

お詫びと訂正

2020年7月31日に発行いたしました本誌「Vol.70, No.1 特集：エネルギー・環境」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。

46ページ 右段下：

『戸島正剛』

誤： 機械事業部門 開発センター 技術開発部

正： 技術開発本部 機械研究所

『久保洋平』

誤： 機械事業部門 開発センター 技術開発部

正： 技術開発本部 機械研究所

105ページ 右段24行目：

誤： り⁵⁾、爆破ごとに累積残留塑性ひずみが増加するいわゆ

正： り⁴⁾、爆破ごとに累積残留塑性ひずみが増加するいわゆ
=

107ページ 右段7行目：

誤： 4) API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For Service.

5) Joseph K. Asahina et al. “ASME” Proceedings of PVP2011-57843, p.135-139.

正： 4) Joseph K. Asahina et al. “ASME” Proceedings of PVP2011-57843, p.135-139.

特集：エネルギー・環境

ページ

- 1 (巻頭言) エネルギー・環境特集の発刊にあたって 森崎計人
- 3 (技術資料) 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・木下 繁・三浦真一・中尾末貴・鈴木文昭・山下和宏
- 7 (技術資料) 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・鈴木文昭・福谷啓太・高島和郎・勝山 拓
- 13 (解説) 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・中尾末貴
- 20 (技術資料) LNG燃料船用圧縮機 高木 一・瀬山勝広・衣川博継・手塚智志・友近貴之
- 24 (解説) 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・江頭慎二・澄田祐二
- 30 (技術資料) DCHETM (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・東 正高・野一色公二
- 36 (技術資料) 大容量処理に適したフロー合成用SMCRTM (積層型多流路反応器) 市橋伸理・大園知宏・松岡 亮
- 42 (解説) 圧縮空気エネルギー貯蔵システム 猿田浩樹・佐藤 隆・中道 亮・戸島正剛・久保洋平
- 47 (技術資料) IoT(Internet of Things)を用いた汎用圧縮機のクラウドサービス「KobelinkTM」 森本光孝
- 52 (技術資料) 油冷式スクリュウ圧縮機「KobelionTM (コベライオン) シリーズ」 濱田克徳
- 56 (技術資料) 新型オイルフリースクリュウ圧縮機「Emeraude-ALETM」
フルモデルチェンジALEIV (132~275 kW) 米田亥央里・宮武利幸
- 60 (技術資料) 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・高橋和雄・前田基秀・川口泰平
- 65 (解説) 冷凍機・ヒートポンプの低GWP冷媒対応 神吉英次・前田倫子
- 69 (論文) 相分離吸収液を活用した低エネルギー消費型CO₂分離プロセス
前田基秀・中西 健・岸本 啓・重久卓夫
- 75 (技術資料) 高圧CO₂ターボ圧縮機 馬場利秋・藤岡輝明・在原広敏・馬場祥孝・岩田卓也
- 81 (解説) ミドレックスプロセス—その進化と脱炭素製鉄への展望—
ビンセント シェヴリエ・ローレン ロレーン・道下晴康
- 88 (解説) 金属スクラップを用いた放射性廃棄物処分容器用内容物の製造に向けた技術的課題の検討
長江拓哉・宮田賢作・中山準平
- 93 (技術資料) ジオポリマによる放射性廃棄物の固化技術の開発
宮田賢作・西村 務・吉田誠司・西尾隆志・古館佑樹・中山準平
- 98 (技術資料) 老朽化・遺棄化学兵器の制御爆破処理 北村竜介
- 102 (解説) 化学兵器処理用爆破チャンバの設計 林 浩一
- 108 (解説) 国内初の内陸型火力発電所 (真岡発電所) 藤尾明久・山本 晃
- 113 神戸製鋼技報掲載 エネルギー・環境関連文献一覧表 (Vol.60, No.1 ~ Vol.69, No.2)

《FEATURE》 Energy and Environment

- 1 Technologies of Kobe Steel Group for Energy and Environment
Kazuto MORISAKI
- 3 Demonstration of Hydrogen Refueling Station Using Renewable Energy for Fuel Cell Vehicles
Dr. Akitoshi FUJISAWA · Shigeru KINOSHITA · Dr. Shin-ichi MIURA · Sueki NAKAO · Fumiaki SUZUKI · Kazuhiro YAMASHITA
- 7 Design Technologies for Hydrogen Refueling Station Using Hydrogen Filling Simulation
Kazuhiro YAMASHITA · Fumiaki SUZUKI · Keita FUKUTANI · Kazuo TAKAHATA · Taku KATSUYAMA
- 13 Development Status of HHO_g Aimed at Arrival of Hydrogen-Based Society
Yutaka ISHII · Sueki NAKAO
- 20 Compressor for LNG-fuelled Ships
Hitoshi TAKAGI · Katsuhiko SEYAMA · Hirotsugu KINUGAWA · Satoshi TEZUKA · Takayuki TOMOCHIKA
- 24 Utilization of Cold Energy in LNG Receiving Terminal based on LNG Vaporizer Using Intermediate Fluid
Tomohiro SUZUKI · Shinji EGASHIRA · Yuji SUMIDA
- 30 Expanding Application of Micro Channel Equipment (Diffusion Bonded Compact Heat Exchanger; DCHE™)
Yasutake MIWA · Masataka AZUMA · Dr. Koji NOISHIKI
- 36 Large Capacity Reactor, Stacked Multi-Channel Reactor (SMCR™) for Flow Chemistry
Nobumasa ICHIHASHI · Tomohiro OZONO · Akira MATSUOKA
- 42 Compressed Air Energy Storage System
Hiroki SARUTA · Dr. Takashi SATO · Ryo NAKAMICHI · Masatake TOSHIMA · Yohei KUBO
- 47 IoT-based Cloud Service "Kobelink™" for Standard Compressors
Mitsutaka MORIMOTO
- 52 Oil Injected Screw Compressor Kobelion™ series
Katsunori HAMADA
- 56 NEW Oil-free Screw Compressor "Emeraude-ALE™" Full Model Change ALEIV (132-275 kW)
Iori YONEDA · Toshiyuki MIYATAKE
- 60 Binary Cycle Power Generation System for Hot Water Utilizing Unused Low-Temperature Waste Heat
Dr. Ryo FUJISAWA · Kazuo TAKAHASHI · Norihide MAEDA · Taihei KAWAGUCHI
- 65 Refrigeration Unit and Heat Pump using Low GWP Refrigerant
Eiji KANKI · Michiko MAEDA
- 69 Low Energy Consumption CO₂ Capture Process Using Phase-Separation Type Absorbent
Norihide MAEDA · Ken NAKANISHI · Dr. Akira KISHIMOTO · Dr. Takuo SHIGEHISA
- 75 Integrally Geared Compressor for High Pressure CO₂
Toshiaki BABA · Koumei FUJIOKA · Dr. Hirotsoshi ARIHARA · Yoshitaka BABA · Takuya IWATA
- 81 MIDREX® Process: Bridge to Ultra-low CO₂ Ironmaking
Dr. Vincent CHEVRIER · Lauren LORRAINE · Haruyasu MICHISHITA
- 88 Study of Technical Issues on Manufacturing Inner Containers of Radioactive Waste Disposal Container Using Metal Scrap
Takuya NAGAE · Kensaku MIYATA · Junpei NAKAYAMA
- 93 Geopolymer Technology for Solidifying Radioactive Waste
Kensaku MIYATA · Tsutomu NISHIMURA · Satoshi YOSHIDA · Takashi NISHIO · Yuki FURUDATE · Junpei NAKAYAMA
- 98 Destruction of Old or Abandoned Chemical Weapons by Controlled Detonation
Ryusuke KITAMURA
- 102 Design of Detonation Chamber for Destructing Chemical Warfare Materials
Koichi HAYASHI
- 108 Japan's First Inland Thermal Power Plant (Moka Power Station)
Akihisa FUJIO · Akira YAMAMOTO
- 113 Papers on Advanced Technologies for Energy and Environment in R&D Kobe Steel Engineering Reports
(Vol.60, No. 1 ~Vol.69, No. 2)

(巻頭言)

エネルギー・環境特集の発刊にあたって

森崎計人

副社長執行役員 機械系事業の総括、エンジニアリング事業部門長

Technologies of Kobe Steel Group for Energy and Environment

Kazuto MORISAKI



気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change：IPCC）は、2017年の世界平均気温が産業革命当時と比べて1℃上昇したとの発表を行った。近年、台風やハリケーン、洪水、山火事などの自然災害が多発し、激しさを増しているのは、地球温暖化による影響が大きいといわれている。2015年12月に締結され、2020年1月から運用が開始されたパリ協定においては、地球温暖化への対応は先進国だけでなく、発展途上国を含めた世界的な取り組みとなっており、その効果が期待されている。また、2019年に我が国において「パリ協定に基づく成長としての長期戦略」が策定され、企業の事業活動を通じた脱炭素社会に向けての貢献も重要になってきている。

資源やエネルギーは、人々が生活を営み、企業が経済的な活動を行うために不可欠なものであるが、地球温暖化の原因となるCO₂の発生に大きく影響を与えている。したがって、地球温暖化を含む環境問題に対応しながら、適切に活用していくことが求められている。

神戸製鋼グループは、すべての生命体を育む地球環境を健全な状態で次世代に引き継ぐことが私たちの使命であるという認識のもと、「環境に配慮した生産活動」、「技術・製品・サービスでの環境への貢献」、「社会との共生・協調」を3本柱とした環境経営基本方針を定め、グループ環境経営を実践している。温室効果ガスであるCO₂の排出量削減に対しては、鉄鋼をはじめとする生産プロセスに加え、当社グループ独自の技術・製品・サービスを通じて、社会のさまざまな分野で貢献している。本特集号では、地球温暖化に対応する技術をはじめ、エネルギー・環境分野において、当社グループが持つ独自の技術を紹介する。

当社グループは、古くからエネルギー・環境分野におけるビジネスを行ってきた。この分野で培ってきた技術・製品・サービスは、地球温暖化に対応するための重要な知見となっており、水素、LNG（液化天然ガス）、省エネ/創エネなどさまざまな分野における環境への貢献につながっている。

水素は、使用時にCO₂を発生しないクリーンなエネルギーとしてその普及が期待されている。そうしたなか、当社グループは水電解装置や水素圧縮機の製造・販売のほか、再生可能エネルギーを使用し水電解装置にて製造した水素を燃料電池車に供給する水素ステーションに関する技術の開発と実証などを行い、水素社会の実現に向けて貢献している。

天然ガスはCO₂発生量の少ないエネルギー源であり、その需要は増加傾向にある。LNG気化器のトップメーカーとして当社は、陸上および洋上のLNG受入基地に機器を供給している。また近年、船舶に対する環境規制が強化されてきており、一部の船舶で重油からCO₂発生量の少ないLNGへと燃料転換が進みつつある。LNGを燃料とする船舶のエンジンに燃料を供給する圧縮機を開発し、製造・販売を始めている。

CO₂削減の観点から、エネルギー効率の高い製品や未利用エネルギーを有効活用する機器はますます重要となっている。より高効率を目指して、当社グループは汎用空気圧縮機、冷凍機、ヒートポンプなどの技術開発を進め、幅広い用途で省エネルギーに貢献している。これまで利用が難しかったより低温の熱源のエネルギー利用を可能にするバイナリー発電システムの開発にも取り組んでいる。

当社グループはまた、製鉄プロセスの技術開発やエンジニアリングにも力を入れている。鉄鉱石を還元して溶銑を製造する過程はエネルギーの消費量が多く、発生するCO₂は製鉄プロセス全体の約8割を占めるといわれている。当社グループが広く世界でビジネスを展開しているミドレックスプロセス（MIDREX[®]注1）は、天然ガスを使用して鉄鉱石を還元することによってCO₂の発生量を低減できる技術である。従来は、ミニミルといわれる比較的小規模の製鉄所に導入されることが多く、生産規模も高炉に比べて小さいものであった。しかしながら近年は、大規模生産のニーズにこたえて生産規模を拡大させ、現在は年産250万tの還元鉄を製造できるようになっている。

当社グループはこれまで、多数のミドレックスプラントを建設・稼働させることによって製鉄分野でのCO₂排出量の削減に貢献している。ミドレックスプロセスは石炭を使用する高炉法を代替する可能性のある技術になってきており、さらなるCO₂排出量の削減に貢献できると期待している。

いっぽう電力の分野においては今後、風力や太陽光などの再生可能エネルギーによる発電が増加すると見込まれている。しかしながら再生可能エネルギーによる発電は、天候に大きく左右されて発電量が不安定になることが利用上の問題となっている。そうした問題を解消すると期待されているのは当社が開発した圧縮空気エネルギー

脚注1）MIDREXは当社の登録商標である。

一貯蔵設備（空圧電池^{TM注2)}）である。この空圧電池は、風力発電や太陽光発電の余剰電力を使って圧縮機を稼働させて空気を圧縮・貯蔵し、電力が必要になった時にその圧縮空気を使って発電機のタービンを回して発電する設備である。変動の大きい再生可能エネルギーの平準化に貢献する技術として期待されている。

また、環境に最大限配慮した高効率の火力発電所を大消費地に近い内陸部に設けることは、電力系統の安定化への対応のほか、レジリエンス効果が高いこと、大消費地への高効率でロスの少ない電力を供給できるなど、多くのメリットがあり、電力系統システム全体としてのCO₂発生量の削減にも寄与するものと考えている。本特集号では、栃木県真岡市で運転を始めた、最新鋭の火力発電所を紹介する。

当社グループは、原子力産業の分野においても古くからビジネスを行っている。総合素材メーカーとして材料・加工技術などの幅広い製品・技術開発力を背景に、素材から機器・システム、プラント・施設設計にいたるまで、独自の製品・技術・サービスを提供している。

また、世界に散在する老朽化・遺棄化学兵器を無害化する独自の技術も有しており、地球環境の保全に貢献している。本特集号では、これらの分野での廃棄物処理に関わる技術についても紹介する。

エネルギー・環境への対応は、今後ますます重要になっていくものと考えられ、当社グループは、ユニークで優れた技術・製品・サービスでもってこの分野における課題に取り組んでいく所存である。各方面の皆様からのご指導と忌憚のないご意見をいただければ幸甚である。

脚注 2) 空圧電池は当社の登録商標である。

(技術資料)

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* (博士(工学))・木下 繁・三浦真一 (博士(工学))・中尾末貴・鈴木文昭・山下和宏

Demonstration of Hydrogen Refueling Station Using Renewable Energy for Fuel Cell Vehicles

Dr. Akitoshi FUJISAWA・Shigeru KINOSHITA・Dr. Shin-ichi MIURA・Sueki NAKAO・Fumiaki SUZUKI・Kazuhiro YAMASHITA

要旨

水素ステーション向けの水素製造時のCO₂排出量を大幅に削減するためには再エネ電力由来の水電解水素を用いることが有効である。当社は、固体高分子型水電解式水素発生装置 (20 Nm³/h) および製造した水素を高圧水素 (45 MPa) として貯蔵する設備を標準的な水素ステーション (水素供給能力300 Nm³/h) に増設する形態を考案し、その実証設備を設計・製作した。実証運転では水電解式水素発生装置を変動電源で約780時間運転し、追従性や耐久性に問題がないことを確認した。また、水素ステーションとの連携運転により、設計したシステム全体の機能を実証した。今後、さらなるコストダウン・効率向上を検討するが、CO₂排出量の少ない水素の社会的な価値設定も必要と考えられる。

Abstract

To significantly reduce CO₂ emissions during the production of hydrogen for hydrogen refueling stations, it is effective to use water-electrolysis hydrogen generated with renewable electricity. Kobe Steel has devised a configuration to add a hydrogen generator using a solid-polymer-electrolyte water electrolyzer (20 Nm³/h) and equipment for storing generated hydrogen at a high pressure (45 MPa) to a standard hydrogen refueling station (hydrogen supply capacity 300 Nm³/h) and has designed and built a demonstration plant. The demonstration included the operation of the water-electrolysis hydrogen generator for about 780 hours with the variable power source without any problems with followability and durability. In addition, the function of the entire system designed was verified by the operation linked with the hydrogen refueling station. In the future, further cost reduction and efficiency improvement will be considered. It is necessary to set a social value for hydrogen, which emits less CO₂.

キーワード

水素ステーション, 水電解装置, 高圧水素, 再生可能エネルギー, 低炭素化技術, 変動電源

ま え が き = 我が国の第5次エネルギー基本計画¹⁾が2018年に経済産業省資源エネルギー庁によって策定された。この基本計画においては水素が二次エネルギーとして位置付けられ、水素インフラは我が国にとって地球温暖化対策のために整備すべきエネルギーインフラとなりつつある。また、2017年12月には内閣官房 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議によって水素基本戦略²⁾が制定されている。この基本戦略は、2050年を視野に入れ、水素社会実現に向けて将来目指すべき姿や目標として官民が共有すべき方向性・ビジョンであるとともに、その実現に向けた2030年までの行動計画という位置づけで制定されている。この水素基本戦略ではさらに、水素製造時のCO₂削減対策として、2040年頃に『水素製造にCCS^{注1)}を組み合わせ、または再生可能エネルギー由来水素を活用し、トータルでのCO₂フリー水素供給システムを確立する。』と方向づけられている。

また国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (以下、NEDOという) では、「水素利用等先端研究開発事業 (平成26年度～平成29年度) 低コスト水

素製造システムの研究開発」において、風力発電などの再生可能エネルギー (以下、再エネという) 電力からアルカリ水電解方式で水素製造を行う開発が進められている。

いっぽう、水素を燃料とし、モビリティ領域におけるゼロエミッション車 (Zero Emission Vehicle) として燃料電池自動車 (Fuel Cell Vehicle, 以下FCVという) が注目を集めていることを背景に、FCV向け水素ステーションの整備・ネットワーク構築が進みつつある。水素ステーションの水素源としては、大規模天然ガス改質や製油所副生水素を輸送・供給するオフサイト供給のほか、天然ガスやLPG (Liquefied Petroleum Gas, 液化石油ガス) を原料として現地で製造するオンサイト水素供給が採用されている。

我が国では水素供給ネットワークの構築が優先されているが、その水素は化石燃料由来であるため、現状では製造過程でCO₂を排出している。そのため、CO₂排出量を大幅に削減できる再エネ由来水素の利用に対する社会的要請は今後ますます高まると考えられる。

水素ステーションに供給される水素は4N (99.99%) 以上の高純度水素が要求される。また、廃液の排出や腐食性などの問題が少ないことなど、市中での使用・取り

脚注1) 二酸化炭素回収・貯留 (Carbon dioxide Capture Storage) 技術をいう。

* 技術開発本部 機械研究所

扱いが容易であることが求められる。そのため、本用途での再エネ由来水素製造方法としては、すでに商品化済みの、高純度水素が得られる固体高分子型の水電解式水素発生装置を用いる方式が有利であると考えられる。いっぽうで、水素ステーションで採用されるためには、水素製造コストの低減や、水素製造効率の向上などが課題となっている。

そこで当社は、(株)神鋼環境ソリューションおよび(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンスとのグループ連携のもと、再エネ由来水素ステーション関連技術の開発および実証試験（以下、本開発という）を共同で実施した。本稿ではその概要を報告する。

1. 再エネ由来水素ステーション実証設備の構成

本開発では、再エネ由来水電解水素を水素ステーションに供給することを目的とした。そこで、標準的規模の水素ステーション（定格300 Nm³/h）に隣接して処理能力20 Nm³/hの水電解式水素発生装置および水素貯蔵設備（図1）を設置する計画とした。これは、現状のコストでは300 Nm³/hの水電解式水素発生装置は水素ステーションで受け入れられる価格にはならないこと、また、MW級の大規模な再エネ電力を得ることも容易ではないためである。20 Nm³/hの処理能力は300 Nm³/hの定格の6%程度であり、CO₂削減効果は部分的である。しかしながら、需要増に応じて大規模なものに差し替えることもできる。

本開発で使用する実証設備は水素ステーションに適用される法規に準拠する設計とした。設備は、当社高砂製

作所内に自社装置検証用に設置した水素ステーションに併設した。実証設備のレイアウトおよび設置状況を図2に示す。以下に主要構成装置の概要を述べる。

(1) 水電解式水素発生装置

(株)神鋼環境ソリューション製20 Nm³/hの水電解式水素製造装置³⁾を用いた（図3）。本装置は電流密度を従来機比1.4倍に向上させた開発品であり、イニシャルコスト低減とダウンサイジングを目指して設計されたものである。また、水素ステーションに設置することを前提に屋外設置が可能なパッケージ型とした。

(2) 水素貯蔵装置

変動電源である再エネ由来電力を用いて水素を製造した場合、水素流量は電力に応じて変動する。また水素ステーションでの水素需要は、FCVへの充填需要に応じた非定常な状況になる。そのため、需要が少ないときに備えて、製造した水素を一時貯蔵することが必要となる。そこで本開発では、中間圧縮機および中間蓄圧器を備え、水素を圧縮ガスとして貯蔵する方式を採用した。

水素貯蔵量は中間蓄圧器の圧力および容量の設定によるため、水素製造能力および水素ステーション側の需要に応じて設計を行う必要がある。本開発での貯蔵量は、2台程度のFCVへ水素供給可能で、水電解式水素発生装置を4時間程度稼働可能な水素貯蔵量として90 Nm³程度と設定した。

中間蓄圧器の圧力は、オフサイト水素ステーションにおいて水素カードルからの荷卸し用として採用されている蓄圧器と同等の常用圧力45 MPaに設定した。また中間蓄圧器の本数は、弁などのトラブルに対応可能なよう

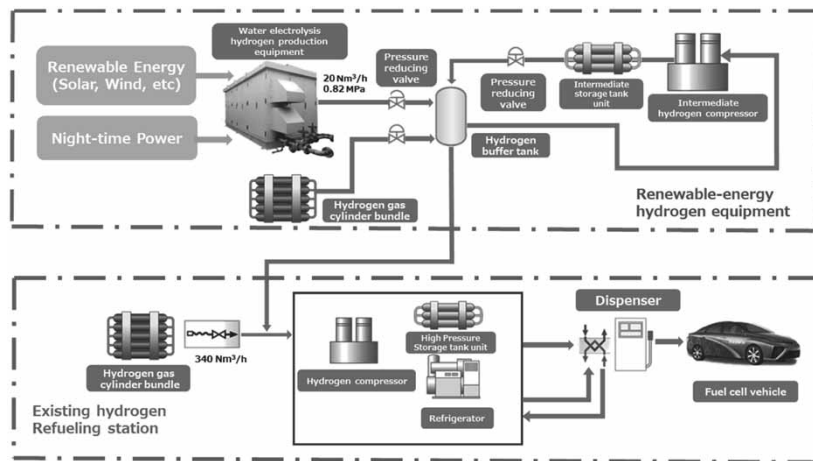


図1 再エネ由来水素ステーションの概念図

Fig.1 Conceptual diagram of hydrogen refueling station using renewable energy

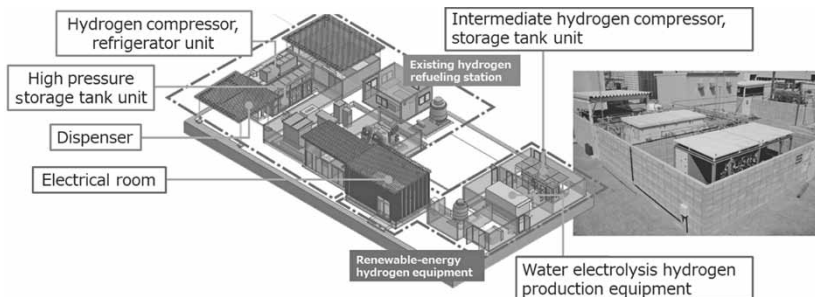


図2 再エネ由来水素ステーション実証設備

Fig.2 Demonstration facility of hydrogen refueling station using renewable energy

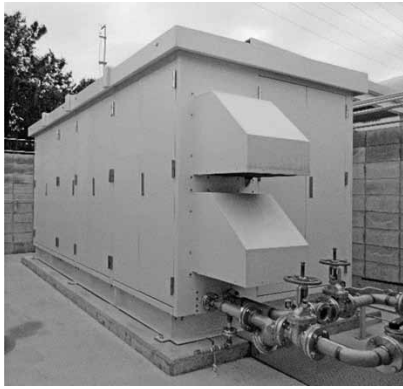


図3 水電解式水素製造装置
Fig.3 Water-electrolysis hydrogen generator

に2本に設定した。以上の要件を満たす蓄圧器容量を検討し、150 Lの蓄圧器容量を採用した。

また、水素ステーションへの水素供給の圧力変動を抑えるため、低圧水素バッファタンクを設けた。これに中間圧縮機吸込配管をはじめ、中間蓄圧器出口配管や水電解式水素発生装置出口配管、および水素ステーションへの水素供給配管を接続した。これは、水素製造・貯蔵・供給それぞれの運転パターンに最小の機器構成で対応することを目指した構成である。

2. 実証運転

2.1 水電解式水素発生装置の検証

これまでの水電解式水素発生装置の用途は産業用水素供給が主であり、安定電源を用いた水素製造が中心であった。いっぽう再エネ由来水素ステーションは、一般的に不安定電源とされる再エネ電力を利用して水素を製造する。そこで本開発では、発電電力が再エネ由来電源のなかでもとくに急峻（きゅうしゅん）に変動する太陽光発電電源に対して水電解式水素発生装置の追従性および耐久性を検証するため、太陽光模擬電源を用いた水素製造試験を行った。

太陽光発電は季節や天候によって発電量が異なる。そこで本開発では、季節としては「夏季」、「中間期」、「冬季」を、また天候は「晴天」、「曇天」、「雨天」を設定し、各季節・天候での日射データに基づく発電電力量を前提とした水電解水素発生装置の運転を実施した（積算運転時間：780時間）。また日射データとしては、NEDOが公開している日射量データベース閲覧システム⁴⁾を参考に、つくば市の2011年6月～2012年12月のなかの標準的と考えられる日射データを設定した。

代表的な例として、夏季の曇天時を想定した日射パターンでの発電電力量および水素製造量の経時変化を図4に示す。負荷変動が大きく、水電解式水素発生装置としては厳しい条件であるが、電力変動に追従した水素製造が可能であることを確認した。また、実証期間中も特段の不具合が生じることなく運転を完了した。効率に影響を及ぼす電解セル電圧の変化率は、実証期間の前後で1%以下であり、耐久性の観点からは十分に許容できる値である。また水素純度についてもISOで規定されるFCV用水素燃料中の許容不純物濃度を下回っており、

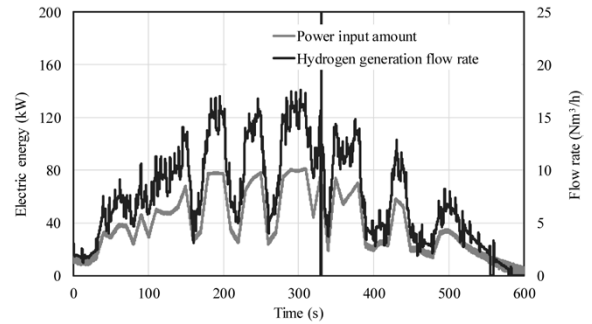


図4 夏季の曇天時パターンでの電力量と水素製造量の経時変化
Fig.4 Changes in electric energy and amount of hydrogen production over time (by pattern of cloudy weather in summer)

FCVに供給可能であることを確認した。

以上より、開発した水電解式水素発生装置は変動電源に対して問題ないことを確認できた。

2.2 水素製造・FCV水素充填実証運転

本実証設備は実運用を想定して以下の3工程を設定した。

- (1) 水素製造工程：水電解式水素発生装置で水素を製造する工程
- (2) 水素貯蔵工程：製造した水素を中間圧縮機によって中間蓄圧器に貯蔵する工程
- (3) 水素供給工程：FCVへの水素充填と連動して、中間蓄圧器から水素を払い出し、水素ステーション側へ供給する工程

水素供給工程では、水電解水素と中間蓄圧器からの供給水素が低圧水素バッファタンクを経由し、圧力を安定させて水素ステーションへ供給されるように制御設計した。

水素ステーションと連携した再エネ由来水素ステーションとしての動作を確認するため、水素製造・FCV水素充填実証運転を実施した。図5に試験結果を示す。なお、図5ではFCVへの水素充填開始時刻を0としている。

充填開始前は水電解水素を中間蓄圧器へ導入しているため、中間蓄圧器の圧力が上昇している(図5の(1)部)。充填開始後、FCVへはまず高圧蓄圧器から水素が供給されるため、高圧蓄圧器の圧力が低下している(図5の(2)部)。つぎに水素ステーション側の圧縮機へ起動指令が出力され、高圧蓄圧器へ水素が導入される。同時に水素供給工程が開始され、その結果中間蓄圧器の圧力が低下している(図5の(3)部)。219秒で水素充填は完了しているが、高圧蓄圧器が初期の圧力に復圧するまで圧縮機は稼働を続ける。このため、連動して水素供給工程が継続される(図5の(4)部)。復圧完了と同時に水素供給工程は終了し、水素蓄圧工程が再開される(図5の(5)部)。

本実証によって以下のことが確認できた。

- ・FCVに2.9 kgの水素を充填し、その間ほぼ同量の水電解水素を本実証設備から供給できている。
- ・運転中、低圧水素バッファタンク圧力は設定した圧力範囲内で制御できている。
- ・一連の工程の間も水電解式水素発生装置は安定して水素製造を行っている。

以上より、水素ステーションとの連携運転を実証した。

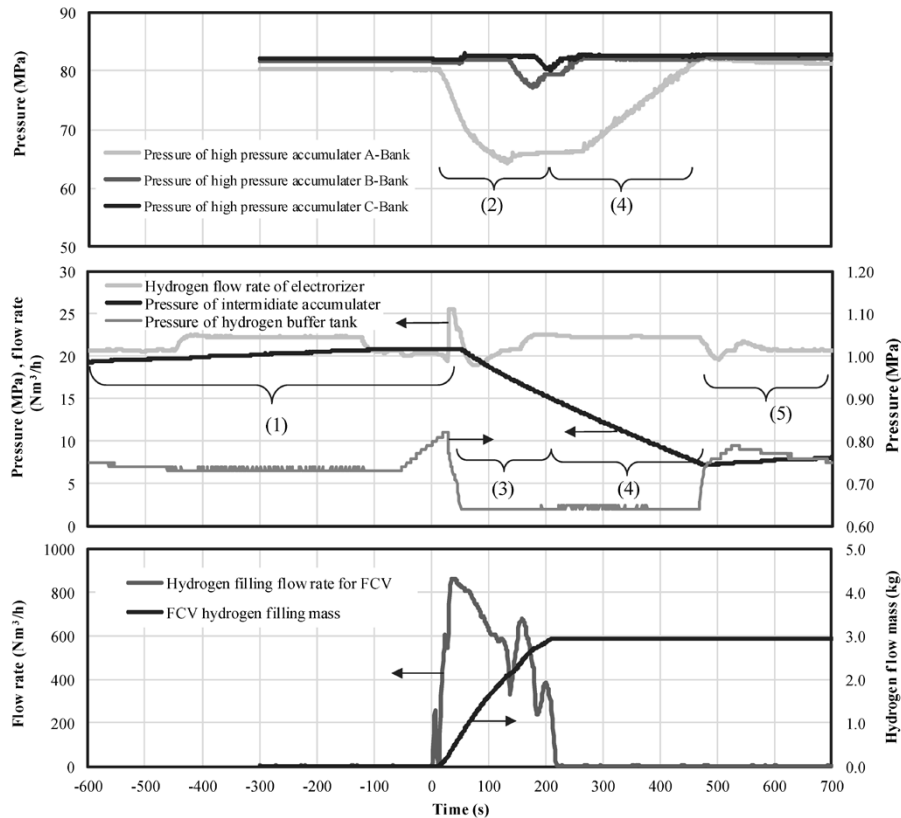


図5 水素製造・FCV水素充填実証運転
Fig.5 Demonstrated operation of hydrogen production / hydrogen refueling to FCV

むすび=再エネ由来水素ステーションの一形態として、 $20 \text{ Nm}^3/\text{h}$ の能力を有する水電解式水素発生装置から製造した水素を水素ステーションに供給する実証設備を設計・製作した。この実証設備を用い、変動電源からの水素製造・貯蔵、水素ステーションへの供給、およびFCVへの充填を実証した。

本実証では、既設の水素ステーションへの再エネ由来水素製造・貯留設備の併設、すなわちオンサイト水素製造を前提とした。しかしながらこれに限らず、再エネ電力や余剰電力の活用によって水素を製造し、その水素の供給先を輸送網のトレーラや水素カードルなどにするこことによってオフサイト水素ステーションの供給網へ再エネ由来水素を導入する形態も可能と考えられる。

いっぽうで再エネ由来水素を普及させるためには、水電解式水素発生装置を中心とした諸設備のコストダウンや効率向上が必要である。また、 CO_2 排出量の少ない水素の定義および認証制度が必要と考える。

今後も最適化・コストダウン検討を継続し、水素エネルギー社会の未来に貢献していく所存である。

なおこの実証は、環境省の平成28~29年度 CO_2 排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業である「中規模(1.5 kg程度)の高圧水素を製造する再エネ由来水素ステーション関連技術の開発・実証」の委託および補助を受けて実施した。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁. エネルギー基本計画. 2018. https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf. (参照 2019-12-05).
- 2) 内閣官房 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議. 水素基

本戦略. 2017. https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy.pdf. (参照 2019-12-05).

- 3) 石井 豊ほか. 神鋼環境ソリューション技報. 2018, Vol.15, No.1, p.2-9.
- 4) NEDO. 日射量データベース閲覧システム. <http://app0.infoc.nedo.go.jp/>. (参照 2019-12-05).



藤澤彰利

技術開発本部 機械研究所



木下 繁

技術開発本部 機械研究所



三浦真一

機械事業部門 圧縮機事業部
回転機本部 回転機技術部



中尾末貴

(株)神鋼環境ソリューション
新規事業推進部



鈴木文昭

(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンス
プラント事業部 エンジニアリング部



山下和宏

(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンス
プラント事業部 エンジニアリング部

(技術資料)

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*・鈴木文昭・福谷啓太・高島和郎・勝山 拓

Design Technologies for Hydrogen Refueling Station Using Hydrogen Filling Simulation

Kazuhiro YAMASHITA・Fumiaki SUZUKI・Keita FUKUTANI・Kazuo TAKAHATA・Taku KATSUYAMA

要旨

水素ステーションビジネスにおいては、今後の燃料電池自動車（FCV）の普及拡大に合わせて用途に合った充填能力と設備投資額のバランスを取った設備仕様の設計が望まれている。㈱神鋼エンジニアリング&メンテナンスプラント事業部が保有する水素充填非定常シミュレーション技術を活用することによって、充填設備の主要機器である圧縮機の能力と蓄圧器の容量の組み合わせを用途に合わせて最適化し、水素ステーションの建設コストを削減できる。本稿では、一般的なFCV向け水素ステーション、設備建設コストの削減をねらった廉価版水素ステーション、およびFCバス向け水素ステーションの3つのケースに関する水素充填シミュレーション検討事例を紹介する。シミュレーション検討の結果、それぞれの用途の水素ステーションにおける充填設備の基本仕様および充填能力を把握できる有用なデータが得られた。

Abstract

In the hydrogen refueling station business, it is desired to design equipment specifications balancing the filling capacity and capital investment in accordance with applications, in line with the future dissemination and expansion of fuel cell vehicles (FCVs). Shinko Engineering & Maintenance Co., Ltd. has developed a technology for dynamically simulating hydrogen filling. The utilization of this technology allows optimizing the capacity combination of the compressor and accumulator, the major apparatuses of filling equipment, in accordance with the application, and thus reduces the construction cost of a hydrogen refueling station. This paper introduces simulation studies done on three cases of hydrogen filling; namely, a general hydrogen refueling station for FCV, a low-cost hydrogen refueling station aimed at reducing equipment construction costs, and a hydrogen refueling station for FC buses. These studies have led to data that is useful for understanding the basic specifications and the filling capacity of the filling equipment at hydrogen stations for each application.

キーワード

水素ステーション、水素充填設備、非定常シミュレーション

まえがき＝㈱神鋼エンジニアリング&メンテナンス（以下、神鋼EN&Mという）プラント事業部は、プラント設備の基本設計・詳細設計・製作・調達・建設・試運転・メンテナンスの総合エンジニアリングを提供している。化学およびエネルギープラントエンジニアリングを基本に、石油化学・一般化学、樹脂・合成ゴム、ファインケミカル、空気分離・ガス精製、LNG関連プラントなどの幅広い分野で実績を有している。とくに、水素ステーション分野においては、2012年度に水素供給・利用技術研究組合（HySUT）の商用モデルステーションの計画段階において、当社が保有する水素充填（じゅうてん）非定常シミュレーション技術を活用いただいたことが契機となり、これまでに11箇所の水素ステーションの設計施工実績を有している。

水素ステーションは、燃料電池車（Fuel Cell Vehicle、以下FCVという）に対して、その燃料となる水素を供給する燃料供給設備であり、2019年9月末時点で109箇所が開所している。今後のさらなる水素ステーションの整備拡大に向けて設備仕様の見直しや整備費の削減が急

がれる。また一般的なFCV以外にも、FCバスやFCフォークリフトに対応した水素ステーションや、再生可能エネルギーを利用した水素ステーションの整備促進が重要視されている。

本稿では、一般的なFCV向け水素ステーションを含む3つのタイプの水素ステーションの充填設備仕様、および車両への水素充填能力に関する水素充填シミュレーション検討事例を紹介する。

1. 水素ステーション

1.1 水素ステーションの設置計画

2019年3月、産官学の有識者から成る水素・燃料電池戦略協議会により『水素・燃料電池戦略ロードマップ』¹⁾が策定された。本ロードマップでは水素社会実現に向けた方針が示されている。その中では、2018～2021年度にかけては四大都市圏を起点として主要都市および交通の要衝を重点に合計80箇所の水素ステーションを整備することが示されている。また、2022～2025年度は2021年度における整備状況などを踏まえて整備地点

* ㈱神鋼エンジニアリング&メンテナンス プラント事業部 エンジニアリング部

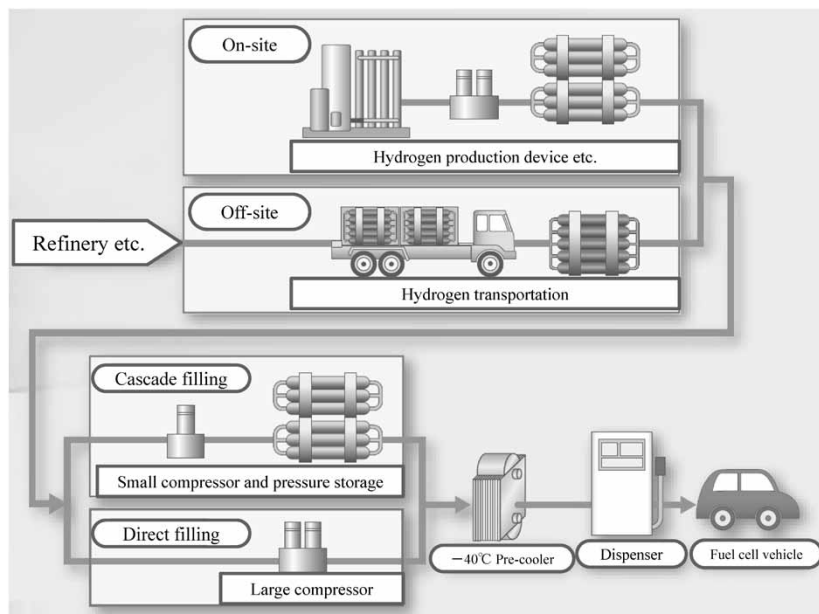


図1 水素ステーションの構成
Fig.1 Configuration of hydrogen refueling station

を検討しつつさらに水素ステーションの整備を進め、2025年度までに320箇所とすることを目指すとしている。また、既設の移動式水素ステーションを水素ステーション未整備地域で活用することや、省スペース・低コストで短工期が期待できるパッケージ型水素ステーションを採用し、効率的に水素ステーションを整備していくことなどがアクションプランに織り込まれている。

1.2 水素ステーションの構成

水素ステーションには、オンサイト型とオフサイト型の2種類が存在する。オンサイト型水素ステーションは敷地内に水素製造装置を有し、天然ガス・液化石油ガスを改質・精製するか、あるいは水を電気分解することにより自前で水素を作り出すことができる水素ステーションである。いっぽう、オフサイト型水素ステーションは、外部の水素製造基地などから数～数十MPaの高圧水素ガスあるいは液体水素を輸送し、それを受け入れる形式の水素ステーションである(図1)。自前で製造した水素あるいは外部から受け入れた水素は、FCVへの水素充填に備えて圧縮機により昇圧され、蓄圧器と称される水素タンクに高圧の状態での貯め置かれる。FCVへの水素充填は、圧縮機の能力と蓄圧器の容量の組み合わせに応じて以下の3つの方式により行われる。

- ①蓄圧器とFCVの燃料タンクとの圧力差を利用した差圧充填方式(Differential Pressure Filling)
- ②圧縮機と蓄圧器を併用しながら充填する圧縮機併用充填方式(Cascade Filling)
- ③圧縮機単独で高圧の水素ガスを充填する直接充填方式(Direct Filling)

神鋼EN&Mプラント事業部では、自社保有する水素充填シミュレーション技術を活用することにより、水素ステーションの充填能力の把握に加えて、主要機器である圧縮機の能力と蓄圧器の容量との組み合わせの最適化検討が可能である。

1.3 水素ステーションの充填技術基準

水素ステーションはFCVへの燃料水素供給設備である。このため、燃料水素1回充填することによる走行単価はガソリンを燃料とするハイブリッド車と同等程度であることが望まれる。日本国内におけるFCV向け定置式水素ステーションの多くは、1時間のうちにFCV5～6台に対して水素充填可能である。さらに、FCV1台に対して5kgの水素を3分程度で充填可能な設備として整備されてきた。設備は高圧ガス保安法の規制を受けるため、常用圧力82MPaを上限として設計される。また、高圧ガス保安法が引用する「圧縮水素充填技術基準(圧縮水素スタンド関係)JPEC-S 0003」(一般財団法人石油エネルギー技術センター)の規定などを順守した設備設計が求められる。本基準は、様々な条件での充填プロセスの検討および充填試験の結果に基づき、FCVへの水素充填に関する取り決めを記載したものである。水素ステーションで水素充填を受けるFCVの充填圧力、供給燃料温度、およびFCVが搭載する燃料タンクの容量の3つの項目の組み合わせごとに、外気温度に応じたFCVへの水素充填スピード(目標昇圧率)や充填終了圧力などが規定されている。燃料水素をマイナス数十℃まで予備冷却したうえでFCVへ充填する、いわゆるプレクール機能を有する水素ステーションについても、供給燃料温度を-40℃区分、-30℃区分、-20℃区分の3つに分類している。さらに、温度区分ごとに目標昇圧率や充填終了圧力などを規定している。日本国内においては-40℃区分での設備設計が基本とされており、水素充填時のFCV燃料タンクの温度上昇がマイルドであるため燃料水素の急速充填が可能となっている。

2. 水素充填シミュレーション

水素ステーションにおけるFCV充填性能は、圧縮機と蓄圧器の組み合わせによってほぼ決まってしまう。このため、所定の時間内に所定の量をFCVに充填できる

ことをシミュレーションを用いて事前に確認しておく必要がある。また、充填時の圧力、温度、および流量が、JPEC-S 0003で規定される圧力範囲および温度範囲(例えば-40℃区分の場合、-33℃~-40℃)にあることのほか、上限流量(3.6 kg/min.)を超えないことを把握しておくことが重要である。さらに、水素充填時にFCVの燃料タンクが断熱圧縮により昇温するため、タンク温度が設計温度を超えないことを把握しておくことも重要である。

2.1 シミュレータおよび高圧水素物性データ

シミュレータはSchneider Electric社製の汎用(はんよう)非定常シミュレータDYNASIM™を用いた。高圧水素物性データはシミュレータ保有の物性データでは誤差が大きい。このためシミュレータにおける水素物性データの使用にあたっては、NIST(National Institute of Standards and Technology,アメリカ国立標準技術研究所)およびAIST(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology,国立研究開発法人産業技術総合研究所)のデータを補正する自社独自の物性式を組み込み、誤差数%以内の精度で表現できるように工夫した。

2.2 水素充填シミュレーションモデル

シミュレーションモデルには機器、配管、計装品などシミュレーションに影響を及ぼす全ての設備を組み込み、各部の圧力損失や設備の内容積、熱容量、放熱、入熱を考慮した。なお、実際の水素ステーションでの充填試験結果をシミュレーションモデルにて再現した結果からは、設備仕様を検討するのに十分な精度を有していることは検証済みである^{2), 3)}。

2.3 水素充填シミュレーション活用事例

2.3.1 FCV向け水素ステーションの仕様検討例

本項では、日本国内で一般的に求められると思われる定置式水素ステーションの要求仕様を満たすFCV向け水素ステーションの設備仕様に関する検討事例を紹介する。シミュレーション条件を表1に示す。

蓄圧器を300 L×3本(3バンク)構成とすることに

より、差圧充填方式によって充填率90%以上・充填時間160秒程度を達成できる結果が得られた(図2)。差圧充填方式は、圧縮機が予期せぬトラブルなどで運転困難な状態に陥った場合でも、圧縮機を使用しないで蓄圧器の水素残圧のみを用いてFCVへ水素を充填できる特長を持つ。

そのいっぽうで、充填終盤に蓄圧器とFCV燃料タンクが均圧化して所定の充填流量が確保されず、充填時間が長時間化したり目標とする充填率・充填量に到達しない場合がある。そのため実設備は、充填終盤における充填時間の短縮や所定の充填率・充填量を確保することを目的に、圧縮機併用充填方式にも対応可能な設備として設計しておくのが賢明である。

2.3.2 廉価版水素ステーションの仕様検討例

さらなる水素ステーションの整備拡大にあたっては建設費のコストダウンが急務であり、各要素技術についてコスト削減目標の達成が求められている。本項では、一般的なFCV向け水素ステーションの要求仕様を一部緩和して充填設備の低コスト化を目指した廉価版水素ステーションの設備仕様の検討事例を紹介する。このときのシミュレーション条件を表2に示す。

廉価版水素ステーションは、充填時間3分程度という急速充填の制約が必達条件ではないと考えられる地域へ

表1 FCV向け差圧充填シミュレーション条件

Table 1 Condition of differential pressure filling simulation for FCV

Initial condition / Boundary condition	Simulation specification
Fueling protocol	JPEC-S 0003
Dispenser pressure class	70 MPa
Pre-cool temperature category	-40℃
Capacity for average hydrogen supply	300 Nm ³ /h
Filling method	Differential pressure filling
Ambient temperature	20℃
Target average pressure ramp rate	28.5 MPa/min.
Volume of FCV tank	122.4 L
Initial pressure of FCV tank	10 MPa
Initial temperature of FCV tank	20℃
Final state of charge or fueling amount	Final state of charge : 90% (more)
Communication / Non-communication	Communication

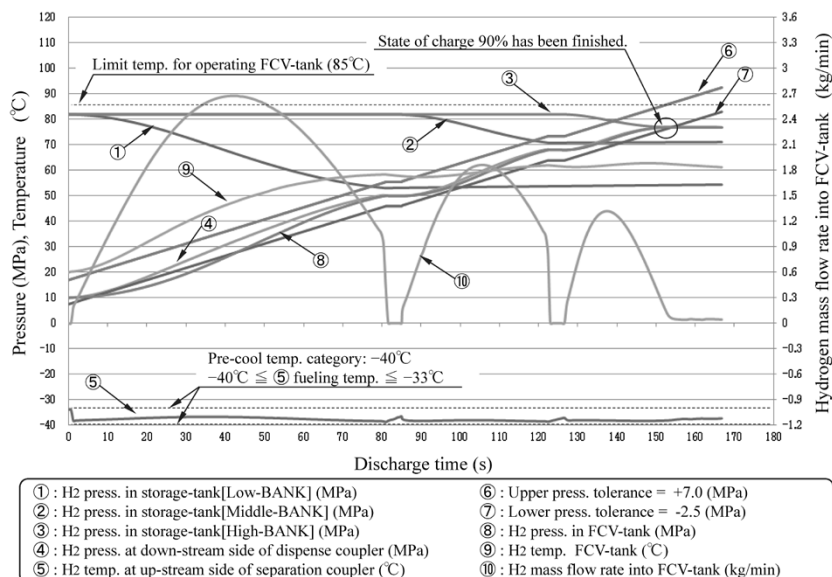


図2 FCV向け差圧充填シミュレーション結果(圧力、温度、流速の傾向)

Fig.2 Results of differential pressure filling simulation for FCV (trend chart of pressure, temperature, and flow rate)

表 2 FCV 向け併用充填シミュレーション条件
Table 2 Condition of cascade filling simulation for FCV

Initial condition / Boundary condition	Simulation specification
Fueling protocol	JPEC-S 0003
Pressure class	70 MPa
Pre-cool temperature category	-20°C
Capacity for average hydrogen supply	300 Nm ³ /h
Filling method	Cascade filling
Ambient temperature	20°C
Target average pressure ramp rate	JPEC-S 0003
Volume of FCV tank	122.4 L
Initial pressure of FCV tank	5 MPa
Initial temperature of FCV tank	20°C
Final state of charge or fueling amount	Final state of charge : 90% (more)
Communication / Non-communication	Communication

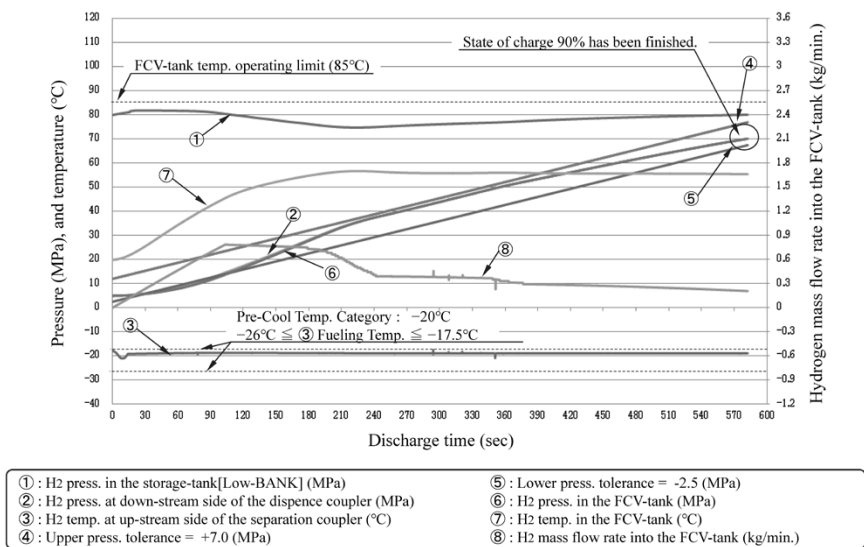


図 3 FCV 向け併用充填シミュレーション結果 (圧力、温度、流速の傾向)
Fig.3 Results of cascade filling simulation for FCV (trend chart of pressure, temperature, and flow rate)

の整備を見据えたものである。そこで検討の前提として、FCV1台に対する充填時間は10分程度が許容されるものと考えた。また、プレクール設備の設計条件の緩和および低コスト化を図るため、FCVの供給燃料温度区分は-20°Cを採用した。水素ステーションの利便性が極端に低下してしまうことを避けるべく、FCVへの水素充填は圧縮機併用充填方式により行うこととした。また、充填1回あたりの燃料水素の充填量は一般的な水素ステーションにおける充填量(5kg)と同等程度を確保できる条件として設定した。

圧縮機を340 Nm³/h × 82 MPa、蓄圧器を300 L × 1本構成として組み合わせることにより、圧縮機併用充填方式にて充填率90%以上・充填時間580秒程度を達成できる結果が得られた(図3)。廉価版水素ステーションは、前項の一般的なFCV向け水素ステーションと比較して蓄圧器本体(300 L × 2本分)および付属する配管・弁類などを不要とすることができ、建設・メンテナンス費を低く抑えられる。いっぽうで、供給燃料温度-20°C区分で設計する水素ステーションは、-40°C区分や-30°C区分での設計と比較して充填開始時に設定される目

脚注) 車両と水素ステーション間で車載容器容量信号や燃料温度信号、充填終了指示信号などを赤外線によって通信することにより、より多くの水素を安全に充填することをいう。

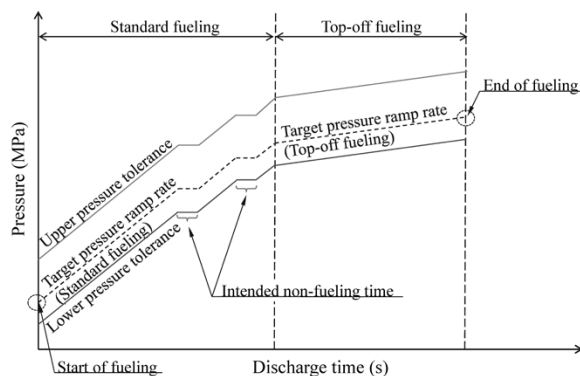


図 4 トップオフ充填の図解
Fig.4 Illustration of top-off fueling procedure

標昇圧率が低い。このため、夏場などの外気温度が高い場合は目標昇圧率がさらに低下し、充填時間が10分を超えて長時間化することになる。また、JPEC-S 0003が規定するトップオフ充填⁴⁾およびフォールバック充填⁴⁾へ移行したときにも、充填時間が長くなったり、あるいは充填が中断するといった問題が発生する。

トップオフ充填は、充填の途中で初期目標昇圧率よりも低い目標昇圧率を新たに設定し直して継続して実施される充填をいう(図4)。充填前のFCV燃料タンクの初期圧力が極めて低いなどの一定条件を満たし、かつ、車両通信充填^{注1)}を実行中の場合に、FCV燃料タンクの設

計温度の範囲内で充填量を増大させることができる。現実には、数百グラム程度の充填量の増大に対し充填時間が数分～十数分長くなってしまふ。

フォールバック充填とは、車両通信充填を実行中に供給燃料温度が上昇して充填開始時に設定された供給燃料温度区分を超えたとき、隣接する温度区分に応じて新たな充填目標圧力および新たな目標昇圧率を設定し直して継続して実施される充填をいう（図5）。つまり、車両通信充填を実行中であれば充填中1回に限りフォールバック充填へ移行でき、充填を継続させられる。しかし、供給燃料温度-20℃区分で車両通信充填を実行中に水素温度が上昇したときは、これより高温側の温度区分が存在しないためフォールバックによる充填継続措置が取れずに充填が中断してしまう。

本項で紹介した廉価版水素ステーションは、建設・メンテナンス費の低減に期待できる。しかしそのいっぽうで、日本国内において主流とされている供給燃料温度-40℃区分で設計された水素ステーションと比較すると運用面での制約が多く、利便性も劣る。このため、あらかじめFCV普及拡大に合わせた拡張性を考慮して設備設計しておくことが望ましい。

2.3.3 FCバス向け水素ステーションの仕様検討例

モビリティ分野における水素利活用は、FCVと水素

ステーションの普及を中心に展開されてきた。日本国内においては、2017年からFCバスの運行が開始されており、今後はFCバスに対応した水素ステーションの整備拡大に向けた取り組みも加速していくと予想される。本項では、既存の水素ステーションに数多く採用された340 Nm³/h級の圧縮機を活用したFCバス向け水素ステーションの設備仕様に関する検討事例を紹介する。シミュレーション条件は表3に示すとおりである。

水素ステーションの基本仕様である水素供給能力は、FCVやFCバスなどに対する時間あたりの平均的な水素充填能力を意味しており、これは圧縮機的能力と直接的に関係している。いっぽう、ピーク時の水素充填能力は、水素ステーションがある限定された1時間内に発揮し得る水素充填能力のポテンシャルを指す。これは単に圧縮機的能力だけでなく、圧縮機と組み合わせる蓄圧器の容量やFCVへの水素充填方式とも関係している。本事例検討においては、水素充填方式は圧縮機併用充填方式を採用した。通常時およびピーク時の水素充填能力をチェックするため、FCバス3台に対して合計45 kgの水素を1時間で充填可能であることをシミュレーションにより確認し、圧縮機的能力と蓄圧器の容量との組み合わせを検討した。

水素充填シミュレーション結果を図6に示す。圧縮

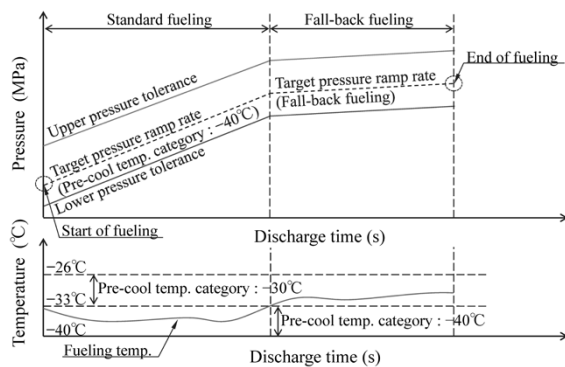


図5 フォールバック充填の図解
Fig.5 Illustration of fall-back fueling procedure

表3 FCバス向け併用充填シミュレーション条件
Table 3 Condition of cascade filling simulation for FCBus

Initial condition / Boundary condition	Simulation specification
Fueling protocol	JPEC-S 0003
Pressure class	70 MPa
Pre-cool temperature category	-40℃
Capacity for average hydrogen supply	300 Nm ³ /h
Filling method	Cascade filling
Ambient temperature	30℃
Target average pressure ramp rate	JPEC-S 0003
Volume of FCV tank	600.0 L
Initial pressure of FCV tank	10 MPa
Initial temperature of FCV tank	30℃
Final state of charge or fueling amount	Final fueling amount : 15 kg (more)
Communication / Non-communication	Communication
Max. capacity for hydrogen filling	500 Nm ³ /h

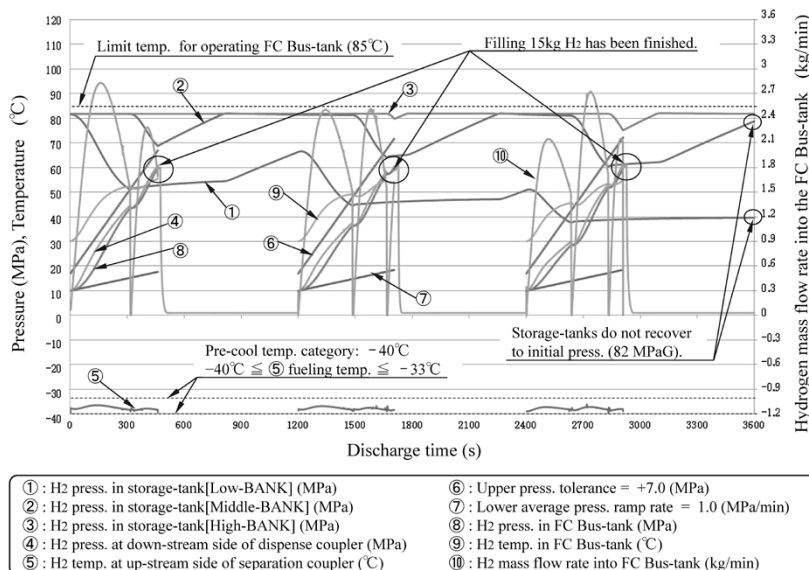


図6 FCバス向け圧縮機併用充填シミュレーション例（圧力、温度、流速の傾向）

Fig.6 Example of cascade filling simulation results for fuel cell bus in peak period (trend chart of pressure, temperature, and flow rate)

機を $340 \text{ Nm}^3/\text{h} \times 82 \text{ MPaG}$ 、蓄圧器を $300 \text{ L} \times 9$ 本（3バンク）構成として組み合わせることにより、圧縮機併用充填方式にてFCバス1台に対して水素充填量 15 kg ・充填時間10分以内を達成できた。さらに、ピーク時にはFCバス3台に対して水素充填量合計 45 kg ・充填時間1時間以内を達成できる結果が得られた。

この結果におけるピーク時対応の1時間経過時点に着目すると、蓄圧器の圧力が最初の圧力の状態まで回復していないことが分かる。この結果は、ピーク時対応の直後は水素ステーションが所定の充填性能を発揮できずにFCバスへの水素充填量が減少すること、あるいは充填時間が長時間化してしまうことを示唆している。実際の設備設計においては、FCバスの充填頻度や運用の考え方などについても十分検討のうえ配慮することが必要と考える。

本項で示したように、神鋼EN&Mプラント事業部が保有する水素充填非定常シミュレーション技術を活用することによって、水素ステーションにおける圧縮機と蓄圧器の組み合わせを用途に合わせて最適化可能である。さらに、FCバス向け水素ステーションにおけるピーク時の水素充填能力チェックも可能である。

むすび = 水素充填シミュレーションは、水素ステーションが所定の充填性能を有しているかどうかを確認するための手段として有用である。本稿で紹介した水素充填シミュレーション活用事例は一部汎用的なデータを使用しているものの、設備規模・能力を把握するのに役立つデータといえる。水素ステーションの基本計画段階において充填設備の基本仕様や充填能力を把握できることの意味は大きい。このため、これまでに他社から数十件を超える水素充填シミュレーションを受注している。今後も水素充填シミュレーションの活用を通して水素ステーション設備提案に貢献し、水素社会実現に向けた取り組みを継続していく。

参 考 文 献

- 1) 水素・燃料電池戦略協議会. 水素・燃料電池戦略ロードマップ. 平成31年3月12日改訂.
- 2) 三浦真一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2014, Vol.64, No.1, p.52-53.
- 3) 山下和宏ほか. 第20回燃料電池シンポジウム講演予稿集. p.113-116.
- 4) 高圧ガス保安協会. 圧縮水素充填技術基準の検討報告書. p.15.



山下和宏

(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンス
プラント事業部 エンジニアリング部



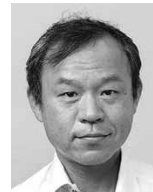
鈴木文昭

(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンス
プラント事業部 エンジニアリング部



福谷啓太

(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンス
プラント事業部 エンジニアリング部



高島和郎

(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンス
プラント事業部 プロジェクト部



勝山 拓

(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンス
プラント事業部 プロジェクト部

(解説)

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*・中尾末貴

Development Status of HHOG Aimed at Arrival of Hydrogen-Based Society

Yutaka ISHII・Sueki NAKAO

要旨

(株)神鋼環境ソリューションは将来の水素社会の到来を見据え、固体高分子電解質膜を用いた水電解式水素発生装置HHOG (High-purity Hydrogen and Oxygen Generator) の技術開発に取り組んでいる。近年は再生可能エネルギーの変動電力を用いた水素製造技術開発に関する実証事業に参画し、その成果や当社がこれまで蓄積してきた知見を活用してHHOGのさらなる改善、改良に取り組んでいる。その成果として、HHOGのシステム構成機器の仕様見直しにより、従来のHHOGと比べてイニシャルコストおよび装置の設置面積を低減することができた。これは水素発生量が60 Nm³/hの装置の場合では、それぞれ約30%および約20%に相当する。また、水素製造時の消費電力低減については、従来と比べて約10%低く抑えた電気分解モジュールの開発により、水素製造効率を向上できた。このほか、太陽光発電電力の急激な変動に追従してHHOGで水素製造可能であることも複数の実証試験を通じて確認でき、再エネ水素ステーション用途や複合エネルギー貯蔵システム向けの水電解装置として利用できることが実証された。

Abstract

In anticipation of the coming hydrogen-based society, Kobelco Eco-Solutions Co., Ltd. has advanced the technical development of a water electrolysis hydrogen generator, HHOGTM (High-purity Hydrogen and Oxygen Generator), using solid polymer electrolyte membrane (PEM). In recent years, the company has participated in a demonstration project for developing hydrogen production technology using fluctuating power from renewable energy and is working on the further improvement and refinement of HHOG based on the results and knowledge that have been accumulated so far. As a result of reviewing the specifications of HHOG system components, the initial cost and equipment installation area have been reduced by approximately 30% and 20%, respectively, compared with those of the conventional HHOG with a base output capacity of 60 Nm³/h. In addition, an electrolysis module has been developed whose power consumption during hydrogen production has been reduced by approximately 10% compared with that of the conventional model, thus improving the efficiency of hydrogen production. Furthermore, several demonstration tests have confirmed that HHOG can produce hydrogen following rapid fluctuations in photovoltaic power generation, revealing its applicability to renewable energy hydrogen refueling stations and to water electrolyzers for hybrid energy storage systems.

