

東海第二発電所

重大事故等対策の有効性評価

(審査資料抜粋)

平成 30 年 5 月

日本原子力発電株式会社

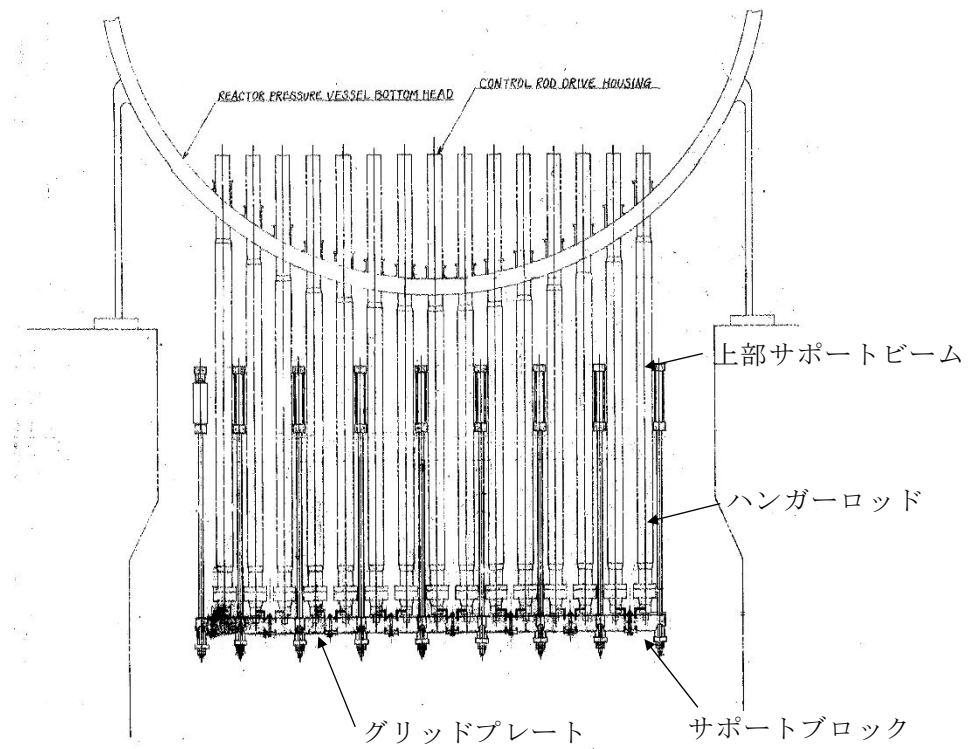
本資料のうち、 は営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

溶融物量として考慮するペDESTAL（ドライウェル部）内構造物の
設定について

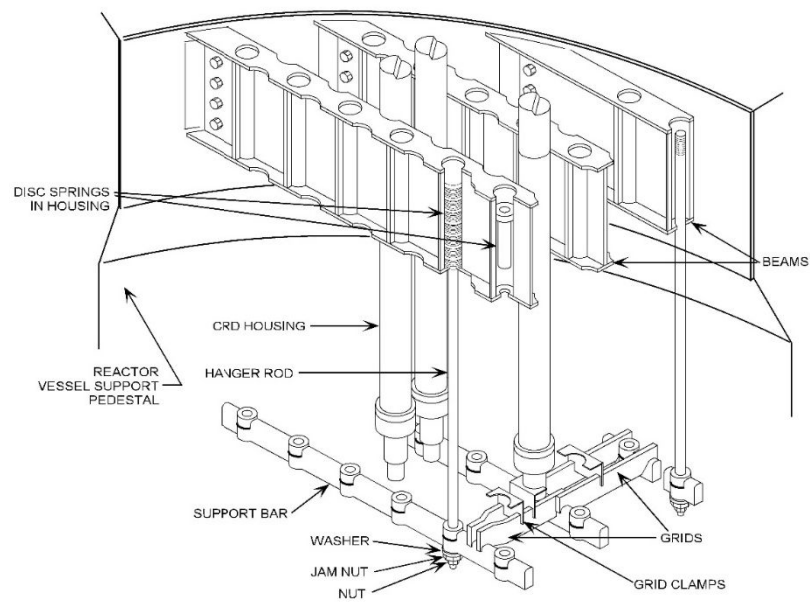
1. 原子炉圧力容器の破損箇所の想定

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（ドライウェル部）（以下「ペDESTAL」という。）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。

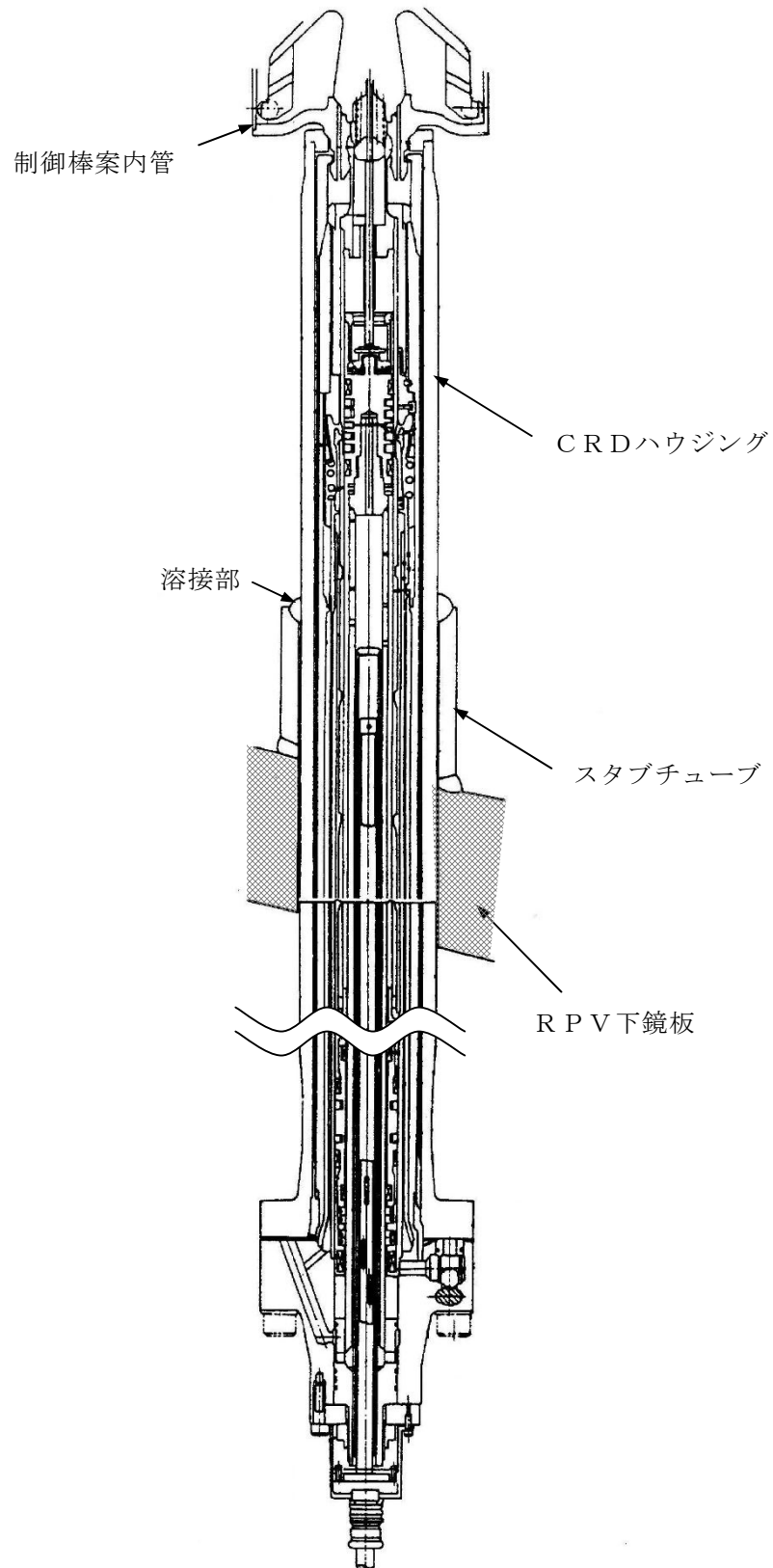
また、CRDハウジングや核計装管の溶接部は複数存在することから、デブリが滞留した下部プレナムの状況によっては、複数箇所からデブリが流出する可能性がある。ただし、RPV下部の形状及びデブリ流出に伴う下部プレナム内のデブリ深さの減少を踏まえると、CRDから流出するデブリ量は中心から外側になるにつれ少なくなることから、外側のCRD及びその下部のCRDハウジングサポートが溶融する可能性は小さくなると考えられる。



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、溶融物となりペデスタル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、ペデスタル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C R D及びC R Dハウジングの破損本数としては、M A A P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C R D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、M A A P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H I P S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C R D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I C I S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C R D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

