

令和 4 年 4 月 30 日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15473

研究課題名（和文）自然循環流を利用した炉心冷却系の水素ガス流入時のロバスト性評価

研究課題名（英文）Evaluation of robustness of reactor core cooling system with natural circulation to hydrogen gas

研究代表者

山本 泰功（Yamamoto, Yasunori）

北海道大学・工学研究院・助教

研究者番号：10800906

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000 円

研究成果の概要（和文）：電源を必要としない静的炉心冷却系である非常用復水器（IC）を模擬した実験ループを用いて、非凝縮性ガスが流入した場合の影響を評価した。非凝縮性ガスの滞留による過渡的な挙動から定常状態に至るまでのICの冷却性能に関する実験データを取得した。また、非凝縮性ガスが主に滞留する下降管部の配管径を変えた実験を実施し、非凝縮性ガスが滞留している区間の長さで実験データを整理すると管径の影響はほとんど見られないことを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ICのような自然循環を利用した静的冷却系は、次世代炉やSMRといった小型炉の設計にも採用されており、今後の原子力発電の安全利用においても非常に重要である。通常、ICは炉心損傷の防止のために早い段階での使用が想定されるが、事故が進展した場合の作動限界やその後の冷却性能への影響についても理解しておくことが望ましい。本研究成果は、事故の条件を想定した非凝縮性ガスの流入による影響を理解するための基礎的な知見を提供するためのものである。

研究成果の概要（英文）：Passive core cooling system, Isolation condenser (IC), was simulated with an experimental loop and effect of inflow of non-condensable gas on the loop was evaluated. The experimental data regarding cooling performance of IC with non-condensable gas injection was obtained, which includes behavior from transient phase to steady state condition. Besides, experiments were performed to evaluate the diameter dependence of the downcomer where non-condensable gas mainly accumulated. As a result, it was confirmed that the impact of the downcomer diameter was small and the experimental data depended on the length of a section in which non-condensable gas accumulated.

研究分野：シビアアクシデント、原子力熱流動

キーワード：静的炉心冷却系 自然循環 凝縮熱伝達 非常用復水器 非凝縮性ガス 水素

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、福島第一原子力発電所の1号機から4号機において、外部電源及び非常用電源が全て失われ全交流電源喪失の事態に陥った。これにより全交流電源喪失への対策の重要性が再認識された。

1号機には、作動のために電源を必要としない静的炉心冷却系である非常用復水器（IC）が設置されていたが、津波到達後に運転員が再起動を試みた際には起動に失敗した。これは隔離弁のフェイルクローズ設計によるものであるが、この時点ではすでに炉心露出に至っていた可能性が指摘されている。そのため、仮に隔離弁が開いていたとしても、ジルコニウム・水反応によって発生した水素の流入によってICによる炉心冷却が成立しなかった可能性がある。ICは本来、炉心損傷の防止のために早い段階で使用されることが想定される。しかし、シビアアクシデントの状況下では、福島第一の事例のように使える可能性があるかと判断されれば炉心冷却手段として活用される可能性も考えられる。

ICは、既設のBWRだけでなくESBWR等の次世代炉やSMRといった小型炉の安全設計にも採用されており、今後も原子力安全において重要な役割を担うことが期待されている。福島事故の経験を踏まえて、本来の使用条件のみでなく、シビアアクシデント条件を含めてICの作動限界や水素影響について理解することは重要であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、IC配管へ水素が流入することによる自然循環特性及び冷却性能への影響を実験的に評価することである。最大7MPa程度の高圧蒸気を供給可能なアキュムレータに接続した自然循環ループを用いて水素影響を模擬するためにヘリウムの注入実験を実施した。また、配管径の影響を評価することを目的として、下降管の配管径を変えた条件での実験も実施した。

3. 研究の方法

実験装置の概略図を図1に示す。電気ヒーターで生成させた蒸気をアキュムレータから上部に設置した熱交換器へ供給し、凝縮水が重力でアキュムレータへと戻る自然循環ループである。ヒーター出力は、9kW一定の条件で実験を実施した。主要な測定パラメータは、ループ内の各地点の圧力、自然循環流量、伝熱管内及び外壁面の温度分布である。

ヘリウムの注入配管は、上昇管の下部に接続し、マスフローコントローラを用いて注入量を制御した。また、配管径の影響を評価するために、ヘリウムが滞留する下降管区間の配管径は10.7mmと19.3mmの2ケースで実験データを取得した。

