

エネルギー有効利用冷熱技術の開発

Development of Airconditioning and Refrigerating Technologies for Effective Use of Energy

技術本部 川田章廣*¹ 藤原 誠*²
緒方潤司*³
高砂製作所 角谷修二*⁴ 関 亘*⁵

地球環境対策への動きの中で、環境負荷低減型冷熱技術へのニーズが高まっている。当社は、従来から吸収冷凍機やターボ冷凍機の高効率化及び氷蓄熱や冷温熱の高効率輸送システムの開発に取り組んできた。吸収冷凍機ではCOP（成績係数）増大への基盤技術を確立したとともに、コージェネレーション排熱を有効利用する直置き吸収冷凍機を完成し、燃料投入量を10%削減した。ターボ冷凍機ではHFC134a機の部分負荷効率を30%向上した。また高効率の海水熱源ヒートポンプをシリーズ化した。蓄熱では大容量スタティック型及び過冷却水利用ダイナミック型氷蓄熱を実用化した。さらに氷スラリーやPCMスラリーによる冷温熱輸送の実証を終了し、従来冷水に比べ、約35%以上の経済性改善の見通しを得た。

Air conditioning and refrigeration technologies are needed to contribute to the global environment protection. We have developed large capacity chillers such as absorption type and turbo compressor type, ice storage systems and cool and heat transportation system. Direct fired absorption chiller has been developed for effective use of waste heat from cogeneration and has been clarified to need 10% less fuel consumption. Newly developed turbo chiller has more higher COP by 30% at 20% partial load than conventional one. High efficiency turbo heat pump utilizing sea water as the heat source has been verified through the actual site operation. Large capacity static type and dynamic type ice storage system using supercooled tap water has been developed and has been put into practical use. Heat transportation by ice slurry and PCM slurry have been verified its performance and ice slurry system is promised to be about 35% more economical than conventional chilled water one.

1. ま え が き

地球温暖化防止京都会議（COP-3）の結果を受け、省エネルギーと代替フロン削減の必要性が強く打出されている。このことは冷凍空調分野に対しても大きなインパクトであり、冷凍機の高効率化や電力負荷準化を目指した蓄熱システム、さらにはエネルギー有効利用の観点からコージェネレーションや未利用エネルギー利用システムなど環境負荷低減型冷凍空調システムへのニーズが加速的に増加するものと考えられる。

当社では、これまで吸収冷凍機、ターボ冷凍機などビル空調、地域冷暖房用熱源機の高性能コンパクト化や氷蓄熱システムの高効率化を実施してきた。

最近ではエネルギー有効利用の面から、コージェネレーション排熱利用吸収冷凍機及び未利用エネルギー利用技術としての自然熱利用ターボヒートポンプ、高効率熱輸送システムについて基礎技術開発と実証を終了した。

本報では、これら冷熱技術の開発内容とキーテクノロジー、今後の展開について紹介する。

2. 高効率冷凍機の開発

2.1 吸収冷凍機

ビル空調、地域冷暖房等に用いられる吸収冷凍機は、二重効用式が主流であり、効率は直置き式の場合HHV（高位発熱量）基準でCOP（成績係数）が1.0、蒸気式の場合蒸気消費率で4.3~4.4 kg/h・Rtが標準仕様である。近年地球温暖化防止の観点より、高効率化、排熱の有効利用のニーズが高まっており当社においても高効率吸収冷凍機、排熱利用型の吸収冷凍機の開発を積極的に進めてきておりこれらについて紹介する。

(1) 吸収冷凍機の高効率化

吸収冷凍機は7~8種類の熱交換器で構成され、高効率化は、熱サイクル及び各熱交換器の高性能化により達成される。

吸収器の高性能化は従来より高性能伝熱管の採用、界面活性剤によるマランゴニ対流の利用等検討されているが、ここでは管群の高性能化について述べる。

吸収器では蒸発器で発生した冷媒蒸気を連続的に吸収する機能が要求されるが、この蒸気の流れを最適化するなわち圧力損失をミニマムにする必要がある。このため当社では、管群形状を決定するために図1に示すような熱流動解析を実施し管群形状の選定を行っている。本熱流動解析ははん用の流動解析プログラムに蒸発器での冷媒の蒸発現象、吸収器での吸収現象を考慮できるようにしたものであり、管群形状と冷凍能力の関係が評価できる機能を有している。本解析手法で選定した管群形状（不等ピッチ管群、ハイブリッド管群等）は既に当社の実機吸収冷凍機に適用され高性能化、小型化に寄与している。

