

# 共同研究成果報告書

## 原子炉施設のプール内の温度成層化機構 に関する研究

原子力規制委員会 原子力規制庁

学校法人 早稲田大学

令和5年9月

## 1. 研究目的

原子炉施設に対する適切な規制を行うためには、事業者が実施する安全性評価の妥当性確認に必要となる解析手法を整備するとともに、事故時の現実的なプラント挙動の知見を拡充、取得していく研究が重要である。

事故時に原子炉施設の各領域で想定される重要な物理現象の一つに、長期の全交流動力電源喪失時等に使用済燃料プール内や沸騰水型原子炉のサプレッション・プール内で発生する温度成層化がある。プール内の温度成層化は、水面蒸発量の増加によるプールの水位低下、気相部の圧力上昇等の影響を及ぼす。温度成層化のプロセスは複雑であるが、その評価ではプール内の温度を一点近似として扱う場合や温度成層化を高温層と低温層の二層に分離して単純化して扱う場合があり、温度成層化や温度分布が適切に考慮されていない。

廃止措置中プラントにおいて使用済燃料プールの冷却機能を停止させた試験<sup>(1)</sup>が実施され、プール水の温度成層化が観測されている。試験では、温度成層化はプール水温度の上昇が継続する間は維持されたが、崩壊熱と放熱とがバランスし温度上昇が収まった後に解消された。また、同様の現象は先行研究の実験<sup>(2)</sup>により観測されている。数値流体力学（CFD: Computational Fluid Dynamics）に基づく再現解析<sup>(3)</sup>も実施されているが、CFDは大局的な温度推移を模擬できるものの、測定結果と比べて高温層と低温層とが早期から十分に混合され、実験との有意な差が現れた。温度成層化は良く知られた現象ではあるが、流体解析による温度推移予測の信頼性には課題があると考えられる。

そこで、本共同研究では、温度成層化発生機構の把握及び温度成層化の流体解析による予測性の向上を目指して、小型水プールに温度・速度場計測を実装した温度成層化実験により温度成層化発生機構を把握し、CFD解析からプール内の温度成層化モデルを検討する。また、これらの実験及びデータ考察を通じて職員の専門性の向上を図る。

## 2. 研究内容

温度成層化発生機構を把握し、実機解析に向けた検討を行うため、早稲田大学との共同研究により、以下の内容を実施した。

- (1) プール内の温度成層化実験
  - ・ 温度成層化実験
  - ・ 温度場・速度場同時計測センサーの開発
  - ・ 流動測定実験
- (2) プール内の温度成層化モデルの検討
  - ・ 温度成層化の確認計算
  - ・ 温度成層化実験解析
  - ・ 成層化モデルの検討

### 3. 実施方法

#### 3.1 プール内の温度成層化実験

小型水プール実験装置を設計・製作して温度成層化実験を行い、プール内の温度場・速度場の情報を取得し、温度成層化発生機構について検討を行った。

また、光ファイバーを用いて、温度場・速度場を同時に計測できる計測センサーを開発した。開発した計測センサーの性能を把握するために、流動測定装置を製作し、流動測定実験を行った。

#### 3.2 プール内の温度成層化モデルの検討

3.1 で取得した水中の温度、速度等の結果について、CFD コード等を用いて、実験解析を行い、温度成層化モデルの検討を行った。

### 4. 研究実施分担

項目	原子力規制庁	早稲田大学
(1) プール内の温度成層化実験 温度成層化実験	◎ 実験	○ 設計検討
温度場・速度場同時計測センサーの開発	◎ 計測原理の確認 実験	◎ 原理検討
流動測定実験		
(2) プール内の温度成層化モデルの検討 温度成層化の確認計算	◎ 解析	○ 入力・モデル検討
温度成層化実験解析		
成層化モデルの検討		
(3) 研究のとりまとめ	◎	○

(◎ : 主担当、○ : 副担当)

### 5. 共同研究参加者

所属部局	本研究における役割
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 関根 将史 塚本 直史 金子 順一 増原 康博	主担当 技術サポート 技術サポート 技術サポート
学校法人早稲田大学理工学術院 先進理工学研究科 共同原子力専攻	

