



Japan Atomic Energy Agency

ソースターム評価の不確かさ低減に向けて② ～プールスクラビングに関する研究～

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
原子炉安全研究ディビジョン
熱水力安全研究グループ

孫 昊旻

平成30年度 安全研究センター報告会
平成30年11月8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28, 29年度原子力施設等防災対策等委託費
(軽水炉のシビアアクシデント時格納容器熱流動調査)事業の成果の一部である

アウトライン

■ 研究背景

- ソースターム評価におけるプールスクラビング
- プールスクラビングに関する既往研究の課題と本研究の目的と方向性

■ プールスクラビング実験

- 実験装置
- 二相流計測手法と計測結果
- エアロゾル計測手法と計測結果

■ まとめと今後の予定

研究背景

- 軽水炉の重大事故時に、エアロゾル状の放射性物質(ソースターム)が発生し、環境に放出される可能性がある。

エアロゾル: 空間中に長時間滞留し、nmから μm オーダーの粒子

- エアロゾルを気相から液相に移行、環境への放出量低減の有効策

- プールスクラビング(気泡内エアロゾル→プール水に保持)

- ✓ BWRのS/Cのベント管やクエンチャ
- ✓ PWRにおけるSGTR
- ✓ Filtered containment venting system (FCVS)

- スプレースクラビング(空間内エアロゾル→液滴に保持)

- ✓ 格納容器スプレイ
- ✓ 自然降雨
- ✓ (原子炉建屋漏洩部に対する)放水砲



注入ノズル

- プールスクラビングの除染係数(DF: Decontamination factor)は比較的大きく、ソースターム評価に与える影響が大きい。

$DF = \text{プール水通過前エアロゾル量} / \text{プール水通過後エアロゾル量}$

- ソースターム評価の不確かさ低減に向けて、プールスクラビングの評価手法の高度化が重要

プールスクラビングにおける研究課題①

■ プールスクラビングの既往研究

- 多数の実験が存在し、主にDF計測
- DF評価コード (SPARC, SUPRA & BUSCA等)が存在
- しかし、DFの評価と計測結果には大きな相違が存在

■ プールスクラビングにおける研究

課題 (IPRESCA 2017の提案項目の一部抜粋)

- ① 詳細な二相流計測データが少なく、評価コード内二相流モデルが不十分
- ② エアロゾル計測の不確かさが大きく、DF計測結果の信頼性が高いといえない

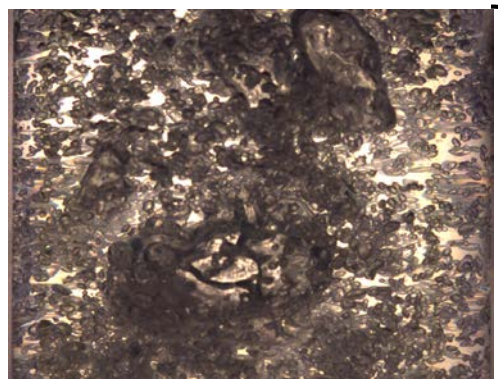


Sanjeev Gupta, PASSAM final workshop, February 28th, 2017

プールスクラビングにおける研究課題②

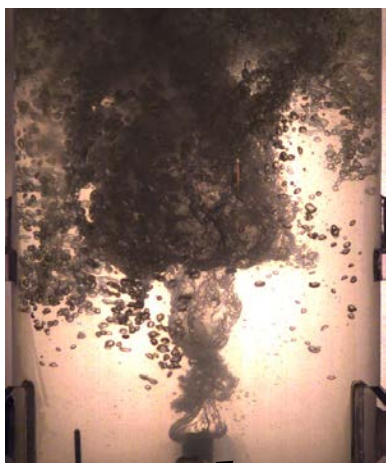
① 評価コード内二相流モデル

実際の二相流現象



気泡上昇領域

20 mm

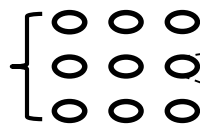


ガス注入領域

20 mm

注入ノズル

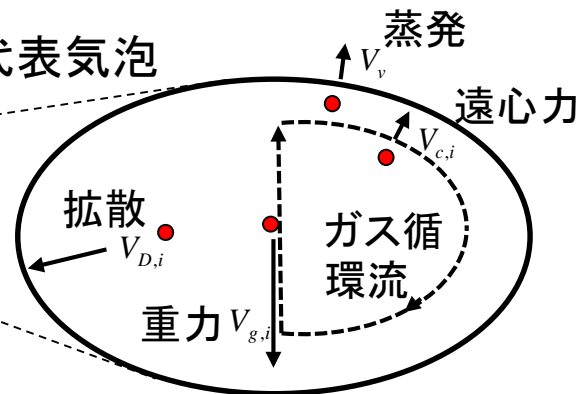
評価コードのモデル



単一形状・挙動の代表気泡仮定

例: 気泡径 $d_{vm} \doteq 7$ mm 一定
気泡径はDFとの相関が強く、重要。

代表気泡



SPARCコードの気泡径モデル

$$d_{vm} = 0.7 \cdot 10^{-0.2265 + \sqrt{0.0203 + 0.0313 \cdot x_{nc}}}$$

d_{vm} : 気泡径 [cm]

x_{nc} : 非凝縮ガスクオリティ [-]