(2) 排熱利用型吸収冷凍機

最近ガスエンジン等の排熱を利用した吸収冷凍機のニーズが強く、東京ガス（株）と共同で排熱利用型吸収冷凍機（商品名：ジェネリンク）を開発した。

本冷凍機は排温水を補助熱源として投入することにより、燃料の投入量を10%削減することを可能としている。構成は図2に示すように、標準機に排熱投入用の熱交換器と排温水三方弁を付加することにより排熱の有効利用が可能となる。特に当社のシステムは、高機能マイコン盤により冷凍負荷制御と排温水の投入制御を一括制御することにより、低負荷まで安定した制御を可能とした点が特徴である。なお本吸収冷凍機は、平成9年度の“省エネヴァンガード21賞”を受賞した。

*1 高砂研究所燃焼・伝熱研究室主査

*4 新製品・新事業開発総括グループ主査

*2 高砂研究所燃焼・伝熱研究室長

*5 機械技術部冷熱機器設計課

*3 高砂研究所燃焼・伝熱研究室主務 工博

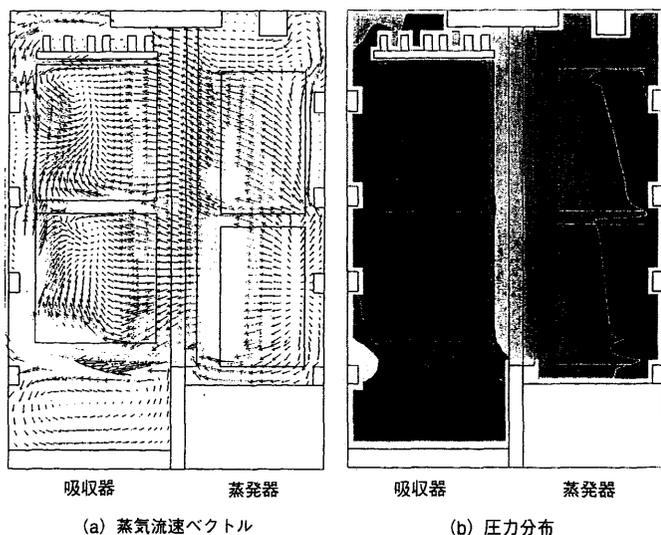


図1 吸収器と蒸発器の熱流動解析例 蒸発器で発生した冷媒蒸気が吸収器へ流入し吸収されるまでの流れを解析した例を示す。
Thermal and hydraulic analysis of refrigerant flow from evaporator to absorber



図2 排熱投入型直置き吸収冷凍機 従来型直置き吸収冷凍機に排温水熱回収用熱交換器と三方弁を付加している。
Direct-fired absorption chiller for heat recovery of waste heat from co-generation system

2.2 ターボ冷凍機・ヒートポンプ

ターボ冷凍機の高効率化に関し、標準シリーズ機の部分負荷特性改善事例及び未利用エネルギーの一つである海水を利用した大容量高温高効率ヒートポンプ実証機の事例を述べる。

(1) 部分負荷時効率の改善

一般ビル空調等で使用されるターボ冷凍機は真夏の一時期を除いて部分負荷で運転される時間が長いため、定格運転時のみならず部分負荷時の効率改善に対するニーズが増加している。

これに対し、当社では、部分負荷効率の改良機を開発検証し、市場投入した。

具体的な改善項目は、2段吐出ディフューザ幅制御、軸受損失低減、流体摩擦損失の低減、膨脹弁の制御などである。

実負荷運転の結果、従来機に比べ定格点で3%、また、20%部分負荷運転点で30%の効率向上を確認した。

(2) 未利用エネルギー活用ヒートポンプ

未利用エネルギーの活用事例も増加しており、福岡市、大阪市、富山市等で実プラントが稼働している。

表1 高温高効率ターボヒートポンプ実証機仕様
Specification of verifying model of high temperature and high efficiency turbo heat pump

