

特集：お客様の「つくる」に寄り添うKOBELCOの機械装置

ページ

- 1 (巻頭言) お客様の「つくる」に寄り添うKOBELCOの機械装置特集の発刊にあたって 猿丸正悟
- 2 (概説) お客様の「より良い製品をつくる」に寄り添うKOBELCOの機械装置 天野靖士
- 3 (技術資料) 無給油式スクリュウ圧縮機用サイレンサの設計技術
青山新輔・林 雅人・高木秀剛・菊池政寛・山極伊知郎・片岡保人
- 7 (解説) 市場で高まるターボ圧縮機大型化のニーズに対する当社の取り組み
今藤雄一・志賀 司・豊田祥寛
- 13 (技術資料) 新型オイルフリースクリュウ圧縮機「Emeraude-ALETM」ALEIVシリーズ 55～120 kWの紹介
木内 優
- 17 (論文) ジャーナル軸受とラビリンスシールの性能評価プラットフォームの開発
馬場祥孝・安倍慎一郎・森中俊輔
- 22 (技術資料) 新型大型樹脂混練機LCM-620IM 山口和郎
- 26 (技術資料) ゴム混練機BBミキサの耐腐食・耐摩耗材料開発 濱田 光
- 30 (解説) ゴム混練機用新標準制御システムの開発 橋本竜馬・牟礼祥一
- 35 (技術資料) 製鉄・非鉄用圧延設備における近年の事例紹介 黒田直行・細川晴行・前田 剛・赤川正憲・宮園太介
- 40 (概説) お客様の「より良い環境をつくる」に寄り添うKOBELCOの機械装置 入谷一夫
- 41 (解説) 「ハイブリッド型水素ガス供給システム」によるボイラ・工業炉での水素利活用
今用浩司・田中孝二・香川公伸・松岡 亮・村上和希・藤澤彰利
- 50 (解説) HHOGユーティリティレス機「オールインプラン」の開発 高雄 悟・中尾末貴
- 54 (解説) 3タイプの液化水素(LH₂)気化器における実証試験の紹介
三輪泰健・鈴木朝寛・江頭慎二・東 正高・鶴 慶彦・西村拓己
- 60 (解説) LNG運搬船用圧縮機 池上祥治・手塚智志
- 64 (解説) 二酸化炭素回収・貯留および長期エネルギー貯蔵用途向けギア内蔵型遠心圧縮機
藤岡輝明
- 71 (技術資料) ノンフロン冷媒採用ヒートポンプチラー 岡田和人
- 77 (概説) 「新しい価値をつくる」事業創出への挑戦 蔭木陽一
- 78 (解説) ボトムアップ型新事業創出の枠組み構築～カンブリアプロジェクト～ 倉田和也
- 82 (技術資料) 全固体電池製造プロセスへの適用に向けた高温高压WIP装置の開発
伊藤洋行・林 和志・ボンチャイシリゲン ナタナピン
- 86 (論文) 新AIP蒸発源によるAlCrN硬質皮膜の特性と実金型での評価
谷藤信一・中村 克・久次米 進・石川剛史
- 94 (技術資料) 三次元磁極構造を用いた船舶向け低速大電磁力直動電動機の設計技術 林 俊平
- 99 神戸製鋼技報掲載 お客様の「つくる」に寄り添うKOBELCOの機械装置関連文献一覧表
(Vol.64, No. 1～Vol.73, No. 2)

《FEATURE》 KOBELCO Machinery - Stay Close to Customers' Value Creation

- 1 On the Publication of a Special Feature... KOBELCO Machinery – Stay Close to Customers' Value Creation
Shogo SARUMARU
- 2 KOBELCO Machinery – Stay Close to Customers in Creating Better Products
Yasushi AMANO
- 3 Design Technologies of Silencer for Oil-free Screw Compressor
Shinsuke AOYAMA · Masato HAYASHI · Shugo TAKAKI · Masahiro KIKUCHI · Ichiro YAMAGIWA · Dr.Yasuto KATAOKA
- 7 Kobe Steel's Efforts to Meet the Growing Market Need for Larger Turbo Compressors
Yuichi KONDO · Tsukasa SHIGA · Yoshihiro TOYODA
- 13 Introduction of The New Oil-free Screw Compressor "Emeraude-ALE™" ALEIV series 55-120 kW
Suguru KIUCHI
- 17 Development of Performance Evaluation Platform for Journal Bearings and Labyrinth Seals
Yoshitaka BABA · Shinichiro ABE · Shunsuke MORINAKA
- 22 New Large Resin Mixer, LCM-620IM
Kazuo YAMAGUCHI
- 26 Development of Corrosion and Abrasion Resistant Materials for the BB Mixer of the Rubber Internal Intensive Mixers
Hikaru HAMADA
- 30 Development of a New Standard Control System for Rubber Mixers
Ryoma HASHIMOTO · Shoichi MURE
- 35 Recent Status of Ferrous and Non-Ferrous Rolling Mills
Naoyuki KURODA · Haruyuki HOSOKAWA · Go MAETA · Masanori AKAGAWA · Taisuke MIYAZONO
- 40 KOBELCO Machinery – Stay Close to Customers in Creating Better Environments
Kazuo IRITANI
- 41 Hydrogen Utilization in Boilers and Industrial Furnaces Using Hybrid Hydrogen Gas Supply System
Hiroshi IMAYO · Koji TANAKA · Kiminobu KAGAWA · Dr. Akira MATSUOKA · Kazuki MURAKAMI · Dr. Akitoshi FUJISAWA
- 50 Development of HHO Utility-Less machine, "All-in-Plan"
Satoru TAKAO · Sueki NAKAO
- 54 Demonstration Tests of Three Types of Liquid Hydrogen (LH₂) Vaporizers
Yasutake MIWA · Tomohiro SUZUKI · Shinji EGASHIRA · Masataka AZUMA · Yoshihiko TSURU · Takumi NISHIMURA
- 60 Compressor for LNG Carriers
Yoshiharu IKEGAMI · Satoshi TEZUKA
- 64 Integrally-gear Centrifugal Compressor for Carbon Capture and Storage (CCS) and Long Duration Energy Storage (LDES) Applications
Komei FUJIOKA
- 71 Heat Pump Chiller Using Non- Fluorocarbon Refrigerant
Dr. Kazuto OKADA
- 77 Creating New Value: The Challenge of Business Creation
Yoichi KAGEKI
- 78 Cambria Project: Building Framework for Creating New Bottom-Up Businesses
Kazuya KURATA
- 82 Development of High-temperature, High-pressure WIP Equipment for All-solid-state Battery Manufacturing Processes
Hiroyuki ITO · Kazushi HAYASHI · Natnapin PONGCHASIRIKUL
- 86 Characteristic of AlCrN Hard Coatings Deposited with New AIP Evaporation Source and Evaluation on Actual Mold
Shinichi TANIFUJI · Masaru NAKAMURA · Susumu KUJIME · Dr. Takeshi ISHIKAWA
- 94 Design Technology for a Low-speed, High-electromagnetic-force, Direct-drive Motor for Ships Using a 3D Magnetic Pole Structure
Shumpei HAYASHI
- 99 Papers on Advanced Technologies for KOBELCO Machinery - Stay Close to Customers' Value Creation in R&D Kobe Steel Engineering Reports (Vol.64, No. 1 ~Vol.73, No. 2)

(巻頭言)

お客様の「つくる」に寄り添う KOBELCO の機械装置特集の発刊にあたって

猿丸正悟

執行役員 機械事業部門長

On the Publication of a Special Feature... KOBELCO Machinery - Stay Close to Customers' Value Creation

Shogo SARUMARU



当社の機械事業は、1915年に往復動圧縮機の製造に端を発して以来、既に110年の歴史を有している。この長い歴史の中で、常にお客様の多様な「つくる」という本質的な課題に寄り添い、独自の機械装置を通してお客様に価値ある解決策を提供してきた。今日まで、このことによりお客様の信頼を獲得し、産業や社会のインフラを支え、人々のより良い日常の実現に貢献してきたと自負している。

当社は、2024年に「稼ぐ力の強化」と「成長追求」と「カーボンニュートラルへの挑戦」の二つを最重要課題として掲げたKOBELCOグループ中期経営計画（2024～2026年度）を公表した。そのなかでこれからの事業戦略を示すと同時に、「KOBELCO-X」と称するAXからGXの7つの変革を設定し、「魅力ある企業への変革」に取り組んでいくことを示した。なかでもAX（AmbideXterity：両利きの経営）とGX（Green Transformation：グリーン・トランスフォーメーション）の二つを事業戦略推進の両輪と定め、全員参加で戦略実行と変革に挑戦することとしている。

その中期経営計画では機械系事業を、「外部環境変化をビジネスチャンスとし、成長を追求する事業」と位置付けている。現在、「新たな需要の捕捉」と「事業の幅の拡大」による成長を目指し、エネルギー転換などの新たなビジネスチャンスの獲得やコト売り・ソリューションビジネスへの事業展開に加えて、保有する資産を最大限活用した新規事業の創出に取り組んでいる。

その戦略実行にあたってのよりどころとすべく、当社機械事業の存在意義をしめすパーパスを、『お客様の「つくる」に寄り添う、他にはない機械装置をとおして、より良い日常を確かなものに。』と定めた。また、2030年の目指す姿を示すアンビションを『個の力の連鎖で「当たり前」から一歩踏み出し、お客様の真のパートナーとなり、セグメントトップを創出し続けるグローバル集団を目指す。』とした。当社機械事業部門は、これまでの事業活動の歴史とこれから目指すべき姿を踏まえて再定義したこのパーパス、アンビションのもと、日々の事業戦略の実行と変革の推進に取り組んでいる。

このような背景のもと、今回の特集では、『お客様の「つくる」に寄り添う KOBELCO の機械装置』と題して、お客様の「より良い製品をつくる」、「より良い環境をつ

くる」、「新しい価値をつくる」の三つの「つくる」に寄り添った当社の機械装置とその技術や取り組みを紹介する。

まず、「より良い製品をつくる」ために取り組んだ事例として、長年にわたりお客様とともに社会課題の解決に向けて歩んできたスクリュやターボなどの各種圧縮機、樹脂およびゴムの混練機、製鉄機械や圧延機と、それらを支える技術を紹介する。これらの機械装置は、お客様の製品製造プロセスを支え、品質向上と効率化に寄与することで、お客様が直面する課題を解決し、お客様の製品の競争力を高める重要な要素となっている。

つぎに、「より良い環境をつくる」という課題を解決するための施策として、カーボンニュートラルや水素社会の実現に向けた取り組みを紹介する。ボイラーや工業炉での利用を想定したハイブリッド型水素ガス供給システム、新たな水電解水素ガス製造装置、水素利用用途で用いられる気化器・熱交換器、様々な環境用途で用いられる圧縮機やヒートポンプに関する記事を掲載した。これらの技術は、お客様とともに持続可能な社会の実現に向けて重要な役割を果たしている。

最後に、「新しい価値をつくる」へ向けた取り組みとして、全個体電池の製造プロセスへの適用を目指したWIP（温間静水圧プレス）装置や、新型PVD（物理蒸着）装置による平滑性に優れた硬質皮膜の開発と応用事例、船舶での活用を想定した低速大推力の直動電動機などを紹介する。また、新しい価値の創造に向けたボトムアップ型の新事業創出活動についても解説する。これらの取り組みは、より幅広いお客様にこれまでにない新しい価値を提供し、ともに未来を切り拓くことを目指している。

当社の機械事業は、これらの製品、技術とソリューションを通じて、お客様のさまざまな「つくる」に寄り添い、ともに成長していくことを目指してきた。当社のエンジニアや研究者たちは日々、新しい技術と製品の開発に取り組み、お客様のニーズに応えるべく努力を重ねている。これからも、当社はお客様との対話を大切にし、人々のより良い日常の実現に貢献することを通じ、パートナーとしての役割を果たしていく所存である。

今後とも、皆様のご支援とご愛顧を賜りますようお願い申し上げます。

(概説)

お客様の「より良い製品をつくる」に寄り添う KOBELCOの機械装置

天野靖士

執行役員 機械事業部門 生産本部長

KOBELCO Machinery – Stay Close to Customers in Creating Better Products

Yasushi AMANO



当社の機械事業は1915年に国産初の往復動式圧縮機を製造して以来、幅広い製品メニューを有する産業機械メーカーへと成長してきた。長い歴史の中でお客様の創造活動に共感し、社会課題の解決に挑むパートナーとして、お客様の「より良い製品をつくる」に寄り添う機械を提供することで産業界の発展に貢献している。

2024年に公表したKOBELCOグループ中期経営計画(2024~2026年度)では、最重要課題として「稼働力の強化」と「成長追求」を掲げている。機械事業部門では「稼働力の強化」のため回転機事業、樹脂事業をコアビジネスとし、海外拠点の拡充・新設によるサービスの拡大を重要施策としている。高砂製作所をマザー工場とし、KIMI (Kobelco Industrial Machinery India:インド)、KWC (Kobelco Wuxi Compressors:中国)、KCA (Kobelco Compressors America:米国)などの海外拠点の生産能力を強化し、グローバルでの生産・販売体制の最適化に取り組んでいる。

今回の特集では、お客様の「より良い製品をつくる」に寄り添う機械および「稼働力の強化」に貢献する機械として、圧縮機、樹脂機械、タイヤ・ゴム機械、製鉄・非鉄圧延機械について紹介する。

当社は、スクリュ式、ターボ式、レシプロ式の圧縮機を製造・販売する総合圧縮機メーカーである。これらの圧縮機は、各種プラント向けに最適な用途で提供することにより、プラントの心臓部として重要な役割を果たしている。また、信頼性と性能の向上を目指して技術開発を進め、多様なニーズにも応えている。圧縮機は「汎用圧縮機」と「汎用圧縮機」に分類され、汎用圧縮機はプロセスガス用に設計しており、汎用圧縮機は空気圧縮機、冷凍機、ヒートポンプなどに使用される。各機種は世界トップレベルの技術を有し、国内外のお客様から高い評価を得ている。本特集では、振動・騒音問題解決のために開発したスクリュ圧縮機のサイレンサ、製造プラントと圧縮機の大規模化ニーズに対応するためのターボ圧縮機大型化の取り組み、汎用圧縮機から新型オイルフリースクリュ圧縮機を紹介する。さらに、これら圧縮機を支える共通技術のひとつとして軸受とシールの性能評価プラットフォームに関しても取り上げる。

樹脂機械は、石油化学工業の進展とともに成長してきた。世界トップクラスのシェアを誇るポリオレフィン製造用大型混練造粒機をはじめ、最新の樹脂流動解析技術を活用し、高性能なプラスチックの製造に適した装置を提供している。本特集では、大型連続混練機LCMシリーズの最大サイズであるLCM-620IMの開発について紹

介する。この装置は、かみ合いロータ技術を初めて商用機に適用し、省エネルギー性能を向上させている。LCM-620IMの開発により、ポリエチレン生産の効率化と省エネルギー化が進み、カーボンニュートラル社会の実現に寄与している。

タイヤ・ゴム機械は、米国からの技術供与を契機として半世紀にわたり世界の自動車・タイヤ業界とともに発展してきた。新型ロータを搭載したゴム混練機を開発し、タイヤ製造の生産性向上に貢献することで、低燃費タイヤの普及に寄与してきた。また、自動車社会の発展と環境問題に対応するため、新たなゴム配合や省資源製造方法の開発に取り組み、次代の自動車産業に貢献している。近年は、環境対応の要求から、タイヤにシリカの使用が増加しており、混練時に発生する反応生成物が混練機内部を腐食させる問題がある。この問題に対応するため、本特集では耐腐食性と耐摩耗性に優れた新しい材料の開発を紹介する。いっぽう、制御面においては、デジタル技術の進展に対応するために、従来の制御システム「タッチパネル+PLC」に代わる、「PC+PLC」を統合した新システムを紹介する。新システムにより、ゴム混練機の操作性と効率が大幅に向上する。今後、AI機能の導入や開発環境の改善などを進め、ゴム混練機の付加価値とお客様満足度の向上を目指していく。

製鉄・非鉄圧延機械は、産業基盤を支える素材の生産設備として、時代の要求に応じて発展してきた。近年の金属系材料の多品種化や高品質化に対応するため、連続鋳造設備や薄板圧延設備などに様々な新技術を導入し、鋳片品質の向上や板反り制御機能の開発に取り組んでいる。国内外のお客様に多数納入されており、多様な素材を高品質かつ効率的に生産するための設備として高い評価を得ている。製品品質の向上や休止期間の最短化などのお客様の様々な要望を具現化してきており、本特集では近年の取り組み事例として、操業を継続しながらの設備更新、圧延効率向上の提案、600 tonf大せん断設備の納入事例を紹介する。これらの取り組みにより、製鉄・非鉄産業の効率化と省エネが進み、環境負荷低減に貢献している。

今回の特集号で紹介する当社の圧縮機ならびに産業機械は、時代とともに変化する社会やお客様のニーズを実現するため、絶え間なく技術開発を積み重ねて進歩してきた。今後も、お客様や社会にとって価値のある新商品・新技術の創出を目指し、技術の研鑽(けんさん)に鋭意取り組み、社会と産業界の発展に貢献していきたいと考えている。

(技術資料)

無給油式スクリュウ圧縮機用サイレンサの設計技術

青山新輔*1・林 雅人*1・高木秀剛*1・菊池政寛*2・山極伊知郎*2・片岡保人*2 (博士(工学))

Design Technologies of Silencer for Oil-free Screw Compressor

Shinsuke AOYAMA・Masato HAYASHI・Shugo TAKAKI・Masahiro KIKUCHI・Ichiro YAMAGIWA・Dr.Yasuto KATAOKA

要旨

カーボンニュートラルの実現に向け、自然エネルギー由来の電力を活用した環境関連設備の需要拡大が見込まれており、自然エネルギーを活用するために生じる設備の負荷変動に対応できる圧縮機が求められている。無給油式スクリュウ圧縮機は、可変速駆動を適用することで、環境関連設備の負荷変動や風量調節・動力削減に対応することができる。しかしながら、可変速駆動によって、圧力脈動が特定の周波数だけでなく、広帯域の周波数で発生するため、対策が難しく、振動・騒音の原因となる。本稿では、無給油式スクリュウ圧縮機の圧力脈動、サイレンサの構成要素の原理と特性、およびサイレンサの設計技術について述べるとともに、広帯域で減音性能を発揮する無給油式スクリュウ圧縮機用サイレンサの開発について紹介する。

Abstract

To realize carbon neutrality, the demand for environmental application facilities that utilizes electricity derived from natural energy is expected to increase, and compressors that can handle the load fluctuations of such equipment are required. By applying a variable speed drive, an oil-free screw compressor can handle the load fluctuations of environment-related equipment, as well as gas capacity control and power reduction.

The variable speed driver, however, generates pressure pulsation at a wide band of frequencies which causes vibration and noise.

This paper describes the pressure pulsation of oil-free screw compressors, the principles and characteristics of silencer components, and the design technology of silencers. Also introduced is the development of a silencer for oil-free screw compressors that exhibits wide-band sound reduction performance.

検索用キーワード

スクリュウ圧縮機, 無給油式, 圧力脈動, サイレンサ, 可変速駆動, 振動・騒音防止

まえがき = 近年、カーボンニュートラルの実現に向け、水素製造設備をはじめとする環境関連設備の設置が検討されており、これらに使用される圧縮機の需要拡大が見込まれる。スクリュウ圧縮機は容積式圧縮機の一つで、幅広いガス種・用途で使用されており、分子量が変動するガスやダストの多いガスにも対応可能、容量調整が容易という特長がある。いっぽうで、スクリュウ圧縮機は吸込・吐出の圧縮機構により高エネルギーの圧力脈動を発生させる。圧縮機から生じた圧力脈動は、圧縮機本体のみならず配管や付属機器を振動させ、大きな騒音源となる場合があり、圧力脈動の低減が重要となる。

そのため、高速で回転し大きな圧力脈動が発生する無給油式スクリュウ圧縮機は、配管部にサイレンサを設けることにより、圧縮機から伝搬する圧力脈動を低減させ、振動・騒音防止を図っている。

本稿では、スクリュウ圧縮機の静音設計技術として、スクリュウ圧縮機から生じる圧力脈動の発生原理、無給油式スクリュウ圧縮機のサイレンサを構成する要素の原理と特性、および設計手法について説明する。

1. スクリュー圧縮機の圧力脈動

スクリュウ圧縮機は図1に示すように雄ロータと雌口

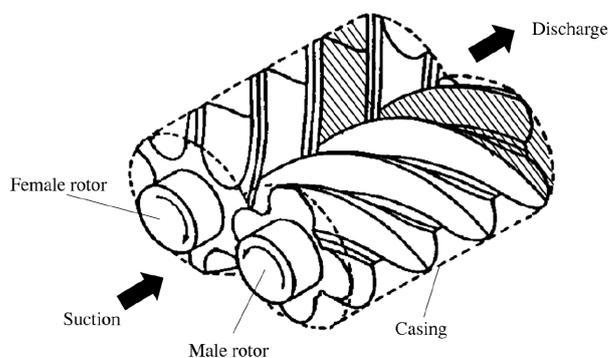


図1 スクリュー圧縮機の圧縮原理

Fig.1 Principle of screw compressor

ータと呼ばれる、大きくねじれた特殊な歯形をもつ2本のロータがわずかな隙間を保って、ケーシング内で回転する。図1の斜線部に示すように、ロータ間の歯溝とケーシングに囲まれた空間の体積がロータの回転とともに変化することにより、ガスの吸込、圧縮、吐出が行われる。この圧縮機構がロータの歯溝ごとに繰り返し行われることにより、スクリュウ圧縮機の吸込および吐出部に周期的な圧力脈動が生じる。

圧力脈動は吸込および吐出部の圧力に生じる変動成分であり、媒質内を微小な圧力変動を生じながら伝搬する

*1 機械事業部門 技術本部 回転機・機器技術部 *2 技術開発本部 機械研究所

音波と同じ振動現象である。以後、吐出部圧力脈動を対象に説明するが、吸込部圧力についても同じである。圧力脈動の変動の大きさを音圧として、音圧の実効値 p は式(1)であらわされる。

$$p = \rho c u \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 p ：音圧の実効値
 ρ ：ガス密度
 c ：音速
 u ：粒子速度の実効値

ここで、式(1)をスクリュウ圧縮機の圧力脈動に置き換えると、粒子速度は各歯溝から吐出される体積速度の合計を、吐出管の断面積で除したものであらわされ、圧力脈動音圧 p の実効値は式(2)となる。

$$p = \rho c \frac{U}{S} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 U ：吐出部の合計体積速度の実効値
 S ：吐出管の断面積

このスクリュウ圧縮機の圧力脈動の変動波形は、雄ロータの歯数と圧縮機の回転数から求まる周波数成分と、その整数倍の周波数成分の周期的波形の複合波となる¹⁾。

ここで、実機試験による吐出脈動音圧測定結果を図2に示す。図2は代表的な無給油式スクリュウ圧縮機である16型で、大気圧の空気を110 kPaGまで昇圧したときの脈動音圧をプロットしている。音圧の評価は、各次数成分の音圧を計算し、通常用いられるdB単位に換算した。

図2の比較結果より、圧力脈動音圧を計算にて精度よく予測できていることが確認できる。なお、3次脈動成分の実測値が高い値となっているが、これは圧縮機吐出部以後の配管などの空間の共鳴特性の影響である。

図2に示すように、スクリュウ圧縮機の脈動音圧は、低周波から高周波まで高い音圧となり、圧縮機本体のみならず配管や付属機器の振動・騒音の要因となる。

2. サイレンサの原理と特性

振動・騒音防止のため、スクリュウ圧縮機の吐出部直後にサイレンサを設け、圧縮機から吐出配管に伝搬する圧力脈動を低減させる。スクリュウ圧縮機のサイレンサは音の吸収、反射、および干渉効果を利用し、圧力脈動として圧縮機から伝搬してくる音響エネルギーを低減する。本章では、サイレンサに用いられている構成要素の基本的原理と特性について説明する。

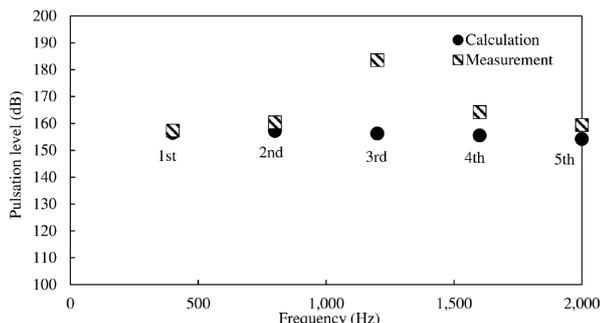


図2 実機試験による吐出脈動音圧の測定結果
 Fig.2 Discharge pulsation level of screw compressor

2.1 膨張室

サイレンサに膨張室を設け、管路を急拡大・縮小させることで、入射音と反射音の干渉現象を生じさせる。膨張室に伝搬してきた音波のうち、平面波として膨張室内を進行する波は、出口端面で一部が入口側へ反射する。膨張室に入射してきた直接音(入射音)と反射音が干渉することで音響エネルギーが増減する。ここで、直接音と反射音が逆位相で干渉して、それぞれの音波を打ち消し合うように膨張室の寸法を調整することで、音響エネルギーを減衰させることができる。膨張室の概略図を図3に示す。ここで、周波数とガスの波長は反比例の関係にあり、周波数が高くなるほどガスの波長は短くなる。スクリュウ圧縮機から生じる圧力脈動成分のうち、ガスの波長が膨張室の内径寸法よりも短くなる高周波音は、平面波として膨張室内を進行しなくなるため、干渉効果が限定的となる。このため高周波音に対しては、膨張室による音響エネルギーの減衰効果も低下する。

2.2 挿入管

サイレンサの管路入口および出口部に挿入管として小径配管を設けることにより、膨張室に管路を挿入した箇所に入射音と反射音の干渉現象を生じさせる。膨張室と同じように、入射音と反射音それぞれの音波を打ち消し合うように、挿入管の寸法を調整することで、音響エネルギーを減衰させることができる。挿入管の概略図を図4に示す。干渉による減衰は、挿入管の長さに応じた特定の周波数に対して高い減衰性能を得られるが、単一周波数成分の減衰効果しか得られない。そのため、広帯域にわたって減衰効果を得たい場合には、複数の挿入管要素を用いる、または後述の吸音材との併用のように、ほかの減音要素と挿入管を組み合わせる用いるのが一般的である。

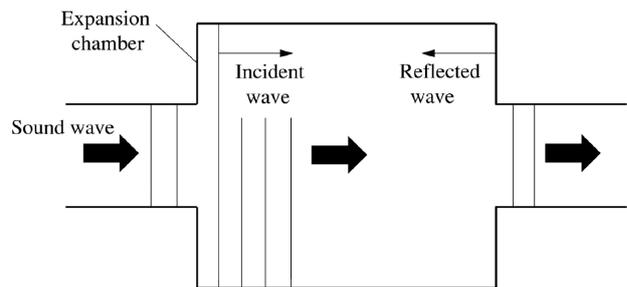


図3 膨張室モデル図
 Fig.3 Model of expansion chamber

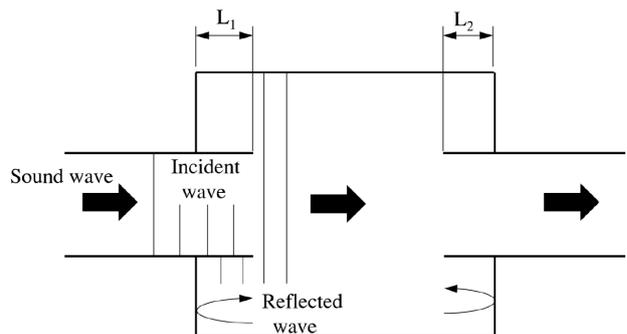


図4 挿入管モデル図
 Fig.4 Model of choke tube

2.3 吸音材

ステンレスウールやロックウールなど多孔質性の材料に音波が伝搬したときに、細かい空隙と繊維との間での流体摩擦および細かい繊維の振動による固体摩擦が生じることによって音響エネルギーを熱エネルギーに変換し減衰させる。サイレンサ内壁に吸音材を張り付ける場合の概略図を図5に示す。吸音材による減衰性能は、吸音材の材質、厚み、充填密度といったパラメータにより決まるが、800 Hz以上の高周波成分に対してとくに高い減衰効果を得ることができる。実際には、吸音材はガス種に応じた材料の選定や使用制限がある。

2.4 多孔板

微細孔を有する多孔板を、背後空気層と呼ばれる空間を仕切り板によって確保したうえで、サイレンサの壁面近傍に設置すると、多孔板の微細孔をガスが周期的に往復運動することにより、微細孔壁面との粘性摩擦が生じ、多孔板に入射した音波の音響エネルギーを減衰させる。また、多孔板前後に圧力差が生じ、微細孔を通過したガスにより、孔後流に流体渦を生じさせてさらに音響エネルギーを減衰させる。多孔板吸音構造の概略図を図6に示す。多孔板による減衰性能は板厚、孔径、開口率や背後空気層厚さといったパラメータにより決まる。実際には、脈動音圧の高い用途では強度上の理由から多孔板の厚みを薄くすることはできないなどの使用制限がある²⁾。

2.5 オリフィス

管路内にオリフィスを配置し、オリフィスを通過したガスにより、オリフィス後流に流体渦を生じさせて音響エネルギーを減衰させる。脈動音圧減衰用のオリフィスの概略図を図7に示す。オリフィスの配置により脈動音圧の減衰効果が得られるが、同時にオリフィス前後で圧力損失も発生する。圧力損失は動力や吐出温度にも影

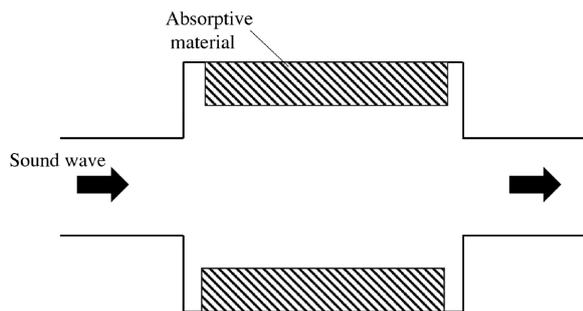


図5 吸音材モデル図
Fig. 5 Model of absorptive material

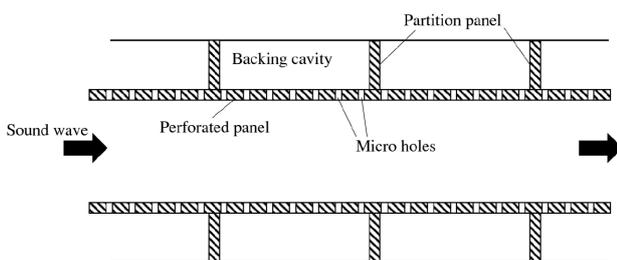


図6 多孔板モデル図
Fig. 6 Model of perforated panel

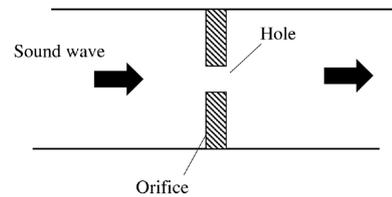


図7 オリフィスモデル図
Fig. 7 Model of orifice plate

響するため、脈動音圧の減衰効果と圧力損失のバランスを考慮しながら、最適な開口率を決定する必要がある。

3. サイレンサの設計技術

当社は前述の構成要素を組み合わせたサイレンサの減音性能を予測する技術・ツールを有しており、ガスの物性、回転数や吐出温度などの運転条件・仕様に合わせて最適なサイレンサを設計している。具体的には以下の流れにて必要減音量を確認し、サイレンサの設計を行う。

- ・圧縮機から生じる吐出脈動音圧 P_i を求める。
- ・API規格にて規定される脈動音圧の許容値 P_{o1} ³⁾、サイレンサ通過後配管で生じる振動および騒音を抑制できる脈動音圧の許容値 P_{o2} および P_{o3} をそれぞれ算出する。
- ・図8に示すように、前述の発生圧力脈動音圧 P_i とサイレンサ通過後の許容脈動音圧 P_{o1} 、 P_{o2} 、 P_{o3} それぞれの差分の内、最も大きい値をサイレンサの必要減音性能とする。
- ・運転条件やお客様の仕様を考慮したうえで、前述のサイレンサ構成要素を適切に組み合わせ、サイレンサの必要減音性能を満足するようにサイレンサ構成・寸法を決定する。

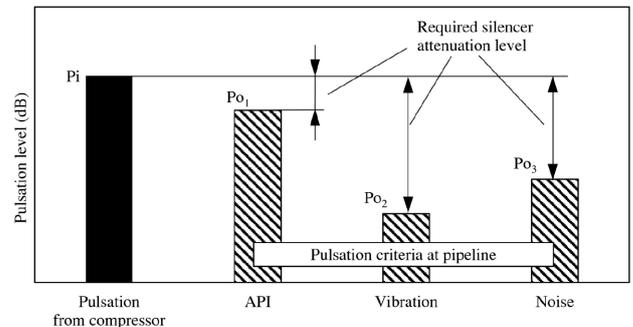


図8 サイレンサ必要減音量
Fig. 8 Required silencer attenuation level

4. 可変速対応の広帯域サイレンサ開発

近年、風量調整・消費動力削減の観点から、無給油式スクリュウ圧縮機に可変速駆動の要求が増えている。可変速駆動の場合、圧縮機回転数の変化により圧力脈動の周波数も変動するため、圧力脈動を低減するサイレンサは定速運転のように特定の周波数の脈動音圧を低減するだけでは不十分で、広帯域にわたる周波数の圧力脈動を低減できる性能が必要となる。このため、当社では可変速駆動に対応可能な、広帯域にわたって減音性能を発揮するサイレンサの設計技術開発に取り組んだ。

4.1 サイレンサの減音性能評価

サイレンサの開発においては、可変速駆動によって特定周波数のみならず、広帯域にわたる周波数で圧力脈動が生じることを想定し、前述の計算による必要減音量を特定の周波数だけでなく、広帯域にわたり設定した。また、必要減音量を設定する際の圧縮機から生じる吐出脈動音圧 P_i および許容値 P_{O1} , P_{O2} , P_{O3} は、脈動音圧 P_i が高く必要減音量が大きいプロセスを想定して設定した。音波の進行方向に垂直な方向、すなわちサイレンサ胴体の径方向に生じる共鳴現象に伴う減音量の低下を抑制するように複数の挿入管を適切に配置するとともに、膨張室効果および挿入管効果による減音効果をサイレンサ全体で積み上げていくことで、可変速駆動を想定した広帯域にわたる必要減音量を運転範囲全域で満足するように、試作サイレンサの設計を行った。図9に開発にて試作したサイレンサを示す。

設計されたサイレンサの性能を確認するため、無給油式スクリュウ圧縮機16型の吐出部に試作サイレンサを取り付け、実機試験によりサイレンサの減音性能を検証した。図10に実機試験風景を示す。実機試験では空気ガスを用いて、6,000 r/min~8,000 r/min まで回転数を変化させ、圧縮機吐出部直後およびサイレンサ後流配管部における脈動音圧を測定し、脈動音圧差をサイレンサによる減音性能として評価した。

実機試験による試作サイレンサの減音性能測定結果を図11に示す。回転数を変化させた実機試験における、各回転数での1次から5次までの圧力脈動周波成分のサイレンサ減音性能を測定結果としてプロットしている。図11より試作したサイレンサが特定の周波数だけでなく、広帯域にわたり高い減音性能を発揮することが確認できた。さらに実機試験による測定結果と当社予測技術による減音性能がよく一致しており、サイレンサの性能予測技術が適切であることを確認できた。

4.2 サイレンサの強度評価

サイレンサの開発において、強度的な信頼性を確保するために、周波数応答解析によるケーススタディ、および実機試験における応力測定を行った。解析に用いたサイレンサの3次元解析モデルを図12に示す。サイレンサ入口を圧縮機本体と接続する都合で圧縮機本体に生じる振動がサイレンサへ伝搬することを想定した固体伝搬加振力と、圧縮機からサイレンサへ流入するガスの圧力脈動によってサイレンサ内部に生じる圧力脈動加振力を加味した解析を行い、サイレンサ各部に生じる応力値を確認した。

試作サイレンサを用いた実機試験において、周波数応答解析にて確認された比較的応力の高い箇所を中心に、サイレンサ各部にひずみゲージを取り付け、運転中のサイレンサに生じる応力の測定を行った。周波数応答解析による応力評価および実機試験での応力測定結果より、溶接部も含めたサイレンサ各部に生じる応力は、静的強度と疲労強度、二つの観点から定めた許容応力値に対し十分な余裕があることが確認できた。

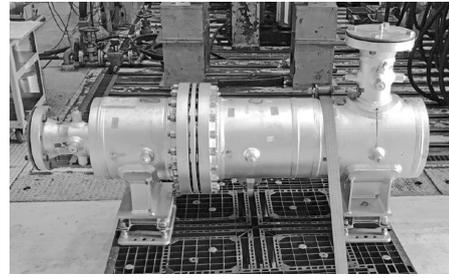


図9 開発したサイレンサの外観
Fig.9 Appearance of test silencer

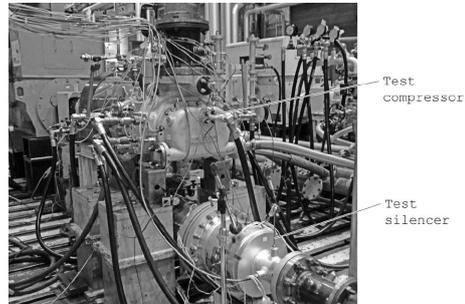


図10 実機試験風景
Fig.10 View of running test

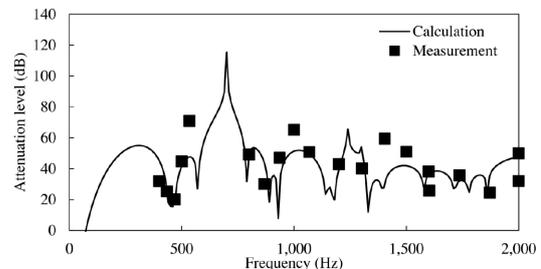


図11 実機試験によるサイレンサ減音性能測定結果
Fig.11 Silencer attenuation level result of running test

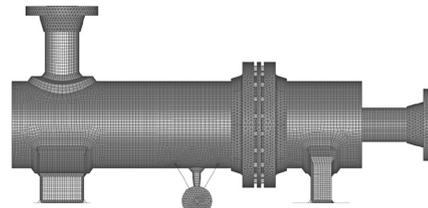


図12 周波数応答解析に用いた3次元モデル
Fig.12 3D model for frequency response analysis

むすび=本稿では、無給油式スクリュウ圧縮機の圧力脈動、サイレンサの設計技術について概説した。また、スクリュウ圧縮機から生じる吐出脈動音圧、およびサイレンサの減音性能を予測する技術をもって、可変速駆動に対応した広帯域にわたり減音性能を発揮するサイレンサを開発した内容について述べた。

当社は、スクリュウ圧縮機の高圧力・高効率・大容量と性能向上を日々追及している。性能追及とあわせて、振動・騒音の予測技術および低減技術についても追及していく必要がある。今後もより高性能の優れた静音設計を実現していく所存である。

参考文献

- 1) 山田 論. 神鋼テクノ技報. 1992, Vol.4, No.7.
- 2) 木村康正ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.3, P.13
- 3) API STANDARD 619 FIFTH EDITION, DECEMBER 2010.

(解説)

市場で高まるターボ圧縮機大型化のニーズに対する当社の取り組み

今藤雄一*1・志賀 司*1・豊田祥寛*1

Kobe Steel's Efforts to Meet the Growing Market Need for Larger Turbo Compressors

Yuichi KONDO・Tsukasa SHIGA・Yoshihiro TOYODA

要旨

近年、各種プラントの大型化が図られる中で、圧縮機をはじめとする基幹設備に対しても大型化が求められている。当社は、EO/EG（エチレンオキシド/エチレングリコール）およびPDH（プロパン脱水素）などの石油・石油化学プラントの分野や、従来からターボ圧縮機の主要用途である空気分離の分野において、圧縮機の大型化や高効率化を求めめるお客様の声に寄り添い、そのニーズに応えるべく取り組みを行っている。本稿では、それらの内容について解説する。

Abstract

In recent years, as various plants have grown in size, there has also been a demand for larger compressors and other key equipment. Kobe Steel has been working to meet the needs of customers who are looking for more extensive and more efficient compressors in oil and petrochemical plants, such as EO/EG (ethylene oxide/ethylene glycol) and PDH (propane dehydrogenation), as well as air separation, which has traditionally been the main application of turbo compressors. This paper discusses the details of these efforts.

検索用キーワード

ターボ圧縮機、大型化、効率化、EO/EG、PDH、エチレンオキシド、エチレングリコール、プロパン脱水素、空気分離

ま え が き = 世界の人口の増加、新興国や開発途上国における経済成長と生活水準の向上に伴い、人々の日常生活や産業活動に欠かせない石油化学製品や酸素、窒素、アルゴンなどの産業ガスの需要は増加し続けている。この需要に応えるため、これらを製造するプラントは、生産効率の向上と生産コストの削減を目指して大型化する傾向にあり、その心臓部として用いられる圧縮機に対しても大型化が求められている。本稿では、主に当社が提供するターボ圧縮機（DHシリーズ、VGシリーズ）のエチレングリコール用途、プロピレン用途、および空気分離装置用途での大型化に対する取り組みについて報告する。

1. エチレングリコールおよびプロピレンの製造プロセス用途への取り組み

1.1 本用途における当社圧縮機の役割

EO/EGとは、自動車の冷却システムなどで使用される不凍液、衣料品用の繊維、ペットボトルなどに使われるエチレングリコール（Ethylene glycol：EG）の原料となるエチレンオキシド（Ethylene oxide：EO）を製造するプロセスであり、現在は、Scientific Design LLC、The Dow Chemical Company、Shell plcの3社の技術によるものが主流となっている。EGの原料となる

EOはエチレンと酸素を触媒反応塔で反応させることで生成される。このEO生成過程における反応効率アップの目的で、未反応ガスを反応塔へ戻すために必要となる循環圧縮機に単段オーバーハング遠心圧縮機が必要であり、当社のDHシリーズが適用されている。

いっぽう、プラスチック・繊維・溶剤・医薬品の製造で利用されるプロピレンを製造するプロセスであるPDH（Propane dehydrogenation、プロパン脱水素）は、多くのエンジニアリングメーカが技術をライセンスしており、Oleflex法、CATOFIN法、STAR法などが主流となっている。これらの一部でヒートポンプ用圧縮機が必要なプロセスがあり、EO/EG用途と同様に当社のDHシリーズが適用可能で、スプリッターやセパレータからオーバーフローしたプロピレンを圧縮し昇温する用途で使用されている。圧縮されたプロピレンの熱は、プロパンの再沸に利用され、プロセス全体のエネルギー効率を向上させている。世界的な脱炭素の流れにもつながる圧縮機であり、今後の需要拡大が見込まれている。

1.2 圧縮機仕様

EO/EG用途での典型的な圧縮機の仕様は、吸込圧力は2 MPaA弱、吸込温度は大気温度、必要となる圧力比（圧縮機の吸込と吐出の絶対圧力の比）は1.2程度である。流量は大型プラントの場合は15万m³/h以上にな

*1 機械事業部門 技術本部 回転機・機器技術部

り、圧縮機のインペラ外径は1mを超え、軸動力も1万kW以上という大型の圧縮機となる。

PDH用途での典型的な圧縮機の仕様は、吸込圧力は1.5 MPaA弱、吸込温度はプロピレンの飽和温度付近、必要となる圧力比は1.8程度である。流量は大型プラントの場合、10万m³/h程度となり、圧縮機のインペラ外径は1mを超え、軸動力としても2万kW以上の大型圧縮機となる。

1.3 圧縮機構造

当社のDHシリーズは、低圧力比で大流量の条件に適した単段のターボ圧縮機である。図1はDHシリーズの対応レンジを示し、図中の太枠で示す大流量の部分がEO/EGおよびPDH用途で要求されるレンジとなる。また、図2に断面図を示す。プロセスガスの漏れを防止する軸封には、タンデムタイプのドライガスシールを適用し、インペラの背面側に組み込まれる。この軸封を基点にインペラ側がプロセスガスの接する領域、ジャーナル軸受側が大気領域となっている。インペラと軸から成るロータを支えるための二つのジャーナル軸受があり、その間に、前述のプロセスガス側の圧力と大気圧の圧力差によって軸方向に発生するスラスト力を支えるためのスラスト軸受が設置される。また、インペラは二つのジャーナル軸受の外側にオーバーハングして配置される構造となっている。

PDH用途についてはターンダウン運転の要求もあるため、流量制御装置であるインレットガイドベーン(IGV)を有している。また、PDH用途で要求される圧力比が従来からのDHシリーズの主要な用途であるポリエチレン/プロピレンプロセスよりも高いため、より高ヘッドタイプのインペラを適用している。

1.4 大型化による主要な課題と対策

両用途ともに、市場の大型化ニーズに合わせて設計流量を大きくするとガスの流路も拡大する必要があるため、ケーシングのサイズも大型になる。いっぽう、従来の設計手法では性能面での最適化を優先しているため、当社圧縮機の優位性は確保できるものの、より大流量の圧縮機に対して従来手法でそのまま相似形の設計を適用した場合にケーシングサイズが大きくなり、コスト面に加えて鋳物の製造上の制約についても課題となるケースも見られた。そこで、インペラ径(D2)とディフューザ出口径(D5)からなるディフューザ比(D5/D2)を従来よりも小さく設定することで、ケーシングのサイズアップを抑える取り組みを実施した。小型化によるケーシング流路内のガスの流れの変化は、性能低下につながることを予想され、これを市場の要求範囲内に抑えることが課題であった。そこで、EO/EGとPDHの両方において、流体解析(Computational Fluid Dynamics: CFD)により数パターンでのディフューザ比の条件で性

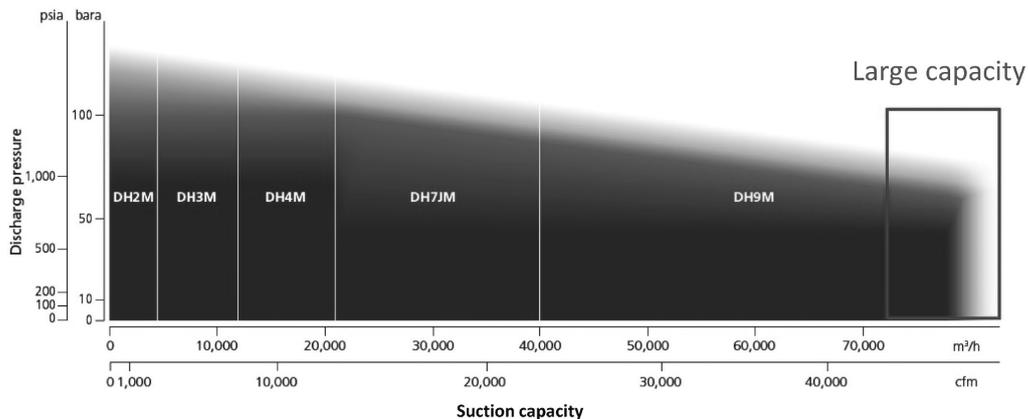


図1 DHシリーズ標準レンジチャート
Fig.1 Standard range chart for DH series

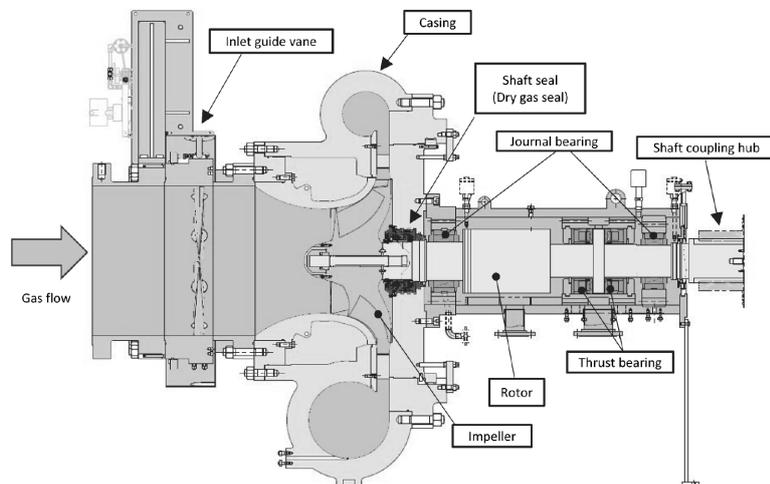


図2 DHシリーズ断面図
Fig.2 Typical sectional drawing of DH series

能への影響を予測した。さらに、それぞれの縮小モデルの実機を製作して性能測定を行った。試験設備および縮小モデルのケーシング外観を図3に示す。これらの結果より、小型化による性能への影響がいずれのパターンにおいても想定範囲内であることを確認できたことから、より小型化したパターンを採用することとした。さらに、実測値とCFDでの計算値の誤差として、効率で±1ポイント以下と良好な精度が得られたことも確認した。

これにより、市場で必要とされる性能を保ちながら、ケーシングの重量アップを従来設計のベースよりも30%程度抑えることに成功し、お客様のプラントサイズの大型化の要望に応えることができた。図4に従来手法と小型化したモデルのケーシングサイズの比較を示す。

ケーシングのほかにも、流量増加に伴う大動力化に対して、増加するトルクを伝達するための軸とインペラの間の締結部分の強度、サイズアップするインペラ径や軸径の材料強度など、要素ごとに確認を行い、要求される条件を満足するよう設計を行った。また、軸径が大き

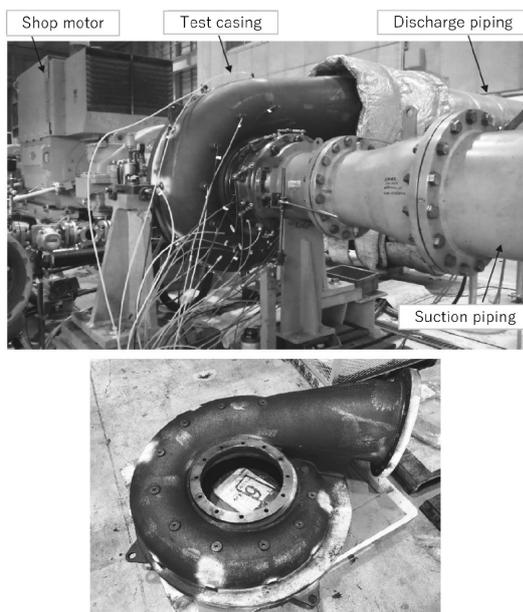


図3 試験設備および縮小モデルケーシング外観
Fig.3 Overview of test facility and scaled down casing

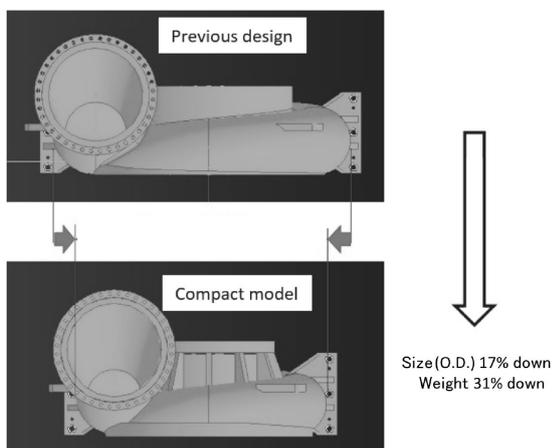


図4 ケーシングサイズの比較
Fig.4 Comparison of compressor casing size

なることでドライガスシールの径も大きくなり、プロセスガスから圧縮機ロータが受けるスラスト力が大きくなる。とくに、お客様から、有圧状態からの圧縮機の起動を求められる場合は、起動時のガススラスト力による影響を起動トルクに考慮して、駆動機の選定を行っている。

また、大型機のメンテナンスには作業時間を要するため、DHシリーズは、とくにメンテナンス頻度の高い軸封や軸受部分を含む圧縮機ロータ組立品を圧縮機のカップリング側から一体での取り外しが可能な構造としている。本用途の小型化ケーシングを適用した圧縮機についても同様の構造を採用しており、圧縮機ケーシングに接続される40インチ以上にもなる大口徑の吸込・吐出配管を取り外すことなく、圧縮機主要部のメンテナンスを可能としている。

くわえて、インペラサイズが大きくなり重量が増加すると、ロータ組立品の重心が相対的にインペラ側に寄ることになるが、メンテナンスなどでロータを単独で保持する際に転倒することがないようにロータ形状を調整し、軸受間に重心位置がくるように設計している。

とくに、PDH用途では大流量かつガスの比重も大きい条件のため、IGVの動作に必要な操作力やガイドベーン自身にかかる応力が大きくなる。IGVは空圧式のアクチュエータで操作するが、その動力源として、お客様で準備される計装空気の最低圧力の条件において、運転に必要な操作力を発揮できるアクチュエータを選定している。

図5、図6に本用途で納入した圧縮機の外観写真を示す。



図5 EO/EG用ターボ圧縮機
Fig.5 Centrifugal compressor for EO/EG application



図6 PDH用ターボ圧縮機
Fig.6 Centrifugal compressor for PDH application

2. 空気分離用途への取り組み

2.1 本用途における当社圧縮機の役割

空気分離は、空気を主に構成する酸素、窒素、アルゴンを分離して取り出す技術である。その中で、深冷分離法は、空気を極低温まで冷却し、液化させてから蒸留によって分離する技術であり、最初のステップとして空気を圧縮するために、Main Air Compressor (MAC) が必要になる。当社では、本用途に増速機内蔵型ターボ圧縮機のVGシリーズを適用している。以前にも大型化の開発を実施¹⁾していたが、競争の激しい市場であることから、価格面および効率面のさらなる競争力アップのため、ケーシングとインペラの小型・高効率化に取り組んだ。

2.2 圧縮機仕様

典型的なMACの仕様として、大気圧から0.5 MPaGまでの大気（空気）の昇圧が要求される。流量は空気分離装置のサイズによって異なるが、図7に示すVGシリーズの対応レンジのうち、とくに吸込流量が太枠で示す30万Nm³/hから40万Nm³/hとなる大型機で、ケーシングとインペラの小型・高効率化の効果が発揮される。図8に示す同用途での当社が納入した圧縮機の流量の推移にも現れているように、近年はこのレンジの大型機のニーズが高まっている。

2.3 圧縮機の構造

従来から省エネルギーや省スペースのメリットが評価されており、増速機内蔵型の遠心圧縮機が適用されている。図9に本機の断面図を示す。ドライバと直結して低速回転しているブルギアの周囲に、両端もしくは一端にインペラを保持して高速回転するピニオン軸を配置することで、各インペラの最適な回転数を選定できる。また、インペラごとにケーシングが分かれているため、各ケーシングの吐出部にガス冷却器を設置して中間冷却をできることが高効率の理由の一つである。一軸多段型遠心圧縮機は、一般的に増速機を別置きとするが、本機では増速機と一体化した内蔵構造とすることにより、省スペースを実現しているのも特徴の一つである。

2.4 大型化による主要な課題と対策

前述したEO/EGやPDHと同様に、ケーシングの大型化は製造面およびコスト面が課題となる。内蔵増速機の軸中心間距離は、増速機に直接取りつく複数の圧縮機のケーシング同士が干渉しないように考慮して決定するため、ケーシングの外径を小型化することができれば、増速機の小型化にも寄与することが可能である。また、空気分離装置においては、MACの消費電力がプラント全体の電力消費に大きな影響を与えるため、MACの効率はお客様がMACを選定する際の重要な評価点の一つとなっている。さらに、大型化することで電力消費量の絶対値が増加し、効率の重要性が一層高まっている。このような背景から、当社では従来のインペラに改良を加え、大型化するプラントにおいて、より競争力を発揮するための取り組みを行った。図10に改良型インペラの外観写真を示す。結果として、図11に示すとおり、同じ流量・ヘッド条件で設計した従来のインペラ¹⁾に比べて、実際の運転で使用されることが多い小流量側の領域において最大3ポイントの効率向上を達成するとともに、インペラサイズを10%縮小することに成功した。図12に改良型インペラを採用して製作した圧縮機の写真を示す。

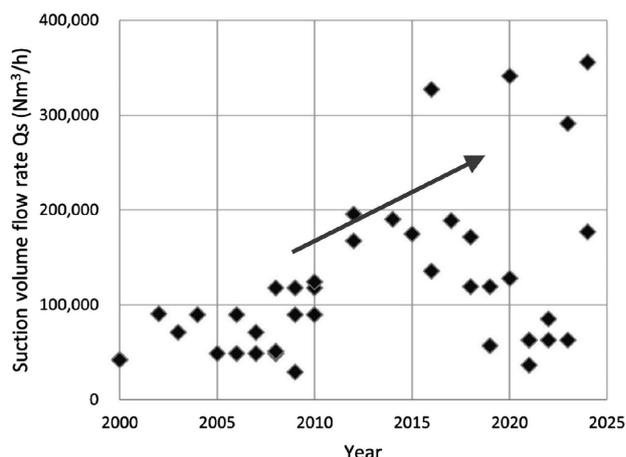


図8 当社が納入した空気分離（ASU）用途向けVGシリーズの流量の推移

Fig. 8 Trend of flow rate of VG series for ASU application

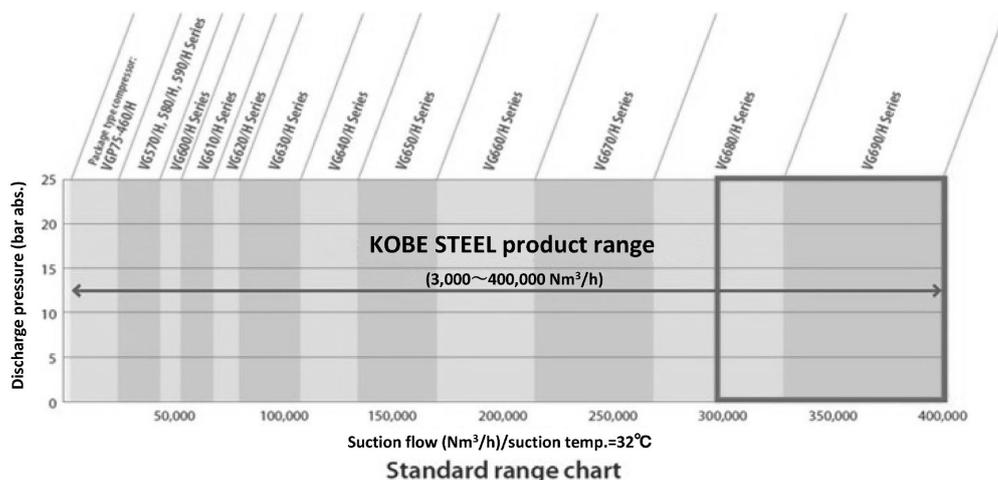


図7 VGシリーズ標準レンジチャート

Fig. 7 Standard range chart for VG series

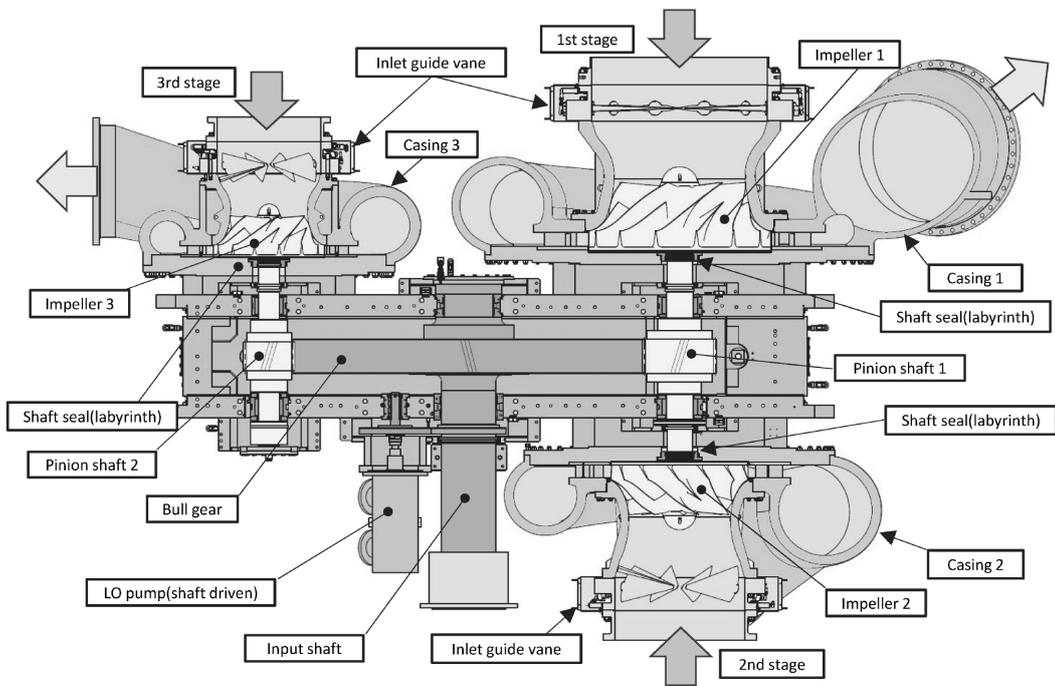


図9 VGシリーズ断面図

Fig.9 Sectional drawing of VG series



図10 改良型インペラ

Fig.10 Improved impeller

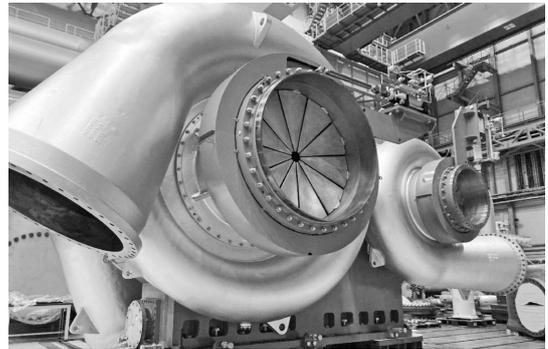


図12 改良型インペラ採用のVGシリーズ

Fig.12 VG series with improved impeller

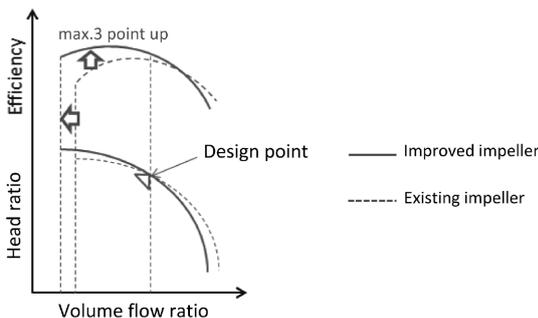


図11 従来インペラと改良型インペラの性能比較

Fig.11 Comparison of efficiency/head between existing and improved impeller

いっぽう、圧縮機の大型化に伴って、内蔵増速機やガス冷却器、潤滑油ユニットなどの付帯機器についても大型化とコストダウンが求められる。それぞれ圧縮機システムにとって必要不可欠なアイテムであり、品質・納期・コスト面でお客様および当社の要求を満足して安定的に供給できるサプライヤの確保は重要なポイントとなる。このため、当社では付帯機器製作の対応が可能な海外サプライヤを新規開拓・採用し、設計・製造・品質管理面

の教育も行うことで、サプライヤの能力向上にも努めている。

2.5 大型増速機内蔵機の他用途への適用拡大

製鉄所での省エネルギー、二酸化炭素排出量低減を実現するため、製鉄過程で発生する高炉ガス (Blast Furnace Gas : BFG) やコークス炉ガス (Coke Oven Gas : COG) などの比較的発熱量の低い副生ガスと都市ガスを燃料とするガスタービン (GT) を利用したコンバインドサイクル発電設備の設置が鉄鋼各社で計画・実行されている。従来、GTへ副生ガスを供給するための副生ガス圧縮機には一軸型のターボ圧縮機が用いられてきたが、当社ではほかのガス用途での経験も活かし、2.3で述べたインペラ回転数の最適化と段間へのガス冷却器設置による高効率化が実現可能である特徴をもつ大型増速機内蔵機の適用に取り組んできた。

本用途での典型的な圧縮機の仕様は、吸込圧力は大気圧、吸込温度は大気温度付近、必要な圧力比は25程度である。流量はGT側の要求によるが、15万Nm³/h程度となり、圧縮機としては中間冷却を含んだ六段、一段インペラ外径は1mを超え、軸動力としても2万kW以上

の大型圧縮機となる。

副生ガスには、可燃性ガスに加え、腐食性成分も含まれることから、圧縮機ケーシングには、ステンレス鋳鋼、もしくは内面に耐腐食性のコーティングを施工した炭素鋼を使用し、インペラを含む回転体にも同様のコーティングを施工するなどの対応を行っている。また、軸封には、ドライガスシールもしくはカーボンシールを採用し、圧縮機ケーシングから外部へのプロセスガス漏れを防止している。本用途では、GTや発電機側の運転条件によって、圧縮機吐出圧力の変動幅の制約や緊急停止時の挙動などにプロセス側の要求があるため、圧縮機を含むシステムの動的シミュレーションを行い、各制御弁の仕様などを選定することで、動作設定の妥当性を評価し、最適化を行っている。²⁾

図13に本用途で納入した圧縮機の写真を示す。

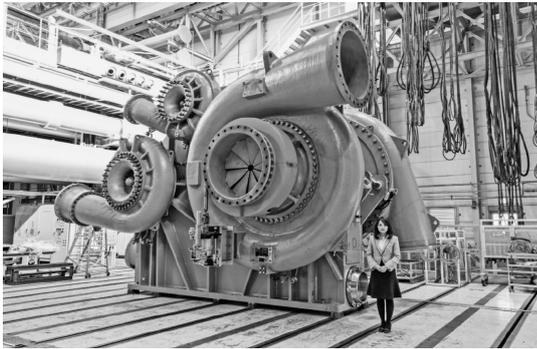


図13 副生ガス圧縮機

Fig.13 Compressor for blast furnace gas application

むすび= EO/EG, PDHおよび空気分離, さらに高炉副生ガスの用途において, 近年の大型プラントの需要に応えるべく, 当社は圧縮機の大型化・高効率化の課題解決に向けて, 積極的に取り組んできた。これらの分野における技術革新と効率向上を目指し, 当社は最先端の圧縮機を開発し続けている。

市場のニーズを的確に把握し, お客様のご要望に寄り添って適切な圧縮機を提供し続けることは, 当社の最も重要な使命の一つである。今後も, お客様の信頼と満足を第一に考え, 常に革新と進化を追求する姿勢を持ち続けることが, お客様に寄り添う鍵であると確信している。

参考文献

- 1) 佐伯圭一ほか, R&D神戸製鋼技報, 2018, Vol.67, No.2, p.68-71.
- 2) 北山伸二ほか, R&D神戸製鋼技報, 2018, Vol.67, No.2, p.101-105.