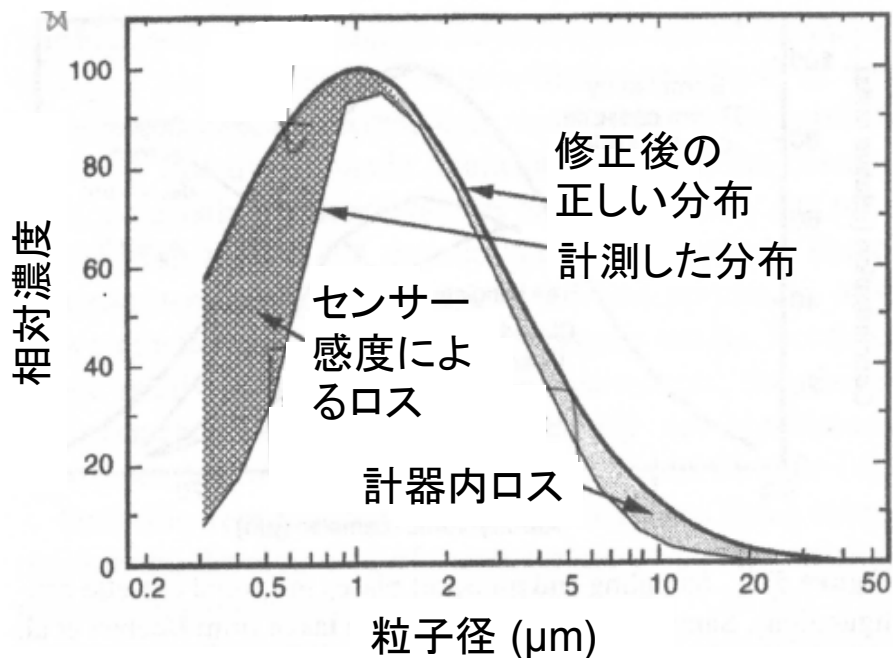
- 慣性衝突
- 蒸気凝縮
- 遠心力、拡散、重力沈降

界面乱れ・変形がない仮定

プールスクラビングにおける研究課題③

②エアロゾル計測の不確かさ

例：計測機器由来の誤差



Pramod Kulkarni et al., Aerosol measurement, 2011

例：装置輸送配管の粒子ロスによるDFの誤差



非公開



上述課題を受けて

本研究の目的と方向性

本研究の目的: プールスクラビング評価モデルの高度化

シビアアクシデントを想定した幅広い条件の二相流挙動に着目した個別現象(体系)

- ガス注入領域
 - ✓ 上向きガス注入
 - ✓ 単一&多穴横向きガス注入(クエンチャ)
 - ✓ 大口径下向きガス注入(ベント管)
- 気泡上昇領域
- 蒸気凝縮
- 水温の影響

詳細な二相流計測

信頼性の高いDF(エアロゾル)計測

二相流挙動把握・モデル構築

高度化

比較・検証

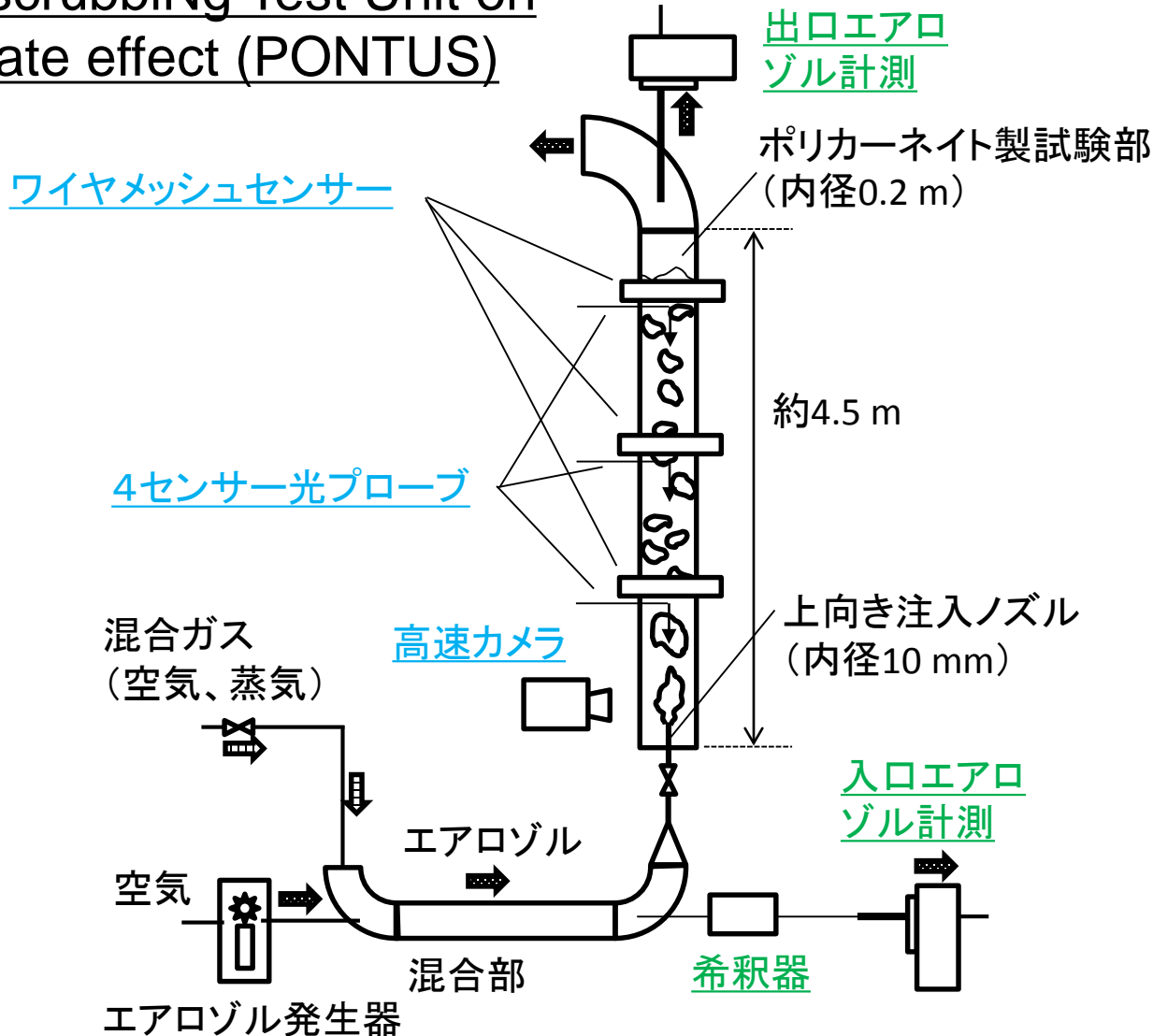
DF評価

既存エアロゾル輸送モデル

高度化

実験装置

POol scrubbiNg Test Unit on Separate effect (PONTUS)

