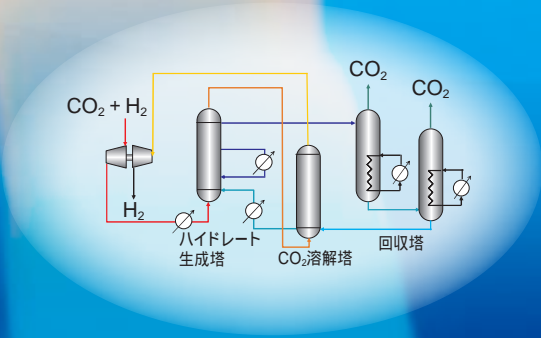
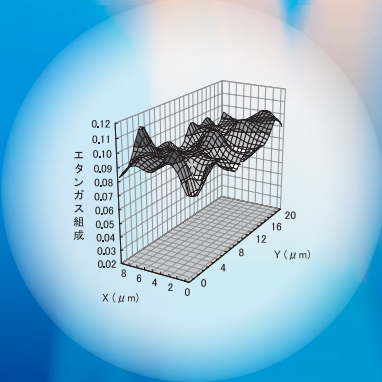
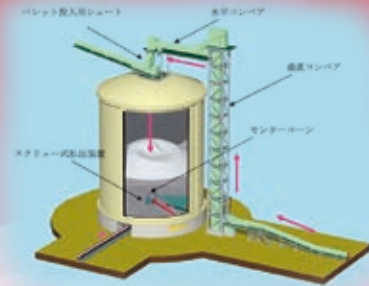


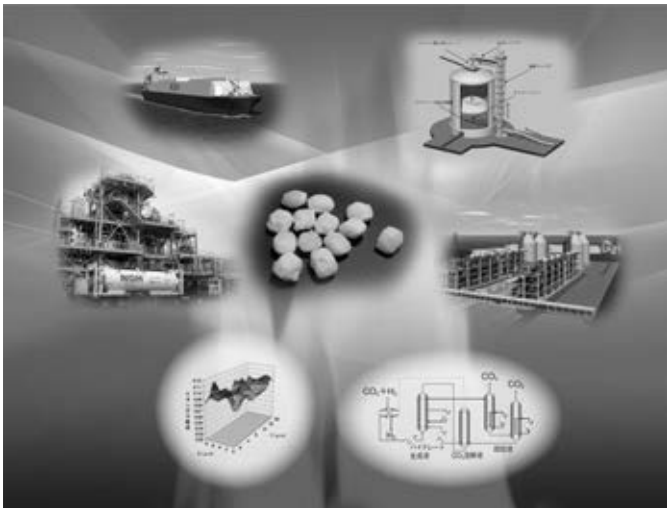
三井 造船 技報

平成 23 年 7 月 第 203 号

MITSUI ZOSEN TECHNICAL REVIEW No. 203 2011



ハイドレート技術小特集号



表紙説明

ハイドレート技術小特集

三井造船は、2001年より天然ガスハイドレート（NGH）の輸送・貯蔵システムの研究開発を実施してきた。2002年からは当社の千葉事業所にベンチスケールのNGH連続生成設備を建設し、NGHペレットの特性データを取得してきた。

この度、中国電力株式会社柳井発電所内に5 t/dのNGH製造設備を建設し、世界初のNGH陸上輸送の実証試験を成功裏に完了した。また、当社では商用化に向けたNGH輸送チェーン実現のために、大型の貯蔵設備を有するNGH輸出基地及びNGH輸送船の開発を進めると共に、NGHの安定性に関する基礎試験も実施している。

更に、ハイドレート技術の新たな適用先として、温室効果ガスであるCO₂ガスの分離回収技術の研究開発も開始した。

NGH輸送船

NGH貯蔵設備 (p.10)

柳井発電所内NGH製造出荷設備全景 (p.1)

NGHペレットの外観 (p.10, p.18)

NGH輸出基地概念図 (p.10)

NGHペレット内包蔵ガスの分析結果 (p.26)

CO₂分離回収設備概念 (p.31)

Cover

Special Issue on Hydrate Technology

We, Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. (MES) are engaged in the research and development of new transportation system of natural gas since 2001. We constructed in 2004 a bench scale unit of Natural Gas Hydrate (NGH) at Chiba Works, and have acquired various characteristic properties of NGH pellet.

We have also built on NGH production demonstration plant whose capacity is 5 tons of NGH pellet per day in Yanai Power Station of Chugoku Electric Power Co., Inc, and successfully finished overland transportation of NGH pellet. In order to establish the NGH transportation chain on commercial base, we are now developing large scale NGH export terminal with storage system and NGH carrier while carrying out basic research of the stability characteristic of NGH.

We have recently started to study on separation and capture of CO₂ gas which is called as green house effect gas using our unique hydrate technology for CCS.

NGH Carrier

NGH Storage System (p.10)

Full View of NGH Demonstration Plant in the Yanai Power Station (p.1)

Sample of NGH Pellet (p.10, p.18)

Conceptual View of NGH Export Terminal (p.10)

Composition of Gas in the NGH Pellet (p.26)

Concept of CO₂ gas Separation and Capture System (p.31)

三井造船技報

2011年(平成23年)7月・第203号

目次

ハイドレート技術小特集

天然ガスハイドレート(NGH)陸上輸送実証試験	1
水林 博 新井 敬 渡邊 茂 柳沢 直樹 堀口 清司 守屋 英教 加藤 裕一 渡辺 敬一 森 恵次郎 内田 和男	
天然ガスハイドレート(NGH)ペレット用貯蔵設備の開発	10
深沢 恵志 加藤 秀治	
天然ガスハイドレート(NGH)輸送船の貨物倉内ガス化システムの開発	18
吉野亥三郎 中田 崇 湯浅 伸哉 島田 潔 大石 剛央	
混合ガスハイドレートペレットのラマン分光による局所構造分析	26
三町 博子 伊藤 真人 高橋 正浩 岩崎 徹 佐野 健一	
CO ₂ 分離回収へのハイドレート技術の適用	31
宮川 満 松尾 和芳 櫻井聡一郎 酒井 正和	

技術論文・報告

CO ₂ 排出量大幅削減船の開発	37
藤井 昭彦 田中 一郎 松井 亨介 木村 校優 山本 敏明 山本 秀則	
CO ₂ 削減を目指した船用ディーゼルエンジン主機の新制御システムの開発	44
田中 一郎 三上 隆 青木 猛 山本 秀則	
固体ソース電子磁気共鳴(ECR)プラズマを用いた LED用インジウムスズ酸化膜(ITO)成膜装置	50
天沢 敬生 鳥居 博典 廣野 滋 岡崎 良弘	

製品・技術ニュース

新船型 110 000 重量トン型ばら積み貨物運搬船“ Mitsui 110BC ” - “ Nord Hercules ”(ノルド ハーキュレス) -	58
博多港社会実験で完全電動トランスレーナが CO ₂ 排出削減などの効果を確認	59
行滕川橋上部工(P6 ~ A2)工事 - 合理的な断面構成, ライフサイクルコストの低減 -	60
大分県 神崎跨線橋 - ニッケル系高耐候性鋼の使用と維持管理 -	61
高性能レーダシステムを搭載した新型空洞探査車による探査サービスを開始 - 3次元地中リアルモード表示機能を搭載 -	62
風車建設用新型クレーンの開発 - 1/4スケールモデル機による要素試験で性能を確認 -	64

Home Page News

「バラスト水事業グループ」を新設 - 就航船へのバラスト水処理装置搭載に迅速に対応 -	65
--	----

MITSUI ZOSEN TECHNICAL REVIEW

No. 203 JULY 2011

CONTENTS

Special Issue on Hydrate Technology

Demonstration Study on Natural Gas Hydrate(NGH)Overland Transportation ...	1
<i>Hiroshi MIZUBAYASHI, Takashi ARAI, Shigeru WATANABE, Naoki YANAGISAWA, Kiyoshi HORIGUCHI, Hidenori MORIYA, Yuichi KATO, keiichi WATANABE, Keijiro MORI, Kazuo UCHIDA</i>	
Development of Storage Facility for Natural Gas Hydrate(NGH)Pellets	10
<i>Keiji FUKAZAWA, Hideharu KATO</i>	
Development of Regasification System inside Cargo Hold of the Natural Gas Hydrate(NGH)Carrier	18
<i>Isao YOSHINO, Takashi NAKATA, Shinya YUASA, Kiyoshi SHIMADA, Go OISHI</i>	
Analysis of Local Structure of Mixed Gas Hydrate Pellets by Raman Spectroscopy.....	26
<i>Hiroko MIMACHI, Masato ITO, Masahiro TAKAHASHI, Toru IWASAKI, Ken'ichi SANO</i>	
Application of Gas Hydrate Technology to CO ₂ Separation and Capture	31
<i>Mitsuru MIYAGAWA, Kazuyoshi MATSUO, Souichiro SAKURAI, Masakazu SAKAI</i>	

Technical Paper and Report

Development of Ship with Significantly Reduced CO ₂ Emission	37
<i>Akihiko FUJII, Ichiro TANAKA, Ryosuke MATSUI, Koyu KIMURA, Tosiaki YAMAMOTO, Hidenori YAMAMOTO</i>	
Development of New Control System for Marine Diesel Engine to Reduce CO ₂ Emission	44
<i>Ichiro TANAKA, Takashi MIKAMI, Takeshi AOKI, Hidenori YAMAMOTO</i>	
Deposition System of ITO Thin Films for LED Application Using Solid-Source ECR Plasma	50
<i>Takao AMAZAWA, Hironori TORII, Shigeru HIRONO, Yoshihiro Okazaki</i>	

Products and Technology News 58, 59, 60, 61, 62, 64

Home Page News 65

Published by

MITSUI ENGINEERING & SHIPBUILDING CO., LTD.

3-16, Nihonbashi 1-chome, Chuo-ku, Tokyo 103-0027, JAPAN

天然ガスハイドレート(NGH)陸上輸送実証試験

水林 博* 新井 敬* 渡邊 茂* 柳沢直樹**
 堀口清司* 守屋英教*** 加藤裕一* 渡辺敬一*
 森 恵次郎* 内田和男*

Demonstration Study on Natural Gas Hydrate(NGH)Overland Transportation

Hiroshi MIZUBAYASHI, Takashi ARAI, Shigeru WATANABE, Naoki YANAGISAWA, Kiyoshi HORIGUCHI

Hidenori MORIYA, Yuichi KATO, keiichi WATANABE, Keijiro MORI, Kazuo UCHIDA

Natural Gas Hydrate (NGH) is a chemical compound where natural gas (guest molecule) is trapped within a cage composed of water molecule (host molecule) and is being expected to be a new medium of transporting natural gas economically and safely, as it can be stabilized under atmospheric pressure at only minus 20 degree Celsius.

This demonstration study is to verify NGH production, transportation, storage, gasification and utilization as an overland transportation supply chain. In order to produce NGH pellets, NGH production demonstration plant whose capacity is 5 tons of NGH pellets per day has been built in Yanai Power Station of Chugoku Electric Power Co., Inc, which is one of the LNG receiving terminals in the west side of Japan. In the production, LNG, multi-component mixed gas is used for feed gas, and untapped LNG cold heat at the terminal is used for cooling system. After the production, NGH pellets are delivered to two different gas users(one is the co-generation gas engine and the other is a households use trend) In order to transport and store the produced NGH pellets, two types of pellet containers have been developed. In conclusion, the production capacity and the effectiveness of NGH land transportation system as a new supply chain of natural gas have been confirmed.

天然ガスハイドレート(NGH)は水分子と天然ガス分子が結合した固体状の包接水和物であり、常圧・20℃付近で準安定状態となるため、新しい輸送・貯蔵媒体として注目されている。本試験は、NGHの製造・配送・利用の一連の実証を行うものであり、多成分系混合ガスであるLNGを原料とし、LNG未利用冷熱を活用したNGH製造設備(5トン/日)を開発し、中国電力株式会社柳井発電所LNG基地にて建設・運転を行い、実用性を実証した。また、NGH配送・利用では、NGHペレット配送・貯蔵・ガス化兼用容器(ペレットコンテナ)を開発し、輸送時の安定性等、実用性を実証した。更に、ガス使用パターンの異なる2種類の需要家(ガスエンジン及び一般家庭)それぞれに対応可能なガス供給制御機能を有する利用システムを開発し、各需要家に対する天然ガス供給の実証を行った。

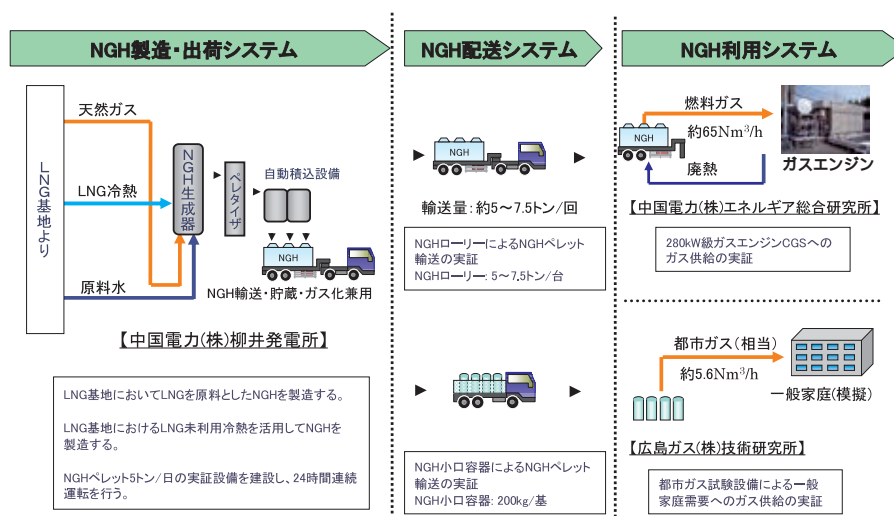


図1 天然ガスハイドレート製造利用システム
 Natural Gas Hydrate Production and Utilization System

* 事業開発本部 NGHプロジェクト室
 ** 事業開発本部 LIB事業室

*** 技術本部 千葉技術開発センター

1. はじめに

天然ガスハイドレート(Natural Gas Hydrate : NGH)は水分子と天然ガス分子が結合した固体状の包接水和物であり、常圧・20 付近で準安定状態となるため¹⁾、新しい輸送・貯蔵媒体として注目されている。三井造船は、NGHによる天然ガス輸送チェーン実用化開発の一里塚として、平成18年から平成22年までの5年にわたり実ガスをを用いたNGHの製造・配送・利用の一連の輸送チェーン全体の実証研究を実施した。

本研究は、中国電力株式会社と共に、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)との共同研究として実施したもので、中国電力株式会社柳井発電所構内に設置したNGH製造出荷設備(写真1)を中心に製造能力を実証し、NGHペレット配送・貯蔵・ガス化兼用容器(ペレットコンテナ)を開発し、輸送時の安定性等、実用性を実証した。更に、ガス使用パターンの異なる2種類の需要家であるガスエンジン及び一般家庭のそれぞれに対応可能なガス供給制御機能を有する利用システムを開発し、各需要家に対する天然ガス供給の実証を行った。以下に研究の中心である実証試験について報告する。



写真1 NGH製造出荷設備全景
Whole View of NGH Demonstration Plant

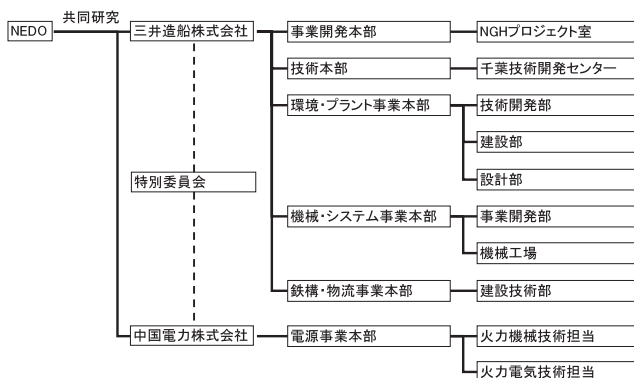


図2 実証研究体制
Structure for NGH Demonstration Project

2. 実証研究の背景と目的

天然ガスは、石油・石炭など他の一次エネルギーに比べて二酸化炭素の排出量が少なく、環境適合性に優れていることから、今後、新興国を中心に需要増加が見込まれている。また、天然ガスの需給は、北米におけるシェールガス革命をはじめとする非在来型天然ガス生産コストの劇的な低減による生産増などの影響で、一時的に緩和傾向にあるものの、北アフリカ・中東の産ガス国における政情不安及び東日本大震災などの影響により、今後の需給はひっばくすることが予想されており、炭層ガスなどシェールガス以外の非在来型油ガス田開発に加え、在来の中小ガス田の開発が促進されるものと思われる。しかしながら、中小ガス田は、経済性の観点から既存の手段では開発の手立てがなく、これまでに浮体式を含めた小型液化天然ガス(Liquefied Natural Gas : LNG)の適用が多数検討されているが、実用化に至っていない。一方でNGH輸送チェーンは、より経済的かつ安全性の高いシステムを提供できるため、中小ガス田開発ツールの一つとして注目されており²⁾、早期実用化を目指して開発を進めている。

当社では、平成13年にNGH輸送チェーンの開発を目指した試験研究を開始し、平成16年には当社千葉技術開発センターに本実証試験設備の原型となる小規模試験設備(Bench Scale Unit : BSU)を設置してNGH製造の試験研究を行ってきた³⁾。

本実証研究は、上記背景を踏まえ、NGH陸上輸送チェーンを国内ガス導管網未整備地域における中小規模ガス需要家への新たな天然ガスの供給手段のひとつと位置付け⁴⁾、システム全般の実証、並びに、より大規模な海上輸送チェーンの実現に必要なパイロットプラント計画に資するプラント長期運転データの検証と課題抽出を目的として実施したものである。

3. 研究開発体制

実証研究を推進するため、図2に示す当社及び中国電力株式会社の2社による共同実施体制を構築した。また、社外専門家からなる特別委員会を内部に設置し、研究開発の方向性等に関する助言を得つつ開発を推進した。

4. 実施工程

図3に本研究の主な実証項目と工程の概要を示す。平成20年度の試運転段階においてLNGポンプなどの設備不具合

項目	平成18年度	平成19年度	平成20年度	平成21年度	平成22年度
1. 多成分系の混合ガスハイドレート製造技術開発	基本設計	設計・製作	現地工事	保安検査 改造工事	保安検査 改造工事
2. 未利用冷熱利用によるNGH生成熱除去技術開発			調整・試運転	試運転 実証試験	試運転 実証試験
3. NGH配送・利用システムの開発	試験研究	設計・製作		実証試験	実証試験
a) 車載型NGH輸送・貯蔵・再ガス化容器の開発	試験研究	設計・製作			
b) ガス供給ユニットの開発	需要家調査・試験検討・調整				

図3 実証研究工程
Schedule for NGH Demonstration Project

があったため、研究期間を延長して不具合対応を実施するとともに、設計点検アクションプランにより対策を立案、実施し、万全を期して平成 21 年度から実証試験を開始した。

5. 実証試験設備

本実証試験のために開発、建設した設備の概要を以下に示す。

5.1 NGH 製造出荷設備

NGH 製造出荷設備の概略系統図を図 4 に示す。本設備は、LNG 冷熱回収設備、NGH ペレット製造設備及びペレット出荷設備で構成されている。以下にこれらの概要を示す。

5.1.1 LNG 冷熱回収設備

(1) LNG 冷熱回収系

本系では、LNG 基地から受け入れた LNG を、NGH 生成に必要な圧力(5.3 MPa)まで昇圧するとともに、保有する冷熱を NGH 生成熱除去、ペレット冷却並びに各設備冷却に利用するため、冷媒系にて LNG 冷熱を回収する。保冷循環している LNG から分岐した LNG は第 1 及び第 2 LNG 熱回収熱交換器でプロパン冷媒と熱交換してガス化し昇温される。ガス化した天然ガス(Natural Gas: NG)は、発電所の NG 母管に戻されるが、一部が原料ガスとして消費され、また脱圧槽の昇圧ガスとして供給される。

(2) 冷媒系(プロパン系、ブライン系)

冷媒系は、プロパンを冷媒とする REF1、REF3、ブライン(エチレングリコール水溶液)を冷媒とする BR1、BR2 で構成される。REF1 と REF3 は、BR1 及び BR2 へ冷熱を供給するための中間冷媒系となっている。

5.1.2 NGH ペレット製造設備

(1) NGH 生成・脱水系

スラリー生成器では攪拌とパブリングを併用して NG と原

料水を気液接触させ、圧力 5.3 MPa、温度 4 ~ 12 の条件で、水相中に NGH を生成させる。生成器底部には、水相への NG 供給用スパージャがあり、NG はブロウでガス循環している。

NGH 生成は発熱反応であり、熱の除去は外部の循環水冷却器にスラリー液を循環し、BR1 と熱交換する。生成器で生成した NGH は、NGH 率約 10% のスラリー液として脱水塔へポンプ移送する。ここで、NGH 率とは、NGH スラリー液中の NGH の重量比をいう⁵⁾。

脱水塔は二重円筒構造で、内筒の中間部にはスラリー液を滲過するスクリーンが設置されている。スラリーは内筒に入り、上昇していく過程で重力により脱水される。分離した水はスクリーン部から排出される。脱水塔頂部の出口で NGH スラリーはパウダー状(以下、パウダーと称す)になり、約 40% の NGH 率となる。塔頂部には、パウダーをかき集めるスクレーパとかき集めたパウダーをペレット成形系へ送るスクリーコンベアを備えている。また、脱水効果を高めるために、ブロウで内塔と外筒に差圧を付加するガス循環ラインを備えている。

(2) ペレット成形・冷却・脱圧系

高圧ペレタイザは、脱水塔から供給されたパウダーを圧搾し、ピロー型のペレット(寸法: 縦 22 × 横 18 × 高さ 13 mm)に成形する。成形の際に発生する圧搾水と不要なバリ等は途中のスノコ状のペレット分離器で分けられ、ペレットは冷却槽に落下する。

冷却槽では高圧状態のままペレットを -20 まで冷却する。冷却されたペレットは脱圧槽 A/B に交互に受け入れ脱圧後、大気圧状態でペレット出荷設備に供給する。

5.1.3 ペレット出荷設備

ペレットは脱圧後に、垂直コンベア、水平コンベア、ディストリビュータを経て、貯蔵容器兼用の配送用ペレットコン

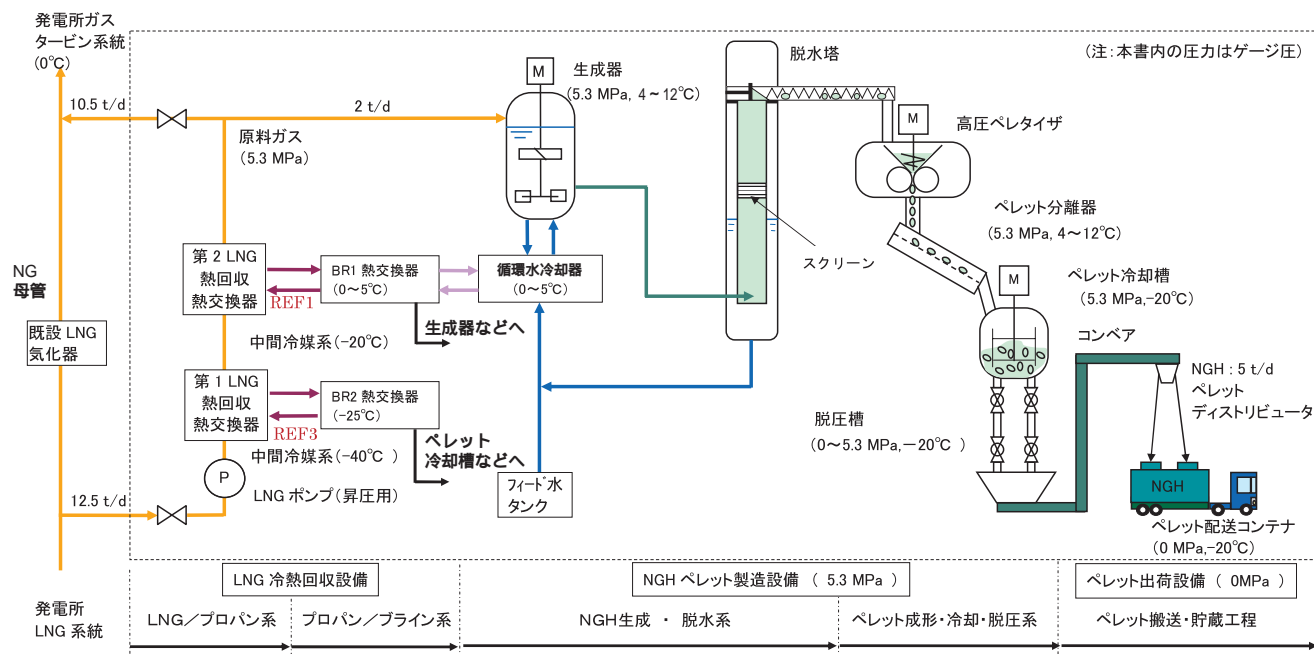


図 4 NGH 製造出荷設備の概略系統図
Schematic Diagram of NGH Demonstration Plant

テナ(大口用のコンテナ, 小口用の容器)に供給される。各設備はブライン(BR2)により - 20 に冷却されている。配送用ペレットコンテナはNGHペレットを受け入れる前に予冷される。

5.2 ペレット配送・ガス化システム

5.2.1 ペレット配送コンテナ

大口需要家向けのガスエンジンにガスを供給するペレットコンテナ A 及び小口需要家向けの一般家庭にガスを供給するペレットコンテナ B を新たに開発した。NGH 製造出荷設備は NGH ペレットの貯蔵設備を持たないため、製造したペレットを直接コンテナに積載する。また、需要家設備ではコンテナに循環水を通してコンテナ内で直接ガス化を行うことから、開発したコンテナは、貯蔵・輸送・ガス化の3つの役割を担う。表1にペレットコンテナ A 及びペレットコンテナ B の仕様の一覧を示す。

5.2.2 大口需要家設備

大口需要家の NGH 利用システムは、中国電力株式会社工

表1 ペレットコンテナ仕様
Specifications of Pellet Container

項目	大口需要家向け		小口需要家向け
	ペレットコンテナ A		ペレットコンテナ B
1)ガス供給先	ガスエンジン		一般家庭
2)コンテナ名称	1, 2号車	3号車	1~4号容器
3)容器形式	1重殻縦型円筒	1重殻横型円筒	1重殻縦型円筒
4)容器積載形式	2本搭載	1本搭載	独立容器
5)設計圧力	0.82 MPa	0.82 MPa	0.82 MPa
6)容器適用法規	第二種压力容器	第二種压力容器	第二種压力容器
7)容器容積	7.7 m ³ × 2本	20 m ³	600
8)ペレット積載量	5 000 kg	7 500 kg	200 kg/ 容器
9)コンテナ寸法	20 ft 級	30 ft 級	0.8 m

ネルギア総合研究所構内に設置したガス供給システム(ガス発生速度65 Nm³/h)と280 kWのガスエンジンで構成される。図5に大口需要家設備の装置構成図を示す。なお、平成22年度は当社玉野事業所内にガス供給システムを移設し、自家発用2800 kW ガスエンジンにガスを供給した。

ガス供給システムは循環水供給系、発生ガス供給系で構成される。

循環水は、流量調整弁等を経由してペレットコンテナに供給される。一部の循環水は、ガスエンジンの排熱を吸収し、循環水タンクに戻り、NGHペレットのガス化に使用される。

ペレットのガス化の際に生成した融解水は、ペレットコンテナから重力落差により遮断弁を経由して循環水タンクに戻ってくる。循環水タンクに戻った水の一部はガスエンジン付属余剰熱放散設備の冷却塔の補給水として利用も可能であり、余剰分は融解水タンクに保管される。

発生ガス供給系は、ペレットコンテナ内で再ガス化したガスをガスバッファタンクに送り、ガス化速度を操作量とした圧力制御をかけてバッファタンクを一定圧に保つ。ガスバッファタンクに貯蔵されたガスは、減圧弁にて所定の圧力に調整され遮断弁を経由してガスエンジンに供給される。

5.2.3 小口需要家設備

小口需要家の NGH 利用システムは、広島ガス株式会社海田基地構内の技術研究所に設置したガス供給システムとガス消費機器となる赤火ガスバーナ及び研究所建家内の一般ガス器具で構成される。図6に小口需要家設備の装置構成図を示す。

ガス供給システムは大口需要家設備と同様であるが、熱源はヒートポンプ式温水器を用いた。また、一般家庭向けであることからガス付臭装置を新たに開発し付設している。

5.3 適用法規

NGHペレットの製造、配送、利用の各工程によって適用

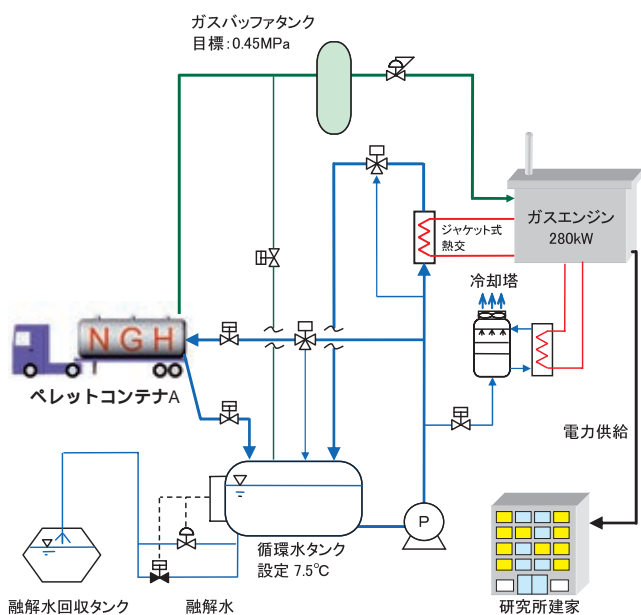


図5 大口需要家 装置構成図
Process Flow of Re-gasification System for Gas Engine

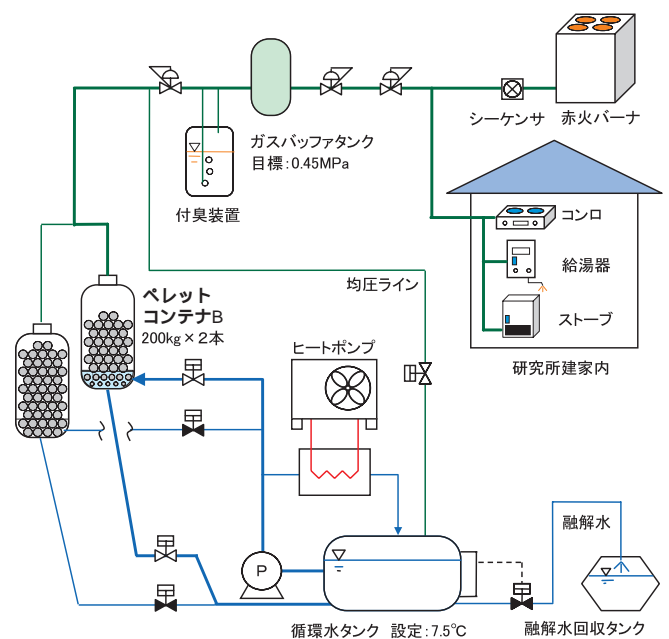


図6 小口需要家 装置構成図
Process Flow of Re-gasification System for City Gas

法規が異なる。

NGH 製造設備は、LNG 及びその気化ガスを用いることから、プロパン系統と共に高圧ガス保安法の適用となっている。NGH は大気圧下、 -20 程度に冷却した固体の状態での貯蔵・搬送されるため、貯蔵状態の NGH は高圧ガスの定義から外れ、高圧ガス保安法は適用されない。また、消防法により適用される化学物資にも分類されていない。しかし、NGH という物質が一般に知られていないこと及び可燃物であることを考慮して、関係自治体、消防署に対して事前に説明を行うとともに、輸送計画書を提出した。

配送用ペレットコンテナについては、設計圧力が 1 MPa 未満であり、高圧ガスの定義から外れ、高圧ガス保安法は適用されない。

その他の適用法規としては、労働安全衛生法、消防法、建築リサイクル法などである。

6. 実証試験結果

6.1 全体概要

NGH 製造出荷設備の平成 21 年度実証試験(図 3 参照)では、日産 5 トンの NGH スラリー生成能力及びペレット製造能力を確認することができたが、ペレット分離器及びペレット冷却槽でのペレット堆積、閉塞が生じ連続運転性に課題が残った。高圧ガス設備であり、時間的制約から大幅改造まではできなかったが、定期自主検査後に設備の部分改造を行った。この結果、平成 22 年度は全系連続運転を 6 回、内 2 回は 100 時間以上の連続運転を達成した。これにより、機器運転安定性、設備信頼性等のデータ取得、確認ができた。

ペレット品質(NGH 率安定性)については、当初運転では製造直後のペレット NGH 率は目標値(安定化後 70%)以上であっても急速に低下する傾向があったが、高圧ペレタイザ

の運転条件調整等により安定化後のペレット NGH 率で 60% 台が得られた。これにより、高品質のペレット連続成形実現への見通しを得ることができ、今後、更なる改良研究を行う。ペレットの包蔵ガス組成については、脱水塔における軽質分の NGH 分解がみられ重質分がやや高い傾向であった。これは脱水塔の温度条件、滞留時間等が影響していると考えられ、今後の機器・システム構成によってより原料組成に近づくと考えられる。

連続実証運転を行うことにより各機器の運転信頼性や耐久性、自動制御特性、大型化に向けたプロセスデータ取得ができるとともに、当初想定し得なかったスクリーンや配管閉塞とその対応などの貴重な経験を積むことができた。

また、本設備では NGH 生成やその他の冷熱源として、LNG の冷熱を活用するシステムとなっている。LNG から回収された冷熱のプロセス利用効率は 1/3 程度であり、その他の多くは冷熱回収系ポンプやダミー負荷の入熱、温水トレース等からの入熱で消費された。この利用効率向上に必要な冷熱回収システムの高度化の知見も得ることができた。

製造したペレットは、配送コンテナに積載し 100 ~ 250 km 先のガス化設備まで実際に配送してガス供給の実証を行った。これにより、配送時のペレットの安定性及び開発したガス供給システムによる燃焼が良好であることを確認できた。一方で、ペレットに同伴する粉化したパウダーに起因する運転制御性に対する課題と対策についても明らかとなり、実用化に向けたデータ取得ができた。

6.2 NGH 製造出荷設備運転結果

6.2.1 NGH 生成

本実証試験設備での NGH スラリー生成特性、循環水冷却器性能、NGH 積算生成量と生成スラリー包蔵ガス分子量変化について報告する。

(1) NGH スラリー生成特性及び循環水冷却器性能

過冷却度に対する NGH 生成量の関係を図 7 に示す。ここで過冷却度は、気相中のガス組成に基づく NGH の三相平衡温度と生成器液相温度との差であり、パラメータの攪拌強度は、攪拌動力を液相体積で除した値である。同図から、いずれの攪拌強度においても、NGH 生成量は過冷却度に比例して増加する傾向がみられた。なお、生成器温度は、NGH 生成熱を除去する循環水冷却器の交換熱量によって調整された。

単位過冷却度当りで整理した NGH 生成量と攪拌強度との関係を図 8 に示す。攪拌強度の増大は生成器の液相に散気した原料ガスと水との気液界面積を増大させる効果があり、攪拌強度の増加に伴って NGH 生成量は増加する。

図 9 に循環水冷却器における交換熱量、総括伝熱係数及び対数平均温度差の経時変化を示す。なお、図中には NGH スラリー中の NGH 率及び流路圧損もプロットした。NGH スラリー濃度は、サンプリングした試料の包蔵ガス体積及び分子量を分析して求めた。生成開始初期に交換熱量が大きいのは、生成器ガス相のメタン割合が比較的少なく、NGH の三相平衡温度が高くなり、冷却用冷媒との温度差が大きくなるためである。その後、三相平衡温度が下がるのに伴い(後述の図 10 の NGH 積算生成量と三相平衡温度の関係を参照)、

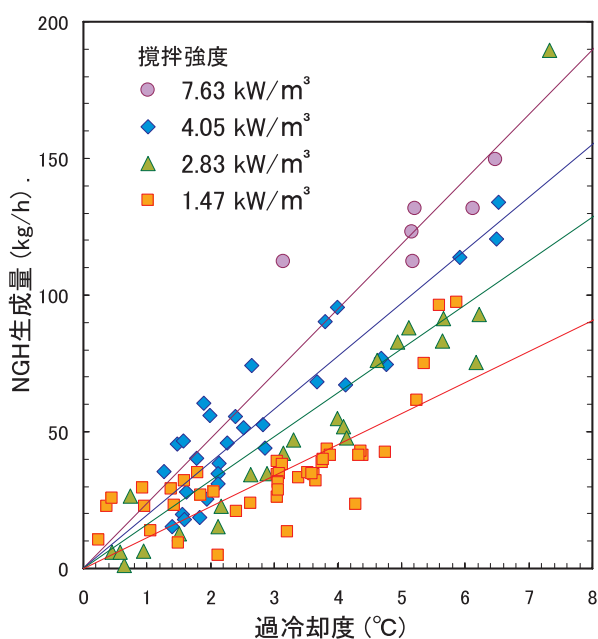


図 7 過冷却度に対する NGH 生成量
NGH Production Rate to Sub-cooling Temperature

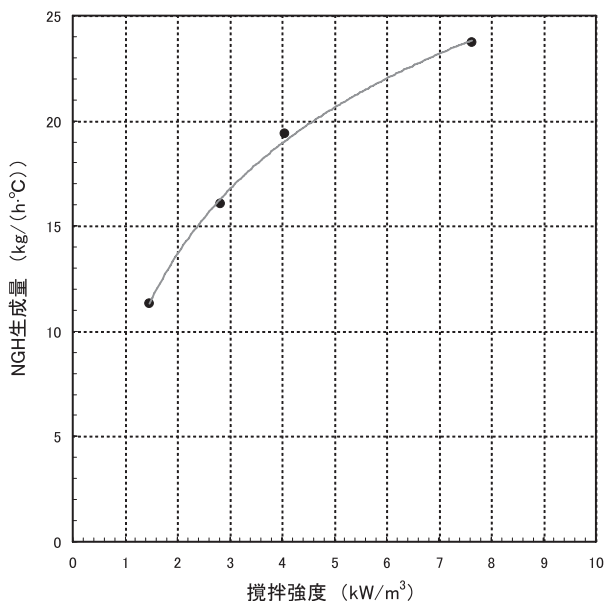


図8 攪拌強度に対する単位過冷却度あたりのNGH生成量
NGH Production Coefficient of Sub-cooling Temperature to Mixing Magnitude

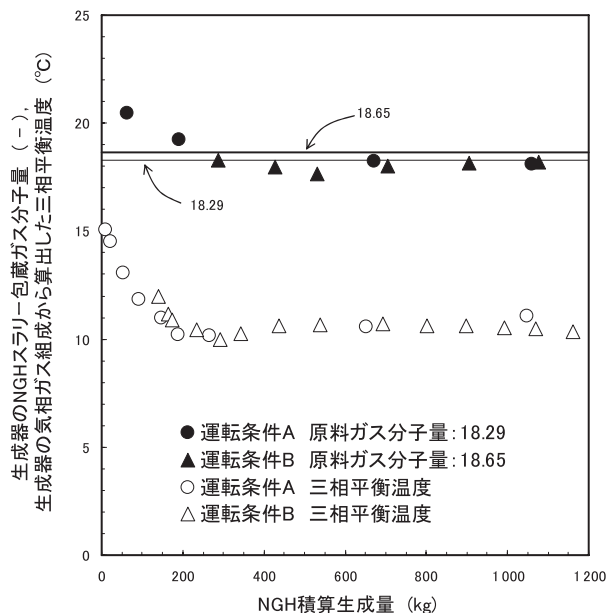


図10 NGH積算生成量と生成器のNGHスラリー包蔵ガス分子量及び三相平衡温度
NGH Total Slurry Generation Amount and, Molecular Weight of Gas in Slurry and Three Phase Equilibrium Temperature in Reactor

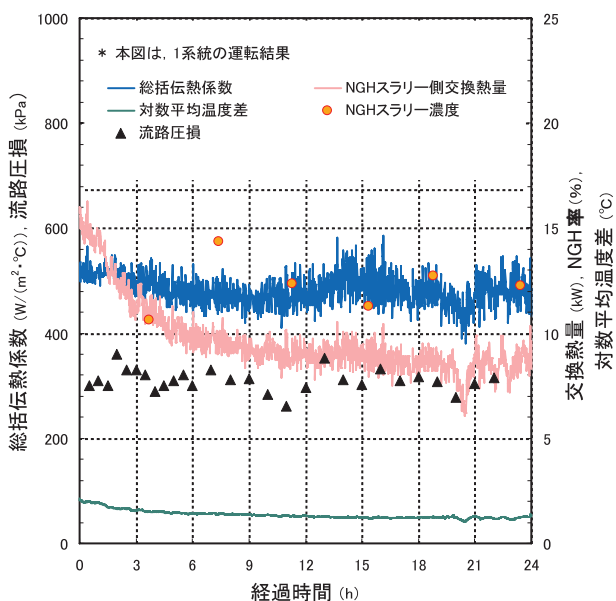


図9 循環水冷却器の総括伝熱係数と対数平均温度差の経時変化
Time History of Overall Heat Transfer Coefficient and Logarithmic Mean Temperature Difference in Heat Exchanger

交換熱量はほぼ一定となる。なお、運転開始12時間から24時間を定常運転とみなした場合、総括伝熱係数は482 W/(m²)、交換熱量は8.65 kW、対数平均温度差は1.23であった。

