

添付 1

溶融物量として考慮する制御棒駆動機構の設定について

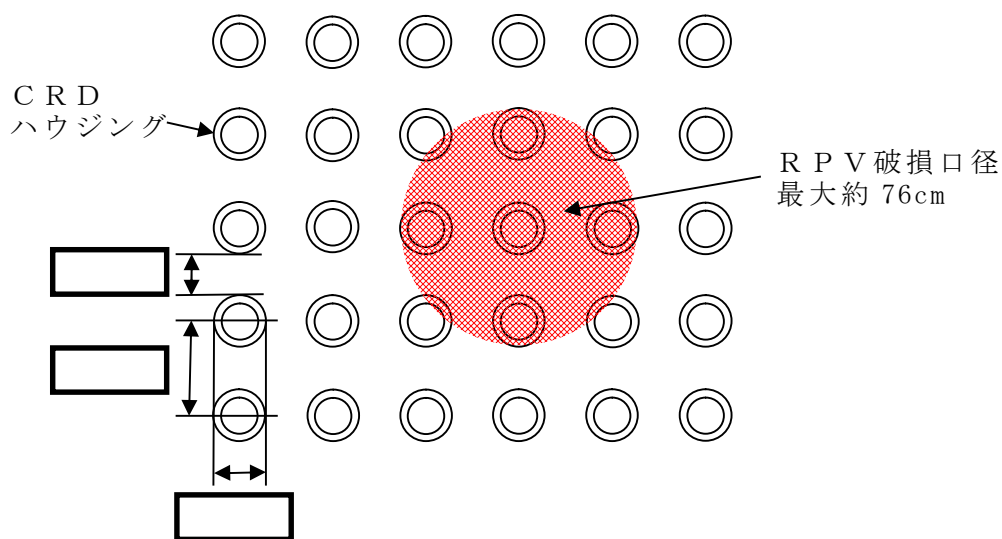
制御棒駆動機構（以下「CRD」という。）及びCRDハウジングの破損本数としては、MAAP解析においてRPV底部の破損後にアブレーションにより広がる最大の破損口径：約76cmに含まれる本数9本を考慮している（第1図）。また、ターンテーブル及びCRDハウジングサポートについては、アブレーションにより広がる最大の破損口径：約76cmを包絡する範囲として、一辺1mの正方形の範囲を考慮している。

ここで、第2図及び第3図に示すとおり、CRDハウジングサポートは、ペDESTAL内側の鋼板に固定された上部サポートビームにハンガーロッド等を介し、グリッドプレートを接続した構造によりCRDハウジングの逸出を防止する設計となっているため、RPV破損時に現実的には逸出は考えにくい構造となっている。このため、現実的なRPV破損時のデブリ流出箇所としては、CRDハウジングとスタブチューブ上部の溶接部に生じる間隙が考えられる（第4図）。以上を考慮すると、RPV破損時は上記溶接部からデブリが流出し、アブレーションにより口径が徐々に広がる状況になると考えられる。また、RPV下部の形状及びデブリ流出に伴う下部プレナム部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及びその下部にある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。一方、本評価では、外側のCRD及びその下部にあるCRDハウジングサポートの全てが溶融（例えば、第1図の破損口の外側付近に一部

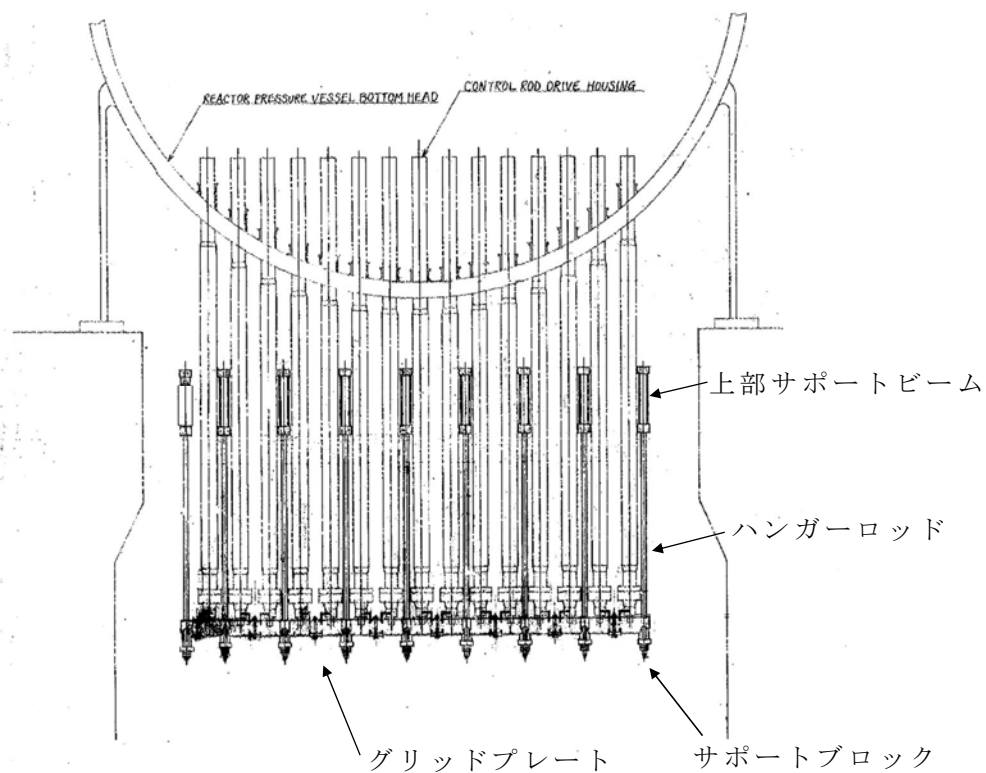
が入る 4 本の CRDハウジングが全て溶けると想定) するものと想定している。

また、解析コードMAAP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HIP S 実験で得られたデータと良好に一致することが確認されている (第 1 表)。

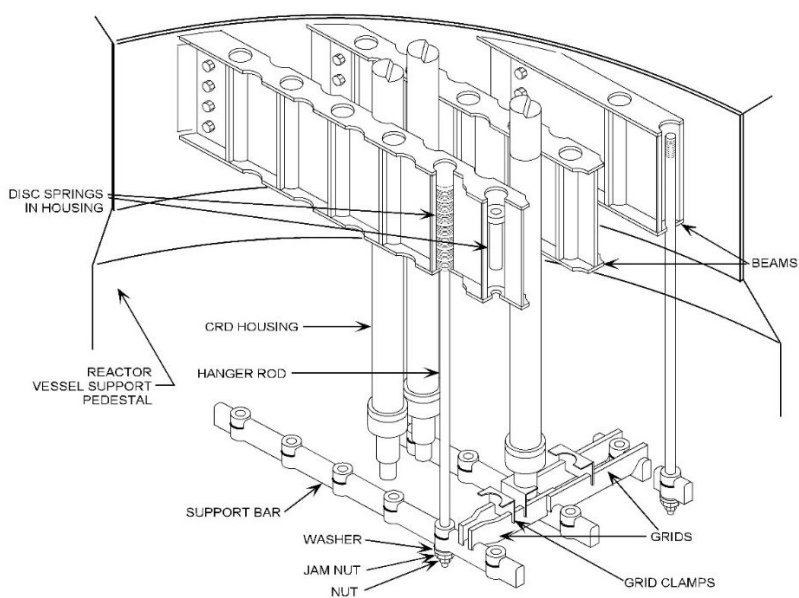
したがって、アブレーションによるRPV破損口径の拡大を考慮したCRDハウジング等のデブリ体積の評価についても、保守性を有していると考えられる。



