

磁界によるプレート式熱交換器の汚防効果に関する研究 (電磁処理装置の海水汚防評価)

吉村 英行^{*1}, 喜山 直紀^{*1}, 有吉 将希^{*1}, 大原 順一^{*1}, 松下 稔^{*2}, 池上 康之^{*3}

Experimental study of antifouling effect for the plate type heat exchanger by magnetic field (Seawater antifouling evaluation of electromagnetic processing equipment)

Hideyuki YOSHIMURA^{*1}, Naoki KIYAMA^{*1}, Masaki ARIYOSHI^{*1}, Junichi OHARA^{*1},
Minoru MATSUSHITA^{*2} and Yasuyuki IKEGAMI^{*3}

^{*1}National Fisheries University

2-7-1 Nagatahon, Shimonoseki, Yamaguchi, 759-6595, Japan

^{*2}Hisaka Corporation

2-1-48 Higashikonoikechou, Higashiosaka-shi, Osaka 578-0973, Japan

^{*3}Institute of Ocean Energy, Saga University

1 Honjo, Saga-shi, Saga, 840-8502, Japan

Abstract

In this study, a seawater-side fouling experimental equipment using a plate heat exchanger was constructed, and experiments were conducted on how seawater fouling affects the heat transfer performance on the seawater side when seawater is passed through the equipment for a long time and an electromagnetic processing equipment, which is an anti-fouling device, is incorporated in the experimental equipment. As antifouling effects against seawater fouling, the reduction of the heat transfer coefficient of the plate heat exchanger and the improvement of the fouling factor were confirmed. After 90 days of operation of the electromagnetic processing equipment, it was confirmed that it reduced the decrease in the heat transfer coefficient of the plate heat exchanger by 7.4%, and that it had an antifouling effect against seawater contamination by 32% and reduced the seawater inlet and outlet differential pressure by 13%, which means that the power of seawater circulation pumps can be reduced by 13%. Based on the overall results of the above, it is clear that after 60 days of operation of the electromagnetic processing equipment, this is the period during which the electromagnetic processing equipment is more effective.

Key words : Electromagnetic Processing Equipment, Plate Type Heat Exchanger, Heat Transfer Coefficient, Fouling Factor, Seawater Fouling, Seawater Inlet and Outlet Differential Pressure

1. 緒 言

近年海運・水産業界においては、石油などの燃料価格が大幅に高騰することで、経済活動を行う上で安定的な経営が困難な状況になりつつある。また、日本政府が発信した 2050 年度カーボンニュートラル実現に向けた取り組みなど、地球環境に配慮した経済活動が求められる中、これら取り組みを行うことで発生する設備投資コストが経済活動に更なる影響を及ぼすことが想定される。この問題を解決するためには、省エネルギー技術や、機械やシステムを取り入れた省人化技術の導入が必要不可欠になってくる。

海運・水産業界では、船舶運航や操業において各種省エネルギー・省人化技術の導入や減速運転の採用など、様々な運航経費削減の試みが行われている。船舶運航経費の中には、燃料費や人件費、機器類の保守整備費用などが含まれる。燃料費については、近年の世界情勢などからエネルギー供給の不安定化により、これからも価格高騰の流れは止まらないものと考えられる。人件費については、省人化技術の導入により削減されているものの、

原稿受付 2023 年 12 月 25 日

^{*1} 水産大学校 (〒759-6595 下関市永田本町 2 丁目 7-1)

^{*2} 株式会社日阪製作所 (〒578-0973 大阪府東大阪市東鴻池町 2-1-48)

^{*3} 佐賀大学海洋エネルギー研究所 (〒840-8502 佐賀市本庄町 1 番地)

E-mail of corresponding author: yoshimura@fish-u.ac.jp

安全運航のために必要な法定員を遵守する必要があるため、経費削減には限界がある。機器類の保守整備費用については、船舶運航経費の中でも大きな割合を占めており、省エネルギー技術の導入やメンテナンスフリーが実現可能であれば、これに関わる費用を大きく削減することが可能になると考えられる。

本研究では、船舶に搭載されている重要機器の一つであるプレート式熱交換器に注目した。海水と熱交換を行うことで、エンジンの冷却水や空調・冷凍設備に用いられる熱源を供給する機器であり、船舶に限らず多くの産業において広く利用されている機器である。プレート式熱交換器は流体を流すことで熱交換を行うため、伝熱性能を維持するためにプレート面の汚れを定期的に清掃する必要がある。特に海水を利用する場合は、海洋生物や汚れの付着により伝熱性能が大きく低下してしまう。また、船内補機の消費電力量の低減のために、熱交換器用の冷却海水流量をインバータにより制御することが近年行われるようになり、海水流速の低下による伝熱面の汚損が危惧されているなど、適切な伝熱性能を維持するために、更なる頻度での清掃が求められている。従来であれば、船舶職員で整備作業を行うのだが、船員不足、高齢化により船内において機器整備することが困難になっており、高額な外注作業に頼る、すなわち高額な保守整備費用となってしまう、運航経費に与える影響は非常に大きい。また、熱交換器の最適な清掃時期に関する研究として、Ezgi らは、海水をシェルアンドチューブ型熱交換器に通し、2500 時間運転した場合の最適な清掃時期について、経済的な面を踏まえた検証を行っている(C. Ezgi and N. Özbalta, 2012)。

