

地域冷暖房用高効率吸収冷凍機

High-Performance Absorption Chiller for District Heating and Cooling

冷熱事業本部 松下修一*¹ 福島亮*¹
技術本部 藤原誠*² 大武幹治*³

地域冷暖房用の高効率吸収冷凍機を開発した。この冷凍機は、高効率サイクルを採用し、CFDを用いた最先端の熱交換器高性能化技術を駆使した画期的な冷凍機であり、蒸気消費率を従来機対比10%削減また設置面積を14%削減し高効率・省スペースを達成している。また、設計・製作・検証各段階において信頼性確立に十分に配慮した高信頼性の吸収冷凍機である。本冷凍機の実用化によりエネルギー利用の高効率化による地球環境保存に貢献できる。

An efficient absorption chiller for district heating and cooling was developed. This chiller is an epoch-making chiller which was developed by full use of the state-of-the-art high performance technology of heat exchanger utilizing CFD, and an efficient cycle. And it has reduced the rate of steam consumption by 10% of the conventional chiller, and 14% in installation space. Moreover, this absorption chiller is highly reliable in design, manufacturing, and verification. It can contribute to the environmental preservation by efficient use of energy.

1. ま え が き

地球温暖化対策、エネルギー問題等エネルギーの有効利用は人類の活動において必要不可欠の課題となっている。また、一方では生活環境の快適化の志向はますます強まり、空調に対するニーズは高まる一方でであり空調機器の高効率化に対するニーズは更に増大している。

吸収冷凍機は、低質熱源で駆動できる熱駆動型の冷凍機であり、発電設備等の排熱で冷熱を作り出すことができるエネルギー有効利用に最適の冷凍機である。特に、空調負荷の集中する都市圏においては、効率的な冷暖房のために大型の地域冷暖房システムの導入が進んでいるが、この地域冷暖房システムにおいて中心となるのは大容量の吸収冷凍機である。この地域冷暖房用吸収冷凍機の高効率化のために、高効率吸収サイクル、最先端のCFD(Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学)を用いた熱交換器の高性能化技術等を駆使して新型の高効率吸収冷凍機を開発した。この新型吸収冷凍機は、横浜のみなとみらい21地区の“みなとみらい21熱供給(株)”にて世界最大容量5000 USRtで蒸気消費率を従来の地域冷暖房用吸収冷凍機より10%削減した高効率吸収冷凍機として順調に稼働中である。また、これらの技術を用いて新型高効率吸収冷凍機MDUEシリーズを開発した。MDUEシリーズは従来のシリーズ機に対して蒸気消費率を10%削減し3.9 kg/h・USRtを達成した画期的な吸収冷凍機である。本論文ではこれらの高効率吸収冷凍機に採用した技術とその運転・実証状況について報告する。

2. 5000 USRt 吸収冷凍機の開発

2.1 概 要

単機容量として世界最大の5000 USRt(従来は2500 USRtが最大)、また蒸気消費率としても従来の地域冷暖房機対比

で10%高効率化した蒸気熱源吸収冷凍機を開発した。この冷凍機を横浜のみなとみらい21地区“みなとみらい21熱供給(株)”向けの第2プラントに設置し、1年間にわたる試運転を実施した。

2.2 開発機の仕様・特徴

表1に開発機の仕様を従来機と比較した結果を示す。今回開発した冷凍機は、従来機対比で設置面積を25%小型化、蒸気消費率で10%削減した高効率・省スペース型の吸収冷凍機である。

図1に本冷凍機の外観を、表2に特徴とそれを達成した手段を示す。高効率・省スペースの他に一般的に冷凍機が運転される部分負荷での効率改善、起動・停止時間の短縮及び負荷変動に対する追従性の改善等が本機の特長となっている。

2.3 要素開発

2.3.1 吸収器・蒸発器要素試験

蒸発器・吸収器は実機の断面を模擬した二次元スライスモデルを作成し性能評価・確認を行った。実際の冷凍機では、冷水・冷却水の温度分布を主原因とする長手方向での分布が存在するが、この長手方向の分布の影響については要素試験で冷却水・冷水温度条件を変えて評価するとともに後述の伝熱モデルを組み込んだ数値流動解析を用いて三次元分布及び

表1 開発機の仕様
Comparison of Specifications

	今回開発機	従来機
冷凍能力	5000 USRt	2500 USRt × 2台
蒸気消費量	19500 kg/h	21500 kg/h
蒸気消費率	3.9 kg/h・USRt	4.3 kg/h・USRt
冷水温度	13 /6	13 /6
冷却水温度	32 /40	32 /40
据付面積	74.1 m ²	98.1 m ²

