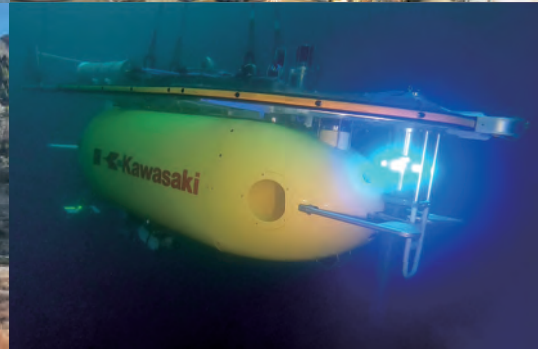


ISSN 0387-7906

川崎重工技報

エネルギーソリューション&マリン特集号



TECHNICAL REVIEW

No.185

December 2023

水素・CN ディビジョン

カワる、サキへ。
Kawasaki

船舶海洋ディビジョン

利便性をそのままに、
カーボンニュートラルに貢献

船用推進ディビジョン

エネルギーディビジョン

プラントディビジョン

■ 巻頭インタビュー	エネルギー&マリンエンジニアリング事業の近況と今後の展開	1
■ 総括説明	エネルギーソリューション&マリンカンパニーにおける製品・技術展開	2

技術解説

■ 5MW級で世界最高効率の純国産ガスタービン [M5A]	World's Most Efficient 5MW-Class Gas Turbine, M5A	6
■ 省エネルギー型CO ₂ 分離・回収システム [KCC]	Energy-Saving CO ₂ Capture System KCC	10
■ 燃焼灰のエネルギー回収および有価物を可能にする新型灰処理システム	New Ash Handling System That Makes It Possible to Recover Energy from Combustion Ash and Convert It into Valuable Resources	14
■ ごみ処理施設・資源化施設における省人化技術	Labor-Saving Technologies for Municipal Waste Treatment Facilities and Recycling Facilities	18
■ 港湾内操船事故ゼロを目指す「安全離着岸支援システム」の開発	Development of Advanced Safety Berthing/Unberthing Assistance System Aimed at Achieving Zero Vessel Accidents in Ports	22
■ 脱炭素社会を推進する船用水素焼き二元燃料エンジンとMHFS (船用水素燃料タンク・燃料供給システム)の開発	Development of Marine Hydrogen Dual Fuel Engine and Marine Hydrogen Fuel System Promotes a Carbon Neutral Society	26
■ LNG運搬船の経済性と環境性を最適化する運航支援システム [SOPass]	SOPass Ship Operation Support System that Optimizes the Economic and Environmental Performance of LNG Carriers	30
■ ロボットアーム付き自律型無人潜水機 (AUV) [SPICE]の開発	Development of Autonomous Underwater Vehicle (AUV) with Robot Arm SPICE	34

新製品紹介

■ カワサキグリーンガスエンジンコージェネレーションシステム	Kawasaki Green Gas Engine Cogeneration System	38
■ 医薬品粉末の連続造粒・乾燥システム [LaVortex]	Continuous Granulation and Drying System for Pharmaceutical Powder LaVortex	40
■ 内航船向け環境対応ハイブリッド/バッテリー推進・給電システム	Eco-friendly Hybrid and Battery Propulsion and Power Supply Systems for Coastal Vessels	42
■ 86,700m ³ 型LPG焚LPG/アンモニア運搬船	An 86,700m ³ LPG Fueled LPG/NH ₃ Carrier	44

特許紹介

■ 圧縮機の吸気構造	—高い発電効率と小型軽量化を両立した純国産ガスタービンの吸気構造—	46
■ 自律型無人潜水機	—ロボットアーム搭載の自律型無人潜水機 (AUV) —	46

【西村プレジデントに聞く】

エネルギー&マリンエンジニアリング 事業の近況と今後の展開

カンパニーのミッション

エネルギーソリューション&マリンカンパニーは、2021年4月に船舶海洋カンパニーとエネルギー・環境プラントカンパニーを統合して誕生しました。本社 水素戦略本部の設立と時を同じくします。この組織編制は当社の将来事業の根幹を成す水素事業を目指すシフトであり、人類共通の社会課題「地球温暖化」解消のための「カーボンニュートラル」の達成に貢献すべく大きな一歩を踏み出しました。

当社は、2010年に水素サプライチェーンの構築を目指すことを宣言し、以来、神戸スマートコミュニティー水素ガスタービンコージェネレーションプロジェクト、日豪水素サプライチェーンパイロット実証など（いずれもNEDO助成事業）、世界初の実証事業を着実に完遂してきました。

現在は水素商用化実証に鋭意取り組んでおり、2030年代初頭の本格商用において水素を大量かつ経済的に調達することで、カーボンニュートラルとエネルギーセキュリティ双方への貢献を目指しています。

このように当社は、水素技術のトップランナーとしてのプレゼンスを築いてきました。水素事業推進のためには、一般産業、公共事業、商船および艦艇関連の既存事業による収益の確保が不可欠であり、引き続き製品の非価格競争力と収益の向上に務めて行きます。

カンパニー統合のシナジー

当カンパニーの製品は、海中、海上、陸上から宇宙に関わる広範かつ独自の技術によって支えられています。カンパニー統合以来、設計の共通部門、営業、生産、調達、品質保証、契約・商務などの横断機能を整え、各ディビジョンの技術と事業のシナジーを追求してきました。現在は、人員と工場の多能化を推進しており、収益性の高い製品の増産に敏速に対応できる体制構築に取り組んでいます。

水素事業の商用化に向けては、年間製造能力を段階的に増強して行きます。このために、神戸、播磨、坂出および明石工場の生産連携を行い、例えば、液化水素を扱う真空二重配管、陸上貯槽、船用カーゴタンクなどを部材やパーツごとに分担製造し最終組み立てを一工場に集約します。先に述べた人員と工場の多能化がここで真価を発揮します。

「エネルギー・環境ソリューション」の提供

カーボンニュートラルに向けた顧客の不安として、化石



西村 元彦 専務執行役員

エネルギーソリューション&マリンカンパニープレジデント

燃料でCO₂を排出しながら運用されている「資産の座礁」が深刻化しています。世界最高効率を誇る当社のガスタービンおよびガスエンジンは、現在の天然ガス利用から将来の水素利用までシームレスに対応できる「水素Ready」技術を提供できるように開発を進めており、ガスタービンについては全ての機種で水素30vol%混焼がすでに可能であり、一部機種では天然ガス-水素の専焼・混焼を自由に切り替え可能となっています。すでに、「水素Ready」を非価格価値として認め当社ガスタービンを導入していただく案件が出ています。ボイラについても、水素燃焼に対応する技術を開発し、カーボンニュートラルへの準備を進めています。

安全・安心リモート社会への取り組み

世界の先進国は、労働人口の不足に直面しています。島国かつ言語の壁が高い我が国は、移民の就労に頼るにも限界があります。そこで注目されるのが、日本がリードしてきたロボット技術です。当社は日本初のロボットメーカーとして事業に取り組んで来ました。

当社が自治体に納入した最新の環境プラント（ごみ処理施設）では、リサイクル資源の選別にロボットを導入することで、作業員の身体的負担軽減と省人化を実現しました。さらに、焼却炉の運転にAIを活用した運転支援システムを導入するとともに、当社サポートセンターに設置している遠隔監視・支援システム「KEEPER」による支援にて安定的な操業に貢献しています。

おわりに

当カンパニーは、水素社会の実現を通して生活の利便性の維持向上とカーボンニュートラルの両立に貢献し、エネルギー・環境、就労、安全などに関わる社会課題に幅広い技術とサービスで信頼のこたえを提供していきます。

エネルギーソリューション & マリンカンパニーにおける 製品・技術展開



今村 圭吾

常務執行役員 エネルギーソリューション&マリンカンパニーバイスプレジデント 兼 船舶海洋ディビジョン長

村上 直樹

執行役員 エネルギーソリューション&マリンカンパニーバイスプレジデント

まえがき

当社の中長期的な事業方針「グループビジョン2030」では水素社会の実現、カーボンニュートラルの達成を目標としており、そのため2021年4月にエネルギー・環境プラントカンパニーと船舶海洋カンパニーを統合し、エネルギーソリューション&マリンカンパニーを設立した。カンパニーの統合によって、水素サプライチェーン構築に必要な「つくる」「はこぶ」「ためる」「つかう」のソリューションを一気通貫で提供する体制が構築できた。これに加えて発電、ごみ処理、造船などこれまで手掛けてきた異なる事業間の交流、ノウハウの共有など、シナジーを発揮している。現在から将来に渡ってカンパニー統合の意義は非常に大きい。

1 カンパニーの紹介

(1) カンパニーの概要

当カンパニーは、水素・CN、エネルギー、プラント、船用推進、船舶海洋の5つのディビジョンと、神戸工場、坂出工場、播磨工場、明石工場の4つの生産拠点を有している。

各ディビジョンの製品は図1の通りだが、幅広い製品を扱い、組み合わせることでシナジーを発揮し、お客様の多様なニーズに応えることができる点に強みを持っている。

(2) 水素事業

「ためる」分野では、水素・CNディビジョンが液化水素タンクと水素基地を所掌する。「はこぶ」分野では船舶海洋ディビジョンが液化水素運搬船を所掌する。これらは後述する水素商用化実証の核となる製品であり、2030年の商用化を目指しプロジェクトを遂行中である。

また、「つくる」分野では水素圧縮機、水素液化設備をエネルギーディビジョン、水素・CNディビジョンで所掌する。「つかう」分野では、エネルギーディビジョンで水

素ガスタービン、水素ガスエンジン、水素ボイラ、船用推進ディビジョンで船用水素ガスエンジン、MHFS（船用水素燃料供給システム）を所掌・開発している。

当社は他社に先駆けて水素事業に取り組んできた。これまで培った技術やノウハウを生かして、今後はさまざまなステークホルダーと協力し、水素社会を創っていく。

(3) 4工場生産体制最適化

カンパニーが一つになったことを受け、4工場の強みや弱みを相互に活用・補完し効率的に生産する体制の構築を進めている。特に水素事業においては、大型液化水素タンクおよび真空二重配管の製造を神戸、坂出、播磨の3工場で分担・連携することを計画中であり、水素商用化実証の完遂に向けて、生産体制の最適化が最重要課題である。

目指す姿としては、4工場を一体運営することで各工場の強みがより発揮され、柔軟に繁閑調整ができる体制である。まずは、各工場の生産工程を細分化した上で、能力や特徴、稼働状況を見える化する。その結果を元に、生産計画を立て効率的な生産体制とする。

また、製造現場における教育内容を標準化し、多能工化

ディビジョン	製品群	拠点	主要製品
水素・CN ディビジョン	液化水素基地 低温タンク	神戸 播磨	・液化・出荷基地 ・受入基地 ・低温タンク(液化水素、LNG等) ・水素液化設備
エネルギー ディビジョン	エネルギーシステム	神戸 明石	・産業用ガスタービン ・発電用ガスエンジン ・空力機械 ・分散型エネルギーシステム
	パワープラント	神戸 播磨	・CCPP(Combined Cycle Power Plant) ・火力・排熱ボイラ ・蒸気タービン
船用推進 ディビジョン	艦艇機器 船用機械	神戸 明石 播磨	・艦艇用機器 ・システム関連機器 ・水力機械 ・船用レシプロエンジン
プラント ディビジョン	産業機械	神戸 播磨	・搬送プラント ・シールド掘進機 ・灰処理プラント ・破砕機プラント
	環境プラント	神戸	・ごみ焼却プラント
船舶海洋 ディビジョン	艦艇・特殊船 商船	神戸 坂出	・潜水艦 ・LPG/アンモニア運搬船 ・高速船 ・液化水素運搬船

図1 各ディビジョンの主要製品と生産拠点

を進めることで1人の作業員ができる工程を増やす。繁閑に応じて4工場を行き来し、操業度を平準化させるとともに、製造部門の能力底上げを図る。

水素事業だけでなく既存事業にもこれを適用することで、今後の事業環境の変動にも機敏かつ的確に対応できる強い工場を目指していく。

2 水素商用化実証について

当社は、日本水素エネルギー株式会社と共に、脱炭素社会実現に向けた具体的取組みの一つとして、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 NEDOのグリーンイノベーション基金事業（GI基金）を活用した商用規模の水素サプライチェーンの実証に取り組んでいる。候補地が決定し、2023年度は液化水素運搬船の設計を進め、液化・出荷基地および受入基地のFEEDを開始する。商用化実証では、液化水素運搬船は日豪パイロット実証の128倍の積載量、陸上液化水素タンクは20倍の貯蔵量と大規模なものになり、商用チェーン複数化に備え、各ディビジョンおよび3工場間の連携と生産能力向上および短納期化のための効率化が必須となる。液化水素出荷基地向け1万 m^3 の球形タンクや真空二重配管の3工場分担製作体制の確立、自動化を含む製作・検査技術、モジュール化工法の開発など、液化水素運搬船向けには試験タンクによる製作性や性能の確認、水素燃料推進システムの開発などを進めている。

(1) 1万 m^3 球形タンク製造における3工場製作体制の確立

液化水素出荷基地には1万 m^3 液化水素球形タンクが5基建設される計画であるが、これらのタンクを播磨工場、神戸工場および坂出工場の3工場で分担して製造するための全体管理体制を構築した。

特に各工場間のインターフェースにおける責任範囲を明確にするとともに、必要情報の授受管理要領を定め、業務が円滑に流れるような仕組みづくりを実施した。

さらに、海外建設工事の契約工程遵守でキーとなる高モ



図2 球形タンクモジュール工法 高効率化技術のイメージ

ジュール化および短納期化を実現するため、当社国内3工場で作成させ一体海上輸送する工法を開発。特に播磨工場でのASME認証取得経験をもとに坂出・神戸工場でも取得。また、工場製作時の高能率化を目的に板曲げ・切断・開先加工法および自走式自動MIG/TIG溶接機、自動UT装置を開発。さらに台船での安全な海上輸送法・出荷基地への安全な搬入方法を開発した。

(2) 液化水素運搬船

船舶海洋ディビジョンでは、世界に先駆けて建造した1,250 m^3 型 液化水素運搬船「すいそ ふろんていあ」で得られた知見を活かし、積載能力を128倍とした貨物容積16万 m^3 の大型液化水素運搬船の基本設計を進めている。本船は2020年代後半に建造完了した後、液化水素の長距離大量輸送を実証する予定である。

本船は推進システムとして主ボイラと主機タービンから構成される蒸気タービンプラントを採用している。主ボイラで発生した蒸気は主機タービンの駆動力となり、減速機を介してプロペラに伝達され、船の推進力となる。主ボイラは水素のみ、油のみ、水素/油混焼の3種類の運転が可能で、特に水素のみの場合は温室効果ガス排出ゼロを実現できる。また、本船には水素と油を切替えて使用できる二元燃料発電機エンジンを実証試験用として搭載予定である。

主ボイラ・主機タービン・二元燃料発電機エンジンの開発・設計はエネルギーディビジョンが担当し、船舶ディビジョンと連携して水素燃料推進システムを開発中である。今後は技術標準化・規格化も進めていく予定である。

3 水素・CNディビジョン

カーボンニュートラルを目指すプロジェクトの効率的かつ確実な遂行を目的とした組織再編を2023年8月1日に行い、新たに水素・CNディビジョンを設立した。

水素関連製品として、液化水素タンクをコアとして液化・出荷基地および受入基地を所掌し、水素サプライチェーンの商用化実証に向けた取組みを進めている。

4 エネルギーディビジョン

エネルギーディビジョンにおいては、水素事業として水素ガスタービン、発電用水素ガスエンジン、水素ボイラ、水素圧縮機を所掌している。また、脱炭素・炭素循環社会に向けCO₂分離回収設備の開発も行っており、国内においては実証試験を開始している。

(1) 水素ガスタービン

水素ガスタービン、水素ガスエンジンは、水素利用の始まる過渡期から本格的な水素社会まで、シームレスに対応

できるように、水素混焼／水素専焼の製品を他社に先駆けて開発してきた。ガスタービンにおいては、すでに水素混焼燃焼技術を確認しており、市場にリリースしている。水素専焼燃焼器は一部の機種で開発・実証を完了しており、今後は全ラインナップに展開すべく開発を進めている。これら当社の水素ガスタービンは既存の天然ガス焼き発電装置を大幅に改造することなく水素も使用可能としており、既に欧州において水素化改造、国内では将来の水素化を前提としたプロジェクトを受注している。



図3 リチウムイオン電池リサイクルシステム

(2) 水素圧縮機

高効率な遠心型の水素圧縮機は、水素液化機の大型化および液化効率の向上に必須の機器である。2050年の水素供給コスト目標の達成に必要なものとして、GI基金事業に採択され開発を進めている。2022年度末までには各種要素技術について試験評価を実施し2023年度からは試験機を製作、2024年度には工場での運転を予定している。その後、2030年に向けて、大型化およびさらなる革新技術の導入を進める予定である。高効率な遠心型水素圧縮機は、水素液化機用のみならず、水素パイプライン用、水素燃料ガス供給用など、幅広い用途で使用できるため、先行市場から製品投入を進める計画である。

ギー損失とともに灰のリサイクルの障害となる。リサイクル促進のため、乾式の処理システムおよび未燃分の除去装置の開発を行い、商用受注の段階に至っている。

また、今後も利用が拡大すると予想されるリチウムイオン電池について、リチウムのリサイクル技術の開発に取り組み、現在中国にて実証試験を行っている。

(3) CO₂分離・回収技術

経済産業省が策定した「カーボンリサイクル技術ロードマップ」においては、CO₂を分離・回収する技術が必要と位置づけられており、当社では固体吸収法を活用したCO₂分離回収技術の開発を行い、実証試験を開始している。国内においては、石炭火力発電所などに実証設備を設置し石炭燃焼排ガスへの適用性の実証試験を開始した。また、米国ワイオミング州のDry Fork発電所においても実証設備を建設中であり、分離回収を行うとともに、周辺地域の環境モニタリングを実施する予定である。

(2) 省人化技術

ごみ処理施設や資源化施設でも、労働人口の減少への対応が喫緊の課題である。そこには、安心・安全への担保、運転員の負荷軽減も考慮に入れる必要がある。そこで、AI搭載資源ごみ選別作業支援システム「K-Repros」を始めとした省人化運転技術の開発を行ってきた。

また、粉塵や火花が発生する厳しい環境下で行うグライNDER作業を自動運転／遠隔操作で行うロボットシステム「Successor-G」を開発し、販売を開始している。

今後も、省人化技術の開発と、適用先の拡大を図っていく計画である。

5 プラントディビジョン

プラントディビジョンでは、これまでセメントプラント、肥料プラント、ハンドリングシステム、LNGタンク、ごみ処理施設などの社会インフラ設備を納めてきた。2023年8月水素・CNディビジョンを新設し、豊富な実績で培ってきた技術を実証的に水素サプライチェーン構築に活用できるようキーマンを配属した。一方、プラントディビジョンではマテリアルリサイクルの分野への展開を進めるとともに、ごみ処理施設などを対象とした省人化技術の開発を進めている。

(1) マテリアルリサイクル

固形燃料を燃やした際に出てくる燃焼灰には、本来燃焼されるべき未燃炭素が含まれている。未燃炭素は、エネルギー

6 船用推進ディビジョン

船用推進ディビジョンでは、商船向けおよび艦艇向け推進システムのコアコンポーネントならびにシステムパッケージ製品を幅広くラインナップし、ビジネス展開している。

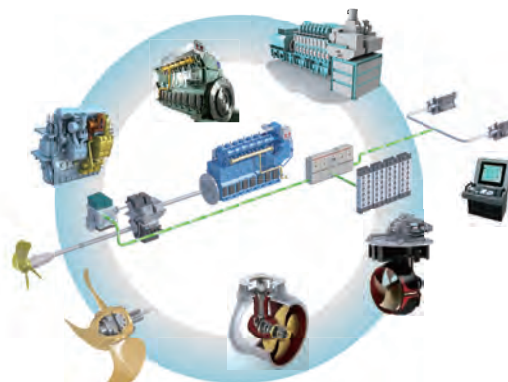


図4 船用推進システム製品

(1) 船用レシプロエンジン

レシプロエンジンは、1911年にドイツのMAN社と技術提携して以来、110年以上にわたり2サイクルならびに4サイクルエンジンを生産・納入してきた。2014年には、それまでに培われた技術を活かしてガス専焼エンジン「L30KG」を自社ブランドとして開発した。GHG削減要求の高まりによりLNGやLPGを燃料とするガス燃料エンジンに注力するとともに、船舶用水素ガスエンジンの開発に着手して将来のカーボンニュートラル達成を目指している。

(2) 水力機械

推進機は、可変ピッチプロペラ、サイドスラストならびに旋回式スラスト「レックスペラ」をラインナップし、これまでに多くの納入実績を有している。高い推進性能が要求される可変ピッチプロペラで技術を磨き、その技術をサイドスラストや旋回式スラストへ展開することでビジネス拡大を図ってきた。特にサイドスラストはコンテナ船を中心に納入を拡大し、2022年時点で世界トップシェアを獲得している。

(3) パッケージ製品とシステムインテグレート

近年、さまざまなコンポーネントを組み合わせたパッケージ製品とそれを実現するシステムインテグレータのニーズが高まっており、当社では商船向け環境対応推進システムや艦艇向けハイブリッド推進システムを含む各種推進システムのシステムインテグレートを手掛けている。2022年にバッテリーのみで運航可能なバッテリー推進システムを納入し、また、2023年にはガスエンジン「L30KG」とバッテリーを組み合わせたハイブリッド推進システムを納入した。

推進機や舵などを統括して操縦することができる統括操縦装置「KICS」をフェリーやケーブル敷設船などに納入している。近年、安全性や省力化のニーズが高まっており、特に船舶が離着岸する際の安全性や乗組員の省力化が求められている。そこで、当社の保有するKICSの技術を軸にした安全離着岸支援システムの開発に着手している。

7 船舶海洋ディビジョン

船舶海洋ディビジョンの主要製品は潜水艦および関連技術を利用した製品群と液化ガス運搬船を主体とした一般商船である。

(1) 潜水艦および関連製品

1960年に戦後初の国産潜水艦である初代「おやしお」を完工して以来、当社は最新鋭潜水艦「はくげい」まで、計30隻の潜水艦を引き渡した。新鋭艦はリチウムイオン電池の採用による高い潜航性能を備え、システムの自動化や搜索能力・ステルス性能の向上等を図るなど、最新技術を反映させた。また、長年の潜水艦建造で培った水中技術を用

いた自律型無人潜水機「SPICE」や、閉鎖空間である潜水艦に搭載されるCO₂分離・回収技術をベースとした陸上向けの新製品などを開発している。

(2) 一般商船

液化石油ガス運搬船（LPG船）を1969年に、液化天然ガス運搬船（LNG船）を1981年に引き渡して以来、当社は優れた低温液化ガス技術を背景に高品質な船舶を提供し続けてきた。近年は世界でGHG排出量の少ない代替燃料の採用が相次いでおり、LPGを燃料とする貨物船として日本初の建造となった当社のLPG船は、顧客の高い評価を受けて連続受注を重ねている。また、中国合弁造船事業においてもLNG／メタノール燃料船をはじめとする新しい環境負荷低減技術を適用した船舶を受注・建造しており、高い競争力を保持している。

また、前述したように、液化ガス運搬船の建造技術と社内の液化水素技術とを融合させ、世界初の液化水素運搬船を建造し、液化水素を海上輸送する技術実証試験を完了させたが、次なる課題として液化水素の大量安定供給と輸送コストの低減に向けた船舶の大型化に取り組んでいる。

(3) その他

当社の商船建造の知見や低温液化ガス技術などを活用した船舶運航支援サービスである「SOPass」は、導入して頂いた顧客（主にLNGの傭船者）から高い評価を受けており、さらなる最適運航／環境負荷低減に向けて、現在も機能の拡充を図っている。

また、当社は2020年に25年ぶりとなるジェットフォイルを引き渡した。全没翼型水中翼によって船体を海面から完全に浮上させて翼走する超高速旅客船であり、離島航路に不可欠な交通インフラとして活躍している。2022年には離島振興法が改正され、後続船の建造に向けた機運も高まっており、今後の社会貢献が期待される。

あ と が き

エネルギーソリューション&マリンカンパニーでは水素サプライチェーンに対するソリューションを一気通貫で提供できる体制を構築した。水素社会の実現、カーボンニュートラルの達成に貢献していく。

また、水素・CN、エネルギー、プラント、船用推進、船舶海洋の5つのディビジョンと、神戸工場、坂出工場、播磨工場、明石工場の4つの生産拠点のシナジーを発揮し、お客様の多様なニーズに応える幅広い製品も提供していく。

グループビジョン2030で定めた今後注力するフィールドにおいて「安全安心リモート社会」「エネルギー・環境ソリューション」を担うカンパニーとして、世界の人々の豊かな社会を支え、地球環境の保全に貢献をしていきたい。

5 MW級で世界最高効率の純国産ガスタービン 「M5A」 World's Most Efficient 5MW-Class Gas Turbine, M5A



池口拓也①*	Takuya Ikeguchi
久保博史②	Hiroshi Kubo
石原信哉③	Shinya Ishihara
吉村親樹④	Motoki Yoshimura
竹田敬士郎⑤	Keishiro Takeda
谷口智紀⑥	Tomoki Taniguchi
櫻澤俊明⑦	Toshiaki Sakurazawa
石飛悠希⑧	Yuuki Ishitobi
堀内豪⑨	Takeshi Horiuchi

地球温暖化対策の枠組みとして定められたパリ協定の発効により、低炭素社会の実現に向けコージェネレーション（熱電併給）の促進が重要となっており、特に高温の蒸気を活用できるガスタービンコージェネには一層の効率向上が期待されている。

最新技術と経験豊富なカワサキガスタービンの知見を融合し、全要素の流れ解析による最適化や全動翼の非接触振動計測評価などを実施して、5 MW級で世界最高効率と低NOx化を達成したコージェネ用ガスタービン「M5A」を開発した。「M5A」は、これまで国内外含め合計15のサイトで採用され、累積運転は16万時間を超える。

Under the Paris Agreement, which is a framework aimed at mitigating global warming, promoting cogeneration (combined heat and power application) is increasingly important for realizing a low-carbon society. In particular, gas turbine cogeneration, which enables the utilization of high-temperature steam, is expected to further boost efficiency.

