



Japan Atomic Energy Agency

格納容器内溶融炉心冷却性評価手法の 高度化に向けたJASMINEコードの改良

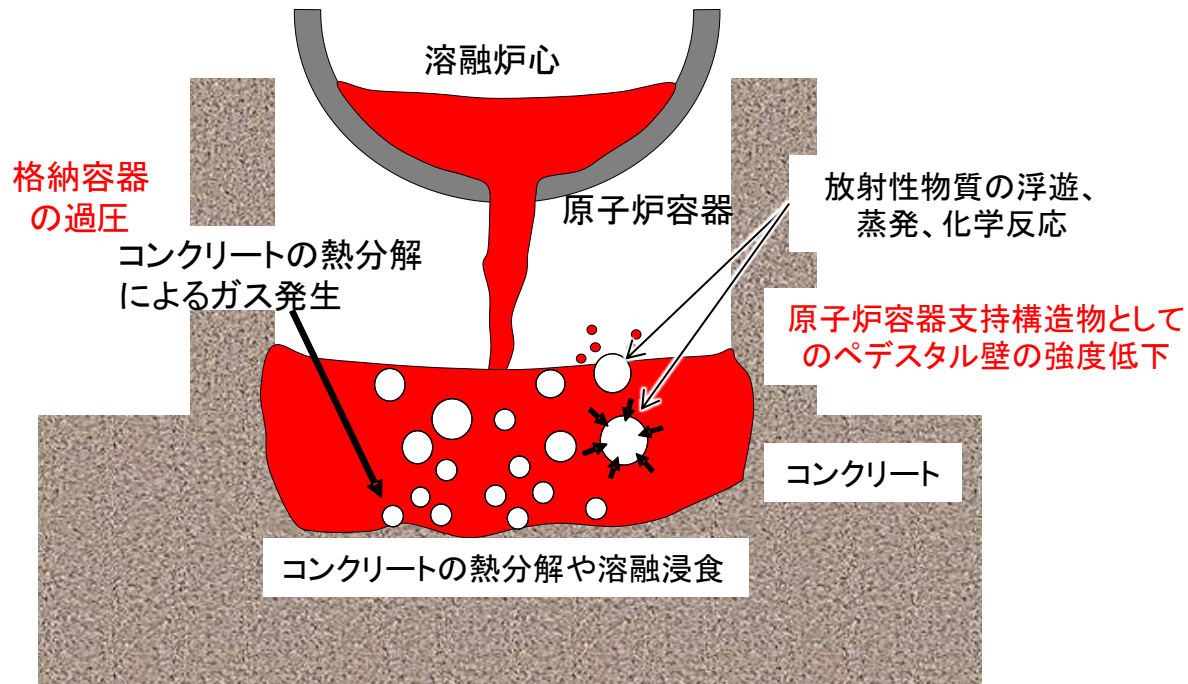
日本原子力研究開発機構
安全研究・防災支援部門
安全研究センター
リスク評価研究ディビジョン
シビアアクシデント評価研究グループ

松本 俊慶

平成28年度 安全研究センター報告会
平成28年11月22日
富士ソフト アキバプラザ

本件は、原子力規制庁から受託した平成27年度「原子力施設等防災対策等委託費
(シビアアクシデント時格納容器内溶融炉心冷却性評価技術高度化)事業」の成果の一部である

背景



背景

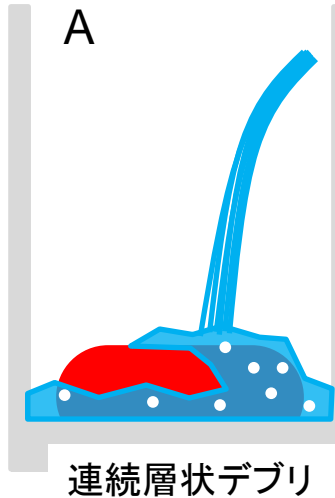
溶融炉心・コンクリート相互作用 (MCCI)

- シビアアクシデント時に格納容器の健全性に対する脅威となり得る現象のひとつ
- コンクリートの浸食及び構造強度の低下、非凝縮性・可燃性ガス及び放射性物質の発生

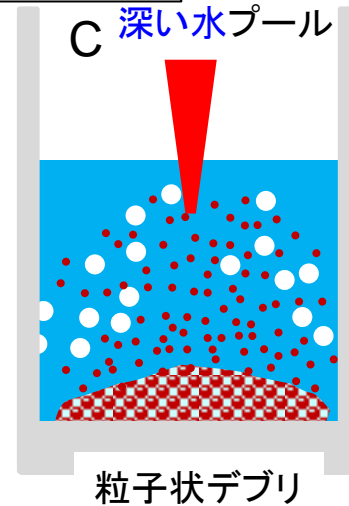
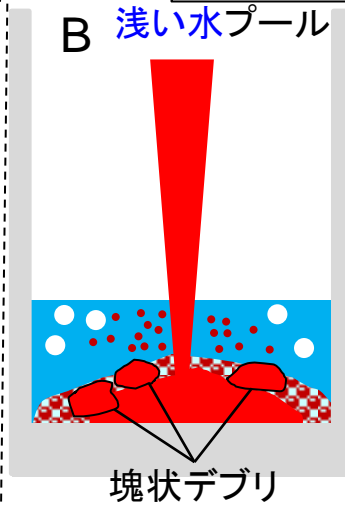
◆ MCCIを防止・緩和するためには、格納容器内に移行した溶融炉心の効果的な冷却が不可欠

