

第32回 研究報告会

原子炉キャビティにおける溶融燃料冷却性詳細  
評価のためのコードの開発

令和4年10月6日

原子力規制庁長官官房技術基盤グループ  
シビアアクシデント研究部門

菊池 航

令和4年11月22日日本原子力研究開発機構「安全研究センター報告会」にて、講演予定。



# 目次

---

## □ 概要

- ✓ 背景・課題・目的
- ✓ 圧力容器外デブリベッド形成及び冷却過程における重要現象
- ✓ 三次元デブリ挙動解析コードTHERMOSの概要

## □ DEFOR-A実験に基づくTHERMOS-JBREAK開発

- ✓ DEFOR-A実験分析結果
- ✓ THERMOS-JBREAKモデル概要
- ✓ DEFOR-A実験に基づく妥当性確認

## □ 結言



# 目次

---

## □ 概要

- ✓ 背景・課題・目的
- ✓ 圧力容器外デブリベッド形成及び冷却過程における重要現象
- ✓ 三次元デブリ挙動解析コードTHERMOSの概要

## □ DEFOR-A実験に基づくTHERMOS-JBREAK開発

- ✓ DEFOR-A実験分析結果
- ✓ THERMOS-JBREAKモデル概要
- ✓ DEFOR-A実験に基づく妥当性確認

## □ 結言



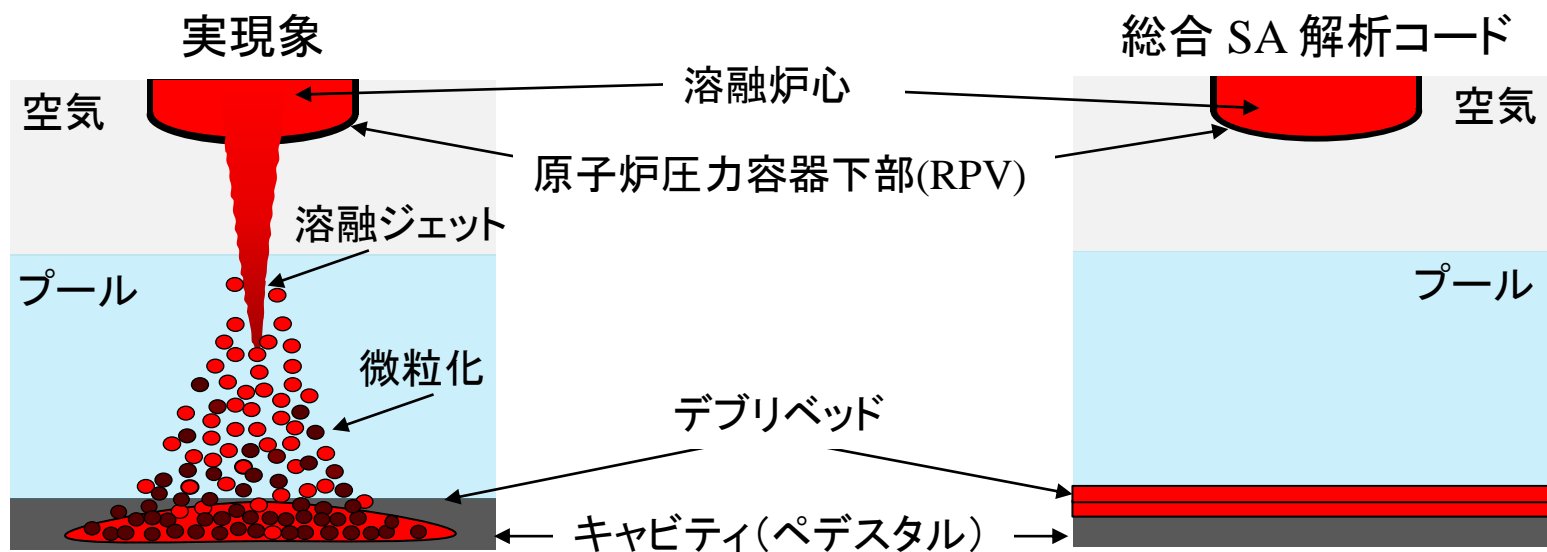
# 背景・課題

## □ 背景

- ✓ 日本の軽水炉では、MCCIの緩和のために**原子炉圧力容器下部(RPV)が破損する前にキャビティ(BWRにおいてはペDESTAL)に注水しプールを形成することを基本戦略**としている。
- ✓ RPVから落下する溶融炉心は、プール中で微粒化しキャビティに堆積し**複雑な伝熱特性を有するデブリベッド**を形成する。

## □ 課題

- ✓ 総合 SA 解析コードでは、プラント全体の多岐にわたる複雑な現象の進展を計算するために、個々の現象を詳細に解くのではなく**単純化し相関式等で低次元評価**している。
- ✓ その中でも**デブリベッドの形成過程**は、3次元デブリ挙動を単純化し**指定された面積に均一の高さかつ瞬時に堆積**するものとして扱われるため**大きな不確かさが存在**する。





# 目的・本発表の内容

---

---

## □ 目的

- ✓ デブリベッドの形成について既往の知見で不足している領域を対象に実験を実施し**メカニズムを把握**
- ✓ 実験分析結果に基づきモデル開発及び妥当性確認を実施することで**三次元デブリ挙動解析コード(THERMOS)**を開発
- ✓ キャビティ内の**高い空間及び時間解像度**な不確かさの少ないデブリ冷却性を評価



