

代替フロンの用途別実用化状況 家庭用・業務用空調機の代替フロン技術の開発状況

Development of Air Conditioners with Zero ODP Alternative Refrigerants

佐野哲夫*

Tetsuo Sano

1. まえがき

1992年のモントリオール議定書締約国会議で、地球オゾン層保護の観点から、冷凍・空調機器に広く使用されているフロンの使用量規制が改訂された。これによると、特定フロン（CFC：クロロフルオロカーボン）は1996年から生産が全廃となる。これに引き続き、現在空調機器で幅広く使用されているフロンHCFC（ハイドロクロロフルオロカーボン；以下HCFCとする）についても1996年から使用量の総量規制の対象となり、2020年からは原則廃止の計画である。現在の家庭用および業務用空調機器の代表的冷媒HCFC22（以下R22とする）の代替冷媒としてODP（オゾン破壊係数）がゼロのフロンHFC（ハイドロフルオロカーボン；以下HFCとする）が開発され、実用化に向けた検討が進められている。

冷凍・空調機器の冷媒として用いられるフロンには大別して3種類あり、これらには下記のような特徴がある。

(1) CFC（クロロフルオロカーボン）；特定フロン。完全にハロゲン化されたクロロフルオロカーボンで塩素を含み、オゾン層破壊係数（ODP）が高い。冷蔵庫やカーエアコンで使用されてきたCFC12はHFC134aに切替えられつつある。

(2) HCFC（ハイドロクロロフルオロカーボン）；塩素を含んでいるが水素があるため、オゾン層破壊係数がCFCの約20分の1と小さい。現在、ほとんどの小型・中型空調機器ではR22が使用されている。

(3) HFC（ハイドロフルオロカーボン）；塩素を含まないので、オゾン層を破壊しない新代替物質として開発されつつある。

ここでは、家庭用・業務用空調機器でおもに使用されているR22に替わる代替フロンとして、HFCの応用技術開発の状況について紹介する。

2. 代替フロンの特性

空調機用代替フロンは国内外のフロン製造メーカーにより数多く提案されているが、これらは次のような考慮がされている。

- (1) オゾン層を破壊しない（ODPがゼロ）
- (2) 安全性（無毒・不燃性など）が高いこと。
- (3) 熱物性値的に効率が高いこと。
- (4) 熱的・化学的に安定性が高い物質であること。
- (5) 温暖化を促進しない。（GWP, TEWIミニマム）
- (6) 温度－圧力特性が現状のものに近い、すなわち機器の設計変更ができるだけ少ないことが望ましい。

ここで、GWPとは、冷媒が大気中に放出されたときの地球温暖化に与える影響度をCO₂と相対比較して表す指数で、数値が大きい冷媒ほど放出されたときの温暖化への影響度が大きいことになる。

TEWIとは、機器に充填された冷媒が大気中に放出された場合に冷媒自身が地球温暖化に与える影響度（＝直接効果；GWP×大気への放出量）と、機器寿命期間中の、運転する為に必要な総エネルギー（電力など）の発生時に生じる温暖化ガス（CO₂など）の影響（＝間接効果）を合計したもので、空調機器では間接効果が大きなウエイトを占めると言われる。このため、機器の効率向上が温暖化防止に重要なポイントとなる。

3. 冷凍空調工業会の動き

日本冷凍空調工業会（JRAIA）は1992年2月にR22・R502代替冷媒評価プログラム（JAREP）をスタートし、米国冷凍空調工業会（ARI）の同一主旨の活動であるAREPに協力し、R22の代替冷媒評

* ㈱東芝 住空間システム技術研究所開発第一担当主幹
〒235 横浜市磯子区新杉田町8（横浜事業所内）

価の国際共同研究を進めてきた¹⁾。

現時点で、オゾン層を破壊しない代替冷媒としてHFC混合冷媒等に有効性が見い出されつつある。

JRAIAでは、R22の代替技術開発目標を次のように設定している²⁾。

- STEP 1 ; ODPゼロ冷媒の性能評価
(1992~1995年)
- STEP 2 ; エネルギー消費効率向上のための冷媒評価 (~2000年)
- STEP 3 ; 実用化のための要素開発 (~2005年)
- STEP 4 ; 商品化設計生産転換 (~2010年)