(技術資料)

新型オイルフリースクリュー圧縮機「Emeraude-ALE™」 ALE IVシリーズ 55~120 kWの紹介

木内 優*1

Introduction of The New Oil-free Screw Compressor “Emeraude-ALE™” ALE IV series 55-120 kW

Suguru KIUCHI

要旨

近年、世界的に一層の省エネルギー化、低炭素化の機運が高まっている。コベルコ・コンプレッサ(株)では従来から省エネルギー性を重視したオイルフリースクリュー圧縮機ALEシリーズを販売してきており、このたび、ALE IVシリーズの55~120 kW機を開発した。従来機と比較し、高効率モータの採用や圧力損失低減などの省エネルギー性の向上に加え、インバータ機のラインアップ拡充、ドライヤ内蔵モデルなどのユーザビリティの向上を実現した。本稿では、今回開発した圧縮機的主要特徴と技術について紹介する。

Abstract

The momentum for further energy saving and low carbonization has increased worldwide in recent years. KOBELCO COMPRESSORS CORPORATION has been selling oil-free screw compressors, ALE series, that emphasize energy saving, and has now developed the series of 55 to 120 kW. Compared with the previous model, the new model has improved energy-saving performance by adopting a high-efficiency motor and reduced pressure loss. It has also enhanced usability, such as lineup expansion of inverter machines and dryer built-in models. This paper introduces the main features and technology of the newly developed compressor.

検索用キーワード

スクリュー圧縮機, オイルフリー, エメロード, ALE, 省エネルギー, IE5, インバータ, クラスゼロ, ワイドレンジ制御

ま え が き = 空気圧縮機の消費電力は一般的な工場において全体の20~25%を占めており、日本の総電力量の5%に達すると言われている。近年、世界的に省エネルギー化と低炭素化の機運が高まっており、消費電力量の多い空気圧縮機の省エネルギー化は必要不可欠である。一部の国では空気圧縮機に対して、省エネルギー等級表示の義務化が進んでおり、例えば、中国では「エネルギーラベル制度」が導入されるなど、空気圧縮機の製品に対してエネルギー効率等級の表示が義務付けられている。

コベルコ・コンプレッサ(株) (以下、当社という)の主力製品であるオイルフリースクリュー圧縮機のEmeraude-ALE™^{注1)} (エメロード-エーエルイー) シリーズは、省エネルギー性能および環境性能を重視したモデルであり、1997年にALE Iシリーズの販売を開始した。その後、ALE IIシリーズ、ALE IIIシリーズ (以下、従来機という) を販売し、2016年以降、クラス最高の省エネルギー性能を追求したALE IVシリーズを順次開発、132~400 kW機をラインアップして販売してきた。

当社はこのたび、ALE IVシリーズの55~120 kW機 (以下、新型機という) を開発した。本稿ではこの新型機に

ついて紹介する。

1. 製品コンセプトとラインアップ

ALE IVシリーズはお客様の省エネルギー改善、安定操業に貢献するため、「高性能」、「高品質」に加え、「静音性」や「耐環境性」を製品コンセプトとして開発している。

新型機の外観、内観 (空冷式、水冷式) をそれぞれ図1~図3に示す。外観はALE IVシリーズとして統一感を持たせており、製品コンセプトを反映して高級感、硬質感のあるデザインとした。また、圧縮機ユニット内



図1 新型機の外観

Fig.1 Exterior design of new model

脚注1) ALEは当社の登録商標である。

Emeraudeは当社の登録商標である。

*1 コベルコ・コンプレッサ(株) 播磨事業所 技術・生産本部 技術部 (現 コベルコ・コンプレッサ(株) 播磨事業所 技術本部 商品開発部)

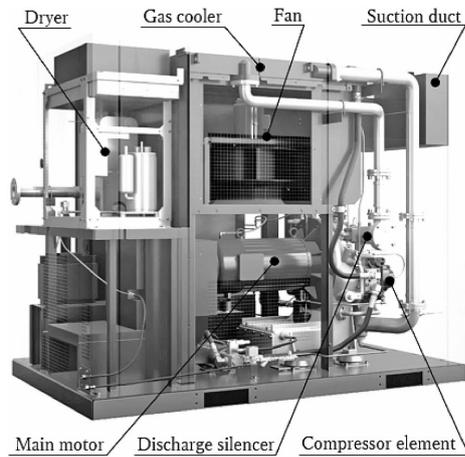


図2 新型機の内観（空冷式）

Fig.2 Interior design of new model (air-cooled type)

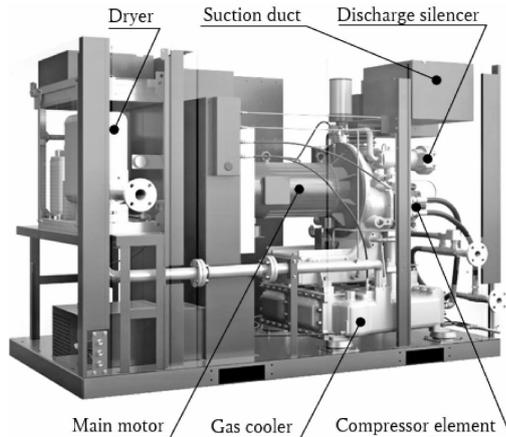


図3 新型機の内観（水冷式）

Fig.3 Interior design of new model (water-cooled type)

表1 新型機のラインアップ
Table 1 Lineup of new model

Model (kW)	Discharge pressure (MPa)	Air-cooled		Water-cooled	
		Std	Inverter	Std	Inverter
55※1	0.75	●	●	●	●
	0.86	●	●	●	●
	1.04※2	●	-	●	●
75※1	0.75	●	●	●	●
	0.86	●	●	●	●
	1.04※2	●	●	●	●
75F※3	0.75	●	●	●	●
	0.86	-	-	-	●
	1.04※2	-	-	-	-
90	0.75	●	-	●	-
	0.86	●	-	●	-
	1.04※2	●	-	●	-
100	0.75	●	●	●	●
	0.86	●	●	●	●
	1.04※2	●	●	●	●
120	0.75	●	-	●	-
	0.86	●	-	●	-
	1.04	-	-	●	-

※1 This models include integrated refrigerated dryer.

※2 Air-cooled type is 1.00.

※3 The compressor elements of ALE75F are different from ALE75.

部は圧縮機本体とガスクーラ、メインモータ、吐出サイレンサなど、当社の技術力を最大限に活かした機器から構成されている。

新型機では、お客様のさまざまなニーズに応えられる

よう、従来機にはなかったドライヤ内蔵モデル（図2、図3）や55 kWのインバータ機、120 kWの0.75 MPa仕様、増風機能を追加するなど、ラインアップを拡充している（表1）。

2. 製品の特長^{1), 2)}

新型機は省エネルギー性能やユーザビリティの向上に積極的に取り組んだ製品である。本章では、省エネルギー性能とユーザビリティの向上に分類し、製品の特長を紹介する。

2.1 省エネルギー性能の向上

圧縮機を構成する機器の性能向上や圧力損失の低減などにより、従来機と比較して大幅に比エネルギー（単位吐出空気量あたりの消費電力）を改善し、クラス最高の比エネルギーを達成した（図4）。

2.1.1 メインモータの高効率化

新型機に搭載しているモータは、従来機と比較し、定速機、インバータ機ともに効率が向上している。とくにインバータ機のメインモータは、従来機同様、回転数制御によるあらゆる負荷変動に対応し、低負荷時の発熱ロスが少ない永久磁石（IPM）モータ（IE5^{注2)}相当）を搭載しており、全負荷時の省エネルギー性能向上だけでなく、部分負荷時の性能も向上している（図5）。

2.1.2 圧力損失の低減

空冷機では、クーラ配置の見直しによる冷却風の低温化と配管レイアウトの工夫を行った結果、従来機の2パス構造から同等のユニットサイズのまま新型機で1パス構造を採用することが可能となった（図6）。この変更により、圧力損失は従来機と比較して約70%減少し、大幅な性能向上が実現された。さらに、圧力損失の低減に加え、冷却ファンに大型ターボファンを採用し、ファンインバータによる適正な制御を行うことにより、冷却用ファンの動力も従来機と比較して約30%低減することが可能となり、圧縮機吐出温度を低減することもできた。

水冷機では、ガスクーラに従来機と同様のプレートフィン式熱交換器（図7）を採用した。このクーラは当社オリジナル設計のため、圧縮機本体との出入口配管を最短距離で繋ぐことができ、圧力損失を極限まで減らしている。また、プレートフィン式熱交換器はシェル&チューブ式と比較しても圧力損失が小さいことが特徴であり、従来機同等の省エネルギー性能を有している。

2.2 ユーザビリティの向上

2.1節で述べた省エネルギー性能の向上に加えて、お客様の使用性、作業環境の向上を目指し、ユーザビリティの改善にも注力した。

2.2.1 水冷ガスクーラの耐久性向上

従来機の水冷ガスクーラではチューブの材質に銅を採用していたが、新型機ではチューブの材質をステンレスとし、耐食性、耐久性を向上させている。いっぽうステ

脚注2) IEC（国際電気標準会議）によって定められたモータ効率等級で、IE5は最高等級（IEC TS 60034-30-2:2016）である。

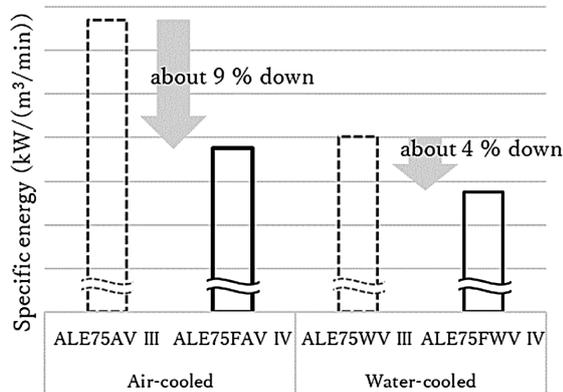


図4 従来機と新型機の比エネルギーの比較

Fig.4 Comparison of specific energy between previous and new models

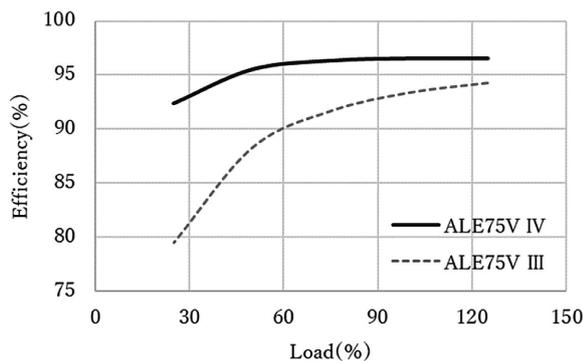


図5 IPMモータ効率の違い

Fig.5 Differences in IPM motor efficiency

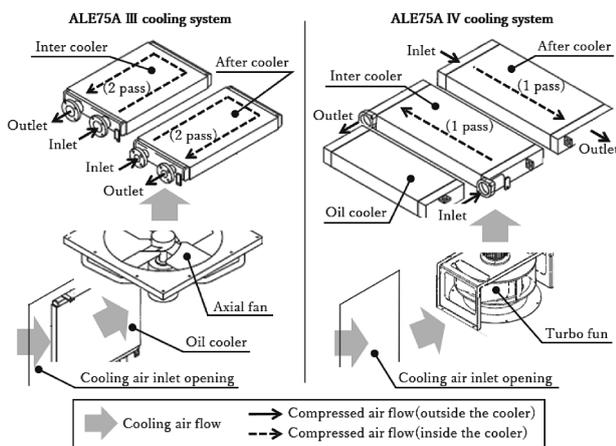


図6 従来機と新型機の空冷システムの違い

Fig.6 Differences between the air-cooling systems of previous and new model

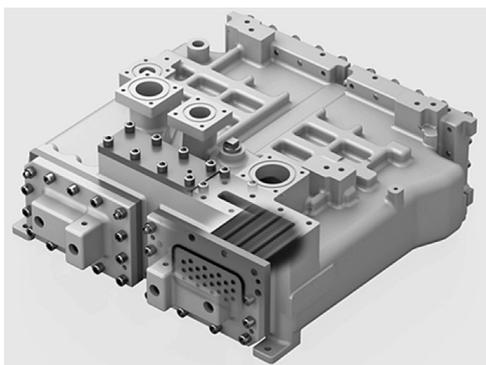


図7 水冷ガスクーラ (プレートフィン式)
Fig.7 Water-cooled gas cooler (plate-fin type)

ステンチューブの方が銅チューブに比べて冷却性能が悪くなるが、新型機ではフィンのピッチや枚数、チューブの拡管率などの調整により従来機同等の冷却性能を達成している。

2.2.2 ワイドレンジ制御 (インバータ機)

ワイドレンジ制御とは、使用吐出圧力に応じて吐出空気量を増量する制御技術である (図8)。従来機では、ユーザの吐出圧力が低くても、スクリーロータの回転数が変わらないため、モータ負荷は軽減され、モータに余力がある状態となっていた。新型機では、このモータの余力に着目し、余力分だけスクリーロータの回転数を上昇させ、より多くの圧縮空気を提供することができる。

これにより、最大吐出空気量は従来機と比較して約10%増加することとなり、ユーザの使用状況によっては、1サイズ小さい圧縮機で必要空気量をカバーできる可能性がある。また、吐出圧力が不足した状態から起動させると、ワイドレンジ制御を搭載することで、必要圧力に達するまでの昇圧時間が従来機と比較して約10%短縮される。

2.2.3 コントローラ

コントローラにはフルカラータッチ液晶モニタを搭載した。従来機と比べ、操作性、視認性が向上しており、圧縮機の運転状況確認や各種設定 (圧力設定やウィークリータイム設定など) が容易に行えるようになった。

台数制御機能においては、従来機は最大2台までの交互運転しか対応できなかったが、新型機は最大6台まで接続可能となり、負荷に応じた容量制御運転を行い、不要な圧縮機は停止できるなど、省エネルギーにも貢献できる機能を標準搭載している。

また、0.5秒以内の瞬時停電が発生しても圧縮機を停止せずに運転を継続する瞬停保護機能を従来から継承し、計画外ダウンタイムを防ぎ、生産設備への影響を最小限に抑えることができる。

2.2.4 静音性

スクリー圧縮機では、雄ロータの回転数と歯数の積を基本周波数とする圧力脈動が発生する。とくにオイルフリースクリー圧縮機は、油冷式と比較して本体回転数が高く、人間の耳にとって耳障りな高周波成分 (高周波音) が主となる。

新型機では、この高周波音を幅広い周波数帯に対して

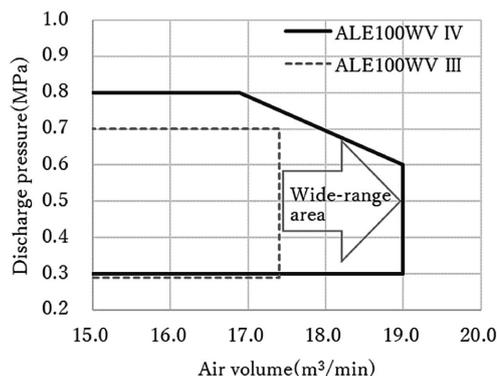


図8 ワイドレンジ制御
Fig.8 Wide-range control

低減するため、拡張型の吐出サイレンサ（図9）を搭載している。このサイレンサは、従来機に搭載している干渉型の吐出サイレンサ（図10）と比較して、幅広い周波数帯に対して減音効果（図11）があるため、インバータ機の回転数制御により周波数が変化する音にも有効なサイレンサとなる。また、防音カバーは、従来機では

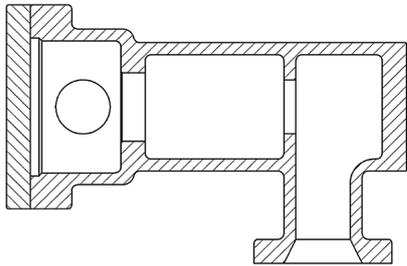


図9 拡張型サイレンサ（断面モデル）
Fig.9 Expansion type silencer (sectional model)

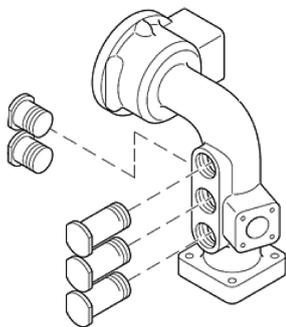


図10 干渉型サイレンサのモデル
Fig.10 Interference type silencer

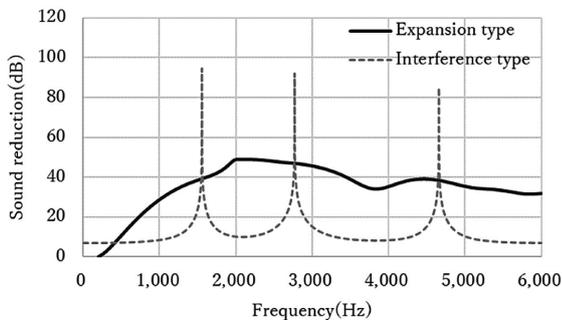


図11 拡張型と干渉型サイレンサの減音量の違い
Fig.11 Difference in sound reduction between expansion and interference type silencer

複数枚のパネルをつなぎ合わせた構成となっており、隙間から音漏れする構造であったが、新型機では1枚物の大型扉とし、隙間を無くすことにより、従来機と比較して最大約5 dBの騒音を低減することができた。

2.2.5 オイル等級クラスゼロ

オイルフリー圧縮機は吐出された圧縮空気中に油分を含まないため、油分除去用フィルタやドレン油水分離装置などが不要となり、メンテナンス費用や環境負荷の低減が可能となる。

ALEシリーズでは、より安心できる高品質な空気を供給するため、従来シリーズより「ISO8573-1 圧縮空気 第1部:汚染物質および清浄等級」で規定される「圧縮空気に関するオイル総濃度の品質等級が0等級(class-0)」(以下、クラスゼロという)の認証を国際的な第三者機関(TÜV: Technischer Überwachungs-Verein Rheinland)より取得している。ALE IVシリーズでもこのクラスゼロを継承しており、最高品質の清浄度の圧縮空気を要求するお客様のニーズに答えている。

むすび=今回紹介したエメロードALE IVシリーズ55~120 kW機は、従来機にはなかったドライヤ内蔵モデルをラインアップに追加するなど、お客様のさまざまなニーズに応えられるよう開発した製品である。本稿で紹介した以外にも、当社ではさまざまな省エネルギー改善のための周辺機器やサービスを提供している。

当社は今後も、時代の変化やお客様のニーズに対応した製品を開発し、さらなる省エネルギー化、低炭素化に貢献する所存である。

参考文献

- 1) 田所真樹. 機関誌「産業機械」. 2024年, 9月号, No.887, P.13-16.
- 2) 木内 優. 油圧・空気圧技術雑誌「油空圧技術」. 2024年, 10月号, 797, Vol.63, No.11, P.13-16.

(論文)

ジャーナル軸受とラビリンズシールの性能評価プラットフォームの開発

馬場祥孝*1・安倍慎一郎*1・森中俊輔*2

Development of Performance Evaluation Platforms for Journal Bearings and Labyrinth Seals

Yoshitaka BABA・Shinichiro ABE・Shunsuke MORINAKA

要旨

ターボ圧縮機やスクリュ圧縮機に使用されるジャーナル軸受とラビリンズシールは回転機械が所定の性能と安定した運転を実現するために必要となる重要機械要素である。そのため、設計段階でその性能（静特性と動特性）を正確に予測する必要がある。当社は、実験と解析技術を組み合わせたジャーナル軸受とラビリンズシールの性能評価プラットフォームを開発し、製品設計と技術開発に活用している。このプラットフォームは、CFDなどの高度解析技術の利用だけでなく、サロゲートモデルを用いた軸受性能計算機能や一次元シール性能計算ツールが含まれており、計算コストを削減しながら高精度な性能予測を実現し、圧縮機の信頼性向上と、設計および開発業務の効率化に貢献している。

Abstract

Journal bearings and labyrinth seals used in turbo compressors and screw compressors are critical machine components that ensure the rotating machinery achieve the specified performance and stable operation. For this reason, it is necessary to accurately predict their performance (static characteristics and dynamic characteristics) at the design stage. Kobe Steel has developed a performance evaluation platforms for journal bearings and labyrinth seals, combining experiments and analysis technology, and is exploiting it in product design and technology development. This platform uses advanced analysis technology such as CFD and further includes bearing performance calculation functions based on surrogate models and one-dimensional seal performance calculation tool, achieving highly accurate performance prediction while reducing calculation costs, contributing to improving compressor reliability, and streamlining design and development work.

検索用キーワード

ジャーナル軸受, ラビリンズシール, 静特性, 動特性, 電磁加振実験, 熱流体潤滑解析, CFD解析, サロゲートモデル, Bulk Flow Model, 性能計算ツール, 圧縮機

まえがき = ターボ圧縮機やスクリュ圧縮機に使用される軸受は、高速回転するロータを支える重要機械要素で、油潤滑軸受を採用することが多い。これらの圧縮機は大容量化、高圧化、小型高速化が進んでおり、高周速高面圧など様々な軸受支持条件での安定した運転が求められる。また、圧縮ガスの漏れ流れを低減させる目的でラビリンズシールが広く使われている。圧縮機の高圧化に伴って、シールで発生する流体力が増大し、ロータ振動を不安定化させるリスクが高まっており、その発生防止は設計段階での重要な検討事項のひとつである。以上述べたように、圧縮機の信頼性と性能を担保し、コストとのバランスが取れた競争力のある製品設計を行うために、軸受とラビリンズシール性能（静特性と動特性）を短時間で正確に予測する技術がますます重要になっている。

当社では圧縮機の重要機械要素であるジャーナル軸受とラビリンズシールの性能を評価するプラットフォーム（実験、解析評価技術）を開発し、設計および製品開発に活用している。本稿では、その概要について紹介する。

1. ジャーナル軸受評価プラットフォーム

ジャーナル軸受評価プラットフォームは、実験評価技術と性能解析技術、プラットフォームを活用した設計ツールから構成される。本章ではその構成技術について紹介する。

1.1 実験評価技術

図1に軸受試験装置の概要図を示す。この試験装置は可変速モータで駆動され、最高回転速度は30,000 rpmである。試験軸受の軸受ハウジング下部に静荷重を負荷する油圧シリンダ機構を有するとともに、軸受ハウジングの周囲四か所に非接触で動荷重を付与する電磁加振装置が配置されている。加振装置は四つの電磁石が独立に動作可能であり、試験軸受に対して一方向や円軌道の加振を行うことができる。軸受の動特性を算出するためのモデルは図2となり、その運動方程式は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{y}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{1x} & 0 \\ 0 & k_{1y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{2xx} & k_{2xy} \\ k_{2yx} & k_{2yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 - x_2 \\ y_1 - y_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \cdots (1)$$

*1 機械事業部門 技術本部 技術企画部 *2 技術開発本部 機械研究所

$$\begin{bmatrix} m_2 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_2 \\ \ddot{y}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{3x} & 0 \\ 0 & k_{3y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{2xx} & k_{2xy} \\ k_{2yx} & k_{2yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 - x_2 \\ y_1 - y_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -F_x \\ -F_y \end{Bmatrix} \dots (2)$$

ここで、 k_{1x} , k_{1y} , $k_{2xx} \sim k_{2yy}$, k_{3x} , k_{3y} は減衰を含む複素剛性とする。

ロータ x_1 , y_1 と軸受ハウジング x_2 , y_2 の相対変位 $x_d (= x_1 - x_2)$, $y_d (= y_1 - y_2)$ を代入して整理すると、

$$\begin{bmatrix} k_{2xx} & k_{2xy} \\ k_{2yx} & k_{2yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_d \\ y_d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} m_2 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_2 \\ \ddot{y}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{3x} & 0 \\ 0 & k_{3y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{Bmatrix} \dots (3)$$

となる。軸受ハウジングの支持剛性を k_3 を k_2 より十分に小さくすることにより、右辺の第3項を省略でき、

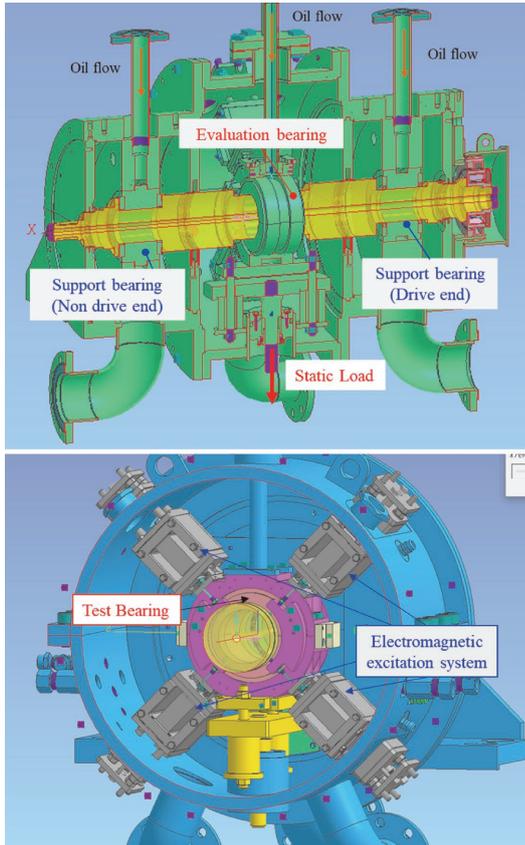


図1 軸受試験装置
Fig.1 Bearing test rig

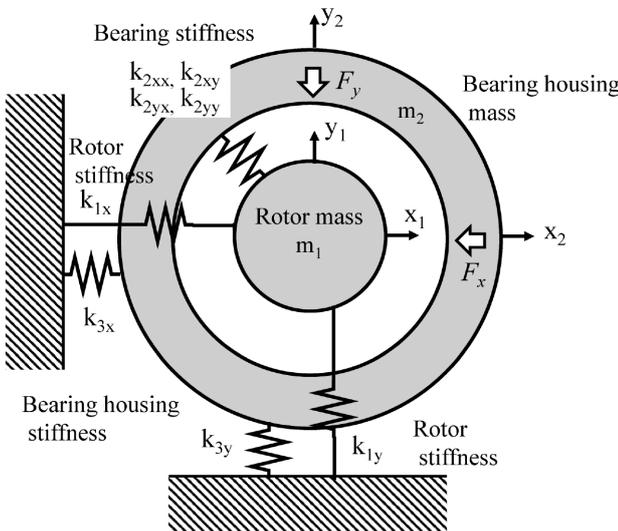


図2 動特性測定の物理モデル
Fig.2 Physical model of dynamic measurement

$$\begin{bmatrix} k_{2xx} & k_{2xy} \\ k_{2yx} & k_{2yy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_d \\ y_d \end{Bmatrix} \approx \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} m_2 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_2 \\ \ddot{y}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_x + m_2 \ddot{x}_2 \\ F_y + m_2 \ddot{y}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F'_x \\ F'_y \end{Bmatrix} \dots (4)$$

とすることができる。式(4)に対して一次独立な2種類の荷重の組合せのデータを用いると、次式により x , y の2自由度の剛性行列が算出できる。

$$\begin{bmatrix} k_{2xx} & k_{2xy} \\ k_{2yx} & k_{2yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{d1} & x_{d2} \\ y_{d1} & y_{d2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F'_{x1} & F'_{x2} \\ F'_{y1} & F'_{y2} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} k_{2xx} & k_{2xy} \\ k_{2yx} & k_{2yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F'_{x1} & F'_{x2} \\ F'_{y1} & F'_{y2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_{d1} & x_{d2} \\ y_{d1} & y_{d2} \end{bmatrix} \dots (5)$$

表1に示すテイルテイングパッド型ジャーナル軸受の性能測定結果の一例を図3と図4に示す。両図は軸受面圧1MPaの結果である。図3左図に各軸受パッドの前縁から5%と75%位置の軸受温度を、図3右図に軸受給油量と給排油温度差から求めた軸受損失を示した。図4は50~300Hzまでの軸受動特性(剛性係数, 減衰係数)の測定結果である。本試験装置は様々な周速, 面圧, 給油条件における軸受静特性と動特性を同時に計測する機能を持っており, 圧縮機で発生した事象の検証試験や, 新たに採用する軸受の実機適用前の健全性と安定性を確認する試験などに活用している。

1.2 性能解析技術

当社ではReynolds方程式とエネルギー方程式を基礎方程式とする熱流体解析と有限要素法による軸受パッド

表1 試験軸受諸元
Table 1 Test bearing specification

Bearing diameter	(mm)	101.6
Pad length	(mm)	76.2
Number of pad	(-)	4
Radial clearance	(mm)	0.162
Preload	(-)	0.282
Pivot offset	(-)	0.6

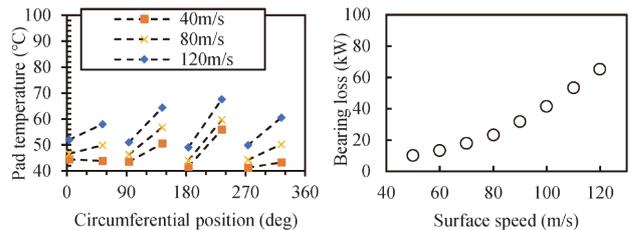


図3 静特性測定結果
Fig.3 Experimental results of static performance

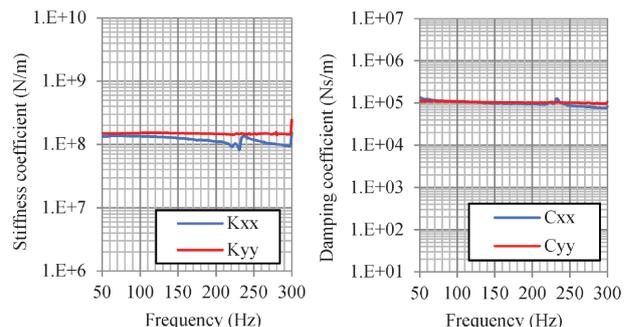


図4 動特性測定結果
Fig.4 Experimental results of dynamic coefficients

変形解析を連成させた軸受性能解析コードを開発し、設計および技術開発に活用している¹⁾。このプログラムは、様々な緒元（軸径、パッド枚数、隙間、L/Dなど）のテイルティングパッド軸受と、真円や多円弧軸受に代表される各種スリーブ軸受の性能計算が可能である。図5と図6は、表1に示すテイルティングパッド型ジャーナル軸受を軸受面圧1MPaで運転した時の静特性と動特性の測定と解析結果である。図に示すように実験値に対し良好な解析精度を示している。このプログラムは自社開発であるため、試験結果を反映させた予測精度の改善や、機械設計の様々な要求に合わせたオプションの追加などの機能向上を容易に行うことができる。

1.3 サロゲートモデルを使った性能計算ツール

1.2節で述べた軸受解析コードは詳細な軸受性能を高精度で求めることができ、軸受選定から機械の詳細設計までの様々な設計段階で活用している。しかしながら概略設計時やさらに前工程の見積検討段階では、迅速に軸受性能を把握する必要があるが、本解析コードは入力しなければいけない緒元が多く、軸受技術に詳しくない技術者には計算難易度が高い。また、詳細設計時においても、軸受性能の目的値を満たす軸受寸法を探索するよう

な場合は、入力項目の多さや計算時間の長さが課題となってくる。

それらの課題を解決するため、機械学習や数値計算の分野で多く使用されているRBF補間（Radial Basis Function Interpolation）を用いたサロゲートモデルを開発した。RBF補間は、ある点からの距離のみで値が決定する放射基底関数（RBF）を用いたノンパラメトリックな補間手法で、式（6）～（8）で定義される。この手法は、既知のデータそのものを補間計算する場合、必ず元データと値が一致するという特徴を持ち、きわめてS/N比が低いデータでなければ、非線形的な曲面でもなめらかに近似できる汎化性の高さを持つ。この特徴から、多様な目的関数を上手く補間することができるため、軸受温度や軸受損失、各種動特性等の多様な値を少ない変数で補間できる。

$$\text{RBF 補間式: } f(x) = [\phi(x, x_1) \cdots \phi(x, x_N)] \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_N \end{bmatrix} \cdots \quad (6)$$

$$\text{重み係数定義式: } \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi(x_1, x_1) & \cdots & \phi(x_1, x_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi(x_N, x_1) & \cdots & \phi(x_N, x_N) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} \cdots \quad (7)$$

$$\text{放射基底関数: } \phi(x, c) = \|x - c\| \cdots \cdots \cdots \quad (8)$$

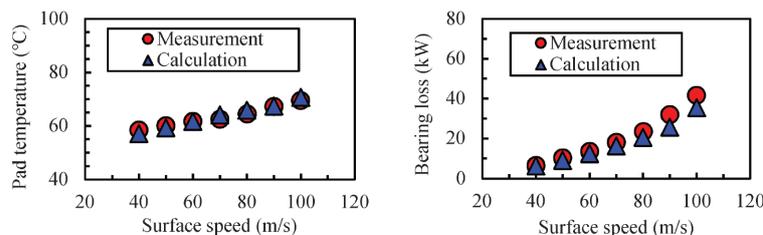


図5 静特性の実験結果と解析結果の比較
Fig.5 Comparison of calculated and experimental results of static performance

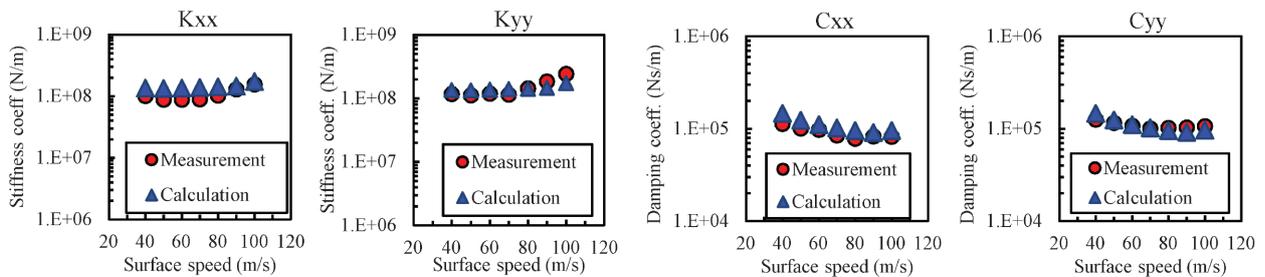


図6 動特性の実験結果と解析結果の比較
Fig.6 Comparison of calculated and experimental results of dynamic coefficients

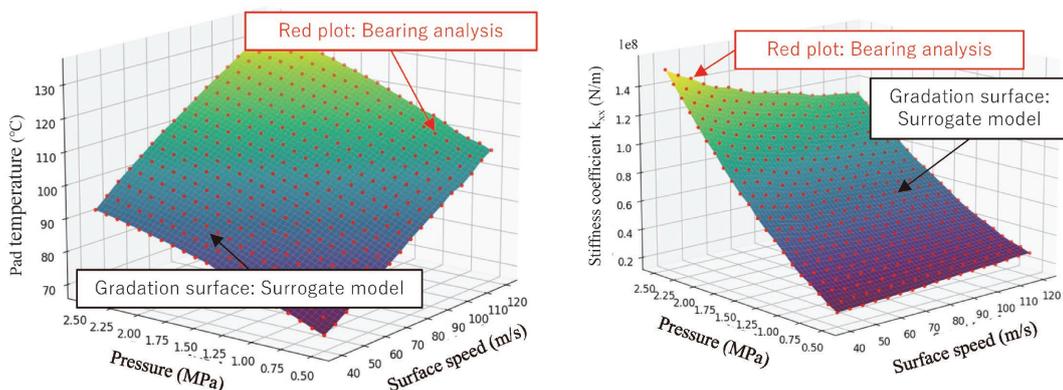


図7 サロゲートモデルでの計算例（パッド温度、軸受動特性、 k_{xx} ）
Fig.7 Calculation example of surrogate model (Pad temperature and bearing dynamic coefficient, k_{xx})

ここで、 x ：説明変数、 y ：目的変数、 x_i ： i 番目の既知の説明変数、 y_i ： i 番目の既知の目的変数、 c ：基準点の座標、 $f(x)$ ：補間関数、 w_i ：重み係数、 ϕ ：放射基底関数、 N ：既知の変数セット数とする。

今回開発したサロゲートモデルには1.2節で解説した解析コードによる数十万件の計算結果が搭載されており、計算したい情報（直径、L/D、油種、周速、面圧など）を入力すれば、即座に図7に示すような補間結果から必要な軸受特性値を得ることができる。

2. ラビリンズシール評価プラットフォーム

ラビリンズシール評価プラットフォームは、実験評価技術、CFD解析評価技術、Bulk Flow Modelによる振動特性の計算ツールで構成され、これらの技術すべてを活用することで、ラビリンズシールの動特性を正確に評価し設計可能とする技術基盤である。本章ではプラットフォームを構成するそれぞれの技術を紹介し、評価結果を例示する。

2.1 実験評価技術²⁾

図8にラビリンズシール試験装置の概要図を示す。可変速モータ駆動の回転軸を高速対応可能なグリース封入式玉軸受で剛支持することで軸回転速度 20,000 rpm まで対応可能とした。非回転側は同じ形状の一对のラビリンズシールを対向させて配置し、その中央から圧縮ガスを流入させて両ラビリンズシール出口で大気解放している。ガスの流入口を2カ所設け、それぞれの流量バランスをコントロールすることで任意の予旋回流速を与えることができる。流入口に繋がる配管に配置した流量計で質量流量を計測し、装置中央に設けた2口ピトー管と熱電対でガスの予旋回流速と圧力、ガス温度を計測している。

ラビリンズシールはロードセルを介して、スプリングによって柔軟支持されるハウジングに固定される。周囲に配置した電磁加振装置によって回転方向に対して前向き（Forward）や後ろ向き（Backward）のふれまわり加振を実現し、以下の手法で動特性を求めている。

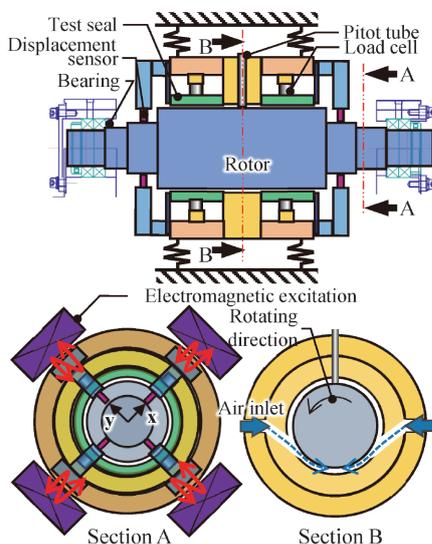


図8 実験装置概要図
Fig.8 Overview of test rig

ロータの断面で直交座標系 x, y をとるとき、ガスの付加質量による荷重への影響が小さいとして、ガス荷重によるシールへの反力 f_x, f_y を式(9)、(10)で表す。

$$-\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \end{bmatrix} + \mathbf{C} \begin{bmatrix} \dot{\delta}_x \\ \dot{\delta}_y \end{bmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{xx} & c_{xy} \\ c_{yx} & c_{yy} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 δ_x, δ_y は、軸とシールの相対変位である。

任意周波数のForwardとBackwardのふれまわり加振において、非回転側のラビリンズシール出口部に配置された8個の渦電流式変位計でシールハウジングと回転軸の相対変位を計測し、同時にロードセルによってラビリンズシールに作用する荷重を計測する。ロードセルで検出される荷重はガス反力に加えてシールの慣性力も含むので、この慣性力を別途計測・除去することでガス反力を求めることができる。これを用いて加振信号に対するガス反力の伝達関数 \mathbf{F} 、変位の伝達関数 \mathbf{D} を式(11)で導出する。

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_{xf} & f_{xb} \\ f_{yf} & f_{yb} \end{bmatrix} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} X_f & X_b \\ Y_f & Y_b \end{bmatrix} \dots\dots\dots (11)$$

剛性係数 \mathbf{K} は式(12)、減衰係数 \mathbf{C} はふれまわり周波数を Ω としたとき、式(13)で表せるため、

$$\mathbf{K} = -[\text{Re}(\mathbf{F})][\text{Re}(\mathbf{D})]^{-1} \dots\dots\dots (12)$$

$$\mathbf{C} = -\frac{1}{2\pi\Omega} [\text{Im}(\mathbf{F})][\text{Im}(\mathbf{D})]^{-1} \dots\dots\dots (13)$$

ガス流体力による任意周波数のラビリンズシール動特性を本装置による実験で求めることができる。

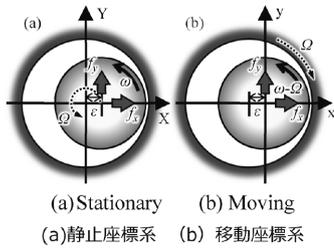
2.2 CFD解析評価技術

高圧、高温等の環境条件やガス種類の制約によって要素実験を実施することが困難な場合がある。そこでCFD解析を利用し、実測できない条件においてもシール動特性を予測することが広く行われており、その評価技術について以下で説明する。

軸に作用する流体力は変位振幅に依存するが、現実的な範囲では流体力は変位振幅に対して線形依存であることが知られており、真円軌道でふれまわると仮定した場合、ふれまわり振幅 ε と流体力の半径方向成分 f_n 、接線方向成分 f_t との関係は式(14)で表される。

$$\begin{cases} f_n/\varepsilon = -K - c\Omega \\ f_t/\varepsilon = k - C\Omega \end{cases} \dots\dots\dots (14)$$

式(14)から各ふれまわり周波数(Ω)におけるロータに作用する流体力の半径方向成分と接線方向成分を求めることで剛性係数(K, k)と減衰係数(C, c)が導出可能であるが、図9(a)に示す静止座標系ではメッシュを変形させながらの非定常解析を複数の周波数で計算する必要があり、計算コストが膨大となる。そこで、ラビリンズシールの軸対称性を利用し、図9(b)に示すように移動基準座標系の中心を軸中心に置いて軸を固定し、逆に静止側をふれまわり周波数でふれまわりと逆方向に回転させ定常解析を実現した上で、遠心力とコリオリ力も考慮することで計算コスト削減した上で実現現象を模擬した評価を行っている³⁾。



(a) Stationary (b) Moving
(a) 静止座標系 (b) 移動座標系

図9 CFDモデルの座標系

Fig.9 Coordinate system of CFD model

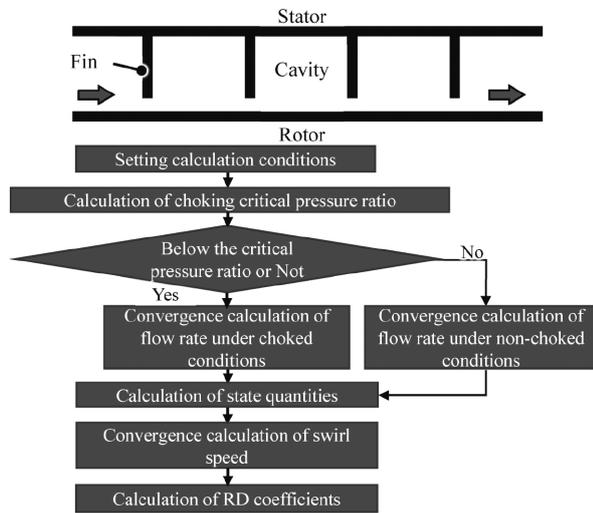


図10 Bulk Flow Modelの計算概略図

Fig.10 Process flow diagram of the bulk flow model

2.3 Bulk Flow Modelによる振動特性計算ツール

Bulk Flow Modelとは、対象となる流体評価領域について、複数の連続する検査体積で離散化し、境界条件と流体の支配方程式から各検査体積の流体の状態量を算出する1次元的な計算手法である。古くからラビリンスシールの動特性評価に用いられており⁴⁾、CFD解析と比較して計算コストが小さいため、ロータ安定性の設計計算に活用される。いっぽうで、シール形状の違いに伴う計算モデルの差異や、採用する摩擦係数モデルの違いが計算精度に影響するため、実験や解析結果との比較による精度検証が必須である。当社では設計者用の計算ツールとして開発し、前記の実験・解析結果との比較によって計算精度を確認している。

図10にBulk Flow Modelによるラビリンスシール動特性の計算概要図を示す。シール形状とガス物性、境界条件から、チョーク発生の有無で場合分けをした上で、支配方程式から流量・入出口の境界条件が合致するように収束計算を行い、シールFinとCavityの通過前後の状態量を求めている。シール内の周速成分については、境界条件と摩擦モデル、導出した状態量を用いて検査体積の上流側から順に導出する。動特性については支配方程式に対して摂動法を用いて線形化し、軸に作用する圧力の変動成分を積分して流体力を算出することで求められる。

2.4 評価結果の比較

本章で紹介した実験技術、CFD解析技術、Bulk Flow Model計算ツールによる評価例を示す。最大軸径109 mm、フィン枚数13枚のStraight型とStep Down型を供試シ

表2 シールの評価条件
Table 2 Evaluation conditions for seals

Differential pressure (kPa)	100	500
Rotating speed (rpm)	5,000	15,000
Excitation freq. (Hz)	50	50

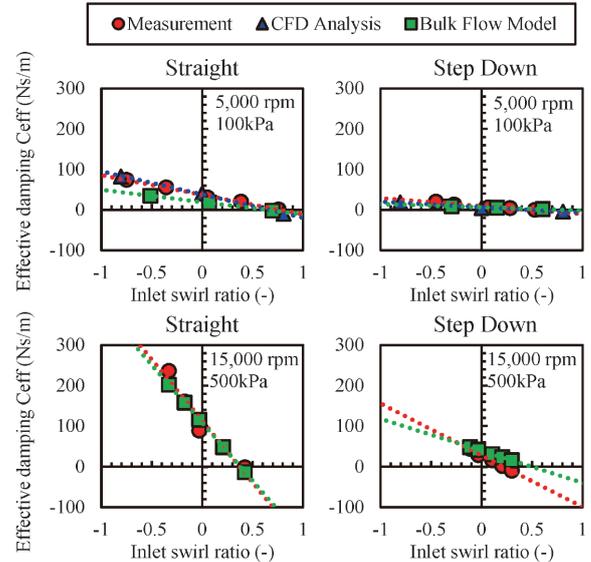


図11 実験計測、CFD解析、Bulk Flow Model計算による有効減衰の比較

Fig.11 Comparison of measurement, CFD analysis and BFM results of effective damping.

ールとした。表2に評価条件を示す。

ラビリンスシールの安定性は、式(15)で表される有効減衰係数 C_{eff} で評価可能⁵⁾で、負になるとロータ系の安定性が低減する。

$$C_{eff} = C(1 - k/C\Omega) \dots\dots\dots (15)$$

軸回転速度に対する入口旋回流速の比と有効減衰係数の関係を図11に示す。実験結果とCFD解析結果はよく一致している。また、Bulk Flow Modelの結果も実験値と比較して良好な評価精度を示しており、設計者用計算ツールとして有用である。

むすび=要素実験と解析技術を組み合わせたジャーナル軸受とラビリンスシールの性能評価プラットフォームを開発し、ジャーナル軸受とラビリンスシール性能を精度良くかつ効率的に求めることが可能になった。本技術は、性能と信頼性を高めた圧縮機製品づくりに貢献するとともに、設計開発業務の効率化に役立っている。引き続き関連技術の開発を進めていく。

参考文献

- 1) H. Arihara et al. ASME, J. Eng. Gas Turbines and Power. Feb 2019, 141 (2), p.021023-1-9.
- 2) 森中俊輔ほか. 日本機械学会論文集, 2022, Vol.88, No.910, p.22-27.
- 3) ANSYS, Inc., ANSYS Fluent 理論ガイド, (2018), p.16-19.
- 4) 岩壺卓三ほか. 機械力学・計測制御講演論文集, 1995, Vol.B, No.95, p.525-528.
- 5) 岩壺卓三ほか. 理論応用力学講演会講演論文集, 2003, No.52, p.417-418.

(技術資料)

新型大型樹脂混練機 LCM-620IM

山口和郎*1

New Large Resin Mixer, LCM-620IM

Kazuo YAMAGUCHI

要旨

ポリエチレン樹脂用連続混練機 LCM™ の史上最大サイズ LCM-620IM を開発し、2024 年に初号機を出荷した。この装置は、100 t/h 以上の生産能力を持ち生産効率を向上させると同時に、かみ合いロータ技術を初めて商用機に適用することで、従来機に比べ 12% 小さい消費エネルギーで同等もしくはそれ以上の混練性能を達成した。

年々増加するポリオレフィン生産量に対応し、混練性能や生産能力を高めることで、CO₂ 排出の低減に寄与し、カーボンニュートラル社会の実現に貢献している。また、別のお客様からも LCM-560IM を受注しており、かみ合いロータ技術は高い評価を得ている。

Abstract

The largest-ever LCM-620IM continuous mixer for polyethylene resins has been developed, and the first unit was shipped in 2024. This machine has a production capacity of over 100 tonnes per hour, improving production efficiency. By applying intermeshing rotor technology to a commercial mixer for the first time, this mixer achieves the same or better mixing performance with 12% less energy consumption compared with our company's conventional machines. In response to the increasing volume of polyolefin production, improving the mixing performance and production capacity will contribute to reducing CO₂ emissions and achieving a carbon-neutral society. A customer has also placed an order for the LCM-560IM and its intermeshing rotor technology is highly regarded in the industry.

検索用キーワード

連続混練機, LCM™, 樹脂, ポリエチレン, 造粒, ペレット, 押出機

まえがき=ポリプロピレン, ポリエチレンといった汎用ポリオレフィンの世界での年間生産量は拡大を続けている。そのため、各生産プラントでは、生産効率の向上志向により、1 ラインあたりの生産能力が年々大型化している。当社は、この生産ラインの中核を占めるペレット製造装置として、大型連続混練機 LCM™ シリーズを製造販売しており、大型化ニーズに対応したシリーズ最大となる公称混練軸径 620 mm サイズの LCM-620IM を開発、受注製造し、初号機を出荷した。

LCM-620IM は、最大サイズであると同時に、商用機としてシリーズ初となるかみ合いロータ技術を適用し、ポリエチレン生産における省エネルギー性能を向上させており、生産プラントにおける電力消費の低減を通じてカーボンニュートラル社会の実現に貢献している。本稿では、大型連続混練機 LCM-620IM について紹介する。

1. 混練機のサイズ

近年、ポリオレフィンペレットの生産コスト低減のため、装置当たりの生産量が増加し続けてきた。1 プラントの年間生産量は、2010 年代の 400,000 トン/年から、2020 年代の 500,000 トン/年~650,000 トン/年へ増加してきており、今後さらに 800,000 トン/年以上に増加する計画も発表されている。

当社では 1980 年代にギアポンプ付き大型連続混練機 LCM™ シリーズを公称混練軸直径 380 mm の 380 サイズ (LCM-380G) で上市以来、1990 年代に 450 サイズ (LCM-450H)、2000 年代に 500 サイズ (LCM-500H)、2013 年に 560 サイズ (LCM-560H) と、市場のニーズに合わせた大型化をおおむね 10 年ごとに進めてきており、620 サイズ (LCM-620IM) を 2022 年に上市、2024 年初号機を出荷した。図 1 に LCM™ 造粒システムの外観図を示す。図 2 には LCM™ シリーズの一台あたりの生産量の推移を示す。LCM-380G の上市以来、混練機下流のギアポンプを使用した昇圧技術により、生産量の拡大ペースが大きく上がり、世界のポリオレフィン生産の効率化に大きく貢献している。

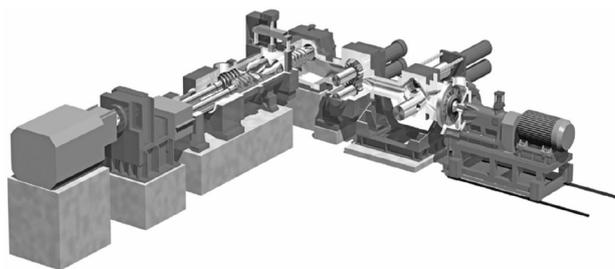


図 1 LCM 連続混練造粒装置外観図
Fig.1 LCM pelletizer unit overview

*1 機械事業部門 技術本部 産業機械技術部

図3はLCM-620IMの外観写真である。LCM™のチャンバにかみ合い型の二軸混練ロータが納められ、チャンバ内で異方向に回転することで、ポリエチレンパウダを効率的に溶融混練する。

この30年間のLCM™の大型化に並行して、LCM™シリーズの型式も左右二軸の混練ロータを45度傾けて配置したLCM-Gシリーズから、ロータ二軸を水平に並べ、搭載モータ動力および軸トルクを向上させたLCM-Hシリーズ、さらにかみ合いロータを搭載したLCM-IMシリーズを開発し、搭載動力の拡大と混練性能の向上をおこなってきた。

大型連続混練機LCM-620IMは、シリーズ史上最大の620サイズであり、従来の最大サイズであった560サイズからロータ軸径寸法を約1割サイズアップしている。表1に寸法諸元を示す。混練ロータ長は約10mにおよび、世界最大の連続混練機である。搭載動力は560サイ

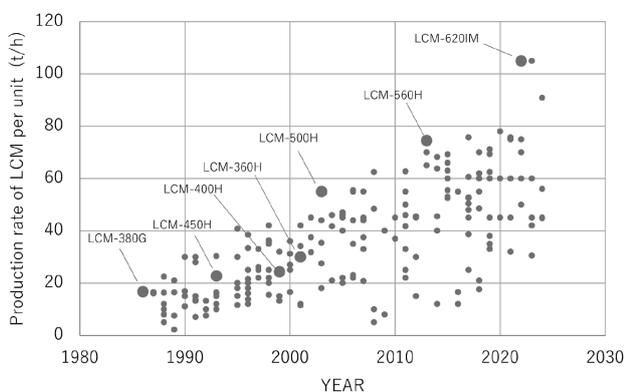


図2 LCMシリーズの1台あたり生産量の推移
Fig.2 Transitions of LCM production rate per unit

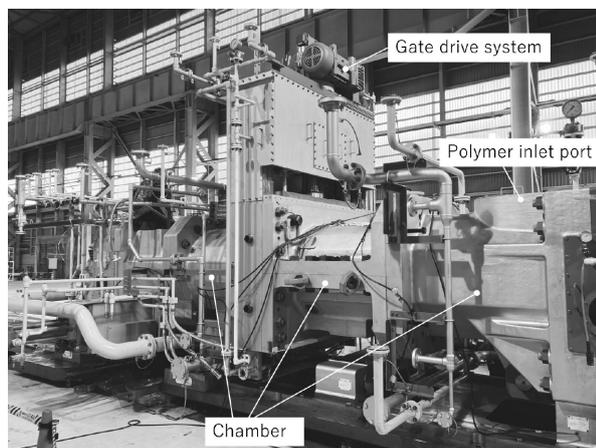


図3 LCM-620IM外観
Fig.3 LCM-620IM overview

表1 LCM主仕様
Table 1 Main specifications of LCM

Model No.	Power (kW)	Rotor speed (rpm)	Rotor diameter (approx. mm)	Rotor length (approx. mm)	Typical production rate (ton/hour)
LCM-360	9,600	550	360	5,800	48
LCM-400	11,800	500	400	6,300	59
LCM-450	15,000	440	450	7,100	75
LCM-500	18,000	400	500	7,800	90
LCM-560	23,100	360	560	9,100	116
LCM-620	26,300	320	620	10,000	132

ズにおける23 MWから、620サイズでは26 MWに拡大しており、これにより生産能力は13%向上し、毎時約100トン以上の高密度ポリエチレンのペレット生産を可能にしている。

お客様は初めての最大サイズの装置発注には慎重になるが、装置の混練性能だけではなく、当社のこれまでの560サイズ以下での約300台の製造・生産、運転実績、機械信頼性や顧客サービスが評価され、受注に至ることができた。

2. 混練性能

一次造粒に使われる大型連続混練機は、樹脂製造工程の上流のリアクタで重合されてできたパウダ状の樹脂を溶融、混練し、分子量分布を有するポリマーを均一化する。また、必要な添加剤などを均一に混合する能力も求められる。

近年、耐久性や強度に優れていることで交換サイクルが長く、かつ成形性もよいBi-modal高密度ポリエチレン（以下、HDPEという）樹脂の開発と生産が盛んになってきている。しかしながら、高性能なHDPE樹脂は、従来の材料に比べて、原料パウダ中の高分子成分の混練時の均一化が困難で混練操作が難しいグレードがある。このようなグレードは、分子量分布が高分子量側と低分子量側にそれぞれピークを持っており、低分子量PEのマトリックスに高分子量PEのかたまりが浮いたような状態であるため、高分子量PEに機械的混練作用が伝わりにくく、高分子量成分を分散させることが難しい。一般に、十分な分散を得るためには、より大きな混練エネルギーが必要とされる。

これら難混練材料を少ないエネルギーで生産することを可能にするため、本混練機には、既報¹⁾の形状を最適化したかみ合いロータ技術を搭載した。図4にロータ構成図を示す。従来のLCM-Hシリーズに対して、LCM-IMシリーズでは下流側の第二混練部のロータ外径(D₂)が大きく(D₁<D₂)、かつ[ロータ外径>軸間距離(Center distance)]の関係となっており、左右二軸のロータ翼がお互にかみ合う寸法関係となっている。

620サイズ初号機受注にあたって、この新技術であるかみ合いロータ技術を初めて適用し、お客様が立ち会ったラボスケールでの混練性能テストに合格した。とく

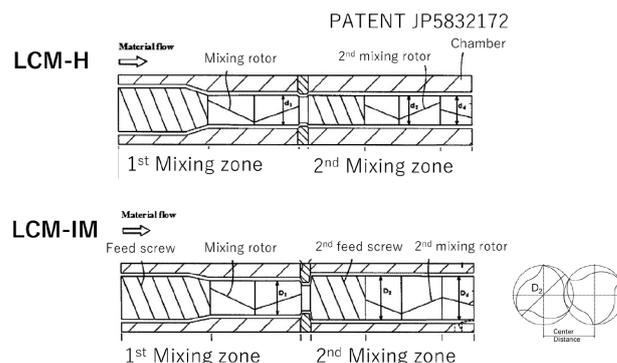


図4 LCM-HとLCM-IMのロータ構成
Fig.4 Rotor configurations of LCM-H and LCM-IM

に、省エネルギー性能においては、高い評価を得ることができた。

HDPE樹脂パウダを溶融混練する過程では、未分散高分子塊（以下、ゲルという）を基準値まで分散させることが要求され、かつその混練で消費する投入エネルギー（Specific Energy Input：以下、消費エネルギーという）は小さいほうが望ましい。かみ合いロータの形状開発においては、当社独自開発の流動解析ソフトウェア^{2), 3)}による混練性能評価技術を適用した。

LCM™がゲル分散とエネルギー消費に及ぼす因子を混練基礎実験により詳細に分析した。また、ゲル分散能力の最大化と省エネルギー化の両立が可能なロータ形状を、シミュレーション計算によって調整することで決定した。

図5には、混練性能のシミュレーションによる評価事例を示す。コンター色（本稿ではグレースケール）は応力レベルを示しており、ゲル分散効率の高い応力領域が大きく、効率の低い領域が小さい応力分布となるように、ロータ形状のパラメータを調整した。

図6は、ラボスケールの混練装置による模擬材料を使った混練性能テスト結果である。この模擬材料は、汎用ポリエチレンに超高分子量ポリエチレンをブレンドしたものであり、超高分子量ポリエチレンの混練による汎用ポリエチレンへの分散が、Bi-modalポリエチレンの高分子量成分の分散と相関があることが確認されている。分散度については、カーボンを混合分散させた際の白残り（White Spot）を未分散とみなし、その量（白残り

面積比：White Spot Area, 以下、WSAという）によって評価した。WSA (%) 値は小さいほうが高品質を示す。図6は、横軸に消費エネルギー、縦軸にWSA (%) 値としたグラフであり、従来ロータとかみ合いロータの混練品質と消費エネルギーの関係を示している。従来のLCM™混練ロータで混練した場合、WSA値1%を達成するために必要な消費エネルギーは、0.33 kWh/kg必要であるのに対して、LCM-IMシリーズのかみ合いロータでは0.29 kWh/kgの消費エネルギーで達成し、12%の省エネルギーとなった。

お客様のポリエチレン材料においても、従来のLCM™混練ロータで混練した場合に必要な消費エネルギーに対して、このかみ合いロータ技術を適用した混練ロータは、大幅に小さい消費エネルギーでゲル分散できることが同様のラボスケールでの混練性能テストで確認され、受注の決め手となった。

プラント据え付け後のLCM-620IMによる生産運転においては、ペレット生産の省エネルギー化が期待できる。例えば、当該樹脂の年産を300,000トン/年とすると、消費エネルギーの差分0.040 kWh/kgが直接消費エネルギー低減に寄与するため、年間300,000トン/年×0.040 kWh/kg=12,000 MWh/年の節電となって、大幅な省エネルギー化、省コスト化およびCO₂排出の低減が期待できる。2026年には稼働開始し、生産運転において、その混練性能、省エネルギー性能が実証される見込みである。

3. 製作

最大サイズの連続混練機を製作するうえでの課題は、大きさそのものである。大型の鋳造部品や鍛造品を高品質に製造する技術が必要であり、加工には、国内最大級の加工機や研磨機を工夫して使用している。さらに、巨大な装置の組立作業や試運転など、製造面で高い技術やノウハウが必要となる。設計段階で、製造技術者を集め、各製作ステップにおける作業の事前検討を十分に行うことで、最大サイズの初号機の製造を可能にした。

4. 振動評価

最大サイズの連続混練機を設計するうえで、機械の信頼性を確保するための各種部品の機械的強度、混練機の加熱・冷却性能、溶融材料流路の圧力損失、各部の材料シール性能などの技術検討が必要である。その中でとくに配慮すべき項目である機械的振動について述べる。

大型混練機は、ロータの混練翼部によって粘度の高いポリエチレンを練るため、その反力が回転数の翼数倍の周波数で発生し、混練荷重が変動するため、非常に振動の大きい装置である。これまでより大きい新サイズの装置では、振動値が大きくなることが懸念されたため、装置振動が許容値を超えることのないように、装置設計の段階で振動解析を行った。

ロータに発生する混練荷重は、ラボ装置を使用してその荷重だけでなく、変動の大きさ、複数ある発生周波数を測定することで把握した。振動解析においては、この

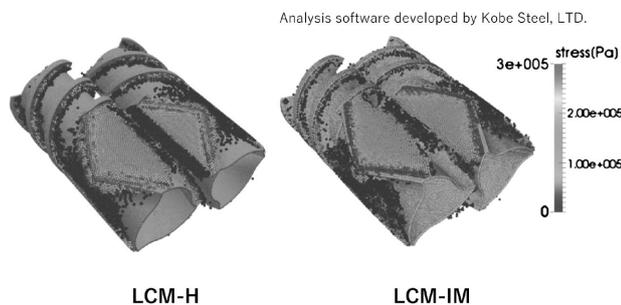


図5 流動解析による混練応力コンター図

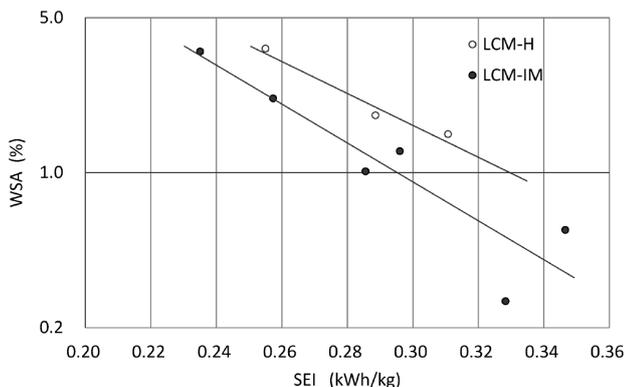


図6 LCM-HとLCM-IMの消費エネルギーに対するWSA値

ラボスケールの混練荷重を生産機の混練荷重にスケールアップして適用し、加振周波数や左右二軸のロータの混練荷重発生位相を忠実にシミュレーションした。解析ソフトウェアはAbaqusを使用した。

シミュレーション計算の結果、620サイズにおいて振動が許容レベルとなることを確認した。図7には振動シミュレーションに用いたFEM解析のメッシュモデルを、図8には樹脂混練の反力に起因する振動による装置変形解析結果の一例を示す。このように振動モードご

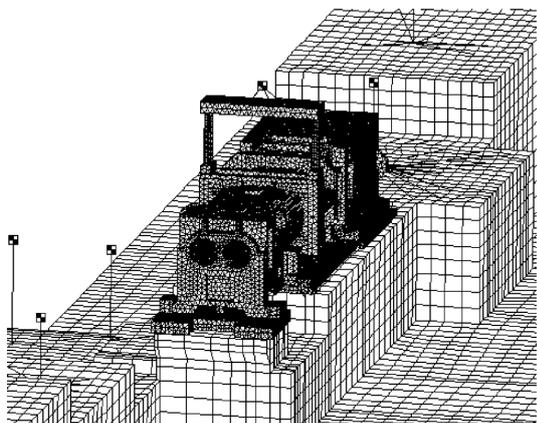


図7 LCM-IMの振動解析モデル

Fig.7 LCM-IM chamber vibration analysis model

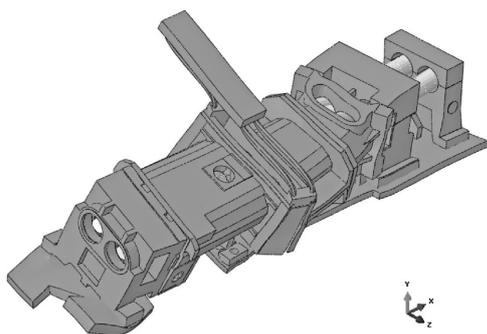


図8 LCM-IMのチャンバ振動解析結果例

Fig.8 LCM-IM chamber vibration analysis result

とのあらゆる変形図を作成し、変形量の大きい部分の部材の剛性を上げることで、全体の振動レベルを抑制することができた。

むすび＝当社は、ポリエチレンの生産効率の向上や、省エネルギー化と分散性能の両立という市場ニーズに応え、当社史上で最大の大型混練造粒装置LCM-620IMを上市し、出荷した。本装置は、新規開発のかみ合いロータ技術を搭載し、従来のLCM™に比べ、省エネルギー性能が向上することで、お客様において、より低コストでのポリエチレンペレット生産が可能となっている。また、ほぼ同時期に別のお客様からも同様のかみ合いロータ技術を搭載したLCM-560IMを受注し、当社のかみ合いロータ技術の省エネルギー効果が認められている。本技術は、より多くのお客様に普及拡大していくと考えている。

今後もポリオレフィン材料メーカーが開発する新たな高性能材料に対して、より省エネルギーで、かつ分散性能の高い大型連続混練機を、タイムリーに開発し、提供していくことで、プラスチックの生産や廃棄に伴うCO₂排出の低減に寄与し、カーボンニュートラル社会の実現に貢献していく。

参考文献

- 1) 山口和郎ほか. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.67, No.2, p.22-25.
- 2) 関山和英ほか. 化学工学論文集. 2024. 第50巻, 第2号, p.35-41.
- 3) 山田紗矢香ほか. PERFORMANCE OF A COUNTER-ROTATING CONTINUOUS MIXER FOR BI-MODAL HIGH DENSITY POLYETHYLENE. 18th Plastic Pipes Conference, September 12-14. 2016, Berlin, Germany.
<https://plasticpipesconference.com/site/database>, (参照2025-04-11).