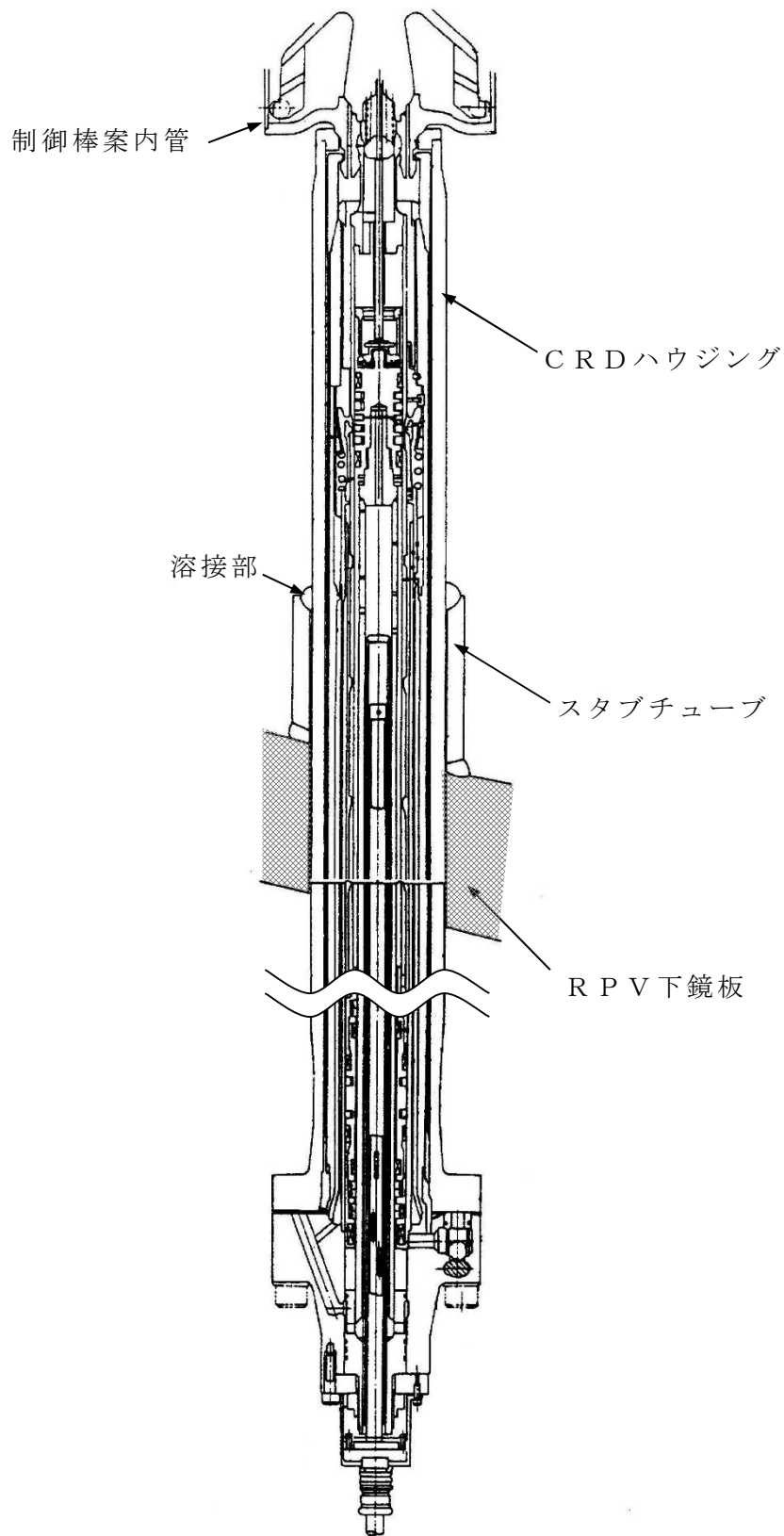
第 1 図 CRD配置とRPV破損口径の関係



第2図 東海第二発電所CRDハウジングサポート構造



第3図 CRDハウジングサポート構造俯瞰図 (参考) [1]



第4図 CRD概要図

添付1-4

第 1 表 H I P S 実験結果とアブレーションモデルの評価結果^[2]

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* [m]

ρ_{dj} : デブリジェット密度 [kg/m³]

ρ_w : 水密度 [kg/m³]

※ 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（ドライウエル部）水位）
- ・デブリジェット密度：（MAAP計算結果※）
- ・初期デブリジェット径：0.15m（CRD案内管径）

※ 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

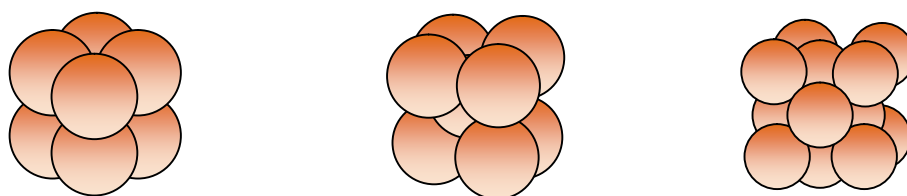
以上により評価した結果、粒子化割合は以下のとおり。

- ・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※¹）
- ・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※¹）

※1：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，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）～0.48（単純立方格子）を包絡する値として 0.5 を設定している。



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

粒子状デブリによる側壁コンクリートへの影響について

1. はじめに

粒子状デブリは、間隙の冷却水による除熱によりデブリ温度が速やかに低下すると考えられるため、側壁コンクリートへの影響は軽微であると考えられる。

ここでは、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、粒子状デブリの温度が高い場合を想定しても側壁コンクリートに与える影響が小さいことを評価する。

(1) 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

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する(第1図)。

- ・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 0.41（粒子化デブリがコリウムシールド高さを超える最少ポロシティ）での熱流束 $1.75\text{MW}/\text{m}^2$ を設定し、除熱量を計算する。粒子状デブリ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、

$$\text{除熱量} = 1.75\text{MW}/\text{m}^2 \times \text{約 } 30\text{m}^2 = \text{約 } 52\text{MW}$$

