

エアコンディショナにおける冷媒ドロップインの動向

「環境エネルギーネットワーク 21」主任研究員 大野慶祐, 石橋直彦

1. はじめに

冷凍空調機器に使用されている冷媒の歴史は、大きく3つに分かれると考えられる。一つ目は1930年代以前、二つ目は1930年代から1987年まで、三つ目は1987年から現在である。1930年代以前は、エーテルやアンモニアといった、元々自然界に存在していた媒体が冷媒として用いられていた。エーテルやアンモニアには可燃性や毒性があり安全な冷媒が望まれていた。そこで、1930年代になるとCFC（クロロフルオロカーボン）が開発され、やがてHCFC（ハイドロクロロフルオロカーボン）も開発された。これらは毒性がなく、きわめて安定（つまり不燃）であるため、冷媒として広く普及した。しかし、CFCとHCFCはオゾン層を破壊することが徐々に明らかとなり、1987年のモントリオール議定書^①の採択により規制されることとなった。その後、オゾン層を破壊しないHFC（ハイドロフルオロカーボン）への転換が試みられ、我が国においてはHFC系冷媒が主流となった。しかし後に、モントリオール議定書はオゾン層を破壊する冷媒だけでなく、地球温暖化に寄与する冷媒も規制対象とする改正が行われ、HFC系冷媒も規制の対象となり、2036年から2047年頃には現在用いられている冷媒のほとんどは使用できなくなる。^②

モントリオール議定書以降の冷媒と規制の変遷の概要を図1に示す。

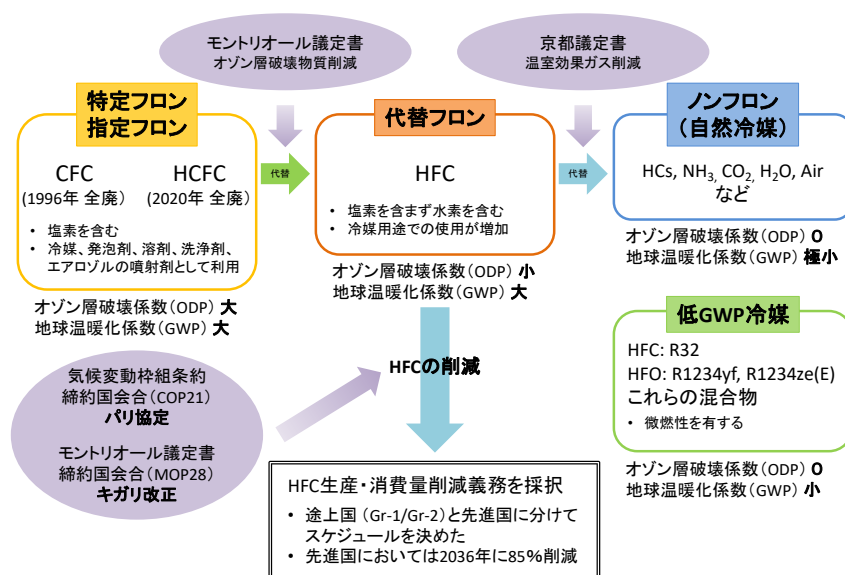


図1 冷媒と規制の変遷

図1に示すキガリ改正により、先進国においては2036年までに2011～2013年の平均数量等を基準として85%削減することが義務付けられた。我が国はHCFCからHFC系冷媒への転換を済ませつつある

が、これには長い時間がかかり、日本冷凍空調工業会の調べ^③によると約 20 年程度と読み取れる。時間がかかる理由としては大きく二つ挙げられる。理由の一つ目は、新冷媒を使用し始めるには時間がかかることである。リスクアセスメント、法整備、新冷媒の生産体制の構築、新冷媒を用いた機器の開発などのためである。理由の二つ目は、規制対象冷媒の使用を突然やめることができないということである。冷凍空調機器の寿命は長いため、たとえ新冷媒が実用化されたとしても、既設の冷凍空調機器は従来の HCFC や HFC 系冷媒を使用し続けなければならない。将来的に冷媒の大転換は必須であり、本稿では冷媒転換の一つの手法であるドロップインとその評価について紹介する。