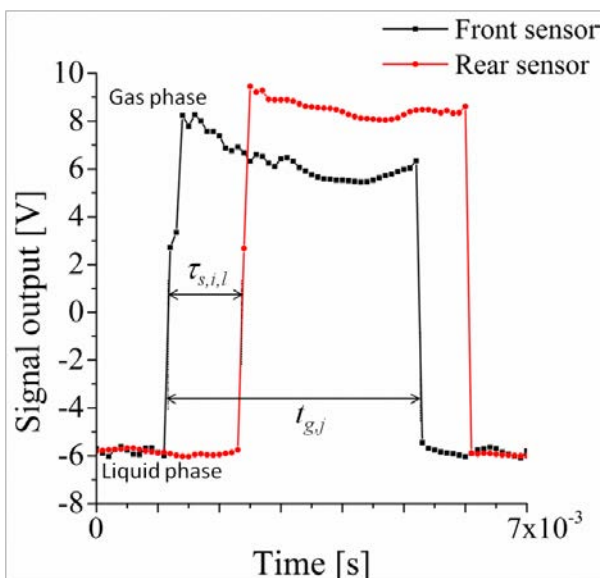
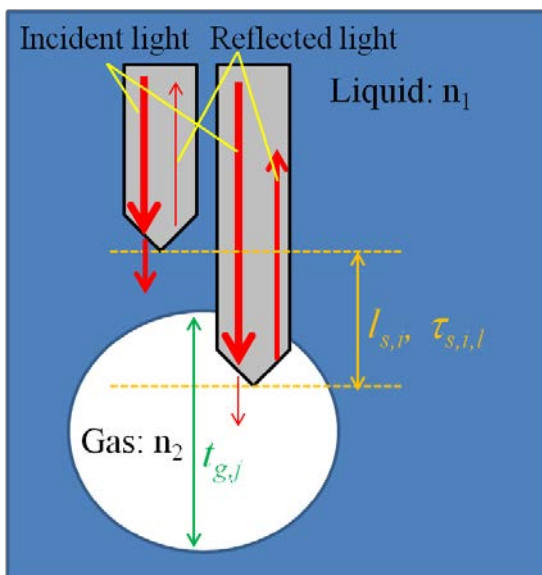
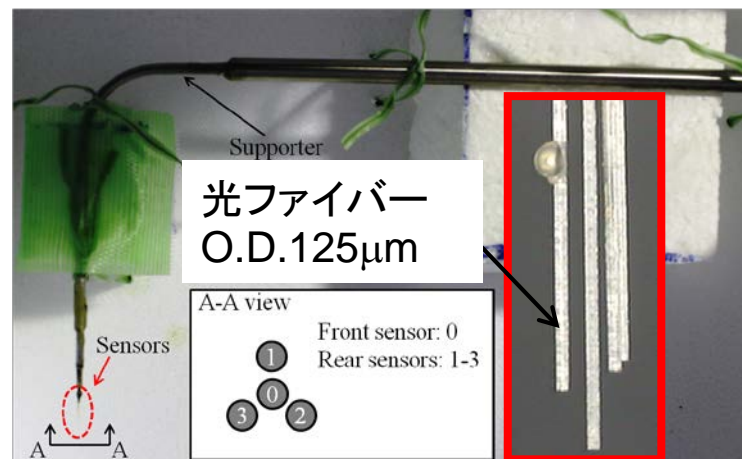


二相流計測
について

4センサー光プローブ(4SOP)

4センサー光プローブ(本研究の特徴)

- 気相と液相における反射光強度の違いを利用。
- 計測できる局所二相流パラメータ:
 - ✓ ボイド率(気相体積率)
 - ✓ 気泡数頻度
 - ✓ 気泡上昇速度
 - ✓ ザウター平均気泡径
 - ✓ 界面面積濃度
- 除染効果が高い小気泡の計測が可能であり、プールスクラビング実験に有効。

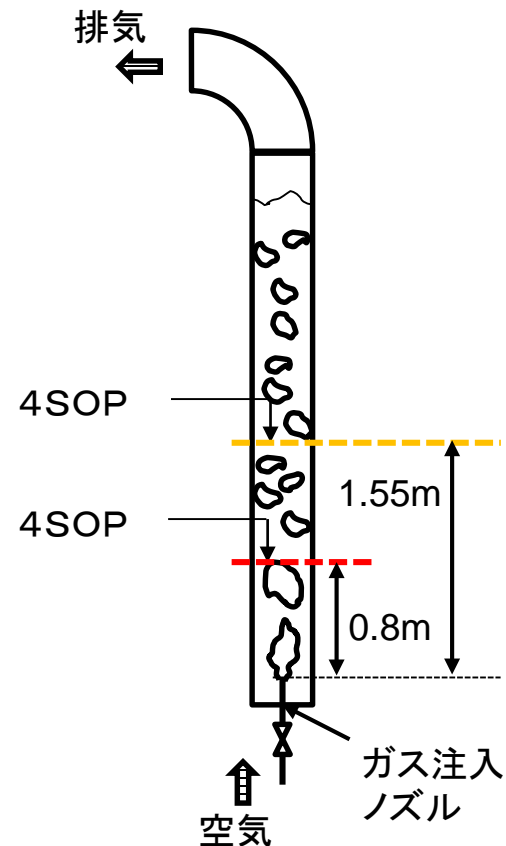
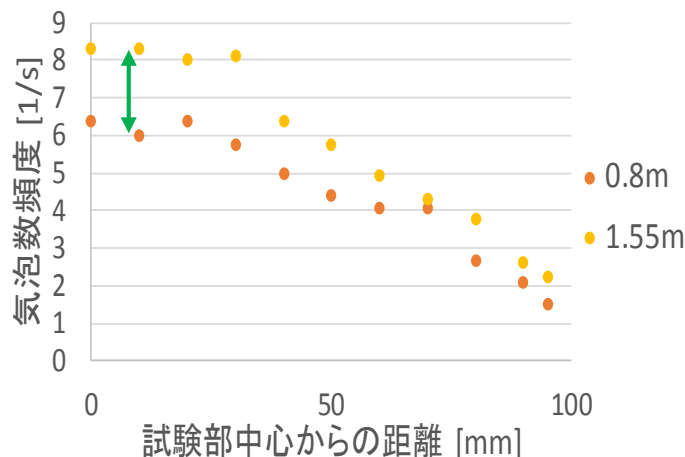
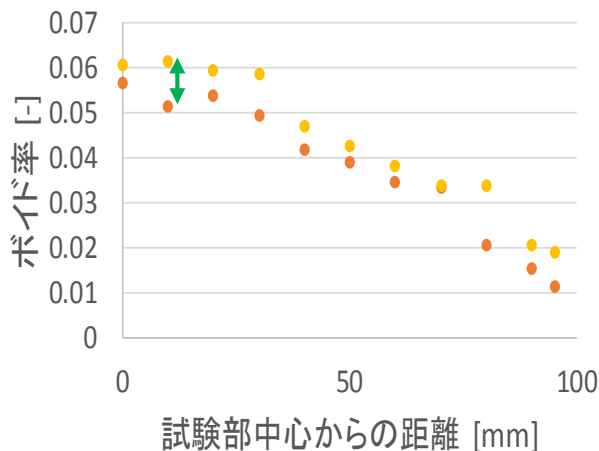


