



令和4年度  
原子力規制庁技術基盤グループ-原子力機構安全研究・防災支援部門  
合同研究成果報告会

## 格納容器内への溶融炉心の移行による デブリ堆積メカニズムに関する研究

—冷却水中での溶融炉心の粒子化及び床面での再結合の予測—

令和4年11月22日

国立研究開発法人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  
シビアアクシデント研究グループ

岩澤 譲

本研究は筑波大学との「溶融炉心粒子のアグロメレーション挙動に関する共同研究」による成果の一部である。

# 研究計画全体の背景

目的: 原子炉格納容器での溶融炉心の冷却性を評価する手法の整備・構築

## 溶融炉心の落下による影響

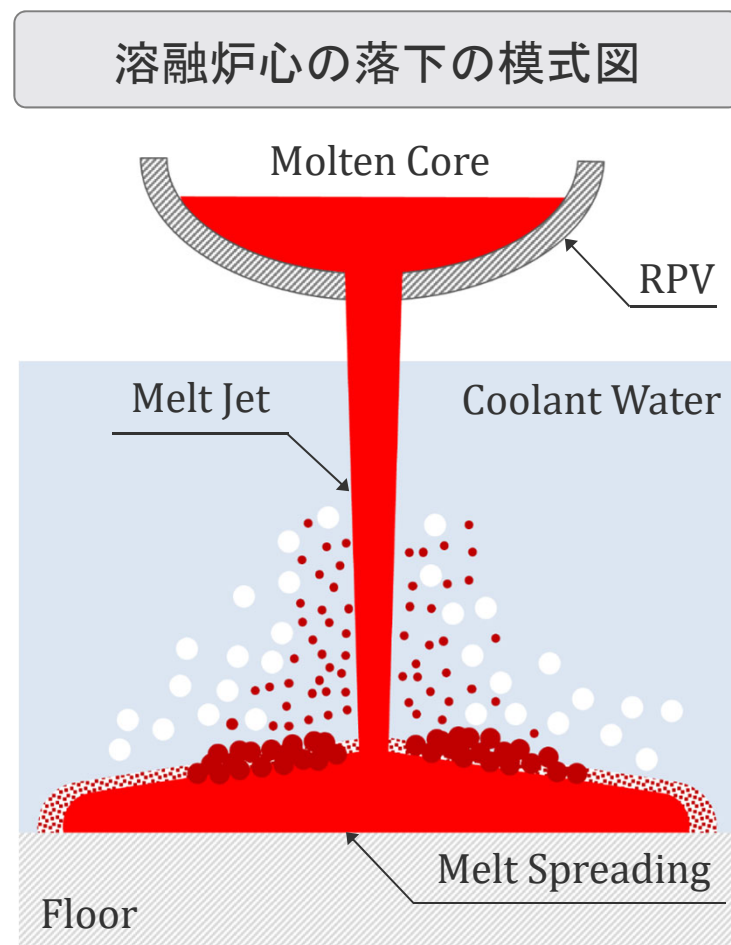
床面が侵食される溶融炉心/コンクリート相互作用 (MCCI) が発生して、原子炉格納容器の破損に至る可能性

## 格納容器の破損防止の対策

MCCIの発生を防止・緩和することを目的として落下した溶融炉心を冷却するための事前注水対策を採用

## 破損防止対策の有効性評価

事前注水対策の有効性評価するために、落下した溶融炉心の冷却性を判断する手法の整備が必要



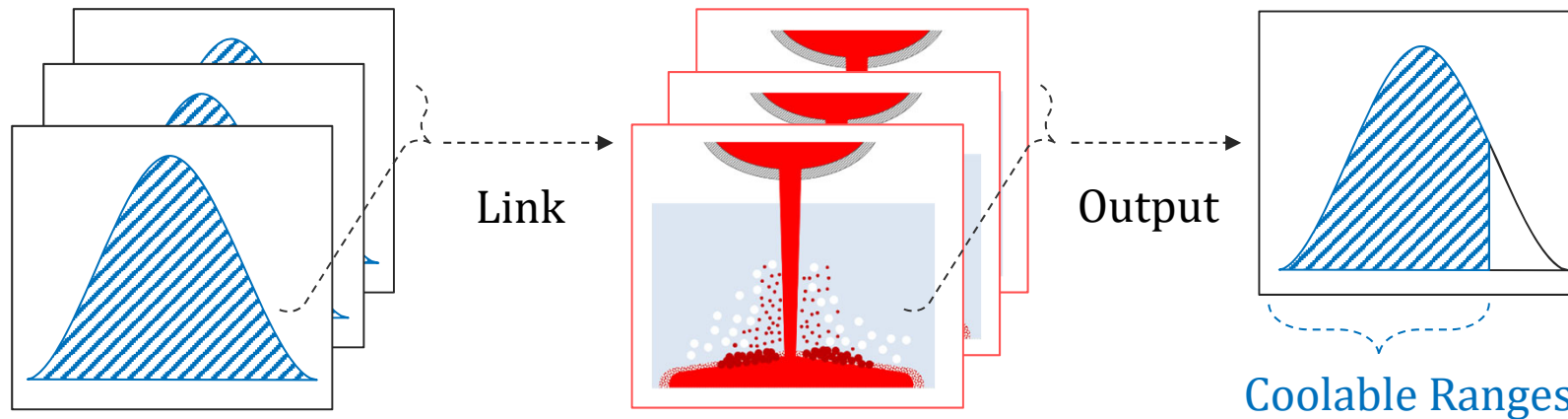
# 研究計画全体の枠組

多数の解析を実施する不確かさ解析に基づき溶融炉心の冷却性を評価

Uncertainty Parameters  
(e.g., breach diameters)

溶融炉心の落下の解析  
(解析コード/相関式の適用)

Target Parameter  
(melt relocation mass)

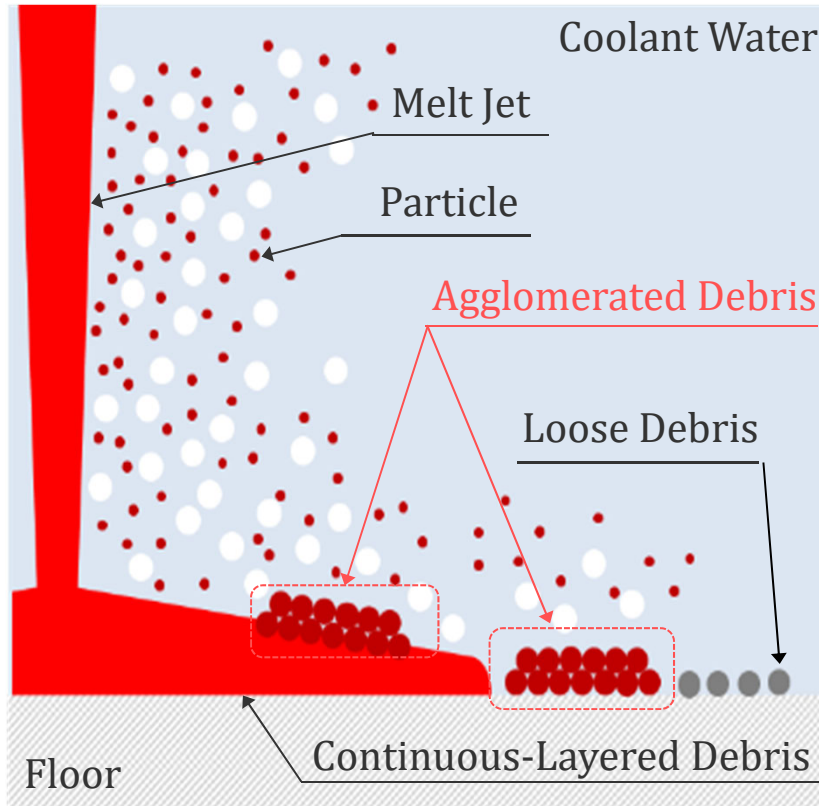


総合解析コード/溶融炉心の落下の解析の連携: デブリの堆積形態の情報を取得

研究対象

-----> 溶融炉心(溶融物)の堆積形態の分類/堆積質量予測手法の構築

# デブリの堆積形態の予測



- 粒子状デブリ\* (Loose debris)