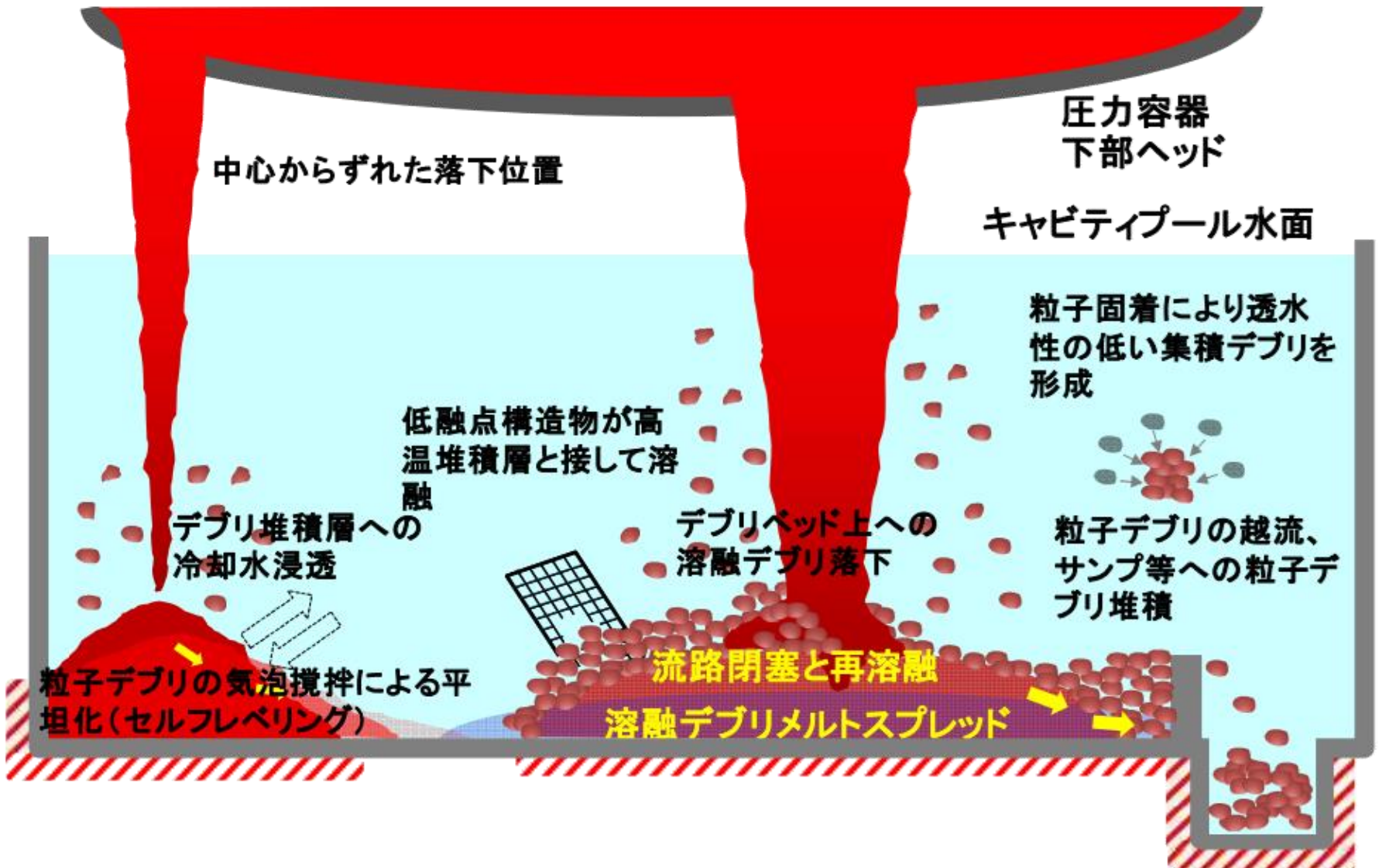
福島第一原子力発電所事故における溶融炉心分析に基づく**規制への要否の検討**

## □ 本発表 DEFOR-A実験に基づくTHERMOS-JBREAK開発

- ✓ DEFOR-A実験分析結果
- ✓ THERMOS-JBREAKモデル概要
- ✓ DEFOR-A実験に基づく妥当性確認

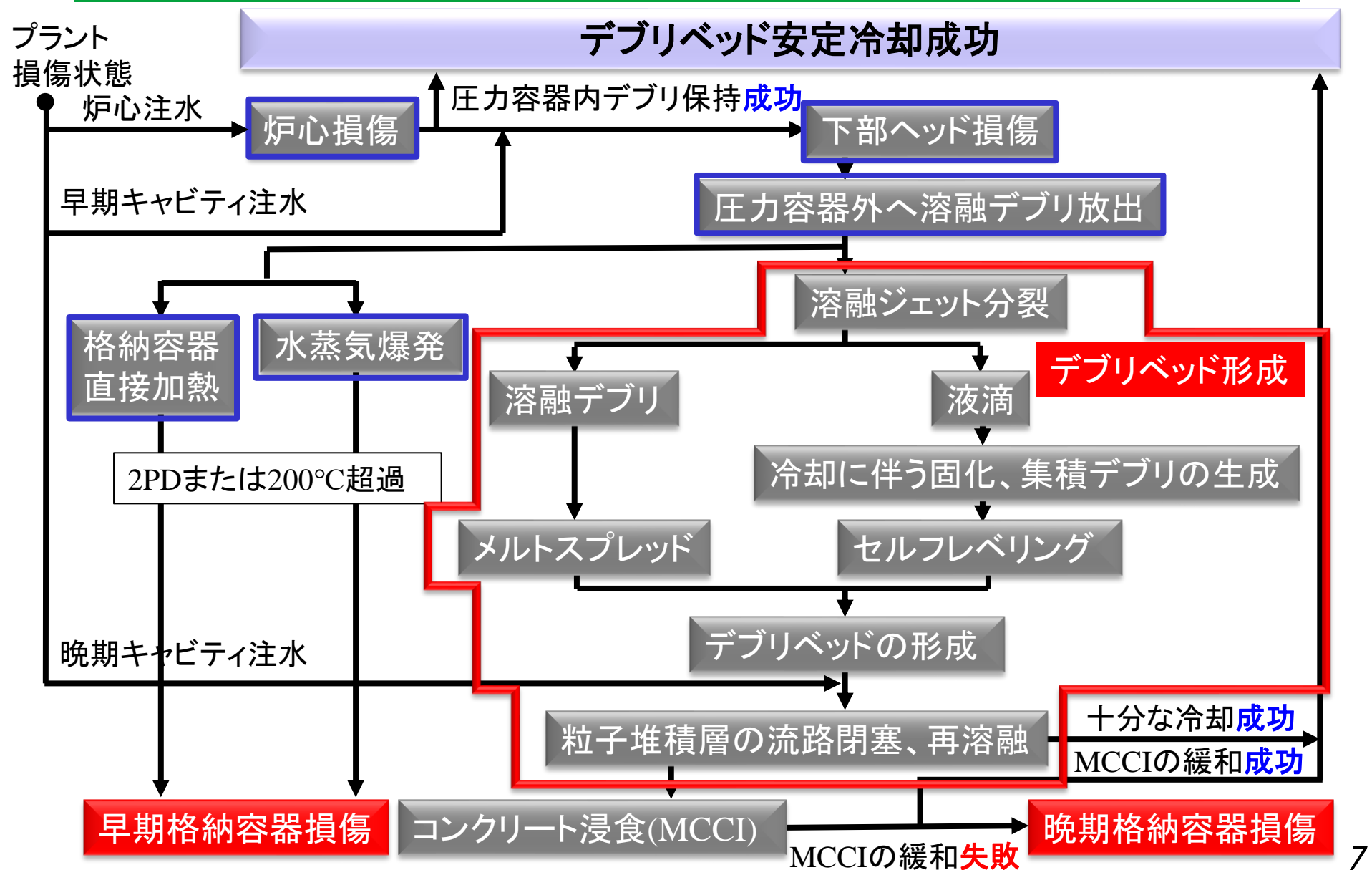


# デブリベッド形成と冷却に関わる現象



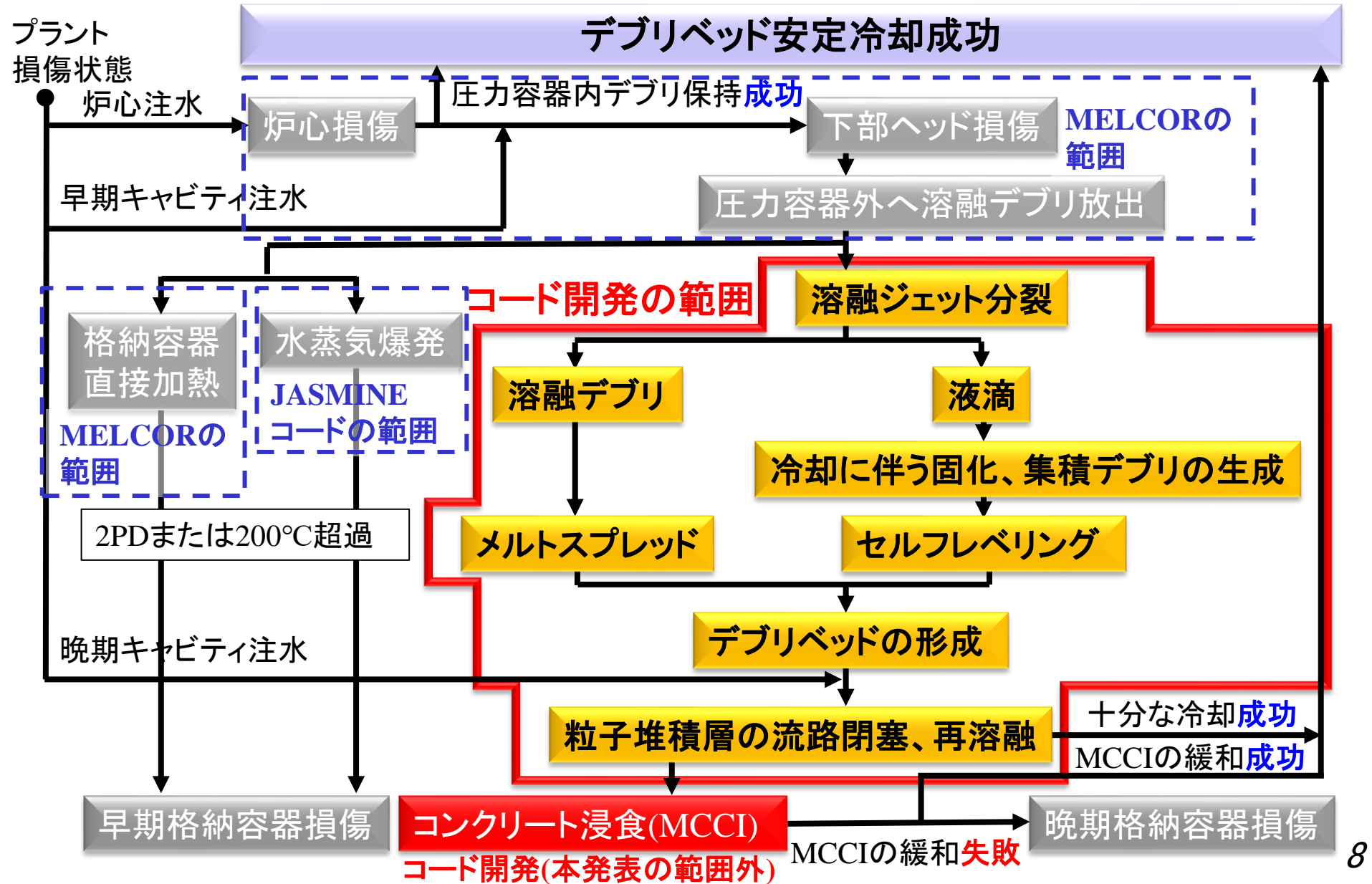


# 圧力容器外デブリベッド形成及び冷却過程における重要現象





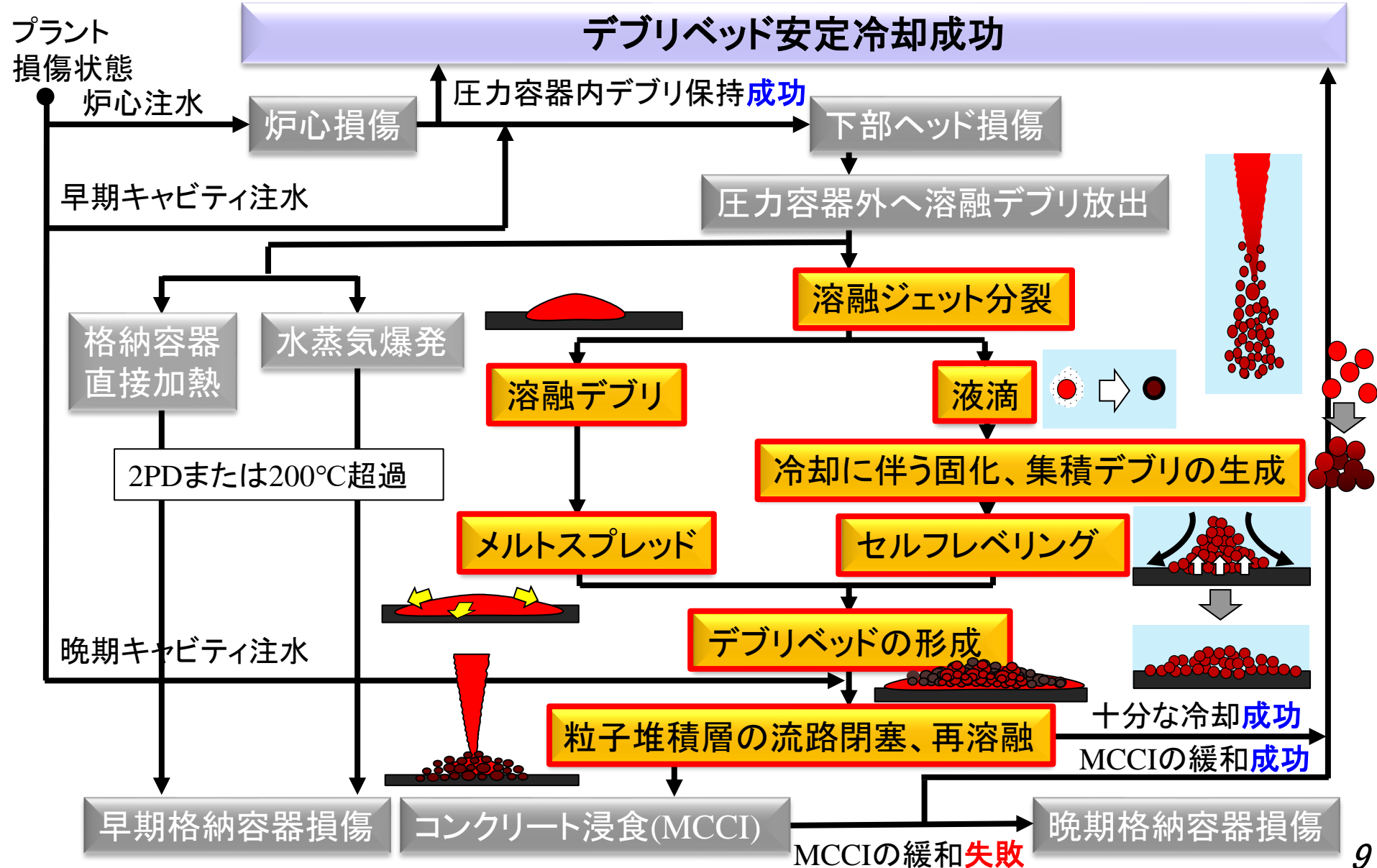
# コード開発において対象とする重要現象







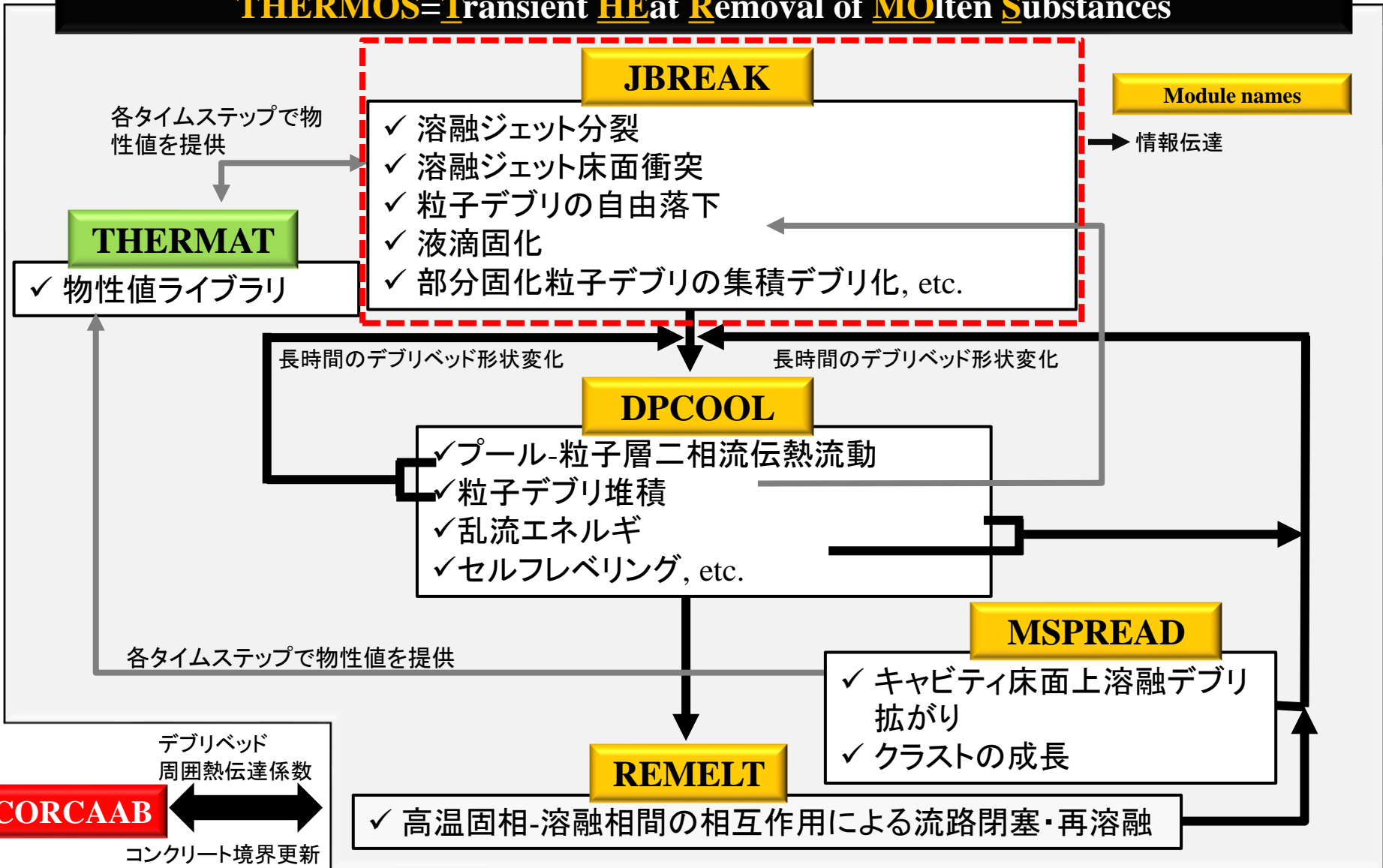