4SOPによる気泡上昇領域の気泡分裂過程計測

■ 初期注入気泡の分裂過程計測

■ 実験

- 試験部に対するガス見かけ速度 $J_g = 0.015 \text{ m/s}$
- 注入ノズルから下流2断面において、4SOPをトラバース計測

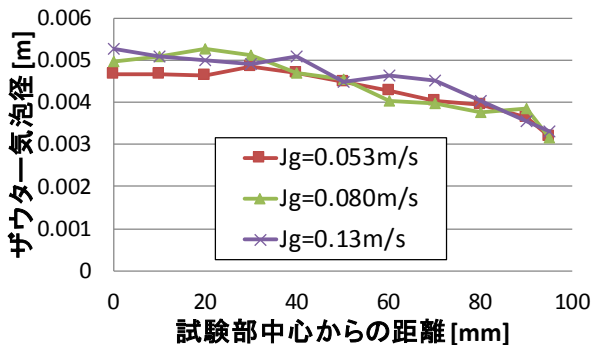
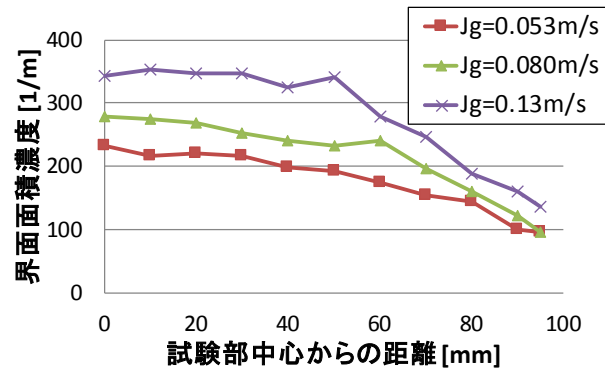
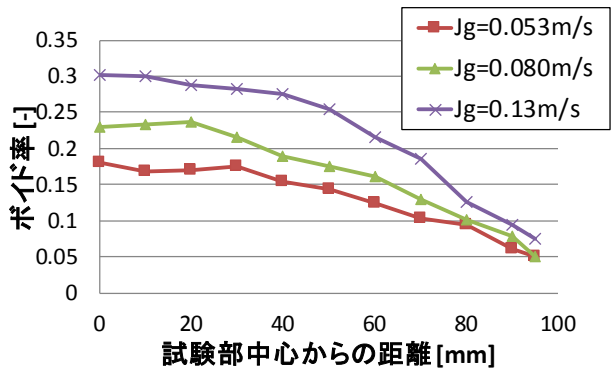


流れ方向に沿って、ボイド率はほぼ一定だが、気泡数頻度は増加
→試験部中心の初期注入気泡が分裂して断面内に広がった後も、気泡分裂は継続

4SOPによる十分発達した気泡上昇領域計測

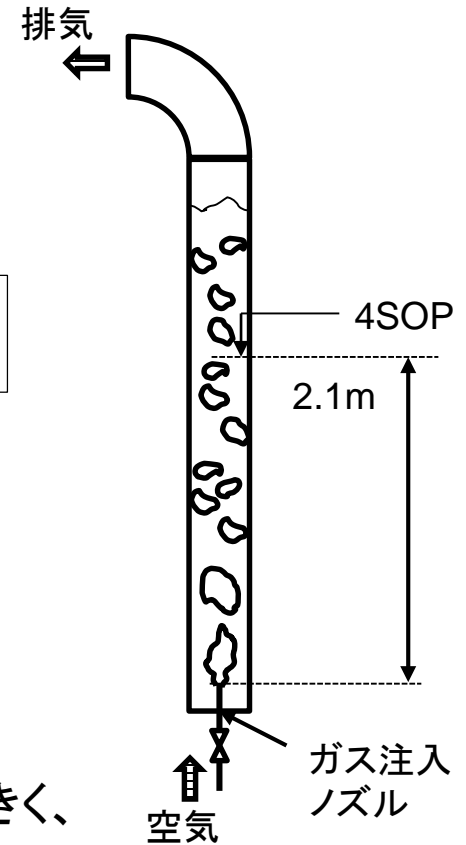
- 十分発達した気泡上昇領域計測
- 実験

- 試験部に対するガス見かけ速度 $J_g = 0.053 - 0.13 \text{ m/s}$
- 注入ノズルから下流2.1 mの断面において、4SOPをトラバース計測



二相流挙動

- 気泡は試験部中心に集中
- 気泡径は試験部中心が大きく、ガス流速の影響は小さい。



4SOP計測手法の整備は完了し、今後DF計測と合わせて
プールスクラビングモデルの高度化を目指す。

エアロゾル計測について

エアロゾル計測機器

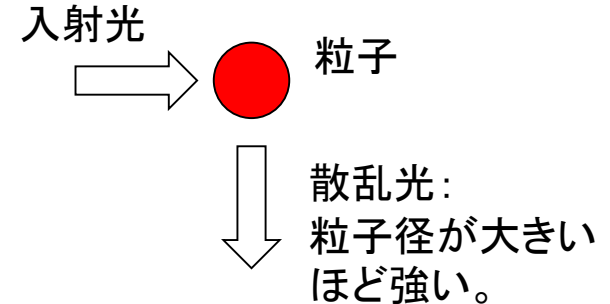
エアロゾル計測器

- エアロゾルスペクトロメーター(WELAS): 散乱光強度と粒子径の関係利用
 - ✓ 粒子径分布計測可
 - ✓ 高圧条件下でも計測可
- 凝縮粒子カウンター(CPC): 小粒子表面に液体を結露して成長させ、光学的に検出
 - ✓ nmオーダーの小粒子に対しても高い検出効率
- サンプルングフィルタ: サンプルングした粒子を電子天秤で計量
 - ✓ 原理が単純
 - ✓ 高圧条件下でも計測可