粒子化した溶融物が分散して  
固化をした状態で床面に堆積

- 再結合デブリ\* (Agglomerated debris)

粒子化した溶融物が溶融をした  
状態で床面で再結合をして堆積

- 連続層状デブリ\* (Continuous-layered debris)

粒子化せず溶融物が連続体と  
して床面に到達して拡がり堆積

研究対象: 再結合デブリ

-----> 粒子状デブリと比較して接触面積が小さい: 冷却性の脅威となる可能性

# 既存研究：大規模実験

## 再結合デブリの堆積に言及/着目した既存研究(実験)の一覧

Test name	Melt	Inlet mass	Water depth	Reference
CWTI (ANL)	UO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub> -SS	~5 kg	~1.1 m	Spence et al. (1987)*
CCM (ANL)	UO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub> -SS	20~500 Kg	~1.1 m	Spence et al. (1994)*
FARO (JRC)	UO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub> -(Zr)	~200 Kg	~2.0 m	Magallon (2006)*
PREMIX (FZK)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	~60 kg	~1.4 m	Kaiser et al. (2001)*
DEFOR (KTH)	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -WO <sub>3</sub>	~25 kg	~1.6 m	Kudinov et al. (2013)

### 大規模実験：溶融物の素混合及び水蒸気爆発に着目

----->

**再結合デブリ\***の堆積を報告(デブリ形状の観察のみ実施)

\*当該文献では Conglomerate / Globular デブリ等と呼称される

# 既存研究：中規模実験

## 再結合デブリの堆積に言及/着目した既存研究(実験)の一覧

Test name	Melt	Inlet mass	Water depth	Reference
CWTI (ANL)	UO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub> -SS	~5 kg	~1.1 m	Spence et al. (1987)
CCM (ANL)	UO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub> -SS	20~500 Kg	~1.1 m	Spence et al. (1994)
FARO (JRC)	UO <sub>2</sub> -ZrO <sub>2</sub> -(Zr)	~200 Kg	~2.0 m	Magallon (2006)
PREMIX (FZK)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	~60 kg	~1.4 m	Kaiser et al. (2001)
DEFOR (KTH)	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -WO <sub>3</sub>	~25 kg	~1.6 m	Kudinov et al. (2013)*

### 中規模実験：再結合デブリの堆積質量を計測

-----> 堆積形態の分類基準が不明確/質量計測の不確かさ：知見が不十分

\*Kudinov et al., *Nucl. Eng. Des.* **263** (2013)

# 研究目的

---

## 研究目的

原子炉格納容器へ落下した溶融物の冷却性を低下させる堆積形態である  
再結合デブリの分類及び堆積質量の予測手法の構築

## 研究課題

既存研究で実施された実験での堆積形態の分類基準が不明確/質量計測  
に不確かな部分があるために、手法の構築に必要な知見は不十分

## 実施内容

### ■ 模擬実験の実施

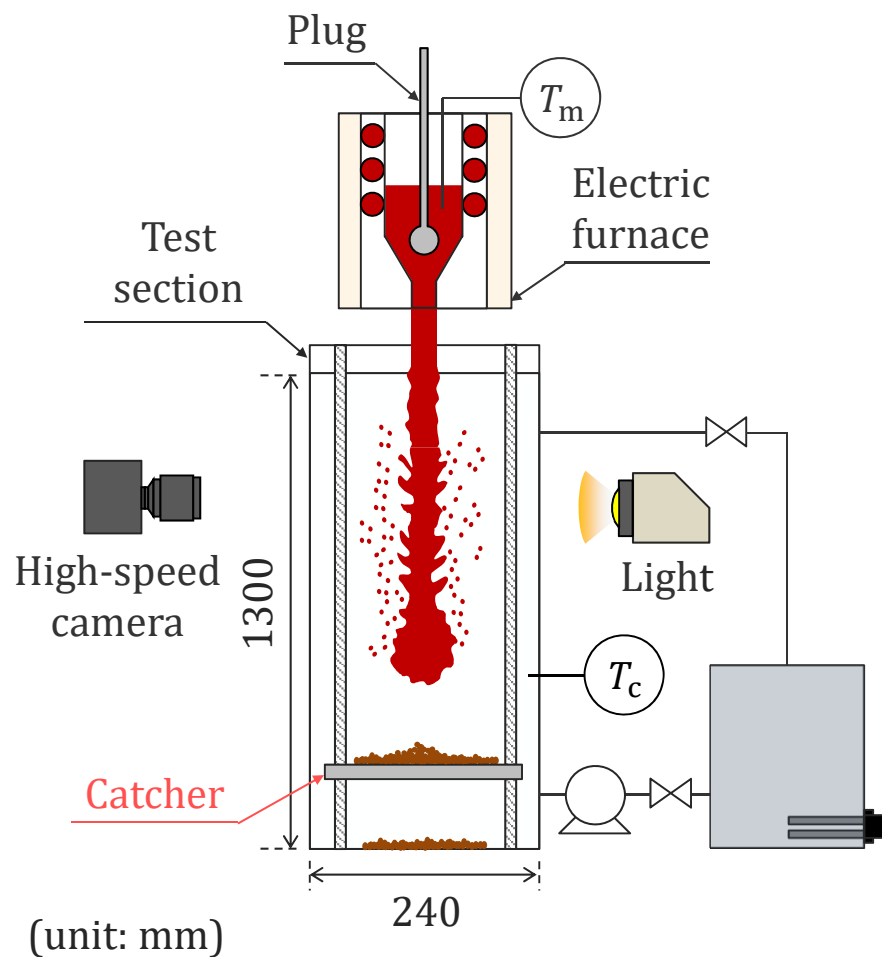
再結合デブリの堆積に関する知見を取得するため、低融点金属を溶融物として冷却水に投入する模擬実験を実施

### ■ 実験相関式の構築

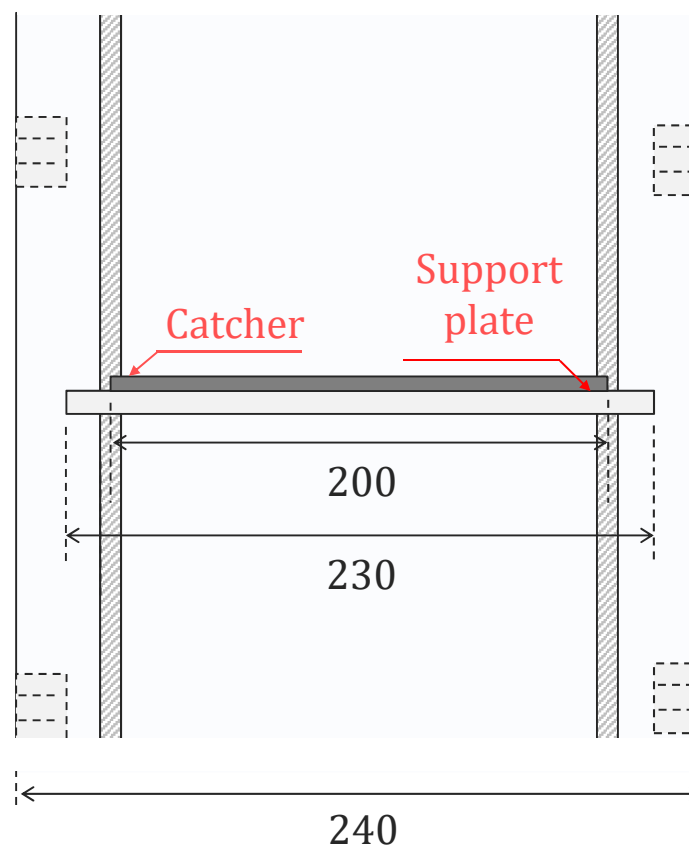
模擬実験で得られた再結合デブリの堆積質量を計測することで、実験条件を規格化した無次元数を用いた実験相関式を構築

