

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00637

研究課題名(和文) OTECの複合利用に適した熱交換器の研究

研究課題名(英文) Study of suitable heat exchanger for multiple uses of OTEC

研究代表者

有馬 博史(Arima, Hirofumi)

佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・准教授

研究者番号：90346875

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、実海域での実験が開始された海洋温度差発電の複合利用の一つとして今後期待されている海水淡水化装置の新しい熱交換器材料の開発を目的としたものである。3年の研究期間において、新規にアルミ合金製のプレートを作製し、それをプレート式熱交換器に組み込み、「海水およびアンモニアに対する耐性」、「海水およびアンモニアを媒体とした場合の伝熱性能の評価」、「海水淡水化装置の凝縮器としての伝熱性能評価」を行った。その結果、提案したアルミ合金製プレートは海水及びアンモニア環境でも腐食はなかつた使用できるものであり、また、海水淡水化における凝縮器としても十分な伝熱性能が発揮できることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：This study was aimed for the development of the new heat exchanger materials of a seawater water conversion device expected as one of the compound use of the ocean thermal energy conversion that the experiment in the true sea area was started in future. In the study period of three years, I manufactured new proposed test plates made by aluminum alloy and installed into a plate-type heat exchanger and performed the "tolerance evaluation against seawater and ammonia", "heat transfer performance evaluation using seawater and ammonia as a working fluid" and "heat transfer performance evaluation as a condenser of the seawater desalination system". As a result, it was found that the proposed plate don't observe the occurrence of the corrosion under the seawater and ammonia environment, then it can use enough under these condition. In addition, the plate show the enough heat transfer performance as a condenser of seawater desalination system.

研究分野：伝熱工学

キーワード：熱交換器 アルミニウム アンモニア 海水 蒸発 凝縮 腐食 海洋温度差発電

1. 研究開始当初の背景

海洋温度差発電(OTEC, Fig. 1)は、海洋の表層にある温海水(約 25~30℃)および 1000m 程度の深層にある冷海水(約 5~10℃)の温度差の熱エネルギーを利用して発電する海洋エネルギー利用法の一つである。佐賀大学海洋エネルギー研究センターでは、約 40 年間に亘って OTEC の実用化に向けた研究を進めてきたが、2003 年伊万里サテライトに 30kW 実験プラントの設置を行い、2013 年には沖縄県が久米島に設置した 50kW-OTEC プラントに技術協力の形で事業に携わることで実用に向けたプラント開発を進めてきた。一方、OTEC の周辺技術として、フラッシュ蒸発法による海水淡水化(Fig. 2)がある。フラッシュ蒸発法は、温海水をフラッシュチャンバーと呼ばれる容器内で減圧蒸発させ、その水蒸気成分のみを冷海水で凝縮することで真水を得る技術である。これらの技術を複合した OTEC/海水淡水化の複合利用についてはかなり古くから構想があり、理論的な検証[①]が行われてきた。特に海水は水や熱としての利用方法のほかに、金属などの資源の回収先としても将来有望であると言われている(Fig. 3)。しかし個々の技術としてはほぼ確立された物であっても、プラントを複合した形での実用的な検証は進んでいない。特に、海水淡水化では OTEC で利用された海水の二次利用を想定しているため、OTEC の負荷変動に対する海水の制御技術、海水に対する防汚技術の開発など複合利用における研究開発課題は数多く残されていると考える。しかし、これまでは実用に近い OTEC プラントが存在していなかったため、複合利用研究については伊万里サテライトの設備を利用した仮想的な温冷海水による海水淡水化の研究に留まっていたが、前出の沖縄県久米島の OTEC 実験施設が完成したことと、同施設の敷地内に佐賀大学海洋エネルギー研究センターの海水淡水化施設(久米島サテライト)が設置されたことにより、実海水を利用した複合利用実験が可能となった。ところで、OTEC や海水淡水化装置には熱交換器としてプレート式熱交換器(Fig. 4)が使用されている。OTEC では温、冷海水とアンモニアの熱交換用として、海水淡水化では水蒸気と冷海水の熱交換に持ちいられている。いずれも、海水と熱交換器が接触する環境下にあるため、海水による腐食によるメンテナンス回数の増加、海洋生物の付着による伝熱性能の低下が懸念されている。それに対し、プレート材料としてチタンを用いることで海水に対する耐腐食性を高めている。また海洋生物については防汚技術に関する研究[②]がすでに進められているが、複合利用による熱交換器への影響については今まで検討が行われていない。その中で、研究代表者は熱交換器の材料としてチタン材より伝熱性能の優れたアルミ材に注目し、さらにそれに樹脂の被膜を施すことで主にアンモニアへの耐食性について検討を行