目的

ドライキャビティ方策
(後から注水)



ウェットキャビティ方策
(先行注水)



デブリの冷却性
連続層状 < 塊状 < 粒子状

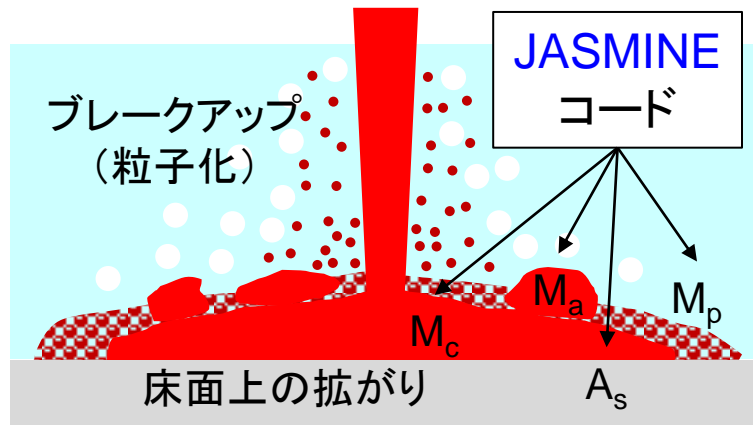
MCCIが生じる可能性 : $A > B > C$

水蒸気爆発が発生した場合の機械的エネルギー: $A < B < C$

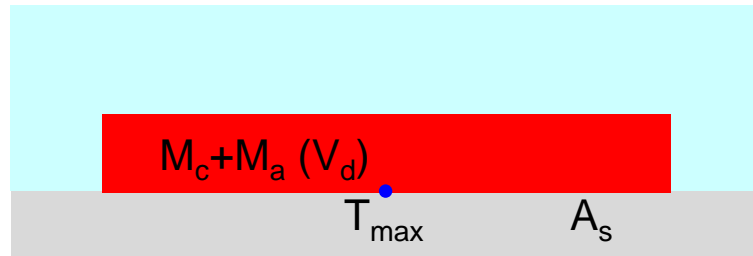
MCCIの防止・緩和に必要な水深を把握するため

◆ 機構論的な溶融炉心／冷却材相互作用の解析コードJASMINEの機能拡張

溶融炉心冷却性評価のアプローチ

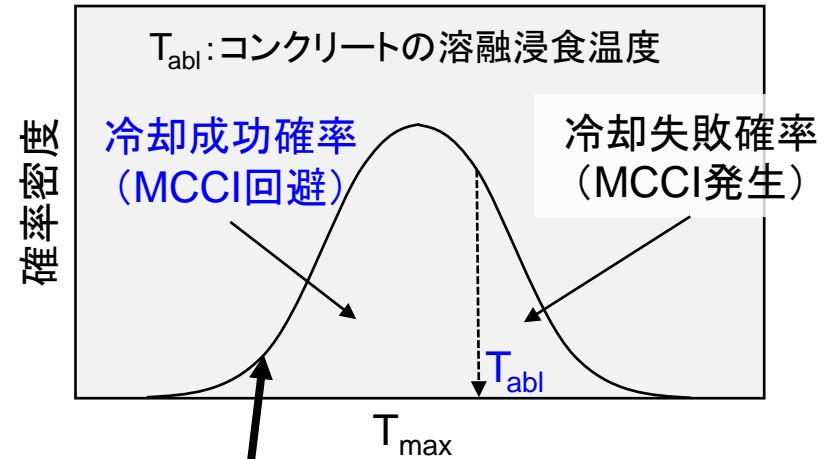


- M_c : 連続層状デブリ質量
- M_a : 塊状デブリ質量
- M_p : 粒子状デブリ質量
- A_s : 拡がり面積

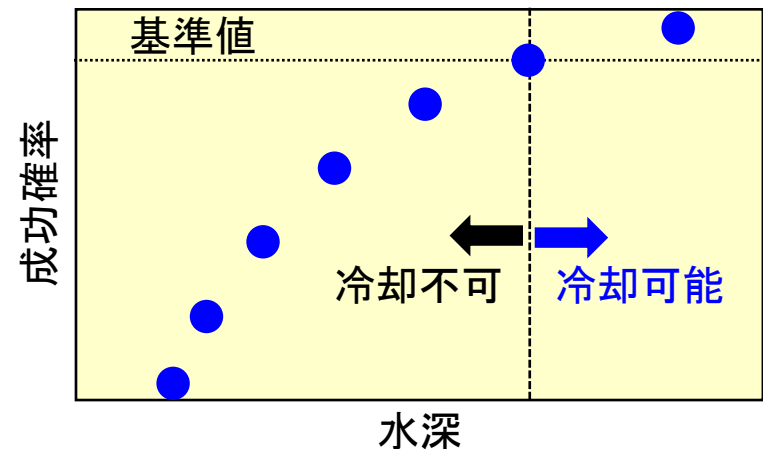


◆ JASMINEの技術的課題
塊状デブリの生成の予測
溶融炉心拡がり挙動の評価

不確かさを考慮した決定論的手法の適用



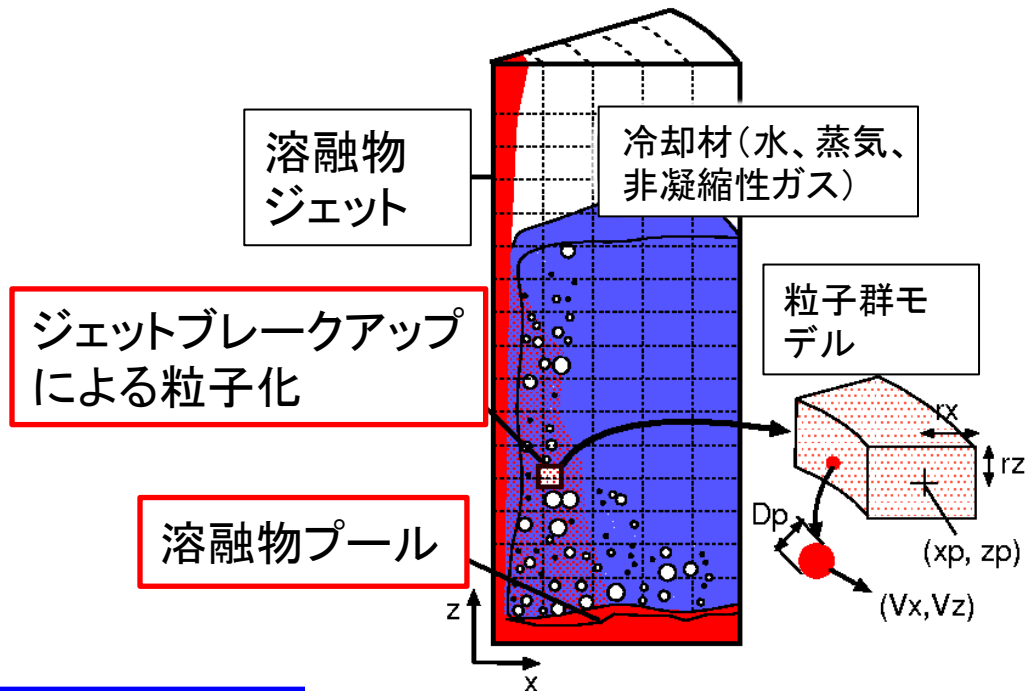
不確かさに依存する T_{max} の確率分布(水位一定での評価)
不確かさは溶融炉心の重量、温度(過熱度)、組成(物性)、
ジェット径、格納容器内の水プール温度や物理モデル等



JASMINEコードの概要

JASMINEコード*

- 溶融炉心冷却材相互作用(FCI)のシミュレーションコード
- 主に水蒸気爆発をターゲットに開発モデルの組み合わせ
- 2相流(ACE-3D**) : 水、蒸気、非凝縮ガス
- 溶融物ジェットモデル
- 粒子群モデル
- 溶融物プールモデル



課題に対応したJASMINEコードの機能拡張

- ◆ 塊状デブリ生成の評価に向けたジェットブレイクアップモデルの改良
種々のジェットブレイクアップ実験に基づいた粒子径分布モデルの導入
⇒ 塊状デブリの生成に寄与する粒子の固化挙動に影響
- ◆ 床面上での溶融物拡がり(溶融物プール)モデルの改良
溶融物冷却面におけるクラスト(固化層)生成モデルの追加

* Moriyama, et. al., JAEA-Data-Code-2008-014, 2008

** Onuki et. al., JAERI-Data-Code-96-033, 1996

ジェットブレイクアップモデルの改良

ジェットブレイクアップ粒子径

Rosin-Rammler累積分布関数

$$F = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{D_p}{D_e} \right)^n \right\}$$