By combining state-of-the-art technologies with Kawasaki's expertise in gas turbines and extensive experience in this field, all the elements are optimized through flow analysis and measured and evaluated the vibration of all the rotor blades in a contactless fashion. M5A was also successfully developed, which is a cogeneration gas turbine with the world's highest efficiency in the 5MW class and reduced NOX emissions. M5A has been adopted in 15 domestic and overseas sites, and the total operation time has exceeded 160,000 hours.

まえがき

地球温暖化対策の枠組みとして定められたパリ協定の発効により、低炭素社会の実現に向けて、コージェネレーション（以下、コージェネ）が、省エネルギーやCO₂排出量削減効果だけではなく、電力の安定供給の観点から分散型エネルギーシステムとしての価値も評価され、導入量が増加している。また、新技術開発による採算性向上のほか、電力/ガス小売市場自由化などの制度改革により市場が活性化している。特に、高温蒸気を利用できるガスタービンコージェネは産業用分野を中心に広く導入され、ガスタービンにはより一層の効率向上が期待されている。

1 背景

当社は1983年に自社開発のガスタービンを用いた1 MW級のコージェネを市場投入して以来、30MW級に至るラインアップを揃え、さまざまな市場要望に応えてきた。当社が長年培ってきた産業用ガスタービンの開発技術を結集し、多くの経験や実績をベースに信頼性を継承しつつ、最

新技術を適用しクラス最高の効率と環境性能を実現した5 MW級の「M5A」ガスタービンと本機をコアとする「PUC50D」コージェネシステムを開発した^{1,2)}。

2 開発コンセプト

多様化する需要へ優れたシステムの提供を可能とするため、当社ラインアップである小型機の「M1A」と中型機の「M7A」の間を埋める新機種として、「M5A」ガスタービンを開発した。鳥瞰図を図1に、主要諸元を表1に示す。以下、特長について述べる。

(1) 卓越したコージェネ性能

本ガスタービンの発電端効率は5 MW級のガスタービンの中で卓越して高く、最新の高効率機種トレンドからも一歩抜きでたレベルにある。また同時に、排熱回収に適した排ガス温度の設定により高い総合効率を可能とした。

高温部の耐久性確保のため、タービン入口温度は適度に設定しつつ冷却空気流量を削減して動力損失を低減している。また、あらゆる空力要素に対して最新の流れ解析を用

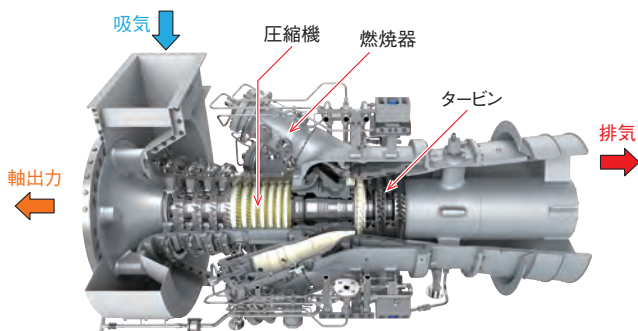


図1 「M5A」ガスタービンの鳥観図
Fig.1 Bird's eye view of M5A gas turbine

表1 「M5A」ガスタービンの主要諸元
Table 1 Main specifications of M5A gas turbine

型式	単純開放サイクル1軸式
圧縮機	11段軸流式
タービン	3段軸流式
燃焼器	6缶形
寸法 [m]	L2.6×H1.5×W1.4
発電端出力 [MW]	4.96
発電端効率 (LHV基準) [%]	33.0
排気流量 [kg/s]	17.6
排気温度 [°C]	523
エミッション	NOx : 52.5ppm以下 (O ₂ =0%)

※ISO条件, 吸排気圧損なし, 100%CH₄

いた最適化設計技術を適用し、圧縮機後段静翼に湾曲翼を採用するなどにより、小型ゆえに発生する問題を抑え、広い作動範囲と高効率を実現している。

(2) クラス最高の環境性能 (低NOx)

当社独自のパイロット・メイン・追焚の3タイプの燃料ノズルを備える構造で、豊富な実績がある希薄予混合燃焼方式による6缶形のドライ低エミッション燃焼器（以下、DLE燃焼器）を搭載している。運転状態により各燃料ノズルへの燃料流量を制御することにより、最適な燃焼状態を維持し、幅広い運転範囲で5 MW級最高レベルの環境性能（低NOx）を実現している。

(3) 「M1A」／「M7A」ガスタービンの信頼性継承

開発設計においては、豊富な実績がある「M1A」／「M7A」ガスタービンの信頼性継承を第一として、その上で性能などの特長を高いレベルで実現することとした。このため、構造や材料は機能・重量・サイズ・整備性・運用性などが全体最適となるよう、実績があり品質上確立したものを使用している。

(4) 軽量・コンパクト

「M1A」ガスタービンを継承したシンプルなリングケーシング構造を採用して、かつ吸排気流路に最新の流れ解析による最適化設計を適用することにより、圧力損失を抑

制しつつ大幅な小型化を実現した。これにより、発電装置を小型化することができた。

(5) 長い整備点検間隔

ガスタービン整備は年1回のボアスコープ点検と4年ごとのオーバーホールを設定して、1年間の連続運転を可能としている。オーバーホールは整備済みのガスタービンとトレードイン交換することで、整備停止時間を短縮する。

(6) 優れた運用性

ガスタービン単体の始動はプレパージを除いて定格出力まで10分である。また、系統連係から解列した自立運転時でも低エミッションで運転が可能な自立運転DLEが可能のため、自立運転時の急負荷変動割合も負荷率50%まで許容しており、運用性に優れている。

(7) 高温余力を活かした性能向上

複数の量産機で長期信頼性に関する確認試験により高温部品の温度に余裕があることが確認できた。そのため、大幅な設計変更なく、高温化による性能向上のポテンシャルを活用した改良を実施した。

3 開発プログラム

2014年4月に開発プロジェクトをスタートさせ、高い開発目標ながら短期での開発完了とスムーズな市場投入を目指し、製品企画・ガスタービン設計・生産準備を同時並行で推進した。2016年12月からガスタービンの運転試験を開始して、約1年弱の社内運転試験により性能・健全性評価・耐久試験など一連の必要な確認を完遂し、2017年10月に開発を一旦完了した。引き続き、さらなる高温化の予備試験や量産機の追加開放点検結果などを評価したうえで、2019年から性能向上プロジェクトを実行し、2年間で完遂した。

開発試験では、性能や健全性に関する確認を行った後、耐久試験で過酷な各種条件下での運転と試験後の検査確認を行い、改良設計が必要となった場合はプロセス上流へ戻り再試験評価を行った。それを想定した事前準備や2機の試作ガスタービンを用いて詳細計測と耐久・性能計測に類別して効率的な試験を実施することで、短期の試験完遂を実現した。

信頼性確認には、「L30A」ガスタービン開発で培ってきた圧縮機・タービン全段動翼の非接触翼振動計測や放射温度計によるタービン全段動翼表面温度計測技術などのノウハウを総動員して試験評価した。運転試験設備のデータ取得やモニタリングシステムでは1,000点を超える項目を計測しながら、リアルタイムに処理分析し評価・判断をタイムリーに行った。以下、代表的な計測実施例を紹介する。

(1) 圧縮機

翼は前置翼で発生する後流（ウェイク）などによる空力励振を受けるため、高サイクル疲労の評価が必須であり、全動翼に対して、光学式の非接触翼振動計測を実施した。翼がセンサを通過するタイミングの翼振動による変化を捉えて振動を評価した上で、耐久試験により健全性を確認した。このほか、3Dプリンタで製作した計測プローブの適用にも取り組んでいる。

(2) 燃焼器

希薄予混合燃焼時の燃焼振動を確認するため、半導体圧力トランスデューサを用いた圧力変動計測により振幅や周波数を評価した。また、熱電対と示温塗料を併用して部品の耐久性確保に必要な温度であることを確認した。

(3) タービン

タービン動翼の温度評価には、より温度分解能に優れた放射温度計（パイロメータ）も適用した（図2）³⁾。併せて、スリップリングを使用した熱電対による評価精度の検証を確認している。なお、この計測では歪ゲージによる動翼の翼振動計測も実施し、別途実施した翼先端隙間の非接触翼振動計測とあわせて高サイクル疲労の評価を行った。

(4) 構造

従来よりも小型に設計した吸排気流路では、各部の壁面静圧や全圧の計測と図3に示す流れ解析により評価を行い、期待通りの性能を発揮していることを確認した。

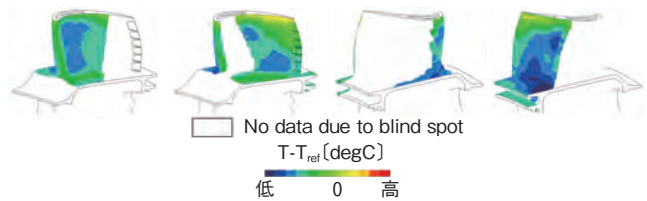


図2 放射温度計によるタービン動翼の温度計測結果
Fig.2 Results of temperature measurement of turbine rotor blades with pyrometer

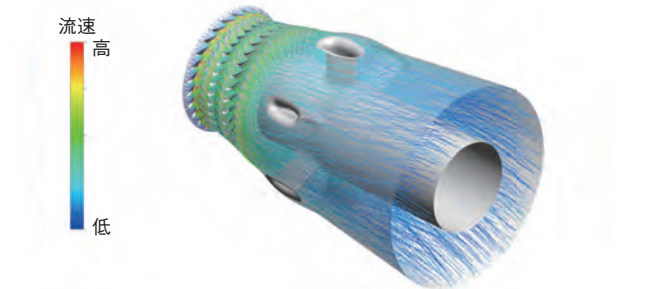


図3 排気流路部の流れ解析例
Fig.3 Example of flow analysis of exhaust flow path

表2 「PUC50D」コージェネ性能
Table 2 Cogeneration performance of PUC50D

機種	「PUC50D」
ガスタービンモデル	「M5 A-01D」
発電端出力 [kW]	4,685
燃料消費量 [Nm ³ /h]	1,287
送気蒸気量 [kg/h]	10,980
発電端効率 [%]	32.3
熱回収効率 [%]	53.0
総合効率 [%]	85.3
NOx値 (O ₂ =0%換算) (DLE運転範囲) [ppm]	52.5 (50~100%負荷)

吸気温度：15℃，大気圧力：101.3kPa（高度 0m）
吸気／排気圧損：0.98/2.94kPa
燃料：都市ガス13A
排熱ボイラ：蒸気圧力0.78MPaG，給水温度60℃

短期間の開発ながら、実機運転試験で上記例のとおり徹底した定量的評価を行うことにより、製品の信頼性を高めた。また同時に、製品の商品性向上へのポテンシャルや、さらなる性能向上の改良余地を定量的に把握した。

4 「PUC50D」コージェネレーションシステム

「M5 A」ガスタービンをコアとして排熱ボイラなどを組み合わせたカワサキガスタービンコージェネシステム「PUC50D」の性能を表2に示す。発電端効率は32.3%と同クラスのガスタービンに比べて約3ポイント、総合効率も85.3%と同クラスに比べ約3ポイント高く、高い経済性を有している。NOx値は同クラス最高の環境性能となっている⁴⁾。

代表例として国内向け「PUC50D」と従来型システム（商用電力とガス焚ボイラ）を比べると、エネルギー消費量では20.9%削減、CO₂排出量では17.5%削減可能である。あわせて、エネルギーコスト（条件：購入電力20円/kWh，都市ガス100円/m³N，他）は従来型システムよりも年間あたり約3.5億円の削減効果が見込まれる。

5 運用実績

量産初号機は国内のユーザに納入し、2018年7月から商用運転を開始した。既設ガスタービンコージェネの更新で、基礎や補機・煙突・電気設備など、できる限り既設を流用しており、経済性や環境性能で劣る老朽化したコージェネ更新のモデルとなる導入ケースである。

運用開始から約3年経過時点でガスタービンの追加開放点検を実施した。サイトからガスタービンを持ち帰り、当社工場で全分解し、目視検査・寸法検査・非破壊検査を行った。長時間の耐久性を評価するため、破壊検査用の一部のサンプルを除き、部品交換は行わずにガスタービンを再組立してサイトに戻し運用を継続する方法を採用した。

† 当社が長年培ってきた産業用中小型ガスタービンの技術を集結し、多くの経験や実績をベースに信頼性を継承しつつ、最新技術の適用によりクラス最高の発電効率、環境性能を実現するガスタービン

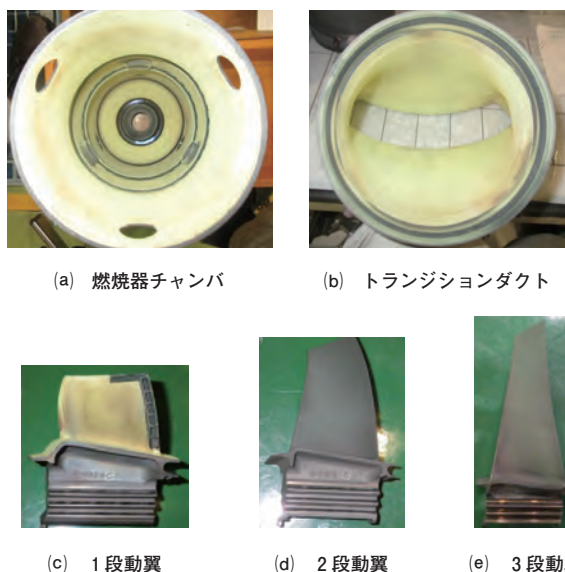


図4 工場持ち帰り追加開放点検時の高温部品写真の例
Fig. 4 Example of hot gas path parts at additional overhaul inspection at factory

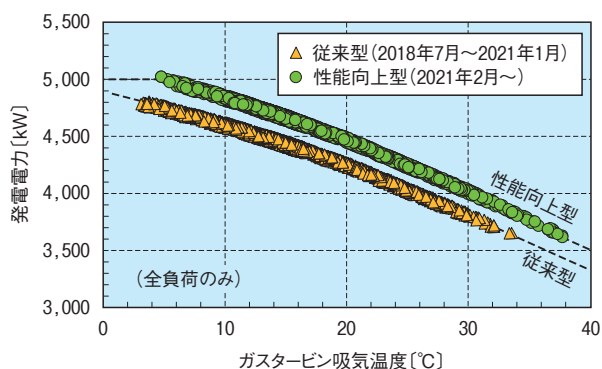


図5 性能向上したM5Aガスタービン導入後の性能推移
Fig. 5 Trends in performance after application of M5A gas turbine with enhanced performance

工場検査時の燃焼器部品とタービン動翼の写真を図4に示す。全ての部品において様相は非常にきれいで有害な欠陥は認められなかった。翼端やラビリンスシール部の隙間部の過度のラッピングも無く、適正であることが確認でき、3年間の運転での耐久性や安定性に問題がないことが実証された。

この追加開放点検後に、性能向上した「M5A」ガスタービンを導入いただき、図5に示すように計画通りの性能を発揮していること、および、運用中の燃料消費量および蒸気量などに劣化の傾向は確認されていない。今後も運用実績を重ねるとともに、計画的な点検で経過観察を継続的に実施し、長期の耐久性や安定性を確認しながら、信頼性を実証していく。

あとがき

CO₂削減に向けた政策支援や非常時のエネルギー供給による事業継続への意識の高まりから、クラス世界最高の効率と環境性能などの優れた特性を実現したM5Aガスタービンがコージェネ導入推進への駆動力となることを期待している。今後も世界が立ち向かうエネルギー問題や環境問題の解決に貢献すべく、さらなる商品性の向上に引き続き努めてゆく。

参考文献

- 1) 寺内晃司 “5 MW級 M5Aガスタービンの開発と運用実績”，第47回日本ガスタービン学会定期講演会（函館）講演論文集（2019）
- 2) S. Ishihara, et al., “DEVELOPMENT OF HIGH EFFICIENCY 5 MW CLASS GAS TURBINE THE KAWASAKI M5A”, ASME Paper GT2019-90773.
- 3) T. Horiuchi, et al., “APPLICATION OF CONJUGATE HEAT TRANSFER ANALYSIS TO IMPROVEMENT OF COOLED TURBINE VANE AND BLADE FOR INDUSTRIAL GAS TURBINE”, ASME Paper GT2018-75669.
- 4) 天然ガスコージェネレーション機器データ2023, 日本工業出版, p.54



池口拓也



久保博史



石原信哉



吉村親樹



竹田敬士郎



谷口智紀



櫻澤俊明



石飛悠希



堀内豪

省エネルギー型CO₂分離・回収システム「KCC」

Energy-Saving CO₂ Capture System KCC



真鍋賢① Satoshi Manabe
 安原克樹② Katsuki Yasuhara
 嶺祐太③ Yuta Mine
 成相俊文④ Toshifumi Nariai
 田中一雄⑤ Kazuo Tanaka
 奥村雄志⑥ Takeshi Okumura
 沼口遼平⑦ Ryohei Numaguchi
 西部祥平⑧ Shohei Nishibe

脱炭素への取組みとしてCO₂分離・回収に対する需要が高まっている。しかし普及にあたっては、そのコストの低減が技術的課題となっている。そこで当社ではCO₂分離・回収エネルギーの大幅な低減を期待できる固体吸収法による省エネルギー型CO₂分離・回収システム KCC (Kawasaki CO₂ Capture) の開発を行っている。

As an effort toward decarbonization, the demand for CO₂ capture is increasing. However, reducing its cost is a technical challenge to popularizing CO₂ capture. Therefore, we are developing KCC (Kawasaki CO₂ Capture), which is an energy-saving CO₂ capture system that is expected to drastically reduce the energy required to capture CO₂ with the solid sorbent method.

まえがき

国連気候変動枠組条約 第21回締約国会議 COP21で採択されたパリ協定の発効を機にCO₂排出を実質ゼロにすることを目指す中で、その実現に向けた具体的な計画策定と実行が急務となっている。その過程で再生可能エネルギーを最大限導入することが脚光を浴びてきたが、再生可能エネルギーの変動を補う調整力として火力発電は重要な機能を保持しており、その脱炭素化が求められている。

1 背景

火力発電脱炭素化に向けては、燃料そのものを水素・アンモニアに転換させる研究や開発が進む一方で、CO₂の分離・回収設備を設置すれば、既存の燃料調達体制や設備を活用しつつCO₂を貯留・固定化することでCO₂排出削減に貢献できるという利点を有している。また避けられないCO₂排出については、大気中のCO₂を分離回収・貯留・固定化するDACCS (Direct Air Carbon dioxide Capture Storage) や、バイオ燃料燃焼排ガスからCO₂を分離回収・貯留・固定化するBECCS (Bio Energy Carbon dioxide Capture Storage) のような工業的にネガティブエミッション化する技術が求められている。このような脱炭素への取組みの中心となるCO₂分離・回収設備はその需要が高まっているが、コストの低減などが技術的課題となっている。

2 排出量削減目標と各国の取組み

CO₂排出削減は人類共通の課題であるという認識のもと、さまざまなCO₂排出量削減目標が公開されている。特に国際エネルギー機関 IEA (International Energy Agency) のNet Zero Emission by 2050 (NZE2050) では、世界全体でエネルギー利用および産業プロセスからのCO₂排出量をネットゼロにするための具体的目標をシナリオとして公表している。このうちCO₂分離・回収によって期待される削減量は図1のように2050年段階で約76億トン-CO₂/年と試算されている¹⁾。

欧州の脱炭素の取組みであるEU域内排出量取引制度 EU-ETS (EU Emission Trading System) が2005年1月から開始された。EU-ETSは制度を都度見直しているが、2021年~2030年を対象とするフェーズ4における注目点として、炭素国境調整措置CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism) の導入合意がある。EU域内市場でのEU製品と輸入品の炭素コスト差を埋めて、産業流出とそれに伴う海外への炭素流出を防ぐ実質的な炭素関税となる。加えてEU-ETS排出枠を有償配布することで得られるオークション収入を気候変動対策に基金として投入することも注目される。イノベーション基金として、CCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) や再生エネルギー・エネルギー貯蔵などの革新的な低炭素技術への投資支援を行う²⁾。EU-ETS排出量先物取引 (カーボン

	2020年	2030年	2050年
1. 化石系燃料からのCO ₂ 分離・回収			
電力分野	0.03	3.40	8.60
産業分野	0.03	3.60	26.20
水素製造分野	0.03	4.55	13.55
非バイオ燃料製造分野	0.30	1.70	4.10
小計	0.39	13.25	52.45
2. バイオ燃料からのCO ₂ 分離・回収			
電力分野	0.00	0.90	5.70
産業分野	0.00	0.15	1.80
バイオ燃料製造分野	0.01	1.50	6.25
小計	0.01	2.55	13.75
3. 大気からのCO ₂ 分離・回収(DAC)			
有効利用	0.00	0.20	3.55
貯留・固定化	0.00	0.70	6.30
小計	0.00	0.90	9.85
合計(億トン-CO ₂ /年)	0.40	16.70	76.05

図1 CO₂回収量シナリオ (IEA NZE2050より)
Fig. 1 CO₂ capture scenario (Source: IEA NZE2050)

プライス)は、2023年2月に初の100EUR/トン-CO₂を超え、欧州も投資可能性が高くなっている。

米国ではインフラ投資・雇用法を更に強力にするインフレ削減法IRA (Inflation Reduction Act) が2022年に成立し、再生可能エネルギー・水素・CCUS・DACなどのカーボンフリーエネルギーやクリーンテクノロジーに大きな税控除インセンティブが導入された。これにより、CCUSにおいては貯留・固定化により85ドル/トン-CO₂、利用により60ドル/トン-CO₂の大きな税控除が得られる。DACでは、貯留・固定化により180ドル/トン-CO₂、利用により130ドル/トン-CO₂の税控除が得られる。この税控除影響は大きく、DACは空想論ではなく現実的な投資可能性をもたらした。図2に示すように米国は世界的規模の貯留地を保有しており、米国インフレ削減法は世界の脱炭素化の流れに対し、大きな影響を与えている³⁾。

日本では、国内CCS事業化検討が開始されており、さらにGX (グリーントランスフォーメーション) リーグによ

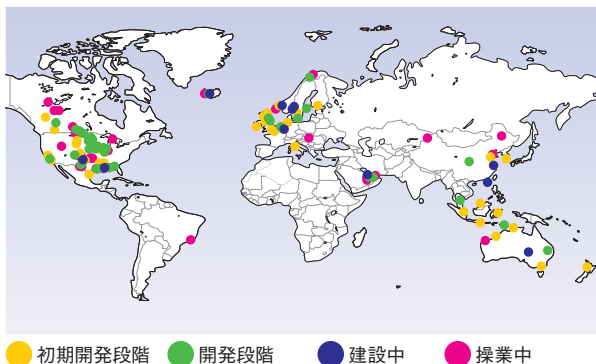


図2 世界のCCSプロジェクト⁴⁾
Fig. 2 Global CCS projects
出典：GCCSI「Global STATUS of CCS 2022」を基に作成

る排出量取引市場導入の見込みである⁵⁾。またグリーンイノベーション基金による支援など活発な開発支援を実施しており、排出量削減に向けて水素と共にCCS社会実装開発が進んでいる。

このようにCO₂分離・回収・貯留・固定化・有効利用は脱炭素をもたらすクリーンテクノロジーとして注目を集め、各国政策に排出量削減の現実解として影響を与えている。このキー技術となるCO₂分離・回収設備は更に世界的に普及を推し進めるためには、革新的な低炭素技術開発により、CO₂分離・回収コストを従来技術より更に低減させる必要がある。

3 CO₂分離・回収技術

(1) 従来技術

商用化されている排ガス中のCO₂を回収する手法として液吸収法が知られている。

液吸収法プロセスとは、CO₂吸収液は対象ガスに応じてアミン系やカリウム系などの水溶液を使用している。水溶液とCO₂含むガス媒体が接触することで、ガス中のCO₂を水溶液が吸収して、ガスからCO₂が分離される。CO₂を含んだ水溶液を加熱することでCO₂を分離して回収する。水溶液からCO₂を分離する際に水溶液を蒸発させるため、水潜熱分に加えて水顕熱のエネルギーも必要となり、大きな熱エネルギーが必要であった。

(2) 固体吸収法

当社では、従来の液吸収法の課題であったCO₂分離エネルギーを低減するため、潜水艦などの閉鎖空間中空気からのCO₂除去技術の研究から始まった固体吸収材を使用したKCC (Kawasaki CO₂ Capture) プロセスを開発している。当社で開発した固体吸収材は、図3に示すようにCO₂吸収多孔質材表面に吸収材用アミンをコーティングしたものである。

固体吸収材では低温蒸気のエネルギーのみでCO₂を分離させることから、液吸収法と違い水顕熱分のエネルギーが不要となるため、従来の液吸収法よりもCO₂分離・回収エネルギーが約6割低減できる。また液吸収法で使用されるアミンより揮発性が低いことから、プロセス系外へのアミ



図3 固体吸収材
Fig. 3 Amine-impregnated solid sorbent

ン飛散量が減少し、環境への影響が少なくなる。

4 CO₂分離回収システム

当社では燃焼後排ガスや空気を対象に、この固体吸収材を用いて固定層方式と移動層方式の2つのシステムを開発した。

(1) 固定層方式

固定層方式は、固体吸収材を吸収塔内に固定して、CO₂を吸収する吸収工程、蒸気によりCO₂を脱離する再生工程、蒸気により材が吸収した水分を乾燥させる乾燥工程を複数塔間でバッチ切替する方式である。この方式は設備構成がシンプルであり小規模の試験評価用CO₂分離・回収設備に向いている。

