

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 | 補足-270-2 改1 |
| 提出年月日 | 平成30年6月7日 |

東海第二発電所

原子炉格納施設的设计条件に関する説明書

に係る補足説明資料

(コリウムシールド的设计)

平成30年6月

日本原子力発電株式会社

目 次

1. ペDESTAL（ドライウェル部）内の水位管理方法について
2. 原子炉圧力容器破損時の溶融炉心の冠水評価について
3. コリウムシールド材料の選定について
4. コリウムシールド厚さ，高さの設定について
5. 水蒸気爆発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
6. J A S M I N E 解析について
7. 水蒸気爆発評価の解析モデルについて
8. 水蒸気爆発発生時のコリウムシールドへの影響
9. 溶融炉心が原子炉圧力容器下部の偏心位置より落下した場合の影響評価
10. 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
11. 溶融炉心による熱影響評価について
12. 溶融炉心の排水流路内での凝固停止評価について

ペDESTAL（ドライウエル部）内の水位管理方法について

東海第二発電所における，溶融燃料－冷却材相互作用及び溶融炉心・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。）内の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)及び(b)に示す。

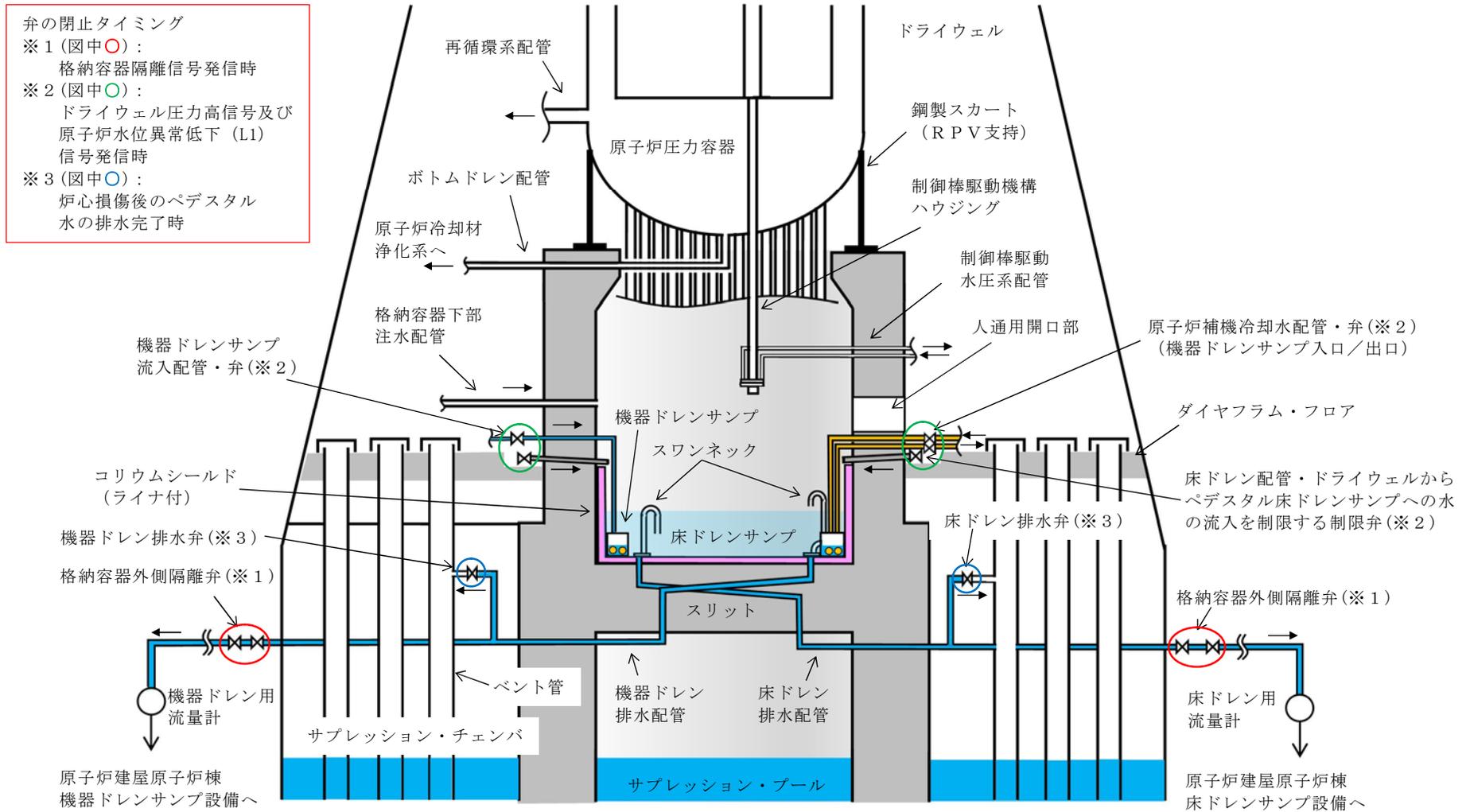
ペDESTAL内の底面及び側面には，原子炉圧力容器（以下「RPV」という。）が破損し溶融炉心（以下「デブリ」という。）が落下した際のペDESTAL構造健全性確保のため，ZrO₂製のコリウムシールドを設置する。また，コリウムシールド内は床ドレンサンプとして用いるために，コリウムシールド表面にSUS製のライナを敷設し通常運転中の水密性を確保するとともに，その内側に機器ドレンサンプを設置する。

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)及び(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。

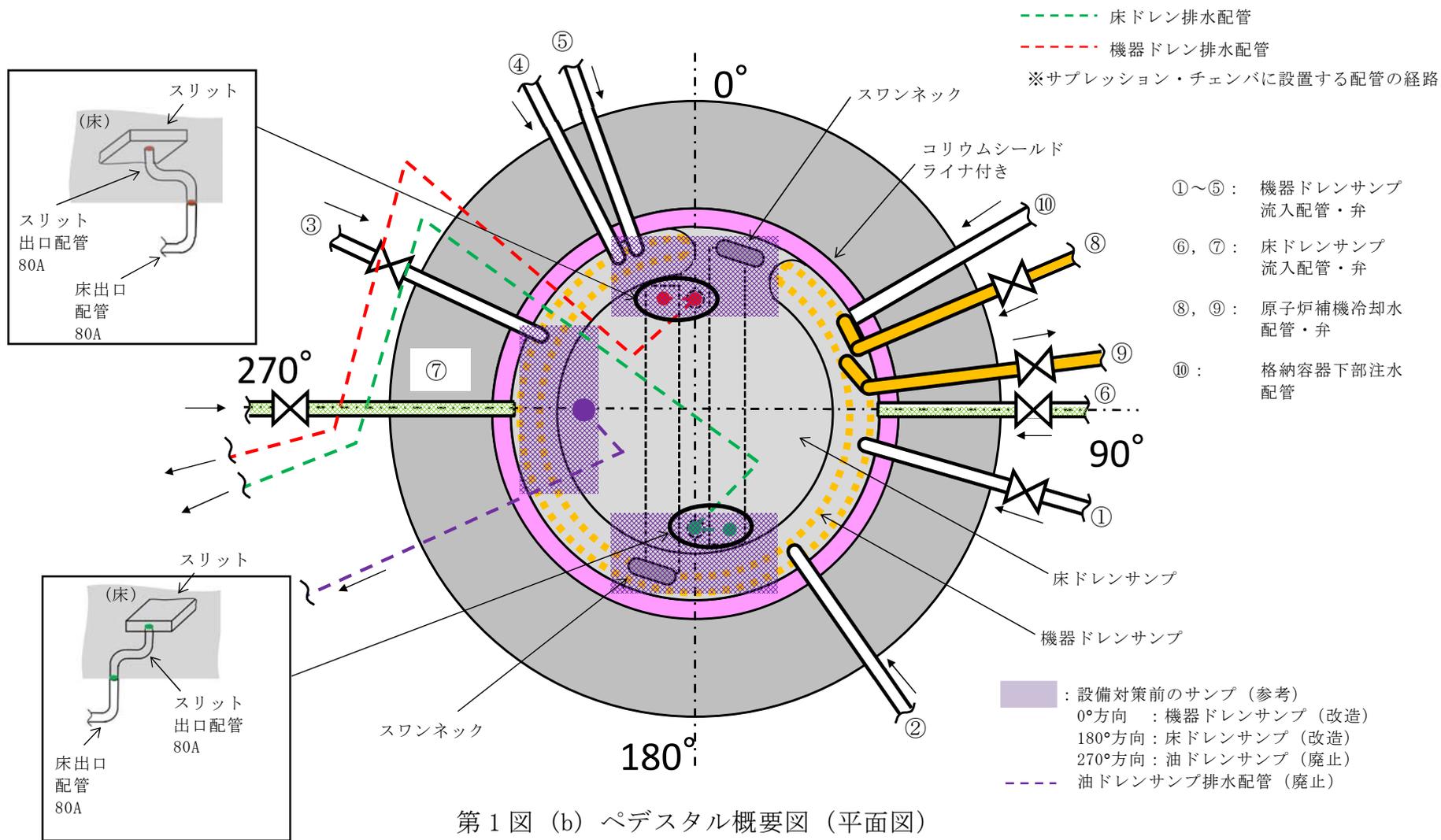
床ドレンサンプ内に流入した水は，1mに立ち上げたスワンネックから流出させ，スリット及び配管を通じて原子炉建屋原子炉棟床ドレンサンプ設備へ排水する。また，排水配管を分岐させベント管へ接続することで，事故時においてペDESTALからサブプレッション・チェンバへ排水する経路を設ける。

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

されているとともに、ペデスタル内には制御棒駆動水圧系配管が敷設されている。



第1図 (a) ペデスタル概要図 (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) 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DESTAL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DESTAL内への事前水張りを行い、ペDESTAL内水位を約 1m (約 27m³) にし、通常運転時のペDESTALへの流入水の計測を可能とする。

通常運転時におけるペDESTAL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（ドライウェルエアー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DESTAL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 6.8L/h, 少量時：約 0.2L/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 3.7Bq/ml である。

ペDESTAL内へ流入した床ドレン水は、ペDESTAL内水位が約 1m の状態で流入し、スワンネックから原子炉建屋原子炉棟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DESTAL内水位が約 1m に維持されていることを確認できる。また、ペDESTAL内水位が約 1m 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、スワンネックから原子炉建屋原子炉棟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。

(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、ペデスタル内へ流入する配管（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）に対してペデスタル外側に設置した制限弁を自動閉止し，ペデスタル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床ドレン排水弁を経由してサブプレッション・チェンバへ排水され，R P V破損までにペデスタル内水位は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30分程度（注水開始操作に要する時間（17分），水位10cm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5cm分の排水に要する時間（5分）に余裕を加味した時間）と想定され，炉心損傷後のペデスタル注水開始から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。

なお，床ドレンサンプの水位をR P V破損までに1mとする排水の過程において，水位が1.2m以上であるときには，床ドレン排水配管及び床ドレン排水弁を経路とした排水に加えて，ベント管に接続された機器ドレンサンプ排水配管及び排水弁を経由してサブプレッション・チェンバに排水することが可能である。

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破損後のペデスタル水のサブプレッション・チェンバ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注水開始後の水蒸気爆発発生の可能性及び
水蒸気爆発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、水蒸気爆発（以下「SE」という。）によるペDESTAL構造への影響抑制のため、RPV破損時のペDESTAL水位を1mと設定し、SE影響評価を実施している。しかし、RPV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、SE影響評価の想定を上回る規模のSEが発生する可能性がある。

これに対して、RPV破損及びペDESTAL注水開始後のペDESTAL内の状況を推定し、SE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. RPV破損時のデブリ落下挙動

RPVが破損するような状況においては原子炉注水機能が喪失している可能性が高く、RPV破損時にはデブリの大部分が下部プレナムに堆積することで、これらのデブリの重量及び熱的影響により制御棒駆動機構ハウジング等のRPV貫通部溶接箇所が破損し、デブリが落下し始めると考えられる。その後も、制御棒駆動機構ハウジングはペDESTAL内において外部サポートにより支持されているため逸出が生じることは考えにくく、アブレーションによる破損口の拡大を伴いながら下部プレナムに堆積したデブリが継続的にペDESTALへ落下するものと考えられる。

なお、有効性評価においては、溶融燃料－冷却材相互作用や溶融炉心・コ

ンクリート相互作用による格納容器への負荷を厳しく評価する観点から、R P Vの破損形態として制御棒駆動機構ハウジングの逸出を想定しており、R P V破損口はアブレーションにより拡大しながら、R P Vの内圧及びデブリの堆積ヘッドにより、約 300ton の熔融デブリが約 30 秒間でペDESTALへ全量落下する結果となっている。

3. R P V破損後のペDESTAL内の水の状態とS E発生抑制の考え方

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

まず、R P V破損時にペDESTAL内に存在する水量（水深 1m）は約 27m³であり、この水量を飽和温度まで昇温させるデブリ量は、約 11ton と評価される。これは、デブリ全体に対して 4%未満の落下量である。また、ペDESTALを満水（水深約 2.8m）とする水量は約 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 27m²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。

※ M A A P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破損後にはペデスタル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デスタル満水相当(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デスタル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。

ペデスタル満水相当(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、水位を2.25mから2.75mの範囲に維持するようペデスタル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の破損口からペデスタルへ落下しペデスタル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からペデスタルへの落下水はR P V内に残存するデブリにより加熱され、また、ペデスタル内の水はペデスタルに落下したデブリにより加熱されているため、ペデスタル内の水は飽和状態を維持する
- ・ R P Vからペデスタル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、ペデスタルへ落下する可能性は低い
ただし、ペデスタル注水手順は、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デスタル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) | | MAAP計算結果 (RPV破損時の値) を, デブリ保有熱が小さくなるように丸めた値 |
| デブリ比熱 (J/kgK) | | |
| デブリ溶融潜熱 (J/kg) | | |
| デブリ初期温度 (°C) | | |
| デブリ冷却後温度 (°C) | 500 | デブリ保有熱を小さめに評価する観点から, 高めに設定 |

第2表 ペDESTAL水の評価条件

| 項目 | 値 | 備考 |
|---------------------------------|-------|---------------------------------------|
| ペDESTAL水密度 (kg/m 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 | RPV破損時のドライウェル圧力の包絡値 (0.3MPa) における飽和温度 |
| ペDESTAL水半径 (m) | 2.936 | コリウムシールド厚さを15cm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、水位を2.25mから2.75mの範囲に維持するようペDESTAL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、デブリがごく少量ずつ継続して落下す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。

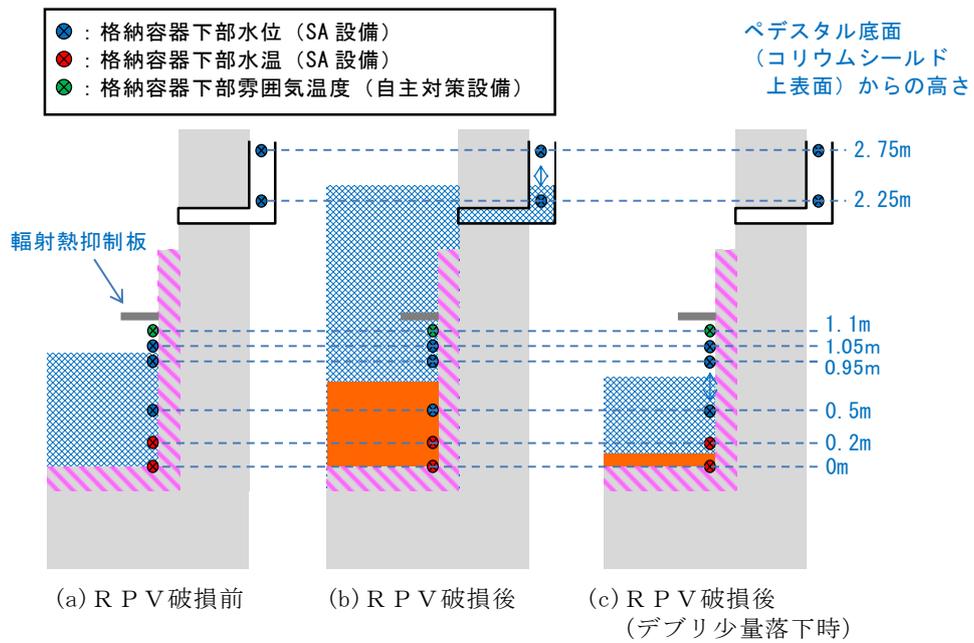
(c) R P V破損後（デブリの落下量が少量の場合）

ペDESTAL満水（水深約 2.8m, 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。

第 1 図に示す重大事故等対処設備の計装設備を用いた水位管理により、上記のとおりデブリの冠水状態は維持・監視可能であるが、水位を 0.5m から 1m の高さで維持している間にデブリの冠水状態が維持されていることが別のパラメータにより参考情報として得られるよう、1m より上部に格納容器下部雰囲気温度を設置し、格納容器下部雰囲気温度が格納容器圧力に対する飽和温度相当であることを確認する。万が一、デブリの冠水状態が維持されずに格納容器下部雰囲気温度が格納容器圧力に対する飽和温度相当を超えて上昇する場合には、ペDESTALへの注水を判断する。

なお、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構造物にデブリが付着した際にも、輻射熱の影響により格納容器下部雰囲気温度の指示が上昇することが考えられる。この格納容器下部雰囲気温度の指示上昇を抑制し、ペDESTAL床面に落下したデブリの冠水状態が維持されずに気相部に露出したデブリからの輻射熱による雰囲気温度の上昇のみを計測可能とするため、格納容器下部雰囲気温度は蒸気密度が高い水面付近（ペDESTAL底面から約 1.1m）に設置するとともに、検出部の上部に輻射熱抑制板を設置する。

ただし、構造物へのデブリの付着量や形状によっては、輻射熱の影響により格納容器下部雰囲気温度が機能喪失する可能性も考えられることから、格納容器下部雰囲気温度及び輻射熱抑制板は自主対策設備として設置する。



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

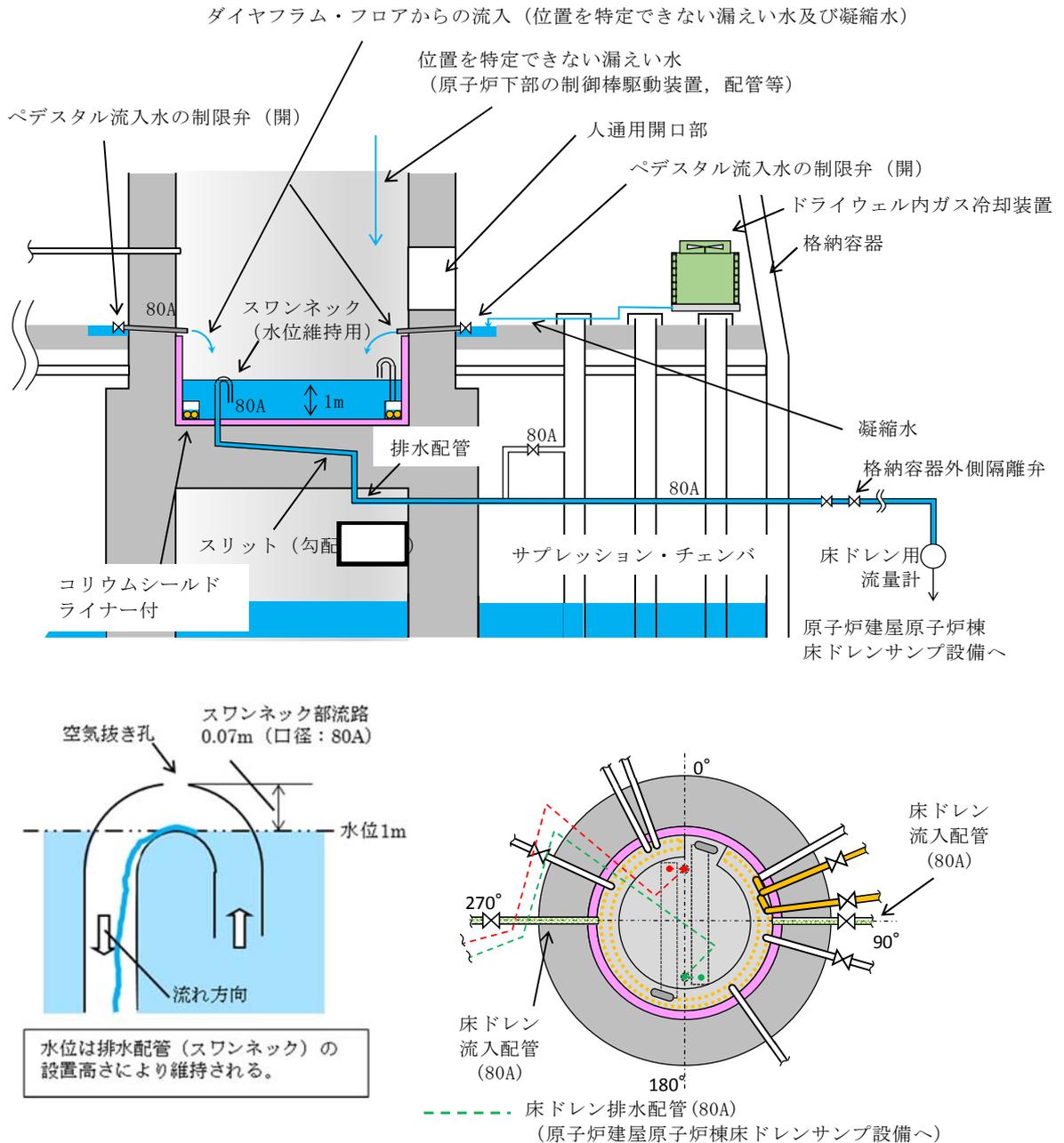
通常運転中，事故発生からR P V破損まで及びR P V破損後について，水位管理に必要な排水設備対策の方針を各々記載する。

(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

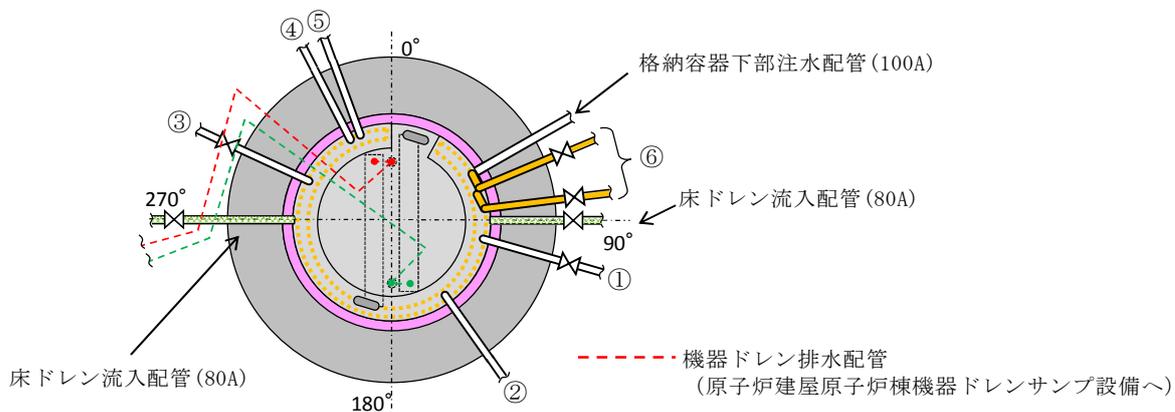
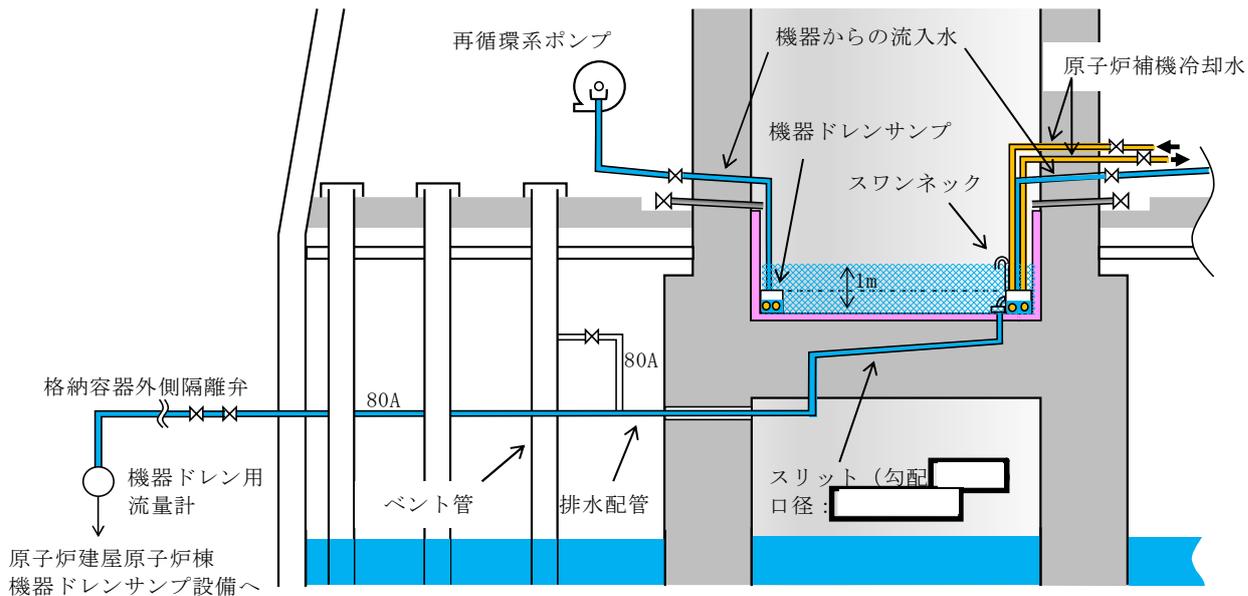
全長は [] を短くする観点から、スリットの勾配を [] に制限した設計とする。(第1図) なお、RPV破損までの排水性に対しては、スリットの勾配は影響しない。



第1図 ペDESTAL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

- ・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□）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）
- ・サンプには複数のドレン水が流入するため，排水性確保の観点からベント管を設置する設計とする。



| 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 (50A) ^(*2) | 常時排水有 |
| ② | 再循環系ポンプ(A) 点検時のドレン (50A) ^(*2) | 常時排水なし |
| ③ | 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 (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 | 再循環系ポンプ(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) | 常時通水 |

