

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289345

研究課題名(和文)全電源喪失時炉心溶融事故回避のための蒸気インジェクタによる静的炉心注水系の研究

研究課題名(英文)Passive core injection cooling system by steam injector to avert the core melt at SBO

研究代表者

森 治嗣 (Mori, Michitsugu)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・特任教授

研究者番号：00611485

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)：全ての電源を喪失し原子炉を冷却する手段を失った時でも、異常に加熱された原子炉から発生する蒸気を利用し、高所の水タンクや外部の水源地(消防車等)の水と混合させ、原子炉の圧力より高圧の水噴流を原子炉に戻して冷却する、蒸気インジェクタのシステム開発を行った。原子炉の圧力が大気圧近くまで下がった時は、高所の水タンクから重力で落下させ、原子炉に戻して冷却できる蒸気インジェクタの作動を確認した。原子炉の圧力が1.5気圧程度までは、非常に備え原子力発電所に複数台設置される消防車を水源として、同様に原子炉に注水して冷却が可能であることが実験と解析により明らかにした。今後より高圧の蒸気で作動させる開発が必要である。

研究成果の概要(英文)：Even if a nuclear reactor lost all power sources, the Steam Injector (SI) enables to inject water and cool down a nuclear reactor by mixed water jet with steam generated from the abnormally-heated reactor itself and water from a water tank or a fire engine due to a higher discharge pressure of SI than the reactor pressure. The work carried out the development and application of SI system for a severe accident. When the reactor pressure decreases close to atmospheric pressure, SI enabled to inject the water jet mixed with gravity-driven water from the high-rise water tank and the steam from a boiler simulating the reactor. Up to around 1.5MPa (~15 atm), a fire engine to be equipped with multiple units for severe-accident mitigation should works as water suppliers and SI could be confirmed to work as the passive injection pump using the steam from the reactor by the experiments and analyses. It is necessary to develop SI system to operate at higher-elevated steam pressures in the future.

研究分野：原子力システム安全、原子炉熱流動

キーワード：原子力 安全 全電源喪失 過酷事故 蒸気インジェクタ 静的ポンプ 原子炉注水 炉心溶融事故回避

1. 研究開始当初の背景

(1)2011年3月11日、東日本大震災に伴い発生した福島第一原子力発電所事故からの教訓として、沸騰水型原子炉(BWR)の過酷事故時は、自動減圧弁(ADS)作動後において大気圧以上でも炉心注水が可能であれば、より早期に炉心熔融回避が可能である。また全電源喪失時でも炉心注水が可能であれば、同様に炉心熔融を伴う過酷事故は回避可能である。

(2)BWRの新たな静的安全系として、可動部を持たない電源が不要な静的ポンプの機能を有する炉心注水系が実現できれば、軽水炉の安全性と信頼性は高まり、将来においても原子力発電が受け入れられると考えられる。

2. 研究の目的

(1)蒸気インジェクタ(Steam Injector: SI)は、図1に示すように、水と蒸気を供給することにより内部で噴流を形成し、供給蒸気圧力よりも高い圧力で吐出することから電源が不要な可能部のない静的ポンプとして知られている。このSIをBWRの新たな静的安全系として利用される事が期待できる。しかしながら、軽水炉に適用する為にはその詳細な作動特性や作動条件の解明は未だ不十分であり、特に従来の実績により高压条件で作動する更なる知見収集が求められる。

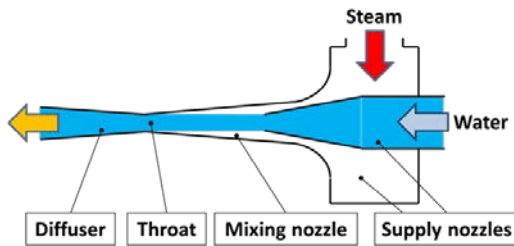


図1. 蒸気インジェクタの概念図

(2)全電源喪失時に原子炉から発生する蒸気と水タンクや消防車等の外部水源を利用し、原子炉圧力より高压の水噴流を原子炉に注水し冷却するSIのシステム開発を目指し研究開発を行った。原子炉圧力が大気圧近傍まで低下した場合を想定し、重力落下水と炉圧蒸気により原子炉注水・冷却が可能なSIシステムの適用を、またADSによる急速減圧直後の1.5MPa程度までの原子炉圧力を想定し、非常用消防車を水源として同様に原子炉に注水・冷却可能なSIシステムの開発適用を目指し研究開発を実施した。