D_p : 粒子直径

F : 直径が D_p 以下の粒子の累積質量割合

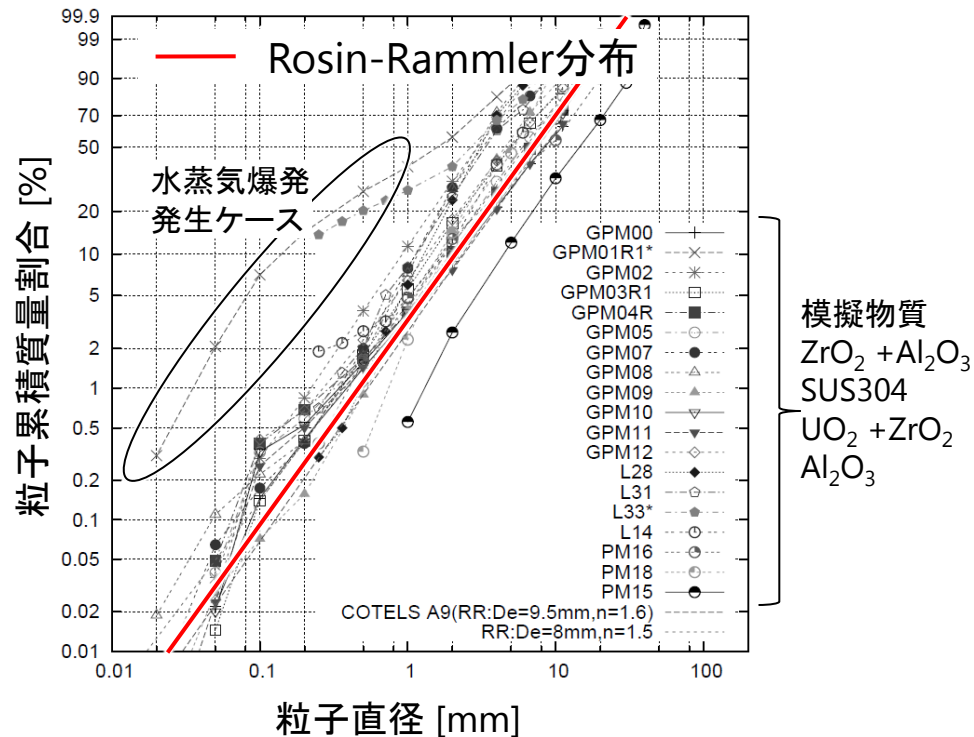
- 分布のパラメータ

D_e : 粒子径定数

n : 分布定数

- モンテカルロ法により粒子径分布を生成

ブレイクアップ粒子の累積質量割合*



* Moriyama, et. al., JAERI-Research 2005-017, 2005

DEFOR-A 実験の概要

DEFOR-A実験*

◆ 塊状デブリの生成に着目した唯一の系統的実験

- 模擬溶融物質: $\text{Bi}_2\text{O}_3 + \text{WO}_3$
- 水中でのデブリ捕集

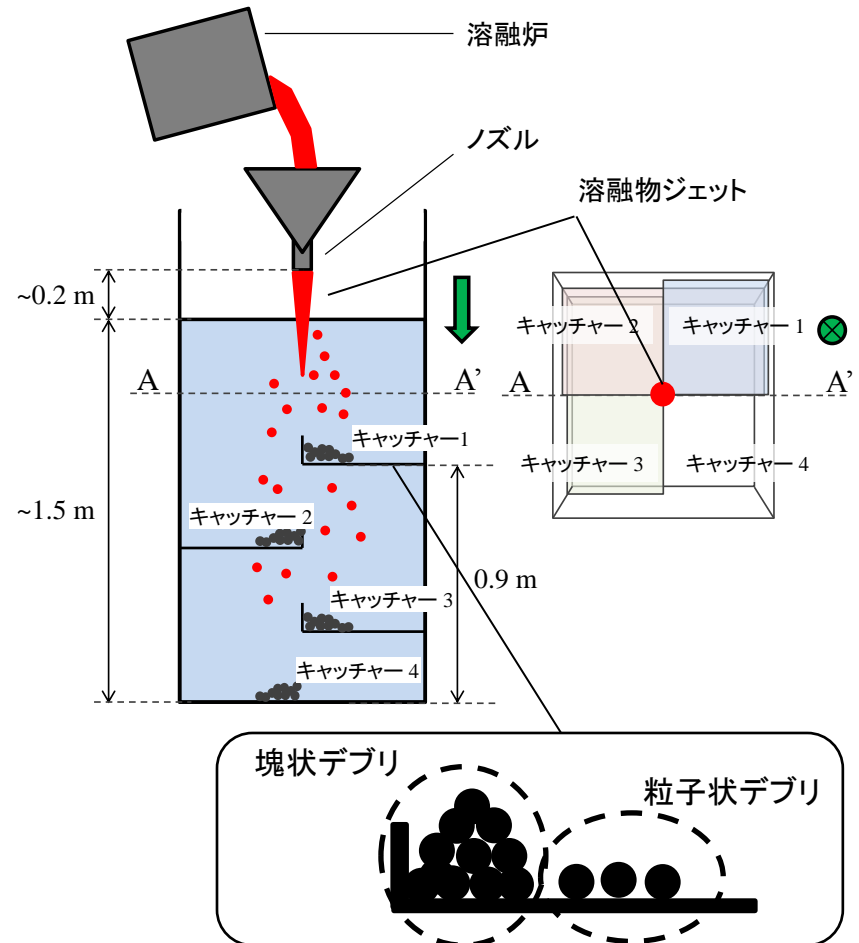
試験パラメータ

- 溶融物ジェット直径 (10~25 [mm])
- 溶融物温度 (過熱度: 78~206 [K])
- 水温度 (サブクール度: 7~27 [K])

主要な実験データ

- 各キャッチャーでの粒子状デブリの粒子径分布
- 各キャッチャーでのデブリの質量割合

DEFOR-A装置の概要図



* KTH: Royal Institute of Technology, Swedenによる
(P. Kudinov, et. al., NED 263 284-295, 2013)

DEFOR-A実験の解析

解析条件

解析領域 (2D 軸対称)

- 計算領域全体
r: 1.37 [m], z: 2.7 [m]
- プール領域
r: 0.268 [m], z: 1.51 [m]

