

大容量超低温冷却装置の開発

Development of Ultra-low Temperature Refrigeration Unit with Large Capacity

要旨

非共沸混合冷媒を使用した大容量の超低温冷却装置NeoCold RCT760を2006年4月に商品化した。この商品は、塩素原子を含まずオゾン層を破壊しない冷媒成分のみを使用したシリーズの2機種目であり、先行の下位機種と装置寸法も、圧縮機も同一としながら、冷却能力や効率を大幅に向上させた。

本報では、主に混合冷媒システムにおける冷媒混合比率などの設計因子と冷却能力などとの関係、このシステムの特徴などについて報告する。

ABSTRACT

We commercialized the NeoCold RCT760 Ultra-low Temperature Refrigeration Unit with large capacity using zeotropic mixed refrigerants on April 2006. This product is the second model of the series that contains no chlorine atoms and uses only refrigerant components causing no destruction of the ozone layer. Its system dimensions and compressor are the same as those of the earlier lower-class model, but its cooling capability and efficiency are substantially improved.

This report mainly describes the relationship between design factors such as the mixing ratio of refrigerants in the mixed refrigerant system and the cooling capability, as well as the features of this system.

1 まえがき

現在、産業界のさまざまな場面で環境負荷低減のための取り組みが進められている。なかでも特に、オゾン層保護や地球温暖化防止に関するものは急務であるといわれている。

当社では、1980年代末から -100 ~ -150 に到達する超低温冷却装置を製造、販売しており、これらには、フロン系の数種類の物質を含む非共沸混合冷媒を使用してきた。また、オゾン層保護のためのフロン類の規制に従って、使用する冷媒の成分を適宜変更してきた¹⁾。2004年4月には、塩素原子を含まずオゾン層を破壊しない成分のみを使用したNeoCold RCT752 (以下、RCT752) を業界に先駆けて発売した。また、2006年4月には、RCT752をベースとして冷却能力および効率を向上させた大容量機種であるNeoCold RCT760 (以下、RCT760) を商品化した²⁾。

本報では、当社の超低温冷却装置NeoColdの概要と、RCT760の開発について報告する。

2 超低温冷却装置の概要

2-1 超低温冷却装置の真空成膜装置への設置例

今回報告する超低温冷却装置は、真空成膜装置の一要素機器であり、真空槽内の水蒸気を捕集するためのトラップを冷却する用途に使用される。本冷却装置をレンズの光学膜や自動車用部品の装飾膜などを形成する真空成膜装置に用いると、タクトタイム短縮や薄膜の品質向上がはかれる。真空成膜装置への設置例を図1に示す。



八木 昌文*



清水 眞正*



高橋 正幸

*開発センタ

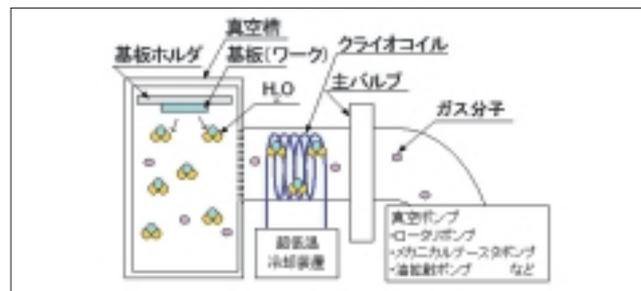


図1 超低温冷却装置の設置例

トラップとしてのクライオコイルは、高真空中に保たれる空間領域内に設置される。クライオコイルは銅などの金属管で形成され、両端は超低温冷却装置の冷媒供給口と戻し口に直結される。クライオコイル表面は、内部を流れる冷媒により超低温域まで冷却され、真空排気時の残留ガスの主成分である水蒸気³⁾を捕捉する。

