

リスクトレードオフを考慮した次世代低 GWP 冷媒の選定

— R-1234yfに対するリスクトレードオフ評価 —

梶原 秀夫

現行の空調機器の冷媒は地球温暖化係数 (GWP) が高いため、R-1234yfをはじめとした、よりGWPの低い物質が次世代冷媒候補として検討されている。しかし低GWP物質は相対的に化学反応性が高く、燃焼性、有害性、分解物生成、省エネ性能低下によるCO₂排出量増加の側面ではリスクを高める可能性、すなわちリスクトレードオフの可能性がある。この研究では (1) 環境特性、(2) 燃焼特性、(3) 有害性、(4) 温室効果ガス排出量、(5) 実装可能性の5項目から構成されるリスクトレードオフ評価の枠組みを提示し、絞り込み過程を明示しながら次世代低GWP冷媒物質の選定を行った。リスクトレードオフを考慮した意思決定において、複数の評価項目の組み合わせ方と評価基準を明示することが重要であることを示した。これにより、意思決定に必要なデータの迅速な把握と、社会情勢に柔軟に対応した意思決定が可能となった。

キーワード: 冷媒、地球温暖化、省エネルギー、燃焼性、有害性

Selection of next-generation low global-warming-potential refrigerants by using a risk trade-off framework

– Risk trade-off assessment for R-1234yf –

Hideo KAJIHARA

Because the refrigerants currently used in air-conditioners have high global-warming-potentials (GWP), substances with lower GWPs, such as R-1234yf, are considered to be candidates for next-generation refrigerants. However, low-GWP substances often have comparatively high chemical reactivity and may carry increased risks of combustibility, toxicity, generation of degraded products, and increased CO₂ emission caused by poor energy-saving performance. Therefore, a possible risk trade-off exists between currently used refrigerants and those with low-GWPs. In this research, I proposed a framework for evaluating this trade-off in the following five categories: (1) environmental characteristics; (2) combustion characteristics; (3) toxicity; (4) volume of greenhouse gas emissions; and (5) applicability to air-conditioning equipment. I then selected substances well suited as next-generation refrigerants in accordance with a specific screening process. I showed the importance of clearly specifying the combination of a number of end points and assessment criteria in the process of decision-making based on risk trade-off. This method yielded a rapid understanding of the necessary data, as well as flexible decision-making that is relevant to social conditions.

Keywords: Refrigerant, global warming, energy saving, flammability, toxicity

1 冷媒物質の変遷と「次世代冷媒」

空調機器の冷媒として用いられる物質はこれまで大きく分けて4つの世代を変遷してきている^[1]。

第1世代(1830年～1930年代)では冷凍システムが「機能する」ことが第一に考えられたため、冷媒には毒性や可燃性、腐食性のある物質でも機能を優先して使用された。第2世代(1931年～1990年代)では「安全性や化学的安定性」が追求され、クロロフルオロカーボン(CFC)やハイドロクロロフルオロカーボン(HCFC)等が導入された。第3世代(1990年～2010年代)では、「オゾン層破壊防止」のため、塩素を全く含まないハイドロフルオロカーボ

ン(HFC)が導入された。第4世代(2010年～)では、「温暖化防止」のためHFC等のように高い地球温暖化係数(GWP)^[1]を持たず、またCFCのようにオゾン層破壊に寄与しない冷媒の追求が開始された。現在は第3世代から第4世代の過渡期ということになる。第4世代に属する新たな冷媒をここでは「次世代冷媒」と呼ぶ。

2 次世代冷媒に求められる要件のトレードオフ関係

リスクトレードオフとは、ある種のリスクを低減させることにより別種のリスクが生じることである。次世代冷媒には地球温暖化係数(GWP)の低減が求められているが、

産業技術総合研究所 安全科学研究部門 〒305-8569 つくば市小野川 16-1 つくば西
Research Institute of Science for Safety and Sustainability, AIST Tsukuba West, 16-1 Onogawa, Tsukuba 305-8569, Japan * E-mail: kajihara.hideo@aist.go.jp

Original manuscript received August 27, 2012, Revisions received April 30, 2013, Accepted May 7, 2013

多くの場合、GWP の小さい物質は化学反応性が相対的に高い。すなわち、GWP を小さくするためには赤外吸収係数を小さくするか、大気寿命を短くする必要があるが、後者の場合は大気中での反応性が高いことを意味している。よって GWP の小さい物質を選択することで、逆に燃焼性、有害性、分解物生成、省エネ性能（空調機器使用時のエネルギー使用量）の側面ではリスクを高める、すなわちリスクトレードオフの可能性がある。