3. 研究の方法

(1)実験装置の概要図を図2に示す。実験には図1に示したオーバーフロー孔付き中心水噴流型蒸気インジェクタを用いており、蒸気ボイラ及び給水ポンプによって蒸気インジェクタ内部に蒸気と水を供給し、ディフューザから吐出された水は吐出水

タンクに導かれ、最終的に外部へと排出されるようになっている。蒸気配管には圧力計、流量計、電動弁、逆止弁が設置している。電動弁は弁の開閉操作をスイッチで行えるようになっており、逆止弁により流体がボイラへ逆流するのを防いでいる。給水配管には圧力計、流量計、流量調整バルブ、逆止弁、ドレン排出バルブを設置している。給水流量は手で弁操作を行い調整した。また、蒸気配管と同様、逆止弁により給水ポンプへの逆流を防いでいる。ドレン排出バルブは、実験後の配管残留水を取り除き錆の発生を抑制するために取り付けられている。オーバーフロー配管には圧力計、逆止弁を設けた。混合ノズル内が負圧になるとオーバーフロー配管に設けた逆止弁が閉じ、蒸気インジェクタ本体からのドレン水流出が止まり、供給流体は蒸気インジェクタ吐出部から全量吐出されるようになる。吐出水配管には圧力計、ベンチュリ流量計、背圧弁、逆止弁、ドレン排出バルブを設置した。背圧弁の開度を小さくして吐出水へ負荷をかけ、背圧を高めていくことで蒸気インジェクタの最大吐出圧力を評価することが可能である。蒸気インジェクタ本体には蒸気供給ノズル部、水供給ノズル部、オーバーフロー部、吐出部に熱電対及び圧力計を設置した。以上、各地点に設置した計測器により圧力、流量、温度を計測し、データロガーを用いてPC内に保存した。

実験に使用する蒸気インジェクタは外径約700×240×125 mmの水中心噴流型蒸気インジェクタで、使用最高圧力は1.5 MPa、使用最高温度は198 °Cである。水供給ノズル出口内径は6.5 mm、混合ノズルスロート部内径は6.0 mm、蒸気インジェクタ出口内径は14 mmとなっている。水供給ノズルにはねじ切りが施してあり、外部に取り付けたハンドルを回すことで水供給ノズルの位置を流れ方向に調整することが可能である。水供給ノズル位置を変化させることで、蒸気インジェクタ内壁面と水供給ノズル外壁面からなる蒸気供給ノズル出口部の流路断面積を変化させ、蒸気供給ノズルの寸法パラメータの作動性能への影響を調べる事が可能である。