*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. ドライウエ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、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))
- ・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・チェンバ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、通常運転中から床ドレン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・チェンバ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、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 下の位置に設置する設計とする。
(第 3 図(a))

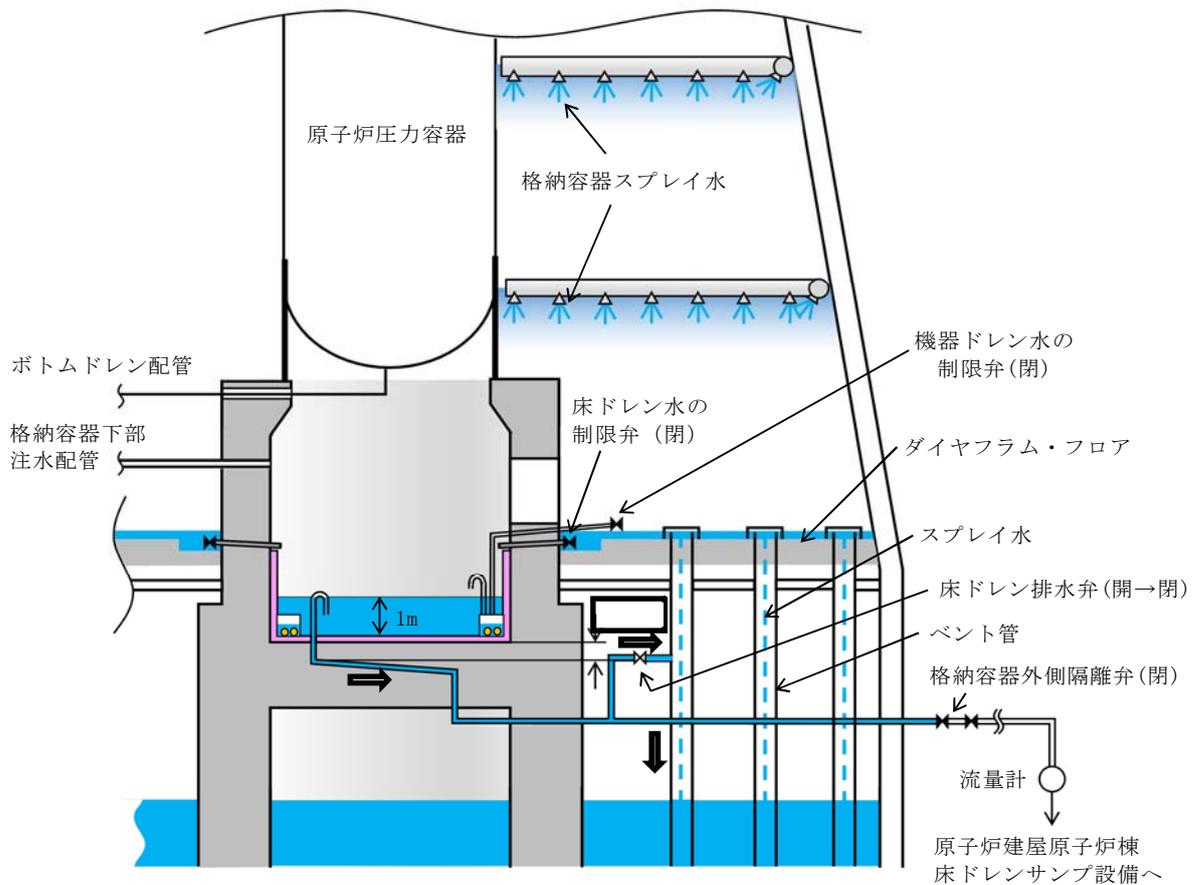
➤ 床ドレン排水配管のベント管への接続高さは、サンプへの流入水の

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（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 下）にスリットを設置する。（第3図(a)）

- ・床ドレン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ェ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床ドレン排水弁は、R P V破損前のペDESTAL注水により水位が上昇し1mを超える高さの水位計が水位を検出した後、ベント管を通じた排水により水位が低下し同水位計にて水位が検出されなくなった場合に、一定の時間遅れ（当該水位計高さから1m高さまでの排水に必要な時間を考慮）で自動閉止する設計とする。これにより、R P V破損後のペDESTAL水のサプレッション・チェンバへの流出を防止する。なお、地震によるスロッシング等により万一排水弁が意図せず閉止した場合には、運転員操作により早期に排水弁を開放する手順とする。

- ・ 機器ドレン排水配管及び排水弁による排水経路から、RPV破損後のペDESTAL水がサプレッション・チェンバへ流出することを防ぐため、床ドレン排水弁と同時に自動閉止する設計とする。また、機器ドレン排水配管のベント管への接続高さ及び接続位置（真空破壊弁が設置されていないベント管に設置する）は、床ドレン排水配管と同じ設計とする。（第3図(d)(e)）

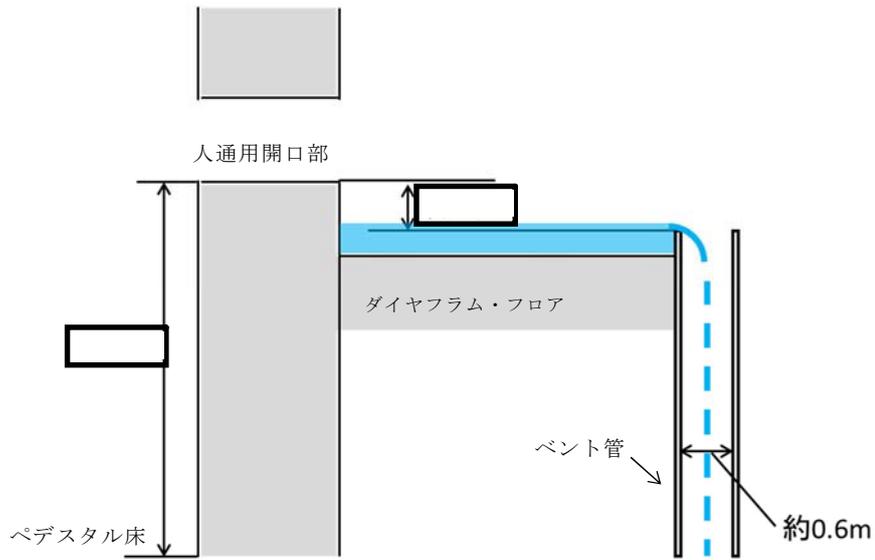


ペDESTALに流入した水はベント管（真空破壊弁が設置されていないもの）を介してサプレッション・チェンバへ排水される。ベント管は、格納容器スプレイ水等の流入も考えられるが、ベント管は個数が108本あり、約0.6mの直径を有していることから、ベント管の単位面積当たりに流れる格納容器スプレイ水等の流量は僅かであり、ペDESTALへの流入水の排水性に影響はないと考えられる。

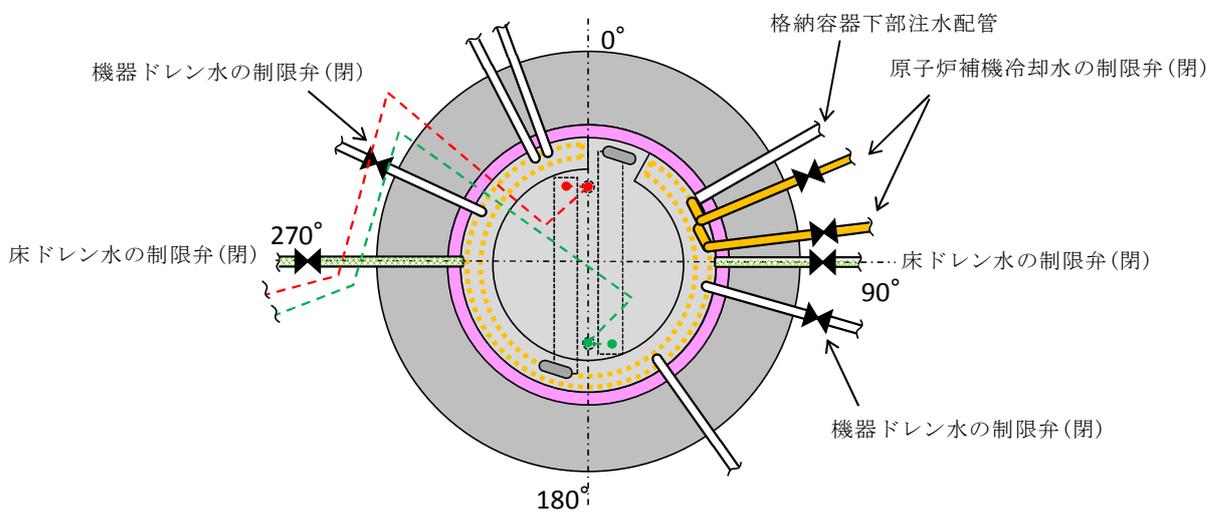
サプレッション・チェンバからの格納容器ベント用の配管下端は、ペDESTAL床のコンクリート表面より約0.62m下であり、排水配管のベント管への接続高さよりも高い位置に設置されている。ただし、格納容器ベント中のサプレッション・プール水の最高水位は、ペDESTAL床のコンクリート表面より約0.62m下であり、床ドレン排水配管のベント管への接続高さよりも低い位置となるため、格納容器ベント中でも床ドレン排水配管が水没することはない。

【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、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、その他の真空破壊弁はペ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。

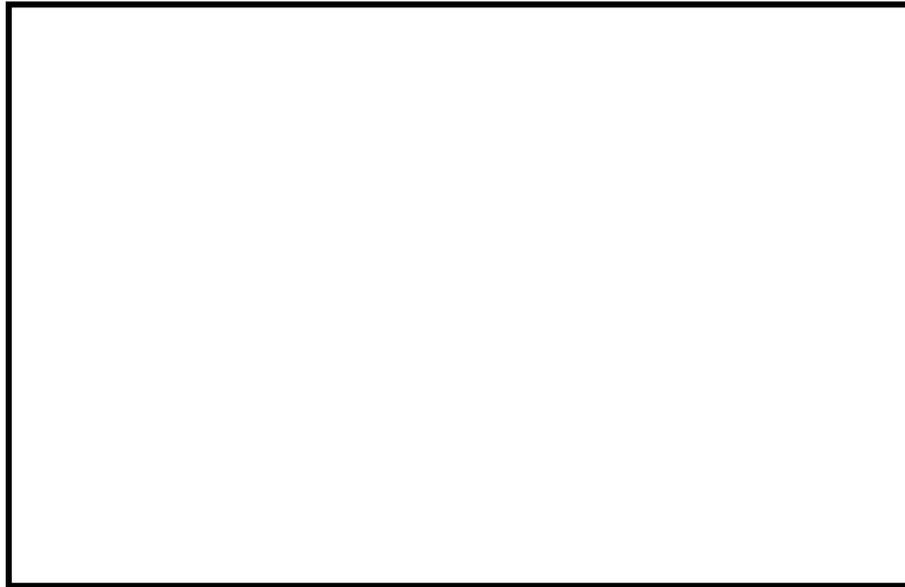
第3図 (a) ペDESTAL床ドレンサンプの水位1m維持対策概要



第3図 (b) ペDESTアル床ドレンサンプの水位 1m 維持対策概要

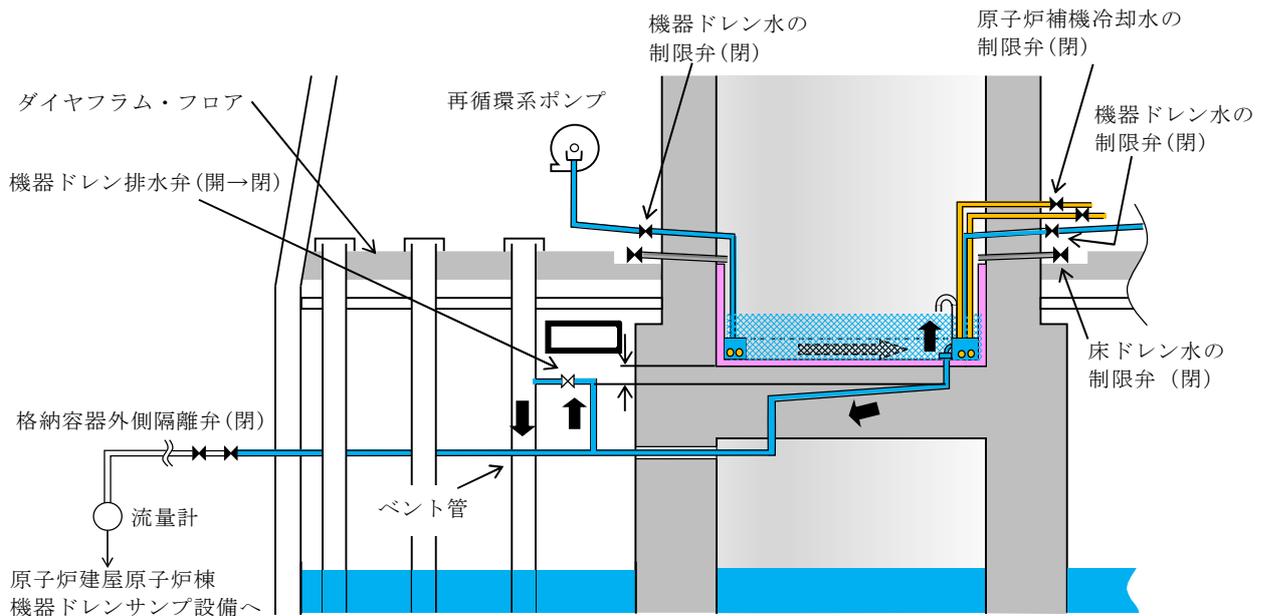


第3図 (c) ペDESTアル床ドレンサンプの水位 1m 維持対策概要



- 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)
- ベント管 ペDESTAL機器ドレンの排水経路となるもの(真空破壊弁なし 1か所)
- ベント管 真空破壊弁付き(11か所)
- ベント管 真空破壊弁なし(95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



第3図 (e) ペDESTAL床ドレンサンプの水位 1m 維持対策概要

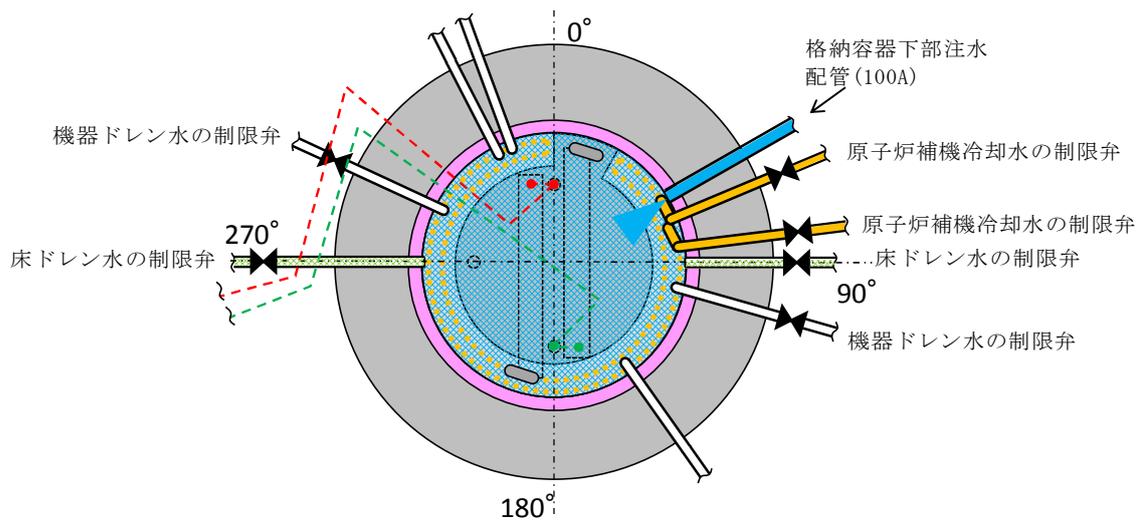
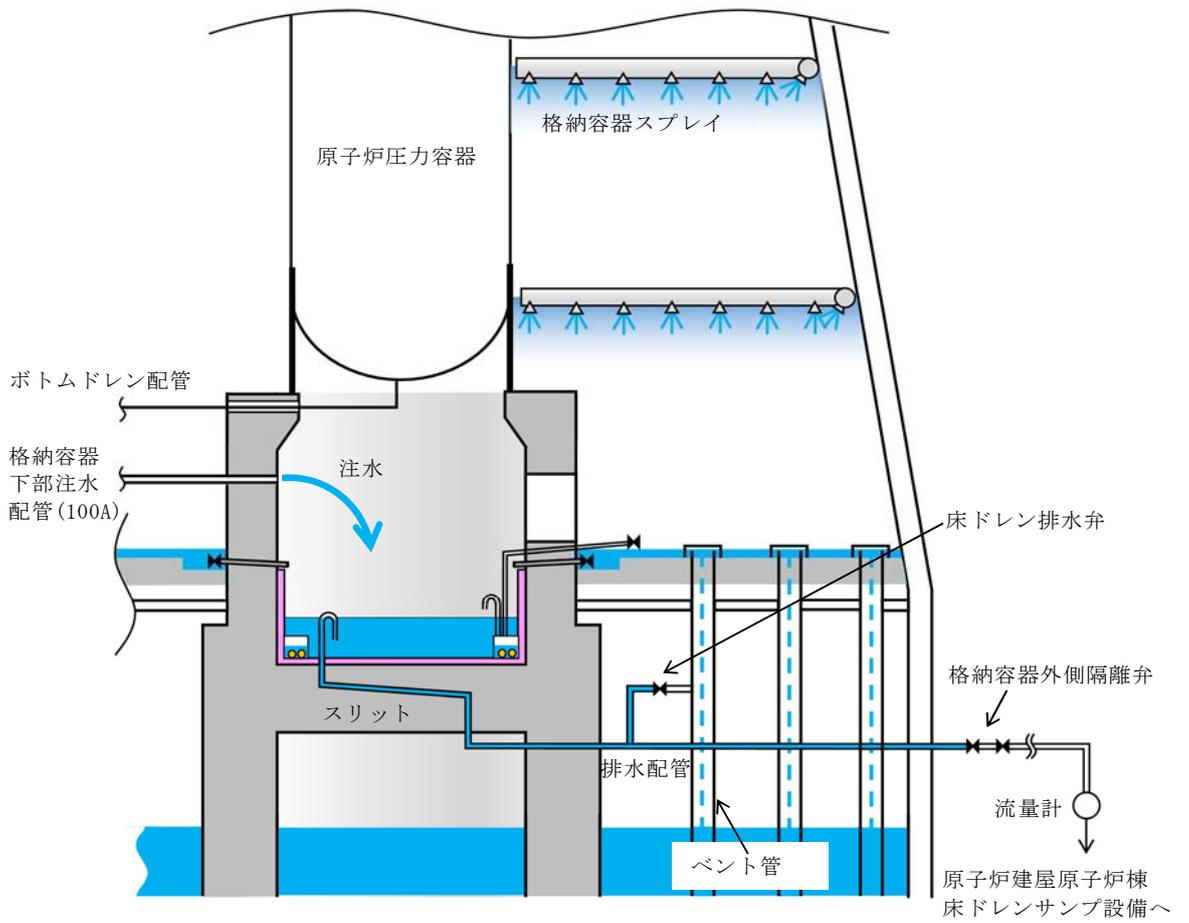
(3) R P V破損後

① R 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、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 ペデスタル床ドレンサンプ注水概要図

事故発生からR P V破損までのペDESTAL流入水の排水評価について

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

1. 評価において想定する事象

東海第二発電所のペDESTAL内構造（添付資料 3.2.3 本文第 1 図参照）を基に、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

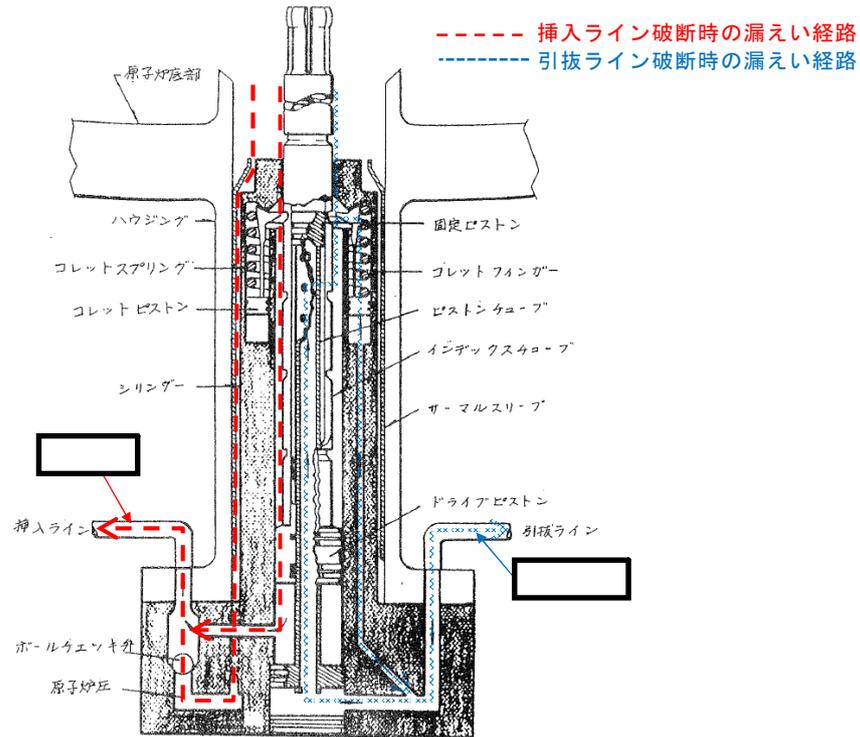
の発生エネルギーも小さいと考えられることから、排水評価の対象事象とする必要はないと考える。ただし、排水性能の保守性を確認する観点から参考として排水可能性を評価する（参考1）。

(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

- L O C A 事象発生時，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）信号によりペDESTAL 流入水の制限弁は事象発生後すぐ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 5 分間はペ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，ダイヤフラム・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)

- ・設備対策に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。
- ・機器ドレン排水配管及び排水弁を經由したサプレッション・チェンバへの排水が期待できるが、この排水経路からの排水は評価から除外する。
- ・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。
- ・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。圧力損失はペデス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 (出典 : 日本機械学会編, 機械工学便覧)

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

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 *5 (L'/D=□) | 個 | | | |
| 弁 *5 (L'/D=□) | 個 | | | |
| 管入口 *5 (λ · (L'/D)=□) | 個 | | | |
| 開放端 *5 (λ · (L'/D)=□) | 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。第1表は流量を (□)とした場合の例を記載。
- *5 CRANE 社「FLOW OF FLUIDS THROUGH VALVES, FITTINGS, AND PIPE Technical Paper No. 410, 1988」

上表を基に、圧力損失を計算した結果を以下に示す。

H1 =

[]

K = []

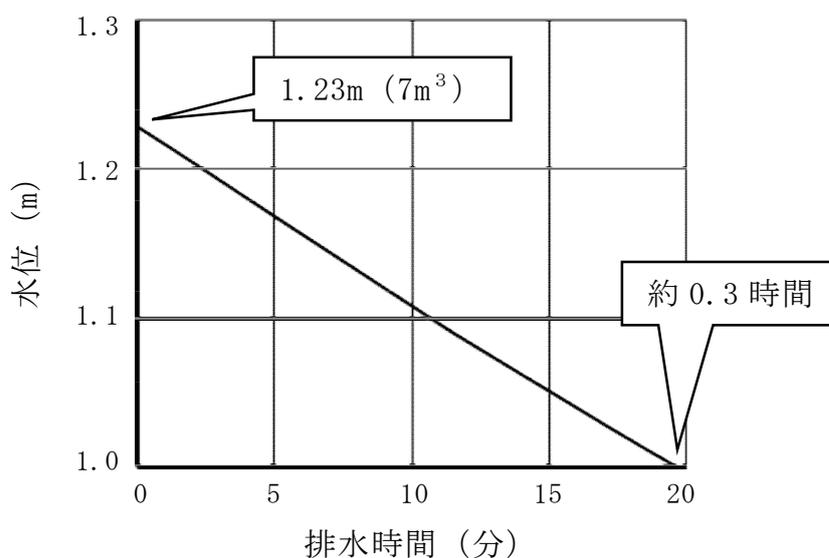
(流量 [] における配管圧損は、 $K \times Q^2 =$ [])

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破損までの時間が短い大破断LOCA（事象発生からRPV破損まで約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 |



第2図 ペデスタル水位 1.23m から水位 1m までの排水時間

4. 評価結果に対する裕度

- ・必要排水量

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

- ・排水時間

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

- ・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 時の圧力損失は合計 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。なお、スワンネック構造を流入口とする排水流路は、R P V破損前にペDESTAL内の水位 1m 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R P V破損前までであり、R P V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)

なお、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、スワンネックの異物混入防止及び損傷防止については、床ドレン排水用のスワンネックと同様の対策を行うことで、悪影響を防止する。

第3表 想定異物と影響評価 (1/3)