これまで、海水冷却型熱交換器の伝熱性能に関する研究としては、川辺は、海水を用いた熱交換器の障害と対策について報告している(A. Kawabe, 2004)。中島は、海水や雑用水による熱交換器の腐食例とその対策について調査を行い報告している(S. Nakajima, 1963)。佐藤は、海水を使用した熱交換器の材料としてチタンの特性について報告している(H. Satoh, 1990)。崔らは、チタン製のパイプを用いた向流型熱交換器に実際の下水を長期間流す実験を行っている(L. Cui, et al., 2013)。有馬らは、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場合の海水淡水化用プレート式熱交換器の実験を行い、伝熱性能や腐食の影響を明らかにしている(H. Arima, et al., 2016)。また、海水冷却型熱交換器の汚損除去に関する研究としては、川辺は、熱交換器の生物損傷対策技術の開発についても報告している(A. Kawabe, 2004)。Rubio らは、海水で冷却する熱交換器において、塩素処理と銅イオンを組み合わせた防汚作用のメカニズムを明らかにしている(D. Rubio, et al., 2015)。三村ら、林は、CO₂ マイクロバブルを活用することで、生物皮膜の付着抑制および除去に有効性について検証している(H. Mimura, et al., 2013)(H. Hayashi, 2015)。鈴木らは、海水流路に超音波照射を行うことで、配管内の生物付着に対する防汚効果について報告している(Y. Suzuki, et al., 1987)。池上らは、2 基のプレート式熱交換器を長期間通水し、オゾンネーションを用いて生物系汚れの抑制実験を行っている(Y. Ikegami, et al., 1995)。田澤らは、天然素粒子による洗浄システムを提案し、疑似汚れを塗布したプレート式熱交換器を用いて洗浄効果を検証している(Y. Tazawa, et al., 2007)。一瀬らは、プレート式熱交換器を長期間海水通水し、季節による海水側伝熱性能の影響を報告している(J. Ichinose, et al., 2018)。しかしながら、プレート式熱交換器に海水を長期間通水し海水側伝熱面による伝熱性能の低下と汚れ係数の把握、汚れに伴う圧力損失の増大と、伝熱面流速、水温等との相関について検討した研究報告は非常に少ない。また、科学的・機械的手法による汚れ除去法の効果と 従来から存在する逆洗や清水張り込みといった除去方法との比較は行われていない。

そこで、海水汚れを抑制方法として防汚装置の一種である電磁処理装置に着目した。電磁処理装置に関する研究としては、Kabeel らは、液体中の流動と熱伝達に関して磁場効果の影響について報告している(A. E. Kabeel, et al., 2015)。したがって、本研究ではプレート式熱交換器を用いた海水側汚れ実験装置を製作し、海水を長時間通水させ、防汚装置である電磁処理装置を実験装置に組み込んだ場合の海水汚れが海水側伝熱性能にどのような影響を及ぼすのかについて実験を行い、電磁処理装置がプレート式熱交換器のプレート面の海水汚れにどのような軽減効果があるのかについて明らかにした。

2. 実験装置

2・1 実験装置および方法

図 1 にプレート式熱交換器を用いた海水側汚れ実験装置の概略図を示す。また、図 2 に実験装置の全体外観写真を示す。実験装置は、プレート式熱交換器 2 基、海水タンク 2 基(屋内・外)、温水タンク、海水ポンプ、温水ポ

ンプ、温水循環ポンプ、電磁流量計 2 基、差圧伝送器 2 基、電気温水器、電磁処理装置で構成される。試験用プレート式熱交換器は日阪製作所製汎用熱交換器[RX-015A-KNHJ-7]を使用した。外観写真を図 3 に、要目を表 1 に示す。プレート材質はチタン製、プレート有効枚数は 5 枚、温水・海水側の流路はそれぞれ 3 流路である。有効伝熱面積は 0.213 [m²]である。海水側ループは、熱交換を行った海水は屋内外の海水タンクへ送られ再循環しているが、屋外の海水タンクにおいてはタンク内に散水機構を設けることにより自然放熱で温度を低下させ、屋内の海水タンクには常に外部からの海水を供給し、一定の海水がオーバーフローすることにより水位を一定に保持し、両タンク間を連結管でつなぐことにより熱交換器供給海水をほぼ一定温度に保っている。温水側ループは、熱交換を行った温水は温水タンクへと戻り、温水循環ポンプにより電気温水器との間を循環することにより一定温度に保たれている。電磁処理装置は A 社、B 社の製品を使用した。ともに納入実績が多く、様々な分野で実績があったことが選定理由である。試験用プレート式熱交換器 No.1 系統に電磁処理装置を設置し、No.2 系統と比較できるように設計している。温度は、熱交換器出入口 4 箇所、各タンク 2 箇所、大気温度について白金測温抵抗体 [Pt100]により計測を行った。なお、白金測温抵抗体については、事前に標準白金測温抵抗体[Pt100, R800-2]を用いて 検定実験を行い、温度算出には検定実験で得られた検定式を用いて算出している。温水及び海水流量は電磁流量計[温水側 : Promag 10, エンドレスハウザージャパン株式会社][海水側 : IFM1010K-GNA-0025-AWIC-S1-1N, 東京計装株式会社], 熱交換器温水・海水側差圧は 2 台の差圧伝送器[EJA110J-DMSIG-210DD, 横河電機株式会社]により計測を行った。実験の温度、圧力、流量などの計測データの取り込みには、データロガー[GL820, グラフテック株式会社]を使用した。また、実験中の水質変化を把握するために多項目水質計[WQC-24, 東亜ディーケーケー株式会社]により海水タンクの水質計測 (pH, 溶存酸素量, 電気伝導度, 塩分, 全溶存固形物量他)を行った。

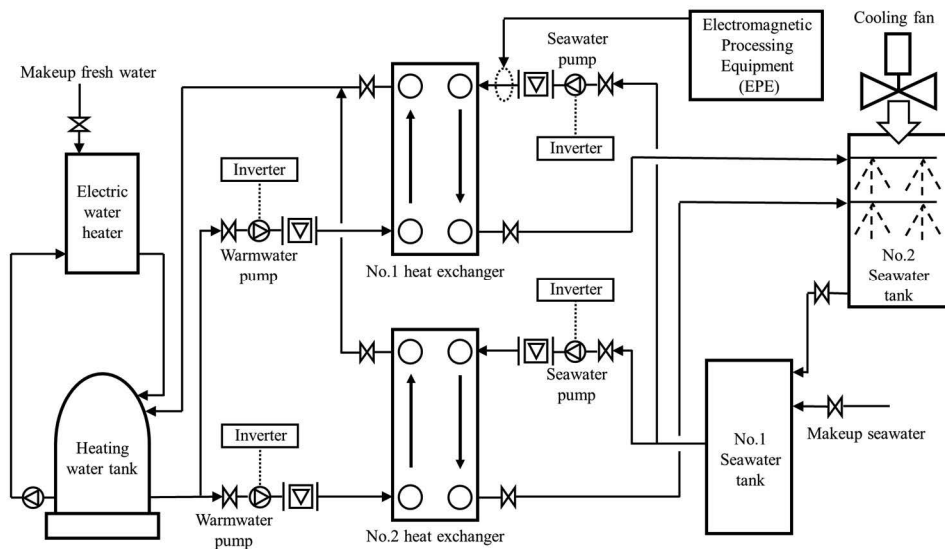


Fig. 1 Diagrammatical view of the device



Fig. 2 Experimental apparatus (General view)



