

固体薬剤を用いたバラスト水処理システム

Ballast Water Treatment System Using Solid Chemical

藤原 茂樹 FUJIWARA Shigeki JFE エンジニアリング 技術本部 総合研究所 主任研究員
平山 敦 HIRAYAMA Atsushi JFE エンジニアリング 技術本部 総合研究所 主任研究員
長藤 雅則 NAGAFUJI Masanori JFE エンジニアリング 船用機器事業部 バラスト水システム部開発室長

要旨

JFE エンジニアリングは、船舶のバラスト水処理システムとして、フィルタ、液体薬剤およびベンチュリ管を用いるバラスト水処理システム「JFE BallastAce^{*1}」を商品化している。本システムは優れた経済性と処理性を発揮し、自動車運搬船から大型原油タンカーまで、幅広い船舶に適用できるが、薬剤補給拠点に寄航できない船舶への適用に課題があった。そこで、この対策として、薬剤が極めて劣化しにくく、薬剤補給頻度を大幅に低減できる固体薬剤を用いるシステムを開発した。本論文では、固体薬剤を用いたバラスト水処理システムの概要および IMO(国際海事機関)が制定したガイドラインに準拠した陸上試験(処理規模 250 m³/h)の結果について述べる。固体薬剤を用いたシステムは、液体薬剤を用いる JFE BallastAce^{*1} と性能面で変わらず、所定の排水基準を常に満足する良好な処理成績が得られ、海域環境にも影響を及ぼさないものと評価できた。

Abstract:

JFE Engineering has developed and commercialized the composite ballast water management system, which comprises filtration, liquid active substance, and venture tubes ("JFE BallastAce^{*1}"). Though the system enables reliable treatment with low cost, it is difficult to provide this system for the ships that cannot make a port call at chemical supply base. In this paper, the practical application of solid active substances for this system which can provide the system for such ships is discussed. The system has been applied for the land based tests in accordance with the International Maritime Organization (IMO) guidelines using the system with the capacity 250 m³/h. The treatment performance of the system cleared the biological standard for discharged ballast water defined as D2 by IMO and the safety of the discharged ballast water treated by this system has also been confirmed.

1. はじめに

JFE エンジニアリングは、船舶のバラスト水処理システムとしてフィルタ、液体薬剤(製品名「TG BallastCleaner^{*2}」、主成分は次亜塩素酸ナトリウム、以下液体塩素剤)およびベンチュリ管を用いるバラスト水処理システム「JFE BallastAce^{*1}」¹⁾を 2010 年に市場投入した。本システムは優れた処理性と経済性が評価され、また、国内外 26 都市に薬剤補給拠点を整備したことで、2013 年 2 月現在、累計 260 隻の受注をいただいております、さらなる適用隻数の増加が期待されている。

しかしながら、薬剤補給拠点を世界各国の港湾すべてに整備することは現実的ではなく、薬剤補給拠点に寄航できない船舶に対して本システムを適用できないという課題があった。これは、液体塩素剤の主成分である次亜塩素酸ナトリウムが自己分解し、徐々に有効塩素濃度が低下するた

め²⁾、補給拠点から離れた地域に薬剤を運搬して船舶へ供給することが難しいためである。

この課題を解決するためには、保存性および殺生物性能に優れた固体薬剤を用いたシステムが有効である。ドック入りの際に薬剤を搭載すれば、次のドック入りまで薬剤の補給が不要になるか、あるいは極力少なくて済むバラスト水処理システムが構築できる。

本論文では、固体薬剤の選定から陸上試験による性能検証までの、バラスト水処理システムの実用化に関する検討結果について報告する。

2. システムの概要

2.1 固体薬剤の選定

固体薬剤の選定にあたり、代表的な固体殺生物薬剤である過炭酸ナトリウム、次亜塩素酸カルシウム、ジクロロイソシアヌル酸ナトリウム 2 水和物 (Sodium dichloroisocyanurate dihydrate, 以下 DICD) の殺生物性能と安全性を評価した。

2013 年 3 月 25 日受付

^{*1}「JFE BallastAce」は JFE エンジニアリング株式会社の登録商標である。

^{*2}「TG BallastCleaner」は東亜合成株式会社の登録商標である。

表 1 DICD と次亜塩素酸カルシウムの比較

Table 1 Comparison of sodium dichloroiso-cyanurate dehydrate (DICD) and calcium hypochlorite

