALに落下したデブリが、各ドレンサンプルの排水流路を通じてサブプレッション・チェンバへ移行することを防止するため、ペDESTAL床スラブのコンクリート内に高さ × 幅 のスリット形状の流路を設置する（図

3-3)。

スリット部は厚さ [] のステンレスで製作し、流入したデブリの冷却及び凝固停止を促進する設計とする。横方向スリット部には、通常運転中の排水性を確保する観点から勾配を設けるが、R P V破損後のスリット内でのデブリの凝固停止距離を短くする観点から、その勾配を [] に制限した設計とする。また、横方向スリット部の長さは約 [] とすることで、流入したデブリがスリット長さの範囲内で凝固停止することを確認している。デブリの凝固停止評価の詳細については、「5. 熔融炉心の排水流路内での凝固停止評価について」に示す。

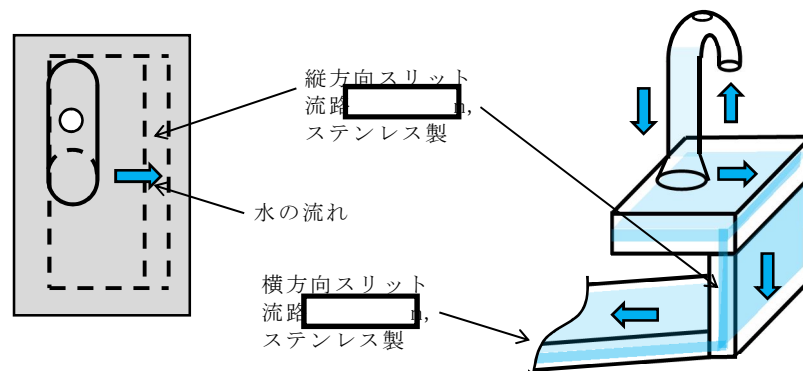


図 3-3 排水流路のスリット部の構造

(5) ペDESTAL排水配管及び排水弁

通常運転中、ペDESTALへ流入した格納容器床ドレン及び機器ドレンは、各ドレンサンプの導入管から排水され、下流の配管及び格納容器外側隔離弁を通じて原子炉建屋原子炉棟のドレンサンプへ導かれる。

事故発生時には、格納容器隔離信号により格納容器外側隔離弁は自動閉止されるため、各ドレンサンプの排水配管を分岐させベント管に接続することで、事故発生後のペDESTALからの排水を可能とする。

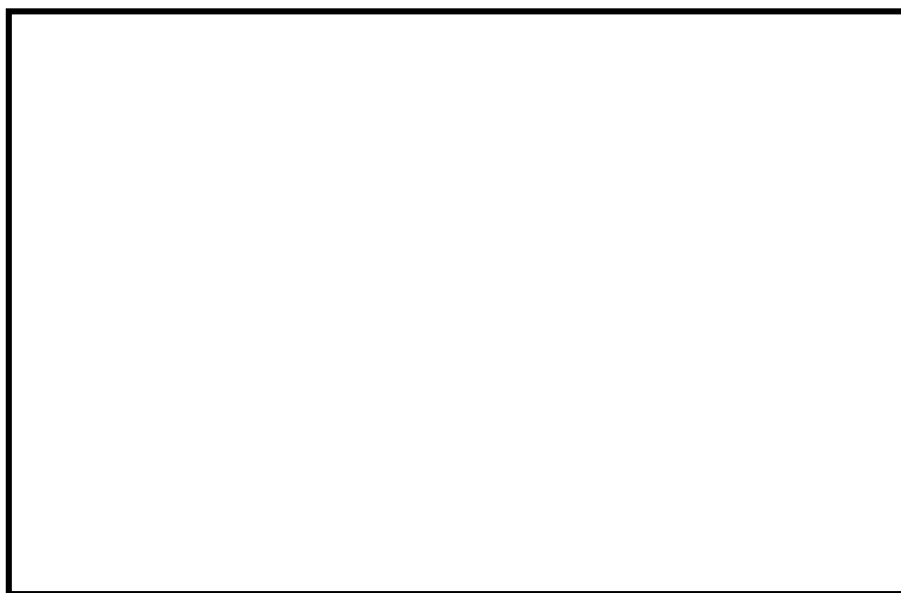
排水配管を接続するベント管は、真空破壊装置作動時のベント管内の上昇流がペDESTALからの排水に影響することがないように、真空破壊装置が設置されていないものを選定する (図 3-4)。

ベント管接続部にはペDESTAL排水弁を設置し、通常運転中から開状態としておく。事故発生後、R P V破損前のペDESTAL注水により一旦水位を上昇させるが、その後排水により格納容器下部水位 (ペDESTAL床面高さ+1.05 m 検知用) が水位を検知しなくなった時点から約 6 分後*に、自動で閉止する設計とする。

注記 * : ペDESTAL水位が 1.05 m から 1 m まで低下する時間 (モックアップ試験より得られたスリット部圧損係数を踏まえ評価した時間)

以下を考慮し、床ドレン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。

- ・床ドレン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、床ドレン排水配管のベント管への接続高さは、床ドレン排水配管の下端位置がスリット高さ方向の流路 () の上端の位置になるように設置する設計とする。
- ・スリットの設置高さを低くする場合、スリット内でデブリが凝固した際に、床スラブ鉄筋コンクリートの温度上昇による強度低下が懸念される。そこで、コリウムシールドな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。



- 格納容器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)
- 格納容器床ドレン排水配管(80A)
(原子炉建屋原子炉棟床ドレンサンプ設備へ)
- ベント管 格納容器床ドレンの排水経路となるもの(真空破壊装置なし 1か所)
- ベント管 格納容器機器ドレンの排水経路となるもの(真空破壊装置なし 1か所)
- ベント管 真空破壊装置付き(11か所)
- ベント管 真空破壊装置なし(95か所)

図 3-4 ペDESTAL排水配管及び排水弁の配置

4. ペデスタル（ドライウェル部）内の水位管理方法について

東海第二発電所における，熔融燃料－冷却材相互作用及び熔融炉心・コンクリート相互作用の影響抑制を考慮したペデスタル内の水位管理方法の内容を以下に示す。

(1) 原子炉起動前及び通常運転時

原子炉起動前において，通常運転時のペデスタル格納容器床ドレンサンプの排水性を確保するため，消火系，補給水系又は純水系を使用して必要によりペデスタル内への事前水張りを行い，ペデスタル内水位を約 1 m（約 27 m³）にし，通常運転時のペデスタルへの流入水の計測を可能とする。

通常運転時におけるペデスタル内へ流入する発生源が明らかな漏えい水として格納容器内のドライウェル内ガス冷却装置から発生する凝縮水等があり，これらが床ドレン水（ドライウェルエアクーラードレン含む。）として格納容器内の床ドレン配管からペデスタル内へ流入（2004年4月30日～2011年3月11日の通常運転時における実測値 多量時：約 6.8 L/h，少量時：約 0.2 L/h）する。なお，通常運転時に発生する格納容器内床ドレン水の放射能濃度は約 3.7 Bq/mL である。

ペデスタル内へ流入した床ドレン水は，ペデスタル内水位が約 1 m の状態で流入し，導入管から原子炉建屋原子炉棟格納容器床ドレンサンプ設備へ排水されるため，その排水状況を格納容器床ドレン流量により確認することで，ペデスタル内水位が約 1 m に維持されていることを確認できる。また，ペデスタル内水位が約 1 m に維持されていることを格納容器下部水位にて確認することもできる。

原子炉冷却材圧力バウンダリからの原子炉冷却材の漏えいが発生した場合において，導入管から原子炉建屋原子炉棟格納容器床ドレンサンプ設備に排水される過程で，格納容器床ドレン流量により原子炉冷却材圧力バウンダリからの原子炉冷却材の漏えい水を検出することが可能である（図 4-1）。

ペデスタル格納容器機器ドレンサンプには，再循環系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。流入したドレン水は，機器ドレンサンプ内を通る原子炉補機冷却系配管により冷却され，原子炉建屋原子炉棟格納容器機器ドレンサンプ設備に排水される。その過程で，格納容器機器ドレン流量により排水量を計測することで，漏えい水を検出することが可能である（図 4-2）。

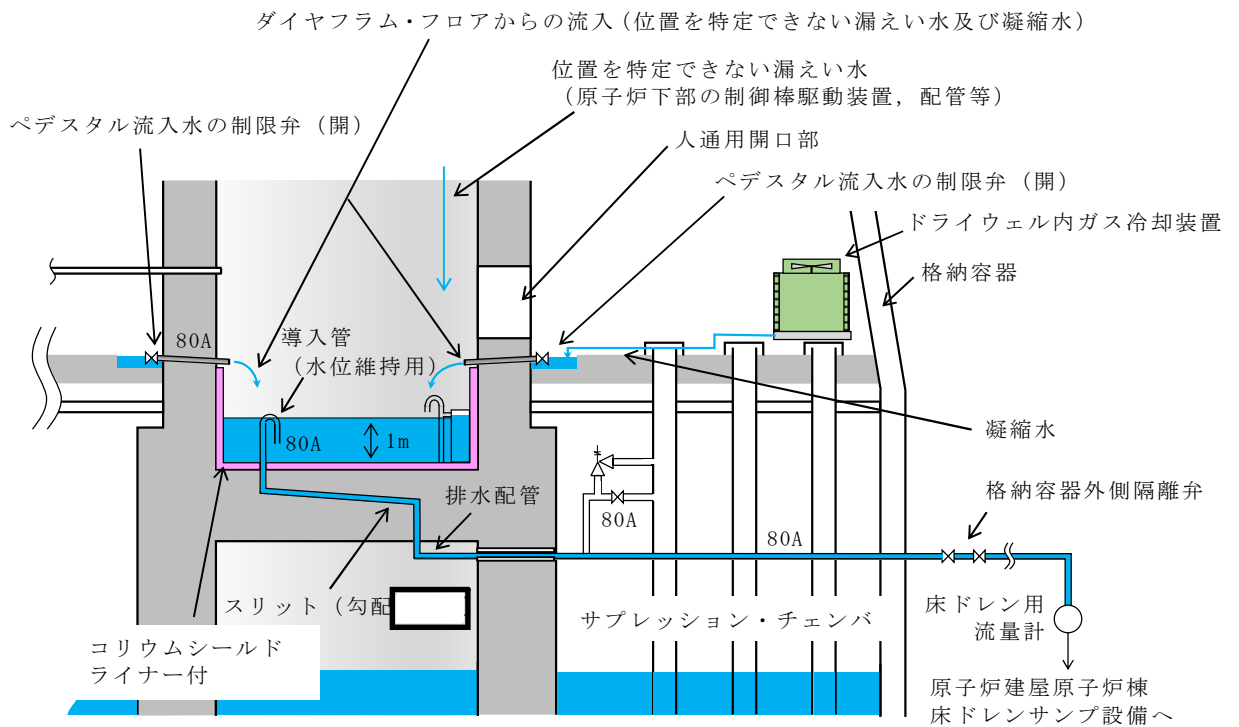


図 4-1 格納容器床ドレンサンプの通常運転時流入水及び排水経路図

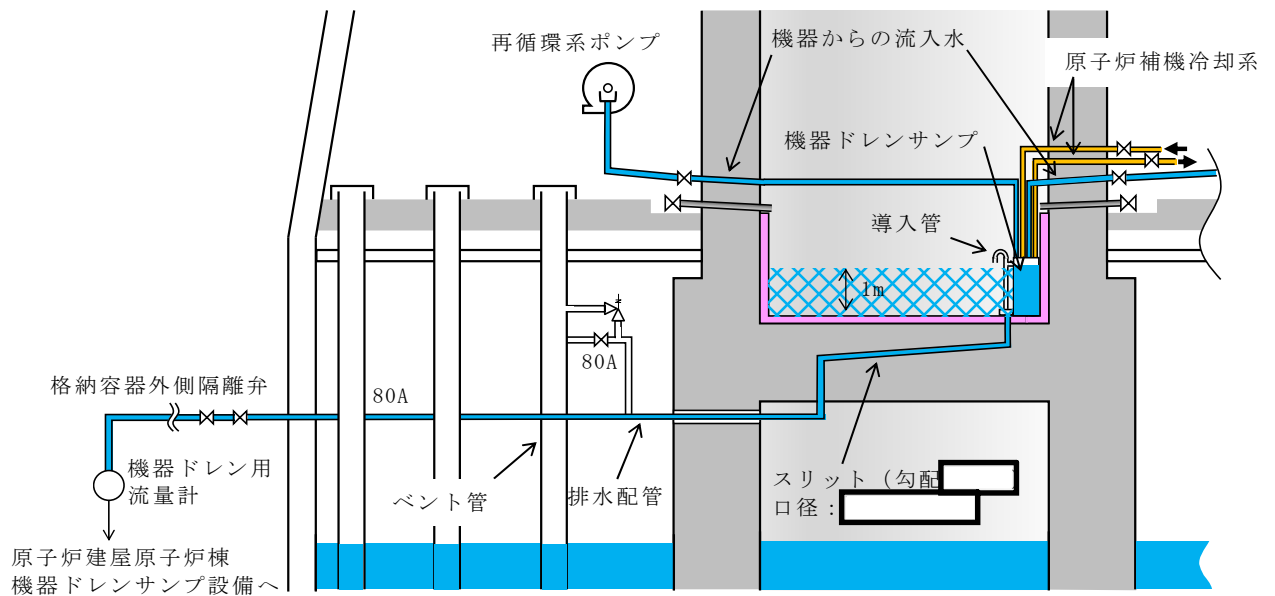
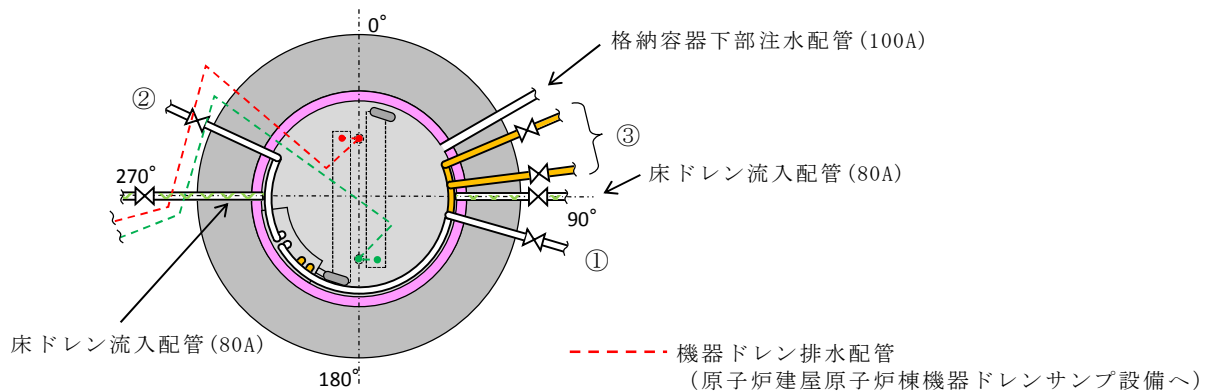


図 4-2 格納容器機器ドレンサンプの通常運転時流入水及び排水経路図 (1/2)



NO.	流入元	運転中の状態
①	再循環系ポンプ (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 (*2)，再循環系ポンプ (A) 点検時のドレン (*2) (50A)	常時排水あり
②	再循環系ポンプ (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 (*2)，再循環系ポンプ (B) 点検時のドレン (50A) (*2)	常時排水あり
③	原子炉補機冷却系配管 (50A)	常時通水

注記 *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）

図 4-2 格納容器機器ドレンサンプの通常運転時流入水及び排水経路図 (2/2)

(2) 事故発生から R P V 破損まで

ドライウェル圧力高信号及び原子炉水位異常低下（レベル 1）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系配管）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（図 4-3）。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プレッション・チェンバへ排水される（図 4-4）。

制限弁閉止前の流入水等により水位が 1 m 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床ドレン排水弁を経由してサプレッション・チェンバへ排水され，R P V破損までにペDESTAL内水位は 1 m まで低下する（図 4-5）。

事故が発生し炉心が損傷した場合，格納容器下部水位（ペDESTAL床面+1.05 m）が水位を検知するまで格納容器下部注水配管から注水を実施し，その後排水することにより，R P V破損時に確実に水位 1 m を確保する運用とする。これに要する時間は 30 分程度（注水開始操作に要する時間（17 分），水位 10 cm 分の注水に

要する時間（3分）、注水停止操作に要する時間（4分）及び5 cm 分の排水に要する時間（6分）に余裕を加味した時間）と想定され、炉心損傷後のペDESTAL注水開始からR P V破損までの約1.8時間（事象進展の早い大破断L O C A時の例）の間に余裕をもって実施可能である。

また、格納容器機器ドレンサンプについても格納容器床ドレンサンプと同様に導入管、ベント管への排水配管及び排水弁を設置することで、ペDESTAL内水位が1.2 m 以上となった場合には、格納容器機器ドレンサンプ排水配管からもサンプレッション・チェンバへ排水が可能な設計とする（図4-6）。

ベント管に接続する床ドレン排水弁及び機器ドレン排水弁はR P V破損前に閉とし、R P V破損後のペDESTAL水のサンプレッション・チェンバへの流出を防止する。

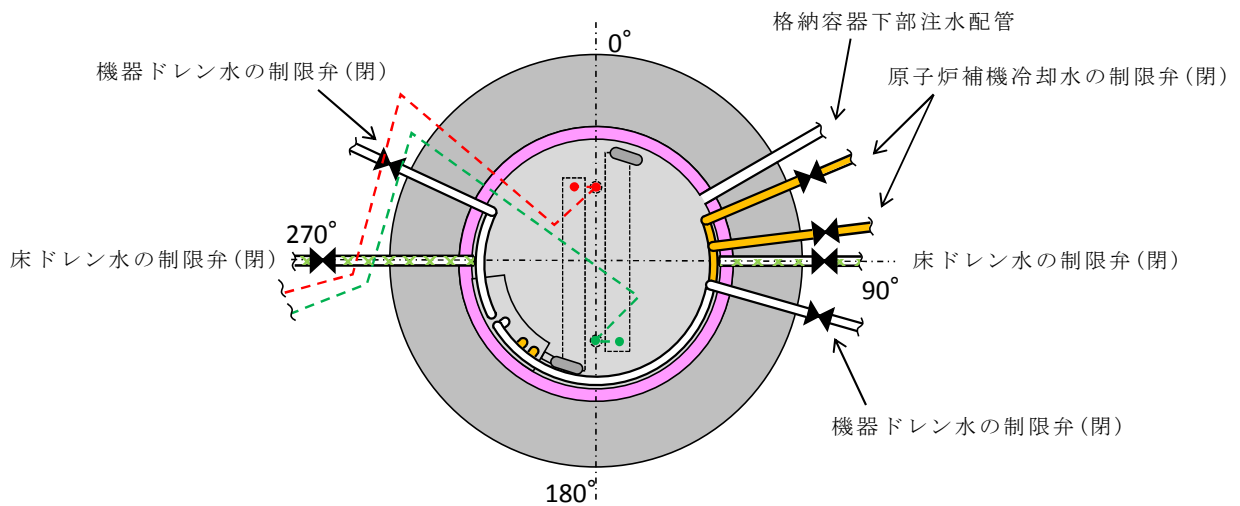


図 4-3 ペDESTAL内への流入水の制限

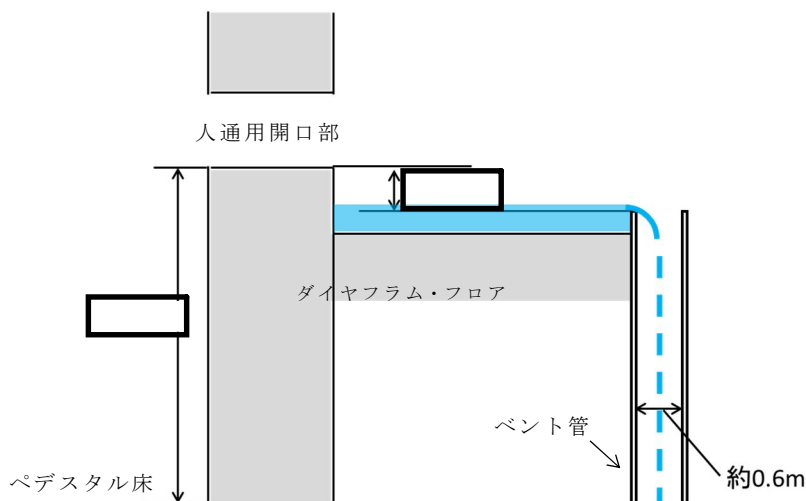
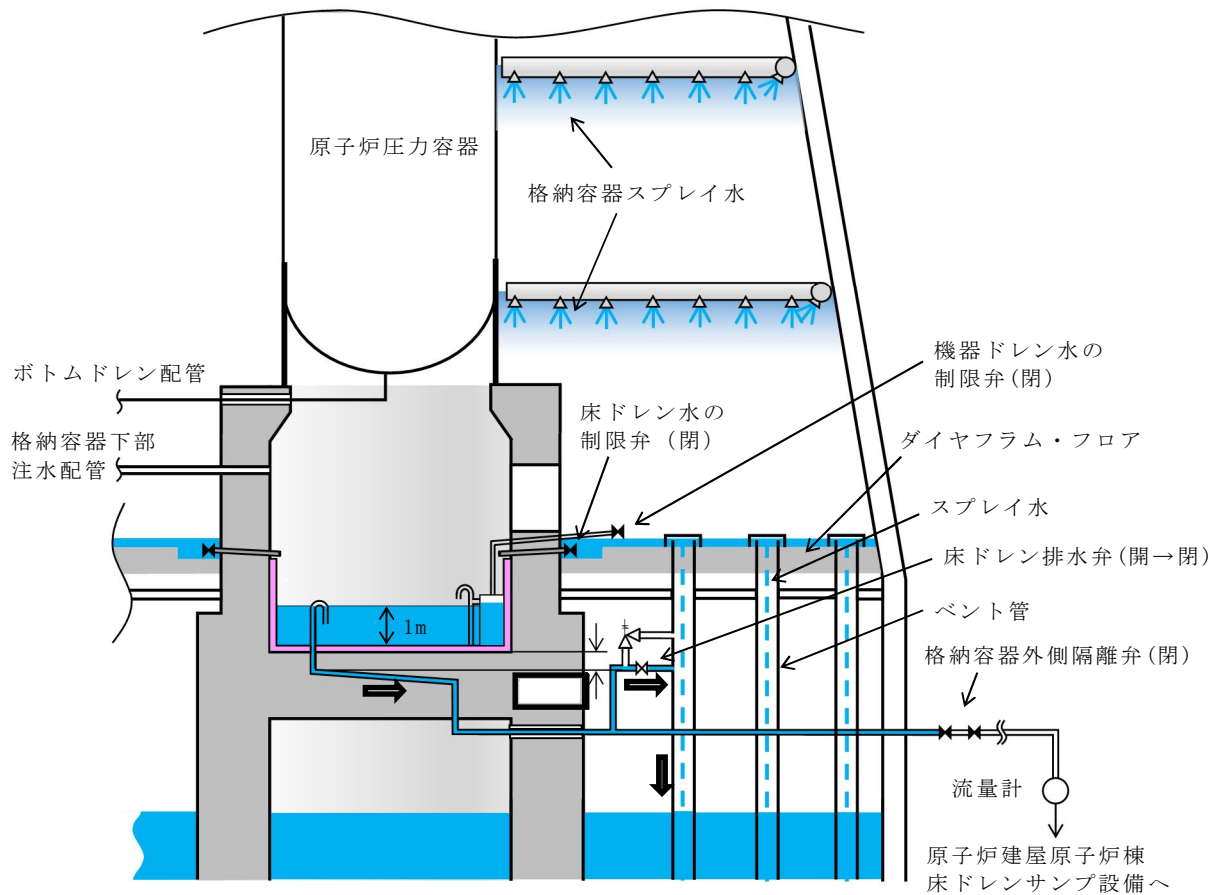


図 4-4 ベント管を通じたサンプレッションチェンバへの排水



ペDESTALに流入した水はベント管（真空破壊装置が設置されていないもの）を介してサブプレッショ^ン・チェンバへ排水される。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当たりに流れる格納容器スプレイ水等の流量は僅かであり、ペDESTALへの流入水の排水性に影響はないと考えられる。

サブプレッショ^ン・チェンバからの格納容器ベント用の配管下端は、ペ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高い位置に設置されている。ただし、格納容器ベント中のサブプレッショ^ン・プール水の最高水位は、ペDESTAL床のコンクリート表面より約0.62m下であり、床ドレン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床ドレン排水配管が水没することはない。（図4-7）

【参考】最も高い位置の真空破壊装置はペDESTAL床のコンクリート表面より約0.47m下であり、床ドレン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、その他の真空破壊装置はペDESTAL床のコンクリート表面より約1.36m下であり、床ドレン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。（図4-7）

図 4-5 床ドレン排水経路及びベント管を介した排水

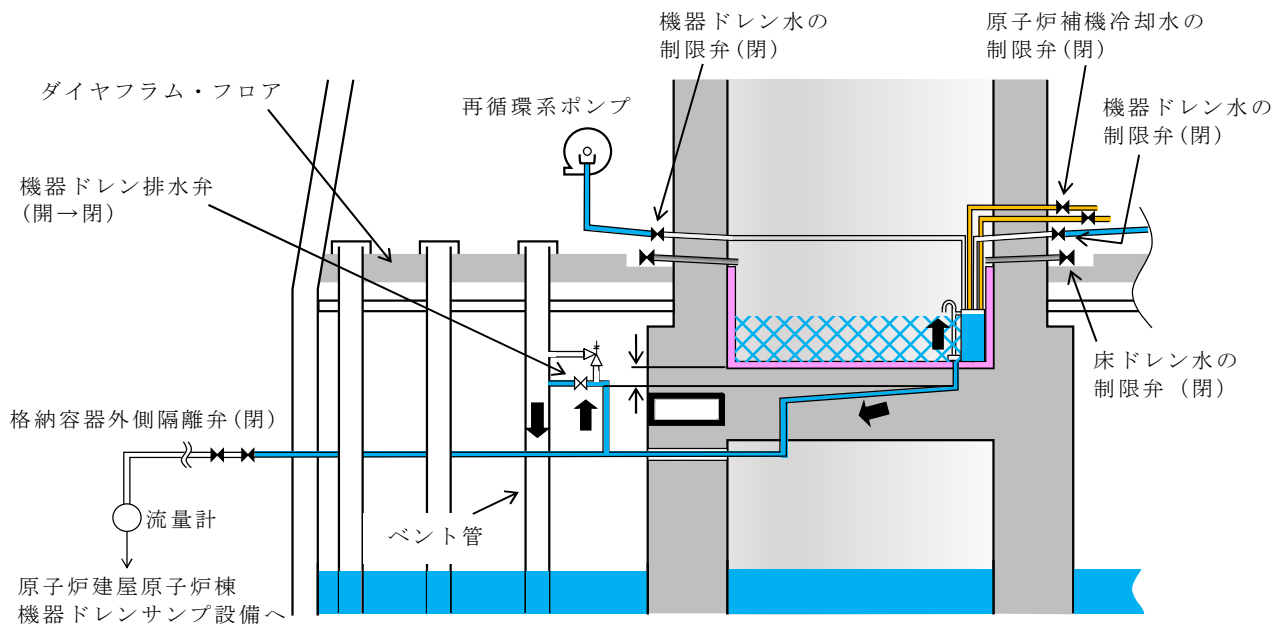
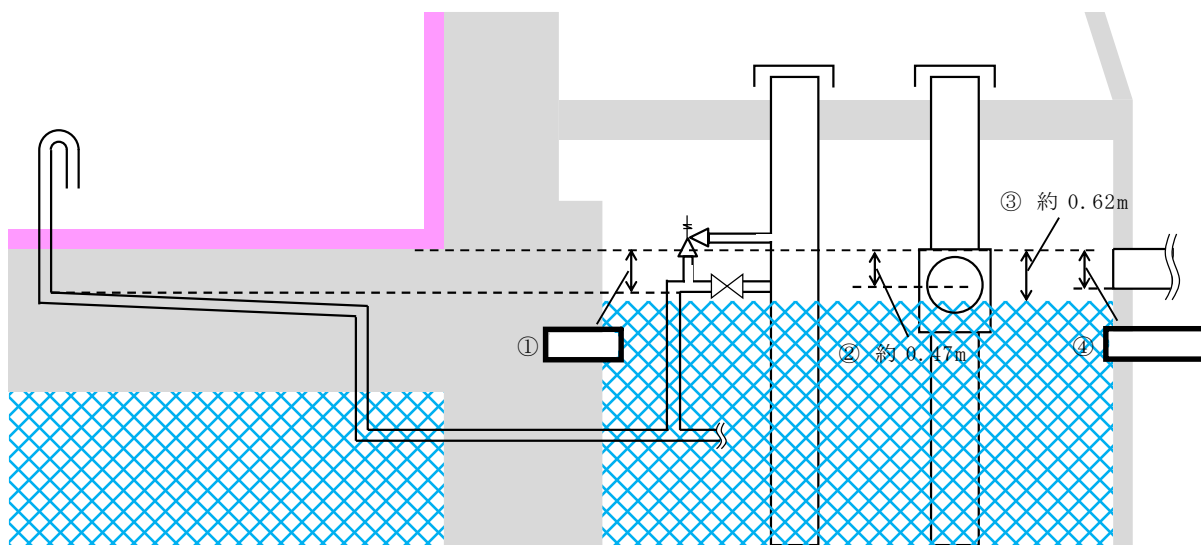


図 4-6 機器ドレン排水経路及びベント管を介した排水



- ① : ペDESTAL床コンクリート表面から、横方向スリット上端及び排水配管のベント管への接続高さ
- ② : ペDESTAL床コンクリート表面から、最も高い位置の真空破壊装置設置高さ
- ③ : ペDESTAL床コンクリート表面から、格納容器ベント中のサブプレッション・プールの最高水位
- ④ : ペDESTAL床コンクリート表面から、サブプレッション・チェンバ側の格納容器ベントライン下端

図 4-7 スリット、排水配管等の位置関係

(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 0.2 m 以上のデブリ堆積を検知後に，80 m³/h でペDESTAL満水相当まで水位を上昇させる（**図 4-8**）とともに，その後は満水近傍にて水位を維持する。この際，ペDESTAL内での貯水はペDESTAL躯体にて行う。

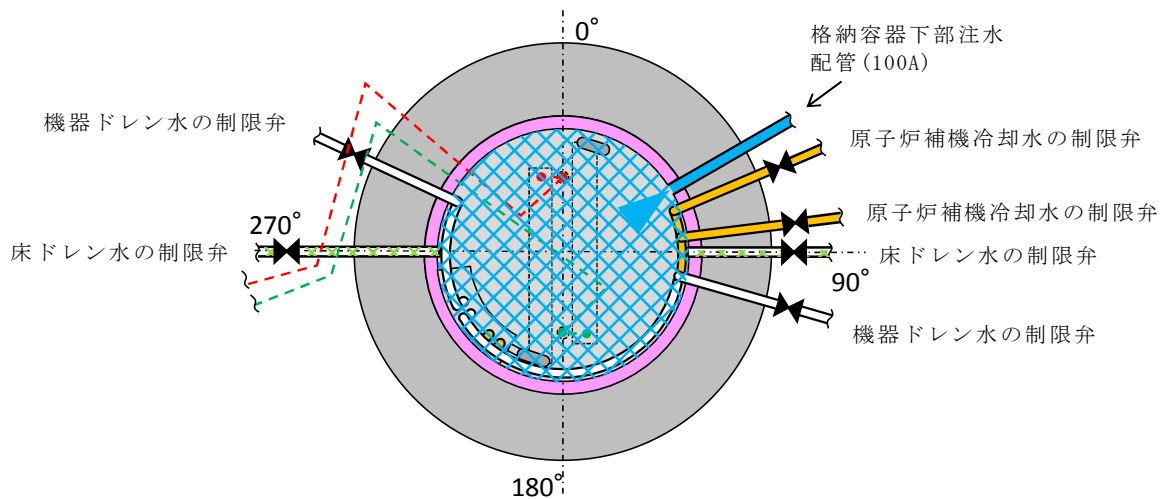


図 4-8 格納容器下部注水系によるペDESTALへの注水

格納容器床ドレンサンプ改造に伴う漏えい水の検知性への影響について添付 4-1 に，ペDESTAL内に設置する計器類について添付 4-2 にそれぞれ示す。

ペDESTAL格納容器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格納容器床ドレンサンプは、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□のサンプである（図1）。改造後は、ペDESTAL格納容器床ドレンサンプの水深は1 m、かつ、表面積は約27 m²であり、漏えい水によるペDESTAL格納容器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ェ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格納容器床ドレンサンプには少量の流入水があり、水位は満水の1 mを常時維持する*。

したがって、ペDESTALへの流入水は常時全量が原子炉建屋原子炉棟格納容器床ドレンサンプ設備へ排水され、その流量はペDESTAL格納容器床ドレンサンプ改造前と同様に格納容器床ドレンサンプ流量計により確認できる設計とする。これにより、位置を特定できない漏えい水はペDESTAL格納容器床ドレンサンプ改造前と同様に検知することが可能である。

注記 *：改造後のペDESTAL格納容器床ドレンサンプは表面積が増えること等により蒸発量が増加することが考えられるが、その分、ドライウェル冷却装置のクーラー部での除湿量も増え凝縮水としてサンプに戻るため、サンプ推移高さは約1 mに維持可能である（図2）。

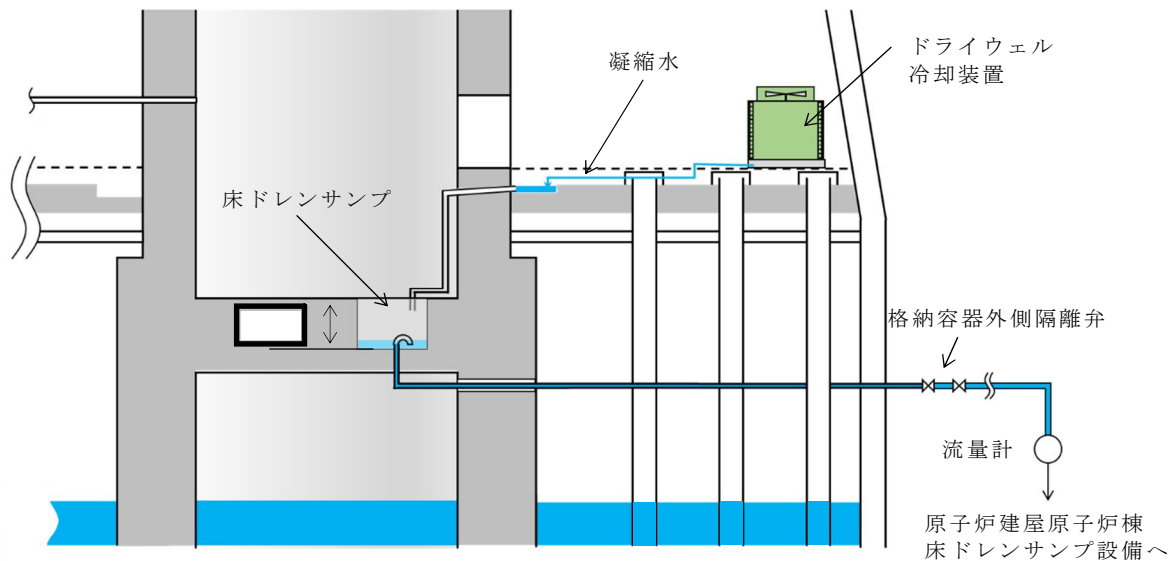


図1 格納容器床ドレンサンブ概要図 (改造前)

(改造前)

格納容器内の湿度(露点温度)を一定に保つ設計としているため、ベント管を通じたS/Pからの蒸発量($G1$)と、サンブ(床ドレン、機器ドレン)からの蒸発量($G2$)が、ドライウエル冷却装置の除湿コイルでの除湿量($G3$)とバランスする。

(改造後)

改造前と比べて、サンブ(床ドレン、機器ドレン)からの蒸発量($G2'$)が増加することになるが、ドライウエル冷却装置の除湿コイルでの除湿量($G3'$)も増加し、蒸発量($G1 + G2'$)と除湿量($G3'$)はバランスする。

