

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289350

研究課題名(和文) 過酷事故評価のためのサプレッションチャンバー温度成層化及び成層化破壊現象解明

研究課題名(英文) Thermal stratification at the suppression chamber for severe accident analysis

研究代表者

岡本 孝司(okamoto, koji)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80204030

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：福島第一原子力発電所事故時に発生したと考えられる、サプレッションプール内の温度成層化現象とその破壊現象を解明する事を目的として研究を実施した。まず、形状効果を確認するため、実機と同様のトラス状容器への蒸気注入と、模擬実験用矩形容器への蒸気注入を比較し、同様の自然対流流動パターンが生成されることをPIVにより確認した。次に、実験によって、蒸気凝縮による運動エネルギー付与と、温度差による自然循環力を評価した。密度差に起因する浮力と、運動量の比であるリチャードソン数を定義した。この結果、リチャードソン数によって、温度成層化の開始、及び破壊条件を評価する事ができる事を示す事が出来た。

研究成果の概要(英文)：The thermal stratification phenomena had been observed at the Suppression Pool of Fukushima-Daiichi NPP. The mechanism of the stratification had been evaluated experimentally. In order to confirm the geometrical effect, slab-type pool and torus-type pool had been experimentally investigated using PIV, showing the similar natural circulation. Then, the momentum caused by the steam condensation and the natural circulation force had been experimentally evaluated using the high-speed visualization. Finally, the Richardson number was defined, which was a ratio between the buoyant force and momentum force. Using the Richardson number, the occurrence and disappearing of the thermal stratification had been well explained.

研究分野：原子力安全工学

キーワード：原子力エネルギー 流体工学 熱工学

1. 研究開始当初の背景

福島第一原子力発電所の事故時挙動は、様々な機関による評価が行われているが不明点も多い。特に3号機に置いては、サブレーションチャンバー(SC)内の温度成層化などが取りざたされている。このなかでも、炉心側の安全弁(SRV)を開いた後に、SC圧力が下がるという物理的に不可思議な挙動は解明されていない。これらの現象を評価する事によって、原子力発電所の事故時の挙動、特にSCの安全への寄与を確認するとともに、その挙動が事故人点に与える影響などを評価する事が重要である。

2. 研究の目的

本研究では、実験及び解析により事故時SC内の挙動を評価し、事故時の格納容器挙動を明らかにする事により、原子力安全に大きく寄与しようとするものである。

SCの温度成層化に着目し、その温度成層化を支配する因子を明らかにするとともに、実機やその他のプラントにおける安全に関して評価を進めようとするものである。

3. 研究の方法

トラス部にける温度成層化状況の評価を行う具体的には、1/20スケールの実験装置を製作し、温度成層化状況を再現する。実機の温度は高温になることから、実験装置を減圧し、0.15気圧(飽和温度約40度)における温度成層化条件を評価する。これらの実験を解析コードによっても評価し、複雑体系における温度成層化現象を評価できることを確認するとともに、実機における温度成層化現象を予測する。

トラス型の大型実験装置だけではなく、温度成層化の基礎的な知見を得るために、スラブタイプの温度成層化試験を実施する。これらの実験可視化結果から、流動を評価し、温度成層化を決定づける無次元数を確定する。この無次元数を評価する事によって、温度成層化の発生と破壊を評価する。

4. 研究成果

a) トラス試験

福島第一原子力発電所2号機の圧力抑制室の1/20スケールのトラス型圧力抑制室(大円直径:1.5m、小円直径:0.4m)に2号機RCICと同様の直管形スパージャー(内径:14.7mm)を設置し、蒸気凝縮実験を行った。ドライウェルへの接続を考慮し、1/20ドライウェル体積のタンクを圧力抑制室に接続した。圧力抑制室周方向に8つの熱電対ツリーを設置し、それぞれの位置で高さ方向の温度分布を計測した。