また、図9に示した条件における循環水側の流路圧力損失は平均310 kPa(流量11.5 t/h ~ 12.2 t/h)となり、時間経過に伴って大きくなることはなかった。一方、別途行った循環流速を半分にした試験では、時間経過と共に流路圧損が増大する傾向を示したことから、ある一定以上の流速にすると

管内でのNGH付着を抑える効果があるものと考えられる。(2) NGH積算生成量と生成スラリー包蔵ガス分子量の関係

図10にNGH積算生成量と生成器のNGHスラリー包蔵ガス分子量の関係を示す。このガス分子量はNGHスラリーを融解して発生したガスをガスクロマトグラフで分析している。図中には生成したNGHスラリーの包蔵ガスと原料ガスの組成を比較するため、生成器に供給した原料ガスの分子量も示した。さらに、同図にNGH積算生成量と三相平衡温度の関係も併記した。

生成を開始した直後のNGHスラリーの包蔵ガス分子量は、重質分ガスが先にNGHになることから、原料ガス分子量に比べて大きい値を示すが、生成が進むに伴い直線で記した原料ガス分子量に漸近していることが分かる。また、この図から、積算で600 ~ 800 kgのNGHを生成することで、原料ガス分子量とほぼ同等のNGHが生成されるという当該設備の装置特性が得られた。

6.2.2 脱水

脱水塔では、内筒に形成されるNGHベッドの安定性、脱水スクリーンの目詰まりあるいはNGH漏れ、脱水部に作用させる差圧と脱水塔出口のパウダーのNGH率の把握が重要である。

図11に供給スラリー及び払い出されたパウダーのNGH率推移の代表例を示す。パウダーのNGH率は、NGH供給量(固体量)と液体に関する物質収支により求めた。具体的には、スラリーフィード流量とスラリーNGH率から算出されるNGH供給量を、スラリーフィード流量からスクリーン排水量を引いた脱水塔出口流量で除したものとなる。

この図に示した運転例において、上述の計算で得られたパウダーのNGH率は約40%(36 ~ 53%)で推移している。サンプリングで得られたパウダーのNGH率も36 ~ 46%であ

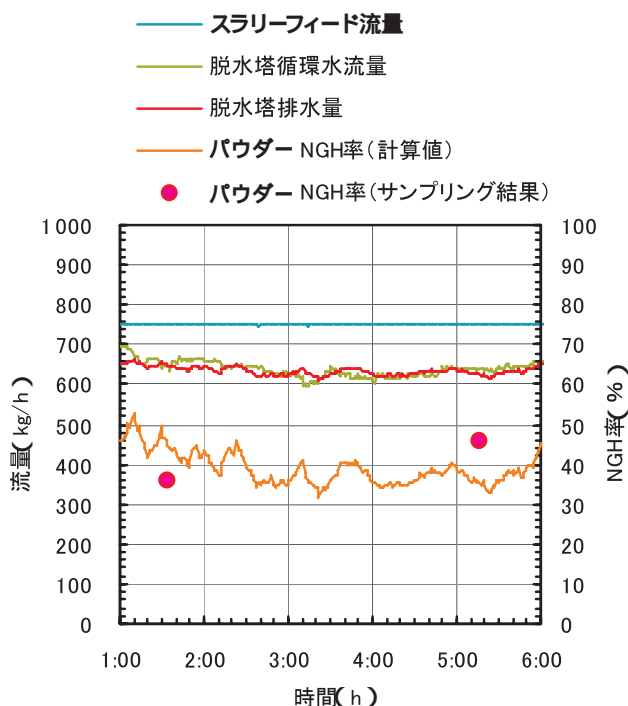


図 11 脱水塔の各流量と出口パウダーの NGH 率
Flow Rates in De-watering Tower and Outlet NGH Percentage



写真 2 冷却槽入口ペレット
(ロール回転数 4 rpm, トルク 18 N・m)
Sample of NGH Pellet at Inlet of Cooling Drum
(Roll Revolution : 4rpm, Torque : 18N・m)

り、物質収支とサンプリングは対応した結果が得られると共に、脱水塔出口で目標とした 40% であることを確認した。

6.2.3 ペレット成形、冷却、脱圧

(1) ペレット成形

ペレット成形運転は、高圧ペレタイザから落下し通過するペレットをペレット分離器の覗き窓に設置した監視カメラで観察しながら行った。

ペレットの搬送・貯蔵工程における環境は大気圧、-20 であるため、NGH にとって分解領域であるが、NGH ペレットには自己保存効果が発現するため NGH 率の低下、すなわち包蔵ガスの放出は比較的少なくなる。なお、自己保存効果とは、平衡圧力以下もしくは平衡温度以上においてもハイ

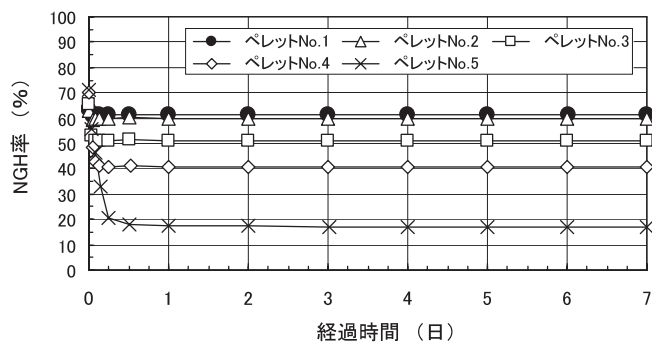


図 12 冷却槽入口ペレットの NGH 率推移
Change in NGH Percentage of Pellet
at Inlet of Cooling Drum

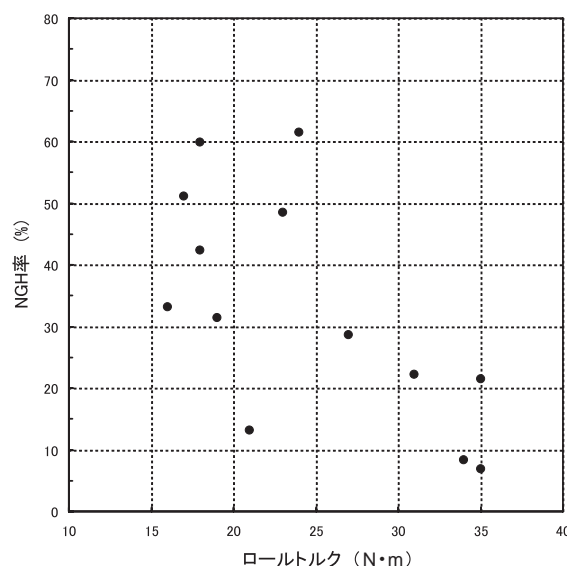


図 13 ロールトルクとペレット安定性の関係
Relation of NGH Percentage of Pellet to Roll Revolution Torque

ドレートの分解が抑制されるペレット独自の特性である。ペレット品質については、大気圧、-20 における安定性が重要であるため 7 日経過後の NGH 率で評価した。

写真 2 に冷却槽入口から採取した代表的なペレット試料の写真を 図 12 にペレットの NGH 率測定結果の一例を示す。ペレットの NGH 率は、取出し直後約 75% であるが、数時間で低下した後、自己保存効果によりほぼ一定となる。

次に、図 13 に高圧ペレタイザのロールトルクとペレットの NGH 率の関係を示す。図ではデータのばらつきが大きい傾向としては 30 N・m 以上のロールトルクで成形したペレットと比較し、20 N・m 前後のトルクで成形したペレットの NGH 率が高い。ロールトルクはパウダーを圧縮成形する際の成形圧に関連する指標であるが、高い安定性を有するペレットを成形するには、成形圧を適切に管理する必要がある。

なお、当社の千葉事業所に設置されている実験装置での結果では、安定後の NGH 率 70% 以上が得られており、十分な調整を行えば目標の NGH 率を達成したものと思われる。今後、高圧ペレタイザ入口のパウダー条件、ロール回転数、温

度などの各成形条件を含めてメカニズム解明を進め、安定で高 NGH 率のペレット成形を目指す。

(2)ペレット冷却・脱圧

ペレットは冷却槽内を循環する冷ガスによって、直接冷却される。冷却槽にペレット投入後、30分で脱圧・払い出しを行ったペレットを採取し温度計測した結果、ペレットの温度は -24℃であった。ペレット温度が冷却槽の温度である -20℃を下回ったのは、脱圧時に一部生じた NGH の分解による分解熱と、脱圧槽内のガスの膨張による冷却によるものと考えられる。

ペレット脱圧時には一部ペレットが割れ、小粒子化がみられた。総じて安定性が良くないペレットには小粒子化が多いようであり、上述のメカニズムと併せて更なる解明を進めていく。

6.2.4 ペレット出荷設備

ペレットを脱圧槽からコンテナにコンベアで搬送する能力は、ほぼ計画どおりの性能を有していることが確認された。系内の圧力はシールポットの背圧制御方式であり、安定した運転であった。

搬送時にはペレットの一部および同伴する粉体がコンベア容器底部に堆積する現象がみられたが特に支障を生ずることはなかった。ただし、長時間搬送休止となった場合には、容器・配管に粉体が固着して、搬送再開後の新たなペレット、粉体が配管曲がり部等に積み重なる事象がみられたことから、長時間の休止を避けるような運転、及び長期運転時には堆積物の融解・排出が出来るような対策が必要である。

6.3 ペレット配送

本実証試験では、柳井発電所内で製造・貯蔵したペレットを、柳井から約 100 km 離れた大口需要家(東広島)及び小口需要家(海田町)へ配送した。さらに、平成 22 年度には約 250 km 離れた岡山県の当社玉野事業所まで配送した。コンテナ A の 3 号車で柳井から大口需要家(東広島)へ輸送した際のペレット移送風景を写真 3 に示す。

大口需要家向けのコンテナはデータロガを装備しており、コンテナ輸送時の温度と圧力の時刻歴を計測することができる。柳井から東広島までの道のり 114 km の所要時間は 2 時



写真 3 コンテナによる NGH ペレット移送風景
A view of NGH Transportation by Pellet Container

間強であり、配送時のコンテナの温度およびコンテナ容器内の圧力を評価したところ、容器壁温度は +1℃、気相温度は +0.9℃の上昇であり、ほとんど昇温は見られず、コンテナは十分な保冷性能を有していることを確認した。

6.4 ガス供給・利用システム

コンテナは、需要家に配送された後、ガス供給・利用システムとフレキシブルホースで接続され、ガス化容器として用いられる。

ガス化は、図 5 及び図 6 に示すように容器に積載したペレットの下方に温水を循環し、循環水に浸かっているペレットが融解してガスを発生させる方式である。循環水に浸かっているペレットが融解・消滅すると、上層に積載しているペレットが重力により順次、温水中に落下してガス化できることを確認した。また、ガス発生量の制御は、需要家設備の系内圧力が目標値になるように、ペレットコンテナへの循環水流量を調整することで可能であった。

大口需要家設備

ガス供給システムは、循環水供給設備、ガスバッファタンクおよび関連機器・連絡配管から成る固定設備と、トラクターヘッドで牽引・搬入される NGH ペレットコンテナで構成され、ガス供給システムの制御盤から運転・監視される。

大口需要家システムの運転は、いわゆる Daily Start & Stop による昼間運転を行った。柳井から配送したペレットから発生したガスをガスエンジンに供給し、エンジンの定格発電量となる 280 kW の出力を確認した。ガスエンジンの燃焼状態に影響する供給ガス中の湿分については、ガス化圧力の目標値を供給圧力よりも高い値とし、供給側の自立型減圧弁でガス圧力を所定圧力まで下げることにより、減圧後のガス中の相対湿度を低くした。この操作により、目標の相対湿度 60% 以下に対して、同 30% 未満の低湿分を得ることができた。

小口需要家設備

ガス供給システムは、基本的に、大口需要家を小規模にした準固定設備と、ユニック車で搬入される NGH ペレットコンテナ(再ガス化容器 2 本)とで構成される(写真 4 参照)。

小口需要家へのコンテナの配送は、ペレット残量が少なくなった時期を見計らって、NGH 製造出荷設備から新しいペレットコンテナを輸送すると同時に、帰りのユニック車で空のコンテナを回収する方法とした。なお、需要家として一般家庭を想定しているため、ガス供給システムは 24 時間連続運転、かつ、全自動制御仕様としている。

ガス供給は、集合住宅で実際に調査したガス需要のトレンドデータに基づいており、赤火ガスバーナにシーケンサを組み合わせた装置を用いて、実際のガス消費を模擬したガス供給試験を行った。さらに、発生ガスを種々の家庭用一般ガス器具に供給して燃焼試験を行い、写真 4 に示すように良好な燃焼状態を確認した。

7. おわりに

多成分混合ガスである LNG を原料として、NGH ペレットの製造出荷、配送・ガス化を行う一連のシステムを開発し、



写真4 小口需要家ガス供給システムとコンロの燃焼状態
NGH Re-gasification System for City Gas
and Combustion State at House Burner

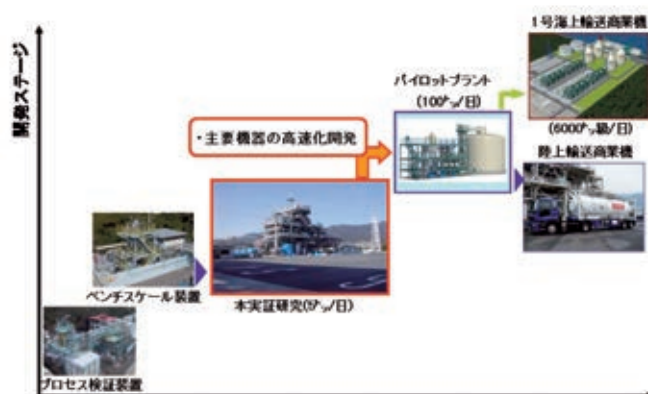


図14 NGH 輸送チェーン実用化ロードマップ
Roadmap of NGH Transportation Chain toward
Commercialization

本実証試験を通じて、6. に概説した以下の項目を確認したことは、NGH 陸上輸送チェーンの実現化に向けて大きな一歩を踏み出すこととなった。

- NGH 製造出荷設備の長時間連続運転の達成
- NGH ペレットの成形条件と安定性
- NGH 陸上輸送実証及び輸送時のペレット安定性
- ガス供給・利用システムの運転実証
- 課題の把握と対策

当社では 図14 に示すロードマップに沿いNGH 輸送チェーン実用化に向けた開発を進めており、次のステップとしては、NGH 日量 100 トン規模のパイロットプラントを計画している。

パイロットプラントのプロセスは、本実証試験により確立された NGH 製造プラントの連続操業条件をベースとし、スラリー生成器、脱水機などの主要機器については、これまでに別途並行して進めてきた高速・コンパクト化技術開発の成果をフィードバックしたものである。

今後、早期にパイロットプラント建設に着手して実用化を加速し、NGH 輸送チェーンをタイムリーに天然ガス市場に導入していきたい。

最後に、本研究実施にあたって、多大なご協力・ご支援をいただいた、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、中国電力株式会社、広島ガス株式会社、中電環境テクノス株式会社並びに関係協力会社の方々、また、適切なお助言をいただいた特別委員会の方々にご心より感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 岩崎 .ほか: 天然ガスハイドレートペレットの自己保存性に関する研究, 三井造船技報, 187(2006-2), p. 15
- 2) 高橋 .ほか: 天然ガスを模擬した多成分混合ガスハイドレートの生成特性, 三井造船技報, 198(2009-10), p. 12

- 3) S. Watanabe, et al. : A Demonstration Project of NGH Land Transportation System, Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates, (2008-7)
- 4) 野上 .ほか: 天然ガスハイドレート(NGH)海上輸送チェーンの事業性調査, 三井造船技報, 198(2009-10), p. 1
- 5) M. Takahashi. et al. : Development of Natural Gas Hydrate (NGH) Pellet Production System by Bench Scale Unit for Transportation and Storage of NGH Pellet, Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates, (2008-7)

〔 問 い 合 わ せ 先 〕

事業開発本部 NGH プロジェクト室
TEL 03 - 5202 - 3980 水林 博



水林 博 新井 敬 渡邊 茂 柳沢 直樹



堀口 清司 守屋 英教 加藤 裕一 渡辺 敬一



森 恵次郎 内田 和男

天然ガスハイドレート(NGH)ペレット用貯蔵設備の開発

深 沢 恵 志* 加 藤 秀 治**

Development of Storage Facility for Natural Gas Hydrate(NGH)Pellets

Keiji FUKAZAWA, Hideharu KATO

Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. has brought forward a palletizing of Natural Gas Hydrate(NGH)for new medium of transporting and storing natural gas and has been engaged in the research of its availability. NGH Pellets under atmospheric pressure can be kept stable at minus 20 degrees Celsius, which is a relatively moderate condition due to their unique characteristics, so-called Self-Preservation Effect.

In storage condition, owing to a self-weight consolidation, a block-up condition caused by their mutual adherence of NGH Pellets and their adherence to inner surface of the silo are the issues of concern. Design of discharging unit of the storage silo has to sufficiently reflect the characteristics of NGH pellets.

In this paper, such characteristics of NGH Pellets obtained through property tests of their adherence and clogging analyses are discussed in consideration of influencing factors of NGH Pellets storage. The element test using scale model machine is also conducted for confirmation of applicability of screw type discharge machine and its specification is studied. In addition the simplified calculation method of power is proposed for design of actual machine.

三井造船は、天然ガスの新しい輸送・貯蔵媒体として NGH をペレット化することを提案し、その有効性について研究を続けてきた。NGH ペレットは、大気圧下 - 20 程度の比較的穏やかな温度領域において自己保存性と呼ばれる保存効果により、本来は不安定な状況下でも安定した状態を保つことが可能である。

しかし、貯蔵設備中での NGH ペレットは、その自重により圧密状態となり、ペレット間の固着と貯蔵設備側面との固着による閉塞が懸念される。そのため、貯蔵設備計画の際には、NGH ペレットの性質に十分配慮した上で払出装置等の仕様を決定する必要がある。

本報では、物性試験により、固着ペレットの物性を明らかにするとともに、得られた物性値を用いた閉塞解析により、閉塞状態の発生に及ぼす影響因子について検討した。また、スクリー式下部払出装置の適用性を確認するため、縮小モデル試験機による要素試験を実施し、仕様を検討するとともに実機設計のための簡易動力算定方法を提案した。

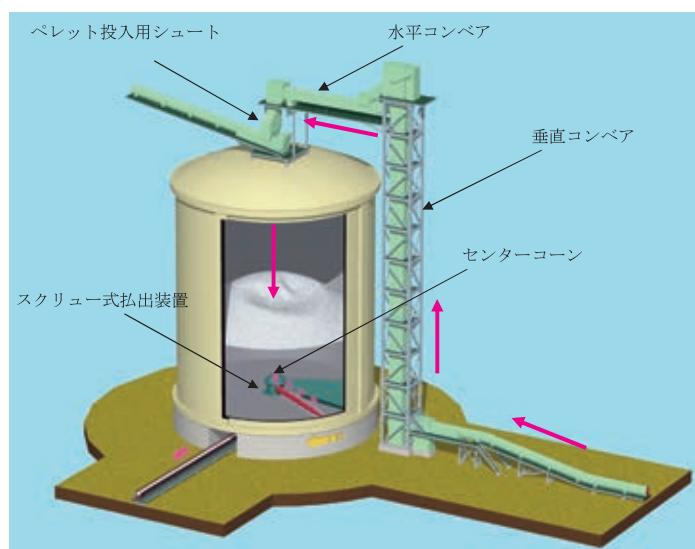


図1 NGH ペレット用貯蔵設備の概要
Outline of NGH Pellets Storage Tank

* 事業開発本部 NGH プロジェクト室

** 鉄構・物流事業本部 建設エンジニアリング部

1. はじめに

三井造船は、新しい天然ガスの輸送媒体として天然ガスハイドレート(Natural Gas Hydrate: NGH)をペレット化して用いることを提案し、輸送及び貯蔵手段としての有効性について検討を行ってきた。NGHペレットを用いた海上輸送チェーンを考えた場合、NGHペレットを製造し、輸送船に積み込み出荷する輸出基地及び輸送船よりNGHを受入れ、再ガス化する受入れ基地が設けられるが、双方に一時貯蔵のための設備が併設される。輸出基地の概念を図2に示す。これは、100万t/y(Natural Gas: NG)規模の輸出基地で、製造設備の奥に貯蔵設備を配置し、岸壁に係留したNGH輸送船にペレットを積み込む様子を示している。

NGHペレットの貯蔵設備内部は、可燃ガス雰囲気となるため気密性、防爆性が求められるほか、温度を-20程度に保持することから、低温に伴う氷結対策も必要となる。また、ペレットの受入れ、払出しに対し柔軟な運転が可能で、長時間運転に対する信頼性及び優れたメンテナンス性が必要であり、これらの要求仕様を満足し、かつコスト的にも優れた貯蔵設備を開発することが求められる。

現在計画しているNGH貯蔵設備を図1に示す。本貯蔵設備では、サイロ上部に設置したシュート部よりペレットを投入し、貯蔵した後、サイロ下部に設置したスクリー式払出装置にてペレットを払出すシステムを採用している。この払出装置は、センターコーンと呼ばれるケーシング内部に電動機や減速機を格納することが可能となっており、これは払出しのためのスクリーフィーダを支える軸受としての機能も有する。スクリー本体は、払出しのため水平軸回りに回転(自転)するとともに、センターコーンを中心としてサイロ周方向へも垂直軸回りに旋回(公転)が可能である。本貯蔵



図2 NGHペレット輸出基地の概念
Conceptual View of NGH Pellet Export Terminal

表1 要素試験名と得られる物性値
Names of Element Tests and Obtained Property Values

要素試験名	物性値
壁面せん断試験	固着ペレットと壁面材料の摩擦係数
	固着ペレットと壁面のせん断ばね定数
一面せん断試験	固着ペレットの粘着力及び内部摩擦角
一軸圧縮試験	固着ペレット弾性係数及び圧縮強度

設備は、ペレットの受入れ及び払出しに対し同時に対応ができるほか、電動機等の電気品を可燃ガス雰囲気外に設置が可能であるため、安全性、メンテナンス性に優れる特長を持つ。

NGHペレット貯蔵設備を設計するためには、NGHペレットの様々な物性データが必要である。本報では、実験により取得した各種物性データに基づき設計した貯蔵設備とその検討結果について報告する。

2. NGHペレット物性試験

本貯蔵設備では、サイロ下部に設置したスクリー式払出装置にてNGHペレットの払出しを計画しており、安定的な払出しを実現させるためにはペレットの固着等によるサイロ内部の閉塞現象を正確に把握する必要がある。ここでは、NGHペレットの閉塞解析に当たり、圧密されて固着したペレットの物性値取得を目的として要素試験を実施した。表1に要素試験の種類と求めた物性値を示す。

2.1 供試用ペレット

要素試験に用いる供試用ペレットは、現在、当社千葉事業所にて稼働中のベンチスケール装置にて製造されたもので、ピロー型のメタンハイドレートペレットを使用した。供試用ペレットの寸法については図3、外観については写真1に示す。

2.2 NGHペレットの壁面せん断試験

実施した要素試験のうち、壁面せん断試験についての概要を示す。試験の目的は、固着したペレットとサイロ壁面の摩擦係数及び解析用のせん断ばね定数を求めることである。試験

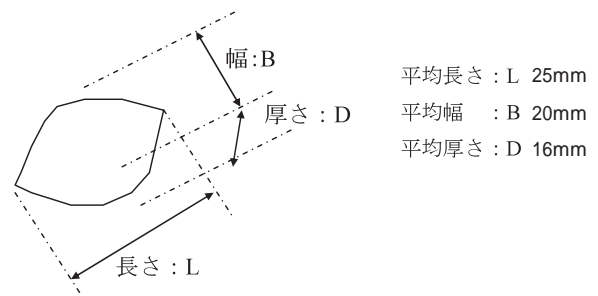


図3 供試用ペレットの概略寸法
Dimensions of NGH Pellets Used for Test



写真1 NGHペレットの外観
Appearance of NGH Pellets

は、土のせん断試験に準じて図4に示す要領に従って実施した。壁面材料としてステンレス2種(表面粗度: Ra = 15 μm 及び Ra = 5 μm)、黒皮の鋼板及び鋼板にポリウレタン塗装を施したものの4種類について、実機の貯蔵期間と荷重状態を想定し、加圧日数0日、5日、12日及び加圧応力度 0.025 N/mm²、0.075 N/mm² 及び 0.150 N/mm² の組合せにて試験を行った。写真2に試験前の壁面せん断試験用の供試体を示す。

2.3 壁面せん断試験結果

実施した試験のうち、ステンレスの表面粗度については、加圧日数が長いほど摩擦係数が大きくなる事が確認できた。一方、表面粗度を 5 μm とした場合では、表面粗度 15 μm の場合の約半分となった。また、黒皮の鋼板及びポリウレタン塗装を施したものについては、ステンレスの表面粗度 5 μm の結果に比べ半分以下となった。

水平移動量と壁面摩擦応力度の関係についての典型例を図5に示す。図5(a)より水平移動量 6 mm 程度において壁面とペレットの固着が一度切れ、応力が急落するのが確認でき、その後、さらに最大摩擦応力度が発生する 12 mm 程度まで増加している。この傾向はいずれの試験においても観測された。

2.4 解析用物性値の設定

得られた結果をもとに解析用のせん断ばね定数を設定する。図5(b)に示すとおり、固着が切れる位置及び最大摩擦応力度が発生する位置で勾配を変化させる3本の接線によるトリリニア置換を行った。なお、最大摩擦力発生以降は応力度は変化しないものと仮定した。また、今回得られたせん断ばね定数は、壁面垂直応力度が 0.025 N/mm²、0.075 N/mm² 及び 0.150 N/mm² の3ケースとなるが、それ以外のばね定

数については、これらの実験値より適宜補間して設定した。その他、一面せん断試験により粘着力及び内部摩擦角を、一軸圧縮試験により弾性係数を求めた。

3. NGH ペレット閉塞解析

本貯蔵設備では図1に示したとおり、底部からの払出しを想定しており、払出しの際にサイロ内で固着による閉塞が発生せず、ペレットが順次底部に崩落することがシステム成立の前提条件となる。

一般に、石炭サイロ等の底部払出しを前提とした閉塞検討においては、固着状態にある石炭を一塊の弾性体と考え、有限要素法などの数値解析の実施及び縮小モデルによる実験や実機との整合性を確認することで、その正当性の裏付けを行っている。

粒状体の挙動を表現する解析手法としては個別要素法(Distinct Element Method: DEM)が知られているが、要素試験の結果から NGH ペレットバルクは内部摩擦角及び粘着力を持つことから、土の挙動と似ていると考えられ、バルクを形成した場合には連続体とみなすことができる。そのため、ここでは有限差分法を用いて評価を行うこととした。有限差分法は地盤の破壊や崩壊を伴う解析で多くの事例がある。今回は、NGH ペレットバルクの破壊、壁面との固着及び摩擦という非線形の挙動を表現する必要があったため、非線形の有限差分法による解析を行った。

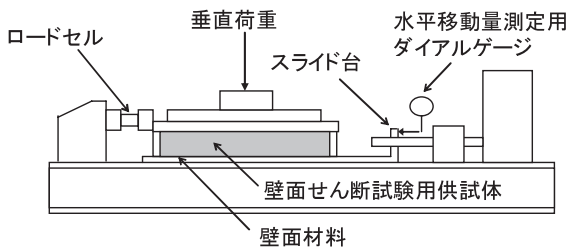
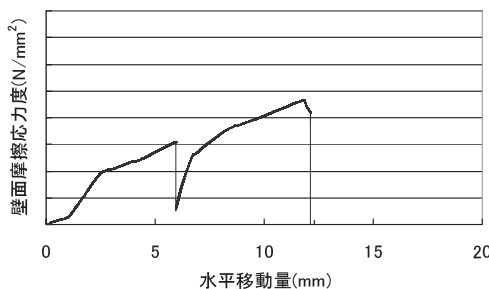


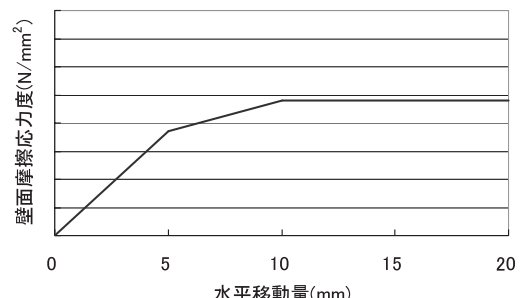
図4 壁面せん断試験の概要
Outline of Shear Testing of Wall Surface



写真2 壁面せん断試験用供試体
Specimen of Shear Testing of Wall Surface



(a) 試験結果



(b) 解析用物性値

図5 せん断ばね係数導出試験結果と解析用定数への設定方法
Set up of Shear Spring Coefficient for Analysis

3.1 解析モデル

商業機を想定して、直径 30 m の貯蔵サイロにペレットを積込んだ状況の解析モデルを設定した。図 6 に解析モデルを示す。ペレットの払出しについては、タンク円周方向の払出し範囲を 90 度、180 度、270 度、360 度の四つのステップに分け、払出装置のスクリー上面から床面までの要素を削除することで表現した。なお、せん断ばね定数は、事前解析で得られたサイロ壁面の垂直応力度を適宜グルーピングし、実験より得られたばね定数をもとにグループごとに設定した。また、固着ペレットの塑性条件としてモール・クーロン(Mohr-Coulomb)の破壊基準を適用し、破壊線については、一面せん断試験より得られた粘着力及び内部摩擦角により設定した。

3.2 解析結果

図 7 に固着ペレットの塑性状況を示す。ペレットの払出しが進むにつれ、センターコーンの上部において塑性領域が進んでいくのが確認できる。これより固着ペレットが崩壊し、サイロ下面に落ちてくると想定される。

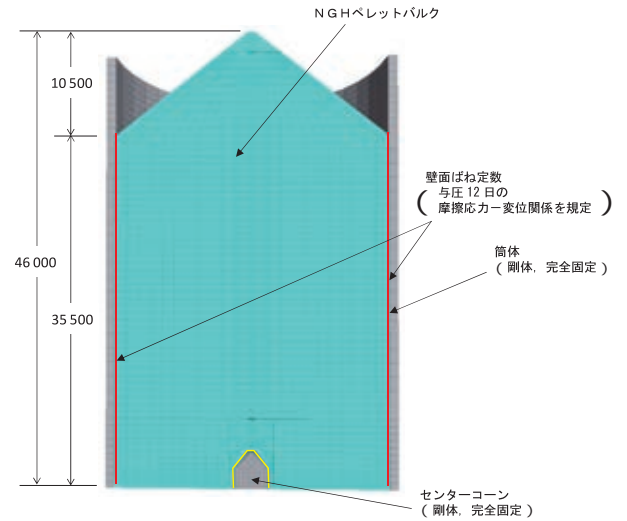


図 6 解析モデル
Analysis Model

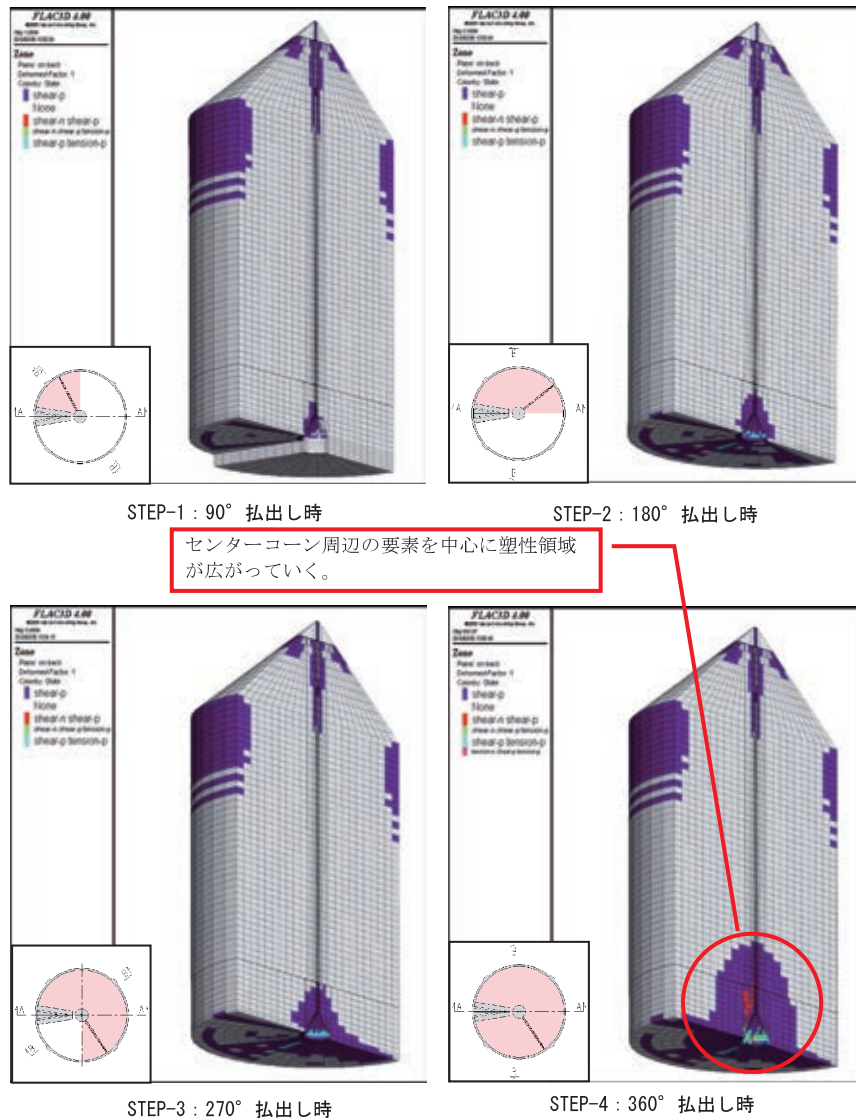


図 7 固着ペレットの塑性状況
Plastic Situation of NGH Pellets Adherence

4. NGH ペレット払出装置の検討

NGH ペレット払出装置としては、-20 でかつ可燃ガス雰囲気の下において確実にペレットを払い出すことが可能な信頼性を有し、構造がシンプルで高いメンテナンス性が求められる。スクリー方式の払出装置は同様の条件下で使用されたことはないものの、燃料チップや石炭用サイロ向けに既に多くの採用実績がある。今回、本払出装置を NGH ペレット用貯蔵設備に適用するに当たり縮小モデルを製作し、それにて要素試験を実施することで、NGH ペレットに対する払出特性について検討を行った。

4.1 払出要素試験

払出要素試験においては、本払出装置の特徴であるスクリーによる払出特性を把握することを目的とする。要素試験機のスクリーについては、実機として実績のあるスクリーの仕様を参考に、NGH ペレット用の実機の仕様を想定し、それをベースに縮小モデルを設定した。なお、縮小モ

デルの縮尺の設定に当たっては、-20 の状態で試験が実施可能な実験室の寸法及びスクリー径とペレットサイズの関係性を考慮し、長さを実機の 1/10 縮尺、断面を 1/7 縮尺とした。図 8 に今回の要素試験に使用する基準となるスクリーの形状及び寸法を示す。

4.1.1 払出要素試験機の仕様

払出試験機本体の概要を図 9 に示す。スクリーの回転と旋回については油圧モーターにて駆動する。旋回範囲は中心角で 37 度となる。払出されたペレットは試験機下部に設けた受箱に蓄えるとともに、受箱下部に設置したロードセルにより、時間ごとの総重量の計測が可能である。また、スクリーに発生するトルクについても、トルク計により計測が可能である。

4.1.2 角氷を使用したパラメータ試験

ペレットによる試験に先立ちスクリーの払出特性を把握するため、試験試料として角氷 (20 mm × 13 mm × 20 mm) を使用したパラメータ試験を実施した。払出量や所要動力に影響を与えると考えられる項目を抽出し、試験ケースを設定した。項目及び試験ケースを図 10 に示す。試験ではスクリー可動範囲内に角氷を充填した後、スクリーを自転させ、数秒後に公転を開始させた。スクリーの自転回転速度については実機で想定している 21 rpm とし、旋回 (公転) 速度は 1 分当たり 3 度 (1/120 rpm) とした。なお、各氷の積み付け高さは底面から 680 mm とし、圧密状態を一定に保つため、払い出された量と同量の角氷を随時追加投入した。

4.1.3 パラメータ試験結果

設定した試験ケースのうち、表面粗度及びスクリー羽根

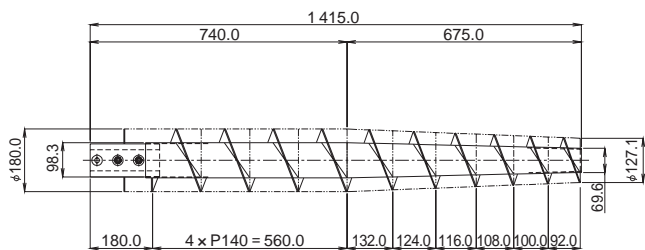


図 8 縮小モデルのスクリー寸法
Dimension of Screw on Reduced Model

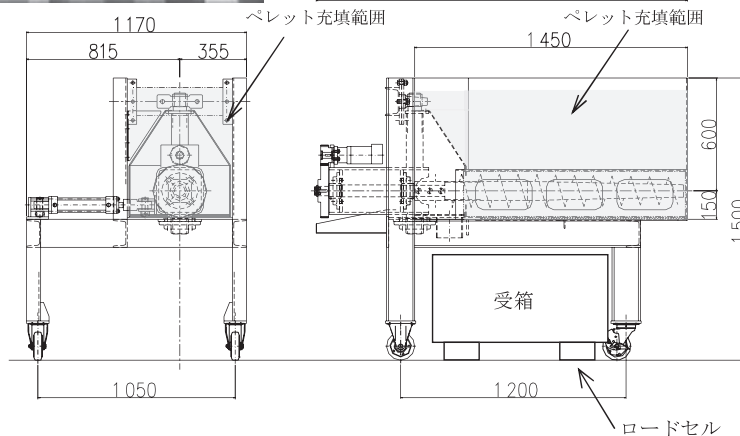
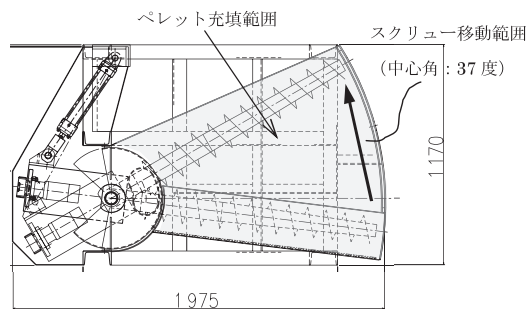
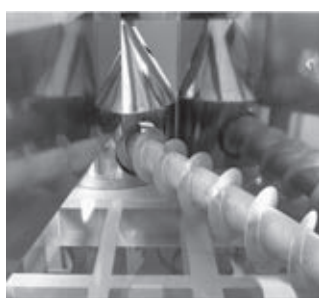
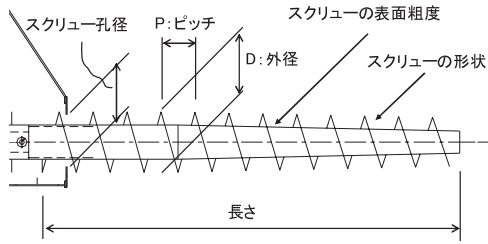


図 9 払出要素試験機の概要
Outline of Discharging Test Machine



試験NO.	試験	P/D	表面粗度	長さ	スクリー形状	スクリー孔径
No.1		0.6	梨地	1.5m	先細りあり	200φ
No.2		0.8	梨地	1.5m	先細りあり	200φ
No.3		0.8	梨地	1.5m	先細りなし	200φ
No.4		0.8	梨地	0.75m	先細りなし	200φ
No.5		0.8	研磨(荒)	1.5m	先細りあり	200φ
No.6		0.8	研磨(細)	1.5m	先細りあり	200φ
No.7		1.0	梨地	1.5m	先細りあり	200φ
No.8		0.8	梨地	1.5m	先細りあり	220φ

注)表面粗度は以下のとおり。
梨地: Ra=5~10μm程度、研磨(荒): Ra=40~100μm程度
研磨(細): Ra=1μm程度

図10 試験ケース
Test case

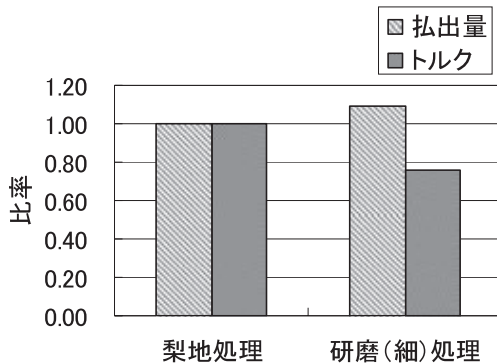


図11 スクリュー表面粗度の影響
Effect of Surface Roughness of Screw

間隔と外径比の影響確認のために実施した試験の結果を以下に示す。

(1) 表面粗度の影響

図11にスクリーウの表面粗度が梨地(表面粗度 Ra = 5μm)の場合のものとして研磨(表面粗度 Ra = 1μm)した場合のものについて実施した試験結果を示す。梨地のスクリーウで実施した試験の抽出量とトルク値を標準値 1.0 とし、研磨したスクリーウの結果をその比率で表現した。これより研磨した場合の抽出量は約 1 割多くなったにもかかわらず、トルク値は 2 割以上少なくなっており、表面粗さが細かい程、抽出効率が高いことが確認できた。

(2) 羽根の間隔と外径比の影響

図12にスクリーウの羽根の間隔 P とスクリーウの外径 D の比 P/D について 0.6, 0.8 及び 1.0 とした場合の結果を示す。なお、P/D を 0.8 とした場合の結果をベースに、0.6 及び 1.0 の結果をそれに対する比率で示した。これより、P/D が 0.6 の場合の結果は、抽出量が約 4 割低下しているにもかかわらずトルク値は約 2 割増えており、P/D が 0.8 のスクリーウに比べ効率的に劣ると判断できる。また、P/D が 1.0 の場合の結果は抽出量が約 1 割増えるもののトルク値は 3 割以上増えており、これについても効率の点で P/D が 0.8 のスクリーウ