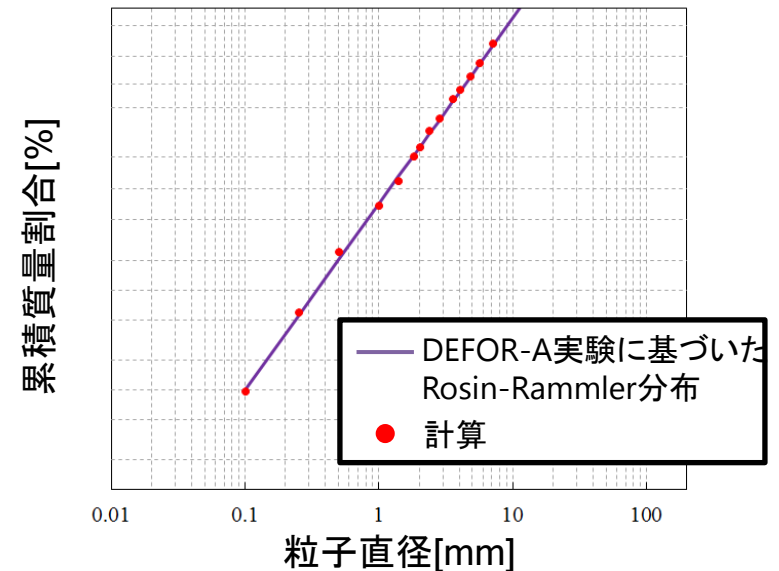
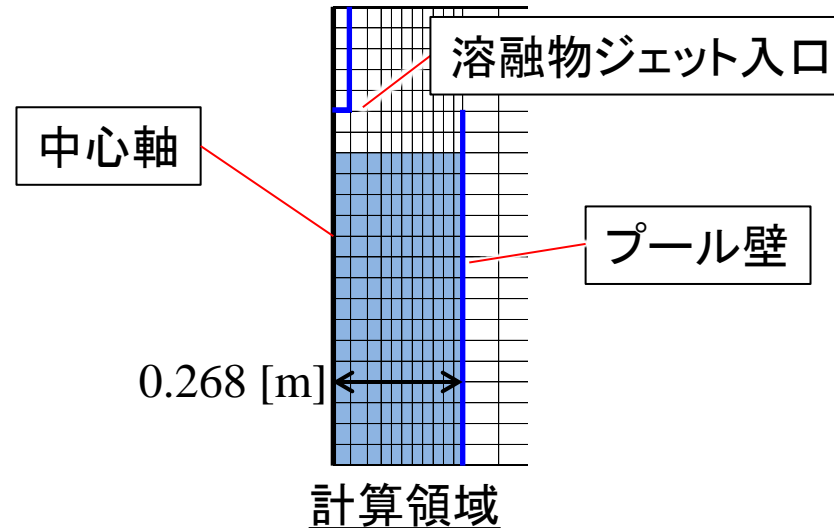
ブレイクアップ粒子径分布

分布のパラメータ:

DEFOR-A実験の平均分布にフィッティング

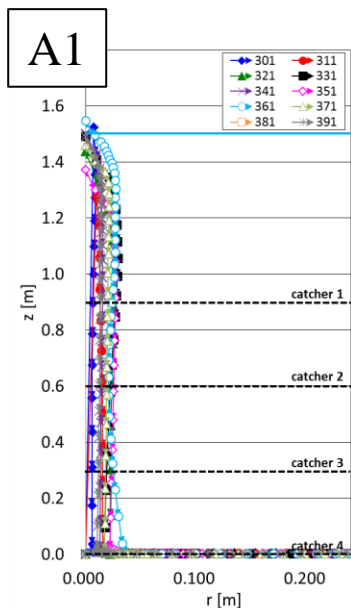
De = 4.0, n = 1.87

$$F = 1 - \exp \left\{ - \left(\frac{D_p}{D_e} \right)^n \right\}$$

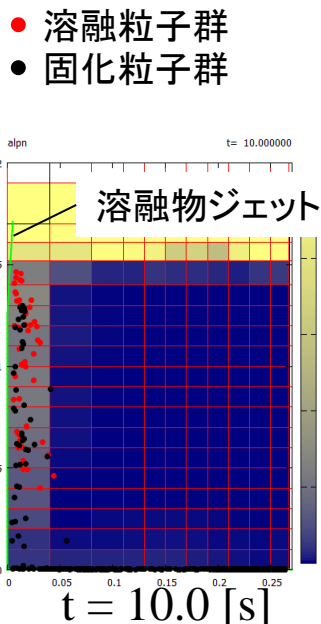


解析結果 —ボイド率及び粒子群の分布—

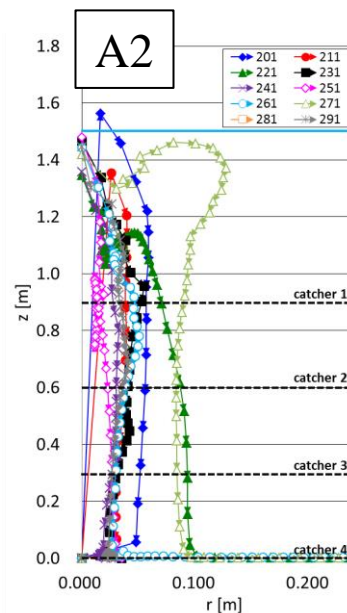
	A1	A2
試験条件	ジェット直径 = 10 [mm] サブクール度 = 27 [K] 過熱度 = 110 [K]	ジェット直径 = 20 [mm] サブクール度 = 7 [K] 過熱度 = 103 [K]



