

# 重大事故時における重要物理化学現象の 不確かさ低減に係る実験 中間評価 説明資料

令和4年10月

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

# 目次

1. 研究概要
2. 研究期間を通じた主要成果
3. まとめ
4. 成果の活用等
5. 成果の公表等
6. 成果目標に対する達成状況
7. 今後の展開

# 1. 研究概要

## 1.1 背景(1/2)

原子炉施設の重大事故等の対処設備に係る規則・ガイド等

- 「实用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」第四十九条、五十条、五十一条
  - ・ 重大事故時の原子炉格納容器の破損防止や放射性物質の放出抑制のための対策及びその有効性の確認を要求。
- 「实用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド」
  - ・ 有効性の評価手法の妥当性を判断する上での留意事項を記載。
- 「实用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイド」
  - ・ 安全性の継続的改善に対する評価について具体的内容を記載。



最新知見を踏まえた規則・ガイドの改訂等の要否検討を通して  
原子炉施設の重大事故に対する安全性を向上させることが重要。

# 1. 研究概要

## 1.1 背景(2/2)

重大事故時に発生する現象には

- そのメカニズムが十分に把握できていないこと
- 実験計測手法の限界により実験データの解像度や信頼性が低いこと
- 実験データが取得された条件範囲が限定的であること
- メカニズムは理解されているが物理モデルに反映されていないこと
- 重大事故の進展に応じた種々の熱水力的及び化学的条件

様々な要因に起因する不確実さが存在する。



現象把握ができていない領域を特定して実験的知見を取得することを繰り返すことにより、重大事故の進展予測や評価結果の不確実さを低減できると期待される。

# 1. 研究概要

## 1.2 目的

重大事故(SA)の発生防止、拡大防止及び影響緩和の各段階において生じる物理化学現象及びSA総合解析コード等でモデルの高度化が必要な個別現象について、その不確実さ低減のための実験データ及び知見を拡充する。

# 1. 研究概要

## 1.3 対象とする物理化学現象(1/2)

重大事故時に発生する現象の中でも、国内外の既往知見及び前プロジェクトで取得した最新知見も踏まえて、未だ大きな不確実さが残されている以下の四つの現象を特定し、実験的知見を取得する。



- (1) プールスクラビング
- (2) ソースターム
- (3) 重大事故時格納容器熱流動
- (4) 粒子状デブリ冷却

# 1. 研究概要

## 1.3 対象とする物理化学現象(2/2)

### (1) プールスクラビング

- 前プロジェクトでは、東京電力福島第一原子力発電所事故の各号機のスクラビング効果の違いとして**プール水温や減圧沸騰の影響**を特定したが、それらをSA総合解析に考慮するには**現象のメカニズムに則したモデル**の開発が必要。

### (2) ソースターム

- 前プロジェクトや既往研究では、**制御棒等の構造材の影響や放射性物質同士の化学反応、放射性物質の再移行挙動及び燃料からの放出挙動**等の個別現象について知見が取得されたが、各々の**機構に即したモデルの高度化**が必要。

### (3) 重大事故時格納容器熱流動

- 格納容器外面冷却等の**上部フランジの過温破損**への対策を評価するうえで重要な現象だが、重大事故時に想定される**300°C超の高温条件**について依然知見が少ない。

### (4) 粒子状デブリ冷却

- 溶融デブリの挙動**は**溶融炉心-コンクリート相互反応**にを評価するうえで重要な現象であるが、その中で粒子状となったデブリの**周囲流体を含めた伝熱流動**については、依然**詳細デブリ解析コード**開発に必要となる実験データが不足している。

# 1. 研究概要

## 1.4 対象とする物理化学現象と知見の活用先

### 本プロジェクトの範囲

- ◆ プールスクラビング → 粒子状放射性物質の移行挙動
- ◆ ソースターム → 放射性物質の移行挙動
- ◆ 重大事故時格納容器熱流動 → 格納容器の熱伝達や雰囲気挙動
- ◆ 粒子状デブリ冷却性 → 圧力容器内外でのデブリ冷却性

知見の直接活用

- 詳細デブリ解析コードの開発
- 総合SA解析コードMELCOR2等のモデル改良・組み込み

※他プロジェクトで実施

重大事故緩和策を踏まえた事故進展及び現実的なソースターム評価

重大事故等の対処設備に係る規則・ガイド等の改訂の要否検討や審査への活用



# 1. 研究概要

## 1.5 全体行程

年度 (令和)	2	3	4	5	6	7
プールスクラビング実験	小規模実験(筑波大学に委託)					総合評価
	中規模実験(JAEAに委託)					
	スプレースクラビング実験 (JAEAに委託)					
ソースターム実験	化学反応実験(JAEAに委託)					
	再移行挙動実験(JAEAに委託)					
	CsI放出実験(福井大学との 共同研究)					
	気相化学・物質移行実験(JAEAとの共同研究)との共同研究)					
	総合評価					
重大事故時格納容器熱流動実験	格納容器上部フランジ加熱実験(JAEAに委託)					
	外面冷却実験(JAEAに委託)					
			熱及び物質移行基礎実験(JAEAに委託)			
	ベント実験(JAEAに委託)					
	スプレイ実験(JAEAに委託)					
総合評価						
粒子状デブリ冷却性実験	粒子状デブリ冷却性実験(電力中央研究所 に委託)					総合評価

# 1. 研究概要

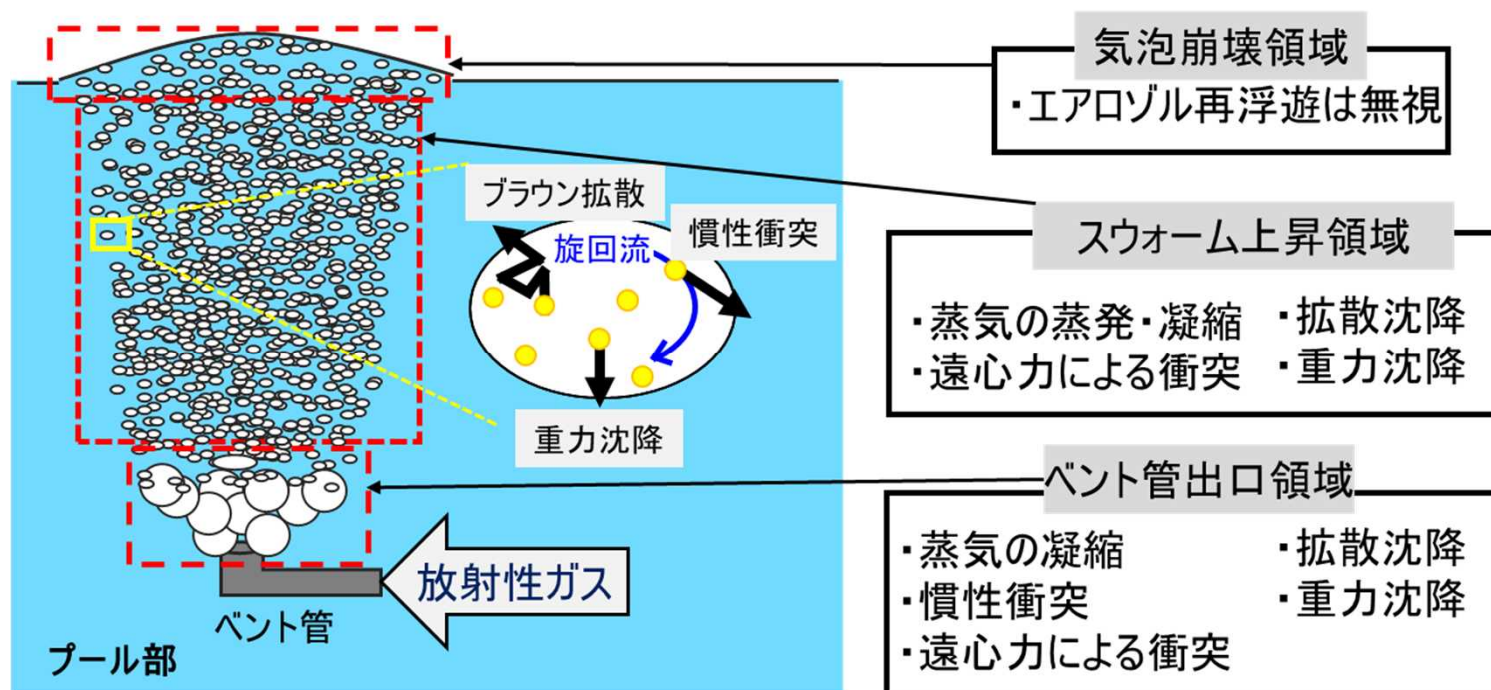
## (1) プールスクラビング実験

### ① 小規模実験(筑波大学に委託)

- ・ 気泡放出から上昇、液面到達までの気泡群又は単一気泡挙動及び気泡内外の詳細なエアロゾルの挙動を高い時空間解像度で把握してモデル高度化に関する知見を拡充。

### ② 中規模実験(JAEAに委託)

- ・ 前プロジェクトで実施した大規模実験とは異なるスケールでプール水温依存性を確認。

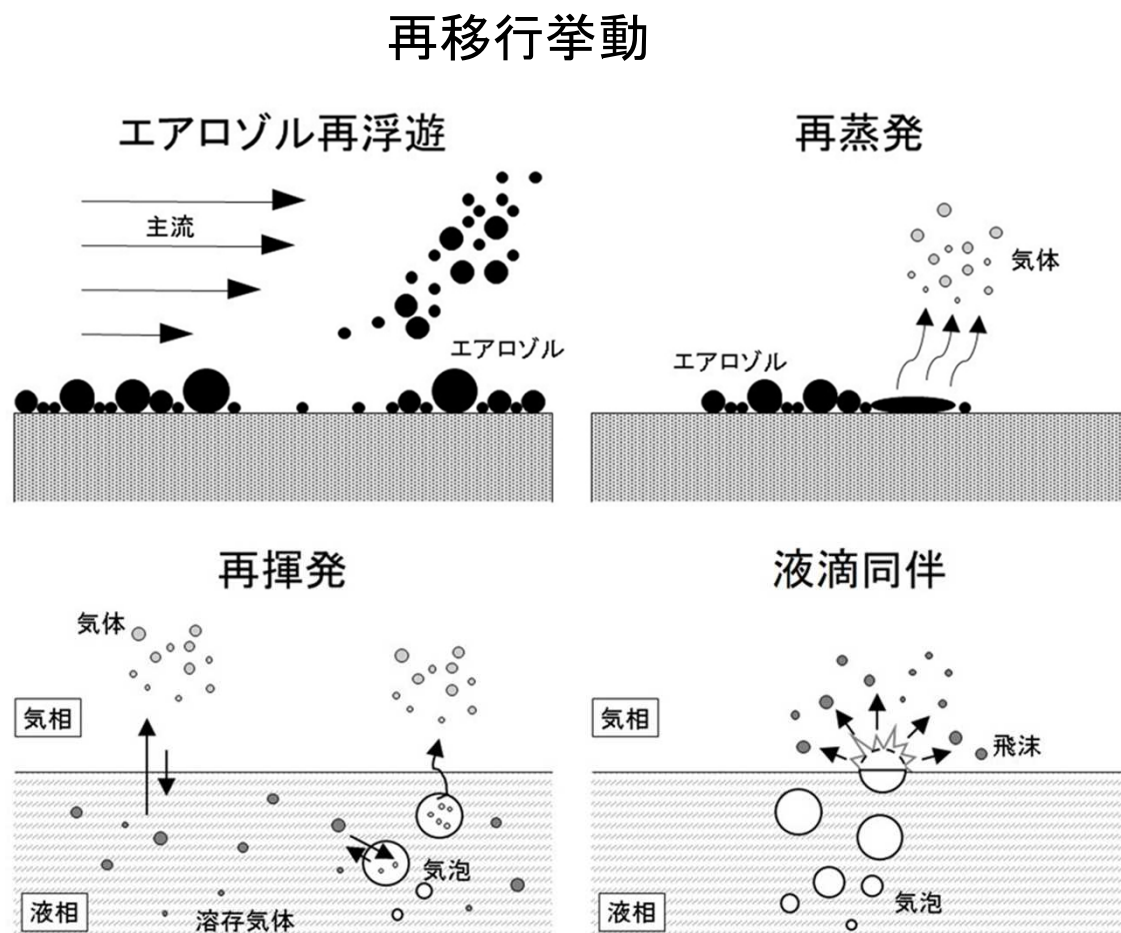


# 1. 研究概要

## (2) ソースターム実験

ソースターム評価に係る不確実さ低減に資する知見を拡充するため、4種の実験及び調査を実施

- ① 化学反応実験 (JAEAへ委託)
- ② 再移行挙動に係る調査 (JAEAへ委託)
- ③ 気相化学実験・物質移行実験 (JAEAとの共同研究)
- ④ CsI放出実験 (福井大学との共同研究)



