

HCFC-22 代替冷媒対応空調機の開発

Development of HCFC-22 Alternative Refrigerant Air Conditioners

エアコン製作所 鈴木 一弘^{*1} 五十住 晋一^{*2}
 鵜飼 徹三^{*3}
 技術本部 大関 茂樹^{*4} 伊藤 武司^{*4}

オゾン層保護対策の重要課題である、HCFC（塩素を含む冷媒）の削減は、モントリオール議定書による2020年の全廃に向けて国のレベルで推進中であり、エアコンとしては塩素を含まないHFC冷媒に切替える計画となっている。当社はこの代替冷媒対応を機にルームエアコン、パッケージエアコン共フルモデルチェンジを行い、圧縮機、インバータ、熱交換器等の高性能化とともにシステムとしてHCFC-22対応機と同等以上の性能、信頼性を確保したエアコンを開発した。

The reduction of HCFC (refrigerants, which containing chlorine), is a major task in protecting the ozone layer, and is underway on a national level with the target of completely abolishing the use of HCFCs by 2020, as stipulated in the Montreal protocol. As a consequence the air conditioner manufacturing industry has undertaken to switch to HFC (chlorine free refrigerants). Accordingly Mitsubishi Heavy Industries has totally changed its room and packaged air conditioners, with improvements to compressors, inverters, heat exchangers and other parts thereby developing air conditioners which have the same or higher efficiency and reliability than those using HCFC-22.

1. ま え が き

20世紀も残りわずかとなり、世界的に地球環境保全に対する気運が高まってきている。特に、空調業界を取巻く問題としては、オゾン層保護への対応が急務であり、既にカーエアコン用に使用されていたCFC (Chloro Fluoro Carbon) 系冷媒は、先進国において生産全廃となり、次は広く一般空調用に使用されているHCFC-22等のHCFC (Hydro Chloro Fluoro Carbon) 系の規制が始まる。

当社は、この規制に対応した代替冷媒を研究開発してきたが、空調用としてHFC (Hydro Fluoro Carbon) 系のR410AとR407Cを各々ルームエアコンとパッケージエアコンに採用することとし、代替冷媒における技術課題を克服するため、心臓部である圧縮機を始めとし、熱交換器、各機能品、システムコントローラ等を開発した。

特にオゾン層破壊と省エネルギー化はどちらも社会的ニーズとして両立させるべきものであり、このために各機能品、システムに関して信頼性とともにより高性能化を図り、商品化を行ったのでその内容について報告する。

2. 代替冷媒対応ルームエアコンの開発

2.1 冷媒物性による検討

ルームエアコン用としてはR410A (R32: 50 wt %, R125: 50 wt %の混合冷媒) を使用する。R410Aは、作動圧力がHCFC-22対比約1.6倍と高くなるが、体積循環量の減少により冷媒圧力損失が減少し、システムとしての性能向上を図ることができる。また混合冷媒ではあるが、疑似共沸のため組成管理が容易であるという利点がある。

図1にHCFC-22を基準とした場合のR410Aの性能予測結果を示す。COP (成績係数: Coefficient Of Performance) はHCFC-22を100としたときの各凝縮温度での比率を示している。R410Aは、HCFC-22対比同一条件でのCOPが、代表運転点で約93%と劣っており、特に凝縮温度が高くなるにつれてCOPの

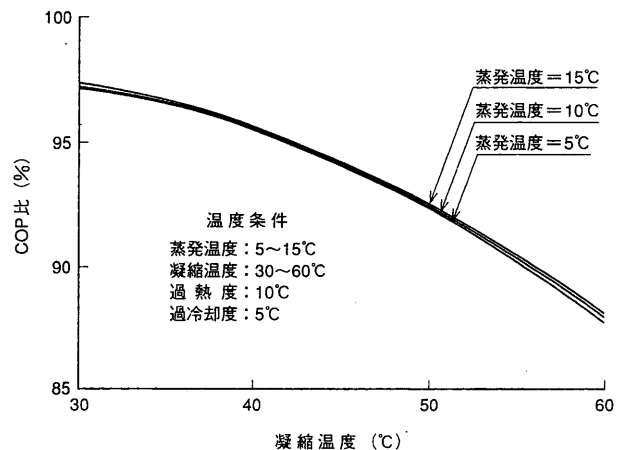


図1 R410AのCOP HCFC-22のCOPを基準(100)として凝縮温度が上昇するとCOPが低下する。
COP of R410A

低下比率が大きくなっている。また、蒸発温度の変化に対してはCOPの影響は少ない。したがってHCFC-22対比の性能を改善するためには、凝縮温度の低下がより有効であることが分かる。

