

平成 30 年 4 月 26 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05829

研究課題名(和文)次世代高温ガス炉の安全性に関わる冷却材流量急減に伴う過渡対流熱伝達現象の解明

研究課題名(英文)Transient Heat Transfer for Coolant Gas under Flow Decay Conditions Concerning with the Safety Assessment of the Very High Temperature Reactor

研究代表者

劉 秋生 (Liu, Qiusheng)

神戸大学・海事科学研究科・教授

研究者番号：80294263

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：次世代高温ガス炉の安全性に関わる冷却材流量急減に伴う過渡対流熱伝達現象を解明するため、流量が減少する場合の過渡対流熱伝達実験を行い、種々の流量減少時定数の条件下で発熱体温度、熱流束、熱伝達係数の実験データを収集した。また、数値解析を行い、実験データとの比較検討を行い、流量減少時間、時定数、初期流速による熱伝達特性を明らかにした。研究結果として、流量の減少に伴い、表面温度が急激に増加することが解った。また、流量減少時定数が短いほど、熱伝達係数の減少速度が速いことが解った。さらに、数値解析結果より、数値解析結果は発熱体表面温度の実験結果と±7%以内で一致していることがわかった。

研究成果の概要(英文)：In the present study, in order to clarify the transient heat transfer caused by flow decay, the forced convection transient heat transfer for a horizontal cylinder in helium gas under flow decay conditions, was experimentally investigated with a uniform heat generation rate. The flow rate of the helium gas decreased exponentially, according to the designed functions, with different time constants. The surface temperature of the cylinder and heat flux were investigated during the flow decay transient process at various initial flow velocities and flow decay time constants. The transient heat transfer coefficient was also obtained and discussed. Moreover, a three-dimensional numerical simulation was also conducted for this transient heat transfer process. Based on the experimental data and simulation results, the transient heat transfer during the exponentially decreasing flow rate conditions was clarified.

研究分野：熱工学

キーワード：過渡熱伝達 流量急減過程 指数関数状減少 流量減少時定数 強制対流 ヘリウムガス 高温ガス炉
温度上昇

1. 研究開始当初の背景

将来のエネルギー需要や社会的ニーズを満たすため、世界各国で革新的な原子炉及び核燃料サイクル技術(革新的原子力システム)の研究開発が進められている。現在、国際的な革新的原子力システム開発としては、第四世代原子力システムに関する国際フォーラム(Generation IV International Forum: GIF)がある。GIFにおいて選定された原子炉型式の中に、次世代(第四世代)革新的原子力システムの有力候補の一つとして、ヘリウムを用いた超高温ガス原子炉(VHTR)が選ばれ、アメリカ、日本、中国などにおいて研究・開発されている(図1)。この革新的なガス冷却原子炉は、1000 程度の高温の熱を供給でき、高い熱効率および熱利用率の達成を可能にする。また、高温ガス炉の高温の熱を利用し、IS(ヨウ素 イオウ)プロセスの熱化学法を用いた水素製造技術が開発されており(図1)、その実用化が将来的に水素を媒体とするクリーンな二次エネルギーシステムの構築にもブレークスルーをもたらすような貢献が大きく期待されている。しかし、超高温ガス炉の開発には、解決されるべき問題がまだ数多く残されており、さらなる基礎的研究の蓄積が望まれている。その中に熱輸送現象の問題に関して、冷却材配管の破断による流量の急減、圧力急減に伴う過渡対流熱伝達現象の解明が超高温ガス原子炉の工学的安全解析において重要な課題である。申請者⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾はすでに気流中の燃料体の発熱率が指数関数状に上昇するときの定常及び非定常強制対流熱移動過程を解明し、種々実験条件下の熱伝達データベースを構築した。本研究では、冷却材の流量急減下の過渡対流熱伝達に関し、実験を行い、流量減少速度、初期流量、初期発熱率、初期圧力などの影響を調べ、流量急減に伴う過渡対流熱伝達現象のメカニズムを明らかにする。また、超高温ガス炉の炉心における温度分布、最高温度及び流量の分布を解明することを目的に、流量急減に伴う過渡対流熱伝達の数値解析も行なう。