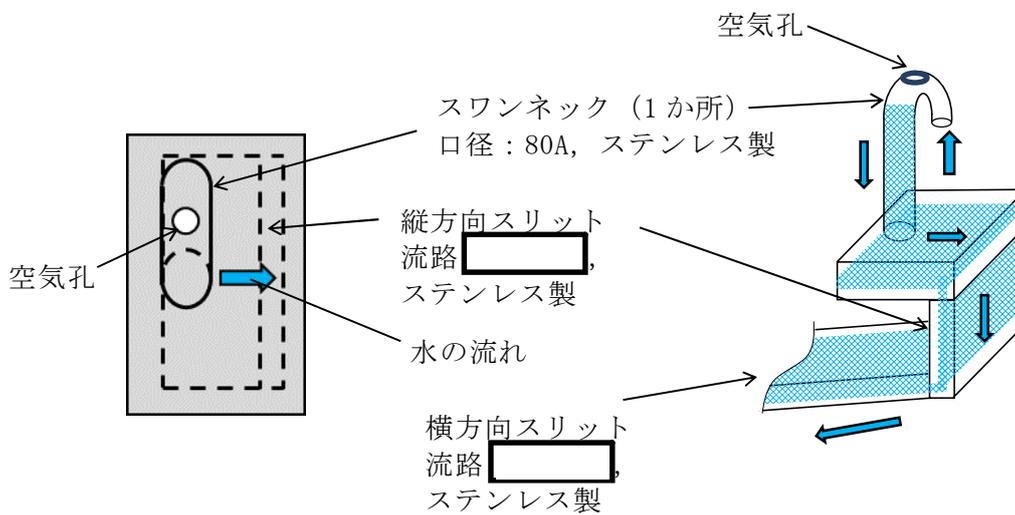
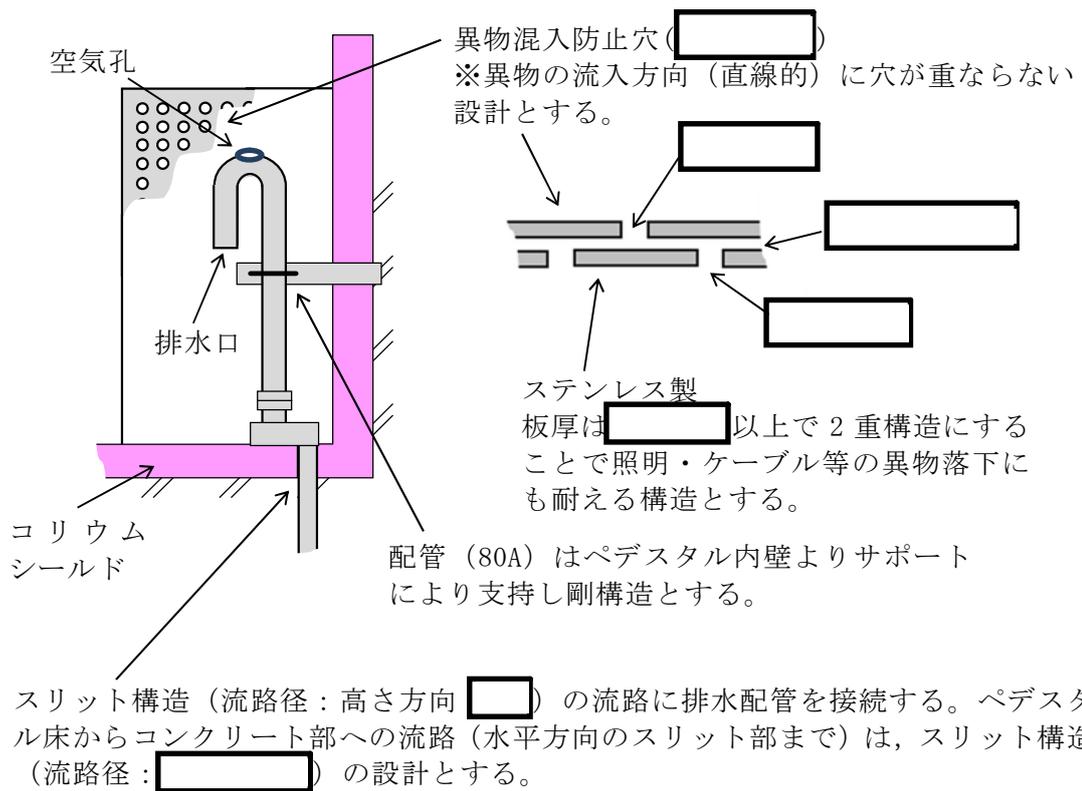
| 想定異物 | 異物による排水性への影響 |
|-----------------------|--|
| 核計装用及び照明用等のケーブル(管路含む) | <p>【発生源】 ペDESTAL内</p> <p>【スワンネックへの落下/床ドレンへの流入】 落下あり/流入あり</p> <p>ペDESTAL上部には、ケーブルが設置されており、落下の可能性はある。</p> <p>【影響評価】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・落下による影響 <p>スワンネックは鋼製でサポートに固定されているため破損・転倒するおそれはない。また、周囲に鋼製の柵を設置することから、スワンネックに直接接触することもない。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。</p> <p>(次頁へ続く)</p> |

第3表 想定異物と影響評価 (2/3)

| 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>・流入による影響</p> <p>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、機器ドレンサンプと床ドレンサンプ各々のスワンネックは対向して配置され、かつ前述のとおり各々の周囲を柵（第3図参照）にて囲うため、共通要因による排水性への影響はない。</p> |
| 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</p> <p>ペDESTAL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】</p> <p>床ドレン流入経路の弁を事故後早期に閉じ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</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> <p>・落下による影響</p> <p>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・転倒するおそれはない。また、同様に機器ドレンサンプへの影響もない。</p> <p>・流入による影響</p> <p>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> |

第3表 想定異物と影響評価 (3/3)

| 想定異物 | 異物による排水性への影響 |
|-----------|---|
| スラッジ (鉄錆) | <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</p> <p>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】</p> <p>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</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>【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</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 <p>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・転倒するおそれはない。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。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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・流入による影響 <p>照明は、床に沈降することから、排水性に影響はない。</p> |



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

しかし、排水性能の保守性を確認する観点から、ペデスタル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

- ・ペデスタル内におけるボトムドレン L O C A 時には、ペデスタル床ドレン サンプに上部から漏えい水が流入し、著しく水位が上昇するため、水位は人通用開口部まで達することが想定される。
- ・排水評価は人通用開口部下端から水位 1m までの水量(必要排水量)とする。
また、設備対策より配置されるコリウムシールド等の構造物については、評価上その体積を除外することで必要排水量を増やし、保守的な評価とする。
- ・排水配管はドライウェル気相部に接続され圧力差はないため、排水量を評価する上でドライウェル及びサプレッション・チェンバ内圧は考慮しない。
- ・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

デス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 (出典：日本機械学会編，機械工学便覧)

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

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 | | | | 22 | 22 | 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 *5 (L'/D=□) | 個 | | | | | | |
| 弁 *5 (L'/D=□) | 個 | | | | | | |
| 管入口 *5 (λ・(L'/D)=□) | 個 | | | | | | |
| 開放端 *5 (λ・(L'/D)=□) | 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 必要排水量約 59m³ を約 2.7 時間で排出した場合の流量 22m³/h とした。
- *5 CRANE 社「FLOW OF FLUIDS THROUGH VALVES, FITTINGS, AND PIPE Technical Paper No. 410, 1988」

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、 $K \times Q^2 =$)

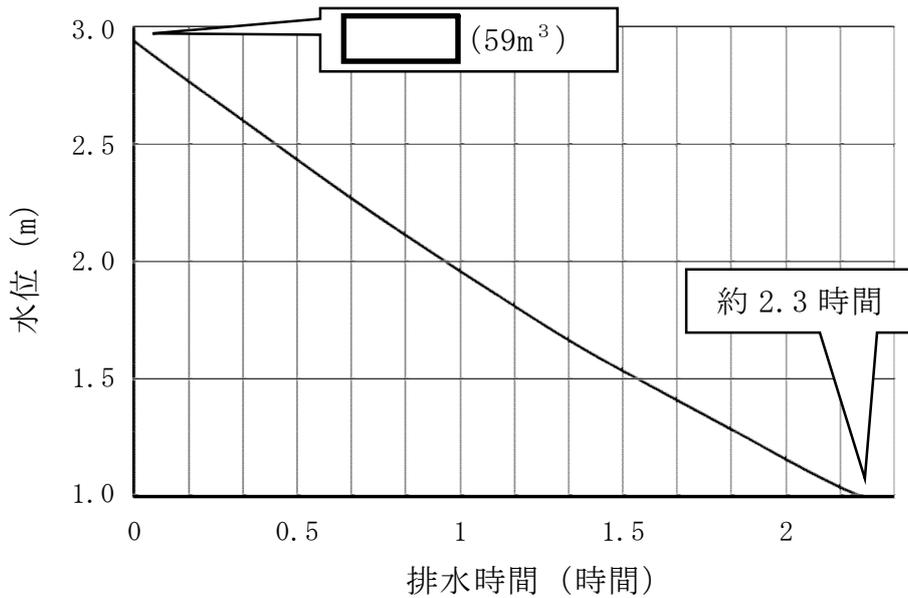
2. 評価結果

評価結果は第 2 表及び第 1 図のとおりであり、ペデスタル内のボトムドレン配管破断時に流入した水を、RPV からペデスタルへの流入停止 (事象発生後約 0.3 時間) から 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 6.172m, 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）を保守的に考慮して算出している。

・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 $22\text{m}^3/\text{h}$ の流量が必要である。これに対して、排水時の水位による圧力損失を考慮した平均排水流量は [] 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 [] である。

4. 機器ドレン排水配管及び排水弁の経路を併用した評価

機器ドレンサンプには排水性を確保するために必要な空気ベント用のスワンネックを有し、通常運転中の機器ドレンと床ドレンの混入防止のため、床ドレンサンプの排水入口水位 1m よりも 0.2m 高い位置に設置する設計としている。床ドレンサンプの水位が 1.2m よりも高い水位までは、床ドレンの排水経路に加え機器ドレンの排水経路が期待できることから、実際の排水時間に対して更に裕度を有している。以下に機器ドレン排水経路を併用した評価を示す。

・機器ドレン排水経路の圧力損失

機器ドレンの排水経路は床ドレンの排水経路と比較してほぼ同じ長さの経路であるが、機器ドレンサンプ内を経由する経路となることが相違している。しかし、排水評価に当たっては、機器ドレンサンプの圧力損失は機器ドレン排水配管に対してその流路面積が十分大きいいため考慮せず、機器ドレンサンプ出入口部の形状による圧力損失のみ考慮し、他は床ドレン排水経路の圧力損失と同等として評価を行う（第3表）。

第3表 圧力損失計算要素

| | 単位 | スワンネック入口～出口(*1) 機器ドレンサンプ入口～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 | 22 | 22 | 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 *5 (L'/D=□) | 個 | | | |
| 弁 *5 (L'/D=□) | 個 | | | |
| 管入口 *5 (λ・(L'/D)=□) | 個 | | | |
| 開放端 *5 (λ・(L'/D)=□) | 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。
機器ドレンサンプ入口と出口について係数を考慮。
- *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 必要排水量約 59m³を約 2.7 時間で排出した場合の流量 22m³/h とした。
- *5 CRANE 社「FLOW OF FLUIDS THROUGH VALVES, FITTINGS, AND PIPE Technical Paper No. 410, 1988」

上表を基に、圧力損失を計算した結果を以下に示す。

H1 =

[Redacted]

K = [Redacted]

(流量 [Redacted] における配管圧損は、 $K \times Q^2 =$ [Redacted])

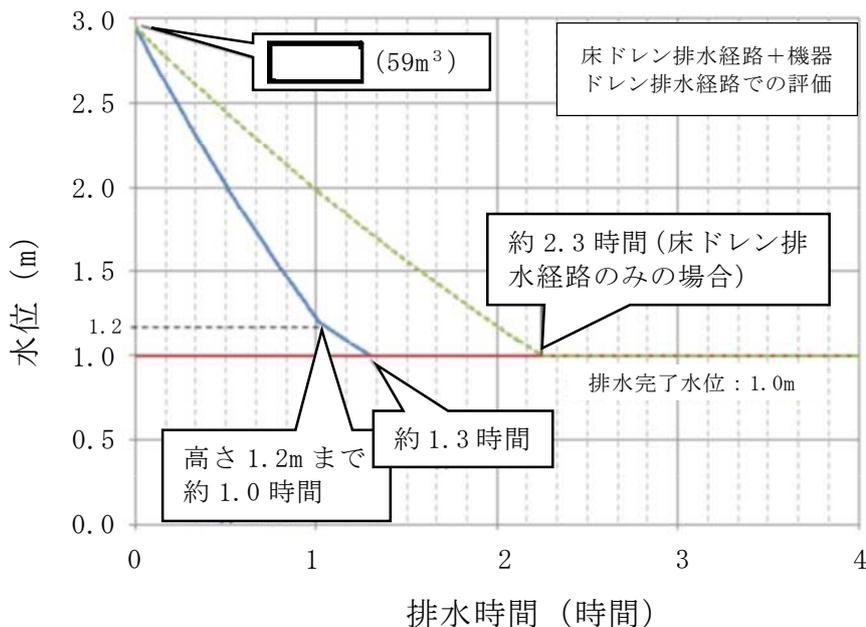
・床ドレン排水経路と機器ドレン排水経路を併用した排水評価結果

評価結果は第4表及び第2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4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 1.3 時間 |

※ 必要排水範囲の水量（内径 6.172m、高さ [Redacted] の水の体積）

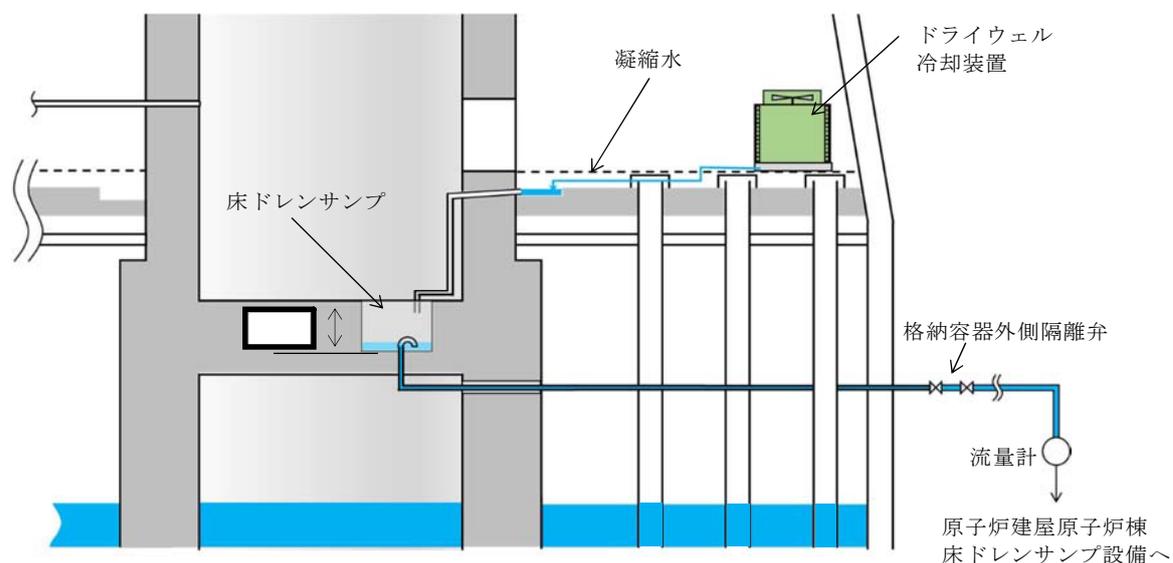


第2図 ペDESTAL水位満水から水位1mまでの排水時間

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 [] の深さ及び水面の表面積が [] 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 [] 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への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格納容器下部水位（ペDESTAL床面高さ+1.05m 検知用）

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

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

なお、水位1.05m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（第2表）

②格納容器下部水温（ペDESTAL床面高さ0m 検知用）

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で、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、R P V破損を判断する。

③格納容器下部水温(ペDESTAL床面高さ+0.2m 検知用)

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、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、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 0.2mの場合)

④格納容器下部水位(ペDESTAL床面高さ+2.25m及び2.75m 満水管理用)

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、2.25m及び2.75mの各高さに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。

(4) R P V破損後の水位管理（デブリ堆積高さ<0.2mの場合）

⑤格納容器下部水位（ペDESTAL床面高さ+0.50m検知用）

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格納容器下部水位（ペDESTAL床面高さ+0.95m検知用）

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0.95m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0.95m到達を検知した場合に注水停止を判断する。

⑦格納容器下部雰囲気温度

自主対策設備としてペ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、デブリが冠水されていることを確認する。

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。

各計器の検出部の仕様等を第3表に、測定原理を第2図及び第3図にそれぞれ示す。また、各計器の構造図及び設置概略図を第4図に示す。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

オ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℃－約 1 秒間、0.465MPa [gage]であり、これを包絡するペDESTAL内環境条件 200℃（ピーク温度 215℃－1 分間）、0.62MPa [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、第5図に示すとおり、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に、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。

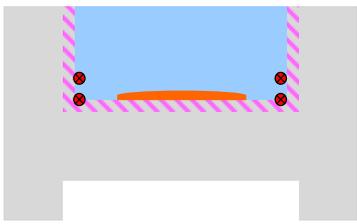
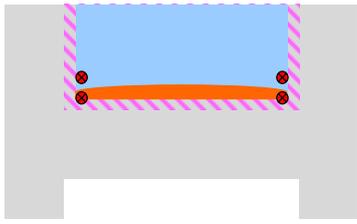
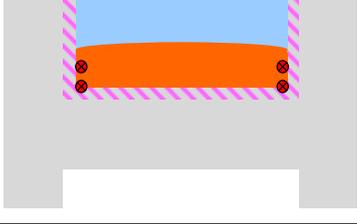
なお、ペDESTAL内の検出器・MIケーブル、保護カバーは無機物で構成されており、放射線による影響はない。

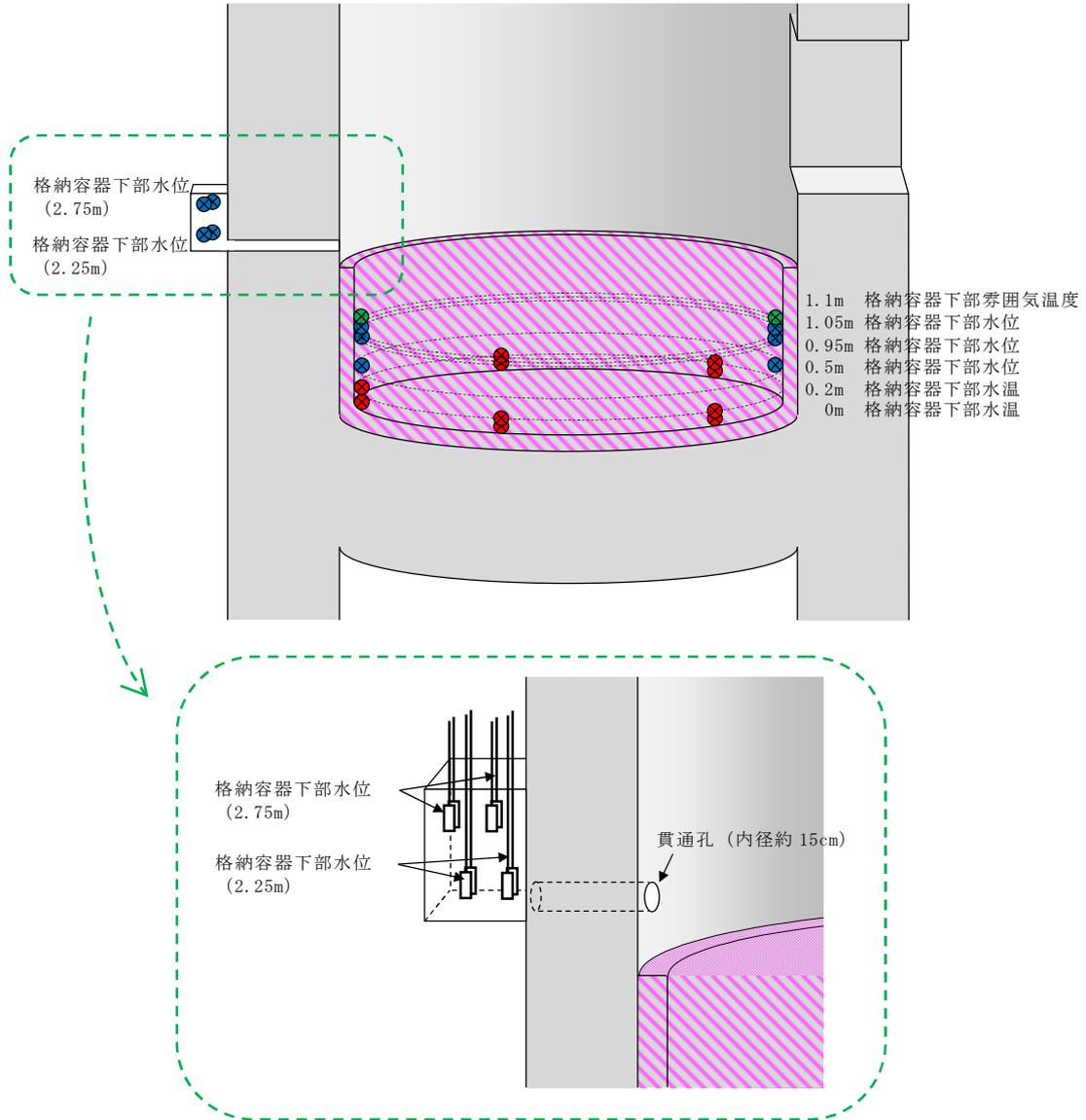
第1表 ペデスタル内計器の概要

| | 設置高さ*1 | 設置数 | 計器種別 |
|--------------|--------|--------|---------------|
| 格納容器下部 水温 | 0m | 各高さに5個 | 測温抵抗体式 温度計 |
| | 0.2m | | |
| 格納容器下部 水位 | 0.5m | 各高さに2個 | 電極式 水位計 |
| | 0.95m | | |
| | 1.05m | | |
| | 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 R P V破損及びデブリ落下・堆積検知の概念

| デブリの堆積状態 | 格納容器下部水温 | | 判断 |
|---|----------|--------|---------------------|
| | 0m位置 | 0.2m位置 | |
|  | 上昇 | 上昇 | R P V破損, デブリ少量落下 |
|  | 上昇/喪失 | 上昇 | R P V破損, デブリ少量落下 |
|  | 上昇/喪失 | 上昇/喪失 | R P V破損, デブリ多量落下 |

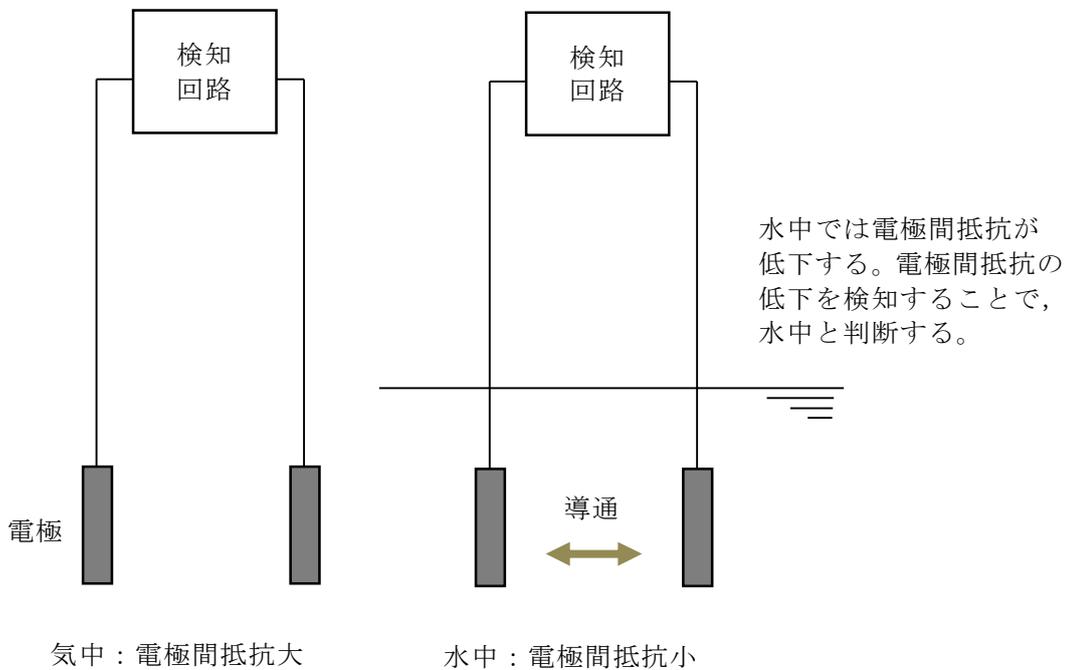


第 1 図 ペDESTAL内の計器設置図

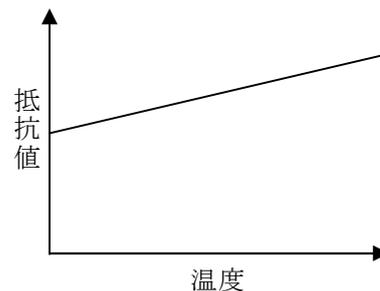
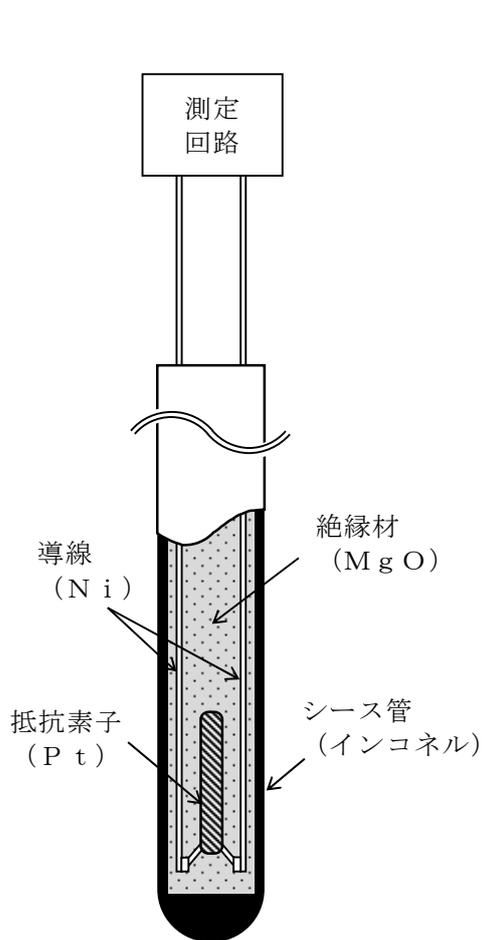
第3表 検出部の仕様等

| 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基に温度測定を行う。

高温のデブリが接触すると、温度指示値は急上昇しオーバースケールとなる。

また、以下の過程の中で導線間の絶縁性が失われ短絡又は導通すると、抵抗値が低下し温度指示値がダウンスケールとなる。

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

测温抵抗体構成材料の融点

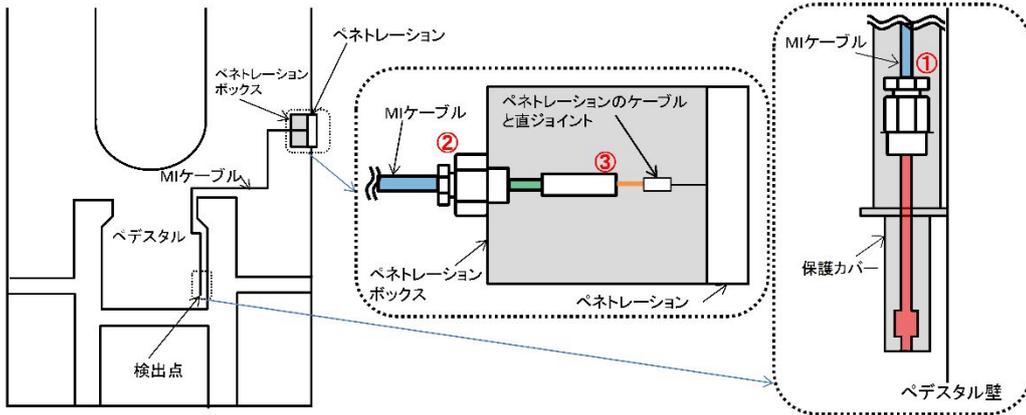
| | 材質 | 融点 |
|------|----------------|-------------------|
| シース管 | インコネル (NCF600) | 1,370℃～ 1,425℃ |
| 導線 | Ni | 1,455℃ |
| 抵抗素子 | Pt | 1,768℃ |
| 絶縁材 | MgO* | 約 2,800℃ |

