

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560231

研究課題名(和文) 超高温ガス炉の工学的安全性に関わる捻り伝熱面の伝熱促進及び炉内熱流動特性の解明

研究課題名(英文) Heat Transfer Enhancement of Twisted Heater and Thermal Hydraulics in a Very High Temperature Gas-cooled Reactor

研究代表者

劉 秋生(Liu, Qiusheng)

神戸大学・海事科学研究科(研究院)・教授

研究者番号：80294263

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：ねじり発熱体におけるヘリウムガスの強制対流伝熱促進を解明するため、発熱体のねじりのピッチの長さ及びピッチの数の影響を調べた。その結果、熱伝達係数はピッチが長いほど、ピッチの数が多くなるほど減少することが判明した。実験データに基づき、準定常熱伝達の実験式を求めた。また、数値解析によりねじり発熱体の熱伝達促進のメカニズムを解明した。さらに、超高温ガス炉(VHTR)における熱流動現象の数値シミュレーションを行い、炉内のバイパス流れ及びクロス流れを考慮し、その影響を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The knowledge of heat transfer enhancement for a twisted heater is important for the high performance design of very high temperature reactor (VHTR). In this study, forced convection transient heat transfer for helium gas at various pitches of a twisted plate was experimentally studied. An enhancement in the heat transfer coefficient was clarified. It was clarified that the convective heat transfer for a small pitch heater is higher than that for a large pitch heater. Based on the experimental data, empirical correlation of heat transfer for twisted plate was obtained. Forced convection heat transfer for a twisted plate was also numerically studied. The mechanism for heat transfer enhancement was clarified by comparing the numerical results with experimental data. Moreover, numerical simulation was conducted for the thermal hydraulic analysis in the VHTR core. Effects of bypass gap size and cross gap size on temperature and coolant mass flow rate distribution were clarified.

研究分野：熱工学

キーワード：対流熱伝達 伝熱促進 ねじり 非定常 ヘリウムガス 熱流動特性 数値シミュレーション 超高温ガス炉

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。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、高温ガス炉から供給される高温の熱は、熱電併給ができ、合成ガス製造、蒸気タービン発電等に多段に利用でき、80%を超える極めて高い利用率で熱を使うことができる。更に、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、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、原子炉内の非定常熱移動現象の解明や原子炉内のバイパス流れによる流量分布の変化とそれに伴う温度分布の変化など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。また、超高温ガス炉の高温の熱を利用する場合、中間熱交換器(IHX)による熱交換が必要であり、中間熱交換器の熱交換効率を上げるため、伝熱促進効果を究明する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、超高温ガス原子炉(VHTR)における熱流動の解明及び中間熱交換器の熱交換を促進するために、以下の項目について研究を行う。

(1) 中間熱交換器における捻り(ねじり)伝熱面を用いた伝熱促進特性の実験的研究

ねじり伝熱面の伝熱促進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。発熱体の部分は捻った白金発熱体を設置して行う。ねじりのピッチ等の影響を実験的に解明する。また、ガス流速の

影響も調べる。

(2) ねじり発熱体における伝熱促進の数値解析

中間熱交換器の熱交換を効率よく促進するため、種々伝熱促進技術を開発する。その中で特に伝熱面の形状、ねじった場合の流れに対する乱流効果を数値的に解明し、その伝達促進のメカニズムを理論的に解明する。

