

特集：エネルギー機器

ページ

- 1 (巻頭言) エネルギー機器特集号の発刊にあたって 榎木一秀
- 2 (論文) 温水仕様バイナリー発電システム 高橋和雄・松田治幸・藤澤 亮・松村昌義・成川 裕・足立成人
- 6 (論文) バイナリー発電用媒体ポンプ 吉村省二・足立成人・松田治幸
- 11 (技術資料) 蒸気駆動式オイルフリー空気圧縮機 山本祐介・松井孝益
- 14 (技術資料) 小形蒸気圧縮機「MSRCTM」によるボイラの省エネルギー 尾上真也・桑原英明
- 18 (解説) 汎用ラジアル蒸気タービン発電装置 (エコ・ラジアル) の開発と今後のマーケット対応 吉田 敦・松谷 修
- 23 (技術資料) マイクロチャンネル機器 (DCHE) の製作技術 三輪泰健・野一色公二・鈴木朝寛・高月謙一
- 28 (解説) マイクロチャンネルリアクタ (Stacked Multi-Channel Reactor: SMCR[®]) のバルクケミカルへの展開 野一色公二・三輪泰健・松岡 亮
- 33 (解説) LNG受入基地向けLNG気化器 江頭慎二
- 37 (解説) LNGサテライト基地向けLNG気化器 吉田龍生・森本佳秀
- 40 (解説) 重油水素化分解・脱硫リアクタの最近の動向 山田雅人・八木 裕・中西智明・原田福三
- 44 (解説) 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[®]) 三橋頭一郎
- 47 (解説) 90℃温水取出し空気熱源ヒートポンプ「HEM-90A」 大上貴博・岡田和人
- 51 (技術資料) 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・飯塚晃一郎・前田倫子・吉本友憲
- 56 (技術資料) 二段半密閉アンモニア冷凍機 大倉正詞・鈴木勝之
- 61 (技術資料) 新型コベライアンTM 22/37kW 奥藤卓也
- 64 神戸製鋼技報掲載 エネルギー機器関連文献一覧表 (Vol.52, No.2~Vol.63, No.1)

新製品・新技術

- 65 新オイルフリースクリュ圧縮機「Emeraude-ALE」 原 崇之

《FEATURE》 Energy Machinery and Equipment

- 1 Recent Trends in Energy Machinery and Equipment
Kazuhide NARAKI
- 2 Binary Cycle Power Generation System for Hot Water
Kazuo TAKAHASHI · Haruyuki MATSUDA · Dr. Ryo FUJISAWA · Masayoshi MATSUMURA · Yutaka NARUKAWA · Shigeto ADACHI
- 6 Medium Pump for Binary Cycle Generation
Dr. Shoji YOSHIMURA · Shigeto ADACHI · Haruyuki MATSUDA
- 11 Steam Driven Oil-free Screw Compressor
Yusuke YAMAMOTO · Takayoshi MATSUI
- 14 Micro Steam Recovery Compressor "MSRC™" for Energy-saving in Boiler Systems
Shinya ONOE · Hideaki KUWABARA
- 18 Development and Approach to Future Market of the Eco-Radial Steam Turbine Generator
Atsushi YOSHIDA · Osamu MATSUTANI
- 23 Manufacturing Technology of Diffusion-bonded Compact Heat Exchanger (DCHE)
Yasutake MIWA · Dr. Koji NOISHIKI · Tomohiro SUZUKI · Kenichi TAKATSUKI
- 28 Microchannel Reactor (Stacked Multi-Channel Reactor: SMCR®) for Bulk Chemical Industry
Dr. Koji NOISHIKI · Yasutake MIWA · Akira MATSUOKA
- 33 LNG Vaporizer for LNG Re-gasification Terminal
Shinji EGASHIRA
- 37 LNG Vaporizers for LNG Satellite Stations
Tatsuo YOSHIDA · Yoshihide MORIMOTO
- 40 Recent Topics for Heavy Oil Hydrocracking and Desulfurization Reactors
Masato YAMADA · Yutaka YAGI · Tomoaki NAKANISHI · Fukuzo HARADA
- 44 Brazed Aluminum Plate-fin Heat Exchanger for LNG Liquefaction Plant (ALEX®)
Kenichiro MITSUHASHI
- 47 Air-sourced 90°C Hot Water Supplying Heat Pump, "HEM-90A"
Takahiro OUE · Kazuto OKADA
- 51 High Efficiency Steam Supply Heat Pump System; Steam Glow Heat Pump (SGH)
Daisuke WADA · Koichiro IIZUKA · Michiko MAEDA · Tomonori YOSHIMOTO
- 56 Two-stage Semi-hermetic Ammonia Refrigerator
Masashi OKURA · Katsuyuki SUZUKI
- 61 New Kobelion 22/37kW
Takuya OKUTO
- 64 Papers on Advanced Technologies for Energy Machinery and Equipment in R&D Kobe Steel Engineering Reports
(Vol.52, No.2~Vol.63, No.1)

(巻頭言)

エネルギー機器特集号の発刊にあたって

楠木一秀

専務取締役 機械事業部門長

Recent Trends in Energy Machinery and Equipment

Kazuhide NARAKI



2011年3月に発生した東日本大震災により、日本には深刻なエネルギー危機がもたらされた。その結果として、エネルギー安全保障の面から、省エネルギーの促進、エネルギー源の安定供給・多様化が重要な課題となっている。また、地球温暖化の原因とされる二酸化炭素の排出量が規制され、自然エネルギーの有効利用に対する関心が急速に高まってきた。

当社では、エネルギー関連機器の開発により蓄積してきた高性能化技術を生かし、エネルギーの面で、社会に貢献することが重要な使命と考えている。当社のエネルギー関連機器は大きく二つに大別される。一つはLNG気化器に代表される熱交換器、もう一つは圧縮機、ヒートポンプ、冷凍機などの回転機である。近年はとくに、圧縮機技術を膨張機に転用し、余剰蒸気、温水などの高温熱源を利用した発電システムに注力している。また、汎用空気圧縮機においては新たな省エネルギー技術を取り入れ、モデルチェンジを行っている。

以下に、これらの技術を具体的に紹介する。

熱交換器

昨今、米国におけるシェールガス（天然ガス）開発が盛んとなってきており、これに伴い、米国内において安価なシェールガスを原料としたエチレンプラント建設の動きが活発となっている。また、シェールガスによる天然ガス国際価格の値下げ圧力に加え、原子力発電所停止による代替発電燃料としての天然ガス需要増により、LNGの世界的な需要も高まっている。

このような状況において、当社の代表的なエネルギー機器であるORV（オープンラック式気化器）を始めとする各種LNG気化器や、天然ガス液化プラントおよびエチレンプラントに使用されるALEX[®]（アルミニウム製プレートフィン式熱交換器）の重要性が高まっている。これらの製品を供給することにより、上記のプラントの安定操業に寄与するよう努めるとともに、当社熱交換器の用途拡大を目指した各種開発を行っている。

また、かかる世界的な天然ガスの一大ブームの中、プラント建設の工期短縮や運用の自由度に利点を持つFSRU（Floating Storage and Re-gasification Unit）やFLNG（Floating LNG）などの浮体式設備建設が世界各地で進められている。当社は浮体式設備の狭小エリアにおける使用を考慮し、従来のシェル&チューブ式に対して1/10のスペースを目指したDCHE（マイクロチャンネル熱交換器）の開発・商品化も進めている。

回転機

回転機における代表的なエネルギー機械は、冷凍機、ヒートポンプである。また近年、エネルギーの有効利用の面から高温熱源を利用した蒸気発電機、蒸気駆動空気

圧縮機、蒸気圧縮機、温水バイナリーシステムを開発している。

汎用冷凍機では世界に先駆けたフロン冷媒でのインバータシリーズを開発するとともに、自然冷媒であるアンモニアを使用した半密閉インバータ機のシリーズ化を実施し、冷凍分野での大幅な省エネルギー化を図ってきた。-30℃レベル以下の低温分野では、当社の得意とする2段圧縮機とインバータを組み合わせることで、現状主流である定速単段機との性能面での差別化を図っている。

ヒートポンプでは業務用および産業用の空調分野を主とした製品を扱っているが、2000年以降、独自の高効率冷媒システムにインバータ化を加えることで、部分負荷性能改善を含めた大幅な省エネルギー化を図り、業界での急速な高効率化の先導役としての役割を果たしてきた。産業の加熱分野では温度レベルにかかわらず、ボイラが使用されてきたが、2010年には従来のヒートポンプでの温水取出の限界を50℃レベルから90℃までアップさせた温水加熱機を商品化した。さらに、2011年には165℃までの蒸気を生成する蒸気生成ヒートポンプシステムを開発し、燃焼式ボイラから電気式高効率ヒートポンプ転換による省エネルギー化を図り、新規市場開拓中である。これらの産業用加熱ヒートポンプは従来のボイラシステムと比較して、ランニングコストやCO₂発生量を1/2以下に抑えることができ、今後の市場拓大が期待できる。

高温熱源利用機械では、2008年に余剰蒸気や減圧蒸気を利用した蒸気発電機、蒸気駆動空気圧縮機を開発・商品化し、その後フラッシュ蒸気を再圧縮する蒸気圧縮機や90℃レベルの低品位の温水を熱源としたバイナリー発電システムをメニューに加えてきた。

以上、-50℃レベルまでの冷却から180℃までの加熱昇温システムや逆に90~180℃の排熱を利用した発電システム等、幅広い温度レンジでの様々なエネルギーソリューションメニューが出揃った。

また、汎用空気圧縮機は、電気・電子、食品、薬品、繊維など幅広い用途で使用されており、その消費電力は工場・事業所の全消費電力の20~30%を占めるといわれている。そのため、環境配慮面からも汎用空気圧縮機にはさらなる省エネルギー性が求められている。この要望に応えるため、スクリュウ式の特長を生かしたインバータ式省エネモデルの開発、高効率化モデルチェンジなどを積極的に進め、国内および東南アジアではトップクラスのシェアを獲得している。

今後とも、長年にわたって培ってきた技術を駆使した特長のある製品を通じ、社会に貢献していく所存である。需要家の皆様を始めとして、各方面からの忌憚のないご意見、ご指導をお願い申し上げる次第である。

(論文)

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*1
Kazuo TAKAHASHI



松田治幸*1
Haruyuki MATSUDA



藤澤 亮*1 (工博)
Dr. Ryo FUJISAWA



松村昌義*2
Masayoshi MATSUMURA



成川 裕*3
Yutaka NARUKAWA



足立成人*3
Shigeto ADACHI

The small-scale binary cycle power generation system is needed for the practical use of renewable energy (heat of the earth and biomass) or waste thermal energy (the unused thermal energy of a factory). Microbinary MB-70H has been developed at Kobe Steel as a small-scale binary-cycle power generation system (in the 60kW class of sending end output). The semi-hermetic screw power generator has been adopted in this system. This paper reports the test results for the system.

まえがき = 地球温暖化対策や東日本大震災後の電力需給問題から、再生可能エネルギーや未利用低位エネルギーの活用による省エネルギーや発電のニーズが高まっている。一方、地熱(温泉)やバイオマス、産業分野では200℃以下の低温排熱があり、地熱分野ではバイナリー発電技術の開発、導入が進められてきた^{1), 2)}。バイナリー発電は、加熱源により低沸点の作動媒体を加熱・蒸発させて膨張機を回転させ、発電するシステムである。地熱や産業分野の排熱は分散かつ小規模であり、対応できる小型バイナリー発電システムが必要とされていた。

当社はこれまで、小型スクリュ蒸気発電機³⁾によって、小型の膨張機としてのスクリュ方式の有効性を実証している経験から、小規模の排熱の有効利用に対応できる小型バイナリー発電システムの開発を行った。独自に開発した半密閉スクリュ発電機を使用して送電端出力60kW級のMicrobinary MB-70H(図1)の開発を行い、2011年10月から受注拡販活動を展開している。



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

本稿では、今回開発した温水熱源用のバイナリー発電システムの技術的特徴を示し、発電試験の結果から、温水、冷水の条件(温度、流量)と回収できる電力、温水の温度エネルギーの電力への変換状況などについて報告する。

1. 温水仕様バイナリー発電システムの特徴

当社の温水仕様バイナリー発電システムは、図2のフロー図に示される機器によって構成される。以下に本システムで用いた各機器の機能と特徴について説明する。
<作動媒体ポンプ>

低温で液体の作動媒体を加圧する。作動媒体の漏洩(ろうえい)を防ぐために密閉構造となっている。

<蒸発器、過熱器>

作動媒体ポンプで加圧された作動媒体を温水との間接熱交換によって加熱、蒸発させ、高圧の作動媒体の飽和蒸気を発生させる。この作動媒体蒸気を温水によってさらに加熱し、過熱蒸気を発生させる。

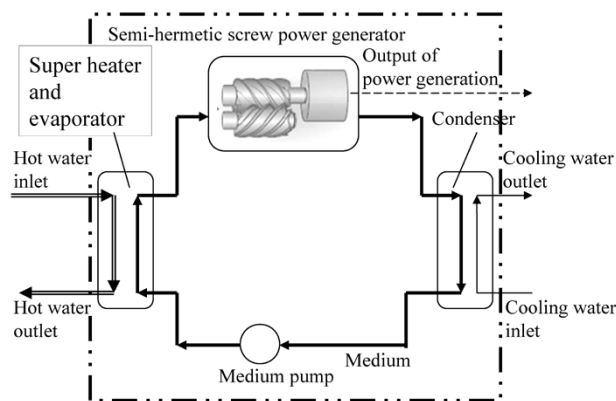


図2 温水仕様バイナリー発電システムフロー図
Fig. 2 Flow diagram of binary cycle power generation system for hot water

*1 技術開発本部 機械研究所 *2 機械事業部門 開発センター *3 機械事業部門 開発センター 商品開発部

<半密閉スクリュ発電機>

上記高圧作動媒体の過熱蒸気をスクリュ発電機に導き、スクリュ膨張機で膨張させることによって動力を回収する。スクリュ膨張機のロータ軸上には発電機が設置されており、回収された回転動力は電力に変換される。

なお、ここで用いた発電機は当社で開発した半密閉スクリュ発電機(図3)である。膨張機および発電機が同一の容器内に格納されて軸封が不要なため、作動媒体ガスの漏洩が起らない構造となっている。

<凝縮器>

スクリュ発電機からの低圧、過熱の作動媒体ガスは凝縮器に導かれ、冷却水と間接熱交換を行うことで凝縮され、過冷却された液体の作動媒体として作動媒体ポンプに供給される。

本システムでは、これらの構成によって温水と冷却水の温度差を電力に変換している。また、作動媒体の漏洩を防ぐため密閉構造の機器を選定している。

使用する作動媒体にはHFC245faを採用した(表1)。この媒体は、大気圧下での沸点が14.9℃の低沸点媒体であり、100℃以下の温水熱源でも圧力の高い蒸気を発生させることができる。

本システムの熱サイクルの高温側圧力と低温側圧力は蒸発器と凝縮器それぞれの作動媒体の飽和圧力によって決まる。図4には、横軸を交換熱量 Q_e 、 Q_c 、縦軸を水側および作動媒体の温度とし、蒸発器、過熱器、凝縮器の熱交換器内での交換熱量と温度変化の関係を示す。蒸発器、過熱器では、低温の作動媒体が温水との間接熱交換で顕熱を受取って飽和温度まで上昇した後、飽和温度で一定の温度を保って蒸発し、蒸発潜熱として受取る。蒸発終了後、再び作動媒体蒸気が顕熱を受取って温度上昇し、過熱蒸気を生成する。この蒸発過程において、温水の温度と蒸発する作動媒体のピンチ温度によって作動媒体の飽和温度 T_{ms1} 、および飽和圧力 P_{ms1} が決まり、作動媒体の高温側圧力の上限值 P_{ms1} が決まる。

一方、凝縮器では、スクリュ発電機で膨張した後の低圧で過熱の作動媒体蒸気を受入れ、冷却水との間接熱交換で飽和温度まで温度低下した後、飽和温度で潜熱を放出させながら凝縮させる。凝縮終了後、さらに作動媒体を冷却し、過冷却液として凝縮器から作動媒体ポンプに供給される。凝縮過程において、冷却水の温度と凝縮する作動媒体のピンチ温度によって、作動媒体の飽和温度 T_{ms2} 、飽和圧力 P_{ms2} が決まり、作動媒体の低温側の下限圧力 P_{ms2} が決まる。

上記の圧力の範囲($P_{ms1} \sim P_{ms2}$)により、本サイクルによるP-h線図は図5のようになる。本システムでは、P-h線図上を矢印の方向に動作を行い、2から3の蒸発、過熱過程で回収した熱を3から4へ移動する膨張過程で動力として取出す。受入れる温水温度の上昇および冷却水温度の低下は(温度の拡大)、図4の蒸発器での作動媒体の飽和温度および飽和圧力の上昇、そして凝縮器での作動媒体の飽和温度および飽和圧力の低下をもたらすことから、回収できる動力が増加する。

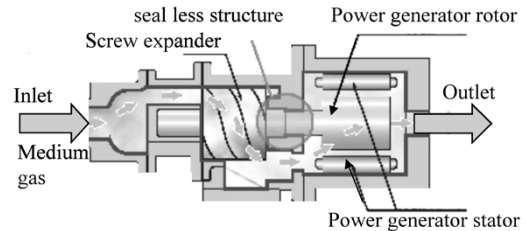
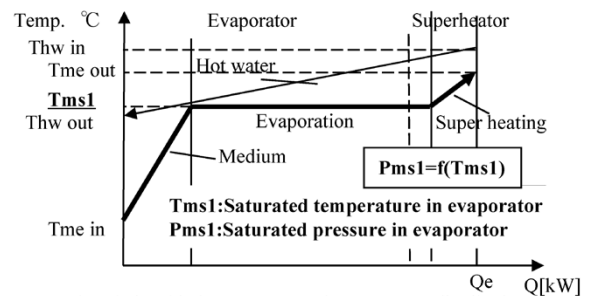


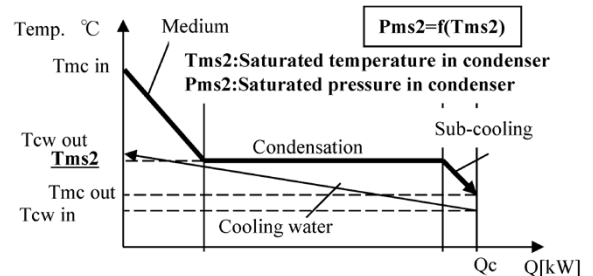
図3 半密閉スクリュ発電機の特徴
Fig. 3 Feature of semi-hermetic screw power generator

表1 作動媒体HFC245faの物性
Table 1 Properties of HFC245fa

		HFC-245fa
Chemical formula		CF ₃ CH ₂ CHF ₂
Molecular weight	kg/kmol	134
Boiling point temperature[101.325kPa]	°C	14.9
Boiling point pressure[25°C]	kPa	149
Density(25°C, Saturated liquid)	kg/m ³	1339
Density(25°C, Saturated gas)	kg/m ³	8.55
Latent heat of vaporization	kJ/kg	190.9
Ozone depletion potential(ODP)(CFC-11=1)	-	0
Global warming potential(GWP)(CO ₂ =1)	-	950



a) Relationship between Q_e and temperature distribution in evaporator and superheater



b) Relationship between Q_c and temperature distribution in condenser

図4 熱交換器内の交換熱量 Q_e 、 Q_c と温度分布
Fig. 4 Relationship between Q and temperature distribution in heat exchanger

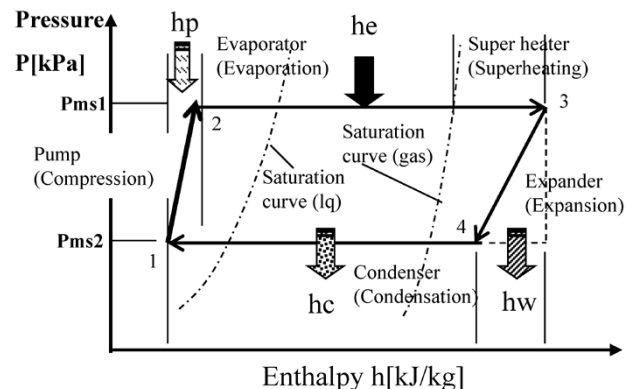


図5 本システムの作動媒体のP-h線図
Fig. 5 P-h diagram of medium for this system

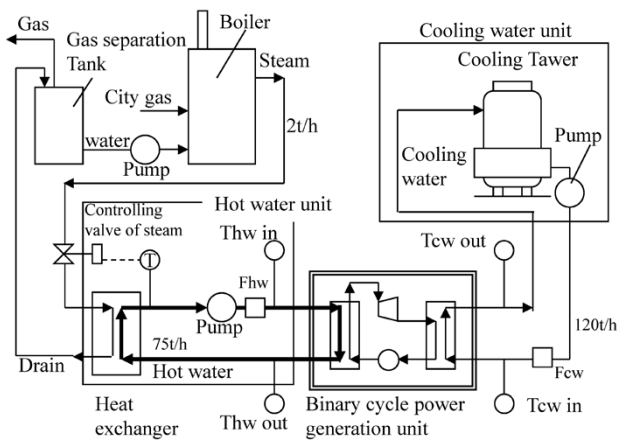


図6 バイナリー発電システム試作機の試験設備
Fig. 6 Test equipment of binary cycle power generation system

2. 温水仕様バイナリー発電システムの試験設備

温水仕様バイナリー発電システムの運転確認を行うために図6に示す試験設備を製作し、温水、冷却水の各種条件について性能確認を行った。入熱側としては、ボイラ蒸気を熱源として蒸気—温水熱交換器で温水を製造し、温水ポンプによって本体の蒸発器に供給し、熱交換後の温水は再び熱交換器で加熱される。蒸気配管に設置された流量調整弁を温水温度により制御することで一定温度の温水を供給する。蒸発器、過熱器の入熱は、温水配管に設置された入口温度計、出口温度計、温水流量計の計測結果（それぞれ、 Thw_{in} , Thw_{out} , F_{hw} とする）から求める。冷却水は、屋外の冷却塔と本体凝縮器の間で循環し、必要な温度の冷水を凝縮器に供給する。凝縮器の放熱は、冷却水配管に設置された入口温度計、出口温度計、冷却水流量計の計測結果（それぞれ、 $T_{cw_{in}}$, $T_{cw_{out}}$, F_{cw} とする）から求める。

3. 温水仕様バイナリー発電システムの試験結果

試験設備による運転を通じ、半密閉式スクリュ発電機の運転は安定しており、バイナリー発電システムの発電機としての有効性が確認された。運転結果の事例として、温水：温度 94.8°C 、 75t/h 、および冷却水：温度 20°C 、 120t/h という条件で運転した場合のエネルギーバランスを図7に示す。

温水による入熱 $Q_e = 1.062\text{kW}$ に対して、発電端出力 $W_e = 71.0\text{kW}$ が回収され、冷却水による放熱 $Q_c = 1.004\text{kW}$ が排出される。システム外部へ供給できる電力である送電端出力 W_e' は 58.4kW であり、システム内部での消費電力 $W_1 (= W_e - W_e')$ は 12.6kW となる。また、ここでは、本システムによって温水の入熱 Q_e から変換される送電端出力 W_e' の割合を示すパラメータとして、電力変換率 $\eta_{eh} [\%] = W_e' / Q_e \times 100$ を導入する。図7の運転では、電力変換率 η_{eh} は 5.4% であった。

装置の性能を確認するために温水流量、温度、冷却水温度を変化させ、各条件で発電出力が最大になる運転を行って送電端出力 W_e' を確認した。温水流量を 75t/h 、冷却水流量を 120t/h で固定し、温水温度 Thw_{in} を $70 \sim 95^{\circ}\text{C}$ 、冷却水温度 $T_{cw_{in}}$ を $20 \sim 35^{\circ}\text{C}$ まで変化させ、適

用温度範囲での送電端出力の確認を行った。横軸を冷却水温度 $T_{cw_{in}}$ 、縦軸を送電端出力 W_e' としてデータを整理すると、本運転範囲における送電端出力 W_e' の範囲は $10 \sim 60\text{kW}$ となることが分かった（図8）。また、図5のP-h線図での検討が示すとおり、送電端出力 W_e' は、温水温度の上昇と冷却水温度の低下に伴って上昇して行く傾向が現れた。

さらに、上記の試験結果に基づいて本システムの各機器の特性を定式化し、熱サイクル計算と組合せた性能予測プログラムを作成した。試験結果と性能予測プログラムの計算結果を図8で比較する。計算結果は各温度条件での送電端出力の試験結果を再現しており、有効性が確認された。この性能予測プログラムから 95°C 、 75t/h の温水、 20°C 、 120t/h の冷却水の条件で性能計算すると、発電端出力 W_e は 72kW 、送電端出力 W_e' は 60kW という性能が予測された。

また、試験結果から冷却水温度を $27 \sim 29^{\circ}\text{C}$ で固定し、温水温度 Thw_{in} を変化させたときの送電端出力 W_e' 、および図7で導入した電力変換率 η_{eh} の変化を図9に示す。温水温度 Thw_{in} が低下するのに従い送電端出力 W_e' と電力変換率 η_{eh} は低下してゆくが、電力変換率 η_{eh} は定格条

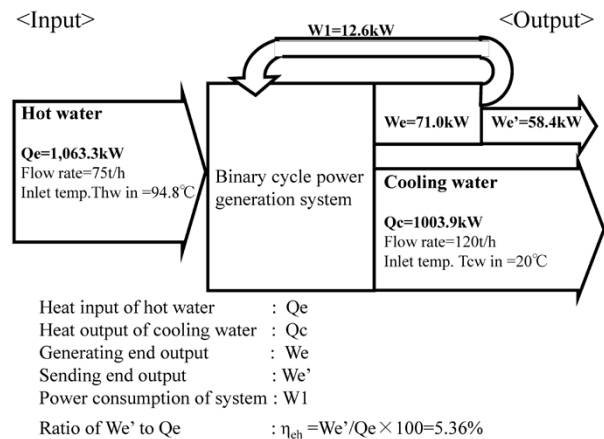


図7 エネルギーバランス
Fig. 7 Energy balance

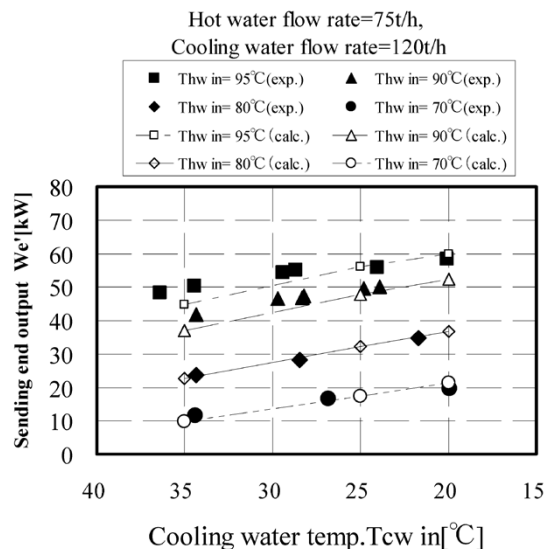


図8 温水温度 Thw_{in} 、冷却水温度 $T_{cw_{in}}$ と送電端出力 W_e' の関係
Fig. 8 Relationship between water temp. (Thw_{in} , $T_{cw_{in}}$) and sending end output W_e'

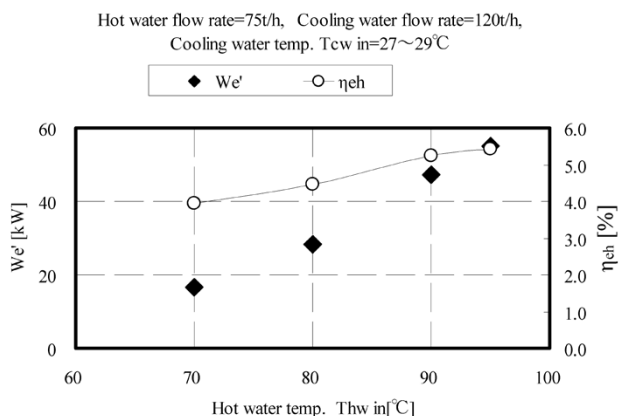


図9 温水温度と送電端出力We', 電力変換率 η_{eh}
Fig. 9 Relationship between Hot water temp., Thw in, and We' and η_{eh}

件付近で5.4%を示しており、発電端出力が30%に低下しても、電力変換率 η_{eh} は4%で定格条件の72%の能力を維持できることが示された。よって、低負荷出力運転に対しても、入熱に対して効率の良い電力変換が可能であることが確認された。産業分野の小規模の温水排熱では、設備の負荷変化によって温度や流量の変化も考えられるが、本システムは温度低下の起こる温水熱源に対しても効率的な電力回収が可能である。

4. システムの仕様と連続運転結果

今回開発したMicrobinary MB-70Hの仕様を表2に示

表2 マイクロバイナリー MB-70Hの仕様
Table 2 Specification of Microbinary MB-70H

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

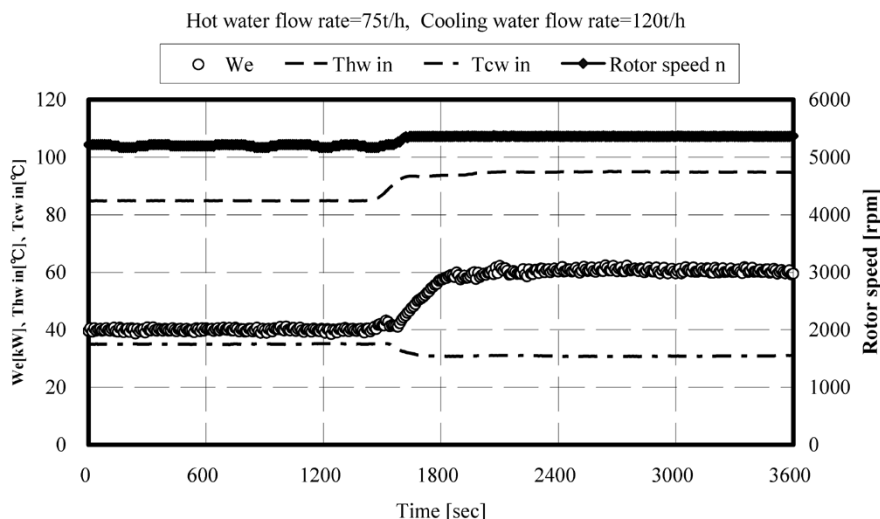


図10 Microbinary MB-70Hの連続運転
Fig.10 Continuous running of Microbinary MB-70H

す。また、連続運転の事例として温水温度Thw inを85°Cから95°Cに変化させ、同時に冷却水温度を35°Cから30°Cに変化させた場合の発電端出力We, 膨張機回転数nの時間変化を図10に示す。本装置では、温水の温度や流量、あるいは冷却水の温度、流量に変化が起こっても発電出力が最大となるように自動制御機能によって制御されており、温水および冷却水の温度条件の変化に伴って発電端出力は40kWから60kWに増加して行き、温水および冷却水の温度の安定とともに膨張機回転数nおよび発電端出力Weが安定して行く過程が確認された。

むすび = 温水仕様バイナリー発電システムMicrobinary MB-70Hの開発を通じ以下の特性を確認した。

- 1) バイナリー発電システムの試験を通じて、当社で開発した半密閉スクリュ発電機が、バイナリー発電システムに対して安定に運転しており、発電機として有効であることを確認した。
- 2) 本システム試験および性能予測計算から、95°C, 75t/hの温水と20°C, 120t/hの冷却水の条件で送電端出力60kWの目処を得た。
- 3) 本システムにおいて、温水入熱と送電端出力を基準とした電力変換率 η_{eh} (= We'/Qe) は定格条件付近で5.4%を示しており、温水温度の低下に伴い送電端出力が30%に低下した運転でも、電力変換率 η_{eh} は4% (定格条件の72%) を維持できることを確認した。
- 4) Microbinary MB-70Hの自動制御による連続運転より、膨張機回転数と発電端出力の安定性、温水および冷却水の温度変化に対する追従性を確認した。

参考文献

- 1) 秋田涼子. 日経研月報2013.1.
- 2) 小長谷瑞木. 季報 政策・経営研究. 2007, Vol.4, p.1.
- 3) 桑原英明ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.3, p.24.

(論文)

バイナリー発電用媒体ポンプ

Medium Pump for Binary Cycle Generation



吉村省二*¹ (工博)
Dr. Shoji YOSHIMURA



足立成人*²
Shigeto ADACHI



松田治幸*³
Haruyuki MATSUDA

The medium pump is an important piece of equipment in binary cycle generation. The medium pump pressurizes the medium, raising it from expander discharge pressure to expander suction pressure. However, the medium is of low viscosity and poor lubricity. There are, therefore, few suitable pumps for small size binary cycle generation. We developed a medium pump using screw compressor technology. This pump was installed in a binary cycle generation system. It has been confirmed that the developed pump is more than twice as efficient as a conventional pump.

まえばき = 地球温暖化対策や東日本大震災後の電力需給課題から、再生可能エネルギーおよび未利用低位エネルギーを活用することによる省エネや発電のニーズが高まっている。当社は、再生可能エネルギーや未利用低位エネルギーから電力としてエネルギー回収する発電機器として、高効率・小形バイナリー発電システムを開発した¹⁾。

バイナリー発電システムは主に、膨張機、凝縮器、媒体ポンプ、蒸発器によって構成されている。小形バイナリー発電において、媒体ポンプは重要な機器である。媒体ポンプは、液媒体を凝縮機出口圧力から膨張器入口圧力まで昇圧する機器であり、小流量で高圧まで昇圧する必要がある。液媒体は低粘度で潤滑性に乏しいため、小形バイナリー発電システムに適した媒体ポンプはほとんど見当たらない²⁾。

そこで、いままで培ったスクリュウ圧縮機技術を応用して媒体ポンプを開発した。本ポンプを小形バイナリー発電システムに組込んで実験を行った結果、従来のポンプに比べて2倍以上の効率で運転できることが確認できた。

1. バイナリー発電システム

バイナリー発電システムは、図1に示すように、主に膨張機、凝縮器、媒体ポンプ、蒸発器によって構成されている。媒体はHFC245faなどで、膨張機によりガス媒体が膨張して発電機を駆動する。膨張したガスは凝縮器により液媒体となり、媒体ポンプにより膨張機出口圧力から膨張機入口圧力まで昇圧する。昇圧された液媒体は、蒸発器によりガス化され、膨張機入口に入る。

媒体ポンプは、発電量が70kWの温水バイナリー発電の場合、流量200L/min、入口圧力0.3MPa、出口圧力1MPa程度である。

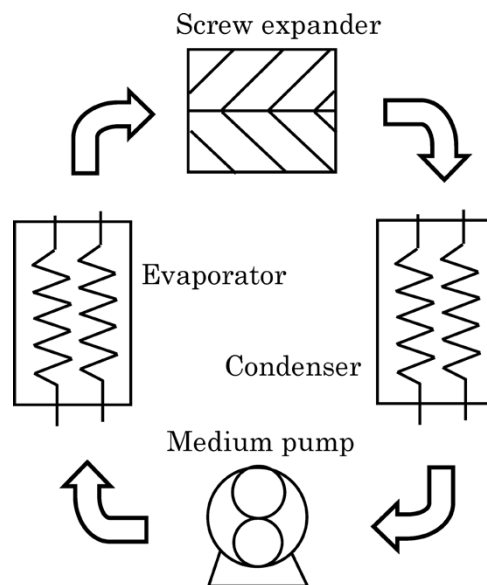


図1 バイナリー発電システム
Fig.1 Binary Cycle Generation

2. 従来の媒体ポンプ

2.1 媒体ポンプの構造

従来のポンプ構造を図2 (a), (b) に示す。大きく2種類あり、一つは (a) で示す遠心式ポンプである。遠心式ポンプはケーシング内に回転するインペラが組込まれている。インペラが回転すると、インペラと一緒にケーシング内の液媒体も回転する。すると、流体に遠心力が働きケーシングの外周部の圧力が高くなり、出口配管から高圧の液媒体が吐出される。

このポンプの特性は、低圧、大流量である。遠心力により昇圧させるため、吐出圧力よりも遠心力が小さいと流体が逆流する。そのため、ある程度の回転数が必要であり、容量が大きくなる。本ポンプをバイナリー発電シ

*¹ 機械事業部門 開発センター *² 機械事業部門 開発センター 商品開発部 *³ 技術開発本部 機械研究所

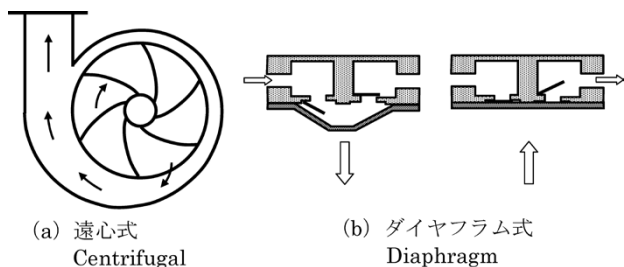


図2 媒体ポンプ
Fig. 2 Medium pump

ステムに採用した場合、高圧、小流量の範囲で使用するため、ポンプ効率が低くなる。

また、バイナリー発電システムにおいて、吐出圧力は蒸発器の温度で決まるが、温度が変化した場合、吐出圧力が変化する。遠心式ポンプの場合、流量は遠心力と吐出圧力のバランスで決まるため、吐出圧が変化するとポンプの流量も変化する。そのため、複雑な制御が必要となり、小流量の小形バイナリー発電システムには不向きである。

従来ポンプのもう一つは (b) で示すダイヤフラム式ポンプである。このポンプは容積式ポンプの一種で、ダイヤフラムを動かすことによって流体を吸引、吐出させる構造である。吐出圧力によらず流量はほとんど一定であり、遠心式ポンプのように吐出圧力により流量が変化することはない。しかし、ダイヤフラムの変形によって流体を押し出しているため、ダイヤフラムに繰り返し応力が作用して破損する可能性がある。このため、変形を小さくする必要があるので必然的に流量が少なくなる。バイナリー発電システムに適用した場合、必要な量を確保するためには複数台並べる必要があり、高価となる。

2.2 ギヤポンプを媒体ポンプとして使用した場合の問題点

バイナリー発電システムには、小流量で高圧まで昇圧できるポンプが必要である。そのため、容積式のポンプを採用する。容積式ポンプの代表的なものとして、ギヤポンプがある。

ギヤポンプの構造を図3に示す。歯車形状の二つのロータが噛み合いながら回転する。そして、噛み合い部の空間の体積変化により、流体を吸引、吐出させる構造である。

ギヤポンプを冷媒ポンプに採用する場合、問題点が大きく二つある。一つはポンプを駆動する電動機の構造、もう一つはロータ接触部の焼付きである。

まず、電動機の構造の問題である。バイナリー発電システムは系内には冷媒が入っており、密閉構造にする必要がある。隙間などがあると冷媒の漏れ出し、または空気の漏れ込みが発生し、発電性能が低下する。しかし、電動機の軸は回転しているため、ポンプとの間にメカニカルシールが必要となる。しかし、メカニカルシールの場合、油の汚れやゴミにより漏れが生じることがある。そのため、電動機自身も冷媒中で運転する構造を採用し、密閉構造とした。

ここでは、もう一つの問題点であるロータ接触部の焼

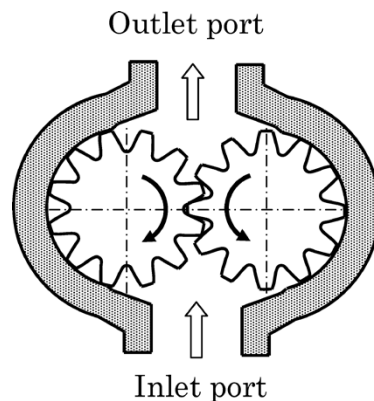


図3 ギヤポンプ
Fig. 3 Gear pump

付きについて詳しく述べる。

ポンプにより流体を昇圧させるため、ロータにはトルクを作用させる。このトルクはロータの歯車の形状により決まる。一般的なギヤポンプの二つのロータは全く同じ形状をしている。したがって、各ロータには同じ大きさのトルクが作用する。一方、電動機は片方のロータ（駆動側ロータ）だけを駆動しているため、もう片方のロータ（従動側ロータ）で流体から受けた圧力により発生したトルクは、駆動側ロータから従動側ロータに伝達される。そのトルク伝達は、ロータの噛み合い部での歯同士が接触し、その接触部で駆動側ロータから従動側ロータへ力が伝達されることにより行われる。

接触部では部分的に大きなヘルツ応力が発生し、潤滑がない場合は焼付いてしまう。潤滑は流体そのものにより行われる。ギヤポンプの用途としては油ポンプが多いが、この場合は油そのものにより潤滑される。したがって、ギヤポンプを媒体ポンプに応用した場合、潤滑は液媒体により行われることになる。

ところが、液媒体の粘度は0.2cSt程度で、油の粘度40cStに比べてはるかに小さく、従来のギヤポンプで液媒体を昇圧しようとする、潤滑不足でロータ同士が焼付いてしまう。

2.3 本開発媒体ポンプの特徴

本開発媒体ポンプの構造は基本的にはギヤポンプである。しかし、先に述べたように、液媒体には潤滑性がないため、ロータ同士が焼付くという問題点があった。これは、駆動側ロータと従動側ロータの形状が同じであるため、昇圧に必要な動力の半分が従動側ロータに伝達されるためである。

各ロータに作用するトルクは、ロータの歯形形状と密接な関係があり、駆動側ロータと従動側ロータの歯形形状を変えることにより、駆動側ロータから従動側ロータへの伝達トルクをコントロールすることが可能である。この伝達トルクコントロール技術は、スクリュ圧縮機技術を応用したものである。当社は、世界最高吐出圧力である100barG高圧スクリュ圧縮機を商品化した³⁾。高圧圧縮機における重要技術の一つに、ロータ間の伝達トルクをコントロールする技術がある。高圧圧縮機の場合、軸動力が非常に大きく、ロータ間の伝達力も大きくなる。伝達トルクが大きいとロータ間の接触部でスコアリ

ングを起し、ロータが損傷してしまう。逆に、伝達トルクが小さ過ぎるとロータ同士が衝突振動を起してしまう⁴⁾。

そこで、歯形状を工夫することにより伝達トルクをコントロールする技術を開発した。この技術を応用し、駆動側ロータから従動側ロータへの伝達トルクをほぼ0とする歯形状を開発した。本歯形状を媒体ポンプに採用することにより、従動側ロータへの伝達トルクが理論上0となる。軸受ロスなどによりロータ接触部でヘルツ応力は多少発生するが非常に小さく、潤滑不足による焼付きは発生しない。

