

機関番号：14501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008 年度 ～ 2010 年度

課題番号：20560192

研究課題名（和文） 種々周期の指数関数状上昇する熱入力に伴うヘリウム等ガスの  
非定常熱伝達特性の解明研究課題名（英文） Transient Heat Transfer for Gases such as Helium Gas Flowing over  
Heaters with Exponentially Increasing Heat Input at Various Periods

研究代表者 劉 秋生 (Liu Qiusheng)

神戸大学・大学院海事科学研究科・教授

研究者番号：80294263

研究成果の概要（和文）：

水平円柱、平板及びねじり発熱体における種々ガス（ヘリウム、二酸化炭素、アルゴン、窒素）の強制対流非定常熱伝達について広い範囲で実験を行い、指数関数状上昇する熱入力の周期や流速、ガスの種類などによる影響を考察した。実験は、周期が 45 ms から 17 s、流速が 1 m/s から 10 m/s、の範囲で行った。ヘリウムガスの熱伝導率が他のガスより高いことより、熱伝達係数も高いことが解った。種々圧力・温度条件下の実験データに基づいて、種々ガスの準定常熱伝達及び非定常熱伝達の実験式を求めた。また、理論解析も行い、実験データとの比較検討を行い、非定常熱伝達のメカニズムを調べた。

研究成果の概要（英文）：

Forced convection transient heat transfer for various gases (helium, carbon dioxide, argon, and nitrogen gas) flowing over a horizontal cylinder, a plate, and a twisted one was experimentally studied under wide experimental conditions. The heaters were heated with heat inputs at various periods of exponentially increasing rate. The effects of period, velocity, and kind of gas were clarified. The periods ranged from 45 ms to 17 s, and the velocities ranged from 1 m/s to 10 m/s. Effect of gas thermal physical properties on heat transfer was investigated, and helium gas shows higher heat transfer coefficients than those of other gases due to its higher thermal conductivity. Empirical correlations for quasi-steady-state heat transfer and transient heat transfer were obtained based on the experimental data. In the theoretical study, transient heat transfer was numerically solved based on a turbulent flow model. The values of numerical solution for surface temperature and heat flux were compared, and the mechanism of transient heat transfer was investigated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：非定常、対流熱伝達、指数関数状上昇、周期、ヘリウムガス、平板、円柱、ねじり発熱体

## 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が選ばれ、ドイツ、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°C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できると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、原子炉内におけるガスの流れの過渡的な変動に伴う燃料温度の変化特性や、原子炉反応度事故の場合のように、気流中の燃料体の発熱率が指数関数状上昇するときの非定常（過渡）強制対流熱移動過程の解明は、超高温ガス炉の工学的安全解析において重要な課題である。

## 2. 研究の目的

本研究では、指数関数状増加する熱入力に伴うガスの非定常熱伝達特性を解明することを目的に、以下の項目について研究を行う。

### (1) 発熱率上昇周期の影響

ヘリウム等種々ガスの流れの中で試験発熱体への熱入力を種々の速さで指数関数状に増加させ、非定常強制対流熱移動現象における発熱率上昇周期の影響を解明する。

### (2) ガス流速の影響

固体壁から流体への熱伝達は、流速の大きさに伴う固体壁近傍にある流体の境界層の発達によって大きく影響を受ける。発熱率が指数関数状に増加した場合、しかも上昇が速い（周期が短い）場合、境界層内の温度分布は非定常的になり、従来の対流熱伝達現象とは異なる現象が現れる。低レイノルズ数から高レイノルズ数領域にかけて、非定常熱伝達実験データを取得する。

### (3) 発熱体の形状の影響及び伝熱促進の効果

対流熱伝達に対し、発熱体の表面に形成する境界層が現象を大きく支配する。水平平板と水平円柱の発熱体を用い、その影響を調べる。また、水平平板をスワール状（よじれたもの）に加工し、伝熱促進の観点から熱伝達がどのように促進されるかを調べる。

### (4) ガス種類の影響

学術的観点から、非定常熱伝達のデータをガスの種類を変えて取得するのが興味深い。ヘリウム、CO<sub>2</sub>、窒素、アルゴン等ガスの物性値の影響がどのようになるのかを調べる。

### (5) 非定常熱伝達の数値解析

乱流モデルに基づいて、種々周期、流速等の条件下で理論解析を行い、発熱体表面の速度境界層及び温度境界層を数値的に解明し、広い範囲で蓄積した実験データと理論解析結果との比較検討により、発熱率上昇速度が速い場合と遅い場合の熱伝達のメカニズムの違いを解明し、ヘリウム等種々のガスの非定常熱伝達特性を解明する。