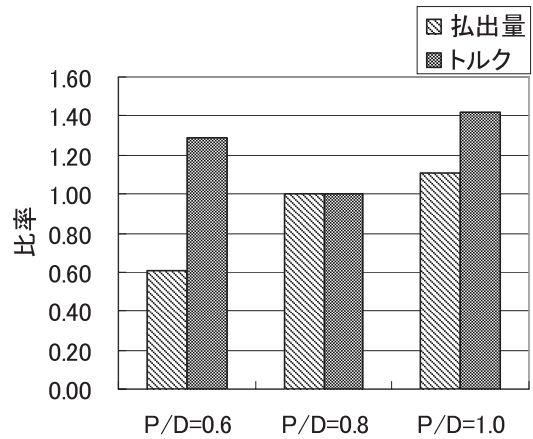


図12 スクリュー羽根間隔と外径比の影響
Effect of Screw Blade Intervals and External Diameter Proportion



写真3 ペレットによる抽出試験の状況
Discharging Test of NGH Pellets

に比べ劣ると判断できる。

4.1.4 ペレットを使用した要素試験

パラメータ試験の結果より、図10に示す試験 No.2 を標準ケースと設定し、ペレットを使用した試験を実施した。写真3に試験状況を示す。試験に用いるペレットは先に実施した物性試験と同様のものを使用した。また、その他の試験条件についてはパラメータ試験と同様としたが、本試験は、ペレットの追加投入を行っていない。

(1) 試験結果

試験時間と抽出量の関係を図13に示す。これより線形性が確認でき、安定的な抽出量が得られていると判断できる。なお、試験開始後 1 分から 3 分までの平均抽出量は 18 660 N/h となった。また、試験時間と作用トルクの間を図14に示す。作用トルクのばらつきも少なく、平均値である 23.5 N・m に対し ± 10% 程度に収まっていることが確認できる。

4.2 抽出量及び所要動力算定方法の提案

実機的设计においては実験等で裏づけされた算定式が必要となる。ここでは既存のスクリーウフィーダの算定式をベースとして、本抽出システムにおける抽出量及び所要動力算定方法について検討した。

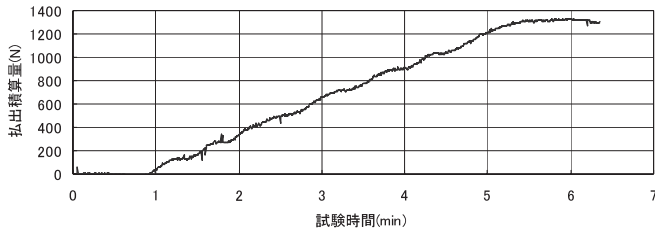


図 13 試験時間と払出積算量の関係
Relation between Testing Time and Accumulated Discharging Amount

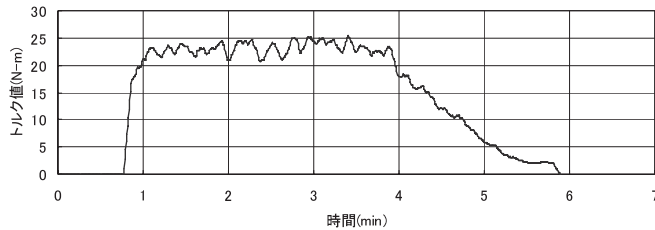


図 14 試験時間とトルク値の関係
Relation between Testing Time and Torque Value

4.2.1 払出量

スクリーウの外周のある1点で考えた場合、その点にある NGH ペレットはスクリーウ軸に対し、スクリーウのねじれ角とスクリーウ壁面とペレットとの摩擦角分ずれた方向に押し出される¹⁾。ここで、スクリーウが1回転した際にスクリーウの羽根間にあるペレットが全量払出された場合を基準として1.0とした場合の効率を η とすると、は次の式で表現できる。

$$\eta = \cos(\alpha - \mu) / \cos(\alpha + \mu) \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 α : スクリューのある外周点におけるリード角

$$\{\alpha = \tan^{-1}(S / D)\}$$

μ : スクリュー羽根表面とペレットの摩擦係数

これより、払出効率を考慮した払出量を以下のとおり設定する。

$$Q = 60 \cdot A / (D^2 - d^2) S \cdot \rho \cdot V \cdot n \cdot \eta \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 Q : 払出量

D : スクリュー根元部における羽根の外径

d : スクリュー根元部における軸径

S : スクリュー根元部の羽根の間隔

ρ : ペレット単体の比重

V : ある圧密下におけるペレットの充填率

n : スクリューの回転数 (rpm)

η : 払出効率

4.2.2 簡易所要動力算定方法の提案

一般にスクリーウフィーダ等においては、フィーダ内部にある内容物の重量を時間当たりの運搬距離から算定することが可能である。ところで、本払出システムの場合、スクリーウにはその上部に積まれたペレットの自重が作用するため、必要動力は積み込み高さの影響を受けると考えられる。そこで、

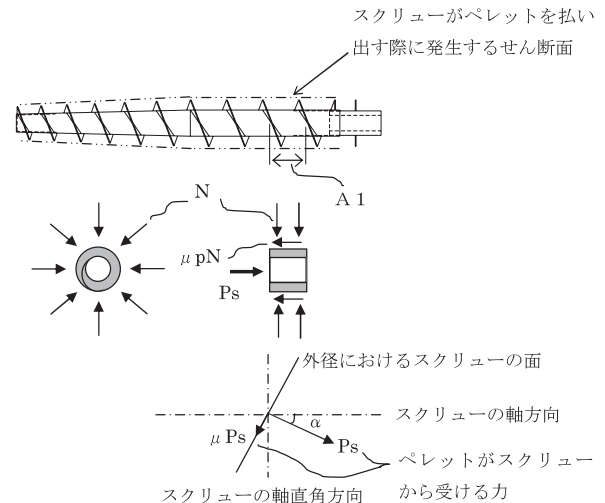


図 15 所要動力算定モデル
Model for Calculation of Required Power

図 15 に示すモデルを想定した。スクリーウ羽根内にあるペレットはスクリーウ羽根の外にあるペレットと接しており、ペレットをスクリーウによって運搬するためには、ペレット間の摩擦力と同等の荷重が必要となる。この摩擦力は作用する鉛直圧力にて算定されるが、これは積み付け高さに依存することとなる。

スクリーウ軸方向の力のつり合いを考えると、以下のように表現できる。

$$f = P_s \cdot \cos(\alpha) - \mu \cdot P_s \cdot \sin(\alpha) - \mu p \cdot N \cdot A1 \dots\dots\dots(3)$$

ここで

f : スクリュー軸方向の力

μ : スクリュー表面とペレットの摩擦係数

μp : ペレット間の摩擦係数

$A1$: 1ピッチ当たりのスクリーウ外径面の表面積

N : スクリュー設置位置におけるペレット圧

P_s : スクリューがペレットを押し出す力

α : スクリューのある外周点におけるリード角

スクリーウがペレットを軸方向へ運搬するための条件として $f = 0$ とすると、スクリーウがペレットを押し出す力は以下のように設定できる。

$$P_s = \mu p \cdot N \cdot A1 / (\cos(\alpha) - \mu \cdot \sin(\alpha))$$

スクリーウの全ピッチにおいて P_s を積分し、払出量から単位時間当たりの運搬距離を算出し、上記 P_s より必要動力を算定することが可能となる。

スクリーウ設置位置におけるペレット圧については、石炭貯蔵用サイロ等の設計に用いられる鉛直圧力式であるヤンセン(Janssen)式により算定する²⁾。なお、円形断面に作用する内容物圧力は上下面、側面と異なるが、スクリーウ中心位置における鉛直及び水平圧力の平均値が一様に周方向に作用するものと仮定した。

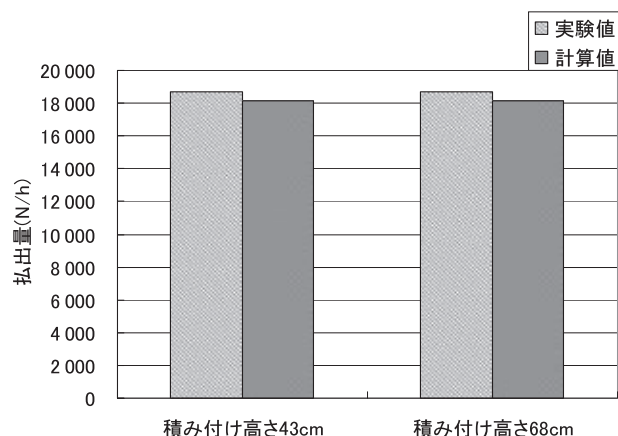


図 16 実験値と計算値の比較：払出量
Comparison of Experimental and Calculation Values
(Amount of Discharge)

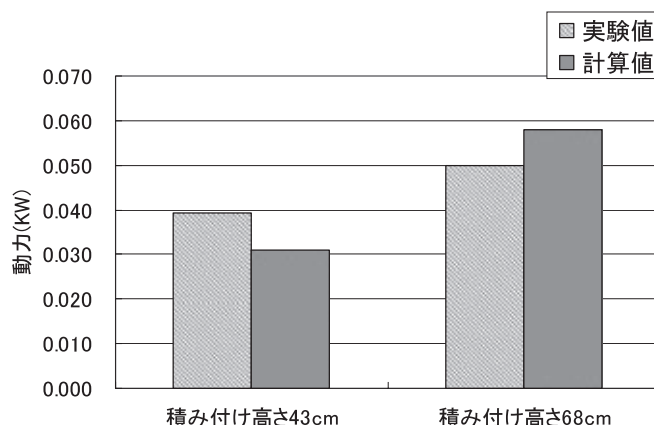


図 17 実験値と計算値の比較：所要動力
Comparison of Experimental and Calculation Values
(Required Power)

4.2.3 計算値と実験値の比較

図 16 に払出量について計算値と実験値の比較及び図 17 に所要動力の比較を示す。なお、積み付け高さの影響を調べるため、先述したペレットを使用した要素試験の条件下において、高さ 430 mm で実施した試験の結果も併記する。また、計算値において、ペレットの充填率は 55%、ペレットとスクリー面の摩擦係数は 0.1、ペレット間の摩擦角度は 46.4 度とした。これらは物性試験より得られたデータである。払出量については、積み付け高さの影響がほとんどなく、計算値ともよく一致している。また、所要動力については、実験結果より明らかにその影響があることが確認でき、今回、提案した算定方法でほぼ模擬できることが分かった。

5. まとめ

NGH ペレットの貯蔵設備の概要を示すとともに、その商業化実現に向け実施した閉塞解析及び払出試験の概要について紹介した。得られた知見を以下に示す。

実際の NGH ペレットを使用して行った物性要素試験より得られた物性値を使用し、実機を想定した非線形の有限差分法による閉塞解析を実施した。

解析の結果より、自重にてセンターコーン上部付近における固着ペレットが崩壊することが確認できた。

スクリー式下部払出装置のペレット払出特性を把握するために縮小モデル試験機による、スクリー仕様を変化させたパラメータ試験を実施し、その影響を把握することができた。ペレット払出しのための払出量及び所要動力算定式を提案し、実験結果と比較することで、その妥当性を検証した。

6. 今後の課題

閉塞解析の妥当性の検討

今回の閉塞解析では、ペレットの払出しに従いセンターコーン上部を中心として塑性領域が広がっていくことが分かった。固着ペレットは塑性すると自重により落下すると予想されるので、今後、崩落試験等を実施して実際の挙動を確認するとともに解析の妥当性を検証する。

積み付け高さの影響の確認

今回、実験室及び試験機の寸法の関係で積み付け高さが 680 mm までの試験となった。今後、3 000 mm 程度まで積み付けが可能ないように試験機を改造し、払出特性や所要動力を確認するとともに、算定式の妥当性について検証する。

7. おわりに

今回、NGH ペレットを対象とした貯蔵設備について、閉塞解析及び払出装置の要素試験の結果から、その実現性が検証された。今後は、課題の一つである解析の妥当性を確認するとともに、閉塞が発生した場合の対応策について具体化していくことが重要と考える。

最後に今回の研究に際し、ご協力いただいた三井住友建設株式会社及び株式会社三井三池製作所の各位に対し、ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 和久．ほか：リボンスクリュー式泥土圧シールドの排土機構解明に関する研究，土木学会論文集，574（1987-9），p. 97
- 2) 容器構造設計指針・同解説，日本建築学会

〔問い合わせ先〕

事業開発本部 NGH プロジェクト室
TEL 03 - 5202 - 3980 深沢 恵志



深沢 恵志



加藤 秀治

天然ガスハイドレート(NGH)輸送船の 貨物倉内ガス化システムの開発

吉野 亥三郎* 中田 崇** 湯浅 伸哉**
 島田 潔*** 大石 剛央***

Development of Regasification System inside Cargo Hold of the Natural Gas Hydrate(NGH)Carrier

Isao YOSHINO, Takashi NAKATA, Shinya YUASA, Kiyoshi SHIMADA, Go OISHI

In the case of a failure of the mechanical unloading system of Natural Gas Hydrate (NGH) carrier in the cargo hold, the NGH pellets stored in its cargo hold must be urgently gasified. Gasification work is also required for NGH regasification carrier that transports gas to onshore terminal after gasifying the pellets in the cargo hold. For both emergency regasification in NGH carrier and normal gasification work in NGH regasification carrier, the establishment of safe and rapid regasification system for huge volume of NGH pellets in the hold is quite essential.

For investigation of the regasification system, model test, modeling of calculation and simulation have been carried out and a practical simulation program has been developed so as to study the full scale regasification system which can analyze the freezing phenomenon expected in the full scale carrier.

三井造船では、天然ガスハイドレート(NGH)ペレットをばら積み貨物として運搬する機械式荷役方式のNGH輸送船を開発してきた。その荷役装置が故障した場合、貨物倉内のNGHを緊急にガス化する必要がある。また、NGHを貨物倉内でガス化し、ガスを直接陸上へ送るNGHリガス船においては、貨物倉内ガス化が通常のオペレーションになる。このように、NGH輸送船(機械式荷役方式船及びリガス船)の実現のためには、貨物倉内で大量のNGHを安全かつ迅速にガス化するシステムの開発が必要となる。

そこで、NGHペレットのガス化試験を行い、貨物倉内のガス化時の凍結等の現象を解明すると共に、数値計算モデルを構築した。更に、その数値計算モデルを用いたシミュレーションプログラムを作成し、実船における凍結現象等を予測することにより、ガス化システムの検討を行った。また、これらの検討結果を用いて、NGHリガス船の概念設計を実施した。

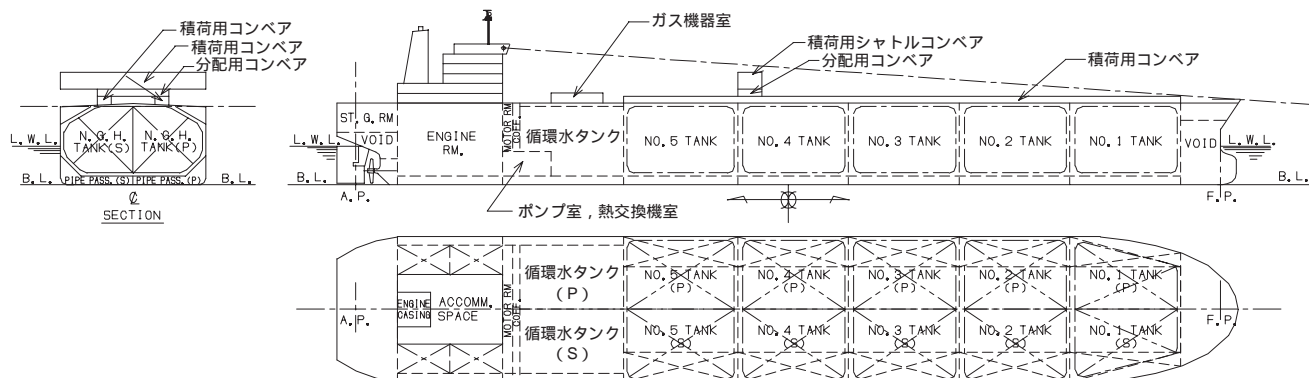


図1 NGHリガス船の一般配置図
 General Arrangement of Regasification Carrier

* 三井造船ヨーロッパ株式会社
 *** 株式会社三井造船昭島研究所

** 船舶・艦艇事業本部 基本設計部

1. 緒言

天然ガスの新しい輸送媒体として天然ガスハイドレート (Natural Gas Hydrate : NGH) が注目されている。NGH は、メタンなどの天然ガス分子が水分子に取り込まれた包接水和物であり、高いガスの包蔵性を有する。また、液化天然ガス (Liquefied Natural Gas : LNG) よりも製造が容易であり、かつ、大気圧下の穏やかな温度 (約 -20) で輸送・貯蔵できることから、1000 ~ 5000 km 程度の中距離輸送の中小ガス田に対し、製造を含めたサプライチェーン全体において、LNG よりも経済性が高いと考えられている¹⁾。

三井造船では、NGH の製造・貯蔵・輸送・利用について研究開発を進めており、NGH ペレットの海上輸送を担う NGH 輸送船について、NGH ペレットをばら積み貨物として運搬する機械式荷役方式船の開発を実施している^{2)~5)}。この NGH 輸送船の荷役装置が貨物倉内で故障した場合、装置の修理を行うために、該当貨物倉内の NGH ペレットを緊急にガス化し、貨物層内のガスを空気に置換する必要がある。また、当社では、機械式荷役方式船の他に、NGH ペレットを貨物倉内でガス化し、ガスを直接陸上へ送る船の開発も進んでおり、当社ではこれを“リガス船”と呼んでいる。このリガス船においては、貨物倉内ガス化が通常オペレーションになる。

しかし、貨物倉内で大量の NGH ペレットを安全かつ迅速にガス化する手法は解明されておらず、上記の機械式荷役方式船の緊急時ガス化及びリガス船実現のために NGH ペレットの貨物倉内ガス化システムを確立させることが必要である。

本報では、このガス化システムの開発にあたって実施した、ガス化試験及びシミュレーションについて説明し、また、ガス化システムを搭載したリガス船の概念設計について紹介する。

2. ガス化の基本的考え方

2.1 貨物倉内ガス化

当社の NGH サプライチェーンの検討においては、NGH ペレットからガス化された天然ガスは、需要家に 5 MPa の高压ガスで供給する計画とし、陸上ガス化装置の場合は、昇圧に動力・コストを掛けないように高压容器内でガス化を行う方

針である⁶⁾。リガス船の場合にこの方式を適用すると、貨物倉を 5 MPa の高压に耐えるように設計する必要があり、これは技術的にもコスト的にも困難である。そこで、機械式荷役方式船の緊急時ガス化と同様に、リガス船では貨物倉内で NGH ペレットをガス化し、その後昇圧する方式を採用することとした。貨物倉内ガス化方式についての詳しい検討は 5.1 に示す。

2.2 海水を熱源とするガス化

貨物倉内の NGH ペレットのガス化にあたって、CO₂ 削減及び経済性の観点から化石燃料を使用せず、海水を熱源として考えることとした。すなわち、貨物倉内ガス化用循環水 (清水) を海水と熱交換することにより熱を供給する。NGH ペレットがガス化するとガスだけでなく水も生成する。この水には天然ガスが溶存しているが、循環水として使用されるため、海水と共に船外放出されることはない。

ガス化後の循環水は 0 に近い温度になり、20 程度の海水温を想定すると、海水との熱交換により循環水温度は十数度になる。このため、海水を熱源としたガス化においては、比較的低温の循環水によりガス化を行う必要がある。NGH ペレットの温度が約 -20 であるため、循環水や NGH ペレット分解水の凍結について考慮する必要がある。

3. 貨物倉内ガス化試験

3.1 目的及び試験条件

安全かつ迅速な貨物倉内ガス化システムを確立するためには以下の知見が必須であり、これらのデータ取得を目的に貨物倉内ガス化試験を実施した。

常圧下で貨物倉内の NGH ペレットを十数度の循環水によりガス化させる際の問題点の確認。

実船に適用可能なガス化シミュレーションプログラムを作成する際に必要となる基礎データの取得。

本試験では NGH ペレットとして、メタンハイドレートペレットを使用した。本ペレットの形状は、写真 1 に示すピロー型で、長さ約 25 mm、幅約 20 mm、厚さ約 16 mm である。これは当社の千葉事業所に設置しているベンチスケール装置で製造されたものである。

貨物倉内壁温度を約 -18 に保つように、写真 2 に示す大



写真 1 NGH ペレット
NGH Pellets



写真 2 大型簡易冷凍庫
Large Freezer for Model Test



写真3 貨物倉模型(管路A)
Hold Model(Pipe Line A)

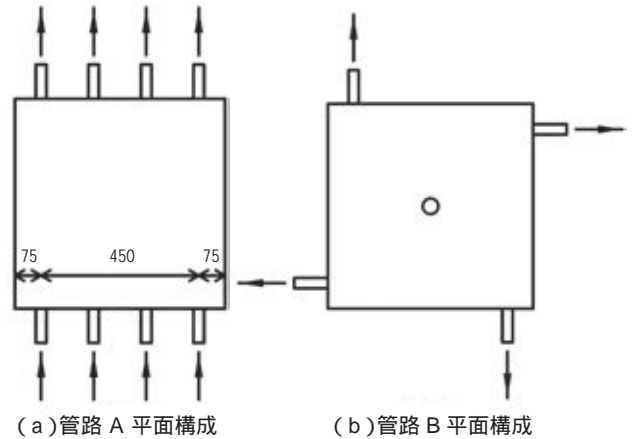


図3 給排水管の管路
Line of Supply and Discharge Pipes

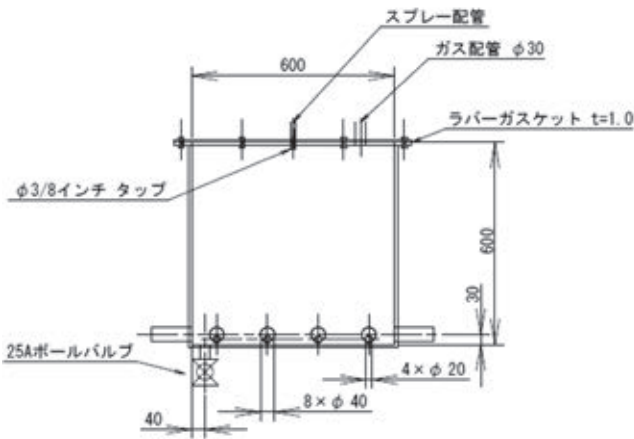


図2 貨物倉模型概略図
Sketch of Hold Model

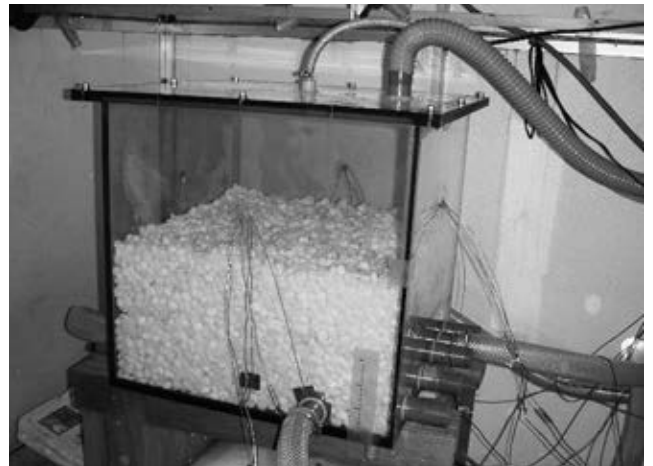


写真4 NGHペレット投入後の貨物倉模型(管路B)
Hold Model after Filling Pellets(Pipe Line B)

型簡易冷凍庫内で試験を実施した。写真3に示す貨物倉模型は一辺が600 mmの立方体であり、図2及び図3に示すように、下部に循環水用の給排水管を、上部にスプレー用給水管を設置した。また、NGHペレット投入後の貨物倉模型の状況を写真4に示す。

表1に代表的な試験条件を示す。循環水の方式として、「模型下部で給排水する方式(ケース1)」、「貨物倉上部からスプレーし、模型下部から排水する方式(ケース2)」及び「両者を組み合わせた方式(ケース3)」の3通りの試験を実施した。

各循環水方式で給排水管の管路タイプについては、下部循環水単独及びこれに上部スプレーを併用した場合は、流れのショートカットを防ぐため図3の管路Aを、上部スプレー単独の場合は、貨物倉下部で平均的に熱交換するため管路Bを採用した。

試験における計測項目を以下に示す。

- ・発生ガス流量
- ・循環水入口流量、温度(給水タンク温度)
- ・循環水温度(模型内9箇所、出口配管4箇所)

表1 試験条件
Test Condition

ケース	方式	管路	ペレット重量 [kg]	充填率	循環水流量 [/s]
1	下部循環水	A	54.6	0.55	0.20
2	上部スプレー	B	51.6	0.52	0.20
3	下部循環水・ 上部スプレー併用	A	50.8	0.54	0.20

水温は熱電対により計測し、温度計測点は図4に示したとおりである。貨物倉模型内の熱電対は、水温が計測できるレベルに設置した。

循環水は温度一定の給水タンクから給水し、排水は再循環させずに保管した。循環水はNGHペレット融解の様子を観察するために赤色に着色した。

3.2. 試験結果及び考察

3.2.1 下部循環水方式(ケース1)

下部循環水方式の試験結果を図5に示す。循環水は、ガ

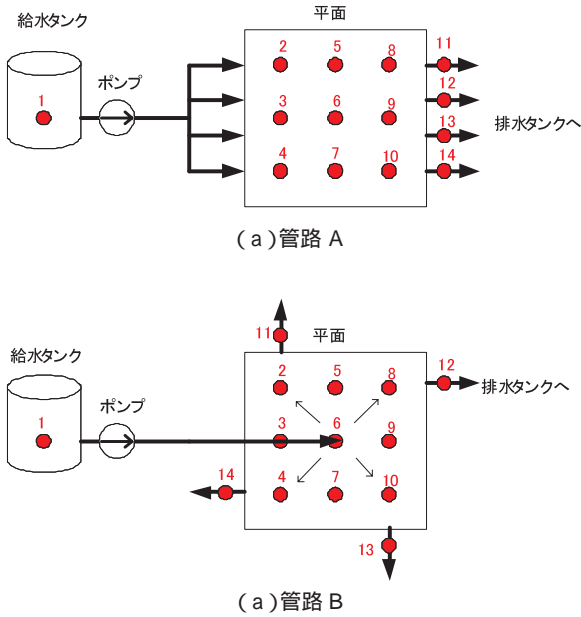


図4 温度計測点
Points of Temperature Measurement

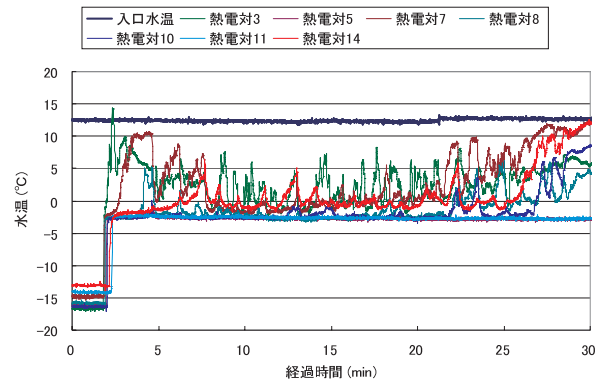


写真5 上部スプレー方式の試験状況
Hold Model during Test of Overhead Spray Method

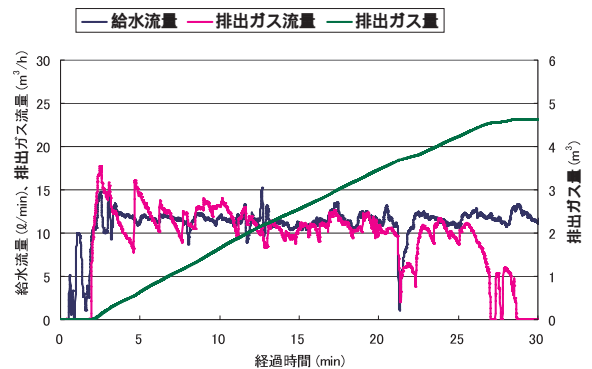
スの排出が始まってから、平均 12 /min で給水されており、測定開始から約 25 分でガスの排出量が減少するとともに、貨物倉模型内の水温も上昇した。本方式では、模型下部の NGH ペレット融解後、直上のペレットが連続して崩落することによって安定的なガス化が達成できた。

下部循環水方式の場合、循環水の流速は速い方が熱伝達率は大きくなる。ケース 1 の試験条件では、熱伝達効果を示すヌセルト数(4.2 の式(6)参照)は 60 程度であるが、これは流速下では静止状態(ヌセルト数=1)より 60 倍熱伝達率が增大することを意味する。すなわち、流水により熱伝達効果を飛躍的に向上させることができるため、この下部循環水方式はガス化を迅速に行う際に有効な方式であると言える。

しかし、ケース 1 より流速を速めたときに、NGH ペレット下部にトンネルを形成し、ほとんど熱交換が行なわれない状況が



(a)経過時間と水温の推移



(b)経過時間と給水流量及び排出ガス流量の推移

図5 計測結果(ケース1)
Test Result(Case 1)

観察された。トンネルの流路ができると伝熱面積が極端に小さくなり、熱交換効率が低下すると考えられる。

また、NGH ペレットの温度は約 - 20 であるため、模型内壁への NGH ペレットの多少の固着は避けられず、この固着がトンネル形成を助長すると考えられる。したがって、下部循環水方式の場合、循環水の流量を適切に設定すると共に、貨物倉壁面のペレット固着防止対策が必要になる。

3.2.2 上部スプレー方式(ケース2)

上部スプレー方式の試験状況を写真5に示す。貨物倉模型内壁温度は約 - 18 であるため、模型内壁への NGH ペレットの多少の固着は避けられないが、上部スプレー方式はこの壁面の固着を防止する効果がある。実際、ケース2では側壁周りの NGH ペレットから融解が進む様子が観察された。ただし、側壁周りのペレットが全て融解されると、ペレット周りに流路が形成され、ケース1のトンネル形成と同様に、熱交換効率が低下した。

3.2.3 下部循環水・上部スプレー併用方式(ケース3)

下部循環水・上部スプレー併用方式のケース3においては、下部でのトンネルの形成がなく、また、側壁周りの流路形成後に上部スプレーの熱交換効率低下を下部循環水が補完し、長時間に渡り安定したガス化を継続することができた。一連の試験結果において、この方式は「下部循環水方式で発生する可能性のあるトンネル形成」や「上部スプレー方式における側壁流路形成後の熱交換効率低下」を避けることができ、

最も有効な方式であった。

なお、実際の NGH ペレットの輸送では、輸送効率を高めるために、大きさの異なるペレットを混ぜて貨物倉に搭載することが計画されている。これを模擬するためにペレットに粉末状のハイドレートを混ぜて試験を行った結果、スプレー水が凍結して流路を塞ぎ、水位が上昇する現象が観察された。側壁周りに流路を形成する過程におけるこの凍結・閉塞現象は、安全性上解決しなくてはならない問題である。この考察については、4.3 で補足する。

3.2.4 ガス流量

ケース 1 ~ 3 の試験におけるガス流量の計測値と計算値の比較を表 2 に示す。ここで、計算値は以下のように 2 通りの方法で推定した。この計算値及びの入熱量計算には、試験結果より出口水温 - 2.5 を使用した。

：NGH が融解することなく、投入した熱量がガスの分離のみに作用する場合(使用ペレットの分解熱約 90 kJ/kg)

：投入した熱量が NGH の融解・ガス分離に作用する場合(使用ペレットの分解熱約 430 kJ/kg、- 20 の NGH から出口水温の水が生成)

表 2 より、最大ガス流量計測値 M は、の 1.5 ~ 2 倍程度の数値になっていることが分かる。また、図 5 において、定常状態でに近い流量でガスが発生している。このことから、初期状態においては、ペレットの融解だけでなく、融解を伴わないガス分解があること及び定常状態では融解を伴ったガス分解が支配的になるものと考えられる。

4. ガス化シミュレーション

4.1 計算の概要

2.2 に示したように、NGH ペレットガス化の検討においては、循環水や NGH ペレット分解水の凍結について考慮する必要がある。そこで、この凍結現象を考慮したシミュレーションプログラムを作成し、試験結果との比較から計算の妥当性を確認し、更に、実船用の計算を実施してガス化システムの検討に用いた。

計算は 3 次元差分法による数値計算とし、計算の仮定や境界条件を含め、以下の前提条件を設定した。

(前提条件)

NGH ペレット、水、氷及びガスの 4 相を考え、ガスを除く 3 相について差分法における微小セル内の充填率として各々の相をモデル化する。

ペレット内における熱伝導を無視し、氷及びペレットの表面温度は一定とする。(別途実施した試験結果より、氷及びペレットの表面温度を - 4.0 に設定した。)

循環水の凍結温度は一定とする。(別途実施した試験結果より - 3.0 に設定した。)

ペレットとの熱交換によって冷却された循環水が凍結温度になると、その熱移動量と同量の循環水が凍結し、循環水の温度は凍結温度になると仮定した。

上部要素にペレットが存在する場合、分解及び移動したペレットと同体積分のペレットが、上部要素から落下すると仮定した。すなわち、要素内のペレット充填率は常に一定とする。

同一要素内のペレットサイズは同一とする。

船倉壁面の流れはスリップとする。

また、本計算における数値計算アルゴリズムを以下に示し、計算フローを図 6 に示す。

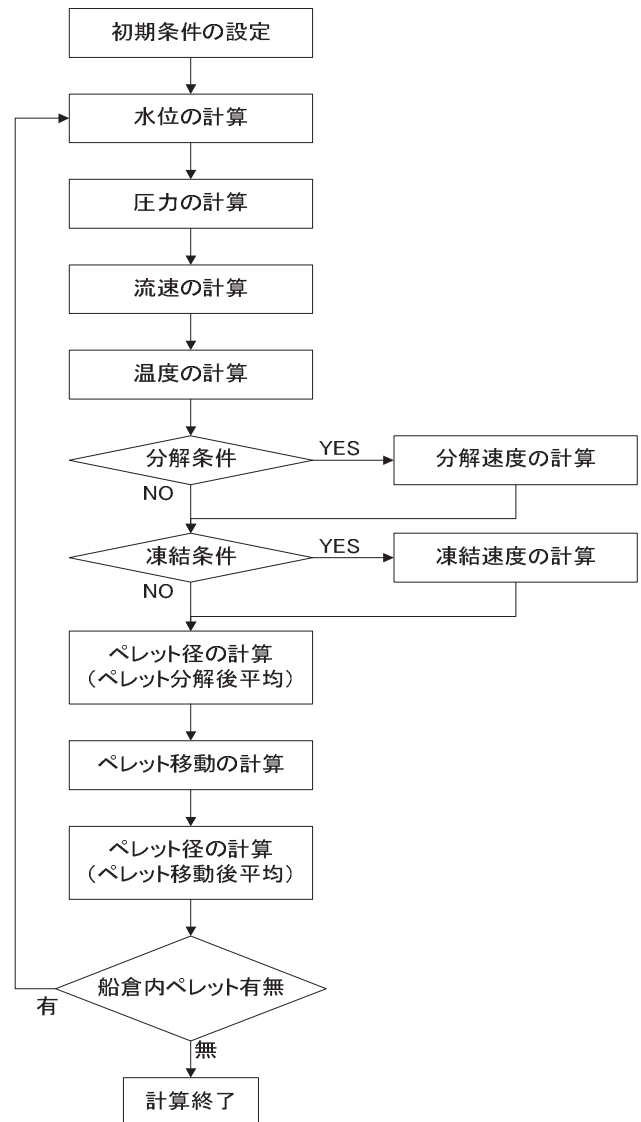


図 6 計算フロー Calculation Flow

表 2 ガス流量の計測値と計算値の比較 Comparison of Test Result and Calculation for Gas Flow Rate

ケース	入口水温 T []	最大ガス 流量計測値 M [m³/h]	ガス流量 計算値 [m³/h]	ガス流量 計算値 [m³/h]
1	12.5	18	61.0	12.5
2	14.6	32	69.5	13.2
3	13.9	55	133.3	28.9

(数値計算アルゴリズム)

計算条件の入力(要素分割, 初期条件の設定等)
境界条件の設定
各要素について, 水位, 圧力, 流速, 温度, ペレット分解,
流水の凍結, 氷の融解及びペレット挙動の計算
とを繰り返し計算

4.2 定式化

本プログラムの基礎式は, 以下に示す6つの式である. 計算により解くべき主な未知数は, x, y, z 方向の流水速度 u, v, w , 液相率, 流水の圧力 P_w , 局所水温 T_w である.

$$\text{連続の式: } \frac{u}{x} + \frac{v}{y} + \frac{w}{z} = \frac{1}{t} \dots\dots(1)$$

運動方程式:

$$\frac{1}{t} \frac{u}{x} = - \frac{1}{w} \frac{P_w}{x} \dots\dots(2)$$

$$\frac{1}{t} \frac{v}{y} = - \frac{1}{w} \frac{P_w}{y} \dots\dots(3)$$

$$\frac{1}{t} \frac{w}{z} = - \frac{1}{w} \frac{P_w}{z} - g \dots\dots(4)$$

ここで, は粒子充填層における圧力損失を表わす実験式(Ergunの式)であり, 以下の式で表わされる.

$$= 150 \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\mu_w U}{w d_p^2} + 1.75 \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon^3} \frac{U \times |U|}{d_p}$$

エネルギー保存式(熱伝導方程式):

$$\frac{T_w}{t} + u \frac{T_w}{x} + v \frac{T_w}{y} + w \frac{T_w}{z} = \frac{w}{w C_{p_w}} \left(\frac{2T_w}{x^2} + \frac{2T_w}{y^2} + \frac{2T_w}{z^2} \right) \dots\dots(5)$$

分解速度式:

$$\frac{1}{t} = \frac{6}{d_{p0} d_p} \frac{Nu_w}{p d E} (T_w - T_p) \dots\dots(6)$$

ここで, $Nu = C Re_p^m$ (ヌセルト数)

$$Re_p = d_p U \frac{w}{\mu_w} \text{ (レイノルズ数)}$$

$$C = 1.3 P^{-0.22}$$

$$m = 0.55 P^{-0.06}$$

NGHペレットの分解速度式は, ペレットサイズ一定の条件で田中等⁷⁾により提案されているが, 式(6)は融解によりペレットが小さくなる影響を考慮して田中等の式を修正したものである. なお, ヌセルト数は本実験結果から推定した実験式である. 式(1)~式(6)の基礎式に使用している変数は, 以下の通りである.

- u, v, w : x, y, z 方向流水速度
- g : 重力加速度
- U : 平均流速 ($U = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$)
- : 液相率
- p : NGHペレット相率
- T_w : 局所水温
- T_p : ペレット表面温度
- d_{p0} : 初期ペレット直径
- d_p : ペレット直径
- P_w : 流水圧力
- P : 静圧
- w : 流水の密度
- p : ペレットの密度
- μ_w : 流水の粘性係数
- p : ペレットの熱伝導率
- w : 流水の熱伝導率
- C_{p_p} : ペレットの比熱容量
- C_{p_w} : 流水の比熱容量
- dE : ペレットの分解潜熱

4.3 計算結果

4.3.1 模型試験と計算結果の比較

シミュレーションプログラムの妥当性を評価するために, 試験結果と数値計算結果の比較を行った.

図7に, ケース1における水温変化及び分解ガス流量(瞬時値)の時系列データを示す. ここで, 以下のように循環水の上流側から上流, 中流, 下流とした.

- 上流温度: 計測点2, 3, 4の平均値(図4参照)
- 中流温度: 計測点5, 6, 7の平均値
- 下流温度: 計測点8, 9, 10の平均値

模型試験において安定したガス化が行われたケース1の水温及び分解ガス流量共に, 試験結果と計算結果は良く一致している. なお, この試験においては, ほとんど凍結現象が観察されず, 計算においても凍結は見られなかった.

一方, 模型底部にトンネルが形成された試験(下部循環水方式)や模型側面に流路が形成された試験(上部スプレー方式)の結果に対しては, 試験結果と計算結果に差異が生じた. この差異の原因として, 計算では流路及びガス化状況が常時一定で理想的な流れであるのに対し, 試験ではトンネルや模型壁面あるいは, 底面近傍の流路形成等により, 不均一な流れになっていたことが考えられる.