キーワード

水素発生装置、水電解、固体高分子電解質膜(PEM)、水素社会、再生可能エネルギー、変動電力、低炭素化、水素ステーション

ま え が き = 水素は、その利用時にCO₂発生を伴わないクリーンな二次エネルギーとして注目されるなか、水素社会の実現に向けて2017年12月に「水素基本戦略」¹⁾が、また2019年3月には「水素・燃料電池戦略ロードマップ」²⁾が策定された。それらの戦略やロードマップにおいては、水素利用の拡大、および太陽光や風力をはじめとする再生可能エネルギー（以下、再エネという）由来水素の利活用を推進するための具体的なアクションプランが示されている。

水素をエネルギーとして利活用する際には、石油や天然ガスなどの従来エネルギーと同等のコストを実現させること、すなわち水素製造コストの低減が求められる。このため、水素発生装置などのイニシャルコストの低減、および水素製造効率の向上のための技術開発が必要である。

(株)神鋼環境ソリューション（以下、当社という）はこれらの技術開発を重点開発項目として位置づけ、国の研究開発プロジェクトなどを活用しながら、当社製品の水電解式水素発生装置（High-purity Hydrogen and Oxygen Generator、以下HHOG^{注1)}という）の技術開発に取り組んでいる。

その成果として、HHOGのシステム構成や機器の仕様の見直しなどにより、従来のものと比べてイニシャルコストおよび装置の設置面積を低減することができた。これらの低減は、水素発生量60 Nm³/h装置の場合ではそれぞれ、約30%および約20%に相当する。

いっぽう、水素製造時の消費電力低減の開発も進めており、水素製造に関わる消費電力を従来と比べて約10%

脚注1) HHOGは(株)神鋼環境ソリューションの登録商標である。

* (株)神鋼環境ソリューション 新規事業推進部

低く抑えた電気分解モジュールを開発した。これにより、水素製造効率を向上させることができた。また、太陽光発電電力の急峻（きゅうしゅん）な変動に追従してHHOGで水素を製造可能であることも実証を通じて確認した。

本稿では、水素社会の到来を見据えたHHOGの技術開発状況について紹介する。

1. HHOGの概要

HHOGは、固体高分子電解質膜（Polymer Electrolyte Membrane, 以下PEMという）を用いた純水の電気分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。PEM形水電解の場合、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上、発生する水素には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、高压ガス保安法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、原料が純水であり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の納入実績は、国内と海外を合わせて180台以上（2019年8月現在）と豊富であり、PEMを用いた水電解式水素発生装置として国内トップシェアを有する。上述のようにHHOGはオンサイトでの水素製造が可能であることから、工業用途でボンベやカードルの代替として利用されているほか、太陽光発電や風力発電などの再エネ由来の変動電力を用いて水素を製造・利用する実証など、さまざまな分野に採用されている。

当社では、再エネ由来電力を用いてHHOGによって水素を製造し、その水素を利用した実証試験を行った。次章以降でその実験の概要と成果を報告する。

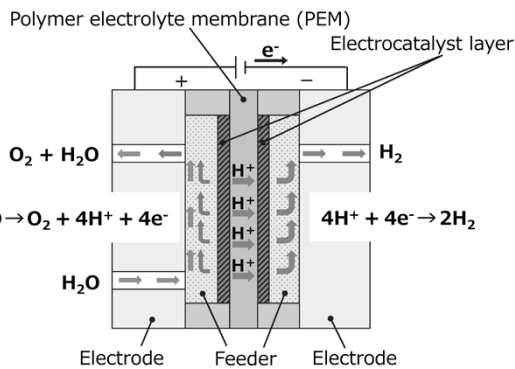


図1 純水の電気分解の原理
Fig.1 Principle of electrolysis of pure water

2. 環境省実証事業³⁾

2.1 実証事業の目的

「水素・燃料電池戦略ロードマップ」²⁾では、燃料電池自動車（Fuel Cell Vehicle, 以下FCVという）の加速的な普及や水素ステーションの自立化に向け、2019

年度以降から水素ステーションの整備地域拡大が示されている。水素利用拡大に向けFCVが重要な役割の一翼を担うと期待されており、2020年までに4万台程度、2025年までに20万台程度、2030年までに80万台程度普及させることが目標として掲げられている。

また、「水素基本戦略」¹⁾においては、2020年度までに主に四大都市圏以外の地域において、水素製造時も含めてトータルで低炭素である再エネ由来水素ステーションを100箇所程度、商用水素ステーションの整備と連携しながら整備することを目指すことが掲げられている。

水素ステーションにおいて低炭素化を実現させる方法の一つに、化石燃料由来の水素へ再エネ由来水素（以下、再エネ水素という）を一部混合させる運用方法が挙げられる。

再エネ水素を活用する水素ステーションシステムの設計・製作・運用などにおいては、技術課題を抽出し、解決しなければならない。このため当社は、(株)神戸製鋼所および(株)神鋼エンジニアリング&メンテナンスと共同で、環境省が進める実証事業^{注2)}に参画した。本実証事業では、水素ステーションにおいて再エネ水素をFCVの燃料用として利用し、CO₂排出量の削減に寄与するシステムを構築することを目的とした。

2.2 再エネ水素ステーション向けHHOGの設計、製作

本実証システムにおいて当社は、再エネ由来電力によって水素を製造・供給する水素発生装置を担当し、①水素発生装置のインシヤルコスト低減、②ダウンサイジングの実現を踏まえた実証用HHOGの設計・製作、および③実証運転における技術的な検証を行った。HHOGの設計にあたっては、装置のインシヤルコスト低減やダウンサイジングを図るため、フローの簡略化や省スペース化を検討し、装置設計に反映した。実証事業用HHOGの外観を図2に、仕様を表1に示す。本節では、今回の実証向けに検討したHHOGの主な仕様について述べる。

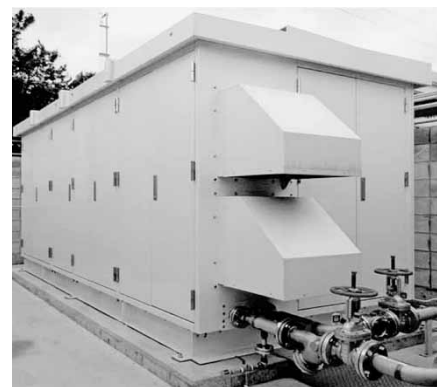


図2 環境省実証事業用HHOGの外観
Fig.2 General view of HHOG for demonstration project of Ministry of the Environment (MoE)

脚注2) 事業名称：CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業「中規模（1.5 kg/h程度）の高圧水素を製造する再エネ由来水素ステーション関連技術の開発・実証

表1 環境省実証事業用HHOGの仕様

Table 1 Specification of HHOG for demonstration project of MoE

Item	Specification	
Output capacity	20 Nm ³ /h	
Purity of H ₂	≥99.999%	
Feed pressure	Approx. 0.82 MPa(Gauge)	
Dew point of H ₂	≤70℃	
Dimensions	Length	Approx. 4,600 mm
	Width	Approx. 2,000 mm
	Height	Approx. 2,200 mm
Others	Outdoor specification (Measures against wind, rain and salt damage)	

2.2.1 屋外仕様

水素ステーションを建設する際には、建屋面積の最小化による建設費の抑制が求められることから、設備は可能な限り屋外に設置することが望ましい。このため、今回の実証事業用HHOGは、従来の屋内仕様ものを屋外設置が可能になるよう筐体（きょうたい）構造の仕様を変更した。また、実証場所が海に面した地域であったことから、風雨対策のみならず塩害対策も講じた仕様とした。

2.2.2 安全対策

水素は可燃性ガスであり、空気中における爆発濃度の範囲が4~75%と非常に広い。このため、水素発生装置には安全面に十分配慮した設計が求められる。水素発生装置内に水素ガスを保有するというリスクに対しては、HHOG内の水素保有量の最小化をはじめとして、水素漏洩（ろうえい）対策を反映した装置設計や、装置出荷前の製品検査による水素漏洩リスク低減、および水素漏洩時のインターロック対策を講じている。また、今回のような筐体構造の場合、水素が万一筐体内で漏洩すると水素が滞留し、高濃度の水素雰囲気形成されるリスクが高まる。このため、筐体内を換気しながら筐体内部の水素濃度を常時監視することによって設備の安全性を確保できる仕様とした。

2.2.3 再エネ電力供給

水素の製造において太陽光発電や風力発電などの再エネ由来電力を活用する場合、さまざまな入力電力パターンが想定される。このため、今回の実証事業における電力供給設備は、①再エネ電力のみでの運転、②系統電力のみでの運転、および③再エネ電力と系統電力とを任意の比率で混合した運転が可能となるよう設計した。

HHOGでは直流電源によって電気分解を行うため、系統電源を用いる場合にはまずAC/DCパワーコンディショナで交流から直流に変換し、続いてHHOG用DC/DCコンバータを用いて水電解に適した電圧に変換して水素製造を行った。今回の実証事業に採用した電力供給回路を図3に示す。

以上の要素を反映した実証事業用HHOGを（株）神戸製鋼所高砂製作所に設置した。同製作所内にある既設の実証用水素ステーションにHHOGを連結後、同設備と連携した実証運転を開始した。

2.3 実証内容および結果

2.3.1 HHOGの適用性

再エネ水素ステーション実証事業設備全体の概略フローを図4に示す。今回の実証事業では、再エネを活用した水素ステーションとしてのシステム構築・運用の実用化を目指した。このため、既設の実証用水素ステーション

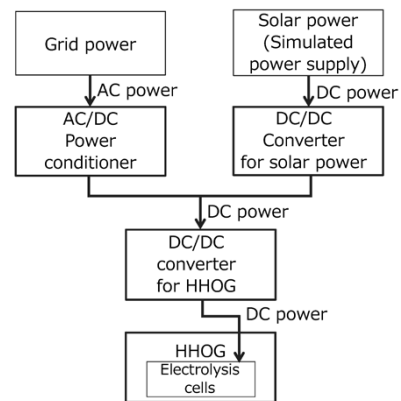


図3 環境省実証事業用HHOGへの電力供給回路
Fig.3 Power supply circuit to HHOG for demonstration project of MoE

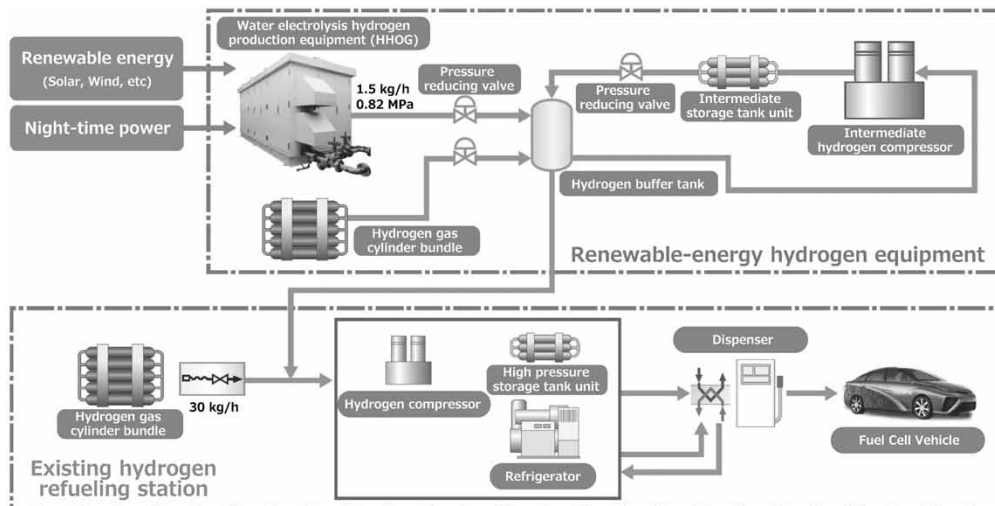


図4 再エネ水素ステーション実証設備の概略フロー
Fig.4 Outline flow of facilities for demonstration project of renewable energy hydrogen refueling station

ョン（水素供給能力300 Nm³/h）のユニットにHHOG（水素製造能力20 Nm³/h（1.5 kg/h程度））を併設し、従来使用されている化石燃料由来の水素と再エネ水素とを混合して水素ステーションで利用することを想定した実証を行った。

再エネ水素の混合比率は、水素製造能力ベースで6%程度となる。FCV黎明期においてはFCVへの水素充填頻度は少ないと想定される。本実証事業用設備は、3時間に1台程度の充填頻度であれば供給する水素全量を再エネ水素で賄うことが可能な構成となっているため、実用性の高いシステムであると考えられる。

つぎに、本実証事業設備で実施した運用方法の概要を述べる。HHOGで製造・供給された再エネ水素は、一時的に水素バッファタンクに貯留されたのち、中間水素圧縮機で昇圧され、中間蓄圧器へ充填貯蔵される。中間水素圧縮機は蓄圧器内の圧力が規定範囲内となるよう間欠的に稼働する。

HHOGと、中間水素圧縮機および周辺機器（以下、中間ユニットという）との連携性に関しては、中間水素圧縮機の起動・停止の影響を受けることなくHHOGの運転状態が安定し、定格性能を発揮できることを判断基準として定め、その検証・確認を行った。

中間ユニットとの連携運転時における、水電解用電源として安定電源（系統電源）を使用した場合と、変動電源（太陽光発電模擬電源）を使用した場合との水素発生量および水素発生圧力の経時変化をそれぞれ図5、図6

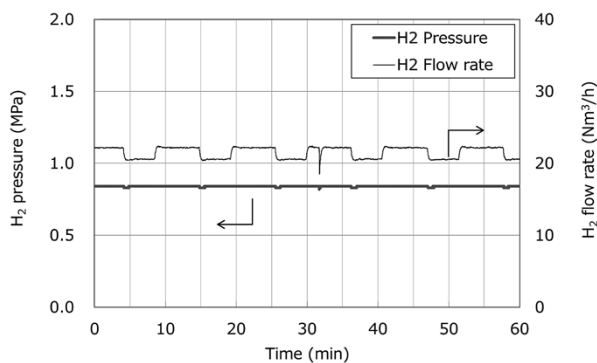


図5 水素発生流量と水素発生圧力の経時変化（安定電源の場合）
Fig.5 Trend of hydrogen flow rate and pressure of HHOG in case of stable power supply

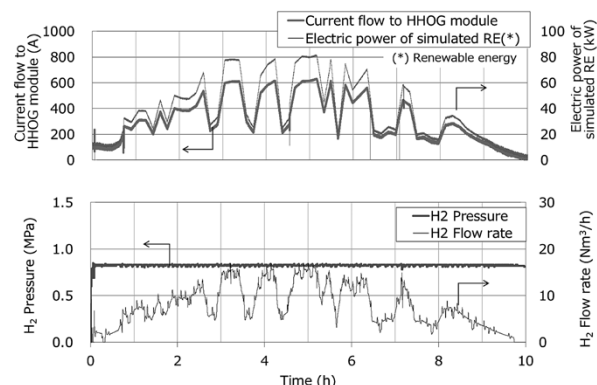


図6 太陽光模擬電源を用いた場合のHHOGの運転状態（夏季・曇天時を模した運転）
Fig.6 Operating state of HHOG using simulated power supply of solar power generation (cloudy weather in summer)

に示す。

太陽光発電利用を想定した運転では、夏季、中間季（春季と秋季）、および冬季のそれぞれについて、晴天時、曇天時、雨天時の各天候条件による実証運転を行った。図6は、各天候条件のなかでも電力変動の比較的大きな夏季の曇天時における運転データである。水素発生量がHHOGへ供給される電力変動に追従して変化する一方で、水素発生圧力はおおむね安定して制御されていることが確認された。

以上より、安定電源あるいは変動電源を使用する場合のいずれにおいても、HHOGの運転状態は中間水素圧縮機の起動や停止の影響を受けずに安定しており、中間ユニットとの連携性に問題のない結果が得られた。

2.3.2 設備の耐久性の検証

再エネ水素ステーションにおけるHHOGの耐久性は、HHOGの電気分解モジュールの状態変化に着目して評価した。状態変化の項目の一つに電解セル電圧が挙げられる。今回の実証期間中、HHOGを積算で約780時間運転しており、その間に400回程度の設備の起動・停止が行われた。実証期間中の電解セル電圧の変化率は1%以下であり、HHOGの耐久性の観点から十分に許容できる値であった。またHHOGからの発生水素ガスの純度も仕様を満足しており、異常は認められなかった。HHOGの各構成機器に関しても、本実証期間中に異常な消耗や損耗などは発生せず、従来のHHOGと同等の耐久性が期待できる結果が得られた。

2.3.3 イニシャルコストの低減

本実証を通じて、水素発生装置のイニシャルコスト低減に寄与するコストダウン項目をいくつか抽出した。このうち電気分解モジュールに関しては、電流密度を高めることによって電気分解モジュールを構成する電解セルの積層数（構成部品数）の低減、すなわちイニシャルコストの低減が可能となる。電気分解モジュールのコストダウン効果を検証するため、従来と比べて電流密度を高めた電解試験を当社内にて行った。具体的には、従来の水素発生量5 Nm³/hの電気分解モジュールを用い、電流密度を従来比1.4倍程度に向上させて約7 Nm³/hの水素製造が可能であることを確認した。以上より、電流密度の向上により電気分解モジュールの構成部品数を30%程度低減できるめどが得られた。

このほか、構成部材の仕様見直しにより部材コストの低減も可能であることが分かった。構成部品数低減と部材の仕様最適化の両面で、電気分解モジュールのコストを低減できた。

また並行して、装置フロー簡略化によるコストダウンについても検討を進めた。従来の場合、電気分解モジュールを構成する部材保護のため、電気分解モジュール内部の水素側圧力と酸素側圧力とおおむね均圧とし、両者間の微小な差圧を一定範囲に保つ必要があった。

その差圧保持のために酸素側への圧力制御が必要となるため、装置フローが複雑となって装置のイニシャルコストがアップする要因になっていた（図7）。今回の実証では微小な差圧保持の必要がない電気分解モジュール

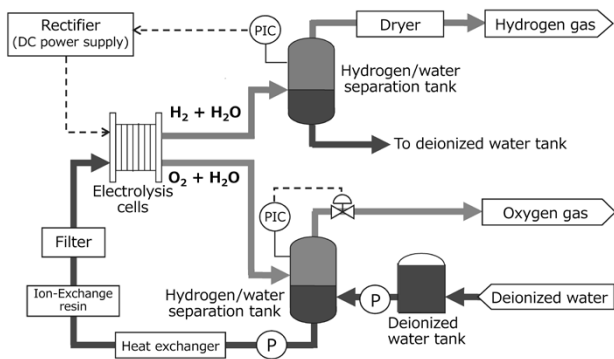


図7 HHOGの概略フロー（従来機）
Fig. 7 Outline flow of HHOG (conventional apparatus)

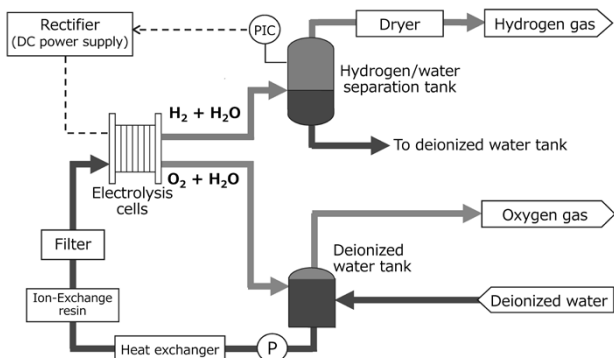


図8 HHOGの概略フロー（簡略化後）
Fig. 8 Outline flow of HHOG (simplified apparatus)

を採用し、微差圧保持の不要な条件による運転の検証を行った（図8）。その結果、水素側圧力をHHOGの標準仕様である水素ガス発生圧力0.85 MPa（高压ガス保安法に該当しない1 MPa未満の圧力）、酸素側圧力をほぼ大気圧とした差圧0.85 MPa程度での運転が可能であることを確認した。微小な差圧保持が不要となることから、従来の装置に備えていた酸素分離タンクや補給水ポンプなどの付属機器が不要となり、装置フローの簡略化を達成した。また、イオン交換樹脂容器や水素分離タンク、純水タンクなどの容器類の減容化も図ることにより、イニシャルコストの低減に寄与することが分かった。

水素発生量60 Nm³/h規模のHHOGに上記のコスト低減方策を適用した場合の装置コストを試算した結果、従来の装置と比べて30%程度のイニシャルコストの低減が可能となることを確認した。

2.3.4 ダウンサイジング

水素発生量60 Nm³/h規模のHHOGを対象に、本実証を通じてダウンサイジングの効果を検証した。前述のコストダウンに関わる各方策の適用に加え、配管サイズの見直しや機器配置の最適化を図った結果、従来機に比べ20%程度の設置面積の低減が可能であることが確認された。

2.3.5 水素製造効率の向上

今回の実証事業用HHOGに、水素製造効率の向上を図った当社開発の電気分解モジュールを搭載し、電解性能の確認を行った。その結果、従来に比べて約10%の消費電力の低減が可能であり、水素製造効率の向上へ寄

与することを確認した。

2.4 今後の展開

今回の実証事業を通じて再エネ水素ステーション用途のHHOGを設計・製作し、実証試験を行った。その結果、既設の水素ステーションとHHOGとの連携性が良好であることを確認し、技術的知見を蓄積することもできた。

今後はこれらの成果を生かした水素ステーション向けシステムの提案などを行っていききたい。また、水素発生装置のイニシャルコスト低減やダウンサイジング、水素製造効率の向上に関して得られた成果をHHOGの標準機設計に順次反映していきたいと考えている。

3. NEDO実証事業

3.1 背景

当社は2014年度から2018年度まで、新エネルギー・産業技術総合開発機構（New Energy and Industrial Technology Development Organization、以下NEDOという）の実証事業^{注3)}に参画した。同実証事業において当社は、NEDOの委託先の一つである東北大学から再委託を受け、水素製造技術に関する研究開発を担当した。

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震に伴って発生した停電の際、仙台市の茂庭浄水場では非常用発電機からの電源供給に切り替わった。しかしながら、停電時間が当初の想定仕様の24時間を大きく上回ったこと、さらに宮城県内の石油備蓄基地の被害や物流の遮断によって非常用発電機に補給するための燃料確保が困難になったことから、それらの対応に浄水場が大変苦慮された経緯がある。

このような状況を受けて東北大学は、災害発生などの非常時でも浄水場の機能を維持できる非常用発電システムを提案された。この提案を受け、再エネ由来の電力と水素を組み合わせた「電力・水素複合エネルギー貯蔵システム」（以下、本システムという）の有効性を検証するため、仙台市水道局の協力のもと茂庭浄水場において実証事業を進めた⁴⁾。

3.2 実証事業の目的

今回のNEDO実証事業では、大規模災害などによる長期停電を想定した連続運転を通じて、災害時においても本システムが有効に機能するかの検証を行うことを目的とした。当社が担当した水素製造技術においては、茂庭浄水場内の既設の太陽光発電設備からHHOGの電気分解モジュールへ変動電力の一部を供給して水素の製造を行った。このため本実証事業においては、再エネ由来の変動電力に対する水素製造の追従性や、本システムを構成する周辺装置との連携性を確認することにより、本システムへのHHOGの適用性を検証することが目的となる。

脚注3) 事業名称：水素社会構築技術開発事業／水素エネルギーシステム技術開発／非常用電源機能を有する再生可能エネルギー出力変動補償用電力・水素複合エネルギー貯蔵システムの研究開発

また「水素基本戦略¹⁾」では、国内の再エネ水素の本格活用に向け、世界最高水準のコスト競争力の実現を目指すために水電解システムのコストを低減することが鍵となることが記載されている。再エネ水素のコスト構造は、①再エネ電源からの電力供給コスト、②水素製造設備などの稼働率、③水電解装置を中心とした設備コストで構成される。

このうち、①再エネ電源からの電力供給コストの低減方法として、設備の運転に必要なユーティリティー量の低減がある。所要ユーティリティー量の削減を図るため、HHOG付属機器の運用方法を見直すとともに、前述の環境省実証事業と同様、水素製造効率向上のために開発した電気分解モジュールを採用することにした。今回の実証事業においてその可能性について検証した。

3.3 実証内容

茂庭浄水場における消費電力と太陽光発電データの実績値とを用いたシミュレーションが東北大学によって行われている。本システムを構成する機器の仕様はそのシミュレーション結果に基づいて決定され、実用システムの1/50の規模とされた。本システムは、太陽光発電設備をはじめとして電力制御装置、模擬負荷装置、水素ガスタンク関連設備、電気二重層キャパシタ (Electric Double Layer Capacitor, 以下EDLCという)、水電解式水素発生装置 (HHOG)、燃料電池 (Fuel Cell, 以下FCという)、および水素吸蔵合金 (Metal Hydride, 以下MHという) で構成される。本システムの概略フローを図9に、実証システム全体の外観写真を図10に示す。

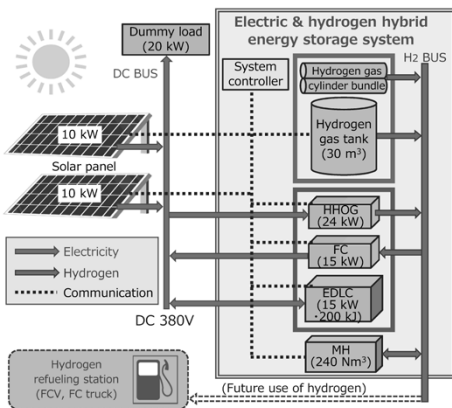


図9 NEDO実証システムの概略フロー
Fig.9 Outline flow of NEDO demonstration system

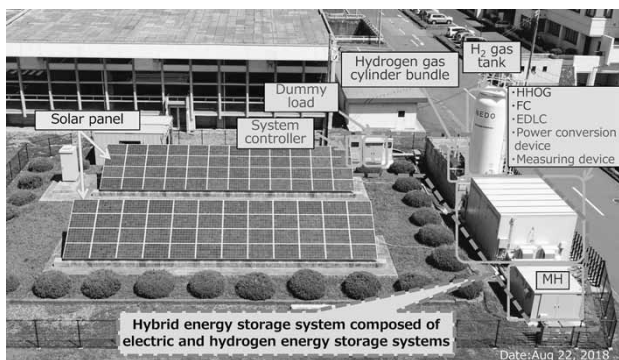


図10 NEDO実証システムの全景 (仙台市茂庭浄水場)
Fig.10 General view of NEDO demonstration system (Moniwa water purification plant in Sendai City)

既設の太陽光発電設備を、HHOGやFC、EDLC、模擬負荷装置に直流母線を介して接続し、HHOGで製造した水素ガスを水素配管を通じて水素ガスタンクおよびMHに貯蔵するシステム構成となっている。水素発生装置は発生量 5 Nm³/h のHHOGを導入した。今回の実証用HHOGの外観写真を図11に、仕様を表2に示す。

複合的なエネルギーとしての電力と水素の利用を検証するため、これらの設備を用いて太陽光発電の出力変動や模擬負荷の消費電力の変動を補償するシステムの実証を行った。

本システムでは、太陽光発電の出力と模擬負荷での消費電力との差の時間変化分に対し、長周期変動成分についてはカルマンフィルター^{注4)}を用いて電力トレンドを予測した。さらに、予測された電力トレンドのうち、電力余剰時はHHOGで水素を製造し、電力不足時はFCで発電することによって変動を補償した。また、残りの短周期変動成分については、直流母線電圧をEDLCの入出力制御で一定に保持することによって変動補償する方式を採用した。

3.4 実証結果

3.4.1 本システムの有効性

今回の実証では、大規模災害による長期停電を想定した3日間 (72時間) の連続運転を実施し、災害時における本システムの有効性を検証した。具体的には、商用系統電力の突然の停電から復旧するまでの3日間は通常時運転、非常時運転、通常時運転の切り替え運転を行った。



図11 NEDO実証用HHOGの外観
Fig.11 Appearance of HHOG for NEDO demonstration project

表2 NEDO実証用HHOGの仕様
Table 2 Specification of HHOG for demonstration project of NEDO

Item	Specification	
Output capacity	5 Nm ³ /h	
Purity of H ₂	≥ 99.999%	
Feed pressure	Approx. 0.82 MPa(Gauge)	
Dew point of H ₂	≤ 70°C	
Dimensions	Length	Approx. 1,700 mm
	Width	Approx. 900 mm
	Height	Approx. 2,000 mm

脚注4) 誤差のある測定データを用いて時間変化する物理量を推定する手法

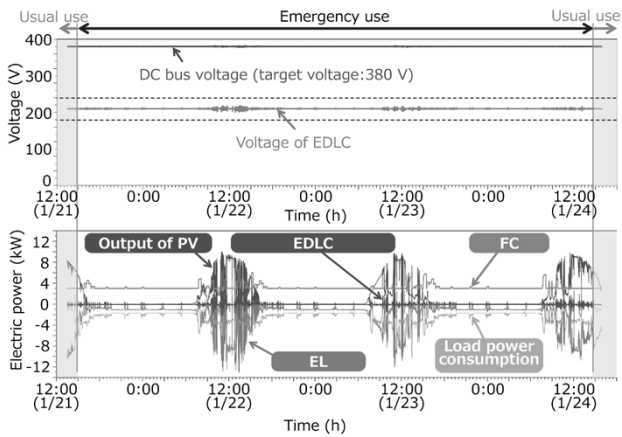


図12 NEDO実証システムにおける長期停電を想定した72時間連続運転試験
 Fig.12 Test of 72 hours continuous operation of NEDO demonstration system assuming long-term blackout

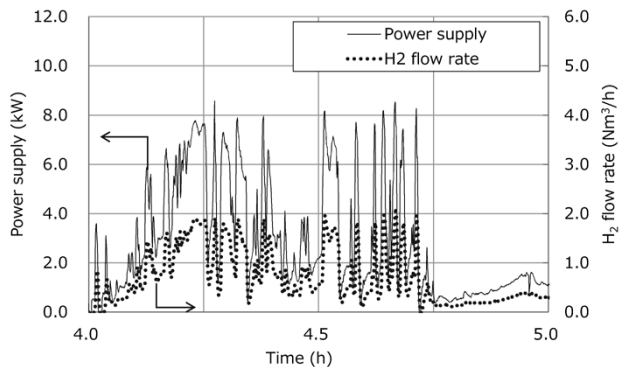


図13 NEDO実証システムにおけるHHOGの消費電力と水素発生量の経時変化
 Fig.13 Trend of power supply and hydrogen flow rate of HHOG (demonstration project of NEDO)

長期停電を想定した本システムによる実証試験結果の一例を図12に示す。図12の下図に示したように、太陽光発電出力や負荷消費電力の変動に応じてHHOGでの水素製造時の消費電力（図12中にELと表記）やFCの発電電力、EDLCの充放電が電力制御装置により制御される。その結果、図12の上図に示したように直流母線電圧が目標電圧（380V）を高精度に維持できていることが確認された。

この実証結果から、電力と水素とを組み合わせ合わせた複合エネルギー貯蔵システムが、太陽光発電出力や負荷消費電力に対して高い変動補償精度を有し、高品質で安定な電力供給可能な非常用電源として活用可能であることが示された。

3.4.2 HHOGの追従性

HHOGへの供給変動電力と、HHOGからの水素発生量の経時変化を図13に示す。HHOGに供給される変動電力に応じて水素発生量が追従して変化していることが確認された。

3.4.3 HHOGのユーティリティー削減

HHOG付属機器の運用方法の見直しのほか、水素製造時の消費電力低減を図った低消費電力仕様の電気分解

モジュールを採用することにより、従来機と比べて所要ユーティリティー量を10%程度削減できることが確認された。

3.5 今後の展開

今回の実証試験を通じ、電力と水素エネルギーを組み合わせ合わせた出力変動補償システムの有効性が確認された。今後は浄水場や公共性の高い施設、災害時の避難所に指定されている施設などへの本システムの適用が期待される。

HHOGについては、急激な変動電力に追従して水素製造できており、本システムへの適用可能性が示された。また本システムの実用化に向けては、非常時だけでなく通常時に変動補償を行う場合の挙動に加えて、さらなる長時間運用時の電解性能の把握のほか、装置コストの低減や所要ユーティリティーの削減など、さまざまな技術課題を解決していく必要がある。

むすび＝「水素基本戦略¹⁾」や「水素・燃料電池戦略ロードマップ²⁾」では、水素社会の実現に向けて具体的な方針が示されており、水素製造に関する技術開発は今後さらに重要になってくると考える。当社は、これまで蓄積してきた水素製造技術に関する知見を生かしつつ、社会や顧客のニーズに応えながら水素製造技術の改善・改良のための開発に今後も取り組んでいく所存である。

最後に、NEDOの実証事業においては、仙台市水道局から実証試験場所を提供いただいた。また実証試験の実施にあたっては、東北大学をはじめ（株）前川製作所、日本ケミコン（株）、北芝電機（株）の関係各位に多大なご協力をいただいた。ここに深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 内閣官房ホームページ. 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議. 水素基本戦略, 平成29年12月26日, https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy.pdf, (参照 2019-12-09).
- 2) 経済産業省ホームページ. 水素・燃料電池戦略協議会. 水素・燃料電池戦略ロードマップ, 平成31年3月12日. <https://www.meti.go.jp/press/2018/03/20190312001/20190312001-1.pdf>, (参照 2019-12-09).
- 3) 株式会社神戸製鋼所ほか. 平成29年度環境省委託・補助事業 CO₂排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業 中規模 (1.5 kg/h程度) の高圧水素を製造する再エネ由来水素ステーション関連技術の開発・実証成果報告書. 平成30年3月.
- 4) 津田 理ほか. 電気設備学会誌. 2017, Vol.37, No.11, p.781-784.



石井 豊

(株)神鋼環境ソリューション
新規事業推進部



中尾末貴

(株)神鋼環境ソリューション
新規事業推進部

(技術資料)

LNG燃料船用圧縮機

高木 一*・瀬山勝広・衣川博継・手塚智志・友近貴之

Compressor for LNG-fuelled Ships

Hitoshi TAKAGI・Katsuhiko SEYAMA・Hirotosugu KINUGAWA・Satoshi TEZUKA・Takayuki TOMOCHIKA

要旨

船舶業界の環境規制強化に伴って低速2元燃料エンジンのME-GIとX-DFが注目されており、これらエンジンのガス供給システムに使われる圧縮機の需要拡大が見込まれる。本稿では、両エンジンを概説するとともに、当該用途用のレシプロ圧縮機の特徴を解説した。水平対向型圧縮機に比べてスペースが小さい堅型圧縮機で、かつメンテナンス性の優れた設計とした。採用したピストンリング式ピストンは、ラビリンズ式に比べてエネルギー効率に優れ、金属どうしの接触リスクが低い。ガスの発生量の変化や複数先へのガス供給に対応した制御を取り入れ、無給油式シリンダと給油式シリンダの組み合わせによりガスへの油混入問題解決と摺動部品の良好な耐久性・信頼性を両立させた。

Abstract

With the tightening of environmental regulations at shipping firms, the low-speed dual-fuel engines ME-GI and X-DF are attracting attention, and the demand for the compressors used in the gas supply systems of these engines is expected to increase. This paper outlines these engines and describes the features of a Kobe Steel reciprocating compressor that was designed for the application. The company has adopted a vertical type compressor, which requires a footprint smaller than that of a horizontal type compressor, and is designed to have excellent maintainability. The piston-ring-type piston that was adapted has higher energy efficiency and a lower risk of metal contact than a labyrinth-type piston. The newly developed compressor incorporates a control system corresponding to the changes in the amount of gas generation and gas supply to multiple destinations, and combines oil-free and oil-lubricated cylinders to solve the problem of oil mixing into the gas as well as to achieve excellent durability and reliability in the sliding parts.

キーワード

環境, 天然ガス, LNG, 船舶, レシプロ圧縮機, 堅型, 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、船舶業界では重油あるいは天然ガスを燃料とする新型の低速2元燃料(だ)きエンジンが注目されており、LNG運搬船に採用され始めている。同エンジンには、ME-GI方式とX-DF方式があり、ともに圧縮機を必要としている。LNG運搬船の建造数は好調に推移すると予測されており、それに伴って船舶エンジン用圧縮機の需要も拡大が見込まれる。このため当社においても、圧縮機事業の拡大を目指して当該用途の圧縮機を商品化し、実績を積みつつある。本稿では、船舶エンジン用圧縮機について紹介する。

1. ME-GIとX-DF

ME-GIとX-DFはともに、重油あるいは天然ガスを燃料とする2元燃料(だ)きエンジンである。海洋汚染防止条約(MARPOL条約)によって燃料油中の硫黄分濃度は世界的に規制されている。その規制値は2020年1月に現行の3.50%以下から0.50%以下に強化された¹⁾。本規制への有効な対応手段の一つが硫黄分を全く含まないLNGの燃料利用である²⁾。

本章では、圧縮機に要求される仕様の観点からME-GIおよびX-DFを概説する。

1.1 ME-GI

図1にME-GIエンジンを搭載したLNG運搬船のガス供給システムを示す。LNGタンクから発生するボイルオフガス(BOG)は低温(およそ -160°C)である。またその量は、タンクの容量や断熱性能によって異なるが、おおよそ3.0~5.0 t/hである。発生したBOGは、レシプロ圧縮機で30 MPaまで昇圧され、LNG運搬船の推進のためにME-GIエンジンへ供給される。その一部は約1 MPaまで昇圧されて船内補機動力用のエンジン

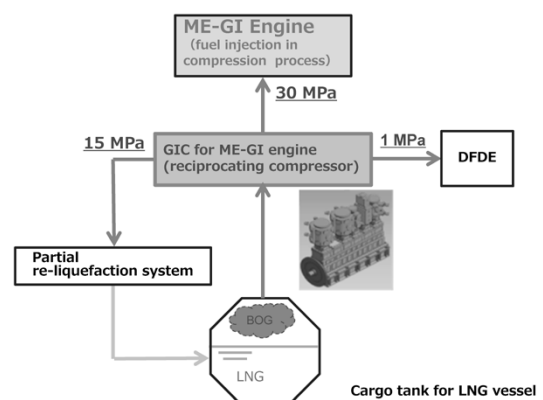


図1 LNG運搬船ME-GIエンジンガス供給システム
Fig.1 Gas supply system for LNGC ME-GI

* 機械事業部門 圧縮機事業部 回転機本部 回転機技術部

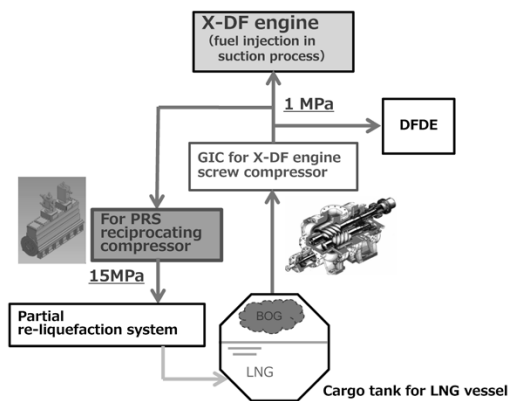


図2 LNG運搬船X-DFエンジンガス供給システム
Fig.2 Gas supply system for LNGC X-DF

表1 ME-GIとX-DFの比較
Table 1 Comparison of ME-GI and X-DF

	ME-GI	X-DF
Fuel	Dual fuel (Heavy oil and natural gas)	Same as left
Engine type	2-stroke	Same as left
Fuel gas supply pressure to engine	30 MPa	1 MPa
Combustion method	Diffusion combustion	Premixed combustion
Fuel gas supply timing to engine	Compression process	Suction process
Compressor for fuel gas supply (/1 engine)	Reciprocating comp. 1 unit	Screw comp. 1 unit Reciprocating comp. 1 unit

(DFDE: Dual Fuel Diesel Engine, 2元燃料ディーゼルエンジン)に供給される。エンジンの燃料ガス消費量がLNGタンクからのBOG発生量を下回る場合や停船時に、余剰BOGを回収し液化させてタンクに戻す再液化システムを搭載する船もある。

1.2 X-DF

図2にX-DFエンジンを搭載したLNG運搬船のシステムを示す。LNGタンクから発生したBOGをスクリュウ圧縮機で約1MPaまで昇圧してX-DFエンジンに供給する。また、一部のガスをDFDEに供給する。本スクリュウ圧縮機に関しては当社プレスリリース³⁾を参照されたい。スクリュウ圧縮機の後流に設置される再液化用レシプロ圧縮機は、その余剰ガスを約15MPaまで昇圧して再液化システムに供給する。当社保有技術の一つとして、スクリュウ圧縮機とレシプロ圧縮機とをバランスよく運転できる制御システムを確立していることがある。

ME-GIとX-DFの比較を表1に示す。両者が市場を二分している状況にある。

2. 船舶エンジン用レシプロ圧縮機

本章では、当社の船舶エンジン用レシプロ圧縮機を取り上げる。当社が納入する機器類は、圧縮機本体をはじめ、主電動機、ガスクーラ、各段の連絡配管、弁、オイルユニット、脈動防止用のドラムなど、関連する機器一式である。さらに、運転中に変動するガス量(エンジンでの消費量、タンクからのBOG発生量)に対して最適なバランスをとるための制御システムも納入している。

3Dモデルによるレイアウト設計だけでなく、ユニットの振動解析や制御のシミュレーション解析などを行い、最適な設計を行っている。図3は、ME-GI用レシプロ圧縮機ユニットの3D CAD図である。

ME-GI用およびX-DF用に使用されるレシプロ圧縮機の仕様例を表2に示す。

2.1 特長

1996年以来当社は、各国のLNG受け入れ基地に高圧LNG BOG圧縮機を多数納入してきた。そうした信頼性のある技術を基盤とし、これに需要家のニーズと使用条件を満たすべく当社固有のさまざまな技術を融合して開発したのが船舶エンジン用レシプロ圧縮機である。その開発過程においては、実物大スケールの試作機を用いた試運転や各種試験によって設計の検証を行った。

本節では当社の船舶エンジン用レシプロ圧縮機の特長を概説する。

2.1.1 縦型圧縮機

船舶エンジン用レシプロ圧縮機は船舶内の限られたスペースに設置される。縦型のレシプロ圧縮機は、メンテナンススペースを含めた設置面積が前述のLNG BOG圧縮機に採用されている水平対向型圧縮機と比較して小さくできる。図4にME-GI用レシプロ圧縮機の3D-CAD

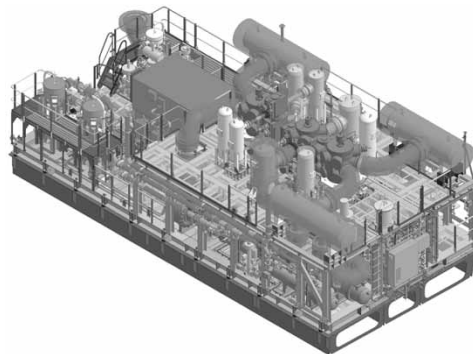


図3 ME-GI用レシプロ圧縮機ユニット
Fig.3 Reciprocating compressor unit for ME-GI

表2 ME-GI用およびX-DF用レシプロ圧縮機の仕様例
Table 2 Typical specifications of reciprocating compressor for ME-GI and X-DF

	For ME-GI	For X-DF
Purpose	Gas supply to engine and partial re-liquefaction system	Gas supply to partial re-liquefaction system
Suction pressure	0.0~0.02 MPa	1 MPa
Suction temperature	-140~43°C	0~43°C
Discharge pressure	30 MPa	15 MPa
Number of stages	6	3
Capacity	4700 kg/h	4800 kg/h

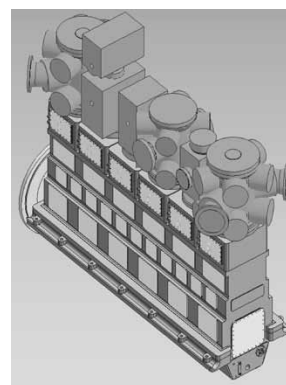


図4 ME-GI用レシプロ圧縮機(縦型)
Fig.4 Reciprocating compressor for ME-GI (vertical type)

図を示す。メンテナンスのためにピストンを水平方向に引き抜く必要がある水平対向型圧縮機に比べて、同性能の堅型圧縮機ではピストンを鉛直方向に引き抜くことができるため、メンテナンススペースを含めた設置面積をおよそ3割削減できる⁴⁾。

堅型圧縮機は一般的に、水平対向型圧縮機に比べてピストンなどの往復動によるアンバランスフォースが大きくなる傾向がある。船側基礎へのアンバランスフォースを最小化するため本圧縮機では、クランクを6スローにし、①#1, #6スロー、②#2, #5スロー、③#3, #4スローを120°ごとに位相をずらすことによってアンバランスフォースを打ち消す設計とした。これにより船側基礎の設計最適化にも貢献でき、運転の低振動化も実現している。

2.1.2 メンテナンス性を考慮した設計

圧縮機のメンテナンスは通常、船のドック入りに合わせて実施することを想定している。このため、停泊中の短時間で圧縮機をメンテナンスできるよう、シリンダとピストン一式を一括で交換できる構造(図5)を採用した。シリンダの中にピストンが挿入されたままの状態ですりリングをクロスガイド部から切り離せるようにしたことにより、シリンダ組立品一式を一括で交換することが可能である。

従来、レシプロ圧縮機の主な消耗部品であるシリンダ弁、ピストン(ピストンリング、ライダリング、ロッドパッキン)などを船上でシリンダ部からそれぞれ個別に取り外して組み立てていた。この方法では短期間のメンテナンスは実現できなかった。

いっぽう、図5のような構造とすることにより、取り外したシリンダ部一式を船外に持ち出してメンテナンスすることができ、船上でのメンテナンス時間を大幅に短縮することが可能になった。

2.1.3 ピストンリング式ピストン

当社の船舶エンジン用レシプロ圧縮機では、全段ピストンにピストンリング式を採用している。他社の船舶エンジン用レシプロ圧縮機とは異なり、低段、低温ピストンにもピストンリング式を採用している特徴がある。と

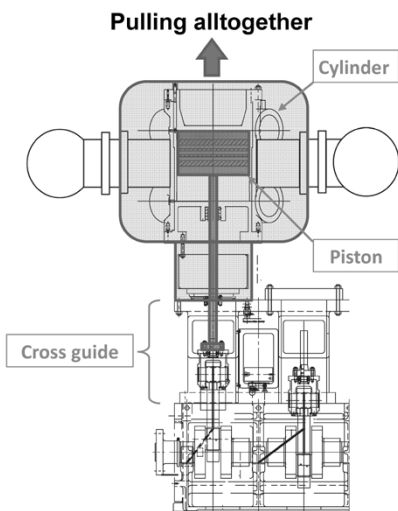


図5 シリンダとピストンの一括吊り上げ
Fig.5 Pulling up cylinder and piston as one body

くに低温部には、リングが摺動(しゅうどう)する相手材に低温で靱性(じんせい)があるNi含有鋳鉄を採用している。さらに、リングとの相性や低温運転時のひずみなどを考慮した特殊な熱処理を行うことによってリングの信頼性を確保している。こうした取り組みによって当社では、LNG受け入れ基地向け圧縮機の実績を長年にわたって構築してきた。

低温ピストンには一般に、ピストンリング式とラビリンズ式が採用されている(図6)。ラビリンズ式は、シリンダ内径とピストン外径の隙間を小さくし、内部リークを少なくするための特殊な溝をピストンに設けた構造となっている(図6下図)。

いっぽうでピストンリング式の大きな特長は、ガスをシールするための樹脂製のピストンリングを複数本配置した構造となっていることである(図6上図)。この構造により、ラビリンズ式よりも内部リークが少なく、その結果としてエネルギー効率が良いといえる。しかしその反面で、低温に適したリング材料の選定や、リングが摺動するシリンダ内径表面の硬度の確保などが必要になる。

図7左図に示すように、ピストンリング式ではシリンダとの接触防止のための樹脂製のライダリングがピストンに装着されている。このため、シリンダ内の温度変化が短時間で起こる急速な立ち上げ時や、圧縮機が大きい

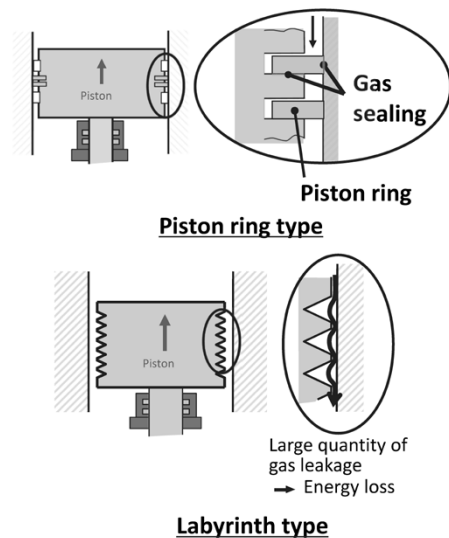


図6 ピストンリング式とラビリンズ式との比較(ガスの内部リーク)
Fig.6 Comparison between piston ring type and labyrinth type (internal leak of gas)

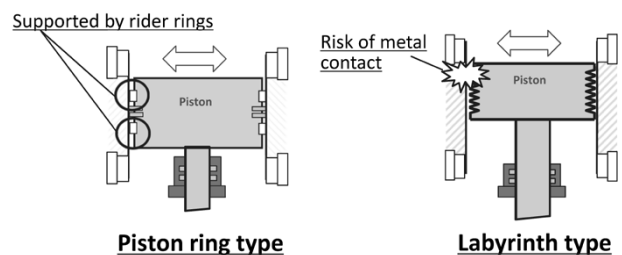


図7 ピストンリング式とラビリンズ式との比較(ピストンとシリンダ内面との接触リスク)
Fig.7 Comparison of piston ring type and labyrinth type (risk of contact of piston and inner surface of cylinder)

く傾く船舶上の場合など、ピストンとシリンダとの隙間が不安定になりやすい環境でも接触の恐れがないことなどがピストンリング式がラビリンス式より優れる点である。

同じ運転条件の場合、当社の全段ピストンリング式圧縮機は、他社の低压段ラビリンス式・高压段ピストンリング式の圧縮機よりも消費電力が10%程度少ない。

2.1.4 複数の供給先をもつ圧縮機

一般には、圧縮機の入口で吸い込んだガスは一つの出口から吐き出される。しかしME-GI用圧縮機は、ME-GIエンジン向け（最高圧段から）のほかに、再液化システム向け（最高圧段の一つ前段から）、あるいは船内補機動力用のエンジン向け（低压段から）というように、異なった圧力からそれぞれの供給先へガスを送出することにより、不必要な昇圧による動力ロスを削減できる。またガス量は、圧縮機の入口となるタンクのBOG発生量も含めて刻々と変化する。このため、各段に設けられたバイパス弁のコントロールなど、圧力を安定させて運転するための制御技術が要求される。設計時には、これらの弁の挙動が適切に制御できていることをシミュレーションによって確認している。

2.1.5 油分を観点にした適正設計

前述のとおりレシプロ圧縮機には、ガスを圧縮するためのピストンリング、ピストン棒の軸封となるロッドパッキングなどの樹脂製摺動部品がある。一般に、高压になるほど樹脂製リングの長期連続使用は難しくなる。30 MPaの高压吐出圧力を要求されるME-GIエンジン圧縮機においても、使用される樹脂製リングの耐久性や信頼性を向上させる必要がある。その一般的な方法としてシリンダ内部への潤滑油の供給がある。

いっぽうME-GIエンジンは、エンジンに供給するガス中の油の混入量を極力少なくする必要がある。再液化システムが設置される場合は、高压で供給されたガスを冷却して急速に膨張させるため、油分がガス中に混入していると系内に付着した油分が凝固し、再液化システムの効率低下や詰まりを引き起こす。また、大型のLNGタンクの油汚染を引き起こす。

当社は現在、これら相反する問題を解決するために、ME-GI用レシプロ圧縮機に対してさまざまな工夫を行っている。すなわち、エンジンへ供給する最高圧段のシリンダ（吐出圧力 約30 MPa）には給油式シリンダを、また再液化システムへ供給する最高圧段の一つ前段のシリンダ（吐出圧力 約15 MPa）には無給油式シリンダを採用している。

また、最高圧段の下流には油分を高度に分離できる装置を設置している。この油分離装置には、油冷式スクリュ圧縮機で当社が長年蓄積してきた技術を用いている。この油冷式スクリュ圧縮機には、圧縮室へ多量の潤滑油を供給し、潤滑油とガスを混合させながら圧縮し、その

後多量の潤滑油を段階を経て分離するシステムが付属している。このような例は、複数のタイプの圧縮機を設計・製造している当社の特徴の一つでもある。

むすび = 環境規制に適合し天然ガスを燃料とするLNG運搬船用の新型推進エンジンの燃料供給システムと、そこに使用される圧縮機を解説した。

今後、LNG運搬船と天然ガスの船舶燃料利用の発展に合わせて、よりスペースの小さなユニットで、多様な運転をよりエネルギー効率よく行えるように当社の圧縮機ユニットも発展させ、エネルギー使用と環境負荷低減を両立させる世界の実現に貢献していく所存である。

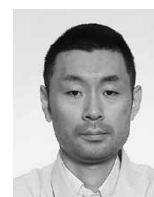
参考文献

- 1) 国土交通省. 報道発表資料, 2020年船舶SOx規制の統一の実施のためのガイドライン策定に着手～国際海事機関 第5回汚染防止・対応小委員会の審議結果について～. https://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji07_hh_000095.html, (参照2019-11-27).
- 2) 国土交通省. 添付資料, (別紙2) PPR5の審議概要(その他). <https://www.mlit.go.jp/common/001221253.pdf>, (参照2019-11-27).
- 3) 神戸製鋼所. LNG船向け非汎用スクリュ式圧縮機の受注について. https://www.kobelco.co.jp/releases/1195651_15541.html, (参照2019-11-27).
- 4) 瀬山勝広ほか. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.67, No.2, p.77.



高木 一

機械事業部門 圧縮機事業部
回転機本部 回転機技術部



瀬山勝広

機械事業部門 圧縮機事業部
回転機本部 回転機技術部



衣川博継

機械事業部門 圧縮機事業部
回転機本部 回転機技術部



手塚智志

機械事業部門 圧縮機事業部
回転機本部 回転機技術部



友近貴之

機械事業部門 圧縮機事業部
回転機本部 回転機技術部

(解説)

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*・江頭慎二・澄田祐二

Utilization of Cold Energy in LNG Receiving Terminal based on LNG Vaporizer Using Intermediate Fluid

Tomohiro SUZUKI・Shinji EGASHIRA・Yuji SUMIDA

要旨

LNG気化器の一つである中間媒体式気化器 (IFV) は従来、冷熱発電などのLNGの冷熱利用が可能な気化器として用いられている。しかしながら近年、ガスタービン吸気冷却などにIFVからの冷水を利用する冷熱利用案件が増加している。

本稿では、洋上受入基地を含めたLNG受入基地の最新動向のほか、冷熱利用するうえでのIFVのLNG気化器としての特徴、およびIFVを用いたガスタービン吸気冷却をはじめとする冷熱利用事例を紹介した。

Abstract

Intermediate fluid-type vaporizers (IFVs), which are a type of LNG vaporizer, have been used to take advantage of the cold energy of LNG, for example, in cold power generation. Recently, there is an increasing number of cold-energy utilization projects using cold water from an IFV for, e.g., the intake air cooling of gas turbines. This paper introduces the latest trends in LNG receiving terminals, including offshore receiving terminals, the features of IFVs as LNG vaporizers for cold energy utilization, and examples of cold energy utilization using IFV, including gas-turbine-intake air cooling.

キーワード

LNG気化器, LNG冷熱利用, ガスタービン吸気冷却, LNG冷熱発電, 中間媒体式LNG気化器

まえがき=天然ガスはクリーンな燃料として世界的に需要が増加している。我が国をはじめとする多くの天然ガス消費地は産ガス地から遠隔に位置するため、天然ガスはいったん極低温(約-160℃)状態の液化天然ガス(以下、LNGという)として輸送される。消費地においてLNGは再度常温まで戻してガス化し、発電用燃料や都市ガスとして利用している。

当社は、LNG気化器トップメーカーとして国内外に多数納入してきている。そうしたなか近年、これまで納入してきた地域とは異なる国からの引き合いや、LNGの冷熱有効利用を目指した案件の引き合いが増加しつつある。

LNGは、大型LNG運搬船によって産ガス地から海上輸送され、消費地においてLNG受入基地から陸揚げされる。このLNG受入基地は一次受入基地と二次受入基地(サテライト基地)とに分類される。一次受入基地は海上輸送されてきたLNGを最初に受け入れる施設である。このLNGをローリーなどで陸送して再ガス化する施設が二次受入基地である。

本稿では、一次受入基地の最新動向、およびその一次受入基地で取り入れられている中間媒体式気化器(Intermediate Fluid type Vaporizer, 以下IFVという)を用いたLNG冷熱有効利用について概説する。

1. LNG一次受入基地の動向

1.1 地域の多様化

LNGはかつて、我が国をはじめとして韓国や台湾、旧西ヨーロッパ諸国及び中国において、陸上のLNG受入基地で受け入れられてきた。しかしながら、近年の米国におけるシェールガス革命や、地球温暖化防止のためのCO₂削減に向けた世界的な取り組みによるガス火力発電の増加に伴い、LNG受け入れ国は多様化し、需要量も増大してきている。近年のLNG受け入れ地域には以下のような特徴がある。

- ・中近東や中南米地域を含めた、これまでLNGの受け入れを行っていなかった国におけるLNG受入基地建設の増加
- ・かつて自国で天然ガスを産出し消費していたフィリピンやミャンマーなどの東南アジア諸国におけるLNG受入基地建設計画の増加

1.2 LNG受入基地形態の多様化

従来、LNG受入基地は陸上の沿岸部に建設され、LNGを常温ガスにまで気化・昇温させるための熱源として主に海水が用いられてきた。また、海水温が低い寒冷地域・時期においては燃焼熱が用いられてきた。いっぽう、我が国や韓国、台湾などの伝統的なLNG輸入国以外の

* 機械事業部門 産業機械事業部 機器本部 技術部

国々においては、近年LNG受入基地の早急な導入、および建設コスト削減を目的に従来の陸上の受入基地に代わる洋上の受入基地が新設され始めている。また、新たにLNGを受け入れ始めた国々においても洋上の基地数が徐々に増加しつつある。

この洋上LNG受入基地には、以下に示す二つの形態がある。

①浮体式LNG受入・再ガス化基地 (Floating Storage Re-gasification Unit, 以下FSRUという)

②浮体式LNG受入・固定再ガス化基地 (Floating Storage Unit + Re-gasification Unit, 以下FSU + Re-gasという)

上記形態のLNG受入基地は発展途上国での導入が多く、2019年時点ですでに27基地のFSRUが稼働している。このことは、陸上LNG受入基地と合わせたガス気化能力のうちの約1割をFSRUが占めていることを示している。また、FSU + Re-gasは3基地が稼働しており、1基地が稼働間近である¹⁾。

1.2.1 FSRU

FSRUは、気化設備などを設置したLNG運搬船を洋上に係留してLNG受入基地として供する形態である。LNG気化器としてIFVが採用された基地として、OLT (Offshore LNG Toscana) 社がイタリアのトスカーナ州リボルノ市沖合で運用するFSRUがある。そのFSRUの外観とLNG気化器として搭載されたIFV3基の外観を図1に示す。FSRUの特徴として以下の3点が挙げられる。

- ・陸上基地で必要となる土工事が不要であることに加えて、LNGタンクを備える運搬船を造船所で建造することから陸上でのLNGタンク建設工事が不要である。このため、建設期間の短縮化と建設コストの低減が可能となる。

- ・基地自体が船舶であるため海上を移動させることができ、将来においてほかの場所での活用が可能となる。

- ・洋上基地のためLNG冷熱利用は同じ船上に限られる。しかしながらこれまでは船上での利用用途がなく、LNG冷熱が有効利用された実績がない。

現在のFSRUでの主要なLNG気化プロセスはシェルアンドチューブ式である。海水の熱で温められたエチレングリコール水を用いてLNGと熱交換する方式であり、この方式のLNG気化器が採用されている基地が多い。

1.2.2 FSU + Re-gas

FSU + Re-gasは、FSRUにおける再ガス化の設備を陸上または固定プラットフォーム上に建造し、LNG受入基地として供する形態である。IFVがLNG気化器として採用されたFSU + Re-gas形態の基地として、EGM (ElectroGas Malta) 社がマルタ共和国で運用するガスタービン複合発電プラント (以下、GTCCという) がある。図2にFSU + Re-gasとGTCCの外観を示す。FSU + Re-gasの特徴として以下の4点が挙げられる。

- ・FSRUと同様、陸上基地での工期やコストの大半を占めるLNGタンクの建設工事が不要となり、建設

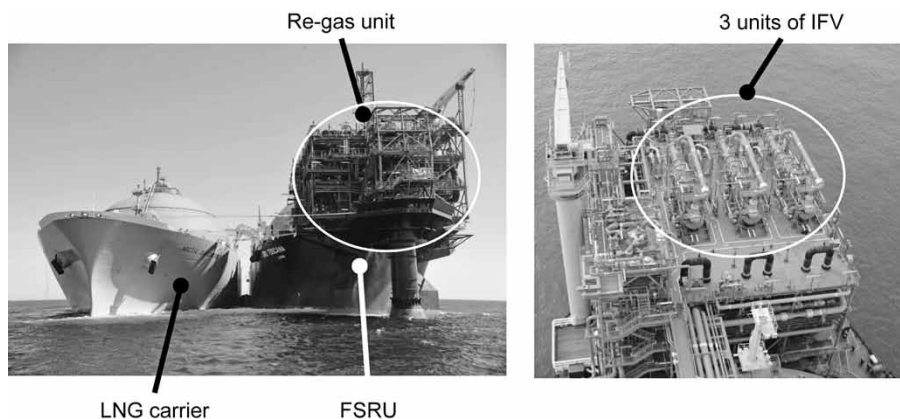


図1 イタリアOLT社のFSRUとLNG運搬船 (左) およびFSRU上のIFV (右) (写真提供: OLT社)
Fig.1 FSRU and LNG carrier (left), and IFVs on FSRU (right) by OLT of Italy (photo courtesy of Offshore LNG Toscana)

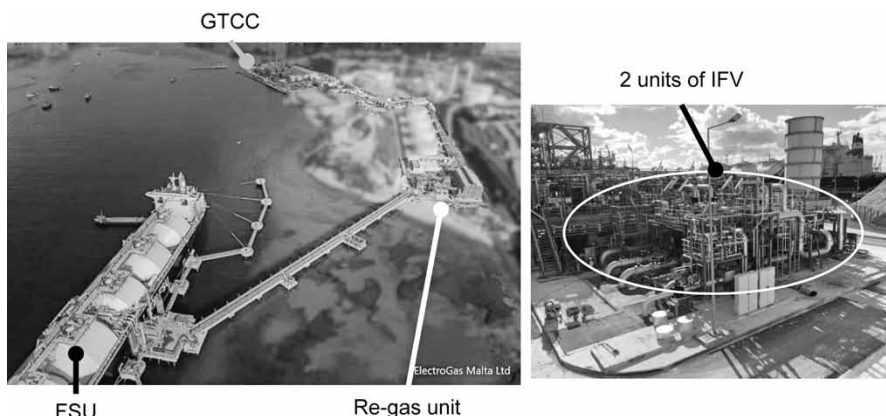


図2 マルタEGM社のFSUと発電所 (左) およびRe-gasユニットのIFV (右) (写真提供: マルタEGM社)
Fig.2 FSU and power plant (left), and IFVs on re-gas unit (right) by EGM of Malta (photo courtesy of ElectroGas Malta Ltd.)

期間の短縮化が可能となる。

- ・再ガス化設備は船上ではなく陸上に建造することから、FSUとしては通常の中古LNG運搬船を使用することができる。このため、FSRUよりも発注できる船会社の選択肢の幅が広がる。
- ・期間リース契約が多いFSRUと異なり、再ガス化設備をオーナーまたは地方政府がインフラとして保有することができる。
- ・再ガス化設備を陸上に建造することから、陸上の一次受入基地と同様にLNGの冷熱の有効利用が容易になる。

2. 一次受入基地用LNG気化器の構造と特徴

2.1 LNG気化器の概要

陸上のLNG受入基地で一般的に使用されているLNG気化器はオープンラック式気化器（Open Rack Vaporizer, 以下ORVという）やIFV, サブマージド式気化器（Submerged Combustion Vaporizer, 以下SCVという）がある。ORVとIFVは海水を熱源とするLNG気化器である。SCVは海水温が低くて熱源として使用できない状況・時期にのみ使用されるバックアップ用途の気化器である。水中バーナによる燃料の燃焼熱によってLNGを気化させる構造であり、燃焼排ガスの環境規制などへの配慮が必要である²⁾。

これらのLNG気化器のうち、LNG冷熱利用の導入実績が多いのがIFVである。

2.2 IFV

2.2.1 IFVの構造と気化プロセスの概要

IFVは、海水などの熱源を利用し、プロパンなどの熱媒体を介してLNGを気化させる気化器である。TRI-EXの名称で1970年代に大阪ガス（株）によって開発され、3種のシェルアンドチューブ式熱交換器（中間媒体蒸発器（以下、E-1という）、LNG気化器（以下、E-2という）、LNG加温器（以下、E-3という））を組み合わせた構造を有している。

図3にIFVの概念図を示す。E-2の伝熱管内に供給されたLNGは、E-1シェル内上部の中間媒体ガスと熱交換される。ほぼ全量のLNGが蒸発した後、連絡配管を通

じてE-3シェル側に移送される。E-3においてLNGは、伝熱管内を流れる海水との熱交換によって加温されて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LNGと熱交換して凝縮された中間媒体は、E-1シェル内の下部に落下し、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てE-2管内のLNGを蒸発させる。

中間媒体には主にプロパンを用いている。FSRUなどの限られた場所において可燃性ガスであるプロパンを中間媒体として使用することに懸念を示す顧客に対しては、オプションとして非可燃性のプロパン代替熱媒を中間媒体として使用する提案を実施している³⁾。

内部を海水が流れる伝熱管（E-1およびE-3伝熱管）にはチタン合金が用いられ、極めて高い耐海水腐食性を有している。

2.2.2 IFVの特徴

LNG気化器としてのIFVの特徴は次のとおりである。

- ①熱源が主に海水であるため、ランニングコストが安価である。
- ②凝固点の低い中間媒体を介してLNGと加熱源流体との熱交換を行うことにより、加熱源流体の凍結による流路閉そくなどの問題を回避できる。
- ③伝熱管材料としてチタン合金を用いることにより、劣悪な水質の海水を加熱源として使用してもエロージョンやコロージョンの発生を回避できる。
- ④熱交換後の中間媒体および冷却された加熱源流体を用いた冷熱利用への応用が可能である。

上記④の冷熱利用への応用例としては、中間媒体であるプロパンを利用したLNG冷熱発電システムがある。LNG受入基地の省エネルギー化を目的に開発され、1970年代より日本各地のLNG受入基地においてガス会社を中心に盛んに導入されてきた。冷熱発電プラントの外観およびプロセス概略をそれぞれ図4および図5に示す。この冷熱発電プラントは、大阪ガス（株）をはじめ現在も継続して運転中である。

2010年代後半に入り、国内基地での更新案件や中国の上海LNG基地において、当社のIFVが採用された冷熱発電システムの導入が決定されている。

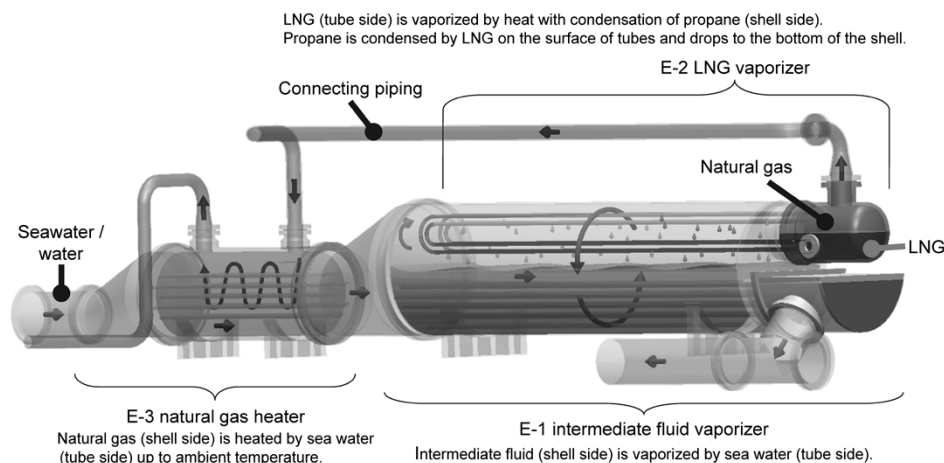


図3 中間媒体式気化器概念図
Fig.3 Schematic of intermediate fluid vaporizer (IFV)



図4 大阪ガス株式会社のLNG冷熱発電プラント外観

Fig.4 Appearance of LNG cryogenic power generation plant in Osaka Gas Co., Ltd.

