

## 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

有馬博史<sup>\*1</sup>, 稲富諒<sup>\*1</sup>, 松田昇一<sup>\*2</sup>

### Heat transfer performance of plate heat exchanger for seawater desalination using special coating aluminum alloy plates

Hirofumi ARIMA<sup>\*1</sup>, Ryo INADOMI<sup>\*1</sup>, Shoichi MATSUDA<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> Institute of Ocean energy, Saga University

1-48, Hirao, Kubara-aza, Yamashiro-cho, Imari-shi, Saga, 849-4256, Japan

<sup>\*2</sup> Dept. of Mech. Eng., University of the Ryukyus,

1 Senbaru, Nishihara-cho, Nakagami-gun, Okinawa, 903-0213, Japan

#### Abstract

The spray flash seawater desalination system has attracted attention as an additional and multipurpose system of the OTEC. The OTEC system uses surface and deep seawater to generate the electricity. After generating electricity, these seawaters are discharged to the ocean. However, much thermal energy is left to this seawater. The desalination system makes a water vapor into the vacuumed chamber and condense the vapor to pure water into the plate condenser with deep seawater. Then, the desalination system can recover these left thermal energies. To improve the characteristic of spray flash seawater desalination system, it is necessary to give superior performance of plate condenser. Therefore, the author proposed the usage of aluminum alloy plate as a new material for plate heat exchanger of this system, instead of the conventional material: titanium. The aluminum alloy surface was treated by coating material, due to that has low resistance and generate corrosion against seawater. Two different coating materials, PEEK resin and WIN KOTE film were adopted. In this study, three types of coated-aluminum were installed in commercially available PHE frames for five-month long-term testing when subjected to the forced convection using deep and surface seawater of Kume-jima Island of Okinawa Prefecture to measure the heat transfer performance and evaluate the tolerate to the seawater. A comparison of the heat transfer performance of each coating before and after the five-month test revealed that the overall heat transfer coefficient after the test was greater than that before the test. A comparison of the surface condition revealed that the surface of the WIN KOTE film had large changed because of the action of the both seawater, while that of the PEEK film had also changed slightly.

**Key Words** : Plate heat exchanger, Desalination, Deep seawater, PEEK resin, WIN KOTE film, Aluminum

#### 1. 緒 言

海洋温度差発電(OTEC)は、2013年に沖縄県久米島(池上, 2015)、2015年にハワイ島(Makai Ocean Engineering, 2015)で実証試験プラントが稼働し、実用化に向けた取り組みが進められている。OTECの研究では実用化後の展開として、複合利用の一つである海水淡水化やその水と電気を使った水素製造、また発電で用いた海水の再利用法として複数の用途で連続的に利用する「海洋深層水のカスケード利用」(沖縄県久米島町, 2011)などの研究が

\*原稿受付 2016年07月29日

佐賀大学海洋エネルギー研究センター (〒849-4256 伊万里市山代町久原字平尾 1-48)