3. 媒体ポンプ用歯形

3.1 ロータに作用するトルク計算方法

図4は開発した媒体ポンプ用ロータの歯形状を示す。歯の厚いほうが駆動側ロータ、薄いほうが従動側ロータである。矢印方向に回転し、下から媒体が吸込まれ、上から媒体が吐出される。

図4において、ロータとケーシングで囲まれた複数の歯溝が存在する。全ての歯溝において、歯溝周囲には二つの接触点が存在する。それらの接触点は、ロータとケーシング、またはロータ同士の接触点である。この歯溝によりロータに作用するトルクを計算する。

図5は歯溝の模式図である。歯面Aを駆動側ロータ歯面、歯面Bを従動側ロータ歯面とする。また、Oは従動

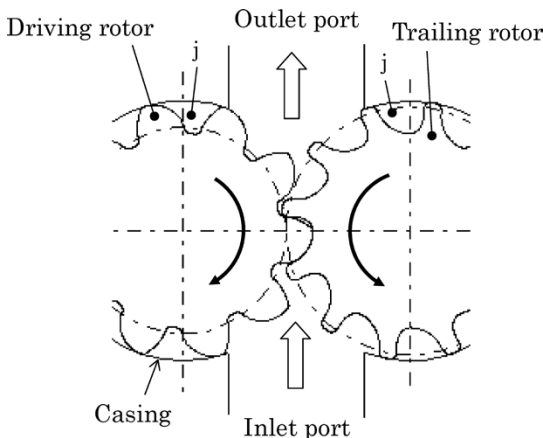


図4 開発したロータ形状
Fig. 4 Profile of developed rotor

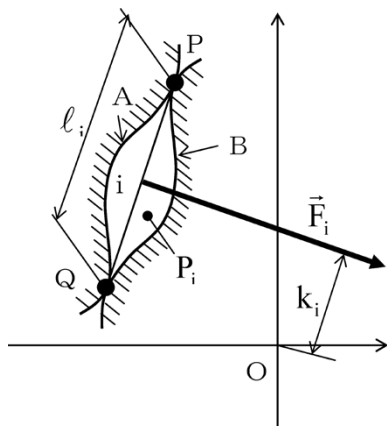


図5 従動側ロータに作用するトルク
Fig. 5 Torque acting on the trailing rotor

側ロータ中心である。この歯溝を歯溝*i*とし、歯溝圧力を*P_i*とする。歯溝周囲に点P、Qの二つの接触点がある。歯溝で発生する力の作用線方向は、点PとQを結んだ線の垂直二等分線方向*F_i*である。点P、Qのどちらかがケーシングと従動側ロータの接触点でも同様である。

歯溝*i*により従動側ロータに作用するトルク*T_i*は次式で表される。

$$T_i = (P_i - P_s) \ell_i k_i L$$

ここで、 ℓ_i は点PとQの距離、 k_i は*F_i*と点Oの距離、*L*はロータの長さ、*P_s*はポンプ吸込圧力である。図4からわかるように、同時に幾つかの歯溝が存在する。それぞれの歯溝の ℓ_i 、 k_i の値はロータの回転により変化する。ロータがある角度φだけ回転したときの従動側ロータに作用するトルク*T(φ)*は、それぞれの歯溝により作用するトルクの合計で、次式で表される。

$$T(\varphi) = L \sum_j \{P_j(\varphi) - P_s\} \ell_j(\varphi) k_j(\varphi)$$

*T(φ)*を常に0にすることは不可能であるが、ロータはある程度大きい慣性モーメントを持っているため、回転角に対するトルクの平均値を0にすることにより、ロータ接触部におけるヘルツ応力をほぼ0にすることができる。したがって、次式を満足する歯形状を決定する。

$$\int T(\varphi) d\varphi \approx 0$$

なお、図4の歯溝*j*のように、二つの接触点がロータとケーシングの接触点である場合、*F_i*はロータ中心を通るため、 k_i は0となりトルクは発生しない。したがって、ロータに作用するトルクは、ロータ同士の噛み合い部のみを考えればよい。

3.2 接触点位置の求め方

トルクを計算するには、ロータが角度φ回転したときの接触点の位置を求める必要がある。この接触点は歯形状を構成する歯関数から容易に求めることができる。図6において、Bを従動側歯面形状とする。Oは従動側ロータ中心、Cは従動側ロータのピッチ円である。この歯面が反時計方向にφ回転したときの駆動側ロータと従動側ロータの接触点位置を求める。接触点は以下の作図により求めることができる⁵⁾。

- 1) 中心線に対して、Oから中心線よりφ傾いた直線Dを引く。
- 2) 直線Dとピッチ円の交点をSとする。

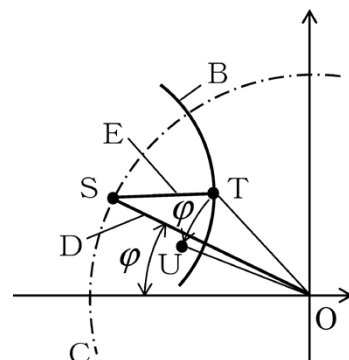


図6 シール点の作図方法
Fig. 6 Drawing method of sealing point

3) 点Sから引いた直線が従動側歯面Bに対して法線となる直線Eを探す。

4) 直線Eと駆動側歯面Bの交点をTとする。

すると、従動側ロータが反時計方向に φ 回転したときの接触点位置は、Oを中心に点Tを反時計方向に φ 回転した位置Uとなる。

3.3 歯形状およびロータに作用するトルク

図7は、開発した歯形におけるある回転角における噛み合い部の形状を示している。この図において、トルクを発生する歯溝は1と2だけである。歯溝1により発生する力の作用線方向は \vec{F}_1 、歯溝2により発生する力の作用線方向は \vec{F}_2 である。この作用線方向からわかるように、歯溝1により発生するトルクは回転方向と反対方向に、歯溝2により発生するトルクは回転方向に作用する。したがって、回転方向と反回転方向のトルクを相殺することにより従動側ロータに作用するトルクをほぼ0にすることができる。

図8は一つの歯溝に注目して、ロータが回転したときの従動側ロータに作用するトルクの変化を示している。このトルクを回転角に対して積分するとほぼ0となる。したがって、従動側に作用するトルクの平均値はほぼ0となり、ロータ接触部で発生するヘルツ応力が小さく潤滑不足による焼付きは発生しない。

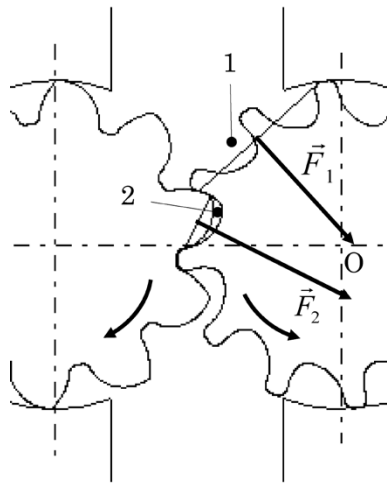


図7 従動側ロータに作用する力の方向
Fig. 7 Direction of force acting on trailing rotor

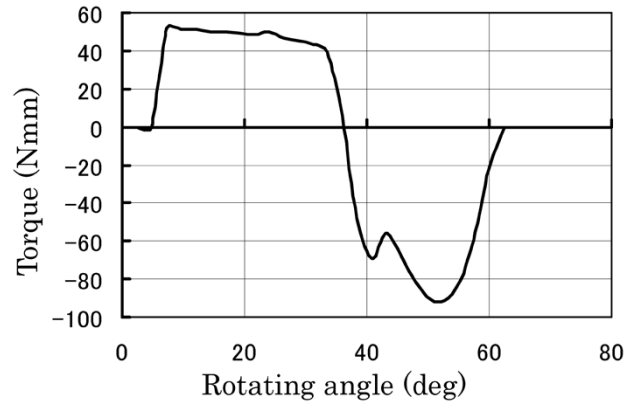


図8 従動側ロータに作用するトルク
Fig. 8 Torque acting on trailing rotor

4. 本開発における媒体ポンプの構造

図9は媒体ポンプの構造を示している。駆動側ロータ軸を伸ばし、その軸にモータの回転子を焼きばめして一体構造としている。このような構造を採用することにより、軸封部からの外部への漏れを防止している。

それぞれのロータは転がり軸受で支持されており、油で潤滑されている。ロータ室から漏れた媒体と潤滑油は混ざって排出される。

5. 試運転結果

図10に示す本開発の媒体ポンプを小形温水バイナリ一発電試験装置（定格発電出力15kW，定格媒体流量50L/min）に組み込み、試運転と性能評価を行った。図11に示す本試験装置では、本開発の媒体ポンプと市販品の遠心式ポンプを並列配置させており、使用する媒体ポンプを切替えることでそれぞれの性能評価を実施した。

試運転ではポンプから吐出される媒体流量 Q 、ポンプ吸込/吐出の圧力 PS/PD 、ポンプモータ動力 W を測定し、次式で算出されるポンプ効率 η で市販品の遠心式ポンプとの性能比較を行った。

$$\eta = \frac{W_{ref}}{W} (\%)$$

$$W_{ref} = \frac{\rho g H Q}{60 \times 10^6} (\text{kW})$$

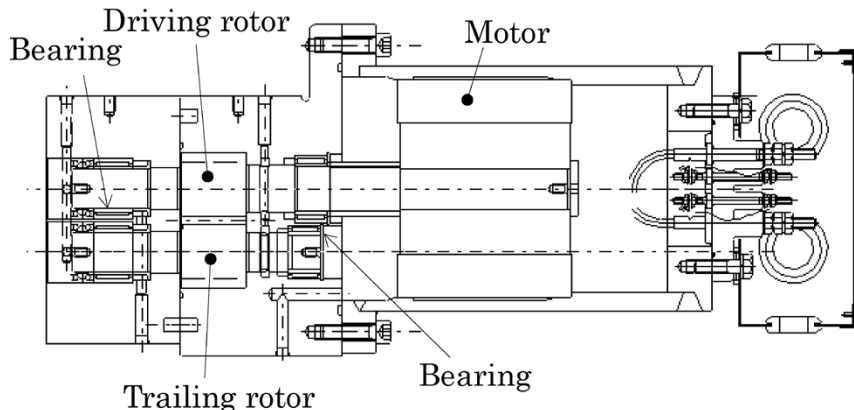


図9 開発した媒体ポンプの構造
Fig. 9 Structure of developed medium pump

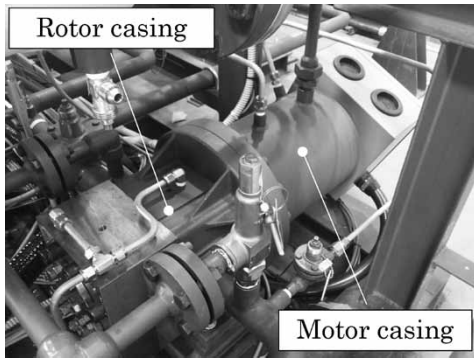


図10 開発した媒体ポンプ
Fig.10 Developed medium pump

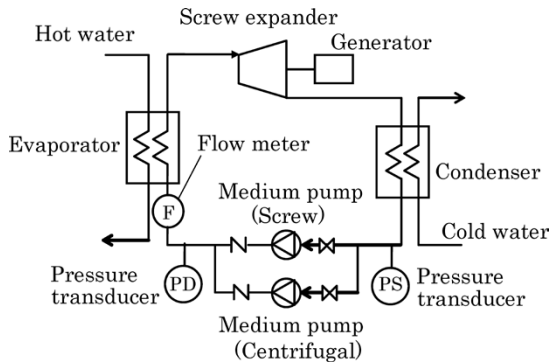


図11 試験装置
Fig.11 Experimental apparatus

ここで、

- W_{ref} : 理論動力 (kW)
- ρ : 媒体密度 (kg/m^3)
- g : 重力加速度 (m/s^2)
- H : 全揚程 (m)
- Q : 媒体流量 (L/min)

図12に媒体流量 Q とポンプ効率 η の関係を示す。この装置の定格前後の流量範囲 (30~63L/min) において、本開発の媒体ポンプは従来の遠心式ポンプに対して2倍

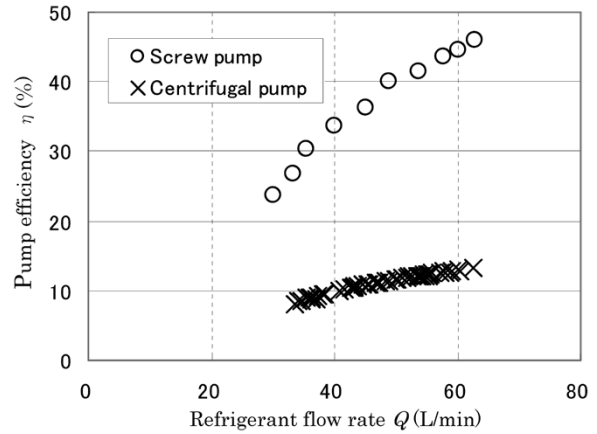


図12 ポンプ効率 η と冷媒流量 Q
Fig.12 Relationship between pump efficiency and medium flow rate

以上の効率となっていることがわかる。小形バイナリー発電装置のような高揚程・小流量の使用条件で、市販ポンプより高い効率で運転できることが確認できた。

むすび= スクリュ圧縮機技術を応用して、バイナリー発電システム用冷媒ポンプを開発した。小形発電システムの場合、循環量が小流量のため、現在、主に大形発電システムで使用されている遠心式ポンプでは効率が悪くなる。そこで、小流量の油ポンプに使用されているギヤポンプを冷媒に使用できるようにロータ形状を変更した。その結果、ポンプ効率が向上するとともに、吐出圧力の変動によらず、安定した流量を確保することが可能となった。

参考文献

- 1) 成川 裕. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.1, p.93.
- 2) 公開特許. 特開平7-27083.
- 3) 天野靖士. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.3, p.17-20.
- 4) 吉村省二. R&D神戸製鋼技報. 1999, Vol.49, No.1, p.48-52.
- 5) 吉村省二. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.3, p.2-7.

(技術資料)

蒸気駆動式オイルフリー空気圧縮機

Steam Driven Oil-free Screw Compressor



山本祐介*1
Yusuke YAMAMOTO



松井孝益*1
Takayoshi MATSUI

Kobe Steel has developed a new steam-driven oil-free air compressor, "Emeraude-SD." The machine can be used effectively with the conventional steam that is widely used in industry, in spite of its small flow, low pressure, and flow rate variations. This paper introduces new product that has been developed using oil-free air compressor technology and screw expander technology.

ま え が き = 地球温暖化や環境問題が世界的に取組むべき社会問題として認識されて久しい。わが国でも地球温暖化対策推進法や改正省エネルギー法が施行されて以降、産業界では徹底したエネルギー利用の合理化やエネルギー効率の高い機器の導入、排熱・予熱の有効活用などに積極的に取り組んでいる。

熱源、動力源として利用されている蒸気利用分野もその一つで、これまでも、エコノマイザやドレン回収、予熱器の設置といった排熱回収の強化や燃焼効率向上といった技術開発により蒸気量の大幅な節約効果をあげてきた。現在、これらの取組は広く普及し、さらなる省エネルギー技術が求められている。そのような中、多くの工場プロセスで見られる数t/h程度の比較的少ない蒸気量、1 MPaG未満の比較的低压で流量変動を伴う使用条件下では、まだ多くの未利用エネルギーが存在している。

そこで当社では、産業界で広く利用されている小流量、低压かつ流量変動を伴う蒸気の有効利用を図り、さらなる省エネルギーとCO₂排出量の削減を推進することを目的として、2008年に75kW出力相当の圧縮熱回収蒸気駆動式エアコンプレッサ「Kobelion^{注1)}-SD（以下、コベライアンTMSDという）『SD1310-HR』¹⁾を開発した。

本稿では、さらなる普及を目指して先行開発機で確立したスクリュエキスパンダ技術²⁾、および製造される空気に油分を含まないオイルフリー空気圧縮機技術³⁾を融合して開発した「Emeraude^{注2)}-SD（以下、エメロードTMSDという）『SD770L-HR』」について概説する。

脚注1) Kobelionおよびコベライアンはそれぞれ当社の登録商標、商標である。

脚注2) Emeraudeおよびエメロードはそれぞれ当社の登録商標、商標である。

1. 商品コンセプト

エメロードSDは、「当社のスクリュエキスパンダ技術とオイルフリースクリュ圧縮機技術を融合し、これまで有効利用できなかった蒸気エネルギーを活用することで、さらなる省エネルギーとCO₂排出量の削減に貢献する」というコンセプトを掲げて商品開発した。エメロードSDの外観を図1、仕様を表1に示す。



図1 SD770L-HRの外観
Fig. 1 Appearance of SD770L-HR

表1 エメロードSDの仕様
Table 1 Specifications of Emeraude-SD

Type	SD770L-HR
Free air delivery (m ³ /min)	7.7
Discharge air pressure (MPaG)	0.7
Supply steam pressure (MPaG)	0.85
Exhaust steam pressure (MPaG)	0.40
Differential pressure (MPa)	0.45
Steam flow (t/h)	2.5
Thermal recycle output of water (kW)	78.8
Dimensions (mm)	2,080×1,200×1,500
Weight (kg)	1,440

*1 機械事業部門 圧縮機事業部 冷熱・エネルギー部

2. エメロードSDの特徴

2.1 蒸気駆動式エアコンプレッサの作動原理

エメロードSDの駆動機であるスクリュエキスパンダの膨張行程の模式図を図2、本体断面構造図を図3に示す。スクリュエキスパンダは、雄ロータ、雌ロータ、およびケーシングで構成される空間（以下、作動室という）ごとの圧力が異なるため、高圧域と膨張後の低圧域との圧力差が各ロータの受圧面に生じる。この圧力差に対応した回転トルクがロータに働くことで互いのロータは反対方向に回転する。ロータが回転することによって給気ポートから遮断された後の作動室では、回転とともに容積が増大して作動室内の蒸気が膨張し、ロータに回転トルクを与える。スクリュエキスパンダでは、一連の動作が連続的に繰返されることによって動力が発生する⁴⁾。この動力がギヤを介して空気圧縮機側の駆動軸へ伝達され、スクリュエキスパンダと逆の原理で空気を圧縮する。

理想スクリュエキスパンダの発生仕事は、図4の指圧線図中の(0-1-2-3-4)で囲まれた斜線部面積で表される(0-1:給気工程, 1-2:膨張行程①, 2-3:膨張行程②, 3-4:排気工程)。縦軸は圧力、横軸は行程体積を表している。ここでは、排気圧力がスクリュエキスパンダの内部排気圧力に比べて低い場合($P_2 > P_3$)を示している。

一方、2段空気圧縮機の理想必要仕事は、図5の指圧線図中の(0-1-2-3-4-5)で囲まれた斜線部面積で表される(0-1:給気工程, 1-2:圧縮行程①, 2-3:中間段冷却, 3-4:圧縮行程②, 4-5:排気工程)。

蒸気駆動式エアコンプレッサでは、スクリュエキスパンダの発生トルクと空気圧縮機の必要トルクが等価になるところで回転数が一定に保たれる。

2.2 制御

空気圧縮機の吐出圧力は工場の使用空気量に影響を受け、ある範囲で変動する。また、蒸気圧力も同様に変動を伴うため、双方の変動に追従できる制御プログラムおよび高い応答性を持った制御機器を備える必要があった。図6にエメロードSDの系統図を示す。

エメロードSDでは、駆動側の機器であるスクリュエキスパンダの制御に空気動アクチュエータ式制御弁を使用し、エキスパンダの上流圧力制御を行っている。制御弁に空気動式を採用することにより、急激な蒸気圧力変動に対する高い追従性を実現した。負荷側の機器である空気圧縮機には、電動式エアコンプレッサで採用している給気調整弁をなくし、圧縮後の空気を無段階に大気へ放気できる放風弁(Blow valve)を新たに配置した。これにより、給気調整弁の開閉による急激な負荷変動をなくし、駆動力と制動力のバランスを保ちながら電動式と同等のロード・アンロード運転を可能とした。加えて、起動/停止時にも放風弁を開放した状態とすることでスムーズな立上がり/停止動作を実現した。

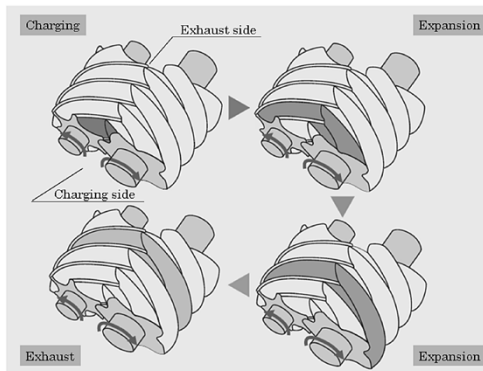


図2 スクリュエキスパンダの膨張行程
Fig.2 Expansion stroke of screw expander

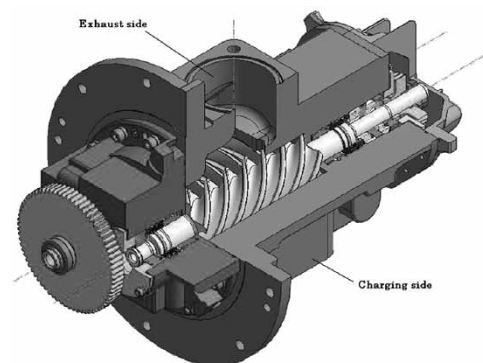


図3 スクリュエキスパンダの本体構造
Fig.3 Main structure of screw expander

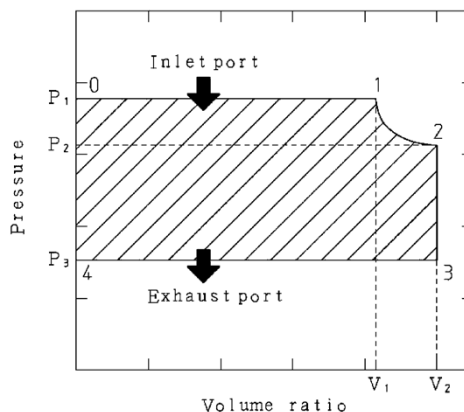


図4 スクリュエキスパンダの指圧線図
Fig.4 Indicator diagram of screw expander

2.3 圧縮熱回収ユニット

エメロードSDでは、空気の圧縮熱、メカニカルロスおよびスクリュエキスパンダ軸封部からの漏れ蒸気の熱を熱交換器により間接的に回収している。冷却媒体として軟水を利用しており、その水をボイラ給水として利用できる。あるいは他の温水利用ユーティリティへ供給することも可能である。エメロードSDでは、蒸気を駆動源としているため、必ずボイラと組合せたシステム構成となることから、前述のように温水として回収した熱を全て無駄なく利用することができ、システム全体のエネルギー効率を大幅に向上させることを可能にした。また、これまでコベライアンSDシリーズでは別置きであった圧縮熱回収ユニットをパッケージ内に収めたことにより、同出力の電動式エアコンプレッサと同等サイズの小型化に成功した。

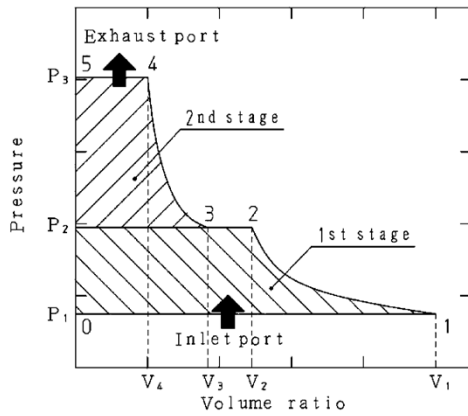


図5 空気圧縮機(2段機)の指圧線図

Fig. 5 Indicator diagram of two-stage air compressor

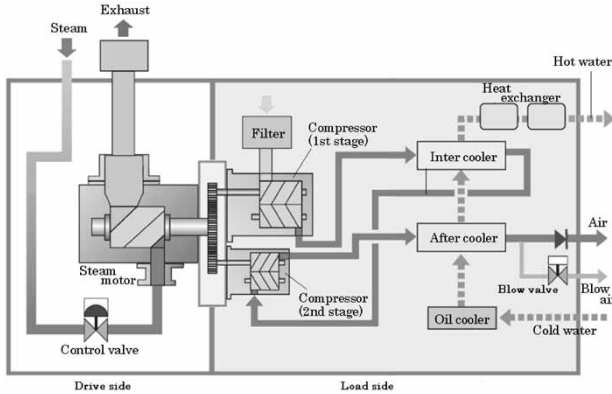


図6 システム図

Fig. 6 System diagram

3. エメロードSDの導入による省エネ効果の試算例

ここでは、多くの工場で蒸気プロセス中に設置されている減圧弁の代替としてエメロードSDを設置し、減圧時に得られた動力で駆動したエアコンプレッサの圧縮空気を既存の空気ラインへ送気する事例(図7)を考える。このときの省エネ効果を試算した結果を表2に示す。同出力の従来型電気駆動式エアコンプレッサとの比較によ

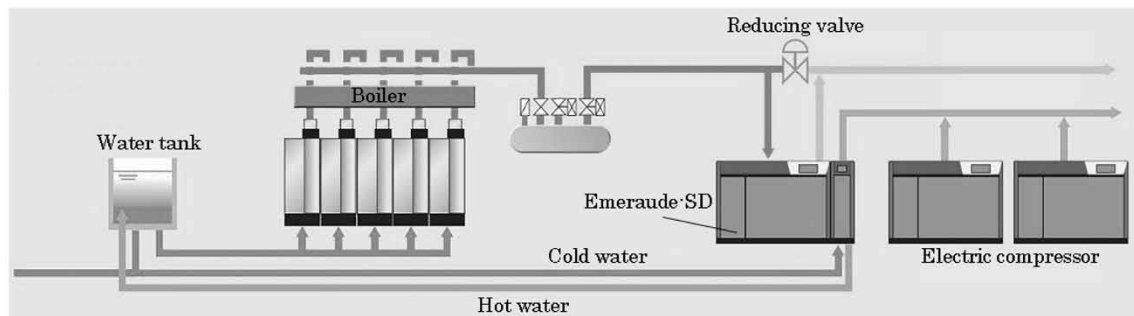


図7 システムフロー

Fig. 7 System flow

表2 導入メリット試算
Table 2 Calculation of introduction merit

	Conventional	Emeraude-SD
Type	FE770W	SD770L-HR
Shaft power (kW)	54.5	55
Free air delivery (m ³ /min)	7.7	7.7
Power of compressor / Steam consumption (kW)	60	114
Thermal recycle output (kW)	—	78.8
Emission factor of carbon dioxide	0.555kg-CO ₂ /kWh	2.23kg-CO ₂ /Nm ³
Annual operation time (h)	8,000	8,000
Operating costs (¥)	5,735,000	625,000
Carbon dioxide emission (t/year)	266	17

※Condition : using city gas-fired boiler

※Steam consumption include leak steam from the axis.

※13A lower heating value : 40.6MJ/Nm³, Boiler efficiency : 96%

※Electricity rate:¥12/kWh, 13A gas rate:¥80/m³

※"Thermal recycle output" = "Heat of compression" + "Heat of leak steam"

るメリット試算の場合、ランニングコストにおいて年間511万円(削減率約89%)の削減、またCO₂排出量では年間249トン(削減率約94%)の削減が期待できる。

むすび=エメロードSDは、小流量、低圧かつ流量変動を伴う蒸気を有効利用し、さらなる省エネルギーとCO₂排出量の削減に貢献できる商品である。当社は今後も、蒸気の有効利用を通じて地球環境問題に貢献できる商品開発を進めていきたい。

参考文献

- 1) 松隈正樹ほか. クリーンエネルギー. 2009, Vol.18, No.1, p.52-56.
- 2) 桑原英明ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.3, p.24-28.
- 3) 泉谷清宣. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.3, p.29-32.
- 4) 松隈正樹ほか. 省エネルギー. 2007, Vol.59, No.8, p.110.

(技術資料)

小形蒸気圧縮機「MSRC™」によるボイラの省エネルギー

Micro Steam Recovery Compressor "MSRC™" for Energy-saving in Boiler Systems



尾上真也*1
Shinya ONOE



桑原英明*1
Hideaki KUWABARA

Steam is used in a wide range of applications in many industries. The flash steam, which is generated at near atmospheric pressure from the condensate water after being used in the process, is released into the atmosphere without being recovered. Kobe Steel has developed the micro steam recovery compressor "MSRC™" to use the flash steam effectively. This paper describes "MSRC," which makes it possible to utilize the flash steam with high efficiency in a boiler system.

まえがき = 昨今、地球温暖化防止のため温室効果ガスの排出量を削減することが世界的に求められている。また、石油や天然ガスなどの化石燃料の高騰により、経済的にも省エネルギーの取組が求められており、産業界では省エネルギー機器の需要が高まっている。

国内・国外問わず多くの産業では、燃焼式ボイラによって生成された水蒸気が、動力源や加熱、蒸留、殺菌、乾燥、洗浄などの幅広い用途で利用されている。図1に燃焼式ボイラを利用した蒸気システムの代表的なフローを示す。ボイラで生成された蒸気は減圧弁により必要な圧力に調整された後、工場内の各プロセスで使用される。プロセスで使用された蒸気はドレンとなり、ドレンタンク内で圧力が開放されることでフラッシュ蒸気が発生する¹⁾。ドレンタンク内のドレンはボイラ給水として回収され、再び蒸気として利用されているが、発生したフラッシュ蒸気は大気に放出されていることが多い。このため、ボイラが蒸気生成に要した化石燃料の数%が有効利用されずに無駄に捨てられているのが現状である。

そこで、当社が保有するスクリュウ圧縮機の技術をベ-

スとして、有効に利用されていない蒸気を再び利用価値のある蒸気として再生することができる小形の蒸気圧縮機を開発した。従来の蒸気圧縮機は大形ターボ式しかなく、小容量の蒸気に対しては効率が悪くて使用できなかった。しかし、今回開発した蒸気圧縮機をボイラシステムに用いることにより、効率よく、かつ低コストで蒸気を回収・再生することができる。また、代表的な蒸気圧力条件で使用すると3年以内の投資回収が可能である²⁾。

本稿では、2011年より新たに量産販売を開始した小形蒸気圧縮機「MSRC™^{注)} (Micro Steam Recovery Compressor)」について紹介する。

1. MSRCのシリーズ構成

MSRCには、容量の異なるMSRC37LとMSRC160Lの二つのモデルがある(図2)。それぞれの内部構造は、スチームコンプレッサとIPM電動機、主インバータ、蒸気配管、ギヤボックス、および補機部品によって構成されている(図3)。

これらのモデルは、表1に示したように0.02~0.10MPaG

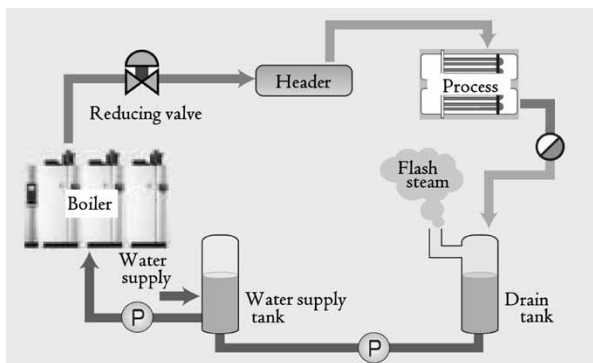


図1 小形貫流ボイラの代表的なフロー
Fig. 1 Typical process flow of micro once-through boiler

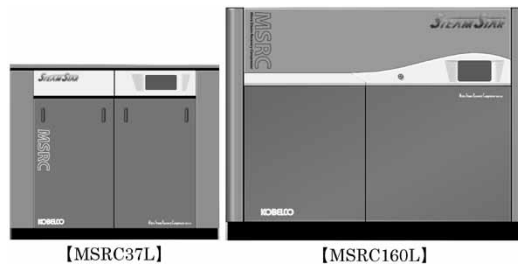


図2 MSRCの外観
Fig. 2 Appearance of MSRC

脚注) MSRCは当社の商標である。

*1 機械事業部門 圧縮機事業部 冷熱・エネルギー部

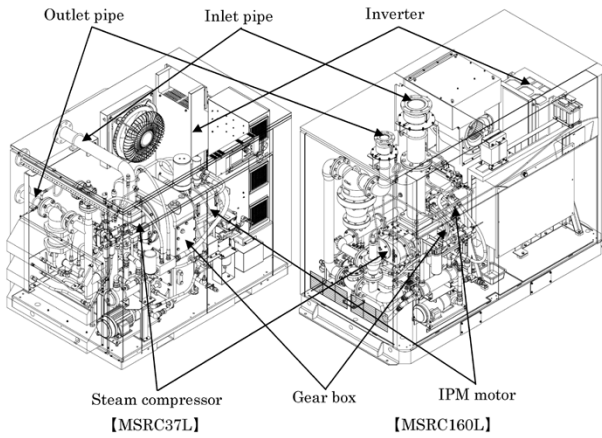


図3 MSRCの内部構造
Fig. 3 Inside view of MSRC

表1 MSRCの仕様

Table 1 Specifications of MSRC

Model		MSRC37L	MSRC160L	
Suction pressure	MPaG	0.02~0.10	0.05~0.10	
Discharge pressure	MPaG	0.2~0.5	0.3~0.8	
Maximum differential pressure	MPaG	0.45	0.75	
Discharge steam flow rate	kg/h	240~420	912~1363	
Motor output	kW	42	160	
Maximum power consumption	kW	47	182	
Power voltage	V	200/220	400/440	
Power Frequency	Hz	50/60		
Dimensions	Width	mm	1,800	
	Depth	mm	1,198	
	Height	mm	1,503	
Weight	kg		1,400	
	Temperature		°C	80~95
Utility	Injection water	Water flow rate	L/min	1.0
		Basic pressure	MPaG	0.05~0.2
	Cooling water of lubricating oil	L/min	22~	40~
	Instrument air	L/min	160	300
Installation location	Indoor / Outdoor			

の低圧蒸気をプロセスで使用される0.2~0.8MPaGまで昇圧する仕様になっており、400kg/hまでの蒸気量に対してはMSRC37Lが、1,360kg/hまでの蒸気量に対してはMSRC160Lが対応している。

2. MSRCの特徴

2.1 システムの基本原理

工場プロセスなどで発生する蒸気ドレンが大気圧付近で再蒸発して発生するフラッシュ蒸気や、工場プロセスなどで使用された後の低圧蒸気は、相当量の熱エネルギーを持っているにもかかわらず、これまでは熱として回収する以外に利用することが困難だった。

ここで、ボイラとMSRCでの水のエンタルピー変化を考え、図4にその概念図を示す。一般的にボイラで蒸気を発生させる場合は、20℃の給水を燃焼ガスで159℃の飽和水まで加熱・蒸発させることによって圧力0.5MPaGの水蒸気を作っている（図中の太破線）。一方MSRCでは、いったん使用された蒸気のドレンから生じる低圧のフラッシュ蒸気や使用済みの低圧蒸気、例えば0.05MPaGの蒸気をプロセス圧力0.5MPaGまで再昇圧する（図中の実線）。このため、ボイラで新たに蒸気を生成する場合に比べ、蒸気を持つエネルギーのうちの潜熱、および過半の顕熱を与える必要がないことから、MSRCでは効率よく、かつ低コストで工場プロセス用蒸気を再生することができる。

2.2 MSRCユニットの特長

MSRCの系統図を図5に示す。MSRCは、単段圧縮機

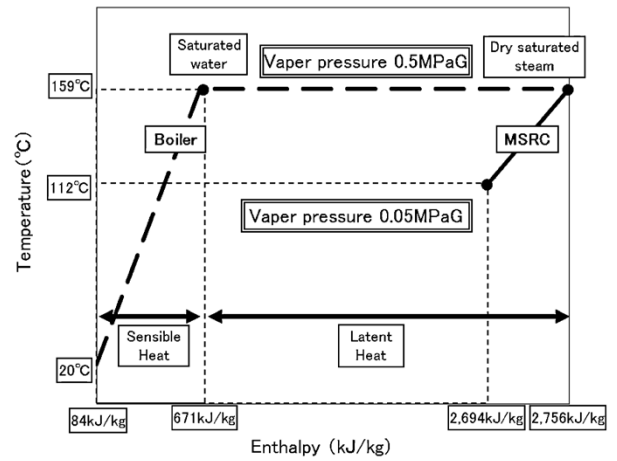


図4 ボイラとMSRCのエンタルピー変化の概念図
Fig. 4 Conceptual diagram of enthalpy change of water in the boiler and MSRC

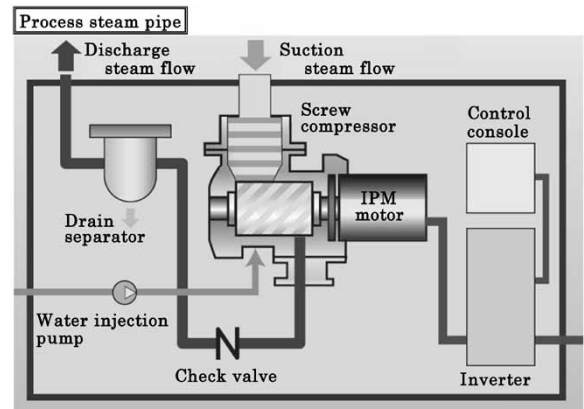


図5 MSRCの系統図
Fig. 5 System diagram of MSRC

により0.05MPaGから0.5MPaGあるいは0.8MPaGまで蒸気を圧縮することができる。圧縮機はインバータ制御の高速IPMモータにより駆動され、高速IPMモータは、主インバータを介して回転数を制御されている。このため、圧力変化に対して柔軟に追従でき、部分負荷でも効率よく蒸気を圧縮できることが特長である。また、後述するように、水蒸気を圧縮する過程で発生する圧縮熱を冷却するために補給水を圧縮機内に噴射しており、蒸発しきれない噴射水がラインに送出されることが考えられる。これを除去してプロセスに飽和蒸気を供給する目的から、ドレンセパレータを設置している。

2.2.1 高速IPM電動機とインバータによる容量制御

MSRCは、スクリュの回転数制御にPID制御 (Proportional Integral and Derivative control) を採用しており、フラッシュタンクで発生する蒸気量の変化に合わせて吸込圧力を一定に保つ運転を行うことができる。スクリュの回転数制御の範囲は二つのモデルともに10~100%であり、幅広い運転範囲に対応していることが特長である。

2.2.2 補給水噴射

圧縮機内の蒸気の温度は、蒸気を圧縮する際の圧縮熱によって高温となる。例えば、圧力0.05MPaGの蒸気を吸込み、圧力0.50MPaGまで断熱圧縮させる場合、112℃で吸込まれた飽和蒸気は約260℃まで上昇する。一方、圧縮機のロータ同士は非接触で微小な隙間を保ちながら

高速回転しており、熱膨張によってロータ同士やロータとケーシングが接触するリスクがある。このため、圧縮機内部に補給水を噴射し、圧縮機のロータやケーシングを冷却している。また、圧縮機内に噴射された補給水は、圧縮熱により一部が気化することから、吐出蒸気は圧縮機に吸込まれた蒸気よりも、質量比で最大約10%増加する。つまり、圧縮熱の一部を蒸気として回収していることが特長である。

3. MSRCの性能

MSRC37LおよびMSRC160Lの性能をそれぞれ表2、表3に示す。従来の大形ターボ式蒸気圧縮機では、蒸気量が数百t/hになり、効率は70%を超えるものもあるが、MSRCが対象としている蒸気量1t/h前後では使用することができない。一方、MSRCではスクリュ式圧縮機を使用しており、ロータ1回転当たり常に一定体積の蒸気を吸込む特性がある。そのため、表2、表3に示すように1t/h以下の蒸気量でも効率よく蒸気を圧縮することができる。また、圧縮機の吸込圧力が高くなるほど吸込む蒸気の密度が高くなり、単位時間あたりに圧縮機が吸込める蒸気量も増加する。また、吐出圧力と吸込圧力との圧力差（圧縮差圧）が低くなることでも、吸込める蒸気量が増加し、より高効率な運転が可能となる。

表2 MSRC37Lの性能
Table 2 Performance of MSRC37L

Discharge pressure (MPaG)	Suction pressure (MPaG)			
	0.02	0.05	0.10	
0.20	①	211.2	294.2	429.4
	②	213.1	300.0	433.2
	③	27.3	27.8	28.6
0.50	①	150.5	228.3	354.7
	②	173.7	254.4	376.6
	③	45.0	45.3	45.7

①	Suction steam flow (kg/h)
②	Discharge steam flow (kg/h)
③	Maximum power consumption (kW)

表3 MSRC160Lの性能
Table 3 Performance of MSRC160L

Discharge pressure (MPaG)	Suction pressure (MPaG)			
	0.05	0.08	0.10	
0.40	①	908	1177	1355
	②	980	1247	1424
	③	112	119	124
0.50	①	841	1107	1282
	②	927	1190	1364
	③	126	132	136
0.80	①	752	1007	1175
	②	880	1131	1297
	③	169	173	175

①	Suction steam flow (kg/h)
②	Discharge steam flow (kg/h)
③	Maximum power consumption (kW)

4. 導入事例と導入メリット試算例

MSRCの導入事例を図6に示す。MSRC導入前のシステムフローは次のとおりである。ボイラで生成された蒸気は減圧弁にて所定圧力まで減圧され、プロセスにて熱源などに使用される。熱を奪われた蒸気は凝縮し、ドレンタンクに回収される。ドレンの一部はフラッシュ蒸気として大気中へ放出され、残りのドレンはボイラ給水として再利用される。

MSRCを導入した場合、ドレンタンクから大気へ放出されているフラッシュ蒸気をMSRCで回収し、再昇圧してプロセスに戻すことができる。表4は、MSRC導入時の経済効果を試算したものである。試算した内容は、蒸気圧力0.4MPaG、蒸気温度152℃で蒸気を利用しているプロセスからドレンが排出され、そのドレンが0.05MPaGでフラッシュして生じた低压蒸気をMSRC37Lで回収・再生し、プロセスへ再送する場合である。MSRCで再生した蒸気量と同量の蒸気をガス焼きボイラで生成した場合に必要な燃料費と燃焼により発生するCO₂量、およびMSRCで消費する電力量と発電に伴い発生するCO₂量を求めた。両者の差がメリットとなり、年間稼働時間を6,000時間とすると、燃料費の削減額は592万円/年、CO₂の排出削減量は159t/年という効果が期待できる。

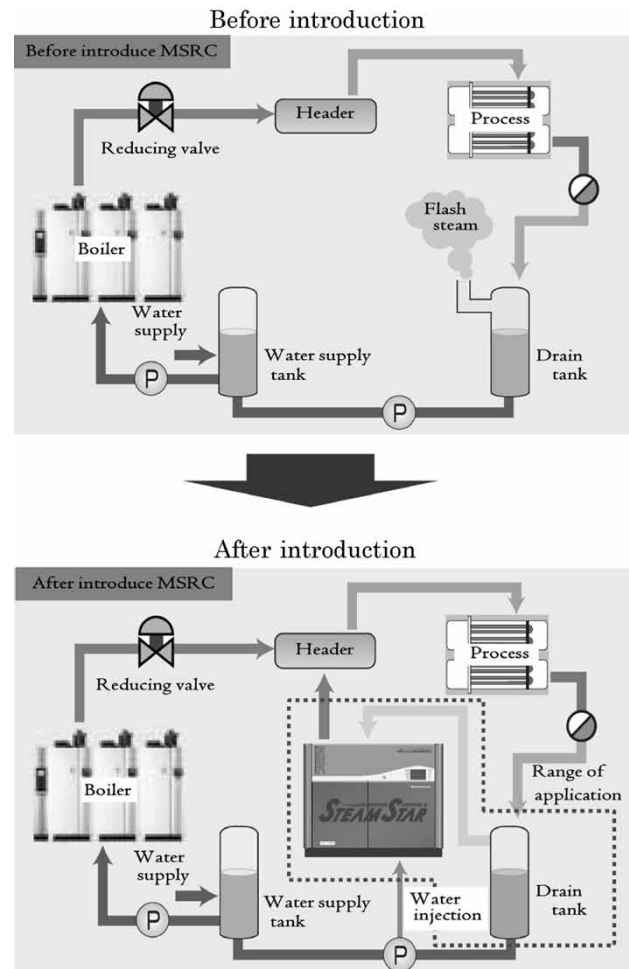


図6 MSRC導入によるボイラシステムフローの変化
Fig. 6 Flow of boiler system before and after introducing MSRC

表 4 MSRC導入効果の試算結果
Table 4 Estimated merit of introduction of MSRC

Steam flow rate	kg/hour	3,100
Flash rate	%	7.7
Suction pressure	MPaG	0.05
Discharge pressure	MPaG	0.4
Discharge steam flow rate	kg/hour	260
Power consumption	kW	41.7
Annual operating time	hour/year	6,000
Merit for one year	thousand yen / year	5,922
CO ₂ reduction	ton/year	159

むすび=MSRCは、従来熱回収でしか利用できなかったために、大気中に捨てられていた利用価値の低い蒸気を、低コストで再び利用価値の高い蒸気に再生することができる、他に例を見ない商品であり、省エネルギーとCO₂排出量の大幅削減に効果のある商品となっている。当社は、MSRCの普及を図ることで、地球環境保全およびCO₂削減に貢献していきたい。

参 考 文 献

- 1) 藤井照重, トラッピング・エンジニアリング 利益を生む省エネ・保全技術. 第1版, 省エネルギーセンター, 2005, p.220-221.
- 2) 松井孝益, 省エネルギー. 省エネルギーセンター, 2012, Vol.64, No.4, p.38-40.

