



冷凍空調業界を取り巻く 地球環境問題とその対応

久島俊也

(社)日本冷凍空調工業会 技術部長

Shunya Hisashima

Status of Global Environment Protection in Refrigeration and Air Conditioning

1 はじめに

現在の日本の生活の中のあらゆる場面で、冷凍・空調技術が関係している。

空気調和機(エアコン)分野では、家庭用エアコンが最も一般的であるが、大型のビル空調機、店舗用空調機、乗用車・バス・鉄道車両・船舶・航空機等の移動体の空調機、コンピューター用空調機、クリーンルーム及び精密加工室用空調機等があり、更には農園芸用のハウス空調機が使われている。空気調和を必要とする対象が、人間だけでなく、加工機や被加工体及び動植物に及んでいる。

冷凍冷蔵分野では、家庭用冷蔵庫が最も一般的であるが、漁船用冷凍設備や稲穂の貯蔵倉庫等の農水産物の貯蔵、船舶やトラック輸送用冷凍冷蔵コンテナ、流通倉庫、店舗用の冷凍冷蔵ショーケース等があり、これらのどれ一つを欠いても現在の社会生活が成り立たなくなっている。

また、近年は医療・保険用途でも随所に用途が拡大している。

これらの冷凍空調機は、一部の特殊用途以外は、作動媒体(冷媒ガス)を圧縮して再膨張させるシステム(カルノーサイクル)を利用したシステムを用いている。作動媒体(冷媒ガス)の開発は、冷凍サイクルの性能や安全性を決定する最重要アイテムであり、フルオロカーボン系の冷媒が発明されて以来、急激に冷凍空調の世界が広がったといえる。近年、このフルオロカーボン類が、オゾン層破壊や地球温暖化影響の視点から問題視されており、業界を上げて対応策を検討しているところである。

本項では、歴史的な技術の流れと現在の問題点及び短中期の対応と長期的な将来への対応の考え方について、できるだけ平易に記してみたい。

2 世界最古の冷蔵

水や氷に浸して物を冷す以外の原理で、冷凍や冷蔵を行い始めたのは何時のころだろうか。

エジプト時代(紀元前5～6世紀)の壁画に描かれている素焼きの甕について、次のような説明が加えられているのを読んだことがある。この素焼きの甕にワインを入れて夜のうちに屋上に置くと、翌朝には冷たく美味しいワインが飲める。これが世界最古の冷蔵庫である。この場合、甕を持ち運びしなければならないことに抵抗がある。

私は、次の事例を世界最古に推奨したい。中国西安の郊外の渭水のほとりで咸陽宮址(紀元前2世紀)を発掘しているときに、直径70～80cmの碗型と円筒型の素焼きの物体を発掘した。碗型を底部に置き、その上に円筒を積み上げて、8m程度の井戸の様な構造にしており、その底部が渭水の水面に近いことから、水の蒸発潜熱を利用した冷蔵庫ではないかと推定されている(咸陽市博物館)。その後、このような遺構が数箇所発見されていることから、しっかりした根拠を持って冷蔵が行われていたと推定しても良いだろう。

3 冷凍機のはじまり

現在用いられている機械式の冷凍機が使われ出したのは、非常に新しく19世紀に入ってからである。1824年にカルノーが、カルノーサイクルの理論を発表し、マイカーが熱の仕事当量の理論を発表して、冷凍空調のシステムが組めるようになったのが1842年のことである。

1849年に、米国で空気を使った空気圧縮式の冷凍機が作られた。その後、航空機用空調機に使われたが衰退し、近年になって特殊な用途で2～3の開発例が話題を呼ぶことがあるエアサイクル冷凍の起源である。

1851年にフランスのフェルジナンド・カレーが、初めて

アンモニア冷媒を使った冷凍機を設計し、この成果によって冷凍機が商業的に使われるようになった。アンモニアは熱物性的には良い特性を持っているが、毒性と弱燃焼性があり、且つ銅材料を腐食するために、冷媒漏洩事故による2次災害の問題から一般的な冷凍空調の用途拡大にはつながらなかった。その後、多くの技術開発が行われて、アンモニア冷凍機のファンもあり、現在なお多くは漁港の冷凍倉庫等で使われている。