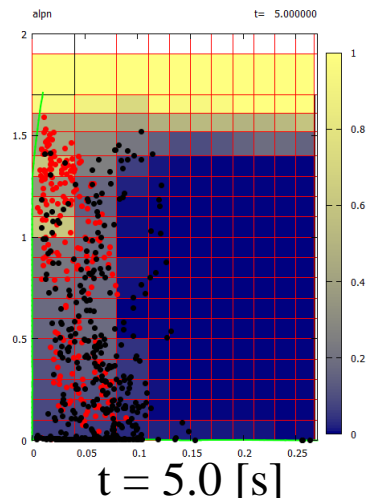
粒子群の軌跡



ボイド率・粒子群の分布



粒子群の軌跡

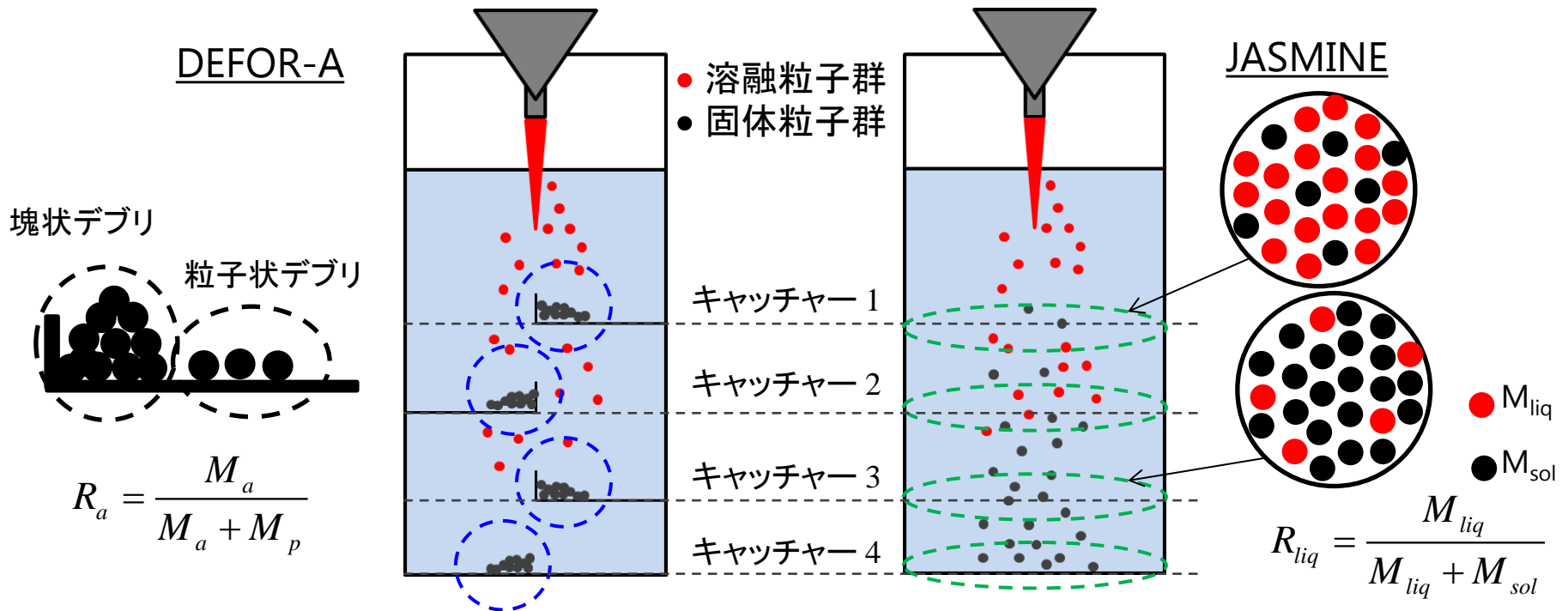


ボイド率・粒子群の分布

- サブクール度とジェット直径の大きいA2実験において、ジェットブレークアップにより生じた粒子群の径方向の拡がりが増進される傾向
 多量の蒸気(ボイド)発生を伴う水プールの流動状況の影響