(技術資料)

ゴム混練機BBミキサの耐腐食・耐摩耗材料開発

濱田 光^{*1}

Development of Corrosion and Abrasion Resistant Materials for the BB Mixer of the Rubber Internal Intensive Mixers

Hikaru HAMADA

要旨

本稿では、BBミキサの耐腐食・耐摩耗材料について紹介する。混練される材料の変化に伴い、混練室の内面部品（ケーシング、ロータなど）において、従来の摩耗の状況とは異なる、腐食が原因と考えられる表面被覆材料の早期減肉が見られるようになってきた。腐食の問題を解決し、耐摩耗性も両立すべく開発した材料KA#T1, KA#93について、耐腐食性能・耐摩耗性能・クロムめっき密着性能を評価した結果、従来の材料と比較して非常に優れた性能を有することを確認した。開発材料を使用したBBミキサは、多くのお客様にご使用いただき、高評価を得ている。

Abstract

This paper introduces corrosion and abrasion resistant materials for the BB Mixer. Early thickness reduction of the surface coating material, which is thought to be caused by corrosion and differs from conventional abrasion, has been observed in the internal components of the mixing chamber (Casing, Rotor, etc.), which is attributed to changes in the mixed compounds.

As a result of evaluating the corrosion-proof performance and wear-proof performance of the materials KA#T1 and KA#93, and adhesion performance of chrome plating on KA#T1 and KA#93, which were developed to solve the problem of corrosion while also providing abrasion resistance, it was confirmed that they have significantly superior performance compared to conventional materials.

BB mixer using the developed materials have been adopted and well received by many customers.

検索用キーワード

BBミキサ, ゴム混練機, 混練室, ケーシング, ロータ, 耐腐食, 耐摩耗, KA#T1, KA#93

まえばき=ゴムは、タイヤ、ホース、ベルト、防振材などの一般工業用として多方面に使用されている。それぞれの用途に必要なゴムの特性を得るため、カーボンブラックやシリカ、オイル、その他充填剤など様々な材料が添加されており、これら材料をゴムに混合、混練するために、混練機が使用されている。バンバリータイプの混練機（MIXTRON™ BBミキサ（以下、BBミキサ）：当社商標、BANBURY（バンバリー）：Farrel Corporationの登録商標）は、代表的なゴム用のバッチ式混練機として知られており、長い歴史の中で各種要素開発が行われ、汎用性のある混練機として、ゴム業界を中心に広く利用されている。

最近のサステナビリティへの要求の高まりにより、タイヤによる低燃費化が重要な性能項目として評価されるようになり、それに伴いタイヤの材料が変化してきた。これまで補強剤としてタイヤに使用されてきたカーボンブラックに代わり、シリカの使用量が増加している。シリカは混練時にシランカップリング剤との化学反応により反応生成物（エタノール、塩酸、硫酸など）が発生し、BBミキサの内部部品（ケーシング、ロータなど）を腐食させる原因となる。本稿では、シリカ混練に対応する

ために開発したBBミキサの内部部品に使用する耐腐食性と耐摩耗性に優れた表面材料について紹介する。

1. BBミキサの概要^{1), 2)}

BBミキサの構成を図1に示す。ホッパ部から材料を投入し、ウェイトによりその材料を混練室に押し込む。つぎに、ロータとケーシングの間およびロータとロータの間で材料にせん断力を加え、混合、混練を行う。混練が終了するとドロップドアを開き、混練物を排出する。

ゴム混練の主な目的を以下に示す。

- 1) 用途に必要なゴムの特性を得るため、ゴム原料に補強剤（カーボンブラック、シリカなど）や、老化防止剤、流動性付与剤などの各種助剤を分散させる。

また、単独のゴムでは発揮できない特性を得るために、複数の異なったゴム原料を混練し、材料の分布を均一にする。

- 2) 混練機の下流工程での押出性や加工性、製品物性を確保するための粘度を調整する。
- 3) 製品として、下流工程で架橋剤と混練材料との架橋反応が必要なため、架橋剤や架橋促進剤の分布

^{*1} 機械事業部門 技術本部 産業機械技術部

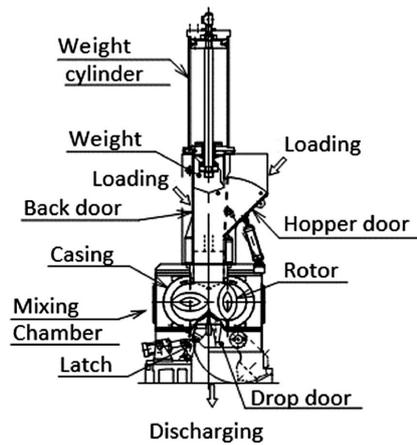


図1 BBミキサの構造
Fig.1 Structure of BB mixer

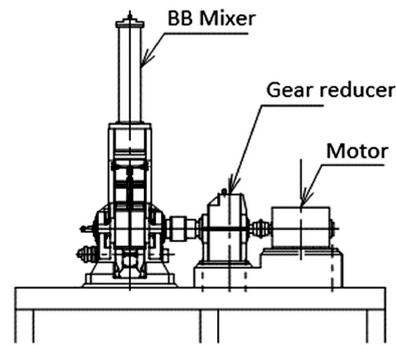


図2 タイヤラベリング制度⁴⁾
Fig.2 Tire labelling system

を均一にする。
一般にゴム材料の混練においては、つぎの3種類の混練工程に大別することができる。

- 1) 素練り混練工程
主としてゴム原料のみを混練し、つぎの混練工程で混練を行いやすくするために、ゴムの粘度を調整する。
- 2) マスターバッチ混練工程
素練りされたゴムや比較的柔らかく素練りが必要のないゴムとカーボンブラックやシリカなどの補強剤や老化防止剤などを混練する。
- 3) ファイナル混練工程
マスターバッチ混練された材料に架橋剤や促進剤を混合し、つぎの架橋反応に備える最終の混練を行う。

2. タイヤ用配合の変化

BBミキサの最大の用途はタイヤ用ゴムの混練である。タイヤメーカーには環境対応要求の高まりにより、タイヤに関わるCO₂排出量の削減が求められている。タイヤのライフサイクルにおけるCO₂排出量のうち、自動車走行時のCO₂排出が全体の80~95%³⁾を占めており、走行時の「タイヤ転がり抵抗」を下げることでCO₂排出量を削減しようとしている。制動性能に関連する「ウェットグリップ性能」とも合わせて、2010年より、業界自主基準として策定したグレーディングシステム（等級制度）に基づき、「転がり抵抗性能」と「ウェットグリップ性能」の等級分けを行いラベル表示するタイヤラベリング制度がスタートした。（転がり抵抗A以上で、かつウェットグリップ性能がd以上で低燃費タイヤと定義⁴⁾（図2）

上記のようなタイヤに求められる性能の変化に伴い、タイヤに使用される原材料の構成が変化してきている。従来はタイヤ補強剤としてカーボンブラックが使用されてきたが、転がり抵抗性能、ウェットグリップ性能の両立のために、シリカが使用されるようになってきた。シリカは単体でゴムと結合せず、シランカップリング剤を介して化学反応でゴムと結合する。シリカの反応には

140~150℃程度で温度制御して混練させる必要があるが、混練時の反応により反応生成物が発生する。タイヤ材料の各素材を投入するマスターバッチ混練工程で、より顕著に反応生成物が発生し、反応生成物には混練室を腐食させる塩酸、硫酸などが含まれる。

3. BBミキサ混練室内面の状況

タイヤにシリカが使用され始める以前から、BBミキサの混練室内面部品の表面（ケーシング、ロータなど）には、耐磨耗性の向上を目的に表面被覆材料を使用しており、ゴム混練により発生するゴムや充填剤と部品表面との摩擦による摩耗の防止・軽減が図られている。ケーシングには従来、耐磨耗目的でリンカーンH560⁵⁾が使用されている。また、従来配合での耐腐食目的でKA#96（KA:KOBELCO ALLOY）、KA#104が使用されている。いっぽう、ロータにはステライト#6⁶⁾が使用されている。リンカーンH560を除き、通常、BBミキサの混練材料接触面には、耐磨耗性のさらなる向上のため、図3のように、表面被覆材料の表面に硬質クロムめっきを施工する。しかしながら、上述のとおり、タイヤ用配合の変化により、混練時にシリカ、カップリング剤による反応生成物が発生し、BBミキサの混練室内部が腐食環境になり、混練室内面部品に施工している表面被覆材料を腐食させ、早期に減肉が進む状況が様々なタイヤ用途のゴム混練機で見られるようになってきた。混練室内の腐食状況を調査した結果、塩化物イオンおよび硫化物イオンを含む残留物が確認された。

上記より、シリカ配合に対応する表面被覆材料には、従来からの必要性能である耐磨耗性に加え、耐腐食性の両立が必要になった。

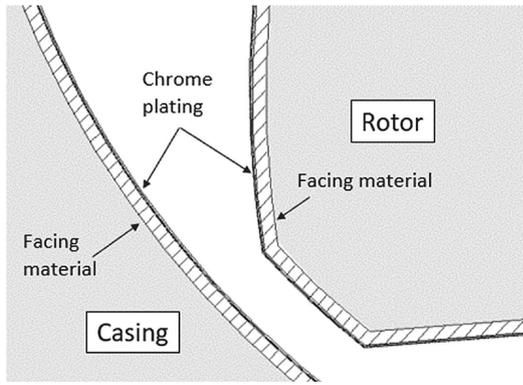


図3 混練室内部品表面材料構成
Fig.3 Surface material structure

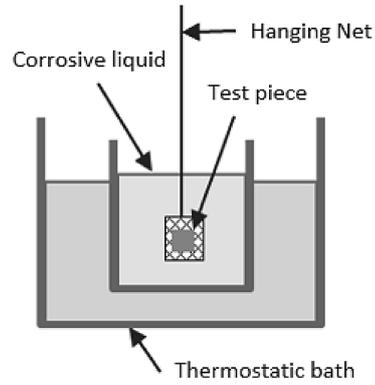


図4 浸漬試験実施状況
Fig.4 Condition of corrosion test

4. 耐腐食性表面被覆材料の開発と評価

早期に減肉が進む表面被覆材料の課題に対し、シリカ配合により発生する反応生成物への耐腐食性のある新表面被覆材料として、ケーシング用はKA#T1、ロータ用はKA#93を開発した。従来材料のリンカーンH560、ステライト#6、KA#96、KA#104とそれぞれの開発材料について、腐食試験、摩耗試験、硬質クロムめっき密着性試験を実施し、各種材料の比較評価を実施した。

4.1 腐食試験

耐腐食性の評価として、塩酸・硫酸混合液による浸漬試験を実施した。図4に浸漬試験の実施状況を示す。試験セルはガラス製フラスコおよび冷却管で構成し、試験片同士が接触しないよう試料ホルダにテフロン製網を用いた。混練機の使用サイクルを考慮して、それぞれ24時間、240時間での減肉速度 (mm/年：それぞれの試験時間における重量減量から計算した単位面積当たりの腐食深さを一年間での腐食深さに換算)、および試験片の外観と断面観察により評価した。

図5に各材料での24時間の減肉速度、図6に24時間および240時間経過後の外観を示す。浸漬24時間で重量減がほとんどないものは、ステライト#6、KA#93、KA#T1であった。これらは試験前後での外観の変化も認められなかった。リンカーンH560、KA#96、KA#104は重量が減少し外観も変化した。ステライト#6、KA#93、KA#T1については240時間まで試験を継続したところ、それぞれの減肉速度はいずれも0.000~0.004 mm/年であり、開発したKA#T1、KA#93はステライト#6と同等の良好な耐腐食性を有することを確認できた。

つぎに、KA#96、KA#104、KA#T1の表面被覆材料に硬質クロムめっきを施工し、同様に240時間の浸漬試験を行い、試験後の試験片断面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した結果を図7に示す。硬質クロムめっきの微細なクラックを通じて表面被覆材料に腐食液が浸透し、KA#96、KA#104は硬質クロムめっきとの境界部で腐食が発生していることが判る。境界部で腐食が発生することにより、硬質クロムめっきがはく離しやすくなる。いっぽうで、KA#T1では境界部にも腐食は見られず、優れた耐腐食性能を確認できた。

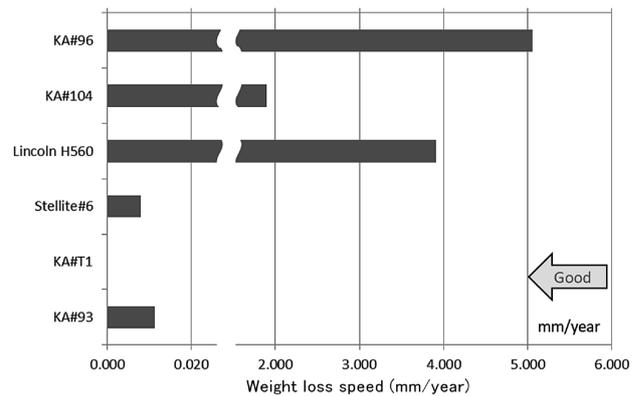


図5 浸漬試験での減肉速度 (24時間)
Fig.5 Weight loss speed on corrosion test (24 hour)

	Start	24 hours	240 hours
KA#96			N/A
KA#104			N/A
Lincoln H560			N/A
Stellite#6			
KA#T1			
KA#93			

図6 腐食試験外観写真
Fig.6 Photos of corrosion test

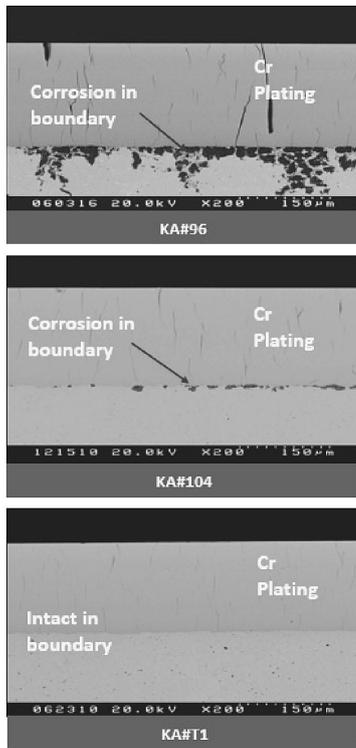


図7 クロムめっきとの境界部SEM写真(240時間浸漬)
Fig.7 SEM of boundary area with plating (240 hour)

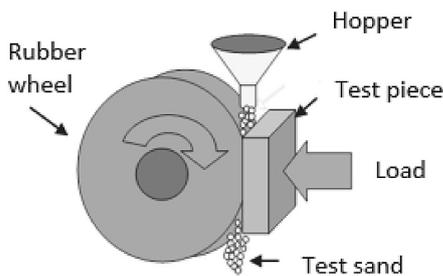


図8 土砂摩耗試験構成 (ASTM G65準拠)
Fig.8 Structure of wear test (ASTM G65)

4.2 摩耗試験

腐食試験を実施した表面被覆材料において、土砂摩耗試験を行い、それぞれの摩耗減肉量を比較評価した。土砂摩耗試験はASTM G65に準拠し、図8の構成で実施した。

結果を図9に示す。耐摩耗性に優れる順は、リンカーンH560 > KA#T1 > KA#104 > KA#93 > KA#96 > ステライト#6となった。KA#T1は、リンカーンH560には劣るものの、その他の表面被覆材料と比較して優れた耐摩耗性を示した。また、KA#93は従来のロータ用表面被覆材料として使用されているステライト#6より、耐摩耗性に優れることが確認できた。

4.3 硬質クロムめっき密着性試験

リンカーンH560を除いた各表面被覆材料への硬質クロムめっき密着性確認試験を実施した。図10に、硬質クロムめっきと各表面被覆材料との密着性の比較結果を示す。KA#T1, KA#93ともにステライト#6以上、また、KA#104, KA#96と比較しても十分な密着性能が得られていることを確認した。

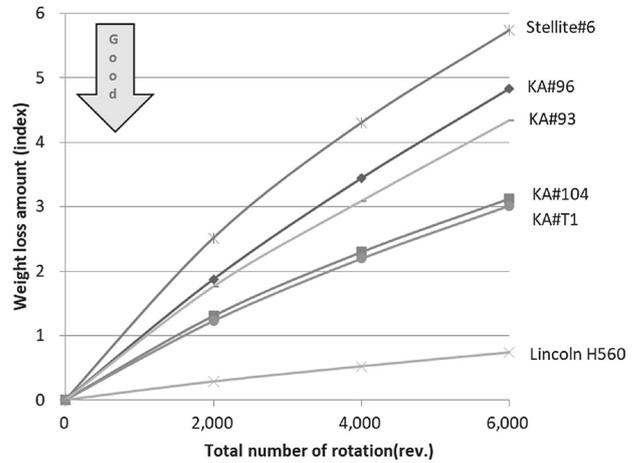


図9 土砂摩耗試験結果
Fig.9 Result of wear test

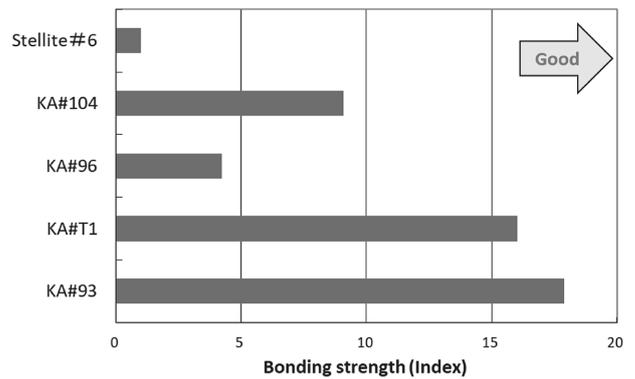


図10 硬質クロムめっき密着性試験結果
Fig.10 Result of bonding strength test

むすび=新しい耐腐食性表面被覆材料として、KA#T1, KA#93を開発し、各種評価試験によって、それぞれの有効性を証明した。KA#T1は2013年頃、KA#93は2020年頃から販売を開始した。本技術により、従来の表面被覆材料に比べて、ケーシングやロータの腐食、摩耗による減肉速度が抑えられ、より長い期間、高品質の混練を行うことができるとお客様より評価をいただいております。シリカ配合や従来のカーボン配合を混練する多くのお客様に使用されている。今後もサステナビリティ要求に伴う混練配合の変化に対応した技術を開発し続けていく。

参考文献

- 1) 山田則文. R&D神戸製鋼技報. 2008, Vol.58, No.2, p.57-61.
- 2) 赤坂 隆ほか. ゴム工業便覧. 第4版, 一般社団法人日本ゴム協会, 1994, p.1077.
- 3) タイヤのLCCO₂ 算定ガイドライン. Ver.3.0.1, 一般社団法人日本自動車タイヤ協会, 2021, p.47.
- 4) 低燃費タイヤ等のラベリング制度, 一般社団法人日本自動車タイヤ協会
https://www.jatma.or.jp/environment_recycle/aboutlabelingsystem.html. (参照2025-2-7).
- 5) Lincolnweld H-560, Lincoln Electric.
<https://www.lincolnelectric.com/en/products/lincolnweldh560-saw>. (参照2025-2-7).
- 6) Stellite 6 Alloy, Kennametal Inc. <https://www.stellite.com/us/en/alloys/stellite/stellite-6-alloy.html>. (参照2025-2-7).

(解説)

ゴム混練機用新標準制御システムの開発

橋本竜馬*1・牟礼祥一*1

Development of a New Standard Control System for Rubber Mixers

Ryoma HASHIMOTO・Shoichi MURE

要旨

PCベースの新たな標準制御システムBBMC (BB mixer Monitor & Controller)を開発した。BBMCは、従来システムが抱えていたデータ処理能力の限界やソフトウェア管理の複雑さを克服することを目的に開発されたものである。

BBMCは、進歩の著しいデジタル技術の活用を視野に入れ、多機能化を実現している。すでに多くのお客様に採用されており、今後もお客様ニーズの拡大が見込まれる。これらのニーズに迅速かつ柔軟に対応することで、ゴム混練機の付加価値向上を図り、さらにはお客様満足度の向上を目指していく。

Abstract

A new PC-based standard control system, BB mixer Monitor & Controller (BBMC), has been developed. The BBMC has been designed to overcome the limitations of conventional systems, such as data processing capacity and the complexity of software management. It has realized multi-functionality to utilize rapidly advancing digital technology. Many customers have already adopted the system, and customer needs are expected to expand. By responding to these needs quickly and flexibly, Kobe Steel will strive to increase the rubber mixer's added value and further increase customer satisfaction.

検索用キーワード

ゴム混練機, ミキサ, バンバリー, BBMC, コントローラ, 自動混練, AI, IoT, DX, Windows

まえがき=ゴム混練機とは、タイヤなどのゴム製品の製造工程において、天然ゴムや各種添加材（カーボンブラック、シリカ、オイルなど）を混合・混練する機械である。

従来、ゴム混練機の標準制御システムとして、「タッチパネル+PLC (Programmable Logic Controller)」を提供してきた。また、自動混練機能を必要とするお客様には、PCベースのMP (Mixing Process) コントローラを別置きのオプションとして提供していた。

しかし、近年、DX (デジタルトランスフォーメーション)、IoT (モノのインターネット)、AI (人工知能) といったデジタル技術の活用が求められ、競合他社も積極的な開発を進めている。このような状況の中、従来の制御システムでは、これらの技術に必要な複雑かつ大量のデジタルデータを高速に演算することが困難であった。

これらの課題を克服するために、従来のタッチパネルをPCに置き換え、MPコントローラを統合した新たな標準制御システム「PC+PLC」を開発し、BBMC (BB mixer Monitor & Controller) と命名した。BBMCはWindowsをプラットフォームとし、その上に様々なソフトウェア機能をモジュール化することで、お客様のニーズに応じた柔軟なアプリケーションの提供を可能にし

ている。

いっぽう、制御システムの多機能化に伴い、ソフトウェア管理の煩雑化や無断複製のリスクといった課題も生じている。これらの課題を解決するためには、新たな対策が必要である。

本稿では、BBMCの主な機能、ソフトウェア管理の手法、複製防止策、および今後の方向性について紹介する。

1. システム構成、動作・開発環境

BBMCの基本情報である、システム構成、および動作・開発環境について紹介する。

1.1 システム構成

ゴム混練機のシステム構成を図1に示す。

まず、盤構成について説明する。ゴム混練機では、制御盤と操作盤を標準として提供している。

制御盤は電気室に設置され、PLCを搭載している。主な役割として、ゴム混練機に搭載される各種計測信号 (センサ信号、スイッチON/OFF信号など) の取り込み、電磁弁のON/OFF制御、およびインバータ制御を担う。

操作盤はゴム混練機の近傍に設置され、オペレータが操作を行うための装置である。BBMCがインストールされたLocal PCを搭載し、OPC (OLE for Process Control) Serverを介してPLCと通信するほか、PLCか

*1 機械事業部門 技術本部 メカトロ技術部

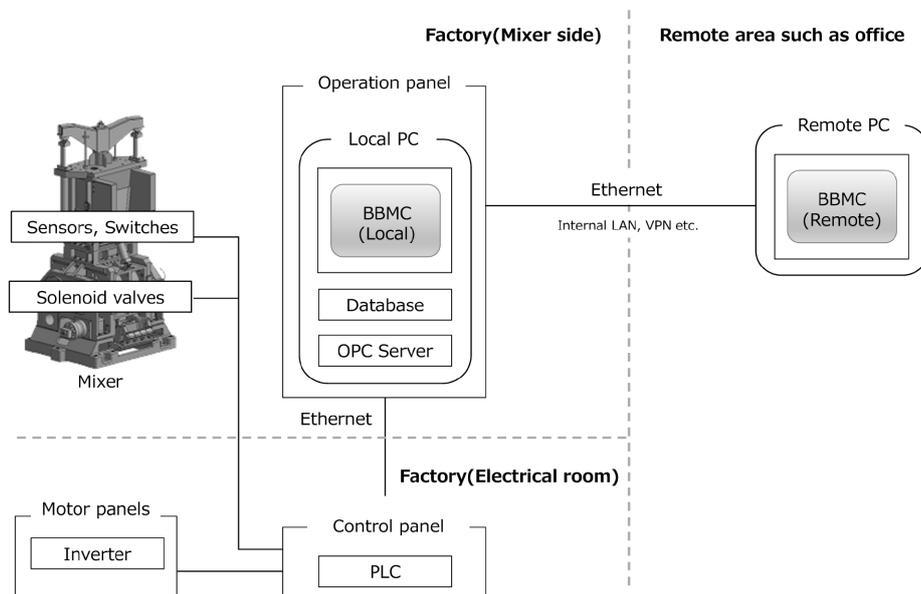


図1 ゴム混練機のシステム構成図
Fig.1 System configuration for BB mixer

ら取得したデータをDatabase (SQL Server) にログインする。このBBMCを「BBMC Local版」と呼び、第2章に示す機能を有する。

いっぽう、BBMCには「Remote版」も存在する。Remote版では、Remote PCをLocal PCと社内LANやVPN (Virtual Private Network) で接続することで、お客様はBBMC Local版のはほぼすべての機能（アクチュエータ駆動などを除く）を事務所や別工場などの遠隔地から利用できる。

1.2 動作・開発環境

BBMCの動作環境は、Windows (7/10) と .NET Frameworkで構成されている。 .NET Frameworkを採用することで、新しいOSやプログラム言語への柔軟な対応が可能となる。

また、BBMCで採用しているWindows 10のエディションはEnterprise LTSC (Long-Term Service Channel) である。これは、長期間にわたって安定した環境で使用できるように設計されたエディションであり、2029年までのサポートが受けられる。そのため、現時点ではWindows 11への移行計画は立てていない。

さらに、BBMCの開発環境にはMicrosoft Visual Studioを使用しており、プログラム言語としてVB.NETを採用し、ユーザインタフェースにはWindows Formsを用いている。

2. BBMCの機能

BBMCの主な機能は以下のとおりであるが、お客様のニーズに応じて必要な機能のみを組み合わせ提供している。なお、これらの機能は、第1.1節で記載したBBMC Local版およびBBMC Remote版で使用できる。

2.1 モニタ、手動操作機能

従来のタッチパネルと同様の機能を備えており、主要データのモニタリングやお客様による手動操作（モータ操作など）が可能である。ただし、遠隔での操作は危険

であるという理由から、BBMC Remote版では手動操作を無効としている。

2.2 データロギング機能

従来のシステムでは、温度、電力、ロータ回転数などの主要パラメータを表示する機能は備えていたものの、ロギング機能は搭載されていなかった。そのため、ロギングを必要とするお客様には、別途ロガーを提供していたが、記録可能なパラメータ数や保存期間には制限があった。

また、IoTやAIの活用を視野に入れると、より多くのデータを長期間にわたって取得する必要がある。この機能を実現するため、BBMCでは前述の主要パラメータを含め、最大400点のアナログデータと500点のビットデータを、最短1秒のサンプリングタイムで保存できるようにした。

アナログデータとは、センサ信号や、アクチュエータの動作時間などを含むPLCによる計算値を指す。ビットデータは、リミットスイッチ、電磁弁、押しボタンなどのON/OFF信号や、アラームなどのイベントデータを含む。

なお、標準仕様（アナログデータ約100点、ビットデータ約100点、サンプリングタイム1秒）であれば、10年以上のデータ保存が可能である。

2.3 自動混練機能 (MPコントローラ)

本機能は、従来はMPコントローラとして単体で提供していたが、BBMCの開発に伴い、BBMCの機能の一つとして統合した。

混練プロセスでは、温度、電力、ロータ回転数などの混練条件を一つのステップで完結させるのではなく、異なる混練条件を組み合わせた複数のステップを連続的に実行する。大手タイヤメーカーなどでは、大規模な上位システムを導入し、この上位システムを利用して連続ステップ運転を自動化している。しかし、上位システムを保有していないお客様も多く存在するため、これらのお客

様に対して自動混練機能を提供している。

図2は、混練条件を設定するための画面である。この画面で設定された条件に基づき、ステップ運転を自動で実行できる。図2では5ステップの混練条件を設定しており、各設定①～③については、以下のとおりである。

- ①混練時間を設定する。
- ②ステップ終了条件を設定する。ここで設定した値に到達すると、つぎのステップに進む。
- ③駆動部の動作条件を設定する。ここでの設定に基づき動作する。

また、自動混練中の混練データは記録され、図3に示す画面で閲覧できる。図3右のグラフは、主要パラメータ（温度、電力など）の時系列チャートをバッチ単位で表示したものであり、図3左のグラフは、そのチャートのカーソル上にある主要パラメータの値を示している。

なお、BBMC Remote版でも、図2の混練条件の設定や、図3のグラフの閲覧は可能である。ただし、遠隔での操作は危険であるとの理由から、自動混練機能（ステップ運転の自動実行）は無効としている。

2.4 IoT機能（ロギングデータ可視化機能）

本機能を採用することで、前記2.2節でロギングしたデータを閲覧できる。

図4は、IoT画面の一例である。この画面では、アナログデータ、ビットデータ、およびイベントデータを、年単位から秒単位まで切り替えて閲覧できる。そのため、トラブル発生時にお客様自身で動作チェックを実施できる。また、閾値（しきい値）を設定することでアラームを発報し、部品交換時期などをお客様に知らせることも可能である。

当初、IoT機能はクラウドで実行するシステムとして事業部門全体で開発を進めていた。しかし、情報漏洩の懸念から、ほとんどのお客様がクラウドへのロギングデータ保存に難色を示した。そこで、ゴム混練機では、エッジデバイス上（BBMC Local版、Remote版）でロギングデータを保存・閲覧できるIoT機能を、BBMCの一つの機能として開発した。

2.5 メンテナンス機能

本機能は、機械トラブル発生時の対策として組み込まれたものであり、とくに機械トラブルからの復旧時間を短縮したいという中国のお客様からの強い要望をもとに開発した。

本機能は、大きくつぎの四つに分類されるが、いずれも機械復旧時間の短縮に寄与する。

2.5.1 トラブルシューティングマニュアル表示機能

図5に示すように、各アラームに対して推定される原因や対策を記載したトラブルシューティングマニュアルを表示する。

2.5.2 インタロック状態表示機能

インタロックの成立条件（例：スイッチ、電磁弁などの状態）と、そのインタロックの成立・不成立状態を表示する。



図2 混練条件設定画面
Fig.2 Mixing condition setting screen

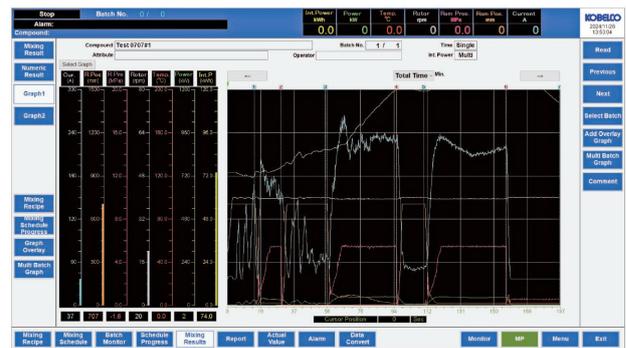


図3 混練結果画面
Fig.3 Mixing result screen



図4 IoT画面
Fig.4 IoT screen

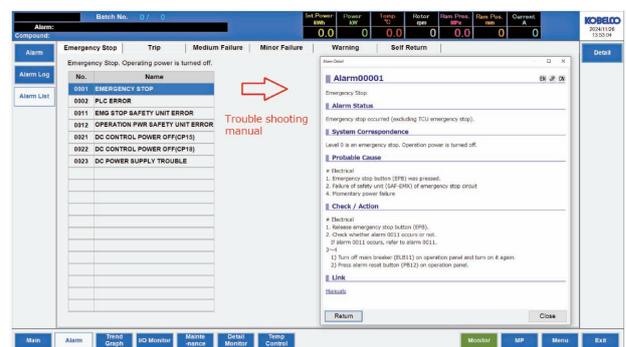


図5 トラブルシューティングマニュアル画面
Fig.5 Trouble shooting manual screen

2.5.3 I/Oモニタ機能

従来の制御システム「タッチパネル+PLC」にも本機能は搭載されていたが、BBMCではお客様の上位システムとの通信情報など、より多くのI/O状態を表示できる。



図6 メニュー画面
Fig.6 Menu screen

2.5.4 詳細状態表示機能

ゴム混練機の一部を拡大表示し、そこに取り付けられているセンサやスイッチの状態を確認できる。

2.6 多言語対応

ゴム混練機の市場は全世界に広がっており、母国語対応が求められることが多い。BBMCはこれに対応し、多言語化を実現している。BBMCには日本語、英語、中国語が標準搭載されており、さらに必要に応じてそのほかの言語を追加できる仕組みを構築している。

図6は、BBMCのメニュー画面を示している。この画面で言語を選択すると、BBMCを再起動することなく、言語を即座に切り替えられる。

3. ソフトウェア管理

3.1 タッチパネルからPC化したことによるメリット

まえがきでも記載したように、PC化の目的は多機能化だけでなく、システムの集約も含まれる。

図7は、従来システム「タッチパネル+PLC」とBBMC「PC+PLC」の比較である。従来システムでは、PLCとタッチパネルを同一メーカーから採用する必要があったため、メーカーごとにタッチパネルのソフトウェアを開発する必要があった。

いっぽう、BBMCのPCソフトウェアは、PLCメーカーに依存せず共通であるため、従来システムのようにPLCメーカーごとに開発する必要がなくなった。その結果、ソフトウェアの管理範囲が大幅に削減され、管理の効率化および不具合の削減に寄与している。

3.2 ソースコード管理

お客様からは、さまざまな要望をいただくことが多いが、従来システムでは、図8上に示すように、お客様ごとにプログラム（ソースコード）を個別管理していた。しかし、お客様数の増加に伴い、管理が煩雑化し、不具合が発生するリスクが高まるという問題があった。

これに対し、BBMCでは、図8下に示すように、標準ソースコードを一つとし、各お客様の要望には設定ファイルによる切り替え方式を採用している。この仕組みにより、第2章で示したさまざまな機能や画面変更などの細かな要望、さらには第5章に示すような機能拡張を行った場合でも、標準ソースコード一つで管理できる。

さらに、BBMCに新たな機能を追加する際には、上述

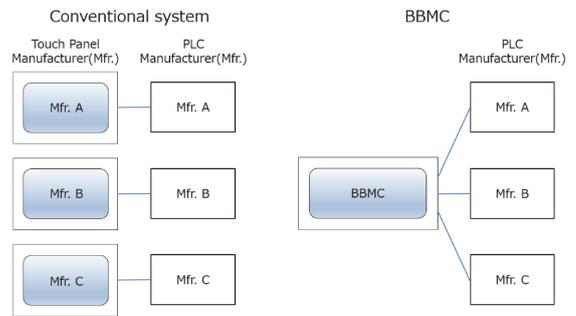


図7 タッチパネル/BBMCとPLC組み合わせ比較
Fig.7 Comparison of combination between touch panel/BBMC and PLC

Conventional System		
User 1	Source Code 1	Setting File 1
User 2	Source Code 2	Setting File 2
.	.	.
.	.	.
User N	Source Code N	Setting File N

BBMC		
User 1	Common Source Code	Setting File 1
User 2		Setting File 2
.		.
.		.
User N		Setting File N

図8 従来システムとBBMCのソースコード管理比較
Fig.8 Comparison of source code management between conventional system and BBMC

の仕組みに基づき、上位互換性を確保した形でソースコードをアップデートしている。ここで、上位互換性とは、「新しいソースコードが古い設定ファイルとの組み合わせでも正常に動作すること」を意味する。

4. 複製防止

BBMCのようなソフトウェアにおいて最も懸念されるのは、複製や第2章で示した機能の無断使用である。これに対する対策として、BBMCではプロテクトキーを採用している。

プロテクトキーとは、USBタイプのデバイスであり、内部に当社が定義した認証キーが設定されている。BBMCは起動時にこのキーの認証を行い、認証されたキーに対応した機能のみを使用可能とする仕組みを採用している。さらに、プロテクトキー自体は、複製が不可能な構造となっている。

いっぽう、お客様にとっての懸念事項は、プロテクトキーの破損である。この対策として、期間限定のソフトライセンス（ライセンスファイル）を発行する仕組みを導入している。プロテクトキーが破損した場合には、このソフトライセンスをお客様に送付することで、生産ラインの迅速な復旧を可能にしている。

5. 今後の方向性

5.1 開発環境

1.2節で記載した現在の開発環境である「プログラム言語VB.NET」および「ユーザーインターフェースWindows Forms」について、将来的に「プログラム言語C#.NET」および「ユーザーインターフェースWPF (Windows Presentation Foundation)」へ移行することを検討している。

この移行を検討する主な理由は、VB.NETの開発がすでにマイクロソフト社によって終了していること、およびWPFの方が開発効率の向上や、より高機能な画面作成が期待できることである。

5.2 AI機能

現在、ゴム混練機においては、混練時の材料温度を一定に保つためにPI制御（比例制御P、積分制御I）が使用されているが、最短時間で温度を一定にすることが求められている。また、混練後の品質データ（粘度、分散など）は、自動取得が難しく、人が介在して測定している。これらの課題をAI（機械学習）で改善することを目的とした開発を進めている。

前者（PI制御）が改善されれば、混練品質の安定や混練時間の短縮に寄与できる。後者（品質データの取得）が改善されれば、工程削減に貢献できる。

また、AIのプログラム言語には、AIに関する充実したライブラリを備えているPythonを採用している。いっぽう、1.2節に記載したように、BBMCはVB.NETをプログラム言語として使用している。そのため、**図9**に示すように、BBMCからAI機能を起動し、共有メモリを介してデータのやり取りを行う仕組みを構築している。

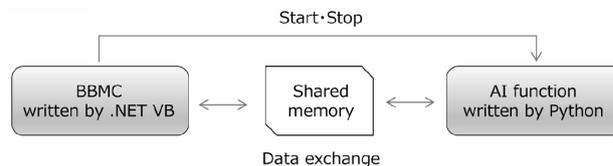


図9 BBMCとAI機能の関係

Fig.9 Relation between BBMC and AI function

むすび = 当社ゴム混練機の歴史は古く、1950年代にさかのぼる。

制御システムは、リレー盤から始まり、PLCの導入、さらにタッチパネルの採用へと、時代のニーズに応じて進化を続けてきた。そして今回、PCを導入したBBMCの開発に至った。

当初の制御システムは、単に機械を動作させることを目的としていた。しかし、近年のデジタル技術の進展に伴い、制御システムは機械に更なる付加価値を提供し、競合他社との技術的な差別化を図るための重要な要素として認識されるようになり、その成果としてBBMCを開発した。

現在、BBMCはゴム混練機の標準制御システムとして採用しており、年間数十台を出荷している。また、従来は制御システムを自社で構築していた国内大手タイヤメーカーへの納入も増加している。

BBMCの開発を通じて、様々な機能を容易に追加できる仕組みを構築したが、この仕組みにより、今後もゴム混練機の付加価値向上に貢献し、さらにはお客様満足度の向上を目指していく。

(技術資料)

製鉄・非鉄用圧延設備における近年の事例紹介

黒田直行*1・細川晴行*1・前田 剛*1・赤川正憲*1・宮園太介*1

Recent Status of Ferrous and Non-Ferrous Rolling Mills

Naoyuki KURODA・Haruyuki HOSOKAWA・Go MAETA・Masanori AKAGAWA・Taisuke MIYAZONO

要旨

機械事業部門のメニューである圧延機やその上流側や下流側の設備の設計では、各お客様の操業ノウハウや様々なニーズに、真摯に向き合い具現化していく必要がある。本稿では鉄鋼用圧延設備において、操業停止期間を最短化するための工事期間の最短化の工夫、老朽化更新時の省エネ設備の提案、さらにお客様が希望する設備仕様に応えてきた事例を紹介した。また非鉄の箔圧延機では、箔の自動形状制御の高精度化ニーズに対し、制御モデルを非線形に改良し、熟練オペレータの制御修正ノウハウを機械学習させアクチュエータのプリセット精度を向上させることで、定常部の平坦度が約10%改善し、先端形状の修正時間が半減した事例を紹介した。

Abstract

The Machinery Business Division produces rolling mills and their upstream and downstream apparatuses, the design of which requires thorough consideration and realization of each customer's operational know-how and needs. This paper introduces ideas for minimizing construction time to reduce shutdown periods, proposals for energy-saving equipment when updating aging facilities, and cases of responding to customer-desired equipment specifications in rolling mills for steel. In the case of a non-ferrous foil mill, the control model has been improved to be nonlinear in response to the need for high-precision automatic shape control of foils. This has included machine learning of the control correction know-how of experienced operators to improve the precision of the actuator presets, which has in turn resulted in an improvement of approximately 10% in the flatness of the steady state portion and a halving of the tip shape correction time.

検索用キーワード

圧延機, 棒鋼, 線材, 多段圧延機, シャー, KTミル, 機械学習, AI

ま え が き = 電炉を利用した製鉄・非鉄産業は、生産された製品がその役目を終えスクラップとなり、また製品に戻る、リサイクルプロセスとして長きにわたり成立している。そのプロセスの一部である圧延機やその上流側・下流側の設備においても、近年のお客様のニーズである効率化・省エネ・DXをキーワードにさらに改良が続けられている。本稿では機械事業部門のメニューである圧延機やその前後設備において、休止期間の最短化や製品品質向上というお客様の様々な要望を具現化してきたので、その近年の取組み事例を紹介する。

1. 線材・棒鋼用圧延設備の事例

本設備における近年のお客様のニーズとして、大規模な設備更新でも極力生産を継続しながら導入する計画や、設備更新時に併せた省エネ化の計画が挙げられる。

1.1 操業を極力継続しながらの設備更新工事

鉄鋼圧延では24時間の連続操業が通常であり、設備更新の工事期間は、生産計画で許される期間内に留めることが要求される。

操業を続けながら半連続式の旧式圧延設備の空きスペースに最初の数スタンドを設置し、短い休止期間(切換・試運転)を経て設備を立ち上げ、不要となった設備の撤去跡につぎの数スタンドを立上げる。このように短い休

止期間の工事を数回繰り返し完成させる方法がある¹⁾。

また、立上げリスクが複数回に及ぶのを避けたいというお客様に対しては、全ラインの操業休止期間を無負荷・負荷試運転含めて一回で行うこともある。その例として、中間列以降が冷却床を含め二系列あるラインにおいて適用した工事例について紹介する。図1に事前工事のパスラインと工事写真、図2に更新後の機器配置を示す。

- (1) スリット圧延²⁾を導入することで中間の片系列を撤去(図1-①②)
- (2) 着脱可能な仮設誘導装置による圧延ラインの確保(図1-③)
- (3) 三回の計画定期修理期間で既設基礎撤去・掘削と架構による既存設備仮受(図1-④, ⑤)

これにより、粗列～中間列の機器設置と仕上列スタンド廻りとコールドシャの基礎構築までを約8箇月の事前工事で完了した。ホットラン調整5日間を含め52日間の休止期間で加熱炉を除く全圧延ラインを更新し設備を立上げた(図2)。

1.2 圧延効率向上の提案

生産性向上を目的に設備増強の検討を依頼された場合、お客様の検討案を具体化することもあるが、当社より代案を提示することも少なくない。

*1 機械事業部門 技術本部 産業機械技術部

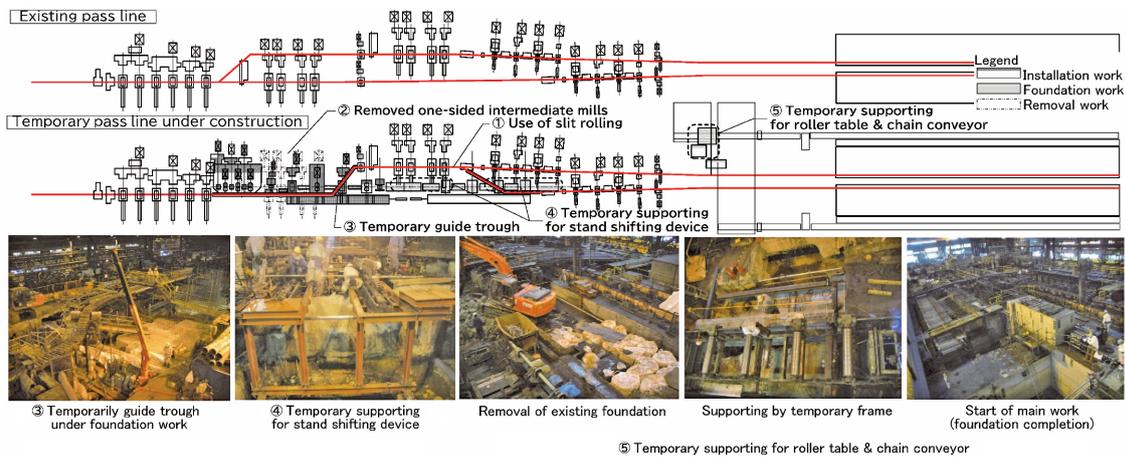


図1 事前工事中のパスラインと工事写真
Fig.1 Pass line and photos of preliminary construction

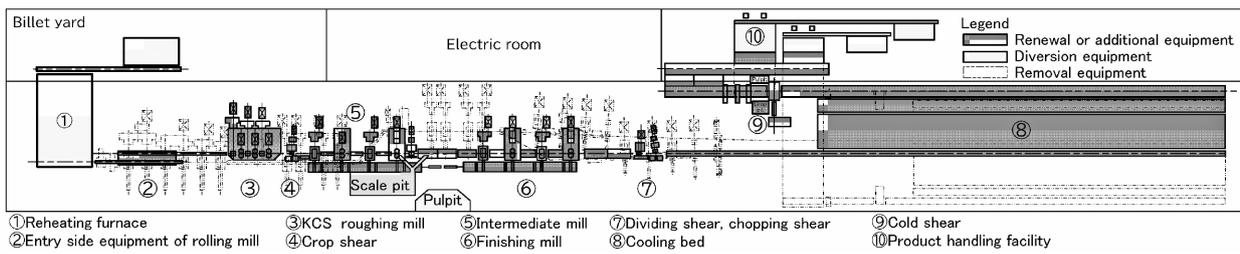


図2 更新後の機器配置
Fig.2 Update layout

小形形鋼圧延設備において、製品サイズアップに伴う駆動トルク増強を要求された例がある。対象とした工場のパススケジュールと機器更新範囲の関係を図3に示す。一般的に連続圧延設備の駆動系トルク容量は上流から下流に向かって小さくなるので、最終圧延を1スタンド上流で仕上げることを提案した。中間列入側材のサイズを大きくする必要があったので、上流に1スタンドを増設する計画とした(図3 Plan B)。

その結果、多くの更新が必要となる当初案(Plan A)に対し、12スタンド中1スタンドの電動機・減速機更新だけの工事(Plan B)で要求に応えることができた。

また、同時に導入された分割シャワー最適切断制御では、秤量器を新設し素材重量で仕上圧延長を予想するシステムの要求があり、最終分割切断の前に圧延が終了するスタンドのパルスカウントを使用するシステムを提案し採用いただいた。

1.3 電源容量の最適化

主電動機は一番負荷の高い圧延サイズに対して容量を決定している。その他のサイズの負荷が全てのスタンドで最高になることは通常無いため、圧延に要する総仕事率(kW)の最大値は、主電動機の容量の総和より下げることが可能である。圧延サイズごとに必要な総仕事率を検討し、数台のコモンコンバータにインバータを最適配置することで、コモンコンバータやトランス容量など電源容量を減らせるので大きな原低効果がある。最適な動力仕様を提案することは、電動機の更新工事においても当社のようなミルメーカーが選ばれる理由の一つである。

STD No.	Existing Product size	Existing & additional size			
		Plan A		Plan B	
From roughing mill		is renewal MOTOR	is renewal MOTOR	is renewal MOTOR	is renewal MOTOR
M0H		-	-	○	○
M1H		○	○	○	-
M2V		-	○	○	-
M3H		○	○	○	-
M4V		X	-	X	-
M5H		○	○	○	-
M6H		○	○	○	-
F1V		X	-	X	-
F2H		○	○	○	○
F3H		-	○	○	-
F4H		-	○	○	-
F5H		○	○	○	-
F6H		○	○	X	-

図3 パススケジュールと機器更新範囲
Fig.3 Pass schedule and equipment updates

1.4 電機品交流化更新の具体事例

2024年に、棒鋼・線材を生産するお客様に対し、主機直流電動機10台と補機直流電動機2台を交流電動機に変更し、制御PLC3台を更新した具体事例を紹介する。

お客様から20日間の操業停止期間を利用して、設備を更新したいとの要請を受け、更新方針の検討を行った。電動機を交流化更新するため、電動機自体の入替に加えて、受配電機器やケーブルの大幅な更新も必要である。コントローラ、ドライブ装置の入れ替え後の試運転調整まで含むと、全機器を一度で更新する案は期間的に

成立しない。そこで、制御コントローラの機能で区分を切り分けて、既設のコントローラとドライブ装置を半分残して更新する案を提示した。その事例では既設電気メーカーが制御コントローラやドライブ装置の事業から撤退しており、更新後は新旧設備のメーカーが混在することになる。コントローラ間で通信が成立するか、指定された期間中にライン全体で機能が満足できるか、確実に設備を立ち上げられるかなど、様々な問題が考えられた。そこで既設コントローラとの通信実績を有し、既設制御機能を満足する改造を実施できる電機サプライヤを当社で選定した。当社が、設計から製作、検査までトータルでエンジニアリングを行った結果、ほぼお客様の要求どおりの期間内で設備の垂直立上げを達成した。

2. 600 tonf大せん断設備の納入事例

特殊鋼製造ラインの中間圧延の前工程に高温矩形断面鋼片のクロップを切断する大せん断設備および前後搬送設備を納入した事例を紹介する。この設備は、お客様から要望を受けた多種の鋼種および断面サイズの鋼片を切断する約600 tonfの切断能力を有した油圧駆動式切断機である。600 tonf大せん断設備本体図を図4に示す。

2.1 お客様の要求仕様に応える提案

本案件は他社製既設切断機の老朽化に伴う更新案件であり、既設機の操業を止めずに切断機を更新するために

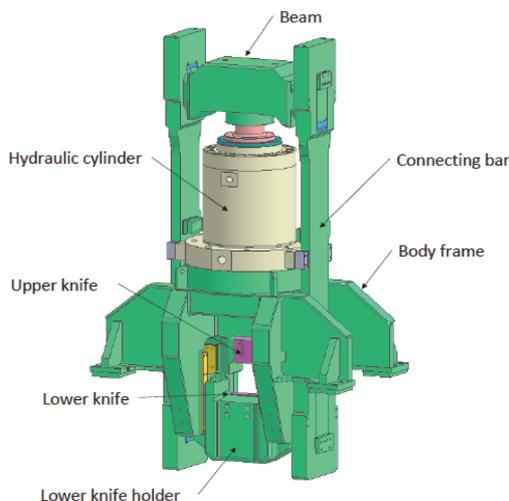


図4 600 tonf大せん断設備本体図
Fig.4 600 tonf Hydraulic shear (shear proper)

既設備に隣接する空きヤードに新切断機を増設、既設製造ラインと接続した。既設切断機は電動駆動式切断機であったが、お客様は設備のコンパクト化およびメンテナンス性を考慮し、油圧駆動式切断機の導入を希望した。

設備設計においては、既設製造ラインとの接続、生産性（サイクルタイム）、製品品質、設備保護、メンテナンス性などの要求をお客様から受け、当社はこれらの要求を具現化するために検討・提案を繰り返し、設計の完成度を高めた。その一例を次節に記す。お客様の要求を満たした本設備は納入後順調に稼働中である。

2.2 技術紹介

2.2.1 油圧切断機の形式

油圧切断機の切断方式は、下刃を上方へ作動させるアップカット式、上刃を下方へ作動させるダウンカット式がある。ダウンカット式の場合は、鋼片をサポートしている周辺設備も上刃に同調して作動する必要があり、設備構成は比較的複雑となるが、切断時の鋼片の曲がりを抑制できるメリットがある。いっぽう、アップカット式は周辺設備の同調機構が不要であり、初期投資や設備メンテナンスの点でメリットがあるため、本案件ではアップカット式を提案し採用された。

また切断方向には、切断刃を鋼片上下面と平行にしてストロークするフラットカット式と、矩形鋼片の対角方向にストロークさせるダイアゴナルカット式がある。ダイアゴナルカット式の方が切断面の変形は小さいが、フラットカットの方が切断ストロークを短くできる利点がある。お客様と協議した結果、次工程の中間圧延では切断面の変形は問題にならないことからフラットカット式が採用された。切断方式の説明図を図5に示す。

2.2.2 クロップ測長方式

切断するクロップ長さは、鋼片の末端形状により様々な長さに設定される。当社が通常納入する従来設備では、鋼片を搬送するローラテーブルの駆動ローラにパルスジェネレータを設置し、ローラ回転数から鋼片の搬送量を測定・制御することで、所定のクロップ切断位置に送っていた。しかし、この方法では鋼片とローラ間にスリップが発生した時に切断長さに誤差が生じてしまう。お客様から新たなクロップ測長方法を導入するよう要望を受け、鋼片端面位置をレーザー距離計で測定し、クロップ長さを制御するオプション機能も併せて納入した。

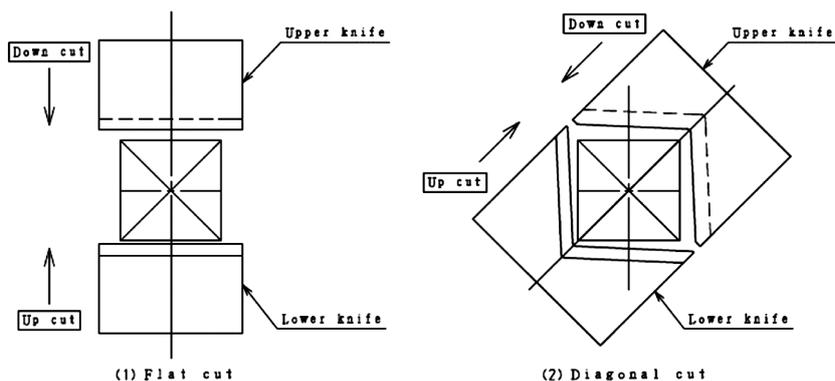


図5 切断方式
Fig.5 Cutting Type

3. 硬質箔用多段圧延設備における自動形状制御の高精度化

高強度極薄板の圧延においては、平坦度と表面光沢において厳格な品質精度が求められる。このため、多段(クラスタ型)圧延機による小径ワークロールでの操業が広く採用されている。

当社の多段圧延機(KTミル)は、小径ワークロールを用いた極薄、硬質材料を効率的、かつ安定的に生産することを目的とし、中間ロールのラテラルシフト、クラウン押出し機構、チルト機構などの多数の形状制御アクチュエータを備えている(図6)。

さらに、圧延機の入出側に形状検出ローラを装備し、自動形状制御システム(AFC)を適用することで、平坦度の高品質化と省人化のニーズに応える設備を提供している。

3.1 高品質・生産性の高い操業ノウハウのシステム化

通常の操業では、全てのオペレータが均質な製品を生産するのは困難で、豊富な経験とノウハウを身につけた一部の熟練オペレータに依存しているのが実態である。

属人化を解消する設備側の代替手段としては、当社は従来から形状影響係数と最小二乗法に基づく線形制御モデルを用いた自動形状制御システムを提供してきた³⁾。

しかし実操業において、材料の板厚や圧延荷重などが大きく変化する場合、形状制御用アクチュエータを手動で補正する場合があります、板形状の安定収束性向上が課題となっていた。

この課題を解決するため、最新の機械学習技術と圧延理論に基づく数理モデルを組み合わせ、熟練オペレータの感覚に近い自動形状制御モデルを開発した。

3.2 技術紹介

3.2.1 非線形影響係数推定⁴⁾

従来形状制御モデルでは、特定の圧延操業条件において、アクチュエータ動作量と形状変化量は線形関係にあると仮定し、独立した制御パラメータと定義していた。

いっぽう、実際の操業では、圧延材先端部では圧延速度の加速に伴い摩擦係数が変化し、初期圧延荷重も変化する。このため、油圧下シリンダが動作して荷重を一定に保つ必要があり、板形状に悪影響を及ぼすケースが

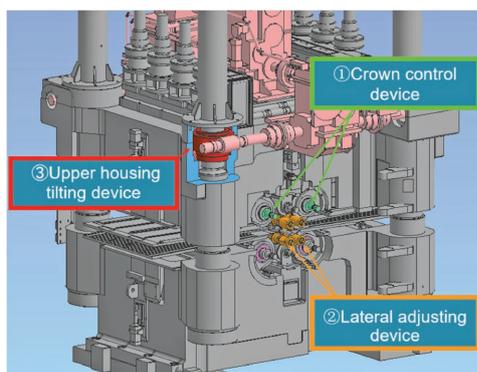


図6 多段圧延機(KTミル)の形状制御アクチュエータ
Fig.6 Actuators of flatness control for multi-high rolling mill (KT mill)

確認されている。

従来、線形形状影響係数の算出モデルは、各アクチュエータの単位動作が板形状に与える影響を幅方向の影響係数分布として多項式近似によりモデル化してきた。いっぽう、アクチュエータが大きく移動し、圧延荷重が大きく変化する場合には、このモデルでは限界がある。そこで、最新のモデルでは、圧延荷重等の影響を考慮した非線形形状影響モデルを採用した。加えて局所外れ値因子法(Local Outlier Factor: LOF)を適用し、圧延パス終了ごとに実績データから影響係数分布を動的に推定して、各制御アクチュエータの動作量と板形状の変化量を正確に反映する方式を開発した。

本手法により、外乱を受けた異常なデータが効果的に排除され、正確かつ妥当なアクチュエータ位置での形状影響係数の抽出が可能となった。

図7に中間ロールシフトでの実例を示す。

3.2.2 各制御アクチュエータのプリセットモデル⁴⁾

圧延先端部の非常状態と前パスから当該パスへの材料の加工硬化に伴う圧延荷重変化を考慮し、圧延開始前に各アクチュエータを事前に適切な位置に設定すること(プリセット)は、圧延材全長にわたる操業の安定化に有効である。適切なアクチュエータ位置の設定は、経験や熟練度に基づく操業オペレータの感覚に依存しており、物理モデルだけでは正確な予測が難しいとされてきた。

一般的に、安定している前パスの圧延荷重(P_{prev})から当該パスの定常状態の圧延荷重変化量(ΔP_1)を推定し、つぎに当該パスの先端部と定常状態の圧延荷重変化量(ΔP_2)を推定する(図8)。これら ΔP_1 および ΔP_2 は、従来はオペレータのノウハウに依存していたが、過去の圧延実績データを用いた機械学習により、圧延荷重を予測できるモデルを構築した。

このモデルにより、前パスの荷重実績を基に当該パスの先端部荷重の増分($\delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2$)を高精度で予測することが可能となる。また、従来は前パスの尾端部の板エッジ部の形状からオペレータ判断によるアクチュエータプリセット方式が一般的であったが、本方式は前パスと当該パスの目標形状の差異を取り込み、総合的に形状偏差を最小化するアクチュエータ位置とすることを実現している。これにより、前パスの圧延荷重(P_{prev})か

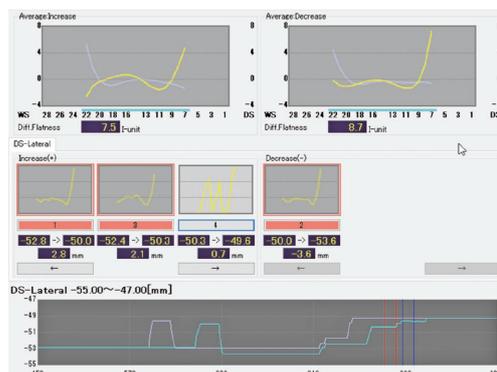


図7 中間ロールシフトの影響係数における局所外れ値除去システム
Fig.7 Remover local outlier of lateral shift for flatness influence

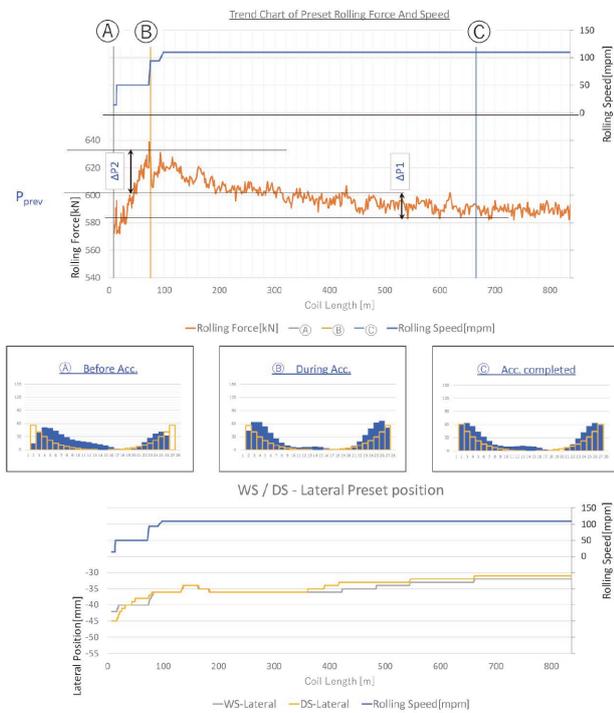


図8 システム適用後の圧延荷重と圧延速度における平坦度の相関図
 Fig.8 Flatness correlation between rolling force and speed after system application

ら現パスの最先端部荷重にラテラル基準位置 (L_{ref}) を初期設定し、荷重変動の予測と形状偏差が最小となる最適なアクチュエータ初期位置を機械学習にて予測することが可能なモデルが完成した。

これらの技術を組み合わせて、当社製圧延機において機能の効果を検証したところ、定常部では平坦度が約10%改善し、先端部分形状の適正精度への収束時間を半減させることが確認できた。

むすび = 製鉄・非鉄機械は、お客様各社の操業技術を設備に反映するため、ほぼオーダメイドにならざるを得ない。お客様のニーズは各社様々であるが、本稿では休止期間の最短化・省エネ・設備仕様要求・製品品質向上に関する近年の実施例を紹介した。

当社の設備が選ばれ続けるためには、これからもお客様のニーズに真摯に耳を傾け、設備として具現化していく必要がある。引き続きお客様に寄り添いながら、製鉄・非鉄業界の発展に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 黒田直行ほか. R&D神戸製鋼技報. 2008, Vol.58, No.2, p.7-11.
- 2) 西垣内徳生ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.2, p.64-68.
- 3) 宮園太介ほか. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.67, No.2, p.39-43.
- 4) 逢坂武次ほか. 材料とプロセス. 2025, Vol.38, p.75-77.