(3) VHTR 炉心における熱流動解析及び燃料体ギャップの影響の解明

実際に開発されている VHTR の炉心について、種々燃料ブロックのギャップの条件下でバイパス流れ及び流量分布、そしてそれに伴う温度分布を求め、炉心の最高温度を求め、燃料ブロック間のギャップ等の影響を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 広範囲の実験条件下で捻り発熱体を用いたヘリウムガスの強制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、ねじり発熱体のピッチ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伝熱実験装置の三つの部分からなる。Fig.1は強制対流実験装置の概略図を示す。ねじり白金発熱体は右下側の試験部(6)に設置する。Fig.2はねじり発熱体を設置した試験部を示す。ねじり発熱体のピッチは20 mmか30 mmまで変更できるように設計している。ねじり発熱体を試験部に取り付け、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、強制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、発熱体に種々発熱率を与える。その時間経過に伴う発熱体表面温度及び熱流束を求める。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)。試験発熱体表面からの熱流束は、発熱体の熱のバランスより求める。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、熱流束、発熱体温度、熱伝達係数のデータを種々ピッチ、流速の実験条件下で求め、それらの影響を詳細に調べる。

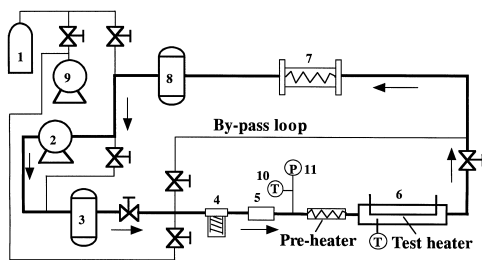
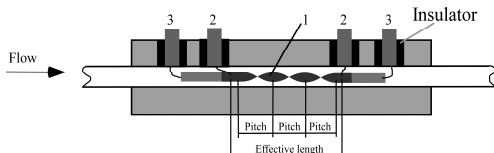


Fig.1 Experimental apparatus.



- 1. Test heater
- 2. Potential conductor
- 3. Current conductor
- 4. Thermocouple

Fig.2 Test section.

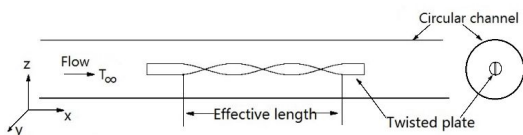


Fig.3 Physical model.

(2) ねじり発熱体を用いた強制対流熱伝達過程の理論解析

実験と並行して、理論解析も行う。Fig.3に示す発熱体のまわりにヘリウムガスが流れ、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変えて強制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発熱体のねじりピッチ、流速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、ねじり発熱体を用いた熱伝達過程のメカニズムを明らかにすることができる。

(3) VHTR における熱流動の解析を行い、そのバイパス流れの影響を解明する。

種々流量、燃料ブロック体間のギャップ等の条件下で超高温ガス炉 (VHTR) 内の流量分布、温度分布解析を行い、バイパス流れや

ギャップの影響を明らかにする。

4. 研究成果

(1) ねじり伝熱面を用いた伝熱促進特性

Fig.4 は、ねじり発熱体のピッチが 20 mm の場合、ガス温度が 303 K、系圧力が 500 kPa、ガス流速が 10 m/s、発熱率上昇周期の e-fold 時間 τ が 433 ms における発熱率 \dot{Q} 、表面温度差 ΔT (発熱体表面温度と流体主流温度との差) 及び熱流束 q の時間変化を示したものである。図より、発熱率が指数関数状に上昇するにつれ、表面温度差及び熱流束はそれぞれ指数関数状に上昇していることがわかる。

Fig.5 はねじり発熱体と平板発熱体の熱伝達係数を比較したものである。平板より 12.8% ~ 16% 熱伝達係数が向上していることがわかる。また、ピッチが 20mm, 25mm, 30mm の実験範囲内で伝熱促進効果を比較した結果、ピッチが 20mm の向上率が一番高く、ピッチが短いほど伝熱促進効果が高いことがわかった。

(2) ねじり発熱体の準定常熱伝達及び非定常熱伝達の表示式

ピッチが 20 mm の場合の実験データに基づき、次に示すねじり発熱体の準定常熱伝達実験表示式を求めた。

$$Nu_{st} = 1.77 Re^{0.5} Pr^{1/3} \quad (1)$$

また、非定常熱伝達について、下記の実験式を求めた。

$$Nu_{tr} / Nu_{st} = 1 + 1.1(\tau U / L)^{-0.8} \quad (2)$$

ここで、 Nu_{st} : 準定常ヌセルト数、 Re : レイノルズ数、 Pr : プラントル数、 Nu_{tr} : 過渡ヌセルト数、 $\tau U / L$: 無次元パラメータ、 U : 流速、 L : 発熱体の有効長さ。

