

令和 2 年 5 月 14 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06200

研究課題名(和文) ナノ流体による対流・沸騰伝熱促進と伝熱機構の解明

研究課題名(英文) Study on convective and boiling heat transfer of nanofluid.

研究代表者

岩本 光生 (Iwamoto, Mitsuo)

大分大学・理工学部・教授

研究者番号：80232718

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：液体中にナノサイズの粒子を分散させたナノ流体の伝熱特性の研究を行った。
(1)自然対流熱伝達：下方加熱，上方冷却の密閉容器内にナノ流体を満たし，ベース流体は水，ナノ粒子としてAl2O3など6種類を用いた。どのナノ流体もベース流体の水より熱伝導率は高いが熱伝達率は低下し，この理由がナノ流体の体膨張係数が小さく，粘性係数が大きいためであることを示した。
(2)ミスト噴流冷却実験：ナノ流体のミストを窒素ガスと共に高温加熱面上に衝突させると，噴射時間が長くなると熱伝達率が低下した。このため加熱面上にナノ粒子を事前に堆積させた水スプレー冷却では熱伝達率は向上するが，堆積層が厚くなると熱伝達率は低下した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電子機器の高密度化に対応し，安全で高性能な冷却剤は重要である。このため，水などのベース流体に水より熱伝導率の高いナノサイズの固体粒子を安定に分散させたナノ流体は，その高い熱伝導率から注目されている。ナノ流体を強制対流熱伝達に使う場合，熱伝達率が上昇することが報告されているが，自然対流熱伝達においてはあまり報告がなく，本報では6種類のナノ粒子を用いたナノ流体の自然対流熱伝達実験を行い，伝熱性能がベース流体より低下することを報告している。また高温加熱面に水スプレー冷却をする場合，ライデンフロスト現象により性能が低下するが，加熱面上にナノ粒子層がある場合，それを抑制できることを報告した。

研究成果の概要(英文)：Nanofluid is suspended nano size particles in the base fluid. The heat transfer characteristic of nanofluid was studied.

1.Natural convection heat transfer.: Al2O3-water nanofluid is filled in the cylindrical container, which top is cooled, and the bottom is heated. Nanofluid has higher thermal conductivity than base fluid. The natural convection heat transfer coefficient of nanofluid is smaller than pure water. In this reason, the thermal expansion coefficient of nanofluid is lower than pure water. In addition, the viscosity of nanofluid is higher than pure water.
2.Nanofluid spray cooling on the heating surface.: Nanofluid spray cooling on the heating surface enhances the heat transfer coefficient than the water spray cooling. However, nanofluid spraying for a long period makes the thick nanoparticles layer on the heating surface, which decreases heat transfer coefficient on the heating surface.

研究分野：熱工学

キーワード：ナノフルード ナノ粒子 自然対流熱伝達 スプレー冷却

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電子機器の高密度化に伴う単位体積当たりの発熱量の増大のため、空冷・水冷より優れた冷却方法が求められている。また高温面への冷却において、水のスプレー冷却では加熱面上に蒸気膜が形成され熱伝達率が減少する。これらの対応として、ナノ流体を活用できないかを検討した。

2. 研究の目的

液体中にナノサイズの粒子を分散させたナノ流体はベース流体より熱伝導率に優れ、これを用いた伝熱促進効果について実験・数値解析により明らかにする。具体的には、

(1)ナノ流体による自然対流伝熱

(2)ナノ流体による高温加熱面の沸騰伝熱

について、ベース流体の水とナノ流体の伝熱性能を比較し、性能を左右する要因を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1)ナノ流体の自然対流伝熱伝達率の測定

実験では図1に示すように内径 **100mm**、厚さ **7mm**、高さ **10mm** のアクリル円筒容器の試験層内にナノ流体を充填した。円筒の上方に設置した銅板は水冷され、下面の銅板はシリコンラバーヒーターにより直流加熱し、上下面の温度差と入力電力から熱伝達率を測定している。また上下を逆にした水を用いた熱伝導実験から装置の熱損失を測定し、さらに水の自然対流実験から実験精度の検定を行った。実験に用いたナノ流体のベース流体は水であり、ナノ粒子は Al_2O_3 など6種類のナノ粒子を用いた。