## 3. 研究の方法

(1) 広範囲の実験条件下でヘリウム等ガスの強制対流非定常熱伝達過程の実験データを集積し、発熱率上昇周期及び流速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。白金発熱体（水平平板又は円柱）は右下側の試験部(6)に設置する。Fig.2は非定常伝熱実験装置試験部を示す。その試験部を既設の強制対流伝熱実験装置に取り込み、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、非定常熱伝達実験を行う。

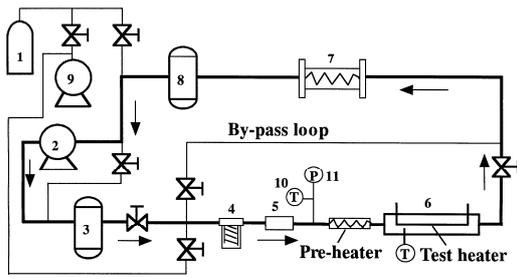
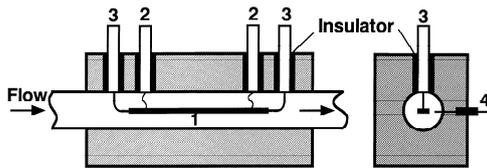


Fig.1 Experimental apparatus



1. Test Heater 2. Potential Conductor  
3. Current Conductor 4. Thermocouple

Fig.2 Cross-section of test section

**実験方法** 熱入力制御システムより、発熱体に電流を流し、発熱体に種々速さの指数関数状の発熱率  $\dot{Q} (= Q_0 \exp(t/\tau))$  を与える (ここで、 $t$  は時間、 $\tau$  は周期 (発熱率が  $e$  倍になる時間))。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等ガスを用い、熱流束、発熱体温度、熱伝達係数のデータを種々の流速、周期、ガス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) 強制対流非定常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 は、本理論解析の物理モデルを示す。実験と同様に、円管流路の中心部に流れる方向と平行に水平平板の発熱体が置かれている。流体と発熱体はヘリウム等種々ガスと白金とする。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、及び境界条件を二次元座標系において連立させ、発熱体内部の発熱率  $(\dot{Q} = Q_0 \exp(t/\tau))$  が種々の上昇周期で指数関数状に上昇する際の強制対流非定常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率上昇周期、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、非定常熱伝達過程のメカニズムを探る。

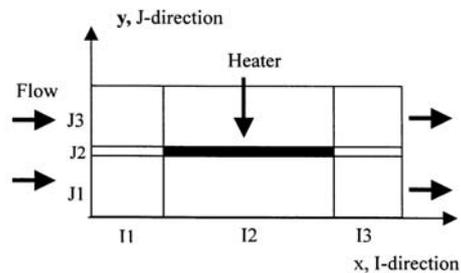


Fig.3 Calculation model

#### 4. 研究成果

##### (1) 発熱率、表面温度差及び熱流束の時間変化

Fig.4 は、発熱体が平板の場合、ガス温度が 313K、系圧力が 500 kPa、ガス流速が 10 m/s、発熱率上昇周期の  $e$ -fold 時間が 735 ms における発熱率  $\dot{Q}$ 、表面温度差  $\Delta T$  (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。Fig.5 は発熱体が円柱の場合における発熱率、表面温度差及び熱流束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.6 は、流速が 4 m/s ~ 10 m/s、発熱率上昇周期の  $e$ -fold 時間が 46 ms ~ 17 s における、熱伝達係数  $h$  と  $e$ -fold 時間  $\tau$  との関係を示す。図に示すように、熱伝達係数は流速が速くなるにつれて増加することがわかった。また、発熱率上昇周期が約 1 秒に存在する遷移領域をはさみ、発熱率上昇周期が早い領域すなわち約 1 秒の  $e$ -fold 時間より短い領域では、発熱率上昇周期が短くなるに従い熱伝達

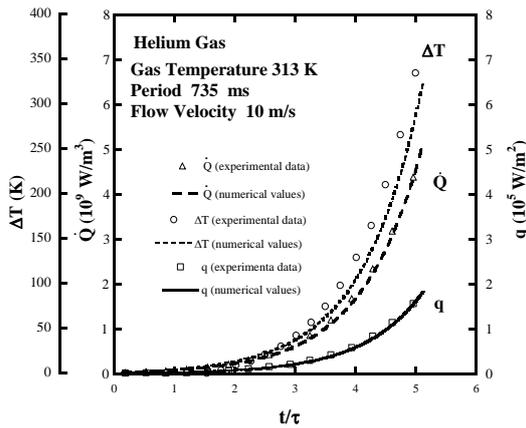


Fig.4 The Relation of  $\dot{Q}$ ,  $q$  and  $\Delta T$  with  $t/\tau$  at the period of 735 ms for the plate.