E-mail of corresponding author: arima@ioes.saga-u.ac.jp

既に始められている．その中でも OTEC の複合利用としてのスプレーフラッシュ蒸発海水淡水化に関する研究 (上原, 中岡, 1990) が古くから行なわれている．また, 沖縄県海洋温度差発電実証設備の複合利用として, その海水を利用した海水淡水化装置の連続運転 (池上, 他, 2015) が 2015 年に当センターの久米島サテライトにて開始され, 実海水を用いた海水淡水化の検証が進められている．スプレーフラッシュ蒸発式は OTEC で使用された表層水をあらかじめ真空にしたフラッシュ室に導入して蒸発させ, その水蒸気を凝縮器で深層水を使って凝縮することで真水を作る方法である．そのため, 凝縮器として効率の良いプレート式熱交換器 (PHE) が用いられている．凝縮器ではフラッシュチャンバーで蒸発させた蒸気を積極的に凝縮させるのに加えてチャンバー内を常に負圧に保つ役割もあるため, その性能が淡水化装置全体の性能に大きく影響する．よって, 今後の海水淡水化装置の性能向上に向けた研究では, フラッシュチャンバーの性能向上と併せて凝縮器の伝熱性能の向上に向けた検討が必要である．ところで, 現在使用されているフラッシュ蒸発式海水淡水化用の凝縮器には, 伝熱プレート材料としてチタンが使用されている．チタンは他の金属材料に比べて海水に対する耐性が高いため, 淡水化利用に限らず海水利用の熱交換において一般的に利用される材料である．本研究では, 凝縮器の伝熱プレートの材料に着目して, チタンとは異なる材料について検討することにした．現在, 様々な伝熱材料の内, 熱伝導率が高い材料としてアルミニウムが挙げられる．著者らは, OTEC の蒸発器での利用を想定して, アルミニウム合金に特殊コーティングした伝熱プレートを用いたプレート式蒸発器において, アンモニア温水の熱交換に関する研究 (有馬, 他, 2016b) を行い, この材料における伝熱性能の検討と, アンモニアにおける利用可能性について明らかにした．本研究ではそれと同一の伝熱プレートを組み込んだプレート式熱交換器を用いて表層水と海洋深層水を通水し, 顕熱交換の熱交換器における伝熱性能について明らかにした．また実験では海水を 5 か月連続通水することで, 長期運転におけるコーティングやアルミ合金プレートへの影響についても明らかにした．本稿ではこれらの結果について報告する．

## 2. 記 号

$A_c$	: 流路断面積	[m <sup>2</sup> ]	$V$	: 平均海水流速	[m/s]
$A_s$	: 総伝熱面積	[m <sup>2</sup> ]		ギリシャ文字	
$C_p$	: 定圧比熱	[J/kgK]	$\rho$	: 密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$m$	: 質量流量	[kg/s]		添字	
$P$	: 圧力	[Pa]	$c$	: 深層水	
$Q$	: 熱交換量	[W]	$h$	: 表層水	
$T$	: 温度	[°C]	$in$	: 入口	
$U$	: 熱通過率	[W/m <sup>2</sup> K]	$out$	: 出口	

## 3. 実 験

### 3・1 実験装置

Fig. 1 に実験装置概略図を示す．実験装置はテストセクションであるプレート式熱交換器 (PHE) と表層水, 深層水の供給系, および測定装置で構成される．PHE はアルファラバル製 T2-BFG 型であり, 久米島で稼働中の海水淡水化装置 (池上, 他, 2015) で使用されているものと同一のものを使用した．PHE にはテストプレートであるコーティングされたアルミ合金板を組み込んで使用した．テストプレートの詳細については後述する．テストセクションへの海水は, 沖縄海洋温度差発電実証施設 (OTEC) の蒸発器に供給される表層水の配管と, OTEC の凝縮器から排出される深層水の配管に分岐点を設け, それぞれの分岐点から供給を行った．OTEC の表層水・深層水配管に設けられた分岐点の様子を Fig. 2 に示す．分岐点から本装置までは 20A の PCV 製パイプおよび内径 18mm のブレードホースで配管されている．実験後の各海水は, 海水専用の排水溝に排出した．

測定装置は, テストセクションの各出入口に設けられた K 型シーース熱電対 (林電工製: ST6) と体積流量計 (キーンエンス製: FD-P05, レンジ 0-5L/min および FD-Q10C, レンジ 0-10L/min), データロガー (GRAPHTEC 製: GL850, チャンネル数 20ch) で構成されている．また, データロガーのデータはインターネット経由で遠隔監視が行えるものである．

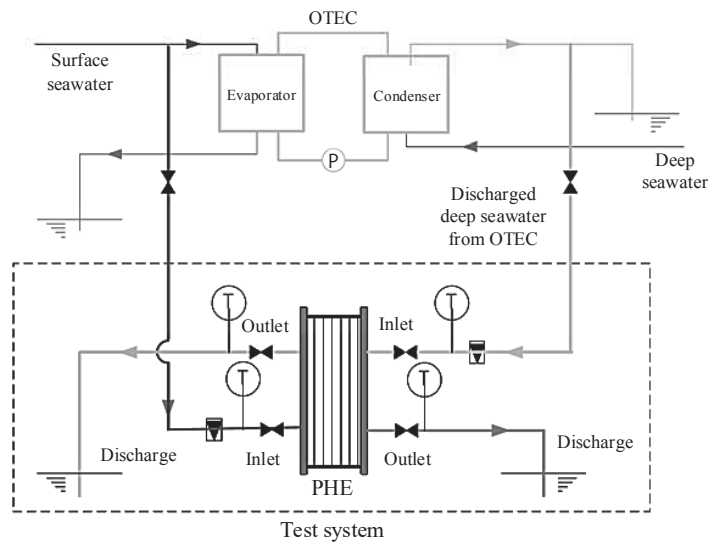


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus.