(概説)

お客様の「より良い環境をつくる」に寄り添う KOBELCOの機械装置

入谷一夫

執行役員 機械事業部門 技術本部長

KOBELCO Machinery – Stay Close to Customers in Creating Better Environments

Kazuo IRITANI



今、気候変動をはじめとする地球規模での環境問題に対し、国際社会は脱炭素化への流れを加速させている。2020年10月、日本政府は2050年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言した。2022年10月までに、150以上の国と地域が、2050年などの年限付きのカーボンニュートラルの実現を表明した。産業革命以前からの世界の平均気温上昇を1.5℃までに抑えるため、再生可能エネルギーや水素、アンモニアなどの非化石エネルギーなどへのエネルギー転換をはじめとする様々な技術革新とその社会展開が急務となっている。

当社グループは、持続的な地球環境への貢献といった社会要請の高まりを中長期的な事業環境として認識し、2021年5月に「グリーン社会への貢献」をはじめとしたマテリアリティ（中長期的に取り組むべき重要課題）を特定し公表した。そして、2024～2026年度の当社グループ中期経営計画においては、「稼ぐ力の強化」と「成長追求」とともに「カーボンニュートラルへの挑戦」を継続して取り組む方針を掲げ、AX（Ambidexterity, 両利きの経営）とGX（Green Transformation, グリーン・トランスフォーメーション）を最重要課題としている。

当社の機械事業は、1915年に国内初のレシプロ式空気圧縮機を製造して以来、エネルギー・化学をはじめとした各種産業分野において、お客様の「つくる」という本質課題に向き合い、当社独自の最善の解決策として、多種多様な機械装置やサービスをグローバルに提供してきた。

機械事業におけるGXは、自社の生産プロセスにおけるCO₂削減と、当社独自の機械装置・サービスによるCO₂排出削減貢献の二つの側面がある。後者の対応として、お客様の「つくる」に伴う本質課題の一つである脱炭素化に対して、当社独自の解決策で貢献するために、様々な製品の開発、実証、提供を行っている。その多くは、機械事業が持つ多数のコア技術を用いて、脱炭素化に貢献する形に適応開発したもの、または機械事業だけでなくKOBELCOグループ全体のアセットを組み合わせ生み出されたものである。

本特集では、脱炭素化社会の実現に向けた「より良い環境をつくる」に寄り添う当社の機械装置の実例として、つぎの2点を取り上げる。1点目は脱炭素手段として注目される水素の製造および利活用のための機械装置であり、2点目は様々な環境用途で用いられる圧縮機やヒートポンプである。いずれの製品も、お客様および当社の生産プロセスにおけるCO₂排出削減への貢献度の高い製品であり、以下に簡単に紹介する。

まず、1点目として、水素の安定供給を実現するハイブリッド型水素ガス供給システムを代表例として挙げる。これは、水素の製造から活用までを実証するための、機械事業を含むKOBELCOグループならではの、多様なアセットを活かした設備であり、再生可能エネルギー由来の水素と、貯蔵した液化水素とを供給源としたハイブリッド型のシステムである。水素ガスの生成には、(株)神鋼環境ソリューションの水電解水素ガス製造装置HHOG[®]と、当社の中間媒体式の極低温液体水素気化器を用いている。当社グループは水素関連の技術および製品の開発を推進しており、水道水と電気のみで水素生成を可能とするユーティリティレスのHHOG[®]や、中間媒体式に加えてオープンラック式とマイクロチャネル熱交換器という液体水素気化器ラインナップでの特性や利点をそれぞれ検証した実証試験などに取り組んでいる。さらに、水素を「つくる」技術に加え、当社素材系事業の実生産プロセスでの燃焼設備や燃料を「使う」技術やノウハウを掛け合わせ、既存設備のボイラや工業炉における水素利活用を進めるための実証を進めている。

そして、2点目として、LNG運搬船でのCO₂排出削減や、CO₂回収・貯留（CCS）、長期エネルギー貯蔵（LDES）などの環境用途で用いられる圧縮機を挙げる。当社は、スクリュ、ターボ、レシプロという3タイプの圧縮機を製品ラインナップとして保有し、石油化学などの既存分野で信頼性の高い製品を長年提供してきた。その中で確立し発展させてきた、性能向上や幅広い仕様への対応といったコア技術を、カーボンニュートラルに向けたお客様の「より良い環境をつくる」取り組みにも応用している。また、コベルコ・コンプレッサ(株)で開発、設計、製造するヒートポンプにおいても、環境負荷の少ない低GWP（地球温暖化係数）冷媒やノンフロン冷媒の採用に加え、燃焼式ボイラに代替する高温水取出ヒートポンプチラーの排熱回収効果も取り込むことでCO₂排出量削減と持続可能な社会の実現へ向けた取り組みを進めている。

当社機械事業のパーパスの冒頭にある、『お客様の「つくる」に寄り添う』を達成するための第一歩は、お客様の「つくる」に伴う本質的な課題を正しく理解することである。その課題に対して、当社独自の最適な解で応え続けるために、お客様をはじめ皆様からの忌憚（きたん）のないご意見をいただくとともに、持続可能な社会の実現へ向けたパートナーとして、ともに前進するための対話をお願い申し上げる。

(解説)

「ハイブリッド型水素ガス供給システム」によるボイラ・工業炉での水素利活用

今用浩司*1・田中孝二*2・香川公伸*3・松岡 亮*4(博士(工学))・村上和希*4・藤澤彰利*4(博士(工学))

Hydrogen Utilization in Boilers and Industrial Furnaces Using Hybrid Hydrogen Gas Supply System

Hiroshi IMAYO・Koji TANAKA・Kiminobu KAGAWA・Dr. Akira MATSUOKA・Kazuki MURAKAMI・Dr. Akitoshi FUJISAWA

要旨

脱炭素手段としてCO₂フリー水素が注目されている。水素社会への過渡期において、大規模な水素供給インフラが整備されるまでは、オンサイトで再エネ電力を使って水素を製造し、その場で利用する「地産地消型の水素利活用」が現実的である。しかし、再エネ電力は安定確保に課題がある。そこで、当社では安定した水素供給を実現するため、「再エネ電力由来の水素」と「貯蔵した液体水素」の二つの水素供給源を併せ持った「ハイブリッド型水素ガス供給システム」の開発、実証を進めている。

また、水素を利用する設備においては、既存設備の大規模な改造や更新を行うのではなく、既存設備を最大限活用しながら燃料転換することが現実的である。

このように水素社会への過渡期においては、水素の供給側と利用側の双方の視点で現実的な水素供給・利用の始め方を考えていくことが重要であり、当社高砂製作所において、水素の製造、供給から、ボイラおよび加熱炉での水素利用までの一連の実証を進めることで、水素社会実現への貢献を目指している。

Abstract

CO₂-free hydrogen is attracting attention as a decarbonization measure. In transitioning to a hydrogen society, the use of hydrogen in a local production for local consumption model, utilizing electricity derived from renewable sources for on-site production and utilization of hydrogen, is a realistic solution until a large-scale hydrogen supply infrastructure is established. However, electricity derived from renewable sources faces the challenge of ensuring a stable hydrogen supply. To counter this, Kobe Steel is developing and demonstrating a hybrid hydrogen gas supply system that combines two hydrogen supply sources: hydrogen derived from renewable energy sources and stored liquid hydrogen.

In addition, it is more realistic for facilities that use hydrogen to convert fuel while making the most of existing equipment rather than undergoing large-scale modifications or renovations. Therefore, in transitioning to a hydrogen society, it is important to consider how to start a realistic hydrogen supply and utilization system from the perspectives of both hydrogen suppliers and users. Kobe Steel's Takasago Works strives to realize a hydrogen society by demonstrating a series of steps, from hydrogen production and supply to hydrogen use in boilers and heating furnaces.

検索用キーワード

水素、水電解式水素発生装置、液化水素気化器、運転マネジメントシステム

ま え が き = 2020年10月、日本政府は、2050年までに温室効果ガスの排出を実質ゼロとする「カーボンニュートラル」を目指すことを宣言した。さらに、2023年6月には「水素基本戦略」が改訂され、水素の社会実装に向けた方針や、水素産業の競争力強化に向けた方向性が示された¹⁾。同戦略では、水素の供給コスト目標として、2030年に30円/Nm³、2050年に20円/Nm³が設定されている。また、これまでの取り組みとして、豪州において水素の製造が進められ、2022年2月には世界初の液体水素運搬船による日本への大規模海上輸送が成功を収めた。

現在、国内に供給される一次エネルギーの約90%は化石資源に依存しており、その約40%は熱エネルギーとして消費されている。さらに、その熱エネルギーの約40%が産業部門で使用されており、カーボンニュートラ

ル(CN)の実現には、電力の脱炭素化に加え、熱エネルギーの脱炭素化も重要な課題となっている。熱エネルギーの脱炭素化の手段の一つとして、CO₂フリー燃料への転換が求められている。本稿では、CO₂フリー燃料として現時点において有望と考えられている水素に着目し、1章にて着目した理由を後述する。CO₂フリーな水素としては、再生可能エネルギー由来の電力を用いて、水電解式水素発生装置(以下、水電解装置)で製造される「グリーン水素」や、炭化水素系の化石燃料を改質して製造された水素のうち、製造時に発生したCO₂を回収、貯留または再利用することでCO₂排出量を抑えた「ブルー水素」がある。しかし、グリーン水素については国内の再エネ電力が普及の途上であるため、確保できる量が限られ、調達も容易ではない。また、都市ガスなどの既存燃料と比較して大幅にコストが高いのが現状である。

*1 機械事業部門 新事業推進本部 新事業企画部(現 機械事業部門 技術本部 回転機・機器技術部) *2 事業開発部
*3 エンジニアリング事業部門 新規事業推進室 *4 技術開発本部 機械研究所

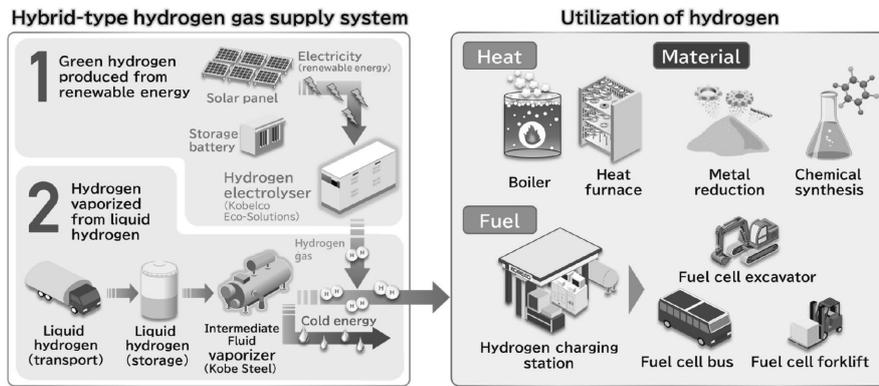


図1 ハイブリッド水素ガス供給システム
Fig.1 Hybrid-type hydrogen gas supply system

ブルー水素については前述の豪州の取り組みの様に、海外から液体水素として安価で国内に輸入されることが期待されているが、2030年代以降と予測されている。したがって、エネルギーの安定供給が求められる産業部門においては、現時点で供給インフラが整備されていないCO₂フリー水素への燃料転換は容易ではない。

そこで本稿では、水素供給、利用を段階的に拡大していく具体的な方策として、図1に示すとおり、まずはオンサイトでの水電解装置による再エネ電力由来のグリーン水素製造から開始し、液体水素（グリーン水素またはブルー水素）の安定、安価な調達が可能となった段階から、液体水素を併用していくハイブリッド型水素ガス供給システム（2章）を提案する。

当社高砂製作所（兵庫県 高砂市）では、鋳鍛鋼・チタン・鉄粉などの素材系事業とエネルギー関連機器などの機械系事業の生産拠点であるため、多数のボイラや加熱炉で消費している化石燃料のCO₂フリー燃料への転換が求められるいっぽう、お客様の脱炭素に貢献できる製品・技術の提供も求められている。そこで、当社と、(株)神鋼環境ソリューション、(株)コベルコE&Mの技術と製品を組み合わせ、水素を「使う」側と「創る」側が連携した水素利活用の検討および実証試験を進めている²⁾。

1. 高砂製作所における水素利活用ポテンシャル

多くの企業でCO₂削減の取り組みが始められており、オンサイトPPA「Power Purchase Agreement」（需要家の敷地内に第三者である発電事業者が太陽光発電設備を導入し、需要家が発電事業者から消費電力量に応じた電気料金を支払う）を活用した再エネ電力の導入といった「電力のCN化」は検討が進んでいる。しかし、800℃～900℃以上の高温域で使用される工業炉では、電化は炉内循環用のRCファンの耐熱性などにより困難であるため、「熱エネルギーのCN化」においては、水素やアンモニアなどのCO₂フリー燃料への燃料転換が脱炭素の有効な手段の一つになる。

現時点でどのCO₂フリー燃料が優位になるか見極めることは困難であるが、「①水素はバーナ開発が先行し、水素ガス焚きボイラが商品化されていること」、「②水素は燃料用途以外にも様々な用途に使用できること」、「③

水素は多様な調達先（国内の再エネ電力由来の水電解水素、海外から調達するブルー水素またはグリーン水素、国内の副生水素など）から確保できるため、エネルギーセキュリティの安定化に寄与できること」、「④アンモニアは毒性ガスのため臨海地にある発電所など人を隔離できる場所では使用できるが、内陸地の工場では漏洩した場合のリスクが高く、MCHは水素を取り出すために大量の熱エネルギーが必要」の4点の理由から、産業部門においては水素による燃料転換に取り組むことが現時点においては有望と考えられる。

当社高砂製作所は、素材系および機械系事業の多種多様な工場があり、燃焼容量および稼働パターン（連続運転や間欠運転、運転時の負荷変動など）の異なるボイラ、加熱炉を100基以上運用している。多拠点かつ多種多様な水素の利活用先を対象とした水素供給、利活用モデルの検討結果は、自社のCN化に貢献するだけでなく、国内での様々な業種の工場のCN化の検討に寄与することが期待できる。そこで、稼働中のボイラ、加熱炉、金属還元設備、産業車両などの現在のエネルギー需要をベースに、各設備でのCO₂フリー水素（アンモニア、MCHなどの各種水素キャリアを含む）の利活用ポテンシャルを把握するとともに、CO₂フリー水素の調達・貯蔵・供給・利用の一連のモデル設定および必要な費用の概算を行い、水素利活用拡大に向けた課題の抽出と解決方針の検討を行った。³⁾

試算の結果、アンモニアは水素キャリアの調達と需要家受入設備の費用が最も低く、水素利活用モデルの総費用も最安となることが示された。ただしアンモニアは、前述のとおり内陸地の工場ではリスクがある。いっぽう、液体水素はアンモニアと比較して輸送や貯蔵の技術成熟度が低いものの、将来的なコストダウンの余地が大きいと考えられ、アンモニアと液体水素の費用差は縮小する可能性がある。最適な水素キャリアを選択するためには、工場が立地する地域の水素キャリア導入方針も重要なポイントとなる。水素サプライチェーン構築の検討が進んでいる神戸・関西圏に位置する当社高砂製作所においては、将来の水素供給網の拡大を見据え、水素による工場の熱エネルギーの燃料転換に向けた検討を進めている。

2. 水素を創る

水素の供給方法は、水素の需要規模、需要パターンおよび燃料転換の程度に応じて適切に選択する必要がある。例えば、数台の燃料電池式フォークリフトへの水素供給であれば、水素カードルを用いた供給で十分と考えられる。いっぽう、ボイラや加熱炉の燃料として利用する場合、水素ガスパイプラインによる供給体制、液体水素サテライト基地（液体水素を貯蔵し、必要に応じて工場へ供給する設備）などの大規模供給設備の設置が必要となる。しかし、水素価格が高く、供給インフラが不十分な黎明（れいめい）期では、水素を利用する工場は限定的であると考えられる。水素需要が小規模な段階では、大規模な水素製造設備や供給設備の構築が進まず、供給インフラのコストダウンも進まないため、水素への燃料転換が停滞する可能性がある。したがって、中長期的な視点で燃料転換を推進するためには、水素需要の創出と水素供給インフラの構築を連携させ、段階的に水素需要を拡大していくことが水素サプライチェーンの確立において重要となる。

現在、国内で入手可能な液体水素はLNGを改質して製造されたグレー水素のみであり、海外から安価なCO₂フリー水素が本格的に輸入されるのは2030年代以降と予測されているため、水素供給網の整備が進み内陸部での利用が可能になるまでには、さらに時間を要すると考えられる。それまでの水素利用導入期においては、水電解装置と太陽光発電などの地域の再エネ電力を活用し、オンサイトでグリーン水素を製造・利用する「水素の地産地消」が現実的な選択肢となる。また、オンサイトの水素製造設備は、電力需要に対して余剰となった再エネ電力を水素に変換し貯蔵、利用できるため、地域同一性・時間同時性が求められる再エネ電力の調整力としても期待できる。

また、時間経過とともに水素利用量が増加してきた際に、再エネ電力由来の水素だけでは供給が不足し液体水素の併用が必要になると考えられる。将来的に海外からCO₂フリーの液体水素が輸入されるようになって、各工場が個別に液体水素の貯蔵、気化、供給設備を保有することは多大な費用負担となり、導入が進まない可能性が高い。そこで、複数の工場や工業団地で共有の液水設備を導入することで個々の企業の負担を軽減でき、水素利用の拡大が期待されると考えている。

以上のように、水素サプライチェーンの構築に向けては需要拡大と供給設備構築の歩調を合わせて進めていくことが重要であり、まずは地域の再エネ電力を活用した水電解によるオンサイト水素製造・利用を行い、不足する水素は国内グレー水素などの液体水素で補完、将来的に液体水素には国内外のグリーン水素へと切り替えていく方針が水素導入期には有望である。本章では、このような水素導入期における水素供給を見据えた「ハイブリッド型水素ガス供給システム」の概要、構成する製品・技術について紹介する。

2.1 「ハイブリッド型水素ガス供給システム」の概要

当社では、“再エネ電力由来の水電解による水素製造プロセス”と“貯蔵した液体水素の気化プロセス”の二つの供給システムを併せ持ち、2システムをつなぎ合わせ最適に制御するための“運転マネジメントシステム”を有する「ハイブリッド型水素ガス供給システム」を考案し、技術開発および実証試験を行っている⁴⁾。本システムは、水素利用が普及し始める期間（導入期）および水素利用が拡大する期間（拡大期）の両フェーズに対応できる水素供給プロセスと考えており、以下に当社が想定している水素供給プロセスの導入モデルを示す。

まず、導入期ではCO₂フリーの液体水素が安定・安価に供給されていないため、再エネ電力にてCO₂フリーな水素が製造できる水電解装置からの水素供給となる。そのうえで、工場の安定操業が最優先事項であるため、導入期では水電解装置の信頼性と運用のしやすさが特に重要となる。また、水電解装置の運転に必要な電力については、オンサイトの再エネ電力は天候に左右され不安定であるため、再エネ電力が電力需要に対して余剰となる場合には蓄電池に充電し、再エネ電力が電力需要に対して不足する場合には系統からの電力（再エネ証書付き電力や安価な時間帯の電力）を受電することが重要となる。そこで、水電解装置にて再エネ電力を最大限活用しながら、安定かつ安価に電力を確保する電力制御機能を有する“運転マネジメントシステム”開発を進めており、2.1.3項にて後述する。

拡大期では、CO₂フリーの液体水素の供給が開始されているため、工場の水素利用率拡大に伴う設備増強において、既設の水電解装置由来の水素に加え液体水素を併用する水素供給システムにアップグレードさせる。貯蔵しておくことで供給量の調整が容易な液体水素を併用することにより、水電解装置から供給されるCO₂フリー水素の不安定性を解消する。また、液体水素の気化時に発生する冷熱を工場内設備冷却や空調、ヒートポンプなどに利用できるため、お客様のプロセス効率向上・省エネルギー化にもつながる。加えて、水電解装置由来の水素と液体水素を併用することで、海外から調達する液体水素だけでなく、水電解装置の水素は国内で生産されたエネルギーにて国内で製造しているため、地域のエネルギーセキュリティの強化にも寄与できる。

水電解装置由来の水素と液体水素を併用するうえで、水素ガスの需要量に対する両者の供給量のバランスが重要となる。そこで、水電解装置へ供給する系統電力の単価、液体水素の単価、CO₂排出量原単位に応じて、ランニングコストもしくはCO₂排出量をお客様のニーズに合わせ、選択的に最小化し得る制御機能についても“運転マネジメントシステム”の機能として開発を進めている。

図2に示すハイブリッド型水素ガス供給システムの実証設備を2023年3月に完成させ、実証試験を進めている。図3に本実証設備のフロー図を示す。水電解装置には、(株)神鋼環境ソリューション製のHHOG[®]（2.1.1項にて詳述）を導入し、液体水素気化器には当社の中間媒体式気化器（2.1.2項にて詳述）を導入した。また、再

エネ電力設備としては、太陽光発電設備（2.1.1項にて詳述）および蓄電池を設置した。加えて、本実証設備は水素ステーション建設の実績を通して各種水素関連設備のノウハウを有する(株)コベルコE&MがEPC（プラント設計・設備調達・建設）を担った。次に本システムを構成する主要機器と運転マネジメントについて述べる。

2.1.1 再生可能エネルギーを活用した水電解装置

(株)神鋼環境ソリューションでは、固体高分子電解質膜を用いた水電解装置 HHOG[®]（High-purity Hydrogen and Oxygen Generator）の技術開発に取り組んできた。

これまで電子産業や金属工業等の製造工場といった産業用プロセスガス用途を中心に納入してきたが、近年CN化の手段として太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーを用いて製造された水素の利用が注目されており、水素ステーションや燃料電池、水素ボイラといったエネルギー用途としても幅広く活用されるようになってきている。

水電解装置の稼働にはユーティリティとして水道水、電気のほかに、窒素ガス、冷却水、計装用圧縮空気を使用されるが、これらのユーティリティが設置場所周辺にない場合には、水電解装置に加えてユーティリティ設備の導入が必要となり、お客様にとって障害となっていた。そこで、必要なユーティリティのうち、水道水と電気以外を不要とした「オールインプラン機」を2023年3月に商品化している。

詳細な内容については、本号p.50「HHOGユーティリティレス機「オールインプラン」の開発」をご参照いた

だきたい。

単独の試運転評価を終えた「オールインプラン機」の実証機は、当社高砂製作所に移設後、ハイブリッド水素ガス供給システムの実証に活用している。また、夏場および冬場での健全性を確認するため、現在も長期運転を継続するとともに、導入を検討されているお客様に太陽光電力で運転している様子を見学いただく場としても活用している。

本実証設備に導入した太陽光発電設備は、公称最大出力が105 kWであり、水電解装置の実証機のフル負荷消費電力50 kWの約2倍の出力とした。太陽光発電量は、図4に示す本実証で得られた運転実績のとおり、パネルの設置状況、日射量、日射角度の影響により日中に大きく変動するため、夜間や曇天等で発電できる時間が限られるいっぽうで、晴天時のピーク出力が非常に高くなってしまった。したがって、水電解装置のフル負荷消費電力を太陽光発電の最大出力より低く設定することで、発電量が少ない時間帯にも再生可能エネルギーの利用割合を高めることができる。

前述のとおり、水電解装置のフル負荷消費電力を太陽光発電の最大出力より低く設定しているため、晴天時には水電解装置の必要電力を上回り、余剰電力が発生するいっぽう、曇天時には発電量が大きく低下し、水電解装置の必要電力を下回ることがある。また、日射角度が低くなる冬には、太陽光パネルへの照射角度が悪くなり、発電量が全般的に低下する。このように、太陽光発電は季節や天候の影響を受けやすく、水電解装置にとって不

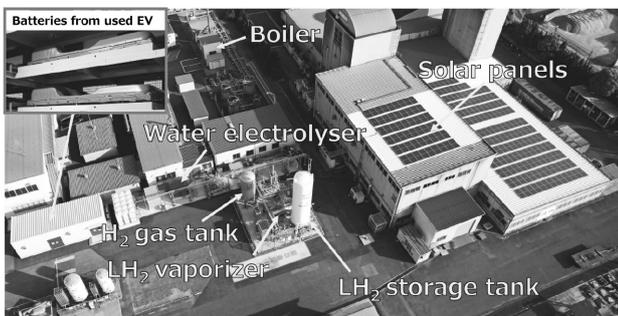


図2 ハイブリッド水素ガス供給システム実証設備（高砂製作所）
Fig.2 Hybrid-type hydrogen gas supply system demonstration facility (Takasago works)

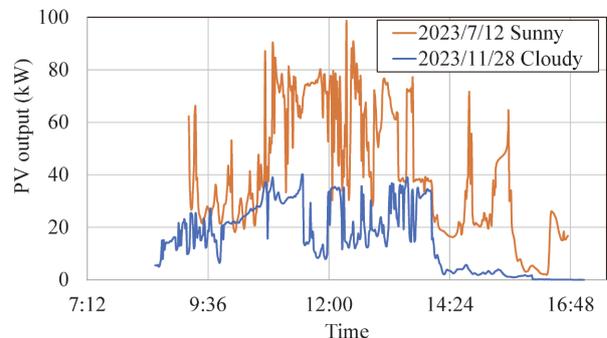


図4 太陽光発電量の代表例
Fig.4 Typical examples of solar power production

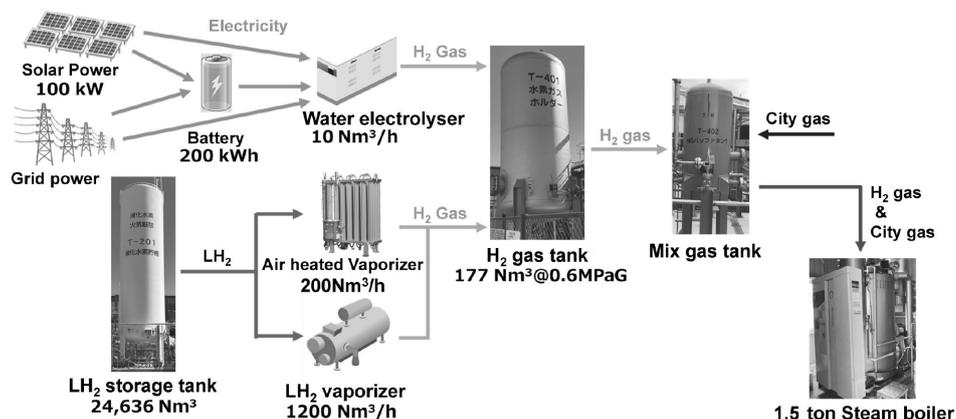


図3 実証設備の概要
Fig.3 Overview of demonstration facility

安定な電力供給源である。そのため、前述のとおり、不安定な太陽光発電を時間帯や天候に応じて蓄電池や系統電力でバックアップすることに加え、液体水素気化プロセスも併用し安定、安価かつ低炭素な水素を供給することが重要となる。上記を実現するための制御システムである“運転マネジメントシステム” (2.1.3項) で説明する。

2.1.2 中間媒体式の極低温液体水素気化器

グリーンイノベーション基金事業「大規模水素サプライチェーンの構築」において、CO₂フリー水素の海外からの輸入が検討されている。水素は気体状態では密度が非常に小さいため、ガスの状態では輸送に不向きであり、-253℃で液化して気体状態の1/800の体積に縮小した液体水素での海上輸送が検討されている。輸入された液体水素は真空二重保冷された液体水素貯蔵タンクに貯蔵され、需要に応じて気化して供給される。水素ガスの液化には多くの電力が使用されており、気化時に冷熱として回収、利用することができれば、省エネ、CO₂削減に寄与することができ、水素発電などで大量に使用されるようになれば、液体水素の冷熱回収・利用は必須と考えられる。

液化天然ガス (LNG) 気化器のトップメーカーである当社は、国内外へ多数の納入実績があり、気化時の冷熱回収に適した中間媒体式気化器 (IFV: Intermediate Fluid type Vaporizer) をラインナップしている。

そこで、当社ではLNG気化器で培った技術を活用したIFV方式の液体水素気化器を国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成事業において開発した⁵⁾。詳細な内容については、本号p.54「3タイプの液化水素 (LH₂) 気化器における実証試験の紹介」をご参照いただきたい。

2.1.3 水素を“創る・使う”を監視制御する運転マネジメントシステム

運転マネジメントシステムは、3種類の電力供給源 (太陽光発電、蓄電池、系統電力) を持つ水電解装置にて製造した水素ガスと液体水素を気化した水素ガスの供給量のバランスを制御するとともに、水電解装置への電力供給を制御することにより、CO₂排出量および水素の供給コストを抑制し、かつ2系統の水素供給源が水素需要に対して補い合うように制御することで、水素ガスを安定的に供給させるシステムを目指している。インプット情

報 (翌日の需要量、天候、原単位、運転モードなど) から事前に作成した供給計画 (水電解装置への電力供給バランス、水素製造量、液体水素の気化量など) をもとにした自動運転制御、運転監視を行うシステムの構築を進めている。以下に、実証を完了した内容および今後の開発内容について述べる。

水電解装置を供給計画に沿って運転するために必要な電力供給バランスを制御するシステムについて実証を行い、**図5**に水電解装置での運転結果を示す。2.1.1項で示したとおり、水電解装置のフル負荷消費電力 (50 kW) を太陽光発電の最大出力 (105 kW) より低く設定しているため、本実証設備では、水電解装置の電力需要に対して太陽光発電量が余剰となった際には蓄電池に貯蔵でき、太陽光発電量が不足となった際には蓄電池から放電してバックアップ供給ができ、それでも不足する場合は系統電力から電力供給し得るシステムを構築した。これにより、不安定な再エネ電力を蓄電池および系統電力で補い、水電解装置に供給する電力を安定化させることができる。また、水電解装置に供給する電力 (太陽光発電、蓄電池、系統電力) の優先順位を手動で選択できる機能を導入しており、再エネ電力を優先的に使うことでCO₂削減量を最大化する運転が基本となるが、電力が安価な時間帯においては系統から安価な電力を優先的に供給する運転を選択可能とした。**図5**に示すとおり、余剰電力が発生する時間帯は蓄電池に蓄電し、水電解装置への供給電力が太陽光電力だけでは不足する時間帯は第二優先の蓄電池から放電している。さらに、蓄電池残量が下限値を下回れば第三優先の系統電力からも受電し、安定的に水電解装置を定格運転していることが分かる。

運転監視システムについても実証を行い、**図6**に示すとおり、水素の製造・貯蔵・供給の状況をリアルタイムで監視できる画面を実証設備に導入した。また、供給した水素のCO₂排出量とコストを計算し、日報や月報の形で出力も可能とした。これにより、水素供給プラントのCO₂排出量のモニタリングを簡易化し、コスト構造 (系統電力価格、液体水素価格など) の明確化による水素の普及、拡大に応じた水電解設備、液水設備、再エネ設備等の設備投資におけるデータに基づいた意思決定を可能とする。

今後は供給計画作成機能の実証を計画しており、「CO₂

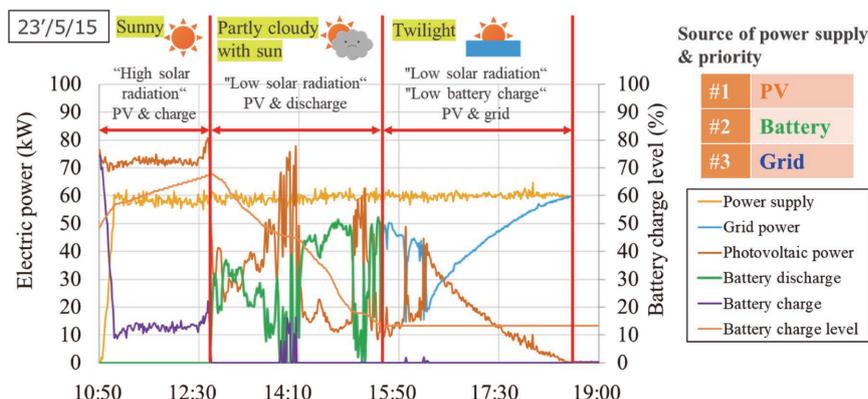


図5 水電解装置への電力供給の一例
Fig.5 Examples of power supply to electrolyser

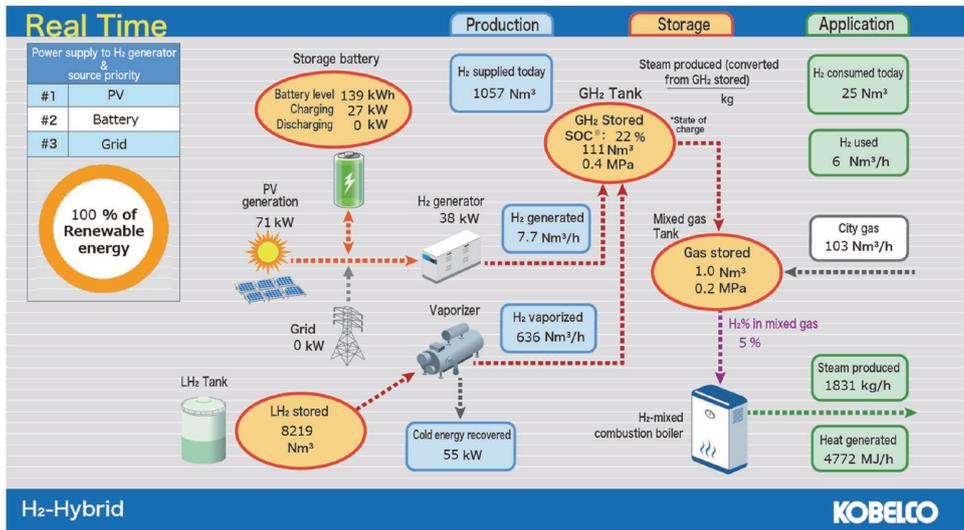


図6 運転マネジメントシステム リアルタイム画面
Fig.6 Real time monitor of operation management system

削減効果優先モード」と「コスト優先モード」から選択されたモードに応じて、事前にインプットされた水素ガス需要の計画値から水素供給計画を自動計算し、水素供給設備を自動制御する機能の開発を進めている。水素供給計画を作成する機能には、日射量予測データに基づく太陽光発電量予測技術を用いた蓄電池の充放電量の計画値を算出する機能を組み込むことにより、日射量の予測値が高い時間帯に蓄電の余力を確保し、太陽光発電の余剰電力を最小化させる。また、昼間の系統電力の受電電力量を予測できるため、必要量だけ蓄電しておいた安価な深夜電力を昼間に放電することで、昼間の受電電力量を最小化する。加えて、CO₂排出量もしくはコストのどちらかを最小化するように、昼間の蓄電余力と夜間の蓄電量のバランスを計算する機能も併せ持つ。

3. 水素を使う

近年、水素利用機器として水素専焼ボイラや水素混焼ボイラが発売され、工業炉においても水素バーナの開発が進んでいる。しかし、産業部門では安定操業やコスト削減が優先されるため水素の供給が安定せず、コストも高い黎明期において多額の設備投資を伴う水素への燃料転換を進めることは困難である。この課題を克服するためには、既存設備を活用することにより段階的に水素利用を拡大することで、設備投資額を抑えることが重要である。そこで、以下に水素利用側における既存設備を活用した水素への燃料転換の方策について示す。

既存の燃料である都市ガス13Aからの水素への燃料転換において、水素と都市ガスでは発熱量、燃焼速度、火炎温度が異なるため、都市ガス13Aから水素に完全に切り替えるためには水素燃焼に対応したバーナなどを搭載した設備に置き換える必要があり、既存設備が活用できない。そこで、図7に示す通り、水素が普及し始める導入期の段階的な燃料転換として、都市ガス13Aと水素の混焼が現実的な選択肢であると考えた。都市ガス13Aへの水素混合割合が20 vol%程度であれば、都市ガス13Aの燃焼特性規格範囲内⁶⁾となるため、都市ガ

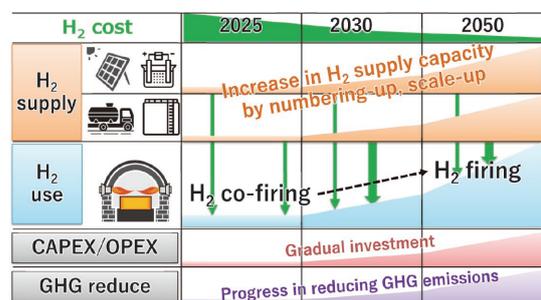


図7 段階的な燃料転換シナリオの概要
Fig.7 Overview of phased fuel conversion scenarios

ス13A用バーナ搭載の既存の燃焼設備でも水素混焼は可能と考えられる。

既存燃焼設備での水素混焼利用では、水素の供給が不安定化しても都市ガスによる運用に戻し生産活動を維持できるため、導入期の水素利用の有効な手段となり得ると考えた。

その後の水素普及拡大期においては、段階的に水素用バーナ搭載の燃焼設備を導入することが現実的である。この場合も既存設備を残したうえで、水素設備を併用することが操業へのリスクヘッジ面では有効であるが、多くの工場では設置場所の確保が問題になると思われ、設備更新の時期も見据えた燃料転換計画が重要である。

当社高砂製作所では、水素の利用先となる様々な燃焼容量をもつ約100基のボイラ、工業炉を使用しており、既設の都市ガスボイラ、工業炉を活用した水素利用、水素燃焼に替えた場合の加熱特性および被加熱物への水素の影響などを検証するための実証に取り組んでいる。⁷⁾

3.1 燃焼式ボイラでの水素利用

多くの工場で使用されている小型貫流ボイラは、既に水素専焼タイプが発売されているが、黎明期においては水素の確保が課題になる。例えば、蒸発量2 ton/hの水素専焼ボイラ1台の定格運転には約400 Nm³/hの水素が必要であり、CO₂フリーの液体水素が安定、安価に供給されない段階ではオンサイトでCO₂フリー水素を製造することになる。そのため、400 Nm³/hの水素を製造でき

る大規模な水電解装置を導入し、2 MWクラスの再生電力（水電解装置の消費電力5 kW/Nm³として計算）を確保する必要がある。これに対応する太陽光パネル設置には約10,000 m²（東京ドームのグラウンド程度）の設置場所が必要であるが、多くの工場では確保することが困難である。仮に太陽光パネルを設置できても年間平均稼働率は15%程度であり、安定して水素を製造してボイラへ供給するためには系統から再生電力を調達する必要がある。さらに、複数台の小型貫流ボイラを台数制御している工場であれば、必要な設備はさらに大規模となり、水素専焼ボイラを導入できる工場は限定されると考えられる。

水素の安定確保には課題があるが、前述のとおり、既存の都市ガスボイラでの水素混焼運転が可能であれば、再生電力由来水素の確保が難しい工場においてもCO₂削減を進めることができる。そのため、都市ガスボイラで水素混焼させる場合の課題を明確にする必要がある。そこで、既設の都市ガス焚き小型貫流ボイラを用い、水素混焼試験を実施した⁸⁾。

図8に当社高砂製作所のハイブリッド型水素ガス供給システム実証設備とボイラのレイアウトを示す。所定の体積比で都市ガスと水素を混合し、ボイラに供給する構成となっている。ボイラには、(株)サムソン製の都市ガス用小型貫流ボイラ（都市ガス用）NFBS-1500PN（換算蒸発量1.5 ton/h）を使用した。このボイラの運転負荷調整は、高/低燃焼モード、停止の三位置制御であり、バーナの燃焼方式はノズルミックス方式（燃料と空気を

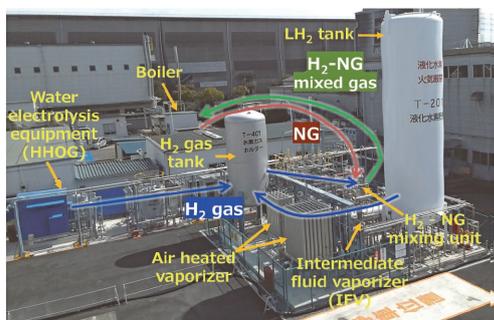


図8 実証設備と小型貫流ボイラ
Fig.8 Demonstration facility and small one-through boiler

別々に供給し、バーナ先端の火口で混合して燃焼させる）である。

都市ガスやプロパンガスは、ガス小売り事業者から安定した成分で需要先に供給される。いっぽう、水素混焼を行う場合、都市ガスと水素の混合はボイラ利用側で行うことになる。ボイラ運転中に水素混合率が変動すれば適正な燃焼条件から逸脱し、不完全燃焼やNO_x量増加といった問題が生じる可能性があり、水素混合率を安定的に維持できることが求められる。

図9に本実証設備の水素混合システムの概要を示す。都市ガス/水素混合ガスタンクの圧力測定値と設定値の差に応じて水素ガスおよび都市ガスのタンクへの流入流量が調整されるカスケード制御方式とした。この時に水素ガス流量センサの設定値QHおよび都市ガス流量センサの設定値QCは、所定の都市ガス/水素混合率に応じた比率 α となるように設定されることで、都市ガスと水素の混合率が一定に維持されるようにした。都市ガスと水素は単位体積あたりの熱量が異なるため混合ガスの熱量から混合率を算定できるので、タンクの出口に熱量センサを設置し、水素混合率を監視した。

図10に、30 vol%水素混合ガスを供給しボイラ負荷を変動させながら運転したときの混合ガス流量と熱量の経時変化を示す。ボイラの負荷変動に応じて混合ガス流量は変動するが、混合ガス熱量は一定である。構築した水素混合システムを用いることでボイラの負荷が変動し、燃料ガス消費量が変動する状態であっても一定の組成で都市ガスと水素の混合ガス供給を行えることを確認した。

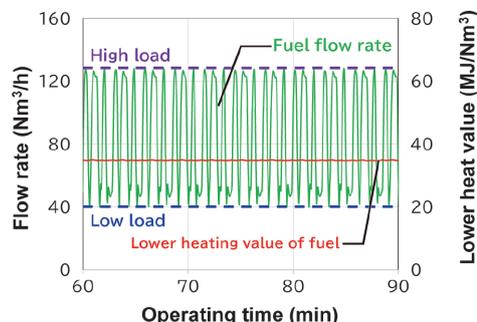


図10 水素30 vol%混合時の混合ガス供給
Fig.10 Evaluation of supply stability of 30 vol% H₂ mixed gas

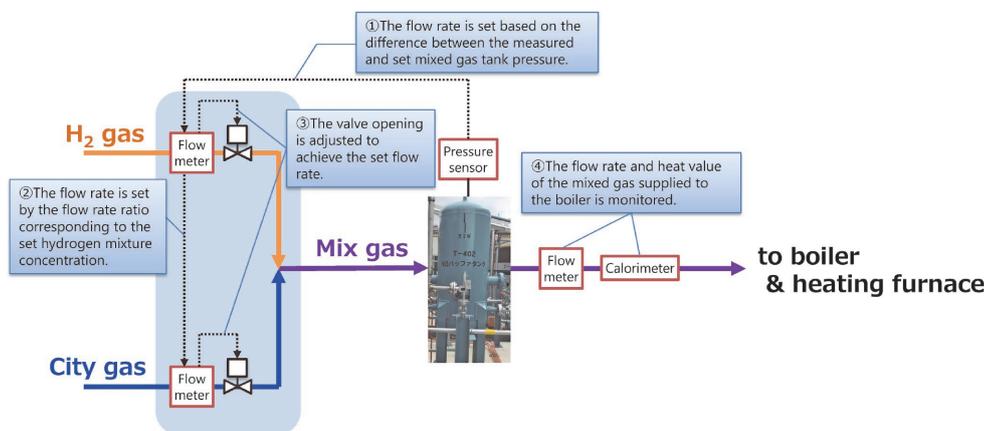


図9 水素混合システムの概要
Fig.9 Overview of hydrogen mixing system

表1に水素濃度0~30 vol%混合における定格負荷運転時のボイラ性能を示す。いずれの水素濃度においてもボイラ効率は都市ガス専焼と同等であった。また、排ガスについてもNO_x濃度やO₂濃度も同等であり、本ボイラの自治体と協定の最大NO_x濃度60 ppm (O₂濃度5%換算)以下となった。

この実証から、都市ガスボイラであっても、水素30 vol%までの水素混焼は可能であることが明らかとなった。しかし、水素混焼による火炎温度の上昇や、それによるバーナやボイラ缶体等の長期的な劣化有無は確認できておらず、今後検証していく必要がある。また、ある特定メーカーのボイラでの実証結果であり、他メーカーのボイラでも同様に水素混焼が可能であるかどうかは、各ボイラメーカーへ確認が必要である。なお、主要な貫流ボイラメーカーへのヒアリングを進めており、都市ガス用ボイラでの水素混焼の可否についてはメーカーによって異なる見解が得られている。ただし、水素混焼ボイラの開発⁹⁾や都市ガス用ボイラのパーツ交換により水素混焼ができるようにする¹⁰⁾など、ボイラメーカーにおいても水素混焼への対応が進められている状況である。今後ボイラメーカーとの対話を継続し、水素供給側と利用側の双方の視点で合理的な水素利用の開始、拡大方法について検討していく。

3.2 加熱炉での水素利用

図11に当社高砂製作所で稼働している加熱炉の容量別設置台数の分布を示す。燃焼容量が1 MW~3 MWの加熱炉が多く占め、国内の加熱炉も同規模サイズが多数を占めていると考えられる。したがって、まずは2 MW級の加熱炉を対象とした水素への燃料転換を検討しており、当社の既設の加熱炉を活用した実証試験と新設の試験炉での実証試験を進めている。以下に、2種の実証試験について説明する。

2章にて段階的な燃料転換シナリオを示したが、安定・安価な水素が供給されるまでには時間が掛かるため、

燃料転換の初期の段階では水素専焼炉に置き換えるのではなく、既設の加熱炉が活用可能な水素混焼から水素利用を開始することが重要と考えている。例えば、水素専焼にて2 MWの燃焼容量を満たすには667 Nm³/h (水素の低位発熱量10.8 MJ/Nm³)の水素供給が必要となり、安定・安価な水素が流通していない段階では、安定的な運用が難しいと考えられる。また、既設加熱炉の活用であれば、水素の供給が不安定化した場合でも都市ガスによる運用に戻すことができ、加熱炉の操業を維持できる。そこで、当社高砂製作所の、設置から50年近く経過する既設の加熱炉(図12)を活用し、改造の必要が無い水素混焼比率および水素専焼を行うために必要な改造範囲を調査するため、水素混焼および水素専焼試験を進めている。

また、加熱炉において燃料を水素へ転換する場合、水素と既存の化石燃料(都市ガスなど)は燃焼特性(燃焼速度、火炎温度)や燃焼雰囲気ガスの成分(水蒸気分圧など)が大きく異なる。特に製品(被加熱物)が高温の水素燃焼雰囲気に曝される直接加熱炉では、製品への品質影響(スケール、脱炭、水素量)、製品への加熱特性(伝熱量/温度分布)を十分に検証しておく必要がある。そこで、当社高砂製作所にて、水素混焼および水素専焼時の燃焼特性、加熱特性、製品への品質影響の詳細なデータ分析を行うため2 MW級の水素実証炉を新たに設置し、水素混焼および水素専焼試験を進めている。

当社は高砂製作所含め500台以上の加熱炉を保有しており、それぞれの加熱炉は被加熱物の金属種、処理温度、加熱方式が異なるため、当社内に多様なスペックの加熱炉が存在している。そのため、2 MW級、直接燃焼式の加熱炉を対象とした実証試験を進めているが、横展開を見据えた技術開発(燃焼シミュレーションの構築、材料評価技術の構築など)を実施している。

水素供給側と水素利用側の双方の視点で実証を行うことで、利用側(加熱炉)の水素需要変動に対する供給側(気化器、水電解装置)の追従性や起動発停の影響に関するノウハウ蓄積など、水素供給側、水素利用側が一体となった技術課題の抽出、技術開発を進めている。

既設の加熱炉を活用した燃料転換の実証試験に加え、新設の試験炉での水素混焼および水素専焼の実証試験を行うことで、水素利用が普及し始める期間(導入期)および水素利用が拡大する期間(拡大期)の両フェーズに

表1 水素混合率を変えた場合のボイラ性能比較

Table 1 Comparison of boiler performance at various H₂ conc.

H ₂ conc.	0%	10%	20%	30%
Boiler efficiency [%]	91.3	90.3	90.7	90.5
Exhaust gas NO _x conc. [ppm, 5%-O ₂]	48.5	46.2	47.9	47.0
Exhaust gas O ₂ conc. [vol%]	3.8	3.3	3.7	3.6

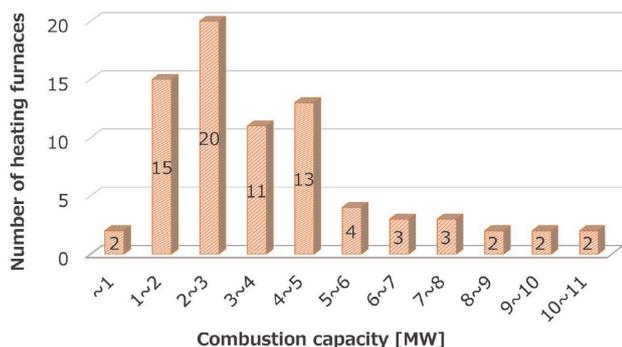


図11 加熱炉の燃焼容量の分布

Fig.11 Distribution of combustion capacity of heating furnaces



図12 改造予定の加熱炉

Fig.12 Heating furnace scheduled for modification

対応できる燃料転換についての知見が得られ、加熱炉での水素利用が広がると考えている。

むすび＝カーボンニュートラルの実現に向け、水素サプライチェーンを構築するためには水素供給側と水素利用側の双方が連帯して取り組むことが必要不可欠である。様々な規模のボイラ、工業炉を操業している当社高砂製作所において、水素による燃料転換の課題を明らかにし、課題解決に向けた検討、実証を進めることは、自社のカーボンニュートラルだけでなく、得られた知見や実績は熱エネルギーを使用する産業部門での脱炭素の取組みにも寄与できると考えている。

また、当社グループは今中期経営計画（2024～2026年度）においては、当社グループが魅力ある企業へと変革していくために取り組むべき変革を総称して「KOBELCO-X」と名付け、七つのXを設定している。本稿で紹介した水素利活用に関する取組みは、以下のAX, GXの一例と考えている。

■AX（Ambidexterity：両利きの経営／既存事業の深化×新規事業機会探索）

機械・エンジニアリング系部門（ハイブリッド型水素ガス供給システムの開発）と素材系部門（加熱炉での水素利用）が連携し、水素利活用の実証を加速

■GX（Green Transformation）

CO₂フリーな水素供給技術の高度化および熱エネルギーとしての水素利用推進による脱炭素への寄与

最後に、これらの成果の一部は、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）の助成事業「水素社会構築技術開発事業」（JPNP14026）により得られた成果であり、ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 内閣官房 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議資料
2023年6月6日。
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy_kaitai.pdf(参照2024-12-13).

- 2) 「KOBELCOグループが提案する液体水素利活用システム「ハイブリッド型水素ガス供給システム」を用いた水素供給・燃焼試験開始について」
神戸製鋼所, 2023年9月14日。
https://www.kobelco.co.jp/releases/1213956_15541.html
(参照2024-12-13).
- 3) 「NEDO「水素社会構築技術開発事業」に採択～「熱によるエネルギー消費が主体の工場の脱炭素化に向けた水素利活用モデルに関する調査」～」
神戸製鋼所, 2022年5月19日。
https://www.kobelco.co.jp/releases/1210226_15541.html
(参照2024-12-13).
- 4) 「KOBELCOグループが提案する液体水素利活用システム「ハイブリッド型水素ガス供給システム」の実証試験開始について」
神戸製鋼所, 2022年5月19日。
https://www.kobelco.co.jp/releases/1210227_15541.html
(参照2024-12-13).
- 5) 「NEDO「水素社会構築技術開発事業」に採択～「液化水素冷熱の利用を可能とする中間媒体式液体水素気化器の開発」～」
神戸製鋼所, 2022年5月19日。
https://www.kobelco.co.jp/releases/1210224_15541.html
(参照2024-12-13).
- 6) 矢田部 隆志, “低炭素社会の実現に向けた水素エネルギーについて(3)－熱需要におけるCO₂フリー水素による化石燃料代替－”, 「特定非営利活動法人」国際環境経済研究所, 2017-05-17.
<https://ieei.or.jp/2017/05/expl170517/?type=print>
(参照2024-12-13).
- 7) 「NEDO「水素社会構築技術開発事業」2023年度第1回公募に採択～熱エネルギー消費が主体の工場の脱炭素化に向けた燃焼式工業炉での水素利活用の実証～」
神戸製鋼所, 2023年9月14日。
https://www.kobelco.co.jp/releases/1213954_15541.html
(参照2024-12-13).
- 8) 村上和希, 化学工学会第55回秋季大会, 講演番号K116, 2024-9-11/12/13.
- 9) 「潜熱回収や水素混焼にも対応可能なガス焚小型貫流ボイラ「スーパーエクオス EQO-2000シリーズ」販売開始のお知らせ」株式会社日本サーモエナー, 2024年10月01日。
<https://www.n-thermo.co.jp/topics/detail.php?pkId=97>
(参照2024-12-13).
- 10) 「主力製品ガス焚きボイラSQが水素混焼可能に！」三浦工業株式会社, 2024年7月10日。
<https://www.miuraz.co.jp/news/newsrelease/2024/1633.php>
(参照2024-12-13).

(解説)

HHOGユーティリティレス機「オールインプラン」の開発

高雄 悟*¹・中尾末貴*¹

Development of HHOG Utility-Less machine, “All-in-Plan”

Satoru TAKAO・Sueki NAKAO

要旨

2050年カーボンニュートラル達成に向けて、今後、グリーン水素、および水素を製造する水電解装置市場の拡大が予想される中、我が国は水素社会の実現に向けて主に技術面で世界をリードしてきた。(株)神鋼環境ソリューションは、高純度水素発生装置HHOG[®]を1996年に上市して以来、固体高分子電解質膜を用いる水電解方式として国内最多となる250基以上の納入実績がある。今般、装置の運転に必要なユーティリティを最小限とするオールインプラン機（AP機）を商品化し、2024年10月に一号機をお客様へ納入した。今後もお客様の要望を先取りし、大容量ラインアップの拡充、コストダウンや耐久性向上を継続し、水素エネルギー社会の未来に貢献していく。

Abstract

As the market for green hydrogen and water electrolyzers that produce hydrogen is expected to increase in the future with the goal of achieving carbon neutrality in 2050, Japan has been leading the world primarily in terms of technology, mainly for the realization of a hydrogen society. Since the launch of the HHOG[®] high-purity hydrogen oxygen generator in 1996, Kobelco Eco-Solutions Co., LTD. has delivered more than 250 units, the largest number in Japan for a water electrolysis system using a polymer electrolyte membrane. We recently commercialized an all-in-plan unit (AP machine) that minimizes the utilities required to operate the equipment and delivered the first machine to a customer in October 2024. Going forward, we will continue to anticipate customer demands, expand our lineup of large-capacity options, pursue cost reductions and durability improvements, and contribute to the future of a hydrogen energy society.

検索用キーワード

水素、水電解、脱炭素、カーボンニュートラル、気候変動、再生可能エネルギー、固体高分子電解質膜、PEM、HHOG

ま え が き = 2017年、我が国は水素の国家戦略「水素基本戦略」を世界に先駆けて策定¹⁾し、水素社会の構築に向けて世界をリードしてきた。この後の大きな節目として2020年10月の「2050年カーボンニュートラル宣言」²⁾があり、これを実現する国家戦略「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」³⁾では、2050年の水素供給コストを20円/Nm³程度以下にするとの目標が掲げられたほか、上記戦略を推し進めるための「グリーンイノベーション基金」⁴⁾が造成されるなど、経済支援政策も整備が進んできた。また、2024年10月に施行された「水素社会推進法」⁵⁾では、事業者が計画認定を受けることで、「価格差に着目した支援制度」、「拠点整備支援」の助成金交付に加え、高圧ガス保安法などの規制に対する特例適用を受けることができ、低炭素水素の導入を促進する制度設計となっている。このような国家戦略や各種支援制度を受け、脱炭素化に向けて水素が担う期待と役割は今後より一層色濃く、注目されると考えられる。

(株)神鋼環境ソリューション（以下、当社という）は水素基本戦略が策定される以前の1996年から水素社会の到来を見据え、水電解式水素発生装置（High-purity Hydrogen and Oxygen Generator、以下HHOG[®]）を商品化し、固体高分子電解質膜（Polymer Electrolyte

Membrane、以下PEM）を用いた電解方式として国内最多となる250基以上の納入実績を有している。納入実績の例として、大手メーカー工場での再エネ利活用実証、小規模事業所での金属熱処理用途、水素ステーション用途などがあり、多様な用途と規模のお客様の要望に応えてきた。

今般、さらなる商品価値向上のため、HHOGの運転に必要なユーティリティを最小限とするオールインプラン機（以下、AP機）を開発・商品化⁶⁾し、2024年10月に商用一号機をお客様へ納入した。本稿ではその概要を報告する。

1. 開発コンセプトと装置仕様

1.1 HHOGの概要

HHOGは、PEM型の水電解方式を採用している。図1に純水の電気分解の原理を示す。本方式は、PEMが電解質として機能して純水を直接電気分解するという原理のため、発生する水素に不純物が含まれにくく、高純度（99.999%以上）の水素ガスの製造・供給が可能である。また、水素ガスの一般的な供給方式である圧縮水素の場合と比較して、供給ガスが高圧ガス保安法の定める高圧ガスに該当しないことや、ガスボンベなど空容器の交換作業の手間が不要であること、容器交換の際の不

*1 (株)神鋼環境ソリューション プロセス機器事業部 水素事業推進部

純物混入のリスクがないことなどの特長も有する。このほか、原料が純水のため危険な化学物質や薬品などを一切使用しないこと、装置内の水素保有量が少ないことから安全性が高いこともHHOGの特長である。HHOGの運転に必要なユーティリティは「水道水・電気・窒素ガス・冷却水・計装空気」の5点であり、水道水・電気はPEM型水電解の原理上欠かせない要素である。窒素ガスは装置停止時の配管パージガス用途、冷却水は装置の冷却用途、計装空気は空圧弁への供給用途として用いる。

1.2 コンセプト

当社HHOGのこれまでの主要なお客様は、大手製造メーカーなどの事業所から、小規模な研究施設まで様々である。ここで、お客様の設置環境によっては、必要ユーティリティのうち複数不足する事例も少なくない。この場合、お客様でのユーティリティ整備が必要となるため、付帯設備の新規導入コストに加え、それらの維持管理作業が必要であり、お客様にとって大きな負担となる。

このような背景から、お客様からは必要最低限のユーティリティのみで水素発生可能な装置の開発が求められてきた。そこで、「水道水と電気のみで水素発生可能」をコンセプトとしたAP機を開発し、脱炭素に向けて水素を活用したい事業者にとって導入しやすいシステムとした。

1.3 装置仕様

水素発生量 10 Nm³/h の従来機「CH-10D」、および AP

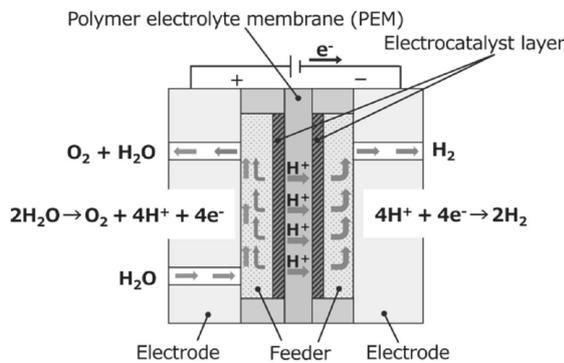


図1 純水の電気分解の原理
Fig.1 Principle of electrolysis of pure water

機「CH-10D-AP」の装置仕様を表1に示す。変更点は、主にユーティリティ削減に伴う仕様と屋外設置を念頭にした局舎仕様の標準化である。AP機の水素ガス純度は従来機と同様に、PEM型水電解方式の長所として99.999%以上の高純度としているほか、除湿方式は当社にて実績豊富な温度スイング吸着（Thermal Swing Adsorption：TSA）方式としており、露点は-70℃以下である。また、供給圧力も従来機と同様に0.82 MPa（ゲージ圧）としており、高圧ガス保安法の定める高圧ガスに該当しない。

2. ユーティリティ削減のための機器選定と局舎設計

従来機種に必要なユーティリティのうち、窒素ガス・冷却水・計装空気を不要とするための要素機器を選定した。以下に各要素機器の概要を紹介する。

2.1 窒素富化膜

HHOGの安全対策として、装置内部で酸素と水素が混合することを防止するため、運転停止後の容器および配管内部に残存するガスを不活性ガスである窒素でパージする設計としている。従来機種では、パージ用ガスの供給源として、窒素ポンプをお客様にて準備する必要があった。AP機ではこれを不要とするため、窒素富化膜、およびコンプレッサの圧縮空気を用いて所定圧力の窒素ガスを装置内で生成する設計とした。

パージ用ガス用途として用いる窒素ガスは必要な純度が求められ、装置運用時の安全に関わる重要な要素である。可燃性ガスである水素で満たされた空間に対し、不活性ガスとして窒素を添加してパージする際の支燃性ガスを酸素と想定した場合、爆発限界酸素濃度は2%である⁷⁾ため、当社では1%以下（窒素濃度99%以上）を基準と定め、窒素富化膜の性能確認試験を行った。図2に窒素富化膜の性能確認試験装置を示す。本装置では、窒素富化膜入口の圧縮空気圧力に応じて酸素濃度が1%（≒窒素濃度99%）となるようニードル弁で流量調整し、流量および窒素濃度が安定した時の窒素流量を計測した。図3に入口空気圧ごとの窒素流量の計測結果を示す。コンプレッサで生成する圧縮空気の最低圧力

表1 装置仕様

Table 1 Equipment specifications

Device name		High-purity Hydrogen Oxygen Generator (HHOG®)	
Model		CH-10D	CH-10D-AP
H ₂ generation method		Polymer Electrolyte Membrane Water Electrolyzer (PEM-WE)	
Dehumidification method		Thermal Swing Adsorption (TSA)	
H ₂ gas	Generation amount	Max 10.0Nm ³ /h	
	Purity	More than 99.999%	
	Pressure	0.82MPa (Gauge pressure)	
	Dew point	Less than -70°C (Under atmospheric pressure)	
Required utilities		Power supply Water supply Cooling water Instrument air Nitrogen gas	Power supply Water supply
Enclosure		Optional	Standard specifications

0.4 MPaGに対し、濃度99%以上の窒素流量が10L/min以上得られることを確認した。本流量は、運転準備段階において窒素用バッファタンクを必要圧力まで昇圧する際や、運転中の消費量に対して十分な流量である。

以上の結果から、パージガスとして必要な濃度および流量の窒素を、選定した窒素富化膜にて精製可能であることを確認した。

2.2 エアフィンクーラ

装置の冷却のため、従来機種では電解モジュールで発生する最大熱量以上の熱交換能力を有する熱交換器を備え、所定仕様の冷却水を供給することで、装置内の循環水温度を一定値以下に保つ設計としている。ここで、冷却水はお客様にて準備が必要であるが、AP機では冷却方式を水冷から空冷へと変更することで、冷却水を不要とする設計とした。空冷機器の選定にあたっては、交換熱量を従来機の水冷方式と同等として算出し、これを満足するエアフィンクーラを選定した。

最低限必要な冷却能力は、電解モジュールの単位時間あたりの最大発生熱量 Q_{max} に安全率を乗じて算出される。 Q_{max} は、電解モジュール内の触媒温度(≒装置内循環水温度)、水素および酸素の分圧により若干の差異が生じるもの⁸⁾、以下の(1)式にて実用的に十分な精度をもって見積もることができる。

$$Q_{max} = N_m N_c I (V_{cell} - V_d) [W] \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

N_m : モジュール数 [-]

N_c : モジュールあたりの電解セル数 [-]

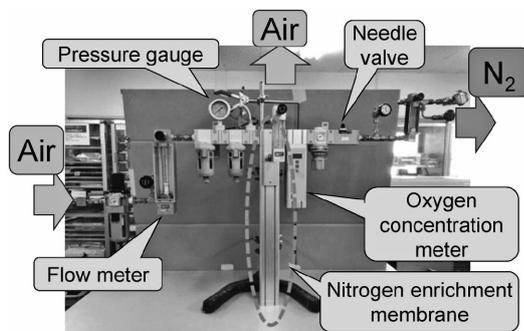


図2 窒素富化膜の性能確認試験装置
Fig.2 Performance test apparatus of N₂ generation unit

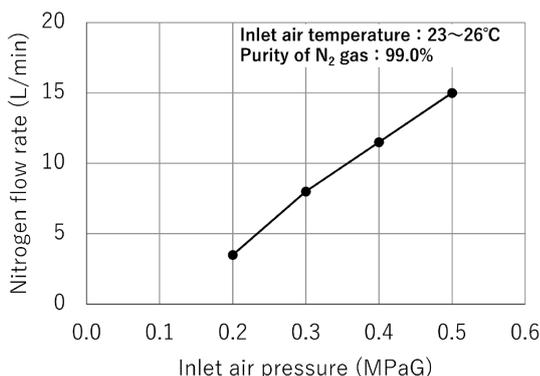


図3 入口圧ごとの窒素流量の計測結果
Fig.3 Measured N₂ flow rate under different inlet air pressure

I : セル電流 [A]

V_{cell} : セル電圧 [V]

V_d : 理論電解電圧 [V] (≒1.48)

上記(1)式を踏まえて必要な冷却能力を算出し、表2に示すエアフィンクーラを採用した。

2.3 コンプレッサ

従来機種では、装置内エアー弁などの駆動に必要な計装空気はお客様からの供給を必要とするが、AP機では装置内で計装空気を生成するためのコンプレッサを搭載した。コンプレッサの仕様として必要な容量は、エアー弁や窒素富化膜の空気消費量、および装置起動後のバッファタンク内圧を運転可能圧まで昇圧するのに要する時間を考慮して選定した。

2.4 局舎

AP機では屋外設置に対応できるよう、局舎付きを標準仕様とした。図4に局舎の外観図を示す。局舎の外部に設置する機器は、放熱のためのエアフィンクーラ、および整流器(屋外仕様)であり、その他の機器は全て局舎内に収納した。局舎には換気ダクトおよび換気ファンが付属し、常時換気を行うことにより、夏場の炎天下においても局舎内の空調は不要としている。

また、メンテナンススペースを考慮したAP機の設置エリアを図5に示す。メンテナンス時は局舎の扉を開けた状態で作業する場合があるため、両開き扉のサイズを考慮して装置周辺1,000 mm以下の範囲をメンテナンスエリアとし、さらに外側900 mmの範囲を通路エリアとした。

表2 エアフィンクーラ仕様(抜粋)
Table 2 Air fin cooler specifications (extraction)

Item	Specification
Heat exchange method	Air-fin cooling
Piping material	SUS316L
Fin material	A1050P
Power supply	Φ3-200V
External dimensions (Unit : mm)	W875 × D875 × H750 (Excluding protrusions)

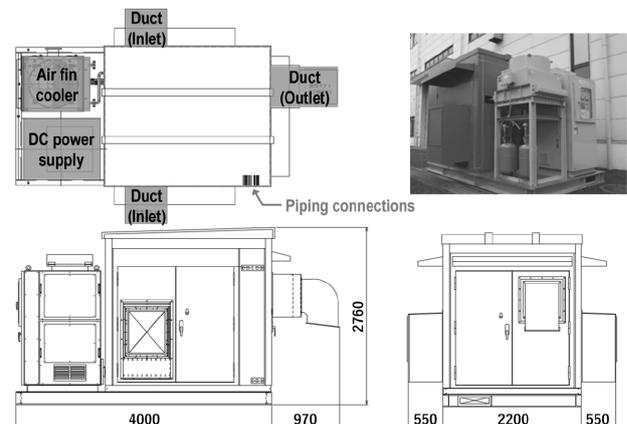


図4 局舎
Fig.4 Station housing

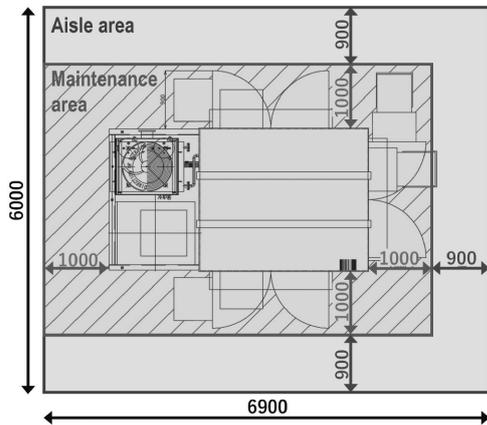


図5 AP機の設置エリア
Fig.5 Installation area of AP-model

3. 試運転評価

AP機の性能評価のため、2022年8月～10月の3箇月にわたり、当社の技術研究所にて実証機による試運転評価を実施し、いずれの機器も問題なく動作することを確認したほか、本装置にて生成する水素ガスが表1に示す仕様を満足する品質であることを確認した。

また、本実証機は2023年1月に神戸製鋼所高砂製作所へ移設したのち、長期運転性能の評価を実施した。HHOGの一般的な運用を想定した運転サイクルとして、平日の就業時間帯に連続運転を行い、夜間および休日に停止する運用方法とした。その結果、一年以上にわたって大きな問題なく継続的に稼働できており、長期運転性能についても問題のないことを確認したため、試運転評価の結果も受けてAP機の実証を完了した。商品化後に受注した商用一号機は、2024年10月に無事お客様へ納入された。

むすび＝水素基本戦略が策定される以前の1996年から水素社会の到来を見据え、水素発生装置HHOGを商品化して以来、当社は業界と規模の異なる様々なお客様へ納入し、その実績は合計250基を超えた。今般、ユーティリティ削減に対する根強いお客様のニーズを実現する最新機種として、「水道水と電気のみで水素発生可能」としたオールインプラン機を開発・商品化した。開発にあたっては、ユーティリティ削減のための補器選定や要素試験を行い、実証機を用いた社内試運転評価、および神戸製鋼所高砂製作所での長期運転性能の評価を行い、いずれも問題のないことを確認した。上市後の商用一号機は2024年10月に納入され、引続き拡販が期待される状況である。今後もお客様の要望を先取りし、HHOG大容量ラインアップの拡充、装置コストダウン、消費電力低減や耐久性向上を継続し、水素エネルギー社会の未来に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 内閣官房.水素基本戦略. 2017-12-26
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy.pdf. (参照2024-12-23)
- 2) 首相官邸. 第二百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説. 2020-10-26
https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026s_hoshinhyomei.html. (参照2024-12-23)
- 3) 経済産業省. 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略. 2021-06-18
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/pdf/green_honbun.pdf. (参照2024-12-23)
- 4) 経済産業省. グリーンイノベーション基金事業の基本方針. 2024-06
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/gifund/09.pdf. (参照2024-12-23)
- 5) 経済産業省. 水素社会推進法について. 2024-06-07
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/014_01_00.pdf. (参照2024-12-23)
- 6) 株式会社神鋼環境ソリューション. 2023-03-09
<https://www.kobelco-eco.co.jp/topics/pdf/2022/20230309.pdf>. (参照2024-12-23)
- 7) 柳生昭三. 安全工学. 1986, Vol.25, No.4. P.194.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/safety/25/4/25_194/_pdf
- 8) 平井清司ほか. 神鋼パンテック技報. 1998, Vol.42, No.1. P.61.
https://www.kobelco-eco.co.jp/development/docs/140_09.pdf

(解説)

3タイプの液化水素(LH₂)気化器における実証試験の紹介

三輪泰健*1・鈴木朝寛*1・江頭慎二*1・東 正高*1・鶴 慶彦*1・西村拓己*1

Demonstration Tests of Three Types of Liquid Hydrogen (LH₂) Vaporizers

Yasutake MIWA・Tomohiro SUZUKI・Shinji EGASHIRA・Masataka AZUMA・Yoshihiko TSURU・Takumi NISHIMURA

要旨

当社は液化天然ガス(LNG)気化器を利用用途に応じて提案できるよう複数タイプ保有しており、長年培ってきた設計・製作技術を基に液化水素(LH₂)気化器の開発を行っている。

液化水素は-253℃で貯蔵され、LNGより約100℃低い温度で処理する必要があるため、熱交換器としての技術的難易度が高い。そのため、性能計算および熱応力計算の裏付けとして実液での実証試験を行うことで信頼性を確保する必要があると判断し、小型実証機を試作して液化水素を用いた実証試験を遂行中である。

それぞれ特徴の異なる3タイプ(中間媒体式気化器(IFV)、オープンラック式気化器(ORV)、マイクロチャネル熱交換器(DCHE))の実証試験の現況を報告する。

Abstract

Kobe Steel owns multiple types of liquefied natural gas (LNG) vaporizers to suit various applications and is developing liquid hydrogen (LH₂) vaporizers based on the design and manufacturing techniques the company has cultivated over many years. Liquid hydrogen is stored at -253°C and must be processed at a temperature approximately 100°C lower than LNG, posing great technical challenges for a heat exchanger. Therefore, reliability should be secured by conducting actual liquid demonstration tests to back up performance and thermal stress calculations. To this end, a small demonstration machine has been prototyped to conduct demonstration tests using liquid hydrogen. This paper describes the current status of demonstration tests of three types of vaporizers with different characteristics: an intermediate-medium vaporizer (IFV), an open rack vaporizer (ORV), and a microchannel heat exchanger (DCHE).