(解説)

汎用ラジアル蒸気タービン発電装置（エコ・ラジアル）の開発と今後のマーケット対応

Development and Approach to Future Market of the Eco-Radial Steam Turbine Generator



吉田 敦*1
Atsushi YOSHIDA



松谷 修*2
Osamu MATSUTANI

Eco-Radial, the new model of a radial turbine power generation system for steam pressure less than 0.98MPaG, has been developed and brought to market. Such measures as downsizing, reducing the number of parts, and reducing the machining time have reduced the original manufacturing cost by 50%. This paper introduces the development of the new model and our future approach to the market.

まえがき = 当社は、1934年に空気分離装置の寒冷発生用として膨張タービンを自社開発し、1987年に蒸気タービンを上市、以降本格的な省エネ装置として拡販に努めてきた。蒸気はいかに及ばず、化学プラントの反応塔から発生する排ガスや中低温排熱回収用カーナサイクルに使用される水・アンモニア混合ガス、液化天然ガスおよび都市ガスに至るまで、様々なガスに対応できる汎用仕様のラジアルタービンを設計、製作し、多くのユーザーから好評を得ている。

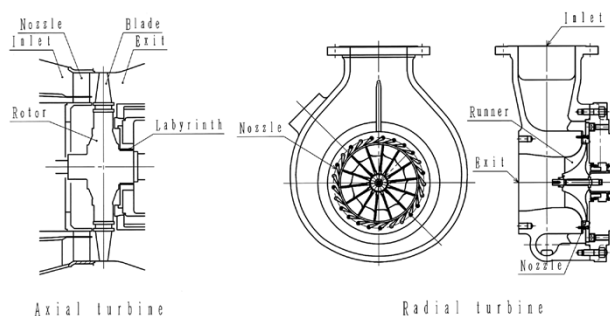
一方で、汎用仕様の本タービンは一品受注品であるため高コストであり、限定された客先へのみ納入するに留まっている。

そこで、幅広いユーザーが存在する0.98MPaG未満の汎用ボイラ蒸気を対象として、ラジアルタービンの特長である高効率を維持し、かつ低コストの小形汎用ラジアルタービン発電装置（以下、エコ・ラジアル^{注1)}）を開発、上市した。本稿ではエコ・ラジアルの開発の概要および今後のマーケット対応を紹介する。

1. 当社汎用仕様ラジアルタービンの特長

1.1 高効率

一般的にタービンには軸流型とラジアル（輻流）型があり、当社はラジアルタービンを採用している。本ラジアルタービンは、減速機を内蔵していることから高速軸および低速軸の速度比を選択でき、軸端にタービン羽根車（ランナ）が設置された高速軸の回転数を最適化することにより高効率化が可能となる^{1)~3)}。図1にラジアルタービンと軸流タービンの構造、また図2に特定条件下における両者の発電量を示す。低圧小出力仕様という



Axial turbine Radial turbine

図1 軸流タービンとラジアルタービンの比較
Fig. 1 Comparison of axial turbine and radial turbine

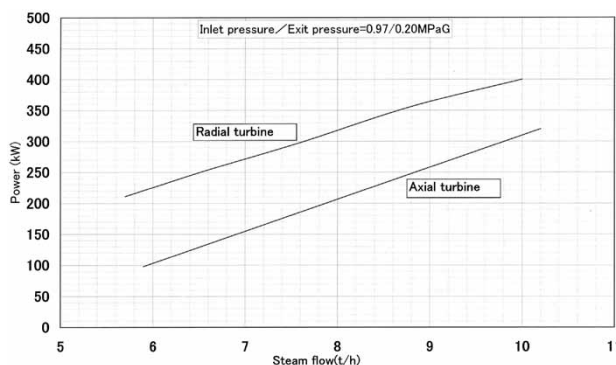


図2 ラジアルタービンと軸流タービンの発電量比較
Fig. 2 Power comparison of Eco-Radial and axial turbine

条件において、ラジアルタービンが軸流タービンに対して優れていることがわかる。

1.2 高信頼性

ラジアルタービンの特長の一つとして「部品点数が少くない」という点が挙げられる。例えばタービン羽根車を考えてみると、軸流タービンの場合、一つの羽根車に数十枚の動翼（ブレード）が埋込まれる構造となる。他方、ラジアルタービンの場合は動翼と一体となった羽根車

脚注1) エコ・ラジアルおよびEco-Radialは当社の登録商標である。

*1 機械事業部門 圧縮機事業部 回転機技術部 *2 神鋼造機㈱

(ランナ) を一つの鍛造素材から削り出して製作するため、部品点数としては一つとなる。この羽根車が先端に取付けられている高速軸ロータは、わずか10点足らずの部品で構成される。このように部品点数が少ないため、機械構造上シンプルであり、信頼性を確保しやすいというメリットが生まれる。

1.3 高耐久性

当社における初号機である500kW級の小形タービンは未だにお客様の工場で順調に運転継続している。また流体を蒸気に限らなければ30年以上の運転実績を誇るものも多数存在する⁴⁾。

2. エコ・ラジアルの開発

2.1 開発の背景

地球温暖化対策や東日本大震災後の電力需給問題から、産業界では電力の自給率の向上が大きな課題となっている。当社は2007年よりスクリュ式小形蒸気発電機「スチームスターTMMSEGTM注2)」を販売しており、既に70台以上の納入実績がある。最近ではとくに節電対策の需要が伸びており、160kW機を複数台設置する節電案件も出現している。このような「スチームスターMSEG」の上位市場に対応する目的で、従来の非汎用型ラジアルタービン式蒸気発電機を小形化、汎用化し、安価なユニットタイプのエコ・ラジアル(型番: GRT160e, 最大出力400kW)の開発に取り組んだ。表1にエコ・ラジアルの設計仕様を示す。

2.2 汎用化と原価低減

本開発においては、ラジアルタービンの特長である高効率を維持しながら大幅に原価低減することを第一目標とした。原価低減のための具体策として、本開発機適用範囲内での汎用化による部品共通化(例えば、ギヤケーシング、タービンケーシングなどの大形鋳造品を共通化することにより、鋳造木型恒久化による鋳造木型原価低減が可能。)や各部品の重量低減、構造簡素化などを実施した。その結果、従来製造原価の50%程度まで原価低減が可能となった。そのなかで、ラジアルタービンの主要部品であるタービンランナおよびタービンノズルの原

表1 エコ・ラジアルの仕様
Table 1 Specification of Eco-Radial

	Eco-Radial (GRT160e)
Inlet condition:	
Max. pressure (MPaG)	0.97
Max temperature (°C)	210
Exit pressure (MPaG)	0~0.5
Steam flow (t/h)	2.5~10.0
Max. power (kW)	400
Generator type	Induce
Size(mm)	1,900×3,500×1,900
Weight(kg)	3,500
Control system	4 options with inlet valve (power, inlet pressure, exit pressure or flow constant control)

脚注2) スチームスターおよびMSEGは当社の商標である。

価低減策を次節で概説する。

2.3 タービンランナブレードおよびタービンノズルの削減

タービン本体を構成する多くの部品のなかでも、タービンランナの加工原価は最も高価である。しかしながら、タービン性能に直接影響する部品のため、これまで大胆な原価低減が実施できなかった。また、タービンノズルにおいても、同様の理由から大胆な原価低減ができなかった。本開発では、大幅な原価低減を実施しつつ、タービン性能への悪影響を最小限とすることを目標にして、タービンランナブレード枚数およびタービンノズル枚数の低減による加工費低減を検討した。

2.3.1 加工時間の低減

タービンランナブレード枚数およびタービンノズル枚数の低減により上記部品のガス通路部が広がる。このため、加工時に使用するドリル径を大きくすることができ、加工時間を縮小することが可能となる。本開発においては、表2のように枚数を低減することによりこれら部品の加工費を60%程度に低減できた。

2.3.2 実機によるタービン性能の検証

タービンランナブレード枚数およびタービンノズル枚数を表2のように削減した場合のタービン性能を検証するため、実機を用いたエア試運転を行った。本試運転の条件を表3に示す。

試運転結果は、従来と比較して最大97%程度のタービン効率比を発揮することが確認できた(図3)。この結果より、ブレード枚数の削減によるタービン性能への悪影響は、許容範囲と判断できる。

2.3.3 CFD解析によるタービン性能の検証

2.3.2項のように、タービンランナブレード枚数およびタービンノズル枚数の削減により、定量的に許容範囲ではあるもののタービン効率の低下が判明した。

この要因を検討するためCFD(Computational Fluid Dynamics)解析を実施した。

(1) ノズル枚数削減によるタービン効率への影響

実機試運転において、ノズル枚数削減によるタービン効率への影響はわずかであることが判明している。よって、本CFD解析において、ノズル枚数は従来枚数(26枚)のみのモデルとする。

(2) CFD解析モデルおよび解析条件

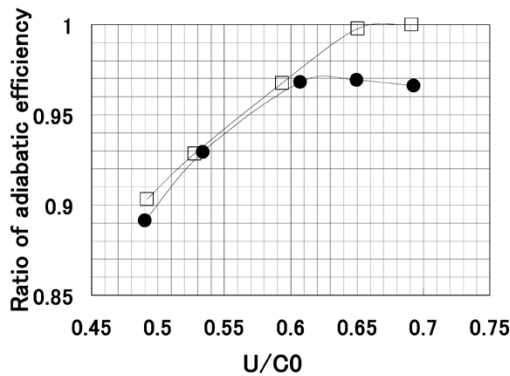
解析対象(モデル化の範囲)は、タービンノズル、タ

表2 エコ・ラジアルとオリジナルの加工コスト比較
Table 2 Processing cost comparison with Eco-Radial and original

	Number of runner blades	Number of nozzles	Processing cost
Eco-Radial	11	14	60%
Original	14	26	100%

表3 テスト運転条件
Table 3 Test condition

Inlet pressure (MPaA)	Inlet temperature (°C)	Exit pressure (MPaA)	Test Gas
0.3221	184	0.12	Air



□ : Runner blade number =14+Nozzle number =26 (Original)
 ● : Runner blade number =11+Nozzle number =14 (Eco-Radial)
 U/C0 : Dimensionless number showing turbine operation condition
 図3 実機試運転によるタービン性能テスト結果(断熱効率比—U/C0)
 Fig.3 Test result of turbine performance (Ratio of adiabatic efficiency vs. U/C0)

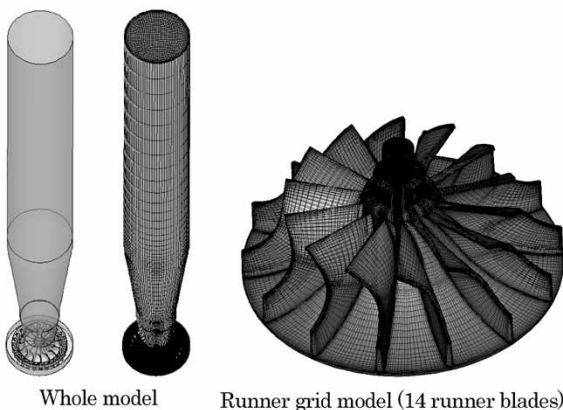


図4 解析モデル
 Fig.4 Analysis model

ービンランナ, 出口管および直管(実機試運転における出口側圧力測定部まで)の一連の流路とした(図4)。また, 解析条件は以下のとおりである。

- ・使用ソフト: ANSYS FLUENT R13
- ・基礎方程式: 連続の式, ナビエ・ストークス方程式, エネルギー式
- ・乱流モデル: k-ε SST2方程式モデル
- ・境界条件: 実機試験条件(表3)と同一
- ・回転数などの条件: 表4参照

なお, ランナブレード枚数は, 従来の14枚のほかに9枚を採用しており, いずれも実機試運転で採用した11枚とは異なる。これは, 枚数を大きく変えた2種類の条件で解析することにより, 効率低下の要因を解析の面から明確にするためである。

(3) 解析結果

タービン効率については, 定性的には実機試運転結果とほぼ同様の結果が得られた(図5)。また, ランナ出口における相対流速は, 図6に示した解析結果から,

- ・U/C0=0.7の場合

出口負圧面シュラウド側周辺の相対流速において, ブレードが14枚の場合は200m/s程度であった。一方, ブレードが9枚の場合は0~15m/s程度となり, 低速領域〔剥離(はくり)領域〕が存在している。

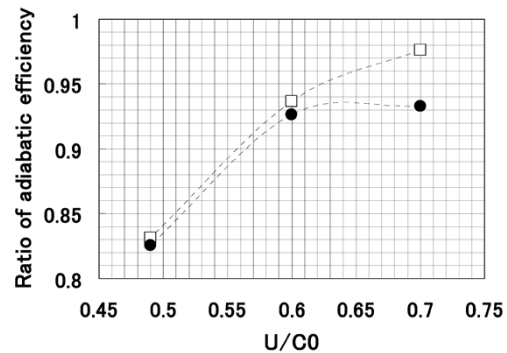
- ・U/C0=0.6, 0.49の場合

表4 解析条件

Table 4 Analysis conditions

Case	U/C0	Rotation speed (rpm)	Number of runner blades
Case1	0.7	39,800	14
Case2	0.6	34,000	14
Case3	0.49	27,200	14
Case4	0.7	39,800	9
Case5	0.6	34,000	9
Case6	0.49	27,200	9

Number of nozzles : 26 in all cases



□ : Runner blade number =14+Nozzle number =26 (Original)
 ● : Runner blade number =11+Nozzle number =14 (Eco-Radial)
 U/C0 : Dimensionless number showing turbine operation condition
 図5 CFD解析によるタービン性能カーブ(断熱効率比—U/C0)
 Fig.5 Turbine performance curve by CFD analysis (Ratio of adiabatic efficiency vs. U/C0)

出口側の流速分布は, ブレード枚数の差異による影響ほとんど見られなかった。

(4) ランナブレード枚数が及ぼす影響のまとめ

ブレードが14枚の場合と9枚の場合における効率比およびランナ出口相対流速分布の差異の傾向をまとめると表5ようになる。これより, ブレードを14枚から9枚に削減した場合の効率比や出口相対流速分布には定性的に関連性(影響)があると推測する。

(5) ランナブレード枚数削減による効率低下の要因

上記(4)より, ブレード枚数削減による効率低下の要因はランナ出口相対流速部分分布の差異に関連していると推測する。とくに, 効率の差異が大きいU/C0=0.7においては, ブレード枚数削減により出口負圧面シュラウド側に生ずる低速領域(剥離領域)の影響が大きいと推測する。

2.4 蒸気による実負荷試運転

実負荷運転におけるエコ・ラジアルの軸振動や軸受温度, 漏れなどの機械的安定性を確認するため, レンタルボイラを用いて蒸気による実負荷試運転を実施した。その結果から, 実負荷においても問題ない運転ができることを確認した。

2.5 エコ・ラジアル開発のまとめ

- ①製造原価において従来比50%程度まで低減し, 当初の目標に到達した。
- ②原価低減の一つ方法として, ランナブレード枚数およびノズル枚数の削減を実施した結果, タービン性能の低下は許容範囲内であることを確認した。
- ③CFD解析により, ランナブレード枚数削減による

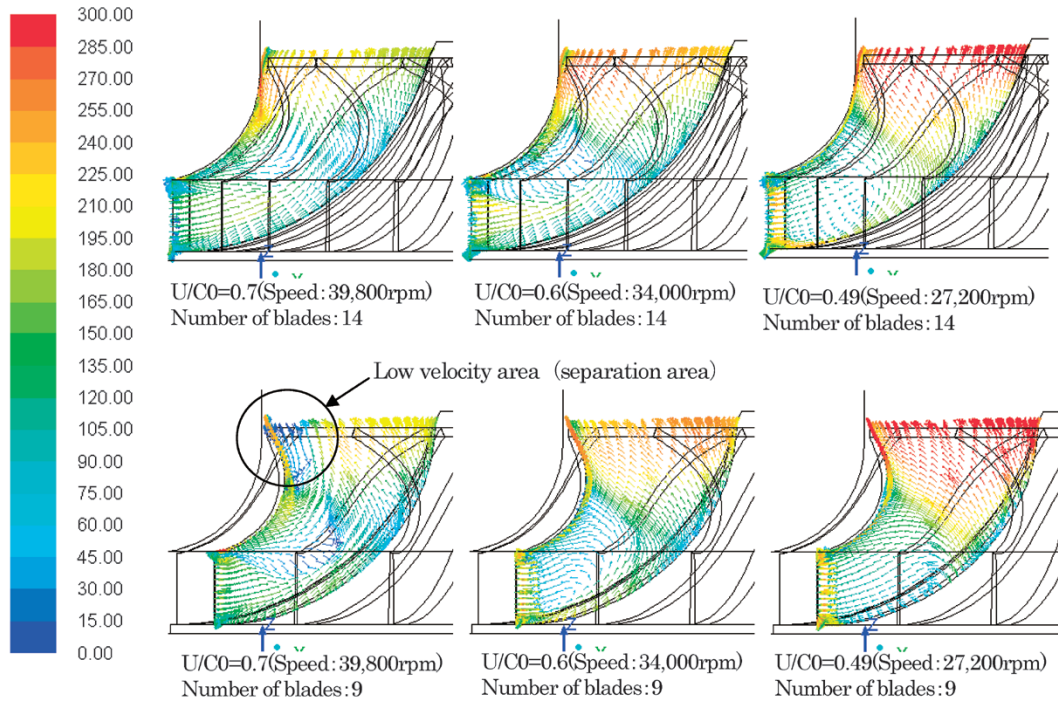


図6 CFD解析による子午面負圧面近傍相対速度ベクトル図
 Fig. 6 Relative velocity profile near suction meridian surface by CFD analysis

表5 効率比差異とランナー出口相対速度分布差異との関連性

Table 5 Relationship between difference of efficiency ratio and difference of relative velocity profile at runner outlet

U/C0	Difference of efficiency ratio between 14 blades and 9 blades in measured result	Difference of efficiency ratio between 14 blades and 9 blades in analytical result	Difference of relative velocity profile between 14 blades and 9 blades in analytical result
0.7	big	big	big
0.6	small	small	small
0.49	small	small	small

タービン性能低下の要因は、ランナ出口負圧面シュラウド周辺部に生ずる低速領域（剥離領域）であることが推定できた。現状ランナの特殊設計および新たなランナ開発において、本推定は役立つものと考えられる。

3. エコ・ラジアルの特長

図7にエコ・ラジアルのパッケージ外観を示す。また図8に従来の当社非汎用ラジアルタービン（GRT：Gas

Recovery Turbine) のパッケージ外観との比較を示す。エコ・ラジアルはタービン本体、発電機、配管、機器、および操作制御盤などの付帯設備を共通台板上にコンパ

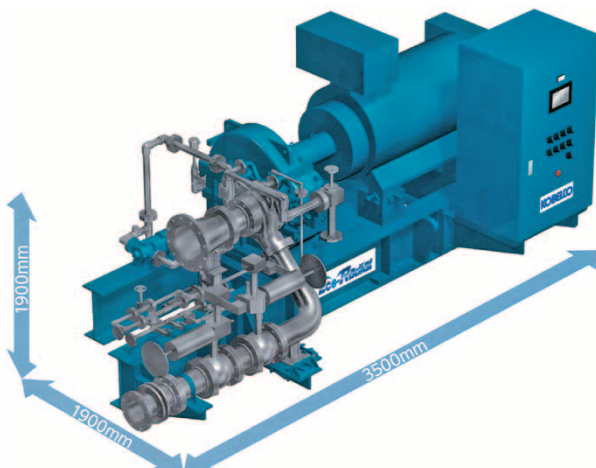


図7 エコ・ラジアル外観図
 Fig. 7 Eco-Radial outline

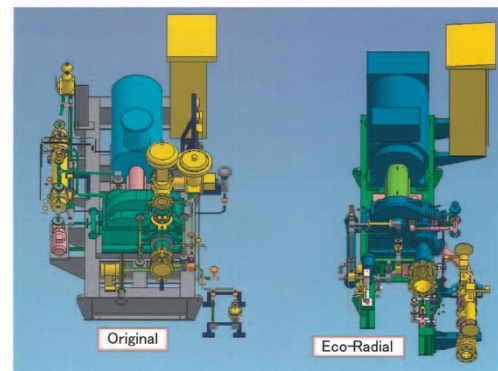
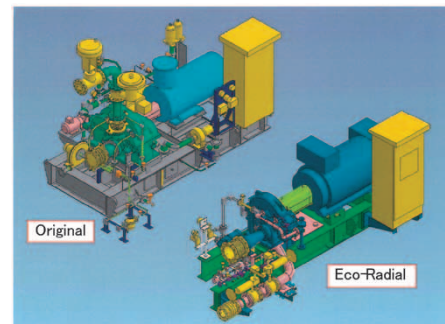


図8 従来機とエコ・ラジアルの外観比較
 Fig. 8 Outline comparison of original and Eco-Radial

クトにパッケージングしている。それによって、当社従来型ラジアルタービンに比べ設置スペースが縮小化し、また配管を含む現地工事の期間および費用の削減が可能となった。メンテナンス面では当社オリジナルの制御・監視システムである「Kobenicle[®]注3)」を標準装備している。Kobenicleは、運転状態や警報の監視が遠隔で常時可能である。また、1年分の運転データの記録が可能であり、長期にわたる運転管理や保守、保全にも威力を発揮する。

4. エコ・ラジアルの用途

図9にエコ・ラジアルの適用例を示す。エコ・ラジアルにより、工場の余剰蒸気の活用およびプロセス蒸気系減圧弁の代替利用など、未利用蒸気エネルギーからの発電に適用ができる。またタービン本体は圧縮機やポンプの小型ドライバのキーコンポーネントとして活用も可能である。海外では小規模ゴミ焼却プラントからの排蒸気など、国内に比べ多量の未利用蒸気があり、海外市場への展開も視野に入れていく。

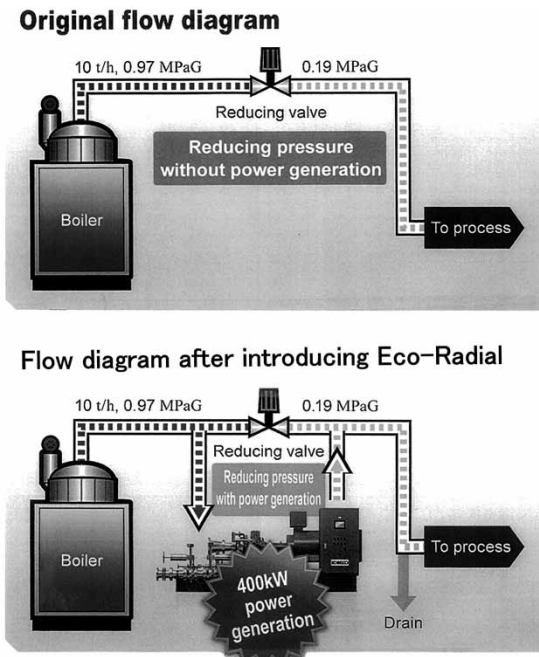


図9 エコ・ラジアル適用例
Fig.9 Eco-Radial application example

5. 今後の取組

5.1 市場動向の把握と仕様の最適化

当社非汎用ラジアルタービンは、これまでの実績から使用圧力45barG、温度400℃、発電出力6,000kWまで対応可能である。したがって、変化する今後の国内外の市場動向に対し、エコ・ラジアルの仕様の最適化は技術的にほとんど問題なく対応できると判断する。ニーズの高い市場に照準を定めて、新たなエコ・ラジアル仕様の確立を目指す。

脚注3) Kobenicleは当社の登録商標である。

5.2 蒸気量変動における対応

ラジアルタービンにおいて、蒸気量変動によるoff-design点（部分負荷）運転における効率低下を抑制するため、非汎用ラジアルタービンでは「可変ノズル機構」を装備して対応している。一方、エコ・ラジアルの場合、パッケージサイズの拡大や部品点数の増大、構造の複雑化などの理由から可変ノズル機構は採用していない。エコ・ラジアルに対しては、蒸気量変動によるoff-design点運転における効率低下を克服するため、off-design点での効率低下の影響が少ない容積型回転機械である「スチームスターMSEG」（小型蒸気発電機）との組合せシステムが考えられる。すなわち、流量一定のベースロード蒸気によってエコ・ラジアルを稼働させ、変動蒸気をスチームスターMSEGの稼働に使用すれば、高効率を維持しながら蒸気量変動に対応することが可能となる。

5.3 普及への取組

エコ・ラジアルの製品価格は従来の当社非汎用ラジアルタービン発電装置のおよそ半分を実現したが、今後もユーザーニーズを満足させるための企業努力、すなわちコストダウンを継続してゆく必要があると考える。本製品は発電ユニットとして開発した製品であるが、被駆動機を発電機からポンプやプロアに置換えることにより、ポンプユニットおよびプロアユニットとしての活用、あるいは減速機出力軸端までをユニット化したドライバユニット（蒸気モータ）として活用することも可能である。製品の主要コア部品を固定しながらアプリケーション派生モデルを展開し、生産にボリューム効果をもたらすことでさらなるコストダウンを図ることが可能と考える。このようにマーケットニーズを睨みながらモデル展開することも検討してゆきたい。

むすび＝当社は、「スチームスターMSEG」、「マイクロバイナリー」（既上市品は温水熱源タイプであり、蒸気熱源タイプは開発中）、既に商品化している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^{注4)}」、小型蒸気圧縮機「スチームスターMSRC」、および蒸気駆動空気圧縮機「Kobelion^{注5)}-SD」と併せ、様々な廃エネルギーを回収・再生できるメニュー提供が可能な商品群を整えつつある。今後もマーケットの広がりを見据えたさらなる製品メニューの拡充を図り、省エネ、未利用エネルギーの有効利用で世界に貢献してゆきたい。

参考文献

- 1) 鈴木日出夫. R&D神戸製鋼技報. 1999, Vol.49, No.1, p.25-27.
- 2) 松本哲也. R&D神戸製鋼技報. 2006, Vol.56, No.2, p.43-46.
- 3) 松谷 修ほか. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.2, p.40-44.
- 4) 松谷 修. R&D神戸製鋼技報. 2009, Vol.59, No.3, p.43-46.

脚注4) スチームグロウヒートポンプおよびSGHは当社の登録商標である。

脚注5) Kobelionは当社の登録商標である。

(技術資料)

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*1
Yasutake MIWA



野一色公二*1 (工博)
Dr. Koji NOISHIKI



鈴木朝寛*2
Tomohiro SUZUKI



高月謙一*2
Kenichi TAKATSUKI

The Diffusion-bonded Compact Heat Exchanger (DCHE) is a compact heat exchanger, and the demand for it is expected to increase in applications for weight saving or those calling for a compact plot area, as well as for use in floating plants. Kobe Steel has been working on the development and establishment of the manufacturing technology of DCHE, which is a compact and high strength micro channel heat exchanger. Its heat transfer performance has been evaluated by comparing it with the conventional shell & tube type heat exchanger, and its strength and fatigue have been evaluated using Kobe Steel's stress analysis technology and fatigue test. This paper introduces the features of DCHE and the activity involved in its development.

まえがき = 現在、小さな設置面積や高効率な機器が求められる海洋資源開発の案件が増加しており、洋上設備向けのコンパクトで高性能な熱交換器が注目されている。この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、流路サイズが数mm程度で単位体積あたりの伝熱面積が大きく¹⁾、コンパクト化が可能であり、軽量化も期待できる。

そこで当社は、これまで40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) という) の設計・製作技術²⁾を適用したマイクロチャネル熱交換器DCHE (Diffusion-bonded Compact Heat Exchanger, 以下DCHEという) の開発に取り組んできた。

本稿では、DCHEの構造や特徴を紹介するとともに、伝熱性能および機械的強度の検証結果を報告する。

1. DCHEの構造および特徴

1.1 DCHEの構造 (ALEXとDCHEの比較)

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・ノズルから成る (図1)。コア本体は、仕切板、フィンおよびサイドバーで構成され (図2)、それぞれの部材を必要なサイズに切断して配置したものを多数積層し、真空炉でろう付することによって製造される。材料は、ろう付の健全性や軽量化の観点からアルミ合金が使用されている。

一方、DCHEの製造工程を図3に示す。ALEXと同様に積層構造であり、ほぼ同様の製作工程であるが、流路の加工方法および接合方法が大きく異なる。流路の加工

脚注) ALEXは当社の登録商標である。

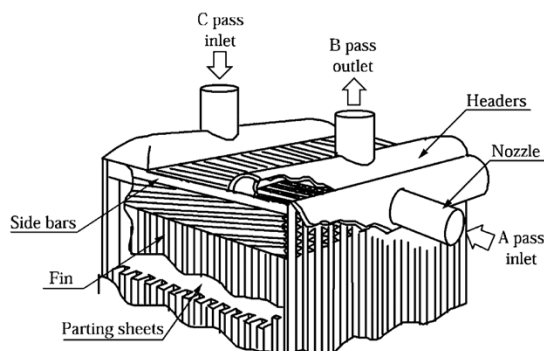


図1 ALEX構造図
Fig. 1 Structure image of ALEX

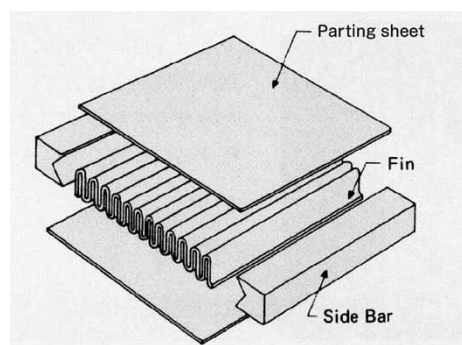


図2 ALEXの主な構成部材
Fig. 2 Main parts of ALEX

は、フィン成形の代わりに化学エッチングを利用し、材料プレートに直接形成する。このため、各層は1枚のプレートから構成されており、積層する組立作業が容易である。

また接合には、ろう付よりも強固な接合が可能な拡散接合を採用している。材質は、適用用途にもよるが、アルミ合金よりも強度が高く、耐食性を有するステンレス

*1 機械事業部門 開発センター 商品開発部 *2 機械事業部門 機器本部 機器工場

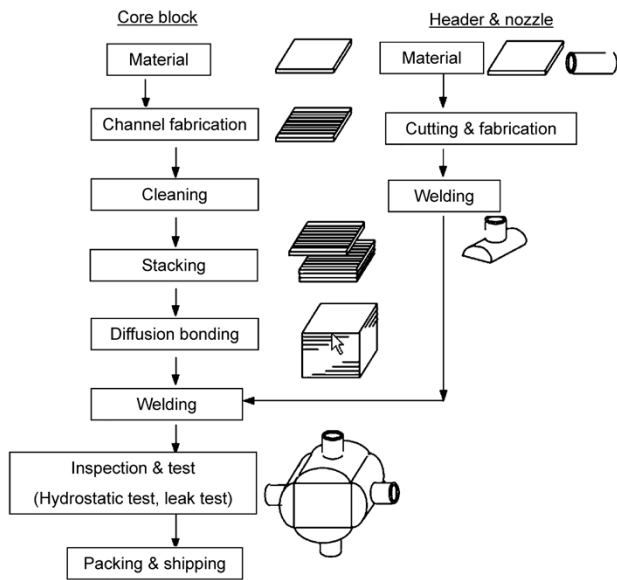


図3 DCHE製作の流れ
Fig. 3 Manufacturing flow of DCHE

鋼などを用いることでALEXが適用できない用途への適用が可能となる。

1.2 DCHEの特長

DCHEは、ALEXの設計・製造技術を適用することが可能であり、とくに複数の流体を同時に熱交換することができる特長がある³⁾。3流体を例とした流れのイメージを図4に示す。このように、プロセス条件に従って各流体の流路設計を最適化することによって一基の熱交換器で多流体を同時に熱交換することができ、複数の多管式熱交換器を一体化することも可能である。

材質についてはこれまで、ステンレス鋼やニッケル基合金、チタンなどを対象にした流路加工および接合性を評価している。また、ステンレス鋼を用いる場合は、流路サイズが数mm程度であるうえ、強度が高いため薄肉化が可能であり、比較的熱伝導が悪いステンレス鋼であっても高い伝熱性能が期待される。

さらに、拡散接合により接合強度がろう付より高く、ALEXが適用できないような13MPa以上の高圧用途や運転変動があるような用途への適用も可能である。

1.3 DCHEの適用用途

DCHEは、多流体を一度に扱える熱交換器であるとともに、材質や流路サイズの選定によっては、設計圧力100MPa、設計温度900℃まで使用することが可能である。適用用途としては、次のようなものが考えられる。

- (1) 洋上設備のようにコンパクト性が要求される機器
例：圧縮機の間中・後方冷却器
- (2) 設置場所が高所でコンパクト性、軽量性が求められる機器
例：蒸留塔などの塔類の蒸発器，凝縮器
- (3) 運転条件が厳しい用途（高圧，流体間温度差が大きい，運転変動がある等）
例：高圧水素ステーション用水素冷却器

ただし、ALEXが適用できるような設計圧力（13MPa以下）の場合や運転変動がないような用途に対しては、経済性の観点からALEXが推奨される。

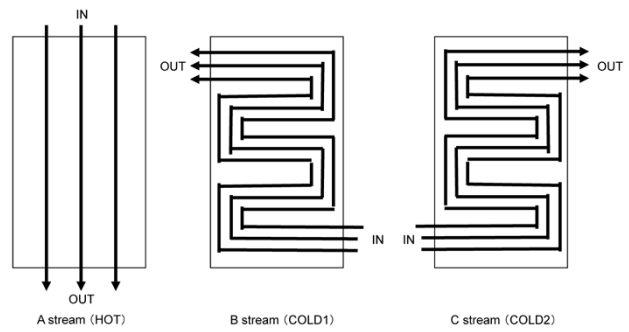


図4 複数流体の流れ(3流体の例)
Fig. 4 Stream images of multi pass (3 stream examples)

2. 伝熱性能の検証

2.1 性能計算手法

DCHEの性能計算には、これまで多数の実績のあるALEXの計算手法を活用した。具体的には、図5に示すように、ALEXのフィン形状をDCHEの流路形状に読替えることによってALEXの設計手法を適用することができる。このALEXとDCHEの読替えについては、各部材の強度計算にも適用可能である。

また、圧力損失および伝熱性能の詳細計算に用いる係数（無次元数）は、流路形状ごとに小形コアを製作して圧力損失および伝熱性能を計測することによって取得し、その結果を性能計算に反映している。

2.2 性能確認試験

性能計算手法の検証および性能確認を目的に、圧縮機の後方冷却器にDCHEを適用した。設計圧力9 MPaGの圧縮機の後方冷却として、これまでは図6上に示す多管式熱交換器が採用されてきた。これを同様の伝熱性能および圧力損失の条件にて設計を行ったDCHE（図6下）に置換え、圧力損失および伝熱性能の測定を行った。

この両機器において各種運転条件で性能を確認した結果、DCHEの伝熱性能および圧力損失が設計どおりであることを確認した。これにより、ALEXの設計手法を用いた設計がDCHEに適用できることが検証できた。また、伝熱性能および圧力損失を同一とした場合、DCHEは多管式熱交換器に比べ、容積が約1/10、重量は約

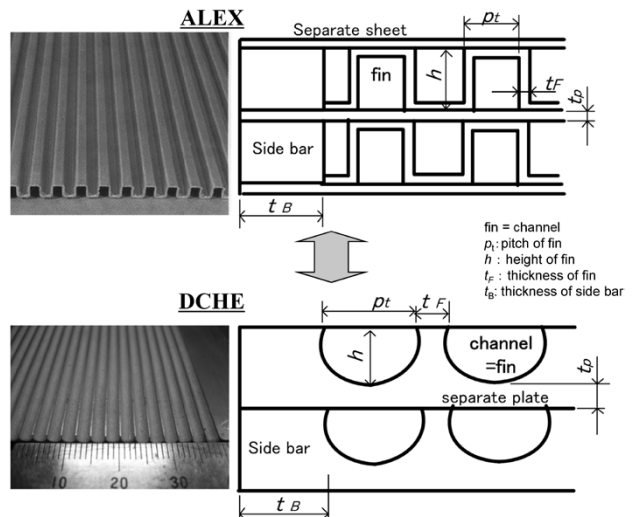
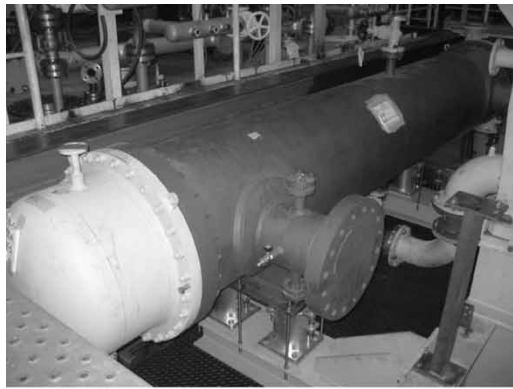
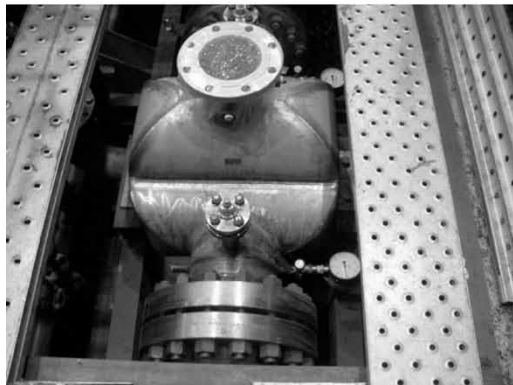


図5 ALEXフィン形状とDCHE流路形状の関係
Fig. 5 Relationship of form between ALEX fin and DCHE channel



(a) Shell & Tube
Φ650 × 4,200TL-TL (5,500kg)



(b) DCHE
330 × 350 × 650 (700kg)

図6 シェル&チューブ式熱交換器およびDCHEの設置状況
Fig. 6 Outside view of Shell & Tube and DCHE at same condition

1/8と非常にコンパクトになることが実証できた。なお、従来の機器に対するコンパクト性および重量低減の効果は、運転圧力が高くなる場合や、高い伝熱性能が求められる場合により大きくなる。

3. 拡散接合部の機械的強度の検証

3.1 拡散接合

DCHEで最も重要な製作工程は拡散接合である。拡散接合とは、JIS Z3001に「母材を密着させ、母材の融点以下の温度条件で、塑性変形をできるだけ生じない程度に加圧して、接合面に生じる原子の拡散を利用して接合する方法」として定義され⁴⁾、摩擦圧接や冷間圧接（常温圧接）などの各種の圧接と同じく、固相接合法に分類される^{5)・6)}。拡散接合品の断面観察結果の一例を図7に示す。

DCHEでは、流路を有する数百枚のプレートを積層し、伝熱性能および耐圧性能を維持するように均一に接合する必要がある。このため、解析などの理論的な検証のほかに、接合試験による検証が重要となる。

3.2 法規・規格対応

DCHEは、高圧ガスや液化ガスを取扱うことが多く、国内では高圧ガス保安法、海外では米国機械学会（THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 以下ASMEという）のボイラおよび圧力容器基準に対応した製品が要求されることが多い。ASME規格合格品の一例を図8に示す。各製品におい

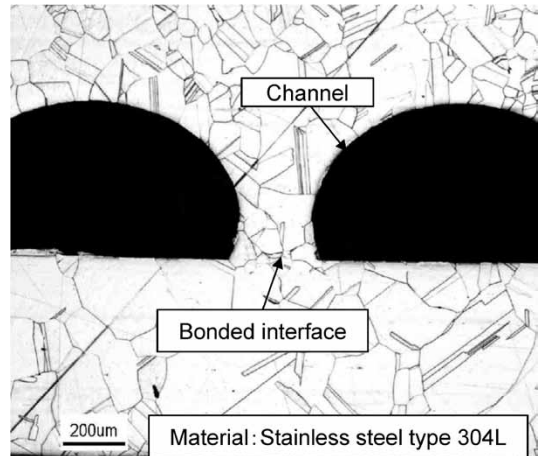


図7 流路および拡散接合部断面観察の一例

Fig. 7 Channel and cross-section observation of diffusion bonding



図8 ASME規格合格のDCHE

Fig. 8 DCHE with U-stamp of ASME

ては、規格で要求される非破壊検査、耐圧試験、および気密試験に合格することによって健全性を確認するが、事前に拡散接合技術を検証しておくことは不可欠である。接合性は、ALEXと同様に以下の項目について評価する。