*¹大型冷凍機部設計課

*²高砂研究所燃焼・伝熱研究室主席

*³高砂研究所燃焼・伝熱研究室



図1 5 000 USRt機の外観写真 5 000 USRt機の現地据え付け状況を示す。
Photograph of 5 000 USRt absorption refrigerator

その影響予測を実施した。

2.3.2 動特性シミュレーション

今回世界最大容量機の開発に当たって、動特性シミュレーションを実施した。動特性シミュレータは各機器を集中近似によってモデル化を行い、小型機でモデルの妥当性を確認済みのものを適用した。本解析を用いて、停止時の溶液濃度を最適化することにより起動時間を15分に短縮することが可能との見通しを得た。

2.4 現地試運転結果

本冷凍機は1年間にわたる現地での検証試験の結果、定格性能・部分負荷性能等の静特性及び起動時間等の動特性とも所期の性能を有することが確認できた。図2に性能試験期間中の性能を示す。5日間5 000 USRt以上の能力が継続して発揮できていることを確認した。

2.5 まとめ

単機容量として世界最大でかつ従来の地域冷暖房用に対し10%の蒸気消費率削減を達成した超大型・高効率吸収冷凍機を開発し、現地運転で定格・部分負荷性能、及び動特性とも所期の性能を達成することを確認した。

3. MDUEシリーズの開発

3.1 狙い

地域冷暖房、工場向き吸収冷凍機としてMDAシリーズを平成5年に開発、発売し7年が経過した。このため、前述の5 000 USRt 吸収冷凍機をベースモデルとして高性能かつ高信頼性の地域冷暖房、工場向け新型吸収冷凍機MDUEシリーズの開発を行った。

(1) 運転費用の低減

蒸気消費率（燃料消費率）3.9 kg/h・USRt
（従来機対比 10%効率向上）

補機動力の低減

冷水、冷却水大温度差仕様対応

(2) 信頼性の向上

高性能抽気装置の採用と溶接部の削減

3.2 製品の特長

3.2.1 高効率・省スペース

地域冷暖房用吸収冷凍機は、規模が大きくまた需要の大き

表2 5 000 USRt機の特徴

Features of 5 000 USRt Absorption Refrigerator

特 徴		達 成 手 段
効率向上	蒸気消費率 3.9 kg/h・USRt (従来比 10%)	蒸発器・低圧再生器に高性能伝熱管採用
		高性能溶液熱交換器の採用
		インバータ採用により部分負荷時の動力削減
小型・軽量化	単機容量5 000 USRt 据付面積の低減 (従来比 25%)	吸収器電熱管配列最適化による蒸気圧損最小化
		蒸発器・吸収器の2段サイクル採用
運転性の改善	制御範囲 10 ~ 100%	片肺運転による低負荷時の効率改善
	起動時間 15分	停止時の最適濃度制御により起動時間を短縮

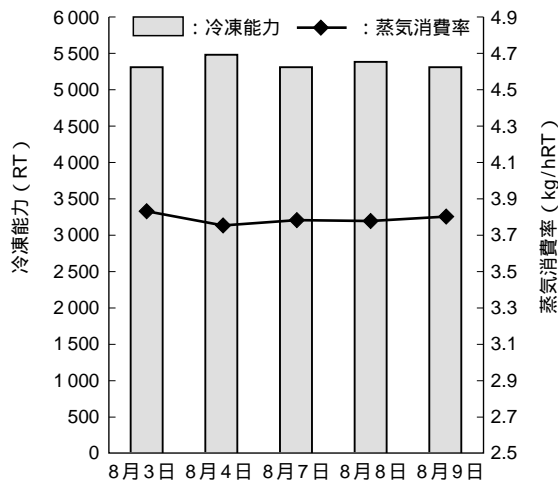


図2 試験期間中の性能計測結果 5 000 USRt機の現地性能試験期間中の計測結果を示す。
Measured Performance Result during Test period

い都市部に設置されることより高効率、省スペースが要求される。MDUEシリーズは、後述の高効率サイクル、熱交換器の高性能化技術の適用により、蒸気消費率で10%、設置スペースで平均14%の削減を達成した高効率・省スペースの冷凍機である。