この設備特長を生かし、当社は環境省事業「環境配慮型CCUS一貫実証拠点・サプライチェーン構築事業（固体吸収剤による分離回収技術実証）」にて、代表事業者である一般財団法人カーボンフロンティア機構（JCOAL）との共同実施により、当社開発固体吸収材による環境影響評価試験を米国ワイオミング州で行う予定である。本事業は、日米協働の上、分離回収技術の実証試験設備を建設するもので、米国ワイオミング州のDry Fork発電所（微粉炭焚石炭火力発電所）に隣接するIntegrated Test Center（ITC）に設置して発電所からの実際の排ガスを使って試験を行う。

欧米では、CO₂分離・回収時のアミン系水溶液が外界へ放出されるアミンエミッションにより、生物が受ける影響を懸念する動きが広まっている。環境影響評価手法に基づき、2023年度に実証試験設備からのCO₂分離回収後排気ガス分析とともに、試験期間中およびその前後の期間に周辺地域のアミン系放散物の環境モニタリングと分析を実施する。固体吸収材による環境に安全で安価なCO₂分離・回収技術の確立を目指して、2022年度に詳細設計、2023年度中に環境影響評価試験を完了する予定である。

(2) 移動層方式および実証試験設備

移動層方式は、図4に示すようにCO₂を吸収する吸収塔、蒸気によりCO₂を脱離する再生塔、蒸気により材が吸収した水分を乾燥させる乾燥塔へ、固体吸収材自体を移動させ、乾燥塔から再度コンベアにより吸収塔へ再度循環させることにより、CO₂を連続的に分離・回収する設備となっている。この方式は再生塔を常時再生するため、固定層と比較してより分離エネルギーが低減できる設備となる。当社明石工場内にベンチスケール5トン-CO₂/日回収の試験設備を建設し、大規模回収用KCCとして開発中である。

このベンチスケールの実績から、当社は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 NEDOの事業「カーボンリサイクル・次世代火力発電等技術開発／CO₂分離・

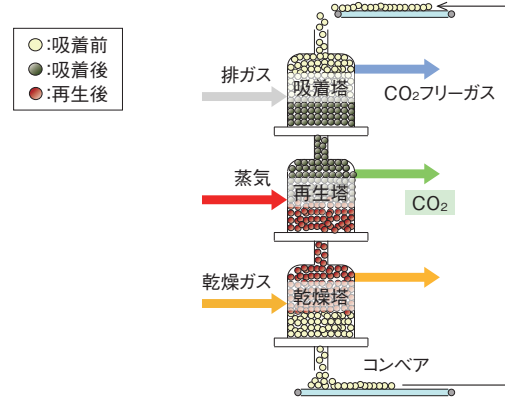


図4 移動層固体吸収法プロセス
Fig. 4 Moving bed solid sorbent process

回収技術の研究開発／先進的二酸化炭素固体吸収材の石炭燃焼排ガス適用性研究」として、関西電力株式会社舞鶴発電所にて、40トン-CO₂/日回収量相当の移動層パイロットスケール試験機の長期連続運転実証試験を公益財団法人地球環境産業技術研究機構（RITE）と共に実施している。当社は移動層パイロットスケール試験設備の設計・製作・据付工事・試運転を担当しており、2021年に土建着工、2022年度までに移動層パイロットスケール試験設備を建設（図5）した。

固体吸収材は、RITEにより石炭排ガス用に新開発されたものを使用しており、2022年度までにCO₂分離・回収を実施した。今後、2024年度まで本試験設備を使用した最大回収量試験や各種パラメータ変更試験、連続運転試験を実施し、事業化・商用化に向けたKCCプロセスの運用方法の確立や連続操作／制御応答性の開発・検証を行う予定である。

実証試験完了後は、数千t-CO₂/d回収までの商用機を開発して、中小規模排出源や火力発電所などに商用展開を開



図5 移動層パイロットスケール試験設備
Fig. 5 Pilot-scale moving bed solid sorbent plant



図6 DAC実証試験機
Fig. 6 Demonstration plant for DAC

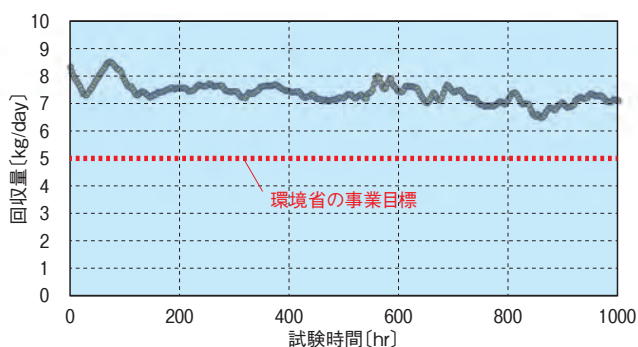


図7 DAC CO₂回収試験
Fig. 7 DAC CO₂ capture test

始する予定である。

(3) DAC開発

当社固体吸収材開発は潜水艦用DACを発祥としており、排ガスよりもCO₂濃度が低い大気からの直接回収にも適用できる。環境省事業「二酸化炭素の資源化を通じた炭素循環社会モデル構築促進事業委託業務（低濃度二酸化炭素回収システムによる炭素循環モデル構築実証）」において、5 kg-CO₂/日回収量（約2トン-CO₂/年）の小型実証試験機（図6）を当社明石工場内に設置し、実証試験を2022年度までに完了した。

固体吸収材は本実証用に新開発した当社製固体吸収材を使用している。1,000時間の連続運転において、図7のように事業目標である5 kg-CO₂/日以上での6.5~8.5 kg-CO₂/日回収量を確認し、回収したCO₂の純度は99%以上であった。さらに季節や天候の変化を模擬した空気によるCO₂回収試験を実施して季節依存性評価を実施しており、商用化展開へのデータ取得は完了済である。

あとがき

当社の省エネルギー型CO₂分離・回収システム「KCC」は実証試験を行うことで、商用機展開に向けて開発を行っている。固体吸収法という革新的な低炭素技術により、世界の脱炭素化に向けて更に開発を推進していく所存である。

参考文献

- 1) IEA ホームページ
<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- 2) 電力中央研究所 ホームページ
<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/column/column61.html>
- 3) 経済産業省 ホームページ
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/ccs_choki_roadmap/pdf/006_03_01.pdf
- 4) Global CCS Institute, 「Global STATUS of CCS 2022」レポート <https://status22.globalccsinstitute.com/>
- 5) 経済産業省 ホームページ
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/GX-league/gx-league.html



真鍋 賢



安原 克樹



嶺 祐太



成相 俊文



田中 一雄



奥村 雄志



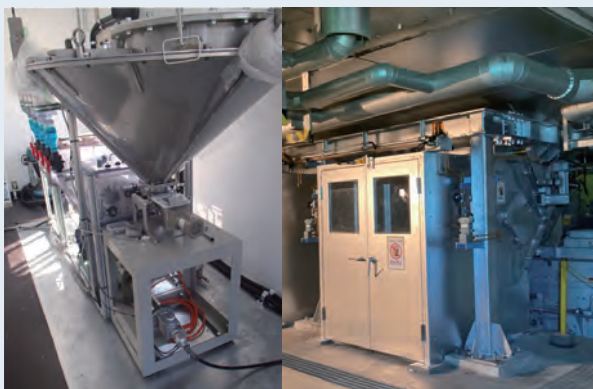
沼口 遼平



西部 祥平

燃焼灰のエネルギー回収および有価物化を可能にする 新型灰処理システム

New Ash Handling System That Makes It Possible to Recover Energy from Combustion Ash and Convert It into Valuable Resources



菊田 宗弘^① Munehiro Kikuta
竹村 嘉彦^② Yoshihiko Takemura
山口 大輔^③ Daisuke Yamaguchi

2050年までのカーボンニュートラル実現を目指す我が国の方針に対して、当社は石炭やバイオマス燃料とする発電所にて発生する灰を有効利用する技術を活用し、CO₂削減などの環境負荷低減やエネルギー回収を図ることで社会に貢献できるものと考えている。炉下に排出される燃焼灰であるクリンカと燃焼ガスから収集される飛灰であるフライアッシュのそれぞれに対して、有効利用できるリサイクル技術を確認して、ベンチ試験や実証試験により効果を確認した。

The Japanese government announced its policy for achieving carbon neutrality by 2050. We believe that we could contribute to society through reducing environmental impact, including lowering CO₂ emissions and recycling energy with technologies to make effective use of ash generated in power plants using coal and biomass as fuels. We established recycling technologies to make effective use of bottom ash, which is combustion ash discharged underneath the furnace, and fly ash, which is collected from combustion gases, and conducted bench testing and demonstration testing to verify their effectiveness.

まえがき

我が国では、2050年までのカーボンニュートラル実現を目指し、各産業においてエネルギー回収やCO₂削減などのさまざまな取組みが行われている。

1 背景

石炭やバイオマス燃料の燃焼灰には、本来はボイラで燃焼されるべき「未燃炭素」が含まれている。灰中の未燃炭素量が多いとエネルギー損失に繋がり、また産業廃棄物としての灰量が増加することから、環境負荷上昇やエンドユーザの灰処分費上昇にも直結する。さらに灰の有効利用の観点からも、灰中の未燃炭素量は減少させる必要がある。

燃焼灰は、ボイラでの燃焼により炉下に排出されるクリンカと、ボイラ燃焼ガスに含まれ大気放出前に集塵装置にて収集されるフライアッシュにより構成されている。

クリンカに関して、現在国内にて稼働中の石炭火力発電所は運転開始から20年を経過したものが6割を超えており、その中の多くが湿式処理方式で老朽化も進んでいる。このため、エネルギー回収や環境負荷低減が可能な乾式処理設備への更新(レトロフィット)需要の増加が見込まれている。

フライアッシュに関して、国内での発生量の多くは粘土

代替としてセメント原料にリサイクルされているが、セメント製造時にはCO₂が発生する。ただし、フライアッシュセメントと呼ばれる灰中の未燃炭素量を規定値以下にした高品質灰を混合するセメントは、通常のセメントの同量を製造する場合と比較すると製造時のCO₂発生量を削減可能であるため、循環型社会を目指す社会情勢において需要が増加すると予想される。

このような状況を踏まえ、当社は石炭やバイオマス燃料の燃焼灰に対して、環境負荷低減ならびにエネルギー回収が見込めるリサイクル技術を確認した。

2 灰処理システムの概要

クリンカおよびフライアッシュの代表的な処理系統を図1および図2に示す。クリンカは、乾式クリンカコンベヤおよびクリンカ冷却コンベヤにて空気冷却されながら搬送され、クラッシュャを経てタンクに一時貯留された後、トラック輸送あるいは後流設備へ空気輸送される。一方フライアッシュは、ブロワにて真空輸送され、フィルタセパレータにて捕集された後、フライアッシュサイロに貯留される。サイロからトラックへの払出方法としては2種類あり、乾灰のまま払い出す場合はバラ積装置、湿灰として払い出す場合はダストレスアンローダ(加湿装置)を用いる。

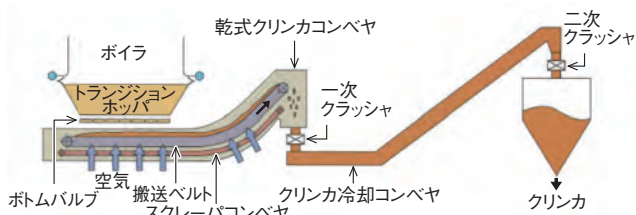


図1 クリンカ処理システム (乾式)
Fig. 1 Bottom ash handling system (dry)

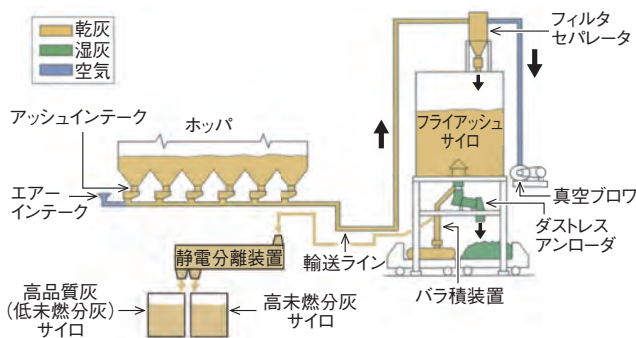


図2 フライアッシュ処理システム (真空輸送)
Fig. 2 Fly ash handling system (vacuum conveyance)

3 新型乾式クリンカ処理システム「KACE」 (Kawasaki Ash Cooling / Conveying Extractor)

(1) 開発背景

乾式クリンカ処理システムでは、クリンカが乾灰のまま排出されることから有効利用先が拡大し、また設備におけるユーティリティ使用量が削減可能であるなどの利点がある。一方、亜瀝青炭などの低品位炭使用時には、ボイラ内にて過度に成長したクリンカ大塊が発生した場合に、現在の方式では下流への搬送に支障を来すおそれがある。そこで、大塊クリンカを大塊の状態ですべて系外に排出することで後流側機器でのトラブルを抑制可能な新型のクリンカ処理システム「KACE」(Kawasaki Ash Cooling / Conveying Extractor)を開発した。

(2) 機器コンセプト

(i) 大塊クリンカの系外排出

「KACE」の概要図を図3に示す。ボイラ内にて発生したクリンカは、ボイラ炉底部に配置されたクリンカホップを通過した後、大塊分離装置(グリズリー)にて大塊クリンカと細粒に分別される^{1,2)}。大塊クリンカは大塊ゲートを手動操作にて開けることで大塊回収箱へ投入され、その後灰捨場などへ人力で運搬される。細粒は乾式クリンカコンベヤにて下流側へ搬送される。大塊クリンカの系外排出を可能とすることで、

- ① 大塊クリンカの詰まりに起因する乾式クリンカコンベヤ停止の未然防止

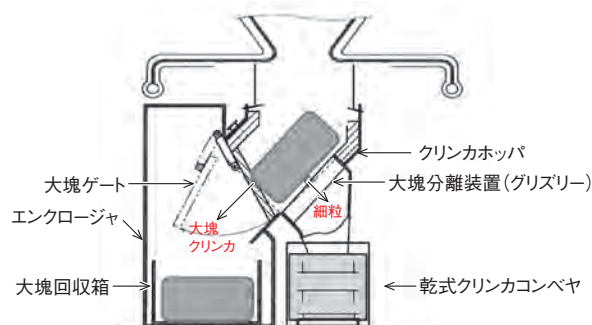


図3 KACE概要図
Fig. 3 Schematic of KACE

- ② 炉下コンベヤの小型化による設置費用の削減が期待できる。

(ii) 未燃炭素(未燃バイオマス)のエネルギー回収

バイオマス混焼や専焼のボイラは石炭専焼ボイラと比較すると、クリンカ中の未燃炭素割合が圧倒的に多い。たとえば、石炭専焼ボイラが5%程度なのに対してバイオマス混焼ボイラは40~50%となる。湿式システムを使用すると大量の未燃炭素を廃棄することとなり、エネルギー回収ができない。加えて、CO₂発生量削減の観点からバイオマス混焼率を上昇させると、付随して未燃炭素量が増加、すなわち産業廃棄物量が増加する。

そこで、クリンカの搬送方式を湿式から乾式へ変更することにより、エネルギー回収の観点から以下が可能となる。

① ボイラ下での燃焼継続による熱回収

コンベヤでのクリンカ冷却には空気取入口からボイラ負圧を利用して取り入れる大気を利用しているため、クリンカは炉下部分やクリンカコンベヤへの落下後も燃焼反応を継続でき、その際に発生した熱エネルギーは流入空気によりボイラに回収される。

② ボイラへの灰再投入による未燃炭素(主に未燃バイオマス由来)の回収

コンベヤ搬送したクリンカを微粉砕した後、空気輸送によりボイラへ再投入することでクリンカに残存する未燃炭素(主に未燃バイオマス由来)を全てボイラにて燃焼させることができる。これは「MAR (Magaldi Ash Recycling)」と呼称され、当社と技術提携関係にあるイタリアのマガルディ社の持つ技術である。

(3) ベンチ試験

ベンチ試験機を製作して、熱負荷中の機器動作確認やグリズリーの分別機能に問題のないことを確認した。

ベンチ試験により判明した事項について、以下のように実証機設計に反映した。

① 大塊ゲート・ホッパ間のシール性向上

ボイラ正圧時における大塊ゲートとホッパ間の隙間からの灰の噴出を防止するため、ベンチ試験時からゲート

形状を変更し、シール性を向上させた。

② グリズリー噛み込み時の解消策

グリズリーでの分離対象となるφ200程度の中塊は、形状によりグリズリーや遮蔽体（回転式シャフトを大塊クリンカ落下の衝撃から保護する耐火材料製ブロック）に噛み込み、自然解消が困難な場合がある。そのため、灰排出を促進するための突起をシャフトに複数設置して、シャフト回転時に噛み込みを解消させる形状とした。また、灰排出が容易となるよう遮蔽体形状も変更した。

(4) 実証試験

実運用中のボイラ下に設置されていた湿式コンベヤを撤去した上で、図4に示すように実証試験機を設置して、以下を確認した。

(i) 機能確認

・グリズリーにおける分別機能

ホッパシュート傾斜部に小中塊が滞留する場合もあるが、多くは一定時間後に排出され、問題なく分別できることを確認した。

・大塊ゲートからの排出

ホッパ内に滞留した大塊が問題なく排出されることを確認した。

・グリズリー部での詰まり発生時の対処方法

クリンカによる排出口閉塞が発生した場合においても、シュート部点検口からの突き作業にて閉塞が解消できることを確認した。

(ii) 各所計測による評価

・クリンカホッパ内雰囲気温度

250~350℃程度であり、強度評価条件の450℃以下と比較し安全側となっていることを確認した。

・乾式クリンカコンベヤ内灰温度

投入口で600~800℃の高温（赤熱）クリンカはコンベヤ傾斜部を搬送される間に100~300℃の温度低下が見られた。

通常落下灰では、投入口で100~200℃である一方、排出口では100℃以下であった。

- ・各部温度計測（ホッパ、グリズリー、ゲートなど）解析による温度分布と比較して安全側となっていることを確認した。

(iii) エネルギー回収に関する考察

実証試験機設置前の湿式コンベヤ運転時に比べて、設置後は燃焼効率の上昇が認められた（設置前：約99.3%→設置後：約99.6%）。これは、乾式への転換により、クリンカに含まれる未燃炭素分が火炉下にて燃焼反応を継続することなどによるものと考えられる。また、乾式化によってボイラ下の水封水が不要となり炉内へ流入する水分（蒸発した水封水）がなくなったことから、ボイラ全体の温度が上昇して、クリンカのみならずフライアッシュの未燃炭素分にも燃焼を促す効果があったと考えられる。

4 静電分離技術によるフライアッシュの未燃分除去システム

今後の需要増加が見込まれる高品質灰の製造手法として、当社は静電分離技術を有している。2003年頃から本技術を開発してきた^{3,4)}が、装置の小型化や回収率向上が課題となっていた。直近では処理量の増大が可能な手法の実現を目指して開発を行ってきた。

(1) 未燃炭素の分離と灰の有価リサイクル

灰を高品質灰（有価物）にするためには、灰中の未燃炭素量を規定値以下にする必要がある。その方法として、図5に示すような静電分離技術により灰から未燃炭素を分離させる装置を開発した。

多孔質の板に原粉を投入し、その上部に網状の板を設置した状態で両者間に電圧を印加すると、正極となる多孔質板には中性の灰分が残り、負極となる網状の板には帯電した未燃炭素が引き寄せられる。多孔質板下部からは流動化エアを流すことで未燃炭素の移動を補助している。この

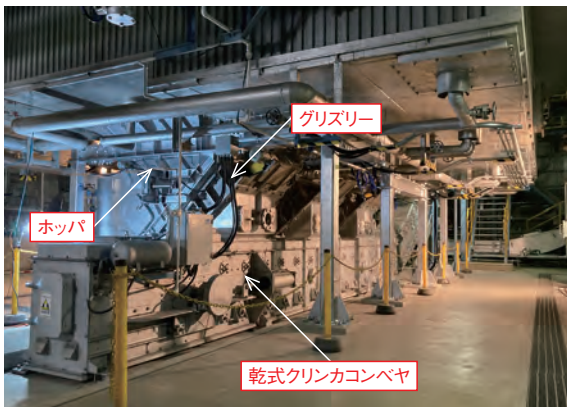


図4 実証試験機外観（缶前側）
Fig. 4 Exterior of demonstration testing equipment (front of boiler side)

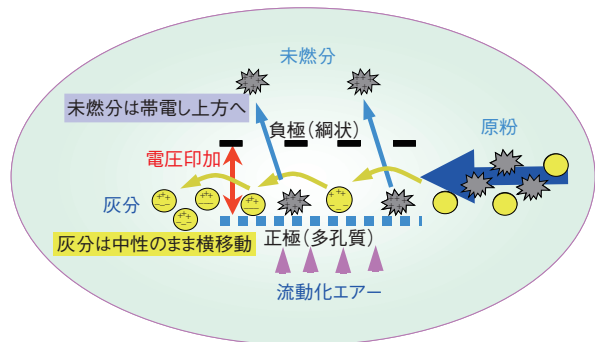


図5 静電分離技術の原理・概念
Fig. 5 Principle and concept of electrostatic separate technology

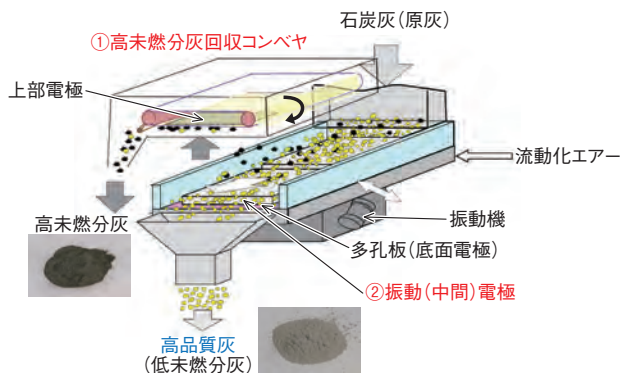


図6 ベンチ試験機
Fig. 6 Bench testing equipment

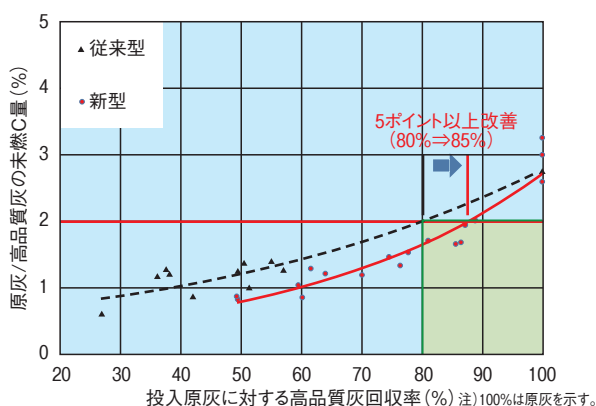


図7 ベンチ試験結果
Fig. 7 Bench testing results

技術により灰から未燃炭素が分離されることで、従来は処分費を要していた灰の有価物化が可能になる。

(2) セメント製造時のCO₂発生量削減

国内のセメント製造時のCO₂発生量(2019年度)は、直接排出総量11億794万トン⁵⁾に対して4,147万トン⁶⁾であり、割合としては3.7%程度である。前述の通り、フライアッシュセメントが普及すれば、国内における高品質灰の需要が増加してCO₂発生量削減に寄与できる。通常のセメント製造時と比較してCO₂発生量を20%程度削減可能である⁷⁾。

(3) ベンチ試験

ベンチ試験機の概要図を図6に示す。多孔板上に灰を投入し、振動機により排出口へ導く過程において、上部電極となる高未燃回収コンベヤとの間に電圧を印加すると同時に、多孔板下部から流動化エアを導入することで、未燃炭素が回収コンベヤに回収・搬送される構造である。

従来型は装置全体を振動させつつ上部電極に移動した未燃炭素を吸引していたため装置が大型化していたが、ベンチ試験機では中間電極にのみ振動を与えつつ、未燃炭素は吸引せずベルトに付着させることで、装置の小型化および

回収率の向上を実現した。

本装置を用い、実運用中の2箇所の発電所にて未燃炭素の分離性能を確認した。ベンチ試験の結果を図7に示す。本試験における目標性能は、「高品質灰に含まれる未燃炭素量の割合」および「投入原灰に対する高品質灰の回収率」とし、前者はセメント製造時の一般的な要求事項である「2%以下」、後者は従来機以上となる「80%以上」とした。なお未燃炭素量は、回収した高品質灰の加熱前後での質量比から求めた。従来型とベンチ試験機を比較すると、いずれも未燃炭素量の異なる灰を安定的に分離可能である一方で、ベンチ試験機は回収率が5ポイント以上改善され、分離性能が高いことが分かる。

あとがき

新型乾式クリンカ処理システム「KACE」については実証試験まで完了して、商用機受注に向け営業活動を実施中である。静電分離技術によるフライアッシュの未燃除去システムについては、ベンチ試験で分離性能が高いことを確認しており、今後実証試験のステージへ進める計画である。当社はこれらの技術によりエネルギーの回収や灰の有効利用を行うことで、カーボンニュートラル実現に貢献していく。

参考文献

- 1) 特許 第6586359号, “灰排出システム”
- 2) 特許 第6722447号, “グリズリ装置及び主灰排出システム”
- 3) 特許 第3981014号, “粒子の静電分離方法”
- 4) 特許 第4749118号, “静電分離方法および静電分離装置”
- 5) 国立環境研究所 温室効果ガスインベントリオフィス 「日本の温室効果ガス排出量データ」(1990~2019年度確報値)
- 6) 経済産業省 製造産業局 資源エネルギー庁「コンクリート・セメントのカーボンニュートラルに向けた国内外の動向等について」(2022年)
- 7) 一般財団法人カーボンフロンティア機構 ホームページ https://www.jcoal.or.jp/ashdb/ashqacollection/ashqa_common/07.html



菊田宗弘



竹村嘉彦



山口大輔

ごみ処理施設・資源化施設における省人化技術

Labor-Saving Technologies for Municipal Waste Treatment Facilities and Recycling Facilities



國政 瑛 大①* Akihiro Kunimasa
 中野 裕② Hiroshi Nakano
 桂木 格③* Tadashi Katsuragi

ごみ処理施設や資源化施設では、労働人口減少などにより、今後運転員の確保がより困難になる状況が予測されており、施設の運転を経済的・効率的にする省人化技術の開発が重要となっている。

これを受け、ICT技術やロボット技術を活用して、ごみ処理施設における遠隔監視・運転支援システム「KEEPER」や資源化施設における資源ごみ選別作業支援システム「K-Repros」など運転員の負荷を軽減させるシステムを開発した。

Because of the declining workforce, municipal waste treatment facilities and recycling facilities are expected to face greater difficulty in securing a sufficient number of operators, and it is increasingly important to develop labor-saving technologies for economical and efficient facility operation.