# 実験装置の模式図

実験装置の全体図



回収機構の構造

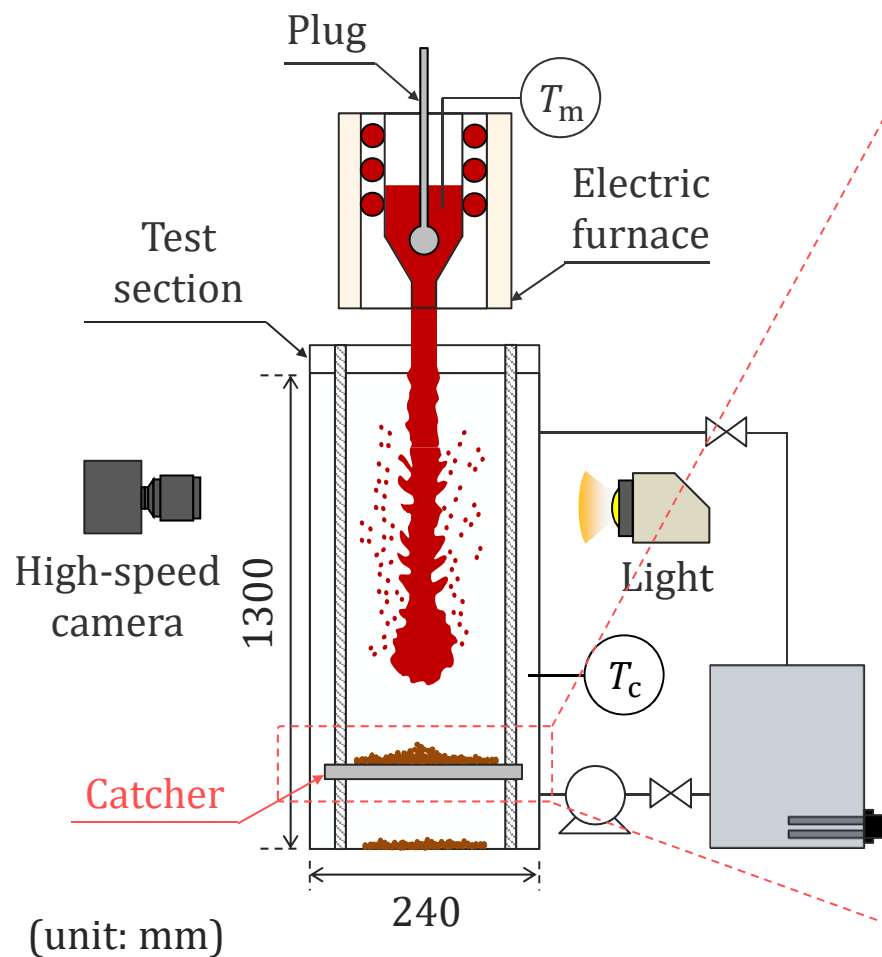


\*出典: Iwasawa et al., *Nucl. Eng. Des.* **386** (2022)

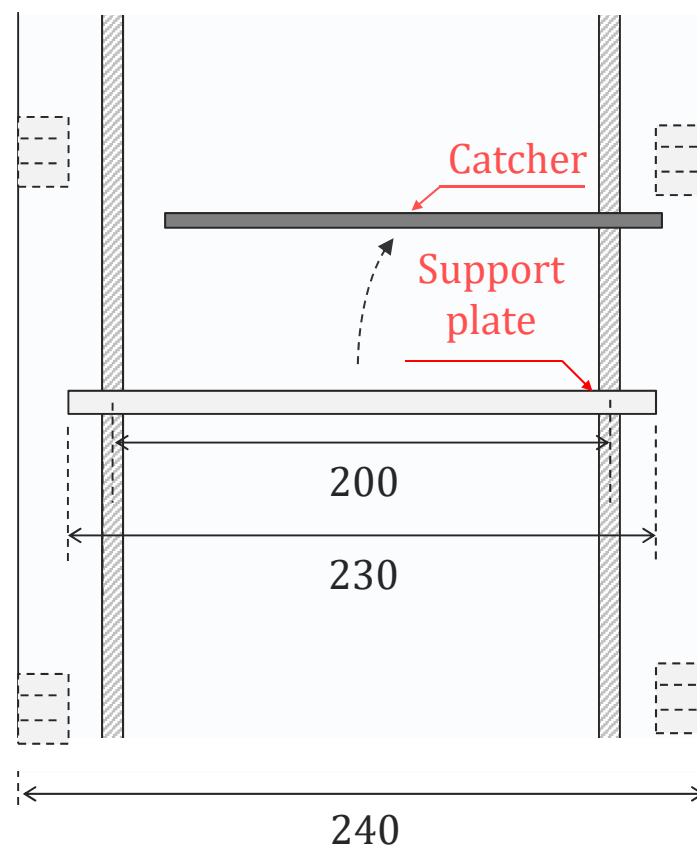


# 実験装置の模式図

実験装置の全体図



回収機構の構造



# 溶融物の物性値/投入条件

溶融物	Sn-Bi-In* <sup>1</sup> ( $T_{\text{melt}} = 78.8^{\circ}\text{C}$ )	投入条件	範囲
密度 $\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )	8595	溶融物温度 $T_m$ (°C)	100-300
粘性 $\mu_m$ (mPa·s)	2.0	冷却水温度 $T_c$ (°C)	20-60
表面張力 $\sigma_m$ (N/m)	0.42	冷却水水深 $h_c$ (mm)	700-1300 > $h_{\text{brk}}^{*2}$
熱伝導率 $\kappa_m$ (W/kg·K)	25.3	投入直径 $D_m$ (mm)	20
比熱 $c_{pm}$ (J/kg·K)	189	投入速度 $v_{\text{in}}$ (m/s)	~1.65
融解潜熱 $L_m$ (J/kg)	$3.23 \times 10^4$	投入質量 $m_{\text{in}}$ (g)	450

冷却水水深  $h_c >$  溶融ジェットの到達距離  $h_{\text{brk}}$ : 溶融ジェットが消失する位置

\*<sup>1</sup>Ye et al., *Ann. Nucl. Energy* **148** (2020); \*<sup>2</sup>Epstein and Fauske., *Chem. Eng. Res. Des.* **79** (2001)