Fig. 3 Heat exchanger

Table. 1 The detail of the plate type heat exchanger

Length of plate	l	392×10^{-3} [m]
Width of plate	ΔL	169×10^{-3} [m]
Thickness of plate	δ	0.5×10^{-3} [m]
Numer of plate	n	5 [-]
Total heat transfer area	A	0.213 [m ²]
Thermal conductivity (titanium)	λ	21.9 [W/m · K]
Equivalent diameter	D_{eq}	$2d(=2 \times 2.65 \times 10^{-3})$ [m]

2・2 防汚装置である電磁処理装置

図4に海水汚れを抑制方法として採用している電磁処理装置の原理を示す。電磁処理装置とは、流体に電磁場を与えることで流体中の粒子の界面電位を制御し、粒子が界面に付着することを防止するものである。具体的には配管内に流れる水に電磁場を与えることで、配管内面へのスケール成分付着を防止する働きがある。電磁処理装置を使用する利点としては、設置が容易であり、薬剤コストの低減、清掃頻度の低減によるメンテナンス費用の低減が期待できる。複数の企業(ZETAWAVE)では既に商品化されており、配管を使用している建物や設備、多岐にわたる分野での納入実績がある。本研究では海水を通水することにより、プレート式熱交換器のプレート面に対しても、電磁処理装置の効果により海水汚れの付着防止に繋がるのではないかと考えた。防汚効果があることで、プレート式熱交換器の伝熱性能の劣化速度を抑え、更に海水を通水する海水ポンプ動力の軽減にも繋がるのではないかと考えた。

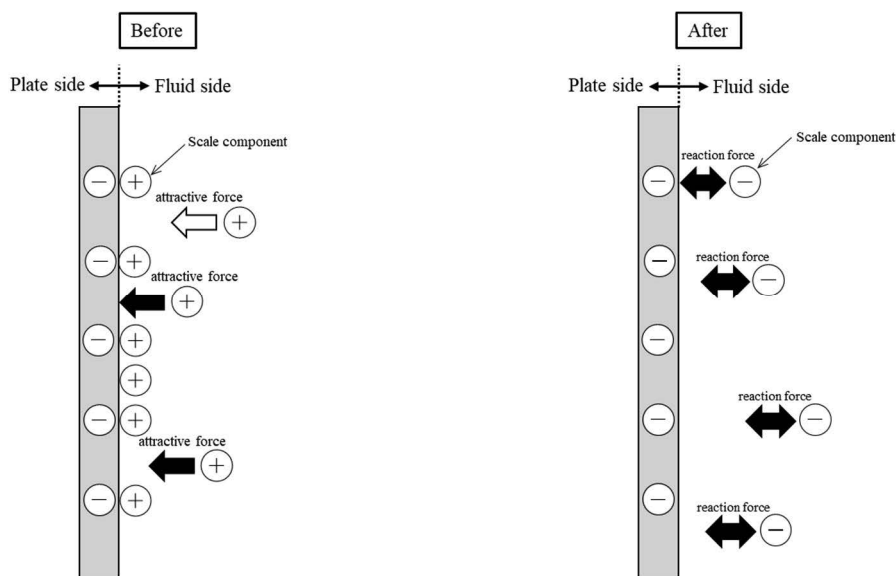


Fig. 4 Electromagnetic Processing Equipment

3. 実験データの整理方法

プレート式熱交換器の温水側交換熱量 Q_{WW} は、次式より求めた。

$$Q_{WW} = m_{WW} \cdot p_{WW} \cdot c_{pWW} (T_{WWI} - T_{WWO})$$

温水の物性値算出には、文献(T. Fujii, et al., 1977)を使用した。プレート式熱交換器の海水側交換熱量 Q_{CW} は、次式より求めた。

$$Q_{CW} = m_{CW} \cdot p_{CW} \cdot c_{pCW}(T_{CWO} - T_{CWI})$$

海水の物性値算出には、文献(The Japan Society of Mechanical Engineers, 2009) (UNESCO, 1981)を使用し、計算に必要な海水塩分については、多項目水質計での計測値を使用した。プレート式熱交換器の熱通過係数 k は、次式で算出した。

$$k = \frac{Q_{WW}}{A \cdot \Delta T_m}$$

ここで、対数平均温度差 ΔT_m は、以下の式で定義される。

$$\Delta T_m = \frac{(T_{WWI} - T_{CWO}) - (T_{WWO} - T_{CWI})}{\ln \frac{T_{WWI} - T_{CWO}}{T_{WWO} - T_{CWI}}}$$

4. 実験条件

実験条件を表 2、表 3 に示す。表 2 の条件で電磁処理装置の防汚効果の有効性を見極めるために、2021 年 10 月 8 日から 2021 年 12 月 21 日の期間で 30 日間運用を実施した。有効性が確認されたのち、表 3 の条件で 2022 年 10 月 18 日から 2023 年 1 月 25 日と 2023 年 4 月 9 日から 2023 年 7 月 8 日の 90 日間の長期的な運用を 2 回実施し、電磁処理装置が海水汚れに対してどれほどの防汚効果があるのか、また季節による影響があるのかについて検証を行った。

Table. 2 Experimental conditions

2021/10/08 ~ 2021/11/06 (30days) 2021/11/21 ~ 2021/12/21 (30days)	No.1 EXC	No.2 EXC
Warmwater temperature	40~45[°C]	40~45[°C]
Seawater temperature	Measured value	Measured value
Warmwater flow rate	0.30 [L/s]	0.30 [L/s]
Seawater flow rate	0.30 [L/s]	0.30 [L/s]