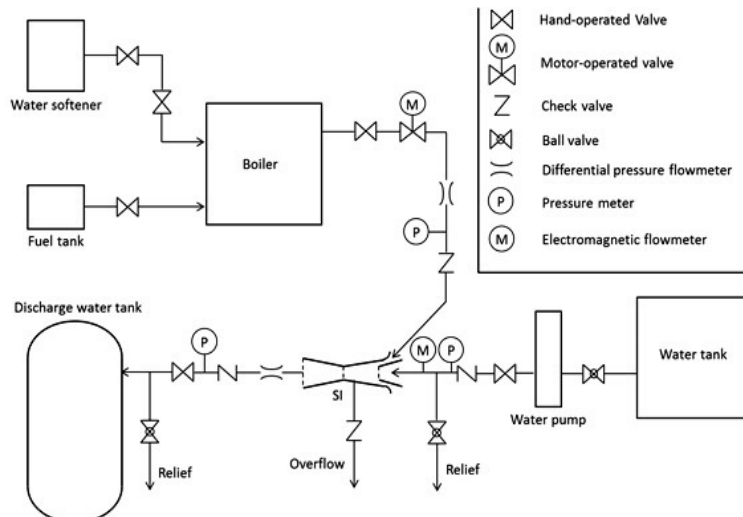


図2. 実験装置概要図

(2) SIの作動範囲実験と高圧域での吐出性能評価実験について以下に実験手法を記す。はじめに蒸気インジェクタに水と蒸気を供給し、オーバーフロー部の圧力が負圧となり、安定することを確認した。本実験ではこの状態を作動状態と定義した。次いで、供給水量及び供給蒸気圧力を変化させた。供給条件を変更した後、作動状態が維持されれば20秒間の計測を行い、再び供給条件を変更する。以上の手順をオーバーフロー部の負圧が解消され、蒸気インジェクタが不動作となる供給条件を見つけるまで繰り返し、作動が安定に維持される範囲を調査した。実験は背圧弁を全開の状態とし、供給水量0.21~0.80 kg/s、供給水温18~23℃、供給蒸気圧力0.02~0.64 MPaGの範囲で供給条件を変化させた。作動が安定した例と不動作となった例をそれぞれ図3と図4に示す。図3では緑色の線で示されるオーバーフロー部の圧力が負圧で保たれているのに対し、図4では計測途中で負圧が解消され、大気圧まで上昇している。

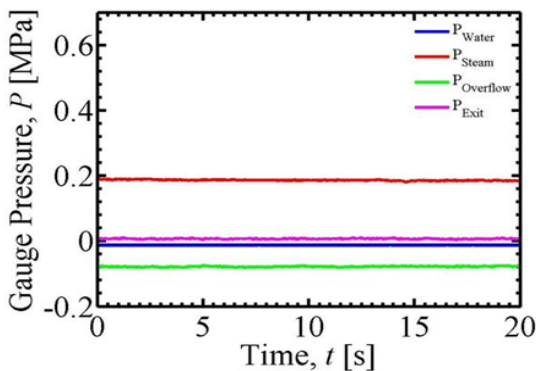


図3.作動が安定した例

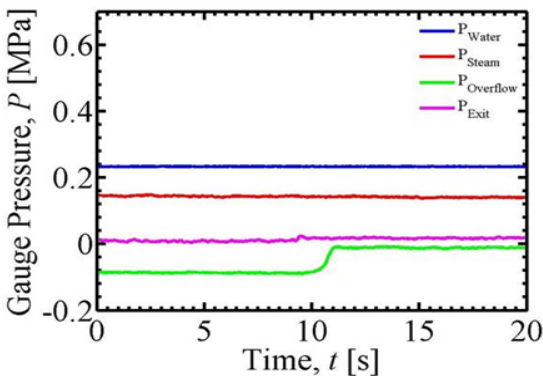


図4.不動作となった例

4. 研究成果

(1) 高圧領域におけるSI最大吐出圧計測

はじめに背圧弁を全開とした状態で水と蒸気を供給し、蒸気インジェクタが作動したことを確認した後、背圧弁を閉めていくことで吐出圧力を上昇させた。背圧弁開度を変更した後、作動が維持されれば20秒間の計測を行い、再び背圧弁を閉めていく。以上の手順を蒸気インジェクタが不動作となるまで繰り返し、不動作となった直前に計測された吐出圧を該当条件での最大吐出圧として記録した。本実験は既存研究では例の少ない高圧蒸気を用いて行うものとし、供給水量0.40~0.80 kg/s、供給水温18~23℃、供給蒸気圧力0.40~0.64 MPaGの条件で行っ