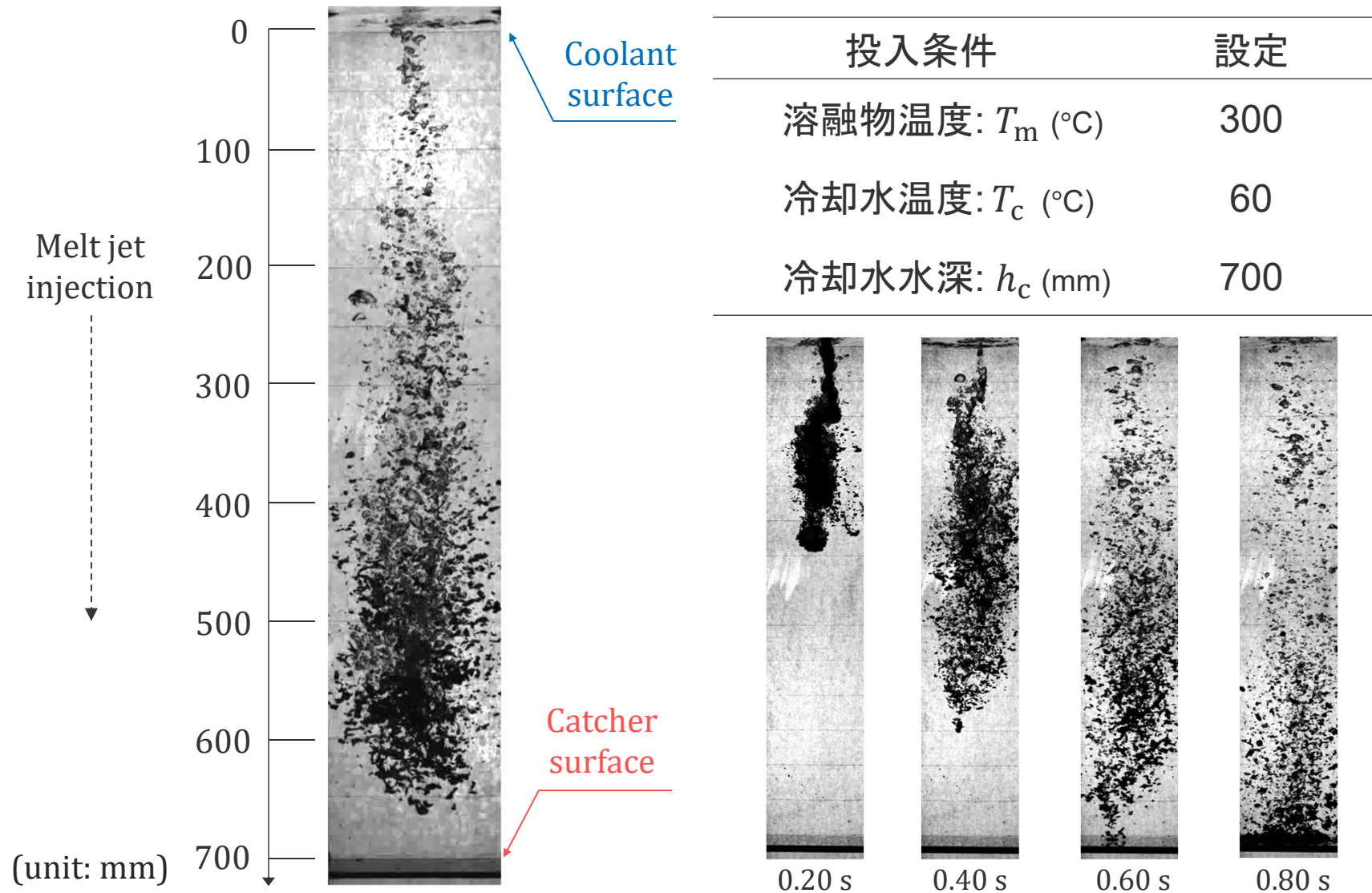
# 溶融物の物性値/投入条件

溶融物	Sn-Bi-In* <sup>1</sup> ( $T_{\text{melt}} = 78.8^{\circ}\text{C}$ )	投入条件	範囲
密度 $\rho_m$ (kg/m <sup>3</sup> )	8595	溶融物温度 $T_m$ (°C)	100-300
粘性 $\mu_m$ (mPa·s)	2.0	冷却水温度 $T_c$ (°C)	20-60
表面張力 $\sigma_m$ (N/m)	0.42	冷却水水深 $h_c$ (mm)	700-1300 > $h_{\text{brk}}^{*2}$
熱伝導率 $\kappa_m$ (W/kg·K)	25.3	投入直径 $D_m$ (mm)	20
比熱 $c_{pm}$ (J/kg·K)	189	投入速度 $v_{\text{in}}$ (m/s)	~1.65
融解潜熱 $L_m$ (J/kg)	$3.23 \times 10^4$	投入質量 $m_{\text{in}}$ (g)	450

冷却水水深  $h_c >$  溶融ジェットの到達距離  $h_{\text{brk}}$ : 粒子のみの堆積に着目

\*<sup>1</sup>Ye et al., *Ann. Nucl. Energy* **148** (2020); \*<sup>2</sup>Epstein and Fauske., *Chem. Eng. Res. Des.* **79** (2001)

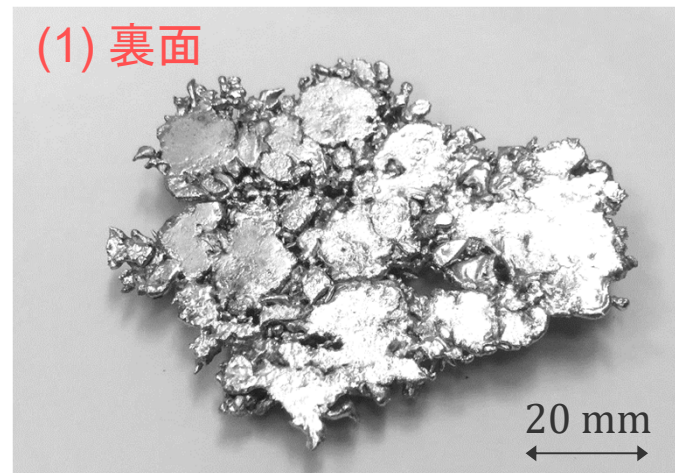
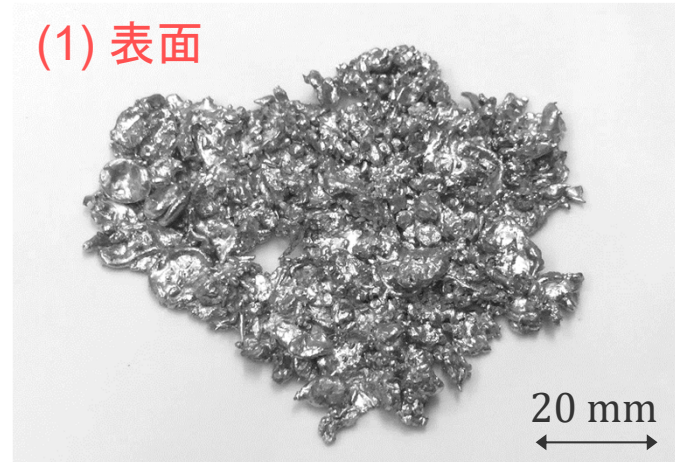
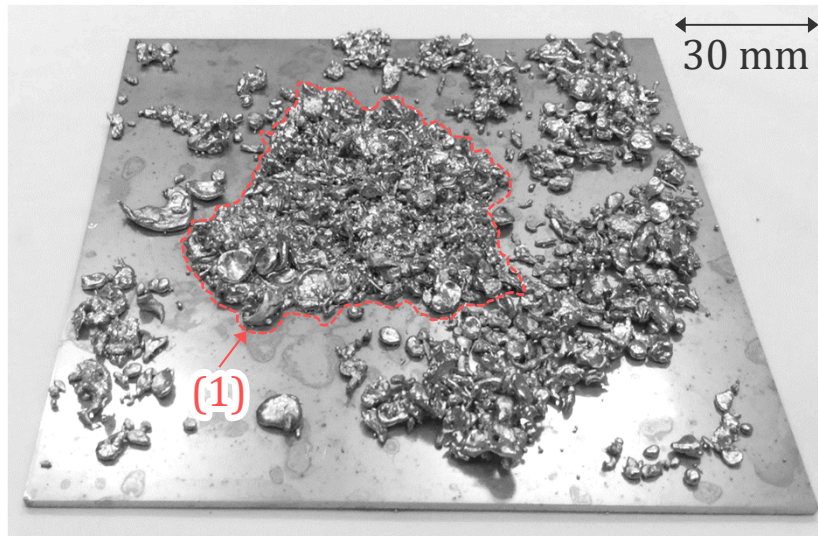
# 溶融物の粒子化/デブリの堆積



\*出典: Iwasawa et al., *Nucl. Eng. Des.* **386** (2022)

# 大規模な塊状デブリの特徴

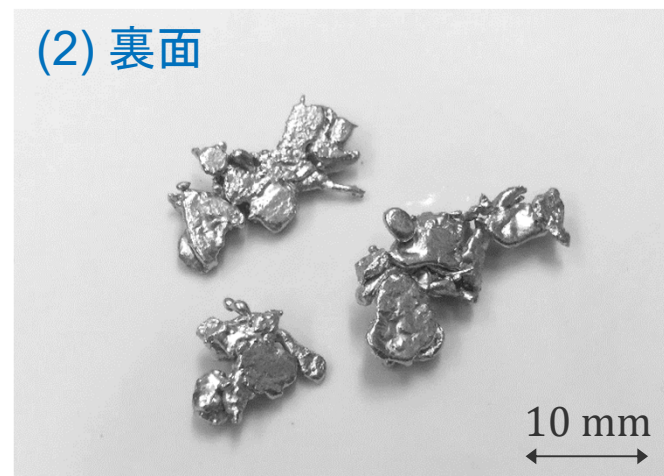
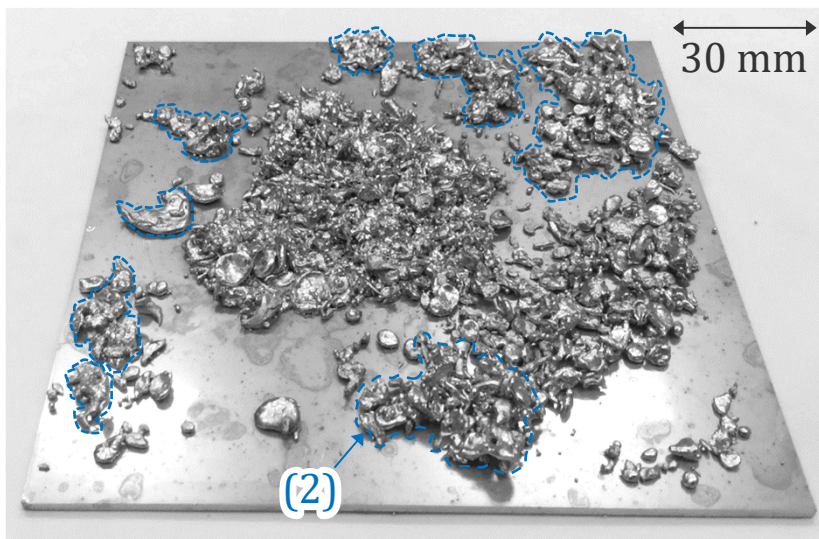
投入条件	設定
熔融物温度: $T_m$ (°C)	300
冷却水温度: $T_c$ (°C)	60
冷却水水深: $h_c$ (mm)	700