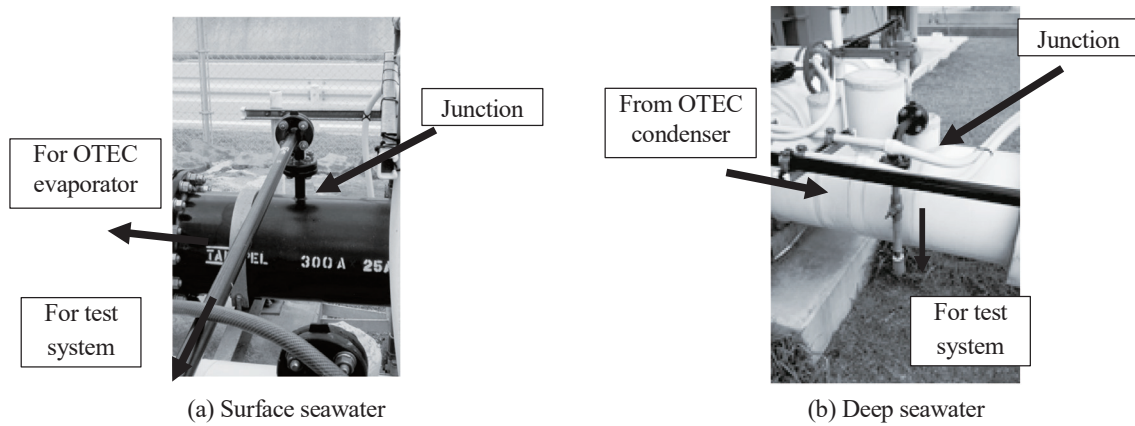


Fig. 2 Junction points on OTEC seawater pipes

Fig. 3 に実験で使用したテストプレート用のアルミ合金製プレート生地寸法を示す。プレート寸法は高さ 350mm、幅 100mm、厚さ 5mm である。また、伝熱面および流路となる青斜線の部分のみプレート厚さが 3.5mm である。上下の計 4 か所に設けられた穴が、それぞれのプレートにおける流体の出入口となる。なお、アルミ合金製プレートの形状については、市販のプレート式熱交換器（アルファラバル製: T2-BFG）を構成するチタン製プレートの形状を参考に設計したものである。なおこのプレート式熱交換器は久米島サテライトで行われている海水淡水化の連続運転実験（池上, 他, 2015）で使用されている凝縮器と同一モデルのものである。

Fig. 4 に Fig. 3 で示したアルミ合金製プレート生地をコーティング材でコーティングした後のテストプレートの写真を示す。コーティング材として、PEEK 樹脂と WIN KOTE® の 2 種類を採用した。いずれのコーティング材についても酸やアルカリ、海水に強い性質を持つ。PEEK 樹脂は、母材となるアルミニウム合金の表面に PEEK 原料をスプレーすることで成膜されている。WIN KOTE は DLC (Diamond Like Carbon) の一種でありプラズマ CVD 法により形成した炭素、水素、ケイ素を主成分とした膜である。また、PEEK 樹脂については約 25 $\mu$ m, 100 $\mu$ m の 2 種類の膜厚でコーティングを行った。なお WIN KOTE の膜厚は約 5 $\mu$ m である。

Fig. 5(a),(b) にテストセクションの写真を示す。テストセクションは前述のプレート式熱交換器（T2-BFG）のフレームに同熱交換器に同梱のチタン板 2 枚を基本構成として、実験別にテストプレートを次の枚数を組み込んで構成した。コーティングの異なるプレートの熱通過率測定時には各 4 枚、連続運転時には 3 種類計 12 枚のプレートを使用した。なお、プレートの枚数により、流路構成数、流路断面積  $A_c$  及び総伝熱面積  $A_s$  が異なる。これらの値について Table 1 にまとめて示す。