2. 研究の目的

本研究では、超高温ガス原子炉(VHTR)における配管の破断等による冷却材の流量急減に伴う過渡対流熱伝達現象を解明するために、以下の項目について研究を行う。

(1)流量急減に伴う過渡対流熱伝達特性の実験的研究

流量急減に伴う過渡対流熱伝達特性を実験的に解明する。実験はヘリウムガス強制対流実験装置を使用する。試験部の前に新しく流量に変動を与えるためのバルブ(比例制御バルブ)及びその制御装置を設置して行う。流量減少速度(流量が初期流量からゼロに減少するまでの速さ)及び初期流量が過渡熱伝達特性及び流動特性に対する影響を実験的に解明する。また、初期発熱体の発熱量、初期圧力、初期ガス温度などの影響も調べる。

(2)流量急減に伴う過渡対流熱伝達特性の数値解析

流量急減に伴う過渡対流熱伝達特性を数値解析し、実験データとの比較検討を行う。その流量急減に伴う過渡対流熱伝達特性のメカニズムを解明する。

3. 研究の方法

(1) 広範囲の実験条件下で流量急減に伴うヘリウムガスの過渡対流熱伝達過程の発熱体表面温度、熱流束、熱伝達係数等実験データを集積し、初期流量からの減少速度、初期流量、初期発熱体の発熱率などの影響を明らかにする。

実験装置 実験装置は、熱入力制御システム、データ計測・処理システム及び強制対流熱伝達実験装置の三つの部分からなる。図1は強制対流実験装置の概略図を示す。円柱白金発熱体は右下側の試験部(6)に設置する。図2は発熱体を設置した試験部を示す。図1に示すように流量計(5)の前に比例制御バルブ(4)及びバルブ制御装置を設置する。初期流量から種々速度で流量をゼロまで減少させることにより、試験部に流れるガスの流量急減に伴う過渡対流熱伝達実験を実現することができる。発熱率制御システム及び実験データ計測・処理システムを用い、過渡対流熱伝達実験を行う。

実験方法 熱入力制御システムより、発熱体に電流を流し、発熱体に種々初期発熱率を与える。比例制御バルブにより所定時間内において、初期流量からゼロまで減少させ、それに伴う過渡対流熱伝達実験を行う。流量が急減の条件下で、その時間経過に伴う発熱体表面温度及び熱流束を測定する。試験発熱体の発熱率及び温度は発熱体を一辺としたダブルブリッジ電気回路で計測され、計算機によりデータのサンプリングとデータ処理が行なわれる。発熱体の平均温度は予め求めておいた発熱体温度と抵抗との関係を用いて算出する(電気抵抗法)。試験発熱体表面温度は、発熱体内の非定常熱伝導方程式より求める。熱伝達係数は熱流束と試験発熱体とガスの温度差より求める。上述のようにヘリウムガスを用い、発熱体温度、熱流束、熱伝達係数のデータを種々の流量減少速度、初期発熱体発熱率、初期流速、初期ガス圧力、初期温度の実験条件下で求め、それらの影響を詳細に調べる。

(2)流量急減に伴う過渡対流熱伝達特性の数値解析

実験と並行して、理論解析も行う。図3に示す発熱体のまわりにヘリウムガスが流れ、比例制御バルブにより流量が過渡的に減少する。それを物理モデル化し、理論解析を行う。実験と同様、内径20mmの円管流路の中心部に流れる方向と平行に発熱体が置かれている。流体と発熱体はヘリウムガスと白金