現在、次世代冷媒に求められる要件は下記の 5 つにまとめることができる。

1. オゾン層破壊に寄与せず（オゾン破壊係数 (ODP) = 0）、また GWP も十分に小さいこと。【環境特性】
2. 可燃性が小さくリスク管理が可能な範囲にある、もしくは不燃であること。【燃焼特性】
3. 物質としての毒性（有害性）が低いこと。【有害性】
4. 冷媒としての熱サイクル的性能（省エネ性能）に優れること。【省エネ性能】
5. 冷媒を実際の空調機器に装填・使用する際に問題が生じないこと。【実装可能性】

このような背景から、この研究の目的は HFC に代わる低 GWP 次世代冷媒の導入にあたって重要となる上記 5 項目について、リスクトレードオフの観点から評価を実施することである。

3 次世代冷媒の開発状況

冷凍空調機器別の温暖化への影響を冷媒排出量推計値（2010 年度値、CO₂ 換算量）で比較すると、全体では 1,710 万トン-CO₂ であり、内訳は業務用冷凍空調機器が 1,130 万トン-CO₂ (66 %)、家庭用空調機器が 290 万トン-CO₂ (17 %)、自動車用空調機器が 250 万トン-CO₂ (15 %)、家庭用冷蔵庫が 40 万トン-CO₂ (2 %) である^[2]。

自動車用空調機器用途での低 GWP 冷媒の検討は、他用途よりも先行して行われている。特に R-1234yf とよばれるオレフィン系の化合物である 2,3,3,3-テトラフルオロプロペン (CH₂=CF₃) は、GWP=4 とされるためにとっても有力な次世代冷媒候補と目されている^[3]（冷媒の略称については用語 2 も参照されたい）。

R-1234yf は自動車用空調機器用の現行冷媒である R-134a に対する有力な代替候補物質であるが、定置型空調機器用の現行冷媒 (R-410a 等) は R-134a に比べ冷媒としての性能が高い（空調機器運転時のエネルギー使用量が小さい）ため、次世代冷媒にも高い冷媒性能が求められる。すなわち、定置型空調機器用冷媒を代替する際には、自動車用空調機器用冷媒を代替する場合に比べ、空調機器運転時のエネルギー使用量増大の問題が生じやすい。

また、定置型空調機器では業務用機器に比べ家庭用機器は機器寿命が短いため、低 GWP 冷媒への代替による温室効果ガス排出削減効果が早期に現れると考えられ、家庭用機器での検討結果は、業務用機器での検討にも活用できると期待される。このような背景を踏まえて、この研究では家庭用空調機器を対象に、機器運転時のエネルギー使用量の変化も注視しながら、リスクトレードオフを考慮して、次世代低 GWP 冷媒物質の評価と選定を行った。

4 リスクトレードオフを考慮した次世代冷媒の選定方法

燃焼性、有害性、温暖化等異なるリスク評価項目が存在するときに最適な物質を選択するためには、各項目でのリスクを統一的なリスク尺度で定量化した上で、その合計が最小となるような物質を選択するのが理想的である。しかし、現在のところ、そのような異種リスクの統一的な定量化技術は実用的な段階にはない。

そこで、この研究では、各項目を直列につなぎ、段階的に候補物質をスクリーニング的に絞り込む形式とした。項目の並びは、候補物質自体の性質に関わる項目から、候補物質を冷媒として使用したときの性質に関わる項目へとこの順とした。

この研究での評価の枠組みおよび絞り込みの結果を表 1 に示す。第 1 段階にはオゾン層を破壊しない、GWP が小さいという「環境特性」を設定した。これらの環境特性は比較的最近、すなわち第 3 世代以降の冷媒で重視された特性である。第 2 段階には、燃焼性を設定した。これは低 GWP 化のために大気中での化学反応性の高い物質を採用するという手段は直接的に燃焼性の増加という結果をもたらすためである。第 3 段階には有害性を設定した。有害性も大気中の化学反応性の増加によって高まる場合もあると思われるが、燃焼性に比べれば変化が小さいと考え第 3 段階に設定した。第 1 段階から第 3 段階までは冷媒物質自体の性質に関わる評価項目である。第 4 段階以降には機器の使用状況の情報が必要なライフサイクルアセスメント (LCA) 評価を、第 5 段階には機器の設計に関わる情報が必要な実装可能性評価を配置した。第 4 段階以降は冷媒が用いられる環境に強く依存する評価項目であり、段階が後になるほど詳細な情報を必要とするように設定した。

各項目の評価で特に必要な技術としては、燃焼特性については燃焼速度や燃焼限界についての試験、有害性については毒性試験が挙げられる。

第 1 段階では、次世代冷媒の候補となる物質を現行の R-410A の GWP 値と比較してスクリーニングする。R-1234yf、R-32、R-152a、R-290、R-600a、R-717、R-744 と相当数の物質が候補冷媒となりうる。ここで R-1234yf

