代替冷媒対応ルームエアコン用スクロール圧縮機の開発

Development of Scroll Compressor for Alternative Refrigerant in Room Air Conditioner

エアコン製作所　鵜飼徹三*1
技術本部　伊藤隆英*2　戸田直樹*3

三菱重工が平成10年春から新しく発売する“代替冷媒対応ビーバーエアコン”は，地球環境に優しいオゾン破壊系数0のR 410 A冷媒を用いたことを一つの特徴としている．R 410 A冷媒は，従来ルームエアコンに用いられていたR 22冷媒に対し，同一温度における飽和圧力が約1.6倍となるため，効率及び信頼性の確保が課題とされていた．当社は，現在のR 22冷媒で好評を得ているDDスクロールの“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ポート”等の特徴を生かし，さらに独自の技術によりR 22冷媒と同等以上の信頼性と高効率を有するスクロール圧縮機を開発した．

Mitsubishi Heavy Industries has developed the new “Beaver” air conditioner using the alternative refrigenant R410A which will be ready for commercial use in the spring of 1998. Although R410A does not destroy the earth's stratospheric ozone layer, its pressure in use is 1.6 times higher than that of R22. Although it has been thought that reliability and efficiency would be a problem for R410 compressors, we have improved and our DD scroll compressor by using original technology and realized higher reliability and efficiency than for R22 compressor.

1. まえがき

オゾン層保護を目的としたモントリオール議定書に従い，現在ルームエアコンに用いられているR 22冷媒等のHCFC冷媒は，2020年までに全廃となる．これに替る代替冷媒として，オゾン層破壊計数が0であるR 410 A冷媒（R 32/R 125＝50/50 wt %）を代替冷媒として用いることとした．

R 410 AはR 22に対し同一温度における飽和圧力が約1.6倍となるため，これに対応する圧縮機は効率及び信頼性の確保が課題とされていた．また，R 410 Aは，R 22用のアルキルベンゼン系の冷凍機油との相溶性が悪いため，適正な冷凍機油を選定することが必要となる．

当社は低振動，低騒音という特徴を生かしたスクロール圧縮機を，R 410 Aに対応して開発し，発売を開始した．この圧縮機は，独自の技術によって，従来のR 22機と同等以上の効率と信頼性を達成した．

2. 高効率化

2. 1 R 410 A用スクロール圧縮機の吸入容積

図1に示すようなR 410 A用スクロール圧縮機を開発するに当り，スクロールの吸入容積を設定することが各部の構造を決定する第一歩となる．

今回，R 410 Aスクロール圧縮機の吸入容積は，最大能力を必要とする低外気温度での暖房運転時にR 22と同等の能力を同一回転数で確保する考え方で設定した．

図2に過熱，過冷却共5℃でR 22と同じ能力[1][2]を得るための吸入容積比率（R 410 Aの吸入容積/R 22の吸入容積）を示す．図2に示すように吸入容積比率は圧力条件により異なり，吐出圧力が高いほどR 410 Aの必要吸入容積は大きくなる．

低外気温度時の運転条件は当社家庭用ビーバーエアコンの運転点計測結果から，発生頻度の高い点（図2中のA点）を統計処理により求めた．このA点における吸入容積比率から，R 410 A用スクロール圧縮機の吸入容積はR 22機の0.7倍とした．

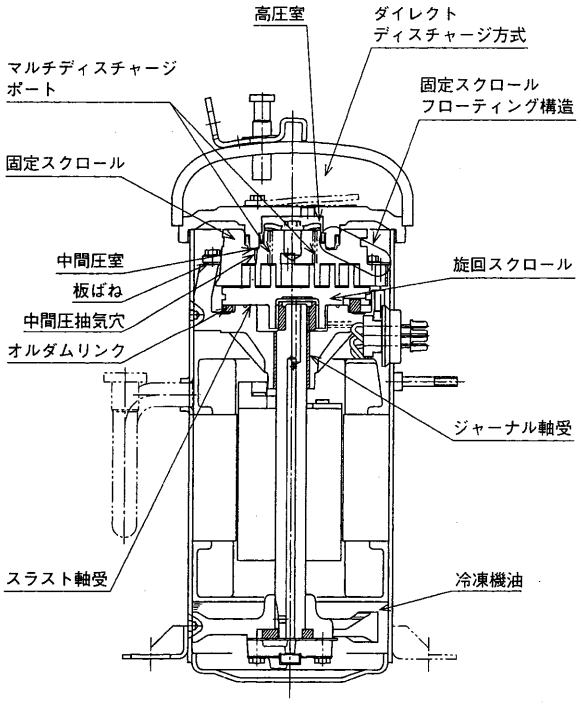


図1　R 410 A用スクロール圧縮機の構造　R 410 A用のスクロール圧縮機として，従来のR 22冷媒機と同等以上の効率と信頼性を達成した．
Structure of scroll compressor for R 410 A