クライオコイル表面に保持できる水分量には限界があるので、表面に堆積する霜状の水を定期的に除去するための昇温が必要である。また、バッチ式の真空成膜装置では、バッチごとに真空槽を大気開放するので、クライオコイルを常温まで短時間で昇温する機能が必要となる。本冷却装置には、クライオコイルを短時間で昇温するデフロスト機能を備えるタイプがラインアップされている。昇温は、超低温冷媒のクライオコイルへの供給を遮断し、代わりに圧縮機吐出直後の高温のガス状冷媒を供給することで行う。

2-2 超低温冷却装置の仕様

近年、真空槽の大型化や樹脂ワークの増加傾向により、1バッチあたりに必要な水分除去量が増えている。そのため、

クライオコイルおよび、超低温冷却装置には、より大きな水分除去能力が要求されるようになってきた。真空槽内の水蒸気排気速度は、分子流状態の水分子の冷却面への入射しやすさに依存するので、クライオコイルの表面積に比例すると考えられる⁴⁾。一方、クライオコイルへの入熱は周囲からの輻射が主であり、その量も表面積に比例すると考えられる。そのため、水蒸気排気速度を高めるためにクライオコイルを大きくすると、それに用いる冷却装置には、入熱が増える分大きな冷却能力が要求される。通常の真空成膜装置においては、冷却装置のクライオコイル冷却能力は、入熱の数倍程度とすることが多い。その理由は、冷却能力に余裕を持たせると、所定温度まで短時間で冷却でき、また、熱負荷に変動が生じても安定した温度に保つことができるからである。このことをふまえ、RCT760の標準クライオコイルのサイズと冷却能力を決定した(表1)。この仕様に対し、RCT752をベースとして冷却能力向上のための改良を加えることにより、達成することとした。両機種の主な仕様の比較を表1に示す。また、RCT760の外観を図2に示す。

表1 超低温冷却装置の主な仕様

型 式	RCT752	RCT760
外形寸法 [mm]	W900×D665D×H1,630	
質量 [kg]	450	460
電源	3 200V 50/60Hz	
圧縮機出力 [kW]	5.5	
サイクル	4段気液分離混合冷媒サイクル	
冷媒	非共沸7種混合冷媒	
到達温度 [°C]	- 140	
冷凍機油	エステル系合成油	
冷却能力 [W]	900(- 120)	1,200(- 120)
標準クライオコイル面積 [m ²] (体積)	0.5 (1.22×10 ⁻³ m ³)	0.7 (2.13×10 ⁻³ m ³)



図2 RCT760外観

2 - 3 冷凍サイクルと冷媒

非共沸混合冷媒は、単一冷媒とは異なり、一定圧力下に

おいても組成や相比率とともに温度が変化し得ることから、超低温冷却装置への適用が有効である⁵⁾。今回報告する超低温冷却装置では、常温域から超低温域の沸点をもつ数種類の冷媒を混合した独自のHFC (HydroFluoroCarbon) 系非共沸混合冷媒を使用している。

本冷却装置の冷凍サイクルを図3に示す。本冷却装置の核となる熱交換器ユニットの構成は、複数の気液分離器、熱交換器、高圧側と低圧側を隔てる減圧器(キャピラリチューブ)からなる。