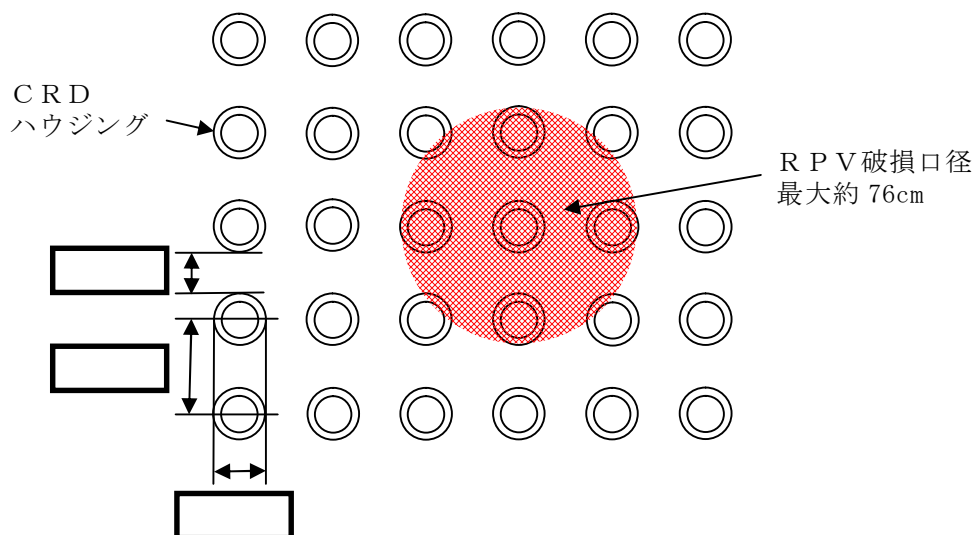
	項目	考え方
R P V 内	炉心位置に存在する構造物 (燃料集合体, 下部炉心支持板, 制御棒案内管等)	・炉心位置に存在する構造物は, 炉心損傷及び炉心 溶融に伴い溶融すると考えられる。
	下部プレナムに存在する構造物 (R P V下鏡部, C R Dハウジン グ, 核計装管, スタブチューブ) の一部	・C R Dや核計装管の溶接部の溶融及び貫通まで に, R P V内のR P V下鏡部, C R Dハウジング, 核計装管等はある程度溶融すると考えられる。 ・ただし, 溶融炉心が下部プレナムに移行後も, 一 時的にC R Dハウジング内に存在する冷却水の 冷却効果により, C R Dハウジング及び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.

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 M A A P 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（ドライウェル部）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。

なお、感度条件としては、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

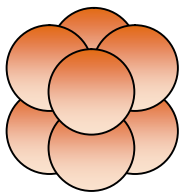
Particles	Wt. (g)	Wt. (%)
6mm steel spheres	11,371.6	43.74
3mm steel spheres	6442.5	24.78
5-10mm Al ₂ O ₃	5410.9	20.81
2-5mm Al ₂ O ₃	2775.0	10.67
Total	26,000.0	100.00

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

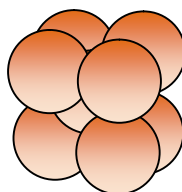
第 2 表 試験における粒子組成

	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

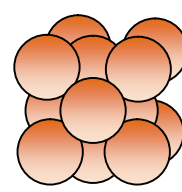
※ $d_{eq} = (\sum m_i / d_i)^{-1}$



単純立方格子 : 0.48



体心立方格子 : 0.32



面心立方格子 : 0.26

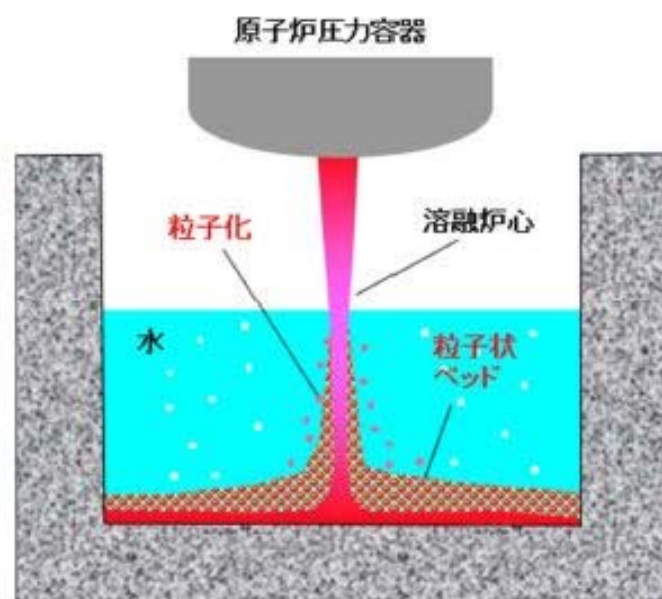
第 1 図 立方格子とポロシティ

- [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（ドライウエル部）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ッドを形成するものと想定される（第1図）。このようなデブリの拡がりにおいて、熔融物の拡がり距離と粒子状ベッドの堆積形状に不確かさが想定される。



第1図 ペDESTAL（ドライウエル部）におけるデブリ挙動の概念

2. デブリの拡がりに関する知見

(1) 熔融物

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

れている。PUL i MS 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デスタル半径が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。PUL i MS 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は促進されることが考えられる（第1表）。

- ・溶融物重量のPUL i MS／実機値に対して冷却材重量のPUL i MS／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、溶融物の着床時の温度は高い傾向となることから、床面上での拡がりにおいても拡がり易い傾向となる
- ・溶融物密度は実機条件の方が大きく、慣性による拡がり効果が大きい
- ・粘性係数については、実験と同程度か小さいものと考えられ、実機条件ではより拡がり易いと考えられる

- ・表面張力については不確かさが大きいパラメータであるが、表面張力が大きいほど床面上を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（ドライウェル部）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	熔融物	UO ₂ -ZrO ₂ -SUS 等	Bi ₂ O ₃ -WO ₃	-
	熔融物重量[kg]	約 300×10 ³	約 47	約 0.16×10 ⁻³
	液相線温度[K]		約 1,143	-
	固相線温度[K]		約 1,143	-
	熔融物過熱度[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	
熔融物冷却材中挙動	L/L _{br} (水深／ブレイク アップ長さ※) ※Taylor 関連式	約 0.08～約 0.23	約 0.35	約 1.5～4.4
熔融物床面上挙動	熔融物密度[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 熔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 P D S－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 P D S－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、熔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期間で均一化される。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、P U L i M S 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、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。P U L i M S 実験は熔融物を水中に落下した実験であり、熔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

P U L i M S 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、ポロシティやペデスタル（ドライウェル部）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。

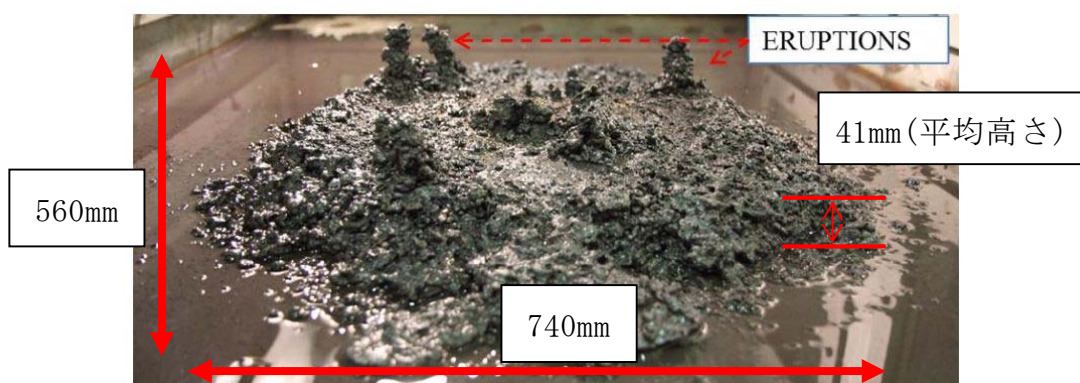
第 2 表 P U L i M S 実験条件と結果

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 P U L i M S 実験結果 (E4)

(2) 堆積高さ評価

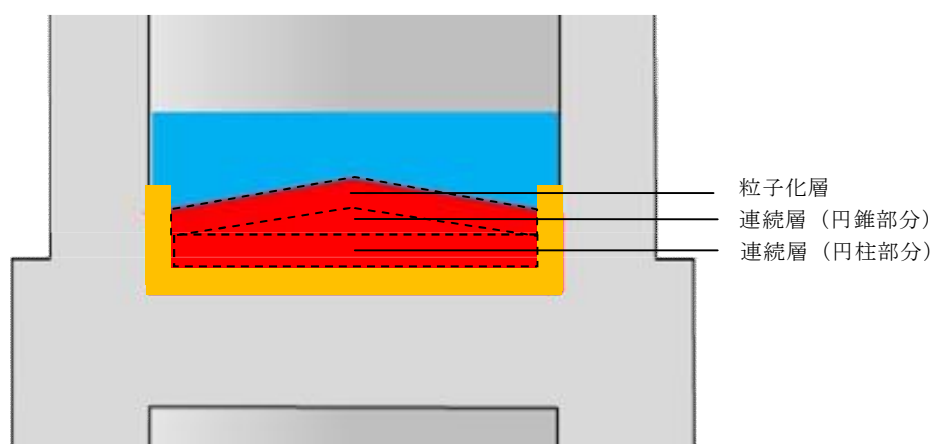
ベースケース※の堆積高さに対してアスペクト比を考慮した場合のデブリの堆積形状として、第3図のように連続層については円柱上に円錐が堆積した形状とし、その上に粒子化層が一様に堆積する形状を仮定する。

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デスタル直径 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 MAA P 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。