Table. 3 Experimental conditions

2022/10/18 ~ 2023/01/25 (90days) 2023/04/09 ~ 2023/07/08 (90days)	No.1 EXC	No.2 EXC
Warmwater temperature	40~45[°C]	40~45[°C]
Seawater temperature	Measured value	Measured value
Warmwater flow rate	0.30 [L/s]	0.30 [L/s]
Seawater flow rate	0.30 [L/s]	0.30 [L/s]

5. 実験結果

5・1 プレート式熱交換器のヒートバランス

本実験では、プレート式熱交換器について温水側と海水側の間での熱平衡（ヒートバランス）がとれているか確認を行った。図5、図6は、それぞれ表2、表3の各実験でのプレート式熱交換器の温水側交換熱量 Q_{WW} と海水側交換熱量 Q_{CW} の関係を示す。図より、温水側交換熱量 Q_{WW} と海水側交換熱量 Q_{CW} は $\pm 15\%$ 以内であり、熱交換器の熱平衡はほぼとれていると考えられる。

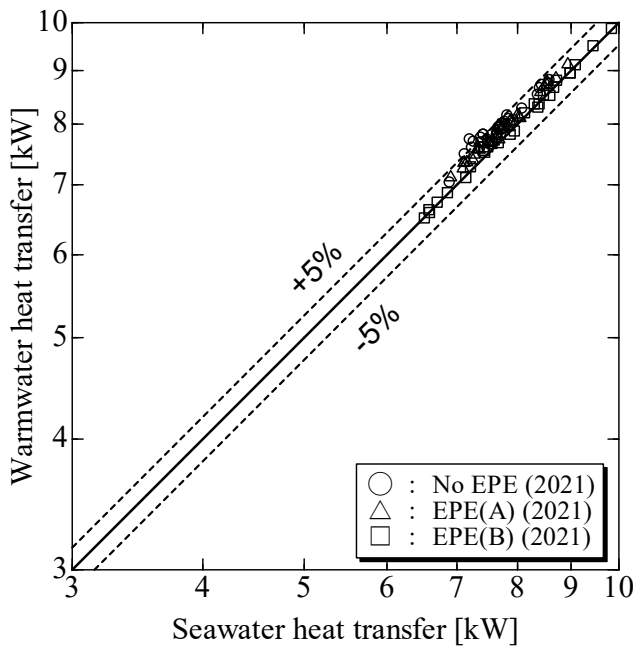


Fig. 5 The variation of heat balance with the day

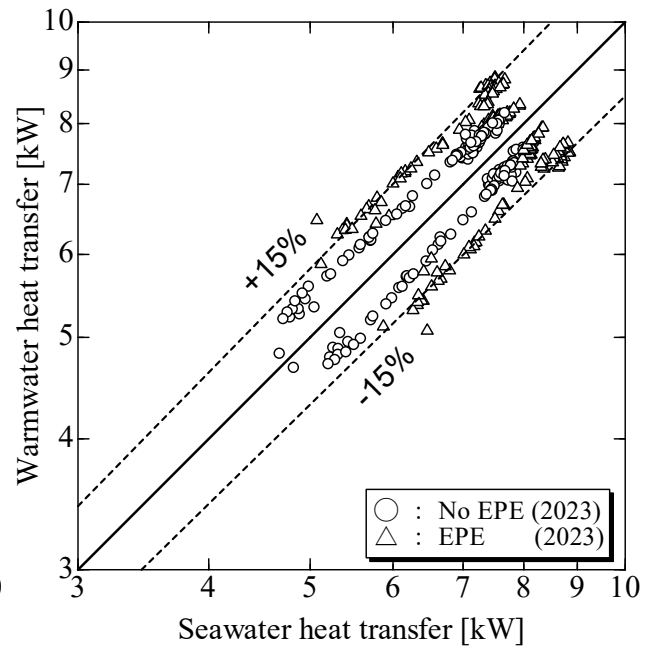


Fig. 6 The variation of heat balance with the day

5・2 海水汚れに対する電磁処理装置の有効性

5・2・1 熱通過係数の経時変化

図7は、表2の条件での熱通過係数の経時変化を示す。図中○印は電磁処理装置が設置されていない場合、△印はA社の電磁処理装置を設置した場合、□印はB社の電磁処理装置を設置した場合の結果である。

図7より、電磁処理装置が設置されていない○印では、実験開始時には熱通過係数の値は $4,785.8\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ であったが、終了時には $3,599.5\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ まで低下し、熱通過係数は24.8%低下した。A社の電磁処理装置を設置した△印では、実験開始時には熱通過係数の値は $4,875.1\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ であったが、終了時には $3,624.2\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ まで低下し、熱通過係数は25.7%低下した。B社の電磁処理装置を設置した□印では、実験開始時には熱通過係数の値は $4,779.2\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ であったが、終了時には $3,743.4\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ まで低下し、熱通過係数は21.7%低下した。

B社の電磁処理装置の方がA社と比較して、熱通過係数の低下幅が小さく、当実験装置においては海水汚れに対して3%の熱通過係数の低下軽減効果が見られた。また、A社とB社で効果の相違が出た理由としては、電磁処理装置の各々の特性が影響していると思われる。実際に電磁処理装置を設置する際には、事前に水質調査等の適合試験を行い効果の有無を判断している。