これらの特性から、エネルギー効率に最も寄与度の高い圧縮機の改善、凝縮温度及び理論COPに寄与度の高い熱交換器の改善に注力するとともに、各コンポーネント性能を最大限引出すためのユニット設計を行い、システムとしてHCFC-22対応機以上の性能確保を目指した⁽¹⁾⁽²⁾。

また、冷凍サイクルとしての高圧力化、冷媒及び冷凍機油の変更等に対応するため、システムの信頼性向上を図った。

2.2 圧縮機の高効率化

当社スクロール圧縮機は既に“ダイレクトディスチャージ方式”、“固定スクロールフローティング構造”、“マルチディスチャージ方式”を採用し、高効率化を図っているが、今回さらに“ダブルドライブ背圧方式”、“ダブルディスチャージポート方式”を採用し、従来構造を用いたR410A用スクロール圧縮機対比約5%効率を改善した。

*1 技術部ルームエアコングループ
 *2 技術部設備エアコングループ

*3 技術部圧縮機設計課
 *4 名古屋研究所冷熱システム研究室

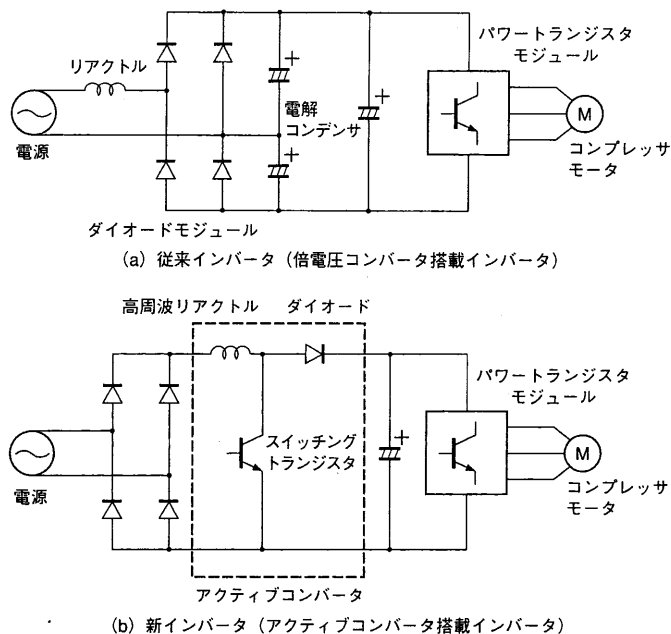


図2 従来インバータと新インバータの比較 新インバータの破線部回路の昇圧作用により、任意の高圧DC電圧が得られる。
Comparison of conventional and newly developed electrical diagrams

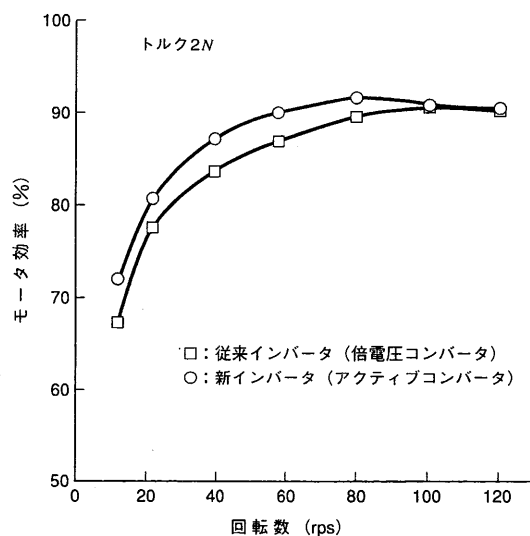


図3 回転数とモータ効率の関係 ほぼ全域で新インバータの方がモータ効率が優れている。
Revolution and motor efficiency

また、従来の倍電圧コンバータ搭載インバータ（以下、従来インバータと称す）からアクティブコンバータ搭載インバータ（以下、新インバータと称す）とすることにより、従来インバータでは得られなかった最大電圧の可変DC電圧を作ることができる。

このことにより、圧縮機モータの巻線を従来より多く巻いて効率アップが図られる。また可変DC電圧制御により、圧縮機モータ駆動時に発生する、高周波に起因するロスを最小限とすることができた。