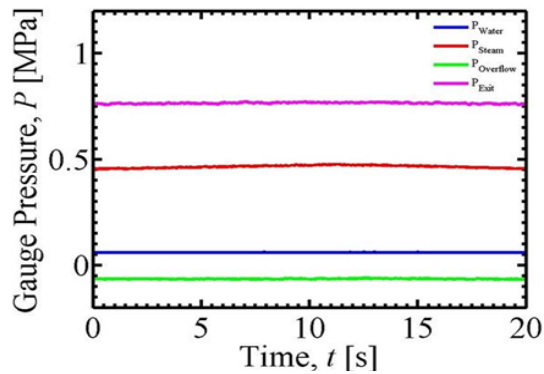


図5.静的ポンプとして作動した例

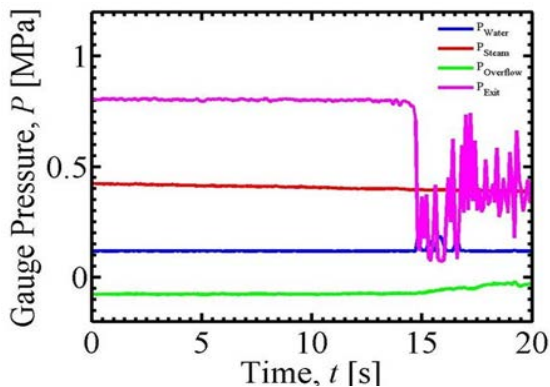


図6.静的ポンプとして作動した例

た。蒸気インジェクタが静的ポンプとして作動した例と、安定して作動を維持できなかった例を図5と図6示す。図5ではマゼンタ色の線で示される吐出圧が赤色の線で示される供給蒸気圧力を上回り、ポンプとして機能していることがわかるが、図6では計測途中で吐出圧が大きく変動し、それに伴ってオーバーフロー部の負圧が解消され不動作となっている。

(2) 供給条件によるSI作動範囲

図7に実験結果を示す。図中のプロットに関して、青○印は安定して作動状態が維

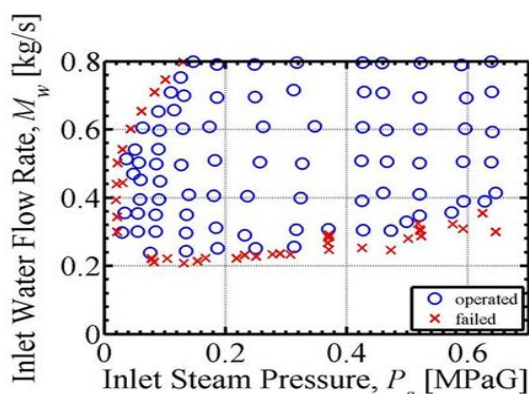


図7.蒸気インジェクタの作動範囲

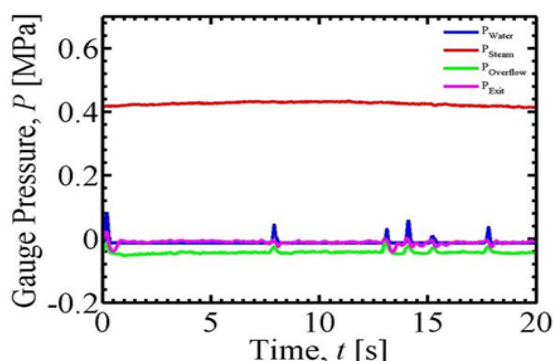


図8.負圧が断続的となった例

持されたことを示しており、赤×印は不作動となったことを示している。なお、図8のようにオーバーフロー部の負圧が不安定で断続的であった場合については、作動が安定しているとみなせないことから不作動とした。全体的な傾向として、蒸気インジェクタが安定して作動するために必要な供給水量の下限値は供給蒸気圧力の上昇に伴い増加することがわかる。これは、蒸気圧力が上昇すると、蒸気インジェクタに流入する蒸気の流量も増加するため、混合ノズル内部で安定した負圧を達成するのに要する蒸気凝縮量を得るにはより多量の供給水が必要となることや、同じく蒸気圧力が上昇すると蒸気供給ノズル出口での蒸気流速が大きくなることから、水噴流を安定に保つためにはより高い供給水圧が必要となること、その理由として考えられる。しかしながら、本実験範囲において 0.04~0.13 MPaG の蒸気圧力では供給水量が過多となると蒸気インジェクタが不作動となることも確認された。この現象の原因としては、混合ノズル内部に流入する水量が余りにも多くなったことによって水噴流が崩壊した可能性が考えられ、作動メカニズム及び作動範囲の解明は今後の課題として検証していく必要がある。本実験の結果として、蒸気インジェクタの作動範囲には供給水量の下限値のみでなく、上限値も存在することが明らかになり、加えて 0.02 MPaG 程度の蒸気圧力では供給水量に依らず不作動となったことから、供給蒸気圧力も蒸気インジェクタ作動範囲に下限値を持つことを示した。