(2)高温加熱面上へのスプレー冷却実験

実験では図2に示すように加熱面としてステンレス箔 (SUS304 , $50 \times 10 \text{ mm}$, 厚さ $30 \mu\text{m}$) を用い、温度測定のため裏面中心に直径 0.1 mm のK種熱電対を設置した。なお箔にはあらかじめ電気炉にて20分間加熱して酸化膜をつけた。これにスプレーノズル (内径 0.5 mm) から、水のみ、水のみ、ナノ流体のスプレー冷却、加熱面上にナノ粒子層を堆積させた状態での水スプレー冷却を行った。加熱面は直流電源で一定入力で加熱し、このときの加熱面温度の時間変化を測定した。

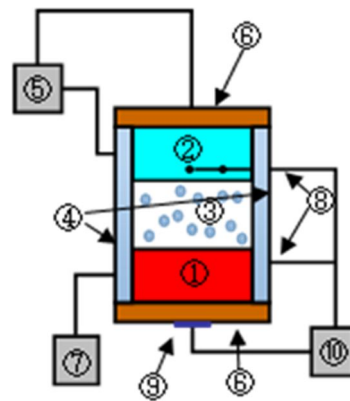


図1 自然対流実験装置

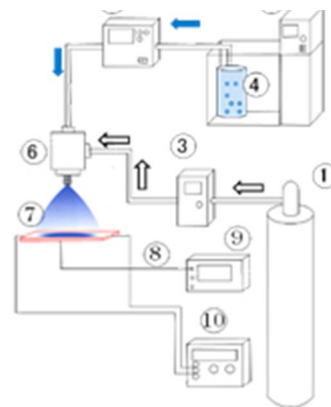


図2 スプレー冷却実験装置

4. 研究成果

(1) ナノ流体の自然対流伝熱伝達実験

Al_2O_3 -水ナノ流体における、ヒーター入力電力と平均熱伝達率の関係を図3に示す。ここで各記号はナノ粒子の体積濃度を示している。結果より、下部ヒーターへの入力電力が高くなるほど、全ての体積濃度で平均熱伝達率の上昇が見られた。また体積濃度と熱伝達率の関係を見ると、水(0 vol.%)の熱伝達率が最も高く、体積濃度の増加とともに熱伝達率が減少していることが分かる。

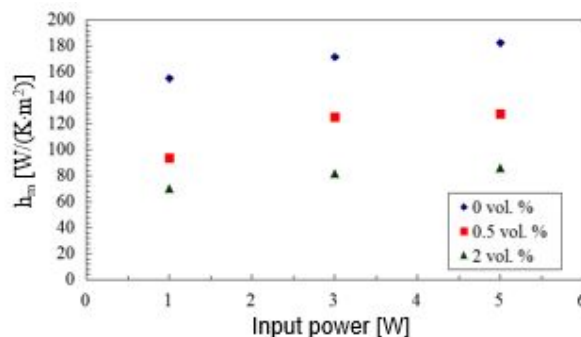


図3 入力電力・体積濃度と平均熱伝達率の関係

また, SiO_2 , CuO , Fe_2O_3 , TiO_2 , グラフェンを用いたナノ流体を用いた自然対流実験でも同様な結果が得られた。

ナノ流体はベース流体より熱伝導率が高いにもかかわらず熱伝達率が低い理由として, 物性値の影響が考えられる。物性値はナノ粒子の体積濃度, 粒径, 加熱-冷却面の平均温度などで変化する。

図4に Al_2O_3 -水ナノ流体の粘性係数と平均熱伝達率の関係を, 図5に体膨張係数と平均熱伝達率の関係を示す。各物性値は khanafer and vafai [1]によって報告された実験相関式を用いて導出した。ここで熱伝達率は粘性係数が増加すると低下し, また体膨張係数が大きくなると増加するという傾向が見られ, 図3で示したように, ナノ流体の熱伝達率が水より劣る原因として, ナノ流体の高い粘性係数と低い体膨張係数が原因ではないかと考えられる。