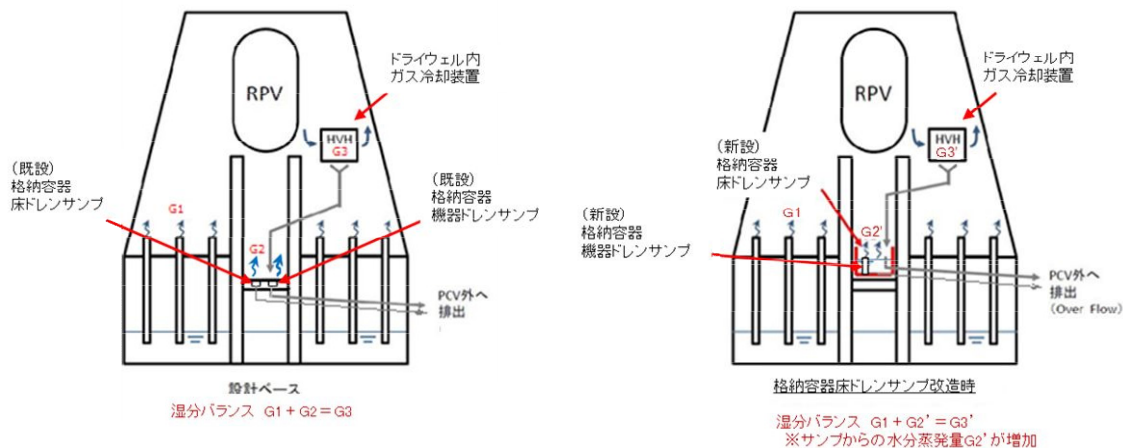


図2 格納容器床ドレンサンブの水位維持イメージ

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表 1 及び図 1 に示す。

各計器の検出部の仕様等を表 2 に、測定原理を図 2 及び図 3 にそれぞれ示す。また、各計器の構造図及び設置概略図を図 4 に示す。ペDESTAL内に設置する各計器の検出部及びケーブル (MI ケーブル) は耐熱性の高い無機物で構成し、ペDESTAL外に取り出したケーブル (MI ケーブル) をペネトレーションボックス内にてペネトレーションのケーブルと直ジョイントで接続する。

これらの計器は、重大事故等時の環境条件下において耐性を有する設計とする。ペDESTAL内の SA 環境条件としては、格納容器破損防止対策の有効性評価において示している各解析結果の最高値は約 212 °C - 約 1 秒間, 0.465 MPa [gage] であり、これを包絡するペDESTAL内環境条件 200 °C (ピーク温度 215 °C - 1 分間), 0.62 MPa [gage] を設定している。また、ペDESTAL内は R P V 破損後のデブリの落下に配慮した設計とする。

- ・各計器の MI ケーブルは、図 5 に示すとおり、チャンネル毎に別ルートで敷設し、デブリの落下に伴うペDESTAL内構造物等の落下物を考慮した場合においても、複数のチャンネルが同時に損傷し、機能喪失することがない設計とする。
- ・R P V からデブリが大量に落下した場合は、デブリはペDESTAL内の構造物に付着せず、ペDESTAL下部のプールに落下すると考えられる。仮に、R P V から少量のデブリが落下した場合に僅かなデブリが構造物に付着したとしても、プールから発生する蒸気や構造物との伝熱によって冷却されるため、輻射熱による各計器への影響は小さいと考えられる。ただし、各計器の検出部及び MI ケーブルに対して金属製の保護カバーを設置 (デブリ検知用水温計検出部を除く) することで、R P V 破損後のペDESTAL内計器の健全性に配慮した設計とする。

なお、ペDESTAL内の検出器・MI ケーブル、保護カバーは無機物で構成されており、放射線による影響はない。

表 1 ペDESTAL内計器の概要

	設置高さ*	設置数	計器種別
格納容器下部 水温	0 m	各高さに 5 個	測温抵抗体式 温度計
	0.2 m		
格納容器下部 水位	0.5 m	各高さに 2 個	電極式 水位計
	0.95 m		
	1.05 m		
	2.25 m		
	2.75 m		

注記 * : ペDESTAL底面 (コリウムシールド上表面) からの高さ

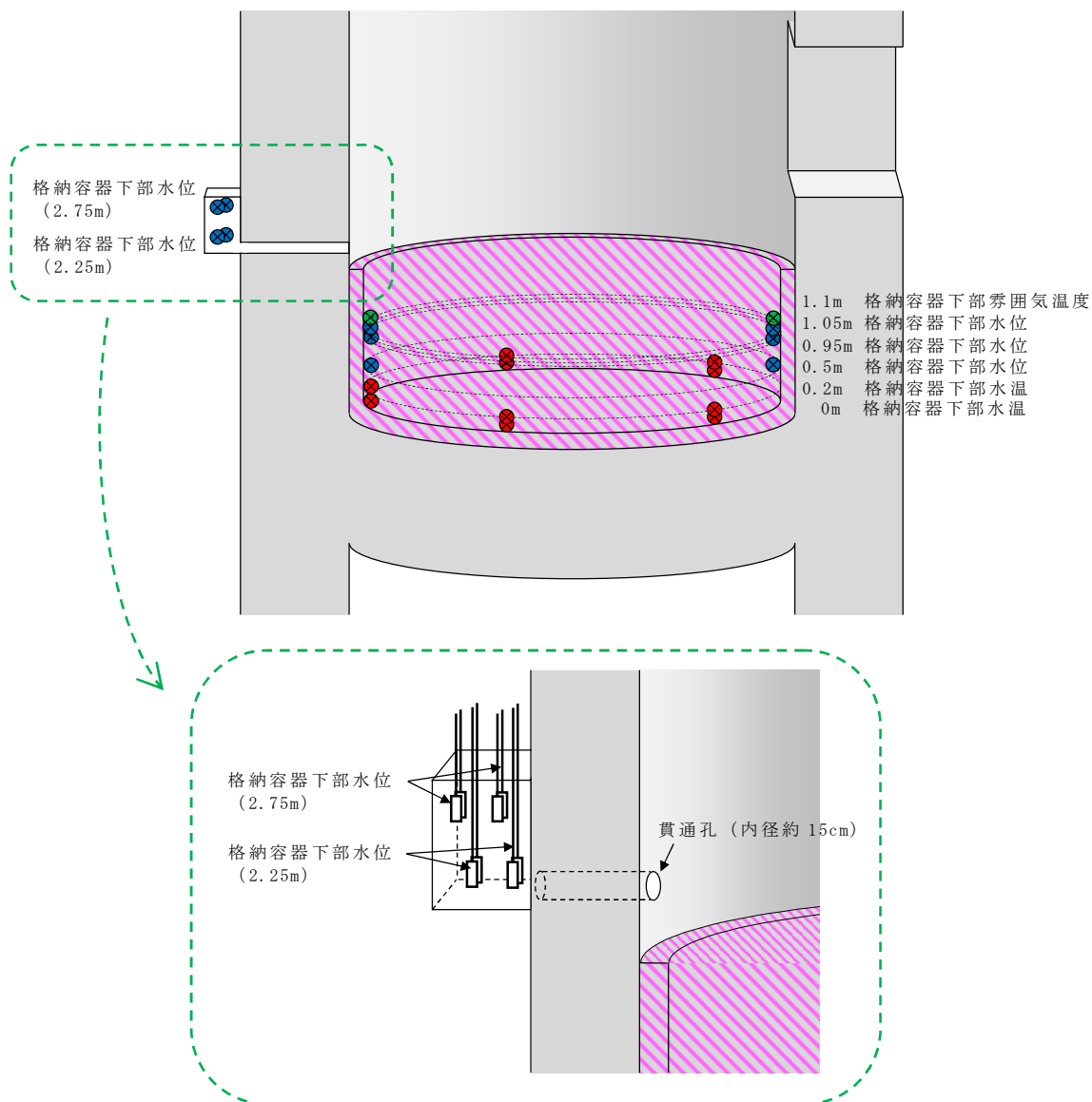


図 1 ペDESTAL内の計器設置図

表 2 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 : 620 kPa[gage] 放射線 : -*
電極式 水位計	— (レベル スイッチ)	$\pm 10\text{mm}$	温度 : 短期 230 ℃, 長期 200 ℃ 圧力 : 620 kPa[gage] 放射線 : -*

注記 * : 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

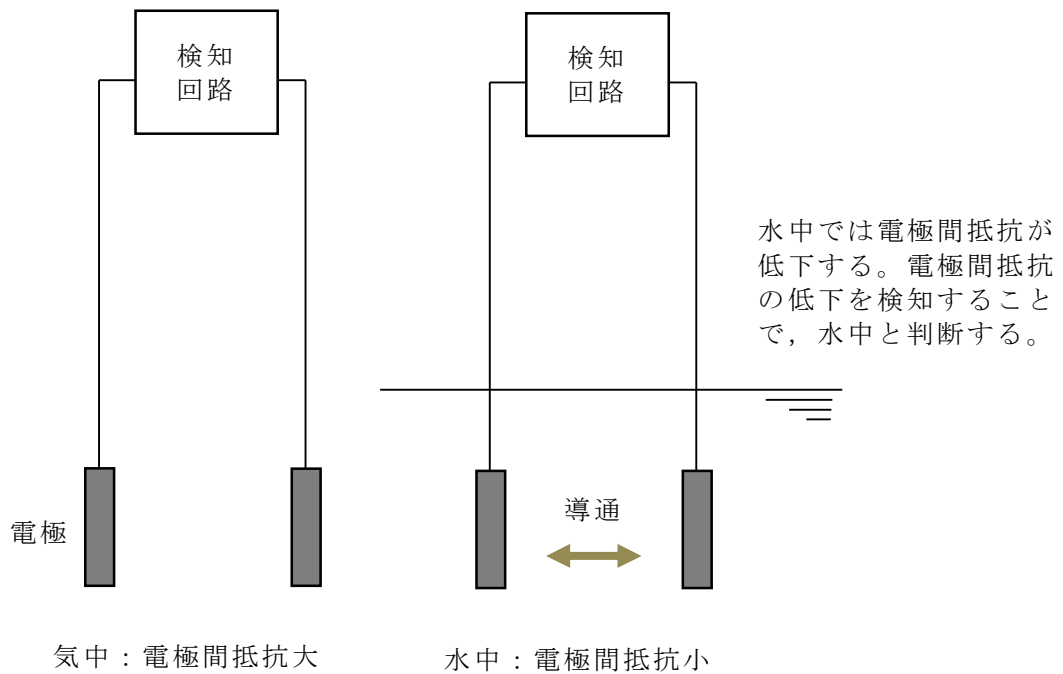
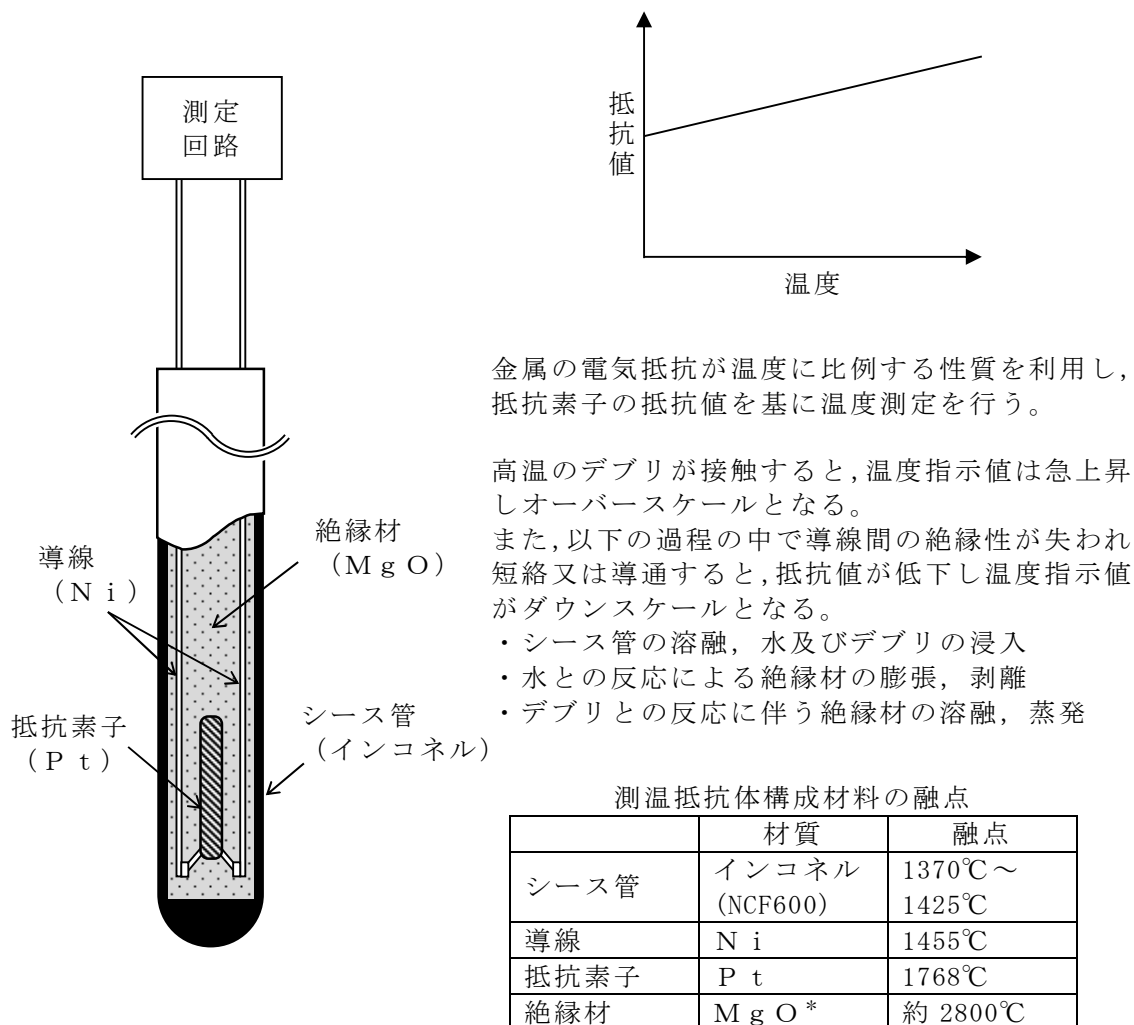


図 2 電極式水位計の動作原理

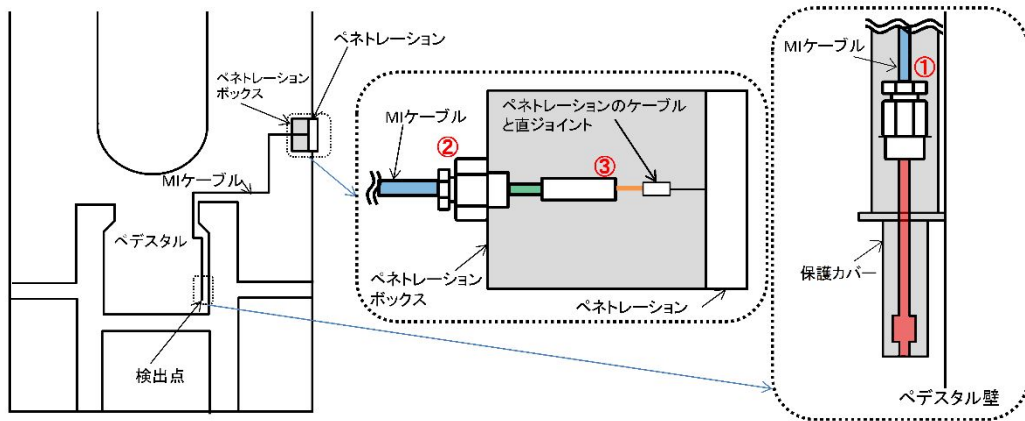


注記 * : デブリ中の Zr 等により還元されると、融点約 650℃、沸点約 1100℃の Mg となり、熔融又は蒸発する。

図 3 測温抵抗体式温度計の動作原理



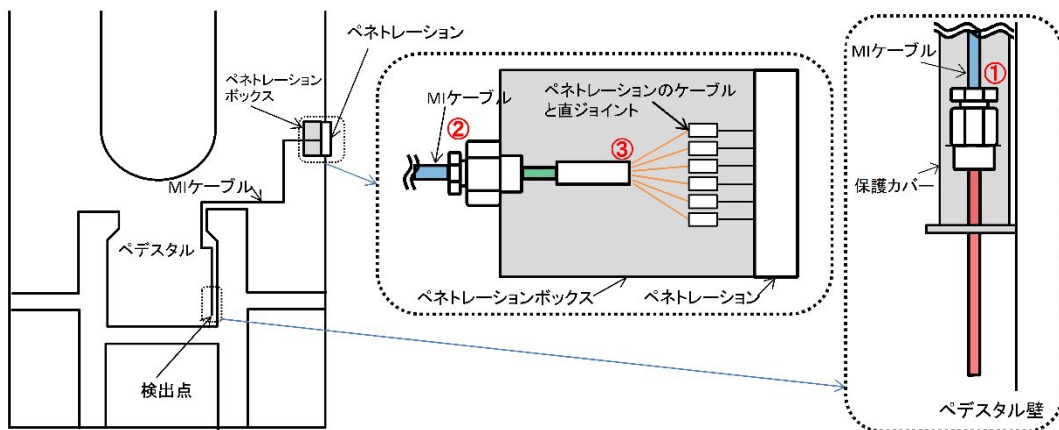
格納容器下部水位（電極式）構造図



格納容器下部水位の設置概略図

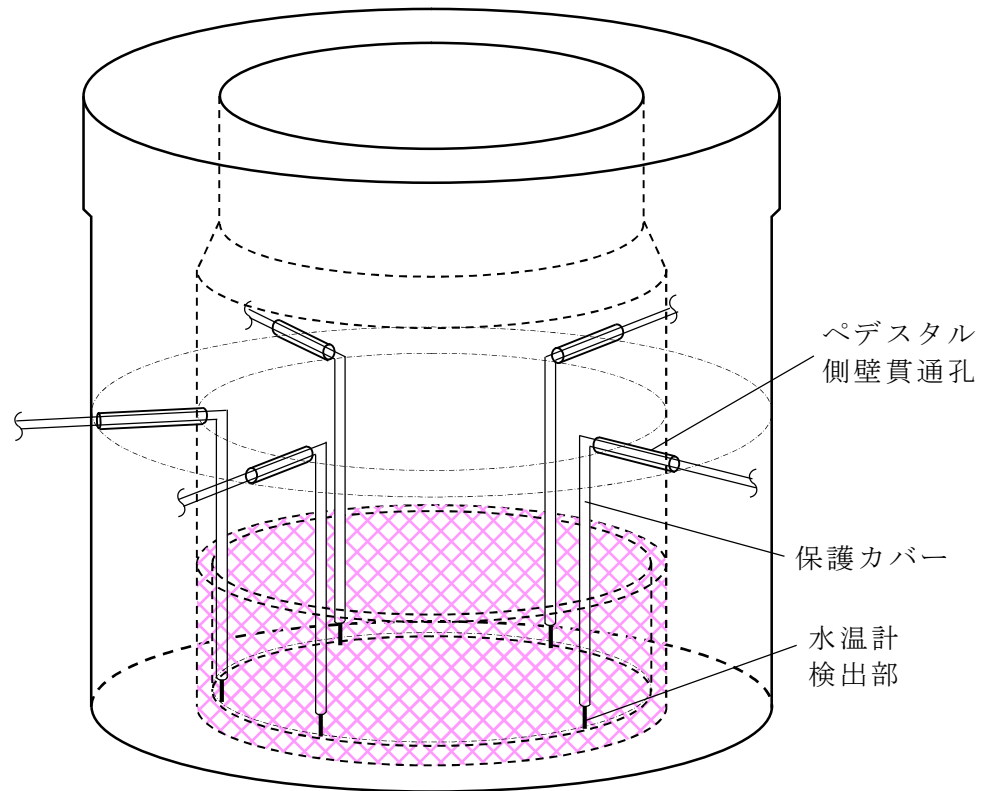


格納容器下部水温（測温抵抗体式）構造図



格納容器下部水温の設置概略図

図 4 格納容器下部水位及び格納容器下部水温の構造図及び設置概略図



図は格納容器下部水温（0m）の場合のイメージ

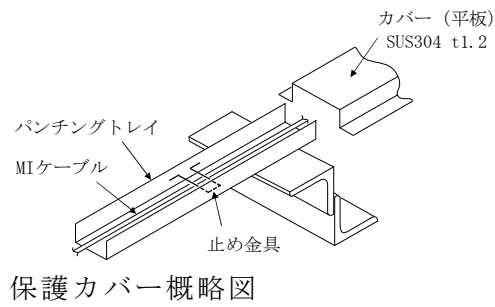


図 5 ペDESTAL内検出器及びケーブル（MIケーブル）設置概略図

ペDESTAL内計器の設置方法について

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

図1のとおり，コリウムシールドより上部のペDESTAL側壁コンクリートからコリウムシールド内にサポートを下ろし，このサポートに溶接された固定金具により計器を固定する。これにより，コリウムシールドに貫通部を設けることなく，ペDESTAL内に計器を設置することとする。

また，計器のサポートは必要な耐震性を確保し，ペDESTAL構造に悪影響を及ぼさない設計とする。

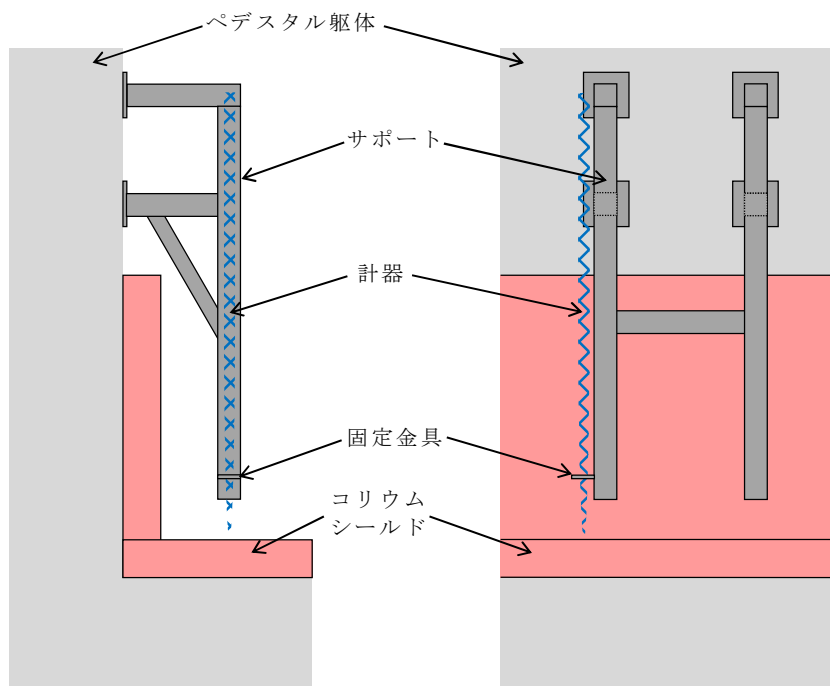


図1 ペDESTAL内計器の設置概念図

5. 溶融炉心の排水流路内での凝固停止評価について

東海第二発電所では、R P V破損時にペDESTALに落下した溶融炉心が、ペDESTALに設置された格納容器ドレンサンプの排水流路を通じてサプレッション・チェンバへ移行することを防止するため、排水流路の形状を変更することとしている。

R P V破損時には、ペDESTAL内の水により格納容器ドレンサンプの排水流路は水で満たされていることから、溶融炉心が排水流路に流入する際には、流路内から水や水蒸気の対向流が生じる。また、溶融炉心が格納容器ドレンサンプの排水口に到達するまでの温度低下及び粘性増加を考慮すると、現実的には溶融炉心の排水流路への流入はごく限定的と考えられる。

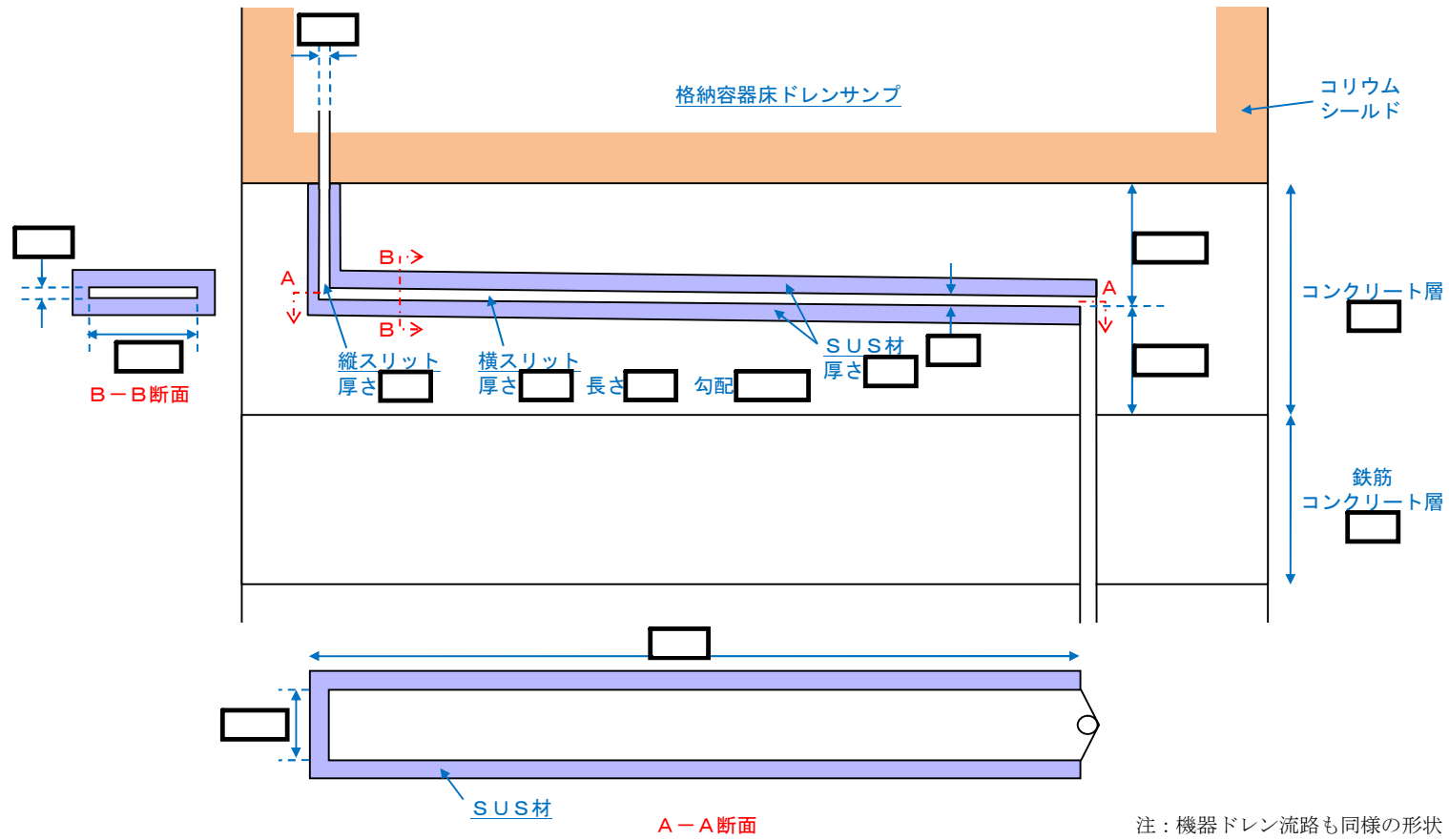
しかしながら、溶融炉心の落下時及び落下後の挙動は不確かさがあることから、溶融炉心の排水流路への流入を想定した場合でも溶融炉心が横スリット内で凝固停止しサプレッション・チェンバ側へ移行しないことを、M A A P計算結果を基に評価し、スリット状排水流路の有効性を確認した。

5.1 格納容器ドレンサンプ排水流路の形状変更を考慮した凝固停止評価モデル

図 5-1 に、格納容器ドレンサンプ排水流路の形状変更を考慮した凝固停止評価モデルの概要図を示す。

各ドレンサンプからの排水流路は、ペDESTAL床面に堆積する溶融炉心による熱影響を抑制するコンクリート深さまで通じる縦方向の流路（縦スリット）と、流入した溶融炉心を凝固させる横方向の流路（横スリット）を介し、既設の格納容器ドレンサンプ排水配管へ接続する構成とする。

また、縦スリット及び横スリットは薄い中空平板型（幅 [内径]、厚さ [内径]）の形状とし、周囲をS U S材とすることで、流入した溶融炉心の冷却及び凝固停止を促進させる設計とする。



別添 2-33

図 5-1 格納容器ドレンサンプ排水流路の形状変更を考慮した凝固停止評価モデル

5.2 既往の試験結果に基づく評価

配管等の流路内における熔融炉心の流動・凝固挙動に係る試験として、米国 E P R I 及び F A I により実施された炉心熔融時の R P V 下部プレナム貫通部の挙動に係る試験がある。^[1]この試験では、R P V 下部プレナム及びドレン配管(内径 5 cm)を模擬した試験体に模擬コリウムとして A 1 2 O 3 を流入させ、その流動挙動を確認している。図 5-2 に試験装置の概要図を示す。

試験の結果、配管内での A 1 2 O 3 の流動距離は最大でも 79 cm 程度となっており、配管の破断は生じていない。また、配管内での水平方向の流速は最大でも約 0.2 m/s と推定されており、流路形状に基づきベルヌーイ則により計算される流速よりも 1/10 から 1/100 小さい結果となっている。これは、模擬ドレン配管内における水の存在により、模擬コリウムの流動が著しく抑制されたためと推定されている。

表 5-1 に、E P R I 試験条件と東二の排水流路における条件の比較を示す。

E P R I 試験では、模擬コリウムとして A 1 2 O 3 を用いており、その体積当たりの熔融潜熱は約 4.41×10^9 J/m³ と計算される。これに対して、東海第二発電所の熔融炉心の場合、熔融潜熱に加えて液相線温度から固相線温度までの顕熱を考慮しても、体積当たりの凝固までの放出熱量は と計算され、A 1 2 O 3 と同等であることが分かる。

また、東海第二の熔融炉心の熱伝導率は A 1 2 O 3 に比べて大きいことに加え、格納容器ドレンサンプの排水流路はスリット形状とし周囲に S U S 材を配置することから、実機条件の方が熔融炉心の冷却が進みやすいと考えられる。

一方、東海第二の熔融炉心は A 1 2 O 3 に比べて動粘度が小さいことや堆積ヘッドが大きくなっていることから、E P R I 試験条件に対して流路内での流入速度が速くなることが考えられる。しかし、流速が大きくなると、熔融炉心と S U S 材間の対流熱伝達率が大きくなり熔融炉心の冷却率が大きくなることから、流動距離は流速の増加に対して単純に線形には増加しない。

以上より、E P R I 試験条件と実機条件の差を勘案しても、総合的な流動距離への影響は同程度であることから、東海第二のスリット条件でも E P R I 試験結果の流動距離(約 79 cm)を大きく上回ることは考えにくく、熔融炉心は横スリット長さ の範囲内で凝固停止するものと考えられる。

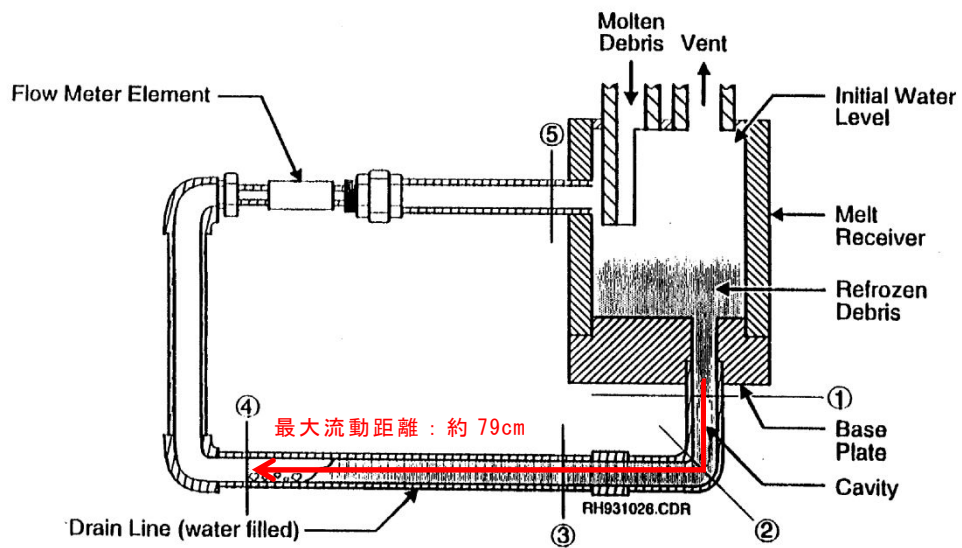
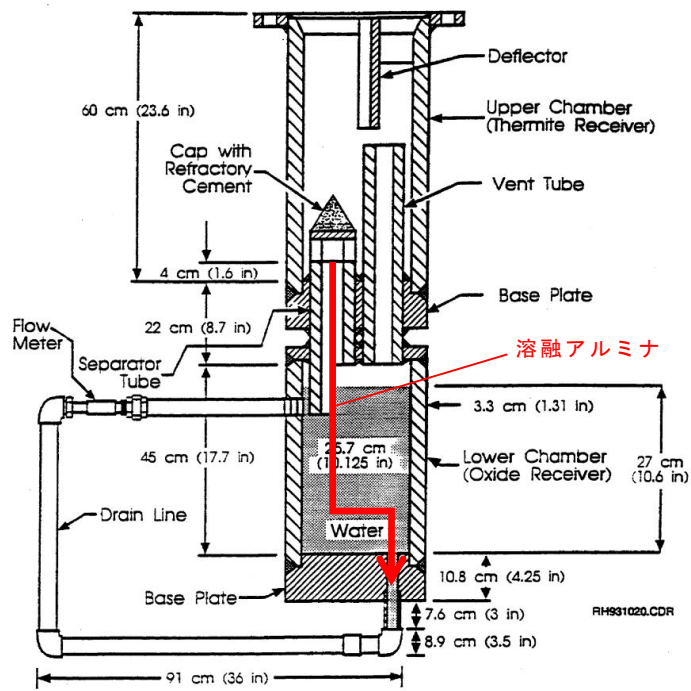


図 5-2 E P R I / F A I による試験装置

表 5-1 E P R I 試験条件と東海第二実機条件の比較

項目		E P R I 試験条件 ^[1]	東海第二 実機条件	流動距離への影響の比較
溶融物条件	溶融物	A l ₂ O ₃	溶融炉心	凝固までに必要な除熱量は同程度。 (A l ₂ O ₃ は溶融潜熱のみ, 溶融炉心は液相線温度から固相線温度までの顕熱と溶融潜熱を考慮) 溶融炉心の方が, 冷却が進みやすい。 東二条件の方が溶融物の流速が速くなる傾向。 (ヘッドは 1/2 乗で流速に寄与)
	融点 (°C)	2047		
	密度 (kg/m ³)	3800		
	比熱 (J/kgK)	1300		
	溶融潜熱 (J/kg)	1.16×10 ⁶		
	体積当たりの凝固までの放出熱量 (J/m ³)	約 4.41×10 ⁹		
	熱伝導率 (W/mK)	7.5		
	粘性係数 (Pa・s)	0.003	0.004* ²	
	動粘性係数 (m ² /s)	7.9×10 ⁻⁷		
全量堆積時の水平流路までのヘッド (m)	0.3			
流路条件	流路構造	配管	スリット状 (S U S 材被覆)	スリット形状では流路壁面との接触面積が大きく, 冷却が進みやすい。
	流路内径	5cm		

注記 *1: M A A P 解析 (T Q U V シーケンス) における R P V 破損時の値

*2: M A T P R O における U O₂ の値^[2]

5.3 溶融金属の凝固モデルによる評価

5.3.1 溶融金属の流路内での凝固挙動

図 5-3 に、流路内における溶融金属の凝固挙動の概念図を示す。

純金属や共晶温度の合金では、図 5-3(a)のように流路の入口付近から固化クラストが成長し流路が閉塞することで、流動が停止する。

一方、液相線温度と固相線温度に差がある合金では、図 5-3(b)のように溶融物の先端から温度低下とともに固相率が増加し、流動限界固相率を超えたときに流動を停止する。これは、図 5-4 に示すように、固相率の増加とともに粘性が増加するためである。