※ デブリ中のZr等により還元されると、融点約650℃、沸点約1,100℃のMgとなり、溶融又は蒸発する。

第3図 测温抵抗体式温度計の動作原理



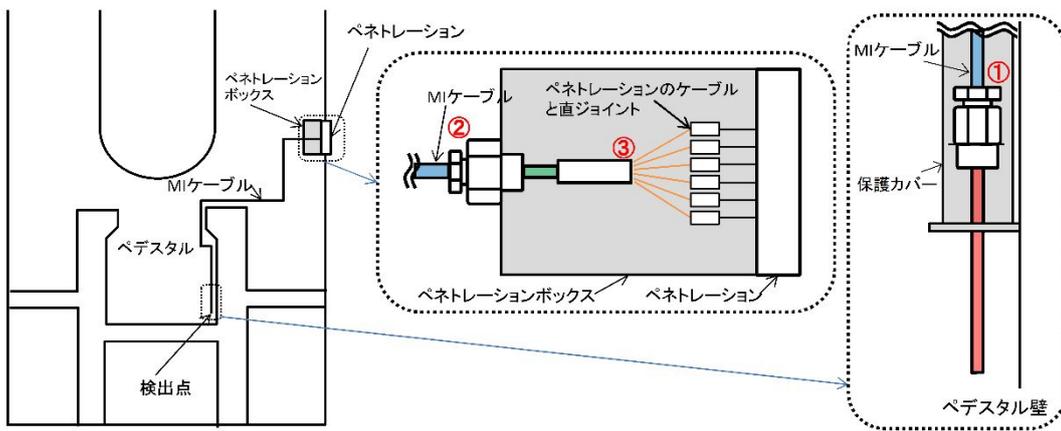
格納容器下部水位（電極式）構造図



格納容器下部水位の設置概略図

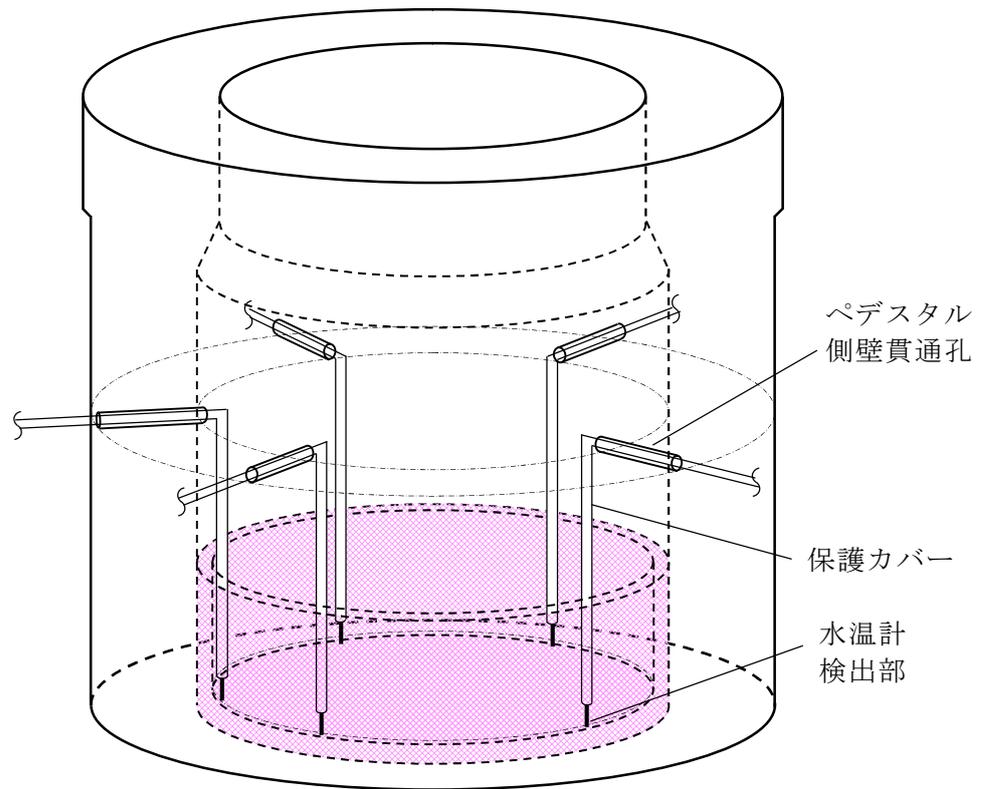


格納容器下部水温（測温抵抗体式）構造図

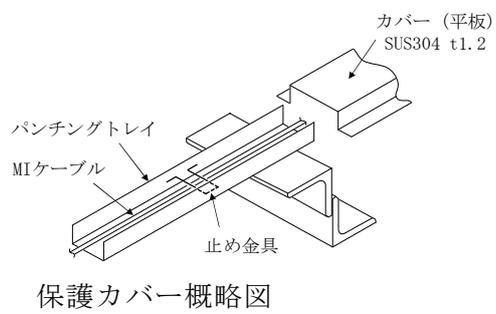


格納容器下部水温の設置概略図

第4図 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

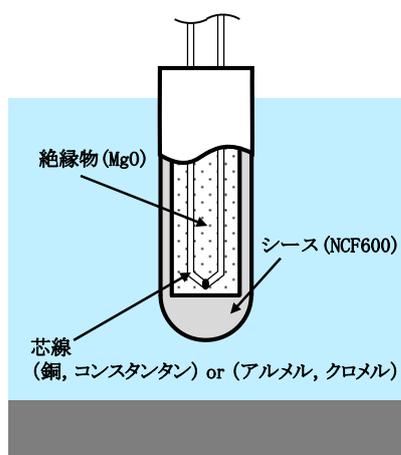


第5図 ペDESTアル内検出器及びケーブル（MIケーブル）設置概略図

格納容器下部水温の測定原理とデブリ検知性について

ペDESTAL内に設置する格納容器下部水温によるデブリ検知性について、熱電対式とした場合と測温抵抗体式とした場合で比較し検討を行った。

熱電対の構造図、仕様、構成材料の融点を以下に示す。



熱電対構造図

熱電対仕様

| No. | 項目 | 仕様 | |
|-----|------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| | | Tタイプ | Kタイプ |
| 1 | 計測範囲 | -40～350℃ | -40～1200℃ |
| 2 | 誤差 | ±1.0℃ (-40～133℃) 0.75% (133～350℃) | ±2.5℃ (-40～333℃) 0.75% (333～1200℃) |

熱電対構成材料の融点

| No. | 材質 | 融点 | タイプ |
|-----|---------|------------|------|
| 1 | NCF600 | 1370～1425℃ | — |
| 2 | 銅 | 1085℃ | Tタイプ |
| 3 | コンスタンタン | 1225～1330℃ | Tタイプ |
| 4 | アルメル | 1315～1390℃ | Kタイプ |
| 5 | クロメル | 1420℃ | Kタイプ |
| 6 | MgO | 約2800℃ | — |

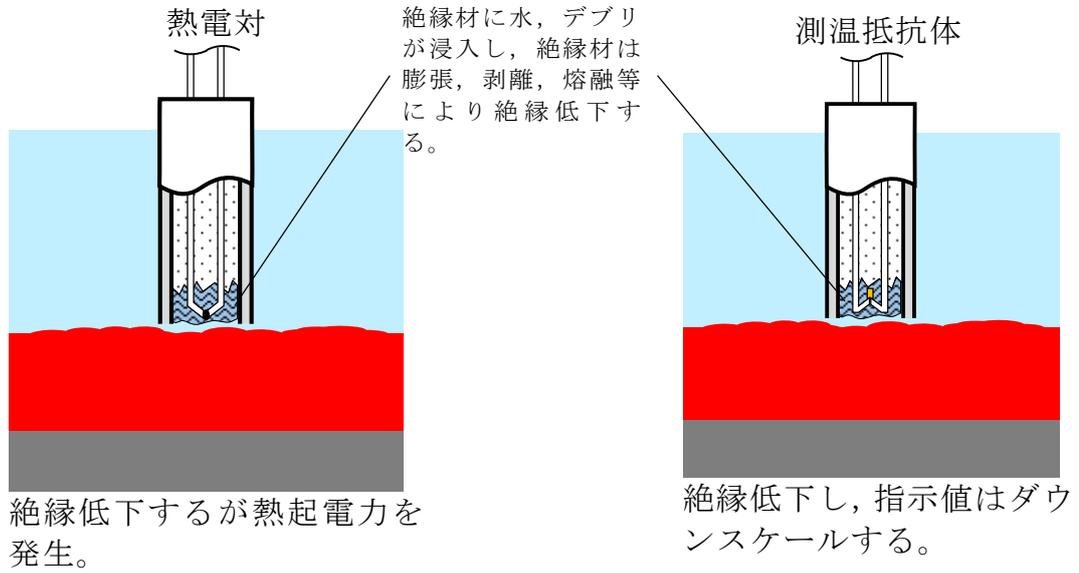
(1) 耐環境性

熱電対式及び測温抵抗体式の検出器は耐熱性の高い無機物により構成されており、いずれも重大事故等時の格納容器雰囲気下において、十分な耐性を有する。

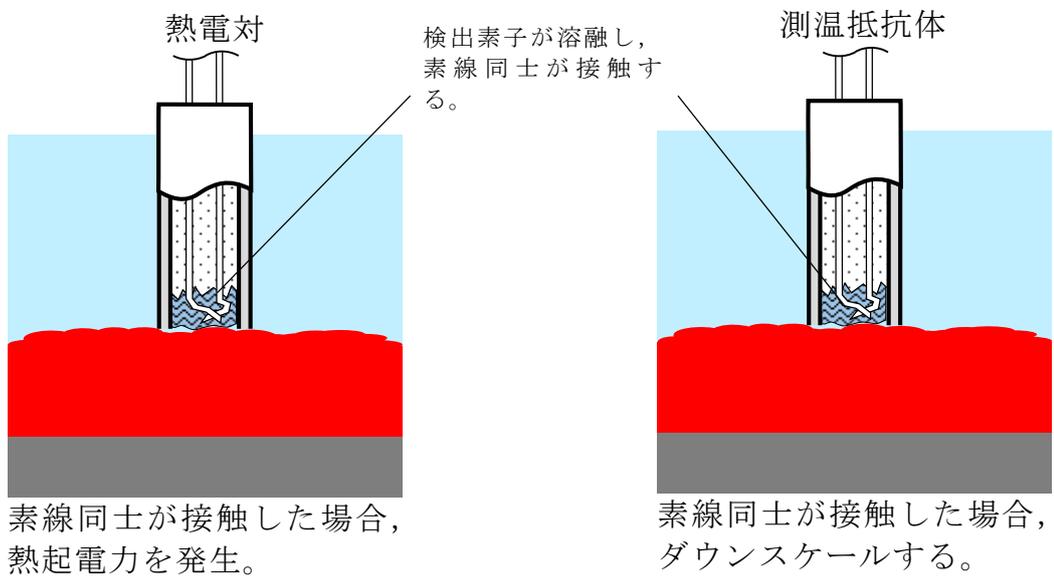
(2) デブリと水温計の接触により発生する現象

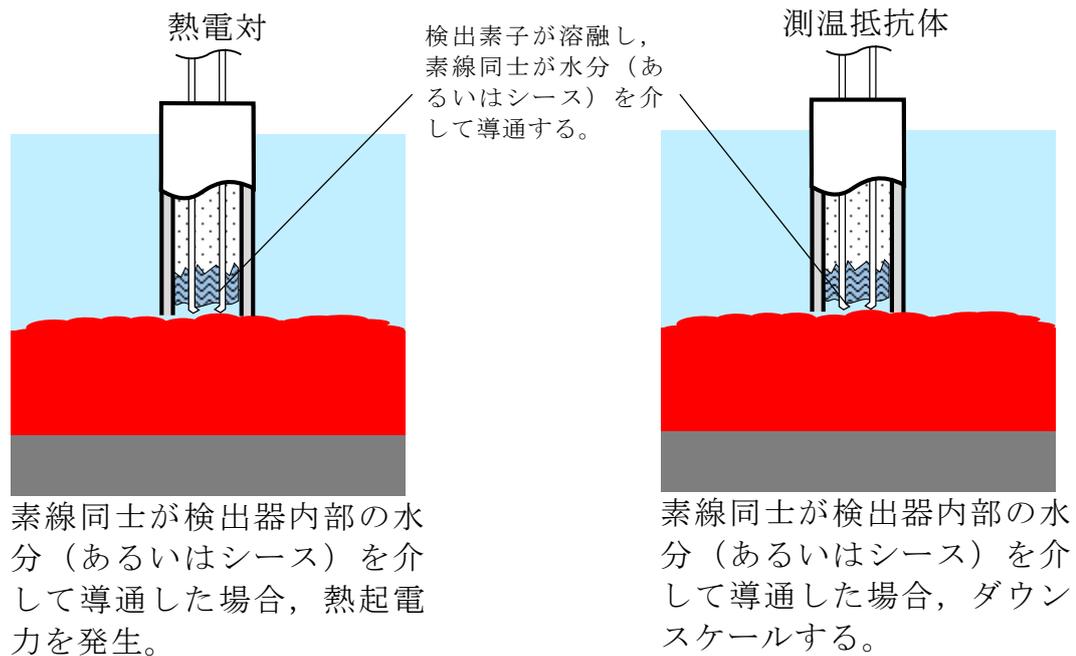
熱電対式及び測温抵抗体式の検出器がデブリと接触した場合に発生する現象を①～②に示す。

- ① デブリが検出器外郭（シース）に接触，シースは熔融し，絶縁材が露出する。



- ② デブリが検出素子に接触し，熔融する。





以上より，検出器とデブリが接触すると，測温抵抗体式の場合はダウンスケール，熱電対式の場合は指示値の急変及び発生する熱起電力による不確実な指示値を示すこととなる。

(3) 測定回路が故障した際の可搬型計測による測定

測定回路は熱電対式の場合は電圧値を，測温抵抗体式は抵抗値を測定することにより温度測定を行っている。可搬型計測器は電圧測定及び抵抗値測定が可能であり，測定回路故障時には可搬型計測器を水温計ケーブル端に接続することで熱電対式，測温抵抗体式のいずれの場合においても温度測定が可能である。

(4) まとめ

熱電対式，測温抵抗体式のいずれの検出器とした場合も，耐環境性を有し，デブリと接触した場合には特徴的な指示傾向を示し，測定回路が故障した際には可搬型計測器による測定が可能である。ただし，熱電対式の場

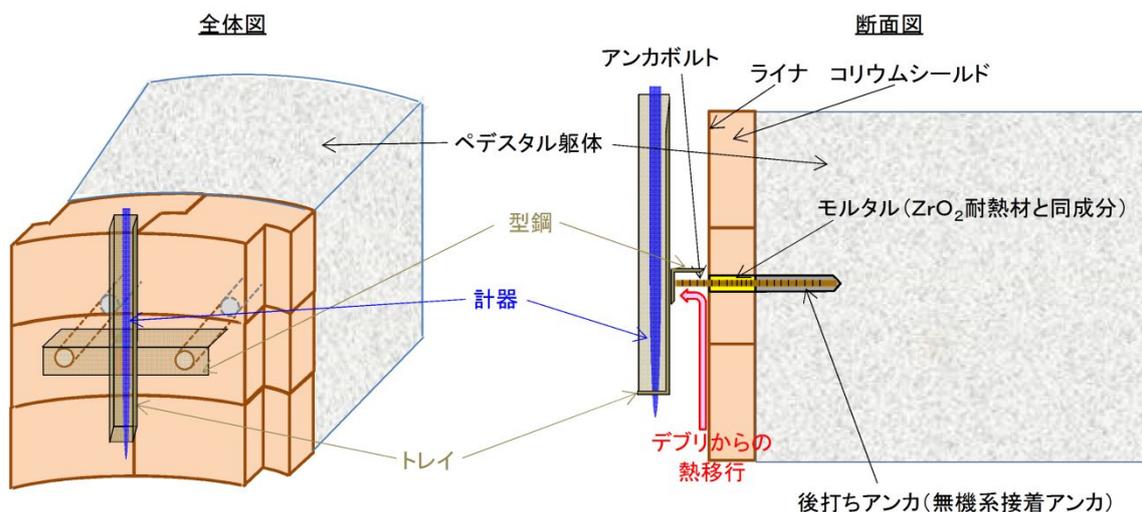
合には、指示値の急変及び不確実な指示値によりデブリとの接触を判断することとなるが、デブリとの接触後においても不確実な指示値が出力されることから、仮にデブリ接触前に近い指示値となった場合は、デブリとの接触の判断に迷う可能性がある。一方で、測温抵抗体式の場合にはオーバースケールやダウンスケールの有無で判断が可能であり、デブリとの接触の判断に迷う可能性はない。したがって、採用に当たっては上記の観点から測温抵抗体式が望ましいと考える。

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

原子炉圧力容器破損時の溶融炉心の冠水評価について

1. はじめに

原子炉圧力容器（以下「R P V」という。）破損により落下した溶融炉心（以下「デブリ」という。）は、事前に水張りされていたペDESTAL（ドライウェル部）（以下「ペDESTAL」という。）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。

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。ポロシティを考慮したデブリ堆積高さ H_{debri} は式(1)で評価する。

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

V_m : 溶融物体積[約 36m³]

V_s : ペDESTAL内構造物体積[約 4m³] (別添 1 参照)

Φ_{ent} : R i c o u - S p a l d i n g 相関式に基づく粒子化割合[0.173]
(別添 2 参照)

P : ポロシティ[0.5] 既往実験の知見から保守的に設定 (別添 3 参照)

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

また、粒子化したデブリの隙間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[約 29.92m²]

式(1)からデブリ堆積高さ H_{debbri} は約 1.71m 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。

解析コードMAAP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/m² (圧力依存性あり) と設定) から、RPV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 0.34m、LOCA事象の場合は約 0.44m であり、デブリの冠水は維持される。なお、RPV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、LOCA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。

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4参照）

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 0.56m 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 0.32m、LOCA 事象の場合は約 0.41m であり、デブリの冠水が維持されることを確認した。

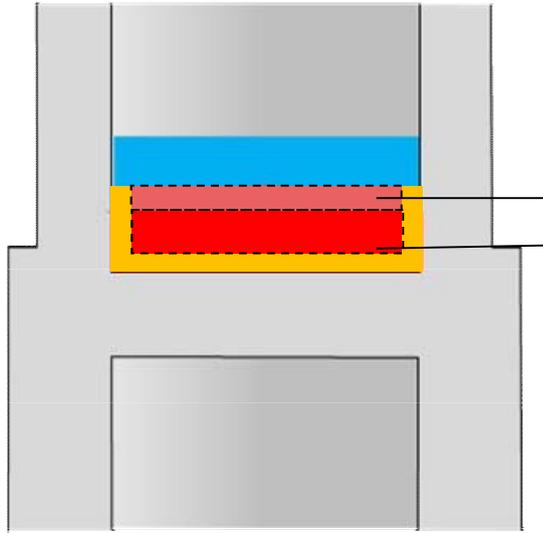
6. 機器ドレンサンプが溶融しない場合の不確かさ評価（別添 5 参照）

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。

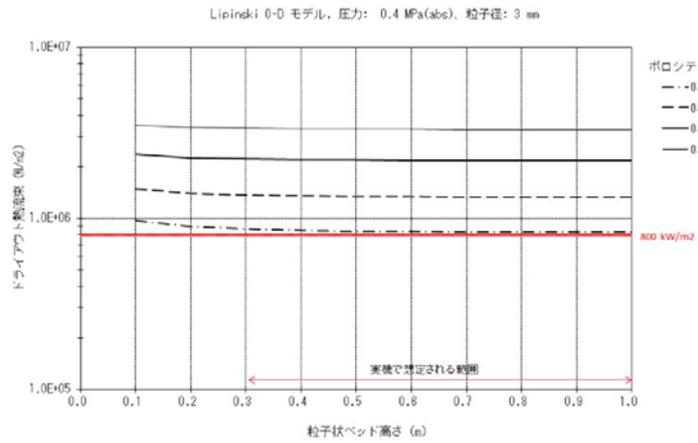
新設する機器ドレンサンプの体積を既設と同等として評価した結果、水プール水位は約 0.58m となった。水位低下量は、過渡事象の場合は約 0.34m、L O C A事象の場合は約 0.44m であり、デブリの冠水が維持されることを確認した。

7. まとめ

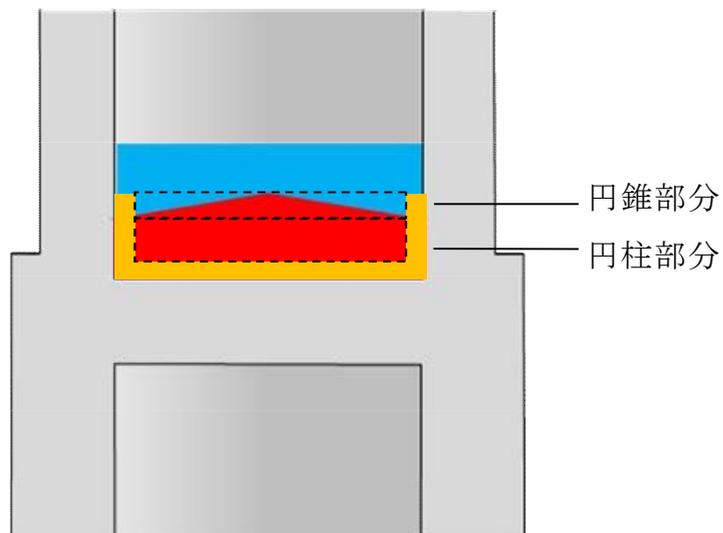
以上の評価から、過渡事象及びL O C A事象いずれにおいても、R P V破損から7分の間において、デブリの冠水状態が維持されることを確認した。



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

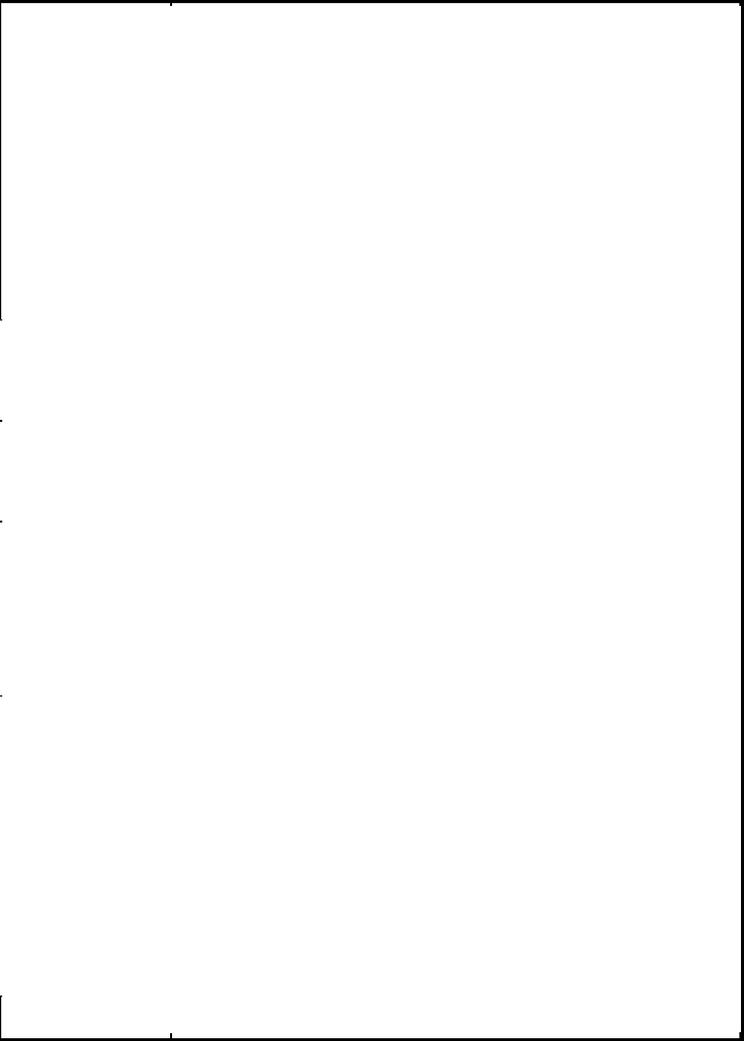


第3図 デブリ堆積形状 (不確かさ考慮)