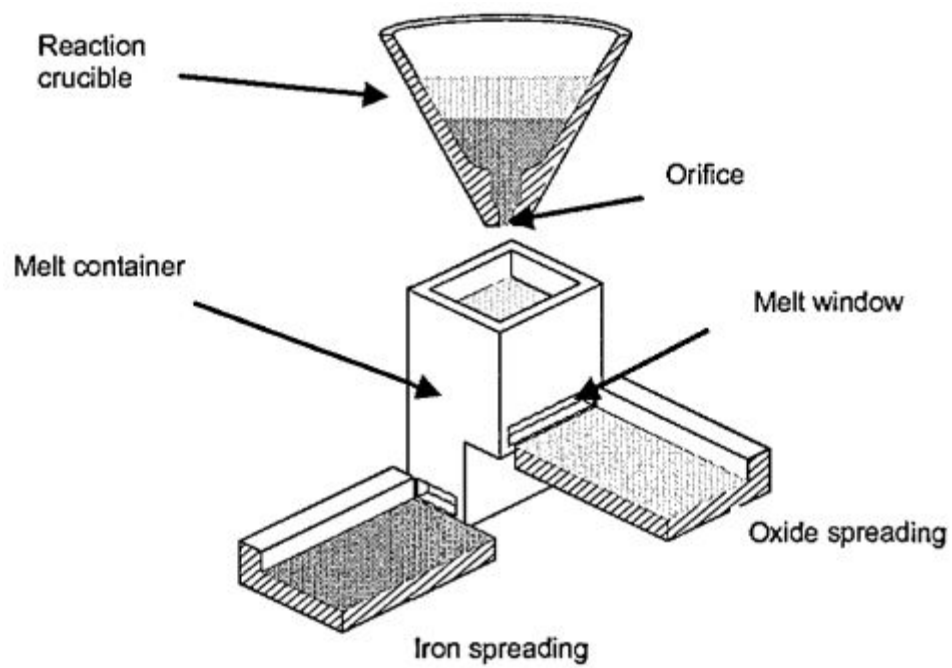
溶融物拡がりに関わる実験

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、熔融物の組成、放出速度や温度、床の材質（コンクリート、セラミック）をパラメータに熔融物の拡がり実験が行われている。VE-U7 実験では、酸化物熔融物（ 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 の酸化物熔融物を 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)



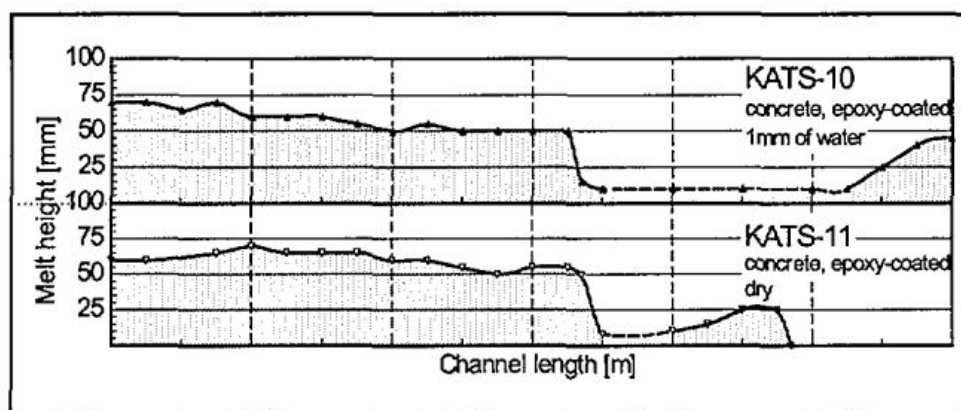
(2D)

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

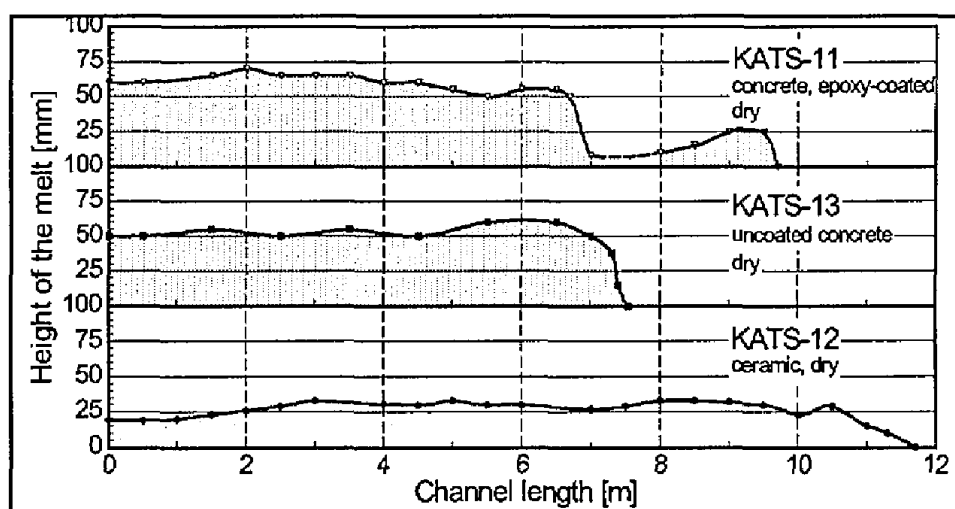
第 1 表 K A T S 実験条件と拡がり距離（酸化物溶融物，1D 拡がり）^[2]

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

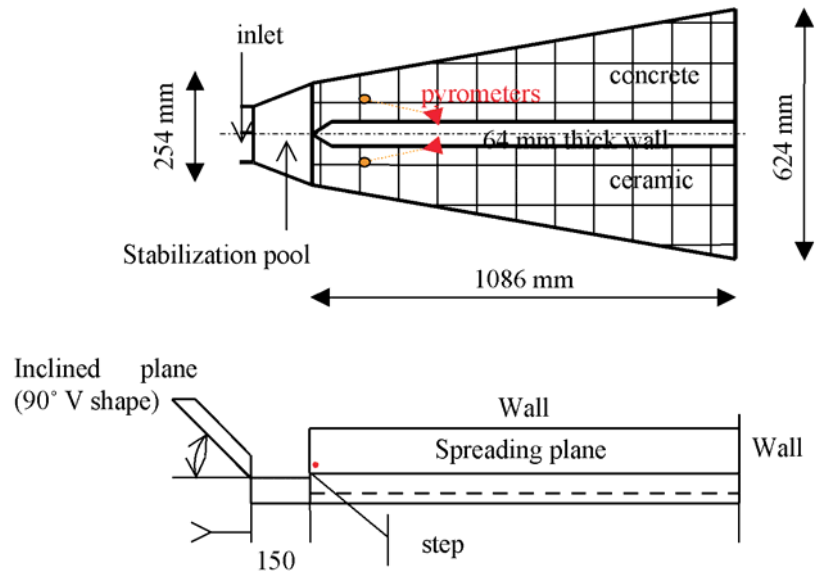
*) Cordierite (Al_2O_3 37 wt%, SiO_2 52 wt%, MgO 6,5 wt%)



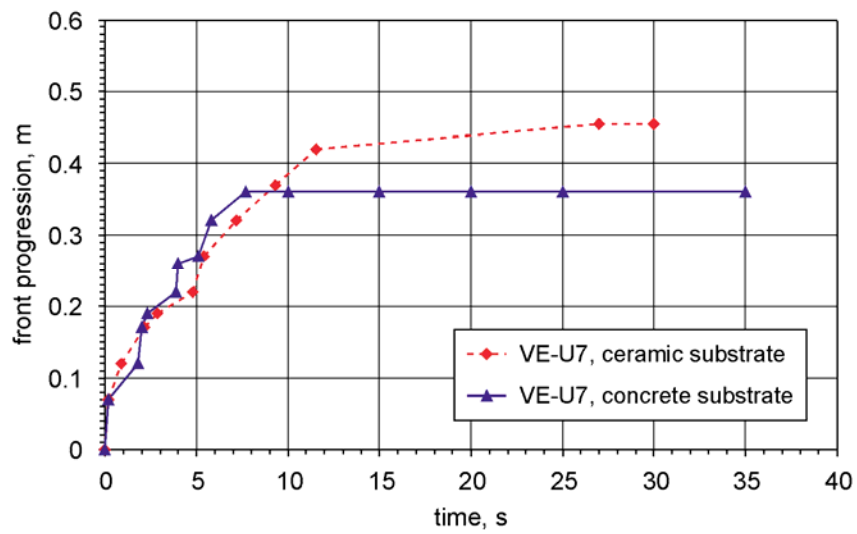
第 3 図 K A T S 実験の水の有無の影響（酸化物溶融物，1D 拡がり）^[2]



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.

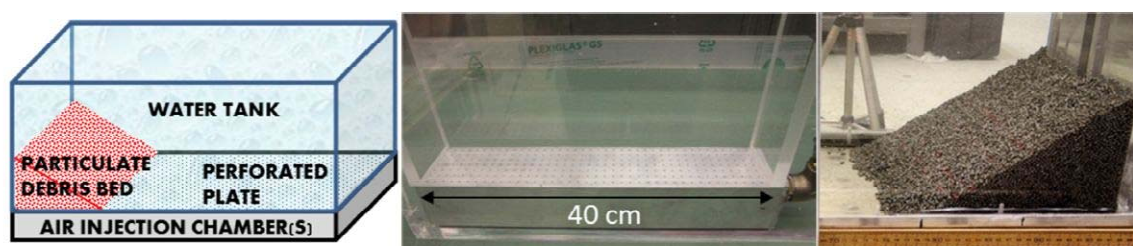
P D S 実験について

1. はじめに

スウェーデン王立工科大学（KTH）で実施された P D S 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) P D S - C 試験

c) P D S - E 7 ~ 2 3 試験

第 1 図 実験装置概要図

また，P D S 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。

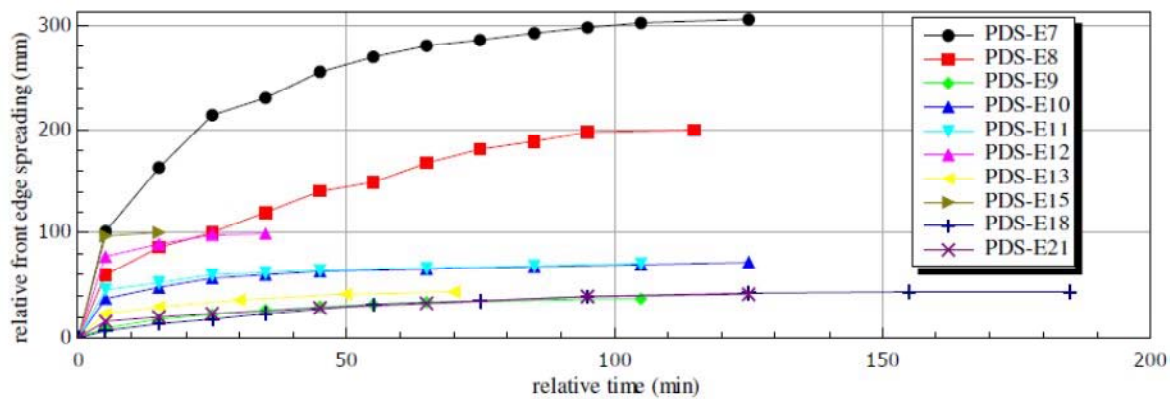
第 1 表 P D S 実験におけるパラメータ設定

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)