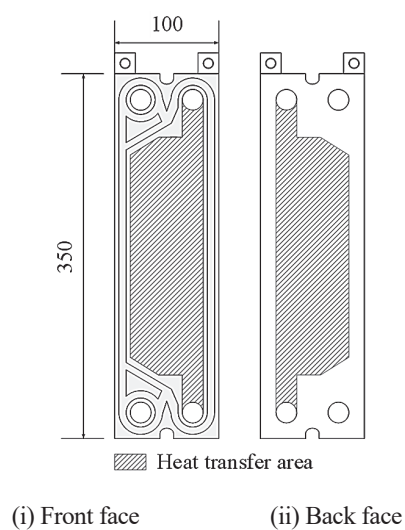


Fig. 3 Design of test plate.

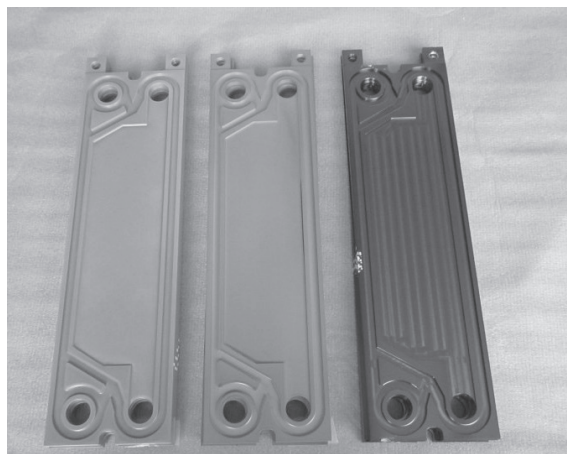


Fig. 4 Photo of test plates.

(Left: 100μm PEEK, Center: 25μm PEEK, Right: WIN KOTE)

(a) Each coating plate type test (Photo: WIN KOTE type)  
(4 coating plates + 2 Ti plates, each coating type).(b) for five-month period test  
(3 types, total 12 plates + 2 Ti plates).

Fig. 5 Test section with test plates.

Table 1 Specification of test sections

	Measurement of overall heat transfer coefficient at different coating plate	Five-month period test
Number of channels (Surface / Deep seawater channels)	3/2	7/6
Total cross-sectional area of surface seawater channels $A_c$ [m <sup>2</sup> ]	$3.15 \times 10^{-4}$	$7.35 \times 10^{-4}$
Total heat transfer surface area $A_s$ [m <sup>2</sup> ]	0.066924	0.200772

### 3・2 実験方法

実験は以下のテストプレートのコーティング別の熱通過率の測定実験と、5か月の連続運転の2種類を行った。まず、コーティング別の熱通過率の測定実験では、表層水と深層水の流量を任意の範囲で変化させ、テストセクションの各入口・出口温度および各海水の流量の計測を1秒間隔で2分間の計測を行った。使用したテストプレ

ートは 25  $\mu\text{m}$  PEEK, 100  $\mu\text{m}$  PEEK, WIN KOTE コーティングの 3 種類である。測定値をもとに、プレート別の熱通過率を導出した。これらの測定は連続運転開始前および連続運転終了後に行った。

一方、5 か月の連続運転の間における熱通過率の測定実験では、表層水および深層水の流量として任意の値を与え、それを初期値としてテストセクションの各入口出温度及び各海水の流量について連続的に測定した。記録はデータロガーに 1 分間隔で 5 か月 (160 日) 間行った。

実験条件を Table 2 に示す。

Table 2 Experimental conditions		
	Each coating plate type test	Five-month period test
Volumetric flow rate of surface seawater [L/min]	1, 2, 3, 4	2 (Initial)
Volumetric flow rate of deep seawater [L/min]	1, 2, 3, 4	2 (Initial)
Date	2015/8 and 2016/1	2015/8 - 2016/1

### 3・3 熱通過率の導出

データロガーで収集された流量および温度のデータを基に、実験結果は熱通過率  $U$  [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] および表層水側の平均流速  $V_h$  [ $\text{m}/\text{s}$ ] で整理を行った。