流れ場を計測するため、スパージャー位置から4分の1周進んだ位置に設置したプール底部よりレーザーシートを挿入し、水中の微小気泡をトレーサとして、ハイスピードカメラにより周方向の流れの撮影を行った。ハイスピードカメラ画像を画像解析することにより、圧力抑制室周方向の流れを計測した。

実験は圧力抑制室の約半分まで水で満たし、初期圧力16.75kPaの負圧環境下で、平均質量流量0.71kg/sにて蒸気を排出した。温度成層化が消滅するときの挙動を確認するため、実験開始後240分から徐々に減圧を行った。

b) 結果

Fig. 1にスパージャー近傍で計測した温度変化を示す。実験開始直後は、ボイラー圧力と圧力抑制室圧力の差が大きく、大量の蒸気が圧力抑制室に放出されるため、プール水全体の温度が上昇する。15分後頃より圧力が釣り合い、ボイラーから飽和蒸気の気化分が圧力抑制室に流れるようになってからは、安定した蒸気凝縮が行われた。安定した凝縮の様子は、Chanらの直接接触凝縮レジームマップでいう、Extarnal Chug with Detached Bubble (ECDB)の挙動に似ていた。この時間から垂直方向に対して温度成層化が発生した。トラスの周方向のどの位置においても、垂直方向の温度分布はFig. 1とほぼ同じであり、周方向に対してはほぼ時間遅れなく温度上昇している様子が確認されていた。

減圧を開始した240分からは、徐々に温度成層化が消滅していった。240分からプール底面から100mmの温度が、280分から50mmの温度が、300分からは10mmの温度が急激に上昇することが確認された。

Fig. 2に高さ毎の温度分布と周方向速度分布を示す。圧力抑制室の流れは、実験中、基本的に上部は反時計回りに、下部は時計回りに流れていることが確認できる。また、減圧を開始する240分までは最下層の速度0の領域が徐々に上方まで拡大する様子が確認された。

c) トラス試験の評価

最下層の速度0の領域と時計回りの下部の流れのインターフェースは、温度成層化が成長する期間で徐々に上方に移動し、温度成層化が消滅していく期間で、下方に移動している。また、このインターフェースはFig. 2の温度分布の中で隣接する熱電対間の温度差がもっとも大きい区間に位置していることがわかる。従って、インターフェース付近で温度境界を形成していると考えられる。このインターフェースが上下することにより、温度境界が移動するため、温度成層化が成長したり消滅したりするものと考えられる。

この結果はSongらの小型2次元プールでの実験結果と一致しており、3次元のトラス型プールと小型2次元プールの現象に差が

ないことを示唆している。つまり、温度成層化現象はノズル周りの熱流動挙動により規定されるとの知見が得られた。

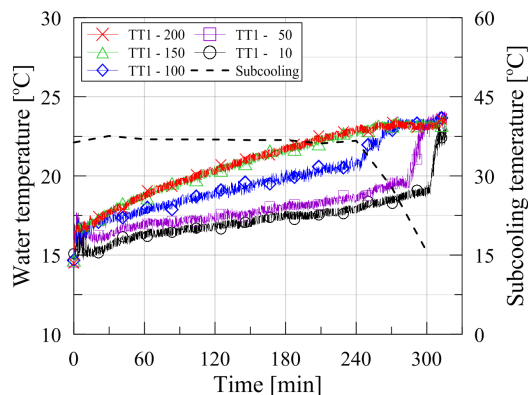


Fig. 1 スパージャー近傍の温度変化 (TT1-XX、XXはプール床面からの高さ)