(2)高温加熱面へのスプレー冷却

図6に高温加熱面上へのスプレー冷却時の加熱面表面温度の時間変化を示す。青線は窒素ガスのみ, 緑線は窒素ガスとともに水をスプレーした場合であり, 赤線が SiO_2 ナノ流体をスプレーした場合の結果である。窒素ガスのみと比べ, 水を窒素ガスとともにスプレーした場合, 水の潜熱により少し温度は低下した。一方, ナノ流体を窒素ガスとともにスプレーすると, 表面温度は急激に低下したが, 時間が長くなると再び温度は上昇した。これはナノ粒子堆積層の熱伝導率は伝熱面の材質であるステンレスに比べて低いため, 成長とともにその層表面温度は低下し, ライデンフロスト点以下では液滴の核沸騰によって冷却速度は増加する。しかし, さらにナノ粒子層が成長すると粒子層が熱抵抗になり, 伝熱面温度は再び上昇するためだと考えられる。

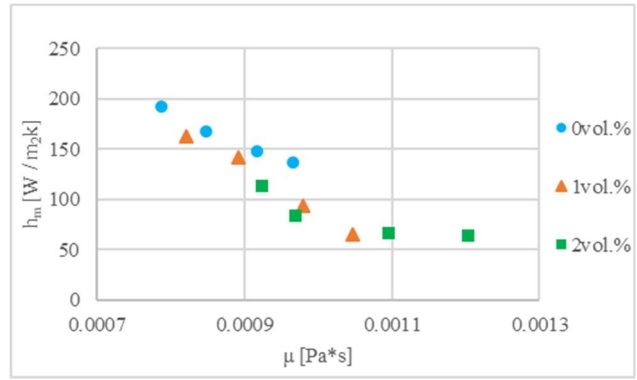


図4 粘性係数と平均熱伝達率の関係

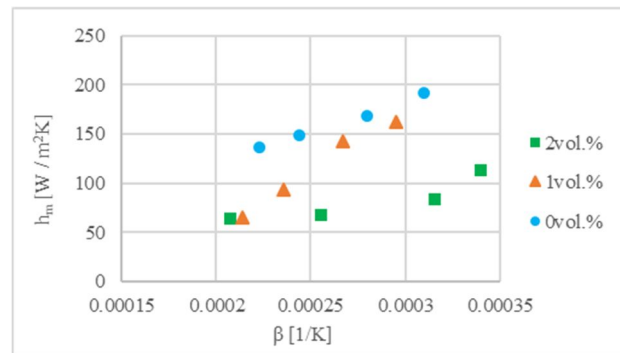


図5 体膨張係数と平均熱伝達率の関係

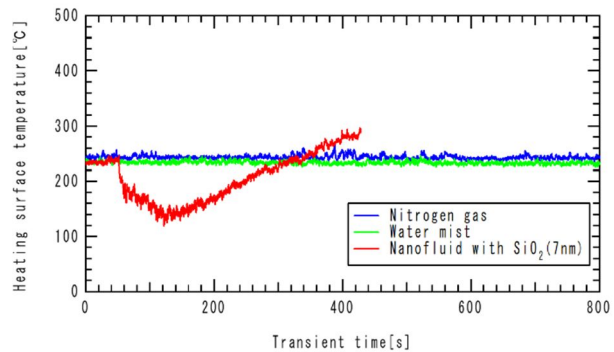


図6 ナノ流体の高温加熱面スプレー冷却時の加熱面温度の時間変化

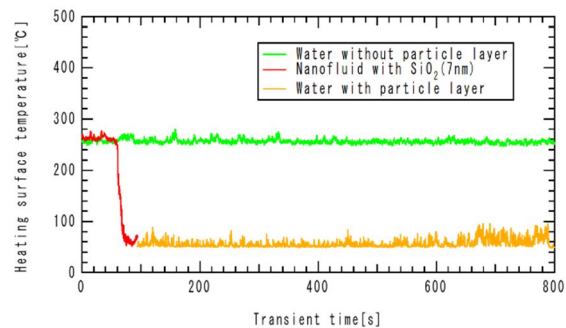


図7 加熱面上にナノ粒子表面堆積層がある場合の, スプレー冷却時の加熱面温度の時間変化