(3) 高圧領域における SI 最大吐出圧計測

図9に供給蒸気圧力に対する最大吐出圧をプロットした結果を示す。図中の○印、△印、□印、◇印、☆印はそれぞれ供給水量が 0.40 kg/s、0.50 kg/s、0.60 kg/s、0.70 kg/s、0.80 kg/s の場合を表している。図9から、供給蒸気圧力の上昇及び供給水量の増加に伴い最大吐出圧が上昇していることが分かる。これは、供給蒸気圧力の上昇と供給水量の増加が、混合ノズルへ流入する作動流体の流速や流量を増加させ、それにより混合ノズル内での水・蒸気間の運動量輸送が向上するためであると考えられる。供給蒸気圧力を 0.64 MPa、供給水量を 0.8 kg/s とした際、蒸気インジェクタは本実験範囲内で最大となる 1.2 MPaG 程度の吐出圧が得られた。原子力プラントの事故時、自動減圧系 (ADS) によって炉内圧力を 1.5 MPa 程度にまで急速減圧することが可能であることを考慮すると、蒸気インジェクタを静的炉心注水設備として適用可能であることが示唆された。次に、供給蒸気圧力に対する圧力増倍率をプロットした結果を図10に示す。圧力増倍率とは、最大吐出圧を供給蒸気圧力で除した値として定義したもので、蒸気インジェクタの吐出性能を評価する指標として用いた。図9と同様、図中の○印、△印、□印、◇印、☆印はそれぞれ供給水量が 0.40 kg/s、0.50 kg/s、0.60 kg/s、0.70 kg/s、0.80 kg/s の場合を表して