表1 次世代低GWP冷媒候補物質のリスクトレードオフ評価の枠組みとスクリーニング結果

評価の段階	評価すべき項目の概要	候補物質の段階的絞り込み
第1段階	環境特性評価 (オゾン層を破壊せず、GWP が小さい物質の選定)	R-1234yf、R-32、R-152a、R-290、R-600a、R-717、R-744
	GWP については、現在家庭用定置型空調機器に使用されている冷媒である R-410A の GWP 値である 1,730 を目安にする。	
第2段階	燃焼特性評価	R-1234yf、R-32、R-717、R-744
	ISO 817 あるいは ASHRAE 34 で規定される Class3 (強燃性) あるいは Class2 (低燃性) に分類されるものを除外し、Class2L (微燃性) あるいは Class1 (不燃性) に分類されるものを残す。	
第3段階	有害性評価	R-1234yf、R-32、R-744
	大気中寿命が短い冷媒については、分解生成物に対する大気暴露評価も同時に実施する。	
第4段階	LCA 評価	5.4 において考察
	候補冷媒を使用する空調機器からの温室効果ガス (GHG) の直接排出量 (冷媒の大気排出) と間接排出量 (電力使用に伴う GHG 排出) の合計排出量を定量化する。	
第5段階	空調機器への実装可能性評価	6. において言及
	実際の冷凍空調機器の冷媒としての使用可能性の評価。機器からの漏洩に対する安全対策も含む。	

と異性体の関係である R-1234ze (E) は、評価に用いることができるデータが少ないことから評価対象物質とはしなかった。ただし、R-1234ze (E) は R-1234yf に化学構造が類似し、物性 (燃焼特性、GWP) も近いため、R-1234yf に近い評価結果となることが予想される。

第2段階 (燃焼特性) では明らかな可燃性を持つものを除外するために、ISO817 や ASHRAE34 で規定される Class3 (強燃性) および Class2 (低燃性) に分類されるものを除外し、Class2L (微燃性) あるいは Class1 (不燃性) に分類されるものを残した。炭化水素冷媒である R-290、R-600a や R-152a は候補から除外された。R-1234yf と R-32 は Class2L に分類される。これら2種の冷媒の燃焼特性の詳細については5.1で述べる。

第3段階 (有害性) では強い有害性を持つ R-717 が除外される。R-1234yf の有害性評価と分解生成物評価の詳細については、各々5.3、5.4で述べるが、結論としては有害性、分解生成物について顕著なリスクを持たないと考えられた。

よって候補として残るのは R-1234yf、従来冷媒で GWP がやや高い R-32、自然冷媒の R-744 となる。

第4段階の LCA 評価に関しては、上記のスクリーニングで残った候補物質を採用した際の温室効果ガス (GHG) 排出削減効果を定量化した。これに関しては5.4に記述する。

第5段階で挙げた実装可能性についてはこの研究ではデータの不足等から実施できなかったが、第6章において定性的に考察した。

5 有力候補物質に対するリスク項目別の詳細評価

5.1 燃焼特性評価

前章では環境特性、燃焼特性、有害性についてスク

リーニングを行った結果、R-1234yf、R-32、R-744 が候補物質として残った。R-744 は不燃性であるため詳細な燃焼特性評価は不要である。R-1234yf と R-32 は、国際的な冷媒の燃焼特性についての体系である ISO 817 あるいは ASHRAE 34 において、いずれも Class2L (微燃性) とされている。しかし、国内の関連法規 (高圧ガス保安法冷凍保安規則) によれば、R-1234yf は可燃性ガスに分類されるが、R-32 は可燃性ガスとはされないため、その混合冷媒は混合比によって可燃性か否かの判断が分かれる。

そこで、燃焼実験を行い R-1234yf/R-32 混合系において燃焼限界値の測定値が、混合比を用いてル・シャトリエの法則によって予測される値と一致するかどうかを明らかにした。測定は 296.15K 換算で湿度 50 % の空気中で行った。得られた結果を表2に示す。例えば体積比 50 : 50 の混合気体は、空気中に 7.78 % から 18.5 % の範囲で存在するときに燃焼することがわかる。燃焼下限値は予測値とよく一致し燃焼上限値も予測値との一致は比較的良好である。

次に R-1234yf/R-32 混合系における最大燃焼速度 ($S_{u0,max}$) の混合割合に対する依存性を測定した。結果を図1に示す。参考のために燃焼下限値 (LFL) の測定結果と、混合冷媒の GWP 値も示す。R-32 の割合の増加に伴い LFL は大きくなり不燃性にはなるが、一方で最大燃焼速度は上昇し、一旦燃え始めた際の燃焼速度は大きくなる。また、燃焼速度の増分は R-32 の割合の増加にともない大きくなることがわかった。