3.2.2 運転費用の低減

地域冷暖房、工場を対象とした冷凍機は年間運転時間が長くなるため燃料消費率の低減のみでなく、補機動力の低減もユーザ運転費用の軽減に大きく寄与することになる。

新型機開発においてはユーザの運転費軽減のため、冷凍機性能向上による燃料消費率低減の外、溶液、冷媒循環用ポンプ動力の低減を念頭に計画した。また、冷水、冷却水ポンプ動力低減のため冷水、冷却水の出入り口温度差を大きくした

表3 従来機との仕様比較

The comparison in the specification between the conventional model and the developed model

		新型機	従来機
冷凍能力		800 ~ 2 500 USRt	
蒸気消費率		3.9 kg/h・USRt	4.3 kg/h・USRt
冷水温度	入 口	13 (15)	13
	出 口	6 (5)	6
冷却水温度	入 口	32	32
	出 口	38	40

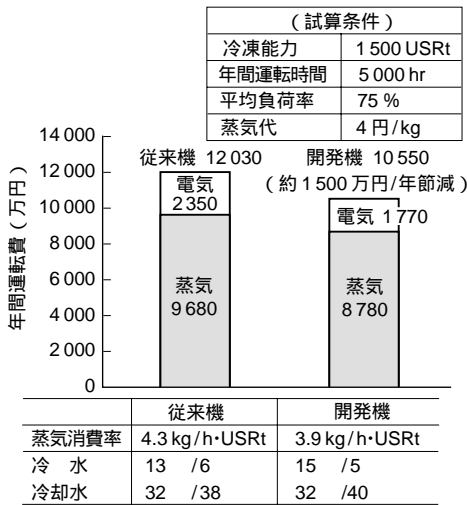


図3 従来機との運転費比較 MDUEシリーズ機が従来シリーズ機に対し、運転費を大幅に低減できることを示す。
The comparison in the running cost between the conventional model and the developed model

大温度差仕様を想定し、開発を行った。従来機との仕様比較を表3に示す。冷水は出入り口温度差10 と7 の2点の仕様を満足するよう計画した。

この結果、運転費用は大幅に低減され、1 500 USRt 機を例とした試算では図3に示すように年間約1 500万円の費用削減が可能となった。

3.2.3 信頼性の向上

地域冷暖房では契約先への安定した冷水の供給義務を有しており、工場では生産ラインと直結していることから機器故障、性能低下等のトラブル防止、機器信頼性の向上を念頭に開発する必要がある。

開発機では高性能抽気装置を採用するとともに配管溶接部を削減し、気密信頼性の改善を図ることで気密不良による性能低下、機内腐食防止を行っている。また、溶液、冷媒系統にそれぞれろ過装置を設置して伝熱管表面の汚れによる性能劣化防止を施している。

3.3 適用技術

冷凍機の高性能化、省スペース化のためにサイクル高効率化と熱交換器の高性能化技術を適用した。

3.3.1 サイクル高効率化

(1) 低循環量・高濃度幅サイクル

図4に示すように、以下に示す打ち手により吸収性能及び再生性能を向上させて濃度幅を拡大したサイクルを実現した。これにより、溶液循環量を削減することが可能となり、各溶液熱交換器での顕熱ロスを低減、高性能化を達成した。

(2) 2段吸収・2段蒸発サイクル

図5に示すように、吸収器と蒸発器を2分割し異なる圧力レベルで吸収させることにより同一濃度で溶液の最低温度をAからBまで上昇させ、溶液と冷却水との温度差を大きく取って、伝熱性能を向上させた。

(3) 冷却水分流サイクル

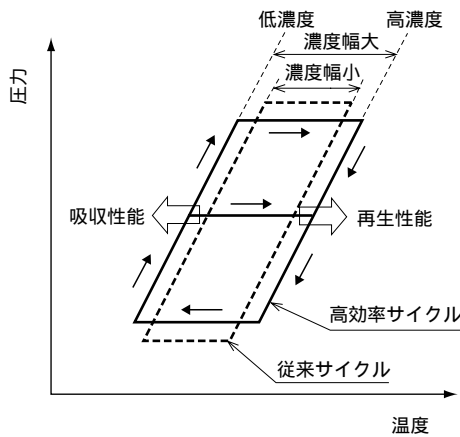


図4 高効率サイクル(高濃度幅サイクル) MDUEシリーズ機に適用した高濃度幅サイクルの性能向上効果を示す。
High performance absorption chiller cycle (Cycle with large difference in LiBr concentration)