(3) 伝熱促進の数値解析

ANSYS Fluent の計算コードを用い、捻り発熱体の強制対流熱伝達現象を数値シミュレーションした。Reynolds Stress Model (RSM) モデルを使用した。Fig.6 は捻り発熱体の数値計算の結果と実験データとの比較を示したものである。実験データとは 7.4% 以内で一致している。Fig.7 は発熱体表面における熱伝達係数の数値計算結果を示す。流れに直面する伝熱面においては高い熱伝達係数の分布が見られる。実験データ及び数値解析結果に基づき、ねじり発熱体の伝熱促進に関するメカニズムの検討を行った。その結果、主に流速増加による速度境界層の厚さの低減効果、二次流れの効果及びスワール流れによる境界層内部と主流との混合効果が挙げられる。

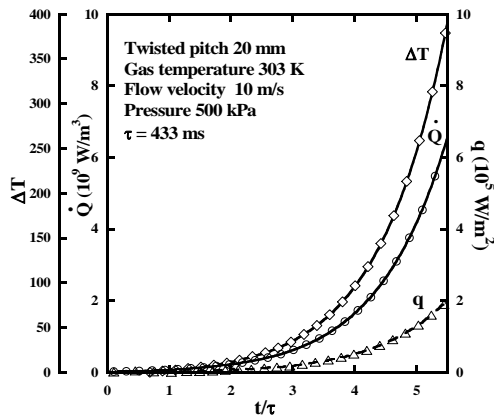


Fig.4 Relationships of \dot{Q} , q , ΔT with t/τ .

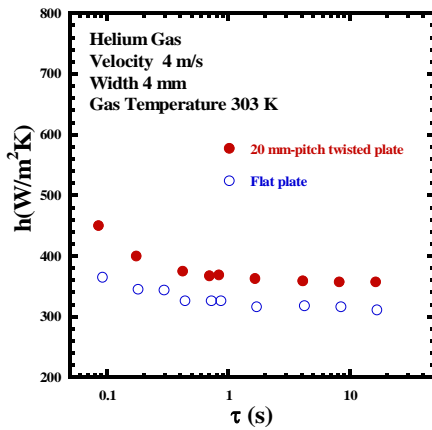


Fig.5 Heat transfer coefficients for 20 mm-pitch twisted plate at 4 m/s and various periods.

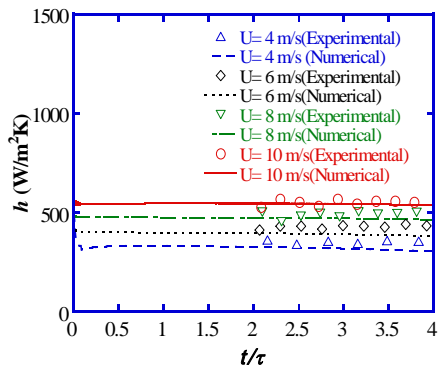


Fig.6 Comparison of simulation results with experimental data.

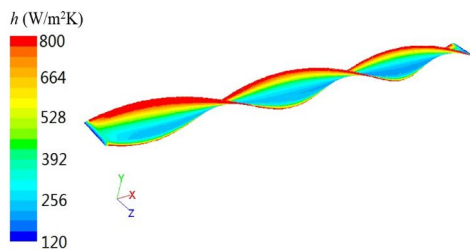


Fig.7 Distribution of heat transfer coefficient on the heater surface.