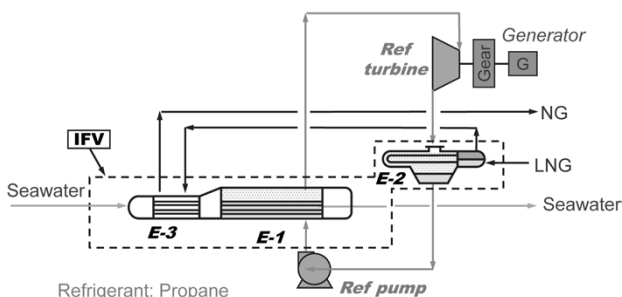


図5 LNG冷熱発電システムのプロセスフロー（ランキンサイクル）概略

Fig.5 Schematic of process flow for LNG cryogenic power generation system (Rankine cycle)

3. IFVを用いたLNG冷熱利用

2.2節で述べたように、LNGの冷熱を利用するLNG気化器としてIFVが検討されている案件が増加している。本章では、すでにLNG受入基地で運用されているIFVを用いたLNG冷熱利用について解説する。

3.1 LNG冷熱利用の概要

LNGは -160°C 程度の極低温流体であり、その冷熱は通常は有効利用されずに、熱交換後の海中などに捨てられている。そこでLNG受入基地のオーナーは、基地運営の経済的観点やCO₂削減の観点からLNG冷熱の有効利用に取り組んできた。

LNG受入基地におけるLNGの冷熱利用に対しては以下のような用途が考えられている。

- ① LNG冷熱発電システム
- ② ドライアイスの製造、冷凍倉庫などへの利用
- ③ ガスタービン吸気冷却システム
- ④ 植物工場やデータセンタなどにおいて使用される冷房機器への冷熱供給

上記①および②の用途は日本のLNG受入基地において古くからガス会社を中心に取り入れられてきた。以下の節では、近年増加している東南アジアなど亜熱帯地域でのLNG受入基地において多く導入が検討されている③および④を概説する。

3.2 ガスタービン吸気冷却に用いられるLNG冷熱利用

IFVでは海水などの熱源が配管内を流れている。このためLNG気化器と冷熱利用先に対して、1台の熱源ポンプで熱源を往復循環させることができる。これに対してORVは、熱交換器本体の上部から大気開放された伝

熱管の外表面に海水を流下させて熱交換を行う。このため、ORVへの供給用および冷熱利用先への送出用に2台の熱源ポンプが必要になる。また、伝熱管を流下中に大気に触れるため異物や水質の管理が必要になる。したがって、熱源循環型の冷熱利用ではIFVの方が効果的であるといえる。

3.2.1 ガスタービン吸気冷却

ガスタービンは、吸入圧縮した空気を燃焼器内で燃料と混合して燃焼させ、その燃焼ガスの圧力を利用して発電機を回転させて発電を行う。圧縮機が吸入する大気温度はISO規格によって 15°C と規定されており、定格出力も大気温度 15°C で設計されている。

高温多湿の亜熱帯地域では年間を通して 15°C 以上となる地域が多い。こうした地域においては、空気密度が小さくなるためガスタービンの燃焼器へ送られる空気の質量が低下する。そのため、ガスタービンの発生動力が低下して発電量が減少する。たとえば 35°C の空気を 15°C に冷やすと空気の密度は10%増え、発電量も10%増大する。こうした理由により、高温多湿の亜熱帯地域においてガスタービンの吸気冷却に取り組む経済的メリットは大きい。

吸気冷却にはいくつかの方式が採用されている。そのなかで最も効率が良い方式は、冷水によって吸気を直接冷却する方法である。すなわち、吸気フィルタ室に組込まれた吸気冷却コイルに冷水を供給し、吸気との間で直接熱交換を行って吸気温度を 15°C 以下に下げる方式である。IFVを用いたガスタービン吸気冷却プロセスフロー概略図を図6に示す。ガスタービン吸気冷却の実施例の一つが東南アジアなどのGTCCにある。この発電所では、電力を用いたターボ冷凍機から冷水の供給を受けてガスタービンの吸気冷却を行い、発電効率を上げている⁴⁾。

東南アジアなどで近年建設されるLNG受入基地では、ガス・ツー・パワーと呼ばれるLNG受入基地とGTCCとが一体で建設される案件が増加してきている。これらの案件は以下の理由からLNG冷熱を利用したガスタービンの吸気冷却に適している。

- ・年間を通して気温が 15°C を超える高温地域であることが多い。
- ・LNG受入基地とGTCCとの距離が近いこと、熱媒体の移送が容易である。
- ・LNG受入基地の事業者とガス火力発電所の事業者とが同じ事業者である場合が多いため、冷熱利用の運用面や経済メリットの利害が対立することがなく、投資判断を行いやすい。

3.2.2 吸気冷却システムへのIFVの利点

LNG冷熱を用いたガスタービン吸気冷却システムにおいて実績があるLNG気化器は、エチレングリコールを循環熱源として用いるシェルアンドチューブ式LNG気化器 (Shell and tube LNG Vaporizer, 以下STVという)⁵⁾と工業用水を循環熱源として用いるIFVがある²⁾。STVはカリブ海諸国でシステム導入実績があり、IFVは我が国のほか、マルタ共和国およびタイ王国での

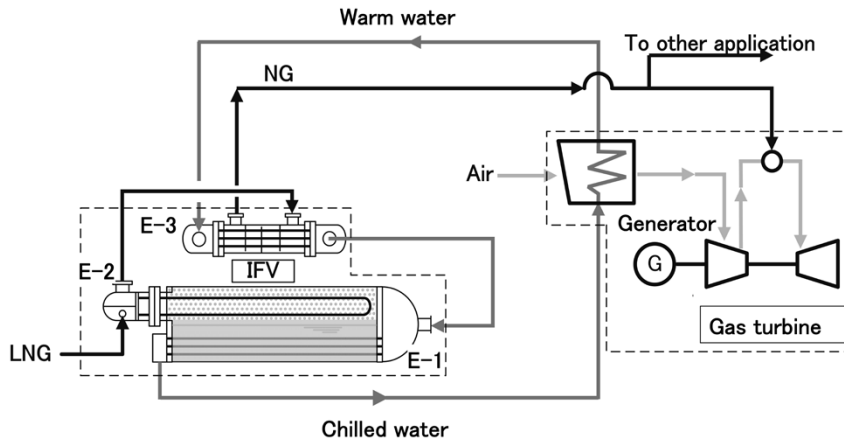


図6 IFVを用いたガスタービン吸気冷却プロセスフロー概略
Fig.6 Schematic of process flow for cooling intake air of gas turbine using IFV

システム導入実績がある。IFVを用いたシステムの特長は次のとおりである。

- ・吸気冷却システムに必要なとされる熱源の温度は約5℃であり、IFVが循環熱源として用いる工業用水でも凍結しない温度域である。このためシステムの運用が可能である。
- ・STVではLNGと循環熱源とを直接熱交換する。このため、5℃の工業用水では凍結の可能性が高く採用できない。しかしながらIFVは、LNG気化プロセスに中間媒体を用いているため循環熱源として5℃の工業用水を用いても凍結の懸念なく運転することが可能である。
- ・IFVは循環熱源に工業用水を用いることが可能なため、グリコール水に比べて安価に準備できる。いっぽう循環熱源は、ガスタービン吸気冷却用途以外にも同時に他の用途に利用されることが多い。こうした用途において、温度調整のための貯槽タンクが必要な場合、水とグリコール水とでは循環熱源の充填コスト差はさらに大きくなる。
- ・グリコール水は配管に対する腐食性があるため水質管理が必要であるが、工業用水は基本的に水質管理の必要がない。

上記のようなIFVの利点から、近年のLNG気化器の案件では循環熱源として工業用水を用いるIFVが選定される件数が増えてきている。

省エネルギーの観点においては、IFVを用いた吸気冷却に対して以下のような効果が期待できる。

- ・IFVがLNG流量100 t/hの能力である場合、約20,000 kWの冷却能力を有しており、IFVでの冷熱供給に必要な消費エネルギーは約700 kW（水循環ポンプ動力）である。いっぽう、同じ冷却能力のターボ冷凍装置では約4,200 kW（冷凍機動力、冷却塔ファン動力および水循環ポンプ動力）の消費エネルギーが必要であり、IFVを用いたLNG冷熱利用の経済効果は大きい。

図2に示したマルタ共和国の基地における発電量は合計150 MWである。これに対して夏季のガスタービンの出力回復効果は6%であり、LNGの冷熱利用で9 MWの効果が得られることが確認できている。この基地におい

てはガスタービン吸気冷却以外にもボイルオフガス用圧縮機への冷却水がIFVから供給されている⁶⁾。

ガス・ツー・パワーの基地では通常、LNG気化器から送出されるガスタービン消費用のガス（LNGを気化させた天然ガス）の量に対し、そのガスタービンの吸気冷却に必要な冷水を発生させるためのLNG量は3倍程度である（入口大気温度35℃、出口温度15℃程度の場合）。すなわち、LNG気化器で気化したガスの全量をガスタービンで消費する運用では吸気冷却による出力回復が十分ではない場合がある。したがって、ガス送出先はガスタービン以外にガス導管などに送出されるケースが多い。

上記の利用環境が整ってLNGの冷熱をこのガスタービンの吸気冷却に利用した場合、LNG 1トンから得られるエネルギー量は最大で180 kWhとなる。2.2節で紹介した冷熱発電システム（プロパンランキンサイクル方式）の23 kWh/tonより利用効率面で大幅に優位である。

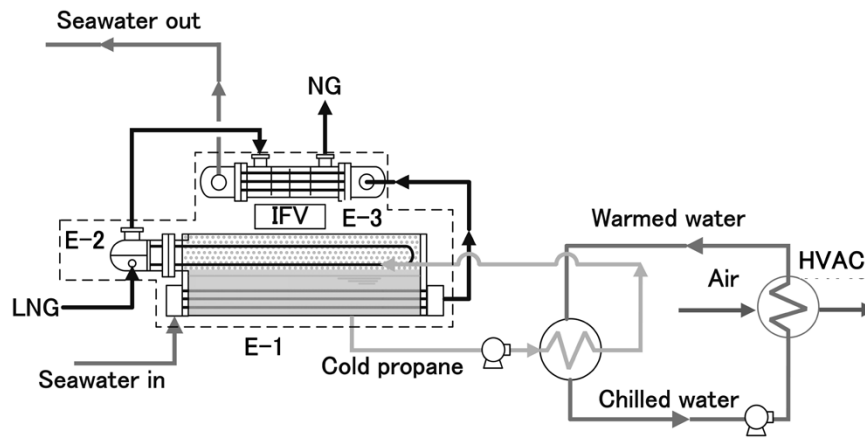
3.3 その他のIFVを用いたLNG冷熱利用

ガスタービン吸気冷却システム以外でIFVの利用実績があるのは植物工場内などの大型冷房システムへの冷水供給がある。IFVからの冷水供給方法としては以下の実績がある。

- (1) ガスタービン吸気冷却と同じく循環熱源としての冷水を利用先に直接供給するケース
タイ王国でのLNG受入基地においては、LNG受入基地内に設置されたガスタービンの吸気冷却用途と合わせて、チューリップなどの植物栽培工場内の冷房用途にIFVから直接供給された冷水が利用されている。
- (2) IFVのE-1内においてLNGの冷熱で冷却されたプロパン（液体）を循環ポンプで抜き出し、プロパン液と循環水との間で熱交換させて間接的に冷熱利用先に供給するケース

このケースでは海水を気化熱源として利用しつつ、プロパンを循環させているのが通常運転である。このため、冷熱利用先の稼働状況に影響を受けずにガスを導管に送り出せる利点がある。

このケースでのシステム概要、およびIFVの外観をそれぞれ図7、図8に示す。図8に示した基地では、中間媒体を3℃の液状態でIFVから取り



*Heating, Ventilation, and Air Conditioning

図7 空調設備へ冷熱を供給するIFVのプロセスフロー

Fig.7 Schematic of process flow of IFV for supplying cold energy to air conditioning apparatus



図8 空調設備へ冷熱を供給するIFVの外観（日本ガス株式会社鹿児島受入基地）

Fig.8 Appearance of IFV for supplying cold energy to air conditioning apparatus in Kagoshima Terminal of NIPPON GAS Co., Ltd.

出し、熱交換器によって循環水を8℃の冷却水とする。冷却水は完全人工光型植物工場内のファンコイルユニット（FCU）へ循環して冷房空調に利用される。植物工場内の温度は18～25℃に保たれる⁷⁾。完全人工光型植物工場は光熱費などの運営経費がかさむが、LNG冷熱の利用によって4割程度低減できると報告されている。

むすび=本稿では、LNG一次受入基地の最新動向、IFVの特徴、およびIFVを用いたLNG冷熱利用を概説した。

当社は、LNG受入基地形態の多様化に応じたLNG気化器の開発、およびLNG受入基地での冷熱利用の効率向上に向けて最適なLNG気化器システムの開発・提案を行ってきた。今後とも引き続き技術開発を進め、LNG気化器の世界トップメーカーとしての地位を堅持して行きたいと考えている。

参考文献

- 1) IGU 2019 WORLD LNG REPORT
- 2) 江頭慎二. R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.2, p.33-36.
- 3) Kosuke HIGASHI et al. ICE2019-25th IIR International Congress of Refrigeration. Montreal, 2019, p.437-444.
- 4) 小室隆信ほか. 三菱重工技報. 2010, Vol.47, No.4, p.49-54.
- 5) Augusto Bulte. Integration of CCGT Plant and LNG Terminal. 2008, 19th WORLD PETROLIUM CNGRESS, Madrid.
- 6) Jesus Losada Maseda et al. LNG to power in islands. Malta case with the FSU terminal of Delimala. <https://www.gti.energy/wp-content/uploads/2019/10/94-LNG19-03April2019-Losada-Maseda-Jes%C3%BAs-poster.pdf>. (参照 2019-12-06).
- 7) 檜物 健. LNG冷熱の植物工場空調への活用(制御法). ガスエネルギー新聞, 2017年12月18日.



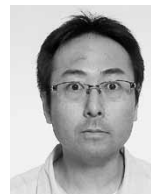
鈴木朝寛

機械事業部門 産業機械事業部
機器本部 技術部



江頭慎二

機械事業部門 産業機械事業部
機器本部 技術部



澄田祐二

機械事業部門 産業機械事業部
機器本部 技術部
(現 機械事業部門 産業機械事業部
機器本部 機器工場)

(技術資料)

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*・東 正高・野一色公二 (博士(工学))

Expanding Application of Micro Channel Equipment (Diffusion Bonded Compact Heat Exchanger; DCHE™)

Yasutake MIWA・Masataka AZUMA・Dr. Koji NOISHIKI

要旨

コンパクト熱交換器の一種であるマイクロチャネル熱交換器は、軽量化・コンパクト性が要求される用途や洋上設備用機器として需要の増加が期待されている。その中でも、近年液化天然ガス (LNG) を用いた燃料供給システムやサテライト基地向け小容量LNG気化器としての需要が増加している。本適用用途では耐圧性やコンパクト性が求められるほか、熱媒となる流体の凍結に対する対策も必要になる。拡散接合型コンパクト熱交換器(Diffusion Bonded Compact Heat Exchanger : DCHE™) では凍結を抑制するコンセプトを熱交換器設計に取り入れ、液体窒素やLNGを用いて試験を実施、気化性能範囲や凍結に対する設計指針を確認した。本稿では、DCHE™のLNG気化器用途に向けた取り組みについて紹介する。

Abstract

The demand for microchannel heat exchangers, a type of compact heat exchanger, is expected to increase as they are used in applications requiring light weight and compactness and as apparatuses for offshore equipment. Above all, their demand has been increasing in recent years for use in the fuel supply systems of offshore equipment that uses liquefied natural gas (LNG) and small-capacity LNG vaporizers for satellite bases. These applications require, not only pressure tightness and compactness, but also measures to be taken against the freezing of the fluid serving as the heat medium. In the case of diffusion bonded compact heat exchangers (DCHE™s), concepts having to do with the suppression of freezing have been incorporated into their design, and tests were conducted using liquid nitrogen and LNG, to establish the design guidelines for the range of vaporization performance and icing. This report introduces the effort to apply a DCHE™ to LNG vaporizer applications.

キーワード

マイクロチャネル, DCHE™, 拡散接合, コンパクト, 耐圧性, LNG気化器, 凍結, FGSS, 洋上, 天然ガス

まえがき = マイクロチャネル熱交換器DCHE™^{注1)} (Diffusion-bonded Compact Heat Exchanger, 以下DCHE™という) はコンパクトで耐圧性能が高く、天然ガス処理プラントの圧縮ガスターラ、天然ガス流体の熱交換器、水素ステーション用の水素圧縮ガス冷却器およびプレクーラとして使われている。機器の信頼性向上やコンパクト性の要求もあり、今後、LNG気化器や天然ガス処理プラントにDCHE™を使う検討が具体化しつつある。

本稿では、主にLNG気化器用途でのDCHE™設計面の特徴を紹介する。

1. DCHE™の構造および特徴

1.1 DCHE™の構造

DCHE™はコンパクト熱交換器の一種であり、ミリサイズの流路を形成させたプレートを積層した構造である。当社はこれまで50年以上の納入実績があるアルミ製ろう付けプレートフィン熱交換器 (Brazed Aluminum Plate-Fin Heat Exchanger, 以下ALEX™^{注2)})

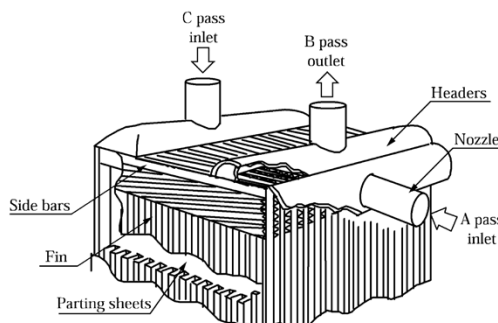


図1 ALEX™構造図
Fig.1 Structure image of ALEX™

という) の設計・製作技術を有しており、DCHE™にはその技術を活用している。ALEX™は、熱交換を行うろう付けされたコア本体、および流体をコア内に導くためのヘッダやノズルからなる(図1)¹⁾。DCHE™はALEX™と同様に積層構造であり、ALEX™で培った製造ノウハウや設計思想をDCHE™へ適用することができる²⁾。製造工程の中で最も大きく異なるのが、流路を形成する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工程である。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

脚注1) DCHEは当社の登録商標である。

脚注2) ALEXは当社の登録商標である。

* 機械事業部門 機器本部 技術部

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て流体が通る流路を形成している。また、DCHE™は拡散接合を適用しているため、他の熱交換器に比べて高い耐圧性能を有している。

1.2 DCHE™の特徴

DCHE™には以下の基本的な特徴がある。

(1) 高耐圧・高耐熱性能

材質の選定、流路サイズの最適化により100 MPa、900℃まで使用可能である。適用可能な温度範囲は法規で規定されている各材質の許容応力表に従う。

(2) コンパクト性

伝熱面積が大きいため伝熱性能が高く、多管式（シェル&チューブ式）熱交換器の1/10程度のサイズで済む。

(3) 優れた耐食性

SUS316Lなどを使用することで冷却水用途などへ適用可能である。

ただしALEX™の方が経済性に優れるため、流体間温度差が小さい50℃以下（単相）、腐食性がない、あるいは耐圧性能要求が13 MPa以下など、ALEX™が使用できる領域についてはALEX™の使用を提案する。

当社はコンパクト熱交換器の一種であるDCHE™とALEX™の両方を取り扱っており、設計および運転条件に応じて最適な熱交換器を提案することが可能である。また、熱交換器や圧力容器など様々な静止機器に対して多数の応力解析の実績を有している。このため、流体間温度差が大きい運転、あるいは運転変動が大きく運転中の損傷が懸念される場合は、熱交換器の期待寿命を有限要素法解析（以下、FEM解析という）を用いて予測することも可能である。

1.3 DCHE™の適用用途

上述したようにDCHE™はコンパクトで伝熱性能に優れる熱交換器である。このため、設置面積に制限がある洋上用機器や、水素ステーション向けのクーラなどに使用される。また、冷却水を使用する天然ガスや水素ガスのクーラ、流体間温度差が50℃以上などと大きいLNG気化器用途など、ALEX™が使用できない場合に採用される。

近年では、米国におけるシェールガスの産出増により、陸上の天然ガスプラントのほか、洋上における浮体式石油・ガス生産貯蔵積出設備（Floating Production Storage and Offloading system：FPSO）や天然ガス液化処理設備（Floating LNG）向けでいくつかのプロジェクトが進んでおり^{3), 4)}、天然ガス流体の熱交換器や圧縮機のアフタガスクーラ向けに適用されるケースが多い。また、同じく洋上向けの用途として期待されているのがLNG燃料船の燃料供給システム（Fuel Gas Supply System：FGSS）で用いられるLNG気化器がある。

この用途では、近年の国際海事機関（IMO）によるSO_x成分排出規制⁵⁾や2025年のCO₂排出規制⁶⁾に向けて、二酸化炭素や硫酸化物、窒素酸化物の排出量が石炭や石油に比べて少なく、環境にやさしい燃料として天然ガ

スの使用が増えることが見込まれている。加えて、洋上設備として設置面積に制限がある場合には機器のコンパクト化が必要となりDCHE™の適用が期待されている。

いっぽう陸上向けにおいても、LNGサテライト基地^{注1)}を使った天然ガス供給の需要が産業向けにおいて増加傾向になっている⁷⁾。さらに、日本をはじめ、米国、欧州、アジアにおいては、温暖化対策目標達成の観点から、増加する再生エネルギーを中長期的に大量貯蔵する手段としての水素への期待が高く、燃料電池車（Fuel Cell Vehicle：FCV）の普及に伴う水素ステーションの建設も進んでいる^{8)~10)}。DCHE™は、ここで用いられる水素圧縮ガスアフタクーラやディスベンサ用プレクーラなどにおいて適用の実績がある。

近年需要が増加傾向にある、洋上向け燃料供給システムやサテライト基地で用いられる天然ガス気化器用途におけるDCHE™の当社独自の設計思想や取り組みの詳細を次章以降で紹介する。

2. 凍結抑制構造

LNG気化器用途では、熱源に用いる温水やグリコール水が熱交換器内流路部においてLNGの冷熱によって凍結するのをいかに防ぎ、連続運転を継続できるかがコンパクト性以外にも重要になってくる。例えば多管式熱交換器など他のタイプの熱交換器では、凍結が生じたときは解氷までLNG気化器の運転を止める必要があることが問題の一つとして認識されている。このため当社では、独自コンセプトを設計に取り入れ、凍結が起こりにくい構造をLNG気化器用途に適用している。本章ではその概要を紹介する。

2.1 コンセプト1：積層構造¹¹⁾

LNG気化器用途の場合の従来の考え方では、COLD側流体であるLNGとHOT側流体との2流体熱交であり、COLD：HOT=1：1の積層数で設計する。しかしこの構造では、HOT側流路内流体が凍結することによって閉塞してしまうと、それが自然解凍するまで待つ必要がある。それに対し、**図2**に示すようなCOLD側一層に対し、HOT1二層、HOT2一層のCOLD：HOT=1：3

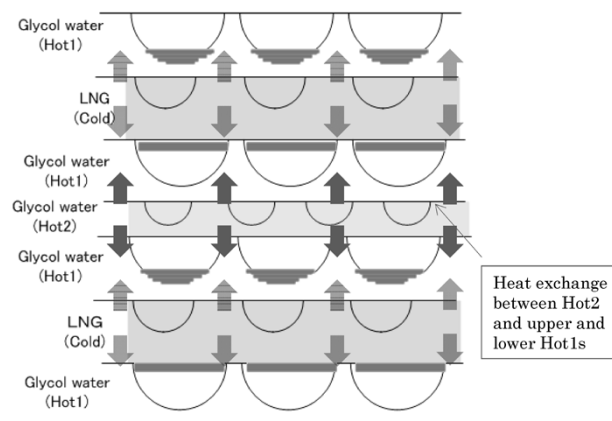


図2 凍結抑制イメージ
Fig.2 Image of antifreezing

脚注1) ローリーなどで一次受け入れ基地から運ばれるLNGを受け入れて再ガス化する二次受け入れ基地

構造を適用することにより、COLD側に接するHOT1の層で凍結が起こり始めたとしてもHOT2の温熱をHOT1へ供給することが可能となる。このため、従来のCOLD:HOT=1:1の構造に比べて、流路を閉塞させるようなHOT側流体の凍結を抑制することが可能である。以降COLD:HOT=1:1の組み合わせを1:1構造、COLD:HOT=1:3の組み合わせを1:3構造と記載する。

2.2 コンセプト2：LNG流路パターン設計

供給されるLNGが低圧の場合、熱交換器の内部でLNG蒸発域が存在する。このため、潜熱やLNG側の伝熱係数の増大により熱交換器のメタル温度（流路の壁面温度）が下がることが予測される。これを緩和するため、LNG蒸発域の伝熱係数が高い部分では、意図的に伝熱性の劣る流路タイプ（ストレート流路）を採用している。また、LNG蒸発域での伝熱面積も小さくするため、LNGの流路ではピッチの大きな流路設計を採用している。

いっぽう熱媒側においては、伝熱係数の高くなる流路タイプ（ウェイビー流路）や、伝熱面積を多く取れるようピッチの小さな流路タイプを採用し、熱交換器のメタル温度を上昇させるように配慮している。

3. 液体窒素(LN₂)およびLNGを用いた性能試験

LNG出口温度やHOT側流体の圧力損失の変化を調べ、機器の性能および流路内流体の凍結条件を確認することによって前章で述べた凍結抑制構造が有効であるかを検討した。本章ではその概要を述べる。

3.1 高圧LN₂試験

3.1.1 気化性能範囲の確認試験

1:1構造と1:3構造のDCHE™を製作し、両構造におけるLN₂入口温度やLN₂流量などをパラメータとして運転可能な範囲の確認を行った。試験に用いた熱媒は40 vol%プロピレングリコール水で凍結温度は-22℃である。図3に気化性能範囲の確認試験結果を示す。まず、プロピレングリコール水の入口温度60℃、流量32.5 m³/hとし、LN₂流量を1,500 kg/hにて試験を実施した。その結果、1:1構造および1:3構造ともに凍結が生じずにLNG出口温度が所定の温度を満足することを確認した。

つぎに、LN₂流量を2,000 kg/h、2,500 kg/h、3,000 kg/h

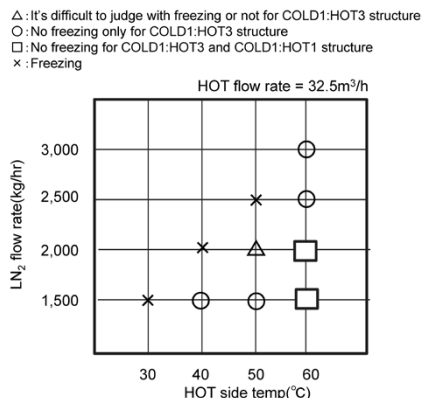


図3 気化性能範囲の確認試験結果

Fig.3 Test results of range for vaporizing performance

へ増加させ、プロピレングリコール水の流量を一定(32.5 m³/h)として入口温度を60℃から50℃、40℃、30℃と低下させて凍結が生じる運転範囲を確認した。その結果、従来設計で用いられる1:1構造ではプロピレングリコール水の入口温度60℃、流量2,000 kg/h以上、また、入口温度50℃以下ではすべての条件において凍結と思われる伝熱性能の低下や熱源側の圧力損失増加が見られた。これに対して1:3構造では、丸印(○)で示しているすべての条件において凍結が生じない結果が得られ、1:1構造に比べてより広範囲の運転条件に対応できることを確認した。

3.1.2 凍結からの性能回復確認試験

上記試験後、熱源流体の凍結からの回復運転が可能であることを以下の条件において確認した。試験結果を図4、流量変化のグラフを図5、圧力損失変化のグラフを図6に示す。

まず、LN₂入口温度60℃、3,000 kg/hの条件にてテス

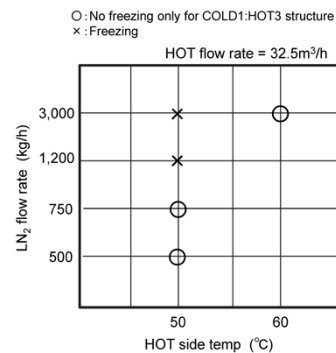


図4 凍結からの性能回復試験結果

Fig.4 Test results of performance recovery from freezing condition

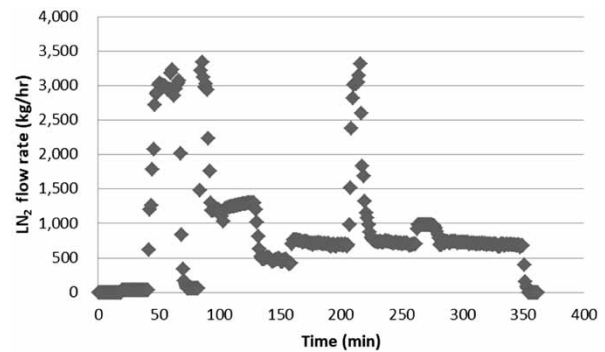


図5 凍結からの性能回復試験(流量変化)

Fig.5 Test results of performance recovery from freezing condition (LN₂ Flow rate)

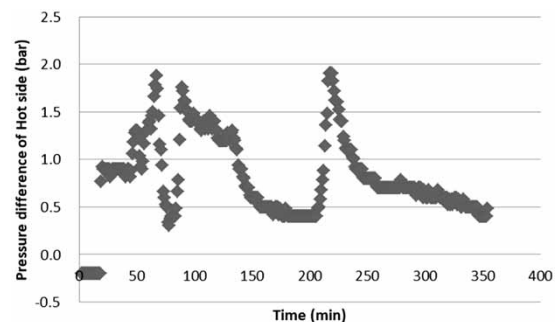


図6 凍結からの性能回復試験:圧力損失変化

Fig.6 Test results of performance recovery from freezing condition (pressure difference of HOT side)

トを行った後、LN₂入口温度を50℃に変化させHOT側流路内流体で凍結が生じたことをHOT側入口出口の圧力損失変化により確認し、ここから流量を減らすことで凍結が回復するかどうかを確認した。流量はグラフに記載のとおり、1,200 kg/h、750 kg/h、500 kg/hの三種類とした。750 kg/hおよび500 kg/hまで減少させた条件でHOT側入口および出口の圧力損失が凍結前のレベルまで下がったことによって凍結が回復したと判断した。すなわち、1：3構造はHOT側流路内流体が凍結を生じたとしてもCOLD側流量を低下させることが回復に有効であることを確認した。また別の方法として、HOT2を別流体として管理する場合は、HOT2側流体の温度を上昇させるか、あるいは流量を増加させることにより凍結の回復が可能である。

3.2 低圧LNGでの試験

3.2.1 熱交換器性能の確認試験

低圧のLNGを用い、機器の内部でLNG蒸発域が生じる条件において試験を実施した。試験条件を表1に示す。2章で述べたコンセプト1に加え、コンセプト2の構造を採用したDCHE™を用いており、これらの凍結に対する有効性を表1に示す試験条件①、②にて確認した。熱交換器の性能評価は、熱交換器の性能を表す総括伝熱係数(U)と伝熱面積(A)の積となる設計UAと実機UAとの比較を行うことで確認した。UAは、熱交換量Qを表す式(1)よりプロセス条件から得られるΔTで割ることで得られる値であり、これは流体の流量および物性が近いとき熱交換器の評価として有効であることが知られている¹²⁾。

$$Q=UA\Delta T \dots\dots\dots (1)$$

ここに、Q：熱交換量 (kW)

U：総括伝熱係数 (kW/m²℃)

A：伝熱面積 (m²)

ΔT：対数平均温度差 (℃)

結果は、表2に示すように試験条件①、②ともに設計条件を上回っており、熱交換器の性能に問題のないことを確認した。

3.2.2 凍結に対する設計指針の確立

前項に引き続き、表1に示した試験条件③を実施した。低圧LNGテストにおいて凍結条件を確認するとともに、当社設計計算による熱交換器内壁面温度との比較を行った。その結果、図7のような設計計算壁面温度と凍結範囲との関係を得た。これらの結果から、設計計算壁面温度とHOT側流体の凝固点に差異があることを確認した。この差としては、通常の運転でも発生する流量や温度変化が影響したものと考え、この値から設計余裕度を決めて設計指針とした。

4. 熱応力対策の検証

LNG気化器用途においては、LNGとHOT側流体との温度差が大きく、大きな熱応力が発生する。どの程度の熱応力が発生するのか、また設計寿命の評価および熱応力の低減方法について検討した。

表1 熱交換器性能確認試験条件

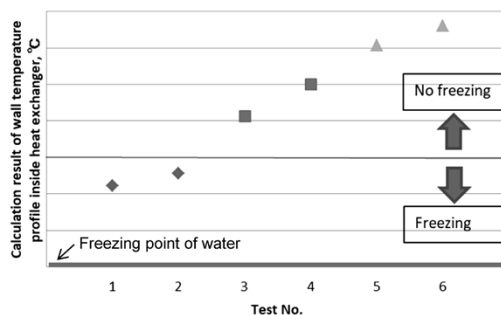
Table 1 Test condition of heat exchanger performance

	LNG side	Hot water side
Pressure	6.5 barg	2.0 barg
Flow rate	123.5 kg/h	9,753 kg/h
Inlet temperature	-125℃	①50℃ (design case) ②40℃ (critical case for freezing) ③30℃ (freezing condition)

表2 熱交換器性能確認試験結果

Table 2 Test results of heat exchanger performance

	Design condition	Test condition ① Inlet temperature: 50℃	Test condition ② Inlet temperature: 40℃
Heat exchanged amount (kW)	26.6	19.53	20.15
Long mean temperature difference (℃)	116.8	48.1	49.7
UA (kW/℃)	0.228	0.406	0.405
Comparison between design condition and test results	100%	178%	178%



Test No.	Hot side in temp (℃)	LNG in temp (℃)
1	30	-129
2	30	-125
3	40	-129
4	40	-125
5	50	-129
6	50	-125

図7 各試験条件での熱交換器内壁面温度計算結果

Fig.7 Calculation results of wall temperature profile inside heat exchanger using each test condition

4.1 熱応力解析による熱応力評価

熱応力の評価は、以下の設計条件において何回起動停止が許容できるのかを確認した。熱応力はFEM解析を用いて算出し、ASME Sec. VIII Div.2に示されているオーステナイト系ステンレス鋼の設計疲労曲線(図8)を用いて設計寿命を算出した。

4.2 実案件における起動停止回数の評価

表3に示す設計条件において熱応力評価を実施した。その結果の応力コンター図を図9に示す。図9より、最も大きな熱応力が発生しているのはHOT側ヘッダとコア本体との溶接部のLNGヘッダ側、およびLNG側ヘッダとコア本体の溶接部であることがわかった。当該部位での最大熱応力振幅および図8のS-N曲線より、設計寿命は6,900回であることを確認した。この結果から、熱応力を低減するためヘッダ位置を適切に配置すると同時に、温水流路の配置を工夫することによって熱応力を低減できることを確認した。1日に5回以上の起動停止で20年(5回/日×365日/年×20年=36,500回)以上となる設計寿命40,000回へと寿命を改善することに成功し

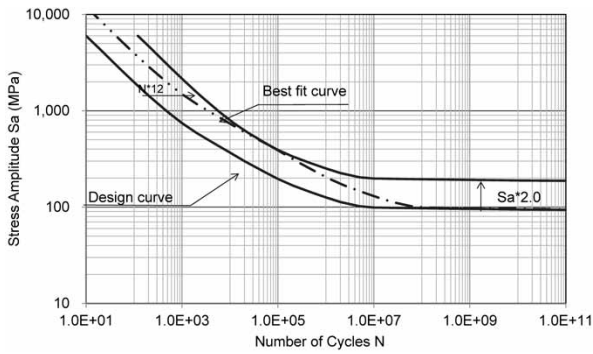


図8 オーステナイト系ステンレス鋼のS-N曲線
Fig.8 S-N curve for stainless steel

表3 設計条件における熱応力評価
(三流体：LNG1, LNG2, Heat medium)
Table 3 Thermal stress evaluation for design condition
(three streams : LNG1, LNG2, heat medium)

	LNG side	Heat medium side
Pressure	6.0 bar	2.0 bar
Temperature	-163°C	60°C
Flow rate	LNG1:840 kg/h LNG2:680 kg/h	25,300 kg/h

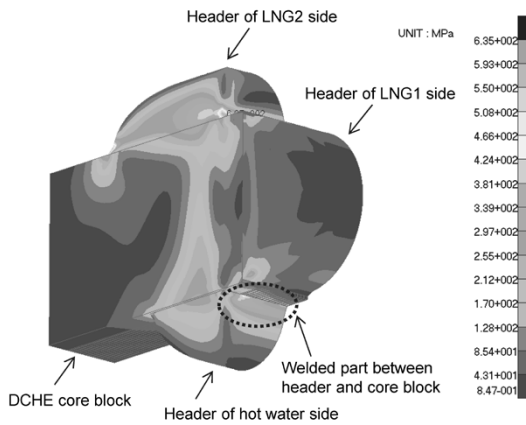


図9 ミーゼス応力カウンター図 (改善前)
Fig.9 Contour map of Mises stress (before improvement)

表4 基本設計と設計改善後の疲労寿命比較
Table 4 Fatigue life evaluation for basic design and improved design

	Basic design	Improved design
Fatigue life (design) ^(*)	6,900 times	40,000 times
Fatigue life (average)	75,000 times	1,000,000 times

^(*) Design fatigue life is considered safety factor by ASME rule.

た(表4)。

5. FGSS用途におけるLNG気化器としてのDCHE™の利点

5.1 設計寿命(熱応力)

FGSS用途におけるLNG気化器は、流体間温度差が大きく運転変動も予想されるため、熱応力に配慮した設計寿命を事前に推算することは重要である。

当社では、2012年より水素ステーション向けに200基

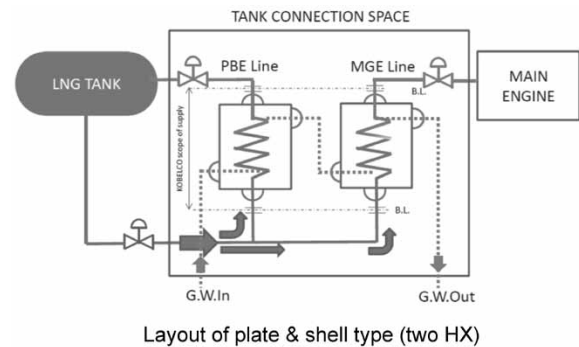
以上のDCHE™を納入しており、水素ステーションにおいても同様に事前に熱応力解析を実施し検証を行っている。実機の経験に基づいた適切な寿命評価、設計改善を行えることがDCHE™における利点であると考えられる。

5.2 タンク加圧用気化器と主機関用気化器の一体化

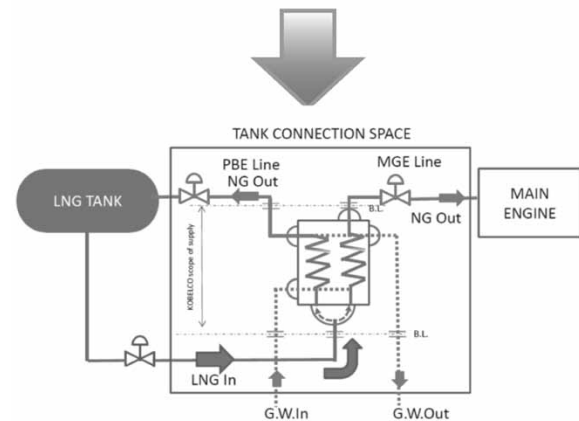
低圧用LNG気化器では、タンク加圧用のLNG気化器、および主機関用気化器の二つの熱交換器が必要となるケースがある。この場合、タンク加圧用のLNG気化器を起動させることによってタンク内LNGを送出し、LNGを気化器へ供給することができ、顧客にとってはポンプを使わずに安価なシステムを構成できるメリットがある。いくつかの顧客では上記のシステムを採用している。従来システムの二流体熱交換器二基に代わり、DCHE™ではタンク加圧用のLNG、主機関に供給されるLNG、およびHOT側流体の三流体熱交換器一基での提案が可能である(図10)。これによって熱交換器の基数を低減させることができ、スペースの有効活用ができる。さらに、周辺配管や架台を低減できることもメリットとして挙げられる。二流体のみだけでなく多流体熱交換とできることもDCHE™のFGSS用途におけるメリットと考える。

5.3 凍結抑制構造

LNG気化器の安定操業に対しては、熱媒の凍結が顧客における現在の最も大きな懸念事項として挙げられている。DCHE™は、コンセプト1：積層構造(COLD：HOT = 1：3構造)で凍結抑制が可能であり、さらに3.2.2項で述べたとおり、凍結に対する設計指針も確立できている。LNG燃料船のオペレーションは負荷が変動するため、設計ポイントでの凍結リスク評価はもちろん



Layout of plate & shell type (two HX)



Layout of DCHE type (one HX)

図10 システムフローのイメージ図
Fig.10 Images of system flow diagrams

のこと、顧客からの条件提示があれば、負荷変動時の凍結リスクを見据えた設計も可能である。

また、万が一凍結が生じても、3.1.2項で述べたとおり、天然ガス流量を減らす必要はあるが、運転を継続しながら凍結から回復する性能も有しており、天然ガス処理プラントの連続運転に寄与できる。

5.4 標準化によるコストダウン

FGSS用途においては、LNG燃料船の主機関の出力ごとに気化量がある程度決まっている。このため、機器を標準化して気化量別の標準品をそろえ、準汎用品として製作していくことによってコストダウンが実現できるものとする。

現状では水素ステーション向けのDCHETMでいくつかの標準品を継続して製作している。この場合、部材の共通化や同時製作により、一基のみ製作する場合に比べてコストダウンを達成している。これらの実績を参考にFGSS用途をはじめとする中・小容量のLNG気化器においても標準化によるコストダウンを進めていく考えである。

むすび = 本稿ではLNG用途におけるDCHETMの特徴について設計面を中心に紹介した。環境規制の影響により、今後ますますLNG気化器の用途は増えていくことと思われる。DCHETMではそのコンパクト性や多流体を一体化できるといったメリットを生かし、引き続き拡販に注力していきたいと考える。また、同じく天然ガスを用いた適用用途として、ガス処理プラントで用いる熱交換器の検討が増えてきている。

当社はDCHETMとALEXTMの両方を提案できる製造メーカーという立場から、引き続き増加する天然ガスプラントへの機器供給に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 野一色公二ほか. R&D神戸製鋼技報. 2003, Vol.53, No.2, p.28-31.
- 2) 三輪泰健ほか. R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.2, p.23-27.
- 3) 松澤進一. JOGMEC資料 シェールを中心とした米国の石油・天然ガス事情. 2018年11月22日.
- 4) プラント雑誌ENN. 2019.10.25号.
- 5) 国土交通省ホームページ https://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji07_hh_000095.html. (参照2019-12-06).
- 6) 国土交通省海事局海洋・環境政策課ホームページ. 国際海運からの温室効果ガス削減対策. 平成30年8月, <http://www.mlit.go.jp/common/001250110.pdf>. (参照2019-12-06).
- 7) 吉田龍生ほか. R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.2, p.37-39.
- 8) NEDOホームページ. 米国における水素・燃料電池技術開発動向. 2019年6月17日, <https://www.nedo.go.jp/content/100895017.pdf>. (参照2019-12-06).
- 9) NEDOホームページ. 武尾伸隆. 欧州における水素関連の研究開発動向. 2019年6月. <https://www.nedo.go.jp/content/100895075.pdf>. (参照2019-12-06).
- 10) 経済産業省ホームページ. 水素・燃料電池戦略ロードマップ. 令和元年6月, <https://www.meti.go.jp/press/2019/09/20190918002/20190918002.html>. (参照2019-12-06).
- 11) 株式会社神戸製鋼所. 野一色公二. 積層型流体加温器および積層型流体加温器による流体の加温方法. 特開2017-166775.
- 12) 化学工学便覧. 丸善出版, 平成23年9月, p.260.



三輪泰健
機械事業部門
機器本部 技術部



東 正高
機械事業部門
機器本部 技術部



野一色公二
機械事業部門
機器本部 技術部

(技術資料)

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*・大園知宏・松岡 亮

Large Capacity Reactor, Stacked Multi-Channel Reactor (SMCR™) for Flow Chemistry

Nobumasa ICHIHASHI・Tomohiro OZONO・Akira MATSUOKA

要旨

従来の攪拌槽型反応器に代わるフロー（連続）合成反応器であり、大容量処理が可能なマイクロチャンネルリアクタであるSMCR™(Stacked Multi-Channel Reactor)を開発した。開発後の取組として、金属製SMCRのラインナップに加えて、用途拡大を目指し、高い耐食性を持つセラミック製SMCR™を開発し、熱衝撃に対する検証試験も実施した。さらに機器の供給のみでなく、SMCR™の商業化への促進を目的として、基礎試験やベンチ試験を積極的に受託して実施している。ベンチ試験では、当社内に設置したベンチ試験装置で検証試験を行い、SMCR™ユニットの有用性を検証している。

Abstract

The stacked multi-channel reactor (SMCR™) is a (continuous) flow chemical reactor that replaces the conventional stirred bed reactors and has been developed as a reactor capable of large-capacity processing. As an effort after the development, an SMCR™ made of metal has been added to the lineup and, furthermore, a ceramic SMCR™ with high corrosion resistance has been developed to expand the applications, for which verification tests have been conducted against thermal shock. Moreover, basic tests and bench scale testing equipment have been actively commissioned and implemented with the aim of promoting the commercialization of SMCR™ in addition to equipment supply. As for bench scale testing, a bench scale testing apparatus installed in Kobe Steel performs verification tests to verify the usefulness of SMCR™ units.

キーワード

フロー合成、連続生産、マイクロチャンネルリアクタ、セラミック製SMCR、耐食性、熱衝撃試験、ベンチ試験装置、SMCRユニット、循環式SMCRシステム

まえがき = 異なる二つの流体を直径1mm程度の微細流路に流すだけで効率的に反応させる。これがマイクロチャンネルリアクタの原理である。国内外の化学品製造プロセスにおいて、高効率化、品質の安定、安全性の向上の観点で、微細な空間で物理化学的な処理を行うマイクロチャンネルリアクタによるフロー合成（連続合成）が注目されている^{1),2)}。これまでは研究室レベルでの検討や医薬品分野など、少量で高付加価値製品への適用検討が主体であった。しかし最近では、ファインケミカルやバルクケミカルなど、大容量処理が求められる用途への検討が本格的に行われている。

当社では、フロー合成向けに大容量処理が可能なマイクロチャンネルリアクタとして積層型多流路反応器(Stacked Multi-Channel Reactor, 以下SMCR™^{注1)})を開発し、商業生産プラントへの適用を目指している。本稿では、SMCR™の基本的な構造や特徴、商業生産への適用に向けた当社の取り組みと今後の展望について述べる。

1. SMCR™の特徴と適用用途

1.1 SMCR™の基本的構造と特徴

マイクロチャンネルリアクタは一般的にサブミリ～数ミ

リの微小な流路を有し、流体が機器の内部で合流する構造となっている。この微小な流路が反応場となり、高い伝熱性能や物質移動速度が得られる³⁾ことがマイクロチャンネルリアクタの最大の特徴である。従来の攪拌（かくはん）槽型反応器とマイクロチャンネルリアクタとの比較を図1に示す。マイクロチャンネルリアクタは一般的に流路1本での処理量が小さいため、複数の流路を並べる、「ナンバリングアップ」という手法を用いて処理量を増加させる。

SMCR™は当社独自開発の製品である。本機器は「ケミカルエッチング」と「拡散接合」を用いて流路を多流路化し、ナンバリングアップすることによって容易に大容量化できる。図2に流路の基本構造を示す。ケミカルエッチングで1枚の金属プレート上に複数流路を形成し、積層した複数のプレートを拡散接合によって強固に接合する。こうした構造により10,000本以上の流路を有する反応器も製作できる。SMCR™内部の流路の数と長さは、反応条件に従って自由に設計が可能である。また、一部のプレートを熱媒体流路に使用することによって反応温度を調整することも可能である。

脚注1) SMCRは当社の登録商標である。

* 機械事業部門 産業機械事業部 機器本部 技術部

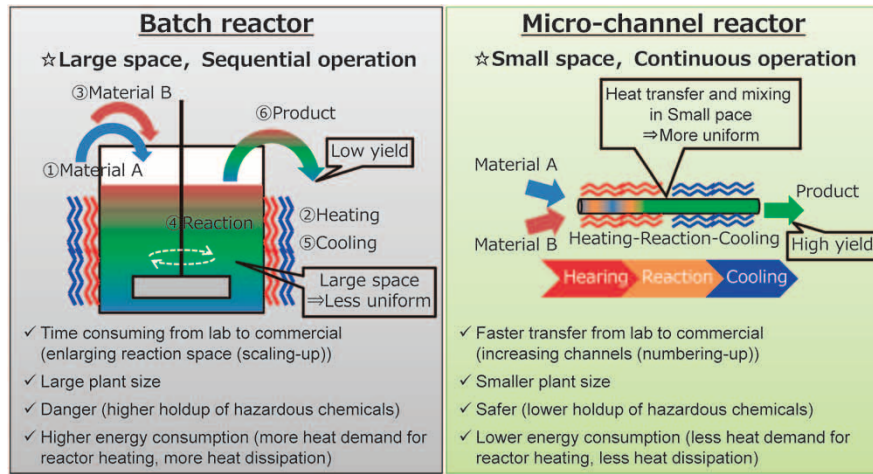


図1 攪拌槽型反応器とマイクロチャネルリアクターの比較
Fig.1 Comparison between batch reactor and micro-channel reactor

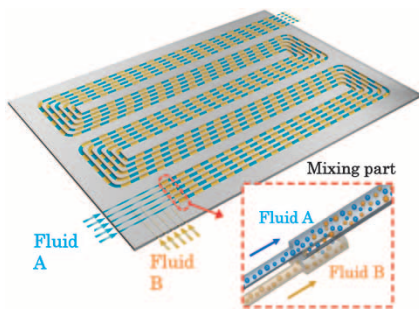


図2 SMCRTMの複数流路の基本構造
Fig.2 Basic construction of multi channel of SMCRTM

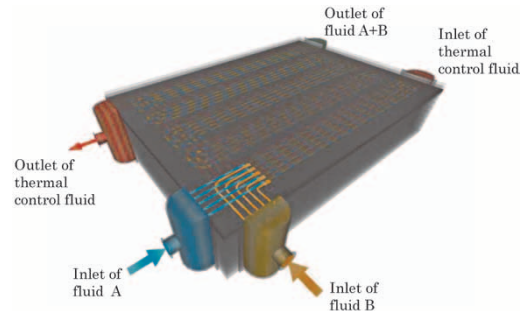


図3 SMCRTMの全体および内部イメージ
Fig.3 Overall and inside image of SMCRTM

このような特徴を有するSMCRTMは、さまざまな反用途の大容量化や連続処理化、装置のコンパクト化を同時に達成できる反応器であることから、商業化に向けての高いニーズがある。SMCRTMの全体および内部イメージを図3に示す。

1.2 SMCRTMの適用用途

SMCRTMの主な適用用途としては、化学品製造プロセスの各单位操作における「合成」および「抽出」が中心になると考えられる。各種有機合成やポリマー合成などは合成時の反応速度が速く反応熱が大きいいため、従来の攪拌槽を使用した合成は温度制御が難しい。このような合成に対してSMCRTMを用いることによって緻密な温度制御が可能となり、製品の品質安定やプロセスの高効率化が期待できる。

いっぽう抽出用途では、微細な流路を用いることによって接触面積が増大し、目的物質の抽出効率を向上させることができる。また、SMCRTMの流路内部で積極的な

流体混合を行っていないため、抽出後の相分離性能が従来の攪拌槽に比べて格段に改善する。こうしたメリットを生かせる用途として、反応後の不純物や触媒の除去、レアメタルの回収などへの展開が期待される。

2. SMCRTMの商業化に向けて

SMCRTMの商業生産に向けた主な開発ステップを図4に示す。基本的には従来の化学プロセスの開発と同様に、まずラボでの基礎試験を行って反応条件を最適化する。その後、複数の流路を有するSMCRTMを用いてベンチ試験を実施し、基礎試験との差異を確認する。最後に、商業生産と同様の機能を有したプラントを用いたパイロット試験によって性能や運転制御面を確認して商業生産に移行するという流れになる。先にも述べたようにSMCRTMを用いる場合、ナンバリングアップという手法を用いて処理量を増やし、商業化に進むことができる。このため、基礎試験で得た反応条件をそのまま商業生産

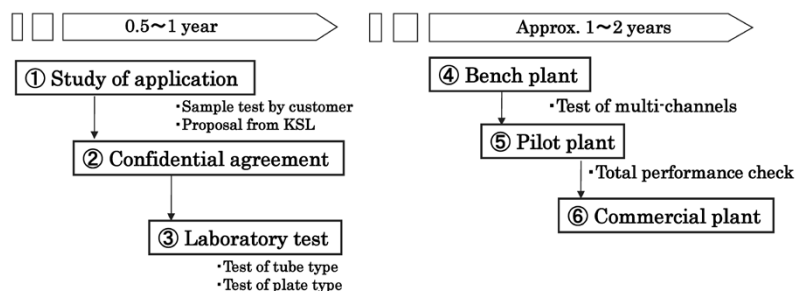


図4 商業化までの開発の流れ
Fig.4 Development work flow for commercialization

にも用いることができることから化学プロセス開発時のリスクが低減し、開発の低コスト化・期間短縮が期待できる。

SMCR™を並列あるいは直列に配置することによって理論的に大容量化の上限はなく、構造面では商業化に十分な機能を有している。いっぽう、腐食性の高い用途に用いる場合、エッチングや拡散接合が可能な金属は使用できない。このため、用途を拡大するためには材質面の問題をクリアする必要がある。

そこで当社は、SMCR™の商業生産をさらに促進するための取り組みとして、「セラミック SMCR™の開発」を進めてきた。さらに、商業化に向けてプロセス（ソフト）面の充実を図るため「基礎検討ステージおよびベンチステージでの受託試験」を行ってきた。取り組みの内容およびその成果を次章以降にて紹介する。

3. セラミック SMCR™の開発

SMCR™は当初、ステンレス鋼をメインとした金属製の機器のラインアップのみであった。しかし、酸・アルカリを多用するプロセスなど耐食性が要求される用途や、医薬・半導体・食品業界など金属イオンの溶出が許容されない用途など、金属製の機器では対応できない用途が多くある。そういった用途への適用拡大を目的とし、セラミック SMCR™の開発を行った。

3.1 セラミック SMCR™の特徴

セラミックは一般的に高い耐食性を有し、また高温での強度が高いという特徴を持つ。いっぽうで脆性（ぜいせい）破壊を起こしやすい材料であり、急加熱・急冷却などを伴う運転時には注意が必要となる。当社では構造解析により SMCR™の構造を最適化し、耐熱衝撃性に優れたセラミック SMCR™を開発した。具体的には、図5に示すとおり、本体のセラミックコアから分離した金属または樹脂製のフランジ部から流体の供給・抜き出しを行う構造とした。セラミック SMCR™は以下のような特徴を有している。

- ①流体供給の不連続な形状部をセラミック本体になくして直線流路のみにした。これにより、応力集中の緩和が図られ、高い耐熱衝撃性を有する構造である（図6参照）。
- ②セラミックコア内部に流路を最大限配置し、流路がなく温度変化がしにくいセラミックの部分をも最小化

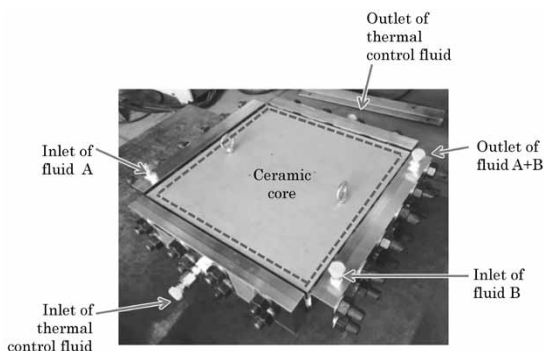


図5 セラミック SMCR™の外観
Fig.5 Ceramic SMCR™

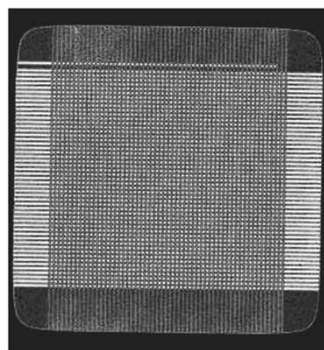


図6 セラミック SMCR™の流路内部構造
Fig.6 Channel flow pattern of ceramic SMCR™

表1 セラミック SMCR™の仕様
Table 1 Specification of ceramic SMCR™

Size (mm)	465 × 505 × 185
Weight (kg)	75
Channel specification	Size: 2 (mm) rectangle Length: 36 (m) Number: 1 Channel
Material (core)	Alumina (Al ₂ O ₃)
Material (flange)	Hastelloy/ PEEK / PPS
Design temperature (° C)	180
Design pressure (MPa)	2
Internal volume (ml)	max. 144

した。これによって、セラミックコアと温度が異なる流体供給時の機器の温度分布の均一化を図り、熱応力の発生を最小化できる。

3.2 熱負荷試験の実施

つぎに、熱衝撃性を検証するため、3.1節にて説明した構造を有して表1に示す仕様のセラミック SMCR™を製作して熱負荷試験を実施した。すなわち、スタートアップ時の温度調整用流路に供給する流体の温度と機器表面温度との許容温度差を明確にすることにより、実際の運転環境にて使用できる機器かどうかを検証した。機器を安全に使用するための機器と流体間の許容温度差として、蒸気や液体窒素を用いた熱衝撃試験および解析結果から65℃に設定した。機器の立ち上げにおいて、機器と流体間の温度差が65℃を超えることが想定される場合には、機器の予熱を段階的に行って流体との温度差を管理することによって対応が可能となる。

今後、実運転データを蓄積することによってさらに許容値の精度を高め、商業生産用機器として用途を拡大する。

4. 受託試験の実施

SMCR™の開発当初は、SMCR™に適用する反応条件を顧客にて最適化し、その反応条件に沿って SMCR™を設計するというステップでの商業化を目指していた。しかし、顧客で実験設備を準備することや実験条件を決定することが困難で問題となっていた。そこで、直近の当社の取り組みとして、基礎試験およびベンチ試験段階

における各種試験を当社が積極的に受託している。これは、当社の研究所に基礎試験装置およびベンチ試験装置を有していることによる。基礎試験やベンチ試験の実施に加えて、試験結果に基づく商業生産用SMCR™の仕様検討、および経済性評価までを一貫して実施することで商業化の促進が期待される。

4.1 ベンチ試験装置

ベンチ試験装置は2018年より当社総合技術研究所内に設置している。ベンチ試験装置の外観写真を図7に示す。ベンチ試験装置はSMCR™の運転に必要な機器・計装類（タンク、ポンプ、各種センサ類、セトラ、熱媒／冷媒供給ユニット、など）を有しており、SMCR™は反応条件や処理量に応じておのおの取り付けが可能な構造となっている。ベンチ試験装置の主な設置・使用目的は大きく以下の3点である。

- ① SMCR™を組み込んだベンチ試験の実施による商業運転のための運転・制御面での知見を獲得する。
- ② SMCR™を用いたベンチ試験により基礎試験と商業生産の間の補完的なデータを取得する。
- ③ フロー合成用のユニット設備のショールームとして使用し、対外的なPRを行う。

4.2 ベンチ試験装置の検証試験

設置したベンチ試験装置およびそれに組み込んだSMCR™の有用性を確認するため、ベンチ試験装置を用

いた検証試験を行った。本試験では抽出操作を対象とし、模擬抽出物質としてフェノールを溶解させたドデカンとフェノール抽出剤である水をSMCR™内で液液接触させ、フェノールを水側へ抽出した。単流路での抽出試験から得られたデータを基に、標準型のSMCR™に適用した場合の性能を推定し、推定した抽出率が得られるかを試験により確認した。本試験のフロー図を図8に、組み込んだ標準型SMCR™の外観を図9に示す。

標準型のSMCR™は半径1mmの半円流路を24本有している。本抽出操作では多段（3段）の抽出操作としており、フェノールを0.1 wt%溶解させたドデカンを1段目から3段目まで順次圧送し、抽剤である水はフレッシュな水を各段に供給するシステムとしている。各段のSMCR™の下流の分相タンクにはレベルセンサが取り付けられており、タンク内におけるフェノールドデカン溶液と水の界面位置を計測する。界面位置を一定に保つように水相の抜出量を制御し、ドデカンを後段のSMCR™へ圧送する方式を採用することでポンプの数を増やすことなくシンプルな運転を可能にしている。

ベンチ試験結果を図10～図13に示す⁴⁾。図10は各SMCR™の後段に取り付けられた分相タンクでのドデカンと水の界面高さの時間的推移を示している。この図からは、各段の分相タンクのドデカンと水の界面高さを一定に保つことができていることが確認できる。また

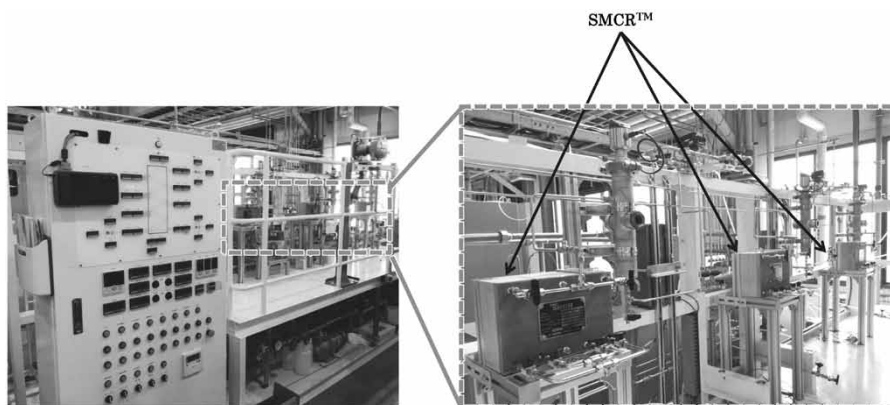


図7 ベンチ試験装置の外観
Fig.7 Bench stage unit

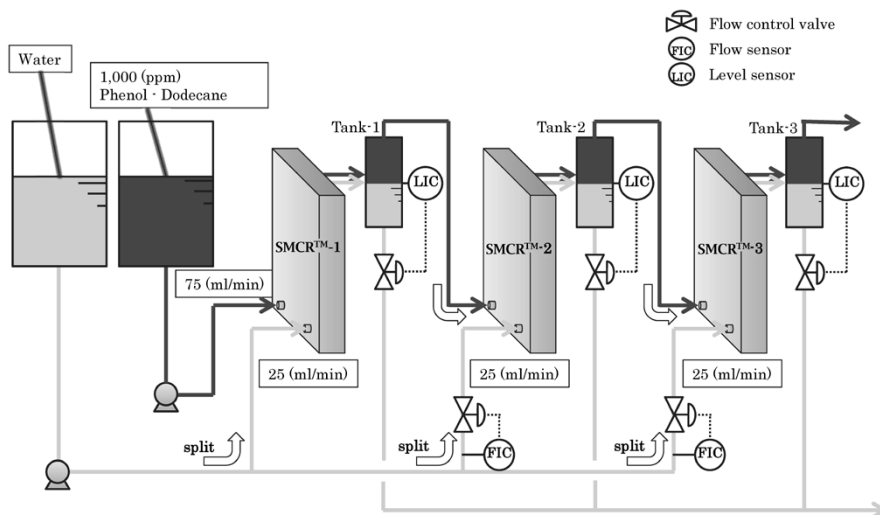


図8 SMCR™を組み込んだベンチ試験装置のフロー図
Fig.8 Flow diagram of SMCR™ bench unit

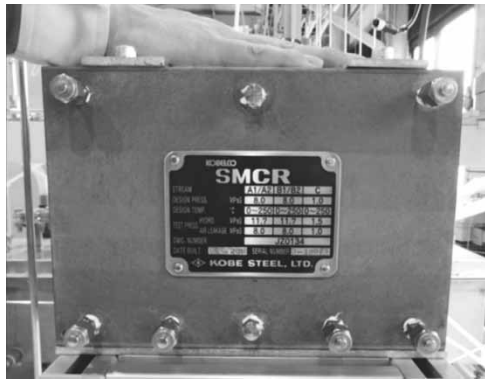


図9 標準型SMCR™の外観
Fig.9 Standard SMCR™

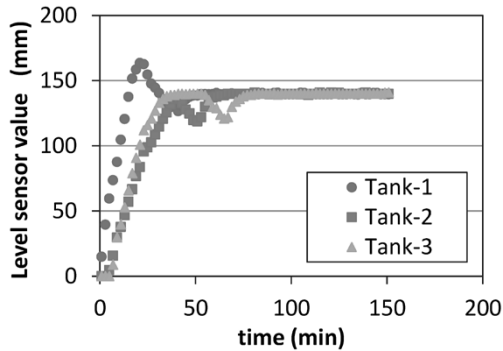


図10 各段における界面レベルの時間経過
Fig.10 Interface level of each stage

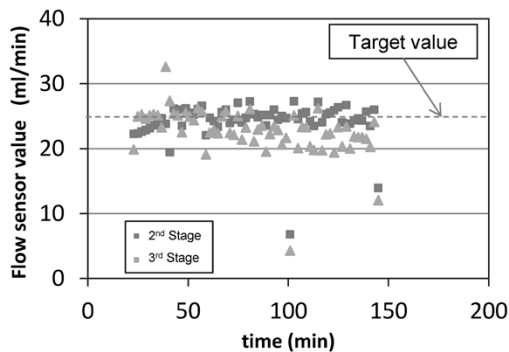


図11 各段の水相の流量
Fig.11 Flow rate of water phase of each stage

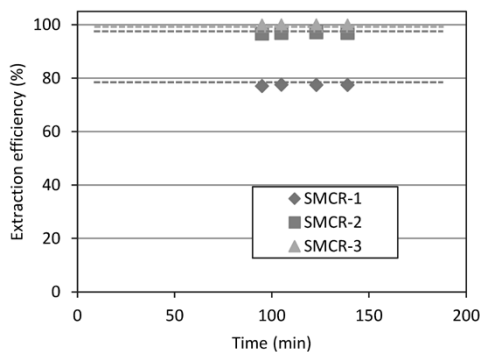


図12 抽出率の時間経過
Fig.12 Results of extraction efficiency

図11は、各段への水の供給量の時間的推移を示しており、2段目および3段目への水の分配についても、ややばらつきはあるもののおおむね設定値付近で安定して制御できることが確認できる。

図12は、各段におけるドデカン中のフェノールの水

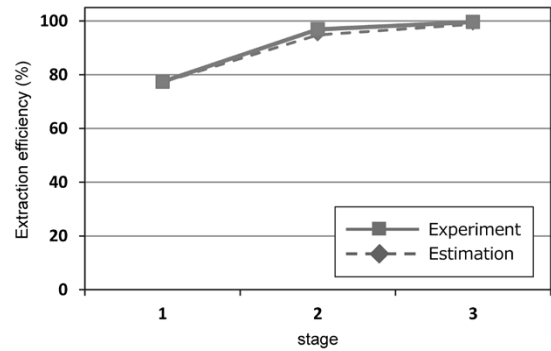


図13 抽出率の時間経過
Fig.13 Results of extraction efficiency

側への抽出率を示す。なお、フェノールの抽出率 E は初期のドデカン中フェノール濃度 C_0 と、 n 段目の分相タンク出口におけるドデカン中フェノール濃度 C_n とを用いて式(1)で表される。

$$E = \frac{C_0 - C_n}{C_0} \dots\dots\dots (1)$$

図12より各段の抽出率は時間の経過によらず一定で安定して抽出を行っていることを確認した。

また、各段におけるフェノール抽出率の実験値と推算値を示したのが図13である。各段におけるフェノール抽出率の推算値は、ビーカースケールでのバッチ式抽出試験により得られた平衡状態における水側とドデカン側とのフェノール濃度の関係(抽出等温線)から計算した平衡抽出率である。図13より、バッチ式抽出試験により得た平衡状態におけるフェノール抽出データに基づく推算結果とベンチ試験結果とはほぼ一致し、バッチ式抽出試験結果を用いてSMCR™抽出システムの設計が可能であることを確認した。

5. SMCR™の今後の展望

SMCR™の機器供給および直近の基礎・ベンチ試験の実施などの取り組みにおいて、SMCR™の商業化の早期達成を目標としており、さらに中・長期的なビジョンとしてSMCR™の標準ユニット化を行っていく。すなわち、現行では用途ごと・顧客ごとに基礎試験の結果に基づいた商業生産用SMCR™をオーダーメイドにて仕様検討を行っている。これを、SMCR™に加えてポンプ、タンク、および計装類を含んだユニットを標準ユニットとし、処理量に応じて数種類ラインナップすることによって低コスト化の実現を考えている。

いっぽうで、反応条件の異なるプロセスに標準ユニットを適用するためには、図14に示すような循環式システムを標準ユニットとして構築することを想定している。これは、例えば多段抽出に用いる場合、SMCR™内である一定時間抽出された原料と抽剤を再びそれぞれのタンクに戻す。この操作を一定時間繰り返した後、新しい抽剤に入れ替えて再度SMCR™内で抽出操作を行うというコンセプトである。この操作方法により、任意の抽出時間・抽出回数に対してユニットの仕様を変更する必要がなく、またユニットの構成をシンプルにすることができる。こうした標準ユニットについて今後、実用化

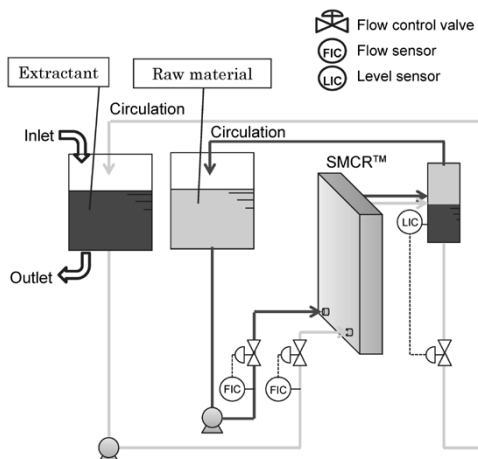


図14 循環式システムの概要
Fig.14 Concept of circulation unit

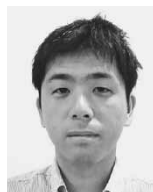
を目指した詳細仕様の検討や実証試験を行い、早期の製品化を目指す。

むすび = 本稿ではSMCR™の特徴に加え、当社の直近の取り組みや今後の展望について紹介した。化学プロセスにおいては近年の環境問題への取り組みや、高生産効率化ニーズの高まりなどから、バッチ処理からフロー合成生産へ進むことが予想されている。しかしながら、プロセスの変換には解決しなければならない課題が多くある。そこで当社は、セラミックSMCR™などの機器の開発から基礎試験やベンチ試験の実施を通じて、顧客のフロー化の採用を促進する活動を行ってきた。そうしたなかで実際に商業化を意識した具体的な検討に進むケースが増えている。このため、早期の商業生産を達成し、

さらに標準的なユニットの供給を通じてフロー合成の初期検討を迅速化することにより、フロー合成生産への転換に貢献したいと考えている。

参考文献

- 1) マイクロリアクタテクノロジー. 株式会社エス・ティー・エス, 2005, p.1-10.
- 2) M. N. Kashid et al. Chem. Eng. Sci., 2011, Vol.66, p.3876-3897.
- 3) 吉田潤一. マイクロリアクターの開発と応用. シーエムシー出版, 2003, p.4.
- 4) 松岡 亮ほか. Bench-scale demonstration of multi-stage continuous process with large capacity microchannel reactor (SMCR™). 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress (APCChE 2019).



市橋伸理

機械事業部門 産業機械事業部
機器本部 技術部



大園知宏

機械事業部門 開発センター
技術開発部



松岡 亮

技術開発本部
機械研究所

(解説)

圧縮空気エネルギー貯蔵システム

猿田浩樹*・佐藤 隆 (博士(工学))・中道 亮・戸島正剛・久保洋平

Compressed Air Energy Storage System

Hiroki SARUTA・Dr. Takashi SATO・Ryo NAKAMICHI・Masatake TOSHIMA・Yohei KUBO

要旨

CO₂排出量削減の観点から、再生可能エネルギーの不安定な出力を平準化するための大規模蓄電設備の普及が待望されている。圧縮空気エネルギー貯蔵システムは、長時間かつ大容量のエネルギーを貯蔵するのに適している。とくに、岩塩層が広く分布する北米や中華人民共和国などにおいては、その岩塩層中に形成した地下空間を圧縮空気の貯蔵に用いると設備のkWh単価を低下させることができる。応答性は1 MWクラスの大型の実証設備で取得したデータをもとにしており、指令に対して秒単位で追従することができている。さらに、圧縮空気エネルギー貯蔵システムの今後の展開を述べる。

Abstract

Large-scale power storage equipment for leveling the unstable output of renewable energy has been expected to spread in order to reduce CO₂ emissions. The compressed air energy storage system described in this paper is suitable for storing large amounts of energy for extended periods of time. Particularly, in North America, China and other areas, where rock salt layers are widely distributed, using underground spaces formed in the rock salt layers to store compressed air can reduce the unit kWh cost of equipment. The equipment's responsiveness was obtained on the basis of the data for large-scale demonstration equipment of 1 MW class, verifying that the equipment can respond to commands within seconds. This paper further describes the future development of the compressed air energy storage system.