$U$  の計算には次式を用いた。

$$U = Q_h / (A_s \Delta T_{lm}) \quad (1)$$

ここで  $Q_h$  [ $\text{W}$ ] は表層水側の熱交換量、 $A_s$  [ $\text{m}^2$ ] はテストセクションの総伝熱面積、 $\Delta T_{lm}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] は対数平均温度差である。また、 $Q_h$ 、 $\Delta T_{lm}$  はそれぞれ次式で求めた。

$$Q_h = m_h C_{ph} (T_{h,in} - T_{h,out}) \quad (2)$$

$$\Delta T_{lm} = (T_{h,in} - T_{c,out}) - (T_{h,in} - T_{c,in}) / \ln((T_{h,in} - T_{c,out}) / (T_{h,out} - T_{c,in})) \quad (3)$$

ここで  $m_h$  [ $\text{kg}/\text{s}$ ] は表層水の質量流量、 $C_{ph}$  [ $\text{J}/\text{kg K}$ ] は表層水の定圧比熱、 $T_{h,in}, T_{h,out}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] は表層水入口・出口温度、 $T_{c,in}, T_{c,out}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] は深層水入口・出口温度である。

表層水の平均流速は以下の式で求めた。

$$V_h = m_h / \rho_h A_c \quad (4)$$

ここで  $m_h$  [ $\text{kg}/\text{s}$ ] は表層水の質量流量、 $\rho_h$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] は表層水の密度、 $A_c$  [ $\text{m}^2$ ] は表層水側の総流路断面積である。

なおこれらのデータの整理には、コーティング別の熱通過率の測定実験では 2 分間の測定値の平均値、連続運転では 1 日毎のデータの平均値を用いた。

## 4. 結 果

### 4・1 コーティング種類による熱通過率の比較

Fig. 6(a)-(c) に各コーティングにおける表層水側流速  $V_h$  に対する熱通過率  $U$  の値を示す。また、各図には連続運転開始前と、5 か月の連続運転後の比較についても示す。Fig. 6(a)-(c) より、全てのコーティングにおいて、表層水の流速の増加に伴い熱通過率が増加することが分かる。また、全てのコーティングにおいて、連続運転の前で熱通過率に大きな変化が見られないことがわかる。次に、Fig. 6(d) に示すコーティングの種類による熱通過率の比較では、25  $\mu\text{m}$  PEEK が一番高く、また WIN KOTE と 100  $\mu\text{m}$  PEEK はほぼ同じ値を示すことが分かる。な