とする。流体における連続の式，運動方程式，エネルギー式といった基礎方程式，固体領域におけるエネルギー式，及び境界条件を三次元座標系において連立させ，発熱体内部の発熱率を一定とし流量が変動する場合の過渡対流熱伝達の数値解析を行う。解析の範囲は本研究で実施する予定の実験範囲と同様，表1に示す通りである。結果として，発熱体の表面温度の上昇，表面熱流束及び熱伝達係数の時間的な変化が流量の減少速度，発熱体の初期発熱率，初期流量等パラメータによりどのような影響を受けるかを求めることができる。その解析結果と広範囲の実験データとの比較・検討により，流量急減に伴う過渡対流熱伝達過程のメカニズムを明らかにする。

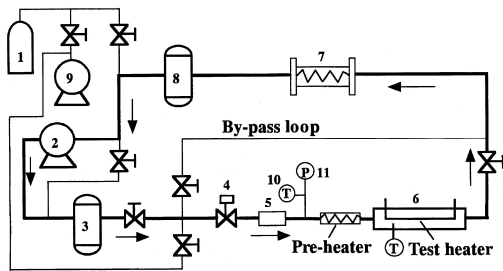


Fig.1 Experimental apparatus.

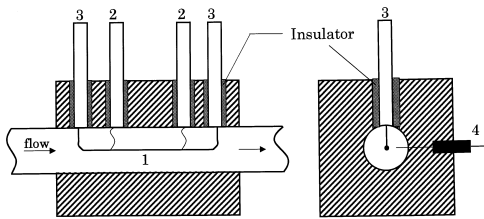


Fig.2 Test section.

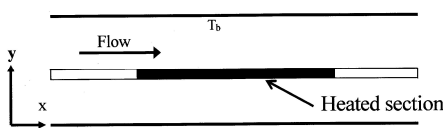


Fig.3 Physical model.

4. 研究成果

(1)流量急減に伴うヘリウムガスの過渡対流熱伝達過程の発熱体表面温度，熱流束，熱伝達係数等実験結果

(a)流量が直線的に減少した場合

発熱率制御システムによって，発熱体がステップ状の初期発熱率を与えられ，一定の値に維持された。図4は種々流量減少時間における流量と時間の関係を示す。図に示すように，時間と共に，流量がほぼ直線的に減少するように制御されている。円柱発熱体の表面温度差が図5に示すように，増加することが解った。また，流量が7秒から減り始めるに

伴い，熱流束 q が先に減少し，後に増加することが解った。流量減少の前半では，温度の時間微分がゼロより大きくなるため，熱流束が小さくなるのが熱流束の計算式から解る。後半では，図5より温度の時間微分はある時点から小さくなり，最後ゼロになることが解った。従って，熱流束の値が先に減少し，後に増加することが解った。さらに，流速の減少に伴い，熱伝達係数が減ることが解った。流量減少時間が短くなればなるほど，熱伝達係数の減少速度が速くなった。

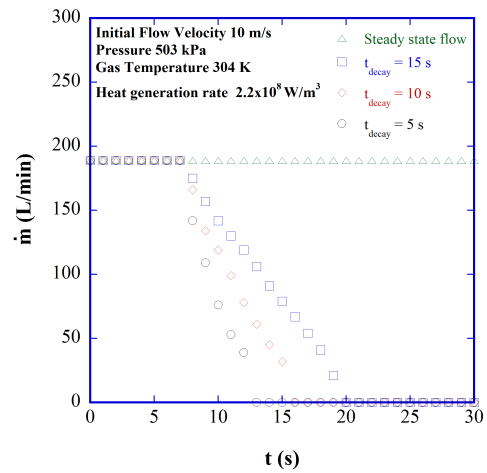


Fig.4 Linear decreased flow rate during flow decay process.

