熱回収型バラスト水処理装置 TAF System の開発 - システム性能*

藤 木 信 彦**
山 根 健 次***綾 威 雄**
池 上 康 之*****猪 原 祥 行****
浦 田 和 也*****
小 池 一 彦*****Development of Thermal-retrieval Type Ballast Water Treatment System "TAF"
— System PerformanceBy Nobuhiko Fujiki, Izuo Aya, Yoshiyuki Inohara, Kenji Yamane,
Yasuyuki Ikegami, Kazuya Urata, Kazuhiko Koike

For drastic reduction of energy necessary to thermal treatment of ballast water, a heat retrieving type ballast-water treatment system (BWTS), Thermal Aqua-Filtration (TAF) system, has been under development. The land-based plant (15 m³/h for TOR), consisting mainly of a plate-type heat exchanger (HX) and a Thermal-treatment Tank with electric heaters for sub-heating, showed to meet D-2 regulation with 70 °C and 5 minutes treatment. By using the land-based plant (15 m³/h for TOR), consisting mainly of a plate-type heat exchanger and a Thermal-treatment Tank with electric heaters for sub-heating, it was confirmed that 70 °C and 5 minutes treatment meet D-2 regulation. The heat-retrieving ratio became over 95 %, which reduces the operation cost of an ocean friendly BWTS to the realistic level. The bio-fouling on the plates of heat exchanger, which has been one of the key technical issues, could well be overcome.

1. はじめに

バラスト水管理条約の発効を間近に控え、様々なバラスト水処理装置の開発が行われ、各国で承認を得た処理装置の数が増えつつある。しかし、これらの処理装置のほとんどは、活性物質を使用するハイブリッド型であるため、排水海域における二次環境汚染が懸念されている。そこで、著者らは二次汚染の心配が全くない熱処理のみでバラスト水中の生物を殺滅することに関心を持った。以前より、熱処理での開発は検討されてきたが、膨大な熱エネルギーが必要なため、経済的な面で実用化が難しかった。その後、熱交換器による熱エネルギーを回収する方式の提案があったが、熱回収率が 60~70%と十分ではないため実用

化に至っていない。そこで、著者らは、熱回収率 95%以上を目指し、高効率な熱交換が可能なプレート式熱交換器を使用した「熱回収型バラスト水処理装置 TAF (Thermal Aqua Filtration) System, の開発」を進め、70°C/5min の熱処理で条約の求める D-2 基準をクリアできることを示した⁽¹⁾。

本稿では、TAF System の開発の内、以下の工学的側面⁽²⁾について報告する。

- ・熱回収率 95%以上が実現できるか
- ・伝熱性能を維持できるか(バイオフィーム対策)

2. 熱回収方式と予測熱回収率

熱回収を担う熱交換器として、小型で高熱回収率が期待できるプレート式熱交換器を採用した。これにより、加熱側(処理水)と被加熱側(未処理水)との温度差 ΔT を、全熱交換器にわたって 2°C にすることができる。寄港地海水温度(処理

*原稿受付 平成 23 年 4 月 20 日

**正会員 (株)大晃産業(尾道市向島町 9515-1)

***正会員 (独)海上技術安全研究所(三鷹市新川 6-38-1)

**** (株)大晃産業(尾道市向島町 9515-1)

***** 佐賀大学(佐賀市本庄町 1)

***** 広島大学大学院生物圏(東広島市鏡山 1-4-4)

前バラスト水温度)を 15°C 、処理温度を 70°C とすると、熱回収率は、 $(68-15)/(70-15)=96.4\%$ となり、運転コスト的に十分実現可能となる。

3. TAF System

Fig.1 に TAF System の処理フローを示す。

(1) 漲水時

シーチェストからバラストタンクに海水を貯める (排水時に処理を行うため、処理は行わない)。

(2) 航行時

寄港するまでに、殺滅タンク内の海水を主機排熱等により処理温度(70°C)まで加熱する。

Fig. 1 A Schematic diagram of water treatment in TAF System.