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 4m^3 として考慮した。

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) | |  |
| 制御棒駆動機構ハウジング (9本) ※1 | | |
| 制御棒駆動機構 (9本) ※1 | | |
| 制御棒駆動機構ハウジングサポート (ターンテーブルと同様に，一辺1mの正方形の範囲が溶融すると想定) | | |
| その他 (ケーブル，サポート，配管等の構造物) | | |
| 合計 | | |

※1 MAAP解析におけるRPVの最大の破損口径を包絡する本数を設定。

ただし，制御棒駆動機構ハウジングは，ペDESTAL内でサポートにより支持することで逸出を防止する設計となっている（添付資料 3.2.16 参照）。

第2表 デブリとして考慮したペデスタル内構造物（新設）

| 構造物 | 体積[m ³] |
|----------------------|---------------------|
| 格納容器下部水位計 | |
| 格納容器下部水温計 | |
| 格納容器下部雰囲気温度計 | |
| 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 | |

※2 第1表に記載の既設分との合計値は であるが、新設分の設計の進捗による物量増加等を考慮し、本評価上は合計 4m³ とする。

粒子化割合の算出

粒子化割合は以下の R i c o u - S p a l d i n g 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^{※1} [m]

ρ_{dj} : デブリジェット密度 [kg/m³]

ρ_w : 水密度 [kg/m³]

※1 解析コードMAAPによる破損口径の拡大（アブレーション）を考慮

評価条件は以下のとおり。

- ・プール水深：1m（ペDESTAL水位）
- ・デブリジェット密度：（MAAP計算結果^{※2}）
- ・初期デブリジェット径：0.15m（CRD案内管径）

※2 粒子化割合を大きく見積もる観点から、デブリ密度が小さい過渡事象シーケンスの値を使用

以上により評価した結果、粒子化割合は以下のとおり。

- ・エントレインメント係数の場合：約 17.3%
（MAAP推奨範囲の最確値^{※3}）
- ・エントレインメント係数の場合：約 22.7%
（MAAP推奨範囲の最大値^{※3}）

※3 MAAPコードにおけるエントレインメント係数は、FARO実験のベンチマーク解析の不確かさの範囲から、からである。また、不確かさの範囲のうち、およそ中間となるを推奨範囲の最確値としており、ALPHA-MJB実験の検証解析において、最確値を用いることで実験結果とよく一致する結果が得られている。

ポロシティの設定について

ポロシティは、ドライアウト熱流束に係る実験^[1]、粒子状デブリの冷却挙動に係る実験^[2]及びPUL i MS実験を踏まえ、平均的な値として0.35を最確条件に設定している。

粒子状デブリの冷却挙動に係る実験では、PREMI X実験^[3]で得られた粒子状デブリに誘導加熱用の鋼球を加えた、第1表に示すデブリ組成での実験を実施しており、ポロシティとして0.38を測定している。ドライアウト熱流束に係る実験では、第2表に示すとおり、スチールで模擬された粒子状デブリ組成を考慮した実験を実施しており、ポロシティは0.327から0.368に設定している。また、PUL i MS実験の知見よりポロシティは0.29から0.37が得られている。これらの実験より、0.3から0.4程度のポロシティが観測されていることから、平均的なポロシティの値として0.35を最確条件として設定する。

これに対して、本評価においては、立方格子の堆積形状（第1図）を踏まえたポロシティの範囲として、0.26（面心立方格子）から0.48（単純立方格子）を包絡する値として0.5を想定する。

第1表 デブリ組成

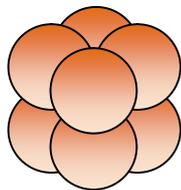
| Particles | Wt. (g) | Wt. (%) |
|---------------------------------------|----------|---------|
| 6mm steel spheres | 11,371.6 | 43.74 |
| 3mm steel spheres | 6442.5 | 24.78 |
| 5-10mm Al ₂ O ₃ | 5410.9 | 20.81 |
| 2-5mm Al ₂ O ₃ | 2775.0 | 10.67 |
| Total | 26,000.0 | 100.00 |

| | |
|------------------------|-----------------------------------|
| Bed weight | 26.000kg |
| Bed volume | $8.47 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ |
| Avg. bed density | 3069kg/m ³ |
| Bed porosity(measured) | 0.38 |

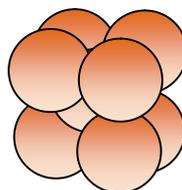
第2表 試験における粒子組成

| | 1mm | 2mm | 3mm | d_{eq} (mm) [※] | ϵ |
|---|----------|----------|-----|----------------------------|------------|
| A | 66.7 (%) | 33.3 (%) | — | 1.2 | 0.364 |
| B | 33.3 | 66.7 | — | 1.5 | 0.360 |
| C | 11.1 | 88.9 | — | 1.8 | 0.368 |
| D | 50 | — | 50 | 1.5 | 0.337 |
| E | 25 | — | 75 | 2.0 | 0.327 |
| F | 10 | — | 90 | 2.5 | 0.357 |

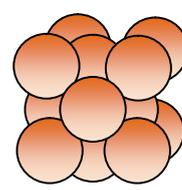
※ $d_{eq} = (\sum m_i/d_i)^{-1}$



単純立方格子 : 0.48



体心立方格子 : 0.32



面心立方格子 : 0.26

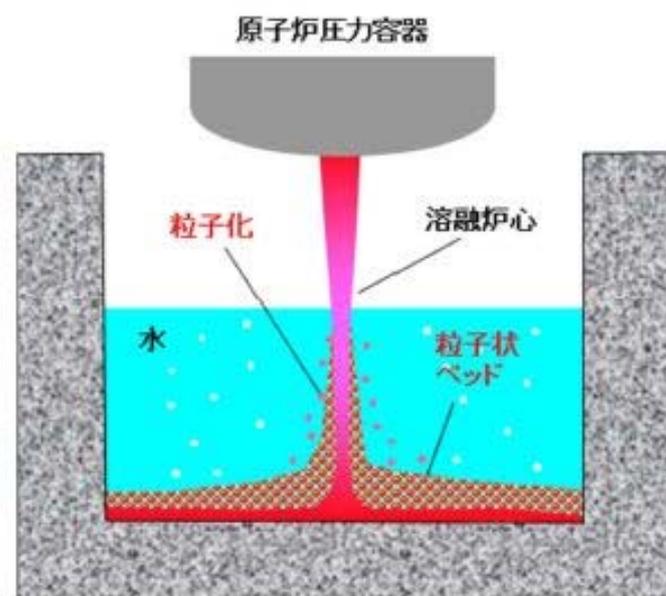
第1図 立方格子とポロシティ

- [1] Miyazaki, K. et al., “Dryout heat flux for core debris bed. (II) Effects of particle size mixing and coolant flow” , Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, 23[9], pp. 769–778, (September 1986).
- [2] P. P. Kulkarni, M. Rashid, R. Kulenovic, A. K. Nayak, “Experimental investigation of coolability behaviour of irregularly shaped particulate debris bed” , Nuclear Engineering and Design 240, pp.3067–3077, (October 2010).
- [3] A. Kaiser, W. Schutz, H. Will, “PREMIX Experiments PM12-PM18 to Investigate the Mixing of a Hot Melt with Water” , Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, (2001).

デブリの拡がりに関する不確かさについて

1. はじめに

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



第1図 ペDESTALにおけるデブリ挙動の概念

2. デブリの拡がりに関する知見

(1) 熔融物

PUL i MS実験では、水中での熔融物の拡がり挙動が観察されるとともに、水中での熔融物の拡がり距離を求めるスケーリング則が提案さ

れている。PULiMS実験結果を元に妥当性が確認されているスケールリング則に、BWR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（付録3 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 第5部MAAP添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について 付録4(5)参照）。コリウムシールドを設置した場合のペDESTAL半径が2.936m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促進されると考えられる（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、実機条件の方がデブリは固化しにくいと考えられる
- ・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、溶融物の床面到達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拡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、床面での熔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、熔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製ライナ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、実機解析から熔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製ライナが熔融した場合にはZrO₂上での拡がりとなるが、熔融物拡がりに関わる実験では、床の材質の差異（種々のセラミック、コンクリート）によらず同様な拡がり挙動になることが確認されており、ZrO₂の場合でも拡がり挙動に差異はないものと考えられる（別紙1参照）

したがって、熔融物の拡がり距離については、熔融物の拡がりに影響する因子のうち、主に熔融炉心落下流量が大きいことにより、不確かさを考慮しても実機条件ではより拡がり易く、床全面に拡がるものと想定される。

第1表 PULiMS実験条件と実機条件の比較

| 分類 | 項目 | 実機条件 | PULiMS (E4) | PULiMS／実機 | |
|-----------|---|--|---|-------------------------|------------------------|
| 初期条件 | 溶融物 | UO ₂ -ZrO ₂ -SUS 等 | Bi ₂ O ₃ -WO ₃ | — | |
| | 溶融物重量[kg] | 約 300×10 ³ | 約 47 | 約 0.16×10 ⁻³ | |
| | 液相線温度[K] | | 約 1,143 | — | |
| | 固相線温度[K] | | 約 1,143 | — | |
| | 溶融物過熱度[K] | | 70 | | |
| | 比熱[J/kgK] | | 250～310 | | |
| | 崩壊熱 | | あり | なし | — |
| | 冷却材重量[kg] | | 約 27×10 ³ | 40 | 約 1.5×10 ⁻³ |
| | サブクール度[K] | | 23 | | |
| 溶融物冷却材中挙動 | L/L _{br} (水深／ブレイク アップ長さ*) ※Taylor 関連式 | 約 0.08～約 0.23 | 約 0.35 | 約 1.5～4.4 | |
| 溶融物床面上挙動 | 溶融物密度[kg/m ³] | | 約 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 (SUS 製ライナ) | SUS 材 | — | |

(2) 粒子状ベッド

ANLで実施されたセルフベリング実験では、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ベリング効果により、2分～3分程度で堆積厚さが均一化されている（付録3 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 第5部M A A P 添付3 溶融炉心とコンクリートの相互作用について 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く、コリウムシールド高さ等の設計は、均一化されていることを前提としたもので問題ないと考えているが、デブリの堆積高さに対して厳しい評価を実施し影響を確認する観点から、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程度となっており、おおよそ1:16程度の拡がり挙動を示している。デブリ堆積高さの評価としては、ポロシティやペDESTAL内構造物量等の保守的な設定をしているため、不確かさ評価として考慮するアスペクト比としては、実験結果に基づく平均的な値として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

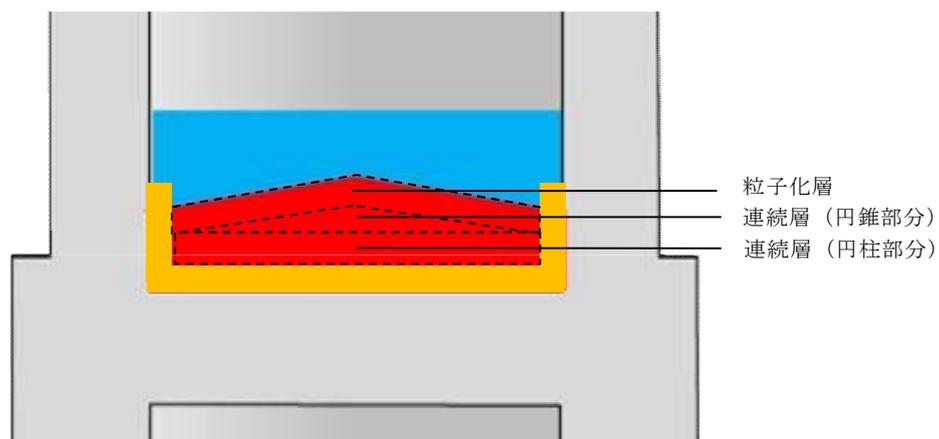
デブリ堆積高さの評価でのベースケース※（添付資料 3.2.16 参照）の堆積高さに対してアスペクト比を考慮した場合のデブリの堆積形状として、第3図のように連続層については円柱上に円錐が堆積した形状とし、その上に粒子化層が一様に堆積する形状を仮定する。

連続層の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広がった場合であることから、コリウムシールド厚さを考慮したペDESTアル直径 5.872m にアスペクト比を考慮すると、頂点部分の堆積高さは約 0.37m となる。円柱部分については、連続層デブリのうち円錐部分の体積を除いたものとなるため、堆積高さは約 1.09m となる。

粒子化層については、連続層の上に一様に堆積すると仮定するため、堆積高さは約 0.36m となる。

以上から、デブリの堆積高さは、連続層と粒子化層の体積高さの合計となることから、約 1.81m となる。

※ 炉外溶融物体積：3m³，ポロシティ：0.35 を設定



第3図 デブリ堆積形状（アスペクト比考慮）

(3) デブリの冠水維持に対する評価

粒子化割合0.173のデブリ量に対してポロシティ0.35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0.56m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。有効性評価のMAAP結果に基づく、RPV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0.31m、LOCA事象の場合は約0.40m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0.32m、LOCA事象の場合は約0.41mとなるため、デブリの冠水は維持される。

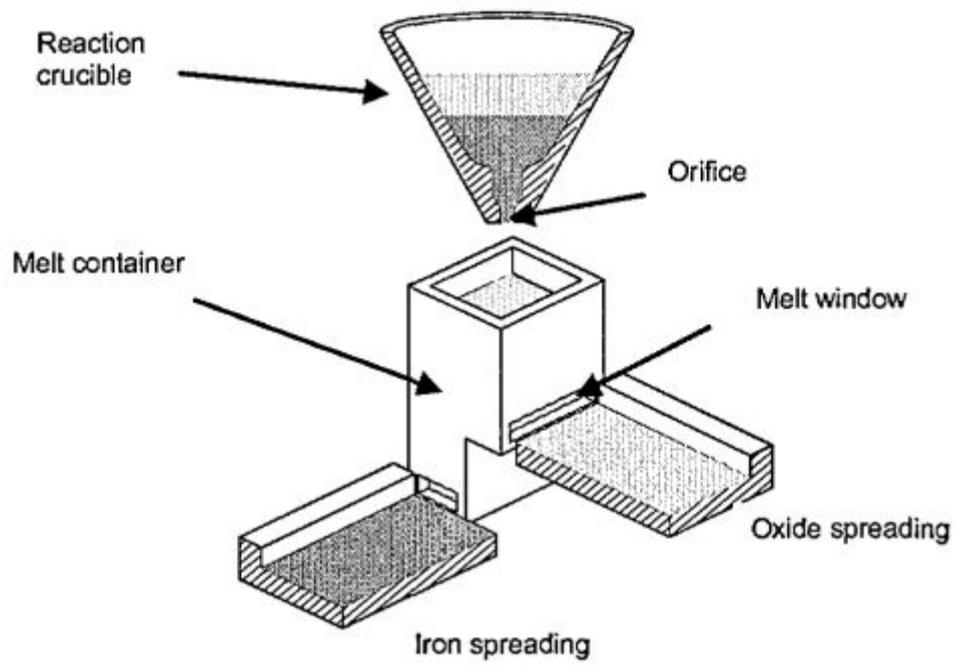
溶融物拡がりに関わる実験

C E A / D R N / D T P で行われた C O R I N E 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（F Z K）で実施された K A T S 実験^{[2][3][4]}では、溶融物としてテルミット（ $A l_2 O_3$ 約 150kg, F e 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。 $A l_2 O_3$ と F e 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 $A l_2 O_3$ が放出し、最後に F e を放出することにより酸化物溶融物の拡がり と 金属溶融物の拡がりを分けて実験が可能となっている。実験条件を第 1 表に示す。K A T S - 1 0 と K A T S - 1 1 の実験条件はほぼ同様であるが、K A T S - 1 0 の方は 1mm の水張りをしてあり、K A T S - 1 1 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、K A T S - 1 2 と K A T S - 1 3 の実験条件はほぼ同様であるが、K A T S - 1 2 の方が床の材質がセラミックであり、K A T S - 1 3 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。

C E A で実施された V U L C A N O^{[5][6]} 実験では、溶融物として酸化物溶融

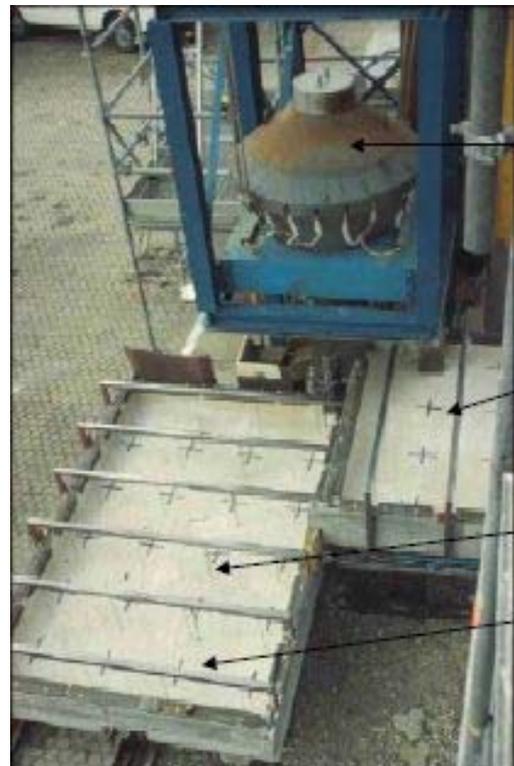
物が使用され、溶融物の組成、放出速度や温度、床の材質（コンクリート、セラミック）をパラメータに溶融物の拡がり実験が行われている。VE-U7実験では、酸化物溶融物（ UO_2 56wt%、 ZrO_2 32wt%、 FeO 5wt%、 $CaSiO_3$ 2wt%、 SiO_2 2wt%、 Fe 1wt%、 CaO 1wt%、 Al_2O_3 1wt%）を用いて、コンクリート床とセラミック（高密度ジルコニア）床での拡がりを実験している。実験装置を第5図に示す。装置の中央にマグネシア煉瓦の分離板を設置し、コンクリート床とセラミック床に40.8kgの酸化物溶融物を4.3kg/sの速度で同時に放出する条件となっている。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 K A T S 実験装置の概要図 [2]



(1D)



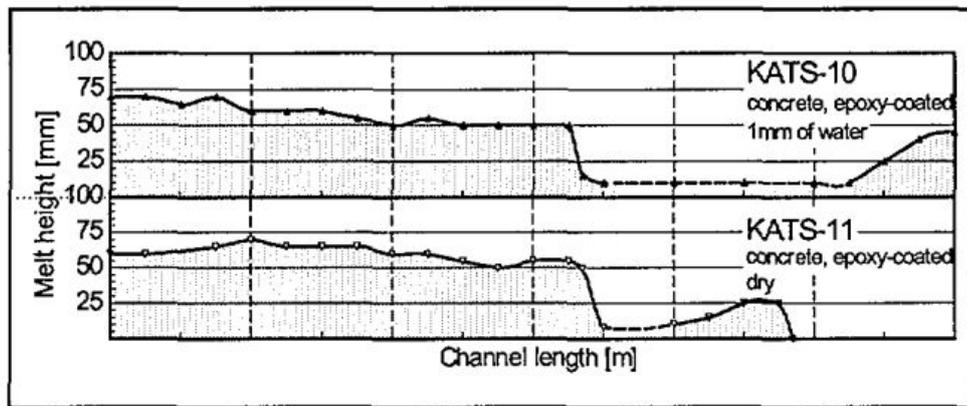
(2D)

第 2 図 K A T S 実験の 1D と 2D の拡がり形状の写真 [3]

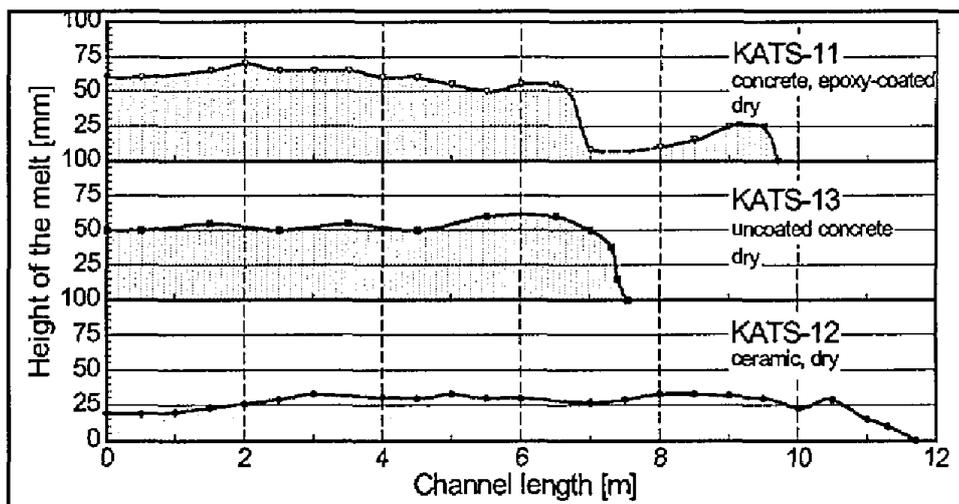
第 1 表 K A T S 実験条件と拡がり距離 (酸化物溶融物, 1D 拡がり) [2]

| 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 |

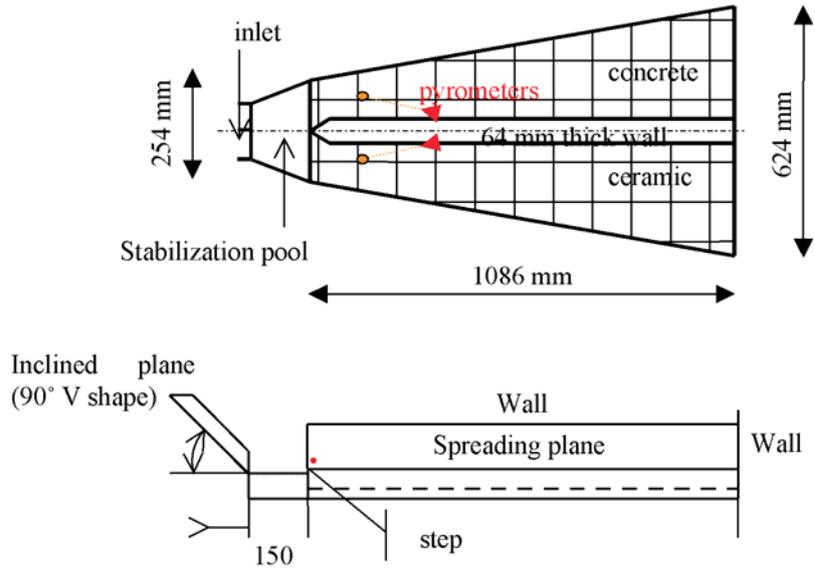
*) Cordierite (Al₂O₃ 37 wt%, SiO₂ 52 wt%, MgO 6,5 wt%)



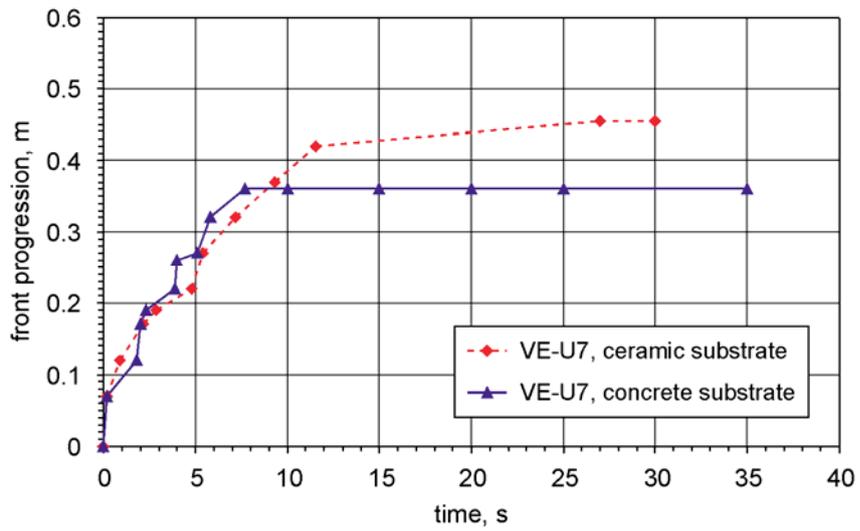
第 3 図 K A T S 実験の水の有無の影響 (酸化物溶融物, 1D 拡がり) [2]



第 4 図 K A T S 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 VULCANO 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.