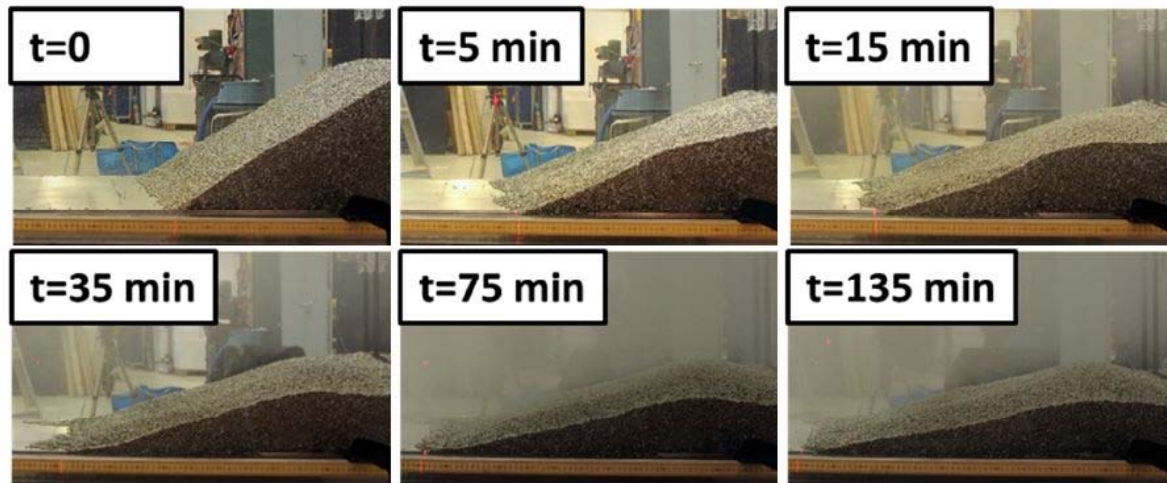
3. 実験結果

(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 P D S - E 7 実験結果

第 2 表 P D S - 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 (dm³)				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) P D S - C 実験

実験マトリックスを第 3 表に示す。P D S - C 実験の気相流体速度は

0.34 m/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ことが確認されている。

実機においては，熔融炉心が落下した直後は，高温の熔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.

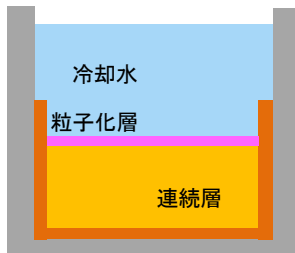
円錐状の堆積や偏心位置での堆積の想定について

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。

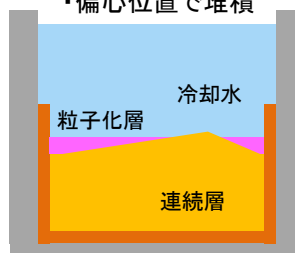
- ・ P U L i M Sは熔融物の拡がりを確認したものであり，実機より厳しい条件
※でもアスペクト比が1:16程度
- ・ 粒子化層はより均一に拡がりやすく，実機で最も考え得る状態は，アスペクト比1:16より緩やかな凹凸のある連続層（熔融物）に粒子化層が被さった状態と考えられる
- ※ 実機条件に比べて，P U L i M S実験条件は熔融物過熱度及び比熱が低くP U L i M S実験条件の方がデブリが固化しやすいこと，P U L i M S実験では崩壊熱を模擬していないこと，実機では落下時の熔融物量が多く固化しにくいこと等

粒子化層が薄い場合

- ・連続層フラット

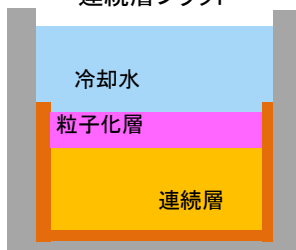


- ・連続層円錐状
- ・偏心位置で堆積

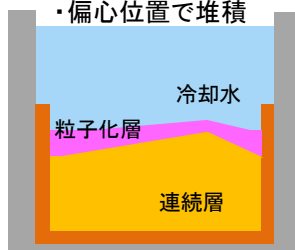


粒子化層が厚い場合

- ・連続層フラット

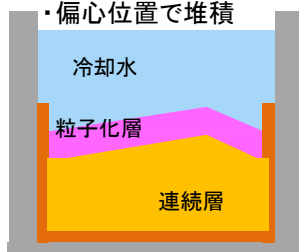


- ・連続層円錐状
- ・偏心位置で堆積



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

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、デブリがペデスタル（ドライウェル部）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C R D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
（P U L i M S 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。

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

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

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 $[\text{m}^3]$

V_m ：炉内デブリ体積 $36[\text{m}^3]$

Φ_{ent} ：粒子化割合 $0.227[-]$

V_s ：炉外デブリ体積 $4[\text{m}^3]$

V_{Blcn} ：連続層の円錐部分の下側の体積 $[\text{m}^3]$

V_{Tlcn} ：連続層の円錐部分の上側の体積 $[\text{m}^3]$

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 $[\text{m}]$

V_{lcy} ：連続層の円柱部分の体積 $[\text{m}^3]$

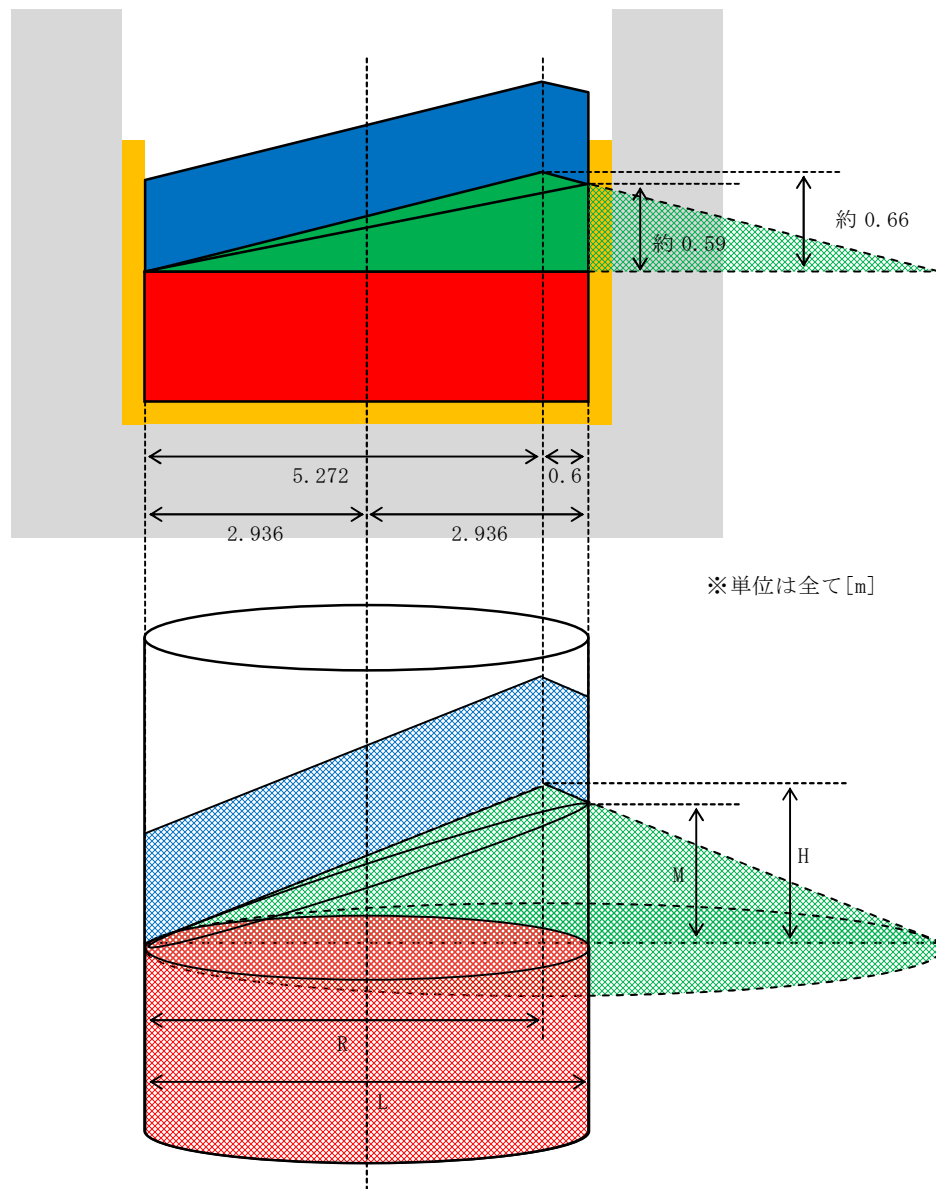
A_p ：コリウムシールド内底面積 約 $27.08[\text{m}^2]$

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超えた部分（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、デブリが広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

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（ドライウェル部）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（ドライウェル部）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