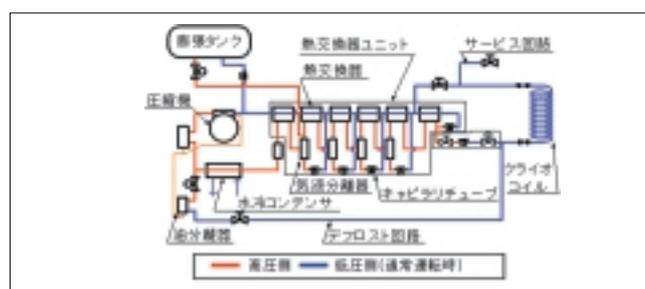


図3 冷凍サイクル

圧縮機から高温・高圧のガスとして出た冷媒は、水冷コンデンサにより常温付近まで冷却され、沸点の高い成分を中心に一部が液化される。気液二相となった冷媒は、気液分離器で気相と液相に分離される。気相冷媒はつぎの熱交換器の高温側(高圧側)に導かれ、液相冷媒は減圧され温度が降下した後に同じ熱交換器の低温側(低圧側)に導かれる。熱交換器では相互に熱交換が行なわれ、低温側冷媒は減圧されたことにより低温で蒸発し、効率よく高温側冷媒を冷却してその一部を液化させる。再び気液二相となった高温側冷媒は、次の段の気液分離器で相分離され、前述と同様な過程を繰り返す。このようにして高圧側の冷媒は次第に低温化し、最終のキャピラリチューブで減圧されることにより、- 150 以下にも達する超低温の冷媒となる。

当社において非共沸混合冷媒に採用した物質の変遷を表2に示すが、上の行にあるほど沸点の高い物質である。

CFC系使用時	HCFC系使用時	現 在
CFC-11	HCFC-141b	HFC-245fa
CFC-12	HFC-152a	HFC-134a
CFC-13	HFC-23	HFC-23
FC-14	FC-14	FC-14
-	-	Kr
CH ₄	CH ₄	CH ₄
Ar	Ar	Ar

表2 使用冷媒の変遷

最も高沸点の成分の選定は、高圧下で常温の冷却水により凝縮可能となるように標準沸点(大気圧下での沸点)が20前後のものを選ぶ。最も標準沸点が低いのは - 186 のアルゴンであり、成分間の最大の標準沸点差は200以上となる。その間隔をほぼ等間隔に区切るように他の成分の種類と数を決定する。なお、非共沸混合冷媒は、成分や合計封入量が同じであっても、混合比率次第で性状が大きく変化する。そのため、圧縮機や熱交換器などの機器の条件が一定であっても、冷媒の条件次第で性能は変化する。成分の数が増えるほど冷媒選定の自由度は高くなり、所定の到達温度や冷却能力を得るための冷媒の構成は幾通りも存在し得る。その中で、効率や圧縮機の吐出温度・圧力のような他の特性も総合的に考慮し、最適な比率と封入量を決定する。

③ 冷却能力向上策の検討

RCT752を試験機として用い、どの程度冷却能力向上の余地があるかを見極める試験を行った。サイクルの構成と圧縮機は変更しないものとし、変更する因子は、冷媒の量、混合比、キャピラリチューブの流れ抵抗とした。また、クライオコイルのサイズを大きくすることの影響、および必要な対策についても検討した。

3-1 試験装置の構成

試験装置の構成を図4に示す。熱負荷を定量的に与えるため、試験機には断熱された銅管製のクライオコイルを接続し、クライオコイルには電気ヒータを接触させ、その電力を調整する構成とした。試験装置の冷却能力は熱負荷とクライオコイルの平均温度の相関で評価することとし、試験装置に供給する冷却水はRCT752の標準と同じの水温25、1時間あたりの水量0.9m³とした。

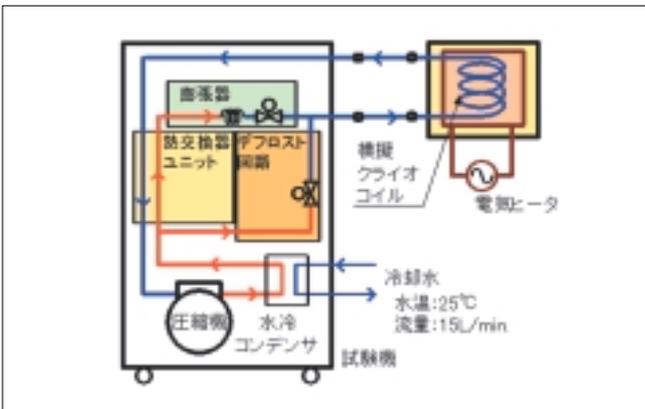


図4 試験装置

3-2 混合冷媒封入量と混合比の検討

混合冷媒の封入量と混合比を変化させたときの、冷却能力への影響を確認したことについて述べる。試験用冷媒の構成例を図5に示す。冷媒AはRCT752標準組成のもの、冷媒Bは冷媒総量を減らし低沸点冷媒の組成比を多くしたものの、冷媒Cは冷媒Bの低沸点冷媒のみを増量したものである。これらを用いた試験結果のうち、冷却性能曲線を図6に、圧縮機吐出圧力を図7に示す。