このように、ナノ粒子層の存在はスプレー冷却において冷却性能を上昇させるが、粒子層の成長とともに性能低下をもたらすことが分かった。このため、まず SiO₂ ナノ流体を噴射してナノ粒子層を形成し、そのあと水のみをスプレーした場合の結果を図7に示す。ここで、横軸は経過時間、縦軸は加熱面表面温度である。まず赤線で示す SiO₂ ナノ流体を一定時間スプレーし、そのあと橙色線で示す水のみをスプレーすると、図6のような冷却性能の低下を防ぐことができることが分かる。次に、このナノ流体のスプレー時間(ナノ粒子層厚さ)と伝熱性能の関係を示す。

SiO₂ ナノ粒子層厚さが冷却性能の及ぼす影響を図8に示す。縦軸が加熱面温度の低下を、横軸が加熱面への入力電力を示している。ここで加熱面温度低下は粒子層形成前後の加熱面温度の差を示し、値が大きいほど冷却効果が大いことを意味する。温度低下は入力電力および堆積時間が増加するにつれ減少することが分かる。また堆積時間100秒で最も冷却促進効果が大きく、堆積時間が500秒で負となり粒子層により冷却が阻害されることが分かった。またCuO ナノ流体を用いた実験でも同様な結果が得られた。

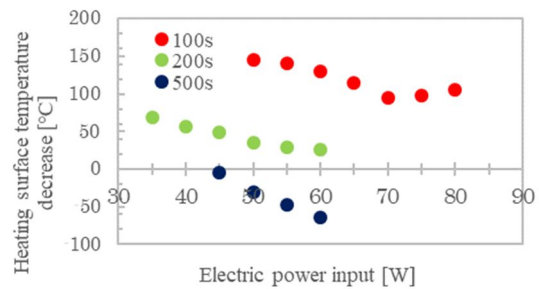


図8 加熱面上へのナノ粒子表面堆積時間と表面の温度低下の関係 (SiO₂ ナノ流体の場合)

(3) ナノ流体の自然対流熱伝達の数値解析

先のナノ流体の自然対流実験に対応する数値解析を行った。垂直断面での流れのベクトル線図と温度分布を図9に示す。ここで(a)は水、(b)は Al₂O₃ 粒子体積濃度3%のナノ流体で、ヒーターへの入力電力5Wでの結果である。ここで水に対しナノ流体は流れが抑制されていることが分かる。

図10にナノ粒子体積濃度と垂直方向の平均速度の関係を示す。垂直方向流れは浮力により誘起され、ここでも体積濃度が上昇するとともに流れが抑制されており、これは先に述べたように体積濃度が上昇すると粘性係数が増加、体膨張係数が低下し、流れが抑制されたためだと考えられる。