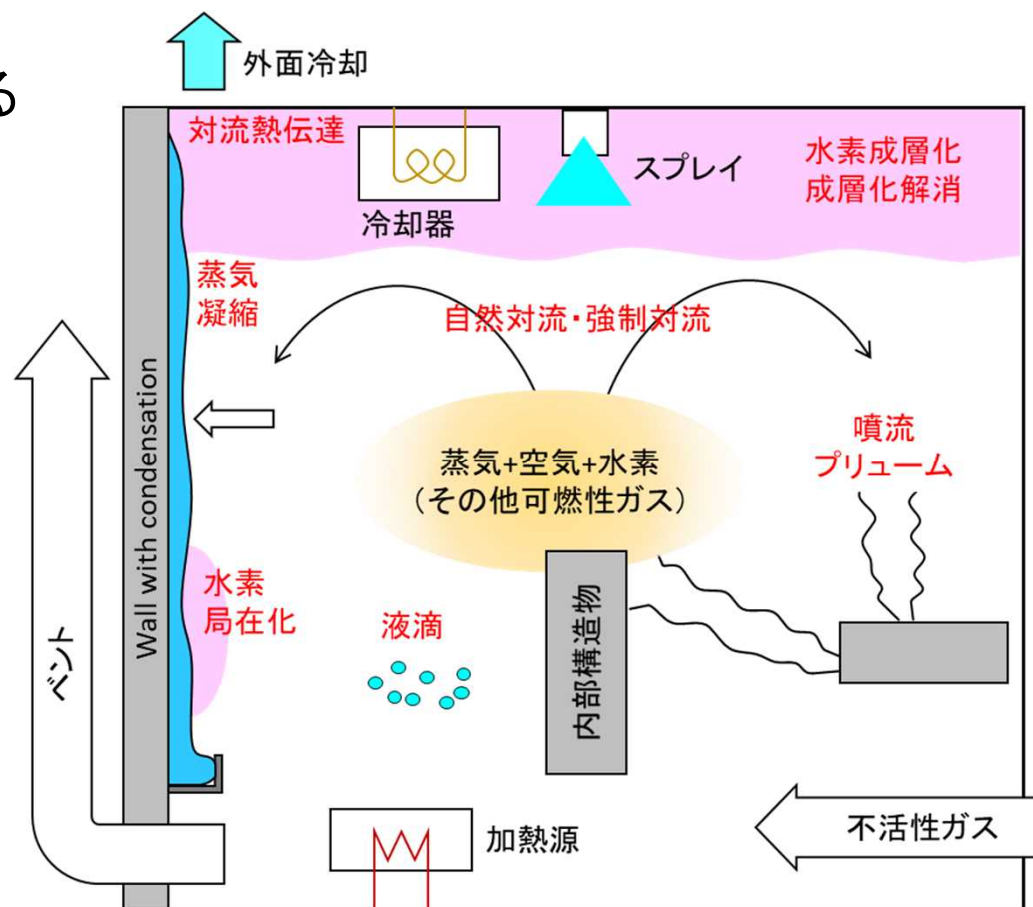
# 1. 研究概要

## (3) 重大事故時格納容器熱流動実験

格納容器破損防止対策の効果と熱流動現象について300°C超の高温条件での知見を拡充するため、JAEAへの委託により大型格納容器実験装置CIGMAを用いた5つの実験を実施。

- ① 上部フランジ冷却実験
- ② 外面冷却時熱流動実験
- ③ 熱及び物質移行基礎実験
- ④ スpray時熱流動実験
- ⑤ ベント時熱流動実験

格納容器破損防止対策と熱流動現象

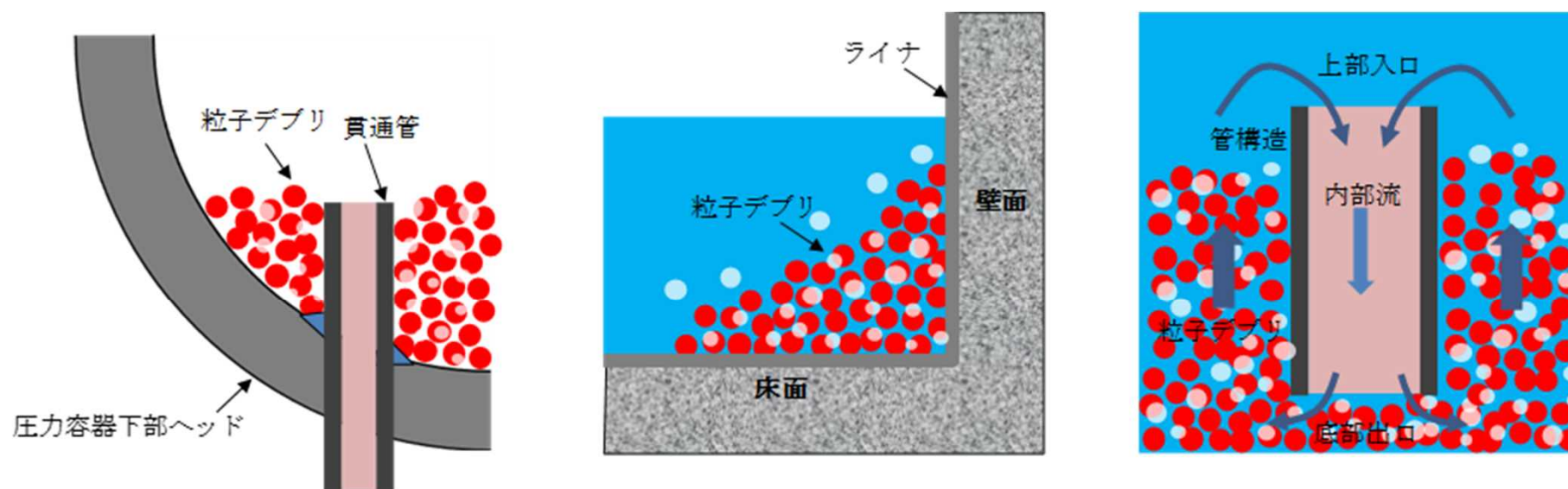




# 1. 研究概要

## (4) 粒子状デブリ冷却実験

- 現象:十分に固化していない半溶融状態の高温デブリが金属表面に押し当てられる場合、半固化状態の粒子状デブリと、融点及び硬度ともに低い金属表面が変形し接触面積が大きくなり、不確かさが大きくなる。
- 目的:接触状態変化に伴う粒子状デブリと金属表面の接触熱伝達による構造健全性の問題に関わる不確かさの低減
- 実験の実施:電力中央研究所に委託



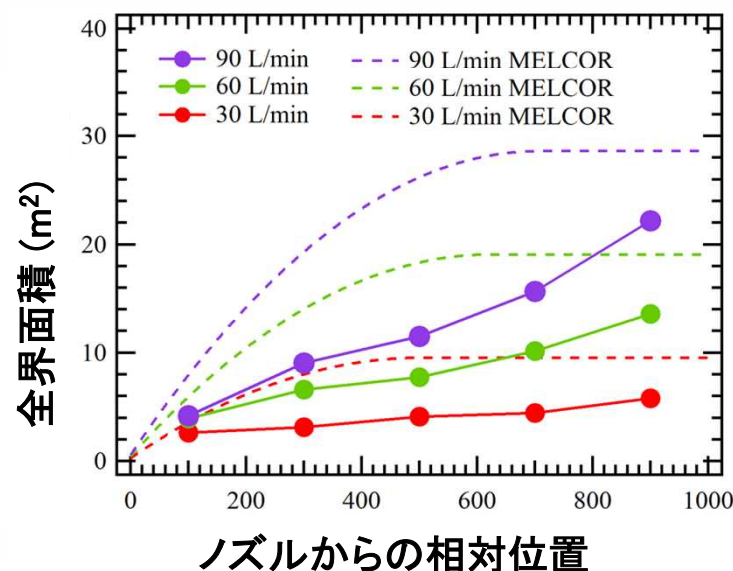
(a) 圧力容器下部ヘッド貫通部 (b) キャビティ側面/床面ライナ (c) 内部流を有する管構造

## 2. 研究期間を通じた主要成果

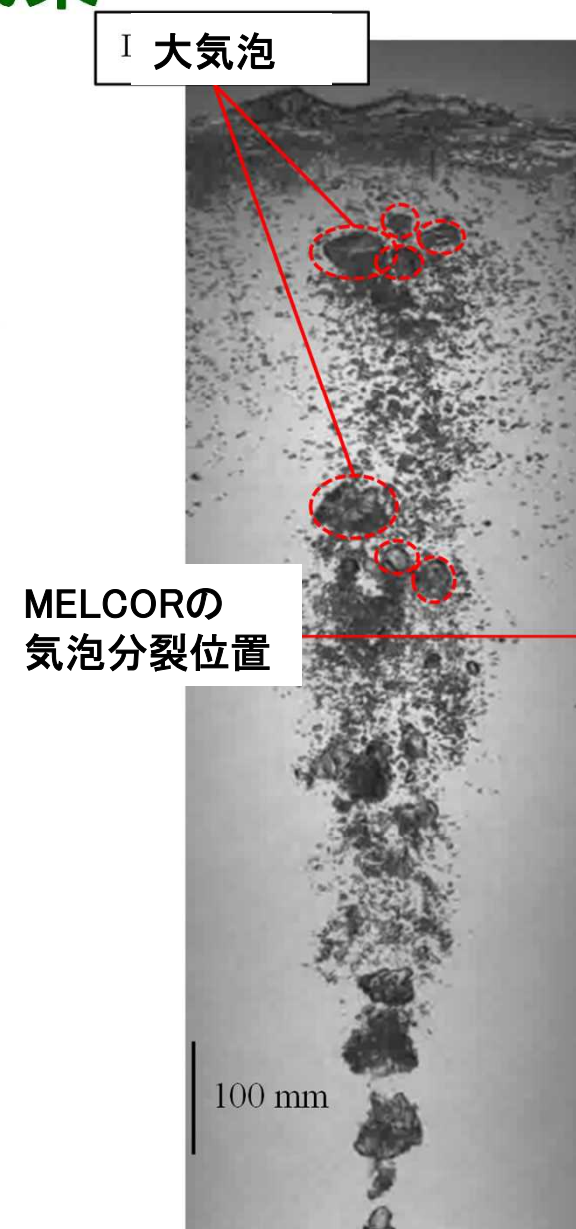
### (1) プールスクラビング実験(1/4)

#### 小規模実験

- 既存の総合解析コード MELCOR で用いられている SPARC-90 モデルは、気液界面積の計測結果を過大評価した。
- この SPARC-90 モデルでは大気泡の完全分裂を仮定しているが、気泡噴流の可視化結果より、下流においても大気泡が残存していた。
- 大気泡の完全分裂の仮定が、気液界面積の過大評価の原因。



気液界面積の計測結果と解析モデルの関係



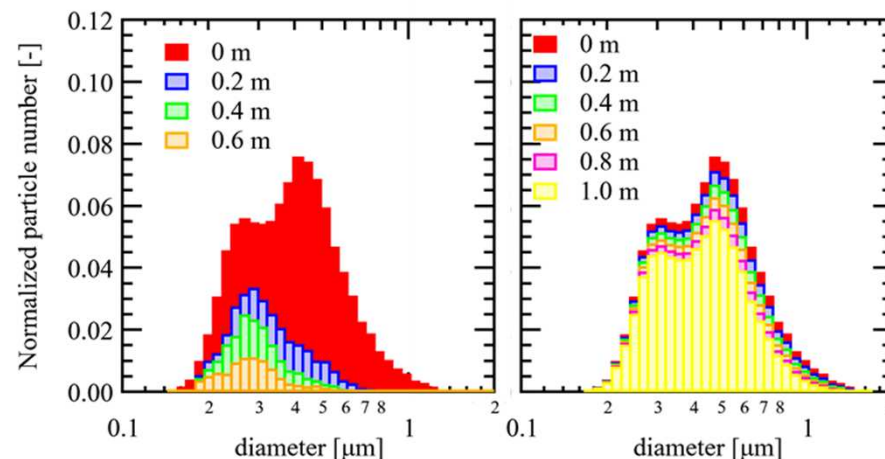
気泡噴流可視化結果

## 2. 研究期間を通じた主要成果

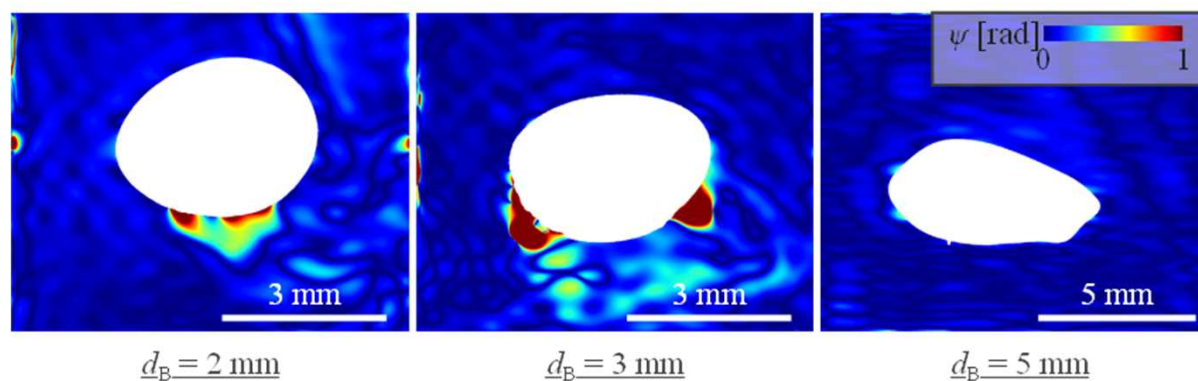
### (1) プールスクラビング実験(2/4)