# コード開発が対象とする重要現象





# THERMOSを構成するモジュール

**THERMOS**=**T**ransient **H**eat **R**emoval of **M**olten **S**ubstances





# 目次

---

## □ 概要

- ✓ 背景・課題・目的
- ✓ 圧力容器外デブリベッド形成及び冷却過程における重要現象
- ✓ 三次元デブリ挙動解析コードTHERMOSの概要

## □ **DEFOR-A実験に基づくTHERMOS-JBREAK開発**

- ✓ **DEFOR-A実験分析結果**
- ✓ **THERMOS-JBREAKモデル概要**
- ✓ **DEFOR-A実験に基づく妥当性確認**

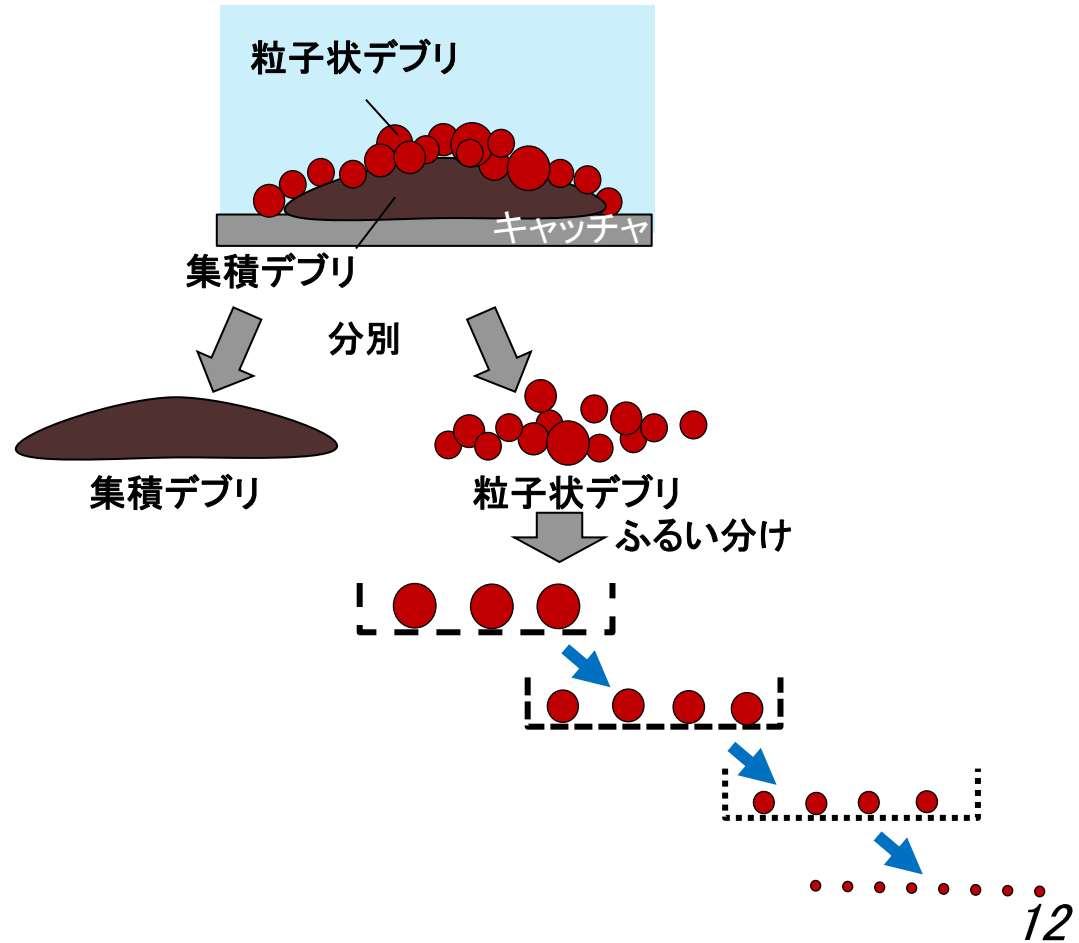
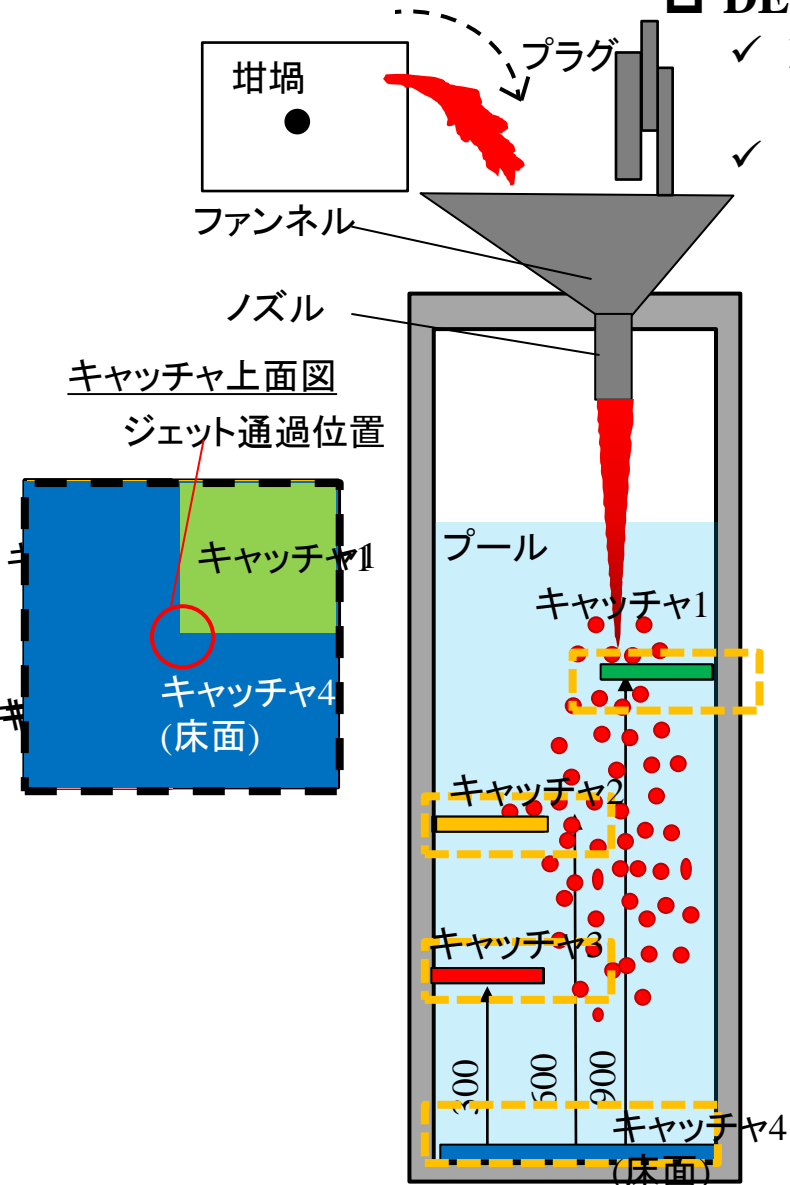
## □ 結言



# DEFOR-A実験の実験概要

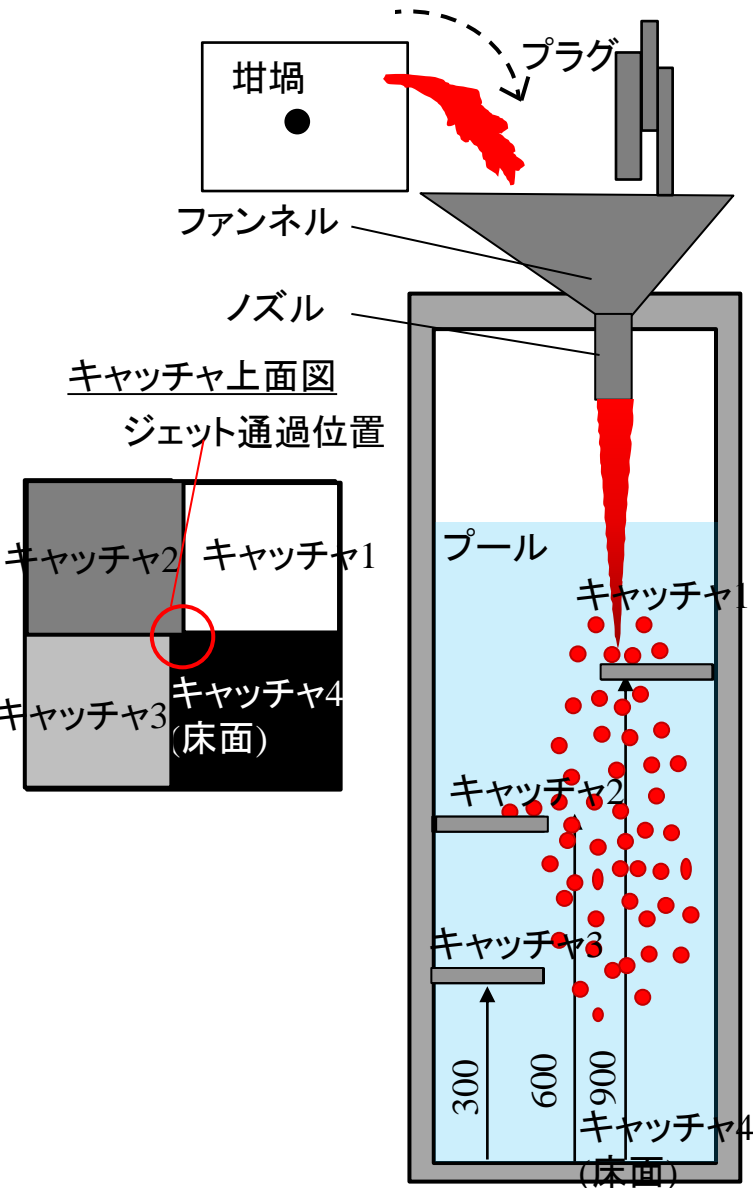
## DEFOR-A (DEbris FORMation and Agglomeration)