検索用キーワード

液化水素(LH₂)気化器, 液化水素(LH₂)冷熱利用, オープンラック式気化器, 中間媒体式気化器, マイクロチャネル熱交換器

まえがき = 当社は液化天然ガス(LNG)気化器トップメーカーとして用途別に複数タイプのLNG気化器を国内外に多数納入してきている。そうしたなか近年、2050年までのCO₂排出ゼロに向けた産業界の取り組みとして、液化水素(LH₂)を輸入し活用する計画が持ち上がっている。

LH₂は-253℃で貯蔵され、LNGより約100℃低い温度で処理する必要があるため、熱交換器としての技術的難易度が高い。そのため、LH₂気化器の小型実証機を試作し、LH₂を用いた実証試験を行うことで液化水素気化器の伝熱性能や機械的データを取得し、大型化に向けた基盤開発を行う必要性が生じている。

LH₂気化器のタイプ別(中間媒体式気化器(IFV: Intermediate Fluid Vaporizer)、オープンラック式気化器(ORV: Open Rack Vaporizer)、マイクロチャネル熱交換器(DCHE: Diffusion-bonded Compact Heat Exchanger))の特徴と想定している用途ならびに実証試験の概況を表1に示す。

本稿では3タイプの実証試験の結果と今後の開発計画を概説する。

1. 冷熱利用可能な大容量液化水素気化器(IFV)の取り組み

1.1 冷熱利用に適した大容量気化器IFV

2030年の水素発電商用化に向け、水素発電用ガスタービンの水素混焼・専焼実証が計画されており、30,000~50,000 Nm³/hr程度のLH₂気化器が必要とされる。また水素の安定供給においてエネルギー効率向上は重要な要素であり、LH₂の冷熱を吸気冷却によるガスタービン効率化などで利用できれば、それに寄与することができる^{1), 2)}。大規模かつ連続して安定した気化の実現、さらに冷熱利用という観点においてLNG気化器で実績のあるIFVが最適であると考えられる。

1.2 IFVの構造と気化プロセス

IFVは、海水などの熱源を利用し、プロパンなどの中間媒体を介して低温の液化ガスを気化させるものである。

図1にIFVの概念図を示す。LH₂気化器(E-2)伝熱管内に供給されたLH₂は、中間媒体気化器(E-1)シェル内上部の中間媒体ガスと熱交換され、ほぼ全量のLH₂が蒸発し、連絡配管を通じてH₂加温器(E-3)シェル側に移送される。ここで伝熱管内を流れる(海)水と熱交

*1 機械事業部門 技術本部 回転機・機器技術部

換・加温され、常温のガスとして送出される。いっぽう、E-2の伝熱管外表面でLH₂との熱交換により凝縮した中間媒体は、E-1シェル内下部に落下する。伝熱管内を流れる（海）水と熱交換して再び中間媒体ガスとして蒸発しE-2管内のLH₂を蒸発させる。気化プロセス上熱源が大気開放されるORVと異なり、IFVは熱源を閉ループで循環させることができる。これにより、冷却後の中間媒体や加熱源流体を用いて冷熱を効果的に取り出せる³⁾。

1.3 LH₂用途におけるIFVの課題

IFVでのLH₂気化は競合他社含めて実績がなく、実用上の課題が不明確であった。そこで、冷熱回収型LH₂気化器の小型実証機の試作・試験を行い、その伝熱性能や機械的データを取得し、気化器大型化に向けた基盤開発を行うことにした。

図2に実証用IFVの外観を示す。E-3は省スペース化のため、E-1シェル上部に積載されている。E-1シェル外面には中間媒体の状態視認用にサイトグラスを取り付け、E-2外表面には歪（ひず）みゲージと熱電対を取り付けている。LH₂気化実証にあたり、この実証用IFVの

専用設備を当社高砂製作所内に建設した。本設備の概略フローを図3に示す。加熱源は循環水であり、試験では模擬負荷として電気ヒータで温度調節を行った。本設備完成後の全景写真を図4に示す。

本実証機は伝熱性能が確認可能な最小サイズ0.1 ton/h (1,200 Nm³/h) として性能設計を行った。また高圧ガス保安法特定設備検査規則に則り機械設計を行い、高圧ガス保安協会による所定の検査を経て特定設備検査合格証を受領した。

LH₂気化実証において以下4点を確認した。

- (1) 連続運転でも出口気化ガス温度が低下せず安定的にLH₂を気化できる。
- (2) LH₂が伝熱管内を流れても、管外の間媒体（プロパン）が凍結しない。
- (3) 冷熱利用に向けて安定した冷熱が取り出せる。
- (4) 実運転における応力歪みを実測し、熱応力解析の結果と比較する。

1.4 IFVによるLH₂気化実証試験の結果

試験は表2に示す条件に基づき実施した。

表1 LH₂気化器の種類と用途別気化量
Table 1 Liquid hydrogen vaporizer product lineup

Liquid hydrogen vaporizer product lineup			
Type	(1) IFV	(2) ORV	(3) DCHE
Appearance			
Features	Material: Stainless steel, titanium (for seawater) ● Eliminates the risk of freezing seawater and industrial water by using propane as an intermediate fluid. Suitable for mid- to large-scale vaporizers. ● Enables the use of exhaust heat from nearby facilities. ● Enables the use of cold energy through the secondary use of heating medium (wide temp. range)	Material: Aluminum alloy + thermal spray ● Uses seawater as heating medium, making it an economic solution for mid- to large-scale vaporizers ● Seawater is an open system, making it difficult to use cold energy ● Allows for the transition of an LNG power plant to a hydrogen co-firing plant using existing seawater intake/outlet facilities as is	Material: Stainless steel ● Enables downsizing while maintaining high thermal fatigue strength. ● Uses brine as heating medium. ● Enables the use of cold energy through the secondary use of heating medium (narrow temp. range)
Demo. schedule	Completed in March 2023	Planned to begin in March 2025	Completed in March 2024

Vaporizing volume by application			
H ₂ refueling stations		Ships	
Small-scale industrial furnaces		Large-scale industrial furnaces	
Small gas turbines		Medium gas turbines	
Large gas turbines			
1,100 (0.1)	11,000 (1.0)	110,000 (10)	1,100,000 (100)
Liquid hydrogen vaporizing vol. (Nm ³ /hr) (Liquid hydrogen vaporizing vol. (tons/hr))			

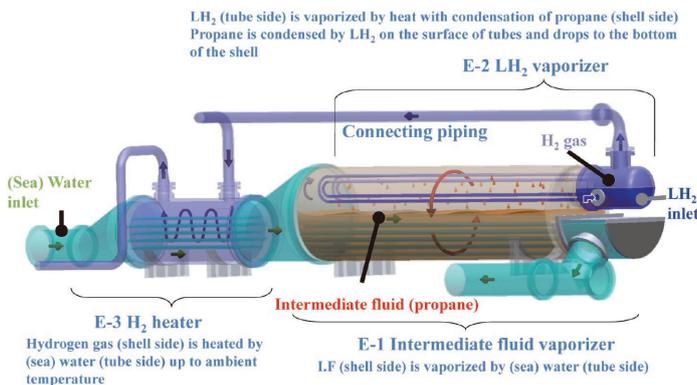


図1 IFV概念図
Fig.1 Schematic of IFV



図2 実証用IFVの外観
Fig.2 Outside view of IFV for LH₂ vaporization demonstration

1.4.1 安定気化の確認結果

図5に実証運転から得られた気化水素温度および水素流量履歴の一例を示す。1時間以上にわたり安定した気化ガス温度が得られ、連続運転でも出口気化ガス温度が低下せず安定的にLH₂を気化できることを実証することができた。

1.4.2 中間媒体の凍結有無確認結果

LH₂温度より凝固温度が高い中間媒体（プロパン）が、LH₂の流れる伝熱管表面上で凍結する可能性を考えていたが、図6に示すサイトグラスからの目視確認結果および運転データから、LH₂が伝熱管内を流れても、管外の間接媒体（プロパン）が凍結しないことを実証することができた。

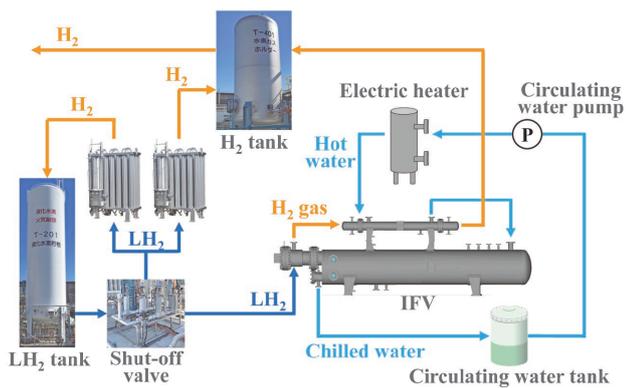


図3 LH₂気化実証設備の概略フロー

Fig.3 Schematic flow of LH₂ vaporization demonstration facility



図4 LH₂気化実証設備の全景

Fig.4 Outside view of LH₂ vaporization demonstration facility

表2 LH₂気化実証試験条件

Table 2 Test conditions of IFV for LH₂ vaporization demonstration

Condition	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
H ₂ flow rate (Nm ³ /h)	1,200	1,200	1,200	1,200	1,300
H ₂ Press. (MPaG)	0.70	0.70	0.70	0.40	0.70
CW flow rate (m ³ /h)	8.0	6.8	4.5	8.0	8.0
CW inlet Temp. (°C)	20	20	30	20	20
CW temp. Difference (°C)	Above 10	Above 15	Above 20	Above 10	Above 10

1.4.3 冷熱安定取り出し確認結果

図7に水素流量を変動させた場合の循環水の入口および出口温度の履歴を示す。水素ガス、中間媒体と熱交換し冷却された循環水は、冷熱の有効利用において被冷却側の負荷変動時においても安定した冷水温度での送出しが望まれる。本実証運転では水素流量変動においても入口水温20°Cに対して10°C以上冷却された7°C程度の冷水を安定して送出可能であることが確認され、安定した冷熱が取り出せることを実証することができた。

1.4.4 熱応力解析の結果と実運転における応力歪みの実測および比較

温度差により高応力が生じると予想されるE-2管板部周辺の応力に着目し、定格運転時の温度および発生応力

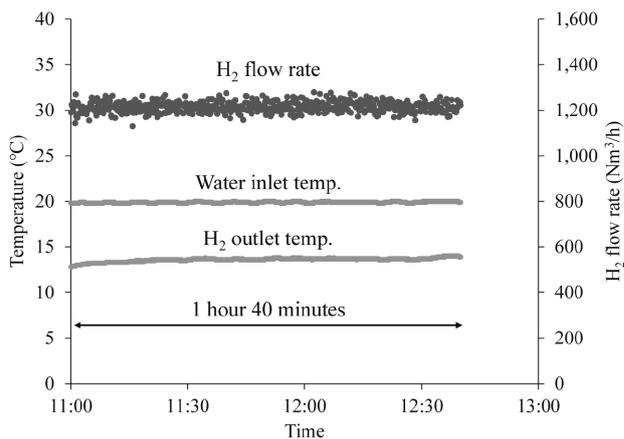


図5 実証試験時の気化水素温度および水素流量履歴の一例

Fig.5 Example of H₂ outlet temp. and H₂ flow rate trend during demonstration test



Propane condensation on E2 heat transfer tube
Propane boiling on E1 heat transfer tube

図6 サイトグラスから撮影したプロパンの状態

Fig.6 Photo of propane boiling and condensing behavior from sight glass

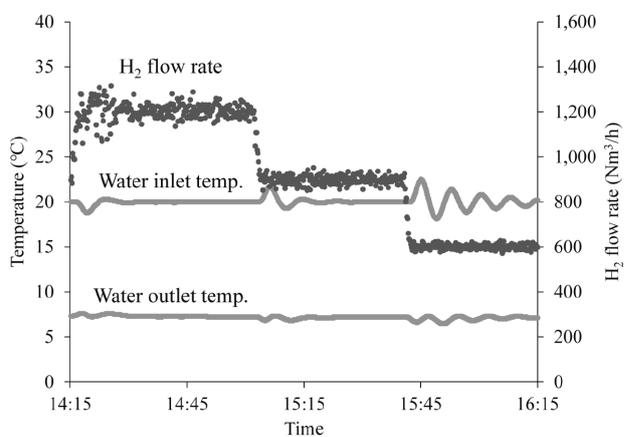


図7 水素流量変動における循環水の入口及び出口温度履歴

Fig.7 Trend of water inlet and outlet temp. during H₂ flow rate fluctuation

とFEM解析結果を比較した。詳細比較は本稿では割愛するが、江頭らの研究⁴⁾に示しているとおおり、応力ひずみの実測値と熱応力解析の結果は定性的に一致しており、解析手法の妥当性が確認できた。

1.5 神戸水素コージェネレーションシステム (CGS) でのIFVによる高圧LH₂気化実証計画

1.4項で記載した実証試験では水素臨界圧以下での運転データを取得した。つぎの段階として臨界圧以上におけるIFVの伝熱挙動を確認し、先の実証で得られた臨界圧以下のデータとの比較により、幅広い運転圧力範囲における課題点の抽出・検証を行う。本実証は神戸水素CGS実証設備の「水素燃料供給系」に実機を適用し実証運転を行い、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) 助成事業「水素CGSの地域モデルにおける水素燃料供給システムの効率化・高度化に向けた技術開発」として2023年6月に採択された。2025年度の実証運転に向け着々と準備を進めている。

2. 大容量 LH₂気化器 (ORV) の取り組み

2.1 LNG気化器として最も普及している大容量気化器 ORV

ORVは主に海水を熱源とし、LNGを-160℃から0℃以上のガスに加温するための熱交換器である。経済性と入手性に優れた海水を用いることができる大流量のLNG気化器として建設コストおよび運転コストに優れ、世界中のLNG受け入れ基地の大容量気化器として広く採用されている。

2.2 ORVの構造と気化プロセス

図8(左)にORVの構造とプロセス概要を示す。

垂直に設置した伝熱管に対して、内部に低温流体(LNG)を流し、外部から加熱流体(海水や工水)を流す対向流式熱交換器であり、シンプルな気化プロセスおよび構造を特徴とする。伝熱管材料は低温脆性および伝熱性能に優れたアルミ合金を採用している。アルミ合金は海水による腐食が懸念されるため、伝熱管表面に犠牲陽極効果のある材料を溶射している。

2.3 LH₂用途におけるORVの課題

大規模かつ連続して安定した運転が期待されるLH₂気化器は多くの需要家においてなじみのあるORVでの問い合わせを受けることが多いため、LNG用ORV構造をベースとして開発することにした。LH₂用ORVを開発するにあたり当社としてORVでのLH₂気化実績はなく、

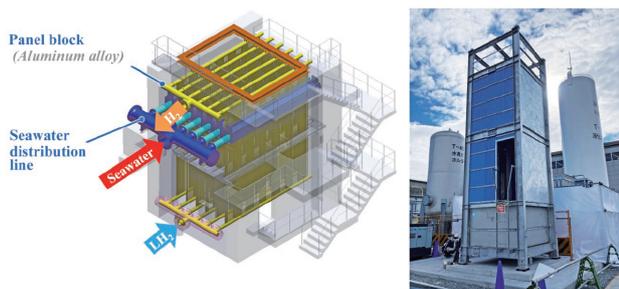


図8 ORV構造と建設中の実証用ORV外観

Fig.8 The structure of ORV and outside view of ORV for LH₂ vaporization demonstration

実用上の課題が不明確であった。そこで、小型実証機の試作・試験を行い、その伝熱性能や機械的データを取得し、気化器大型化に向けた基盤開発を行うことにした。

2.3.1 LH₂での伝熱性能

LNGと比較しLH₂の気化では単位質量当たりの交換熱量が約5倍に増加するため、LNGと同じ質量流量を気化できない。また、管内熱伝達率がLNGと同等であれば運転温度が100℃低下することで着氷増加による性能低下も懸念される。これまでLNGで使用してきた性能シミュレーションをLH₂に適用するためには、LH₂実液の試験による伝熱性能取得とシミュレーションへの反映が必須となる。

2.3.2 LH₂用途での熱応力解析

LNG運転温度が-150℃付近であることに対して、LH₂運転温度は約-250℃とLNGと比較してさらに100℃ほど低温となるため、増加する熱応力への対応が課題となる。この課題に対して極低温の熱応力解析が必須である。当社は長年ORVをはじめとしたLNG気化器の熱応力解析を実施しており、この知見に基づきLH₂用途のORVの開発を進めている。

2.4 ORVによるLH₂気化実証試験の計画

当社はこれまでに「ハイブリッド型水素ガス供給システム」として、LH₂気化器性能評価のために必要な試験設備一式を有しており、臨界圧以下のIFVの実証試験を終えている。2024年度にはLH₂用ORV実証設備を増設した(図8(右)参照)。

2025年3月より液化水素実液を使った実証試験を実施し、ORV設計において課題となる熱応力解析および伝熱性能予測に必要なデータを取得し、LH₂気化器の製品化に取り組む。

本実証機は伝熱性能が確認可能な最小サイズ0.1 ton/h (1,200 Nm³/h)として性能設計を行った。本設備も前述したIFV同様に高圧ガス保安協会による特定設備合格証を受領している。

LH₂気化実証において以下2点を確認する予定である。

- (1) 連続運転でも管外の着氷高さが想定基準値内で安定化し、出口気化ガス温度が低下せず安定的にLH₂を気化できる。
- (2) ORV下部エリアの温度分布結果を用いて熱応力解析を実施し、十分な熱疲労寿命を有する。

3. 小容量 洋上用途などのLH₂気化器 (DCHE) の取り組み

3.1 コンパクトで耐圧性能が高い気化器DCHE

DCHEはコンパクトで耐圧性能が高い特徴を有しており、浮体式生産貯蔵積出設備 (FPSO/Floating Production, Storage and Offloading system)・浮体式生産設備 (FLNG/Floating LNG Production system) など設置スペースに制限がある用途で適用が拡大している。さらに船舶用燃料システムに用いられるLNG気化器に拡大しており、当社はLNGによる熱媒の凍結抑止技術を確立し船舶用途や陸上基地に展開している。

3.2 DCHEの構造と気化プロセス

DCHEはコンパクト熱交換器の一種であり、エッチング加工とプレート間を一度に接合する拡散接合の技術が用いられている。構造を図9(左)に示す。

エッチング加工はエッチング液などの薬品による腐食作用を利用して金属を溶解加工する技術で、この手法をステンレス鋼のプレート材に適用し流体が通るミリサイズの流路を形成している。

拡散接合は、加工されたプレートを積層しておき接合面に生じる原子の拡散を利用した接合であり、母材同士が直接接合することから接合部は母材と同等の強度を有する。エッチングプレートはLNGが通るプレートとグリコール水などの熱媒が通るプレートがある割合で積層されており、隣り合う流路間にあるプレートを介して直接熱交換を行う。LNGとグリコール水はノズルからヘッダーを通して積層された各プレートに分配されている。

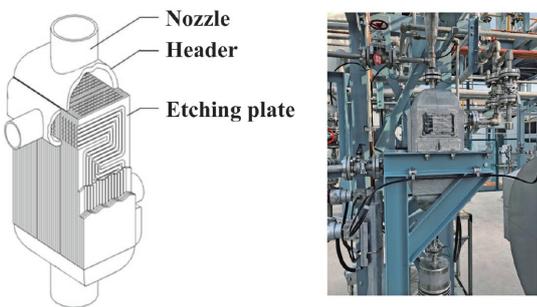


図9 DCHE構造図と実証用DCHEの外観
Fig.9 Schematic structure of DCHE

3.3 LH₂用途におけるDCHEの課題

LH₂は熱源となるグリコール水の凍結温度をはるかに下回る極低温で運転されるため、熱交換器流路内部の凍結防止が課題となる。伝熱設計に関しては、これまで50年以上蓄積されたプレートフィン熱交換器の設計技術により、確立しているが、凍結現象は計算で予測できない。そこで、LNG、液化窒素(LN₂)、水、グリコール水を用いた実験により、様々な運転状態の凍結条件を確認し、二つの独自の凍結防止技術を確認し特許を取得している。特許の概要について、図10に「1cold:3hotデザイン」ならびに図11に「2ゾーンデザイン」をそれぞれ示す。

現在、衛星基地向けLNG気化器、船舶用LNG燃料気化器および高圧LH₂気化器を納入し、当社の設計手法および凍結防止技術の有効性は確認されている。

この確立した技術基準を応用し沸騰現象がある臨界圧以下のLH₂温度(-253℃)にも適用可能であることを確認するため、納入する製品サイズを模擬して試作した試験機を用いて実証試験を行った。

試験は「ハイブリット型水素ガス供給システム」に設置されているIFVと並列設置する形で、LH₂実液で試験を実施した。試験体のデザイン、試験条件および試験体外観を表3、図9(右)に示す。本試験体も同様に特定設備検査合格証を受領している。LH₂気化実証では以下2点を確認した。

- (1) 熱媒凍結挙動がなく気化性能が安定している。
- (2) 伝熱性能が設計値を満足している。

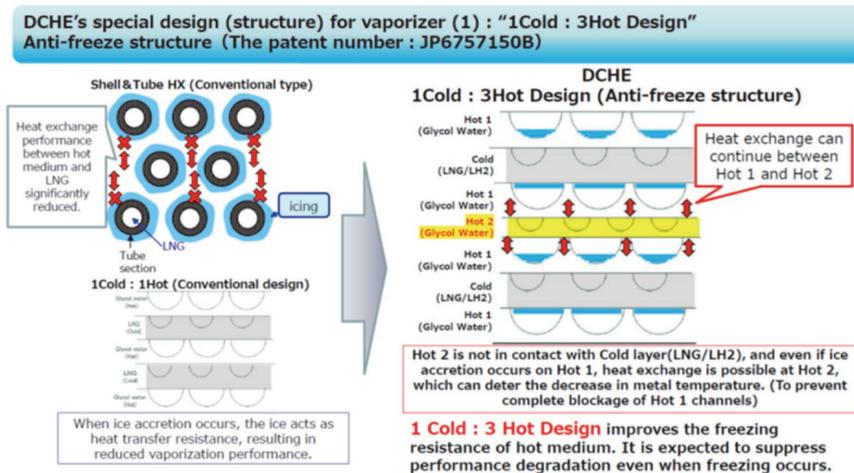


図10 凍結抑止構造 (1cold:3hotデザイン)
Fig.10 Anti-freeze structure (1 cold : 3 hot design)

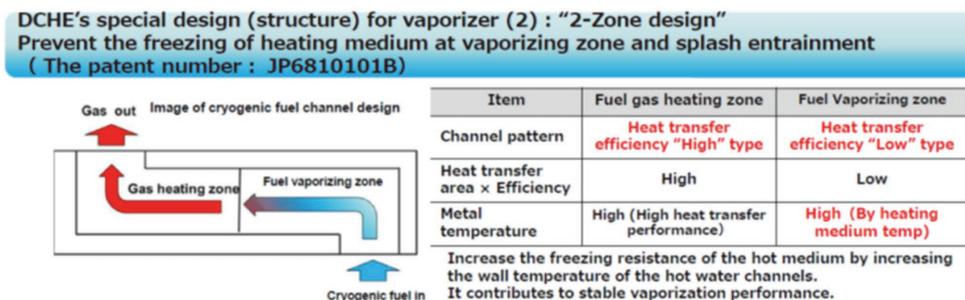


図11 凍結抑止構造 (2ゾーンデザイン)
Fig.11 Anti-freeze structure (2-zone design)

表3 水素気化性能試験用DCHE諸元

Table 3 DCHE specifications for hydrogen vaporization performance test

Basic specifications	Vaporization capacity (liquid hydrogen)	18.9 kg/h
	Type	Micro channel heat exchanger
	Material	Stainless steel type 316 L
Design specifications (path A) Fluid: liquid hydrogen	Inlet temp. (°C)	-253
	Outlet temp. (°C)	30
	Operating press. (MPaG)	0.3
Design specifications (path B) Fluid: ethylene glycol water	Inlet temp. (°C)	40
	Outlet temp. (°C)	35

3.4 DCHEによるLH₂気化実証の結果

3.4.1 熱媒凍結挙動および安定気化性能の確認

熱媒の凍結が発生した場合、熱媒流路が徐々に閉塞していくため、圧力損失が安定せず徐々に増大傾向となる。そのため、設計点(LH₂流量18.9 kg/h)にて1時間連続運転を行い、熱媒の圧力損失の傾向を確認することで熱媒凍結の有無を評価した。

その結果、図12から熱媒圧力損失は安定し増大傾向になく、設計点において熱媒の凍結挙動が無いことを確認した。

なお、図12は水素流量、熱媒圧損、水素ガス出口温度の経時変化を示しているが、熱媒圧損の軸の値は非表示としている。

また図12の1時間連続運転結果より、運転中水素出口温度はほぼ一定で安定した気化性能を有することを確認した。

3.4.2 伝熱性能の評価

熱交換器の熱交換量 Q は以下の式で表すことができる。

$$Q = UAAT$$

ここに、

Q : 熱交換量 (kW)

U : 総括伝熱係数 (kW/(m²・°C))

A : 伝熱面積 (m²)

ΔT : 対数平均温度差 (°C)

前述の式において、流体の物性や流量に近い場合、総括伝熱係数 U はほぼ一定となる。また伝熱面積 A は一定であるため、熱交換器の性能は、 UA で評価することができる。性能試験で実測した Q : 熱交換量 (kW), ΔT : 対数平均温度差 (°C) から算出した UA を、設計点と比較したものを表4に示す。設計点での試験から得られた UA が、設計値の100%以上であることから、伝熱性能は設計値を十分満足することを確認した。このことから、LNG気化器で確立した設計基準、特許技術を応用したLH₂気化器の設計が妥当であり、製品化が可能になった。

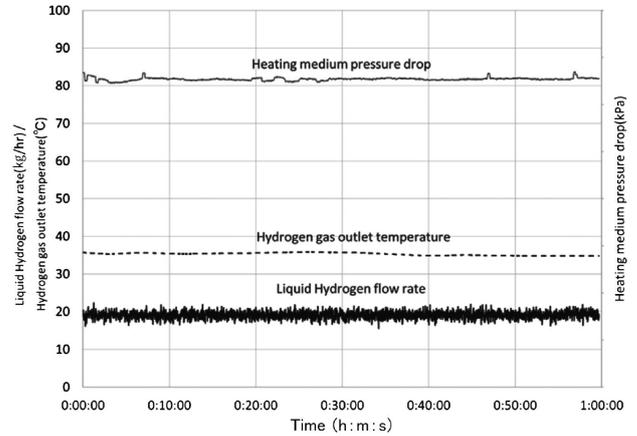


図12 設計点に於ける実証試験時の気化水素温度、水素流量及び熱媒圧損履歴

Fig.12 H₂ outlet temp., H₂ flow rate and heating medium pressure drop trend during performance test at design point

表4 設計値と試験実測値から求めたUA比較

Table 4 Comparison of UA calculated from design value and actual test value

Item	Design	Actual measurements
Heat duty (kW)	23.0	25.3
Logarithmic mean temperature difference (°C)	69.5	40.2
UA (kW/°C)(*)	1	Over 1.5

(*) It is defined 1 as a design point.

むすび=本稿では、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)助成事業において、2023年3月末に完了した「液化水素冷熱の利用を可能とする中間媒体式液化水素気化器の開発」のLH₂供給設備を利用して実施した実証試験結果と、これから実施する実証試験を紹介した。本稿で紹介したすべての実証が終了すればLNG気化器と同程度のタイプのLH₂気化器を製品ラインナップとして揃えることができる。

これらの成果の一部は、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)の助成事業「水素社会構築技術開発事業」(JPNP14026)により得られた成果であり、NEDOおよび関わった方々へここに感謝の意を表す。

当社は水素エネルギーの社会実装に向け、陸上での使用から船舶への搭載といったさまざまな使用環境での液化水素利用への対応を気化器の供給を通して目指す。

参考文献

- 1) 小室隆信ほか. 三菱重工技報. 2010, Vol.47, No.4, p.49-54.
- 2) 鈴木朝寛ほか. R&D神戸製鋼技報. 2020, Vol.70, No.1, p.24-27.
- 3) 江頭慎二. R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.2, p.33-36.
- 4) 江頭慎二ほか. 圧力技術. 2024, Vol.62, No.5, p.2-12.

(解説)

LNG 運搬船用圧縮機

池上祥治*1・手塚智志*1

Compressor for LNG Carriers

Yoshiharu Ikegami・Satoshi Tezuka

要旨

船舶の環境規制対応の必要性から、船用推進エンジンには、重油以外に天然ガスも燃料として使用できる二元燃料焚(だ)きエンジンが、近年新規建造されるほぼ全てのLNG運搬船で採用されている。低圧(X-DF)、高圧(ME-GI)の二種類の推進エンジンがあるなか、当社はおののに最適な燃料ガス供給用圧縮機を提供している。本稿では、LNG運搬船のLNGタンクから発生するBOG(ボイルオフガス)を利用した推進エンジンへの燃料ガス供給と、余剰BOGの再液化を含めたガス供給システムを概説するとともに、当該用途の油冷式スクリュウ圧縮機およびレシプロ圧縮機の特徴を解説した。また、液化水素運搬といったほかの環境用途船舶への技術展開に関する展望を述べた。

Abstract

Due to the need to comply with environmental regulations for ships, dual-fuel engines that can use natural gas in addition to heavy fuel oil have been adopted in nearly all newly-built LNG carriers in recent years. While there are two types of propulsion engines, low pressure (X-DF) and high pressure (ME-GI), our company offers the optimal compressors for fuel gas supply for each type. This paper outlines the fuel gas supply system for propulsion engines that uses boil-off gas (BOG) generated from the LNG tank of LNG carrier, including the re-liquefaction of excess BOG while also explaining the characteristics of oil-flooded screw compressors and reciprocating compressors for this application. Furthermore, it discusses the prospects of technological development for other environmental vessels, such as liquefied hydrogen carriers.

検索用キーワード

環境, 天然ガス, LNG, 水素, 船舶, スクリュー圧縮機, レシプロ圧縮機, 圧縮機, 再液化

ま え が き = 国際海事機関 (IMO) による環境規制強化の影響を受け、船舶業界では重油と天然ガスの両方を燃料に使用できる低速二元燃料焚(だ)きエンジンが注目されており、近年新規建造されるほぼ全てのLNG運搬船に採用されている。同方式の推進エンジンには、MAN社の電子制御式ガスインジェクションディーゼルエンジン(以下、ME-GIという)とWinGD社の低圧ガス噴射方式の予混合・希薄燃料を採用したデュアルフェューエルエンジン(以下、X-DFという)があり、ともに天然ガスを燃料として供給する圧縮機を必要としている。LNG運搬船は、今後も世界で年間30隻程度の継続的な新規建造が見込まれており、その推進エンジンに使用される圧縮機の持続的な需要が期待される。当社は同用途に燃料ガス供給用圧縮機(スクリュウ圧縮機およびレシプロ圧縮機)を提供し、稼働実績を積み上げてきた。本稿では、LNG運搬船用圧縮機および近年商用化に向けた計画が進む液化水素運搬船への展開について解説する。

1. LNG運搬船ガス供給システム

LNG運搬船には航海中にLNGタンクから発生するボイルオフガス(以下、BOGという)を活用するシステムが組み込まれている。BOGは推進エンジンの燃料として使

用され、またエンジンが停止中や低負荷の際には、再液化システムによって余剰BOGを回収し、液化させて再びLNGタンクに戻すことが主流となっている。本章では、圧縮機に要求される仕様とともに、代表的なガス供給システムを概説する。

1.1 ME-GIガス供給システム

図1にME-GIを搭載したLNG運搬船のガス供給システムの一例を示す。BOGの発生量はタンクの容量や断

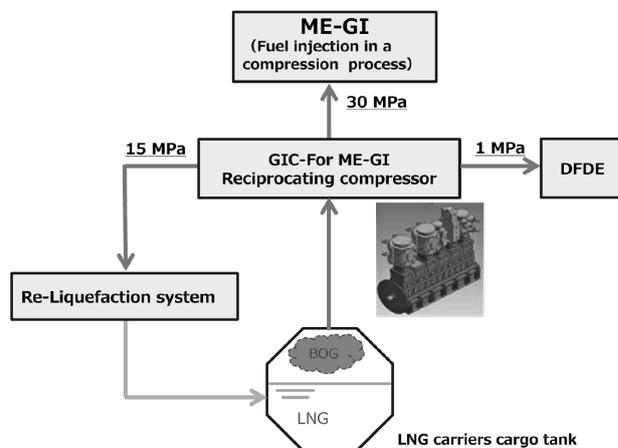


図1 LNG運搬船ME-GIガス供給システム
Fig.1 Gas supply system of LNGC ME-GI

*1 機械事業部門 技術本部 回転機・機器技術部

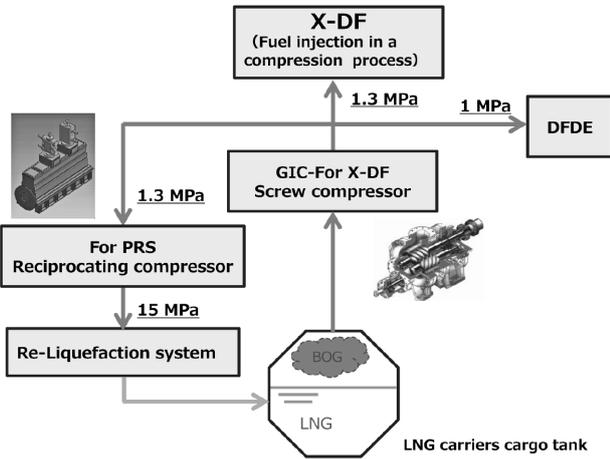


図2 LNG運搬船X-DFガス供給システム
Fig.2 Gas supply system of LNGC X-DF

熱性能によって異なるが、3.0~5.0 t/h程度である。レシプロ圧縮機によってBOGを約30 MPaまで昇圧し、ME-GIへ供給する。一部は、約1 MPaまで昇圧し、船上電力を賄う二元燃料焚きディーゼルエンジン（以下、DFDEという）へ供給する。余剰BOGは、約15 MPaまで昇圧して再液化システム（Re-Liquefaction system）へ供給し、液化させてタンクに戻すことでLNG輸送効率の向上を図っている。

1.2 X-DFガス供給システム

図2にX-DFを搭載したLNG運搬船のガス供給システムの一例を示す。発生したBOGをスクリュウ圧縮機によって約1.3 MPaまで昇圧し、X-DFへ供給する。一部は分岐後に約1 MPaまで減圧し、DFDEへ供給する。余剰BOGは、レシプロ圧縮機によって約15 MPaまでさらに昇圧して再液化システムへ供給し、液化させてタンクに戻すことでLNG輸送効率の向上を図っている。このほかに、レシプロ圧縮機によってガスを昇圧せずに冷凍機を用いてスクリュウ圧縮機の供給圧力（約1.3 MPa）から再液化させる方式や、冷凍機を用いた再液化システムをLNGタンクに搭載することでタンクからのBOG発生量を最小化する方式もある。

2. LNG運搬船用スクリュウ圧縮機

2.1 構造と基本系統

当社は、X-DFガス供給システムに油冷式スクリュウ圧縮機を採用している。スクリュウ圧縮機は、容積式でありながら回転式の特徴をあわせ持ち、高効率、省スペース、長時間運転性などの特徴がある。とりわけ、圧縮ガス中に油を注入する油冷式スクリュウ圧縮機は一段で高吐出圧力、高圧力比が達成可能である¹⁾。当社LNG運搬船用スクリュウ圧縮機のユニット外観を図3、システム系統を図4に示す。

吸込加温器を用いて適温となり、濾過（ろか）器・逆止弁を通過した大気圧程度程度のガスは圧縮機で約1.3 MPaまで昇圧される。油冷式スクリュウ圧縮機は、ロータや軸受の潤滑、圧縮熱の除去などを目的に油をガス中に給油しているため、この油をX-DFおよび再液化システムの許容油分量まで分離・除去してガスを供給する。

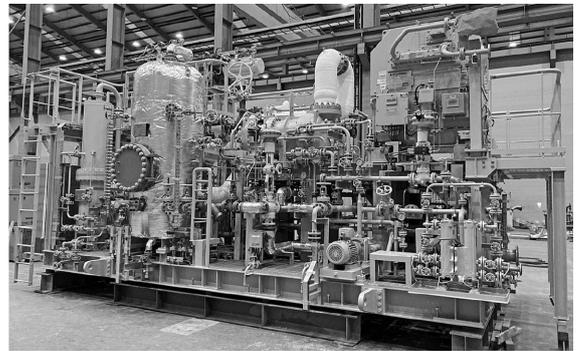


図3 X-DF用油冷式スクリュウ圧縮機 ユニット外観
Fig.3 Appearance of oil flooded screw compressor for X-DF

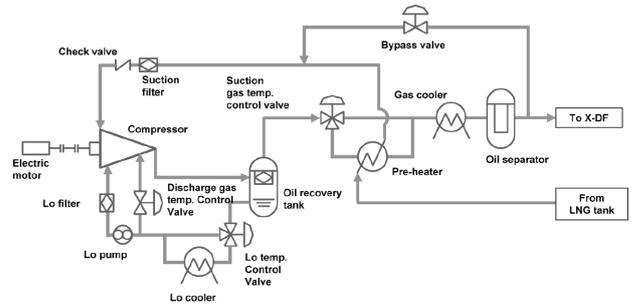


図4 X-DF用油冷式スクリュウ圧縮機 システム系統
Fig.4 System flow of oil flooded screw compressor for X-DF

2.2 圧縮機システムの特徴

2.2.1 プレヒートシステム

LNGタンクから発生するBOGは超低温（およそ -160°C ）であり、圧縮機から吐出された圧縮ガス熱を利用した吸込加温器（図4中のPre-heater）によって油冷式スクリュウ圧縮機（図4中のCompressor）に適した吸込温度（およそ -90°C ）まで加温される。吐出温度調節弁（図4中のDischarge gas temp. control valve）によって圧縮機への給油量を制御することで圧縮熱を適切に除去し、圧縮機から吐出される圧縮ガスの温度は一定に保たれている。それにより、吸込温度調節弁（図4中のSuction gas temp. control valve）によって吸込加温器への圧縮ガス流入量を制御することで、油冷式スクリュウ圧縮機に供給するガス温度を適温に保つことが可能である。

2.2.2 油分離システム

圧縮ガスに含まれる油は、油回収器（図4中のOil recovery tank）内で一次分離される。分離された油は油冷却器（図4中のLo cooler）を経て再び圧縮機へ給油される。一次分離後に圧縮ガス中に残る油は、二次分離器（図4中のOil separator）によりさらに分離・除去される。二次分離器には、厳格な油除去要求を受けるヘリウムガス液化用途へも適用している特殊微細繊維フィルタ（コアレスフィルタ）を採用している。また、必要に応じて下流に活性炭吸着器を追加することで、さらなる油の分離・除去も可能である。

2.2.3 スクリュ圧縮機とレシプロ圧縮機との連携制御

X-DFガス供給システムの一例において、スクリュウ圧縮機はX-DFやDFDEだけでなく、レシプロ圧縮機および再液化システムへのガス供給元となる。そのため、各

供給先のガス需要が変動するなかでも圧力を安定させて運転することが要求される。当社は同用途のスクリュウ圧縮機とレシプロ圧縮機の両方の供給実績がある唯一のメーカーであり、両圧縮機の制御・風量特性を正確に反映した連携制御を実装することが可能である。それにより、とくにガス処理量の変動が大きいレシプロ圧縮機の起動時においても、スクリュウ圧縮機の吐出圧力（＝ガス供給圧力）を一定に保つことが可能であり、通常運転、負荷変動時においても安定した運転を実現できる。

3. LNG運搬船用レシプロ圧縮機

3.1 ME-GIガス供給用レシプロ圧縮機

3.1.1 構造と基本系統

一般に船に搭載する場合、設置スペースの制約を受けるため、レシプロ圧縮機の場合は、縦型圧縮機が採用されている。当社はME-GIガス供給システムに六段式レシプロ圧縮機を採用しており、一段～五段シリンダは無潤滑式、六段シリンダは油潤滑式としている。それぞれの系統を図5（無潤滑部）、図6（油潤滑部）に示す。LNGタンクから発生した大気圧力程度のBOGは、六段式レシプロ圧縮機で30 MPaまで昇圧される。レシプロ圧縮機には、ピストンリングやライダリング、ピストン棒パッキンなどの樹脂製摺動（しゅうどう）部品がある。それらの耐久性や信頼性を向上させるために、摺動環境が最も厳しい六段シリンダ内部には潤滑油を供給し、長期連続運転を可能にしている。いっぽう、供給するガス中の油の混入量をME-GIの許容油分量まで少なくする必要がある。このため、圧縮機の六段吐出下流に油分離用の高性能フィルタを設置し、ガスに随伴される潤滑油を分離・除去する²⁾。

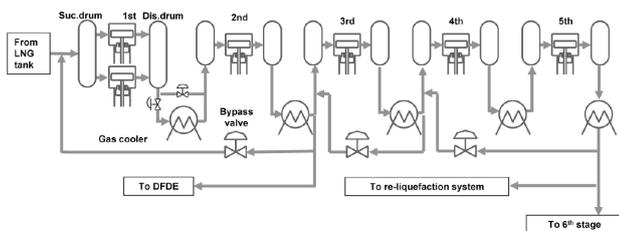


図5 ME-GI用レシプロ圧縮機 システム系統（無潤滑部）

Fig. 5 System flow of reciprocating compressor for ME-GI (Non-lubrication line)

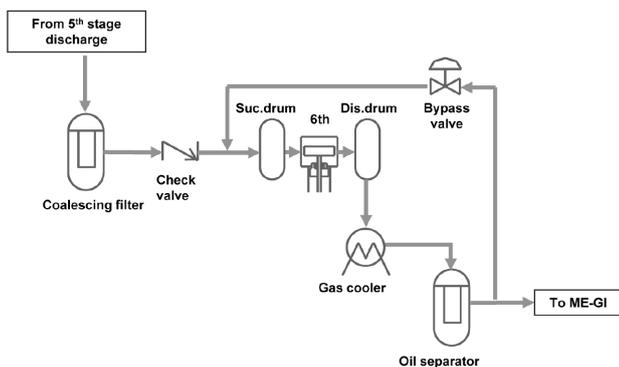


図6 ME-GI用レシプロ圧縮機 システム系統（潤滑部）

Fig. 6 System flow of reciprocating compressor for ME-GI (Lubrication line)

3.1.2 特徴

当該レシプロ圧縮機は、ME-GIへのガス供給に加えて、DFDEや余剰BOGの再液化システムへのガス供給の役割を担っている。ME-GIやDFDEの需要量に応じて各段の処理量を調整するシステムを採用している。さらに再液化システムへ供給される15 MPaのガスについては、LNGタンクから発生した超低温BOGとの熱交換や、再液化したLNGをLNGタンクに戻すため油混入に対する制限が厳しい。そのため、15 MPaまで昇圧するための一段～五段シリンダは、無潤滑式としている。また、停止時に系内に保持されていたガスが、高压の潤滑部（六段）から低压の無潤滑部（五段）へ逆流して油が混入することを防ぐために、五段と六段の間に逆流防止の逆止弁やそのリークを考慮した油分離器を備えている。

3.2 X-DF余剰ガス再液化用レシプロ圧縮機

3.2.1 構造と基本系統

X-DF余剰ガス再液化用レシプロ圧縮機の系統を図7、ユニット外観を図8に示す。前段に配置されている油冷式スクリュウ圧縮機によって、LNGタンクから発生した大気圧力程度のBOGは約1.3 MPaまで昇圧され、本レシプロ圧縮機によって約15 MPaまで昇圧する。その後、再液化効率を最大化させるためにLNGタンクから発生した超低温BOGとの熱交換を行った後、0.1 MPa～0.3 MPa程度まで減圧させて再液化するシステムが構築されている。その再液化システムにおいてガス中の油混入に対する制限が厳しいため、当社は1.3 MPaから15 MPaまでを無潤滑で昇圧できる三段式レシプロ圧縮機を提供している。圧力レンジとしては、前述のME-GI

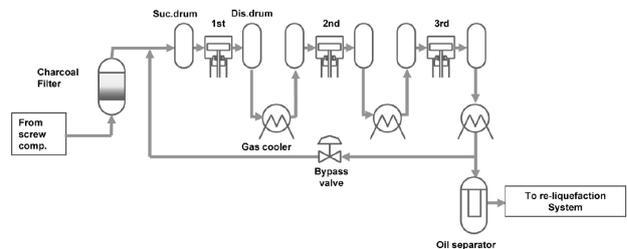


図7 X-DF余剰ガス再液化用レシプロ圧縮機 システム系統

Fig. 7 System flow of reciprocating compressor for re-liquefying surplus gas of X-DF

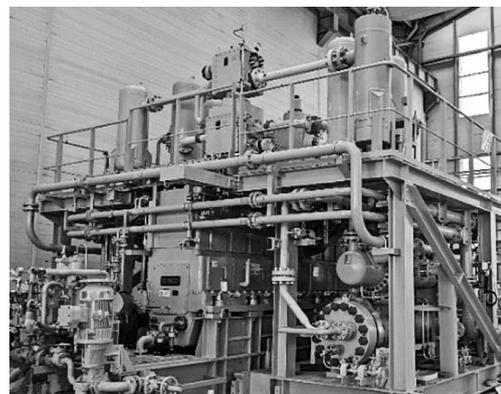


図8 X-DF余剰ガス再液化用レシプロ圧縮機 ユニット外観

Fig. 8 Appearance of reciprocating compressor for re-liquefying surplus gas of X-DF

用レシプロ圧縮機の三、四、五段に相当し、流量も同レンジであることから、シリンダの標準設計をME-GI用レシプロ圧縮機と統一し、消耗部品の種類を最小化することで、維持管理費を最適化している。

3.2.2 特徴

無潤滑式シリンダにおける、ピストンリングやピストン棒パッキンなどの樹脂製摺動部品と相手材（シリンダライナーやピストン棒）の摺動は、摩擦により樹脂材が相手材に付着して移行膜をつくり、両者間の摩擦を軽減することで、長寿命化を実現している。いっぽう、ガス中に数ppmw程度のごく少量の油が混入されている場合、その油が相手材への移行膜形成を阻害し、異常摩擦を引き起こす要因となる。スクリュウ圧縮機側に設置されている油分離器で、0.5ppmw以下に油分を除去できているが、突発的な油分離器の不調によるレシプロ圧縮機や再液化システムへの油飛散の懸念に備え、レシプロ圧縮機の前段に活性炭吸着を追加し、信頼性を向上させている。また、レシプロ圧縮機の後流にも油分離器を備えており、万が一油が飛散した際に分離し、下部に溜まる油を検知できるようになっている。この油分離器は油以外の異物をせき止めて再液化システム側に流出させない役割も果たしており、信頼性向上に一役買っている。

4. 液化水素運搬への展開

カーボンニュートラル社会の実現に向けた水素サプライチェーン構築のための技術開発が進んでおり、液体水素の輸送分野においては、液化水素運搬船の建造計画や基本設計計画が進んでいる。液化水素の輸送はLNGよりも低い温度（およそ -253°C の極低温）での貯蔵が必要であることから、LNG運搬と同様に航海中にタンクから発生するBOGを活用するシステムを設置する必要がある。水素ガスを燃料とするディーゼルエンジンの開発が進むいっぽう、同方式のエンジンに水素ガスを燃料として供給する圧縮機も併せて必要となる。タンクから発生する水素BOGは大気圧力程度となるため、大気圧力からエンジン用途に応じた圧力（およそ1 MPa）に昇圧するには一般的に高圧力比の圧縮機が必要となる。分子量の小さい水素ガスは漏れやすく、高い圧力比の昇圧を行うことが難しいことから、通常、複数段の圧縮機システムとなる場合が多い。

縮機システムとなる場合が多い。

油冷式スクリュウ圧縮機は、圧縮中のロータ室内に潤滑油を給油することによって、ロータ間でのガス漏れを少なくすると同時に圧縮ガスの温度上昇も抑えることができる。このため、分子量が小さい水素においても一段で高い圧縮比を達成することができる。さらに、当社独自のタンデム機（一つの圧縮機内部に一段用と二段用のロータを装備）により、二段圧縮であっても一段と二段の連絡配管や中間ガス冷却器を省略した省スペース設計も実現している¹⁾。

レシプロ圧縮機は分子量が小さい水素でも効率よく昇圧できることが特徴で、LNG BOG用途での -160°C 程度の超低温ガス吸込対応技術を活かし、水素BOG用途においても極低温の吸込ガスの加温を最小限に抑え、ガス密度が高いままの水素ガスを吸い込むことが可能であり、圧縮機の小型化と消費電力を抑えるメリットがある。

このほか、当社は陸上の水素ガス分野においてスクリュウ圧縮機およびレシプロ圧縮機の稼働実績を多く有している。LNG運搬船用途で適用している低温BOGのプレヒートシステムや船舶用途での留意事項を組み合わせることで、最適な液化水素運搬船用圧縮機も選定、提供が可能であり、今後の水素サプライチェーン構築に大きく貢献できるものと考えている。

むすび=環境規制強化の影響を受け、LNG運搬船において二元燃料焚きエンジンの採用が近年主流となっているなか、代表的なLNG運搬船ガス供給システムと同用途に使用されるスクリュウ圧縮機およびレシプロ圧縮機を解説した。今後も、当社は稼働実績と技術信頼性により安定的なLNG大量輸送の確保の一翼を担う所存である。加えて、液化水素運搬といった新分野においても、LNG運搬船用途で培った技術を展開した最適な圧縮機を提供できる。これらを通じて、現在・未来におけるエネルギー問題や環境問題の解決に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 天野靖士. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.3, p.17-19.
- 2) 瀬山勝広. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.67, No.2, p.78-79.

(解説)

二酸化炭素回収・貯留および長期エネルギー貯蔵用途向け ギア内蔵型遠心圧縮機

藤岡輝明*¹

Integrally-gear Centrifugal Compressor for Carbon Capture and Storage (CCS) and Long Duration Energy Storage (LDES) Applications

Komei FUJIOKA

要旨

近年、社会の環境意識が高まるなか、当社は温室効果ガスの削減を目的とする二酸化炭素回収・貯留（Carbon Capture and Storage：CCS）において回収したCO₂を地下貯留層に圧入する高圧のCO₂圧縮機を開発し、当社工場内でCO₂ガスを用いた超臨界状態での実圧試験を実施した。また、技術開発が期待されている長期エネルギー貯蔵（Long Duration Energy Storage：LDES）における機械式バッテリーシステムの充電用圧縮機は、高温ガスの取り扱いや頻繁に起動・停止を繰り返す運転条件に技術課題がある。当社はこれまでに培った技術やノウハウを組み合わせてこれらの課題解決に取り組んでいる。本稿ではお客様のより良い環境を「つくる」に寄り添う遠心圧縮機の製品開発や技術課題への取り組みについて解説する。

Abstract

In recent years, as environmental awareness in society has increased, Carbon Capture and Storage (CCS) has been implemented to reduce greenhouse gas emissions. Kobe Steel has developed a high-pressure CO₂ compressor for injecting captured CO₂ into underground reservoirs and conducted pressure tests in a supercritical state using CO₂ gas in its factory. Meanwhile, the charging compressor for the mechanical battery system in Long Duration Energy Storage (LDES), which is expected to undergo technological advancement, faces technical challenges in handling high-temperature gas and operating conditions that require daily start and stop. Kobe Steel is addressing these challenges by combining its own technologies and know-how the company has cultivated to date. This article explains Kobe Steel's product development and approach to technical issues for centrifugal compressors to support its customers by creating a better environment.