- ① 拡散接合部の健全性評価（材料に起因する接合性）
- ② 流路形状に対する強度評価（形状に起因する接合性）

次項より各項目の検証結果について述べる。

3.2.1 拡散接合部の健全性評価

製品に用いる接合方法は、拡散接合施工条件（Diffusion bonding Procedure Qualification Record, 以下DPQRという）として材料ごとに接合方法の詳細を決定し管理している。このDPQRの健全性評価としては、DPQRに示された接合方法に従ってサンプルを製作し、サンプルから採取した試験片を用いて機械試験を実施した。その結果、接合体の場所（試験片の採取位置）および方向（接合面に対して垂直または平行）にかかわらず、母材の引張強度、耐力、および伸びのおおのおおにおいて、規格値以上の強度を有することを確認している。

3.2.2 流路形状に対する強度評価

上述のとおり、DPQRに基づいて接合条件を決定しているが、同一材料で同一接合条件であっても、一般的に流路形状によって熱交換器全体としての強度は異なる。そこで、流路形状に対する強度は、計算のほかに、実際に試験体を製作して破壊試験を実施することによって評価する。破壊試験は、拡散接合試験体を水圧や油圧により昇圧し、部材が破断した圧力を破壊圧力として測定する。破断が生じた圧力は、流路が内圧を保持できず膨れが生じ、内容積が増加して内圧が急激に降下することか

ら容易に確認できる。

破壊試験の一例として、材料にステンレス鋼SUS316Lを用いた試験体により試験を行い、高圧用の流路形状で最大450MPa以上の破壊圧力を有していることを確認した。この流路形状において安全率を4とした場合、設計圧力は100MPa以上となる。また、各流路タイプごとに複数の破壊試験を実施しているが、破壊圧力のばらつきは±数%以内であり、安定した接合を実現している。

4. 疲労強度の検証

DCHEの適用用途の一つとして、高圧水素ステーション向けの熱交換器がある。この用途では、80MPa程度の超高圧水素を冷却水で冷却するため、従来は二重管式熱交換器が使われてきた。しかしながら、接続継手の数が多いことや、機器サイズが大きいことが課題であった。とくに、ガソリンスタンドとの併設が想定されている水素ステーションにおいては小形化が大きな課題となっている。

水素ステーションでのDCHEの具体的な適用用途には以下がある。

- ① 圧縮機のインタクーラ、アフタクーラ（設計圧力95MPa、設計温度 \sim 180 $^{\circ}$ C）
- ② ディスペンサ用プレクーラ（設計圧力92MPa、設計温度 -50° C \sim 50 $^{\circ}$ C）

上記の用途で使用する場合、静的な機械的強度に加えて、日々の起動停止や圧縮機による圧力変動などに対する疲労強度を考慮する必要がある。そこで、以下の条件（Test 1 および Test 2）にて解析による強度評価を実施するとともに、実機相当の試験体を用いて表1に示す高圧環境の疲労試験を実施し、機械的強度の検証を行った。Test 1 は用途①の圧縮機のクーラを想定し、Test 2 は用途②のディスペンサ用のプレクーラを想定している。

4.1 応力解析による評価

本機器に用いた流路形状での解析モデルを図9に示す。また、運転状態での解析結果例を図10に示す。流路端部にて生じたピーク応力値に基づき、圧力変動時のピーク応力、平均応力、および応力振幅など疲労強度評価に必要な値を算出した。オーステナイト系ステンレス鋼の平均応力補正済の設計疲労曲線を用いて疲労強度評価を行ったところ、運転条件に対して十分余裕があり使用上問題のないことを確認した。

4.2 疲労試験による評価

図11、12に示すように、表1に示す圧力変動繰返し

表1 圧力変動試験条件
Table 1 Pressure fluctuation condition

	Test 1	Test 2
Test media	Water	Hydrogen
Temperature of test device	20 $^{\circ}$ C	-40 $^{\circ}$ C
Range of pressure fluctuation	86.5MPa	90MPa
Cycle of pressure fluctuation	100,000 cycle	70,000 cycle

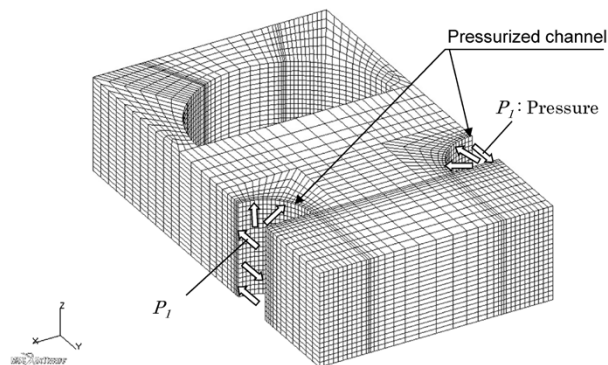


図9 応力解析モデル図
Fig.9 Stress analysis model

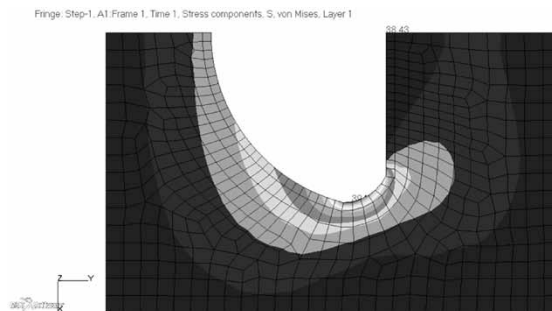


図10 実機想定モデルの応力解析結果
Fig.10 Stress analysis of production simulation model

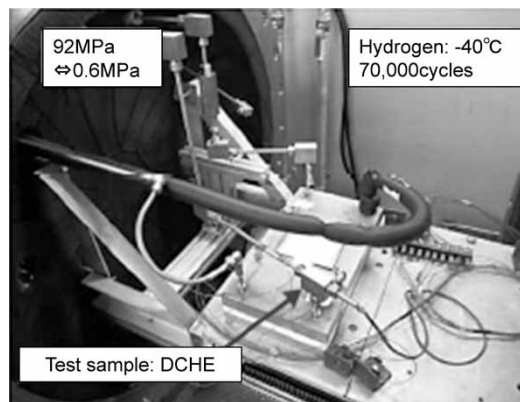


図11 圧力変動繰返し試験（Test 2）
Fig.11 Cycle test of pressure fluctuation（Test 2）

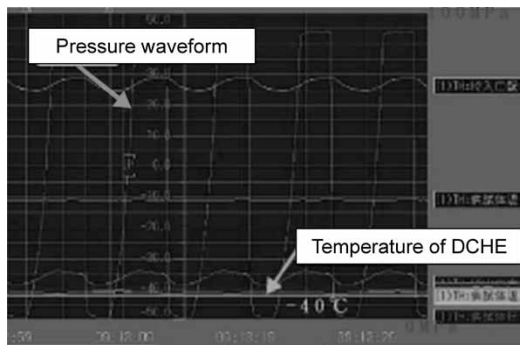


図12 試験状況（Test 2）
Fig.12 Cycle test of pressure fluctuation（Test 2）

試験を行った。その結果、両試験とも試験体は所定の回数を超えても破壊せず、試験装置からの流体（水または水素）の漏洩（ろうえい）も確認されなかった。さらに、圧力繰返し試験終了後、試験流体としてヘリウムを用いた気密・漏洩試験を行い、各部から漏洩のないことを再

度確認している。また、この結果より、先の解析および疲労強度評価手法が妥当であることを確認できた。

そのほか、拡散接合部における耐水素脆化試験として、拡散接合試験体から採取した試験片を対象に、水素チャージ後に引張試験および低ひずみ速度引張試験を実施し、高圧水素環境であっても脆化の影響が認められないことを確認している。

以上により、水素ステーション稼動時の起動・停止などを考慮した圧力変動繰返し試験においても、拡散接合品の接合品質に問題のないことを確認した。

これらの結果を基に、図13に示す水素圧縮機用のア

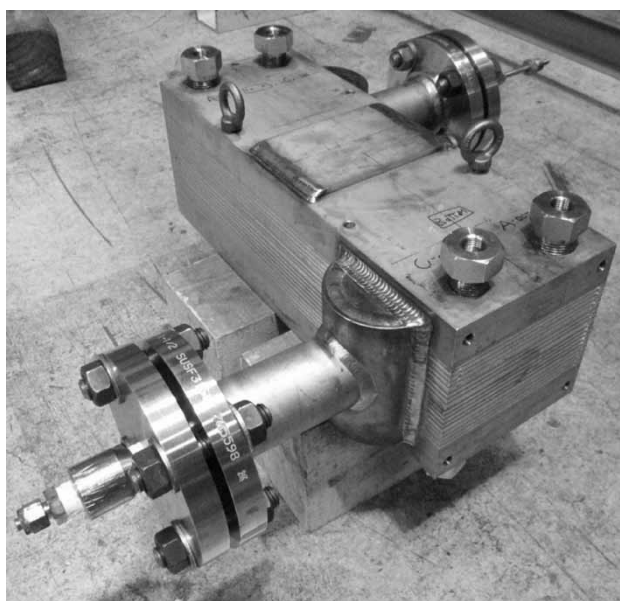


図13 水素ステーション向けDCHE
Fig.13 Outside view of DCHE for hydrogen station

フタクーラを高圧ガス保安法特定設備検査規則に基づいて製作した。機器サイズは従来の二重管式熱交換器に比べわずか1/30~1/100と非常にコンパクトであり、今後、採用拡大が期待される。

むすび=本稿では、コンパクト熱交換器の一つであるDCHEの紹介を行った。とくに、拡散接合技術の検証では、解析に加えて機械試験や疲労試験を行うことによって定量的に評価し、接合品質に問題のないことを報告した。今後、高圧用途で信頼性が求められる水素ステーション向けにおいてDCHEの適用拡大が期待される。一方、洋上設備向けの用途では、さらなる大形化、高性能化が不可欠であり、製造技術のさらなる向上に取り組んでいる。今後もDCHEの製作実績を重ね、製品の信頼性を向上させるとともに、さらなる用途拡大のために開発を継続していく。

最後に、表1 Test 2で紹介した実験を実施いただいた(株)タツノに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 化学工学会反応工学部会マイクロ化学プロセス分科会. マイクロ化学プロセス分科会講演会資料 2010-1-15, p.1-10.
- 2) 野一色公二ほか. R&D神戸製鋼技報. Vol.53, No.2, p.28-31.
- 3) 野一色公二. PETROTECH JAN 2012. VOL.35, NO.1.
- 4) JIS Z3001-1, 2008, p.27.
- 5) 橋本達哉ほか. 現代溶接技術大系 第9巻 固相溶接・ろう付. 産報出版, 1980, p.95.
- 6) 大橋 修. Q&A拡散接合. 産報出版, 1993, p.31.

(解説)

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^{*1} (工博)
Dr. Koji NOISHIKI



三輪泰健^{*1}
Yasutake MIWA



松岡 亮^{*2}
Akira MATSUOKA

The Microchannel Reactor (MCR) has a high thermal performance and rapid mass transfer due to the small channel size where the reaction takes place; the channel size is smaller than that of the conventional mixer type reactor. However, the application of MCR is limited to such fields as medicine and the like, which are high value applications of many types and small productive capacity, due to the limitation on the flow capacity of MCR. We have therefore developed the stacked multi-channel reactor (SMCR[®]) to handle mass production and make it applicable to/in the bulk chemical industry. This report explains the technology of MCR, the features and the construction of SMCR and the work done to develop it for commercialization.

まえがき = 攪拌 (かくはん) 槽などの従来の反応場に比べ、流路径を小さくすることによって高い伝熱性能と物質移動速度が得られるマイクロチャネルリアクタ (Microchannel Reactor, 以下MCRという) が注目されている。しかし、装置の処理量の制限などから、医薬品などの高付加価値で多品種少量生産用途にしか適用されてこなかった。

そこで当社は、大容量処理が可能な積層型多流路反応器 (Stacked Multi-Channel Reactor, 以下SMCR[®]注) という) を開発することにより、このMCR技術のバルクケミカル用途への展開を行っている。

本稿では、MCR技術およびSMCRの構造とその特徴を紹介するとともに、SMCRを用いた商業化までの開発の流れを紹介する。

1. MCRとは

1.1 MCRの特徴

攪拌槽などの従来の反応場に比べ、図1のように流路

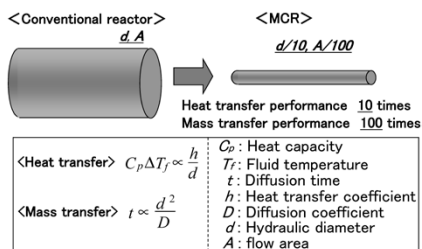


図1 既存の反応場とマイクロチャネルの比較

Fig. 1 Comparison between conventional reactor and microchannel reactor

脚注) SMCRは当社の登録商標である。

径を小さくすることによって高い伝熱性能と物質移動速度が得られることが多数報告されている^{1), 2)}。

また、微細な流路内では壁面の効果を受けやすく、相対的に重力の効果を受けにくいいため、これまでの機器や配管内で見られてきた重質と軽質、あるいは気体と液体の分離が生じにくい。その結果、流体の物性や流速により、図2に示すような種々の流動状態をとる。例えば、水と油のような不溶性の2流体では、流速の比較的遅い領域ではスラグ流、流速の速い領域では2層流となる。スラグ流の流動状態の写真およびイメージ図を図3に示す。壁面の材質がステンレス鋼やガラスの場合、親水性であるため水が壁面に滞留し油が水に内包されるように流動する。このため、2層流に比べスラグ流の方が流体間の接触界面積が大きくなる場合がある。また壁面の効果による内部循環流が発生することも確認されており^{3), 4)}、スラグ流を選択的に使用することでより高い物質移動性能が得られ、MCRのさらなる高性能化が期待できる。

1.2 既存のMCRの課題

MCRは、別名「“マイクロ”リアクター」と呼ばれる

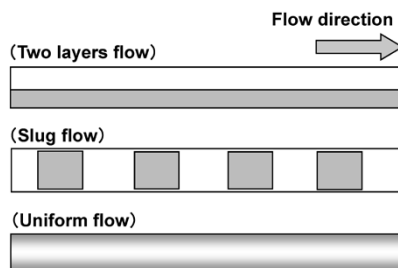


図2 微細流路内の流動状態の例

Fig. 2 Example of flow pattern in microchannel

^{*1} 機械事業部門 開発センター 商品開発部 ^{*2} 技術開発本部 機械研究所

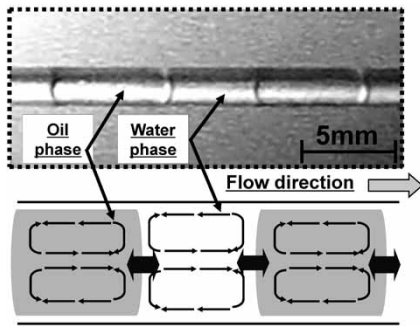


図3 微細流路内のスラグ流
Fig. 3 Slug flow in microchannel

ように、流路のサイズが微細であるのみならず、装置・機器サイズが小形とのイメージが定着している。このため例えば、年間数kgから数百kgまでの医薬品のような高付加価値・小ロット製品の製造への適用がほとんどで、年間数千~数万トンのような大容量処理を要求される一般工業化学などには採用されていない。

この理由としては、流路加工などの装置製作費用が高く小形の装置しか製作できないこと、および単一機器での多流路化（以下、ナンバリングアップという）方法が難しく大容量用途には適さないことなどが考えられる。

このように、MCRには従来になかった高性能な反応器としての可能性があるが、それを工業化する“装置”がないことが大きな課題と考えられる。そこで当社は、大容量処理が可能なMCRの開発を行うこととした。

2. SMCRの機器構造

2.1 積層型熱交換器の基盤技術

伝熱性能に優れるアルミ合金を用いた高性能な熱交換器の一種であるアルミ製ろう付プレートフィン熱交換器（Brazed Aluminum Plate-Fin Heat Exchanger, 以下ALEX[®]（注）という）は、空気を深冷分離して酸素や窒素を生産する設備用の熱交換器として開発された。多流体を一度に熱交換できるため、近年、天然ガス処理やエチレンの深冷分離用などの機器として化学プラントにも広く使用されている。

ALEXは、図4に示すように熱交換を行うろう付されたコア本体、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。ALEXはこの積層構造の特徴を生かし、層内のフィンの置き方や組合せを工夫することによって気体、液体のみならず2相流（気液混相）を均一分配できるとともに、複数の流体を同時に熱交換することができる。

用途にもよるが、単位体積あたりの伝熱面積が $1,000\text{m}^2/\text{m}^3$ 以上と従来の多管式熱交換器に比べ約5倍以上大きいため、機器のコンパクト化が可能である。またALEXは、複数のコア本体を溶接接合してヘッダとノズルを共通化することによって一つの熱交換器とするか、または、複数のALEXを配管で結合することにより、任意の流量を処理でき、大容量処理に用いることができる。

脚注) ALEXは当社の登録商標である。

2.2 大容量SMCRへ適用可能な技術

ALEXは熱交換器として広く使用されており、基盤技術として以下の技術がある。

- (1) 接合、流路加工などの製造技術
- (2) 性能計算に用いる伝熱設計、圧力損失計算技術
- (3) 気液分配構造を利用した均一分配、混合技術
- (4) 流体をコアごとに均等に分配するコア間の偏流対策技術
- (5) 流体を各層に均等に分配する積層間の偏流対策技術

これらの技術はこれまでALEXで得られた設計技術やノウハウであり、大容量SMCRにも活用できる。

2.3 SMCRの基本構造

MCRの流路の基本構造としては一般的に、図5上図に示すようにチューブを組合せたY字およびT字形状が多用されている。しかし、この構造のままでは大容量化のためのナンバリングアップの際、流体の供給方法などから流路の配置に制限がある。積層方向のナンバリングアップは容易であるが、幅方向に複数の流体を効率良く配置するのは難しく、大容量MCRには適さない。そこで、既存のALEXの構造を参考に、図5下図に示すようにプレートの両面に流路を加工し、流路を3次元配置し

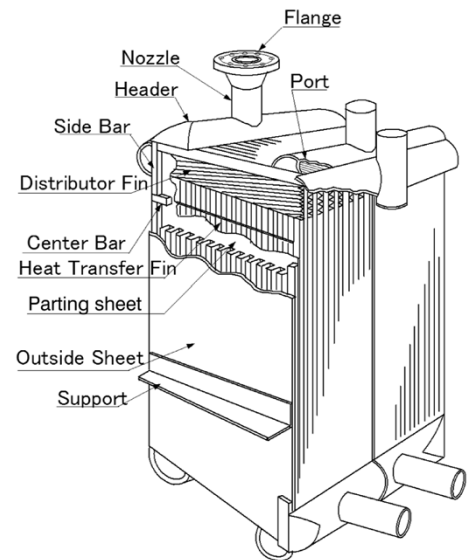


図4 ALEXの構造
Fig. 4 Structure of ALEX

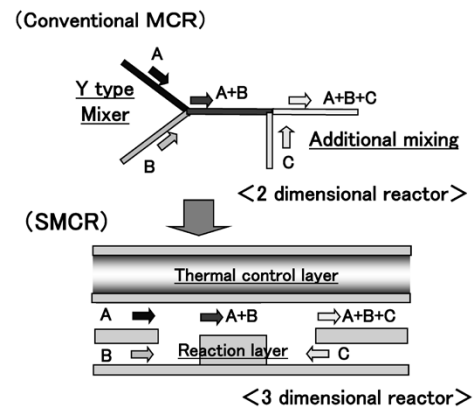


図5 2次元および3次元のマイクロチャネルリアクターの基本構造
Fig. 5 Basic construction of two dimensional reactor and three dimensional reactor

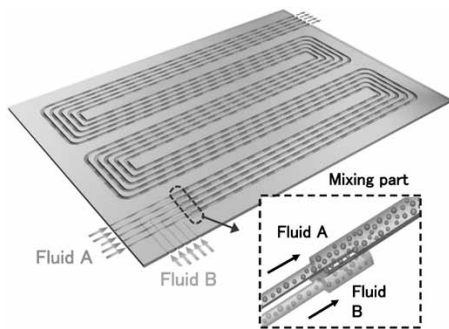


図6 SMCRの複数流路の基本構造
Fig. 6 Basic construction of multi-channel SMCR

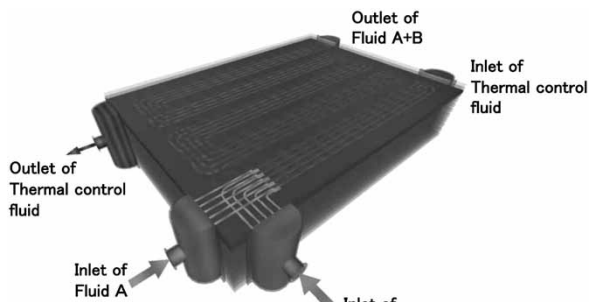


図7 SMCRの内部イメージ
Fig. 7 Inside image of SMCR

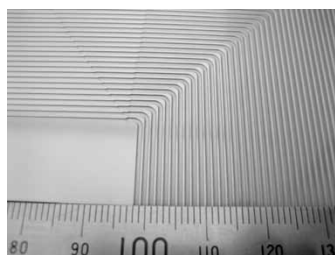


図8 エッチングにより形成した微細流路
Fig. 8 Microchannel manufactured by chemical etching

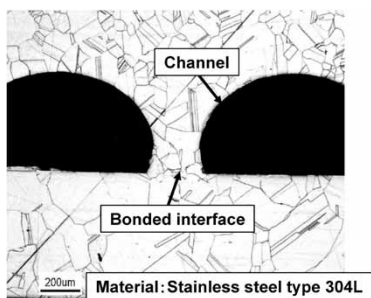


図9 流路および拡散接合部断面観察の一例
Fig. 9 Cross-sectional observation of channels and bonded interface

た構造を採用した。

この構造を採用することにより、図6のようにプレート内に流路を密に配置して単位体積あたりの流路数を大幅に増加することができ、大容量の処理が可能となる。また、処理量が増えれば図7のようにプレートを複数積層することで流路数を増すことができる。すなわち、1機器あたりの流路本数は、1プレートあたりの流路本数×積層枚数で設計可能となる。

また、本操作時に温度調節が必要であれば、図5のように温調流路を重ねることで精密な温度調節も可能となる。各流路への流体供給は、図4のALEXで示したようなヘッド、ノズル構造を利用することで各プレートに流体を均一に分配することが可能となる(図7)。本構造を採用した大容量MCRをSMCRと呼んでいる。

SMCRの製作手順は、まずステンレス鋼などの金属プレートに化学エッチングなどにより図8のような流路パターンを形成する。その後、目的の流路本数となるように温調プレートと組合せて必要枚数を積層する。つづいて、真空加熱炉にて加熱・加圧することにより、拡散接合にて各プレートが接合されて流路が形成される。図9はステンレス鋼での拡散接合例である。流路の閉塞は認められず、また接合界面を越えて結晶粒の成長も行われており、母材と同等以上の接合強度が得られる。したがって耐圧性能は、流路サイズに基づいた強度計算で推算可能である。また、耐腐食性、耐熱性などの要求仕様によって様々な材質を採用でき、自由度のある設計・製造が可能である。

3. 商業化に向けた開発の流れ

SMCRにおいても従来機器と同様に図10に示す流れで開発を実施する。しかし、MCRの特徴であるナンバリングアップの思想を当社SMCRへ適用することによって開発の期間を短縮することができる。

ラボ試験における例として、各種流路および形状(半円形流路、円形流路)を用い、抽出原料としてドデカンにフェノール0.1wt%を溶解させた液を、抽剤として水を用いてフェノールの抽出を行った。図11に示すように、物質の移動速度を表す物質移動容量係数 Ka は、流路相当径(=4倍の流路断面積/濡れ辺長さ)で整理した場合、相関関係があることが確認できた⁵⁾。

これにより、大学や企業の研究機関で得られたラボ試

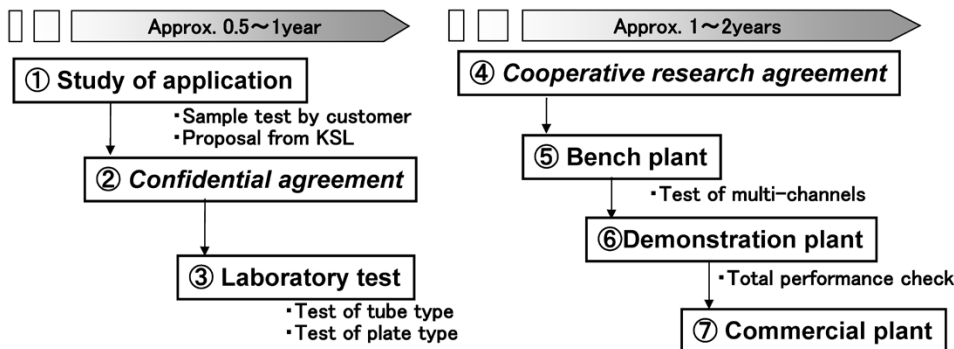


図10 商業化までの開発の流れ
Fig.10 Flow of development work for commercialization

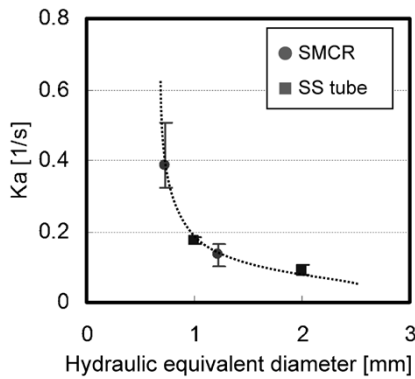


図11 K_a と流路相当直径の関係
Fig.11 Relationship between K_a and hydraulic equivalent diameter

験のデータをそのままSMCRへ適用することが可能であることから、重複する試験を最小限にすることができ、SMCRによる開発試験期間を短くすることができる。

またベンチ試験においては、SMCRの商業化で必要とされる機器形状・プレートサイズおよび積層枚数を決定した上で、図6のように実機相当のプレートサイズにおいて、偏流の影響が確認できる積層数3段程度でテストを実施すれば、商業化時の性能が予測可能である。商業化時の課題としては、大形化に伴う各段プレートへの流体の均一分散があるが、ALEXではこれまで100段以上の積層構造で流路への流体の均一分散を行ってきた実績があり、この設計技術を活用すれば実用上偏流の問題は生じないと考える。したがって、攪拌槽タイプの反応器などで課題とされてきたスケールアップでの性能低下リスクが低減可能であり、SMCRではベンチ試験とデモプラントを兼ねた検証で商業化の判断ができると考える。

このように、SMCRは伝熱性能や物質移動速度に優れるだけでなく、開発投資・期間を低減することが可能である。

4. SMCRの適用事例

4.1 抽出用途への適用検討

各種化学製品の製造工程には、原料中の目的物質または目的外物質を、抽剤を用いて除去する抽出工程がある。例えば、抽剤をリサイクルする場合には、攪拌槽において製品を含む原料を抽剤で抽出後、製品と抽剤を比重差で分離し、その後、原料と抽剤を蒸留操作などで分離・回収する一連の工程となる。この場合、抽出を行う攪拌槽の処理能力に合わせて抽剤回収塔の処理能力が決定される。

このような抽出ユニットにおいてSMCRを適用すると、以下のような効果が期待される。

- (1) 抽出時間の低減
- (2) 抽出工程機器サイズの低減
- (3) 抽剤の使用量削減による原単位改善
- (4) 多段抽出が必要な場合、連続処理が可能

そこで、SMCRを用いた抽出試験を実施し、SMCRの抽出用途への適用の可能性を確認した。

4.2 実験内容および結果

SMCRの試験体は、エッチングにより形成した半円形

の微小流路を有するステンレス製のプレートを別のプレートで両側から挟んで製作した。また多流路化、すなわち大容量化による各流体の偏流の影響による性能低下の有無を確認するため、試験体の流路数は、1本×1段の1本流路、5本×1段の5本流路、5本×5段の25本流路の3種類とし、図12に示すベンチ試験装置を用いて抽出実験を行った。

実験では、抽出原料としてドデカンにフェノール0.1wt%を溶解させた液を、抽剤として水を用い、フェノールの抽出を行った。

抽出原料および抽剤の体積比を1とし、各液をポンプを用いて所定の流量（流路あたり合計1~10ml/min）で試験体に供給し、回収液を有機相と水相に分離した。分離した有機相中のフェノール濃度を吸光度法を用いて分析し、フェノールの抽出率を求めた。

攪拌抽出試験では、200mlビーカーに抽出原料および抽剤を各100ml入れ、抽剤相をマグネチックスターを用いて所定の回転数で攪拌した。所定の時間間隔で抽出原料中のフェノール濃度を分析し抽出率を求めた。実験結果を図13に示す。縦軸に平衡抽出率比（=抽出率（%）/平衡抽出率（%））、横軸に滞留時間を示す。

攪拌抽出試験では、攪拌子の回転数が速くなるにつれて抽出に要する時間が短くなるが、回転数が400rpmより速い場合は抽出原料が抽剤中に分散した状態になり、分離が困難であった。平衡抽出に達するまでの時間は、攪拌抽出試験では約100分程度必要であったのに対し、SMCRでは0.1~1分程度と約1/100に短縮された。また、SMCR試験体から流出した液は直ちに抽出原料と抽

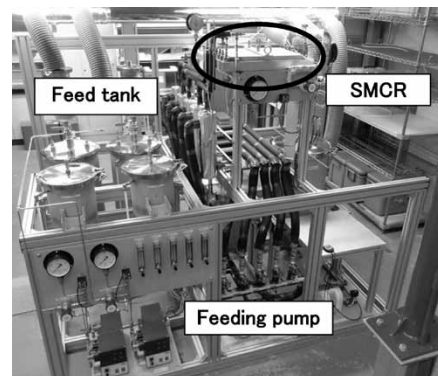


図12 抽出用SMCRベンチ試験装置
Fig.12 Bench test unit of SMCR for extraction use

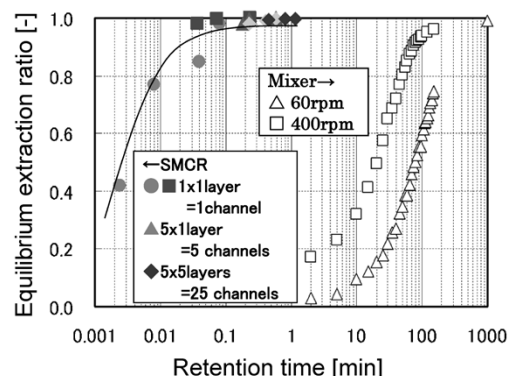


図13 抽出試験結果 (SMCR vs. 攪拌)
Fig.13 Test results for extraction use (SMCR vs. Mixer)

剤の2相に分離した。これは、図5の混合部では積極的な混合を行わず、油層と水層でスラグ流や2層流を形成させて分離性を保っているためである。この実験の結果からSMCRを抽出に用いた場合、以下の利点があることが確認された。

- (1) 攪拌抽出に比べ滞留時間が1/100に短縮できる。
- (2) 抽出後の分液性に優れる。
- (3) 流路本数および段数の影響は認められず、溶液の分配性に優れる。

4.3 SMCRによる商業化検討について

多くの抽出用途では、目的の抽出濃度に達するまで複数回の抽出を必要とする場合がある。このとき、これまでの抽出装置では、図14に示すように攪拌槽が分液槽の役目を兼ね、抽出後に分液を行うことで複数回の抽出をバッチ式に処理していた。また抽出用途によっては、抽出操作自体は数分で終了するが分液に数時間必要な場合もあり、目的の抽出率を得るために多くの作業と時間が必要であった。

これに対してSMCRを多段の抽出に用いる場合、図15のように複数の抽出ユニットを積層して一体化すること

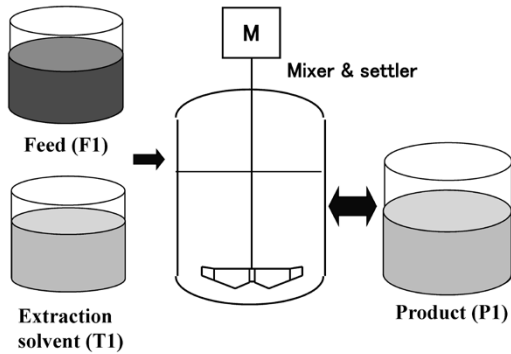


図14 攪拌槽を用いた従来の抽出ユニット
Fig.14 Conventional extraction unit using mixer

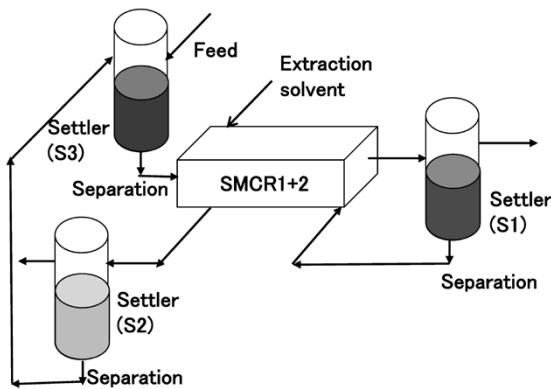


図15 SMCRを用いた多段抽出ユニット
Fig.15 Multi-stage extraction unit using SMCR

が可能である。さらに、抽出後の分液性に優れるため、セトラで迅速に分離された原料を連続してSMCRへ供給することによって連続処理が可能である。

これにより、従来のバッチ式で必要であった分液に要する時間や、溶液の排出あるいは導入にかかる切替操作などが不要となるため、SMCRでは効率良く抽出を行うことができる。したがって、SMCRによる商業化においては、従来のバッチ式と同等の時間で処理を行う場合では、単位時間あたりの処理量を減らして機器サイズを最小とするか、あるいはバッチ式よりも短時間で効率良く処理を行うことによってさらなる大容量処理を狙うかの選択肢がある。

今後、他の抽出用途での試験を継続し抽出性能データの蓄積を行うとともに、既存の抽出ユニットとの設備費及び運転費用を含めた経済性比較を実施し、商業化を推進していく。

むすび=MCRは、高い伝熱性能および高い物質移動速度などの特徴を有することから工業化の検討がされている。しかし、一般的には装置が小形で高価であるため、高付加価値用途であるか、あるいは、迅速な反応のためほとんど滞留時間を必要とせず、結果として小形機器が採用される場合に限られてきた。

しかし、本稿で紹介したSMCRにおいては、MCRの伝熱促進、物質移動促進の機能を維持しつつ大容量化が可能であり、これまでの高付加価値用途のみならず、比較的長い滞留時間を必要とする抽出、反応などのバルクケミカル用途への適用も可能となる。

また、SMCRにおいて達成される高い伝熱性能、高収率などを機器のコンパクト化だけに適用するのではなく、連続処理の利点を生かし、従来バッチ式処理で必要であった段取り時間までも活用して生産効率を向上させることや、プロセス条件（運転圧力、温度など）の緩和に適用することで省エネルギーや抽剤、溶剤などの低減を実現するなどの多面的な効果が期待できる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) G. S. Calabrese. AIChE J. 2011, Vol.57, No.4, p.828.
- 3) A. Ghaini et al. Chemical Engineering Science. 2011, Vol.66, p.1168-1178.
- 4) H. Kinoshita et al. Lab Chip, 2007, Vol.7, p.338-346.
- 5) 松岡 亮ほか. 半円形断面微小流路における液液抽出性能. 化学工学会秋季大会研究発表講演要旨 第44年秋季大会. 2012, I305.

(解説)

LNG受入基地向けLNG気化器

LNG Vaporizer for LNG Re-gasification Terminal



江頭慎二*¹
Shinji EGASHIRA

Kobe Steel is the leading LNG vaporizer supplier in the world. We design and fabricate the "Open Rack type Vaporizer" (ORV) and "Intermediate Fluid type LNG vaporizer" (IFV) for large scale LNG receiving terminals. In this paper, we introduce the trends of the present LNG receiving terminal, features of the LNG vaporizers and the topic of the development of our vaporizer.