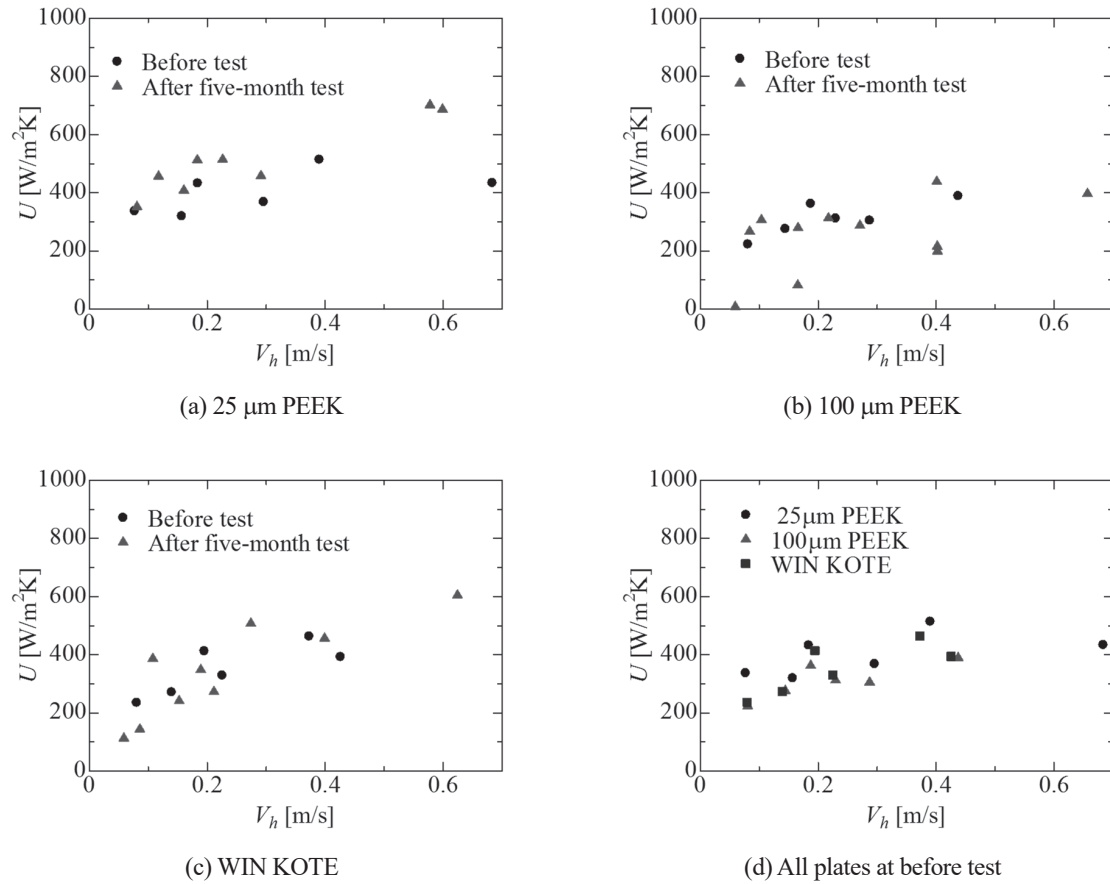
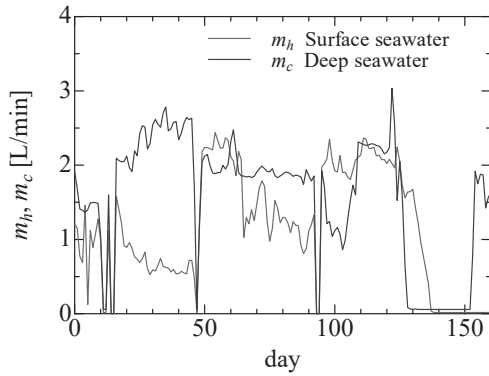


Fig. 6 Comparison with over all heat transfer coefficient against surface seawater velocity and between before and after five-month period test.

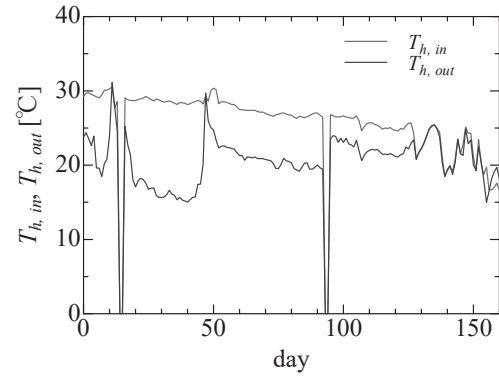
お、本実験と同一の3種類のコーティングを用いたアンモニア-温水を作動流体および熱源とした沸騰を伴うプレート式蒸発器の実験(有馬, 他, 2016)ではWIN KOTEの熱通過率が一番高い値を示しており、今回の結果とは異なっている。