#### 小規模実験

- 実験結果に対して、MELCORのSPARC-90モデルによる計算結果は、全てのエアロゾル粒径においてエアロゾルの除染性能を過小評価した。
- 単一気泡外のエアロゾル濃度場を、光干渉計を用いて計測した結果、エアロゾル輸送現象が気泡径や形状に依存することが示された。



(a)実験結果 (b)MELCORモデル  
水位毎のエアロゾル粒径分布計測結果



光干渉計による気泡外エアロゾル濃度分布計測結果

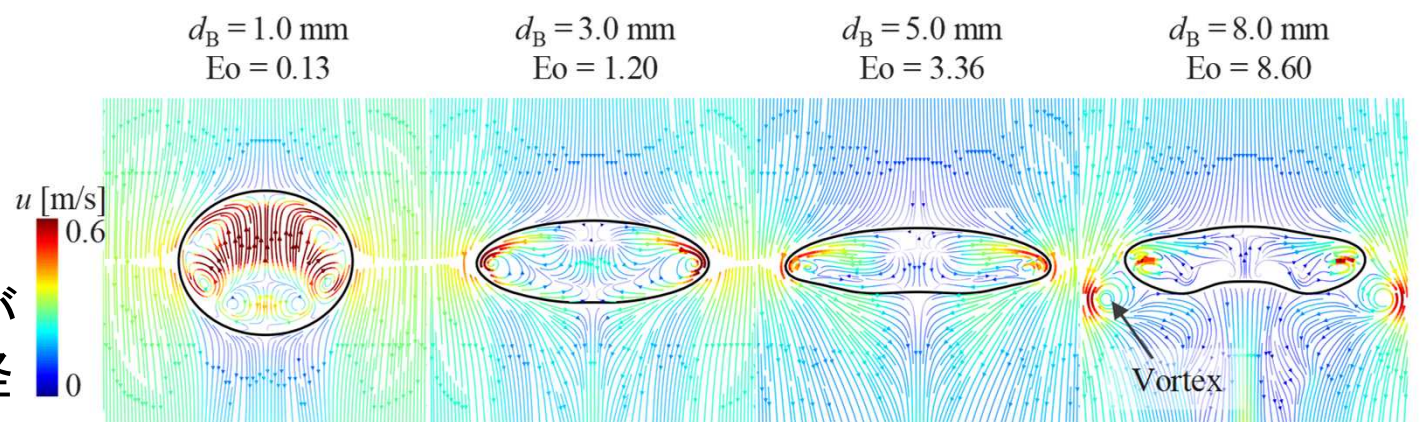


## 2. 研究期間を通じた主要成果

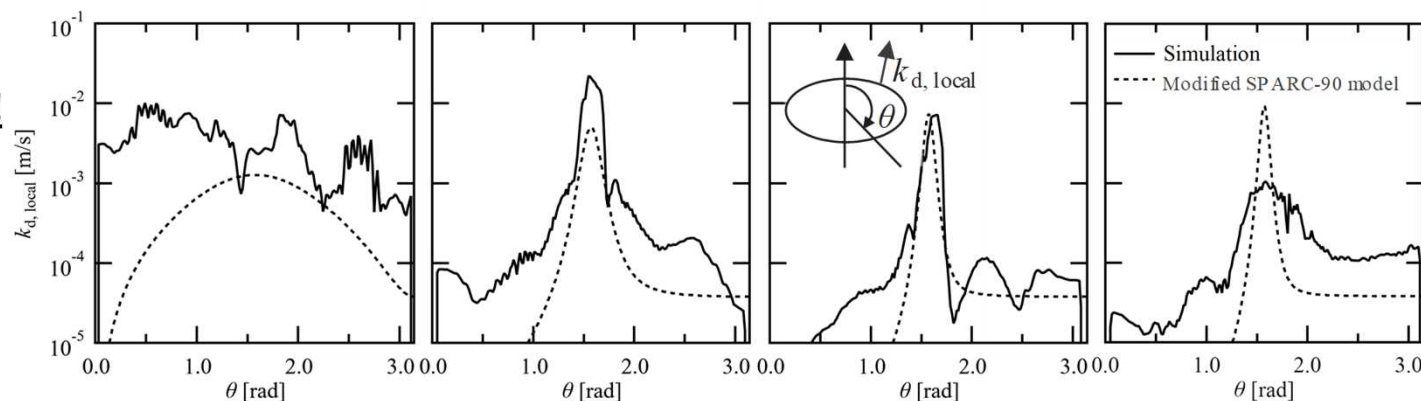
### (1) プールスクラビング実験(3/4)

#### 小規模実験

- 開発した固気液三相流解析コードの数値解析から、小気泡ではMELCORが想定するトロイダル渦構造が確認できた。一方、気泡径が増大するとともにトロイダル渦構造がなくなった。
- 物質輸送係数は、改良SPARC-90モデルとCFD解析結果がほぼ一致した。
- 気泡分裂の過大評価にもかかわらず、MELCORが実験の除染性能を保守的に評価するのは、単一気泡からのエアロゾル輸送の過小評価による。



気泡中心断面における内部流動場の流跡線



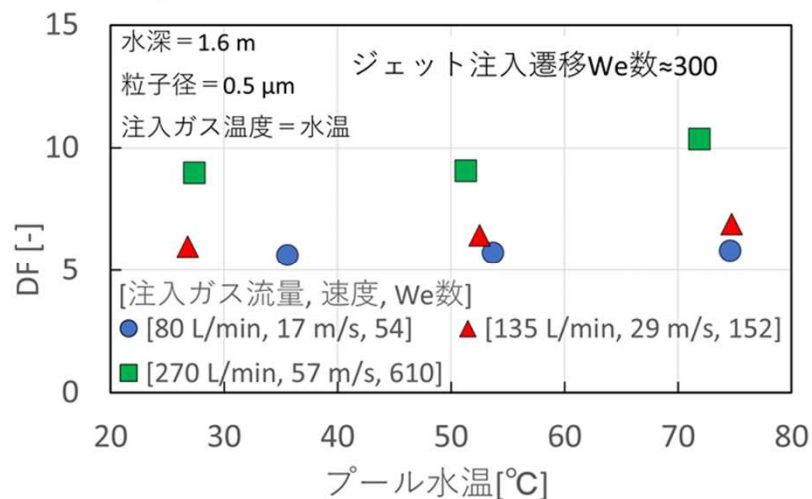
気泡界面における局所物質輸送係数



## 2. 研究期間を通じた主要成果

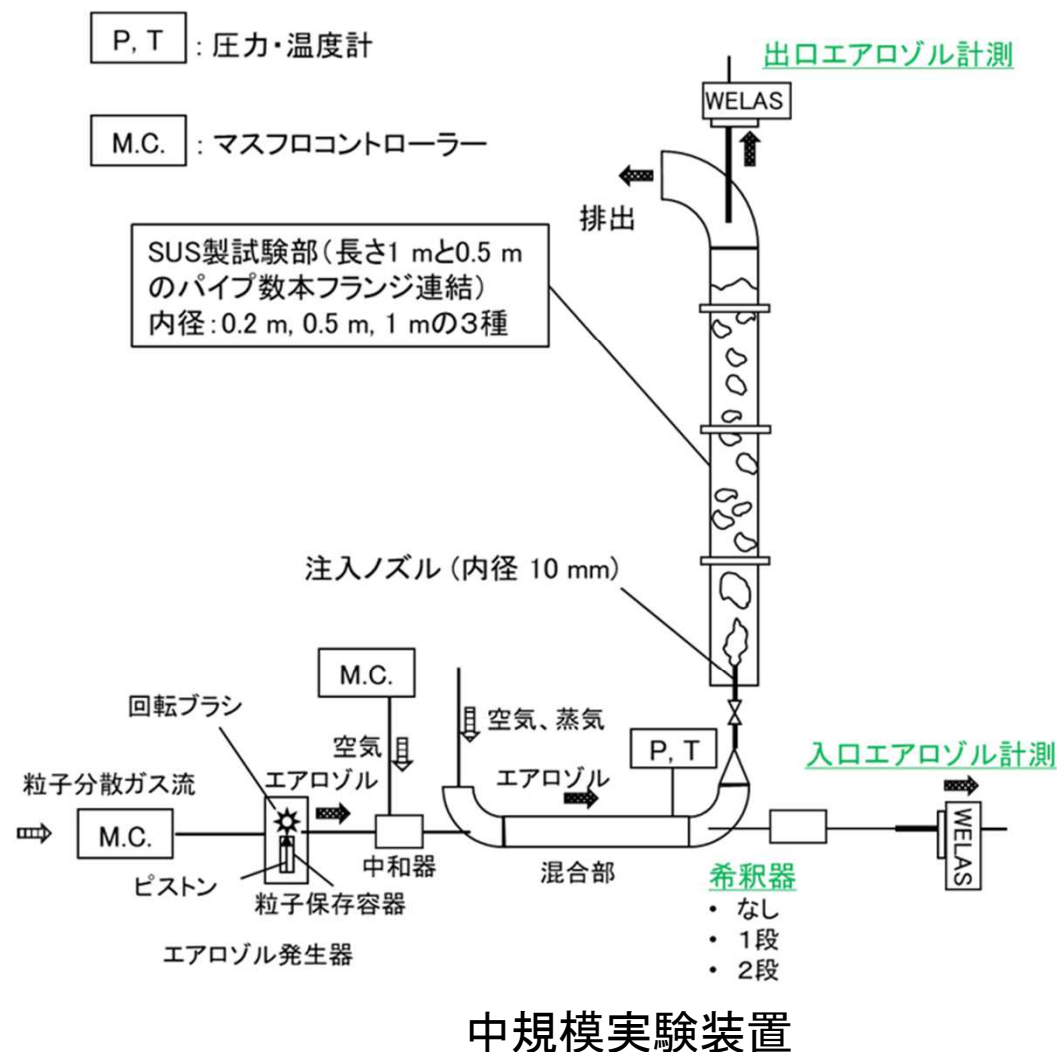
### (1) プールスクラビング実験(4/4)