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。

(2) 粒子状デブリ温度が高い場合の影響評価

デブリ堆積高さの影響評価として、粒子状デブリがコリウムシールドを超えて堆積した場合のペDESTAL（ドライウエル部）の側壁コンクリートの侵食量を解析コード M A A P にて評価する。

① 解析条件

評価モデルは第 1 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）

- ・粒子化デブリの堆積高さ：5cm

デブリ影響評価条件における堆積高さを踏まえて設定

- ・粒子化デブリの初期温度：

➤ ベースケース

粒子化デブリは冷却固化していることから、デブリ温度として固相線温度 を想定する。

➤ 保守的ケース

更に保守的な条件として、連続層を含む全デブリの平均温度 を想定する。

上記を包絡する温度として を設定する。

- ・ 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

- ・ 崩壊熱：5cm 堆積分の粒子化デブリの崩壊熱

- ・ 粒子化デブリから上面の水プールへの熱流束： $1.75\text{MW}/\text{m}^2$

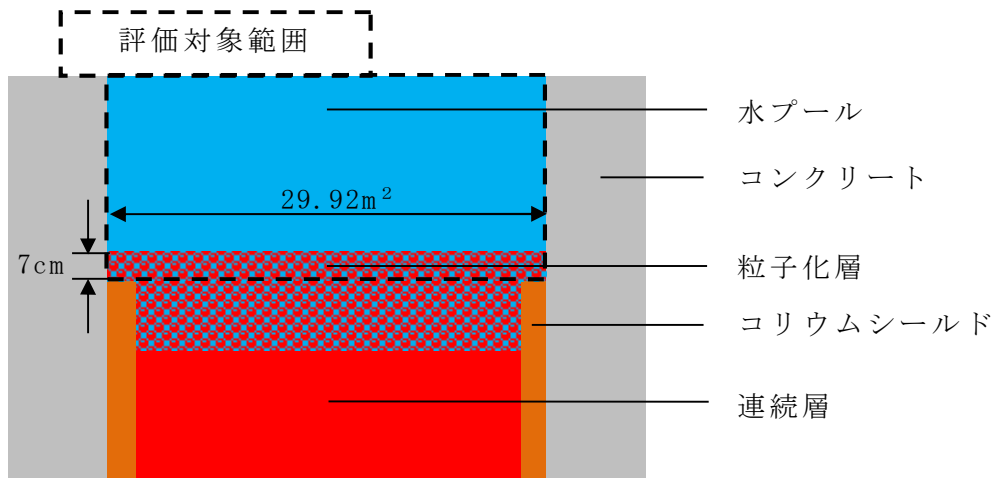
Lipinski-0D モデル（第 2 図）において、ポロシティ 0.41（粒子化デブリがコリウムシールド高さを超える最少ポロシティ）に対応するドライアウト熱流束を設定

- ・ 粒子化デブリと水プールの接触面積：約 30m^2

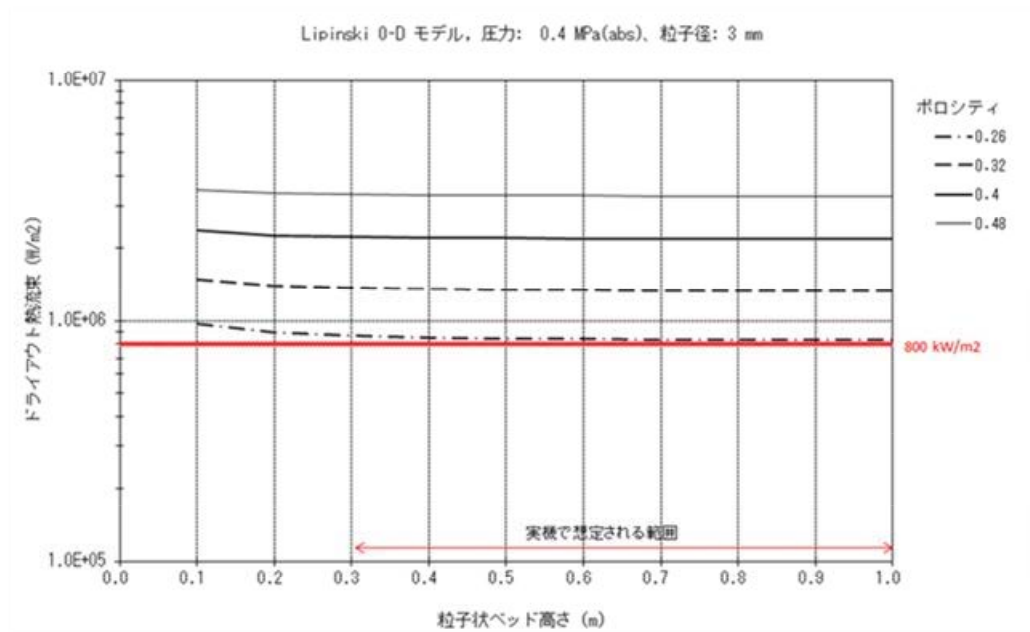
コリウムシールド高さより上部のペデスタル（ドライウエル部）の断面積を設定

② 解析結果

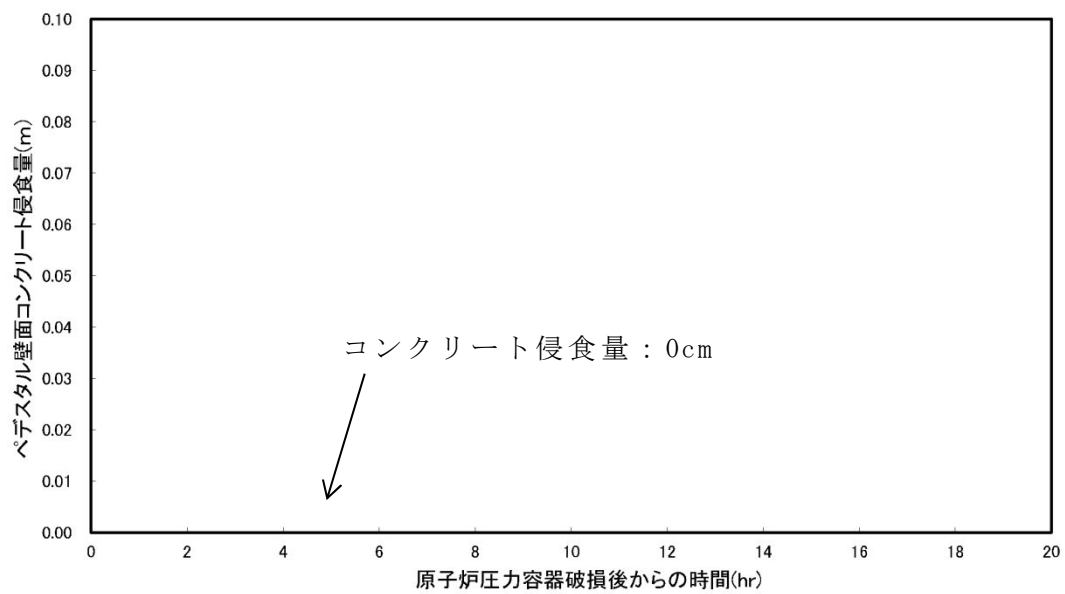
崩壊熱に対して粒子化デブリから上面の水プールへの除熱量が大きいことから、側壁コンクリートの温度が融点に到達するまでにデブリ温度が低下することで、ペデスタル（ドライウエル部）の側壁コンクリートの侵食量は 0cm となった（第 3 図）。以上より、コリウムシールド高さを超える粒子化デブリによりペデスタルの構造健全性に影響ないことを確認した。