熔融状態で到達/粒子同士が結合して堆積:再結合デブリ

# 中規模な塊状デブリの特徴

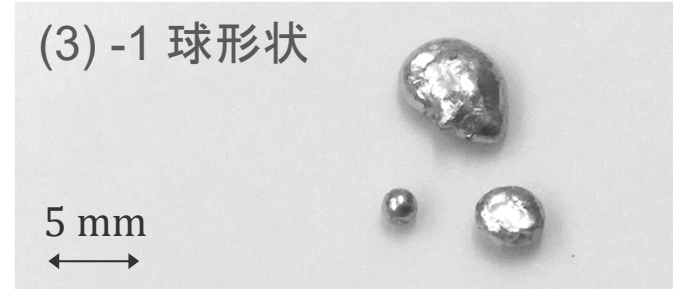
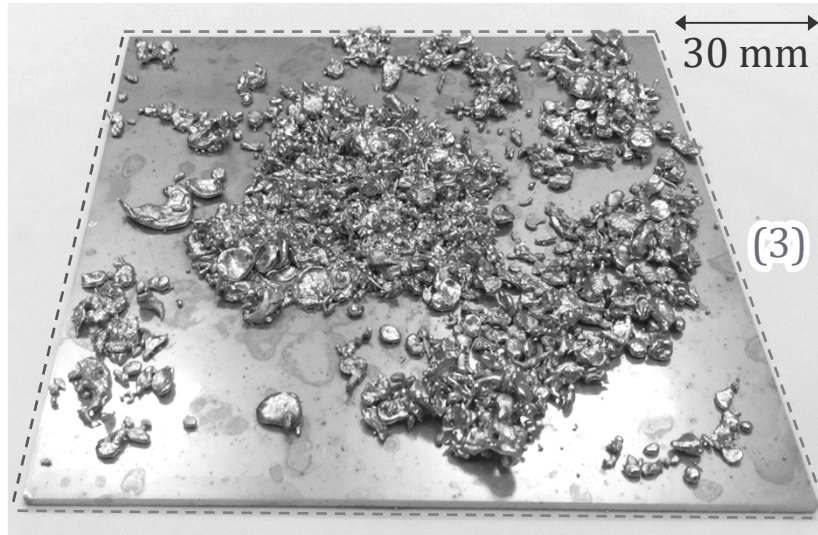
投入条件	設定
溶融物温度: $T_m$ (°C)	300
冷却水温度: $T_c$ (°C)	60
冷却水水深: $h_c$ (mm)	700



溶融状態で到達/粒子同士が結合して堆積: 再結合デブリ

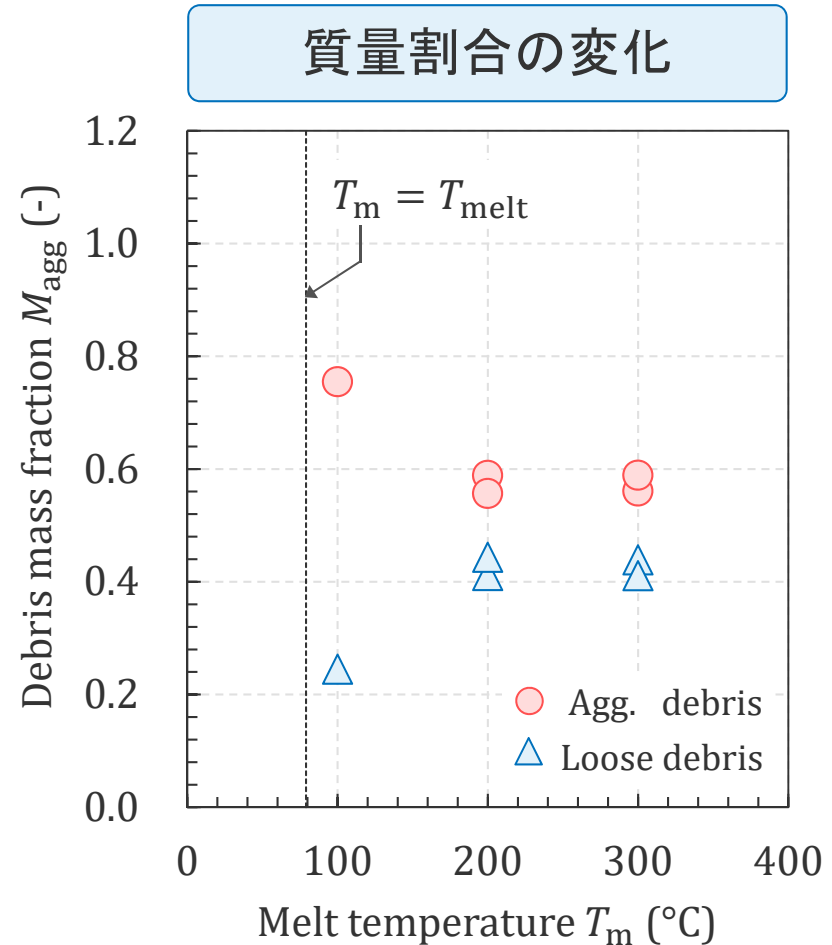
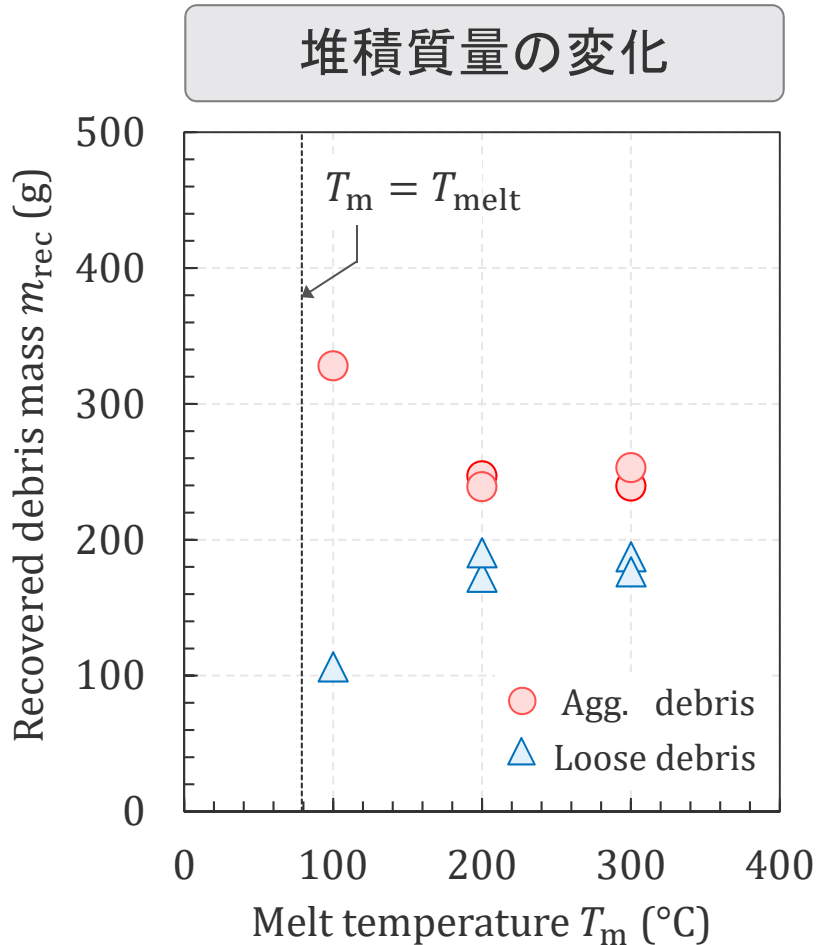
# 分散して堆積したデブリの特徴