	単位	暖房時	冷房時
能力	Gcal/h	1.397	—
能力	USRt	—	546
温水温度	℃	50 → 70	—
冷水温度	℃	12 → 5	11 → 3.8
冷却水温度	℃	—	28.5 → 33.5
COP		3.0 (暖房)	5.0 (冷房)

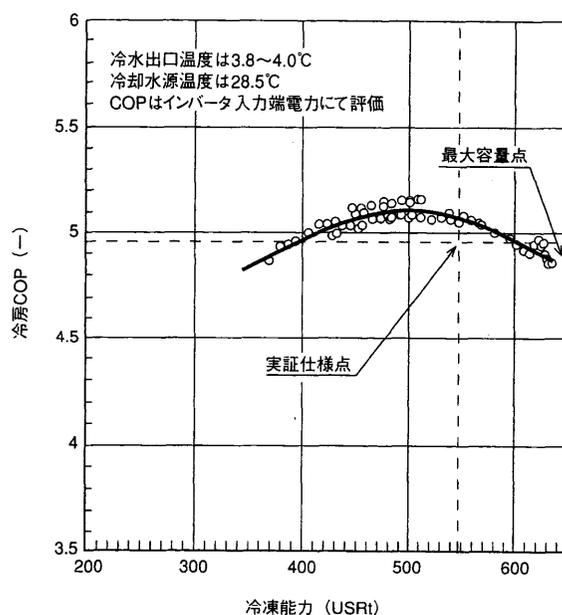


図3 冷房運転結果 ターボヒートポンプの冷房運転の結果、開発目標のCOP 5をクリアした。
Result of cooling mode operation of turbo heat pump

新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が主体となって地域冷暖房プラント用として、海水などの未利用エネルギーを熱源に用い、70℃の高温水を高効率で取出せる26 Gcal/hクラスの大容量ターボヒートポンプの実用化を行った。高温高効率を実現するために代替冷媒 HFC 134 a を用いた背面向向4段圧縮式のヒートポンプ実証機を、実際の地域冷暖房プラントに設置し1年間の実証試験を行った。実証機の容量は1.4 Gcal/hで、冷房時及び部分負荷時最も最適な運転を行うため、インバータによる回転数制御を採用した。

実証機仕様を表1に、冷房時運転結果を図3に示すが、計画仕様をクリアする結果が得られた。

この成果を反映し最大容量26 Gcal/hまでのシリーズ化計画を完了した。

3. 蓄冷熱技術

電力の夏期ピーク負荷の約40%が冷房需要であるとされており、冷熱蓄熱は電力負荷平準化の効果的な対策の一つである。

夜間電力利用の冷熱蓄熱方式のうち、これまで実用化されている方式は、冷水や氷によるもの及びCFC (Chloro Fluoro Carbon) を使用したクラスレート方式⁽¹⁾がある。