まえがき＝クリーンな燃料として世界的に需要が増加している天然ガスは、産ガス地から遠隔に位置する日本などの消費地では、極低温（約 -160°C ）状態の液化天然ガス（LNG）として受入れ、再度常温までガス化して発電用燃料および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、国内外で積極的に営業展開しているが、近年、これまで納入してきた地域とは異なる国での案件や、従来とは異なる環境および熱源による案件が増加しつつある。

LNG受入基地は、大形LNG船にて輸入LNGを受入れる一次受入基地と、ローリーなどで一次受入基地から運ばれるLNGを受入れて再ガス化する二次受入基地（サテライト基地）とに分類される。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使用されるLNG気化器について概説する。

1. LNG一次受入基地の動向

1.1 地域の多様化

LNGはかつて、日本や韓国、台湾をはじめ、スペインやフランスといったヨーロッパ先進諸国など、一部先進地域のみにおいて受入れられてきた。しかしながら、今世紀に入ってLNG受入国は多様化し、需要量も増大してきている。近年のLNG受入地域の状況としては、以下が挙げられる。

- ・インド、ブラジルといった高経済成長地域におけるLNG受入基地計画の増大、とくに中国における建設や計画の急増
- ・中近東や中南米地域を含めた、従来LNG受入を行っていない国におけるLNG受入基地計画の増加
- ・かつてLNG輸出国であったインドネシアおよびマレーシアにおけるLNG受入基地建設
- ・シェールガス革命に伴う、既存アメリカLNG受入

基地のLNG液化・出荷基地への転換

1.2 LNG受入基地形態の多様化

従来、LNG受入基地は沿岸に建設され、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を用い、寒冷地域・時期においては燃焼熱を用いてきた。近年、従来とは異なる形態のLNG受入基地が出現し、新規計画も徐々に増加しつつある。この新規基地形態は、以下に示すものである。

- 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空気熱源LNG気化システム

1.2.1 FSRU

FSRUは、既存のLNG運搬船を改造し、気化設備などを設置した上で洋上に係留させてLNG受入基地として供する形態である。FSRUの特徴として以下が挙げられる。

- ・既存のLNG運搬船を利用することにより、陸上基地で必要となる土建工事やLNGタンク建設工事が不要となり、建設期間の短縮化が可能となる
- ・移動させることが可能であり、他場所への転用が可能となる
- ・万が一の災害時における近隣一般住民への被害が回避できるため、建設反対運動が比較的起きづらい
- ・船体の揺動対策が必要となる

FSRUはブラジルなどで既に運用が開始されている。FSRUのイメージを図1¹⁾に示す。本図の左側船体がLNG運搬船、右側船体がFSRUであり、FSRU船先（へさき）ストラクチャ最上段に搭載されているのが中間媒体式気化器（Intermediate Fluid type Vaporizer, 以下IFVという）である。

1.2.2 空気熱源LNG気化システム

LNGを気化・昇温させるための熱源として、寒冷地

*¹ 機械事業部門 機器本部 機器工場



図1 FSRU形態図¹⁾
Fig. 1 Image of FSRU in operation¹⁾

域以外の一次受入基地では一般的に海水を用いている。海水を使用する場合、取排水設備に多額の設備費を要するとともに、LNGと熱交換した後の冷海水の排出に対する環境規制が必要となる。

この問題を回避するために、グリコール水の顕熱を利用してLNGを気化させ、冷却されたグリコール水をファンによる送風空気を熱源として加温し、再びLNG気化に供する無海水気化システムが考案された。インドDAHEJ基地において現在稼働中であり、インド国内の他基地においても建設・計画されている。

この気化システムは、基本的に大気温度15℃以上での運転を前提としており、大気温度が高い地域においてのみ適用が可能となる。

2. 一次受入基地用LNG気化器の構造・特徴

2.1 概要

LNG受入基地は現在、日本国内で30基地以上、海外においても多数の基地が運用されている。本章では、これらの基地で一般的に使用されているオープンラック式気化器（Open Rack Vaporizer, 以下ORVという）、IFVおよびサブマージド式気化器（Submerged Combustion Vaporizer, 以下SCVという）の構造・特徴について述べる。

2.2 ORV

2.2.1 ORVの構造・気化プロセス概要

図2にORVの概念図を示す。ORVは、伝熱管内部を流れるLNGと伝熱管外部を流れる海水との間で熱交換し、LNGをガス化させる気化器である。LNGは下方の入口ノズルから流入し、入口マニホールドおよびヘッダ管を通じて伝熱管がカーテン状に配列されたパネルへ送られる。伝熱管内を上昇する間に管外をフィルム状に流下する海水とLNGとの間で熱交換が行われ、常温のガス体として出口ヘッダ、マニホールド管を通じて出口ノズルから送出される。パネルは通常、100本近い伝熱管から構成され、数枚（3～8枚）単位でマニホールド管を介して接合（ブロック化）し、据付現場のコンクリート架構に渡した天井架構フレームから釣下げられる。また、ブロック下部にはスライドタイプのサポートを設け、熱伸縮を吸収する構造となっている。アルミニウム合金からなるパネルにはアルミ-亜鉛合金を表面に溶射すること

によって犠牲陽極効果をもたせ、海水腐食から母材を保護している。

ORVに用いられる伝熱管は、低温靱性などの低温特性や熱伝導性、加工性に優れたアルミニウム合金を使用し、伝熱面積を向上させるためのフィンが設けられている。伝熱管内部には、十字状のアルミニウム合金をらせん状にねじった部材が全長にわたって固定されている。この構造によって乱流が促進される結果、伝熱性能を向上させるとともに、出口へのLNGミスト流出を防いでいる。

2.2.2 二重管式伝熱管：SUPERORV[®]注)

ORVの運転中、伝熱管下部の外壁温度は海水の凝固温度を下回るため、管外に着氷が生成する。とくに低海水温度条件では着氷厚み・高さが著しく増加し、大きな伝熱抵抗となる。このため当社では、伝熱管の下部を二重管構造とし、伝熱管外面への着氷を抑制することで伝熱抵抗を低減させ、気化性能を大幅に向上させた伝熱管（SUPERORV）を実機へ適用している。SUPERORV伝熱管構造を図3に示す。

2.2.3 ORVの特徴

ORVは以下の特徴を有しており、一次受入基地では最も一般的に使用されている。

- ①加熱源が海水のため、ランニングコストが安価である（主にポンプの動力費のみ）
- ②システムが単純で運転性が良く、運転中の伝熱管状

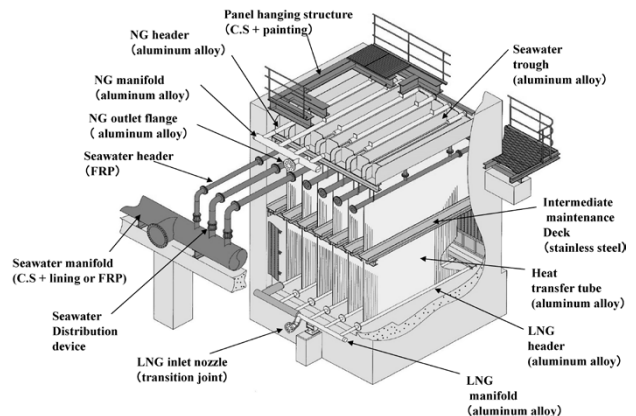


図2 オープンラック式気化器概念図
Fig. 2 Schematic of Open Rack Vaporizer (ORV)

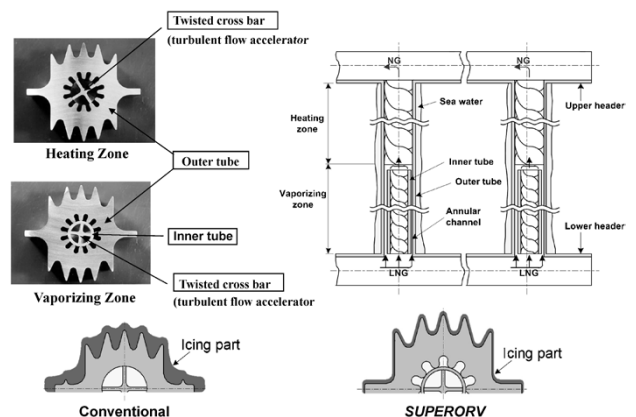


図3 SUPERORV伝熱管構造
Fig. 3 Configuration of SUPERORV heat transfer tube

脚注) SUPERORVは当社の登録商標である。

況を外部から目視で確認することが可能であり、信頼性が非常に高い

- ③パネル枚数・ブロック数の増減で気化能力に応じた設計が容易であり、300ton/hを超えるような大容量の気化器としても対応が可能である

2.3 IFV

2.3.1 IFVの構造・気化プロセス概要

IFVは、海水などの加熱源により、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種類のシェルアンドチューブ式熱交換器（中間熱媒体蒸発器（以下、E1という）、LNG気化器（以下、E2という）、NG加温器（以下、E3という））を組合せた構造を有している。

図4にIFVの概念図を示す。E2の伝熱管内へ供給されたLNGは、E1シェル内上部の中間媒体ガスと熱交換し、ほぼ全量蒸発した後、連絡配管を通じてE3シェル側に移送される。LNGはここで、伝熱管内を流れる海水と熱交換・加温され常温のガスとして送出される。一方、E2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、E1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、E2管内のLNGを蒸発させる。中間媒体は主にプロパンを用いている。

内部を海水が流れる伝熱管（E1およびE3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。

2.3.2 IFVの特徴

IFVの特徴は次のとおりである。

- ①ORVと同様に加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。
- ②LNGと加熱源流体との熱交換を中間媒体を介して行うことにより、流路閉塞（へいそく）などの問題となる加熱源流体の凍結を回避できる。
- ③伝熱管材料としてチタン合金を用いることにより、悪水質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問題が回避できる。
- ④熱交換後の中間媒体や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③の特徴を生かした当社の事例として、海水中の浮遊固形成分濃度が10,000ppm（ORVの推奨値である80ppmの125倍）を超えている中国・上海LNG基地に納入したIFVがある。2009年の運転開始以降、良好な状態で運転が継続されている。同様に、海水中の浮遊固形成分濃度が高い中国・寧波LNG基地においてもIFVが採用され、2012年11月より運転が開始されている。

2.4 SCV

2.4.1 SCVの構造・気化プロセス概要

SCVは、水中バーナによる燃料ガスの燃焼熱によりLNGを気化させる構造であり、水槽、水中バーナ、伝熱管バンドル、燃焼空気ファン、および燃料供給制御装置などから構成される（図5）。

熱交換部である伝熱管バンドルおよび熱供給源の水中

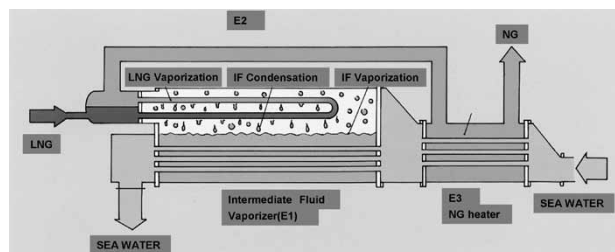


図4 中間媒体式気化器概念図

Fig. 4 Schematic of Intermediate Fluid type Vaporizer (IFV)

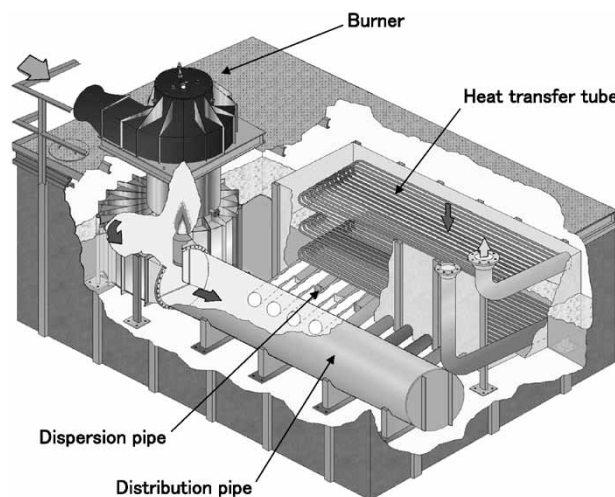


図5 サブマージド式気化器概念図

Fig. 5 Schematic of Submerged Combustion Vaporizer (SCV)

バーナは水槽内に水没して設けられており、水中バーナの燃焼熱により水槽内の水温を上昇させる。また、高温の燃焼ガスを水中に放出することから、燃焼ガスに含まれる水蒸気の潜熱も有効に利用される。なお、この排気ガスは水槽内で微小な気泡を含む二層混合気泡流となって伝熱管バンドルに作用し、より効率的な熱交換を促進する。水中バーナおよび燃焼ガス分配機構はともに水槽内に設けられており、排気用煙突も備えている。

2.4.2 SCVの特徴

SCVの特徴は次のとおりである。

- ①燃焼ガスを熱源とするため、同容量の他の気化器に比べて気化器のサイズが小さくなる。
- ②燃料ガスが突然停止した場合でも、水槽内の温水の熱容量によって短時間ながら気化ガス供給を継続することが可能である。
- ③ORVやIFVのような取排水設備が不要であり、建設費が安い。
- ④LNG気化量に対して約1.5%の気化ガスを燃料として消費するため、ランニングコストが非常に高い。
- ⑤燃焼排ガスの環境規制対応が必要とされる。

3. LNG受入基地形態多様化への取組

1.2節で述べたように、近年LNG受入基地形態の多様化が進んでいる。本章では、基地形態多様化に対する、当社の取組状況について記述する。

3.1 FSRU対応

3.1.1 FSRU用LNG気化器取組実績

1.2.1項で述べたように、FSRUは船体が揺動するた

め、LNG気化器に対しても揺動を考慮する必要がある。1999年に当社は、Mobil社（現ExxonMobil社）からの依頼に基づいて船上受入基地用LNG気化器の検討を行ったところ、中間媒体プロパンのスロッシング（液面の揺動による波打ち現象）対策を講じさえすればIFVが最適であることがわかった。これを受けてスロッシング対策を講じたIFVの特許を出願し、成立した。

Mobil社が計画した案件は最終的に実現には至らなかったが、その後、OLT（Offshore LNG Toscana）社がイタリア・トスカーナ州リボルノ市沖合で運用を行うFSRU用LNG気化器として、気化能力150ton/hを有する3基のIFVをイタリアのSAIPEM S.P.A社から受注し、納入した。OLT FSRUプロジェクトは、IFV納入後に客先事情によって工程が遅延していたが、試運転を経て2013年夏季に運用が開始される予定である。

本案件はイタリア船級（RINA）が適用され、RINAによるIFV各耐圧部材料に対するメカおよび製造プロセス認証、溶接工場認証、溶接施工法・溶接士認証などの各種認証手続き、製作中検査が実施された。さらに、100年に1回の確率で発生が想定される荒天での船体揺動データを用いたサドルや機器接合部を中心とした強度評価解析、中間媒体プロパンのスロッシング解析、および各種危険因子リスクアセスメントなどの図書の承認手続きが必要となった。

OLT FSRUの工事中の写真を図6に示す。

3.1.2 FSRU用LNG気化器の今後の課題

FSRUはLNG船の改造によって建設するため、設置スペースが限られ、LNG気化器としても省スペース・重量軽減化が求められる。さらに最近では、気化器単体だけではなく周辺配管や計電装設備、ポンプ類も含めたLNG気化設備としてのパッケージ供給が求められる状況となってきている。

こうした要求に対応するため当社は、IFV高性能化によるコンパクト化、およびLNG気化設備モジュールの検討を進めている。

3.2 空気熱源LNG気化システム対応

3.2.1 空気熱源IFV（Air-IFV）の開発

1.2.2項で述べたように、海水の代わりに空気を熱源とした一次受入基地用LNG気化器がインドDAHEJ基地



図6 OLT FSRU建設中写真

Fig. 6 Outside view of OLT FSRU (under construction)

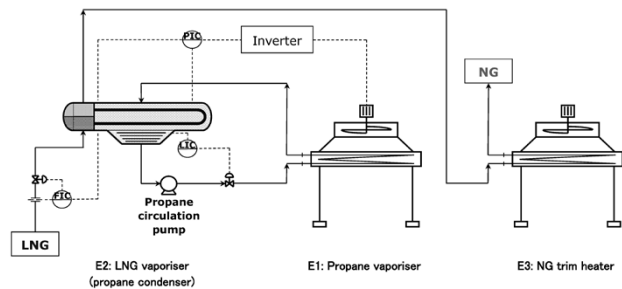


図7 Air-IFV概略フロー

Fig. 7 Schematic process of Air-IFV

において実用化されている。このシステムは、LNGとの熱交換によって冷却されたグリコール水に対してファンによって空気を送風・加温し、再びLNGとの熱交換に供するものである。このときの送風ファンは、LNG総気化量600ton/hに対して100台以上が必要となっている。

当社は、既存のIFV技術をベースとし、海水の代わりに空気を熱源として用い、プロパンを中間媒体としてLNGとの熱交換に供する空気熱源IFV（以下、Air-IFVという）を考案した。上記グリコール水を中間媒体として用いるシステムと比べて、以下の点で優位性がある。

- ①プロパンの蒸発・凝縮潜熱を利用するため、液顕熱を利用するグリコール水と比べて循環量が少なくなり、循環ポンプ動力費低減が図れる。
- ②プロパン加温時は、プロパン蒸発側は高い沸騰伝熱係数が得られるため、グリコール水加温に比べて必要空気量を抑制でき、ファンの台数および動力の低減が図れる。

図7にAir-IFVの概略フローを示す。LNG気化部（E2：プロパン凝縮部）におけるプロパンの圧力が一定となるよう、プロパン循環量および大気温度に応じて空気量のインバータ制御を行うことによって動力を削減する。

3.2.2 Air-IFVの今後の展開

現在、Air-IFVの実用化に向けて検討を進めているが、空気熱源によるプロパン蒸発特性を検証し、実機レベルでのプロパン蒸発器の設計手法を確立することが急務である。さらに、制御方法を含めたLNG気化設備としての詳細設計を実施し、上市を図ってゆきたい。

むすび = 本稿では、LNG一次受入基地の最新動向、一次受入基地用LNG気化器の特徴、および当社のLNG気化器への取組状況を概説した。

当社は、既存のORVおよびIFV技術のブラッシュアップを引続き行うと同時に、LNG受入基地形態多様化に応じた最適なLNG気化器システムの開発・提案を行い、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ゆく。

参考文献

- 1) A. Favi. OLT Livorno FSRU: an innovative solution for the gas industry. Convegni Tematici ATI-2012 Sesto San Giovanni (MI).

(解説)

LNGサテライト基地向けLNG気化器

LNG Vaporizers for LNG Satellite Stations



吉田龍生*1

Tatsuo YOSHIDA



森本佳秀*2

Yoshihide MORIMOTO

Natural gas prices are going down around the world due to shale gas production in USA. Electric power prices in Japan are increasing because all nuclear power stations except the Ohi station have been shut down. This has recently led, in the industrial field, to an increase in the demand for natural gas from LNG satellite stations. Kobe Steel has delivered LNG vaporizers to LNG satellite stations. This paper introduces an outline and the features of LNG vaporizers for LNG satellite stations, from the points of view of energy conservation and easy access for maintenance and inspection.

まえがき = 東北地方太平洋沖地震による被害を受けて以来、日本では大飯発電所を除くすべての原子力発電所が停止している。このため、電力は石油や天然ガスを燃料とする火力発電に頼らざるを得なくなり、電力価格が高騰する状況となっている。

天然ガスは石炭や石油に比べて二酸化炭素や硫黄酸化物、窒素酸化物の排出量が少ない、環境に優しい燃料である。一方で近年、米国におけるシェールガスの産出により天然ガスの価格が下落してきている。

このような背景から、大規模発電所から中小工場に至るまで、十分な電源の確保を目的として、ガスタービンやガスエンジン、ボイラなどの火力発電関連機器の新規あるいは増設計画が相次いでいる。

また、省エネルギー対策に加え、環境負荷の少ない天然ガスを利用してCO₂削減を行う事業者に対しては国から補助金が交付され、初期投資が軽減できる。そこで、LNGサテライト基地（ローリーなどで一次受入基地から運ばれるLNGを受入れて再ガス化する二次受入基地）を使った天然ガスの需要が産業向けにおいて旺盛となってきた。

当社は、国内LNGサテライト基地向け各種LNG気化器を市場に提供してきた。本稿では、省エネルギーおよびメンテナンスや検査においてアクセスがしやすいなど、当社のサテライト基地向けLNG気化器の概要と特徴を紹介する。

1. LNG気化器

サテライト基地向けLNG気化器は気化容量が10t/h以下と小規模である。このため、海水でなく温水や大気を熱源としてLNGを気化し、0℃以上の天然ガスを連続かつ安定的に生産する設備である。

LNG気化器は生産形態により、①一年間の平均的な需要量に対して昼夜稼働し生産するベースロード用、②一時的な需要負荷対策として稼働生産するピークシェービング用、および③緊急事態の需要対策として稼働生産するバックアップ用に分類される。

昨今の市場環境の変化としては、補助金交付制度を活用する事業者が急増していることが特筆される。これらの需要や設置環境に対応できる当社のLNGサテライト基地向けLNG気化器メニューには下記の4機種がある。

- ・円筒型温水バス式気化器
- ・冷水式気化器
- ・自然通風型空温式気化器（SUPERAFV^{脚注)}）
- ・消霧装置

2. 円筒型温水バス式気化器

温水式LNG気化器は温水を熱源とするためランニングコストがかかり、ベースロード用としての使用ケースは少なく、ピークシェービング用あるいはバックアップ用であった。しかし、産業向けでは省スペースおよび低イニシャルコストの観点からベースロード用に使用されてきている。また、温水式気化器は連続運転ができ、切替予備機を必要としない。

円筒型バス式気化器の概念図を図1に、運転中の外観を図2に示す。当社の円筒型バス式気化器は、国内気化器メーカーにおいて唯一横置型を採用しており、下記のような特長を有している。

- ・気化容量1～10t/h程度の中小規模サテライトに適す。
- ・ローリー加圧蒸発器、貯槽加圧蒸発器やBOG加温

脚注) SUPERAFVは当社の登録商標である。

*1 機械事業部門 機器本部 機器工場 *2 神鋼テクノ㈱

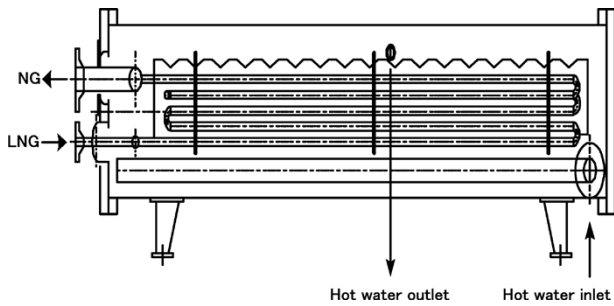


図1 円筒型温水バス式気化器の概念図
Fig. 1 Concept of hot-water bath vaporizer



図2 運転中の円筒型温水バス式気化器外観¹⁾
Fig. 2 Hot-water bath vaporizer in operation¹⁾

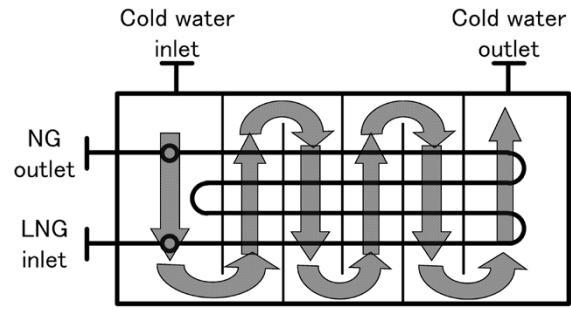


図3 冷水式気化器の概念図²⁾
Fig. 3 Concept of cold water vaporizer²⁾

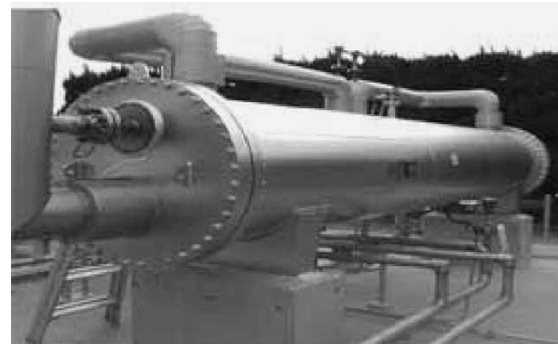


図4 運転中の冷水式気化器外観
Fig. 4 Cold water vaporizer in operation

器を同一シェル内に併せ持つことができる。

- ・小重量，低インシャルコスト，省スペースの高経済性気化器である。
- ・伝熱管は十分な間隔をおいて配置されているため，温水側の氷結閉そくトラブルがない。
- ・温水側シェルを円筒胴としているため，温水側が無圧開放型および有圧密閉型のいずれにも対応でき，有効な寒冷地（寒冷期）対策となる。
- ・外形が円筒形状かつ横置きのため高所作業にならず，工事性（据付工事，断熱工事）およびメンテナンス性に優れている。

こうした特長から，円筒型バス式気化器は現在までに50基の納入実績がある。

3. 冷水式気化器

冷水式LNG気化器は，産業用LNGサテライト基地における省エネルギーのニーズから中国電力株式会社と共同で開発したものであり，現在18基の納入実績がある。

温排水や井戸水を熱源とするため，ランニングコストがかからず，省エネルギーに大きく寄与する。このため補助金交付制度が活用でき，2012年度には9基を納入した。

ベースロード用に使用され，連続運転ができることにより切替予備機を必要としない。

冷水式気化器の概念図および運転中の外観をそれぞれ図3，図4に示す。冷水式気化器は，LNGが流れるチューブ側は温水式と同様の構造を採用した。また，熱源の水が流れるシェル側はシェルアンドチューブ熱交換器と同様のバッフルプレートを設置して所定の流速を確保した。これによりチューブ表面の着氷厚さを効果的に抑

制できる。

当社の冷水式気化器は，LNGと水との直接熱交換を行い，LNGの気化と同時に空調に利用可能な冷水を供給できる世界で唯一のLNG気化器である。このほかにも下記の特長をもつ。

- ・気化容量1～5 t/h程度の中小規模サテライトに適す。
- ・貯槽加圧蒸発器やBOG（Boil Off Gas）加温器を同一シェル内に併せ持つことができる。
- ・小重量，低インシャルコスト，省スペースの高経済性気化器である。
- ・伝熱管は十分な間隔をおいて配置されているため，水側の氷結閉そくトラブルがない。
- ・シェルを円筒胴とし，バッフルプレートを配置して所定流速を確保することにより，チューブ表面の着氷厚さを抑制できる。このため，LNGと水を直接熱交換させ，LNG冷熱を冷水として供給することが可能となる。
- ・外形が円筒形状かつ横置きのため高所作業にならず，工事性（据付工事，断熱工事）およびメンテナンス性に優れる。

3.1 利用用途

当社の冷水式気化器は，下記のような用途での利用によって顧客における熱効率の向上およびCO₂削減に大いに寄与するものとする。

- ・ガスタービン吸気冷却用に冷水を供給することにより，ガスタービンの発電量回復とLNGの気化熱源（燃料）削減ができる。
- ・温排水や井戸水を熱源とすることにより，LNGの気化熱源（燃料）を削減できる。

- ・冷却塔の一部代替として冷水を供給することにより、冷却塔の動力およびLNGの気化熱源（燃料）を削減できる。
- ・冷凍機の代替として冷水を供給することにより、冷凍機の動力とLNGの気化熱源（燃料）を削減できる。

4. 自然通風型空温式気化器（SUPERAFV）

自然通風型空温式気化器は空気を熱源とするためランニングコストが少なく、ベースロード用として使用されている。従来型の空温式気化器は蒸発部の伝熱管を並列に接続した構造としているため、蒸発部に付着する霜の成長が早く運転時間が短かった。外気の影響などで各蒸発管のLNG蒸発量が異なることによって伝熱管ごとに大きな温度差が生じる。この温度差が蒸発管とヘッダ管のすみ肉溶接部に繰返し熱応力を発生させ、き裂を生じさせる可能性があった。LNG需要の急増による稼働率の上昇に伴ってこれらの課題が顕著になってきたため、その対策として上下屈曲方式を採用した高信頼性の自然通風型空温式気化器（以下、SUPERAFVという）を開発した。SUPERAFVの概念図を図5に、運転中の外観を図6に示す。本方式により、冬季の霜成長が少なく連続運転時間は従来型の3倍を達成しており、き裂の発生は皆無の記録を誇る。

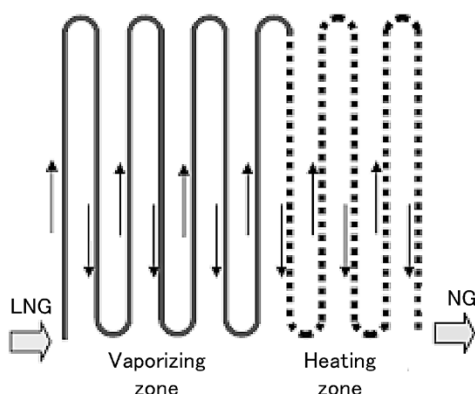


図5 自然通風型空温式気化器(SUPERAFV)の概念図³⁾
Fig. 5 Concept of natural draft vaporizer³⁾



図6 運転中の消霧装置付き自然通風型空温式気化器外観³⁾
Fig. 6 Natural draft vaporizer with de-fog system in operation³⁾

当社のSUPERAFVは次に示したような特徴をもつ。切替運転のための予備機を必要とするものの、現在までに5基を納入している。

- ・蒸発部管内に伝熱促進体を入れることで上下両方向での蒸発が安定し、定常運転下での熱量変動が少ない。
- ・管内の伝熱が促進され、伝熱管外表面に自然通風などで飛散するパウダー状の霜が薄く付着する程度で、冬季連続運転時間が大幅に向上した（従来機の約3倍）。
- ・上下屈曲管方式の採用およびサポート構造の見直しにより、機器への熱疲労の蓄積は極めて小さい。
- ・上記効果によってメンテナンス頻度の低減および長時間運転が可能になり、運転の自由度が増大する。運用パターンによっては解氷予備機が不要となる。ただし、高イニシャルコストが課題である。

5. 消霧装置

「可視障害」といわれる空温式気化器の冷気白煙発生に対し、顧客における近隣地域への配慮および運転操作上での安全確保の観点から消霧装置の設置要求が増えてきている。そこで当社では自然通風型空温式気化器に対応した消霧装置を開発し、現在までに63基の納入実績をもつ。

SUPERAFVの冷気を吸込み、大気中に拡散させることによって冷気の温度を上げる。相対湿度が下がることによって霧が消滅する。これが当社の消霧装置の原理であり、次のような特徴をもつ。

- ・構造が簡単なため、運転操作性およびメンテナンス性に優れる。
- ・温風器およびそれに必要な温水熱源を使用しないため、低イニシャルコスト、低ランニングコストを実現した。

むすび=本稿で紹介したように当社は、円筒型温水バス式気化器、冷水式気化器、自然通風型空温式気化器および消霧装置のメニューをもっている。顧客の様々な使用条件の下での省エネルギー要求に対し、当社は、最適な形式の気化器のLNG気化システムを提案し、納入・稼働することを責務とするサテライト基地用LNG気化器の総合メーカーと認識している。

参考文献

- 1) 岩崎正英ほか. サテライト基地用LNG気化器. R&D神戸製鋼技報. 2003, Vol.53, No.2, p.23-27.
- 2) 吉田龍生ほか. LNGサテライト基地における冷熱の有効利用について. R&D神戸製鋼技報. 2003, Vol.53, No.2, p.19-22.
- 3) 野一色公二ほか. 高信頼性空温式LNG気化器(SUPERAFV). R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.3, p.73.

(解説)

重油水素化分解・脱硫リアクタの最近の動向

Recent Topics for Heavy Oil Hydrocracking and Desulfurization Reactors



山田雅人*1
Masato YAMADA



八木 裕*1
Yutaka YAGI



中西智明*1
Tomoaki NAKANISHI



原田福三*2
Fukuzo HARADA

Heavy oil hydrocracking and desulfurization reactors are pressure vessels installed in oil refineries and operated at high pressure and high temperature to reduce light oil such as gasoline, diesel, etc., from heavy oil. The main body of a reactor is made from a forged shell ring and the wall thickness is normally more than 200mm. The weight of the largest class reactor is nearly 2,000tonnes. In 1975, a 13,000tonne forging press was installed in the Takasago Works of Kobe Steel, which made it possible to supply large forged shell rings used for reactor bodies. Since 1980, Kobe Steel has been supplying large scale reactors all over the world. The previous report issued in 2000 describes the technology for constructing and fabricating reactors; this report describes some reactor-related topics that have come up since 2000.

まえがき = 重油水素化分解・脱硫リアクタは原油の重質分を原料として、付加価値の高いガソリン、軽油などの軽質油を生産するために石油製油所内に設置される高温・高圧下で運転される反応器（以下、リアクタという）である。リアクタは一般的に肉厚200mmを超え、重量は大きいものでは2,000トン近くになる大形鍛造シェル製の縦型円筒圧力容器である（図1）。当社は1975年に13,000トン水圧自由鍛造プレスを高砂製作所に導入し、リアクタ製造に必須となる大形鍛造シェルの自給が可能になり、1980年には大型鍛造シェル製リアクタの供給を本格的に開始した。リアクタの構造、関連技術については2000年に発行された本誌¹⁾で紹介しており、本稿では主に2000年以降のリアクタを取巻く市場および技術動向について述べる。

を行う装置であり、重質油を軽質、低硫黄の石油製品に転換する。その中でも残渣（ごんさ）油から硫黄分の脱硫を主に行うリアクタは、直接脱硫もしくはRDS（Residue Desulfurization）リアクタと呼ばれる。一方、重質油を分解して軽質油を主に生産する目的のリアクタは、水素化分解リアクタもしくはHydrocrackerと呼ばれる。リアクタの内部構造は触媒の保持方法によって異なり、固定床、移動床、沸騰床、スラリ床などがある²⁾。最も一般的なリアクタは固定床タイプであるが、残渣油に含まれる金属類を効率的に除去する目的から、通常の固定床リアクタの上流側に移動床リアクタが設置されるケースもある。また、残渣油の直接水素化分解にはこれまで、LC-Fining、H-OILなどの沸騰床のプロセスが主に適用されたが、近年、VCC（Veba Combi-Cracking）、HDH-plusなどのスラリ床のプロセスも適用され始めた。

一般的なリアクタの設計条件は圧力20MPa前後、温度450℃前後である。水素侵食および耐熱性からCr-Mo鋼を耐圧部材とし、高温硫化物腐食を防止するために内面はTp347ステンレスなどの溶接肉盛を行って耐食性を担保している。耐圧部材は1990年頃までは2.25Cr-1Mo鋼（ASME SA-336-F22-3）が主に用いられ、1988年から1998年の間には3Cr-1Mo-V鋼（ASME SA-336-F3V、F3VCb）やEnhanced 2.25Cr-1Mo鋼（ASME SA-541-22-3）などの高強度鋼を用いてリアクタの重量削減が行われた。1997年、当社が世界で初めて2.25Cr-1Mo-V改良鋼（ASME SA-336-F22V）製リアクタを米国大手石油会社に納入し³⁾、数年後には2.25Cr-1Mo-V改良鋼がリアクタの主要材料に置き替わった。2.25Cr-1Mo-V改良鋼は水素侵食、水素脆化に対する抵抗力が高く、かつ、高強度でリアクタ重量を従来の材料に比べて最大25%の削減を可能にした。しかしながら、2.25Cr-1Mo-V改良鋼は溶接性が極め



図1 1,900tonリアクタの出荷
Fig. 1 Shipping of 1,900 tonnes reactors

1. リアクタの特徴と市場

リアクタは、高温・高圧下で重質油に水素を添加し、触媒によって反応を促進させて分解、脱硫、不純物除去

*1 機械事業部門 機器本部 機器工場 *2 神鋼テクノ株式会社

て悪く、多くのリアクタ製造会社で問題を起こしている。このため、米国石油協会（API）が中心となり、問題防止のためのガイドラインを提供している。

リアクタの需要は白油化、硫黄規制の強化、超重質油（オイルサンド、オリノコータル）利用により大きなトレンドとしては増加が予想されるが、原油価格や重質原油と軽質原油の油種間価格差、世界経済状況に依存して大きく変動する。とくに2005年から原油価格の高騰と同時に油種間価格差も拡大したために大型の設備投資が活発に行われ、一時はリアクタ供給能力をはるかに超える需要となった。

しかしながら、2008年のリーマンショックで原油価格は一時暴落、計画中の設備投資のほとんどは延期もしくは中止となった。その後、原油価格は回復したものの景気低迷の影響もあり、リアクタ需要は低迷している。一方では近年、ベネズエラのオリノコータルやカナダのオイルサンドが原油埋蔵量として認識され、ベネズエラは世界第1位、カナダは世界第3位の原油埋蔵量となり、今後の超重質油の改質用並びに石炭液化用にリアクタの需要増加も期待される。

2. 設計規格・基準の変遷

2.1 ASME Section VIII, Division 2 の2007年の全面改訂

2007年にASME Section VIII, Division 2⁴⁾が全面改訂された（以下、ASME 2007年度版という）。大きな改訂項目は、以下のとおりである。

- ・リアクタなどで使用される2.25Cr-1Mo-V改良鋼などの高強度材料の許容応力が改訂前より高く設定され、圧力容器肉厚を薄くすることができる。
- ・耐圧部に対する強度計算式が全面的に見直され、ヨーロッパの規格との整合性が図られた。
- ・圧力容器に使用する素材に対する非破壊検査要求項目が増加した。

ASME 2007年度版を2.25Cr-1Mo-V改良鋼製リアクタに適用すると、以前に比べて20~25%程度軽量化できる。

この改訂には、ASME委員会より（社）日本高圧力技術協会協（HPI）にあらかじめ協力依頼があり、当社を含めて国内16社が参加する研究会が立ち上げられた。日本側での担当箇所の最初の素案を2001年12月に作成し、最終案を2003年末にASME委員会へ提出した。

その後、ASME委員会内にプロジェクトチームが組織され、2007年の春にASME 2007年度版の検証のためのβ版が作られた。ASME委員会の依頼に基づき、当社でもASME 2007年度版のβ版でリアクタが設計できることの検証を行った。その結果、ASME 2007年度版で疲労解析の要否を判断する項目および疲労解析を評価する表が、一部の材料を除き、圧力容器運転温度で最大371℃（700°F）までしか対応しておらず、通常運転温度が371℃を超えるリアクタの場合には疲労解析の要否の判断も疲労解析の評価もできなくなり、ASME 2007年度版で設計ができないことが判明した。

この問題を短期的に解決するため、ASME Section

VIII, Division 2 2007年度版が発行され適用が必須となっても、旧版である2004年度版を使用することが可能となるASME Code Case 2575が発行された。当社ではこの間、Code Case 2575を適用したリアクタを3案件、9基製造した。

上記問題を解決するため、リアクタに通常使用される2.25Cr-1Mo-V改良鋼に限定してASME 2007年度版で設計することを可能とするCode Case 2605が2008年10月にASME委員会で承認され、即時に適用可能となった。このCode Case 2605では、発注者が発行するUser's Design Specificationに詳細な運転条件や設計寿命、設計繰返し数を規定する必要がある。また、標準部品やフランジ以外の全ての耐圧部に対して詳細なクリープ疲労解析を実施し、設計寿命や設計繰返し数を満足することを機器製作会社が発行するManufacture's Design Reportで示すことを要求している。

Code Case 2605に従うクリープ疲労解析では、応力集中が発生する構造的不連続部のクリープ損傷を評価する必要がある。リアクタに取付けられる斜角ノズルの応力集中部ではとくに高いクリープ損傷が発生することを確認していることから、設計には特別の配慮が必要となる。

2.2 API（米国石油協会）基準

リアクタの設計や製作における規定としては、前述の米国圧力容器規格（ASME Section VIII, Division 2）のほかに米国石油協会のガイドラインがある。そのうちリアクタに適用されるものがAPI RP934-A⁵⁾およびAPI TG934-B⁶⁾である。

API RP934-Aは高温高圧の水素環境で使用されるリアクタに関する基準であり、成分や強度などの材料に関する要求から溶接方法や熱処理といった製作に関する要求、また、製作中および製作後の検査や試験、さらに出荷準備や提出する図書への要求まで具体的に規定されている。

これらの規定は定期的な会議で見直しが議論されており、近年では、後述する溶接部の再熱割れ問題への対策として、溶接後の高感度超音波探傷試験方法や溶接材料の健全性確認試験方法に関する規定が追加されている。これらの会議には当社も参加してリアクタ製造会社としての改訂提案やデータの提供を行っている。

一方でAPI TG934-Bは、とくに製作が難しいとされるバナジウム添加された改良鋼製のリアクタ製作時に配慮すべき事項をまとめた技術報告である。製造の難しさからバナジウム改良鋼製リアクタの製造会社は世界でも限定されており、2000年代半ばの需要増大時には供給が逼迫し、納期の長期化を招くこととなった。それを機に石油精製業界で当分野への新規参入を求める声が高まり、それを促進する目的で作られたものがAPI TG934-Bである。ここでは、これまで発生した成形時の割れや溶接欠陥等が紹介され、その原因と防止策、推奨される製作手順、さらに新規製造会社の評価方法まで具体的に提示されている。

3. 2.25Cr-1Mo-V改良鋼製リアクタ製造上の課題

3.1 溶接部の低温割れ

2.25Cr-1Mo-V改良鋼は、バナジウム（V）の添加により強度を高めているためバナジウム添加のない従来鋼に比べて溶接部の低温割れ感受性が高く、溶接施工管理には特別な配慮が必要となる。焼鈍前の溶接部は非常にもろく、溶接欠陥を起点に低温割れを起こしやすい。さらに、この種のリアクタの特殊要求として運転開始後に施す補修溶接後の焼鈍の可能性も考慮した長時間のシミュレート焼鈍を与えた試験片での強度保証を要求される。このため、材料製造会社での焼戻し温度を低めにせざるを得ず、納入状態の母材のじん性も一般的に低い。そのため、溶接金属中で発生した低温割れがじん性の低い母材まで進展し、大きな貫通割れを起こす危険性がある。従来鋼では低水素系溶接材料の使用と300℃以上での脱水素熱処理により低温割れを防止できた。しかしながら2.25Cr-1Mo-V改良鋼では、拘束の強いノズル取付溶接などに対してはより高温（650℃前後）での中間焼鈍によるじん性の改善が必須となる。当社は開発段階からこれらの危険性を十分に評価し、脱水素熱処理と中間焼鈍とを使い分けていたが、これらの知見が十分でないリアクタ製作会社では大きなトラブルを起こしており、その一部の事例はC. Shargayらが報告している⁷⁾。これらの事例に基づき、溶接材料製造会社が溶接金属の中間焼鈍条件の違いによるじん性の影響を報告している⁶⁾。さらにAPI RP934-Aでは、中間焼鈍条件をmin.650℃×min. 4h保持もしくはmin.680℃×min. 2h保持との要求が記載され、当社が自主的に行ってきた条件より厳しい条件が一般化した。

3.2 溶接部の再熱割れ

再熱割れとは、溶接後の熱処理中に不純物などの影響により材料がぜい化して割れが生じる現象である。2008年初めに、主に欧州のリアクタ製造会社で製作中の2.25Cr-1Mo-V改良鋼製リアクタにおいて発生して大きな問題となった⁸⁾。胴体の接合に用いられるサブマージアーク溶接部に、最終的には25基以上の同種の機器でこの再熱割れが発見されたものである。2.25Cr-1Mo-V改良鋼用の溶接材料を製造販売しているのは当社と欧州製造会社の数社のみであり、当社製溶接材料を使用するリアクタ製造会社ではこの問題は発生していない。そのため、この問題に対しては欧州製造会社を中心となって原因調査と対策検討が実施された⁹⁾。Gleeble[®]テストと呼ばれる高温引張試験の結果、問題発生時期以前に使用された溶接材料の620～650℃の温度域での絞りが20%以上であったのに対して、問題発生時期に使用された溶接材料の絞りは10～15%程度と溶接後の熱処理温度域でのぜい化が著しいことが報告されている。また、この原因として鉛、ビスマス、アンチモンといった不純物元素が影響しているとされ、溶接材料の清浄度を管理する指標として以下のKファクターが提案された。

$$K = \text{Pb} + \text{Bi} + 0.03\text{Sb} \leq 1.5\text{ppm}$$

割れの大きさは幅4mm×高さ4mm程度と非常に小

さく、溶接線に垂直方向に生じた横割れであるため、従来の超音波探傷試験では検出が難しい。そこで、新たな探傷方法の確立が必要となり、TOFD（Time of Flight Diffraction）法と呼ばれる超音波探傷法と従来型で高感度の超音波探傷法を組合せた検査手法が開発された⁸⁾。その後この検査手法は、2010年2月よりAPI RP934-Aの付録-Aとして正式採用された。

前述のように、再熱割れの原因調査にあたっては溶接材料の再熱割れ感受性を評価する手法としてGleeble[®]テストが採用されていたが、本試験方法は特殊な試験装置を必要とし汎用性に欠けることが指摘されていた。そこで、リアクタのユーザ、当社を含めたりアクタ製造会社、および材料製造会社が集まり、2010年より1年間のJIP（Joint Industrial Program）と呼ばれる試験方法の標準化プロジェクトが進められた。その結果、汎用の高温引張試験装置で実施可能な新たな評価手法が確立され¹⁰⁾、API RP934-Aの付録-Bとして正式採用されている。

4. 現地組立溶接工事

表1に示すとおり当社は、オイルサンドの産地であるカナダ中西部のアルバータ州において、リアクタの現地組立溶接工事を2000年以降継続して実施してきた。これらのリアクタはカナダ国内の輸送限界を超えることから、当社高砂製作所で輸送可能なサイズにまで部分組立を行ってカナダに輸送し、設置場所やその近辺で完成させたものである。本章では、カナダで当社が最初に経験したS社向けリアクタの現地組立溶接工事を中心に、その概要を紹介する。

(1) S社向けリアクタの製作仕様

表1に示したとおり、2.25Cr-1Mo-V改良鋼製リアクタ2基の組立溶接工事で、リアクタはカナダ国内の輸送制限に従うべく2分割状態まで当社工場で作成し、最終周継手の組立溶接を現地で行った。サイトはアルバータ州エドモントンから北東に約40km離れたフォートサスカチュワンの近郊で、冬季は零下20～30℃におよぶ厳寒地である。

(2) リアクタ半製品の輸送

リアクタ半製品は2分割状態ではあるが長尺重量物である。日本から船で五大湖の一つスペリオール湖の最西端に位置する米国ミネソタ州ダールズまで海上輸送し、ダールズからサイトまではレール地盤の凍結を待って、特別仕立ての貨車で輸送した。

表1 カナダでの現地工事実績
Fig. 1 Field fabrication in Canada

Customer		S company	P company	C company
Site		Near Fort Saskatchewan, Alberta	Edmonton, Alberta	Fort McMurray, Alberta
Reactor	Number of equipments	2	1	1
	Inside diameter	4,000 mm	4,572 mm	4,600 mm
	Thickness	206 mm	224 mm	155 mm
	Overall length	36,100 mm	27,432 mm	35,100 mm
	Weight	760 tonnes	734 tonnes	715 tonnes
Period of field fabrication		Nov. 2000 – May 2001	June 2003 – Dec. 2003	Nov. 2005 – Dec. 2006

(3) 現地工事体制

カナダでの外国人の一時就労については、カナダ国籍者や永住権保有者の雇用機会に影響を与えるなどの観点から厳しい審査基準が設けられている。このため、カナダでの一時就労について顧客と共にカナダ人材技能開発省（HRSDC）と調整を図ったが、当社派遣員による作業が許されたのは溶接のみであった。他方、組立、仕上げ、非破壊検査などの作業は、カナダで過去に十分な職務経験があるとの位置づけで、現地作業員の起用が必須であった。

(4) 搬入機材

現地業者は大形圧力容器の製造に不慣れで設備も十分に有していなかったことから、SAW溶接機、溶接用マニプレータ、ターニングロールなどの主要大物機材は日本より搬入した。

なおアルバータ州では火災・感電に関する安全性について、カナダ規格協会（CSA）または州の検査当局の安全に関する承認を受けることが義務づけられているため、SAW溶接機やターニングロールなどの電気機器類をはじめ、ヘルメット、安全靴、安全帯などもCSAに検査申請して承認を得る必要があった。

(5) 組立溶接工事

厳寒地のため、客先より提供された工事建屋内でのリアクタ組立溶接工事であった。工事建屋の近くで仮置きされた2分割状態のリアクタ部品は自走式特殊トランスポータで建屋内に搬送され（図2）、ターニングロール上に横置き状態にセットされた後、特殊トランスポータのジャッキ機能でオリエンテーションや真直度調整を行い、最後にターニングロールの芯を合わせて開先合わせを完了した。建屋内のハンドリングは、自走式特殊トランスポータと100トン級クローラクレーンを活用した。

溶接は前述のとおり当社の溶接士が従事し、溶接後熱処理およびその後の非破壊検査、耐圧試験は、当社技術員指導の下に現地業者の手で行われた（図3）。

(6) 今後のリアクタ現地組立溶接工事

カナダでは今後も、N社向けオイルサンド処理用2.25Cr-1Mo-V改良鋼製リアクタ3基の現地組立溶接工事が予定されている。サイトはエドモントン北東部、カナダで最初に現地工事を行ったフォートサスカチュワンの近隣地域で、工事開始は2014年春の予定である。



図2 カナダ現地でのリアクタ上部の移動
Fig. 2 Transportation of top half of reactor at Canadian site



図3 現地工事建屋内での最終溶接
Fig. 3 Welding of final seam inside site fabrication shop

むすび=当社が本格的にリアクタの分野に進出してから30年以上になり、300基あまりの機器を世界中の製油所に供給してきた。その間、大きく増減を繰り返す需要変動や技術要求の変化に対応して製造技術の向上、品質向上、競争力の強化に努め、多くの顧客からの信頼を得ている。

今後も超重質油の改質用などにこの種のリアクタの需要は増加すると予想しており、顧客の新たなニーズに的確に応えることで技術競争力の維持、向上を図っていく。

参考文献

- 1) 能勢士郎ほか. R&D神戸製鋼技報. 2000, Vol.50, No.3, p.95-98.
- 2) Refining Processes Handbook 2011, Gulf Publishing Company.
- 3) Shiro Nose et al. "Fabrication of a hydroprocessing reactor applying 2.25Cr-1Mo-V-Cb-Ca Steel". ASME PVP, 1998, Vol.380, p.301-314.
- 4) ASME boiler and pressure vessel code, Sect.VIII, Div.2, 2007 Edition.
- 5) API recommended practice 934-A, Second edition.
- 6) API technical report 934-B, First edition.
- 7) C.Shargay et al. "Consideration for requiring intermediate stress relief (ISR) for all weld types on 2 1/4Cr-1Mo-V reactors". ASME PVP 2010-25361.
- 8) L. Antalffy et al. "Reheat Cracking in 2 1/4Cr-1Mo-1/4V Reactor Welds and the Development of Ultrasonic Techniques for Their Discovery". Proceedings of 12th International Conference of Pressure Vessel Technology, 2009, p.52-64.
- 9) C. Chauvy et al. "Prevention of Weld Metal Reheat Cracking During Cr-Mo-V Heavy Reactors Fabrication". ASME PVP2009-78144.
- 10) S. Pillot et al. "Standard Procedure to Test 2 1/4Cr-1Mo-V SAW Filler Material Reheat Cracking Susceptibility". ASME PVP2012-78030.