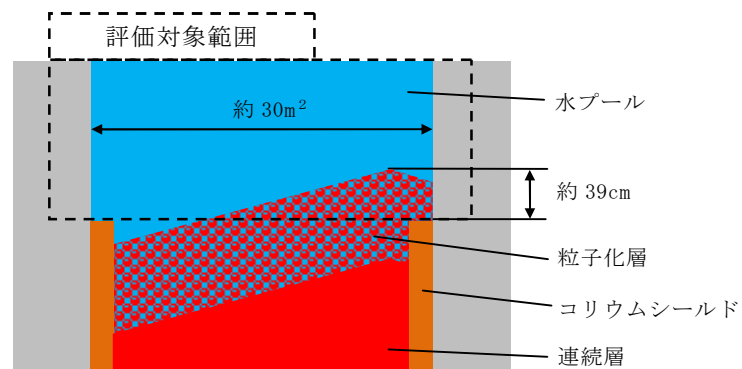
粒子状デブリ上面に水プールが存在する体系であることから、Lipinski-0D モデル(第 2 図)におけるポロシティ 0.35 での熱流束 $1.4\text{MW}/\text{m}^2$ を設定し、除熱量を計算する。

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、

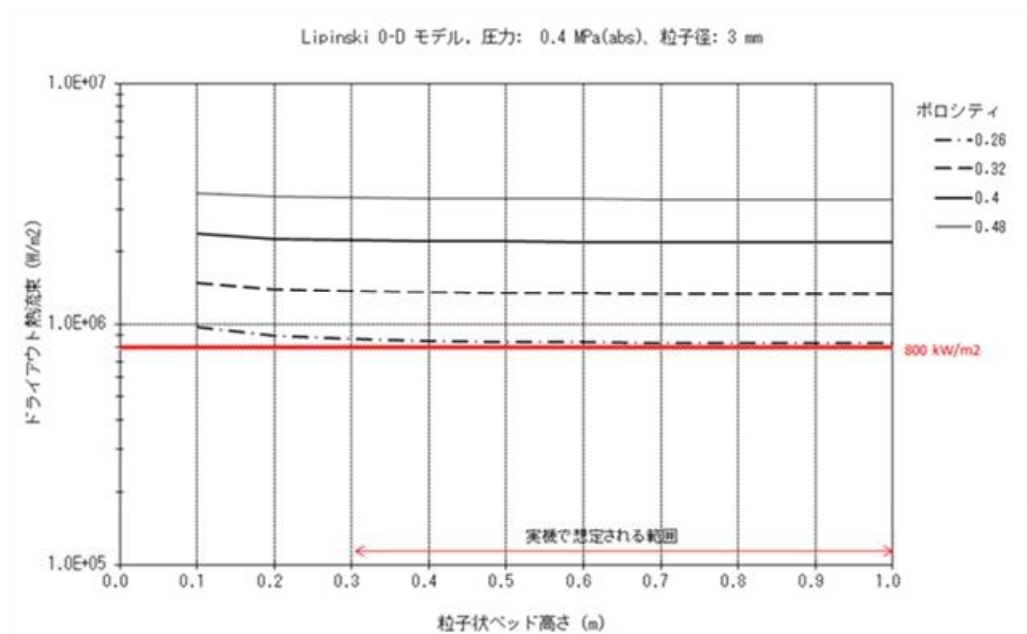
$$\text{除熱量} = 1.4\text{MW}/\text{m}^2 \times \text{約 } 30\text{m}^2 = \text{約 } 42\text{MW}$$

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、ペデスタル（ドライウェル部）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デスタル（ドライウェル部）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、保守的にペデスタル（ドライウェル部）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に評価する設定

- ・粒子状デブリの初期温度：約 °C

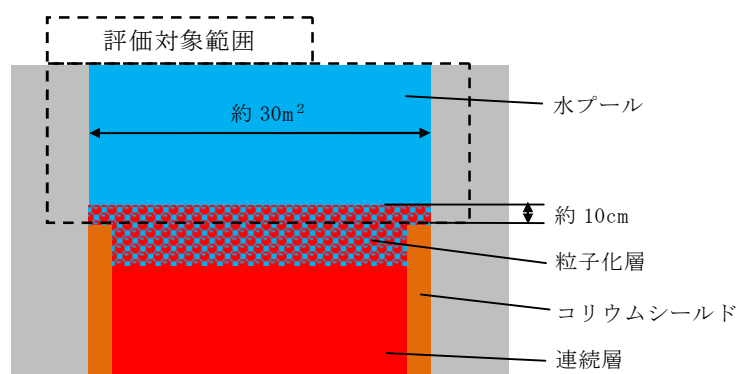
粒子状デブリは冷却固化していることから、固相線温度以下であるが、保守的に固相線温度（MAAP解析結果）を設定

- ・粒子状デブリと水プールの接触面積：約 30m^2

コリウムシールド高さより上部のペデスタル（ドライウェル部）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、デブリがペデスタル（ドライウェル部）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デスタル（ドライウェル部）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，別紙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℃
(M A A P 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℃（S U S の融点を設定）
- ・ 床ドレン配管熱伝導率(λ_1)：16.5W/mK（S U S の熱伝導率を設定）
- ・ 床ドレン配管密度(ρ_1)：7,890kg/m³（S U S の密度を設定）
- ・ 床ドレン配管比熱(c_1)：511J/kgK（S U S 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（M A A P 解析結果））
- ・ デブリ熱伝導率(λ_2)：W/mK（M A A P 解析結果）
- ・ デブリ密度(ρ_2)：kg/m³（M A A P 解析結果）
- ・ デブリ比熱(c_2)：J/kgK（M A A P 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℃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、ペデスタル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（ドライウェル部）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（ドライウェル部）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

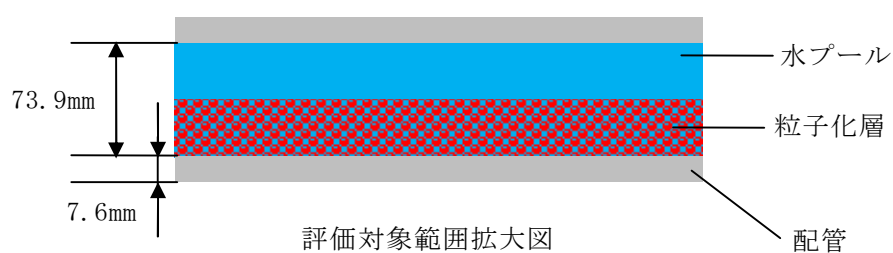
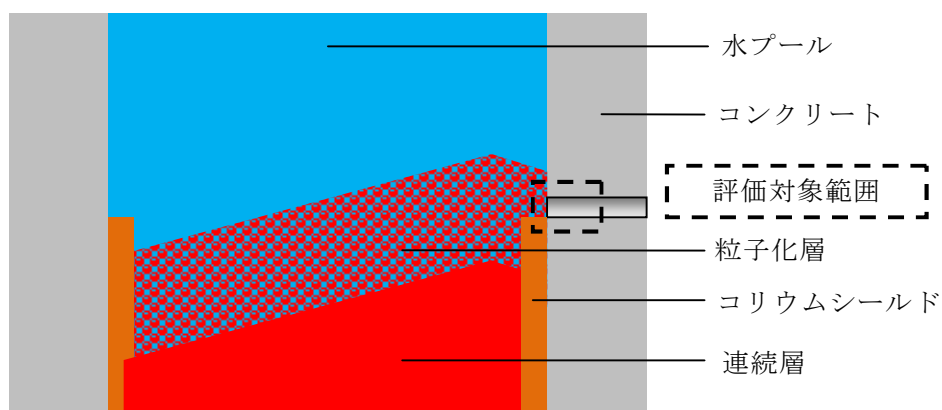
構造健全性に影響を与えることはないことを確認した。

5. まとめ

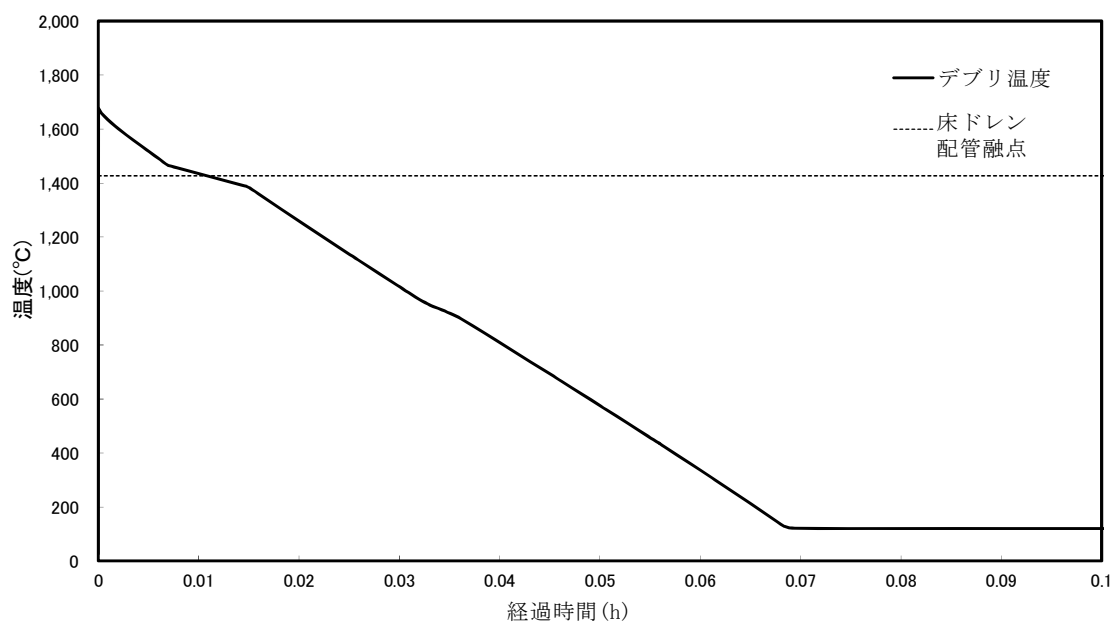
以上のとおり，コリウムシールド高さを超えた粒子状デブリにより，側壁コンクリート及び床ドレン配管の侵食は生じないことを確認した。したがって，コリウムシールド高さを超える粒子状デブリがペDESTALの構造健全性に影響を与えることはない。