4. R22代替冷媒開発状況

代替冷媒と考えられるHFCの中には、単一の冷媒では特性面でR22に近いものがなく、ほとんどの候補が3種または2種のHFCを混合させて調整したもので提案されている。冷媒メーカ各社からは空調用として20種類近くの候補冷媒が提案されている。

機器メーカとして代替冷媒を採用するうえで大切なことは、まず数多くある候補の中から最適な冷媒を選定することにある。この選定条件として、対象機器の効率、設計変更と追加コストの最小化、信頼性、可燃性に対する安全性の確保などがあげられる。

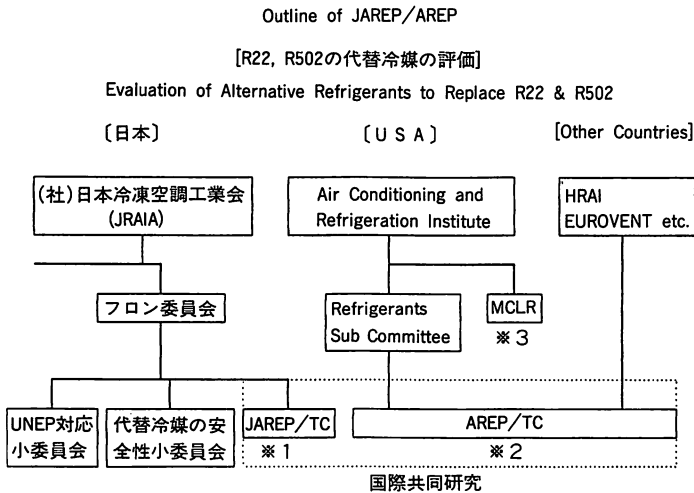
4.1 AREP/JAREP活動

空調メーカとして、全製品群にわたってこれらの条件を評価しスクリーニングする作業は多額の資金と評価期間を必要とする。この問題に対して、できるだけ効率的に評価作業を進めるために組織されたものが、米国の冷凍空調工業会 (ARI) での「代替冷媒評価プログラム (AREP)」と日本冷凍空調工業会 (JRAIA) での「代替冷媒評価プログラム (JAREP)」である。これらは独立して情報交換するとともに、日米欧加の空調機器メーカ、冷媒、潤滑油メーカ、米国の民間や国立研究機関および大学等が参加して国際的な共同研究プロジェクト (AREP/JAREP) を進めてきた (図-1参照)^{2,3)}。

4.1.1 AREP/JAREPの評価レポート

各種候補冷媒について、参加各社にて分担し、次のようなテストを実施し発表・情報交換を行ってきた。

- コンプレッサカロリーメータテスト (CC) ; R22用コンプレッサに、新冷媒およびこれと適合する潤滑油のみを置き換えて性能評価した。
- システムドロップインテスト (DI) ; R22用空調システム仕様そのまま、新冷媒およびコンプレッサ潤滑油を置き換えて性能評価した。
- ソフトオプティマイズドコンプレッサテスト (SOC) ; 現状生産設備で可能な範囲の仕様変更を織り込みテストするもの。新冷媒の特性に合わ



※ 1 JAREP : 日本冷凍空調工業会代替冷媒評価プログラム
 ※ 2 AREP : Alternative Refrigerants Evaluation Program
 ※ 3 MCLR : Materials Compatibility and Lubricants Research Program