溶融炉心については、液相線温度 に対して固相線温度が (M A A P 計算結果) と差があることから、合金の凝固挙動を示すものと考えられる。

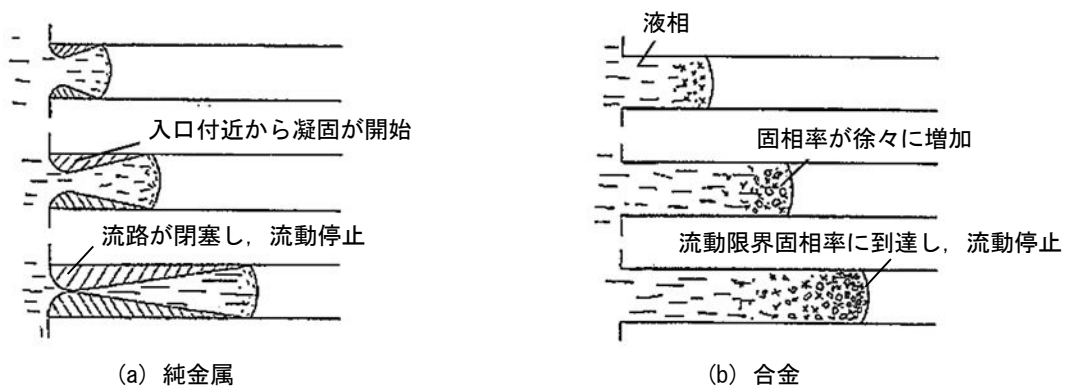


図 5-3 流路内での溶融金属の凝固挙動の概念図

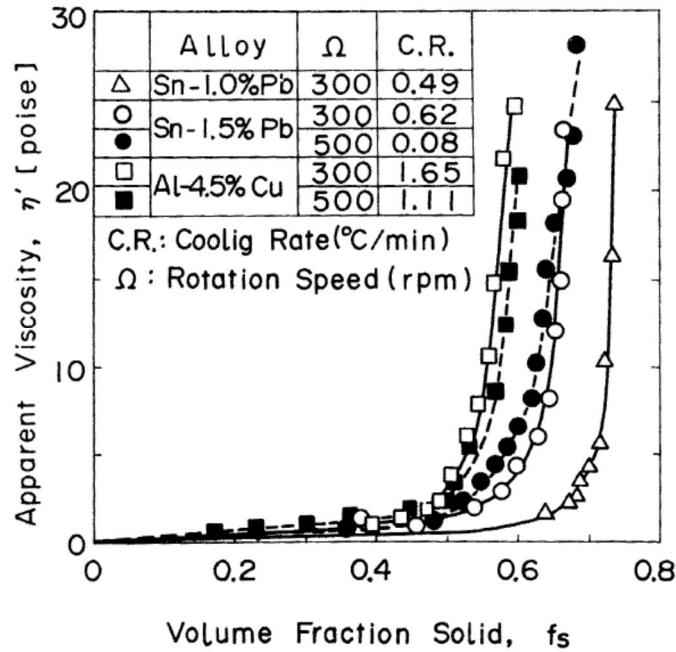


図 5-4 溶融合金における固相率と見かけの粘性の関係 [3]

5.3.2 評価方法

溶融合金の流路内での流動距離を評価するモデルとして, Fleming のモデル [4] があり, このモデルを用いて溶融炉心の横スリット内での流動距離の評価を行った。その内容を以下に示す。

なお, 本凝固評価モデルは流路内に水が存在しないドライ状態を前提としていることから, 実機条件に対して十分保守的な評価となると考えられる。

(1) Flemings モデルの評価式

Flemings モデルは (5.1) 式のように表され, 流路を流れる溶融物が保有するエネルギーと周囲の構造材への除熱速度を基に, 溶融物が凝固するまでに必要なエネルギーが除去されるまでの流動距離を評価するモデルとなっている。

$$L_{freeze} = \frac{A\rho v(f_c H_f + C_p \Delta T)}{hS(T_d - T_w)} \left(1 + \frac{B}{2}\right) \quad (5.1)$$

ここで,

$$B = \frac{h\sqrt{\pi\alpha_w\Delta X}}{k_w\sqrt{v}} \quad (5.2)$$

であり, 各パラメータの内容は以下のとおりである。

- L_{freeze} : 流動距離 (m), A : 流路断面積 (m^2),
- ρ : 溶融炉心密度 (kg/m^3), v : 溶融炉心流速 (m/s),
- f_c : 流動限界固相率 (-), H_f : 溶融炉心溶融潜熱 (J/kg),
- C_p : 溶融炉心比熱 (J/kgK), ΔT : 初期温度と凝固温度の差 (K),
- h : 熱伝達率 (W/m^2K), S : 流路周長 (m), T_d : 溶融炉心温度 (K),

T_w : 構造材温度 (K), α_w : 構造材熱拡散率 (m^2/s),

ΔX : チョーキングレンジ* (m), k_w : 構造材熱伝導率 (W/mK)

注記 * : 熔融物先端でどの程度の長さが流動限界固相率を超えると流動が停止するかを定義する定数

(2) 熱伝達係数の計算

熔融炉心とスリット構造材間の熱伝達係数 h は, 熔融炉心の熱伝導率 k , 水力等価直径 d_e 及び Sleicher-Rouse の式^[5] より求まるヌセルト数 Nu を用いて, 下式により算出する。

$$h = \frac{k}{d_e} Nu \quad (5.3)$$

Sleicher-Rouse の式

$$Nu_m = 5 + 0.015 Re_f^a Pr_w^b \quad (5.4)$$
$$\left(10^4 < Re < 10^6, 0.1 < Pr < 10^4 \right)$$
$$\begin{cases} a = 0.88 - \frac{0.24}{4 + Pr_w} \\ b = \frac{1}{3} + 0.5 \exp(-0.6 Pr_w) \end{cases}$$

添字はそれぞれ, m : 混合平均温度, f : 膜温度, w : 壁温における物性値を表す。ただし本評価では, 物性値は温度によらず一定と仮定している。

(3) 熔融炉心の温度低下の考慮

(5.1)式から直接的に流動距離を計算すると, 流路内を進行する間の熔融炉心の温度低下が考慮されず, 熔融炉心から構造材への熱伝達速度が過大評価されることにより, 流動距離が短く評価されることが考えられる。

今回の評価では, Flemings の評価式を基に, 流動に伴う熔融炉心の温度低下を考慮した上で, 熔融炉心先端が流動停止する固相率に至るまでの除熱時間を算出し, 熔融炉心の流速との積により流動距離を計算した。評価の概要を図 5-5 に示す。



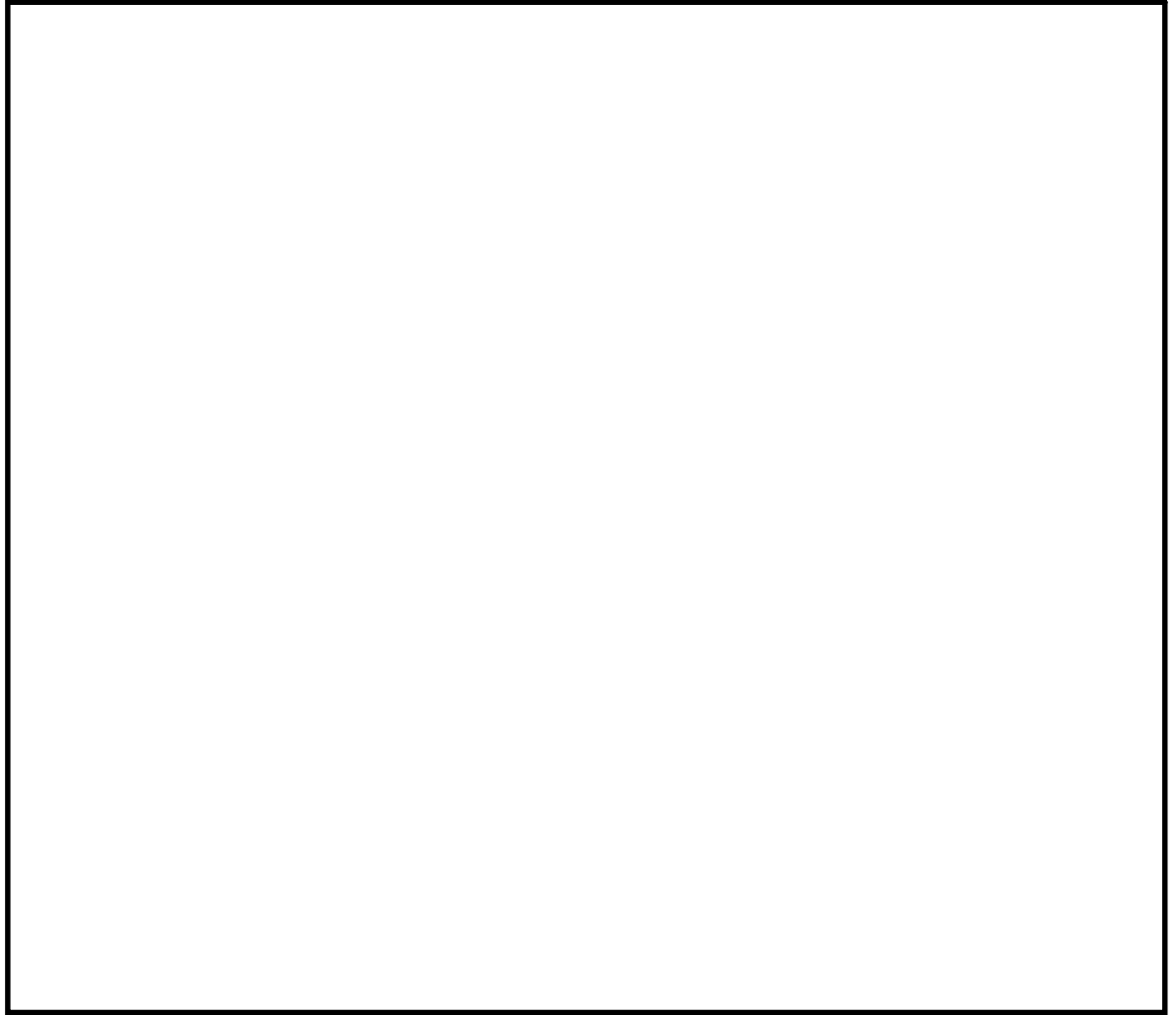


図 5-5 溶融炉心流動距離の評価イメージ図

5.3.3 評価条件

横スリット内での溶融炉心凝固評価に用いた条件を表 5-2 に示す。

溶融炉心の物性については，MAAP 計算結果における R P V 破損時の溶融炉心物性値を用いる。なお，流動距離が長くなるよう溶融炉心の保有エネルギーを大きく設定する観点から，T Q U V シーケンスの値を設定する。

溶融炉心の流速については，溶融炉心全量に加えペDESTAL 内構造物等がペDESTAL 内に堆積した場合の堆積高さ と，横スリット下端までの高低差 の合計 をヘッドとして考慮した場合，溶融炉心の流速は m/s となる。これに対し，スリット内の冷却水の存在による溶融炉心の流速の低下として，E P R I 試験の知見（1/10 から 1/100）及び実機溶融炉心と E P R I 試験の溶融アルミナの動粘度の差（約 1.6 倍）を考慮し，保守的に 1/2 を考慮した を設定する。

流動限界固相率及びチョーキングレンジについては，既往の溶融炉心拡がり試験においては固相率が 0.4～0.6 程度で粘性が急激に増加するといった知見^[6]

があるが、チョーキングレンジには明確な知見がないことから、熔融炉心先端が完全に凝固するまで流動が続くものと仮定し、流動限界固相率を 1.0、チョーキングレンジを 0 m と設定する。

表 5-2 評価条件

	項目	条件	備考
横スリット流路形状	流路高さ (cm)		設計値
	流路幅 (cm)		
熔融炉心物性	液相線温度 (°C)		M A A P 計算結果 (R P V 破損時の値) 流動距離が長くなるよう熔融炉心の保有エネルギーを大きく設定する観点から、T Q U V シーケンスの値を使用
	固相線温度 (°C)		
	密度 (kg/m ³)		
	熱伝導率 (W/mK)		
	比熱 (J/kgK)		
	熔融潜熱 (J/kg)		
	粘性係数 (Pa・s)		
構造材物性	密度 (kg/m ³)	7890	伝熱工学資料 (300K における S U S 304 の値)
	熱伝導率 (W/mK)	16.5	
	比熱 (J/kgK)	511	
初期温度条件	熔融炉心初期温度 (°C)		R P V 破損時の熔融炉心平均温度 (): 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)	167	保守的に限界圧力での飽和水温度を設定
熔融炉心流動条件	熔融炉心流速 (m/s)		熔融炉心等の堆積量、スリット形状、スリット内冷却水の存在を考慮し、保守的に設定
	流動限界固相率 (-)	1.0	熔融炉心先端が完全に凝固するまで流動が続くと仮定し設定
	チョーキングレンジ (m)	0	

5.3.4 評価結果

5.3.3 に示した条件に基づく評価の結果、溶融炉心の流動距離は約 1.0 m となり、横スリットの長さ () の範囲内で凝固停止することを確認した。また、凝固に要する時間は 程度であり、この間の溶融炉心の崩壊熱による影響は無視し得る。

なお、表 5-2 の評価条件において、溶融炉心のレイノルズ数及びプラントル数はそれぞれ $Re \approx 1.3 \times 10^5$ 及び $Pr \approx 0.14$ であり、(4) 式の Sleicher-Rouse の式の適用範囲内である。

5.3.5 評価における保守性について

本評価は、以下のような点で保守性を有すると考えられる。

- ・本評価は流路内がドライな状態を前提としているが、実際にはスリット内は水で満たされた状態であり、溶融炉心から水への除熱等により流動距離はより短くなると考えられる。
- ・流動距離の計算において、溶融炉心の流速は流動停止まで一定としており、縦スリット及び横スリット内での圧損や粘性増加に伴う速度低下を考慮していない。
- ・横スリットへ流入する溶融炉心の初期温度は、R P V 破損時の溶融炉心平均温度 () に対し保守的に液相線温度 () を設定しているが、溶融炉心がペDESTAL 床面を拡がる間や縦スリットを通過する間の除熱を考慮すると、実際にはより温度は低下し、またそれに伴い溶融炉心の粘性は増加すると考えられる。
- ・流動限界固相率は 1.0 を設定しているが、既往の溶融炉心拡がり試験においては、固相率が 0.4~0.6 程度で粘性が急激に増加するといった知見^[6]がある。

5.3.6 評価条件の不確かさによる影響について

表 5-2 の評価条件において、溶融炉心の物性値条件については M A A P 計算結果における溶融炉心の組成平均値を用いている。

これに対して、スリットに流入する溶融炉心の物性は不確かさを有すると考えられることから、評価条件の不確かさとして M A A P 計算結果のうち溶融炉心内の金属相及び酸化物相の物性値を参照し、評価結果への影響を検討する。なお、表 5-2 の評価条件において、構造材物性値は不確かさが小さいと考えられること、構造材初期温度及び溶融炉心流動条件は十分な保守性を見込み設定していることから、評価結果に対する不確かさの影響は小さいと考えられる。

表 5-3 に、M A A P 計算結果における溶融炉心の組成平均、金属相及び酸化

物相のそれぞれの物性値を示す。各物性値から計算される溶融炉心が凝固するまでの体積当たりの放出熱量を比較すると、組成平均の物性値を用いた場合が最も大きく、溶融炉心の凝固までの流動距離が最も長くなることが分かる。

したがって、溶融炉心の物性値の不確かさを考慮した場合でも、溶融炉心は横スリットの長さ () の範囲内で凝固停止すると考えられる。

表 5-3 溶融炉心の物性値の比較

項目		組成平均	金属相	酸化物相	備考
溶融炉心物性	液相線温度 (°C)				M A A P 計算結果 (R P V 破損時の値)
	固相線温度 (°C)				
	密度 (kg/m ³)				
	比熱 (J/kgK)				
	溶融潜熱 (J/kg)				
	体積当たりの凝固までの放出熱量 (J/m ³)				計算値

参考文献

- [1] EPRI, Experiments to Address Lower Plenum Response Under Severe Accident Conditions, Volumel, EPRI report TR-103389, 1994
- [2] L. J. Siefken et al., SCDAP/RELAP5/MOD3.3 Code Manual; MATPRO - A Library of Materials Properties for Light-Water-Reactor Accident Analysis, NUREG/CR-6150, Vol. 4 Rev. 2, 2001
- [3] 渋谷 他, 固相・液相共存下における鉄および非鉄合金のみかけの粘性の測定結果, 鉄と鋼, 第 66 年, 第 10 号, 1980
- [4] M. C. Fleming et al., "An Experimental and Quantitative Evaluation of the Fluidity of Aluminium Alloys", AFC Transactions, vol. 69, 1961
- [5] 日本機械学会, 伝熱工学資料 第 4 版, 1986
- [6] M. T. Farmer, Melt Spreading Code Assessment, Modifications, and Applications to the EPR Core Catcher Design, ANL-09/10, 2009

6. 原子炉圧力容器破損時の溶融炉心の冠水評価について

6.1 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）によるペDESTAL注水を実施することとしているが、7分の間に水が蒸発することから、デブリの冠水状態の評価を実施する。

また、ポロシティが冠水状態に与える影響についても評価した。

6.2 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。

6.3 デブリ冠水評価

デブリの堆積形状を図6-1に示す。ポロシティを考慮したデブリ堆積高さ H_{deabri} は式(6.1)で評価する。

$$H_{deabri} = (V_m \times (1 - \Phi_{ent}) + V_s + V_m \times \Phi_{ent} \div (1 - P)) \div S_{fz} \quad (6.1)$$

V_m : 溶融物体積 [約 36 m³]

V_s : ペDESTAL内構造物体積 [約 4 m³]

Φ_{ent} : 粒子化割合 [0.173]

P : ポロシティ [0.5] 既往実験の知見から保守的に設定

S_{fz} : コリウムシールドの設置を考慮した床面積 [約 27.08 m²]

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(6.2)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。

$$H_{pool-ent} = (H_{pool} - (V_m \times \Phi_{ent} \div (1 - P) \times P \div S_{fz})) \times (S_{fz} / S_f) \quad (6.2)$$

H_{pool} : 水プール初期水深 [1 m]

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 [約 29.92 m²]

式(1)からデブリ堆積高さ H_{deabri} は約 1.71 m となる。また、式(6.2)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 0.69 m となる。

解析コードM A A Pを用いた有効性評価の結果（デブリから水プールへの限界熱流束を 800 kW/m^2 （圧力依存性あり）と設定）から、R P V破損によるデブリ落下からペDESTAL注水開始までの7分間におけるペDESTAL水位低下量は、過渡事象の場合は約 0.34 m 、L O C A事象の場合は約 0.44 m であり、デブリの冠水は維持される。なお、R P V破損時点からデブリ露出までの時間は、過渡事象の場合で約21分間、L O C A事象の場合で約15分間であることから、ペDESTAL注水の開始が遅れた場合でも一定時間冠水維持することが可能である。

6.4 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L i p i n s k i - 0 D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、図6-2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 3300 kW/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 kW/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。

6.5 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。

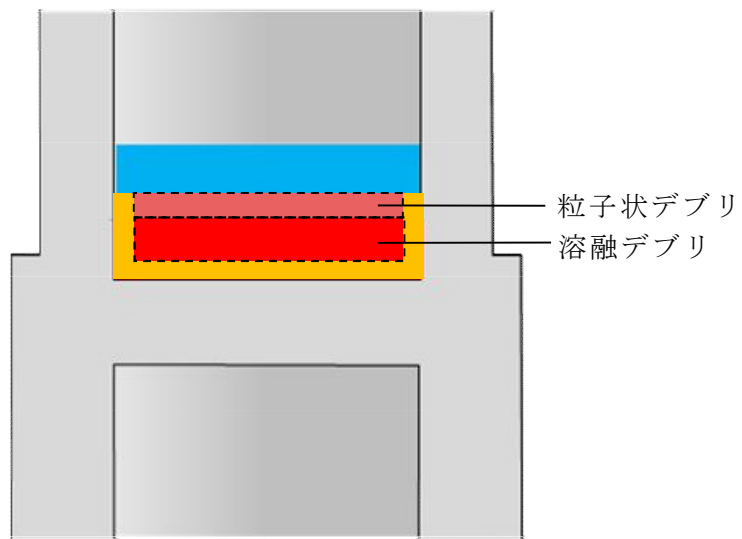


図 6-1 デブリ堆積形状

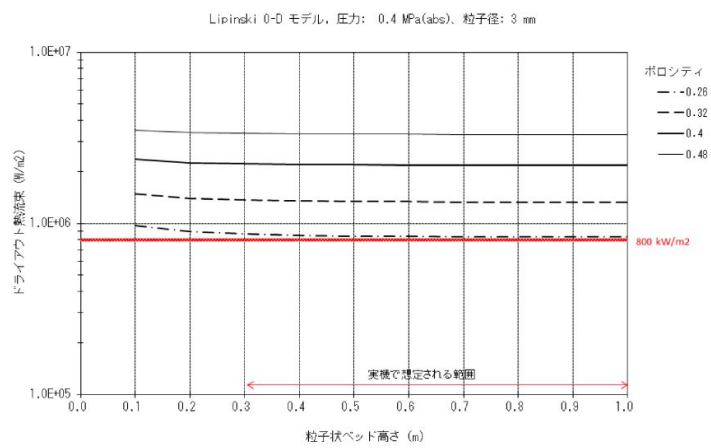


図 6-2 粒子状ベッド高さ とドライアウト熱流束の関係

7. コリウムシールドを考慮した熔融炉心・コンクリート相互作用による侵食量評価について

格納容器破損モード「熔融炉心・コンクリート相互作用」に対する重大事故等対処設備であるコリウムシールドについて、解析コードにおける取扱いを示すとともに、解析コード及び解析条件の不確かさの影響について整理する。

7.1 解析コードにおけるコリウムシールドの取扱いについて

解析コードMAAPにおける、熔融炉心・コンクリート相互作用（以下「MCCI」という。）伝熱モデルでは、熔融炉心-コンクリート間の伝熱、クラストの伝熱と厚さ、上部クラスト-水プール間熱伝達が考慮されている。ここでは、コリウムシールド模擬に伴う設定の変更点及び評価モデルの適用性について示す。

(1) コリウムシールドの模擬について

解析コードMAAPにおけるMCCI伝熱モデルの概念図を図 7-1 に示す。解析コードMAAPによる侵食量評価では、本モデルのうちコンクリートの物性値として設定されている以下のパラメータについて ZrO_2 の物性値を固定値で設定し、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
- ・熔融潜熱

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（添付 7-1）。また、落下した熔融炉心とコリウムシールド間の接触面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。なお、解析上はコリウムシールドの厚さを考慮し、コリウムシールド裏面にはコンクリートが配置されたモデル*1として評価を実施しているが、コンクリート-コリウムシールド間の伝熱において接触熱抵抗は考慮していない。

以上のとおり、解析コードMAAPにおいてコリウムシールドを適切に模擬している。

注記 *1：ペDESTAL（ドライウェル部）壁面，床のコンクリートとドライウェル，サプレッション・チェンバ雰囲気との伝熱についても考慮している。

(2) 熔融炉心-コリウムシールド間の伝熱

熔融炉心-コリウムシールド間の伝熱は、熔融炉心-コンクリート間の伝熱と同様のモデルを用いている。熔融プールからクラスト，クラストから構造材への

伝熱は以下の式で評価され、(1)で示した構造材の物性値等による影響を受けずにクラスト内の熱量が全て構造材に移行する扱いとなっており、壁面及び床の材質に依存しないモデルとなっている。なお、伝熱を受けた構造材の温度上昇は、構造材の熱伝導率等の物性に基づき計算され、種々の実験により得られたコリウムシールド耐熱材の物性値を適切に入力することで、適切に計算される。

$$\text{床方向の熱流束 } q_d = h_d (T_f - T_{F,m}) + q_v \cdot X_{cd} \quad (7.1)$$

$$h_d = h_{d0}(1 - f_s)^n \quad (7.2)$$

$$\text{壁方向の熱流束 } q_s = h_s (T_f - T_{F,m}) + q_v \cdot X_{cs} \quad (7.3)$$

$$h_s = h_{s0}(1 - f_s)^n \quad (7.4)$$

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/m²K]

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/m²K]

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]

(3) クラストの厚さ

床面及び壁面のクラスト厚さ評価モデルでは、溶融プールからの伝熱及び構造材への伝熱によりクラスト厚さの変化率を計算しており、壁面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。なお、クラスト-コリウムシールド接触面温度は、(1)に記載のとおり Z r O₂ の物性値を基に計算されることから、クラストの厚さを評価するにあたり Z r O₂ の物性値が考慮されている。

$$q = 2k_F(T_{F,m} - T_i)/x_c \quad (7.5)$$

ここで、

q : 床方向又は側面方向の熱流束 [W/m²]

k_F : デブリ熱伝導率 [W/mK]

$T_{F,m}$: デブリ融点 [K]

T_i : クラスト-コリウムシールド接触面温度*² [K]

x_c : 床面又は壁面のクラスト厚さ [m]

注記 *² : コリウムシールドの表面温度と同値であり、クラストからの伝熱量及び入力したコリウムシールドの物性値に基づいて適切に計算されている。

7.2 解析コードにおける不確かさの影響

(1) 不確かさの整理

解析コードにおける，コリウムシールドを考慮したMCCI過程毎の不確かさ要因を整理する。BWRプラント安全審査資料「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」において，MCCIは以下の過程で段階的に推移することが示されているが，コリウムシールドを考慮してもこの過程に変わりはない。

- ・原子炉圧力容器下部ヘッド破損過程
- ・熔融物の落下・堆積過程
- ・MCCI進行と注水によるデブリ冷却過程

ただし，「MCCI進行と注水によるデブリ冷却過程」においては，MCCI現象の影響因子として熔融炉心からのコリウムシールドを介したコンクリートへの伝熱を考慮する必要がある。ここで，MCCI伝熱モデルでは固定値の物性を設定することから，コリウムシールドを介した伝熱の感度解析パラメータとして，コリウムシールドの伝熱物性値の温度依存性が想定される。図 7-2 にMCCIにおける不確かさに関する流れ図を示す。

MCCI現象の影響因子より抽出された感度解析パラメータに対して，感度解析の要否を整理する。MCCI評価の不確かさに関する評価結果を表 7-1 に示す。

エントレインメント係数について，感度解析より熔融炉心の細粒化割合がコンクリート侵食に与える感度は小さいことを確認している。また，このことは，エントレインメント係数の不確かさにより熔融炉心の細粒化割合が変化した場合でも熔融炉心の温度に対する感度は小さいことを示しており，コリウムシールド侵食に与える感度についても同様に小さいと考えられることから，評価項目となるパラメータに与える影響は小さく，コリウムシールドを考慮した感度解析は不要である。

熔融炉心の拡がりについて，熔融炉心の拡がりが抑制されると想定した場合は，種々の不均一な堆積形状を考慮しても，拡がりが抑制されないペデスタル（ドライウェル部）への均一堆積形状の方が熔融炉心と水の伝熱面積が大きくなり，熔融炉心が冷却される傾向となる。拡がりが抑制されない均一堆積形状の場合，熔融炉心落下時点における熔融炉心とコリウムシールドの接触面温度はコリウムシールドの侵食開始温度を下回っており，また，熔融炉心への注水によって熔融炉心は継続的に冷却されることから，熔融炉心の拡がりが抑制されると想定した場合においても，コリウムシールド及びコンクリートの侵食への影響はなく，評価項目となるパラメータに与える影響はないことから，コリウムシールドを考慮した感度解析は不要である。

上面熱流束係数及び溶融プール・クラスト間の熱伝達係数について、溶融炉心・コンクリート相互作用への影響を確認する観点で実施したエントレインメント係数、上面熱流束及び溶融プールからクラストへの熱伝達係数をパラメータとした感度解析を踏まえ、解析コードM A A Pによりコリウムシールド及びコンクリート侵食量について支配的な溶融炉心からプールへの熱流束を対象に感度解析を行い、影響を確認する。【感度解析①】

また、侵食の異方性について、コンクリート侵食の異方性については溶融炉心からプール水への熱流束の感度に比べて影響が小さいことが確認されており、コリウムシールドは侵食開始温度に到達していないことより同様に影響が小さいと考えられるため、上記の溶融炉心からプールへの熱流束を対象にした感度解析により、影響を確認する。【感度解析①】

コリウムシールドの伝熱物性値の温度依存性について、解析コードM A A PにおけるM C C I 伝熱モデルでは、固定値の物性を設定することから、不確かさが想定される。このため、感度解析により伝熱物性値（熱伝導率、比熱）の温度依存性の影響を確認する。【感度解析②】

(2) 感度解析

a. 溶融炉心上面熱流束の感度解析【感度解析①】

(a) 解析条件

解析条件を表 7-2 に示す。溶融炉心から水プールへの熱流束については、上面熱流束の不確かさを考慮した 800 kW/m^2 （一定）とする。また、対象シーケンスは、事象進展が早く、崩壊熱が大きくなり、侵食を厳しくする観点で「大破断 L O C A 時に損傷炉心冷却に失敗し、原子炉圧力容器が破損するシーケンス」とする。

(b) 解析結果

評価結果を表 7-3 に示す。ペDESTALのプール水中に落下した溶融炉心とコリウムシールドの接触面温度は $2100 \text{ }^\circ\text{C}$ 未満であり、コリウムシールドを設置することにより、溶融炉心・コンクリート相互作用によるコンクリートの侵食が生じない。このため、原子炉圧力容器の支持機能を維持できる。

b. 伝熱物性値温度依存性の感度解析【感度解析②】

コリウムシールドの伝熱物性値の温度依存性の影響については、「7.4 コリウムシールドの侵食を考慮した感度解析」において、コリウムシールドの侵食が生じた場合の影響と併せて確認する。なお、伝熱物性値の温度依存性の取扱いが可能な汎用有限解析コードにて評価した場合においても、ペDESTAL（ドライウェル部）のコンクリートが侵食されないことを確認している（添付 7-2）。

7.3 解析条件における不確かさの影響

解析コードMAAPにおけるMCCI評価では、コリウムシールドを考慮した機器条件として、以下の条件を設定している。

- ・コリウムシールド耐熱材の種類
- ・コリウムシールド耐熱材の侵食開始温度
- ・ペDESTAL（ドライウエル部）床面積

これらは全て最確条件と同様の設定であることから、不確かさの影響はない。解析コードMAAPの解析条件を表7-4に示す。

7.4 コリウムシールドの侵食及び伝熱物性値の温度依存性を考慮した感度解析

熔融炉心中の金属酸化物によるジルコニア耐熱材の溶出により、コリウムシールドが侵食される可能性があるが、既往の実験にて確認された侵食速度を仮定した場合、コリウムシールドの侵食量は約33mmとなる（添付7-3）。コリウムシールドの厚みが減少した場合、コリウムシールド外表面のペDESTAL（ドライウエル部）のコンクリートへの伝熱量が大きくなることから、この影響を感度解析により確認する。また、前述のとおり、解析コードMAAPでは ZrO_2 の物性値を固定値で設定するモデルであることから、伝熱物性値の温度依存性の不確かさの影響についても併せて確認する。

(1) 解析条件

解析条件を表7-5に示す。コリウムシールドの厚さは、コリウムシールドの設計値に対して、既往実験に基づく侵食量の約33mmを考慮し、保守性を見込んだ値として110mmを設定する。なお、コリウムシールドの侵食によるペDESTAL（ドライウエル部）床面積の拡大は保守的に考慮しない。

また、解析コードMAAPにおけるコリウムシールドの伝熱物性値の温度依存性の不確かさを考慮し、ペDESTAL（ドライウエル部）のコンクリートの温度を厳しく評価する観点で、常温時の ZrO_2 の伝熱物性値を設定する。

対象シーケンスは、事象進展が早く、崩壊熱が大きくなり、ペDESTAL（ドライウエル部）のコンクリート侵食を厳しく評価する観点で「大破断LOCA時に損傷炉心冷却に失敗し、原子炉圧力容器が破損するシーケンス」とする。

(2) 解析結果

解析結果を表7-6に示す。また、ベースケース及び感度解析ケースのコリウムシールド温度の推移及びコンクリート温度の推移を図7-3から図7-6、クラスト厚さの推移（上下方向）を図7-7に示す。コリウムシールド内表面温度の最高値は

約 1860 °Cにとどまり、コリウムシールドの侵食開始温度である 2100 °Cを下回ることから、コリウムシールドの侵食は熔融炉心中の金属酸化物によるジルコニア耐熱材の溶出で生じた状態から進行しない。また、コリウムシールド外表面と接するペDESTAL（ドライウェル部）コンクリートの温度の最高値は約 728 °Cにとどまり、コンクリートの侵食開始温度である約 1230 °Cを下回ることから、コンクリートは侵食されない。このため、コリウムシールドが熔融炉心中の金属酸化物により侵食された場合においても、コリウムシールドを介した伝熱の不確かさが、評価項目となるパラメータに与える影響は小さい。

なお、本評価においては、コンクリートの表面温度を厳しく評価する観点から、コンクリートーコリウムシールド間の接触熱抵抗は考慮していない。接触熱抵抗を考慮した場合には、熔融炉心からペDESTAL（ドライウェル部）コンクリートへの熱通過率が小さくなり、熔融炉心及びコリウムシールドの温度挙動に影響を与えることが考えられるが、熔融炉心はペDESTAL（ドライウェル部）のプール水に落下した直後に 2100 °C未満となること、また、熔融炉心から上面水へは崩壊熱以上の除熱がされ熔融炉心の温度は 2100 °C未満を維持することから、コリウムシールドの侵食は生じず、温度挙動への影響は軽微であると考えられる。

7.5 まとめ

解析コードMAAPではコリウムシールドを適切に模擬しており、熔融炉心ーコリウムシールド間の伝熱モデルはコリウムシールドに適用可能である。

コリウムシールドを考慮した解析コードの不確かさを踏まえた感度解析により、原子炉圧力容器の支持機能を維持でき、不確かさの影響は小さいことを確認した。また、コリウムシールドを考慮した解析条件は最確条件と同様であり、不確かさはない。

さらに、コリウムシールドが熔融炉心中の金属酸化物により侵食される可能性を考慮した感度解析により、コリウムシールド外表面と接するコンクリートは侵食されないことを確認した。

表 7-1 コリウムシールドを考慮した場合のMCC I 評価の不確かさに関する整理結果

MCC I 現象への影響因子	不確かさ要因	有効性評価の取扱い	解析コード資料* における感度解析の要否	東海第二発電所における コリウムシールドを考慮した取扱い
下部ヘッド破損モード	破損部位 破損口侵食拡大	下部ヘッド貫通部の中で最も大口徑の制御棒駆動機構ハウジングの瞬時破損を想定し、破損口径の拡大を考慮	下部ヘッド貫通部の中で最も大口徑の貫通部の破損を想定し、破損口径の拡大も考慮しているため、感度解析不要	同左
溶融炉心落下量	原子炉圧力容器内 溶融進展	全炉心相当を想定	全炉心相当の最も厳しい落下量を想定しているため、感度解析不要	同左
溶融炉心の粒子化	プール水深	ベDESTALの注水開始条件及び注水流量について、手順書規定に準じた操作を想定	解析モデルパラメータではないため、感度解析不要	同左
	エントレインメント 係数	実験解析を元に、粒子化割合を少ない側に評価する値を使用	エントレインメント係数に不確かさがあるため、解析コードMAAPの不確かさ範囲内(FARO実験解析に基づく)で感度解析を実施	左記の感度解析により、溶融炉心の細粒化割合がコンクリート侵食に与える感度が小さいことを確認しており、溶融炉心の細粒化割合が溶融炉心温度に対する感度は小さいと考えられることから感度解析不要
	溶融炉心ジェット径	破損口径に対応した径を考慮	最も大きい径を想定して、粒子化割合を小さくし、水に落下した際のデブリクエンチ量を小さくして厳しい側の扱いをしているため、感度解析不要	同左
溶融炉心の拡がり	水による拡がり抑制	拡がりの知見から、全面に拡がることを想定し、均一堆積モデルを使用	溶融炉心の拡がりを抑制した場合を想定し、水張深さ等の個別プラントの状況を踏まえた感度解析等の取扱いを行うことが必要	溶融炉心の拡がりが抑制される場合は、溶融炉心と水の伝熱面積が大きくなり、溶融炉心が冷却される傾向となる。拡がりが抑制されない場合、溶融炉心落下時点における溶融炉心とコリウムシールド接触面温度はコリウムシールドの侵食開始温度を下回っており、また、注水により溶融炉心は継続的に冷却されることから、侵食への影響はなく、感度解析不要
デブリから水への熱伝達	デブリ上面の性状	粒子状ベッドの熱流束として、現実的な範囲内で保守側の想定をして、大気圧状態で800 kW/m ² として圧力依存性を考慮	粒径やポロシティの不確かさを考慮して、下限の熱流束に対して感度解析を実施	【感度解析①】(コンクリートの種類と同じ) 溶融炉心・コンクリート相互作用への影響の観点で、エントレインメント係数、上面熱流束及び溶融プールからクラストへの熱伝達係数をパラメータとした感度解析を踏まえ、コリウムシールド及びコンクリート侵食量について支配的な溶融炉心からプール水への熱流束についての感度解析を実施
コリウムシールドを介した熱伝達	伝熱物性値の 温度依存性	コリウムシールド侵食開始温度における物性値を考慮	—	【感度解析②】 コリウムシールドの伝熱物性値には温度依存性があることを踏まえ、コリウムシールド及びコンクリート侵食量への影響を確認する観点で、伝熱物性値についての感度解析を実施
コンクリート種類 (玄武岩系コンクリートの侵食) の異方性	壁方向と床方向の 熱分配	溶融プールが完全な液相の場合の対流熱伝達係数として、床方向クラストへは[]、壁方向クラストへは[]を使用	床方向と壁方向の侵食の異方性の影響を見るため、CCI-3 実験で確認された熱分配比率を想定した感度解析を実施	【感度解析①】(デブリから水への熱伝達と同じ) コンクリート侵食の異方性については溶融炉心からプール水への熱流束の影響に比べて影響が小さいことが確認されており、コリウムシールドにおいても侵食開始温度に到達していないことなどから同様に影響が小さいと考えられるため、溶融炉心からプールへの熱流束についての感度解析を実施