2. 2 スクロールプロファイルの検討

スクロールの渦巻形状は圧縮機の基本的な性能を左右する重要な部分であり，当社はスクロール形状設計手法や応力，温度分布の解析及び計測に最先端の技術を投入してきた．R 410 A用スクロール圧縮機の渦巻形状設計に当っては，従来の形状最適化設計手法を更に推進め，スクロールの変形を考慮した損失評価を取入れた形状設計を行った．

*1 技術部圧縮機設計課
*2 名古屋研究所圧縮機研究室
*3 名古屋研究所高分子・化学研究室

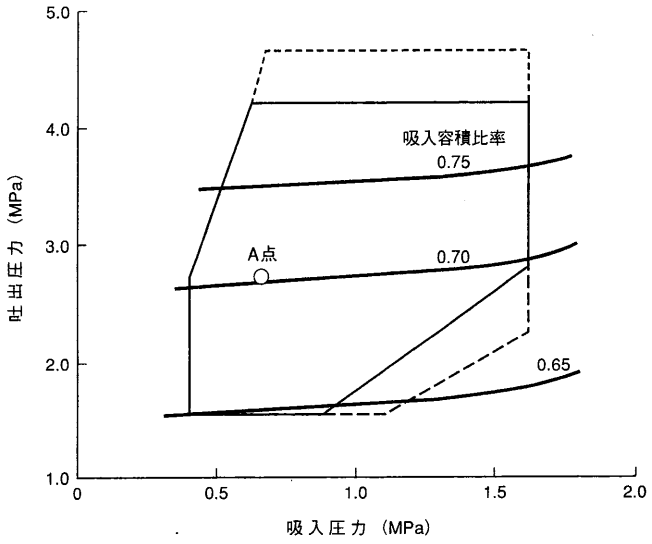


図2　R 410 A での吸入容積比率（R 22 対比）　R 410 A での吸入容積は，低外気温条件で R 22 と同等となるように設定した．
Suction volume ratio in R 410 A (compared with R 22)

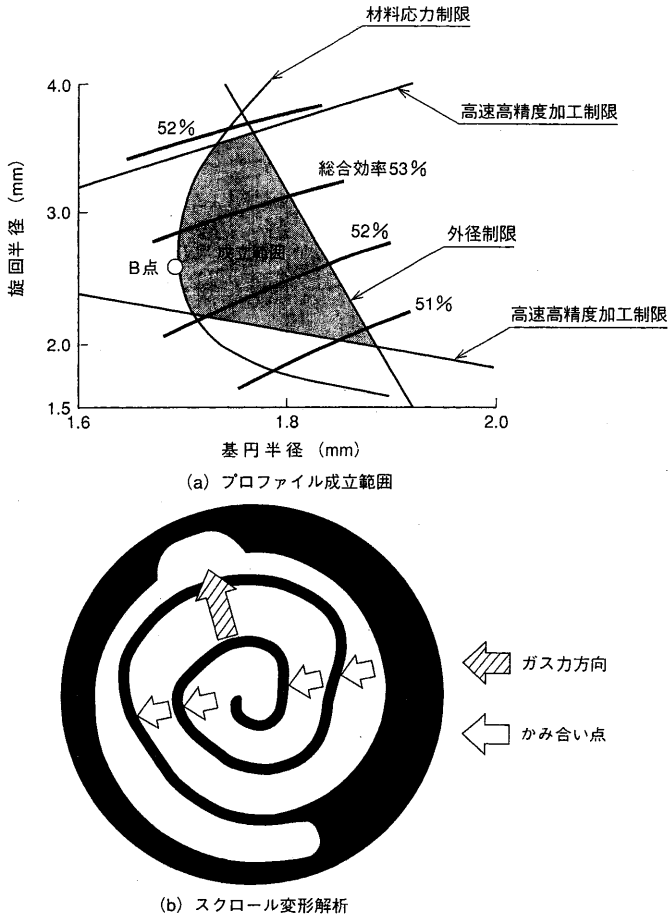


図3　プロファイル成立範囲及びスクロール変形解析
(a) スクロール形状は変形漏れを含む指示効率，強度，外径寸法，加工性を考慮して決定した．(b) スクロール端板やラップの剛性を調整し，かみ合い点の変形を減少させた．
Determination of scroll profile basic parameter and FEM analysis of scroll deformation