(解説)

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[®])



三橋頭一郎*¹
Kenichiro MITSUHASHI

Since the growing demand for natural gas as a clean natural resource is expected to continue, the construction of new LNG liquefaction plants is being planned in various parts of the world. The Brazed Aluminum Plate-fin Heat Exchanger ALEX[®] used in the LNG liquefaction process has excellent characteristics in both its construction cost and running cost compared with those of the conventional shell & tube heat exchanger; and it has been used more than 40 years as the heat exchanger most suitable to complicated low-temperature multi-fluid processes such as those of an air separation plant, or energy and chemical plant. This paper introduces the advantages that ALEX possesses over conventional shell & tube heat exchangers. Various special techniques required especially for the heat exchanger of an LNG liquefaction plant, such as two-phase flow distribution, improvement in mercury corrosion resistance, and stress analysis, are also explained.

まえがき = 当社は国内外の低温プラントに6,000機以上のアルミろう付熱交換器ALEX[®]を納入している。近年は、クリーンな化石燃料として天然ガスの需要が伸びており、液化して輸送するためのLNGプラントの建設計画が活発化している。本稿では、LNG液化プラントでも使用されているALEXを紹介し、他の熱交換器に比べた経済的なメリットや省エネルギーへの貢献など、その優位性について説明する。

1. 構造

ALEXの基本構造を図1、伝熱コア部の構成を図2に示す。ALEXは、コアと呼ばれる伝熱部に流体の出入り口となるヘッダやノズルを溶接接合して製作される。コアはフィン、仕切板、サイドバーを積層して真空ろう付

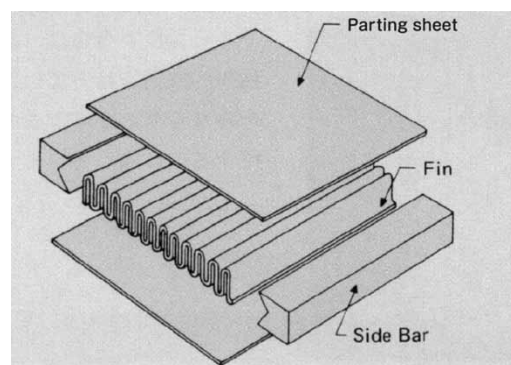


図2 ALEXコアの構成部材
Fig. 2 Parts for ALEX core block

法によって接合され、流体を流すための流路層を構成する。隣接する流路の各層にそれぞれ高温流体および低温流体を流すことにより、フィンと仕切板を通じて効率的に熱交換される仕組みである。

2. 優位性

最も一般的な熱交換器として知られる多管式熱交換器に比べ、ALEXは以下に示すような様々な優位性を持つ。

①コンパクト・軽量

高密度に成型された薄肉フィンを使用するため、1 m³あたり1,000m²以上の伝熱面積を有し、多管式熱交換器の1/20~1/30程度のサイズで設計可能。プラントにおける機器設置面積の削減と機器設置架台の負担軽減が可能になる。

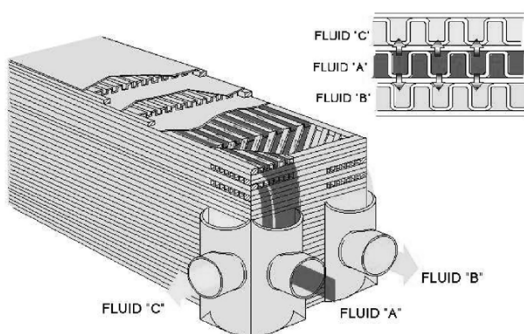


図1 ALEX基本構造図
Fig. 1 Basic construction of ALEX

脚注) ALEXは当社の登録商標である。

*¹ 機械事業部門 機器本部 機械工場

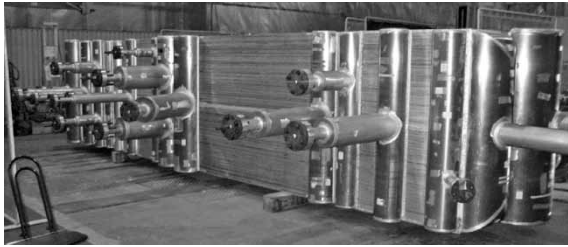


図3 多流体ALEX(14流体)の例
Fig. 3 Multi-stream ALEX having 14 streams

[多管式熱交換器では1 m³あたり40~70m²が一般的]

②多流体設計

100段を超える流路を積層できるため、1機のALEXで多流体を同時に熱交換することが可能。(図3は14流体のALEXの例)

複数の熱交換器を一つに統合することにより、プラントエリアを節約できるだけでなく、据付用架台や接続配管を大幅に減らすことができるため、機器コストに加えてプラント建設コストも低減できる。

[多管式熱交換器では2~3流体が一般的]

③省エネルギー

完全な対向流熱交換が可能であること、およびアルミニウムの高い伝熱性能により、1.5℃の非常に小さい流体間温度差のプロセスにも対応が可能。

冷凍サイクルでは、冷熱を発生させるために冷媒を減圧し再度圧縮する必要があるが、ALEXの使用により冷媒の減圧幅を小さくできるため、再昇圧幅も軽減でき、圧縮機動力のランニングコストの低減が可能になる。

[多管式熱交換器では最小温度差3~5℃が一般的]

3. 用途

上述のように、ALEXは産業用の熱交換器として極めて優れた利点を数多く持つことから、様々な産業用プラントで幅広く使用されている。その一方でいくつかの制約もあり、その代表的な点に触れておく。

まず、ピッチの細かい伝熱フィンを使用するためコンパクトである反面、流体中の固形異物が詰まりの原因になる。上流にメッシュストレーナを設けることで解決できるが、ストレーナが頻繁に詰まると連続運転に支障をきたす。このため、流体中に固形異物がない用途に限られる。また、使用できる温度は材料の制約から約200℃まで、圧力は適用法規によって異なるが90~130気圧まで使用が可能である。

これらの制約の範囲内で使用できる産業用途、とくに天然ガス関連プラントやエチレンプラント、空気分離プラントなど、-100℃以下の運転温度で複数の流体を熱交換する複雑なプロセスでは最も適した熱交換器として世界中で使用されている。

4. LNG液化基地向けALEX

天然ガスを液化してLNGを生産するプロセスは、ガスの性状や採用される液化プロセスの種類によって異なるが、おおむね以下の工程に分類される。

前処理：天然ガスからメタンガスを分離

予冷：メタンガスを液化温度手前まで予冷

液化：メタンガスを液化

減圧：液化したLNGをタンクに貯蔵するため減圧

ALEXは上記全ての工程において採用実績があり、具体的には以下の熱交換器として使用されている。

前処理：ガスプロセッシングプラント用各種熱交換器
(蒸発器、凝縮器、ガス熱交換器など)

予冷：天然ガス予冷熱交換器 (Pre-cooler)

液化：天然ガス液化熱交換器 (Main exchanger)

減圧：減圧ガス冷熱回収熱交換器 (Flash gas exchanger)

LNG液化基地用のALEXは、運転温度域の広さ(常温から-160℃)、運転プロセスの複雑さ、天然ガス中の異物といった面で特殊な配慮が必要であり、そのいくつか代表的なものをここで紹介する。

(1) 保冷箱パッケージ

ALEXは通常、熱交換器単体として出荷されてプラントの機器受け架台に設置されるが、LNG液化熱交換器のように使用温度が-160℃と低い場合は、コールドボックス(図4)と呼ばれる鉄製の箱にパッケージ化して納入され、パーライト(粉状の保冷材)を充填して運転される。外部の湿気が侵入して保冷性能を劣化させるのを防ぐ目的から、保冷箱内部は窒素が微圧で保持される構造となっている。

また、この窒素を定期的にサンプリングして分析することにより、内部の熱交換器から可燃性のガスが漏れていないかどうかを確認することも可能である。

(2) 二相流の分散構造

LNGを液化する冷凍サイクルは、消費動力を最小限にするために図5の例のように非常に小さい温度差で



図4 コールドボックスの例
Fig. 4 Example of cold box package

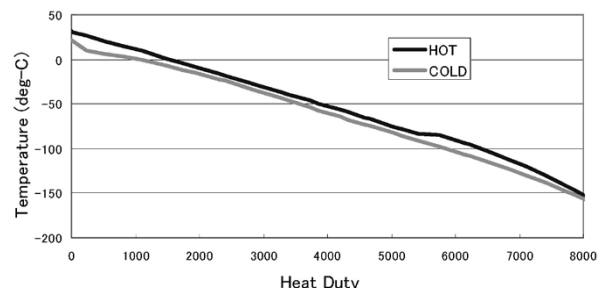


図5 冷凍サイクルの温度 vs 熱量カーブの例
Fig. 5 Temperature vs duty curve of refrigeration cycle

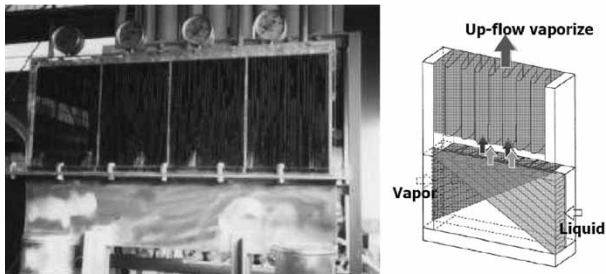


図6 ALEXの入口部二相流分散構造実験装置

Fig. 6 Experimental equipment for two phase inlet distributor of ALEX

運転される。この伝熱的に厳しい運転条件で所定の能力を発揮させるためには、流体を熱交換器内に均等に分散させ、全ての伝熱面積を有効に機能させる必要がある。とくに二相流の均等分散には特殊な技術が必要であり、当社は図6のような独自の実験によって様々なプロセスに適した分散装置を開発している。

(3) 水銀対策

アルミニウム合金は水銀によって短期間で腐食する性質があるため、プラント上流の水銀除去ユニットによって天然ガス中に含まれる水銀はほぼ完全に除去される。しかし熱交換器の腐食のリスクは依然として残るため、補助的な役割ではあるが、耐水銀腐食性の改善が求められる。

当社は、独自の実験データをベースとした耐食性向上技術を開発し、必要に応じて提供している。開発にあたってはまず、コアに使用される合金3003とヘッダ・ノズルに使用される合金5083の耐水銀腐食性を確認した。その結果、5083は3003に比較して腐食速度が3倍程度であることがわかった。そこで、5083の耐食性能を3003と同等程度まで向上させることとした。具体的には、コアへ溶接する前のヘッダ・ノズルを炉内に入れ、1~10時間、250~350℃、大気雰囲気の中で熱処理を行う。これによって良好な酸化膜を形成させ、ボトルネックとなるヘッダ・ノズルの耐食性を向上させることができる。コアへの溶接時には、図7のように熱影響部を3003の裏当金で保護することによって耐食性を保持させる。ユーザによる水銀除去装置の設置、メンテナンス時の窒素封入(乾燥維持)と併用することでより水銀腐食のリスクを低減できる。

(4) コアの熱応力解析技術

ALEXのコアは、図1、2に示すように薄肉のフィンが100段以上積層された構造であり、応力解析を行うためのモデル化には特殊な技術が必要になる。当社はこのフィンのモデル化にあたって、実験によって裏付けられた適切な等価モデルを用い、複雑なコア部の応力を解析する技術を開発した^{1)~6)}。図8はコア部の変形を解析によって求めた一例を示す。また、図9は、解析技術の妥当性を確認するために実施した様々な実験の一例(急冷実験)を示す。こうした解析技術を活用することにより、運転中の破損原因の調査や想定される異常運転に対

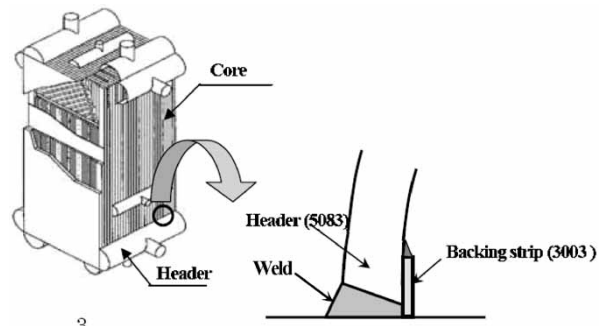


図7 ALEXの耐水銀腐食性向上技術

Fig. 7 Improvement technique of mercury corrosion resistance for ALEX

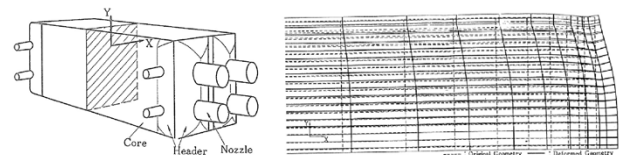


図8 ALEXの伝熱コア部の応力解析事例

Fig. 8 Example of stress analysis for ALEX core



図9 ALEXの応力解析手法確立のための熱応力発生実験

Fig. 9 Thermal stress testing to establish stress analysis of ALEX

する応力評価など、様々な顧客ニーズ、アフタサービスに対応している。

むすび = 本稿で紹介したとおり、LNG液化基地向けALEXには様々な特殊な技術が必要であり、これに応えるために様々な技術開発を行ってきた。LNG液化熱交換器としての需要は、シェールガスや海洋ガス田開発という新たな展開によって今後も増加する傾向にある。当社は、これらの市場で求められる新たな技術課題を解消し、ALEXをさらに拡販することによって産業分野における省エネルギーに貢献していく。

参考文献

- 1) 神田邦昭ほか. アルミニウム熱交換器ALEXの疲労強度. R&D神戸製鋼技報. 1979, Vol.29, No.1, p.75-80.
- 2) 野一色公二ほか. 天然ガス処理プラント用大型高圧ALEXの開発. R&D神戸製鋼技報. 2003, Vol.53, No.2, p.28-31.
- 3) T. Mizoguchi et al. Pro. ASME Pressure Vessel&Piping Conference. 1982, 82-PVP-29.
- 4) T. Nakagawa et al. Pro. ASME Pressure Vessel&Piping Conference. 1984, 84-PVP-7.
- 5) S. Terada et al. Pro. ASME Pressure Vessel&Piping Conference. 2001, 01-PVP-418.
- 6) T. Nakaoka et al. International Conference on Pressure Vessel technology. Vol.1 ASME 1996.

(解説)

90°C温水取り出し空気熱源ヒートポンプ「HEM-90A」

Air-sourced 90°C Hot Water Supplying Heat Pump, "HEM-90A"



大上貴博*1
Takahiro OUE



岡田和人*1
Kazuto OKADA

Kobe Steel has developed the Air-sourced Hot Water Supplying Heat Pump "HEM-90A," which has the capability of extracting 65-90°C of hot water for the heating process of factories dealing with such items as foods, beverages, automobiles, chemicals, etc. The new developed heat pump is able to realize the highest energy efficiency as an air-sourced hot water supplying heat pump under circulation heating, by means of adopting a semi-hermetic two-stage twin-screw compressor modified for high temperature operation, as well as selecting adequate refrigerants and optimizing the air-sourced evaporator unit. In this paper, we introduce the features and the performance of our new developed heat pump.

まえがき = 飲料、食品、自動車などの生産工場では、原材料の洗浄や殺菌、塗装といった高温水を必要とする様々な工程が存在する。これら高温水の熱源として従来、燃焼式ガスボイラやヒータが適用されてきたが、近年、ヒートポンプの省エネ性が高く評価され、これらの代替熱源として普及が進みつつある。

当社では、2009年には70°Cまでの温水と冷水の同時供給可能な「ハイエフミニシリーズHEM^{注1)}-II HR」を、さらに2010年には90°Cまでの温水と冷水の同時供給が可能な「ハイエフミニシリーズHEM-HR90」を他社に先駆けて商品化し、各種生産工程にて活用されている^{1), 2)}。本熱源機は、冷水と温水を同時に供給するため高いエネルギー利用率を実現できる。とくに、冷熱温熱ともにベースロードとして活用することでそのメリットを生かせる反面、熱需要がそれほど大きくない用途の場合には冷熱温熱の負荷バランスを取る必要があり、ユーザーズによっては導入を見送られるケースもあった。

そこで当社では、ヒートポンプのさらなる普及を図るべく、温水供給に冷水負荷が不要な「空気熱源温水ヒートポンプHEM-90A」を開発し、2012年5月より販売を開始した。本稿では、当該開発機のシステム構成をはじめ、特徴や性能などについて紹介する^{3), 4)}。

1. HEM-90Aの特徴

1.1 概要

図1に「HEM-90A」のフロー図を示す。従来の冷温同時取出機「ハイエフミニシリーズHEM-HR90」では、蒸発器にて冷水からの熱を冷媒液の蒸発潜熱として汲上げ

げ、気化した冷媒ガスをスクリュウ式圧縮機にて昇圧し、凝縮器にて冷媒ガスの凝縮潜熱を温水に与える構造となっている。冷温同時利用のためCOP^{注2)}は非常に高く維持できるが、取出せる冷熱量と温熱量の比率は冷水温度と温水温度で一義的に決まり、顧客の用途によっては冷熱温熱の負荷バランスを取る必要があった。

顧客が当社熱源機を利用するうえでの制約を極力減らすために、「HEM-90A」では蒸発器として空気熱交換器を採用して冷水負荷をなくし、空気からの熱を冷媒液の蒸発潜熱として汲上げることで、ヒートポンプサイクルによる高温水のみ供給が可能となった。

「HEM-90A」の概略仕様、性能、および冷凍サイクルをそれぞれ表1、表2、および図2に示す。

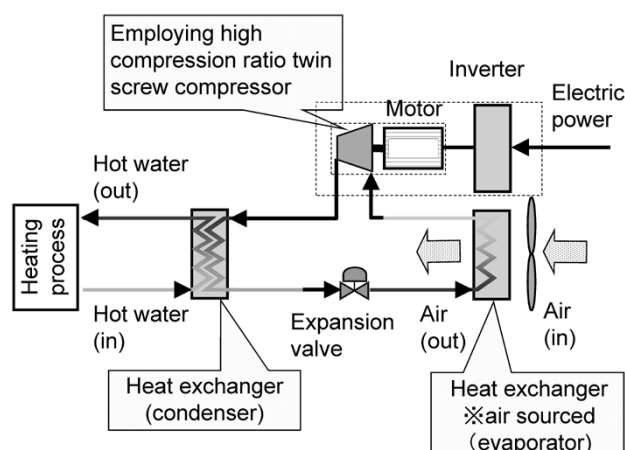


図1 HEM-90Aのフロー図
Fig. 1 Flow diagram of HEM-90A

脚注2) Coefficient Of Performance : システム投入電力に対する出力熱量、すなわちエネルギー効率を表す指標。

脚注1) HEMは当社の登録商標である。

*1 機械事業部門 圧縮機事業部 冷熱・エネルギー部

表1 概略仕様
Table 1 Specification

Dimension (m)	L 2.84×W 1.54×H 2.70
Weight (kg)	2,990
Refrigerant	Mixture of HFC-134a and HFC-245fa
Hot water temperature at outlet (°C)	65~90
Ambient temperature (°C)	-10~40
Compressor	semi-hermetic two-stage twin-screw

表2 性能(外気温度: 25°C)
Table 2 Performance (ambient temperature: 25°C)

Performance (condition ①)		55/65
Hot water temp. (°C)		
Heating capacity (kW)		159.1
Power input (kW)		45.2
Heating COP		3.5
Performance (condition ②)		80/90
Hot water temp. (°C)		
Heating capacity (kW)		176.2
Power input (kW)		62.9
Heating COP		2.8

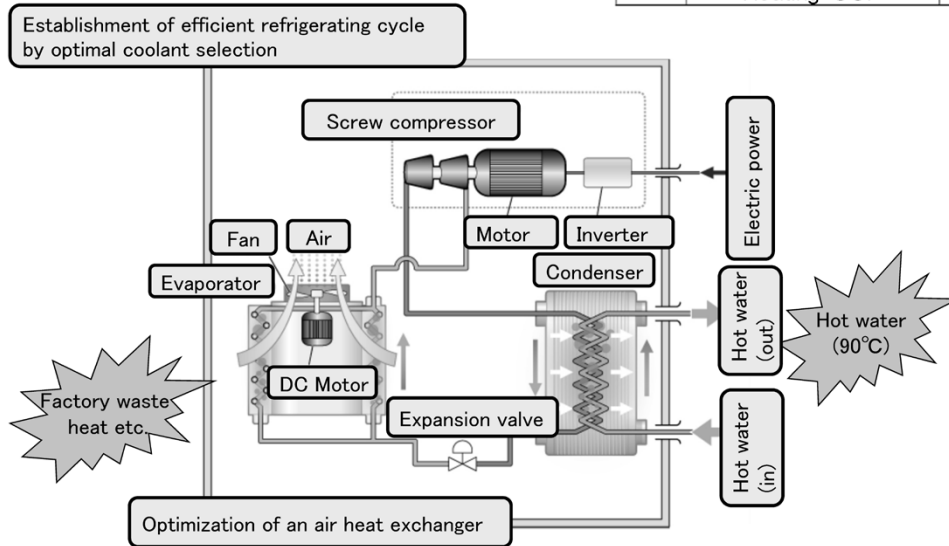


図2 HEM-90Aの冷凍サイクル
Fig. 2 Refrigerating cycle of HEM-90A

1.2 特長

今回開発した「HEM-90A」は、「HEM-HR90」の技術を活用した。90°Cまでの高温水取出し条件においても高い効率を維持する2段スクリュウ圧縮機を採用すると同時に、空気熱交換器の最適設計と最適な冷媒選定などを行うことによってエネルギー効率の高い運転を可能とした。その結果、加熱COP3.4(外気温度25°C、温水60/70°C条件)という、循環加温式の空気熱源温水ヒートポンプとしては最高のエネルギー効率を実現している。ここで、加熱COPとはヒートポンプユニットへの投入電力に対する加熱熱量の比率とする。

水熱源式と比べ配管が少なく済むうえに、空気熱源でありながらコンパクト設計(設置面積: 約4.4m²)とした。このため、温水が必要なプロセスの直近に設置することが可能であり、従来の中央熱源から蒸気または温水を供給する場合に対して熱搬送損失の大幅な低減が見込める(詳細は4章で述べる)。

2. 高効率化技術

2.1 高圧縮比小形2段スクリュウ圧縮機

図3に「HEM-90A」で採用した小形2段スクリュウ圧縮機と単段圧縮機の概略図を示す。通常の空調機あるいは冷凍機用途向けに開発した小形2段圧縮機を高温水供給用途に適用すべく、高温条件下でもモータ冷却性能を

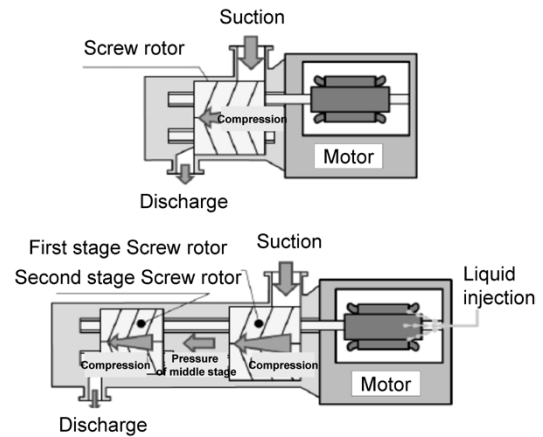


図3 圧縮機概略図
Fig. 3 Schematic view of compressor

確保するために、フラッシュした冷媒をモータに直接噴霧する冷却方法を採用した。

図4に圧縮機の効率(断熱効率)と圧縮比の関係を示す。ここで、圧縮比とは圧縮機の吐出圧力と吸込圧力の比を示しており、ヒートポンプでは外気温度と温水との温度差が大きくなるほど圧縮比を大きくする必要がある。図に示したようにHEM-90Aの運転範囲は、外気温度あるいは温水温度によっては単段スクリュウ圧縮機では圧縮機効率が大幅に低下するような高圧縮比運転条件となる。このためHEM-90Aは、広い圧縮比の範囲で高効率

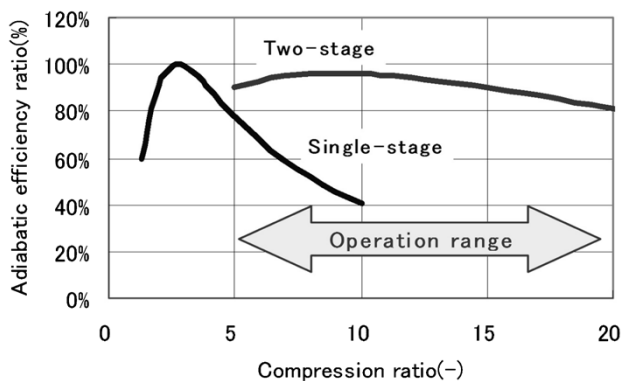


図4 圧縮機の効率比
Fig. 4 Adiabatic efficiency ratio of compressor

を維持できる2段スクリュウ圧縮機を採用し、高いシステム性能を実現した。

2.2 空気熱交換器の最適化

空気熱交換器（蒸発器）には、プレートフィンチューブ型熱交換器を採用した。空気熱交換器において各伝熱管への冷媒分配に偏りが生じると、冷媒供給が少ない伝熱管にて冷媒出口付近でドライアウトを起こす。また、プレートフィンを通る空気流れに偏流がある場合も伝熱面を有効に活用できない。これらの現象は伝熱性能の低下を招く要因となる。

さらに今回、冷媒はフルオロカーボンであるHFC-134aとHFC-245faとを混合して使用した。このため非共沸となり、冷媒のクオリティ（ある断面における冷媒ガスおよび冷媒液の質量流量比）に依存して蒸発温度が変化する。また、HFC-134a単体に比べて粘度が高く熱伝導率が低いため、同じ質量速度条件では蒸発熱伝達が相対的に低くなってしまふ。

そこで、上述したような空気熱交換器の設計上の留意点を勘案し、伝熱管には内面溝付管を採用し、プレートフィンにはルーバ型を採用した。また、冷媒の分配機構や伝熱管群の配置、ユニットの設置面積を加味したファンの仕様選定と空気熱交換器を含めたレイアウトの最適化を行うことにより、高い伝熱性能とファン動力の最小化を実現した。

2.3 最適な冷媒選定

90℃の温水を供給する場合、冷媒HFC-134aでは気相と液相の相転移が起こる限界の温度である臨界温度（101.1℃）とほぼ同等の温度となり、効率の良い冷凍サイクルを構築することはできない。そこで「HEM-90A」では、「HEM-HR90」でも実績があるうえにHFC-134aより臨界温度が高く（157.5℃）、市場の入手性も良いHFC-245faをHFC-134aに混合して使用する方法を採用した。

混合冷媒の採用により単元冷媒サイクルを実現し、二元冷媒サイクルで必要となる複数台の圧縮機、低元側と高元側の熱授受のための熱交換器が不要となる。

3. 性能特性

図5および図6にそれぞれ、外気温度に対する加熱能力およびCOPの特性を示す。代表的な運転条件として、外気温度25℃、温水出口温度70℃（温水入口温度60

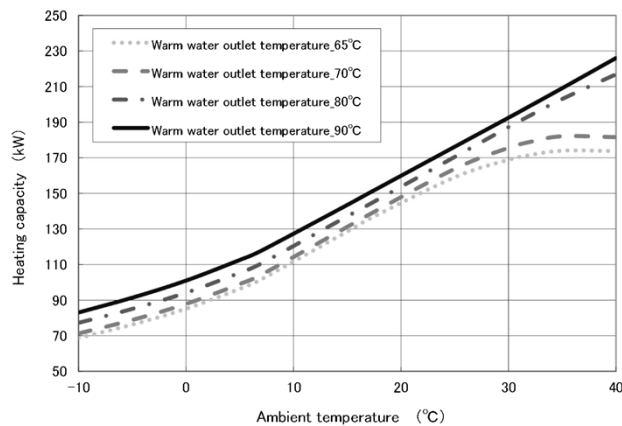


図5 外気温度と加熱能力の関係
Fig. 5 Relationship between ambient temperature and heating capacity

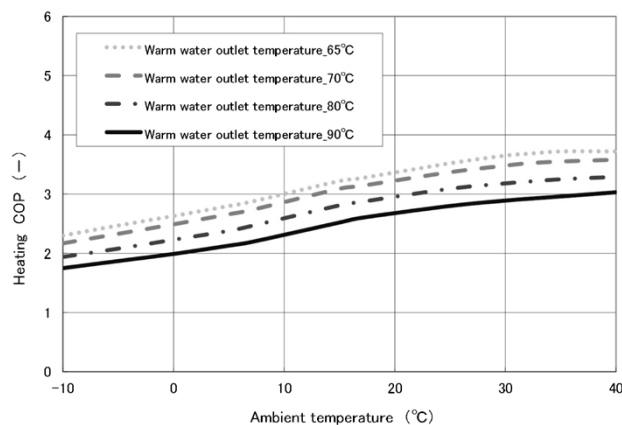


図6 外気温度と加熱COPの関係
Fig. 6 Relationship between ambient temperature and heating COP

℃) の場合では、加熱能力163.8kW、加熱COP3.4を実現し、温水取出の最高温度となる90℃（温水入口温度80℃）の場合でも、加熱能力176.2kW、加熱COP2.8を実現している。

空気熱源式ヒートポンプで初めて90℃温水を取出すと同時に、高いエネルギー効率を達成することが可能となった。

4. 導入効果

飲料、食品、自動車などの生産工場には排熱が少なからずある。図7に示すとおり、既存プロセスにおいて、ガスボイラから各プロセスへ蒸気を供給する場合、蒸気供給配管での熱損失や減圧弁での圧力損失が生じる。また、プロセスで使用後のドレンが十分に再利用されていないケースも多く、システム全体の損失が約70%にも達するという事例も報告されている⁵⁾。

そこで、蒸気を使用する工程の近くに「HEM-90A」を設置することにより、蒸気配管からの熱損失の削減、および生産プロセスより排出されている未利用排熱の有効活用といったメリットが期待できる。すなわち、工場内雰囲気へ放出された排熱の一部を回収し、ヒートポンプサイクルによって高温水を生成することができる。

ここで、そのときのメリットの定量的評価を行った。温水出口温度70℃（入口温度60℃）、産業用途で年間8,000h運転、既存のガスボイラのシステム効率を50%と

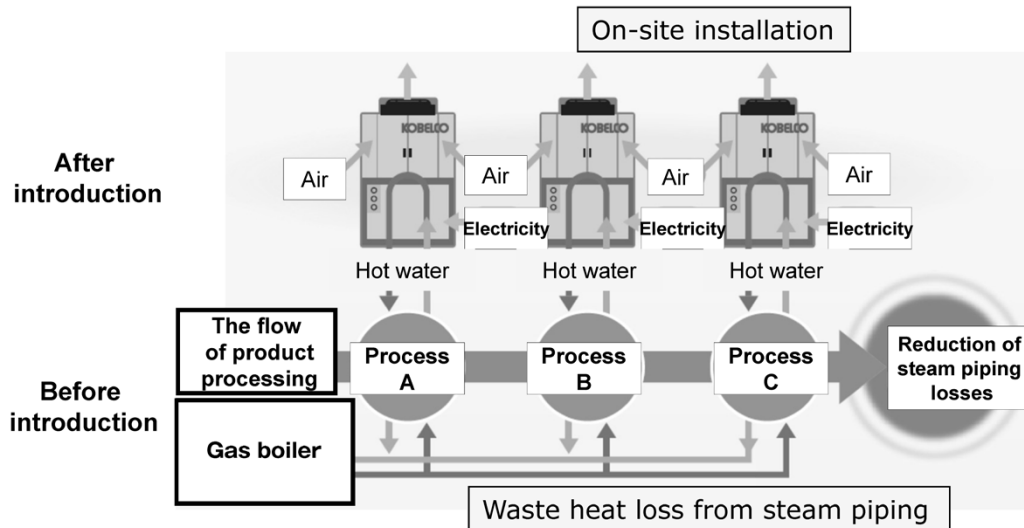


図7 ガスボイラとHEM-90Aのプロセスへの導入方法
 Fig. 7 Introduction method of gas boiler and HEM-90A to a process

した場合、「HEM-90A」によるランニングコストは58%削減(図8)、エネルギー消費量は56%(図9)の大幅な削減が見込める。なお、外気条件は東京、名古屋、大阪地区における平均気温、電気料金単価は12円/kWh、ガス料金単価は57円/Nm³を採用した。

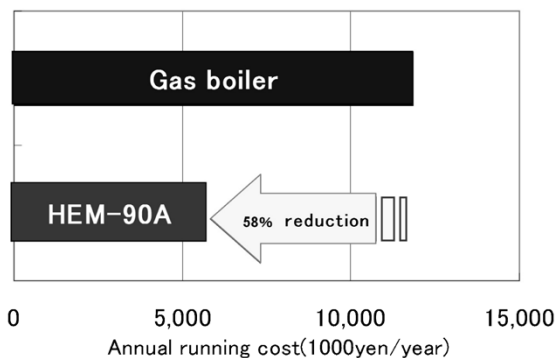


図8 年間ランニングコストの試算
 Fig. 8 Estimation of annual running cost

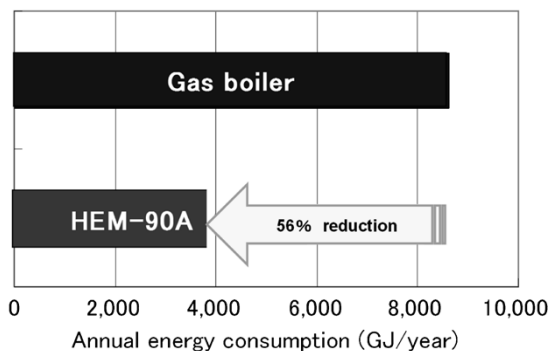


図9 年間エネルギー消費量の試算
 Fig. 9 Estimation of annual energy consumption

むすび=近年、東日本大震災後の国内の電力需給が逼迫するなか、石油や天然ガスをはじめとする化石燃料の高騰が懸念されている。こうした状況から今後は、リスク分散と省エネルギーの両観点から、既存の燃焼式ボイラと電動式の空気熱源ヒートポンプHEM-90Aとのベストミックスが図られるものと考えられる。また、ヒートポンプを産業用途に導入するにあたっては、製造工程ごとに熱利用の方法が異なるため、各工程の実態を具体的に把握し、経済性、省エネルギー性など、事前検討による導入メリットを見極めることが重要であると考えられる。

今後ともユーザーズに合致した熱源機の提案を推し進め、産業用ヒートポンプの普及拡大に貢献していきたい。

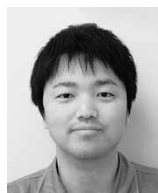
参考文献

- 1) 下田平修和. 建築設備と配管工事. 2009年8月号, No.631, p.28-30.
- 2) 下田平修和. 建築設備と配管工事. 2010年9月号, No.647, p.23-25.
- 3) 大上貴博ほか. 2012年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集. p.275-276.
- 4) 下田平修和ほか. エレクトロヒート. 2012年9月号
- 5) ECCJ省エネルギーセンター. 平成19年度 省エネルギー優秀事例全国大会. <http://www.eccj.or.jp/succase/07/b/26kan10.html>, (参照2013-04-09).

(技術資料)

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)」

High Efficiency Steam Supply Heat Pump System; Steam Glow Heat Pump (SGH)



和田大祐*1
Daisuke WADA



飯塚晃一朗*2
Koichiro IIZUKA



前田倫子*2
Michiko MAEDA



吉本友憲*3
Tomonori YOSHIMOTO

Four companies—Kobe Steel, Ltd., Tokyo Electric Power Company, Inc., Chubu Electric Power Co., Inc. and The Kansai Electric Power Co., Inc.—have jointly developed two heat-pump-based steam supply systems: the Steam Glow Heat Pump 120 (SGH120) high efficiency steam supply system with a steam temperature of 120°C and the Steam Glow Heat Pump 165 (SGH165), which enables a steam temperature of 165°C. This is the highest temperature for a heat pump system. The heat pump system, which is equipped with a newly developed screw compressor (applicable to high compression ratios and high temperatures) and a compressor motor resistant to high temperatures, uses a refrigerant suitable for high temperature supply and is a world first for enabling steam supply. Its energy efficiency of COP3.5 is higher than that achieved by gas boilers.