4.3.2 実船の計算

模型レベルの計算においては顕著な凍結は発生しなかったが, 冷熱量の大きな実船においては模型試験以上に顕著な凍結現象が見込まれる. そこで, 投入した水がどのような状況で凍結するのかを確認し, 凍結しない状況を探る適切な貨

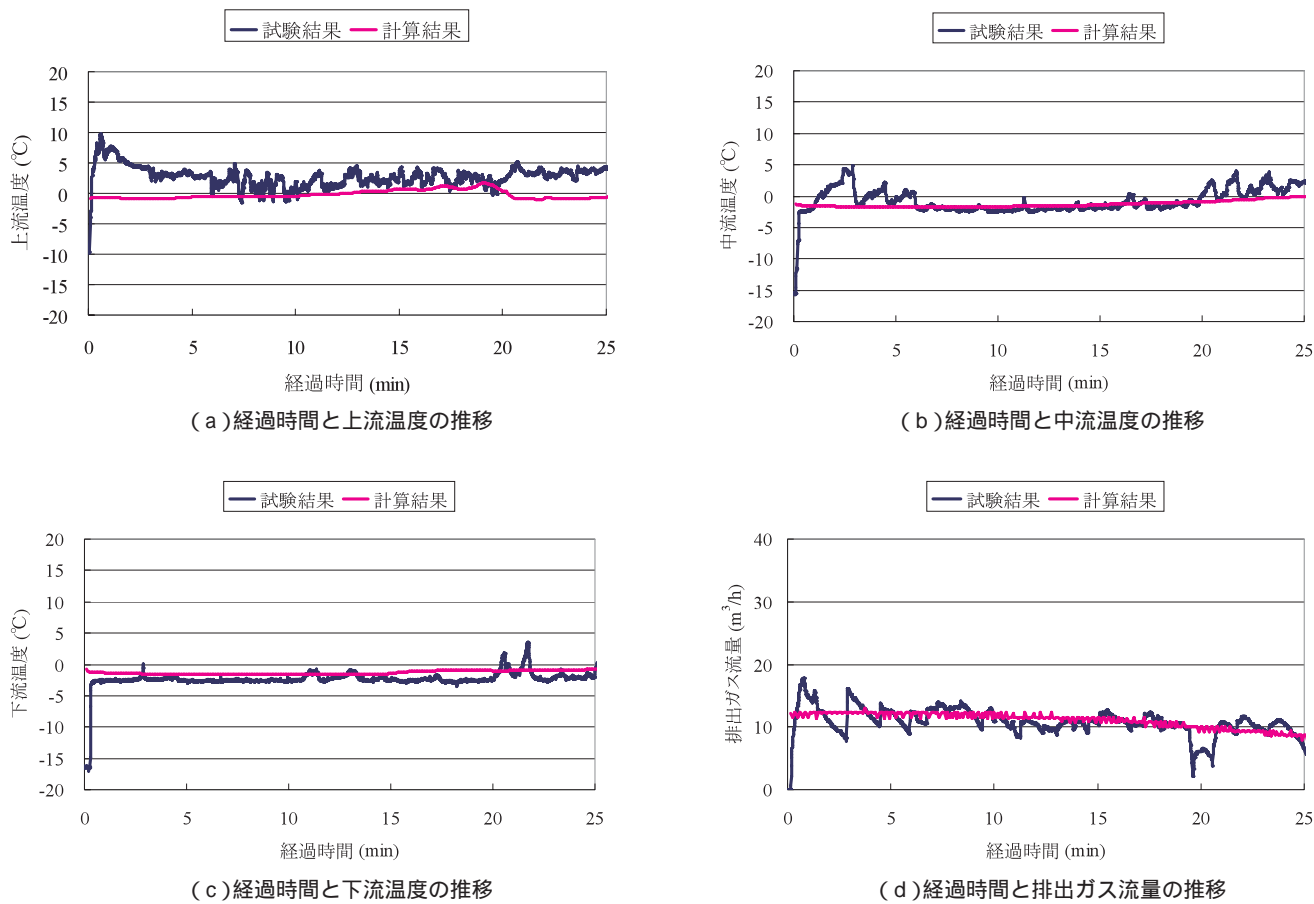


図7 試験と計算結果の比較(ケース1)
Comparison of Test Result and Calculation (Case 1)

物倉内ガス化方式を選定するために、実船におけるガス化シミュレーションを実施した。

以下に主な計算結果を示す。

(1) 下部循環水方式

- ・小流量(ガス化日数10日相当)の場合、急激に水位が上昇することもなく、安定したガス化が行われた。
- ・大流量(ガス化日数2日相当)の場合、大量の循環水が流れてペレットが急激に分解されるが、同時に循環水が凍結し、徐々に空隙率が減少することで水位が異常に上昇した。

(2) 上部スプレー方式

- ・小流量(ガス化日数10日相当)の場合、計算開始後急激に凍結量が増加するが、徐々に融解し、水位が大きく上昇することもなく、安定したガス化が行われた。
- ・大流量(ガス化日数2日相当)の場合、スプレー開始直後に凍結が起こりやすくなるが、別途流路を確保すれば小流量時と同様に安定したガス化が行われた。

4.3.3 シミュレーションの課題

4.3.2 に示した計算結果により、上部スプレー方式単独、または、これに下部循環水方式を組み合わせた方法により実用的なガス化が可能であることが明らかになった。凍結現象についても模擬できるが、実船でのシミュレーションを考え

ると、以下の課題が考えられ、「氷が付着した NGH ペレットの特性」を模擬する必要があると考えられる。

- ・本計算では NGH ペレットと水の熱交換により凍結を模擬しているが、実際は NGH ペレットの周りに氷が付着するため、ペレット表面の伝熱状況が変化する。
- ・凍結は発熱現象であるため、本計算では凍結が進展するほど NGH ペレットのガス化が進行する。これは熱力学上発生し得る現象であるが、NGH ペレットの周りに氷が付着すると、この氷はガス化を阻害する方向に作用すると推測される。

5. リガス船の概念設計

5.1 再ガス化方式の検討

2.1 で示したように、ガスの需要地では 5 MPa の高圧ガスを需要家に供給する計画である。そこで、リガス船のガス化方式として以下の3通りを想定した。

貨物倉内常圧ガス化(ガス化後昇圧)

貨物倉内中圧ガス化(貨物倉内で約 0.4 MPa(G)程度の中圧でガス化後昇圧)

高圧ガス化装置によるガス化(昇圧装置不要)

は装置の CAPEX (投資コスト)を抑えることができるが、昇圧に要する OPEX (オペレーションコスト)が大きく

表3 リガス船ガス化方式のケーススタディ結果
Case Study of Regasification Method for Regasification Carrier

ケース	1	2	3	4	5	6
ガス化方式	貨物倉内 常圧ガス化		貨物倉内 中圧ガス化		高圧ガス化装置 によるガス化	
ガス化の場所	貨物倉				船上	
昇圧コンプレッサ	陸上 (常圧 5MPa)		陸上 (0.4 5MPa)		なし	
荷役日数	2	10	2	10	2	10
輸送船隻数	8	11	8	11	8	11
ライフサイクルコスト比率	109%	116%	100%	114%	116%	104%

なる。一方、については、昇圧コストは不要であるが、高圧ガス化装置及びこの装置にNGHペレットを搬送する機械式荷役装置のCAPEXが大きくなる。

また、ガス化日数として2日と10日を想定した。ガス化日数2日の場合、昇圧用コンプレッサのCAPEXは大きくなるが、船の必要隻数を減らすことができる。一方、ガス化日数10日の場合は、この逆となる。

サプライチェーンの検討条件⁶⁾を以下のように設定し、上記～のガス化方式及びガス化日数をパラメータとしてライフサイクルコストのケーススタディを行った。

(サプライチェーン検討条件)

- ・年間ガス輸送量 : 100万t
- ・輸送距離 : 2600M(海里)
- ・輸送船貨物重量 : 約57000t

この検討条件においては、表3に示すように、20年間のOPEXを含めたライフサイクルコストは、ケース3の「貨物倉内中圧ガス化、ガス化日数2日」が最適となる。

5.2 概念設計

5.1の検討結果より、「貨物倉内中圧ガス化、ガス化日数2日」を採用し、ガス化方式としては、下部循環水方式と上部スプレー方式を組み合わせた方法を想定して、リガス船の概念設計を行った。主要目を表4に、一般配置図を図1に示す。

貨物倉はNGHペレットの他に、バラスト航海時には分解水を搭載する。この分解水をガス供給地に輸送してNGH製造に使用する計画である。また、最初の貨物倉をガス化するときに分解水(循環水)を一時保管するタンクが必要になるため、貨物倉後部に循環水タンクを設置した。

6. 結言

機械式荷役方式船の緊急時ガス化及びリガス船の通常ガス化検討のために、ガス化試験、計算モデル化及びシミュレーションを実施し、凍結現象を含めた実船のガス化システム検討に用いることができる実用的なシミュレーションプログラムを作成した。また、これらの検討結果を用いてリガス船の概念設計を行った。今後は、4.3.3に示した課題を解決するために、模型試験で凍結現象を確認し、この成果を反映してシミュレーションモデルをブラッシュアップすると共に、より安全かつ迅速なガス化システムを構築する計画である。

表4 リガス船の主要目
Principal Particulars of Regasification Carrier

垂線間長[m]	Lpp	250.0
幅[m]	B	42.0
深さ[m]	D	22.5
喫水[m]	d	11.0
貨物積載量[t]	Cargo DW	約57000

参考文献

- 1) J.S. Gudmundsson, et al. : Frozen hydrate for transport of natural gas, Proceedings of 2nd International Conference on Gas Hydrate, (1996), p. 415
- 2) T. Takaoki, et al. : Use of Hydrate Pellets for Transportation of Natural Gas - I, Proceedings of the Fourth International Conference on Gas Hydrates, (2002), p. 982
- 3) T. Nakata, et al. : STUDY OF NATURAL GAS HYDRATE(NGH)CARRIER -, ICGH 6,(2008)
- 4) 中田. ほか : 天然ガスハイドレート(NGH)輸送船の開発, 三井造船技報, 198(2009-10), p. 7
- 5) 吉野. ほか : NGH輸送船の開発, 第1回メタンハイドレート総合シンポジウム,(2010), p. 101
- 6) 野上. ほか : 天然ガスハイドレート(NGH)海上輸送チェーンの事業性調査, 三井造船技報, 198(2009-10), p. 1
- 7) 田中. ほか : 強制対流下におけるハイドレートペレット充填層の熱伝達特性, 第28回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集,(2009)

(問い合わせ先)

船舶・艦艇事業本部 基本設計部
TEL 03-5202-3528 湯浅 伸哉



吉野 玄三郎



中田 崇



湯浅 伸哉



島田 潔



大石 剛央

混合ガスハイドレートペレットのラマン分光による局所構造分析

三 町 博 子* 伊 藤 真 人* 高 橋 正 浩*
 岩 崎 徹** 佐 野 健 一*

Analysis of Local Structure of Mixed Gas Hydrate Pellets by Raman Spectroscopy

Hiroko MIMACHI, Masato ITO, Masahiro TAKAHASHI, Toru IWASAKI, Ken'ichi SANO

It is necessary to establish the analytical method of investigating into the hydrate quality for the new gas transport system using natural gas hydrate(NGH)pellets.

In this report, distribution of crystal structure and gas composition in local parts of the mixed hydrate pellets of simulated natural gas composed of methane, ethane and propane are revealed by means of Raman mapping. Crystal structure of pellet formed at 281 K has proved to be structure II on the basis of the proportion of occupied cages: small cage: large cage = 2 : 1. Meanwhile, the pellet formed at 278 K shows some spread toward the straight line representing structure I ratio, which suggests that both structure I and structure II exist in this sample. Furthermore, the pellet formed at 281 K has been more stable than that formed at 278 K under 253 K storage condition. It indicates that the former has higher quality than the latter.

天然ガスハイドレート(NGH)ペレットによる天然ガス輸送システムの実現に向け、ハイドレート品質の把握に必要な分析法は、確立すべき重要技術の一つである。

本報では、天然ガスを模擬したメタン、エタン及びプロパン混合ガスからハイドレートペレットを製造し、ラマンマッピング測定によりハイドレートの局所結晶構造と局所ガス組成を明らかにした。その結果、生成温度 281 K では包蔵ガスの小(S)ケージと大(L)ケージの存在比が 2 対 1 であることから結晶構造 II 型のハイドレートが生成しており、生成温度 278 K では小(S)ケージと中(M)ケージの比が構造 I 型に近づく部位も見られたことから 構造 I 型と II 型が混在していることが分かった。また、253 K の貯蔵では、281 K で生成したペレットの方が分解は少なく、より高品質なペレットであることが示された。

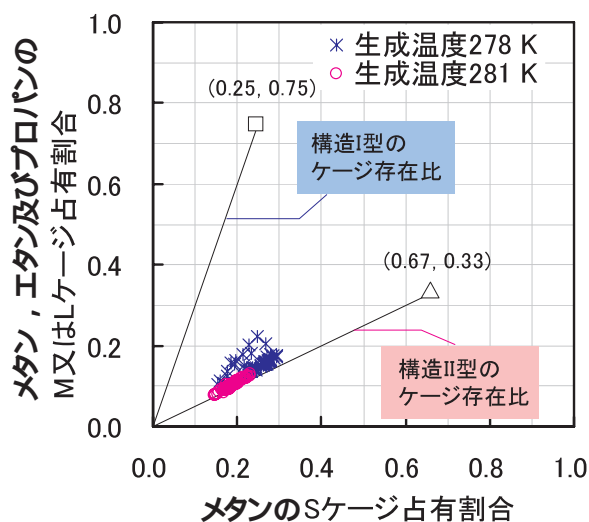


図1 混合ガスハイドレートのケージ占有性
 Proportion of Occupied Cages about Mixed Gas Hydrates

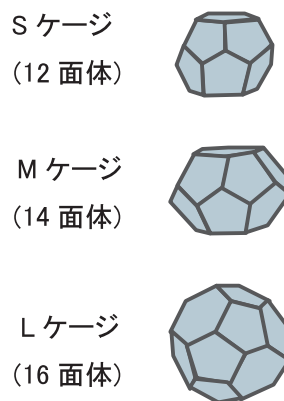


図2 構造 I 型と II 型の結晶を構成するケージのモデル
 Cage Models Constructing Crystal Unit Structure and

* 技術本部 千葉技術開発センター

** 技術本部 技術総括部

1. はじめに

天然ガスハイドレート(Natural Gas Hydrate: NGH)は、メタン、エタン、プロパンなどの天然ガス分子が、水分子によって形成された多面体のケージに取り込まれた包接水和物であり、優れたガス包蔵性を持つと共に、ペレット状のNGHは自己保存性によって温和な条件でガスを輸送・貯蔵できることを特長とする。この特性を利用して、ペレット状のNGHを新しいガスの輸送・貯蔵媒体として用いる天然ガス輸送システムの開発が行われている¹⁾。

ここで、自己保存性とは、氷点下の温度領域においてハイドレートの分解する圧力条件であっても分解が抑制され、準安定にハイドレートとして存在する特性である。例えば、大気圧下ではメタンハイドレートは193 K以下で安定であるが、メタンハイドレートペレットは253 K前後で準安定に存在する。しかし、分解挙動は、貯蔵条件によって異なることはもちろん、ハイドレートの原料となるガスや水に含まれる成分によっても変化する²⁾⁻⁴⁾。

一成分のガスを包蔵するハイドレートの生成条件や結晶構造などは既によく調べられているが、NGHのような複数成分のガスを包蔵するハイドレートに関する知見は、未だ十分ではない。また、NGH製造プロセスにおいては、NGHの生成圧力における生成分解平衡温度と生成温度との差である過冷却度を大きく取る方が生成速度を速めるために有利である⁵⁾。しかし、この過冷却度がNGHの微細構造や貯蔵性にどのような影響を与えるかは明らかになっていない。

そこで、天然ガスを模擬したメタン、エタン及びプロパンから成る混合ガスを用い、過冷却度の異なる生成条件においてハイドレートペレットを製造し、ラマン分光分析及び貯蔵試験を行った。更に、その分析から得られたガスの分布状態、結晶構造及び貯蔵中の分解特性との関連を検討した。

2. 円柱状ハイドレートペレットサンプルの作製

ハイドレートペレットは、図3に示す半回分式製造装置で以下のとおり作製した。ステンレス鋼製の容量約1 lの反応器に精製水(KOGA Chemical Mfg Co., Ltd.)約0.7 lを入れ、メタンガスを供給して4.5 MPaまで加圧後、メタン、エタン及びプロパンの組成比が90対6対4の混合ガスを供給

して5.4 MPaまで加圧した。反応器内を278 K又は281 Kに冷却して攪拌し、ハイドレートスラリーを生成した。ハイドレートの生成に伴い圧力が低下するため、5.4 MPaを維持するように、混合ガスを適宜追加した。生成したスラリーをペレタイザーに送り、φ33 mm、長さ約40 mm、重量約30 gの混合ガスハイドレートの円柱状ペレットを作製した。続いて、ペレットを253 Kに冷却後、大気圧に減圧して取り出した。円柱状ペレットサンプルを写真1に示す。

3. 混合ガスハイドレートペレットのラマン分光分析

3.1 ハイドレートの結晶構造

ラマン分光分析では、ケージを占有するガスの種類を同定することができる。ハイドレートを構成するケージは、表1に示すとおりである。5角形12面からなる12面体(5¹²)をSケージ、5角形12面と6角形2面からなる14面体(5¹²6²)をMケージ、5角形12面と6角形4面からなる16面体(5¹²6⁴)をLケージと呼び、これらで構成された結晶構造には、構造I型、構造II型がある。前者は2個のSケージと6個のMケージから構成され、後者は16個のSケージと8個のLケージで構成されているため、それぞれの単位格子は取り込めるガスの種類や数が異なる。例えば、メタン(CH₄)はS、M及びLのケージを占有するが、エタン(C₂H₆)はMとLケージを、プロパン(C₃H₈)はLケージを占有する。なお、エタンは数十MPa以上の高圧条件下ではSケージも占有するとの報告があるが、本報ではハイドレート製造圧力が低いいため、エタン及びプロパンはSケージを占有しないと仮定した^{6),7)}。



写真1 メタン、エタン、プロパン混合ガスハイドレートの円柱状ペレットサンプル
Cylindrical Pellet Sample of CH₄-C₂H₆-C₃H₈ Mixed Gas Hydrate

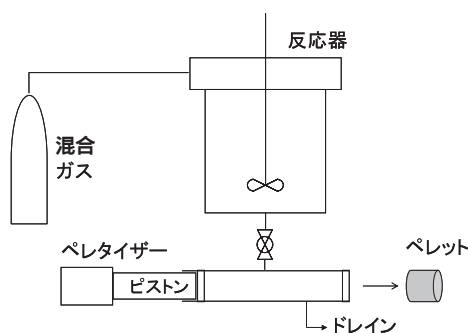


図3 半回分式ハイドレートペレット製造装置
Scheme of the Formation Equipment of Semibatch System for Hydrate Pellet

表1 構造I型、構造II型を構成するケージ
Cages of Structure-I and -II

構造	I型		II型	
ケージ	5 ¹²	5 ¹² 6 ²	5 ¹²	5 ¹² 6 ⁴
ケージの名称	S	M	S	L
単位格子を構成するケージの数	2	6	16	8
ケージ内部の空隙直径 (nm)	0.51	0.58	0.50	0.67
占有するガス	CH ₄	CH ₄ C ₂ H ₆	CH ₄	CH ₄ C ₂ H ₆ C ₃ H ₈

3.2 顕微ラマン分光による局所ガス組成の分析

日本分光株式会社製の顕微レーザーラマン分光光度計 NRS-1000 によりラマン分光分析を行った。光源は、波長 514.5 nm、発振出力 35 mW の Ar レーザである。分析のため、図 4 のように円柱状ペレットを粒径 1 ~ 2 mm の大きさに削ってサンプルを調整した。また、分解を防ぐため、液体窒素流通による冷却ステージを用いて計測中の温度を 183 K に保持した。1 サンプルにつき、XY 平面上の 8 μm × 22 μm 四方をステップ幅 2 μm でスキャンし、60 点のデータ取得を基本として、更に広い範囲の測定も行い、ガス組成の分布を解析した。なお、観察サンプルの方向は、円柱状ペレットの元の方向とは対応しない。

図 5 と図 6 は、ペレットサンプルの C-H 伸縮振動モード領域のラマン分光スペクトルである。生成温度が 278 K と 281 K のハイドレートサンプルは、共に六つのピークが観測された。これらはハイドレートにメタン、エタン及びプロパンが取り込まれていることを示しており、各々のピークにおけるガスの種類と包蔵されたケージは図 5 に示すとおりである^{8),9)}。

また、278 K で生成したサンプルでは、図 6 に示すように計測箇所によって変化が見られた。Y が零の原点では図 5 と同様の六つのピークが見られたが、Y が 22 μm 以上の位置では最も大きな二つのピークの強度が逆転した。そして、同サンプルの別の部位からは、図 6 の a) のように純粋なメタンハイドレートの存在を示すスペクトルが得られた¹⁰⁾。278 K においては、メタンガス分圧がこの温度におけるメタンハイドレートの平衡圧力より高いため、部分的にメタンハイドレートの生成が起こったと考えられる。

3.3 混合ガスハイドレートペレットの結晶構造

2900 cm⁻¹ 付近に複数の C-H 伸縮振動によるピークを持つメタン、エタン及びプロパンの単一組成ハイドレートのラマ

ンシフトと強度を基に、3.2 で得られた混合ガスハイドレートのラマンスペクトルをローレンツ関数でカーブフィッティングして分離した。それらのピーク面積と、組成既知の混合ガスハイドレートのピーク面積との直接比較によって各ガスの各ケージの占有量を求めた¹¹⁾。表 1 に示したように、結晶構造によって、ケージの種類や数が異なるため、ガスに占有された各ケージの比率から、結晶構造を推定することができる。

検討結果を図 1 に示す。同図では、単位格子を構成するケージ全体を 1 として、横軸は S ケージをメタンが占有している割合、縦軸は L ケージ又は M ケージをメタン、エタン及びプロパンのいずれかが占有している割合とした。すなわち 構造 I 型は S ケージと M ケージの比は 2 対 6 であるため、全てのケージをガスが占有している場合、図上では四角形で表した点(0.25, 0.75)に位置する。同様に 構造 II 型の場合は、S ケージと L ケージの比は 16 対 8 であるため、三角形で表した点(0.67, 0.33)になる。また、原点とこれらの点を結んだ直線上にデータが位置するときは、各々の構造のケージ存在比と同じ割合で各ケージが占有されていることを示す。

281 K で生成したサンプルは、傾き 0.5 の直線に沿っており、構造 II 型と同じケージ存在比でハイドレートが生成したことが確認された。すなわち 構造 II 型のみからなるハイドレートを生成したと言える。なお、全てのケージが占有されている場合に比べて値が小さいが、これは必ずしも空のケージを意味するものではなく、共存する氷のラマン散乱光による影響によるものと考えられる。一方、278 K で生成したサンプルでは、傾き 3、すなわち構造 I 型を示す直線に向かって広がりが見られ、構造 II 型に少量の構造 I 型が混在していることが示唆された。

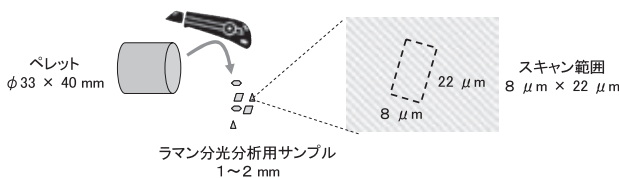


図 4 ラマン分光分析サンプルの調製
Sample Preparation for Raman Spectroscopic Analysis

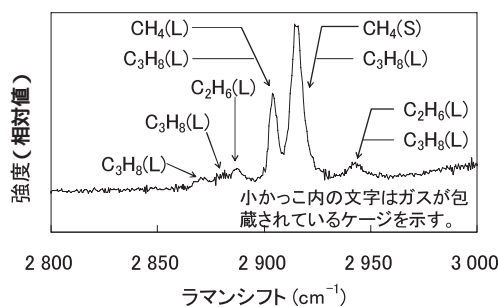


図 5 281 K で生成した混合ガスハイドレートの C-H 伸縮振動モードラマンスペクトル
Representative Raman Spectra for C-H Stretching Mode of Mixed Gas Hydrate Formed at 281 K

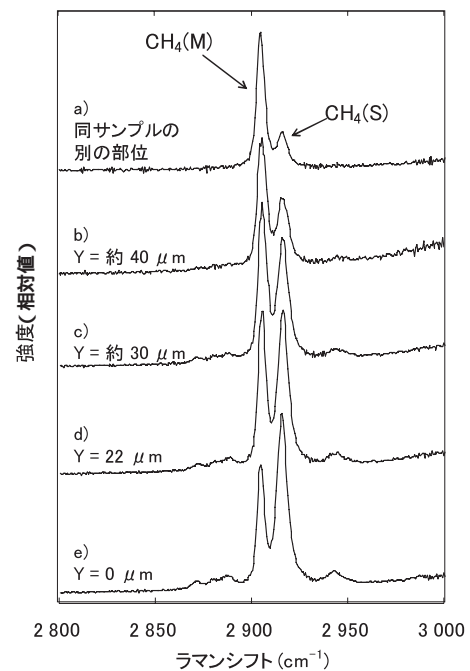


図 6 278 K で生成した混合ガスハイドレートの C-H 伸縮振動モードラマンスペクトル
Representative Raman Spectra for C-H Stretching Mode of Mixed Gas Hydrate Formed at 278 K

3.4 局所ガス組成分布

3.3 で得られた各ガスのケージ占有量から、ガス組成を算出してマッピングすると、**図 7 ~ 図 12** のように表される。特に、**図 7** では、 $Y = 20 \mu\text{m}$ に近づくにつれて、メタン濃度が高まる傾向が顕著に見られた。

これらの図より、ラマン分光分析から局所的なガス組成分布が得られ、ミクロな視点でサンプルの均質性を把握することが可能になった。

4. 分解特性

2. に従って作製したペレットサンプルの大気圧下、253 K における分解計測結果を**表 2** に示す。計測開始時のガス包蔵量を 100% として、任意時間ごとの重量計測によって、分解量を把握した¹²⁾。計測時間は、天然ガス輸送システムで

の貯蔵期間を考慮して 14 日とした。

281 K で生成したサンプルは計測 1 日後には約 0.5% の包蔵ガスが減少したが、それ以降は減少が見られず、2 週間後も同値であった。一方、278 K で生成したサンプルは、計測期間中包蔵ガスが減少し続け、2 週間後には 1% 以上のガスが減少した。また、その後もガスが減少を続ける傾向が見られた。したがって、貯蔵期間が 1 週間以上の長期に亘る場合、より過冷却度の小さい生成温度にする方が貯蔵性の良いサンプルが得られることが分かった。

ラマン分光分析結果より、278 K で生成したサンプルは構造 I 型と構造 II 型が混在して分解が継続するが、281 K で生成したサンプルは構造 II 型で構成され、より安定性に優れていると言える。

構造 I 型と構造 II 型が混合している場合、構造 I 型のメタ

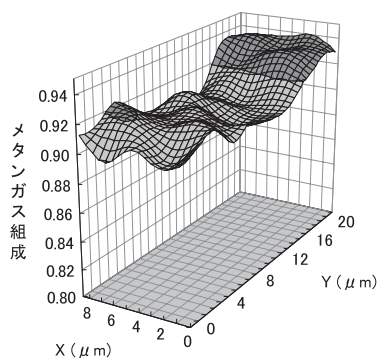


図 7 278 K で生成した混合ガスハイドレートペレットのメタン分布
Methane Composition Map of Mixed Gas Hydrate Pellet formed at 278 K

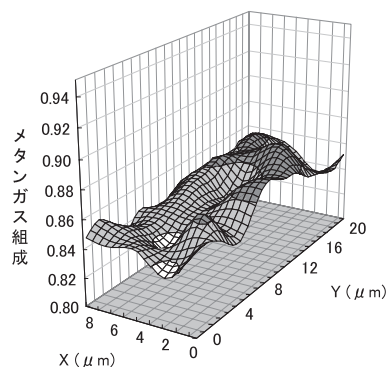


図 8 281 K で生成した混合ガスハイドレートペレットのメタン分布
Methane Composition Map of Mixed Gas Hydrate Pellet formed at 281 K

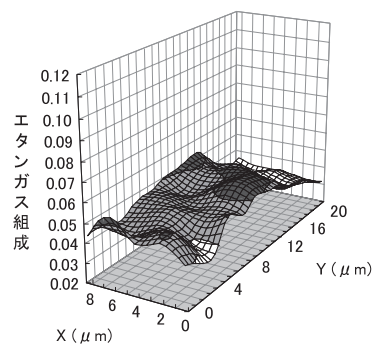


図 9 278 K で生成した混合ガスハイドレートペレットのエタン分布
Ethane Composition Map of Mixed Gas Hydrate Pellet formed at 278 K

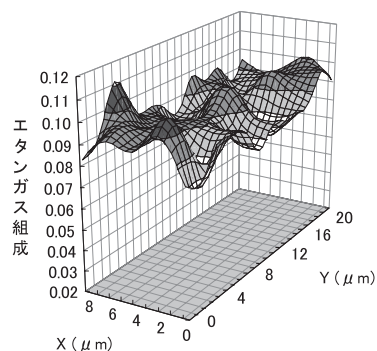


図 10 281 K で生成した混合ガスハイドレートペレットのエタン分布
Ethane Composition Map of Mixed Gas Hydrate Pellet formed at 281 K

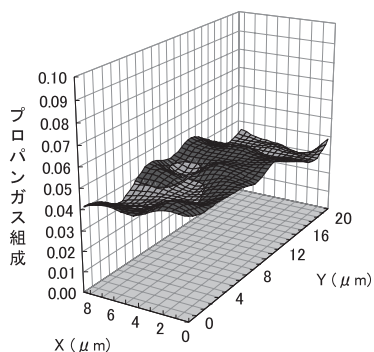


図 11 278 K で生成した混合ガスハイドレートペレットのプロパン分布
Propane Composition Map of Mixed Gas Hydrate Pellet formed at 278 K

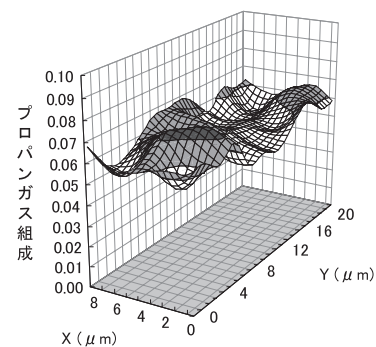


図 12 281 K で生成した混合ガスハイドレートペレットのプロパン分布
Propane Composition Map of Mixed Gas Hydrate Pellet formed at 281 K

表2 混合ガスハイドレートペレットの大気圧下 253 K における分解挙動
Decomposition Behavior at 253 K of Mixed Gas Hydrate Pellets

	生成温度 278 K	生成温度 281 K
0 ~ 1 日後までの 平均分解速度	計測限界以下	0.51% / d
1 ~ 14 日後までの 平均分解速度	0.08% / d	計測限界以下
0 ~ 14 日後までの 平均分解速度	0.08% / d	0.04% / d
14 日後の ガス残存率	98.89%	99.49%

ンハイドレートと構造 II 型の混合ガスハイドレートの混合物と仮定し, Sloan らの方法(平衡シミュレーションソフト CSMHYD)¹³⁾を用いて計算すると, 構造 I 型ハイドレートの 253 K における平衡圧力は 1.4 MPa であるのに対し, 構造 II 型ハイドレート(例えば包蔵ガスのメタン, エタン及びプロパンの比が 84 対 10 対 6)ではそれよりも 0.3 MPa 程度低い。このように, 構造 II 型ハイドレートは平衡圧力と貯蔵条件の圧力との差が構造 I 型に比べて小さい。したがって, 構造 II 型のみで構成される場合に分解しにくい要因は, 第一義的には, その圧力差に起因する分解の推進力が小さいことによると考えられるが, その他の要因もあるのではないかと検討を進めている。

5. おわりに

メタン, エタン及びプロパンからなる混合ガスを用いてハイドレートを生成し, ラマン分光分析を行った結果, 生成温度 281 K の場合は構造 II 型の結晶となり, 278 K の場合は構造 I 型と構造 II 型が混在することが分かった。また, 前者を大気圧下 253 K で貯蔵すると, 1 日後から 2 週間の間, 分解が進まず, 後者に比べて安定であった。すなわち, 過冷却度の小さい 281 K で生成する方がハイドレートの安定性は高く, その要因の一つとして結晶全体が構造 II 型のみから構成され, 均質であることが挙げられる。同時に, ラマン分光分析によって, ガス組成の均質性を μm オーダで把握することが可能となった。このように, 微細構造からペレットの安定性や均質性を評価できる技術は, NGH ペレットによる天然ガス輸送システムの開発に大きく寄与し, 今後の事業化を支えるものとなる。

最後に, 本研究を進めるに当たり, ラマン分光分析装置による計測・解析・評価について多大なるご指導と, 全般に亘る有益なご助言を頂いた大阪大学の太垣一成教授, 佐藤博准教授, 菅原武助教に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 松尾 . ほか : NGH PDU の運転研究(第 1 報)
- NGH による天然ガス輸送システムの実証 -, 三井造船技報, 181(2004-2), p. 50

- 2) H. Sato, et al. : Preservation of Methane Hydrates Prepared from Dilute Electrolyte Solutions, Int. J. Chem. Eng., Article ID 843274,(2009) p. 1
- 3) G. Zhang, et al. : Ultra-stability of gas hydrates at 1 atm and 268.2 K, Chem. Eng. Sci., 63(2008) p. 2066
- 4) S. Takeya, et al. : Dissociation Behavior of Clathrate Hydrates to Ice and Dependence on Guest Molecules, Angew. Chem. Int. Ed., 47(2008), p. 1276
- 5) 加藤 . ほか : 天然ガスハイドレートの生成特性に関する実験的研究, 三井造船技報, 175(2002-2), p. 1
- 6) K. Morita, et al. : Structure and Stability of Ethane Hydrate Crystal, Fluid Phase Equilibria. 169(2000) p. 167
- 7) E. D. Sloan Jr. : Clathrate Hydrates of Natural Gases, (1998), p. 53, Marcel Dekker, Inc.
- 8) S. Hashimoto, et al. : Isothermal Phase Equilibria for Methane + Ethane + Water Ternary System Containing Gas Hydrates, The Open Thermodynamics Journal, 2(2008) p. 100
- 9) T. Uchida, et al. : Two-Step Formation of Methane-Propane Mixed Gas Hydrates in a Batch-Type Reactor, AIChE J., 50(2004) p. 518
- 10) A. K. Sum, et al. : Measurement of Clathrate Hydrates via Raman Spectroscopy, J. Phys. Chem. B, 101(1997) p. 7371
- 11) T. Makino, et al. : Isothermal Phase Equilibria and Cage Occupancies for CH_4+CHF_3 Mixed-Gas Hydrate System, The Open Thermodynamics Journal, 2(2008) p. 17
- 12) 岩崎 . ほか : 天然ガスハイドレートペレットの自己保存性に関する研究, 三井造船技報, 187(2006-2), p. 15
- 13) E. D. Sloan Jr. : Clathrate Hydrates of Natural Gases, (1998), p. 602, Marcel Dekker, Inc.

[問い合わせ先]

技術本部 千葉技術開発センター
TEL 0436 - 41 - 1930 三町 博子



三町 博子



伊藤 真人



高橋 正浩



岩崎 徹



佐野 健一

CO₂ 分離回収へのハイドレート技術の適用

宮川 満* 松尾和芳* 櫻井 聡一郎* 酒井正和**

Application of Gas Hydrate Technology to CO₂ Separation and Capture

Mitsuru MIYAGAWA, Kazuyoshi MATSUO, Souichiro SAKURAI, Masakazu SAKAI

Carbon dioxide (CO₂) separation and capture technology is one of the effective methods to reduce CO₂ emissions. Mitui Engineering & Shipbuilding Co.,Ltd. is now developing an inovative system of transport and storage of natural gas in a form of gas hydrate. In this paper, we report on an application possibility of the gas hydrate technology to CO₂ separation and capture from shifted syngas in IGCC(Integrated coal gasification Combined Cycle)process.

We studied an optimizing process combined hydrate formation and CO₂ dissolution by simulation considering energy recovery. The simulation results has indicated that the total energy consumption including re-compression energy of recovery CO₂ is 170 kWh/ton-CO₂ in case of 90% CO₂ recovery rate from raw gas witch consists of hydrogen and CO₂. This result has shown that our process can separate and recover CO₂ with lower cost than existing technologies. Furthermore, we confirmed the fundamental principle of CO₂ separation and the effectiveness of the above combined process, by carrying out the experiments using a continuous-type test apparatus with a mixed gas.