#### 中規模実験



#### 除染性能の水温依存性

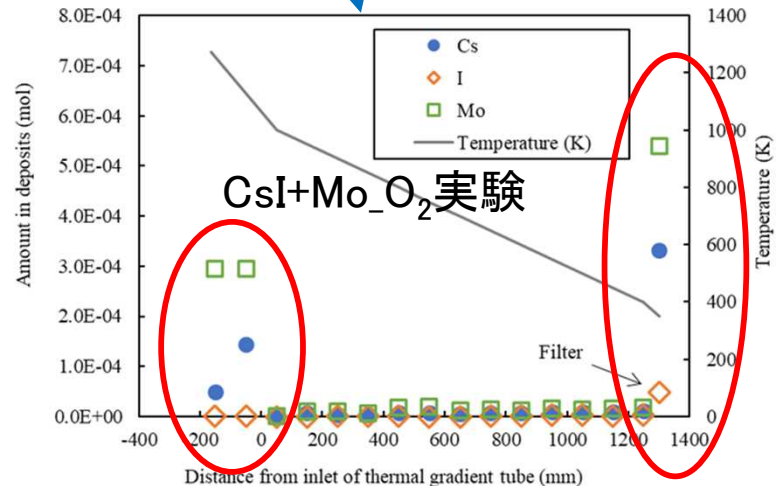
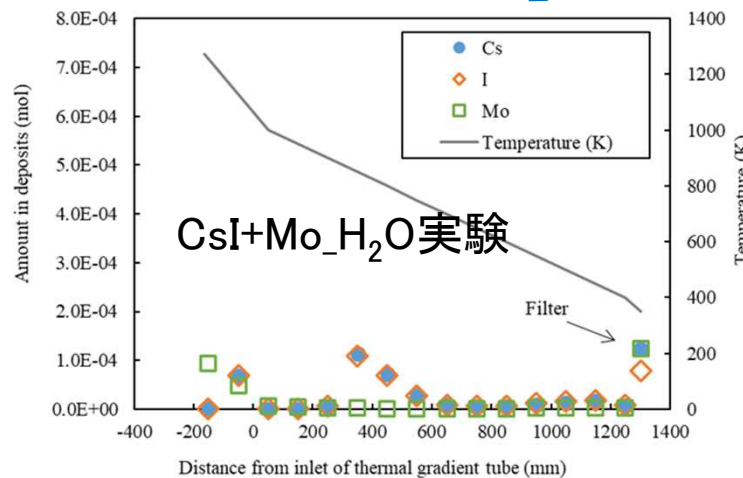
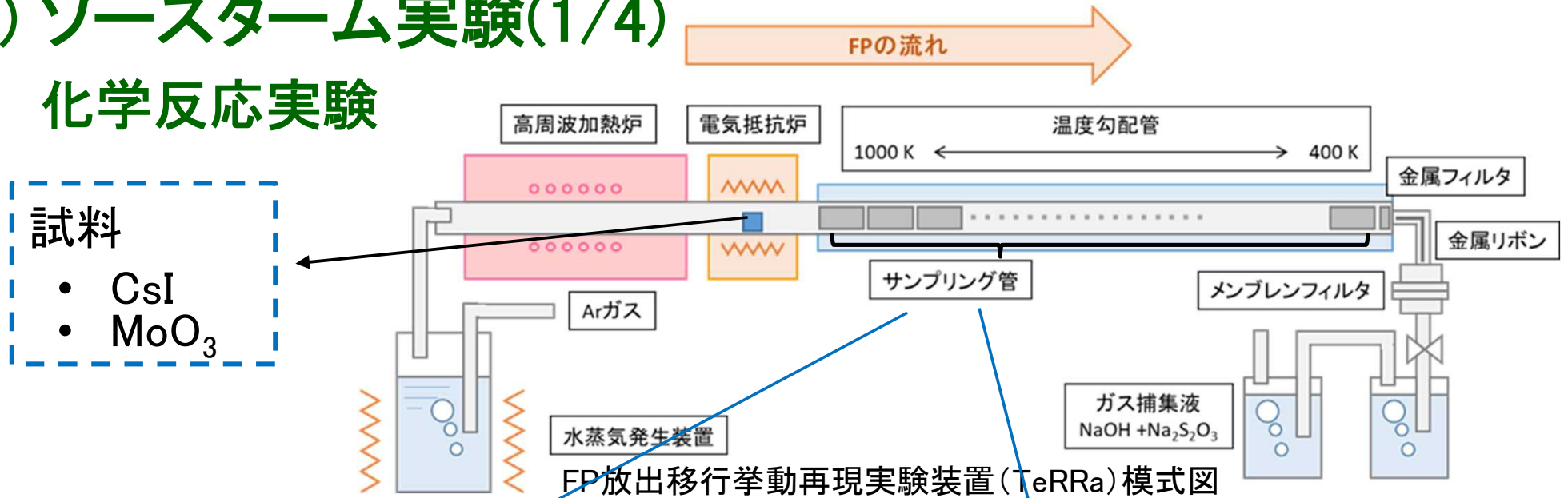
- 前プロジェクトから改良した装置を用いて、除染性能のプール水温への依存性を再調査。
- 入口部での蒸気凝縮効果やプール水面上での粒子周りの凝縮の影響を除外すれば、水温の除染性能への影響は小さい結果となった。



## 2. 研究期間を通じた主要成果

### (2) ソースターム実験(1/4)

#### 化学反応実験



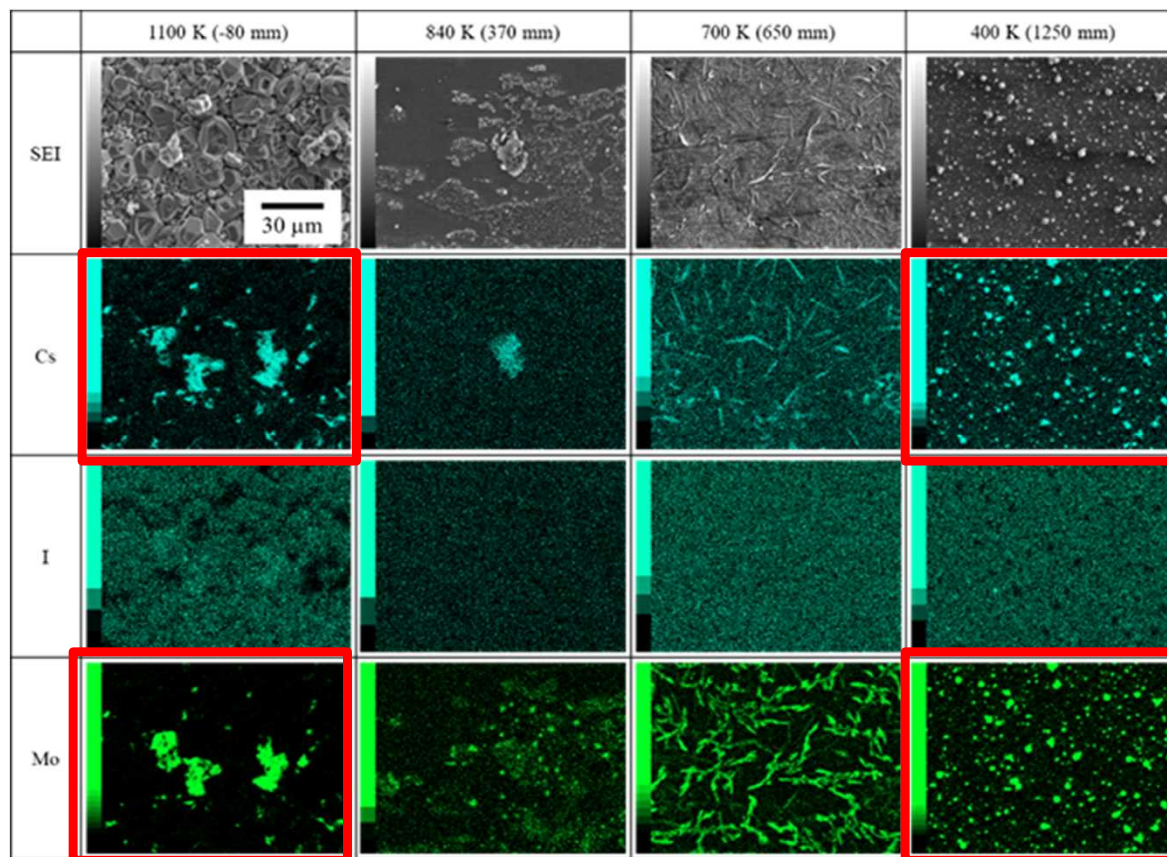
- 酸素含有条件において、セシウムとモリブデンの分布傾向が類似。
- 約1100 K以上の温度勾配管内及びフィルタに多く沈着。

## 2. 研究期間を通じた主要成果

### (2) ソースターム実験(2/4)

#### 化学反応実験

CsI+Mo<sub>2</sub>O<sub>3</sub>実験のサンプリング管における沈着物のSEM及びEDS画像



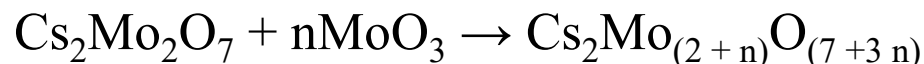
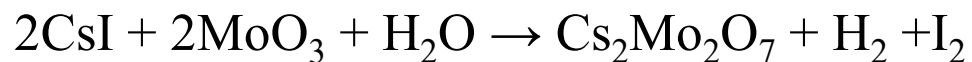
- 酸素ポテンシャルが高い雰囲気においては、MoO<sub>3</sub>蒸気種のまま下流側へ移行
- CsI及びMoO<sub>3</sub>との反応 ( $2\text{CsI} + 2\text{MoO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cs}_2\text{Mo}_2\text{O}_7 + \text{H}_2 + \text{I}_2$ ) により揮発性のヨウ素ガスがより生成し、下流側へ移行しやすくなる。



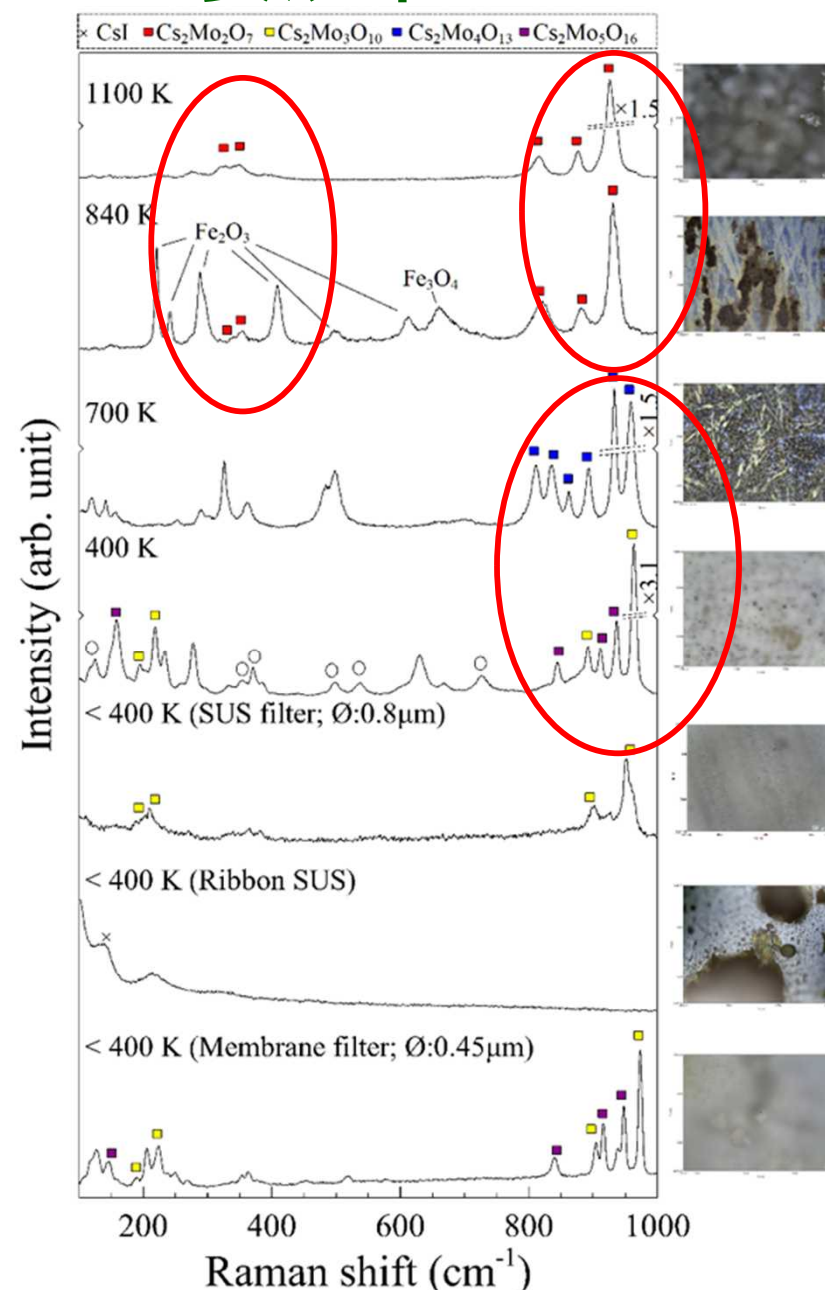
## 2. 研究期間を通じた主要成果

### (2) ソースターム実験(3/4) 化学反応実験

- CsI+Mo<sub>2</sub>O<sub>7</sub>実験における温度勾配管に付着した沈着物のラマン分光スペクトル
- 1100 K及び840 Kにて、Cs<sub>2</sub>Mo<sub>2</sub>O<sub>7</sub>に起因するピーク
- さらに下流側(低温側)のサンプリング管にて、高次のモリブデン酸セシウム化合物のピーク
- 酸素ポテンシャルが高い場合、MoO<sub>3</sub>蒸気種のまま下流側へ移行し、CsI蒸気種やモリブデン酸セシウム蒸気種との反応が生じていると考えられる

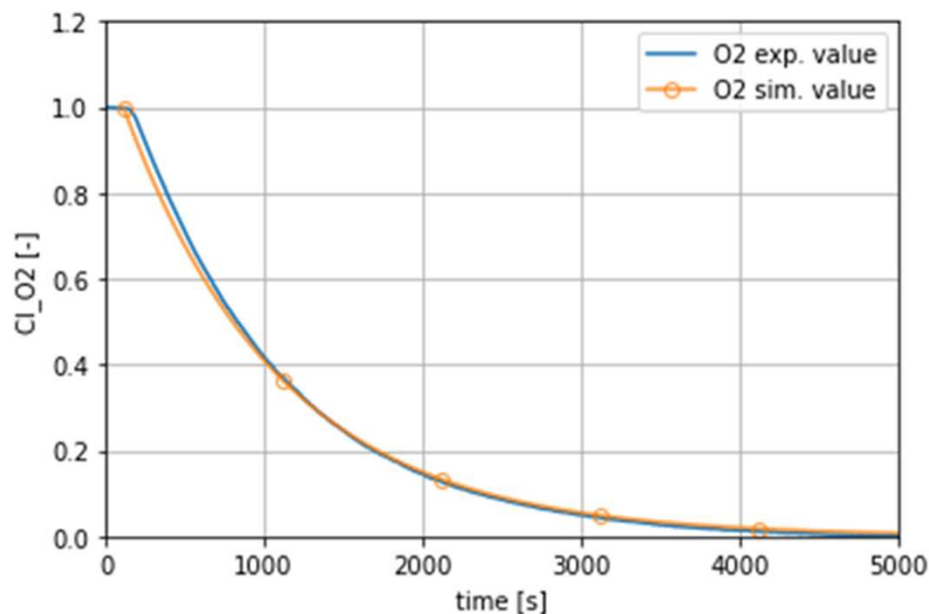


- 化学反応実験により、CsIとMoO<sub>3</sub>の反応によるCs<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>生成は、雰囲気中の酸素濃度が大きく影響することを確認。