#### 4・2 5か月連続運転における熱通過率の変化

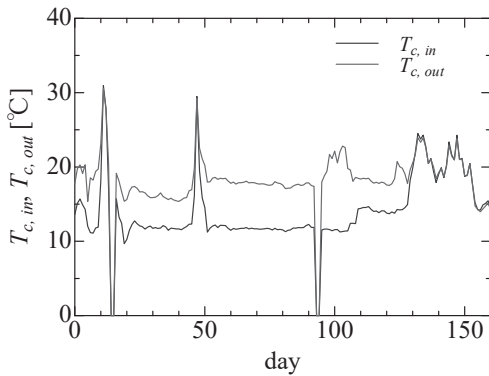
Fig. 7に5か月連続運転の間における(a)表層水および深層水の体積流量, (b)表層水の出入口温度, (c)深層水の出入口温度, (d)平均熱通過率の経時変化を示す。5か月間の連続運転の間, 表層水および深層水の流量および温度がいずれも測定日より大きく変化していることが分かる。これは, OTEC 側からの海水を分岐して使用するため, OTEC の稼働状況によって状態が変化することによるものである。特に流量については, OTEC 側の流量の変化が配管分岐点の圧力に直接影響を与えるため変化しやすい。また, 125日目以降に両海水の流量がほぼ0となっているが, これもその影響によるものである。また, Fig. 7(c)の表層水入口温度は, 連続運転開始の8月期から終了の翌1月期にかけて約10℃の低下している。これは夏季から冬季にかけて取水された表層水温度が低下していることを示す。一方, Fig. 7(d)の深層水入口温度は期間中ほぼ一定の温度を示している。深層水はOTEC凝縮器出口から供給されるため, 発電で使用後の深層水温度はほとんど変化しなかったことが分かる。Fig. 7(e)の熱通過率は, 50日目から125日目まで増加していることが分かる。これは同期間において表層水の流量が初期の流量に比べて増加したためである。Fig. 6において全てのプレートで流速の増加に対応して熱通過率が増加していたが, それに対応して熱通過率が増加したことになる。



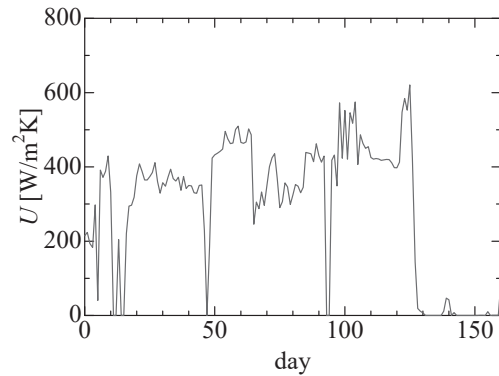
(a) Volumetric flow rate of surface and deep seawater



(b) Temperature of inlet and outlet surface seawater



(c) Temperature of inlet and outlet deep seawater

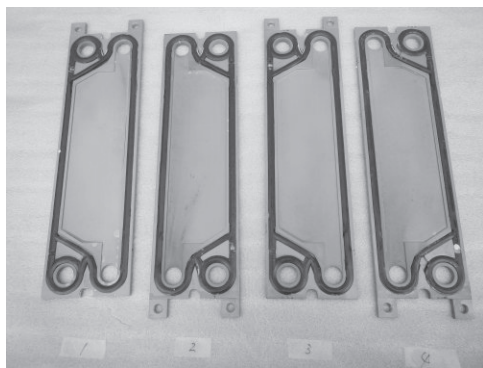


(d) Overall heat transfer coefficient

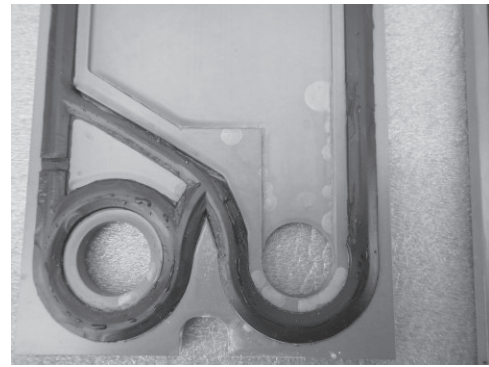
Fig. 7 Time variation of several values during five-month test.