注記 * : 設置変更許可申請書 添付書類十 追補 2. III 「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」

表 7-2 解析条件（溶融炉心上面熱流束）【感度解析①】

項目	ベースケース	感度ケース
対象シーケンス	過渡事象時に損傷炉心冷却に失敗し，原子炉圧力容器が破損するシーケンス	大破断 L O C A 時に損傷炉心冷却に失敗し，原子炉圧力容器が破損するシーケンス
溶融炉心から水プールへの限界熱流束	800 kW/m ² (圧力依存性あり)	800 kW/m ² (一定*1)
ペDESTAL初期水位	1 m	
ペDESTAL注水	R P V破損 7 分後から 80 m ³ /h	
コリウムシールド厚さ	15 cm	
コリウムシールド侵食開始温度	2100 °C*2	
R P V破損時の溶融炉心温度	M A A P 解析結果に基づく	

注記 *1：侵食の不均一性等の影響を考慮して設定

*2：Z r O₂耐熱材の 100 mol% Z r による侵食試験結果に基づき設定
(添付 7-1)

表 7-3 解析結果（溶融炉心上面熱流束）【感度解析①】

項目	ベースケース	感度ケース
コリウムシールド侵食量 (壁面及び床面)	侵食なし	侵食なし
ペDESTAL (ドライウェル部) コンクリート侵食量 (壁面及び床面)	侵食なし	侵食なし

表 7-4 解析コードM A A P 解析条件

項 目		解析条件	最確条件
機器条件	コリウムシールド耐熱材の種類	ジルコニア耐火材	ジルコニア耐火材
	コリウムシールド耐熱材の侵食開始温度	2100 °C	2100 °C
	ペDESTAL (ドライウエル部) 床面積	コリウムシールドを考慮	コリウムシールドを考慮

表 7-5 解析条件 (伝熱物性値及びコリウムシールド侵食) 【感度解析②】

項 目	ベースケース	感度ケース
対象シーケンス	過渡事象時に損傷炉心冷却に失敗し, 原子炉圧力容器が破損するシーケンス	大破断L O C A時に損傷炉心冷却に失敗し, 原子炉圧力容器が破損するシーケンス
コリウムシールド厚さ	15 cm	11 cm *1
コリウムシールド熱伝導率	<input type="text"/> *2	<input type="text"/> *3
コリウムシールド比熱	<input type="text"/> *2	<input type="text"/> *3
コリウムシールド侵食開始温度	2100 °C *4	
ペDESTAL (ドライウエル部) 床面積	27.08 m ²	
ペDESTAL初期水位	1 m	

注記 *1: 熔融炉心中の金属酸化物による侵食を仮定した厚さとして設定 (添付 7-3)
 *2: Z r O₂ 耐熱材の侵食開始温度における伝熱物性として設定
 *3: Z r O₂ 耐熱材の常温における伝熱物性として設定
 *4: Z r O₂ 耐熱材の 100mol% Z r による侵食試験結果に基づき設定 (添付 7-1)

表 7-6 解析結果（伝熱物性値及びコリウムシールド侵食）【感度解析②】

項目	ベースケース	感度ケース
コリウムシールド侵食量 (壁面及び床面)	侵食なし	侵食なし
ペDESTAL (ドライウェル部) コンクリート侵食量 (壁面及び床面)	侵食なし	侵食なし

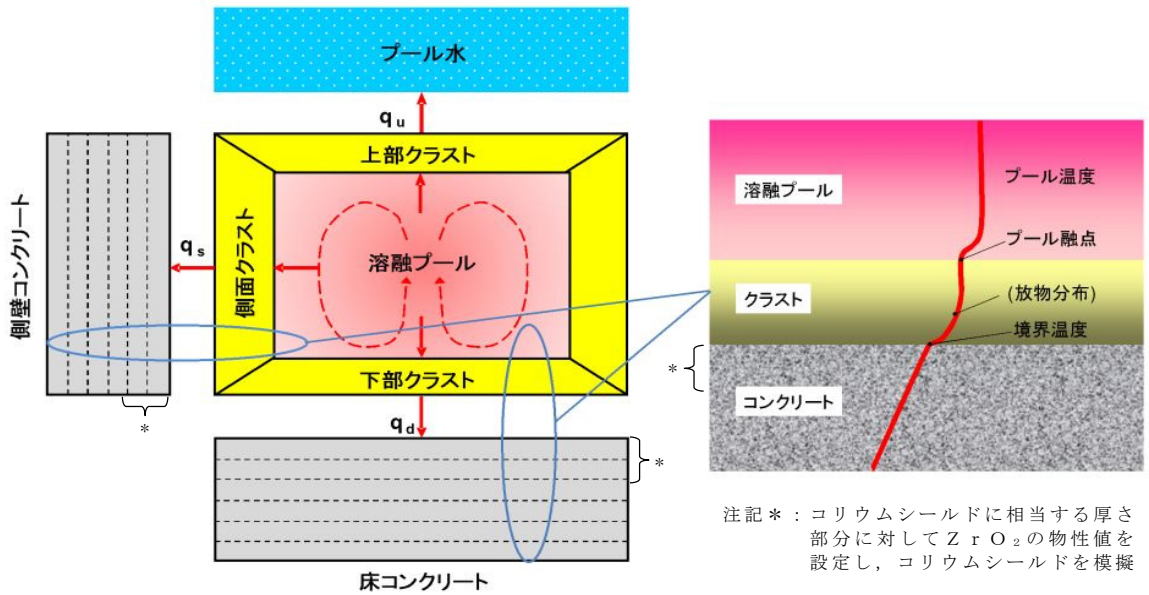
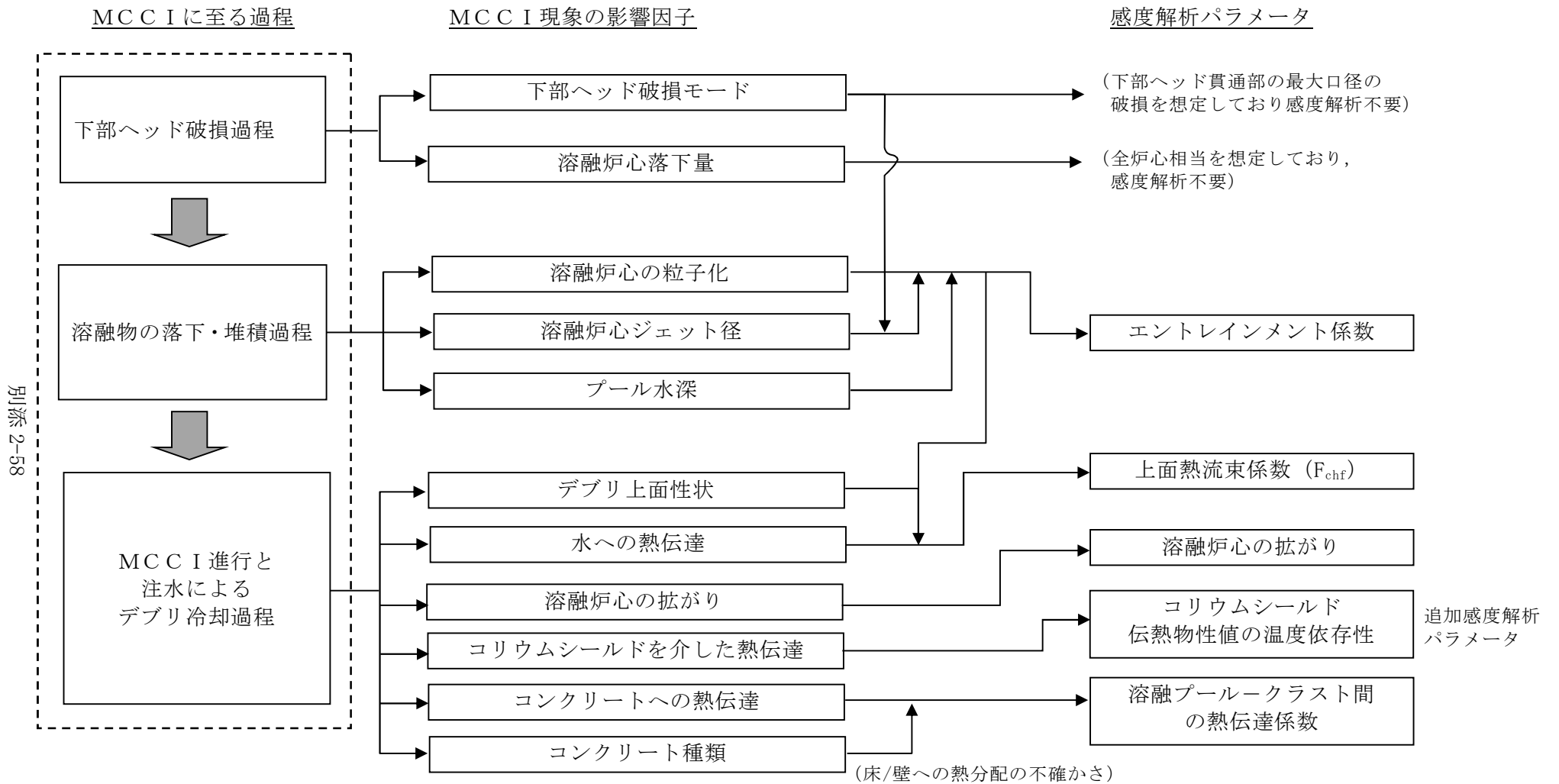


図 7-1 解析コードMAAPにおけるMCCI伝熱モデル



別添 2-58

図 7-2 コリウムシールドを考慮した場合のMCC Iにおける不確かさに関する流れ図

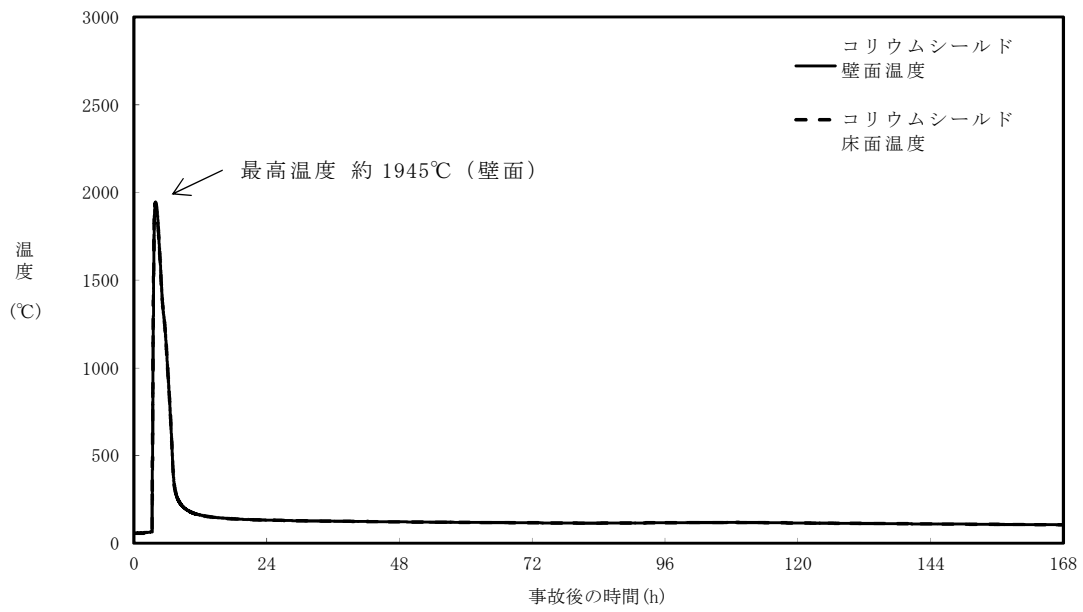


図 7-3 コリウムシールド内表面温度の推移 (ベースケース)

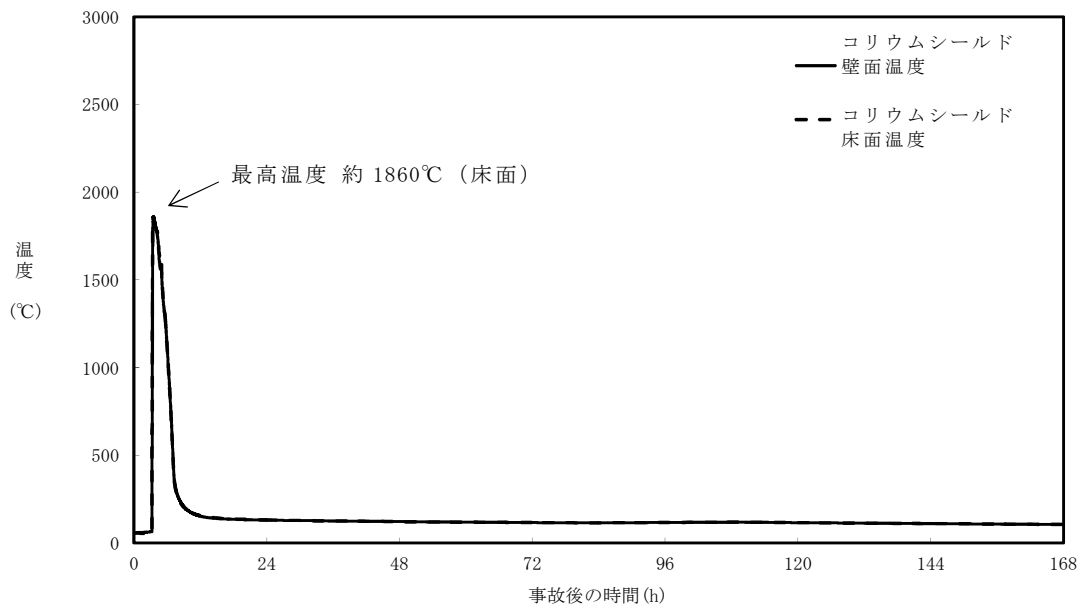


図 7-4 コリウムシールド内表面温度の推移 (感度解析ケース)

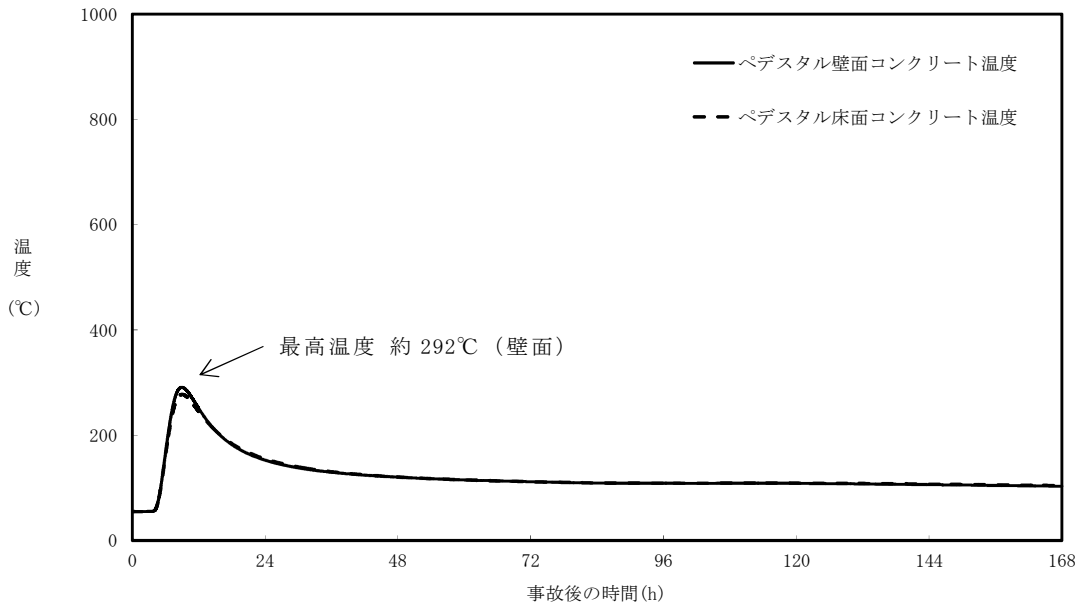


図 7-5 ペDESTAL (ドライウェル部) コンクリート表面温度の推移 (ベースケース)

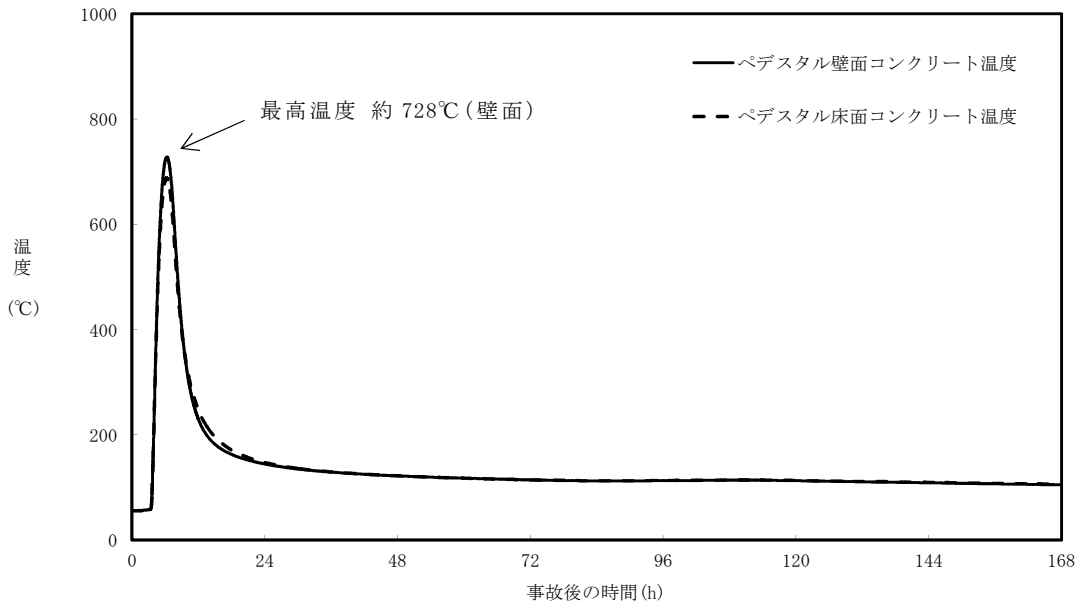


図 7-6 ペDESTAL (ドライウェル部) コンクリート表面温度の推移 (感度解析ケース)

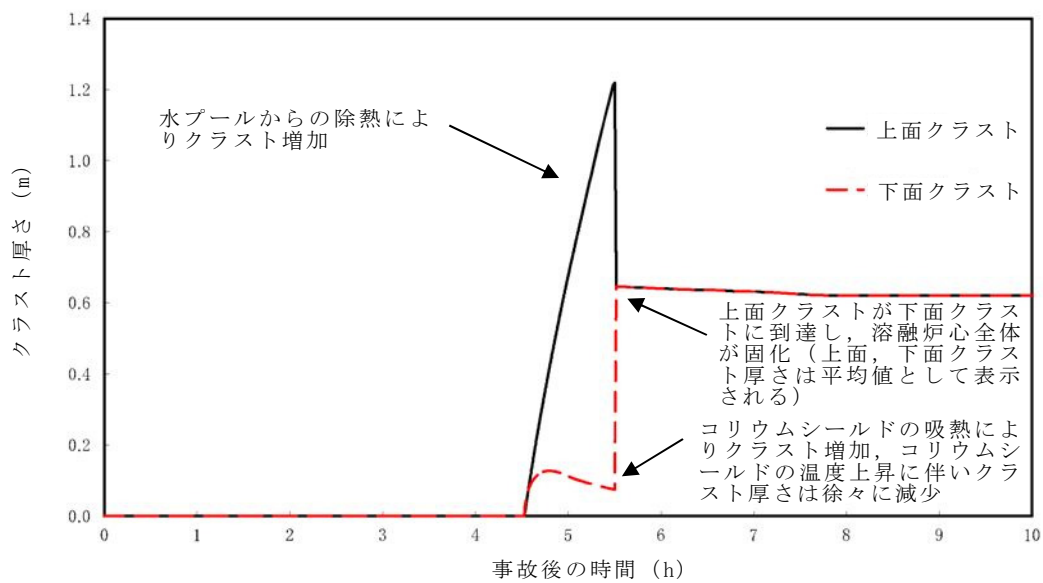


図 7-7 クラスト厚さの推移（上面及び下面*）

注記 *：側面クラストはコリウムシールドと接しており下面クラストと同等の挙動を示すと考えられることから、代表として上面及び下面クラスト厚さを示す。

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 2100 °C 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 2700 °C であるが、熔融炉心に含まれる 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 2700 °C 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試験片の各種熔融金属への浸透試験が実施されており、熔融金属中の 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。

図 1* に、極めて耐熱材の侵食が大きくなる 100 mol% 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、2150 °C 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、2100 °C 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 100 mol% Zr という極めて厳しい条件で実施されているが、実機における熔融炉心では、UO₂、SUS 及び金属-水反応で生成された ZrO₂等が含まれるため、100 mol% 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僅かであった 2100 °C を侵食開始温度として設定した。



図 1 試験後の断面写真

注記 * : 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。

汎用有限解析コードによるコリウムシールド伝熱物性値温度依存性の 影響評価について

解析コードM A A PにおけるM C C I 伝熱モデルでは、固定値の物性を設定することから、不確かさが想定される。このため、伝熱物性値の温度依存性の取扱いが可能な汎用有限解析コードA B A Q U Sを用いた熱伝導解析により影響を確認する。

1. 伝熱物性値温度依存性の感度解析

(1) 解析条件

解析条件を表 1 に示す。コリウムシールドの伝熱物性は既往の共同研究において確認された値を設定する。また、M A A P 解析に基づくコリウムシールド-溶融炉心接触面温度、ペDESTAL 雰囲気温度等を境界条件とする。なお、これらの境界条件は、R P V が破損し溶融炉心がペDESTAL へ落下する事故シーケンスの解析結果を包絡する保守的な温度条件を適用する。

(2) 解析結果

解析結果を表 2 及び図 1 に示す。解析結果が最も厳しいペDESTAL (ドライウェル部) 壁面の温度は約 900 °C であり、コンクリートの侵食開始温度である約 1230 °C を下回ることから、ペDESTAL (ドライウェル部) のコンクリートは侵食されない。

なお、A B A Q U S を用いた熱伝導解析結果は、「7.4 コリウムシールドの侵食及び伝熱物性値の温度依存性を考慮した感度解析」において示した解析コードM A A P による解析結果(壁面温度 約 728 °C)を上回っているが、これは大破断L O C A シナリオとして溶融炉心から水プールへの限界熱流束 800 kW/m² (一定) を考慮したM A A P 解析を包絡する温度境界条件を与えたためである。

表 1 解析条件（伝熱物性値温度依存性）

項目	設定	備考
解析コード	汎用有限解析コード A B A Q U S	—
温度境界条件	過渡事象及び大破断 L O C A シナリオ *の M A A P 解析結果を包絡する条件	「8. 熔融炉心による 熱影響評価について」 添付 8-1 参照
コリウムシールド 伝熱物性値	既往の共同研究において確認された値	

注記 * : 大破断 L O C A シナリオとして熔融炉心から水プールへの限界熱流束 800 kW/m²（圧力依存性あり）及び 800 kW/m²（一定）の 2 ケースを考慮

表 2 解析結果（伝熱物性値温度依存性）

項目	解析結果	備考
ペDESTAL 壁面温度	約 900 °C	コンクリート侵食開始温度 約 1230 °C

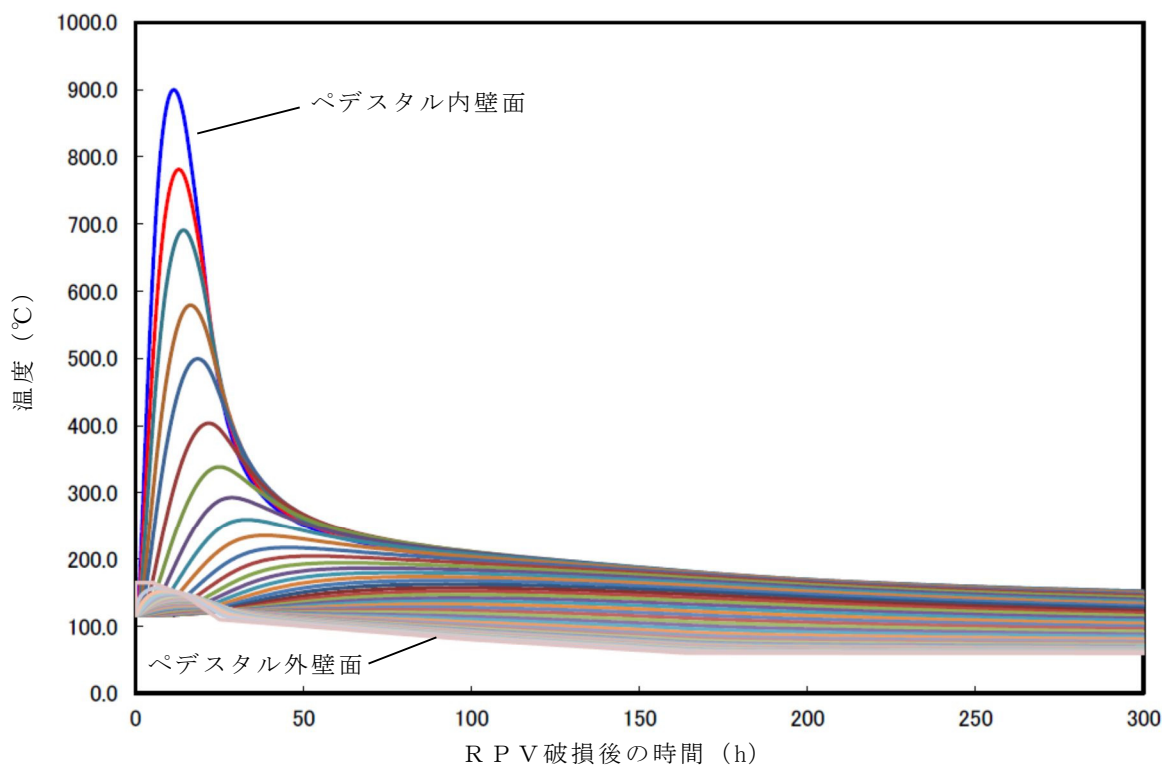


図 1 ペDESTAL壁面の温度変化

既往実験の知見を考慮したコリウムシールドの侵食量評価について

解析コードMAAPによる侵食量評価では、熔融炉心中のZrによるZrO₂耐熱材の還元反応を考慮し、耐熱材侵食試験結果に基づき侵食開始温度を保守的に2100℃と設定した上で、熔融炉心によるコリウムシールドの侵食が生じないことを確認している。しかし、熔融炉心には少量ながらその他の金属酸化物も含まれており、これらの影響によってZrO₂耐熱材が侵食される可能性も考えられるため、関連する既往実験の知見を考慮した場合のコリウムシールドの侵食量について検討する。

1. CIT実験について

模擬熔融炉心によるZrO₂耐熱材の侵食挙動に係る実験として、欧州委員会のプロジェクトとして実施されたCIT実験^{[1][2]}がある。

CIT実験では、図1に示すような試験装置によって、模擬熔融炉心とZrO₂耐熱材を最長10時間程度接触させ、模擬熔融炉心の表面温度（ZrO₂耐熱材との界面温度）と侵食深さの推移が測定された。そのうち、CIT-9及びCIT-11では実機の条件に近い組成のZrO₂耐熱材が用いられている。

CIT-9における入力エネルギー及び模擬熔融炉心表面温度とZrO₂耐熱材の侵食深さの推移を図2及び図3に示す。耐熱材の最終的な侵食深さは22.5mm、最大の侵食速度は0.18mm/minと報告されている。実験において、模擬熔融炉心は誘導加熱により2080℃から2474℃まで段階的に昇温されたが、出力を一定に維持し模擬熔融炉心の昇温を停止すると、耐熱材の侵食は一定の深さまで進んだ後に停止する挙動が確認されている。

また、CIT-11における模擬熔融炉心表面温度とZrO₂耐熱材の侵食深さの推移を図4に示す。最終的な侵食深さは39.5mm、最大の侵食速度は0.28mm/minと報告されており、CIT-9と同様に出力を一定に維持すると侵食が停止する挙動が確認されている。

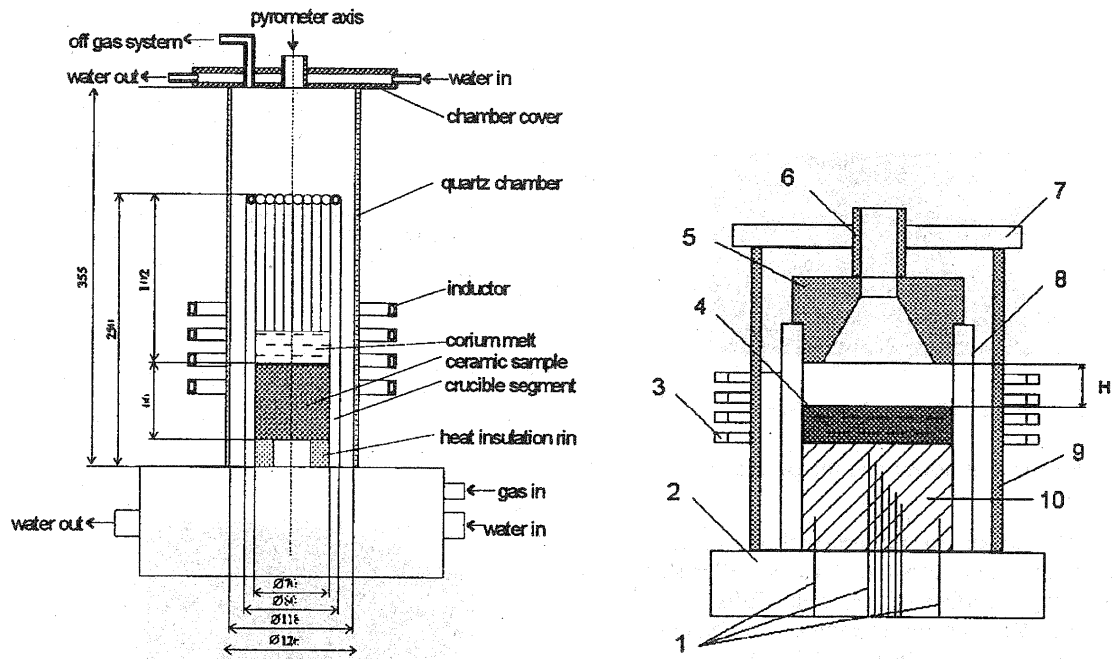


Figure 7.4 Test device and details of the interaction zone. 1 – thermocouples; 2 – water collector of the crucible; 3 – inductor; 4 – corium melt; 5 – ceramic shield; 6 – ceramic shaft of pyrometer; 7 – steel water-cooled lid of the furnace; 8 – crucible sections and cooling system; 9 – quartz shell; 10 – bottom ceramic specimen. H – distance between the ceramic shield and corium melt surface.

図 1 C I T 実験装置

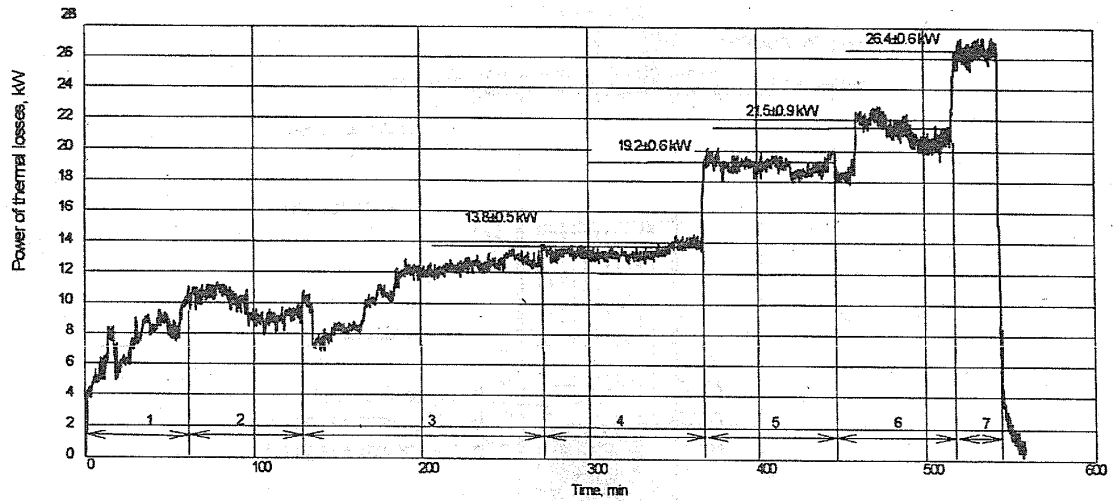


図 2 CIT-9 における入力エネルギー

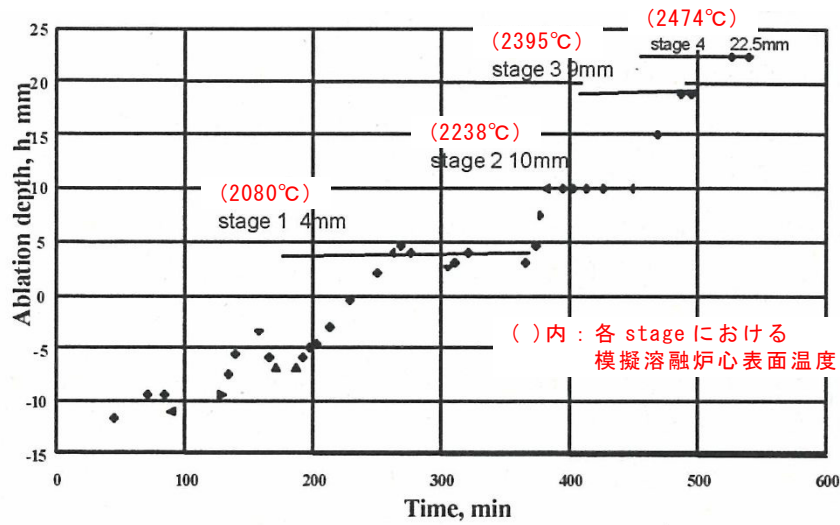


図 3 CIT-9 における模擬熔融炉心表面温度と耐熱材侵食深さの推移

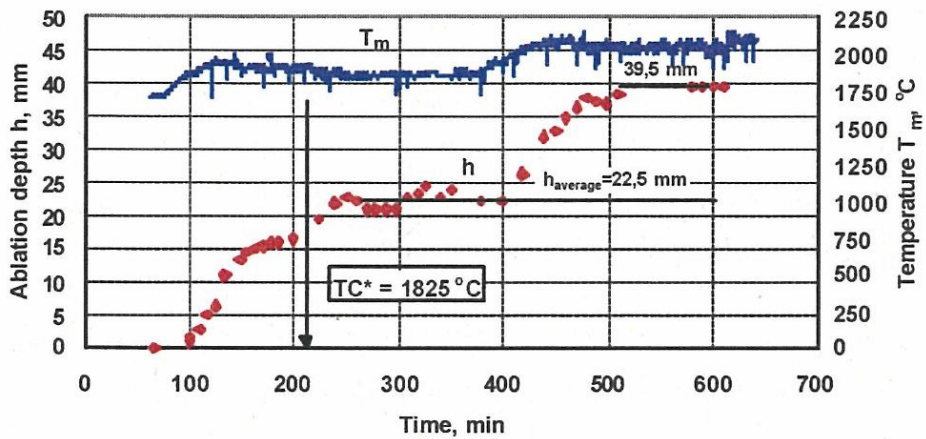


図 4 CIT-11 における模擬熔融炉心表面温度と耐熱材侵食深さの推移

2. 実験条件と実機条件の比較

CIT-9 及び CIT-11 実験にて用いられた ZrO_2 耐熱材の組成を表 1 に示す。主成分である ZrO_2 の純度は 94.7 wt% であり、東海第二発電所においてコリウムシールドとして用いる ZrO_2 耐熱材と同等であることから、耐熱材の特性は実験条件と実機条件で大きな差はないと考えられる。

次に、CIT-9 及び CIT-11 実験における模擬熔融炉心の組成を表 2 に示す。実験で用いられた模擬熔融炉心は、酸化鉄 (FeO や Fe_3O_4) の割合が大きく、CIT 実験においては、酸化鉄成分を多く含んだ模擬熔融炉心中へ ZrO_2 が溶出することにより、耐熱材が侵食されたものと考えられる。

一方、実機での熔融炉心に含まれる酸化鉄の割合は 3 % 程度*1 と想定され、熔融炉心に混入し得るペダスタル内構造物 4 m³ を全量酸化鉄*2 として加えた場合でも酸化鉄割合は約 13 % となることから、CIT 実験の条件は、ともに実機条件に比べて熔融

炉心中の酸化鉄成分による耐熱材侵食が生じやすい条件と考えられる。

注記 *1：原子炉压力容器破損時点での熔融炉心中の酸化鉄割合（MAAP解析結果より）

*2：ペDESTAL内構造物は主にSUS材であり鉄以外の物質も含まれる。また，含有する鉄が全て酸化することは考え難いが，ここでは保守的に全量を酸化鉄として計算

表1 CIT-9及びCIT-11実験におけるZrO₂耐熱材組成

成分	割合 wt%
SiO ₂	1.4
CaO	0.2
MgO	2.5
Fe ₂ O ₃	0.2
Al ₂ O ₃	0.8
TiO ₂	0.2
ZrO ₂	94.7

表2 CIT-9及びCIT-11実験における模擬熔融炉心組成

	CIT-9	CIT-11
組成 wt%	49.1 UO ₂ 20.4 ZrO ₂ 30.5 FeO	19.0 ZrO ₂ 81.0 Fe ₃ O ₄ (共晶組成)

3. 実機における熔融炉心中の金属酸化物によるZrO₂耐熱材の侵食

CIT-9及びCIT-11実験は，ともに実機の酸化鉄の割合を大きく上回っているが，ここでは実機の酸化鉄の割合により近いCIT-9実験に基づき，熔融炉心中の金属酸化物によるZrO₂耐熱材の侵食量について考察する。

実機のMAAP解析結果によれば，熔融炉心とコリウムシールドの接触面の最高温度は約2000℃となっている。CIT-9実験では，これを上回る2080℃において約4mmの侵食が見られているが，その侵食量は時間とともに増加する傾向にはない結果となっている。ただし，この挙動は実験容器が外部から冷却されていたことに起因することが示唆されており，外部冷却がない場合には侵食が継続的に生じる可能性がある。

仮に実機において熔融炉心中の金属酸化物による侵食が継続的に生じる可能性を考慮し，RPV破損時点から熔融炉心とコリウムシールドの接触面温度が1800℃^{*3}を下回るまでの約3時間，CIT-9実験で確認された最大侵食速度である0.18mm/minで侵食が進んだと仮定した場合でも，侵食量は約33mmとなる。

注記 *3: 熔融炉心中の酸化鉄による侵食がより生じやすい条件と考えられる CIT-11 実験にて、 ZrO_2 耐熱材の侵食が開始している温度 (図 4)

したがって、万一熔融炉心中の酸化鉄が局所的に存在し耐熱材が侵食されたとしても、侵食量はコリウムシールド厚さ 15 cm を十分下回る。

なお、コリウムシールドの ZrO_2 耐熱材ブロック間やアンカボルト周囲の隙間には、耐熱材ブロックと同成分の不定形耐火物とモルタルバイнда (主成分: ケイ酸ナトリウム) を混練したモルタルを目地材として用いる (図 5)。このモルタルは、耐熱材ブロックと同等の ZrO_2 含有率を有するものを用いるとともに、常温で固化し、固化後は周囲の ZrO_2 耐熱材と結合して耐熱材ブロックと同等の性能を発揮するため、熔融炉心による選択的な侵食は生じない。また、仮にモルタルの熔融を想定する場合においても、モルタルの大半を占める ZrO_2 は熔融せず、モルタルバイндаのみが熔融すると考えられるため、耐火材ブロックに生じる間隙は極めて僅かであること、及びコリウムシールドへの伝熱によって熔融炉心は表面がクラスト化し流動性が低下することから、耐火材ブロックに生じる間隙へ選択的に侵入するとは考え難く、コリウムシールドの健全性に影響を与えることはないと考ええる。

また、MAAP 解析結果における原子炉压力容器破損時の熔融炉心温度は 2100 °C から 2200 °C 程度となっているが、ドライ条件にて 2450 °C 以上の模擬熔融炉心を落下させた試験でも、耐熱材の顕著な侵食や割れは確認されておらず、また、 ZrO_2 の融点は約 2700 °C^{*4} と十分高いことから、熔融炉心落下時の熱衝撃やジェットインピンジメントによりコリウムシールドの健全性が失われることはない。

注記 *4: ZrO_2 耐熱材の侵食開始温度 2100 °C は、熔融炉心と耐熱材が接触し続けた際の化学反応を考慮し設定している (添付 7-1)。一方、ジェットインピンジメントは、化学反応ではなく熔融炉心落下時の短時間での熱移送に付随し生じるものであるため、 ZrO_2 の融点との比較を行っており、水プール中に熔融炉心が落下することから影響はないと考える。

<側面図>

<正面図>



図 5 コリウムシールド設置構造概念図

参考文献

- [1] D.Lopukh et al., “New Experimental Results On The Interaction Of Molten Corium With Core Catcher Material” , ICONE-8179, (2000).
- [2] J.M.Seiler, K.Froment, “Material Effects On Multiphase Phenomena In Late Phases Of Severe Accidents Of Nuclear Reactors” , Multiphase Science and technology, Vol.12, No.2, pp.117-257, (2000).

