

機関番号：10101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06483

研究課題名（和文）福島第一原発および次世代炉の静的冷却系に与える非凝縮性ガスの影響評価

研究課題名（英文）Effects of noncondensable gas on passive cooling systems in Fukushima Daiichi and advanced reactors

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） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：非常用復水器（IC）は静的炉心冷却系であり、電源喪失時にも炉心冷却機能を担うことが期待できる。本研究では、ICを模擬した実験体系において、冷却能力を評価するために重要な蒸気流量、伝熱管内温度分布、圧力等の実験データを取得した。また、非凝縮性ガスがICの除熱能力へ及ぼす影響を評価するために、自然循環ループに対してヘリウムガスを注入できる実験体系を構築した。電気ヒーターによる入熱と伝熱管での除熱がほぼ釣り合った準定常状態で微量のヘリウムを注入すると配管内の圧力上昇と蒸気流量の低下が見られ、自然循環の駆動力の低下に起因する影響が顕著に見られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

福島原発事故を経験し、全交流電源喪失に備えた対策の重要性が再認識されており、ICのような静的炉心冷却系は有力な安全対策の1つである。事故の条件を含めてICの活用を考えた場合、福島第一原発1号機で問題となった水素の影響が懸念される。ICのシステム全体を模擬して水素影響を評価した実験データの公開文献はほとんどなく、本研究で得られたデータは、ICの水素口バスト性を評価するための重要な知見となることが期待される。

研究成果の概要（英文）： Isolation condenser (IC) is one of the passive core cooling system that can be used even when loss of power accident occurs. Experiments simulating IC were carried out to evaluate the cooling capability, where various parameters such as steam flow rate, temperature distribution in a heat transfer tube and pressure were measured. In order to evaluate effect of non-condensable gas on cooling capability of IC, injection section of helium gas to natural circulation loop was constructed. Pressure in the loop increased and steam flow rate decreased due to the reduction of driving force of natural circulation when helium was injected under quasi-steady state conditions.

研究分野：原子炉熱流動

キーワード：非常用復水器 凝縮熱伝達 非凝縮性ガス 自然循環

1. 研究開始当初の背景

非常用復水器（IC）は電源を必要とせず、炉心から上がってくる蒸気を凝縮させて重力で凝縮水を炉心に戻すことで炉心冷却機能を長期間維持することができる。そのため、静的安全設備として全交流電源喪失時にも炉心の冷却機能を担うことが期待できる。

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、東京電力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。1号機にはICが設置されており、そのような状況でも運転員が手動停止させるまでは、炉心冷却機能が維持できていたと考えられる。同日18時18分に弁を開けてICの作動を試みた際には、冷却水プールから蒸気が発生した後すぐに停止した。この時には、既に炉心が露出していたと考えられ、ジルコニウム・水反応によって発生した水素が伝熱管内での凝縮熱伝達や自然循環流の流れを阻害し、ICが運転不能な状態に陥っていた可能性がある。非常用復水器と同様の冷却システムは、ESBWRやAP1000などの先進的な原子炉設計にも採用されており、事故の条件を含めた安全対策として有効に活用して行くためには、炉心から発生する水素ガスに対するロバスト性を明らかにする必要がある。

ICのシステム全体を模擬した実験体系を用いて非凝縮性ガスの影響について評価した公開データはほとんど存在しない。福島第一原子力発電所1号機の事故の進展を大きく左右したICの不作動の原因を明らかにするためには、高圧蒸気を用いた模擬実験を実施し、実験事実に基づく評価を行う必要がある。

2. 研究の目的

福島第一原発1号機の事故原因究明のためには、炉心から発生した水素がICの動作に及ぼす影響について正しく理解する必要がある。また、ICを事故時の重要な安全対策の1つとして今後活用して行くためには、水素ガス混入時の影響を明らかにし、必要であれば対策を講じる必要がある。本研究では、ICの水素ロバスト性を評価するための実験的な知見を取得することを目的として、ICのシステム全体を模擬した実験体系で高圧蒸気を用いた模擬実験を実施した。