In response to this situation, we have developed systems for reducing the burden of operators by using ICT (Information Communication Technology) and robot technology, including KEEPER, a system for remotely monitoring and supporting the operation of municipal waste treatment facilities, and K-Repros, a support system for hand-sorting recyclable waste in recycling facilities.

まえがき

近年、我が国を取り巻く社会環境の変化（労働人口減少、大規模災害や感染症の流行）により、今後運転員の確保がより困難になる状況が予測されている。ごみ処理施設や資源化施設においても、より少ない運転員で効率的に運転する社会的ニーズが高まっている。

1 背景

ごみ処理施設や資源化施設は生活基盤を支える重要社会インフラ施設の一つであり、安心・安全な操業が求められる。施設の安定稼働には、運転状態を管理・補助する運転員の存在が不可欠である。労働人口が減少していく中で効率的に施設を操業していくには、運転員の経験に依存せず安定した運転を実現する運転システムの構築が必要である。

現在、当社はごみ処理施設や資源化施設の人による認識や判断行為・作業を補助するものとして、遠隔監視・運転支援システムや資源ごみ選別作業支援システムなど省人化技術の開発を進めている。運転員のノウハウをシステム化して負担を軽減することで、より人の関与が必要な業務へのリソースシフトを可能にするソリューションを目指した技術開発に取り組んでいる。

2 ごみ処理施設の遠隔監視・運転支援システム

ごみ処理施設は、家庭ごみをはじめとする一般可燃ごみを焼却処理により減容化・無害化する施設である。収集されたごみをごみ処理施設のごみピットに受入れて、焼却炉内で効率的に完全燃焼して減容化する。焼却排ガスは排ガス処理装置により無害化して煙突から排出する。また、焼却時に発生する熱エネルギーは発電や熱供給に利用される。

(1) ごみ処理施設の省人化運転における課題

ごみ処理施設は分散制御システムDCS (Distributed Control System) で制御され、焼却炉の運転は自動燃焼制御ACC (Automatic Combustion Control) により自動化されている。処理対象となるごみは不均質であるため、一時的にごみの性状（質や発熱量）が大きく変動した場合、手動操作により安定燃焼を補助する必要がある。そのため、ごみ処理施設の安定運転には、焼却炉の燃焼状態を監視して自動燃焼制御を補助するベテラン運転員が不可欠である。

ごみ処理施設の省人化運転の実現には、①現地運転員による焼却炉の監視・操作の遠隔監視サポート、②焼却炉に投入するごみ性状の安定、③燃焼状態の変動に応じた自動燃焼制御の補正が課題となっている。

(2) ごみ処理施設における省人化技術

① 遠隔監視・運転支援システム「KEEPER」

当社は、ごみ処理施設における遠隔監視システム「KEEPER (Kawasaki Expert Environmental Plant Engineered Remote support system)」を2016年度より導入している。当社神戸工場内に設けた環境遠隔監視室と全国にある各施設の運転監視システムを仮想的な専用回線IP-VPN (Internet Protocol-Virtual Private Network) で接続して、遠隔で集約的に監視可能としたものである。導入当初は4施設が対象であったが、DBO事業の受注に伴い、2023年3月現在で対象施設は12施設となっている。

プラットフォームとしてNTT PCコミュニケーションのMaster's ONEを用いたIP-VPNを基本に構築して、セキュリティの担保を図っており、ネットワークを含めたハード側の高いセキュリティ対策の維持・向上を進めている。また、監視員・社員による悪意の有無を問わないセキュリティアタックに対する対策として、2020年10月に図1に示すサイバーセキュリティマネジメントシステムCSMS (2023年3月現在3社取得)の認証を取得して運用中である。

「KEEPER」では、当社ベテラン運転員のこれまでに培った運転経験を活用し、24時間監視を通じた各施設(オンサイト)の監視と運転状況の確認・診断に関するサポート業務を行っている。また、各施設の運転データを収集・蓄積・分析するデータセンターとしての機能も持ち、AIを活用した運転支援システムを運用している。燃焼の安定化と運転員の負荷低減を目的に、焼却炉の運転において実施される手動操作をAIで再現し、最適な手動操作を運転員にレコメンド出力するものである。図2で示すように、プロセスデータや燃焼映像および手動操作履歴といった施設運転データをAIが関連付けて学習して、過去に手動操作が行われた運転状況と類似していると判断した場合に、その操作レコメンドを自動出力する¹⁾。

学習AIは、各施設運転データが登録された遠隔監視システムのデータベースにアクセスして、蓄積された過去データの学習により演算モデルを生成する。予測AIはこの演算モデルと最新データから操作レコメンドを生



図1 CSMS認証ロゴおよび遠隔監視室
Fig.1 CSMS certification logo and remote monitoring room

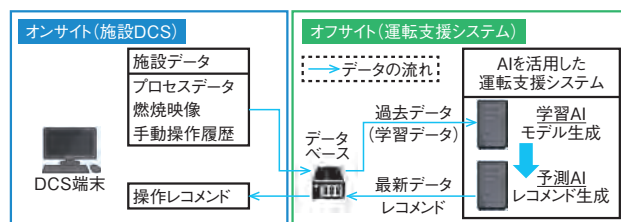


図2 AIを活用した運転支援システム概要
Fig.2 Overview of operation support system using AI

成する。なお学習AIによる演算モデルの生成は適宜可能であり、各施設運転データの追加に応じて追加学習が可能なシステムである。

② ごみクレーン最適運用システムによるごみ燃焼安定化

焼却炉における安定燃焼の基本はごみ質(発熱量)を可能な限り安定させることであるが、ごみ質が大きく変動する主要因は水分である。従来は、ごみピット内のごみ質の状況を定量的に把握できなかったため、運転員による目視(ごみの色、ごみクレーンでつかんだ際の重量など)によるごみピット内の攪拌が必要であった。ごみクレーン最適運用システムとして、ごみ中の水分の定量的な計測とごみクレーンによるごみピットの最適攪拌方法を組み合わせた自動運転技術を開発した。

水分カメラにより、近赤外線カメラで撮影した画像を水の吸収帯域とその影響が小さい非吸収帯域の両者の画像の輝度の違いからごみ中の水分指標を数値化する。図3に示すようなピット全域の水分指標の分布データを使用して、ごみクレーンでピット内のごみ水分指標の分布が平準化する最適攪拌を自動で効率的に行う。

③ AI活用運転支援システムによるACC自動補正

運転支援システムから発信された操作レコメンドは、図4で示すように、施設DCSで操作端と操作方向を定性的に表示するガイダンスモードと、ACCに自動補正を行うAI補正モードで使用される。AIが補正する制御操作量の範囲は操作端ごとに施設DCS(オンサイト)上で

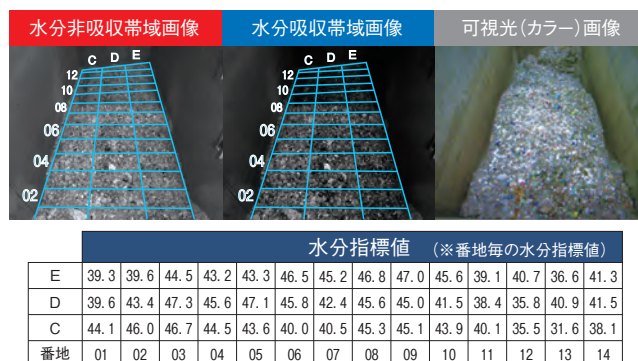


図3 水分カメラ画像と水分指標マップ
Fig.3 Moisture content camera image and moisture content index map

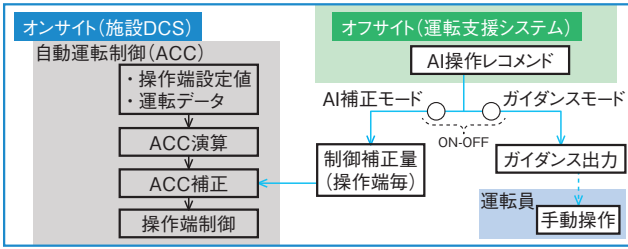


図4 操作レコメンドの活用システム
Fig. 4 System using operation recommendations

設定可能である。過去の運転データに基づく運転員の燃焼監視・手動操作を再現した操作レコメンドとACCとを連携させることで、自動運転適用範囲が拡大し、運転員の手動操作の負荷を軽減できる。

(3) 実証試験

2021年1月～3月に環境遠隔監視室で運転を代行して、遠隔操作を試験的に実施してシステムを実証した。なお「KEEPER」を使用した遠隔操作を行う場合、環境遠隔監視室でも中央制御室と同じ情報(運転操作画面・ITV映像)は得られるが、機械室の各機器の運転状況などは把握できないため、現地側と連携を図りながら行った。

2022年3月竣工の知多南部広域環境センターでは、ごみクレーン最適運用システムとAI活用運転支援システムによるACC自動補正システムが適用されており、その実証試験で2週間手動操作が不要となる安定運転を確認した。また環境遠隔監視室の運転員による24時間監視を通じたバックアップを組み合わせることで運転しており、各省人化技術の活用により省人化運転が可能なる状態である。

3 AI搭載資源ごみ選別作業支援システム「K-Repros」

資源化施設は、ガラスびん・缶・ペットボトルなどの資源をリサイクルするため、選別処理や圧縮梱包を行う施設である。この内ガラスびんは、リサイクルするために色別に分別する必要がある。一般的に茶色や無色およびその他の3種類に分別される。

(1) びんの選別工程における省人化の課題

ガラスびんの選別工程における回収物は、栄養ドリンクのような小さなびんから一升びんのような重量物までサイズも多様であり、分別対象の色・サイズの組合せは多岐にわたる。また、ガラスびんとして回収されたもののなかにはガラスびんとしてリサイクルできないキャップ等の異物が混入していることもあり、それらの異物除去も選別工程では必要となる。このような状況において、選別精度向上のため複数の作業員による手選別が広く採用されている。

AI搭載資源ごみ選別作業支援システム「K-Repros」は、

図5に示すように、作業員の手選別作業と協働してガラスびんの色選別作業の補助を目的に開発したものである。開発にあたり、①ロボットと人の共存・協働作業への対応、②びん識別技術、③びん把持を可能とするハンドの開発が課題となっている。

(2) AI搭載資源ごみ選別作業支援システム「K-Repros」

K-Reprosのシステム概要を図6に示す。本システムは画像データから選別対象であるびんを自動で検出・識別を行う認識部とその信号に基づきピッキングする把持部から構成される。把持部はロボットとロボットアームの先端に取り付けるハンドで構成される。課題を解決するために以下3つを適用・開発した。

① 「duAro 2」による共存・協働作業

把持部は当社の協働ロボット「duAro 2」を採用しており、作業員とロボットが同じ空間で共に作業することが可能である。「duAro 2」は衝突検知機能やロボット表面に柔軟な材料のパーツを採用するなど、安全を担保するためのさまざまな機能により、人との共存・協働作業が可能である。また設置にあたり隔離柵が不要で、人ひとり分のスペースに設置できるコンパクトなサイズであり、コントローラを内蔵したキャスター付きの台車により容易に移動できる。

② AIによるびん識別

認識部には、びんの認識に特化した自社開発のAIを採用している。深層学習により入力された画像データから対象物を検出できるもので、図7で示すようにカメラで撮影した画像データを基にAIが色や形状などの特徴

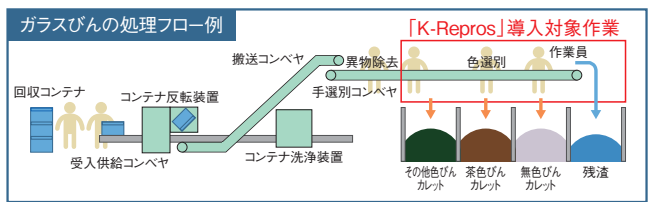


図5 「K-Repros」の導入対象作業
Fig. 5 Processes covered by K-Repros

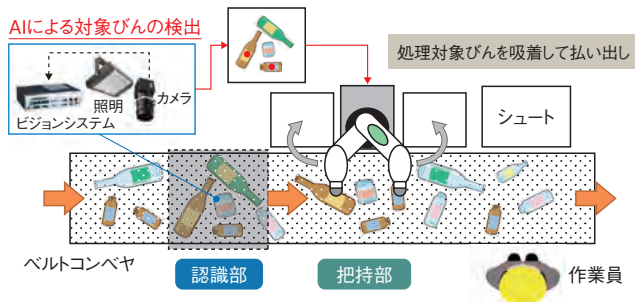


図6 「K-Repros」システムの概要
Fig. 6 Overview of K-Repros system



図7 AIによる検出例
Fig.7 Example of detection using AI
(○:茶色びん, ○:無色びん, ○:その他色びん)

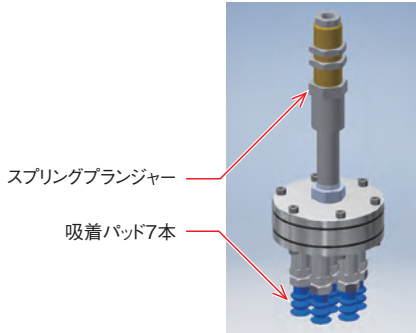


図8 ハンド構造
Fig.8 Construction of hand

量から自動でびんの色識別を行い、対象物の把持ポイントを判断する。

③ 真空吸着式ハンドによるびん把持

「duAro 2」のハンドには、図8に示すような真空吸着式を採用している。びんの大小の差による吸着面高さの差をスプリングプランジャーで吸収して、先端に配置した吸着パッドでびんを吸着する。複数の爪の開閉により対象物を挟むグripper式に比べて、把持スピードに優れ、びんの向きや形状・大きさに関係なく把持することが可能である。処理対象物が密集する状況にあっても目標物だけをピンポイントで把持可能で、確実性が高い。

(3) 実証試験

AIの識別精度ならびに処理能力を確認するため、図9に示すように、実際にびんの手選別工程を有する資源化施設の手選別コンベヤに本システムを設置し、実証試験を実施した。なお、資源化施設におけるガラスびんの選別では色選別後の純度（異色びんの混入率）に高い精度が求められることが多いため、AIモデルの構築においてはびんの検出率よりも色間違いなどの誤検出数を最小限とすることに重点を置いた。

AIによる識別精度の検証結果を表1に示す。対象色びんへの他の色びんの混入程度を示す適合率は、いずれの種類も100%であった。適合率100%とは色間違いが無く、全て対象色ごとに分類されている状態を示している。また、AIがびんとして識別した割合を示す検出率は、平均97.2%



図9 実証試験の様子
Fig.9 Demonstration experiment

表1 AIによる識別精度の検証結果

Table 1 Verification results of accuracy of identification using AI

ガラスびんの種類	適合率 ((B-D)/B)	検出率 (B/A)	処理対象数 (A)	検出数 (B)	未検出数 (C)	誤検出数 (D)
茶色	100%	97.4%	534	520	14	0
無色	100%	97.3%	515	501	14	0
その他色	100%	96.6%	298	288	10	0
平均(合計)	100%	97.2%	(1347)	(1309)	(38)	(0)

であり、色に対する高い識別精度を有しつつ、びんに対する検出率においても十分な性能が得られた。なお、作業員1人分の処理量に対するロボット1台の処理量の割合は、50%程度を確保できており、協働ロボットを適用して人とその共存・協働作業をコンセプトとした本システムの能力として、想定通りの成果となった。

あ と が き

長期間にわたる施設の安定運営には、ベテラン運転員の経験に依存せずに安定した運転を実現する運転システムの構築が必要である。また、運転員の確保がより困難になる状況が予測されており、ごみ処理施設や資源化施設において省人化技術が今後ますます重要となる。ICTの発展状況なども踏まえつつ、本技術の開発に今後も取り組んでいく。

参 考 文 献

- 1) 國政瑛大, 他: AIを活用した運転支援システムの評価について, 第31回廃棄物資源循環学会発表会講演原稿, D1-4 P.249-P250 (2020)



國政 瑛大



中野 裕



桂木 格

港湾内操船事故ゼロを目指す「安全離着岸支援システム」の開発

Development of Advanced Safety Berthing/Unberthing Assistance System Aimed at Achieving Zero Vessel Accidents in Ports



杉本 健① Takeshi Sugimoto
 檜野 武憲② Takenori Hino
 大江 啓司③ Hiroshi Ooe
 風間 英輝④ Eiki Kazama
 坂本 守行⑤ Moriyuki Sakamoto

多数の船が輻輳し、また高度な操船が要求される港湾内での事故は人的な要因で生じることが多く、さらなる安全性の向上が求められている。当社は船用推進機システムと船用装置全般にわたる製品群技術のバックグラウンドを生かして、港内操船・離着岸操船・係船作業・係船管理の4つの対応を一気通貫で支援する世界初の「安全離着岸支援システム」開発に川崎汽船(株)並びに川崎近海汽船(株)と共に取り組んでいる。川崎近海汽船が運航する内航船を使用して、実用環境下での研究・開発を進めており、2025年の社会実装を目指す。

In ports, which are congested with ships and require sensitive vessel maneuvering, many accidents are caused by human factors and a higher level of safety is required. Taking advantage of our product technologies for marine propulsion systems and general marine machinery, we are working with Kawasaki Kisen Kaisha, Ltd. and Kawasaki Kinkai Kisen Kaisha, Ltd. to develop the world's first advanced Safety Berthing/Unberthing Assistance System that supports maneuvering in port, berthing/unberthing, mooring operations, and mooring management in an integrated way. We are conducting research and development by using Kawasaki Kinkai Kisen coastal vessels in actual service conditions, aiming for social implementation by 2025.

まえがき

近年、海上安全の一層の向上、船上の労働環境改善、産業競争力の向上・生産性の向上などの観点から、船舶の自動運航技術の実用化への期待が高まっており、わが国でも2018年に国土交通省が「自動運行船の実用化に向けたロードマップ」を策定し、2020年に一般財団法人日本海事協会が「自動運航、自律運航に関するガイドライン ～自動化システム/遠隔制御システムの設計開発、船舶搭載並びに運用について～」を発行するなど、各方面で社会実装へ向けての取組みが行われている。

また国際海事機関IMO (International Maritime Organization) において、MASS (Maritime Autonomous Surface Ships) すなわち自動運行船に関する国際的なルール MASS Codeの2028年発効に向けた検討が続けられている¹⁾。

1 背景

航海計器の進歩やIoT技術の発展はあるものの海難事故

の発生件数は減少しておらず、特に内航船では港湾設備など沿岸域での事故件数が半数以上を占め、船舶の入出港時の安全性向上が求められている。

そこで、港湾内操船事故ゼロを目指して川崎汽船株式会社並びに川崎近海汽船株式会社と当社が共同で「安全離着岸支援システム」の技術研究開発に取り組んでいる。これは港内操船・離着岸操船・係船作業・係船管理の4つの対応を一気通貫で支援する世界初のシステムである。最大の特長として、推進機と係船機の連携制御により入港から係船作業そして停泊中の係船管理までの支援を実現する。

2 「安全離着岸支援システム」三社共同開発のねらい

現在、港湾内での離着岸作業は、操船技術に精通して船固有の操縦性能と係船設備の特性を熟知した乗組員によって行われているが、船舶の大型化による操船の高度化や社会課題となっている船員人材不足から、船舶操船・係船におけるさらなる安全管理の向上が求められている。本システムにより操船者の安全離着岸操船をAIなど最新技術でアシストして省スキル化することによって、離着岸作業の

課題解決に繋がることを期待される。実用化に向けた研究・開発に当たっては、共同開発パートナー2社が持つ豊富な操船ノウハウと当社がこれまでの船用機械事業で培ってきた推進機システムインテグレーション技術および係船支援技術を融合して、離着岸操船および係船作業におけるさまざまな課題解決とさらなる安全性の確立を目指す。

3 安全離着岸支援を実現するための開発技術

(1) 港内操船

港湾内での操船は低船速で、図1に示すように風や潮流といった気象海象などの外乱による影響を受けやすい難しさがあり、操船者には安全操船の判断を適切に行いたいニーズがある。

これに対して、自船操船および周辺状況を正確に認識するセンシング技術と船体運動モデルによる船体状態予測技術である「操船支援情報技術」を開発することにより、港湾内での他船や岸壁との相対関係の正確な情報や気象海象外乱の影響を考慮した将来の針路・速力や停船位置などの高精度な船体動作予測とそれに基づいた将来危険予知情報をHMI (Human-Machine-Interface) 装置へ適確に表示し、熟練操船者でなくとも安全操船判断を適切に行えるような操船支援を実現する。

複数のセンサの信号を組合せること（センサ・フュージョン）と膨大なセンサ信号を高速で処理することで周囲状況を認識する環境認識センサ技術を活用して、自船や他船並びに浮標など障害物の位置・姿勢・移動速度および自船と着岸岸壁との相対関係などの正確な情報を船上で取得して、操船者を支援することができる。レーザー距離測定と画像情報から岸壁部を認識しているセンサ・フュージョンの例を図2に示す。また、船の運動モデルを活用して、センサで得られない気象海象外乱の影響力推定や将来動作予測を演算（図3）することで、着岸時の船体と岸壁との平行度や角速度変化・岸壁への接近速度・船体の将来位置予測などを操船者に提供することが可能となる。

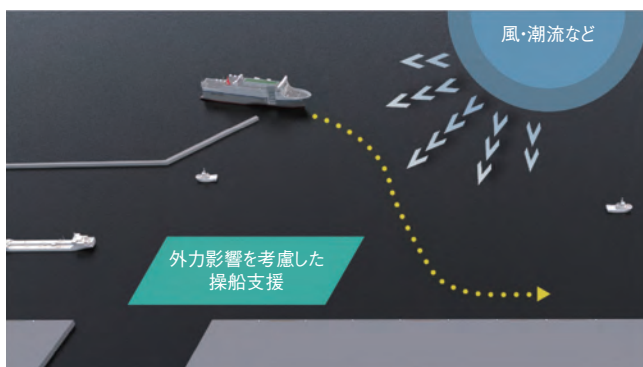


図1 港内操船～離着岸操船
Fig.1 Maneuvering in port and berthing/unberthing

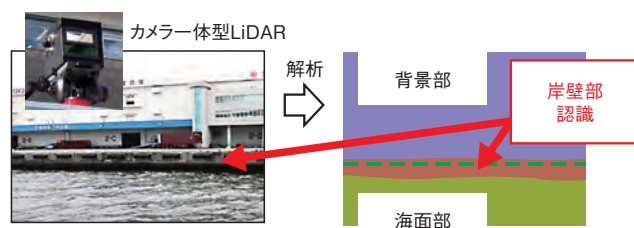


図2 LiDARとカメラFusionによる岸壁検出
Fig.2 Berth detection by LiDAR/camera fusion

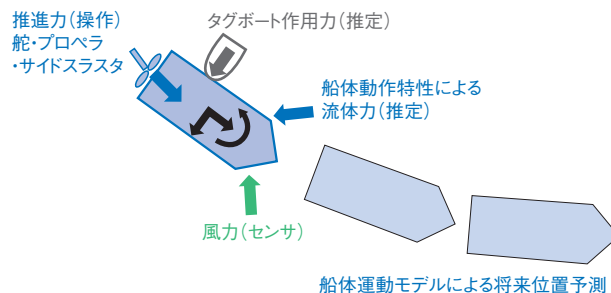


図3 外力影響を考慮した将来状態予測
Fig.3 Ship movement prediction that takes disturbance into consideration

(2) 離着岸操船

岸壁に接近した離着岸操船では、気象海象などの外乱による影響を考慮しながら、停船目標位置へ向けた適切な速力減速操船と岸壁との距離や平行度維持操船を同時に行う必要があり操船者に極めて高負担な作業となっており、操船者の作業負荷軽減へのニーズがある。

これに対して、船体運動モデルを活用したモデル予測制御を採用することにより、将来の船速や船体姿勢を予測して安全操船に最適な推力指令を演算して、刻々と変化する気象・海象などのさまざまな外力に影響される船体運動に対して船速や船体姿勢を最適に自動制御することが可能である。外乱力を補償した船速と船体姿勢の自動保持機能により操船作業の負荷を軽減し、操船者が停船目標位置へ向けた適切な減速指令判断と逐次の操船安全性判断に注力できるような操船支援を実現する。

当社は、可変ピッチプロペラ・旋回式スラスター・サイドスラスター・舵など、複数の操船要素を総括して操縦することができる総括操縦装置「KICS」(Kawasaki Integrated Control System) を製造・販売しており、フェリー・サブライボート・ケーブル敷設船・漁船など各種船舶の操船に豊富な実績がある^{2,3,4)}。システム構築例を図4に示す。ジャイロコンパス・測位システム・風向風速計・対水船速計などの航法センサと船体の動作特性を表す船体運動モデルを内蔵した制御装置を組合せ構成することで、船体運動の予測が可能となり、風や波などの外乱に対し、複数の推



図4 KICS-5000システム構築例
Fig. 4 Example of system construction of KICS-5000

進機の翼角・回転数・舵の舵角を瞬時に計算して最適な制御を自動で行うことができる。

(3) 係船作業

係船作業は、図5に示すブリッジでの推進機操作と甲板部での係船機操作を連携させる必要があり、船体操船の安全性を向上するニーズがある。

これに対して、「操船と係船の統合連携技術」を開発することにより、遠隔のブリッジから推進機と係船機を連携動作させることが可能になる。このとき、係船機制御装置は、張力を自動制御することにより推進機とバランスが取れた最適な索張力を発生させる。また、遠隔操作される係船機および係船索周辺に不要な作業員がいないか等をカメラセンサ技術により監視する機能も提供する。これらによ

