

博士論文（要約）

論文題目 圧力抑制室における温度成層化現象の発生と消滅の

メカニズムに関する研究

(Research on Mechanisms of Occurrence
and Disappearance of Thermal Stratification
in Suppression Chamber)

氏名 山内 大典

論文の内容の要旨

論文題目 圧力抑制室における温度成層化現象の発生と消滅の
メカニズムに関する研究
(Research on Mechanisms of Occurrence
and Disappearance of Thermal Stratification
in Suppression Chamber)

氏 名 山内 大典

福島第一原子力発電所の3号機の事故進展において、初期格納容器圧力の早期上昇の原因として、圧力抑制室内で温度成層化が発生したことが考えられているが、そのメカニズムについては十分な知見が得られていなかった。また、他の原子力発電所においても、温度成層化が発生することで設備の健全性や運転に障害がある可能性があり、温度成層化のメカニズムを理解し予測できることは、プラントの安全性に繋がる知見となると考えられた。これらをモチベーションに、温度成層化のメカニズムを理解し、最終的に温度成層化のクライテリアを構築することを目標に研究を行った。

既往研究を整理した結果、様々な実験体系の中で温度成層化が発生していることがわかった。特に、凝縮によって配管内に水が逆流し、プールへの水の排出が繰り返されるチャギング現象が発生している間には温度成層化が発生しないこと、温度成層化のクライテリアとして浮力と運動量のバランスが寄与することが重要な知見として得られている。しかし、チャギングの条件についての理解が不十分であること、グローバルパラメータのみで浮力と運動量のバランスが定義できていないこと、マルチホールスパージャーでの評価方法がないこと、形状・スケーリングを考慮した実スケールへの適用性の議論が不十分であることが、不足点として挙げられた。そこで、温度成層化のクライテリアの構築のために、チャギングが発生する場合の条件の整理、チャギングが発生しない場合のグローバルパラメータを用いた温度成層化の条件の整理を行い、福島第一原子力発電所3号機のトーラス型圧力抑制室への適用性の検討を行った。

チャギングの発生条件の整理を目的に、SIETにて行った追加実験の結果から検討を行った。チャギングが停止する温度は、スパージャーの形状や蒸気供給条件により異なる結果となった。また、チャギングが発生している期間とチャギングの停止後の期間に

において、それぞれのケースによってスパージャー内の水面到達位置が異なる結果となった。スパージャー内の水面到達位置が異なるあるいは変化すると、同じ蒸気流量でも蒸気質量流束が変化することから、水面到達位置に着目した蒸気質量流束とプール水温度によってチャギングが発生する条件をマッピングした。

チャギングが発生する条件のマップをスパージャーの穴径に分けて議論をした結果、 $\phi 25\text{mm}$ の穴径の場合、同じ蒸気質量流束にあるにも関わらず、チャギングが停止するときのプール水温度が異なる場合があることが確認された。この挙動を蒸気泡の凝縮様式に着目して分析した結果、同じチャギングでも IC の凝縮様式により発生するものと、ECDB の凝縮様式により発生するものがあることが示唆された。この IC 型のチャギングと ECDB 型のチャギングは、マップ上許容される蒸気質量流束とプール水温度の領域が異なっていた。従って、プール水温度が上昇する中で、IC 型チャギングと ECDB 型チャギングのどちらの様式に属するかによって、チャギングが停止する温度が異なることが示唆された。

また、小型 2 次元プール、トーラス型プールにおいてチャギングが発生しなかった理由は、スパージャー穴径が小さく、サブクール度が小さいことにあると推定された。

温度成層化の発生と消滅について、都度実験を必要としないグローバルパラメータのみで評価できるモデルの構築を目指し検討を行った。

蒸気凝縮モデルでは、球形の蒸気泡を仮定し、蒸気質量流束、サブクール度、配管径の 3 つのグローバルパラメータのみで表せる、蒸気泡の長さや蒸気泡の生成周波数を導出した。このモデルの調整パラメータの決定と妥当性検証のため、1F3 排気管と同じ穴径のスパージャーによる蒸気凝縮実験を行い、調整パラメータを決定した。実験値との比較においては、蒸気の凝縮挙動にばらつきもあり蒸気凝縮モデルで実験値を正確に再現できてはいないが、定性的には再現することができた。