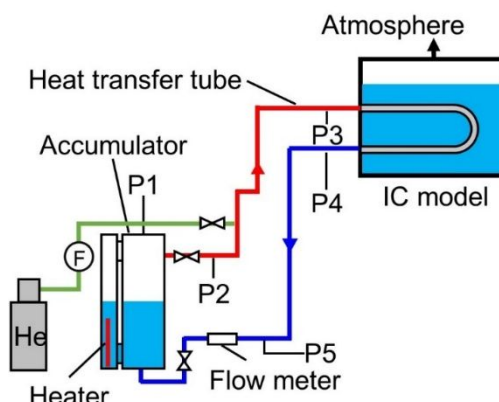


図1. IC 模擬実験装置の概略図

4. 研究成果

図2にヘリウム注入以降の時間帯を含む測定パラメータの時系列データの例を示す。ここでは、ヘリウム注入前に長時間運転し、ヒーターからの入熱とループ全体の除熱が釣り合う定常状態に達したことを確認してからヘリウム注入を実施した。注入開始直後に自然循環流量が低下し、圧力と温度が上昇し始めている。これは、注入したヘリウムが下降管から伝熱管にかけて滞留し、蒸気の伝熱面積が減少したことで除熱量がヒーターからの入熱量を下回ったためであると考えられる。ここで示している差圧は、下降管区間の上部と下部の差圧であり、静止状態では下降管の水頭に対応する。流れがある状態では圧力損失の成分が含まれるが、水頭と比べて小さいため、下降管の水位の目安となる。ヘリウム注入直後には、自然循環流がほとんどなくなり、アキュムレータの水面位置付近まで下降管水位が低下した。

その後、運転を続けると自然循環流量が徐々に回復し、圧力上昇も緩やかとなり再び定常状態に達した。これは、滞留したヘリウムが圧力上昇により圧縮され、結果として伝熱管内に占める体積割合が低下して蒸気の伝熱面積が確保されたためであると考えられる。また、下降管水位も流量の増加とともに再び上昇しており、この水位上昇は流量の増加に伴う自然循環ループ全体の圧損の増加に対応している。

図3に定常状態の圧力のヘリウム注入量依存性を示す。ヘリウム注入量が多くなるほど圧力が上昇する傾向が見られた。これは、ヘリウム注入量が多くなるほど、伝熱管における蒸気の伝熱面積を確保するためにより高い圧力で気体を圧縮させる必要があるためである。実機プラントでは、炉内を一定の圧力以下に下げることで可搬設備等を用いた定圧注入が可能となるため、ICの冷却性能を考える上で定常圧力も重要な情報であると考えられる。

次に、ICの配管径の影響を評価するために、ヘリウムが滞留する下降管の配管径を10.7mm

から 19.3mm に拡大して実験を行った。図 4 に配管径を変えた条件を含めた定常圧力のヘリウム注入量依存性を示す。配管径が大きい条件では、ヘリウム注入量当たりの定常圧力の上昇が小さくなっていることがわかる。これは、下降管の容積が大きくなったことで、下降管部に滞留できるヘリウム体積が増加し、伝熱管領域に影響を及ぼしにくくなったためである。図 5 は、配管の断面積の違いを考慮するために、横軸をヘリウムが滞留した区間の長さで実験データを整理したものである。ここで、下降管の水面位置は下降管区間の差圧データ、伝熱管中にヘリウムが存在する境界は伝熱管表面の核沸騰の終了位置の観察によって評価した。ヘリウムが滞留した区間の長さで実験データを整理すると定常圧力のヘリウム影響に配管径の影響は見られなかった。

これらの結果から、IC 配管に流入した水素は炉心へ戻ることなく伝熱管の凝縮完了位置以降に滞留し、伝熱管内の凝縮熱伝達の阻害を通して IC の冷却性能や定常圧力に影響を及ぼす可能性が示唆された。