国内関連法規によれば可燃性冷媒ガスの定義は「燃焼下限値 (LFL) が 10 % 以下または燃焼上限値 (UFL) と下限値との差が 20 % 以上」であり、この定義に従い不燃性を実現するためには R-1234yf の混合比 (体積比) を 36.2 % 以下、重量比では 55.4 % 以下とすればよいことが

表2 R-1234yf と R-32 混合系の燃焼限界

(平成 19 年度～平成 22 年度成果報告書「ノンフロン型省エネ冷凍空調システム開発 / 実用的な性能評価、安全基準の構築 / 『ノンフロン型省エネ冷凍空調システム開発』の実用的な運転モード及び評価手法ならびに安全基準の構築」平成 23 年 4 月独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (以下、NEDO 成果報告書 (2011) と略す) より引用)

R-1234yf : R-32 (体積比)	燃焼下限界 (vol%)		燃焼上限界 (vol%)	
	測定値	予測値	測定値	予測値
100 : 0	5.53 (0.10)	5.53	13.3 (0.5)	13.30
80 : 20	6.22 (0.05)	6.27	14.5 (0.5)	14.80
60 : 40	7.2 (0.1)	7.24	17.0 (0.6)	16.69
50 : 50	7.78 (0.05)	7.85	18.5 (0.5)	17.82
40 : 60	8.53 (0.08)	8.56	19.9 (0.7)	19.12
20 : 80	10.45 (0.05)	10.48	23.6 (0.7)	22.39
0 : 100	13.5 (0.1)	13.50	27.0 (0.5)	27.00

わかった^{注1)}。この混合比 (R-32 が重量比で 44.6 %) の組成を用いたときの混合系冷媒の GWP はおよそ 300 と試算された。また、図 1 からわかるように、この混合比での燃焼速度は、R-1234yf 単体に比べ顕著な増加を示さないことがわかる。この混合比を 5.4 の LCA 評価における各種設定条件の一つとして用いた。

5.2 有害性評価

R-1234yf、R-32、R-744 のうち、R-1234yf 以外は現行の冷媒として使用実績があり、有害性は低いと考えられるため、ここでは R-1234yf を有害性評価の対象とした。

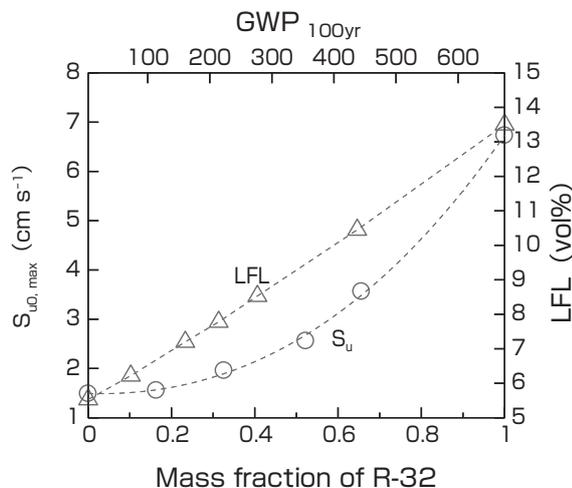


図1 R-1234yf/R-32混合冷媒系における最大燃焼速度のR-32 重量分率に対する依存性

$S_{u0,max}$: 最大燃焼速度、LFL: 燃焼下限値 (NEDO成果報告書 (2011) より引用)

表3 R-1234yfの有害性情報のまとめ (NEDO成果報告書 (2011) より引用)

エンドポイント	試験内容概要	試験結果	引用文献
急性毒性	ラット、吸入、4 時間	400,000 ppm まで死亡例なし	[5],[6],[9]
反復吸入毒性	ラット、吸入、2 週間	NOEL=50,000 ppm	[9]
	同、4 週間	NOAEL=50,000 ppm	[9]
	同、13 週間	NOAEL=50,000 ppm	[5],[6],[9]
心感作性	イヌ、吸入	12 % (120,189 ppm) まで影響なし	[5],[6],[9]
ゲノミクス	13 週間	50,000 ppm まで活性なし	[5],[6]
発生毒性	ラット、吸入 (鼻腔)	NOAEL=50,000 ppm	[5],[6]
	ウサギ、吸入 (全身)	NOAEL/LOAEL=4,000/5,500 ppm	[5],[6],[9],[10]
二世世代繁殖毒性	ラット、吸入、6 時間 / 日	NOAEL=5,000 ppm	[5],[6]
遺伝毒性 (エームス試験)	S.typhimurium (TA1535, TA98, TA100) and E.coli (WP2uvrA)	TA100 と WP2uvrA で 20 % 以上で陽性、他は陰性	[9]
遺伝毒性 (ヒト細胞)	ヒトリンパ球、4 時間	760,000 ppm において陰性	[9]
遺伝毒性 (in vivo 小核試験)	マウス、吸入、4 時間	陰性 (最大 200,000 ppm)	[9]
	ラット、吸入、4 時間	陰性 (最大 50,000 ppm)	[9]
不定期 DNA 合成阻害試験	ラット、吸入、4 週間	陰性 (最大 50,000 ppm)	[9]