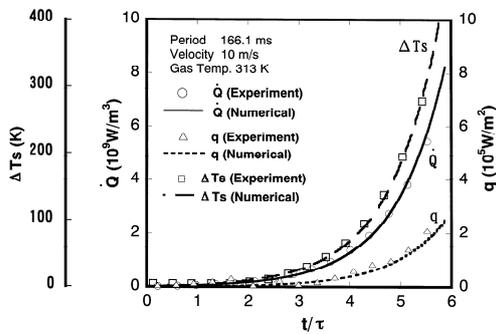


Fig.5 The Relation of  $\dot{Q}$ ,  $q$  and  $\Delta T_s$  with  $t/\tau$  at the period of 166.1 ms for the cylinder with a diameter of 1 mm.

係数が増加することがわかった。一方、発熱率上昇周期が遅い領域、すなわち約1秒のe-fold時間より長い領域では、熱伝達係数は発熱率上昇周期の変化に無関係にほぼ一定値となり、準定常熱伝達状態にあると考えられる。

### (2) 準定常強制対流熱伝達

発熱率上昇周期が1 s以上のデータに基づき、ヌセルト数 ( $Nu_{st}$ ) とレイノルズ数 ( $Re$ ) の関係を両対数面上にプロットした。 $Nu_{st}$  と  $Re$  の関係から、レイノルズ数の増加に伴ってヌセルト数が増加していることが解る。これらの実験データに基づき、次に示す準定常熱伝達実験表示式を求めた。

$$Nu_{st} = 1.24Re^{0.5}Pr^{1/3} \quad \text{for plate} \quad (1)$$

$$Nu_{st} = 2.2Re^{0.5}Pr^{0.4}(D/D_0)^{-0.5} \quad \text{for cylinder} \quad (2)$$

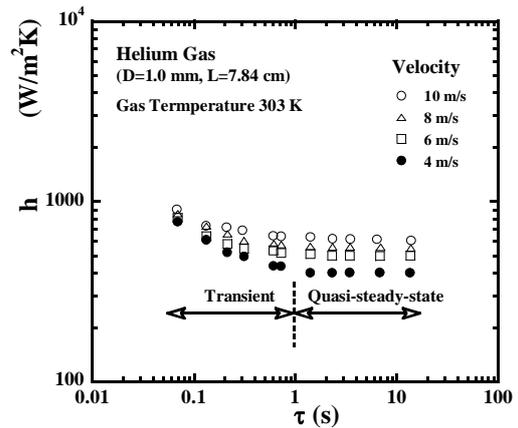


Fig.6 Heat transfer coefficients for the cylinder heater at various periods and velocities.

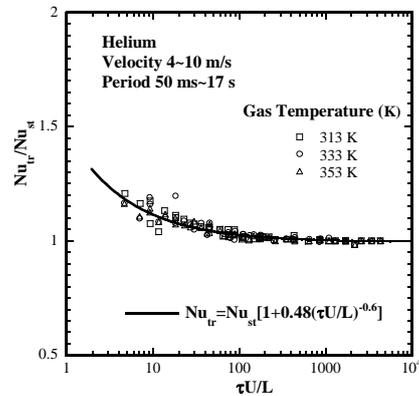


Fig.7 Transient heat transfer and its correlation correlated by dimensionless parameter,  $\tau U/L$ . (Plate)

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,  $D$  : 発熱体直径,  $D_0=1$  mm.

### (3) 非定常(過渡)強制対流熱伝達

非定常(過渡)熱伝達におけるヌセルト数 ( $Nu_{tr}$ ) とレイノルズ数との関係を両対数面上にプロットし、各発熱率上昇周期での熱伝達を比較した場合、周期が短くなればヌセルト数は増加するが勾配は小さくなり、すなわち、流速の影響が低減するような傾向が見られる。このように過渡強制対流熱伝達のヌセルト数は周期と流速の影響を受ける。周期が長いほど定常熱伝達に漸近し、周期が短いほどデータの勾配が減少し、流速の影響が小さくなっている。

Fig.7 は、平板の場合、過渡ヌセルト数、

$Nu_{tr}$ , と定常ヌセルト数,  $Nu_{st}$ , との比を無次元パラメータ,  $\tau U/L$  ( $U$ :流速,  $L$ :発熱体の有効長さ) との関係を示したものである。図に示すように, 無次元パラメータが約 200 以上になると, 過渡熱伝達が定常値に漸近していることが解る。これらの実験データに基づき, 以下に示すような過渡熱伝達の実験式を求めた。円柱の場合でも, 同様に種々発熱体直径における過渡熱伝達の表示式を下記のように求めた。