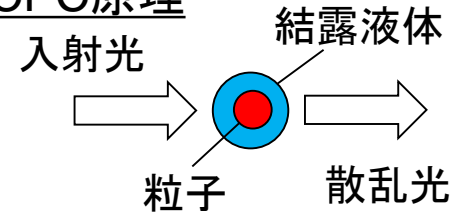
本研究の特徴

原理が異なる計測手法による計測結果を検証し、エアロゾル計測の不確かさを低減

WELAS原理



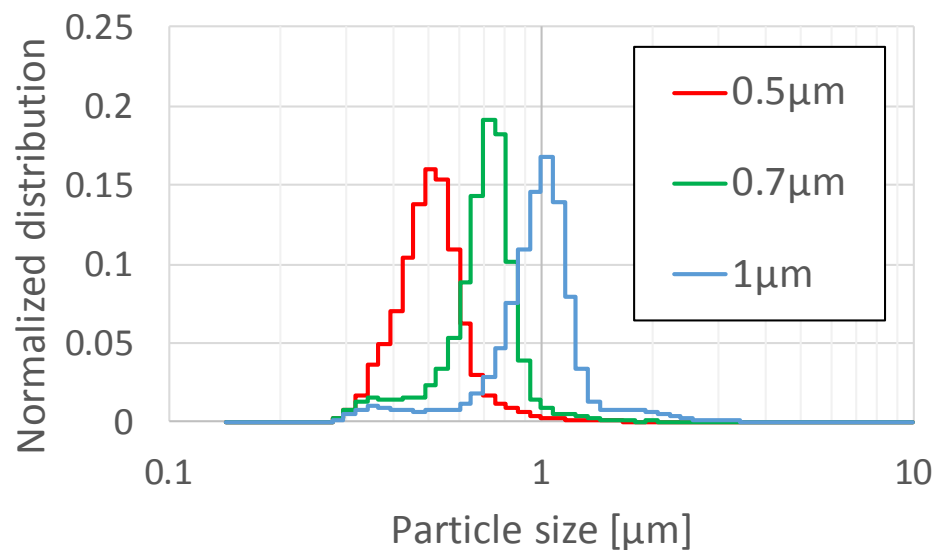
CPC原理



エアロゾル計測

試験粒子

- ✓ 単分散球形シリカ(SiO_2)粒子
- ✓ 粒子径: 0.5, 0.7, 1 μm (比較的DFが低く、環境に放出されやすいレンジ)
- ✓ 非溶解性、親水性



除染係数DFの評価

$$DF = A_{\text{入口}} / A_{\text{出口}}$$

WELASによる粒子径分布計測結果

エアロゾル量A: 個数 (WELASとCPC計測)
重量 (サンプリングフィルタ計測)

プールスクラビング実験

エアロゾル濃度に対するDFの依存性調査

ガス注入領域に着目した0.3 m水深実験

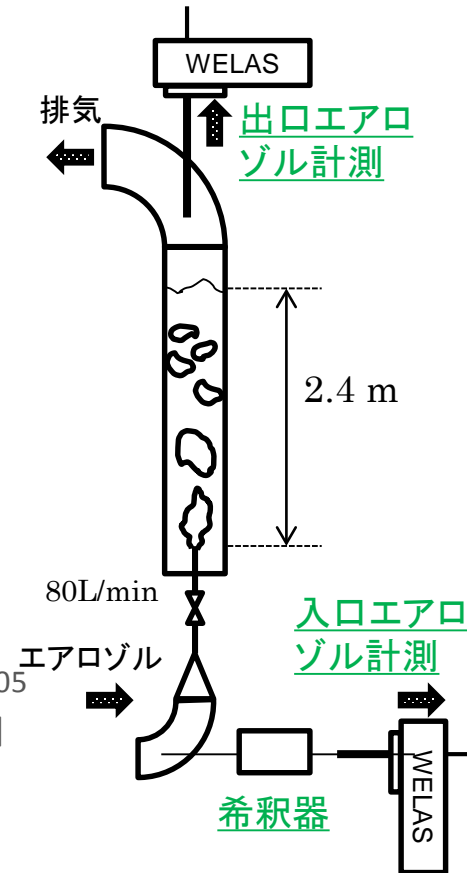
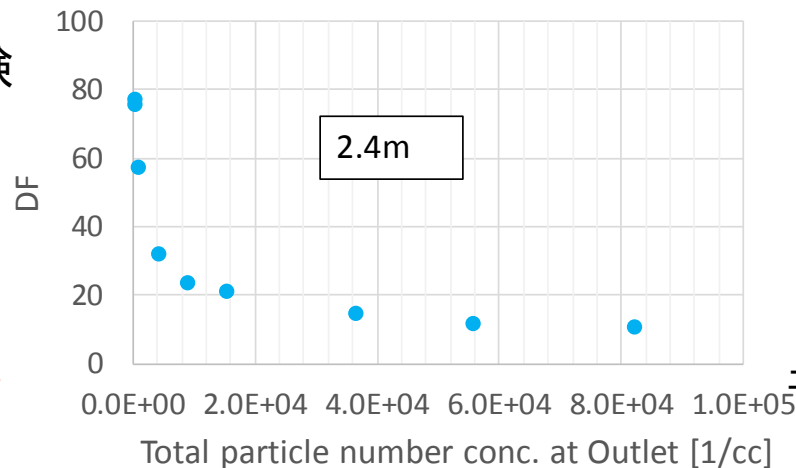
エアロゾル濃度に対するDFの依存性調査

既往研究において

- エアロゾル濃度に対するDFの依存性に関する調査例はほとんどなく、エアロゾル濃度は試験パラメータとして除外されている。
- DFの依存性に関する報告 (Hashimoto K. et al., 1988.) はあるものの、結果検証や機構検討がほとんどない。

DFの依存性調査実験

- 常温・常圧、水-空気試験
- 空気注入流量: 80 L/min
- 水深: 2.4 m
- 0.5 μm シリカ粒子
- エアロゾル計測: WELAS
- **試験パラメータ: 入口粒子数濃度**