NOEL (no observed effect level): 最大無影響量、NOAEL (no observed adverse effect level): 最大無毒性量

R-32 は R-410A の構成成分であり、R-744 はヒートポンプ式給湯器の冷媒として用いられている^{用語2)}。R-1234yf の有害性試験結果を表 3 に示す。急性毒性試験、反復暴露試験、心臓感作性試験、二世世代繁殖試験では数万 ppm というとても高い濃度においても特段の有害性は認められておらず、また遺伝毒性試験の結果からも生体内では遺伝毒性を示さないと考えられる。最も低濃度で影響が現れた試験はウサギを用いた発生毒性試験だが、妊娠ウサギの死亡が観察された濃度は 5,500 ppm 以上であった。ただし、ラットにおいては発生毒性試験および 2 世代繁殖試験でも母体の死亡についての記述は見られず、反復暴露試験では 50,000 ppm という高濃度においても暴露の影響は認められなかったことから、ウサギは R-1234yf に対してラットよりも高い感受性を有していることが窺われる。表 3 の結果を総合的に検討して、R-1234yf の有害性は低いと判断した。

Minor^[5] は、R-1234yf の有害性は現行冷媒である R-134a と同程度に低いとしている。Rinne^[6]、Schuster *et al.*^[7]、日本冷凍空調学会^[8] 等においても R-1234yf の有害性は低いとしている。しかし、現在のところ有害性試験の詳細なデータは公開されていないため、今後、客観性、透明性を持った有害性評価を行うために有害性試験報告書の公表が望まれる。

5.3 大気経路暴露評価

R-1234yf は大気中での反応性が従来冷媒よりも高いため分解生成物が比較的高濃度に生成する可能性がある。そこで各種空調機器（家庭用、業務用、自動車用）に用いられる冷媒がすべて R-1234yf 単体に置換された場合の R-1234yf の大気放出量を推定した。R-1234yf の冷媒としての使用検討は、自動車が先行し、家庭用、業務用はそれより遅れているが、ここでは R-1234yf の排出量を最大に見積もるために各種空調機器で使用されることを仮定した。また R-1234yf は混合系冷媒として使用される可能性が高いが、混合比に関してはさまざまなケースが考えられるため、やはり排出量が最大になる場合として R-1234yf が単体で使用されることを仮定した。大気放出後の R-1234yf および大気中分解生成物であるオゾン、ホルムアルデヒド、トリフルオロ酢酸 (TFA) についての環境中濃度を推定しヒト健康および生態（水生生物）への影響を考察した。

冷媒排出量推定における仮定として、新規に生産される空調機器全部に使用される冷媒が 2011 年に R-1234yf に切り替わったとし、その後 40 年たった時点の冷媒排出量を機器種類ごと、ライフサイクルごとに推定した。機器製造台数、排出係数、廃棄時回収率等の推定パラメータは現行機器と同一とした。この仮定は将来予測を目的としたものではなく『現在用いられている空調機器の冷媒がすべて R-1234yf に置き換わる』という仮想的なシナリオにおける排出量の推定である。推定された年間排出量は合計で 15,172 t/年であり、機器の用途別では家庭用 (6,366 t/年) と業務用 (6,734 t/年) からの排出が大半を占めており、ライフサイクル段階別では廃棄段階 (8,744 t/年) からの排出が多かった。

使用した大気モデルは NO_x-VOC-オゾン系の反応過程および乾性沈着過程が内蔵された ADMER-PRO^{[11][13]} であり、R-1234yf が OH ラジカルと反応し、中間体 CF₃C(O)F を経て最終生成物である TFA に至る反応過程と TFA の湿性沈着過程を追加実装し計算を行った。TFA が雲水中で中間体 (CF₃C(O)F) から加水分解により生成する過程における総括反応速度定数については実験的手法 (2 相フロー法) により測定した。

表4 R-1234yfを冷媒として用いた場合の冷媒および分解生成物の大気中濃度 (年平均値、関東地方) (NEDO成果報告書 (2011) より引用)