- ✓ NRA-JAEA-スウェーデン王立工科大学の3組織が協力し実験条件の提案・実験の実施・分析を行った。
- ✓ 対象とする現象は、プールでの溶融物のブレイクアップ挙動、粒子状デブリ径分布、集積挙動等





# DEFOR-A実験の条件



## 実験条件

	A23	A24	A26	A27
模擬溶融物	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -WO <sub>3</sub>			
溶融物密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	7811			
固相線/液相線温度[K]	1143.2			
初期溶融物温度 [K]	1280	1248	1299	1342
溶融物融点[K]	1143			
初期溶融物過熱度* [K]	137	105	156	199
溶融物体積 [L]	3.5			3.73
溶融物放出時間 [s]	5.8	5.3	5.5	6.92
ノズル直径 [mm]	25	34	20	
平均流量 [L/s]	0.54	0.62	0.59	0.54
ジェット自由落下長さ [m]	0.205	0.17	0.195	
水深 [m]	1.515	1.6	1.5	
初期水温 [K]	332	346	361	
初期水サブクール度 [K]	41	27	12.5	

集積現象には、**溶融物過熱度\***が**支配的**であるため、幅広い溶融物過熱度で実験を実施した。

\*初期溶融物過熱度=初期溶融物温度-溶融物融点



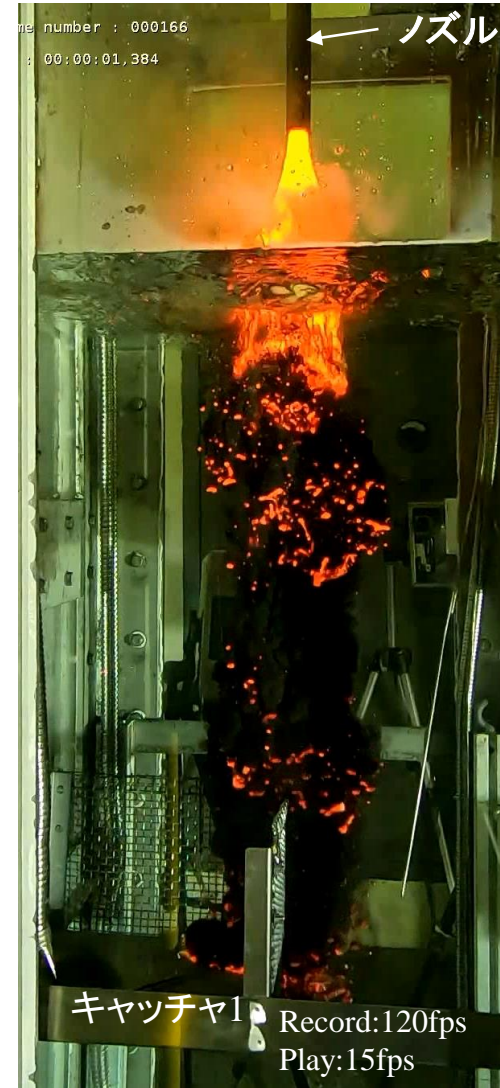
# ジェット拳動可視化結果

A23 ( $T_{\text{sup}} : 137 \text{ K}$ )

A24 ( $T_{\text{sup}} : 105 \text{ K}$ )

A26 ( $T_{\text{sup}} : 156 \text{ K}$ )

A27 ( $T_{\text{sup}} : 199 \text{ K}$ )





# 粒子状デブリ径に及ぼす溶融物温度の影響

## A24 (溶融物過熱度:105 K)

0.71-1.4 mm



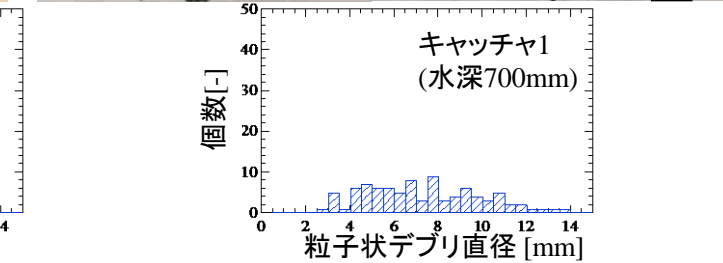
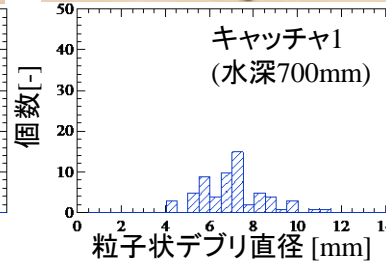
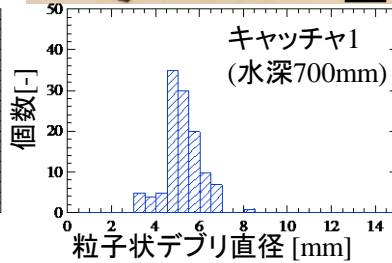
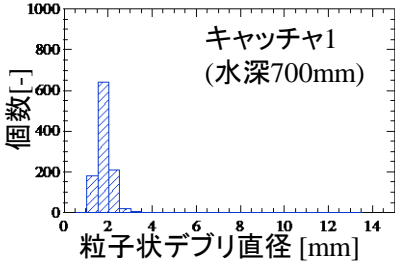
4.0-4.5 mm



6.3-7.1 mm



7.1-12.5 mm



## A27 (溶融物過熱度:199 K)

0.71-1.4 mm



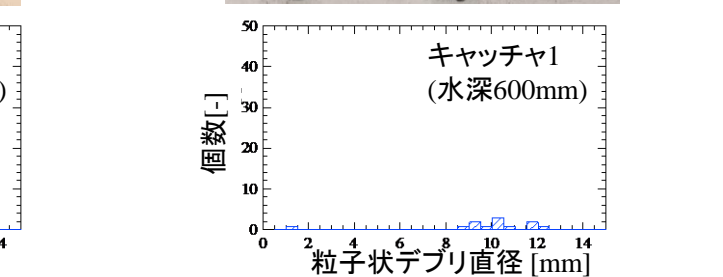
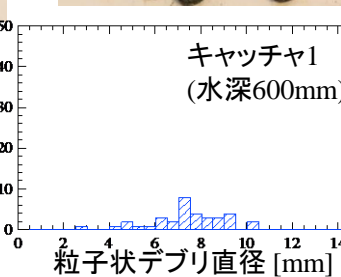
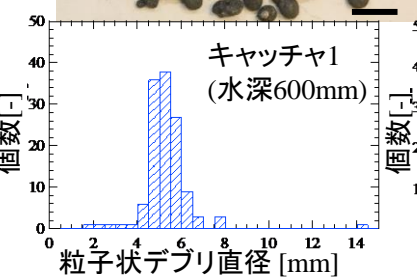
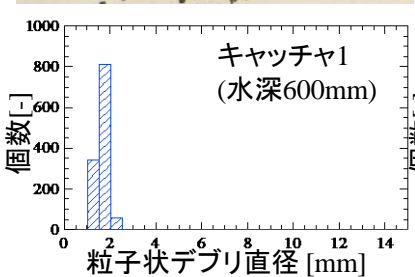
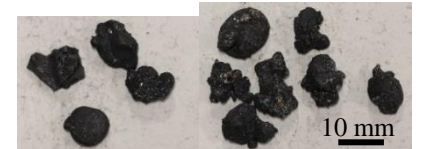
4.0-4.5 mm



6.3-7.1 mm



7.1-12.5 mm

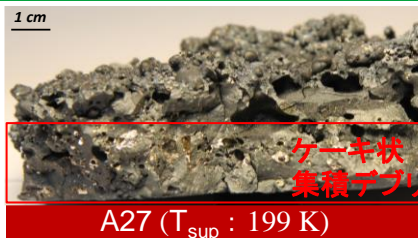


✓ 水面に最も近いキャッチャ1では、溶融物温度の高いA27に比べ溶融物温度の低いA24では大流粒径の分布を持つ。

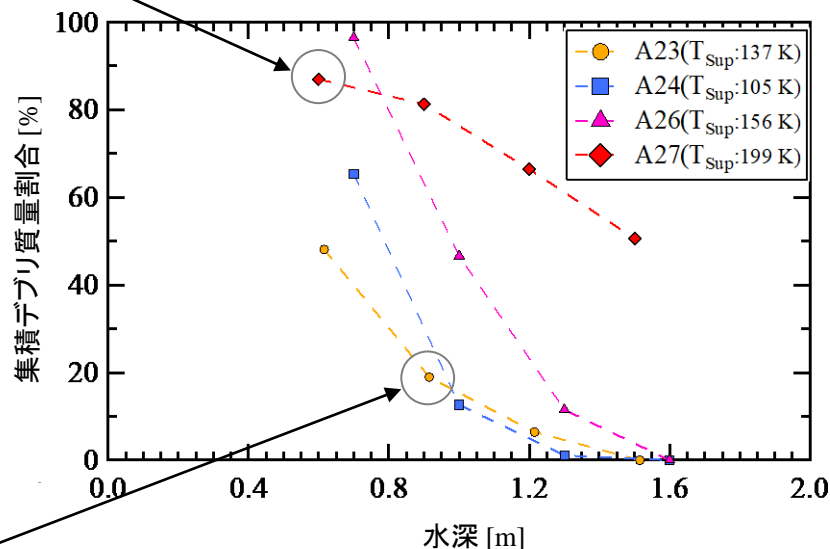
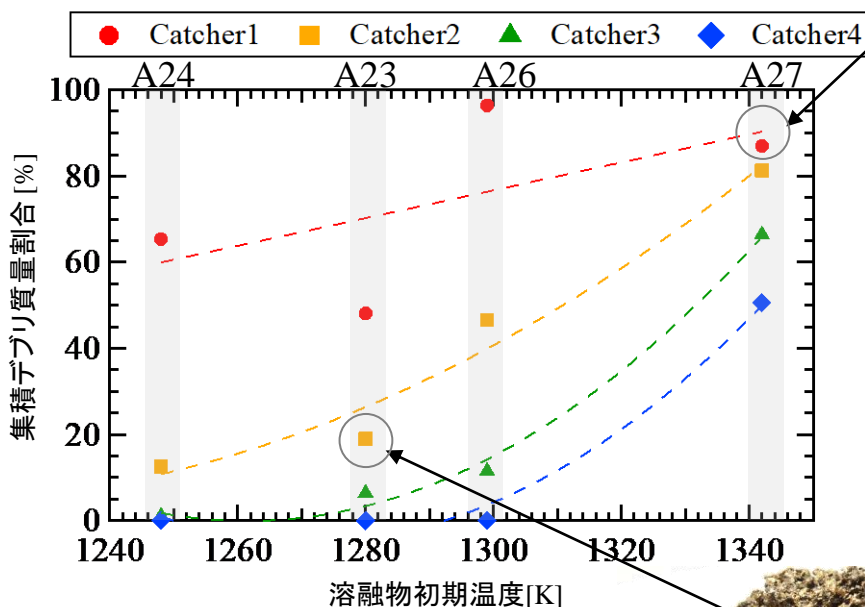