解析における塊状デブリ質量割合評価の考え方

塊状デブリの質量割合と溶融粒子の質量割合の相関性を推定



R_a : 塊状デブリ質量割合

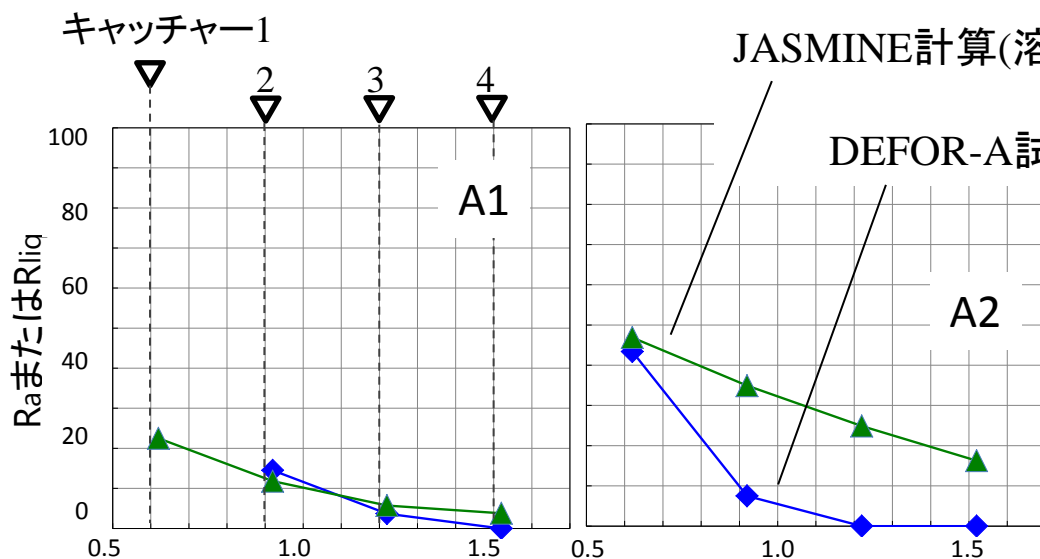
- キャッチャーで捕集されたデブリのうち、塊状デブリの質量割合

R_{liq} : 溶融粒子質量割合

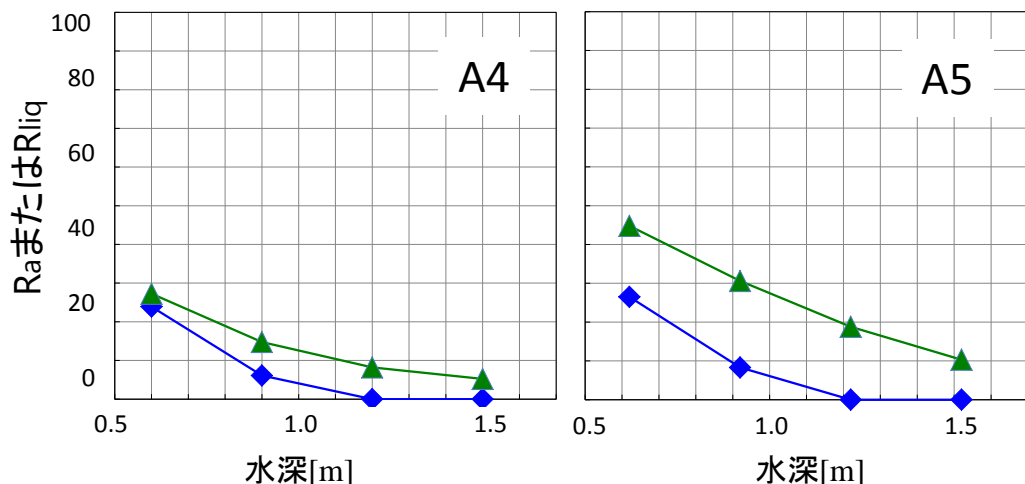
- キャッチャー高さを通り抜けた粒子のうち、溶融粒子(>融点)の質量割合

◆ R_a (実験) と R_{liq} (解析) を比較

塊状デブリ及び溶融粒子質量割合の比較



	A1	A2	A4	A5
ジェット直径 (mm)	10	20	20	10
過熱度(K)	110	103	78	102
サブクール 度(K)	27	7	27	9



水深と溶融粒子質量割合の関係は、水深の増加とともに塊状デブリ質量割合が低下する定性的な傾向と一致

サブクール度の小さなケースでは差が大

- 溶融粒子質量割合以外の因子も影響することを示唆
- 水プール単位体積当たりの粒子の量(重量や個数)

溶融物拡がりモデルに関する改良

溶融物拡がりモデル

- 溶融物の液位差を駆動力とする
半径方向1次元浅水方程式

クラスト形成モデル

クラスト成長速度（上部クラスト）

$$\Delta h_{mfs} m_{cr} = q_{cr}(0) - h_{conv}(T_{av} - T_m)$$

Δh_{mfs} : 溶融物凝固潜熱

m_{cr} : クラストの成長速度(質量流束)