ドロップインとは、既存の冷凍空調機器に本来使用されるべき冷媒ではない冷媒を封入することである。同時に、新冷媒に順応させるために機器に軽微な改良を加えることがある。ドロップインの利点としては、軽微な改良のみで既存の冷凍空調機器を新冷媒に適応させることができる点である。しかしながら、冷媒をドロップインしただけでは設計上想定された冷媒とは異なる冷媒を封入することになるため、冷房能力や冷媒の圧力損失といった冷凍空調機器の特性が大きく変化し、冷媒として本来実現可能な性能を得ることが困難であることは容易に予想できる。

本稿では、HFC 冷媒（今回は R 410A）からの転換を想定し、炭化水素系冷媒ならびに HFO（ハイドロフルオロオレフィン）系混合冷媒をドロップインした効果について紹介する。

2. R 410A 用ルームエアコンへの R 600a ドロップイン評価

本節では HFC 系冷媒である R 410A 用に開発された一般的なルームエアコンに炭化水素系冷媒である R 600a（イソブタン）をドロップインした場合の性能評価を紹介する。

2.1 冷媒物性からの結果予測

R 410A と R 600a について、蒸発温度 10 °C、凝縮温度 45 °C、凝縮出口過冷度 5 K、蒸発出口過熱度 5 K、圧縮機断熱効率 1.0 の条件にてルームエアコン冷房運転した場合の、熱交換器の圧力損失を無視した理想的な圧縮式冷凍サイクルの COP、圧縮機吸込み比体積、蒸発器過程冷媒出入口の比エンタルピ差、冷房能力当たりの冷媒循環量を表 1 に示す。冷媒の物性値は REFPROP を用いた。

表 1 理論冷凍サイクルにおける比較（R 600a）

	R 410A	R 600a
理論 COP [-]	6.40	7.13
圧縮機吸込み比体積 [m ³ /kg]	0.0248	0.174
蒸発過程冷媒出入口比エンタルピ差 [kJ/kg]	164	280
冷房能力当たりの冷媒循環量 [kg/(s・kW)]	0.00610	0.00357

表 1 から、R 600a は R 410A と比較して理想 COP が約 1.1 倍、圧縮機吸込み比体積が約 7.0 倍、蒸発過程冷媒出入口比エンタルピ差が 1.7 倍であることがわかる。これら検討結果より、実際に R 600a をドロップインした場合に以下のことが予測される。

- ・圧縮機を同一行程容積で運転した場合、R 600a の蒸発過程冷媒出入口の比エンタルピ差が大きいため、冷媒循環量当たりの冷房能力は大きいですが、比体積が大きいため十分な冷媒循環量が得られず、圧縮機動力も低下するが冷房能力も大幅に低下することが予想される。

・ R 600a の理想 COP は R 410A よりもわずかに大きい。しかし、R 600a は比体積が大きく、蒸発器やガス配管など、気体冷媒の流速が大幅に増大し、圧力損失が増大するため、COP が逆に低下することすら十分に予想される。

以上のように、R 410A 用ルームエアコンに R 600a をドロップインすることにより、冷房能力と消費電力の大幅な低下が容易に示唆される。また、COP については、向上する要因と低下する要因が存在するため、シミュレーション等による十分な評価が必要である。

2.2 実験による R 600a 冷媒のドロップイン評価

本項では実験による評価について述べる。実験の詳細は文献⁽⁴⁾を参照されたい。なお、以降の結果では R 410A を用いた場合を基準とするために 100 % として記述している。

夏期の標準的な冷房条件での試験結果を表 2 に示す。R 600a では圧縮機行程容積の不足から冷媒循環量が低下し、冷房能力は 69 % 低下した。また、圧縮機動力は 74 % 低下した。これは冷房能力が低下したため、相対的に冷房能力あたりの熱交換器の体格が大きくなり、十分に熱交換が行えたからである。そのため、R 600a の COP が R 410A に比べて 22 % 高くなった。このように COP は向上するように見えるが、これは消費電力の低下があるからである。