	Calcium hypochlorite	DICD
Chemical formula	Ca(ClO) ₂	C ₃ Cl ₂ N ₃ NaO ₃ ·2H ₂ O
CAS* Registry Number	7778-54-3	51580-86-0
Active ingredient	Hypochlorite	Hypochlorite
Percentage of active ingredient	72%	55%
UN** Number	1748	3077
UN** Hazard Class	5.1	9
Packing Group	II	III

*CAS: Chemical Abstracts Service

**UN: United Nations

過炭酸ナトリウムは安全性に優れるものの、有効成分である過酸化水素濃度が32%と低い。しかも、有効成分の過酸化水素の殺生物性能は低く、次亜塩素酸ナトリウムと比較して数倍～数十倍量添加しないと同等の効果が得られない³⁾ため、選定対象から除外した。

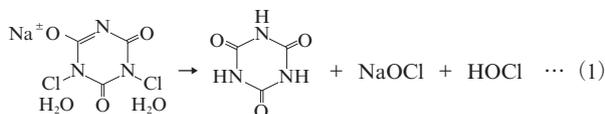
また、次亜塩素酸カルシウムは有効塩素を72%含有し、高い殺生物性能が期待されるが、過去、コンテナ輸送時に火災が発生した事例があり⁴⁾、安全性に課題がある。そのため、表1に示すように、国連による危険物分類では分類5.1「酸化性物質」に指定され、容器等級は中程度の危険性を有する「II」に指定されている。

一方、DICDは有効塩素濃度を55%含有するが、分類9「その他の危険物および物品」に該当し、容器等級は低い危険性を有する「III」に指定されており、次亜塩素酸カルシウムと比較して安全性が高い物質である。

これらの理由から、本システムではDICDを採用することとした。なお、殺生物性能を有する活性物質を用いるシステムは、IMOへの申請時に製造者と品名の特定が義務付けられている。本システムで使用するDICDは四国化成工業(株)製「NEO-CHLOR MARINE^{*3}」である。

2.2 DICD の特性

DICDは(1)式に示すように純水中で殺生物性能を有しないイソシアヌル酸と、殺生物性能を有する次亜塩素酸ナトリウム(NaOCl)および次亜塩素酸(HOCl)に解離する。そのため、海水に注入した後の殺生物性能および海水成分との反応性は液体塩素剤の場合と大きな差はないものと考えられる。



*3「NEO-CHLOR MARINE」は四国化成工業株式会社の登録商標である。

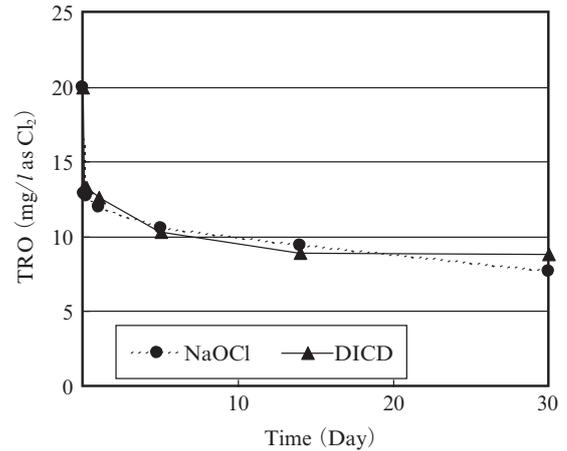


図 1 海中における DICD と NaOCl の TRO 濃度変化

Fig. 1 Total residual oxidant (TRO) changes of sodium dichloroiso-cyanurate dehydrate (DICD) and NaOCl in seawater

そこで、DICDの殺生物性能および海水成分との反応性が液体塩素剤と同等であるかどうかを把握するため、DICDおよび液体塩素剤を海水に溶解したときの残留オキシダント(Total residual oxidant, 以下TRO)濃度の経時変化を調査した(図1)。同図よりDICDは液体塩素剤と同様の初期消費量および減衰傾向を示すものとみられた。また、TRO濃度と同時に測定した有機塩素化合物などの副生化学物質の濃度も、液体塩素剤を加えた場合とほぼ一致する値であった。これらの結果から、DICDの殺生物性能および反応性は液体塩素剤と同等であるものとみられた。