投入条件	設定
溶融物温度: $T_m$ (°C)	300
冷却水温度: $T_c$ (°C)	60
冷却水水深: $h_c$ (mm)	700



溶融物より発生した粒子が分散して固化した状態で堆積: 粒子状デブリ

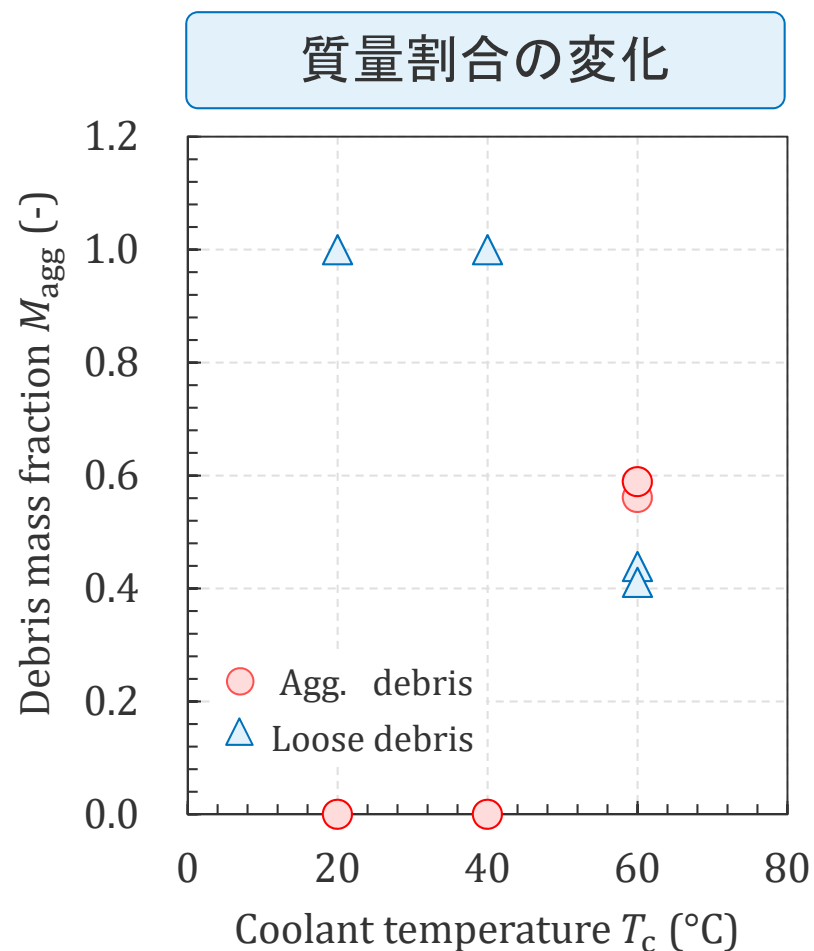
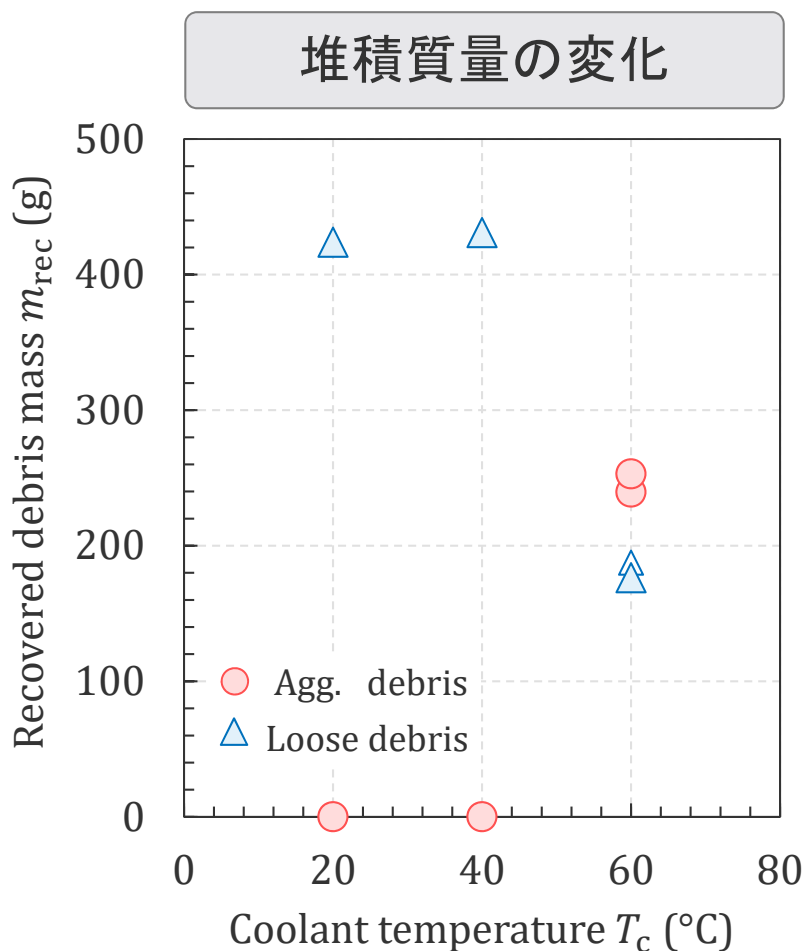
# 溶融物温度による堆積質量への影響