(3) 排水時

以下の 3 プロセスから成る。

- ・バラストタンクから送られる 15°C (寄港地海水温度であるため、必ずしも一定ではない) のバラスト水は、熱交換器内で、 70°C の処理済み海水により、 68°C まで加熱される (熱回収プロセス)。
- ・ 68°C で殺滅タンクに入る未処理海水は、補助ボイラからの熱により、 70°C まで補助加熱される。
- ・5 分の熱処理の後、 70°C の処理済み海水は、熱交換器で新たな未処理海水を加熱することにより、 17°C まで冷却され排出される。排水温度が寄

港地海水より 2°C 高いだけで、温排水の問題は生じない (我が国の温排水規制値は、 $+7^{\circ}\text{C}$ 以下)。

4. 実証試験装置による試験

4.1 実証試験装置

Fig. 2 Set-up of TAF System
(land-based plant: TRC= $15\text{ m}^3/\text{h}$, $\Delta T=2^{\circ}\text{C}$)

Fig.2 a に、TAF System の実現性を確認するための社内試験に供した実証試験装置を示す。実証試験装置は、主として、模擬バラストタンク (13m^3)、プレート式熱交換器、加熱殺滅タンク及び水質分析とバクテリア/プランクトン計測のためのサンプリング排水管から構成される。

加熱殺滅タンク (Fig.2 b) は 5 つの区画から構成されており、容積は処理流量×処理時間により決定される。今回の実証試験装置では処理流量 $15\text{m}^3/\text{h}$ 、加熱処理時間 5 分であるため、タンク容量は 1.25m^3 になるが、タンク内の速度分布を考慮して、20% のマージンを取り、加熱殺滅タンク

容量を 1.5m³に設定した. 2℃の補助加熱のため, 4 台の電気ヒーター (各 10kW) を, 各々の区画の底部に設置した. 熱交換器により 68℃まで加熱された海水は, 加熱殺滅タンク内で 5 分の処理中に 70℃まで補助加熱される.

プレート式熱交換器の構造を Fig.3 に示す. 海

水による腐食に対処するため, 厚さ 0.5mm のチタン・プレートを使用した. 今回使用した熱交換器のプレート数は 232 枚で, それらは 4 分割されており, 各区間の温度変化は (68-15) / 4= 13.25℃となっている. この熱交換器により, Δ*T* をわずか 2℃まで小さくすることができる.

Fig.3 Structure of the plate-type HX equipped with the land-based model

4.2 熱回収率

熱回収率を決定づける熱交換器内のΔ*T*に着目する. TAF System では, 処理海水と未処理海水の流量は完全に一致しているが, 本試験装置では流量調整が手動制御のため, 完全な一致は難しい. Table.1 に実証試験装置で確認したデータを示す. データからも分かる通り, 高温側Δ*T_H*と低温側Δ*T_L*は異なる. しかも, Δ*T*は流量に対して非常に敏

感である. 例えば, 流量が 1%変動すると, Δ*T*は, (68-15)×0.01=0.53℃, 即ち, 26.5% (0.53/2=0.265) も変化する. また, 未処理海水温度は 15℃とは限らず, 処理温度も制御の面から, 正確に 70℃に設定することは難しい. 従って, 得られたΔ*T*の生データを, 定格運転時の値に補正する必要がある.

Table 1 Typical data of Δ*T*, logarithmic mean Δ*T_M* and modified Δ*T_{MO}* for rated condition