温室効果ガスである二酸化炭素(CO₂)を削減する有力な手段の一つにCO₂分離回収・貯留技術がある。三井造船では、ガスハイドレートによる天然ガスの輸送・貯蔵システムの開発を行っており、本報では、このハイドレート技術の活用として石炭ガス化複合発電(IGCC)設備中間工程排ガスの分離回収プロセスへの適用可能性について報告する。

ハイドレート生成とCO₂溶解を組み合わせたプロセスの最適化を、動力回収を含めたシミュレーションにより検討した。その結果、H₂とCO₂の混合ガスである対象排ガスからのCO₂回収率を90%とした場合に、回収ガスの再昇圧動力を含めた全所要エネルギーは170 kWh/t - CO₂で、従来技術よりも低コストでCO₂の分離回収が可能なが分かった。更に、連続式試験装置にて模擬ガスを用いたCO₂分離回収試験を行い、ハイドレートによるCO₂分離回収の基本原理及びCO₂溶解との組合せプロセスの有効性を確認した。

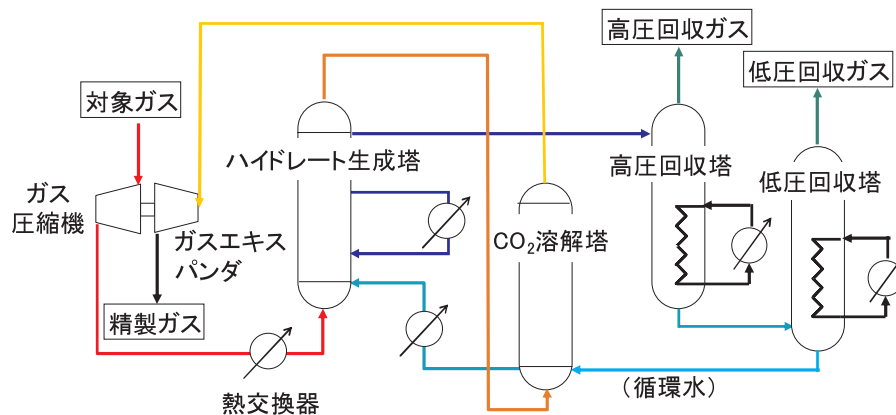


図1 石炭ガス化複合発電(IGCC)設備向けCO₂分離回収プロセスの一例
Example of CO₂ Separation Process flow for IGCC

* 技術本部 千葉技術開発センター

** 経営企画部

1. はじめに

近年、開発途上国の経済成長に伴うエネルギー需要の増大により温室効果ガスの一つである二酸化炭素(CO₂)排出量が増大し、気候変動に対する脅威に注目が集まっている。CO₂排出量の大幅な削減のためには、電力部門での脱炭素化が極めて重要であり、特にCO₂排出量が多い化石燃料による発電にCO₂回収・貯留(Carbon Dioxide Capture and Storage: CCS)技術を導入しなければならないとされている¹⁾。

三井造船では、ガスハイドレートによる天然ガスの輸送・貯蔵システムの開発を行っている^{2),3)}。現在、そのハイドレート技術を活用し、ハイドレートによるCO₂分離回収技術を開発中である。本報では、ハイドレートによるCO₂分離回収プロセスの石炭ガス化複合発電(Integrated Coal Gasification Combined Cycle: IGCC)への適用可能性について報告する。対象としたIGCCは、石炭をガス化し製造した水素(H₂)と一酸化炭素(CO)から成るガス化炉出口ガスに水蒸気を加え、シフト反応を行うことで得たH₂とCO₂の混合ガスからCO₂を分離し、残ったH₂ガスを燃焼させ発電する設備とした。

このCO₂分離にハイドレート技術を適用し、シミュレーションを中心とした検討を行った。

2. ハイドレートによるCO₂分離回収技術

2.1 基本原理

ガスハイドレートはガス分子が水分子に取り込まれた包接水和物であり、高いガス包蔵性を有する。それぞれのガスはハイドレートの生成しやすさに差があるため、この差を利用してガス分離ができる。図2に各種ガスのハイドレートにおける相平衡図を示す。CO₂は窒素(N₂)やH₂に比べると容易にハイドレートを生成する。例えば、CO₂は4 MPaの条件下では圧力約2 MPaでハイドレートを生成するが、N₂は4 MPaの条件下でハイドレートを生成するには、約24 MPaの圧力が必要となる。すなわち、2 MPa、4 MPaの条件下では、CO₂はハイドレートを生成するが、N₂はハイドレートを生成しないことになる。ただし、実際にはハイドレートを生成するガスが混在するガス系では、各ガスの分圧によって、混合ガスハイドレートが生成するため、単ガス成分の相平衡条件が再現されるわけではない。

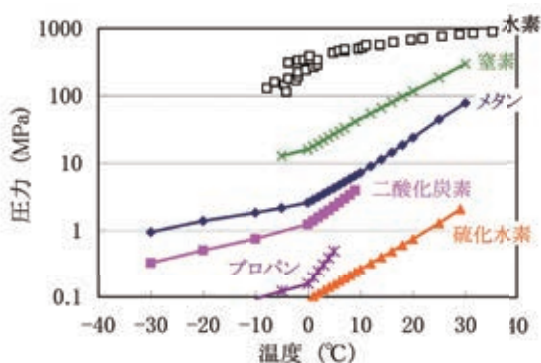


図2 各種ガスのハイドレート相平衡図
Phase Equilibrium of Gases

一方、H₂は、氷点温度付近において100～360 MPaの圧力範囲でハイドレートとして存在することが報告されており⁴⁾、H₂とCO₂の混合ガス系においてはハイドレートの生成しやすさの差が非常に大きく、他の混合ガス系に比べて、容易にCO₂を分離回収することができる。

2.2 対象ガスの選定

ハイドレートによるCO₂分離回収技術を混合ガスに適用する場合には、CO₂以外のガスがハイドレートを生成しにくいガスで構成されていること、対象ガス中のCO₂ガス分圧が高いことが、所要エネルギーの観点から重要な要素である。

表1にCCSの適用が検討されている様々なCO₂の大規模排出源を示す⁵⁾。対象ガスに含まれるCO₂以外のガス成分の視点では、N₂との混合ガス系となる火力発電所、セメント産業、高炉ガス、又はH₂との混合ガス系となるIGCCの燃焼前ガス(シフト出口)への適用が有利である。一方、対象ガス中のCO₂分圧の視点では、高圧の天然ガス、IGCCの燃焼前ガス(シフト出口)が有利となる。本報では、相平衡図上ハイドレートの生成のしやすさに大きな差があるH₂とCO₂の混合ガスであり、かつ、CO₂分圧の高いIGCC燃焼前ガス(シフト出口)を対象にハイドレートによる分離回収技術を検討した。

2.3 利点

ハイドレートによるCO₂分離回収技術には、以下の利点がある。

水と電気のみを用いた分離回収技術であるため、環境に優しく、特別な薬品や消耗品を必要としない。

CO₂分圧の高い混合ガスにおいて、他の既存技術に比べて、所要エネルギーが少ない。特に、パイプライン輸送などを考慮して高い圧力のCO₂ガスを回収したい場合には、トータル所要エネルギーの低減が可能である。

3. CO₂分離回収プロセスの検討

3.1 概要

CO₂の水への溶解度が高い特性を利用し、高いCO₂回収率の達成と所要エネルギーの削減を目的として、ハイドレート生成塔とCO₂を溶解させるCO₂溶解塔を組み合わせたハイブリッドプロセスについて検討した。ハイドレートの生成においては水を循環利用するため、同じく水を使用するCO₂溶解塔の追加は容易である。図1にIGCC向けCO₂分離回収プロセスの一例を示し、以下に、そのプロセスの主要工程について示す。

表1 CO₂の大規模排出源の例
Example of Large CO₂ Source

混合ガス系	排出源	CO ₂ 濃度 (vol.%)	ガス圧力 (MPa)	CO ₂ 分圧 (MPa)
N ₂ -CO ₂	火力発電所	7～14	0.1	0.007～0.014
N ₂ -CO ₂	セメント産業	14～33	0.1	0.014～0.033
N ₂ -CO ₂	高炉ガス	20	0.2～0.3	0.040～0.060
H ₂ -CO ₂	IGCC (シフト出口)	30～40	3～4	0.9～1.6
CH ₄ -CO ₂	天然ガス	2～65	0.9～8	0.05～4.4

(出典) IPCC 特別レポート 2005 より作成

3.1.1 圧縮工程

対象ガスをガス圧縮機でハイドレートの生成に必要な圧力まで加圧する。その後、加圧したガスをガス冷却熱交換器で、ハイドレートの生成に必要な温度にまで冷却する。

3.1.2 CO₂ 分離工程

加圧・冷却された対象ガスを、ハイドレート生成塔に吹き込む。ハイドレート生成塔では、冷却された循環水と吹き込まれたガスが効率よく接触し、ガス中のCO₂の半分程度がCO₂ハイドレートとして生成される。ハイドレートに取り込まれなかったCO₂は、CO₂溶解塔で循環水に溶解する。ハイドレート生成塔に供給される循環水には、ハイドレートに取り込まれなかったCO₂の大部分が先に溶解している。CO₂ハイドレートが生成するとき、及びCO₂が溶解するときに、生成熱及び溶解熱が発生する。このため、ハイドレート生成塔では循環水冷却器によりハイドレート生成塔の除熱を行ない、CO₂溶解塔でCO₂溶解により昇温した循環水は、ハイドレート生成塔への戻り循環ラインで冷却される。CO₂が分離され、H₂濃度が高められた対象ガスは更にCO₂溶解塔でCO₂が分離され、精製ガスとなる。得られた精製ガスは、高い圧力エネルギーをもっているため、ガスエキスパンダにより動力を回収する。

3.1.3 CO₂ 回収工程

ハイドレート生成塔で生成されたCO₂ハイドレートを含んだ水スラリーは、高圧回収塔に送られ、ハイドレートが分解する圧力まで下げることで、スラリー中のCO₂ハイドレートをCO₂と水に分解(再ガス化)する。このCO₂ハイドレートが分解するときに入熱が必要となるが、10の熱源で十分なため、海水等を利用することができ、温熱源設備は不要である。

また、ハイドレート分解後の循環水は溶解したCO₂を含有しているため、この循環水は、低圧回収塔に送られ、更に減圧することで溶解したCO₂を放散させてCO₂ガスを回収する。CO₂が水から放散するために必要な熱源は、CO₂ハイドレートの分解に必要な熱源と同程度で十分であるため、同様に温熱源設備は不要である。CO₂放散後の水は、CO₂溶解塔で再利用するために循環する。

3.1.4 CO₂ 再昇圧工程

高圧回収塔及び低圧回収塔で回収されたCO₂ガスは、CO₂ガス圧縮機でパイプライン輸送に必要な圧力まで昇圧される。

3.2 プロセスの操作条件

表2に対象ガスの組成や回収CO₂ガスの操作条件を示す。対象ガスとしたIGCCの燃焼前ガス(シフト出口)の操作条件は、NETLの報告にあるShell炉シフト反応後(シフト出口)の操作条件を参考にして決定した⁶⁾。

3.2.1 対象ガス組成

ガス化炉出口ガスに水蒸気を加えることで、シフト反応(CO+H₂O → CO₂+H₂)が起こり、対象ガス中のCO₂濃度は約40%(H₂濃度は約60%)まで増加する。なお、Shell炉の対象ガス中には硫化水素(H₂S)が0.5%含まれているため、NETLの報告ケースではCO₂とH₂Sを分離して回収する条件で試算が行われているが、本報では単純化のため、対象ガス中のH₂Sはゼロとして検討を行った。

3.2.2 回収CO₂ガスの操作条件

帯水層等の貯留場所にパイプラインで輸送することを想定して、対象ガスから回収したCO₂を圧縮機を用いて7.2MPaまで再昇圧する。

3.2.3 精製ガス操作条件

対象ガスからCO₂を回収した後の精製ガスは、3.2MPaの条件で回収する。

3.3 シミュレーションによるプロセスの検討

図3にプロセスの検討モデルの概念図を、表3にプロセスの検討条件を示す。ハイドレート生成塔でのCO₂分離については、スローンらの方法により計算(以下、平衡計算と記す)し、検討を行った⁷⁾。なお、平衡計算による推定値と実測値との相関は、天然ガスハイドレートでの結果によりある程度把握できている⁸⁾。

CO₂溶解塔でのCO₂分離については、化学プロセスシミュレータ Aspen Plus の UNIFAC 活量係数モデルを用い、Henry 則を適用したガス溶解塔のモデルを作成して検討した。

3.4 検討結果

3.4.1 CO₂ 回収率

図4に平衡計算によるハイドレート生成塔での気相ガス組成の変化を、表4に最終的に平衡状態に達したときの生成塔での気相ガス組成とハイドレート包蔵ガス組成を示す。対象ガス中の初期CO₂濃度は38.0%であるが、ハイドレートが生成して気相のCO₂がハイドレートに取り込まれるため、22.9%まで低下する。この結果から、ハイドレート生成塔でのCO₂回収率は約52%となる。また、ハイドレート包蔵ガス中のCO₂濃度は97.6%であった。

図5に、低圧回収塔の操作圧力をパラメーターとして、ハ

表2 プロセスの操作条件
Process Conditions

対象ガス組成		
H ₂	vol.%	55.8
CO ₂	vol.%	38.0
CO	vol.%	1.7
CH ₄	vol.%	0.0
N ₂	vol.%	3.9
Ar	vol.%	0.6
対象ガスの操作条件		
流量	t/h	563
圧力	MPa	3.3
温度		49
回収CO ₂ ガスの操作条件(再昇圧後)		
圧力	MPa	7.2
温度		49
精製ガスの操作条件 (ガスエキスパンダ出口)		
圧力	MPa	3.2
温度		49

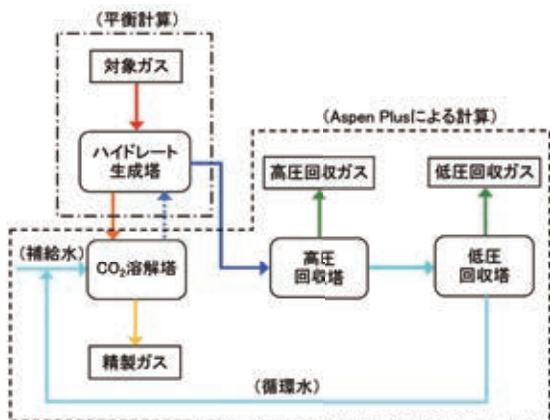


図3 プロセスの検討モデルの概念図
Conceptual Diagram of Process Model

表3 プロセスの検討条件
Calculation Conditions

ハイドレート生成塔		
圧力	MPa	6.0
温度		1
初期ガス組成	-	表2の対象ガスと同じ
CO ₂ 溶解塔		
圧力	MPa	6.0
入口温度		1
入口ガス組成	-	表4の気相ガスと同じ
循環水量	t/h	5 000 ~ 10 000
高圧回収塔		
圧力	MPa	4.0
温度		10
低圧回収塔		
圧力	MPa	0.3, 0.4, 0.5
温度		10

イドレート生成塔でハイドレートに取り込まれなかったCO₂を循環水で溶解した計算結果を示す。CO₂溶解塔でのCO₂回収率は、循環する水の流量、溶解したCO₂を回収する低圧回収塔の操作圧力で変化し、水の循環量が多いほど、また低圧回収塔の操作圧力が低いほど増加する結果となった。

3.4.2 回収ガス及び精製ガスの組成

表5にハイドレート生成とCO₂溶解を組合せたプロセスにおいて、CO₂回収率を90%とした場合の、回収ガス及び精製ガス組成の推算結果を示す。

回収ガスのうち、高圧回収ガス中のCO₂濃度は約95%となり、その他ガスとしてH₂、N₂などが含まれている。ここで、高圧回収ガス中のH₂は、ハイドレートではなく水への溶解により回収されたものである。また、低圧回収ガス中のCO₂濃度も約95%となり、高圧回収ガス中のCO₂濃度とほぼ同等である。一方、精製ガス中のCO₂濃度は約6%となり、H₂濃度は約86%まで高まる。なお、本報の試算ではCO₂回

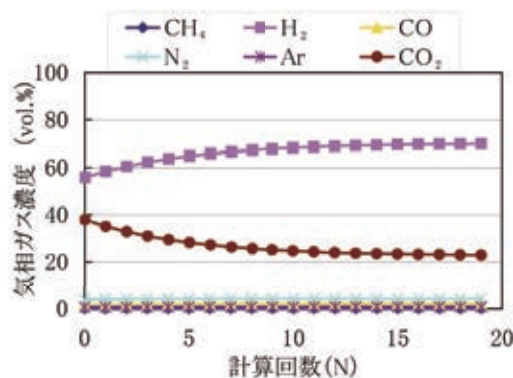


図4 ハイドレート生成塔での気相ガス組成の変化
Calculation Result of Gas Phase in Hydrate Reactor

表4 ハイドレート生成塔での気相ガス組成と
ハイドレート包蔵ガス組成
Calculation Result of Compositions of Gas Phase and Hydrate
in Hydrate Reactor

組成	単位	気相ガス組成	ハイドレート包蔵ガス組成
H ₂	vol.%	69.9	-
CO ₂	vol.%	22.9	97.6
CO	vol.%	2.1	-
CH ₄	vol.%	0.0	0.0
N ₂	vol.%	4.2	2.4
Ar	vol.%	0.8	-

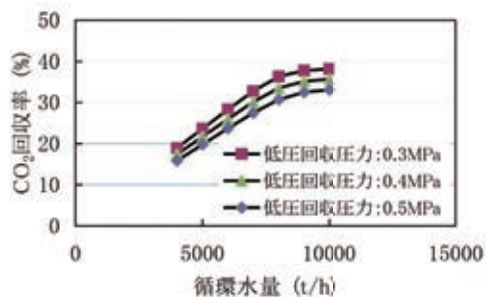


図5 CO₂溶解塔でのCO₂回収率の計算結果
Calculation Result of CO₂ Recovery Rate in CO₂ Dissolution Reactor

率を上げるためには、溶解でのCO₂回収量を増加させることが必要であるが、それに伴い、CO₂以外のガスの溶解での回収量も増加することが分かった。特に、有用な成分であるH₂は分圧が高く、回収ガスへの混入量が増加してH₂のロスとなるため、溶解でのガス回収には注意が必要である。

3.4.3 プロセスの所要エネルギーの検討

図6に、ハイドレート生成とCO₂溶解を組合せたプロセスにおいて、低圧回収塔の操作圧力を0.3MPaに設定した場合のCO₂回収率と所要エネルギーの試算結果を示す。また、表6に所要エネルギーの試算における圧縮機効率等の条件を示す。検討を行ったCO₂回収率75~90%の範囲では、圧縮工程、分離工程、回収工程を含む、CO₂分離回収での所要エネルギーは、約125 kWh/t - CO₂程度であり、パイプラインでの輸送のための再昇圧工程を含めた全所要エネルギー

表5 回収ガス及び精製ガス組成の計算結果

Calculation Result of Compositions of Recovered Gas and Treated Gas

組成	単位	高压回収ガス	低压回収ガス	精製ガス
H ₂	vol.%	2.8	4.4	85.5
CO ₂	vol.%	94.5	95.0	5.9
CO	vol.%	0.1	0.2	2.5
CH ₄	vol.%	0.0	0.0	0.0
N ₂	vol.%	2.5	0.2	5.1
Ar	vol.%	0.0	0.1	1.0

表6 所要エネルギーの試算条件

Estimation Conditions of Energy Consumption

項目	設定値
圧縮機効率	0.75
ガスエキパンダ効率	0.86
冷凍機効率 (COP)	4.6
循環水ポンプ効率	0.85

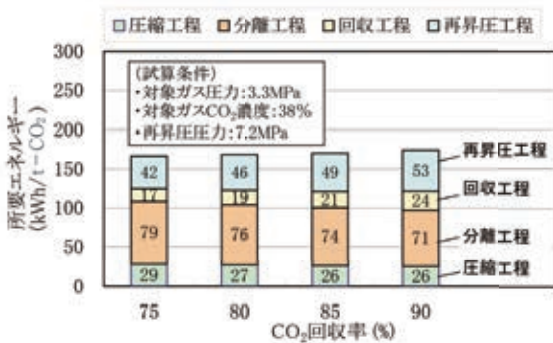


図6 所要エネルギーの計算結果
Calculation Result of Energy Consumption

は、170 kWh/t - CO₂ 程度となった。CO₂ 回収率の増加に伴い、CO₂ 回収量が増加し、単位 CO₂ 当たりの圧縮動力は減少するため、圧縮工程のエネルギーは減少する。また、本試算ではハイドレートによる CO₂ 回収量は一定のため、溶解による CO₂ 回収量が増加することで単位 CO₂ 当たりの必要除熱量が減少し、分離工程でのエネルギーは減少する。なお、CO₂ が水に溶解するときが発生する溶解熱は約 20 kJ/mol-CO₂ で、ハイドレートが生成するときが発生する生成熱(約 65 kJ/mol-CO₂)の 1/3 程度である。

一方、溶解での CO₂ 回収量を増加させるために水の循環量が増加、もしくは、圧力が低下し昇圧が大きくなることで、循環水のポンプ動力が増加し、回収工程のエネルギーは増加する。また、溶解による CO₂ 回収量を増やすために、低压回収塔の操作圧力を下げているため、再昇圧工程のエネルギーも増加する。今後、プロセスの熱利用の最適化を図ることで、本分離回収プロセスの所要エネルギーの低減が更に可能になると考えられる。

本報での試算結果を電気エネルギーから熱エネルギーに換算すると約 1.5 GJ/t - CO₂ となる。一方、経済産業省の CO₂ 固定化・有効利用分野の技術ロードマップでは、現在の CO₂ 分離コスト 4 200 円 / t - CO₂ を 2 000 円台 / t - CO₂ まで引き下げることが目標としている⁹⁾。本報で得られた所要エネルギーとプロセス機器の検討結果から CO₂ 分離コストを計算した結果、目標値を達成する可能性は高いことが分った。

4. 連続試験

4.1 試験目的

ハイドレートによる CO₂ 分離回収の基本原理とプロセス

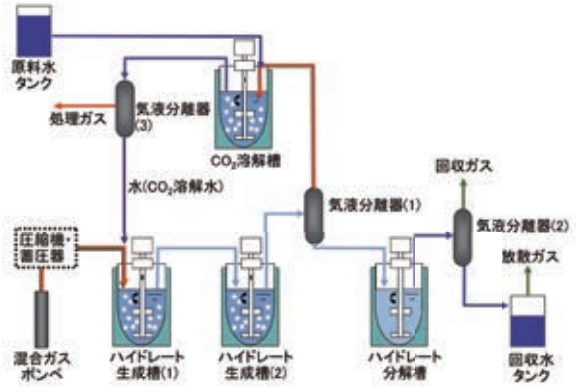


図7 連続式試験装置の概略フロー
Flow Diagram of Continuous-type Test Apparatus

表7 連続式試験装置の概略仕様

Main Specifications of Continuous-type Test Apparatus

項目	仕様	
各反応槽内容量		1.0
混合ガス最大供給量	Nm ³ /h	0.48
原料水最大供給量	/h	8.4
生成槽・溶解槽最大耐圧	MPa	12.0
分解槽最大耐圧	MPa	4.0
かくはん機	rpm	0 ~ 1 600

の有効性の確認を主目的として、小型の連続式試験装置を製作し、データ取得を行った。

4.2 連続式試験装置

図7に連続式試験装置の概略フローを、表7に連続式試験装置の概略仕様を示す。試験装置は混合ガスの供給系、原料水の供給系、CO₂ ハイドレートの生成・分解及び CO₂ 溶解を行う各反応槽で構成される。

あらかじめ所定のガス濃度に調整した混合ガスを充填したガスボンベからのガスを圧縮機で昇圧し、蓄圧器を経由して、ハイドレート生成槽に供給する。また、冷却ジャケットとチラーユニットにより、各生成槽の温度をコントロールした。各生成槽から排出されるガスとハイドレートスラリーの気液固の混合物は、気液分離器にて、ガスとハイドレートスラリーに分離された。

4.3 試験方法

混合ガス(H₂ 濃度：約 60%，CO₂ 濃度：約 40%)を所定の流量(0.105 ~ 0.42 Nm³/h)に調整し、図7に示す圧力約 6.0 MPa、温度 0 ~ 3 に設定したハイドレート生成槽(1)及び(2)に供給し、ハイドレートを生成した。原料水は 4.2 /h に調節し、CO₂ 溶解槽、気液分離器(3)を経てハイ

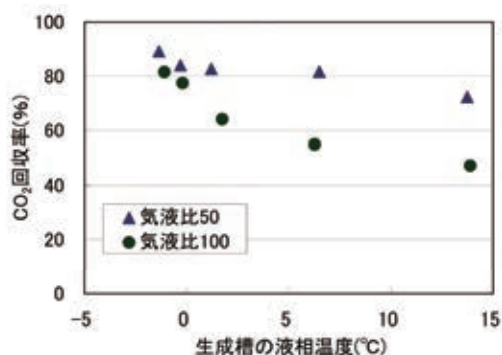


図8 ハイドレート生成槽の液相温度とCO₂回収率の相関
Relationship between Hydrate Reactor Temperature and CO₂ Recovery Rate

ドレート生成槽(1)へ供給した。生成槽出口のガスは、CO₂溶解槽にて更にCO₂が分離される。一方、生成槽からのハイドレートスラリーは分解槽に供給され、圧力約0.5MPa、約15の条件でハイドレートの分解(再ガス化)を行った。気液分離器(1)~(3)で回収したガス(処理、回収、放散)は湿式ガスメータを用いて流量の測定を、ガスクロマトグラフィを用いてガス組成の分析を行った。なお、本報での試験では、回収水の循環利用は行わなかった。

4.4 試験結果

図8に、ハイドレート生成槽の液相温度とCO₂回収率の相関を示す。なお、気液比及びCO₂回収率は以下の式で定義した。

$$\text{気液比} = \frac{G_0}{L} \times 1000$$

$$\text{CO}_2\text{回収率}(\%) = \frac{G_0 \times C_{\text{CO}_2}^0 - G_T \times C_{\text{CO}_2}^T}{G_0 \times C_{\text{CO}_2}^0} \times 100$$

ここで、

- G₀ : 混合ガス流量(Nm³/h)
- G_T : 処理ガス流量(Nm³/h)
- L : 原料水流量(L/h)
- C_{CO₂}⁰ : 混合ガス中CO₂濃度(%)
- C_{CO₂}^T : 処理ガス中CO₂濃度(%)

生成槽の液相温度が低下するにつれて、CO₂回収率が向上している。これは、低温にすることでCO₂ハイドレートの生成量が増加したためと考えられる。また、ハイドレートの平衡計算の結果では、ハイドレート生成でのCO₂回収率は約52%であったが、試験結果においては、ハイドレート生成領域である0~3にて、80%以上のCO₂回収率を実証することができた。この結果から、ハイドレート生成とCO₂溶解を組み合わせることにより、CO₂回収率が向上することが分かった。

5. おわりに

本報では、ハイドレート生成とCO₂溶解を組合せたプロセスでのCO₂分離回収性能について、シミュレーション検討を行い、CO₂を分離回収の所要エネルギーを求めた。このプロセスは、連続試験の結果、80%以上CO₂の回収ができ、有効であることを確認した。また、シミュレーションで得られた所要エネルギーからCO₂分離コストを試算したところ、我が国の将来の目標値を達成する可能性が高い、低コストのプロセスであることが分かった。

今後、連続式試験装置を活用したデータ取得を更に進め、ガス分離回収性能の詳細検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) IEA 編: Energy Technology Perspectives 2010, (2010) IEA
- 2) 松尾.ほか: NGH PDUの運転研究(第1報) - NGHによる天然ガス輸送システムの実証 -, 三井造船技報, 181(2004-2), p. 50
- 3) 松尾.ほか: NGHシステムのプロセス開発(第2報) - NGHによる天然ガス輸送システムの実証 -, 三井造船技報, 184(2005-2), p.50
- 4) Y. A. Dyadin, et al.: Clathrate Formation in Water-Noble Gas (Hydrogen) Systems at High pressures, Journal of Structural Chemistry, 40, 5(1999), p. 790
- 5) B. Metz, et al.: IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, (2005), p. 75, Cambridge University Press
- 6) NETL: Cost and Performance Baseline for Fossil Energy Plants, 1,(2007), DOE/NETL
- 7) E. D. Sloan, et al.: Clathrate Hydrates of Natural Gases, Third Edition, (2007), CRC Press, Inc
- 8) 高橋.ほか: 天然ガスを模擬した多成分混合ガスハイドレートの生成特性, 三井造船技報, 198(2009-10), p. 12
- 9) 経済産業省: 技術戦略マップ2010, (2010), p. 923

〔問い合わせ先〕

技術本部 千葉技術開発センター
TEL 0436 - 41 - 1930 宮川 満



宮川 満 松尾 和芳 櫻井聡一郎 酒井 正和

CO₂ 排出量大幅削減船の開発

藤井昭彦*¹ 田中一郎*² 松井亨介*³
木村校優*⁴ 山本敏明*⁵ 山本秀則*⁶

Development of Ship with Significantly Reduced CO₂ Emission

Akihiko FUJII, Ichiro TANAKA, Ryosuke MATSUI, Koyu KIMURA, Tosiaki YAMAMOTO, Hidenori YAMAMOTO

As the global efforts have been made to the reduction of environment load, the significant control of CO₂ emission from ship has been internationally proceeded. MES has been proceeding actively and continuously the reduction of fuel consumption of ships which is directly connected with CO₂ emission. Considering such an accelerated activities for the control of CO₂ emission and advantage of top maker of ship and engine, we have developed an advanced VLCC, as a cross divisional R&D project, targeting to reduce CO₂ emission by 30%.

The development has been made for the improvements of energy efficiency at calm sea condition, using technologies related to hull, such as improvement of hull, propeller and energy saving devices and etc, and technologies related to engine, such as electronic control of engine, and recovery of waste heat energy etc. The improvement has also been made in the fuel consumption per ton-mile at actual voyage, using technologies for better actual sea performance and engine control, and optimum voyage, etc. By combining and integrating many technologies which we have, we have achieved as a result the reduced emission by 30%.

環境負荷低減に対しての地球規模での取り組みの中、船舶のCO₂排出量も国際的に大きく規制する方向に進んでいる。三井造船はCO₂排出量と直結する船の燃費削減には従来から積極的にかつ継続的に取り組んできた。しかし規制の動きが加速されていることを考慮し、造船・主機のトップメーカーとしての強みも生かし、全社的な展開を図ることにより30%の削減達成を目指すこととし、VLCCを対象に研究開発を進めてきた。

船型やプロペラ効率改善、新省エネ装置などの船体に関する技術と、電子制御化、排熱回収などの主機関連の技術により、平水中のエネルギー効率を改善した。さらに、実海域性能改善、主機制御改善、最適運航などにより実運航時のトン・マイル当たりの燃料消費量を改善した。このように実現可能な多くの技術を総合的に組み合わせ集積することで30%という大きな改善を達成した。



図1 CO₂ 排出量 30% 削減船の要素技術の概要
Outline of Technology Elements of the Ship with Reduced CO₂ Emission by 30%

*¹ 船舶・艦艇事業本部 基本設計部

*³ 技術本部 技術総括部

*⁵ 事業開発本部 マリタイム・ソリューション事業室

*² 機械・システム事業本部 技術開発部

*⁴ 株式会社三井造船昭島研究所

*⁶ 三井造船システム技研株式会社

1. はじめに

環境負荷低減に対する地球規模での要求がますます強まる中、船舶のCO₂排出量も国際海事機関(International Maritime Organization: IMO)を中心にして大きく規制する方向に進んでいる。

IMOでは、設計時には輸送量トン・マイル当たりの排出量としての新造船エネルギー効率設計指標(Energy Efficiency Design Index: EEDI)、就航後は現存船エネルギー効率運航指標(Energy Efficiency Operational Indicator: EEOI)を定め、それぞれ、個々の船の効率を高めることによって海運界全体のCO₂排出量削減を狙っている。

EEDIについては、船種と積載重量に応じて規制ラインを定め、段階的に厳しくしていく方法が既に提案されており、将来は、この規制方式に従って、大幅な削減が義務付けられることになるものと予測される。また、EEOIも船主側の自主的な努力とは言え、個々の船の燃費をモニタリングし、削減努力をしていく方向で進められている。

一方、三井造船は、CO₂排出量と直結する船の燃費削減には、従来から積極的にかつ継続的に取り組んできた。しかし、上記のようなCO₂排出量規制の動きが加速されていることを考慮し、より大幅な削減に挑戦することにした。当社は、造船・主機のトップメーカーであり、その強みを生かし、全社的な展開を図ることにより大幅な削減を目指すことにした。

その一つが既報のバルクキャリアの開発¹⁾のようなコンセプトデザインの後、要素技術開発を実施する方式によるものである。もう一つが個々の要素技術の開発の集積により30%の削減を目指したもので、船型変更要素が少ない大型タンカー(VLCC)を対象に研究開発を進めてきた。3年間に及び研究開発の結果、目標達成のめどがついたため、ここにその概要を紹介するものである。

2. 全体概要

2.1 開発方針と体制

開発方針としては、多くの実用可能な要素技術開発の集積

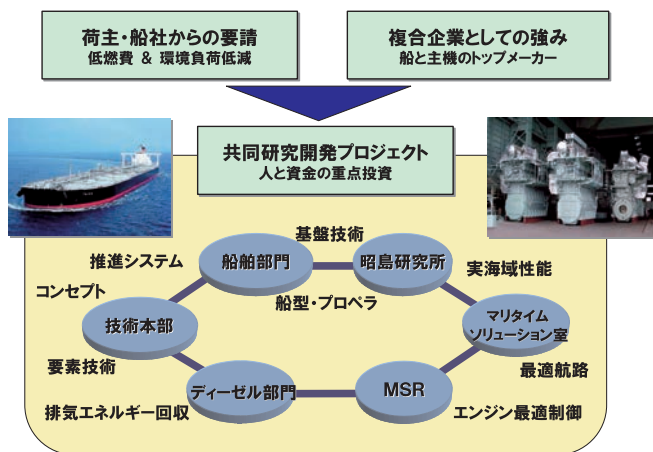


図2 CO₂排出量30%削減船開発プロジェクト
Project of Development of the Ship with Reduced CO₂ Emission by 30%

でCO₂排出量30%削減を狙うものとした。個々の要素技術としては、船型・プロペラ・省エネ装置・新規塗料などの船型関連技術、ロングストローク化主機・電子制御エンジン・排熱回収などの主機関連技術、実海域性能・主機制御・最適運航などの運航性能の改善技術からなるものである。これらの技術に関して、当社が有する全ての技術を網羅的に結集して30%削減達成の目標として掲げた。図1にこれらの要素技術を示す。開発は、造船・主機メーカーとしての船舶・艦艇事業本部及び機械・システム事業本部を中心として、研究開発を主とする技術本部、事業開発本部、(株)三井造船昭島研究所及び三井造船システム技研(株)の各部門の専門家を集め、社内横断的なプロジェクトチームを立ち上げて、推し進めてきた。図2に本プロジェクトの開発体制を示す。

2.2 開発対象と仕様

開発対象船種は、VLCCを選定した。VLCCのような大型船では、搭載主機の出力が大きい個々の要素技術が有意な効果を示し、集積された効果が大きくなることが期待できる。また、VLCCは満載の試運転にてその性能が直接確認されているため、貨物積載時の評価が明確となっている点もある。その他、現時点での各社の性能のばらつきが少ないことや、同じ航路を行き来するため評価がしやすいこともある。VLCCでなされた各要素技術の改良は他の船種にも適用可能(特に大型船)であり、波及効果は大きいなどの利点がある。

開発船は、総トン数、全長、全幅は現状のままとし、基準船と共に新規の共通構造規則(Common Structural Rule: CSR)適用船とした。また、開発船はCSR対応の船殻重量による積載重量の減少分を排水量増加で補い、基準船より載貨重量を多少増加させるが、基準船とほぼ同じトン・マイルで開発を進めた。

その他、NO_x規制も開発船は二次規制となるため、基準船も二次規制とし、排熱回収のタービン発電機(Turbo Generator: TG)やウェザールーティングについても現状装備しない船を対象としている。表1に両船型の仕様の比較を示す。

3. 設計指標(EEDI)対応の要素技術開発

まず、EEDIの改善について述べる。これは、船型及びブ

表1 対象船の仕様の比較
Comparison of Ship Specifications

	現状(基準)	30%削減船
船種	CSR適用VLCC	
船型制限	総トン数,全長,全幅は現状(船型の大きな変更はない)	
DWT	Base	+約1%
速力	Base	-約1% トン・マイル(DWT・Vs)キープ
NO _x 規制	二次規制	二次規制
排熱回収	TG無し	TG有
最適運航	ウェザールーティング 無し	ウェザールーティング 有

ロペラ改良や主機推進プラントの燃費改善からなる中核の要素技術である。

3.1 船型

船舶の燃料消費量改善は、従来から当社にとっては最重要課題であり、常に最新の技術を駆使した船型開発により高性能の船舶を提供してきた。特に近年、数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics : CFD) による船型開発システムを構築し^{2),3),4)}、CFD シミュレーションによる性能推定を軸に船型改良を行うことにより、様々な船種に対して優秀な船型を生み出してきている。

開発船の VLCC については、載貨重量の増加に伴い船型が肥大化するため、通常は推進性能が悪化し、載貨重量増加のメリットを享受できない。そこで、CFD による船型開発システムを用いてシステムティックな船型改良を行い、さらに細やかな改善を重ねることで、原型と遜色ない性能とすることができ、トン・マイル当たりの燃費削減を実現できた。具体的には、船体前半部については CP カーブやバルブ形状の最適化で改善を図り、船尾形状は主機配置を考慮しながら、全体のフレーム形状の改善を行うことで現実に即した改善を行なうことができた。また、操縦性能にも注意を払った開発を行った。図 3、4 に開発した船型の CFD シミュレーション結果を示す。

3.2 プロペラ

船型と同様にプロペラの効率改善も重要な要素である。

プロペラの効率改善方法は二つあり、一つは低回転大直径プロペラの採用によるもので、これはロングストロークの低回転主機の選定による主機と結びついた効率改善である。今回の VLCC では、現状の回転数から約 10 rpm 下げた主機を採用することにより、有意なプロペラ効率上昇が図られた。他の一つは、プロペラ翼形状 (翼断面形状含む) の最適化による効率改善である。当社では船型開発と同様に、プロペラ開発についても、CFD による低起振力高効率プロペラの開発システムを構築し^{5),6)}、効率ばかりでなく、キャビテーション性能や振動にも配慮した設計を行っている。さらに船尾圧力の実船計測も実施し、その結果もフィードバックさせ精度向上を図っている。

今回の設計でもこのシステムを使用してプロペラ形状をシステムティックに変え、効率とキャビテーション予測計算を実施することにより、より最適な形状を見出し、更なる効率向上が実現できた。

図 5、6 にプロペラ周りの圧力分布やキャビテーションの CFD シミュレーション例を示す。

3.3 省エネ付加物

省エネ付加物は、比較的小規模なものでも有意な省エネ効果を出ることができるため、船型による改善を補うものとして非常に有効な手段である。特に、渦やプロペラがあり複雑な流れとなっている船尾の流れ場において、大きな効果を発揮する。当社は従来から、舵にバルブ状のものを付けてプロペラ中心近傍の整流を行う MIPB (Mitsui Integrated Propeller Boss)⁷⁾を採用してきた。また、それにフィンをつけ、プロペラ後流の回転流の回収を行うものも開発している。今回はさらに、プロペラ前方に小型ダクトを取り付け、プロペラ前方の流れを整流し、更なる省エネ効果の向上を行った。

このようなハイブリッドタイプの省エネ装置は必ずしも各単体の重ねあわせの効果にはならない難しさがあるが、CFD で付加物周りの流れのシミュレーションをできるようにした結果、流れを考察しながらの改善が可能となった。その考察をもとに水槽試験での改良を行うことで、目標の効果を得ることができた。図 7 に省エネ付加物の構成要素の一つであるラダーフィン周りの流れの CFD シミュレーション結果を示す。

こうした船型やプロペラの改良技術は技術開発データベースとして蓄積されており、他の肥大船型などへも十分活かせられる技術となっている。また、省エネ付加物は各々の船型の流れに合わせた形状とする必要があり、今回開発した CFD による付加物流れの解析技術は、省エネ付加物の最適化を可能としたものである。

3.4 主機燃料消費率

次に船型関連と並び、改善効果の大きい主機側からの CO₂ 削減対策について述べる。主機燃料消費率 (Specific Fuel Oil Consumption : SFOC) の改善としては、電子制御エンジンの採用と低回転ロングストローク化があげられる。

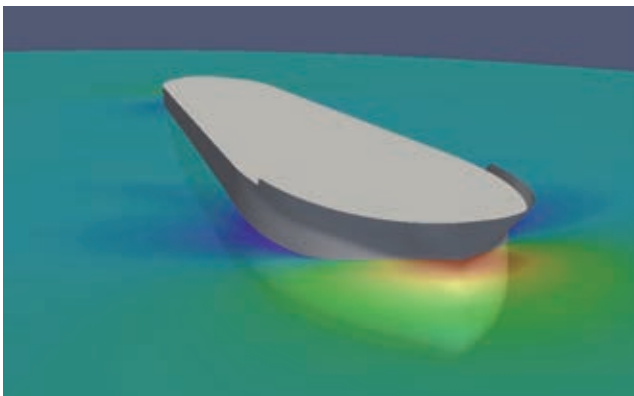


図 3 CFD 計算例 (船首波の例)
Example of CFD Calculation (Fore Part Wave)

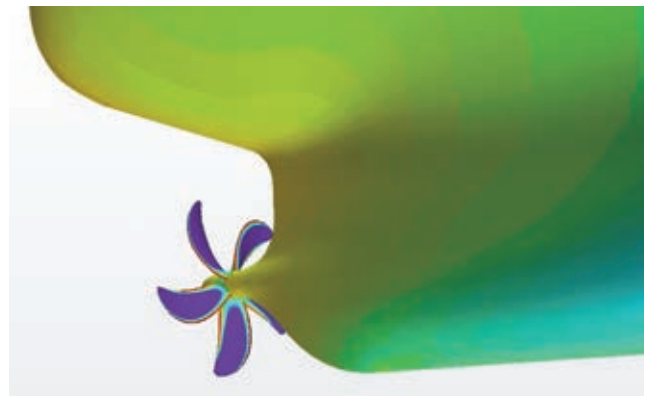


図 4 CFD 計算例 (船尾船体表面圧力分布の例)
Example of CFD Calculation (Pressure Distribution on Hull Surface of Aft Part)

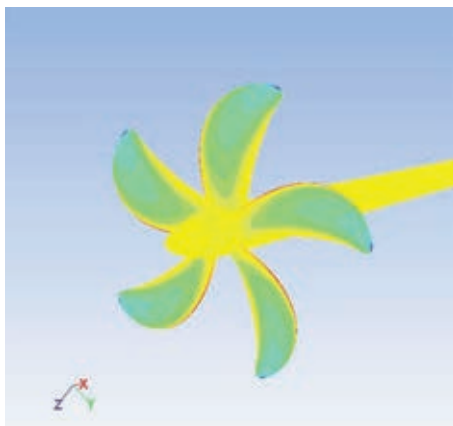


図5 CFDによるプロペラ上の圧力分布
Pressure Distribution on Propeller by CFD

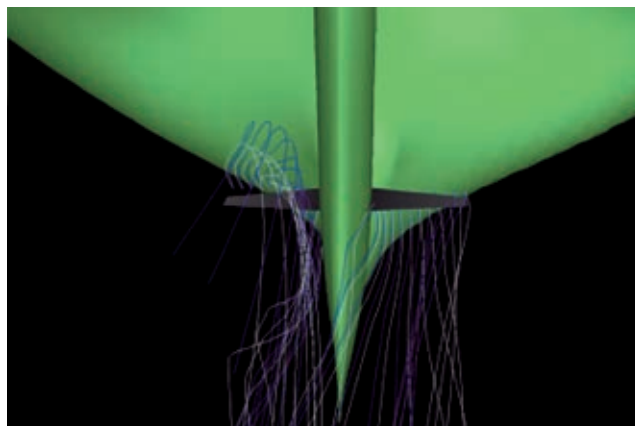


図7 ラダーフィン周りの流れのシミュレーション
Flow Simulation around Rudder Fin



図6 CFDによるキャビテーション計算
Cavitation Calculation by CFD



図8 電子制御エンジン
Electronically Controlled Diesel Engine

電子制御エンジンは、燃料噴射パターンのフレキシビリティを生かして、NO_x 二次規制に対応し、かつ主機燃料消費率の向上を図ったもので、その採用により従来の機械式エンジンより燃料消費率が改善されるものである。図8に電子制御エンジンを示す。

低回転ロングストローク化による改善は、3.2で述べたようなプロペラの低回転大直径化による効率改善と、SFOCの向上によるものがある。3.1～3.3で述べたような船型関連の改善によりエンジン出力を下げるのが可能となったため、エンジンレイアウトダイアグラム内において、プロペラ回転数とSFOCの組み合わせの中で、最も低燃料消費率となるレイアウト点を選定することが可能となり、最大限の改善が可能となった。また、マンディーゼルアンドターボ(MAN Diesel & Turbo)社より最近発表された超ロングストローク化されたGエンジン(Green Series Engine)は、主機自体のSFOC低減のみならず、ロングストローク化によりプロペラ回転数を更に下げることができるため、プロペラ

効率の更なる改善にもつながっている。

主機選定に関しては、当社が船舶と主機部門を有するメリットを生かし、最新の規制情報や主機開発状況を船型開発にフィードバックするなどして、最大限の効果を得るようにしている。

3.5 主機排熱回収

過給機の高効率化に伴い、余剰排気ガスエネルギーの回収がより容易となってきたため、CO₂削減対策の有効な手段となっている。開発船に対しては、排気ガスエネルギーをうまく生かし電力エネルギーとして回収するシステムとして以下を採用する⁸⁾。

- ・TG: 排気ガスの熱エネルギーによりボイラにて蒸気を生成後、蒸気タービンを駆動し、タービン軸に直結した発電機により発電するものである。
- ・TCS (Turbo Compound System): 排気ガスを過給機前でバイパスさせ、そのバイパス排気ガスによりパワータービン(PT)を駆動し、PTに直結した発電機により発電す

るものである。

本プロジェクトでは、この TG と PT を一軸上に配置し、一台の発電機と接続したものを開発した。発電された電気エネルギーは船内電力に供した後、その余剰分を推進加勢に利用するもので、両者の接続により電力制御がより容易となり信頼性向上にもつながっている。図 9 に排熱回収システムを示す。

排熱回収率をさらに向上するために、PT の前に補助ボイラーを装備する方法などもあるが、より一層の省エネ化を図るために、まだ活用されていない機関冷却水などの低温域排熱を活用する低温排熱回収システムにも注力している。

4. 運航指標(EEOI)対応の要素技術開発

次に、EEOI に対応した要素技術の開発について述べる。これは EEDI と異り、実際の航海における海象環境下での性能を向上させるものである。近年、実海域での性能向上の要求も高まっており、その向上による CO₂ 排出量削減も大きな課題となってきた。

4.1 船型関連の実海域性能改善

船型関連の実海域性能としては風圧抵抗と波浪中の抵抗増加によるものがある。

まず、風圧抵抗改善については、特に居住区の風圧抵抗が支配的となり、その前面形状の影響が大きいとされる。そこで、CFD にて居住区周りの流れの調査を行うとともに、居住区を取り出したシリーズ模型にて風洞試験を実施した。