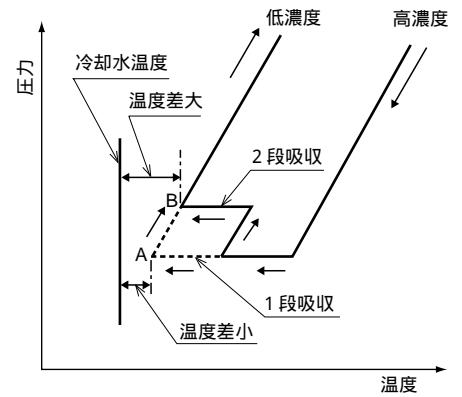


図5 高効率サイクル(2段吸収サイクル) MDUEシリーズ機に適用した2段吸収サイクルの性能向上効果を示す。
High performance absorption chiller cycle (Two stage absorption cycle)

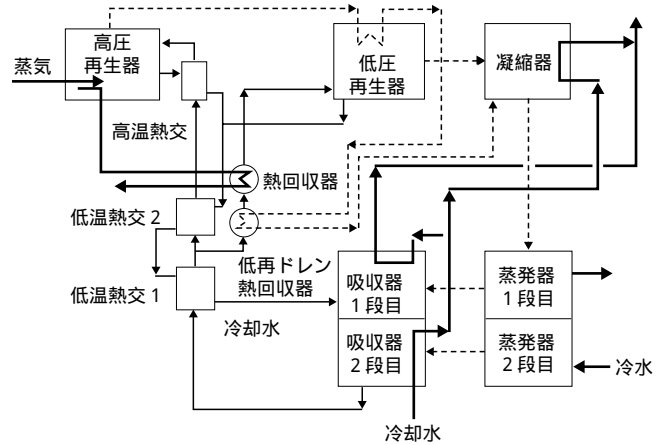


図6 高効率サイクル(冷却水分流サイクル) MDUEシリーズ機に適用した冷却水分流サイクルを示す。
High performance absorption chiller cycle (Separated flow system of cooling water)

図6に示すように吸収器中間の冷却水を、低圧側の吸収器と凝縮器に分流する冷却水の流し方を採用し、吸収器、凝縮器の管内性能と、圧損の関係を最適化し、高性能化を図った。

3.3.2 熱交換器の高性能化

(1) 高性能伝熱管の採用

吸収器に高性能型台形針状フィン管を、蒸発器に高性能針状フィン管を、それぞれ採用し伝熱性能向上を図った。

(2) 高性能管群の採用

吸収器、蒸発器の高性能化のためにCFDを用いて管群形状の最適化を実施した。吸収器における熱・物質移動現象を考慮し、蒸発器管群を含めた蒸気流れの影響をモデル化した解析コードを用いて、吸収器・蒸発器内部流動分布の影響を評価した。図7に解析結果の一例を示す。

3.3.3 高信頼性の実現

検証された伝熱・流動解析、構造解析等のシミュレーション技術を適用し、大型機で顕著となる熱交換器内部流動分布、構造強度の影響を評価し、機器の高信頼性を実現させた。

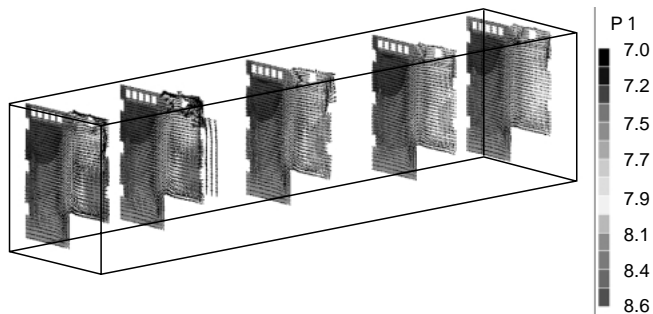


図7 吸収器・蒸発器内部流動解析結果 CFDによる吸収器 / 蒸発器内の流動分布及び圧力分布解析結果例を示す。
Example result of CFD in absorber and evaporator

表4 MDUE 2 500 USRt機性能試験結果
The performance test result of the MDUE 2 500 USRt model

		仕様値	計測値	
冷凍能力	USRt	2 500	2 505	2 503
蒸気消費率	kg/h・USRt	3.9	3.80	3.74
蒸気消費量	kg/h	9 750	9 530	9 360
冷水入口温度		14	14.0	14.1
冷水出口温度		6	6.0	6.1
冷水流量	m ³ /h	945	947	952
冷却水入口温度		32	32.0	31.9
冷却水出口温度		40	39.9	39.8
冷却水流量	m ³ /h	1 680	1 682	1 680