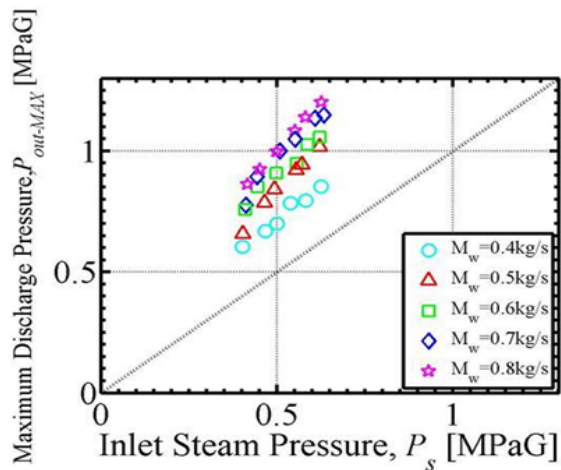


図9.供給蒸気圧力に対する最大吐出圧力

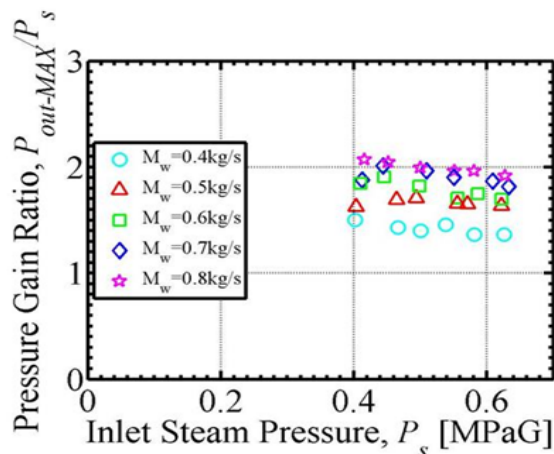


図10 供給蒸気圧力に対する圧力増倍率

いる。図10より、供給水量の増加に伴い圧力増倍率は大きくなっていることがわかる。これは図9の結果からも明らかな傾向である。また、供給蒸気圧力の上昇に対して圧力増倍率は緩やかに小さくなっている。本実験の条件内では圧力増倍率は常に 1.0 より大きく蒸気インジェクタは静的ポンプとして機能したが、蒸気供給圧力の上昇に対して圧力増倍率が減少した傾向から、より高圧な条件では、圧力増倍率が 1.0 以下となる作動限界を迎える可能性が示唆された。より高圧な供給条件による実験を実施し蒸気インジェクタが静的ポンプとして作動する条件範囲を明らかにする必要がある。

(4) 蒸気供給ノズル内流れ数値解析

計算領域の作成には 3D-CAD によって作成した。作成したジオメトリはポリヘドラルメッシュ、サーフェスリメッシュ、プリズムレイヤーメッシュの3つのモデルにより反復計算解が十分に収束可能な 342107 セルにメッシュ分割し、計算を実行した。そのメッシュ処理後の計算ジオメトリを図11に示す。計算に用いた解析モデ



図11.メッシュ処理後の計算ジオメトリ

表 1. 解析で使した実験データ

		Inlet static pressure [MPaG]	Mass flow rate [kg/s]	Inlet static temperature [K]
Experimental values	Case 1	0.54	0.044	442
	Case 2	0.36	0.033	431
	Case 3	0.15	0.020	410

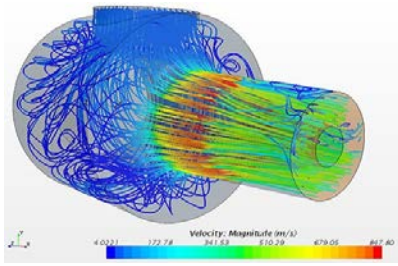


図 12. 蒸気流れの流線

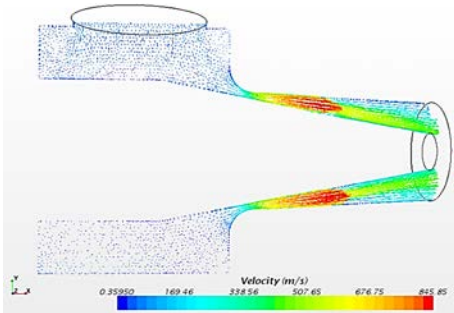


図 13. Case1 の垂直断面の速度分布

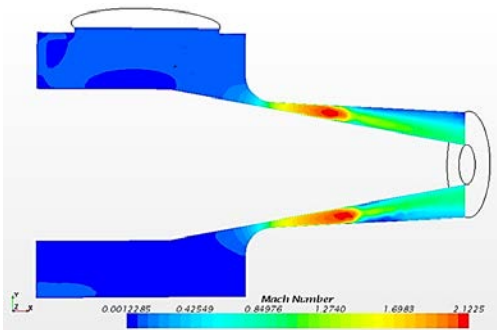


図 14. Case1 の垂直断面のマッハ数

ルについて以下に記す。計算対象の蒸気流れは収縮拡大管形状のノズルにより音速付近まで加速されると考えられたため、気体の圧縮性を考慮した計算が可能な理想気体モデルを選択した。また乱流モデルとして $k-\epsilon$ 乱流モデルを使用した。計算アルゴリズムには各保存方程式を行列計算により同時に解いていく連成型流れモデルを適用し、定常解析として解いた。今回の計算では、非凝縮性ガスの混合は考慮していない。境界条件については、流入境界に流量入口を選択し、全温及び流量を指定した。流出境界には圧力出口を選択し、質量保存を満たすよう各反復計算において境界値を再構築するよう定義した。壁面は断熱、ノンスリップ、滑らかな壁面とした。