図7より、いずれの冷媒構成でも熱負荷と吐出圧力は概ね比例関係にあるが、高負荷域においてコイル平均温度と吐出圧力がともに急上昇する傾向にある冷媒Aに対し、冷媒B、およびCでは安定している。このような傾向は低沸点冷媒の比率に関係しているためと見ることができ、ある程度低沸点冷媒の比率を上げることが吐出圧力の安定に有効と考えられる。

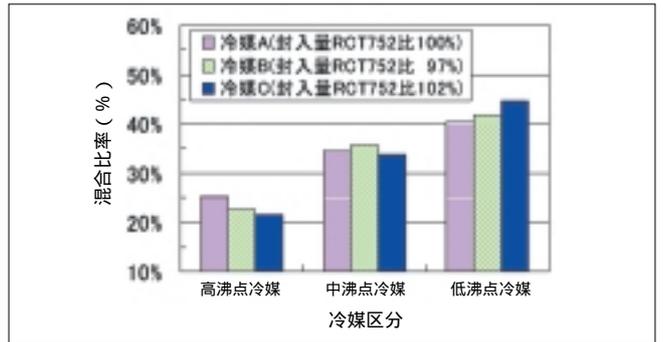


図5 試験冷媒構成例

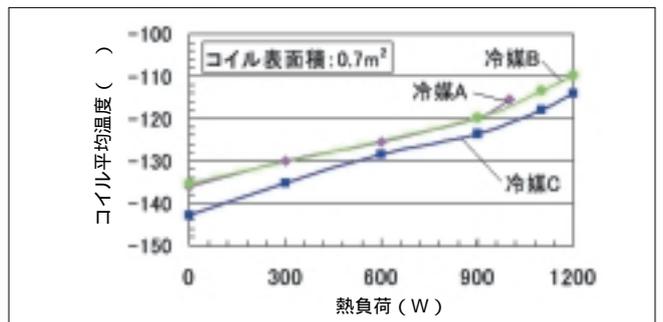


図6 試験結果 (熱負荷 - コイル平均温度)

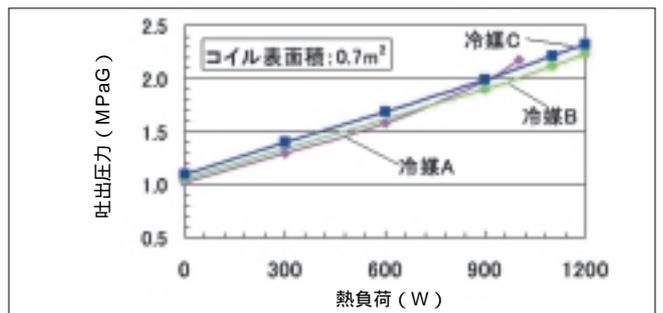


図7 試験結果 (熱負荷 - 吐出圧力)

図6より、冷却能力の向上には、冷媒総量、特に低沸点冷媒の増量が有効であると言える。ただし、吐出圧力や吐出温度の上昇を招く傾向があるので、それらとのバランスを考慮する必要がある。製品化の段階では、圧力や吐出温度などの値を装置の信頼性を確保できるレベルに収める必要がある。当社が本製品に適用する基準を表3に示す。