結果

- DFはエアロゾル濃度に依存
- 低濃度条件下のDFは高く、その実験結果は非保守的な評価モデルの構築につながる可能性があるから重要。

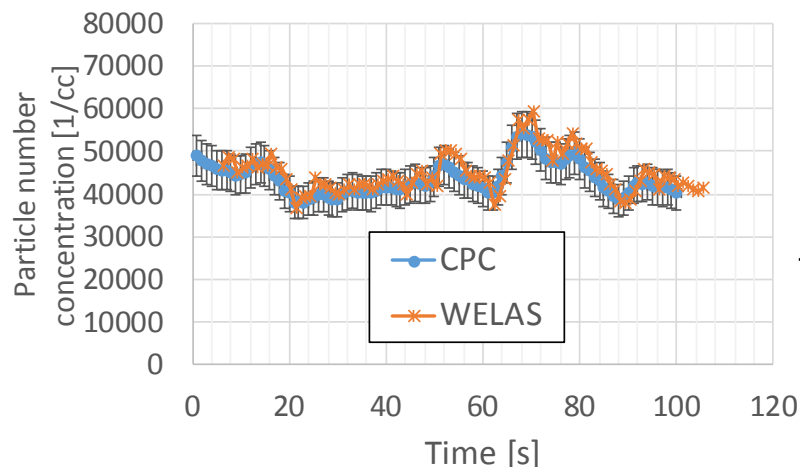


本結果が装置依存ではなく、スクラビング現象であることを確認するため、検証試験実施。

検証試験①: CPCによるWELAS計測精度調査

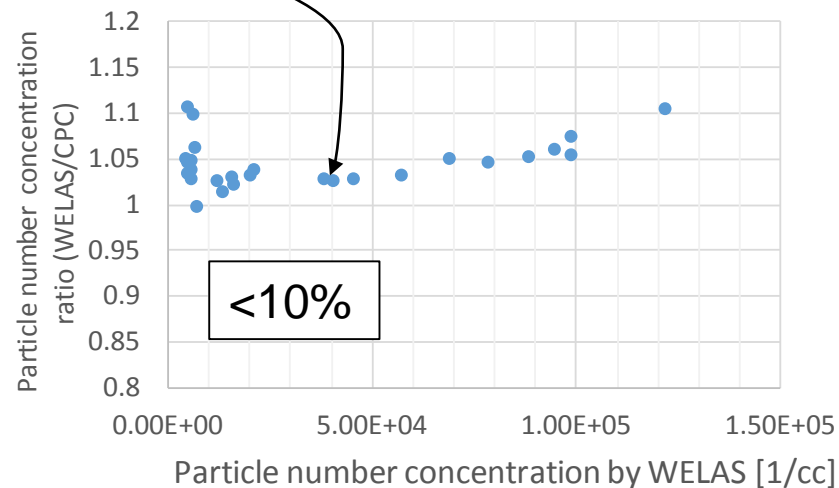
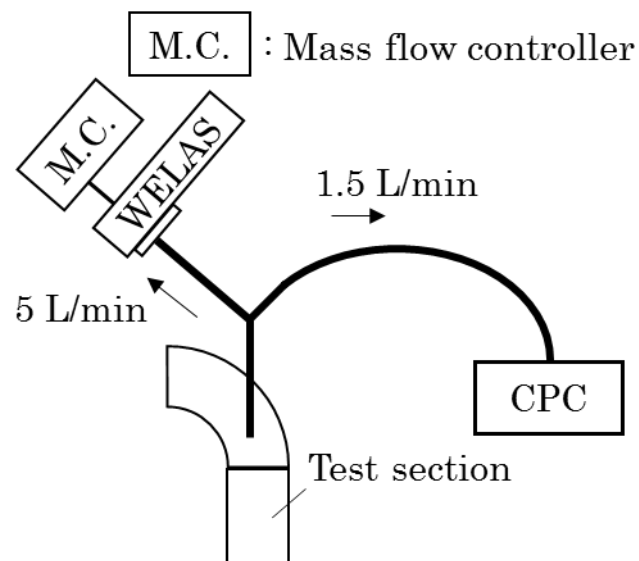
WELAS計測精度調査

- 常温・常圧
- 0.5 μm シリカ粒子
- WELASとCPCで同時にエアロゾル計測



結果

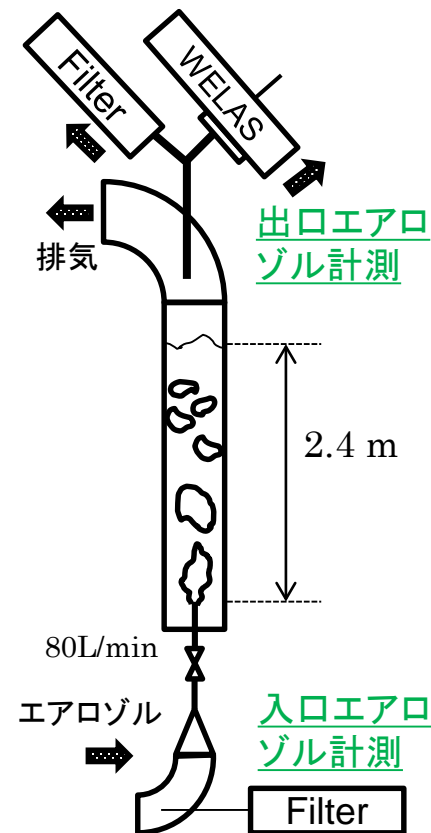
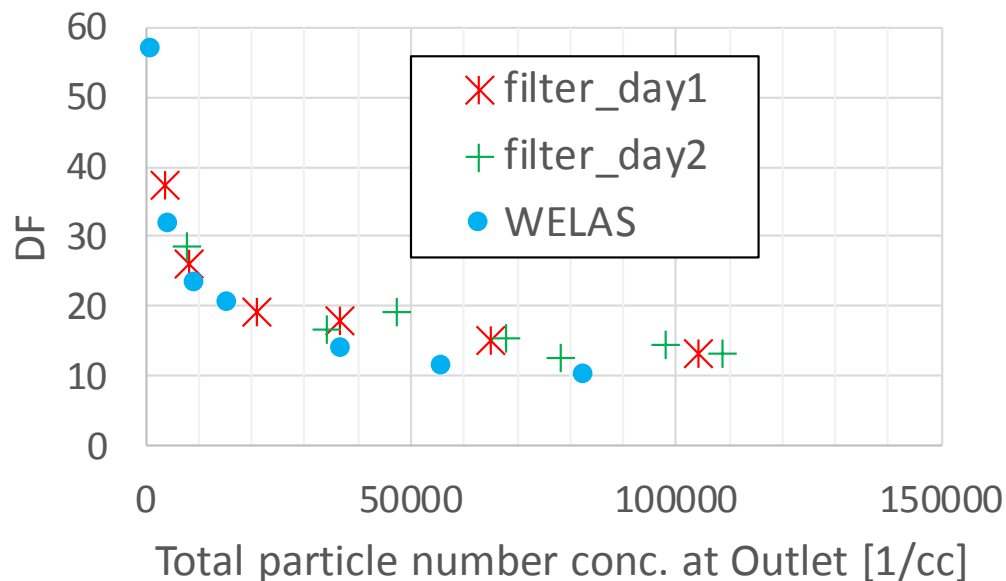
- WELASとCPCの計数差はほぼ10%以下
→WELASの計測結果の信頼性を確認