平板:

$$Nu_{tr} = Nu_{st} \{1 + 0.48(\tau U/L)^{-0.6}\} \quad (3)$$

円柱:

$$Nu_{tr} = Nu_{st} \{1 + 2.0(\tau U/L)^{-0.8}\} \quad (4)$$

#### (4) 数値解析結果

発熱体内部の発熱率  $\dot{Q}(=Q_0 \exp(t/\tau))$  が種々の周期で指数関数状に増加する場合の強制対流過渡熱伝達の数値解析を行った。CFD2000解析コードを使用した。

数値解析結果の代表例は Fig. 4-5 に示す。数値解析解の発熱体表面温度差及び熱流束は, 実験データと同様, 発熱率が指数関数状に上昇するにつれて, それぞれ指数関数状に上昇している。流速 6 m/s では, 平板における数値解析解と実験データとよく一致している。しかし, 10 m/s の場合, 熱流束は実験データと一致するが, 表面温度差は実験データより 5%低くなっている。一方, 円柱の場合, 直径 1 mm では, 実験値とよく一致していることが解った。直径が 0.7 mm, 2.0 mm の場合, 表面温度差が実験値とよく一致するが, 熱流束の実験値との相違が少し大きく見られた。

#### (5) ガス種類の影響

ヘリウム, 二酸化炭素, アルゴン, 窒素の強制対流非定常(過渡)熱伝達について実験的に調べた。ヘリウムガスの熱伝導率が二酸化炭素ガスより 8 倍程度高いことより, 熱伝達係数も高いことが解った。実験データに基づき, 種々ガスの定常及び非定常熱伝達表示式を求めた。

#### (6) 発熱体の形状による影響

発熱体の形状による影響を調べるため, ねじり発熱体のねじり角度を 45°, 90°とした場合の実験データを取得した。平板の場合と比べ, ねじり発熱体の熱伝達係数がガスの種類によるが 13%~28%高いことが解った。実験データより種々ガスにおけるねじり発熱体の伝熱促進効果が判明した。

#### (7) 本研究の学術的な特色・独創性

本研究は, 超高温ガス炉の工学的安全解析に関わる非定常熱移動特性を解明するため, 真の現象へのアプローチが実現できる指数関数状の熱入力を与えた場合の非定常熱移動問題を取り扱うものである。この発熱率の上昇速度が極めて速い, 指数関数状上昇に伴う非定常熱移動現象を解明したことが本研究の特色である。

#### (8) 得られた成果の意義とインパクト

① 種々発熱率上昇周期, 流速, 発熱体形状等の非定常熱伝達のデータベースが体系的に構築でき, 種々パラメータによる影響が解明できた。特に発熱率の上昇速度が速い場合と遅い場合の熱伝達のメカニズムが解明できた。

② 本研究で構築したデータベースは超高温ガス炉の工学的安全解析に基礎的なデータを提供し, 超高温ガス炉の研究・開発並びに将来の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。

#### 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 11 件)

(1) M. Shibahara, Q.S. Liu, and K. Fukuda, Effect of Heater Configurations on Transient Heat Transfer for Various Gases Flowing over a Twisted Heater, *Journal of Power and Energy Systems (JSME)*, Vol.4, No.1, pp.262-273, 2010, 査読有

(2) Sutopo P. Fitri, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Direct transition phenomena in pool boiling of Fc-72, *Journal of Thermal Science and Technology*, Vol.5, No.2, pp.206-221, 2010, 査読有

(3) Q.S. Liu, Innovative Nuclear Technologies for Low-Carbon Society, Sixth Overseas Chinese Forum Worldwide, pp.95-98, 2010. 査読有

(4) M. Shibahara, Q.S. Liu, K. Fukuda, Enhanced Transient Heat Transfer Caused by Partially Twisted Heater in Various Gases, *Journal of the Japan Institute of Marine Engineering*, Vol.45, Special Issue, pp.97-102, 2010, 査読有

(5) J. Park, K. Fukuda, and Q.S. Liu, Boiling Transition Phenomena to CHF in Water and FC-72, *Journal of the Japan Institute of Marine Engineering*, Vol.45, Special Issue, pp.103-108, 2010, 査読有