8. 溶融炉心による熱影響評価について

8.1 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、溶融炉心・コンクリート相互作用によるペDESTALへの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、RPVから落下したデブリの冠水及び溶融燃料-冷却材相互作用による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。

8.2 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。

8.3 評価方法

(1) 荷重条件

構造強度の評価に当たり、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（RPV支持機能）

RPV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、側壁基部コンクリート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、RPV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

添付 8-1 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、MAAPコードによる解析結果に基づき、汎用有限解析コードABAQUSによる熱伝導解析にて評価する。

(4) 判断基準

炉心損傷防止に失敗し、重大事故時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。添付 8-2 にRPV支持に必要な側壁コンクリート厚さ評価を、添付 8-3 にデブリ保持に必要な床スラブコンクリート厚さ評価を、添付 8-4 にデブリ保持に必要な床スラブ鉄筋量評価を示す。

8.4 評価結果

以下にRPV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 (RPV支持機能)

a. コンクリートに対する圧縮軸力

添付 8-5 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 1229 mm であり、RPV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 133 mm (添付 8-2) を上回る。

b. 基部コンクリートに対する面外せん断力

添付 8-5 に示したとおり、側壁コンクリートの等価壁厚は約 1276 mm であり、RPV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 192 mm (添付 8-2) 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

添付 8-6 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 629 mm 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 (添付 8-3) を上回る。

b. 鉄筋に対する曲げ応力

添付 8-6 に示したとおり，床スラブの鉄筋コンクリート部の幅 1 m 当たりの等価鉄筋量は 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 (添付 8-4) を上回る。

8.5 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. 概要

MAAPコードによる解析結果に基づき、汎用有限解析コードABAQUSを用いた熱伝導解析により、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を評価する。

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

図1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次元体系での非定常熱伝導の支配方程式に基づき、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

表1にABAQUSコードによる熱伝導解析の解析条件を示す。解析条件は、RPVが破損しデブリがペDESTALへ落下する事故シーケンスに対するMAAPコードの解析結果を参照*し、これを包絡する条件を設定している。

注記 * : 参照するMAAP解析結果は、有効性評価上のベースケースを含む以下を考慮

- ・ 起因事象：過渡事象，デブリから水プールへの限界熱流束：
800 kW/m²（圧力依存性あり）（ベースケース）
- ・ 起因事象：LOCA，デブリから水プールへの限界熱流束：
800 kW/m²（圧力依存性あり）
- ・ 起因事象：LOCA，デブリから水プールへの限界熱流束：
800 kW/m²（一定）

(3) 評価結果

図7にペDESTAL温度の評価点の位置を示す。また、図8に横スリット部の温度変化を示す。横スリット部の最高温度は約798℃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。

また、図 9 に最も温度が高くなる位置の側壁の温度変化を、図 10 に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。ペDESTAL側壁の最高温度は内表面で約 900 °C、床スラブ鉄筋コンクリート部の最高温度は上端部で約 475 °Cとなっている。

表 1 ABAQUSコードによる熱伝導解析条件

項目	条件	備考
デブリ密度 (kg/m ³)		MAAP 計算結果 (RPV 破損時の値) を包絡する値
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)	(図 2)	MAAP 計算結果 (保守的にスクラム後 3 時間からの崩壊熱を使用。希ガス・揮発性 FP による減衰 (30 %) を考慮)
SUS 密度 (kg/m ³)	(表 2)	伝熱工学資料改訂第 5 版より
SUS 熱伝導率 (W/mK)		
SUS 比熱 (J/kgK)		
コンクリート密度 (kg/m ³)	2345	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)	(表 3)	Eurocode より
コンクリート比熱 (J/kgK)		
ジルコニア耐火材密度 (kg/m ³)	(表 4)	試験結果*に基づき設定
ジルコニア耐火材熱伝導率 (W/mK)		
ジルコニア耐火材比熱 (J/kgK)		
スリット内デブリ初期温度 (°C)		MAAP 計算結果における RPV 破損時のデブリ平均温度 に対し、保守的に液相線温度を設定
構造材初期温度 (°C)	117	MAAP 解析結果における RPV 破損時点でのペDESTAL構造部の最高温度
ペDESTAL雰囲気温度 (°C)	(図 3)	MAAP 計算結果を包絡する温度変化を設定
ドライウェル雰囲気温度 (°C)	(図 4)	
サプレッション・チェンバ雰囲気温度 (°C)	(図 5)	
デブリ-ジルコニア耐火材接触面温度 (°C)	(図 6)	

注記 * : 本試験は、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。

表2 SUS材物性値

温度 (K)	密度 (kg/m ³)	熱伝導率 (W/mK)	比熱 (J/kgK)
300	7920	16.0	499
400	7890	16.5	511
600	7810	19.0	556
800	7730	22.5	620
1000	7640	25.7	644

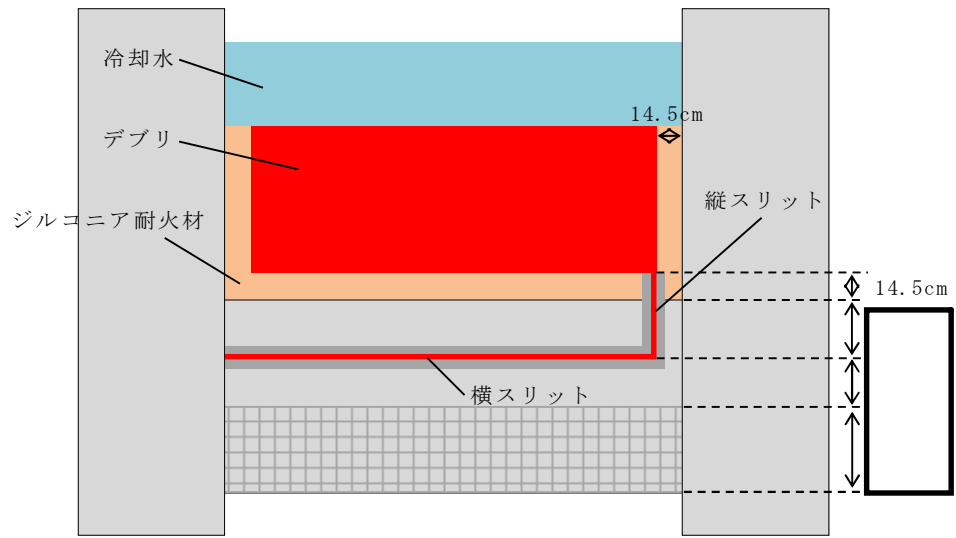
表3 コンクリート物性値

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	1111.7
50	1.880	917.3	675	0.833	1114.4
75	1.822	930.2	700	0.809	1116.8
100	1.766	942.8	725	0.785	1118.7
125	1.710	954.9	750	0.764	1120.3
150	1.656	966.7	775	0.743	1121.3
175	1.604	977.9	800	0.724	1122.0
200	1.553	988.8	825	0.706	1122.2
225	1.503	999.2	850	0.690	1122.1
250	1.454	1009.3	875	0.675	1121.4
275	1.407	1018.8	900	0.661	1120.4
300	1.361	1028.0	925	0.648	1118.9
325	1.316	1036.7	950	0.637	1117.1
350	1.273	1045.1	975	0.627	1114.7
375	1.231	1052.9	1000	0.619	1112.0
400	1.191	1060.4	1025	0.612	1108.8
425	1.152	1067.4	1050	0.606	1105.3
450	1.114	1074.1	1075	0.602	1101.2
475	1.077	1080.2	1100	0.599	1096.8
500	1.042	1086.0	1125	0.597	1091.9
525	1.008	1091.3	1150	0.596	1086.7
550	0.976	1096.3	1175	0.597	1080.9
575	0.944	1100.7	1200	0.600	1074.8
600	0.915	1104.8	1225	0.600	1068.2
625	0.886	1108.4	1250	0.600	1061.3

表 4 ジルコニア耐火材の物性値*

温度 (°C)	密度 (kg/m ³)	熱伝導率 (W/mK)	比熱 (J/kgK)
(Table content is blank)			

注記 * : 本数値は、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。



(a) 全体概要図



(b) スリット部拡大図

図1 熱伝導解析モデル



図2 デブリ内部発熱密度条件

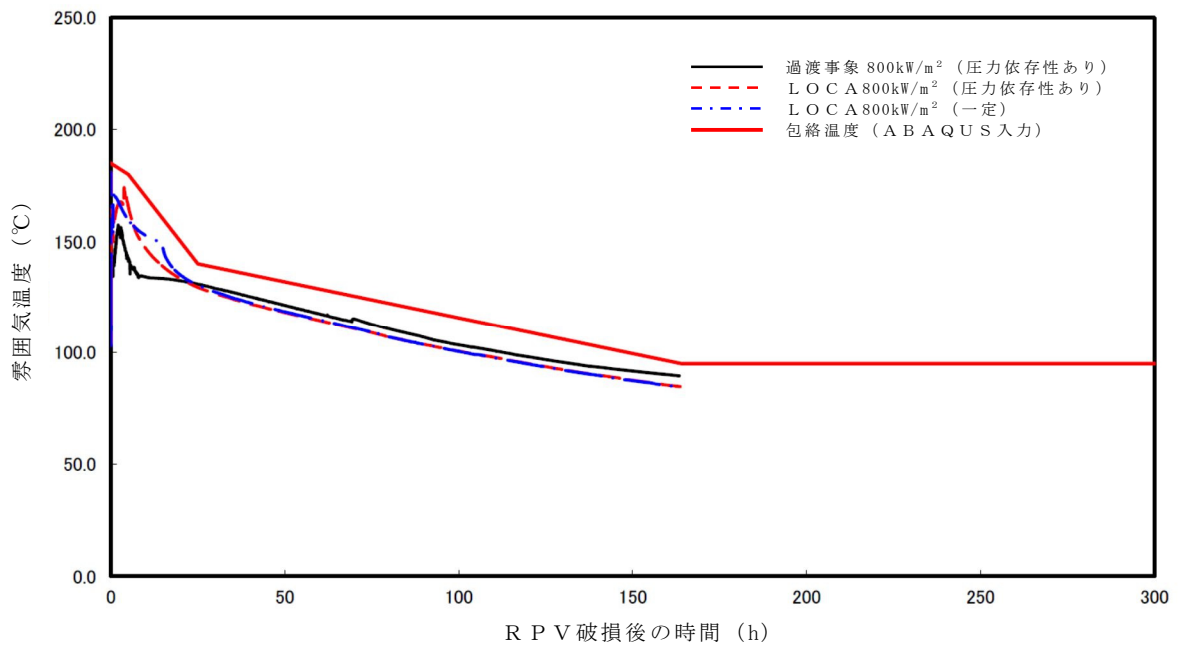


図 3 ペデスタル雰囲気温度条件

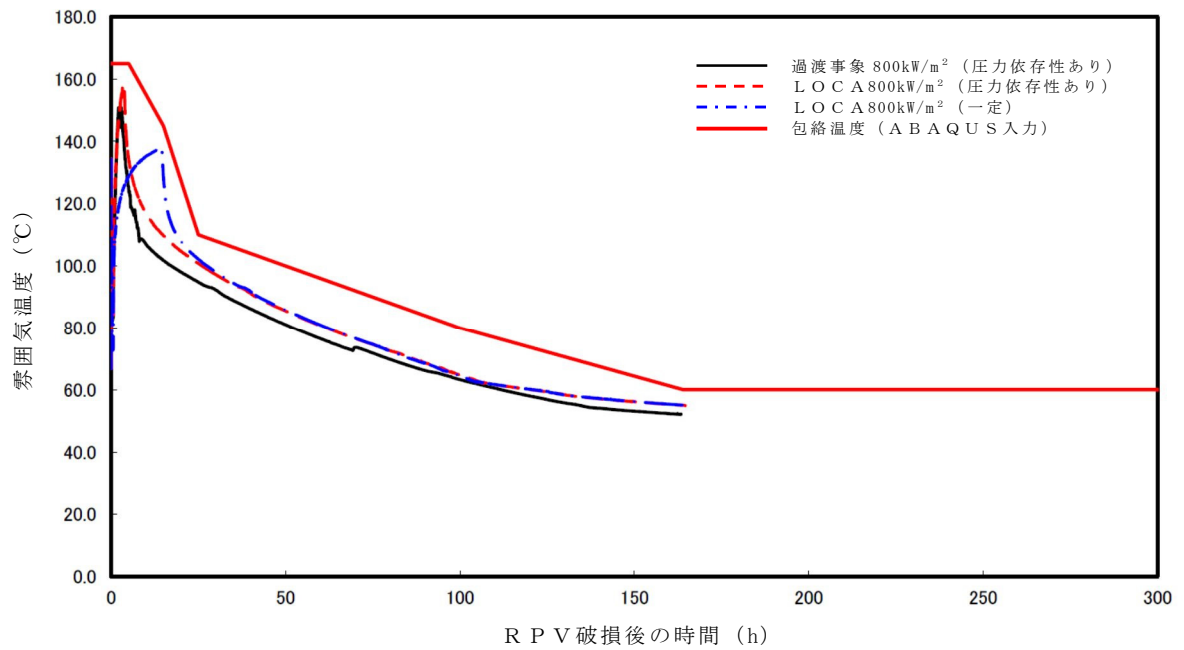


図 4 ドライウェル雰囲気温度条件

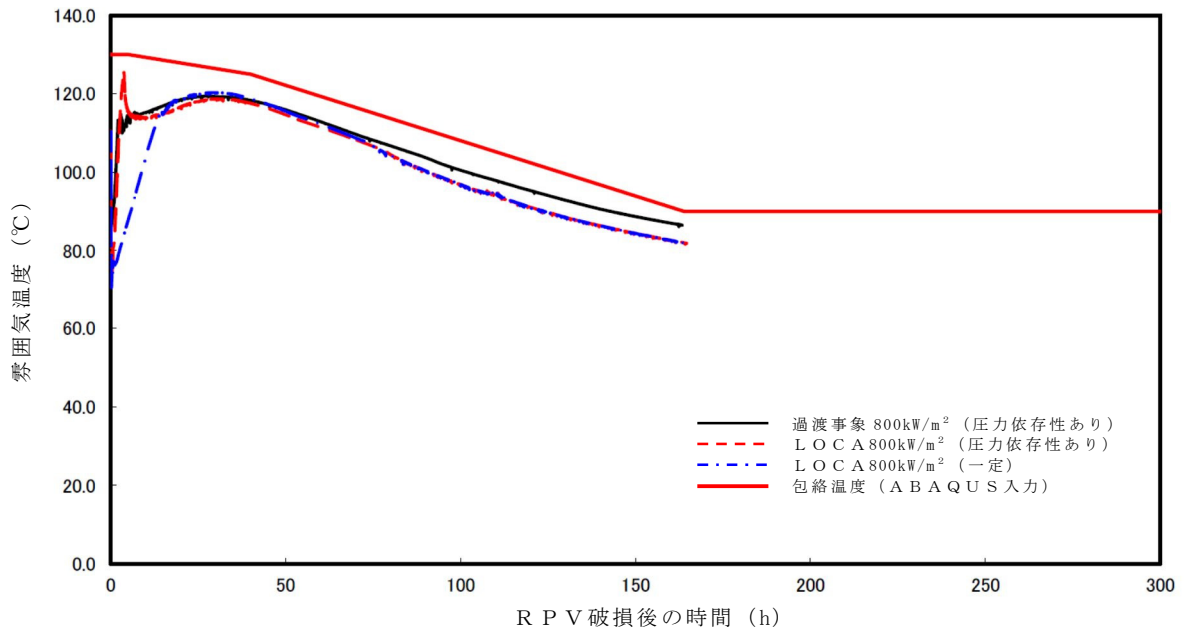


図 5 サプレッション・チェンバ雰囲気温度条件

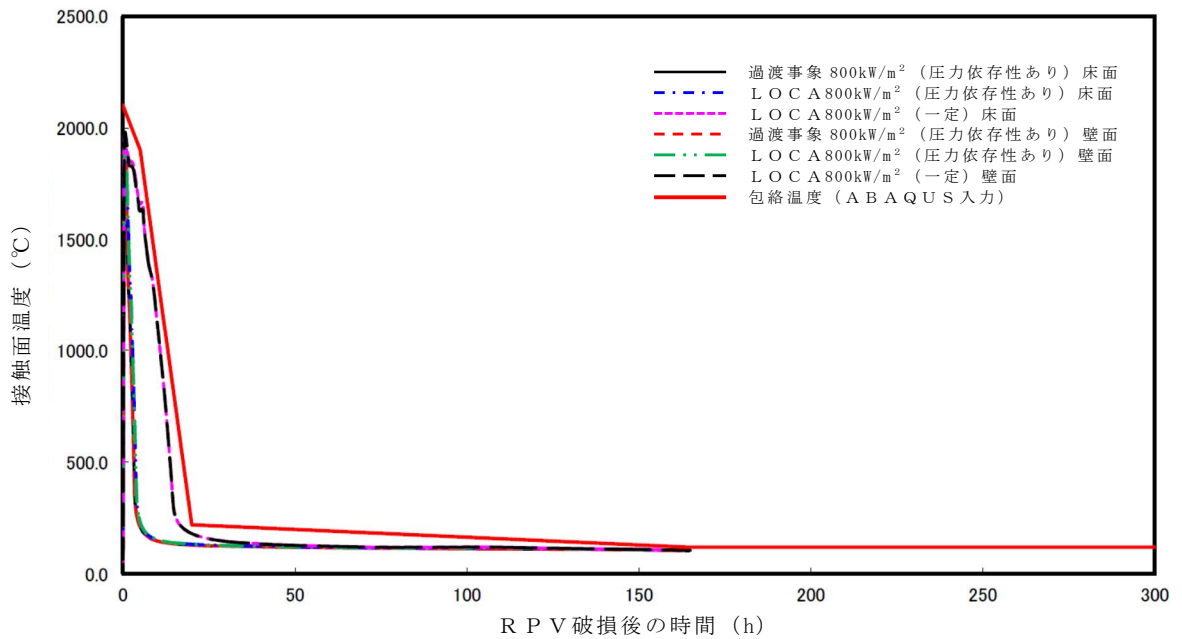


図 6 デブリー・ジルコニア耐火材接触面温度条件

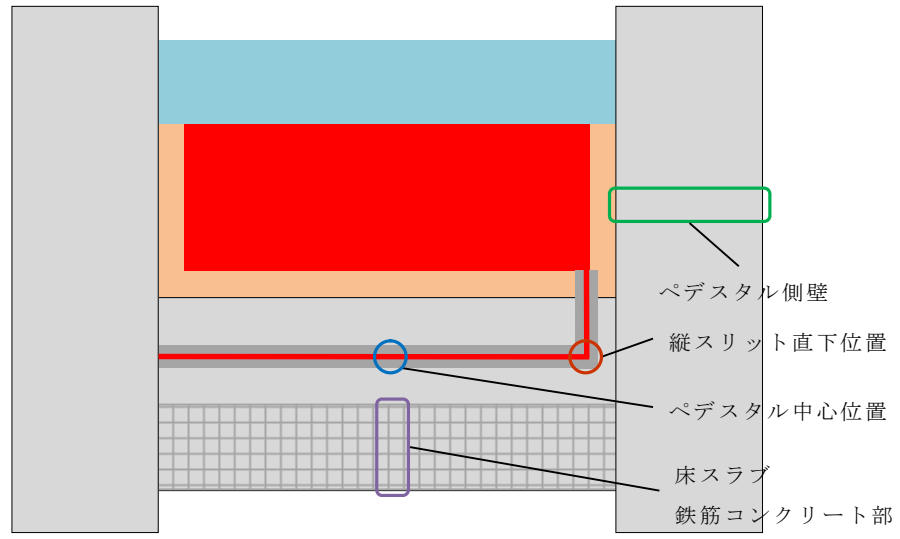


図 7 ペデスタル温度評価位置

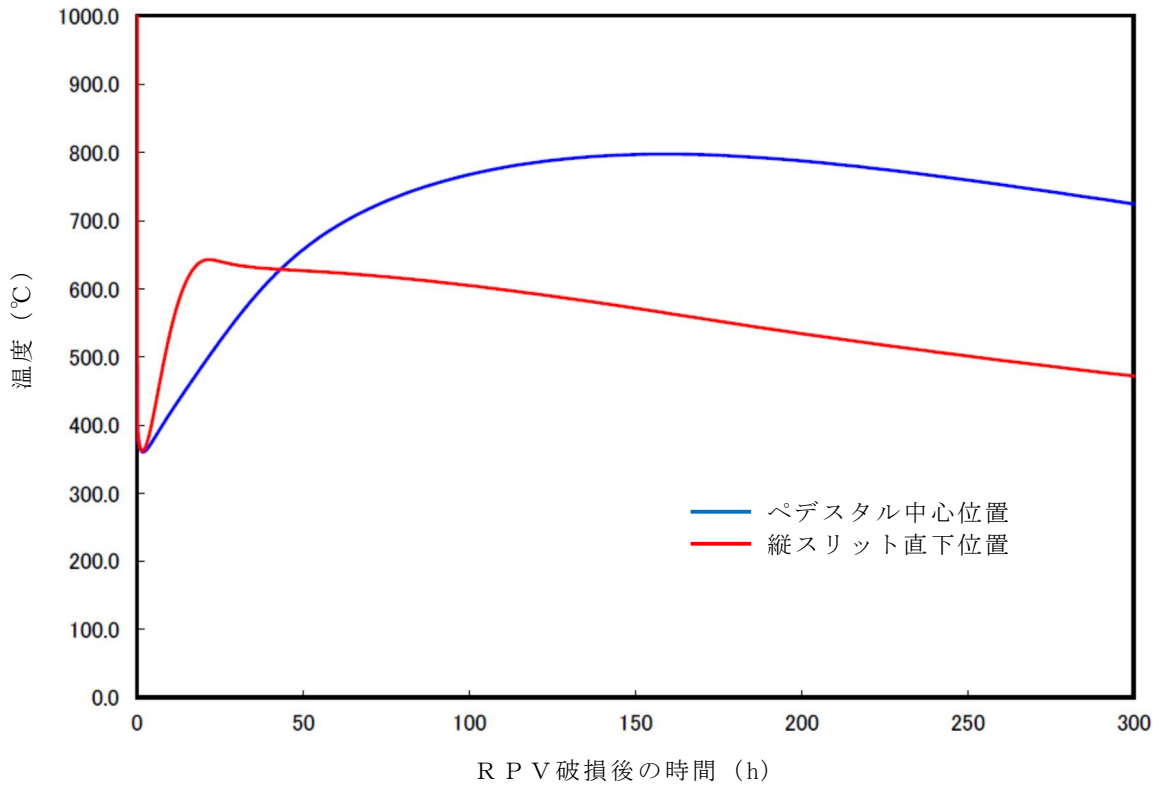


図 8 横スリット部の温度変化

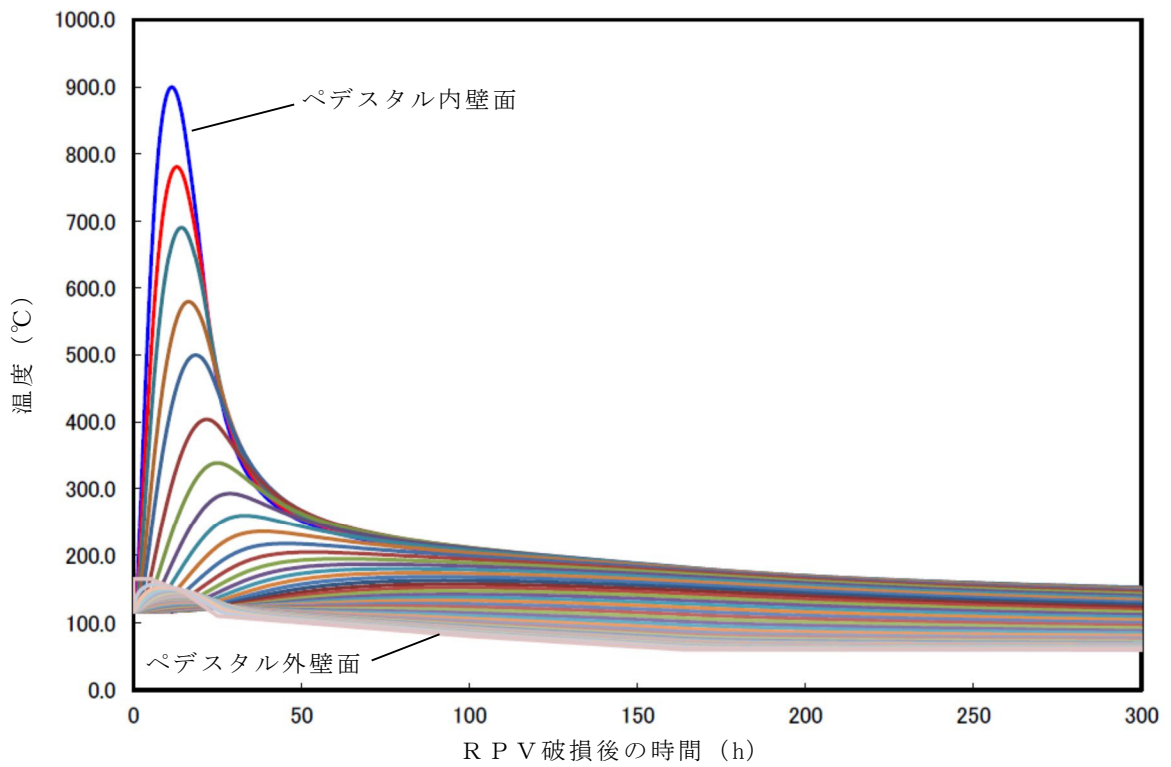


図 9 ペDESTAL側壁の温度変化

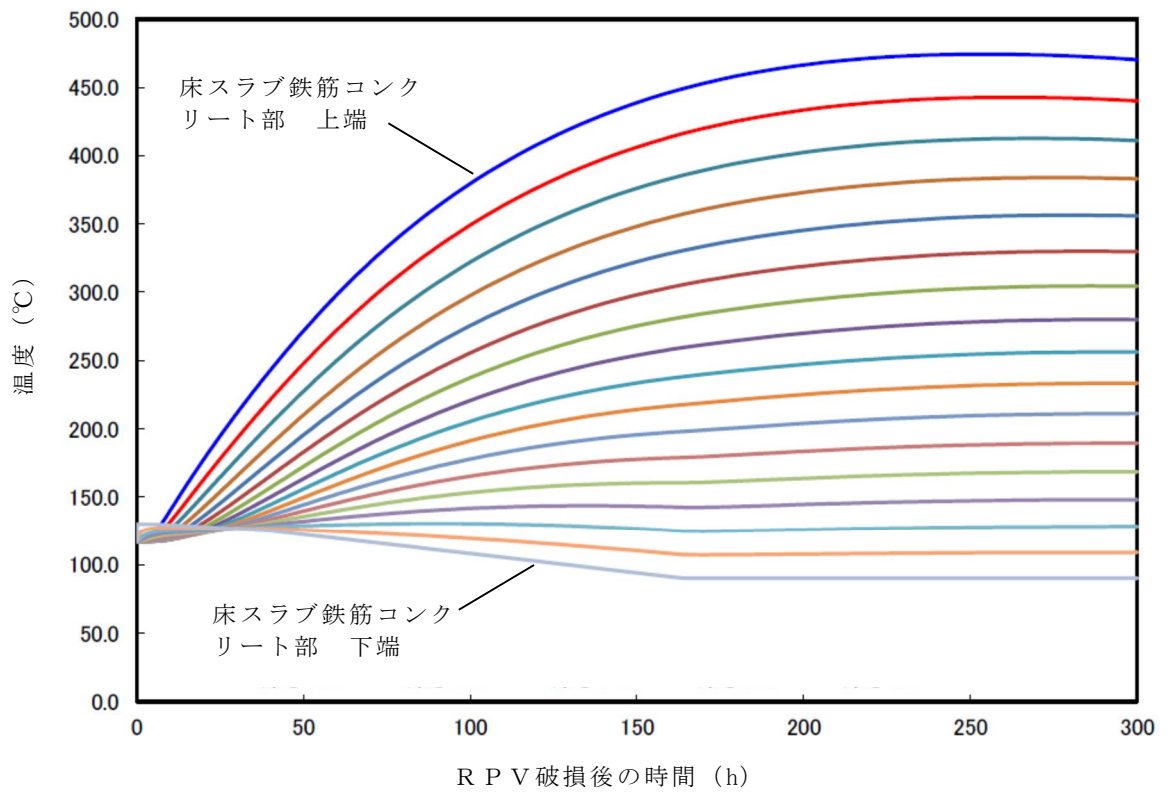


図 10 床スラブ鉄筋コンクリート部の温度変化

R P V 支持に必要な側壁コンクリート厚さ評価

1. 概要

格納容器内のペDESTAL等配置図を図 1 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。R P Vが破損しデブリがペDESTALに落下した場合でも、コンクリートの侵食は生じない評価結果となっているが、ペDESTAL側壁部のコンクリートが侵食する可能性を考慮し、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。）を算定する。

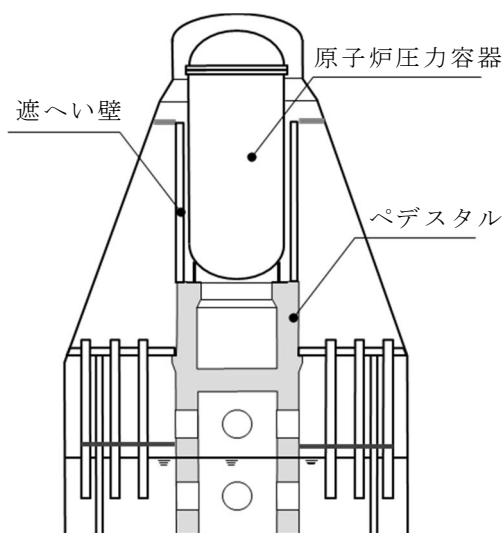


図 1 格納容器内ペDESTAL等配置図

2. ペDESTAL側壁部に生じる荷重算定

2.1 荷重の算定方針

必要壁厚の算定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

解析モデル図を図 2 に、解析条件等の概要について表 1 に示す。解析モデルは、ペDESTAL構造をシェル要素にて 3 次的にモデル化したものを用いる。

ペDESTALは、R P V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、M C C Iに至る過程を踏まえれば、R P V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側壁コンクリートの必要壁厚を保守的に算定するために、RPV内に燃料集合体が残存することを前提に評価した。

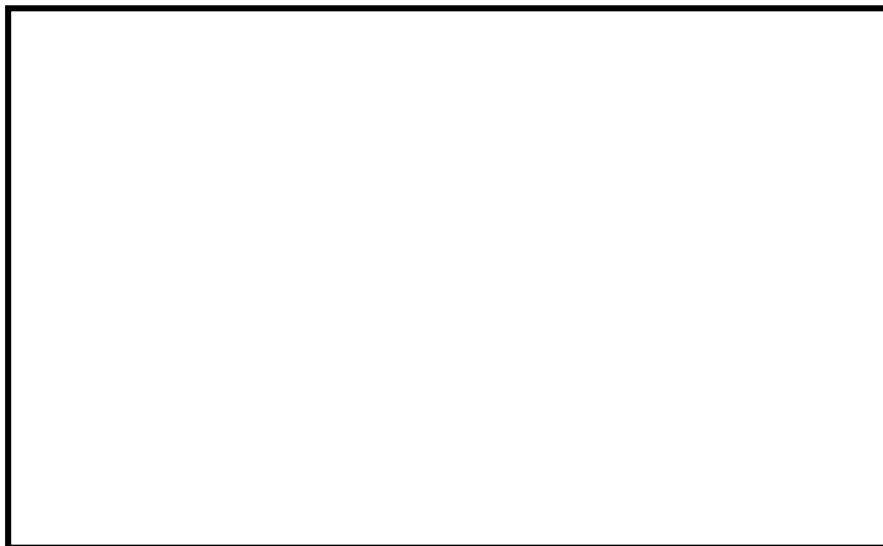


図 2 ペDESTAL 3次元FEMモデル図

表 1 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"> ・ N A S T R A N
重量模擬	<ul style="list-style-type: none"> ・ 原子炉压力容器 955×10^3 kg (压力容器内構造物を含む) ・ 遮へい壁 656×10^3 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、側壁コンクリート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べ