次に、修正 Richardson 数のモデルを定義した。このモデルでは、①ノズル下層で密度成層を保つ力と、②ノズル直下で凝縮振動によって密度成層を直接破壊する力と③ノズル遠方で対流によって密度成層を破壊する力に注目した。それぞれを構成する力によりモデルを構築した。定義した修正 Richardson 数の妥当性を確認するため、①ノズル下層で密度成層を保つ力には、密度差を逆転させるだけの力としてノズル下層の浮力を設定した。②ノズル直下で凝縮振動によって密度成層を直接破壊する力は、鉛直下向きのスパージャーの場合に発生し、凝縮振動によってプール水に与える力を設定した。③ノズル遠方で対流によって密度成層を破壊する力には、凝縮によってプール水に与える力と凝縮しない気体がプール水に与える力を設定した。凝縮によってプール水に与える力には、蒸気泡の浮力が与える力、凝縮水とプール水の密度差による浮力を設定した。また、水平向きのスパージャーの場合には、凝縮振動によってプール水に与える力を加えた。凝縮しない気体がプール水に与える力は、凝縮が不十分な水蒸気あるいは非凝縮

性ガスによってプール水が受ける力を設定した。

小型2次元プールを用いた流れ場と温度の計測を行い、モデル化した各項の想定が妥当性かを確認し、影響ファクターおよび各力の係数を決定した。妥当性確認の結果、密度成層の破壊に関してノズル遠方の対流を考慮することの妥当性と構成する力の各項の寄与については確認できた。モデルに設定する影響ファクターと各係数について、実験により得られた壁近傍下降流の最大速度を再現する値を設定することができた。ただし、これらについては今後さらなる検討が必要との課題が残った。このプールで発生した温度成層化現象より、修正 Richardson 数が $0.1 \sim 0.01$ より大きくなると温度成層化が発生し、小さくなると温度成層化が消滅することが示唆され、温度成層化のクライテリアを構築することができた。

温度成層化のクライテリアについて、トーラス型の幾何形状や実スケールに対して適用可能であるかを検討した。

トーラス型プールを用いた蒸気凝縮実験により、流れ場と温度成層化の関係を確認した。実験の結果、プール水上部の流れのある部分と下部の流れのない部分が確認された。プール水上部の流れのある部分では、プール水面付近では反時計回りに、その下部では時計回りの流れが形成されていることが確認された。プール水上部の流れのある部分と下部の流れのない部分のインターフェースは温度成層化の成長するに従って上昇し、消滅するに従って下降することが確認された。また、インターフェースの存在する位置に密度成層が形成されることが確認された。これらのトーラス型プールでの熱流動挙動は、小型2次元プールで得られた熱流動挙動と一致した。従って、トーラス型幾何形状のプールにおいても、排気管近傍の熱流動挙動で規定されることが示唆された。

また、修正 Richardson 数の評価を行った結果、温度成層化が発生している期間では、修正 Richardson 数は 0.1 より大きな値となった。温度成層化が徐々に発達するのに従って、修正 Richardson 数が上昇し、減圧以降は修正 Richardson 数が単調に減少し温度成層化が発生しにくい環境に変わっていくことが表現された。従って、トーラス型プールを用いた本実験においても、前章で求めた修正 Richardson 数と同じく、 $0.1 \sim 0.01$ のところに温度成層化のクライテリアがあることが確認された。

SIET実験より広いプールの円筒型タンクを用いた蒸気凝縮実験により、温度成層化のクライテリアであるチャギングと修正 Richardson 数がより大きなスケールに適用できるか確認を行った。実験の結果、SIET実験と同様に、チャギングが発生している期間には温度成層化は発生せず、チャギング停止後に温度成層化が発生することが確認された。また、修正 Richardson 数を評価した結果、温度成層化が発生している期間は修正 Richardson 数が 0.1 より大きく、温度成層化が発生する状況にあることが確認された。従って、この円筒型プールでも温度成層化のクライテリアが適用できることが示唆された。円筒型プールは、修正 Richardson 数の検証を行った小型2次元プールやトーラス型

プールのスケーリングの6~30倍程度の差があるものの、温度成層化のクライテリアが適応出来た。実際のS/Cと円筒型プールのスケーリング差は約6倍であるため、温度成層化のクライテリアが適応できる可能性は高いと推定された。

温度成層化のクライテリアを用いて、1F3のS/Cでの温度成層化を評価した。S/C内の非凝縮性ガス分圧と飽和水蒸気分圧により、格納容器圧力上昇中のサブクール度を求めた。このサブクール度に注目し、チャギングと修正Richardson数の評価により、温度成層化の発生について推定と格納容器圧力実測値の挙動の説明を行うことができた。

以上により、温度成層化のクライテリアを、チャギングと修正Richardson数によって整理し、得られたクライテリアは実機に適用可能であるとの結論が得られた。