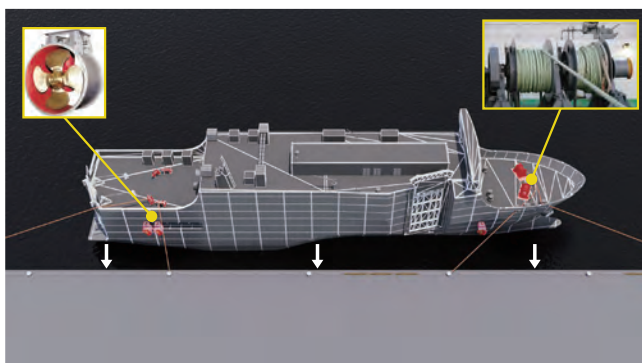


図5 係船作業
Fig. 5 Mooring operations & management

って、係船時の人身事故の危険を大幅に減らす係船作業支援を実現する。

プロペラ・サイドスラスト・舵取機などを制御して船位・船首方位を自動制御する「KICS」が有するDPS (Dynamic Positioning System) 技術を応用して、複数の推進機の推力指令と複数の係船機の係船索張力指令を最適に配分し、船全体としてバランスが取れた所望の合力を発生させる⁵⁾。制御ブロック図を図6に示す。これにより着岸係船を行う船体の位置や姿勢を容易にコントロールすることが可能となり、岸壁の所定の位置への安全な着岸係船を実現できる。

(4) 係船管理

停泊中の船舶の船首から船尾にわたり張られる係船索の管理に関しては、潮汐や本船喫水変化などに応じた索張力状態管理作業の作業負荷軽減と作業安全性向上のニーズがある。

これに対して、停泊中の係船索に加わる張力を船上にて検出し、リアルタイムで船内任意の場所から索張力を監視できるシステムを新たに構築する。係船索は複数の船上金物を介して岸壁側の係船柱に固定されるため、一般的に係船機側と係船柱側の索張力には差異が生じるが、当社独自の索張力推定モデルを用いることにより高精度な索張力の検出を実現した。この技術は、特に潮汐差の大きい港や本船の喫水変化が早い場合に、高頻度を実施されている状態確認や張力調整操作などの作業の負荷軽減や、係船時の安全性向上に寄与する。

当社は、舵取機や甲板機械（揚錨機や係船機など）の船用油圧装置を、1916年の舵取機用油圧ポンプ製作から始まり、油圧機器や油圧システムを発展させながら様々な船型や船種に応じた製品を製造・販売している。甲板機械においては高度な油圧制御技術によって荷役・係船作業の省力化にも貢献し、現在まで7,000隻以上の船舶に納入され、国内外の造船・海運業各方面から高い評価を得ている。図7に当社製甲板機械の例を示す。

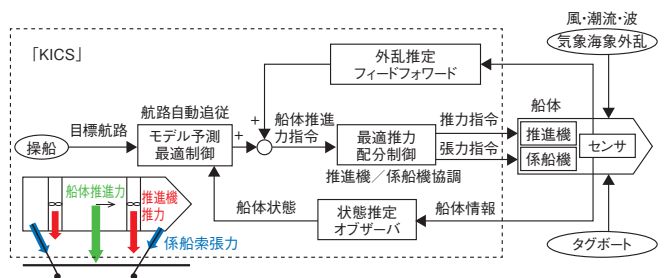


図6 KICS制御ブロック図（操船／係船の統合連携）
Fig. 6 Control block diagram of 「KICS」
(integrated linkage of propulsion and mooring systems)



図7 甲板機械
Fig.7 Deck machinery

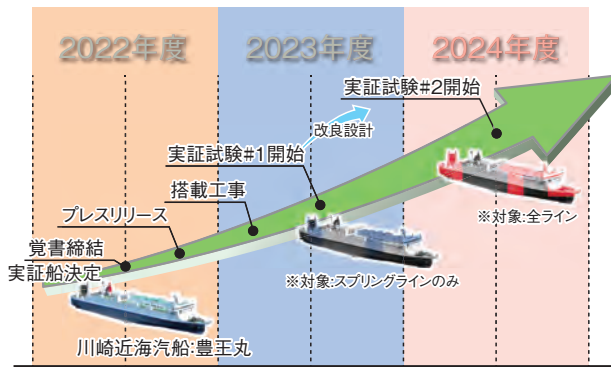


図8 実証試験スケジュール
Fig.8 Schedule of verification trial

4 技術実証試験

差別化のための要素技術の知財化を進めながら、社会実装へ向けて、安全離着岸支援システムとしての実証装置を開発している。実証試験スケジュールを図8に示す。

安全離着岸支援システムは、共同開発パートナーが保有する内航RORO船「豊王丸」を対象に、実証装置搭載工事を完了して、船体の運動モデルなど各種実船のデータを収集しつつ制御調整を実施中で、2023年10月から実証試験を開始する予定である。

あとがき

当社は、推進機・DPS・係船機を製造し、船の推進から係船まで一括でエンジニアリングできる国内唯一のメーカ

である。DPSである「KICS」は、主推進機や舵、サイドスラストなどを統括制御する性能を持つほか、設定航路上を自動的に航行するルートトラッキング機能を有しており、これまでに国内外で豊富な自動操船技術の実績を積んできている。この「KICS」で練磨した制御技術をベースとして、操船と係船の統合連係を実用化すべく、今後さらにDPS技術と先進ICTを駆使して研究開発を進める。これらに共同開発パートナーである川崎汽船(株)並びに川崎近海汽船(株)が長年培ってこられた安全運航のノウハウを高い次元で融合させることで、港内操船、離着岸操船から係船作業および係船管理まで一貫した安全性の向上ならびに将来の自動運航船など、さらなる安全安心な海のモビリティの実現を志向してゆく所存である。

参考文献

- 1) 清水：“自動運行船の実用化に向けた最新動向と課題”，ClassNK技報，No.3 2021年（I），pp.1-8（2021）
- 2) 河野，浜松，斎藤，池田：“自動操船システム（DPS）の開発”，川崎重工技報，No.147，pp.30-33（2001）
- 3) 河野，浜松，小野寺，斎藤：“自動操船システムなどのオンライン最適制御技術”，川崎重工技報，No.159，pp.36-37（2005）
- 4) 岡田，浜松，下山，斎藤：“トロール漁業の効率化を支援－自動曳網システム「KICS-5000STN」－”，川崎重工技報，No.167，pp.42-45（2008）
- 5) 原田，絹川：“川崎 DPS（KICS）による定点保持制御－最適制御技術による性能向上”，日本マリンエンジニアリング学会誌，第55巻 第1号，pp.52-56（2020）



杉本 健



檜野 武憲



大江 啓司



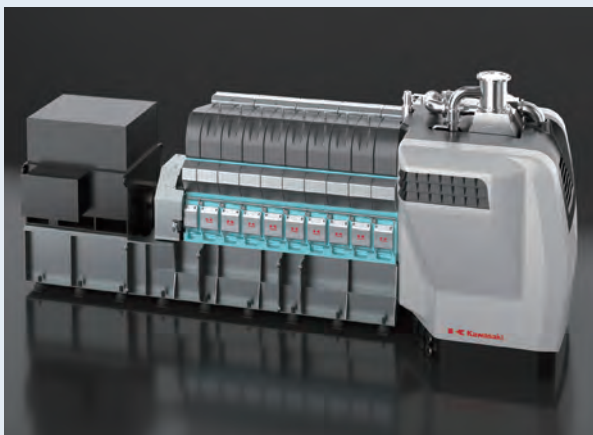
風間 英輝



坂本 守行

脱炭素社会を推進する舶用水素焚き二元燃料エンジンとMHFS（舶用水素燃料タンク・燃料供給システム）の開発

Development of Marine Hydrogen Dual Fuel Engine and Marine Hydrogen Fuel System Promotes a Carbon Neutral Society



酒井能成①	Yoshishige Sakai
東田正憲②	Masanori Higashida
堀江尚③*	Takashi Horie
皿井康雄④	Yasuo Sarai
水谷好生⑤	Sumio Mizutani
仲井雅人⑥	Masato Nakai
辻陽平⑦	Yohei Tsuji
宮本世界⑧	Sekai Miyamoto

脱炭素社会における水素エネルギーの普及を見据え、水素を「つかう」技術開発として舶用水素エンジンと水素燃料を供給するシステムの開発に取り組んでいる。水素焚き二元燃料エンジンは2020年代の実証運航を目指す大型液化水素運搬船に搭載して長期実証を行う。また、舶用の水素燃料タンク・燃料供給システム（MHFS）は2030年までに実証を完了し商用化を目指している。

In preparation for the widespread use of hydrogen energy in a carbon neutral society, we are developing marine hydrogen engines and hydrogen fuel supply systems as technologies to make use of hydrogen. For long-term demonstration, we will install our marine hydrogen dual fuel engine on a large liquid hydrogen carrier targeting demonstration operation in the 2020s.

Also, we will complete the demonstration of the marine hydrogen fuel system (MHFS) by 2030 and are aiming for the commercialization of MHFS.

まえがき

国連気候変動枠組条約 第21回締約国会議 COP21で採択されたパリ協定に基づき、国際海事機関であるIMOが国際海運においてGHG排出量削減目標として、2050年頃までの排出量ゼロを掲げ、国際合意されている。

日本国においても二酸化炭素排出量削減目標として2030年までに2013年比で46%、2050年までにはカーボンニュートラル実現を目指しており、内航海運業界では2030年度までの二酸化炭素排出量目標として2013年度比で約17%削減が掲げられている。

1 背景

国内外での情勢を受け、水素燃料が市場に幅広く供給される場合、海運業界の脱炭素化に向けて水素を燃料とするエンジンの市場が急速に拡大することが期待されている。現行は天然ガススペースでの高性能化やバッテリー併用における二酸化炭素削減が進められているが、近い将来には水素と液体燃料との水素混焼、さらにはその技術を活用した

水素専焼による水素エンジンの商用化が求められている。

舶用水素焚き二元燃料エンジン（舶用水素DFエンジン）および舶用水素燃料タンクおよび燃料供給システム（MHFS）は国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構であるNEDOのグリーンイノベーション基金（GI基金）に採択され開発を開始した。

また、水素燃料を取り扱うにあたり、共通課題を共同で効率よく解決して、将来的な水素燃料船の普及に貢献することを目的として、当社・ヤンマーパワーテクノロジー株式会社・株式会社ジャパンエンジンコーポレーションと3社共同出資新会社であるHyEng株式会社を設立した。共通課題として、水素脆化評価・水素燃料供給システム・水素燃料に対する国際ルール対応などを進めていき、本GI基金をベースに各社がそれぞれ水素燃料エンジンの開発を実施するとともに当社がMHFSの開発を実施する。

その中で、当社が2020年代に実証運航する大型液化水素運搬船に舶用水素DFエンジンを搭載して実証評価し、将来には舶用推進用として商用化することを目的としている。また、MHFSもHyEngを構成する他社エンジン向けとして開発実証し2030年以降の商用化を実現する。

2 船用水素DFエンジンの開発

(1) 開発コンセプト

主たる要求開発コンセプトは以下である。

- (i) 同サイズ、同クラスでトップとなる高い水素混焼率の実現

水素混焼率を熱量ベースで95%以上として二酸化炭素排出を大幅に削減する。

- (ii) 高出力化

シリンダ径300mmの大口径かつ高い平均有効圧力の実現により、単位シリンダあたりの出力を高出力化して、コンパクトで競争力のある製品を目指す。

- (iii) 低圧水素ガスの適用

液化水素貯蔵タンク内の水素の気化により発生するボイルオフガスを有効利用するため、燃焼室に入る前に過給空気と低圧水素ガスを混合する予混合ポート噴射する機能を設計に取り入れ、ガスを圧縮する補機の動力を低減する。

- (iv) 二元焚き燃料の適用

船用における冗長性を目的に水素燃料と液体燃料が使えるDual Fuelエンジンとして、水素運転で問題が発生した場合に液体燃料に切り替えられる構造とする。

その他、船用に適用するための船級対応および排ガス性能についても満足する必要がある。

(2) 開発課題

当社はこれまで天然ガスベースの発電用ガスエンジンを2007年に開発しており、既に200台以上販売している。その中でエンジン制御や部材の信頼性について幅広い知見を有しているが、開発にあたり水素燃料の特性に起因する以下のような技術課題を解決することが必要である。

- (i) 異常燃焼の抑制

メタンを主成分とする天然ガスと比較して水素は着火する濃度である可燃範囲が広く、最小着火エネルギーが小さく、燃焼速度が速いため異常燃焼が発生しやすい。発生が予測される異常燃焼を表1に示す。いずれの場合においてもエンジンの安定運用に影響が出るだけでなく、エンジン部材に影響を与える可能性がある。特に高出力化をコンセ

表1 異常燃焼の項目と現象
Table 1 Types and symptoms of abnormal combustion

項目	現象
① 逆火	給気管内に燃焼室から火炎が逆流
② 過早着火	主燃焼室内にて着火前に自己着火し過大な燃焼圧力が発生
③ ノッキング	着火源から遠い燃焼室壁面近傍で未燃ガスが膨張行程で自己着火し過大な燃焼圧力が発生

プトに挙げており、異常燃焼が発生しやすい状況となるため、異常燃焼を安定的に抑止することが求められる。

- (ii) 材料選定の評価

燃焼室を中心に高温で高圧の水素燃料にさらされることになり、水素脆化影響による主要部材の材料特性の低下が懸念されるため、実運用状態を想定した材料選定の評価が必要である。

- (iii) 船級の取得

水素燃料を適用するエンジンに対する船級規則が確立されていないため、安全評価を含めた基本的な考え方について評価して船級協会からの承認を取得することが必要である。

(3) 開発の取組み

- (i) 異常燃焼の抑制

異常燃焼を抑制するには、エンジン内の酸素濃度を低く抑えることが効果的であり、排ガス再循環 EGR (Exhaust Gas Recirculation) の採用と最適化を図った。EGR量による燃焼圧波形の変化を図1に示す。EGR量を増加することにより燃焼圧力と温度を下げる事が可能となり、水素燃料の燃焼速度が速い特性を抑制できている¹⁾。またEGRに加えて、燃焼室や制御ロジックを最適化した。

- (ii) 材料選定の評価

エンジン部品として使用する環境の水素濃度に応じた材料評価を実施した。低ひずみ速度引張試験 SSRT (Slow Strain Rate Technique) により水素脆化への影響が大きい環境を特定して、疲労限度に対する影響などについて評価した。適切な評価となるよう大学や日本海事協会 (Class NK) などの知見も得ながら実施している。今後も適宜水素燃料使用環境下における材料試験を実施する予定である。

- (iii) 船級の取得

当社船舶部門と基本設計を進めている160,000m³型の大型液化水素運搬船に搭載する水素DFエンジンおよび補機

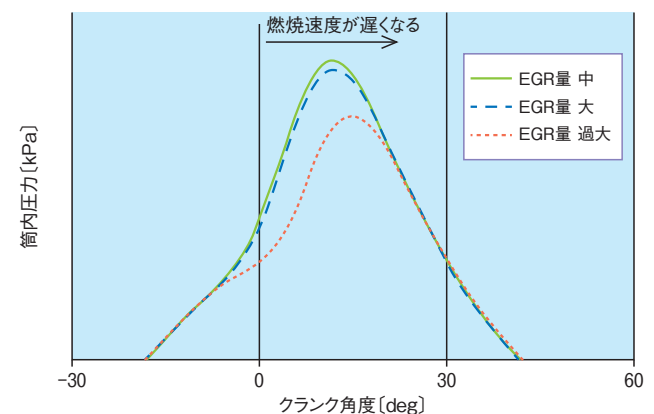


図1 EGR量増加による筒内圧力のピークの変化
Fig. 1 Differences in peak in-cylinder pressure by EGR amount

の構成や配置を検討し、液化水素運搬船ガイドラインやIGCコードに基づいて基本設計を実施した。また、安全の観点では、HAZID解析法を用いてリスク評価して、さまざまなハザードが発生した場合でも安全に運航できる事を専門家を交えて確認した。これにより、ClassNKより基本設計承認 AiP (Approval in Principle) を取得した。

(4) 運転試験について

開発の全体スケジュールを図2に示す。多気筒エンジンの設計を2023年度までに完了し2024年度から陸上にて実機試験を実施する。その結果を反映した船舶搭載用エンジンを設計製造して、長期実証で大型液化水素運搬船の発電用補機として搭載する。エンジンの仕様を表2に示す。

(i) 単筒試験機による燃焼評価

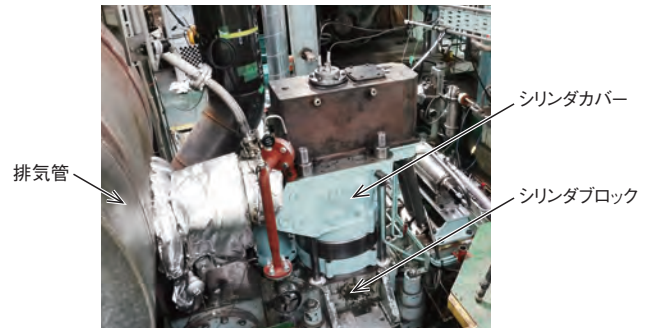
神戸工場と播磨工場で、図3に示す単筒試験機の運転評価を実施している。神戸工場での試験にて当初計画した水素混焼率95%で目標平均有効圧を達成した。引き続き2拠点の試験機で実機試験に向けて燃料・制御・信頼性の評価を実施する。

(ii) 陸上実機試験

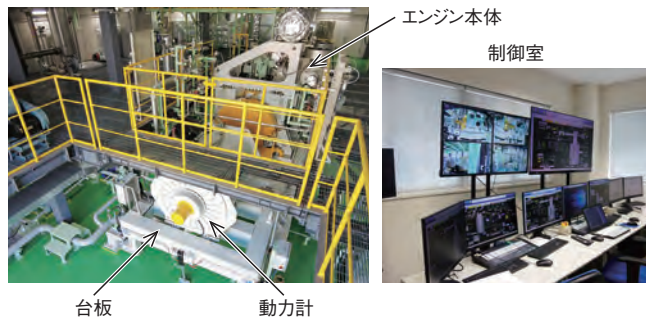
単筒試験機の結果を反映した実証エンジン（発電機も含む）を製造し陸上実機試験を実施する。性能評価・耐久評価・水素燃料運転での各機能評価・水素燃料と液体燃料の燃料切替試験を実施する予定である。

(iii) 長期実証試験

大型液化水素運搬船に実証エンジンを搭載して、発電用として船内に電力を供給しながらエンジンの長期実証を行



(a) 神戸工場



(b) 播磨工場

図3 単筒試験機
Fig. 3 Single cylinder test engine

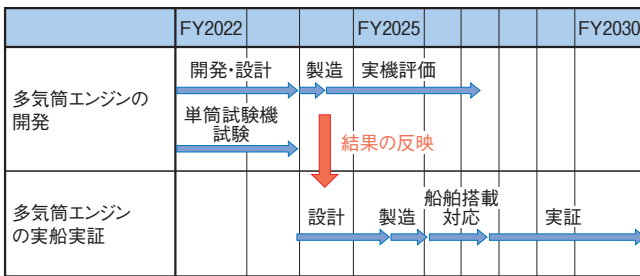


図2 全体開発スケジュール
Fig. 2 Overall development schedule

表2 実証エンジン仕様
Table 2 Specifications of demonstration engine

項目	内容	
エンジン緒元	発電出力 [kWe]	2,400
	シリンダ径 [mm]	300
	回転数 [1/min]	720
燃料	水素燃料 (ボイルオフガス) / 低硫黄燃料油 水素燃料カロリー-95%以上	
水素供給圧力 [MPa]	1.0未満	
排ガス規制	IMO NOxTier II	
認証	ClassNK	

い、エンジンの性能や信頼性を評価して、本水素DFエンジンの商用化に目途をつける。

3 水素燃料タンク・燃料供給システム (MHFS) の開発

開発するMHFSは2種類あり、国内他社が開発する船内発電用の中高速4ストローク水素エンジン（1MW級、1MPa低圧供給）、および船舶推進用の低速2ストローク水素エンジン（3MW級、30MPa高圧供給）に適用される。それぞれのMHFSにおいて水素燃料による実証運転を行い、安全性や信頼性および船用に求められる機能性を実船に搭載して確認する。2030年までにMHFSを実現させ、2030年以降の社会実装と海運における液化水素燃料の普及および海上輸送の脱炭素化を目指したMHFSの販売事業化を計画している。4ストローク水素エンジン用のMHFSの概要として表3に主要目、図4にユニット外観を示す。

MHFSの開発課題は、

- ・国際ガス燃料船安全コード (IGFコード) への適合
- ・水素特有のハザード (極低温, 水素脆化, 浸透性, 着火性など) に対応するための設計
- ・リスク評価に基づく安全対策の確認と必要に応じた追加対策の適用
- ・液化水素タンクや配管への侵入熱を最小とする真空断熱技術

表3 MHFSの主要目（4ストロークエンジン用）
Table 3 Particulars of MHFS (for four-stroke engine)

ユニットサイズ	40フィートコンテナサイズ
液化水素燃料タンク	約30m ³ 、約1 MPaG 横置・円筒・真空多層断熱
液化水素充填量	約1,400kg
水素ガス燃料供給方式	タンク自己加圧方式 約0.7MPaG・常温にて約100kg/h

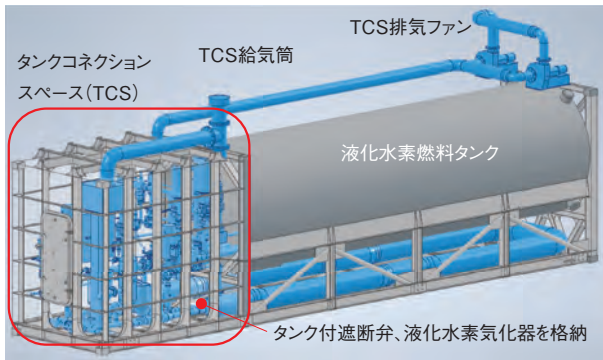


図4 MHFSのユニット外観（4ストロークエンジン用）
Fig. 4 General view of MHFS unit (for four-stroke engine)

・船用に特有な事象および要求への対応，たとえば船体傾斜や揺動，タンク内部スロッシング，エンジン水素消費量の急変動への対応，限られた船上スペースに搭載するための小型化，などが挙げられる。

水素のハザードを対象とするリスク評価は今後，それぞれの水素燃料船プロジェクトに携わる関係各社（船主・運航者，造船所，水素エンジンメーカー，船級協会）と当社の連携によって実施されていく。現在はMHFSを搭載する水素燃料船の基本設計承認（AiP）の取得に向けた取組みを行っている。

造船所かつエンジンを含む船用機器メーカーとして船舶関連技術を熟知している当社が有する広範な水素関連技術とその実績および経験を最大利用し，当社のモノづくりの技術と提案力，さらに開発・設計段階における予測と検証を可能とする当社の高精度な数値解析（シミュレーション）の保有技術を駆使してMHFS開発と実船実証を進めていく。

あ と が き

2020年代に実証運航が計画されている大型液化水素運搬に水素DFエンジンを搭載して実証する。またHyEngによる船用水素エンジンおよびMHFSの商用化が加速して，水素を「つかう」分野において当社のレシプロエンジンの展開を期待する。

なお，本内容の一部についてはNEDO助成事業の「水素社会構築技術開発事業／大規模水素エネルギー利用技術開発／大出力水素燃焼エンジン発電システムに関する技術開発」「グリーンイノベーション基金事業／次世代船舶の開発／水素燃料船の開発／船用水素エンジンおよびMHFSの開発」にご支援いただき実施しており深く謝意を示す。

参 考 文 献

- 1) 仲井雅人，宮本世界：NEDO水素・燃料電池成果報告会2022発表No.E-11



酒井能成



東田正憲



堀江尚



皿井康雄



水谷好生



仲井雅人



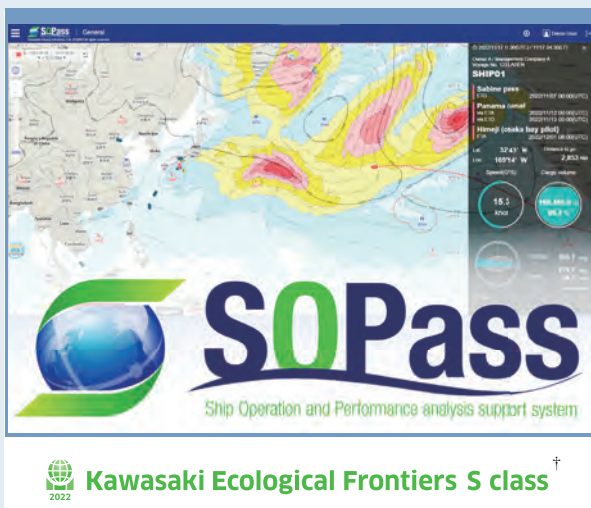
辻陽平



宮本世界

LNG運搬船の経済性と環境性を最適化する 運航支援システム「SOPass」

SOPass Ship Operation Support System that Optimizes the Economic and Environmental Performance of LNG Carriers



森田直子① Naoko Morita
山添愛② Ai Yamazoe
岩崎英和③ Hidekazu Iwasaki
高田広崇④ Hirotaka Takata
新村暢大⑤ Nobuhiro Shimmura

カーボンニュートラルを目指す世界的な潮流のなか、環境負荷の低い天然ガスの需要が高まっている。また、国際海運のGHG排出量評価制度の施行があり、天然ガスの海上輸送を担うLNG運搬船では、輸送効率向上と環境負荷評価の両立が課題となっている。当社が開発した「SOPass」により、モデル計算による船舶の最適なオペレーションの提案と、運航データ解析による環境負荷評価(CII)を実現し、これらの課題解決に応えた。

The demand for natural gas, which is environmentally friendly, is increasing because of the global trend toward carbon neutrality. Also, a greenhouse gas emissions evaluation system has been put into effect in the international maritime industry, and LNG carriers, which play a key role in the marine transportation of natural gas, are required to achieve a good balance between boosting transportation efficiency and evaluating environmental impact. SOPass, which we developed, allows us to respond to these challenges by proposing optimal ship operations based on model calculations and evaluating environmental impact with operational data analysis(CII).