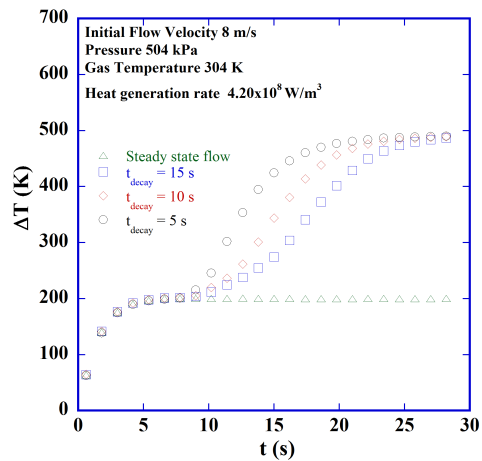


Fig.5 The surface temperature difference during flow decay process at different flow decay times.

(b)流量が指数関数状に減少した場合

図6に示すように発熱体表面温度差 T が上昇し，熱流束 q は T の増加の割合がプラスのときに減少，増加の割合がマイナスのときには増加した。また，ガス流速が低下するにつれて熱伝達係数 h は減少し，いずれの初期ガス流速においても時定数が小さくなればなるほど減少のスピードは速くなるのがわかる。

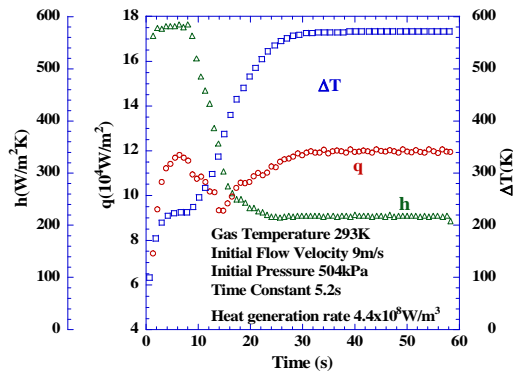


Fig.6 The relation of h, q and ΔT with time.

(2)流量急減に伴う過渡対流熱伝達特性の数値解析

本解析では ANSYS FLUENT 14 を用い、実験結果との比較検討を行った。乱流モデルは標準 k-モデル, RNG k-モデル, レイノルズ応力モデル (RSM) を用いた。円柱発熱体に対してステップ状の発熱率 $\dot{Q} = Q_0$ の熱入力を与え、7 秒後に指数関数状にガス流速を低下させた。また初期流速は 10m/s, 初期系圧力は 504kPa とした。

図 7 は発熱率が $6.63 \times 10^8 \text{W/m}^3$, ガス流量減衰時定数が 5.3s における発熱体表面温度の時間経過の RNG k-モデルを使用した場合の解析結果と実験結果を比較したものである。解析結果と実験結果の差は発熱率が安定する 7s 時点で 6.7%, ガス流量減少開始後温度上昇の中間時間にあたる 17s 時点で 1.2%, ガス流量がゼロに近づく 50s の時点で 3.0% となった。

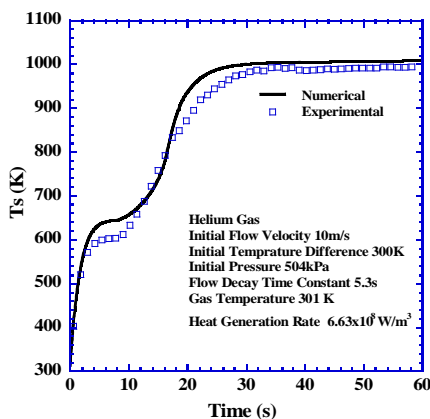


Fig.7 Comparison of surface temperature of heater with experimental data.

図 8 は発熱率が $4.43 \times 10^8 \text{W/m}^3$, 時定数が 3.4s の時の熱流束のシミュレーション結果と実験結果を比較したものである。ガス流量が減少し始める 7s までの時点ではシミュレーション結果と実験結果の差はほとんどないが、流量がゼロに近づいた時点での差は 5.1% となった。

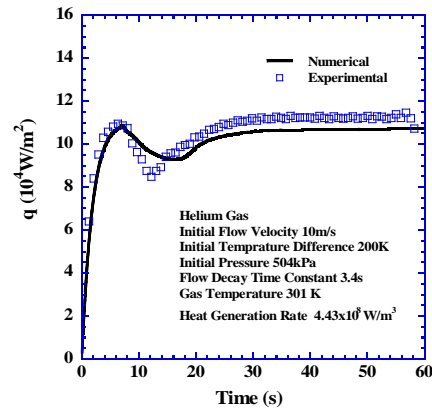


Fig.8 Comparison of heat flux with experimental data.