図2に従来インバータと新インバータの構成比較、図3に回転数—モータ効率特性を示す。ほとんどの回転数で新インバータの方がモータ効率を3～5%向上できた。

2.3 室内ユニットの改善

性能改善のために“熱交換器フィン新設計”、“熱交換器大容量化”、“送風系の改善”を行った。

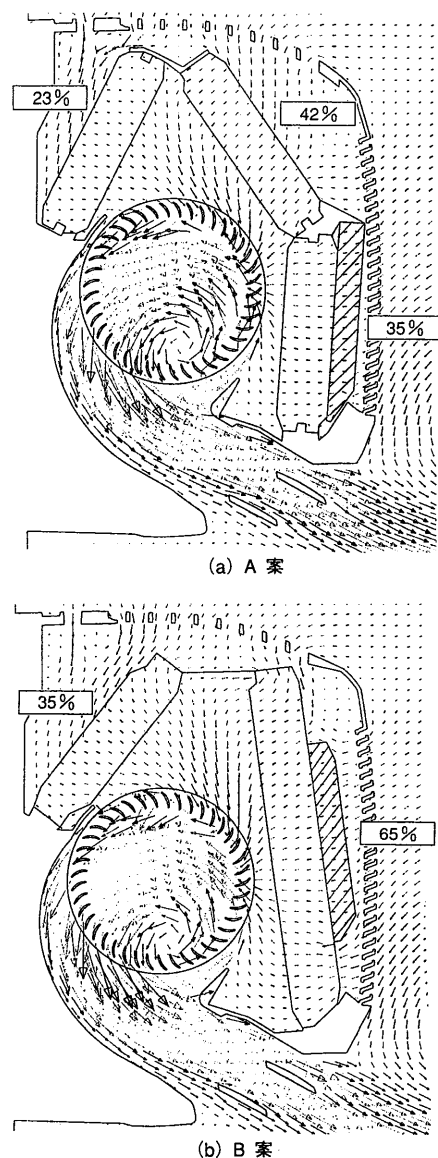


図4 室内機流動解析 斜線部の熱交換器を増強した結果、B案の方が風速分布が平均化されている（数字は風速分布から算出した各面の風量比率）。
Air flow analysis of inside unit

熱交換器フィンは、従来のルーバフィンが、切り起しをルーバ状に傾けることで空気側熱伝達率を向上させ、比較的広いフィンピッチで、ある程度高い熱交換性能を得るという点では優れたものであった。しかし、より高性能を図る場合には大風量化、フィン表面積の増大といった方向性が不可欠であり、その目的のためには従来フィンでは対応しきれない。

新フィンは、フィン前縁の高い熱伝達領域を生かし、フィンの高密度化を図ると同時に通風抵抗を減少させ、性能改善を行った。熱交換器単位性能としては同一ファン動力で従来比凝縮側+10%、蒸発側+8%の熱交換量増大となった。

熱交換器大容量化は、従来比15%アップを目標とした。

従来の多段曲げ熱交換器は風速分布の点でやや偏りがあり、大容量化の場合、この点も考慮する必要がある。このため、容量アップを行う場所を図4のようにA、B二案を設定し、おのおの流動解析を行って風速分布を計算したところB案の方が分布が良く、熱交換特性が優れる資質を持っていることが判明した。図4中の数値は、風速分布の計算結果を熱交換器各面の風量割合とし

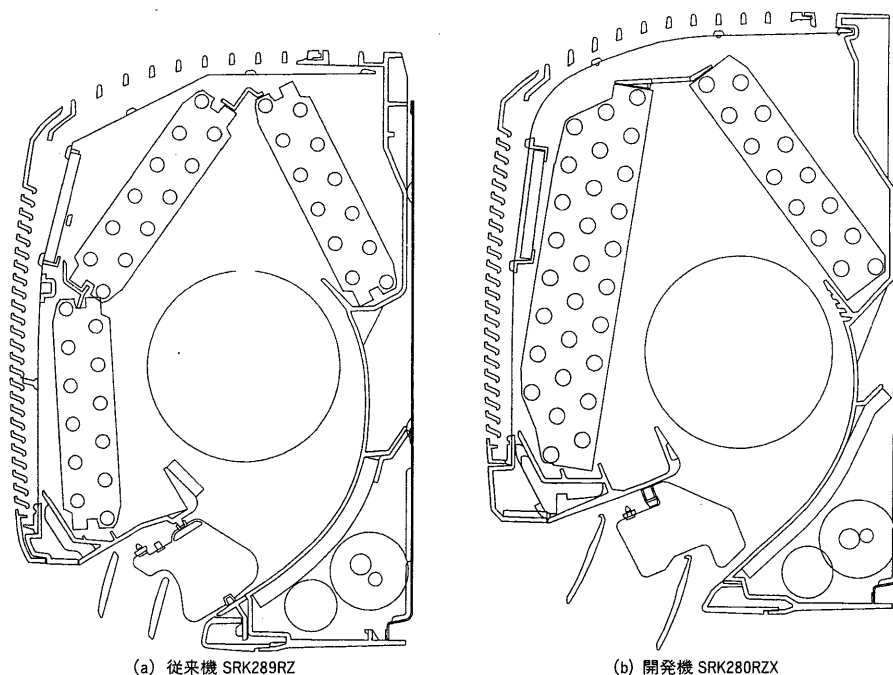


図5 室内ユニット断面図 2列と3列を組合せ、風量分布を損なわず熱交換器容量を15%増大させた。
Sectional plan of inside unit

て表したものである。

これに基づき詳細レイアウトを設定した。図5に従来機との比較を示す。

送風系については、当初タンゼンシャルファンを $\phi 95\text{ mm}$ として検討していたが、ファン効率、モータ効率の点で細径、高回転の方が優れていることが分かり、 $\phi 88\text{ mm}$ とした。最大風量のポイントで $\phi 88\text{ mm}$ の方が約7Wファン入力を低減できる。