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

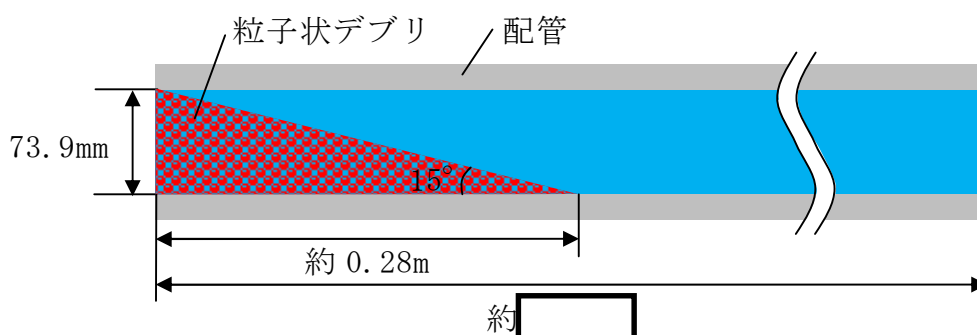


第5図 側壁コンクリート侵食量評価時のデブリ温度の時間変化
(MAAP解析結果)

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° 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° 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（別紙第 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。



別紙第 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（ドライウェル部）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（ドライウェル部）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、ペデスタル（ドライウェル部）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デスタル（ドライウェル部）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、ペデスタル（ドライウェル部）内の水位挙動について評価する。

2. 評価方法

ペデスタル（ドライウェル部）水位は、床ドレン配管での圧力損失H分だけドライウェ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

- ・ドライウェル側水位：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)
- ・ペデスタル側最大水位：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 (ドライウェル部) 水位は人通用開口部を超える結果となる。

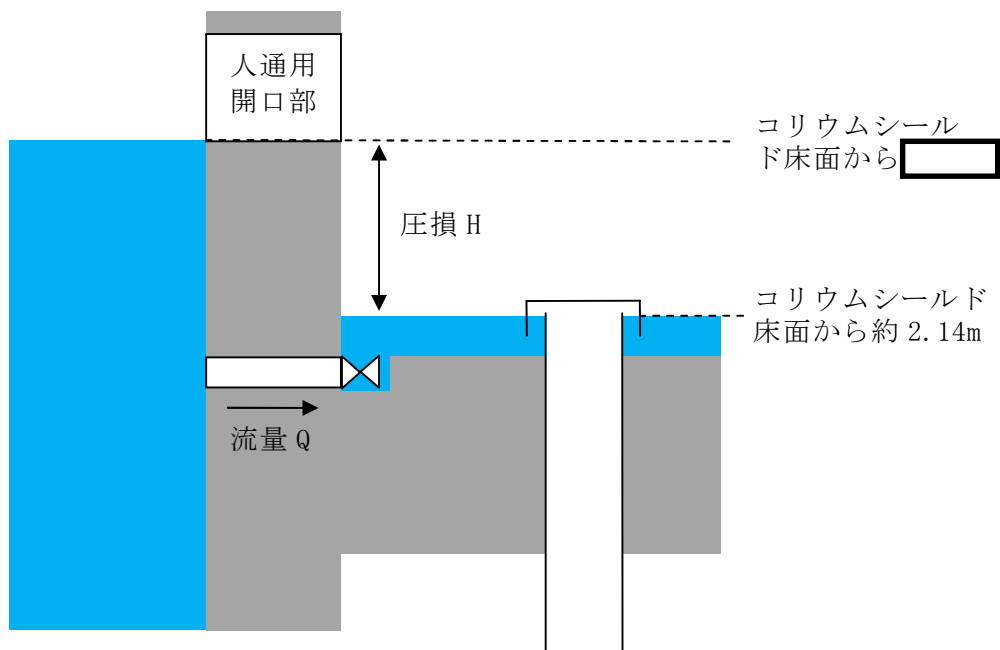
以上から, 制限弁の破損を仮想し, ドライウェル側への流出を仮想した場合においても, 代替循環冷却系による原子炉注水によって, ペDESTAL (ドライウェル部) 水位は維持される結果となった。

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° 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 (ドライウェル部) 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 ($\lambda \cdot (L'/D) =$)	個	1	1
開放端 *1 ($\lambda \cdot (L'/D) =$)	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