って来た[③]。しかし、海水に対する影響については明らかにされていなかった。アルミ材を用いた熱交換器を実海水で使用した場合の影響についても今後の実用化を進める上でも必要であることから、本研究では久米島の複合プラントを利用して、複合利用における熱交換器の海水および伝熱特性の解明を行い、それに適した熱交換器の開発を進めた。

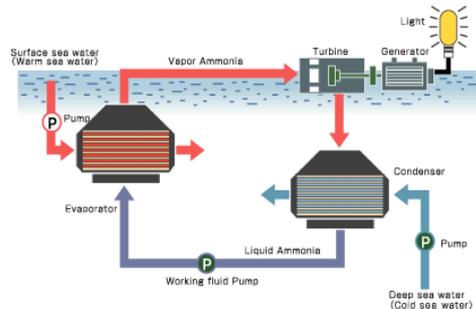


Fig. 1 OTEC の原理

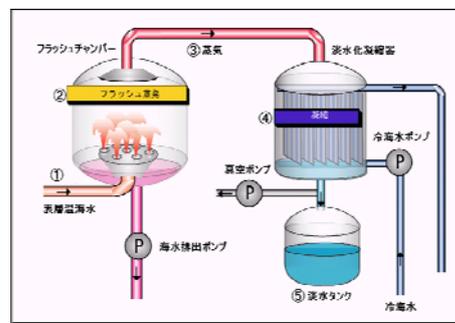


Fig. 2 フラッシュ蒸発式海水淡水化装置

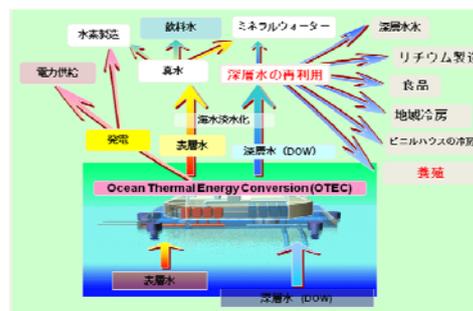


Fig. 3 OTEC の複合利用

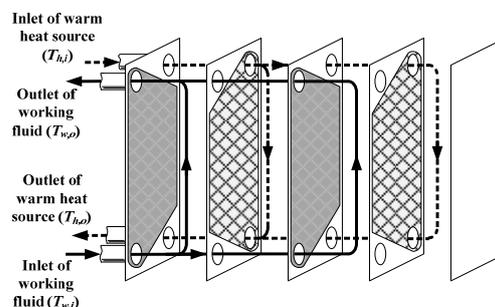


Fig. 4 プレート式熱交換器

2. 研究の目的

現在、再生可能エネルギーの一つとして海

洋温度差発電(OTEC)の海水淡水化設備との複合利用の実用化に向けた研究が進められている。しかし、今まで実用プラントがなかったため複合利用時の海水の熱交換器材料に対する影響と伝熱性能への影響に関する知見が不足している。そこで、複合利用時の海水の熱交換器材料に対する影響および伝熱性能への影響について明らかにし、伝熱性能向上と海水への耐性を兼ね備えた複合利用に適したプレート式熱交換器の開発を行う。

3. 研究の方法

①実験装置の準備

(1) 新規伝熱プレートの製作

初年度(平成 27 年度)は、試験の対象となる新規のアルミ製伝熱プレート(以降、テストプレート)の製作を行った。テストプレートは、既成のチタン製プレート式熱交換器用の伝熱プレート構造を基に設計を行った。また、テストプレートには耐アンモニア、耐海水性を高めるため PEEK 樹脂および WIN-KOTE による被覆を行った (Fig. 5)。被覆厚さは PEEK 樹脂が 25, 100 μm , WIN KOTE が 5 μm のものを用い、各々4枚1組を1セットとし、計12セットを準備した。各セットは伊万里海水実験用(3セット)、久米島海水実験用(3セット)、アンモニア実験用(3セット)として用いた。(平成 27 年度遂行、完了)