したがって、本実験装置ではB社の電磁処理装置が適しており、海水汚れに対する防汚効果として、プレート式熱交換器の熱通過係数の低下軽減効果が確認できた。

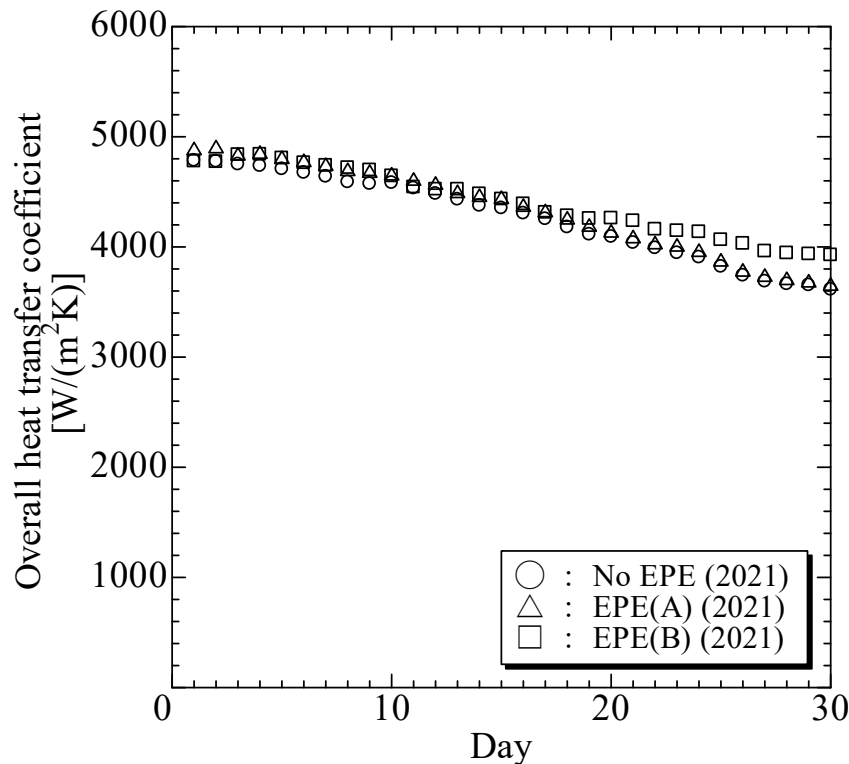


Fig. 7 Overall heat transfer coefficient with the day

5・2・2 汚れ係数の経時変化

実際の熱交換器においては、運転中に伝熱面に汚れが付着し伝熱性能が低下する。従って熱交換器の設計の際には、運転中における伝熱性能の劣化を予測し、その状態における伝熱面上の熱抵抗（汚れ係数）を定めて熱通過係数を決定する必要がある。汚れ係数については、指針的なものも提案されているが、実際には流体の性質・温度・流速等により大きく変化するとされている(S.J.PUGH, et al., 2005)。ここでは、本実験条件下における汚れ係数を算出し、電磁処理装置の影響について比較を行った。

本実験における汚れ係数 R_{fre} は、以下で定義される。

$$R_{fre} = \frac{1}{k_2} - \frac{1}{k_1}$$

ここで、 k_1 は汚れる前の熱通過係数、 k_2 は汚れた後の熱通過係数である。

図8は、表2の条件での汚れ係数の経時変化を示す。図中○印は電磁処理装置が設置されていない場合、△印はA社の電磁処理装置を設置した場合、□印はB社の電磁処理装置を設置した場合の結果である。

電磁処理装置が設置されていない○印では、汚れ係数の値は実験開始から終了時まで6.89×10⁻⁵(m²・K)/Wまで増加し、A社の電磁処理装置を設置した△印では7.08×10⁻⁵(m²・K)/Wまで増加した。また、B社の電磁処理装置を設置した□印では6.34×10⁻⁵(m²・K)/Wまで増加した。

以上より、A社の電磁処理装置を設置する有無に関係なく汚れ係数はほぼ変わらず、電磁処理装置の効果は確認できなかった。しかし、B社の電磁処理装置を設置することで、汚れ係数の値に8%の改善が見られ電磁処理装置の効果を確認できた。A社とB社で効果の相違が出た理由としては、前述でも述べているが、電磁処理装置の各々の特性が影響していると思われる。本実験装置ではB社の電磁処理装置が適していたことが分かった。

したがって、本実験装置ではB社の電磁処理装置が適しており、海水汚れに対する防汚効果として、プレート式熱交換器の汚れ係数に改善が見られることが確認できた。

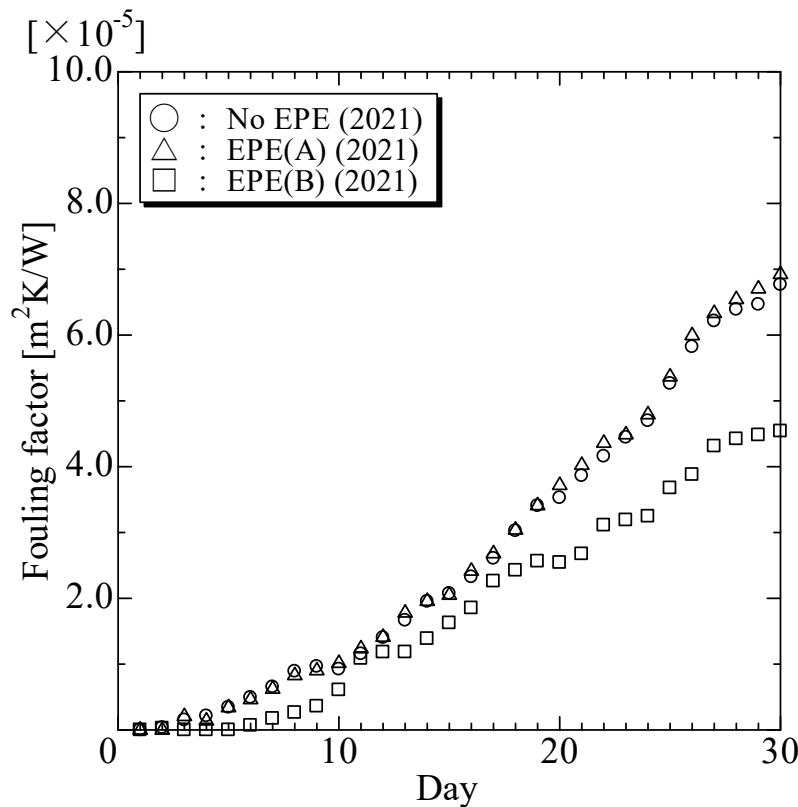


Fig. 8 The variation of fouling thermal resistance R_{fre} with the day

5・3 海水汚れに対する電磁処理装置の防汚効果

前述より、プレート式熱交換器に海水を通水する場合、電磁処理装置が海水汚れに良い影響を及ぼすことが明らかになった。ここからは実際に実験装置を長期運用した場合に、電磁処理装置が海水汚れに対して、どれだけ良い効果を及ぼすのか、また良い効果がいつまで続くのか、あるいは運用する季節によってどのような影響があるのかを明らかにするための実験を行い、海水汚れに対する電磁処理装置の長期的な防汚効果を明らかにした。