2．2．1　スクロールプロファイルの成立範囲

図3 (a) に R 22 と同じ材料強度の安全率，圧縮機外径寸法とした場合のプロファイルの成立範囲を，渦巻の形状を表す基円半径，旋回半径で示す．

プロファイルの成立範囲に対しては，材料応力制限，高速高精度加工制限，外径制限等があり，この成立範囲内で最も効率の高いプロファイルを選定する必要がある．

2．2．2　最適プロファイルの設定

図3 (a) にはスクロールの変形を考慮した性能解析結果による総合効率を示している．従来の設計方法では，吸入容積を一定としたときにスクロール高さが高くなるとスラスト受圧面積が小さくなり，またシール線長さが短くなることから効率が高くなると考えられていた．しかし，変形を考慮すると，スクロール高さが高いときは変形量が増えるためにかえって効率の低下を招くことが明らかとなった．

図3 (b) に最終的に選択したスクロール形状での変形解析結果を示す．FEM 変形解析は，圧縮室内部の圧力分布，固定及び旋回スクロール同士の接触力，駆動力を境界条件として与え，得られた変形量から再度圧力分布を算出する収束計算を行った．解析の結果，最終形式でのかみ合い点すきまは R 22 同様ほぼ 0 となった．これはかみ合い点で，スクロールの倒れが外側から内側へ変る中立点となるように，スクロール端板厚さやスクロールラップ厚さによる剛性調整を行ったためである．これからスクロール形状は，総合効率が高く，基円半径が最も小さくなる図3 (a) 中の B 点における基円半径，旋回半径を採用した．

2．3　マルチディスチャージポートによる設計圧力比の可変化

従来のスクロール圧縮機では，スクロールの形状により決る設計圧力比を有するため，運転圧力比が設計圧力比より低い場合，スクロール圧縮室内の圧力は図4に示すように過大圧縮が発生していた．過大圧縮の発生は，圧縮動力の損失を招くだけでなく，スラスト軸受荷重を増加させる面もあり，低圧力比条件運転下での効率を低下させる大きな要因であった．このため，スクロール圧縮室が中央の吐出ポートと連通する前に，高圧室と連通するポート及び弁体を設けることにより過大圧縮を防止し，低圧力比での性能を向上した．

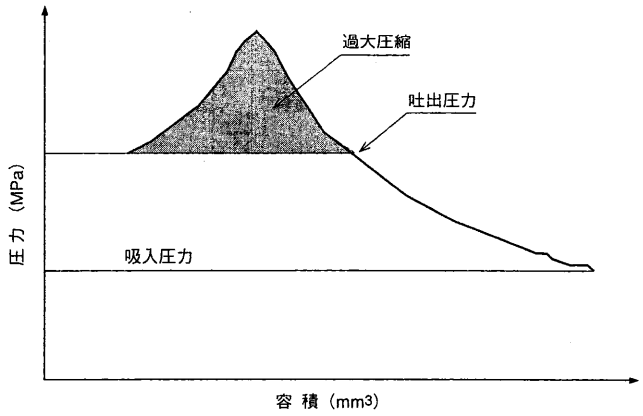
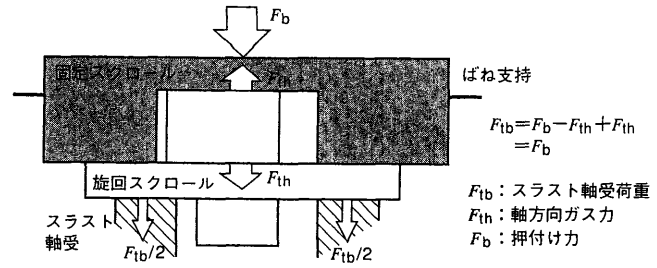