第 1 図 評価モデル



第 2 図 Lipinski-0D モデル



第 3 図 ペデスタル（ドライウェル部）の側壁コンクリートの侵食量

R P V 中心位置以外で溶融物が落下した場合の
デブリ堆積高さについて

R P V 中心位置以外で溶融物が落下し，さらにデブリの拡がりの不確かさを考慮した場合においても，以下の理由により堆積高さがコリウムシールド付近で局所的に高くなることはないと考える。

- ・溶融物の落下位置として最もコリウムシールドに近くなる部分として，C R D のうち最外周のものが破損する場合（コリウムシールド表面まで約 60cm）を考慮したとしても，R P V 底部にはデブリが残存するため堆積高さが高くないこと
- ・残存したデブリが落下する場合には，C R D のうち最外周のものより中心付近に落下し，セルフレベルリング効果による均一化や溶融デブリ落下により堆積した粒子状デブリが攪拌される影響などで堆積形状はより均一化されること
- ・セルフレベルリングの効果によってデブリは均一に拡がる方向となること

床ドレン配管の侵食量評価について

1. はじめに

デブリ影響評価条件では、粒子化層は床ドレン配管の上端高さまで到達しないものの、コリウムシールド高さを超えて床ドレン配管下端高さを超過する評価となっている。ただし、以下のとおり床ドレン配管内への粒子化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。

- ・ R P V が破損し、デブリがペDESTAL（ドライウエル部）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（＝ペDESTAL（ドライウエル部）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（ドライウエル部）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下端高さを超過した場合でも、床ドレン配管上端には到達せず、粒子化デブリが床ドレン配管内に流入するための駆動源もない※ため、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

※ 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

ここでは、粒子化デブリが床ドレン配管入口付近に堆積した場合を想定し、床ドレン配管に与える影響が小さいことを評価する。

2. 床ドレン配管入口付近の侵食量評価

粒子化デブリによる侵食量評価として、粒子化デブリの温度が床ドレン配管の融点まで低下するのに必要な除熱量を算出し、この除熱量が配管に加わった場合の侵食量について評価した。

(1) 評価条件

評価モデルは第 1 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する。ベースケースとして、粒子状デブリは冷却固化していることから、デブリ温度として固相線温度を設定する。また、更に保守的な条件として、連続層を含む全デブリの平均温度を設定する。

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
- ・配管初期温度：117℃

(M A A P 結果におけるコンクリート壁面温度を設定)

- ・S U S 融点：
- ・S U S 密度：
- ・S U S 溶融潜熱：
- ・S U S 比熱：

②デブリ条件

- ・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）

- ・床ドレン配管内の粒子化デブリの堆積高さ：約 43mm

床ドレン配管内の堆積高さ（均一に堆積すると仮定）

- ・床ドレン配管内の粒子化デブリの体積：約 $2.6 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

（単位長さ当たり）

床ドレン配管内の堆積高さに相当する体積

ポロシティ 0.5 を含む

- ・粒子化デブリの初期温度：

➤ ベースケース

粒子状デブリは冷却固化していることから、デブリ温度と

して固相線温度 を想定する。

➤ 保守的ケース

更に保守的な条件として、連続層を含む全デブリの平均温

度 を想定する。

上記を包絡する温度として、 を設定する。

- ・デブリ密度 （M A A P 結果）

- ・デブリ比熱 （M A A P 結果）

- ・除熱量：冷却水による除熱を考慮せず配管への熱移行を計算

（冷却水による除熱量が崩壊熱量を上回る（別紙 1）

が、保守的に粒子化デブリの顕熱分を全て考慮）

(2) 評価結果

① ベースケース

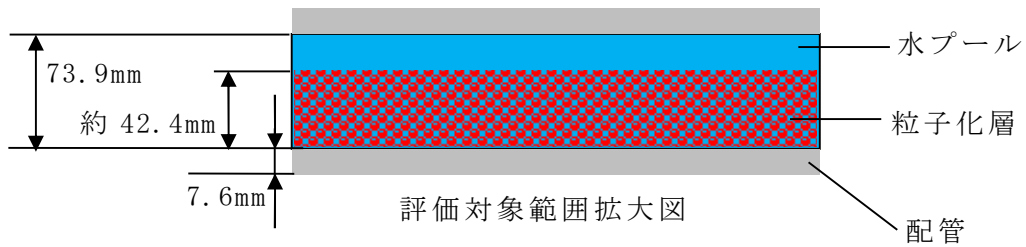
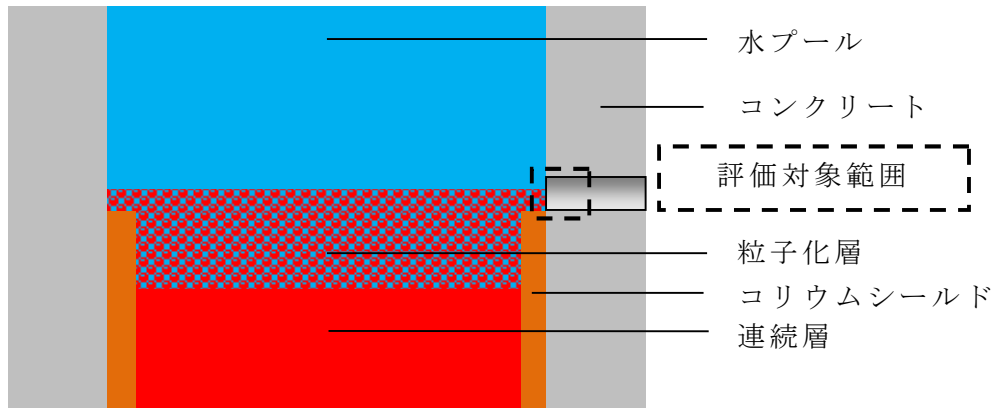
粒子化デブリの温度が床ドレン配管の融点まで低下するのに必要な除熱量は1m当たり約1.4MJとなり、この熱量が配管に与えられた場合の配管の侵食量は約1.1mmとなるため、床ドレン配管は貫通しない。