5・3・1 熱通過係数の経時変化(長期運用した場合)

図9は、表3の条件での熱通過係数の経時変化を示す。電磁処理装置の有無による効果や季節による電磁処理装置の効果の有無について比較検証を行った結果を以下に示す。

図9より、電磁処理装置がある系統(夏季)では、実験開始時には熱通過係数の値は $4,418.7\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ であったが、実験終了時には $2,199.3\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ まで低下し、熱通過係数は 50.2% 低下した。電磁処理装置がある系統(冬季)では、実験開始時には熱通過係数の値は $4,334.7\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ であったが、実験終了時には $2,106.1\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ まで低下し、熱通過係数は 51.4% 低下した。また、電磁処理装置が無い系統では、実験開始時には熱通過係数の値は $4,016.8\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ であったが、実験終了時には $1,704.7\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ まで低下し、熱通過係数は 57.6% 低下した。

以上の結果より、90日間プレート式熱交換器の海水系統に電磁処理装置を設置して運転を行うことで、7.4%の海水汚れに対する熱通過係数の低下軽減が可能であることが明らかになった。また、季節による海水汚れへの影響は考えにくい結果も明らかになった。

5・3・2 汚れ係数の経時変化(長期運用した場合)

図10は、表3の条件での汚れ係数の経時変化を示す。電磁処理装置の有無による効果や季節による電磁処理装置の効果の有無について比較検証を行った結果を以下に示す。

図10より、90日経過後の電磁処理装置がある系統(夏季)では、汚れ係数の値は $2.28 \times 10^{-4}(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$ 、電磁処理装置がある系統(冬季)では $2.14 \times 10^{-4}(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$ 、また電磁処理装置が無い系統では $3.38 \times 10^{-4}(\text{m}^2\cdot\text{K})/\text{W}$ であった。

以上の結果より、90日間プレート式熱交換器の海水系統に電磁処理装置を設置して運転を行うことで、32.5%の海水汚れに対する防汚効果が得られることが明らかになった。また、季節による海水汚れへの影響は考えにくい結果も明らかになった。

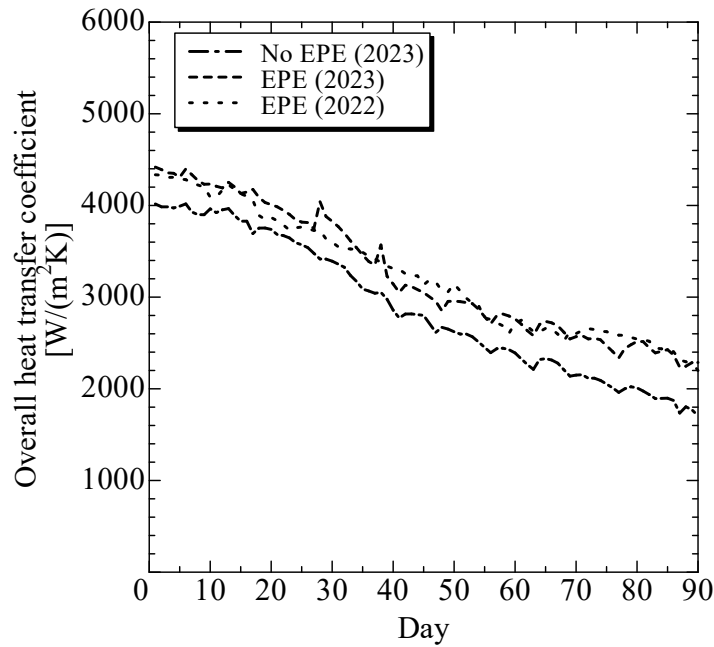


Fig. 9 Overall heat transfer coefficient with the day

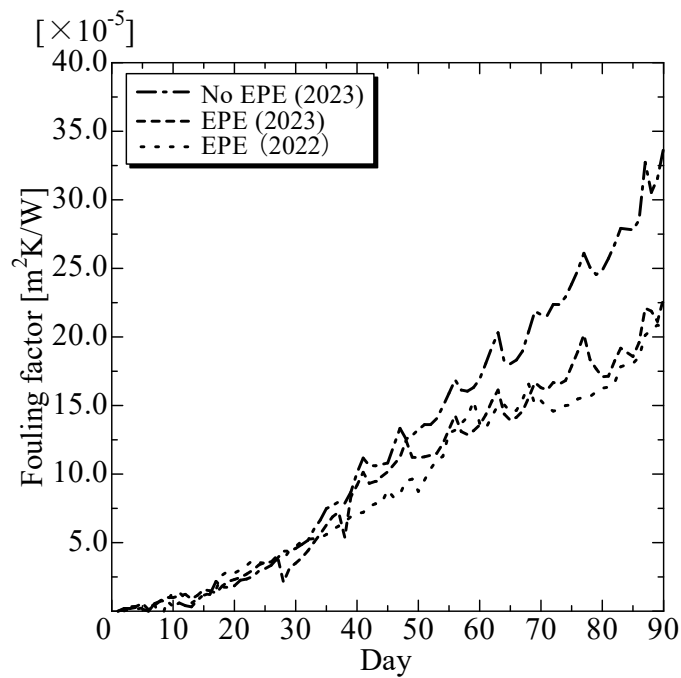


Fig. 10 The variation of fouling thermal resistance R_{fre} with the day

5・3・3 差圧の経時変化(長期運用した場合)

プレート式熱交換器の海水側出入口の差圧の変化を表したものを図 11 に示す。ここでの差圧とは、伝熱面に堆積する汚れやスケール量によって変化し、海水を通水する海水循環ポンプに関するパラメータである。長期的に運転するほど汚れやスケールが徐々にプレート面に付着・堆積し、流れる流体にとって大きな抵抗になり、同じ流量を確保するためにより多くの海水循環ポンプ動力が必要になり、省エネルギーにはならない。そこで電磁処理装置を設置し長期運用した場合の、海水出入口差圧の経時変化について評価を行った。