表 2 実機とシミュレーションの冷房条件試験結果比較

冷媒	R 410A (原機)	R 600a (ドロップイン)
冷房能力 [kW]	2.84	0.887 (↓ 69 %)
Electric input [kW]	0.692	0.177 (↓ 74 %)
COP [-]	4.11	5.00 (↑ 22 %)
凝縮温度 [°C]	42.5	36.6 (↓ 5.9 °C)
蒸発温度 [°C]	17.8	23.7 (↑ 5.9 °C)

2.3 シミュレーションによる R 600a 冷媒のドロップイン評価

2.2 項の結果はドロップイン試験であるため、試験上の制約から必ずしも同一の条件では比較できない。そこで、運転条件を変化させることにより冷房能力を同一とした場合のシミュレーション評価を行った。すなわち、R 410A と R 600a それぞれにおいて同じ冷房負荷を処理した場合の評価について述べる。シミュレーションの詳細は文献⁽⁵⁾を参照されたい。

結果としては、R 600a をドロップインした場合は、消費電力が増大したが、冷房能力は同一であるため、COP が低下した。例えば冷房能力 1 kW の場合では、消費電力は約 32 % 増大し、COP が約 24 % 低下した。これは、同一の冷房能力を得るためには、気体冷媒が流れる蒸発器やガス配管内の冷媒流速が大きくなり、圧力損失が増大し、圧縮機消費電力が増大するためである。

蒸発器では冷房能力の増加とともに圧力損失が増大していることが確認できた。また、理想的には COP の向上が予測されたが、現実的には圧力損失が増大することから、COP が低下する結果となった。

以上のように R 600a は理想的には高性能を達成できるが、単純にドロップインしただけでは性能が低下することが明らかとなった。R 600a を用いた実機を実用化するためには、その設計方法について十分な議論が必要である。また、ここでは触れなかったが、COP や冷房能力だけではなく、毒性や可燃性といった安全性についても十分な配慮が必要であることはいままでもない。

3. R 410A 用空調機器への R 290 ドロップイン評価

R 290（プロパン）は R 600a 同様炭化水素系冷媒として 2012 年以降海外では家庭用エアコンへの使用が報告されている。⁶⁾ R 290 の性能については、冷媒の物性値から予測できるものを表 3 にまとめた。算出の条件は表 1 と同様である。結果から、R290 は R410 と比較して、COP はわずかに向上することが予測されるが、体積能力は 40%ほど低下し、R410A の 60%程度になってしまうことが予測された。このため、単純に R 290 をドロップインしただけでは、冷暖房能力不足となってしまうことが考えられる。

表 3 理論冷凍サイクルにおける比較 (R 290)

	R 410A	R 290
理論 COP [-]	6.40	6.82
体積能力 [kJ/ m ³]	6613	3859

また、日本冷凍空調工業会が、モントリオール議定書第 36 回 OEWG（事前事務局会議）第 2 セッション（2015 年 10 月 30 日～31 日 UAE・ドバイ開催）の技術フォーラム「高気圧気国の代替冷媒研究プロジェクト」において行った講演プレゼンテーションの中で、R 410A 仕様のエアコンに R 290 をドロップインした場合のシミュレーション結果を述べており、これによると、R 410A での COP を基準として R 290 をドロップインした場合の COP は約 30%低下する。このシミュレーションは、家庭用及びこれに類する電気機器の安全性を規定する IEC 60335-2-40 に準拠する冷媒充填量を遵守することを想定している。冷媒の熱物性から予測される性能では、COP はわずかに向上したが、安全性を考慮した条件では逆に COP が低下してしまうことが示唆されている。

また、冷媒と冷凍機油との相溶性の観点からは、R 410A に用いられる合成油と R 290 とは相溶性がないため圧縮機への油戻りが不十分となり、ドロップイン運転後早い段階で故障につながる事が考えられる。