キーワード

再生可能エネルギー, CO₂排出量削減, 圧縮空気, エネルギー貯蔵, スクリュー式圧縮機, スクリュー膨張機, 電力出力変動緩和, 大規模蓄電

まえがき = 近年、気候変動抑制に関するパリ協定により課された温室効果ガスの排出削減要請に加え、太陽光発電や風力発電の発電単価の大幅な低下により、再生可能エネルギーの導入が世界的に急速に進んでいる。

しかしながら、再生可能エネルギーである太陽光発電や風力発電の発電電力は、日照や気象条件によって安定しないという問題がある。このため、そのまま系統連系すると電力系統に対する擾乱(じょうらん)要因となる。その結果、電力需給のバランスが崩れて周波数変動を引き起こし、最悪の場合、大規模な停電を引き起こす可能性がある。風力や太陽光のような再生可能エネルギーは需要と一致させるように制御することはできないことから、需要と供給のアンマッチが生ずる。このアンマッチの緩和は主に火力発電出力の調整により行われているが、不安定な出力を平準化して調整負荷を減らすことができれば、再生可能エネルギーの活用を後押しすることができる。このため、発電出力の平準化が可能な大規模蓄電設備の普及が、CO₂排出量削減の観点から求められている。

このような背景から当社は、一般財団法人エネルギー総合工学研究所からスクリュウ式の圧縮機・膨張機を用いた新たな圧縮空気エネルギー貯蔵(Compressed Air Energy Storage, 以下CAESという)システムを受注・納入し、同研究所と早稲田大学が2017年4月から一年

半にわたって行った実証試験に供した。なお本実証試験は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下、NEDOという)が進める「電力系統出力変動対応技術研究開発事業」の一環として進めたものである。

本稿では、当社が設計製造したCAES設備の性能を紹介するとともに、当社における今後の展開を述べる。

1. CAES設備

当社のCAES技術は、スクリュウ式圧縮機によってまず圧縮空気をタンクに貯蔵する。つぎに、この貯蔵した圧縮空気をスクリュウ式膨張機で膨張させ、膨張機に直結した発電機を駆動して発電する。また、圧縮時に発生した圧縮熱を熱媒で回収し、膨張機に流入する前の圧縮空気を予熱することによって充放電効率を改善することを特長としている。また、機器からの放熱ロスによる充放電効率の低下を低減するための断熱対策を施している。

それぞれ充電時および放電時のCAESシステムのフローを図1および図2に示す。これらを比較すると分かるように、圧縮空気と熱媒のフローの方向は反対であるが、その主要構成機器は充電時と放電時でほぼ同一である。スクリュウ圧縮機を使用する場合、スクリュウを逆回転させることによってそのままスクリュウ膨張機として使用することができる。これは、圧縮機兼膨張機としてシス

* 機械事業部門 開発センター

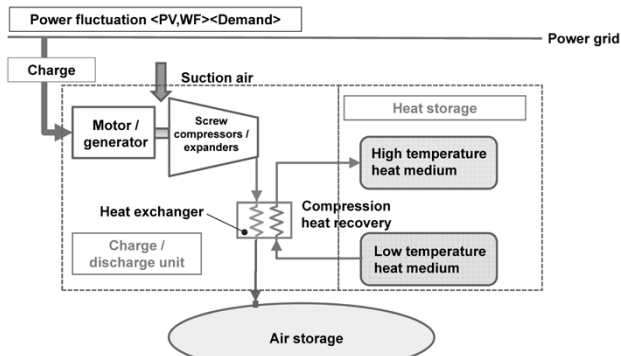


図1 圧縮空気エネルギー貯蔵システムのフロー（充電時）
Fig.1 Charge flow of compressed air energy storage (CAES) system

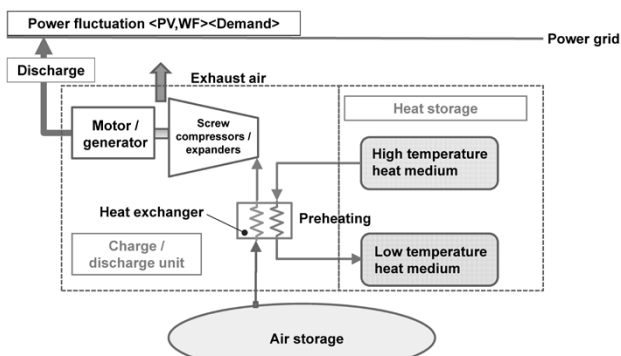


図2 圧縮空気エネルギー貯蔵システムのフロー（放電時）
Fig.2 Discharge flow of CAES system

テムを構成することもできることを意味する。このようにすることによって設備をコンパクトにできるだけでなく、設備コストを大幅に抑制することができる¹⁾。

2. 実証設備の概要

当社では、断熱式CAES技術の開発を行うに際して、まず神戸総合技術研究所内に50 kWクラスの小型プロトタイプ機を設置し、各種の基礎試験を行った。つづいて、この小型プロトタイプ機で知得したノウハウを生かして、一般財団法人エネルギー総合工学研究所に1 MWクラスの大型実証設備を納入した。本章では、この二つの設備の概要を説明する。

2.1 50 kW小型プロトタイプ機

当社神戸総合技術研究所内に設置した50 kWクラスの小型プロトタイプ機の外観を図3に示す。この設備は、当社の汎用オイルフリースクリュウ圧縮機（出力55 kW）をベースに、CAES技術の実験用に圧縮機と膨張機に改造したものである。圧縮空気を貯蔵する蓄圧タンクは、内容積7.6 m³、耐圧0.97 MPaGの鋼製タンクを4本設置している。

この社内実験設備は2016年2月から発電試験を開始し、圧縮機および膨張機の試運転、熱交換器の性能試験などを行った。この試験を通じて得られた知見は、1 MWクラスの大型実証設備の設計・製作に生かすことができた。

2.2 1 MW大型実証設備

図4は静岡県賀茂郡東伊豆町に設置されていた1 MWクラスの大型実証設備（以下、伊豆実証設備という）である^{2), 3)}。この設備は、東京電力ホールディングス株

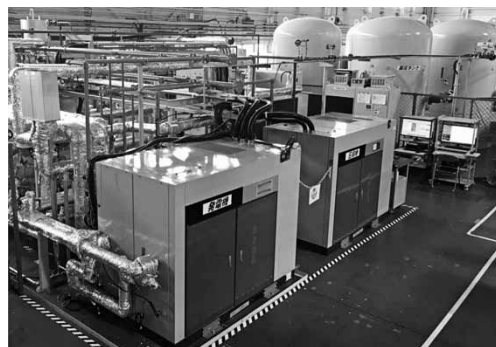


図3 50 kW小型プロトタイプ機の外観
Fig.3 Appearance of 50 kW small-scale prototype



図4 1 MW大型実証設備の外観
Fig.4 Appearance of 1 MW large-scale demonstration plant

式会社 東伊豆風力発電所に隣接して設置され、経済産業省による2017年3月の使用前検査を経て、同年4月に稼働した。その後、2018年10月に同発電所が閉所するまでの1年半にわたり、一般財団法人エネルギー総合工学研究所と早稲田大学が風力発電所の発電電力の変動緩和に関わる各種実験を行った。

この設備は、充電ユニット、蓄熱ユニット、放電ユニットと名付けた三つのユニットから構成された500 kWの基本ユニットを2セット並列接続しており、最大入出力電力1 MWの充放電が可能である。

各ユニットは、当社工場から実証試験地までの搬送作業や現地での据付工事などが容易にできるように、20フィートコンテナ相当の大きさの筐体（きょうたい）とした。このため、圧縮空気タンクの据え付けも含めた据付工事の期間を、1箇月以内に抑えることができた。規格化されたコンテナ内に収納することは、運用開始後のメンテナンス作業を容易にできるというメリットもある。また、定期点検時や故障修理時に設備全体を停止させることを避ける目的で、複数の基本ユニットを並列に接続した。図5、図6にそれぞれ、充電ユニットおよび放電ユニットの概要を示す。いずれも、内部構造を透視可能な斜視図、正面図、および上面図を示している。

充電ユニット内には、当社標準の160 kWクラスの二段型オイルフリースクリュウ空気圧縮機の本体部分を3台収納し、その下部に熱交換器を配置した。台数制御と回転数制御を組み合わせることによって500 kWまでの連続的な出力制御を可能にした。圧縮時に発生する圧縮熱は、熱交換器によって熱媒で吸収し、蓄熱ユニット内に収納した熱媒タンクに貯蔵した。熱媒の最高温度は、汎用圧縮機が使用可能な200℃以下に抑えた。

いっぽう放電ユニット内にも、160 kWクラスの二段型オイルフリースクリュウ空気圧縮機の本体部分を4台収

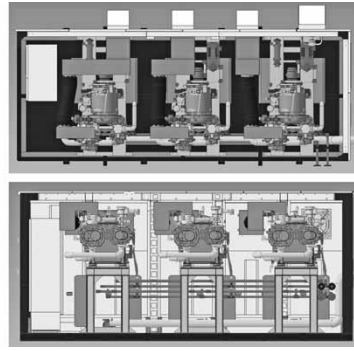
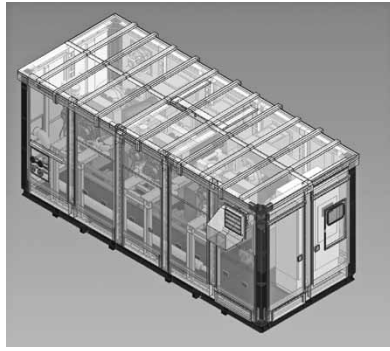


図5 500 kW 充電ユニット
Fig.5 500 kW charging unit

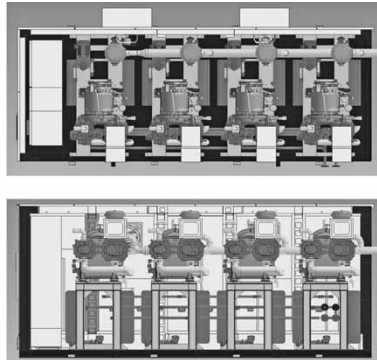
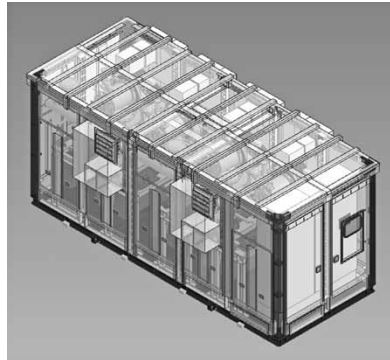


図6 500 kW 放電ユニット
Fig.6 500 kW discharging unit

納し、圧縮時の回転方向と逆方向に回転させることによって膨張機として機能させた。圧縮機と膨張機の台数が異なるのは、充放電効率を考慮したことによる。蓄熱ユニットの高温熱媒を熱源として熱交換器によって空気タンクの常温レベルの圧縮空気を加熱して高温の圧縮空気とする。これを膨張機に給気して大気との圧力差トルクでスクリュを回して発電機を駆動した。

3. 伊豆実証設備の性能

伊豆実証設備は、スクリュ式の圧縮機と膨張機とを使用している。このため、従来のCAESシステムで使用されているターボ式の圧縮機および膨張機を使用する場合に比べて、充電指令や放電指令に対して応答性がよいという特長がある。本章では、伊豆実証設備の運転により得た応答性を中心に説明する。

3.1 立ち上がり性

伊豆実証設備において、待機状態から1 MWの最大充電状態に立ち上げた際の応答特性の一例を図7に示す。また、1 MWの最大放電状態に立ち上げた際の応答特性の一例を図8に示す。図7、図8において、縦軸のゼロが充放電ゼロの状態を示しており、マイナスの値は充電状態（圧縮機稼働状態）を、プラスの値は放電状態（膨張機稼働状態）を示す。

図7、図8に示すように、指令値（signal）を受けて30秒前後で、停止状態から最大充電、あるいは放電電力に到達することができている。このことから、風力発電所の出力変動緩和用途に十分使用可能であるといえる。

数十MWクラスのより大規模な設備となっても、単位ユニットを並列に増設することで対応できることか

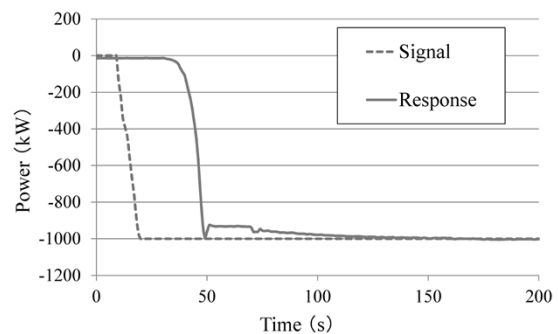


図7 充電時の応答時間
Fig.7 Response time in charging

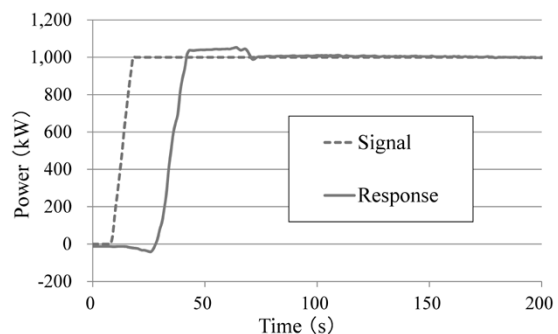


図8 放電時の応答時間
Fig.8 Response time in discharging

ら、立ち上がりの応答時間は大きくは変わらないと考えられる。停電時のバックアップ電源として考えた場合、瞬停対策のための機器は別途必要であるが、大電力を比較的早期に供給できる設備として活用可能である。

3.2 指令追従性

風力発電所の発電出力は風況によって大きく変化するため、その変動を緩和するためには出力指令に対する応

答性が重要になる。

伊豆実証設備の指令追従性を評価するに際して、アメリカ合衆国北東部の送電会社であるPJM Interconnection LLC (PJM) が応答確認試験用として公開している模擬指令(Reg.D)⁴⁾を使ってCAES設備の応答性を評価した。図9はその結果の一例である。

図9の電力指令は、PJMにて公開されるReg.D Normalized Self-Test Signalをプラスマイナス500KW最大値としてスケーリングした波形を用いている。PJMの応答性パフォーマンス評価方法に基づき、CAES設備の応答特性を測定した。その評価結果を図10に示す。評価は、正確性 (accuracy score), 遅延時間 (delay score), 精密性 (precision score) の三点からなされる。各スコア評価式を以下に示す。

$$Accuracy\ Score_{\delta=0\ to\ 5\ min} = \gamma_{Signal, Response(\delta, \delta+5\ min)}$$

$$Delay\ Score = Abs\left|\frac{\delta-5\ Minutes}{5\ Minutes}\right|$$

$$Error = Avg\ of\ Abs\left|\frac{Response-Regulation\ Signal}{Hourly\ Average\ Regulation\ Signal}\right|$$

$$Precision\ Score = 1 - \frac{1}{n} \sum Abs(Error)$$

ここで、 γ : 相関係数,

n : 単位時間あたりのサンプリング数

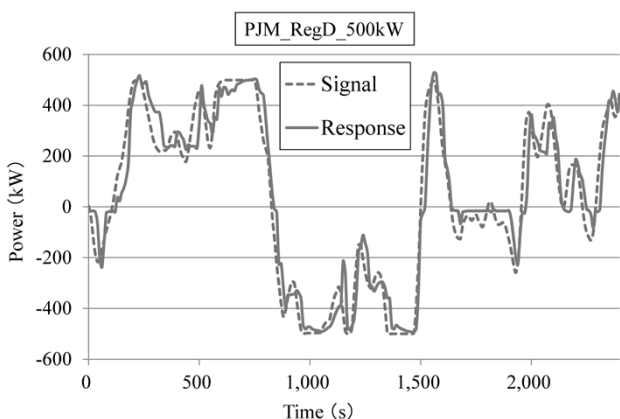


図9 PJM Reg.D信号に対する応答
Fig.9 Response to PJM Reg.D signal

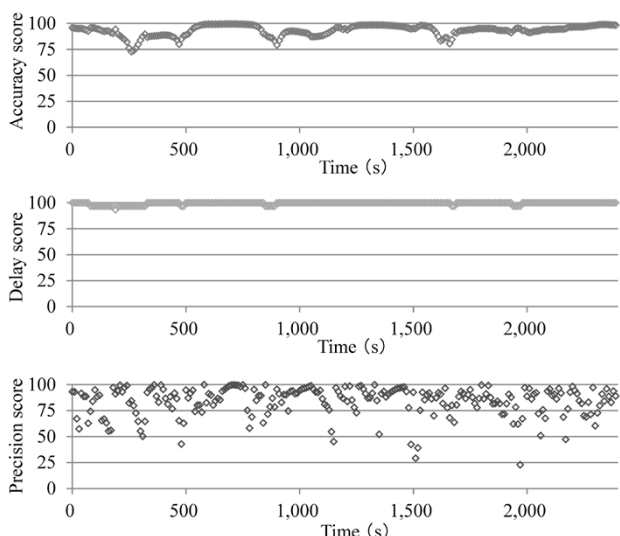


図10 PJM テストの結果
Fig.10 Results of PJM performance scores

伊豆実証設備では40分間テストの各スコアの単純平均は、accuracy : 93.3, delay : 99.46, precision : 84.12が得られ、三つの平均値92.29という高いスコアを記録することができた。PJMは、周波数調整市場の参入条件として、40分間の連続するテスト信号に対するパフォーマンススコアが75ポイント以上必要としている。伊豆実証設備での上記スコアは十分に電力市場における調整力として使用可能なレベルと考えている。なお、圧縮空気の貯蔵量や、Reg.Dテスト波形のスケーリング幅などの条件を変更して何度か試験を行い、75ポイントを満たすパフォーマンスを確認済みである。

4. 今後の展開

4.1 性能向上とコストダウン

伊豆実証設備において、オイルフリースクリュウ圧縮機をキーコンポーネントとする設備が風力発電所の出力変動の緩和に使用できることは確認できた。しかしながら、CAES設備を普及させていくためには、性能向上とコストダウンが必要である。

現在当社では、充電ユニットと放電ユニットとを共用化することによって性能向上とコストダウンの両方を実現することを検討している。また、圧縮空気貯蔵タンクの容積を削減することができることから、貯蔵圧力を高圧化することも検討している。

現在検討中のスクリュウ圧縮機を充放電兼用とし、最大貯蔵圧力を2 MPaGまで高めた充放電兼用ユニットの概要を図11に示す。このユニット内には、最大吐出圧力1 MPaGのスクリュウ圧縮機を3台、最大吐出圧力2 MPaGのスクリュウ圧縮機を1台配置し、いずれも圧縮機兼膨張機として使用可能としている。台数制御と回転数制御を組み合わせることによって555 KWまでの連続的な出力制御を可能にしている。

図11に示した例よりさらに高圧のスクリュウ圧縮機を組み合わせることで5 MPaG程度まで昇圧することも検討している。

4.2 海外展開

再生可能エネルギーの導入が進んでいる諸外国、とくに北米と中華人民共和国ではCAES設備の具体的な導入

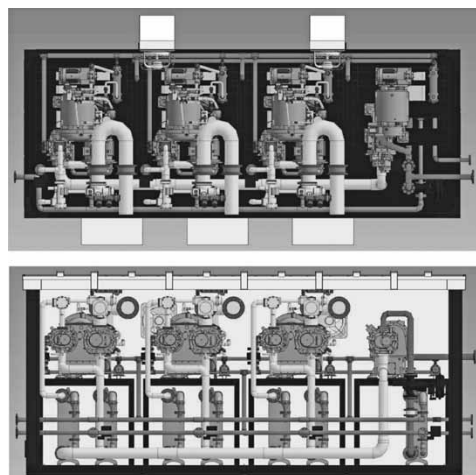


図11 555 kW 充放電兼用ユニット
Fig.11 555 kW charging and discharging unit

計画がある。中華人民共和国では、数十MWのCAES設備の建設が国家プロジェクトとして江蘇州において始まっている。

これらの国々でCAES設備が評価されている理由として、日本国内に存在しない地下岩塩層の存在がある。例えば北米においては、テキサス州からカンザス州を経てカナダ アルバータ州に至るロッキー山脈東側の平原部や、五大湖東側などに地下岩塩層が広く分布している。この地下岩塩層は、岩塩採掘だけでなく、岩塩層に形成された地下空間が天然ガスなどの地下備蓄に利用されている。この地下空間は密閉性に優れていることから、圧縮空気の貯蔵タンクとして利用した場合、大容量のエネルギー貯蔵を廉価に実現できる可能性がある。例えば、一般的なMWを超える大規模リチウムイオン電池の蓄電時間は4時間から長くても8時間程度である。岩塩採掘洞などの巨大な地下空間を確保できたCAES設備では、その蓄電時間を24時間から48時間程度に大幅に延長することができる。

先に述べたロッキー山脈東側の平原部は、アメリカ合衆国における風力発電所の適地とおおむね一致している。したがって、この地域における風力発電所の発電電力の抑制や、風力発電由来の電力による計画発電などが期待できる。さらに、停電時におけるバックアップとして、ある程度の大きさのコミュニティをカバーする電源としての活用も期待できる。

岩塩層に形成した地下空間を圧縮空気の貯蔵タンクとして利用したCAES設備のコンセプトを図12に示す。図12においては、風力発電所の送電線にCAES設備を連系した例を示しているが、太陽光発電所と連系することもできる。

地上に設置する設備は充放電ユニットを収納したコンテナと電気設備のみとなる。北米においては設置面積はあまり問題にならないが、地上部分の設備をコンパクトにまとめることができ、リチウムイオン電池と似通った外観の設備となる。

当社は2019年度に、NEDOが進める「エネルギー消費の効率化等に資する我が国技術の国際実証事業実証要件適合性等調査」において、「大規模電力貯蔵を実現するための圧縮空気地下貯蔵設備の実証研究（北米）」として採択された。これを受けて現在、北米地域を中心に

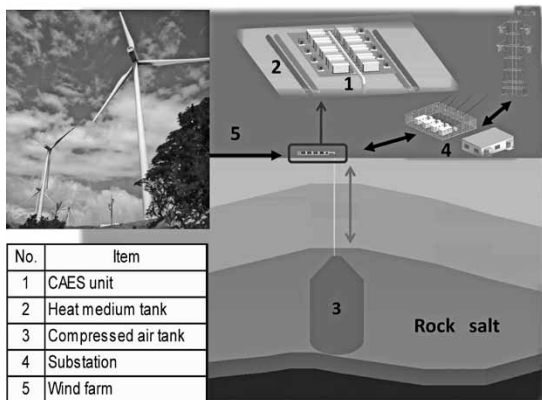


図12 岩塩空洞を利用したCAES設備
Fig.12 CAES plant using rock salt cavern

CAES設備の展開可能性を探索中である。

むずび=放電継続時間が長い長時間貯蔵仕様の大規模な電力貯蔵設備に関して、貯蔵可能な電力量(kWh)に対する設備コストの割合、すなわちkWh単価において、圧縮空気エネルギー貯蔵設備は他の電力貯蔵設備に対して優位(廉価)になり得る。とくに、岩塩採掘洞などの地下空間を圧縮空気貯蔵タンクとして利用する場合は、リチウムイオン電池などの化学的二次電池より廉価となり、数千円/kWhの大規模蓄電設備を構成できる可能性がある⁵⁾。

北米や中国、中東欧などには岩塩層が広く存在している。したがって、圧縮空気エネルギー貯蔵設備が普及することによって、これらの地域における再生可能エネルギーの導入促進に資することができると考えている。

最後に、当社の圧縮空気エネルギー貯蔵設備を実証機として採用していただき、伊豆における実証試験に関連して当社に多大のご指導とご助言を賜った一般財団法人エネルギー総合工学研究所と早稲田大学に感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 戸島正剛ほか. 日本エネルギー学会誌. 2016, Vol.95, No.3, p.180-187.
- 2) 堂本宗宏ほか. クリーンエネルギー. 2017年12月号, p.13-20.
- 3) 松隈正樹. 冷凍. 2017年5月号, Vol.92, No.1075, p.351-356.
- 4) PJMウェブサイト. <https://www.pjm.com>, (参照2018-01-24).
- 5) K Mongird et al. Energy Storage Technology and Cost Characterization Report. July 2019, p.6.1-6.2.



猿田浩樹
機械事業部門 開発センター



佐藤 隆
機械事業部門 開発センター



中道 亮
機械事業部門 開発センター
技術開発部



戸島正剛
機械事業部門 開発センター
技術開発部



久保洋平
機械事業部門 開発センター
技術開発部

(技術資料)

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

要旨

当社圧縮機の安定稼働に向けて、高機能かつ低コストなIoTクラウドサービスシステム（Kobelink™）を開発した。本システムは通信配線工事が不要で、圧縮機を設置するだけでWeb監視を行うことができる。また、当社内サービスシステムとも連携させ省力化を図った。2017年以降、3000台の導入実績があり、ユーザーにおける装置の安定稼働や当社メンテナンス・サービスの効率化・省力化にも大きく貢献している。

Abstract

For the stable operation of Kobe Steel's compressors, the company has developed a high-performance, low-cost IoT cloud service, Kobelink™. This system requires no communication wiring work and enables Web monitoring by simply installing compressors. In cooperation with the company's internal service system, it has saved a significant amount of labor. Since 2017, there have been 3,000 units installed, which has contributed greatly to the stable operation of the equipment by users and to the efficiency and labor-saving of Kobe Steel's maintenance services.

キーワード

圧縮機, コンプレッサ, IoT, Kobelink™, クラウドサービス, 遠隔監視, Kobelion™, Emeraude™, K-COMET™, Kobenicle™

ま え が き = 昨今、モバイル通信や各種情報技術の進化によりパソコンや携帯電話のような通信機器のみではなく、家電や自動車などの通信とは無縁なものがインターネットにつながるIoT (Internet of Things) が普及しつつある。産業機械も例外ではなく、機械をインターネットにつなげることによって各社はいろいろなサービスを

始めており、今後も発展・成長の可能性を秘めている。

当社の圧縮機事業においても、操業管理や遠隔監視に対してインターネットを活用した以下のような監視システムを提供してきた^{1), 2)}。

① K-COMET™^{注1)} (24時間365日の遠隔監視サービス),

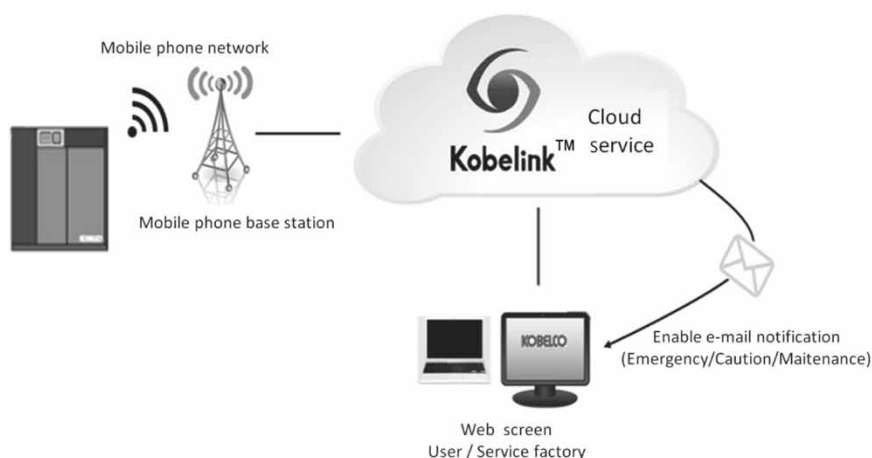


図1 Kobelink™の概要
Fig.1 Overview of Kobelink™

脚注1) K-COMETは当社の登録商標である。

* 機械事業部門 圧縮機事業部 回転機本部 回転機技術部

② Kobenicle™^{注2)} (運転監視, 保守診断システム)

産業分野での監視システムといえば分散制御システム(DCS)や産業用監視システム(SCADA)が有名であるが、これらは一般に大規模用であり、遠隔監視をはじめとしてシステム自体の保守も含めるとお客さまが負担する費用は高額になりがちである。いっぽう汎用圧縮機においては、機械自体が安価であり、適切なメンテナンスが施される限り特段監視の必要性が低い。このため、監視システムの採用に際しても限りなく低コストなものが要求される。

当社では、上記ニーズに対応すべく、高機能でありながら低コストなIoTによる遠隔監視システム「Kobelink™^{注3)}」(以下、Kobelinkという)を開発し(図1)、2017年よりサービスの提供を開始した。Kobelinkはお客さまには便利さを提供し、対価をお客さまにではなく社内のシステムや業務の改善、省力化に求めることで、コストを抑えたものである。本稿ではその概要を紹介する。

1. Kobelinkの製品概要

Kobelinkは、当社の汎用圧縮機をインターネットに接続し、圧縮機の運転状態を遠隔にて監視するサービスを提供するシステムである。圧縮機パッケージ内にゲートウェイと呼ばれるモバイル通信モジュールを内蔵しており、このモジュールから圧縮機の運転データが携帯電

話回線を通じてクラウドサービスに定期的送信される。お客さまやサービス工場は、セキュリティ性能の高いVPN(Virtual Private Network)を用いたインターネット接続によってこのクラウドサービスにアクセスし、専用の監視システムとして圧縮機の稼働状態を監視・確認することができる。以下にKobelinkの特長を示す(図2)。

(1) 低コストで簡易なセットアップ

遠隔監視システムの設置には一般に相応のコストがかかる。Kobelinkの場合、メンテナンスサービスの効率化によって導入コストを相殺させ、無償に近い形で提供している。また、圧縮機の通信ユニットの設定からクラウドサービスへの接続まですべてを当社が実施しており、面倒な設定作業は一切ないうえに特別なソフトも必要ない。インターネットに接続できるパソコンにMicrosoft社が提供するInternet Explorer[®]やGoogle社のGoogle Chrome[®]などのWebブラウザがインストールされていればすぐにでも使用できる。

(2) 複数の圧縮機の一括監視

同じお客さまに圧縮機が複数台設置されている場合、それらの運転状態やメンテナンス情報をアイコン形式あるいはリスト形式で一覧表示できる。また、個別に確認したい圧縮機を選択することによってより詳細な稼働状態、例えば現場で確認できる表示ランプやディスプレイ上に表示しているアナログデータを容易に確認すること

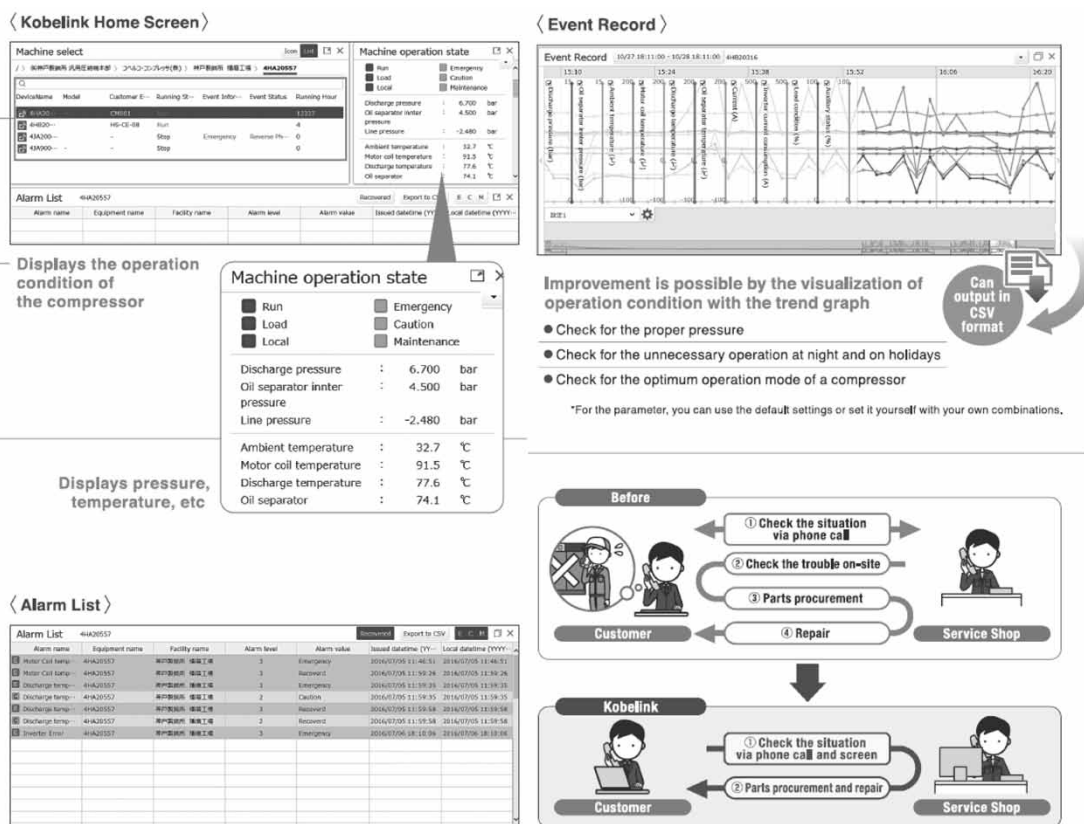


図2 Kobelink™の特長
 Fig.2 Characteristic of Kobelink™

脚注2) Kobenicleは当社の登録商標である。

脚注3) Kobelinkは当社の登録商標である。

ができる。

(3) フレキシブルなイベントレコード

イベントレコード機能によって、個別の圧縮機ごとに約1年間の運転状態をトレンドグラフで確認することができる。この長期間の運転データは、通常時は2分に1回の頻度でデータを保存している。このデータはCSVファイルとして出力できMicrosoft社のExcel[®]にて容易に加工できるため、日常点検の効率化を図ることができる。また、運転状況を把握・分析することによって最適な運転方法の検討や省エネ対策につなげることができる。

(4) メンテナンス情報・アラーム一覧

発報情報一覧機能によって圧縮機の運転・停止情報やメンテナンス情報、警報ログを確認することができる。また、メンテナンスアラームや警報などのイベント発生時には、任意のアドレスにメールで通知することができ、圧縮機のメンテナンス時期の確認や異常発生を早期に認知することができる。これにより、最適なメンテナンス計画・予防保全が可能となり、生産ラインの安定操業に貢献できる。

(5) 迅速なメンテナンスへの対応

万一トラブルが発生した場合、トラブル発生直前の運転データを1秒に1回の高頻度で保存している。またこの発報情報は、イベントレコード機能にも連動しており、トレンドグラフ上でも警報が発生したポイントを容易に確認ができる。これにより、トラブル発生直前までの運転データを確認・分析できる。すなわち、トラブルに関する事前検証を実施することによって原因の特定や修理のためのサービスパーツの事前準備を行うことができ、復旧時間の短縮につながる。

2. 既存サービス管理システムとの統合

もともと社内にはサービス管理システムがあり、これを用いて営業情報やサービス情報を入力して管理を行ってきた。この既存のシステムを一新し、現場からの必要な情報がうまく紐（ひも）付くようにKobelinkとのデータ連携を図った（図3）。これにより、お客さま情報は自動的にKobelinkとリンクし、Kobelink上で機械を選択することによってサービス情報や機械情報が簡単に確認できるようになった。

またその逆に、機械の運転時間やアラート発生情報（異常、警報、メンテナンス）がサービス管理システムに自動で登録されるようになった。稼働状況をはじめ、工事実績や各種技術情報、対策管理、部品構成情報などを電子カルテとして一元管理でき、現場対応能力などの向上に有益なサービス管理システムとなった。

3. Kobelinkに対応する機種

Kobelinkの対応機種は表1に示したとおりで、2世代前の圧縮機にも対応している。そのなかでも、以下の最新機種にはKobelinkを標準搭載している。

(1) 油冷式コンプレッサKOBELIONTM注4) IV型

新型KOBELIONシリーズとして、2018年に22kW、37kWの販売を開始し、2020年までに55kW、75kW、90kWを順次販売開始した。図4に新型KOBELIONの外観を示す。

ラインアップは従来機と同様に、インバータ可変速タイプのVSシリーズと、定速タイプのSGシリーズの2シリーズである。シリーズの特長として、高性能スクリュ本体を新たに開発し、国内最高クラスの吐出空気量（当社従来機比で最大11%増）を達成した。さらに、周囲温度環境に関しては、従来は周囲温度45℃対応であ

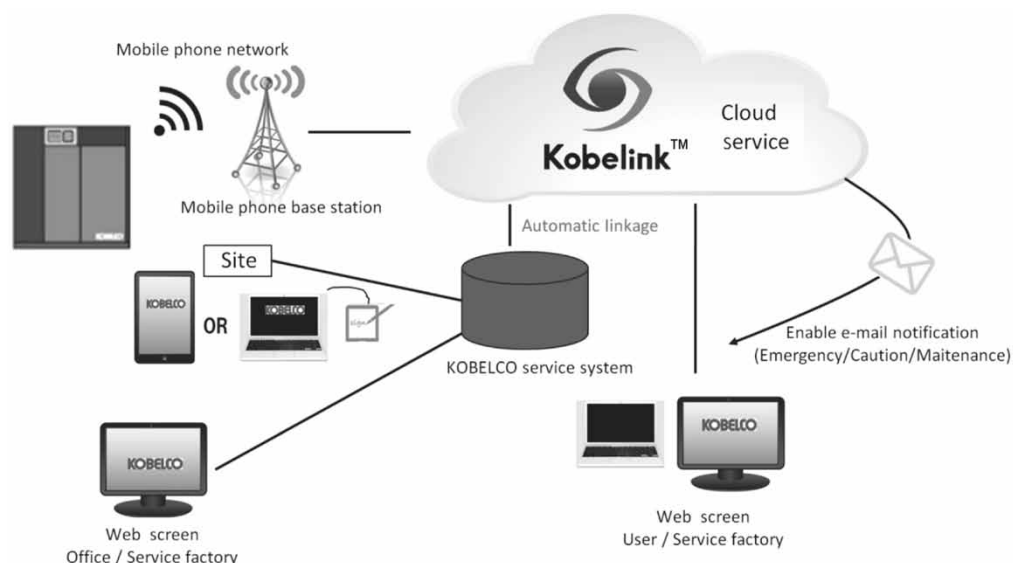


図3 システム連携の概要
Fig.3 Overview of system linkage

脚注4) KOBELIONは当社の登録商標である。

表 1 Kobelink™対応機種一覧表
Table 1 List of Kobelink™ support model

Type	Model	Output (kW)	Existing		Previous generation	Before second generation	
			Existing	KLⅢ/VS・NVS			
Oil Injected	Inverter	VS	22/37/55/75	KLⅣ/VS	KLⅡ/VS	KL/VS・中B/VS	
	Fix speed	AG	22/37/55/75	—	—	KL/AG・中B/AG	
	Fix speed	SG	22/37/55/75	KLⅣ/SG	KLⅡ/SG	KL/SG・中B/SG	
	Fix/Inverter	XG	110~160	—	KL/NXG	KL/XG	—
	Fix speed	LT・ST	160/200/220	—	KLⅢ/LT・ST	KST-v	—
Oil Free	Fix/Inverter	FE	15~55	—	FEⅢ	FEⅡ	FE
	Fix/Inverter	ALE	55~370	ALEⅣ	ALEⅢ	ALEⅡ	ALE
	Inverter	EA	22/37/55	—	EAⅢ	EA	—



図 4 新型 KOBELION™ 外観
Fig.4 Appearance of new model KOBELION™



図 5 新型 ALE™ 外観
Fig.5 Appearance of new model ALE™

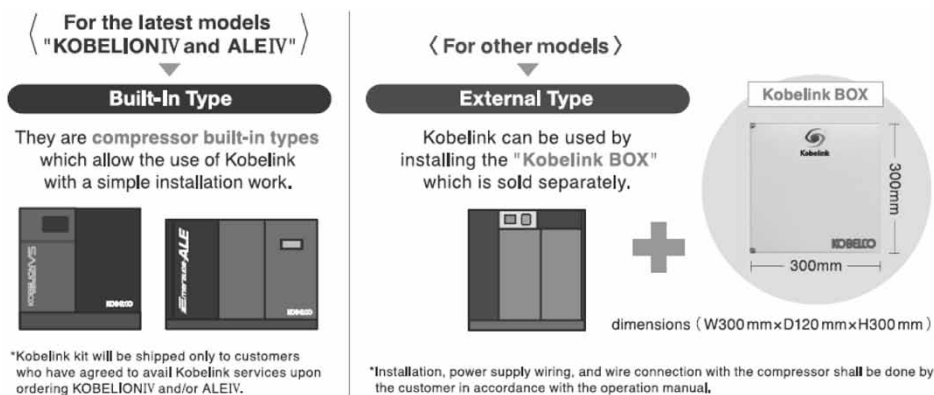


図 6 Kobelink BOX の概要
Fig.6 Overview of Kobelink BOX

ったのに対し50℃でも運転を可能にした。

(2) オイルフリー式コンプレッサ ALE™^{注5)} IV型

新型 ALE シリーズとして2016年に132-160 kW を販売開始し、2020までに200-400 kW を順次、販売開始した。図 5 に新型 ALE の外観を示す。ラインアップは、インバータ可変速タイプと定速タイプの2シリーズである。

本シリーズは、高効率スクリュ本体を新たに開発し、クラス最高効率の比エネルギー（当社従来比最大4%性能向上）を達成したことを特長とする。また、徹底した騒音対策により、オイルフリー特有の騒音を低減させ、ISO に準拠した測定方法にて、世界最高レベルの低騒音化（当社従来比最大-7dB）を実現した。

さらに、上記新型機以前の現行機や従来機において

は、Kobelink に接続する「Kobelink BOX」(図 6) という外付盤をオプションにて準備し、2019年4月から受注を開始した。これにより、当社から過去に納入済である既設機にもKobelinkを適用可能となった。

また、このシステムはグローバル対応しており、日本だけでなくタイ、シンガポール、マレーシア、ベトナム、フィリピン、インドといった東南アジア地域での使用が可能である。もちろん、グローバル展開にあたっては各国での電波法やRoHS化対応や輸入者登録などの諸条件をすべてクリアしている^{注6)}。

脚注 5) ALE は当社の登録商標である。

脚注 6) 各国の情報通信に関する法規が変更になった場合、一時的に中断する場合がある。

4. Kobelinkの効果

地理的な問題などで定期訪問が難しいお客さまにおいては、メンテナンスが十分に行われずに機械寿命が短くなるのが最悪の状況といえる。このような、たとえ訪問が難しい状況であったとしてもKobelinkを使用することによって稼働状態の管理を行うことができる。

また、メンテナンスを実施していないお客さまも容易に抽出できる。そうしたお客さまに対しては、定量的データと実際の運転状況を基に、安定操業が継続できるように適切なサービスを提案・提供することができる。こうしたサービスを通じて圧縮機の定期的なメンテナンスの実現と安定操業につなげることができる。

以上のようなメンテナンスサービスをタイムリーに行うことにより、多数のお客さまに対する巡回などの効率化や最適化、業務の省力化を図ることができる。また当社にとっても、稼働時間を把握することによって必要なサービスパーツの物量を把握した上でパーツの事前仕込み発注ができ、在庫量の適正化にも寄与できる。

つぎに、機械に故障が発生した場合を考えてみる。故障が発生した時点で機械は止まっている。お客さまから提供される情報のみで原因を特定することは難しいことから、当社のサービス担当者は納入履歴や修理・メンテナンス履歴を調べ、現地への訪問が必要となる場合も多い。同じ機械を複数台納入している場合は、調べるデータも増える。

こうした復旧のための作業は、その内容や手順は決まっているもののかなりの時間を要することになる。これが、Kobelinkを使用することによって、故障した機械の納入履歴や修理・メンテナンス履歴、異常停止する直前の運転データを即座に把握することができ、サービス担当者の業務時間の短縮や現地訪問回数の削減が期待できる。また、プレアラームを有効活用することによって故障停止による突発対応の低減も見込め、安定操業につなげることができる。

最後に運転データの活用について考えてみる。Kobelinkを使用することによって運転データをパソコンから容易に取得することができる。さらに、トレンドグラフによって長期間の運転状況も容易に確認できる。

こうした運転データが納入台数分あることから、当社で確認できるデータがどんどん増えていく。いわゆるビッグデータと呼ばれるものである。このデータをうまく活用することによって、たとえば圧縮機の使用法の改善や適正な運転方法の検討・提案、将来的には故障の予兆診断をお客さまごとに行うことも可能になる。

このように、ビッグデータが営業、サービス、開発、品質へのフィードバックデータとなり、いろいろなサービスに加えて将来へのビジネス展開として活用が期待できる。

むすび = Kobelinkは、2017年に販売開始以来3,000台以上の圧縮機に搭載され、多くのお客さまにご好評をいただいている。また当社においても、一新した本サービス管理システムとともに、このシステムを活用したサービス活動の改革を進めている。

本稿ではIoTを活用したサービスであるKobelinkを紹介したが、関連技術であるビッグデータの活用やAIといったIT技術はどんどん進展している。Kobelinkも、進展するIT技術との融合によってさらなる進化を続ける予定である。さらに、省エネルギー化やサービス能力の向上に寄与させていくことによってお客さまとのWin-Winな関係をより強固なものにしていきたいと考えている。今後も、たゆまぬ改革によって新たな価値を創造し、ますます発展する社会に対して貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 松本泰治ほか. R&D神戸製鋼技報. 2008, Vol.58, No.2 P.47-50.
- 2) 松本泰治. R&D神戸製鋼技報. 2018, Vol.67, No.2 P.97-100.



森本光孝

機械事業部門 圧縮機事業部
回転機本部 回転機技術部

(技術資料)

油冷式スクリュウ圧縮機「Kobelion™ (コベライアン) シリーズ」

濱田克徳*

Oil Injected Screw Compressor Kobelion™ series

Katsunori HAMADA

要旨

コベライアン™ IV型シリーズは、スクリュウ本体の新開発による基本性能の向上に加え、給油方法や機器選定・パッケージ内部の最適設計による圧力損失の低減などにより、省エネルギーを実現した。本稿において、主な特長と技術について紹介する。

Abstract

The new model in the Kobelion™ IV series has realized energy savings by improving basic performance with a newly developed screw body, using a method of lubrication that reduces pressure loss, equipment selection and optimal design inside the package. This paper introduces its main features and technologies.

キーワード

油冷式スクリュウ圧縮機Kobelion™, 直結オーバハング構造, 周囲温度50℃, ワイドレンジ制御, 省エネルギー

まえがき = 2015年にトップランナー規制の導入によるモータの高効率化を進めた我が国をはじめ、中国やシンガポール、ベトナムなど世界各国でモータの効率規制 (MEPS^{注1)}) が始まり、モータの高効率化が進んでいる。また空気圧縮機に対しても、中国では「容積式空気圧縮機能效限定値及能效等級 (GB19153)」によって容積型油冷式空気圧縮機に省エネルギー等級表示が義務化されるなど、省エネルギーへの関心は世界的に高まっている。

当社の油冷式空気圧縮機「Kobelion™^{注2)}」シリーズは、2002年に「Kobelion™ I型 (以下、I型という)」の販売を開始した。その後、2012年に「Kobelion™ II型」、2015年に「Kobelion™ III型 (以下、III型という)」を販売してきた。そしてこの度、第4世代となる「Kobelion™ IV型 (以下、IV型という)」の開発 (以下、本開発という) が完了し、2018年2月より日本市場へ22 kW, 37 kW, 2019年10月より55 kW, 75 kWの販売を開始した。また、中国市場や東南アジア市場をはじめとする海外市場へは、2019年4月より15~37 kW, 2020年1月より45~90 kWの販売を開始した。

これらの商品の特長を次章以降で概説する。

1. 商品コンセプト

当社の汎用空気圧縮機は、播磨工場と中国上海市にある神鋼圧縮機製造 (上海) 有限公司 (以下、KCMSという) の2拠点で生産を行っている。これまで、それぞれの市場に特化した商品の開発・生産を行ってきたが、本開発では「世界中で高品質の機械を提供する」という開発コンセプトを掲げ、「高品質」に加え、「高性能」、「耐環境性」、「静音性」を徹底的に追求したグローバルモデルとして開発を進めた。IV型は「直結オーバハング構造」を採用している。この構造はI型から採用しており、スクリュウ圧縮機本体の軸端部にモーターロータを直接取り付けることでモータ軸受が不要となり、メカニカルロスを削減できる。また、使用吐出圧力に応じて最大空気量となるように制御する「ワイドレンジ制御」などを採用している。さらに、「周囲温度50℃でも運転可能」、「永久磁石モータ (以下、IPMモータという) の油冷ジャケット冷却機構」など、高温環境下においても圧縮機を稼働継続できる耐環境性の向上を実現した。

IV型のラインアップは、インバータ駆動機のVS機、非インバータ駆動機はスタンダードモデルのSG機、および大風量高性能モデルのAG機 (KCMSのみ生産) の3機種となっている。生産工場に対するラインアップおよび仕様を表1に示す。

つぎに、図1にIV型の外観を示す。15~90 kWの機種は生産工場によらず統一デザインとしており、共通モジュール設計により豊富な機種ラインアップと部品の共通化を実現した。

脚注1) Minimum Energy Performance Standard : 高効率法規制で最も広く取り入れられている「最低エネルギー消費効率基準」のこと。

脚注2) Kobelion™は当社の登録商標である。

表1 Kobelion™ IVのラインアップおよび仕様
Table 1 Lineup and specification of Kobelion™ IV

○ Products of Harima Plant

		Without dryer		With dryer	
		Discharge pressure (MPa)	Discharge air flow (m³/min)	Discharge pressure (MPa)	Discharge air flow (m³/min)
VS	22kW	0.4~0.86	4.75~3.82	0.5~0.86	4.75~3.82
	37kW	0.4~0.86	7.7~6.4	0.5~0.86	7.7~6.4
	55kW	0.4~0.86	11.8~9.8	0.5~0.86	11.4~9.8
	75kW	0.4~0.86	15.2~13.0	0.5~0.86	14.8~13.0
SG	22kW	0.75/0.85/1.05	4.15/3.9/3.33	0.75/0.85/1.05	4.15/3.9/3.33
	37kW	0.75/0.85/1.05	7.1/6.4/5.85	0.75/0.85/1.05	7.1/6.4/5.85
	55kW	0.75/0.85/1.05	10.6/10.0/9.1	0.75/0.85/1.05	10.6/10.0/9.1
	75kW	0.75/0.85/1.05	14.0/13.1/12.0	0.75/0.85/1.05	14.0/13.1/12.0

○ Products of KCMS

		Without dryer				Without dryer	
		Discharge pressure (MPa)	Discharge air flow (m³/min)			Discharge pressure (MPa)	Discharge air flow (m³/min)
VS	22kW	0.4~0.86	4.72~3.8	AG	15kW	0.75/0.85/1.05	2.75/2.53/2.18
	37kW	0.4~0.86	7.6~6.3		22kW	0.75/0.85/1.05	4.15/3.9/3.2
	55kW	0.4~0.86	11.8~9.65		37kW	0.75/0.85/1.05	7.3/6.9/6.2
	75kW	0.4~0.86	15.1~12.9		55kW	0.75/0.85/1.05	11.3/10.5/9.6
SG	30kW	0.75/0.85/1.05	5.9/5.4/4.75	75kW	0.75/0.85/1.05	15.0/14.3/12.9	
	37kW	0.75/0.85/1.05	7.0/6.4/5.7				
	45kW	0.75/0.85/1.05	9.1/8.5/7.7				
	55kW	0.75/0.85/1.05	10.7/10.1/9.1				
	75kW	0.75/0.85/1.05	13.9/13.4/12.0				
	90kW	0.75/0.85/1.05	17.8/16.5/15.2				



15~37kW

45~90kW

図1 圧縮機外観

Fig.1 Appearances of two types of compressor

2. 商品の特長¹⁾

2.1 比エネルギー

圧縮機の全負荷時消費電力性能は、JIS B 8341「容積形圧縮機－試験及び検査方法」で規定される比エネルギーで表され(式(1))、値が小さいほど省エネルギーな圧縮機であることを示す。

$$W = \frac{L}{Q} \dots\dots\dots (1)$$

W: 比エネルギー (kW/m³/min)

L: 圧縮機の総入力電力 (kW)

Q: 圧縮機吸込状態換算吐出空気量 (m³/min)

VSタイプ22kW機のIV型およびIII型を対象に、それぞれの運転範囲における総入力電力に対する比エネルギーの比較を図2に示す。IV型は、スクリュ圧縮機本体の性能向上や、軸受給油バイパス機構の採用によるメカニカルロス削減などにより、III型と比べて全運転範囲で比エネルギーが下回っており、省エネルギーな圧縮機であることが分かる。

2.2 軸受給油バイパス機構²⁾

スクリュロータを支持する軸受には冷却と潤滑のための給油が必要である。いっぽう、軸受に給油された潤滑油は軸受自身の回転運動による攪拌(かくはん)ロスが発生する。このため一般的に、給油量を必要最小限にすることによって性能向上を図られることが知られている。設計段階では、オイルフィルタの目詰まりや低温時の潤滑油の粘度変化などを考慮し、いかなる状況でも故障しない給油量を確保する方針で進める必要がある。しかしながらこの方針では、正常な状態では過給油になり、攪拌ロス低減の余地があった。そこで本開発では軸受給油バイパス機構を開発した(図3)。この機構により、必要以上に流入した潤滑油は軸受回転部を通過することなく軸受外輪の外部に設けたバイパスラインを通過する。このため、過給油による攪拌ロスを低減できる。すなわち、軸受回転部には必要な量の潤滑油を給油する

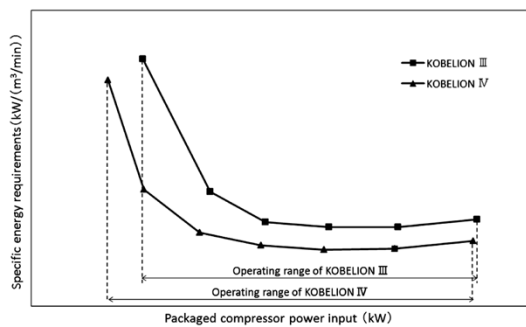


図2 運転範囲における比エネルギー変化

Fig.2 Change of specific energy requirements in operating range

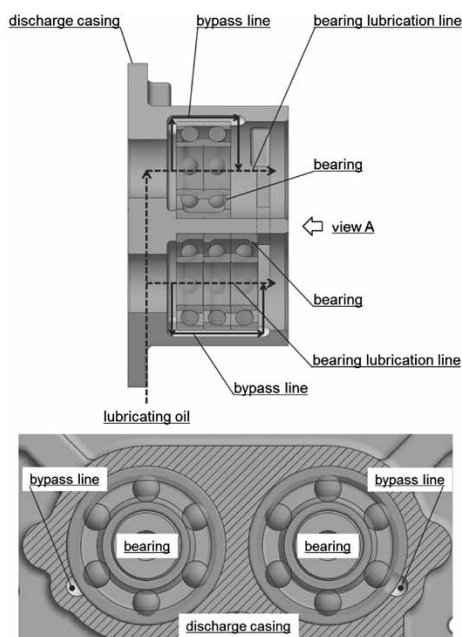


図3 軸受給油バイパス構造

Fig.3 Structure of bearing oil feed bypass

ことができるため、最適な給油状態を常に維持することができる。

2.3 ワイドレンジ制御 (VS機)

ワイドレンジ制御とは、使用吐出圧力に応じて最大吐出空気量となるように制御する技術である。図4にその概略を示す。空気圧縮機の理論動力 L は式(2)で表される。式(2)より、吐出圧力 Pd を下げると理論動力 L が下がることが分かる。

$$L = \frac{(i+1)n}{n-1} \cdot \frac{Ps \cdot Qs}{0.06} \left[\left(\frac{Pd}{Ps} \right)^{\frac{n-1}{(i+1)n}} - 1 \right] \dots\dots\dots (2)$$

ここで、

- Ps : 吸込空気の絶対圧力 (MPa)
- Pd : 吐出圧力の絶対圧力 (MPa)
- Qs : 吸込状態換算空気量 (m^3/min)
- n : 空気のポリトロップ指数
- i : 中間冷却器の数

ユーザの使用吐出圧力が低い場合、定格吐出圧力まで昇圧するとエネルギーロスとなる。このため、省エネルギーを目的とし、吐出空気量に応じた圧縮機の定格吐出圧力(図4-A点)から吐出圧力を下げて使用する(図4-B点)。吐出圧力に応じて消費動力は低くなるが、ス

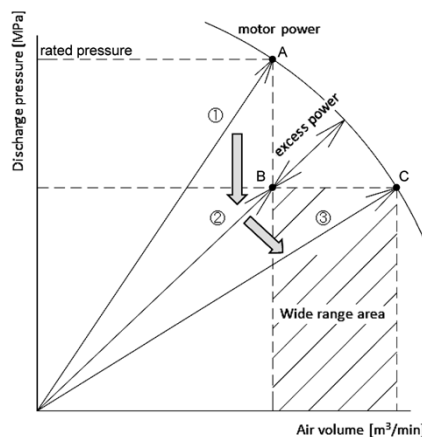


図4 ワイドレンジ制御
Fig.4 Wide range control

クリュータの回転数は変わらないため、吐出空気量は定格吐出圧力時と変わらない。このような状態では、モータ動力に余力がある状態となっている。この余力に着目し、必要吐出圧力において、この余力分だけスクリュロータの回転数を上昇させ、定格吐出圧力時と同じ動力でより多くの圧縮空気を提供することができる(図4-C点)のようにコントロールする。

ワイドレンジ制御範囲は、Ⅲ型は吐出圧力0.6~0.85 MPaに対して、Ⅳ型は吐出圧力0.4~0.85 MPaまで制御範囲が広域になり、吐出空気量が約8~12%増加した。

さらに、ワイドレンジ制御は上述のとおり、吐出圧力に応じてスクリュロータの回転数を制御する。このため、吐出圧力がゼロの状態から起動すると増速起動が可能となる。これによって昇圧時間を約8~10%短縮でき、圧縮空気の圧送開始時間短縮を達成した。

2.4 周囲温度50℃対応

Ⅲ型は、周囲温度が45℃でも稼働継続できることを特長としてきた。しかしながら、近年の温暖化による夏場の気温上昇の影響により、圧縮機稼働中の室温が45℃を超えることも珍しくない。

このため、Ⅳ型では稼働継続できる周囲温度を50℃とした。そこで、流体解析による圧縮機内部の空気の流れ(図5)に基づいて機器を最適配置し、冷却効率を高める検討を行った。その結果、周囲温度に対する環境性をⅢ型よりも5℃向上させることができた。

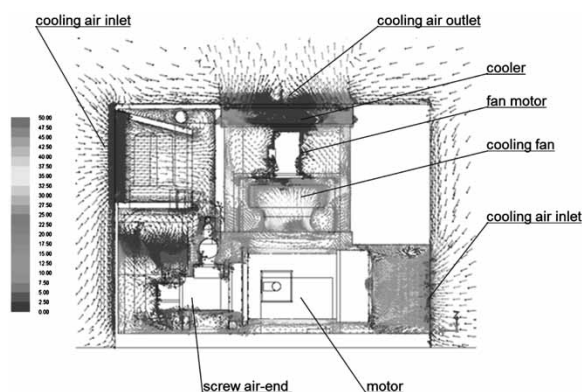


図5 冷却風の流体解析

Fig.5 Fluid analysis of cooling air

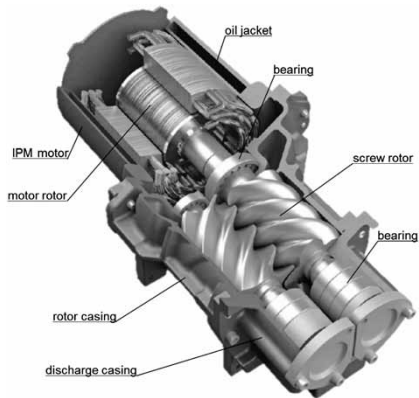


図6 油冷ジャケットモータ
Fig.6 Oil jacket cooling motor

2.5 IPMモータ (VS機)

一般的なIPMモータは、モータ自身に冷却ファンを備えた空冷モータである。パッケージ型圧縮機の場合、冷却空気の吸込口にダストフィルタを装備していることが多く、圧縮機の設置環境によってはダストフィルタが想定よりも早く目詰まりする可能性がある。ダストフィルタの早期目詰まりは、モータの冷却不良を引き起こし、最悪の場合、圧縮機が異常停止する可能性がある。

IV型では、圧縮機の潤滑に使用している潤滑油を利用してIPMモータを冷却する油冷ジャケット機構とした(図6参照)。油冷ジャケット機構は、圧縮機を設置す

る環境によらず安定してモータを冷却することができ、周囲温度や設置環境に対する耐久性を向上させることができた。

むすび = Kobelion™ IV型の新技術の一部を紹介した。本稿で紹介した以外にもさまざまな性能や機能、信頼性の向上のために新技術を多数採用している。

今後も、「省エネルギー」や「耐環境性」に対する市場の要求はさらに高まることが予測されることから、新技術の創出を継続し、当社独自技術を生かした一層魅力のある商品開発に取り組み、新商品を提供し続けていく所存である。

参考文献

- 1) 松隈正樹. 空気圧縮機. 省エネルギーセンター, p.41-49.
- 2) (株)神戸製鋼所. 今城貴徳ほか. 特開2019-52633, 2019.4.4.



濱田克徳

機械事業部門 圧縮機事業部
汎用圧縮機本部 技術部

(技術資料)

新型オイルフリースクリュー圧縮機「Emeraude-ALE™」 フルモデルチェンジ ALE IV (132~275 kW)

米田 亥央里*・宮武 利幸

NEW Oil-free Screw Compressor "Emeraude-ALE™" Full Model Change ALE IV (132-275 kW)

Iori YONEDA・Toshiyuki MIYATAKE

要旨

今日、一層深刻化する環境問題から、省エネルギーの積極的な取組が求められている。当社は環境志向の高まりや技術開発状況に合わせて、優れた特性を最大限に活かし、高性能および環境面に優れた新型オイルフリースクリュー圧縮機；ALE IVシリーズ（132 kW～275 kW）を開発した。圧縮機本体のモデルチェンジ、圧力損失の低減により性能向上を実現した。また新たに開発した吐出サイレンサを搭載したうえで、構造を見直すことによって、低騒音化も実現した。新型ALE IVは、従来機に比べ性能だけでなく、ユーザビリティの向上にも取組んだ商品である。本稿では、今回開発した圧縮機の主な特徴と主要技術を紹介する。

Abstract

Today, environmental regulations are becoming more stringent, and there is a need for active efforts to conserve energy. Kobe Steel has newly developed a series of oil-free screw compressors, the ALE IV series (132 kW to 275 kW), with superior performance and environmental friendliness that make the most of its outstanding characteristics in response to growing environmental consciousness and the state of technological development. Performance has been improved by renovation in the model change of compressor element design and reducing pressure leakages. In addition, a new type of discharge silencer has been installed and the acoustic housing has been revised to reduce noise. The new ALE IV is a product that not only delivers superior performance but also is very user friendly compared with conventional models. This report introduces the main features and technologies of the newly developed compressors.