図-1 JAREP/AREP活動組織

表 1 HFCおよびその混合冷媒

成 分	組成比 (質量%)	ASHRAEコード
HFC - 134a	100	R134a
HFC - 32/125	45/55	(R410B)
HFC - 32/125	50/50	R410A
HFC - 32/125	60/40	
HFC - 32/134a	20/80	
HFC - 32/134a	25/75	
HFC - 32/134a	30/70	
HFC - 32/134a	40/60	
HFC - 32/125/134a	10/70/20	
HFC - 32/125/134a	23/25/52	R407C
HFC - 32/125/134a	30/10/60	
HFC - 23/32/134a	1.5/20/78.5	
HFC - 23/32/134a	1.5/27/71.5	
HFC - 23/32/134a	2/29.4/68.6	

せて排除容積の修正および潤滑油など限られる範囲内で仕様変更を実施してコンプレッサの性能評価を行った。

- ・ソフトオプティマイズドシステムテスト (SOS) ; R22仕様空調機をベースとし、SOCレベルのコンプレッサを用い新冷媒に適合するよう、冷媒封入量や熱交換器内の冷媒の流し方など現状生産設備で可能な範囲の最小限の仕様変更を織り込みシステム性能評価をした。

表 1には、これまでAREP/JAREPで性能評価結果が報告された空調機用の候補冷媒を示す。

発足後、約3年を経過し1994年12月時点でR22 (空調用) およびR502 (低温用) の代替冷媒に関して、合計で約180編の性能・効率評価レポートが各社から提出され、ARTIのデータベースに登録され、一般に

公開されている。性能評価以外でも、新冷媒の熱物性値測定と推算プログラム検討、熱伝達率測定、燃焼性テスト、適合潤滑油の発表などの技術的報告が研究機関、冷媒メーカ、潤滑油メーカ等からなされた。

また1994年12月には神戸において、AREP/JAREP参加企業・研究機関による国際シンポジウムを開催し評価状況の発表を行った³⁾。

4.2 ASHRAE規格と燃焼性等級

ASHRAEでは、申請された新登場の冷媒に冷媒コード名の付与と安全等級格付けを行い、ASHRAE34規格に追補版として発行する。

毒性と燃焼性の程度で図-2のように等級付けされる。代替冷媒として有力と見られるものは、2~3種類のHFCを混合させた物であるが、この中で主要な成分冷媒であるHFC32は、ある条件下において可燃性を

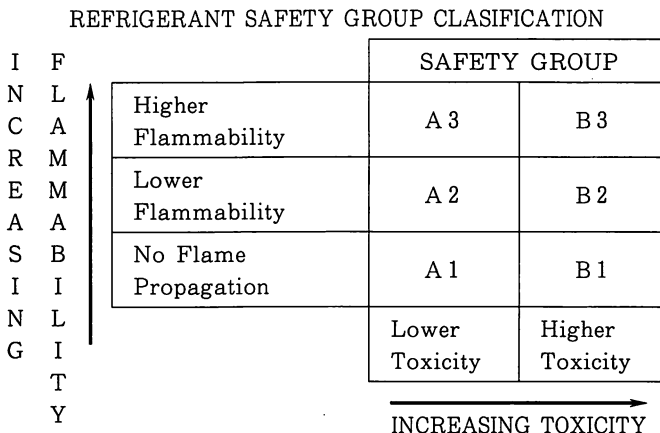


図 2 冷媒の安全性等級 (出展 ASHRAE 34)

示すため、単独では図-2のA 2等級に格付けされる。しかしながら他の成分冷媒(HFC134aまたはHFC125)が不燃性の冷媒であるので、これらの混合冷媒としては不燃性となるよう混合比率を選定している。ちなみに、プロパンはA 3(強燃性)に格付けされる。

なお、非共沸混合冷媒では周囲温度条件の影響などによりシステムから洩れ出す時の冷媒の組成比が初期封入比率と変化している場合が多い。これは成分冷媒の蒸発温度に違いがあるため生ずる現象で“分溜”と言われる。一般に成分冷媒同士の蒸発温度(沸点)特性に差が大きい程分溜の影響も大きく現れる。分溜によって変化した組成比においても不燃性判定となるようにするため、検討開始初期に提案された混合冷媒の中でいくつかは組成比が見直された候補がある。