ここでは、今後コンパクト性、取扱い性の面で最も普及することが予想される氷蓄熱に焦点を絞る。

氷蓄熱には製氷方式により大別してスタティック型とダイナミ

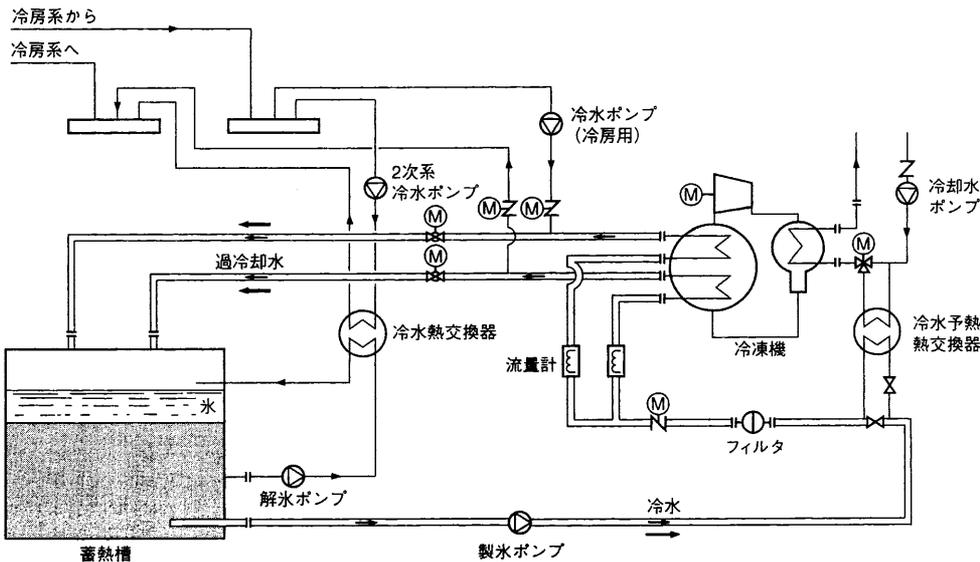


図4 ダイナミック氷蓄熱システム系統図 ターボ冷凍機の蒸発器を兼用した過冷却器で清水を過冷却し、その状態で蓄熱槽へ搬送した後、そこで過冷却解除させて氷にする。
System flow of dynamic ice storage system utilizing super cooled tap water

ック型があり、両方が既に開発され実用化されている。当社では、大容量の地域冷房用途にアイスオンコイル方式のスタティック型を、さらに製氷時高効率を特徴とする過冷却水型ダイナミック氷蓄熱システムの両者を開発した。

3.1 スタティック氷蓄熱

当社スタティック氷蓄熱システムの技術開発内容については前報⁽²⁾で報告した。神戸リサーチパーク向け4800RTH（蓄熱槽は全長19×全高4×全幅6m）ほか実用機での各種検証試験を通じ、大容量機で特に問題となりがちな融解時の水の解け残りによる有効利用率低下の回避方法の検証、また精度の高い放熱量、蓄熱量の予測手法の整備を行った。

3.2 ダイナミック氷蓄熱システム

当社では、製氷能力90Rtのダイナミック氷蓄熱システムを当社伊豆高原クラブで運転中で今年で4年目である。図4にダイナミック氷蓄熱システムの系統例を示す。

冷凍機の蒸発器部分を過冷却器として、ここで過冷却水を製造する。

過冷却水は配管を流れ、蓄熱槽に運ばれ、そこで過冷却解除（氷と水に分離）する。

実用機での過冷却水の温度は-1~-2℃程度であり、これをさらに低い温度で実用化するため、研究開発を実施中である。

4. 熱輸送システム

地域冷暖房は、未利用エネルギーの利用促進による大気汚染の防止及び電力負荷の平準化等への効果が大きいが、普及の課題の一つに、熱供給コストの低減がある。特に、熱供給プラント建設費の約30%を占める配管敷設費の低減が必要である。このため、所要熱量を小口径の配管で輸送できかつ輸送動力を低減できることをねらった高密度熱輸送システムの開発を、通商産業省資源エネルギー庁の支援を受けて推進している“未利用エネルギー高度活用負荷平準化冷暖房技術開発”の一環として、NEDO、(財)ヒートポンプ・蓄熱センター及び中部電力(株)と共同で実施してきた。

高密度熱輸送システム概念を図5に示す。

本システムでは、氷や相変化物質（以下、PCMと称す）と水とを混合した固液混合物（スラリー）を配管に流す方式により熱輸送密度を高めて配管径を縮小し、設備費や輸送動力を削減する。