② 保守的ケース

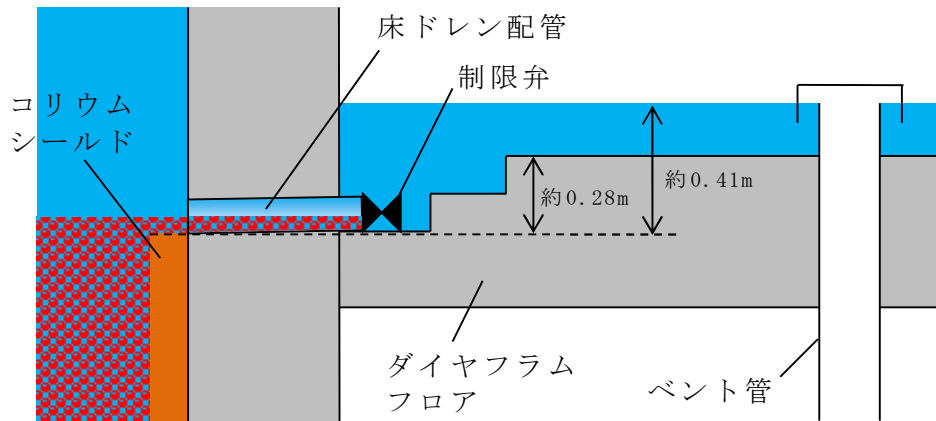
粒子化デブリの温度が床ドレン配管の融点まで低下するのに必要な除熱量は1m当たり約6.6MJとなり、この熱量が配管に与えられた場合の配管の侵食量は約5.1mmとなるため、床ドレン配管は貫通しない。なお、1.に記載のとおり粒子化デブリが堆積するのは床ドレン配管入口付近と考えられ、約5.1mm侵食による影響は小さい。

以上から、ベースケース、保守的ケース、どちらにもおいても、床ドレン配管の健全性は維持される。

また、粒子状デブリは、間隙の冷却水による除熱によりデブリ温度が速やかに低下するため、床ドレン配管に粒子化デブリが流入した際の温度はデブリ固相線温度を下回っており、配管の侵食量は約1.1mm以下になると考えられる。



第1図 評価モデル



第2図 床ドレン配管及びダイヤフラムフロアの概要図

配管内の粒子状デブリによる崩壊熱

1. 床ドレン配管条件

- ・ 内径：73.9mm (3B×7.6t)

2. デブリ条件

- ・ 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)

- ・ デブリ重量： ton

- ・ デブリ堆積高さ：約 56mm

デブリ影響評価条件における，床ドレン配管内の堆積高さ均一に堆積すると仮定

- ・ 配管内に流入するデブリ粒子重量 (1m 当たり)：14.1kg

(ポロシティ 0.5，デブリ密度 kg/m³ を仮定)

- ・ 配管内デブリの崩壊熱 (1m 当たり)

$$22.4\text{MW} \times 14.1 \div \text{} = 1.09 \times 10^{-3} \text{MW} = \text{} \text{kW}$$

3. 除熱量評価

Lipinski-0D モデルにおけるポロシティ 0.41 での熱流束として 1,750kW/m²を設定し，除熱量を計算すると，

粒子状デブリ上面からの除熱量

$$= \text{配管内デブリ表面積 (1m 当たり)} \times \text{除熱量}$$

$$= 6.40 \times 10^{-2} \times 1,750 = 112 \text{kW}$$

となり，配管内デブリの崩壊熱 kW を十分上回ることから，配管内デブリ粒子の崩壊熱は除去可能である。

床ドレン制限弁の損傷を仮想した場合の
ペデスタル（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化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化デブリが流入した場合でも，東海第二では，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り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，粒子化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であり，溝までの流出にとどまる。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、流出した粒子化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（ドライウエル部）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DESTAL（ドライウエル部）内の低下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（ドライウエル部）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弁が損傷したと仮想し、ペDESTAL（ドライウエル部）内の水位挙動について評価する。

2. 評価方法

ペDESTAL（ドライウエル部）水位は、床ドレン配管との圧力損失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。

第 1 表 圧力損失計算要素

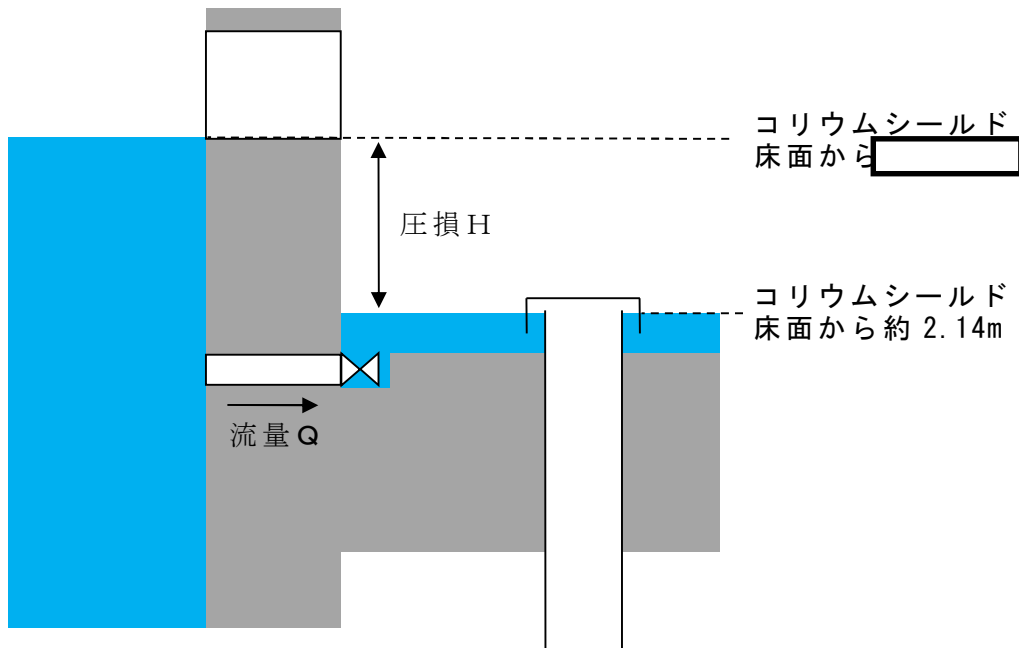
	単位	配管 1 本	配管 2 本
配管内径 : D	m	0.0739	0.0739
流量	m ³ /h	100	50
流速	m/s	6.48	3.24
管摩擦係数 : λ	—		
配管長	m		
配管 L/D	—		
弁 *1 (L'/D) = <input type="text"/>	個	1	1
管入口 *1 (λ · (L'/D)) = <input type="text"/>	個	1	1
開放端 *1 (λ · (L'/D)) = <input type="text"/>	個	1	1