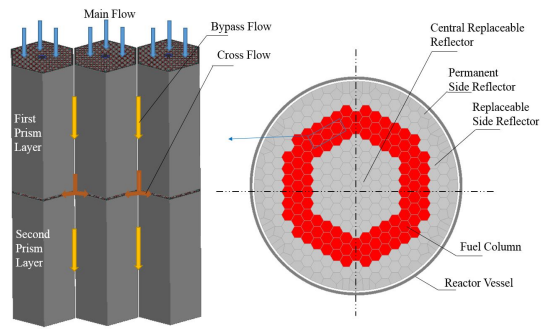


Fig.8 Bypass flow and cross flow in a VHTR.

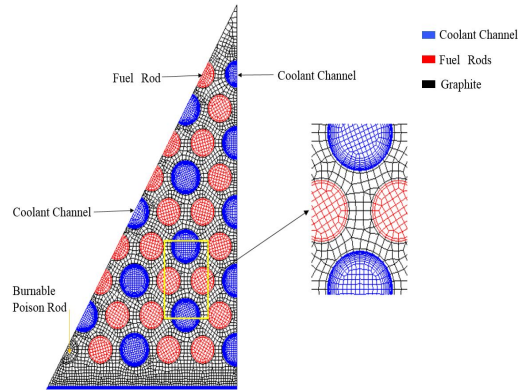


Fig. 9 1/12 sector for a fuel assembly.

(4) VHTR 炉心における熱流動解析

超高温ガス炉におけるバイパス流れとクロス流れは Fig.8 に示す。燃料体における温度分布と流量分布について、ANSYS Fluent の計算コードを用い、数値シミュレーションを行った。Fig.9 は 1/12 の燃料体の解析モデルを示す。解析結果に基づき燃料ブロック体間のギャップが大きいほど温度勾配が大きくなることがわかる。また、計算結果より、ホットスポット温度及び冷却チャンネル出口温度差がギャップサイズと共に増加することを明らかにした。

(5) 本研究の学術的な特色・独創性

種々捻りピッチを持つ伝熱面の伝熱促進メカニズムを実験及び理論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、実際に起こり得る燃料体のブロック間のギャップ変動に伴うバイパスフローの現象を数値的にアプローチし、解明するものである。この複雑な現象が炉内の熱流動に及ぼす影響を解明することに特色がある。

(6) 得られた成果の意義とインパクト

種々ピッチの捻り伝熱面の伝熱促進効果を実験的及び理論的に解明することができた。また、原子炉内の流れや温度分布を解析し、燃料体のギャップの影響やバイパス流れの影響が解明できた。

本研究で得られた成果は 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 10 件)

- (1) LIU Qiusheng, Zhao Zhou, FUKUDA Katsuya, Transient heat transfer for forced flow of helium gas along a horizontal plate with different widths, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.75, pp.433-441,2014, 査読有
- (2) PARK Jongdoc, FUKUDA Katsuya, LIU Qiusheng, Boiling CHF phenomena in water and FC-72, *J. of the Korea Society of Marine Engineering*, Vol.38-5, pp. 581-588,2014, 査読有
- (3) Zhao Zhou, LIU Qiusheng, FUKUDA Katsuya, Experimental and numerical study on transient heat transfer for helium gas flowing over a flat plate containing an exponentially increasing heat source, *Mechanical Engineering Journal*, Vol.14, No.4, pp.1-13,2014, 査読有
- (4) LIU Qiusheng, Morooka Shinichi, Recent activities in the field of thermal hydraulic researches, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol.51, No.10, pp.1311-1313,2014, 査読有
- (5) LIU Qiusheng, FUKUDA Katsuya, Sutopo Purwono Fitri, Experimental Study on Thermosyphon for Shipboard High-Power Electronics Cooling System, *Heat Transfer Engineering*, Vol.35, No.11-12, pp.1077-1083, 2014, 査読有
- (6) 樋口 慶明, 福田 勝哉, 劉 秋生, 高熱流束二相閉ループサーモサイフオンの熱輸送特性, *日本マリンエンジニアリング学会誌*, Vol.49, No.4, pp.539-546,2014, 査読有
- (7) Zhao Zhou, 劉 秋生, 福田 勝哉, Transient Heat Transfer for Helium Gas Flowing over a Plate, *日本マリンエンジニアリング学会誌*, Vol.48, No.3, pp.129-134,2013, 査読有
- (8) PARK Jongdoc, FUKUDA Katsuya, LIU Qiusheng, CHF Phenomena by Photographic Study of Boiling Behavior due to Transient Heat Inputs, *Science and Technology of Nuclear Installations*, pp.1-12, 2012, 査読有