Fig. 5 テストプレート

(左から 100 μm PEEK, 25 μm PEEK, WIN KOTE)

(2) 海水を用いた予備実験

予備実験では、テストプレートを組み込んだプレート式熱交換器(以降、テストセクション)を伊万里サテライトにある既存の海水取水循環装置(Fig. 6)接続することで熱交換器に海水を循環させた。テストセクションには被覆の種類および被覆厚さの異なる3種類のテストプレートを計3セット組み込んだ。海水の循環は8か月連続で行った。また材料の腐食の有無の確認のため、連続運転前後の伝熱面表面の状態の変化について比較を行った。(27年度遂行、完了)

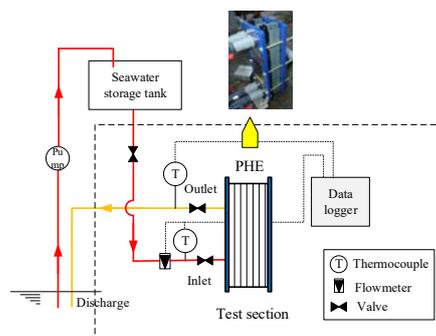


Fig. 6 実験装置概略図 (海水循環)

(3) アンモニアを用いた伝熱性能および耐腐食性試験

本実験では、テストセクションをアンモニア循環装置(Fig. 7, プレート式熱交換器基礎実験装置)に接続し、熱交換器に温水およびアンモニアを循環させ、アンモニア沸騰状態に保ち、3か月連続で運転を行った。連続運転中とその前後の熱通過率を測定することで伝熱性能の評価を行った。また材料の腐食の有無の確認のため、連続運転前後の伝熱面表面の状態の変化について比較を行った。(27年度遂行、完了)

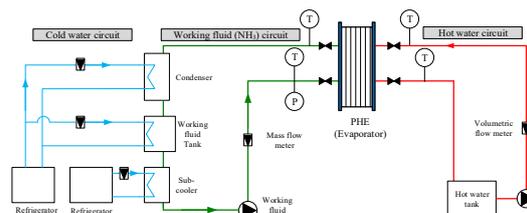


Fig. 7 実験装置概略図 (アンモニア循環)

(4) 海洋深層水、表層水を用いた伝熱性能および耐腐食性試験

本実験は海洋深層水、表層水が利用可能な久米島サテライトにて行った。新規に構築した海水供給装置(Fig. 8)にテストセクションを接続し、被覆の種類および被覆厚さの異なる3種類のテストプレートを計3セット組み込んだ。海水の循環は5か月連続で行った。

本装置で使用した海水は、久米島 OTEC の海水配管(表層、深層の2系統)から分岐された配管から供給した。

連続運転中とその前後の熱通過率を測定することで伝熱性能の評価を行った。また材料の腐食の有無の確認のため、連続運転前後の伝熱面表面の状態の変化について比較を行った。(27年度遂行、完了)

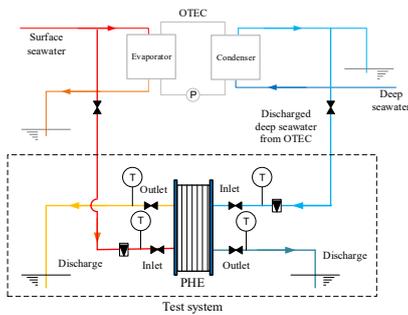


Fig. 8 深層・表層海水循環実験装置概略図

(5) 海水淡水化装置に組み込まれたプレート式凝縮器の性能評価試験

フラッシュ蒸発式海水淡水化装置の凝縮器におけるテストプレートの伝熱性能評価を行うため、テストセクションを凝縮器として海水淡水化装置(Fig. 9 (a), (b))に組み込み、凝縮器としての伝熱性能、淡水化装置の造水量に関する評価を行った。実験は伊万里サテライトと久米島サテライトで行い、淡水化の原料水および冷却水として伊万里サテライトでは水道水および冷凍機で作った冷水を、久米島サテライトでは表層海水および深層水を用いた。実験では、異なるテストプレート、原料水温度と流量、冷却水流量をパラメーターとして各々の条件における熱通過率の測定を行なった。(28~29年度遂行、完了)