4.3 代替候補冷媒の評価結果

これまでのスクリーニング評価の結果、空調機用としては、表 2 に示すHFC32/125/134a系の混合冷媒(R407C)およびHFC32/125系の混合冷媒(R410A, R410B)などの数種類が有力候補と考えられる。

ここで非共沸混合冷媒とは沸点の異なる冷媒の混合物のことで、空調機の熱交換器内部で蒸発または凝縮(相変化)させる過程で温度が変化してゆくものである。この温度変化の大きさを“温度勾配”で表す。これは熱交換器の入口側と出口側とで温度差が生じることを意味する。この表では大気圧条件における蒸発開始と終了の温度差で表している。

疑似共沸混合冷媒は成分冷媒相互の沸点の差がごく小さいため、蒸発・凝縮における温度勾配が小さく、ほぼ単一冷媒に近い性質と考えて良い物である。

これらの評価結果は概略次のようである。

(1) R407C ;

この3種混合冷媒の特徴は、冷凍能力と圧力がR22(HCFC22)に近いため、部品・コンプレッサなどの

設計変更は比較的少なくて対応できる点である。ただし非共沸混合冷媒(沸点の異なる冷媒の混合物)であるため、熱交換器における冷媒の流し方(冷媒パス)はこれまでの単一冷媒と異なる工夫をしないと熱交換効率の損失が生ずる場合がある。JAREPのいくつかの性能評価テストレポートでは熱交換器の冷媒経路の変更やパス数の改良を検討している。システム効率評価結果の報告ではR22と比べ-2%から-8%と劣る傾向の結果となっている。

(2) R410A ;

コンプレッサの単位排除容積当たりの冷凍能力がR22の約1.5倍であるためコンプレッサの排除容積を小さくして冷凍能力特性の合せ込みを行う必要がある。このときに圧縮機構部の要素部品ディメンジョンの最適化が必要で効率向上の鍵となる。また、圧力がR22の約1.5倍に高くなるため、コンプレッサの外部ケースおよび内部機構部品、冷媒配管、冷凍サイクル制御部品等の耐圧向上のための設計変更も必要となる。なお、成分である冷媒HFC32とHFC125の沸点がごく近いと沸点の違いにより生ずる温度勾配は非常に小さく、この面からは熱交換器の冷媒経路の設定の考え方は単一冷媒とほぼ同じ設計思想で対応できる。利点としては、同等冷凍能力を得る時の冷媒循環量(体積流量)がR22の約70%と少なくなるため、冷媒配管内での流動抵抗が減少しシステム効率上有利に作用する点である。

当初この2種混合冷媒はHFC32/125 ; 60/40%で提案され、JAREPの評価もこの組成比でいくつかの評価データが報告されたが、可燃性判断基準により、この組成比では微可燃性域にあると判定されたため、50/50% (R410A)に変更された。

AREPで報告されたシステム効率評価結果ではR410Aの効率はR22と同等か5%程度上回るとのデー

表 2 候補冷媒と特性

冷媒成分 組成比, WT%	ASHRAE コード	凝縮圧力(Mpa) 凝縮温度 50℃時	温度勾配(℃) (at, 1 atm)	備 考
HFC - 32/125/134a 23/25/52 %	R407C	2.09	7	非 共 沸
HFC - 32/125 50/50 %	R410A	3.04	0.1	疑似共沸 高压冷媒
HFC - 32/125 45/55 %	(R410B)	3.01	0.1	疑似共沸 高压冷媒
HCFC - 22 (参考)	R22	1.95	0	単 体

タが報告されている。JAREPではこの冷媒に関するデータ報告はまだ一件のみであるが、R22とほぼ同等のシステム効率を得ている³⁾。しかしJAREPとしてはデータ量がまだ少ないので、1995年度に参加各社で、オブティマイズしたシステムでの効率評価テストを追加実施する計画である。

(3) R410B ;

R410Aに対して、組成比違いのR410B (45/55%) は、R410Aとほぼ同じ特性を示すものと考えられるが、提案された時期が後になったため、性能評価データはJAREPではまだ報告されていない。これも今後の作業となる。