2.4 室外ユニットの改善

性能改善のため“熱交換器細径化”、“プロペラファン新開発”、“ユニットレイアウト改善”を行った。

熱交換器パイプ径は、理論的には細径化するほど熱伝達率が改善され、性能が向上するが、実際には蒸発器としての冷媒圧力損失によって、細径化に伴い必要パス数（サーキット数）が増大し、理論的な性能改善を阻害する。現HCFC-22機では $\phi 9.52\text{ mm}$ 、2パスを採用しているが、R410A機としては冷媒圧力損失減少を考慮し、 $\phi 8\text{ mm}$ 、2パスとした。

この結果同等冷媒条件で、凝縮性能+4%、蒸発性能+1.5%の向上となった。

プロペラファンについては、従来の $\phi 375\text{ mm} \times 4$ 枚羽根から $\phi 385 \times 3$ 枚羽根と大径、高効率化することにより、細径熱交換器による空気側圧損低減と相まってファン動力低減が図られた。また、翼後縁をのこ歯状（セレーション）にして、翼上面と下面の集合部に縦渦を発生させ、流れをスムーズに混合させることにより低騒音化を図った。また、この加工はファン入力低減にも若干寄与していることが確認された。

ユニットとしては、熱交換器のレイアウト見直しと熱交換器曲げRの最小化を併せ、従来と同一ユニット寸法としながら熱交換器面積を従来比+11%と増大させた。

2.5 低騒音化

R410Aシステムは圧力が高くなるため、冷媒ガス圧縮時の脈動値が大きくなり、放射音、配管を伝わる伝達音等が増大する。このため圧縮機上部の吐出チャンバ部容積を約2倍として減音効果

を増大させた。

吐出脈動は、圧縮機の吐出チャンバだけでは低減しきれない。このため通常、吐出管途中に設置したマフラにより、必要な周波数帯域を選択的に減音し、室内機等に騒音として搬送されるのを防止している。R410A化した場合、冷媒の密度変化により冷凍サイクル内の音速が変化し、HCFC-22対応としてチューニングしたマフラ仕様では必要帯域での減音量が確保できない。

従来HCFC-22対応では音速185 m/sとして共鳴周波数計算を行っていたのを200 m/sとして計算、各諸元を決定し、所定の減音量を確保した。

2.6 システム信頼性

運転圧力が従来HCFC-22機対比約1.6倍となるため、高圧力化仕様を確立した。

圧縮機は設計圧力4.15 MPaとして新設計し、例えば吐出ハウジングは肉厚をアップしている。

各冷媒系機能品も設計圧力4.15 MPaとして耐圧設計を行い、対応する。

熱交換器は、室内用（ $\phi 6.35\text{ mm}$ ）は現行肉厚で対応可能であるが、室外用（ $\phi 8\text{ mm}$ ）は場合により若干の肉厚アップが必要となる。

以上により、耐圧としてはシステム上問題ないものとできるめどを得た。また、システムとしての耐圧を確保するとともに、ユニット運転時にも設計圧力を超えないよう、冷房時の凝縮温度検知センサを追加し、電流値から圧力上限を制御するルールの見直しと組合せることにより、更に信頼性を向上させた。

冷凍機油については、冷媒との相溶性、潤滑性の観点からエステル系（POE）とエーテル系（PE）を候補として検討した。いずれも特性として大きな差はなく、一定の仕様を満足しているが、使用実績から判断し、エステル系を選定した。

コンタミ（異物）に関しては、R410Aが塩素を含まないため、冷媒中にコンタミを溶解させる作用が小さく、運転により生成されるスラッジ等が析出されやすくなり、絞り系を詰らせる要因が

大きい。対策としては詰りの要因となる物質の排除が重要であり、圧縮機製造等に使用する工程油の見直し、酸の生成を抑制させるための水分管理の徹底等を行っている。

当社スクロール圧縮機は、低圧ハウジング構造であるため、冷凍機油が長時間高温にさらされることがなく、油の劣化によるスラッジ生成等に関してはリスクが少ない。キャピラリー詰り耐久検証の結果でも、これら対策を実施した結果大きな問題はなく、現 HCFC-22 機と同等の信頼性が確認されている。

2. 7 ま と め

以上を総合したユニット性能検証において、R 410 A 機は現行 HCFC-22 機 (SRK 289 RZ) に対し、定格条件での COP を約 5 % 向上させ、冷房 COP 4.08、暖房 COP 4.28 を達成した。