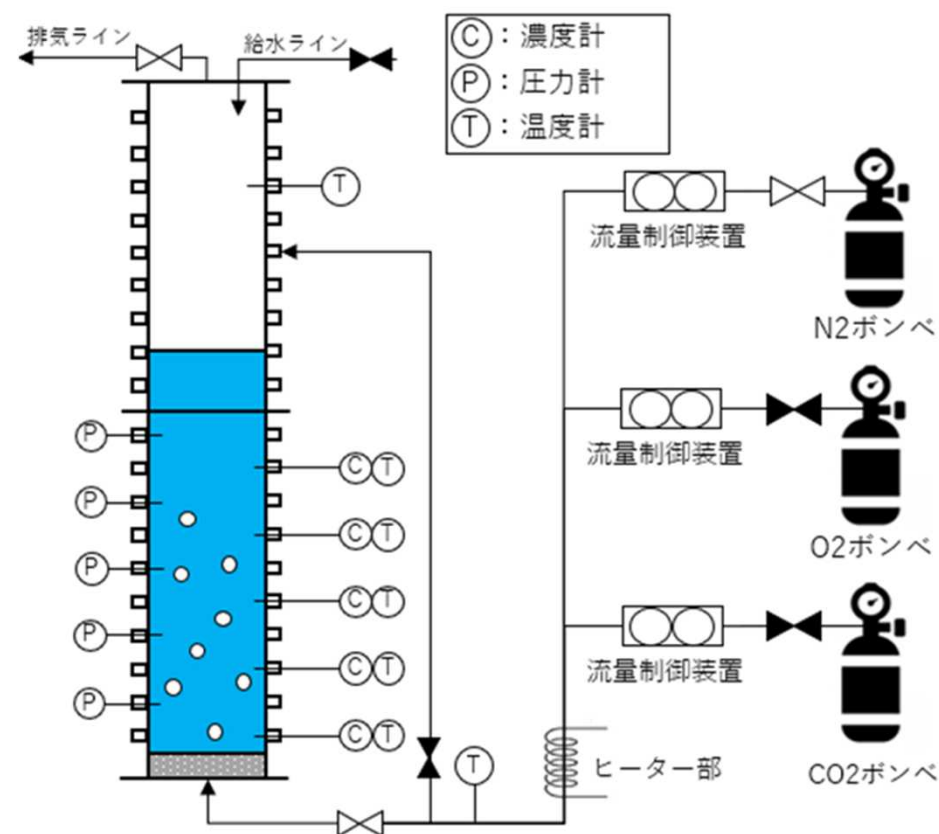


## 2. 研究期間を通じた主要成果

### (2) ソースターム実験(4/4) 気相化学・物質移行実験



窒素フロー時の溶存酸素濃度の変化

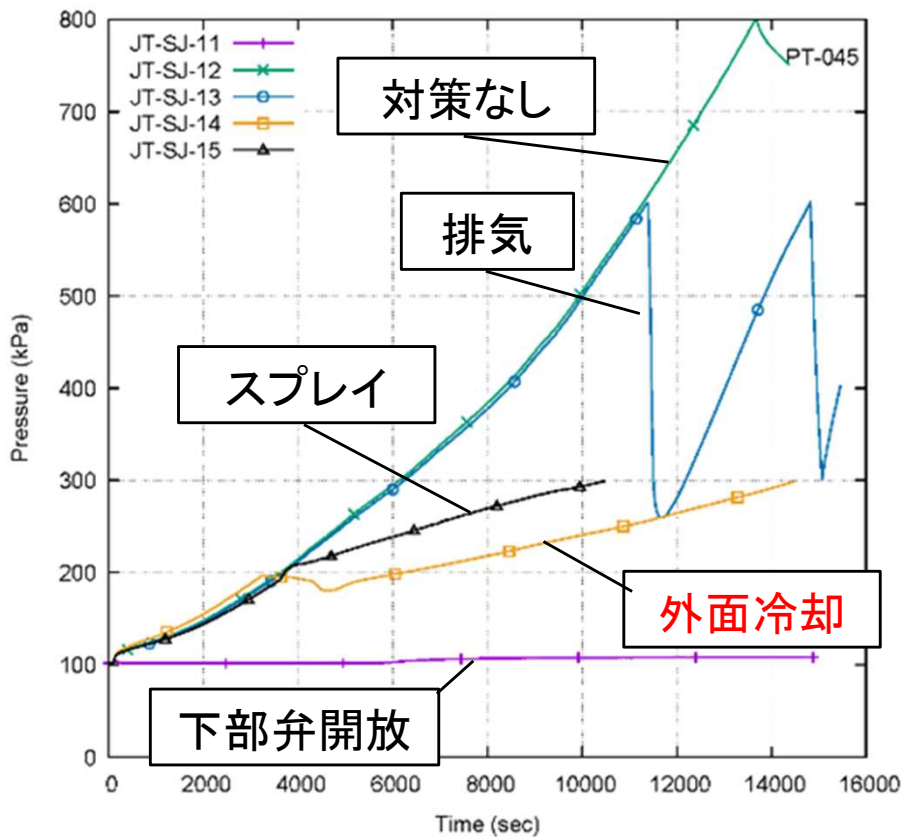


再揮発現象における物質移行係数の評価実験

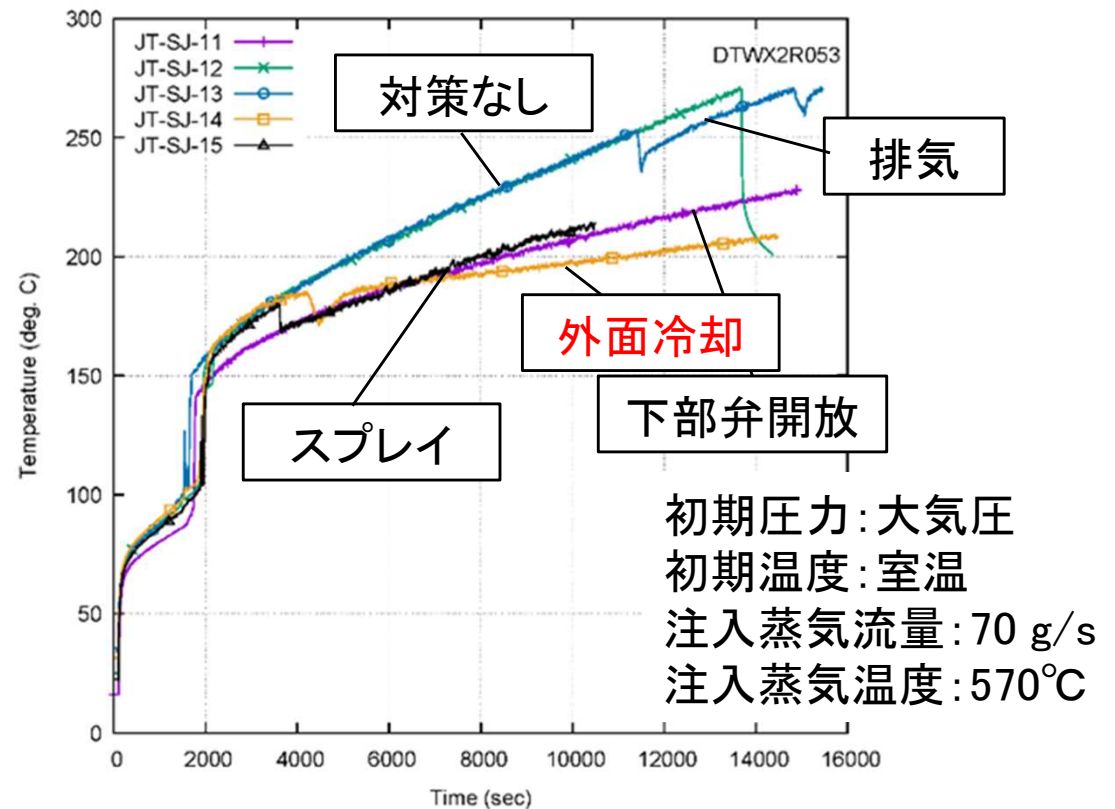
- 圧力抑制室等の液相に溶存する気体状ヨウ素の気相への移行(再揮発現象)については、減圧沸騰やスクラビングによって発生する気泡(二相流条件)の影響が十分に考慮されていなかった。
- 二酸化炭素と気泡塔実験装置を用いた実験を実施するとともに、二重境界膜モデルに基づく再揮発現象に係るモデルを作成、その妥当性を確認した。

## 2. 研究期間を通じた主要成果

### (3) 重大事故時格納容器熱流動実験(1/3) 上部フランジ冷却実験



圧力変化

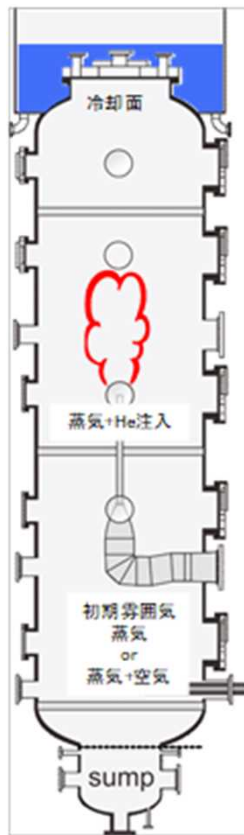


フランジ内表面温度変化

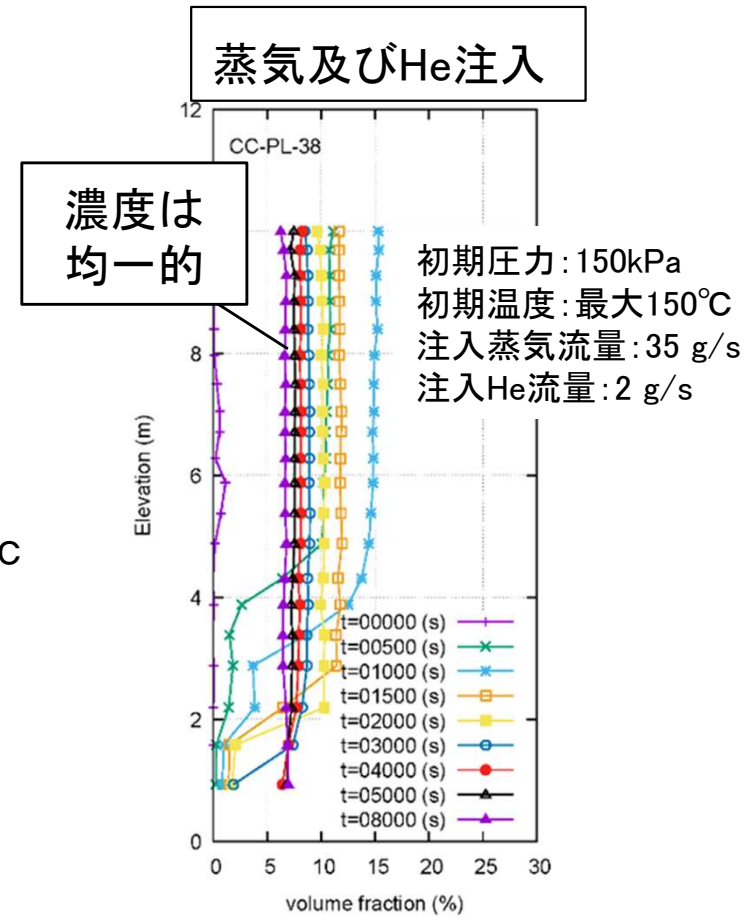
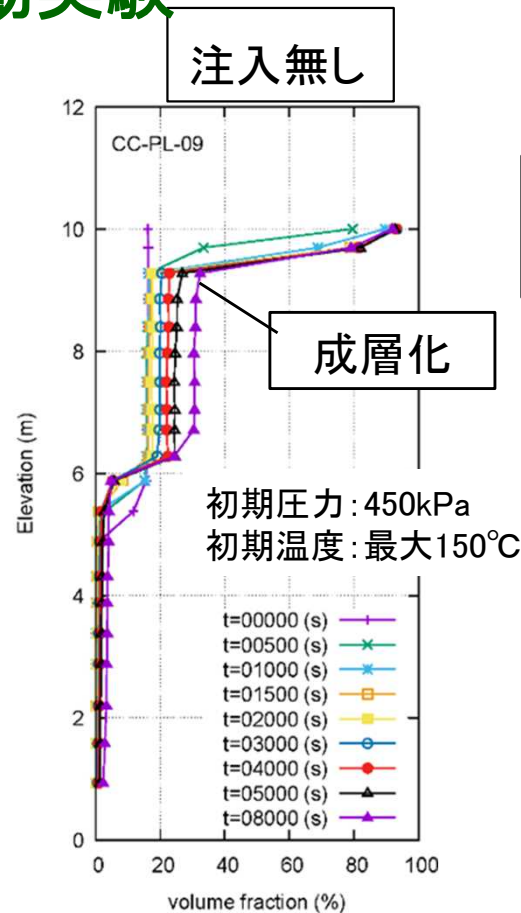
- フランジ冷却及び圧力上昇抑制の効果は外面冷却が大きい

