

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K05000

研究課題名（和文）メルトダウンが起こりえない受動的放射冷却を用いた原子炉压力容器の革新的冷却設備

研究課題名（英文）Innovative reactor cavity cooling system using passive radiative cooling to prevent meltdowns

研究代表者

高松 邦吉（Takamatsu, Kuniyoshi）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・高速炉・新型炉研究開発部門 大洗研究所 高温ガス炉研究開発センター・研究副主幹

研究者番号：70414547

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：全く新しい形状を採用した原子炉压力容器（RPV）冷却設備について、放射冷却でどこまで受動的に冷却できるのかを、解析及び実験で定量的に明らかにし、除熱性能が十分あることを実証した。また、実機のRPV冷却設備を等倍縮小した伝熱試験装置（スケールモデル）を製作し、内部の空気を加圧できない場合でも、実機の熱流束をスケールモデルで再現できることを明らかにした。さらに、設計基準の強風が発生した場合、煙突効果を利用して外気自然循環を促進させたRPV冷却設備は、原子炉の受動的安全性を確実に担保できるとは言い難い一方、放射冷却を利用したRPV冷却設備は問題無く除熱できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

【学術的意義】全く新しい形状を採用したRPV冷却設備について、放射冷却でどこまで受動的に冷却できるのかを、解析及び実験で定量的に明らかにし、除熱性能が十分あることを実証した。また、実機のRPV冷却設備を等倍縮小したスケールモデルを製作し、内部の空気を加圧できない場合でも、実機の熱流束をスケールモデルで再現できることを明らかにした。

【社会的意義】放射冷却を利用したRPV冷却設備は、自然現象や事故事象の影響を受け難く、炉心のメルトダウンも起こりえない、最も信頼性の高い革新的RPV冷却設備となった。このRPV冷却設備を採用することで、世界で最も安全な原子炉システムを創出することができる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we quantitatively clarified the cooling capability of a reactor cavity cooling system (RCCS) using passive radiative cooling with a completely new geometry through analyses and experiments. When the air in the heat transfer test apparatus (scale model) cannot be pressurized, which is equally scaled down from the actual RCCS, it was also determined that the scale model can reproduce the heat flux of the actual RCCS. This is true even when the Rayleigh or Grashof numbers are not the same between the actual RCCS and the scale model. Results of this basic research showed that the sufficient heat removal performance of the RCCS can be demonstrated. In addition, when a strong wind (typhoon) occurs under the design basis, it was determined that a second RCCS, which uses the chimney effect to promote natural circulation of ambient air, cannot reliably guarantee the passive safety of the reactor.

研究分野：原子力工学

キーワード：格納容器 冷却設備 受動的安全性 輻射 自然対流 高温ガス炉 HTGR 新型炉

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 福島第一原子力発電所の事故後、深層防護の観点から炉心損傷の防止対策が重要視されている。「様々な原子炉で使用可能な、動的機器および非常用電源等を必要としない受動的な冷却設備を開発できるだろうか？」との問いに対し、我々は、極めて信頼性が高い新たな RPV 冷却設備を提案する。なお、日本原子力研究機構(原子力機構)は全交流電源喪失事故への対策として、「自然循環を利用した冷却設備による崩壊熱の除去」を既に提案している。しかし原子力規制庁は、高速実験炉常陽の再稼働にかかわる審査において、「冷却系の自然循環にも失敗シナリオがある筈」、「冷却系の自然循環が失敗するという事故を想定すべき」、「なぜ自然循環は必ず成功すると言い切れるのか」、「最も厳しい重大事故に対する措置を新たに提案すること」を要求した。

2. 研究の目的

(1) そこで本研究では、自然循環ではなく、輻射による原子炉圧力容器(RPV)からの除熱や外気への放射冷却を重視した革新的冷却設備を考案し、「メルtdownは起こりえない」冷却設備として提案する。

3. 研究の方法

(1) 図1に示すように、放射冷却を利用した RPV 冷却設備は、RPV を格納する RPV 室、RPV 室の上部に取り付けられた冷却室から構成される。RPV から放出された熱は、輻射によって RPV 室から冷却室へ移動する。また、RPV 室の流体(空気)が冷却室へ流入することで熱は移動する。その後、冷却室は外部の外気と熱交換することで冷却される。なお、冷却室に開口部はない。このように、作動流体として空気を採用し、究極の最終ヒートシンクとして周囲の外気を使用することで、全交流電源喪失を含む原子力事故時に、作動流体及びヒートシンクが喪失する可能性をゼロとした。加えて、冷却室が外気と熱交換できる面の数を冷却室の内面、上面、外面と2つ以上になるよう設計した(特許 6075573、格納容器、高松邦吉)。