その他多くの化学物質が、冷媒用途として試みられてきたが、万能な冷媒は無かった。

4 フルオロカーボン(通称フロン)冷媒の発見

1930年に米国のトーマス・ミッジェリーがフルオロカーボンの合成に成功した。彼は、ゼネラルモーターズの家庭用冷蔵庫部門からの委託を受けて、フッ素と塩素の化合物の開発を行っていたのである。彼が、米国の化学学会での発表に際して、合成した化学物質を口に含んで、蠟燭の炎に向かって吹き付けて見せたと云う逸話がある。毒性が全く無く、燃えない、理想的な冷媒としてのレビューである。アンモニアが最も一般的な冷媒として使われていた時代背景を考えると、如何に衝撃的なデモンストレーションであったかが推察される。

この技術をデュポンが商品化して、1931年には220ポンド生産し、5年後には7600ポンドまで大量生産している。その後各種のフルオロカーボンが合成され、各領域の冷媒用途に提供されるようになって、応用製品の種類も急激に広がり、冷凍空調機器がより市民生活の近くに展開されることになった。

フルオロカーボンは、当初は冷媒用途に開発されたものであるが、その後、発泡剤・洗浄剤・溶剤・エアゾル等の開放系での用途も急激に広がり、その生産量及び消費量は急激に増大した。

5 冷媒に求められる特性

第1の基本特性は、温度調整する対象温度帯域に応じて、実用的な圧力下で適切な蒸発温度を持つことであり、単位質量当たりの熱エネルギーの変換量が多いことである。この点では、アンモニアや炭化水素系及びフルオロカーボン系は共に良い特性を持っている。

第2に、金属や非金属材料との適合性が良いことである。アンモニアは銅系材料を腐食することから、小形の冷凍空調機の多くで用いられている密閉圧縮機システムに適さな

い。アルミ巻線のモータやキャンドモータ等の技術開発が進められているが、このハンディは大きい。現在用いられているシステムの多くは、開放型の圧縮機で鉄系の配管及び熱交換器を用いているために、外部からの腐食や加工性のハンディを負っている。

第3は、毒性や燃焼性が無いことである。これは取扱時や事故故障時の冷媒漏洩に伴う2次災害の問題である。アンモニアは毒性があり、炭化水素類は強い燃焼性があるので、冷媒使用量の少ない小形の機器やしっかりした安全管理ができる用途に限定される。フルオロカーボンが発明されてから冷凍空調の世界が急激に広がった理由は、フルオロカーボンが無毒、不燃であることによる。

第4はオゾン層を破壊しないこと、第5は温暖化効果が低いことが、近年追加されたが、これは別項で説明する。

6 オゾン層保護活動

1974年にカリフォルニア大学のローランド教授がオゾン層の減少と人類生態系に与える影響と可能性に関する論文を発表した。これを契機にして、1985年にウィーン条約、1987年にモントリオール議定書が締結されて、国際的なオゾン層保護活動が始まった。モントリオール議定書における規制の基本的な考え方は、オゾン層破壊物質を特定して、ガス種毎に生産の段階削減と全廃スケジュールを設定したことである。