古谷 正裕 教授	主担当
同 招聘研究員	サポート
同 学生	サポート
同 学生	サポート

## 6. 研究実施工程

項目	R2 年度		R3 年度				R4 年度				R5 年度	
	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2
(1) プール内の 温度成層化実験	<ul style="list-style-type: none"> <li>計測装置の開発</li> <li>実験装置の設計・整備</li> <li>流動測定実験</li> </ul>											
			<ul style="list-style-type: none"> <li>小型水プール実験装置の設計・整備</li> <li>温度成層化実験</li> </ul>									
							<ul style="list-style-type: none"> <li>小型水プール実験装置の設計変更</li> <li>温度成層化実験</li> </ul>					
(2) プール内の 温度成層化モデルの検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>温度成層化の確認計算</li> </ul>											
			<ul style="list-style-type: none"> <li>温度成層化実験解析</li> </ul>									
							<ul style="list-style-type: none"> <li>温度成層化モデルの検討</li> </ul>					

## 7. 成果概要

本共同研究では、温度成層化発生機構の把握及び温度成層化の流体解析による予測性の向上を目指して、小型水プール実験装置を製作し、温度成層化実験を実施した。また、プール内の温度場・速度場の情報を取得できる光ファイバーを用いた温度場・速度場の同時計測手法を開発した。

温度成層化実験では、加熱部より位置が高い領域では加熱源からの入熱により昇温されるが、加熱部より低い領域では実験初期の温度が維持された。すなわち加熱部下端が温度成層化面となる。出力が高い場合は上部の温度が沸点に到達すると、容器内に気泡生成に伴い乱れが生じ、加熱部下端で停滞していた成層化面を押し下げ、下部の領域の温度が急昇し、温度成層化が解消された。一方で、加熱源の出力が小さい場合は容器内対流が成層化面に到

達せず、温度成層化面が加熱部下部のまま長時間維持された。また、実験では熱電対、サーモグラフィによる温度測定と粒子画像流速測定法による流速の測定を行ったことから、温度成層化に関する CFD コード等の妥当性確認に活用できる実験データを取得できた。

さらに、高空間分解能で温度場・速度場の情報を取得できる光ファイバーを用いた温度・流速同時計測センサーを開発し、空気流、液相流に対して実証試験を実施して計測性能を確認した。このセンサーは任意の場所において高分解能（約 2.5 mm 間隔）で温度と流速を同時に計測できる新技術であり、温度成層化等の温度・速度場を多次元計測することで CFD コード等の妥当性確認に活用できる。

この試験で得られた温度場・速度場の実験結果に対して、CFD コードを用いて解析を行い、温度成層化の評価にあたっては対象とするモデルや放熱を適切に与える必要があることを確認した。

また、以上の技術的知見を取得する過程で実施した実験及びデータ考察を通じて本共同研究に携わる職員の専門性を向上し、技術基盤維持に貢献することができた。

## 8. 公表成果一覧

- (1) Sekine, M., Furuya, M., “Development of measurement method for temperature and velocity field with optical fiber sensor”, *Sensors*, Vol. 23, Issue 3, p. 1627, 2023.
- (2) 関根将史、古谷正裕、「加熱源出力が水プール内の温度成層化過程に与える影響」、日本機械学会 2022 年度年次大会、S081-10、令和 4 年

## 9. 参考文献一覧

- (1) 関西電力株式会社、「美浜発電所 1,2 号炉の廃止措置計画変更申請について(審査会合における指摘事項の回答)」、第 8 回実用発電用原子炉施設の廃止措置計画に係る審査会合 試料 3-1、令和元年 8 月 27 日
- (2) Kim, S., Kim, D. E., Ryu, S. U., Lee, S. T., Euh, D. J., “Experimental investigation on the natural convection flow in pool boiling”, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 280, pp. 349-361, 2014.
- (3) Grazevicius, A., Kaliatka, A., Uspuras, E., “Numerical investigation of two-phase natural convection and temperature stratification phenomena in a rectangular enclosure with conjugate heat transfer”, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 52, pp. 27-36, 2020.

以上