溶融物温度が融点付近 ( $T_m \cong T_{melt}$ ) から増加: 再結合デブリ減少

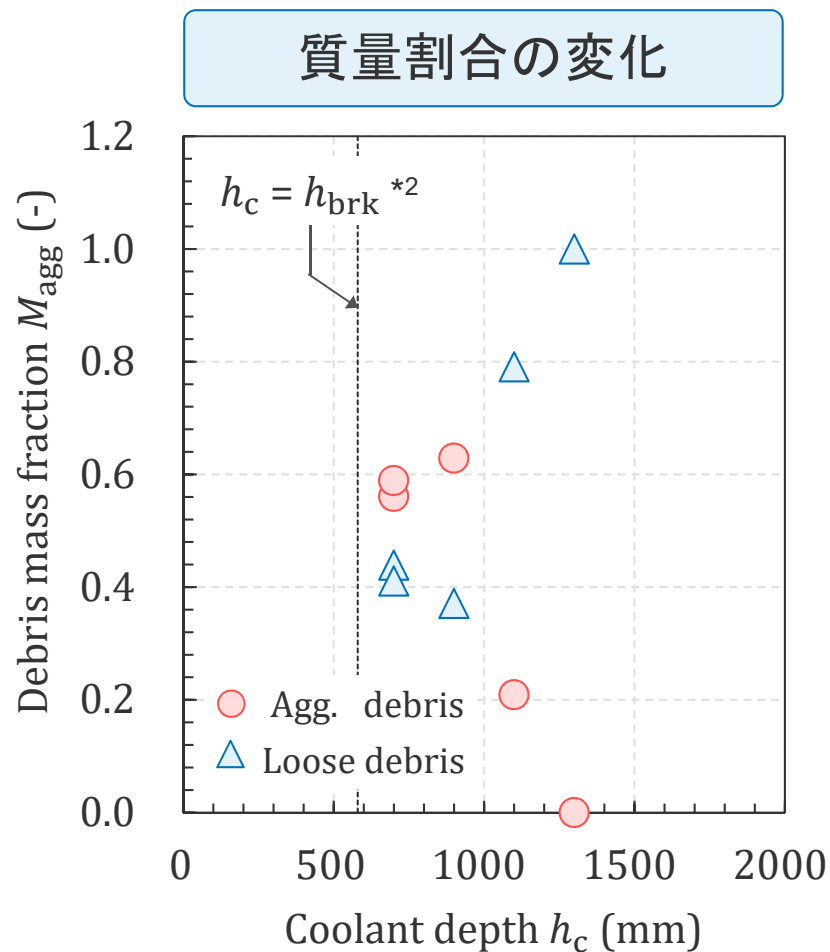
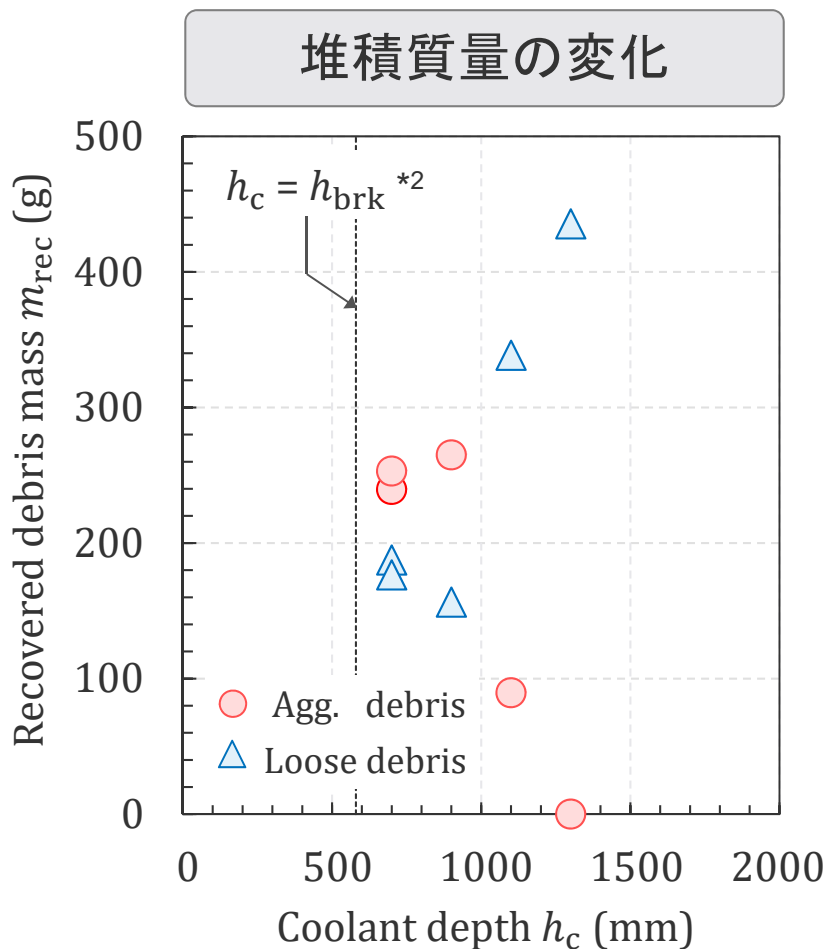


# 冷却水温度による堆積質量への影響



冷却水温度の低下 ( $T_c \leq 60^\circ\text{C}$ ): 再結合デブリが急激に減少

# 冷却水水深による質量割合への影響



冷却水水深の増加 ( $h_c > 1000$  mm) : 再結合デブリが急激に減少

\*出典 : Iwasawa et al., *Nucl. Eng. Des.* **386** (2022); \*2Epstein and Fauske., *Chem. Eng. Res. Des.* **79** (2001)

# 投入条件を用いた無次元数での整理

## 粒子化の形態の整理\*1

規格化した無次元数で投入条件により変化する粒子化の形態を整理

- Weber 数 粒子化の指標

$$We = \frac{\rho_c D_m v_{in}^2}{\sigma_m} \quad (1)$$

- 修正 Stefan 数 相変化の指標

$$St^* = \frac{c_{pm} \Delta T_{sup} + c_{pc} \Delta T_{sub}}{L_m + L_c} \quad (2)$$

## 粒子の分散/堆積の考慮

冷却水水深を溶融物の到達距離 (ジェットブレイクアップ長さ) で規格化

- 規格化した冷却水水深

$$H = \frac{h_c}{h_{brk}} \quad (3)$$

ジェットブレイクアップ長さ\*2

$$\frac{h_{brk}}{D_m} = \frac{1}{E_0} \left( \frac{\rho_m}{\rho_c} \right)^{1/2}$$

$\rho$  : 密度、 $D_m$  : 投入直径、 $v_{in}$  : 投入速度、 $\sigma_m$  : 表面張力、 $c_p$  : 比熱、 $L$  : 潜熱、 $\Delta T_{sup}$  : 溶融物の加熱度、 $\Delta T_{sub}$  : 冷却水のサブクール度、 $m$  : 溶融物、 $c$  : 冷却水、 $h_c$  : 冷却水水深、 $h_{brk}$  : ジェットブレイクアップ長さ、 $E_0$  : エントレンメント係数

\*1Iwasawa et al., *Ann. Nucl. Energy* **125** (2019); \*2Epstein and Fauske., *Chem. Eng. Res. Des.* **79** (2001)

# 投入条件を用いた無次元数での整理

## 粒子化の形態の整理\*1

規格化した無次元数で投入条件により変化する粒子化の形態を整理

### ● Weber 数

$$We = \frac{\rho_c D_m v_{in}^2}{\sigma_m} \quad \text{-----} \quad (1)$$

### ● 修正 Stefan 数

$$St^* = \frac{c_{pm} \Delta T_{sup} + c_{pc} \Delta T_{sub}}{L_m + L_c} \quad (2)$$

$\rho$  : 密度、 $D_m$  : 投入直径、 $v_{in}$  : 投入速度、 $\sigma_m$  : 表面張力、 $c_p$  : 比熱、 $L$  : 潜熱、 $\Delta T_{sup}$  : 溶融物の加熱度、 $\Delta T_{sub}$  : 冷却水のサブクール度、 $m$  : 溶融物、 $c$  : 冷却水、 $h_c$  : 冷却水水深、 $h_{brk}$  : ジェットブレイクアップ長さ、 $E_0$  : エントレンメント係数

## 粒子の分散/堆積の考慮

冷却水水深を溶融物の到達距離 (ジェットブレイクアップ長さ) で規格化

### ● 規格化した冷却水水深

$$H = \frac{h_c}{h_{brk}} \quad \leftarrow \text{粒子化した後の落下距離の指標}$$

ジェットブレイクアップ長さ\*2

$$\frac{h_{brk}}{D_m} = \frac{1}{E_0} \left( \frac{\rho_m}{\rho_c} \right)^{1/2}$$

\*1Iwasawa et al., *Ann. Nucl. Energy* **125** (2019); \*2Epstein and Fauske., *Chem. Eng. Res. Des.* **79** (2001)

# 投入条件を用いた無次元数での整理

## 粒子化の形態の整理\*1

規格化した無次元数で投入条件により変化する粒子化の形態を整理

- Weber 数

$$We = \frac{\rho_c D_m v_{in}^2}{\sigma_m} \quad \text{-----} \quad (1)$$

- 修正 Stefan 数

$$St^* = \frac{c_{pm} \Delta T_{sup} + c_{pc} \Delta T_{sub}}{L_m + L_c} \quad (2)$$

## 粒子の分散/堆積の考慮

冷却水水深を溶融物の到達距離 (ジェットレイクアップ長さ) で規格化

- 規格化した冷却水水深

$$H = \frac{h_c}{h_{brk}} \quad \text{-----} \quad (3)$$

ジェットブレイクアップ長さ\*2

$$\frac{h_{brk}}{D_m} = \frac{1}{E_0} \left( \frac{\rho_m}{\rho_c} \right)^{1/2}$$