当社高密度熱輸送システムのうち、氷スラリーによる冷熱輸送の開発内容については、前報⁽³⁾で報告している。

前記のような水とのスラリーによる熱輸送の場合、スラリーの1m³当り熱輸送量は次式で表され、潜熱が大きい媒体を使用することが不可欠である。

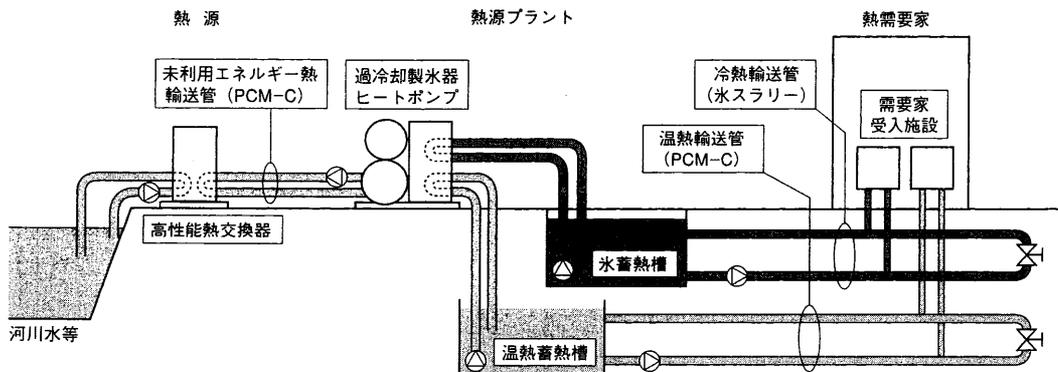


図5 高密度熱輸送システム概念 冷熱輸送に氷スラリーを、温熱輸送及び河川水など未利用熱輸送にPCM-Cスラリーを使用したシステムの概念を示す。
Schematic diagram of high density cool and heat transportation system

冷熱輸送システム経済性評価 (熱搬送系+熱源設備系)
水スラリー IPF=15%

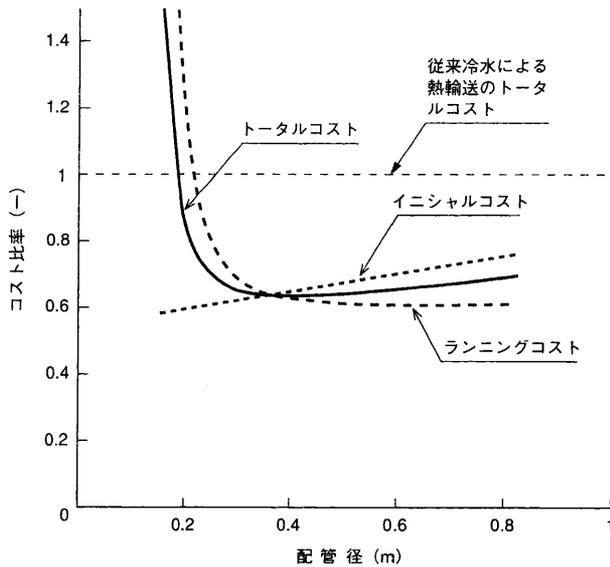


図6 高密度熱輸送システムの経済性試算結果 水スラリーによる冷熱輸送の場合、従来冷水に比べトータルコストが約65%になる。
Trial calculation result of economical effect by ice slurry cool transportation

$$\text{熱輸送密度} = \gamma_w (1 - PF) c_{pw} \Delta T + \gamma_m PF (L + c_{pm} \Delta T) \quad (\text{kcal/m}^3)$$

ここで、

γ_w : 水の比重量 (kg/m^3)

γ_m : 氷又はPCMの比重量 (kg/m^3)

PF : 氷やPCMの体積割合 (-)

[特に氷の場合 IPF (Ice Packing Factor)]

c_{pw}, c_{pm} : 水, PCM単体の比熱 ($\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)

ΔT : スラリの温度変化幅 ($^\circ\text{C}$)

L : 水, PCM単体の融解(凝固)潜熱 (kcal/kg)

4.1 冷熱輸送

冷熱輸送では、夜間にダイナミック製氷により蓄熱槽に貯蔵した微細な氷と水を混合した氷スラリーを使用する。氷スラリー輸送の場合、当初圧力損失増大による搬送動力増加や氷の閉そくが懸念されたので、実用口径 ($\phi 25 \sim 100 \text{ mm}$) の配管要素を使用した各種要素試験により搬送ノウハウを得た。さらにファンコイルユニットや分岐、曲りなどを含む往復 200 m の管路による実証試験で、 $IPF 15 \sim 25\%$ の氷スラリーを連続 10 時間搬送して実験棟内の冷房 (最大負荷 40 Rt) に供し、冷水 (温度差 7°C) 対比 3.4 倍 (熱輸送密度 23.8 Mcal/m^3) の性能を検証した。上記結果に基づき従来システムと経済性を比較した結果を図6に示す。冷房負荷 $3.4 \times 10^7 \text{ kcal/h}$ (延べ床面積 $40\,000 \text{ m}^2$ を想定、約 11 000 Rt)、配管長 1 000 m、耐用年数 15 年を前提として試算した例である。