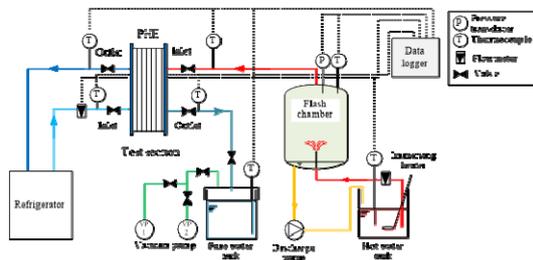


Fig. 9 (a) 海水淡水化凝縮実験装置概略図
(伊万里サテライト)

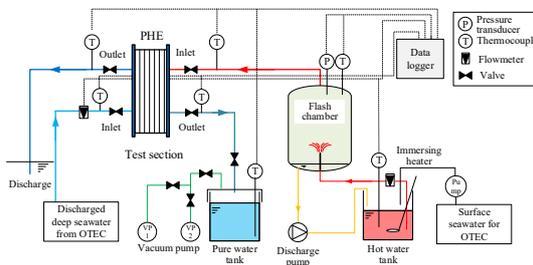


Fig. 9 (b) 海水淡水化凝縮実験装置概略図
(久米島サテライト)

4. 研究成果

(1) 海水を用いた予備実験の結果

テストセクションに海水を通水した状態で8か月間連続運転を行い、テストプレート

の海水による腐食に関する予備実験を行った。その結果を Fig. 10 に示す。テストプレート自体は8か月の運転中に海洋生物やヘドロで汚損していたため、洗浄した後に表面の観察を行った。その結果、PEEK 100 μ m のプレートについては表面状態の変化が観察されなかったものの、PEEK 25 μ m については、海水の流入口穴周辺に一部剥離が観察された。一方 WIN KOTE では表面が完全に剥離し、母材であるアルミ合金が露出した状態が4枚の内1枚で観察された。一部剥離したPEEKと完全に露出したWIN KOTE プレートについては、プレート式熱交換器の構造上流速が最も早くなる部分で表面の剥離が発生していることから、海水による腐食ではなく、機械的なエロージョンによるものであることが分かった。この結果を踏まえて、以降に続く実験では、低い流速条件で実験を行うことになった。また、海水の浸漬のみでは3種類のコーティングの腐食は発生しないことが明らかになったため、以降の実験でもこれらのテストプレートを引き続き使用することにした。



(a) PEEK 25 μ m (b) PEEK 100 μ m (c) WIN KOTE

Fig. 10 連続運転後の表面状態の観察

(2) アンモニアを用いた伝熱性能および耐腐食性試験の結果

PEEK樹脂およびWIN KOTEでコーティングされたアルミプレートを使用したPHEについて、伝熱性能および腐食に関する検討を行った。Fig. 11に連続運転前後における熱通過率の比較を示す。3か月間の連続運転によりPEEK 25 μ mおよびWIN KOTEの熱通過率の上昇が確認された。特にWIN KOTEの熱通過率の増加は作動流体側の伝熱面に腐食による伝熱面の粗さの変化によるものであった。また、Fig. 12に連続運転後における各テストプレートの表面状態を示す。図より2種類のPEEKコーティングプレートについては、アンモニアに対する腐食はないことが分かった。一方、WIN KOTEの作動流体側については特に流路側面の段差部分を中心にコーティングの欠損が見られ、アンモニアによるアルミ母材の腐食が観察された。WIN KOTEの変化については特に角のある部分で発生しているため、角部におけるコーティングの厚さ不足によるものと考えられる。

(3) 海洋深層水、表層水を用いた伝熱性能および耐腐食性試験の結果

3種類のテストプレートを組み込んだテストセクションにおいて、表層水・深層水を熱源とした顕熱による熱交換を行い伝熱性能の評価を行った。また、5か月の連続運転に

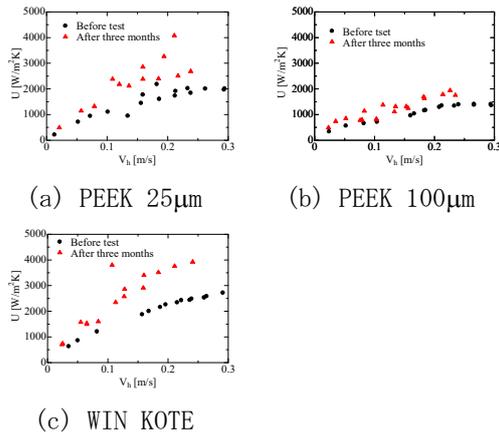


Fig. 11 連続運転前後における熱通過率の比較



Fig. 12 連続運転後の表面状態 (左から温水/作動流体/温水/作動流体側)