検索用キーワード

地球温暖化、二酸化炭素回収・貯留、ギア内蔵型遠心圧縮機、CO₂圧縮機、長期エネルギー貯蔵、高温圧縮機、CCS、LDES

ま え が き = 二酸化炭素回収・貯留（Carbon capture and storage：CCS）はカーボンニュートラルの実現に不可欠な役割が期待されているだけでなく、ブルー水素、ブルーアンモニアのエネルギー供給の面でも貢献度が高く、近年とくに米国や欧州でプラント計画および稼働実績が増えている。また我が国でも2020年に、2050年までのカーボンニュートラル実現を目標に掲げている。それにともない2024年には二酸化炭素の貯留事業に関する法律（CCS事業法）が成立し、2030年の事業開始を目指していることから、日本においてもCCS事業が近い将来身近な存在になると考えられる。

CCSの中で圧縮機は主に輸送、貯留で用いられ、それぞれCO₂を排出源から船舶やパイプライン輸送のための圧送用として、さらに貯留地へ圧入用として用いられる。一般にCCSに関わる設備費や運転費用はCCSが設置されるプラント全体の経済的効率性を下げるため、機械的信頼性に加えて安価で高効率な経済性の高い圧縮機が求められる。

太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーが増えていくなかで、余ったエネルギーを長時間貯める長期

エネルギー貯蔵（Long Duration Energy Storage：LDES）が注目され始めており、2020年代に入り様々なプロセスが開発され、一部は商用化まで進んでいる。その中の一つとして圧縮機を用いてガスの圧力エネルギーと熱エネルギーを貯蔵する機械式がある。リチウムイオンバッテリーに代表される蓄電池と比べ、部品を構成する材料の調達に制約が少なく、機械自体の耐久年数が長く、大容量蓄電ができるなどの利点がある。いっぽう取扱ガスが高温であることや頻繁に起動・停止を行うことなど、通常連続運転で使用される機械とは異なる点に配慮が必要である。

本稿では、まずCCSにおいて回収したCO₂を地下貯留層に圧入する用途を想定した当社の高圧CO₂圧縮機の開発内容と技術のポイントについて紹介する。ついでLDESで用いられる高温圧縮機の技術要求と課題、およびその解決に向けた当社の取り組みについて解説する。

1. CCS用高圧CO₂圧縮機

当社の主力商品のギア内蔵型遠心圧縮機（以下、ギア内蔵型）は図1の圧縮機断面モデルに示すように大歯

*¹ 機械事業部門 技術本部 回転機・機器技術部

車 (Bull gear) を介して増速された小歯車を有するピニオンロータの先端にインペラが取り付けられている。そのため、ギア比を変えることでピニオンロータごとにインペラの回転数を調整することができる。図2に一例を示すように遠心圧縮機の効率インペラの形状の相似性を表す指標である比速度 (n_s) で整理される¹⁾。必要なヘッドと体積流量に対してインペラの外径と回転数を変えて適当な比速度を選定することで効率を最適化できる。比速度の定義式は回転数、体積流量、ヘッド、重力加速度でつぎのように示される。

$$n_s = 2\pi N Q^{1/2} / (gH)^{3/4} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 N : 回転数 (1/s)
 Q : 体積流量 (m^3/s)
 g : 重力加速度 (m/s^2)
 H : ヘッド (m)

さらにギア内蔵型は各段が独立しており段間に中間冷却器を配置することが容易なため、より等温圧縮に近づくことで動力削減効果が期待できる。いっぽうロータの両端にインペラが取り付けられた状態で高速回転するため、ロータ剛性が下がりやすい。そのため効率を優先して回転数を高くしすぎるとロータの振動に対する安定性の確保が難しくなることが課題である。

このような特徴を持つギア内蔵型をCCS用途におけ

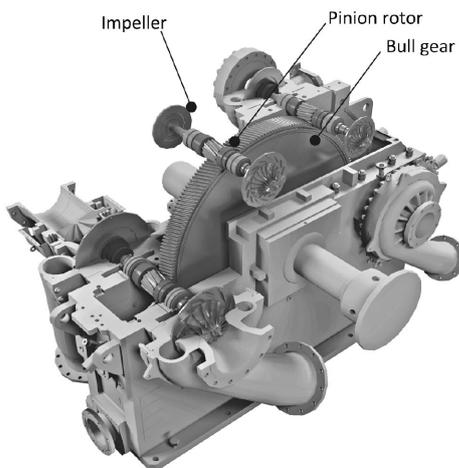


図1 ギア内蔵型遠心圧縮機断面モデル

Fig.1 Section model of integrally geared centrifugal compressor

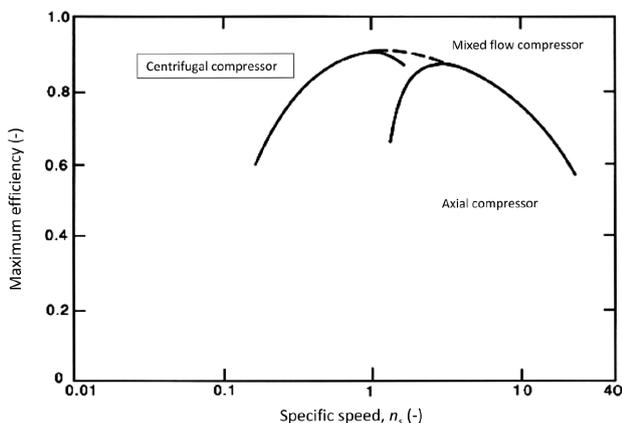


図2 比速度と最高効率

Fig.2 Specific speed vs maximum efficiency¹⁾

る高圧のCO₂圧縮機に適用した場合、つぎのような技術的課題がある。

- i) 高圧状態のCO₂の物性値変化を考慮した空力性能の予測精度の確保
- ii) 高圧・高密度のCO₂から流体力が作用するロータの振動安定性およびインペラブレードの振動強度の確保
- iii) 高圧CO₂ガスの漏えいを低減するシール性能の確保
- iv) ライフサイクルコストの低減

当社はこれらの課題解決とその検証を行うために試作圧縮機を設計・製作し、工場内でCO₂ガスを用いた実圧試験を実施した²⁾。表1に試作したCO₂圧縮機の目標仕様を示す。また、図3にCO₂圧縮機本体および機器類が試運転設備に据え付けられた状態の外観写真を示す。

以下に前述の技術課題解決のために高圧CO₂圧縮機(以下、開発機という)に適用した技術のポイントと実圧試験による検証結果を説明する。²⁾

1.1 空力設計および性能試験結果

ガスに速度エネルギーを与えるインペラおよび速度エネルギーを静圧上昇に変えるディフューザは圧縮機の性能を決めるうえで重要な部品である。CO₂ガスは圧力が高い超臨界域では物性値の変化が大きいため、理想気体として扱うと圧力比が予想と大きくずれることがある。その場合、空力設計に組み込まれるガス物性の変化を考

表1 高圧CO₂圧縮機の開発目標仕様

Table 1 Specification of development target for high pressure CO₂ compressor

Application	Prototype
Type	Integrally geared
No. of stage	8 stages
Gas handled	CO ₂
Capacity	140,000 kg/h (72,500 m ³ /h)
Suction / discharge pressure	0.01 / 20 MPaG
Shaft power	16,600 kW
Driver	Motor (18,500kW)

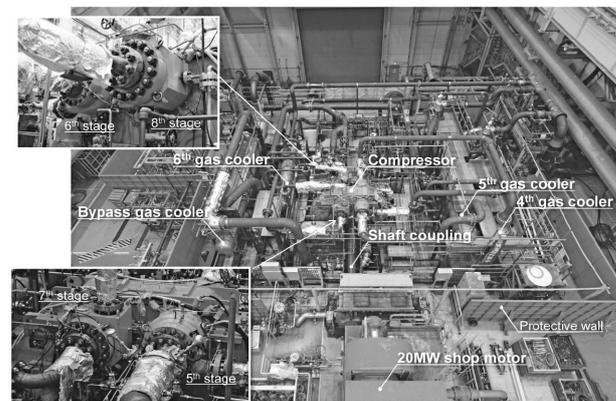


図3 高圧CO₂圧縮機開発機と試験設備外観

Fig.3 Overview of high pressure CO₂ prototype compressor and test facility

慮することでより正確なインペラ設計を行っている。

図4に実圧試験における開発機の空力性能試験結果を示す。仕様流量 ($\phi/\phi_{design} = 1$) において最終段(8段)の吐出圧力が20 MPaGを達成しており、空力設計の妥当性が検証された。

1.2 ロータ設計および安定性評価

ロータに組み込まれたインペラやシールで発生する流体力は不安定化力として作用し、不安定振動の元となるため、十分な安定性が求められる。安定性は一般的にロータと軸受により構成されるロータ系の対数減衰率で評価され、対数減衰率が正であればロータ系は安定し、負であれば不安定となる。図5に開発機の7-8段ロータの安定性解析の結果を示す。横軸に遠心圧縮機で広く用いられる規格API617³⁾で規定されている不安定化力(Cross coupling)を示し、縦軸に対数減衰率を示す。ガスが高圧になるにともない動力や密度が高くなるため、インペラおよびシールに作用する不安定化力が大きくなる。API617では設計時の対数減衰率は0.1以上確保することが求められるが、ティルティングパッド軸受(TPJB)の場合、計算上は過大な不安定化力により0.1以上を確保することが難しい。不安定化力を抑えるためにインペラ吸込シール部のラビリンズシールに旋回流れを抑制する多数のフィンを持つスワールブレーカ(Swirl braker)を用いた。さらにロータに高減衰を付加させるダンパー軸受(ISFD)を用いることで、安定性の高いロータ設計を実現している。

ロータの振動特性を実測する方法として加振試験が行

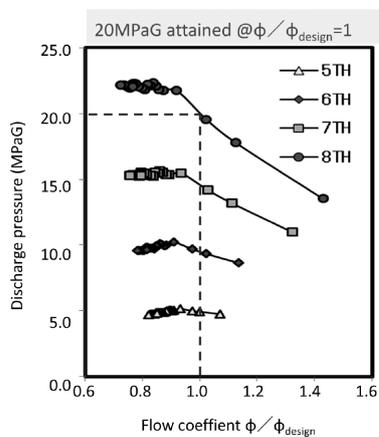


図4 各段吐出圧力
Fig.4 Discharge pressure of each stage

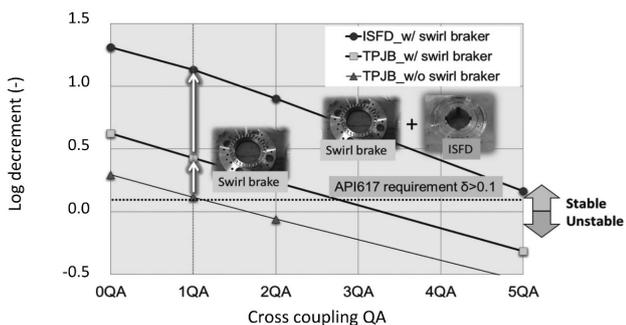


図5 ロータ安定性解析結果
Fig.5 Result of rotor stability analysis

われている。当社は図6に示すロータ安定性を評価するためにロータを加振する試験を実施した。円周方向に四つの電磁石をインペラ前方に配置し、圧縮機運転時にインペラを介してロータに曲げモーメントを電磁力により作用させることで軸直角方向に加振し、精度良くロータの減衰特性を取得することができた。図7に、横軸に最終段の吐出圧力を示し、縦軸に加振試験により測定されたロータの1次前回りモード(1stFW)と2次前回りモード(2ndFW)の固有振動数および対数減衰率を示している。加振試験の結果から、高圧条件下においてもAPI617で定められている対数減衰率以上の安定性を有することが分かった。

1.3 インペラブレード振動測定と強度評価

オープンインペラはブレードが片持ちになるためガス密度が高い場合、ブレードに大きなガス荷重が作用し、振動が大きくなった場合に過大な変動応力が発生することで破損に至る可能性がある。そこで当社は開発機の5, 6段インペラに対してブレード振動測定による強度評価を行った。

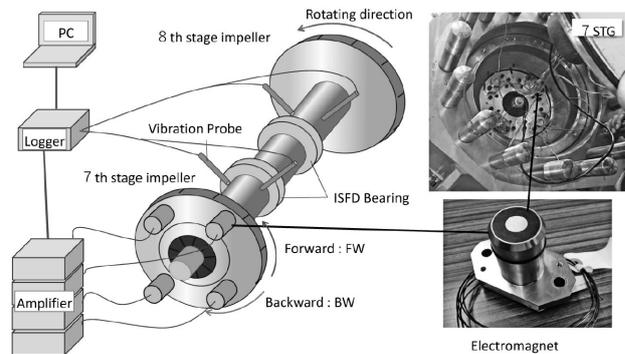


図6 開発した磁気加振システム
Fig.6 Developed magnetic excitation system

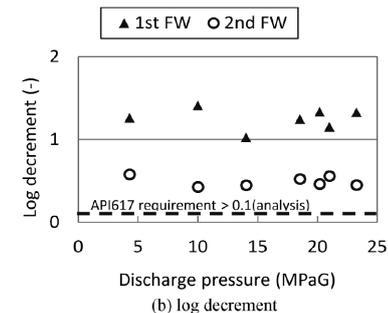
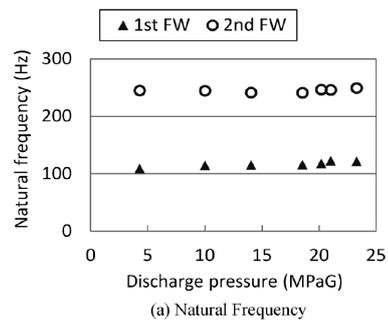


図7 吐出圧力に対するロータ動特性測定結果 (ISFD軸受)
Fig.7 Measured dynamic characteristics of rotor vs discharge pressure (ISFD bearing)

ブレード振動測定システムを**図8**に示す。インペラと向かい合わせのケーシングに光学式変位センサを設置し、振動しながらセンサを通過するブレードのタイミングを計測する（破線）。それに加えて振動していないブレードのタイミング（実線）との時間偏差（ ΔT ）を分析してインペラの振動振幅（ ΔX ）と振動周波数を求めている。**図9**は横軸に設計流量に対する流量比を示し、縦軸に6段吐出圧力を示した図上に各運転点におけるインペラのブレード振幅をプロットしたものである。各プロットの丸の大きさはブレード振幅の大きさを表している。取得した振幅を元に有限要素解析を用いて変動応力を算出し、横軸に一般化された平均応力、縦軸に一般化された変動応力で整理した修正グッドマン線図を**図10**に示す。通常の運転範囲における振動のほかにもサージ時の応力も算出し、どの運転点においてもインペラ材料の疲労限以下であり、インペラに作用する負荷が十分低いことが確認できた。この検証により、クローズドインペラに比べ高周速化が可能なオープンインペラの適用拡大により、段数削減効果ならびにコンパクトな圧縮機の実現が可能となった。

1.4 軸シール選定と漏れ量検証結果

図11に主にCO₂圧縮機で使用されるカーボンリングシールとドライガスシールを示す。系内が比較的低圧の

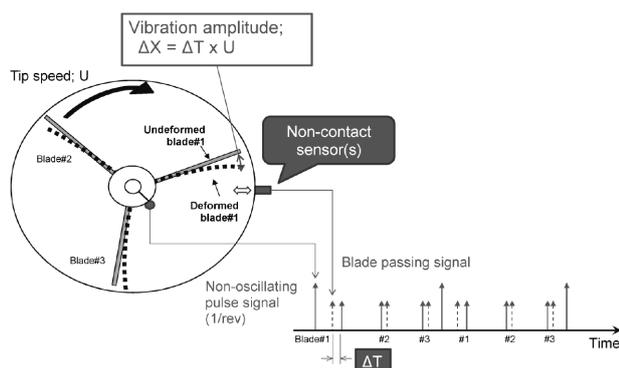


図8 ブレード振動測定システム概略図
Fig.8 Schematic of blade vibration measurement system

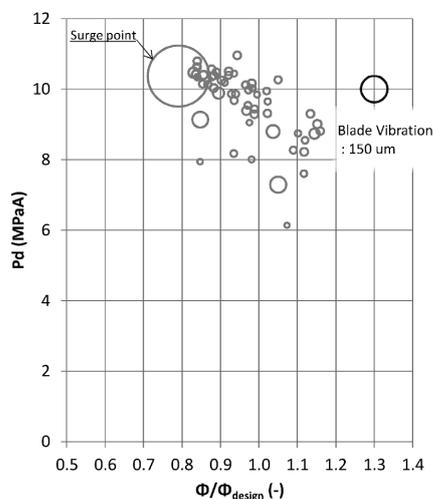


図9 各運転点における6段オープンインペラのブレード振動
Fig.9 Blade vibration of 6th stage open impeller each operation point

場合は、大気との圧力差が小さいため、安価で漏れ量の削減効果が期待できるカーボンリングシールが用いられる。カーボンリングシールは非接触型の環状シールであり、軸とカーボンの線膨張係数の差を利用し、運転時のシール部の隙間を小さくする効果があり、大気への漏れ量を削減することができる。いっぽう、シール圧力が高圧になる場合は、カーボンリングの枚数や厚みを増やす必要があり、両端にインペラを配置するギア内蔵型にとってはオーバーハングが長くなることにより、ロータ剛性と安定性が下がる傾向にある。そのため、圧力によらずシール長さが一定で、カーボンリングシールより漏れ量をさらに少なくすることができるドライガスシールが高圧条件下で用いられる。ドライガスシールは半径流方向のシールであり、シール面に溝を設け回転時にガスを巻き込むことで発生する動圧によりシール面を微小に浮

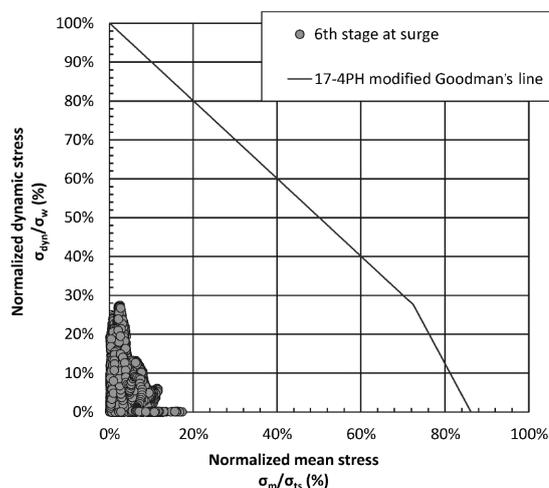
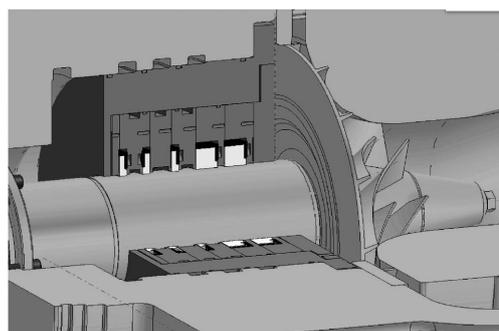
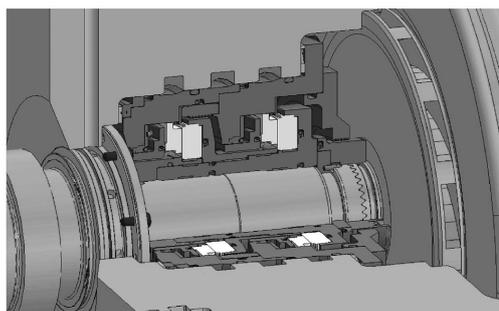


図10 オープンインペラの修正グッドマン線図
Fig.10 Modified Goodman's diagram of open impeller



(a) Carbon ring seal



(b) Dry gas seal

図11 ガスシール
Fig.11 Gas seal

上させる非接触シールである。

当社は開発機の軸シールとしてドライガスシールを使用した。吐出圧力20 MPaGにおける漏れ量計測を実施し、ドライガスシールの高い信頼性と少ない漏れ量を検証した。図12に、横軸に最終段（8段）吐出圧力を示し、縦軸に最終段（8段）に搭載したドライガスシールの漏れ量を示す。

一般的にドライガスシールはドライ環境化で使用することが求められるため、シールガスの温度は注意が必要である。高圧段の吐出ガスから分岐して、低圧段にシールガスを掃気する場合は、ジュールトムソン効果によるガスの液化を回避するように対策してある。

なおCCSで使用される圧縮機用軸シールは分離回収、輸送、貯留それぞれの圧力レベルにおいて漏れ特性、コスト、機械的信頼性が最適になるよう選定される。

1.5 スキッドを用いた圧縮機パッケージ

圧縮機の設置スペースを抑え、現地据え付け工期を短縮する方法の一つに、鋼材を組み合わせた、二階建ての骨組み（以下、スキッドという）を用いたパッケージがある。主に一階には低圧段の中間冷却器、潤滑油ユニットやシールガスユニットを設置し、二階に圧縮機、駆動機と高圧段の中間冷却器を配置することで、圧縮機ユニットをコンパクトに一体化することが目的である。図13にスキッド構造で圧縮機をパッケージした外観を示す。

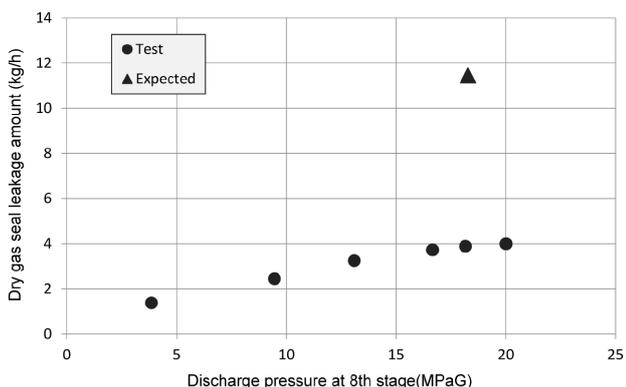


図12 8段ドライガスシール漏れ量

Fig.12 Dry gas seal leakage amount of 8th stage

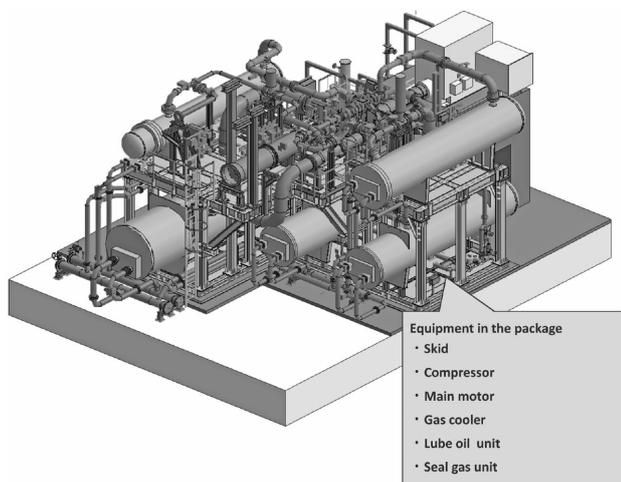


図13 圧縮機パッケージ外観

Fig.13 Overview of compressor package

この圧縮機パッケージの利点は、二階建て構造とすることで圧縮機および付帯機器の占有面積を減らすことができる。さらに圧縮機パッケージは工場出荷前に配管最終のつなぎこみまで行うため、現地で配管溶接施工、耐圧気密試験をする必要が無いことや、各機器はあらかじめ工場で組み立てた順番に設置することで、現地では容易に組み立てることができるため、現地作業時間の削減により、近年高騰する人件費を抑えることが期待できる。いっぽう、メンテナンス時には圧縮機および付帯機器を容易に吊り下ろせること、作業者が機械へ容易にアクセスできること、手すりなど安全面での配慮が必要である。また、圧縮機パッケージは二階建て構造となるため、スキッドの固有振動数と運転周波数の共振回避を固有値解析などを用いて設計時に確認する必要がある。さらに回転体から発生する動荷重に対しては、基礎ボルトのサイズ、材質の妥当性などを評価する。当社は以上の技術アプローチにより信頼性の高い圧縮機ユニットを提供している。

2. LDES用高温圧縮機

再生可能エネルギーを長期間貯蔵するシステムの検討、実証プロジェクトが近年増えている⁴⁾。圧縮機によってエネルギーが与えられた高温ガスを圧力エネルギーと熱エネルギーに分離して貯留する機械式の充電システムに遠心圧縮機が用いられており、熱交換器、蓄圧・蓄熱装置、発電タービンを組み合わせて充電と発電を行う。機械式の蓄エネルギーシステムはリチウムイオン電池に代表される蓄電池に比べ材料の調達に制約が無いことや、充放電効率の経年的な劣化も無く、充放電量が大きくなると運用コストが低くなるというメリットがある。

機械式の蓄エネルギーシステムの一つであるCO₂バッテリーの系統図⁵⁾を図14に示す。充電時はドームと呼ばれる大容量のCO₂ガスホルダーからCO₂ガスを吸い込み、圧縮機を用いて、圧力および温度を上昇させる。その後、TES (Thermal energy storage) と呼ばれる熱交換器に熱エネルギーを貯蔵し、その後CO₂を液化させ高圧状態で貯蔵する。放電時は貯めたCO₂をTESで気化および加熱されたガスを用いてタービンによる膨張で発電するシステムである。本用途に納入したCO₂バッテリー用の圧縮機の外観を図15に示す。

図16に取り扱うガスを空気とし、低温液化システムを組み合わせたLAES (Liquid air energy storage) の系統を示す⁶⁾。これらに用いられる圧縮機の技術的課題は大きく二つあり、一つ目は高温状態で使用されること、二つ目は発停頻度が多いことである。本章ではそれぞれの課題と当社対応について解説する。

2.1 高温および熱遮断設計

高温になるにしたがい遠心圧縮機で用いられるインペラ材料は強度が低下する。そのため、インペラは運転時の温度における許容応力以下になるよう材質と回転数を決定する。とくにインペラ背面はインペラ出口温度にさらされることで高温状態となる。さらにインペラは自身

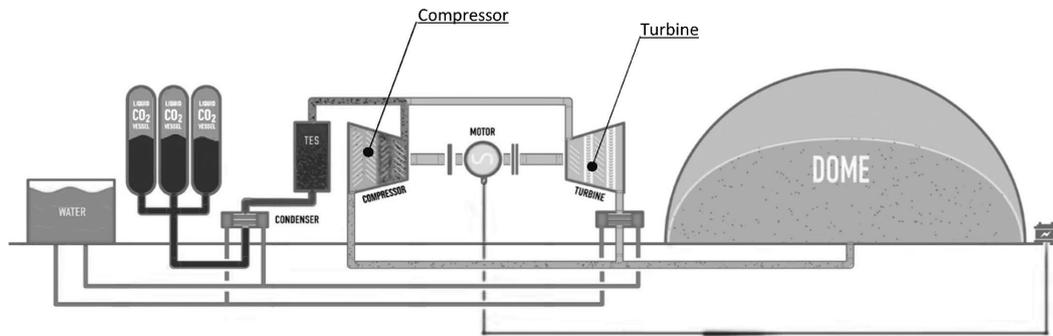


図14 CO₂バッテリー系統概略図⁵⁾
Fig.14 System schematic of CO₂ battery

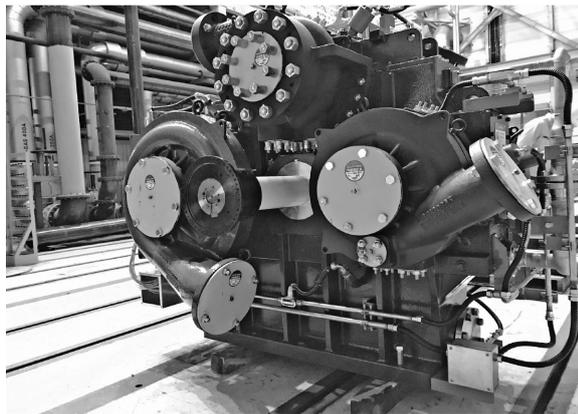


図15 CO₂バッテリー用遠心圧縮機
Fig.15 Centrifugal compressor for CO₂ battery

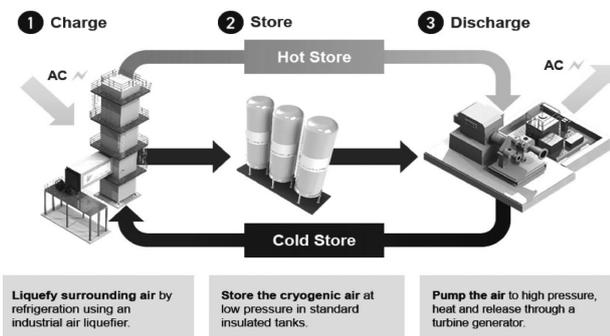


図16 LAES系統概略図⁶⁾
Fig.16 System schematic of LAES

の回転による遠心応力によって運転中は常に高応力場がインペラ内部および背面に発生する。有限要素解析を用いた強度解析により、許容応力を超えていないことや、クリープ寿命についても考慮しておくべき必要がある。当社ではインペラおよび周辺部品は設計温度に応じた耐熱鋼を使用することで高温対策を行っている。

ピニオンロータもインペラからの熱伝導およびガスからの熱伝達により高温状態となる。ピニオンロータは歯車強度を上げるために熱処理を施しており、運転時の温度が材料の焼戻し温度より高くないようにする必要がある。トルク伝達部である軸端の強度評価はもちろん軸部に熱を伝達させない工夫も必要となる。その課題を解決するために、当社はインペラとピニオンロータの間に耐熱鋼のスリーブを軸方向に挟むことでピニオンロータとインペラの距離を増やし、ロータへの入熱を抑える

工夫を行った⁷⁾。

さらに圧縮機ケーシングからギアケースへの過大な入熱はギアケースの熱変形を起し、軸受部の芯ずれを発生させる。それにより、回転体と静止体の接触を起こす原因となるため、ギアケースへの熱遮断も必要である。こうした熱変形による影響を少なくするために断熱材を圧縮機ケーシングとギアケースの間に使用することでギアケースへの入熱を抑えた構造として対策している。

2.2 熱応力および高発停頻度

停止時と運転時の温度差が大きい場合、熱伸びで発生する配管ノズル荷重およびモーメントは非常に大きく、それらを低減もしくは支持するための工夫が必要となる。伸縮管や曲げ配管による配管外力緩和や配管荷重を支持するサポート計画は事前に検討を行っている。

また、本用途はエネルギーロスを最小化するため、起動時間を短くすることが望ましい。しかし、熱応力は起動・停止時における急激な温度変化により発生するため、どのタイミングでどの部分が高応力状態になるか把握する必要がある。当社は流体解析による接ガス部の温度状態の計算や過渡伝熱解析および構造解析を組み合わせ、熱応力の計算を行った。図17に圧縮機が起動から定格回転数到達までの時間で正規化した時間を横軸とし、縦軸にインペラに発生する応力をその最大値で正規化した値を取り、起動時の暖気運転有無による応力の変化を比較した。暖機温度および保持時間を最適化することでインペラブレード根元の応力比を10%削減することで、インペラの長寿命化を図っている。

余剰に生成された電気を用いて充電し、調整力として使用されるLDESは、起動停止の頻度が高く、毎日起動停止 (Daily Start and Stop : DSS) の繰り返し回数を設計時に考慮する必要がある。前述した熱応力は起動・停止ごとに繰り返し荷重を受けるため繰り返し数を考慮した疲労設計を行っている。また、トルク伝達する軸や軸継手は起動時に定格の数倍もの起動トルクが発生するため、起動トルクと発停数を加味した強度設計を行っている。

停止してから次の起動までの時間が比較的短い場合、圧縮機内部の部品は一律に冷めず、回転体では不均一な温度分布によりロータに熱曲がりが生じることがある。熱曲がりが発生した状態ではバランスが崩れ、起動時に振動が高くなり定格回転数まで昇速できないことがあ

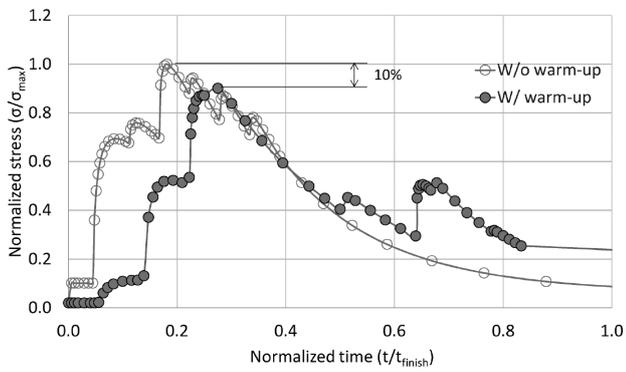


図17 起動時のインペラブレード根元応力
Fig.17 Stress at root of impeller blade during start-up

る。そのため、とくに熱変形の影響が大きい大型機には、運転後にロータを完全に停止してしまうのではなく、ターニング装置を用いた低速回転運転を行うことで、ロータの温度均一化を図り、つぎの運転時にスムーズな起動ができるように対策を行っている。

むすび = CCSで使用される高圧CO₂圧縮機やLDES向けで期待されている高温圧縮機に対する技術課題やその取り組みについて述べた。これらは今後のカーボンニュートラル社会および持続可能な社会実現に向けて重要な技術である。当社はこれからも高効率で信頼性の高い圧縮機製品技術の高度化を進めるだけでなく新しいニーズに対してもチャレンジし続け、お客様の「つくる」に寄り添った圧縮機の製品展開を行っていく。

参考文献

- 1) O. E. Balje. TURBOMACHINES, John Wiley & Sons, Inc. 1981, p.55.
- 2) 馬場利秋ほか. R&D神戸製鋼技報. 2020, Vol.70, No.1, p.75-80.
- 3) API STANDARD 617, NINTH EDITION, APRIL 2022.
- 4) 蓄電池以外のエネルギー貯蔵システム (LDES) の技術動向・課題整理 (経済産業省). 2024年第4回定置用蓄電システム普及拡大検討会. 2024-11-11.
- 5) ENERGYDOME S. p. A. HP. <https://energydome.com/CO2-battery/>. (参照2024-12-24).
- 6) 住友重機械工業HP. <https://www.shi.co.jp/products/energy/cryobattery/index.html>. (参照2024-12-24).
- 7) 株式会社神戸製鋼所. 藤岡輝明ほか. 回転機械. 特許第7610742号. 2025-01-08.

(技術資料)

ノンフロン冷媒採用ヒートポンプチラー

岡田和人^{*1} (工学博士)

Heat Pump Chiller Using Non- Fluorocarbon Refrigerant

Dr. Kazuto OKADA

要旨

コベルコ・コンプレッサ(株)における高温水取出スクリュ式ヒートポンプチラーの低GWP冷媒化に向けた技術開発状況と、市場投入したノンフロン冷媒対応機種「HEMⅢ-HR-GNシリーズ」、70℃温水取出機 (HEMⅢ-HR70-GN)、85℃温水取出機 (HEMⅢ-HR85-GN)、排熱回収85℃温水取出機 (HEMⅢ-HR85W-GN)、排熱回収95℃温水取出機 (HEMⅢ-HR95WZ-GN)の性能および加熱能力を示し、日本における導入効果として、HEMⅢ-HR85W-GNを事例に、既存のガス炊きボイラからの置き換えに対する、ランニングコストメリット、CO₂排出量削減効果について試算した結果を紹介する。試算の結果、国内導入においては、少なくとも、温度リフト(温水出口温度と熱源水出口温度との差)が60℃以下、加熱COPが3以上となる運用が望ましいことが分かった。

Abstract

This paper describes the status of technological development aimed at low GWP refrigerants for high-temperature water extraction screw-type heat pump chillers at Kobelco Compressors Corporation, the performance and heating capacity of the HEMⅢ-HR-GN series 70℃ hot water extraction machine (HEMⅢ-HR70-GN), the 85℃ hot water extraction machine (HEMⅢ-HR85-GN), the waste heat recovery 85℃ hot water extraction machine (HEMⅢ-HR85W-GN) and the waste heat recovery 95℃ hot water extraction machine (HEMⅢ-HR95WZ-GN), which are non-fluorocarbon refrigerant compatible models, and introduces the results of calculations of the running cost benefits and CO₂ emissions reduction effect of replacing existing gas-fired boilers with the HEMⅢ-HR85W-GN as an example of the effects of its introduction in Japan. As a result of these calculations, it was found that for the introduction in Japan, it is desirable to operate the system so that the temperature lift (the difference between the hot water outlet temperature and the heat source water outlet temperature) is at least 60℃ or less and the heating COP is three or more.

検索用キーワード

ヒートポンプ, チラー, 低GWP冷媒, ノンフロン冷媒, 熱回収, 冷温同時取出し, 廃熱回収, 高温水取出し

ま え が き = 世界的に地球環境問題が重要視される中、国内においては、2020年の菅首相による2050年までのカーボンニュートラル表明、2023年に岸田政権下で閣議決定された脱炭素成長型経済構造移行推進戦略 (GX推進戦略) などによって、高効率な脱炭素化技術として産業用ヒートポンプは再び脚光を浴びるようになってきた。コベルコ・コンプレッサ株式会社 (以下、当社という) においても、燃焼式ボイラを代替するヒートポンプチラーとして温水取出の限界を50℃レベルから70℃、90℃、さらには175℃蒸気までアップさせた機種を市場投入し、CO₂排出量の削減やランニングコストの低減の寄与に努めてきた¹⁾。

いっぽうで、ヒートポンプチラーは、GWP (Global Warming Potential: 地球温暖化係数) の高いHFC冷媒を使用しており、低GWP冷媒への転換が急務となっている。本稿では、当社における高温水取出スクリュ式ヒートポンプチラーの低GWP冷媒化に向けた技術開発の取組状況と、市場投入したノンフロン冷媒 (GWPが1桁と低く、フロン排出抑制法の対象外となる冷媒であり、専門業者による回収や定期点検の義務がなく、フロンによる管理や廃棄コストを削減することが可能) 対応

機種の特徴、その導入メリット試算結果と課題について紹介する。

1. スクリュ式ヒートポンプチラーの低GWP化とノンフロン化の必要性

CO₂排出量の削減に貢献しているヒートポンプは、温室効果の高いフロン類を多く使用している機器でもあり、漏えい時や回収時の大気への放り出しの観点から、これらフロン類に対する排出規制が強化されている。2016年10月のキガリ改正によって、日本を含む先進国は2036年までにHFCの生産、消費量を基準値の85%まで段階的に削減しなければならなくなった²⁾。また、国内においてオゾン層保護法が改正されて、HFC冷媒の新規出荷量の削減により価格上昇を招き、一部のHFC冷媒は入手が困難になりつつある。

さらに、フロン排出抑制法によって、熱源機器製造メーカーには製品に使用する冷媒の低GWP化およびノンフロン化が要求されることとなり、熱源機器に応じた製品区分ごとに目標GWP値と目標年度が定められ (指定製品化)、目標年度以降は出荷台数ベースの加重平均GWP値を目標値以下とするよう課せられている。2023年4月

*1 コベルコ・コンプレッサ(株) 播磨事業所 技術本部 商品開発部

より、当社のスクリュ式チラーも指定製品として、目標GWP値750、目標年度2027年と定められた。³⁾

これらの背景より、当社ではチラー用途ではGWP750以下の低GWP化、温水温度50℃以上のヒートポンプ用途ではノンフロン冷媒への転換を進めており、以下に後者（温水温度50℃以上のヒートポンプ用途）の取り組みを紹介する。

2. 高温水取出スクリュ式ヒートポンプチラーに採用できる低GWP候補

高温水取出スクリュ式ヒートポンプチラーの代表機種に使用されている現行HFC冷媒と低GWP代替冷媒候補を表1に示す。R134a、R245faのGWP値は、1,000前後と高い値を有している。低GWP冷媒候補としてHFO（ハイドロフルオロオレフィン）やHCFO（ハイドロクロロフルオロオレフィン）などのいわゆるノンフロン冷媒が提案されているが、不活性ガスまたは特定不活性ガスであること（低毒性、燃焼性が低い）、使用温度における設計圧が現行HFC冷媒機種と同等であること、運転性能が良いこと、入手性に問題がないことなどを考慮し、代替冷媒を選定する必要がある。具体的には、取り出す温水温度条件見合いで、R134aの代替候補はR1234yf、

R1234ze(E)、また、R245faの代替候補はR1224yd(Z)、R1233zd(E)、R1336mzz(Z)などとなるが、いずれもフロン排出抑制法の対象外となる冷媒であり、専門業者による回収や定期点検の義務がなく、フロンによる管理や廃棄コストを削減することが可能となるノンフロン冷媒となる。

R1234yf、R1234ze(E)については、僅かながら燃焼性を有するA2L（微燃性）冷媒（ASHRAEの安全性分類）ではあるが、高圧ガス保安法で「特定不活性ガス」に分類され、機械換気装置（チラー、ヒートポンプとのインタロックが必要）および冷媒漏えい検知警報装置を設置すれば不活性ガスと同等の扱いとなる。

3. ノンフロン冷媒対応高温水取出スクリュ式ヒートポンプチラー

1章で述べた冷媒規制動向を受け、当社で市場投入した、あるいは、市場投入予定の高温水取出および蒸気供給スクリュ式ヒートポンプチラーのノンフロン冷媒対応機種ラインナップについて、横軸に冷水（熱源水）出口温度、縦軸に冷却水（温水）出口温度を取り、適用可能な温度範囲で分類したマップを図1に、代表仕様を表2に示す。

表1 高温水取出スクリュ式ヒートポンプチラーに採用の現行冷媒と低GWP冷媒候補

Table 1 Present refrigerants applied to high temperature screw heat pump chiller and low GWP refrigerant candidates

Refrigerant species	HFC		HFO				HCFO
	R134a	R245fa	R1234yf	R1234ze(E)	R1233zd(E)	R1336mzz(Z)	R1224yd(Z)
Refrigerant name	R134a	R245fa	R1234yf	R1234ze(E)	R1233zd(E)	R1336mzz(Z)	R1224yd(Z)
GWP (AR5 ^{※1)})	1,300	858	<1	<1	1	2	<1
ASHRAE 34 ^{※2)}	A1	B1	A2L	A2L	A1	A1	A1
Refrigerant safety classification standards	A1	B1	A2L	A2L	A1	A1	A1
Classification by act on the safety of high-pressure gases	Inert gas	Inert gas ^{※3)}	Specified inert gas	Specified inert gas	Inert gas	Inert gas	Inert gas
Act on rational use and proper management of fluorocarbons	Applicable	Applicable	Not applicable	Not applicable	Not applicable	Not applicable	Not applicable
Boiling point (at 1atm)	-26.1℃	15.3℃	-29.4℃	-19.0℃	18.3℃	33.5℃	14.6℃

※1) IPCC Fifth Assessment Report

※2) American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc.,

A : Lower toxic, B : Higher toxic, 1 : Non-flammable, 2L : Mild flammable, 2 : Weakly flammable, 3 : Strong flammable

※3) Depending on the specification conditions, the act on the safety of high-pressure gases does not apply.

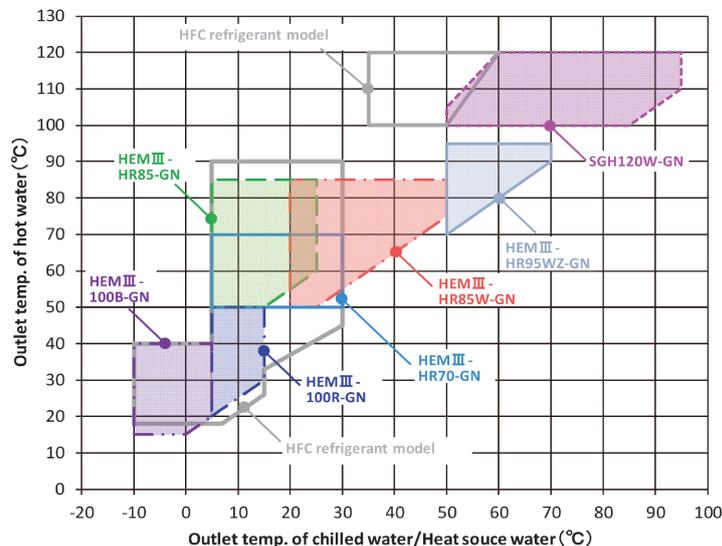


図1 ノンフロン冷媒採用の高温水取出スクリュ式ヒートポンプチラーの運転温度マップ

Fig.1 Operating temperature map of high-temperature screw heat pump chiller filled with non-fluorocarbon refrigerant

表2 ノンフロン冷媒採用の高温水取出スクリュ式ヒートポンプチラーの代表仕様

Table 2 Representative performance of high-temperature screw heat pump chiller filled with non-fluorocarbon refrigerant

Model	Refrigerant	GWP	Outlet temperature range		Representative performance			
			Chilled water Heat source water	Hot water	Cooling capacity	Heating capacity	COP ^{※1}	Temperature condition ^{※2}
HEMIII-HR70-GN	R1234yf	<1	5~30°C	50~70°C	247.6 kW	359.4 kW	5.3	17/7°C, 55/65°C
HEMIII-HR85-GN	R1234ze(E)	<1	5~25°C	50~85°C	156.3 kW	254.1 kW	4.1	17/7°C, 70/80°C
HEMIII-HR95WZ-GN	R1224yd(Z)	<1	50~70°C	70~95°C	-	487.6 kW	5.3	65/60°C, 90/95°C
HEMIII-HR85W-GN	R1234ze(E)	<1	20~50°C	50~85°C	-	537.9 kW	5.3	55/50°C, 80/85°C

※1) HEMIII-HR85W-GN, HEMIII-HR95WZ-GN: Heating COP, HEMIII-HR70-GN, HEMIII-HR85-GN: Total COP

※2) [Chilled water(heat source water) inlet temp.]/[Chilled water(heat source water) outlet temp.] °C, [Hot water inlet temp.]/[Hot water outlet temp.] °C

ノンフロン冷媒への転換にあたり、既存機種（HFC冷媒）において納入実績のある温度範囲を網羅しつつも、後述するようにヒートポンプがより高い効率で運転できる熱源水温度の高温化にも取り組んだ。具体的には、熱源水入口温度範囲をこれまでの40°Cから60°C程度まで広げたHEMIII-HR85W(Z)-GN、さらに80°Cまで広げたHEMIII-HR95WZ-GNを新たに開発し商品化した。また、蒸気供給ヒートポンプについても熱源水温度の高温化による性能向上を図ったSGH120W-GNを開発中である。

図2に、ユニット内の主要機器構成を示したフロー図を示す。基本的なヒートポンプサイクルを構成する、蒸発器、圧縮機、凝縮器、膨張弁に加え、加熱能力（および冷却能力）の向上と性能アップを図るためにエコマイザを搭載している。また、熱源水温度が高い排熱回収用途では、総じてユニット内の圧縮機吸込側冷媒の密度が大きくなることで冷媒循環質量流量が多くなり、圧縮機の効率向上のために設置していた冷媒過熱器（冷媒熱交換器、図2中に灰色線で記載）での圧力損失が大きくなり、かえってユニット性能が低下してしまう運転となるため、冷媒過熱器（冷媒熱交換器）のない機器構成でまとめた。

図3には、後述する70°C温水取出機HEMIII-HR70-GNのユニット外観写真を示す。幅1.2 m、高さ2.1 m、奥行2.1 m程度の直方体形状の防音カバーに上記主要機器およびインバータや制御盤が収められている。

3.1 70°C温水取出機HEMIII-HR70-GN（温水取出温度50°C~70°C）

70°C温水取出機（HEMIII-HR70-GN）は、スクリュ式水冷ヒートポンプチラーで初となるノンフロン冷媒対応機種HEM-HR70-GN⁴⁾の性能改善を図った後継機種であり、冷水入口温度30°C/冷水出口温度20°C、温水入口温度55°C/温水出口温度65°Cの場合で熱回収COP（ヒートポンプチラーのエネルギー消費効率を表す指標の一つで、冷却能力と加熱能力の合計を消費電力で除した値、COPはCoefficient of performanceの略記）8%程度の向上を実現し、2024年4月から販売を開始した機種となる。冷媒はHEM-HR70-GNと同様にR1234yfを採用し、後述するHEMIII-HR85WZ-GNと比較すると加熱能力が大きく、熱負荷が季節により変化する場合など、冷温同時取出運転と冷却専用運転を切り替えての適用が可能である。図4に、HEMIII-HR70-GNの各運転温度条件（出入口温度差10°C）における加熱COP（ヒートポンプチラー

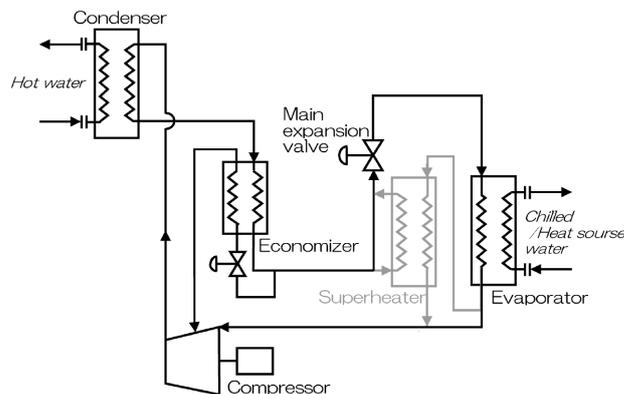


図2 ユニット内の主要機器構成を示したフロー図

Fig.2 Flow diagram showing the main equipment configuration within the unit

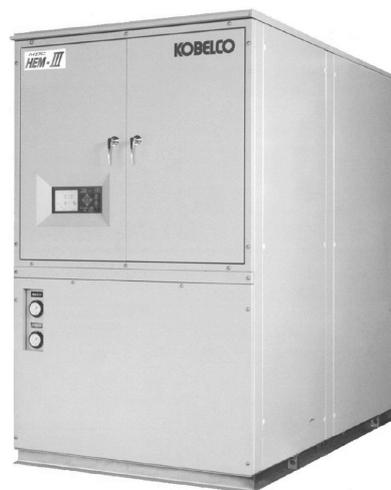


図3 HEMIII-HR70-GNのユニット外観写真

Fig.3 Unit exterior photograph of HEMIII-HR70-GN

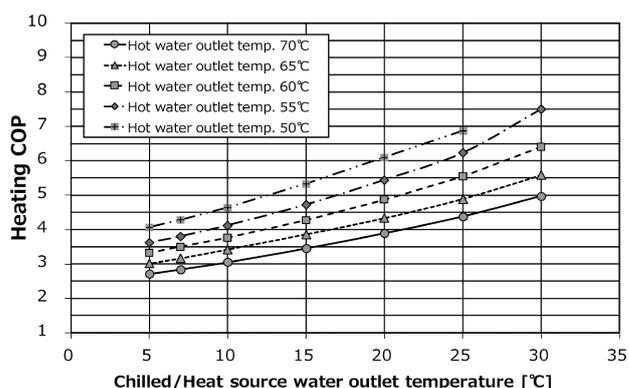


図4 HEMIII-HR70-GNの加熱COP特性

Fig.4 Heating COP characteristics of HEMIII-HR70-GN

一のエネルギー消費効率を表す指標の一つで、加熱能力を消費電力で除した値、COPはCoefficient of performanceの略記)を示す。冷水入口温度40℃/冷水出口温度30℃、温水入口温度45℃/温水出口温度55℃の場合で加熱COP7.5を実現可能である。なお、図1の対応温度マップに記載のとおり、低GWP冷媒採用の冷却専用チラーあるいは熱回収(冷温同時取出)ヒートポンプチラー:HEMIII-GL⁵⁾のノンフロン冷媒機として、HEMIII-100R/B-GNも2024年4月にラインナップに加えた。

3.2 85℃温水取出機HEMIII-HR85(Z)-GN^{注1)}(温水取出温度50℃~85℃)

85℃温水取出機(HEMIII-HR85-GN)は、現行のHFC冷媒採用の90℃取出ヒートポンプチラー(HEM-HR90、スクリュ式二段圧縮機を搭載)の温水取出温度領域を、単段圧縮機を搭載して85℃までカバーした冷温同時取出ノンフロン冷媒対応機であり、2020年7月に販売開始したHEM-HR85-GN⁶⁾の運転温度範囲拡大と部分負荷制御安定性のさらなる向上を図った後継機となる。冷媒は、R134aとR245faとの混合冷媒と動作圧力が近くかつGWP1以下のR1234ze(E)を採用した。単段圧縮機を搭載しながら、排熱回収条件(熱源水入口温度35℃/熱源水出口温度25℃、温水入口温度70℃/温水出口温度80℃)においては、従来モデルHEM-HR90の熱回収COP3.7に対し3.6と、遜色ない性能となっており、二段圧縮機と比較し起動温度条件の制約緩和などのメリットを有する機種となっている。また、HEMIII-HR85Z-GNは、15~20%程度加熱能力を増量した仕様となる。

3.3 排熱回収95℃温水取出機HEMIII-HR95WZ-GN(温水取出温度70℃~95℃)

排熱回収95℃温水取出機(HEMIII-HR95WZ-GN)は、プラントエンジニアリングメーカーの木村化工機株式会社と共同開発した95℃温水取出機(HEM-HR95-GN)⁷⁾の加熱能力を30%アップした後継モデルであり、低沸点溶剤の蒸留濃縮回収システムやアンモニア回収装置などの省エネ化、省CO₂化を目的に、従来の温水ヒートポンプでは対応できなかった高温排熱の回収に対応したノンフロン対応機種である。これまでの温水ヒートポンプでは、最高40℃までの排温水から熱回収して70℃~90℃の温水供給に対応していたが、本機種は、60℃~80℃というより高温の排温水から熱を回収し、最大95℃の温水供給を可能にしたことで、例えば、熱源水入口温度80℃/熱源水出口温度70℃、温水入口温度80℃/温水出口温度90℃の場合には、加熱COPが8.3と非常に高いCOPでの運用が可能となる。冷媒は蒸気供給ヒートポンプで実績のあるR245faに近い物性でかつGWP1以下のR1224yd(Z)を採用した。

3.4 排熱回収85℃温水取出機HEMIII-HR85W(Z)-GN(温水取出温度50℃~85℃)

排熱回収85℃温水取出機(HEMIII-HR85W(Z)-GN)は、HEMIII-HR95WZ-GNの運転温度域を低温側に広げて、

様々な蒸留プロセスへの適用を可能とした機種である。運転可能温度域は、熱源水出口温度20℃~50℃、温水出口温度50℃~85℃と広範囲にわたり、加熱COPは最大で7.7となる。冷媒は、運転温度帯より、R134aとR245faとの混合冷媒と動作圧力が近くかつGWP1以下のR1234ze(E)を採用した。3.1節に記載のHEMIII-HR70-GNと運転温度範囲が重なる条件においては、COPは若干優位となるため、必要となる加熱能力見合いで、機種選定をすることとなる。

3.5 排熱回収120℃蒸気供給機SGH120W-GN(蒸気供給温度100℃~120℃)

排熱回収120℃蒸気供給機(SGH120W-GN)は、SGH120の後継機として、熱源水温度の高温化による加熱COPの向上を図ったものであり、現在、鋭意開発中である。図1にSGH120W-GNの対応温度領域を破線多角形で示しており、膨張弁の耐熱温度を上げることで、熱源水出口温度を現行SGH120での60℃から95℃まで広げ、加熱COPも3.5から5.5程度まで向上の見込みである。冷媒は、HEMIII-HR95WZ-GNと同様に、R1224yd(Z)を採用する予定である。

4. ノンフロン冷媒対応スクリュ式ヒートポンプチラー導入によるランニングコストおよびCO₂排出量の削減効果試算

4.1 ヒートポンプチラーの温度リフトと加熱COP

3章で詳述した各機種に関して、温水出口温度と熱源水(冷水)出口温度の差(温度リフト)を横軸に、加熱COPを縦軸にプロットしたグラフを図5に示す。ユニットのプラットホームが共通化されている(熱交換器や圧縮機などの主要機器が共通)こと、採用した冷媒の臨界温度が作動温度帯よりも十分高いこともあり、機種、冷水(熱源水)温度、温水温度の絶対値によらず、おおむね一つの曲線で整理できることが分かる。

ヒートポンプチラー導入により期待されるメリットは、省エネルギー化、ランニングコスト削減、および、CO₂排出量の削減となる。日本では省エネ法の中で、各種二次エネルギーの一次エネルギーへの換算係数が定められており、電力については、2023年4月に施行された

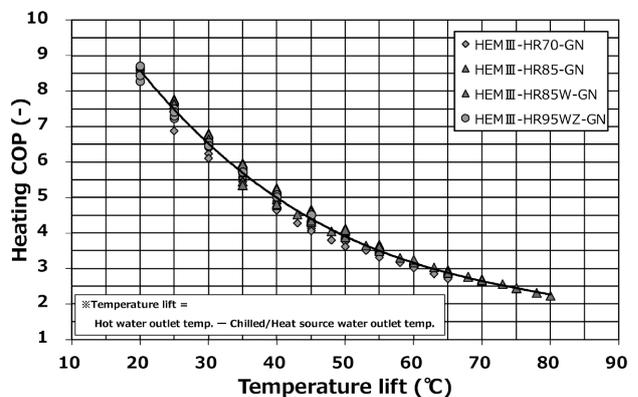


図5 ノンフロン冷媒対応高温温水取出スクリュ式ヒートポンプチラーの加熱COP特性

Fig.5 Heating COP characteristics of high-temperature screw heat pump chiller filled with non-fluorocarbon refrigerant

脚注1) HEMIII-HR85(Z)-GNはHEMIII-HR85-GNとHEMIII-HR85Z-GNの総称である。(以下同様)

改正省エネ法で、一次エネルギー換算係数が2.4(8.64MJ/kWh)に引き下げられたら、化石燃料については輸送などに伴う損失は無視し、1となっている。CO₂排出係数については、林本の研究⁸⁾により、13AガスのCO₂排出係数は2.23kg-CO₂/Nm³(=0.0549kg-CO₂/MJ)、電気のCO₂排出係数は438kg-CO₂/kWh(=0.1217kg-CO₂/MJ)となり、その比は2.22となる。電気とガスの価格比(二次エネルギー価格比)については、甲斐田の研究⁹⁾から、2011年の東日本大震災を契機とした原子力発電所の長期停止や2012年に開始された再生可能エネルギー発電促進賦課金(再エネ賦課金)によって、2014年頃から電力単価が燃料単価と比べて相対的に高くなり、再エネ賦課金込で2.92(再エネ賦課金なしで2.44)となる。後述する試算結果からわかるように、省エネ性、環境性、経済性の観点から、少なくともCOP3以上を目安とした温水出口温度と熱源水(冷水)出口温度の差(温度リフト)60℃以下となるような導入計画を推奨する。

4.2 ヒートポンプチャラーの加熱能力特性

3章での各機種の温水取出最高温度条件において、定格運転時の加熱能力を、上限および下限の温水出口温度それぞれについて、熱源水(冷水)出口温度に対してプロットしたグラフを図6に示す。いずれの機種も、熱源水(冷水)出口温度が高くなるにつれて加熱能力は上昇するが、HEMIII-HR85W-GNを除いた3機種はユニット機器構成が同等であり、熱源水(冷水)出口温度が同じ条件で加熱能力に差異が見られるのは、充填している冷媒種の物理特性の違いによる(単位体積あたりの蒸発および凝縮熱容量がR1234yf > R1234ze > R1224yd(Z)となる)ところが多い。温水出口温度が低い場合の方が、加熱能力が大きくなっているのは、温水出口温度と熱源水(冷水)出口温度の差(温度リフト)が小さいほど、圧縮工程での比エンタルピー差が小さくなり、同じ圧縮機消費動力に対して圧縮機回転数を高く(冷媒循環質量流量を大きく)できるためである。ヒートポンプチャラーの導入検討にあたっては、運用予定の温度条件と熱需要パターンに基づき、ヒートポンプチャラー側の加熱能力を確認の上、熱需要に見合ったユニット台数を選定することとなる。

4.3 ランニングコストおよびCO₂排出量の削減効果試算事例

代表例として、排熱回収85℃温水取出機(HEMIII-HR85W-GN)にて、熱源水温度55/50℃~25/20℃、温水温度80/85℃とし、ボイラの蒸気利用効率(ボイラで生成した蒸気のうち、蒸気配管での熱損失などを加味した、実際にプロセスなどで利用される蒸気の比率)を90%と仮定した場合の、加熱COPに対するランニングコスト削減率、および、CO₂排出量削減率をプロットした結果を、図7に示す。ここで、4.1節に記載のとおり、電気と13Aガスの価格比(二次エネルギー価格比)は2.92とし、CO₂排出係数は2.22とした。熱源水の温度条件によって加熱COPは3未満から5超まで変化し、これに伴いランニングコスト削減率は4%から50%まで、CO₂排出量削減率は27%から62%まで大きく変化する。

メリットが見込める下限の加熱COPは、ランニングコストで2.63、CO₂排出量削減で2.00となる。図8には、温水温度80/85℃とし、熱源水温度55/50℃、40/35℃、25/20℃の3ケースについて、HEMIII-HR85W-GN導入前におけるボイラの蒸気利用効率に対するランニングコスト削減率、および、CO₂排出量削減率をプロットした結果を示す。

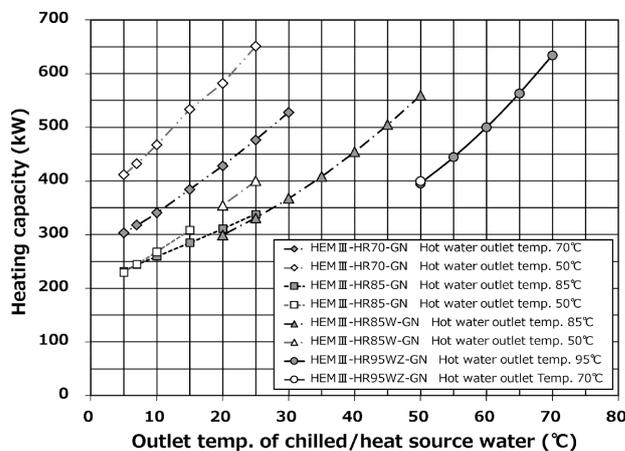


図6 ノンフロン冷媒対応高温水取出スクリュ式ヒートポンプチャラーの加熱能力特性

Fig.6 Heating capacity characteristics of high-temperature screw heat pump chiller filled with non-fluorocarbon refrigerant

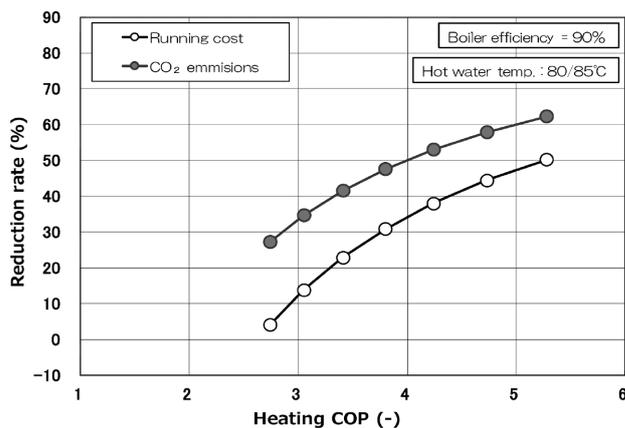


図7 HEMIII-HR85W-GN導入メリット評価(加熱COPの影響度)
Fig.7 Evaluation of the merits of introducing HEMIII-HR85W-GN (influence of heating COP)

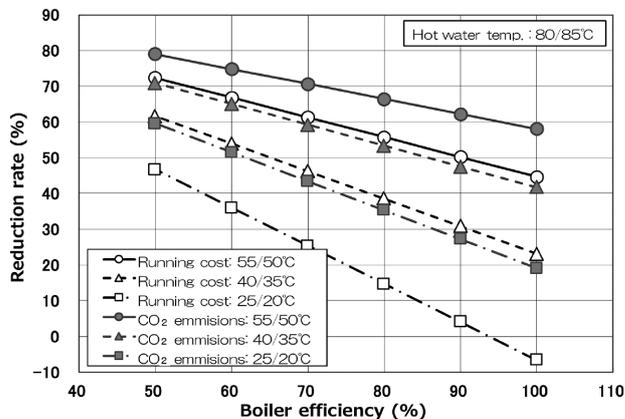


図8 HEMIII-HR85W-GN導入メリット評価(ボイラー効率の影響度)

Fig.8 Evaluation of the merits of introducing HEMIII-HR85W-GN (influence of boiler efficiency)

一般に、ボイラの蒸気利用効率は、60%から最大でも85%と言われ¹⁰⁾、この値により、ヒートポンプチラーの導入効果が大きく影響を受けることが分かる。

むすび = 2050年までのカーボンニュートラル実現を目指す中、中長期的に見て産業用ヒートポンプの普及促進は必須であるが、現時点において、燃焼系機器と比べ初期費用が高いことや高度なエンジニアリングが必要になること、再エネ賦課金が電力のみに課せられていることなどが導入障壁になっている状況にある。これら導入障壁を緩和するための取り組みとして、国内におけるエネルギー政策の見直しに期待するとともに、熱源機器メーカーである当社においては、今後も継続して新たな製品開発を推し進めることで、全地球規模的な脱炭素化社会の実現に貢献していきたい。

参 考 文 献

- 1) 田下友和ほか. エレクトロヒート. 2018, No.220, p.19-24.
- 2) 環境省. モントリオール議定書第28回締約国会合の結果. https://www.env.go.jp/earth/ozone/montreal/mop28_result.html. (参照2025-03-23).
- 3) 経済産業省HP. 第18回産業構造審議会製造産業分科会化学物質政策小委員会フロン類等対策ワーキンググループ. 資料6：新たな指定製品の目標値及び目標年度の設定等について(案). https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/seizo_sangyo/kagaku_busshitsu/flon_taisaku/018.html. (参照2025-03-23).
- 4) ㈱神戸製鋼所. 「グリーン冷媒」採用の水冷式高温ヒートポンプ「HEM-HR-GN/GLシリーズ」を販売開始 ～55℃から95℃温水取出機をラインアップ(95℃温水取出機：木村化工機㈱共同開発)～. https://www.kobelco.co.jp/releases/1201980_15541.html. (参照2025-03-23).
- 5) 岡田和人. BE 建築設備. 2022, 9月号, p.25-32.
- 6) 岡田和人. エレクトロヒート. 2021, No.237, p.28-32.
- 7) 坂口勝俊ほか. エレクトロヒート. 2020, No.234, p.12-20.
- 8) 林本伸章. ボイラ研究. 2017, 第405号, p.45-48.
- 9) 甲斐田武延. エレクトロヒート. 2024, No.257, p.43-48.
- 10) 林本伸章. ボイラ研究. 2020, 第419号, p.51-55.

(概説)

「新しい価値をつくる」事業創出への挑戦

蔭木陽一

執行役員 機械事業部門 新事業推進本部長

Creating New Value: The Challenge of Business Creation

Yoichi KAGEKI



当社において、素材・機械・電力の3本柱という言葉を使い始めたのは、2016年に発表した「2016～2020年度グループ中期経営計画」からである。素材系事業・機械系事業・電力事業の3本柱による成長戦略を一層深化させ、盤石な事業体を確立させることを志向してスタートした。過去より複合経営を標榜していたものの、素材系中心に陥りがちであった当社の思考ベクトルから、各事業部門のアイデンティティと責任が明確となり、馴れ合いではない切磋琢磨の意識や思考が芽生えてきたように感じる。

さらに2024年度からスタートした「KOBELCOグループ中期経営計画(2024～2026年度)」では、“KOBELCO-X”の考え方が示され、持続的に成長していくうえで欠くことのできない要素としてAX(既存事業の深化と新規事業機会の探索)とGX(カーボンニュートラルへの挑戦)の両輪による戦略推進も打ち出された。KOBELCO-Xは、我々の未来を見据えた挑戦を象徴しており、企業としての持続可能な成長を目指すための重要なキーワードとなっている。

機械事業部門においても、現中期経営計画の2030年ビジョン「コアビジネスをより強化するとともに、カーボンニュートラル社会の実現に向けた新規事業を創出・育成し、機械事業部門として取り組むべき社会課題に挑戦することで、全社の安定収益の最大の柱となる」を掲げ、ビジョン達成に向けた戦略実行にあたってのよりどころとすべく「パーパス・アンビション」を定めた。巻頭言でも機械事業部門長が述べているように、正しく全員参加で戦略実行と変革に挑戦する一体感が事業部門内で醸成されてきている。

今回、約7年ぶりの機械特集号では、KOBELCO-Xを構成するAXとGXを意識した構成となっており、GXは「環境ビジネス」、AXは「新たな価値提供(新規事業)」をテーマとして、我々の競争力の源泉となるコアコンピタンスを明確にしつつ、新しいビジネスへの展開可能性を示した。本稿以降では、主にAXの一翼を担うことが期待される機械事業部門の新規事業分野における取り組みを紹介する。

これまでの我々の新規事業創出は、主にお客様のニーズ・求めに応じて既存技術リソースや製品群を駆使して世の中に提供し、その価値をお客様に認めていただいたものが多い。いっぽうで昨今の取り組みは、これまでとは大きく違い、我々の持つ製品群や技術資産、お客様のニーズから、さらに一步飛躍させたところを狙っているのが特徴である。市場および技術・製品が既存ではなく

新規であり、既存のフィールドを超えたところで戦うリスクは高いものの、技術の成長や市場拡大などリターンも大きい。そして事業としての成長に加えて、個人や組織としての成長も見落とすことができないリターンの一つである。

新規事業のシード(種)を見つける組織的なボトムアップ型事業創出活動の「カンブリアプロジェクト」、次世代の蓄電デバイスとして注目されるも要素技術開発や量産技術の確立が課題となっている全固体電池、切削工具や金型に適用されてきた成膜技術による新たな市場となる半導体や脱炭素で注目される水素への展開、船舶の電動化を見据えた新しい高推力密度電動機の開発など、いずれの取り組みも機械事業部門でターゲットとしていた既存のマーケットセグメントと異なる分野に積極果敢に挑戦していることをご理解いただくのに相応しいものである。また今回紹介するテーマはごく一部であり、全てのテーマは紹介できていない。アイデア段階、要素技術開発、試作開発、パートナー・お客様の評価ステージなど、機械事業部門内では多くのテーマが輻輳しつつも新規事業創出に一步一步着実に進んでいることを申し添えておく。

チャールズ・A・オライリーらによる著書『両利きの経営』では、既存と新規事業の二兎を追う戦略で成功した企業の事例とともに失敗事例とその要因についても書かれている。機械事業部門でも長年新規事業開発を継続してきているが、道半ばで諦めたテーマも数多くあり、決して成功事例が多くある訳ではない。今回紹介する新しい技術や製品も、事業規模換算で100億円を超える売上を生み出す可能性を秘めたものばかりであり、期待も大きい。しかし、可能性だけでは事業として成立しないことも事実である。事業化に至るまでの間に今後想定外の技術的な問題や事業環境変化、競合の台頭などの障害があることは覚悟しておかなければならない。また最も恐れるべきは、我々自身の既存事業への執着と傾注が新規事業の芽を早々に摘んでしまうことかもしれない。泥臭い話になって恐縮だが、新規事業を創っていくうえでは、やはり最後までやり遂げる粘り強さや忍耐“Perseverance”と覚悟が無ければ難しいとも感じている。

機械事業部門は、全社におけるAXとGXの両輪を体現する役割のもと、既存事業の深化と新規事業の探索との間にあるこれらの矛盾を内包しつつ、我々の持てるリソースを融通し、既存と新規の有機的成長を必ずやり遂げる信念を持って愚直に諦めず推進していきたい。

(解説)

ボトムアップ型新事業創出の枠組み構築 ～カンブリアプロジェクト～

倉田和也*¹

Cambria Project: Building Framework for Creating New Bottom-Up Businesses

Kazuya KURATA

要旨

産業と消費の転換期を迎えるなか、近年多くの企業が、様々な方法で既存事業に代わる新事業の創出を進めている。重工・機械メーカーにとっての新事業では多額の開発や設備投資をとまなう例も多く、既存の技術やサプライチェーン、情報など幅広く資産への認識を深めることとそれらの活用が有効とされる。また価値の多様化や相互連携が進むなか、市場変化へ追従するには、従来までの自前主義から脱却し協業や共創することが必要となる。本稿では、事業創出のため、資産の認知と活用そしてオープンイノベーション促進の手段採用に至った経緯とそれらの有効性、さらなる今後の展望について述べる。

Abstract

As we enter a transition period for industries and consumption, many companies have been using various methods to create new businesses to replace existing ones. For heavy industry and machinery manufacturers, new businesses often involve significant development and capital investment. It is also considered to be effective to deepen the awareness and utilization of a wide range of assets such as existing technologies, supply chains, and information. Furthermore, as value diversification and mutual collaboration progress, it is necessary to break away from the traditional self-reliance and engage in collaboration and co-creation to keep up with market changes.