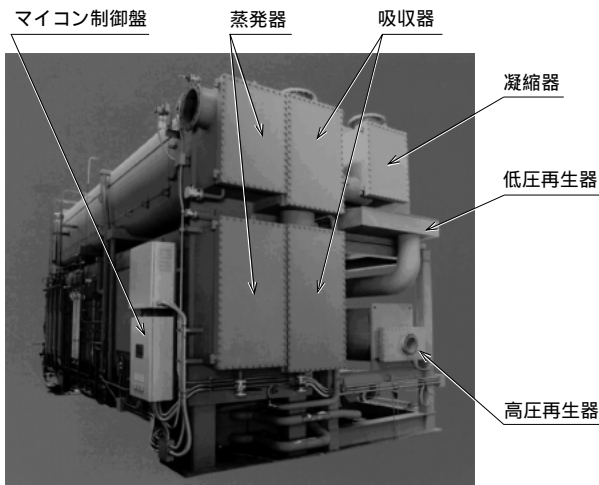


図8 MDUE 2 500 USRt機外観 開発したMDUEシリーズ2 500 USRt機の外観を示す。
The external view of MDUE 2500USRt model

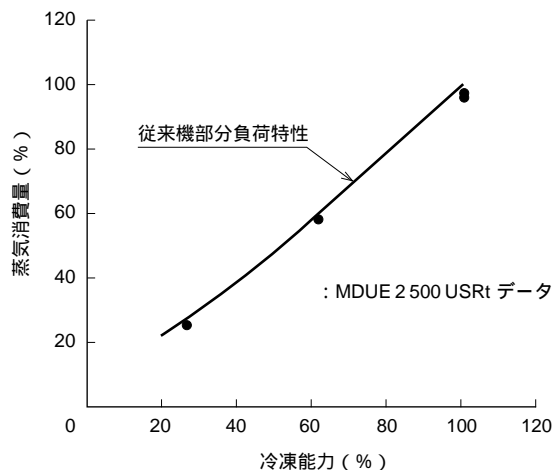


図9 MDUE 2 500 USRt機部分負荷特性 開発機の部分負荷特性が従来機と同等であり、部分負荷においても良好な性能であることを示す。
The partial load data of the MDUE 2 500 USRt model

(1) 伝熱流動解析

吸収冷凍機を構成する各熱交換器では前述の解析コードを用いて内部の流動状況を定量的に予測し、管群内の抽気位置の最適化や、管群圧損低減、キャリアーオーバー防止等の、機器の高信頼性を実現させた。

(2) 流動解析

コンパクトな低圧再生器を実現するため、入口の溶液のフラッシュ部に組み込むサイクロン型気液分離器を設計し、流動解析で性能を検証の上、搭載した。

(3) 構造強度解析

シェル等を始めとする各部の構造部材の構造解析を実施し、各部の応力値が基準値内であることを確認し、信頼性を検証した。

3.4 検証状況

本開発では計画、設計の最終確認として1 000 USRt機を試作し、性能、制御性、抽気等の検証を行った後、平成13年4月より販売を開始した。その後初号機として2 500 USRt機を受注し、工場での性能検証後平成13年10月に客先に納入している。2 500 USRt機の外観を図8に示す。2 500 USRt機の性能検証試験結果を表4に示す。冷凍能力は仕様の2 500 USRtを満足しており、蒸気消費率は仕様の3.9 kg/h・USRtに対し、2.5 ~ 4.0%上回る3.74 ~ 3.80 kg/h・USRtを確

認した。また、図9に示すように部分負荷においても良好な性能を確認した。さらに試作機と同型の1 000 USRt機についても受注機による性能検証試験を行い、仕様能力における蒸気消費率は3.80 kg/h・USRtを上回る性能を確認している。

以上のようにMDUEシリーズは1 000 USRt及び2 500 USRt機の性能確認を終え、基本計画及び設計手法の妥当性を確認することができた。

4.むすび

新しく開発した地域冷暖房用高効率大容量吸収冷凍機は高効率の吸収サイクル、CFDを用いた熱交換器の高性能化技術等最先端の技術を駆使した画期的な冷凍機である。本冷凍機は開発段階での綿密な計画と十分な要素試験での裏づけに基づき開発し、工場での十分な検証を経て製品化した信頼性の高い冷凍機である。この冷凍機の実用化により地域冷暖房システムの高効率化による運転費用の削減と設置スペースの削減が可能となるだけでなく、エネルギーの有効利用により地球温暖化対策にも貢献できるものと考えられる。

今後、この種高効率のエネルギー利用機器の普及促進が地球環境保存の観点から進むことを希望するとともに、更なる高効率機の開発を進めていく。