表 各ケースにおけるデブリ堆積高さ

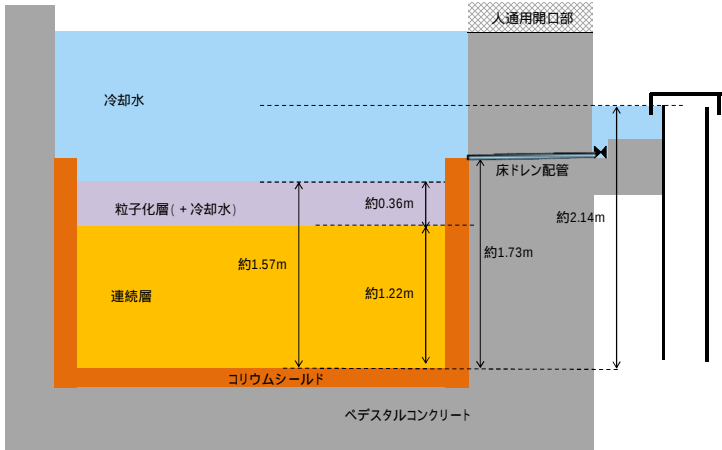
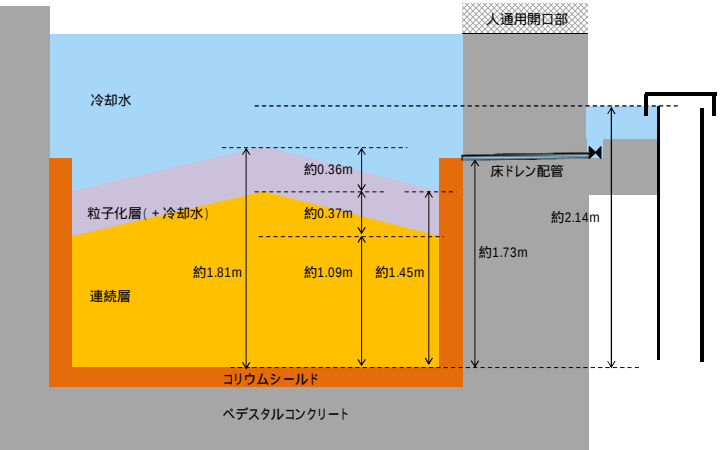
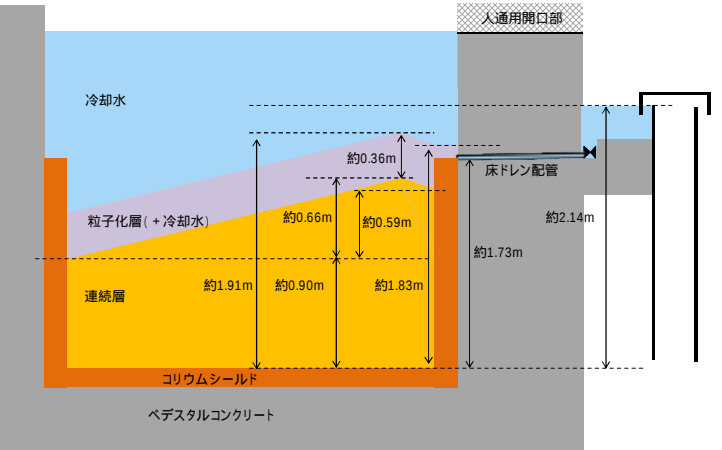
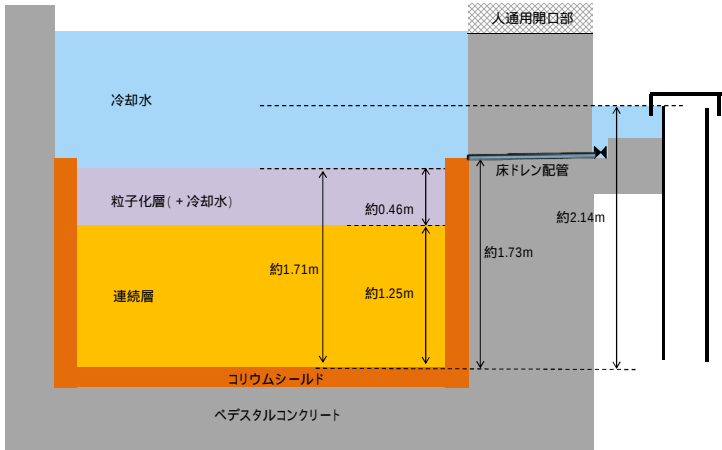
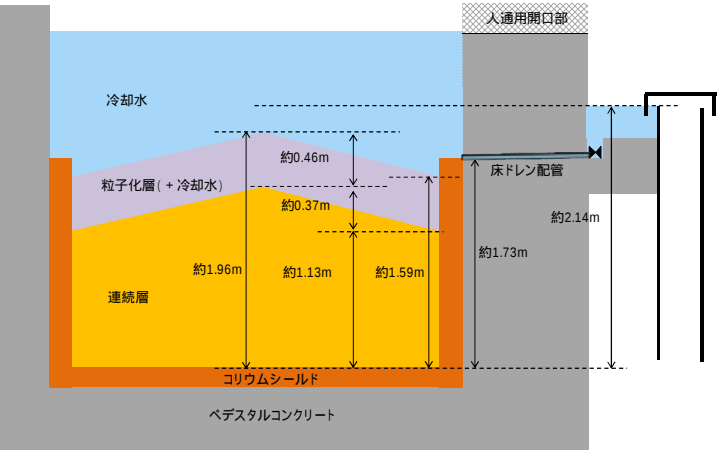
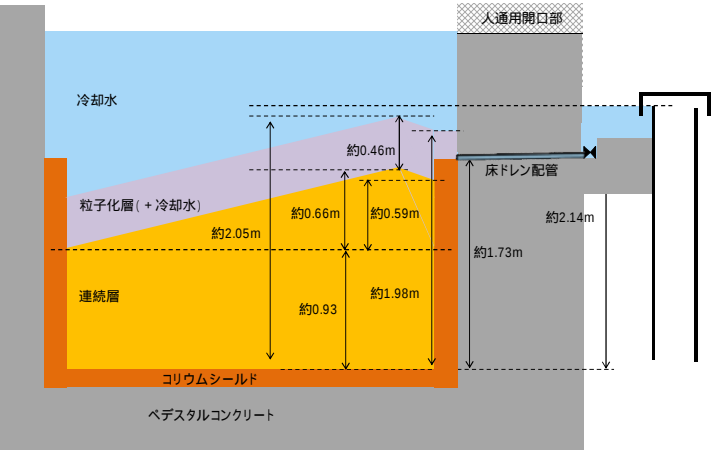
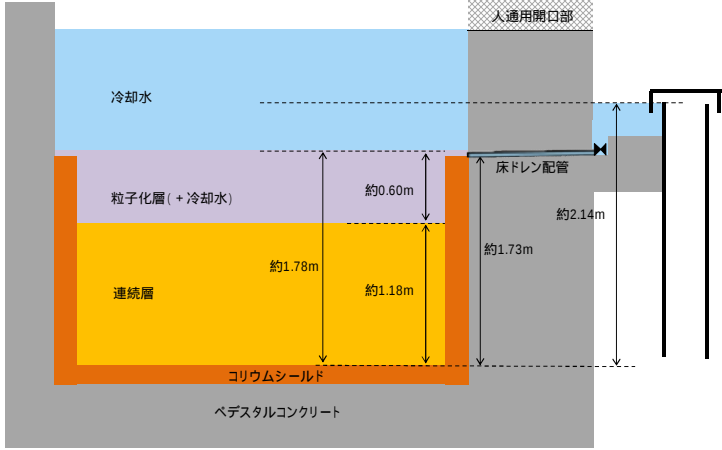
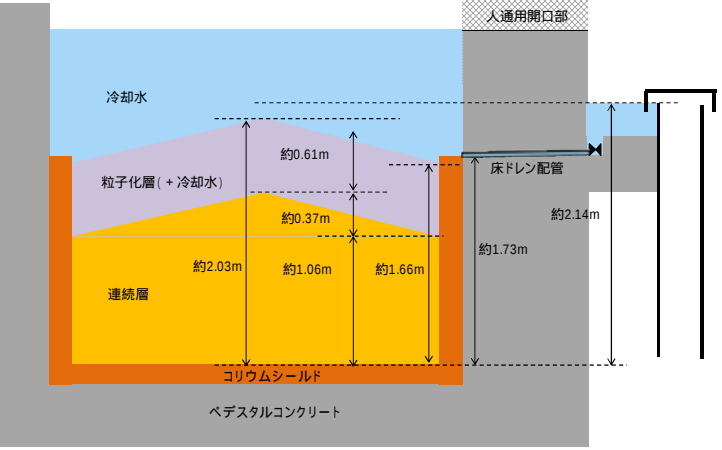
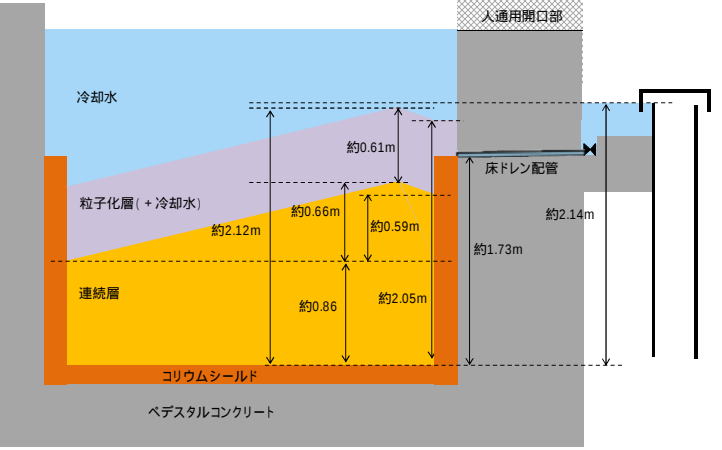
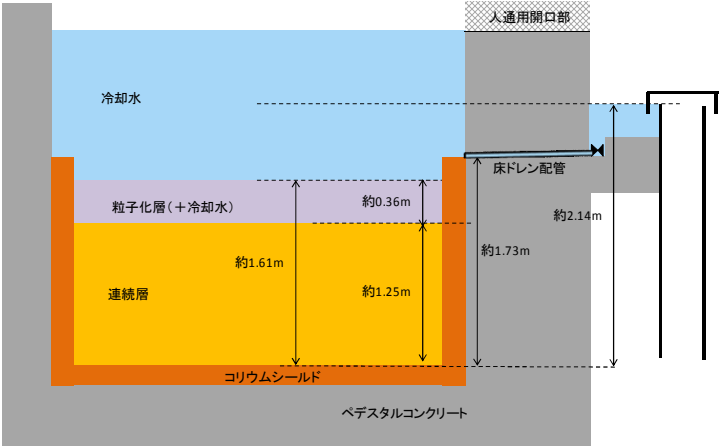
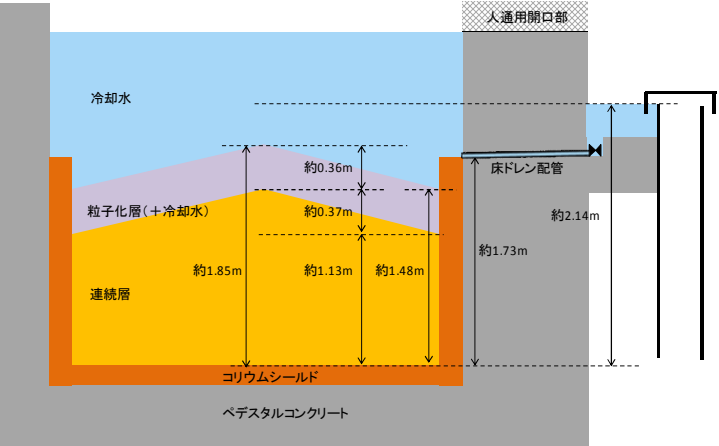
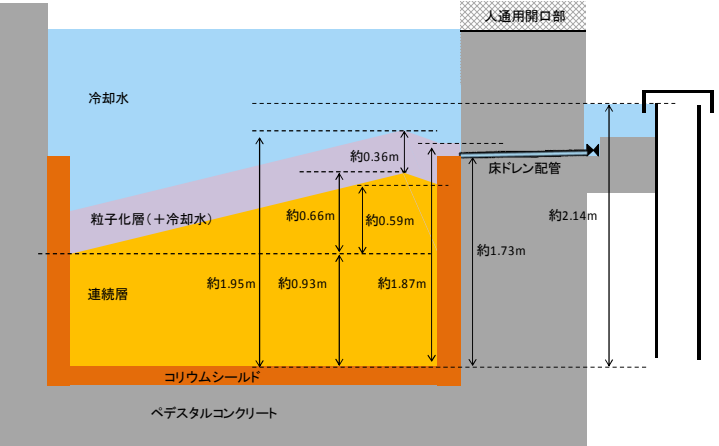
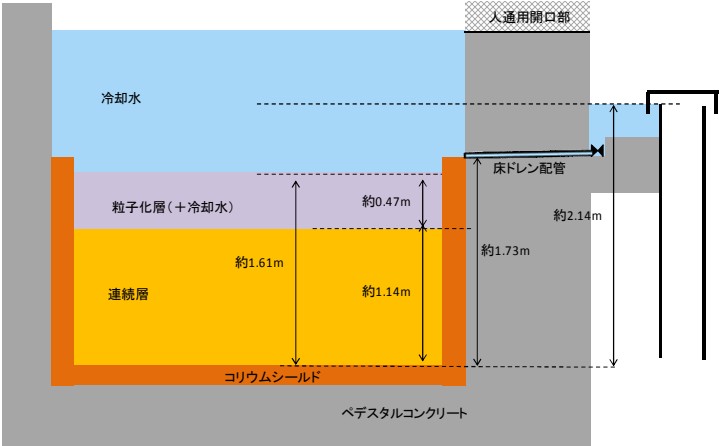
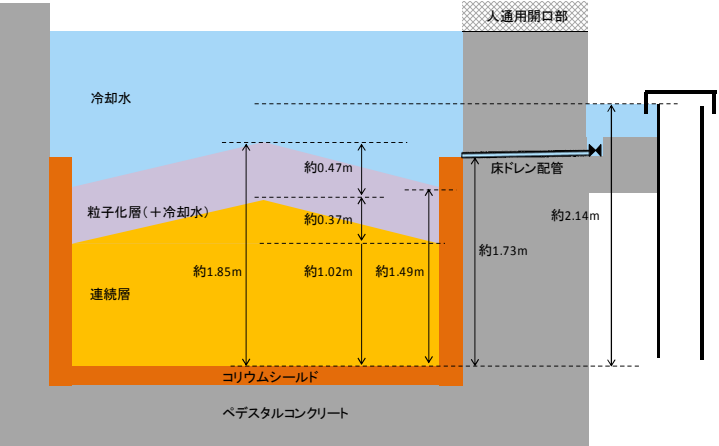
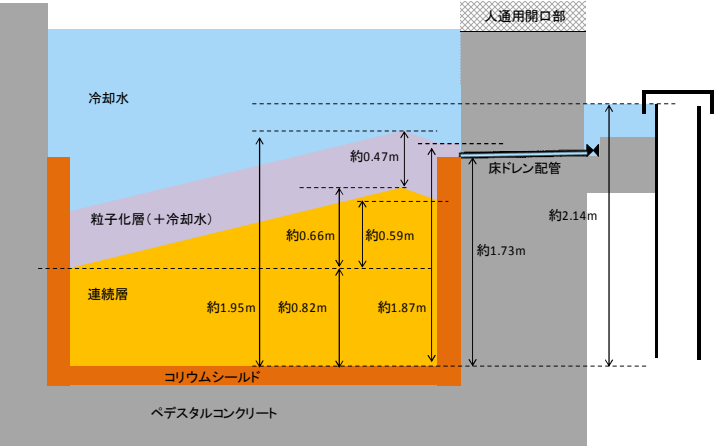
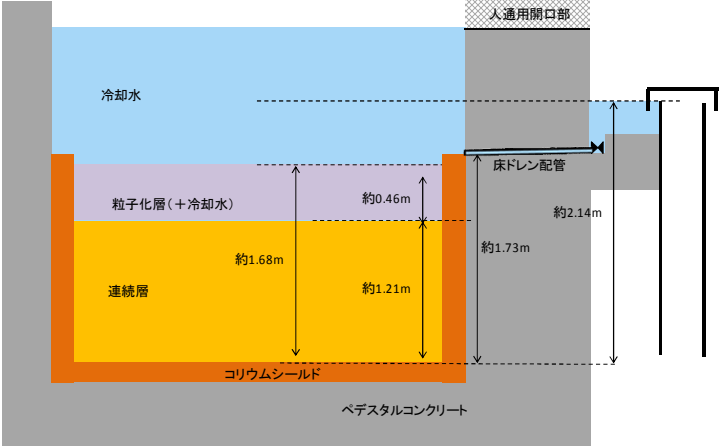
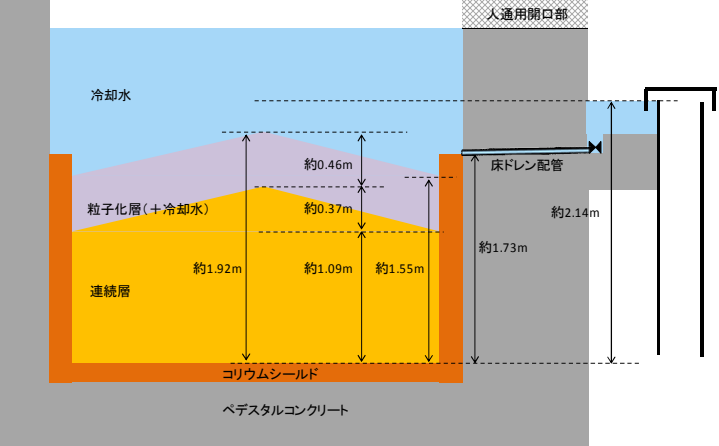
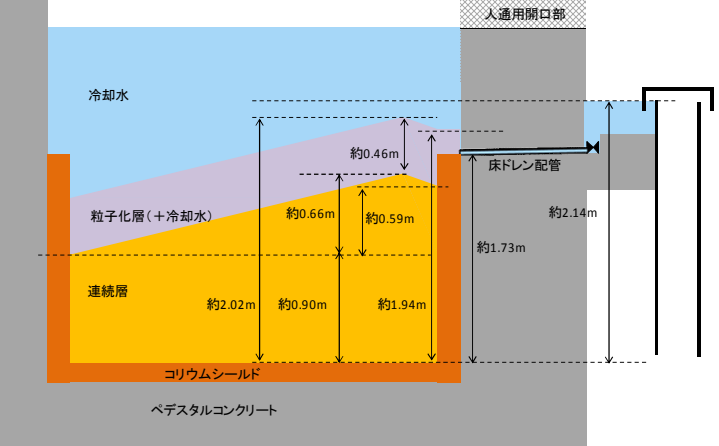
形状 体積	(1) ベース条件 均一化して堆積した場合	(2) 円錐状に堆積した場合 円錐部分のアスペクト比 1:16	(3) 偏心位置で堆積した場合 コリウムシールド壁面から 60cm 内側に偏心
ベース条件 溶融物量： 炉内：36m ³ 炉外：3m ³ 粒子化割合： 0.173 ポロシティ： 0.35	 デブリ堆積高さ：約 1.57m(コリウムシールド上端に対して約 16cm の余裕) (ベント管上端に対して約 57cm の余裕)	 デブリ堆積高さ(壁面)：約 1.45m(コリウムシールド上端から約 28cm の余裕) デブリ堆積高さ(頂点)：約 1.81m(ベント管上端から約 33cm の余裕)	 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)
コリウムシールド高さ， 厚さ設定条件ケース (感度条件 +) 溶融物量： 炉内：36m ³ 炉外：4m ³ 粒子化割合： 0.173 ポロシティ： 0.50	 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)	 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)	 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)
感度条件 + + 溶融物量： 炉内：36m ³ 炉外：4m ³ 粒子化割合： 0.227 ポロシティ： 0.50	 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)	 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)	 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)