当初は先進国だけに規制を義務付けていたが、1995年の第7回会合で途上国に対しても生産規制のスケジュールを設定したことにより、真に世界を挙げての活動になった。

7 日本における主なオゾン層破壊物質の現状

表1に示すように、多くのオゾン層破壊物質の生産は全

表1 オゾン層破壊物質と用途

名 称	用 途	削減、全廃時期
CFC〔クロロフルオロカーボン〕(0.6~1.0)	冷媒 発泡剤 洗浄剤	1995年末全廃 エッセンシャルユースを除く
ハロン (3.0~10.0)	消化剤	1993年末全廃
1,1,1-トリクロロエタン (0.1)	金属洗浄剤 樹脂洗浄	1995年末全廃 エッセンシャルユースを除く
四塩化炭素 (1.1)	CFCの原料 一般溶剤 研究分析用途	1995年末全廃 エッセンシャルユースを除く
HCFC〔ハイドロクロロフルオロカーボン〕(0.02~0.11)	冷媒 発泡剤	1989年総量規制 2004年から段階削減 2020年全廃
HBFC〔ハイドロブロモフルオロカーボン〕(0.1~14)	消化剤 (代替ハロン)	1995年末全廃
臭化メチル (0.6)	薰蒸剤 (検疫、食品、土壌)	1991年総量規制 2001年から段階削減 2010年全廃

() 内の値はオゾン層破壊係数を示す。
オゾン層破壊係数：CFC11及びCFC12のオゾン層破壊を1.0とした場合の比較値

廃され、今後、代替物、代替技術の開発と生産転換が必要なのは、HCFCと臭化メチルだけである。

8 冷媒の種類と特徴

一般に「フロン」と呼ばれているフルオロカーボンは、炭素とフッ素の化合物の総称で、冷媒用途に使われるものに、CFC、HCFC、HFCの3種類がある(表2)。

表2 冷媒の種類

種類	特徴と冷媒用に使われる物質
自然系冷媒 (0)	オゾン層を破壊しない。 アンモニア、プロパン、イソブタン、炭酸ガス、水等
CFC〔クロロフルオロカーボン〕 (0.6~1.0)	オゾン層破壊係数が高い。 CFC11, CFC12, CFC113, CFC114, CFC115等
HCFC〔ハイドロクロロフルオ ロカーボン〕(0.02~0.055)	オゾン層破壊係数が低い。 HCFC123, HCFC22等
HFC〔ハイドロフルオロカーボ ン〕(0)	オゾン層を破壊しない。 HFC134a, HFC152a, HFC32, HFC143a, HFC125等 R410A, R407C, R404A, R507A等のHFCの混合物

() 内はオゾン層破壊係数を示す。

9 冷凍空調機の冷媒転換

CFCは炭素と塩素とフッ素の化合物で、化学的に極めて安定した物質である。化学的に安定であることは、10~20年間使われる冷凍空調用冷媒として望ましい特性であるが、一方、大気漏洩した時に破壊されずに成層圏に達して、成層圏で徐々に分解して発生する塩素分子がオゾン層を破壊する原因になっている。CFC冷媒は、カーエアコン、家庭用冷蔵庫、ショーケースや業務用の冷凍冷蔵装置等に使われていたが、1995年のCFC生産全廃に先立って、夫々の代替物質を用いた機器の技術開発を行い、工場生産ベースでは1995年には総べてCFCを使わない機器に生産転換した。

HCFCは炭素と塩素とフッ素と水素の化合物で、CFCより安定度は低いが、塩素分子を含むので、少ないながらオゾン層を破壊する原因になる。

HCFC冷媒は家庭用エアコンや業務用エアコンに当初から使われている物質で、現在生産されている大部分は未だHCFCを使っている。また、HCFCはCFC冷媒の代替物としての位置付けもあり、CFC冷媒を使っていた遠心冷凍機、ショーケース、業務用の冷凍冷蔵装置や輸送用冷凍装置等の多くは、CFCの代替冷媒としてHCFC冷媒を使っている。

モントリオール議定書及び日本のオゾン層保護法で決められているHCFCの削減スケジュールを図1に示す。現時点ではHCFCの使用量の5~6割を冷媒として使っているため、HCFC冷媒使用機器の代替冷媒への転換は業界にとって最も大きな課題である。生産額で云うと、既にCFC冷媒からHFC冷媒使用に転換したカーエアコンを除くと、2兆円弱の製品で、HCFC冷媒からの転換を求められることになる。