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

3. 評価結果

配管 1 本破損の場合 $\Delta H =$ 約 5m, 配管 2 本破損の場合 $\Delta H =$ 約 1.2m となり, どちらもペDESTAL (ドライウエル部) 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, ドライウエ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 (ドライウエル部) 水位は維持される結果となった。

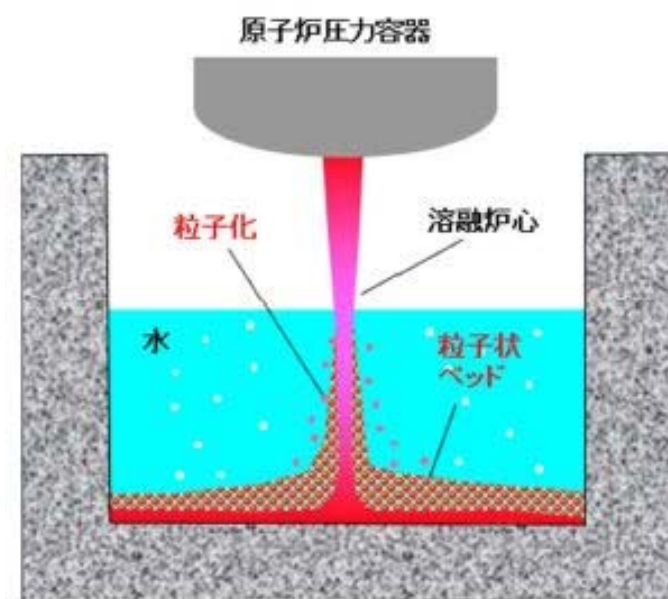


第 1 図 評価体系

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

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リング則に、BWRの熔融炉心落下条件を適用して、水中での熔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 熔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 であることを考慮すると、熔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、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）。

- ・ 熔融物重量の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熔融物量が多くなる
- ・ 熔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が固化しにくいと考えられる。
- ・ 実機において熔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、熔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、熔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。
- ・ 熔融物密度は実機条件の方が大きく、慣性による拡がり効果が大きい
- ・ 粘性係数については、実験と同程度か小さいものと考えられ、実機条件ではより拡がり易いと考えられる。

- ・表面張力については不確かさが大きいパラメータであるが、表面張力が大きいほど床面上を広がりにくくなる一方で、床面到達までの細粒化に伴う冷却・固化が生じにくいいため、床面での熔融物温度が高めになり広がり易くなることから、両者の相殺により表面張力が広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、広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、床面熱伝達が広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上での広がりとなるが、熔融物広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）によらず同様な広がり挙動になることが確認されており、ZrO₂の場合でも広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、熔融物の広がり距離については、熔融物の広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広がり易く、床全面に広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/kg/K]		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PDS-E実験では粒子状ベッドの均一化に要する時間が数分～数十分であるが、気相流体速度がより大きいPDS-C実験では数秒～数十秒と早く均一化が進むことが確認されている。実機においては、デブリが落下した直後は高温のデブリから急激に伝熱が進むことから発生蒸気速度は十分速いものと考えられるため、落下直後に十分な均一化が進むと考えられる。

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

3. デブリの拡がりに関する不確かさ評価

これまでの知見によれば、溶融物は床全面に拡がると想定され、粒子状ベッドについても短時間で均一化される。よって、デブリの拡がりに関する不確かさはないものと考えられるが、デブリの堆積高さに対して厳しい評価を実施する観点から、PULiMS実験において確認されたデブリ堆積高さと同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(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。

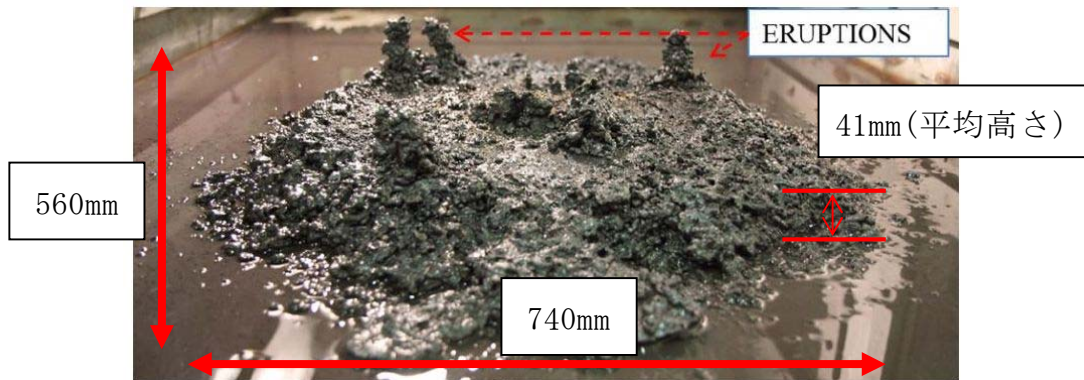
第2表 PULiMS実験条件と結果

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 _{lig.} , °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 × y, mm	460x440	~750x750	740x560	-
Cake size x × 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

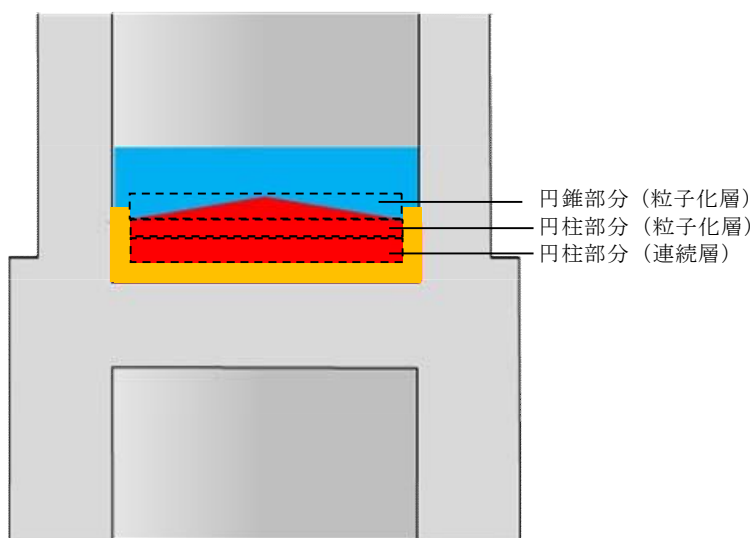


第2図 PULiMS実験結果 (E4)