また、長期保存性を確認するため、3年4ヶ月間、室温(20~25℃)、暗所で保存したDICDの有効塩素濃度を調査したところ、初期値に対して3.7%の減少にとどまった。適切な条件で保存すれば、DICDは3年以上殺生物性能を維持できるものと期待される。

2.3 処理フロー

図2にバラスト水取水時の処理フローを示す。取水した海水はまずフィルタ処理によって大型のプランクトンが除去される。さらにDICD水溶液の注入と後段のベンチュリ管によって残存するプランクトンや細菌類が処理され、バラストタンクへ注水される。この際、DICD注入量は処理水のTRO濃度により決定されるDICD顆粒の供給量によってフィードバック制御される。

図3にバラスト水排出時の処理フローを示す。バラスト排出時にはまずTRO濃度が計測される。その計測値を基にしたフィードフォワード制御により亜硫酸ナトリウム溶液が注入されることで、TROが還元分解される。バラストポンプ通過後に再度TRO濃度が計測され、不検出であることが確認された後に、海域へ排出される。

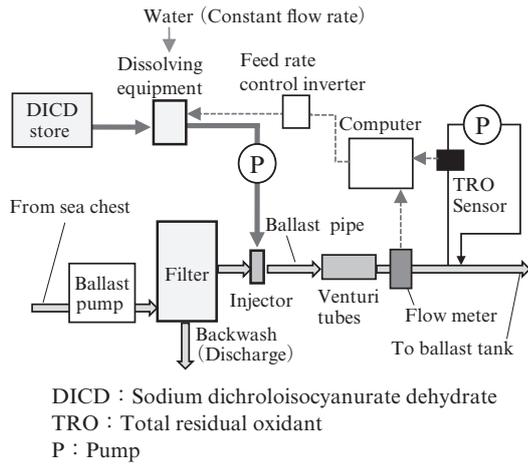


図2 バラスト水取水時の処理フロー図

Fig. 2 Schematic diagram for uptake of ballast water

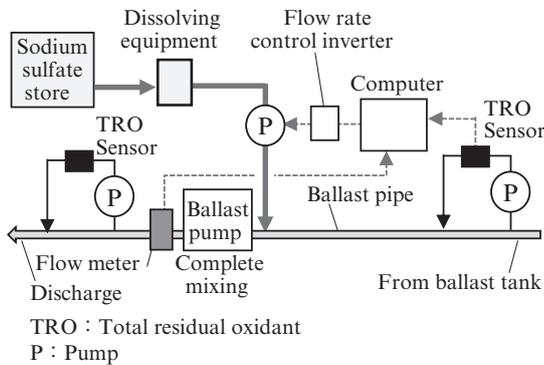


図3 バラスト水排出時の処理フロー図

Fig. 3 Schematic diagram for discharge of ballast water

3. 性能試験

3.1 陸上試験方法

陸上試験の方法はIMOが定めたガイドラインG8⁵⁾とG9⁶⁾に規定されている。その要件は、(1) 処理規模が200 m³/h以上であること、(2) 定められた水質の処理対象水を用いること、(3) バラストタンクを模擬した水槽で5日間貯留した後の処理水を評価対象とすること、(4) 淡水・汽水・海水のうち2種類の水で実施することである。処理効果はIMOが定めたD2基準⁷⁾に記載の生物数、細菌数と比較して評価する。

陸上試験は、処理規模250 m³/hの装置を韓国慶尚南道統営市の試験サイトに設置し、Korea Marine Equipment Research Instituteに委託して、G8⁵⁾およびG9⁶⁾に定められた方法に則って実施した。

図4に陸上試験の流れを示す。処理対象水の水質をG8⁵⁾の規定に適合させるため、模擬バラストタンク(BWT)1に取水した海水に浮遊性固形物、粒子状有機炭素、溶解性有機炭素、培養したプランクトンおよび従属栄養細菌を添