This paper describes the events that lead to the adoption of methods for recognizing and utilizing assets and promoting open innovation to create businesses, as well as the effectiveness of these methods and outlook for the future.

検索用キーワード

オープンイノベーション, 重工, メーカー, 新事業, 資産, 自前主義, 協業, 共創

まえがき＝新事業の創出は、事業のライフサイクルが短くなるなか企業にとって安定的に事業運営を行うために近年注目されている。その方法は既存事業の発展や拡大だけでなく、企業買収やオープンイノベーションのように社外の資産を活用する様々な方法がとられている。いっぽうで、当社機械事業部門も含まれる重厚長大産業にて特殊な環境下で使用される製品は、構成する技術を活かした用途に特化することで成長を遂げてきた場合が多い。技術開発からモノづくりへの多大なコストをかける必要性から比較的大規模な企業が自社で技術開発を進める「自前主義」を取ることで担ってきた。現在でも多くの製品が過去の実績やその特殊性による参入障壁の高さから長らく同じ事業を継続している。ただし、今後さらに脱炭素化が進められるなか、従来の産業構造にも大きな転換が求められており、重厚長大産業もその例外ではない。本稿では機械・重工メーカーにおける事業開発の課題克服にむけた機械事業部門のボトムアップ型新事業創出の取り組みについて紹介する。

1. 価値創造手法

新事業における価値創造の方法は、大きく二つに分けられる。一つ目がシーズ起点の方法で、自社のアセットを基に新たな市場を探す方法、そして二つ目がデザイン思考によるお客様課題やニーズを起点として事業アイデアを創出する方法である。

前者のシーズ起点の方法は、これまで重厚長大産業が得意としてきた方法である。保有する技術や製品に対して、たとえば大型化や高温・高圧化のための開発を長期的に進めて優位性を高めることで新たな市場やお客様への展開が進められた例が多い。いっぽうで、シーズ起点の新事業がうまくいかない場合は、長期間にわたり開発を進めたものの実際にお客様の課題を十分に検証されないまま自社のアセットにこだわった結果、後々になって実際の需要が存在せず具体的な用途やお客様が見つからないといった失敗に陥ることがあり、当社も同様に事業化に至らなかった事例があった。しかしながら、近年の脱炭素に関連する転換期においては、より迅速かつ確実に事業転換や事業創出が求められることから、従来型

*¹ 機械事業部門 新事業推進本部 新事業企画部

の多くの意思決定を伴うトップダウンによる事業開発方法だけでは不十分といえる。

後者のデザイン思考は、アップルやグーグルといった情報技術を活用する多くの企業で主に取り入れられているニーズ起点のボトムアップ型アプローチであり、お客様の課題や困りごとと、その解決方法が合致することを重視するものである。デザイン思考から派生して、お客様課題の特定と解決策が完全に合致すべくアイデアを繰り返し練り直しリスタートアップと呼ばれるアプローチ¹⁾や、迅速かつ最低限の製品サービスで事業化を進めたのちに改良を加えるようなアジャイル型開発も多く採用されている。参考例としては少し古いですが、配車サービスアプリやフリマアプリなどのスマートデバイス向けサービス提供によりお客様課題の解決とともに需要を喚起する新たな事業が多く生まれている。しかしながら、多くのメーカーのとりわけ重厚長大産業にとって、デザイン思考は実現化することが容易でない場合が多い。その要因には複数の理由があげられるが、主な理由として、課題そのものの大きさや、その課題を解決するために必要かつ有効な技術を保有していない場合、課題解決そのものは実現が可能であってもコストや販路など様々な要因によって自社が優位性を出せず事業として成立しないことがあげられる。このような機械・重工メーカーにおける新事業創出活動の難しさを解決すべく、デザイン思考を採用しつつ様々なアセットを取り入れたアプローチを可能とするオリジナルプログラムの企画設計に取り組んだ。

2. オリジナルプログラム設計

2.1 従来の取り組み

前段でオリジナルプログラムの企画実施に至った背景には、これまでの新事業創出活動にていくつかの失敗経験を経ていることがある。過去の新事業創出活動プログラムについての振り返りを以下に示す。

- ・活動体制：事業創出の経験不足を補うために、活動当初に外部のコンサルタント会社を採用し、当時主流であったデザイン思考の要素を多分に含んだアプローチであった。しかし、営業、開発、設計、製造といった社内の多様な人材での活動とする点や、技術などのアセットおよび部門指針との連携が不足していた。つまり、お客様との接点を持つことでの具体的な課題の把握や、自社の様々な製品や資産を理解した上で強みを活かす点が十分ではなかった。
- ・組織性：上位層と新事業の定義や考え方への合意形成や、それに基づく指針の共有といったプロセスが不足していた。
- ・提案評価：新事業アイデアの評価指針が定められておらず、提案への修正過程で次々と条件が加わり、結論付けが不明瞭なままのプログラム終了が多くみられ、一部ではモチベーションの低下も見られた。

以上の振り返りに基づいて新事業創出活動の新たな企画としてプログラムを刷新し、人選の方法や役員の関与を増やすなど、様々な見直しを実施した。そこで発足し

たのが『カンブリアプロジェクト』という機械事業部門独自のボトムアップ型事業創出活動である。このカンブリアプロジェクトのミッションは『機械事業部門の新事業創出／企画』と『継続的に新事業を生み出す組織／土壌となること』とし、プロジェクトの特徴を『デザイン思考や共創を取り入れた重厚長大の機械産業に合致するオリジナルプログラム』と設定し構想設計を実施した。

2.2 社史の分析

カンブリアプロジェクトの活動を開始するにあたって、最初に行ったことは社史の分析である。社史の分析を通じ、これまでに生み出された製品や技術の経緯やきっかけ、そして撤退した製品の背景などを調査した。例をあげると、現在も主力である圧縮機などの回転機事業は、1914年に当時第一次世界大戦の勃発による技術の国産化が加速されていたなか、海軍の要請により当社が英ピーターブラザーズ社と空気圧縮機の技術ライセンスを結んだことで始まっている²⁾。その後、ディーゼルエンジンや冷凍機、粉碎機など数多くの技術導入とともに設備投資が進められ、昭和に入ると軍需の急増と陸軍の要請はさらに強まり、石炭液化事業や空気分離など多くの事業が生まれている。戦後には民需への転換を図るため、再び欧米のメーカーと提携を開始し、ターボ圧縮機やスクリュ圧縮機の技術導入による製造を開始した。並行して、製粉機、搾汁機、連続式油搾機、フライパン、天ぷら鍋などの製作をするも現在では撤退している。

その後、1980年代になると、アリス・チャーマーズ社からターボ圧縮機のバイ・アウト（技術買取り）を実施するなど、各機種において独自の発展を現在も進めているが、1990年以降の30年間で生まれた事業は大幅に減る。このように機械事業部門の歴史を辿ると、かつて旺盛な軍需や民需の確かな需要や課題に基づいて技術提携や設備投資が行われ、製造事業が拡大したことがわかる。その後、世界をリードする立場になると独自の進化をするも後発に追従され撤退したものも多い。現有している事業は、特定用途における実績や、多額の開発や設備投資が必要で参入障壁が高いものである。これらから当活動では、技術やサービスを社内に制限せずに共創する必要性を強く認識することとなった。

2.3 組織的活動にむけた詳細設計

プログラムの詳細設計にむけて次に実施したのが、活動の各種定義づけと判断基準の設定である。具体的には、自社製品と成長市場の親和性について分析を行い、対象とする新事業の領域と分類、さらに事業アイデアの規模として目標とする売上や利益達成までの期間を設定した。また進捗段階に応じた到達度などのゲート基準の設定を行った。これらの指標は、各プログラムを開始する際に、目標設定会議として役員と議論し、それら活動の全体スケジュールとその進め方について合意を得ることで、将来的な事業部への移管や投資などが円滑に行われるような組織的活動とした。

また活動に参画するメンバの人選では、デザイン思考に必要な現場の生きた課題と、当社製品に関連した高い専門性の両方が有効となるため、これまでの開発を専門

とするメンバ構成から、機械事業部門全体で募られた有志のメンバ構成へと転換させた。さらに当活動では参加メンバそれぞれの正式分担された業務負荷100%のうち20%として認めるとともに、活動期間を通じた査定を行い参加メンバの所属長へフィードバックを行うこととした。

つぎに取り掛かったのが、オリジナルプログラムの企画である。対象領域の市場調査と課題の抽出や、自社製品の分析、社史や過去開発の成功や失敗事例を分析し自社の風土や組織に合致する事業を語り合う場、モノづくりに必要な中長期的な展望をもつためのシナリオプランニングと未来洞察、オリジナルを含めた各種のアイデア発想法など、これらスキルの獲得や自社に合致する事業の考えを会得するコンテンツの企画と構成をプログラムの前半に織り込ませた。なお、提案された事業アイデアは前半のプログラム終了後に、後半のプログラムに向けて第一選別が行われるが、当活動では一つの事業アイデアについて最低三名の仲間を検討チームのメンバに揃えることを条件としている。

プログラムの後半では、お客様課題検証や課題解決検証とおおまかな事業収支検証を経て役員へのピッチが行われるスタイルで、一般的なプログラム内容となっている。後半のプログラム中では、『責任メンター制』を採用しており、事業開発の経験者やカンブリアプロジェクト卒業生などがアサインされ、支援をしつつ最終の報告会ではメンバと同じ起案者としてピッチに臨む。これら一年のプログラムを通じてイノベーションの輪を広げるとともに、メンターとしてのスキルアップの機会を設けている。

いっぽうでオリジナルプログラム採用により当活動そのものが自前主義となることや、ガラパゴスな企画となってしまうよう、事務局メンバは、外部研修や新事業強化トレーニングへ参加することで、ちまたの主流なプログラムとの整合性をとりつつ、必要に応じて適宜プログラムの修正を図っている。

このようにして開始したカンブリアプロジェクトは、有志メンバによる情報収集や各種スキル獲得段階の後に、アイデア創出と絞り込み、そして事業アイデアのブラッシュアップが行われ、スモールスタートにて開始し一年間のプログラム終了時の参加者アンケート結果から、おおむね良好な評価が得られていることが示された。また、提案されたアイデアは、プログラム終了後一年半以上が経過する本稿執筆時も数件が事業化にむけた開発が継続されている。

3. イノベーションの輪の拡大

有志メンバによるチーム活動のつぎに行ったのが、新事業研修である。この研修の実施に至った背景には、有志チーム活動の回数を経るごとにプログラム参加希望者が減少したことによる。筆者の調査によると多くの企業の社内イノベーションプログラムにて同様の傾向があり、回数を重ねるごとに希望者が一巡することで減少する事象が起こっている。これは、イノベーション人材が

一定数に限られること、活動の認知が進まないなどの様々な要因によると推察する。カンブリアプロジェクトでも同様に、専用ウェブサイトや役員メッセージの配信、さらにはメーリングリストを通じた情報発信にもかかわらず同傾向が見られた。

解決策として、少数精鋭でスモールスタートに進められてきた同年の有志チーム活動に加えて、イノベーション人材の裾野を広げるべく新たに新事業研修を立ち上げ、このコンセプトを『市民革命』と名づけた。目的は、限られたメンバが大きなゴール（新事業）を目指すのではなく、より多くの従業員が小さくも付加価値を高める意識改革に挑戦することとした。具体的には現在の業務を見渡し、お客様やパートナーの困りごとの解決から、既存のコア事業と連携しつつ新たな価値を提供し、既存事業の付加価値向上といった成功体験から新事業への意識拡大をすることが活動の狙いである。

当研修では年次を30代前半から中盤に指定し、約6時間（3時間×2回）の研修を実施することとした。また使用するコンテンツは有志チーム活動を通じて蓄積されたコンテンツの一部を研修向けに再編集させている。研修の対象とする年次を指定した理由は、前章にて述べた当社の新事業に必要な業務における高い専門性が確立できつつある年代で、かつ同時に形成されるコンフォートゾーンから脱却しやすい時期としている。

研修では、新事業の意義と受講者にとっての有用性、共創によって広がる可能性を伝えるとともに、リスタートアップの仮説検証を繰り返す方法や、アイデア発想法を用いた事業創出体験により、新事業への興味を幅広く持ってもらう、裾野を広げる事でカンブリアプロジェクトを持続可能な活動とすることを期待している。さらに現在準備を進めているビジネスコンテストにより、新事業へのタッチポイントと新事業アイデアのアウトプットの場を身近にすることで、『実現できるKOBELCO』という希望とともに、能動的に新しい価値創造にチャレンジするプラスのスパイラルが発生する三つの取り組みを展開していく。

4. もう一つの課題 外部連携

有志メンバによるチーム活動を一年半継続し、一つの変化点が見えてきた。これまで提案された1,600件にわたるアイデアから、現在も事業に向けて継続しているプロジェクトの全てが、当社のアセットや対象と指定する領域の事業アイデアで、かつ当社単独では事業化が困難ということが判っている。それらのアイデアの事業化には関連するサプライチェーン企業や大学、スタートアップとの連携が必要となる。なかでも当活動と親和性が高いものに、スタートアップや大学はクライメートテックやディーブテックであることが判明している。

当社では従来から研究や開発において、企業間ならびに産学の連携は進めてきたが、新事業創出にはあらたにスタートアップと連携する手段が必要と認識し、様々なコーポレートベンチャリング^{注1)}の施策について調査を行った。コーポレートベンチャリングには、インキュベ

ーションプログラムや、アクセラレーションプログラム、本体（B/S）出資や、ベンチャーキャピタルが運用するファンドに出資するLP(Limited Partnership)出資、さらに自社もしくは子会社にて自らファンドを組成し運用するCVC（Corporate Venture Capital）出資やM&A（Merge and Acquisition）など様々な手法がある³⁾。活動を通じた機械事業部門に関する調査では、現在インキュベーションやアクセラレーションプログラムは組織立って進められているものは無く、また過去15年間にこれまで実施された様々な資本政策のほとんどが関連子会社に関するもので、アライアンスや協業を意図して出資した例は全体のごくわずかで、かつスタートアップへの出資実績はゼロであることを確認している。

前述の社史調査にて述べた1990年代以前のオープンイノベーションと事業多産の歴史からも、事業創出のために当社が新たに取組むべき課題として、オープンイノベーションの手段を保有することと考えられる。これらアプローチのほかにも、当社のコングロマリット事業体^{注2)}という特性をいかすことで、様々な協業や概念検証（POC：Proof of Concept）のフィールドを提供すること、またSiemensやBMWといった重工・機械メーカーと親和性が高いとされるベンチャークライアントモデル^{注3)}のように、スタートアップの突出した技術やサービスをお客様として実装支援することが当社には可能である⁴⁾。

当活動では、これらの様々なコーポレートベンチャリングの手法について、実際にスタートアップとの連携に積極的な約30社の事業会社へインタビュー調査を行っている。さらに自社のコングロマリット事業形態、そして各事業の中長期計画や自社製品とサービスの特徴や企

業風土など様々な視点で見つめなおすことで当社に合致するコーポレートベンチャリングの施策や組織組成準備を進めている。また施策に加えて、並行して有望かつ当社と相乗効果が期待されるスタートアップとの協業による事業連携も現在進められている。

むすび＝本稿では、重工・機械メーカーに焦点を当てたボトムアップ型新事業創出の取り組みについて紹介した。昨今の価値の多様化と相互連携化から今後もオープンイノベーションは幅広く採用されながら、各社にて新事業の取り組みが活発に行われていくと予想される。また本稿ではあまり言及していないが、新事業創出の取り組みには、従業員のエンゲージメント向上や人材育成、さらには企業の組織改革など様々な効果や意義が期待されるほか、スタートアップ連携を通じてスタートアップエコシステムへの参画と貢献ができるなど、業種に関係なく新事業とイノベーションが継続的に生まれることを期待している。

最後に当活動は、これまで社内以外にも多くの事業会社やスタートアップ、ベンチャーキャピタル、大学や国・地方自治体など幅広い方に支えられて歩んでおり、ご協力いただいた皆様へ心から感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) エリック・リース、リールスタートアップ。初版、日経BP、2012、408p.
- 2) 株式会社神戸製鋼所。神戸製鋼所100年、初版、2006、600p.
- 3) 経済産業省。事業会社と研究開発型ベンチャー企業の連携のための手引き。第三版、2019、88p.
- 4) 木村将之ほか。スタートアップ協業を成功させるBMW発の手法。ベンチャークライアント。初版、日経BP、2024、216p.

脚注1) コーポレートベンチャリング：企業が新規事業開発やイノベーション促進を目的に、スタートアップ企業へ出資・協業する取り組み

脚注2) コングロマリット事業：異なる業種や市場の複数事業を一つの企業グループが保有・運営する経営形態

脚注3) ベンチャークライアントモデル：大企業がスタートアップの製品やサービスをお客様として活用し、両者の成長を目指す協業モデル

(技術資料)

全固体電池製造プロセスへの適用に向けた高温高压WIP装置の開発

伊藤洋行*¹・林 和志*²・ポンチャイシリグン ナタナピン*¹

Development of High-temperature, High-pressure WIP Equipment for All-solid-state Battery Manufacturing Processes

Hiroyuki ITO・Kazushi HAYASHI・Natnapin PONGCHAISIRIKUL

要旨

全固体電池の製造プロセスにおいて、電極活物質／電解質の界面形成のために加圧処理が行われている。WIP (Warm Isostatic Pressing) 技術は、高温かつ高压状態で等方的に被処理物を加圧できることから、その加圧処理工程への適用が期待される。当社では、WIP技術が全固体電池製造プロセスに採用されることを目指し、WIP技術を用いた全固体電池電極の高密度化に関する研究を行うとともに、より高温下でWIP処理できる装置の開発に取り組んでいる。今回、高温高压下でWIP処理を行うことにより、良好な電極界面が得られることを明らかにした。さらに、WIP装置の高压配管内部の圧力媒体を加熱することで、圧力容器内で発生する温度分布のバラツキを改善できた。本稿では、それらの研究および装置開発の成果について紹介する。

Abstract

In the manufacturing process of all-solid-state batteries, pressure treatment is performed to form the interface between the electrode active material and the electrolyte. Warm Isostatic Pressing (WIP) technology is expected to be applied to the pressure treatment processes because it can isostatically pressurize target materials at high temperatures and pressures. Kobe Steel has been researching the densification of all-solid-state battery electrodes using WIP technology, aiming to adopt WIP technology in the all-solid-state battery manufacturing process. The company is also developing equipment to perform WIP treatment at higher temperatures. This study has revealed that a good electrode interface can be obtained by performing WIP treatment at a high temperature and pressure. Furthermore, heating the pressure medium inside the high-pressure piping of the WIP equipment has improved the variation in temperature distribution inside the pressure vessel. This paper discusses the results of this research and equipment development.

検索用キーワード

WIP, 温間等方圧加圧, 全固体電池, 圧密化, 高温, 高压, 熱交換

まえがき = 温間等方圧加圧 (Warm Isostatic Pressing, 以下、WIPという) は、高温に加熱した液体を圧力媒体とし、高温と高圧力を同時に被処理物へ加える技術である。WIP技術は積層セラミックコンデンサの圧着をはじめ、さまざまな用途に利用されており、当社はこれまで生産用のWIP装置を販売してきた。

最近では、全固体リチウムイオン電池 (以下、全固体電池という) の製造プロセスとして、WIP技術が適用できる可能性がある。全固体電池はすべて固体材料で構成されるため、電極活物質と固体電解質間の空隙を無くし、密着性を向上させるために加圧処理がなされることが一般的である。この加圧処理において、加圧と同時に加熱することは固体電解質の流動性を高め、良好な界面形成に有効であると報告されており¹⁾、WIP技術は全固体電池の加圧方法として適していると考えられる。

いっぽう、全固体電池は製造プロセスも含めて開発途上であり、最適な処理圧力、処理温度は明確になっていないのが現状である。そこで、当社ではWIP技術が全固体電池の製造プロセスに採用されることを目指し、

WIP処理圧力、処理温度が全固体電池の構造や特性に与える影響に関する研究を進めるとともに、WIP装置の処理温度の高温化および圧力容器内の温度バラツキ低減に向けた開発を行っている。

1. 全固体電池製造プロセスにおける加圧技術の課題および当社の開発目的

全固体電池は、その充放電容量、エネルギー密度向上のため、電極活物質と固体電解質間の空隙を無くし、密着性を向上させることが重要である。その空隙を無くするため、ロールプレスや単動式プレスのような一軸方向による加圧方法が一般的に用いられている。しかし、電極活物質層や固体電解質層の表面には微細な凹凸があるため、均一に加圧できず、電極活物質層と固体電解質層との密着性を十分に向上させることは困難である²⁾。これに対し、WIP技術では被処理物を等方圧的に加圧できるため、電極活物質層および固体電解質層の密着性に優れた全固体電池を得ることができると考えられる。

全固体電池は製造プロセスも含めて開発途上であり、

*¹ 機械事業部門 新事業推進本部 先端プロセス技術部 *² 技術開発本部 応用物理研究所

最適な処理圧力、処理温度は明確になっていないものの、処理温度は200℃近くの高温が必要とされる可能性がある。実際、WIP技術を用いて190℃の高温下で加圧することにより、電解質の流動性を高め、より密着性の高い界面が得られることが報告されている³⁾。

当社では、全固体電池を安定的に大量生産できる大口径のWIP装置を開発したいと考えており、そのためには、後述する外部昇圧式のWIP装置において、処理温度の高温化ならびに温度バラツキ低減に向けた課題解決が必要である。本稿では、生産機への適用が可能な200℃対応のWIP装置の開発成果について述べる。

2. 当社WIP装置の現状および開発方針

2.1 当社WIP装置の概要

当社WIP装置は以下の1)～5)により構成される。

- 1) 高圧力を内部で保持する圧力容器と上下蓋
- 2) 圧力容器内の軸力を支えるプレスフレーム
- 3) 油圧駆動の昇圧機構（増圧機またはピストン）
- 4) 圧力媒体の封止、解放を行う高圧弁
- 5) 圧力容器を加熱するジャケットと加熱機器

1)～5)の構成機器により、圧力容器内に圧力媒体を満たして加熱した後、被処理物を投入し、昇圧機構で昇圧を行うことで圧力容器内を高温高圧状態とし、被処理物に液圧を作用させている。

2.2 WIP装置の昇圧方式による長所と課題

WIP装置は昇圧方式の違いにより外部昇圧式とピストン直圧式に分類される。WIP装置における各昇圧方式の比較図を図1、各昇圧方式の特徴、長所および課題を表1に示す。外部昇圧式は、増圧機によって圧力媒

体を圧力容器内に送り込んで昇圧する方式であり、主に処理圧力600MPa以下の中大型機で採用される。これに対し、ピストン直圧式は、圧力容器にピストンを押し込むことによって圧力媒体を直接圧縮する方式であり、主に処理圧力600MPa超の小型機で採用される。外部昇圧式はピストン直圧式に比べると圧力容器の大口径化には適しているものの、増圧機高圧シールの耐熱温度の理由により、増圧機のタイプにもよるが増圧機へ供給する圧力媒体温度は60～80℃を上限としている。そのため、昇圧前に圧力容器内の圧力媒体を加熱しても、圧力容器内に低温の圧力媒体が流入し、昇圧後の圧力容器内で温度差が発生するという短所がある。圧力容器内で温度差が生じると、圧力容器内の被処理物に処理温度バラツキが生じてしまう。さらに、圧力容器内の処理温度を高温化しようとしても、増圧機へ供給する圧力媒体温度は高くできないため、昇圧中の圧力容器内において温度差が増すという問題がある。

2.3 当社の開発方針

以上をふまえ、当社の開発方針としては、将来的に全固体電池を量産化することを見据え、大口径化が比較的容易な「外部昇圧式」のWIP装置を開発ターゲットとした。そして、処理温度の高温化を図るとともに、圧力容器内の処理温度バラツキを低減する技術を開発する方針とした。

3. 全固体電池用正極の高密度化試作トライによるWIP適用可能性の検証

まず、WIP技術により、全固体電池用正極の高密度化が実際に可能かどうかの検証を試みた。全固体電池で

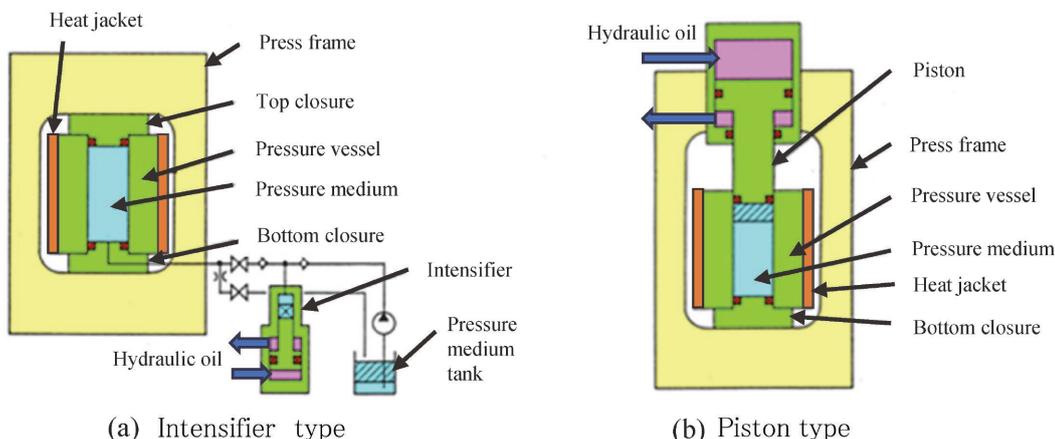


図1 WIP装置における各昇圧方式の比較図 ((a) 外部昇圧式, (b) ピストン直圧式)
Fig.1 Comparison of pressurizing system about WIP ((a) Intensifier type, (b) Piston type)

表1 WIP装置における各昇圧方式の特徴、メリットおよび課題

Table 1 Characteristics, advantages and challenges of each pressurizing system about WIP

Pressurizing system		Intensifier type	Piston type
Characteristic	Inner diameter	Medium to large	Small
	Pressure level	Lower (600MPa or under)	High (over 600MPa)
Advantage		Suitable for large scale (diameter) WIP	Easy to make high temperature and high pressure in pressure vessel
Challenge		Difficult to make high temperature and prevent occurring temperature distribution	Not suitable for large scale (diameter) WIP

は、正極活物質が固体電解質および添加材と混合された構造を持つ。本研究では、正極活物質 (Active Material, 以下, AMという) にはLiNbO₃が表面にコートされたLi(Ni_{1/3}Mn_{1/3}Co_{1/3})O₂(NMC), 固体電解質 (Solid Electrolyte, 以下, SEという) はLi₆PS₄Clを用いた。AM, SE, 導電助剤 (AB) を74:23:3 (wt%)となるよう混合し, バインダと溶剤を加えてスラリー化した後, Al集電箔に塗工・乾燥させて電極とした。最後に, 大気との接触を断つため, アルミラミネートフィルムに密封した。WIP処理にはピストン直圧式を用いた。処理圧力は600 MPa, 処理温度は190℃, 処理時間は1分とした。得られた電極の3次元的な構造を非破壊で評価するため, 放射光X線CTを用いた。X線CT測定は, SPring-8 BL16B2 (課題番号2021A5320, 2021B5320, 2022A5320)で行った。入射X線エネルギーは30 keVである。X線透過像の取得にはXSight Micron LCを用いた。X線CTデータのボクセルサイズは1.3μmまたは0.65μmである。試料はAr雰囲気下のグローブボックス内でガラスキャピラリーへ密閉した。各構成要素のCT値をもとにしきい値を決定し, 得られたCT像を三つの領域 (AM/SE/空隙・導電助剤・バインダ) に分類することで構造の差異を評価した。

図2に, WIP未処理およびWIP処理後 (室温, 190℃)の電極内のCT像と3値化による解析結果を示す。図2より, 「電極活物質」(赤)内に存在する「空隙・導電助剤・バインダ」(黒)がWIP処理により減少しているこ

とが明瞭に確認された。この結果から, 処理圧力600 MPa, 処理温度190℃のWIP処理が, 本研究で用いた混合比を持つ電極において高密度化に有効であることが分かった。

4. 外部昇圧式WIP装置による高温化および温度バラツキ低減方法の検討

4.1 外部昇圧式WIP装置における課題と解決策

前述のように, 外部昇圧式のWIP装置では昇圧時に低温の圧力媒体が圧力容器内に流入することにより, 高温化の阻害および温度バラツキが発生する。それを解消するため, 熱交換技術を高圧配管に適用した (以下, 高圧熱交換技術という)。高圧熱交換技術を採用した系統図を図3に示す。

本技術では, 増圧機吐出後の高圧配管を加熱したオイルバスに入れることにより, 高圧配管内の圧力媒体を加熱し, 圧力容器に高温の圧力媒体を流入させることが可能になるため, 昇圧後に圧力容器内で高温状態を維持でき, 温度バラツキも低減できると考えている。

4.2 高圧熱交換技術の効果確認

4.2.1 実験方法

圧力容器内の圧力が600 MPa, 圧力媒体温度が200℃になる運転条件で, オイルバスの温度条件を変えて昇圧運転を行い, 高圧熱交換技術の効果を確認した。本実験に用いた試験装置の仕様を表2, 実験条件を表3に示す。オイルバス温度は60℃ (case 1)と200℃ (case 2)とし,

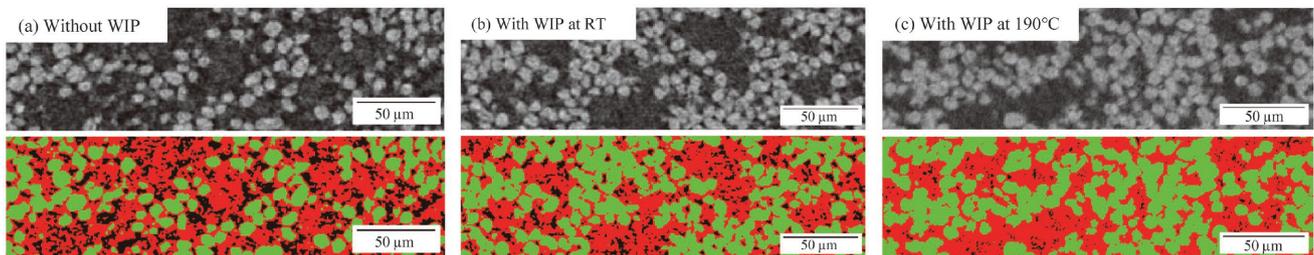


図2 電極内のCT像 (上) と3値化 (下) による解析結果 ((a) WIPなし, (b) WIP処理 (常温), (c) WIP処理 (190℃)) (NMC: 緑, SE: 赤, ポイド/カーボン/バインダ: 黒) (b) と (c) のサンプルは600 MPaで1分間加圧

Fig.2 CT (upper) and the categorized (lower) images of the composite electrodes. ((a) without WIP, (b) with WIP at RT, and (c) with WIP at 190℃) (NMC: green, SE: red, and voids/carbon/binder: black) The samples of (b) and (c) were pressed at 600 MPa for 1 minutes.

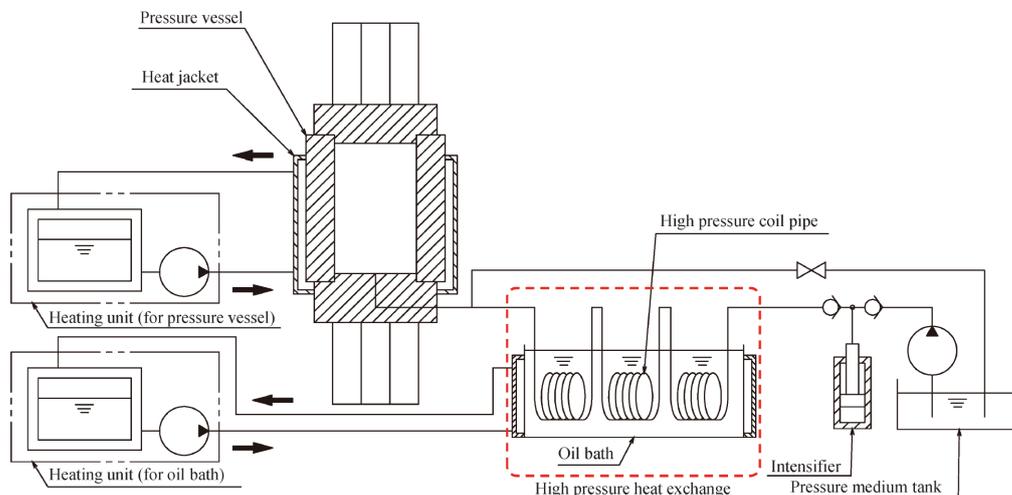


図3 高圧熱交換の系統図

Fig.3 System diagram of high pressure heat exchange

表2 高圧熱交換技術を採用したWIP装置の仕様

Table 2 Specifications of WIP equipment with high pressure heat exchange

Maximum operating pressure	600 MPa
Maximum operating temperature	200°C
Maximum temperature of Oil bath	220°C
Pressure medium	Hydraulic oil of high flash point
Diameter of working zone	120 mm
Height of working zone	500 mm
Thermocouple height (Thermocouple is inner work zone)	Upper / +450 mm Middle upper / +300 mm Middle lower / +150 mm lower / +50 mm

表3 高圧熱交換技術効果確認の実験条件

Table 3 Experimental conditions of high pressure heat exchange

	(a) Case1	(b) Case2
Operating pressure (MPa)	600	600
Temperature of pressure medium inner pressure vessel (before pressurizing) (°C)	160	160
Temperature of oil bath (°C)	60	200

圧力容器内下部，中下部，中上部，上部に設置した熱電対で，各高さ位置での昇圧運転中の温度を測定した。なお，熱電対は圧力容器内面とは接触していない位置に設置した。

4.2.2 実験結果

本実験で得られた昇圧運転チャートを図4に示す。(a) Case1のオイルバス60°Cでは，600 MPa到達時の圧力容器内下部～上部温度が138～204°C（温度バラツキ66°C）であるのに対し，(b) Case2のオイルバス200°Cでは，圧力容器内下部～上部温度が175～204°C（温度バラツキ29°C）となり，温度バラツキとしては37°C改善した。

4.2.3 考察

(a) Case1のオイルバス60°C，(b) Case2のオイルバス200°Cいずれの条件においても，圧力容器内上部，中上部温度は600 MPa到達時，195～205°C以内で推移している。いっぽう，(a) Case1のオイルバス60°Cでは，圧力容器内下部～中下部の温度低下が顕著となった。このことから，圧力容器内上部，中上部は昇圧中に流入する圧力媒体温度の影響を受けず，圧縮熱で温度上昇していると考えられる。それに対し，圧力容器内下部～中下部は昇圧時に流入する圧力媒体温度の影響を受けやすいと考えられる。(b) Case2のオイルバス200°Cでは，圧力容器内下部で175°Cとなったが，この要因としては，オイルバス通過後の配管～下蓋での放熱により，圧力容器内に流入する圧力媒体温度が低下したことが考えられる。また，(b) Case2のオイルバス200°Cの容器内下部の温度チャートを見ると，350 MPa付近から温度上昇しなくなっている。このことから，350 MPa以上の高圧域では，圧縮熱による温度上昇よりも圧力容器内に流入する圧力媒体温度による温度低下の影響が大きくなったと考えられる。

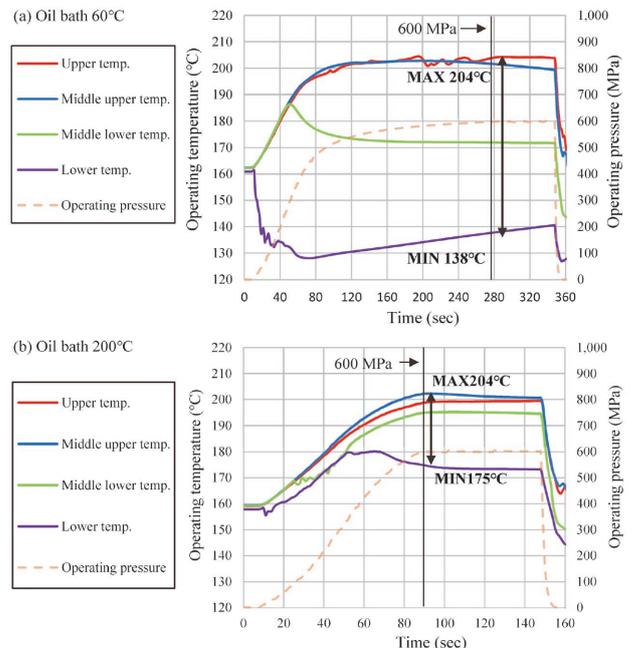


図4 高圧熱交換実験の運転チャート
(a) オイルバス60°C，(b) オイルバス200°C

Fig. 4 Operation chart of high pressure heat exchange test
(a) Oil bath 60°C, (b) Oil bath 200°C

圧力容器内下部も含む均熱化には課題が残ったが，オイルバスのかくはんによる熱交換効率の向上や，圧力容器内の圧力媒体の流路を形成し，圧力容器内に流入する圧力媒体を上部に分散させるような改良を行い，今後さらなる改善を図る必要がある。

むすび = 本稿では，当社WIP装置の開発方針および開発成果について述べた。残された課題として，圧力容器内下部も含む均熱化が挙げられる。今後は，圧力容器内の均熱化構造の設計を進めつつ，大型のWIP装置を試作して高圧熱交換技術の効果を検証し，上市・拡販につなげていく。

全固体電池の製造プロセスとしてWIP装置を適用するにはWIP装置の大型化による生産能力向上が必須である。WIP装置の大型化に向けた装置開発を着実に進めていくとともに，全固体電池の製造プロセスにWIP装置が採用されるよう自動車・電池メーカーのお客様のテスト処理対応，ニーズ調査を引き続き行っていく所存である。

参考文献

- 1) A. Sakuda et al. Sci. Rep. 2013, Vol.3, 2261.
- 2) TOYOTA Motor Corporation, Nishino J. et al. METHOD FOR MANUFACTURING ALL-SOLID CELL. WO2012164723. 2012_12_06.
- 3) 林 和志ほか. WIP処理された全固体リチウムイオン電池用合材電極のX線CT評価, 第63回電池討論会要旨集. 2022, 3E09.

(論文)

新AIP蒸発源によるAlCrN硬質皮膜の特性と実金型での評価

谷藤信一*¹・中村 克*¹・久次米 進*¹・石川剛史*²(工学博士)

Characteristic of AlCrN Hard Coatings Deposited with New AIP Evaporation Source and Evaluation on Actual Mold

Shinichi TANIFUJI・Masaru NAKAMURA・Susumu KUJIME・Dr. Takeshi ISHIKAWA

要旨

環境問題への関心の高まりから、金型加工においてはオイルレス化や冷間加工が増えつつあり、使用環境は年々厳しくなっている。金型の長寿命化のために、AIP（陰極真空アーク）法によって金型表面を金属窒化物で被覆することが行われ、高い硬さが要求されることからAlCrN皮膜がよく用いられる。また、コーティングの特性は成膜プロセスに用いられる蒸発源の特性に大きく影響される。本稿では、新しい蒸発源（以下、 μ -ARCという）を用いて、成膜条件とAl含有率を変化させて成膜したAlCrN皮膜の特性を評価するとともに、当該コーティングを被覆した超硬パンチを冷間鍛造加工に供して評価した。 μ -ARCで成膜したAlCrN皮膜は、高Al含有率での立方晶構造形成と優れた平滑性が得られ、卓越した耐久性を示した。加えて、往復しゅう動試験を行い、金型加工の試験結果をトライボロジーの観点から考察した。

Abstract

Due to the growing concern about environmental issues, the use of oilless and cold working process is increasing in mold processing, and the operating environment is becoming more challenging each year. In order to extend the service life of molds, their surfaces are coated with metal nitride using the AIP (cathodic arc deposition) method, and AlCrN coatings are often used due to the requirement for high hardness. Additionally, the properties of the coating are greatly influenced by the properties of the evaporation source used for the deposition process. This paper evaluates the properties of AlCrN coatings deposited by varying the deposition conditions and Al content using a new evaporation source (hereinafter referred to as μ -ARC) while also assessing carbide punches coated with this coating and subjected to cold forging. AlCrN coatings deposited by μ -ARC demonstrated excellent durability due to the formation of a cubic structure with a high Al content and exceptional smoothness. In addition, reciprocating sliding tests were conducted, and the mold processing test results were examined from viewpoint of tribology.

検索用キーワード

表面処理、真空成膜、物理蒸着法、プラズマ成膜、アークイオンプレーティング法、AIP法、陰極真空アーク法、窒化膜、パーティクル

まえがき = Physical Vapor Deposition（以下、PVDという）法は、真空中でコーティングの原料となる固体金属（以下、ターゲットという）を蒸発または昇華させ、同じ真空容器内に配置した基材に付着させて薄膜を形成する技術である。1980年代から切削工具、金型などに耐磨耗性を付与する表面処理方法として用いられている。当社は1986年にPVD法の一つである陰極真空アーク（Arc Ion Plating：以下、AIPという）法の基本技術を米国から導入し、装置の国産化と販売を開始している。AIP法とは真空チャンバ内でターゲットを陰極としたアーク放電を発生させ、ターゲット表面に形成されるアークスポット（直径数 μm 程度）に集中するアーク電流のエネルギーによりターゲットを蒸発、イオン化させ、基材の表面に皮膜を形成する方法である。同時にチャンバ内に窒素などのプロセスガスを導入することで、窒化物などの化合物皮膜を形成可能である。また、蒸発したターゲット材料のイオン化率が非常に高いことがAIP法の特徴である。負のバイアス電位を基材表面に印加することで、イオンエネルギーを制御し、緻密で密着性に優れた

皮膜を形成することができる¹⁾。当社はPVD装置市場への参入当初より、装置のみならずコーティングについても改良、開発を手掛けており、切削工具や金型に適したハードコーティングを提供している。本稿では、冷間鍛造金型向けの皮膜開発例について紹介する。

冷間鍛造金型を代表とする金型の使用環境は年々厳しくなっている。金型の寿命を延ばすために、AIP法による金属窒化物コーティングが被覆されるが、そのコーティングには高い硬さ、耐磨耗性、韌性（じんせい）、しゅう動性、および耐凝着性が要求される。このような特性を有する代表的なコーティングの一つにAlCrN皮膜がある。AlCrNの基本構造はCrNの立方晶岩塩型構造（B1）であり、Crの位置にAlが置換したCrNと立方晶構造（B1）AINの混合物となっている。本来、AINは立方晶ウルツ型構造（B4）が安定相であり、立方晶構造は高圧下でのみ報告されている^{2),3)}。このためAlCrN皮膜では、準安定な立方晶AINをCrNの立方晶格子中に固溶させることで実現している。AlCrN皮膜の硬さはAl含有率にほぼ比例して高くなるが、バンドパラメー

*¹ 機械事業部門 新事業推進本部 先端プロセス技術部 *² 株式会社和田山コーティングセンター

タの理論予測によれば、AlCrNは立方晶構造のAlNの最大固溶量が77at%とされている⁴⁾。また、コーティングの特性はAIP蒸発源が生成するプラズマの特性に依存し、従来のAIP蒸発源ではAlCrN中のAl含有率が70at%を超えると六方晶構造のAlNが析出することでコーティングの硬さが低下する課題があった⁵⁾。AIPでは前述したようにアーク放電発生時、ターゲット表面に直径数 μm のアークスポットと呼ばれる電子放出点が形成され、そこに数十アンペアの電流（放電電圧は30ボルト前後）が流れることで、 10^9 W/cm^2 と大きなエネルギーが瞬時に投入される。これにより金属を一瞬で固体からイオンに変化させることができるが、このとき、ターゲットの一部は溶滴として放出される。この溶滴は金属粒子（以下、マクロパーティクルという）として基材に付着し、コーティングの表面粗さの増加につながることから、AIPの課題であった。これに対して、当社は2022年に新しいAIP蒸着源 μ -ARCを開発し、Al含有率が70at%を超えた場合でも高い硬さを保持し、かつ従来のAIP蒸発源によるコーティングに比べてマクロパーティクルが少ないAlCrN皮膜を形成することができることを確認している⁶⁾。本稿では、 μ -ARCを用いてAlCrN皮膜を被覆し、Al含有率および成膜条件がコーティング特性に及ぼす影響を調査した結果について報告する。また、前記評価の結果を踏まえて、AlCrNを被覆した冷間鍛造金型を製作し、従来のAIP蒸発源で作製したコーティングとの性能比較を行った。また、実金型環境を想定した条件で往復しゅう動試験を行い、金型評価結果を考察した。

1. 実験方法

1.1 成膜方法

粉末冶金法によるAlCrターゲットを用いてAlCrN皮膜を作製した。詳細な試験条件は表1に示す。また、従来のAIP蒸発源Super Fine Cathode 2（以下、SFC2という）、新AIP蒸発源 μ -ARCの成膜模式図を図1、図2に示す。従来のAIP蒸発源SFC2では、ターゲットの金属が蒸発、イオン化した粒子が基材に堆積すると同時に、ターゲットから放出されたマクロパーティクルが基材に付着する。いっぽう、 μ -ARCはターゲットと基材間に円筒ダクトを設け、その外周にはコイル電磁石を配置することで、中性粒子であるマクロパーティクルはダクト手前で捕捉し、イオン化した粒子のみを磁場によって基板方向へ誘導することができる。

1.2 コーティング組成分析

走査型電子顕微鏡（株日立ハイテクフィールドイニング製、S-3400N）に付属のエネルギー分散型X線分析装置（オックスフォードインストルメンツ株製、EDS: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, 検出器: X-act C3400, 解析ソフト: INCA）を用い、電子線加速電圧15 kVの条件により、AlCrN皮膜に含有される金属元素の平均組成を測定した。

1.3 コーティング表面粗さ測定

JIS-B-0601 (2001) に準じて、表面粗さ・輪郭形状複

表1 成膜条件
Table 1 Coating condition

Evaporation source	New model (μ -ARC) Conventional model (SFC2)
Target composition	Al70at%-Cr30at% Al75at%-Cr25at% Al80at%-Cr20at%
Arc discharge current (A)	150
Process gas	Nitrogen
Gas pressure (Pa)	4
Substrate bias voltage (-V)	75, 100, 125, 150
Substrate temperature (°C)	500
Substrate	Solid carbide coupon
Coating thickness (μm)	4

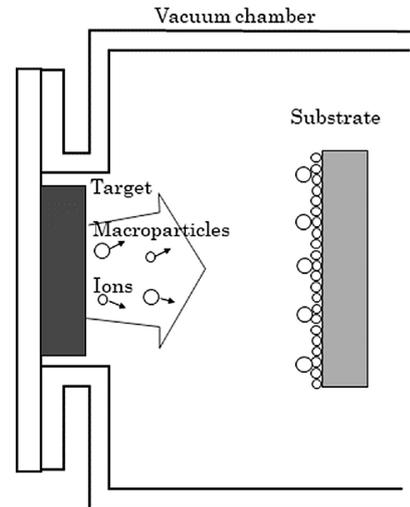


図1 従来AIP蒸発源SFC2による成膜プロセス模式図
Fig.1 Schematic diagram of coating process by SFC2

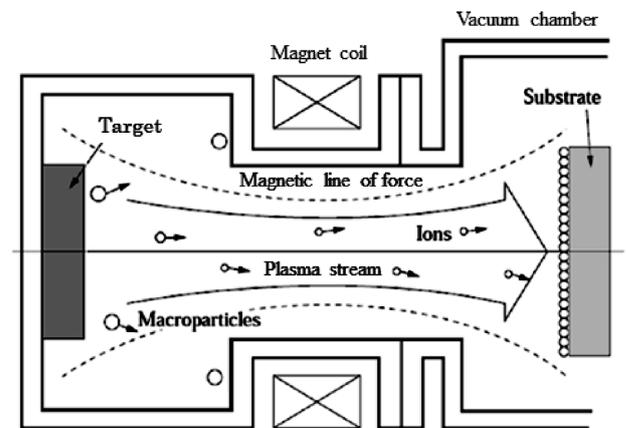


図2 新しいAIP蒸発源 μ -ARCによる成膜プロセス模式図
Fig.2 Schematic diagram of coating process by μ -ARC

合測定機（株東京精密製、サーフコム NEX）を用いて測定した。

1.4 コーティング硬さおよびヤング率測定

ナノインデンタ（株エリオニクス製、ENT-1100b）を用いて硬さおよびヤング率を測定した。測定は、Berkovich圧子を使用して、荷重速度1 mN/秒、最大荷重10 mNの条件で行った。また、標準試料には溶融石英を使用し、Oliver-Pharr手法⁷⁾による圧子先端補正で解析した。

1.5 X線回折法 (X-ray Diffraction) 結晶構造解析

X線回折装置（株リガク製、SmartLab）を用いて、コーティングの結晶構造解析を行った。測定はCu-K α

線源を使用し、出力40 kV・40 mA、走査軸 $2\theta/\theta$ 、サンプル幅 0.01° の条件で行った。

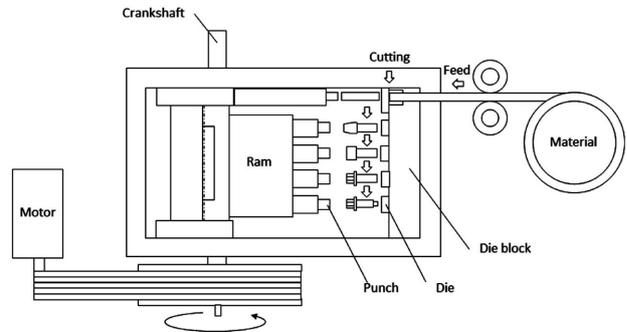
1.6 冷間鍛造金型試験

金型は、CIS規格でVC30相当（CIS019D分類）の超硬合金製のパンチを使用した。当該超硬合金製からなる素材を図3の形状を有するように研削加工および切削加工を施すことによって、実験用のパンチを作製した。研削加工および切削加工後に機能部表面（図3（a）におけるWork area）において、表面粗さRaが $0.03\mu\text{m}$ 以下、表面粗さRzが $0.3\mu\text{m}$ 以下となるように鏡面研磨した。その後、当社の μ -ARCおよびSFC2蒸発源を用いてコーティングを被覆した。コーティング表面に付着している金属パーティクル（ドロップレット）は成膜後に投射型の研磨処理で除去し、除去後のパンチを試験に使用した。冷間鍛造試験の条件を表2に示す。また、図4（a）には冷間鍛造フォーマの模式図、図4（b）には冷間鍛造試験に使用した6段式冷間鍛造フォーマを示す。

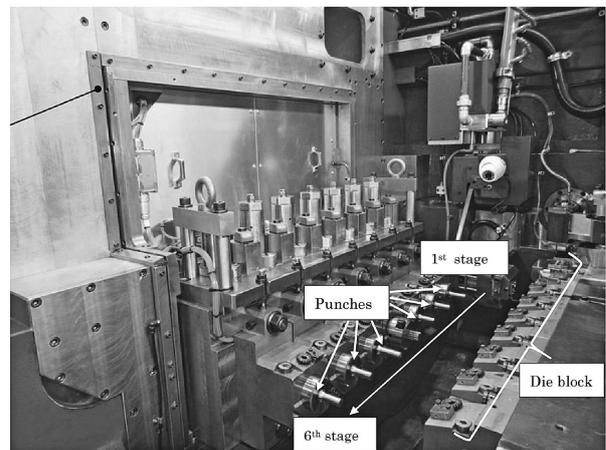
1.7 往復しゅう動試験

往復しゅう動試験装置（TPRエンジニアリング㈱製、RTF-070）を用いて、表3および図5に示す条件による往復しゅう動試験を行った。鍛造シミュレーションによれば、超硬パンチの面圧負荷は先端R部において1,380 MPaとなり、最も負荷が大きくなることが分かっている。この結果を踏まえて、しゅう動試験時のピン先端にかかる荷重も同じ値となるようにピン形状を設計し

た。しゅう動試験に使用するピンは、鍛造試験に用いた超硬パンチと同じ材料から製作した。しゅう動試験ピンには、Al含有率70at%のターゲットで作製したAlCrNコーティングをSFC2、 μ -ARCを用いて被覆し、試験前に投射型の研磨処理を行うことで、コーティング表面に付着している金属パーティクルを除去した。当該試験ピンを用いて、しゅう動試験を行った。

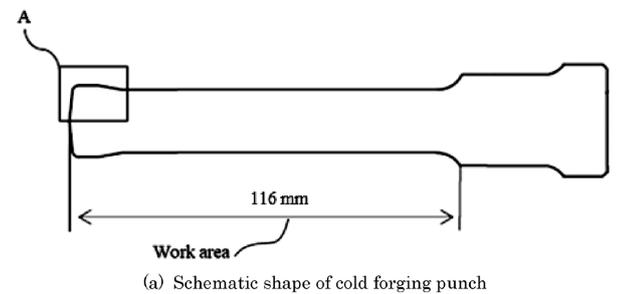


(a) Schematic diagram of cold forging former

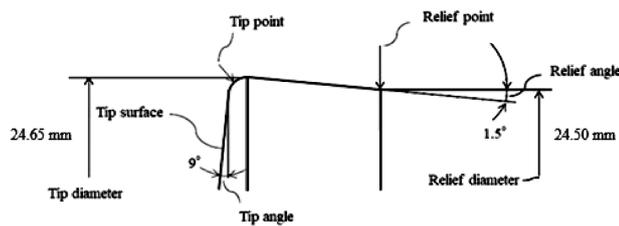


(b) Cold forging six stage former (BPF-680SSL)

図4 冷間鍛造フォーマ
Fig.4 Cold forging former



(a) Schematic shape of cold forging punch



(b) Details of "A" in (a)

図3 冷間鍛造パンチの模式図
Fig.3 Cold forging punch

表2 冷間鍛造試験条件
Table 2 Cold forging test condition

Cold forging former	BPF-680SSL (Six-stage former)
Stage	Second stage
Forging method	Forward extrusion process
Drawing depth (mm)	110
Reduction of area (%)	50 to 65
Work material	SCM440
Lubricant	Forging oil
Shot number	7,000

表3 往復しゅう動試験条件
Table 3 Reciprocating sliding test conditions

Load (N)	1,000 (Pmax 1,380 MPa)
Sliding speed (m/second)	0.5
Sliding length (mm/sliding)	50
Lubricant	Oil
Reciprocating sliding number	50,000
Replacement frequency of counter material	2,000 reciprocating
Pin material	Solid carbide
Counter material	SUJ2

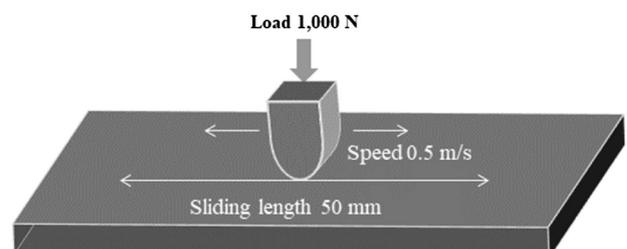


図5 往復しゅう動試験模式図
Fig.5 Schematic diagram of reciprocating sliding test

2. 結果と考察

2.1 コーティング組成および表面粗さ

走査型電子顕微鏡のEDSによるコーティング組成分析の結果を図6に示す。すべての試料において、コーティング中のAl組成がターゲットのAl組成よりも2at%から3at%減少していた。また、同じ組成のターゲットで成膜した試料と比較すると、高いバイアス電圧で成膜した試料ほどAl組成が減少していた。前述のように、AIPは蒸着原子のイオン化率が高いことが特徴であり、基板に印加された負バイアスによりイオンが加速、堆積した膜が一部スパッタリングされたことが原因と推定される。コーティングに含まれる原子のうち、Crに比べて軽いAlが優先的にスパッタリングされることで、コーティング中のAl組成が減少したと考えられる。

つぎに、表面粗さ測定の結果を図7に示す。 μ -ARCで成膜したすべての試料において、大きな差異は見られなかった。Alの融点は660°Cで金属の中でも比較的融点が低い材料のため、アーク放電発生時に金属の一部が溶けた液滴として放出されやすく、ドロップレットとして

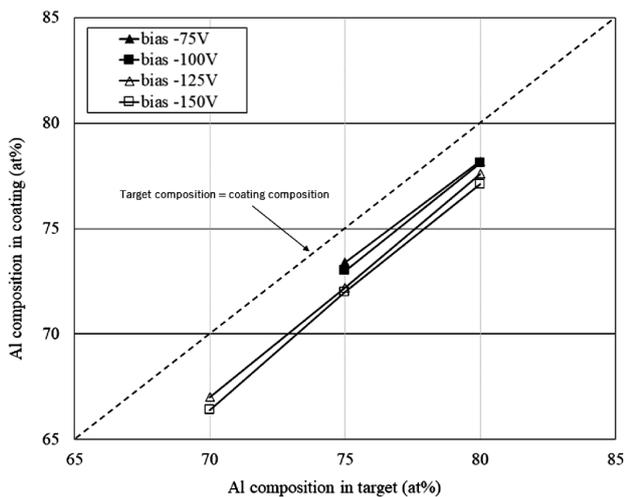


図6 ターゲット組成とコーティング組成の関係

Fig.6 Relationship between Al composition in target and Al composition in coating

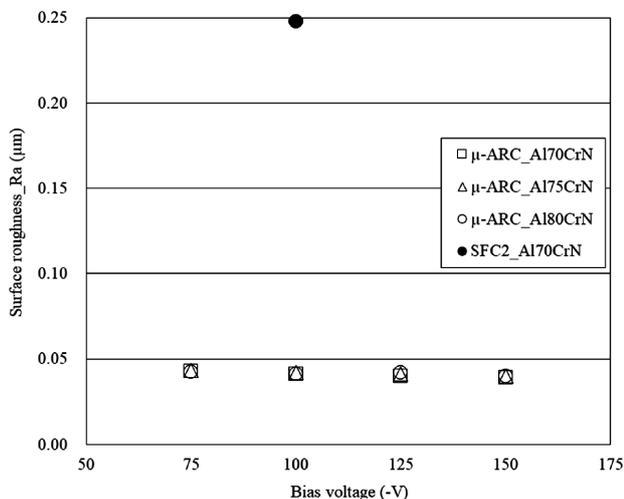


図7 バイアス電圧と算術平均粗さRaの関係

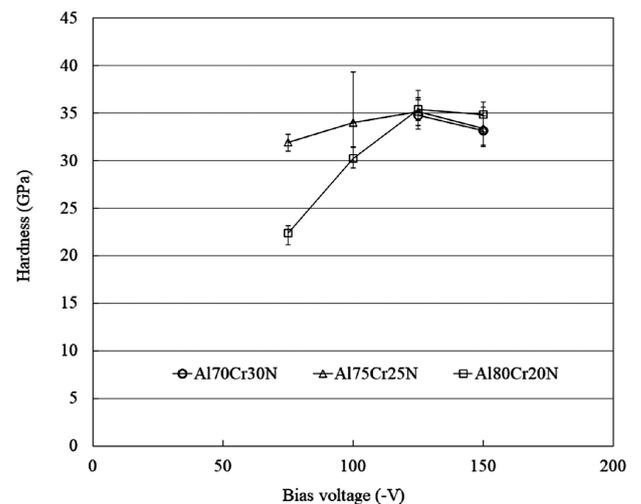
Fig.7 Relationship between bias voltage and surface roughness

基板に付着することで、表面粗さを大きくする傾向にある。しかしながら、前述のように μ -ARCはその特徴的な機械的構造と磁場形態により、ドロップレットを極力排除した皮膜を形成することができる⁸⁾。そのためSFC2により作製したAl70CrNコーティングのように表面粗さが大きくなりやすいAl量の多いターゲットを用いた場合でも、今回得られた結果が示すように、 μ -ARCの場合は表面粗さを小さく保つことが可能となる。

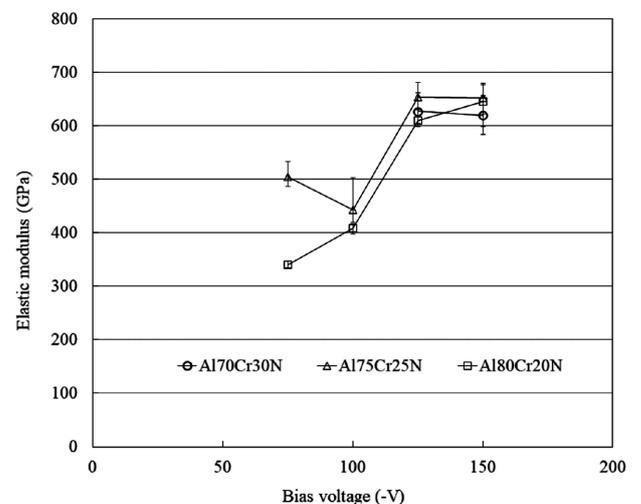
2.2 コーティング機械特性および結晶構造

ナノインデンテーション試験によるコーティング硬さおよびヤング率の結果を図8に示す。バイアス電圧の高い試料ほど、硬さ、ヤング率ともに高い値を示す傾向が見られ、バイアス電圧が125Vと150Vでは特性に大きな変化は見られなかった。Al含有率80at%のターゲットで作製した試料では、低いバイアス電圧の75Vと100Vのときに硬さとヤング率の低下を示した。この結果は、成膜時のイオン照射のエネルギーが不足していたため、CrN結晶中に準安定相である立方晶構造(B1)のAlNが固溶せず、安定相である六方晶構造(B4)の軟質AlNが析出したことを示唆している。

つぎに、XRDによる結晶構造解析の結果を図9に示



(a) Relationship between bias voltage and film hardness



(b) Relationship between bias voltage and elastic modulus

図8 各AlCrNコーティングのバイアス電圧と機械特性の関係
Fig.8 Relationship between bias voltage and mechanical properties for each AlCrN

す。Al含有率80at%のターゲットで作製した試料のバイアス電圧75Vと100V試料において、38°と44°付近にCrNの立方晶構造(B1)に由来するピークとともに、33°付近に六方晶構造(B4)に由来するピークが見られた。このことは、当該試料が立方晶のCrN中に六方晶構造のAlNが析出していることを示す結果であり、前述したコーティングの硬さの低下を裏付ける結果である。いっぽう、他試料は全て立方晶単相となっていた。この結果より、 μ -ARCを用い、一定値以上のバイアス電圧を印加することで、AlCrN中に立方晶構造のAlNを