	R-1234yf [ppb]	オゾン [ppb]		ホルムアルデヒド [ppb]	
		—	増分*1	—	増分*1
最大値	0.28	44	+0.13	2.9	+0.012
最小値	0.0068	11	-0.03	1.1	-0.005
平均値	0.050	34	+0.03	2.0	+0.002

*1：コントロールケース (冷媒代替を行わない場合)からの増分

大気モデルにより算出された R-1234yf、オゾン、ホルムアルデヒド濃度を表 4 に示す。R-1234yf の最大濃度は 0.28 ppb と推定され、これは毒性試験のうち最も低い NOAEL (no observed adverse effect level:最大無毒性量) (4000 ppm、ウサギ、発生毒性;表 3) に対し 1000 万分の 1 の大きさであるため、R-1234yf の大気からの吸入暴露によるヒトの慢性影響は無視できると考えられる。またオゾンとホルムアルデヒドの平均濃度のコントロールケース (冷媒代替を行わない場合) からの増分はどちらも 0.1 % 程度と十分に小さく、よって R-1234yf のオキシダント生成への影響はとても小さいと考えられる。

また雨水中 TFA 濃度の年平均濃度の最大値は 3.4 μg/L と推定された。TFA の水生生物への NOEC (無影響濃度) は、種々の水生生物 (魚類、甲殻類、藻類) のうち最も感受性の高い藻類 (*Selenastrum capricornutum*) において、100 μg/L である^[14]。推定最大濃度はこの無影響濃度を大きく下回るため、雨水中 TFA が水生生物に影響を及ぼす可能性は極めて小さいと考えられる。

5.4 LCA評価

5.4.1 評価の対象範囲

各候補物質を冷媒として家庭用空調機器に用いたときにライフサイクル全体を通じて排出される温室効果ガス (GHG) 排出量を LCA の手法を用いて推定した。GHG 排出量は、大きく分けて空調機器使用時の電力消費や空調機器製造時のエネルギー消費による CO₂ 発生を推定する「エネルギー起因」のものと、漏洩冷媒による温室効果を推定する「冷媒起因」のものに分かれる。低 GWP 物質への代替では、冷媒起因 GHG 排出量は GWP の低下によって減少するが、エネルギー起因 GHG 排出量は、冷媒性能が下がれば増加する。よって、正味の GHG 排出を削減するかどうかを検証するためには、この「エネルギー起因」と「冷媒起因」の GHG 排出量の合計が削減されていることを確認する必要がある。

候補物質としては、第 4 章のスクリーニングにおいて残った R-1234yf、R-32、R-744 の 3 種類が挙げられる。しか

し R-744 については、この物質を家庭用固定型空調機器の冷媒として LCA 評価を実施するのに必要なデータが見当たらず、次世代冷媒としての可能性を十分に検討できないと判断し、評価対象からは除外した。ただし R-744 を家庭用空調機器の冷媒として実装した際の省エネ性能低下による CO₂ 排出量増加等のデータが把握できれば、以降に提示する R-1234yf 等に対する LCA 評価と同様の評価と冷媒としての適性判断は将来可能になるとと思われる。

R-1234yf と R-32 の 2 種類の冷媒に加えて、両者の混合冷媒も評価の対象とした。混合冷媒の混合比は 5.1 の燃焼特性評価において国内関連法で不燃性ガスとされる R-1234yf : R-32 = 55.4 : 44.6 (重量比) とした。

評価範囲はライフサイクル全体とし冷媒製造、機器製造、機器使用、機器廃棄の各段階について「エネルギー起因」と「冷媒起因」それぞれの温室効果ガス (GHG) 排出量を推定した。空調機器の製造、使用、廃棄場所は日本とした。GHG としては冷媒物質の他に CO₂、N₂O、CH₄ を推定対象とし GWP により CO₂ 換算した。

5.4.2 空調機器使用実態アンケート調査

空調機器の使用段階に起因する GHG は通電による消費電力量に相当するが、消費電力量は空調機器の使用実態に大きく依存する。この研究では使用実態に近い消費電力量を算出するため、詳細な調査項目 (世帯属性、住宅属性、空調機器の仕様、使用方法、使用時間等) から成る全国規模の使用実態調査を実施した。アンケートは 2010 年 2 月 (第 1 回) と 12 月 (第 2 回) にインターネットにより実施した。第 1 回調査では全国 4,000 世帯 (10 地域、各 400 世帯) を対象とし、第 2 回調査では第 1 回の調査対象世帯の追跡調査に加え、新たに全国 4,000 世帯 (10 地域、各 400 世帯) を対象とした。有効回答数は 7,090 世帯分であった。アンケート結果データから空調機器 1 台あたりの年間平均使用時間を算出した。図 2 に地域別の年間平