これによると配管口径約 400 mm 付近に経済効率最高点があり、トータルコストは従来熱輸送対比約 65% となる結果が得られた。

4.2 温熱輸送

未利用エネルギーと温熱の輸送では、パラフィン合成樹脂皮膜で被覆した直径 1 ~ 数 μm の PCM マイクロカプセルを水に混合

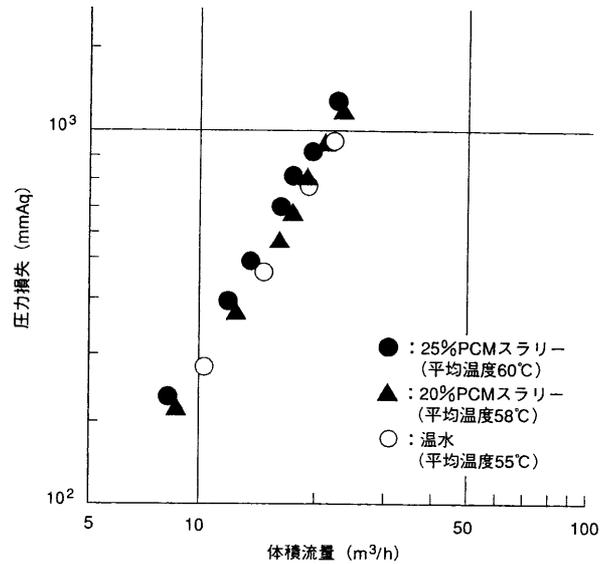


図7 PCM-C スラリーの圧力損失測定結果 PCM-C スラリーの温熱輸送温度 60°C レベルでの配管内圧力損失は、 $PF 25\%$ まで温水と大きく変わらない結果を得た。
Test result of pressure drop of PCM-C slurry

した PCM カプセルスラリー (PCM-C スラリー) を用いる。図7に PCM-C スラリーの温熱輸送温度 60°C レベルでの配管内圧力損失を示す。 $PF 25\%$ まで温水と大きく変わらない結果を得た。なお、実証試験での PCM-C スラリーの熱輸送量は温水 (温度差 5°C) の約 1.6 倍であった。また PCM カプセルの耐久性は、加熱冷却による凝固融解を伴う配管内を長時間 (約 70 000 ~ 100 000 サイクル以上) 流動させる試験により、実用上問題のないレベルにあることを確認した。

5. まとめと今後の課題

地球環境改善に寄与する冷熱技術として、当社で取組んでいる主要項目を概説した。これら技術の更なる普及のためには、ニーズに見合った効率、サイズを持つ冷凍機、システムの開発及び信頼性、経済性の一層の向上が課題である。環境負荷低減型指向が一層強まっている現在、冷凍機単体の高性能化、小型化、低 NO_x 化などの推進とともに、コージェネレーション、蓄熱、熱輸送などを、その作動特性と需要側特性を勘案して効果的に組み入れたシステム構築が不可欠となる。

当社はこれまで吸収冷凍機、ターボ冷凍機の技術開発並びに地域冷暖房への熱源機供給を多く手掛けてきた実績を生かし、ユーザーに適合した冷熱製品の開発、製品化を通じ、地球環境問題の改善に貢献していきたい。

参考文献

- (1) 中沢, クラスレート蓄熱式空調ユニット, 三菱重工技報 Vol.26 No.3 (1989) p.273
- (2) 川田ほか, 大容量氷蓄熱システムの開発, 三菱重工技報 Vol.35 No.2 (1998) p.124
- (3) 角谷ほか, 大容量地域熱供給システムの開発, 三菱重工技報 Vol.33 No.2 (1996) p.114