表3 温度・圧力の基準

項目	基準
圧縮機吐出温度〔℃〕	130以下
圧縮機吐出圧力〔MPa〕	ゲージ圧2.5以下
圧縮機吸込圧力	負圧にならないこと

3-3 キャピラリチューブの検討

キャピラリチューブの長さや内径を変更すると、流れ抵抗の変化により流量が変化する。流量の変化に応じてその段の冷却能力が変化し、また同時に温度降下幅が変化する。単一成分の冷媒として広く使われるHCFC-22などでは、キャピラリチューブの長さや内径から冷却能力の目安を得るための線図が整備されている⁶⁾。しかし、混合冷媒の場合、流量が変化すると混合比率や物性も変化するの、キャピラリチューブの寸法から冷却能力を予測することは困難である。また、本シリーズの構成では、1本のキャピラリチューブを変更するとサイクル全体に複雑な変化をもたらすと考えられる。そのため、実験により1本ごとに最適化することも困難と予想されるので、本検討では、気液分離器後の4本のキャピラリチューブについて、下記のパラメータが一定の比となるように寸法を変更し、その影響を評価した。このパラメータは、キャピラリチューブのある寸法に対する前述の文献⁶⁾のHCFC-22の線図から読み取れる冷却能力である。ここでは、RCT752のキャピラリチューブの寸法における値をQ(W)として表すこととする。以下ではこのパラメータをキャピラリ容量と称す。

キャピラリ容量を変化させた場合の冷媒封入量とクライオコイルにおける冷却能力の関係を図8に示す。横軸はRCT752の冷媒封入量に対する封入量比(%)であり、縦軸はクライオコイルの平均温度が-120℃となる時の熱負荷の値(W)である。模擬クライオコイルは、RCT752の標準である表面積0.5m²のものと、開発仕様の0.7m²のものとを比較するため併用した。冷媒の混合比率は前節の冷媒Cと同一とした。また、図9には、各条件での圧縮機の吐

出圧力を示す。

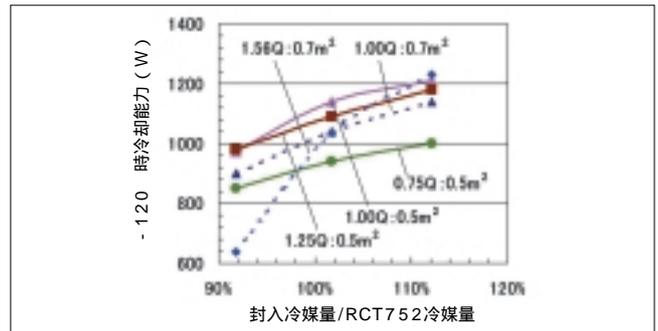


図8 キャピラリ容量・封入量と冷却能力

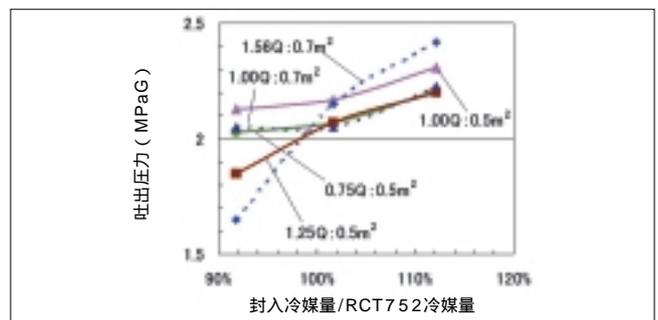


図9 キャピラリ容量・封入量と吐出圧力

図8より、クライオコイルが0.5m²の場合、キャピラリ容量0.75Qでは、1.00Q(RCT752仕様)の場合と比較して、冷却能力が大幅に低下していることが分かる。この条件ではキャピラリの流れ抵抗が大き過ぎることにより、各熱交換器の低温側の液冷媒が不足し、十分な冷却が行われなためと考えられる。1.25Qの場合も若干低下する結果となったが、これはつぎのように考えられる。キャピラリの流れ抵抗が小さくなったことにより各熱交換器での冷却は改善され、0.75Qの場合より冷却能力は向上した。しかし、全体の冷媒循環量がさほど増えないまま上流側のキャピラリの流量が増えたため、クライオコイルの冷媒流量が減少し、冷却能力が低下した。なお、図9に見られるように、1.25Qの場合は、1.00Qより吐出圧力に余裕があり、冷媒の低沸点成分の比率を増すなどの方法で冷却能力向上の余地が残っていると考えられる。