(2) 堆積高さ評価

ノミナル条件[※]の堆積高さに対してアスペクト比を考慮した場合、デブリの堆積形状は第3図のように円柱上に円錐が堆積した形状となる。円錐部分については粒子状デブリが円錐形状に堆積すると考え、堆積高さが最大となるのは床全面に拡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DESTAL直径 にアスペクト比を考慮すると、堆積高さは約0.37mとなる。円柱部分については、粒子状デブリのうち円錐部分の体積を除いたものと、連続層のデブリが円柱状に堆積するため、堆積高さは約1.43mとなる。以上から、デブリの堆積高さは円錐部分の体積高さと円柱部分の体積高さの合計となることから、約1.80mとなる。

※ 炉外溶融物体積：3m³，ポロシティ：0.32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0.32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0.57m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。

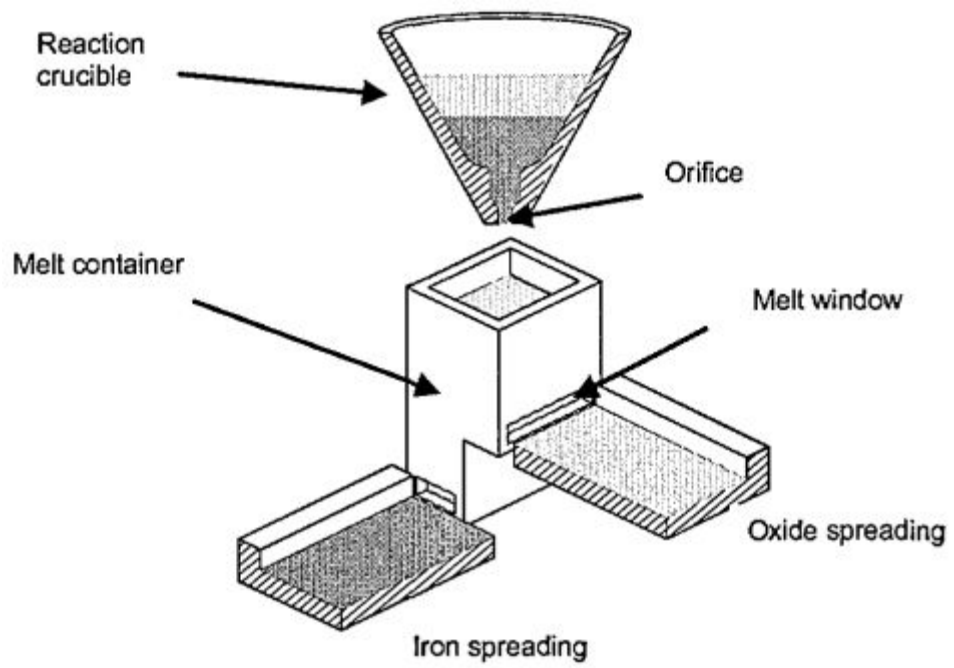
溶融物拡がりに関わる実験

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増加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)



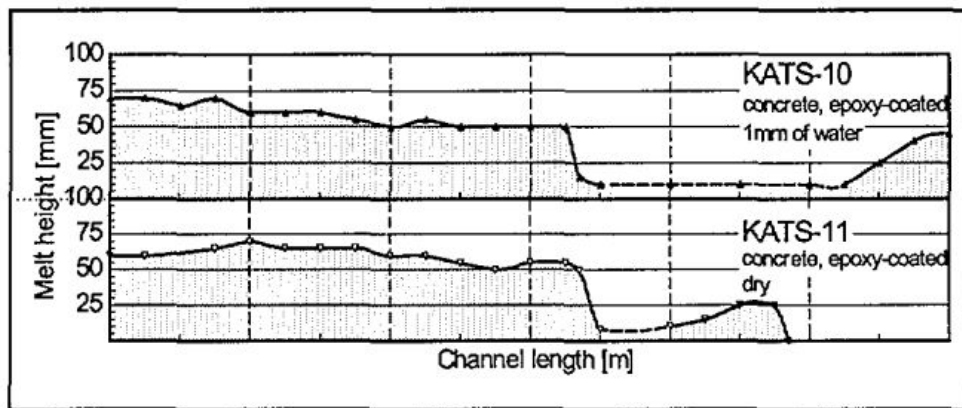
(2D)

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

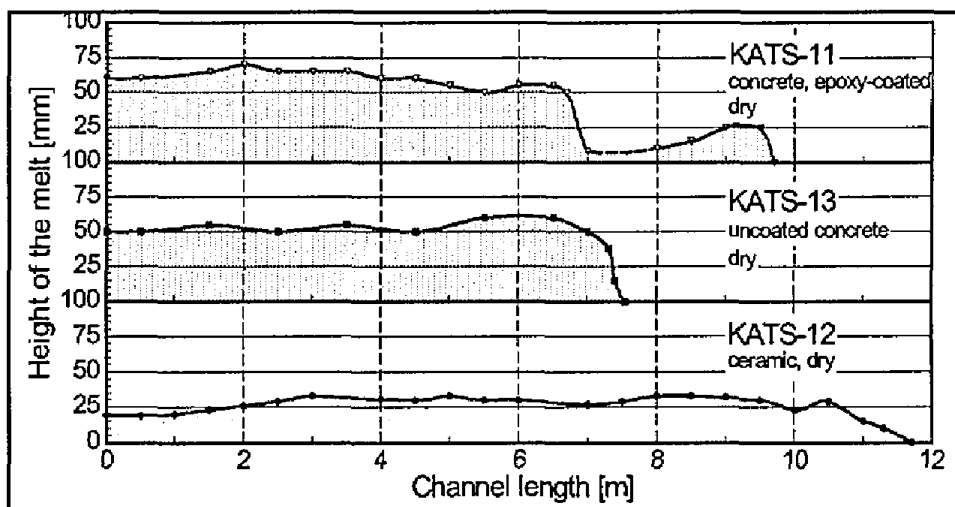
第 1 表 K A T S 実験条件と拡がり距離 (酸化物溶融物, 1D 拡がり) [2]

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

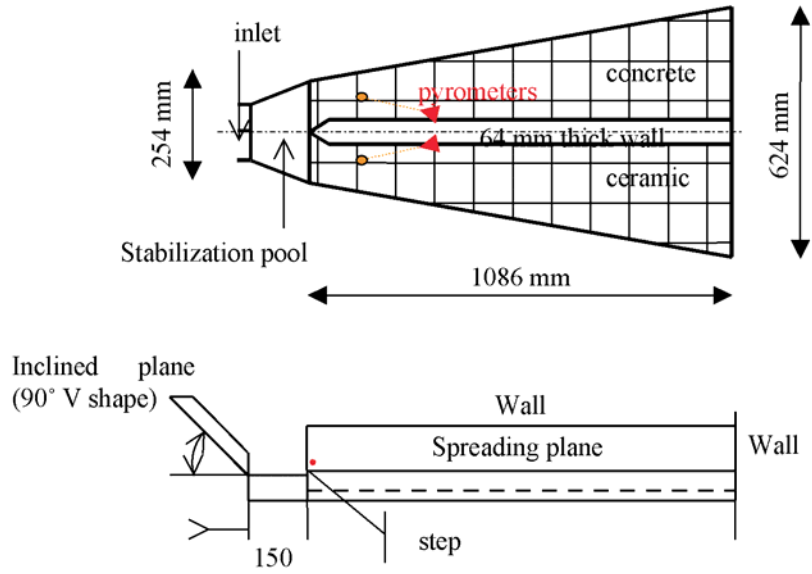
*) Cordierite (Al₂O₃ 37 wt%, SiO₂ 52 wt%, MgO 6,5 wt%)