図 11 より、90 日経過後の電磁処理装置がある場合の海水出入口差圧は 11.03kPa、電磁処理装置が無い場合の海水出入口差圧は 12.78kPa であり、13%の海水出入口差圧の低減効果が確認できた。本実験では同等の海水流量を通水しており、海水流量は一定であると仮定した場合に、海水出入口差圧の増減量が海水循環ポンプ動力の増減量として評価することができる。したがって、13%の海水出入口差圧の低減効果が確認でき、これは海水循環ポンプ動力を 13%削減することができるとも言える。

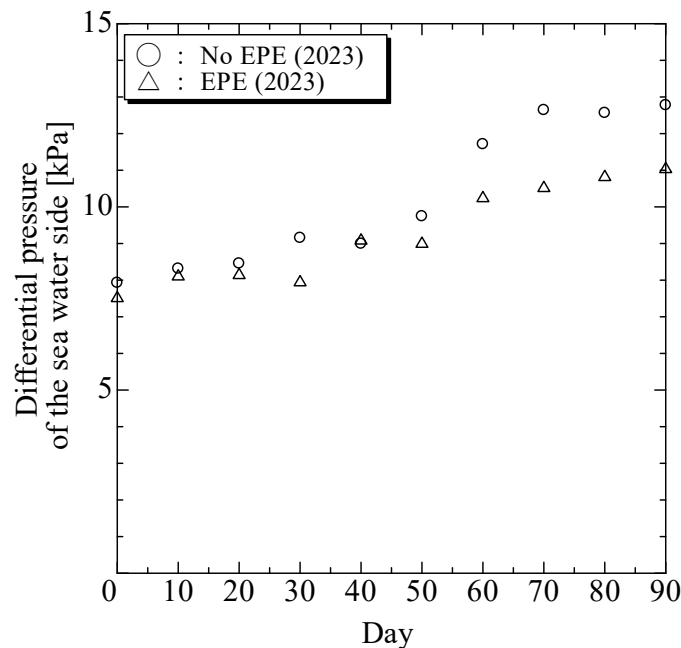


Fig. 11 Differential pressure of the sea water side with the day

6. 電磁処理装置が海水汚れに及ぼす評価方法

6・1 評価手法について

電磁処理装置は海水汚れに効果があることは前述により証明された。海水汚れを軽減することでプレート式熱交換器の伝熱性能の劣化速度を抑え、プレート式熱交換器のメンテナンスコストを抑えることに繋がり、またプレート式熱交換器の海水出入口の差圧に関しても軽減させ、海水ポンプ動力の軽減にも繋がることも分かった。したがって、電磁処理装置を設置することで複数の利点が存在するという結果を踏まえ、プレート式熱交換器に海水を通水した場合の電磁処理装置の効果を数値化するために以下の評価関数 γ で定義する。

$$\gamma = \frac{\Delta P}{k}$$

ΔP はプレート式熱交換器の海水出入口の差圧、 k はプレート式熱交換器の熱通過係数を示す。プレート式熱交換器の熱通過係数が大きい、すなわち伝熱性能が良く、かつプレート式熱交換器の海水出入口の差圧が小さい、すなわち海水ポンプ動力が小さい場合の最小値 γ が、電磁処理装置が海水汚れに及ぼす防汚効果を評価する数値として表現することができる。

6・2 評価手法を用いた結果

評価関数 γ を用いて今回の実験結果について考察する。図 12 に、90 日間運転した場合に電磁処理装置が海水汚れに及ぼす防汚効果を表す評価関数 γ を示す。実験開始から 60 日以降になると電磁処理装置の有無により、評価関数 γ に大きな差が生じていることが分かる。これは前述で述べている電磁処理装置を設置することで複数の利点に関係しており、複数の利点（①プレート式熱交換器の熱通過係数の劣化速度を抑え、②プレート式熱交換器の海水出入口の差圧を軽減させる）がより顕著に表れていることを示している。したがって、電磁処理装置を運用開始してから 60 日以降になると電磁処理装置がより効果を発揮する期間であることが明らかになった。

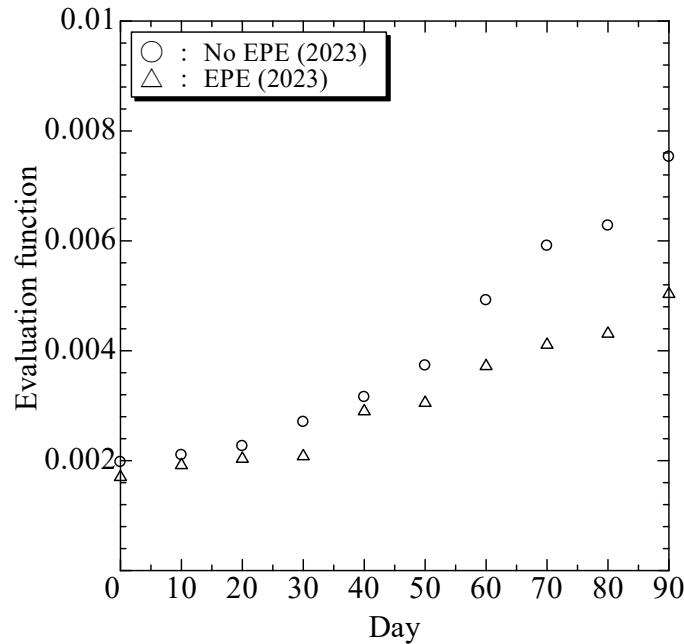


Fig. 12 Evaluation function γ with the day

7. 結 言

本研究ではプレート式熱交換器を用いた海水側汚れ実験装置を製作し、海水を長時間通水させ、防汚装置である電磁処理装置を実験装置に組み込んだ場合の海水汚れが海水側伝熱性能にどのような影響を及ぼすのかについて実験を行い、電磁処理装置がプレート式熱交換器のプレート面の海水汚れにどのような軽減効果があるのかについて明らかにした。以下の結果が得られた。