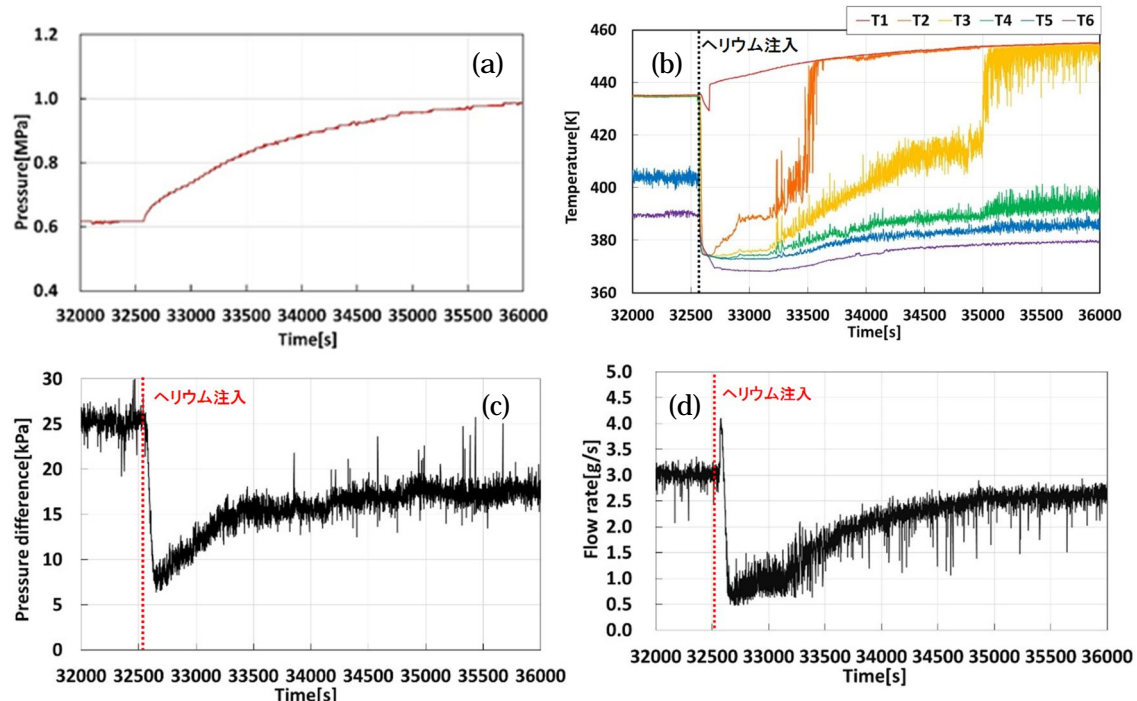


図 2. He 注入後の時系列データ ((a)圧力、(b)伝熱管内温度、(c)下降管区間の差圧、(d)流量)

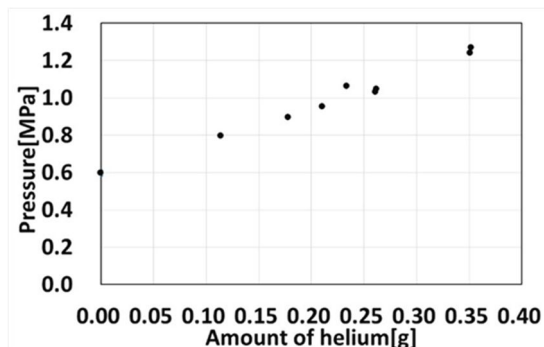


図 3. 定常圧力の He 注入量依存性

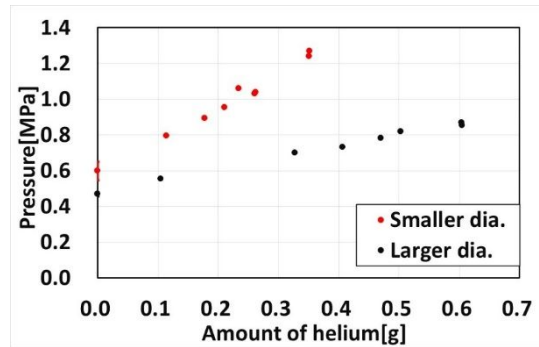


図 4. 定常圧力への配管径の影響

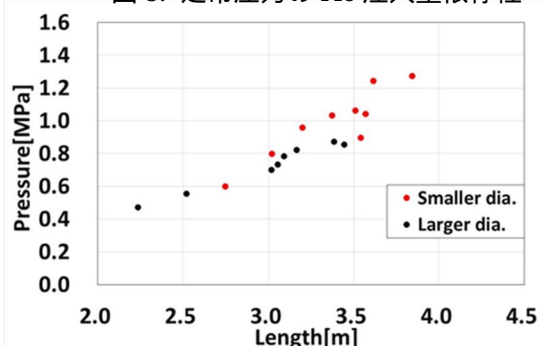


図 5. 定常圧力と He が滞留した区間長さの関係

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計9件(うち招待講演 0件/うち国際学会 3件)

1 . 発表者名 T.Takada, Y.Yamamoto, K.Ono
2 . 発表標題 Effects of non-condensable gas on characteristics of natural circulation flow of isolation condenser
3 . 学会等名 28th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE28) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Y.Yamamoto, M.Mori, K.Ono, T.Takada
2 . 発表標題 Experimental study of the effect of hydrogen inflow on passive core cooling system with natural circulation flow
3 . 学会等名 ASME 's POWER and Nuclear Engineering powered by ICONE Virtual Conference (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 K.Ono, Y.Yamamoto, M.Mori, T.Takada
2 . 発表標題 Experiment and analysis on isolation condenser simulator using pressurized steam
3 . 学会等名 ASME 's POWER and Nuclear Engineering powered by ICONE Virtual Conference (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 高田 哲也、山本 泰功、小野 考祐
2 . 発表標題 非凝縮性ガス存在下における非常用復水器の自然循環特性の評価
3 . 学会等名 日本原子力学会2021年春の年会
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 小野 考祐、山本 泰功、高田 哲也
2 . 発表標題 自然循環ループを用いた高圧実験と再現解析
3 . 学会等名 日本原子力学会2020年秋の年会
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 山本 泰功、小野 考祐、高田 哲也
2 . 発表標題 非常用復水器の冷却性能に及ぼす非凝縮性ガスの影響の実験的評価
3 . 学会等名 日本原子力学会2020年秋の年会
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 山本泰功、森正義、高田哲也、小野考祐
2 . 発表標題 水素流入による静的炉心冷却系の自然循環流への影響
3 . 学会等名 日本原子力学会2020年春の年会
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 山本泰功、森正義
2 . 発表標題 水素流入時の非常用復水器の作動限界評価のための研究
3 . 学会等名 日本原子力学会2019年秋の年会
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 森正義、山本泰功
2. 発表標題 非常用復水器の流動抵抗に対する非凝縮性ガスの影響
3. 学会等名 日本原子力学会2019年秋の年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関