# 集積挙動に及ぼす溶融物温度と水深の影響

$$\text{集積デブリ質量割合} = \frac{\text{集積デブリ質量}}{\text{全デブリ質量}}$$



下部には**ケーキ部**、上部には**複数の液滴が結合し集積デブリ**を形成  
⇒ポロシティ不均一に存在し**透過性の悪い**表面を形成している。



**複数の小さな液滴が結合し集積デブリを形成**  
⇒ポロシティが均一に存在する。  
**多孔質な構造**を有し、**透水性も良く**、効率的に冷却されることが予想される。

- ✓ 集積現象には**溶融物過熱度と水深**が支配的である。
- ✓ 溶融物温度によって**集積デブリ構造の差異**が生じ、冷却に大きな影響を与える。





# DEFOR-A実験結果の分析から得られたJBREAK開発の基本方針

## DEFOR-A実験の分析結果

### □ 堆積した粒子状デブリ分布分析

✓ 粒径分布には**溶融物温度**が影響することが示された。

### □ 堆積した集積デブリ分析

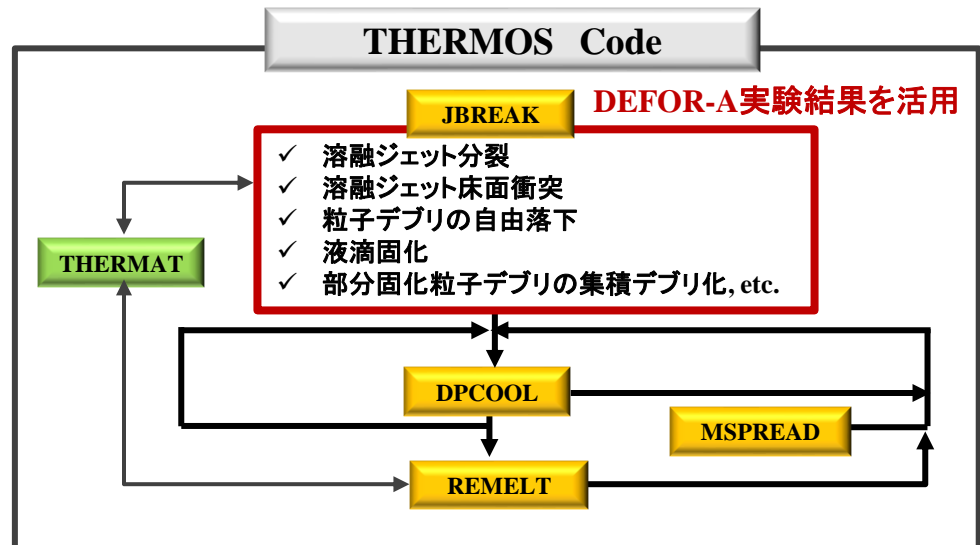
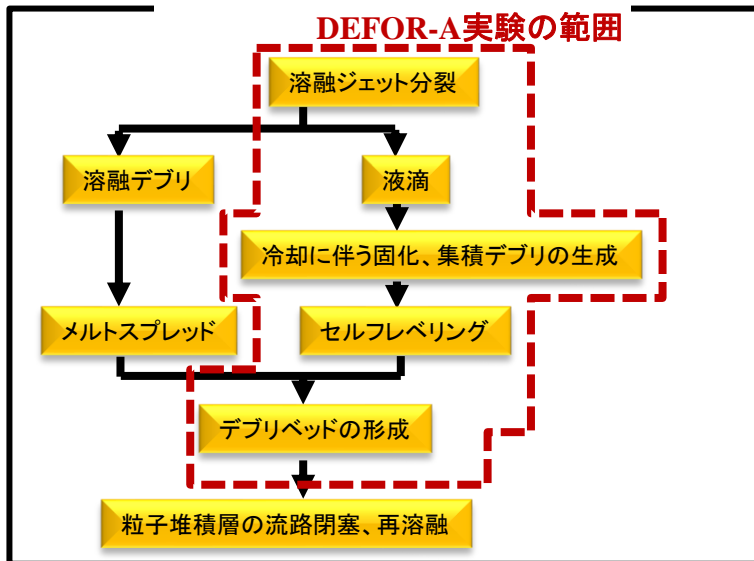
✓ 溶融物温度によって集積デブリ構造の差異が生じることが示された。