キーワード

スクリュー圧縮機、オイルフリー、省エネルギー、Kobelink™、Emeraude-ALE™、インバータ、ロード／アンロード制御、クラスゼロ、排熱式ドライヤ、台数制御

ま え が き = 当社は、1956年に国産第1号のオイルフリースクリュー圧縮機を製造して以来、1984年に二段オイルフリースクリュー圧縮機ALシリーズを販売開始し、1997年にはEmeraude-ALE™^{脚注1)}シリーズを販売開始した。以降も、省エネに対するニーズの高まりや技術開発状況に合わせて、ALE IIシリーズ、ALE IIIシリーズを順次開発してきた。このALEシリーズは省エネ特性および環境面を重視したモデルであり、現在では当社の汎用（はんよう）オイルフリースクリュー圧縮機の主力製品となっている。

当社はこのたび、132~275 kWのALE IVシリーズ（以下、ALE IVという）を開発した。本稿ではこのALE IVについて紹介する。

1. オイルフリー圧縮機の構造と商品コンセプト

ALE IVの外観、内観図（水冷式、空冷式）をそれぞれ図1～図3に示す。オイルフリースクリュー圧縮機は、空気を圧縮する工程に冷却・潤滑目的で油を給油しない。

このため、吐出された圧縮空气中に油分を含まないクリーンな空気を供給できる。この点がオイルフリースクリュー圧縮機の大きな特長として挙げられる。

圧縮機のユニット内部は、圧縮機本体と増速歯車箱、ガスクーラ、メインモータ、吐出サイレンサなどで構成されている。吸込フィルタを通過した空気は一段圧縮機本体にて0.20~0.23 MPaへ昇圧され、インタクーラで冷却される。その後、二段圧縮機本体で所定の圧力まで昇圧された空気は、アフタクーラで冷却されて圧送される。二段圧縮機本体の後流側に配置された吐出サイレンサは、オイルフリー圧縮機特有の高周波音を低減する働



図1 圧縮機ユニット外観
Fig.1 Outside view of compressor unit

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。

* 機械事業部門 圧縮機事業部 汎用圧縮機本部 技術部

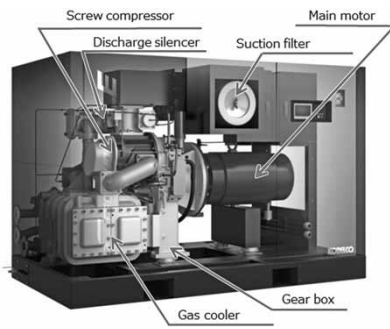


図2 水冷式スクリュウ圧縮機ユニットの内観
Fig.2 Internal view of water-cooled screw compressor unit

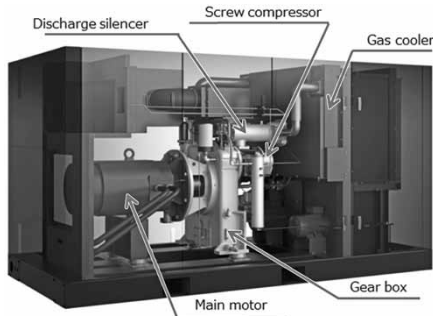


図3 空冷式スクリュウ圧縮機ユニットの内観
Fig.3 Internal view of air-cooled screw compressor unit

表1 ALE IV の出力ラインアップ
Table 1 Lineup of ALE IV

Motor output (kW)	Discharge pressure (MPa)	Water-cooled		Air-cooled	
		Std	Inv	Std	Inv
132	0.75	✓	✓	✓	✓
	0.86	✓	✓	✓	✓
	1.04	✓	✓	※	
145	0.75	✓		✓	
	0.86	✓		✓	
	1.04	✓		※	
160	0.75	✓	✓	✓	✓
	0.86	✓	✓	✓	✓
	1.04	✓	✓	※	
200	0.75	✓		✓	
	0.86	✓		✓	
	1.04	✓		※	
250	0.75	✓	✓	✓	✓
	0.86	✓	✓	✓	✓
	1.04	✓	✓	※	
275	0.75	✓		✓	
	0.86	✓		✓	
	1.04	✓		※	

Available ambient temperature range: 0-45°C
(※0-40°C)

きがある。

ALE IVは、お客さまの省エネ改善や安定操業、健康な職場づくりに貢献するため、「クラス最高の比エネルギー」のほか、「多彩な省エネルギー機能」や「高い信頼性」、「クラス最高の静音性」を商品コンセプトとして開発した。また、お客さまがより最適な仕様を選択できるように、従来シリーズにはなかった132 kW以上の空冷式モデルを新たに加え、インバータ仕様に132 kWを新たに追加するなど、ラインアップを拡充している(表1)。

2. ALE IVの特徴

2.1 クラス最高の比エネルギー

ALE IVでは、圧縮機本体の性能向上と機器および配

管の圧力損失低減により、従来機に比べ最高3%の比エネルギー(空気量あたりのユニット入力電力)向上を達成した。本節では、比エネルギー向上に向けた取り組みについて述べる。

2.1.1 圧縮機本体性能の向上

ALE IV用スクリュウ圧縮機本体の断面図を図4に示す。オイルフリースクリュウ圧縮機本体は、ケーシング内に配置された雄ロータおよび雌ロータが転がり軸受によって支持されている。ロータ同士、およびロータとケーシングとは接触することなく、一定の隙間を保った状態で運転される。この隙間を小さく設定することで圧縮機本体の性能を向上させることができるが、ロータとケーシングの熱膨張やたわみによって接触するリスクが高まる。

ALE IVの圧縮機本体の開発においては、ロータとケーシングの熱膨張解析より得られた知見に基づき、ロータ同士の隙間およびロータとケーシングの隙間を最適化するとともに、軸封構造を見直すことによってロータのたわみを抑制した。さらに、生産方法を見直すことによって寸法精度を向上させ、従来機に比べて圧縮機本体性能(比動力:空気量あたりの圧縮機本体入力電力)を約2%向上させた。

2.1.2 圧力損失の低減

水冷式の高スクーラにはプレートフィン式熱交換器を採用した(図5)。これは、管内通水・管外空気とすることによって圧縮空気側の圧力損失を低減することができる。高スクーラの圧力損失は性能に直結するため、これを低減することによって圧縮機性能を向上させることが可能となる。

また、流れが均一になるよう流体解析によって空気の流入口と流出口の位置を決定し、熱交換効率を改善した。これにより、圧縮機の吐出空気温度を大幅に低減することができた。従来機の吐出空気温度は冷却水温+9~15°Cとなるのに対し、ALE IVの吐出空気温度は冷却



図4 スクリュウ圧縮機本体断面
Fig.4 Cross sectional view of screw compressor body

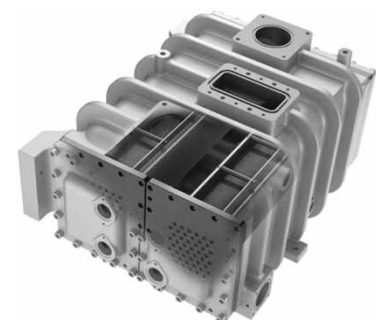


図5 プレートフィンクーラ外観
Fig.5 Outside view of plate-fin type gas cooler

水温+8℃以下を達成している。

吐出空気温度を低減することにより、圧縮機後流側に設置するドライヤをサイズダウンさせて選定することが可能となった。これにより、圧縮機単体のみでなく、後流側機器も含めた工場全体でよりエネルギー効率の良いシステムを構築できる。

空冷式の高スクーラを図6に示す。従来機は圧縮空気側を2パス構造としていたが、ALE IVは圧縮空気側に1パス構造を採用することで、より圧力損失を低減させることができた。さらに、クーラを斜め配置方式に改めることによってクーラ内でのドレン滞留防止を図っている。

上記に加え、内部配管ルートの見直しにより圧力損失を低減した。さらにエネルギーロスが最小になるよう中間圧力を最適化、オイルポンプを効率の良いメインモータで駆動する構造を採用した。それらにより従来機に比べ約1%性能向上させた。

2.2 運転制御による省エネ

ALE IVは、従来機種機能を踏襲して多彩な省エネ機能を備えている。ロード／アンロード制御はロード運転とアンロード運転の運転時間比で容量調整を行う方式である。一般的には吐出圧力が事前に設定されたアンロード開始圧力およびロード復帰圧力に達すると運転を切り替える方式である。ALE IVでは、設定した容量調整周期をクリアすれば強制でアンロードに切り替える省エネロジックを標準装備しており、圧力調整幅を最小限に抑えた運転を行う。

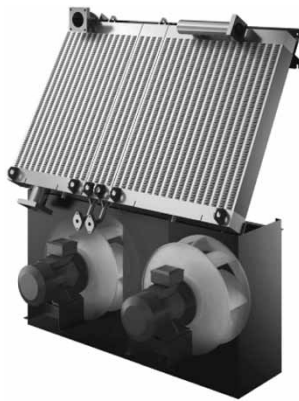


図6 空冷式高スクーラ
Fig.6 Air-cooled type gas cooler

いっぽうでインバータ制御では、お客さまの使用状況に応じてメインモータの回転数を制御する。これにより、必要最小圧力に対する圧力変動幅を0.01 MPa以内に抑えることができる。こうした制御による圧力低減効果によって省エネを実現する。複数台運転の場合、容量調整機にインバータ機を導入することによって定速機の吐出圧力も一定となり、システムとして圧力低減効果を生み出す。またインバータ機のモータは、部分負荷であっても効率の良い永久磁石 (IPM) モータを採用している。

ALE IVは、通信コントローラに台数制御運転システムを内蔵している。そのため、台数制御盤不要で最大6台までの台数制御が可能となった。これにより、台数制御盤を導入しなくて済むため、お客さまには省エネに向けた台数制御運転をより容易に実施いただける。

また、IoTを活用したクラウドサービスKobelinTM注1)を活用し、さらなる省エネに向けた改善を行える環境を構築した。KobelinTMの運用イメージを図7に示す。圧縮機の運転状況を日常的に管理・把握することにより、よりよい運転方法への改善やトラブルの発生を未然に防止するためのメンテナンスを検討することができる。これにより、お客さまの省エネ改善・安定操業に貢献できると考える。

2.3 ユーザビリティの向上

2.2節で述べた省エネ性に加えてALE IVは、お客さまの使用性・作業環境を第一に考えてユーザビリティをさらに向上させている。

2.3.1 静音性

スクリュ圧縮機は、雄ロータの回転数と歯数と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ュ圧縮機は、油冷式に比べると高回転である。このため、脈動周波数は一般に600 Hzを超える高周波成分 (高周波音) が主となる。この高周波音を低減するため、ALE IVでは新型のサイレンサを標準装備した。このサイレンサは拡張型と多孔板式とを組み合わせたもので (200 kW 超のALE IVは拡張型のみ)、従来機に搭載している共鳴型と比較してより幅広い周波数帯に対して高い減音効果を発揮する。幅広い周波数帯に対して効果があることから、インバータ機の部分負荷運転時にも有効なサイレンサとなる。この新型吐出サイレンサ

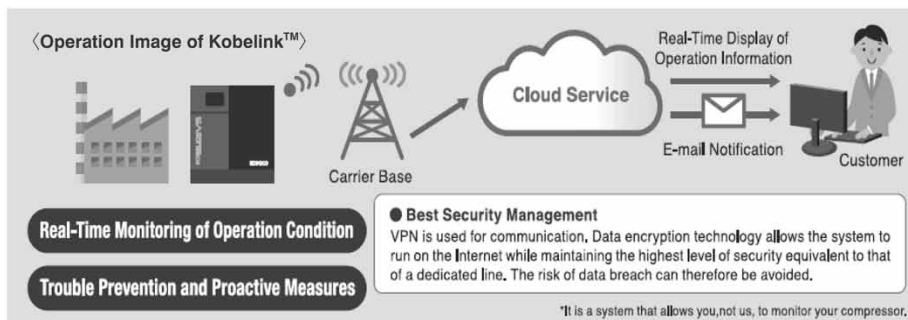


図7 KobelinTM運用イメージ
Fig.7 Operational image of KobelinTM

脚注1) Kobelinは当社の登録商標である。

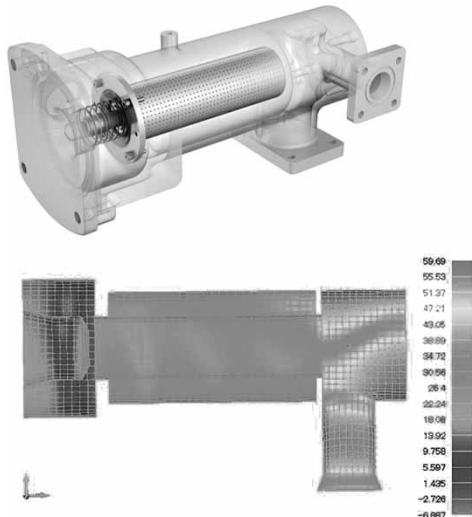


図8 吐出サイレンサの内観と音響解析結果

Fig.8 Internal view of discharge silencer and results of acoustic analysis

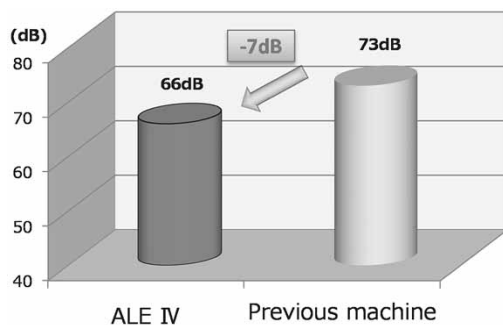


図9 ALE IVと従来機との騒音値比較

Fig.9 Comparison of noise of ALE IV and conventional machine

の内観図と音響解析結果を図8に示す。

上述のサイレンサに加え、防音カバーの構造見直しや吸音ダクトの設置などの徹底した騒音対策を行った。これにより、オイルフリー特有の騒音を静音化することができ、従来機に比べて最大約7dBの低騒音化を実現した(図9)。

またALE IVは、騒音の評価方法についても見直しを行った。従来は圧縮機の周囲4方向のみを評価していたが、ALE IVはISO基準の圧縮機上部中心や4隅など、騒音源に近い点も評価対象として加えた。それにより、圧縮機自体からの騒音を従来に比べてより正確に評価することができる。

2.3.2 オイル等級クラスゼロ

ALEシリーズは従来、「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)の認証を国際的第三者機関(TÜV: Technischer Überwachungs-Verein Rheinland)より取得している。ALE IVにおいてもクラスゼロを継承しており、清浄度が最高品質の油分を含まない圧縮空気を要求するユーザーニーズに応えている。

オイル等級クラスゼロにより、油分除去用のフィルタエレメント交換費用やドレン処理(油分分離)費用など、



図10 排熱式ドライヤ

Fig.10 Waste heat type dryer

圧縮空気の清浄化に要する費用の削減が可能となる。

2.3.3 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。洗練されたインターフェースのモニタ画面により、運転状況や系統図、アラーム・インターロックリストなどの情報が一目でわかる。よりわかりやすい情報の提供と簡単でスムーズな操作性を実現した。

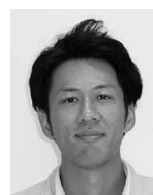
2.3.4 排熱式ドライヤ

当社では省エネ対応周辺機器として、排熱式ドライヤ(図10)をラインアップしている。これは、圧縮機からの排熱を利用する吸着式ドライヤで、160kW相当の圧縮機に対して約15W程度の電力で稼働できる省エネドライヤであり、空気のロス・エアパージも不要である。また、冷媒も使用していないため、環境面でも優れたドライヤである。

本ドライヤはALE IVにも接続可能であり、組み合わせることによってより省エネ性の高いシステムを実現できる。

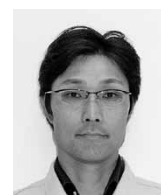
むすび = ALE IIIシリーズをフルモデルチェンジしたALE IVは、当社の技術力を最大限に生かし、省エネ特性向上やユーザービリティ向上に積極的に取り組んだ商品である。とくにALE IVは、お客さまの使用環境においてお役に立てることを考え、定格状態での性能向上だけでなく中間負荷での性能向上を図った。また、近年の温暖化によって周囲温度が高い環境にあっても、本機を高性能で安心して運転できることを実現している。

当社は今後もお客さまからのニーズを敏感に把握するとともに、省エネ型空気圧縮機の開発を通じて、消費電力削減ならびにCO₂削減に貢献していきたいと考えている。



米田 玄央里

機械事業部門 圧縮機事業部
汎用圧縮機本部 技術部



宮武 利幸

機械事業部門 圧縮機事業部
汎用圧縮機本部 技術部

(技術資料)

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* (博士(工学))・高橋和雄・前田基秀・川口泰平

Binary Cycle Power Generation System for Hot Water Utilizing Unused Low-Temperature Waste Heat

Dr. Ryo FUJISAWA・Kazuo TAKAHASHI・Norihide MAEDA・Taihei KAWAGUCHI

要旨

未利用の低温排熱から電力を得られるバイナリー発電装置は、今後の低炭素社会の中で再生可能エネルギーを活用するための有用な一手段となりうる。本研究では、環境性および80℃以下の低温度域での出力向上を目的とし、低GWP冷媒の選定と既存装置へのドロップインにより性能特性試験を実施した。その結果、80℃以下の熱源温度では既存装置を上回る発電性能を示すことが確認された。また、得られた結果から空冷システム化された場合の年間累積発電量を試算し、年間平均発電出力のさらなる向上には中間期での性能向上が必要であることを示した。

Abstract

Binary cycle power generation systems, capable of obtaining power from unused low temperature waste heat, can be a useful means to utilize renewable energy in the future low-carbon society. In this study, performance characteristics tests were conducted by selecting a low GWP (Global Warming Potential) refrigerant and by performing a drop-in test on existing equipment in order to improve environmental performance and to increase the output in the low temperature range below 80°C. As a result, it was confirmed that the power generation performance exceeded that of the existing equipment at a heat source temperature of 80°C or below. The annual cumulative amount of power generation for an air-cooled system was estimated from the results obtained, and it was shown that a performance improvement in the interim period was necessary to further improve the annual average power generation output.

キーワード

低温排熱, バイナリー発電装置, 再生可能エネルギー, 低GWP冷媒, ドロップイン性能特性試験

まえばき = 地球温暖化防止の観点から、地熱やバイオマスなどの再生可能エネルギー分野およびエネルギー多消費産業分野では未利用低位エネルギーのさらなる利活用が進められている。そのなかで、80℃以下の低温排熱は利用価値が低いうえに、利用場所との距離や時間のギャップによる損失があることから、未利用のまま排出されていることが多い。

バイナリー発電システムは熱エネルギー落差を利用することによって発電可能なシステムであり、100℃以下の低温未利用排熱からでも電力を得られる。また、産業排熱や地熱利用によるCO₂削減が期待されており、当社においても95℃の温水を熱源とするバイナリー発電システムの開発・商品化が行われてきた¹⁾。

表1に当社温水バイナリー発電システムMB-70Hの主

な仕様を、図1にその外観を示す。本システムは冷媒としてHFC245faを使用していたが、本冷媒はモントリオール議定書のキガリ改正で新たな規制対象と定められた²⁾。このため、本システムを継続して販売するためには次世代の低GWP (Global Warming Potential: 地球温暖化係数) 冷媒への転換が必須である。また本システムは、熱源温度90℃をターゲットとして開発されたため、熱源温度80℃以下での飽和蒸気圧が下がる冷媒特性により性能低下も大きい。

従来の温水バイナリー発電システムでは放熱に開放式冷却塔を想定している。開放式冷却塔は外気と直接接触して冷却されることによって性能向上が図れる一方、冷

表1 温水バイナリー発電システムMB-70Hの仕様

Table 1 Specifications of binary cycle power generation system MB-70H for hot water

Model	Microbinary™ MB-70H
Maximum generating-end output	72 kW
Maximum sending-end output	60 kW
Power generator	IPM synchronous generator
Standard screw rotor speed	5,500 rpm
Power voltage	200/400 V
Medium	HFC245fa
Design pressure	0.97 MPaG
Heat source	70~95℃
Expander	Screw expander



図1 温水仕様バイナリー発電システム Microbinary™ MB-70Hの外観
Fig.1 Appearance of binary cycle power generation system MB-70H for hot water

* 技術開発本部 機械研究所

却水の汚れによる熱交換器閉塞など水質に起因するトラブルが多い。こうしたトラブルを防止し、バイナリー発電システムの年間稼働率を向上させることが課題となっている。また、開放式冷却塔は放熱量のおよそ80%が蒸発潜熱によるため水消費量が多く、水使用料金による発電メリットの低下を軽減させることも課題である。

以上の観点から、本開発ではGWPが100以下の次世代低GWP冷媒を使用し、熱源温度80℃以下の条件においても現行製品の発電性能を上回ることを目標とした。発電性能試験は、既存の機器に変更を加えずに新たな冷媒を封入するドロップイン試験とした。また、年間稼働率向上および水消費量の削減を目的に、空冷ドライクーラを組み合わせたシステム試験を実施し、外気温度変化による性能の実測と、得られた結果から年間累積発電量を試算した。なお、地熱FIT^{注1)}による買取価格を40円/kWhとした場合、メンテナンス費も含めた設備投資回収年数7年未満を目標とした。この目標は年間累積発電量185 MWh/年、平均発電量30 kWである。

1. 冷媒および潤滑油の選定

1.1 サイクル計算による冷媒の選定

本開発では、上で述べた温水バイナリーユニットで用いるスクリュタービンを発電機として使用する。本タービンは従来、冷媒であるHFC245faに対して設計されているため、開発機向けに選定する冷媒物性はHFC245faに近いものが望ましい。HFC245fa代替とされる冷媒³⁾の中から冷媒物性および入手性を考慮し、HFO1336mzz(E)およびHFO1336mzz(Z)を候補として検討した。

冷媒の選定はサイクル線図によって行った。サイクルは基本的なランキンサイクルを想定し、外部熱源条件や各機器性能（タービン効率や熱交換器ピンチ温度差）を同一として冷媒物性による発電量の変化を計算した。各冷媒の熱力学的物性データにはNIST Refprop ver9.0⁴⁾を用いた。発電量の計算では、蒸発器および凝縮器の圧力を固定し、熱源水の条件から所定のピンチ温度差になるまで収束計算を行った。詳細は既報¹⁾を参照されたい。発電量を算出する際の計算条件は、温水：80℃、75 t/h、冷却水：25℃、60 t/h、各熱交換器ピンチ温度差を3.0℃、蒸発器過熱度および凝縮器過冷却度を5.0℃、膨張機吸込体積流量400 m³/h、膨張機断熱効率75%、冷媒ポンプ効率50%とした。

結果を表2に示す。発電機での出力を発電端出力、発電端出力からシステム内部消費となる冷媒ポンプ動力を減じたものを送電端出力とした。発電端出力で比較すると

表2 各冷媒のサイクル性能比較

Table 2 Comparison of cycle performances of each refrigerant

	HFC245fa	HFO1336mzz(E)	HFO1336mzz(Z)
GWP	858	18	2
Heat input	797.3	919.0	508.3
Expansion ratio	2.63	2.34	3.43
Density of Expander inlet	33.0	49.7	22.2
Generating-end output	45.1	48.0	33.1
Refrigerant pump power	2.1	3.1	0.9
Sending-end output	43.0	44.9	32.2

脚注1) 固定価格買取制度 (Feed-in-tariff)。

HFO1336mzz(E)は48.0 kWであり、HFC245faの45.1 kWに対して6.4%高い。これは、膨張機体積流量一定では、吸込ガス密度の高いHFO1336mzz(E)がHFC245faよりも多くの熱量を取り込むことが可能であることを示している。いっぽう冷媒ポンプ動力は、循環冷媒量が多くなることで48%増加し、送電端としては4.4%の向上にとどまる。

もう一つの冷媒候補であるHFO1336mzz(Z)は、吸込密度が低く入熱量が低下するため、送電端でHFC245faの75%出力と低下した。

1.2 安定性評価および冷媒溶解度による油適合性の検討

HFO系およびHFC系冷媒では一般に、適合油として冷媒に対して高い安定性を示すPOE (ポリ・オール・エステル) 合成油が使用される。いっぽうで当社バイナリー発電システムでは、PAG (ポリ・アルキレン・グリコール) 合成油を使用している。そこで、PAG2種、POE1種を候補として安定性評価を実施した。安定性評価試験にはオートクレーブ試験 (JIS K 2211) を用いた。冷媒と油を1対1で混合し、基準となる熱源温度80℃に対して余裕度を50℃とした130℃で14日間の浸漬試験を行い、劣化特性を評価した。結果を表3に示す。

温度などの影響で冷媒が分解するとふっ酸が発生し、同時に油の分解も起こって酸価が上昇する。当社では酸価0.1未満を基準値としている。酸価は、HFO1336mzz(Z)とPAG合成油Aの組み合わせのみ0.1を超えたが、他の組み合わせでは0.1未満の良好な値を示している。また試験後の油の外観に関しても、劣化時特有の鉄さび由来の褐色化も一切確認されず、130℃未満においてはいずれの組み合わせも十分な安定性を有すると結論づけた。

潤滑油は冷媒と同時にシステム内を循環するため、冷媒への溶解度が低いとバイナリー発電システム内の意図しない配管部分で冷媒と油が比重差により二相に分離することが懸念される。分離した場合、液相の均一性が失われて軸受け部が油不足になり、焼き付きが発生することも考えられる。いっぽうで冷媒溶解度が高すぎると油相が適切な粘度を保持できなくなり、同様に軸受け焼き付きの原因となる。したがって潤滑油選定にあたり、適切な冷媒溶解度・粘度を有する油を選定することが肝要である。

HFO1336mzz(E)に対する各油の冷媒溶解度の測定結果を図2に示す。図の縦軸は温度を、横軸は全重量に対する合成油の割合を重量比率で整理した。図の実線は冷媒ガス相に対する合成油の溶解度を、点線は冷媒液相に対する溶解度を示している。PAG合成油AおよびB

表3 各合成油の安定性評価試験の結果

Table 3 Results of stability evaluation test for each synthetic oil

	HFO1336mzz(E)		
	PAG synthetic oil A	PAG synthetic oil B	POE synthetic oil
Color	L 0.5	L 0.5	L 0.5
Acid value	0.01	0.08	0.01
	HFO1336mzz(Z)		
	PAG synthetic oil A	PAG synthetic oil B	POE synthetic oil
Color	L 0.5	L 0.5	L 0.5
Acid value	0.11	0.00	0.01

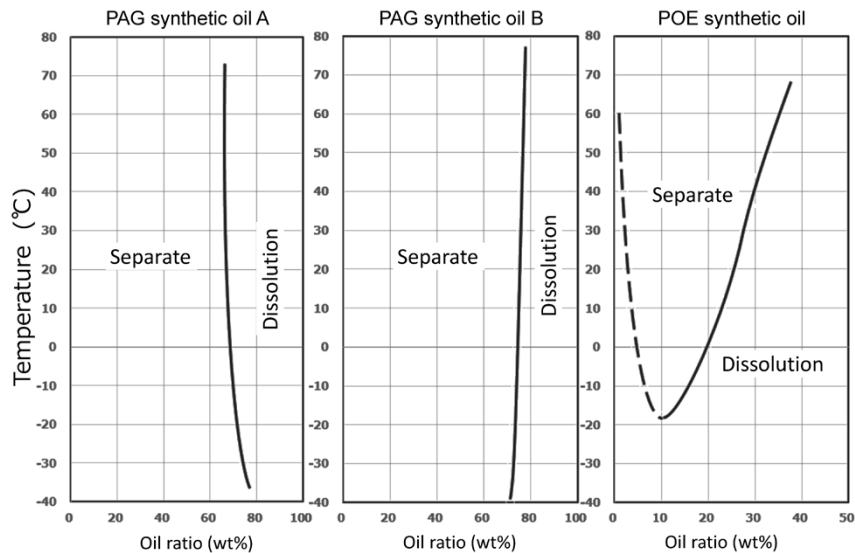


図2 R1336mzz (E) に対する各油の冷媒溶解度
Fig.2 Refrigerant solubility of each oil in R1336mzz (E)

は二相分離域が広いうえに、点線の冷媒液相に対する溶解度が存在せず、冷媒液相が油を溶解しないことを示している。すなわち、PAG合成油はシステム内配管の意図しない場所で相分離し軸受けの油不足を引き起こす可能性が高いといえる。例えば凝縮器後に冷媒液が20~40℃となるが、PAG合成油は二相分離する可能性が高い。いっぽうでPOE合成油は、冷媒相が油を一定量溶解するため均一層で安定的に送液可能であり、システムへの適合性が高いことが分かった。

以上の安定性評価および溶解度適合性評価の結果から、本システムでは冷媒にHFO1366mzz(E)とPOE合成油を選定した。

2. 空冷ドライクーラによる冷却の検討

空冷ドライクーラは、冬季の最大出力時における約1MWの放熱量を考慮し、アルファ・ラバル社製の空冷ドライクーラを採用した。その概略図を図3に、主な仕様を表4に示す。バイナリー発電システムは、とくに地熱利用において腐食ガス環境に設置されることも想定し、耐環境性を考慮した材料選定を行った。すなわち、伝熱性能的に不利ではあるが、伝熱管にSUS304、フィンにはエポキシコーティングを採用した。空冷ドライクーラはファンによる送風で冷却を行う。このため、風量増加によって冷却性能は向上し、発電端出力は向上す

表4 空冷ドライクーラの主な仕様

Table 4 Main specifications of air-cooled dry cooler

<Approximate dimension>			
Width	7,200 mm	Depth	2,280 mm
Height	2,500 mm	Dry weight	2,850 kg
<Design point data>			
Inlet air temp.	6.2℃	Inlet water temp.	36.4℃
Outlet air temp.	30.4℃	Outlet water temp.	28.0℃
Cooling capacity	915 kW	Flow rate	100 m ³ /h
		Pressure drop	80 kPa
<Fan specifications>			
Flow rate	120,000 m ³ /h	number of fans	10
<Heat transfer coil specifications>			
Heat transfer area	2,954 m ²	Material of tube	SUS 304
Material of fin	Aluminum with epoxy coating		

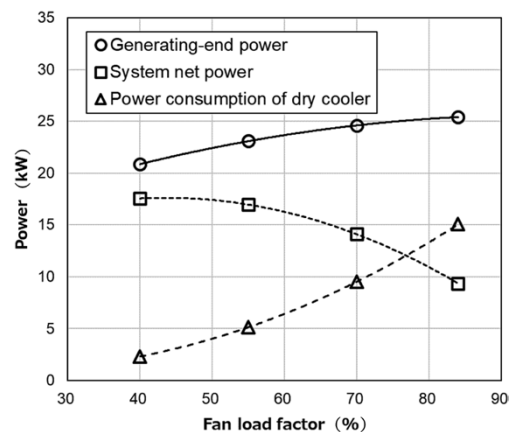


図4 システム正味出力とドライクーラ消費電力の関係
Fig.4 Relationship between system net power and power consumption of dry cooler

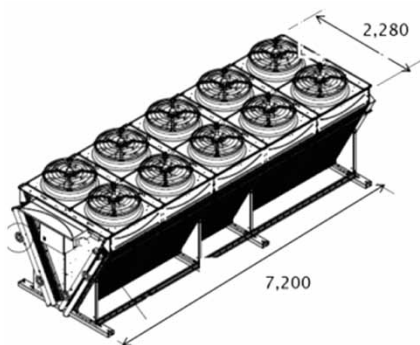


図3 空冷ドライクーラの概略図
Fig.3 Schematic diagram of air-cooled dry cooler

る。しかしながらその反面、ファンの消費動力が増加することからシステムの正味発電出力は減少する。

そこでファン動力の最適点を探るため、バイナリー発電システムとの組み合わせによるシステム性能の検討を進めた。検討にあたっては、当社内製のMB-70H性能計算シミュレータと、任意の外気温度・ファン回転数条件下で空冷ドライクーラ性能を計算する性能モデルとを組み合わせ、システム全体の正味発電電力を試算した。その結果を図4に示す。図の横軸はファンの最大回転数

に対する負荷率であり、縦軸は送電端出力、ドライクーラ消費電力、および発電端出力からドライクーラの消費電力を差し引いたシステム全体の正味出力である。ファン出力を上げることによってバイナリー発電システムの発電端出力は緩やかに向上するが、ドライクーラ消費電力の上昇が勝り、システム正味出力は減少する。本システムにおいてはファン出力を極力抑えることがシステム効率上有効と示唆された。なお、本検討結果は既存のMB-70Hに対する検討結果であり、後述する低GWP冷媒を用いたドロップイン試験において最適な負荷率を確認する。

3. 新冷媒を適用するバイナリー発電システムの発電性能

前章までの検討より決定した冷媒および油を試験システムに充填し、発電性能確認試験を実施した。温水熱源の温度と送電端出力との関係を図5に示す。比較のため、HFC245faを冷媒とする現行機種MB-70Hの場合を図中の破線で示す。図より新冷媒による発電結果では70~80℃の範囲で現行機種より発電出力が増加しており、70℃では約4.5 kWの増加が確認された。温水熱源温度の上昇に伴ってその差は縮まり、85℃ではほぼ同等、90℃では逆に約2 kW低下する結果となった。温水熱源温度が低い範囲では、前述の冷媒特性により狙い通りの性能向上を達成したと考える。しかし、高温になるに伴って冷媒循環量が増加し、各部圧力損失の増加による膨張比の低下、またそれに伴う冷媒ポンプ動力の増加が大きく影響したと考えられる。

温水熱源温度を80℃に固定し、冷却水温度を変化させた送電端出力の結果を図6に示す。図5と同様、破線は現行機種の出力を示す。図より20~33℃の範囲で現行機種に対して発電出力は増加しており、冷却水温度の低下に伴って現行機種との出力差は小さくなっている。

以上より、新冷媒による発電性能は冷媒循環量の少ない低負荷時に性能向上するものの、高負荷時に同等、あるいは現行機種を下回ることが分かった。配管サイズアップによる圧力損失低減や適切な冷媒ポンプの再選定によりさらなる性能向上が期待できる。

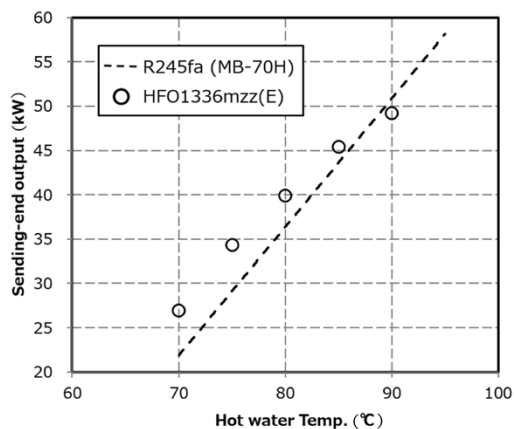


図5 温水温度と送電端出力との関係

Fig.5 Relationship between hot water temperature and sending-end output

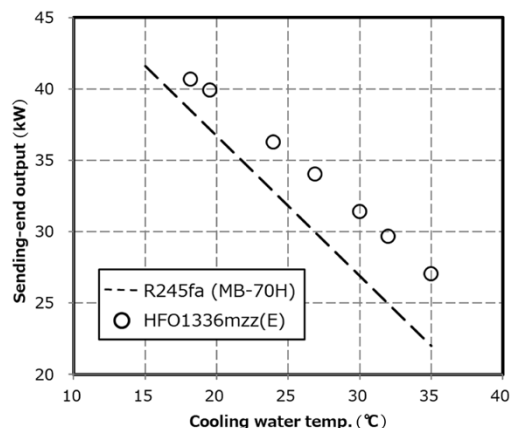


図6 冷却水温度と送電端出力との関係

Fig.6 Relationship between hot water temperature and sending-end output

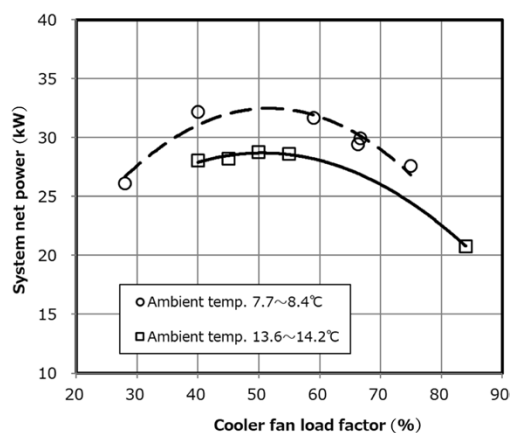


図7 クーラファン回転数とシステム正味出力との関係

Fig.7 Relationship between cooler fan load and system net power

空冷ドライクーラを冷却源とした際のシステム性能を実測により確認した結果を図7に示す。横軸はファン負荷率を、縦軸はシステムの正味出力であり、外気温度が約8℃前後および14℃前後の結果を示した。いずれの外気温度においてもファン出力が50%付近で極大となっており、2章での検討どおりファン出力を抑える運転が最適になることが確認できた。なお、事前検討時には40%前後であった最適点が50%付近にずれた理由は、冷媒変更によって膨張機吸込ガス密度が上がり、バイナリー発電システムの発電端出力が向上したことによる。

4. 年間累積発電量の推算

冷媒としてHFO1336mzz(E)を採用した空冷冷却バイナリー発電システムの試験結果から、年間の外気温変化による年間累積発電電力量を試算した。外気温には神戸市の年間気温データを使用した。なお、外気温が高くて発電出力が低下する7~9月の3箇月はメンテナンス期間として運転を休止した。

試算結果を図8に示す。累積発電電力量は190.2 MWh/年と試算され、平均発電電力は目標の30 kWをわずかに下回り約29 kWとなった。平均発電電力の向上には、外気温が15~20℃となる中間期(4~6, 9~11月)における発電出力の改善が必要であり、前述した圧力損失改善などによって達成可能と考える。

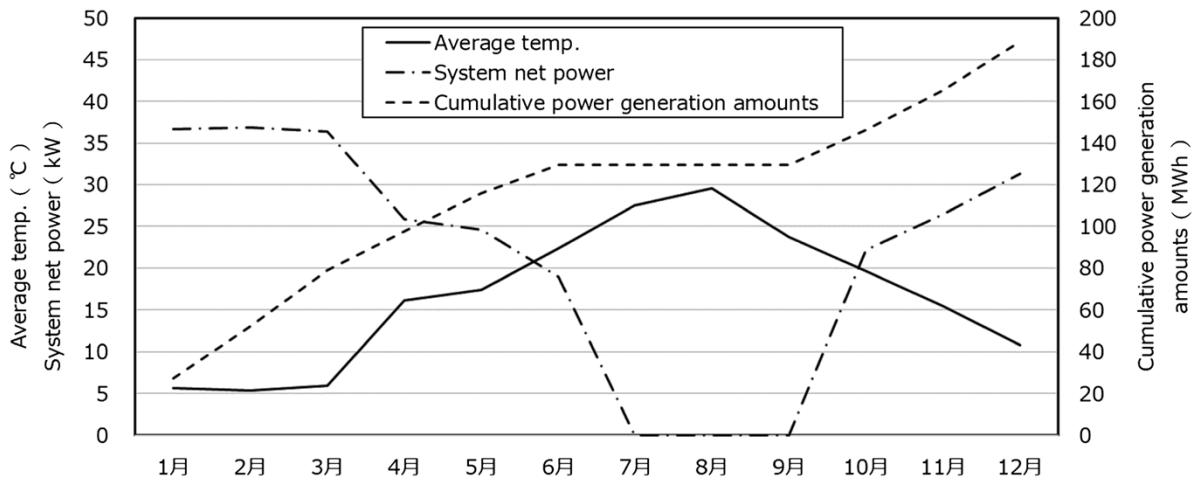


図8 神戸市の年間気温を例としたシステム正味出力および年間累積発電量の予測

Fig.8 Prediction of system net power and amount of cumulative power generation using annual ambient temperature of Kobe city

むすび = 低GWP冷媒への対応や年間稼働率の向上を目的に、現行機種へのドロップイン試験および空冷化試験を実施し、以下のことが明らかとなった。

- (1) 低GWP冷媒であるHFO1336mzz(E)とPOE合成油との組み合わせで発電性能試験を実施した。その結果、80℃以下の温水温度では現行機種を上回る性能が得られた。冷却水温度変化による試験結果からも、広い範囲で現行機種を上回る発電性能が確認された。
- (2) 上記の発電性能向上は温水温度が高くなるにつれて現行機種との差が縮まり、90℃では下回ることが確認された。この結果は冷媒圧損によるものが支配的と考えられ、配管サイズの最適化によりさらなる性能向上が期待される。
- (3) 空冷化によるシステム性能を試験し、選定したドライクーラのファン負荷率は50%程度で最適点になることを確認した。なお、最適点はドライクーラの容量によって変わる。
- (4) 神戸市を例とした年間累積発電量を試算した結果、累積発電電力量は190 MWh/年、平均発電電力は約29 kWとなった。平均発電電力の向上には、外気温が15~20℃の中間期での発電性能を向上させることが必要である。

本開発は、平成28~30年度の環境省委託事業「低温熱源活用発電技術実用化推進事業」により遂行された。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 高橋和雄ほか, R&D神戸製鋼技報. 2013, Vol.63, No.2, p.2.
- 2) 環境省ホームページ. キガリ改正を踏まえた新たな代替フロン規制の基本的事項等について. 平成29年, <https://www.env.go.jp/press/y0615-05/mat02.pdf>. (参照 2020-01-14).
- 3) Jason R. Juhaz. 12th IEA Heat Pump Conference. 2017. Rotterdam. O.3.3.4.
- 4) National Institute of Standards and Technology (NIST). REFPROP Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database. <https://www.nist.gov/srd/refprop>. (参照 2010-01-14).



藤澤 亮
技術開発本部 機械研究所



高橋和雄
技術開発本部 機械研究所



前田基秀
技術開発本部 機械研究所



川口泰平
技術開発本部 機械研究所

(解説)

冷凍機・ヒートポンプの低GWP冷媒対応

神吉英次*・前田倫子

Refrigeration Unit and Heat Pump using Low GWP Refrigerant

Eiji KANKI・Michiko MAEDA

要旨

近年、地球温暖化防止に向けたCO₂排出量の削減が世界的な課題となっている。また、代替フロンは温室効果が高いことから規制が進んでおり、冷凍機やヒートポンプなどの熱源機器に対しては地球温暖化係数（Global Warming Potential：GWP）の低い冷媒への早期転換が求められている。本稿では、当社の冷凍機やヒートポンプへの低GWP冷媒対応として、アンモニア冷媒を使用したインバータ駆動の半密閉アンモニアスクリュ冷凍機の開発をはじめ、ヒートポンプ用冷媒としてR1234yfなどの採用に向けた取り組みを紹介した。

Abstract

In recent years, the reduction of CO₂ emissions to prevent global warming has become a global challenge. Hydrofluorocarbons (HFCs) are being regulated due to their high greenhouse effect; and, for heat source devices such as refrigerators and heat pumps, early conversion to refrigerants with low global warming potential (GWP) is required. This article introduces Kobe Steel's efforts to introduce low GWP refrigerants into refrigerators and heat pumps, which includes the development of an inverter-driven semi-hermetic ammonia screw refrigerator based on ammonia refrigerant and the adoption of R1234yf, or other refrigerants, for heat pumps.

キーワード

地球温暖化, ヒートポンプ, 冷凍機, 低GWP冷媒

ま え が き = 空調機器や冷凍・冷蔵機器にはフロン類が多く使用されているが、近年の地球温暖化問題により、温室効果の高いフロン類への規制が進んでいる。2016年10月に採択されたモントリオール議定書キガリ改正では、高いGWP（Global Warming Potential：地球温暖化係数）をもつHFC（ハイドロフルオロカーボン）が新たな規制対象に加わった。これにより日本を含む先進国は、2011-2013年の平均数量等を基準値として、2019年から削減を開始し、2036年までに85%分を段階的に削減する必要に迫られている¹⁾。

これを受けて国内では、HFC冷媒の製造量および輸入量の事業者ごとの割り当てがオゾン層保護法によって定められ、一部のHFC冷媒の価格が上昇し始め、入手が困難になりつつある。また、フロン排出抑制法では、フロン類を使用する製品区分ごとにフロン類の目標GWP値と目標年度を設定した「指定製品」が定められた。このため機器メーカーは、目標年度以降は出荷台数ベースの加重平均GWP値が目標GWP値を超えないようにしなければならない²⁾。表1はフロン排出抑制法による指定製品の一部を抜粋したものである。現時点で指定製品に挙がっていない製品についても、代替冷媒の安全性評価や技術的課題の解決など要件が整い次第、順次追加される見込みである。このため、機器のノンフロン化・低

表1 フロン排出抑制法によるGWP目標値と目標年度

Table 1 GWP targets and target year under "Act on Rational Use and Proper Management of Fluorocarbons"

Designated products	Present refrigerant (GWP)	Target GWP	Target year
Room air conditioning	R410A (2090) R32 (675)	750	2018
Commercial air conditioning (offices & stores)	R410A (2090)	750	2020
Condensing units and refrigeration units (> 1.5 kW)	R404A (3920) R410A (2090) R407C (1774) CO ₂ (1)	1500	2025
Cold storage warehouse (> 50,000 m ³)	R404A (3920) NH ₃ (0)	100	2019
Mobile air conditioning	R134a (1430)	150	2023

GWP化は機器メーカーにとって急務となっている。

本稿では、当社の冷凍機およびヒートポンプを対象に、モントリオール議定書キガリ改正に基づく低GWP冷媒化に向けた取り組みを紹介する。

1. 冷凍機

当社は2002年に世界で初めてインバータ駆動の2段圧縮スクリュ冷凍機iZシリーズの開発に成功した。さらに2004年にはオゾン層を破壊しないフロン冷媒R404Aを使用したiZ αシリーズを上市した。これらの冷凍機は低温用途の蒸発温度-60~-30℃の広い温度範

* 機械事業部門 汎用圧縮機本部 冷熱・エネルギー部

囲に対応し、食品冷蔵のほか食品用フリーザ装置や真空凍結乾燥、環境試験室、プロセス冷却などの用途において多くのお客さまに使用していただき、ご好評をいただいている。本機はインバータ駆動による部分負荷時の省エネ効果に加え、圧縮機の吸込圧力が下がるにしたがって回転数を増速させる能力増強機能が大きな特長である³⁾。

また、中温用途の単段冷凍機およびブラインクーラユニットを機種追加してシリーズを拡充している。

1.1 冷凍機の低GWP冷媒対応（自然冷媒）

当社は、iZ冷凍機の省エネ、能力増強の特長を生かし、さらにGWPがゼロであるアンモニア冷媒を使用したインバータ駆動の半密閉アンモニアスクリュ冷凍機（iZNシリーズ）を開発・商品化した。

従来のアンモニア冷凍機はメカニカルシール付きの開放型圧縮機であり、冷媒であるアンモニアの漏れが避けられない構造であった。しかしながらアンモニアには毒性や可燃性があることから、アンモニアが外部に漏れない圧縮機が強く望まれていた。

アンモニアが外部に漏れないようにするためには圧縮機本体にモータを内蔵した半密閉構造にする必要がある。しかしながら従来のモータの巻線に使用されている銅線はアンモニアによって腐食される。このため、圧縮機本体の半密閉化にあたってはアルミ巻線モータを採用した。半密閉化によってメカニカルシールが不要な構造の本開発機はアンモニアの漏れがなくなった。またメカニカルシールの定期整備が不要となり、安全性が高く、省メンテナンスな冷凍機である（図1）。

本インバータ駆動半密閉アンモニア冷凍機は、モータ公称出力24~125 kWまでラインアップしている。本機はまた、アンモニアを機械室内で循環させてアンモニアで冷却凝縮したCO₂を冷蔵庫に供給するNH₃/CO₂二次冷媒システムなどで使用されている。

1.2 冷凍機の低GWP冷媒対応（フロン冷媒）

冷凍機にはフロン冷媒R404A（GWP値3920）が多く使用されているが、指定製品化により2025年までにGWP値1500以下の冷媒に転換する必要がある（表1）。しかしながら冷媒のGWP値と燃焼性は相反する関係にあり、現在のところ不燃性でGWP値1000以下の冷媒は上市されていない。また、冷蔵庫内を換気できず、組み合わせられる冷蔵庫も特定できない。そこで、現行冷媒R404Aと圧力が近く、上記GWP規制値をクリアする不

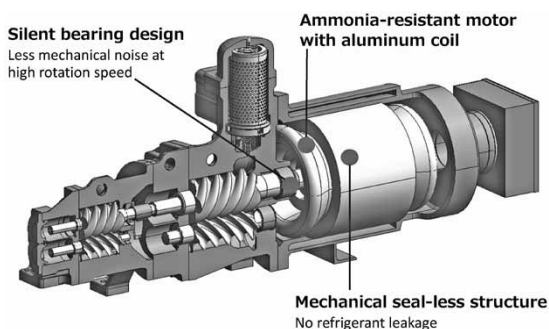


図1 半密閉アンモニア2段スクリュ圧縮機

Fig.1 Two-stage ammonia semi-hermetic screw compressor

燃性冷媒R448A（GWP値1387）を、冷凍機に使用する冷媒として採用することにした。冷媒R448Aを採用して開発した2段スクリュ冷凍機iZFシリーズを図2に示す。

冷媒R448Aは同一圧力の沸点と露点に5℃程度の温度差を有する5種混合の非共沸混合冷媒である。熱交換器の型式によっては伝熱性能が低下するため再設計を行った。また液冷媒の過冷却効果を増強することにより、現行冷媒R404A使用機に対し冷却能力およびCOP（成績係数）の向上を図った。

現在、37 kWおよび55 kWの水冷機と空冷機とを上市しており、順次シリーズを拡充していく予定である。

2. ヒートポンプ

当社は、オフィスビルや商業施設などの空調用途、あるいは工場のプロセス冷却用途のチラーから産業用加熱用途の高温ヒートポンプまで、幅広い温度に対応した高効率の熱源機をラインアップし、お客さまの省エネ・省CO₂に加えてランニングコストの低減に寄与してきた。図3は当社既存代表機種の供給温度範囲を整理・分類したものである。横軸および縦軸はそれぞれ冷水（熱源水）および冷却水（温水）の出力温度を示す。

ヒートポンプは従来、空調用途を主としており、温水温度は暖房に使用する50~55℃程度であった。しかし



図2 冷媒R448Aを採用した2段スクリュ冷凍機iZF90Aの外観
Fig.2 Appearance of two-stage screw refrigerator iZF90A using refrigerant R448A

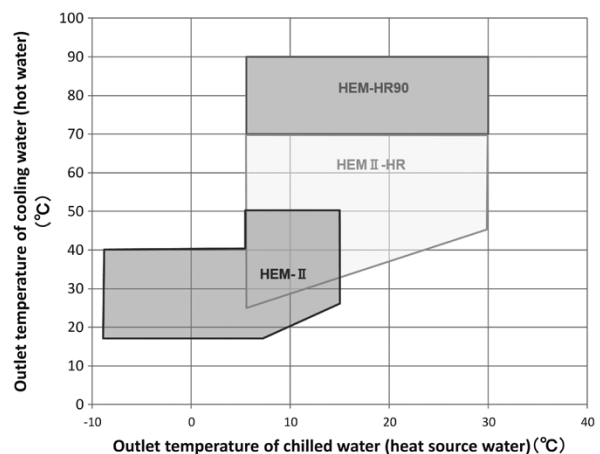


図3 当社ヒートポンプの供給温度範囲

Fig.3 Supply Temperature Range of Heat Pumps

表2 現行のHFC冷媒および低GWP冷媒の候補

Table 2 Current HFC refrigerant and candidate of low GWP refrigerants

Refrigerant	HFC			HFO Blend			HFO			
	R407E	R134a	R245fa	R513A	R454A	R454C	R1234yf	R1234ze(E)	1233zd(E)	R1224yd(Z)
GWP (AR5)	1425	1300	858	573	238	146	<1	<1	1	<1
Safety group ^{*1}	A1	A1	B1	A1	A2L	A2L	A2L	A2L	A1	A1
High pressure gas safety act	Inert gas	Inert gas	Inert gas ^{*2}	Inert gas	Flammable gas	Flammable gas	Specific inert gas	Specific inert gas	Inert gas ^{*2}	Inert gas ^{*2}
Act on rational use and proper management of fluorocarbons	Applicable	Applicable	Applicable	Applicable	Applicable	Applicable	Not applicable	Not applicable	Not applicable	Not applicable
Boiling point (at 1atm)	-43.9°C	-26.1°C	15.3°C	-29.2°C	-48.3°C	-45.9°C	-29.4°C	-19.0°C	18.3°C	14.6°C

*1 A: Lower toxicity, B: Higher toxicity, 1: No flame propagation, 2L: Lower flammability, 2: Flammable, 3: Higher flammability

*2 Not applicable to high pressure gas safety act due to specification conditions

当社では産業用加熱用途に適用可能な高温ヒートポンプの開発を進めてきた。すなわち、2009年には70℃までの温水と冷水を同時供給する「ハイエフミニシリーズ HEM^{注1)} II-HR」を、また2010年には90℃までの温水と冷水を同時供給する「ハイエフミニシリーズ HEM-HR90」を他社に先駆けて商品化した。

生産工場ではガスや石油など化石燃料を燃焼させるボイラが主流である。しかしながら近年は、ヒートポンプの省エネ性が高く評価され、ボイラの代替熱源として普及が進みつつある。

2.1 ヒートポンプの低GWP化

当社ヒートポンプの代表機種に使用している現行HFC冷媒および低GWP冷媒候補を表2に示す。R407EやR134aのGWP値は、冷凍機に多く使用されているR404Aに比べると1/3程度であるものの1000以上と高い値を有している。

チラーやヒートポンプは現在、フロン排出抑制法の指定製品には該当していないが、数年以内には指定製品化されることが予測されている。指定製品となった場合、家庭用・店舗用エアコンの目標GWPが750以下であることから(表1)、同様に750以下が目標となる可能性が高い。低GWP冷媒は主にHFO(ハイドロフルオロオレフィン)を始めとしてさまざまな冷媒が提案されているが、上述の理由からGWP値が750以下の冷媒を代替候補とした。

機器の設計上、現行HFC冷媒と沸点の近い冷媒が候補になると考えるが、R407EやR134aの沸点に近くGWP値が750以下の冷媒はわずかながら燃焼性を有する。A2L(微燃性)冷媒は高圧ガス保安法では「可燃性」に分類されるため、防爆対応などの措置が必要となる。いっぽうで、R1234yf、R1234ze(E)は高圧ガス保安法で「特定不活性ガス」に分類されており、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)および冷媒漏れ検知警報装置を設置すれば不活性ガスと同等の扱いができる。ただし現在、A2L冷媒の中で「特定不活性ガス」に定められているのはR32、R1234yf、およびR1234ze(E)の三種のみである。R454AやR454CなどのA2L冷媒は実質使用することができない。低GWP化促進のため、より広範なA2L冷媒が「特定不活性ガス」



図4 HEM-HR70-GNの外観
Fig.4 Appearance of HEM-HR70-GN

とされるよう早期の法緩和が望まれる。

2.2 低GWP冷媒対応ヒートポンプ⁴⁾

2.2.1 70℃/55℃温水取出機

当社のヒートポンプでは初の低GWP冷媒対応機70℃/55℃温水取出機(HEM-HR70/55-GN/GL、図4)を2019年10月から販売開始した。冷媒としてR1234yfを採用したGNモデルと、R513Aを採用したGLモデルとがあり、HEM-HR70-GN/GLは温水55~70℃取出、HEM-HR55-GN/GLは温水40~55℃取出に対応している。

R1234yfは、GWP値が1未満でフロン排出抑制法の対象外である。さらに、高圧ガス保安法で特定不活性ガスに定められていることに加えて、入手性が良いことや運転性能が良いことなどを総合的に判断して採用した。

またR513Aは、GWP750以下の不燃冷媒であり、特定不活性ガスの対応が難しいお客さまからの低GWP化ニーズに応えられるようラインアップした。

2.2.2 85℃/95℃温水取出機

85℃温水取出機は、従来のHEM-HR90の温水取出温度領域(90℃)を85℃までカバーすることを目的に開発した低GWP冷媒対応機である。本機は基本試験を終了し、来年度販売開始予定である。冷媒は、従来のR134aとR245faとの混合冷媒と圧力の近いR1234ze(E)を採用した。

95℃取出機(HEM-HR95-GN)は、蒸留濃縮システムやアンモニア回収装置などの省エネ・省CO₂を目的に、

脚注1) HEMは当社の登録商標である。

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低GWPモデルである。温水ヒートポンプはこれまで、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。しかしながら本機は、60～75℃というより高温の排温水から熱回収し、最大95℃の温水供給を可能にした。冷媒は当社的高温機で実績のあるR245faに近い物性のR1224yd (Z)を採用した。

むすび = 当社の低GWP冷媒対応について紹介した。低GWP冷媒は冷媒メーカーから多種登録されているが、性能や安全性に優れた低GWP冷媒は少なく、すべてのHFC冷媒に対応した低GWP冷媒はない。このため、機器メーカー各社は創意工夫を凝らしているのが実情である。

また、冷媒規制に関する情報は、即対応を求められている冷媒メーカーや機器メーカーにとっては切迫した問題として認知されているが、機器を使用されるお客さまにはいまだ伝わっていないことも大きな問題である。とくに、R404AはGWP値が高いことからすでに生産量が削減されており、入手が難しくなっている。このため従来の冷媒が入手できず、メンテナンスが実施できなくなって初めて冷媒の低GWP化の動きを知るお客さまやサービス会社も多い。冷媒規制に関する情報を広く伝えていく必要性を痛感している。

当社は今後も低GWP冷媒に対応した機種開発を推進し、環境に優しい製品を提供することによって低炭素社会の実現に貢献していく所存である。

参 考 文 献

- 1) 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2020-02-20).
- 2) 経済産業省 フロン類等対策ワーキンググループ. 指定製品の目標値及び目標年度の設定について(案). 第12回 開催資料4, https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/seizo_sangyo/kagaku_busshitsu/flon_taisaku/pdf/012_04_00.pdf. (参照2020-02-20).
- 3) ㈱神戸製鋼所. スクリューラインチラーユニット iZSB / iZ a B. https://www.kobelco.co.jp/products/standard_compressors/refrigerationunit/izsb_izab/index.html. (参照2020-02-20).
- 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)～. 2019年9月9日, https://www.kobelco.co.jp/releases/1201980_15541.html. (参照2020-02-20).



神吉英次

機械事業部門 汎用圧縮機本部
冷熱・エネルギー部



前田倫子

機械事業部門 汎用圧縮機本部
冷熱・エネルギー部

(論文)

相分離吸収液を活用した低エネルギー消費型CO₂分離プロセス

前田基秀*・中西 健・岸本 啓 (博士(工学))・重久卓夫 (博士(工学))

Low Energy Consumption CO₂ Capture Process Using Phase-Separation Type Absorbent

Norihide MAEDA・Ken NAKANISHI・Dr. Akira KISHIMOTO・Dr. Takuo SHIGEHISA

要旨

当社は現在、アミンとエーテルで構成される独自の相分離吸収液を活用した低エネルギー消費型CO₂分離プロセスの開発を行っている。本プロセスのエネルギー消費量の目標は、1.5 GJ/ton-CO₂である。相分離液はモノエタノールアミンなどの一般的なアミン液と比較してより低温(90℃)での再生が可能であり、液再生に必要な熱量の削減を実現した。加えて、ヒートポンプを導入することで、さらなる省エネを実現できる。プロセス実現には以下の3点、(1) アミンの劣化(アミン共通の課題)、(2) 吸収液の発火(相分離液特有の課題)、(3) 運転温度を変更した時のエネルギー消費量の顕著な増減(ヒートポンプ導入による課題)が開発課題となる。これまでに行った検証では、いずれの課題においても大きな問題は見つかっていない。そこで、さらなる検証のために今後実証試験を行うことを計画している。

Abstract

Kobe Steel is developing a low-energy consumption CO₂ capture process that utilizes a unique phase-separation-type liquid absorbent composed of amine and ether. Its target for energy consumption has been set at 1.5 GJ/tonne-CO₂. The phase-separation liquid can be regenerated at a temperature (90°C) lower than that for general amine liquids such as monoethanolamine, thus reducing the amount of heat required for liquid regeneration. In addition, introducing a heat pump can realize further energy savings. The following three points have been raised as development issues in realizing the process: (1) Degradation of amine (a problem common to amines), (2) Ignition of absorption liquid (a problem peculiar to phase separation liquid), and (3) Significant increase/decrease in energy consumption when the operating temperature is changed (an issue due to the introduction of the heat pump). The verification conducted so far has found no major problems related to any of the issues. For further verification, we are planning a demonstration trial.

キーワード

CO₂分離, 省エネ, アミン, 低温再生, 相分離吸収液, ヒートポンプ

ま え が き = 国連気候変動に関する政府間パネル(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)は2007年に第4次評価報告書¹⁾を公表している。それによると、平均気温は1906年から2005年にかけて0.74℃上昇したうえに、直近50年間(1956~2005年)の気温上昇は過去100年間(1906~2005年)の約2倍に相当することから、地球温暖化は加速傾向にあるとされている。またこれらは、CO₂を含む温室効果ガス(Greenhouse Gas, 以下GHGという)が、人間の活動によって大気に放散されたことで引き起こされた可能性が高いと結論付けられている。さらに2014年に公表された第5次評価報告書²⁾によると、GHGの排出量が多くなるシナリオでは、2100年には2006年比で2.6~4.8℃の気温上昇が起り得ることが示唆されている。気温上昇は、氷河融解による水位上昇や熱波の増加など、生物存続上のリスクを増大させ得る。そのため、気温上昇を2℃未満に抑えることを目標に、CO₂排出を抑制する取組みが各国で進められている。

我が国は今世紀後半のできるだけ早い時期に「脱炭素社会」の実現を目指しており、それに向けて、GHG排出

量を2030年に2013年度比で26%削減することをパリ協定で宣言している。さらに、2050年にはGHG排出量を80%削減することを長期目標に掲げている³⁾。

当社は、こうした目標の達成に貢献すべく、CO₂削減の取り組みの一環として低エネルギー消費型CO₂分離プロセスの開発を進めている。

1. 開発中のCO₂分離プロセスの概要

1.1 CO₂の分離方法

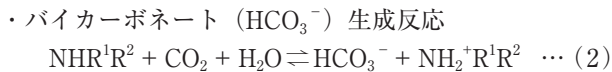
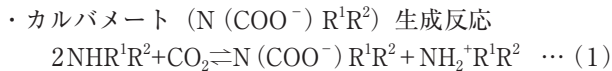
CO₂の分離方法は化学吸収、物理吸収、化学吸着、物理吸着、膜分離、および昇華に大別される。いずれも温度と圧力の違いによるCO₂の特性変化を利用した方法である。いずれの方法においてもCO₂回収源となるガスを昇圧する必要があるが、化学吸収は温度差によるCO₂の特性変化が大きいため、他の方法と比較して、より低圧での運転が可能である。また、化学吸収はガス精製や化成品製造において多くの稼働実績があり、大型化手法が確立されている。大幅なCO₂削減には、多量のCO₂を排出する発電所などからCO₂を回収する必要があるが、これらから排出されるCO₂は低圧かつ大容量であるため、

* 技術開発本部 機械研究所

上記理由から化学吸収が適していると考えられている。当社で開発中のプロセスもアミンを用いた化学吸収プロセスである。

1.2 アミン吸収の原理と普及における課題

アミン（構造式の例： $2\text{NHR}^1\text{R}^2$ ）は水との混合液が CO_2 の吸収に用いられる物質で、 CO_2 と下記の反応を生じる。



両反応とも可逆反応であり、温度が低いほど、また圧力が高いほど CO_2 の吸収が促進される。温度変化によるアミンへの CO_2 吸収/放散挙動を図1に示す。簡単のため、液中の CO_2 は全量カルバメートで示した。

発電所の排ガスといった大気圧近傍のガスを処理する際には、省エネの観点から低圧のまま、温度調整（温度スイング）のみで CO_2 を分離することが主流となっている。すなわち、低温の吸収器で CO_2 をアミン液に吸収させた後、カルバメート含有液を高温の放散器で CO_2 を放散させることによって排ガスから CO_2 を分離する（図2）。

このようにアミン吸収は、原理の解明に加えてプロセスの検討も先行開発が充実しており、技術的には成熟した分野である。しかし、発電所や製鉄所からの CO_2 回収

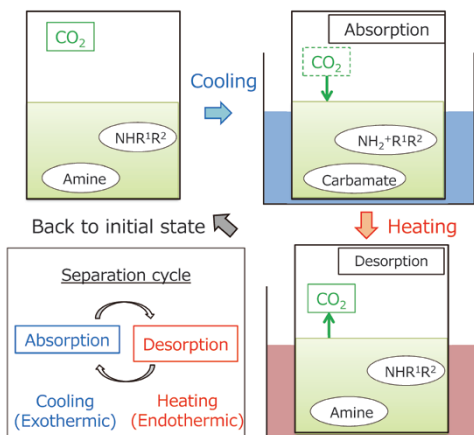


図1 温度変化に対するアミンの CO_2 吸収/放散挙動

Fig.1 CO_2 absorption/desorption behavior of amine on temperature change

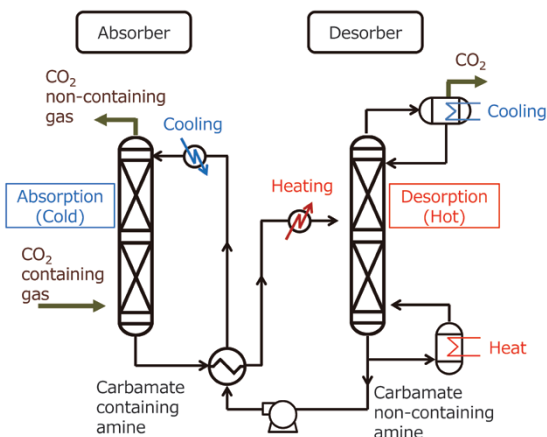


図2 温度スイングによるアミン吸収式 CO_2 分離プロセス

Fig.2 CO_2 separation process using amine by temperature swing

を目的に実装された例はごく少数にとどまっている。その主たる原因の一つは、 CO_2 の分離には多量のエネルギーが必要であり、ランニングコストが高い⁴⁾ことにある。たとえば、アミン液の性能/コスト評価にあたってベンチマークとして使用されるモノエタノールアミン（以下、MEAという）の場合、供給ガスの圧力と組成に応じて変動するものの、 CO_2 分離にかかるエネルギーは3.5~4.5 GJ/トン- CO_2 ⁵⁾である。日本国内での天然ガス価格がおおよそ10 \$/MMBTU⁶⁾であることから、分離コストは¥4,170/トン- CO_2 となる（表1）。したがって、本コストで国内の発電所の総 CO_2 排出量4億9,200万トン/年⁷⁾を分離した場合、総エネルギーコストは表2に示した値となる。

このように、我が国が今世紀後半の実現を目指しているGHG排出量26%削減、80%削減をアミン吸収で実現しようとする、エネルギーコストだけでも大きな経済的負担となる。このため、エネルギー消費量を抑えたプロセスの開発が各国で進められている。我が国は、分離に必要なエネルギー消費量の目標値を1.5 GJ/トン- CO_2 未満に定めており、各機関が省エネプロセスの開発を進めている⁸⁾。当社で開発中のプロセスも分離に必要な消費エネルギーの低減を図ったプロセスである。

1.3 アミン吸収における消費エネルギー低減方法

アミン吸収の投入エネルギーは一般に、供給ガスの昇圧にかかる電力を除くと CO_2 放散器のリボイラー供給熱（図2中のDesorber下部のHeatに相当）が95%以上を占める。町田ら⁹⁾によると、低圧ガスにMEAを適用した際の運転条件およびリボイラー供給熱の消費内訳はそ

表1 MEAを用いた CO_2 分離のエネルギーコスト
Table 1 Energy cost of CO_2 separation using MEA

LNG price		Energy consum.	Energy cost
(\$/MMBTU)	(¥/GJ)	(GJ/ton- CO_2)	(¥/ton- CO_2)
10	1,043	4.0	4,170

表2 国内の発電所にMEAを適用した場合の分離エネルギーコスト
Table 2 Energy cost of CO_2 separation when applying MEA to domestic power plants

Total CO_2 emission (Mton- CO_2 /year)	Energy cost at 26% CO_2 recovery (B¥/year)	Energy cost at 80% CO_2 recovery (B¥/year)
492	533	1,641

表3 MEA使用時の一般的な運転条件
Table 3 Typical operating conditions when using MEA

Comp.	MEA conc.	(wt%)	30
	Water conc.	(wt%)	70
Condition	Abs. temp.	(°C)	40
	Des. temp.	(°C)	120

表4 MEA使用時のリボイラー供給熱量の内訳

Table 4 Breakdown of heat input on reboiler when using MEA

	Total	Reaction h.	Sensible h.	Latent h.
Input energy (GJ/ton- CO_2)	3.85	2.05	0.63	1.18
Percentage	100%	53%	16%	31%

それぞれ表3, 表4となる。

このように、供給熱はCO₂放散時の反応熱と蒸発潜熱によって80%以上が消費される。このため、省エネ実現にはこれらの低減が鍵となる。

1.4 開発中のプロセスのエネルギー原単位

開発中のプロセスでは、アミン液の改良と機器構成の改良とによって反応熱と蒸発潜熱を低減させる。低減の本節では、その原理と目標原単位について述べる。

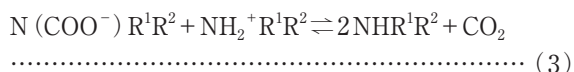
1.4.1 蒸発潜熱の低減

一般的なアミン液のCO₂放散温度と水の沸点を比較すると、水の沸点の方が低い。それゆえ、水の沸点がCO₂放散温度よりも高くなる微加圧下でCO₂を放散させるが、微圧下においても一定量の水は蒸発する。また、一般的なアミン液は重量の半分以上を水が占めるため、水の蒸発にともなう多量の熱が必要となる。これが蒸発潜熱を大きくする主要因である。

そこで蒸発潜熱低減のため、名古屋大学と当社は高沸点のエーテルを主溶媒とした吸収液を開発した。本吸収液は、CO₂吸収時のみアミン相とエーテル相の2相に分離するというユニークな特性を有する。本相分離液の組成と各成分の沸点を表5に、相分離挙動を図3に示す。

CO₂の放散反応は1.2節に示した式(1)および式(2)の逆反応であり、以下の式で表される。

- ・カルバメート分解反応



- ・バイカーボネート分解反応



表5 相分離液の組成

Table 5 Composition of phase separation type absorbent

Component	Phase sep.	MEA	Boiling point
Monoethanolamine (MEA)		30 wt%	169°C
N-Ethylethanolamine (EAE)	30 wt%		171°C
Water	10 wt%	70 wt%	100°C
Diethyleneglycol diethylether (DEGDDE)	60 wt%		188°C

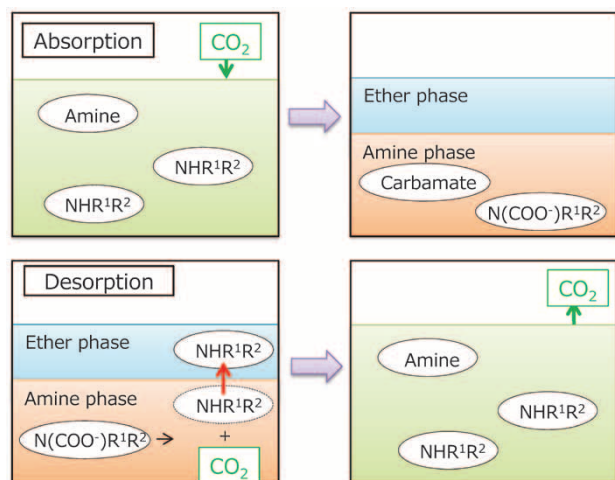


図3 相分離液の相分離挙動

Fig.3 Phase separation behavior of phase separation type absorbent

式(3), 式(4) いずれも右辺に単離アミン (NHR¹R²) が含まれる。相分離液は、相分離後の状態において、アミン相よりもエーテル相に対してより強い親和性を持つアミンとエーテルを選定している。反応で生じた単離アミンは、アミン相から除去されてエーテル相に抽出される。このため、アミン相内ではCO₂放散反応が右に進みやすくなり、容易にCO₂を放散できる。これにより、相分離液は90°CでCO₂を放散可能であり、大幅な蒸発潜熱の低減を実現した。

1.4.2 反応熱の低減

アミンによるCO₂吸収時の発熱(吸収熱)は、アミンとCO₂が結合する際に放出されるエネルギーである。いっぽう、CO₂放散時の吸熱(放散熱)はアミンとCO₂とが分離する際に吸収されるエネルギーである。したがって、発熱量と吸熱量の絶対値は理論上同じ値となる。このため、CO₂吸収時に発する熱をCO₂放散時の熱として再利用できれば大幅な省エネとなる。そこで、ヒートポンプの導入によって低温の吸収熱を回収し、高温の放散熱として利用することにした¹⁰⁾。これにより、反応熱として投入するエネルギーはヒートポンプの動作電力のみとなり、大幅に反応熱を低減可能となる。

1.4.3 目標とするエネルギー原単位

当社で開発中のプロセスの原単位目標も我が国の開発目標と同じ1.5 GJ/トン-CO₂としている。本プロセスは、相分離液を用いたアミン吸収にヒートポンプを導入したプロセスであり、前項に示した蒸発潜熱と反応熱との低減によって低原単位を実現させる。開発中のプロセスの概略フローを図4に示す。本フローを対象に、シミュレーションソフトを用いてCO₂の放散に必要な投入エネルギーを計算した。計算条件を表6に、計算結果を図5に示す。ここでの計算では吸収器および放散器での反応熱は熱ロスなしで全量授受されるものとして計算した。なお公正な評価のため、ヒートポンプの動作電力は発電効率40%を想定し、電力量を0.4で割り戻して一次エネルギー基準に換算した。

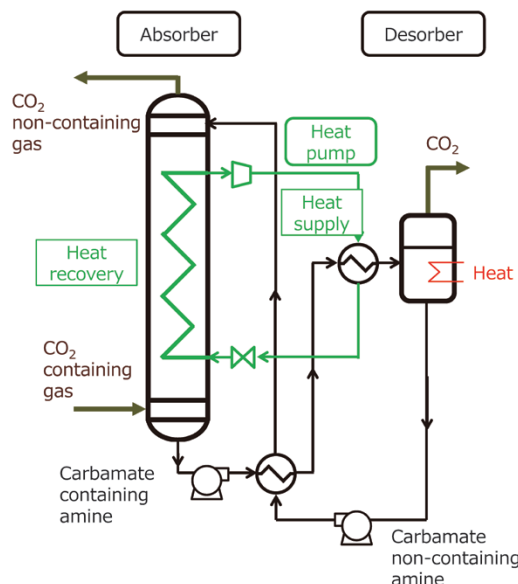


図4 開発中のプロセスの概略フロー

Fig.4 Schematic flow diagram of process under development

表6 投入エネルギーの計算条件

Table 6 Conditions for input energy calculation

Feed gas composition	CO ₂ :N ₂ :O ₂ = 15:79:6 vol%-Dry
Absorbent composition	EAE:Water:DEGDDEE = 30:10:60 wt%
Absorbing condition	50°C ambient pressure
Desorbing condition	90°C ambient pressure
Form. heat of carbamate	90 kJ/mol at 40°C
Form. heat of bicarbonate	60 kJ/mol at 40°C
Vapor-liquid equil. of CO ₂ abs.	Measured value
Recovery rate of CO ₂	50%
COP of heat pump	6.0