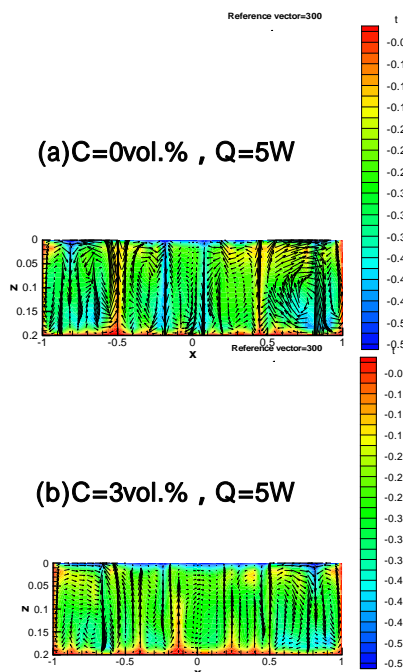


図9 垂直断面における流れのベクトル線図と温度分布

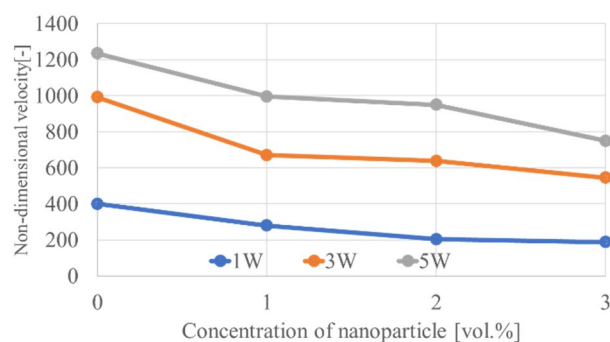


図10 ナノ粒子体積濃度と垂直方向平均速度の関係

参考文献

[1] Khanafer, K., and Vafai, K. A critical synthesis of thermophysical characteristics of nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol 54, No.19-20 (2011), pp.4410-4428.