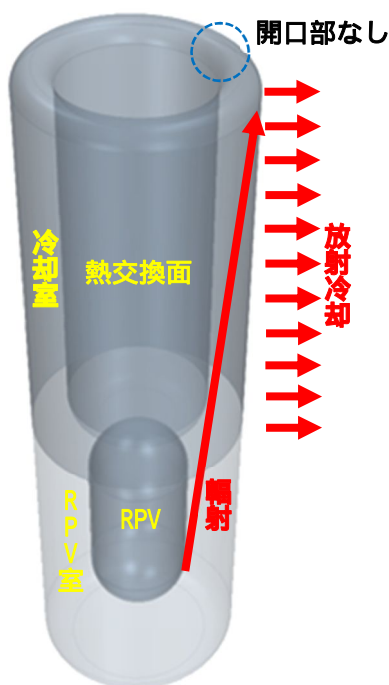


図1 放射冷却を利用した RPV 冷却設備

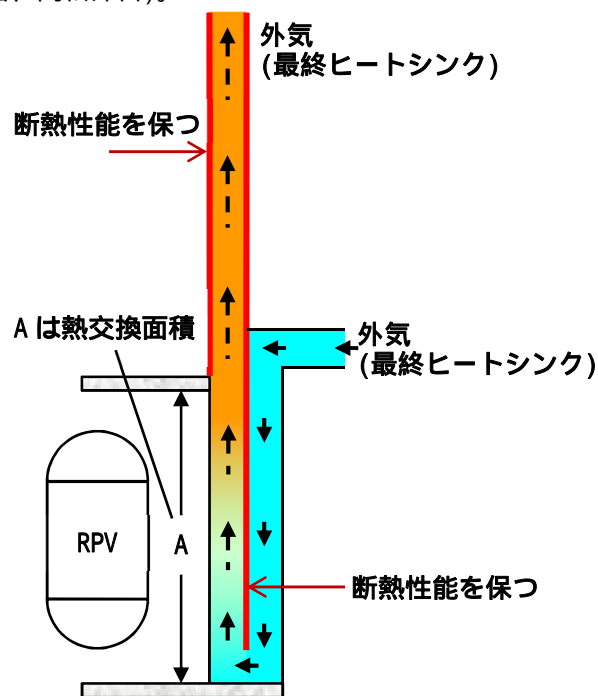


図2 煙突効果を利用して外気自然循環を促進させた RPV 冷却設備

4. 研究成果

(1) 放射冷却を利用した RPV 冷却設備は、外気の温度が 40 の場合でも、原子力機構の高温工学試験研究炉(HTR)の通常運転時に RPV から放出される 600~800kW を受動的に除熱でき、事故直後から長期間に渡って崩壊熱も受動的に除去可能である。なお、冷却室の表面の自然対流の熱伝達率は、解析において無風状態の値 $5.0\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ を用いた。また、ドーナツ(トーラス)形状の冷却室を採用したことで、地震にも強い構造となった。最終的に、RPV 表面から除熱できる熱流束は約 $3\text{kW}/\text{m}^2$ を達成した。一方、HTR や実用(商用)高温ガス炉の RPV 表面から除熱すべき熱流束は、それぞれ $1.23\sim 2.46\text{kW}/\text{m}^2$ 、約 $3.0\text{kW}/\text{m}^2$ である。このように放射冷却を利用した RPV 冷却設備は、RPV から放出される熱や崩壊熱を安定的かつ受動的に除去できることが示された。

(2) 各 RPV 冷却設備の特徴を理解するために、放射冷却を利用した RPV 冷却設備と、図2に示すように煙突効果を利用して外気自然循環を促進させた RPV 冷却設備を比較した。煙突効果