クライオコイルのサイズの違いについては、キャピラリ容量1.00Qの場合で比較すると、0.7m²では0.5m²より冷却能力の低下が見られる。これは、クライオコイルの内容積が増えた分、低沸点冷媒の滞留量が増え、低温部で熱交換に寄与する冷媒が減少したためと考えられる。また、クライオコイル内の気相冷媒の体積比が増して伝熱を阻害することも原因の一つとして考えられる。以上のことから、クライオコイルを大きくする場合には、つぎの対策が有効と言える。

- (1) 低温部の冷媒循環量を増やすために、低沸点冷媒を増量する。
- (2) クライオコイルでの液冷媒の比率を高めるために、キャピラリチューブの調整などにより各熱交換器での冷却能力を改善する。

0.7m²のクライオコイルにおいてキャピラリ容量を1.56Qとした場合、冷媒量が増すにつれて冷却能力の大幅な向上が見られた。これは、キャピラリの流れ抵抗の減少と冷媒封入量の増加が相まってクライオコイルを含めた全体の循環量が増加したことによるものと考えられる。この条件において冷媒封入量を増やした場合、上述の対策(1)(2)と同等の効果が得られたものと考えられる。

図8に示す条件のうち、キャピラリ容量1.56Q、封入冷媒比112%、クライオコイル表面積0.7m²の場合の予備試験結果の詳細を図10に示す。ここには、冷却性能曲線、および熱負荷と吐出圧力の関係を示す。冷却性能は表1の仕様を満たし、吐出圧力をはじめとして、表3の特性にも基準を満たす。しかし、製品化にあたっては、吐出圧力と冷媒封入量のさらなる低減を目指すこととした。

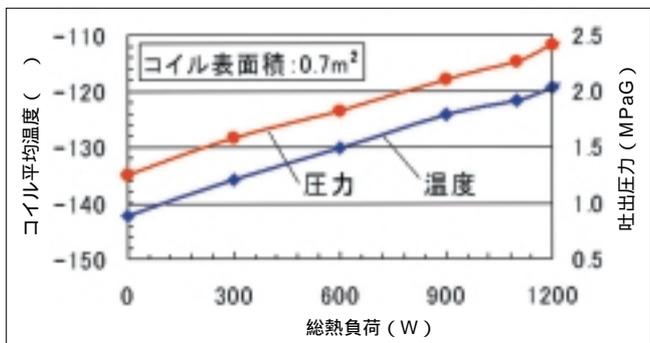


図10 予備試験結果

4 製品試作と開発結果

予備試験結果を受けて、RCT760の試作機を製作した。本試作機において、表1の仕様を満たしつつ前節の課題を達成するため、つぎの改良と調整を行った。

- (1) 混合冷媒の封入量と混合比率の調整
- (2) クライオコイル直前のキャピラリチューブの調整
- (3) 真空断熱材の採用による熱損失の抑制
- (4) 圧縮機モータ冷却、および吐出温度低減のための液インジェクション回路キャピラリチューブの調整

4-1 最終調整結果

RCT760試作機では、熱交換器ユニットへの侵入熱を低

減して効率を向上させるため真空断熱材を採用した。また、冷媒封入量を低減しながらクライオコイルへの冷媒循環量を確保し、併せて圧縮機吐出圧力も低減するため、コイル直前のキャピラリチューブを調整した。このような機器側の変更に伴い、混合冷媒の最適バランス点は常に変化するので、冷媒の再調整が必要となる。今回の場合、クライオコイルの到達温度の上昇を招いたため、低沸点冷媒を増量した。一方、圧縮機吐出温度が許容レベルを超えないことを確認しながら高沸点冷媒の低減を行った。また、吐出温度抑制のために液インジェクション回路の見直しも併せて行った。