デスタル側壁部における圧縮軸力及び面外せん断力を表 2 に示す。

表 2 ペデスタル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)
MCC I による 侵食想定部位	1940	178

3.2 コンクリートの応力度

必要壁厚の算定に当たっては、鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，1999）（以下「RC規準」という。）に規定されているコンクリートの短期許容応力度を用いた。表 3 に必要壁厚算定に用いた許容応力度を示す。

表 3 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

※ RC規準許容応力度（短期）

・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

側壁コンクリートに生じる荷重，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

側壁コンクリート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，RC規準の断面算定に用いる評価式を適用する。

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

ここで、

Q : 発生荷重 (N)

b : 部材の有効幅 (mm)

j : 柱の中心間距離 (mm)

$$j = d \times 7/8$$

d : 有効せい (必要壁厚) (mm)

f_s : 短期許容応力度 (N/mm²)

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。

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

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表 4 に整理する。熱影響を考慮しない場合の健全な側壁コンクリート厚さ に対し、必要壁厚は、圧縮軸力に対しては 133 mm、面外せん断力に対しては 192 mm となる。

表 4 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	133 mm	192 mm

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定する。なお、本評価におけるコンクリートのせん断耐力は、終局強度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 53.85 m³
- ・鉄筋コンクリートの単位体積重量：24 kN/m³

より、床スラブ自重による荷重は約 1.30×10^3 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DESTAL内構造物等の総重量を保守的に切り上げた値として 500 ton を使用し、約 4.90×10^3 kN となる。

以上から、床スラブ荷重として約 6.20×10^3 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定される（図 1）。

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

RC 規準に規定されている短期許容せん断応力度に基づき 1.06 N/mm^2 を使用すると、熱影響を考慮しない場合の健全な床スラブ厚さ に対し、必要厚さは と算定される。

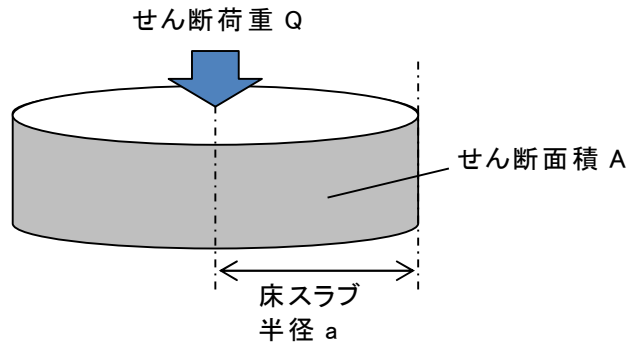


図 1 床スラブのせん断荷重

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 (N/mm²)

図 2 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定する。

1. 床スラブ荷重

床スラブ荷重は添付 8-3 と同様に約 6.20×10^3 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 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」(図 1) 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 を算定する。

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

ここで、

ν : ポアソン比 0.2

p : 分布荷重

a : 床スラブ半径

算定したモーメント及び建築物の構造関係技術規準解説書(国土交通省ほか, 2015) に示される終局曲げ強度算定式より、床スラブ本体部の幅 1 m 当たりの必要鉄筋量を算定する。

$$\text{必要鉄筋量} = M / (\sigma_y \cdot d) = \input{type="text"}$$

ここで、

σ_y : 鉄筋の降伏強度 (345 N/mm^2) の 1.1 倍 $*1 = 379.5 \text{ N/mm}^2$

d : 床スラブの有効せい $*2 = \input{type="text"}$

- 注記 *1: 建築物の構造関係技術規準解説書では、終局強度算定に当たり 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 (図 2)

表 5・1 円板のたわみと曲げ応力 (その1)
 (图中○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 	$w = \frac{pa^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2$ $w_{max} = (w)_{r=0} = \frac{pa^4}{64D} = 0.171 \frac{pa^4}{Eh^3}^*$ $\sigma_r = \mp \frac{3pa^2}{8h^2} \left\{ (1+\nu) - (3+\nu) \frac{r^2}{a^2} \right\}$ $\sigma_\theta = \mp \frac{3pa^2}{8h^2} \left\{ (1+\nu) - (1+3\nu) \frac{r^2}{a^2} \right\}$ $\sigma_{max} = (\sigma_r)_{r=a} = \pm \frac{3pa^2}{4h^2} = \pm 0.750 \frac{pa^2}{h^2}$ <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

図 1 等分布荷重を受ける円板の応力計算式

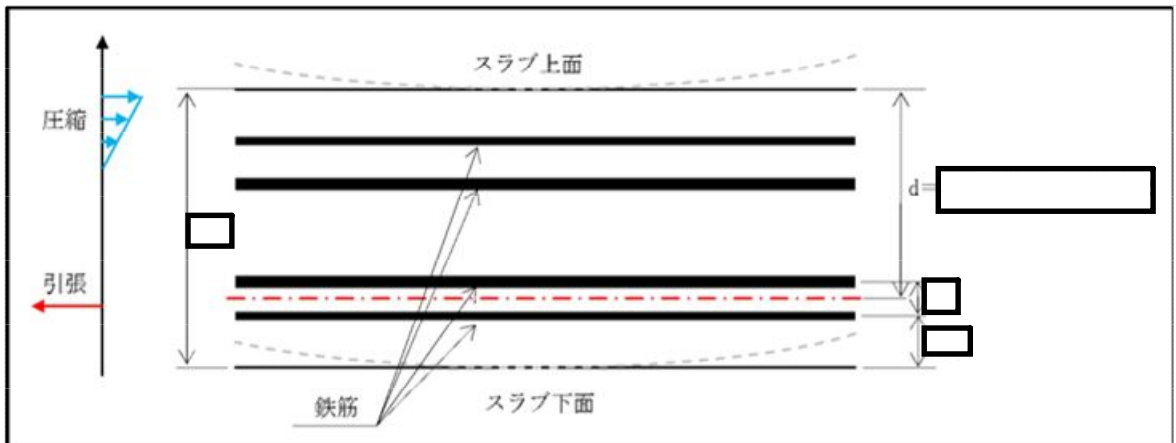


図 2 床スラブの有効せい

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

- ・ R P V等の重量は，側壁コンクリートに圧縮軸力として作用することから，コンクリートを対象に評価し，鉄筋については考慮しない。
- ・ A B A Q U Sコードによる熱伝導解析結果における側壁での径方向各厚さの温度（図 1）に対して，図 2 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，図 3 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，コンクリート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添付 8-2 に示す R P Vを支持するために必要な壁厚である 133 mm 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 1229 mm となり，R P V 支持に必要な壁厚 133 mm を上回ることから，側壁コンクリート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

- ・図 4 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（図 2）を考慮した圧縮強度残存比（図 3）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。
- ・R C 規準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。

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

ここで，

Q：発生荷重（N）

b：部材の有効幅（mm）

j：柱の中心間距離（mm）

$$j = d \times 7/8$$

d：有効せい（必要壁厚）（mm）

f_s：短期許容応力度（N/mm²）

- ・上記手順により算定した等価壁厚と添付 8-2 に示す R P Vを支持するために必要な壁厚である 192 mm 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 1276 mm となり, R P V 支持に必要な壁厚 192 mm を上回ることから, 側壁基部コンクリートの面外せん断に対して R P V 支持機能は維持される。

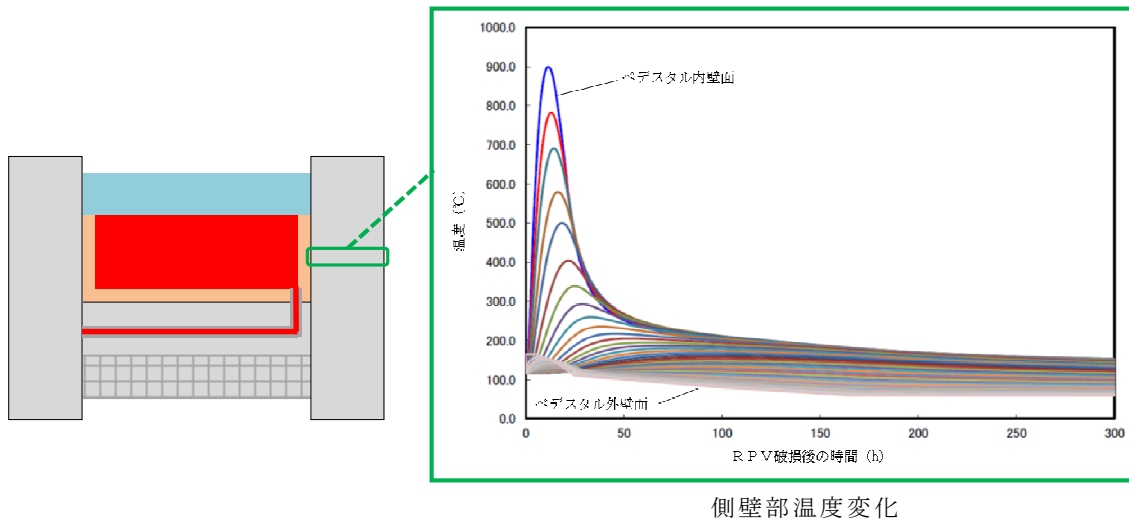


図 1 側壁部の熱伝導解析結果

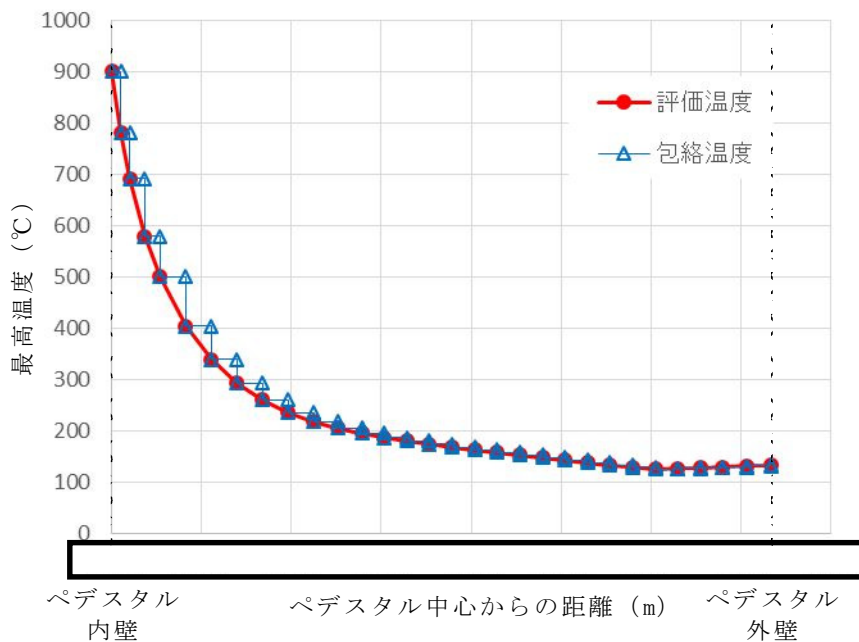


図 2 ペデスタル側壁における包絡温度の設定

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 $\kappa_{cr}(T_r)$
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。

図 3 コンクリートの圧縮強度残存比

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

[注] F_c は、コンクリートの設計基準強度 (N/mm²) を表す。

図 4 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

- ・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。また、必要なコンクリート厚さを小さく評価する観点で保守的に、床スラブのコンクリート部厚さ () を考慮せず、鉄筋コンクリート部厚さ () を対象に評価する。
- ・ A B A Q U S コードによる熱伝導解析結果における床スラブ鉄筋コンクリート部の縦方向各厚さの温度 (図 1) に対して、図 2 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、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板厚を算定する。
- ・上記手順により算定した等価板厚と添付 8-3 に示すデブリ保持に必要な板厚である () とを比較し、等価板厚が必要板厚を上回ることを確認する。

(2) 評価結果

等価板厚は約 618 mm 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 コードによる熱伝導解析結果より、下端筋位置では最高 220 °C 程度まで温度上昇するため、図 4 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 1 m 当たりの鉄筋量 () 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添付 8-3 に示すデブリ等の重量保持に必要な鉄筋量である幅 1 m 当たり () とを比較し、健全な状態とみなせる鉄筋量が必要鉄筋量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 となる。デブリ等の重量保持に必要な鉄筋量は幅 1 m 当たり 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。

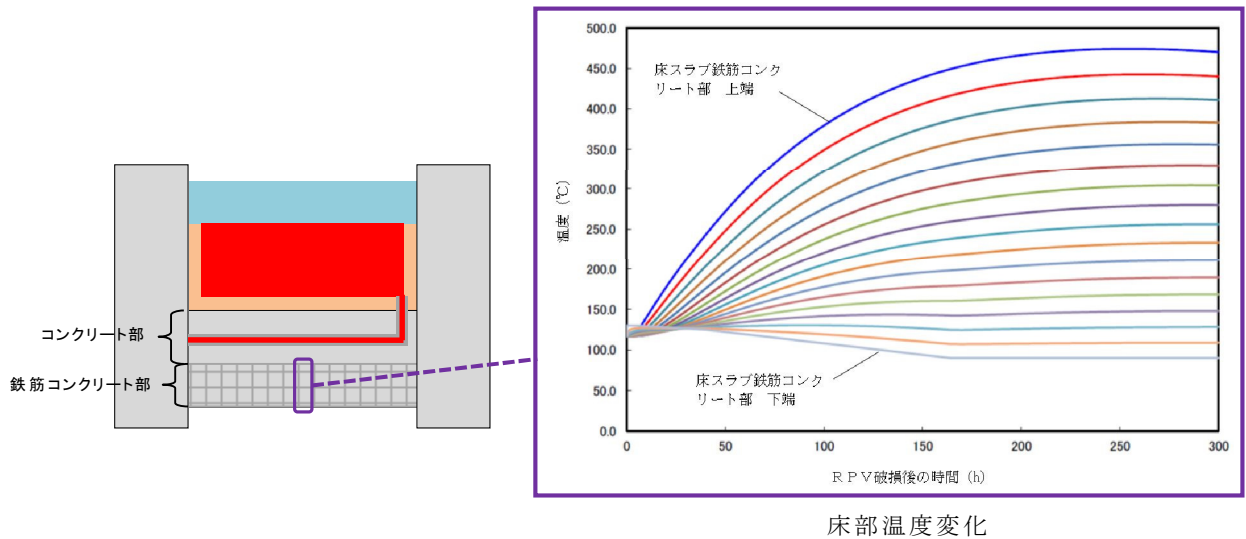


図 1 ペデスタル温度評価結果

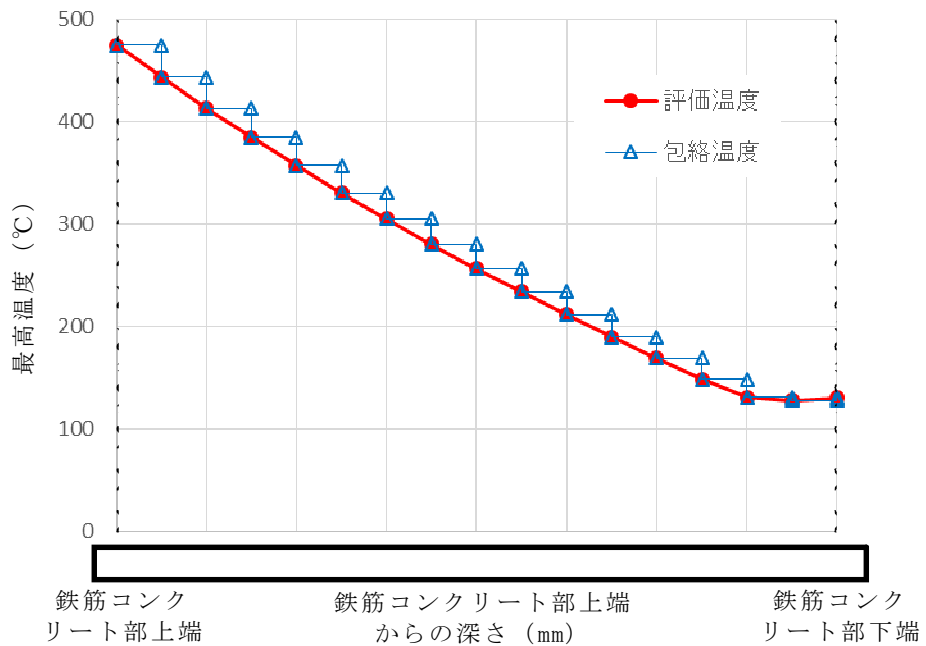


図 2 床スラブ鉄筋コンクリート部における包絡温度の設定

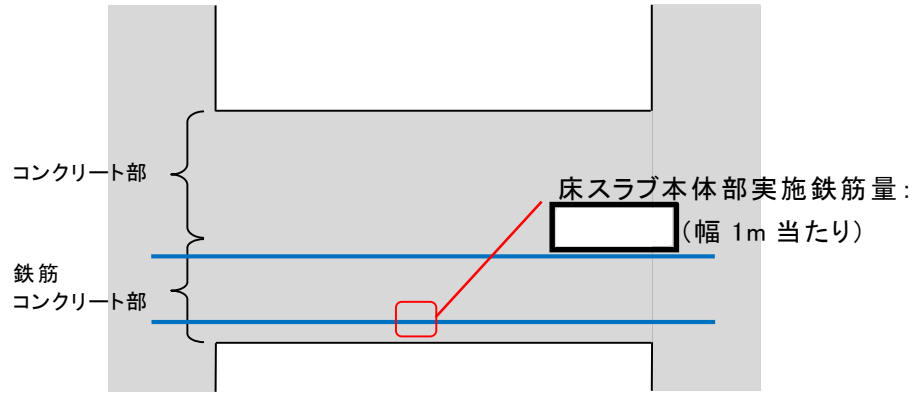


図 3 床スラブの鉄筋コンクリート範囲

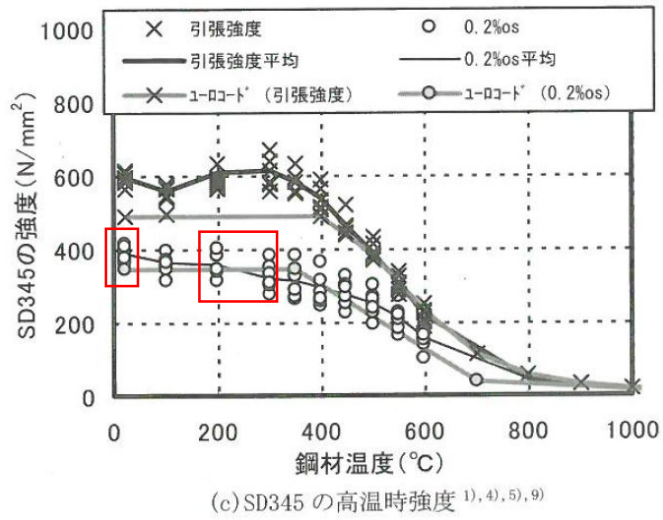


図 4 鉄筋強度の低下割合

9. ペデスタル排水系の排水機能評価について

9.1 概要

R P Vから落下した熔融炉心の冠水及び熔融燃料－冷却材相互作用による影響抑制の観点から、R P V破損時のペデスタル内水位を1 mに維持することとしている。

これに対して、事故発生後にペデスタル内への流入水（余剰水）が生じた場合に、余剰水が規定時間内にサプレッション・チェンバへ排水できることを、モックアップ試験及び試験結果に基づく排水評価により確認する。具体的には、下記の確認を実施する。

- ・モックアップ試験により、格納容器床ドレンサンプ導入管（以下「導入管」という。）及びスリット形状の排水ラインにおける流動状況を確認するとともに、圧損係数を評価する。
- ・試験結果を基に、実機体系における排水評価を実施し、排水制限時間内にペデスタル内水位1 mまで排水可能であることを確認する。

9.2 評価において想定する事象

ペデスタル内への流入水により水位が著しく高くなり得る事象として、ペデスタル内におけるボトムドレンLOCAを想定する。この場合、R P Vからペデスタル内への流入は事象発生約0.3時間で停止し、水位はペデスタルの人通用開口部下端まで達すると想定される。

排水時間の制限としては、流入が停止する事象発生約0.3時間から、R P V破損が早くなる大破断LOCA時におけるR P V破損時間を保守的に短くした3時間を組合せて2.7時間とする。

9.3 試験条件

試験方法を表9-1、設備条件を表9-2、確認項目及び判定基準を表9-3に示す。また、試験装置を図9-1に示す。

表 9-1 試験方法

試験水	排水配管状態	排水先	試験方法
水道水 (常温)	配管内満水 (DB時に常時排水があるため)	排水口をスリットと同程度の高さに設定 (SA時にベント管への排水となるため)	排水弁を閉の状態にて導入管より高く水を張り、弁を開とすることで、静水圧にて排水

表 9-2 設備条件

排水配管経路	試験計画
導入管～ スリット入口	アクリル製 80A (ペデスタル床面から高さ1 m)
スリット入口～ スリット出口	アクリル製 (流路断面寸法：)
スリット出口～ ベント管	塩化ビニル製 80A

表 9-3 確認項目／判定基準

確認項目	判定基準
排水流路全体での排水時間	2.7 時間以下
流動状況	—

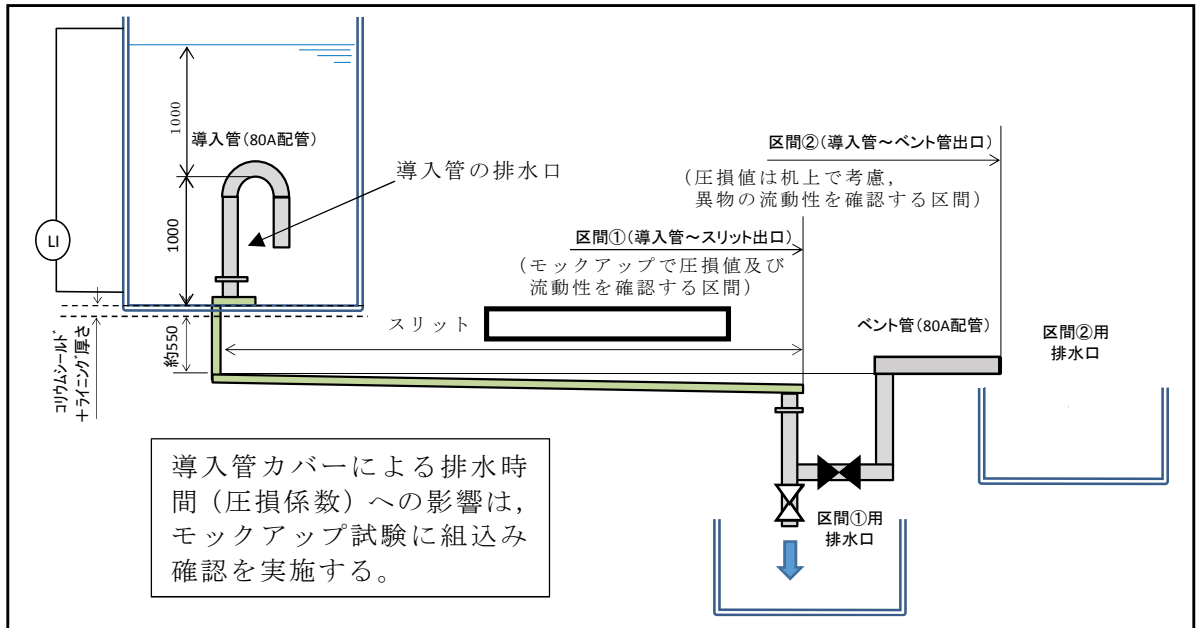


図 9-1 試験装置

9.4 モックアップ装置と実機の相違点について

今回使用するモックアップ装置と実機の相違点を表 9-4 に示す。

表 9-4 モックアップ装置と実機の相違点


	モックアップ装置	実機	評価に与える影響
配管材質	導入管～スリット出口： アクリル製 スリット出口からベント管： 塩化ビニル製	導入管～ベント管： ステンレス製	材質の違いによる表面粗さの違いによって、圧損係数への影響はあるが、試験で得られた係数に対しては、裕度を考慮して今後の設計を行うため問題ないと考える。
水温	常温（約 10～20 ℃）	高温水 （約 167 ℃（2Pd での飽和温度に相当））	水温が低い方が圧損係数は高くなるため、常温水での試験を実施しておけば、SA 時の高温水の排水性については包絡できる。
流路勾配			装置のたわみ等を考慮し、保守的に設定。
水位差	1.000 m （最高水位 2 m から最低水位 1 m までの差）		圧損 $H = \text{圧損係数 } K \times \text{流量 } Q^2$ より水位差による圧損係数算出への影響は無いが、信頼性のあるデータ取得のため十分な試験時間及び流量確保の観点から設定。

9.5 異物による影響について

ペDESTAL内に設ける排水の流入口（導入管）は、スワンネック構造とする。導入管は、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。この導入管の構造を考慮した上で、導入管への落下物の影響、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。なお、スワンネック構造を流入口とする排水流路は、RPV破損前にペDESTAL内の水位 1 m を達成した時点で排水弁を閉止し、その後は用いないことから、排水機能の要求期間はRPV破損前までであり、RPV破損前までに想定される落下物及び異物を対象として評価する。

事故時に発生する落下物により導入管が損傷しないこと、異物がペDESTAL格納容器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表 9-5 に示す。

落下物により、導入管が影響を受けないことを確実にするため、導入管の周囲に柵を設置する設計とする。

この柵は、異物が導入管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。(図 9-2)

なお、格納容器機器ドレンサンプについても、排水経路として利用することから、異物落下に対して破損等がないよう、十分な強度を有する設計とし、導入管の異物混入防止及び損傷防止については、床ドレン排水用の導入管と同様の対策を行うことで、悪影響を防止する。

表 9-5 想定異物と影響評価 (1/2)

想定異物	異物による排水性への影響
核計装用及び照明用等のケーブル (管路含む)	<p>【発生源】 ペDESTAL内</p> <p>【導入管への落下/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、落下の可能性はある。</p> <p>【影響評価】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・落下による影響 導入管は鋼製でサポートに固定されているため破損・転倒するおそれはない。また、周囲に鋼製の柵を設置することから、導入管に直接接触することもない。格納容器機器ドレンサンプについては、サンプ自体を十分な強度を有する設計とするため、破損するおそれはない。 ・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。また、何らかの要因で被覆片が生じたとしても、格納容器機器ドレンサンプと格納容器床ドレンサンプ各々の導入管は対向して配置され、かつ前述のとおり各々の周囲を柵(図 9-2 参照)にて囲うため、共通要因による排水性への影響はない。
保温材	<p>【発生源】 ペDESTAL外</p> <p>【導入管への落下/床ドレンへの流入】 落下なし/流入あり ペDESTAL格納容器床ドレンサンプ内に保温材はない。</p> <p>重大事故時にドライウエ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>

表 9-5 想定異物と影響評価 (2/2)

想定異物	異物による排水性への影響
塗料片	<p>【発生源】 ペDESTAL内・外</p> <p>【導入管への落下/床ドレンへの流入】 落下あり/流入あり</p> <p>ペDESTAL内・外の構造物には塗装が施されていることから導入管への落下、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 導入管を損傷する程の重量はなく導入管が破損・転倒するおそれはない。また、同様に格納容器機器ドレンサンプへの影響もない。 ・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、導入管の排水口を水位 1 m の中間位置に設定するため、これらの異物が導入管の排水口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。
スラッジ (鉄錆)	<p>【発生源】 ペDESTAL外</p> <p>【導入管への落下/床ドレンへの流入】 落下なし/流入あり</p> <p>スラッジ(鉄錆)は、床ドレン水によって格納容器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】</p> <p>導入管の排水口を水位 1 m 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</p> <p>【導入管への落下/床ドレンへの流入】 落下なし/流入なし</p> <p>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】</p> <p>排水性への影響はない。</p>
照明	<p>【発生源】 ペDESTAL内</p> <p>【導入管への落下/床ドレンへの流入】 落下あり/流入あり</p> <p>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 導入管は鋼製でサポートに固定されているため破損・転倒するおそれはない。また、周囲に鋼製の柵を設置することから、導入管に直接接触することもない。格納容器機器ドレンサンプについても、十分な強度を有する設計とすることから、破損するおそれはない。 ・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。

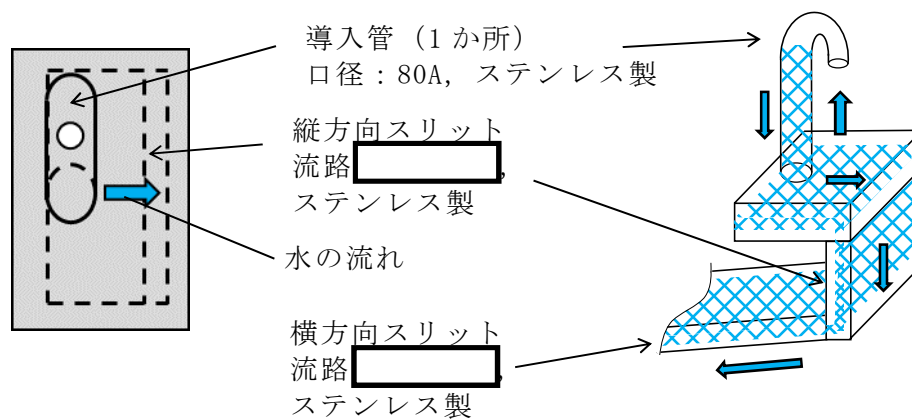
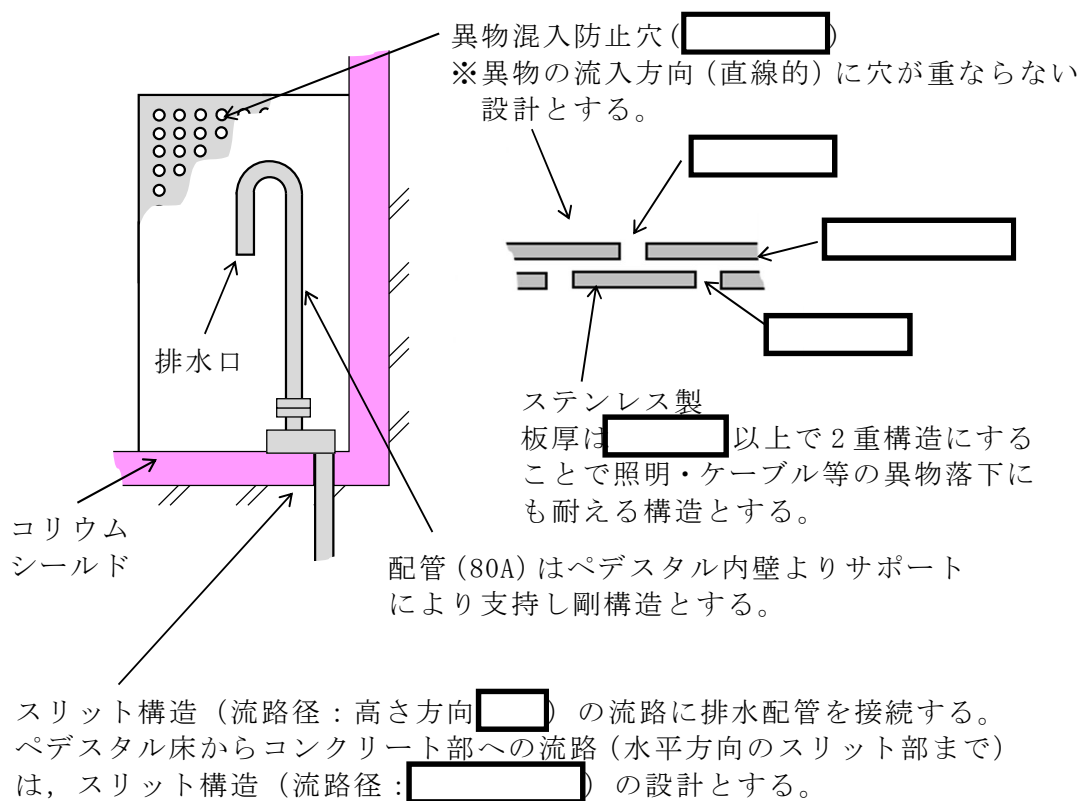


図 9-2 排水配管に対する異物対策概要

9.6 モックアップ試験における異物の考慮

9.5 項の内容を踏まえ想定した異物の種類を表 9-6 に示す。表 9-6 の保温材、塵土、塗料片、錆片、スラッジ及びその他異物は、ECCS ストレーナに関する『平成 20・02・12 原院第 5 号』の内規記載項目から抽出した。

表 9-6 に示すように、導入管に到達、通過する異物としてスラッジが想定されるため、モックアップ試験で想定する異物は下記のとおりとした。

- ・異物（スラッジ）の模擬材として Fe_3O_4 （四酸化三鉄）を使用する。
- ・濃度は、東海第二発電所の調査結果から最大値を考慮し保守的に で設定する。
- ・異物（スラッジ）は、保守的に全量がスリットを通過するよう投入する。

表 9-6 モックアップで想定する異物の種類

想定異物	ペデスタル内への流入		導入管・スリットへの流入	
ケーブル	○	ペデスタル内での落下	×	床に沈降*2
照明	○	ペデスタル内での落下	×	床に沈降*2
保温材	×	ペデスタル内にはない*1	—	(評価不要)
塵土	×	ペデスタル内にはない*1	—	(評価不要)
塗装片	○	流入、あるいは、ペデスタル内に存在	×	床に沈降*2
錆片	○		×	床に沈降*2
スラッジ	○		○	大部分は床に沈降*2

- 注記 ○ : 流入すると想定したもの。
 × : 流入しないと想定したもの。
 *1 : 外部からの通常時流入については、作業後清掃等を実施することでほとんどないと想定。
 また、事故後早期に流入経路の弁を閉とすることで流入を制限することから事故時の流入は無いものと想定。
 *2 : 導入管 (80A) の周りには導入管カバー () の穴ダブル構造) を設置していることから、大きな異物は近接・流入できない構造となっている。
 導入管の排水口を水位 1 m の中間位置に設置するため、床や水面の異物が排水口に流入するとは考え難い。

9.7 試験結果

試験結果の一例を図 9-3 に示す。図 9-3 は床ドレン排水系経路のみを考慮した場合であるが、判定基準である 2.7 時間以内に水位 1 m まで排水できない結果となった。このため、排水経路全体で支配的な圧損発生部位を特定し、特定部位を改善し、全体圧損を低減することとした。

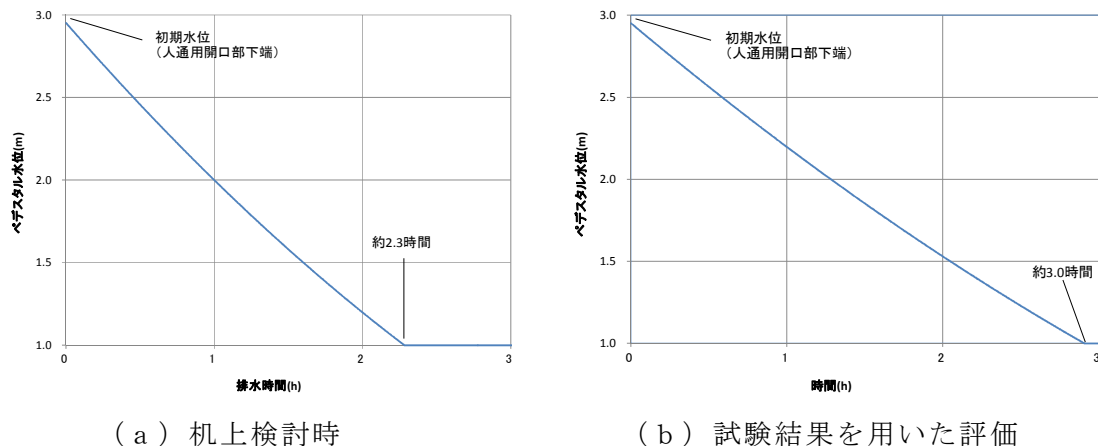


図 9-3 実機排水時間評価結果

9.8 試験結果を踏まえた改善

流動性の向上を図るため導入管とスリット接続部の形状をレデューサ形状に変更し、導水管のベント穴形状や位置を見直すことで流速及び抵抗の低減を図ることとした。

(図 9-4)