を利用して外気自然循環を促進させた RPV 冷却設備は、外気温度変化、風速変化、湿度変化の影響を受ける。また、乱流から層流への熱伝達率の低下の影響も受ける。そのため、伝熱面を 200~300 の高温に保つことで煙突効果を促進させる必要があり、ダクト内に侵入した可燃物の低温発火の可能性もある。一方、放射冷却を利用した RPV 冷却設備は、外気温度変化の影響を受けるだけである。また、伝熱面を 100 以下に設計でき、温度に対する安全マージンを大きく確保できる。さらに、煙突効果を促進させるための空気ダクトがないため、台風や竜巻の影響を受けない。このように、受動的安全性の大小関係は、熱伝導>輻射>自然対流(自然循環)の順となるため、煙突効果を利用して外気自然循環を促進させた RPV 冷却設備に対し、放射冷却を利用した RPV 冷却設備は、受動的安全性が高いことがわかった。さらに、除熱量を制御する方法については、放射冷却を利用した RPV 冷却設備は伝熱面積を変えるだけである。一方、煙突効果を利用して外気自然循環を促進させた RPV 冷却設備は煙突効果を変える必要がある。つまり、ダクト内の空気抵抗を変える必要がある。よって、放射冷却を利用した RPV 冷却設備は、煙突効果を利用して外気自然循環を促進させた RPV 冷却設備より、簡単に除熱量を制御できることがわかった。

(3) 放射冷却を利用した RPV 冷却設備の優れた除熱性能を示すために、等倍縮小した除熱試験装置(スケールモデル)(図 3)を製作し、実験を実施した。そこで、実機の RPV 冷却設備とスケールモデルを比較する方法を提案した。その際、スケールモデル内の作動流体を加圧できず、実機の RPV 冷却設備と同じレイリー数やグラスホフ数を得られない場合を想定した。一方、層流や乱流の流れの条件は同じであると仮定した。すると乱流で指数 $m = 1/3$ の場合は、両者の熱流束は等しくなることがわかった。スケールモデルや Natural Convection Shutdown Heat Removal Test Facility(NSTF)による実験結果から実機の RPV 冷却設備の熱流束を推定する場合、この比較手法は有効であることを明らかにした。

(4) 図 3 の温度分布(解析)で示すように、RPV 室の周囲は断熱境界条件を設定していた。その断熱境界条件を変更し、RPV 室から境界壁を介して地上へ熱伝導による放熱効果を考慮することで、除熱能力の向上を図った。さらに、冷却室が外気と熱交換できる伝熱面積を 2 倍にし、放射率も高めた場合、RPV 表面から除熱できる熱流束は約 3.0kW/m^2 から約 7.0kW/m^2 へ約 2.3 倍増加することができた。RPV 冷却設備の除熱能力の向上を目指した結果、除熱できる熱流束が 2 倍となり、原子炉出力を 2 倍又は冷却室の高さを半分にする見通しを得た。

(5) スケールモデル(図 3)のヒーター表面と冷却室の表面に異なる放射率を設定し、3 種類の実験を実施した。その結果、ヒーターから放出された熱出力、図 3 に示す温度分布(実験)に関するデータが得られた。また、モンテカルロ法を使って、ヒーターから放出された熱出力に対する放射(輻射)の寄与を評価した。ヒーター表面を黒く塗った場合、熱出力に対する放射(輻射)の寄与は約 60%まで増加できた。実機においても RPV 表面の放射率を高くすることは有効であることを確認できた。同時に、冷却室の表面の放射率も高くすれば、外気への放射冷却を増加できるだけでなく、RPV 冷却設備内の対流熱伝達も促進できることを明らかにした。最終的に、RPV 表面から除熱できる熱流束は約 3.0kW/m^2 を大幅に上回り、約 2.7~3.3 倍の $8.2\sim 9.8\text{kW/m}^2$ 、つまり約 10kW/m^2 を実験的に達成することができた。また、冷却室の伝熱面積を変化させることで、除熱量をコントロールできることを明らかにし、実機においても冷却室の伝熱面積を増加させることは、原子炉出力の増加に繋がることを明らかにした。