3. 研究の方法

実験装置はアキュムレータとICの伝熱管の模型部を組み合わせた図1のような構成となっている。伝熱管模型部は冷却水タンクとU字型伝熱管から構成されており、伝熱管には長さ1m、内径10.9mmのステンレス鋼の管が使用されている。また、冷却水槽の前面はポリカーボネート製であり、実験中に水槽内の様子を観察することができる。

実機のBWRではICが压力容器の上方に配置されており、压力容器内とIC装置内の水頭差を利用して配管内に自然循環流が生じる構造となっている。実験装置においては、このIC配管内の自然循環流を模擬するために、IC伝熱管模型部を压力容器の上方約4.9mに配置している。実機のICと同様に、通常閉められている出口側の弁を開放することでアキュムレータから伝熱管へ飽和蒸気が供給され、伝熱管で凝縮した水が重力でアキュムレータへ戻る自然循環流が形成され継続的な冷却が行われる。

測定パラメータとしては、伝熱管入口圧力、伝熱管内温度分布、伝熱管外壁面温度、蒸気流量等を測定した。

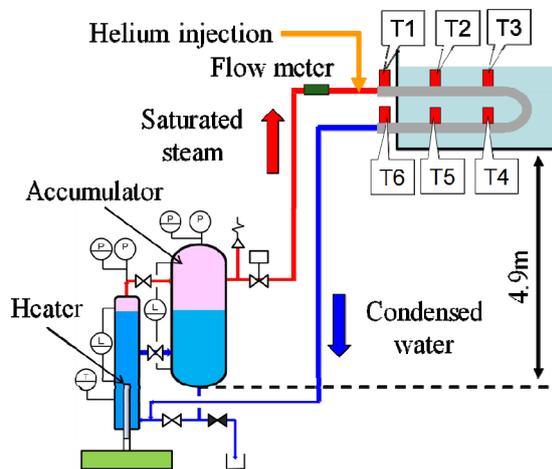


図1. 実験装置概略図

4. 研究成果

平成29年度には、図1の実験体系でICの通常の動作を模擬した実験を実施するために、冷却水プール用のポリカーボネート製の水槽の製作や計測装置の整備など、実験環境を整えた。また、最大6MPaの初期圧力条件で実験を実施し、実機と同様に自然循環流による連続的な冷却が行われることを確認した。初期圧力を変化させて複数回の実験を行い、蒸気流量やICの除熱能力はアキュムレータの初期圧力にはほとんど依存しないことを確認した。また、二相流解析コードを用いて、高圧条件を含めた実験解析を実施した。

平成30年度には、水素の模擬としてヘリウムを注入するためのラインを新たに追加し、ヘリウム注入前後での比較を行った。ここでは、4.5kWの電気ヒーター2台を使用して実験を実施し、ヒーターによる入熱とICでの除熱が釣り合った準定常状態でヘリウムの注入を行った。また、ヘリウムの注入量をパラメータとして、蒸気流量や伝熱管内温度、圧力等の実験データを取得した。

図2にヘリウム注入前後におけるIC伝熱管模擬部の比較した例を示す。伝熱管内に蒸気が到達している入口側では、凝縮熱伝達による伝熱が大きく伝熱管外表面で激しく沸騰が起こって



図 2. IC 伝熱管模型部の様子 (左 : He 注入前、右 : He 注入後)

いる様子が観察できる。ヘリウム注入後には、沸騰領域が狭まっており蒸気の到達距離が短くなっていることが分かる。図 3 に伝熱管内の温度分布の測定例を示す。T1 の測定点は伝熱管の手前であり、常に飽和温度を示している。ヘリウム注入前には T2 の測定位置まで飽和温度を示しているが、ヘリウム注入後には T2 の温度が飽和温度を下回っており、蒸気の到達距離が短くなっていることがわかる。図 4 は伝熱管外壁面温度の測定結果を用いて概算した温度測定点 T2 における熱流束を示している。ヘリウム注入後には熱流束が大きく低下しており、伝熱管内温度と熱流束が共に低下していることから、自然循環流量の低下による影響であると考えられる。