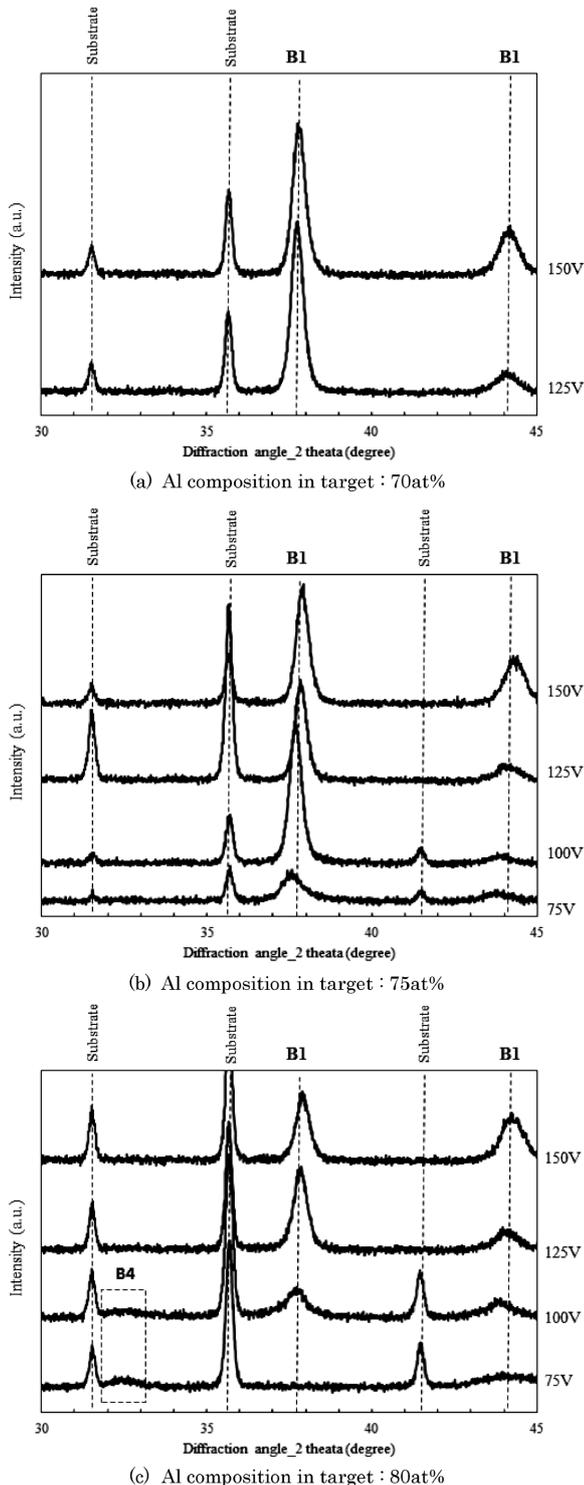


図9 各AlCrNのバイアス電圧と結晶構造の関係

Fig.9 Relationship between bias voltage and AlCrN crystal structure

理論予測の上限値である77at%まで固溶させることが可能であることが分かった。

2.3 AlCrN被覆超硬パンチによる冷間鍛造試験

これまでの試験結果から、 μ -ARCを用いてAlCrNを成膜する場合、使用するターゲットのAl含有率が70at%から80at%の範囲であれば、バイアス電圧を125V以上印加することで立方晶構造のAlCrNを形成できることを確認した。いっぽう、SFC2を使用する場合、Al含有率が70at%を超えると六方晶のAlNが析出することにより、コーティングの硬さが低下してしまう⁹⁾。そこで本試験では、 μ -ARC、SFC2ともに立方晶のAlCrNが形成できるAl含有率70at%のAlCrターゲットを使用した。各蒸発源により成膜したAlCrN試料の硬さは35GPa程度、膜厚は5 μ mとなるように成膜時のバイアス電圧および成膜時間を調整した。また、被覆した超硬パンチは試験前に投射型の研磨処理を行った後、7,000ショットまで冷間鍛造試験を行った。試験後のパンチ先端側面の観察は、図10に示すように、0°、90°、180°、270°の角度から行った。7,000ショットまで鍛造試験後のパンチ観察結果および基材露出幅の評価結果を図11に示す。図11(a)に示すとおり、SFC2により被覆したパンチは7,000ショット後にはコーティングが消失し、基材が露出している。これに対して、 μ -ARCにより被覆したパンチ(図11(b))はコーティング表面に擦れた跡がわずかに見えるが、基材は全く露出していなかった。この結果より、冷間鍛造加工用の超硬パンチに対して、 μ -ARCを用いてAlCrNを被覆することによりパンチ寿命を伸ばすことができた。

つぎに、冷間鍛造試験結果の考察のため、試験環境を模擬した往復しゅう動試験を行った。被覆まま、投射型の研磨処理後、およびしゅう動試験後の各ピン表面を走査型電子顕微鏡により観察した結果を図12に示す。図12(a)の結果が示すとおり、SFC2で成膜したコーティング表面には金属パーティクルが多数付着しており、粗い表面性状であることに対して、 μ -ARCによるコーティングの表面は金属パーティクルの付着が少なく、滑らかな表面性状であることが分かる。つぎに、試料表面の金属パーティクルを除去する目的で投射型の研磨処理を行った試料の比較を行った(図12(b))。図に示すとおり、両試料表面からは金属パーティクルが除去されていることが分かる。いっぽう、SFC2によるコーティングでは金属パーティクルが除去されたエリアが小さく、ほみを多数形成していることが分かった。つぎに、しゅう動試験後の試料表面(図12(c))を比較すると、 μ -ARCによるコーティングでは試験前後で表面性状に変化が全く見られなかったことに対して、SFC2による

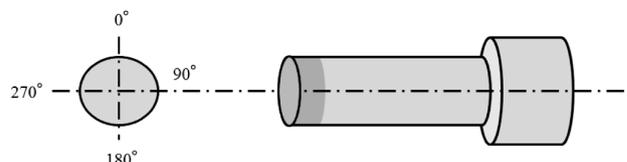
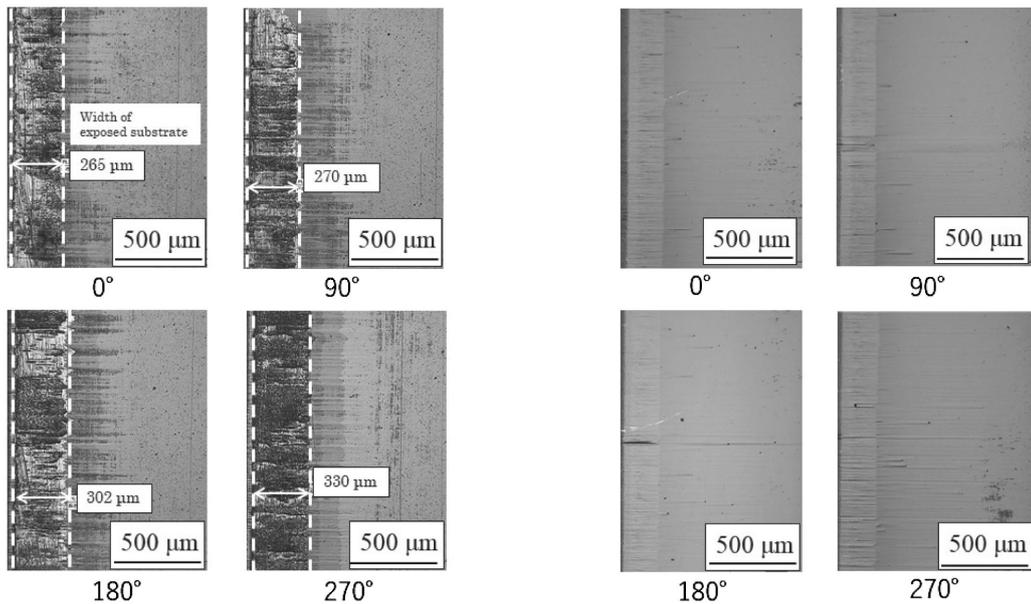


図10 試験後の超硬パンチ先端側面の観察位置

Fig.10 Observation angle of punch after forging test

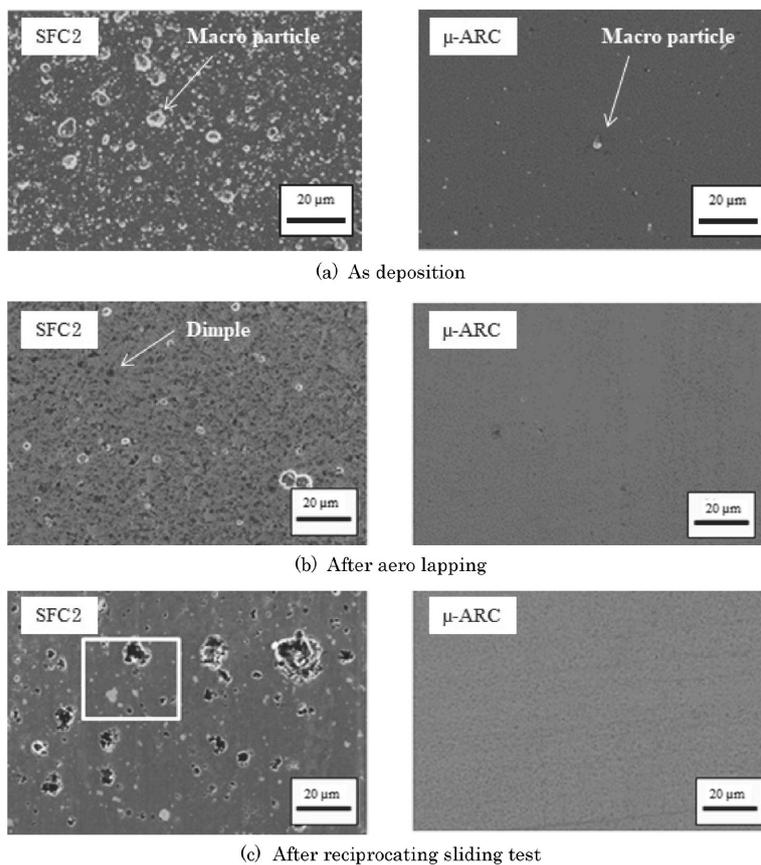


(a) Edge of tip of punch (with Al composition in target : 70at%) coated by SFC2 after forging test

(b) Edge of tip of punch (with Al composition in target : 70at%) coated by μ -ARC after forging test

図11 冷間鍛造試験後のパンチ先端側面の観察結果

Fig.11 Pictures for edge tip of punch with Al70Cr30 coated by μ -ARC and SFC2 after forging test



(a) As deposition

(b) After aero lapping

(c) After reciprocating sliding test

図12 前処理前後, しゅう動試験後の皮膜表面性状

Fig.12 Surface property for before/after polishing and after sliding test

コーティングでは試験前に見られた小さなくぼみに充填物が形成された表面性状に変化していた。その部分をSEM-EDS分析した結果を図13に示す。図13の結果が示すとおり、充填物からは摩耗、酸化した相手材に相当する酸素、クロム、鉄が検出され、しゅう動条件下で摩耗した相手材が擦り込まれ充填されたと考えられる。今回のしゅう動試験の結果を踏まえて、冷間鍛造金型コー

ティングの摩耗メカニズムは、図14に示すプロセスで進行していると推察した。STEP1はSFC2で成膜したコーティング直後の状態を示している。コーティング表面および内部には金属パーティクルが多数存在している。金型の表面粗さはその性能に影響を及ぼすため、それら除去する目的で被覆金型は使用前に磨かれ、結果としてコーティング表面には多数のくぼみが形成される

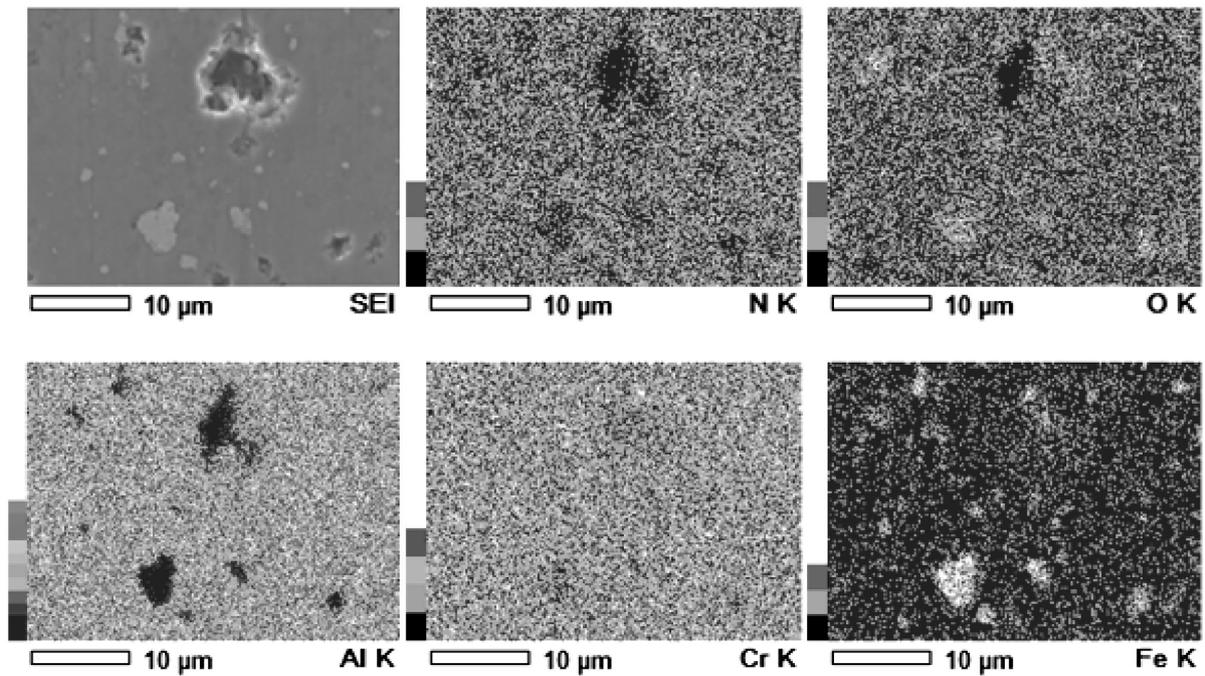


図13 しゅう動試験後のSFC2コーティングのSEM-EDS元素マッピング
 Fig.13 Elemental mapping of SFC2 coating after sliding test using SEM-EDS

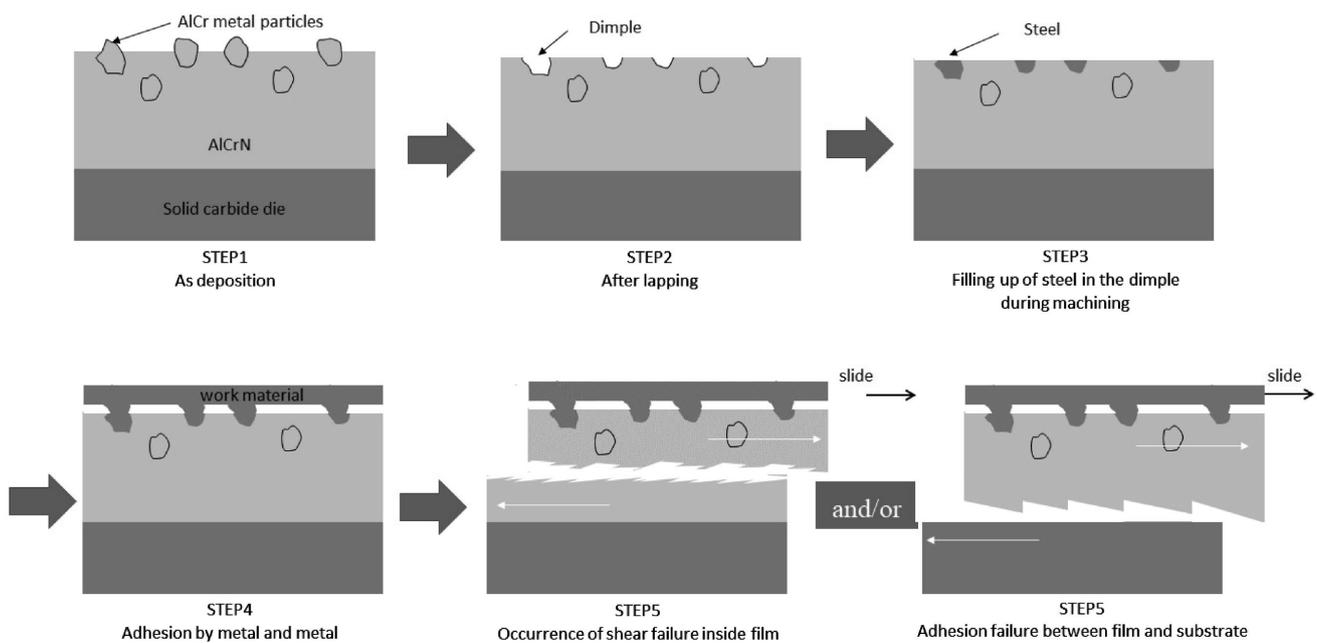


図14 冷間鍛造金型コーティングの摩耗メカニズム
 Fig.14 Coating wear mechanism for cold forging process

(STEP2)。その金型を用いて加工を行うと、加工中に被加工材の酸化した鉄がコーティング表面のくぼみに充填される (STEP3)。被加工材とコーティング表面に充填された被加工材が接触し、また加工時の大きな荷重によって凝着現象が生じる (STEP4)。被加工材はコーティング表面に対して水平方向へ横すべりして、コーティング表層側も同じ方向へ引張られる。このときコーティング内部にはそれとは逆方向のせん断力が生じて、破壊は膜内あるいは界面の機械的強度が低い方で生じる

(STEP5)。

しゅう動試験の結果から、鍛造試験では前述の膜中のドロプレットを起点としたコーティングの内部でのせん断破壊や基材／コーティング界面での剥離現象が生じていると推定される。したがって、 μ -ARCで形成したAlCrNはSFC2に比較してドロプレットが少ないことから、結果として金型の長寿命化につながったと考えられる。

むすび=当社の新しいAIP蒸発源 (μ -ARC) により Al 含有率の異なる AlCrN 皮膜を作製し、ターゲット組成とバイアス電圧がコーティング特性と結晶構造に及ぼす影響を調査した結果、以下の知見を得た。

- ・ AlCrN 皮膜の表面粗さはターゲット中の Al 含有率の影響を受けない。これは μ -ARC の特徴的な蒸発源構造によりドロップレットを排除した結果と考えられる。
- ・ 成膜時のバイアス電圧を 125 V 以上印加することで、AlCrN 中に立方晶構造の AlN を理論予測の上限値である 77at% まで固溶させることができる。

また、SFC2 と μ -ARC を用いて冷間鍛造金型へ Al 含有率 70at% のターゲットで被覆を行い金型性能の比較を行った。金型試験環境を模擬した往復しゅう動試験の考察から以下の知見を得た。

- ・ μ -ARC により、Al 含有率 70at% のターゲットを用いて AlCrN を被覆した冷間鍛造金型は、基材が露出することなく定数加工まで使用することができ、SFC2 に比べて長寿命化した。
- ・ μ -ARC による AlCrN 皮膜は、その表面およびコーティング中のドロップレットが少ないことが特徴であり、それが金型寿命に影響していると考えられる。

参 考 文 献

- 1) Andre Anders, Cathodic Arc, Springer, 2008.
- 2) P. E. Van Camp et al. Phys. Rev. B 1991, 44, p.9056.
- 3) M. Ueno et al. Phys. Rev. B, 1992, 44, p.10123.
- 4) 巻野勇喜雄. あたりあ. 1997, Vol.36. No.10. p.996.
- 5) Joerg Vetter et al. Coatings. 2021, Vol.11, No.3, p.344.
- 6) 中村克. 表面技術. 2024, Vol.75, No.7, p.314.
- 7) W. C. Oliver and G. M. Pharr, J. Mater. Res. 1992, Vol.7, No.6, p.1564-1583.
- 8) 高原一樹ほか. R&D神戸製鋼技報. 2000, Vol.50, No.2, p.53.
- 9) Ryosuke Takei et al. ICMCTF 2024, G3-WeM-2.

(技術資料)

三次元磁極構造を用いた船舶向け低速大電磁力直動電動機の設計技術

林 俊平*¹

Design Technology for a Low-speed, High-electromagnetic-force, Direct-drive Motor for Ships Using a 3D Magnetic Pole Structure

Shumpei HAYASHI

要旨

船舶電動化に適した高電磁力密度特性を有する当社の独自三次元磁極構造を用いた電動機と、その設計技術について具体的な事例を挙げて紹介する。高電磁力密度を指向した設計事例では平板型の直動電動機において、質量当たりの電磁力が従来比約3倍まで向上する結果を得ている。またシステム全体の小型化に向けて低銅損を志向した設計事例では、モータ定数二乗密度を指標として最適化した結果を紹介している。これら当社が保有する三次元磁極構造を用いた電動機設計技術を用いて、船舶向け駆動装置の電動化適用範囲拡大に貢献していく。

Abstract

This paper introduces specific examples of motors using Kobe Steel's unique 3D magnetic pole structure, which has high electromagnetic force density characteristics suitable for electrifying ships, and its design technology. In a design example aimed at high electromagnetic force density, the electromagnetic force per mass of a flat plate-type direct-drive motor has been improved approximately three times compared with the conventional model. The optimization results using motor constant squared density as an index are presented in a design example aimed at low copper loss to downsize the entire system. Kobe Steel's motor design technology, based on a 3D magnetic pole structure, will contribute to expanding the scope of electrification of drive units for ships.

検索用キーワード

高電磁力密度, 電動機, モータ, 船舶, 三次元磁極, 永久磁石

まえがき＝船舶電動化のドライビングフォースとなりうる変化の一つに世界的な脱炭素の取組が挙げられる。我が国においても2050年にカーボンニュートラル実現が表明され温室効果ガス（GHG）ゼロ排出に向けた目標が掲げられており、ゼロエミッションバッテリー推進タンカー¹⁾が竣工するなど社会ニーズ変化の兆しが見られる。くわえて海運業界では、船員の高齢化、船員不足が顕在化している。そのソリューションとして期待される自動・自律運航、遠隔支援技術は電動機との親和性が高い²⁾ことも、船舶電動化のドライビングフォースになりうる。

これまでも船舶電動化に関する技術開発は進められてきていたが、回生電力の発生機会が少ない駆動条件に起因して、自動車や鉄道などほかの輸送分野に比べ電動化の利点に乏しかった。そのため静粛性や低速時の操船性を活かせる客船や調査船、砕氷船などの用途で利用³⁾されてきた。今後は脱炭素に加えて省人化を目的に船舶電動化が進展する場合、推進システムのみならず装備品や補器を含めた駆動装置の電気駆動化ニーズが拡大していくと想定している。

本稿では、船舶電動化に適した電動機の質量もしくは体積当たりに発生可能な力が大きい特性（高電磁力密度）を有する当社の独自三次元磁極構造を用いた電動機と、

その設計技術について具体的な事例を挙げて紹介していく。

1. 船舶電動化の課題

船舶に使用される装備品や補器などの駆動系は大きな負荷や重量物を扱うことから低速かつ大きな駆動力が必要となる。そのため、装備品の一つである操舵装置の駆動系には油圧駆動装置が広く利用されており、電動機を使用する場合でも減速機など機械的な動力伝達機構を介して出力する構成が主となる。電動機は非接触で駆動力を出力できるため一般的にはメンテナンスフリーであるが、電動機と出力軸間の動力伝達機構内にあるギアやグリスは摩耗・劣化するため、メンテナンスが必要となる。ギアを用いて減速すると、電動機側から発揮される力が小さくてもギアによって大きな力に変換して出力軸側を駆動できるようになる。その反面、出駆動装置の一部に何らかの不具合があったとき、出力軸側から駆動させるには大きな力が必要になる。とくに高減速比の場合は、大きな力にギアが耐えられないため、外部から駆動させることができなくなる。これは、本来の働きを維持するための予備の機能を付けること（冗長性の確保）を困難にする。

今後、船舶の自動・自律航行を実現するうえでは機器

*1 技術開発本部 応用物理研究所

のメンテナンス性、破損時の冗長性の向上が重視されると想定している。そのため、電動機と出力軸間に設けられる動力伝達機構を低ギア比に構成するか、理想的にはギアレス化による非接触駆動が望ましい。通常、大きい力を発揮するには大型の電動機が必要になるため、大きさや形状に制約が大きい装置の電気駆動化は困難である。つまり電気駆動に置換可能な船舶駆動系を拡大するには、より小型軽量で大きな力を非接触か低ギア比で伝達可能にする高電磁力密度を有する電動機が必要となる。

2. 電磁力密度向上の方策

電動機の駆動方式のうち永久磁石式同期電動機と呼ばれるものは、電気エネルギーを運動エネルギーに変換する過程で介する磁場の一部を着磁済みの永久磁石が担う。そのため、電流のみで磁場を形成する場合に比べて低電流でも（永久磁石の作る磁場と合算して）高磁場を形成できるため、電気エネルギーを高電圧低電流で電動機内に投入することができる。この特性によって電磁力密度に優れた電動機を実現することができる。

電動機の質量もしくは体積あたりに発揮可能な電磁力を向上する方策は種々提案されている。電動機の構造的な工夫に関しては、電動機のうちで電磁力が作用する面を大きくする構成が提案されている。スパイラルモータ⁴⁾は可動子をらせん状に構成することで電磁力の作用面を確保している。また可動子を構成する永久磁石を扁平（へんぺい）にし、両面に電機子を配置する構成⁵⁾も提案されている。

しかし、いずれも電磁力が作用される面を際限なく増加することはできず、さらなる性能向上が困難である。くわえて装置の搭載要件によっては、電動機の形状が制約される場合がある。したがって、体積あたりの電磁力作用面が小さい円筒型のような構造においても電磁力を確保できることが望ましい。

電動機構造に依らない手段として、永久磁石の形状や配置の工夫によって作用面あたりに発揮可能な電磁力を向上する構成が提案されている。鉄芯と永久磁石を組み合わせたHalbach配列⁶⁾や、形状自由度の高いボンド磁石を利用して永久磁石表面積を最大化して配置した構造⁷⁾では、二次元面内の磁気回路を最大限に活用した工夫がなされている。しかし、これら構造についても電動機や使用する永久磁石のサイズや質量で制約されるため、性能向上には限界がある。

3. 三次元磁極について

永久磁石を用いた電動機は磁極子と電機子に対向配置して構成される。磁極子（Magnetic pole）は主に永久磁石と鉄芯から構成され、電機子（Armature）はコイルと鉄芯から構成される。図1に永久磁石を用いた電動機内で形成される磁場分布を模式的に示す。永久磁石から生じる磁場は空隙を介して電機子と相互作用することで電磁力が得られるように配置される。このとき、永久磁石が作る磁場は電磁力に寄与する磁場と磁極内部に

留まる磁場に分けられる。電磁力に寄与する磁場の割合は永久磁石の磁気抵抗と電動機全体の磁気抵抗によって決まるため、電機子と相互作用する磁場成分を増加させるためには、電動機全体の磁気抵抗を下げると同時に永久磁石の磁気抵抗を高くすることが有効である。しかし永久磁石の磁気抵抗を高くするには、永久磁石の厚みを増やすか永久磁石の表面積を小さくする必要があり、そのいずれも電動機の電磁力密度を向上させることは困難である。

当社グループで独自開発した三次元磁極構造⁸⁾は、図2に示す構成を最小単位とする構造を基本として、これを単位胞と呼んでいる。単位胞の中には三つの磁気回路が独立した方向に配置されることで磁極内に等方的な磁場分布が形成される。各永久磁石を磁極内で立体的に配置することで永久磁石表面積の総和を大きくすることができる。くわえて各永久磁石は三つに分割されているため、各表面積は小さく構成できる。このため、永久磁石表面積の総和を大きくしながらも各経路の磁気抵抗が高く、全体の磁気抵抗は低い磁極を構成することができる。この効果によって永久磁石を薄くしても磁極内部に留まる磁場を低減することができる。つまり、使用する永久磁石量を減らしても電磁力に寄与する磁場の割合を大きくすることができ、電動機の電磁力密度向上が可能になる。

前述の効果を電動機に適用した場合にも得るためには、従来の電動機と同様に設計最適化が必要になる。効率的な設計解探索を行うためには構造の特徴を把握して

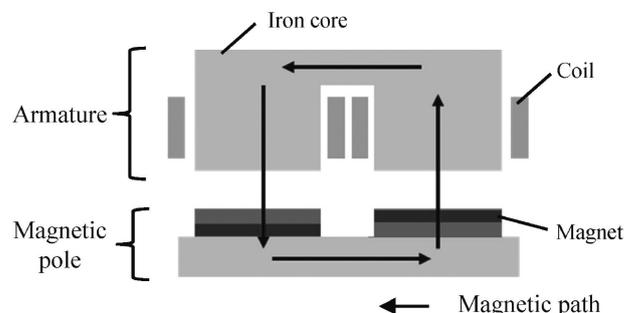


図1 電動機の磁気回路
Fig.1 Motor components and magnetic circuits

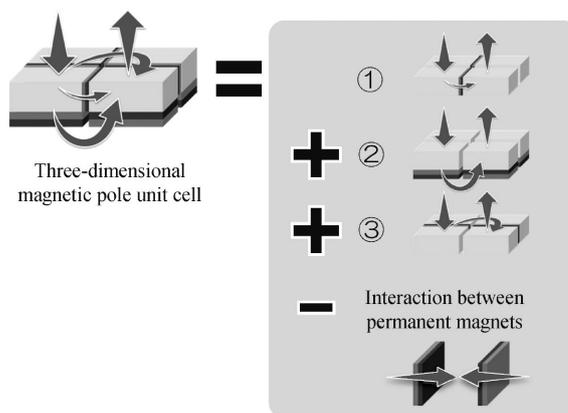


図2 三次元磁極構造と、内在する3つの磁気回路
Fig.2 Three-dimensional magnetic pole unit cell and three magnetic circuits formed inside

設計を行うことが有効であるため、つぎに三次元磁極構造を用いて発生する磁場の傾向について述べる。

一般的な永久磁石付きの電動機においては、電磁力に寄与する磁場を磁極子から電機子の間にある空隙の磁束密度を用いて評価することができる。くわえて電動機の磁気抵抗は永久磁石と空隙の厚みが支配的であることを用いて、空隙の磁束密度 B_g を次式で見積もることができる。

$$B_g = B_r \frac{1}{1+g/l} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 B_r ：残留磁束密度 [T]
 g ：有効空隙長 [m]
 l ：永久磁石の厚み [m]

また、磁石の磁気特性を式(2)で表すことができる。

$$B = B_r + \mu_0 H \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 B ：永久磁石中の磁束密度 [T]
 H ：永久磁石中の磁場の強さ [A/m]

磁石厚みを空隙長に比べ大きくしていくと永久磁石内に生じる反磁場が低減されることで空隙の磁束密度が増加するが、(1)式からその大きさは残留磁束密度を超えない。

対して三次元磁極構造では空隙の磁束密度 B_g を次式で見積もることができる。

$$B_g = B_r \frac{3}{1+5g/l} \dots\dots\dots (3)$$

ここでは各経路の永久磁石の厚みと表面積を一定としている。

(1)式と(3)式を用いて、**図3**に一般的な永久磁石配置と三次元磁極構造における空隙幅と永久磁石厚みの比に対する空隙中に生じる磁束密度の依存性の比較を示す。いずれも永久磁石厚みに対する空隙長が短くなることで空隙の磁束密度が単調増加する傾向がみられる。とくに、永久磁石厚みに対して空隙長が小さいときには、一般的な永久磁石配置に比べて、三次元磁極構造ではより多くの空隙の磁束密度が得られる。

対して、永久磁石厚みに対して空隙長が大きいとき、三次元磁極構造は一般的な永久磁石配置に比べて空隙の磁束密度が劣る傾向にある。これは隣接する永久磁石間で生じている互いを減磁させる相互作用が、空隙長が大

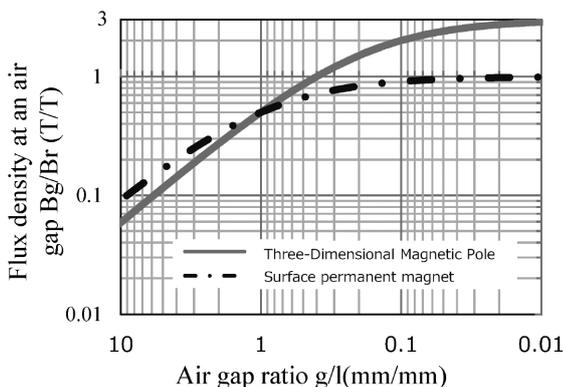


図3 空隙中の磁束密度
 Fig.3 Flux density at an air gap

きくなることで顕著に表れるために生じる。

この傾向から三次元磁極構造で、一般的な永久磁石配置に比べて大きな磁束を得るには、永久磁石厚み以下の空隙幅が構成可能な電動機が目安となる。つまり三次元磁極構造を電動機に適用する場合は、鉄芯付きの電機子を用い、かつ空隙を狭くすることで電動機全体の磁気抵抗を小さく構成することが可能な要件への適用が好適と考えられる。

これまでに当社では三次元磁極構造を用いた電動機を複数開発しているため、つぎに具体的な電動機構造を挙げながら三次元磁極構造の適用事例について紹介していく。

4. 高電磁力密度を指向した設計事例

まずは、これまで設計した電動機の中で電磁力密度に特化した平板型直動電動機の設計事例を紹介する。

電磁力は電機子と磁極子の対向する面で生じるため、**図4**に示すような平板直動型の電動機は電動機の質量当たりの対向面積を最大化することが有利な構造と考えられる。そこで本構造を前提に三次元磁極構造を適用し、寸法最適化を行った。

三次元磁極構造では、磁石間の相互作用や永久磁石の作る磁場による磁気飽和の影響が大きいいため磁性材料の非線形性を考慮する必要があり、電磁場FEM解析を用いた設計と性能予測を行っている。電磁力密度を最大化する設計案の探索のため、各部品寸法を変数として寸法最適化を行っているが、3DのFEM解析は計算負荷が高い。そこで、あらかじめ数値モデルを用いた寸法最適化を行うことで設計候補を絞り込んだうえでFEM解析にて詳細確認を行う。

本設計における目的関数は電動機質量当たりに発揮可能な電磁力としている。数値モデルにおいて、電磁力に寄与する磁場を電動機の寸法と永久磁石の残留磁束密度から見積もることとしている。この計算で磁気飽和を考慮すると繰り返し計算が必要となり設計候補の探索速度が低下する。そこで、磁気飽和による非線形性は3DのFEM解析にて確認することとして、設計候補の絞り込みを行う数値モデルでは磁気飽和を考慮しない線形モデ

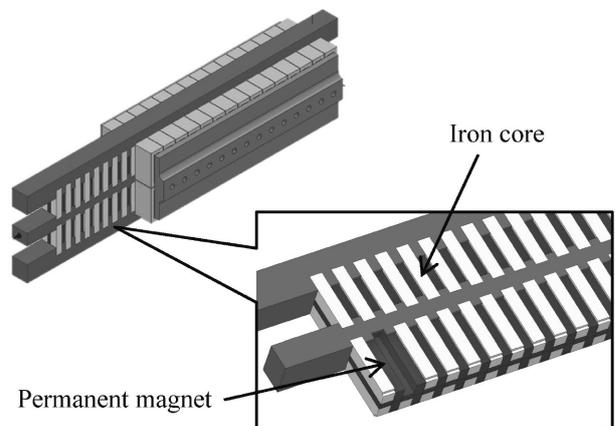


図4 三次元磁極を用いた平板型直動電動機
 Fig.4 Flat plate type linear motor with three-dimensional magnetic pole

ルをベースに構築した。ただし、非線形性が生じやすい高飽和磁束側の解を除外するため、電磁力が作用する面あたりに生じる電磁力を制約条件に設定して線形領域内での探索を行っている。図5に数理モデルで試算した最良案と3DFEM解析結果の世代ごとの推移を示す。図の丸点は各世代における数理モデルの最良案、ひし形の点は数理モデルと同じ最良案をFEM解析した結果を示す。世代は値が低い方が探索する計算回数が少ない時点での結果を示し、世代が大きくなるにつれて設計後期の結果を示す。数理モデルは3DFEM解析結果を逐次反映しているため、世代を追うごとに修正した制約条件で寸法最適化を行っている。制約条件は電磁力が作用する面あたりに生じる電磁力のほか、漏れ磁場を数理モデルで再現するための係数などが含まれる。

使用する永久磁石はネオジウム磁石として設計しており、その残留磁束密度 (B_r) は1.32 Tに設定している。そのため、磁束密度を最大化する方向での設計では磁気飽和が生じ、永久磁石使用量の増加のわりに得られる電磁力が小さくなる。よって、鉄芯の飽和磁束密度以下の範囲内で電磁力に寄与する磁場の最大化だけでなく、永久磁石の使用量を最小化しつつ電磁力密度を向上させる方向に設計探索が進んだ。

最適化結果をもとに試作した直動電動機と他社製品の直動電動機^{9),10)}の電磁力密度を比較した結果を図6に示す。電動機の中でも磁力密度が重視される用途である直動電動機製品群との比較において、約3倍以上の電磁力密度を発揮することが確認できている。

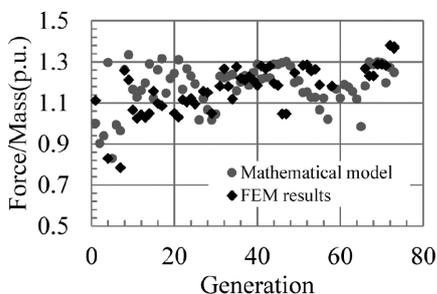


図5 寸法最適化の過程
Fig.5 Size optimization process

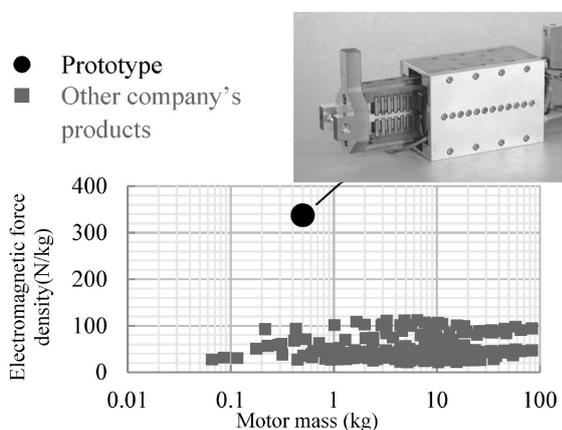


図6 試作品と他社製品の性能比較
Fig.6 Performance comparison of prototype and other company's products

5. 低銅損を指向した設計事例

つぎに駆動システムを含めた最小化を実現するために、円筒型直動電動機の銅損最小化を指向した設計事例について紹介する。電磁力密度向上によってスペース内に搭載可能となった場合、つぎの課題は電源を含めた駆動システム最小化である。電動機を設計するうえでは必要となる最大電力の最小化によって駆動システム最小化に貢献することができるが、ギアなしで直接駆動する電動機の場合、非常に低速での駆動が主となるため、損失はコイル励磁時の銅損が支配的となる。つまり最大推力発生時の銅損最小化を目指すことで、駆動システムを含めた最小化が実現できる。

銅損最小化を目指す場合の設計指標としてモータ定数二乗密度¹¹⁾が提案されている。この指標は大きさや形状が異なる電動機の性能比較する際に用いられるが、これまでの当社における経験から電機子と磁極子の対向面当たりの電磁力が100 kN/m²を超える範囲においては、電磁力密度の低い設計案が優位な傾向が見られた。これは透磁率に非線形物性を有する鉄芯材料を使用し、高磁場側では透磁率が低下する磁場範囲となることで生じたと想定している。電磁力密度を上げた場合、透磁率の低下が主因となってモータ定数が低下し、透磁率が最大化する電流密度の低い範囲での解が有利となったと考える。そのため今回のように高い電磁力密度が要求される場合は、電磁力密度に係る条件を揃えたうえで評価する必要があると考える。今回は電動機体積と発揮可能な電磁力を制約条件とすることで、目的関数を銅損最小化として探索と設計解同士の比較評価を行った。

電動機が発生可能な電磁力は極数に比例するため、電磁力密度の向上に向けては、極数の増加が有効とされる¹²⁾。そこで極ピッチを変化させて特性変化を調査しており、結果を図7にまとめている。軸長を同じとした場合、極ピッチを短くすることで極数を大きくすることができるが、極ピッチ変化によって極値が現れる。これは極ピッチが短い構造では漏れ磁束が増加することで生じる。数理モデルでもティース間の対向面積とティース間距離をもとに漏れ磁束を考慮することで銅損最小となる極値を予測することができている。最適化前後の電動機モデル形状の変化とモータ定数二乗密度を図8に示す。いずれも円筒型の直動電動機の軸方向一周期かつ周

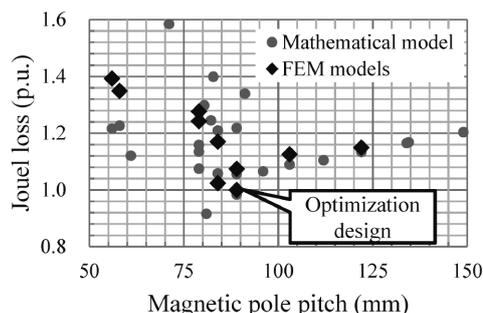


図7 銅損最小化における数理モデルとFEM解析結果の比較
Fig.7 Comparison of linear models and FEM analysis results in copper loss minimization

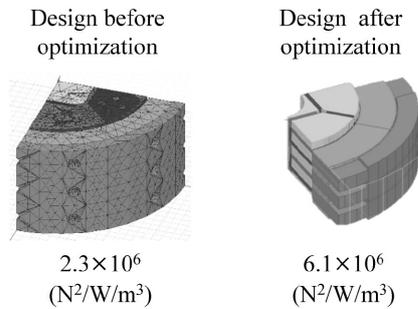


図8 銅損最小化設計の前後比較

Fig.8 Comparison before and after copper loss minimization design

方向に4分の1とした形状のみ図示している。探索の結果、搭載要件を満足する電磁力密度を維持しながら、損失低減が実現する設計案を複数抽出することができた。モータ定数二乗密度は最適化前から約2倍以上に向上している。同じ条件下で生じる損失は、モータ定数二乗密度に反比例することから、今回は損失を半減以下にすることができた。

むすび = 当社グループで独自開発した三次元磁極構を活用した電動機の性能向上に関する研究開発を進めている。今後船舶の自動・自律運航、遠隔支援の実現に有利な駆動装置開発に貢献できると考えている。

独自の三次元磁極構造に特有の複雑な磁場分布を考慮した数理モデル構築をもとにした設計技術と3DFEM

解析技術の組合せによって、現在までも優れた性能をもつ電動機を設計開発することができている。

今回、電動機質量当たりの発揮可能な電磁力を指す電磁力密度に特化した設計を行うことで、既存製品と比較して約3倍以上の性能向上を実現した。さらに、寸法変化による漏れ磁束の挙動を数理モデル上で再現することで、低速駆動時に電動機で生じる損失の主要因である銅損を半減する設計案を見出した。

今後も非接触で大きな電磁力を発揮可能な電動機の用途は拡大していくと想定しており、さらなる性能向上に向けて開発を進めていく。

参考文献

- 1) 平松雄樹ほか. ClassNK技報. 2022, No.6, p.41-47.
- 2) 坂本大輔ほか. 日本マリンエンジニアリング学会誌. 2021, 第56巻, 第5号, p10-14.
- 3) 山田英城ほか. IHI技報. 2010, Vol.50, No.4, p.28-32.
- 4) 藤本康孝. 日本ロボット学会誌. 2013, Vol. 31, No.6, p.556-559.
- 5) 青山康明ほか. 電気学会論文誌D. 2013, Vol.133, No.9, p.894-901.
- 6) 伊藤誠ほか. 電気学会論文誌D. 2023, Vol.143, No.5, p.398-404.
- 7) 吉川祐一ほか. 電気学会論文誌D. 2016, Vol.136, No.12, p.997-1004.
- 8) 林俊平ほか. 電気学会論文誌D. 2019, Vol.139, No.7, p.645-651.
- 9) ハイウィン株式会社. リニアガイドウェイ技術情報. 第21版, 2023, p.12-65.
- 10) 株式会社安川電機. ACサーボドライブΣ-7シリーズ. 2017, p.231-347.
- 11) 鹿山透ほか. 電気学会論文誌D. 2003, Vol.123, No.6, p.746-753.
- 12) 大西和夫. 電気学会論文誌D. 1995, Vol.115, No.7, p.930-935.

R&D 神戸製鋼技報掲載 お客様の「つくる」に寄り添うKOBELCOの機械装置 関連文献一覧表 (Vol.64, No.1~Vol.73, No.2)

Papers on Advanced Technologies for KOBELCO Machinery - Stay Close to Customers' Value Creation in R&D Kobe Steel Engineering Reports (Vol.64, No.1~Vol.73, No.2)

	卷/号
●IoTプラットフォームを用いた機械加工工場の統合管理 浅井新輔ほか Integrated Management of Machining Factory Using IoT Platform Shinsuke ASAI et al.	73/1
●プロセスシミュレータによる設計および開発プロセス変革への取り組み 四木悠貴ほか Transformation of Design and Development Processes with Dynamic Process Simulator Yuki SHIGI et al.	73/1
●『静かに安全にそして効率良くものを動かす』振動・音・動的特性の制御技術 山口善三ほか Technology to Control Vibration, Noise, and Dynamics Characteristics for Quiet, Safe, and Efficient Machinery Dr. Zenzo YAMAGUCHI et al.	72/2
●機械製品を高精度・高効率に操り省エネに貢献する電気・磁気制御技術 寺尾泰昭ほか Electric and Magnetic Control Technology for Manipulating Machinery Products with High Precision and Efficiency, Contributing to Energy Savings Yasuaki TERAO et al.	72/2
●遠心圧縮機用インペラのシュラウド接合技術 西村幸弘ほか Shroud Bonding Technology on Centrifugal Compressor Impellers Yukihiro NISHIMURA et al.	72/1
●燃料電池自動車向け再エネ由来水素ステーションの実証 藤澤彰利ほか Demonstration of Hydrogen Refueling Station Using Renewable Energy for Fuel Cell Vehicles Dr. Akitoshi FUJISAWA et al.	70/1
●水素充填シミュレーションを用いた水素ステーション設計技術 山下和宏ほか Design Technologies for Hydrogen Refueling Station Using Hydrogen Filling Simulation Kazuhiro YAMASHITA et al.	70/1
●水素社会の到来を見据えた水電解式水素発生装置HHOGの開発状況 石井 豊ほか Development Status of HHOG Aimed at Arrival of Hydrogen-Based Society Yutaka ISHII et al.	70/1
●LNG燃料船用圧縮機 高木 一ほか Compressor for LNG-fuelled Ships Hitoshi TAKAGI et al.	70/1
●中間媒体式LNG気化器 (IFV) を用いたLNG受け入れ基地における冷熱利用 鈴木朝寛ほか Utilization of Cold Energy in LNG Receiving Terminal based on LNG Vaporizer Using Intermediate Fluid Tomohiro SUZUKI et al.	70/1
●DCHE™ (拡散接合型コンパクト熱交換器) の適用用途拡大 三輪泰健ほか Expanding Application of Micro Channel Equipment (Diffusion Bonded Compact Heat Exchanger; DCHE™) Yasutake MIWA et al.	70/1
●大容量処理に適したフロー合成用SMCR™ (積層型多流路反応器) 市橋伸理ほか Large Capacity Reactor, Stacked Multi-Channel Reactor (SMCR™) for Flow Chemistry Nobumasa ICHIHASHI et al.	70/1
●圧縮空気エネルギー貯蔵システム 猿田浩樹ほか Compressed Air Energy Storage System Hiroki SARUTA et al.	70/1
●IoT (Internet of Things) を用いた汎用圧縮機のクラウドサービス「Kobelink™」 森本光孝 IoT-based Cloud Service "Kobelink™" for Standard Compressors Mitsutaka MORIMOTO	70/1
●油冷式スクリュ圧縮機「Kobelion™ (コベライアン) シリーズ」 濱田克徳 Oil Injected Screw Compressor Kobelion™ series Katsunori HAMADA	70/1
●新型オイルフリースクリュ圧縮機「Emeraude-ALE™」 フルモデルチェンジALEIV (132~275 kW) 米田亥央里ほか NEW Oil-free Screw Compressor "Emeraude-ALE™" Full Model Change ALEIV (132-275 kW) Iori YONEDA et al.	70/1
●未利用低温排熱を活用するバイナリー発電システム 藤澤 亮ほか Binary Cycle Power Generation System for Hot Water Utilizing Unused Low-Temperature Waste Heat Dr. Ryo FUJISAWA et al.	70/1
●冷凍機・ヒートポンプの低GWP冷媒対応 神吉英次ほか Refrigeration Unit and Heat Pump using Low GWP Refrigerant Eiji KANKI et al.	70/1
●高圧CO ₂ ターボ圧縮機 馬場利秋ほか Integrally Geared Compressor for High Pressure CO ₂ Toshiaki BABA et al.	70/1

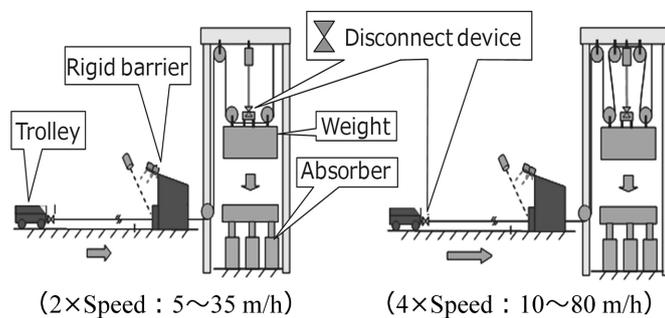
●高砂機械工場新日程計画・物流管理システム	井筒理人ほか	68/2
Development of New Production Scheduling and Logistics System for Takasago Machinery Plant	Rihito IZUTSU et al.	
●MIXTRON [®] BB 接線ミキサ用新ロータ 5THR	山根泰明ほか	67/2
New Tangential Rotor, 5THR, for MIXTRON [®] BB	Yasuaki YAMANE et al.	
●部分充填の混練解析による密閉式ゴム混練機の分配混合評価方法	福谷和久ほか	67/2
Evaluation Method of Distributive Mixing in Internal Mixers by Using Partially-Filled Numerical Flow Analysis	Dr. Kazuhisa FUKUTANI et al.	
●新型大型樹脂混練機 (LCM-IM)	山口和郎ほか	67/2
Newly Developed Large Size Continuous Mixer (LCM-IM)	Kazuo YAMAGUCHI et al.	
●粒子法に基づく樹脂混練機内の部分充填解析技術の開発	関山和英ほか	67/2
Partially Filled Flow Simulation Based on Particle Method of High-Viscosity Fluid in Mixer	Kazuhide SEKIYAMA et al.	
●連続鋳造設備の新技術紹介	西岡智則ほか	67/2
New Technologies for Continuous Casting Machine	Tomonori NISHIOKA et al.	
●薄板用冷間圧延設備KTミルの新機能紹介	宮園太介ほか	67/2
Introduction of New Function of KT mill, Cold Rolling Mill for Thin Strips	Taisuke MIYAZONO et al.	
●棒鋼用ブロックミル	竹田康彦ほか	67/2
Finishing Block Mill for Small Bar Lines	Yasuhiko TAKEDA et al.	
●HIP装置の新技術紹介	渡邊克充	67/2
Introduction of New Technology for HIP Equipment	Katsumi WATANABE	
●食品用横型CIP装置	南野友哉	67/2
Horizontal CIP Equipment for Food	Tomoya MINAMINO	
●大型油冷式スクリュウ圧縮機	落合圭太ほか	67/2
Large Oil-flooded Screw Compressor	Keita OCHIAI et al.	
●高圧無給油式スクリュウ圧縮機	高木秀剛	67/2
High-pressure Oil-free Screw Compressor	Shugo TAKAKI	
●スクリュウ圧縮機のポリプロピレン／ポリエチレンプラント用ガス回収圧縮機への適用	阿部幸治	67/2
Application of Screw Compressors for Gas Recovery to Polypropylene/Polyethylene Plant	Koji ABE	
●大型増速機内蔵型遠心圧縮機	佐伯圭一ほか	67/2
Large Integrally Geared Centrifugal Compressor	Keiichi SAEKI et al.	
●ポリプロピレン／ポリエチレンプラント用DH型遠心圧縮機	田中宏明ほか	67/2
Centrifugal Compressor, Model DH, for Polypropylene and Polyethylene Plants	Hiroaki TANAKA et al.	
●LNG船用燃料噴射圧縮機	瀬山勝広ほか	67/2
LNG Boil Off Gas (BOG) Vertical Type Reciprocating Compressor for Fuel Gas Injection	Katsuhiko SEYAMA et al.	
●船用バイナリー発電システム	西村和真ほか	67/2
Marine Binary Power Generation System	Kazuma NISHIMURA et al.	
●高温オフガス用動力回収ラジアルタービン	吉田 敦ほか	67/2
Radial Turbine for Energy Recovery from Off Gas at High Temperature	Atsushi YOSHIDA et al.	
●圧縮機の運転監視、保守診断システム	松本泰治	67/2
System for Monitoring Operation and Diagnosing Maintenance of Compressors	Yasuharu MATSUMOTO	
●燃料ガス圧縮機のプロセス系ダイナミックシミュレーション	北山伸二ほか	67/2
Dynamic Simulation of Process System for Gas Compressor	Shinji KITAYAMA et al.	
●ねずみ鋳鉄製圧縮機ケーシングの強度評価解析	黒澤瑛介ほか	67/2
Strength Analysis of Compressor Casing made of Gray Cast Iron	Dr. Eisuke KUROSAWA et al.	
●遠心圧縮機大型インペラ加工技術	戒能 徹	64/2
Machining Technology for Large Impellers of Centrifugal Compressors	Toru KAINO	
●水素ステーション整備に向けた神戸製鋼グループの取り組み	三浦真一ほか	64/1
Technical Developments and Kobe Steel's Business Approach for Hydrogen Filling Stations	Dr. Shinichi MIURA et al.	

お詫びと訂正

2024年11月28日に発行いたしました本誌「Vol.73, No.2 特集：自動車用材料・技術」におきまして、記載に誤りがございましたので以下のように訂正いたします。

ご愛読いただいている皆さま、ならびに関係各位にご迷惑をお掛けしましたことをお詫び申し上げます。

21ページ右段 図1：



誤：(2×Speed : 5 ~ 35 m/h)

正：(2×Speed : 5 ~ 35 km/h)

誤：(4×Speed : 10 ~ 80 m/h)

正：(4×Speed : 10 ~ 80 km/h)



Business Field

■ Steel & Aluminum

- Steel Sheets
- Aluminum Flat Rolled Products
- Wire Rods and Bars
- Steel Plates

■ Advanced Materials

- Steel Casting and Forging
- Aluminum Castings and Forgings
- Titanium
- Aluminum Extrusions
- Suspensions
- Copper Sheets
- Steel Powder

■ Welding

- Robots and Welding Power Sources
- Welding Materials

■ Machinery

- Isostatic Pressing (IP) Equipment
- PVD Coating Equipment
- Tire and Rubber Machinery
- Plastic Processing Machinery
- Steelmaking Machinery & Rolling Mills Plant
- Non-Standard Compressors
- Heat Exchangers & Vaporizers
- Standard Compressors & Chillers

■ Engineering

- Direct Reduced Iron field
- Advanced Urban Transit System
- Environmental Engineering

■ Construction Machinery

■ Electric Power

URL : Kobe Steel, Ltd Website, "Products"
<https://www.kobelco.co.jp/english/products/>

QR code :



“QR Code” is a registered trademark of DENSO WAVE INCORPORATED.



主要事業内容

■鉄鋼アルミ

- 薄板
- アルミ板
- 線材・条鋼
- 厚板
- 鉄鋼スラグ

■素形材

- 鋳鍛鋼
- アルミ鋳鍛
- チタン
- アルミ押出
- サスペンション
- 銅板
- 鉄粉

■溶接

- 溶接システム
- 溶接材料

■機 械

- 等方圧加圧装置（IP：Isostatic Press）
- PVDコーティング装置（高機能商品）
- タイヤ・ゴム機械
- 樹脂機械
- 鉄鋼・非鉄用機械
- 非汎用圧縮機（回転機）
- 熱交換器／気化器（機器）
- 汎用圧縮機／冷熱機器

■エンジニアリング

- 直接還元鉄関連分野
- 原子力プラント関連
- 都市交通システム
- エネルギー・化学プラント
- 水処理
- 廃棄物処理・リサイクル
- 医薬・ファインケミカル機械
- 冷却塔
- 水電解式高純度水素発生装置

■建設機械

■電 力

URL： 神戸製鋼ホームページ 技術・製品情報
<https://www.kobelco.co.jp/products/>

QRコード：



QRコードはデンソーウェーブの登録商標です。

編集後記

＜特集：お客様の「つくる」に寄り添うKOBELCOの機械装置＞

*2018年5月以来、7年ぶりとなる機械特集号をお届けすることができました。ここまでお読みいただいた読者の皆様へ感謝申し上げます。

*当社グループの機械事業は、お客様の「つくる」という本質的な課題に寄り添い、独自の機械装置とソリューションを提供してきました。

*今回の特集号では、「お客様の『つくる』に寄り添うKOBELCOの機械装置」と題し、「より良い製品をつくる」、「より良い環境をつくる」、「新しい価値をつくる」の三つのテーマに沿って、当社グループの機械装置とその技術や取り組みについて紹介しました。

*「より良い製品をつくる」というテーマでは、非汎用・汎用圧縮機、大型樹脂混練機、タイヤ・ゴム混練機、製鉄・非鉄圧延機など、時代とともに変化する社会やお客様のニーズを実現するため、絶え間なく技術開発を積み重ねて進歩してきた機械装置を解説しました。

*二つ目のテーマ、「より良い環境をつくる」では、ハイブリッド型水素ガス供給システム、水電解水素ガス製造装置(HHOG[®])、液体水素気化器、環境用途の各種圧縮機、ヒートポンプなど、CO₂排出削減と持続可能な社会の実現に対し

貢献度の高い製品を説明しました。お客様の「つくる」に伴う課題の一つである脱炭素化に対して、機械事業が持つ多数のコア技術と当社グループならではの多様なアセットをかけ合わせた当社独自の最適な解決策を提供しています。

*最後に「新しい価値をつくる」というテーマで、高温高圧WIP装置と全個体電池製造への適用、新AIP装置と被膜開発、低速大電磁力直動電動機とその設計技術、ボトムアップ型新事業創出活動の取り組みなどを紹介しました。従来の市場とは異なる新たな分野のニーズに応える挑戦について、ご理解を深めていただけたことと思います。

*当社グループは、これらお客様の「つくる」に寄り添う機械装置とソリューションの提供を通じて、より良い日常を確かなものにするためにお客様とともに歩み続けます。本特集号がより多くのお客様に私たちが寄り添うことのきっかけとなれば幸いです。

*当社グループの機械事業は、皆様からのフィードバックを基に、さらなる改善を目指してまいります。本特集号について、ご意見、ご要望がありましたら事務局までお寄せください。ご連絡をお待ちしています。

(佐成弘毅)

(協力：田中健嗣、岩田卓也、坂本佳直美)

次号予告

＜特集：建築・土木を支えるKOBELCOの材料およびソリューション＞

*当社グループは、鉄鋼アルミ・素形材・溶接の「素材系事業」、機械・エンジニアリング・建設機械の「機械系事業」、さらに、製鉄所の自家発電操業で長年培った技術・ノウハウを活かした「電力事業」の三つの事業領域を柱としてお客様・社会の課題解決に貢献しています。

*2021年には当社グループが持続的に成長し、社会にとってかけがえのない存在となるために取り組むべき五つのマテリアリティ（重要課題：グリーン社会への貢献、安全・安心なまちづくり・ものづくりへの貢献、人と技術で繋ぐ未来へのソリューション提供、多様な人材の活躍推進、持続的成長を支えるガバナンスの追求）を特定しました。

*次号では、建築・土木分野における当社グループの取り組みを前述のマテリアリティに沿って「素材系事業」・「機械系事業」の技術を中心に紹介いたします。
*マテリアリティ＝グリーン社会への貢献では、鋼製橋梁において塗装成分とのマッチング効果発現を実現させ塗り替え周期の長期化を可能とする塗膜下耐食鋼『エコビュープラス』、環境負荷低減および資源循環を目的に地盤改良材としての鉄鋼スラグの利活用技術を紹介いたします。

*マテリアリティ＝安全・安心なまちづくり・ものづくりへの貢献では、建築向け各種TMCP鋼・780MPa級鋼材の大入熱溶接技術、橋梁向け高降伏点圧延鋼材SBHSシリーズ、疲労亀裂発生寿命を改

善した疲労抑制鋼板『EX-FacterTM』を紹介いたします。薄鋼板では優れた耐食性を有する高耐食めっき鋼板『KOBEMAG[®]』、鋼線では意匠性に配慮した伝統木造建築向け『ステルスプレース[®]』、橋梁の補強対策として高性能かつ高耐久な外ケーブル工法『RE-SETケーブルシステム』を紹介いたします。接合技術では、建築・橋梁における接合の重要性やこれまでの当社グループの取り組みを振り返るとともに、建築鉄骨製作に使用される各種溶接材料のラインナップ、BIM/CADデータ連携による自動化溶接の取り組み、小型可搬型ロボット「石松」を用いたコラム柱横向自動溶接技術について紹介しま

す。
*マテリアリティ＝人と技術で繋ぐ未来へのソリューション提供では、建材の利用技術として、上フランジ拘束効果を活用した鉄骨梁の横座屈補剛工法、アンダーマッチ溶接による780MPa級箱形断面柱継手の耐力評価、700MPa級アンカーボルトを用いた露出柱脚の構造性能を、また溶接技術においては画像センサ搭載小型可搬型溶接ロボットシステム、斜張橋やPC橋などの構造物に用いるレーザードップラーを用いた張力測定について紹介いたします。

*次号では、建築・土木分野における社会課題に対し、当社グループが取り組む最新技術について紹介いたします。どうぞご期待ください。

(高田武之)

＜編集委員＞

委員長	西野都
副委員長	杵淵雅男
委員	池田英生
	佐藤統宣
	佐成弘毅
	杉立宏志
	鈴木一也
	高久真也
	高田武之
	中久保昌平
	永浜睦久
	本家浩一
	山本兼司
	渡辺憲一
	＜五十音順＞
本号特集編集委員	佐成弘毅

R&D 神戸製鋼技報

第74巻・第1号（通巻第252号）

2025年6月27日発行

年2回発行

非売品 <禁無断転載>

発行人 西野 都

発行所 株式会社 神戸製鋼所
技術開発本部 企画管理部
〒651-2271
神戸市西区高塚台1丁目5-5

印刷所 福田印刷工業株式会社
〒658-0026
神戸市東灘区魚崎西町4丁目
6番3号

お問合わせ先 コベルコビジネスパートナーズ(株)
R&D神戸製鋼技報事務局
〒651-0073
神戸市中央区脇浜海岸通2丁目2-4
(株)神戸製鋼所 神戸本社ビル
FAX(078)261-7843
rd-office@kobelco.com

2025年 6月 27日

各 位

(株)神戸製鋼所
技術開発本部

「R & D神戸製鋼技報 Vol.74, No.1」お届けの件

拝啓、時下ますますご清栄のこととお慶び申し上げます。

また平素は、格別のご高配を賜り厚くお礼申し上げます。

このたび、「R & D神戸製鋼技報 Vol.74, No.1」を発行しましたのでお届け致します。
ご笑納のうえご高覧いただきましたら幸甚です。

なお、ご住所・宛先名称などの訂正・変更がございましたら、下の変更届に必要な事項を
ご記入のうえ、FAXあるいはE-mailにてご連絡いただきますようお願い申し上げます。

敬 具

コベルコビジネスパートナーズ(株)
R&D神戸製鋼技報事務局 行
FAX (078)261-7843
rd-office@kobelco.com

本誌お送り先変更届

	変 更 前	変 更 後
貴社名		
ご所属		
ご住所	〒	〒
宛名シール 番号	No. _____ ←(封筒の宛名シール右下の番号をご記入下さい)	
備 考		
本紙記入者	お名前：	E-mail： TEL：

June 27, 2025

Kobe Steel, Ltd.
Technical Development Group

RE: Delivery of R&D Kobe Steel Engineering Reports, Vol.74, No.1

Dear Sir or Madam,

We would like to express our sincere gratitude for your continued support and cooperation.

Attached please find Vol.74, No. 1 of the R&D Kobe Steel Engineering Reports.

If there is any correction or change of address, contact name, etc., please fill in the required information in the change notification below and contact us by fax or by e-mail.

Best wishes for your continued success,

Attention:

R&D Office, Kobe Steel Engineering Reports

Kobelco Business Partners Co., Ltd.

FAX: +81-78-261-7843

E-mail: rd-office@kobelco.com

Change Notification

	Before change	After change
Company name		
Department		
Address		
Address sticker number	No. _____ ← (Please fill in the right lower number on the address sticker)	
Remarks		
Person making this entry	Name :	E-mail :