今回は性能面を主体に報告したが、製品化に当り操作性、快適性向上も図っており、平成 10 年 3 月から魅力ある新商品 (機種名 SRK 280 RZX, 320 RZX) として発売する。

3. 代替冷媒対応パッケージエアコンの開発

3. 1 R 407 C 空調システムの課題

HCFC-22 の代替冷媒として幾つか候補のある中で、パッケージエアコンとしては、非共沸混合冷媒 R 407 C を採用した。

これは米国 ASHRAE 規格で不燃/無毒と認定されたこと、圧力が HCFC-22 の約 1.1 倍であり、材料費コストアップが最小限に抑えられること等の理由による。

しかしながら一方で、空調機として実用化するには、以下のような技術課題が挙げられる。

(1) 冷凍能力及び COP

表 1 に R 407 C の理論冷凍サイクル特性を示す。これによると HCFC-22 対比で、冷凍能力 98 %、COP 95 % であり、いずれも若干悪化するため、圧縮機や熱交換器等のコンポーネントの性能向上を要する。

(2) 圧力上昇

表 1 に示すように、R 407 C は高压冷媒 HFC-32 を含むために、HCFC-22 対比約 10 % 凝縮圧力が上昇する。これに伴い、設計圧力の見直しが必要となる。

(3) 温度グライド

非共沸混合冷媒は、二相域において圧力と温度とが 1 対 1 で対応する単一冷媒と異なり、一定圧力下でも乾き度の変化に応じて冷媒温度が変化する (温度グライド)。このため凝縮や蒸発の相変化を伴う熱交換器では、入口側と出口側とで温度差が発生し、これを考慮した開発を要する。

(4) 冷媒組成の変化

非共沸混合冷媒は、空調システム内の冷媒組成分布が一様でなく偏在を引起す。特にアキュムレータに余剰冷媒が増加すると、循環冷媒は低沸点冷媒 HFC-32 がリッチとなり、システムの性能に影響を及ぼす。

(5) 冷凍機油

HFC 系冷媒は、分子中に塩素を含んでいないため、従来の冷凍機油 (鉱油やアルキルベンゼン油) との相溶性に乏しい。そのため相溶性が良好で、かつ高電気絶縁性、熱安定性、高潤滑性を兼ね備えた冷凍機油の開発が必要である。

3. 2 冷凍サイクルの仕様確立

今回の R 407 C 対応を機に、ビル用インバータマルチエアコンをフルモデルチェンジした。機体のコンパクト化や使用制限範囲の拡大等のほかに、R 407 C 対策も盛り込んでいる。

図 6 は、新規開発したビル用インバータマルチエアコン (10 馬力クラス) の冷媒回路であり、前述した技術課題に対応して以下の改良を実施した。

(1) 冷凍能力及び COP の向上

まず第 1 に冷凍サイクルの心臓部として、新型スクロール圧縮機を開発した。これは巡回スクロールの可変巡回半径機構を最適化することで、高効率と低騒音とを両立して実現している⁽³⁾。また、圧縮機の構成を従来の“インバータ圧縮機×1 台”から“一定速圧縮機×1 台+インバータ圧縮機×1 台”に変更し、低負荷時の発停ロスを減少するため最小冷凍能力を低減した。

第 2 に室外側空気熱交換器を増強した。冷媒側及び空気側の伝熱面積を従来から 40 % 増やすとともに、室外ファンを $\phi 530$ mm から $\phi 570$ mm へと大口径化し低騒音を維持しつつ導入する外気量を上げた。これらの効果により室外側空気熱交換器の凝縮能力は従来比約 10 % 向上している。

(2) 圧力上昇対策

第 1 に冷媒物性上凝縮圧力が 10 % 上がるのに合わせて、システム設計圧力を 3.0 MPa から 3.3 MPa へ変更した。具体的には、一部の配管の肉厚のアップ及び各種機能品の耐圧基準を見直した。

第 2 に冷凍サイクル内での異常な圧力上昇を監視する高压保護制御を改良した。圧力スイッチ (63 H 1-1, 2, 63 H 2) の保護設定値をアップさせるとともに、圧縮機への入力電流値で間接的に圧力を検知するカレントセーフ制御値を見直した。

(3) 温度グライド対策

R 407 C の温度グライドの特性を生かし、凝縮過程で冷媒の流れと空気の流れを対向流化することにより熱交換器の温度効率の向上を図った。

熱交換器の温度検知センサの取付位置に関しては、デフロスト、低外気冷房等に対し最適位置を温度グライドを考慮して決定した。

(4) 冷媒組成の変化

ビル用インバータマルチエアコンでは、余剰冷媒が多量に発生するケースがあり、それに応じてアキュムレータの容量も大きい。循環冷媒の組成変化を起しやすい状況にある。

その様子を暖房運転時について、解析/実測の両面から検討した結果が表 2 である。いずれの結果もほぼ一致して、循環冷媒中に占める可燃性冷媒 HFC-32 の割合が大きくなっている。しかしながら、図 7 に示すように混合冷媒全体としては可燃域から 7 % 以上離れており問題ない⁽⁴⁾。同様に、冷房運転時につい