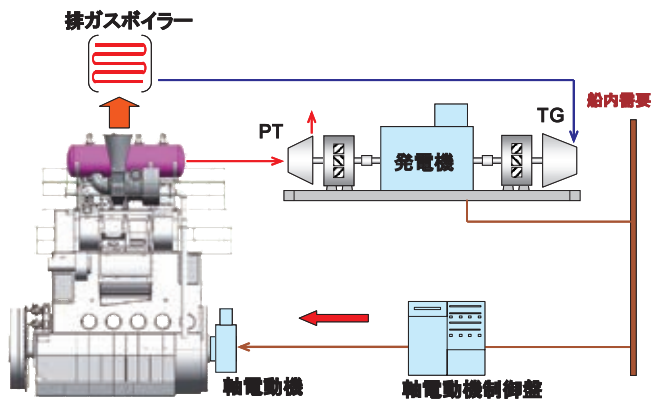


図 9 排熱回収システム
System of Recovery of Waste heat Energy



図 10 居住区模型と CFD での流れのシミュレーション
Model of Accommodation and Flow Simulation by CFD

その結果、居住区形状は隅切り形状よりラウンドな形状が効果があること、ウィングとよばれる横に張り出した部分には流れを整流する形状改善が風圧力低減に効果があることなどが分かった。また、居住区だけでなく全船模型での風洞試験も実施し効果の確認を行った。図 10 に実験を行った居住区模型と CFD での流れのシミュレーション例を示す。

次に波浪中の抵抗増加に対しては、船首部の形状の影響が非常に大きいので、その形状シリーズについて波浪中試験を実施した。水面付近の水線形状を削るなどで改善することにより、波による抵抗増加量を低くできること、また、波高が小さいときでも効果があることが分かった。また、波浪中の CFD シミュレーション技術の開発も行い、船首部形状改良の方向付けに役立っている。図 11 に波浪中抵抗試験を示す。

今回の改善技術が他の船種にも応用できるばかりでなく、流れのシミュレーション技術や実験技術は、実海域性能改善に今後とも大きな貢献をしていくものと考えられる。

4.2 主機の実海域性能改善

実海域では船体側だけでなく主機も影響を受けている。

船が実海域を航行すると、風・波により船体・プロペラが変動する外力を受ける。それが、主機に伝わり負荷変動という形で静的な状態とは異なった影響を与え、主機出力が変動する。一方、現状の主機制御は、運航者の指令回転速度に主機回転速度が一致するよう PID 制御を行っており、必ずしも負荷変動に最適な形で対応した制御とはなっていない。こうした負荷変動に最適な形で対応した制御システムを構築するため、実海域での負荷変動を模擬できる航海性能シミュレータを本プロジェクトで開発し、それをを用いて負荷変動に対応した新主機制御システムの開発を行った。さらに実船試験での検証も行い、新ガバナ制御システムとして製品化を行った。詳細は今号の「CO₂ 削減を目指した船用ディーゼルエンジン主機の新制御システムの開発」⁹⁾に述べられている。図 12 に航海性能シミュレータの概念図を示す。

本システムのような海象に応じた制御法の開発は従来にない試みであり、社内横断的なプロジェクトチームによる共同開発の結果実現したものである。



図 11 波浪中の抵抗試験
Resistance Test in Waves

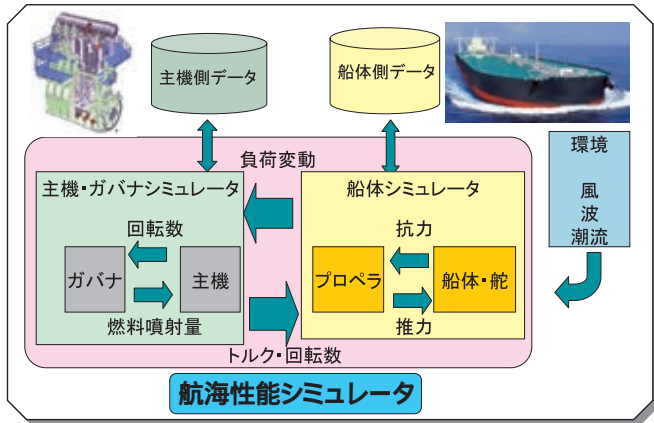


図 12 航海性能シミュレータの概念図
Concept of Voyage Performance Simulator

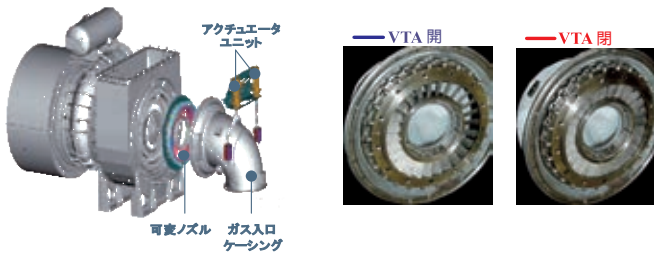


図 13 過給機可変ノズル
VTA:Variable Turbine Area

さらに、図 13 に示す過給機可変ノズル(Variable Turbine Area: VTA)を採用する。本来これは常用出力より低い負荷(部分負荷性能)の燃費率改善が目的であるが、次のような熱負荷の改善も可能である。一般的に、中近東のような温帯地域においては掃気温度が上昇し、空気密度が下がるため、掃気圧力が低下する。この結果、シリンダ内最高圧力が低下し、機関性能の悪化や、排気ガス温度上昇により機関室部品の熱負荷の増加につながる。VTA は掃気圧力を調整することにより熱負荷の改善を可能としたもので、VLCC などは熱帯域を通過するため、このような熱負荷の改善は燃費改善に有意な効果となる。

4.3 最適運航(最適トリム含む)

EEOI の改善には最適な運航も重要な要素である。近年、気象・海象予報の発展もあり、海象の良い航路を探索して航行し、燃費削減を行なう研究開発も盛んに行われるようになった。当社でも、これらに対応するため、実海域性能を高精度にモニタリングし、タイムリーな解析・診断と、効率的な運航計画を支援する「運航モニタリングシステム(Fleet Monitor)」、「就航解析システム(Fleet Cal)」及び「最適航路選定システム(Fleet Navi)」から構成される図 14 に示す「最適運航支援システム」の開発を行った^{10),11)}

最適航路を求める Fleet Navi システムは、東京海洋大学と共同で研究を進めたもので、計算時間負荷が軽く、計算の

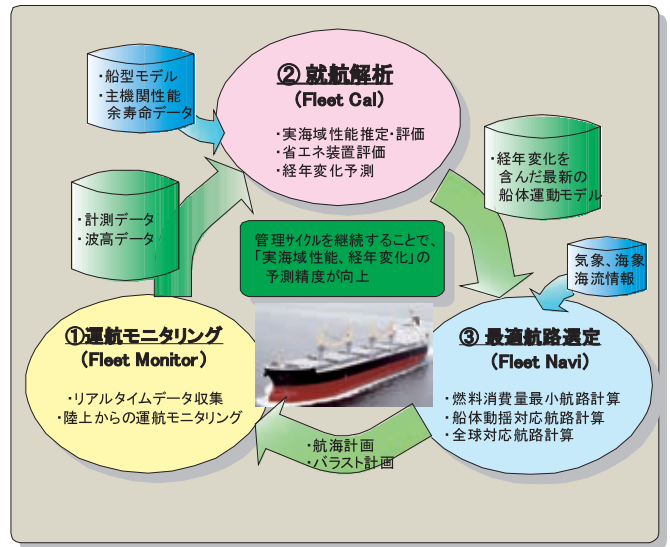


図 14 最適運航支援システム
Optimum Ship Operation System

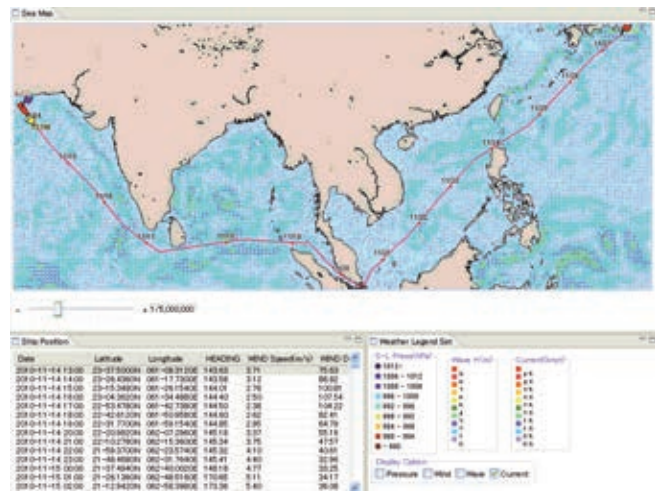


図 15 最適航路探索例
Example of Search for Optimum Route

収束性が良く、色々な海域に対応しやすい“等時間曲線法”を採用し、海流影響や船体動揺も考慮した最短時間で到着する航路の探索や、燃費最小の航路の探索も行うことが可能となっている。特に最短時間の探索は、結果的に速力減少にもつながり、同じ時間内に着くのに必要な燃費をより削減している。また、航路途中に任意のWay Point(必ず通過する地点)の指定を組み込むことで、マラッカ海峡、パナマ運河、スエズ運河等、海峡の通過航路を含む航路全体の自動計算を可能にした。図 15 に最適航路探索例を示す。

航行中の最適なトリムについても近年研究されるようになった。本船でも、トリムを変えた状態での水槽試験を実施したところ、多少の前トリムがイーブントリムより推進性能が良い結果が得られた。

最適運航支援システムについては、今後船舶運航支援サービスという形で、広く実際の運航でのCO₂ 排出量削減に貢献していくであろう。

5. 全体の削減率

全体の削減率は、設計指標(EEDI)に関して、船型関連で、積載重量増、速力調整、船型改善、プロペラ低回転化や形状改善、新省エネ装置採用などの効果に最近塗料メーカーが開発している低摩擦塗料採用も加え約13%、主機関連では、電子制御化、ロングストローク化、TGやTCSなどの排熱回収で約12%となっている。運航指標(EEOI)については、実海域性能改善・主機制御改善、最適運航や最適トリムの効果などで約9%となっており、全体として約30%の改善を達成することができた。

6. おわりに

船舶のCO₂ 排出量削減について全社的展開を行うことにより、当社の技術開発力の集積として、CO₂ 排出量30%削減船の開発を行うことができた。これは地道な技術開発の積み重ねと、全社横断的展開による開発力の相乗効果などが合わさり、大きな成果へとつながったものである。今回の成果は、実現可能な複数の技術を総合的に組み合わせで達成したものであるが、今後も自然エネルギーの利用などの新たな技術を取り入れて、将来の大きなCO₂ 規制にも十分対応可能な技術に発展すべく、更なるCO₂ 排出量削減を追求していく所存である。

参 考 文 献

- 1) 松村．ほか：近年の船型開発における最新省エネ技術 - CO₂ 排出量30%削減を目指して - 三井造船技報201号(2010-10), p.1
- 2) 藤井．ほか：CFDを用いた船型開発システム, 三井造船技報177号(2002-10), p.1
- 3) 藤井．ほか：CFDを用いた船型開発システム(第2報), 三井造船技報190号(2007-3), p.8

- 4) A. Fujii, et al. : Application of Hull Form Design System Using CFD, ICMRT(2005), p.139
- 5) 木村．ほか：低起振力型高効率プロペラ開発システムの構築, 三井造船技報189号(2006-10), p.25
- 6) K. Kimura, et al. : High-Efficiency Propeller Design System Using CFD, ISME2009
- 7) A. Fujii, et al. : New Energy Saving System -Mitsui Integrated Propeller Boss, ISME 95(1995)
- 8) 田中．ほか：ディーゼルエンジン - 環境対応関連の技術開発 -, 三井造船技報200号(2010-6), p.35
- 9) 田中．ほか：CO₂削減を目指した船用ディーゼルエンジン主機の新制御システムの開発, 三井造船技報203号(2011-6), p.44
- 10) 村上．ほか：船体性能解析サービスの開発, 三井造船技報195号(2008-10), p.28
- 11) 山本．ほか：就航船解析サービス, 三井造船技報201号(2010-6), p.19

〔問い合わせ先〕

船舶・艦艇事業本部 基本設計部
TEL 042 - 545 - 3121 藤井 昭彦



藤井 昭彦



田中 一郎



松井 亨介



木村 校優



山本 敏明



山本 秀則

CO₂ 削減を目指した船用ディーゼルエンジン主機の新制御システムの開発

田中一郎* 三上隆** 青木猛*** 山本秀則****

Development of New Control System for Marine Diesel Engine to Reduce CO₂ Emission

Ichiro TANAKA, Takashi MIKAMI, Takeshi AOKI, Hidenori YAMAMOTO

Increased fuel oil price and request of reduction of CO₂ emission against the global warming motivate Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd. (MES) to develop CO₂ 30% reducing vessels. This development project has a lot of activities on not only the application of new technologies in design stage but also the optimization of vessel operation during a voyage. In this paper, the status of the development of new engine control system, which is one of main subjects in the activities, is described. This new system has three engine control modes. Two modes are conventional and one is newly developed. A most suitable mode is automatically selected in accordance with the actual sea condition. Finally, fuel oil consumption is expected to be totally reduced by 1 - 2% during a voyage. The system can easily be introduced in our latest control system only by replacing the software with new one. MES has already finished a function test of the system in our shop test and is planning to have tests in actual vessels. Eventually, the new system will be able to be put into commercial in 2011.

原油価格の高騰や地球温暖化回避の観点から、運航費の中で大きな比重を占める燃料費の削減要求が一層強まっている。このような背景より、三井造船は、2008年度より全社横断的なCO₂ 30%削減船開発プロジェクトを発足させた。

本報ではその開発項目の一つである、船用ディーゼルエンジン主機の新制御システムの開発状況について述べる。この新制御システムの最大の特長は、従来の制御モードと本報で開発中の新たな制御モードを組み合わせ、時々刻々と変化する海象に応じて最適な制御モードを選択することにより、航海中の燃料消費量を1～2%程度削減するものである。新制御システムは、当社標準の最新制御装置では、ソフトウェアの変更のみで導入が可能である。既に陸上での機能検証を終え、2011年度中の商品化を目指している。

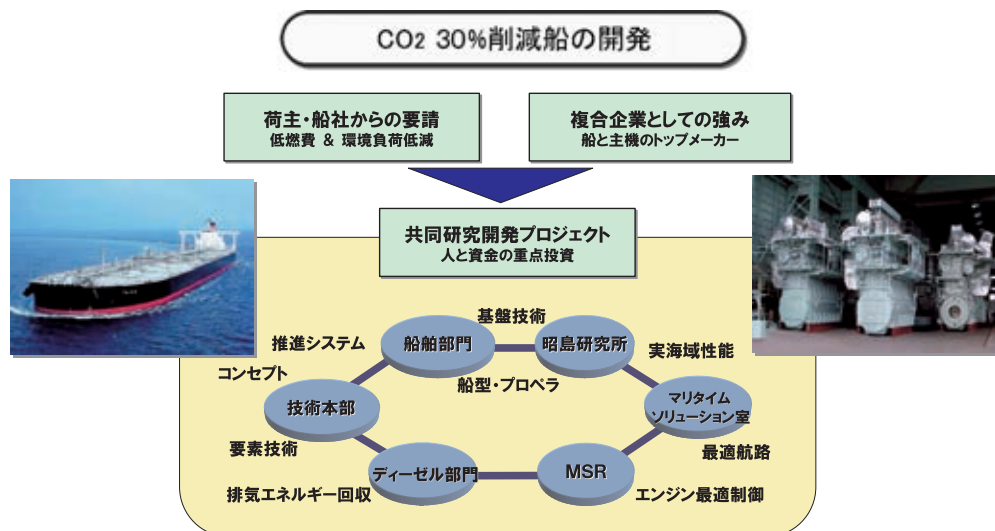


図1 CO₂ 30%削減船開発プロジェクト
The Development of a Ship with Reduced CO₂ Emission by 30% Organizing the Across-the-board Project

* 機械・システム事業本部 機械工場 技術開発部

** 株式会社三井造船昭島研究所

*** 機械・システム事業本部 機械工場 システム技術部

**** 三井造船システム技研株式会社

1. はじめに

中国を始めとする新興国経済の成長に伴い、原油等各種資源価格の高騰が見られる。更に、リーマンショック後の経済不安等、世界経済は回復基調にあるものの依然先行きは不透明な状況にある。したがって、船舶の運行費の中で大きな比重を占める燃料費の削減要求が一層高まっていると共に、一方では環境保護の観点からのCO₂削減要求も強まっている。

このような背景より、三井造船は、2008年度より全社横断的なCO₂ 30%削減船開発プロジェクトを発足させた(図1)。このプロジェクトにおける各要素技術は、新造船エネルギー効率設計指標(Energy Efficiency Design Index: EEDI)¹⁾に対応する技術、既存船エネルギー効率運航指標(Energy Efficiency Operational Indicator: EEOI)²⁾に対応する技術に分類されるが、本報では、EEOIに対応する技術の一つである、船用ディーゼルエンジン主機の新制御システム(以下、新主機制御システムと称す)の開発について取り組み状況を紹介する。

刻々と変化する気象・海象に適応し、燃費悪化を抑えられる制御方法を開発するために、まず、実船計測を行い、航海中の船体運動、主機、ガバナの応答やそれらの関連を把握した。気象・海象の変化による船体挙動の変化は、主機に対する変動外力として主機挙動へ影響を及ぼすが、従来は、船体・主機について個別にシミュレーションを実施していた。本プロジェクトでは、ガバナによる制御も含め、総合的なシミュレーションが可能な計算プログラムを開発し、実測データとシミュレーション計算をもとに、新たな制御方式を検討した。その結果、制御目標を回転速度の代わりに、燃料投入量又は機関出力とする方式を検討し、それら方式が従来の回転速度制御に対して燃費削減効果があることをシミュレーションや実船計測で確認した。そして、これらの計算と計測結果から、得られた知見に種々の改良を加え、CO₂削減を目指した新主機制御システムを開発した。

2. 従来の主機制御方式

当社の主機は、標準として、電子ガバナにより、操縦者が

決定する指令回転速度に実際の主機回転速度が一致するように、燃料投入量(以下、フューエル・インデックスと称す)を制御する回転速度一定制御を採用している。主機・ガバナ制御システムの概略構成を、図2に示す。

従来の主機制御方式は、次のようになっている。海象条件は常に変化するため、主機の負荷状態も常に変化し、主機の負荷が増えるような海象となった場合には、主機回転数が低下し、主機出力も下がる。その結果、排気ガスエネルギーも減り、過給機により供給される空気量と掃気圧も低下する。

そこで、従来の主機制御では、回転数が指令回転数に近づくように燃料投入量を増す。一方、主機と過給機には応答遅れがあるため、増加した全投入燃料を最適に燃焼させるために必要な空気量が確保されず、燃焼効率が悪化する。極端な場合の例としては、自動車が坂道を走る場合、運転者はアクセルを最大限踏み込むため、空気量に応じて燃焼する以上に燃料が供給される結果、多量の黒煙が排出される状況となる。

主機回転数が指令回転数より高い場合は逆のケースとなるが、この燃焼状態が悪化することによる燃費の悪化の影響が大きく、実海象条件下では負荷静定時に比べ、燃費(効率)が悪化する。

本開発では、新制御方式によるシミュレーションと各種試験を行うことで、主機回転数の変動によるこれらの事象の改善を確認した。

更に従来の主機制御では、穏やかな海域を航海中はフューエル・インデックスを自動的に固定するモード(以下、フューエル・モードと称す)を装備している。これは、穏やかな海域での過度な制御による燃費の悪化やガバナ・アクチュエータから燃料ポンプに至る機械的摩耗を軽減するために装備したモードである。通常回転速度制御からフューエル・モードとなる条件(デフォルト値)は次の通りである。

指令回転速度が大洋航海領域内にあり変化していない
 主機回転速度が指令回転速度の $\pm 1 \text{ min}^{-1}$ 以内に入っている
 ~ の状態が20分間以上継続

フューエル・モード中に、主機回転速度が指令回転速度の $\pm 15 \text{ min}^{-1}$ を超えるとモードは解除され、回転速度制御が再開される。船速変更時や平均負荷の変化に合わせてフューエル・インデックスを変更する場合、指令回転速度を変更すると、上記条件によりフューエル・モードが解除されるため、再びフューエル・モードとなるには20分を必要とする。今回、このフューエル・モードの改善も行った。

3. 新主機制御システム開発の取り組み

3.1 シミュレーション技術の開発

実海域での燃費向上を図るには主機単体の検討では限界があるため、船体、プロペラ、舵を含んだ船全体での総合的な特性を種々の条件下で検討できるシミュレータの開発が必要となる。これまで主機制御は、主機・ガバナシミュレータを用いて検討し開発を行ってきた。また、船体運動に関しても操縦性能推定プログラムMSP^{3), 4)}や耐航性能推定プログラムSCS⁵⁾、PLOW⁶⁾などを開発し、多くの検討を行ってきた。これらのプログラム開発において培った経験や技

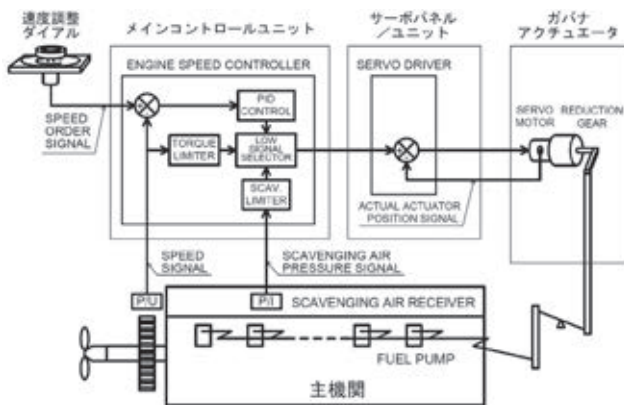


図2 主機・ガバナ制御システムの概略構成
Governor Control System

術を統合し、主機制御による燃費差を評価できるツールとして、新たに図3に示すような構成の航海性能シミュレータ (Voyage Performance Simulator : VPS)を開発した。

主機には船体やプロペラに作用する変動外力が伝達されるため、主機制御による燃費削減を図るためには、実海域で海流、風、波からもたらされる変動外力の大きさや周期を正確に見積もることが重要となる。通常運航状態における変動外力源として特に重要となるのは波であり、波によるプロペラトルク変動の推定モデルが報告されているが^{7),8)}、本報では大型船における斜波中に対してより高精度な推定を行うために広範な水槽実験を行い、シミュレーションに反映させることで推定精度向上を図っている(写真1)。このVPSは運航方法による燃費差の評価も可能であるため、EEOIの性能評価ツールとしての利用も視野に入れて取り組んでいる。

一方、多くの制御手法をアイデア段階で検討し、簡便に性能を判断するためには、必ずしもVPSによる詳細検討が必要なわけではない。そこで、船体を受ける操縦流体力や波浪による変動などを簡略化したモデルを用いて、汎用解析ツールMATLAB/Simulinkを用いた簡易シミュレータを開発した。このシミュレータを用いて、PIDのゲイン変更、燃料一定制御、出力一定制御など種々の制御手法アイデア(A~I)による制御効果の比較を行った例を図4に示す。図4

では暖色側の総合効率が高く、制御手法によって効率が変化していることが分かる。

また、主機そのものの特性理解を進めた上で、原理的な観点から制御への応用を探る意味で、船用低速ディーゼルエンジンシミュレータを開発中である。本シミュレータは、主機単体の動特性を計算することが可能で、これを活用した検討も行っている。

3.2 効果の予測と実船計測

3.2.1 効果の予測

3.1に示したシミュレーション技術を用いて、回転速度制御、フューエル・インデックス制御、出力制御の3種類の制御モードの検討を行った。すなわち、制御モードによる燃費改善を予測するため、大型タンカー(VLCC)を対象として、各制御モードに対してVPSによりシミュレーションを行った。一例として、Beaufort Scale 7(強風)の海象条件でのシミュレーション結果を図5に示す。回転速度制御と比較して、フューエル・インデックス制御及び出力制御は、フューエル・

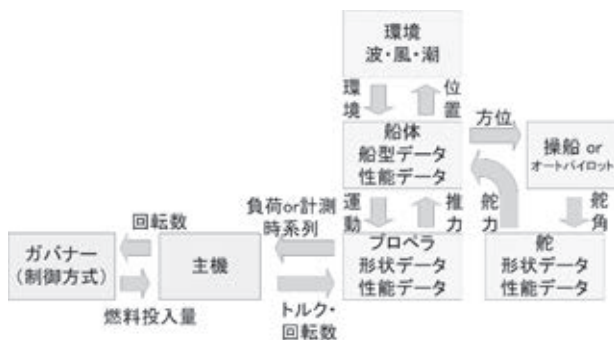


図3 航海性能シミュレータの概略構成
Voyage Performance Simulator (VPS)



写真1 斜波中水槽実験
Model Ship Experiment in Oblique Sea

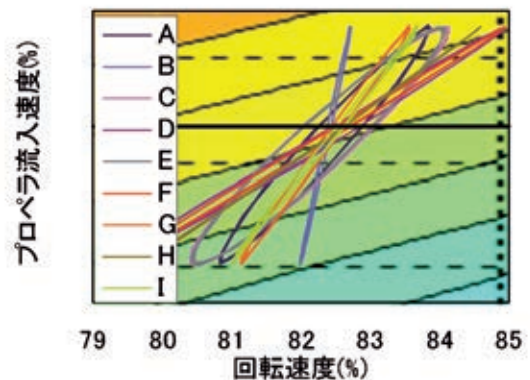


図4 簡易シミュレータによる計算結果の一例
An Example of Calculated Results
by a Simplified Performance Simulator

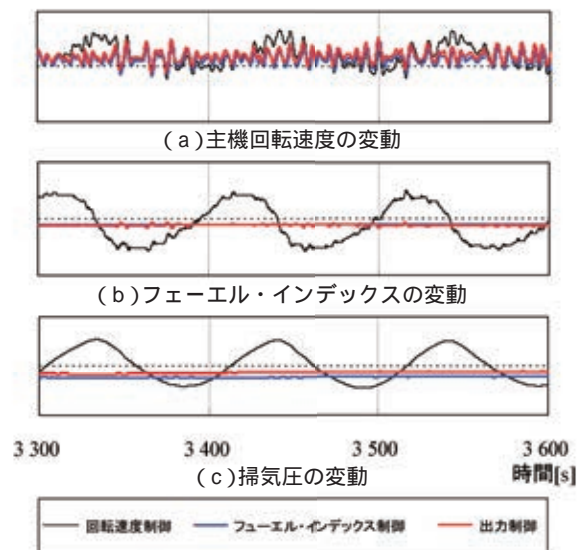


図5 航海性能シミュレータによる計算結果の一例
An Example of Calculated Results by the VPS

インデックスの変動，掃気圧の変動が少ないことが分かる．また，回転速度制御と比較してフューエル・インデックス制御及び出力制御は，後述の式(1)で定義される対水船速燃費が約 1.5%改善されることが予測された．

3.2.2 実船計測

種々の気象・海象における制御モードによる燃費の違いを確認するために，就航船において従来の主機制御装置でガバナの制御パラメータを変更して，その影響度を評価した．30分毎に手動操作で制御モードを切り替え，回転速度制御とフューエル・インデックス制御，又は，回転速度制御と出力制御の組み合わせで，燃費の変化を計測した．

回転速度が変化すると対水船速燃費も影響を受けるため，回転速度で補正した対水船速燃費で評価した．各制御モードの後半 20 分間の平均対水船速 V_s ，平均回転速度 N_e ，及び燃料消費量 FOC から対水船速燃費 FOC_{vs} を計算した．

$$FOC_{vs} = FOC / (V_s \cdot N_e^2) \dots\dots\dots (1)$$

実船計測の結果，フューエル・インデックス制御及び出力制御にすることで，回転速度制御に比べて約 1 ~ 2% の対水船速燃費の改善がみられた．一例として，図 6 に回転速度制御と出力制御の時系列計測データを示す．出力制御では，フューエル・インデックスの変動が小さくなると同時に，掃気圧の長周期 (100 秒以上) の変動も小さくなっている．これは，出力制御では積分定数の影響が減少していることに起因する．

4. 新主機制御システム

4.1 海象適応制御

新主機制御システムでは，海象状態によって自動的に次の 3 種類の制御モードの切り替えを行う．

- 回転速度制御
- フューエル・インデックス制御
- 出力制御

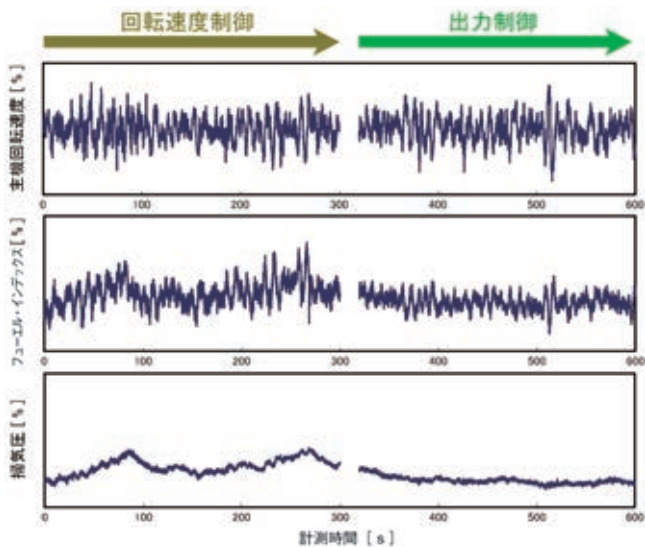


図 6 実船計測結果の一例
An Example of Real Ship Measurements

すなわち， N ， F の三つの物理量を制御目標として切り替えることにより，海象に適応した制御を行う．

4.1.1 海象状態の判定

海象状態を判定する指標として，新たに主機回転速度 N とフューエル・インデックス FI から求める負荷抵抗係数 R を式(2)で定義する．

$$R = FI / (N / 100)^2 \dots\dots\dots (2)$$

ここで扱う物理量は，主機の連続最大定格時の値を 100% としたときの相対量である．

負荷抵抗係数の変動状態から波浪の状態を推定し，また，一定時間における負荷抵抗係数の平均値 R_{av} から波浪，風圧損失を含んだ船体抵抗を推定する．

4.1.2 海象状態に応じた制御モードの切り替え

図 7 に示すように，負荷抵抗係数の変動実効値と変動周期によって，3 種類の制御モードの切り替えを行う．変動実効値が小さい時や主機トルクの応答遅れが問題になるような短い周期の変動の場合，あるいは極めて長い周期の変動の場合には，フューエル・インデックス制御が選択される．

一方，プロペラが海面から出るような大きな変動がある場合には，過速度を防止するために，回転速度制御が選択される．

それ以外の場合には，出力制御が選択される．出力制御では時間当たりの排気エネルギーを安定に保ち，過給機，排気，掃気系を含んだ主機全体の状態変化を極力抑えることを意図している．

4.1.3 各制御モードの演算

3 種類の制御モードを実現する制御ブロックを，図 8 に示す．フューエル・インデックス制御では，制御指令として与えられた目標回転速度 N_o が N - FI 変換ブロックにおいて目標フューエル・インデックス FI_o に変換される．この変換においては，負荷抵抗係数算出ブロックで算出される平均負荷抵抗係数 R_{av} を用いて，式(3)で FI_o を求める．

$$FI_o = R_{av} \cdot (N_o / 100)^2 \dots\dots\dots (3)$$

式(3)から分かるように，フューエル・インデックス制御では，目標回転速度が平均負荷抵抗係数の変化がない限り，フューエル・インデックスは一定値に固定される．目標回転

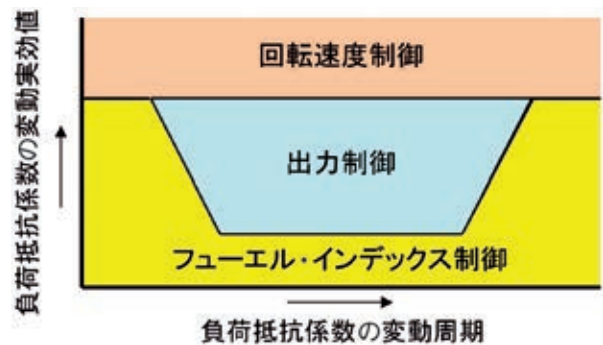


図 7 制御モード切り替えの例
An Example of Control Mode Changeover

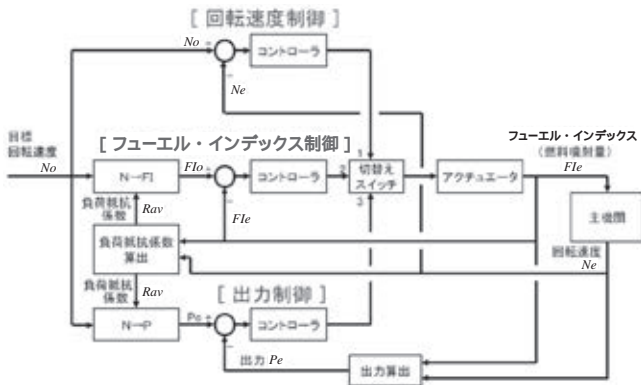
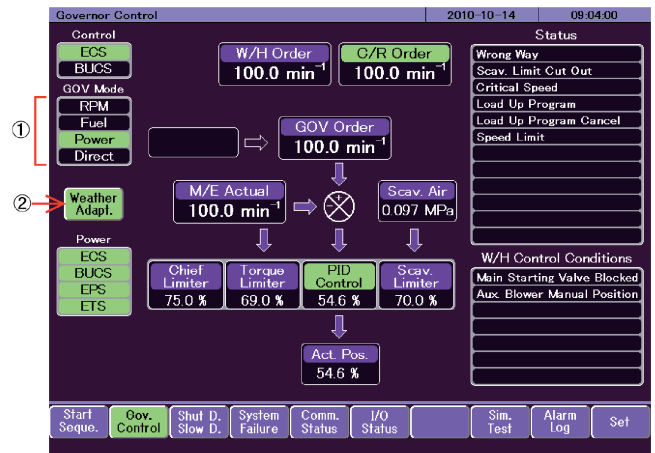


図8 海象適応ガバナ制御ブロック図
Block Diagram of Weather Adaptive Governor



- ① 制御モード表示 (“Power”が追加)
- ② 海象適応制御 有効/無効切替ボタン

図9 新主機制御装置のガバナ画面例(制御室ディスプレイ)
An Example of Governor Monitor Image(ECR Display)

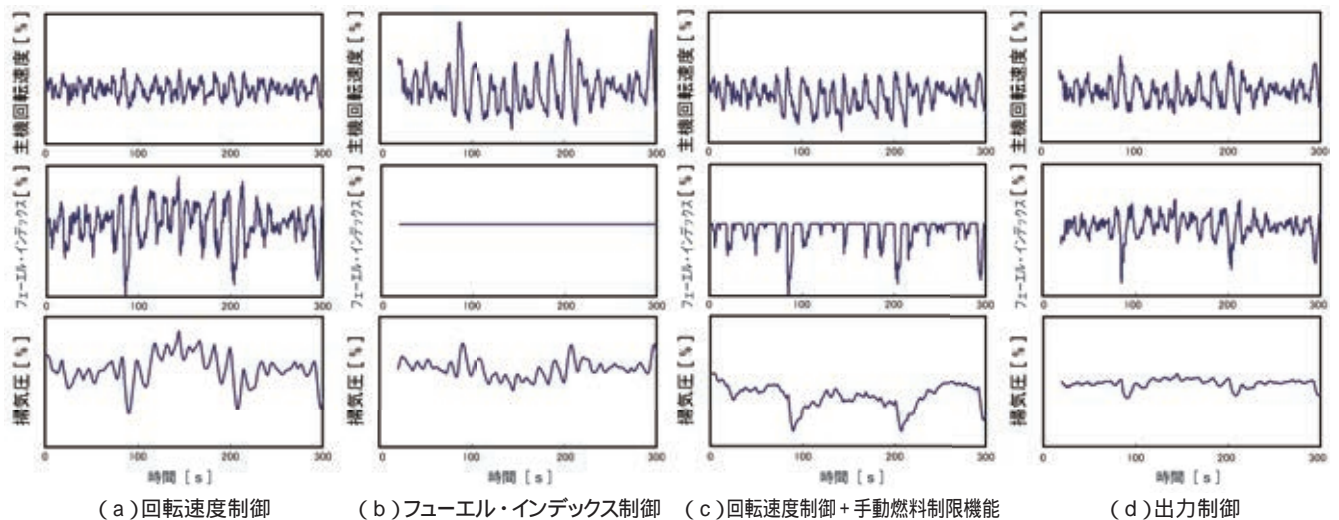


図10 新主機制御シミュレーション結果の一例
An Example of Calculated Results by New Control Algorithm

速度を変更すると、それに合わせてフューエル・インデックスが変更され、また、平均負荷抵抗係数が変化した場合には、それに合わせて平均回転速度が目標回転速度に一致するように自動的にフューエル・インデックスが変更される点が、従来のフューエル・モードとは異なる点である。

出力制御では、制御指令として与えられた目標回転速度 No が $N-P$ 変換ブロックにおいて、目標出力 Po に変換される。この変換においても平均負荷抵抗係数 Rav を用いて式(4)で Po を求める。

$$Po = Rav \cdot (No / 100)^3 \dots\dots\dots (4)$$

現在の出力 Pe は式(5)で求める。

$$Pe = Fle \cdot (Ne / 100) \dots\dots\dots (5)$$

ここに、添字 e はフィードバック値を表す。

4.2 新主機制御方式のシステム化への適用

今回開発した制御方式の適用には、新たなセンサや信号接続の追加を必要とせず、システムの設計に影響を与えない。式(3)~(5)から分かるように、本来ガバナが持っている回転速度とフューエル・インデックスを用いて、ガバナ独自で海象状態の推定や各モードの制御を行っている。すなわち、新主機制御方式は、ソフトウェアの更新のみで実現できるものである。

最新の当社製主機リモコン・ガバナ制御装置 BMS-2000 に、新主機制御方式の組み込みを行った。就航船の中でも BMS-2000 を搭載した就航船は、ソフトウェアの更新のみで適用が可能である。また、一世代前の制御装置 BMS-2000 を搭載した就航船では、最低限のハードウェアの交換で新主機制御方式を導入できるように開発を完了している。

新主機制御装置の画面の一例を図9に示す。新主機制御装

置には、回転速度、フューエル・インデックス、掃気圧、負荷抵抗係数などの統計データを蓄積する機能も備えており、今後の制御のチューニングや評価に役立てていく予定である。

4.3 機能検証

新主機制御システムを組み込んだ実機制御装置とVPSを組み合わせた機能検証のための陸上試験を行い、すべての機能が正常に作動することを確認した。パラスト状態で荒天に遭遇した時には、海面とプロペラとの距離が短く、フューエル・インデックスの変動が極めて大きくなるため、この状態に対する制御性能は、特に重点的に検討・検証を行った。

実船計測で得られた負荷抵抗変動パターンを使ったシミュレーション結果を図10に示す。

図10(a)は、従来の回転速度制御での動作を示している。回転速度をできるだけ一定に保つためにフューエル・インデックスが大きく変動している。掃気圧は、長周期(100秒以上)で変動しており、また、短周期(10～20秒)の変動も見られる。

図10(b)は、フューエル・インデックス制御での動作を示している。フューエル・インデックスが固定され、負荷抵抗の変動に合わせて回転速度が大きく変動している。掃気圧は、長周期の変動が回転速度制御に比べて小さくなったが、短周期の変動が残っている。

図10(c)は、従来の回転速度制御と手動燃料制限機能を組み合わせた場合の動作を示している。掃気圧の短周期の変動はほとんど抑えられたが、長周期の変動は残っている。

図10(d)は、出力制御での動作を示している。掃気圧の変動が他のモードに比べて極めて小さくなった。出力制御では、過給機、排気、掃気系の変化を最小限に抑えて、良好な燃焼状態を維持できることが分かる。

5. おわりに

新主機制御システムを組み込んだ実機制御装置の陸上試験を実施し、新主機制御システムのすべての機能が正常に作動することを確認し、穏やかな気象・海象下に留まらず、外洋航海中における気象・海象下でも一層の燃費削減効果が期待される新主機制御システムの商品化に目処が立った。今後、複数の就航船において、新主機制御装置の実船検証試験を計画中であり、良好な結果が得られることが期待される。

なお、今回の実船計測は、三造企業株式会社の協力のもとに実施したものである。

参考文献

- 1) IMO : INTERIM GUIDELINES ON THE METHOD OF CALCULATION OF THE ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX FOR NEW SHIPS, MEPC.1/Circ.681, (2009)
- 2) IMO : GUIDELINES FOR VOLUNTARY USE OF THE SHIP ENERGY EFFICIENCY OPERATIONAL INDICATOR (EEOI), MEPC.1/Circ.684, (2009)
- 3) 平野 : 初期設計時における船の操縦運動計算法について, 日本造船学会誌, 147(1982-6), p. 144
- 4) 平野 : ほか : 船舶の操縦運動計算システムの開発, 三井造船技報, 122(1984-6), p. 1
- 5) 小林 : ほか : 船舶の耐航性に関する理論計算プログラム(その1 理論計算式), 三井造船技報, 82(1973-4), p. 18
- 6) 仁保 : ほか : 新しい船体構造解析トータルシステムの開発(第1報) - 概要及び運動・波浪荷重解析サブシステム -, 三井造船技報, 157(1996-2), p. 1
- 7) 内藤 : ほか : 波浪中における船速低下の推定法に関する研究, 日本造船学会論文集, 146(1979-12), p. 147
- 8) 湯浅 : 斜波中の船体運動によるプロペラ負荷変動の算定(その1), 日本造船学会論文集, 136(1974-12), p. 69

〔問い合わせ先〕

機械・システム事業本部 機械工場 技術開発部
TEL 0863 - 23 - 2360 田中 一郎



田中 一郎 三上 隆 青木 猛 山本 秀則

固体ソース電子磁気共鳴 (ECR) プラズマを用いた LED 用インジウムスズ酸化膜 (ITO) 成膜装置

天 沢 敬 生* 鳥 居 博 典** 廣 野 滋** 岡 崎 良 弘***

Deposition System of ITO Thin Films for LED Application Using Solid-Source ECR Plasma

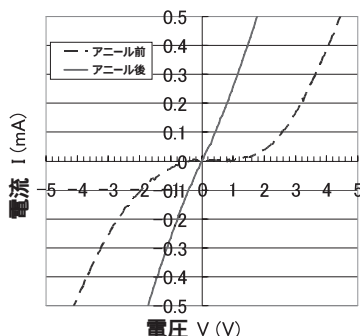
Takao AMAZAWA, Hironori TORII, Shigeru HIRONO, Yoshihiro Okazaki

The market for blue or white light emitting diodes (LEDs) is expected to expand significantly in the near future as their use in TV backlights and lighting devices grows. MES Afty manufactures and sells electron cyclotron resonance (ECR) plasma deposition systems as a unique technology, and these systems are expected to be used for the deposition of high quality transparent conducting electrodes of LEDs. As a result of studying ECR deposition technology of indium tin oxide (ITO, a typical transparent conducting film) top level characteristics such as resistivity and flatness of the film have been obtained by effectively utilizing ECR plasma irradiation. Furthermore, the ohmic contact to p-GaN has also been realized.