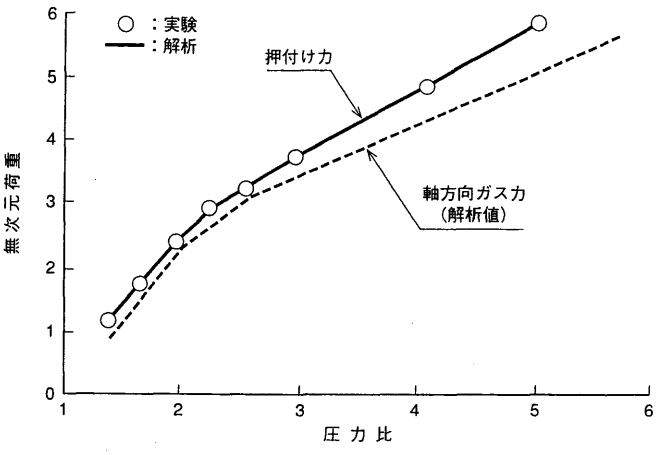
図4　過大圧縮概念図　従来のスクロール圧縮機では過大圧縮が発生し，圧縮動力，軸受損失が増大する低圧力比条件が存在する．
Scheme of over-compression in scroll compressor

2．4　固定スクロールフローティング構造の最適化

当社のルームエアコン用スクロール圧縮機は，スクロール先端の密封機構として，固定スクロールフローティング機構を有している．この機構は，ばねによって支持された固定スクロールに軸方向ガス力より大きい押付け力を付加して，固定スクロールを旋回スクロールに押付ける構造となっている．この場合，図5 (a) に示すように，固定スクロールを押付ける荷重がそのままスラスト軸受に作用する荷重となることから，密閉機構を達成すると同時



(a) スラスト軸受荷重



(b) ダブルドライブ背圧方式

図5　スラスト軸受荷重及びダブルドライブ背圧方式　(a)固定スクロールフローティング構造では，押付け力がそのままスラスト軸受荷重となる．(b)中間圧力取出し位置をマルチディスチャージポート作動範囲と重ねることで，最適押付け力が得られる．
Scheme of thrust bearing force and characteristic of duble drive back pressure system

に最小の荷重で固定スクロールを押す構造が必要となる．

このために，マルチディスチャージポートの設置角位置と同じ角度で中間圧を抽気するダブルドライブ背圧方式を開発した．ダブルドライブ背圧方式を用いたときの実荷重を吸入圧力と吸入締切時の底面積で割って，無次元化した結果を図5(b)に示す．どの圧力比においても，押付け力は軸方向ガス力をわずかに上回っており，理想的な押付け力特性を得ることが可能となった．

2．5　R 410 A スクロール圧縮機の性能計測結果

図6にR 410 Aスクロール圧機械の性能計測結果を示す．

R 410 A化に伴うスクロールプロファイル最適化，マルチポート化，背圧適正化によりR 410 A用圧縮機の総合効率はR 22機と同等以上の効率を達成した．

3．信頼性の検討

R 410 A用に効率を最適化した圧縮機において，各しゅう動部が受ける荷重のR 22機に対する増加割合は一律でない．

表1にR 410 A機におけるスラスト軸受，ジャーナル軸受，オルダムリンクに作用する荷重のR 22機に対する比率を示す．

スラスト荷重は，R 410 A化による圧力上昇分だけ荷重が上昇するが，ジャーナル軸受荷重は7％，オルダム荷重は9％大きくなる．

表1　各しゅう動部の荷重（R 22機対比）
Sliding force of R 410 A compressor (compared with R 22)

	スラスト軸受	ジャーナル軸受	オルダムリンク
荷重比（R 22比）	1.56	1.07	1.09

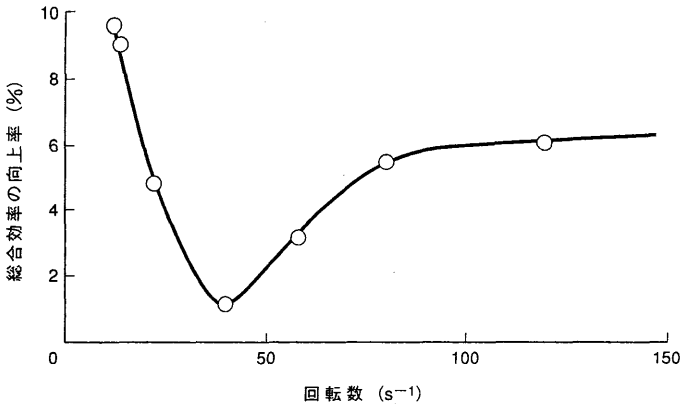


図6　圧縮機効率比較　新開発のR 410 Aスクロール圧縮機は，R 22と同等以上の高効率を達成した．
R 410 A scroll compressor efficiency (compared with R 22)