まえがき

カーボンニュートラルを目指す世界的な潮流のなか、天然ガスは化石燃料の中で最も環境負荷の低い燃料として需要が高まっている。パイプラインの敷設が経済的でない、大陸間など長距離の天然ガス輸送にはLNG運搬船が用いられており、LNG長距離海上輸送の高効率化への需要は高い。特に近年は、米国のシェールガスをはじめとする新規LNG輸出プロジェクトの遅延や、ロシアのウクライナ侵攻に関連したパイプラインガス供給の停止に伴う欧州のLNG需要拡大により、需給バランスが崩れている。LNG価格は高騰しており、LNG運搬船による天然ガス輸送の高効率化への需要はさらに高まっている。

また、国際海運の温室効果ガス GHG (Greenhouse Gas) 排出量評価制度の施行があり、LNG運搬船の運航においては、輸送効率向上と環境負荷物質削減を両立するとともに、それらを指標として評価するための船舶運航管理支援システムが求められている。

1 背景・歴史

当社は2000年頃から船陸間通信を利用した運航支援システムを開発・提供している。一般貨物船の主機性能解析と機関部監視を陸上で行うシステムを最初に開発した。その後、LNG運搬船を対象とした性能解析システムや、一般貨物船向けの最適航路計算（ウェザールーティング）システムなど、多岐にわたる運航支援システムの開発・提供を行ってきた。

2016年より、LNG海上輸送を高効率化するニーズに先がけて、LNG運搬船向け運航管理支援システム「SOPass (Ship Operation and Performance analysis system)」をリリースし、2017年よりサービスの提供を開始した¹⁾。

「SOPass」は、天然ガス取引の主体として陸上からLNG運搬船の運航管理に携わる備船社をサポートすることを目的に開発した。「SOPass」は、航海開始前から航海中、航海後まで切れ目なく活用可能な各種アプリケーションを備えている。船舶状態をリアルタイムで確認する機能に加え、将来を予測する機能や評価を行う機能を提供することにより、高度な専門性や長年の経験を持たなくても船舶運航の将来

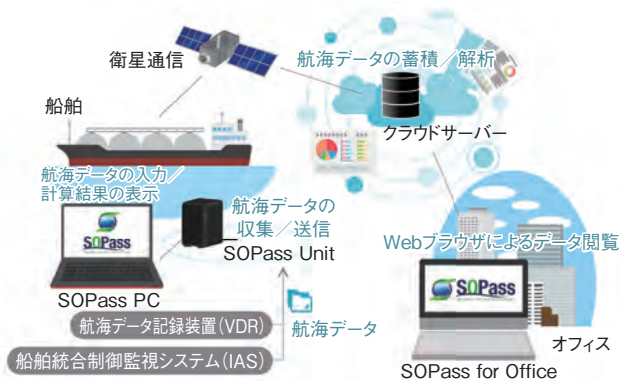


図1 システム構成とデータフロー概略図
Fig. 1 System configuration and data flow schematic

的アクションを把握・検討できるサービスを目指した²⁾。

「SOPass」のシステム構成とデータフロー概略図を図1に示す。衛星通信を介して船舶の運航データを陸上のデータセンターに収集して、アプリケーションの目的に応じて解析するほか、将来の航海を予測するためのモデルシミュレーション計算を行う。「SOPass」の利用者は、ウェブブラウザを介して、いつでもどこでも本船の運航状況や解析結果を閲覧することができる。

2 「SOPass」が解決する課題

(1) LNG運搬船の輸送効率向上

満載航海時と空載航海時のそれぞれに課題がある。

満載航海時の課題は、NBOG (Natural Boil off Gas) を無駄なく推進エネルギーや船内電力として活用することである。NBOGとは、外部からの入熱によって、カーゴタンク内のLNGが一部気化することにより発生するガスをいう。航海中には、NBOGによって上昇したカーゴタンク内の圧力を下げるためにこのガスを引き抜き、カーゴタンク内圧を適正にコントロールする必要がある。引き抜いたNBOGは主機関の燃料として使用するが、再液化装置を備えていない場合、主機関の出力状態によって消費しきれないNBOGが発生すると、燃焼装置で無駄に焼却することになる。カーゴタンクから引き抜いたNBOG量と主機関のNBOG消費量とを均衡させるために保つべき主機出力、その主機出力から得られる船速および航路、それらを複合的に考慮して得られる船舶のオペレーションが最も輸送効率の良い運航プランとなる。

空載航海時の課題は、カーゴタンクの冷却や推進用燃料、発電用燃料に使用するためにカーゴタンクに残すLNG量(ヒール量)を過不足なく決定することである。満載航海終了時にLNGの荷揚量を最大化するためには、次の空載航海用のヒール量をなるべく少なくするのが良い。しかし、空載航海中に必要なヒール量は、カーゴタンク方式・航海

日数・航路における燃料消費量によって異なるため、これらを十分に考慮して過不足ないヒール量を決定する必要がある。さらに、カーゴタンク冷却のためにカーゴタンク内にスプレーしたLNGが気化することによって発生するSBOG (Spray Boil off Gas) を、無駄なく推進エネルギーや船内電力として活用することも課題となる。

これらの課題に対して貨物であるLNGの損失を抑えたLNG運搬船の最適なプラントオペレーションと航路の提案を可能とする必要がある。

(2) LNG運搬船の環境負荷評価

国際海運の分野ではGHG排出削減に向けた対策が進められており、船舶のGHG排出量の評価が喫緊の課題である。船舶の運航における環境負荷の国際的な評価制度が2023年に開始されたことにより、国際海運におけるカーボンニュートラルへの取組みにおいて、船舶の燃費実績を可視化して評価することへの関心が非常に高まっている。

LNG運搬船において、評価指標となるCII (Carbon Intensity Indicator) 値は、以下の式で表すことができる。

$$CII = \frac{CO_2 \text{ 排出量 [g]}}{\text{積載能力 (DWT) [MT]} \times \text{実績航海距離 [NM]}}$$

MT : Metric Ton
NM : Nautical Mile (海里)

CIIの実績値に応じて、A～Eのランクで表されるCII格付け評価値が決定される。船舶のCII格付け評価値が低評価となった場合、船主はその船舶に対する改善計画を作成して公的機関からの承認を取得する必要がある。さらに、制度を制定したIMO (国際海事機関) は、主管庁や港湾当局などの海運関係者に対してCII格付け評価値の良い船舶へ報酬を与えることを奨励しているため、船舶の運航においてCII実績値のモニタリングやCII格付け評価値の改善は重要となっている。

国際海運に関連する企業間においても、荷主や海運会社が運航船におけるIMOのGHG排出削減目標への整合度合いを評価して公表する海上貨物憲章や、金融機関の船舶融資ポートフォリオに対するポセイドン原則の取組みが行われており、船舶の運航におけるGHG排出量の評価は海運業界全体の課題とも言える。

3 「SOPass」による課題解決プロセス

(1) LNG運搬船の輸送効率向上に向けた取組み

これまでのシステム開発で培った最適航路計算技術および運航データ解析技術と、LNG運搬船の建造で培ったオペレーションの知見、当社の持つ熱力学的評価技術などを組み合わせ、LNG海上輸送の効率向上に貢献する機能

† 船舶からのリアルデータと造船所の持つ工学的知見を融合してデータの解析・将来予測を行うことにより、船舶の効率的運用をサポートする船舶運航管理支援システム

「BOG-Navigation」を開発した。

(i) 船体運動とLNG状態の予測

「SOPass」は、船舶建造時の設計データを用いて構築した船体性能モデルを基に、海気象条件の変化による船体抵抗の増加量や船体の動揺を予測できる。波による抵抗増加量を予測する船体性能モデルから、図2に示すように、ある船速で航行したときの遭遇する波の周期と向きに応じた抵抗増加量を予測できる。ほかにも風による船体への抵抗力・造波抵抗・粘性抵抗などを予測することにより、船舶の推進に必要な軸出力およびプロペラ回転数・船速・燃料消費量を算出できる。波や風を受けた船舶のローリングやピッチングといった船体運動も予測できる。

また、船体・タンク・配管などの構造的要因を考慮して構築したカーゴタンクの伝熱モデルを基に、カーゴタンクと、カーゴタンク内部の液層および気層の状態を予測できる。さらに、周囲の空気温度や海水温度・日射量などの熱の侵入に応じて時々刻々と変化するカーゴタンク内の圧力やLNGの量・温度・組成を予測できる。当社建造のLNG運搬船の設計データを用いて構築した伝熱モデルにより、日射影響を計算した結果を図3に示す。カーゴタンク内で発生するNBOG量・SBOG量・モス型タンクの場合は赤道

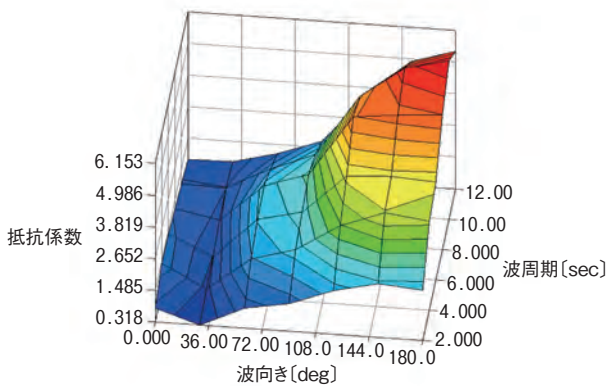


図2 ある船速における不規則波中の抵抗増加量
Fig. 2 Amount of increase in resistance in irregular waves at a certain vessel speed

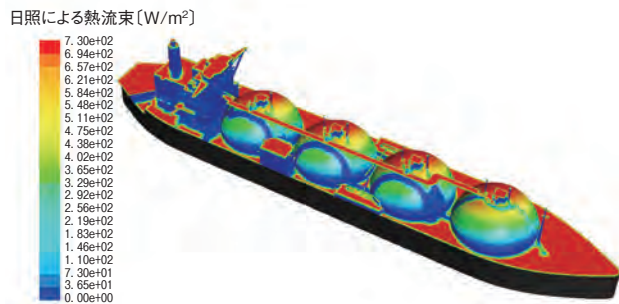


図3 伝熱モデルによる日射影響の計算
Fig. 3 Solar radiation impact calculation by heat transfer model

温度、メムレン型の場合は各液位のLNG温度も予測できる。

モデルシミュレーションによって、船体運動の予測とLNG状態の予測を可能とすることにより、航海中のLNG運搬船の状態予測を実現した。

(ii) 輸送効率向上を目指した船舶オペレーションの提案

造船所として培ったLNG運搬船のプラントオペレーション技術と、(i)のモデルシミュレーションによるLNG運搬船の状態予測データおよびウェザルーティングの技術を組み合わせてLNG運搬船の輸送効率を向上できる船舶オペレーションを提案する「BOG-Navigation」機能を開発した。

「BOG-Navigation」は、海気象予報データを入力として、満載航海時に発生するNBOG量とタンク圧力の変化やLNGの組成変化(Aging)などを予測することにより、航海中に推進用燃料として使用可能な時間当たりのエネルギー量を算出する。このエネルギーを無駄にしないプラントオペレーションと航路を提示することによって、各航海の輸送効率向上を可能とした。また、「BOG-Navigation」はLNG状態の予測に加え、海気象状況に応じた船体運動の予測が可能のため、利用者は運航制限として遭遇する波高やローリング・ピッチング角度の上限値を設定した上で、最も安全かつ燃費が良い航路情報と船舶運航状態の予測情報を航海に活用できる。この航海予測情報は、陸上の利用者がウェブブラウザ上で操作することにより、本船へ共有できる。さらに、「BOG-Navigation」は、図4のように、本船の現在位置から入港地までのプランを毎日自動計算して陸上の利用者および本船へ提供する。陸上の利用者は常に最新の海気象予報データを用いて計算された航海の予測情報を本船と共有できる。

また、空載航海に必要なヒール量は、最適な冷却スプレーパターンおよび(i)のモデルによる冷却スプレー量や航海に必要な燃料消費量の予測によって推定できる。満載航海終了時に次の空載航海に最低限必要なヒール量を予測・提示することにより、LNGの荷揚げ量の最大化を可能とした。

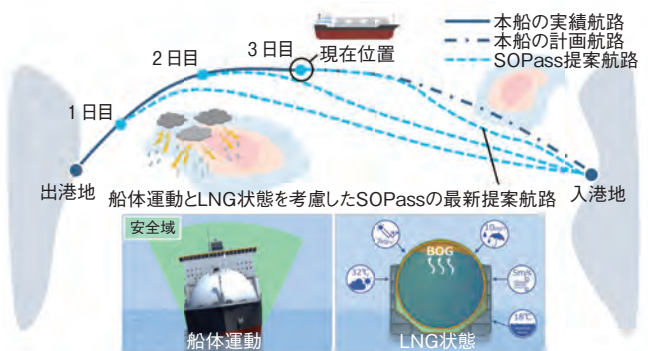


図4 「BOG-Navigation」の定期計算の概要
Fig. 4 Outline of periodic calculation by BOG-Navigation



図5 CII評価情報の航海ごとの表示
Fig.5 Representation of CII evaluation information for each voyage

(2) LNG運搬船の環境負荷評価に向けた取組み

CII燃費実績格付け制度では、1年間の運航実績データを基に計算したCII実績値が評価の対象となり、CII格付け評価値が決定される。CII実績値を求めるためには、船舶が使用した燃料種類・消費量・航海距離などの実運航データが必要になる。「SOPass」ではこれらの実運航データから、船舶のCO₂排出量やCII実績値の推移を推定する「CII評価機能」を開発し、常に最新の实運航データから計算したCII評価情報の提供を実現した。

図5に示すCII評価情報の表示画面では、CII燃費実績格付け制度の評価期間である1年ごとのほかに、航海ごとのCII実績値(①)やCO₂排出量(②)の表示を可能としており、航海ごとに環境負荷を評価できる。さらに、航海距離やCO₂排出量を、どの程度変化させればCII格付け評価値を変化させられるかを確認可能な表示(③)も設けており、格付けを改善するために必要な運航方法の検討に活用できる。

また、CO₂排出量やCII実績値の30分ごとのトレンドグラフを表示する画面もあり、「SOPass」が提供する海気象データや過去の運航実績トレンドグラフと合わせて確認することによって、CII実績値が悪化した航海の原因分析や運航方法の改善に活用できる。

あ と が き

将来の航海計画立案を支援する「BOG-Navigation」は、当社が造船所としての強みと高い熱力学的評価技術を活か

して開発した独自の機能である。今後、より正確に将来の船舶運航状態を予測するため、機械学習を使った将来予測に取り組み、実用性の高い運航支援を目指す。

将来はこの技術を発展させ、当社がゼロエミッションエネルギーとして注目している水素を輸送する「液化水素運搬船」の輸送効率向上に「SOPass」を活用することを検討している。

また、現在実績値の評価情報のみを提供している「CII評価機能」においても、運航実績データや、将来の航海スケジュールから将来のCII評価値を予測する機能の早期リリースを目指す。

今後も当社の技術を結集して挑戦的な開発を続けることにより「SOPass」の機能を拡張し、さらなる国際海運の海上輸送効率向上とGHG排出量削減に寄与していく。

参 考 文 献

- 1) 大嶺：“IoT技術を活用した船舶運航管理支援システム「SOPass」について”，日本マリンエンジニアリング学会誌，第54巻2号，pp.126-128（2019）
- 2) 上垣内，安藤，大嶺，飯坂：“船舶運航管理支援システムSOPassによる将来予測を用いた運航管理支援”，日本マリンエンジニアリング学会誌，第55巻5号，pp.42-46（2020）



森田直子



山添愛



岩崎英和



高田広崇



新村暢大

ロボットアーム付き自律型無人潜水機 (AUV) 「SPICE」の開発 Development of Autonomous Underwater Vehicle (AUV) with Robot Arm SPICE



岡 矢 紀 幸① Noriyuki Okaya
 福 井 厚 市② Koichi Fukui
 松 居 学③ Manabu Matsui
 益 田 興 佑④ Kosuke Masuda
 小谷野 薫⑤ Kaoru Koyano
 中 村 和 行⑥ Kazuyuki Nakamura

海底油田ガス田などの海洋開発事業においても、作業の効率化や、環境影響の低減が求められており、その解の一つとしてAUVに実用化の期待が高まっている。これに応えるため当社は、海中ドッキングステーションやロボットアームを備えた海底パイプライン検査用のAUV “SPICE”を開発した。

In the offshore development business, including offshore oil and gas field development, as well as in other businesses, it is required to enhance operating efficiency and reduce environmental impact, and as a solution to it, there are increasing expectations for the commercialization of autonomous underwater vehicles (AUVs). In response to such expectations, we have developed SPICE, an AUV that is equipped with a subsea docking station and a robot arm for inspecting subsea pipelines.

まえがき

近年、海底油田ガス田や海底鉱物資源などの海洋開発事業においても、作業効率の向上や環境影響の低減が求められている¹⁾。

1 背景／目的

海底油田ガス田の開発・建設・維持整備や海底鉱物資源調査等の海洋開発事業において、海底の調査・海中構造物の建設・検査・整備などは、従来、有索の遠隔操作型無人潜水機 ROV (Remotely Operated Vehicle) で行われてきた。近年のオイル価格の下落や環境影響への関心の高まりをきっかけとし、また一方でAUV (Autonomous Underwater Vehicle) 技術開発の進展に伴い、ROVの作業の一部をAUVで自動化することによる作業の効率化、またその結果として支援船の稼働時間の削減によるCO₂排出量の削減への期待が高まっている。AUVはROVに比べて、高度な技量を必要とするオペレータが不要で、かつ索による行動の制限がない。また、ROVは高度な定点保持能力を有する支援船で運用する必要があるのに対し、AUVはより簡易な支援船での運用が可能である。当社は長年の潜水艦や深海救難艇の建造で培ってきた水中ピークルや水中機器の技術を背景に、AUVの研究開発を2013年から開始した。

2 製品コンセプト／技術課題

当社独自の水中ドッキング技術に加えて、AUVを揚取することなく連続して稼働させるための基盤技術である水中給電技術や、水中光通信技術を開発した。さらにオイル・ガス業界への参入を目指し、パイプライントラッキングや検査用ロボットアームといった従来のAUVにない近接検査が可能となる技術を開発して、パイプライン検査用AUV「SPICE (Subsea Precise Inspector with Close Eyes)」として実用化した²⁾。

現状の海洋調査において主用とされているROVとの得失比較やパイプライン検査会社へのヒアリング結果を基に、製品化のための技術課題を以下のように設定した。

- ・電池容量により航行時間が制限されるため、水中充電システムの搭載など水中ステーションへのドッキング技術が必要。
- ・リアルタイムで状況監視および指示ができないため、パイプライン検索・トラッキング・ロボットアーム制御を自律で行う技術が必要。

3 要素技術の詳細／課題解決プロセス

(1) 水中ステーションへのドッキング技術

これまでのAUVは、電池が切れると船上に回収して充電作業を行っていた。しかし、水中でのドッキングと充電・

データ転送機能を使用すると、洋上に回収することなく海底パイプラインの検査を半永久的に行うことができ、洋上作業の安全性が向上する。この技術は海底設置型ステーションにも応用でき、給電と通信が確保されたステーションを中心に一定の範囲を定期的に巡回検査するシステムにも利用できる。AUVと水中ステーションとのドッキングの様子を図1に示す。

(i) 水中でのドッキング³⁾

AUVはドッキングシーケンスを2段階に分けて実行している。1段階目は、ステーションに備え付けられたポールをキャッチすることである。ポール先端に装備されたトランスポンダの音波に向かって進行し、ステーションとの距離が近づくと、ポールの付け根に装備された全周囲光源を捉え、光源の方向に進むことでAUV前方に装備された凹型の金物がポールを捉える。2段階目として、捉えたポールを中心にAUVが回転して、上方に取り付けられた凸型の嵌合金物をステーション側の嵌合装置の位置に合わせて上昇動作を行い、ドッキングする。この位置合わせにはAUVとステーションの双方に対で取り付けられた光無線通信装置を使用している。

(ii) 水中での充電・データ転送

AUVはステーションとドッキングすると電池を充電する。水中で電力伝送するために、AUVとステーションの双方に対で取り付けられた非接触の給電パッドを使用する。ドッキング中はパッド間同士を数cmの間隔に保ち、電磁誘導を利用して90%以上の効率で送電する。

電池が充電されるのと並行して、ドッキング時に使用した光無線通信装置を介して海底パイプライン検査時に取得した映像や画像の検査データを転送する。

(2) パイプサーチ／トラッキング技術

海底パイプラインに取り付くため自己位置を認識し、パイプサーチを行い検査のためにパイプを機体やアームを使ってトレースしてトラッキングする。

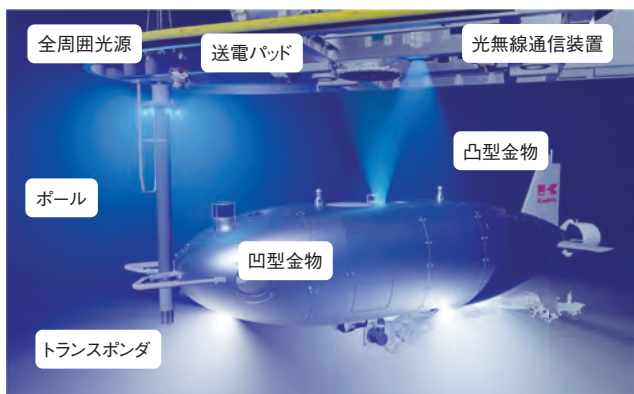


図1 AUVと水中ステーションのドッキング
Fig. 1 Docking between AUV and underwater station

(i) 海中での自己位置認識

海底パイプラインは水深3,000mを超えて敷設されているものもある。このような深海のパイプラインを検査するために、AUVは海中で常に自分の位置を把握しておく必要がある。この役割を果たすのが慣性航法装置 (INS) である。INSはセンサーから取得した加速度・姿勢から自己位置を計算するが、数時間単位で潜航を行うAUVでは、誤差を蓄積してしまう。水中では陸上と違い、自分の位置をGPS等で計測することができないため、音響測位・音響通信によって洋上船から補正を行っている。

(ii) パイプサーチ

海底に到達したAUVはパイプラインの側方の離れた場所から、パイプがあると予想する位置を目指して航走する。マルチビームソナーを使用して、海底マッピングを行いながらパイプの上を通過すると、直線状の濃淡が現れるため、これを画像処理してパイプの位置を特定する。

(iii) パイプトラッキング

パイプの位置を捉えたAUVはあらかじめ決められた方向を向いてパイプ上方数mでパイプトラッキングを開始する。パイプトラッキングは、図2で示すように、パイプサーチで使用したマルチビームソナーを使用してパイプ断面と海底を「かまぼこ型」の形状として検出する。このかまぼこ型の形状を追従制御することで、パイプラインをトラッキングすることができる。さらにAUVの姿勢・高さ・高度を加味して、ロボットアームを制御し、ロボットアーム先端をパイプ近傍へと正確に導いている⁴⁾。

(3) アーム制御技術

水中での近接検査を可能とするために、カメラなどの各種センサ類をパイプラインに正確に近づける技術として、AUV底部に装備する専用ロボットアームを開発した。

(i) 構造

AUVに装備するため、軽量かつ海水中での作動を考慮する必要がある。構造部材は主に耐食アルミ合金を使用した。加えて、使用する軸受やアクチュエータも海中での使用に耐えるものを採用した。

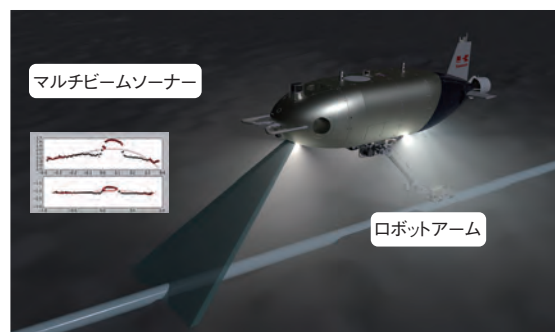


図2 パイプトラッキング
Fig. 2 Pipeline tracking

† 海底パイプラインを中心とするインフラの近距離検査を目的とした自律型無人潜水機 (AUV) や支援船、ステーションなどから構成されるシステム

アームは、手先が任意の位置・姿勢でセンサ類を近接させることができるように、図3に示すように6軸6自由度を持つ設計になっている。ただし、能動的に制御する軸は3軸、残りの3軸はバネによる受動リンク構造とすることで、センサ類が検査対象に合わせて馴染むようにパイプラインに追従する設計となっている。この構造の簡易化によって、軽量化と制御負荷の低減を実現した。

(ii) 制御

地上に固定される従来のロボットアームと異なり、絶えず移動するAUVに装備されるため、図4に示すように移動するAUVが捉えたパイプラインの位置座標と移動後AUVの位置や姿勢を考慮しながら、パイプラインに向けて絶えずアームの手先位置を制御し、AUVの機体がパイプラインから外れてもアーム先端はパイプライン上に制御するロジックを開発した。