青色または白色発光ダイオード (LED) は、テレビのバックライトや照明用途として、今後、巨大市場を形成することが予想されている。MES アフティ株式会社では、独自技術である電子磁気共鳴 (ECR) プラズマを用いた成膜装置の製造販売を展開しており、マーケット拡大の一環として、LED 向けの高品質透明導電膜への適用を検討した。

代表的な透明導電膜であるインジウムスズ酸化膜 (ITO) について成膜技術を検討した結果、ECR プラズマ照射を有効に利用することにより、抵抗率や平坦性などでトップレベルの特性が得られた。また、これまで困難であった p 型窒化ガリウム (GaN) に対する直線性の電圧 - 電流特性 (オームックコンタクト) を実現した。LED 生産では、薄膜の基本特性のほかに、生産コストと量産性が極めて重要となることから、各種基板サイズに対応した高スループットの ECR プラズマ成膜装置を開発・製品化した。

開発した ITO 膜 (成膜技術)	特徴
超平坦膜 (パルスフロー ITO)	平均表面粗さ: 0.2nm (業界トップ)
超低抵抗膜 (エピタキシャル ITO)	抵抗率: $1.4 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$ (業界トップレベル)
高耐熱性膜 (多結晶 ITO)	600°C アニールに対応
オームックコンタクト膜 (コンタクト ITO)	ITO/p-GaN オームックコンタクト 実現



新たに開発した ECR-ITO 膜

オームックコンタクト特性
(ECR-ITO / p-GaN)

ECR-ITO 成膜装置 (AFTEX-9800)

図 1 開発した ECR-ITO 膜と成膜装置
Newly Developed ECR-ITO Films and Deposition System

* MES アフティ株式会社 八王子工場 技術設計部

*** 機械・システム事業本部 事業開発部

** MES アフティ株式会社 開発部

1. ECR プラズマ成膜により高品質 ITO 膜とオーミックコンタクトを実現

1990 年代に青色発光ダイオード(Light Emitting Diode : LED)が実用化されて以来、透明導電膜材料としてのインジウムスズ酸化膜(Indium Tin Oxide : ITO)は電子ビームなどの蒸着法を用いて形成されてきた。しかしながら、バッチ処理方式の蒸着法では、毎回、成膜チャンバを大気開放するため高品質な ITO 膜が得られず、ロット間ばらつきや自動化などの観点からも、今後の高輝度 LED への対応は困難となっている。ITO 膜を多量に用いる液晶パネル生産など、ほとんどの分野では、既にスパッタ法に置き換わっているにもかかわらず、LED プロセスにおいて現在まで蒸着 ITO が用いられてきた最大の理由は、GaN に対する直線性のある電流 - 電圧特性(オーミックコンタクト)が蒸着法でしか得られなかったことによる。

MES アフティ株式会社では、従来から電子サイクロトロン共鳴(Electron Cyclotron Resonance : ECR)プラズマ成膜装置の製造販売を展開しており、特にブルーレイレコーダなどに用いられる青色レーザ生産では欠かすことのできない装置となっている。これは青色レーザに用いる GaN 基板に、低ダメージで高品質な光学膜を形成できることによるものであり、この特徴は同じ GaN を用いる LED 向け装置にも活かせるのではないかと考えた。ITO 膜は、成膜条件やアニール処理によって抵抗率や透過率などの膜質が極端に変化し、一方、LED に用いる ITO 膜に要求される特性も、基本となる抵抗率や透過率、コンタクト特性のほかに、表面粗さ、応力、薬品耐性など多岐にわたっている。

以上の観点に立って、LED 向け ITO の成膜技術とその後のアニール処理を検討した結果、ECR プラズマ流を有効に利用することにより、膜品質を保ちながらオーミックコンタクトを得る新たな ITO 成膜手法を見出した。本報では、その実現方法と特性を報告するとともに、従来の蒸着装置に代わる LED の量産向け ECR-ITO 成膜装置の諸元についても言及する。

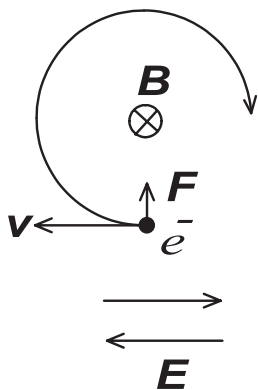


図2 ECR プラズマの生成原理
Principle of ECR Plasma Generation

2. 固体ソース ECR プラズマ成膜の原理と特徴

2.1 ECR プラズマの原理

図2に示すように、電子 e^- の進行方向に垂直の磁場 B を与えると、電子はローレンツ力 F を受けて磁力線の周りを回転運動する。回転の周波数は磁力線の強さに比例し、強い磁場ほど高速に回転する。通常の ECR プラズマでは、875 Gauss の磁場を与えて電子を高速に回転させ、その回転と同一周期の交播電界 E を加えることで、共鳴現象を誘起させて高密度プラズマを持続させる。

このときの電子の回転周波数は 2.45 GHz であり、対応する交播電界はマイクロ波となる。ECR プラズマは、減圧チャンバに磁界と電界を供給するだけで発生し、電極は不要である。電子が電界に沿って直進運動する一般のプラズマに対し、一桁以上低い 0.01 Pa レベルの低圧で、 10^{12} cm^{-3} オーダと二桁高い高密度プラズマが得られる特徴を有する。

2.2 固体ソース ECR プラズマ成膜

ITO 成膜に用いた固体ソース ECR プラズマ成膜装置の基本構成を図3に示す¹⁾。真空排気されたチャンバは、直径 20 cm 程度の ECR プラズマ室と、回転する成膜基板の置かれた成膜室とからなる。これらのチャンバにアルゴンガスを供給した状態で、ECR プラズマ室の周りに配置された磁気コイルに直流電流を流して磁界を発生させ、ECR プラズマ室下方からマイクロ波を投入すると、共鳴条件を満足する ECR ポイントでプラズマが発生する。プラズマは ECR プラズマ室から成膜室に向かって ECR プラズマ流として流れ出て成膜基板に照射される。

プラズマの出口に設置された円筒状のターゲットに高周波(Radio Frequency : RF)パワーを印加すると、ECR プラズマ中のイオンがターゲットに加速され、スパッタリング作用によりターゲット材料を気化して成膜基板上に薄膜を形成する。固体ソース型の成膜は当社独自の方式であり、化学気相成長法(Chemical Vapor Deposition : CVD)のような爆発性、毒性ガスを用いることなく、高活性な ECR プラズマにより、金属原料と酸素・窒素ガスを無加熱で反応させて広範な酸化

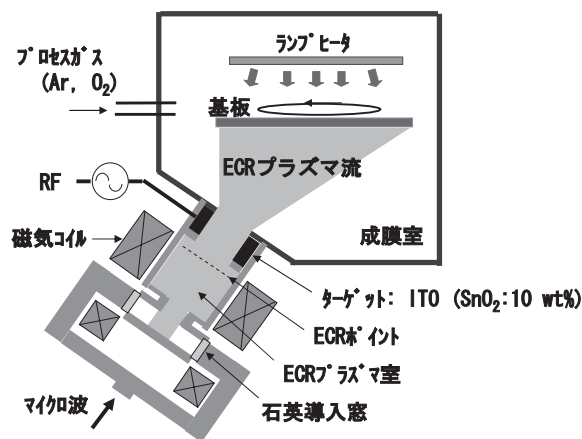


図3 固体ソース ECR プラズマ成膜装置の基本構成
Basic Configuration of Solid-Source ECR Plasma Deposition System

物や窒化物薄膜を得ることができる。

ECR プラズマ源は大きな磁気コイルを有することから小型軽量化に難点があるが、プラズマ源を成膜基板に対して傾ける傾斜回転方式にすることで、3インチ基板用の ECR プラズマ源をそのまま用いて 6～8インチ基板への高均一な成膜が可能となる。また図3では、マイクロ波はいったん2方向に分かれ、両サイドから ECR プラズマ室に導入されている。これは分岐結合方式と呼ばれ、石英製の導入窓をターゲットから見えない位置に配置することで膜付着による経時変化を防ぎ、生産工場での終夜の稼働に十分対応できる装置となっている。

ECR プラズマ成膜において、半導体基板などにダメージを与えることなく高品質な薄膜が得られる理由は、以下の作用による^{2,3)}。図3の ECR ポイントでは磁気コイルで発生した磁力線の周りを多くの電子が回転を始めるが、回転する電子は磁気モーメントを有することから、回転しながら磁界の弱い成膜室に向かって磁力線の周りをらせん状に移動する。このため、重いプラスイオンは電子に引かれて加速され、成膜基板に入射する。電子とイオンの分布によって発生するポテンシャル差は 20～30 V 程度であり、20～30 eV の低いエネルギーの高密度イオンが成膜基板に照射される。

イオンエネルギーが 50 eV を超えるとスパッタリングや結晶欠陥などの問題が発生するが、ECR プラズマ流では、低エネルギー高密度のイオン照射によって、ダメージを与えることなく薄膜成長時の表面マイグレーションや原子間の結合に必要なエネルギーを基板に与え、高品質な薄膜形成が可能となる。

3. ITO 薄膜の形成

3.1 ECR-ITO 膜の主要な形成パラメータ

図3の ECR プラズマ成膜装置に SnO₂ 10 wt% 添加の ITO ターゲットを装着し、各種条件で ITO 膜を形成した。固体ソース ECR プラズマ成膜において最も重要なパラメータは、マイクロ波パワー(最大 1000 W)とアルゴン流量(最大 50 sccm)である。マイクロ波パワーはイオン密度を制御し、アルゴン流量は圧力すなわちイオン密度のほか、イオンエネルギーをも制御する。圧力が高くなると回転する電子の分子衝突確率が増えて基板側への流れが弱まり、イオンを引き出すエネルギーが低下する。ECR に限らず ITO 成膜では微量の酸素ガス添加により膜の抵抗率が大幅に変化することから、重要なパラメータとなっている。本検討では単に流量を可変するだけでなく、流し方にも工夫を加えた。

ターゲットに印加するスパッタパワーは最大 1000 W まで可変でき、主として成膜速度を決めるが、膜質への影響は小さい。磁界を発生させる上下2個のコイル電流は、ECR ポイント位置を変えるだけで膜質には大きく影響しないので、基板回転速度とともにそれぞれ 26 A と 15 rpm の条件で成膜した。ECR 成膜では基板加熱無しで高品質膜が得られることが特徴であるが、一部試料については最大 400 までの基板加熱を行った。

図4に、代表的な条件で成膜した ITO 膜の抵抗率の酸素

流量依存性を示す。このときアルゴン流量は 40 sccm に固定し、マイクロ波パワーと基板加熱有無をパラメータとした。抵抗率は、0.5 sccm 以下の微量酸素流量において最小となり、1 sccm 前後以上で急激に上昇する。抵抗率は、マイクロ波パワーまたは基板温度を上げることで低減される傾向がある。スパッタや蒸着では 10⁻⁴ Ω・cm 台の抵抗率を得るために、通常、200～300 程度の基板加熱を行っているが、ECR 成膜では無加熱でも抵抗率 4 × 10⁻⁴ Ω・cm の ITO 膜を形成することができる。

3.2 パルスフロー成膜法により実現した超平坦 ITO 膜

ITO 膜を液晶パネルのような一般のアプリケーションで利用する場合には、図4に示す低い抵抗率()の領域で成膜することになる。プラスチック基板や有機 EL のように基板の耐熱温度に制約があるアプリケーションもあり、この場合は無加熱で成膜する。一方、LED プロセスでは一般に、ITO 成膜後に 500～600 のアニール処理があり、このアニールによって抵抗率や透過率などの膜質が大幅に変化する。アニール条件によっては特性が成膜後と逆転することもあることから、本節以降では、LED 製作プロセスを想定して、アニール処理後の特性に主眼を置いて評価した。

図5は、アニール後の ITO 膜の抵抗率と表面粗さを酸素流量に対して測定した結果である。表面粗さには、いくつかの定義があるが、ここでは算術平均粗さ Ra を用いている。膜の表面形状や Ra は、アニール前後で大きな差異がみられなかったが、抵抗率は大幅に減少し 10⁻⁴ Ω・cm 台となっている。

同図によると、酸素流量 0 sccm では、抵抗率は低い Ra が約 5 nm と極めて大きい。僅かに酸素を添加することで Ra は約十分の一に低減し、一方で抵抗率は急激に増大した後で飽和している。ITO 膜の原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope: AFM) 写真を図6に示す。酸素流量 0 sccm では、インジウムの凝集によるとみられる大きな凹凸が観察され、酸素添加量とともに徐々に小さな組織に変化している。

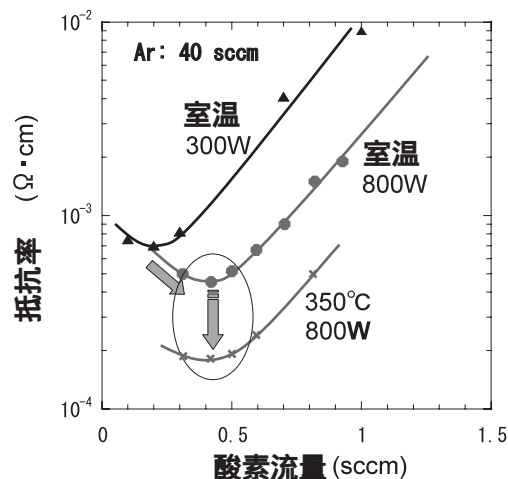


図4 抵抗率の酸素流量依存性
Oxygen Flow Rate Dependences of Resistivity

LED向けのITO膜に要求される最も一般的な特性は低い抵抗率であるが、LEDの構造によっては表面平坦性が極めて重視される。従来の蒸着ITO膜のRaは数nmであり、スパッタ法でも0.5nm以下を実現することは困難といわれている。図5、6の結果からも抵抗率と表面粗さはトレードオフとなっている。そこで、両方の特性を満足させる新たな成膜方法を試みた。図6に見られる酸素流量0sccmの場合に生じるインジウムの凝集は、表面エネルギーの大きな金属では本質的に避けられない。しかし、成膜初期に発生する核が大きく成長する前に表面エネルギーの小さな酸化層で覆えば、核成長が停止して凹凸が低減されると考え、確認のための成膜を行った。具体的な成膜方法としては、酸素0sccmで成膜中に、パルス的に一定流量の酸素を流す手法を採用した。この方法によれば、微量な酸素流量制御に代えて、酸素流量と開閉の時間分割比で制御できることから、ITOの成膜をより精密に制御でき、最適な特性を再現よく得ることが可能となる。

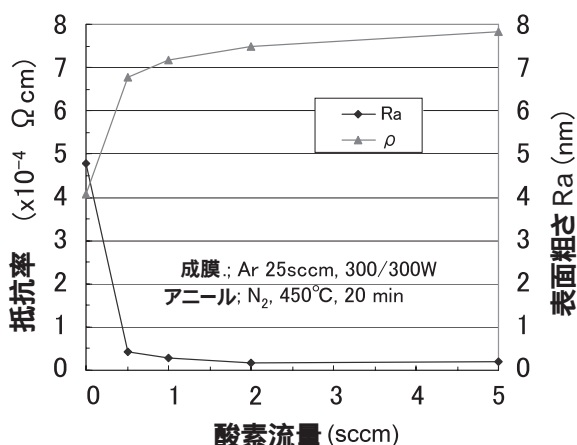


図5 アニールしたITO膜の抵抗率と表面粗さの酸素流量依存性
Oxygen Flow Rate Dependences of Resistivity and Surface Roughness of ITO Films after Annealing

酸素流量と分割比をパラメータとして検討した結果、幅広い条件において低抵抗で平滑なITO膜を形成できることが確認された。図7は、一例として、成膜とアニール処理を図5と同様の条件に設定し、酸素流量を1.5sccmとして2.5秒間隔で開閉を繰り返して成膜したITO膜のAFM写真である。ITO膜の表面粗さは0.22nmと小さく、また抵抗率も $5.7 \times 10^{-4} \text{ cm}$ と低く抑えられており、目標とする膜質が得られた。

図8は、ITO膜の透過特性について、通常の成膜とパルス成膜を比較したものである。これらのサンプルは、サファイア基板上に100nmのITOを成膜し、基板材質の影響を排除しITO膜自身の吸収の有無を見るため、分光光度計を用いて透過光と反射光との和を波長に対してプロットした。ITO膜の透過率はいずれも最大99%以上であり、可視光線の波長である約400~約800nmの範囲で良好な特性が得られていることが確認できた。なお、同一パワー条件ではパルス成膜により僅かに短波長側に伸びることが分かる。

LEDの製作プロセスの中にはレジストリフトオフを用いてITOのパターンを形成するものもある。レジストは応力で容易に変形し、耐熱温度も100程度と低いことから、低温形成で低応力のITO膜が必要となる。パルス成膜ではレジストが変形しない程度の低い応力のITO膜を無加熱で形成でき、このような用途にも適用できる。

以上のとおり、パルス成膜法によって、これまで他の成膜法で実現されていないレベルの超平坦ITO膜が得られたことから、今後、LEDのほか、有機ELの下地膜などへの応用も考えられる。

3.3 世界初のGaN基板上へのITOエピタキシャル成長

ECRプラズマ成膜法は基板加熱無しで高品質な薄膜を形成できることに特徴があるが、ITO膜の場合には図4のように、マイクロ波パワーが高いほど、また基板温度が高いほど抵抗率が低減される傾向がみられた。そこで、マイクロ波パワーをできるだけ高く設定して、基板温度によるITO膜の特性の変化を調べた。

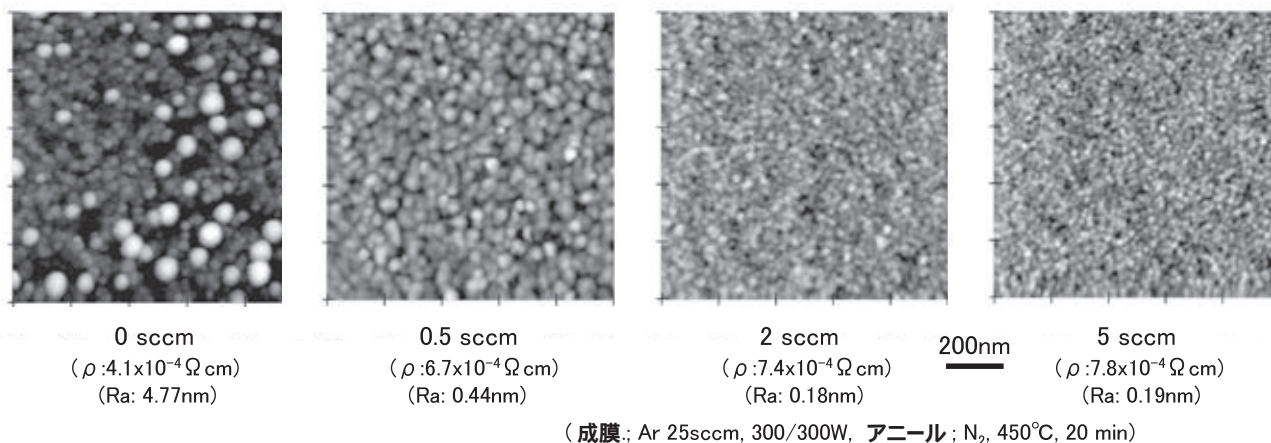
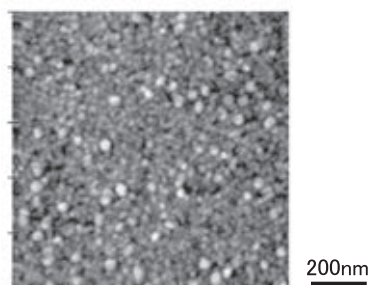


図6 各種酸素流量で成膜したITO膜の表面モフォロジー
Surface Morphology of ITO Films deposited at Various Oxygen Flow Rate



(Ra: 0.22nm, ρ : $5.7 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$)

図7 パルス成膜 ITO 膜の表面モフォロジー
Surface Morphology of Pulse Deposition ITO Film

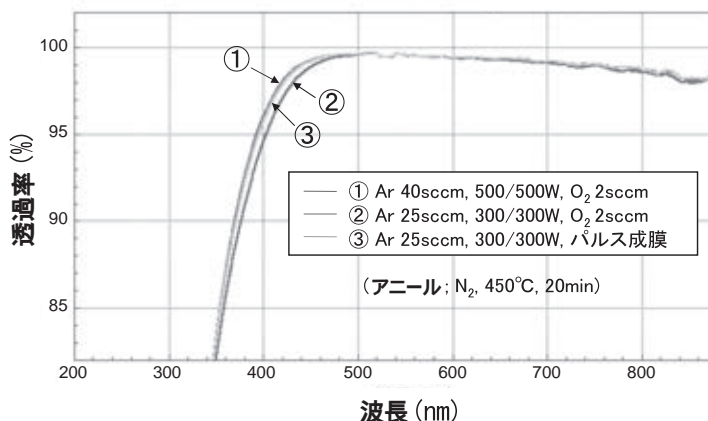
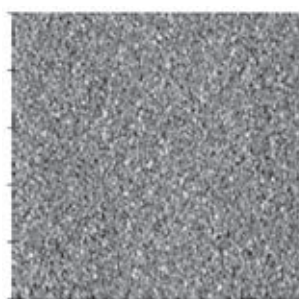
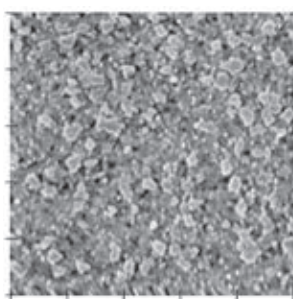


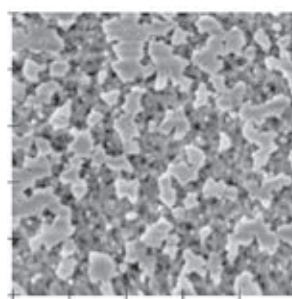
図8 ITO 膜の透過率
Transmission Characteristics of ITO Films



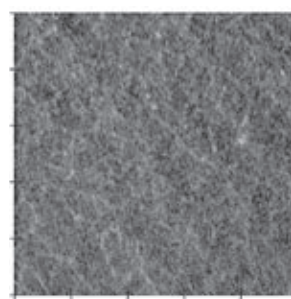
室温
(ρ : $4.2 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$)
(Ra: 0.92nm)



150°C
(ρ : $2.6 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$)
(Ra: 3.0nm)



250°C
(ρ : $1.9 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$)
(Ra: 4.5nm)



350°C
(ρ : $1.4 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$)
(Ra: 0.48nm)

図9 各種基板温度で成膜した ITO 膜の表面モフォロジー
Surface Morphology of ITO Films deposited at Various Substrate Temperatures

図9は、酸素流量を抵抗率が最も低くなる 0.5 sccm に設定し、マイクロ波パワー 800 W で成膜した ITO 膜の AFM 写真である。表面モフォロジーは基板温度とともに凹凸が大幅に増大するが、350 °C では平坦な表面となっている。一方、抵抗率は基板温度とともに単調に減少し、350 °C では $1.4 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}$ と極めて低い値が得られた。基板温度が高くなるに従って結晶粒が成長して表面粗さが増大することは一般的な傾向であり容易に理解できるが、350 °C で平坦になる現象については、解釈が困難である。そこで、膜の結晶性について X 線回折を用いて調べた。

図10は、各基板温度で成膜した ITO 膜の -2 回折パターンである。無加熱及び 150 °C 加熱による ITO 膜は様々な面方位からの回折ピークが見られ、一般的な多結晶膜となっているが 350 °C のサンプルでは $\{001\}$ 面による回折ピークのみが観察されており、配向性の高い結晶であることが分かった。後者では、ITO 結晶膜の $\{001\}$ 面が全て基板に平行に揃っていることになるが、個々の結晶粒が基板面で回転している多結晶膜である可能性もある。そこで、このサンプルに対して更に (222) 面の ω スキャンを試みたところ 12 回対称性を示し、ばらばらに回転した多結晶ではなく、サファ

イア基板上に 3 ドメインでエピタキシャル成長していることが確認された。ロッキングカーブの半値幅は 0.025° と優れた結晶性を示した。

石英ガラスのようなアモルファス基板を用いた場合には、350 °C で成膜しても荒れた膜となり多結晶であった。ITO 膜を LED に適用する場合には下地が GaN 結晶となることから、c - 面 GaN エピタキシャル膜 / サファイア基板についても調べた。その結果、同様の成膜条件で GaN 上でも平坦な ITO エピタキシャル成長が確認されたが、 -2 の回折ピーク及び ω スキャンから、 $\{001\}$ 面ではなく $\{111\}$ 面でエピタキシャル成長していることが確認された。

サファイア基板と GaN 基板はいずれも c 面であり、両者でエピタキシャル ITO の配向が異なる理由は明らかでないが、基板と ITO 結晶の格子定数の比例関係で決定されることも考えられる。両者とも低抵抗、平坦な膜であり、膜成長初期の配置関係を除いたバルクとしての膜の性質は同等と解釈される。一般の蒸着 ITO 膜などの抵抗率は、電子の粒界散乱の影響が大きく、膜厚数 100 nm 程度以下では膜厚の減少と共に抵抗率が増大する傾向を示すが、エピタキシャル成長した ECR-ITO 膜の抵抗率は 10 nm レベルまで抵抗増大はみられ

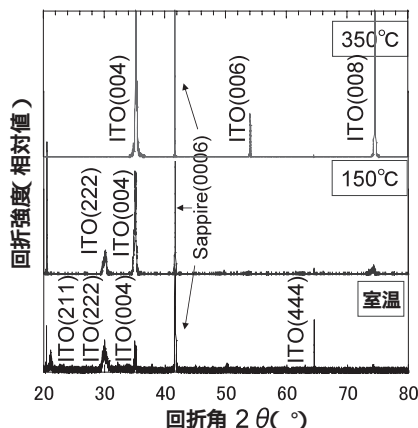


図10 各種基板温度で成膜したITO膜のX線回折パターン
X-ray Diffraction Patterns of ITO Films deposited at Various Substrate Temperatures

ず、2つの表面のみで散乱される理想的な薄膜となっている。

ITO膜のエピタキシャル成長に関しては、これまでにPLD (Pulse Laser Deposition)法により、基板温度600以上でエピタキシャル成長することが報告されているが⁴⁾、実用可能な350でのGaN基板上へのエピタキシャル成長は初めてであり、LEDプロセス以外でも各種応用が期待される。

エピタキシャルITO膜は、極めて低い抵抗率を有し、平坦性も良好である。ただし、アモルファス材質の基板上では凹凸の激しい膜となる。そこで、エピタキシャル成長しなくとも、極端な凹凸とならない条件を探索したところ、成膜速度を低く抑えてECRプラズマ流の照射を強化すると、結晶粒が均質化して凹凸が低減される傾向がみられた。エピタキシャル成長の条件において、マイクロ波パワー900W、スパッタパワー150Wで成膜したITO膜は表面粗さが1nm程度となり、抵抗率も 1.7×10^{-4} cmと良好であった。この多結晶ITO膜は膜質が下地に依存せず、600程度のアニールに対する抵抗率増大も少ないことから、汎用性に優れた膜といえる。

4. 実現したITO/p-GaN オーミックコンタクト特性

検討を始めるに当たって、これまで広く用いられている蒸着法と、オーミックが困難といわれているスパッタ法とを用いてITOを形成し、p-GaNとのコンタクト特性を評価した。

試料作製手順としては、サファイア基板上に有機金属気相成長法(Metal Organic Chemical Vapor Deposition: MOCVD)を用いてMgドープGaNをエピタキシャル成長し、活性化熱処理を行ってキャリア濃度 10^{18} cm⁻³のp-GaNを得た。この基板を希フッ酸を用いてライトエッチし、その上にITO膜を形成した。成膜条件は、蒸着、スパッタとも、基板加熱無し、微量酸素添加、膜厚100~200nmに設定した。また電極形成後のアニールは、ゴールドイメージ炉を用い、窒素ガス1slm、550、5分で処理した。

図11にI-V特性の測定結果を示す。スパッタの場合、アニール有無のいずれもショットキー特性を示しているが、

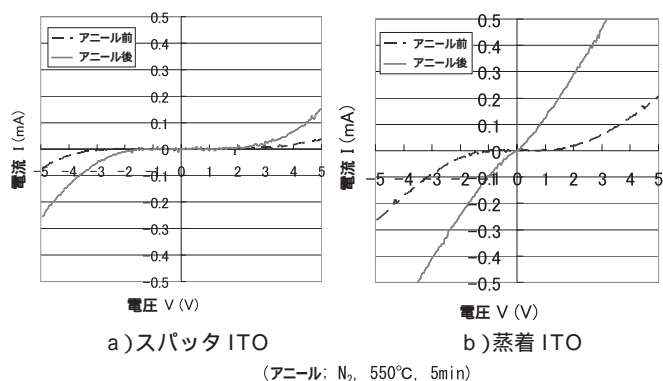


図11 スパッタ及び蒸着ITO/p-GaNコンタクトのI-V特性
I-V Characteristics of sputtered and evaporated ITO/p-GaN Contacts

蒸着では、アニール後にはオーミック特性が得られている。以上の結果は、これまでに論文や特許などで報告されている傾向と同様であり⁵⁾、本実験においてもスパッタITOではオーミックコンタクトを得られないことが確認された。

上記検討によって、オーミックコンタクトの可否を評価するための試料作製プロセスと測定法が明らかとなったので、同上の手法を用いて、ECR-ITO膜の成膜パラメータとp-GaNコンタクト特性との関係を調べた。

成膜パラメータの各条件を最大限に変化して検討した結果、全ての特性がショットキーを示すなかでも、酸素流量が少ないほど(0~0.5sccm)、またマイクロ波パワーが高いほど電流が流れやすくなる傾向が得られた。そのほか、基板加熱は特性を悪化させ、また、スパッタパワーや成膜圧力に対しては顕著な依存性はみられなかった。ITO成膜後のアニール条件に対しては、アニール温度を高くするに従ってI-V特性が改善されたが、600以上でアニールするとITO膜自身の抵抗率が急激に増大するので、アニール温度は550~600程度に限定されることが明らかとなった。

一方、ITO/p-GaN界面の膜厚5~10nm程度のITOのみを変化する試みを行ったところ、コンタクト特性は界面側のITO成膜条件によって決定され、界面と離れたITO膜の影響は小さいことが判明した。そこで、界面側10nm程度のITOの成膜を細かく分割して成膜とECRプラズマ流照射を繰り返す工夫を行ったところ、コンタクト特性が大きく改善され、実用可能レベルの良好なオーミックコンタクトを得ることができた。図12は、界面コンタクト層の有無によるI-V特性の差を比較したものである。マイクロ波パワー700W、スパッタパワー500Wで形成した膜厚100nmの Puls成膜だけではアニール後もショットキー特性を示すのに対し、界面に10nmのコンタクト層を挿入したサンプルではI-V特性が直線性を示し、オーミック特性が得られている。このように、ECRプラズマ流照射量を増やすことでオーミックとなるメカニズムは、現在、明らかとなっていない。

従来、蒸着ITOで容易にオーミックコンタクトが取れる一方、スパッタ法では長年の努力にもかかわらずオーミックが得られていないことから、現実的な解決策として、膜厚

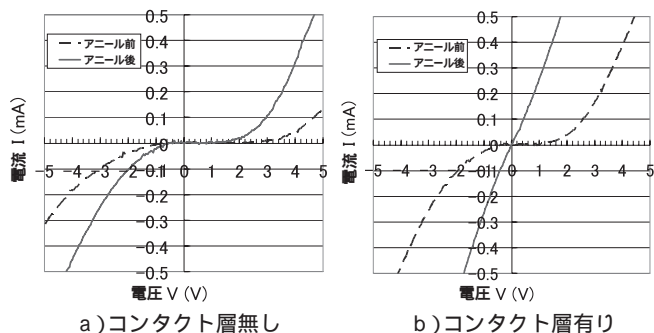


図 12 ECR-ITO/p-GaN コンタクトの I-V 特性
I-V Characteristics of ECR-ITO/p-GaN Contacts

表 1 代表的な ECR-ITO 膜の特性
Characteristics of Typical ECR-ITO Films

ITO 成膜技術	成膜条件	特徴	屈折率	抵抗率 (10^{-4} cm)	平均表面 粗さ (nm)
パルスフロー ITO	酸素ガスの パルス制御	超平坦	2.05	5 (熱処理後)	0.2
エピタキシャル ITO	加熱 ECR プラズマ流照射	超低抵抗	1.75	1.4	0.5
多結晶 ITO	加熱 ECR プラズマ流照射	高耐熱性	1.9	1.7	0.9
コンタクト ITO	ECR プラズマ流照射	オーミックコンタクト (ITO/p-GaN)	1.9	3.5	0.4

(ITO 膜厚: 100 nm)

10 nm 程度の薄い蒸着 ITO 層を形成した上にスパッタ ITO を成膜するといった特許もいくつか出されている⁶⁾。これらの特許も含め多くの文献において、スパッタでオーミックとならない理由はスパッタダメージによるものとされている。しかし、本検討においては ECR プラズマ流照射を強化することによってオーミック特性が得られており、単純なダメージでは説明できない。ITO/p-GaN 界面に、InGaO₃ や InGaON などの仕事関数の大きな反応層が形成されることがコンタクト特性改善に寄与するとの報告もあり⁷⁾、今後、ECR プラズマ流による反応促進やキャリア活性化効果などを調べる予定である。

5. LED 向け ITO 成膜装置

前章までの検討から、ECR プラズマ成膜を用いることにより、LED の p 型電極に適用するために必要な各種特性を十分満足できることが確認された。蒸着、スパッタ、ECR いずれの ITO 膜においても、成膜条件とアニール条件の組み合わせによって膜質は大きく変化し、LED で必要とする抵抗率 ($2 \sim 5 \times 10^{-4}$ cm) や透過率 (95 ~ 99%) を個別に確保することは可能である。しかし、コンタクト特性をはじめ、表面粗さや薬品耐性なども含めて LED の品種とプロセ

表 2 ECR-ITO 成膜装置の諸元
Specifications of ECR-ITO Deposition System

型式	AFTEX - 9800S	AFTEX - 9800W	AFTEX - 9800T
搬送方式	CtoC 枚葉式		
ECR プラズマ源	1元	2元	3元
本体床面積 (m ²)	1.5 x 3	3 x 3	3 x 4
トレイサイズ	200		
トレイ/Lot/時間	6トレイ/Lot/140分	12トレイ/Lot/140分	8トレイ/Lot/140分
6" ウエハ(枚/Lot)	6枚	12枚	18枚
4" ウエハ(枚/Lot)	18枚	36枚	54枚
3" ウエハ(枚/Lot)	30枚	60枚	90枚
2" ウエハ(枚/Lot)	72枚	144枚	216枚
抵抗率 (cm)	$1.5 \sim 5 \times 10^{-4}$		
透過率 (%) @ : 500 nm	> 99.5		
表面粗さ Ra (nm)	0.2 ~ 1		
オーミックコンタクト			
緻密性・安定性			
備考	・ウエハ処理枚数は、20分/トレイとした場合の計算。 膜構成や成膜法で変化する。		

スに応じて必要な特性をトータルとして満足する条件を見出すことは困難である。

蒸着 ITO では、良好なオーミックコンタクトが得られる一方で、Ra が数 nm 程度と凹凸の大きい粗な膜のために、パターニングなどのプロセス中に薬品がしみ込んで穴が開くなどのトラブルが生じやすい。LED の高輝度化に向けて、抵抗率や透過率、平坦性は極限的な性能を求められる品種が増えているが、これらの特性は互いに相反する傾向があり、ITO の膜種も LED に応じて細分化されつつある。このような中で、スパッタ法も精力的に検討されており、最近になって装置構造の工夫などで、ある程度のオーミックコンタクトが得られるとの情報もあるが確かではない。

本検討の結果、ECR 成膜によって各種の特徴ある ITO 膜が得られ、これらをレシピ操作で組み合わせて用いることにより、これまでの蒸着法に代わる多くの特性を満足する ITO 膜が実現された。代表的な ECR-ITO 膜とその特徴を表 1 にまとめて示す。パルスフロー成膜では表面粗さ 0.2 nm、エピタキシャル成膜では抵抗率 1.4×10^{-4} cm と、いずれも業界トップレベルのデータが得られ、p-GaN とのオーミックコンタクトも実現された。また、多結晶 ITO のように、熱処理に対する膜質変化の少ない膜も形成でき、アプリケーションによって幅広い選択が可能である。これらの ITO 膜を LED に適用しての検証はこれからの課題であるが、これまでのデモにおいて良好な結果が得られつつある。

ITO を成膜する ECR 装置としては、従来の装置ラインナップをもとに ITO 用にカスタマイズすることになる。表 2 は、当社の 8 インチ基板対応 C to C 装置である AFTEX-9800 をベースとした ITO 生産向け装置の仕様である。最大 3 元までの ECR プラズマ源を搭載可能であり、トレイにより 2 ~ 6 インチの各種基板をセットできる。標準の AFTEX-9800 に対していくつかの仕様変更部分がある。

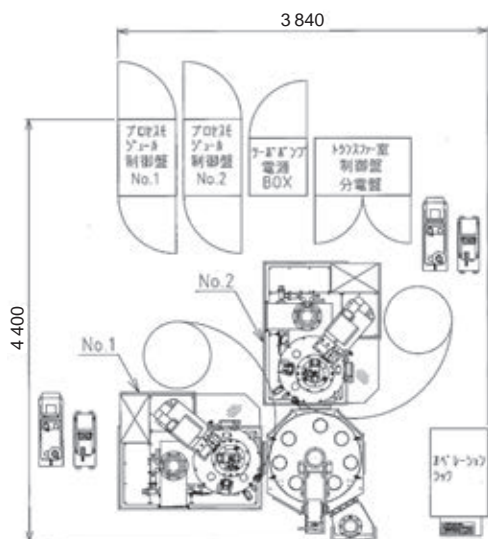


図 13 ECR-ITO 成膜装置のフットプリント
Footprint of ECR-ITO Deposition System

当面のLED生産で主流となる4インチ基板を3枚セット可能とするためにトレイの外径を8インチよりやや大きくし、蒸着装置に対抗しうるスループットとした。またエピタキシャルITO向けに基板温度を400としたほか、成膜シーケンスに関して酸素ガスのパルス制御機能などが追加されている。

図13は、2元タイプのITO成膜装置の配置図である。ECR装置では電源類が多く、蒸着装置と比較するとフットプリントが大きくなるを得ないが、ラックやポンプ類を床下に配置することによってクリーンルーム内のスペースファクタを改善することができる。

6. おわりに

現在、韓国、台湾、中国などの新興メーカーがGaN結晶成長のためのMOCVD装置に巨額な投資を一斉に開始しており、ITO成膜装置への投資も秒読み段階である。今回の検討により、ECR-ITO膜は、超平坦膜、超低抵抗膜、高耐熱性膜という特徴ある優れた膜質とオーミックコンタクトを実現できたことから、従来の蒸着法に置き換わってLED生産に広く利用されることが期待される。また、新たにGaN基板上にITO膜をエピタキシャル成長できることが明らかとなり、光学的・電子的機能を複合した様々な機能デバイスへの展開も考えられる。

ただ、ECR装置は複雑な機構を持つために装置価格や運用コストが蒸着装置に比べて高いという課題を残している。今後は、デバイスメーカーへの積極的なデモ展開を進めるとともに、装置設計や材料調達なども含めたコストダウンを図り、LED装置マーケット開拓を目指す。

参考文献

- 1) T. Ono, et al. : Electron Cyclotron Resonance Plasma Source for Conductive Film Deposition, J. Vac. Sci. Technol., A12, 4(1994), p. 1281
- 2) T. Amazawa, et al. : Ultrathin Oxide Films Deposited Using Electron Cyclotron Resonance Sputter, J. Vac. Sci. Technol., B17, 5(1999), p. 2222
- 3) 天沢 : ECR プラズマの光半導体プロセスへの応用, 精密工学会誌, 73, 9(2007), p. 975
- 4) M. Y. Chern, et al. : A Well-matched Substrate for Epitaxial Growth of Indium Tin Oxide, Thin Solid Films, 515(2007), p. 7866
- 5) T. Margalith, et al. : Indium Tin Oxide Contacts to Gallium Nitride Optoelectronic Devices, 74, 26(1999), p. 3930
- 6) 徳寺 . ほか : 窒化ガリウム系半導体発光素子及びその製造方法, 特許公報, 特許第 3394488 号(2003)
- 7) Y. Toyoshima, et al. : Analysis of ITO/Mg : GaN Interfaces by Synchrotron Radiation Hard X-ray Photoemission Spectroscopy and Their Electrical Characteristics, Applied Surface Science, 255(2008), p. 2149