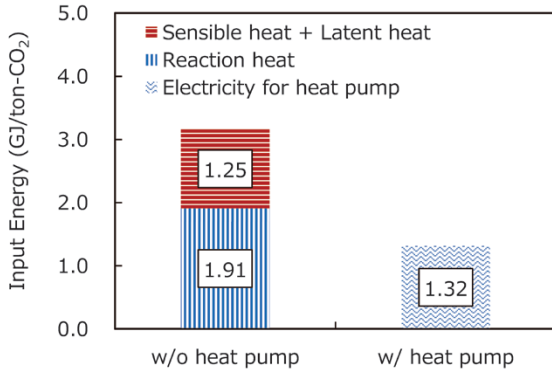


図5 CO₂放散に要する投入エネルギーの計算結果

Fig.5 Calculation results of input energy for CO₂ desorption

本計算条件ではCO₂放散時のエネルギーは1.32 GJ/トン-CO₂となる。この値に、圧力損失を補うためのガス昇圧動力やアミン循環ポンプの動力、冷却水製造電力が加算された値が最終的な投入エネルギーとなる。したがって、これらを0.18 GJ/トン-CO₂に抑えられれば目標の1.5 GJ/トン-CO₂を実現可能である。なお、本稿に示した結果は、開発中のモデルを用いた暫定的な値である。このため、今後変動する可能性が高く、性能を保証するものではない。

2. 開発課題

通常のアミン吸収と異なり、開発中のプロセスは相分離液とヒートポンプを使用する。このため、アミン吸収における共通の課題に加えて、開発中のプロセス独自の課題も解決する必要がある。本章ではそれらの課題について概説する。

2.1 アミン吸収共通の課題

アミンは、長期間使用すると酸化劣化 (Oxidative degradation) や熱劣化 (Thermal degradation) によって変質し、吸収性能が徐々に低下することが報告されている¹¹⁾。また、酸化劣化、熱劣化とも温度が高いほど反応速度が向上することが報告されている^{12), 13)}。変質したアミンは再生が難しいため、吸収性能を維持するには定期的に吸収液を入れ替える必要があるが、アミンの入れ替えはランニングコストに大きな影響を与えるため、実際のプロセスの運転条件における吸収液の耐久性をラボ検証によってあらかじめ確認しておく必要がある。

2.2 開発中の相分離吸収液を使用したプロセス独自の課題

2.2.1 吸収液の安全性

相分離液はアミン 30 wt%、エーテル 60 wt% で構成

され、可燃物が90%を占める。そのため、酸素との接触による発火が懸念される。火力発電所の排ガスには通常、燃焼やタービン駆動に用いた酸素を由来とする残留酸素が含まれる。したがって安全を確保するためには、分離装置への供給ガスの酸素濃度あるいは運転温度に制約を設けることにより、燃焼範囲外での運転を行わなければならない。このため、ラボ検証によって燃焼範囲をあらかじめ確認しておく必要がある。

2.2.2 エーテル過酸化物の生成

エーテルは、酸素と接触することによって過酸化物を生成することが一般に知られている。この過酸化物は爆発性を有しており、実際に爆発事例も報告されている。過酸化物の生成速度はエーテルの種類によって大きく異なり、なかには60°Cで1,000 ppm/hを超える速度で過酸化物を生成するエーテルも存在する¹⁴⁾。そのため、ラボ検証を通じて過酸化物蓄積挙動をあらかじめ確認しておく必要がある。

2.2.3 運転温度の最適化

CO₂の吸収温度と放散温度の温度差が小さいほどヒートポンプの動力は少なくなる。いっぽう、これらの温度差が小さくなると液循環量の増加によって、ポンプの動力と液の加熱に必要な熱量は多くなる。これは温度差が小さいほど吸収液のCO₂分離性能が低下するためである。それゆえ、上記の兼ね合いを考慮し、プロセス全体の温度の最適化を行う必要がある。

3. 各課題に対する検証試験の結果と考察

2章で述べたそれぞれの課題に対して各種の検証試験を行った。本章ではその結果と考察について概説する。

3.1 耐久性評価試験

耐久性評価にあたって、加熱と冷却を周期的に繰り返す、CO₂の吸収/放散の長期的な実施が可能な装置を製作した。図6に評価試験装置概要を示す。本装置では、吸収/放散槽の外側に設けたペルチエ素子によって吸収液の温度を制御し、CO₂の吸収/放散を行う。また、CO₂放散時のCO₂流量を装置出口のマスフローメータ (MFM) で測定し、吸収液のCO₂分離性能の経時変化を評価した。さらに、劣化 (耐久性) 評価を行うため、試験終了後の吸収液を回収し、分析した。試験条件と分析方法をそれぞれ表7、表8に、また試験結果を表9および図7に示す。なお、供給ガスは装置の適用対象である火力発電

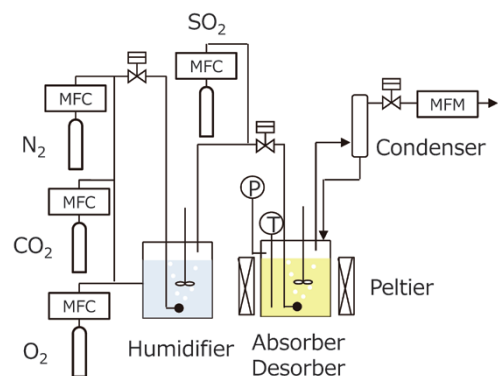


図6 吸収液の耐久性評価試験装置

Fig.6 Apparatus for durability evaluation of CO₂ absorbent

表7 耐久性評価試験の試験条件
Table 7 Conditions for durability evaluation test

Item	Conditions
Test period	500 h
Initial liquid composition	EAE:Water:DEGDDEE = 30:10:60 wt%
Initial liquid weight	100 g
Feed gas flow rate	1.33 NL/min
Feed gas composition	CO ₂ :O ₂ :N ₂ = 15:6:79 + 15ppm SO ₂
Absorbing condition	50°C 0.2 MPaG
Desorbing condition	90°C 0.0 MPaG
Temp. of humid. & condens.	0 ~ 2°C
Required time at each step	Absorption: 20 mins (50°C) Heating: 25 mins (50°C to 90°C) Desorption: 5 mins (90°C) Cooling: 10 mins (90°C to 50°C)
Total time of one cycle	60 min (20 + 25 + 5 + 10 min)

表8 相分離液の分析方法
Table 8 Analysis method of phase separation type absorbent

Component	Analysis method
EAE	LC-MS/MS, formic acid sol. carrier
DEGDDEE	LC-MS/MS, formic acid sol. carrier
Water	Karl-Fischer titration
Total sulfur	Combustion ion chromatograph

*LC-MS/MS: Liquid chromatograph - Mass spectrometry

表9 耐久性評価試験の結果
Table 9 Results of durability evaluation test

	Results
Liquid weight after test	(g) 90.2
Total supplied SO ₂ along with gas feed	(mol) 0.0089
EAE concentration after test	(wt%) 35.8%
DEGDDEE concentration after test	(wt%) 61.9%
Water concentration after test	(wt%) 8.2%
Sulfur concentration after test	(wt%) 0.3%
Total Sulfur in absorbent after test	(mol) 0.0073
Equivalent value of H ₂ SO ₃ concentration	(wt%) 0.7%
Summation of EAE, DEGDDEE, Water, and H ₂ SO ₃	(wt%) 106.6%
Liquid loss ratio	(%) 9.8%
Calculated value of Poisoned EAE by H ₂ SO ₃	(%) 2.2%

*Poisoned EAE: Value of liquid analysis divided by initial charged

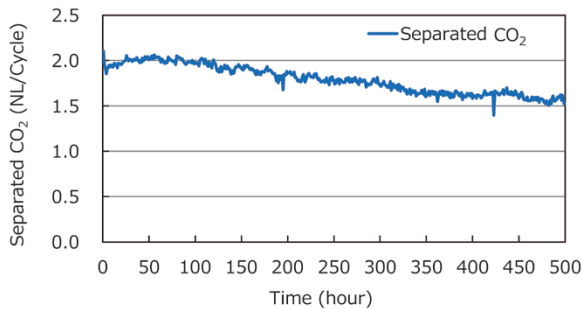


図7 耐久性評価試験の結果
Fig.7 Results of durability evaluation test

所のボイラ排ガスを模擬した組成とした。

試験の結果、CO₂分離性能は500時間で15%程度低下することが確認された。性能が低下した原因はアミンの劣化のほか、液量の減少や、SO₂によるアミンの被毒、水分量の変動が考えられる。最も寄与度が大きいのは液量の減少であり、500時間で9.8%の液損失が確認された。つぎに寄与度が大きいのはSO₂によるアミンの被毒である。1モルのSO₂は1~2モルのEAEを被毒する可能性がある。等モルで被毒したと仮定すると、仕込んだEAEの2.2%が被毒した計算となる。すなわち、液量の

減少とSO₂による被毒とによって、単純計算で性能が12%低下することとなる。

したがって、性能が15%低下した原因の大部分はアミンの劣化以外の原因で説明でき、アミンの劣化はそれほど進行していない可能性が高い。しかしながら、液分析において各成分の濃度和が100%を超えているなど、液分析の精度にも課題がある。また、500時間の試験では性能低下幅が小さく、この試験だけではアミンの劣化が進行しているかどうか断定できなかった。このため、より長時間での試験と分析精度の検証・向上を行い、より詳細に液の耐久性を確認する予定である。

3.2 安全性評価試験

3.2.1 燃焼範囲の測定

EAEおよびDEGDDEEの引火点を表10に示す。両物質とも引火点が71°Cと低い。このため、温度の制約よりも酸素濃度の制約によって燃焼範囲を回避する方が望ましい。そこで、プロセス内の最高温度である90°Cに5°Cの温度余裕をもたせた95°Cにおける限界酸素濃度を測定した(表11)。なお限界酸素濃度は、爆発を生じる酸素の下限界濃度、すなわちこれ以下では爆発は生じない濃度を表す。限界酸素濃度はEAEおよびDEGDDEEのいずれもが8%を超えており、一般的な石炭火力発電所における排ガス中の残留酸素濃度(通常6%未満)よりも十分に高い。したがって、石炭火力発電所に適用する場合は内部の発火は回避可能であると考えられる。ただし、LNG火力発電所の排ガス中の残留酸素濃度は通常10%を超えており、酸素濃度の制約では対応できない。このため、温度に対しても制約をかける、蒸気圧の低いアミン、エーテルを使用するなどの対策が必要と考える。

3.2.2 エーテル過酸化物の蓄積評価

エーテル過酸化物は熱によって容易に分解する。そのため、吸収液を加熱した際の熱分解挙動を測定することによって蓄積量を定性的に把握することができる。そこで、密封セル型示差走査熱量測定装置(Sealed Cell-Differential Scanning Calorimetry: SC-DSC)を用い、未使用液と表7に示した500時間使用した試験液との熱分解挙動を比較した。表12、図8にそれぞれ試験条件および試験結果を示す。未使用液と使用済液は発熱量およびピーク位置のいずれもおおむね一致していることが

表10 EAE, DEGDDEEの引火点
Table10 Flash point of EAE and DEGDDEE

Component	Flash point (°C)
EAE	71
DEGDDEE	71

表11 EAE, DEGDDEEの限界酸素濃度
Table11 Limiting O₂ concentration of EAE and DEGDDEE

Component	Temperature (°C)	Pressure (MPaG)	limiting O ₂ Conc. (%)
EAE	95	0	8.8
DEGDDEE	95	0	8.2

表12 SC-DSC測定条件
Table12 Test conditions of SC-DSC

Heating rate	10°C/ min
Upper limit of temp.	500°C
Atmospheric gas	Air of atmospheric pressure

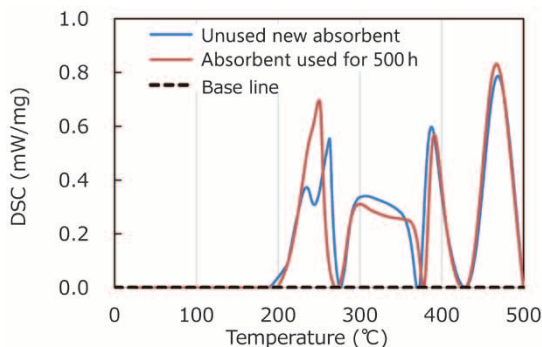


図8 SC-DSC測定結果
Fig.8 Test results of SC-DSC

分かる。したがって使用済液には、運転温度範囲で爆発を生じる化合物は蓄積していないと考えられる。ただし、使用済液の運転時間は500時間と短いため、耐久性評価と同様、より長時間での安全性評価を行う必要があると考える。

3.3 プロセス全体の運転温度の最適化

プロセス全体の運転温度によってヒートポンプの性能は大きく変化することから、運転温度に適合する冷媒選定が重要である。現在、冷媒の選定中であり、最適化を実施するには至っていない。このため、今後は冷媒選定と併せてシミュレーターによる全体の最適化を実施予定である。

むすび=開発中のプロセスを実現するためには、吸収液の耐久性や安全性の評価、運転条件の最適化を行い、技術的検証をさらに進める必要があると考える。これまでにに行ったラボ検証では、いずれに関しても大きな課題は確認されていないため、今後より厳しい条件での追加試験を行い検証の確度を高めていく。また、ラボにて、技術の成立性が確認できれば、より詳細な技術検証に向け、実証試験を行うことを計画中である。

本開発を進めるに当たって、東海国立大学機構 名古屋大学 則永 行庸教授、町田 洋助教、山口 毅助教より、実験/解析データおよび多大な助言を賜りました。厚く感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) IPCC. 第4次評価報告書, 2007.
- 2) IPCC. 第5次評価報告書, 2014.
- 3) 環境省. パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略, 2019. https://www.env.go.jp/earth/earth/ondanka/post_41.html. (参照2019-12-13).
- 4) G. T. Rochelle et al. Science. 2009, Vol.325, No.p.1652-1654.
- 5) S. Oh et al. Applied Energy, 2016, Vol.169, p.353-362.
- 6) 一般社団法人エネルギー情報センター. 新電力ネット コモディティ統計情報. <https://pps-net.org/statistics/gas>. (参照2019-12-13).
- 7) 経済産業省資源エネルギー庁. 日本のエネルギー 2018., および同2019.
- 8) 経済産業省. エネルギー関係技術開発ロードマップ. 2014. https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/for_energy_technology/pdf/141203_roadmap.pdf. (参照2019-12-13).
- 9) H. Machida et al. Int. J. Greenh. Gas Control. 2018, Vol.75, p.1-7.
- 10) A. Kishimoto et al. Ind. Eng. Chem. Res. 2011, Vol.50, No.17, p.10128-10135.
- 11) A. Bello et al. Ind. Eng. Chem. Res. 2005, Vol.44, p.945-969.
- 12) D. D. D. Pinto et al. Energy Procedia. 2014, Vol.63, p.940-950.
- 13) J. Davis et al. Energy Procedia. 2009, Vol.1, p.327-333.
- 14) X. Liu et al. Fuel. 2016, Vol.165, p.513-525.



前田基秀

技術開発本部 機械研究所



中西 健

技術開発本部 機械研究所
(現 技術開発本部 プロセス技術センター)



岸本 啓

技術開発本部 機械研究所



重久卓夫

技術開発本部 機械研究所

(技術資料)

高圧CO₂ターボ圧縮機

馬場利秋*・藤岡輝明・在原広敏 (博士(工学))・馬場祥孝・岩田卓也

Integrally Geared Compressor for High Pressure CO₂

Toshiaki BABA・Koumei FUJIOKA・Dr. Hiroto ARIHARA・Yoshitaka BABA・Takuya IWATA

要旨

地球温暖化問題に対応するために従来の一軸型遠心圧縮機よりも省エネとなる増速機内蔵型の高圧CO₂ターボ圧縮機を開発した。主要部品の設計、要素試験に始まり実機サイズのプロトタイプ機の製作とガス実圧力での定格負荷運転試験までを実施し目標となる性能を満足していることを確認した。さらに信頼性の見える化を実現するために最新の技術を導入して通常の計測では測定できない運転中のロータの安定性、インペラブレードの振動と発生応力、スラスト軸受にかかる荷重の計測にも成功した。機械的信頼性についての評価も行い、長期運転に対しても十分な信頼性を有していることも確認した。

Abstract

To cope with global environmental issues, an integrally geared turbo compressor for high-pressure CO₂ has been developed, the compressor being more energy-saving than conventional single-shaft centrifugal compressors. Starting with the design and testing of the main components, a prototype machine of the actual size was made, and full pressure and a full load test using actual gas was performed to confirm that the target performance was satisfied. In addition, a state-of-the-art-technique for visualizing its reliability was introduced. This has led to the successful measurement during operation of the rotor stability, impeller blade vibration, dynamic blade stress, and load on thrust bearing, which cannot be measured by the normal method. Mechanical reliability was also evaluated to confirm sufficient reliability for long-term operation.

キーワード

省エネ、地球環境問題、プロトタイプ機、実運転条件試験、信頼性の見える化、最新技術、ロータ安定性、ブレード振動、スラスト力測定、機械的信頼性、増速機内蔵型圧縮機、高圧圧縮機、二酸化炭素貯留

ま え が き = 地球温暖化問題に対応するため産業機械においても省エネはもはやトレンドとなっている。当社では各種プラントで用いられている非汎用（はんよう）の圧縮機を製作しており、本機においても省エネ、すなわち動力削減のニーズが高くなってきている。高圧のCO₂遠心圧縮機は肥料プラントや二酸化炭素貯留（Carbon Capture and Storage, 以下CCSという）用途などに用いられる。吐出圧力は通常15~50 MPaGと非常に高いため、これまでは1軸型の遠心圧縮機が多く用いられてきた。

遠心圧縮機の設計においても近年の技術進歩は目覚ましく、増速機内蔵型の遠心圧縮機がこのような用途に適用できるようになってきている。増速機内蔵型の遠心圧縮機は各段の圧縮機の回転数を最適な回転数に設計することができ、1軸型の場合に比べて各段の効率を高く設計することができる。さらに、各段の間に中間冷却器を挿入することが比較的容易にでき、圧縮動力の低減を図ることができる。このため、増速機内蔵型遠心圧縮機を用いることによって1軸型遠心圧縮機の場合よりも動力消費量を10%程度削減することが期待でき、省エネに貢献できる。

そこで当社は、吐出圧力20 MPaGレベルの高圧CO₂遠心圧縮機を増速機内蔵型にて開発し¹⁾、省エネニーズ

に対応することとした。

1. 高圧CO₂遠心圧縮機的设计

1.1 高圧CO₂遠心圧縮機の技術課題と開発目標仕様

遠心圧縮機の高圧化における主な技術課題は①高圧下における構成部品の高強度化、②高圧状態での空力性能の向上、③ロータの安定性向上、④高圧ガスのシール性能の向上である。高圧遠心圧縮機の開発にあたっては、これらの課題解決後の性能検証が必要となる。要素試験だけでは不十分であるため、実機サイズのプロトタイプ機を設計製作し、定格運転条件にて運転試験を実際に行った。

高圧CO₂遠心圧縮機の仕様策定にあたっては、典型的な用途として尿素プラントやCCS用を想定し、かつ産業用増速機内蔵型遠心圧縮機に通常要求される技術的な仕様も加味した。高圧CO₂遠心圧縮機の開発目標仕様を表1に示す。尿素プラント用の圧縮機の仕様も参考に示した。プロトタイプ機としてはCO₂ガスを20 MPaGまで昇圧できる能力を目標とした²⁾。設計製作した高圧CO₂遠心圧縮機の内部構造を図1に示す。実際にプラントで用いられる際には圧縮機は8段型となる。しかしながら、大気圧から1 MPaGレベルまでの圧縮は当社では十分に経験を有していたため、それ以上の圧力レベルと

* 機械事業部門 圧縮機事業部 回転機本部 回転機技術部

表 1 高圧CO₂圧縮機の開発目標仕様

Table 1 Specification of development objective for high pressure CO₂ compressor

Application	Prototype	Urea Application (1,000 ~ 3,300 mtpd*)
Type	Integrally Geared	Integrally Geared
No. of stage	8 Stages	8 Stages
Gas handled	CO ₂	CO ₂
Capacity	140,000 kg/h	up to 110,000 kg/h
	(72,500 m ³ /h)	(57,000 m ³ /h)
Suction/ Discharge pressure	0.01 / 20 MPaG	0.01/16 MPaG
Shaft power	16,600 kW	up to 13,000 kW
Driver	Sync. motor (18,500 kW)	Motor/ Steam turbine

*mtpd: metric ton per day

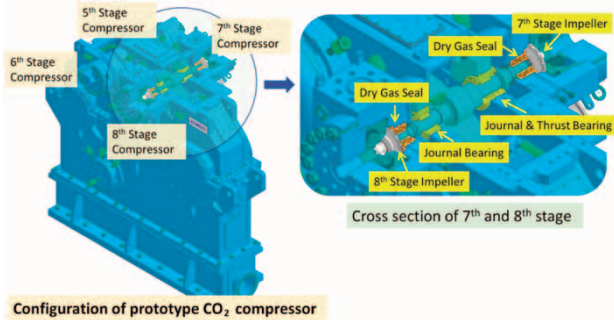


図 1 高圧CO₂遠心圧縮機内部構造

Fig.1 Internal structure of centrifugal compressor for high pressure CO₂

なる4～8段の計5段からなる圧縮機を製作して試験を行った。

1.2 高圧CO₂圧縮機の要素設計

圧縮機のケーシングには高圧のCO₂ガスに耐える設計が要求される。また、ケーシングの内部はインペラやシールを有しており、ガスを効率良く流す流路も形成させる必要があることから、ケーシングの形状は複雑なものとなる。このため有限要素法（FEM）による応力解析結果に基づいて構造設計を行った。さらにそのFEM解析結果を検証するため、ケーシングの耐圧試験時にケーシング内部のひずみ測定も実施した。最も高圧となる8段ケーシングの場合の結果を図2に示す。FEM解析結果と実測値はよく一致しており、ケーシングの耐圧設計の妥当性が実証された。

CO₂ガスは高圧となると超臨界と呼ばれる領域に入り、ガスの物性が大きく変わることが知られている。圧縮機の動力削減にはこのような領域においても効率良くガスを圧縮することが求められる。このため、高圧CO₂遠心圧縮機を開発するにあたり、高圧部で用いるインペラの改良も併せて実施した。すなわち、インペラの流路内部の流れを数値流体力学（CFD）を用いて解析し、その流路形状を改良した。さらに、インペラ吸込部にあるシールを通過する流れをより高性能に抑制できるシール形状を考案した。CFDの計算結果では35%の漏れ流れ量の抑制が予測されたことから、このシールを製作して実機に供した。圧縮機インペラの高性能化を図3に示す。

増速機内蔵型圧縮機ではロータはブルギヤによって駆

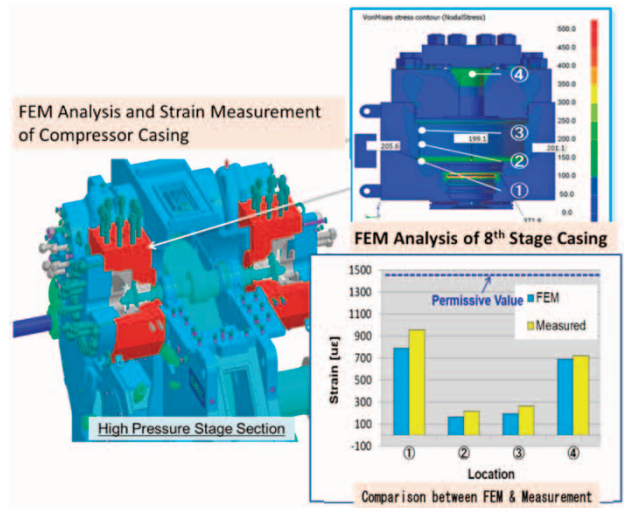


図 2 圧縮機ケーシングFEM解析とひずみ測定

Fig.2 FEM analysis and strain measurement of compressor casing

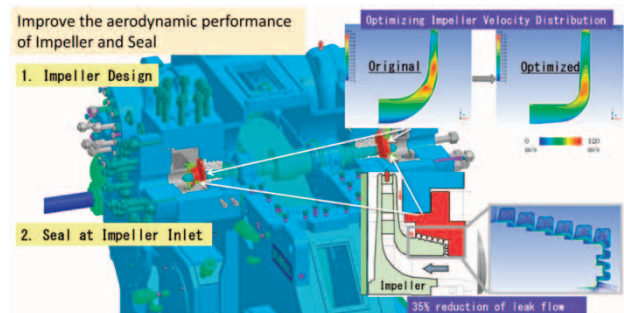


図 3 圧縮機インペラの高性能化

Fig.3 Optimization of compressor impeller

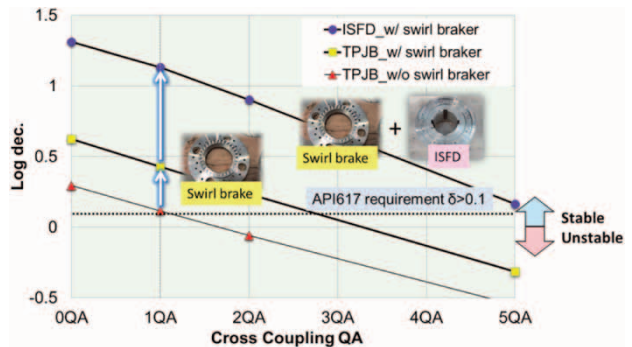


図 4 ロータ安定性解析結果

Fig.4 Analysis results of rotor stability

動され高速で回転する。ロータは軸受で支持されており、ロータに組み込まれたインペラやシールに作用する流体力によって発生する不安定化力に対して十分な安定性を有することが求められる。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る。対数減衰率が正であればそのロータ系は安定であり、負であれば不安定となる。遠心圧縮機で広く用いられている規格API617³⁾では対数減衰率を0.1以上に設計することが求められている。

図4は7～8段ロータに作用する不安定化力（Cross coupling）を変化させて安定性を計算した結果を表している。図4の横軸は、API617規格で規定される不安定化力QAを基準としている。通常のティルティングパッド軸受（TPJB）のみを使用した当初の設計では十分な

安定性を持たせることができなかった。そこで、安定性を向上させる手段として軸受にダンパー付きの軸受 (ISFD) を、さらにインペラの吸込シール部にスワールブレーカを用いることとした。これらを考慮すると、図示したとおり対数減衰率は大幅に増加してロータ系の安定性が向上することが確認されたことから、プロトタイプ機に適用して検証することとした。

2. 高圧CO₂圧縮機の運転試験

2.1 運転試験の概要

設計した高圧CO₂圧縮機のプロトタイプ機を製作し、当社の試運転ベンチに据え付けて運転試験を実施した。試験に必要な中間冷却機器も製作して試験に供した。日本国内での設置となるため、圧縮機本体のみならず中間冷却器や各段の圧縮機を結ぶ配管も高圧ガス設備の対象となる。このため規制基準に従って設計し、検査を行って合格させている。据え付けを完了した圧縮機および機器類の外観写真を図5に示す。圧縮機本体はカップリングを介して当社設備モータに結合され駆動される。

運転試験の系統図を図6に示す。各段の吸込部および吐出部で圧力と温度の計測を行い、圧縮機の各段の性能を評価した。最終段である8段圧縮機から吐出されたガスは主バイパス弁を経由して4段圧縮機の吸込部に戻される。5段圧縮機吐出後にはとくに、圧縮機の起動時の運転を考慮して中間バイパスラインを設置している。図中の赤色の系統線は圧縮機で圧縮された温度の高いガスラインを、青色は冷却器によって冷却されたガスラインを示す。試験ガスにはCO₂ガスを用いた。

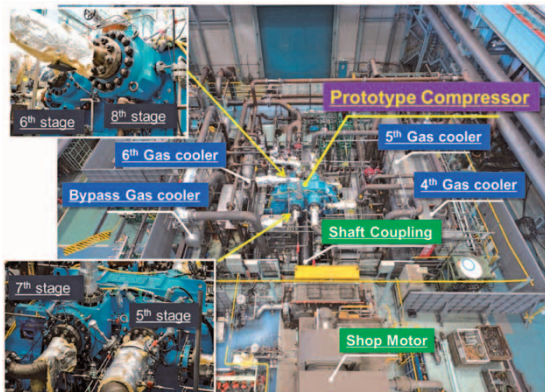


図5 プロトタイプ圧縮機と試験設備
Fig.5 Overview of prototype compressor and test facility

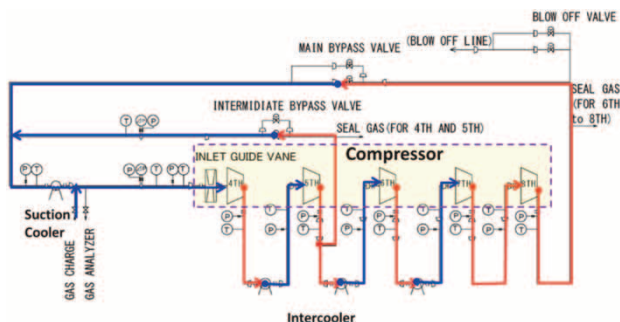


図6 プロトタイプ圧縮機試験系統図
Fig.6 Process flow diagram of prototype compressor

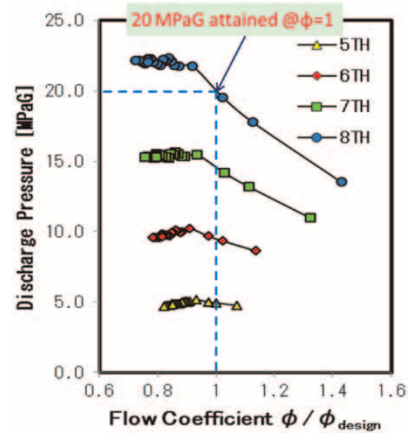


図7 圧縮機吐出圧力特性
Fig.7 Discharge pressure of each stage

表2 メカニカルランニング試験結果
Table 2 Test results of mechanical performance

	Result	Criteria	Judgement
Shaft Vibration	5 th : 10 μ m 6 th : 15 μ m 7 th : 18 μ m 8 th : 19 μ m	API 617 criteria 5 th -6 th : 21 μ m 7 th -8 th : 22 μ m	OK
Journal Bearing Temperature	5 th : 70 °C 6 th : 74 °C 7 th : 65 °C 8 th : 69 °C	Equal or less than 105 °C	OK
Thrust bearing Temperature	5 th : 75 °C 7 th : 90 °C	Equal or less than 105 °C	OK

2.2 運転試験の結果と評価

図7は圧縮機の空力性能試験結果である。各段の圧縮の状況がこの図から読み取れる。定格流量 ($\phi/\phi_{design}=1$) において8段の吐出圧力が20 MPaGを達成している。

機械的性能の測定結果を表2に示す。各段の軸振動値はすべてAPI617基準値を満足しており、軸受の温度もジャーナル軸受、スラスト軸受ともすべて当社基準を満足していることが確認された。軸振動値がすべて低値でAPI617の基準を満足したことは、1章で述べたロータ系の設計が妥当であったことを意味する。すなわち、採用した軸受の特性、ロータの形状の設計、およびインペラやシールに働く不安定化流体力の見積りが適正であり、本ロータ系は実運転を継続するのに十分な安定性を有していたということになる。

これらの試験結果から、開発した高圧CO₂遠心圧縮機は構造強度、空力性能、機械的性能、およびシール性能において、産業プラントに用いられる圧縮機としての要求仕様をすべて満足していることが検証されたといえる。

3. 信頼性の見える化

産業用圧縮機には信頼性も求められる。その信頼性は多くの場合、類似機での運転実績でしか判断が難しいのが実情である。しかしながら、運転状態の圧縮機が機械的あるいは設計的な限界からどの程度離れた状態で運転されているのかが定量的に把握できれば、それをもって信頼性あるいは安全性を評価することも可能となる。このような観点から信頼性の見える化に取り組んだ。

3.1 加振試験による高圧ロータの安定性評価

3.1.1 加振試験の目的

高圧圧縮機では流体が高密度化することにより、インペラやシールに大きな流体加振力が作用する⁴⁾。不安定化力はロータ系の前回り振動モードの対数減衰率を減少させる作用があり、適切ではない振動設計によって対数減衰率がマイナスになると深刻な不安定振動が発生する⁵⁾。したがって、高圧運転時の振動安定性を実現するうえで十分な対数減衰率を確保する設計とすることが重要である。

API617規格では対数減衰率0.1以上を確保することが求められており、実機においてロータ系の対数減衰率を測定することができれば、不安定振動に対する機械的信頼性を実証することができる⁶⁾。ロータ系の対数減衰率は運転圧力や軸受荷重、軸回転数によって変化するため、運転中に圧縮負荷が与えられた状態で評価しなければならない。一般的には定常運転状態の振動波形から対数減衰率を把握することは困難であるため、外部から加振を行うことでロータ系の振動モードを励起し、実機に備え付けられた軸振動計の応答から対数減衰率を求める方法がとられる^{7)~9)}。加振により励起される振動応答は小さいため、ケーシングの内部にあるロータ系を効率的に加振する技術が重要となる^{10)・11)}。

本開発では独自設計の電磁石によってロータを直接加振できる技術を開発した。これによってロータ系の振動モードを効果的に励起することができ、実機の安定性評価が可能となった。

3.1.2 加振試験原理と構造

図8に開発した磁気加振システムを示す。7段インペラのシュラウドに対向するように電磁石を周方向に四つ配置した。電磁石の発生荷重は軸方向であるが電磁石をシュラウド外周側に配置しており、ロータに対する曲げモーメントを発生させることでロータの振動モードを励起することができる。

ロータ系の振動モードには、ロータ回転方向に振動する前回りモードと、逆方向の後回りモードとが存在する。これらの振動モードを個別に励起するため、四つの電磁石の電流を位相制御することによってロータ回転方向に電磁石を駆動させる前回り加振と、それとは逆方向の後回り加振とを実現した。なお、解析で評価したロー

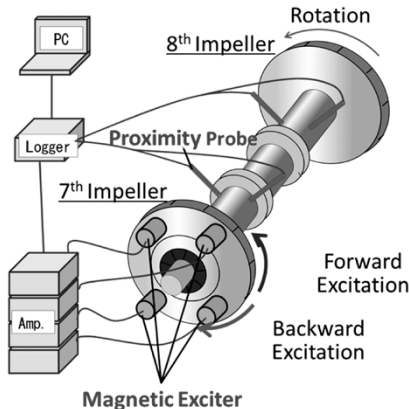


図8 開発した磁気加振システム
Fig.8 Developed magnetic excitation system

タの振動モードより、加振用電磁石は7段側インペラのみを設置することを決定した。

いっぽう、本ロータには軸受部の軸振動を監視するために7段側と8段側の軸受に軸振動計をX方向とY方向とに計4箇所設置している。本開発では、加振試験用に特別な軸振動計を追加することなく、通常使用される軸振動計によって振動応答を測定した。加振試験により周波数応答を測定し、カーブフィットすることによって固有振動数と対数減衰率を求めた。

3.1.3 解析結果と測定結果の比較

定格圧力20 MPaG運転時のロータ動特性の解析結果と測定結果を図9に示す。図9(a)はロータ固有振動数を示し、実測で1次前回りモードが約120 Hz、2次の前回りモードが約250 Hzにあり解析結果ともよく一致した。事前に解析した固有振動数について、実機においても解析どおりの固有振動数であることを定量的に示した。図9(b)に示す対数減衰率は1次の前回りモードは良好な予測結果であったが、2次の前回りモードの実測値では解析値で期待されたほどの効果はなかった。この原因については明らかにはなっておらず今後の技術課題とはなるものの、対数減衰率に関するAPI617基準値は大幅に上回っており、定格圧力運転でも十分な安定性を有することが明らかとなった。

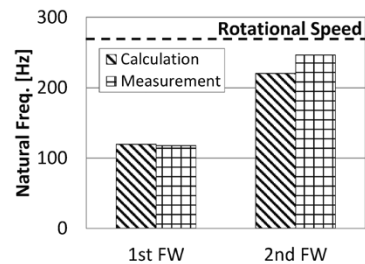
3.1.4 運転圧力に対する振動特性の変化

吐出圧力に対する固有振動数と対数減衰率の測定結果を図10に示す。図10(a)よりロータ固有振動数は吐出圧力を変化させても大きな変化は見られない。図10(b)の対数減衰率についても吐出圧力の増加に対しては対数減衰率がほとんど低下することなく、最高圧力まで十分な安定性を維持した。これらの結果より、本機種開発におけるロータ設計の妥当性が実証された。

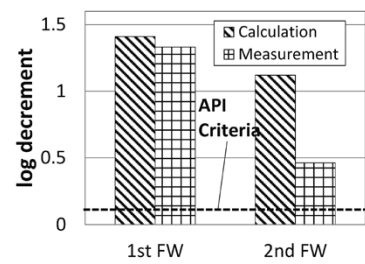
3.2 インペラブレードの振動測定

3.2.1 測定の目的と方法

運転中の圧縮機インペラには遠心力と流体加振力が作



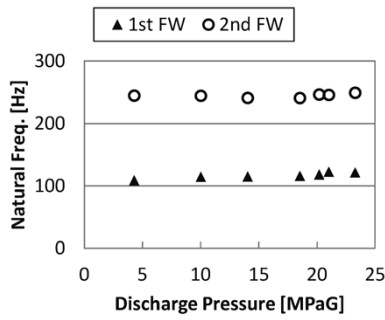
(a) 固有振動数
(a) Natural frequency



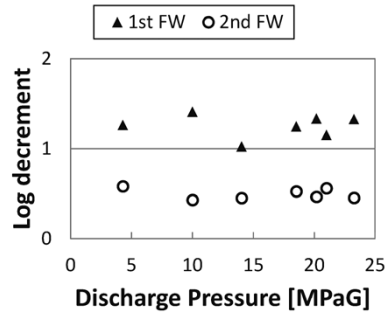
(b) 対数減衰率
(b) Logarithmic decrement

図9 ISFD軸受のロータ動特性

Fig.9 Dynamic characteristics of rotor with ISFD bearing



(a) 固有振動数
(a) Natural Frequency



(b) 対数減衰率
(b) Logarithmic decrement

図10 吐出圧力とロータ動特性測定結果との関係 (ISFD 軸受)
Fig.10 Relationship between discharge pressure (ISFD bearing) and measured dynamic characteristics of rotor

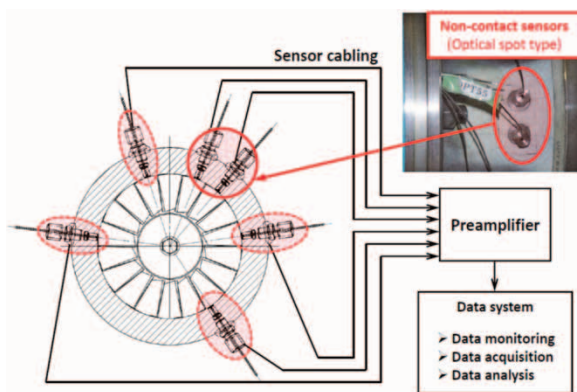


図11 ブレード振動測定システムの構成
Fig.11 Configuration of measurement system for blade vibration

用する。とくに高圧条件下では、ブレードに作用する流体加振力が大きくなることが予測されるため、運転中のブレード強度を評価し、健全性を確保することが重要である。本圧縮機のインペラは、7段と8段がシュラウドカバー付き、4～6段はオープン形を採用している。オープン形インペラは、シュラウドにカバーがないため大きく振動した場合に大きな変動応力が発生する可能性がある。そこで、高圧段のオープン形インペラである5段および6段インペラのブレード振動を測定し、高圧運転中のブレード振動強度を評価した。

ブレード振動測定システムの構成を図11に示す。ブレード振動は、静止部に設置した光学式変位センサにより計測する。センサはブレード前縁部の周方向6箇所に配置し、各センサを通過するブレードの通過タイミングを80 MHzの高速サンプリングで測定した。ブレードがセンサを通過するタイミングはブレードの振動に伴って

変動する。ブレード振動システムは、この通過時間の変化を分析して各ブレードの振動振幅と周波数を求めることができる¹²⁾。

3.2.2 ブレード共振時の振動応答

起動停止時 (低圧) および加減速スweep運転時 (中圧/高圧) のブレード振動応答を測定した。ここで、高圧運転時の8段吐出圧力は21.0 MPaG、ブレード振動を測定した5段吐出圧力は、高圧運転時が5.3 MPaG、中圧運転時は2.7 MPaGであった。

低圧運転時の5段インペラブレードの振動応答を図12に示す。図の横軸は回転速度、縦軸はディフューザベーンの羽根枚数倍にあたる回転速度の15倍成分の振動振幅を示した。振動振幅はインペラ外径寸法で無次元化した。図にはすべてのブレードの振動応答を示しており、回転速度17,500 rpm付近で回転速度の15倍成分との共振と推定される振動上昇が確認された。その時のブレード振動はブレード#1の振幅が最大であった。

低圧/中圧/高圧運転における5段インペラブレードの振動応答を図13に示す。図の縦軸は回転速度の15倍成分の振動振幅をインペラ外径寸法で無次元化しており、各圧力条件において最大振幅となったブレードの振動応答を示した。ブレード振動の最大値は低圧運転時に

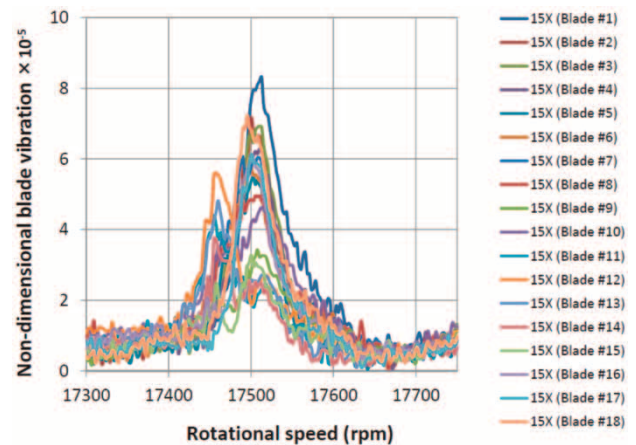


図12 低圧運転時の5段インペラのブレード振動応答
Fig.12 Blade vibration response of 5th stage impeller in low pressure operation

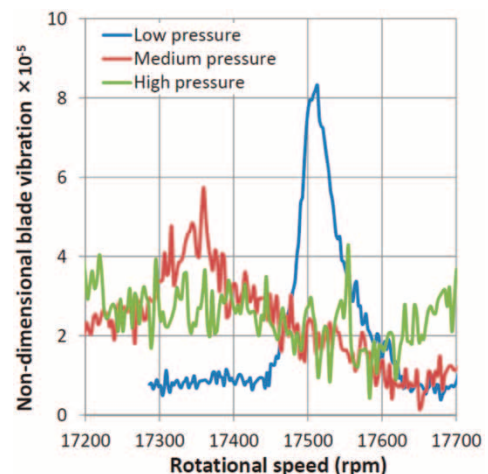


図13 5段インペラのブレード振動応答 (低/中/高圧条件)
Fig.13 Blade vibration response of 5th stage impeller in low / med. / high pressure operation

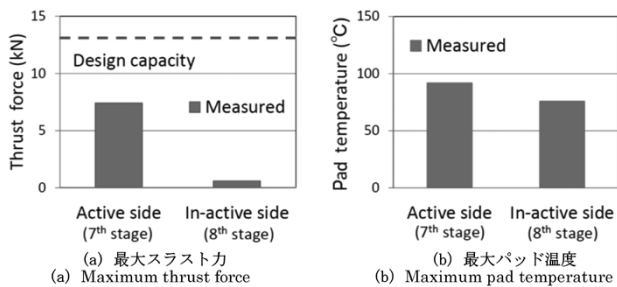


図14 7, 8段スラスト軸受のスラスト力とパッド温度測定結果
Fig.14 Measured values of thrust force and pad temperature of 7th and 8th tilting pad thrust bearing

測定され、圧力が上昇すると振動応答は低下した。

つぎに、測定した最大振幅からブレードの変動応力を算出した。インペラのFEM解析結果から各振動モードの変位分布と応力分布の関係を求め、測定した振幅値からブレードの最大応力値を算出した。算出した応力値は材料疲労限の3%程度であり、十分に小さい値であった。6段インペラは、起動停止時と減速スweep運転のいずれにおいても明確な共振応答は見られず、ブレード振動による変動応力は十分に小さいことを確認した。

以上から、ブレードの強度は共振時のブレード変動応力に対して強度的に十分な裕度があることを確認した。

3.3 ロータスラスト力測定

ピニオン軸に作用するスラスト力は圧縮機の運転条件によって変化する。とくに高圧圧縮機ではその影響が大きくなるため、さまざまな運転条件におけるスラスト力を実測した。スラスト力の測定は、テイルティンパッド型スラスト軸受のパッド背面の支持部にひずみゲージを4枚貼付し、パッド支持部に作用する軸力を測定する方法で行った。各スラスト軸受にひずみゲージ付きパッドを3個ずつ組み込み、運転中の5~8段軸受に作用するスラスト力を測定した。

7段と8段軸受のスラスト力測定値とパッド温度測定値の最大値を図14に示す。スラスト力は軸受負荷容量の設計値に比べて十分に小さく、軸受温度は92℃以下であった。5, 6段についても設計値に比べて十分に低い値が計測されており、スラスト軸受設計が適切であることを確認した。

むすび = 近年の地球環境問題に対する意識の高まりに応えるため、動力削減による省エネが従来の圧縮機よりも可能な増速機内蔵型の高圧CO₂遠心圧縮機を開発した。実機サイズのプロトタイプ機を実際に設計製作し、運転試験を実施した。

その性能を評価したところ、空力性能や機械的性能は目標とした仕様を満足していることが確認された。さらに新たな計測システムを開発し、信頼性の見える化に取り組んだ。運転中のロータの固有振動や対数減衰率、インペラのブレードの振動、スラスト軸受に作用しているスラスト力がさまざまな運転モードで定量的に把握でき、長期の運転に対して十分な信頼性を有していること

も検証できた。

今後この高圧CO₂圧縮機が各種産業プラントに導入され、地球温暖化対策として省エネに貢献することを期待している。

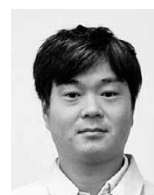
参考文献

- 1) T. Baba et al. 48TH TURBOMACHINERY & 35TH SYMPOSIA Turbomachinery Laboratory, Texas A&M University, College Station, Texas, 2019.
- 2) A. Musardo et al. Proceedings of the Fortieth Turbomachinery Symposium.
- 3) API STANDARD 617, SEPTEMBER 2014, EIGHTH EDITION, American Petroleum Institute, Washington, D.C.
- 4) J. Moore et al. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. APRIL 2011, Vol.133.
- 5) C. D. Kulhanek et al. Proceedings of 46th Turbomachinery Symposium, Houston. 2017.
- 6) G. Vannini et al. Proceedings of 46th Turbomachinery Symposium, Houston. 2017.
- 7) R. F. Noronha et al. Proceedings of 43rd Turbomachinery Symposium, Houston. 2014.
- 8) S. Tokuyama et al. Proceedings of 43rd Turbomachinery Symposium, Houston. 2014.
- 9) G. Vannini et al. Proceedings of 43rd Turbomachinery Symposium, Houston. 2014.
- 10) N. Takahashi et al. ASME Journal of Vibration and Acoustics, April 2007, Vol.129.
- 11) N. Takahashi et al. Proceedings of ASME Turbo Expo 2011, GT2011-45829, Vancouver, Canada, June 2011, p.6-10.
- 12) T. Iwata et al. 46th Turbomachinery & 33rd Pump Symposia, Turbomachinery Laboratory, Texas A&M University, College Station, Texas, 2017.



馬場利秋

機械事業部門 圧縮機事業部
回転機本部 回転機技術部



藤岡輝明

機械事業部門 圧縮機事業部
回転機本部 回転機技術部



在原広敏

技術開発本部 機械研究所



馬場祥孝

機械事業部門 開発センター
技術開発部



岩田卓也

機械事業部門 開発センター
技術開発部

(解説)

ミドレックスプロセス—その進化と脱炭素製鉄への展望—

ビンセント シェヴリエ* (Ph.D.)・ローレン ロレーン・道下晴康

MIDREX[®] Process: Bridge to Ultra-low CO₂ Ironmaking

Dr. Vincent CHEVRIER・Lauren LORRAINE・Haruyasu MICHISHITA

要旨

1983年に神戸製鋼所100%子会社となったミドレックス社は、神戸製鋼所およびお客さまプラントのサポートの下、シンプルで高効率なプロセスを継続して革新・改良してきた。これにより、直接還元製鉄のマーケットリーダーの役割を45年間果たしてきた。パリ協定後、温室効果ガスの排出低減が課題となるなか、天然ガス・LNGを使用した直接還元法は、製鉄業におけるCO₂排出量の顕著な低減が期待できる商業規模で確立された唯一のプロセスである。また、水素を使用すべく進化したMIDREX H₂TMにより、CO₂をほとんど排出しない製鉄が実現可能である。しかしながら、再生可能エネルギーを基にした水素が、現状では入手できないほど大量に必要となることが課題である。本稿はミドレックスプロセスおよびその50年間の進化を解説し、水素社会の到来で実現する脱炭素製鉄を展望する。

Abstract

Midrex Technologies Inc. - a wholly owned subsidiary of Kobe Steel since 1983 - has been the market leader in direct reduction of iron for nearly 45 years. This success is based on a simple and efficient process, years of continuous innovations and improvements, the excellence of plant operators, and the support from Kobe Steel. With the emphasis on reducing greenhouse gas emissions following the ratification of the Paris Agreement, direct reduction is the only commercially-proven process that can achieve significant reduction in CO₂ emissions for the iron and steel industry today, using natural gas or liquified natural gas (LNG). The MIDREX H₂TM is an evolution of the MIDREX[®] Process that can produce iron with almost no CO₂ emissions; but it requires amounts of hydrogen that are not currently available from renewable sources today. This article describes the MIDREX[®] Process and significant improvements made over the last 50 years and offers a vision of ultra-low carbon ironmaking that can be realized in the hydrogen economy.

キーワード

直接還元製鉄, ミドレックスプロセス, シャフト炉, 天然ガス改質, 還元鉄, ホットブリケットアイアン, 水素製鉄, CO₂フリー製鉄

まえがき = 鉄鉱石直接還元プロセス (ミドレックスプロセス) 技術を保有するミドレックス社は、1969年に米国オレゴン州ポートランドで第一号機が稼働を始め、2019年に操業50周年を迎えた。その間、1983年に神戸製鋼の100%子会社となり、2018年には還元鉄 (Direct Reduced Iron, 以下DRIという) 累積生産量10億トンの到達というマイルストーンを達成している。また、プ

ラント1基あたりの生産能力は年産15万トンから250万トンに増加した (図1)。

これまでに建設された90基のプラントのほとんどが今なお運転を継続している。たとえば、ドイツ・ハンブルグに1971年に建設されたプラントは現在稼働中の最古のプラントである。仕様能力40万トンに対し、2018年に56万4千トンの生産量と約8,000時間の稼働時間を

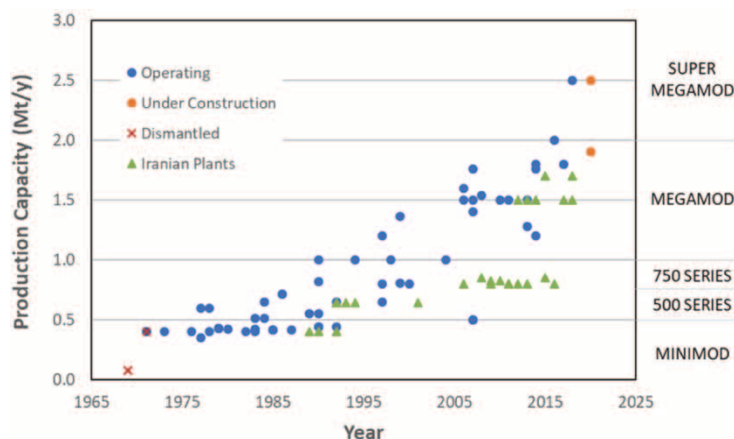


図1 ミドレックスプラント生産能力の50年間の進化
Fig.1 Evolution of MIDREX[®] Module sizes over the last 50 years

* Midrex Technologies Inc.

達成した。

最新のプラントとしては、アルジェリア・トシアリ社向けの年産250万トンの能力を持つプラントがある。アルジェリア・オラン近郊に建設された。2018年11月に最初の製品が製造され、そのわずか8箇月後の2019年7月に日産7,700トンの世界記録を樹立した。さらに、アルジェリア・カタールスチール社向けにアルジェリア・ベラーラに建設中の年産250万トンプラントに加えて、米国オハイオ州トレドに建設中のクリーブランド・クリフス社向け年産160万トンの最新プラント2基が2020年に運転を開始する予定である。

DRI市場拡大の最も大きい要因は、各地でより多くのリサイクルスクラップが活用されるようになり、従来型の高炉一貫製鉄法から電炉法へのシフトが世界的に起こっていることである。スクラップを使用する電炉鋼の品質を維持するためには、鉱石由来の鉄源（Ore-based Metallics：OBM）の併用が必要である。こうした理由からDRIの需要が世界的に増えている。

いっぽう将来的には、天然ガスや水素を利用して還元されたDRIとともにスクラップを電気炉で使用することがCO₂削減につながることから、環境面からもDRI市場の拡大が期待されている。

1. DRI: 製品付加価値を向上させる製鋼原料

DRIは、鉄鉱石ペレットや塊鉄石を溶解することなしに、化学的に結合した酸素を除去した天然鉄鉱石由来の高級鉄鋼原料である。このためDRIは、高濃度の鉄分を含むいっぽうで、鋼材品質に多くの場合悪影響を及ぼす銅などのトランプエレメントや窒素の含有は少ない。すなわち、DRIはスクラップに含まれる不純物を希釈する上で有効な原料であるといえる。このため、自動車外装用鋼板をはじめとして、深絞り用鋼や細線材、特殊棒鋼、鍛造用棒鋼、継ぎ目無し鋼管など、高品質の鉄鋼製

品を製造する電気炉で使用されている。

DRIが最も多く使用されるのは電気炉であるが、高炉でも長年にわたって使用されてきた。DRIは還元された金属鉄が主成分であることから、高炉で使用すると高炉での還元負荷が軽減され、生産量を増やすことができる、もしくはコークスの消費量を下げることが可能になるからである。例えば米国AKスチールの高炉では、溶銑トン当たり約250 kgのDRIが使用されていた¹⁾。

2. DRIの形態

DRIには常温還元鉄（Cold DRI、以下CDRIという）、熱間還元鉄（Hot DRI、以下HDRIという）、およびホットブリケットアイアン（Hot Briquetted Iron、以下HBIという）があり（図2）、それぞれは電気炉、高炉、転炉での使用に好ましい物理・化学性状を有している。初期に建設されたミドレックスプラントでは、還元後にほぼ常温まで冷却されたCDRIを製造し、隣接する電気炉製鋼工場で使用された。DRI使用の利点が広まるにつれ、この高級鉄鋼原料の需要は世界的に増大し、ミドレックス社では新たに二つのDRI形態であるHDRIとHBIを開発・商品化した。

還元後の高温のDRIには、酸素が抜け出したことによって生じた気孔が多数空いており、再び酸素と結びついて（再酸化）空気などに触れると発熱・発火するという欠点がある。そこで、DRIを二つのローラ間で圧縮成型してブリケット化し、空げき率を減少させたのがHBIである。このためHBIは耐再酸化特性に優れ、長期貯蔵や海上輸送に伴う問題を解決するとともに、ハンドリング中の粉発生による歩留りの低下を防いでいる。またHBIは外販に好ましい形態であることからHBIのサプライチェーンが形成され、生産コストが低く海上輸送の便が良い場所で製造されたHBIが市場でいつでも入手可能になっている。前述のクリーブランド・クリフス社向



図2 各種DRI製品の特徴とその用途
Fig.2 Description and use of DRI products

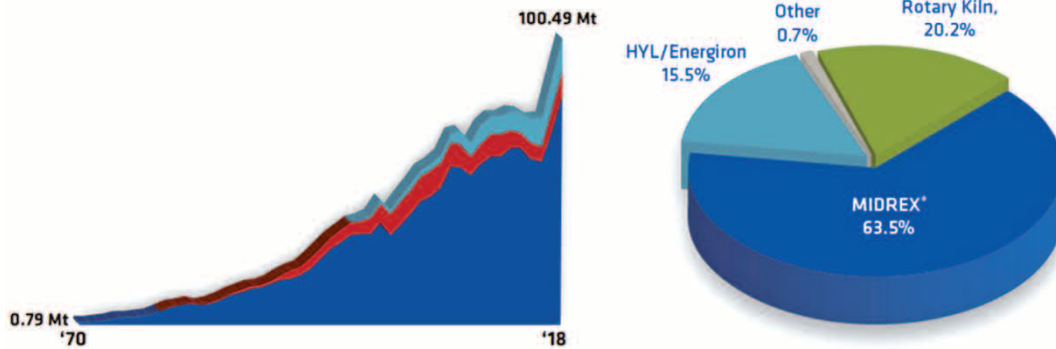


図3 世界のDRI年間生産量の推移²⁾
Fig.3 Trends in world's annual DRI production²⁾

けのプラントはHBIを製造するプラントである。

いっぽう、ミドレックスプラントで製造されたDRIを隣接する電気炉工場で使用する場合、還元後の600℃以上と高温であるDRIを電気炉で使用すれば溶解に必要なエネルギーの多くを減らすことができる。このため、ミドレックス社ではHDRIを搬送して電気炉へ装入する技術を開発した。これによってDRIの価値がさらに高まった。前述のアルジェリアの最新プラント2基では、HDRIを製造して隣接する電気炉に供給している。

このように、電気炉に隣接してHDRIを製造するプラント、あるいは外販用にHBIを製造する大型プラントの建設が最近のトレンドになっている。

なお、本稿においては以降、CDRI/HDRI/HBIの三つの製品形態すべてを指す包括的な還元鉄製品をDRIという。このDRIにおける製品形態の多様化も世界製鉄業における電気炉生産量の増加に寄与し、図3が示すように2018年の世界DRI生産量は1億トンを超えた²⁾。

3. ミドレックスプロセスの概要

天然ガスベースの最新のミドレックスプロセス(MIDREX NGTM)のフローシートおよびプラント(アルジェリア・オランのトシアリ社の製鉄所)外観写真をそれぞれ図4、図5に示す。MIDREX NGは二つの主要ユニット、すなわち鉄鉱石を金属鉄に還元するシャフト炉、およびシャフト炉での鉄鉱石還元に必要な還元ガスを製造するリフォーマーから成る。

シャフト炉では、その中を降下する鉄鉱石ペレットあるいは塊鉄石の充填層に対して還元ガスが対向流で供給される。鉄鉱石ペレットはその上昇ガスによって非常に効率よく昇温、還元、浸炭される。常温の鉄鉱石がシャフト炉頂から装入され、炉下部からCDRIまたはHDRIとして排出される。鉄鉱石中に含まれる約30%(重量比)の酸素が、シャフト炉内の高温下において一酸化炭素(CO)や水素(H₂)と反応して除去され、二酸化炭素(CO₂)と水蒸気(H₂O)になる。

これらの固体-ガス反応を図6に示す。H₂による鉄鉱石の還元は吸熱反応で、COによる還元は発熱反応である。さらにDRIが含有する炭素は、COあるいはメタン(CH₄)との化学反応によって生成される。天然ガスをシャフト炉下部から吹込むことにより、DRI中の炭素含有量を高めること、およびCDRIのプラントにおいて

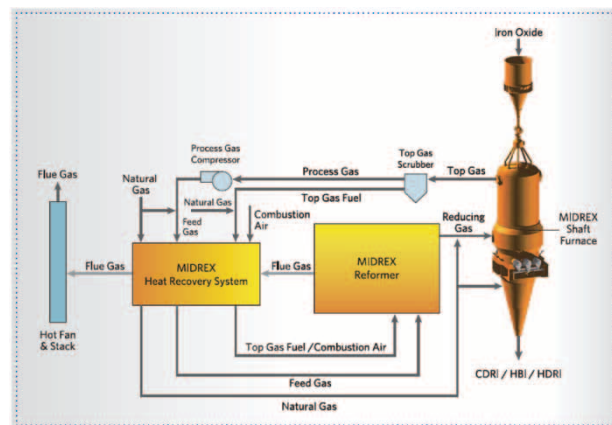


図4 MIDREX NGフローシート
Fig.4 MIDREX NG flowsheet



図5 アルジェリア・オランのトシアリ社の製鉄所に建設された最新MIDREX NGプラント(還元シャフト炉(奥中央)と製鋼工場(奥左側)にHDRIを搬送するコンベア(手前))
Fig.5 Latest MIDREX NG plant: Tosiya in Oran, Algeria. (Reduction furnace in center with HDRI conveyor to EAF meltshop on left side.)