<i>Q_H</i> (m ³ /h)	<i>Q_L</i> (m ³ /h)	<i>T_{HIN}</i> (°C)	<i>T_{HOUT}</i> (°C)	<i>T_{LIN}</i> (°C)	<i>T_{LOUT}</i> (°C)	<i>T_{HIN}</i> - <i>T_{HOUT}</i> (°C)	<i>T_{LOUT}</i> - <i>T_{LIN}</i> (°C)	Δ <i>T_H</i> (°C)	Δ <i>T_L</i> (°C)	Δ <i>T_M</i> (°C)	Δ <i>T_{MO}</i> (°C)
15.0	14.6	58.32	24.22	23.34	56.03	34.10	32.69	2.29	0.88	1.47	2.29
15.0	14.6	58.86	24.67	23.77	56.56	34.19	32.79	2.30	0.90	1.49	2.31
15.0	14.5	59.41	24.75	23.84	57.10	34.66	33.26	2.31	0.91	1.50	2.30
15.0	14.6	59.91	24.84	23.93	57.57	35.07	33.64	2.34	0.91	1.51	2.29
14.9	14.5	60.37	24.90	23.89	58.14	35.47	34.25	2.23	1.01	1.54	2.29
14.9	15.1	61.87	23.40	22.34	59.36	38.47	37.02	2.51	1.06	1.68	2.30
14.9	15.1	62.25	24.27	23.15	59.91	37.98	36.76	2.34	1.12	1.66	2.30
14.7	15.0	62.80	24.59	23.39	60.59	38.21	37.20	2.21	1.20	1.65	2.25
14.7	15.0	63.51	24.92	23.67	60.34	38.59	36.67	2.17	1.25	1.67	2.24
14.7	15.0	64.19	25.02	23.76	61.91	39.17	38.15	2.28	1.26	1.72	2.28

定格運転時温度差 ΔT_0 は式(1)から求めた.

$$\Delta T_0 = \Delta T_{LN} \times Q_0 / Q \times 53 / (T_{HIN} - T_{HOUT}) \quad (1)$$

ただし, $\Delta T_{LN} = (\Delta T_H - \Delta T_L) / \ln(\Delta T_H / \Delta T_L)$

Q_0 : 定格流量(15 m³/h)

Q : 処理水流量(m³/h)

T_{HIN} : 処理水入口温度(°C)

T_{HOUT} : 処理水出口温度(°C)

式(1)から求めた ΔT_0 の代数平均は, 2.29 °C (回収率: 95.7%)となった. 目標の2°Cより14%ほど大きい, その理由として, 以下が考えられる.

TAF System では, 加熱温度が53°Cと大きいことから, 熱交換器のプレート群を4段に分けているが(1段当たりの加熱: 13.25°C), 段間を断熱しなかったため, 段間の熱移動(熱交換した一部の熱が逆流する)により熱交換性能が悪くなっている. この熱移動は, 高性能熱交換器であるが故, 相当大きい. 従って, 段間を断熱構造とすることにより, $\Delta T=2^\circ\text{C}$ は十分達成できると考えている.

4.3 殺滅試験結果

殺滅性能試験を実施するに当たり, 装置の隅々に至るまで, 98°C程度の自然海水を通すことで, 生物汚染の除去を行った. 熱処理条件は70 °C/5min とした. G8 試験マニュアルに準拠した試験結果の詳細は既に公表している⁽¹⁾が, 最も重要な殺滅性能を Table 2 に再掲する. Table 2 から, 条約の求める D-2 基準を満足していることが分かる.

Table 2 Results of biological analyses for the heat-treated discharge water in TAF System.

		Before heat-treatment	After heat-treated
Plankton	S-size	$1.61 \pm 0.31 \times 10^3$ cell/ml	N.D.
	L-size	$2.1 \pm 0.44 \times 10^5$ cell/ml	N.D.
Bacteria	Coliform (大腸菌)	328×27 cfu/100ml	N.D.
	Enterococcus (腸球菌)	N.D.	N.D.
	<i>Vibrio cholerae</i> (毒性コレラ菌)	N.D.	N.D.
	Heterotrophic (従属栄養細菌)	$4.9 \pm 0.9 \times 10^4$ cfu/100ml	12 ± 12 cfu/100ml

※N.D.: Less than detection limits

5 バイオフィルム対策

5.1 試験装置

Fig.4 Apparatus for bio-fouling test

TAF システム実現のために克服すべきもう一つの技術的課題が伝熱プレート面への生物付着(バイオフィルム)による伝熱性能の悪化である。伝熱性能の変化と回復方法について、流量 $4 \text{ m}^3/\text{h}$ のプレート式熱交換器 2 台(EX1 と EX2)を組み込んだ小規模試験装置で確認を行った。Fig.4 に試験装置の系統を示す。本装置により、長期伝熱性能試験と短期伝熱性能試験を行った。Table 3 に各試験条件を示す。

Table 3 Condition of bio-fouling tests

	Test term	Test water
Long term test	25days	Natural seawater
Short term test	6days	IMO test soup