## 2. 研究期間を通じた主要成果

### (3) 重大事故時格納容器熱流動実験(2/3) 外面冷却時熱流動実験



実験概要  
(蒸気及びHe注入)



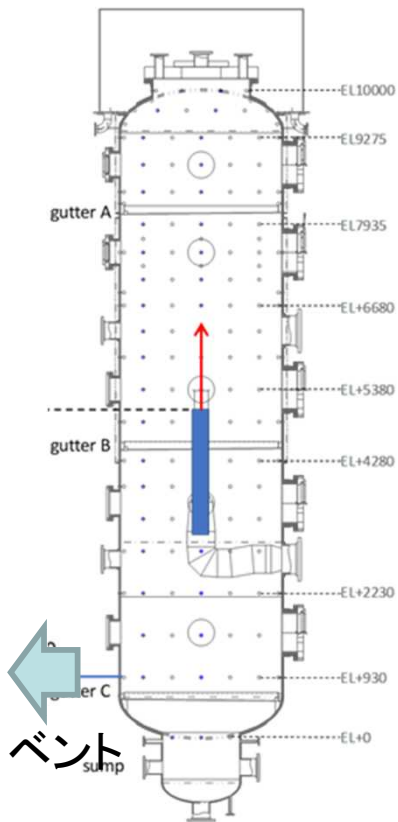
ヘリウムの容器鉛直方向の濃度分布

- 外面冷却により生じたHeの成層化は気体のプリュームにより解消される



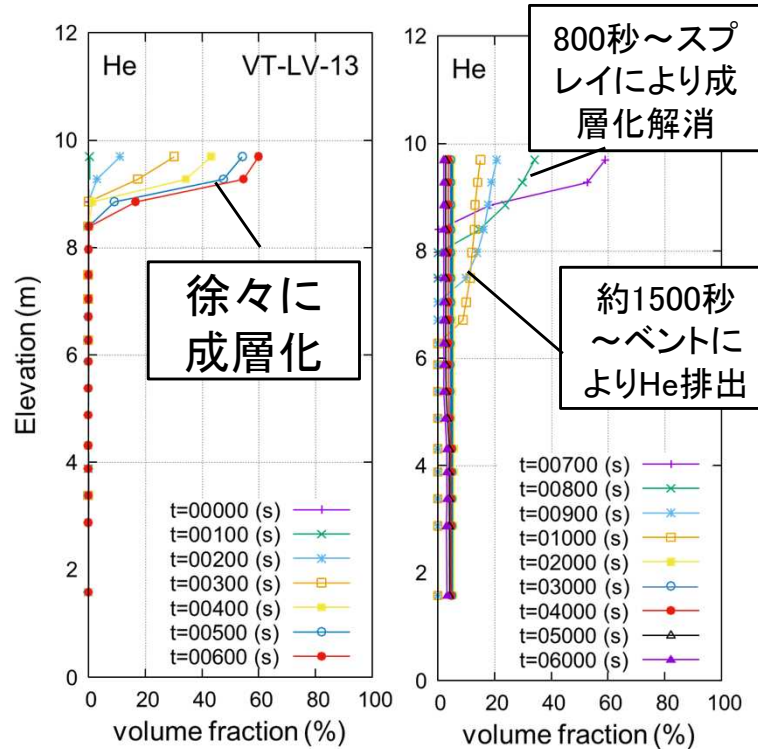
## 2. 研究期間を通じた主要成果

### (3) 重大事故時格納容器熱流動実験(3/3) スプレイ及びベント時熱流動実験

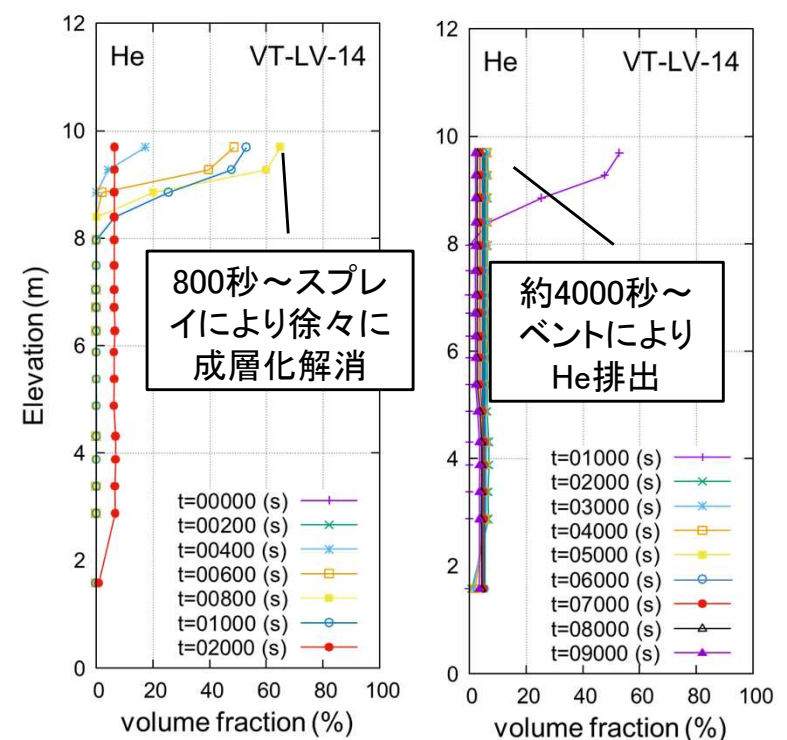


実験概要

スプレイ後直ちにベント



スプレイ後2400秒でベント



ヘリウムの容器鉛直方向の濃度分布

- 両ケースでも微量のスプレイ注入によりHeの成層化は解消した
- 異なるタイミングでのベントによるHe排出挙動に違いはなかった

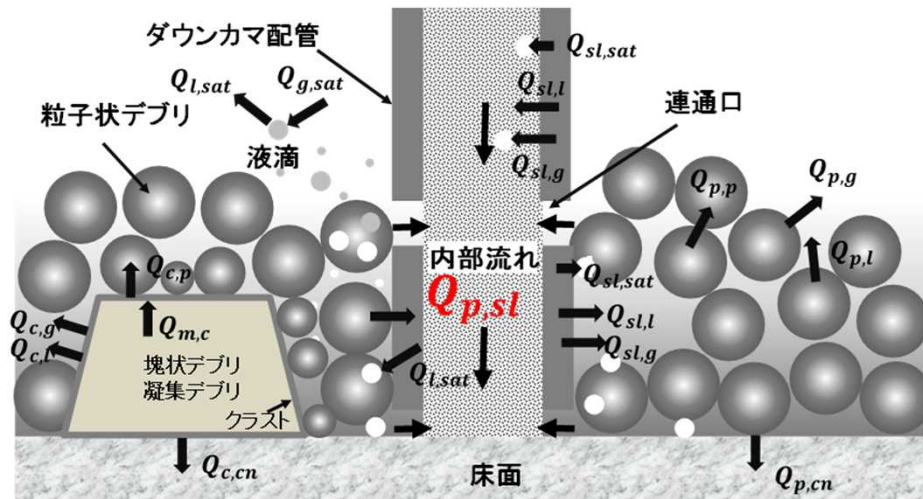
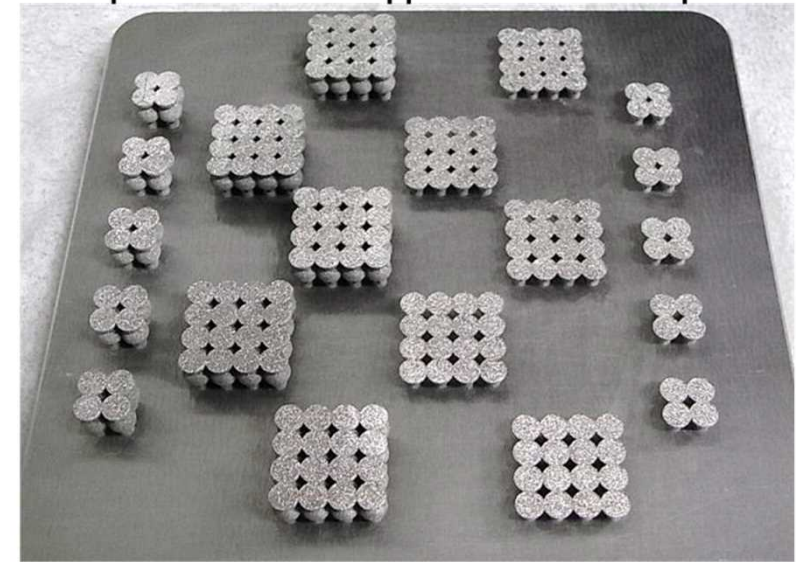


## 2. 研究期間を通じた主要成果

### (4) 粒子状デブリ冷却実験 (1/4) 成立性確認基礎実験

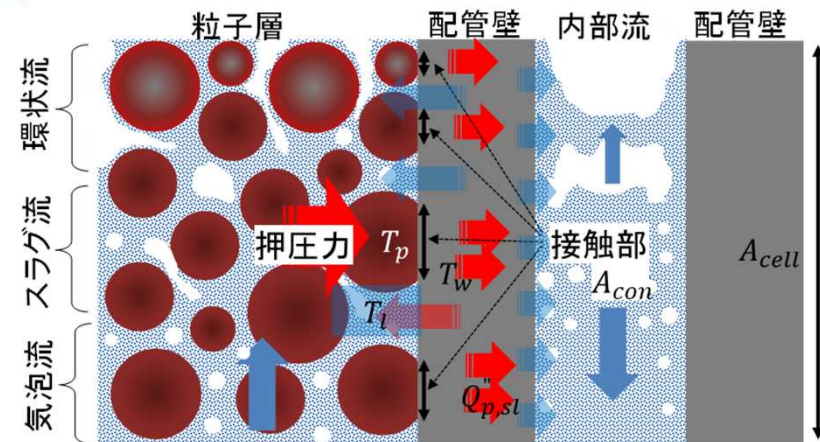
- 粒子状デブリが固化していれば、粒子と金属平面との接触面積は変化しない。
- 半熔融状態の高温デブリの場合、接触界面が変形し接触面積が大きくなる。
- 金属3Dプリンタを使用して、粒子形状(サイズ、形状)及び粒子配置を変えた粒子層の製造技術を構築した。

上下方向オーバーラップ確認用 (10パターン)      水平方向オーバーラップ確認用 (10パターン)