表 1 R 407 C 冷媒特性
Characteristics of R 407 C

		R 407 C	HCFC-22
成 分		HFC 32/125/134 a	HCFC-22
混合比率 (wt %)		23/25/52	100
オゾン破壊係数 CFC 11=1		0	0.055
理論冷凍 ⁽¹⁾ サイクル特性	蒸発圧力 (kPa)	499	498
	凝縮圧力 (kPa)	2 112	1 943
	温度グライド (°C)	4.3	0
	COP	3.94	4.14
	冷凍能力 (kJ/m ³)	2 947	3 010

注) 蒸発温度: 0 °C 凝縮温度: 50 °C 過熱度, 過冷却度: 0 °C

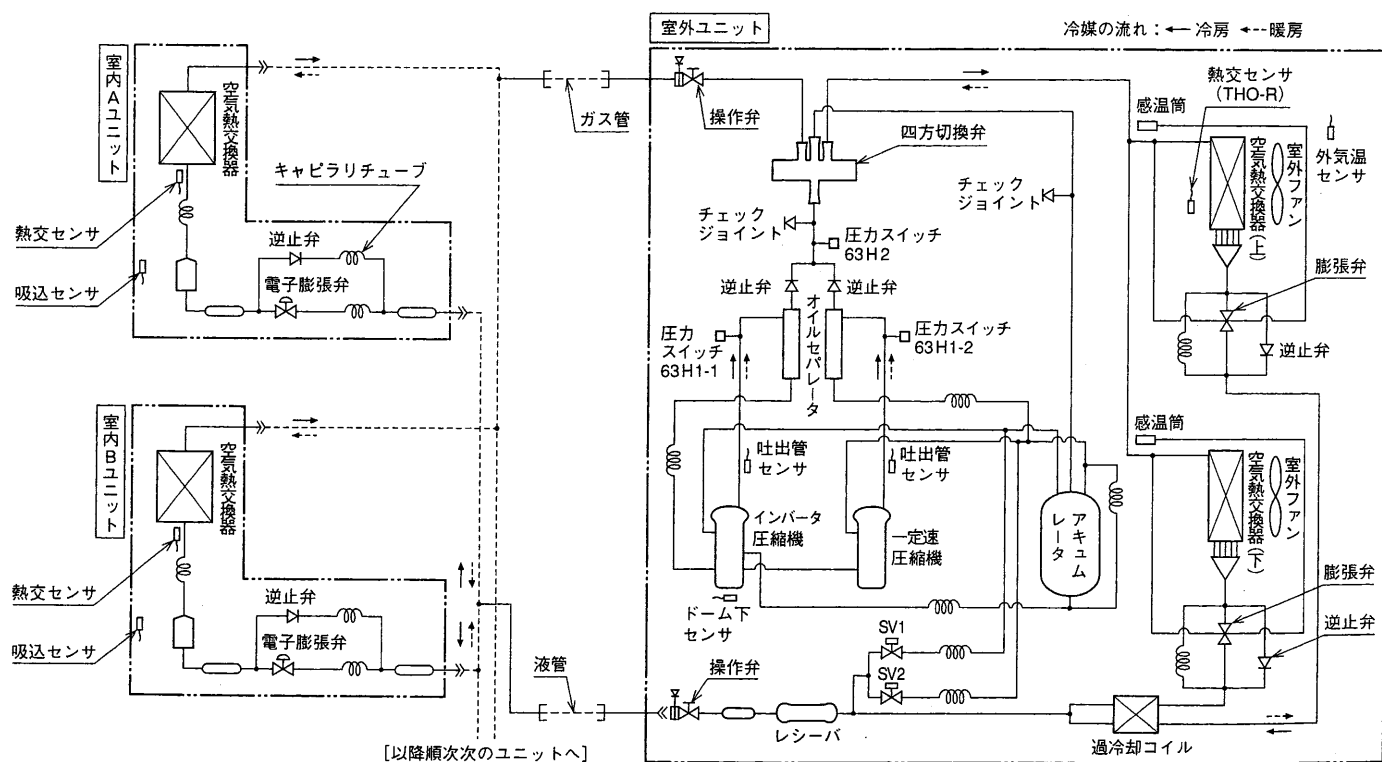


図6 ビル用インバータマルチエアコンの冷媒回路 10馬力クラスの室外ユニットに複数台の室内ユニットを接続した例を示す。
Refrigerant circuit of inverter-driven, multi-indoor-unit air conditioner