スラスト軸受以外は荷重の増加率が小さく，R 22用スクロール圧縮機の設計手法と大きく変ることはない．スラスト軸受に関しては，耐摩耗性，耐焼付き性を考慮した表面コーティング処理を行うことでR 22と同等以上の信頼性を確保した．

4．冷凍機油の選定

HFC系冷媒R 410 A用の冷凍機油を選定するためには，以下の項目を評価する必要がある．

(1) 冷媒との相溶性
(2) 潤滑性（耐焼付き，耐摩耗性）
(3) 安定性（熱，酸化，加水分解，耐コンタミ安定性）
(4) 金属，化成材との適合性
(5) 吸湿性
(6) 電気絶縁性
(7) 安全性

本報では，そのうち特に重要な性能である冷媒との相溶性，熱安定性，潤滑性（耐焼付き性）の評価結果を述べる．

4．1　冷凍機油と冷媒との相溶性

R 410 Aは，オゾン層破壊で問題となる塩素を含まないことが特徴である．しかし，塩素を含むCFC系及びHCFC系の冷媒に比べると一般に溶解性が乏しく，従来の冷凍機油（鉱油，アルキルベンゼン油）には溶け難い．冷凍機油にR 410 Aを溶解させるためには，冷凍機油の分子構造中の酸素含有量を多くすることが有効である．そこで，含酸素系の冷凍機油に関して二層分離温度を測定し，R 410 Aとの相溶性を評価した．その結果を**図7**に示す．POE（ポリオールエステル）油及びPVE（ポリビニルエーテル）油とも，実用条件において分離域が存在しない．したがって，いずれの油も実機に適用可能な相溶性を有している．

4．2　冷凍機油の安定性

上述のPOE油及びPVE油について，R 410 A共存下でのシールドチューブ法による熱安定性試験を行った．特にPOE油は，加水分解して酸を生成する特性があり，金属腐食や油劣化によりスラッジが生成すると，キャピラリ詰りなどシステムの致命的なトラブルにつながるため，加水分解安定性の高い基油構造と添加剤を選定する必要がある．

試験の結果を**表2**に示す．いずれの油も変色やスラッジ（沈殿物）生成は認められなかった．また，3種類の金属片Fe，Al，Cuの表面変色や腐食もなかった．したがって，いずれの油も実機に適用可能な熱安定性を有している．

表2　冷凍機油の熱安定性
Thermal stability of lubricant oils on sealed glass tube test

試験条件						試験結果					評価	
冷凍機油		冷媒		水分量 (ppm)	空気量 (ppm)	油色相	Fe	Cu	Al	沈殿物	耐熱性	金属腐食性
種類	封入量	種類	封入量									
POE油	1cc	R410A	1cc	1000	300	L0.5	○	○	○	なし	○	○
PVE油	1cc	R410A	1cc	1000	300	L0.5	○	○	○	なし	○	○

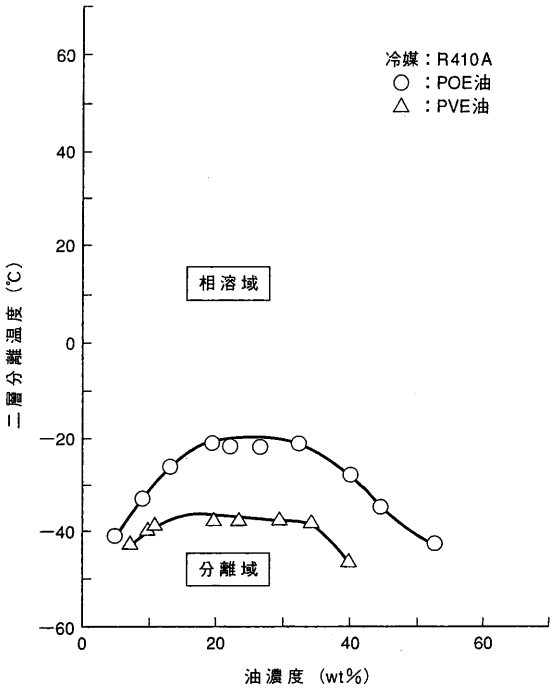


図7　冷凍機油と冷媒の二層分離温度曲線　各種冷凍機油と冷媒R410Aが，溶け合わずに分離する温度を示す．
Miscibility of lubricant oils with R 410 A