✓ 集積現象には**溶融物温度**と**水深**が**支配的**であることが示された。

## JBREAK開発へ反映

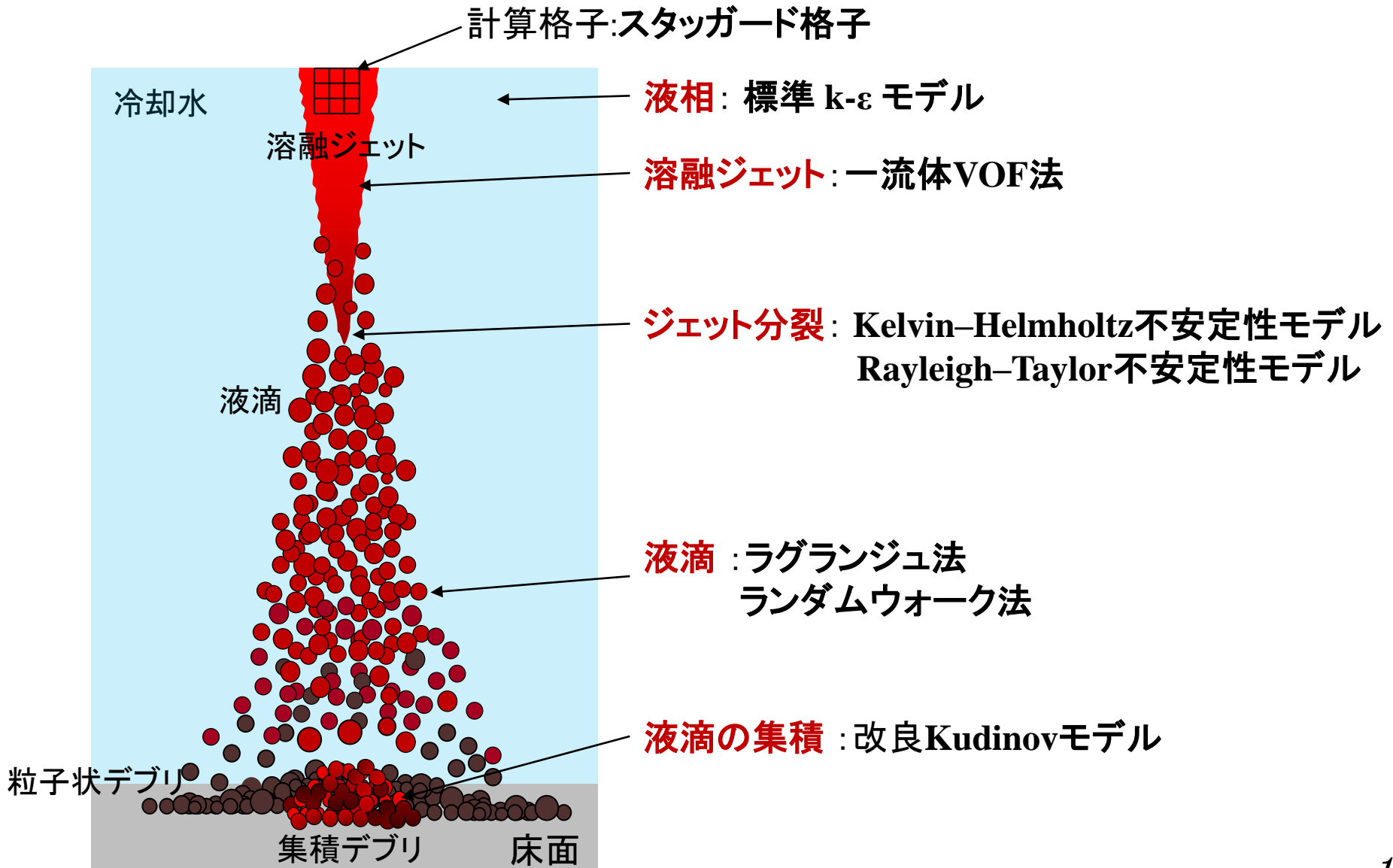
### THERMOS開発の範囲

#### DEFOR-A実験の範囲





# JBREAKの概要





# ジェットモデル

空気

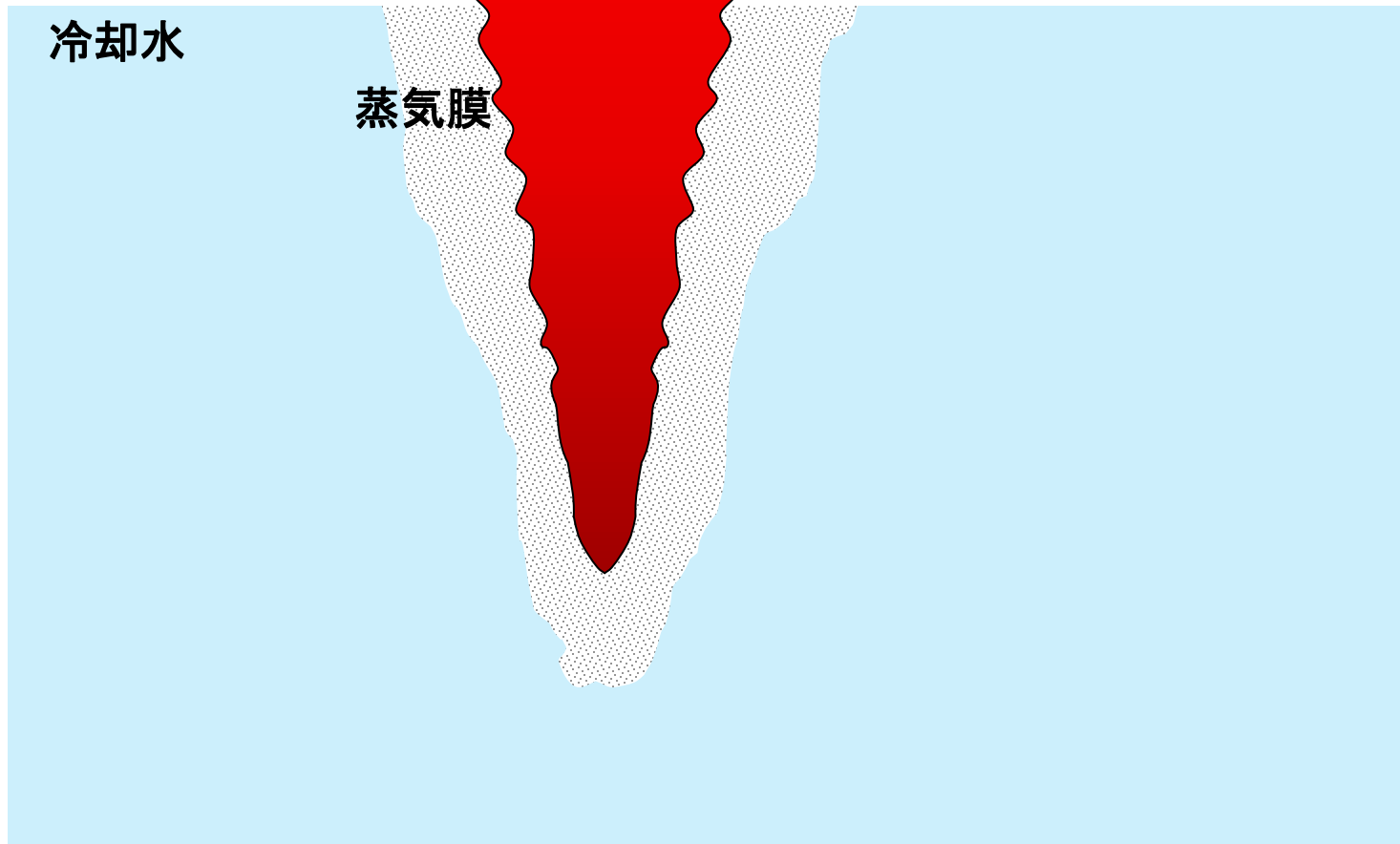
溶融ジェット

□ 一流体VOF法

- ✓ 溶融ジェット外側界面の変形
- ✓ 溶融ジェットと周囲流体の相互作用
- ✓ 溶融ジェットと障害物(壁を含む)の衝突
- ✓ ジェット-周囲流体の摩擦、熱伝達を考慮

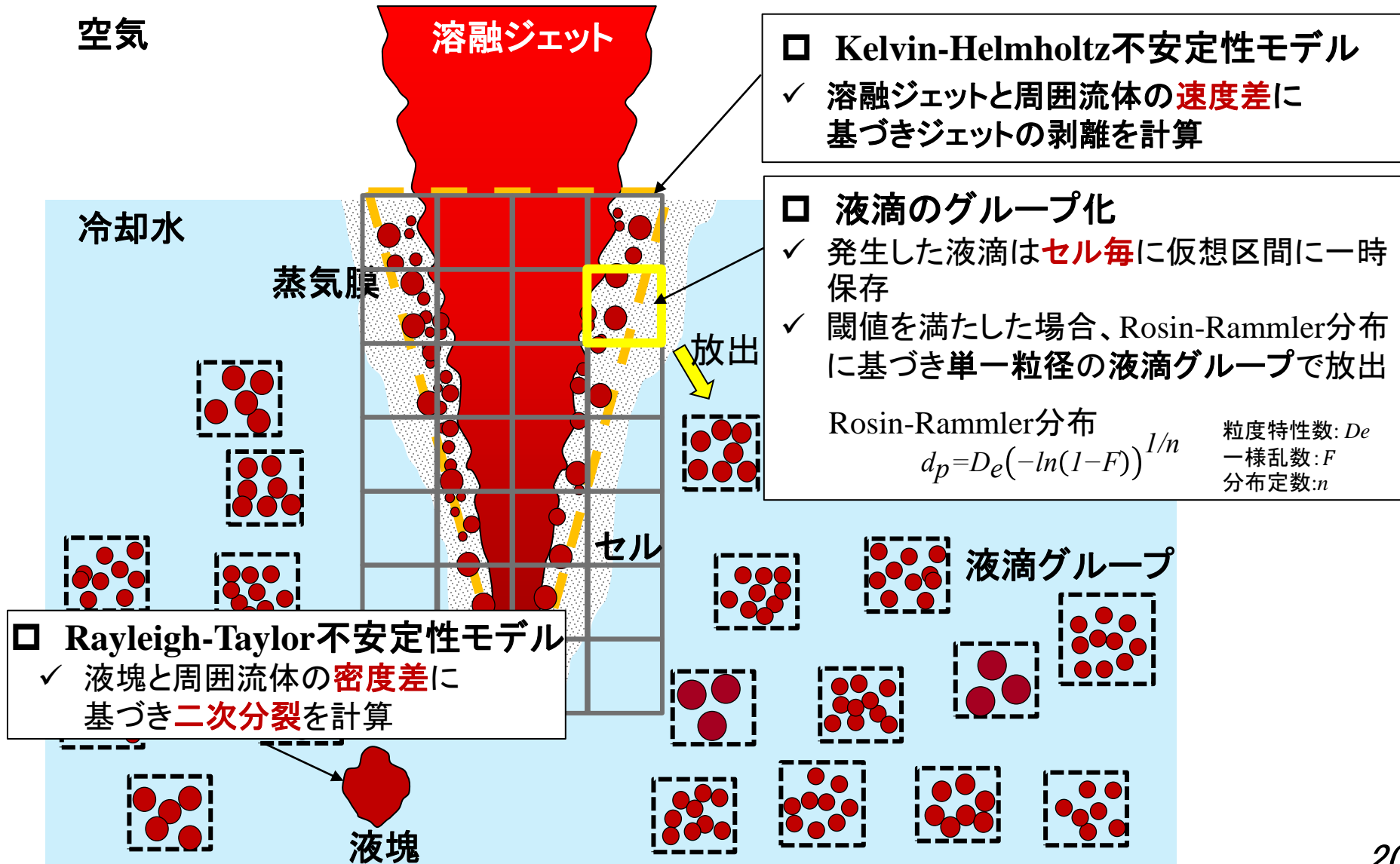
冷却水

蒸気膜



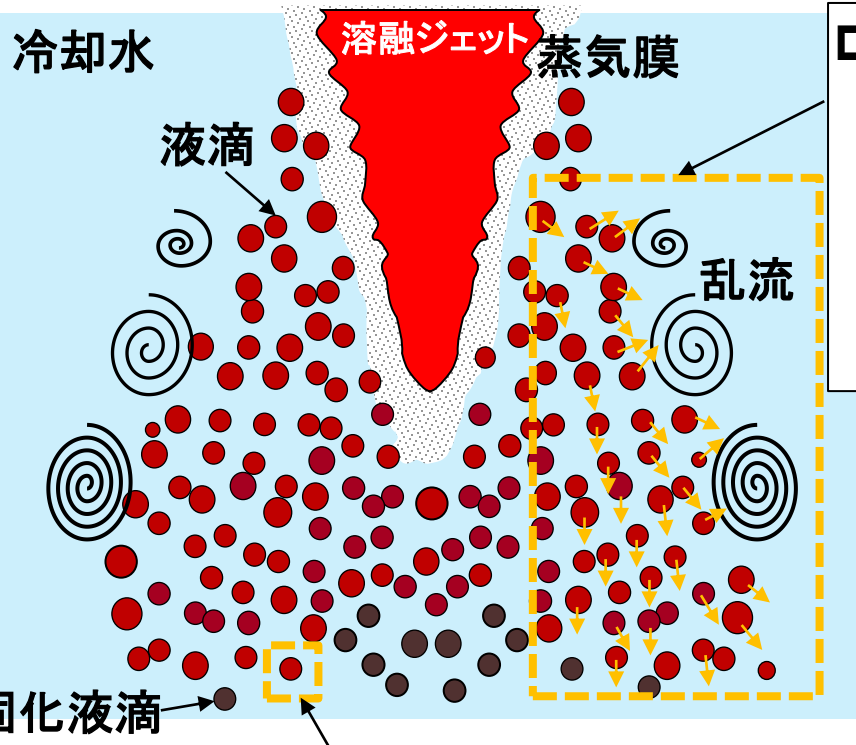


# 液滴発生モデル





# 液滴拡散及び温度計算モデル



## □ 液滴の拡散モデル

- ✓ 液滴の軌跡計算: 粒子法のラグランジュ法
- ✓ 乱流による拡散効果: ランダムウォーク法

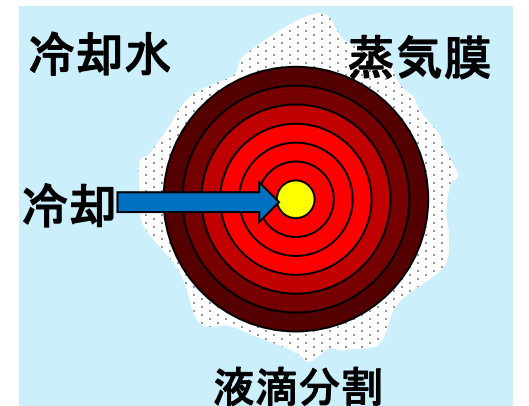
周囲流体速度    一様乱数    乱流エネルギー

$$\text{液滴速度: } u_p = \overline{u}_{amb} + \xi \sqrt{\frac{2}{3}} k$$

## □ 液滴温度計算モデル

- ✓ 液滴を球として、半径方向に分割し温度を計算

$$\frac{\partial}{\partial t} (\underbrace{\rho}_{\text{液滴密度}} \underbrace{cT}_{\text{液滴比熱}}) = \frac{\partial (r^2 \underbrace{q_r'}_{\text{半径方向熱流束}})}{\partial r} + \underbrace{q_{decay}''}_{\text{崩壊熱}}$$

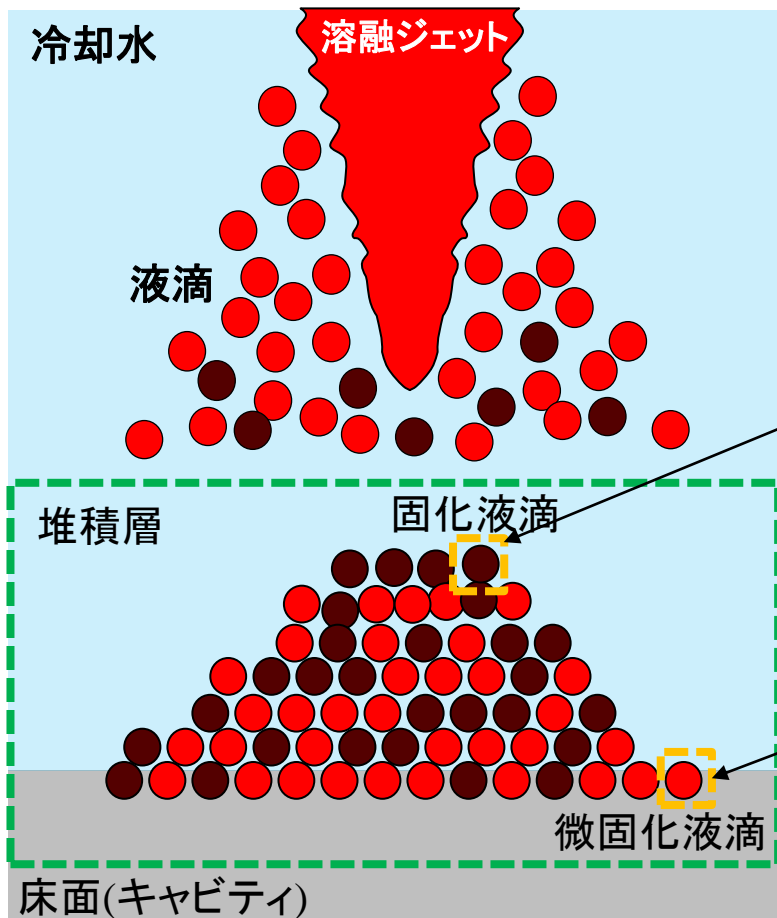




# 液滴集積モデル

## □ 改良Kudinovモデル

- ✓ KTHのKudinov等が提案したモデルを三次元CFDに拡張し適用
- ✓ 集積現象には液滴のクラスト(固相線温度以下)の厚さが支配的
- ✓ 堆積した液滴を**固化液滴**と**微固化液滴**に分類、その質量・割合から集積デブリ質量を計算