Reduction (removal of oxygen from iron ore)

1. $Fe_2O_3 + 3H_2 \rightarrow 2Fe + 3H_2O$ (endothermic)
2. $Fe_2O_3 + 3CO \rightarrow 2Fe + 3CO_2$ (exothermic)

Carburization (addition of carbon to iron)

3. $3Fe + CO + H_2 \rightarrow Fe_3C + H_2O$
4. $3Fe + CH_4 \rightarrow Fe_3C + 2H_2$
5. $3Fe + 2CO \rightarrow Fe_3C + CO_2$

Reforming (conversion of CH₄ to CO and H₂)

6. $CH_4 + CO_2 \rightarrow 2CO + 2H_2$
7. $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$

図6 ミドレックスプロセスの主要な化学反応
Fig.6 Major chemical reactions in MIDREX Process

はDRIの冷却が可能となる。

シャフト炉頂から排出される350~450℃の還元後ガスは冷却されて除塵(じょじん)される。このガスには還元反応生成物であるCO₂とH₂Oに加えてCOとH₂も含まれている。このため、その約2/3は還元ガスとしてリサイクルされ、残りは改質反応に必要な熱源に利用される。リサイクルされるガスは天然ガスが加えられた後に、ミドレックスリフォーマに送られる。ミドレックスリフォーマは、ニッケルをベースにした特殊な触媒を充填したチューブが耐火物ケーシング内に収められた構造になっている。ガスがチューブ内を通る過程で酸化化合物(CO₂, H₂O)とメタンとが触媒によって反応し、COとH₂に改質される。天然ガスを利用した他のDRI製造プロセスでは、通常の水蒸気リフォーマを採用している。これに対して還元生成物であるCO₂を主な改質剤として使用するミドレックスリフォーマでは、H₂/CO比の低いガスを製造できる。これをシャフト炉の還元ガスとして使用することで、COによる還元に伴う発熱によりシャフト炉内を安定して高温に維持でき、安定した操業と高品質のDRI製造が可能となっている。

ミドレックスプロセスは、つぎの三つの目的で天然ガスを効率的に使用している。

- (1) 鉄鉱石の還元に必要なCOとH₂の原料
- (2) シャフト炉およびリフォーマへの熱源
- (3) 還元鉄の冷却および浸炭促進剤

また、ミドレックスリフォーマには排ガス顕熱回収設備があり、リフォーマ供給ガスや燃焼空気、天然ガスなどを予熱することによって高い熱効率を実現している。

ミドレックスプロセスが鉄鉱石原料および還元ガスに関してフレキシブルであることは長年の実績が示している。鉄鉱石原料として、世界各地の鉄鉱石ペレットに加えて、銘柄にもよるが塊鉄石を高配合で使用することが可能である。またミドレックスプロセスは、COREX[®]ガス、石炭ガス、コークス炉ガスおよび水蒸気リフォーマガスなど、H₂/CO = 0.5~3.5のさまざまな還元ガスを商業プラントで用いてきた実績を有している。ミドレックス社は、小規模であるがR&Dセンターに建設したパイロットプラントを1970年代後期から1980年代半ばまで操業し、最高H₂/CO=4.2の還元ガスを用いた実績もある。

ミドレックスプロセスがDRI製造プロセスの中で拡大してきた主な理由は、プロセスがシンプルであることである。たとえば、鉄鉱石還元とガス改質とを別々の反応器で行うことでプロセス制御が容易になっている。また、ミドレックスプロセスは低い運転圧力を採用しており、これがプラントの安定かつ容易な運転をもたらしている。これらにより、多くのプラントが年間8,000時間を超える稼働時間を毎年達成している。

4. イノベーションの継続によるミドレックスプロセスの進化

1969年にオレゴン州ポートランドに最初のミドレックスプラントが稼働を始めてから、2018年にアルジェリ

アの最新プラントが稼働を始めるまで、ミドレックスプロセスには大小多くの改良がなされた。神戸製鋼グループの一員であるミドレックス社に対する神戸製鋼の技術開発支援、プラント操業からのフィードバック、および技術提携パートナーとの協力などから得られる革新的なアイデアを採用してきた。これにより、ミドレックスプロセスは最も信頼性が高く、効率がよく、また環境に優しいプロセスに進化した。

Direct from Midrexの最近の記事³⁾に、これまでミドレックスプロセスに採用されてきた革新技術を網羅するリストが掲載されている。そのうちの6件を以下に例示する。

- ・熱回収設備の増強による大幅なエネルギー効率の向上
- ・鉄鉱石ペレット表面へのコーティングによるクラスタリング防止とシャフト炉高温操業の実現
- ・還元ガスへの酸素吹き込みによるシャフト炉高温操業の実現
- ・HBIの強度・耐再酸化性・歩留りを向上させるホットブリケティングおよびHBI冷却技術
- ・電気炉へのHDRI直接装入(HOTLINK[®]注1))による溶解エネルギーの低減と、これによる電気炉の生産性向上およびコストダウンの実現
- ・大型シャフト炉(MEGAMOD[®]注2))の適用によるプラント規模の拡大(1970年代年産40万トン→現在年産250万トン)

また最近では、当社R&Dチームと神戸製鋼所とが協力して以下の新技術を開発した。

- ・ミドレックスリフォーマの性能向上技術
 - (1) 大口径11インチチューブ
 - (2) 高温時のひずみを抑えるMA-1合金
 - (3) 圧力損失を低減する新触媒(R7RWH, R17)
 - (4) NO_x排出を低減する新たなバーナシステム
- ・ACTTM(Adjustable Carbon Technology)

COと天然ガスとの混合ガスをシャフト炉下部に吹込むことにより、HDRI排出温度と含有炭素量を個別に制御できるシステム
- ・DRIPAX and Expert system

プラントのオペレータおよびエンジニアによる操業の最適化を支援するコンピュータツール
- ・MidrexConnectTM

プラント設備を遠隔監視し、操業データを解析するサービスの提供。ミドレックス本社からWeb経由でプラントデータにリアルタイムでアクセスし、プラント性能に影響するプロセス変数と生産プロセス全体への影響を確認する。これによりプラントオペレータが即座に判断して操作しなければならない情報をプラントに伝達する⁴⁾。
- ・Integrated Plant Solutions (IPS)

プラント機器と操業を総合的に解析し、稼働率と

脚注1) HOTLINKは当社の登録商標である。

脚注2) MEGAMODは当社の登録商標である。

生産性を向上する総合ソリューションを提供。ミドレックス社は現在、水処理設備管理サービスを複数のプラントに提供している。

・Midrex H₂

Midrex H₂については5.4節で詳述した。

この10年間にミドレックス社は提携パートナーとともに9基のプラントを建設し稼働させた。加えて、二つのプラントが現在建設中もしくはコミショニング中である。これらすべての新プラントが上でリストアップした技術のすべて、あるいはほとんどを採用している。これはミドレックス社がさまざまなアイデアから斬新で意義ある商品開発をしてきた成果である。

前述したアルジェリアの年産250万トン最新プラントにおいては主にHDRIを生産し、熱間搬送コンベアにより隣接する電気炉に連続供給することで最大の生産性と最小の消費エネルギーが実現される。また、ミドレックス社が建設したこれらのプラントにおいては、大口徑M1合金チューブを8列配置した新設計のリフォーマ、還元ガスヘッダへの2箇所ガス供給や2基並列リフォーマ排ガスホットファンなどの新技術が適用されている。

さらに、クリーブランド・クリフス社向けに建設中の年産160万トンHBIプラントでは、前述のACT技術の採用によりHBI含有炭素量を調節することが可能な最初のプラントである。

5. ミドレックスプロセスによるCO₂フリー製鉄への道筋

5.1 鉄鋼業によるCO₂排出

鉄鋼業は、とくにその製鉄プロセスが石炭に大きく依存しているため、温室効果ガス最大の排出産業の一つであり、排出量全体のおよそ7~9%を占める。世界で生産される粗鋼の約70%が高炉で造られた銑鉄(せんでつ)が転炉で精錬されたものである⁵⁾。高炉を使った製鉄ではコークスおよび石炭をエネルギー源や還元剤として使用している。このため、高炉-転炉プロセスでは1.6~2.0 t/t-steelの多量のCO₂を排出する。

いっぽう、ミドレックスプロセスは天然ガスをエネルギー源および還元剤として使用していることから、高炉と比べてCO₂排出量の少ない製鉄が可能である。

以下の節では、ミドレックスプロセスを利用することによってCO₂排出量を下げていく道筋を概説する。

5.2 高炉からMIDREX NGプロセスへの置き換え

上記のように、天然ガスを使用したMIDREX NGプロセスはCO₂排出量の少ない製鉄が可能である。このプロセスと電気炉とを組み合わせる場合、CO₂排出量は鉄鉱石を用いて粗鋼を生産する商業プロセスの中で最も少ない1.1~1.2 t/t-steel⁶⁾とすることができる。すなわち、高炉-転炉プロセスからMIDREX NG-電気炉プロセスに置き換えることによって大幅なCO₂削減が可能である。

さらに、MIDREX NGプロセスにCO₂除去設備を設置し、除去したCO₂を地中深くに貯留(CCS: Carbon dioxide Capture and Storage)あるいは新たな商品やエネルギーとして利用(CCU: Carbon dioxide Capture and Utilization)できれば、高炉-転炉プロセスの約1/3のCO₂排出量にまで低減することができる。

MIDREX NGプロセスはCO₂除去設備を含めて豊富な実績があり、これに置き換えることによって技術的リスクを負うことなくCO₂排出量を効果的に大幅に低減することができる。

5.3 MIDREX NGプロセスにおける水素への部分置換

ミドレックスプロセスが排出するCO₂を劇的に低減する究極の方法は、燃料および還元剤に使用する天然ガスの代わりに再生可能エネルギーから製造された水素(以下、グリーン水素という)を使用することである。

その第1段階は、既存のMIDREX NGプラントにおいて、グリーン水素が入手可能になった時点で天然ガスの一部をグリーン水素に置き換えることである。図7に、MIDREX NGプロセスに水素を添加する場合のフローシートを示す。図7(a)では、設備を改造することなく20~30%までの天然ガスを水素に置き換えることが可能である。たとえば、年産200万トン能力のDRプラントにおいては、天然ガス消費量全体の約30%に相当する約20,000 Nm³/hの天然ガスを60,000 Nm³/hの水素によって置き換えることができる。さらに多くの天然ガスを置き換える際には、ミドレックスリフォーマに蒸気を供給する必要がある。この蒸気は別途ボイラで製造するか、あるいは製鉄所内で入手できる他の蒸気源を活

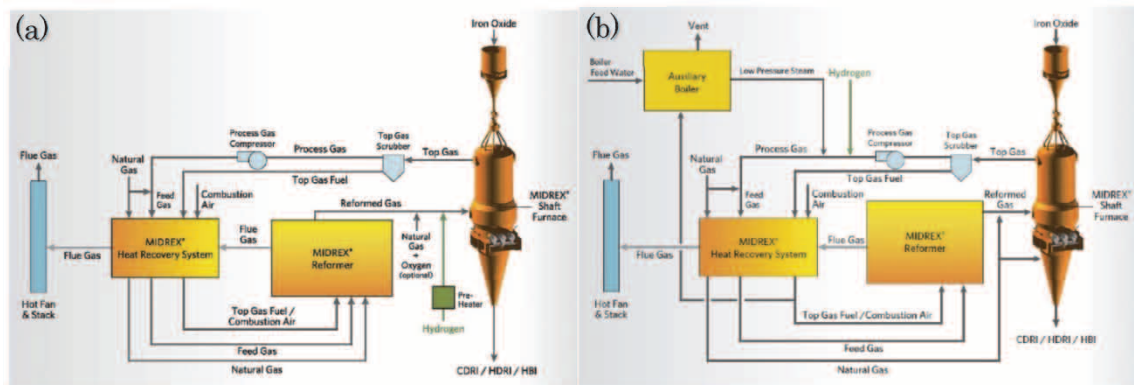


図7 H₂添加MIDREX NGプロセス (a) 20~30%以下の天然ガス置換, (b) 30%以上の天然ガス置換

Fig.7 MIDREX NG Process with hydrogen addition:

(a) less than 20-30% of natural gas displacement, (b) more than 30% natural gas displacement

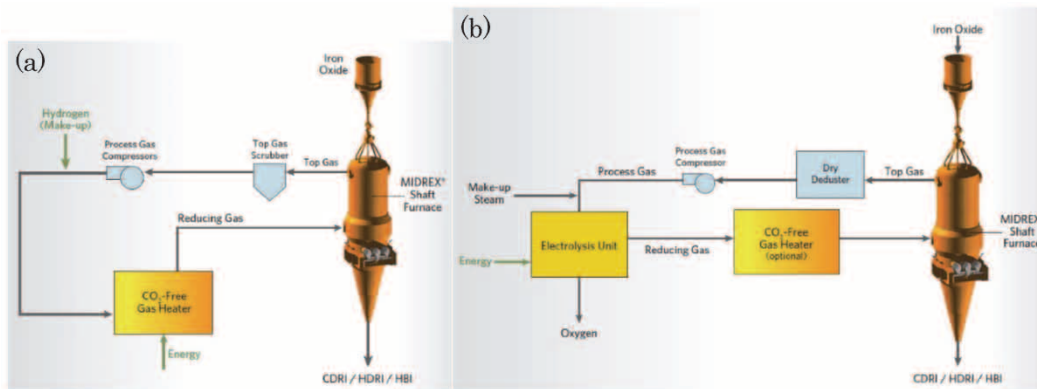


図8 MIDREX H₂プロセス (a) H₂を外部から供給, (b) H₂発生設備の組み込み

Fig.8 MIDREX H₂ Process: (a) hydrogen supplied over-the-fence, (b) integrated hydrogen generation

用することができる。図7 (b) がこの場合のフローシートである。蒸気を供給するためのこれらの改造を既存のMIDREX NGプラントに施すことは可能である。また新規プラントにおいては、将来の改造を考慮した設計にすることが可能である。

炭素経済から水素経済へのインフラ変化の過程で、利用可能となる水素量が日ごとあるいは季節ごとに変動する場合、ミドレックスプロセスはその時の状況に応じて柔軟にエネルギー源を変えることができる。また水素は、プラントサイト内で製造することも、外部で製造された水素を受け取ることも可能である。

5.4 MIDREX H₂プロセス (100%水素使用)

MIDREX H₂プロセスのフローシートを図8に示す。図8 (a) は外部で製造された水素を供給する場合、図8 (b) は水素製造設備をプロセス内に組み込んだ場合である。ミドレックスリフォーマは必要なく、水素を必要な温度まで昇温するガスヒータのみが必要となる。既存のMIDREX NGプラントをMIDREX H₂プラントに切り替える場合、吸熱である改質反応がなくなって熱負荷が下がるため、ミドレックスリフォーマを簡単にガスヒータに転換することができる。新規のMIDREX H₂プラントでは、水素の昇温に限定した機器仕様にする事ができる。シャフト炉については、プロセスモデル計算とラボ実験により、既設デザインのまま100%水素を適用してDRIを生産することが可能であることを検証している。

これらのフローシートにおける水素原単位は約650 Nm³/t-DRIである。さらに150 Nm³/t-DRIまでの水素、あるいは別のCO₂負荷の低い熱源、たとえば廃熱や電気、天然ガスが還元ガスヒータのエネルギー源として必要となる。MIDREX H₂プロセスを電気炉と組み合わせることにより、使用電力のCO₂負荷によって削減量は異なるが、高炉-転炉プロセスで粗鋼を製造する場合と比べて、CO₂排出量を80%以上削減することが可能である。

6. 水素製鉄が直面する課題

本章では、前章で述べたMIDREX NGプロセスにおける水素への部分置換、およびMIDREX H₂プロセスにおける100%水素使用に向けた課題について述べる。図6の化学反応式が示すように、天然ガスを使用する現在

のMIDREX NGプロセスにおいて、すでに多くの水素を鉄鉱石の還元で使用している。したがって、MIDREX NGプロセスでの水素の部分置換あるいはMIDREX H₂プロセスは、技術のブレークスルーというよりMIDREX NGプロセスからの進化というべきである。

このようにMIDREX H₂へのハードルは高くないが、いくつかの課題がある。その一つがシャフト炉内の温度である。還元ガス中に水素が増えることによって、発熱反応である一酸化炭素還元 (図6の反応2) から吸熱反応である水素還元 (図6の反応1) へ移行する。これによってシャフト炉内の熱バランスが影響を受け、シャフト炉内に供給する熱量を増やす必要がある。しかしながらMIDREX H₂ではいくつかの方法のなかから個々のプロジェクトの状況に応じて対応することが可能である。

もう一つの課題は製品DRI中の炭素量である。100%水素で還元するとDRI中の炭素量が0%になる。今日の電気炉で最もよく実施されている操業では、DRIや銑鉄などの鉄源に含まれる炭素あるいはコークスブリーズなどの炭素質物質を積極的に利用している。これは、炭素によって鉄の融点が下がることをはじめ、DRI中に残存する酸化鉄を還元するのに炭素を必要とするからである。また、酸素を吹込むことによって炭素を燃焼し、多くのエネルギーを発生させて溶解時間を短くできるなどのメリットがある。すなわち、炭素なしでは電気炉の効率が大幅に低下することになる。そのため、CO₂排出コストを含む多くの要素を考慮し、電気炉とDRプラントとを全体として最適なDRI中炭素濃度と、それに合わせた操業条件に変更する必要がある。DRIに含まれる炭素の利用効率はコークスブリーズなどの炭素質物質より高い。このため、DRプラントにおいてDRIにいくらかの炭素を添加することが求められる可能性がある。その場合、たとえば50 Nm³/tの天然ガスの添加によって1.4%のDRI中炭素を得ることが可能である⁷⁾。

水素製鉄を実現させるための最大の課題は、グリーン水素のコスト低減と供給の安定化である。世界的に現在、ほとんどの水素は水蒸気リフォーマを用いて化石燃料から製造されている。いっぽう、グリーン水素は水を電気分解することによって製造されており、その電気にはCO₂フリーの電気が利用されている。水の電気分解技術は新しいものではなく、電気分解槽に多くの開発が行

われている。しかしながらどの技術を用いても大量の電力が必要で^{注3)}、電気分解槽の運転コストのほとんどが電気代である。したがって、現在の価格の天然ガスから置き換えるには電気料金が\$0.01/kWh程度に低下しなければ経済的に成立しない。さらに、現在確立している技術をもってしても、DRプラントに必要な量の水素を供給することができない。最近欧州で発表されている最大のプロジェクトでは、100 MWのアルカリ電気分解によって水素を製造する計画⁸⁾がある。しかし、ミドレックスプラント1基に必要な水素を賄うには、この6~8倍の規模が必要である。また、電気料金が\$0.01/kWhになったとしても、化石燃料から製造した水素の価格と同等になるためには、電気分解槽の設備費を現在の1/3~1/4にまで下げる必要がある。電気分解槽の大規模化に向けた開発も進められているが、大規模化で設備コストを下げるとしても、経済的に成立するにはまだ時間を要しそうである。

水素が安定供給されて水素経済が実現するためには、水素製造コストの課題に加えて水素の貯蔵や輸送のような水素インフラの課題にも挑戦していく必要がある。

水素経済実現のもう一つの課題は発電である。たとえば、スクラップとMIDREX H₂で製造したDRIを50:50で電気炉に供給することによって現在の我が国の粗鋼量を生産することを考える。この場合、DRプラントに必要な電力だけでも約25 GWのグリーン電力、すなわち300,000 haのソーラーパネル、あるいは40,000ユニットの発電風車(7,500 haの敷地)、もしくは20基の原子力発電所が必要となる。このように膨大な量のグリーン電力が必要であり、これは国家レベルでの対応を要する課題と考える。

7. MIDREX H₂プロセスの実証プラント

アルセロール・ミッタル社は2019年9月、水素を使って鋼を生産する実証プラントをミドレックス社と協力してドイツ・ハンブルグに建設することを発表した。このプロジェクトの目的は、還元剤に水素のみを用いて生産したDRIを電気炉で使用して溶鋼製造することを実証することである。この実証プラントでは、天然ガスを還元剤とする既設ミドレックスプラントの炉頂ガスに含まれる水素を回収し、これを使って年間10万トンのDRIを製造する。将来的には、部分的もしくは全ての水素を再生可能エネルギーで製造する構想である。このプロジェクトにおいて両社は、水素還元によるDRI物性や溶解特性などの技術課題に取り組む計画である。

むすび=ミドレックスプロセスが誕生して2019年で50周年を迎えた。同時に当社が神戸製鋼所のグループに加わって37年が経過した。このシンプルで優れたプロセスの改善・改良を継続することによって効率が向上し、市場に合わせて進化を遂げてきたことが今日までのビジネスの成功につながっている。鉄鋼業界の最近の動向を背景に、鋼材品質に対する高い要求を満たすと同時に、温室効果ガスの排出を大きく低減できるDRIという高級鉄源を製造する技術として、ミドレックスプロセスの役割はこれまで以上に大きなものになると考える。

ミドレックスプロセスは実績が豊富な確立した技術である。これを導入することによって温室効果ガス排出量を直ちに削減できるのみならず、将来的に求められる大幅な削減を実現させ得る最も信頼できる技術であると考えている。

参 考 文 献

- 1) Blast Furnace Roundup 2002. Iron and Steelmaker. August 2002.
- 2) Midrex Technologies, Inc. 2018 World Direct Reduction Statistics.
- 3) Kopfle, J. et al. DIRECT FROM MIDREX 2nd QUARTER 2019.
- 4) Cotton, C. DIRECT FROM MIDREX 1st QUARTER 2019.
- 5) worldsteel ASSOCIATION. FACTSHEET Steel and raw materials 2019.
- 6) Treatise on Process Metallurgy Volume 3: Industrial Processes. p.170.
- 7) Chevrier, V. et al. MIDREX H₂TM: Ultimate Low CO₂ Ironmaking and its place in the new Hydrogen Economy. AISTech 2018, conference, Philadelphia, PA.
- 8) REUTERS. "German energy grids say plans ready for 100 MW hydrogen plant". February 11, 2019, <https://uk.reuters.com/article/us-amprion-opengrid-europe-hydrogen/german-energy-grids-say-plans-ready-for-100mw-hydrogen-plant-idUKKCN1Q01S4>. (参照 2020.2.10).



Vincent CHEVRIER
Midrex Technologies Inc.



Lauren LORRAINE
Midrex Technologies Inc.



道下晴康
Midrex Technologies Inc.

脚注3) 1 MWhで製造できる水素はおよそ200 Nm³ (18 kg) 程度である。

(解説)

金属スクラップを用いた放射性廃棄物処分容器用内容器の製造に向けた技術的課題の検討

長江拓哉*・宮田賢作・中山準平

Study of Technical Issues on Manufacturing Inner Containers of Radioactive Waste Disposal Container Using Metal Scrap

Takuya NAGAE・Kensaku MIYATA・Junpei NAKAYAMA

要旨

原子力発電所で発生した金属廃棄物のうち、クリアランス制度の適用が可能なものは再利用することが望ましい。金属スクラップの再利用方法の一つに放射性廃棄物処分容器の内容器用材料に使用する案がある。内容器の製作においては遮へい性能、強度、耐久性の観点から所定の品質を満足する製作方法を開発する必要がある。そこで、金属スクラップを原料とした再利用品の品質を確認するために -20°C シャルピー試験を実施した。その結果、不純物元素の中でりん(P)や硫黄(S)は-吸収エネルギーを有意に低下させることが確認された。また、溶接による熱影響部の吸収エネルギーの変化や、適用可能な熱処理条件について、模擬試験体および汎用衝撃解析ソフトを用いて検討した。

Abstract

Among the metallic wastes generated at a nuclear power plant, it is desirable to reuse those to which the clearance system is applicable. One of the proposed methods of recycling such metal scraps, or so-called clearance metals, is to use them for the inner containers of radioactive waste disposal vessels. In manufacturing an inner container, it is necessary to develop a manufacturing method that satisfies the specified quality in terms of shielding performance, strength, and durability. Hence, a -20°C Charpy test was conducted to confirm the quality of recycled products made from clearance metal. The results indicated that P and S, among other impurity elements, significantly reduce the amount of absorbed energy. In addition, changes in absorbed energy in the heat-affected zone caused by welding and applicable heat treatment conditions were examined using simulated test pieces and general-purpose impact analysis software.

キーワード

廃止措置、処分容器の製造方法、金属再利用、クリアランス、放射性廃棄物、強度評価

ま え が き = 資源小国である我が国においては、高効率かつ低炭素である原子力発電はベースロード電源として1960年代から開発が進められてきた。初期に建設された原子力発電所のなかには老朽化などの理由によってその役割を終え、運転を停止して施設を解体・撤去する措置（以下、廃止措置という）が実施されているものがある。我が国においては廃止措置の実績はまだ少ないが、今後廃止措置に進む発電所は2019年12月現在で26基^{1), 2)}あり、今後さらに増加すると予測される。また、廃止措置の進捗とともに放射性廃棄物の発生量が増加することも予測され、その処分が課題となっている。発生する放射性廃棄物のうち、放射能濃度が低く人の健康への影響がほとんどないものは、国の確認を受けることにより一般廃棄物として再利用または処分できる。この制度を「クリアランス制度」という。金属スクラップを再利用すれば最終処分する放射性廃棄物量が減り、資源を有効活用することができる。

そこで本稿では、金属スクラップを放射性廃棄物処分容器の内容器として再利用する方法について、これまでの検討状況を示すとともに、今後の展望について紹介する。

1. 廃止措置と金属廃棄物

原子力施設の廃止措置では、解体作業において大量の廃棄物が発生する。発生する廃棄物は金属と非金属に大別される。さらに金属廃棄物は、配管や鉄筋のような単純かつ小型なもの、蒸気発生器やタービンロータのような大型機器に分けられる。

大型機器に共通する特徴は、高重量で寸法が大きくかさばる点にある。これらを解体作業現場や事業用地に保管した場合は広いスペースを専有する。また、容易に移動させることもできないため、解体作業の障害となる。省スペースで保管できるよう機械的に小さく切断することは可能であるものの、切断作業にかかる時間的・人的負担は無視できない。以上のように、金属廃棄物の搬出・処分は廃止措置における重要な検討課題の一つである。

2. 金属廃棄物のクリアランス制度

金属廃棄物は、放射性物質の濃度が規制値以下であれば「廃棄物」ではなく、有価な「スクラップ」として扱うことが可能である。すなわち、放射性物質に対する規

* エンジニアリング事業部門 原子力・復興センター 技術部

制体系から除外して金属原料としてさまざまな製品に造り替えることが可能である。前述したクリアランス制度を適用可能な金属廃棄物をクリアランス金属という。

金属廃棄物を放射性廃棄物として廃棄する場合、一定の基準を満たすよう専用の処分場に廃棄体として埋設する必要がある。このため、一般の廃棄物と比較して搬送や処分にコストがかかってしまう。さらに再利用可能な金属資源を埋設処分してしまうため、環境への負荷も増大する。

クリアランス制度はコストや環境負荷の面で有効な選択肢の一つとして期待されている。今後増加する金属廃棄物を滞りなく処理するためにはクリアランス金属の再利用が広く普及する必要がある。そのためには、放射性物質の管理技術や金属製造技術を開発・改善していくことはもちろん、安全に再利用できた実績を積み上げていくことが重要である。

3. クリアランス金属の再利用

3.1 金属スクラップの再利用

クリアランス金属のリサイクル過程は、放射能汚染されていない一般の金属スクラップの再利用と同様である。一般の金属スクラップは回収された後、切断または破碎処理によって取り扱いやすいサイズに分割、分別される。これが電炉メーカーなどへ引き渡され、溶解、精錬などのプロセスを経て鋼材などに加工される。安定した品質の金属スクラップを大量かつ安定して確保することが難しいため、建材のような厳密な品質を求められない資材として再利用されることが多い。

3.2 金属スクラップからの製造方法

金属材料を製造する方法は鋳造により製造する方法と、鋳造の後にさらに鍛造する方法がある。鋳造は熔融した金属を鋳型に流し込んで凝固させる手法であり、鍛造は金属をハンマなどで叩いて成形する手法である。

金属スクラップの再利用という観点では、形状や材質の異なるスクラップを配合することから、安定した品質の製品を得るためには工夫が必要である。すなわち、密度や強度、耐久性といった観点で所要の品質を有する製品を得るためには、スクラップを配合して不純物を平均化するプロセス、あるいはスクラップを精錬して不純物を除去するプロセスなどの組み込みが考えられる。鍛造と比べて鋳造の場合、製造工程のなかでこれらのプロセスを組込むことが可能である。また、後述する容器は廃止措置の進捗に伴って発生する廃棄物を収納するため、長期間にわたって大量に製造する必要がある。この点においても、鋳型を使用することによって同一形状の製品を大量に安価に生産することのできる鋳造が最適であるといえる。

3.3 容器としての再利用

放射性廃棄物は高レベル放射性廃棄物と低レベル放射性廃棄物の二つに分類される。低レベル放射性廃棄物にも、L1廃棄物と区分される比較的放射能濃度の高い廃棄物があり、管理に注意を要する。そこで、廃棄物が発生してから処分場へ搬出するまでの間、遮へい機能を有す

る容器に廃棄物を収納しておくことが考えられる。この措置によって搬出までの一時保管を安全に実施することが可能となる。

そこで当社は、金属スクラップを容器へ再利用するために必要な材料の化学成分、強度、製造方法の検討を行った。次章以降でその概要を述べる。

4. 容器に求められる要件

容器に収納する低レベル放射性廃棄物の性状、容器の使用環境および適用法令などを調査し、容器に求められる技術要件を以下のとおり整理した。

- (1) 遮へい材として使用できる遮へい能力を持つこと
- (2) 予測される温度変化の範囲（ $-20\sim 38^{\circ}\text{C}$ ）において、き裂や破損などの生じる恐れがないこと
- (3) 処分容器に収納可能な寸法であること

以上の要件を満足するため、衝撃吸収エネルギーを低下させる不純物（りん（P）、硫黄（S）など）の上限設定や、衝撃等を受けた際に健全性を維持できるように角部の設計を工夫する必要がある。

5. 容器用材料の規格化に向けた検討

金属スクラップを再利用して製造される容器は、遮へい材として求められる遮へい能力および耐久性を有する必要がある。そこで、金属スクラップを原料として所要の品質の容器が製造できるよう、化学成分を調整して試作した材料の各種試験データを採取し、材料規格案の根拠を得ることとした。

5.1 化学成分

容器の一部を模擬した鉄鋼品（以下、試験片という）を製造し、熱処理条件と機械的性質（ -20°C シャルピー吸収エネルギー、以下吸収エネルギーという）との関係を調査した。図1に示すとおり、低合金鋼は冷却速度が遅い場合でも安定して高い吸収エネルギーが得られている。いっぽうで、炭素鋼は焼入れなどによって冷却を速くすることで吸収エネルギーを向上させることができる。

PやSのような不純物はその含有量によって鋼の靱性（じんせい）を劣化させる傾向がある。また、銅（Cu）やすず（Sn）は、溶解炉で精錬しても除去することは

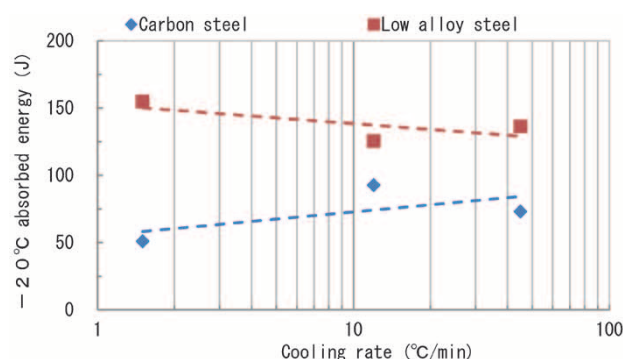


図1 -20°C シャルピー吸収エネルギーと冷却速度との関係
Fig.1 Relationship between -20°C Charpy absorption energy and cooling rate

容易ではない。そこで、これらの不純物元素の含有量が機械的性質に及ぼす影響を確認するため、不純物元素を意図的に添加した試験片を製造して低温衝撃吸収試験を行った。表1にその結果を示す。CuおよびSnは除去が容易でないものの、多少含有される場合であっても低温吸収エネルギーに与える影響は顕著ではない。PおよびSは含有量の増加に伴って低温吸収エネルギーに著しく影響を及ぼすため、含有量の上限值を設定する必要がある。

そこで、P、Sの含有量を変化させた試験片を製造し、材料試験を実施した。鋼種は炭素鋼と低合金鋼とし、不純物含有量を変化させてシャルピー衝撃試験を実施した。その結果を図2に示す。不純物元素が吸収エネルギーに与える影響は鋼種によらず同じ傾向であり、P、S含有量が多いほど吸収エネルギーは減少することが分かった。

金属スクラップにはクロム (Cr) を含むステンレスなども含まれるため、配合されるスクラップの種類によってはCrが材料の物性に影響を与える恐れがある。そ

表1 不純物元素が衝撃吸収エネルギーに与える影響

Table 1 Influence of impurity elements on low temperature impact energy absorption

Impurity element	Additive range (%)	Influence on mechanical properties
P	0.010-0.040	Increasing of impurity elements decreases absorbed energy
S	0.005-0.040	Increasing of impurity elements significantly decreases absorbed energy
Cu	0.10-0.50	No noticeable effect
Sn	0.005-0.030	No noticeable effect

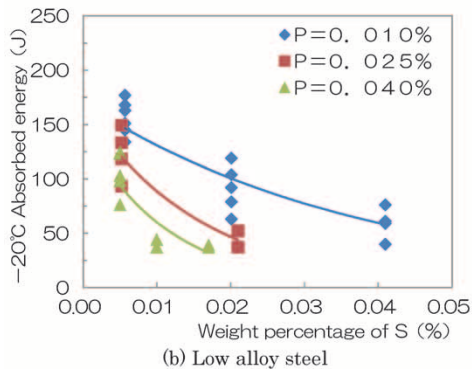
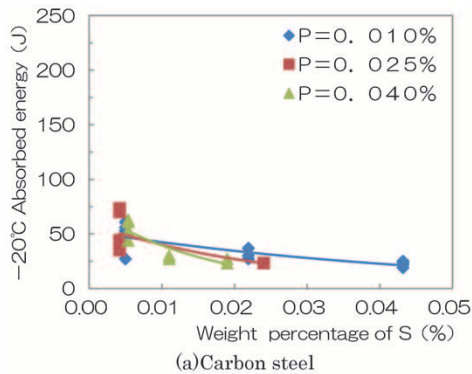


図2 不純物含有量と-20°Cシャルピー吸収エネルギーとの関係
Fig.2 Relationship between amount of impurity element and -20°C Charpy absorbed energy

こで、炭素鋼および低合金鋼についてCr含有量と吸収エネルギーとの関係を調査したところ、図3に示す結果が得られた。

炭素鋼では、試験範囲内でのCr含有量の変化では有意な変化は見られなかった。いっぽう低合金鋼では、Cr含有量の増加に伴って吸収エネルギーがわずかに低下した。また、いずれの場合も低炭素化(炭素量0.05%以下)した場合には吸収エネルギーは大きく増加した。これはフェライト量の増加によるものと考えられる。

5.2 機械的性質

内容器(図4)の耐久性評価に必要な物性データを取得するため、炭素鋼鋳鋼品および低合金鋼鋳鋼品の母材と、その補修溶接部および蓋溶接部(図4のA部)とを

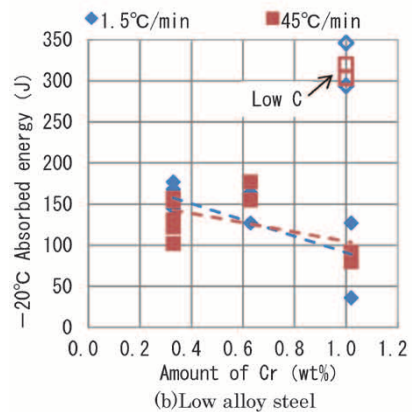
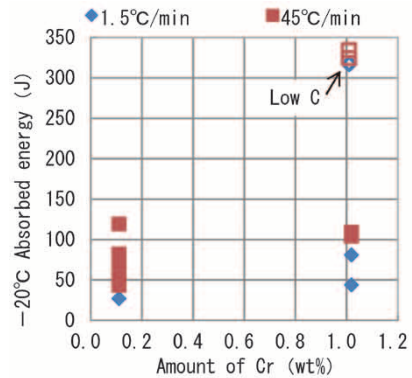


図3 Cr含有量と-20°Cシャルピー吸収エネルギーとの関係
Fig.3 Relationship between amount of Cr and -20°C Charpy absorbed energy

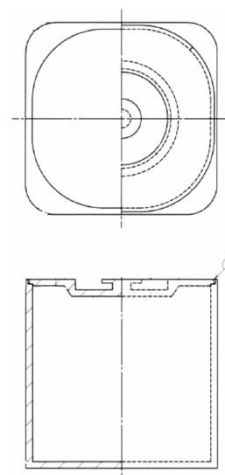


図4 内容器概形図
Fig.4 Schematic of inner container

模擬した試験片を対象にシャルピー衝撃試験を実施した。以下にその試験結果の概要を示す。

- (1) 低合金鋼の吸収エネルギーは、蓋溶接部および補修溶接部ともに、溶接金属、BOND部（溶融金属と母材の境界部分）、HAZ部（母材における溶接の熱影響を受けた部分）の順に高くなった。
- (2) 炭素鋼の吸収エネルギーは母材が最も低かった。
- (3) 低合金鋼の母材、蓋溶接の溶接金属、未溶着部、HAZ部、補修溶接の溶接金属およびHAZ部を対象に破壊靱性試験を実施した。その結果、蓋溶接の溶接金属が最も低い値を示し、動的破壊靱性試験では最小値 $53 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であった。また、母材の動的破壊靱性値の最小値は $72 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であった。
- (4) 炭素鋼の母材、蓋溶接の未溶着部、溶接金属、HAZ部および補修溶接のHAZ部を対象に破壊靱性試験を実施した結果、蓋溶接の未溶着部が最も低い値を示し、動的破壊靱性試験では最小値 $50 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であった。また、母材の動的破壊靱性値の最小値は $51 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であった。

5.3 数値解析による耐久性検証

内容器は衝撃等を受けた場合でも破壊されないことが求められる。そこで衝撃・構造解析ソフトウェアLS-DYNA[®]を用い、内容器（蓋溶接部を含む）を対象とする落下衝撃時の応力解析を実施した。内容器の材料は炭素鋼および低合金鋼とした。得られた結果は以下のとおりである。

- (1) 容器の板厚によって結果が異なり、200 mm厚容器は低合金鋼でも炭素鋼でも蓋溶接部からの脆性（ぜいせい）破壊は生じない。いっぽう、50 mm厚容器では低合金鋼で脆性破壊が生じる結果であった。しかしながら、容器形状を変更することによって発生応力は低減し、脆性破壊を防止できることが分かった。
50 mm厚容器を角部から落下させた際に生じる相当塑性ひずみのコンター図を図5に示す。
- (2) 脆性破壊に対する母材の許容欠陥寸法は、炭素鋼で11.4 mm、低合金鋼で15.6 mmと推定される。いずれの欠陥寸法も非破壊検査で検出できる寸



図5 LS-DYNA[®]による容器の落下解析結果（相当塑性ひずみコンター図）

Fig.5 Dropdown analysis result of container by LS-DYNA (plastic strain contour diagram)

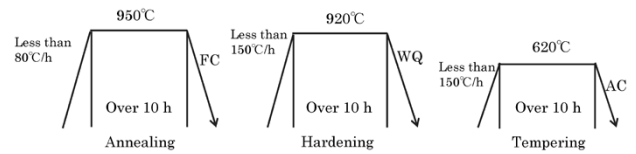


図6 模擬試験体の熱処理条件
Fig.6 Heat treatment conditions of test piece

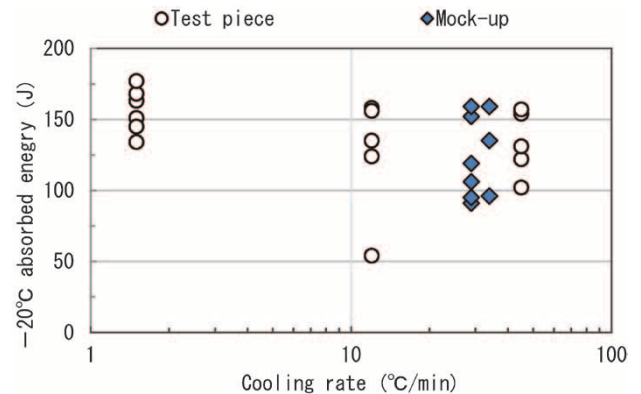


図7 試験片と模擬試験体との比較（低合金鋼）
Fig.7 Comparison of laboratory experiments and test pieces (low alloy steel)

法（脆性試験用試験体の最大製造欠陥サイズは2.6 mm）より十分に大きく、製造欠陥から脆性破壊に至る危険性は低いと思われる。

5.4 製造方法の検討

試験片と比べて実際の容器は形状が複雑であり、厚さ／深さ方向に対して熱履歴が異なる。そこで、5.1節から5.3節の評価結果が妥当であることを検証するため、内容器の形状を模擬した図4と同様の模擬試験体を試作し、図6に示す熱処理条件の妥当性を評価した。

冷却速度と吸収エネルギーとの関係を図7に示す。吸収エネルギーにはそれぞれの値にばらつきがあるものの、おおむね試験片で確認された値が得られている。

- (1) 内容器の代表する位置での焼入れ冷却速度は、試験片で実施した熱処理と同等である。
- (2) 模擬試験体による試験結果より、冷却速度と低温吸収エネルギーの関係はそれぞれの値にばらつきがあるが、おおむね試験片で確認された値が得られた。したがって、5.1節から5.3節の評価は妥当と考えられる。

むすび＝原子力施設で発生する金属スクラップを再利用することは、廃止措置を円滑かつ経済的に遂行するために重要である。

本稿に示した試験結果に基づいて、一般社団法人日本鋳鍛鋼会より『JCSS C1 (2019) 低温溶接構造用鋳鋼品』が発行³⁾されており、内容器に適用可能な材料の規格化が完了した。これにより、金属スクラップが原料であっても、原子力施設で使用可能な製品が製造できる基盤が整った。

今後は内容器の詳細設計や運用方法等が整備され、再利用が実施されることが期待される。

なお、本稿に添付した図表は参考資料⁴⁾の記載内容を基に作成した。

参 考 文 献

- 1) 資源エネルギー庁. 日本の原子力発電所の状況.
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/001/pdf/001_02_001.pdf. (参照2019-12-24).
- 2) 原子力規制委員会. 廃止措置中の研究開発段階発電用原子炉.
https://www.nsr.go.jp/activity/regulation/reactor/haishi/sochichu_kenkai.html. (参照2019-12-24).
- 3) 日本鑄鍛鋼会. 日本鑄鍛鋼会規格(JCSS・JFSS)について.
<http://jscfa.or.jp/doc.php>. (参照2019-12-11).
- 4) ㈱日本製鋼所ほか. 原子力発電所等金属廃棄物利用技術開発3ヵ年研究成果の取りまとめ.
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2017/27-29fy_kanri_kinnzoku_torimatome.pdf. (参照2019-12-13).



長江拓哉

エンジニアリング事業部門
原子力・復興センター 技術部



宮田賢作

エンジニアリング事業部門
原子力・復興センター 技術部



中山準平

エンジニアリング事業部
原子力・復興センター

(技術資料)

ジオポリマによる放射性廃棄物の固化技術の開発

宮田賢作*・西村 務・吉田誠司・西尾隆志・古館佑樹・中山準平

Geopolymer Technology for Solidifying Radioactive Waste

Kensaku MIYATA・Tsutomu NISHIMURA・Satoshi YOSHIDA・Takashi NISHIO・Yuki FURUDATE・Junpei NAKAYAMA

要旨

放射能濃度が高い放射性廃棄物の処理に適用する目的で、原料に水を添加することなく、粉末のみでジオポリマ固化体を製作する方法を検討するための製作試験を実施した。一軸圧縮強度の目標値である1.47 MPa以上の均質なジオポリマ固化体を製作する方法として、ジオポリマ固化反応に必要な水をより長時間固化体中にとどめておくために、蒸発抑制蓋などの使用および約60℃以下の温度で加熱する方法が有効であることが分かった。本稿では、ジオポリマによる固化技術に関する当社の取り組みについて報告した。

Abstract

With the aim of application to the treatment of radioactive waste with high radioactivity concentration, a manufacturing test was conducted to study a method for making a solidified geopolymer using only powder without adding water to the raw material. The goal was to produce a homogeneous solid body of geopolymer with a uniaxial compressive strength greater than the target value of 1.47 MPa. Water is necessary for the solidification reaction of the geopolymer, and it was found that using an evaporation control lid and heating at a temperature of approximately 60°C or lower are effective in keeping water in the solidified body for an extended period of time. This paper reports on Kobe Steel's efforts regarding the solidification technology using geopolymers.

キーワード

ジオポリマ, 放射性廃棄物, 固化体製作方法, 低含水率の固化体, 水和物を含んだ粉末

ま え が き = 原子力発電所などの原子力施設で発生する放射性廃棄物は一般に、ドラム缶などの容器の中に入れて固化される。固化するための固化材としてセメントを使用し、放射性廃棄物と混合して容器の中に固める。このセメント固化法は、原子力施設内での処理が比較的容易なことから、多くの原子力施設で標準的な固化法として用いられている¹⁾。

セメント固化法は、水和反応により水和物を生成して硬化する反応を利用するため、将来、放射能濃度が高い廃棄物へ適用することを考えると、水和物に不可分に含まれている水分および添加した水分が放射線分解されて発生する水素が課題となる。水素が滞留して万一爆発限界濃度を超えると爆発を起こす可能性があるからである。この対策としては、セメントと混合する放射性廃棄物の放射能濃度あるいは量を予め制限して水素の発生量を抑制することが考えられる。この場合、放射能濃度の高い放射性廃棄物をセメントで固化する場合には、容器に充填する放射性廃棄物の量を制限することになる。ただし、容器に充填する放射性廃棄物の量を制限すると容器の数が増大し、放射性廃棄物の輸送費用、および処分費用が増大するという問題がある。

この問題に対し、セメントに代わる固化材の適用可能性としてジオポリマが候補として挙げられる^{2)~5)}。セ

メントは水和反応により固化するが、ジオポリマは重合反応が主となる。このため、固化体中に不可分な水が含まれることがない。セメント固化に比べてジオポリマは材料費が高価であるものの、含水率を低くすることができる点においてセメント固化法の代替法に適する^{2~5)}。

しかしジオポリマでも、放射能濃度が高い放射性廃棄物に適用するためにはさらなる含水率の低下が求められる。そこで当社は、ジオポリマ材料や反応促進材としてのアルカリ刺激材に水和物を含んだ粉末を用いることを考えた。すなわち、自由水を用いて製作する一般的なジオポリマ固化体よりも含水率を抑えられることが期待できる。当社では、粉末を原料としたジオポリマ製作方法を放射性廃棄物に適用するために、廃棄物としての処分基準である均質性および強度を満足する製作方法の開発に取り組んできた。

本稿では、ジオポリマによる固化技術に関する当社の取り組みについて概説する。

1. ジオポリマによる固化技術

ジオポリマとは、けい酸ナトリウム溶液（水ガラス）をモノマ源とする無機ポリマの一つである。このジオポリマは、たとえばけい酸ナトリウム（ Na_2SiO_3 など）と水（ H_2O ）、アルミナ（ Al_2O_3 ）および水酸化ナトリウム

* エンジニアリング事業部門 原子力・復興センター 技術部

(NaOH) を混合して生成する。水は、けい酸ナトリウムを溶解して水ガラス（けい酸ナトリウム溶液）にするためのものである。アルミナはSi同士を化学結合させるバインダとなる。水酸化ナトリウムは、アルミナに含まれるアルミニウムを溶出させて水ガラスとの反応を促進させる反応促進剤である。これらの反応によってSi-O-Al結合が生じ、ジオポリマが生成される。当社では従来、ジオポリマによる放射性廃棄物の固化方法を開発してきた⁶⁾。本章ではその製造法を概説する。

ジオポリマによる固型化工程は以下の三つの工程から成る。

- ①ジオポリマと放射性廃棄物とを混合する混合工程。
- ②上記混合物を100℃以上150℃以下の温度で加熱することによって混合物から水分を除去しながら混合物を固化させていく第1加熱工程。
- ③混合物を300℃以上400℃以下の温度で加熱することによって混合物から水分をさらに除去していく第2加熱工程。

混合工程(①)の後、まず100℃以上150℃以下の温度でスラリー状の混合物を加熱する工程(②)を設けた。この加熱工程により、内部の水分の大部分が蒸発によって除かれるまでに混合物の外周部(表面)のみが硬く緻密となってしまうということが防止される。すなわち、外周部(表面)から中心部へ向かってスラリー粘度を全体的に増加させていくことができる。その結果、固化体の爆裂および強度低下が抑制され、最終的に高強度の固化体とすることができる。また、その後の300℃以上400℃以下の温度での加熱により(第2加熱工程)、残留している水分を除去することができる。すなわち、低含水率の固化体とすることができる。

上記工程による固化体製作方法を検証するため、つぎのような試験を実施した。まず、試験に用いる模擬廃棄物は、代表的な放射性廃棄物であり金属酸化物の粒子(クラッド)の主成分である酸化鉄(Fe_2O_3)とした。原料であるスラリーとの配合率は、模擬廃棄物(酸化鉄):52.9 wt%, アルミナ:4.53 wt%, 水ガラス($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$):23.3 wt%, 水:11.6 wt%, 水酸化ナトリウム:7.7 wt%とした。この配合でジオポリマと模擬廃棄物の混合物を常温下で製作し、 $\phi 25 \times 30$ mmの固化体を製作した(図1)。第1加熱工程での加熱条件は、100℃にて20時間、その後、150℃にて24時間とした。つづく第2加熱工程では、300℃にて24時間の加熱とした。

製作した固化体の含水率を950℃まで加熱したときの重量減少から計算した。固化体の9箇所から試片を採取してそれぞれの加熱前後の重量を測定した。その結果、含水率は0.39~0.46 wt%であることが分かった。

また、この固化体の一軸圧縮強度は13~46 MPaであり、廃棄体に要求される圧縮強度の基準である1.47 MPa以上を満足した。

第1加熱工程および第2加熱工程の必要性に関する比較試験を行った。ジオポリマと模擬廃棄物との混合物(スラリー)を同じ配合で常温下で製作し、この混合物を室温から600℃まで一工程で加熱した。その結果、加

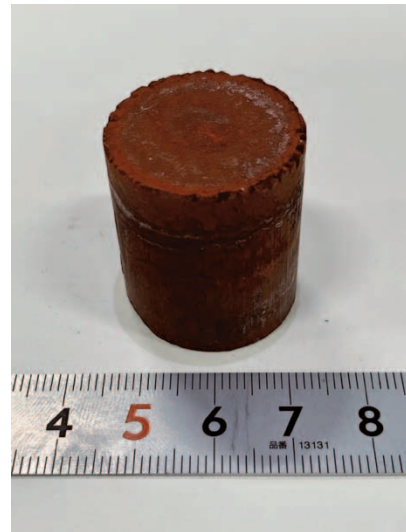


図1 固化体の全体写真
Fig.1 Appearance of solidified body

熱途中で固化体は爆裂して小片に破壊された。この爆裂は、固化体の内部温度が315~350℃の範囲で数回起こった。

以上の試験結果から、第1および第2加熱による製造法は一般的な放射性廃棄物に適用可能であると考えられる。

2. 粉末/低含水ジオポリマ固化法の開発

粉末のみで製作することができるとさらなる低含水率となり、放射能濃度が高い廃棄物への適用が期待できる。いっぽう、タイルなどの建材分野では、水和物を用いることにより、反応場を形成するための水として水和水を機能させる方法が一般的に知られている²⁾。そこで当社は、この水和物を用いる方法について着目した。

しかし、粉末のみの原料でジオポリマ固化体を製作する方法について、以下の問題点がある。

ジオポリマによる固化方法は前章で述べたように、固化体中の水を除去するための加熱工程を有することが一般的である。粉末の場合、加熱工程における固化体中の温度不均一が局所的に急激な反応を引き起こしたり、反応が不十分な領域が生じたりする可能性がある。このため、放射性廃棄物を廃棄体として処分する際には処分基準に適合できない可能性が考えられる。

したがって、ジオポリマ固化反応時の加熱による急速な水の蒸発を抑制することが重要である。

本章では、粉末のみを原料としたジオポリマによる固化体の製作試験結果について報告する。

2.1 ジオポリマ固化体の製作条件

ジオポリマ固化体の製作条件を表1に示す。模擬廃棄物は硝酸塩廃液を処理して発生する炭酸ナトリウム(Na_2CO_3)とし、混合比は50 wt%とした。また、ジオポリマの材料であり、反応に必要な水および反応促進剤の要素として機能するメタけい酸ナトリウム九水和物($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)を37 wt%, もう一つのバインダとしてのアルミナ(Al_2O_3)を13 wt%混合した。

ジオポリマ固化体の製作工程は、混合工程、充填工程、加熱工程、および養生工程で構成される。

表 1 製作条件
Table 1 Solidifying conditions

		Condition 1	Condition 2	Condition 3
Mixing ratio (wt%)	Na ₂ CO ₃ (Waste)	50	50	50
	Na ₂ SiO ₃ ·9H ₂ O (Material)	37	37	37
	Al ₂ O ₃ (Material)	13	13	13
Weight (g)		250	250	250
Preset temperature (°C)		55	55	55*
Heating time (h)		65	65	65
Lid		Absence	Presence	Presence

* Heat the first hour at 60°C

(1) 混合工程

ジオポリマの原料として、アルミナを入れたステンレス製ビーカーにメタけい酸ナトリウム九水和物を少量ずつ投入し、塊状のものがなくなるまで混合機で混合した。つぎに模擬廃棄物である炭酸ナトリウムを加え、塊状のものがなくなるまで混合機で混合した。

(2) 充填工程

ジオポリマの原料と模擬廃棄物との充填混合物を硬質な紙製の型枠（φ 50 × 80 mm）に充填した。実際の放射性廃棄物の固型化においては、容器としてドラム缶などの使用が想定されるため、型枠内面に水を通さない樹脂製のフィルムを取り付けた（図 2）。充填は少量ずつ行い、都度タッピングすることで嵩（かさ）密度を高めた。また、加熱工程中の急速な水の蒸発を抑制するための蓋状の機構（以下、「蒸発抑制蓋」という）を採用した。

(3) 加熱工程

図 3 に示す加熱装置を用いて充填混合物を加熱した。加熱時は、充填混合物の内部温度（T1）および加熱装置内温度（T2）を測定した。T1 が表 1 の試験条件に示した温度となるように T2 を制御した。

充填混合物の加熱温度の設定値は 55°C とした。ただし、条件 3 のみ加熱初期 1 時間の温度を 60°C に変更して加熱した。温度 100°C 以上で加熱を行うと水分が急速に蒸発し、混合物の表面部のみで固化反応が進む。このため、表面部が硬く緻密となるいっぽうで、混合物の内部には大量の水分が残存することがある。閉じ込められた混合物の水分は外部に放散されなくなり、不均質なジオポリマ固化体が生成する可能性がある。また、40°C より低い温度で加熱を行うと、ジオポリマ固化反応の進行や水分の除去が適切に行われず、余剰な水分を含んだジオポリマ固化体が生成する可能性がある⁴⁾。

(4) 養生工程

養生工程は、加熱工程後の生成物を養生してポリマ化反応を進行させる工程である。本試験では、加熱工程を経て適度にジオポリマ固化反応が進行した生成物を常温常圧環境下に 110 日間静置した。

2.2 試験結果

2.2.1 固化体の均質性

固化体の均質性は、作製したジオポリマ固化体の外観を観察することによって評価した。条件 1 の固化体は蒸発抑制蓋を被（かぶ）せていなかったため、上部から

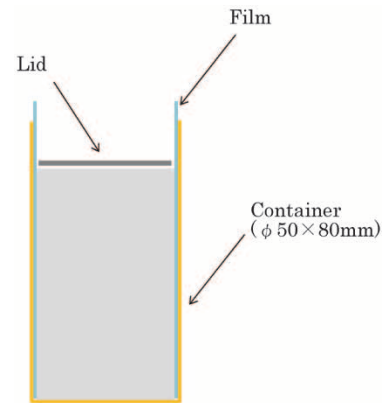


図 2 試験体
Fig.2 Test container

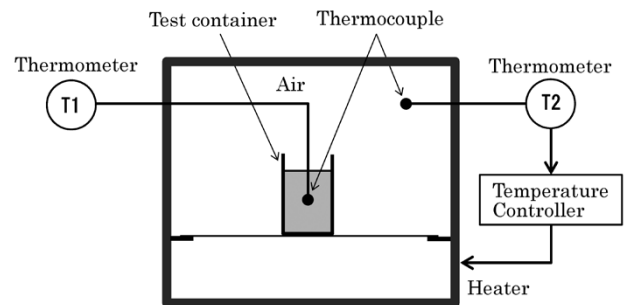


図 3 固化体製作試験における加熱装置
Fig.3 Heating apparatus for test of producing solidified body

1/4 程度が二層化した不均質なものであった。外観上は、上部は下部より乾燥していた。これは、ジオポリマ固化反応に必要な水分量が不足していたため不均質な固化体になったものと考えられる。

条件 2 の固化体は蒸発抑制蓋を被せていたが、上部から 1/7 程度が二層化していた（図 4）。この時の温度履歴を図 5 に示す。

いっぽう、条件 3 の固化体は条件 2 と同様に蒸発抑制蓋を被せ、加熱初期の 1 時間の温度を 60°C に変更したところ、外観上、二層化は見られなかった（図 6）。この時の温度履歴を図 7 に示す。条件 3 の固化体は、加熱初期の 1 時間は 60°C で加熱したことにより、その内部温度は条件 2 の固化体に比べて高くなっている。

これらの結果から、加熱開始直後に Na₂SiO₃·9H₂O から脱離した結晶水の量は条件 3 の固化体の方が多く、固化体上部の水分が多かったものと考えられる。すなわち、条件 3 の固化体は、ジオポリマ固化反応に寄与する



図4 条件2の固化体（養生工程後）

Fig.4 Solidified body in condition 2 (after curing process)

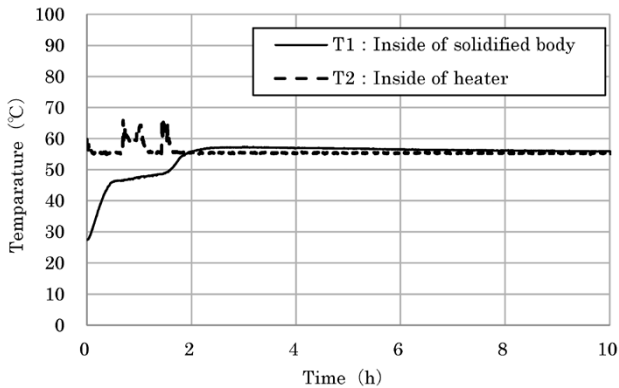


図5 条件2の温度履歴

Fig.5 Temperature history of condition 2



図6 条件3の固化体（養生工程後）

Fig.6 Solidified body in condition 3 (after curing process)

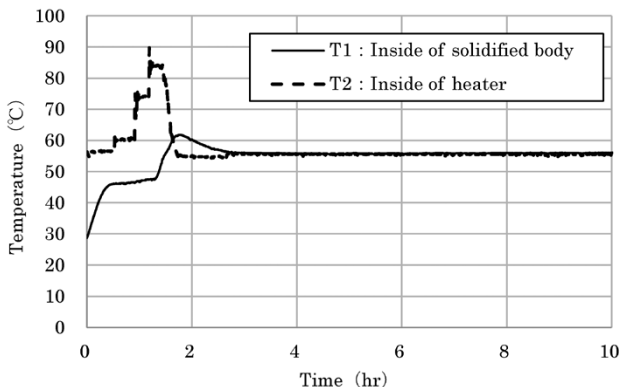


図7 条件3の温度履歴

Fig.7 Temperature history of condition 3

水分量が固化体上部においても十分であったと考えられる。また、この水分が急速に蒸発することを抑制することにより、条件2の固化体と比較してジオポリマ固化体の均質性が向上したものと考えられる。

2.2.2 固化体の圧縮強度

養生工程後に得られたジオポリマ固化体を型枠から取り出し、JIS A 1108に準拠した一軸圧縮強度の測定を行った。条件2の固化体は、荷重が増加していくとともに圧縮方向に亀裂が入ったものの、上部が変形することはなかった。このときの圧縮荷重は1.7 MPaであった。圧縮試験終了時の固化体の外観を図8に示す。

条件3の固化体は、荷重の増加とともに上部が変形して崩れ始め、さらに荷重を付加していくと圧縮方向に亀裂が入った。固化体上部が崩れた後の固化体の最大圧縮荷重は5.6 MPaであった。圧縮試験終了時の固化体の外観を図9に示す。

これらの圧縮試験結果から、条件2および条件3のいずれも圧壊時の荷重は廃棄体の処分基準値である1.47 MPa以上であることが分かった。

2.3 考察

前節の試験結果より、蒸発抑制蓋がジオポリマ固化反応時の加熱による急速な水の蒸発を抑制したと考えられる。これによって、固化反応に必要な水をより長時間固化体中にとどめておき、固化反応の進行が不十分な領域が生じることを抑制することができたと考えられる。

また、固化体内部の上下間で水分蒸発速度が異なると

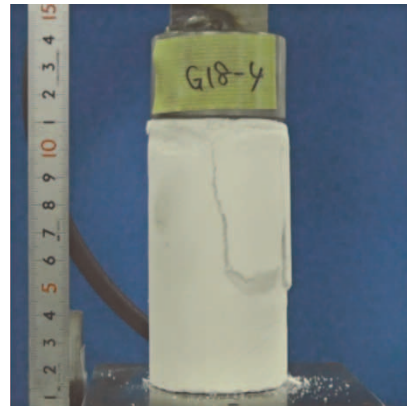


図8 圧縮試験によって圧壊した条件2の固化体
Fig.8 Collapsed solidified body of condition 2 by compression test

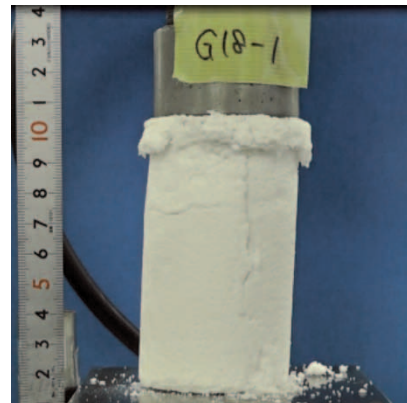


図9 圧縮試験によって圧壊した条件3の固化体
Fig.9 Collapsed solidified body of condition 3 by compression test

内部が不均質になって二層構造となることが分かった。そこで、加熱工程における初期温度を約60℃以下にすることによって固化体内部の急激な温度上昇を抑制でき、二層構造となるのを抑制できることが分かった。すなわち、加熱工程における温度が重要と考えられる。

3. 課題と今後の取り組み

今後、200 Lドラム缶相当の実規模固化体を製作する場合における課題を以下に示す。

(1) 廃棄物および原料の混合方法

今回実施した製作試験では小型の混合機を用いて混合した。実規模固化体を製作する場合においても、均質な固化体が製作可能な廃棄物および原料の混合方法を開発する必要がある。

(2) 廃棄物および原料の混合比

今回実施した製作試験では、模擬廃棄物である炭酸ナトリウム、原料であるメタけい酸ナトリウム九水和物、アルミナの混合比は、50 wt %、37 wt %、13 wt %とした。実規模固化体を製作する場合においても、同様の混合比で均質な固化体が製作可能かを確認する必要がある。

(3) 加熱温度および加熱時間

今回実施した小型固化体の製作実績を基に、実規模固化体を製作する場合における適切な加熱温度および加熱時間を確認する必要がある。

(4) 養生時間

実規模固化体において、ポリマ化反応が十分に進み、均質な固化体が製作可能な養生時間を確認する必要がある。

むすび = ジオポリマの固化体を対象に、原料に水を添加することなく粉末のみで製作する方法の開発を目的に製作試験を実施した。試験の結果、一軸圧縮強度の目標値である1.47 MPa以上の均質なジオポリマ固化体を製作する方法として、ジオポリマ固化反応に必要な水をより長時間固化体中にとどめておくために、蒸発抑制蓋などの使用、および加熱温度を約60℃以下とする方法が有効であることが分かった。

今後、200 Lドラム缶相当の実規模固化体を製作する

場合には、廃棄物および原料の混合方法および混合比、加熱温度および加熱時間、養生時間について最適値を確認する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 北海道電力株式会社. 充填固化体の標準的な製作方法改訂8版. 北海道電力, 2016, 72p.
- 2) 吉元昭二ほか. あいち産業学技術総合センター 研究報告2017. 2017, p.30-33.
- 3) 福原 徹ほか. あいち産業学技術総合センター 研究報告2016. 2016, p.66-69.
- 4) 八谷英佑ほか. 農業農村工学会論文集. 2019, Vol.87, No.1, p. II_39-II_45.
- 5) 岡戸仁志ほか. 粘土科学討論会講演要旨集. 2017, Vol.61, A18, p.60-61.
- 6) 株式会社神戸製鋼所. 中山準平. 放射性廃棄物の固化体製造方法. 特開2014-035202.



宮田賢作

エンジニアリング事業部門
原子力・復興センター 技術部



西村 務

エンジニアリング事業部門
原子力・復興センター 技術部



吉田誠司

エンジニアリング事業部門
原子力・復興センター 技術部



西尾隆志

エンジニアリング事業部門
原子力・復興センター 技術部



古館佑樹

エンジニアリング事業部門
原子力・復興センター 技術部



中山準平

エンジニアリング事業部門
原子力・復興センター

(技術資料)

老朽化・遺棄化学兵器の制御爆破処理

北村竜介*

Destruction of Old or Abandoned Chemical Weapons by Controlled Detonation

Ryusuke KITAMURA

要旨

世界でストックパイル化学兵器の処理は終息に向かいつつあるが、ノンストックパイルの処理は今後も続く。老朽化化学兵器や遺棄化学兵器などのノンストックパイル化学弾を分解することは非常に危険で困難である。しかし、制御爆破処理では化学弾を分解せずに処理できるため、老朽化化学兵器や遺棄化学兵器の処理に適している。制御爆破処理では補助爆薬の爆轟により発生する衝撃波や高温高压状態を利用して化学弾を破砕し、内蔵された化学剤と火薬類を破壊する。当社が開発した爆破チャンバと、それを中心とする化学兵器制御爆破処理システムを用いて、2004年以来、国内外で多くの老朽化化学兵器や遺棄化学兵器が廃棄処理されている。本稿では、開発した化学兵器制御爆破処理システムの概要を紹介する。

Abstract

While a large part of the world's stockpile of chemical weapons has been destroyed already, the destruction of non-stockpiled chemical weapons will continue in the future. Dismantling non-stockpiled chemical munitions such as old/abandoned chemical weapons is a very difficult task and involves a high risk of accidents. Controlled detonation is suitable for old/abandoned chemical weapons, since it can destroy chemical munitions without prior dismantling. In controlled detonation, the shells of chemical munitions are fragmented, and the chemical agents and explosives filling the shells are destroyed by the shock wave, as well as by the high-pressure and high-temperature environment produced by the detonation of the donor charge. A detonation chamber and a controlled detonation system, whose main component is the detonation chamber, have been developed and used in destroying many old/abandoned chemical weapons in and out of Japan since 2004. The controlled detonation system and destruction of chemical weapons are outlined in this report.

キーワード

化学兵器, ノンストックパイル, 遺棄化学兵器, 老朽化化学兵器, 破壊, 処理, 制御爆破, 爆轟, 爆破チャンバ

ま え が き = 化学兵器が最初に使用されたのは1915年、第一次世界大戦中のことである。それ以来、化学兵器は多くの国で開発、製造、保有、使用された。過去に戦場となった地域では今も不発弾として見つかっている。また、他国に遺棄され、あるいは自国内に投棄された化学兵器が陸域のみならず水域からも発見され、住民の安全や健康のみならず地域の環境や経済活動上の問題となっている。

当社は、1997年の化学兵器禁止条約発効により日本が中国での遺棄化学兵器処理の義務を負ったことを受け、エンジニアリング部門にて当該処理事業への参入を目指した技術調査や開発を進めてきた。そして屈斜路湖（北海道）で発見された旧日本軍の化学弾の処理を2000年に受注・実施して以来、いろいろな方法で化学兵器処理を行ってきた。なかでも、自社開発した制御爆破処理システム DAVINCHTM（注）によって多くの老朽化した化学兵器・遺棄化学兵器を無害化処理し、また制御爆破処理設備を顧客にも納入してきた。

脚注) DAVINCHは当社の登録商標である。

本稿では当社の DAVINCHTM システムを紹介するとともに、化学兵器と DAVINCHTM システムによる化学兵器処理を概説する。

1. 化学兵器

1.1 化学兵器とは

化学兵器は、広義には化学物質を使って人間を殺傷または無力化するための兵器といえる。毒性の高い現代の化学物質が大量破壊兵器として最初に使用されたのは前述のとおり第一次世界大戦であった。最初は、塩素ガスを風に乗せて敵に向かって流すだけであったが、すぐに有毒な化学物質（化学剤）を充填した砲弾を火炮で発射するなどして効率よく敵陣に届けるようになった。砲弾には弾殻を開いて化学剤を飛散させ、蒸発させるための炸薬（さくやく）などの火薬類も内蔵されている。

その後も化学剤とそれを敵に届ける手段（砲弾、航空機から投下する爆弾など）を各国が競って開発し、化学兵器は急激に多様化した。化学剤として有名なホスゲン（分子式： COCl_2 、NATOコード：CG）やマスタードガス（分子式： $(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Cl})_2\text{S}$ 、NATOコード：HD）な

* エンジニアリング事業部門 CWDセンター プロジェクト部

どが第一次世界大戦中すでに使われていた。さらに第二次世界大戦で旧日本軍は、HDとルイサイト（分子式： $\text{CHCl}=\text{CHAsCl}_2$ ，NATOコード：L）の混合物をさい剤、ジフェニルシアノアルシン（分子式： $(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{AsCN}$ ，NATOコード：DC），ジフェニルクロロアルシン（分子式： $(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{AsCl}$ ，NATOコード：DA）をあか剤と呼び、大量に製造した。第二次世界大戦後の冷戦下では、さらに毒性が強いサリンやVXなども旧ソ連や米国などで大量に製造・備蓄された。

1.2 化学兵器禁止条約

「化学兵器の開発、生産、貯蔵及び使用の禁止並びに廃棄に関する条約」（以下、化学兵器禁止条約という）は1992年に採択され、1997年に発効した。現在の締約国は193箇国であり、日本は1993年に署名し1995年に批准している。

化学兵器禁止条約では

- ・締約国は化学兵器の開発、生産、取得、保有、移譲及び使用を行わないこと
- ・保有する化学兵器及び化学兵器生産施設を申告し、原則として条約発効後10年以内（2007年4月まで；発効当時）に廃棄すること
- ・締約国からの申告を受け、査察などにより条約の遵守（じゅんしゅ）を検証する機関として化学兵器禁止機関（OPCW）を設立すること

などが定められている¹⁾。

1.3 ストックパイルとノンストックパイル

使わずに備蓄されている化学兵器をストックパイルと呼ぶ。化学兵器禁止条約の発効後、化学兵器を保有する締約国ではストックパイルの処理が進められた。現在までに全世界で約72,000 tの化学剤がOPCWに申告され、そのうち約70,000 t（97%以上）が廃棄された。

これに対し、地中や水中に投棄されていたものや不発弾など、保管されていたもの以外の化学兵器をノンストックパイルと呼んでいる。ノンストックパイルは存在が明らかになっていないものが多く、廃棄が進んでいない。

1.4 老朽化化学兵器と遺棄化学兵器

化学兵器禁止条約では、締約国は自国内の老朽化した化学兵器（以下、老朽化化学兵器という）や他の締約国の領域内に遺棄した化学兵器（以下、遺棄化学兵器という）を廃棄することも定められた。

老朽化化学兵器とは、1925年以前に生産されたもの、または1925～1946年に生産されたもので化学兵器として使用できないまでに劣化したものと定義される¹⁾。日本国内で発見される旧日本軍の化学兵器のほか、ベルギーやフランスなどで発見される第一次世界大戦中の化学兵器がこれにあたる（図1）。

また遺棄化学兵器は、1925年1月1日以降に、ある国が他の国の領域内に当該他の国の同意なく遺棄した化学兵器と定義されている¹⁾。中国で発見される旧日本軍の化学兵器はこれにあたる。

これらの老朽化化学兵器や遺棄化学兵器はほとんどの場合、ノンストックパイルとして発見される。



図1 老朽化化学兵器の例

Fig.1 Examples of old chemical weapons

2. 化学兵器の処理

2.1 種々の処理方法

不発弾となった化学兵器や敗戦国の兵器などの廃棄に際して、過去においては海中に投棄されることが多かった。しかし、海洋投棄が国際的に禁止されたことに加えて、化学兵器禁止条約の発効によって大量のストックパイルを保有する国家が短期間に廃棄する必要に迫られたことなどもあり、種々の処理方法が開発されてきた。主な処理方法には、中和、焼却、爆破がある。

中和法は、反応槽の中で化学兵器の化学剤に処理用の薬剤を混合して化学反応によって分解する処理方法である。また焼却法は、高温の焼却炉で化学剤を燃焼分解する方法である。これら二つの処理方法は化学剤単独の大量処理に適している。このため、タンクなどに貯蔵されたストックパイルの化学剤を廃棄する際に多くの国で使われてきた。米国では1990年からほとんどの化学兵器処理施設で液体焼却炉による大量焼却処理が行われた。最近ではシリアの化学兵器が地中海の米国船上で中和処理されている。当社でも北海道：屈斜路湖（2000年）と神奈川県：寒川（2004年）で旧日本軍の化学剤を中和処理した経験を持つ。

いっぽう、化学剤と火薬類を分離して個別に処理するために化学砲弾や爆弾などを解体することは、化学剤への暴露と火薬類の爆発との二重の危険を伴う。さらに、地中や海中に長期間放置されたノンストックパイルでは砲弾などが腐食・変形しているため、解体が困難である。

2.2 爆破処理法

爆破処理法では弾を爆破することによって化学剤と火薬類の両方を破壊できるため、老朽化化学兵器や遺棄化学兵器などのノンストックパイル化学弾の処理に適している。

爆破処理には加熱爆破と制御爆破の二方式がある。加熱爆破方式では化学弾は加熱爆破炉の中で加熱され、化学剤が熱分解される。さらに、炸薬が点火されて爆燃し、弾殻から放出された熱分解ガスや未分解の化学剤蒸気を後段の二次燃焼炉などのガス処理装置で分解・除去する。加熱爆破炉は後段のガス処理装置と常時連通しているた

め、耐爆性能上、一度に投入できる化学弾の爆薬量への制約が厳しい。いっぽうで弾の炉投入頻度を増やすことによって時間あたりの処理量を増加できるため、比較的小型の弾の大量処理に適している。

制御爆破方式では、化学弾に補助爆薬を取り付けて耐爆性の鋼製密閉容器（爆破チャンバ）の中で爆轟（ばくごう）させ、炸薬と化学剤を破壊する。耐爆性能の高い容器で処理するため大型の弾の処理が可能であること、バッチ処理のため化学弾の破壊を確認しやすく異常発生時に対処しやすいこと、などの利点がある。また、爆破チャンバの大型化・高強度化によって一度に処理できる爆薬量を増加させ、弾の大量処理も可能とすることができる。

当社は、2000年に屈斜路湖で化学爆弾を切断して化学剤を中和処理し、炸薬を爆破処理した実績を持つ。その後、压力容器製造技術を応用した爆破チャンバなどの開発を続け、化学弾を切断することなく処理可能な制御爆破法によるDAVINCH™システムを実用化した。

3. 制御爆破処理

3.1 DAVINCH™システム

DAVINCH™ (Detonation of Ammunition in a Vacuum Integrated Chamber) は当社の制御爆破システムである。その処理プロセスの概要を図2および図3に示す。化学弾に補助爆薬を取り付けて爆破チャンバの中に設置し、爆破チャンバ内を真空ポンプで減圧する。適量の酸素を添加してバルブを閉止し、爆破チャンバを完全に密閉する。その後、遠隔操作によって補助爆薬を起爆し、化学弾を爆破処理する。密閉された爆破チャンバは爆発の圧力や生成ガスを封じ込め、万一未分解の化

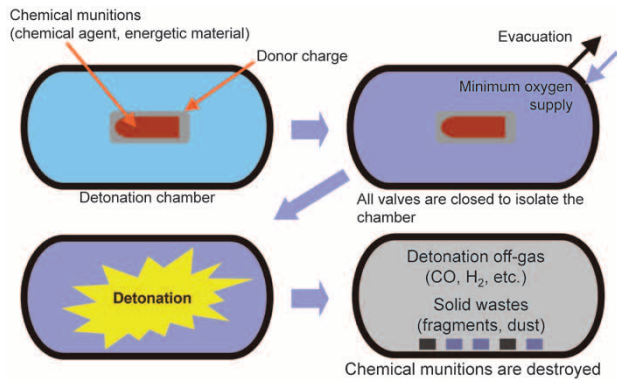


図2 DAVINCH™システムの破壊処理プロセス - (1): 爆破
Fig.2 Destruction process of DAVINCH™ system - (1): detonation

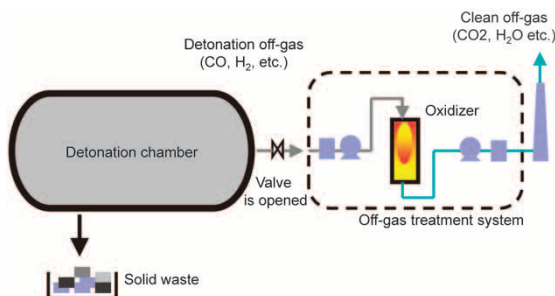


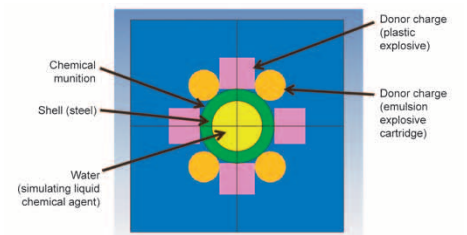
図3 DAVINCH™システムの破壊処理プロセス - (2): オフガス処理
Fig.3 Destruction process of DAVINCH™ system - (2): off-gas treatment

学剤が残っていても環境中に漏らすことはない。減圧下で爆轟させることによって爆破チャンバへの衝撃負荷が緩和され、疲労寿命を延ばすとともに、騒音・振動も軽減される。

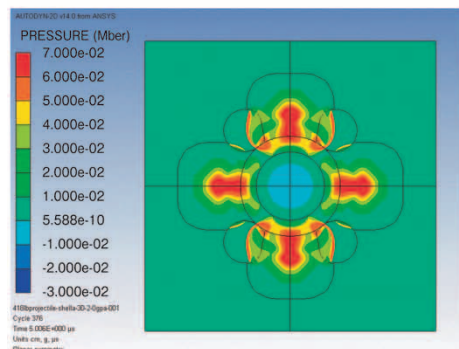
爆破後には水素と一酸化炭素を高濃度に含む爆破生成ガス（オフガス）と弾殻破片やダストなどの固体残渣（ごんさ）とが爆破チャンバ内に残る。爆破チャンバとオフガス処理設備を連結する配管中のバルブが開かれ、オフガスは真空ポンプによって爆破チャンバからオフガス処理設備に送られる。オフガス処理設備においては、オフガス中の粉塵の除去に加えて前述の水素、一酸化炭素などの可燃分を酸化させる。さらに、酸性ガスなどを除去して二酸化炭素、水蒸気、窒素などを成分とする無害な処理済み廃ガスとし、万一化学剤が残留した場合のため活性炭フィルタを通過して大気中に放出する。

3.2 爆破による化学弾の破壊

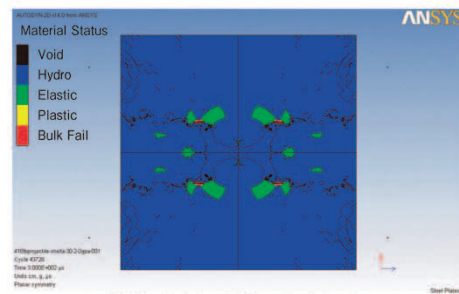
爆薬の爆轟により発生する圧力と温度は、非常に短時間ながらそれぞれ数GPa、数千Kに達する。補助爆薬を起爆すると、爆轟によって発生した衝撃波は弾殻を通過して化学弾内部の化学剤に伝播（でんぱ）し、化学剤分子の化学結合の一部が衝撃波によって切断される²⁾。やがて爆轟から数十～数百μs後に化学弾の弾殻が破碎され、高温・高圧の爆轟生成物に接触することで化学剤は種々の化学反応を起こす。さらに、周囲で長時間（～1



(1) Before detonation (simulation model, cross section of chemical munition with donor charge)



(2) Pressure contour at 5μs after detonation



(3) Material status at 300μs after detonation

図4 爆破処理時の化学弾の挙動の数値解析
Fig.4 Numerical simulation of behavior of chemical munition in destruction by detonation



図5 ベルギー軍プールカペッレ基地に納入した爆破チャンバ
Fig.5 Detonation chamber delivered to Poelkapelle, Belgium

秒程度) 続く高温雰囲気中で熱分解や雰囲気中の酸素との反応などにより、ほぼ完全に分解される。

爆破処理時の化学弾の挙動の数値解析を行った。その一例を図4に示す。図4(1)図はその解析モデルである。爆破前の化学弾に補助爆薬として可塑性爆薬とカートリッジ充填されたエマルジョン爆薬とを取り付けた状態を示す。図4(2)図は、補助爆薬の起爆から約5 μ s後の弾の横断面の圧力等高線図を示しており、弾殻内を衝撃波が伝播していることが分かる。起爆後300 μ sには弾殻は粉々に飛び散っている(図4(3)図)。

弾殻越しに伝わる衝撃波によって炸薬も起爆され、爆轟して消費される。すなわち、補助爆薬を用いた爆破により化学弾は破碎され、危険源であった化学剤や炸薬が無害化されることによって破壊が完了する。

3.3 爆破チャンバ

図5は爆破チャンバの例である。爆破チャンバは円筒の両端に半球または半楕円の鏡板がついた鋼製の容器であり、その一端が蓋として開く構造になっている。蓋と本体は油圧駆動のクランプでフランジを締結することによって密閉される。爆破チャンバは二重の円筒構造になっており、内筒は爆破時に飛散する弾殻の破片から外筒を保護し、外筒は爆破の圧力、ガスを封じ込める役割を持つ。内筒は破片による損傷が限度以上に進んだ時には取り換える。外筒は爆破時のひずみ測定などによって疲労損傷を監視し、余寿命を予測しながら使用する。

4. DAVINCH™システムによる制御爆破処理の実績

4.1 荻田港

福岡県荻田港の海底から、あか剤や、きい剤が充填された第二次世界大戦中の旧日本軍の化学弾が発見された。これを受けて当社は、これらの化学弾約3,000発を2004年から2013年にかけて揚収し、DAVINCH™システムによって処理を行った。また、2017年に再び同海域で化学弾の疑いのある物体が1個発見されたため、同じく当社が2018年から2019年初頭にかけて揚収し、DAVINCH™システムにより処理を行った。

4.2 ベルギー

第一次世界大戦の激戦地であったベルギーでは、今も毎年200トンを超える不発弾が発見・回収されており、そのうち約5%が化学弾であるとのことである。ベルギ

ー国防省は化学弾を解体して処理を行っていたが、解体の困難な弾の処理のためにDAVINCH™システムの採用を決めた。

当社は同国西部のベルギー軍Poelkapelle基地にDAVINCH™設備を納入し(図5)、2008年にベルギー軍が同設備を用いた処理を開始した。2018年末までの通算で、主にDCまたはDAが充填された化学弾約4,400発、ヒ素化合物を含む発煙剤が充填された通常弾9,300発の合計約13,700発が処理され、現在も処理は続けられている。

4.3 フランス

ベルギーと同様に第一次世界大戦の不発弾が数多く発見されるフランスでも、国防省によりMailly-le-campの軍用地でSECOIAという名称の老朽化学兵器処理施設プロジェクトが進められている。DAVINCH™システムがSECOIA施設の中心部に採用され、当社はフランスの元請企業から受注して設備を納入した。現在、元請企業によって処理運転開始に向けて準備が進められている。

4.4 中国遺棄化学兵器処理

中国では第二次世界大戦中に旧日本軍が残した遺棄化学兵器が各地で発見され、日本政府がその処理を行っている。当社は2010年より、南京、武漢、石家庄、ハルビンにおいて移動式のDAVINCH™システムによって処理を実施している。また2014年からは、吉林省ハルバ嶺にて固定式のDAVINCH™システムによって処理を実施しており、近々、大型のDAVINCH™システムも納入して処理を加速することとなっている。

むすび=約100年前に使用が始まった化学兵器は、戦争で非人道的な被害を生み出しただけでなく、現在も各地で不発弾などが発見され住民の生活や環境を脅かしている。そうしたなか、当社が開発したDAVINCH™システムによって、2004年から現在まで国内外で多くの老朽化学兵器、遺棄化学兵器が無事故で処理されてきた。

今後も当社は、爆破チャンバとプロセス・設備の設計を高度化し、化学剤の漏洩(ろうえい)・被曝(ひばく)リスクの最小化、汚染拡散防止などの対策を改善することによって処理の安全性と効率を向上させていく所存である。

参考文献

- 1) Chemical weapons convention. 27 September 2005.
- 2) 松永猛裕ほか. 平成12年度環境保全研究成果集. 環境省, 2001, p.56-1-56-48.