- (6) J. Park, K. Fukuda, and Q.S. Liu, Transient CHF Phenomena Due to Exponentially Increasing Heat Inputs, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.41, No.9, pp.1205-1214, 2009, 査読有
- (7) Makoto Shibahara, Qiusheng Liu, and Katsuya Fukuda, Transient Forced Convection Heat Transfer Due to Exponentially Increasing Heat Input for Helium Gas Flowing on a Narrow Plate, *Journal of Power and Energy Systems*, Vol.3, No.1, pp.1-17, 2009, 査読有
- (8) Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda, and Makoto Shibahara, Theoretical and Experimental Studies on Transient Forced Convection Heat Transfer of Helium Gas, *Thermal Science & Engineering*, Vol. 16, No.4, pp.157-162, 2008, 査読有
- (9) Q.S. Liu, M. Shibahara, and K. Fukuda, Transient Heat Transfer for Forced Convection Flow of Helium Gas over a Horizontal Plate, *Experimental Heat Transfer*, vol.21, pp.206-219, 2008, 査読有
- (10) Sutopo P. Fitri, Katsuya Fukuda, Qiusheng Liu, Transient critical heat fluxes in subcooled pool boiling of FC-72, *Journal of Power and Energy Systems*, Vol.2, No.2, 804-814, 2008, 査読有
- (11) Jongdoc Park, Katsuya Fukuda, and Qiusheng Liu, Steady and Transient Boiling CHF's with Different Mechanisms Depending on Cylinder Surface Roughness in Highly Wetting Liquid, *Journal of Power and Energy Systems*, Vol.2, No.6, p.1333-1344, 2008, 査読有

〔学会発表〕 (計 11 件)

- (1) Q.S.Liu, M. Shibahara, and K.Fukuda, Transient Heat Transfer from a Horizontal Plate in Forced Flow of Various Gases, 8th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, March 13-17, 2011, Honolulu, Hawaii, USA, 査読有
- (2) M. Shibahara, Q.S.Liu, and K.Fukuda, Enhanced Heat Transfer for Various Gases Flowing over a Twisted Heater Due to Exponentially Increasing Heat Input, *14th International Heat Transfer Conference, IHTC14, Paper No.22978, pp.1-9, Aug.8-13, Washington, DC, USA, 2010*, 査読有
- (3) Q.S.Liu, K.Fukuda, Transient Heat Transfer from a Horizontal Cylinder in the Perpendicular and Parallel flow of Helium Gas, *International Topical Meeting on Nuclear Thermal-Hydraulics, Operation and Safety*, N8P0045, pp.1-13, 2010, 査読有
- (4) Q.S. Liu, K. Fukuda, and Makoto Shibahara, Transient Forced Convection Heat Transfer of Helium Gas at Various Pressures and Temperatures, *The 13th International Topical*

*Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics*, N13P1132, pp.1-13, 2009, 査読有

(5) M. Shibahara, Q.S. Liu, and K. Fukuda, Effect of Heater Configurations on Transient Heat Transfer for Various Gases Flowing Over a Twisted Heater, *17th International Conference on Nuclear Engineering*, 2009, Brussels, Belgium, 査読有

(6) M. Shibahara, Q.S. Liu, and K. Fukuda, Enhanced Transient Heat Transfer Caused by Partially Twisted Heater in Various Gases, *International Symposium on Marine Engineering (ISME) 2009*, 2009.10.18-22, Pusan, Korea, 査読有

(7) K.Fukuda, Q.S.Liu, Non-linear characteristics of saturated and subcooled pool boiling CHF for various test heater configuration, *17th International Conference on Nuclear Engineering*, 2009.7.12-16, Brussels, Belgium, 査読有

(8) 柴原誠, 劉秋生, 福田勝哉, 増加熱入力を伴うねじり発熱体を用いた気流中の伝熱促進, 第79回マリンエンジニアリング学術講演会, 2009.9.16, 広島, 査読無

(9) Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda, Forced Convection Film Boiling Heat Transfer from Single Horizontal Cylinders in Saturated and Subcooled Liquids: Part 1-Experimental Data and Its Correlation for Saturated Liquids, *2008 ASME Heat Transfer Conference (HT2008)*, HT2008-56397, pp.1-17, 2008, 査読有

(10) Qiusheng Liu, Katsuya Fukuda, and Per F. Peterson, Transient Heat Transfer of Helium Gas for Advanced High Temperature Reactor System, *Sixth Japan-Korea Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety*, Okinawa, Japan, Nov. 24- 27, pp. 1-8, 2008, 査読有

(11) M. Shibahara, Q.S. Liu, and K. Fukuda, Transient Heat Transfer for Carbon Dioxide Flowing over a Horizontal Plate with Exponentially Increasing Heat Input, *2008 ASME Int. Mechanical Eng. Congress and Exposition*, Oct.31-Nov.6, 2008, Boston, USA, 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