検証試験②：サンプリングフィルタによるDF計測

サンプリングフィルタによるDF計測

- WELASによるDFの依存性計測試験と同じ条件
- 入口出口のエアロゾルをサンプリングフィルタで同時計測し、DF評価



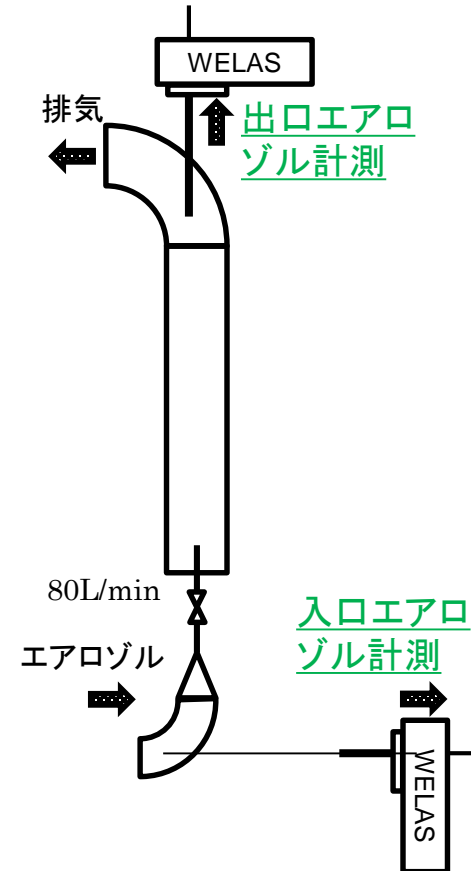
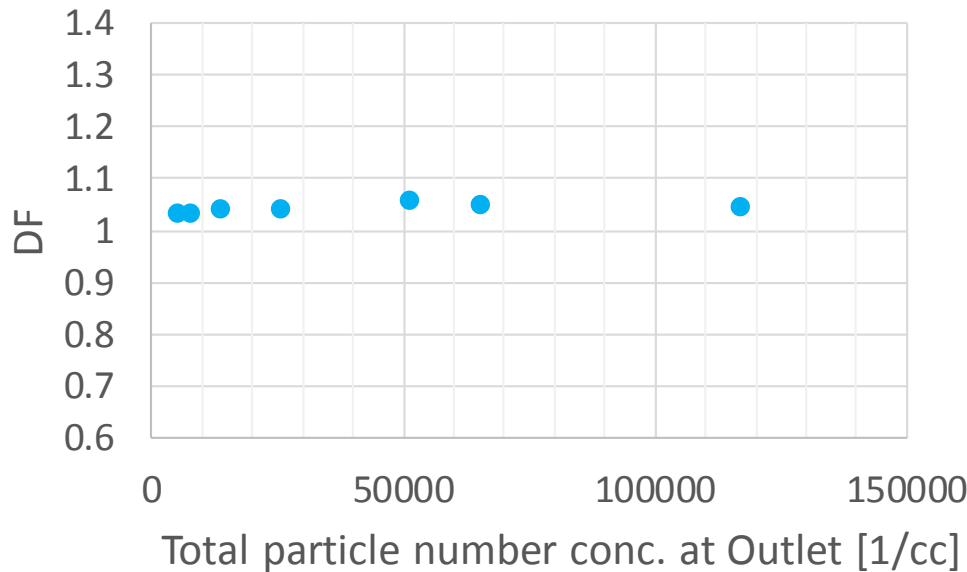
結果

- フィルタ計測したDF変化傾向はWELASと同じ。
→DF依存性の原因はエアロゾル計測誤差でない。

検証試験③：空試験部のDF計測

空試験部のDF計測

- 常温・常圧
- 0.5 μm シリカ粒子
- WELASでエアロゾル計測し、DF評価



結果

- DFの依存性は観測されなかった。

→プールスクラビング時に計測されたDFの依存性は、プールスクラビングの現象であることを示唆する。

プールスクラビング実験

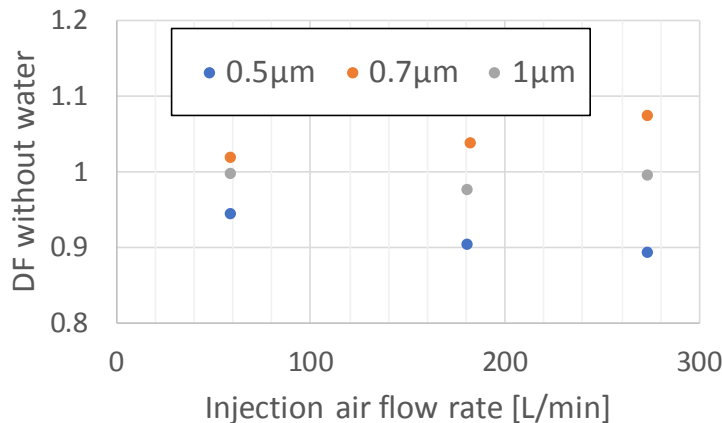
エアロゾル濃度に対するDFの依存性調査

ガス注入領域に着目した0.3 m水深実験

0.3 m水深におけるプールスクラビング実験

- ガス注入領域の除染効率は比較的に高い
← 0.3m水深で半分 (DF=2) 程度の粒子が除去
(A. Dehbi et al., 2001)