表 感度条件①～③における堆積高さ

形状	体積		
	(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	 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)	 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)	 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)
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	 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)	 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)	 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)
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	 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)	 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)	 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)

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，ペデスタル（ドライウェル部）（以下「ペデスタル」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，原子炉压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

ペデスタル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，ペデスタル外へ流出するおそれがある。そのため，デブリをペデスタル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デスタル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。ペデスタル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デスタル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，ペデスタル床から約 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。

- ・ペデスタル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。ペデスタル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、ペデスタル内構造物への熱影響を抑制する観点では、粒子化していない溶融デブリ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溶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、粒子化デブリからの影響も緩和できるよう、粒子化デブリも含めたデブリ全量を保有できるように考慮する。

- ・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溶融デブリによる侵食量を評価し、ペデスタル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

デブリ体積高さ $H_{\text{debr i}}$ は、式(1)及び式(2)で算定される。ここで、ポロシテ

イは P U L i M S 実験等の知見を基に保守的な値として 0.5 を設定している。

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

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

V_m : 溶融物体積 [36m³]

V_s : ペDESTAL内構造物体積 [4m³]

Φ_{ent} : 粒子化割合 [0.173]

P : ポロシティ [0.5]

S_{fz} : コリウムシールドの設置を考慮した床面積 [m²]

L_{PD} : ペDESTAL床直径 [6.172m]

D_{CS} : コリウムシールド厚さ [m]

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

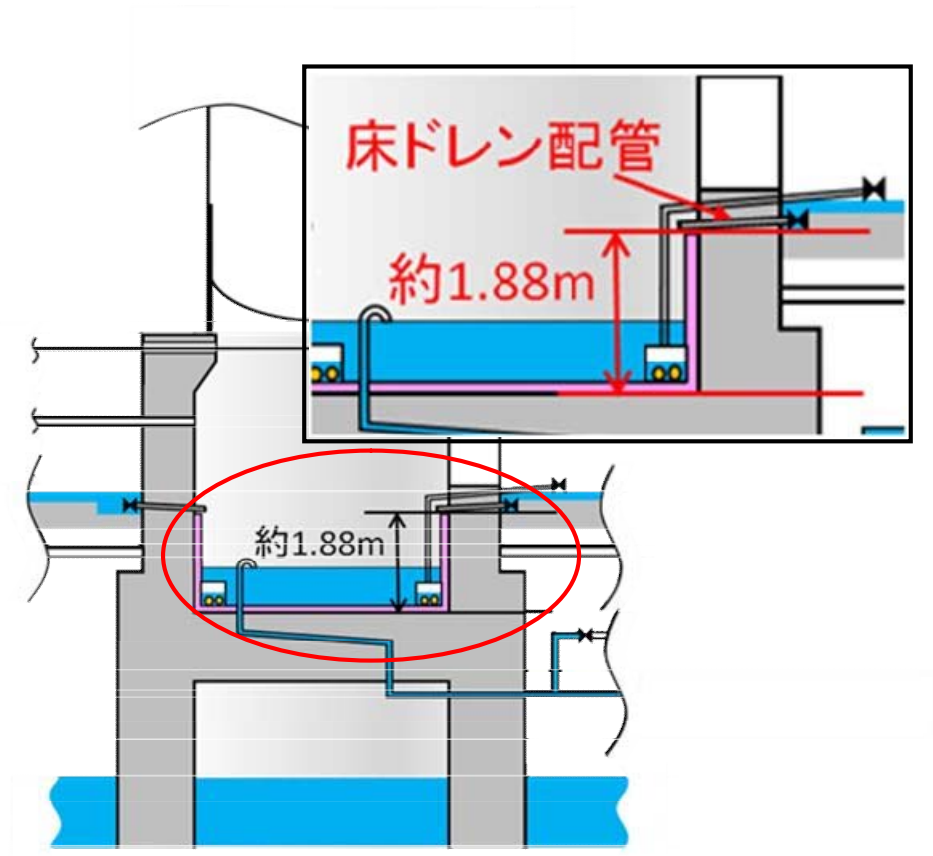
3.3 その他の影響を踏まえたコリウムシールド厚さの設定

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有効性評価にて確認している。また、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溶融デブリに着目すると、デブリ全量（溶融物体積 [約 36m³] 及びペDESTAL内構造物体積 [約 4m³]）が溶融デブリ

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 デブリがペデスタル外へ流出する可能性のある経路