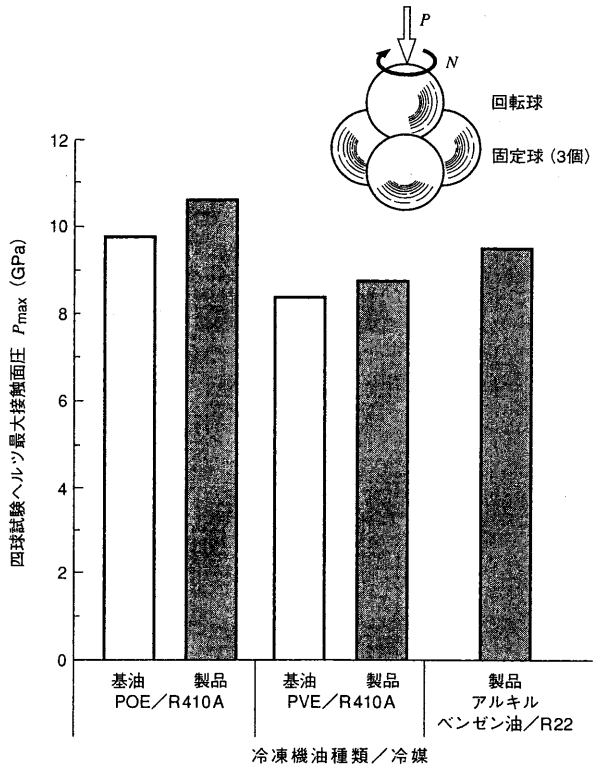


図8　冷媒雰囲気での四球試験焼付き荷重　1MPa冷媒雰囲気下での各種油の四球試験焼付き荷重 P_{max} を示す．
Scoring characteristic of lubricant oils with refreigerant R 410 A by four-ball test

4．3　冷凍機油の潤滑性

R 410 Aは塩素を含有しないため冷媒自体の潤滑性が乏しい．このため，圧縮機しゅう動部における潤滑条件は従来に比べて厳しくなる．したがって，R 410 A用の冷凍機油には，R 22で使用しているアルキルベンゼン油以上の潤滑性が必要となる．そこで，前述のPOE油及びPVE油について，冷媒雰囲気での四球試験を行い耐焼付き性を評価した．図8にPOE油及びPVE油の四球試験における焼付き荷重を示す．POE油の焼付き荷重は基油の状態にて，PVE油や従来のアルキルベンゼン油に比べて大きくなっている．製品としてのPOE油は，極圧剤を添加することによって基油よりも更に焼付き荷重が増大しており，十分な潤滑性を有している．したがって，R 410 A用の冷凍機油としてPOE油が最も有力であると考え，冒頭に示したその他の項目についても評価を行い，良好な結果を得た．最終的には実機耐久試験による確認を行い，R 410 A用の冷凍機油としてPOE油を選定した．

5．むすび

オゾン破壊係数0のR 410 A冷媒用の圧縮機は，圧力が従来のR 22冷媒に対し約1.6倍になること，従来の冷凍機油との相溶性も悪いこと等から，効率及び信頼性が課題とされてきた．しかし，本報で述べた技術によりR 22機と同等以上の効率と信頼性を確保することができ，製品化することができた．

また，騒音の低いスクロール式の圧縮機構を採用したため，業界トップレベルの低振動，低騒音の実力を有するR 410 A用圧縮機を開発することができた．

R 410 A用スクロール圧縮機は，1998年度に2.8～3.2kWクラスのユニットに搭載されるのを皮切りに順次機種数と台数の拡大を行い，2004年にはR 22等のHCFC系冷媒のルームエアコンにおける使用を中止する予定である．

以上のように，三菱重工の“ビーバーエアコン”は技術と英知を結集させ，人と地球環境に優しい空調機を実現するために確実に進歩し続けている．

参考文献

(1) National Institute of Standards and Technology (NIST), Thermodynamic Properties of Refrigerants and Refrigerant Mixtures Database (REFPROP) Version 5.0 (1996)
(2) 伊藤ほか，R 410 A用小型スクロール圧縮機の特性評価，第二回代替冷媒国際シンポジウム (1996)