北村 竜介

エンジニアリング事業部門
CWDセンター プロジェクト部

(解説)

化学兵器処理用爆破チャンバの設計

林 浩一*

Design of Detonation Chamber for Destructing Chemical Warfare Materials

Koichi HAYASHI

要旨

爆破チャンバは内部で化学兵器を数十kgの爆薬で爆破処理する設備である。耐破片性、操作性、密閉性などの性能を満足するための構造の制限がある。基本の頑健性に対する構造設計には、爆破衝撃波が瞬間の動的荷重であるため、静的圧力を対象とした通常の圧力容器の設計規格は適用できない。近年ASME（米国機械学会）より特別規格「衝撃荷重を受ける圧力容器」が発行され、これを設計指針としている。すなわち、動的圧力解析と動的応力・ひずみ解析を実施し、疲労損傷や局部ひずみ制限など各破壊形態について評価する手法により詳細構造設計が可能となった。ここでは、その設計手法の実践例も含めて紹介する。

Abstract

A detonation chamber is a device for destroying chemical warfare materials by detonation, using tens of kilograms of explosives in the process. Special structural features are required to satisfy fragment resistance, operability and leak tightness. The normal design code for static pressure vessels cannot be applied to the basic structural design of the robust detonation chamber because the detonation shock wave causes instantaneous dynamic pressure. Hence, the Code Case "Impulsively loaded pressure vessels," published recently by the American Society of Mechanical Engineers (ASME), was used as the design guideline. It requires dynamic pressure analysis and dynamic stress and strain analysis, which are used for the evaluation of each mode of failure such as fatigue damage and local strain limit, to allow detailed design. This paper introduces the design features with examples.

キーワード

爆破チャンバ、動的荷重、化学兵器、衝撃波、ASME規格、多層胴、破壊評価、LBBM、完全塑性ヒンジ、局部塑性ひずみ、疲労破壊

まえがき = 爆破チャンバは内部で化学兵器を数十kgの爆薬で爆破処理する設備である。耐破片性・操作性・密閉性などの用途上特有の性能を満足するために構造の制限がある。いっぽうで頑健性に対する構造設計には静的圧力を対象とした通常の設計規格はそのまま適用できない。これは爆破時に発生する爆破衝撃波が動的荷重であるためである。

近年、動的荷重に対する特別規格ASME Section VIII Division3¹⁾ (以下、ASMEという) およびCode Case2564²⁾ (以下、Code Caseという) が発行され、現在はそれらを設計指針としている。当社もこのASME特別規格の

Task Groupに参画し、情報提供などの協力を行っている。この特別規格は、動的圧力解析や動的応力・ひずみ解析を実施し、疲労損傷や局部ひずみ制限など各破壊形態について評価する手法である。設計手順や評価基準が複雑で厳しいが、この適用により一層安全な爆破チャンバの設計や安全評価が可能となった。

本稿では爆破チャンバの構造上の特徴とその設計手法、および設計・評価例について紹介する。

1. 爆破チャンバの構造

爆破チャンバは基本的には鋼製の圧力容器であり、図1

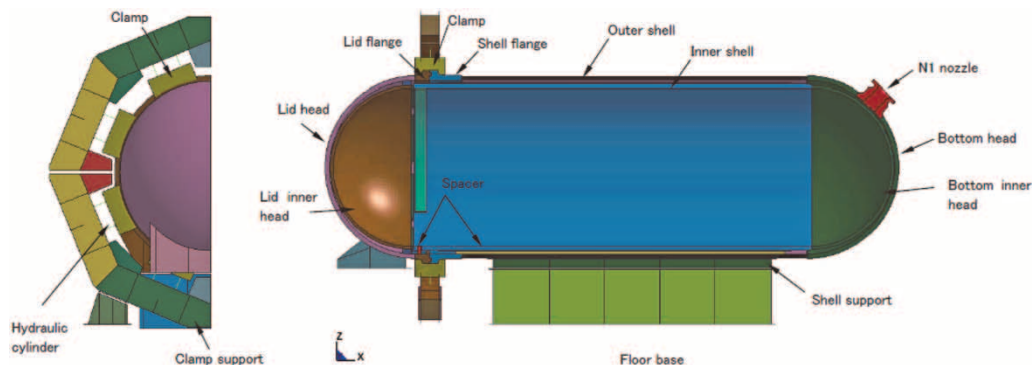


図1 爆破チャンバの構造モデル
Fig.1 Structural model of detonation chamber

* エンジニアリング事業部門 CWDセンタープロジェクト部

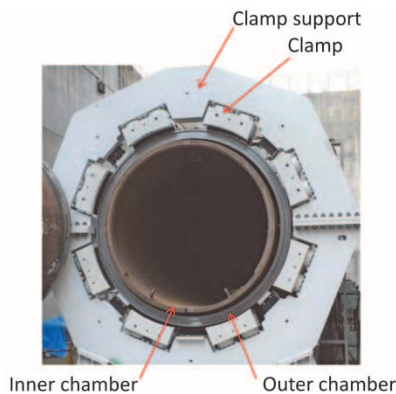


図2 爆破チャンバ内部
Fig.2 Inside view of detonation chamber

にその基本構造モデル図を示す。化学弾を爆破処理するため、耐破片性、操作性、密閉性、および爆破衝撃に耐える頑健性の機能を持つ構造上の特徴を有する。以下にその特徴を概説する。

1.1 耐破片性

爆破処理する化学兵器が弾の場合、爆破時に弾殻の破片が高速で爆破チャンバ内面に衝突して損傷を与える。爆破衝撃波に耐えるべき耐圧部分が損傷によって減肉すると頑健性が低下する。図2に示すように、胴体・鏡部とも外筒・内筒の2重構造とし、圧力容器の密封性は外筒が、耐破片性は内筒がそれぞれ受け持っている。内筒が密閉容器とならないように内筒胴と内筒蓋鏡との間には隙間を設け、衝撃波圧力が内筒部分から外筒内面に漏洩（ろうえい）する構造としている。

内筒は耐破片性の高い800 MPa級の引張強度を有する高張力鋼（JIS SHY685）を使用している。また、損傷を受けた場合は外筒から内筒だけを引き抜いて交換できるような構造としている。

1.2 操作性

化学兵器を爆破チャンバ内部へ搬入・設置し、爆破後に破片を回収する必要がある。このため容器は水平型とし、蓋は油圧駆動でスライドさせて完全開放できるようにしている。図2は開放した状態を示している。爆破処理にあたっては、運転員は爆破チャンバの軸中心に化学兵器を設置する。このため、操作性の観点から直径は3m以下に抑えている。

水平型容器は爆破時に、架台のサポート部に水平方向の大きな動的荷重を受ける。このため初期には大きなひずみやき裂の発生もあった。そこでこうした問題を解消すべく、サポート部を対象に、リブの大きさやそれらの組み合わせ、溶接施工法を解析と実運転データとによって詳細に検討し、改善してきた。図3に架台サポート部の構造改善例を示す。

衝撃波による圧力は伝搬距離の3乗に反比例する。このため円筒容器の場合、同じ容量であれば内径を大きく全長を短くすれば円筒胴体部の応力を低減できる。しかしながら上述の操作性の問題から、水平円筒の直径の大きさは制限される。したがって爆薬処理能力を増加する場合は、円筒の軸方向長さを伸ばすことで対応している。

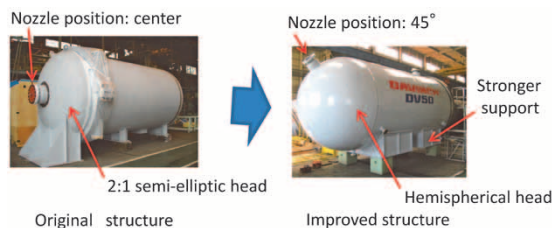


図3 構造の改善例
Fig.3 Example of structural improvement

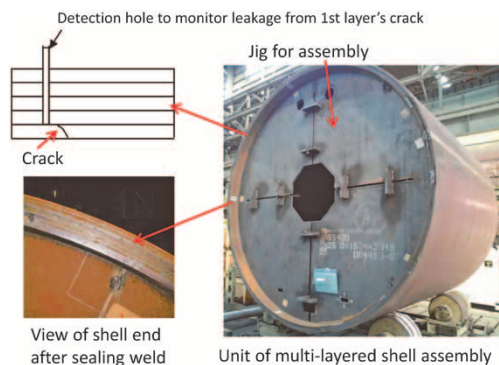


図4 多層構造の外筒胴体
Fig.4 Multi-layered outer shell

1.3 密閉性

化学兵器の処理環境中の許容濃度は低く、爆破時のガス漏洩が抑えられるように稼働蓋も高い密閉性が要求される。蓋は当初、半割リングをボルトで止めた構造であったが、爆薬量増加に伴ってより密閉性の高い油圧クランプ方式に変更した（図2参照）。8個のクランプで蓋側および胴体側フランジを油圧で締め付け、両フランジ間で密封性を保つ。これらの変形挙動も動的解析により確認し、例えばインロー部のはめあい構造を両フランジ部に持たせるなど各種の機構的な改善を実施している。

1.4 爆破衝撃波に対する構造の頑健性

構造の頑健性の評価上最も問題となるのは爆発衝撃波によるぜい性破壊である。これを防止するため胴体部分には、図4に示すように薄板を重ね合わせて厚肉の胴体構造を形成する多層構造としている。この多層構造は、衝撃波を受ける最内層（1層目）にき裂が入った場合でも、その不連続性から2層目より外の層にき裂が伝搬しない。このため、一挙に全厚を貫通したぜい性破壊に至ることはない。また1層目に図4左上図に示すようなき裂が生じた場合、検知孔からのガス漏れを検出することによって1層目のき裂の存在が確認できる構造となっている。いっぽう、鏡やノズル、フランジなどは単肉構造であるが、引張強度よりも耐ぜい性破壊性を重視してSA203Gr.EあるいはSA350LF3などのじん性の高い3.5%Ni鋼を使用している。

内筒胴体はスペーサの上に外筒胴体と軸芯を合わせて設置される。上述のとおり内筒を容易に交換可能とするため外筒に固定はされていない。このため内筒は爆破の衝撃エネルギーによって軸・上下方向に動き外筒に衝突する。この内筒と外筒との衝突時の衝撃荷重についても検討する必要がある。とくに局部的な衝突箇所では外筒に発生する応力が高くなる。これを緩和するために、図

3に示すように鏡の形状を2:1半楕円から半球形に変更するとともに、ノズル位置を鏡中央(当初のノズル位置)から45°上方向へ変更するなどの対策を実施している。

2. 構造設計

衝撃荷重を受ける圧力容器の板厚を設計する場合、最も簡便な方法としては静的圧力容器の計算式を流用し、衝撃荷重を考慮して安全率を大きく(許容応力を小さく)設定して計算する方法が考えられる。しかし安全率の設定には数多くの実績値が必要であり、適切な設定が困難である。また上述の爆破チャンバ固有の構造自体が頑健性においてもクリティカルな箇所であり上記計算式に当てはまらない。そこでASMEの特別規格を設計指針として、当社独自で爆破チャンバの設計と安全性評価手法を確立してきた。

本章ではこの設計および安全性評価手法について概説するとともに、設計爆薬量TNT60 kg相当を超える現在までの最大クラスの爆破チャンバを対象とした設計・評価例を紹介する。

2.1 Design Input

爆破チャンバの設計においては通常の設計規格での「設計圧力」という概念はなく、各爆破チャンバの詳細構造、使用材質および爆薬量(TNT換算量)がDesign Inputとなる。また、爆薬の爆破位置や爆破時間差などの爆破方法もDesign Inputとなる。同じ爆薬量でも、一箇所爆破する場合と3分割で爆破する場合とでは衝撃波の分散状況が異なる。また、使用材料の機械的性質は動的荷重下ではひずみ速度に応じて変わるため、高速引張試験結果を基に得られた応力-ひずみ曲線を使用している。

2.2 爆発解析

衝撃解析ソフトAUTODYN^{®注1)}を用いて解析した爆発時の圧力分布の経時変化を図5に示す。外筒内径

3.0 m、爆薬量64.2 kgTNT換算で3点同時爆破の例(以下、本稿の計算例はすべてこの条件を用いた)であり、時刻の経過とともに圧力波は反射拡散を繰り返していることが分かる。爆薬の起爆箇所や起爆時間などの爆破条件によって圧力分布の変動状況は変わる。また、静的圧力容器は圧力分布が容器内で均一であるのに対し、爆破衝撃波を受けるチャンバの場合は各部位・時刻によって受ける圧力が異なる。したがって部位ごとに圧力時刻歴を求める必要がある。図6に外筒鏡内面の圧力時刻歴の一例を示す。圧力は単調に減衰するのではなく、いくつかのピークを示している。これは、衝撃波が反射拡散を繰り返して当該部位に衝撃力を及ぼしていることを示している。

2.3 動的構造解析

各箇所の圧力の時刻歴を基に衝撃・構造解析ソフトLS-DYNA^{®注2)}によって動的応力やひずみ分布を計算する。圧力と同様に、外筒に生じる応力やひずみ分布も繰

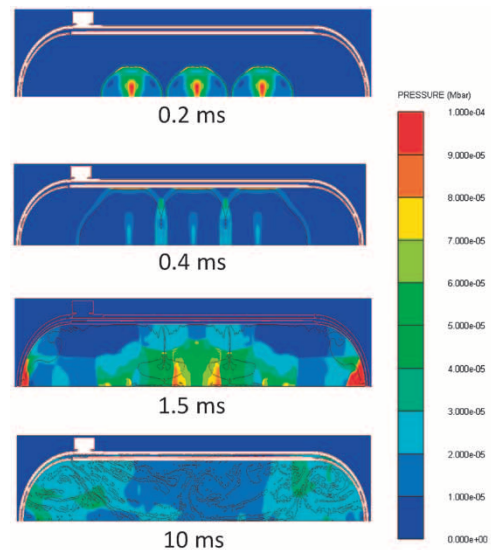


図5 圧力分布の経時変化
Fig.5 Change with time of pressure distribution

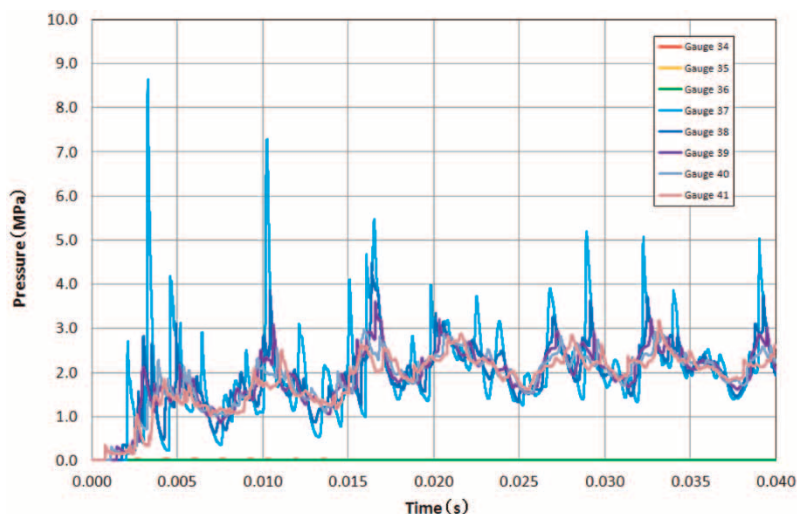


図6 圧力時刻歴(蓋外筒内面)
Fig.6 Time history of pressure of inside surface of outer lid head

脚注1) 爆破をはじめとする広範な衝撃問題解析のために設計された陽解法による解析ソフトウェア。ANSYS[®]社が提供。

脚注2) Lawrence Software Technology Corporationが提供する陽解法による高速非線形動解析ソフトウェア。

り返しピークを示す状態が発生する。これには内筒の衝突による衝撃荷重も考慮されている。解析結果例は以下の評価項目ごとに個別に紹介する。

2.4 ASMEとCode Caseに基づく評価

本節では4種類の破壊モードについてその評価方法の基本概念と評価例を述べる。

2.4.1 Leak before burst mode of failure (LBBM)

LBBMはき裂が高速で一挙に進展して壊滅的破壊が生じないことを示し、ASME KD-141で規定される。多層胴の部分は構造上LBBMとASME KD-810で認められており、単肉の部位は下記(I)と(II)の2項目の両方を満たせばLBBMと判断される。

- (I) 材料全厚 (t) の80%の厚さまでき裂が進展したとしてき裂先端の応力拡大係数 K_I が材料の破壊じん性値 K_{Ic} より小さいこと。
- (II) Remaining ligament (き裂先端から自由表面までの距離) が $(K_{Ic}/\sigma_{ys})^2$ より小さいこと。

以下に詳細な評価方法について説明する。き裂形状はASME KD-410に示す半楕円(だえん)とし、深さ(a)と長さ($2c$)との比を1:3とする。き裂先端の K_I 値は下式³⁾で表される。

$$K_I = [\sigma_0 G_0 + \sigma_1 G_1 (a/t) + \sigma_2 G_2 (a/t)^2 + \sigma_3 G_3 (a/t)^3 + \sigma_4 G_4 (a/t)^4] \sqrt{\pi(a/Q)} \dots\dots\dots (1)$$

$$Q = 1 + 1.464(a/c)^{1.65} \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma(x) = \sigma_0 + \sigma_1(x/t) \dots\dots\dots (3)$$

$\sigma(x)$ は瞬間的に最大となる応力を基に式(3)より求める。

ここで、

$\sigma_0 \sim \sigma_4$: き裂に直交する応力 $\sigma(x)$ を4次多項式で表した場合の係数

t : 板厚

x : 端部からの距離 (0~ t)

Q : き裂形状係数

$G_0 \sim G_4$: 影響係数

σ_{ys} : 静的降伏強さ

K_{Ic} は下式で算出される。

$$(K_{Ic}/\sigma_{ys})^2 = 5(CVN/\sigma_{ys} - 0.05) \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 CVN : 材料のじん性値に関連するシャルピー衝撃試験での吸収エネルギー値である。

つぎに、今回の対象チャンバの評価例について示す。

- (I) については $K_I = 107 \text{ MPa m}^{1/2}$, $K_{Ic} = 225 \text{ MPa m}^{1/2}$ となり、 $K_I < K_{Ic}$ を満足する。また(II)についてもRemaining ligamentは肉厚75 mmの20%で15 mm, $(K_{Ic}/\sigma_{ys})^2 = 670 \text{ mm}$ となり、Remaining ligament $< (K_{Ic}/\sigma_{ys})^2$ を満足する。すなわち(I), (II)両方の条件を満足するため、LBBMと判断できる。

2.4.2 Global plastic instability

Code Caseでは、衝撃荷重で塑性不安定状態が形成されないことを動的弾塑性解析で示すことを要求している。例えば、開口部回りに完全塑性ヒンジの形成がない

ことである。爆破チャンバでは、胴側鏡の排ガス用ノズル部と、蓋側・胴側フランジとが評価対象となる。衝撃荷重の設計マージンとして1.732が規定され、具体的には設計爆薬量に相当する衝撃荷重(圧力)の175%とした荷重を用いて解析評価する。

図7に胴側フランジの蓋側から見た残留相当塑性ひずみ分布例を示す。フランジ部材に残留相当塑性ひずみが観察されるが、全断面に弾性域が存在していることが確認できる。すなわち、胴側フランジには完全塑性ヒンジがなく、塑性不安定状態はないと判断できる。

2.4.3 局部塑性ひずみの制限 (Local strain limit)

Code Caseでは局部塑性ひずみ制限については以下の3条件を規定している。

- (1) 最大相当塑性ひずみの許容値は容器の板厚平均で0.2%
- (2) 最大塑性ひずみ成分の許容値は容器板厚内で線形化したもので2% (1% at welds)
- (3) 容器内任意の点における最大ピーク相当塑性ひずみの許容値は5% (2.5% at welds)

これは1回の爆破による基準であるが、複数回の爆破の累積残留塑性ひずみについても同基準で評価が必要である。ただし、爆破の動的荷重変形の場合でも高ひずみ発生部ではシェイクダウンが実験的に確認されており⁵⁾、爆破ごとに累積残留塑性ひずみが増加するいわゆる漸増崩壊(ratcheting)現象は生じず、最大の爆破量の1回の残留塑性ひずみ量で評価すればよいことが確認されている。

本例の蓋鏡部における上述の条件(3)の最大ピーク塑性ひずみ成分および最大ピーク相当塑性ひずみの解析結果例を表1に示す。結果例は条件(3)の判定基準である50,000(25,000 at welds) μ 以下である。計算値は割

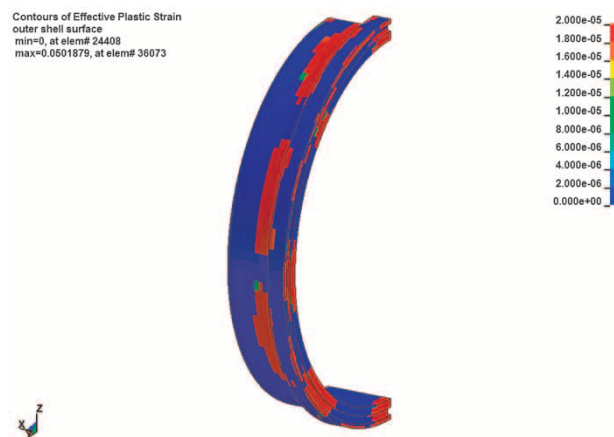


図7 胴体フランジの残留相当塑性ひずみ分布 (175%荷重)
Fig.7 Contours of effective equivalent plastic strain in shell flange (175%load)

表1 蓋鏡部の最大ピーク相当塑性ひずみ
Table 1 Maximum peak equivalent plastic strain of lid head

Plastic strain component						Equivalent plastic strain $\epsilon_{eq,p}$	Acceptable range
$\epsilon_{xx,p}$	$\epsilon_{yy,p}$	$\epsilon_{zz,p}$	$\epsilon_{xy,p}$	$\epsilon_{yz,p}$	$\epsilon_{zx,p}$		
-589	75	210	23	1	521	792	<50,000 <25,000 weld unit: μ

愛するが (1) および (2) の条件も満足しており基準内と判断される。

2.4.4 疲労破壊評価

LBBMが立証された場合、疲労破壊評価においてはき裂が発生するまでの回数をASME KD-3により求めることが認められている。LBBMが立証されない場合は、発生したき裂の進展を評価するASME KD-4に基づいて破壊力学的評価を行う必要がある。

爆破チャンバの最新モデルでは、前述のとおり破壊じん性の高い材料を使用し、LBBMが立証されていることからASME KD-3での評価を実施している。以下にその概要を紹介する。

(1) ひずみ振幅

ひずみ振幅の時刻歴からASME KD-353のレインプロー法で次式により各ひずみピーク群について時刻ごとに相当ひずみ振幅を求める。

$${}^{mn}\Delta\varepsilon_{ij} = {}^m\varepsilon_{ij} - {}^n\varepsilon_{ij} \dots\dots\dots (5)$$

$${}^{mn}\Delta\varepsilon_{range} = \frac{\sqrt{2} \sqrt{({}^m\Delta\varepsilon_{11} - {}^m\Delta\varepsilon_{22})^2 + ({}^m\Delta\varepsilon_{22} - {}^m\Delta\varepsilon_{33})^2 + ({}^m\Delta\varepsilon_{33} - {}^m\Delta\varepsilon_{11})^2 + 6({}^m\Delta\varepsilon_{12}^2 + {}^m\Delta\varepsilon_{23}^2 + {}^m\Delta\varepsilon_{31}^2)}}{3} \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 ${}^m\varepsilon_{ij}$ ；時刻mにおけるひずみ成分

${}^{mn}\Delta\varepsilon_{range}$ ；相当ひずみ振幅

(2) 疲労限度減少係数

ノズル付け根部などの局所的な形状不連続部の疲労強度は減少するため、疲労強度減少係数をひずみ振幅に乗じて評価する。疲労強度減少係数は基本的に形状から算定される応力集中係数と関連した係数としている。

(3) 疲労曲線

塑性ひずみによる低サイクル疲労であることから、応力-寿命曲線ではなくひずみ-寿命曲線で評価する。ASME設計疲労曲線より推定されるBest Fit Curveの寿命に3倍のマージンを持った図8に示す曲線で評価する。各時刻のひずみ振幅に疲労強度減少係数を乗じた値と、疲労曲線上で対応する寿命Niとを求め、一つのひずみピーク群の疲労損傷度 $1/Ni$ を算出する。つぎに1回の爆破で生じるすべてのひずみピーク群に対しての総計 $\Sigma 1/Ni$ を求める。これが1回の爆破による疲労損傷度の総計である。

(4) 複数回爆破時の疲労損傷度

例えば計画された爆破回数がnであり、爆薬量など爆

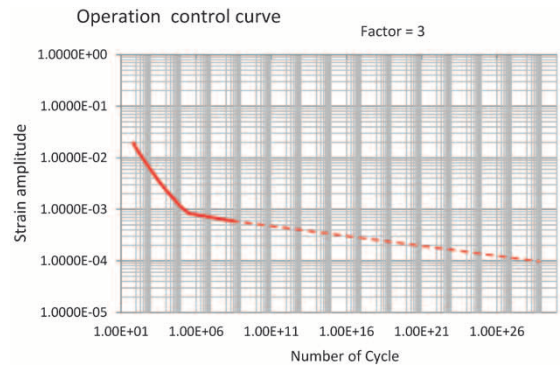


図8 疲労曲線
Fig.8 Fatigue curve

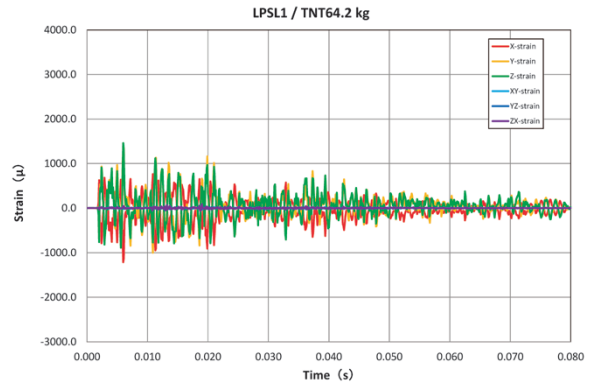


図9 蓋鏡部の動ひずみ時刻歴
Fig.9 Time history of dynamic strain of top of lid head

破条件がすべての爆破で同じであれば累積疲労損傷度は $n \times \Sigma 1/Ni$ となる。累積疲労損傷度が1となれば寿命と判断されるため、逆に設計計算上の許容爆破回数は $n = 1 / (\Sigma 1/Ni)$ となる。

図9に本例(蓋鏡部)の動ひずみ時刻歴を示す。上記手順により求めた1回の爆破あたりの疲労損傷度は $7.8E-05$ となり許容爆破回数は12,800回となる。本例の場合、設計上の許容爆破回数は約1,700回であり、設計基準を満足する。

本例の場合4項目の破壊形態のいずれも基準を満足しており安全性が設計上担保されている。

3. 設計検証と運転管理

ASME KD-12では試験による設計検証が規定されており、爆破チャンバも爆破試験でひずみを実測することにより設計検証を行っている。破壊試験という手法も

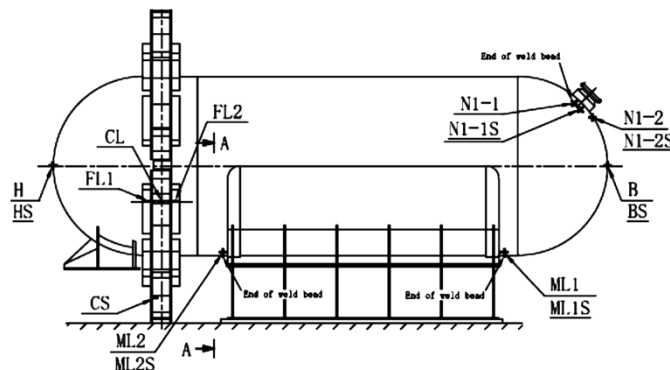


図10 ひずみゲージ貼付位置
Fig.10 Location of strain gage

あるが爆破チャンバでは設計爆薬量にて発生するひずみを測定する。測定箇所は図10に示すクリティカルポイントを選定している。静ひずみゲージで累積残留塑性ひずみ(2.4.3項)、動ひずみゲージで爆破ごとの疲労損傷(2.4.4項)を確認する。疲労損傷の累積計算は独自開発の計算プログラムにより試験中での計算が可能である。

また、実機運転中にもひずみを実測し、爆破ごとに累積残留塑性ひずみ、および累積疲労損傷を算定し、補修あるいは交換時期を予測する保守に活用している。

むすび=爆破チャンバを実際の化学兵器処理案件に導入して十数年以上が経過する。その間、衝撃荷重を受ける圧力容器に関わるASMEの特別設計規格を基に構造設計手法を確立してきた。今後もさらなる設計のブラッシュアップを図り保守、改善および開発に反映して一層の安全性の向上を目指したい。

最後に、設計にあたって協力・指導を頂いた元ASMEのPresident 故Dr. Robert E Nickellに謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) ASME Code Section VIII Division 3, Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels.
- 2) Code Case 2564-4 Impulsively Loaded Pressure Vessels, Section VIII Division 3.
- 3) WRC Bulletin 471 May. 2002.
- 4) API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For Service.
- 5) Joseph K. Asahina et al. "ASME" Proceedings of PVP2011-57843, p.135-139.



林 浩一

エンジニアリング事業部門
CWDセンタープロジェクト部

(解説)

国内初の内陸型火力発電所（真岡発電所）

藤尾明久*・山本 晃

Japan's First Inland Thermal Power Plant (Moka Power Station)

Akihisa FUJIO・Akira YAMAMOTO

要旨

真岡発電所は、日本で唯一の内陸型大型火力発電所として、2019年10月に1号機が、2020年3月に2号機が営業運転を開始した。本発電所は、総発電能力約125万kWで、空気冷却式復水器を採用したことも大きな特徴である。発電所建設に際しては、設備機器の分割輸送に始まり、現地製作・組立、周辺環境への最大限の配慮などを行った。内陸立地である点に配慮したこうした数々の技術課題を克服したことによって当初の計画どおりに竣工、運転開始につながった。

Abstract

The Moka Power Station launched the commercial operation of Unit 1 in October 2019 and Unit 2 in March 2020 as the only large-scale inland thermal power plant in Japan. One of the distinctive features of the station is that it has adopted an air-cooled condenser to generate approximately 1.25 million kW in total. The construction of the power station involved the transportation of disassembled equipment, on-site manufacture and assembly, as well as the maximum consideration for the surrounding environment. After overcoming the many technical issues related to the inland location, the project was completed by the original date planned for the plant to begin operation.

キーワード

国内初内陸型大型火力発電所, ガスタービン・コンバインドサイクル発電方式, 空気冷却式復水器 (ACC), 高効率発電, 分割輸送, 現地製作, 現地組立

まえがき = 当社は、製鉄所で長年培った自家発電所での知見を活かし、2002年4月より神戸発電所（総出力140万kW）において電力供給事業を営んできた。そうしたなか、2011年3月11日に発生した東日本大震災によって臨海部に立地している多くの発電所が停止し、計画発電を余儀なくされた状況をまのあたりにした。そこで当社は、東日本地区における電力供給事業の可能性について検討を開始した。

まず発電所の立地として、当社真岡製造所に隣接した工業団地に建設用地を確保できた。この工業団地は各種インフラ（燃料供給、送電線）へのアクセスに恵まれていた。また、初めて経験する多くの技術課題などを乗り越えられたことなど、さまざまな課題に対処することによって内陸大型火力発電所である真岡発電所を開所させることができた。

真岡発電所は内陸立地であることから、電源立地の分散化による電力インフラの強靱（きょうじん）化に資する事業として、国土強靱化（内閣官房）、およびエネルギー基盤の強靱化（経産省）の民間取組事例にも選定され、社会的意義の深い発電所である。現地調査から営業運転に至るまでの真岡発電所に関わるこれまでの主な経緯を表1に示す。

表1 真岡発電所の沿革
Table 1 History of Moka Power Station

Jul. 2011	On-site investigation (Moka 5th Industrial Park) Started basic study and feasibility study
Jul. 2012	Established project team
Mar. 2013	Started environmental assessment
Mar. 2014	Set basic agreement with Tokyo Gas Co., Ltd.
Apr. 2014	Entered into EPC contract with Fuji Electric Co., Ltd.
Sep. 2014	Concluded power supply contract with Tokyo Gas Co., Ltd.
May. 2016	Completed environmental assessment (38 months)
Jun. 2016	Started on-site construction
Oct. 2019	Started commercial operation of Unit 1
Mar. 2020	Started commercial operation of Unit 2

1. 真岡発電所の概要

真岡発電所は、東京ガス株式会社（以下、東京ガスという）から都市ガスの供給を受け、最新鋭のガスタービン・コンバインドサイクル発電方式^{注1)}によって総出力約125万kWの発電を行う。発電効率は60%以上という国内最高レベルを有する。発電した電力は全量を東京ガ

脚注1) ガスタービン発電と汽力発電の二つを組み合わせた発電方式。都市ガスを燃焼させてガスタービン発電設備で発電した後、排熱をボイラで回収して蒸気タービン発電設備で発電する複合発電である。従来型のボイラー・タービン発電設備と比べて高い発電効率を得ることができる。

* 電力事業部門 真岡発電所



図1 真岡発電所全景

Fig.1 Overview of Moka Power Station

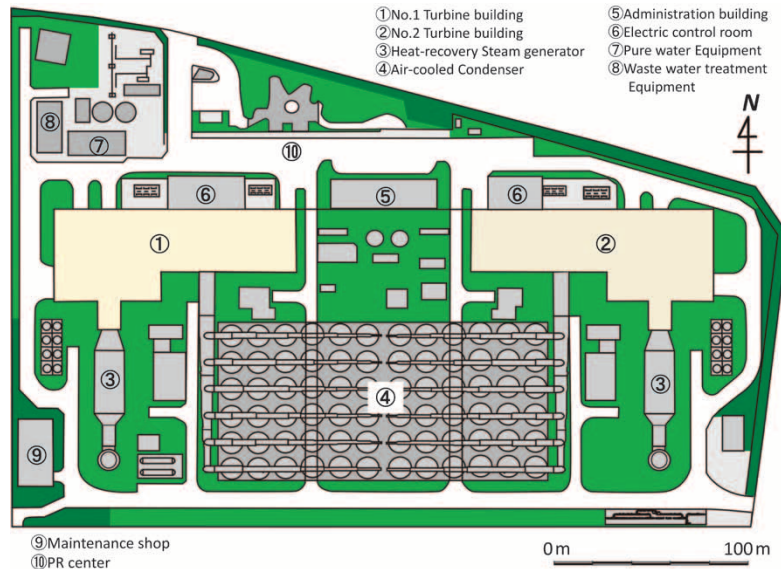


図2 主要施設および設備の全体レイアウト

Fig.2 Layout of main facilities and equipments

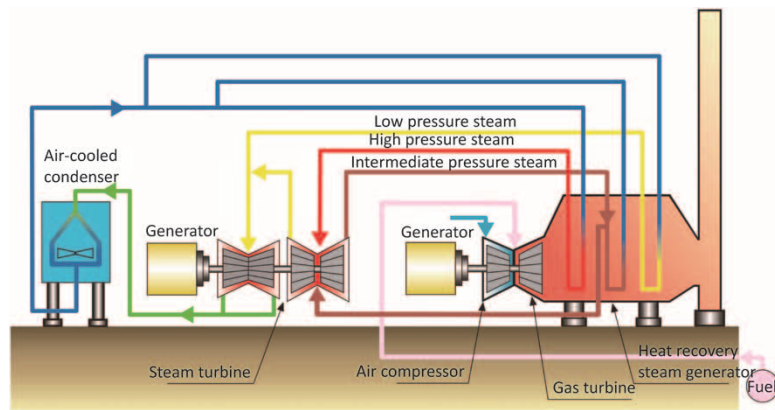


図3 ガスタービン複合サイクルによる発電設備の概念図

Fig.3 Schematics of power generation apparatuses with gas turbine combined cycle

スへ供給する。図1に発電所全景，図2に主要施設および設備の全体レイアウト，図3に発電設備の概念図を示す。

真岡発電所では，EPC請負契約^{注2)}を富士電機株式会社（以下，富士電機という）と締結した。また，主要機器であるガスタービンはシーメンス社の高効率モデルSGT5-8000Hを国内で初めて採用した。

脚注2) 設計(engineering)，調達(procurement)，建設(construction)を含む建設プロジェクトの建設工事請負契約のこと。

2. 発電所の開所に向けた検討項目

発電所の建設・開所に向けては，内陸立地であるうえに，敷地北側には住居地区が隣接することから，以下の項目に対して十分留意して詳細な検討を行った。

2.1 内陸輸送

当発電設備は海外製作比率が高い。このため，海上輸送される大物設備・資機材の多くは茨城県日立港で荷揚げを行い，真岡発電所までの約100 kmの距離を内陸輸送する必要があった。輸送対象のなかには重量物（最大

160 t) が含まれており、これらは一般道路を使用するの夜間・低速（5～10 km/h）輸送を行うことにした。

また、主要機器であるガスタービンや発電機、変圧器などは完成品の状態で輸送し、現地据付を行うのが一般的である。しかし今回は一般道路を使用するため、道路交通法を順守する必要がある。すなわち、輸送する機器の寸法を制限内（幅3.5 m以下、高さ4.7 m以下、長さ26 m以下）に収める必要があった。このため、主要機器は分割輸送する方向で計画を練った。

さらに、大量の資機材を扱ううえに、細かく分割するが故に機材の点数は膨大となる。このため、建設エリア近傍には広大な資材ヤードに加えて、地組（現地組立）エリアを確保する必要があった。

2.2 設備配置計画

発電所においては、タービンを駆動し終えた蒸気を冷却して復水させる方法として、大量の水（海水、工業用水など）によって間接冷却する水冷方式が一般的である。真岡発電所においても工業用水として地下水を使用するが、その地下水の使用量に制限があるため、蒸気の復水に対して水冷方式を採用することができない。この対応策として、大型火力発電所としては国内初となる空気冷却式復水器（Air-Cooled Condenser、以下ACCという）を採用することとした。

発電所建設予定地の広さは9 haであり、120万kW級の火力発電所としては極めてコンパクトである。このため、騒音源や温風源であるACCと敷地境界との距離が短くなる。また住居地区が隣接していることから、周辺環境への最大限の配慮が必要であった。

(1) 騒音

発電所北側と東側には住居地区が隣接しており、とくに騒音に対しては万全を期す必要があった。発電設備への防音対策に加えて、建屋形状および防音壁の仕様、さらには設備配置までもを含めて検討を行うこととした。

(2) 温風の影響

ACCは、蒸気タービンを回し終えた蒸気を大気と間接的に熱交換を行って冷却し、蒸気を状態変化させて水に戻す装置である。このため、熱交換に使用された空気は、周辺大気よりも温度の高い温風となってACC上部から排出される。

ACCからの温風に対する影響評価は国内での実施例もほとんどなく、また環境アセスメントの影響評価項目にはなかった。しかしながら周辺への環境配慮の観点から、温風の影響を評価する必要があった。

さらに、ACCからの排気温風が吸込み側へ還流（再循環）すると、常温より高い温度の空気を吸い込むことになり、発電効率が低下する。このため、再循環量を最小化することがプラント性能維持の観点で重要となる。

3. 検討結果

3.1 内陸輸送

(1) 輸送制限に収めるための機器の分割輸送

今回、道路交通法に基づく輸送制限（重量、大きさ）

をクリアするために、ガスタービンはケーシング分割が可能な構造を採用した。シーメンス社のベルリン工場で行った組み立てたガスタービンは、ケーシング、ロータ、翼に分解してそれぞれを別々に輸送した。また、排熱回収ボイラは、伝熱管群を細かく分割するハープ工法を採用した。最大重量物（約160 t）の輸送に際しては、輸送ルート上の橋梁（きょうりょう）すべて（全51箇所）に対して、橋梁強度上問題ないことを検証した。最大重量物の荷姿を図4に示す。

また、内陸輸送の最大工程が8泊9日と想定されていた（実績は6泊7日）ため、沿線に10箇所の仮泊地を準備するなど、緊急時にも配慮した輸送計画を策定した。その結果、計画どおりに輸送を完遂させることができた。

(2) 資材ヤード、地組エリアの確保

今回の発電所建設には、発電所敷地（約9 ha）とほぼ同等の資材ヤードが必要となることが分かった。幸い、発電所建設エリアの南側には真岡市所有の土地（約9 ha）があり、工事期間の約4年間、この土地を真岡市より借り受けることができた。これによって地組品や資機材の横持を円滑に行うことができた。

(3) 発電機などの現地製作・組立

ガスタービンと同様に、ガスタービン用発電機（出力：470 MVA）についても輸送制限以下への分割を検討した。しかしながら固定子は、分割して輸送することが物理制約上（重量・形状）困難であることが分かった。そこで、固定子は現地で製作することとした。

このクラスの発電機を現地製作するのは国内初の試みであった。現地製作に関してはメーカーである富士電機が有する独自の技術が採用された。ここでは詳細な紹介は差し控えるが、発電機製作工場として先行して2号タービン建屋を建設し、メーカー側で簡易クリーンルームを設置するなどによって現地製作が実現した。

(4) 品質管理の徹底

上述のとおり、主要設備や資機材等は分割輸送が主であり、現地組立・溶接比率の高い工事であった。このため、現地工場の品質確保に努めるとともに、各工場内での製品品質を事前に確保し、出荷体制の確認などを徹底した。こうした取り組みによって現地での手直し工事の撲滅を図り、工程順守に努めた。

3.2 設備の最適配置計画

騒音や温風が周辺環境に与える影響を最小化する



図4 最大重量物の荷姿

Fig.4 Package of maximum weight component for transportation

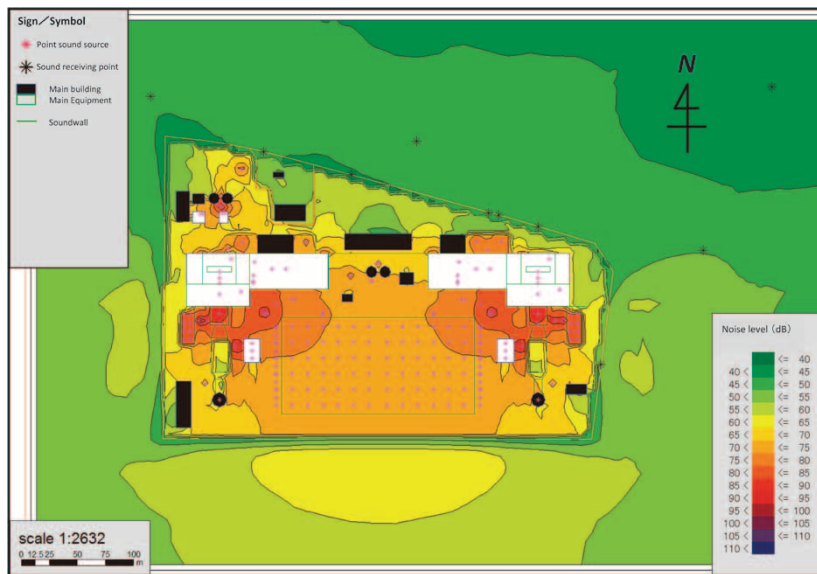


図5 3次元騒音解析例
Fig.5 Three-dimensional noise analysis

と同時にプラント効率を維持する必要がある。そこで、3次元騒音解析と3次元温風解析を実施した。これらの解析結果に基づき、発電所の主機への防音対策をはじめ、設備配置やタービン建屋の形状、防音対策、敷地周囲の防音壁など、発電所の具体的な防音対策に関する仕様を決定した。

このように、設備計画の早い段階において自社で各種検討を行ったことにより、最適な設備配置計画が策定できた。その結果、環境アセスメントを円滑に推進させることができたうえに、プラント効率を維持させることができた。

(1) 騒音評価と対策

通常運転時に市条例の騒音基準を満足するように防音対策を計画し、実施した。なお、防音壁や建屋はデザインに統一感を持たせると同時に、近隣の景観ともマッチするよう配慮した(図1参照)。

騒音解析の一例として、地上1mの高さにおける発電所周辺の音圧レベルを図5に示す。複数のケースで実施した3次元騒音解析のいずれのケースにおいても、発電所北側や東側の住宅地に対して、住宅地の環境基準(昼間60dB、夜間50dB)を満足することを確認した。

(2) 温風の影響評価と対策

温風の影響を評価するにあたっては、真岡市の過去の気象実績や環境アセスメントの現況調査結果を踏まえ、当社研究所が発電所の敷地を対象とする3次元温風解析を実施した。発電所の構成機器や建屋形状を反映した熱流動解析モデルを構築し、各種条件での解析を行った。解析結果の一例として、敷地の東西中心位置での南北断面における空気流れの速度ベクトル図(図6)および温度分布図(図7)を示す。

本解析結果から、強い南風の時でも後流側となる敷地北側の住居地域(地上)に与える影響はほとんどないことが確認できた(図6、図7)。また、ACC上部から排出される温風が吸気側へ再循環することによって吸気側の空気温度が上昇していることを示している(図7)。

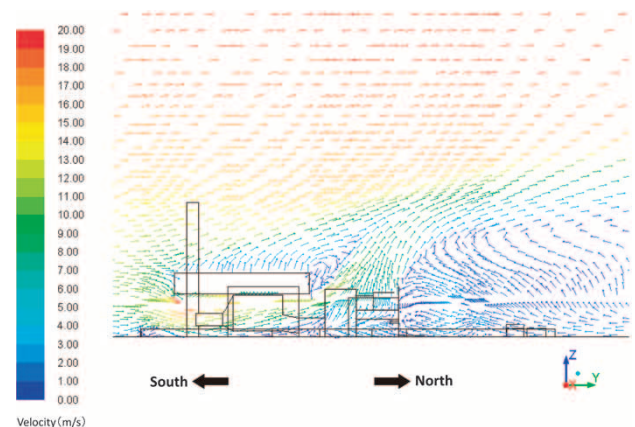


図6 発電所敷地内の空気の流れの速度ベクトル図
Fig.6 Velocity vector diagram of air flow in power station site

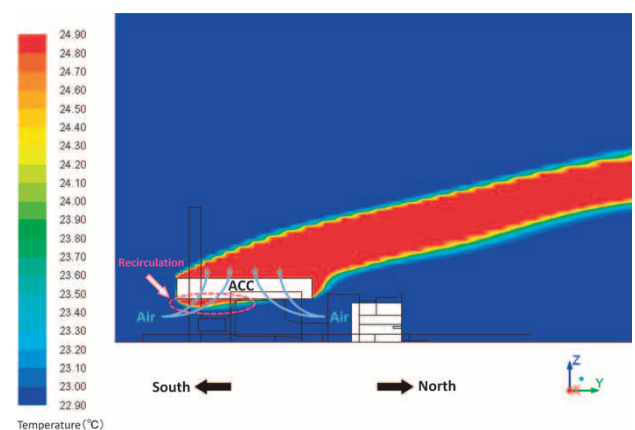


図7 発電所敷地内の温度分布図
Fig.7 Temperature distribution diagram in power station site

今回、狭い敷地内の建屋レイアウトを工夫することによって吸気側の空気温度上昇を2℃以下に抑制し、性能低下が最小となる最適配置を実現することができた。

むすび=1号ユニットは2019年10月1日に営業運転を開始し、2号ユニットは2020年3月1日に営業運転を開始した。いずれのユニットも現在まで順調に稼働している。

これまで当社が製鉄所の操業を通じて培った自家発電所の知見を基に、真岡発電所の安定稼働に努め、「国土強靱化」に寄与するとともに、国内最高レベルの効率維持に努めることによって地球温暖化抑制に貢献していきたいと考えている。

そのためにも、今後発電所の運転を継続するなかでプラント特性を把握すると同時に、性能改善や操業面での改善に取り組むことによって発電所の価値向上に努める所存である。

また今後、真岡発電所のプラント性能面についてこれまでの技術的な取り組みを報告したい。



藤尾明久
電力事業部門 真岡発電所



山本 晃
電力事業部門 真岡発電所

R&D 神戸製鋼技報掲載 エネルギー・環境関連文献一覧表 (Vol.60, No.1~Vol.69, No.2)

Papers on Advanced Technologies for Energy and Environment in R&D Kobe Steel Engineering Reports (Vol.60, No.1~Vol.69, No.2)

	巻/号
●LNG船用燃料噴射圧縮機…………… LNG Boil Off Gas (BOG) Vertical Type Reciprocating Compressor for Fuel Gas Injection	瀬山勝広ほか 67/2 Katsuhiko SEYAMA et al.
●水素ステーション用高圧水素圧縮機HyACシリーズの開発…………… High-pressure Hydrogen Compressors, HYAC® Series, for Hydrogen Stations	福田貴之ほか 67/2 Takayuki FUKUDA et al.
●船用バイナリー発電システム…………… Marine Binary Power Generation System	西村和真ほか 67/2 Kazuma NISHIMURA et al.
●資源動向と還元鉄を利用した鉄鋼製造プロセス…………… Resources Trend and Use of Directly Reduced Iron in Steelmaking Process	田中英年 64/1 Dr. Hidetoshi TANAKA
●コークス炉ガスのMIDREX®プロセスへの適用…………… Application of Coke Oven Gas to MIDREX® Process	水谷範昭ほか 64/1 Noriaki MIZUTANI et al.
●原子力発電所湿分分離加熱器再熱部の性能予測手法…………… Numerical Analysis Method for Reheater Performance of Moisture Separator Reheater for Nuclear Power Plants	織田 剛ほか 64/1 Dr. Tsuyoshi ODA et al.
●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…………… Technical Developments and Kobe Steel's Business Approach for Hydrogen Filling Stations	三浦真一ほか 64/1 Dr. Shinichi MIURA et al.
●使用済燃料中間貯蔵のためのTK-26型輸送貯蔵兼用容器…………… TK-26 Transport and Storage Packaging for Interim Storage of Spent Fuels	下条 純ほか 64/1 Jun SHIMOJO et al.
●福島第一原子力発電所向け乾式貯蔵キャスクの製作と貯蔵実績…………… Manufacturing of Dry Storage Casks for Storing Spent Fuel and their Use at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station	伊藤賢司ほか 64/1 Kenji ITO et al.
●使用済燃料中間貯蔵施設…………… Interim Storage Facility for Spent Fuel	白谷 誠ほか 64/1 Makoto SHIRATANI et al.
●原子力施設の廃止措置と金属再利用…………… Decommissioning of Nuclear Facilities and Metal Recycling	中山準平ほか 64/1 Junpei NAKAYAMA et al.
●温水仕様バイナリー発電システム…………… Binary Cycle Power Generation System for Hot Water	高橋和雄ほか 63/2 Kazuo TAKAHASHI et al.
●マイクロチャネル機器 (DCHE) の製作技術…………… Manufacturing Technology of Diffusion-bonded Compact Heat Exchanger (DCHE)	三輪泰健ほか 63/2 Yasutake MIWA et al.
●マイクロチャネルリアクタ (Stacked Multi-Channel Reactor: SMCR®) のバルクケミカルへの展開…………… Microchannel Reactor (Stacked Multi-Channel Reactor: SMCR®) for Bulk Chemical Industry	野一色公二ほか 63/2 Dr. Koji NOISHIKI et al.
●LNG受入基地向けLNG気化器…………… LNG Vaporizer for LNG Re-gasification Terminal	江頭慎二 63/2 Shinji EGASHIRA
●LNGサテライト基地向けLNG気化器…………… LNG Vaporizers for LNG Satellite Stations	吉田龍生ほか 63/2 Tatsuo YOSHIDA et al.
●LNG液化基地向けアルミろう付プレートフィン型熱交換器 (ALEX®)…………… Brazed Aluminum Plate-fin Heat Exchanger for LNG Liquefaction Plant (ALEX®)	三橋顕一郎 63/2 Kenichiro MITSUHASHI

- 90℃温水取出し空気熱源ヒートポンプ「HEM-90A」…………… 大上貴博ほか 63/2
Air-sourced 90℃ Hot Water Supplying Heat Pump, "HEM-90A" Takahiro OUE et al.
- 高効率蒸気供給システム「スチームグロウヒートポンプ (SGH)」…………… 和田大祐ほか 63/2
High Efficiency Steam Supply Heat Pump System; Steam Glow Heat Pump (SGH) Daisuke WADA et al.
- 二段半密閉アンモニア冷凍機…………… 大倉正詞ほか 63/2
Two-stage Semi-hermetic Ammonia Refrigerator Masashi OKURA et al.
- 新型コベライアン™ 22/37kW…………… 奥藤卓也 63/2
New Kobelion 22/37kW Takuya OKUTO
- 新オイルフリースクリュ圧縮機「Emeraude-ALE」…………… 原 崇之 63/2
New Oil-free Air Compressors, "Emeraude-ALE" Takayuki HARA
- MIDREX®プロセス…………… 厚 雅章ほか 60/1
MIDREX® Processes Masaaki ATSUSHI et al.



主要事業内容

■鉄鋼アルミ

- 薄板製品
- アルミ板
- 線材・条鋼製品
- 厚板製品

■素形材

- 鋳鍛鋼製品
- アルミ鋳鍛
- アルミサスペンション
- チタン
- 建材用チタン
- アルミ押出・加工品
- 銅板条
- 鉄粉製品

■溶接

- 溶接システム
- 溶接材料

■機 械

- 汎用圧縮機
- 回転機（非汎用圧縮機）
- タイヤ・ゴム機械
- 樹脂機械
- 高性能商品
- 圧延設備
- 超高压装置
- エネルギー・化学関連機器

■エンジニアリング

- 製鉄プラント関連
- 原子力プラント・機器
- 都市交通システム
- 水処理
- 廃棄物処理、リサイクル
- 冷却塔
- 化学・食品機械
- エネルギー・化学プラント

■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 :



編集後記

<特集：エネルギー・環境>

*近年、地球温暖化が大きな社会問題になっていますが、CO₂などの温室効果ガスの増加がこの現象に大きな影響を及ぼしているといわれています。当社グループは、地球温暖化問題に対応できる技術・製品の研究開発にも力を入れています。本特集号では、省CO₂をはじめとする地球温暖化問題に焦点を当て、当社グループが持つユニークな技術・製品・サービスを紹介します。

*使用時にCO₂を発生しないクリーンなエネルギーとして利活用が期待されている水素関連技術をご紹介します。また省エネ/創エネ技術をはじめ、CO₂発生量の少ないLNG燃料への対応技術や天然ガスを使って還元鉄を製造する技術など、温室効果ガスの発生量を直接的に削減する技術や、さらには発生したCO₂を分離回収する技術をご紹介します。

*低炭素の国産エネルギー源である再生可能エネルギーの増加に伴い、必要性が高まると考えられる余剰電力の貯蔵技術も商品化に向けて開発中です。

*再生可能エネルギーによる発電を増加させるには、安定的に発電可能なベース電源も重要になります。本特集号でご紹介した火力発電所は大消費地に近い内陸部に建設した環境に最大限配慮した高効

率のもので、レジリエンス効果が高く、消費地への送電ロスが少ないという大きなメリットがあります。電力システムの安定化と合わせ、電力システム全体としてのCO₂削減にも寄与するものと考えています。

*原子力分野や化学兵器処理分野の技術も取り上げました。原子力エネルギーは温室効果ガスの発生を伴わないエネルギーです。本特集号では放射性廃棄物の処理に関わる技術を中心にご紹介しました。また化学兵器処理技術では、当社が得意とする高圧容器の中で爆発処理させることによって無害化させるなど、当社独自の技術をご紹介します。

*豊かな社会を維持・創造するうえでエネルギーの需要は今後とも増大するものと考えられます。また、エネルギーの活用と同時に地球環境に配慮することは今後ますます重要になってくるといえます。当社は今後も、エネルギー・環境の分野において優れた技術・製品・サービスをご提供することによって世の中に貢献できるよう取り組んでいく所存です。本特集号について、ご意見やご要望などがござい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おります。

(原田孝夫)

次号予告

<特集：素形材>

*「素形材」という言葉は一般的になじみの薄い言葉ですが、鑄造・鍛造・粉末冶金等によって三次元形状を与えられた素材のことを指します。当社はこの素形材事業において、創業以来100年を超える歴史を持っています。

*当社は2020年4月1日、これまでの素材系のさまざまな事業に対し、「素材」と「部品」(素形材)という観点で組織改編を行い、鑄鍛鋼・アルミ鑄鍛・チタン・サスペンション・アルミ押出・銅板・鉄粉の7ユニットから成る「素形材事業部門」を発足させました。

*鑄鍛鋼ユニットにおいては、船用ディーゼル機関用クランク軸をはじめとして、機関とプロペラをつなぐ軸・舵(かじ)などの船舶向け部品に加えて、各種圧延用ロール・プラスチック金型向けの鍛造素材なども製造しております。

*アルミ鑄鍛ユニットでは、航空機部品製造により培われた「高精度・高品質」の鑄鍛造技術を基盤とし、鉄道車両部品、半導体・液晶製造装置部品などの製品メニューも有しています。

*チタンユニットでは、電力・化学プラント、航空・宇宙、海洋、建材などの分野に向けた純チタンおよびチタン合金の鍛造品・圧延品を製造、販売しております。近年では、スポーツやレジャー、医療・福祉の分野にもチタン製品は広がりを見せています。

*サスペンションユニットでは、自動車向け足回り部品用の鍛造品を製造しています。国内最大の6,300トン高速プレスによる一貫生産ラインを有し、材料開発から部品設計・評価までのトータル対応で自動車軽量化に貢献しています。

*アルミ押出ユニットでは、自動車・鉄道車両・船舶など幅広い分野の製品を製造しています。材料開発技術に加えて薄肉・高精度押出技術を有し、部品設計・評価技術により超軽量化ニーズに対応しています。

*銅板ユニットでは、電子材料用の高性能銅合金板を製造しています。パワーデバイスおよびICの高集積化に対応した高強度・高伝導率性リードフレーム材、耐熱性に優れた端子・コネクタ材などに使用されています。近年は、自動車・民生用端子向けなどの新たなニーズにも対応しています。

*鉄粉ユニットでは、粉末焼結品を自動車産業向けに提供しているほか、電磁部品・土壌改良用機能材・脱酸素剤など、幅広い分野に向けて製造しています。

*素形材事業における製品の多くは、そのまま各種機械に組込まれる部品となるため、お客さまごとに製品の材質・形状が異なり、それぞれの性能・特性の要求を満足することが求められます。素形材事業部門の7ユニットは扱う素材と部品は異なるものの、原材料から部品までのトータルの製造技術や、お客様のニーズにおこたえするために必要な部品設計・評価技術は共通する部分は多くあります。したがって、「素形材事業部門」の発足によってこれまで以上にシナジー創出が可能になると考えます。

*次号の「特集：素形材」では、当社が進めてきた新製品・材料開発、成形技術・品質評価技術などに関する最新の取り組み状況をご紹介します。関係分野の皆さまに当社製品と技術をご理解いただける一助となれば幸いです。

(松田真理子)

<編集委員>

委員長	後藤 有一郎
副委員長	高 柰 弘 行
委員	稲 田 淳 之
	小 西 晴 之
	佐 成 弘 毅
	橋 本 裕 志
	原 田 孝 夫
	藤 綱 宣 之
	本 家 浩 一
	前 田 恭 志
	松 崎 道 弘
	渡 邊 博 久

<五十音順>

本号特集編集委員 原 田 孝 夫

R&D 神戸製鋼技報

第70巻・第1号(通巻第244号)

2020年7月31日発行

年2回発行

非売品 <禁無断転載>

発行人 後藤有一郎

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 神鋼リサーチ株式会社
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6F
FAX(078)261-7843
rd-office@kobelco.com

2020年7月31日

各 位

(株)神戸製鋼所
技術開発本部

「R & D神戸製鋼技報 Vol.70, 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.70, 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

神鋼リサーチ株式会社
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：

July 31, 2020

Kobe Steel Ltd.
Technical Development Group

RE: Delivery of R&D Kobe Steel Engineering Report, Vol.70, No.1

Dear Sir or Madam,

We would like to express our sincere gratitude for your continued support and cooperation.

Attached please find Vol.70, No. 1 of the R&D Kobe Steel Engineering Report.

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 Report

Shinko Research Co., Ltd.

FAX: +81-78-261-7843

E-mail: rd-office@kobelco.com

Change Notification

	Before change	After change
Company name		
Department		
Address		
Address seal number	No. _____ ← (Please fill in the right lower number on the address sticker)	
Remarks		
Person making this entry	Name :	E-mail :