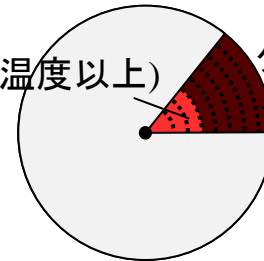


## □ 固化液滴

液滴のクラストの厚さがユーザ指定の閾値より厚い

溶融(固相線温度以上)

クラスト(固相線温度以下)

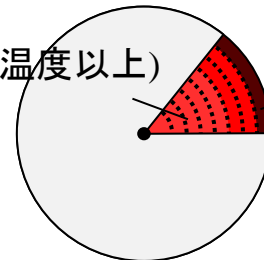


## □ 微固化液滴

液滴のクラストの厚さがユーザ指定の閾値より小さい

溶融(固相線温度以上)

クラスト(固相線温度以下)





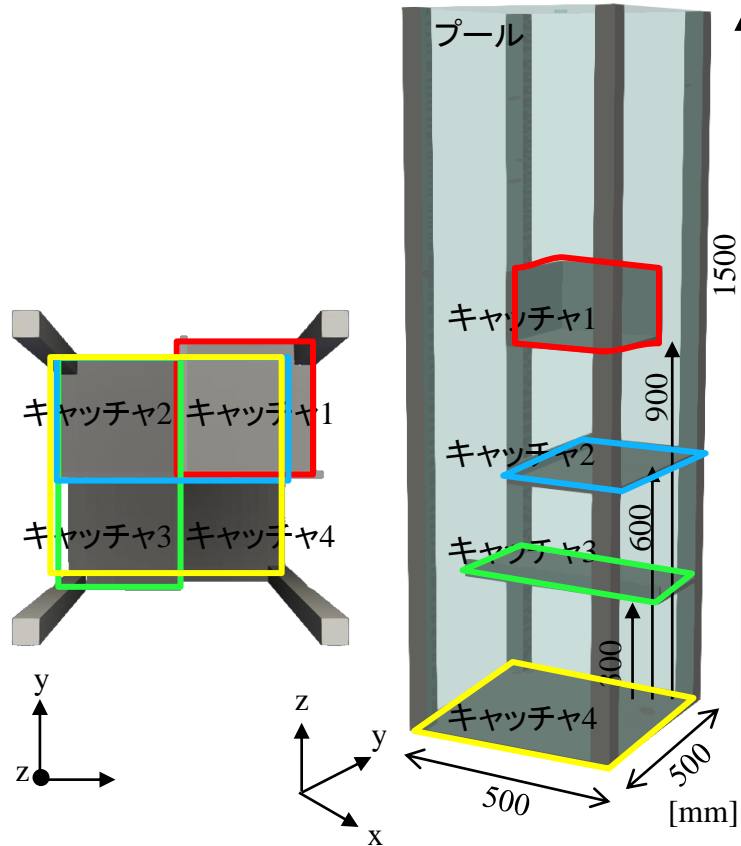
# DEFOR-A実験に基づく妥当性確認

## 実験条件

	A24	A26	A27
模擬溶融物	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -WO <sub>3</sub>		
溶融物密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	7811		
固相線/液相線温度 [K]	1143.2		
初期溶融物温度 [K]	1248	1299	1342
<b>初期溶融物過熱度 [K]</b>	<b>105</b>	<b>156</b>	<b>199</b>
溶融物体積 [L]	3.73		
溶融物放出時間 [s]	5.3	5.5	6.92
ノズル直径 [mm]	34	20	
平均流量 [L/s]	0.62	0.59	0.54
ジェット自由落下長さ [m]	0.17	0.195	
水深 [m]	1.6	1.5	
初期水温 [K]	346	361	
初期水サブクール度 [K]	27	12.5	

## 解析条件

	A24	A26	A27
メッシュサイズ [m]	x,y direction:0.004~0.0225 z direction:0.005~0.01		
タイムステップ [s]	1.0 × 10 <sup>-3</sup>		
CFL条件	0.90	0.95	0.90
Rosin-Rammler分布			
粒度特性数:De	4.0 × 10 <sup>-3</sup>		
分布定数:n	1.87		
液滴初期速度調整パラメータ	鉛直方向:1.0 水平方向:0.5		
固化液滴/微固化液滴分別閾値	50%		



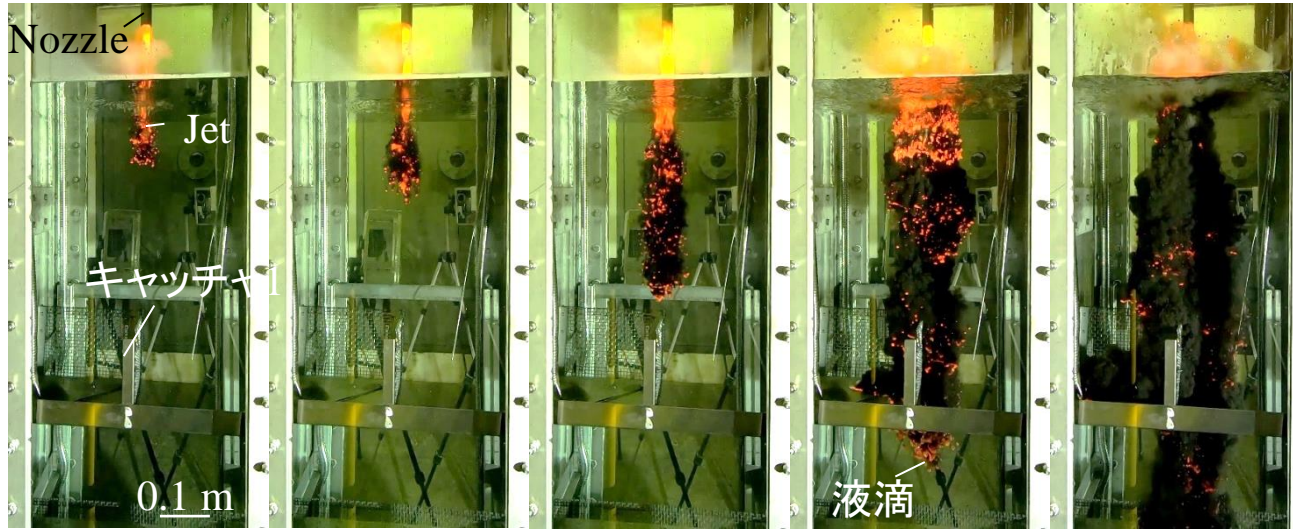
解析体系



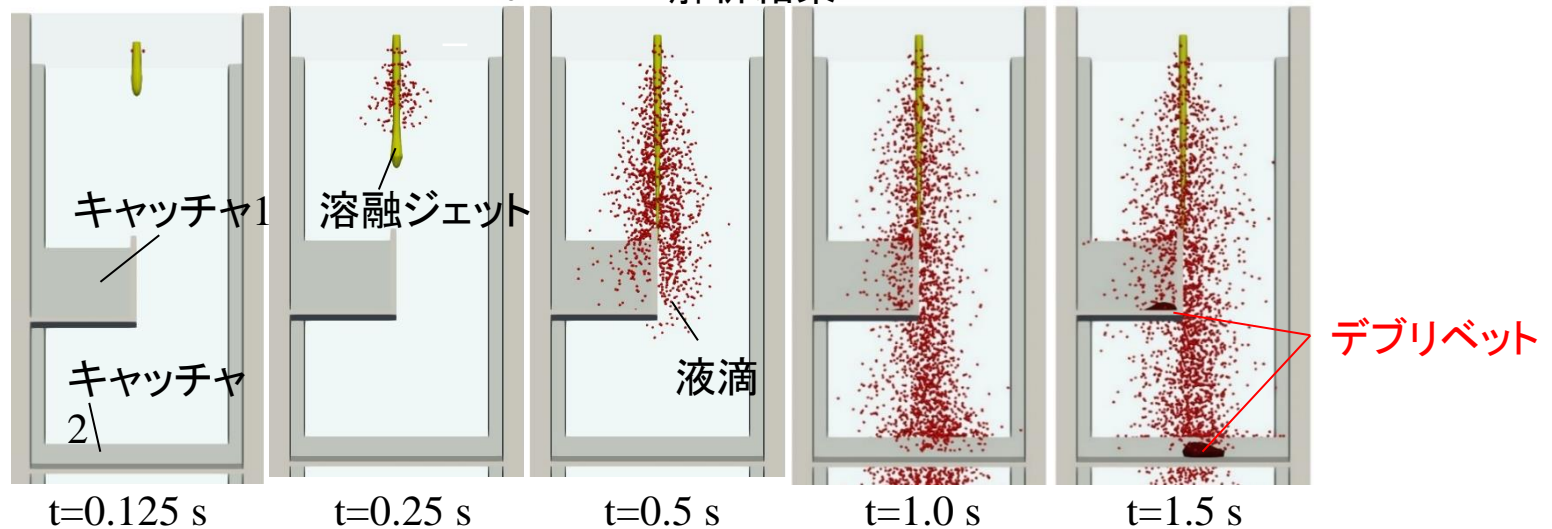
\* (Case/ $T_{melt}$ / $T_{sup}$ )