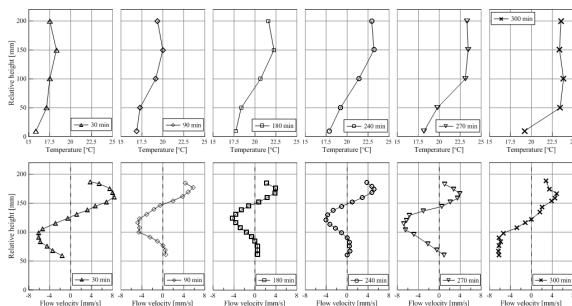


Fig. 2 高さ毎の温度分布(上) 周方向速度分布(下)

d) 無次元数評価

実験結果を元に浮力と慣性力の比であるリチャードソン数を定義する。流動場の観察結果から、温度成層化によって生成される密度成層場の強さを浮力項で表し、その成層場と流動による慣性力の大きさによって、温度成層化が発生するか破壊されるかが決まると考えた。ここでは、浮力項は、最下部の温度と、プレナムの圧力で決定される飽和温度との差で決まる浮力とする。また、浮力の方向は鉛直方向であるため、鉛直方向に働く運動量を考察する。具体的には、直接接触凝縮において、ノズル先端から蒸気気泡が振動しながら凝縮しているが、この振動により、流体に運動量を加えられる。この凝縮振動による鉛直方向の運動量をまず考慮する。次に、蒸気が凝縮したノズル先端では、飽和温度の液体となっており、周囲流体との温度差がある場合、この温度差によって自然対流が発生する。また、サブクール度が小さくなり、蒸気が凝縮しなくなると、蒸気がそのまま浮力によって上昇する。この蒸気上昇流によっても、SC内に対流が生ずる。自然対流と蒸気上昇流による対流は、ノズル近傍においてはその向きが鉛直上側であり、成層界面との相互作用は小さい。一方、これらの対流によって、SCの別の場所において、必ず加工りゅうが

生成する事が実験的に確認されている。この対流による下降流によって、成層界面に運動量が付与され、成層界面と相互作用を行う。下降流の運動量が十分に小さければ、成層化は継続するが、下降流の運動量が大きくなってきた場合には、成層界面を破壊する。つまり、この場合、自然対流及び蒸気上昇流によって形成される対流に依る下降流の運動量を考慮する事になる。自然対流の駆動力及び蒸気上昇流の駆動力は密度差から物理的に定まるが、その駆動力によって発生させられる下降流は、大きくSCの形状に依存する。

その結果として、修正リチャードソン数、浮力に対する、蒸気振動による慣性力と対流による下降流の慣性力の和の比をとる事で定義する。

実験データを修正リチャードソン数で整理する事によって、0.1を境として、温度成層化の発生及び破壊をまとめる事ができる事を示す事が出来た。

実機に適用する事によって、実機においても修正リチャードソン数で、温度成層化の有無を定量的に把握する事ができる事を示した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3件)

D.Song, N. Erkan, B. Jo and K. Okamoto, Relationship between thermal stratification and flow patterns in steam-quenching suppression pool, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.56, (2015), pp.209-217 (査読有)

J. Cai, B. Jo, N. Erkan and K. Okamoto, Effect of non-condensable gas on thermal stratification and flow patterns in suppression pool, Nuclear Engineering and Design, Vol.300, (2016) pp.117-126 (査読有)

D. Yamauchi, B. Jo, N. Erkan and K. Okamoto, Verification of thermal stratification characteristics using a scaled-down suppression pool of the Fukushima Daiichi nuclear power plants, Mechanical Engineering Letters, Vol.2 (2016), 16-00098 (査読有)

[学会発表](計 3件)

山内大典、岡本孝司、蒸気凝縮モデルを用いた圧力抑制室内温度成層化の発生条件の検討、日本原子力学会2016春の年会、2016年3月26日~28日、東北大学(宮城県仙台市)

D. Yamauchi, N. Erkan, B. Jo and K. Okamoto, Study on the disappearing of thermal stratification at the suppression chamber, 10th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operation and Safety, December 17, 2014, Okinawa Convention Center (Okinawa, Ginowan)

高橋真二、岡本孝司、サプレッションチャンバーの温度成層化現象に関する研究、日本原子力学会 2014 春の大会、2014 年 3 月 26 日～28 日、東京都市大学(東京都世田谷区)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

岡本孝司 (Okamoto, Koji)

東京大学大学院・工学系研究科・教授

研究者番号：8 0 2 0 4 0 3 0