境界条件に定義した値は全て、これまでの実験で得られたデータを基とし、本計算では 3 つのケースを選択した。その実験データを表 1 に示す。

図 12 は蒸気供給ノズル内流れの流線を示している。図から分かるように、蒸気はわずかに旋回しながら流れ、ノズルのスロート部通過時には周方向にほぼ均等に流れ

ており、ノズル流出後の流れに偏向はほとんど無いと考えられる。図 13 に Case1 の垂直断面の速度分布、図 14 に Case1 の垂直断面のマッハ数を示す。また図 15 に流速分布のケース間比較を、図 16 にマッハ数分布のケース間比較を示す。これらの図から、マッハ数はいずれのケースでも 1.0 を超えており、蒸気流速は音速に達している事が確認できる。流速はスロート通過直後に音速に達しており、蒸気流量の増大とともに流速ピーク値も増大している。また、流速ピーク位置と、音速流れ状態の崩壊位置、すなわちマッハ数が 1.0 以上から 1.0 以下になる位置は、蒸気流量の増大とともに流出境界側へ移動していった。

以上の結果より、いくつかの蒸気供給ノズル内流れ挙動が明らかになり、それらが蒸気インジェクタポンプ性能に影響を及ぼしている。今後、作動メカニズム及び作動条件の解明のためには、更に高圧な蒸気条件での確認試験が求められる。

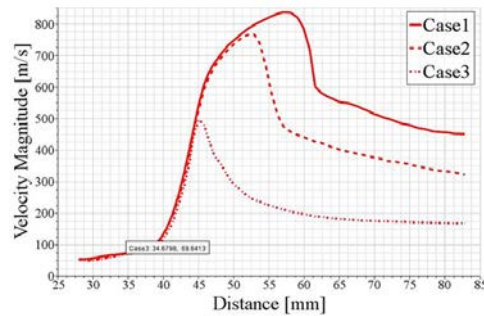


図 15. 流速分布に関するケース間の比

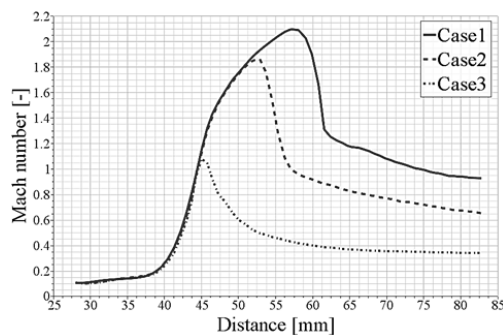


図 16. マッハ数分布のケース間比較

<引用文献>

- [1] Y. Abe, "Study on Operational Characteristics of Supersonic Steam Injector" *Japan Soc. Mech. Eng.*
- [2] C. Iwaki, "Study on High Performance of Steam Injector (2nd Report, Measurement of Jet Structure)" *JSME Annu. Meet.*, 2003.
- [3] S. Ohmori, "Development of Technologies on Innovative-Simplified Nuclear Power Plant using High-Efficiency Steam Injector (Numerical

- Flow Analysis and Visualization Study),” *Adv. Mater.*, p. 10, 2008.
- [4] Y. Abe and S. Shibayama, “Study on the characteristics of the supersonic steam injector,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 268, pp. 191–202, 2014.
- [5] Y. Takahashi, Y. Koizumi, H. Ohtake, N. Yamashita, T. Miyashita, M. Mori, “Study on Direct Condensation Heat Transfer in Steam Injector”, *Progress in Multiphase Flow Research* 1, 241–248, 2006
- [6] N. Deberne, J.-F. Leone, and A. Lallemand, “Local measurements in the flow of a steam injector and visualisation,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 39, no. 9–11, pp. 1056–1065, 2000.
- [7] A. Fukuichi, Y. Abe, A. Fujiwara, Y. Kawamoto, C. Iwaki, T. Narabayashi, M. Mori, and S. Ohmori, “Study on Turbulent Behavior of Water Jet in Supersonic Steam Injector,” *J. Power Energy Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 289–300, 2009.
- [8] T. Shimizu, Y. Koizumi, T. Miyashita, Y. Takahashi, H. Ohtake, and M. Mori, “Study on Mechanism of Condensation Heat Transfer of Water Jet in Steam Injector,” *Interface*, pp. 1–6, 2008.
- [9] S. Shibayama, Y. Abe, A. Kaneko, A. Fukuichi, C. Iwaki, T. Narabayashi, M. Mori, and S. Ohmori, “Study on the Interfacial Behavior and Thermal Characteristics in Liquid-Vapor Flow of the Supersonic Steam Injector” *ICONE18* pp. 1–10, 2010.
- [10] A. Shah, I. R. Chughtai, and M. H. Inayat, “Experimental and numerical investigation of the effect of mixing section length on direct-contact condensation in steam jet pump,” *Int. J. Heat Mass Transfer.*, vol. 72, no. 1–2, pp. 430–439, 2014.
- [11] T. Narabayashi, W. Mizumachi, and M. Mori, “Study on two-phase flow dynamics in steam injectors,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 175, no. 1–2, pp. 147–156, Nov. 1997.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- ① Kyosuke SATO, Yutaka ABE, Akiko KANEKO, Tetsuya KANAGAWA, Michitsugu MORI, Two-phase flow structure and operating characteristics of supersonic steam injector, *Mechanical Engineering Journal*, Vol.2, 2015, 10.1299/mej.15-00004