粒子状デブリが固化している場合

→ 粒子から壁面への熱流束      ← 壁面から冷却水への熱流束



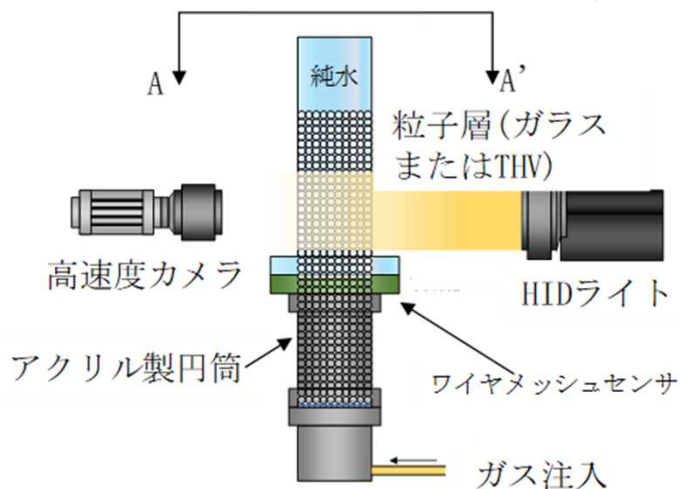
粒子状デブリが固化しない場合

## 2. 研究期間を通じた主要成果

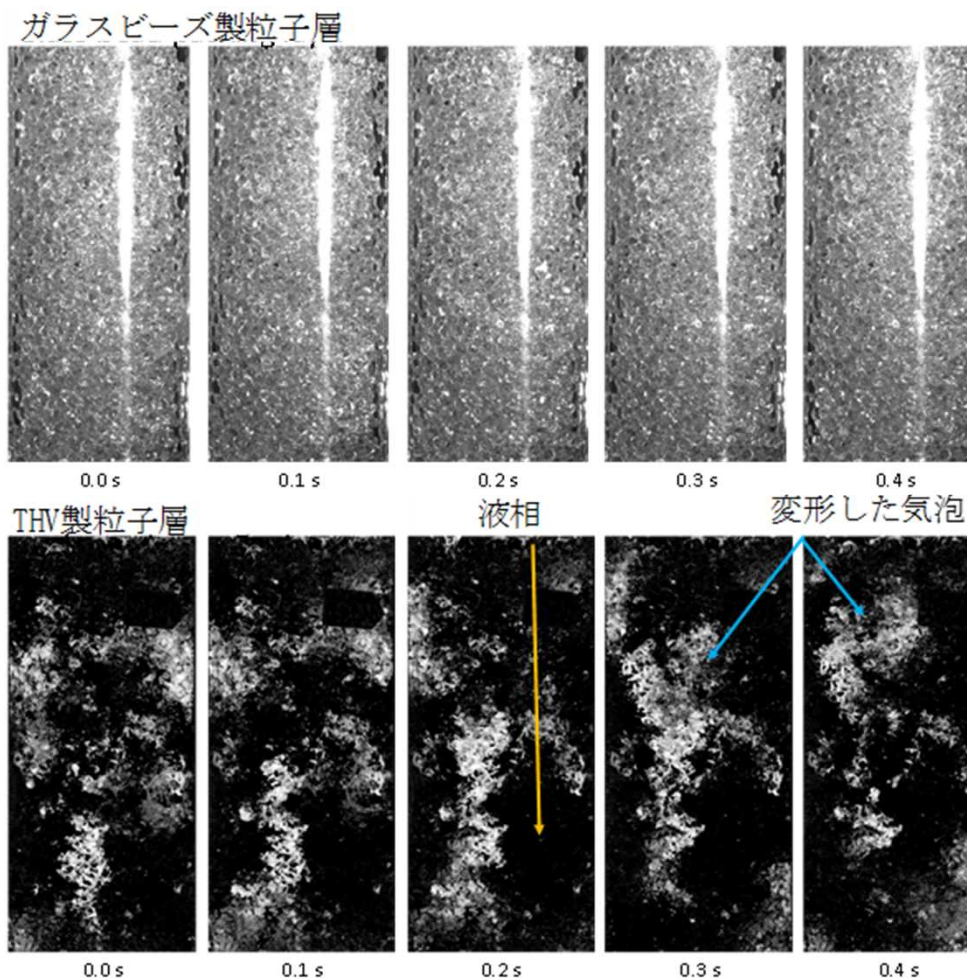
### (4) 粒子状デブリ冷却実験 (2/4)

#### 成立性確認基礎実験

#### 流動可視化実験装置の設計と構築 (インデックスマッチング)



- ガラスビーズ粒子層では、容器壁面付近を流れる小気泡を観察することはできるが、全体としては気泡の輪郭を捉えることは難しい。
- THV粒子層では、気泡の射影画像が観察されており、スラグが下方から上方へ流れていく様子を観察することができる。

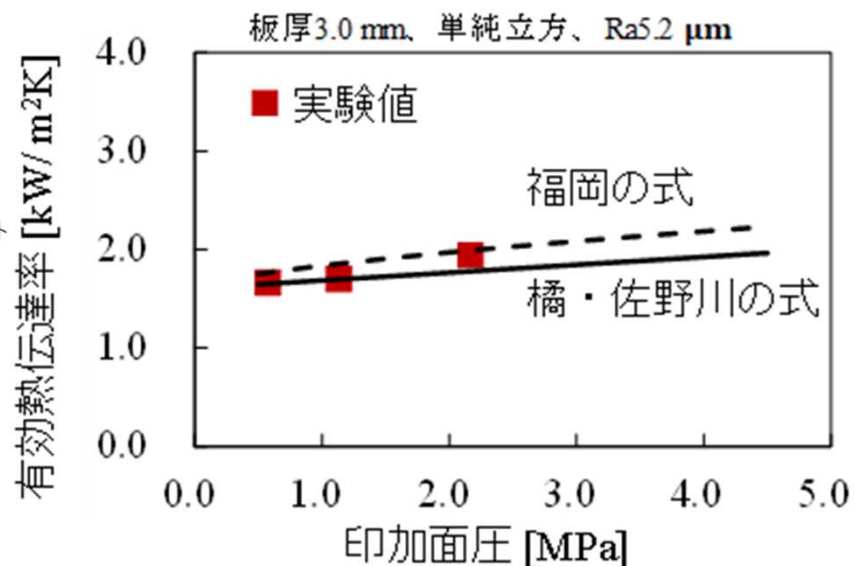
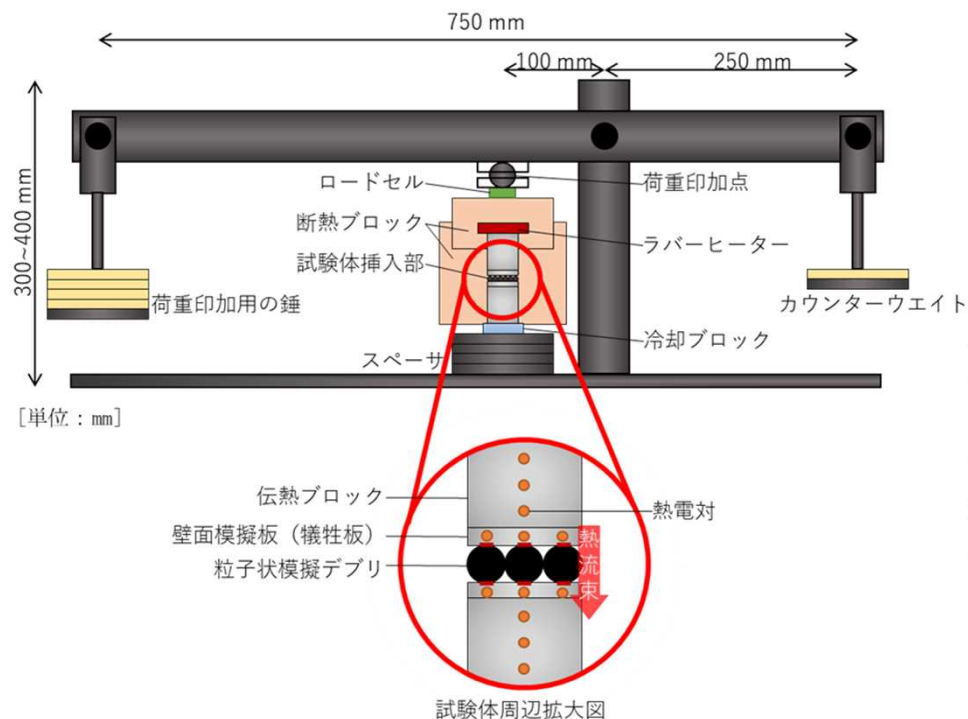


ガラスビーズ粒子層とTHV粒子層における二相流観察結果



## 2. 研究期間を通じた主要成果

### (4) 粒子状デブリ冷却実験 (3/4) 接触熱抵抗実験

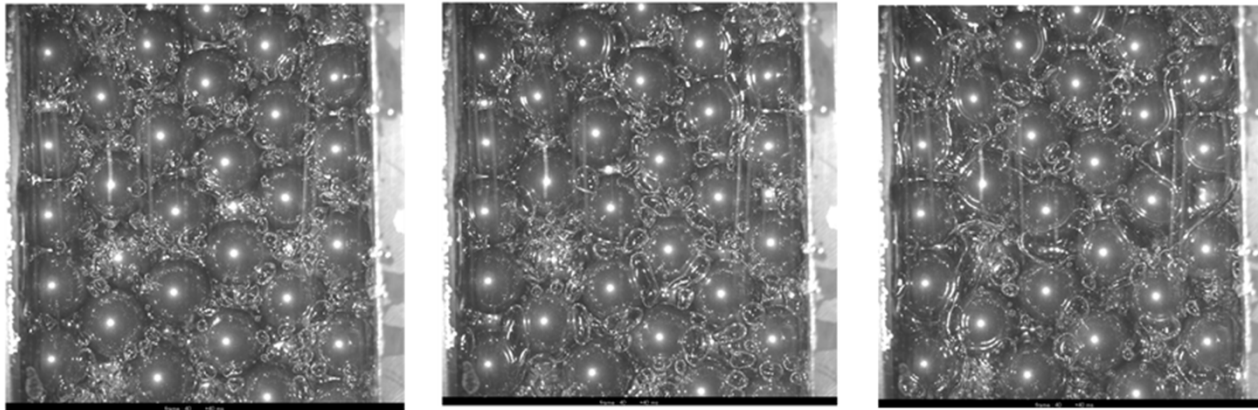


- 接触する材料の硬度が高いほど面圧の影響は生じにくいですが、本実験のように硬度の小さなアルミニウム合金を用いた場合でも、接触面圧による有効熱伝達率への影響は、表面粗さや設計接触面積比較して小さい。
- 実測値は、福岡の式及び橋・佐野川の式により、実測値のばらつきの範囲で近似できる。

## 2. 研究期間を通じた主要成果

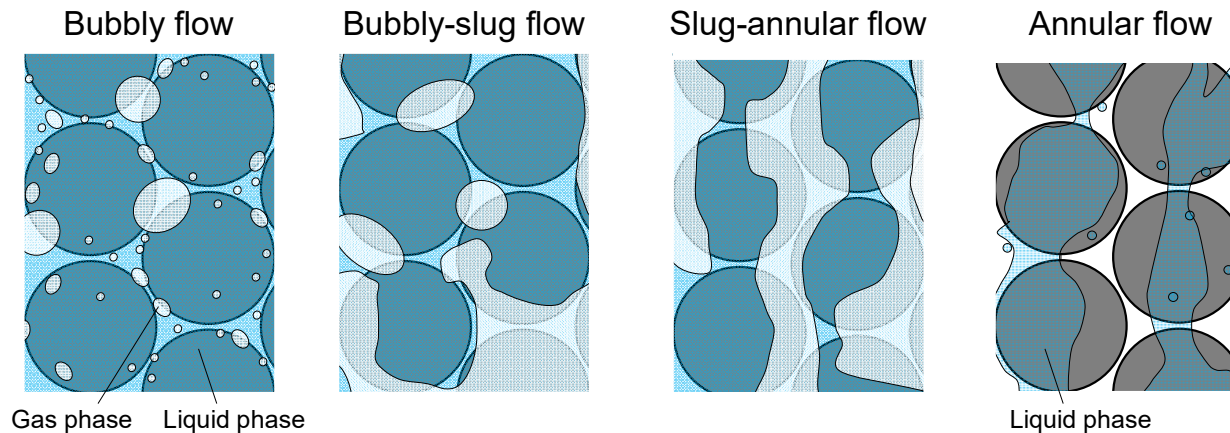
### (4) 粒子状デブリ冷却実験 (4/4) 流動可視化実験

粒子層-壁面接触部二相構造可視化例



(a)  $j_g=0.055 / j_l=0.075$  (m/s) (b)  $j_g=0.055 / j_l=0.047$  (m/s) (c)  $j_g=0.055 / j_l=0.028$  (m/s)

粒子層内の二相流動構造分類の概念図



- 可視観察結果から、気泡流(a)から気泡-スラグ流の遷移領域が観察されている。
- 粒子層内の二相構造を概念図により判定した。
- ボイド率時系列の空間分布では、流路中央(バルク領域)と流路壁面近傍でボイド率時系列の振幅や波形パターンが異なる場合が見られた。

### 3. まとめ

重大事故時に発生する現象には、様々な要因に起因する不確かさが存在する。

本プロジェクトにおいては、重大事故時に発生する現象の中でも、特に知見が欠如しており、いまだ大きな不確かさが残っていると考えられる以下の四つの現象を特定し実験を行っている。

- (1) プールスクラビング
- (2) ソースターム
- (3) 重大事故時格納容器熱流動
- (4) 粒子状デブリ冷却

本プロジェクトにより、重大事故の進展予測や評価結果の不確かさの低減に資する実験データ及び実験的知見を取得しつつある。

## 4. 成果の活用等

本プロジェクトで取得した重大事故時の物理化学現象の不確かさ低減に資する知見は、以下の検討への活用期待できる。

- 格納容器破損防止対策の有効性評価に係る適合性審査及びそのガイドの記載拡充の検討
- 実用発電用原子炉の安全性向上評価に関する運用ガイドの記載拡充の検討 等

## 5. 成果の公表等 (1/4)

原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表

論文(査読付)

① プールスクラビング実験

- 秋葉美幸、堀田亮年、阿部豊、孫昊旻、“粒子状放射性物質のプールスクラビングに関する実験的研究”、日本原子力学会和文論文集、J18-042、2020.