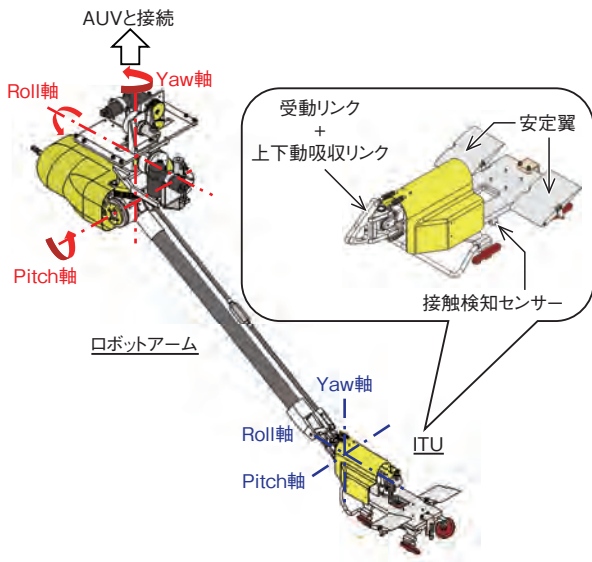


図3 アーム構造
Fig. 3 Structure of robot arm

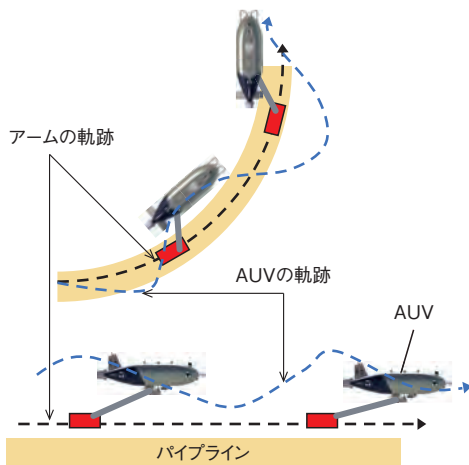


図4 AUVによるパイプ追従動作イメージ²⁾
Fig. 4 Pipeline tracking by AUV²⁾



図5 産業用ロボットを使用したアーム追従動作模擬
Fig. 5 Simulation of robot arm tracking operation using an industrial robot

(iii) ITU (Inspection Tool Unit)

アーム手先に装備するセンサ類を安全かつ確実にパイプラインに追従させるために、ITUを開発した。ITUには走行時の水流によりパイプラインに押し付け力を発生させるための安定翼や、過度な押し付けや障害物など衝突を軽減するためのセンサや吸収機構を有している。ITUはアームの手先に取付けられ、パイプライン上を走行することで、ITUに取り付けられたセンサ類を安定した姿勢でパイプラインに近接させ続けることを可能とした。これにより、従来AUVでは成し得なかった正確かつ精度が高い検査データを取得することを可能となった⁵⁾。

(iv) 実証

AUVに装備されるロボットアームは、世界初の取組みであり、設計・製造や各種試験からAUVに装備するまでの検証方法に多くの課題があった。しかし、当社が蓄積してきたロボット技術により、図5に示すように、産業用ロボットの手先にAUV用ロボットアームを取りつけて、AUVを模擬した動きに対してアームの追従動作を確認するなど要素試験を効率的に実施でき、AUVに装備しての動作実証試験までを短期間で進めることができた。

加えて、数々の試験で当社AUVの安定したパイプ追従能力と海底パイプライン近接検査のプラットフォームとして高いポテンシャルを示したとことで、Oil & Gas分野での注目を浴びることになり、2022年9月エネルギースーパーメジャーのトタルエナジーズ社（仏国）と当社AUVを用いて、海底パイプライン近接検査における防食電位計測に関する共同研究海上試験に成功して（図6）、当社AUVの有用性を世界に示すことができた⁶⁾。

4 納入／導入事例

これらの技術を搭載した商用AUV 1号機（図7）を、英国のパイプライン検査会社から2020年に受注した⁷⁾。主



図6 トタルエナジーズ社との共同研究海上試験成功
Fig.6 Successful offshore testing jointly with TotalEnergies

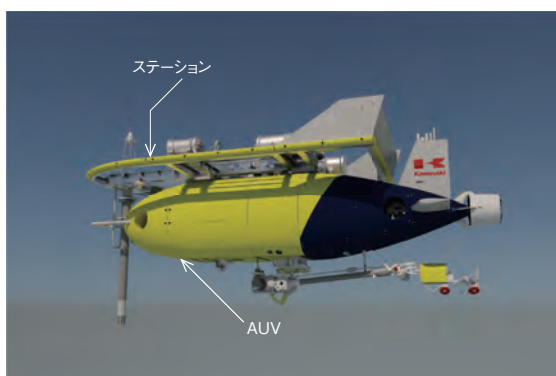


図7 商用AUV 1号機
Fig.7 First commercial AUV

表1 商用AUV 1号機の主要目
Table 1 Principal particulars of first commercial model

	AUV	ステーション
全長 [m]	5.6	5.6
全幅 [m]	1.3	2.0
全高 [m]	1.5	2.6
空中重量 [ton]	約2.5	約1.2
運用深度 [m]	3,000 (max.)	500 (max.)
電池	リチウムポリマー電池	-
速力 [knot]	4.0 (max.)	-
運用時間 [hours]	10 (検査作業)	-
充電時間 [hours]	3 (水中)	-
非接触充電システム [kW]		10
光無線通信 [Mbps]		100

要目を表1に示す。商用AUVは、最大水深3000mまで潜航が可能で、速力2ノットで10時間のパイプライン検査が可能である。また、ステーションは最大500mまで潜入させることが可能であり、AUV潜航時の電池消費量を減らすことができる。また、水中充電システムは10kWのものを搭載しており、3時間での充電が可能である。

あ と が き

AUVによるパイプライン検査の自動化を目指して技術

開発を行い、パイプライントラッキングの実証試験においてはオイルメジャーの高い評価を得ることができ、実フィールドへ投入も間近なところまで来ている。

今後は浮体式洋上風力発電設備などに対象を広げ、パイプライン検査AUVで培った機体制御技術およびアーム制御技術を生かして、検査対象のニーズに沿った機体や検査手法の開発を行っていく。また、国土交通省が発行した「AUVの安全運用ガイドライン」で示された機体要件や運用要件を満足させ、より安全に運用が可能なAUVを目指す。

最後に、検査用ロボットアームの開発ならびにパイプライントラッキングの実証試験に助成いただいた日本財団、検査センサならびにそのデータ処理の開発に助成いただいた国土交通省殿に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 阪上, 岡矢, 益田: “海底油田を守る: 川崎重工のAUV”, Kawasaki News, No.199, pp.4-8 (2020)
- 2) 特許 第5806568号, “水中移動型検査装置及び水中検査設備”
- 3) 特許 第6990708号, “自律型無人潜水機の充電システムおよび自律型無人潜水機の揚収方法”
- 4) 特許 第7001730号, “潜水艇 (自律型無人潜水艇のアーム協調制御)”
- 5) 特許 第7137342号, “自律型無人潜水機 (パイプラインに対する追従性を高めた本体及びアーム構造)”
- 6) “自律型無人潜水機 (AUV) による海底パイプライン近接検査の実証試験に成功”, 川崎重工業プレスリリース, 2020年7月15日
- 7) “世界初の海底パイプライン検査用ロボットアームを搭載した自律型無人潜水機「SPICE」を受注”, 川崎重工業プレスリリース, 2021年5月18日



岡矢 紀幸



福井 厚市



松居 学



益田 興佑



小谷野 薫



中村 和行

カワサキグリーンガスエンジンコージェネレーションシステム Kawasaki Green Gas Engine Cogeneration System



都市ガス／天然ガスを燃料とするガス専焼のカワサキグリーンガスエンジンを組み合わせたコージェネレーションシステムが、熱回収など設備全体の省エネ化を図る目的で導入されることが多い。最新機種の発電効率はクラス世界最高水準の51.0%に到達しており、最近では災害時のBCP対策を目的に導入されることが増加している。急速起動・低負荷運転・周波数変動などにも対応可能であり、水素混焼率30vol%の混焼技術も確立した。また、2050年カーボンニュートラル社会の実現に向けた再生可能エネルギーの利用促進を支える製品としてガスエンジンへの期待は大きい。

まえがき

国連気候変動枠組条約第26回締約国会議 COP26にて、日本は2030年度にCO₂排出量を2013年度比46%削減することを掲げた。再生可能エネルギーの利用促進がカーボンニュートラル実現に向けて大きく取り上げられる中、災害時のBCP対策だけでなく、自然エネルギーによる電力供給の不安定さから調整力としてガスエンジンによる発電への期待が増している。

1 背景

ガスエンジンのコージェネレーションシステムは、需要側での発電および排熱の有効活用による熱電併給設備として、高い経済性と省エネ性を実現することで、これまで広く普及してきた。グリーンガスエンジンの受注実績は2022年12月時点で224台、発電容量にして1,684MWに達している。

2 製品の概要

最も販売実績のある「KG-18-V」の回収事例では、投入エネルギー100%に対して電力49.5%、蒸気15.2%、高温水13.4%、低温水4.0%と総合効率で82.1%となる。（都市ガス/0.784MPaG飽和蒸気/高温水回収（75℃→90℃）/低温水（25℃→60℃）の条件時）蒸気は生産プロセスでの加温の熱源、高温水は温水式の吸収式冷凍機の熱源、低温水はユーティリティー加温などで利用される。

3 製品の特長

(1) クラス世界最高水準の発電効率と環境性能

カワサキグリーンガスエンジンのラインナップは表1に示す計5種であり、最新機種である2段過給を採用した「KG-18-T」の発電効率はクラス世界最高水準の51.0%に到達した。NO_x排出レベルは多くの地域で脱硝装置が不要である200ppm以下（O₂=0%換算）という低い排出量を継承している。

「KG-18-T」は、図1で示すように、国内の同クラスのガスエンジンでは初となる2台の過給機と2台の空気冷却機をモジュール化した2段過給システムを採用することで過給機の効率を高めたことにより、発電効率を大幅に向上させた。

その点などが評価され、コージェネ財団主催の「コージェネ大賞2020」にて「技術開発部門 理事長賞」および一般社団法人 日本機械工業連合会主催の「令和4年度優秀省エネ脱炭素機器・システム表彰」にて「資源エネルギー庁長官賞」など数々の賞を受賞している。

表1 カワサキグリーンエンジンのラインナップ
Table 1 Lineup of Kawasaki Green Gas Engines

		[KG-12]	[KG-18]	[KG-12-V]	[KG-18-V]	[KG-18-T] (2段過給)
シリンダ数		12	18	12	18	18
出力 [kW]	50Hz	5,200	7,800	5,200	7,800	
	60Hz	5,000	7,500	5,000	7,500	
発電効率 [%]		49.0		49.5		51.0
NO _x [ppm]		200以下 (O ₂ =0%換算)				

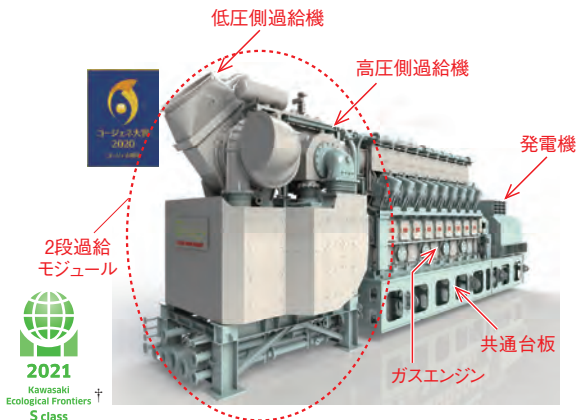


図1 2段過給ガスエンジン（「KG-18-T」）
Fig. 1 Two-stage turbocharging gas engine (KG-18-T)

(2) 速い起動性

定格負荷に到達するまでの起動時間は、通常起動では起動指令から10分以内であるが、圧縮空気により過給機回転をアシストして、過給圧を安定に保ちつつ負荷上昇による異常燃焼を抑止する急速起動システムを採用することで、起動時間を5分以内とすることができる。

(3) 低負荷運転の拡大

市場のニーズを受けて、低負荷運転時の燃焼を従来の30%負荷から20%負荷に運転可能範囲を拡大した。起動性の改善と併せて需給調整力の向上に繋がった。

(4) 周波数変動対応

北海道胆振東部地震に端を発した大規模停電を経験して、周波数変動の耐性を高める必要性が増した。そこで新たに周波数低下時の動特性評価を行うことで、全型式を94%周波数低下まで運転可能として、電力システムの周波数安定化へ貢献している。

(5) 30%水素混焼技術の確立

発電出力や水素混合比率に応じて燃焼状態を適正に制御

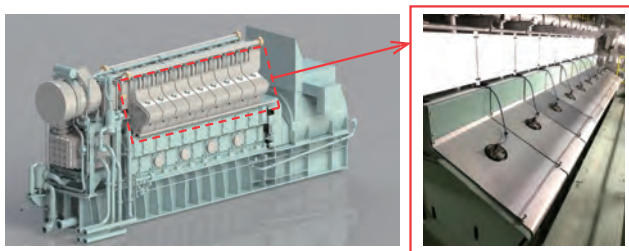


図2 水素混焼仕様実証機および漏洩検知カバー
Fig. 2 Hydrogen mixed-fuel combustion gas engine for demonstration and leak detection

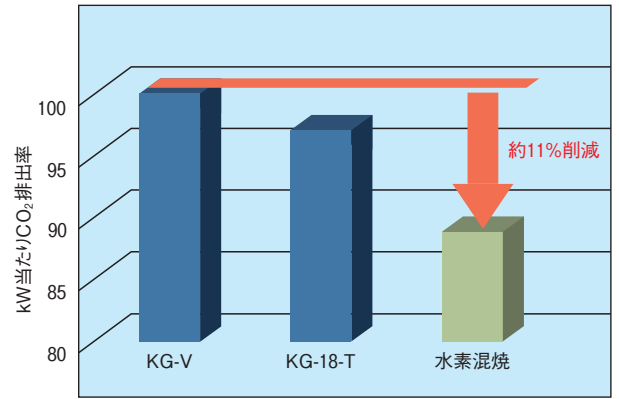


図3 当社製ガスエンジンのCO₂排出率比較
Fig. 3 Comparison of CO₂ emission rate among Kawasaki's gas engines

できるシステムの構築や、単筒試験機での水素混焼試験などを実施した。これにより、発電出力5 MW以上の大型ガスエンジンでは、水素を体積比30%までの割合で天然ガスと混焼して安定した運用を実現できる燃焼技術を国内ガスエンジンメーカーとして初めて開発した。また、水素混焼では、水素の漏れに対する安全対策が重要となるため、図2に示すような燃焼室周りで漏洩した水素を安全に屋外へ排出させるシステムを実証機に適用した。

実証機で各種試験を実施後、水素混焼仕様を2025年に市場投入し、2030年に水素混焼率を100%まで高めた仕様も市場投入する予定である。図3に示すように水素混焼率30%では従来型と比較してCO₂排出率を約11%低減でき、さらに水素混焼率100%ではCO₂排出率0%となる。

あとがき

ガスエンジンはCO₂排出率を低減させる開発を続けてきており、低炭素社会から脱炭素社会に向けた移行期に柔軟に対応していく。

2050年カーボンニュートラル社会の実現に向け、脱炭素社会へ向けた技術が実装されている本製品への期待は大きい。

〔文責 エネルギーソリューション&マリンカンパニー
エネルギーディビジョン エネルギーシステム総括部
発電プロジェクト部 佐藤 洋〕

【問い合わせ先】

エネルギーソリューション&マリンカンパニー
営業本部 国内常用発電営業部
Tel. (03) 3435-2211, Fax. (03) 3435-2022

† 8MW級の2段過給システム搭載し、同出力クラス世界最高発電効率による燃料ガス消費量の大幅な削減を達成した、新型高性能グリーンガスエンジン

医薬品粉末の連続造粒・乾燥システム「LaVortex」

Continuous Granulation and Drying System for Pharmaceutical Powder LaVortex



医薬品固形製剤（錠剤・顆粒剤）の製造はバッチ式がまだまだ主流である。しかし、センサ技術の発達や行政機関の方針もあり、連続生産方式の導入が検討されている。当社では、医薬品粉末の造粒・乾燥工程の連続処理が可能な連続生産システム「LaVortex」を開発した。本装置は、容器回転攪拌式連続式造粒機「LaVortex G」と、連続式気流乾燥機「LaVortex D」から構成される。従来のバッチ式の攪拌造粒法および流動層造粒法と比較して、錠剤にしやすい打錠性の良い顆粒を連続的に得ることができ、大量生産が可能になる。

まえがき

米国食品医薬品局 FDA (Food and Drug Administration) により、2014年に医薬品生産を従来のバッチから連続生産へと移行するICH Q13宣言が発表された。日本国内でも、医薬品医療機器総合機構 PMDAから連続生産への転換を勧める方針が打ち出され、センサ技術の発達や行政機関の方針もあり医薬品メーカー各社はその導入を検討している。

1 背景

医薬品固形製剤（錠剤・顆粒剤）製造は、装置への一括投入・排出によるバッチ式が主流であり、生産効率化は他業界と比較して遅れている。原料を継続投入して製造品を連続的に作る生産方式では、医薬品の厳しい品質管理基準への対応が難しいためである。これを満たすためには工程内を連続的に流れる原料や製品を常時監視・管理する技術が求められ、高精度なプロセス解析技術 PAT (Process Analytical Technology) が必要になる。連続生産方式では稼働時間の変更により製造量を調整可能であり、開発段階から商用生産に適用するためのスケールアップ検討が不要であるなどのメリットがある。

そこで、当社は医薬品固形製剤の製造工程のうち、最も重要とされる造粒・乾燥工程を担う連続生産システム「LaVortex (ラボルテックス)」を開発した。

2 製品概要

連続生産システム「LaVortex」は代表図のように連続造

粒機「LaVortex G」および連続乾燥機「LaVortex D」で構成され、粉体の造粒および乾燥工程を連続処理して原料粉末および結合液から乾燥顆粒を連続生産する。医薬品の標準的な処方で2～25kg/hと幅広い処理量に対応できる。

主薬および各種添加剤が混合された原料を、定量供給機に結合液を注液することで、湿粉として「LaVortex G」に供給する。造粒された湿粉は「LaVortex G」の直下に設けた熱風配管へと順次落下し、熱風とともに輸送されて「LaVortex D」に供給され、連続乾燥部を通過しながら乾燥が進行し、サイクロンによって回収される。サイクロン下部に設置したPAT機器で乾燥した顆粒の含水率と粒子径を連続的に測定する。測定結果に基づいた品質判定により分岐ダンパーが作動して、良品のみが次工程へ移送される。

3 製品の特長

(1) 連続造粒機「LaVortex G」の特長

「LaVortex G」の連続造粒部の構造を図1に示す。バッチ式攪拌造粒機のノウハウを活用した容器回転攪拌方式を採用した。チョッパー羽根および容器は同方向に回転し、チョッパー羽根の高速回転および容器の低速回転によって造粒が進行する。投入口へ原料粉末と結合液の混ざった湿粉を流し、スクリーンで連続造粒部へと運ばれ、回転中心をずらしたチョッパー羽根および容器の回転によって攪拌される。連続造粒部の下部ではチョッパー羽根と容器との距離を近づけ、容器壁面付近を移動する湿粉に対してチョッパー羽根が接触しやすい構造としている。逆に距離が離れている上部は2枚の仕切り板によって連続造粒部を分け、湿粉の滞留時間を増加させている。また、チョッパー軸の一部には羽根ではなく円板を上記2枚の仕切り板近傍

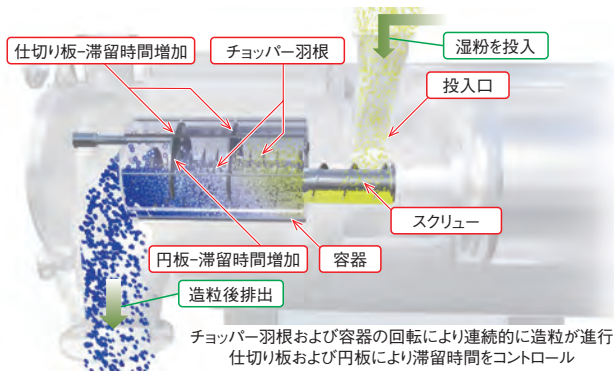


図1 連続造粒部の構造
Fig. 1 Structure of continuous granulation unit

に設置して、それらの組み合わせにより連続造粒部での湿粉の滞留時間を増加させると同時に整粒も行うことができる。連続造粒部を通過した造粒湿粉は排出口から順次排出され、次工程へと進んでいく。

(2) 連続乾燥機「LaVortex D」の特長

「LaVortex D」は2層式渦巻乾燥室で構成されており、その連続乾燥部の構造を図2に示す。「LaVortex G」から排出された造粒湿粉は熱風により輸送され、経路長さ10mの連続乾燥部を通過しながら乾燥し、サイクロンで回収される。乾燥部は中間板で隔てた入口側乾燥室およびその反対面の出口側乾燥室の2層に分かれている。各乾燥室に渦巻状の板を取り付けて2層構造の渦巻状流路を構成している。熱風配管から流れる熱風と造粒湿粉は入口側乾燥室の外周部に入り、渦巻の中心に向かう流路を流れる。渦巻中心に到達した後は、中間板の穴を通して出口側乾燥室に移動して渦巻の中心から外側に向かう流路を流れる。これにより装置外部と接する乾燥経路壁面の面積が小さく、放熱ロスが小さい構造を実現している。渦巻の最外周に到達した後は、連続乾燥部から排出され、サイクロンによって乾燥顆粒が回収される。

乾燥顆粒は、サイクロン下部のPAT機器で連続測定される。PAT機器として、非破壊で測定できる近赤外分光計および粒子測定プローブを設置して、含水率・粒子径・粒度



図2 連続乾燥部の構造
Fig. 2 Structure of continuous drying unit

表1 従来の造粒方式との比較

Table 1 Comparison with conventional granulation methods

造粒方式	①「LaVortex」	②攪拌造粒法	③流動層造粒法
生産方式	連続	バッチ	バッチ
粒子径 d10 [μm]	58.4	62.9	62.2
粒子径 d50 [μm]	181.0	197.9	125.1
粒子径 d90 [μm]	537.8	670.3	234.2
粒度分布の幅	中間	広い	狭い
かさ密度 [g/mL]	0.547 中間	0.730 大きい	0.390 小さい
打錠硬度 [N]	70 適正	35 低い	75 適正

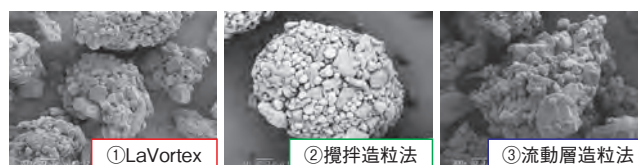


図3 顆粒形状・表面状態
Fig. 3 Granular shape and surface condition

分布をリアルタイム測定する。近赤外分光計による含水率測定では、正確な測定のためにダンパーで一時堆積させて少量単位で半連続測定する。また粒子測定では、測定ノズルをサイクロン流路内に設置して、顆粒を堆積せず完全連続測定する。これらの測定により、「LaVortex」で生産される顆粒品質が均一であることを確認することができる。

(3) 従来の造粒方式との比較

処理量25kg/hの条件で「LaVortex」による造粒乾燥方式を、従来のバッチ式である攪拌造粒法や流動層造粒法と比較して表1に示す。「LaVortex」で生産される顆粒は粒度分布の幅およびかさ密度が従来方式の中間である。また、流動層造粒法のように打錠硬度（錠剤成型した後に割るために必要な力）が適正でありながら、図3で示すように攪拌造粒法と同様に球状で扱いやすい。このように、「LaVortex」は、錠剤にしやすい打錠性の良い顆粒が連続的に大量生産できる。

あとがき

現在、「LaVortex」は医薬品業界のみならず、食品・化学業界を含めて営業活動を実施中である。造粒前の原料混合の連続生産システムなど、造粒・乾燥以外の前後工程も開発中である。

〔文責 株式会社アーステクニカ 技術部 小柳 敬太〕

【問い合わせ先】

株式会社アーステクニカ
営業統括部 産業マテリアル営業部
Tel. (03) 3230-7155, Fax. (03) 3230-7158

内航船向け環境対応ハイブリッド／バッテリー推進・給電システム Eco-friendly Hybrid and Battery Propulsion and Power Supply Systems for Coastal Vessels



 Kawasaki Ecological Frontiers S class †

地球温暖化対策として温室効果ガス GHGの排出削減は喫緊の課題であり、環境性能に優れた船舶の開発が求められている。当社はシステムインテグレータとして、自社開発のガスエンジンを使用したハイブリッド推進・給電システムやバッテリー推進・給電システムを開発して、船舶の環境性能を大幅に改善することに成功した。

まえがき

地球温暖化対策として温室効果ガス GHGの排出削減が喫緊の課題となっている。船用業界においても環境規制が厳しくなっており、環境性能に優れた船舶の開発が求められている。

1 背景

2023年7月に国際海事機関IMOは国際海運における温室効果ガス削減戦略を採択した。2050年頃までに温室効果ガス排出ネットゼロとすること、およびそこに至るまでの段階的な削減目標を掲げている。

国内でも温室効果ガス排出規制の機運が高まり、国土交通省は、内航海運の2030年度のCO₂削減目標を2013年度比15%減から17%減に引き上げている。

こうした社会ニーズの高まりに対して、従来の船舶では船体形状の改善やエンジン・プロペラの性能向上など機器単体での改善が行われていたが、さらなる性能向上が必要となった。

そこで、この厳しい目標を達成するため、船舶全体での必要エネルギーを考慮して、最適化を図ることとした。当社は、船舶の運用や航続距離に合わせて最適な構成を提案するため、2つのシステムを開発した。

2 ハイブリッド推進・給電システム

航続距離が長い場合は、図1に示すように、推進用動力源である主機エンジンと船内電力源である発電機を電氣的

に結合して船舶の運用に合わせて最適な供給を行うことでエネルギーを効率良く運用するシステムが適しており、以下の特長がある。

- ① LNGガス専焼エンジンと組み合わせた高い環境性能
当社が独自開発したLNGガス専焼エンジンであるカワサキグリーンガスエンジン「L30KG」（図2）とバッテ

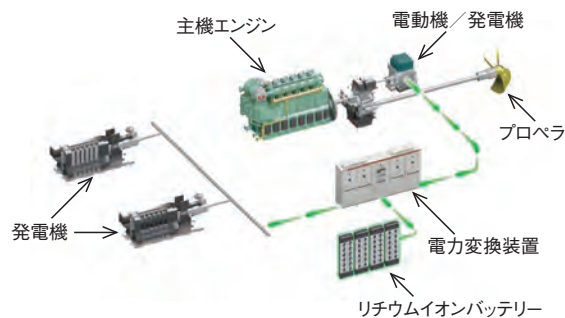


図1 ハイブリッド推進・給電システム
Fig. 1 Hybrid propulsion and power supply system



図2 川崎グリーンガスエンジンL30KG
Fig. 2 Kawasaki Green Gas Engine L30KG

† 出入港時はバッテリー電気推進によりゼロエミッション、巡航時は推進効率を重視した機械推進など、船舶の運用に応じて複数のエネルギー源を切り替え、効率の最大化と排ガスの低減を図るシステム