R 290 をドロップインした場合の危険性については、R 290 は強燃性（ASHRAE 燃焼区分 A3）であり、使用機器には防爆対策を施す必要がある。また、R 290 がドロップインされていることを知らずに、故障のサービスなどを行うと火災の発生及び爆発等の重大事故につながる虞があり、火災事故も報告されている。

4. R 410A 用空調機器への HFO 系混合冷媒ドロップイン評価

2 節及び 3 節では HC 系冷媒のドロップインの状況を述べたが、本節では旭硝子株式会社 AGC 化学品カンパニーの講演プレゼンテーション資料⁷⁾から HFO 系冷媒と R 32 との混合冷媒を R 410A 用空調機器にドロップインした場合の状況を紹介する。

この冷媒は、HFO 1123（40%）と R 32（60%）からなる混合冷媒であり、沸点と露点の温度差が小さく、共沸様組成物である。

ドロップイン試験は、冷房能力 4 kW のルームエアコンを用い、JIS B 8615-1 に準じた試験条件にて行われ、冷房条件、暖房条件のそれぞれにおいてエネルギー消費効率（COP）が最大となる冷媒充填量で最適化されている。試験の結果、通年エネルギー消費効率（APF）が、R 410A を 100%として HFO

系混合冷媒は 93 %であった。

また、同混合冷媒の GWP は 270 (CO₂を 1 とする) であり、R 410 A の 2090 と比較し大幅に小さい。

5. まとめ

HFC 系冷媒のひとつである R 410A を使用する空調機器への HC 系冷媒 (R 600a 及び R 290) と HFO 系混合冷媒のドロップイン評価の状況を紹介した。HFC 系冷媒から地球温暖化係数の低い冷媒への転換は喫緊の課題であるが、新たに開発される代替候補冷媒に関しては、機器の設計、冷凍機油との長期信頼評価、毒性及び可燃性など関するリスク評価等を解決しなければならない。課題は多くある。このため、実機を用いた性能試験による評価と並行して数値シミュレーションによるドロップインを想定した評価を行うことで、新冷媒開発スピードの向上を図れるものと期待する。

参考・引用文献

- (1) MONTREAL PROTOCOL ON SUBSTANCES THAT DEplete THE OZONE LAYER. MONTREAL, 16 SEPTEMBER, (1987).
- (2) AMENDMENT TO THE MONTREAL PROTOCOL ON SUBSTANCES THAT DEplete THE OZONE LAYER, KIGALI, 15 OCTOBER, (2016).
- (3) 冷凍空調機器の冷媒ストック量 (推計) と排出量 (推計) について、日本冷凍空調工業会、available from < <https://www.jraia.or.jp/flon/estimate.html>>、(参照日 2017 年 1 月 7 日)。
- (4) K. Ohno, K. Saito, S. Yamaguchi, T. Kishimoto, and K. Matsumoto, Intermittent Driving Simulation of Compression type Heat Pump (1st Report) Mathematical model and simulation of single-stage vapor compression type heat pump, Trans. Japan Soc. Refrig. Air Cond. Eng., vol. 30, no. 2 (2013), pp. 107–122. (in Japanese)
- (5) K. Ohno, T. Kimura, S. Yamaguchi, K. Saito, S. Itonaga, K. Matsuda, and T. Kishimoto, Performance Evaluation of HC 600a as a Drop-in Replacement for R 410A in Room Air Conditioner, Trans. Japan Soc. Refrig. Air Cond. Eng., vol. 30, no. 4 (2013), pp. 389–399. (in Japanese)
- (6) 次世代冷凍空調に関する今後の技術開発に向けた可能性調査、省エネルギーセンター、available from < <http://www.nedo.go.jp/content/100754368.pdf>>、(参照日 2017 年 4 月 10 日)。
- (7) 冷凍空調分野における最新動向と課題への取組み—低 GWP 冷媒の開発、AGC 化学品カンパニー、旭硝子株式会社。