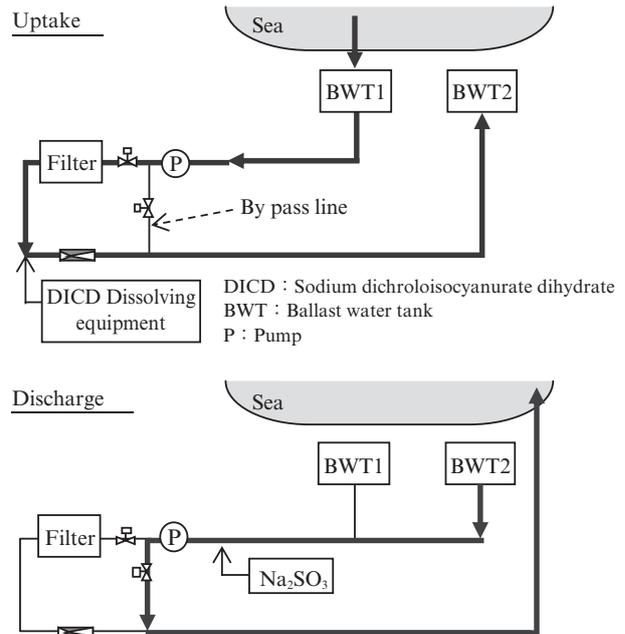


図4 陸上試験の流れ

Fig. 4 Schematic flow diagram of Land based test

加した。汽水条件に用いる試験水は、取水海水を水道水で希釈して定められた塩分濃度に調整した。試験水を取水時のフローで処理して得られた一次処理バラスト水をBWT2に貯留した。5日後に、排出時のフローで処理して得られた二次処理バラスト水を、生物評価および水質分析に供した。

3.2 生物処理性能

表2に水生生物の処理結果を示す。海水を用いた試験5回、汽水を用いた試験5回、合計10回の試験において、処理対象水および二次処理バラスト水に含まれる水生生物はD2基準⁷⁾を満足していることを確認した。また、細菌類の分析結果も、D2基準⁷⁾で規定されている大腸菌、腸球菌、コレラ菌について同基準を満たしていることが確認された。

3.3 毒性試験

二次処理バラスト水が水生生物に及ぼす影響を把握するため、藻類(*Skeletonema costatum*)、海生ワムシ(*Brachionus plicatilis*)、魚類(*Paralichthys olivaceus*)を用いて、急性毒性および慢性毒性を調査した。その結果、致死的影响および生育に関して悪影響は認められなかった。このことから、二次処理バラスト水は水生生物にほとんど影響を与えないことが検証された。

3.4 排出バラスト水に関する環境影響評価

二次処理バラスト水に含まれる副生化学物質とイソシアヌル酸を定量し、環境中に排出されたバラスト水が水生生物に及ぼす影響と、船の乗組員や一般人に及ぼす影響をIMOが指定した方法^{8,9)}に則り評価した。イソシアヌル酸

表2 陸上試験における水生生物の処理結果

Table 2 Treatment performance in land based test (Aquatic organisms)

Test water	Aquatic organisms	Test water			Secondary treated water		
		G8*	Mean	Max.	G8*	Mean	Max.
Sea water (N = 5)	≥ 50 μm (ind./m ³)	>1 × 10 ⁵	3.59 × 10 ⁵	5.44 × 10 ⁵	<10	0.2	1.0
	10-50 μm (ind./ml)	>1 × 10 ³	1.36 × 10 ³	2.28 × 10 ³	<10	0.2	1.0
Brackish water (N = 5)	≥ 50 μm (ind./m ³)	>1 × 10 ⁵	3.39 × 10 ⁵	4.53 × 10 ⁵	<10	0.2	1.0
	10-50 μm (ind./ml)	>1 × 10 ³	1.56 × 10 ³	2.22 × 10 ³	<10	1.0	2.0

* G8: Test standard^{5,7)}

は二次処理バラスト水中に最大 8.5 mg/l 含まれていたが、排出先の海水で速やかに希釈される。IMO が定める方法⁸⁾で計算した希釈率から、予測環境濃度 (Predicted environmental concentration: PEC) が 128 μg/l と計算された。一方、文献に記載された毒性データ¹⁰⁾より、予測無影響濃度 (Predict no effective concentration: PNEC) は 320 μg/l と計算され、PEC が PNEC を下回った。OECD によれば PEC/PNEC < 1 の場合、潜在的な生態リスクが小さく、更なる環境影響評価が不要とされている¹⁰⁾。このことから、処理後のバラスト水に含まれるイソシアヌル酸による環境影響はほとんどないものと判断した。その他の副生成物についても同様の評価を行ない、いずれも PEC/PNEC が 1 未満であることを確認した。