リーを組み合わせることで、高い環境性能を実現できる。

② 燃費向上

船舶では、気象条件や海象条件によってエンジンの負荷が変動することで燃費が悪化する。バッテリーを活用して、この負荷変動のエンジンへの影響を抑制することにより、特に荒天時には大幅な燃費向上が可能となる。

③ 港湾内ゼロエミッション

港湾内など所要推進動力が小さい場合、バッテリーからの給電のみによるゼロエミッション運行が可能である。

④ 安全性の向上

万が一エンジンが使用できない場合も、バッテリーからの給電によって航行を継続することが可能である。

3 バッテリー推進・給電システム

航続距離の短い場合は全てのエネルギーをバッテリーからの給電で賄うシステムが適しており、以下の特長がある。

① ゼロエミッション

運航中常時ゼロエミッションとなる。

② 振動騒音の低減

エンジンの振動や騒音が無いため、乗組員や周辺住民にとっても優しい船舶となる。

③ 災害時の陸上への電力給電

自然災害時に緊急用電源として、バッテリーに貯めた電力を陸上へ供給できる。

④ 乗組員の労務負荷低減

主機関の暖機運転やメンテナンスが不要なため、乗組員の負担を大幅に低減できる。

4 納入／導入事例

それぞれのシステムの特長を最大化するためには、船舶の用途や航続距離に応じて適切な機器やシステム構成を選択する必要がある。当社は船用機器メーカーとして長年培った豊富な経験を活用し、船舶の運用に合わせた最適な推進・給電システムを提案することが可能である。

(1) 石灰石運搬船

NSユナイテッド内航海運株式会社が運航予定の石灰石運搬船に搭載する、ガスエンジンハイブリッド推進・給電システムを受注した。ガスエンジンと電動機/軸発電機および2.8MWhの大容量バッテリーを適切に制御して、温室効果ガス削減に最適な運転を行う。従来の同型船と比較して、常用出力時にCO₂は約30%、NO_xは約90%、SO_xは約100%削減することができるだけでなく、メタンスリップの発生も少ない。非常に環境に優しい船舶である。本船は、2024年に竣工予定である。



図3 ピュアバッテリータンカー「あさひ」
Fig. 3 Pure battery tanker Asahi
(提供：旭タンカー株式会社)

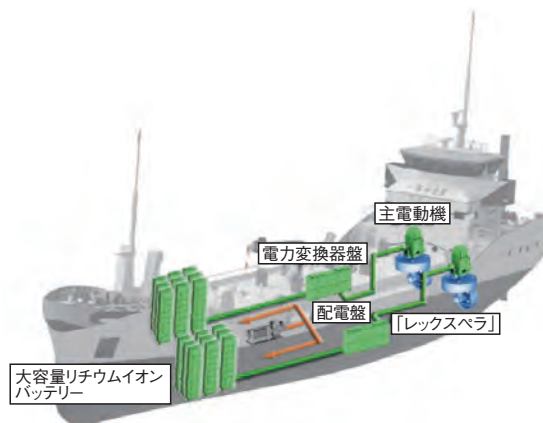


図4 主要構成機器搭載イメージ
Fig. 4 Installation of main components

(2) 世界初ピュアバッテリータンカー「あさひ」「あかり」

2022年3月に当社のバッテリー推進・給電システムを搭載した世界初のピュアバッテリータンカー「あさひ」が竣工した(図3)。旭タンカー株式会社が発注した本船は、3.5MWhの大容量バッテリーに貯めた電力で推進・給電を行うため、運航中のゼロエミッションを達成する。当社所掌の主要な構成機器搭載イメージを図4に示す。また2023年3月には同システムを採用した姉妹船「あかり」も竣工し、両船は東京湾で船用燃料補給作業に従事している。

あ と が き

当社はこれからも本システムを採用した環境対応船舶の普及を目指し、地球環境の改善に貢献していく。

[文責 エネルギーソリューション&マリンカンパニー
船用推進ディビジョン 船用推進システム総括部
システムエンジニアリング部 平松 雄樹]

[問い合わせ先]

エネルギーソリューション&マリンカンパニー
営業本部 船用機械営業部
東京：Tel. (03) 3435-2279, Fax. (03) 3435-2022
神戸：Tel. (078) 682-5320, Fax. (078) 682-5549

86,700m³型LPG焚LPG／アンモニア運搬船

An 86,700m³ LPG Fueled LPG/NH₃ Carrier



Kawasaki Ecological Frontiers S class †

本LPG／アンモニア運搬船は、環境負荷の低いエネルギー源として幅広く活用されているLPGと、脱炭素社会の新たな燃料として将来的に活用が期待されるアンモニアを同時に運搬でき、主機燃料としてLPGを使用可能である。従来船型からの主寸法は維持しつつ、貨物タンク容積を増加させた船型であり、燃費も業界最高峰レベルの低燃費を達成している。

まえがき

世界有数のエネルギー大国である日本では、一般家庭用・タクシー・工業用など幅広い分野でクリーンエネルギーとしてLPGが利用されている。それらの大半は輸入で賄っており、LPGを運ぶ大型LPG運搬船は日本にとってなくてはならないものとなっている。

1 背景

大型LPG運搬船の建造は日本だけでなく韓国や中国でも増加しており、受注競争が活発化している。また、輸送効率を高めるために船型の大型化が進んでおり、市場のトレンドが変化する中、競合他社を上回る評価を得る船型を早急に開発する必要があった。

さらに、昨今CO₂フリー燃料として注目されているアンモニアについても輸送できるように仕様を見直した。

2 概要と特長

本船の主要目を表1に、一般配置図を図1に示す。本船は日本の主要LPG基地に入港可能な最大船型となっている。

従来船型に比べて低燃費・貨物タンクの増加・アンモニア輸送という新たな3点の特長があり、油燃料に比べて環境に優しいLPG燃料が使用可能である。

(1) 低燃費

これまでに蓄積してきた海上試験データを活用して、推進性能上最適な船型に改良した。さらに、従来から採用している当社独自のSEA-Arrow船型(図2(a))および省エネ

付加物 (Semi Duct System with Contra Fins, Rudder Bulb System with Fins) (図2(b),(c))に加え、新たに開発した省エネフィン (Short Horizontal Fins) (図2(d))を採用した。船型改良や省エネ付加物に加えて、低燃費主機を搭載することにより、前シリーズ船である84,000m³型LPG焚LPG運搬船と比べて約6%の燃費低減を達成し、業界最高の低燃費レベルとなった。

(2) 貨物タンク容積の増加

LPG基地は基地建造当時のLPG船型を基に設計された基地が多く、現在の大型化した船型には適合しなくなっている。よって、安易に船を大型化すると、重要な基地へ入港できなくなったり入港制限が加わるなどの弊害が増える。そのため、前シリーズである84,000m³型LPG運搬船が寄港可能な基地は引き続き寄港できるように基地制約に影

表1 主要目

Table 1 Principal particulars

船種	重油／LPG 二元燃料推進 LPG／アンモニア運搬船
全長×幅×型深さ [m]	約 230×37.2×21.9
貨物容積 [m ³]	86,700
常用速力 [knots]	17

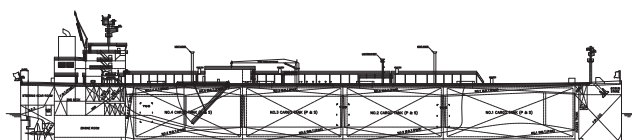


図1 一般配置図

Fig. 1 General arrangement



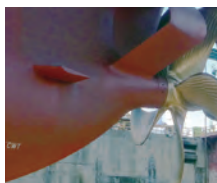
(a) SEA-Arrow



(b) Semi Duct System with Contra Fins



(c) Rudder Bulb System with Fins



(d) Short Horizontal Fins

図2 船首形状および省エネ付加物
Fig. 2 Bow form and energy-saving devices

響のある主寸法を変えずに貨物タンク容積を増加させることとした。

貨物タンク容積は主要航路であるヒューストン〜極東を往復できるLPG燃料を確保しつつも十分な貨物容積を確保できるサイズとした。また、LPGは貨物重量ベースのロット単位で取り引きされることが多いが、その値は時代に合わせて変化しており、最新の取引ロットから逸脱することがない貨物容積を確保できるようにした。

(3) アンモニア輸送への対応

近年CO₂フリー燃料として注目されているアンモニアが搭載できるように仕様を変更した。特に考慮した点は腐食性・比重・オペレーションである。

アンモニアは一部の材料に対して応力腐食割れを引き起こすリスクがあるため、耐応力腐食割れ材料に変更した。

また、液体状態のアンモニアはLPGよりも比重が大きいため、大比重にも対応できるように貨物機器の仕様を変更した。加えて、ガス状態のアンモニアはLPGと違い空気よりも軽いため、貨物機器室などの安全設備をLPG用に設置しているエリア下部に加えエリア上部にも設置した。

アンモニアのオペレーションは20年ほど前に建造したマルチガス運搬船の経験や各種ガイドラインを参考に検討して、必要な設備を設けた。

アンモニアを貨物として輸送可能な仕様へ変更することに加え、さらなるCO₂削減を目指し、将来的に主機の燃料としてアンモニアを利用可能な船級符号「アンモニア燃料レディ」ノーテーションを一部取得した。

(4) LPG燃料供給システム

日本初のLPG燃料船を建造して以降、LPG運搬船においてLPG燃料システムは世界標準になっている。当社は環境

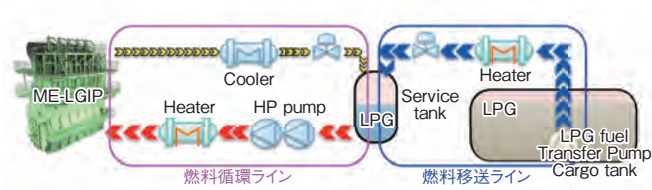


図3 LPG燃料供給システム図
Fig. 3 LPG fuel supply system diagram

負荷を考慮し世界に先駆けLPG燃料システムの開発に着手して、長年培ってきたLPG運搬船の知識と、すでに開発・導入されているLNG燃料システムを基に、独自の燃料供給システムを開発した。

LPG燃料供給システムの概要図を図3に示す。主な特徴はサービスタンクの存在と各ラインの個別制御である。

サービスタンクは燃料として使用するLPGを必要最低限貯蔵しておくタンクである。また、主機から返送されるLPGには少量の潤滑油が混在するので、潤滑油が貨物タンクに混入した場合の貨物のダメージを防ぐためにも必要なタンクとなる。サービスタンクを燃料供給システムを中心に設けることにより、燃料移送ラインと燃料循環ラインそれぞれ個別で制御することができるシンプルな制御機構としている。

各ラインの制御システムは想定される温度および物性を考慮したシミュレーションを重ねて構築した。本システム全体に液体状態のLPGが供給されるため、ガス化させないようにシステム内のLPGを監視して、適切な制御装置によって液体状態を維持するシンプルなシステムとした。

あ と が き

本船は過去船型と比べても大ヒット船型となりさまざまな船主から好評である。

今後も全世界的に強化されつつある環境規制ならびにSDGsに代表される具体的な行動計画を踏まえ、代表図の86,700m³型LPG／アンモニア運搬船を皮切りに地球環境にやさしい船舶技術を開発・提供し、低炭素・脱炭素社会の実現に貢献していく。

〔文責 エネルギーソリューション&マリンカンパニー
船舶海洋ディビジョン 技術総括部 商船設計部
赤星 顕悟〕

【問い合わせ先】

エネルギーソリューション&マリンカンパニー
船舶海洋ディビジョン 技術総括部 商船設計部
Tel. (0877) 46-6699, Fax. (0877) 46-0144

特許 第6661323号

発明の名称：圧縮機の吸気構造

発明者：池口 拓也, 寺内 晃司, 追風 恵次, 阪井 直人,
谷村 和彦

—高い発電効率と小型軽量化を両立した純国産ガスタービンの吸気構造—

当社は、高い発電効率と優れた信頼性を誇るガスタービンなど、分散型のエネルギー供給に適した製品を提供している。特に、2014年に開発を開始した純国産ガスタービン「M5A」は、信頼性を継承するため可能な限り既存品と同じ構造にして、小型軽量と高性能を追求すべく、あらゆる場所で圧力損失の低減に努めた。

吸気構造（図1）での圧力損失を最小化するには、ベルマウスの径方向の湾曲を最低限にする必要があるため、ガスタービ

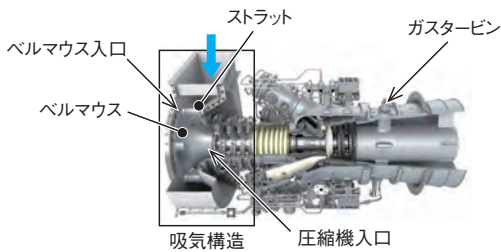


図1 ガスタービンの吸気構造

ンの軸長が長くなり大型化する傾向がある。一方で、既存発電設備からリプレイスしたいという顧客に応えるには、従来の設置スペース内に設置できる小型軽量のガスタービンを提供する必要がある。

本発明では、吸気構造において、圧縮機入口に空気を導入するベルマウスの内側ケーシングと外側ケーシングとを連結する複数のストラットの形状を、吸気流れに沿うような湾曲形状にしている（図2）。さらに、ストラット中心軸の延長線がガスタービンの中心に重なるような湾曲形状にすることで、吸気の流れ方向を滑らかに変化させることができ、軸長を長大化せずとも、流路を通過する際の圧力損失の大幅な低減を実現した。

本発明により、高い発電効率と小型軽量化という相反する課題を解決し、出力に対する軸長を従来機種と比較して2割以上短縮するなど、さまざまなお客様の要求に応えられるガスタービンを実現した。

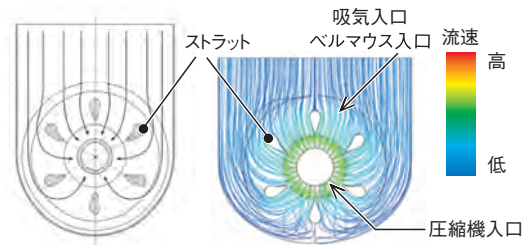


図2 ストラットの湾曲形状

特許 第7137342号

発明の名称：自律型無人潜水機

発明者：向田 峰彦, 益田 興佑, 宮田 慎一, 岡矢 紀幸,
中村 和行, 橋本 誠志, 沖村 祐亮

—ロボットアーム搭載の自律型無人潜水機（AUV）—

海底パイプラインなどの海洋構造物は、腐食や劣化の状況などを定期的に検査する必要がある。長距離にわたり敷設されている海底パイプラインの検査に自律型無人潜水機AUV (Autonomous Underwater Vehicle) を用いることは、運用におけるコストダウンと遠隔操縦ケーブルによる行動制限の無いAUVの利点を生かせるものである。当社は、潜水船技術と産業用ロボット技術との技術シナジーにより開発された、世界初の海底パイプライン検査用ロボットアーム搭載のAUV（図1）を提供している。

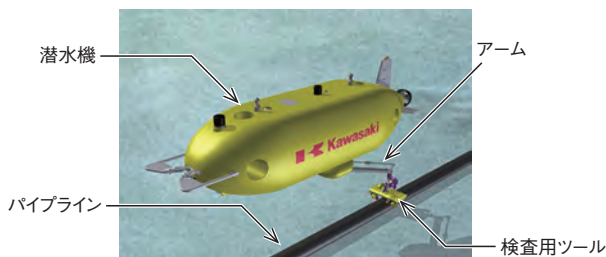


図1 AUVによる海底パイプライン検査

潜水機本体にアームが設けられ、アーム先端には検査用ツールが設けられる。検査用ツールは、検査対象物に対して適切な距離や姿勢を保持する必要がある。航走中の潜水機本体の揺動に対応して都度姿勢制御されている。検査用ツールの姿勢制御には、潜水機本体に内蔵されたバッテリーの電力が用いられるため、検査の継続時間に依りてバッテリーの充電が必要であり、検査の全体工期を伸ばす要因となっていた。

本発明では、アームと検査用ツールとの間に受動関節機構（図2）を設けることで、潜水機本体やアームの動きを受動関節が吸収するため、航走中に潜水機本体が揺動しても、機械的に検査用ツールの姿勢を安全に保持することができる。さらに、検査用ツールの姿勢制御のための電力が一部不要となるため、連続運用時間を向上させ検査を効率よく進めることが可能となる。

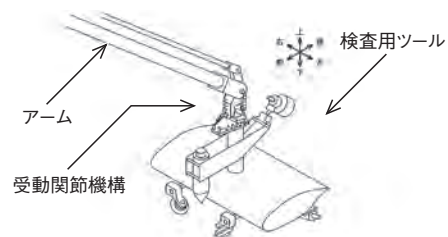


図2 受動関節機構

事業セグメント別主要製品／生産拠点

事業セグメント	主要製品	主要製品拠点
航空宇宙システム	・航空機（固定翼機，ヘリコプター），誘導機器，電子機器，宇宙関連機器，シミュレータ	岐阜工場 名古屋第一工場 名古屋第二工場 Kawasaki Motors Manufacturing Corp., U.S.A.（アメリカ）
	・航空機部分品、標的システム、ロケット部分品、宇宙機器、航空機整備・改造	日本飛行機(株)・横浜工場 日本飛行機(株)・厚木工場
	・航空機用エンジン，航空機用ギアボックス	明石工場 西神工場
車両 (川崎車両株式会社)	・鉄道車両，新交通システム，貨車	神戸本社 播磨工場 Kawasaki Motors Manufacturing Corp., U.S.A.（アメリカ） Kawasaki Rail Car, Inc.（アメリカ）
	・ロータリー除雪車，凍結防止剤散布車 ・軌道モーターカー，重量物運搬車	(株)NICHIGO・曙工場 (株)NICHIGO・稲穂工場
エネルギーソリューション & マリン	・各種産業用プラント（セメント，化学，搬送プラント） ・各種陸船用ボイラ（発電事業用ボイラ，産業用ボイラなど） ・ごみ処理設備 ・各種低温貯蔵設備（LNG タンク）	播磨工場 安徽海螺川崎節能設備製造有限公司（中国）* 安徽海螺川崎裝備製造有限公司（中国）* 上海海螺川崎節能環保工程有限公司（中国）*
	・ガスタービン（産業用，艦艇用）	明石工場 神戸工場
	・蒸気タービン，ディーゼル機関，ガスエンジン，大型減速装置 ・船用推進装置（サイドスラスト，旋回式スラストなど） ・各種空力機械（天然ガス圧送設備，送風機など）	神戸工場 播磨工場 武漢川崎船用機械有限公司（中国）
	・空調機器，汎用ボイラ	川重冷熱工業(株)・滋賀工場
	・破砕機，環境関連機器	(株)アーステクニカ・八千代工場
	・LNG 運搬船，LPG 運搬船，油槽船，ばら積み船，コンテナ船，自動車運搬船，超高速船，艦艇，官公庁船	神戸工場 坂出工場 南通中遠海運川崎船舶工程有限公司（中国）* 大連中遠海運川崎船舶工程有限公司（中国）*
	・建設機械用油圧機器，産業機械用油圧機器・装置 ・船用舵取機，船用各種甲板機械 ・産業用ロボット ・医薬・医療ロボット	明石工場 西神戸工場 Kawasaki Precision Machinery (U.K.) Ltd.（イギリス） Kawasaki Precision Machinery (U.S.A.) , Inc.（アメリカ） Wipro Kawasaki Precision Machinery Private Limited（インド） 川崎精密機械（蘇州）有限公司（中国） 川崎春暉精密機械（浙江）有限公司（中国）* 川崎（重慶）機器人工程有限公司（中国） Flutek, Ltd.（韓国）
・油圧プレス	川崎油工(株)	
パワースポーツ & エンジン (カワサキモーターズ株式会社)	・モーターサイクル，ATV（四輪バギー車），レクリエーションユティリティビークル，多用途四輪車，パーソナルウォータークラフト「ジェットスキー®」，電動3輪ビークル「noslisu」 ・汎用ガソリンエンジン	本社工場 加古川工場 Kawasaki Motors Manufacturing Corp., U.S.A.（アメリカ） Kawasaki Motores do Brasil Ltda.（ブラジル） India Kawasaki Motors Pvt. Ltd.（インド） Kawasaki Motors Enterprise (Thailand) Co., Ltd.（タイ） PT. Kawasaki Motor Indonesia（インドネシア） Kawasaki Motors (Phils.) Corporation（フィリピン） Kawasaki Motores de Mexico S.A. de C.V.（メキシコ） 常州川崎光陽発動機有限公司（中国）*

- [KCC], [KACE], [Successor-G], [K-Repros], [duAro], [KICS], [SOPass], [SOPass] ロゴ, [SPICE], [SPICE] ロゴ, [レックスペラ]は、川崎重工株式会社の商標または登録商標です。



- [LaVortex] は、株式会社アーステクニカの登録商標です。

- 本誌に記載されている社名、商品名、サービス名などは、それぞれ各社が商標として使用している場合があります。

Kawasaki Ecological Frontiers

川崎重工グループでは、製品・サービスのライフサイクルを通じた環境負荷低減を目的として、2014年より独自の環境配慮製品認証制度「Kawasakiエコロジカル・フロンティアズ制度（旧名称：Kawasaki グリーン製品制度）」を推進しています。本制度は、製品自体の環境性能向上と生産工程での環境負荷低減の両面において、特に優れた製品を認定・登録するものです。

川崎重工技報 第185号

2023年12月1日

編集・発行	兵庫県明石市川崎町1番1号 川崎重工業株式会社 技術開発本部
発行責任者	技術開発本部長 中谷 浩
発行人	技術開発本部 技術企画推進センター長 片岡 幹彦
印刷	広島県広島市中区中島町9番6号 株式会社 秀巧堂

禁無断転載

川崎重工株式会社

国内事業所

東京本社

〒105-8315 東京都港区海岸1丁目14番5号
Tel. 03-3435-2111 / Fax. 03-3436-3037

神戸本社

〒650-8680 兵庫県神戸市中央区東川崎町1丁目1番3号
(神戸クリスタルタワー)
Tel. 078-371-9530 / Fax. 078-371-9568

技術開発本部

〒673-8666 兵庫県明石市川崎町1番1号(明石工場内)
Tel. 078-921-1611 / Fax. 078-921-1867

北海道支社

〒060-0005 北海道札幌市中央区北5条西2丁目5番
(JRタワーオフィスプラザさっぽろ14階)
Tel. 011-281-3500 / Fax. 011-281-3507

東北支社

〒980-0021 宮城県仙台市青葉区中央1丁目6番35号(東京建物仙台ビル16階)
Tel. 022-261-3611 / Fax. 022-265-2736

中部支社

〒450-6041 愛知県名古屋市中村区名駅1丁目1番4号
(JRセントラルタワーズ41階)
Tel. 052-388-2211 / Fax. 052-388-2210

関西支社

〒530-0057 大阪府大阪市北区曾根崎2丁目12番7号(清和梅田ビル16F)
Tel. 06-6484-9310 / Fax. 06-6484-9330

中国支社

〒730-0013 広島県広島市中区八丁堀14番4号(JEI広島八丁堀ビル6階)
Tel. 082-222-3668 / Fax. 082-222-2229

九州支社

〒812-0011 福岡県福岡市博多区博多駅前1丁目4番1号
(博多駅前第一生命ビル)
Tel. 092-432-9550 / Fax. 092-432-9566

沖縄支社

〒900-0015 沖縄県那覇市久茂地3丁目21番1号(國場ビル)
Tel. 098-867-0252 / Fax. 098-864-2606

生産拠点

岐阜工場

〒504-8710 岐阜県各務原市川崎町1番地
Tel. 058-382-5712 / Fax. 058-382-2981

名古屋第一工場

〒498-0066 愛知県弥富市楠3丁目20番地3
Tel. 0567-68-5117 / Fax. 0567-68-5161

名古屋第二工場

〒490-1445 愛知県海部郡飛鳥村金岡7番地4
Tel. 0567-68-5117 / Fax. 0567-68-5161

神戸工場

〒650-8670 兵庫県神戸市中央区東川崎町3丁目1番1号
Tel. 078-682-5001 / Fax. 078-682-5503

西神戸工場

〒651-2271 兵庫県神戸市西区高塚台2丁目8番1号
Tel. 078-992-1911 / Fax. 078-992-1910

西神戸工場

〒651-2239 兵庫県神戸市西区櫛谷町松本234番地
Tel. 078-991-1133 / Fax. 078-991-3186

明石工場

〒673-8666 兵庫県明石市川崎町1番1号
Tel. 078-921-1301 / Fax. 078-924-8654

播磨工場

〒675-0180 兵庫県加古郡播磨町新島8番地
Tel. 079-435-2131 / Fax. 079-435-2132

坂出工場

〒762-8507 香川県坂出市川崎町1番地
Tel. 0877-46-1111 / Fax. 0877-46-7006

海外事務所

台北事務所

台湾 台北市仁愛路二段99号 福記大樓15樓
Tel. +886-2-2322-1752 / Fax. +886-2-2322-5009

川崎車両株式会社

神戸本社

〒652-0884 兵庫県神戸市兵庫区和田山通2丁目1番18号
Tel. 078-682-3111 / Fax. 078-671-5784

東京本社

〒105-8315 東京都港区海岸1丁目14番5号
Tel. 03-3435-2111 / Fax. 03-3436-3037

播磨工場

〒675-0180 兵庫県加古郡播磨町新島8番地
Tel. 079-435-2131 / Fax. 079-435-2132

カワサキモーターズ株式会社

本社・本社工場

〒673-8666 兵庫県明石市川崎町1番1号
Tel. 078-921-1301 / Fax. 078-921-1420

加古川工場

〒675-0112 兵庫県加古川市平岡町山之上向原170番地
Tel. 079-427-0743 / Fax. 079-427-0745

東京事務所

〒105-8315 東京都港区海岸1丁目14番5号
Tel. 03-3435-2523 / Fax. 03-3435-2033