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 13件）

1 . 発表者名 Hiroki Kawasho, Takayoshi Hirano, Arata Ikemoto, Mitsuo Iwamoto, Shinichi Saito, Masato Akamatsu
2 . 発表標題 The experimental study of Benard convective heat transfer with nanofluid (The effect of material of nanoparticles)
3 . 学会等名 The 31th International Symposium on Chemical Engineering, No.0G-02 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Koichiro Sezaki, Mitsuo Iwamoto, Shinichi Saito, Masato Akamatsu
2 . 発表標題 Experimental study of the water spray cooling on the heating surface with particle layer (Effect of period of nanofluid spraying)
3 . 学会等名 The 31th International Symposium on Chemical Engineering, No.0B-03 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Arata Ikemoto, Hiroki Kawasho, Takayoshi Hirano, Mitsuo Iwamoto, Shinichi Saito, Masato Akamatsu
2 . 発表標題 Numerical Study of Natural Convection of Al2O3 Nanofluid in the Cylindrical Container.
3 . 学会等名 The 31th International Symposium on Chemical Engineering, No.PB-01 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Takayoshi Hirano, Hiroki Kawasho, Mitsuo Iwamoto, Shinichi Saito, Masato Akamatsu
2 . 発表標題 Experimental study of natural convection of Al2O3 nanofluid in the cylindrical container (Effect of the concentration of Al2O3 nanoparticles)
3 . 学会等名 The 31th International Symposium on Chemical Engineering, No.PB-02 (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 川庄宏樹, 平野貴義, 岩本光生, 齋藤晋一
2. 発表標題 ナノフルードを用いた円筒容器内ベナール対流のレイリー数変化に伴う自然対流熱伝達特性に関する実験的研究(ナノ粒子材質の影響)
3. 学会等名 化学工学会九州支部 第29回九州地区若手ケミカルエンジニア討論会 No.23
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平野貴義, 川庄宏樹, 岩本光生, 齋藤晋一
2. 発表標題 ナノ流体を用いた円筒容器内ベナール流体の実験的研究 (Al ₂ O ₃ 粒子濃度の影響)
3. 学会等名 化学工学会九州支部 第29回九州地区若手ケミカルエンジニア討論会 No.26
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinichi Saito, Koichiro Sezaki, Mitsuo Iwamoto
2. 発表標題 EVAPORATION BEHAVIOR OF WATER SPRAY COOLING ON THE NANO-PARTICLE LAYER FORMED ON THE HEATING SURFACE
3. 学会等名 The 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takeshi Hayashida, Shinichi Saito, Mitsuo Iwamoto, Masato Akamatsu
2. 発表標題 Experimental study of the cooling performance of the spray cooling with nanofluid.(Effect of the material of the heating surface)
3. 学会等名 The 30th International Symposium on Chemical Engineering, No.PRO-006 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroki Kawasho, Miu Yunoki, Mitsuo Iwamoto, Shinichi Saito , Masato Akamatu
2. 発表標題 Effect of Rayleigh number for the Benard convective heat transfer with Al2O3-water nanofluid.
3. 学会等名 The 30th International Symposium on Chemical Engineering, No.PRO-P03 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Koichiro Sezaki, Takesi Hayasida, Mitsuo Iwamoto, Shinichi Saito, Masato Akamatsu
2. 発表標題 Experimental study of the water spray cooling on the heating surface with particle layer.(Effect of the material of nanoparticle)
3. 学会等名 The 30th International Symposium on Chemical Engineering, No.PRO-P05 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹崎幸輝, 瀬崎功一郎, 岩本光生, 齋藤晋一
2. 発表標題 ナノ粒子層を用いた水スプレー冷却の実験的研究 (粒子層堆積時間の効果)
3. 学会等名 日本機械学会九州支部, 第49回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平野貴義, 川庄宏樹, 岩本光生, 齋藤晋一
2. 発表標題 Al2O3 - 水ナノ流体を用いた円筒容器内ベナール対流における粒子濃度の影響
3. 学会等名 日本機械学会九州支部, 第49回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池本 新, 浜元 伶, 岩本光生, 齋藤晋一, 赤松正人
2. 発表標題 Numerical computation of Benard convection using Al2O3-water nanofluid.
3. 学会等名 2019 Japan/Taiwan/Korea Chemical Engineering Conference, P-57, p.128 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横田直也, 伊藤慎也, 志賀 竜, 齋藤晋一, 岩本光生, 赤松正人
2. 発表標題 Effect of the nanoparticle materials on evaporation time of the water droplet on the nanoparticle layer.
3. 学会等名 Japan/Taiwan/Korea Chemical Engineering Conference, P-64, p.135 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤慎也, 横田直也, 小西弘人, 齋藤晋一, 岩本光生, 赤松正人
2. 発表標題 Effect of amount of nanoparticle on evaporation time of the water droplet on the nanoparticle layer.
3. 学会等名 2019 Japan/Taiwan/Korea Chemical Engineering Conference, P-65, p.136 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 平野貴義, 岩本耀大, 岩本光生, 齋藤晋一, 赤松正人
2. 発表標題 Experimental study of natural convection of nanofluid in the cylindrical container. (Effect of the materials of CuO, Fe2O3 and TiO2 nanoparticle)
3. 学会等名 2019 Japan/Taiwan/Korea Chemical Engineering Conference, P-62, p.133 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福岡佳幸, 平野貴義, 岩本光生, 齋藤晋一, 赤松正人
2. 発表標題 Experimental study of natural convection of SiO ₂ nanofluid in the cylindrical container.(Effect of the concentration and particle diameter of SiO ₂ nanoparticles)
3. 学会等名 2019 Japan/Taiwan/Korea Chemical Engineering Conference,P-60,p.131 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤慎也, 横田直也, 岩本光生, 齋藤晋一
2. 発表標題 ナノ粒子堆積層上における 単一液滴の蒸発挙動に関する実験的研究 (ナノ粒子の堆積量の 影響)
3. 学会等名 化学工学会九州支部 第30回九州地区若手ケミカルエンジニア討論会 No.19,p.36
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横田直也, 伊藤慎也, 岩本光生, 齋藤晋一
2. 発表標題 ナノ粒子堆積層上における単一液滴の蒸発挙動に関する実験的研究 (ナノ粒子の材質の影響)
3. 学会等名 化学工学会九州支部 第30回九州地区若手ケミカルエンジニア討論会 No.23, p.40
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福岡佳幸, 平野貴義, 岩本光生, 齋藤晋一
2. 発表標題 円筒容器内SiO ₂ ナノ流体ベナール対流の熱伝達に関する実験的研究 (濃度および粒径の影響)
3. 学会等名 化学工学会九州支部 第30回九州地区若手ケミカルエンジニア討論会 No.22,p.39
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----