10 HCFC代替冷媒の開発と利用技術の開発

1993年から1996年にかけて、日米が中心になって、カナダ、欧州の冷凍空調工業会が集まって、HCFCの代替冷媒の

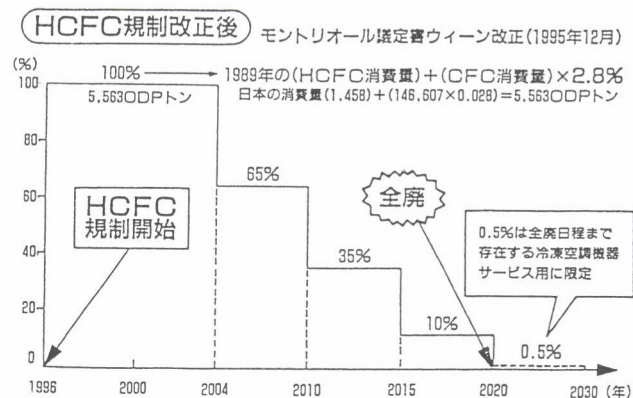


図1 HCFCの規制スケジュール

評価のための共同事業(AREP; Alternative Refrigerants Evaluation Program)を実施した。安全且つエネルギー効率の高い冷媒を求めてゆくと、単一冷媒としてはHFC134a以外に存在せず、更に良い冷媒を求めるには2種または3種のHFCを混合する必要があった。この時点で代替冷媒候補の数は大幅に増大し、更に熱物性等の基礎データが無い中で評価が必要になった。

この状況から、研究投資の負担を軽減し且つ開発時間を短縮するために世界規模の共同事業を起こし、関係者がそれぞれ検討テーマを分担したのである。この事業は、冷凍空調機器メーカーが中心になって、冷媒メーカー及び潤滑油メーカーの参加を得て進められた。

この成果として、HFCならびにその混合体、アンモニア、プロパン等の自然系冷媒に関して、空調・冷凍システムによる性能評価とコンプレッサーによる性能評価の200編以上のデータを公開した。この事業によって代替冷媒の大きな方向付けができた。

1996年から1998年にかけては、HFC系の新冷媒を生産して市場に導入するに際して、生産及び受け入れの体制を整備することが必要であり、これも業界を上げて取り組んできた。性能・信頼性の検討、規格・基準の検討、工事・サービス業者のためのマニュアル作成と普及、新冷媒使用時のTEWI評価(12章で説明)等が主な事業である。

これらの活動の結果、1996年からR404A使用の低温機器が発売され、1998年春にはR410A及びR407C使用の空調機

が各社から発売されて、今後の積極的な市場展開を期待しているところである。

表3に各種の冷凍空調機における使用冷媒の変遷を示す。

11 地球気候変動枠組み条約京都合会 (COP3)

1997年12月に行われた気候変動枠組み条約京都合会 (COP3)において、2000年以降の温暖化ガスの排出削減の目標が設定されたことは衆知のとおりである。

京都議定書では、CO₂、N₂O、メタン、HFC、PFC、SF₆の6種類のガスを1バスケットにして、その総大気排出量の削減を目標値にしている。

冷凍空調業界にとっては、CFC・HCFC冷媒の代替物としてこれから使用を始めようとしているHFCが温暖化ガスに指定されたことの影響は極めて大きい。ただ一つの救いは、大気排出を規制していることである。冷凍空調用の冷媒は密閉系で使われており、順調に機能している間は環境に何の影響も無く、修理や使用済み機器の処理時に冷媒回収をすることで大気排出を避けることができる。

モントリオール議定書では、密閉系で使うものも、開放系で使うものも区別をせずに、大気排出を防止するためにオゾン層破壊物質の生産を全廃する手段を採っている。このために、冷凍空調の領域ではオゾン層破壊物質からの転換を果たして、更に、オゾン層保護の追加対策として既存機器の冷媒回収を求められている。

日本における基準年の温暖化ガスの排出量の分析結果を図2に示す。HFCの大気排出量は全体の約1.6%であり、冷媒用途に限ると全体の0.02%に過ぎない。しかし、今後のHCFCからの冷媒転換し特別の対策を行わないと、2010年には約20倍になり、2020年には更に増大すると予想されるので、今からできるかぎりの対策を準備しておく必要がある。