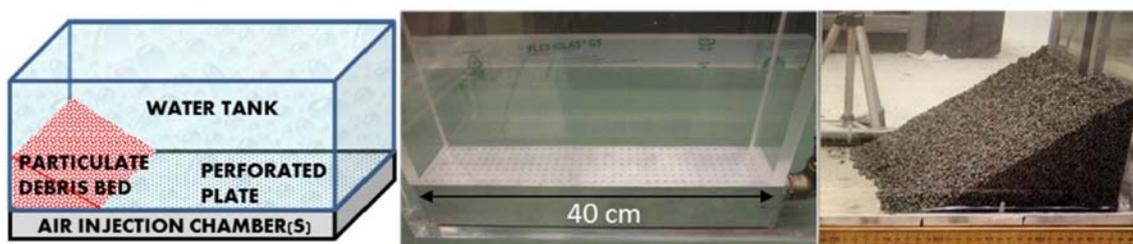
PDS実験について

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-E 7~23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。

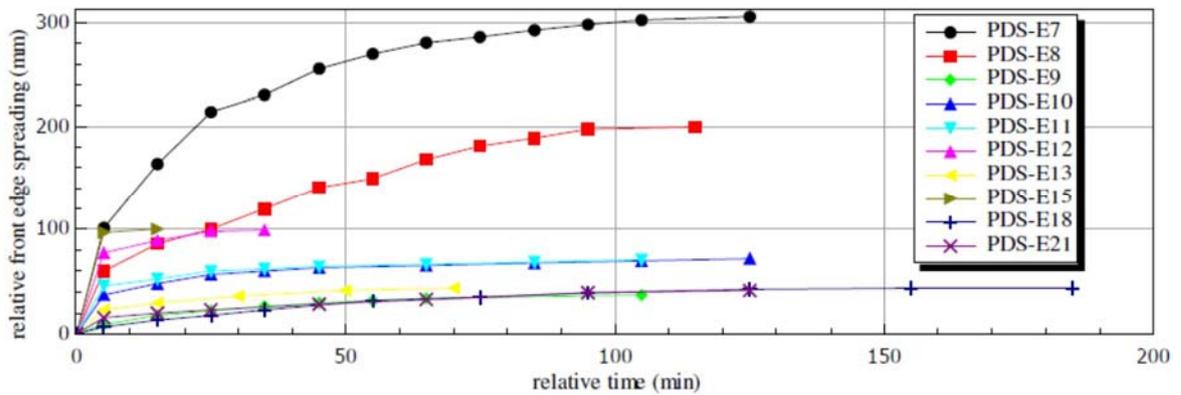
第 1 表 P D S 実験におけるパラメータ設定

| 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) |

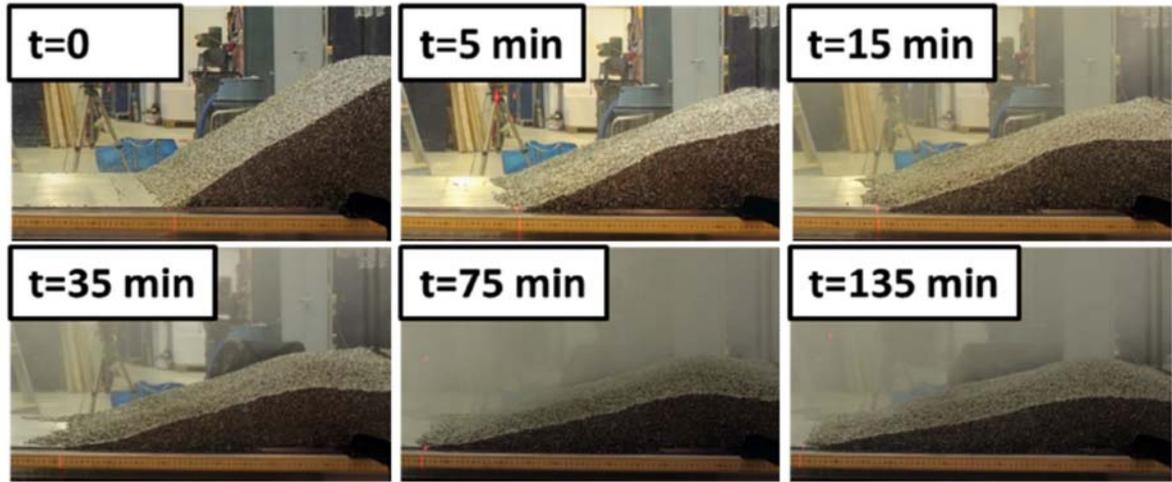
3. 実験結果

(1) P D S - 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。P D S - 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 P D S - 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

0.34m/s～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 $\frac{v_{air}}{u_{mf}^{air}}$ | | | |
| 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（R P V破損後のデブリ冠水維持に関連するもの）

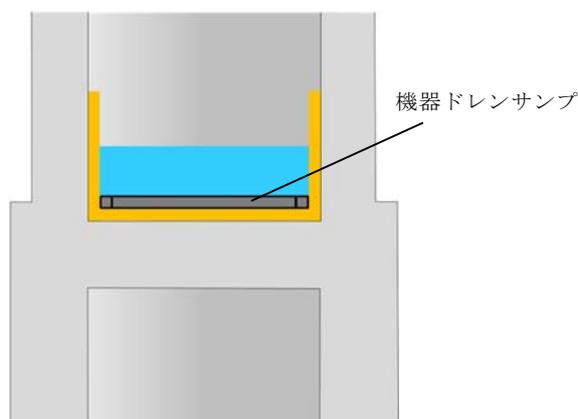
| 項目 | 主要解析条件 | 条件設定の考え方 | |
|-------|----------------|---|---|
| 解析コード | MAAP | — | |
| 初期条件 | 原子炉停止後の崩壊熱 | ANSI/ANS-5.1-1979 燃焼度 33GWd/t | 1サイクルの運転期間（13ヶ月）に調整運転期間（約1ヶ月）を考慮した運転期間に対応する燃焼度を設定 |
| | 格納容器圧力 | 5kPa[gage] | 通常運転時の格納容器圧力を包含する値 |
| | 格納容器雰囲気温度 | 57℃ | 通常運転時の格納容器雰囲気温度（ドライウェル内ガス冷却装置の設計温度）として設定 |
| | 外部水源の温度 | 35℃ | 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℃ | 通常運転時のサプレッション・プール水温度の上限値として設定 |
| | デブリ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 | 原子炉水位の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） | 80m ³ /hにてペDESTALへ注水開始（RPV破損から7分後） | 熔融炉心の冠水が継続可能な流量として設定 |

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SUS製の機器ドレンサンプを設置する（第1図）。RPV破損時のデブリ温度が2,000℃以上であるのに対し、SUS材の融点は1,400℃前後であるため、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内に均一に拡散すると考えられる。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、プール水深及び溶融炉心・コンクリート相互作用による侵食量に与える影響を評価する。

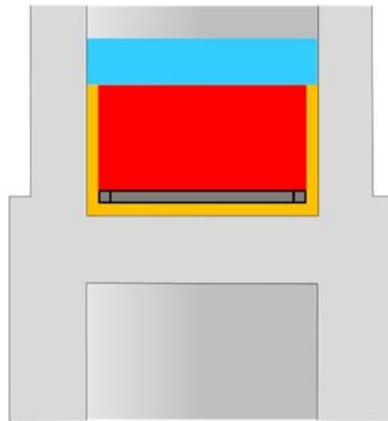
なお、設計の進捗により機器ドレンサンプの形状が変更となる可能性を考慮し、ここでは、機器ドレンサンプの体積を既設のサンプと同等の とし、コリウムシールド内周全体に沿って設置した条件で評価を行う。



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ペDESTAL注水開始までのペDESTAL水位低下量は、過渡事象の場合は約 0.34m、LOCA事象の場合は約 0.44m 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. 溶融炉心・コンクリート相互作用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 | 約 27m ² | 約 27m ² |
| ペDESTAL側面及び 床面 | | |
| 機器ドレンサンプ | | |
| 合計 | 約 86m ² | 約 87m ² |

機器ドレンサンプが健全な場合（②）の接触面積の合計は、機器ドレンサンプが溶融した場合（①）と同等であり、また、機器ドレンサンプとの接触面においてはサンプ内の冷却水による除熱効果も加わることから、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溶融炉心・コンクリート相互作用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、溶融炉心・コンクリート相互作用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。

コリウムシールド厚さ，高さの設定について

1. はじめに

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（ドライウェル部）（以下「ペDESTAL」という。）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溶融炉心（以下「デブリ」という。）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。以下に設定方針を示す。

2. 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ェ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，ドライウェルからペDESTAL床ドレンサンプへのドレン配管である（第1図）。当該配管の下端は，ペDESTAL床から約1.88m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1.88mを設定する。

3. コリウムシールド厚さの設定

3.1 コリウムシールド厚さの設定方針

コリウムシールド厚さは，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，可能な限り厚さを確保する方針とする。ただし，

コリウムシールド厚さを増やした場合の影響として、以下を考慮する。

- ・ペDESTAL床面積の減少によるデブリ保有可能量の減少

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保有可能なデブリ量が減少する。ペDESTAL内に落下するデブリのうち、粒子化したデブリは水プール中で冷却されやすいため、ペDESTAL内構造物への熱影響を抑制する観点では、粒子化していない熔融デブリ（連続層）からの寄与が大きい。そのため、コリウムシールドの厚さとしては熔融デブリが全量保有できることが重要となる。

ただし、コリウムシールド厚さの設定に当たっては、粒子状デブリからの影響も緩和できるよう、粒子状デブリも含めたデブリ量を保有できるよう考慮する。

- ・水プールとの接触面積の減少

コリウムシールド厚さを増加させると、水プールとの接触面積が減少するため、水プールへの除熱量が崩壊熱を下回ることでデブリ温度が上昇し、コリウムシールドが侵食するおそれがある。そのため、コリウムシールドの厚さを設定した上で熔融デブリによる侵食量を評価し、ペDESTALに要求される原子炉圧力容器支持機能及びデブリ保持機能に対する影響を評価する。

以上を踏まえ、コリウムシールド高さを上限である 1.88m とした上で、粒子化による堆積高さ上昇も踏まえたデブリ堆積高さを考慮した場合においてもデブリが全量保有できるコリウムシールド厚さを設定する。

3.2 デブリ保有可能量を踏まえたコリウムシールド厚さの算定

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

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

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

V_m : 溶融物体積[36m³]

V_s : ペDESTAL内構造物体積[4m³] (添付資料 3. 2. 14 別添 1 参照)

Φ_{ent} : 粒子化割合[0. 173] (添付資料 3. 2. 14 別添 2 参照)

P : ポロシテイ[0. 5] (添付資料 3. 2. 14 別添 3 参照)

S_{fz} : コリウムシールドの設置を考慮した床面積[m³]

L_{PD} : ペDESTAL床直径[6. 172m]

D_{CS} : コリウムシールド厚さ[m]

堆積高さの計算においては、ベースとなる条件 (別添 1) に対して不確かさを有すると考えられる項目として、以下のものが考えられる。

- ・連続層に対する不確かさ
 - ーデブリとして考慮するペDESTAL内構造物体積
- ・粒子化層に対する不確かさ
 - ーデブリの粒子化割合 (エントレインメント係数)
 - ーポロシテイ

そこで、コリウムシールド厚さを算定するに当たっては、連続層に対する不確かさとしてペDESTAL内構造物体積を、粒子化層に対する不確かさとしては堆積高さへの影響が大きいポロシテイを、それぞれ考慮している。

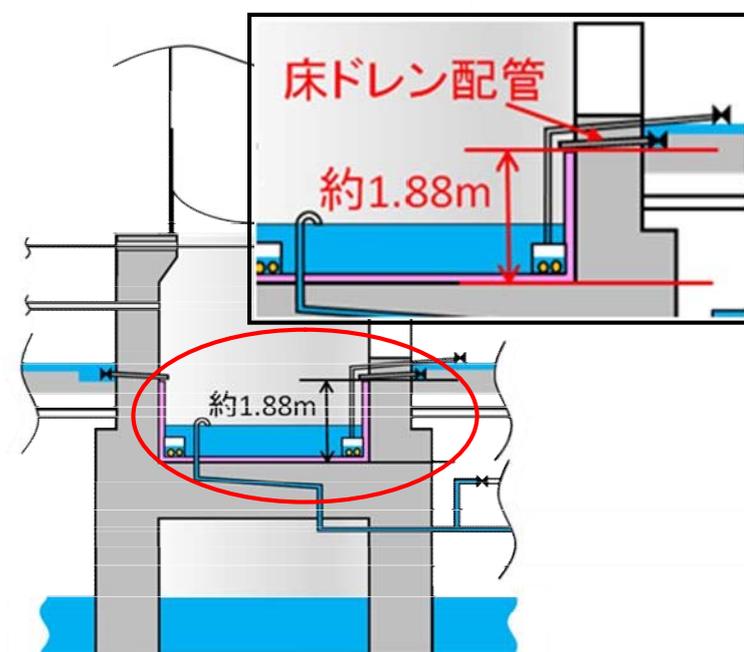
コリウムシールドの高さは、デブリ堆積高さと同様に設置するコリウムシールドの厚さを加えた値となるため、式(1)において H_{debri} を $(1.88 - D_{\text{CS}})m$ として計算した結果、 $D_{\text{CS}} = \text{約 } 0.15m$ となる。よって、デブリ保有可能性を踏まえると、コリウムシールド厚さは $0.15m$ となる。

3.3 その他の影響を踏まえたコリウムシールド厚さの設定

コリウムシールド厚さが 0.15m の場合、コリウムシールドの侵食は発生しないことを添付資料 3.5.1 にて確認している。また、添付資料 3.5.2 にて、コンクリートの温度履歴を基に、原子炉圧力容器支持機能及びデブリ保持機能を評価した結果、これらの機能が損なわれないことを確認している。以上より、コリウムシールド厚さが 0.15m の場合でも、原子炉圧力容器支持機能及びデブリ保持機能への影響はない。

また、熱影響の観点で寄与が大きい熔融デブリに着目すると、デブリ全量（熔融物体積[約 36m³]及びペDESTAL内構造物体積[約 4m³]）が熔融デブリと仮定した場合におけるデブリ堆積高さは約 1.63m であり、コリウムシールド高さ約 1.88m に対して余裕がある。

以上から、コリウムシールド厚さを 0.15m とする。



第1図 デブリがペDESTAL外へ流出する可能性のある経路

コリウムシールド厚さ、高さの設定の妥当性について

コリウムシールド厚さを設定するに当たってのデブリ堆積高さの評価においては、最確条件のデブリ体積に対して保守性を見込んだベースケースを設定し、さらに、ベースケースの各条件に対して保守性を見込んだ感度条件を設定した上で評価を行っている（別紙 1）。

しかし、上記の感度条件が全て重畳した場合や、RPVの破損位置及びデブリの堆積形状（添付資料 3.2.14 別添 4 参照）の不確かさが重畳した場合を想定すると、粒子状デブリの一部がコリウムシールド高さを超える可能性が存在する（別紙 2, 別紙 3）。

これに対して、粒子状デブリがコリウムシールド高さを超えた状態を想定した場合でも、ペDESTALの側壁コンクリートや床ドレン配管等に与える影響が軽微であることを確認している（別紙 4）。

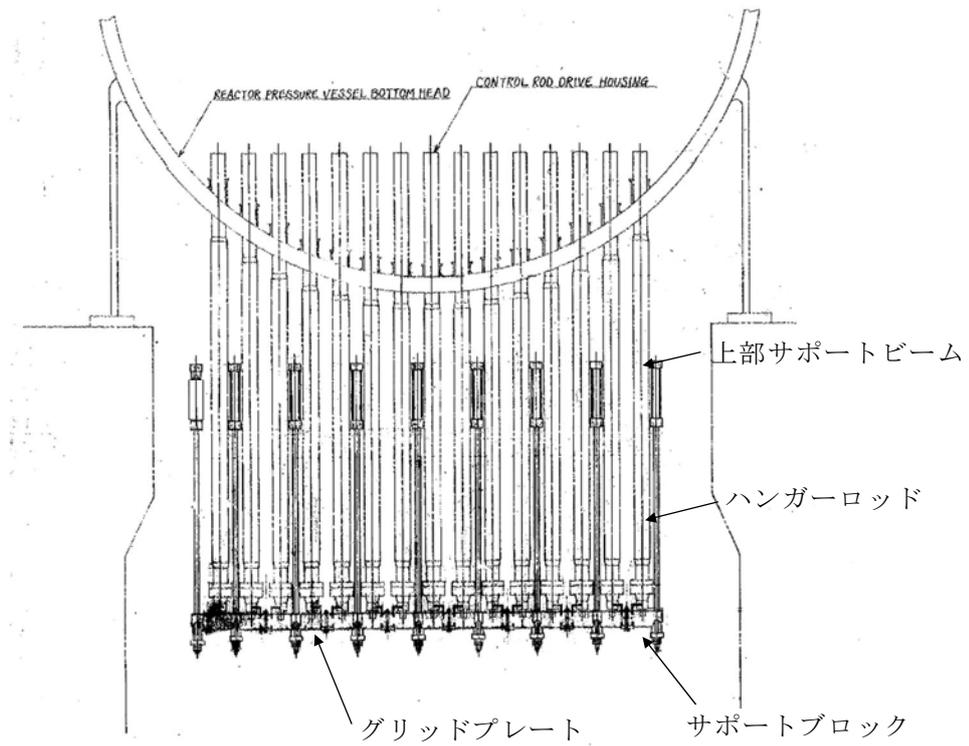
また、粒子状デブリの影響により万が一ペDESTAL外側の床ドレン制限弁が損傷することを仮想した場合にも、デブリの冠水及び冷却は維持されることを確認している（別紙 3, 別紙 5）。

デブリ堆積高さの評価条件の設定について

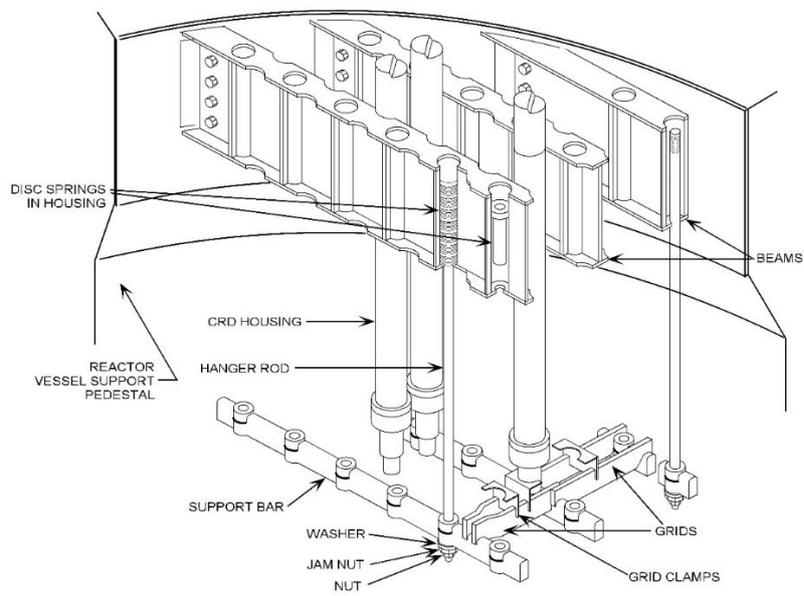
1. 原子炉圧力容器の破損箇所の想定

MAAPコードによる有効性評価解析では、原子炉圧力容器（以下「RPV」という。）破損時の格納容器への負荷を厳しくする観点から、RPVの破損形態として制御棒駆動機構（以下「CRD」という。）ハウジングの逸出を想定している。しかし、第1図及び第2図に示すとおり、CRDハウジングは、ペDESTAL内に設置されたCRDハウジングサポートにより支持することで、逸出を防止する設計となっている。このため、現実的なRPV破損時の初期のデブリ流出箇所としては、CRDハウジングや核計装管とスタブチューブ上部との溶接部が溶融することで生じる間隙が考えられる（第3図）。その後、アブレーションにより口径が徐々に広がるとともに、CRDハウジングサポートが溶融した場合にはCRDハウジングの逸出が生じる状況になると考えられる。

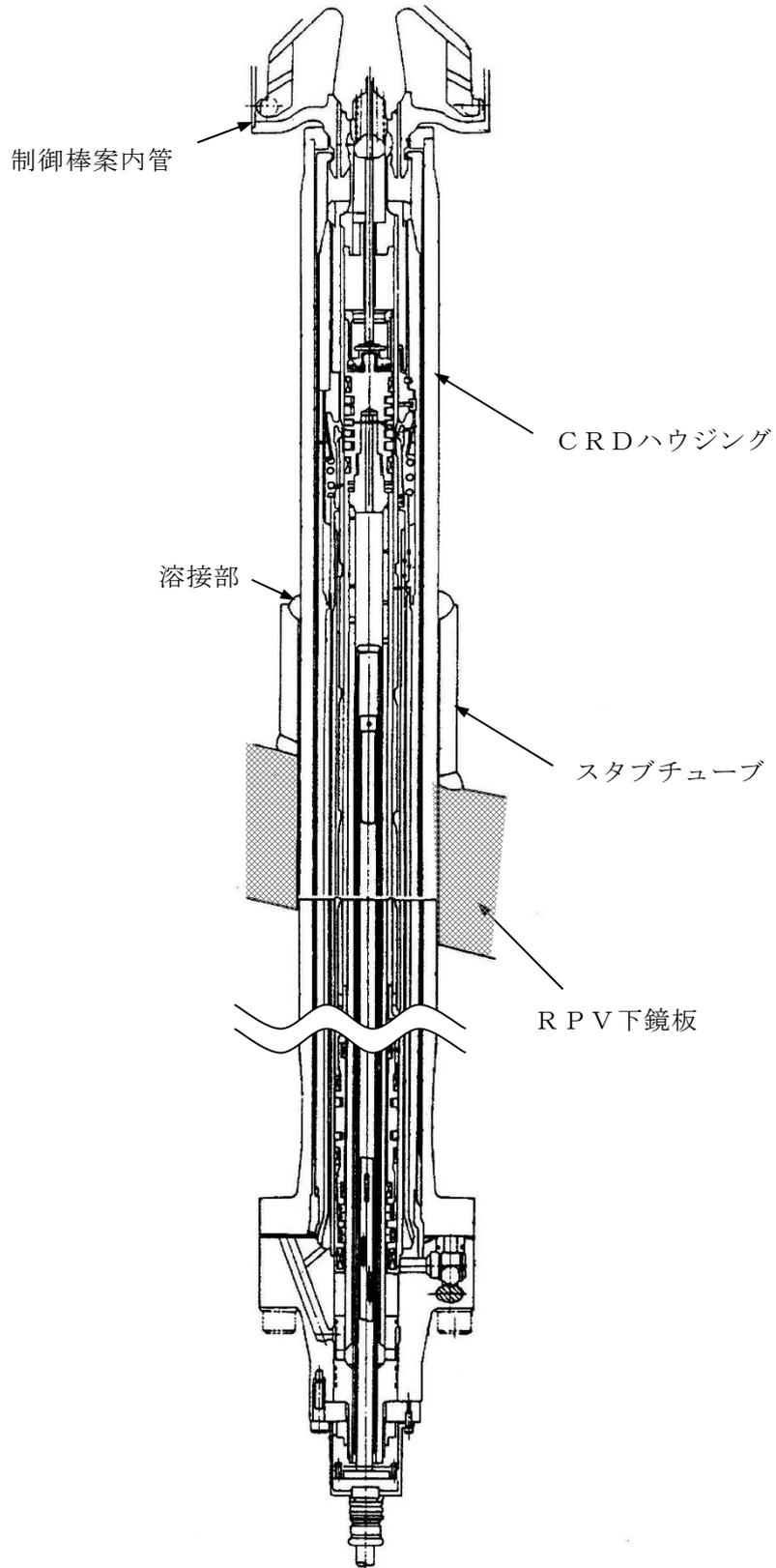
また、CRDハウジングや核計装管の溶接部は複数存在することから、デブリが滞留した下部プレナムの状況によっては、複数箇所からデブリが流出する可能性がある。ただし、RPV下部の形状及びデブリ流出に伴う下部プレナム内のデブリ深さの減少を踏まえると、CRDから流出するデブリ量は中心から外側になるにつれ少なくなることから、外側のCRD及びその下部のCRDハウジングサポートが溶融する可能性は小さくなると考えられる。



第1図 東海第二発電所CRDハウジングサポート構造



第2図 CRDハウジングサポート構造俯瞰図 (参考) [1]



第3図 CRD概要図

2. デブリとして考慮する構造物

R P V内外において、溶融物となりペDESTALに堆積する可能性がある構造物として、第1表に示すものが考えられる。これを踏まえ、ペDESTALに堆積するデブリ体積の最確条件と、最確条件に保守性を加味したデブリ堆積高さ評価上のベースケース条件を第2表に示す。

ベースケースにおけるCRD及びCRDハウジングの破損本数としては、MAAP解析においてR P V底部の破損後にアブレーションにより広がる最大の破損口径：約76cmに含まれる本数9本を考慮している(第4図)。また、ターンテーブル及びCRDハウジングサポートについては、アブレーションにより広がる最大の破損口径：約76cmを包絡する範囲として、一辺1mの正方形の範囲を考慮している。

また、MAAPコードに適用されているアブレーションモデルは、サンディア国立研究所において実施された、鋼製容器及びアルミナ混合物を用いたHIPS実験の結果と良く一致することが確認されている(第3表)。

したがって、アブレーションによるR P V破損口径の拡大を考慮したCRDハウジング等のデブリ体積の評価についても、保守性を有していると考えられる。

なお、R P Vの破損形態として、米国におけるAP600/AP1000の審査において、ヒンジ状破損(原子炉容器ベルトラインのほぼ全周にわたり裂け目が生じる大規模破損)を考慮した場合の流動の影響が議論されているが、ヒンジ状破損は他のPWRと異なりICIS下部貫通部がないAP600/AP1000の原子炉容器に対して考慮されるものであり、下部プレナムにCRDハウジング等の溶接部がある国内BWRプラントに対して、ヒンジ状破損は支配的な原子炉容器破損モードにはならない。したがって、国内BWRプラントにおけるR P Vの破損形態としては、溶接部の溶融を考慮することで問題ないと

考える。

第1表 デブリとなる構造物の推測

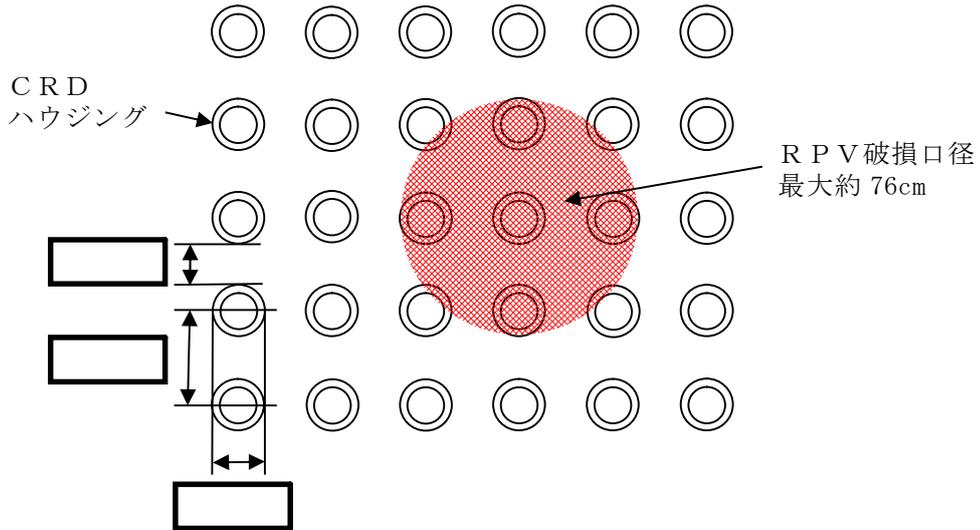
| | 項目 | 考え方 |
|---------|--|---|
| R P V 内 | 炉心位置に存在する構造物 (燃料集合体, 下部炉心支持板, 制御棒案内管等) | ・炉心位置に存在する構造物は, 炉心損傷及び炉心溶融に伴い溶融すると考えられる。 |
| | 下部プレナムに存在する構造物 (R P V下鏡部, C R Dハウジング, 核計装管, スタブチューブ)の一部 | ・C R Dや核計装管の溶接部の溶融及び貫通までに, R P V内のR P V下鏡部, C R Dハウジング, 核計装管等はある程度溶融すると考えられる。 ・ただし, 溶融炉心が下部プレナムに移行後も, 一時的にC R Dハウジング内に存在する冷却水の冷却効果により, C R Dハウジング及びC R D全てが溶融する可能性は低いと考えられる。 |
| R P V 外 | R P V外側の構造物 (C R Dハウジング, C R Dハウジングサポート, 核計装管)の一部 | ・R P Vからのデブリ流出時, デブリはC R Dハウジング, C R Dハウジングサポート, 核計装管により冷却されること, デブリはこれらの構造物と一時的に接触後にペDESTAL床面に落下することから, これらの構造物が全て溶融する可能性は低いと考えられる。 |
| | R P Vからのデブリ流出箇所の直下に存在するペDESTAL内構造物 (ケーブル, サポート, 配管, 新設設備等)の一部 | ・デブリはR P V下部の構造物と一時的に接触後にペDESTAL床面に落下することから, デブリ流出箇所の直下に存在するペDESTAL内構造物は一部溶融するものの, 全て溶融する可能性は低いと考えられる。 |