決定した冷媒の混合比率を、RCT752と予備試験時点のものとの比較を図11に、また、それぞれの冷却性能曲線を図12に、圧縮機吐出圧力を図13に示す。これらの改良・調整の結果、1,200W以上の高負荷域において圧縮機吐出圧力は0.1MPa以上低減され、冷媒封入量は約33%低減された。冷却能力も若干向上する方向となった。

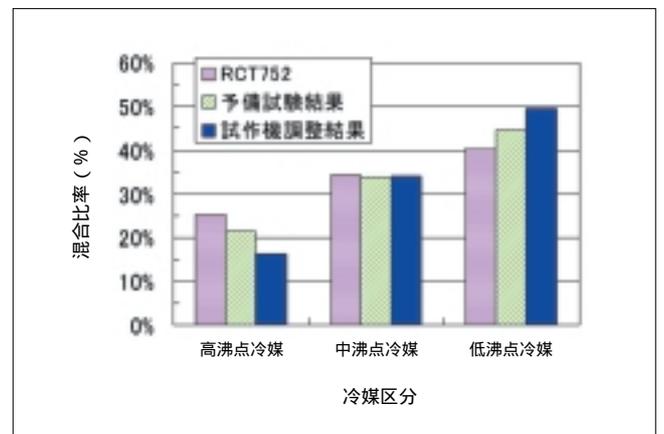


図11 冷媒組成比の変化

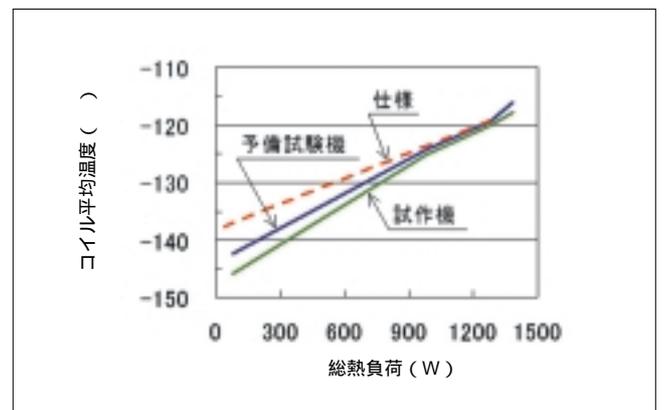


図12 最終結果(熱負荷 - コイル平均温度)

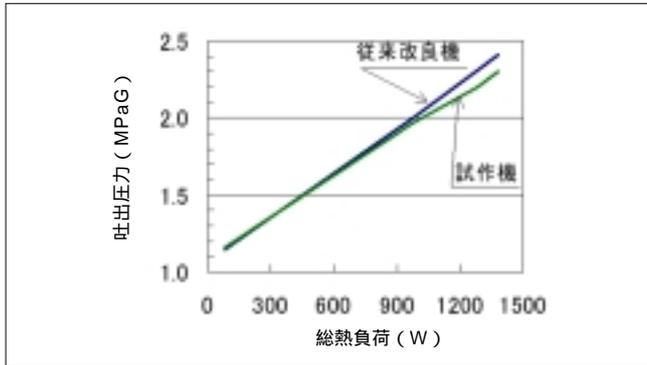


図13 最終結果(熱負荷 - 吐出圧力)

4 - 2 従来機種との比較

今回開発したRCT760と、従来機種RCT752および、1993年に開発した当社のHCFC系冷媒を用いた同クラス冷却装置RCT-75との概略比較を表4に、冷却性能の比較を図14に示す。

表4 機種比較

	RCT-75	RCT752	RCT760
圧縮機出力 [kW]	5.5		
圧縮機吐出量 [%]	104	100	100
標準コイル表面積 [%]	22	71	100