4.4 熱交換器の最適化

R407C等の非共沸混合冷媒に対応する熱交換器の開発には次の2点について考慮しなければならない。

- (1) 温度勾配があるため、冷媒を流す方向により熱交換器の性能に影響がでる。
- (2) 沸点の異なる冷媒の混合物であるため、熱交換器管内の蒸発および凝縮過程で物質移動にともなう伝熱抵抗が生じ、単一冷媒単独の場合に比べ混合物での熱伝達率が低下する。

(1) 項の温度勾配に対しては、対向流とすることで効率向上は期待できるが、冷房・暖房兼用タイプでは冷房運転と暖房運転とで冷媒の流れが逆転するため、両方のモードにおいて常に対向流とすることは難しい。このため、両運転モードにおいて一部を対向流、一部を平行流としバランスを取りつつ効率上最適となるよう改善した例が報告されている⁴⁾。

(2) 項については、HFC32/125/134aの管内熱伝達率の測定結果として、R22と比べ約30%の熱伝達率低下が報告されている⁵⁾。これはシステム効率の低下として3から5%の影響が見積もられる。この改善のために、管内の熱伝達率を向上させるための技術開発は今後の課題である。

温度勾配の少ない冷媒（疑似共沸冷媒）については温度勾配の影響を考慮する必要性は少ない。ただし、R410A（またはR410B）は高压化への対応、および、冷媒の流速が小さくなるため、熱交換器内の冷媒パス数またはパイプ径の適正化検討および高压化への対応は必要と考えられる。

4.5 コンプレッサの開発

R22の代替フロン候補で、R407Cは運転圧力範囲および冷凍能力特性がR22に近いのでシリンダのディメンジョンや耐圧設計面からの仕様変更の程度は比較的

少ない。

一方、R410A系（HFC32/125）はR22に比べ運転圧力が50%程度高くなり、かつ冷凍能力特性が45%程度高くなるため、シリンダディメンジョンの大幅な変更および耐圧性向上を、コンプレッサの効率を維持・向上させながら進めなければならない。これに伴い生産設備の変更も大幅になる可能性がある。

この他に、潤滑油としてHFC冷媒と相溶性のあるポリオールエステル油（POE）などの新冷凍機油を使う必要があるが、この油の粘度の選定も効率や耐久性に深く関係するので最適化することが重要である。また、POE油以外の潤滑油候補も提案されており、総合的に最適な潤滑油の選定が重要である。

4.6 代替フロンにおけるシステムの信頼性評価

代替フロン採用に際し、機器の信頼性でもっとも留意すべき点は、コンプレッサの耐久性、コンプレッサの有機系部品材料適合性、機器の部品洗浄などに用いる工程副資材との反応によるコンタミナツ（有害な生成物で機器の性能劣化を生じさせる）の発生、である。特に、コンプレッサの潤滑油として現在まで使用してきた鉱油やアルキルベンゼンなどは代替フロンとの相溶性がほとんど無いため、冷媒と潤滑油が分離し、コンプレッサから冷凍サイクルに流れ出した潤滑油がコンプレッサにきわめて戻りにくい現象が発生する可能性がある。そのために代替フロンと相溶性が高いポリオールエステル油（POE）などが新たに開発され検討が進められている。POEは鉱油に対して代替フロンとの組合せで潤滑性に若干劣ること、また、吸湿性が高く加水分解しやすいので水分管理を徹底する必要があること、などに留意しなければならない。

また、日本の空調機器は冷暖房兼用のヒートポンプタイプが数量的に多くを占め、さらにコンプレッサモータの回転数制御を行うインバータ能力可変タイプが主流となっている。このため、幅広い使用環境条件において種々のストレスを加え、長期間にわたる信頼性を確認するなどの慎重な評価が必要である。したがって、最終的な結論に至るまでさらに時間を要するであろう。