(9) 柴原 誠, 劉 秋生, 福田 勝哉, 強制対流ガス冷却と伝熱促進について, *日本マリンエンジニアリング学会誌*, Vol.48, No.2, pp.175-180, 2013, 査読有

(10) 福田 勝哉, 劉 秋生, 未来エネルギーシステムにおける高熱流束除熱に関わる基礎研究: 除熱限界熱流束について, *日本マリンエンジニアリング学会誌*, Vol.48, No.2, pp.167-174, 2013, 査読有

[学会発表](計 22 件)

- (1) Li Wang, Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda, Experimental and Numerical Study on Transient Heat Transfer for Helium Gas Flowing over a Twisted Plate with Different Length, *Proceedings of 23th International Conference on Nuclear Engineering*, ICONE23-1035, pp.1-9,2015.5.17-21, Chiba (Japan), 査読有
- (2) 王麗, 劉秋生, 福田勝哉, 超高温ガス炉の炉心燃料要素体における伝熱と流動の数値シミュレーション, 第 52 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, SP404, pp.1-2, 2015.6.3, 福岡, 査読無
- (3) LIU Qiusheng, Zhao Zhou, FUKUDA Katsuya, Transient heat transfer for a twisted plate in forced convection flow of helium gas, *15th International Heat Transfer Conference*, IHTC15-8667, pp.1-11, 2014.8.10-15, Kyoto (Japan), 査読有
- (4) LIU Qiusheng, ENDO Hirohiko, FUKUDA Katsuya, ZHANG Peng, Solution Process of Single Carbon Dioxide Bubble in Seawater, *Proceedings of the 6th PAAMES and AMEC 2014*, Paper No.SEDR-01, pp.328-332, 2014.10.28-30, Hangzhou (China), 査読有
- (5) Li Wang, Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda, Numerical solution on transient heat transfer for forced convection flow of helium gas over a twisted plate with different helical pitch, *Proceedings of the International Symposium on Marine Engineering 2014*, Paper No 119, pp.1-6, 2014.9.15-18, Harbin (China), 査読有
- (6) Min Han Htet, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Transient boiling critical heat flux on horizontal vertically-oriented ribbon in a pool of water, *Proceedings of the International Symposium on Marine Engineering 2014*, Paper No 138, pp.1-6, 2014.9.15-18, Harbin (China), 査読有
- (7) Zhou Zhao, Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda, Numerical and experimental study on transient forced convection heat transfer for exhaust gases flowing over a horizontal plate, *Proceedings of the International Symposium on Marine Engineering 2014*, Paper No 120, pp.1-6, 2014.9.15-18, Harbin (China), 査読有
- (8) Zhao Zhou, LIU Qiusheng, FUKUDA Katsuya, Experimental study on transient heat transfer enhancement for helium gas flowing

over a thin twisted plate, *22nd International Conference on Nuclear Engineering*, ICONE22-30158, pp.1-9, 2014.7.7-11, Prague(Czech Republic), 査読有

(9) Li Wang, Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda, Numerical Study on Transient Heat Transfer for Forced Convection Flow of Helium Gas over a Twisted Plate, *The 3rd International Symposium of Maritime Sciences*, pp.149-153, 2014.11.10-14, Kobe University (Hyogo), 査読無

(10)三石朗大, 趙舟, 劉秋生, 福田勝哉, ヘリウムガスにおけるねじり発熱体の強制対流熱伝達, 日本機械学会関西支部第89期定時総会講演会, 2014.3.17, 大阪府立大学(大阪), 査読無

