

# 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 Phase2

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7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を確認するために必要とされ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し、取得していく研究が重要である。また、そのような知見を有する人材の育成は、今後の規制活動を行う上で必須である。

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・プール内の水中で発生する温度成層化がある。温度成層化とは、異なる層の密度差によって、温度が高い層が上側に、温度が低い層が下側に層状に分布する状態である。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ことから、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、保守的な条件を設定することで評価を実施している。しかし、プール内では温度成層化や温度成層化をもたらす多次元の流動場が生じる場合があり、その影響を把握できていない。

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、水温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、その CFD 解析は大局的な温度推移を予測できるが、測定結果と比べて高温層と低温層とが実験より早期に混合され、均一温度になるという課題が指摘された。温度成層化は日常生活にも見られる現象ではあるが、発熱体を含む水プール内の自然対流を対象とした CFD 解析では、温度成層化現象時の温度分布予測に改善の余地があると考えられる。

そこで、温度成層化を適切に評価し、事故時の影響評価や緩和策の効果を適切に評価するための知見を取得するため、早稲田大学と共同研究「原子炉施設のプール内の温度成層化機構に関する研究 Phase2」(以下、本共同研究という。)を令和5年8月～令和7年3月に実施した。前フェーズの共同研究<sup>(4)</sup>では、温度成層化の発生に着目し、水プール中に発熱体が存在する温度成層化実験装置を設計・製作し、可視化技術を工夫して温度分布、速度分布等の実験データを取得するとともに、光ファイバによる温度・流速の同時計測手法を開発した。

本共同研究では、前フェーズで得られた知見を踏まえ、温度成層化機構の把握及び温度成層化の CFD 解析による予測性の向上を目指して、温度場・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した。

## 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
  - ・ 温度成層化の各フェーズに着目した温度成層化実験
  - ・ 温度成層化実験への光ファイバセンサの適用
- (2) プール内の温度成層化モデルの検討
  - ・ 温度成層化実験の流体解析
  - ・ 温度成層化の影響評価手法の検討

## 3. 実施方法

### 3.1 プール内の温度成層化実験

プール内の温度成層化の発生、維持、解消の各フェーズに焦点を当て、境界条件を制御した上で実験を行った。また、従来の測定手法にくわえて、高分解能多点温度・速度測定が可能な光ファイバセンサを適用し、詳細な温度場と流動場の分布計測を行った。プール内の温度成層化時の温度場・速度場の実験データを取得し、プール内の温度成層化機構について考察を行った。

### 3.2 プール内の温度成層化モデルの検討

3.1 で取得した実験データを用いて、CFD 解析のベンチマークを実施することで評価手法の適切性について検討するとともに、温度成層化時のプール水温度等の評価モデルについて検討を行った。

## 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 温度成層化の各フェーズに着目した温度成層化実験	◎	○
温度成層化実験への光ファイバセンサの適用	実験研究、装置整備	実験サポート
(2) プール内の温度成層化モデルの検討 温度成層化実験の流体解析	◎	○
温度成層化の影響評価手法の検討	解析研究	入力・モデル検討
(3) 研究のとりまとめ	◎	○

(◎：主担当、○：副担当)

## 5. 共同研究参加者

氏名	所属部局・職名	本研究における役割
関根 将史	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 副主任技術研究調査官	主担当
塚本 直史	同部門 上席技術研究調査官	技術サポート
金子 順一	同部門 主任技術研究調査官	技術サポート
増原 康博	同部門 技術参与	技術サポート
古谷 正裕	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 教授	主担当

## 6. 研究実施工程

項目	R5 年度			R6 年度			
	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
(1) プール内の 温度成層化実験		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     ・温度成層化実験（光ファイバを用いた温度成層化実験等）                 </div>		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     ・温度成層化実験の実施及びデータ分析                 </div>			
(2) プール内の 温度成層化モデルの検討		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     ・温度成層化の流体解析                 </div>		<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">                     ・温度成層化の流体解析                      ・温度成層化の影響評価手法の検討                 </div>			

## 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、小型温度成層化実験装置の加熱源出力、加熱源位置、容器サイズ等をパラメータとした温度成層化実験を実施した。また、実験に対して CFD 解析を実施することで評価手法の適切性について検討するとともに、温度成層化時のプール水温度等の評価方法について検討を行った。

温度成層化実験から、温度成層化の界面は加熱源の出力や位置に依らず、加熱部下端付近で生じることを明らかにした。また、温度場・速度場の実験結果から、高温領域内には巨視的な流れが生じる渦領域（Region 1）と流速の小さな淀み領域（Region 2）が存在し、低温

層内はほぼ流れのない淀み領域 (Region 3) となっており、本実験体系におけるプール内の温度成層化は鉛直方向に 3 領域から構成されていることを明らかにした。出力が高い場合は、沸騰が発生すると流れの駆動力が増大し、渦領域 (Region 1) が高温層の淀み領域 (Region 2) 全体にまで広がり、その後、低温層 (Region 3) に広がることで温度成層化が消散された。出力が低い場合は、容器内対流が温度成層化界面に到達せず、温度成層化界面が加熱部下端付近のまま長時間維持された<sup>(成果(1))</sup>。また、本実験の範囲ではプールの容器幅、容器奥行を増加させた場合においても同様に温度成層化発生時は鉛直方向に 3 領域に分類された。さらに実験では熱電対と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、光ファイバによる温度分布、速度分布の測定を行い、温度成層化に関する CFD 解析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。

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 解析を実施し、温度成層化の評価にあたっては対象とするメッシュなどの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<sup>(成果(1))</sup>。また、温度勾配に基づき、勾配が小さい上部のモデル化は粗く、勾配が大きい加熱部下端付近のモデル化は詳細に設定することなど、実機評価に向けた解析条件の設定などの知見が得られた。

さらに、使用済燃料プールの温度成層化時のプール水温度等の評価方法について検討を行った。実験結果から加熱部下端付近の高さ位置は重要な指標であり、加熱部下端付近を中心に上部領域は高温、下部領域は低温に別けられることが分かった。その結果を踏まえると、これまで安全評価等で用いられている崩壊熱と蒸発量を一定とした一点近似計算では、加熱部下端より下の領域の保有水量を考慮しないことで、温度成層化によって加熱部下端より下の領域の水が温度上昇せず、冷却に寄与できないことを考慮でき、温度成層界面が下降する際には保守的に評価することが可能である<sup>(5)</sup>。

## 8. 公表成果一覧

- (1) Sekine, M., Tsukamoto, N., Masuhara, Y., Furuya, M., "Experimental Study on Thermal Stratification in Water Pool with Vertical Heat Source", *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 207, 110681, 2024.  
[doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110681](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110681)
- (2) Sekine, M., Furuya, M., "A novel method for measuring temperature and velocity fields with metal-coated optical fiber", *ISMTMF 2023*, 2023.
- (3) 関根将史、塚本直史、増原康博、古谷正裕、「鉛直加熱源を有する水プール内の温度成層化機構の分析」、日本原子力学会 2024 年秋の大会、令和 6 年。

## 9. 参考文献

- (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 資料 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.  
[doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.09.040](https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.09.040)
- (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.  
[doi.org/10.1016/j.net.2019.06.022](https://doi.org/10.1016/j.net.2019.06.022)
- (4) 原子力規制委員会原子力規制庁、学校法人早稲田大学、「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」、令和 5 年  
<https://www.nra.go.jp/data/000452301.pdf> (2025 年 8 月 29 日確認)
- (5) 関根将史、「使用済燃料プールにおける温度成層化の形成と消散メカニズムの解明」、早稲田大学、博士論文、令和 6 年

以上