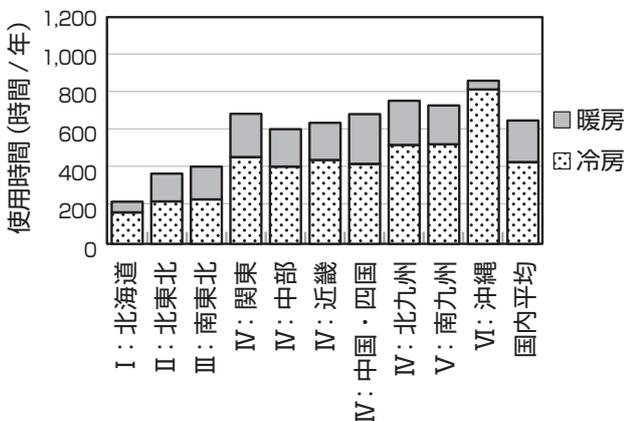


図2 地域別空調機器1台あたり平均年間使用時間 (I~VIは省エネ法での地域区分を示す)
(NEDO成果報告書 (2011) より引用)

表5 LCA評価の対象とする冷媒の特性
(NEDO成果報告書 (2011) より一部抜粋して引用)

冷媒	GWP	機器 1 台あたり冷媒充填量 [kg]	機器使用時の消費電力増分 [%]*2
R-410A	1730	1.2	
R-32	650	1.0	①-2.5 %, ②0 %
R-1234yf/R-32*1	300	1.1	①+2.5 %, ②+5 %
R-1234yf	4	1.1	①+5 %, ②+10 %, ③+20 %

*1) R-1234yf : R-32=55.4 : 44.6 (重量比)

*2) R-410A を基準とした場合の値。①、②、③は消費電力増分の仮定についての場合分けを示す。R-1234yf およびその混合冷媒を使用した際には遠藤ら [15] を参考に設定した。

均使用時間を示す。暖房について北海道や北東北等外気温が低い地域で使用時間が相対的に短いのは、それらの地域では「エアコン以外の暖房機器」を主に使用する世帯が過半数を占めることが要因であることがアンケート結果からわかった。

またアンケート結果から空調機器の 365 日×24 時間の使用スケジュールを算出し、外気温と運転開始後の経過時間を考慮した上で、機器 1 台あたりの年間平均消費電力量を地域別に算出した。

5.4.3 冷媒候補物質に対する評価結果

現行冷媒である R-410A、単体としての R-1234yf と R-32、および混合冷媒 (R-1234yf/R-32)、の計 4 種類の冷媒について LCA 評価を実施した。LCA 評価の対象とする冷媒の特性を表 5 に示す。表 5 で消費電力量増分に ①、②、③とあるのは、エネルギー起因 GHG 排出量を推定するための仮定についての場合分けを示す。R-1234yf は R-410A よりも冷媒性能が劣るという報告 [15] があるため R-1234yf 単体および混合冷媒の消費電力増分には正の値を、R-32 は R-410A よりも冷媒性能が優れるためゼロまたは負の値を仮定している。

図 3 に各次世代冷媒に対する家庭用空調機器 1 台あたりの GHG 排出量を示す。ライフサイクル別の寄与では、どの冷媒においても製造段階 (製造および機器) の冷媒起因や廃棄段階のエネルギー起因の寄与はとても小さく、GWP の大きい冷媒では廃棄段階の冷媒起因の寄与が大きく、GWP の小さい冷媒では製造段階と使用段階のエネルギー起因の寄与が大きい。全体として、冷媒の GWP を小さくすることによって GHG 排出量も概ねそれに従い削減されることがわかる。ただし、R-32 を使用した場合の GHG 排出量はいずれの省エネ性能についても約 1,100 kg-CO₂

であり、R-410A での排出量推定値である 2,300 kg-CO₂ の 50 % 程度の数値となる。これに対し、混合冷媒の GHG 排出量は約 920 kg-CO₂ であり、R-32 単体の場合と大差が見られない。よって R-32 に対する混合冷媒のメリットは GHG 排出削減の面では大きくない。これに対し R-1234yf 単体の場合は 670 ~ 740 kg-CO₂ となり、従来冷媒比で GHG 排出量を 40 % 程度にまで削減することができる。

6 次世代冷媒選定に関する考察とまとめ

本章では、第 5 段階の空調機器への実装可能性についても定性的に述べながら、この研究の評価結果と今後の課題等について考察する。

R-1234yf 単体の導入による GHG 排出削減効果はとても大きく、比較対象となった他の二つの冷媒 (R-32 単体、混合冷媒) と比較しても大きく削減できることが期待される。しかし、R-1234yf は価格が高いため今後の低価格化が課題である。また R-1234yf を導入することにより曲がり管等の設計変更のため圧縮機サイズの増大が懸念されるなど、固定型空調機器への実装に対する技術的課題の解決が今後不可欠である。