よる腐食の評価を行い、以下の結果が明らかとなった。

- ① 3種類のテストプレートの中で熱通過率はPEEK 25µmのプレートが一番良い値を示した。
- ② 連続運転前後の熱通過率の比較では、いずれのコーティングプレートにおいてもほとんど変化が見られなかったことから、海水の連続通水による伝熱性能の変化はないことが分かる。
- ③ 5か月の連続運転でWIN KOTEプレートのみ腐食が観察された。腐食は海水出入口付近に集中していることから、流水によるコーティングの剥離が発生し、その部分から腐食が始まったものと考えられる。

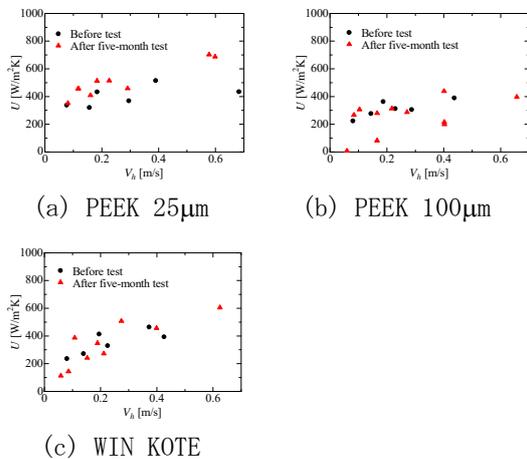


Fig. 13 連続運転前後における熱通過率の比較

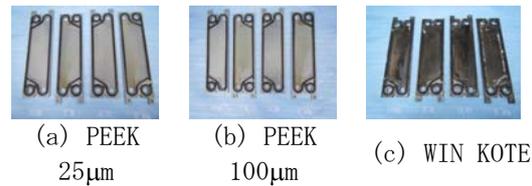


Fig. 14 連続運転後の表面状態 (左から冷水/温水/冷水/温水側)

(4) 海水淡水化装置に組み込まれたプレート式凝縮器の性能評価試験結果

スプレーフラッシュ蒸発式海水淡水化装置の凝縮器としてテストプレートを組み込んだテストセクションを使用し、その伝熱性能について測定を行ない、既存のチタンプレートとの比較を行った。その結果、以下の事が明らかとなった。

① Fig. 15にフラッシュ蒸発器内のノズル温度と飽和温度との差から得られる過熱度に対する凝縮熱熱交換量の値の相関を示す。フラッシュ蒸発式淡水化の場合、これらの値は比例することが過去の研究で明らかになっており、本装置でも同様な結果が得られたことから、本テストセクションは凝縮器として正常に動作していることが分かる。

② Fig. 16に蒸気 Re 数に対する平均 Nu 数の相関を示す。また、テストプレートの違いによる比較も示す。これらの値は、蒸気流量と凝縮熱伝達率の値から得られたものである。図より、チタン製プレートが最も大きい値を示したが、アルミ合金製テストプレートの中ではPEEK 25µmコーティングの場合が最も良い性能を示した。

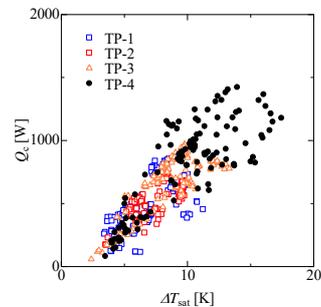


Fig. 15 過熱度に対する凝縮器の熱交換量の変化 (TP-1: PEEK 25µm, TP-2: PEEK 100µm, TP-3: WIN KOTE, TP-4: Ti)

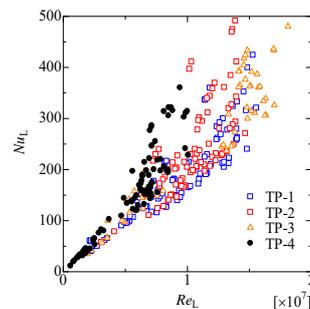


Fig. 16 水蒸気流量に対する凝縮熱伝達率の変化 (Nu_L vs. Re_L)