- (1) 熱通過係数の経時変化について、B社の電磁処理装置では、熱通過係数の低下率が3%程度改善されており、防汚装置として有効性が示された。A社の電磁処理装置では熱通過係数の低下率改善傾向は見られなかった。
- (2) 汚れ係数の経時変化について、B社の電磁処理装置では、汚れ係数の増加率が8%程度改善されており、防汚装置として有効性が示された。A社の電磁処理装置では汚れ係数の改善傾向は見られなかった。
- (3) A社とB社で効果の相違が出た理由としては、電磁処理装置の各々の特性が影響していると思われる。実際に電磁処理装置を設置する際には、事前に水質調査等の適合試験を行い効果の有無を判断している。そのため、本実験装置ではB社の電磁処理装置が適していたことが分かった。
- (4) 90日間プレート式熱交換器の海水系統に電磁処理装置を設置して運転を行うことで、7.4%の海水汚れに対する熱通過係数の低下軽減が可能であることが明らかになった。また、季節による海水汚れへの影響は考えにくい結果も明らかになった。

- (5) 90日間プレート式熱交換器の海水系統に電磁処理装置を設置して運転を行うことで、32.5%の海水汚れに対する防汚効果が得られることが明らかになった。また、季節による海水汚れへの影響は考えにくい結果も明らかになった。
- (6) 90日間プレート式熱交換器の海水系統に電磁処理装置を設置して運転を行うことで、13%の海水出入口差圧の低減効果が確認できた。本実験では同等の海水流量を通水しており、海水流量は一定であると仮定した場合に、海水出入口差圧の増減量が海水循環ポンプ動力の増減量として評価することができる。したがって、13%の海水出入口差圧の低減効果が確認でき、これは海水循環ポンプ動力を13%削減することができるとも言える。
- (7) 電磁処理装置を設置することで複数の利点が存在するという結果を踏まえ、プレート式熱交換器に海水を通水した場合の電磁処理装置の効果を数値化するために以下の評価関数 γ で定義した。
- (8) 定義した評価関数 γ で今回の実験データを評価した場合、電磁処理装置を運用開始してから60日以降になると電磁処理装置がより効果を発揮する期間であることが明らかになった。

文 献

- C. Ezgi, N. Özbalta, Optimization of Heat Exchanger Cleaning Cycle on a Ship, *Journal of Naval Science and Engineering*, Vol.8, No.1, (2012), 33-46.
- A. Kawabe, Development of antifouling technologies for heat exchanger, *Sessile Organisms*, Vol.21, No.2, (2004), 55-84.
- S. Nakajima, Research on examples of corrosion of heat exchangers caused by seawater and miscellaneous water and countermeasures, *Chemical Engineering*, Vol.27, No.10, (1963), 756-757.
- H. Satoh, Some Properties of Titanium as a Structural Material for Heat Exchangers Using Sea Water Coolant, *Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan*, Vol.3, No.44, (1990), 200-208.
- L. Cui, M. Mike, M. Kitatomi, Y. Kanjo, M. Nishioka, M. Nakao, M. Nabeshima, C. Farnham, K. Sawabe, A basic study of fouling on a heat exchanger used in sewage for heat recovery, *The Japan Society of Air-Conditioning and Sanitation Engineers Kinki Branch Proceedings of the Academic Research and Presentation Meeting*, (2013), 297-300.
- H. Arima, R. Inadomi, S. Matsuda, Heat transfer performance of plate heat exchanger for seawater desalination using special coating aluminum alloy plates, *OTEC*, Vol.21, (2016), 7-15.
- D. Rubio, J. F. Casanueva, E. Nebot, Assessment of the antifouling effect of five different treatment strategies on a seawater cooling system, *Applied Thermal Engineering*, Vol.85, (2015), 124-135.
- H. Mimura, H. Hayashi, A. Serizawa, Application of Microbubbles toward Repression of Biofilm Formation and Removal of Biofilm Formed inside Aluminum Brass Pipes with Iron Film Used for Heat Exchangers, *Bulletin of the Society of Sea Water Science, Japan*, Vol.67, No.5, (2013), 289-295.
- H. Hayashi, Sea water heat exchanger washing with CO₂ microbubble, *Proceedings of the Thermal and Nuclear Power Conference*, Vol.11, (2015), 28-34.
- Y. Suzuki, T. Hoshino, T. Saegusa, Fouling prevention in seawater piping by ultrasonic waves, *Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan C*, Vol.107, No.5, (1987), 477-484.
- Y. Ikegami, K. Urata, T. Tsuru, H. Sumitomo, T. Yamasaki, H. Uehara, Prevention of Marine Biofouling by Ozonation Using Plate-Type Heat Exchanger, *Proceedings of the JSME*, Vol.61, No.586, (1995), 303-309.
- Y. Tazawa, H. Sakai, S. Ooki, T. Imoto, New Cleaning System using Particle of Natural Material for Marine Plate-type Heat-exchanger, *Fisheries Engineering*, Vol.44, No.2, (2007), 79-84.
- J. Ichinose, T. Takami, T. Nishida, N. Inoue, Experimental study of marine biofouling for the plate type heat exchanger with sea water cooling -Effect of sea water temperature-, *Journal of National Fisheries University*, Vol.67, No.2, (2018), 71-77.
- A. E. Kabeel, E. M. S. El-Said, S. A. Dafea, A review of magnetic field effects on flow and heat transfer in liquids: Present status and future potential for studies and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.45, (2015), 830-837.
- ZETAWAVE, Techno Lab Inc and Koshin Chemical Inc

- T. Fujii, Y. Katou, K. Mihara, Proposed formulas for indicating the physical properties of air, water vapor, and water, The reports of the Research Institute of Science and Industry, Kyushu University, No.66, (1977), 81-95.
The Japan Society of Mechanical Engineers, Heat Transfer Engineering Materials, Revised 5th ed, (2009)
UNESCO, Unesco technical papers in marine science. 38(1981)
S.J.PUGH, G.F.HEWITT, H.MULLER-STEINHAGEN : Fouling During the Use of Seawater as Coolant-the Development of a User Guide. Heat Transfer Engineering, Vol.26, No.1, pp.35-43, (2005)