5. 今後の課題と取り組み

5.1 AREP/JAREP活動

日米欧の冷凍空調機器メーカーは今後もR22の代替冷媒技術開発に協力してあたることを確認しており、AREP/JAREPでも1995年からは特に実用化技術開発で協

力し合うことになっている。

これらの主な内容は、

- ・未評価もしくは今後提案されるであろう冷媒の性能評価（最適化設計機器による性能評価の継続を含む）
- ・規格の制定（特に非共沸混合冷媒冷媒におけるコンプレッサ性能評価法の国際基準制定）
- ・実用化過程における市場実績，経験の情報交換（潤滑油の選定およびコンプレッサ耐久性）
- ・冷媒物性値の研究（新冷媒の追加，データ精度の向上，世界共通化）
- ・将来冷媒の可能性（可燃性試験法，製品安全設計基準，製品設置基準の制定など）

などである²⁾。

5.2 製品開発と市場導入

ここで述べたHFC候補冷媒を用いた製品の開発と市場導入までには、冷凍サイクルの冷媒制御に使用する、部品メーカーが生産する各種制御部品（四方弁，二方弁，膨張弁など）の開発促進と供給体制の確立のために、部品メーカーとの連携をとり製品生産体制を整えること，また現地設置工事やサービス対応において混合冷媒（特に分溜を生じやすい非共沸混合冷媒）および新しい潤滑油の取扱い方法の最適化と整備などにも取り組んで行かねばならない。

5.3 代替フロンの製品化時期

米国では数社において、3種混合冷媒R407Cや2種混合冷媒R410Aを用いたユニタリーエアコンが発売もしくは本年中に発売予定と報じられている。

日本のメーカーも数年後にはこれに追従して、HFC系混合冷媒の製品化を始めるものと思われる。しかしながら、空調機用としてはまだ評価期間が浅く、HF

C系混合冷媒のほとんどが非共沸混合冷媒であることから、分溜現象の解明，冷媒に対する最適化仕様の確立と高効率化検討，材料適合性，耐久・信頼性の確認などについては今後もさらに上記候補を中心として研究と評価が必要である。このような条件を勘案すると，広く全製品・全地域で商用生産に入れるのは2000年から2005年以後になると思われる。

6. おわりに

現在，オゾン層保護のため，オゾン破壊係数ゼロの代替冷媒としてHFC冷媒を本命として検討している。これに加えて，地球温暖化防止の観点から，TEWIミニマム化のために，コンプレッサや熱交換器の最適化技術開発および，システムとしての効率向上技術の開発を将来にわたって推進して行く必要がある。

省エネルギーなどの商品性の維持および向上を図りつつ，地球環境保護，機器使用者の安全性保証の3要素を満足させる研究開発の推進が技術者とメーカーの課題であり使命であると考ええる。

文 献

- 1) 森川善之；“HCFC代替冷媒の開発状況”，冷凍，69（795），100（1994）。
- 2) 森川善之；“HCFC22の生産全廃への動きと代替技術開発の現状”，冷凍，70（808），4（1995）。
- 3) Proceedings for The International Symposium on R22 & R502 Alternative Refrigerants '94. Dec. 8-9, 1994. KOBE JAPAN.
- 4) 小津政雄，他；“冷凍・空調機器の今後のフロン対応技術”，東芝レビュー，VOL. 50 NO. 2, 143, (1995)。
- 5) 五島政雄，他；“HCFC22およびHFC-32/125/134aの水平溝付管内の蒸発熱伝達”，第31回日本伝熱シンポジウム，Vol 2, pp. 721-723 (1994)。

協賛行事ごあんない

「超高温材料国際シンポジウム」について

〔日 時〕平成7年12月7日(木)～8日(金)

〔場 所〕多治見市文化会館

(岐阜県多治見市十九田町2-8，

TEL 0572-23-2600)

〔参加料・交流会費〕

参加料 8,000円 (昼食及び交流会費)

〔問い合わせ先〕

〒507 岐阜県多治見市東町3-1-8

(株)超高温材料研究所 岐阜研究所

TEL0572-25-5380 FAX0572-21-1045