5.2 試験結果

長期性能試験では、実船での処理時間を考慮し、2～3 日ピッチで自然海水を通した後、 80°C の自然海水で 1 時間の逆洗を行うという試験を、連続で計 12 回行った。短期性能試験では、生物濃度調整タンク内の海水を、バイオフィルムの成長を促進させる上で最も好条件と考えられる陸上試験の汽水条件(従属栄養細菌 $>10^4 \text{ cfu/mL}$, DOC & POC $>5 \text{ mg/L}$)と同じ濃度(IMO テストスープ)に調整するとともに、常時エアレーションを行いバクテリアの増殖を高めた。

自然海水を使った長期試験では開放型(試験海水を捨てる方法)で運転したが、生物濃度調整海水を使わなければならない短期試験では、6 日に及ぶ試験水が準備できないことから、循環式とし、温度調節用に(ボイラにつながる)温水タンクと冷凍機を組み込んだ。熱交換器 EX1 により、実機と同じ海水/海水試験が模擬できる(Fig.4 参照)。

いずれの試験においても、試験中の伝熱性能(熱通過率 U) の変化を調べるとともに、逆洗後の熱通過率 U の回復を調べた。

Fig.5 と Fig.6 に、長期連続試験における U とバクテリア濃度の変化を示す。 U は、最大で 7% / 日の低下を示したが、いずれも高温逆洗でほぼ回

復しており、逆洗後の U の悪化は、 $0.5\%/2$ 日程度と僅かであることが分かる。海洋性バクテリア(MA)は、日々の変化はあるが、 $10^3 \sim 10^4 \text{ cfu/mL}$ の中に入っている。

Fig.5 Change of U 's at the long-term test

Fig.6 Densities of marine bacteria (grown on MA plates) and terrestrial bacteria (on R2A plates) in the test seawater at the long-term test

Fig.7 と Fig.8 に、汽水条件の IMO テストスープを使った短期試験における、 U とバクテリア濃度の変化を示す。有機物濃度が高いこととエアレーションにより、バクテリア密度は最大で 10^6 cfu/mL

と自然海水の 100 倍以上となり、 U の悪化率は 30%/日に達したが、逆洗後は自然海水を使った長期試験と同程度まで回復している。

Fig.7 Change of U 's at the short-term test.

Fig.8 Densities of marine bacteria (grown on MA plates) and terrestrial bacteria (on R2A plates) in the test seawater at the short-term test.

6 まとめ

実証試験装置と小規模試験装置を使用した試験から以下の結果を得た。

6.1 実証試験装置での確認

(1) 熱回収率

「熱回収率 95.7%」と実用化可能なレベルの熱回収率を達成した。

(2) 生物殺滅性能

G8 マニュアルに準拠した社内試験の結果、「70°C/5min」の熱処理で D-2 基準を満足することを確認した。

6.2 小規模試験装置での確認

小規模試験の結果、長・短期試験及びバクテリアの濃度に関係なく、2 日間の熱処理終了後に 1 時間の高温(80°C)逆洗を行うことにより、熱通過率 U の悪化を、僅か 0.5%/2 日程度に止めることができることを確認した。このことから、熱回収型バラスト水処理に使われるプレート式熱交換器は船舶の定期検査まで分解清掃せずに使用できる見通しを得た。

参考文献

- (1) K. Koike, N. Fujiki, K. Yamane, Y. Inohara, I. Aya, Thermal Aqua-Filtration (TAF) System: A New Concept of Environment-Friendly BWMS Applying "Retrieved Heat" to Eliminate Living Organisms, "In Emerging Ballast Water Management Systems" (eds. by Bellefontaine, N. et al.), WMU Publications, pp.157-169, 2010.
- (2) N. Fujiki, Y. Inohara, K. Yamane, K. Koike, Y. Ikegami, K. Urata, I. Aya, Engineering Aspects of Heat-retrieving BWTS : Thermal Aqua-Filtration (TAF) System, ICBWM 2010, Singapore, 2010.

謝 辞

本報告の内、熱回収率に関わる部分は、海洋政策研究財団からの補助制度により実施した。ここに深く感謝の意を表したい。