表2 R 407 C 冷媒組成の変化
R 407 C refrigerant composition

運転条件		場 所	解 析	実 測
暖房	室内機 1台運転	循環冷媒	25.7/26.2/48.1	24.0/25.3/50.7
		余剰冷媒 (アキュムレータ内)	13.3/18.0/68.7	13.0/16.0/71.0
	室内機 7台運転	循環冷媒	29.1/29.8/41.1	29.1/28.3/42.6
		余剰冷媒 (アキュムレータ内)	19.7/22.0/58.3	18.0/19.0/63.0

注) 室内機は8台接続している

でも問題ないことを確認した。

(5) 冷凍機油の開発

R 407 C の冷凍機油としてエステル系油を開発した。基油としてのポリオールエステル油に添加剤を加えることで、現使用油とほぼ同等の熱安定性及び耐摩耗性が得られた⁽⁵⁾。

(6) その他の改良点

第1に室外機の温度式自動膨張弁を R 407 C 対応とし、感温筒内の封入ガス等の変更を実施している。

第2に操作弁及びチェックジョイントのゴム材質をCR系からHNBR系に変更した。これにより、R 407 C+ポリオールエステル油に対し化学的に安定なことを確認した。

3.3 試驗結果

図1で示した冷媒回路により各種性能試験を実施した。ここではそのうち、冷房／暖房定格性能試験をデフロスト／低外気温冷房試験の結果について紹介する。

3.3.1 冷房/暖房定格性能

試験結果を表3に示す。

表 3 では、従来の HCFC-22 対応機のデータを基準に相対値で表

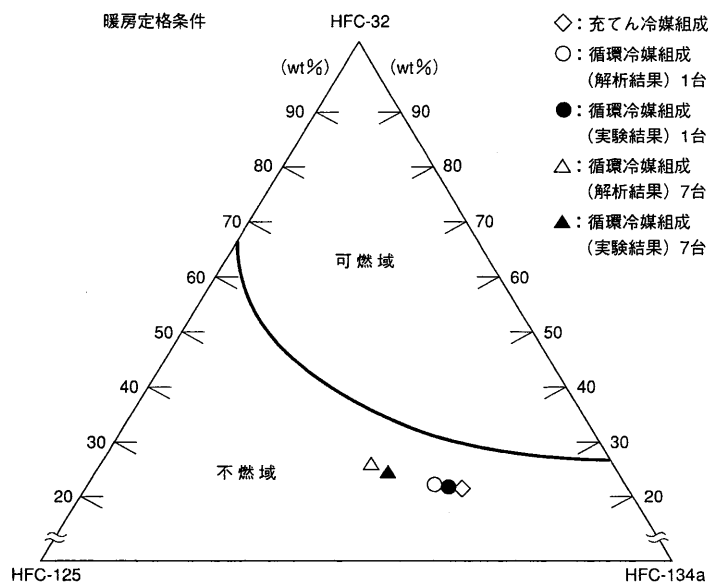


図7 冷媒の可燃性評価 いずれも可燃域から7%以上離れており不燃性が確認できた。

Results of composition analysis for flammability

表3 R 407 C 冷房/暖房定格性能
Cooling and heating capacity of R 407 C

	冷 房	暖 房
COP (%)	106	100
凝縮圧力 (MPa)	+0.20	+0.07

注) 温度条件は JISB 8616 による

示した。これによると、COP は従来機と同等以上の性能が得られている。また、凝縮圧力もほぼ理論どおりに 5 ～ 10 % の上昇となった。

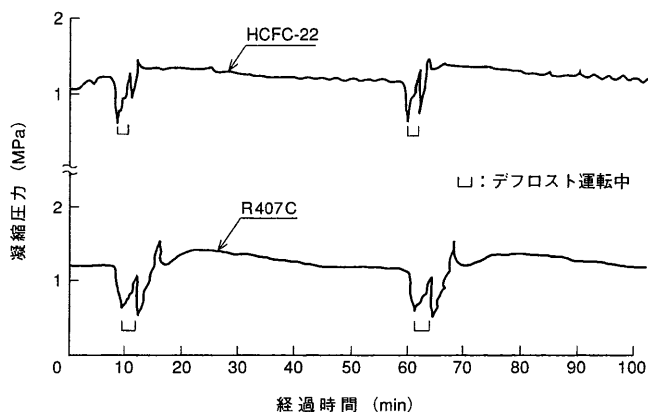


図8 デフロスト運転時の凝縮圧力の推移 温度グライドの影響で R 407 C の方がデフロスト運転時間が若干長い。
Condensing pressure in defrost operation

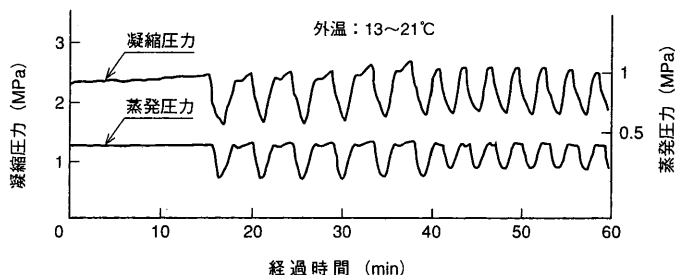


図9 低外気温冷房時の凝縮圧力/蒸発圧力の推移 約3～5分間隔でハンチングしているが、圧縮機の使用制限は逸脱しない。
Condensing and evaporating pressure in cooling cycle at low outdoor temperature.