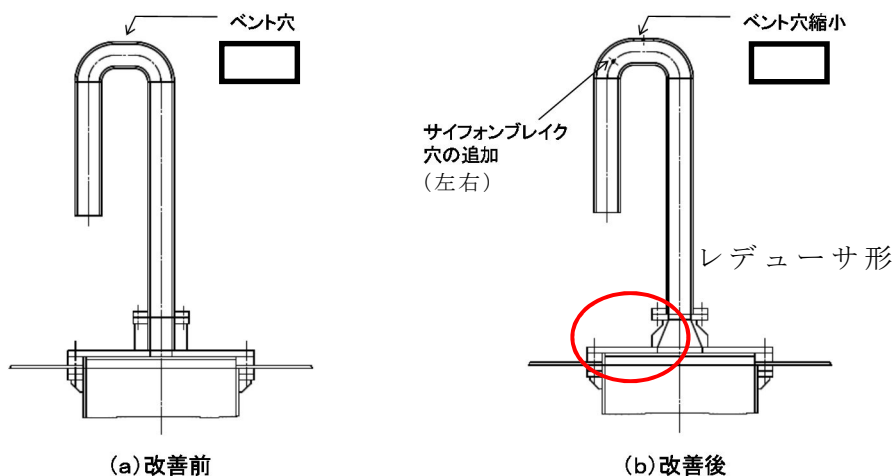


図 9-4 導入管の接続部及びベント穴の改善

9.9 実機排水評価

実施した試験結果を踏まえ、流路等の改善を反映した試験を実施し、試験結果を基にした実機体系における排水時間を評価した。評価においては、以下を考慮している。

- ・排水評価は人通用開口部下端から水位 1 m 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・チェンバ内圧は考慮しない。
- ・導入管及びスリット部の圧損係数は、モックアップ試験により確認された値を用いる。モックアップ試験により確認された圧損係数値は、 $3.0 \times 10^{-3} \text{ m}/(\text{m}^3/\text{h})^2$ である。
- ・スリット部下流側の排水配管については、実配管ルートを考慮した机上評価により算出した圧損係数を用いる。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（1.04 m）を算出し、圧損係数（K）を求めた。

圧力損失計算式（出典：日本機械学会編，機械工学便覧）

$$H = \lambda \times (L/D) \times (v^2/2g) + \Sigma \lambda \times (L'/D) \times (v^2/2g) = K \times Q^2 \quad (9.1)$$

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]

表 9-7 圧力損失計算要素

	単位	スリット下流配管
配管内径：D	m	
流量* ¹	m ³ /h	22
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* ² (L' /D=□)	個	
90° ロングエルボ (L' /D=□)	個	
弁 (L' /D=□)	個	
ティー分岐 (直流) (L' /D=□)	個	
ティー分岐 (分流) (L' /D=□)	個	
管入口 (λ・(L' /D)=□)	個	
開放端 (λ・(L' /D)=□)	個	

注記 *1：必要排水量約 59 m³を約 2.7 時間で排出する場合の流量 22 m³/h とした場合の例を記載。

*2：CRANE 社「FLOW OF FLUIDS THROUGH VALVES, FITTINGS, AND PIPE Technical Paper No. 410, 1988」

上表を基に、スリット下流配管の圧力損失を計算した結果を以下に示す。

$$H = \square$$

$$\square$$

$$K = \square$$

導入管及びスリット部とスリット部下流側の排水配管それぞれで求めた圧損係数を加えた流路全体の圧損係数を以下に示す。

$$K = \square$$

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 1 m までの排出時間を算出している。

評価結果を図 9-5 に示す。床ドレン流路からの排水により、判定基準である 2.7 時間以内にペDESTAL水位 1 m までの排水が可能であることを確認した。

また、床ドレンに加え機器ドレンも考慮した場合の評価結果は、図 9-6 のとおりであり、排水時間は約 1.5 時間となる。

なお、排水時間の判定基準は想定事象を保守的に組合せて設定していること、必要排水量等についても保守的な条件で評価を行っていることから、実態としては十分な時間余裕がある。

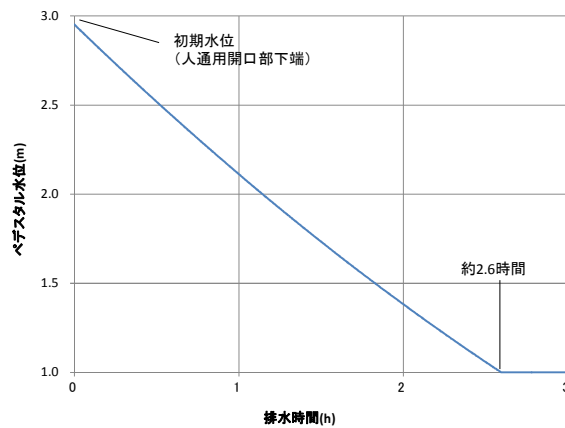


図 9-5 実機排水時間評価結果

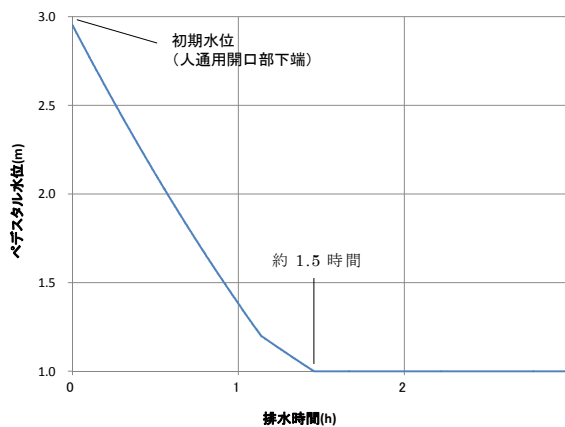


図 9-6 実機排水時間評価結果（床ドレン及び機器ドレン流路を考慮した場合）

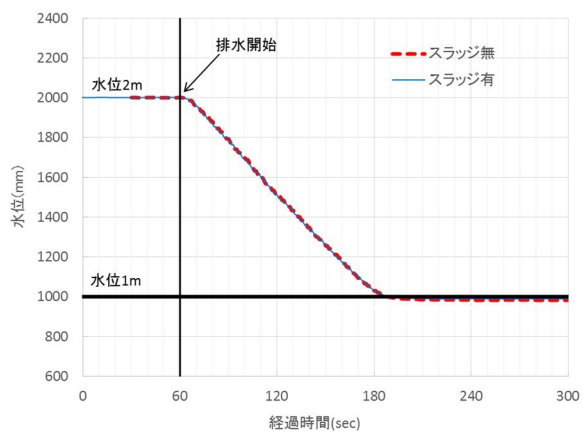
9.10 スラッジ模擬試験

9.6 項で検討した想定する異物であるスラッジ模擬材（ Fe_3O_4 ）を投入した試験を実施した。

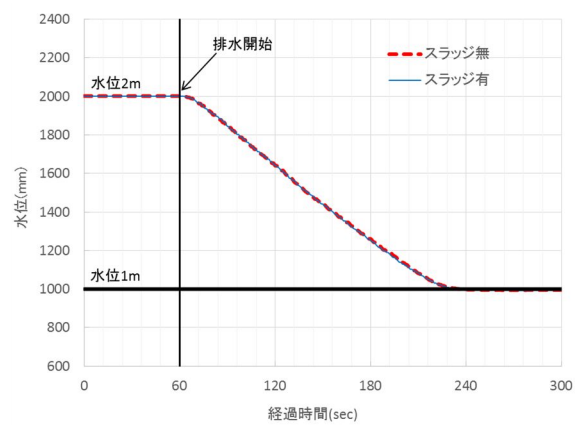
スラッジ模擬試験の結果を図 9-7 に示す。

区間①及び区間②から排出した場合共にスラッジ有無で排出時間の相違はなく，圧損への影響がないことを確認した。

スラッジ模擬試験におけるスラッジの流動状況を表 9-8 及び表 9-9 に示す。



(a) 区間①の試験結果



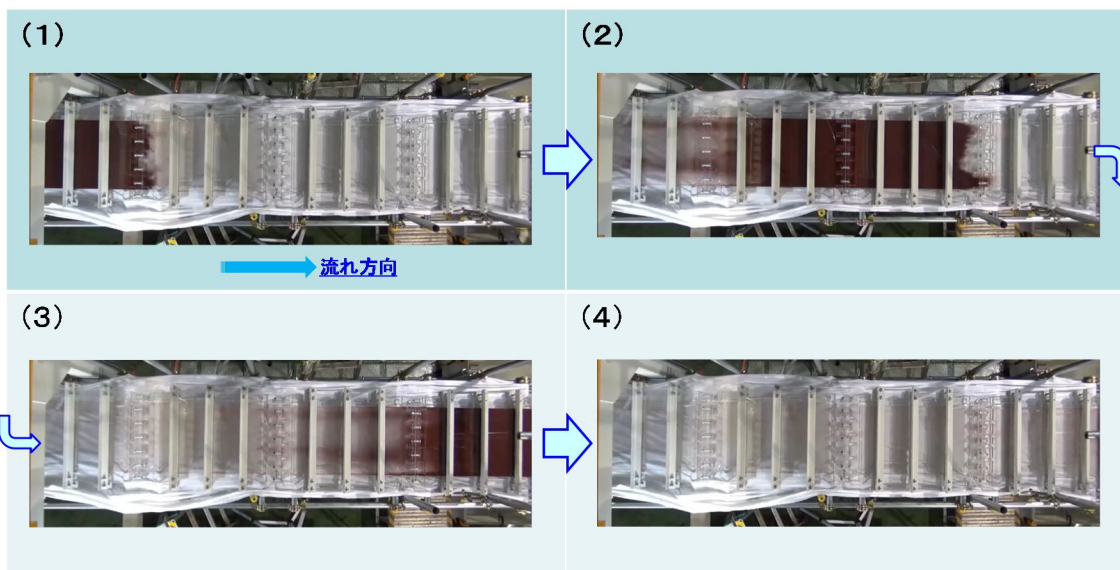
(b) 区間②から排出時の試験結果

図 9-7 スラッジ模擬試験結果

表 9-8 スラッジ模擬試験のスラッジ流動状況

	排水前	排水中	排水後
導入管部			
垂直スリット部			

表 9-9 スラッジ模擬試験のスラッジ流動状況（水平スリットを真上から見た状態）



9.11 導入管カバー影響試験

落下物に対する導入管保護，導入管への異物混入防止として設置する導入管カバーの圧損への影響を確認するため，導入管カバーを設置した試験を実施した。

試験用の導入管カバーは，流動状況を確認可能なようにスリットと同じ亚克力製（図 9-8）とし，図 9-9 に示す位置に設置した。



図 9-8 試験用導入管カバー

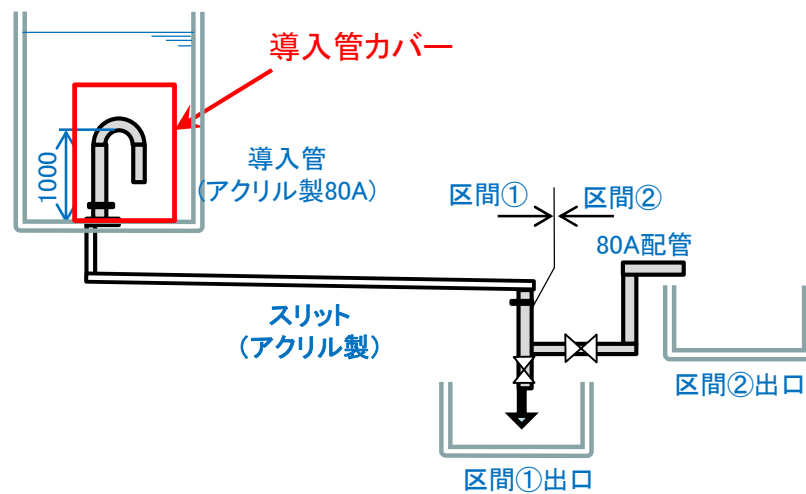


図 9-9 導入管カバー設置入位置

導入管カバーを設置した場合及び設置しない場合の試験結果を図 9-10 に示す。

図 9-10 に示すように導入管カバーの有無で排出時間の相違はなく，圧損への影響がないことを確認した。

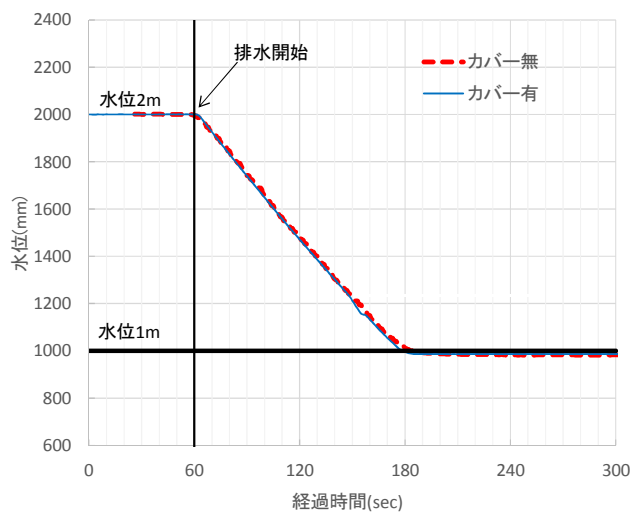


図 9-10 導入管カバー試験の結果

9.12 まとめ

採用実績，圧損評価実績のないスリット部の流動状況，圧損係数を把握し，実機排水評価のため，スリットモックアップ試験を実施した。

試験の結果，ボトムドレンLOCA時において，ペDESTAL内が満水（人通口開口部下端まで）になった際，RPV破損までの間（約2.7時間）に床ドレン流路からの排水によりペDESTAL水位1 mまでの排水が可能なことを確認した。

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1 mを超過する（1.05 m）まで注水を実施し，その後排水することにより，RPV破損時に確実に水位1 mを確保する運用としている。その際に5 cm分の排水に要する時間を約5分としていたが，試験結果を踏まえ約6分と設定した。当運用に要する時間は約30分（注水開始操作に要する時間約17分，水位10 cm分の注水に要する時間約3分，注水停止操作に要する時間約4分及び5 cm分の排水に要する時間約6分）と想定され，炉心損傷後のペDESTAL注水開始からRPV破損までの約1.8時間（事象進展の早い大破断LOCA時の例）の間に余裕をもって実施可能であることを確認した。

また，スラッジ及び導入管カバーによる圧損への影響を確認する試験を実施し，スラッジ及び導入管カバーは圧損への影響がないことを確認した。

10. コリウムシールドの施工

10.1 概要

コリウムシールドの施工は、国内プラントでは初めてとなり、構造・手順・環境の面で施工に係る実現性を確認する必要があることから、コリウムシールドの施工性について説明するものである。

10.2 施工前後

溶融炉心の冷却に係る設備の施工前、施工後を図 10-1 及び図 10-2 に示す。

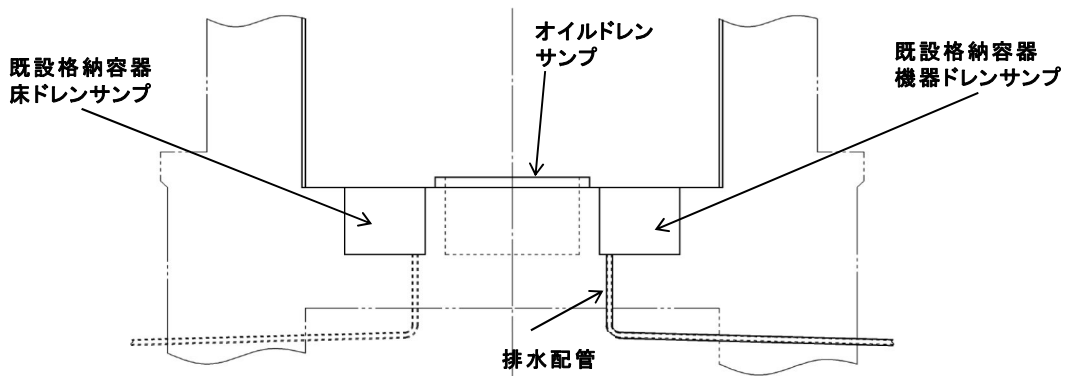


図 10-1 施工前

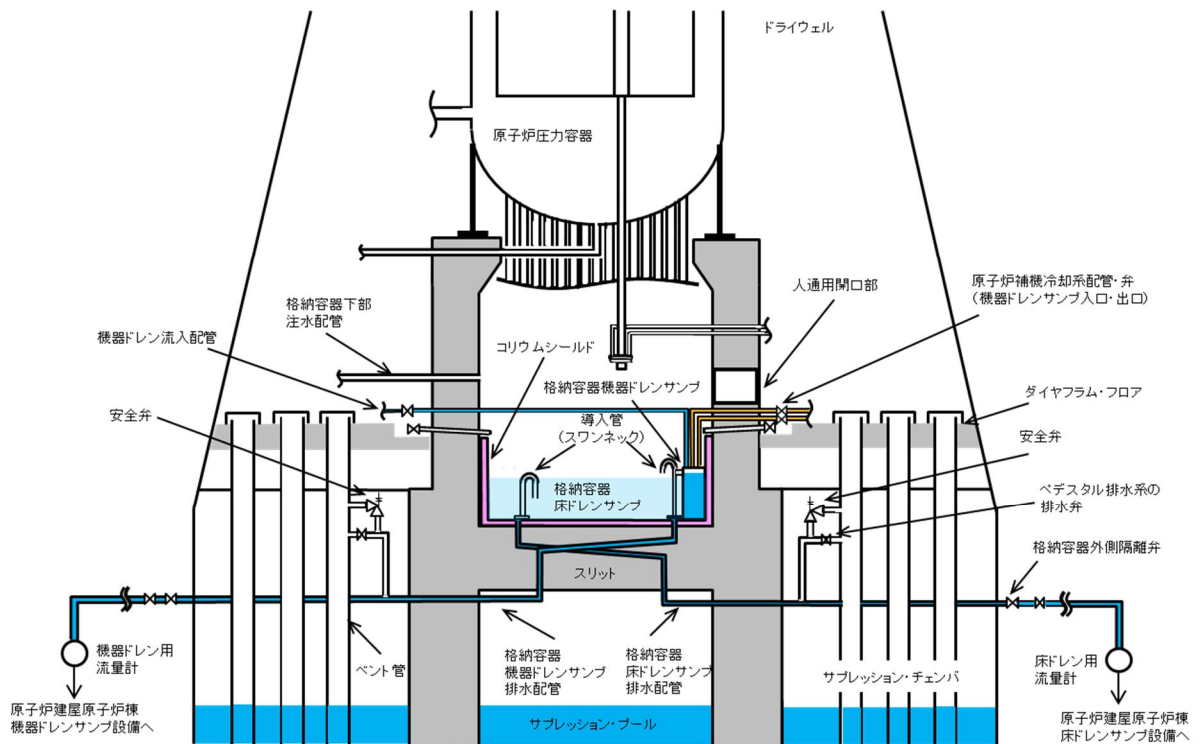


図 10-2 施工後

10.3 施工手順

コリウムシールド及びペDESTAL排水系配管の施工手順を確認する。

①既設サンプの撤去

【作業概要】

- ・既設の床ドレンサンプ及び機器ドレンサンプ，オールドレンサンプの除染
- ・既設の床ドレンサンプ及び機器ドレンサンプ，オールドレンサンプの撤去

【作業内容】

- ・作業環境を改善するため，ペDESTAL内の床ドレンサンプ及び機器ドレンサンプ，オールドレンサンプ，ペDESTAL内の除染を行う。除染は線量による今後の作業時間と除染による線量の低減を踏まえて作業が実施可能な範囲で行う。
- ・既設の床ドレンサンプ及び機器ドレンサンプ，オールドレンサンプのライナ（SUS）を撤去し，サンプ設置深さ（)までコンクリート部をはつる。
深さ)までのコンクリート内にある鉄筋は計算に使用されていないものなので切断・撤去する。

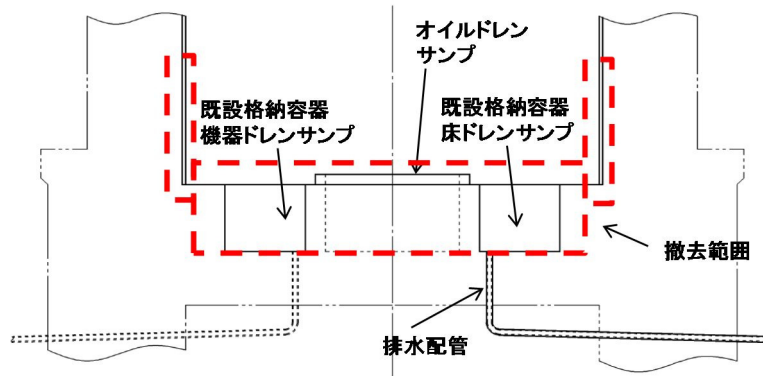


図 10-3 既設サンプの撤去範囲

②スリットの設置，モルタル打設


【作業概要】

- ・排水用スリットの設置
- ・モルタル打設

【作業内容】

- ・アンカーボルト用の穿孔（ハンマードリル等使用），無機系接着材の充填後，アンカーボルト（スリット用，ライナ用）を設置する。
- ・スリット用のサポート及びライナの下地材をアンカーボルトに溶接する。
- ・スリットをサポート部材の上に設置し，既設の排水配管と接続（溶接）する。
- ・規定の高さまでモルタルを打設する。

【管理項目】

- ・スリット設置位置，勾配 
- ・モルタル打設高さ

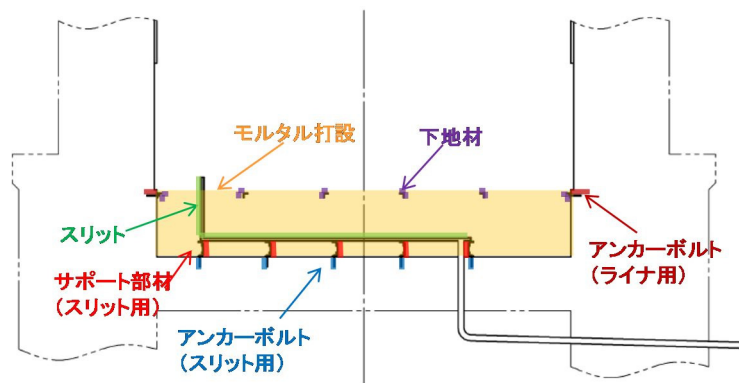


図 10-4 スリット設置・モルタル打設

③アンカーボルト，下地材設置

【作業概要】

- ・ペDESTALライナ，アンカーボルト及び下地材の設置

【作業内容】

- ・ペDESTALライナ及びコリウムシールド用のアンカーボルト等を設置する。
- ・コリウムシールド用サポート部材（水平方向）を設置する。

【管理項目】

- ・アンカーボルトの埋め込み長さを管理

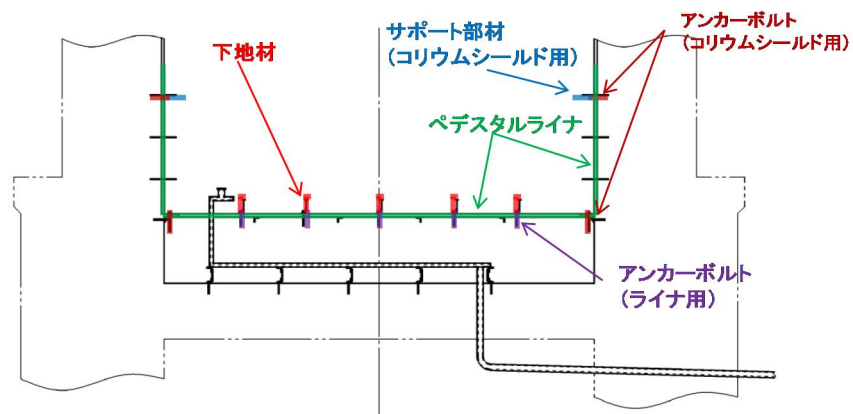


図 10-5 ペDESTALライナ，アンカーボルト，下地材の設置

④ コリウムシールド設置

【作業概要】

- ・ コリウムシールドの設置

【作業内容】

- ・ コリウムシールド用サポート部材（鉛直方向）を設置する。
- ・ コリウムシールド用のサポート部材（鉛直方向）に沿って、コリウムシールドブロックを積む。

【管理項目】

- ・ コリウムシールド高さ，厚さ，内径を管理

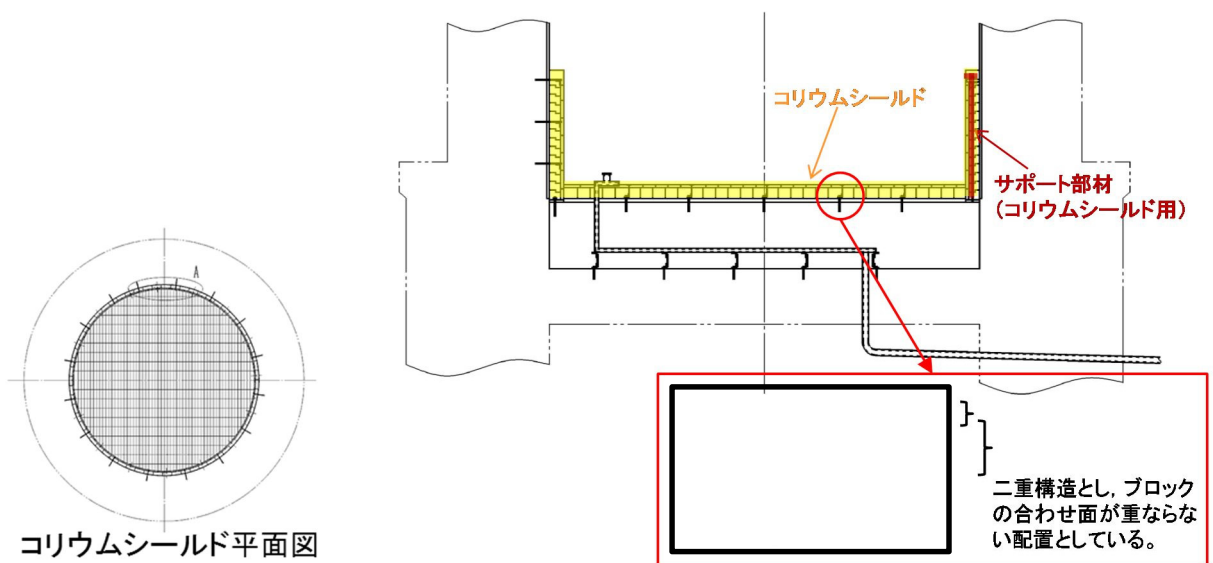


図 10-6 コリウムシールドサポート，コリウムシールドの設置

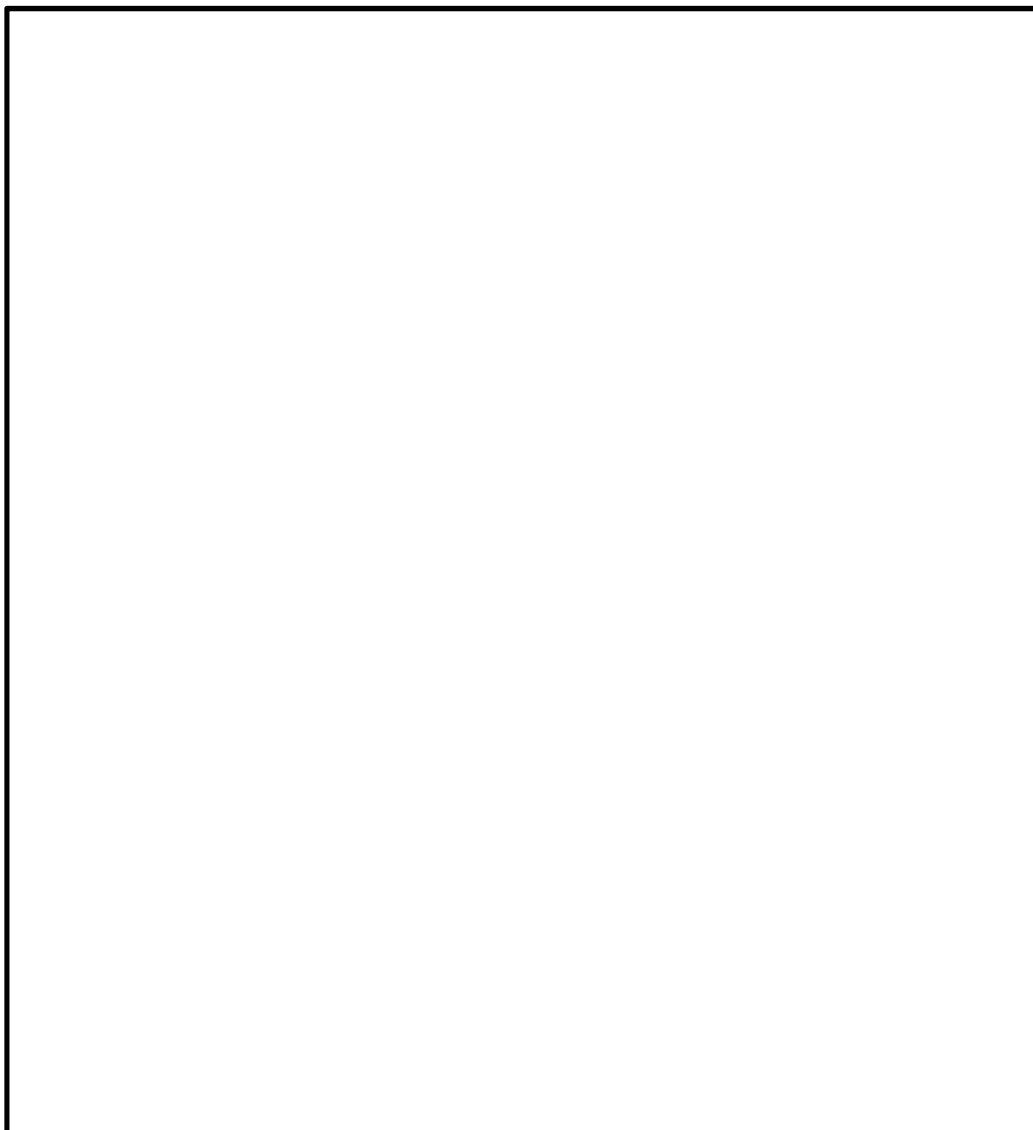


図 10-7 コリウムシールドサポート， コリウムシールド設置概念図

⑤床ドレンサンプ，機器ドレンサンプ，スワンネック（導入管）設置

【作業概要】

- ・新設の床ドレンサンプ，機器ドレンサンプ，導入管の設置

【作業内容】

- ・下地材にステンスライナ（新設の床ドレンサンプ）を溶接により取付ける。
- ・新設の機器ドレンサンプ及びスワンネック（導水管）等を設置する。

【管理項目】

- ・床ドレンサンプの内径が，規定の寸法であることを管理
- ・スワンネック（導水管）の内面の高さが規定寸法であること（床面から1 m）を管理

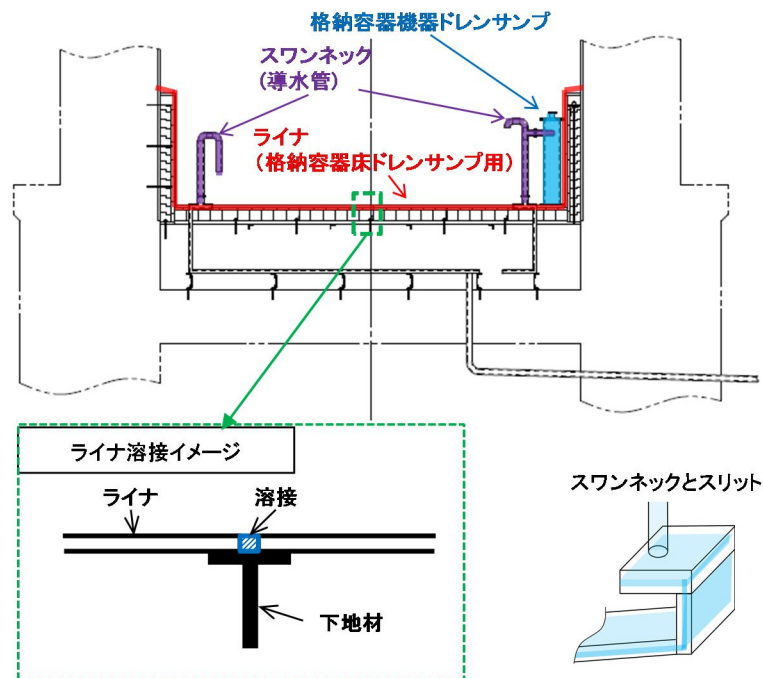


図 10-8 床ドレンサンプ（ライナ），機器ドレンサンプ，スワンネック（導入管）設置

⑥計測機器，スワンネック（導入管）カバー，機器ドレン配管設置

【作業概要】

- ・計測機器用（サポート含む），スワンネック（導入管）カバー（サポート含む），機器ドレン配管設置

【作業内容】

- ・計装機器用サポート，スワンネック（導入管）カバーサポート設置，機器ドレン接続配管の接続。
- ・スワンネック（導水管）カバー，水位計・水温計を設置し完成。

【管理項目】

- ・格納容器下部水位計・水温計設置位置の確認
- ・漏えい試験
- ・排水性確認試験

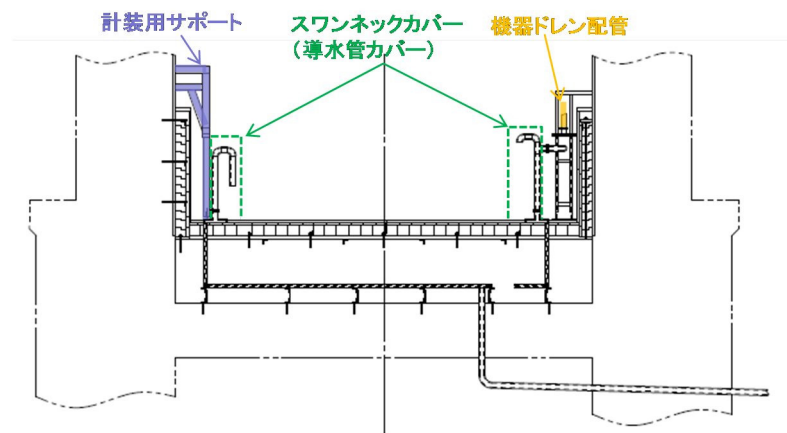


図 10-9 計測機器，スワンネック（導入管）カバー，機器ドレン配管の設置

10.4 製造公差について

コリウムシールド及びペデスタル排水系に係る設備の製造公差を表 10-1 に示す。また、製造公差による各種評価への影響を表 10-2 に示す。

各設備の製造公差を考慮した場合でも、各種評価結果への有意な影響はなく、設備対策に悪影響を及ぼすものがないことを確認した。

表 10-1 各設備の製造公差

構成	主要寸法 (mm)		許容範囲	根拠
コリウムシールド	厚さ	150		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
	高さ	1880		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
導入管	高さ	1000		製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
排水配管のベント管接続高さ	高さ			製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
スリット	厚さ			製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値
	幅			製造能力，製造実績を考慮したメーカー許容値

表 10-2 製造公差と各種評価への影響 (1/3)

項目	コリウムシールド厚さ	コリウムシールド高さ
ノミナル値 (製造公差)	150 mm	1800 mm
ペデスタル 流入水の 排水評価	保守的に、コリウムシールド等の体積を考慮せず必要排水量を多めに設定しているため、影響なし。	
デブリ堆積 高さ・冠水 維持評価	コリウムシールド厚さを 160 mm とした場合でも、デブリ堆積高さは約 1.72 m ^{*2} となり、コリウムシールドを超過しない。コリウムシールドが薄くなると、デブリ堆積高さは低くなり、水深 1 m に対応する水量は多くなるため、裕度が増加する。	コリウムシールドが高くなると、デブリ堆積高さに対するコリウムシールド超過までの余裕は大きくなる。
デブリによる 侵食量評価	コリウムシールドが厚くなると、デブリの上面プール水との接触面積が減少するが、 厚くなった場合でも面積減少率は約 0.5% と小さく、有意な影響はない。コリウムシールドが薄くなる場合でも、耐熱材の侵食に係る不確かさとして厚さを 110 mm とした感度解析を実施しており、これに包絡される。	影響なし。
デブリによる 熱影響評価	コリウムシールドが厚くなると、デブリからコンクリートへの熱伝達が緩和され、裕度が増加する。コリウムシールドが薄くなる場合でも、耐熱材の侵食に係る不確かさとして厚さを 110 mm とした感度解析を実施しており、これに包絡される。	コリウムシールドが高くなると、その分床スラブコンクリート上部が薄くなるが、床スラブの強度を担保する鉄筋コンクリート部への熱影響はスリット内デブリの崩壊熱が支配的であり、床スラブ強度への有意な影響はない。また、強度評価上は、床スラブ上側の無筋コンクリート部には期待していないため、影響はない。
デブリの凝固 停止評価	コリウムシールド等のペデスタル内構造物は考慮せず、ペデスタルに堆積したデブリが直接スリットに流入するモデルとしているため、影響なし。	