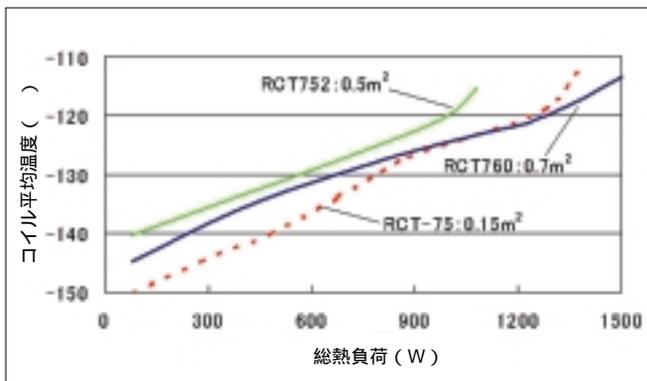


図14 冷却能力比較

表4に示すとおり、RCT-75はRCT760に比べ圧縮機吐出量が大きく、標準クライオコイルの表面積は小さい。これらの点から見ると、クライオコイルの冷却能力を高めるにはRCT-75の方が有利な条件であったと考えられる。しかし、低負荷域ではRCT-75の方が低温に達するものの、指標となる - 120 近傍では、RCT760のほうが高い冷却能力を得ている。両者の違いとしてRCT-75は、到達温度を下げる方向で調整された結果、クライオコイルを含む低压側の圧力が低くなり、冷媒循環量が抑えられたと考えられる。これに対し、RCT760は、キャピラリ容量を増した結果、低压側圧力が上昇して循環量が増し、それが冷却能力向上につながっ

たとえられる。

これらの機種のコイル平均温度が - 120 時のCOP(Coefficient Of Performance : 冷凍機の効率を示す値で、消費電力に対する冷却能力の比)を表5に示す。RCT760は、侵入熱対策の強化や圧縮機負荷の抑制を重視した冷媒などの調整の結果、従来機種と比較して効率が大幅に向上していることが分かる。

表5 COP比較

	RCT-75	RCT752	RCT760
コイル - 120 時のCOP	0.149	0.151	0.167

5 あとがき

非共沸混合冷媒を用いた超低温冷却装置で、従来機種よりも冷却能力と効率を向上させた大容量機種を開発した。装置寸法と圧縮機を先行の下位機種と同一としながら、冷媒封入量と混合比率とキャピラリ容量に重点を置いて検討し、目標仕様を達成した。また、記述してはいないが、信頼性に関わる他の特性も満足することができた。

また、今回の開発をとおして、混合冷媒サイクルにおけるキャピラリ容量や冷媒などの多数の設計因子と、冷却性能や他のさまざまな特性との関係を把握することができた。

本商品は、現在稼働中の規制冷媒を使用した超低温冷却装置と問題なく置換えることができ、オゾン層を破壊しない冷媒成分のみを使用しているため、今後、広く市場に普及することを期待している。

参考文献

- 1) 池田昌彦：冷凍,68 (785),pp.73-76 (1993)
- 2) 高橋正幸,清水寛正,八木昌文,室谷育克：「超低温冷却装置の開発」,第40回空気調和・冷凍連合講演会講演論文集,pp.61-64 (2006)
- 3) 熊谷寛夫,富永五郎,辻泰,堀越源一：「真空の物理と応用」,第8版,pp.152-153,裳華房,東京 (1983)
- 4) 低温工学協会・関西支部,海外低温工学研究会,低温工学ハンドブック編集委員会 訳：「低温工学ハンドブック」,pp.338-340,内田老鶴圃新社,東京 (1982)
- 5) 日本冷凍協会編：「上級標準テキスト 冷凍空調技術」,pp.65-66,日本冷凍協会,東京 (1988)
- 6) 日本冷凍協会編：「冷凍空調便覧」,II巻,pp.139-140,日本冷凍協会,東京 (1993)