(11) Min Han Htet, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Photographic Study of Subcooled Pool Boiling Critical Heat Flux on Horizontal Cylinders with Commercial and Rough Surfaces, *The 21st International Conference on Nuclear Engineering* (ICONE21), Paper No.16174, 2013.7.29-8.2, Chengdu(China), 査読有

(12) Zhou Zhao, Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda, Transient Heat Transfer for Helium Gas Flowing over a Horizontal Flat-plate with Different Widths, *The 21st International Conference on Nuclear Engineering* (ICONE21), ICONE21-15303, pp.1-9, 2013.7.29-8.2, Chengdu(China), 査読有

(13) Min Han Htet, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Photographic Study of Subcooled Pool Boiling CHF for Pre-pressurization before Each Experimental Run, *The 24th International Symposium on Transport Phenomena* (ISTP-24), 380-387, 2013.11.1-5, Yamaguchi (Japan), 査読有

(14) Zhao Zhou, Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda, Experimental and Numerical Study on Transient Heat Transfer for Helium Gas Flowing over a Flat Plate with Uniform Exponential Heat Generation, *The 24th International Symposium on Transport Phenomena* (ISTP-24), 358-364, 2013.11.1-5, Yamaguchi(Japan), 査読有

(15)Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda, Transient Forced Convection Heat Transfer from Various Gases Flowing over Horizontal Heaters with Different Configurations, *The 15th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics* (NURETH-15), Paper No.429, 2013.5.12-17, Pisa(Italy), 査読有

(16) Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda, Zhou Zhao, Transient Heat Transfer for Helium Gas with Exponentially Increasing Heat Inputs in Horizontal Heaters, International seminar on Subchannel Analysis CFD modeling and verification, CHF experiment and benchmarking, ISACC-2013, pp.1-16, 2013.8.3-4, Xian(China), 査読無.

(17) Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Nonlinear characteristics of pool and flow boiling CHF in subcooled water, International seminar on

Subchannel Analysis CFD modeling and verification, CHF experiment and benchmarking, ISACC-2013, pp.1-15, 2013.8.3-4, Xian(China), 査読無

(18) SHIBAHARA Makoto, FUKUDA Katsuya, LIU Qiusheng, Enhancement of Forced Convection Heat Transfer Using Twisted Heater with Exponential Heat Inputs, *ASME 2013 Heat Transfer Summer Conference* (HT2013), Paper No.17227, pp.1-6, 2013.7.14-19, Minneapolis (USA), 査読有

(19)柴原誠, 劉秋生, 福田勝哉, 強制対流ガス冷却に関する数値シミュレーション, 第83回日本マリンエンジニアリング学術講演会, pp.125-126, 2013.9.2-4, 静岡, 査読無

(20) PARK Jongdoc, FUKUDA Katsuya, LIU Qiusheng, Photographic Study on CHF Phenomena in Transient Pool Boiling, *8th International Symposium on Heat Transfer*, Paper No. 01-04, 1-5, 2012.10.21-24, Beijing (China), 査読有

(21) Zhao Zhou, LIU Qiusheng, FUKUDA Katsuya, Study on Forced Convection Transient Heat Transfer for Helium Gas Flowing over Horizontal Heaters, *8th International Symposium on Heat Transfer*, Paper No. ISHT8-8-8, pp.1-6, 2012.10.21-24, Beijing (China), 査読有

(22) LI Yantao, FUKUDA Katsuya, LIU Qiusheng, Subcooled flow boiling CHF versus outlet subcooling in short tube, *Proceedings of 23rd International Symposium on Transport Phenomena* (ISTP-23), Paper No.187, 2012.11.18-23, Auckland (New Zealand), 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

(4) 研究協力者

Per F. Peterson
米国カリフォルニア大学バークレー校 (UC Berkeley) 原子核工学科教授