(3)本研究の学術的な特色・独創性

流量急減に伴う過渡対流熱伝達現象を実験的に解明することが学術的に興味深いものである。

本研究では、VHTR の工学的安全解析に関わる炉心の流量分布や温度分布を解明するため、実際に起こり得る冷却材喪失に伴う過渡熱流動現象を数値的にアプローチし、解明を試みることに特色がある。

(4)得られた成果の意義とインパクト

配管破断による冷却材喪失に伴う原子炉内の流れや温度分布を解明するために、基礎的なデータベースを提供できる。

本研究で解明した結果は VHTR のような工学的安全解析に実用可能なデータを提供し、VHTR の研究・開発並びに水素を利用したエネルギーシステムの構築に寄与できる。また、核融合炉のヘリウム冷却ブランケットの研究・開発にも貢献できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 20 件)

(1) LIU Qiusheng, FUKUDA Katsuya, Transient Convection Heat Transfer for Helium Gas at Various Flow Decay Times, *Applied Thermal Engineering*, Vol.116C, pp.355- 363, 2017, 査読有

(2) Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Effects of outlet subcoolings and heat generation rates on transient critical heat flux for subcooled flow boiling of water in a vertical tube, *Heat and Mass Transfer*, Vol.53-9, pp.2999-3012, 2017, 査読有

(3) Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Prediction of forced convective heat transfer and critical heat flux for subcooled water flowing in miniature tubes, *Heat and Mass Transfer*, Vol.54-2, pp.501-508, 2018, 査読有

(4) Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, SINGLE-PHASE

CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN A CIRCULAR MINICHANNEL WITH UNSTEADY THERMAL LOADS, *Heat Transfer Research*, Begell house, Vol.48-13, pp.1179-1193, 2017, 査読有

(5) Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Suguru Masuzaki, Boiling incipience of subcooled water flowing in a narrow tube using wavelet analysis, *Applied Thermal Engineering*, Vol.132-5, pp.595-604, 2018, 査読有

(6) Qiusheng Liu, Akihiro Mitsuishi, Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Transient heat transfer for helium gas flowing over a horizontal cylinder in a narrow channel, *Experimental Heat Transfer*, Vol.30-4, pp.341-354, 2017, 査読有

(7) Yantao Li, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Transient heat transfer due to exponentially increasing heat inputs for turbulent flow of FC-72 in small diameter tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.110, pp.880-889, 2017, 査読有

(8) LIU Qiusheng, ENDO Hirohiko, FUKUDA Katsuya, SHIBAHARA Makoto, ZHANG Peng, Experimental study on solution and diffusion process of single carbon dioxide bubble in seawater, *Mechanical Engineering Journal*, Vol.3-5, pp.1-9, 2016, 査読有

(9) MIN Han Htet, FUKUDA Katsuya, LIU Qiusheng, Transient boiling critical heat flux on horizontal vertically oriented ribbon heater with treated surface condition in pool of water, *Mechanical Engineering Journal*, Vol.3-3, pp.1-19, 2016, 査読有

(10) Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Correlation of high critical heat flux during flow boiling for water in a small tube at various subcooled conditions, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.82, pp.74-80, 2017, 査読有

(11) Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Steady and transient critical heat flux for subcooled water in a mini channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.104, pp.267-275, 2017, 査読有

(12) Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Yuji Nakamura, Takeo Muroga, Masayuki Tokitani, Hiroyuki Noto, Transient critical heat flux for subcooled boiling of water flowing upward through a vertical small-diameter tube with exponentially increasing heat inputs, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.11-3, pp.16-0037, 2016, 査読有