<引用文献>

- ① 上原春男ら, 「ハイブリッドサイクルを用いた海洋温度差発電システムの研究－沖永良部海域－」, OTEC, Vol. 4, pp. 39-51, 1993.
- ② 池上康之ら, 「オゾンーションを用いたプレート式熱交換器の海生生物防汚に関する研究」日本機会学会論文集, B 編 Vol. 61 (586), pp. 2269-2275, 1995.
- ③ 有馬博史ら, 「高分子樹脂被覆アルミニウムのアンモニアを作動流体とした海洋温度差発電用プレート式熱交換器への利用可能性」, 軽金属, Vol. 63, No. 4, pp. 1-6, 2013.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 有馬博史, 稲富諒, 松田昇一, 久米島海洋深層水を利用した海水淡水化用プレート式熱交換器の伝熱性能に関する研究, 海洋深層水研究, Vol. 18, No. 1, pp. 8-17 (2017). 査読有

<http://www.dowas.net/paper/18-1.html>

- ② 有馬博史, 管慶信, 松田昇一, スプレーフラッシュ蒸発式海水淡水化用アルミニウム合金プレート式凝縮器の伝熱性能評価, 佐賀大学海洋エネルギー研究センター報告 OTEC, Vol. 22, pp. 27-36 (2017). 査読無

<http://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/publication/journal-otec-top>

- ③ 有馬博史, 小山幸平, コーティングされたアルミニウム合金のアンモニア沸騰環境下における利用可能性, 軽金属, Vol. 66, No. 9, pp. 498-502 (2016). 査読有

<https://doi.org/10.2464/jilm.66.498>

- ④ 有馬博史, 稲富諒, 松田昇一, 特殊コーティングされたアルミニウム合金伝熱面を用いた海水淡水化用プレート式熱交換器の伝熱性能, 佐賀大学海洋エネルギー研究センター報告 OTEC, Vol. 21, pp. 7-15 (2016).

<http://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/publication/journal-otec-top>

[学会発表] (計 8 件)

- ① 有馬博史, アルミ合金伝熱板を用いた海水淡水化用プレート式凝縮器の伝熱特性, 第 54 回日本伝熱シンポジウム, 2017 年 5 月, 大宮市.

- ② 有馬博史, コーティングされたアルミプレートを用いた熱交換器の海水における熱伝達特性, 日本機械学会九州支部 第 70 期総会, 講演会, 2017 年 3 月, 佐賀市.

- ③ H. ARIMA, Heat transfer characteristics of plate heat exchanger using coated-aluminum plate for ammonia boiling, The 27th International Symposium on Transport Phenomena, Sept., 2016, Hawaii, USA.

- ④ 有馬博史, コーティングされたアルミプレートを用いた熱交換器におけるアンモニア沸騰熱伝達特性, 第 53 回日本伝熱シンポジウム, 2016 年 5 月, 大阪市.

- ⑤ 有馬博史, 海水淡水化用プレート式熱交換器に関する研究 –第一報 コーティングアルミプレートの伝熱性能の評価–, 第 19 回海洋深層水利用学会全国大会 2015 久米島大会, 2015 年 11 月, 沖縄県久米島町.

- ⑥ 有馬博史, コーティングされたアルミのアンモニア沸騰環境における使用可能性, 熱工学コンファレンス 2015, 2015 年 10 月, 大阪市.

- ⑦ 有馬博史, アンモニア用プレート式熱交換器へのアルミ合金の使用に関する研究, 日本機械学会九州支部長崎講演会, 2015 年 9 月, 長崎市.

- ⑧ 有馬博史, 特殊コーティングアルミ伝熱面におけるアンモニアのプール沸騰熱伝達, 第 52 回日本伝熱シンポジウム, 2015 年 6 月, 福岡市.

[図書] (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

http://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/research/ioes_present_study/otec_present_study_2#AL-plate に公開

6. 研究組織

(1) 研究代表者

有馬 博史 (ARIMA, Hirofumi)

佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・准教授

研究者番号: 90346875

(2) 研究分担者

研究者番号:

(3) 連携研究者

小山 幸平 (KOYAMA, Kohei)

東京工業高等専門学校・機械工学科・講師

研究者番号: 40597845

(4) 研究協力者

()