まきがき = 地球温暖化防止に対する様々な取組がなされる中、当社は、オフィスビルや商業施設などの空調用途および工場のプロセス冷却用途の電気式ヒートポンプ型熱源機として2008年に「ハイエフミニシリーズ・HEM^{注1)} II」を開発・製品化し¹⁾、その後、産業用加熱分野向けに、ガスや石油など化石燃料を直接燃焼させるボイラに代わる機種として、7°Cの冷水と90°Cまでの温水を同時供給可能な電気式ヒートポンプ型熱源機「ハイエフミニシリーズ・HEM-HR90」を開発・販売してきた^{2), 3)}。

今回、さらなる省エネルギー化や環境保全性を高めたいとの産業用加熱用途での要望に対し、殺菌・濃縮・乾燥・蒸留工程などの温度領域まで使用でき、世界で初めて、120°Cを超える蒸気供給を可能にした高効率ヒートポンプシステムを開発した。本製品を「スチームグロウヒートポンプ^{注2)}」(以下、SGH^{注2)}という)と称し、120°C定格の「SGH120」および165°C定格の「SGH165」の2機種(以下、本機という)をラインナップした。

当社では製氷・冷房・暖房・加熱分野まで様々なユーザーニーズに対応したヒートポンプを販売している。図1は、上記の既存機種と今回開発した2機種を、適用可能なユーザーニーズの目安となる同時出力される冷水と温水の温度範囲で整理・分類したものである。横軸が冷水(熱源水)の、縦軸が冷却水(温水)の出力温度を示す。

なお、本稿で紹介するSGHは、東京電力(株)、中部電力(株)、関西電力(株)および当社の4社によって共同

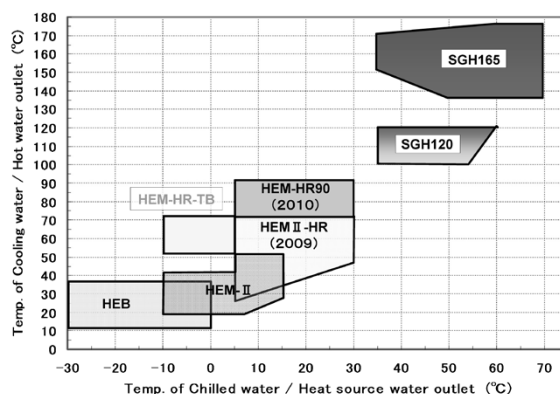


図1 当社ヒートポンプの対応温度マップ
Fig. 1 Temperature map of products

開発したものである。

以下、その仕組や特徴、導入メリットなどについて概説する。

1. SGHの構成および特徴

1.1 ユニット構成

図2にSGH120およびSGH165の外観、図3にはそれぞれの機器構成と冷媒などのフロー図を示す。

SGH120は、ヒートポンプユニットとフラッシュタンクユニットから構成される。ヒートポンプユニットはさらに圧縮機、二つの熱交換器(蒸発器と凝縮器)および膨張弁から成る。ヒートポンプユニットではまず、蒸発器で排温水からの熱を汲上げ(吸収し)て冷媒液を気化させる。この冷媒ガスをスクリュウ圧縮機によって昇圧し、凝縮器において冷媒ガスの凝縮潜熱を加圧水に与える。さらに、凝縮後の冷媒液を膨張弁によって減圧し、

脚注1) HEMは当社の登録商標である。

脚注2) スチームグロウヒートポンプおよびSGHは当社の登録商標である。

*1 機械事業部門 圧縮機事業部 冷熱・エネルギー部 *2 機械事業部門 開発センター 技術開発部 *3 神鋼テクノ(株)

蒸発器へと循環させる。フラッシュタンクユニットは、ヒートポンプユニットで昇温した加圧水をフラッシュタンク内でフラッシュ蒸発させ、汽水分離後の飽和蒸気

(最高120℃, 0.1MPaG)として供給する。残ったドレンは循環ポンプによりフラッシュタンクユニットに戻される。

SGH165は、SGH120の後段にさらに蒸気圧縮機ユニットを付設したものである。蒸気圧縮機ユニットは、フラッシュタンクユニットで生成した飽和蒸気を圧縮し、高圧高温の飽和蒸気(最高175℃, 0.8MPaG)を供給する。

1.2 高温対応技術

高温供給が可能なヒートポンプとしては従来、高温水単独供給^{2)~6)}、高温水と蒸気の同時供給⁷⁾、あるいは熱風単独供給⁸⁾のいずれかの方式しかなく、120℃以上の飽和蒸気を単独で供給できるのは当社のSGH方式のみである。100℃を超える蒸気供給が困難であった理由としては、冷房用途に適した冷媒では凝縮圧力が高く臨界温度が低いなど高温供給に不向きであったことに加え、冷媒を圧縮する圧縮機的设计温度が蒸気供給用途には低く、高温化や高圧縮比への対応が必要であったことが挙げられる。

開発機では、120℃以上の蒸気を効率的に安定供給するために、以下に紹介する対策を施している。

1.2.1 圧縮機

本機を対象に、運転条件における温度分布および熱変形解析を実施した。それらの結果をそれぞれ図4(a)および(b)に示す。この結果に基づいて圧縮機内各部の隙間設計を見直した。また、圧縮機の吸込温度が高い運転条件でもモータが過熱しないよう、冷媒液をモータ内部に直接噴霧して冷却する方法を採用し、圧縮機の信頼性と性能維持を確保した。

単段スクリュウ圧縮機および二段スクリュウ圧縮機の圧縮比に対する圧縮機断熱効率を図5に示す。ヒートポンプ

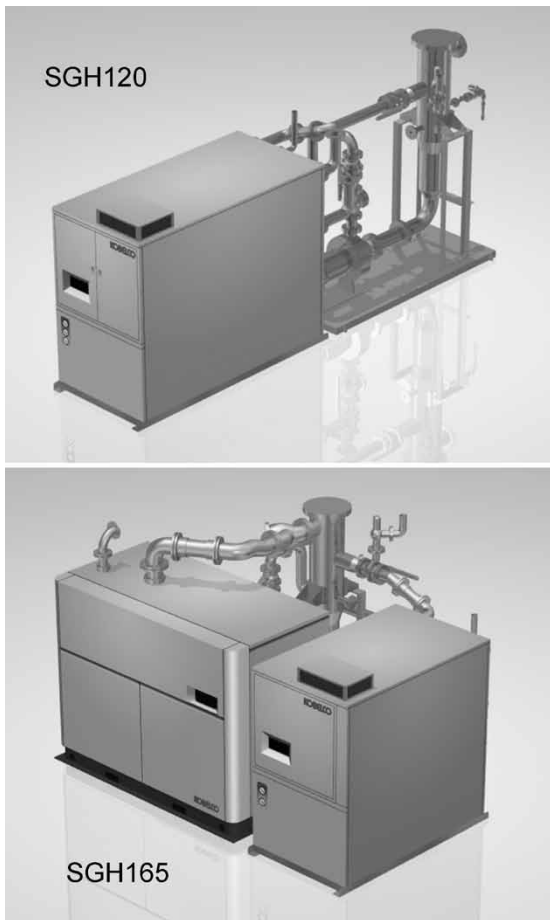


図2 SGH120およびSGH165の外観
Fig. 2 Appearances of SGH120 and SGH165

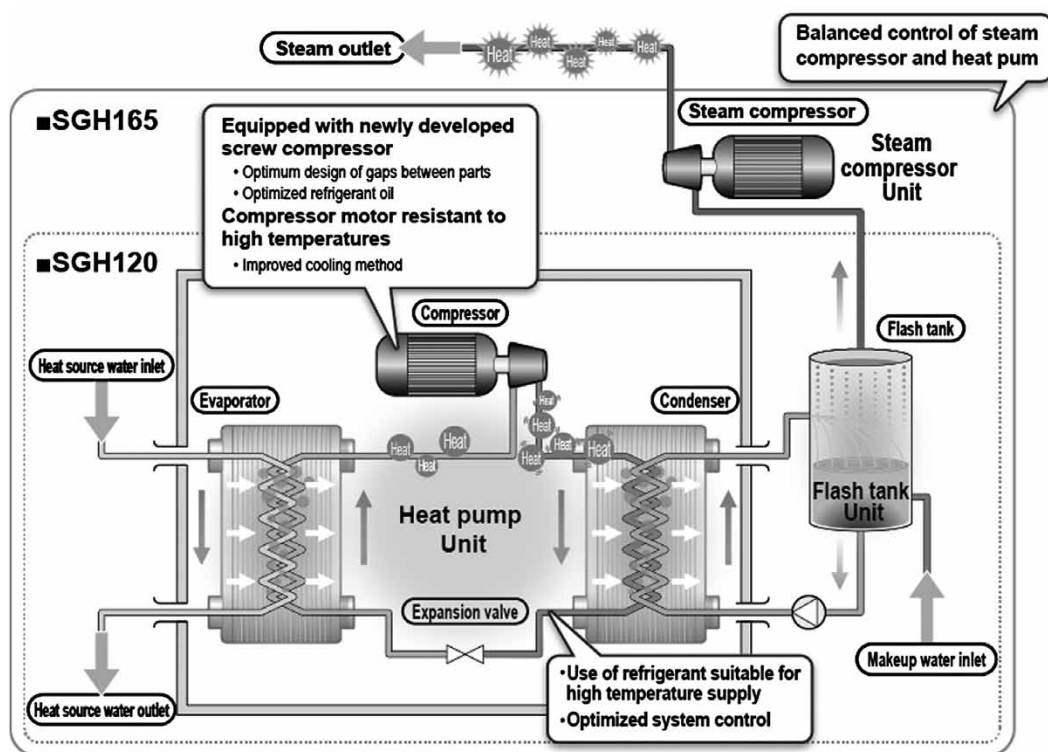


図3 SGHフロー図
Fig. 3 Flow diagram of SGH

ユニットに対し、適用する圧縮比範囲において高効率運転を達成させるため、SGH120では二段圧縮機を、SGH165では単段圧縮機を採用した。

1.2.2 冷媒・冷凍機油

ヒートポンプユニットの冷媒には、HFC（ハイドロフルオロカーボン）の一種で臨界温度が高く低圧冷媒であるHFC-245fa（臨界温度157.5℃）をベース冷媒として選定した。オゾン層破壊係数（ODP）がゼロであるこ

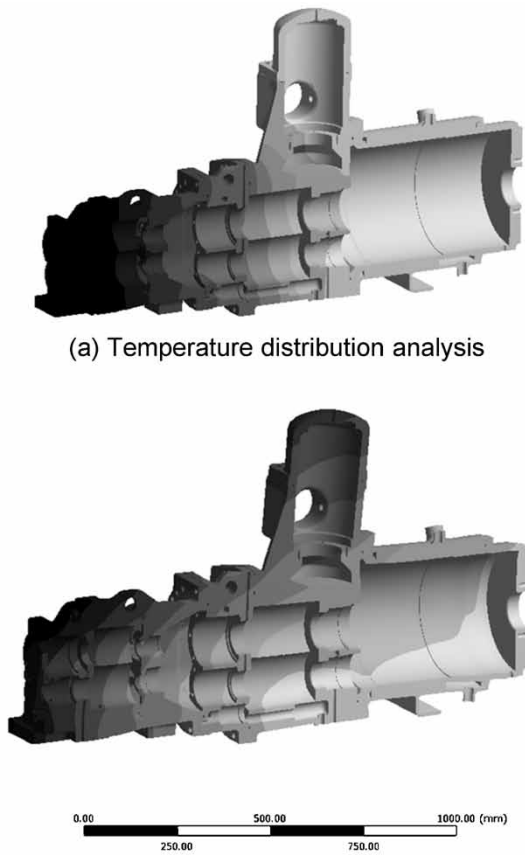
とに加えて地球温暖化係数（GWP）が低く、地球環境に対する影響が極めて少ないことも選定理由である。ただし、SGH165ではHFC-245faだけでは単位流量あたりの能力が小さい。このため、HFC-134a（臨界温度101.1℃）を混合せ、最適な冷媒成分比とすることによって高効率運転を実現した。また冷凍機油は、高温下でも必要な粘度を維持し、劣化やスラッジの発生のないものを選定した。

1.2.3 取出蒸気圧力制御

SGHのヒートポンプユニットは、取出（供給）蒸気圧力を制御パラメータとして取込み、圧力変動に応じた出力制御を行う。すなわち、取出蒸気圧力が必要圧力より高い場合は供給蒸気量が余剰であることから、圧縮機の回転数を下げて蒸気量を減らす。逆に、低い場合は蒸気量が不足しているため、回転数を上げて蒸気量を増やす制御を行っている。この制御方法により、要求される蒸気量に応じた供給を可能とする省エネ性能を実現している。

1.3 性能

表1に本機の概略仕様を示す。定格条件でのSGH120の性能は蒸気供給量0.51t/h、COP3.5、SGH165のそれは蒸気供給量0.89t/h、COP2.5を達成した。COP（Coefficient Of Performance）値とは、システム投入（消費）電力に対する出力熱量、すなわちエネルギー効率を表す指標



(a) Temperature distribution analysis

(b) Heat distortion analysis

図4 数値解析結果

Fig. 4 Results of numerical analyses

表1 SGHの概略仕様
Table 1 Specification of SGH

Unit type	SGH120	SGH165
Steam supply condition	0.1MPaG 120℃	0.6MPaG 165℃
Heat source water (℃)	65	70
Heating capacity (kW)	370	624
Mass flow rate of steam supply (t/h)	0.51	0.89
COP	3.5	2.5
Heat source water range (℃)	35~65	35~70
Output steam range (MPaG)	0.0~0.1	0.2~0.8
Dimensions (W×D×H)	1,325×4,850×2,540	4,400×3,180×2,810
Installing weight (kg)	4,000	7,000

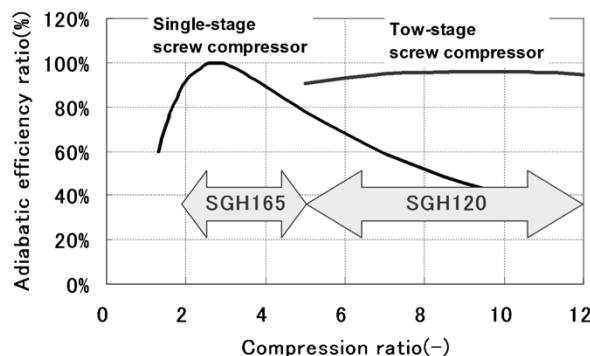
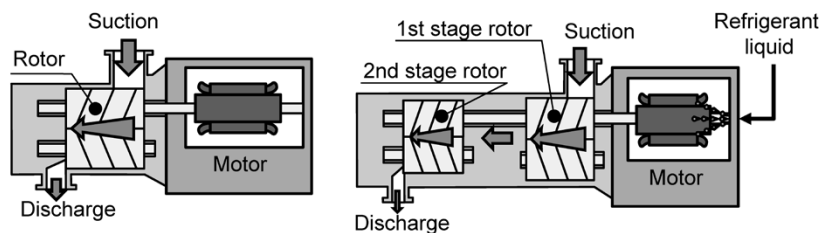


図5 最適な圧縮機の選定

Fig. 5 Optimum selection of compressors

である。図6に、熱源水入口温度に対する全負荷時のCOP特性、および蒸気供給量（給水温度20℃換算）を示す。熱源水温度が高いほどCOPおよび蒸気供給量はとも高くなっており、4本の曲線の右端のデータはいずれも表1の定格性能に相当する。これらの値は、工場内の水冷チラーの冷却水や生産プロセスからの排温水、あるいは未利用熱源水から効率的に排熱を回収し、利用可能な蒸気として供給できる性能である。とくに、SGH165が出力可能な蒸気温度165℃（最高175℃）は、燃焼式ボイラシステムに代えて本機を既設の蒸気配管に接続が可能なることを意味する。また本機は、供給蒸気圧が一定となるようにヒートポンプユニットの圧縮機回転

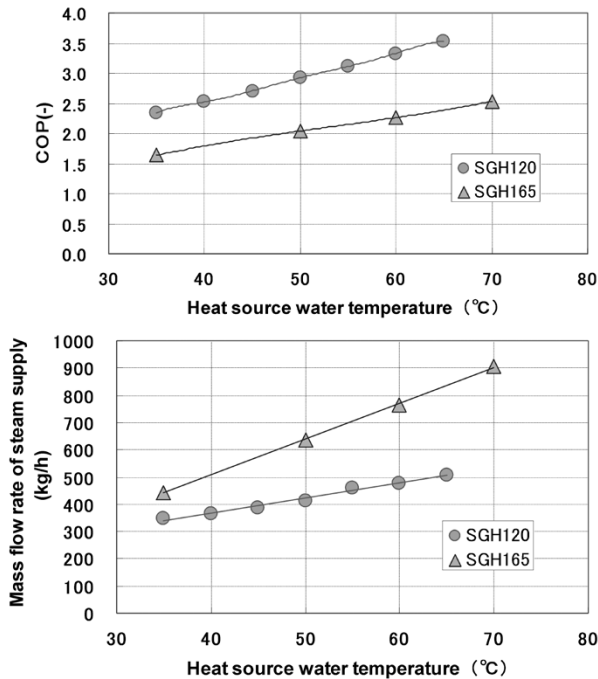


図6 SGHの全負荷特性
Fig. 6 SGH full load performance

数をインバータ制御する。このため、一般の貫流ボイラに比べてより安定した圧力の蒸気を供給できることは、顧客における蒸気利用プロセス、すなわち顧客製品の品質安定化につながる。

2. SGHの導入分野とメリット

食品・飲料の殺菌や化学薬品・飲料の濃縮、印刷物・塗装品・汚泥・紙・医薬品・食品などの乾燥、さらに蒸留酒などの蒸留など、蒸気を使用する工程を有する工場には、排温水や排蒸気といった排熱が少なからずある。こうした排熱を再利用する本機の典型的な適用例を図7に模式的に示す。一般の工場では、既存の燃焼ボイラから各プロセスへ蒸気を供給するが、熱源から遠く離れた各プロセスへの蒸気供給配管において、かなりの熱損失や減圧弁での圧力損失が生じる。これに加え、プロセスで使用後のドレンが十分に再利用されていない（できない）ケースが多い。そこで、蒸気を使用する工程の近くに本機を設置し、これらのプロセスからの排温水から熱を回収して蒸気を生成することにより、つぎのようなことが期待できる。

- ① 需要先への熱源機分散設置による蒸気配管での各種損失の削減。
- ② プロセスに最低限必要な圧力の蒸気を供給することによるエネルギー使用量の削減。
- ③ 生産プロセスより排出されている未利用排熱の有効活用。

具体的に、100~120℃の蒸気利用と35~65℃の排温水が同時に存在するプロセスにはSGH120を、135~175℃の蒸気利用と35~70℃の排温水が同時に存在するプロセスにはSGH165を適用した場合を考えてメリットを定量に試算した。年間320日24時間運転（7,680時間運転）、既存のガスボイラのシステム効率を50%とした場合、SGH120およびSGH165による定格運転条件でのランニ

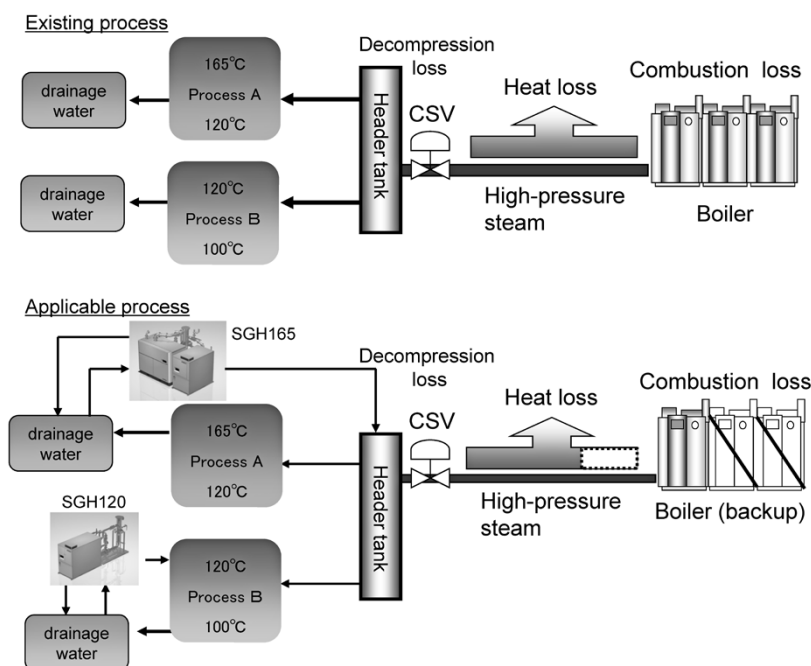


図7 SGHの適用例
Fig. 7 Application example of SGH

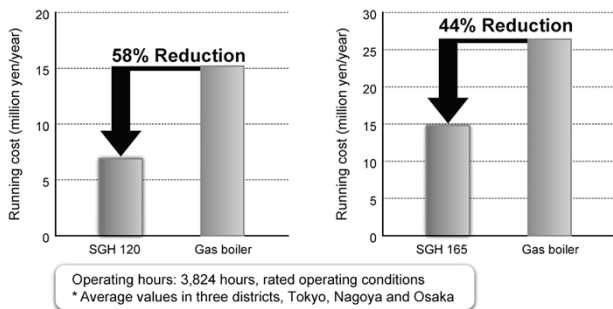


図 8 経済性試算結果
Fig. 8 Economical evaluation

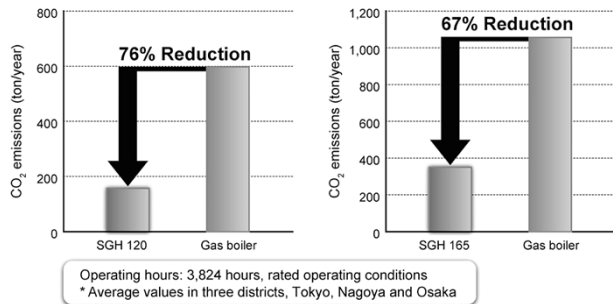


図 9 環境性試算結果
Fig. 9 Environmental evaluation

ングコストはそれぞれ58%および44% (図 8), CO₂排出量はそれぞれ76%および67% (図 9) と大幅な削減が見込める。なお, 試算で用いたガス代や電気代は, 東京, 名古屋, 大阪の三地区の平均値とした。

むすび=東日本大震災後2年が経過し, 燃料の高騰や電力需給が逼迫する状況にある中, リスク分散と省エネルギーの両観点から既存の燃焼式ボイラとSGHとのベストミックスが図られるものと考えられる。中長期的には, その特徴である高効率性や省エネ性から, 温水供給ヒートポンプおよびSGHは, 産業用加熱分野において広く採用されるものと期待される。

今後も社会ニーズや各ユーザ個別のニーズを的確にとらえ, 市場動向に対応したラインナップの拡充を図りたい。また, 次世代の市場に適合した高効率性や省エネ性に優れた商品の開発を推し進めることにより, 海外への展開を含めた全地球規模的な低炭素化社会の実現に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 神崎奈津夫ほか. OHM 2004年7月号. p.43.
- 2) 下田平修和. 建築設備と配管工事. 2009年8月号, No.631, p.28-30.
- 3) 下田平修和. 建築設備と配管工事. 2010年9月号, No.647, p.23-25.
- 4) 三菱重工業(株)ホームページ. 産業用温水ヒートポンプ (ETW). http://www.mhi.co.jp/products/detail/turbo_hotwater.html, (参照 2013-04-09).
- 5) ゼネラルヒートポンプ工業ホームページ. 排湯熱源対応高温型高効率水冷式ヒートポンプZQH. http://www.zeneral.co.jp/seihinjyouhou/pdf/catalog_zqhwa.pdf, (参照 2013-04-09).
- 6) サイエンス(株)ホームページ. ECOマルチ・ヒーポン. <http://www.science-inc.jp/heat-pump/>, (参照 2013-04-09).
- 7) (株)東洋製作所ホームページ. Mr. エコ スチーム. <http://www.h.toyo-ew.co.jp/product/catalog/mr-eco-steam.html>, (参照 2013-04-09).
- 8) (株)前川製作所ホームページ. CO₂熱風ヒートポンプ エコシロッコ. http://www.mayekawa.co.jp/ja/products/heat_pumps/03/, (参照 2013-04-09).

(技術資料)

二段半密閉アンモニア冷凍機

Two-stage Semi-hermetic Ammonia Refrigerator



大倉正詞*¹
Masashi OKURA



鈴木勝之*¹
Katsuyuki SUZUKI

Kobe Steel has developed a new inverter driven semi-hermetic ammonia screw refrigerator. By adopting a new control method for linking the compressor speed to the compressor suction pressure, a 40% greater cooling capacity can be generated at an evaporating temperature of -40°C , and 35% energy saving can be achieved at a 50% partial load compared to that of our conventional refrigerator. In addition, the semi-hermetic structure prevents ammonia from leaking from the mechanical seal of the compressor. This machine can be used for a wide range of evaporating temperatures from -30°C to -60°C and for applications such as freezing food, process cooling, etc.

まえがき=インバータを搭載した省エネ・能力増強型高速二段スクリュ冷凍機*iZ*^(注)シリーズは上市以来、食品冷凍や真空凍結乾燥、環境試験室、プロセス冷却などの用途で多く使用され、ユーザから非常に高い評価を得ている。省エネと能力増強という二つの機能を同時に達成した本機は全く新しい発想の冷凍機であり、多くの新技術を取入れ、他社の追随を許さないオンリーワン・ナンバーワン商品である。

一方、オゾン層破壊係数および地球温暖化係数がゼロであるアンモニア冷媒が産業用冷凍機の冷媒として再注目されている。そこで本稿では、*iZ*シリーズのインバータ制御技術による省エネ・能力増強機能とアンモニア冷媒への対応(*iZN*)について紹介する。

1. 開発背景

昨今の地球温暖化の加速により、地球環境意識(CO_2 排出量削減、エネルギー使用量削減)が高まるなかで、省エネ性能の向上が強く望まれている。*iZ*シリーズは以下の特長を有した冷凍機である。

- 1) 優れた省エネ性能
- 2) 冷凍能力増強
- 3) 静音

冷凍機は年間の約3/4が部分負荷運転であり、年間を通しての省エネを考えた場合、部分負荷運転時にいかに効率を高めるかが省エネ性能向上につながる。

図1は圧縮機の回転数、動力、冷凍能力と蒸発温度、圧縮機吸込圧力との関係を*iZN*冷凍機と従来機との比較で示したものである。通常冷凍機は、アプリケーションによって使用温度が異なる。例えば二段圧縮冷凍機で

は、蒸発温度 $-30\sim-60^{\circ}\text{C}$ の広い温度領域に対応する必要がある。この時の圧縮機の吸込圧力は $119\sim 22\text{kPa}$ の広い範囲で変化する。従来の定速機は蒸発温度が低下するに従って冷凍能力は大幅に低下していた。これは、蒸発温度が低下すると圧縮機の吸込圧力が低下し、それに伴って冷媒の比容積が大きくなり、冷媒循環量(kg/h)が減少するためである(図2)。

冷凍機の主要機器であるモータ、油回収器、コンデンサなどの設計点は二段圧縮冷凍機の場合 -30°C であり、蒸発温度が下がるに従って冷媒循環量が減少することにより、主要機器に余力が生じている。すなわち、蒸発温度が下がるに従って圧縮機の最高回転数を増加させることにより、モータの余力や油分離器の性能、熱交換器での交換熱量を最大限に発揮させ、冷凍能力を増強させることができる。

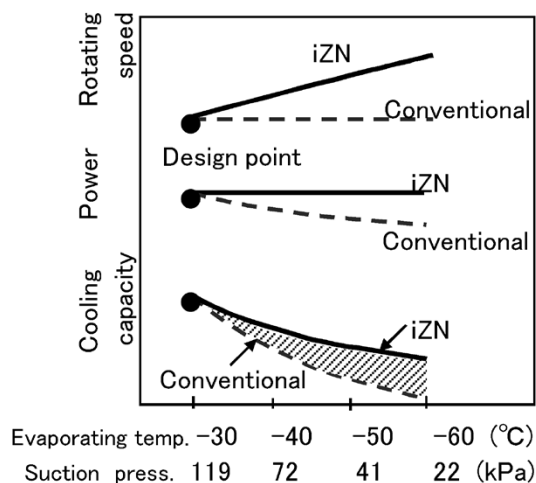


図1 *iZN*シリーズと従来機との比較
Fig. 1 Comparison between *iZN* and conventional machine

脚注) *iZ*は当社の登録商標である。

*¹ 機械事業部門 圧縮機事業部 冷熱・エネルギー部

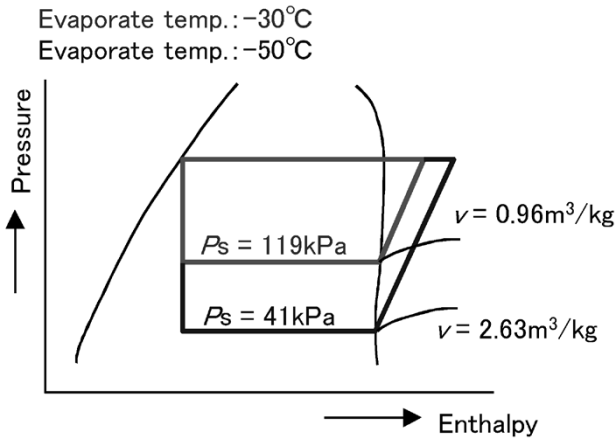


図2 P-h線図
Fig. 2 P-h diagram of ammonia refrigerator

また地球温暖化防止と環境保全の推進を背景に、地球温暖化係数およびオゾン破壊係数がゼロであるアンモニアが再注目されている。自然冷媒であるアンモニアは環境負荷が小さい反面、毒性や可燃性の面における安全性の確保が重要となる。そこで当社では、半密閉構造（メカニカルシールレス）にすることでこの点に対応した。

2. 技術課題とその対応

アンモニア冷媒への対応、省エネ性能の向上、能力増強、および静音化を実現するための課題を次に示す。

- 1) アンモニア冷凍機の半密閉化
 - ・耐アンモニア性を有するモータの開発
- 2) 省エネ制御技術、コントローラの開発
 - ・吸込圧力にリンクした回転数制御技術
 - ・所定温度に制御する部分負荷運転
 - ・運転状態を監視するコントローラの開発
- 3) 静音化
 - ・吐出脈動音の低減
 - ・高速時の振動防止

本章では、これらの課題に対する当社の対応を概説する。

2.1 アンモニア冷凍機の半密閉化

従来機のアンモニア冷凍機では、圧縮機とモータの間にメカニカルシールが配置されており、アンモニア冷媒の漏れが問題となっていた。アンモニア冷凍機を半密閉化するには、モータをアンモニア雰囲気中に配置する必要がある。モータが銅線巻きの場合、アンモニア雰囲気で銅線が腐食するだけでなく、絶縁材や端子棒などの構成部品も腐食する。

そこで、モータの巻線には、アルミニウム線に耐アンモニア性を有する絶縁コーティングを施したものを採用した。モータを構成する絶縁材も同様に、耐アンモニア性を有するものを使用した。一方、巻線に使用しているアルミニウムの導電率は銅の60%程度である。そこで、モータのサイズを大きくすることにより、銅線モータと同等のモータ効率を確保した。

2.2 省エネ制御技術

省エネと能力増強の考え方を図3に示す。蒸発温度

-30°Cで標準回転数を設定し、図のように蒸発温度が低下するに従って圧縮機回転数が増加するようにコントローラで設定する。実際の運転においては最高回転数ラインを通過して所定の温度まで最速で到達させる。所定の温度に達した後は、負荷に応じてインバータ回転数制御を行って目標温度に制御し、冷やし過ぎなどのロスを防止する。二段圧縮冷凍機は、蒸発温度-30~-60°Cという広い温度範囲に対応して圧縮機回転数を変化させるという考え方で開発しており、この点で冷却温度領域が狭い空調などに見られるインバータ機と大きく異なる。

図4にその仕組みを示す。TIC（温度調節計）は温度センサより蒸発器内温度を取込み、目標温度と比較して冷凍機容量をコントローラに出力する。一方、コントローラは圧縮機吸込圧力を検出し、吸込圧力の低下に伴って運転可能な最高回転数を増加させる。TICからの冷凍機容量指令が100%の場合、吸込圧力の低下に伴って圧縮機の回転数が増加し、オーバロードさせることなく動力一定に制御される。これによって冷凍能力の大幅なアップを実現した。また、TICからの冷凍機容量指令が100%未満の場合、回転数を増減させて目標温度が一定になるよう回転数を制御する。本システムの技術は特許登録されている¹⁾。

図5に本機の冷凍サイクルを示す。部分負荷運転時、従来機ではスライド弁によって一段側のみ容量制御していた。そのため、中間圧力（二段側吸込圧力）が吸込圧力近くまで低下し、エコノマイザの効果が減少していた。本機ではインバータによる回転数制御を行うため、

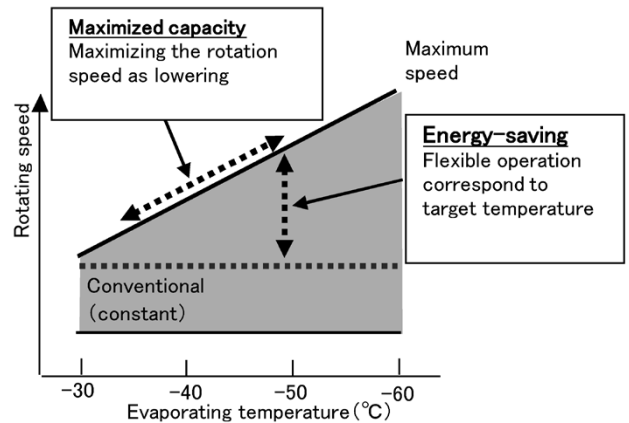


図3 iZN冷凍機の回転数制御
Fig. 3 iZN rotation speed control

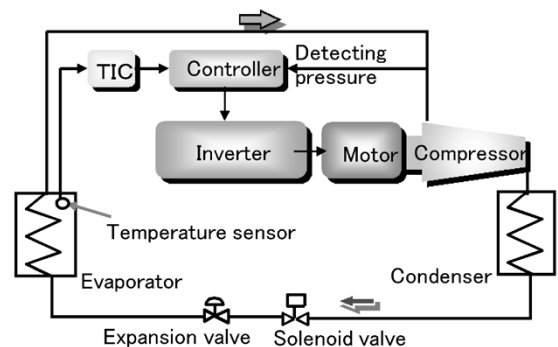


図4 iZN冷凍機の回転速度制御フロー
Fig. 4 Control flow of rotation speed

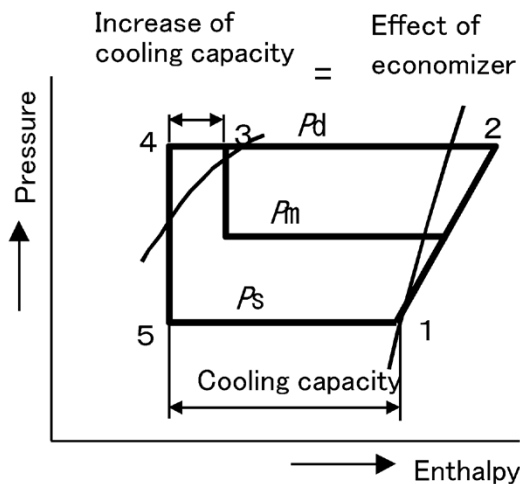


図5 エコマイザの効果
Fig. 5 Effect of economizer

部分負荷運転中でも最適な中間圧力をキープすることができ、エコマイザの効果を発揮させることができる。すなわち、エンタルピ ($h3-h4$) がエコマイザによる冷凍能力の増加となる。従来機の冷凍能力が ($h1-h3$) に対し、本機では冷凍能力が ($h1-h5$) となる。ここで、 P_s は圧縮機の吸込圧力、 P_m は中間圧力、 P_d は吐出圧力を示す。また数値1～5は冷凍サイクル上での下記状態を示す。

- h : エンタルピ, 1 : 圧縮機吸込, 2 : 圧縮機吐出,
- 3 : コンデンサ出口, 4 : エコマイザ出口, 5 : 蒸発器入口。

図6に本機の開発において使用、あるいは開発を通して取得した特許群を示す。考案した技術の特許出願し、権利化することによって他社の追随を許さない高い商品力を持つ冷凍機とした。

2.3 二段スクリュウ圧縮機の高速度化、静音化

図7に二段スクリュウ圧縮機の断面図を示す。モータは一段側雄ロータにオーバハンクさせた。二段側ロータは一段側ロータとスプラインで結合し、一段側ロータから二段側ロータへの動力伝達を行った。圧縮機への冷媒の入口はモータと一段側ロータとの間とし、さらにモータはステータ外被に設けたジャケットにより冷却する構造とした²⁾。これによりモータでの発熱による圧縮機吸込ガスの過熱、吸込効率の低下を防止した。とくに蒸発温度が $-30\sim-60^\circ\text{C}$ という低温の場合、吸込ガスの過熱が効率に及ぼす影響は大きい。例えば蒸発温度が -30°C の場合、吸込ガスが5K過熱すると比容積が2%程度増加して吸込冷媒量は低下する。

圧縮機の歯数組合せは一段側5-6歯数、二段側4-6歯数とした³⁾。一段側雄ロータの歯数を5とすることによって歯底径を大きくすることができ、片持ち支持となるモータ部の軸径を太くすることが可能となった。また、一段側雄吸込軸受の位置をモータ側に移動させた。これらの対策によってモータロータの共振を回避し、6,000rpmまでの高速運転を実現した。

また、圧縮機の騒音は主に吐出ポート部での吐出脈動に起因する。本開発機は、一段側と二段側の歯数組合せ

を変えることによって吐出脈動の周波数をずらすことができ、従来機と比較して騒音レベルを5dB低減した⁴⁾。

インバータ駆動による回転数制御を行うため、従来機の容量制御用スライド弁は不要となる。一方で、圧縮機起動時においてスクリュウロータ内部圧が上昇することによって増加する起動負荷に対しては、簡単な構造で効果的に軽減できる方法を考案した⁵⁾。一段側スクリュウロータの吐出端面に設置したリフト弁がそれである(図8)。A室と圧縮機吸込部とを導通するラインに電磁弁V1を、A室と圧縮機吐出部とを導通するラインに電磁弁V2をそれぞれ配置する。起動時はV1を開、V2を閉としてA室の圧力を低压側の圧縮機吸込圧力とする。この時、圧縮機内部圧が上昇するとリフト弁は右側に移動し、リフト弁は開いた状態となって吸込側にバイパスし、内部圧

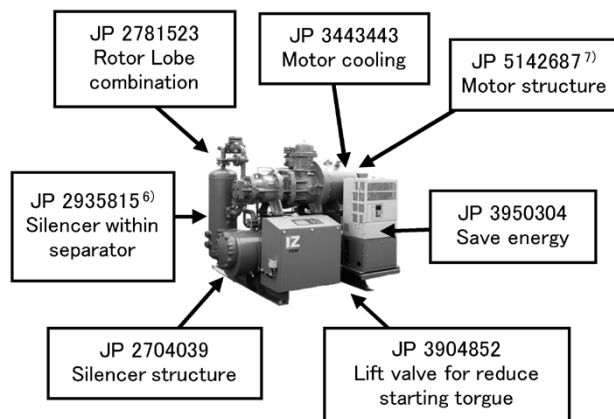


図6 iZ冷凍機特許群
Fig. 6 Patents for refrigeration unit

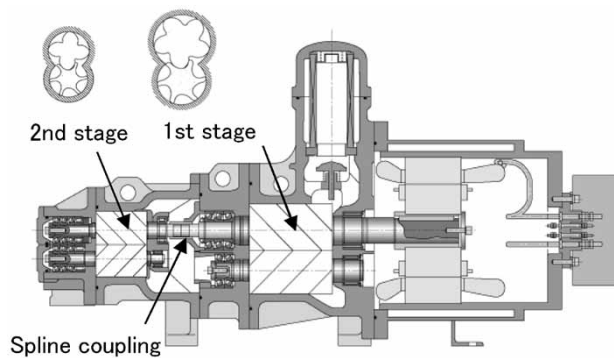


図7 二段スクリュウ圧縮機
Fig. 7 Two-stage integrated screw compressor

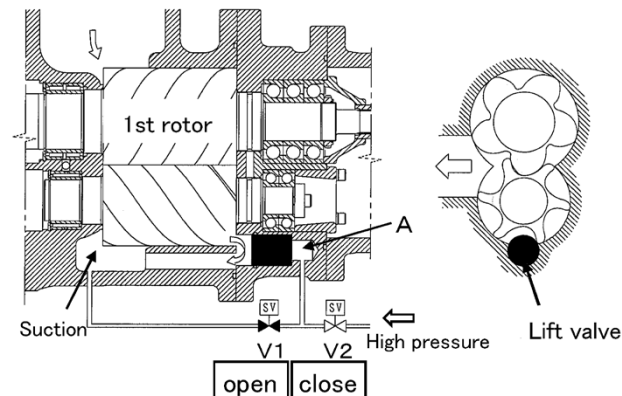


図8 起動時負荷軽減方法
Fig. 8 Method for starting torque reduction

の上昇を防止できる（アンロード運転）。通常運転時はV1を閉、V2を開としてA室に高压側の圧縮機吐出圧を導入し、リフト弁を吐出端面まで押戻した状態を保つ。これによって内部圧を吸込側にバイパスすることなくフルロード運転できる。本機構は自前の圧縮機吸込圧および吐出圧を活用するため、非常に簡単な構造で起動負荷を軽減できた。

3. 本開発機の特長と効果

図9に、部分負荷運転時における冷凍能力比と消費電力比を本開発機と従来機との比較で示す。従来機に比べ50%負荷時で35%の省エネ、70%負荷時で17%の省エネを達成した。これは、先に述べたように、従来機では容量調整機構が低段側のみに付加されており、部分負荷運転時には中間圧力が下がり過ぎて高段側の効率が悪くなる。これに比べて本機の容量調整では、インバータによる回転数制御を行うため、部分負荷時においても中間圧力は変化しない。このため、一段側と二段側の圧縮比が最適に保たれる。つまり最適な冷凍サイクルを維持したまま部分負荷運転が可能となる。この省エネ性能の向上は、顧客におけるランニングコストの削減、およびCO₂排出量の削減に寄与する。

図10に本開発機と従来機の冷凍能力を示す。蒸発温度の低下に従い、インバータによって最高回転数を増加

させた効果により、蒸発温度-40℃では従来機よりも42%（50Hz地区）、あるいは19%（60Hz地区）の能力増強を達成した。この能力増強により、条件によっては既設機よりワンランク小さな機種を選択できることから、顧客のインシャルコスト削減につながる。また能力増強による急速冷凍により、冷却対象物の品質の向上にも寄与する。

表1に本機と当社従来機との性能対比表を示す。本機は、省エネ性能の向上や冷凍能力の増強、半密閉化および静音化によって従来機に対して優位性を有している。また、これらを実現した基盤技術の特許権利化したことから、省エネアンモニア冷凍機としては他社の追随を許さないものである。

なお、本開発機のコントローラでは、運転状態を常時モニタリングしており、トレンドを予知して異常を事前に察知できるように安全性にも配慮した機械となっている。また本コントローラは通信機能を有しており、遠隔監視が可能となっている。

表2に当社の半密閉アンモニア冷凍機のラインアップを示す。2009年4月に上市して以来、単段スクリュウ冷凍機と併せて蒸発温度0~-60℃、モータ出力24~125kWまでの幅広い用途に対応できるようにラインアップを拡充した。

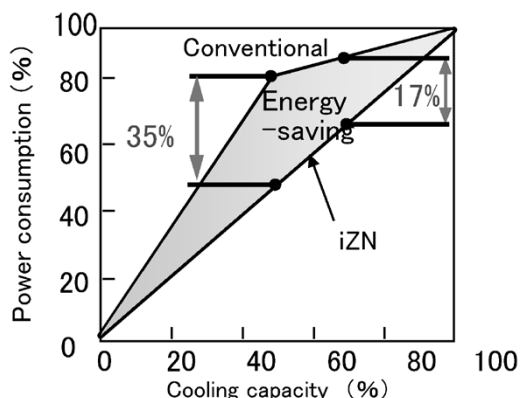


図9 iZN冷凍機の省エネ性能
Fig.9 Comparison of power consumption

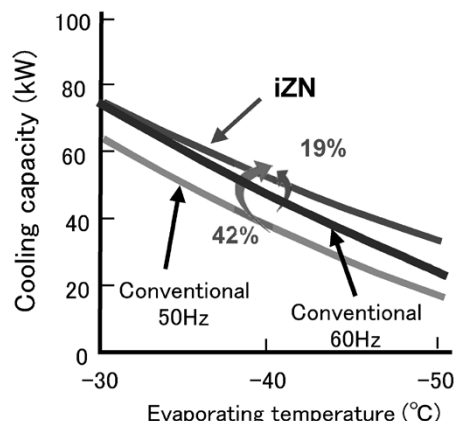


図10 冷凍能力比較
Fig.10 Comparison of cooling capacity

表1 iZNシリーズと従来機との仕様比較

Table 1 Comparison of performance between iZN and conventional machine

		Conventional SHN Series	iZN Series	Comparison	Remarks
Structure		Open type	Semi-Hermetic type	No leakage ammonia	
Cooling capacity (kW)	50Hz	39.5	56.2	42% increase	Comparison of 37kW motor CT/ET=40/-40°C
	60Hz	47.3	56.2	19% increase	
Part load power (%)	50% Load	85	50	Improved by 35%	
	70% Load	87	70	Improved by 17%	
Environment	Low noise	—	Lower by 5dB than the conventionals.		Comparison of 37kW motor
	Safety	—	Remote observation, communication function	Foreseeing the trend of operating conditions, sensing the advance warning	

表2 半密閉アンモニア冷凍機 ラインアップ

Table 2 Semi hermetic ammonia screw refrigerator lineup

Saturated temperature at suction pressure		Motor normal output (kW)						
		24	37	45	74	90	110	125
0~-30°C	Single stage		●	●	●	●	●	●
-30~-60°C	Two stage	●	●	●	●	●	●	●

むすび=2002年に上市して以来、インバータ冷凍機は顧客から非常に高い評価を得ている。また、インバータ駆動半密閉アンモニア冷凍機は、地球温暖化防止や環境保全の流れにマッチし、累計出荷台数200台を超える商品となった。当社は今後も省エネ冷凍機の開発に取組み、地球環境保全に貢献していきたい。

参 考 文 献

- 1) 特許第3950304号.
- 2) 特許第3443443号.
- 3) 特許第2781523号.
- 4) 特許第2704039号.
- 5) 特許第3904852号.
- 6) 特許第2935815号.
- 7) 特許第5142687号.