(13) Makoto Shibahara, Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda, Heat transfer characteristics of d-mannitol as a phase change material for a medium thermal energy system, *Heat and Mass Transfer*, Vol.52-9, pp.1993-2004, 2016, 査読有

(14) Makoto Shibahara, Qiusheng Liu, Katsuya

Fukuda, Transient forced convection heat transfer for nitrogen gas flowing over plate heater with exponentially increasing heat input, *International Heat and Mass Transfer*, Vol.95, pp.405-415, 2016, 査読有

(15) Makoto Shibahara, Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda, Transient natural convection heat transfer of liquid D-mannitol on a horizontal cylinder, *Renewable Energy*, Vol.99, pp.971-977, 2016, 査読有

(16) SHIBAHARA Makoto, FUKUDA Katsuya, LIU Qiusheng, Hata Koichi, Steady and transient forced convection heat transfer for water flowing in small tubes with exponentially increasing heat inputs, *Heat and Mass Transfer*, Vol.53-3, pp.787 - 797, 2017, 査読有

(17) Wang Li, LIU Qiusheng, Fukuda Katsuya, Numerical solution of heat transfer process in a prismatic VHTR core accompanying bypass and cross flows, *Nuclear Engineering and Design*, Vol.307, pp.275-283, 2016, 査読有

(18) Yantao Li, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Steady and Transient CHF in Subcooled Pool Boiling of Water under Sub-atmospheric Pressures, *Journal of JIME*, Vol.52-2, pp.114-119, 2017, 査読有

(19) Yantao Li, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Makoto Shibahara, Turbulent heat transfer with FC-72 in small diameter tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.103, pp.428-434, 2016, 査読有

(20) LIU Qiusheng, Zhao Zhou, FUKUDA Katsuya, Experimental Study on Transient Heat Transfer Enhancement from a Twisted Plate in Convection Flow of Helium Gas, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 90, pp. 1160-1169, 2015, 査読有

〔学会発表〕(計 15 件)

(1) Liu Qiusheng, Shibahara Makoto, Fukuda Katsuya, TRANSIENT CONVECTION HEAT TRANSFER FOR HELIUM GAS UNDER EXPERIMENTALLY DECREASING FLOW CONDITION, Proc. of the 16th International Heat Transfer Conference, IHTC16-21556, pp.1-8, August 10-15, 2018, Beijing (China), 査読有

(2) Liu Qiusheng, Ayumi Kitano, Fukuda Katsuya, Shibahara Makoto, Transient Heat Transfer for Helium Gas at Various Flow Decay Time Conditions and Heat Generation Rates, Proceedings of the 26th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE26-81391, pp.1-7, July 22-26, 2018, London (UK), 査読有

(3) Liu Qiusheng, Shibahara Makoto, Fukuda Katsuya, Convection Heat Transfer of Helium Gas under Flow Decay Conditions, International Symposium on Marine Engineering (ISME 2017), Oct.15-19, 2017, TIEC (Tokyo) 査読有

(4) Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Flow Boiling and High Critical

Heat Flux for Subcooled Water in a Mini Channel, International Symposium on Marine Engineering, Oct.15-19, 2017, TIEC (Tokyo) 査読有

(5)Nakamura Yuji, Liu Qiusheng, Fukuda Katsuya, Shibahara Makoto, Hata Koichi, Transient Heat Transfer in Vertical Small Tube at Slow Flow Velocities, International Symposium on Marine Engineering, Oct.15-19, 2017, TIEC (Tokyo) 査読有

(6)LIU Qiusheng, Shibahara Makoto, Fukuda Katsuya, Forced Convection Heat Transfer for Helium Gas under Exponentially Decreasing Flow Condition, The 25th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 25), Paper No. 66469, pp.1-6, July 17-21, 2017, Shanghai (China), 査読有