12 冷凍空調機の温暖化防止への貢献

冷凍空調の温暖化防止への貢献を評価するためには、二つの視点で考える必要がある。第1は、冷凍空調機器はエネルギー消費形の製品であり、機器使用に伴うエネルギー供給源からのCO₂排出である。第2は、機器の生産から廃棄までの間に漏洩する冷媒用HFCガスによる影響である。

この二つを総合してTEWI (Total Equivalent Warming Impact 総等価温暖化影響) なる指標を用いて、総合評価している。

TEWI指標の定義

TEWI = 直接効果 + 間接効果

表3 冷凍空調機器で使われている冷媒の種類

	従 来	現在商品化 されている例	将 来
ルームエアコン	HCFC-22	HCFC-22	R410A
パッケージエアコン	HCFC-22	HCFC-22	R407C
遠心冷凍機	CFC-11 CFC-12 HCFC-22	HCFC-123 HFC-134a HCFC-22	(HFC-245fa) HFC-134a ?
吸収式冷凍機	臭化リチウム	臭化リチウム	臭化リチウム
スクリュ冷凍機	CFC-12 HCFC-22	HFC-134a HCFC-22 アンモニア	HFC-134a R-407C アンモニア
業務用冷凍機 ショーケース	CFC-12, R502 HCFC-22 アンモニア	HFC-134a HCFC-22 アンモニア	HFC-134a R404A, R507A アンモニア
輸送用冷凍機	CFC-12, R502 HCFC-22	HFC-134a, R404A HCFC-22	HFC-134a, R404A R507A
車両用エアコン	CFC-12	HFC-134a	HFC-134a
家庭用冷蔵庫	CFC-12, R502	HFC-134a HCFC-22	HFC-134a
自動販売機	CFC-12, R502	HCFC-22	R404A (R-407C)

(注) R-410A (HFC-32/125), R-407C (HFC-32/125/134a)

R-404A (HFC-125/143a/134a), R-507C (HFC-125/143a)

(1997.8.30. 日本冷凍空調工業会調べ)

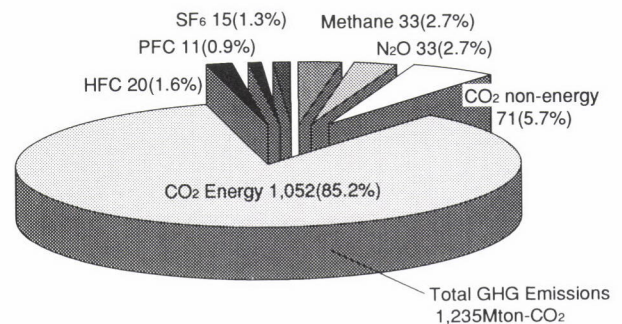


図2 基準年の温暖化ガス排出量

直接効果 = $GWP \times L \times N + GWP \times (1 - \alpha)$

間接効果 = $N \times E \times \beta$

GWP: CO₂を基準とした対象ガス 1 kg 当たりの温暖化影響値

L: 機器からの年間漏洩量 (kg/year)

N: 機器の使用年数 (year)

M: 機器への冷媒充填量 (kg)

α : 機器廃棄時の冷媒回収率

E: 機器の年間エネルギー消費量 (kWh/year)

β : 1 kWh の発力を発電するときの CO₂ 発生量 (kg-CO₂/kWh)

業務用空調機での TEWI 分析の例を図3に示す。

図に示すように、冷媒の大気排出による直接効果よりも、エネルギー消費による間接効果が遙かに大きいこと理解できるであろう。各種の冷凍空調機器について同様の分析を行い、業界としての基本的な考え方を纏めている。

第1に、冷凍空調機器のエネルギー消費の削減、エネルギー効率の向上を第1優先に考える。冷媒の選択に当たっては、使用冷媒のGWP (温暖化影響) 値だけでなく、機器のエネルギー効率をどこまで高められるかを充分配慮する。