注記 *1: コリウムシールド高さが高くなる場合、その分床スラブの打継コンクリート厚さが減少する (コリウムシールドと床ドレン流入配管との干渉を避けるため (図 2-4 参照))

*2: 床面コリウムシールド上表面からの高さ

表 10-2 製造公差と各種評価への影響 (2/3)




項目	導入管高さ	ベント管への接続高さ
ノミナル値 (製造公差)	1000 mm 	ペDESTAL床コンクリート表面 
ペDESTAL 流入水の 排水評価	スワンネックが高くなると、排水開始水位からスワンネック高さまでの高低差が小さくなり、排水時間は短くなる。	接続高さが  高くなった場合でも、ペDESTAL満水からの排水時間は2分程度の増加に留まり、想定している時間内(2.7時間)に排水可能である。
デブリ堆積 高さ・冠水 維持評価	スワンネックが高くなると、RPV破損時のペDESTAL内の水量が多くなり、露出までの時間余裕が増加する。水深が深くなるとデブリ落下時の粒子化割合が増加するが、その増加率は0.3%未満であり、デブリ堆積高さへの有意な影響はない。	影響なし。
デブリによる 侵食量評価	スワンネックが高くなると、RPV破損時のペDESTAL内の水量が多くなり、デブリ落下時の冷却効果が大きくなるため、裕度が増加する。	影響なし。
デブリによる 熱影響評価	スワンネックが高くなると、RPV破損時のペDESTAL内の水量が多くなり、デブリ落下時の冷却効果が大きくなるため、裕度が増加する。	影響なし。
デブリの凝固 停止評価	コリウムシールド等のペDESTAL内構造物は考慮せず、ペDESTALに堆積したデブリが直接スリットに流入するモデルとしているため、影響なし。	接続高さが高くなった場合でも、スリット内に水が存在することには変わりはないため、影響なし。

表 10-2 製造公差と各種評価への影響 (3/3)

項目	スリット厚さ	スリット幅
ノミナル値 (製造公差)		
ペDESTAL 流入水の 排水評価	スリットの厚さや幅が大きくなると、排水時の圧損が小さくなり排水時間は短くなるため、裕度が増加する。	
デブリ堆積 高さ・冠水 維持評価	影響なし。	
デブリによる 侵食量評価	影響なし。	
デブリによる 熱影響評価	スリットの厚さや幅が大きくなると、スリット内のデブリ量（発熱量）が増加するが、評価モデルは2次元軸対象であり床スラブ内の水平面全面にスリットが存在するモデルとなっているため、この保守性に包絡される。	
デブリの凝固 停止評価	スリット厚さが <input type="text"/> スリット幅が <input type="text"/> 大きくなった場合、スリット内の単位長さ当たりのデブリ量は約 1.2 倍となる。これにより、デブリが冷却され凝固停止するまでの距離が 1.2 倍となったとしても*、その距離は約 1.2 m であり、スリット長さの範囲内に留まる。	

注記 *：スリット厚さ及び幅が増加するとデブリからスリットへの除熱面積も増加するため、実際には凝固停止距離は 1.2 倍より小さくなる

11. 溶融デブリによる選択的侵食について

11.1 概要

コリウムシールドは、重大事故等時、溶融デブリ落下時のペDESTAL・中間スラブの侵食防止機能が求められる。一方で、コリウムシールドは、重大事故等対処設備として、基準地震動 S_s により定まる地震力に対して機能維持が求められ、耐震補強部材として、鋼製のサポート材が内部に設置される。また、重大事故等時、溶融デブリの冠水及び水蒸気爆発抑制の観点から、ペDESTALの水位を1 mに維持するために、水密性を担保する必要があるため、コリウムシールド上面に床ドレンサンプを兼ねるライナを設置する。ライナ同士を溶接するため、ライナの下に鋼製の下地材を設ける。

しかし、原子炉圧力容器から落下した溶融デブリの大部分は、ライナを溶融、貫通して融点の高い耐熱煉瓦と接触するが、ごく一部の溶融デブリはコリウムシールド内部に設けられる、サポート材やライナの下地材といった鋼材と接触する。

ここで、耐熱煉瓦と鋼材との融点の違いによって、鋼材の溶融の方が先行し、コリウムシールドを貫通するリークパスとなり得ることが想定される（以下「選択的侵食」という。）。

本項は、溶融デブリに対する選択的侵食の有無を確認した結果を示すものである。

11.2 評価の概要

コリウムシールドを貫通する鋼材は、水平サポート材及びライナの下地材のみであるため、選択的侵食が想定される部位は水平サポート材及びライナの下地材である。コリウムシールド内に設置される計測機器、導入管カバーや機器ドレンサンプのサポートはコリウムシールド設置位置から取らないため、選択的侵食を想定する部位とはならない。

コリウムシールド内部の構造物である水平サポート材を図11-1に示す。また、下地材を図11-2に示す。

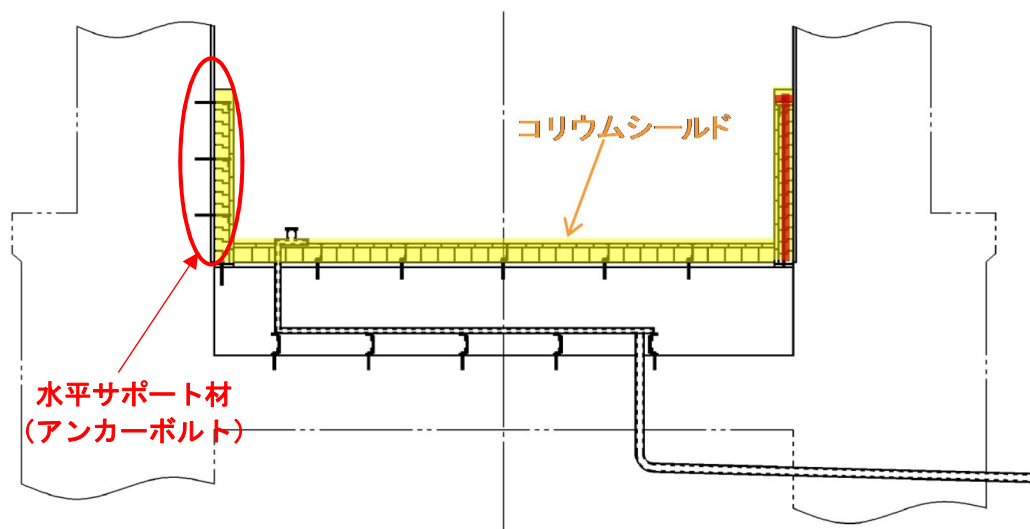


図 11-1 水平サポート材

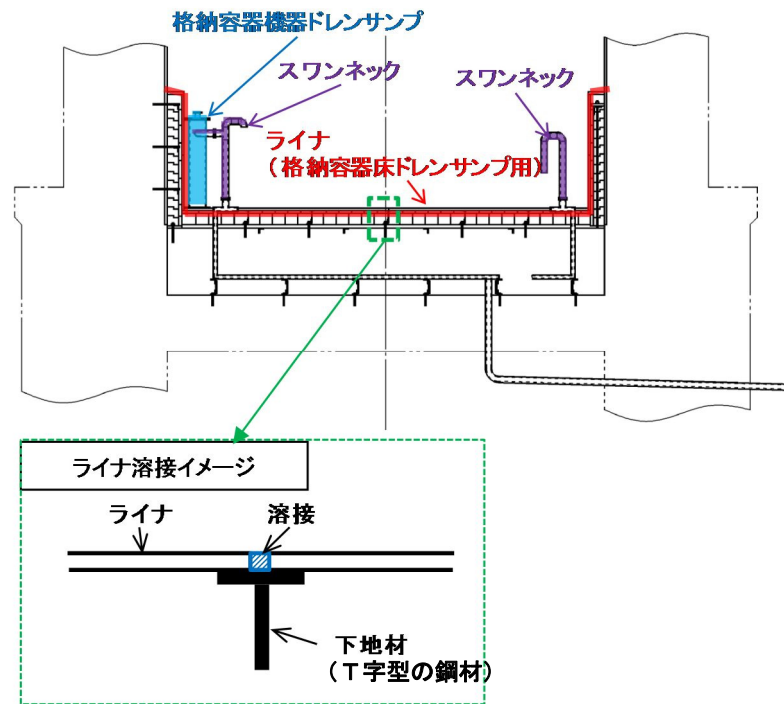


図 11-2 下地材

図 11-1 及び図 11-2 に示す構造から、原子炉圧力容器から落下した溶融デブリの大部分は、ライナを溶融、貫通して融点の高い耐熱煉瓦と接触するが、ごく一部の溶融デブリはコリウムシールド内部に設けられる、水平サポート材（アンカーボルト）やライナの下地材（T字型の鋼材）といった鋼材と接触し、溶融デブリによる選択的侵食が想定される。

ここで、選択的侵食の有無を確認するため、耐熱煉瓦、溶融デブリ、鋼材をモデル化した温度分布解析を実施し、当該部の温度分布挙動を評価する。

なお、溶融デブリはペDESTAL内に張られた水により上面から冷却されること、及び自重の影響により下方向への侵食が想定される。また、床部の下地材は壁面の水平サポート（アンカーボルト）に比べ、伝熱面積が大きいことから、床部の下地材の方が壁面のサポートよりも選択的侵食が生じやすいと想定されるため、温度分布解析の評価対象の代表部位は床部ライナの下地材とする。

11.3 温度分布計算

(1) 計算方法

温度分布計算は、解析コードABAQUSを用いる。なお、評価に用いるABAQUSの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

(2) 計算モデル

モデル化範囲は、コリウムシールド内を貫通するライナの下地材（鋼材）及び下地材周囲の耐熱材（ ZrO_2 ）とする。耐熱材のモデル化範囲は下地材のピッチを考慮して設定する。また、コリウムシールドの上のライナ（厚さ4 mm）及びライナ直下の下地材（幅50 mm，厚さ3 mm）については、保守的な評価となるよう溶融デブリにより直ちに溶融した場合を想定し、解析モデルには含めない。

解析モデル及び境界条件を図 11-3 に示す。



図 11-3 計算モデル（左：実機構造 右：解析モデル）

図 11-3 の計算モデルにおいて溶融デブリ接触面温度及び床スラブ上面温度は、MAAP解析に基づき保守的に設定した図 11-4，図 11-5 及び図 11-6 を用いる。図 11-4 は、「8. 溶融炉心による熱影響評価について」の添付 8-1 における図 6 の包絡温度であり，図 11-5 及び図 11-6 は、「7. コリウムシールドを考慮した溶融炉心・コンクリート相互作用による侵食量評価について」の図 7-5 及び図 7-6 のペDESTAL床面コンクリート温度である。

また、耐熱材及び下地材の初期温度はMAAP解析でのRPV破損直前の床面，壁面ヒートシンクの最高温度である117°Cとする。

ここで、耐熱材の物性値は、試験結果に基づき設定した「8. 溶融炉心による熱影響評価について」の添付 8-1 における表 4 を用いた。

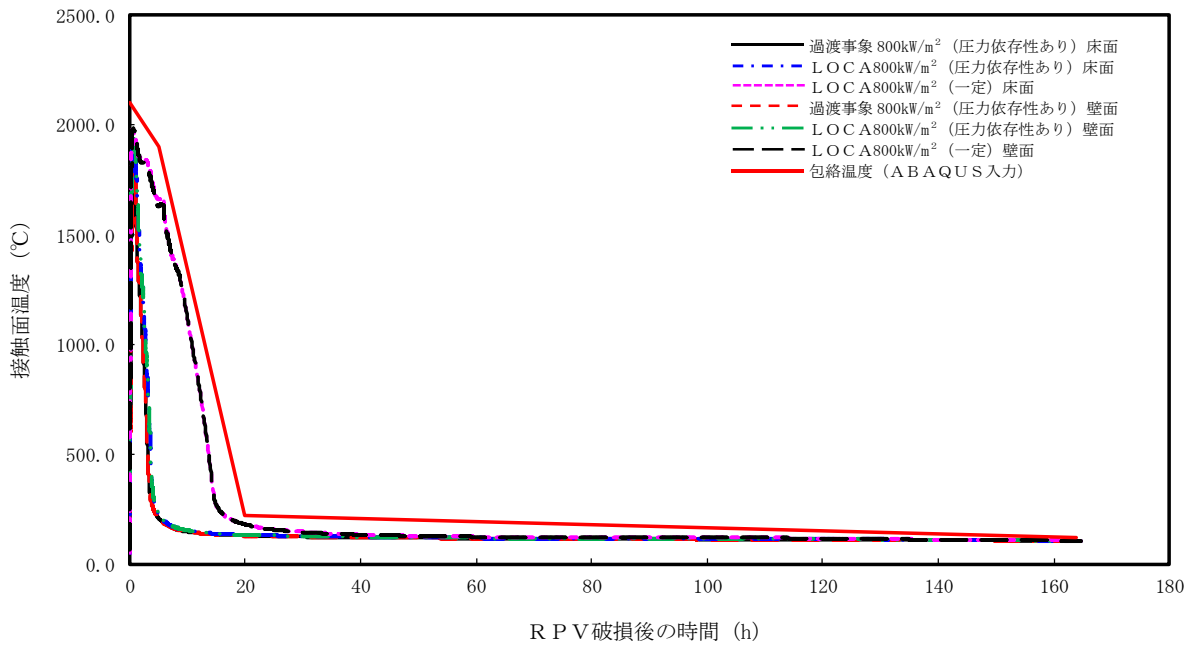


図 11-4 熔融デブリ接触面温度

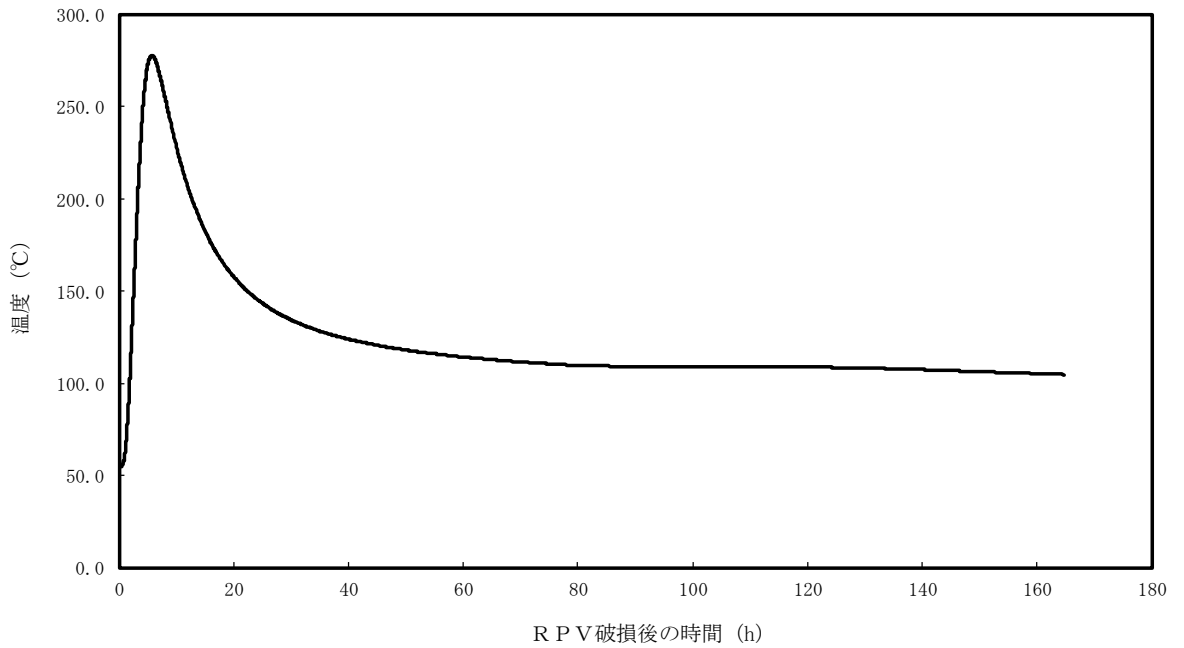


図 11-5 床スラブ上面温度 (ベースケース)

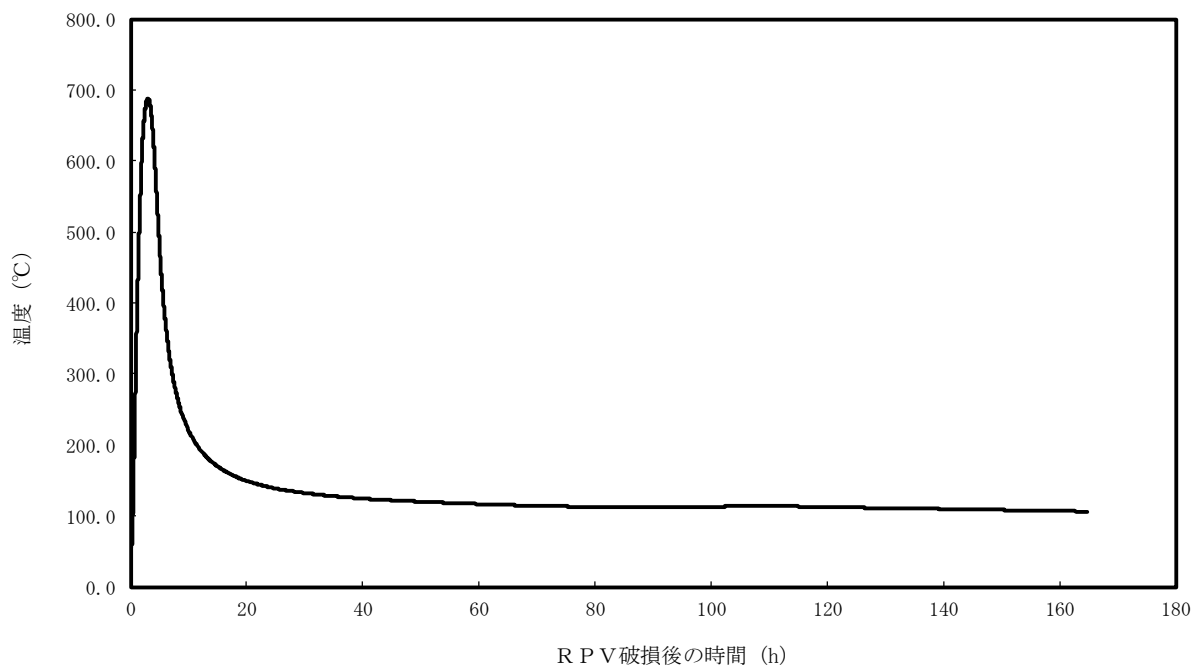


図 11-6 床スラブ上面温度 (感度解析ケース)

11.4 評価結果

温度分布解析の解析モデル及び結果を図 11-7～図 11-11 に示す。

図 11-7 は解析モデル及び評価点，図 11-8 及び図 11-10 は温度分布の時刻履歴，図 11-9 及び図 11-11 は各時刻における温度分布のコンター図を示す。

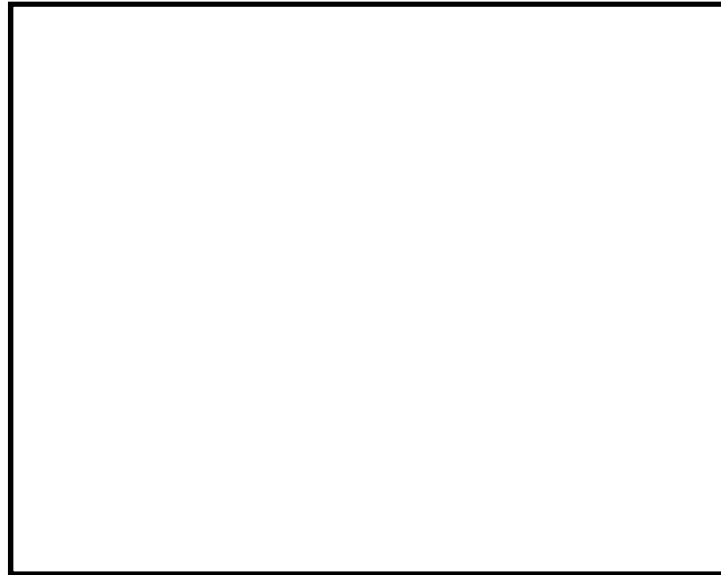


図 11-7 解析モデル及び評価点

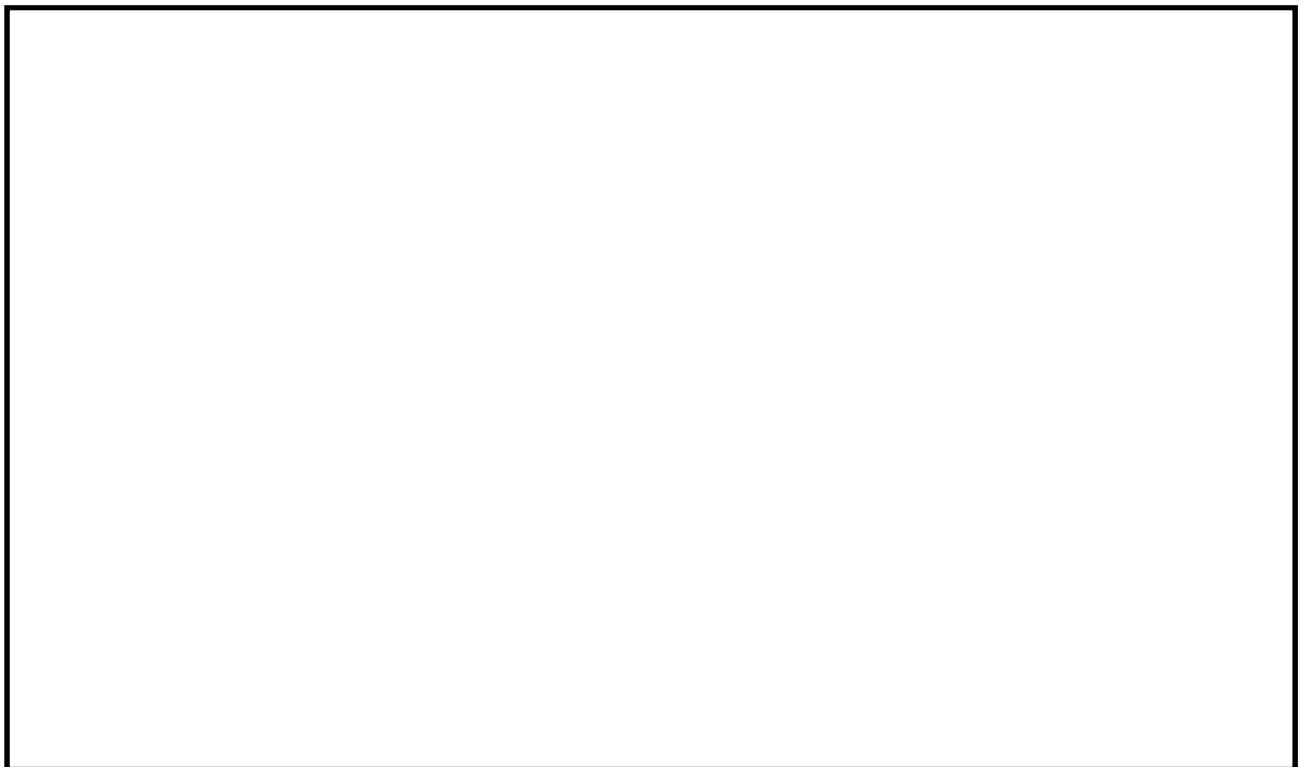


図 11-8 温度分布履歴 (ベースケース)

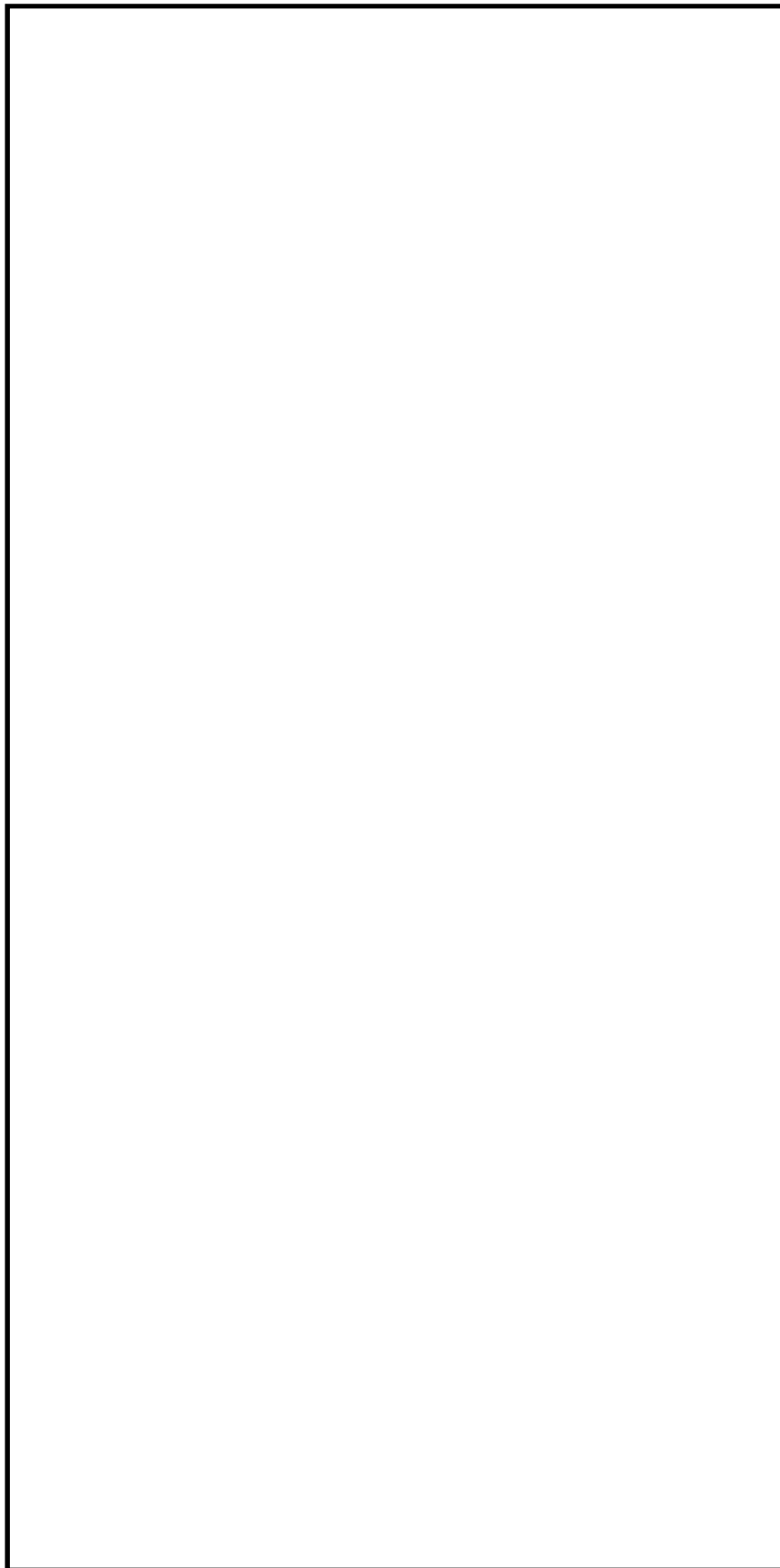


図 11-9 各時刻における温度分布のコンター図 (ベースケース)

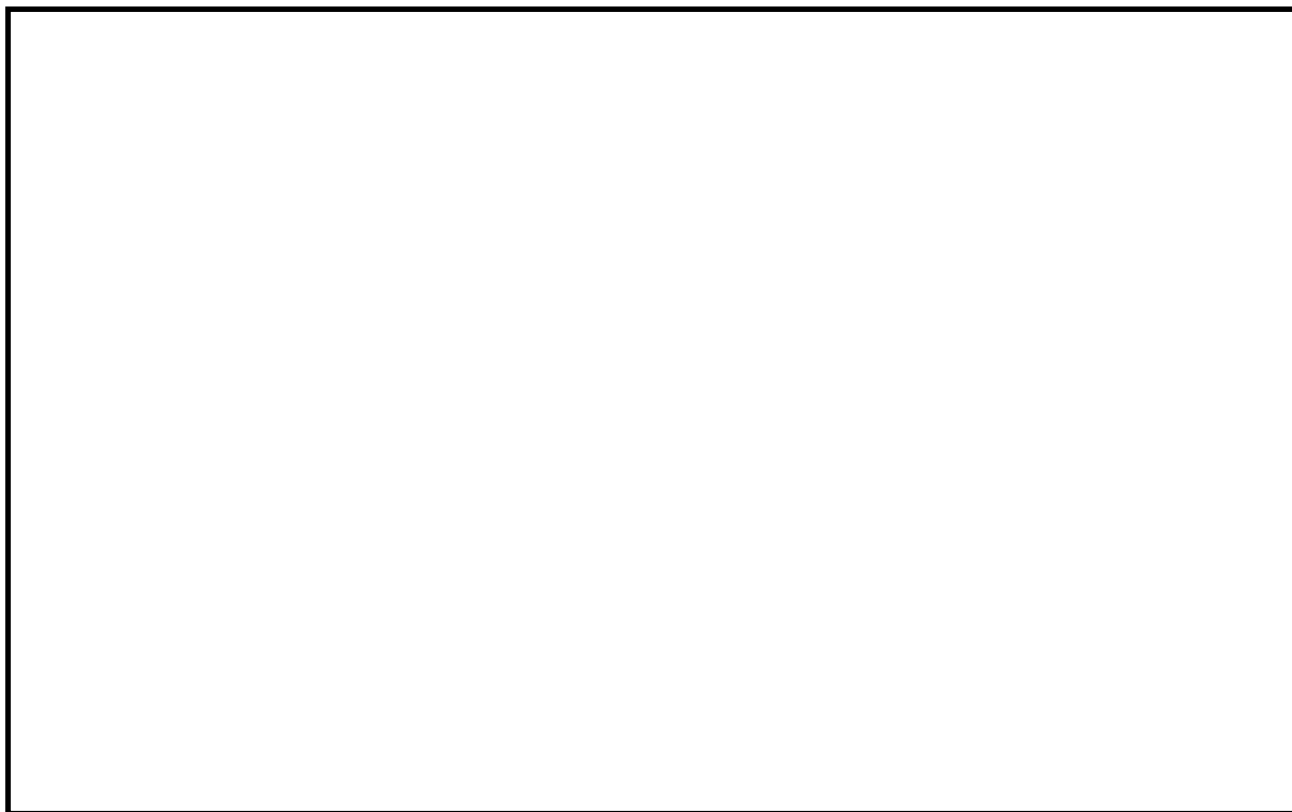


図 11-10 温度分布履歴（感度解析ケース）

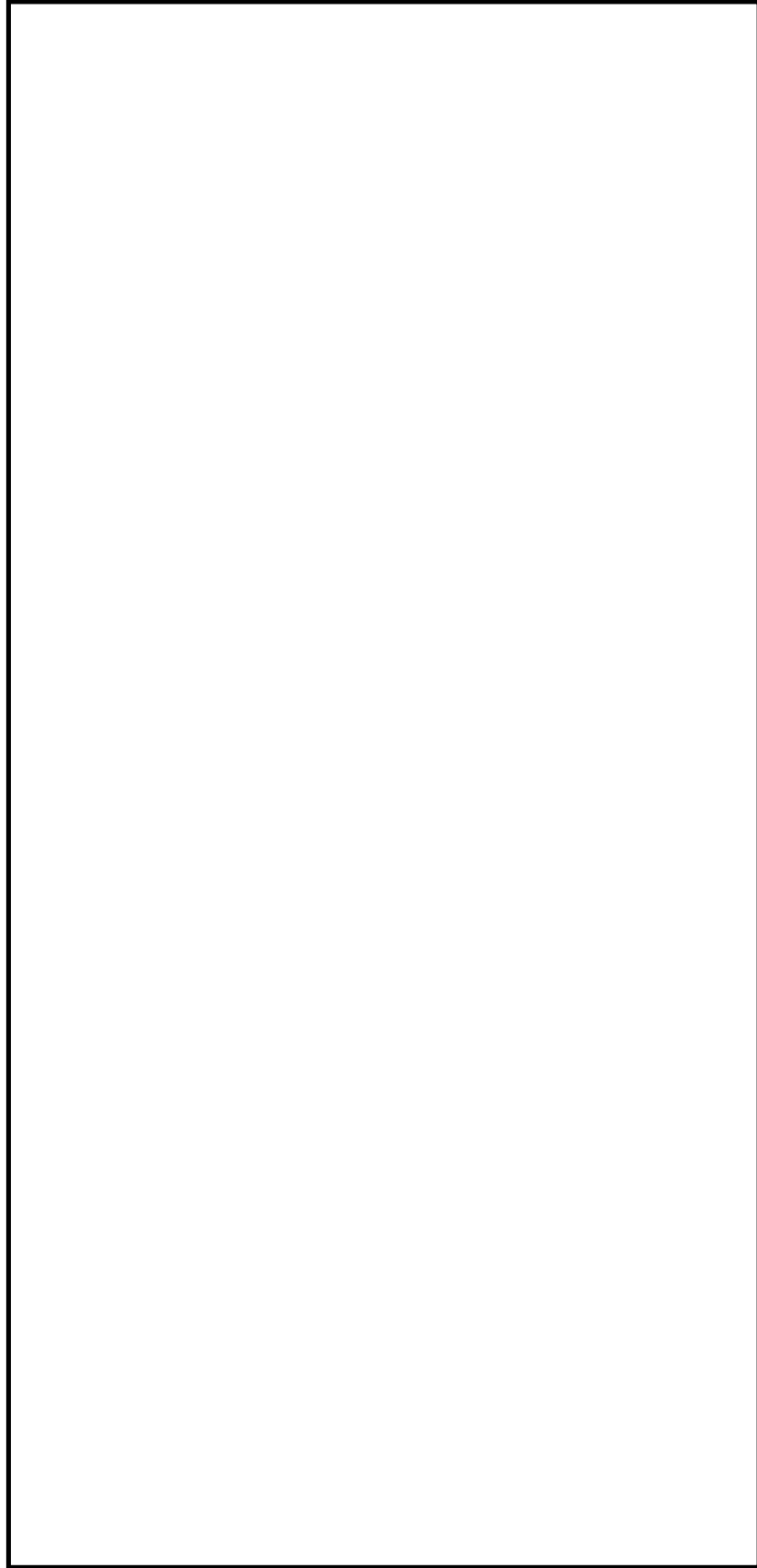


図 11-11 各時刻における温度分布のコンター図（感度解析ケース）

ベースケースについては、図 11-8 に示す各評価点における温度の時刻歴より、2.2 時間後の溶融デブリ接触面 N201 と隣接する下地材評価点 N181 の温度は鋼材の融点 1500 °C を超えるが、床スラブ上面 N1 と隣接する下地材評価点 N21 の温度は約 290 °C となり、下地材が全溶融しないことが確認できる。また、床スラブ上面と隣接する下地材の温度が最大となる 5.7 時間後の下地材評価点 N21 の温度は約 463 °C となり、下地材は全溶融しない。

更に、図 11-8 の各評価点での温度の時刻歴及び図 11-9 の温度分布のコンター図より、15 時間後の下地材の最大温度は約 780 °C となり、20 時間後には約 290 °C に下がり鋼材の融点を下回ることが確認できる。

感度解析ケースについては、図 11-10 に示す各評価点における温度の時刻歴より、2.8 時間後の溶融デブリ接触面 N201 と隣接する下地材評価点 N181 の温度は鋼材の融点 1500 °C を超えるが、床スラブ上面 N1 と隣接する下地材評価点 N21 の温度は約 800 °C となり、下地材が全溶融しないことが確認できる。

更に、図 11-10 の各評価点での温度の時刻歴及び図 11-11 の温度分布のコンター図より、15 時間後の下地材の最大温度は約 780 °C となり、20 時間後には約 280 °C に下がり鋼材の融点を下回ることが確認できる。

以上より、溶融デブリの熱に対し、鋼材の下地材は全溶融しないことを確認した。

ベースケース及び感度解析ケース共に、溶融デブリが選択的にライナ下地材を侵食したとしても、ライナ下地材が全て溶融しないため、溶融デブリはペデスタルスラブコンクリートまで到達せず、ライナ溶接部の下地材が溶融デブリ落下時のリークパスとなることはない。また、水平サポート材についても、先に侵食されることが想定されるライナ溶接部の下地材が溶融しないため、同様に溶融せず、溶融デブリによるコリウムシールド内部の鋼材の選択的侵食は生じない。