ヘリウムガス注入直後には密度の小さいヘリウムが自然循環ループの上部に存在することで、自然循環の駆動力が低下し流量の低下による IC の除熱能力の低下が顕著に見られた。ヘリウム注入後に長時間 IC を作動させ続けると、自然循環流量は徐々に回復し、ヘリウム注入前の流量に近づくが、準定常状態における圧力はヘリウム注入前よりも上昇する。このように、本実験体系では、非凝縮性ガスの混入による熱伝達率の低下よりも、自然循環の駆動力が低下する影響がより顕著に見られた。また、ヘリウム注入量を大きくすると IC 配管内の自然循環は停止し、ヘリウム注入停止後も IC が作動しなくなる作動限界に達することも確認した。

本研究で得られた実験データは、水素ガス混入時の IC の冷却特性を理解するために重要である。今後、ヘリウム注入量をより精密に制御し実験データを系統的に取得することで、IC が作動可能な運転条件が明らかになることが期待される。

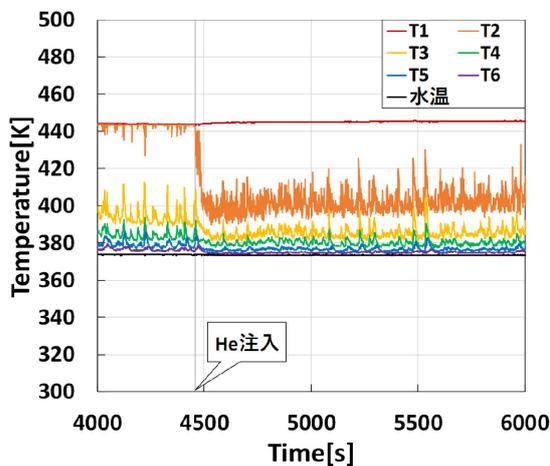


図 3. 伝熱管内温度

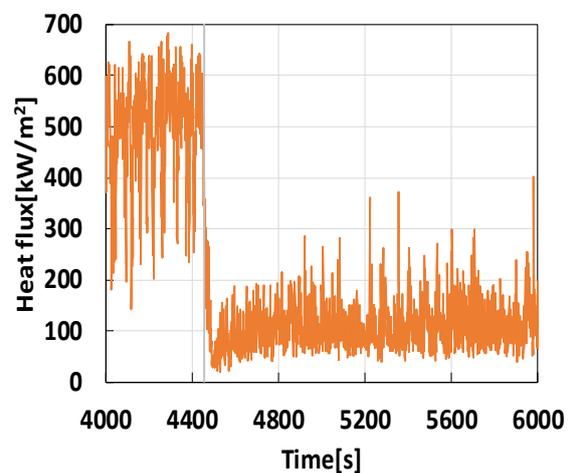


図 4. 熱流束 (測定点 T2)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 5 件)

①M.Mori, Y.Yamamoto, "Experimental study of isolation condenser with high pressure steam and non-condensable gas," The 11th Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety - student seminar (NTHAS-11 student seminar), (Nov, 2018), Busan, Korea

②森正義、山本泰功、"非常用復水器の事故時冷却性能評価(4)非凝縮性ガスの影響評価", 日本原子力学会 2018 年秋の年会, (Sep. 5-7, 2018), 岡山大学

- ③山本泰功、森正義、"非常用復水器の事故時冷却性能評価(3)冷却性能の圧力依存性", 日本原子力学会 2018 年秋の年会, (Sep. 5-7, 2018), 岡山大学
- ④山本泰功、森正義、"静的炉心冷却系を模擬した高圧条件下における凝縮熱伝達実験", 混相流シンポジウム 2018, (Aug. 8-10, 2018), 東北大学
- ⑤森正義、山本泰功、"シビアアクシデント時の非常用復水器の冷却性能評価のための研究", 混相流シンポジウム 2018, (Aug. 8-10, 2018), 東北大学

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等：<http://roko.eng.hokudai.ac.jp/studentadm/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8 桁)：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。