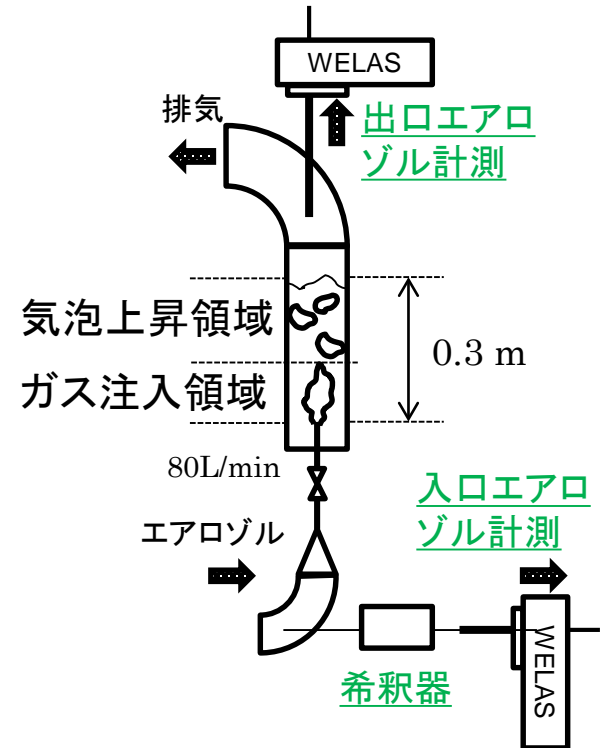
- ガス注入領域のDF評価モデル高度化のために、0.3 m水深において
 - DF計測
 - 初期気泡挙動可視化
- 先行確認試験: 空試験部における粒子ロス等に起因するDF計測



結果

空試験部におけるDFは0.9-1.1

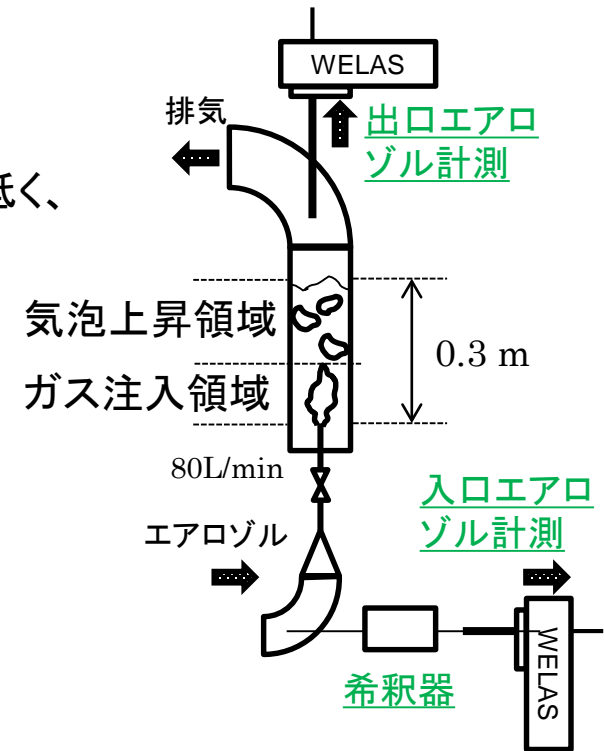
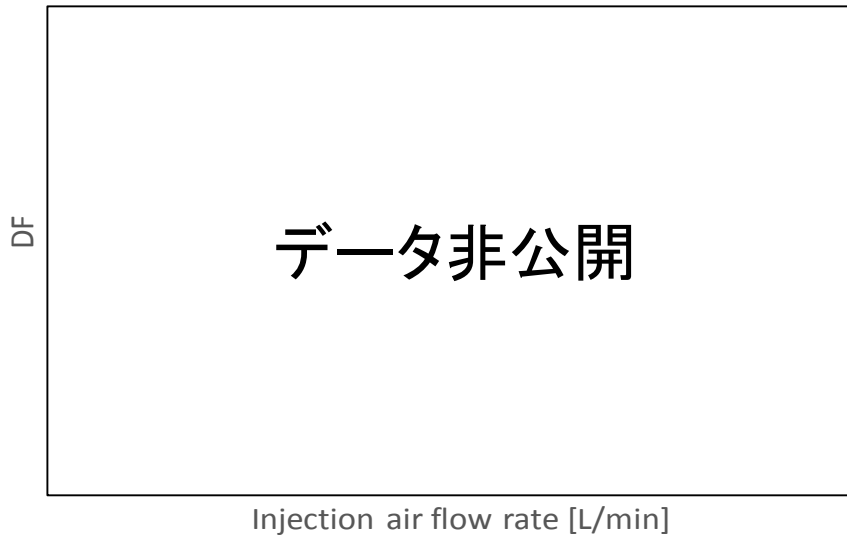
→ 粒子ロスが限定的であり、スクラビング実験におけるDF計測結果の信頼性を確認。



DF計測結果

プールスクラビング実験

- 0.3 m水深
- 常温・常圧、水-空気
- 注入空気流量: 58-272 L/min
→GlobuleとJet初期気泡の両領域を含む。
- 試験粒子: 0.5, 0.7, 1 μ mシリカ粒子(比較的DFが低く、環境に放出されやすい粒子径レンジ)



結果

粒子径、ガス流量の増加に伴ってDF増加
←初期粒子慣性力の増加がDF増加の主な原因

今後、可視化の結果と合わせてDF評価モデル高度化を行う予定。

まとめ

- ソースターム評価の不確かさ低減に資するプールスクラビングの評価手法の高度化のために、実験的研究を実施している。
- 詳細な二相流計測データを取得するために、4センサー光プローブを整備し、二相流挙動を計測した。
- 高精度なエアロゾル計測データを取得するために、原理が異なるエアロゾル計測手法を整備し、プールスクラビング実験を行った。
 - エアロゾル濃度に対するDFの依存性の調査
 - ガス注入領域に着目した0.3 m水深における実験
- 今後の予定
 - 0.3 m水深において取得した可視化とDFの結果を合わせて評価モデルの高度化を行う。
 - 他の体系の評価モデル高度化のための二相流とDFの計測データベースを構築する。

謝辞

本件は、原子力規制庁から受託した平成28、29年度原子力施設等防災対策等委託費（軽水炉のシビアアクシデント時格納容器熱流動調査）事業の成果の一部である。