〔問い合わせ先〕

MES アフティ(株) 八王子工場 技術設計部
TEL 042-632-8845 天沢 敬生



天沢 敬生 鳥居 博典 廣野 滋 岡崎 良弘

新船型 110 000 重量トン型ばら積み貨物運搬船“ Mitsui 110BC ”
 - “ Nord Hercules ”(ノルド ハーキュレス) -



三井造船は、千葉事業所にて建造したリベリア国の CLIO MARINE INC. (クリオ マリン社) 向け 110 000 重量トン型ばら積み貨物運搬船“ Nord Hercules ”(ノルド ハーキュレス) を 2011 年 1 月 21 日に引き渡した。

本船は、将来のパナマ運河拡張を視野に入れ、現在のパナマ運河を通航できる最大船幅 32.3 m を超える船型(オーバーパナマックス型)で、鉄鉱石、石炭及び穀物類の効率的な海上輸送を目指して開発されたものである。更に、新規則を取り入れることにより、環境性能、オペレーションの自由度及び構造安全性の向上を図った新設計のオーバーパナマックス型バルクキャリアの 1 番船となる。

特 長

- (1) パナマ運河拡張を視野に入れて船幅をオーバーパナマックス幅とし、更に、汎用性を重視し主要な石炭揚荷港の制限を考慮した船型としつつ、載貨重量の最大化を図っている。
- (2) 主要想定貨物を鉄鉱石、石炭に加え穀物類とし、十分な船体強度と貨物倉容積を有し、貨物に合わせた効率的な配船が可能となっている。
- (3) 最新の船首形状及び船尾形状の採用並びに高効率プロペラ及び省エネ装置装備により、省エネルギー化を図っている。
- (4) 国際船級協会連合 (IACS) のばら積貨物船のための共通構造規則 (CSR-B) に沿って設計され、オペレーションの自由度の確保と構造安全性の向上を両立させている。
- (5) 船首楼の設置及び船首部予備浮力に関する新規則への対応により、安全性の向上を図っている。
- (6) 貨物倉とバラスタック内は、海上における人命の安全のための条約 (SOLAS 条約) に基づき設置している固定点検設備と可搬式梯子を組合せることで、安全で効率的

な点検が可能となっている。

- (7) ブラジルの鉄鉱石積出港に対応した係船設備を採用している。
- (8) 海洋汚染防止条約 (MARPOL 条約) の燃料油タンク保護規則に対応し、また、汚水溜タンクを設置するなど、環境保護に配慮している。
- (9) 主機関には、コンパクト・高出力で、国際海事機関 (IMO) の排ガス環境基準を満たした三井・MAN B&W ディーゼル機関 6S60MC-C 型を搭載している。

主要目

全長	240.00 m
長さ(垂線間)	233.00 m
幅(型)	43.00 m
深さ(型)	20.70 m
総トン数	60 997
載貨重量トン数	110 944 メトリックトン
主機関	三井・MAN B&W ディーゼル機関 6S60MC-C 1基
連続最大出力	13 560 kW × 105.0 回転 / 分
航海速度	14.5 ノット
最大搭載人数	25 人
船級	NK
船籍	パナマ

(船舶・艦艇事業本部)

[問い合わせ先]

基本設計部

TEL 03 - 5202 - 3522 横田 浩明

博多港社会実験で完全電動トランスレーナが CO₂ 排出削減などの効果を確認



写真1 完全電動トランスレーナ



写真2 ヤード全域に配置したバスバー

三井造船は、国土交通省九州地方整備局 博多港湾・空港整備事務所より受注したアイランドシティコンテナターミナルの電動化設備工事を、平成 22 年 12 月に完成した。

この電動化設備工事は、新規の完全電動トランスレーナ 4 基の他に、既設のトランスレーナ 13 基の電動化改造、ヤード全域への給電用バスバーの設置及び特高受電所からバスバーまでの電源供給と変電の設備を一括して受注したものである。

新規の完全電動トランスレーナは、リチウムイオン電池を搭載することで、レーン替え時に給電用バスバーから分離した場合でも電力を維持でき、世界初のタイヤ式ヤードクレーンの完全電動化を達成した。

また、新規と改造の全 17 基は、両側の脚外側に自動脱着機能付きの給電装置を備えることにより、給電用バスバーへの脱着が自動化され、短時間で自動脱着と共に、自由度の高い運用が可能となっている。

納入後の現地計測によると、電動化による効果をターミナル全体で見た場合、CO₂ の排出量は約 7 割減で、トランスレーナの燃料費を約 5 割削減することができたと評価されている。

今後は、CO₂ 排出削減と省エネルギーのために、このような電動化ターミナルの需要が広がるものと期待される。

特長

(1) 自動脱着機能付き給電装置

自動脱着機能により、給電装置の脱着のための人員が不要で、レーン替え時の省人化を図った。

(2) 再生電力の有効利用

従来は熱として大気放出していたトランスレーナの再生電力を、他の機器に供給することで電力の有効活用を可能

とした。

(3) バスバー給電

バスバー給電により、トランスレーナの配置計画の自由度が広がり、従来と変わらないヤードの運用が可能になった。

主要目の完全電動

(1) 新規トランスレーナ(4 基)

型式 : RT4023-16I-4

定格荷重 : 40.6 t

スパン : 29.45 m

揚程 : 15.24 m

レーン替え動力 : トランスレーナ搭載リチウムイオン電池

(2) 改造トランスレーナ(13 基)

型式 : RT4023-16I-4

定格荷重 : 40.6 t

スパン : 29.45 m

揚程 : 15.24 m

レーン替え動力 : 既設ディーゼル発電機

(3) トランスレーナ給電用バスバー設備

総延長 : 3 873 m (全 15 レーン)

(4) 受変電設備

送り出し盤 : 一式(特高受電所内設置)

変圧器盤 : 一式(ヤード内設置)

(鉄構・物流事業本部)

〔問い合わせ先〕

運搬機システム営業部

TEL 03 - 593 - 3062 加藤 亮太

行滕川橋上部工(P6～A2)工事 - 合理的な断面構成，ライフサイクルコストの低減 -



写真1 完成時全景

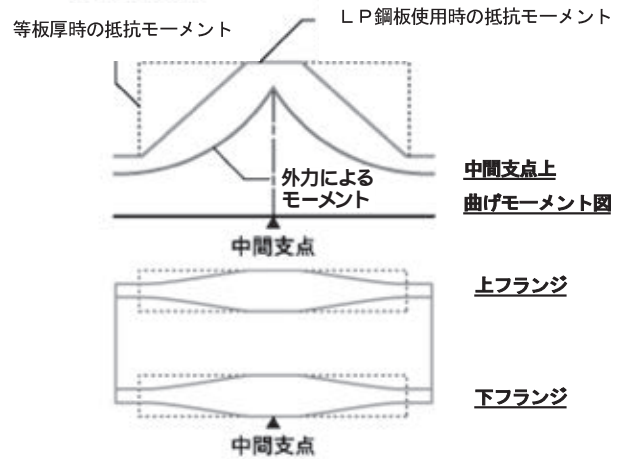


図1 LP鋼板の概念説明図¹⁾

延岡道路は、国道10号の交通混雑を緩和するために計画された延長20.6kmのバイパスである。この道路は、自動車専用道路であり、すでに開通している延岡南道路と接続することにより、宮崎の県北地方拠点都市地域の骨格を成す路線と位置づけられている。

行滕川橋は、この延岡道路の北川IC～延岡IC間に位置する橋梁であり、行滕川を跨いで架橋される(写真1)。

特長

(1) 合理的な断面構成

鋼少数主桁形式の採用

鋼少数主桁とは、耐力・耐久性に優れた床版構造を採用することにより、主桁間隔を広げ主桁本数を減らし、横構・対傾構を省略することのできる構造形式である。

従来の鉄筋コンクリート床版を採用した多主桁の構造形式に比べ、施工の大幅な省力化やメンテナンス性の向上を図ることができる。なお、床版には、鋼板パネルとコンクリートが一体となって荷重に抵抗することのできる合成床版を採用している。

LP鋼板¹⁾の採用

通常1枚の鋼板は、全体にわたり板厚が一定であるのに対し、1枚の鋼板の中で板厚を長手方向に変化させたものがLP鋼板(Longitudinally Profiled Steel Plate)である(図1)。

このLP鋼板を主桁の上下フランジに使用することにより、必要断面力に応じた合理的な断面を構成している。

(2) ライフサイクルコストの低減

耐候性鋼材の採用

耐候性鋼材とは、無塗装のまま年月と共に表面にち密

な錆(保護性錆)を形成することで優れた防食性能を発揮する鋼材であり、近年重要な課題となっているライフサイクルコストの低減を目的として本工事で採用している。

耐候性鋼用表面処理剤(景観仕様)の採用

耐候性鋼用表面処理剤とは、耐候性鋼材表面の保護性錆の形成を補助し、架設初期の錆むらの発生や錆汁の流出を防ぐために鋼材表面に被膜を塗布する処理剤である。

本工事では景観性を考慮し、主に見えがかりの部分に着色タイプの耐候性鋼用表面処理剤を採用している。

主要目

工事名：宮崎10号行滕川橋上部工(P6～A2)工事
 発注者：国土交通省九州地方整備局延岡河川国道事務所
 工事場所：宮崎県延岡市天下町地内
 橋梁形式：鋼3径間連続非合成少数鋼桁橋
 床版形式：合成床版 $t = 210 \sim 240 \text{ mm}$
 橋長：162 m，支間長：57.85 m + 58.5 m + 44.25 m
 平面線形：R = 2 000 m，縦断勾配：1.298%，横断勾配：2%
 有効幅員：12.394～24.618 m，鋼重：920 t
 主要鋼材：SMA570W，SMA490AW，SS400，S10TW

参考文献

1) 一般社団法人日本鉄鋼連盟：LP鋼板，<http://www.jisf.or.jp/business/tech/bridge/high/lp.html>，(2011-4-19)

(鉄構・物流事業本部)

〔問い合わせ先〕

鉄構運搬機工場 鉄構設計部

TEL 097 - 593 - 3773 大野 幸生

大分県 神崎跨線橋
- ニッケル系高耐候性鋼の使用と維持管理 -



写真1 完成時全景

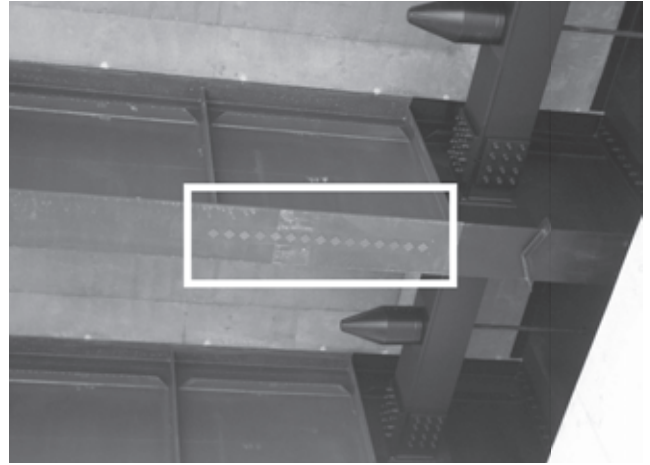


写真2 ワッペン式暴露試験部(白枠内)

県道木田神崎線は、大分市木田を起点として本神崎で国道197号に接続する延長6.3kmの一般地方道である。大分県では、県内の地方中核都市への連絡強化及び都市と農山村との交流促進を支援する道路設備の充実が図られており、大分市と臼杵市を結ぶ広域ネットワークの構築、通学路の安全確保という役割で、木田神崎線の整備が展開されている。神崎跨線橋はこの木田神崎線整備事業の一環であり、九州旅客鉄道株式会社の日豊本線上に跨線橋を架けることで、現道の線形の不良、狭あい区間の解消も担っている。

神崎跨線橋は3橋で構成されており、日豊本線直上はPC桁、両端の隣接橋は鋼桁である。三井造船は、これら鋼桁2橋を平成22年3月に大分県大分土木事務所より受注し、翌平成23年3月に無事故で納めることができた(写真1)。

特長

(1)ニッケル系高耐候性鋼の採用

現在の無塗装耐候性鋼橋梁の現地適用性評価は、道路橋示方書により飛来塩分量0.05 mdd以下、又は離岸距離により定められている。本橋は、別府湾(太平洋沿岸部)からの離岸距離が0.5 kmに位置し、現道路橋示方書によるJIS耐候性鋼(JIS G 3114)では適用範囲外(当架設地点は2 km以内)であることから、1%ニッケル系高耐候性鋼が採用された。

(2)ワッペン式暴露試験による維持管理

最近の耐候性鋼橋梁の防食設計に関する研究では、腐食に与える環境因子は、飛来塩分量以外に温度や湿度などもあることを考慮し、耐候性鋼材の腐食量を直接測定する方法としてワッペン式暴露試験が提案されている。ワッペン式暴露

試験は、従来の飛来塩分測定に比べて回収頻度が1年に一回と少ないこと(従来法では毎月回収)、直接測定のため評価精度が高いこと(従来法では間接指標の評価)、長期間評価が可能など優れる点が多い。そのため、本橋では、架設後におけるニッケル系高耐候性鋼の現地適用性検証や維持管理に役立てるため、ワッペン式暴露試験を採用した。試験の内容は、薄手の小型試験片を両面粘着テープで橋梁部材に貼り付け、その後、ある頻度で試験片を回収し腐食量を調査する(写真2)。また、調査した腐食量と腐食予測技術を合せることにより、長期の腐食減耗量を推定することができるため、維持管理への活用及び県内他地域へのニッケル系高耐候性鋼の現地適用性評価にも参考データとして活用できる。

主要目

工事場所：大分市大字本神崎

A1-P1 橋梁

橋梁形式：鋼単純非合成鈹桁橋

橋長：20.0 m, 支間長：19.0 m, 鋼重：35 t

P2-A2 橋梁

橋梁形式：2径間連続非合成鈹桁橋

橋長：45.0 m, 支間長：20.5 + 23.5 m, 鋼重：71 t

幅員：11.0 m(有効幅員：10.0 m)

主要鋼材：SMA490W-MOD, SMA400W-MOD, S10TMR

(鉄構・物流事業本部)

〔問い合わせ先〕

鉄構運搬機工場 鉄構設計部

TEL 097 - 593 - 3773 太田 真二

高性能レーダシステムを搭載した新型空洞探査車による探査サービスを開始
 - 3次元地中リアルモード表示機能を搭載 -



写真1 新型空洞探査車

株式会社三造試験センターは、路面下空洞探査業務での探査性能の向上と作業の迅速化を図るため、3次元地中リアルモード表示機能をもつ高性能レーダシステムを搭載した新型空洞探査車を開発した。(写真1)

空洞探査は、昭和63年5月に東京都で道路の陥没事故が発生し、その後も陥没事故が多発したことから、その必要性が高まることとなった。このような状況より、当社では平成3年からいち早く事業展開し、現在までに延べ6000kmの調査実績を有している。

従来型空洞探査車の課題

路面下の空洞探査は、地中レーダ装置を搭載した車輛を走行させながら、電磁波の送信、反射波の受信を行い、そのデータを解析することで行っている。従来の空洞探査車は、探査幅2mに対し3台の送受信アンテナを配列させ、横断方向0.67mピッチでデータ取得を行っており、この結果から3測線のBモード画像を制作し、空洞解析を行っていた。

図1に示す空洞例は、埋設管の周囲に発生した空洞のBモード画像であるが、観測結果から空洞と埋設管を推定するためには、高度な技術が必要となる。知識と経験を積んだ技術者が、画像から異常が想定されるものを抽出しその位置を特定後、周辺道路の図面や現場の状況から地下埋設物等の存在も考慮しながら、空洞の有無を検討する。このため、空洞の確認までに長時間を要するのが現状である。

高性能レーダシステム搭載の新型空洞探査車

開発した新型空洞探査車は、探査幅2.5mの範囲を16素子のアンテナにより、横断方向0.17mピッチで15測線のデータ取得を行う。これにより、図1と同一の地点の測定結果は、

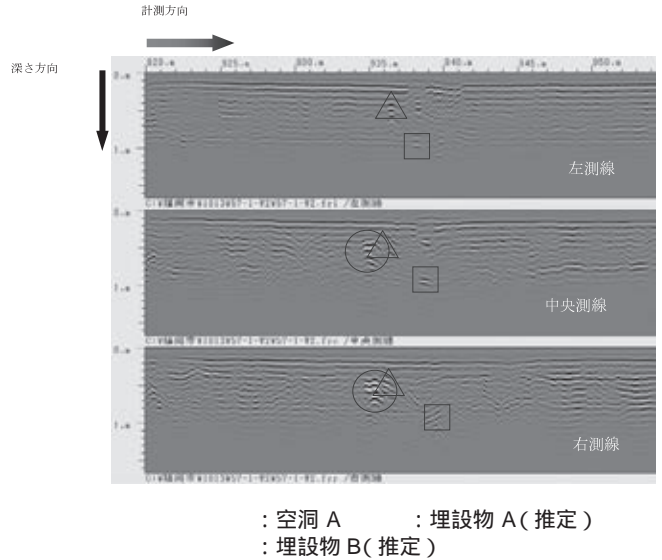


図1 3測線計測によるBモード表示例
 (従来型空洞探査車)

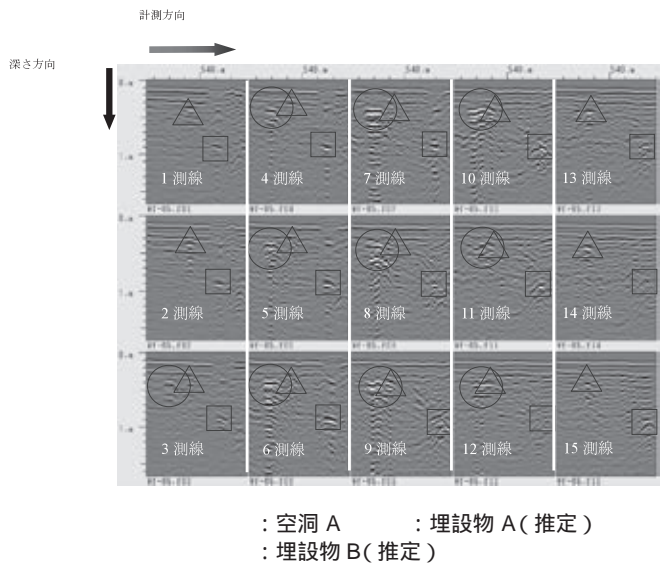


図2 15測線計測によるBモード表示例
 (新型探査車)

15測線のBモード表示では図2のようになり、従来の3測線と比較してより多くの情報が得られる。このため、3次元表示ソフトにより図3に示す3次元地中リアルモード表示が可能となった。図3は、図1と同一地点を新型空洞探査車の3次元画像で表したものであるが、埋設管と空洞がはっきりと表現されており、空洞を容易に検出するための判断材料として大いに活用できることが分る。

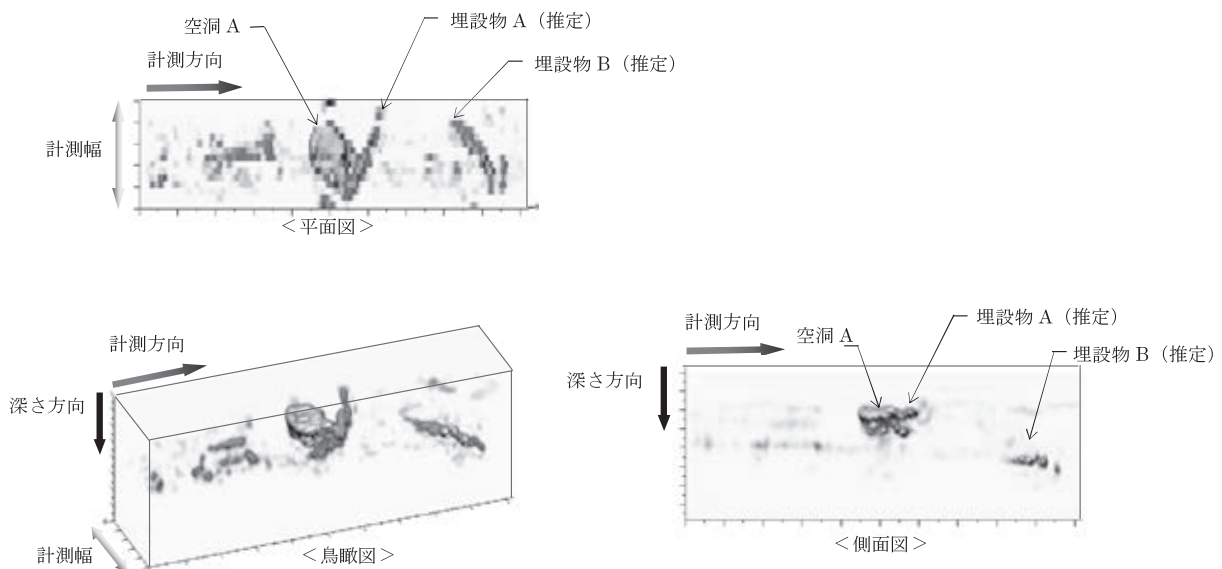


図3 地中リアルモードの表示例

空洞の想定箇所を抽出した後の作業として、小型探査機による精密測定、ボーリング調査による空洞の有無、内部状況の確認作業がある。新型空洞探査車は、これらの作業を効率よく実施できるように、測定ルートについて正確な位置情報を与える機能を増強した。位置情報と地中のレーダ情報を同期させて電子化して記録する機能を持たせたことで、データの視認性・客観性の向上、道路の健全性評価・安全性管理の向上に貢献できる。

当社は、空洞探査業務を2台の探査車、手押し式装置2台(1測線用,3測線用各1台)及び削孔・観察装置2台を用いて実施しており、複数の現場及び状況に適した装置を使用しての空洞探査が可能である。また、対象物を埋設管やRC構造物など適用範囲を広げており、多くの分野・物標に対応した調査を実施している。

特長

- (1) 新型空洞探査車は、高性能レーダシステムを搭載したことにより、路面下空洞探査結果を3次元地中リアルモードで表示することができる。
- (2) 3次元地中リアルモード表示では、地中の状況を任意の方向に回転させることができ、抽出したい標的に合わせて画像の切り抜きをすることにより、空洞の判別精度が向上した。
- (3) 時速50kmの走行状態で、探査幅2.5mの範囲を16素子のシングル・リニア・アレイアンテナにより、15測線の連続計測が可能な稼働特性を考慮した最適なシステム構成とした。

- (4) 車輻幅よりレーダ探査幅を広くしたことで、路肩付近まで調査可能である(測定不能箇所低減)。
- (5) 車輻前方の路面状況を記録する高速カメラ1台、車輻の左右および後方の周辺状況を記録する赤外線カメラ3台及びD-GPSの搭載により、連続した正確な位置情報を収集することができる。

主要目

- 車輻形式：小型マイクロバス(1Box形状)
 - レーダ方式：FMCW シングルパスリニアアレイレーダ
 - アンテナ数：16素子
 - 探査幅：2.5m
 - 最大探査深度：約1.5m(乾燥した最適条件時)
 - 空洞探査能力：50cm×50cm×5cm以上
 - 走行速度：50km/h(計測ピッチ4cmの場合)
 - 位置情報：D-GPS機能
 - 4方向カメラ(前方路面,左側,右側,後方)
 - 画像処理：地中断面15測線Bモード表示
 - 地中リアルモード表示(3次元表示)
- (株式会社三造試験センター)

〔問い合わせ先〕

- 西部事業所 営業部 TEL 0863 - 23 - 2620 三宅
- 東部事業所 営業部 TEL 0436 - 43 - 8931 岩崎
- 新事業推進部 TEL 0863 - 23 - 2364 井上

風車建設用新型クレーンの開発

- 1/4 スケールモデル機による要素試験で性能を確認 -

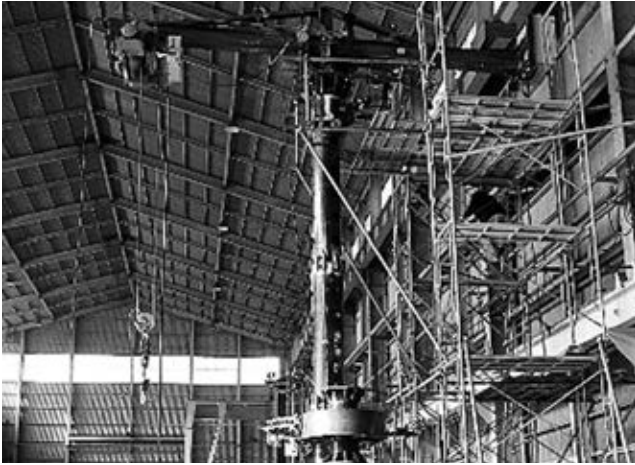


写真1 1/4スケールモデル機

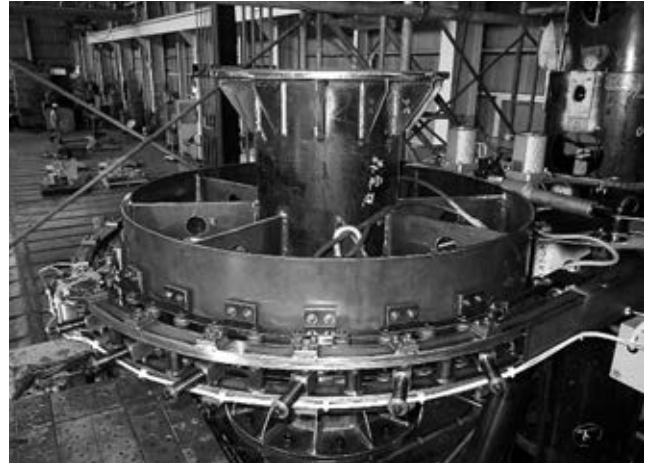


写真2 把持装置

継続的成長が期待される風力発電では、その事業の効率性向上のため、設備の大型化が予想されている。この大型設備の工事にあたっては、高いタワーの組み立てとその先端に発電機などが収納されている重量物のナセルなどを設置可能な大型クレーンが必要となる。しかし、このような大型クレーンの国内保有台数は少ない。また、最近では山間部に設置される風力発電設備も多くなり、道路などのインフラ整備費用削減のため、アクセス性に優れたクレーンが求められている。

これらの課題を解決するため、三井造船は、風力発電設備建設のための新たなクレーンの開発を進めている。このクレーンは、自立を補助する目的で風車のタワーを支持構造体として活用するものであり、タワーの組み立て、タワー先端へのナセル、ブレードなどの設置を可能としている。これにより、建設作業時間の短縮化が図られ、山岳地域へのアクセス性に優れたコンパクトな風車用クレーンを実現できる。

当社が検討している風車建設用新型クレーンは、最大巻上げ荷重が80t、最大作業半径が10m、最大対応風車タワー高さが100mである。この度、実機の1/4スケールモデルを製作し、実用化に向けて以下のような要素試験を実施し、その性能を確認した。

今後も風車建設の効率化に向けて、引き続き検討・開発を進めて行く。

試験項目と目的

本要素試験の実施内容とその目的は、以下のとおりである。

- (1)メインブーム伸縮機構
クレーンメインブームには自走伸縮機を持たせ、輸送、組立時の作業時間の短縮が図れること。
- (2)把持装置
風車タワーを把持することにより、クレーン自身の自立補助に有効であること。
- (3)ガイロブ機構
ガイロブ制御装置を設置し、載荷時における荷重バランス及びブーム振動抑制が確保できること。

特長

風車建設用新型クレーンは以下の特長を有する。

- (1)既存の自走式クレーンと同等の機動性を確保し、高さ80m以上の風車の設置が可能である。
- (2)輸走時の最大寸法は18m×3m×4.3mに抑えられ、山岳地域へのアクセス性が向上する。
- (3)作業ヤードでの組立解体に要する作業時間を短縮できる。
- (4)コンパクト化により、設置作業エリアの有効活用化が図れる。

(鉄構・物流事業本部)

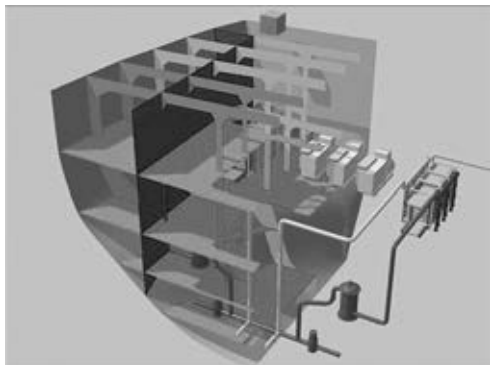
〔問い合わせ先〕

建設エンジニアリング部

TEL 03-5202-3908 佐々木 潤

「バラスト水事業グループ」を新設

- 就航船へのバラスト水処理装置搭載に迅速に対応 -



三井造船株式会社(社長：加藤 泰彦)は、6月1日付でバラスト水処理装置関連の事業を行う「バラスト水事業グループ」を、船舶・艦艇事業本部 事業開発部内に新設しました。

当グループは、営業、設計及び開発のメンバーで構成され、装置搭載事業の窓口となり、客先ニーズを取り入れ、機動的で迅速な対応を目指していきます。今後、事業展開を積極的に推進し、子会社も含めた当社グループ全体を緊密に連携させた事業体制を整えていく予定です。

現在、外航船へのバラスト水処理装置の搭載を義務付けるバラスト水管理条約の発効が間近に迫っています。条約発行後には大量の就航船への搭載が必要となるため、対応が急務となっています。そ

こで当社は、当グループを中心に就航船への装置搭載に関し、設計・購買・装置据付をスムーズに行い、就航船へのサービス拡大を図っていきます。

あわせて開発中の当社製バラスト水処理装置「Fine Ballast」の受注機会拡大も図ります。

[担当] 船舶・艦艇事業本部 事業開発部 バラスト水事業グループ 井上 良太 電話：03 - 5202 - 3520

[問い合わせ先] 広報室 乾 雅俊 電話：03 - 5202 - 3147

三井造船技報編集委員会

委員長	中 谷 龍 男
委員	木 澤 厚 夫
	福 岡 哲 二
	小 野 純 二
	川 島 幸 司
	速 水 礼
	大 橋 弘 隆
	延 永 尚 志
	松 本 正 文
	神 田 伸 靖
	有 信 俊 郎

三 井 造 船 技 報

第 203 号

2011年(平成23年)7月7日発行
(年3回発行)

発行人 入 江 泰 雄

発行所 三井造船株式会社 技術本部

〒103 - 0027 東京都中央区日本橋1丁目3番16号

TEL 03 - 5202 - 3600

印 刷 株式会社 三造ビジネスクリエイティブ

〒134 - 0088 東京都江戸川区西隼西8丁目4番6号

三井造船株式会社

<http://www.mes.co.jp/>

本社	〒103-0027	東京都中央区日本橋1丁目3番16号	TEL 03-5202-3147
鑑西センター	〒134-0088	東京都江戸川区西鑑西8丁目4番6号	TEL 03-3675-2819
北海道支社	〒060-0807	札幌市北区北七条西4丁目5番地1(伊藤110ビル)	TEL 011-736-0036
東北支社	〒980-0811	仙台市青葉区一番町2丁目7番17号(朝日生命仙台一番町ビル)	TEL 022-262-3481
中部支社	〒450-0003	名古屋市中村区名駅南1丁目24番30号(名古屋三井ビル)	TEL 052-582-0145
関西支社	〒550-0004	大阪市西区靱本町1丁目11番7号(信濃橋三井ビル)	TEL 06-6447-2001
岡山支店	〒700-0903	岡山市北区幸町8番29号(三井生命ビル)	TEL 086-233-4131
中国支社	〒730-0051	広島市中区大手町2丁目7番10号(広島三井ビル)	TEL 082-248-0311
呉営業所	〒737-0045	広島県呉市本通3丁目5番18号(メゾンロイヤル)	TEL 0823-25-7837
四国支店	〒760-0050	香川県高松市亀井町5番地1(百十四ビル)	TEL 087-833-4111
松山営業所	〒790-0002	愛媛県松山市二番町3丁目3番8号(伊予石油ビル)	TEL 089-947-7060
九州支社	〒812-0011	福岡市博多区博多駅前1丁目1番1号(博多新三井ビル)	TEL 092-411-8111
東九州支店	〒870-0027	大分県大分市末広町1丁目1番18号(ニッセイ大分駅前ビル)	TEL 097-537-9260
沖縄支店	〒900-0033	沖縄県那覇市久米2丁目4番16号(三井生命那覇ビル)	TEL 098-869-3135
玉野事業所	〒706-8651	岡山県玉野市玉3丁目1番1号	TEL 0863-23-2010
千葉事業所	〒290-8531	千葉県市原市八幡海岸通1番地	TEL 0436-41-1112
大分事業所	〒870-0395	大分県大分市日吉原3番地	TEL 097-593-3111
技術本部			
玉野技術開発センター	〒706-0014	岡山県玉野市玉原3丁目16番1号	TEL 0863-23-3001
千葉技術開発センター	〒290-8531	千葉県市原市八幡海岸通1番地	TEL 0436-41-1110
基盤技術センター	〒706-0014	岡山県玉野市玉原3丁目16番1号	TEL 0863-23-3101
昭島研究センター	〒196-0012	東京都昭島市つつじが丘1丁目1番50号	TEL 042-545-3111
つくば研究センター	〒103-0027	東京都中央区日本橋1丁目3番16号	TEL 03-5202-3600
海外事務所	シンガポール, 北京, ジャカルタ, ハノイ, クアラルンプール		
海外現地法人	三井造船ヨーロッパ株式会社(ロンドン)		
	三井造船(U.S.A.)株式会社(ニューヨーク)		
	三井造船(上海)商貿有限公司		

三井造船技報 第 203 号の発行に当たって

「三井造船技報」をご高覧いただき、ありがとうございます。

本誌は、当社が平素ご指導いただいている方々へ、最近の当社の新製品や、それを支える技術についてご紹介するものです。本誌の内容につきましては、更に充実を図る所存ですが、忌憚のない御意見を賜りましたら、大変幸甚です。

送付先の貴組織名、ご担当部署、所在地などにつきましては正確を期しておりますが、変更などがございましたら、以下にご記入の上、FAX でお知らせ頂きたくお願い申し上げます。

敬具

キ リ ト リ 線

FAX : 03 - 5202 - 3610

三井造船株式会社 技報編集委員会 事務局 行(TEL. 03 - 5202 - 3600)

三井造船技報 送付先の確認と第 203 号へのご意見等について

1. 送 付 先 : 従来通り 変更 削除 (いずれかに V を付けてください)

a) 旧送付先

所在地 〒 _____

組織名称 _____

担当部署 _____

旧送付先は、現在の宛先ラベルのコピーをここに貼付して
頂いても構いません。

b) 新送付先

所在地 〒 _____

組織名称 _____

担当部署 _____

ご担当者 _____

TEL No. _____

FAX No. _____

2. 今後の編集に反映させていただくため、下記アンケートにご協力をお願いします。

(1) 本号で興味のある記事をお知らせください。(最初のページ No. で可。複数回答可)

技術論文・報告では

製品・技術ニュースでは

その他の記事では

(2) その他、ご意見・ご要望あれば、お聞かせください。

キ
リ
ト
リ
線

主要営業品目

船舶・艦艇事業本部 TEL 03-5202-3510 FAX 03-5202-3599

液化天然ガス（LNG）運搬船，液化石油ガス（LPG）運搬船，原油輸送船，石油精製品運搬船，ばら積貨物船，オープンハッチ型貨物船，鉸石運搬船，石炭運搬船，コンテナ船，自動車運搬船，FSO，FPSO，超高速貨物船，超高速カーフェリー，各種特殊船
修繕船，各種改造船工事，M & R エンジニアリング
護衛艦（DD），潜水艦救難母艦（AS），潜水艦救難艦（ASR），音響測定艦（AOS），輸送艦（LST），補給艦（AOE），掃海母艦（MST），海洋観測艦（AGS），巡視船，練習船，海洋気象観測船，漁業調査船，漁業取締船，海洋調査船，研究調査船，物理探査船，環境整備船，視察船，測量船，交通艇，消防艇，高速旅客船，深海探査ロボット（AUV，ROV），小型水中ロボット，水道管点検ロボット
自動艦位保持装置（DPS），システム操船装置，艦橋情報表示装置（ABS / IBS），舵減揺装置，船体運動状態表示装置（SMACS），航海情報表示装置，フィンスタビライザー，中折式デッキクレーン，赤外線低減装置，弾薬搭載機材，補機制御表示装置，機関操縦装置，水中放射雑音シミュレータ，防火防水実習場，各種訓練水槽，操船シミュレータ
水中ロボット / 水道管点検ロボットを用いた点検サービス

鉄構・物流事業本部 TEL 03-5202-3900 FAX 03-5202-3937

橋梁，ハイブリッド構造物（浮防波堤，浮消波堤，浮棧橋，浮体式係船岸，ケーソン），海洋構造物（シーパス，ケーソン，沈埋函，ジャケット），浮体式海洋設備，海外土木・建築工事全般，特殊構造物，風力発電設備工事
岸壁用コンテナクレーン，ヤード用コンテナクレーン，船用ガントリークレーン，ローダー，アンローダー（連続式，グラブバケット式），ジブクレーン，天井クレーン，コンテナターミナルマネジメントシステム

機械・システム事業本部 TEL 03-5202-3950 FAX 03-5202-3977

船用ディーゼル機関
往復動圧縮機，ガスタービン発電設備，ガスエンジン発電設備，ディーゼルエンジン発電設備，太陽熱発電設備，バイナリー発電設備，各種コージェネレーションプラント，蒸気タービン，炉頂圧回収タービン，軸流・遠心式圧縮機
鍛造前誘導加熱装置（ピレットヒータ，パーヒータ，ピンヒータ 他），鉄鋼・非鉄分野向け誘導加熱装置（薄板加熱装置，銅管焼鈍装置，線材加熱装置），高周波電源装置（PWM インバータ，サイリスタインバータ，トランジスタインバータ，ゾーンコントロール用電源）
遠隔操作マニピュレータおよびその周辺機器，センシング機器（地中埋設物・建築物探査レーダ，太陽追尾採光システム，複合材剥離検査器），レーダ探査サービス，水理実験設備，塔，槽，熱交換器，回転式乾燥機
IT を活用した各種設備・機器のリモートモニタリングサービス・診断サービス・情報サービス，各種設備・機器の包括／一括メンテナンスサービス，各種技術サービス（運転及びメンテナンスにかかわる技術指導・工事指導・工事施工），LSS（ライフサイクルソリューションサービス：陸・船用ディーゼルエンジン，ガスタービン，各種ボイラ，プロセス用圧縮機，蒸気タービン発電設備，炉頂圧タービン発電設備，プロセス機器，誘導加熱装置，各種クレーンの保守，改造用部品・機器の供給，性能改善・改造工事・延命工事などのエンジニアリング・サービスと施工）
SiC ウェハー，CVD-SiC コーティング，SiC 製半導体装置用部品

環境・プラント事業本部 TEL 03-3675-6984 FAX 03-3675-6429

プラントのエンジニアリング及び建設工事（石油化学，化学繊維，合成樹脂，石油精製，ガス製造・精製，無機化学，化学肥料，石炭化学，発酵関連，ファインケミカル，代替エネルギー関連），プラント要素技術（加熱炉，分離炉，分解ガスクェンチャー，高粘度流体脱揮装置，PSA 装置），エンジニアリング支援システム，フィージビリティスタディ，プラントメンテナンス，SDM 工事
三井リサイクリング 21（キルン式ガス化溶解システム），廃棄物処理関連（流動床式焼却炉，粗大ごみ処理施設，リサイクルセンター，加熱脱塩素化装置，ダイオキシン分解触媒，炭化炉，PCB 処理），ガス処理関連（脱塩，集塵）
水処理関連（産業排水，汚泥），ガス処理関連（排煙脱硫，排煙脱硝，脱臭），廃棄物再資源化システム（焼酎廃液，有機性廃棄物からのメタン発酵，コンポスト及び乾燥装置），バイオガスプラント（生ごみ・汚泥バイオガスプラント，油温減圧乾燥式食品廃棄物再資源化システム，家畜糞尿再資源化システム）

事業開発本部 TEL 03-5202-3981 FAX 03-5202-3989

新規事業の発掘・立案・計画・事業化推進，全社の事業開発の統括・推進，社内向け事業開発関連情報の発信，新規事業のフィージビリティスタディ，新規事業のプロジェクトの推進
天然ガスハイドレートの製造・貯蔵・輸送・ガス化技術の開発，ガスハイドレートの特性を生かした各種事業開発，バイオエタノール事業の開発，次世代リチウムイオン電池正極材事業の開発
船舶運航支援のポータルサービス

営業総括本部 TEL 03-5202-3940 FAX 03-5202-3125

CS（顧客満足）向上活動の推進，全社にかかわる営業戦略の企画・立案・推進，各事業本部の営業支援及び社内横断プロジェクトの推進，新規事業の発掘と事業化推進，国内・海外営業拠点（支社，支店，営業所，海外駐在員事務所）の統括と受注活動の推進
海外プロジェクトの推進（ODA 案件），海外新規案件の発掘及び支援

バイオマスパワーで 日々の生活を支え、資源循環社会に貢献

三浦地域資源ユーズ株式会社向けし尿・浄化槽汚泥および農水産物残渣の処理施設である「三浦バイオマスセンター（愛称：「MKE BIMA ステーション三浦」）」が竣工しました。

本センターは、三浦市の衛生センターの老朽化に伴う建て替えであり、し尿・浄化槽汚泥だけでなく、三浦市の特産物である大根、スイカなどの農産物残渣（未利用バイオマス）や処理後の小魚など（廃棄物系バイオマス）の水産残渣と一緒に処理することが特長です。

また、処理の過程で生じるバイオガスはボイラや発電機のエネルギーとして施設内で利用し、堆肥化設備を備えて発生残渣から堆肥を生産し、農家に利用してもらう資源循環型の施設となっています。