これらの結果から、固体薬剤を用いたシステムで処理されたバラスト水は、水生生物に対しても、船の乗組員や港湾や海岸などの一般人に対しても安全であることが確認できた。

4. 基本承認および最終承認

JFE エンジニアリングは、本稿に示した検討結果をまとめて申請書を提出し、2011 年 7 月に開催された第 62 回環境保護委員会 (MEPC62) にて DICD の基本承認を取得した。また、2012 年 10 月に開催された MEPC64 にて本システムの最終承認を取得した。

5. 結論

固体薬剤を用いたバラスト水処理システムの実用化にあたり、固体薬剤の選定および陸上試験を実施し、以下の結果を得た。

- (1) 安全性および殺菌性能を評価して、固体薬剤としてジクロロイソシアヌル酸ナトリウム 2 水和物を採用した。
- (2) ジクロロイソシアヌル酸ナトリウム 2 水和物は、適切な条件で保管することにより、3 年以上性能を維持できることを確認した。
- (3) 陸上試験 (250 m³/h) における全 10 回の試験において、処理水質は IMO が定めた D2 基準を満足し、高い処理

性を実証した。

- (4) 二次処理バラスト水について実施した急性・慢性毒性試験の結果から、水生生物に対する安全性を検証した。
- (5) 二次処理バラスト水中に含まれるイソシアヌル酸と副生化物質の分析結果をもとに影響評価を行なった結果、水生生物および乗組員や港湾、海岸における一般人に対しても安全であることを確認した。
- (6) 薬剤の安全性を確認し、所定の性能が得られたことで、IMO の最終承認を取得した。

なお、NEO-CHLOR MARINE^{*3} の船舶への搭載や装置への補給は、治具を用いることで、船員が直接暴露しない構成としている。固体薬剤の適用を可能にしたことで、JFE BallastAce^{*1} をさらに多くのお客様に提供できると考えている。

5. おわりに

以上に述べた結果から、固体薬剤を用いるバラスト水処理システムは、すでに商品化した液体薬剤を用いる JFE BallastAce^{*1} と同様に D2 基準を常に満足した。さらに、環境影響評価を実施した結果、排出バラスト水は環境および乗組員や一般人に対しても安全であることが確認された。

IMO の承認取得や、型式証明取得方法などについて多岐に渡りご指導いただいた国土交通省海事局、また基本承認や最終承認取得に必要な試験を実施していただいた Ballast Tech NIVA AS, Korea Marine Equipment Research Institute の関係者各位に心から謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 岡本幸彦ほか. 船舶用バラスト水処理システムの実用化. JFE 技報. 2010, no. 25, p. 1-6.
- 2) 金子光美. 水の消毒. 日本環境整備教育センター.
- 3) Izumi, Hidemi. Microbiological quality and control of microbes on fresh-cut vegetables. Nippon Shokuhin Kagaku Kougaku Kaishi. 2005, vol. 52, no.5, p 197-206.
- 4) [http://www.epandi.com/ukpandi/resource.nsf/Files/jp9920/\\$FILE/jp9920.pdf](http://www.epandi.com/ukpandi/resource.nsf/Files/jp9920/$FILE/jp9920.pdf)
- 5) Guidelines for approval of ballast water management systems (G8). MEPC53/24/aAdd. 1, ANNEX3 Resolution MEPC.125 (53) 2005-07-22.
- 6) Procedure for approval of ballast water management systems that make

use of active substances (G9). MEPC53/24/Add. 1, ANNEX4 Resolution MEPC. 126 (53). 2005-07-22.

- 7) Regulation D-2, Ballast water performance standard. BWM/Conf./36 ANNEX 2004-02-16, p. 22.
- 8) ANNEX 5, GESAMP-BWWG 6/9, MEPC 58/2/7, 2008-07-14.
- 9) Methodology for information gathering and conduct of work of the GESAMP-BWWG. BWM.2/Circ.13, 2008-06-10.
- 10) OECD SIDS Initial Assessment Report for 9th SIAM (1999).
<http://www.inchem.org/documents/sids/sids/108805.pdf>



藤原 茂樹



平山 敦



長藤 雅則