〔学会発表〕(計9件)

- ② Hiroto Endo, Shuichiro Miwa, Michitsugu Mori, Characteristics of the Steam Injector for the Static Reactor Cooling Systems, ICAPP2016, April 17–20, 2015, San Francisco, USA,

- ③ Kyosuke SATO, Yutaka ABE, Akiko KANEKO, Michitsugu MORI, INFLUENCE OF TWO-PHASE FLOW STRUCTURE ON OPERATING CHARACTERISTICS OF THE SUPERSONIC STEAM INJECTOR, ICONE22, July 7–11, 2014, Prague, Czech Republic
- ④ Kyosuke SATO, Yutaka ABE, Akiko KANEKO, Tetsuya KANAGAWA, Michitsugu MORI, OPERATING CRITERIA AND MECHANISMS OF SUPERSONIC STEAM INJECTOR, ICONE-23, May 17–21, 2015, Chiba, Japan
- ⑤ 森部貴裕、遠藤宏純、三輪修一郎、森治嗣、蒸気インジェクタシステムの作動範囲と吐出性能に関する研究, 日本機械学会 北海道支部第45回 学生員卒業研究発表講演会, 2016年3月07日, 函館
- ⑥ 遠藤宏純、森部貴裕、三輪修一郎、森治嗣、静的安全炉心注水系としての蒸気インジェクタ作動特性に関する研究, 日本原子力学会 2016春の年会 2016年3月26日～2016年3月28日, 仙台
- ⑦ 佐藤喬亮、阿部豊、金子暁子、森治嗣、超音速蒸気インジェクターの吐出噴流挙動が作動限界に及ぼす影響, 日本原子力学会 2014年春の年会, 2014年3月26日(水)～28日, 東京
- ⑧ 佐藤喬亮、阿部豊、金子暁子、金川哲也、森治嗣、超音速蒸気インジェクターの作動特性と圧力発生機構, 日本原子力学会 2014年秋の大会, 2014年9月8日(月)～10日, 京都
- ⑨ 佐藤喬亮、阿部豊、金子暁子、金川哲也、森治嗣、超音速蒸気インジェクターの作動範囲と吐出圧力発生機構, 日本原子力学会 2015年春の年会, 3月20日(金)～22日, 日立市

〔その他〕ホームページ等:

<http://http://nuclearsafety.eng.hokudai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森 治嗣 (Mori, Michitsugu)
北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・特任教授
研究者番号: 00611485

(2) 研究分担者

奈良林 直 (Narabayashi, Tadashi)
北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・特任教授
研究者番号: 10419947

阿部 豊 (Abe, Yutaka) 筑波大学・システム情報工学研究科(系)・教授
研究者番号: 10241720

坂下 弘人 (Sakashita Hiroto) 北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授
研究者番号: 00142696

三輪 修一郎 (Miwa Zhuichiro) 北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・助教
研究者番号: 00705288