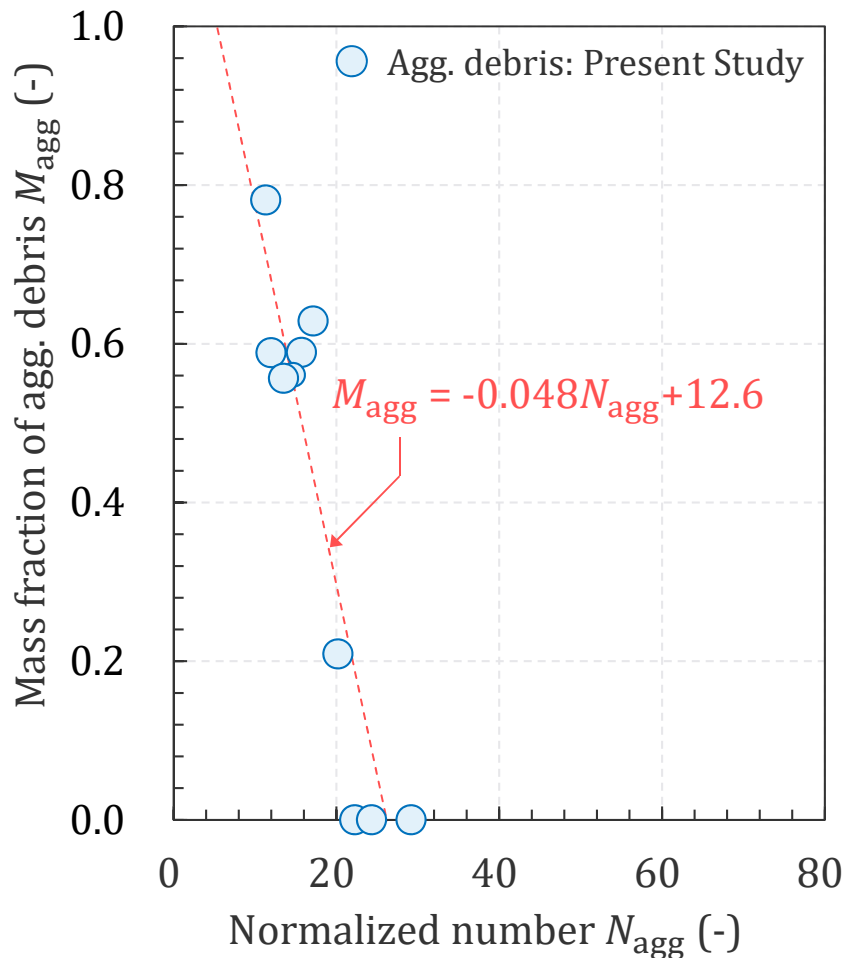
再結合デブリの質量割合  $M_{agg}$  を投入条件を用いた無次元数  $N_{agg}$  で整理

$$N_{agg} = We \cdot St^* \cdot H \quad \left[ (1) \cdot (2) \cdot (3) \right]$$

\*1Iwasawa et al., *Ann. Nucl. Energy* **125** (2019); \*2Epstein and Fauske., *Chem. Eng. Res. Des.* **79** (2001)

# 無次元数を用いた実験相関式の構築

質量割合/無次元数の分布



## 無次元数による整理

質量割合  $M_{agg}$  は無次元数  $N_{agg}$  の増加に従い単調に減少する傾向

$$N_{agg} = We \cdot St^* \cdot H$$

## 実験相関式の構築

質量割合  $M_{agg}$  と無次元数  $N_{agg}$  の関係は単純な線形関係と仮定

$$M_{agg} = -0.048 \cdot N_{agg} + 12.6$$

堆積した再結合デブリの質量割合の実験相関式を構築

# 構築した実験相関式の検証

## DEFOR-A実験\*1

混合酸化物 ( $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ ) を溶融物として冷却水に投入した模擬実験

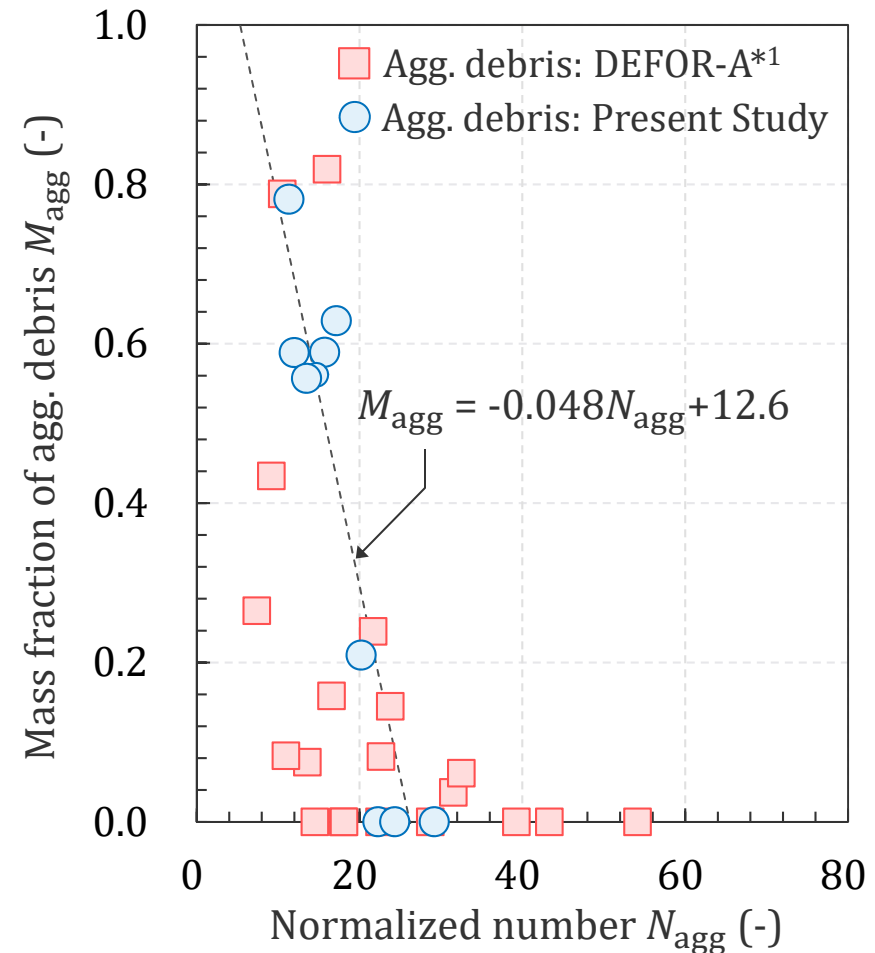
## 実験相関式の検証

DEFOR-A実験\*1より得られた  $N_{\text{agg}}$  に対する  $M_{\text{agg}}$  の分布を再現

低融点金属を用いた模擬実験による実験相関式を適用できた

実験相関式は異なる溶融物を用いた模擬実験の評価が可能

### 既存研究との比較\*2



\*1Kudinov et al., *Nucl. Eng. Des.* **263** (2013); \*2出典: Iwasawa et al., *Nucl. Eng. Des.* **386** (2022)

# まとめ

---

## 研究の成果

### ■ デブリの分類と計測

堆積デブリを形状に基づき分類することにより、投入条件に依存して変化する再結合デブリの質量割合の変化を定量的に計測

### ■ 実験相関式の構築

堆積した再結合デブリの質量割合を予測するための実験相関式を構築するとともに、異なる溶融物を用いた模擬実験で検証

## 今後の展開

### ■ 実験相関式の高度化

投入直径及び投入速度の影響調査と実験結果に基づく実験相関式の高度化

### ■ 実機条件等への適用

実機条件へ外挿をした場合での再結合デブリの質量割合の評価



## 参考文献

---

- Epstein and Fauske, 2001. “Applications of the turbulent entrainment assumption to immiscible gas-liquid and liquid-liquid systems.” Chemical Engineering Research and Design 79, 453-462.
- Kaiser et al., 2001. “PREMIX experiments PM12-pm18 to investigate the mixing of a hot melt with water.” FZKA-6380.
- Kudinov et al., 2013. “Agglomeration and size distribution of debris in DEFOR-A experiment with Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-WO<sub>3</sub> corium simulant melt.” Nuclear Engineering and Design 263, 284-295.
- Magallon, 2006. “Characteristics of corium debris bed generated in large-scale fuel-coolant interaction experiments.” Nuclear Engineering and Design 236, 1998-2009.
- Spencer et al., 1987. “Hydrodynamic and heat transfer aspects of corium-water interactions: internal report.” EPRI-NP-5127.
- Spencer et al., 1994. “Fragmentation and quench behavior of corium melt stream in water”. NUREG/CR-6133.
- Iwasawa and Abe, 2019. “Scaling analysis of melt jets and solidification modes.” Annals of Nuclear Energy 125, 231-241.
- Iwasawa et al., “Experiments of melt jet-breakup for agglomerated debris formation using a metallic melt.” Nuclear Engineering and Design 386, 2022, 111575.
- Ye et al., 2020. “Experimental study on melt-jet behavior during SFR core disruptive accidents using simulant materials.” Annals of Nuclear Energy 148, 107705.