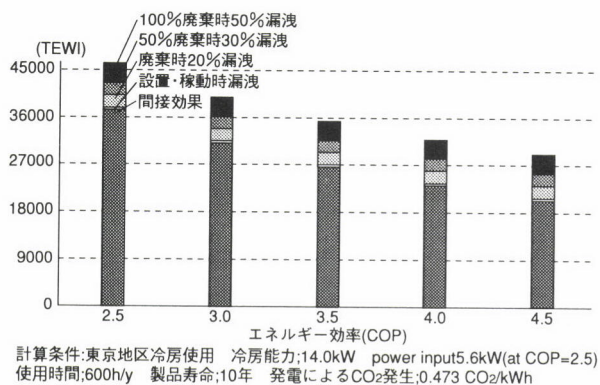


図3 パッケージエアコン(14.0kW)のTEWI分析例

第2に、機器の生産から廃棄までを通じて、冷媒の 대기排出を極小にするために、機器の設計改善、工事事業者の再教育、機器使用者への廃棄時の冷媒回収のPRに努める。

13 エネルギー効率の向上

空調機を例にして説明する。「エネルギーの使用の合理化に関する法律」(省エネ法)は昭和54年に制定され、エアコンデショナー(家庭用エアコン、業務用エアコン)が特定機器に指定されている。その後、平成5年に改正され、平成10年6月に抜本的な改正が行われた。今回の改正の眼目はトップランナー方式を導入したことである。すなわち、現在商品化されている製品のうちエネルギー消費効率が最も優れているもの(トップランナー)の性能・技術開発の見通し等を勘案して目標設定することにより、機器のエネルギー消費効率を大幅に改善することを狙いとしている。

目標値は現在検討中であるが、冷暖兼用エアコンではCOP2.96→4.84と約70%の改善を、冷房専用機ではCOP2.80→3.21と約14%の改善の改善が義務付けられることになる。HCFC冷媒からHFC冷媒に転換することは、冷媒の熱物性的にもエネルギー効率が低下する方向であり、機器設計面でこれをカバーしてゆく必要がある。

このために、機器の大きさやコスト影響は避けられないことを考えると、更に激しい技術競争が続くと考えねばならない。

4 冷媒の大気排出の極小化

市場稼働機のCFC冷媒の回収及び将来のHFC冷媒の大気排出極小化については、短期対応と長期対応を視野に入れて、業界活動を展開しているところであるが、活動内容を説明するスペースがないので、ごく簡単に状況を述べる。

業務用冷凍機のCFC冷媒回収については、1997年9月に通産大臣に業界自主計画を提出し着実にインフラ整備を進めているところである。CFC冷媒だけを考えるならば一時的な対応で良いが、中期的にはHCFC冷媒を、長期的にはHFC冷媒も回収が必要であり、恒久的な社会システムを構築することを意図している。

HFC冷媒については、1998年4月に業界自主計画を立案し、これも通商産業省に提出している。これから生産が始まり機器の廃棄は10～20年後であるが、生産から廃棄までを想定して、冷媒の大気排出の極小化の検討を進めている。

15 おわりに

オゾン層保護及び地球温暖化防止の活動とフルオロカーボン系冷媒の関係について述べてきた。近年、欧州を中心にして自然系冷媒に戻るべきとの意見が強くなり、国内でも同様なNGOの意見や新聞報道がされることが多いし、原理的にエネルギー効率の悪い機器を、フルオロカーボン冷媒を使っていないと云うだけで、地球にやさしいと称している例もある。しかし、これだけ多様化した技術について単純に昔に戻ることはできない。将来の冷凍空調の世界では、必ずしもHFCのみに頼るのでなく、冒頭に説明した成陽宮冷蔵庫もアンモニアやプロパンもできるだけ広い視野で判断して使えるところには使ってゆくことが肝要と考える。化学物質を大量に消費することはそれ事態がリスクを伴うとすれば、CFC・HCFCに代わる万能の冷媒を求めるのでなく、用途に応じて適切な冷媒や技術を開発し利用してゆくことが必要であると考えます。

(1998年12月16日受付)