第2表 デブリ堆積高さ評価上のデブリ体積の考え方

| 対象 | 最確条件 | ベースケース | 考え方 |
|---|--|---|--|
| 炉心位置に存在する構造物 | 全て考慮 | 同左 | 一部溶け残る可能性もあるが, 全て溶融するものとして考慮する。 |
| R P V下鏡部, C R Dハウジング, C R D, 核計装管, C R Dハウジングサポート | M A A P解析でのアブレーションによる最大口径: 約0.76mの範囲 ^{※1} を考慮し, C R D6本分 ^{※2} 設定 | M A A P解析でのアブレーションによる最大口径: 約0.76mの範囲 ^{※1} を考慮し, これを包絡するC R D9本分を設定 | 複数箇所からのデブリ流出が生じ, 各流出箇所のC R Dハウジング等の一部が溶融する可能性を考慮し, M A A P解析に基づきR P V下部中心位置における複数の炉内外のC R Dハウジング完全逸出で代表する。 |
| ケーブル, サポート, 配管, 新設設備等のペDESTAL内構造物 | ターンテーブルより下部の構造物が溶融するものとして設定 | R P Vより下部に存在するペDESTAL内の構造物全てを保守的に考慮し設定 | ペDESTAL上部の内壁付近の構造物は, 位置的にデブリと接触し難いため, 最確条件では考慮せず。 ベースケースでは全ての構造物を考慮する。 |

※1 第4図参照

※2 一部溶融のC R D4本を計1本としてカウント



第4図 CRD配置とRPV破損口径の関係

第3表 HIPS実験結果とアブレーションモデルの評価結果^[2]

Table I
Comparison of Hole Ablation Models With Experiment Data

| Test | ΔP (MPa) | d_0 (cm) | L (cm) | Observed D_f (cm) | Current Model D_f (cm) | ZPSS Model D_f (cm) |
|---------|------------------|------------|--------|------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| HIPS-1J | 9.69 | 2.54 | 2.54 | 5.08 ^a | 5.08 | 4.78 |
| HIPS-2C | 11.7 | 2.54 | 2.54 | 5.5-7 | 6.40 | 4.76 |
| HIPS-3J | 4.85 | 2.54 | 5.08 | 6-7 | 6.32 | 4.87 |

a) Ablation limited by a graphite shield

[1] General Electric Systems Technology Manual Chapter 2.1 Reactor Vessel System, USNRC HRTD, Rev 09/11.

[2] Pilch, M., and Tarbell, W. W., 1985, High Pressure Ejection of Melt from a Reactor Pressure Vessel, The Discharge Phase. NUREG/CR-4383 (SAND85-0012), September.

3. デブリ堆積高さの評価条件

デブリ堆積高さの評価における，最確条件，ベースケース条件及び感度条件について，第4表に示す。コリウムシールド厚さの設定においては，ベースケース条件に対して，デブリ体積及びポロシティの感度条件を重畳させた条件での堆積高さを考慮している。

第4表 デブリ堆積高さ評価の条件

| ケース | デブリ体積 | 粒子化層の堆積高さ | |
|------------|---|--|--------------------|
| | | 粒子化割合 | ポロシティ |
| 最確条件 | 約 2.2m ³ ・CRD6 本分の範囲 ・ターンテーブルより下の構造物 | 17.3% ・エントレインメント 係数： <input type="text"/> (MAAP 推奨範囲の最確値) | 0.35 ・各種実験に基づく値 |
| ベース ケース | 3m ³ ・CRD9 本分の範囲 ・ペDESTAL内の全ての構造物 | 22.7% ・エントレインメント 係数： <input type="text"/> (MAAP 推奨範囲の最大値) | 0.50 ・更なる保守性を考慮 |

デブリが原子炉圧力容器の偏心位置から落下し
円錐状に堆積した場合のデブリ堆積高さの計算方法について

R P Vの破損位置が中心軸から偏心し、デブリがペDESTALの中心から外れた位置で円錐状に堆積した場合の、コリウムシールド床面からのデブリ堆積高さの計算方法を以下に示す。

1. 評価条件

ここでは、デブリ堆積高さを評価する上での感度条件①、②、③を全て考慮した場合の例を示す。

- ・コリウムシールド内半径： 2.936m（設計値）
- ・円錐状デブリ頂点からコリウムシールド内壁面までの水平距離： 0.6m
（最外周のCRD位置からコリウムシールド内壁面までの水平距離）
- ・円錐状デブリのアスペクト比： 高さ：直径=1：16
（PULiMS実験にて確認されているアスペクト比）
- ・デブリ体積： 40m^3 （炉内 36m^3 + 炉外 4m^3 （感度条件①））
- ・粒子化割合： 0.227（感度条件②）
- ・粒子状デブリのポロシティ： 0.50（感度条件③）

2. 評価方法

堆積高さの計算に当たっては、デブリを粒子化層（第1図 青部分）、連続層の円錐部分（第1図 緑部分）及び連続層の円柱部分（第1図 赤部分）に分割してそれぞれの高さを合計する。

(1) 粒子化層（第1図 青部分）

粒子化層は円錐状に堆積した連続層上に一様な厚さで堆積すると考えると、その堆積高さは式(1)により計算できる。

$$H_p = \frac{V_m \times \Phi_{ent}}{(1 - P) \times A_p} \quad (1)$$

H_p : 粒子化層の高さ [m]

V_m : 炉内デブリ体積 36[m³]

Φ_{ent} : 粒子化割合 0.227[-]

P : 粒子状デブリのポロシティ 0.50[-]

A_p : コリウムシールド内底面積 約 27.08[m²]

(2) 連続層の円錐部分（第1図 緑部分）

円錐状デブリのアスペクト比を、高さ：直径＝1：16と想定すると、その堆積高さは式(2)により計算できる。

$$H_{lcn} = R \times \frac{1}{8} \quad (2)$$

H_{lcn} : 連続層の円錐部分の高さ [m]

R : 連続層の円錐部分の半径 5.272[m]

(3) 連続層の円柱部分（第1図 赤部分）

連続層の円柱部分の高さの計算に当たっては、同部分の体積を求める必要がある。この体積は、連続層全体の体積から円錐部分の体積を除くことで得られるため、まずは連続層の円錐部分の体積を計算する。

① 連続層の円錐部分の体積の計算

第1図のように、連続層の円錐部分（緑部分）を上下に分割することを考える。

このとき、下部分は、コリウムシールド内を底面積とする高さMの円柱を斜めに二等分した形状となるため、その体積は式(3)により計算できる。

$$V_{Blcn} = A_P \times M \times \frac{1}{2} \quad (3)$$

V_{Blcn} : 連続層の円錐部分の下側の体積 [m³]

A_P : コリウムシールド内底面積 約 27.08[m²]

M : 連続層の円錐部分の下側の高さ 約 0.59[m]

((2)で求めた円錐高さ、円錐頂点からコリウムシールド内壁面までの水平距離及び円錐のアスペクト比より計算)

また、上部分は、半径R、高さHの円錐を、高さMの位置から反対側へ斜めに切り取った形状となり、その体積は、式(4)により計算できる。

$$V_{Tlcn} = \frac{\pi}{3} \times R^2 \times H \times \left\{ \frac{k-m}{\sqrt{k^2-m^2}} \right\}^3 \quad (4)$$

$$\left(k = \frac{H}{R}, m = \frac{M}{L} \right)$$

V_{Tlcn} : 連続層の円錐部分の上側の体積 [m³]

H : 連続層の円錐部分の高さ 約 0.66[m]

(円錐頂点からコリウムシールド内壁面までの水平距離及び円錐のアスペクト比より計算)

R : 連続層の円錐部分の半径 5.272[m]

M : 連続層の円錐部分の下側の高さ 約 0.59[m]

((2)で求めた円錐高さ、円錐頂点からコリウムシールド内壁面までの水平距離及び円錐のアスペクト比より計算)

L : コリウムシールド内の直径 5.872[m]

② 連続層の円柱部分の体積の計算

連続層の円柱部分（第1図 赤部分）の体積は、粒子化しないデブリ全体の体積から、①で求めた円錐部分の体積を差し引いたものとなり、式(5)により計算できる。

$$V_{lcy} = V_m \times (1 - \Phi_{ent}) + V_s - (V_{Blcn} + V_{Tlcn}) \quad (5)$$

V_{lcy} : 連続層の円柱部分の体積 [m³]

V_m : 炉内デブリ体積 36[m³]

Φ_{ent} : 粒子化割合 0.227[-]

V_s : 炉外デブリ体積 4[m³]

V_{Blcn} : 連続層の円錐部分の下側の体積 [m³]

V_{Tlcn} : 連続層の円錐部分の上側の体積 [m³]

③ 連続層の円柱部分の高さの計算

②で求めた連続層の円柱部分の体積及びコリウムシールド内底面積より、連続層の円柱部分の高さは式(6)により計算できる。

$$H_{lcy} = \frac{V_{lcy}}{A_p} \quad (6)$$

H_{lcy} : 連続層の円柱部分の高さ [m]

V_{lcy} : 連続層の円柱部分の体積 [m³]

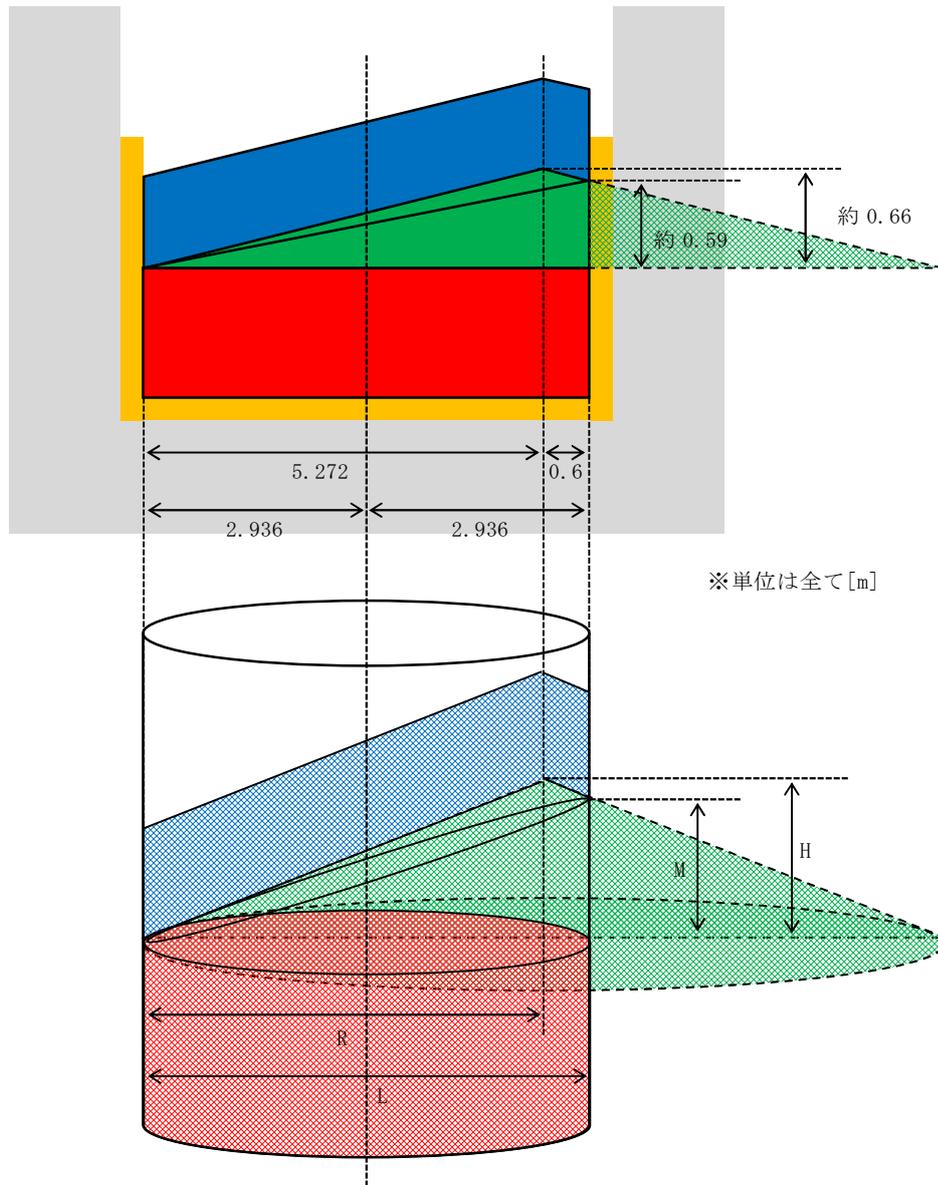
A_p : コリウムシールド内底面積 約 27.08[m²]

以上、(1)から(3)で求めた各部分の高さ (H_p , H_{lcn} , H_{lcy}) を合計することで、デブリ全体の堆積高さが計算される。

3. 評価の保守性について

本評価は、下記の点で保守性を有している。

- R P V破損及びデブリ落下位置が中心軸から外れた場合、R P Vの曲率を考慮すると、偏心位置でのデブリ落下量は減少すると考えられるが、本評価では保守的に偏心位置から全量が落下したものとしている。
- デブリがコリウムシールド高さを越えた部分（第1図 青部分の右側）については、コリウムシールドの厚さの分、デブリが拡がることで高さが低くなるが、本評価ではその影響を考慮していない。



第1図 デブリ堆積状態の例

円錐状の堆積や偏心位置での堆積の想定について

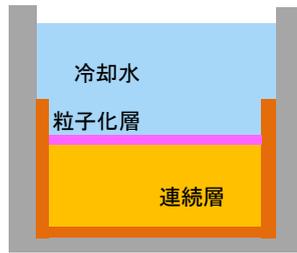
円錐状の堆積や偏心位置での堆積の想定として、PUL i MSの知見に基づく保守的な設定として1:16を採用している。堆積の想定に対する保守性を以下に示す。

- ・ PUL i MSは溶融物の拡がりを確認したものであり、実機より厳しい条件
※でもアスペクト比が1:16程度
- ・ 粒子化層はより均一に拡がりやすく、実機で最も考え得る状態は、アスペクト比1:16より緩やかな凹凸のある連続層（溶融物）に粒子化層が被さった状態と考えられる

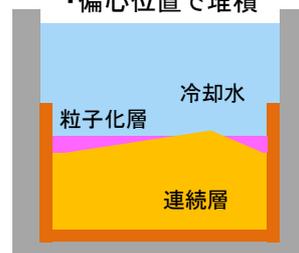
※ 実機条件に比べて、PUL i MS実験条件は溶融物過熱度及び比熱が低くPUL i MS実験条件の方がデブリが固化しやすいこと、PUL i MS実験では崩壊熱を模擬していないこと、実機では落下時の溶融物量が多く固化しにくいこと等

粒子化層が薄い場合

- ・連続層フラット



- ・連続層円錐状
- ・偏心位置で堆積

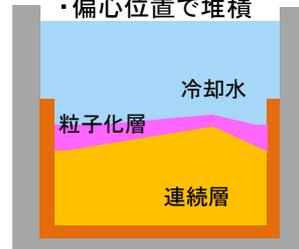


粒子化層が厚い場合

- ・連続層フラット

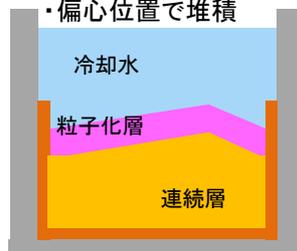


- ・連続層円錐状
- ・偏心位置で堆積



評価条件

- ・連続層及び粒子化層円錐状
- ・偏心位置で堆積



第 1 図 堆積の想定

表 各ケースにおけるデブリ堆積高さ

| 形状 | (1) ベース条件 均一化して堆積した場合 | (2) 円錐状に堆積した場合 円錐部分のアスペクト比 1:16 | (3) 偏心位置で堆積した場合 コリウムシールド壁面から 60cm 内側に偏心 |
|---|---|--|---|
| <p>体積</p> <p>ベース条件</p> <p>溶融物量： 炉内：36m³ 炉外：3m³</p> <p>粒子化割合： 0.173</p> <p>ポロシティ： 0.35</p> | | | |
| | <p>デブリ堆積高さ：約 1.57m(コリウムシールド上端に対して約 16cm の余裕) (ベント管上端に対して約 57cm の余裕)</p> | <p>デブリ堆積高さ(壁面)：約 1.45m(コリウムシールド上端から約 28cm の余裕) デブリ堆積高さ(頂点)：約 1.81m(ベント管上端から約 33cm の余裕)</p> | <p>デブリ堆積高さ(壁面)：約 1.83m(コリウムシールド上端から約 10cm 超過) デブリ堆積高さ(頂点)：約 1.91m(ベント管上端から約 23cm の余裕)</p> |
| <p>コリウムシールド高さ, 厚さ設定条件ケース (感度条件①+③)</p> <p>溶融物量： 炉内：36m³ 炉外：4m³</p> <p>粒子化割合： 0.173</p> <p>ポロシティ： 0.50</p> | | | |
| | <p>デブリ堆積高さ：約 1.71m(コリウムシールド上端に対して約 2cm の余裕) (ベント管上端に対して約 43cm の余裕)</p> | <p>デブリ堆積高さ(壁面)：約 1.59m(コリウムシールド上端から約 14cm の余裕) デブリ堆積高さ(頂点)：約 1.96m(ベント管上端から約 18cm の余裕)</p> | <p>デブリ堆積高さ(壁面)：約 1.98m(コリウムシールド上端から約 25cm 超過) デブリ堆積高さ(頂点)：約 2.05m(ベント管上端から約 9cm の余裕)</p> |
| <p>感度条件①+②+③</p> <p>溶融物量： 炉内：36m³ 炉外：4m³</p> <p>粒子化割合： 0.227</p> <p>ポロシティ： 0.50</p> | | | |
| | <p>デブリ堆積高さ：約 1.78m(コリウムシールド上端から約 5cm 超過) (ベント管上端に対して約 36cm の余裕)</p> | <p>デブリ堆積高さ(壁面)：約 1.66m(コリウムシールド上端から約 7cm の余裕) デブリ堆積高さ(頂点)：約 2.03m(ベント管上端から約 11cm の余裕)</p> | <p>デブリ堆積高さ(壁面)：約 2.05m(コリウムシールド上端から約 32cm 超過) デブリ堆積高さ(頂点)：約 2.12m(ベント管上端から約 2cm の余裕)</p> |

(参考) 表 感度条件①～③における堆積高さ

| 形状 | (1) ベース条件 均一化して堆積した場合 | (2) 円錐状に堆積した場合 円錐部分のアスペクト比 1:16 | (3) 偏心位置で堆積した場合 コリウムシールド壁面から 60cm 内側に偏心 |
|--|---|--|---|
| 感度条件① 溶融物量： 炉内：36m ³ 炉外：4m ³ 粒子化割合： 0.173 ポロシティ： 0.35 | <p>デブリ堆積高さ：約 1.61m(コリウムシールド上端に対して約 12cm の余裕) (ベント管上端に対して約 53cm の余裕)</p> | <p>デブリ堆積高さ(壁面)：約 1.48m(コリウムシールド上端から約 25cm の余裕) デブリ堆積高さ(頂点)：約 1.85m(ベント管上端から約 29cm の余裕)</p> | <p>デブリ堆積高さ(壁面)：約 1.87m(コリウムシールド上端から約 14cm 超過) デブリ堆積高さ(頂点)：約 1.95m(ベント管上端から約 19cm の余裕)</p> |
| 感度条件② 溶融物量： 炉内：36m ³ 炉外：3m ³ 粒子化割合： 0.227 ポロシティ： 0.35 | <p>デブリ堆積高さ：約 1.61m(コリウムシールド上端に対して約 12cm の余裕) (ベント管上端に対して約 53cm の余裕)</p> | <p>デブリ堆積高さ(壁面)：約 1.49m(コリウムシールド上端から約 24cm の余裕) デブリ堆積高さ(頂点)：約 1.85m(ベント管上端から約 29cm の余裕)</p> | <p>デブリ堆積高さ(壁面)：約 1.87m(コリウムシールド上端から約 14cm 超過) デブリ堆積高さ(頂点)：約 1.95m(ベント管上端から約 19cm の余裕)</p> |
| 感度条件③ 溶融物量： 炉内：36m ³ 炉外：3m ³ 粒子化割合： 0.173 ポロシティ： 0.50 | <p>デブリ堆積高さ：約 1.68m(コリウムシールド上端に対して約 5cm の余裕) (ベント管上端に対して約 46cm の余裕)</p> | <p>デブリ堆積高さ(壁面)：約 1.55m(コリウムシールド上端から約 18cm の余裕) デブリ堆積高さ(頂点)：約 1.92m(ベント管上端から約 22cm の余裕)</p> | <p>デブリ堆積高さ(壁面)：約 1.94m(コリウムシールド上端から約 21cm 超過) デブリ堆積高さ(頂点)：約 2.02m(ベント管上端から約 12cm の余裕)</p> |

コリウムシールド高さを超えた粒子状デブリによる影響について

1. はじめに

デブリ堆積高さの評価条件（デブリ体積，デブリの粒子化割合，粒子化層のポロシティ）を全て保守的にした場合や，デブリが偏心位置に落下し円錐状に堆積した場合を想定すると，粒子状デブリがコリウムシールドの高さを超過する可能性が考えられる。

しかしながら，粒子状デブリは水により急速に冷却されるため，その温度は速やかに低下し，ペDESTAL側壁コンクリートとの接触や床ドレン配管への流入が生じた場合でも，コンクリートや配管への影響はほとんど生じないと考えられる。

これに対して，粒子状デブリ上面からの除熱によってデブリが冷却されることを定量的に評価するとともに，万が一粒子状デブリの温度が高い状態でペDESTAL側壁コンクリートと接触すること等を想定しても，側壁コンクリートや床ドレン配管等に与える影響が小さいことを評価する。

2. 粒子状デブリ上面からの除熱による冷却性評価

水プールによる上面からの除熱量を評価し，粒子状デブリの崩壊熱と比較する。

① デブリ条件

- ・デブリの堆積モデル：第1図

デブリが中心軸から偏心した位置に落下し円錐状に堆積した場合に，粒子状デブリがコリウムシールド高さを超えて堆積するモデルを想定する

- ・評価シーケンス：大破断 L O C A + 注水機能喪失

R P V 破損時の崩壊熱を高め評価する設定

- ・ R P V 破損時の崩壊熱：22.4MW

M A A P 結果に基づく R P V 破損時のデブリ全量（連続層を含む）の崩壊熱であるが、保守的に粒子化層の崩壊熱として設定

② 除熱量評価

粒子状デブリがコリウムシールド高さを超えて堆積するのは以下の 4 ケースであり、ドライアウト熱流束を厳しく設定する観点から、このうち最もポロシティの小さい「ベースケース、偏心位置で円錐状に堆積」のポロシティ：0.35 を想定する。

- ▶ ベースケース、偏心位置で円錐状に堆積
- ▶ コリウムシールド高さ、厚さ設定条件（感度条件①+③）、偏心位置で円錐状に堆積
- ▶ 感度条件①+②+③、均一化して堆積
- ▶ 感度条件①+②+③、偏心位置で円錐状に堆積

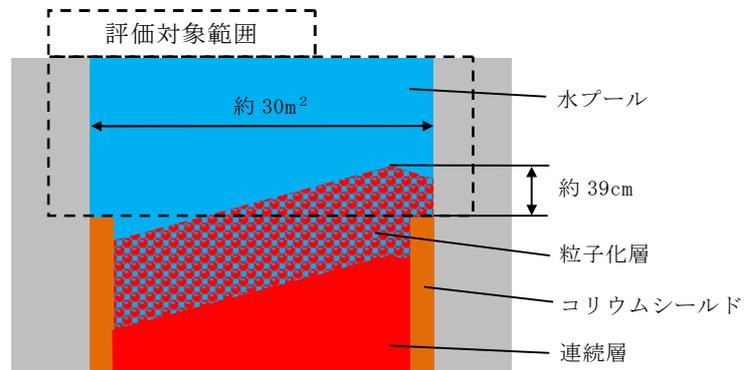
粒子状デブリ上面に水プールが存在する体系であることから、Lipinski-0D モデル(第 2 図)におけるポロシティ 0.35 での熱流束 $1.4\text{MW}/\text{m}^2$ を設定し、除熱量を計算する。