3.3.2 デフロスト/低外気温冷房試験

デフロスト試験結果を図8に示す。上が従来の HCFC-22、下が R 407 C の凝縮圧力のトレンドデータである。デフロスト間隔は共に 50 分間で、デフロスト運転時間は、HCFC-22 が約 2 分 30 秒に対し R 407 C は 3 分でありほぼ同等となった。これにより HCFC-22 とほぼ同等の暖房性能が確保された。

次に、低外気温冷房試験を実施した結果を図9に示す。凝縮圧力の異常な低下を防ぐ目的で、室外ファンタップ（導入外気量）の切換えを行っている。これにより HCFC-22 の場合と同様に高圧が確保され、外気温度 -5℃ までの冷房が可能となった。

3.4 製品化

今回開発した新型ビル用インバータマルチエアコンは、平成 10 年 1 月から 5, 6, 8, 10 馬力の 4 機種を発売開始した。

これまで述べた R 407 C 対応化のほかにも、従来機に比べ下記のような特長を有している。

- (1) 従来比で高さを 250 mm 縮小、5, 6 馬力は幅も縮めて業界一のコンパクトな室外機（図 10 参照）
- (2) 室外機 1 台当りに接続可能な室内機台数を大幅に増加（10 馬力の室外機で 8 → 16 台へアップ）

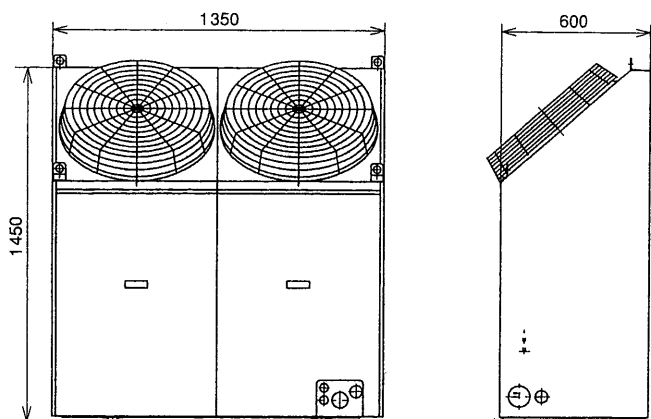


図 10 室外機外形図 従来比高さを 250 mm 縮めて業界最小のコンパクト化を実現した（8, 10 馬力クラス）。
Outward form of outdoor-unit

(3) 室外機を低騒音化

（10 馬力で 59 → 57 dB）

(4) 室外機に運転データ等をデジタル表示しサービス性向上

4. ま と め

オゾン層保護を目的とした代替冷媒として、ルームエアコンは R 410 A、パッケージエアコンは R 407 C を各々選択し、商品化を図った。どちらの冷媒もその物性上 HCFC-22 対比エネルギー効率のダウン、運転圧力の上昇といった技術課題を抱えていたが、主に高性能圧縮機、熱交換器の開発及び設計圧力のアップにより克服することに成功した。

この結果、空調機としては従来の HCFC-22 対応機と同等以上の性能を確保している。

最近、代替冷媒にはオゾン層保護に加えて、温室効果の抑制も求められ始めている。その意味では、R 410 A/R 407 C 共に更に高効率化が必要と思われる。今後更に新たな冷媒を模索する動きもあり、当社としてはこういった状況を踏まえながら、より“地球に優しい”エアコンを開発していく。

参 考 文 献

- (1) 小島ほか、省エネ形ルームエアコンの開発、三菱重工技報 Vol.33 No.2 (1996) p.78
- (2) 伊藤ほか、R 410 A ルームエアコンの性能評価、HCFC 代替冷媒国際シンポジウム'96 論文集 p.34
- (3) 広岡ほか、業務用エアコン横形スクロール圧縮機の開発、三菱重工技報 Vol.33 No.2 (1996) p.86
- (4) 平尾ほか、非共沸混合冷媒を用いたマルチエアコンの冷媒組成分布の研究、三菱重工技報 Vol.34 No.3 (1997) p.210
- (5) 西浦ほか、HCFC-22 代替冷媒空調システムの研究、三菱重工技報 Vol.33 No.2 (1996) p.90