(技術資料)

新型コベライアン™ 22/37kW

New Kobelion 22/37kW



奥藤卓也*¹
Takuya OKUTO

For this model change, a new model of Kobelion was developed, attaining the highest amount of discharge air in the domestic class. The control range for the amount of discharge air and discharge-pressure in the inverter machine was greatly expanded. In the non-inverter machine, the new model has enabled the use of just one kind of unit, regardless of a user's installation frequency band (50/60Hz) and pressure specification.

まえがき = ここ数年の日本の電力不足から、油冷式空気圧縮機の市場においては、省エネ性に優れた空気圧縮機の需要がますます高まっている。

当社の油冷式空気圧縮機であるコベライアン™^注シリーズ^{1), 2)}は「省エネ性」「信頼性」「耐久性」が顧客から評価され、2002年の販売開始から10年間で、累計販売台数35,000台を達成した。

その初代コベライアンの基本コンセプトである「安心・安全」「業界トップの効率」「高性能・高品質」はそのまま継承し、さらに進化した新型コベライアン22/37kW（以下、新型機という）を開発した。

1. 概要

油冷式スクリュ圧縮機は大きく二つのシリーズがある。一つはインバータ機（VX・VSシリーズ）であり、もう一つは非インバータ機（SGシリーズ）である。圧縮機本体のモデルチェンジや制御方法の高度化により、さらに高性能、省エネ性を実現した圧縮機³⁾を開発した。以下にその特徴を概説する。

1.1 インバータ機（VX・VSシリーズ）

圧縮機の吐出圧力に応じて、最大風量を制御するワイドレンジ制御を採用した。吐出圧力の設定範囲を拡大することにより、風量・吐出圧力の制御範囲を従来より大幅に拡大した。

また、運転状態を監視し、省エネが実現できる新型モータを搭載し、利便性・サービス性を大幅に向上させた。

1.2 非インバータ機（SGシリーズ）

モータ直結構造としたことに加え、電源および回転数

を設定するために周波数変換器を搭載したことにより、電源の周波数（50/60Hz）および圧力仕様にかかわらず1機種での対応を可能とした。

また、容量調整において、省エネ性に優れたロード／アンロード制御を採用し、さらなる省エネを可能にした。

2. 新型コベライアンの特徴

2.1 VX・VSシリーズ

2.1.1 ワイドレンジ制御

インバータ機の制御では回転数を自由に調整できるため、使用条件によって設定圧力や最大風量の調整が可能なワイドレンジ制御を採用している。従来は圧力仕様によって0.59~0.69MPa、あるいは0.74~0.83MPaに機種を分ける必要があった。しかしながら新型機では、高トルクモータを採用することにより、1機種でのワイドレンジ制御範囲をVXシリーズでは0.4~0.85MPaに、またVSシリーズでは0.6~0.85MPaに拡大した。

2.1.2 省エネ機構

一般的なインバータ機では、停止後残圧起動防止により再起動まで数分の時間を要するため、モータを停止させずにアンロード待機させることで再起動時のライン圧力の低下を予防していた。

新型コベライアンでは、高トルクモータを採用することにより、圧力が残った状態においても即時の再起動を可能にする「e-STOP機能」を採用した。

e-STOP機能は、コンプレッサの負荷が下がり圧縮空気の供給が不要な場合、アンロード待機せずにモータを停止させ、必要に応じて再起動させる。これによってアンロード待機中の無駄なエネルギーを使うことができなく、消費電力を削減することができる。

脚注) コベライアンは当社の商標である。またKobelionは当社の登録商標である。

*¹ 機械事業部門 圧縮機事業部 汎用圧縮機工場

このe-STOP機能とワイドレンジ制御との組合せにより、これまでより広範囲な負荷領域での省エネを実現した（図1）。

また、冷却ファンとして省エネターボファンを採用したことにより、動力を従来の約半分に低減させることが可能となった。さらに、負荷や吐出温度に応じてファンの回転数をコントロールすることにより、従来比で最大50%の消費電力削減を実現した（図2）。

2.1.3 自己診断機能の強化

圧縮機の運転状態をセンサによって常に監視し、それらのデータに基づいてコンピュータが運転状況を判断して必要な点検項目をメッセージとランプで液晶タッチパネルモニタに表示（通報）する。こうした自己診断機能の強化により、トラブルの早期発見と素早い対応が可能となった。

また、圧縮機に異常が生じた場合は、表示・警報・自動停止機能を有する高度な早期警戒システムにより、突如のマシンドアウンが防止できる。

予防機能としては、インバータが過負荷を検知したとき、回転数を自動的に下げることによって異常停止を防止し、圧縮空気を安定して供給し続けることができる。

さらにメンテナンス、警報、異常停止などの情報をリモート監視できる機能を標準装備しており、Modbus通信機能による運転データの収集や遠隔操作が可能である。

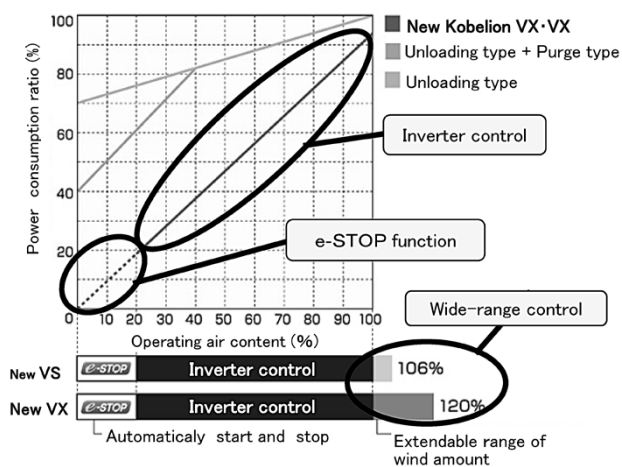


図1 新型コベライアンでの省エネ運転
Fig. 1 Energy-saving operation of new Kobelion

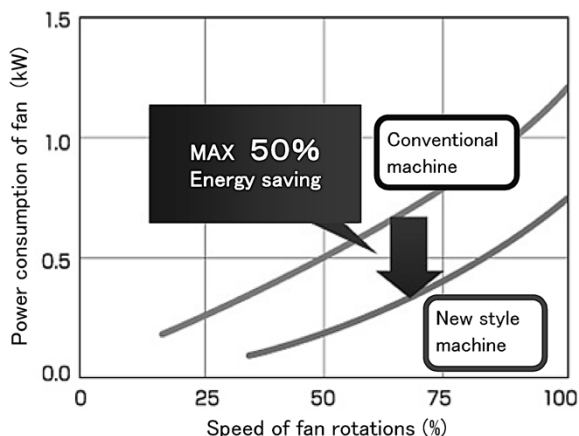


図2 省エネファン
Fig. 2 Energy-saving fan

る。これにより、運転管理の省力化や異常発生時の迅速な対応を実現することができた。

2.1.4 液晶タッチパネルモニタ

圧縮機の吐出圧力は省エネ性に大きく影響することから、新型機に搭載した新型液晶タッチパネルモニタ（以下、新型モニタという）では新たな機能を開発した。圧力設定が0.01MPaの幅で容易に設定できるほか、コンプレッサの設定、運転記録やアラーム履歴の確認、問合せ先の表示などによって圧縮機の運転状態が常に監視でき、トラブル時には原因の究明と対応が素早くできる。さらに、カラー表示、系統図などのビジュアル表示によって操作性が向上した。

2.1.5 台数制御

従来は、圧縮機ごとに各種の設定を行う必要があり、また圧縮機の運転情報も各ユニットごとに確認する必要があった。しかし、新型機において圧縮機を複数台接続して使用する場合、新型モニタ搭載機1台を親機にすることにより、接続されている他のユニットの圧力設定などが最大5台まで可能であり、他のユニットの運転データを取込んで記録することができる（図3）。

新型モニタをLAN接続することにより、遠隔地からWEBブラウザでリアルタイムにモニタすることが可能である（別途プログラムのインストールが必要）。

また、圧力パターンを3パターンまで設定でき、平日・夜間・休日など、圧縮空気の使用状況に応じて設定を使い分けることができる。

2.1.6 圧縮機の振動対策

回転数が変化するインバータ機では、運転条件によってはロータの固有振動数と一致する場合があります。このため、本体とモータの直結構造では、モータロータ（振動発生源）からの振動を抑制する必要があった。

従来機では大きな制振装置をモータケーシングに取付けていたが、新型機では、振動発生源であるモータロータに制振装置を直接取付ける構造を採用した（図4）。これにより、小型でシンプルな装置とすることができ、より効率的に振動を抑えることが可能になった。また、省スペース化および制振装置のコスト削減が可能となった（特許出願中⁴⁾）。

2.2 SGシリーズ

2.2.1 圧縮機本体構造

SGシリーズでは従来、増・減速装置としてプリー&ベルト、および歯車を採用していた。新型機では、VX・

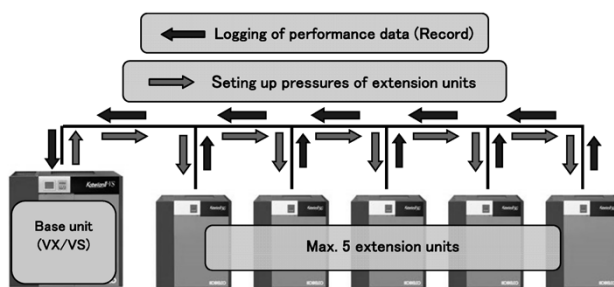


図3 新型モニタによる運転制御
Fig. 3 Operation control by new monitor

VSシリーズで採用しているモータをビルトインしたオーバハング直結構造を採用した。これにより増・減速装置が不要になり、メカロスの削減およびメンテナンス性の向上につながった。

さらに、本体・モータ完全密閉構造によってメカニカルシールが不要となり、油漏れに対する信頼性も向上した。

2.2.2 周波数変換器の搭載

非インバータ機の場合、顧客における電源の周波数帯(50/60Hz)および圧力仕様によって圧縮機の回転数を変更していた。すなわち、要求仕様によって増・減速比が異なるため、回転数の異なる数種のユニットを備える必要があった。

新型機では、電源および回転数を設定するために周波数変換器を搭載し、1機種での対応を可能とした(特許出願中、図5)。これにより、移設に伴う周波数変換工事、あるいは設備変更に応じた圧力変更などが容易になった。

また、起動方式にソフトスタートを採用した。直入・スターデルタなどの起動方式では、起動時に定格電流値を大きく超える電流が流れ、電源設備に負担がかかる。ソフトスタートでは起動時に定格以上の電流が流れることを防止できる。

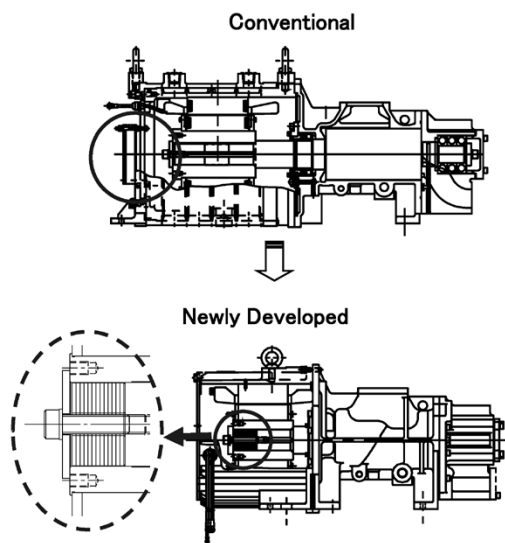


図4 新型制振装置
Fig. 4 New vibration suppressor

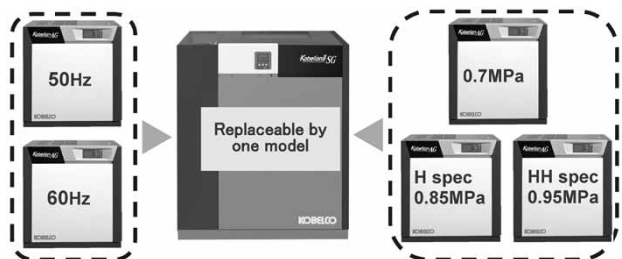


図5 SGユニット種類削減

Fig. 5 One new compressor replacing several types of conventional compressors

2.2.3 液晶モニタ

モニタはシンプル操作と見やすい液晶表示画面とし、運転・保守に必要な情報が簡単に得られるようにした。また、インバータ機と同様、早期警戒システムを標準装備しており、突然のマシダウンの防止や遠隔からの監視も可能である。

2.2.4 省エネ機構

SGシリーズは省エネ性に優れたロード/アンロード制御を採用している。また、当社独自の省エネ容量調整が可能な省エネロジック機能を標準装備し、必要な圧力を自己判断して無駄な昇圧運転をしないことによってさらなる省エネを図ることができる。

2.3 各シリーズ共通の特徴

これまでに述べた特徴のほかに、VX・VSシリーズおよびSGシリーズに共通した特徴として下記が挙げられる。

- (1) 周囲温度への耐久性を向上させるために、クーラ形状・ファンなどの冷却システムを見直し、周囲温度が45℃でも異常停止しない、ゆとりある設計基準を採用した。
- (2) 設置面積は従来比-23%のコンパクト化を図り、コンプレッサ単体型においてクラス最少を達成した。
- (3) ドライヤー体型では、圧縮機ユニット室からの熱の影響を受けないよう、ドライヤ室を圧縮機ユニット室から完全に仕切った(ブロック化)。これにより、品質安定化・メンテナンス性の向上を実現した。
- (4) 初期充填オイルは、新ユニット設計によって最大25%削減した(クラス最少)。また、オイルタンクの内部温度を高く保持することによってドレンの発生が防止でき、ドレン抜きを不要にした。スタート直後など、低温時に発生するドレンも水分除去運転機能でその発生を防ぐことにより、潤滑油の劣化も防止できる。

むすび=新型コペライアンは、旧型の「安心・安全」「業界トップの効率」「高性能・高品質」を継承し、ユーザーニーズに基づいてさらなる進化を遂げた圧縮機であり、とくに現代のエネルギー不足に対する社会問題の改善に則した商品といえる。

今後もこれらの特徴を伸ばし、さらなる省エネ・顧客ニーズにあった商品開発に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 松隈正樹. 産業機械. 2002-10, No.625.
- 2) 中村 元ほか. R&D神戸製鋼技報. 2003, Vol.53, No.2, p.106.
- 3) 奥藤卓也. 油空圧技術. 2012-10, Vol.51, p.28-31.
- 4) 公開特許: 2011-256973.

R&D 神戸製鋼技報掲載 エネルギー機器関連文献一覧表 (Vol.52, No.2~Vol.63, No.1)
Papers on Advanced Technologies for Energy Machinery and Equipment in R&D
Kobe Steel Engineering Reports (Vol.52, No.2~Vol.63, No.1)

	巻/号
●小型スクリュ蒸気発電機…………… Micro Steam Energy Generator	桑原英明ほか 59/3 Hideaki KUWABARA et al.
●省エネ・能力増強型高速スクリュ ブラインクーラ…………… Energy Saving High-speed Screw Brine Cooler	神吉英次ほか 59/3 Eiji KANKI et al.
●ガスエネルギー回収タービン発電装置…………… Gas Energy Recovery Radial Turbine Generator System	松谷 修 59/3 Osamu MATSUTANI
●小形蒸気発電機の開発…………… Development of Micro Steam Energy Generator	桑原英明ほか 59/2 Hideaki KUWABARA et al.
●省エネ・能力増強型高速2段スクリュ冷凍機…………… Energy-saving, High-speed, 2-stage Screw Refrigerator	大倉正詞ほか 59/2 Masashi OKURA et al.
●ラジアルタービンを用いた省エネ化技術…………… Energy Saving Rotating Equipment using Radial Turbines	松本哲也 56/2 Tetsuya Matsumoto
●省エネ・能力増強型高速2段スクリュ冷凍機…………… Energy Efficient High Speed 2-stage Screw Refrigerators	壺井 昇ほか 56/2 Noboru Tsuboi et al.
●高効率アルミニウム製熱交換器の開発…………… KOBELCO ALEX [®] & ORV Aluminum Heat Exchangers	遠藤将夫ほか 55/2 Masao Endo et al.
●神鋼神戸発電所の余剰蒸気を利用した熱供給設備…………… Extracted Steam District Heating Facilities at the Shinko Kobe Power Station	宮部善之ほか 53/2 Yoshiyuki Miyabe et al.
●LNGサテライト基地における冷熱の有効利用について…………… LNG Satellite Station Cold Energy Utilization	吉田龍生ほか 53/2 Tatsuo Yoshida et al.
●サテライト基地用LNG気化器…………… Vaporizers for LNG Satellite Stations	岩崎正英ほか 53/2 Masahide Iwasaki et al.
●天然ガス処理プラント用高圧大型ALEX [®] の開発…………… Development of High-pressure Large ALEX [®] for Gas Processing Plants	野一色公二ほか 53/2 Dr. Koji Noishiki et al.
●LNG冷熱利用による水素製造システム…………… LNG Cold Energy Use for Hydrogen Production Processes	田中正幸ほか 53/2 Masayuki Tanaka et al.
●ゴミ焼却プラント用高圧蒸気ラジアルタービン…………… High Pressure Steam Radial Turbines for Incineration Plants	梶木一俊ほか 53/2 Kazutoshi Kajiki et al.
●蒸気過熱器を用いた動力回収型圧縮機の高性能化…………… Improvement of Power Recovery Turbo Compressor by Using Steam Super Heater	桑原英明ほか 53/2 Hideaki Kuwabara et al.

新オイルフリースクリュー圧縮機「Emeraude-ALE」

New Oil-free Air Compressors, "Emeraude-ALE"



原 崇之*¹
Takayuki HARA

Today, superior energy-saving characteristics are demanded of air compressors, due to increasing environmental issues. Kobe Steel has developed the oil-free air compressor "Emeraude-ALE" series, which has superior energy-saving characteristics to meet this need. The concept behind the new Emeraude-ALE is "the advancement of customer satisfaction" by expanding the lineup of inverter types, increasing the air discharge flow rate, expanding the discharge pressure range, providing a compact cabinet, and achieving a "class 0" rating for the cleanliness of the discharged air. This paper introduces the main features and the key technologies of the newly developed compressors.

まえがき = 当社は1915年に国産第1号の高圧レシプロ圧縮機を製造し、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た。その後、1984年にはオイルフリー2段圧縮機「ALシリーズ」を販売開始し、1996年に「ALE (Emeraude[®]) シリーズ」を販売開始した。

ALEシリーズは1996年に出力15~37kWクラスの販売を開始し、1999年までに45~290kWクラスも販売を順次開始した。2007年には超大型シリーズ305~370kWクラスの販売を開始し、現在に至っている。このALEシリーズは省エネルギー性能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。

このたび、さらなる顧客満足度を向上させるため従来機をブラッシュアップし、同シリーズの標準機である120~290kWクラスのモデルチェンジを行った。

1. 商品コンセプト

今回開発した新型ALEシリーズの商品コンセプトを『機能、信頼性向上による顧客満足度向上』とし、具体的には以下のような取組を行った。

- ①インバータ機ラインナップの強化
- ②吐出空気量の増量
- ③圧力範囲の拡大
- ④コンパクト設計
- ⑤吐出空気の清浄度等級「クラスゼロ」の継続

いずれの取組も、「省エネルギー」、「使いやすさ」、「高品質空気の提供」など、顧客の要求に合致させるものである。

2. ラインナップと構造

2.1 圧縮機ユニット内構成とラインナップ

新型ALEの外観および内部構造をそれぞれ図1と図2に、また標準機の出力行ラインナップを表1に示す。インタクーラおよびアフタクーラの上に主モータと圧縮機本体を搭載している構造であり、出力ラインナップは120~290kWの計10種類ある。

2.2 圧縮機ユニット内の空気フロー

図3に圧縮機ユニット内空気フローを示す。本ユニッ



図1 圧縮機ユニット外観

Fig. 1 Appearance of compressor unit

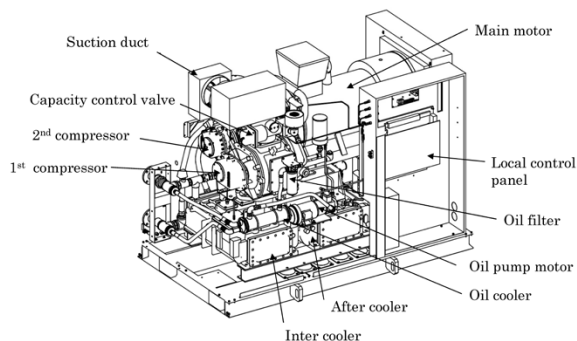


図2 圧縮機内部構造

Fig. 2 Internal structure of compressor unit

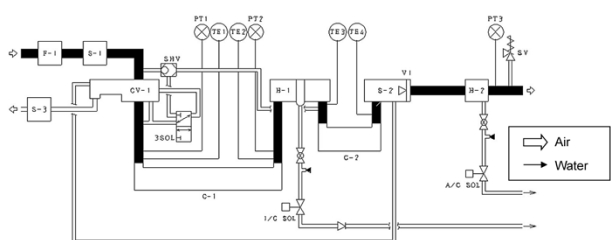
脚注) Emeraudeは当社の登録商標である。

*¹ 機械事業部門 圧縮機事業部 汎用圧縮機工場

表1 新型ALE標準機の出力行ラインナップ

Table 1 Lineup of standard units of new ALE series

Output	Pressure	400V class	3000V class	6000V class	Output	Pressure	400V class	3000V class	6000V class
120kW	0.7MPa	○	○	○	200kW	0.7MPa	○	○	○
	0.88MPa	-	-	-		0.88MPa	-	-	-
	1.0MPa	-	-	-		1.0MPa	-	-	-
132kW	0.7MPa	○	○	○	220kW	0.7MPa	○	○	○
	0.88MPa	-	-	-		0.88MPa	○	○	○
	1.0MPa	-	-	-		1.0MPa	-	-	-
145kW	0.7MPa	○	○	○	250kW	0.7MPa	○	○	○
	0.88MPa	○	○	○		0.88MPa	○	○	○
	1.0MPa	-	-	-		1.0MPa	○	○	○
160kW	0.7MPa	○	○	○	270kW	0.7MPa	○	○	○
	0.88MPa	○	○	○		0.88MPa	○	○	○
	1.0MPa	○	○	○		1.0MPa	○	○	○
180kW	0.7MPa	○	○	○	290kW	0.7MPa	-	-	-
	0.88MPa	○	○	○		0.88MPa	○	○	○
	1.0MPa	○	○	○		1.0MPa	○	○	○



Symbol	Item	Symbol	Item
C-1	1 st stage compressor	3SOL	Three-way solenoid valve
C-2	2 nd stage compressor	I/C SOL	Solenoid valve for I/C
CV-1	Volumetric regulator valve	A/C SOL	Solenoid valve for A/C
S-1	Suction silencer	V1	2 nd stage discharge air check valve
S-2	Discharge silencer	PT1	1 st stage suction air pressure sensor
S-3	Blow-off silencer	PT2	1 st stage discharge air pressure sensor
H-1	Inter-cooler	PT3	2 nd stage discharge air pressure sensor
H-2	After-cooler	TE1	Thermocouple for 1 st stage suction air temperature
F-1	Suction filter	TE2	Thermocouple for 1 st stage discharge air temperature
SV	Safety valve	TE3	Thermocouple for 2 nd stage suction air temperature
SHV	Shuttle valve	TE4	Thermocouple for 2 nd stage discharge air temperature

図3 圧縮機ユニット内の空気フロー

Fig. 3 Air flow in compressor unit

トは、吸込フィルタで濾過（ろか）した空気を第1段圧縮機にて約0.2MPaまで昇圧し、インタクーラで冷却した後、第2段圧縮機にて所定圧力まで昇圧する。その後、アフタクーラで冷却し、空気を圧送する装置である。

3. 新型ALEシリーズの特長

3.1 インバータ機ラインナップの強化

国内における空気圧縮機の消費電力は工場事業所電力の20~30%を占めるといわれている¹⁾。このため、空気圧縮機の省エネルギーを推進することによって大きな省エネルギー効果が得られる。そのような背景から近年、空気圧縮機の省エネルギー性能の向上が求められている。

空気圧縮機は工場の操業負荷に応じたさまざまな負荷条件で運転しなければならない。したがって、空気圧縮機の省エネルギー性能を考えるには、全負荷時だけでなく、操業状態（部分負荷時）での負荷性能も非常に重要である。

部分負荷時における省エネルギーの観点では、主モータにインバータ機を採用するのが最も効果的である。回転数制御による一定圧制御を行うことで無駄な昇圧を行わずに必要な空気量だけを圧送することができ、電力使用量を最小限に抑えることができる。このような背景から、今回のモデルチェンジでは下記3点の改善を行った。

- ①出力クラスの追加
- ②高圧力仕様の追加
- ③永久磁石モータの採用

表2に新型ALEシリーズにおけるインバータ採用機の出力行ラインナップを示す。出力クラスの追加に加えて高圧力仕様の機種を追加し、インバータ採用機を従来の2機種から8機種に拡充した。また、部分負荷特性を向上させるため、当社では永久磁石モータを採用している。

以上のように、「出力クラスの追加」や「高圧力仕様の追加」、「永久磁石モータの採用」を行ったことにより、顧客の要求に合致した機種の提供が可能となった。

3.2 吐出空気量の増量

顧客は、より小さな出力でより吐出空気量が多い圧縮機を求めている。新型ALEではそのニーズに応えるべく、従来から採用している高性能ロータや低圧損クーラに加え、歯車のサイジングの見直しなど、設計の最適化を行った。表3に従来機と新型ALEの比較を示す。吐出空気量は、従来の同出力機と比較して最大12.5%と大幅にアップした。

3.3 圧力範囲の拡大

スクリュ圧縮機では、0.1MPaの昇圧を行うと動力が約7%上昇する。一方、汎用圧縮機のラインナップ特性上、最大使用圧力に区切りがある。表4に示したとおり、新型ALEでは0.7MPa、0.88MPa、1.0MPa仕様とな

表2 インバータ機の出力行ラインナップ

Table 2 Lineup of inverter unit

	120kW	132kW	145kW	160kW	180kW	200kW	220kW	250kW	270kW	290kW
0.7MPa				○	★			○	★	
0.88MPa				★	★			★	★	

(★:new lineup)

表3 新型ALEの吐出空気量

Table 3 Air discharge rate of new ALE

	Frequency	Air discharge rate (m ³ /min)									
		120kW	132kW	145kW	160kW	180kW	200kW	220kW	250kW	270kW	
0.7MPa	New ALE	50Hz	22.3	24.7	27.3	29.8	33.6	37.4	39.7	45.0	49.2
		60Hz	22.1	24.5	27.4	29.8	33.9	37.4	39.7	45.0	49.3
	ALE	50Hz	21.5	23.8	26.3	28.3	32.7	36.3	39.0	43.5	48.0
		60Hz	21.8	23.9	26.3	28.3	32.8	36.4	39.2	43.6	48.0
	UP (%)	50Hz	3.7	3.8	3.8	5.3	2.8	3.0	1.8	3.4	2.5
		60Hz	1.4	2.5	4.2	5.3	3.4	2.7	1.3	3.2	2.7
0.88MPa	New ALE	50Hz	23.6	25.8	29.6	35.6	39.7	41.9	45.3		
		60Hz	23.6	26.2	29.5	35.8	39.9	42.5	46.0		
	ALE	50Hz	21.4	23.7	26.3	32.7	36.2	38.9	43.4		
		60Hz	21.7	23.8	26.3	32.8	36.3	39.1	43.6		
	UP (%)	50Hz	10.3	8.9	12.5	8.9	9.7	7.7	4.4		
		60Hz	8.8	10.1	12.2	9.1	9.9	8.7	5.5		
1.0MPa	New ALE	50Hz	23.6	26.3	35.7	39.6	41.9				
		60Hz	23.5	26.2	32.7	36.3	39.1				
	ALE	50Hz	21.4	26.3	32.7	36.2	38.9				
		60Hz	23.5	26.2	35.8	39.8	42.5				
	UP (%)	50Hz	10.3	0.0	9.2	9.4	7.7				
		60Hz	8.3	0.0	9.5	9.6	8.7				

表4 新型ALEの圧力仕様

Table 4 Pressure specifications of new ALE

Pressure	New ALE	ALE
1.03MPa	1.0MPa UNIT (MAX1.03MPa) ex) 160kW:23.5m ³ /min	1.0MPa UNIT ex) 160kW:21.7m ³ /min
1.0MPa		
0.93MPa	0.88MPa UNIT (MAX0.93MPa) ex) 160kW:26.2m ³ /min	0.93MPa UNIT ex) 160kW:23.8m ³ /min
0.88MPa		
0.75MPa	0.7MPa UNIT (MAX0.75MPa) ex) 160kW:29.8m ³ /min	0.69MPa UNIT ex) 160kW:28.3m ³ /min
0.7MPa		
0.69MPa		

っている。この仕様圧力の区切りがギヤ比に基づく圧縮機本体回転速度の区切りであり、吐出空気量もこれによって決定される。今回、例えば従来機では最大0.69MPa仕様であったものを0.75MPaまで使用できるように変更し、より吐出空気量の多い機種をより高い圧力でも使用できるようにした。最大使用圧力を超える場合、1ランク上の圧力設定機種で選定することになり、回転数が低い（＝風量が少ない）運転となる。新型ALEでは、より幅広い圧力設定が可能となるような圧力ラインナップに変更した。

例を挙げると、160kW機で必要圧力が0.7MPaとした場合、従来シリーズでは23.8m³/minの0.93MPa仕様機の選定となるが、新型ALEでは29.8m³/minの0.7MPa機を選定することができ、約25%の空気量増加が期待できる。顧客にとって、より空気量の多い機種が選定できるメリットがある。その他、0.88MPa機、1.0MPa機も従来シリーズの圧力設定範囲をカバーしている。

3.4 コンパクト設計

汎用圧縮機は工場の動力室など限られた敷地内に設置される。そのため、より小さな設置面積が求められる。新型ALEは内部構造部品の適正配置を行うことにより、従来シリーズより最大10%設置面積を削減することに成功した。これにより、従来よりも動力室のスペースが有効に活用できる効果がある。

3.5 吐出空気清浄度等級クラスゼロの継続

ALEシリーズは、従来シリーズより「ISO8573-1 圧縮空気 第1部：汚染物質および清浄等級」で規定される「圧縮空気に関するオイル総濃度の品質等級が0等級(class-0)」(以下、クラスゼロという)の認証を国際的第三者機関TÜV (Technische Überwachungsvereine Rheinland) より取得している。すなわち、当社のオイルフリー技術によって吐出空気品質の最高レベルが確保されていることが外部公的機関にも認められている。新型ALEでもこのクラスゼロを継承しており、最高品質の清浄度の圧縮空気を要求する顧客のニーズに答えている。

3.6 その他の特長

ALEシリーズは鋳物製ケーシングのガスクーラ（インタクーラおよびアフタクーラ）を採用している。新型ALEでは、ガスクーラケーシングの肉厚最適設計を行った。ガスクーラは圧力容器であり、法規に定められた

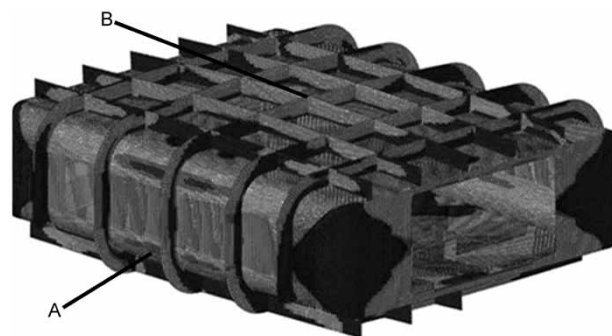


図4 ガスクーラのFEM応力解析結果
Fig. 4 Result of FEM stress analysis for gas cooler

耐圧強度を確保しなければならない。ALEシリーズのガスクーラの配管は本体下に配置している。これは、配管の熱膨張を逃がすことと圧損低減を目的として配管の最短ルートを実現するためである。また、ガスクーラは架台兼用とするため直方体形状としている。このため形状が特殊であり、破壊テストによる強度確認の必要があったが、本開発ではFEM解析による肉厚の最適化および軽量化を行った。新型ALEのFEM応力解析結果を図4に示す。従来のガスクーラは、上下平面部にのみリブを設けた構造であった。これは、直方体形状の圧力容器に内圧が作用した場合、最も広い平面部で変形（たわみ）が大きくなると予想したためである。しかし、FEM解析の結果では、アフタクーラを例に挙げると応力が高い部分は図4のA部（肉厚29mm）であり、B部（肉厚23mm）の応力は低かった。側面リブを追加して内圧によるたわみを抑えることでガスクーラ全体の肉厚を薄くすることができた。その結果、総重量を約10%削減することができた。このことは材料費削減にも寄与している。

むすび＝新型ALEはオイルフリースクリュー圧縮機に対する顧客のニーズをもとに開発し、環境性能の向上にも積極的に取り組んだ商品である。

今後とも顧客のニーズに対応した製品を開発し、シリーズの拡大および改善に努めていく所存である。

参考文献

- 1) 松隈正樹. 省エネルギー 第1版. 財団法人省エネルギーセンター, 2006, p.42-50.



Iron & Steel Business

- Iron and Steel Products :** Wire rods, Bars, Plates, Hot-rolled sheets, Cold-rolled sheets, Electro-galvanized sheets, Hot dip galvanized sheets, Painted sheets, Deformed bars, Pig iron
- Steel Castings and forgings :** Marine parts (Crankshafts, Engine components, Shafting, Ship hull parts), Industrial machinery parts (Forgings for molds, Rolls, Bridge parts, Forgings for pressure vessel), Nuclear parts
- Titanium Products :** Parts for jet engines and airframes (Forgings, Ring rolling products), Coils, Sheets, Foils, Plates, Wire rods, Welded tubes, Titanium alloys for high strength applications, corrosion resistant applications and heat transfer applications, Titanium alloys for motorbikes and automobiles exhaust systems, golf club heads, architecture and medical appliances
- Steel Powders :** Atomized steel powders for Sintered parts, Soft magnetic components, Soil and ground water remediation, Handwarmers, Deoxidizers, Metal injection moldings
- Independent Power Producer :** Wholesale power supply

Welding Business

- Welding Consumables :** Covered welding electrodes, flux-cored and solid welding wire for semi-automatic welding, solid wire and fluxes for submerged arc welding, TIG welding rods, backing materials
- Welding Systems :** Robot systems for welding steel columns, welding robot systems for construction machine, offline teaching systems, other welding robots, power sources
- High Functional Materials :** Filters for deodorization, dehumidification, ozone decomposition, toxic gas absorption, and oil mist elimination; equipments for deodorization, dehumidification
- General :** Testing, analysis, inspection, and commissioned research; educational guidance; consulting; maintenance and inspection of industrial robots, power sources, and machinery

Aluminum & Copper Business

- Aluminum and Aluminum Alloy Products :** Sheets, strips, plates, shapes, bars, tubes, forgings, castings
- Aluminum Secondary Products :** Blank and substrates for computer memory disks, pre-coated materials
- Aluminum Fabricated Products :** Construction materials, electronics and OA equipment drums, automotive parts, heat exchanger parts, chamber, electrode parts
- Copper and Copper Alloys :** Sheets, strips, tubes, pipes
- Copper Secondary Products :** Conductivity pipes, inner grooved tubes for air conditioners, Lead frames
- Magnesium castings : Sand mold castings**

Machinery Business

- Tire and Rubber Machinery :** Batch mixers, twin-screw extruders, tire curing presses, tire testing machines, tire & rubber plant
- Plastic Process Machinery :** Large-capacity mixing / pelletizing systems, compounding units, twin-screw extruders, optical fiber processing equipment, wire-coating equipment, injection-molding machines
- Advanced Products :** Surface modification system (AIP, UBMS), inspection and analysis systems (high-resolution RBS system)
- Compressor :** Screw compressors, centrifugal compressors, reciprocating compressors, refrigeration compressors, heat pump, radial turbine, standard compressors, micro steam energy generator
- Material Forming Machinery :** Bar & wire rod rolling mills, blooming & billeting mills, strip rolling mills, automatic flatness control systems, continuous casting equipment, hot isostatic presses, cold isostatic presses, various high pressure machinery, metal press machines
- Energy :** Aluminum brazed plate fin heat exchanger (ALEX), LNG vaporizers (Open rack vaporizers, Intermediate fluid vaporizer, Hot water vaporizer, Cold water vaporizer, Air-fin vaporizer), Pressure vessels, Aerospace ground testing equipment,

Engineering Business

- New Iron · Coal and Energy :** Direct reduction plants, Pelletizing plants, Steel mill waste processing plants, New ironmaking plants (ITmk3, FASTMELT), Iron ore beneficiation plants, Upgraded brown coal
- Nuclear · CWD :** Nuclear plants (radioactive waste processing/disposal), Advanced nuclear equipment, Spent fuel storage and transport packaging, Power reactor/Reprocessing plant components, Fuel channels
Chemical weapon destruction (Consulting, search and recovery, Transportation, Storage, Chemical analysis, Monitoring, Safety management, CWD plant construction and operation), Detoxification of soil and other materials contaminated with chemical agents, Destruction of explosive ordnance and persistent toxic substances, Contaminated site remediation projects
- Steel Structure · Sabo :** Sabo and Disaster Prevention Products (Steel grid sabo dams, Flaring shaped seawalls), Cable construction work, Acoustic & vibration absorption systems
- Urban Systems :** Urban transit system (Mass rapid transit system, Automated guideway transit system, SKYRAIL, Guideway bus), Platform screen door (PSD), Train stopping place detection equipment, Clearance envelope measurement equipment, Wireless monitoring, Automatic train control system, Private finance initiative (PFI) business, Medical information system

編集後記

<特集：エネルギー機器>

*本特集号では、機械分野における省エネ、エネルギーの有効利用を目指した技術開発の取組について紹介しました。東日本大震災以降、エネルギー問題がクローズアップされ、いままでも無駄にエネルギーを消費していたことが浮彫になってきました。そのため、今まで捨てられていたエネルギーをいかに有効に利用するかが課題となっています。

*当社では、材料分野、機械分野において多くの省エネおよびエネルギー有効利用に関する製品・技術を保有しています。機械分野におけるエネルギー機器として、大きく二つに分類されます。

*一つは、圧縮機技術をベースとした冷凍機、ヒートポンプ、および圧縮機を膨張機として利用して余剰水蒸気、温熱などの熱エネルギーを電気に変換する発電システムです。とくに、温泉の熱を利用する発電システムとして世の中に送り出したバイナリー発電システムは、自然エ

ネルギーを有効利用した装置として高く評価されています。

*もう一つは、LNG気化器、熱交換器などによるエネルギー有効利用、省エネ技術です。熱交換はエネルギー利用に不可欠な機器であり、様々な分野で使用されています。装置全体の効率は熱交換器の効率に大きく依存しており、高効率の熱交換器が要求されています。当社では、高い技術力に基づく高効率の機器を開発しております。

*我が国は、エネルギーの大半は海外に依存しており、いかにエネルギーの消費を抑え、新しいエネルギー源を創出するかが今後の重要な課題となっています。

*当社では、いままでも培ってきた技術を基に、これまで以上に新技術の開発に取り組む所存であります。本特集号について、ご意見、ご要求がありましたら事務局までお寄せください。ご連絡をお待ちしております。

(吉村省二)

次号予告

<特集：資源・エネルギー>

*当社グループは、総合素材・エンジニアリングメカとして、資源・エネルギー分野において製品・技術を幅広く提供しています。

*中国を中心とした世界的な鉄鋼生産の増加に伴って、鉄鉱石、原料炭などの鉄鋼原燃料はタイト化しています。当社グループは、ベレタイジングプラント、MIDREX直接還元プラント、FASTMET製鉄ダスト処理プラント、ITmk3新製鉄プラントなどのメニューを世界各地に提供しています。これらのプロセスは、粉鉱石やダストなどの低品位原料を用い、一般炭や天然ガスを還元剤に使用したCO₂削減効果の高い環境に優しいプロセスです。

*鉄鋼スラグは鉄鋼生産に伴って副生されます。当社製鉄所において生成される鉄鋼スラグは、セメント・海砂などの代替、土木・港湾工事資材として幅広く活用され、天然資源の保護・保全に寄与しています。

*原子力分野では、当社グループは素材から機器・システム、プラント・施設建設にいたるまでを総合的に提供できる特

長を有しています。使用済燃料および放射性廃棄物の輸送・貯蔵容器の製造、および減容・安定固化・貯蔵プラントの建設を行い、最近では震災復興に大きく貢献しています。また、大形水圧プレスなどの充実した設備を使用し、原子力圧力容器用部材などの原子炉機器を提供しています。

*エネルギー・化学機器分野においては、リアクタをはじめとする超大形・高圧肉厚容器、およびLNGなどの極低温容器用鋼材を提供しています。

*発電事業では、製鉄所が長年培ってきた自家発電技術を活用した神鋼神戸発電所を建設し、安定した運転を続けています。また、最近では製鉄所発生ガスを用いた高効率のガスタービン・コンバインドサイクル発電を行っています。

*これらの事業を支える基盤技術として、新材料開発および評価・シミュレーション技術の開発を進めています。

*次号では、これらの資源・エネルギーに関する当社グループの製品・技術を横断的に幅広く紹介いたします。

(森 啓之, 三村 毅)

<<編集委員>>

委員長	杉崎康昭
副委員長	中川知和
委員	井上憲一
	清水弘一
	中島悟博
	橋村徹博
	福中恒博
	前三村恭志
	森村啓之
	吉村省二
	<五十音順>
本号特集編集委員	吉村省二

R&D 神戸製鋼技報

第63巻・第2号(通巻第231号)

2013年9月11日発行

年2回(4月, 8月)発行

非売品 <禁無断転載>

発行人 杉崎 康昭

発行所 株式会社 神戸製鋼所
秘書広報部
〒651-8585
神戸市中央区脇浜海岸通
2丁目2番4号

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
〒651-2271
神戸市西区高塚台1丁目5-5
(株)神戸製鋼所内
FAX(078)992-5588
rd-office@kobelco.com

2013年9月11日

各 位

(株)神戸製鋼所
秘書広報部

「R & D神戸製鋼技報 Vol.63, No.2」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.63, No.2」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、下記変更届けに必要な事項
をご記入のうえ、FAX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 078-992-5588
rd-office@kobelco.com

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：	TEL：