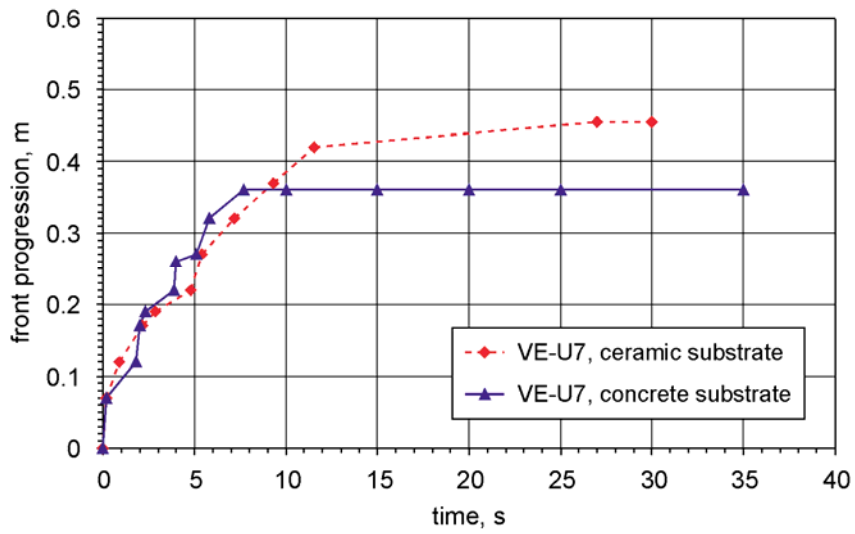
第 3 図 K A T S 実験の水の有無の影響 (酸化物溶融物, 1D 拡がり) [2]



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.

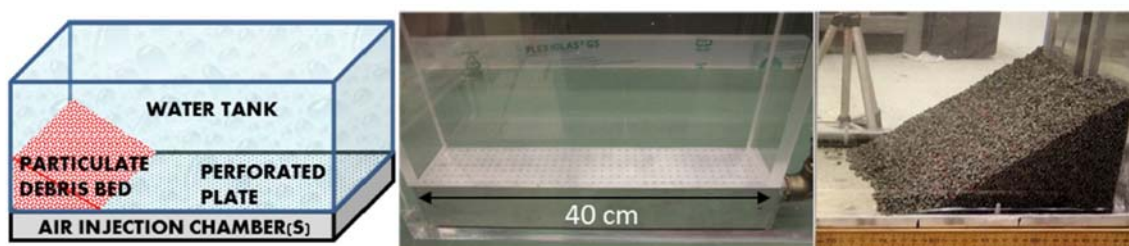
PDS 実験について

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。

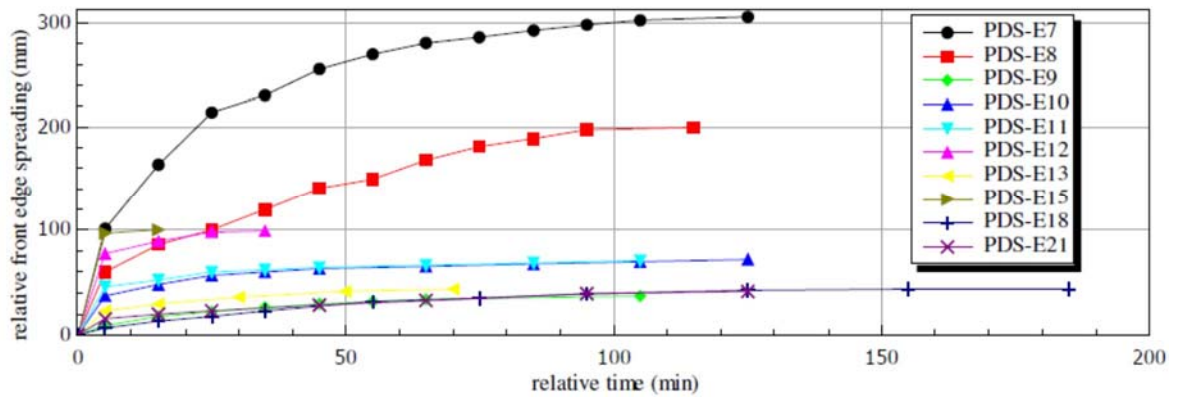
第 1 表 P D S 実験におけるパラメータ設定

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)

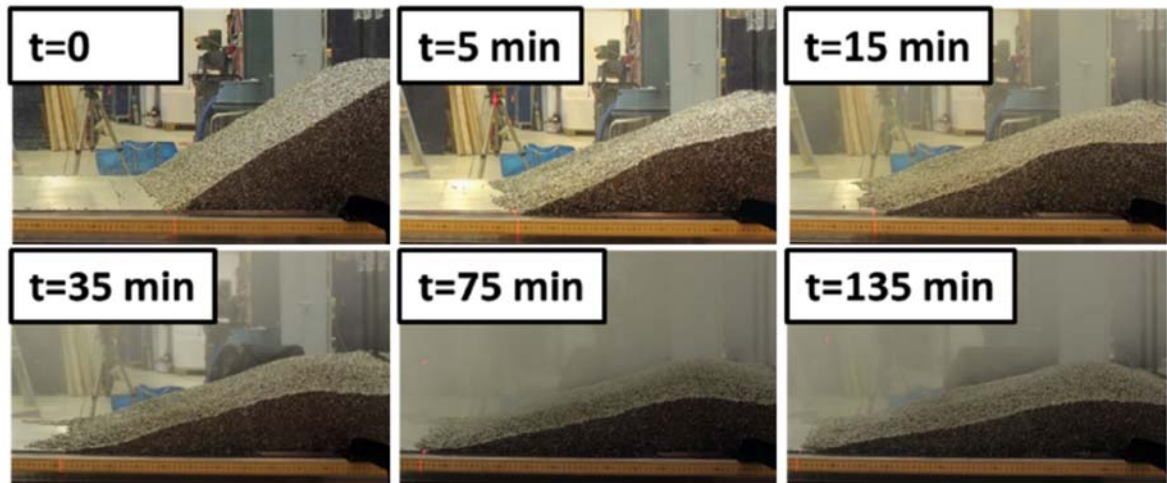
3. 実験結果

(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

0.34 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頃が確認されている。

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.