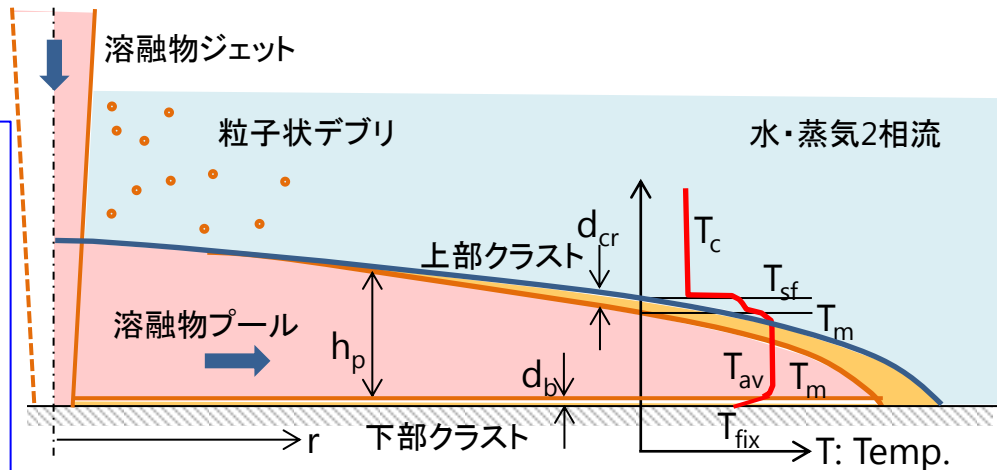
右辺第1項: クラスト下面からクラスト内部への熱流束

右辺第2項: 溶融物プールからクラスト仮面への熱流束

溶融物停止の条件

- 重力で溶融物が拡がる力と、拡がり先端における溶融物の表面張力とのつり合い

溶融物のプールは3層構造を想定
上部クラスト、下部クラスト、溶融物プール



クラスト内熱伝達メカニズム及び境界条件

上部クラスト内

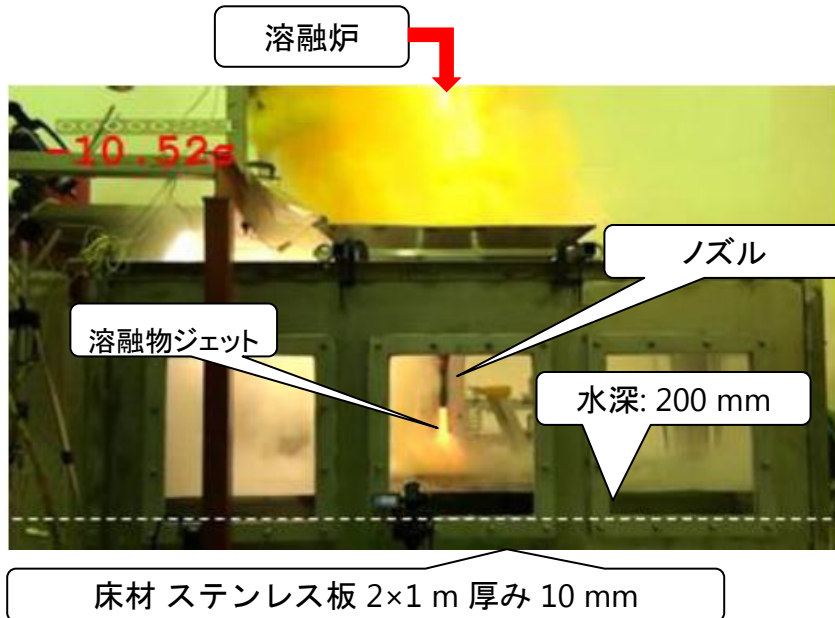
熱伝導 (上面: 沸騰熱伝達、下面: 対流熱伝達)

下部クラスト

熱伝導 (上面: 対流熱伝達、下面: 一定温度)

PULiMS実験の概要

PULiMS試験装置



PULiMS実験*

溶融物ジェットを浅い水プール中に落下させ、水プール床面での拡がりを観察した唯一の実験

主要な実験データ

・デブリの拡がり面積、平均堆積厚さなど

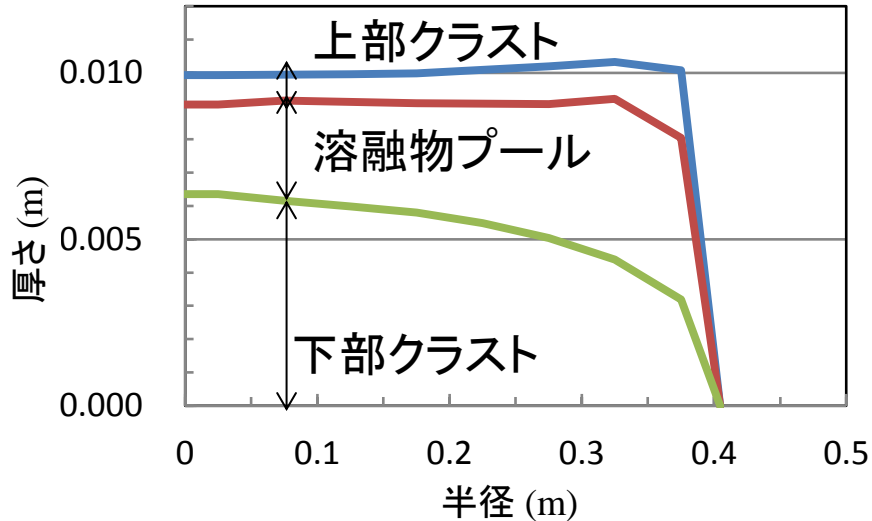
解析の対象とした実験

	模擬物質	溶融物質質量 (Kg)	溶融物過熱度 (K)	注入時間 (s)
E1	$\text{Bi}_2\text{O}_3 + \text{WO}_3$	23.4	136	10
E4	$\text{Bi}_2\text{O}_3 + \text{WO}_3$	46.9	70	12

* KTH Royal Institute of Technology, Swedenによる
(A. Konovalenko, et al., NUTHOS-9, Kaohsiung, Taiwan, Sep. 2012, N9P0303)

拡がり挙動に関する解析と実験の比較

クラストと溶融物プールの厚さ (E4実験 20 s)



固化した模擬物質の層構造 (E4実験)



PULiMS実験解析による拡がり面積の比較

	拡がり面積 (m ²)		拡がり面積 解析／実験
	実験	解析	
E1	実験	0.14	2.1
	解析	0.292	
E4	実験	0.30	1.7
	解析	0.518	

解析結果は拡がり面積を過大評価

- 上部クラストから水プールへの除熱量の過小評価(上面を平滑面とする仮定の影響など)
- 溶融物やクラストに形成されるボイドによる浮力増大の影響

まとめと今後の展開

格納容器内溶融炉心冷却性評価手法の高度化に向けて

◆ JASMINEコードの機能拡張を実施

ジェットブレイクアップモデルの改良

- 塊状デブリ生成に寄与すると考えられるブレイクアップ粒子径分布モデルを導入
- DEFOR-A実験の解析
 - ✓ 解析の溶融粒子質量割合と、実験の塊状デブリ質量割合を比較
 - ✓ 水深と塊状デブリ質量割合の関係について定性的な傾向を再現

溶融物拡がりモデルの改良

- クラスト生成モデル及び拡がり停止条件を追加
- PULiMS実験の解析
 - ✓ 拡がり停止を予測できることを確認したが、拡がり面積を過大評価

今後の展開

- 塊状デブリ生成モデルの構築
- 溶融物の拡がりに及ぼす溶融物内ボイドの影響の検討及びモデルの改良
- 実機評価への適用
 - 実機条件の試解析、冷却性に及ぼす水深の影響の評価