粒子状デブリと水プールとの接触面積はコリウムシールドを設置していない場合の床面積約 30m^2 と等しいため、

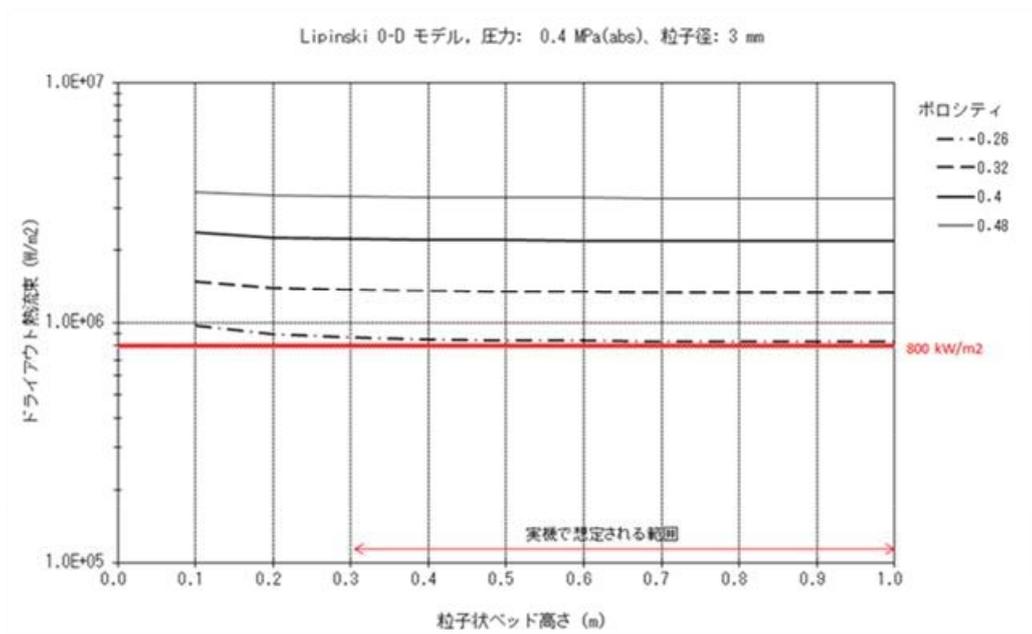
$$\text{除熱量} = 1.4\text{MW}/\text{m}^2 \times \text{約 } 30\text{m}^2 = \text{約 } 42\text{MW}$$

となる。

よって、粒子化層の崩壊熱を十分上回ることから、粒子状デブリは適切に冷却される。



第 1 図 冷却性評価モデル



第 2 図 Lipinski-0D モデル

3. 粒子状デブリによる側壁コンクリートへの影響

粒子状デブリは水により急速に冷却されるため、ペDESTAL側壁のコンクリートに接触した場合でも、コンクリートの有意な侵食は生じないと考えられるが、デブリ堆積高さの影響評価として、側壁コンクリートの侵食量を解析コードMAAPにて評価する。

① 解析条件

- ・デブリの堆積モデル：第3図

粒子状デブリがコリウムシールド高さを超えて堆積する上記4ケースのうち、コリウムシールド高さを超えて堆積する粒子状デブリの体積が最も大きいのは感度条件①+②+③の偏心位置で円錐状に堆積したケースとなる。このケースにおいても、コリウムシールド高さを超えて堆積する粒子状デブリがペDESTAL内に均一化して堆積した場合の堆積高さは10cm未満となることから、以下の4ケースを包絡する条件として、保守的にペDESTAL内に粒子状デブリが10cm均一化して堆積するモデルとする

- ・崩壊熱：10cm堆積した粒子状デブリ（ポロシティ0.35）による崩壊熱

粒子状デブリの10cm均一化した堆積を想定する場合、ポロシティの小さい方がデブリの量は多くなるため、4ケースのうち最もポロシティの小さい「ベースケース、偏心位置で円錐状に堆積」のポロシティ：0.35を想定し、残りの65%のデブリによる崩壊熱を考慮する

- ・粒子状デブリから上面の水プールへの熱流束： $1.4\text{MW}/\text{m}^2$

Lipinski-0Dモデル（第2図）におけるポロシティ0.35での熱流束 $1.4\text{MW}/\text{m}^2$ を設定

- ・評価シーケンス：大破断LOCA+注水機能喪失

RPV破損時の崩壊熱を高めて評価する設定

- ・粒子状デブリの初期温度：約 °C

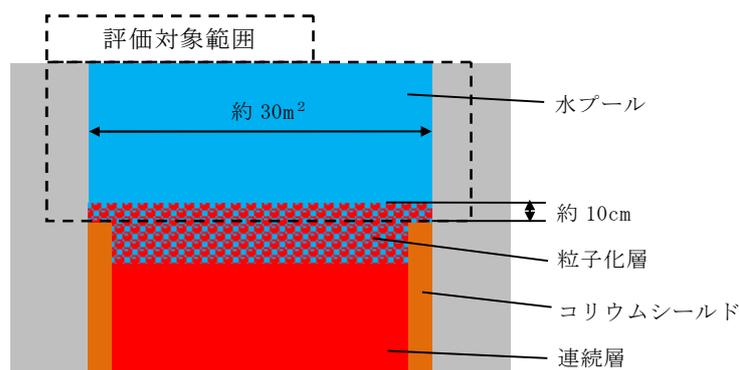
粒子状デブリは冷却固化していることから、固相線温度以下であるが、保守的に固相線温度（MAAP解析結果）を設定

- ・粒子状デブリと水プールの接触面積：約 30m²

コリウムシールド高さより上部のペDESTALの断面積を設定

② 解析結果

崩壊熱に対して粒子状デブリから上面の水プールへの除熱量が大きいことから、側壁コンクリートの温度が融点に到達するまでにデブリ温度が低下することで、側壁コンクリートの侵食量は0mmとなった。



第3図 側壁コンクリートへの影響評価モデル

4. 粒子状デブリによる床ドレン配管等への影響

粒子状デブリがコリウムシールド高さを超えて堆積し、床ドレン配管上端高さを超過した場合でも、以下のとおり、床ドレン配管内への粒子状デブリの流入は少ないと考えられる。

- ・ R P Vが破損し、デブリがペDESTALに落下し堆積していく際には、密度の関係からデブリの上に冷却水が移行した状態でデブリの堆積高さが増える（=水位が上昇する）
- ・ 床ドレン配管はほぼ水平（約1度の傾斜）であることから、床ドレン配管内はペDESTAL水位の上昇に伴い、冷却水によりほぼ満たされた状態になると考えられる
- ・ その後、粒子化層の堆積高さが床ドレン配管高さを超過した場合でも、粒子状デブリが床ドレン配管内の奥まで拡がるための駆動力は小さい[※]
¹ため、配管内への流入は少ないと考えられる

※1 セルフレベリングによる均一化は、連続層からの発生蒸気による駆動力が大きく、配管内では粒子状デブリの崩壊熱による発生蒸気のみが駆動力となることから、セルフレベリングによる配管内への侵入の効果は低減されると考えられる

また、粒子状デブリの配管内への流入を想定した場合でも、3.において粒子状デブリによるコンクリートの侵食は生じない結果となっていることから、コンクリートよりも融点の高い床ドレン配管及び床ドレン制限弁等の有意な侵食も生じないと考えられるが、3.の側壁コンクリートの侵食量評価の結果をもとに、床ドレン配管の侵食評価を行った。以下にその内容を示す。

(1) 評価条件

評価モデルは第4図に示すとおり、粒子状デブリがコリウムシールド高

さを超えて堆積している場合を想定し、床ドレン配管の中心高さまで粒子状デブリが一様に堆積したことを仮定する（実際は、上記のとおり床ドレン配管内への粒子状デブリの流入は少ないと考えられるが、参考1のとおり保守的に想定）。3.の側壁コンクリートの侵食量評価で得られた粒子状デブリの温度変化をもとに、粒子状デブリの温度が床ドレン配管の融点を下回るまでの配管への入熱量を計算し、配管の影響評価を実施する。

① 配管条件

- ・床ドレン配管内径：73.9mm
- ・床ドレン配管厚さ：7.6mm
- ・床ドレン配管初期温度(T_1)：117℃
(MAAP結果におけるコンクリート壁面温度を設定)
- ・床ドレン配管融点：1,427℃（SUSの融点を設定）
- ・床ドレン配管熱伝導率(λ_1)：16.5W/mK（SUSの熱伝導率を設定）
- ・床ドレン配管密度(ρ_1)：7,890kg/m³（SUSの密度を設定）
- ・床ドレン配管比熱(c_1)：511J/kgK（SUSの比熱を設定）

② デブリ条件

- ・デブリ初期温度(T_2)：℃（固相線温度（MAAP解析結果））
- ・デブリ熱伝導率(λ_2)：W/mK（MAAP解析結果）
- ・デブリ密度(ρ_2)：kg/m³（MAAP解析結果）
- ・デブリ比熱(c_2)：J/kgK（MAAP解析結果）

③ デブリと配管の境界温度条件

デブリと配管の境界温度は、半無限固体の非定常熱伝導に係る表面熱流束の式(1)^[1]を用いて計算する。

$$q = \frac{\lambda \times (T_s - T_0)}{\sqrt{\pi \times \frac{\lambda}{\rho \times c} \times t}} \quad (1)$$

q : 表面熱流束, T_s : 境界温度, T_0 : 床ドレン配管又はデブリの初期温度, λ : 熱伝導率, ρ : 密度, c : 比熱, t : 経過時間

ここで、デブリが配管に与える表面熱流束と配管がデブリから受ける表面熱流束は同じのため、式(2)が成立する。

$$q = \frac{\lambda_1 \times (T_s - T_1)}{\sqrt{\pi \times \frac{\lambda_1}{\rho_1 \times c_1} \times t}} = \frac{\lambda_2 \times (T_2 - T_s)}{\sqrt{\pi \times \frac{\lambda_2}{\rho_2 \times c_2} \times t}} \quad (2)$$

T_s について式を整理すると式(3)のとおりとなり、境界温度 T_s は約 890°C となる。

$$T_s = \frac{\sqrt{\lambda_1 \times \rho_1 \times c_1} \times T_1 + \sqrt{\lambda_2 \times \rho_2 \times c_2} \times T_2}{\sqrt{\lambda_1 \times \rho_1 \times c_1} + \sqrt{\lambda_2 \times \rho_2 \times c_2}} \quad (3)$$

④ 伝熱条件

デブリから配管への熱流束 q は式(2)により計算され、配管に与えられる熱量は式(4)により求められる。

$$Q = A \times q \times \Delta t \quad (4)$$

Q : 配管への伝熱量, A : 伝熱面積 (粒子状デブリの堆積を想定する床ドレン配管の中心高さまでの床ドレン配管内側の表面積),
 Δt : 時間

熱流束 q については、配管への入熱量を保守的に評価するため、デブリ温度の低下及び床ドレン配管の温度上昇を考慮せず、デブリ初期温度 (T_2) 及び床ドレン配管初期温度 (T_1) 時の熱流束一定とし (実際は、デブリ温度の低下及び床ドレン配管温度の上昇により、熱流束は低下する)、配管に与えられる熱量を計算する際の時間 Δt については、ペDESTAL内の粒子状デブリの温度が床ドレン配管融点まで低下するまでの時間とする。具体的には、第5図に、3.にて側壁コンクリートの侵食量を解析コードMAAPで評価した場合のデブリ温度の時間変化を示すが、この

グラフにおいて床ドレン配管融点：1,427℃まで低下するまでの時間は40秒となる。

なお、ペデスタル内に存在する粒子状デブリと床ドレン配管内に流入した粒子状デブリはつながっており、ペデスタル内に存在する粒子状デブリが冷却されれば床ドレン配管内に流入した粒子状デブリも冷却されることで両粒子状デブリの温度は同一と考えられることから、床ドレン配管の侵食評価においては、第5図のデブリ温度の時間変化を床ドレン配管内に流入した粒子状デブリとして適用している。ただし、床ドレン配管内に流入した粒子状デブリはコンクリートと接触しないことから、第5図で考慮している側壁コンクリートへの伝熱を考慮しない場合を仮定すると、床ドレン配管融点：1,427℃まで低下するまでの時間は約42秒以下^{※2}となる。

※2 第5図の評価における側壁コンクリートへの熱流束は、初期は全熱流束（水プール及び側壁コンクリート）の約5%であり、その後20秒程度で約1%まで低下する。側壁コンクリートの熱流束を保守的に約5%とし、これを考慮しない場合、第5図のデブリ温度の低下率は約5%遅くなる

(2) 評価結果

評価の結果、40秒間及び42秒間での配管への伝熱量は、それぞれ配管長さ1m当たり約4.6MJ及び約4.8MJとなる。

一方、デブリと接触している部分の配管が、床ドレン配管融点である1,427℃まで温度上昇するために必要な熱量は、配管長さ1m当たり約5.1MJとなるため、配管の温度は融点に至らず、侵食は生じない結果となった。

以上より、コリウムシールド高さを超える粒子状デブリがペデスタルの

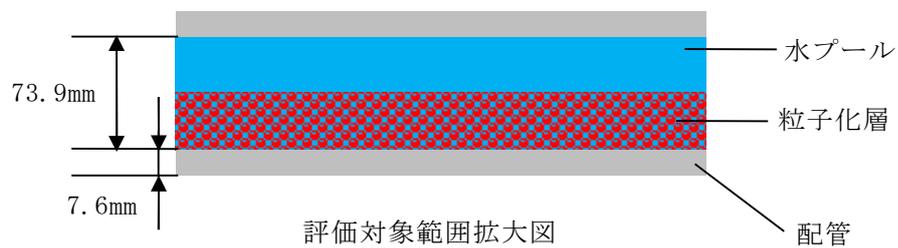
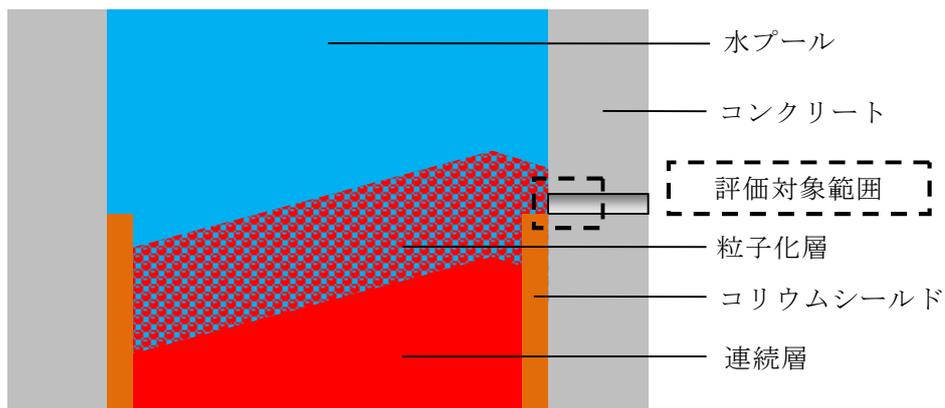
構造健全性に影響を与えることはないことを確認した。

5. まとめ

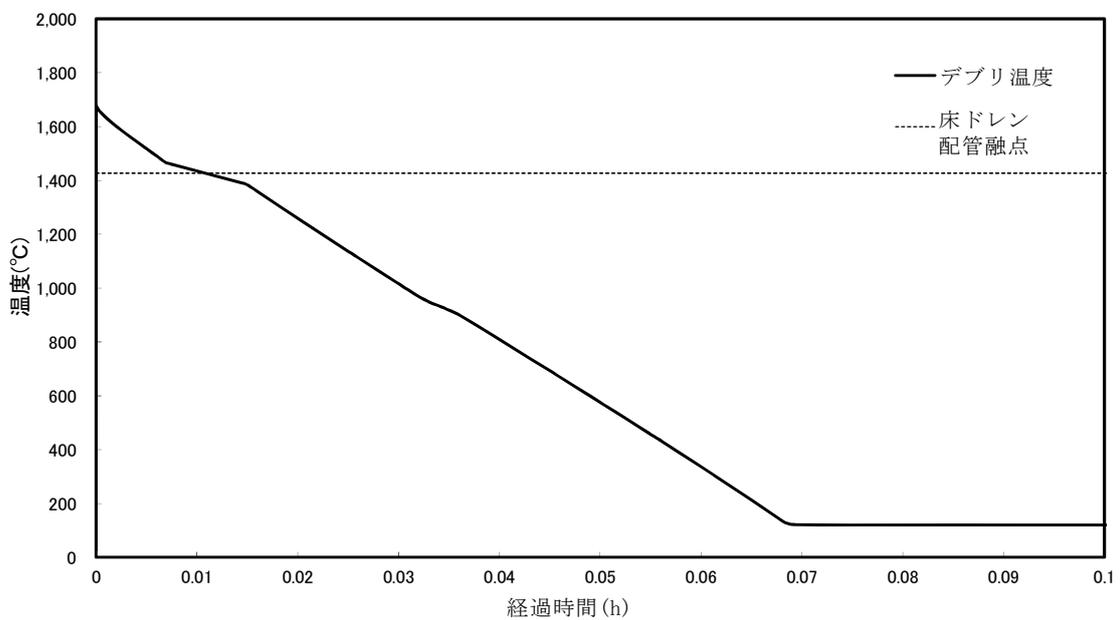
以上のおり，コリウムシールド高さを超えた粒子状デブリにより，側壁コンクリート及び床ドレン配管の侵食は生じないことを確認した。したがって，コリウムシールド高さを超える粒子状デブリがペDESTALの構造健全性に影響を与えることはない。

参考文献

- [1] 日本機械学会，“伝熱工学資料 改訂第4版”，（1986）.



第4図 床ドレン配管侵食評価のイメージ

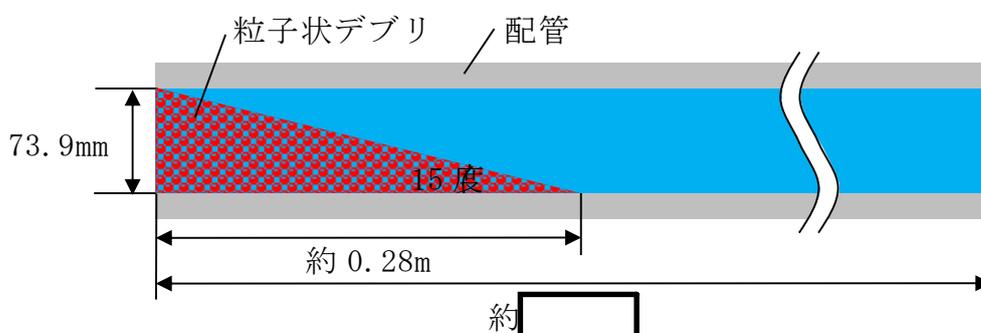


第5図 側壁コンクリート侵食量評価時のデブリ温度の時間変化
 (MAAP解析結果)

配管内に堆積する粒子状デブリ量について

粒子状デブリが、駆動源がない状態で傾斜をもって堆積するとき、その安息角は小さいものでも 20 度程度であることが報告されている^[1]。床ドレン配管内に流入するデブリに対して、傾斜角度を上記より小さめに見積もった 15 度で堆積することを考えると、その流入距離は約 0.28m となり、床ドレン配管の長さを大きく下回る（第 1 図）。

これより、床ドレン配管内に一様に、配管の半分の高さまで粒子状デブリが堆積することを想定した場合、配管内に流入する粒子状デブリ量を実際よりも多く評価することとなり、配管に与えられる熱量の観点で保守的な条件となると考えられる。



第 1 図 配管内への粒子状デブリの流入イメージ

参考文献

- [1] S.Basso, PARTICULATE DEBRIS SPREADING AND COOLABILITY, KTH, 2017.

床ドレン制限弁の損傷を仮想した場合のペDESTAL内水位について

1. はじめに

床ドレン配管内への粒子状デブリの流入はほとんどなく、流入しても床ドレン配管入口付近のみに堆積すると考えられる。また、仮に床ドレン配管入口付近のみだけでなく、床ドレン配管の奥に粒子状デブリが流入した場合でも、東海第二発電所では、シビアアクシデント時においてR P V破損までに代替循環冷却系により格納容器スプレイを実施するため、ダイヤフラムフロアにスプレイ水が溜まり^{*}、ドライウェルに近い配管及び制限弁は冷却される。したがって、ドライウェルに近い配管及び制限弁の侵食量は更に軽減されるため、これら設備が貫通することはないと考えられる。

※ 事象発生 90 分後から代替循環冷却系によるドライウェルスプレイ ($250\text{m}^3/\text{h}$) を開始することとしているため、R P V破損（最も早い大破断L O C A起因の場合、事象発生から約 3.3 時間後）までにベント管上端高さ相当の水位が形成される。

また、粒子状デブリが床ドレン配管の奥まで流入し、制限弁を損傷させることを仮想した場合にも、粒子化層の堆積高さはダイヤフラムフロアの床ドレンが集積する溝の高さの範囲内にとどまると考えられる。さらに、ダイヤフラムフロア上には、ベント管上端高さ（コリウムシールド上端から約 0.41m）までスプレイ水等が存在するため、流出した粒子状デブリの冷却は維持される。

ただし、床ドレン制限弁が損傷した場合、ペDESTAL内の冷却水が床ドレン配管及び制限弁を介してダイヤフラムフロア上に流出し、ベント管よりサプレッション・チェンバに流入することで、ペDESTAL内の水位が低下する

可能性がある。ここでは、代替循環冷却系によりペDESTAL内に冷却水が供給される状態において、床ドレン制限弁2個が損傷したと仮想し、ペDESTAL内の水位挙動について評価する。

2. 評価方法

ペDESTAL水位は、床ドレン配管での圧力損失H分だけドライウエル側よりも高くなるため、圧力損失Hを評価する。

(1) 水位条件

- ・ドライウエル側水位：コリウムシールド床面から 2.14m
(流出水はベント管上端からサプレッション・プールへ移行)
- ・ペDESTAL側最大水位：床から (人通用開口部高さ)

(2) 圧力損失評価方法

評価体系を第1図、評価条件を第1表に示す。以下の圧力損失計算式を用いて評価する。

- ・圧力損失計算式 (出典：日本機械学会編，機械工学便覧)

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

H：配管圧損 [m]，L：配管長さ [m]，D：配管内径 [m]，

L'：エルボや弁等に相当する長さ [m]，v：流速 [m/s]，

g：重力加速度 [m/s²]，λ：管摩擦係数

配管傾斜は、上り勾配を考慮せず水平を仮定する。また、床ドレン制限弁は保守的に全開状態を想定する。

3. 評価結果

配管 1 本破損の場合 $H=$ 約 5m, 配管 2 本破損の場合 $H=$ 約 1.2m となり, どちらもペDESTAL水位は人通用開口部を超える結果となる。

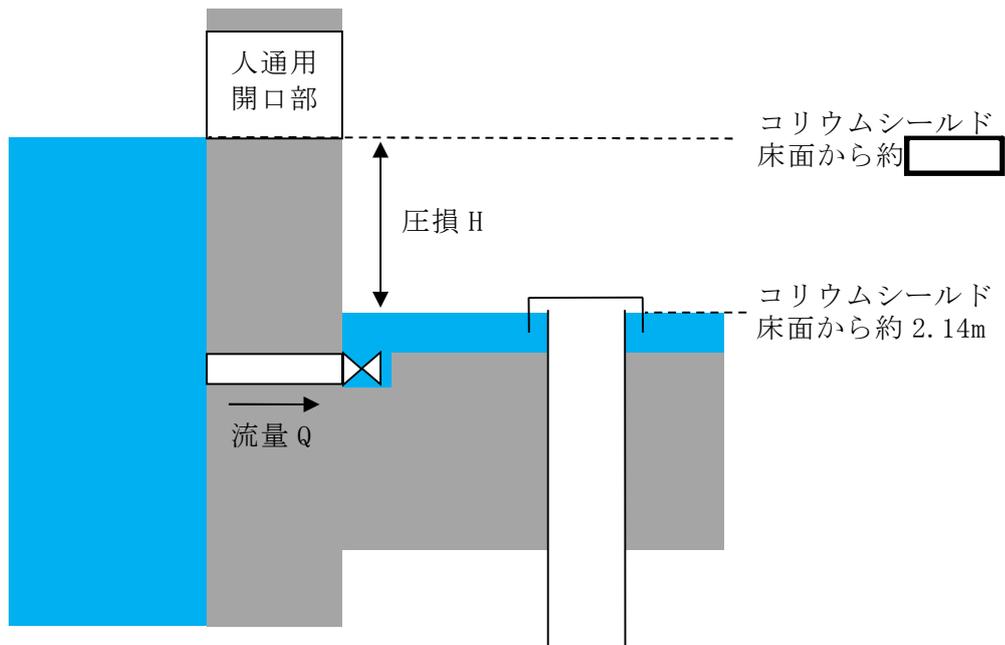
以上から, 制限弁の破損を仮想し, ドライウェル側への流出を仮想した場合においても, 代替循環冷却系による原子炉注水によって, ペDESTAL水位は維持される結果となった。

なお, 機器ドレン制限弁の損傷を想定し得るのは, 機器ドレン配管付近でデブリが円錐状に堆積した場合であり, この場合, 近くの床ドレン配管にもデブリの流入を想定し得るが, 180 度反対方向の床ドレン配管付近及び機器ドレン配管付近は円錐状の裾野となるためデブリは流入せず, 円錐状の頂上付近の床ドレン制限弁 1 個及び機器ドレン制限弁 1 個の損傷のみが想定し得る。このような場合においても, 機器ドレン配管 (50A) は床ドレン配管 (80A) よりも細いことから, ドライウェルへの流出流量は床ドレン配管 2 個の場合に包絡され, 代替循環冷却系による原子炉注水によって, ペDESTAL水位は維持される。

第 1 表 圧力損失計算要素

| | 単位 | 配管 1 本 | 配管 2 本 |
|--------------------------|-------------------|--------|--------|
| 配管内径 : D | m | 0.0739 | 0.0739 |
| 流量 | m ³ /h | 100 | 50 |
| 流速 | m/s | 6.48 | 3.24 |
| 管摩擦係数 : λ | — | | |
| 配管長 | m | | |
| 配管 L/D | — | | |
| 弁 *1 (L'/D=□) | 個 | 1 | 1 |
| 管入口 *1 (λ · (L'/D)=□) | 個 | 1 | 1 |
| 開放端 *1 (λ · (L'/D)=□) | 個 | 1 | 1 |

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



第 1 図 評価体系