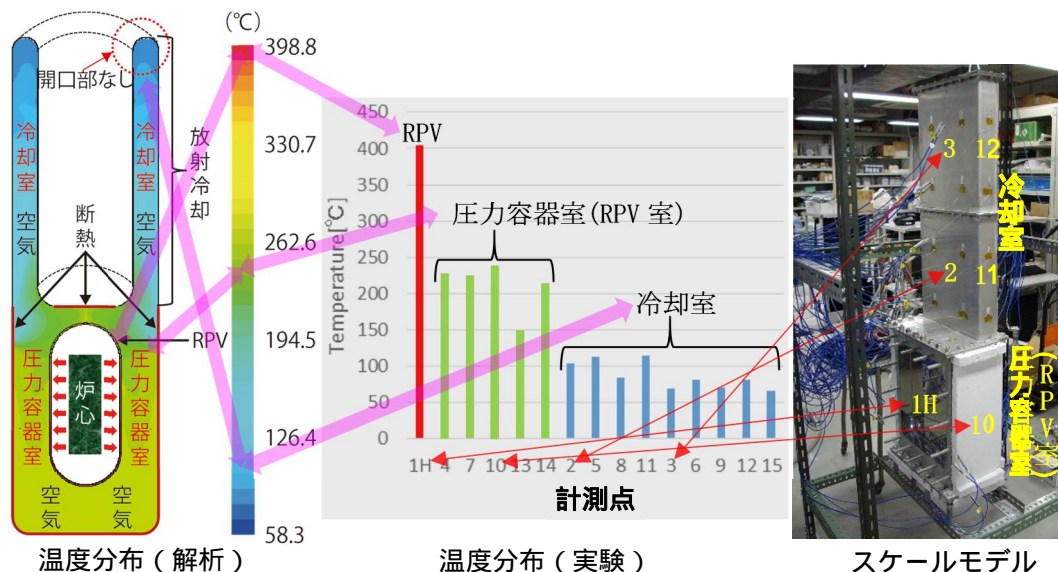


図 3 実機とスケールモデルの温度分布の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takamatsu Kuniyoshi、Matsumoto Tatsuya、Liu Wei、Morita Koji	4. 巻 151
2. 論文標題 Comparison between passive reactor cavity cooling systems based on atmospheric radiation and atmospheric natural circulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Annals of Nuclear Energy	6. 最初と最後の頁 107867_1 ~ 11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.anucene.2020.107867	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takamatsu Kuniyoshi、Matsumoto Tatsuya、Liu Wei、Morita Koji	4. 巻 133
2. 論文標題 Comparative methodology between actual RCCS and downscaled heat-removal test facility	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Annals of Nuclear Energy	6. 最初と最後の頁 830 ~ 836
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.anucene.2019.07.025	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takamatsu Kuniyoshi、Matsumoto Tatsuya、Liu Wei、Morita Koji	4. 巻 122
2. 論文標題 Improvement of heat-removal capability using heat conduction on a novel reactor cavity cooling system (RCCS) design with passive safety features through radiation and natural convection	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Annals of Nuclear Energy	6. 最初と最後の頁 201 ~ 206
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.anucene.2018.08.047	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高松邦吉	4. 巻 -
2. 論文標題 6-4 受動的放射冷却を用いた高温ガス炉の冷却設備を開発 - 事故時崩壊熱除去方法の概念成立に向けて -	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 原子力機構の研究開発成果 2018-19	6. 最初と最後の頁 67
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 西森友弥、明石知泰、宇和田尚悟、松元達也、劉維、守田幸路、高松邦吉
2. 発表標題 ふく射を利用した原子炉キャビティ冷却システムの伝熱特性に関する研究
3. 学会等名 日本原子力学会 九州支部 第38回 研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hosomi Seisuke, Akashi Tomoyasu, Matsumoto Tatsuya, Liu Wei, Morita Koji, Takamatsu Kuniyoshi
2. 発表標題 Experimental study on heat removal performance of a new reactor cavity cooling system (RCCS)
3. 学会等名 The 11th Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS11) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 明石知泰、細見成祐、井福弘基、松元達也、劉維、守田幸路、高松邦吉
2. 発表標題 高温ガス炉における受動的冷却設備の伝熱特性に関する検討
3. 学会等名 日本原子力学会 九州支部 第37回 研究発表講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

2020年度 一般社団法人 日本機械学会 関東支部 茨城ブロック 技術賞を受賞した。
--

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
研究分担者	守田 幸路 (Morita Koji) (40311849)	九州大学・工学研究院・教授 (17102)	
研究分担者	劉 維 (Liu Wei) (70446417)	九州大学・工学研究院・准教授 (17102)	
研究分担者	松元 達也 (Matsumoto Tatsuya) (90325514)	九州大学・工学研究院・助教 (17102)	

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