(7)Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Critical Heat Flux for Convective Boiling in Mini-Tube due to Power Transient, ASME 2017 Summer Heat Transfer Conference, HT2017-5043, 1-6, July 9-12, 2017, Washington(US), 査読有

(8) Park Jongdoc, FUKUDA Katsuya, LIU Qiusheng, Critical Heat Flux Phenomena Depending on Pre-pressurization in Transient Heat Input, Proceeding of the 3rd International Conference of Global Network for Innovative Technology, AIP Publishing, 1865, 080005, 1-7, Jan. 27-29, 2017, Penang(Malaysia), 査読有

(9) LIU Qiusheng, Transient Heat Transfer of Helium Gas and Thermal Hydraulics in the Very High Temperature Gas-cooled Reactor, 9th International Symposium on Heat Transfer (ISHT9), Tsinghua University, Keynote Q1004, 1-7, Aug. 15-19, 2016, Beijing (China), 査読有

(10)LIU Qiusheng, FUKUDA Katsuya, Transient Forced Convective Heat Transfer for Helium Gas under Flow Decay Conditions, The 5th International Conference on Nuclear and Renewable Energy Resources (NURER2016), Chinese Academy of Sciences, OS5B-I01, 1-10, Sep.18-21, 2016, Hefei(China), 査読有

(11) LIU Qiusheng, WANG Li, SHIBAHARA Makoto, FUKUDA Katsuya, TRANSIENT HEAT TRANSFER FOR HELIUM GAS FLOWING OVER A HORIZONTAL CYLINDER UNDER FLOW DECAY CONDITIONS, International Conference on Nuclear Engineering (ICONE24), ICONE24-60783, 1-6, June 26-30, 2016, Charlotte(USA), 査読有

(12) LIU Qiusheng, Zhang Yu, Wang Li, Shibahara Makoto, Fukuda Katsuya, TRANSIENT CONVECTIVE HEAT TRANSFER FOR HELIUM GAS AT VARIOUS FLOW DECAY TIMES, 9th International Symposium on Heat Transfer (ISHT9), Tsinghua University, Paper No. ISHT9-R0226, 1-6, Aug. 15-19, 2016, Beijing (China), 査読有

(13)Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda,

Qiusheng Liu, Hata Koichi, Watanabe Sho, Nakamura Yuji, Muroga Takeo, FLOW BOILING AND CRITICAL HEAT FLUX FOR SUBCOOLED WATER IN VERTICAL TUBE DUE TO EXPONENTIALLY INCREASING HEAT INPUTS, Proc. of The 27th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP27), 101,1-5, Sep. 20-23, 2016, Hawaii(US), 査読有

(14)Makoto Shibahara, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Koichi Hata, Convective Boiling Heat Transfer Characteristics for Pressurized Water in a Small Tube, Proceedings of 7th Pan Asian Association of Maritime Engineering Societies and Advanced Maritime Engineering Conference 2016, AMEC2016-2B3-074, 1-6, Oct.13-14, 2016, Hong Kong(China).

(15) Wang Li, LIU Qiusheng, Shibahara Makoto, Fukuda Katsuya, NUMERICAL STUDY OF TRANSIENT HEAT TRANSFER FOR HELIUM GAS FLOWING OVER A HORIZONTAL CYLINDER UNDER FLOW DECAY CONDITIONS, 9th International Symposium on Heat Transfer (ISHT9), Tsinghua University, Paper No. ISHT9-R0320, 1-6, Aug. 15-19, 2016, Beijing (China), 査読有

6 . 研究組織

(1)研究代表者

劉 秋生 (Qiusheng Liu)
神戸大学・海事科学研究科・教授
研究者番号：80294263

(2)研究分担者

福田勝哉 (Katsuya Fukuda)
神戸大学・海事科学研究科・教授
研究者番号：10127417

(3)研究分担者

柴原誠 (Makoto Shibahara)
神戸大学・海事科学研究科・特命助教
研究者番号：70628859