# ジェット及び液滴追跡挙動解析結果(A27/1342 K/ 199 K) \*

実験結果



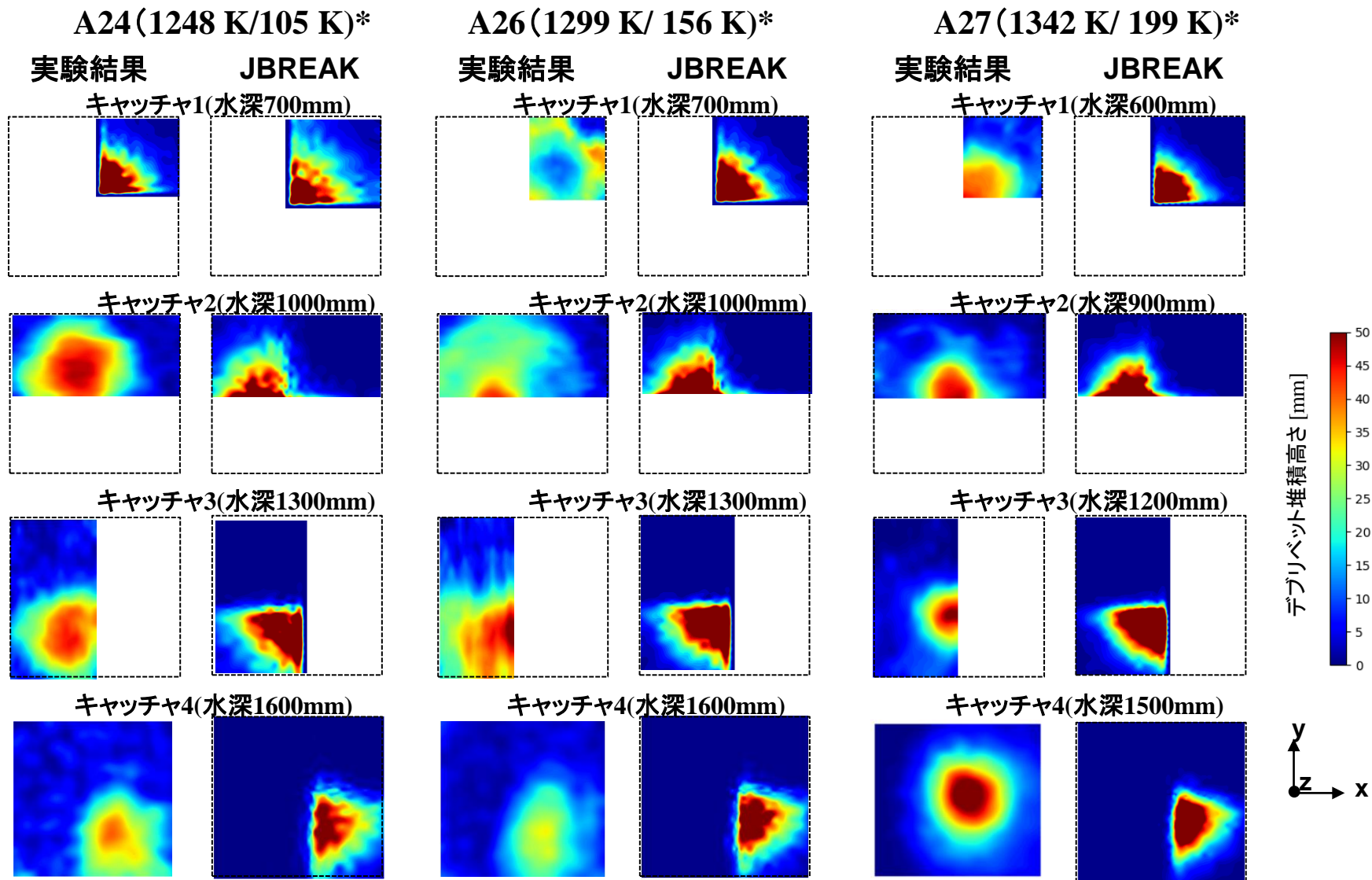
JBREAK解析結果



✓ JBREAK計算結果は、ジェット分裂及び液滴の拡散を良好に再現した。



# 3次元デブリベッド分布解析結果(A24/A26/A27)



✓ JBREAKの計算結果は、堆積面積を過小に予測し、高さを過大に予測した。



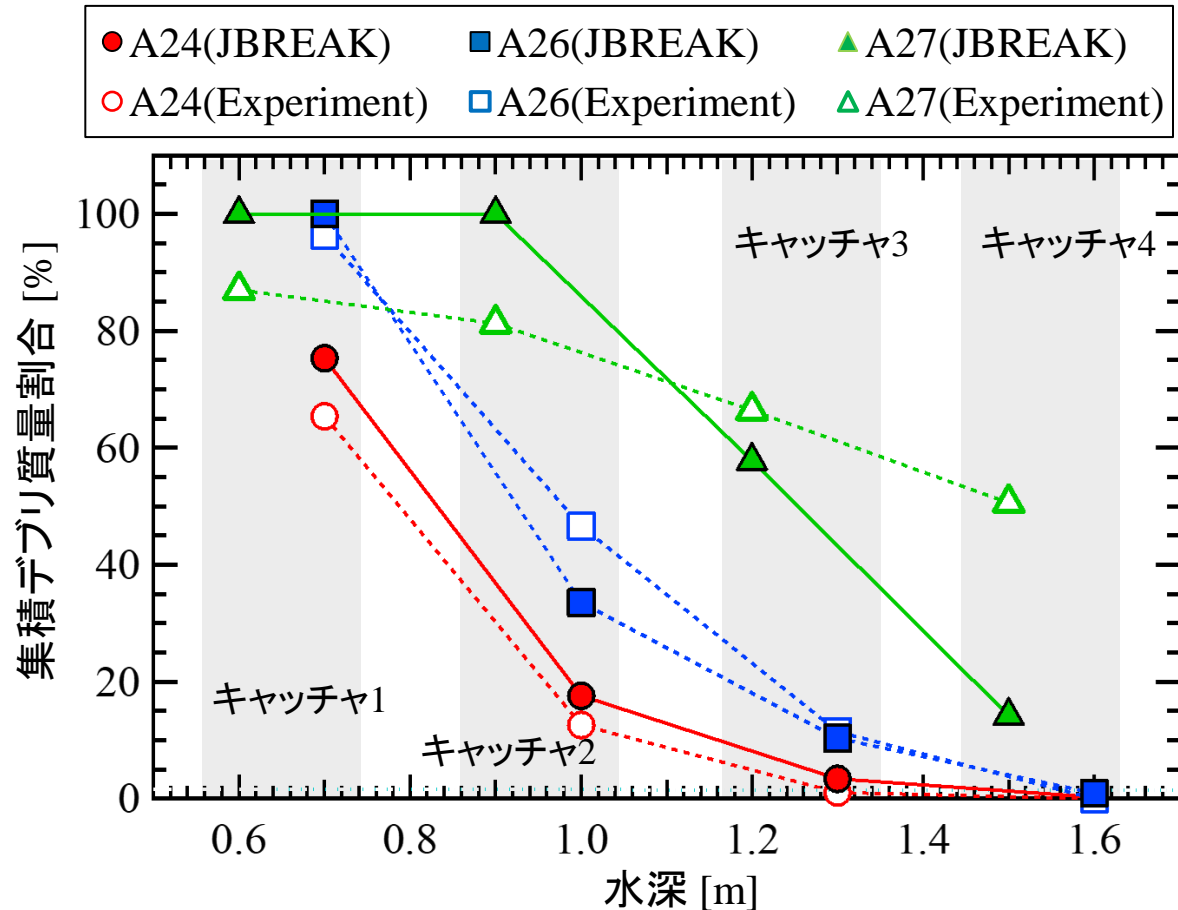
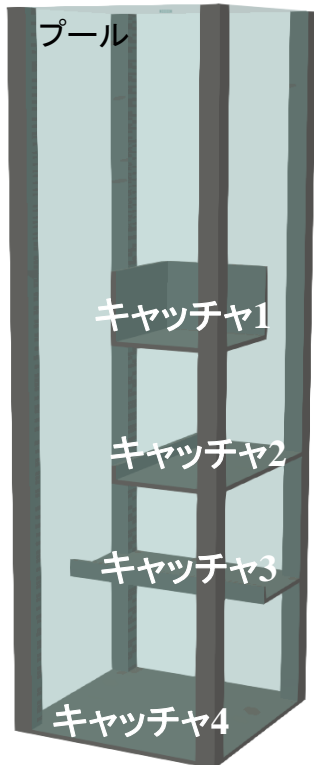
# 集積デブリ解析結果(A24/A26/A27)

$$\text{集積デブリ質量割合} = \frac{\text{集積デブリ質量}}{\text{全デブリ質量}}$$

A24(1248 K/105 K)

A26(1299 K/ 156 K)

A27(1342 K/ 199 K)



- ✓ JBREAK計算結果は、低温条件(A24及びA26)で**良好な予測**を示した。
- ✓ 高温条件(A27)の場合、上流では**過大評価**、下流では**過小評価**した。



# 目次

---

## □ 概要

- ✓ 背景・課題・目的
- ✓ 圧力容器外デブリベッド形成及び冷却過程における重要現象
- ✓ 三次元デブリ挙動解析コードTHERMOSの概要

## □ DEFOR-A実験に基づくTHERMOS-JBREAK開発

- ✓ DEFOR-A実験分析結果
- ✓ THERMOS-JBREAKモデル概要
- ✓ DEFOR-A実験に基づく妥当性確認

## □ 結言



# 結言

ジェットの分裂、堆積及び集積を予測するために、JBREAKコードを開発した。

## □ 溶融ジェット分裂及び液滴拡散

✓ JBREAK計算結果は、ジェット分裂及び液滴の拡散を良好に再現した。

## □ 3次元デブリベッド分布

✓ JBREAKの計算結果は、堆積面積を過小に予測し、高さを過大に予測することが確認された。

## □ 集積デブリ質量割合

✓ JBREAK計算結果は、低温条件(A24及びA26)で良好な予測を示した。  
高温条件(A27)の場合、上流では過大評価、下流では過小評価した。

高温溶融デブリ挙動を予測するJBREAKを開発することで、既存解析コードで扱えない領域を高い空間及び時間解像度での解析を可能とし不確かさを低減に資する知見が得られた。

## □ 今後の課題

- ✓ THERMOSを構成する他モジュールとのインターフェイス拡張、モデルの改良
- ✓ DEFOR-A実験以外の妥当性確認、実機スケールの解析



## 【参考文献】

- K. Moriyama et al., Simulation of melt jet breakup experiments by JASMINE with an empirical correlation for melt particle size distribution, Nuclear Science Technology, 2016
- P. Kudinov et al., Development and validation of conservative-mechanistic and best estimate approaches to quantifying mass fractions of agglomerated debris, Nuclear Engineering and Design. 262, 452-461, 2013
- P. Kudinov et al., Agglomeration and size distribution of debris in DEFOR-A experiments with Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WO<sub>3</sub> corium simulant melt, Nuclear Engineering and Design. 263, 284-295, 2013
- R. Meignen, et al., Comparative Review of FCI Computer Models Used in the OECD SERENA Program. Proceedings of ICAPP-05, Seoul, KOREA, May 15-19, Paper 5087
- Yakush, S., Kudinov, P., Dinh, T.-N., 2009, Multiscale simulation of selforganization phenomena in the formation and Coolability of corium debris bed, NUREG-13 Kanazawa Japan, N13P1143.
- 菊池ほか, “JBREAKによるDEFOR-A実験解析に基づくデブリ堆積モデル開発”, 日本原子力学会2020年秋の大会予稿, 2020
- 菊池ほか, “JBREAKにおける溶融デブリ堆積及び集積モデル開発”, 日本原子力学会2021年秋の大会予稿, 2021
- 菊池ほか, “溶融デブリ冷却性挙動における不確かさ検討(1)ジェット分裂及びメルトスプレッド挙動”, 日本原子力学会2021年春の年会予稿, 2021
- 菊池ほか, “高温溶融デブリの分裂及び集積挙動に関する分析”, 日本原子力学会2022年春の年会予稿, 2022



---

---

ご清聴ありがとうございました。