#### 4・3 プレートの腐食の評価

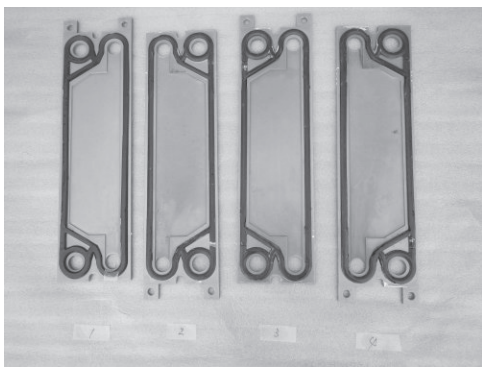
腐食の有無の評価のため、5 か月の連続運転後のプレートの表面の状態の観察を行った。Fig. 8(a)-(c)に各コーティングの表面の状態の写真を示す。Fig. 8(a)-(b)に示した2種類のPEEKプレートについては、配管錆由来の錆の付着を除いて表面には大きな変化が見られないものの、Fig. 8(a)-(ii)に示した25 $\mu$ mのPEEKコーティングプレートでは海水の出入口の穴付近に変色が複数箇所観察された。この変色はコーティングの表面が薄く剥離したためと思われる。また、この剥離は海水の流れによる摩擦で発生したものと考えられる。Fig. 8(b)-(ii)について同様に出入口付近の表面を観察した結果、錆による変色以外は観察されなかった。一方、Fig. 8(c)のWIN KOTEの場合では、塩類と思われる白色の物質の付着が観察された。また、その付着した物質を洗浄して取り除いた後に観察した結果、その部分はコーティングが完全に削り取られてアルミ合金の母材が露出し、さらに母材自体も削られていることが分かった。これも海水の流水による影響が考えられる。初めに、コーティング自体が摩擦で削り取られた後に母材がむき出しとなり、次に海水による腐食が進んだものと考えられる。なお、すべてのコーティングについて、指摘した箇所以外、特にプレートの中心部分については特に変化がなく、出入口部分の海水流速が速くなる部分についてのみ対策を施せば、海水での使用に十分耐えられる材料であることが明らかとなった。



(i) All tested plate



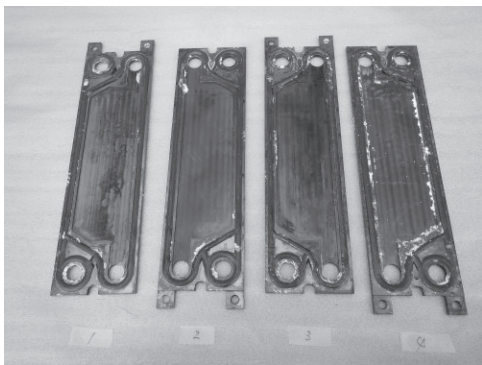
(ii) Enlarged changing portion

(a) 25  $\mu\text{m}$  PEEK plate

(i) All tested plate



(ii) Enlarged changing portion

(b) 100  $\mu\text{m}$  PEEK plate

(i) All tested plate



(ii) Enlarged changing portion

(c) WIN KOTE plate

Fig. 8 Photos of each coating plates after five-month test.

## 5. 結 言

3 種類のコーティングアルミ合金プレートを組み込んだプレート式熱交換器において、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 か月の連続運転による腐食の評価を行い、以下の結果が明らかとなった。

1) 熱通過率は3種類のコーティングの中で25 $\mu\text{m}$  PEEK 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。

## 謝 辞

この研究は、JSPS 科研費 15K00637 および佐賀大学学内研究プロジェクトにより資金の一部の助成を受けたものである。ここに記して感謝する。

## 文 献

- 有馬博史，稲富諒，小山幸平，“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講演論文集，(2016), J234.
- 池上康之，“再生可能エネルギーにおける安定電源の役割を目指す海洋温度差発電の新しい展開 -沖縄・久米島から始まった海洋温度差発電の系統連系”，日本マリンエンジニアリング学会誌, **50-1** (2015), pp. 54-58.
- 池上康之，岩崎君夫，安永健，浦田和也，兼島盛吉，“久米島海洋深層水を利用した海水淡水化装置の連続運転”，海洋深層水研究 (第 19 回海洋深層水利用学会全国大会), Vol. 16, No. 2 (2015), p. 61.
- 上原春男，中岡勉，“インテグレートハイブリッド海洋温度差発電サイクルの性能解析 —OTEC プラントと海水淡水化プラントの組合せ—”，日本海水学会誌, Vol. 44, No. 3 (1990), p. 167.
- 沖縄県久米島町，久米島海洋深層水複合利用基本調査, (2011).
- Makai Ocean Engineering, “Makai Connects World’s Largest Ocean Thermal Plant to U.S. Grid”,  
[http://www.makai.com/makai-news/2015\\_08\\_29\\_makai\\_connects\\_otec/](http://www.makai.com/makai-news/2015_08_29_makai_connects_otec/) (2015.8).