委託先による公表

論文(査読付)

① プールスクラビング実験

- K. Fujiwara, K. Yoshida, A. Kaneko, and Y. Abe, “Experimental and numerical investigations of aerosol transportation phenomena from single bubbles”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.195, 123160, 2022.
- K. Yoshida, K. Fujiwara, Y. Nakamura, A. Kaneko and Y. Abe, “Experimental Study of Interfacial Area of Bubble Plume Based on Bubble Tracking by Wire-Mesh Sensor,” Nuclear Engineering and Design, Vol.388, 111645, 2022.
- K. Fujiwara, Y. Nakamura, W. Kikuchi, A. Kaneko and Y. Abe, “Measurement of Particle Decontamination Behavior using Interferometer”, Experiments in Fluids, Vol.61, 37, 2020.
- K. Fujiwara, K. Yoshida, Y. Nakamura, S. Kadoma, A. Kaneko, and Y. Abe, “Investigation of aerosol transportation phenomena in pool scrubbing by combining bubble plume measurements and single-bubble mass transfer analysis”, Nuclear Engineering and Design, submitted in June 2022.

## 5. 成果の公表等 (2/4)

### ② ソースターム実験

- Kotaro Nanjo, Jun Ishikawa, Tomoyuki Sugiyama, Marco Pellegrini and Koji Okamoto, “Revolatilization of iodine by bubbly flow in the suppression pool during an accident”, Journal of Nuclear Science and Technology, 2022, accepted in March 2022.

### ③ 重大事故時格納容器熱流動実験

- A. Hamdani, S. Abe, M. Ishigaki, Y. Sibamoto and T. Yonomoto, “Unsteady Natural Convection in a Cylindrical Containment Vessel (CIGMA) With External Wall Cooling”: Numerical CFD Simulation, Energies, Vol.13, 3652, 2020.
- M. Ishigaki, S. Abe, Y. Sibamoto and T. Yonomoto, “Experimental investigation of density stratification behavior during outer surface cooling of a containment vessel with the CIGMA facility”, Nuclear Engineering and Design, Vol.367, 110790, 2020.
- S. Abe, E. Studer, M. Ishigaki, Y. Sibamoto and T. Yonomoto, “Density Stratification Breakup by a Vertical Jet: Experimental and Numerical Investigation on the Effect of Dynamic Change of Turbulent Schmidt Number”, Nuclear Engineering and Design, Vol.368, 110785, 2020.
- H. Sun, Y. Sibamoto, Y. Hirose and Y. Kukita, “The dependence of pool scrubbing decontamination factor on particle number density: modeling based on bubble mass and energy balances”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.58, pp.1048-1057, 2021.
- S. Abe, A. Hamdani, M. Ishigaki and Y. Sibamoto, “Experimental investigation of natural convection and gas mixing behaviors driven by outer surface cooling with and without density stratification consisting of an air-helium gas mixture in a large-scale enclosed vessel”, Annals of Nuclear Energy, Vol.166, 108791, 2022.
- H. Sun, Y. Leblois, T. Gelain, and E. Porcheron, “Experimental and analytical investigations on aerosol washout in a large vessel with high spray coverage ratio simulating PWR containment spray”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.257, 2055673, 2022.



## 5. 成果の公表等 (3/4)

### (2) 国際会議のプロシーディング (査読付)

#### ① プールスクラビング実験

- S. Kadoma, K. Fujiwara, K. Yoshida and A. Kaneko, “Measurement of Gas-Liquid Interfacial Area Concentration and its Effect on Aerosol Behavior in Pool Scrubbing”, 90448, 29th International Conference on Nuclear Engineering, Online, August 8-12, 2022.
- K. Yoshida, K. Fujiwara, A. Kaneko and Y. Abe, “Experimental Study on Bubble and Aerosol Behavior During Pool Scrubbing”, 61490, 28th International Conference on Nuclear Engineering, Online, August 4-6, 2021.
- K. Fujiwara, K. Yoshida, Y. Nakamura, A. Kaneko and Y. Abe, “Experimental Investigation of Particle Decontamination Efficiency in a Single-bubble by Pool Scrubbing”, 16173, 28th Conference on Nuclear Engineering Joint with the ASME 2020 Power Conference, Online, August 2-6, 2020.

## 5. 成果の公表等 (4/4)

### ② 重大事故時格納容器熱流動実験

- S. Abe, A. Hamdani, M. Ishigaki and Y. Sibamoto, “CIGMA experimental investigation on heat and mass transfer phenomena induced by natural convection with density stratification in the enclosure vessel”, Proc. of Advances in Thermal Hydraulics (ATH'20), pp.258-268, Online, October 20-23, 2020.
- Y. Hirose, M. Ishigaki, S. Abe and Y. Sibamoto, “Application of immersed boundary method for jet flow in grating type structure”, Proc. of Advances in Thermal Hydraulics (ATH'20), Online, October 20-23, 2020.
- S. Soma, M. Ishigaki, S. Abe and Y. Sibamoto, “Measurement of velocity and temperature profiles in boundary layer with steam condensation”, Proc. of the 19th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-19), 35503, Online, March 6 - 11, 2022.

### (3) その他(学会表彰等)

#### ① プールスクラビング実験

- 門間彩介(筑波大学), 日本原子力学会, フェロー賞, March, 2022.
- 吉田滉平(筑波大学), 日本原子力学会熱流動部会, 優秀講演賞, September, 2021.
- 中村優樹(筑波大学), 日本原子力学会熱流動部会, 優秀講演賞, March, 2020.
- 藤原広太(筑波大学), 日本原子力学会熱流動部会, 奨励賞, March, 2020.
- Kohei Yoshida (University of Tsukuba), ICONE-power 2020, best video presentation award, August, 2020.

## 6. 成果目標に対する達成状況

### (1) プールスクラビング実験

- プールスクラビングに係る小規模実験(単一気泡及び気泡群)及び中規模実験(気泡群)を進めている。
  - 小規模実験では、詳細計測や数値解析によりエアロゾル輸送の促進や抑制のメカニズムを明らかにした。
  - 中規模実験では、実験装置を改良して前プロジェクトで実施したDFの水溫依存性に係る実験結果を再調査した。
- 令和4年度末までに、さらに実験を実施し、これらの知見を踏まえて令和7年度に総合評価を行う予定であり、順調に進捗している。

## 6. 成果目標に対する達成状況

### (2) ソースターム実験

- ソースタームに係る化学反応、再移行挙動、気相化学・物質移行及びペレット放出の四つに着目して、これまでに文献調査や基礎実験を実施しており、測定技術の確立や支配因子等の現象把握をおおむね完了。
- これらの知見を踏まえて、令和4年度以降に実験手法の改良及び実験データの拡充を進める予定であり、順調に進捗している。

## 6. 成果目標に対する達成状況

### (3) 重大事故時格納容器熱流動実験

- 格納容器上部フランジ加熱実験、外面冷却自然循環実験、熱及び物質移行に関する実験、スプレイ実験並びにベント実験に行い、重大事故時の個々の物理化学現象を把握するとともに、300°C超の雰囲気温度条件を含む実験データベースを構築した。
- 令和7年度までに、この実験データベースを拡充する予定であり、順調に進捗している。

## 6. 成果目標に対する達成状況

### (4) 粒子状デブリ冷却性実験

- 第0ステップとして基礎技術を構築し、第1ステップとして構築した技術を用いて個別効果実験を実施した。粒子状デブリの伝熱特性並びに粒子層と壁面接触領域及び粒子層内の流動特性を把握した。
- 令和4年度末までに更に実験を行い接触熱伝熱のモデル化に向けた実験データベースを拡充し、令和7年度に、これらの知見に基づき総合評価を行う予定であり、順調に進捗している。

## 6. 成果目標に対する達成状況

- 本研究の実施期間は令和2年度から令和7年度までの6箇年度。
- 本中間報告書は主に令和2年度及び令和3年度に実施した研究成果をまとめたものである。



- 令和3年度終了時点で予定していた項目について、計画どおりに進んでいる。

年度 (令和)	2	3	4	5	6	7
プールスクラビング 実験	小規模実験 (筑波大学に委託)					
	中規模実験 (JAEA に委託)					
			スプレースクラビング実験 (JAEA に委託)			総合評価
ソースターム実験	化学反応実験 (JAEA に委託)					
	再移行挙動実験 (JAEA に委託)					
		CsI 放出実験 (福 井大学との共同研 究)				
	気相化学・物質移行実験 (JAEA との共同研究)					
						総合評価
重大事故時格納容器 熱流動実験	格納容器上部フランジ加熱実験 (JAEA に委託)					
	外面冷却実験 (JAEA に委託)					
		熱及び物質移行基礎実験 (JAEA に委託)				
	ベント実験 (JAEA に委託)					
	スプレイ実験 (JAEA に委託)					総合評価
粒子状デブリ冷却性 実験	粒子状デブリ冷却性実験 (電力中央研究所に委託)					
						総合評価

## 7. 今後の展開

- 残りのプロジェクト期間において、重大事故時の物理化学現象に関わる不確かさを低減するための実験を更に実施する。

年度 (令和)	2	3	4	5	6	7
プールスクラビング 実験	小規模実験 (筑波大学に委託)					
	中規模実験 (JAEA に委託)					
			スプレースクラビング実験 (JAEA に委託)			総合評価
ゾースターム実験	化学反応実験 (JAEA に委託)					
	再移行挙動実験 (JAEA に委託)					
			CsI 放出実験 (福 井大学との共同研 究)			
	気相化学・物質移行実験 (JAEA との共同研究)					
						総合評価
重大事故時格納容器 熱流動実験	格納容器上部フランジ加熱実験 (JAEA に委託)					
	外面冷却実験 (JAEA に委託)					
			熱及び物質移行基礎実験 (JAEA に委託)			
	ベント実験 (JAEA に委託)					
	スプレイ実験 (JAEA に委託)					
					総合評価	
粒子状デブリ冷却性 実験	粒子状デブリ冷却性実験 (電力中央研究所に委託)					
						総合評価



## 参考1 プールスクラビング実験とSPARC-90モデルの改良

小規模試験(筑波大学)

- 単一気泡計測
  - ✓ マツハツエンダー干渉計による密度分布計測
  - ✓ DF計測
  - ✓ 詳細CFD
    - 気泡上昇に伴う気泡アスペクト比の変化
    - 気泡内部流動
    - DF評価
- 気泡群計測
  - ✓ 高速度カメラによる可視化計測
    - 気泡分裂距離
  - ✓ ワイヤメッシュセンサーによる流動計測
    - ボイド率計測
    - 気相上昇速度計測
    - 気泡径分布
    - 界面積濃度
  - ✓ DF計測

前プロジェクト

大規模試験(東芝 磯子エンジニアリング)

- 実機相当スケール装置によるDFデータベース取得
- シビアアクシデント時の減圧条件の模擬
- DFに対する影響因子の同定
  - ✓ 定圧/減圧(減圧率:大/中/小)
  - ✓ エアロゾル物質(BaSO<sub>4</sub>/ポリマ/シリカ)
  - ✓ プール水温
  - ✓ 蒸気及び窒素割合
  - ✓ 注入ノズル深さ
  - ✓ 注入ノズル形状(ベント/クエンチャー)
  - ✓ プール内二相流動

中規模試験(JAEA/安全研究センター)

- 実機より小規模な体系におけるDFデータベース取得
- 他の要素との相互作用を確認すべきと判断される個別効果を含む総合効果実験データの取得
  - ✓ より実機に近い気泡プルーム上昇時の挙動
- より広範囲で確認すべきと判断される総合効果データの取得
  - ✓ プール水温及びエアロゾル物質のDFへの影響

SPARC-90モデルの改良/開発

- 二相流体力学
  - ✓ 気泡群流動構造(グローブユール分裂領域/スウォーム上昇領域)
  - ✓ 初期グローブユール形状
  - ✓ 気泡径とアスペクト比
  - ✓ 気泡上昇速度
  - ✓ スウォーム上昇速度
- ベント管出口領域におけるエアロゾル除去
  - ✓ 慣性衝突
  - ✓ 遠心力
  - ✓ 拡散沈着
  - ✓ 蒸気凝縮
- スウォーム上昇領域におけるエアロゾル除去
  - ✓ 界面速度( $V_s$ )
  - ✓ 重力沈着( $V_g$ )
  - ✓ 遠心力沈着( $V_c$ )
  - ✓ ブラウン拡散( $V_d$ )
  - ✓ プール液相からの蒸气流束( $V_v$ )
- 可溶性エアロゾルを含む粒子成長モデル(CsI/CsOH)
  - ✓ 修正Mason方程式及びJokiniemi活性度

## 参考2 ソースタームの現象とそれに対応する国際実験及びモデルの整理