R-32 単体を導入した場合は、GHG 排出削減への効果は R-1234yf と比較すれば若干小さいものの一定の効果があり、現行冷媒の構成成分であるため機器実装上の問題は少ないと予想される。冷媒価格も安価であるため、次世代冷媒の候補と考えることができる。ただし、R-32 は弱燃性 (Class 2L) に分類されるものの R-1234yf より燃焼速

度が大きく (乾燥空气中)、安全性への対策が必要といえる。

R-1234yf と R-32 の混合冷媒については、GHG 排出削減効果、価格、燃焼性のどれも、単体冷媒の中間的な値になるため次世代冷媒候補物質といえるが、非共沸系混合冷媒特有の機器実装に際する取り扱いにくさが欠点となりうる。

よって、この研究でとりあげた 3 つの冷媒は、上で述べたような欠点や課題に対する対応がとられたうえで、第 5 段階の実装可能性についての定量的な評価が行われることが必要である。第 5 段階の実装可能性は、機器の設計に強く依存し、冷媒価格も関係するため、機器製造者と研究者、行政との密接な協力のもとに評価する必要があると思われる。

また、第 3 段階の有害性評価では有害性試験の詳細が公開されていない問題を指摘した。今後、客観性、透明性を持った評価を行うためには、冷媒製造者からの有害性試験報告書の公表が望まれる。第 4 段階の LCA 評価では、データの不足によって R-744 についての評価ができなかった。今後、家庭用空調機器の製造者が、R-744 を機器に実装した際の省エネ性能低下による CO₂ 排出量増加に関するデータを公表し、そのデータを用いた評価を行うことが課題であることがわかった。

この論文での評価結果は家庭用空調機器以外の冷媒使用機器については必ずしもそのまま適用できるものではないことに注意すべきである。それは表 1 に示した 5 つの段階のうち、第 4 段階 (LCA 評価)、第 5 段階 (実装評価) が機器の使用形態や現行冷媒との関係等に強く影響を受けるためである。

この研究では、リスクトレードオフを考慮して、次世代冷媒選定の意思決定を行うための方法論を提示したものが、次世代冷媒選定に限らず、リスクトレードオフを考慮した意思決定方法論全般に対し適用可能な次のような特徴を有していると考えられる。複数ある評価項目と評価基準を明確に示していること、段階的スクリーニングと詳細評価を組み合わせしており、各段階で必要なデータや不足しているデータを示すことができること、である。このような方法論をとることで、社会情勢の変化等によって新たな評価項目が追加されたり、評価基準の変更が必要になった際にも、以前の評価との合理的な連続性を持った再評価が容易にできることが期待される。また、取得すべきデータと意思決定との関係を把握することができるため、他の研究機関からのデータ提供等の協力関係の構築が促進されると思われる。

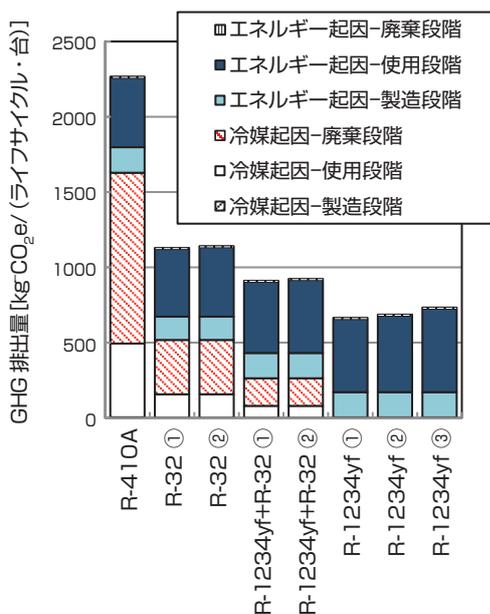


図3 冷媒の転換にともなう家庭用空調機器1台あたりのライフサイクル全体におけるGHG排出量推定結果 (横軸の冷媒種類は表5参照)
(NEDO成果報告書 (2011) より一部抜粋して引用)

謝辞

この研究は NEDO からの受託プロジェクト「ノンフロン

型省エネ冷凍空調システム開発／実用的な性能評価、安全基準の構築 (平成 19 年度～ 22 年度)」による成果の一部であり、この論文は当該プロジェクトに参加された産総研の各部署の研究者の成果である。以下に名前を挙げさせていただく。永翁龍一氏 (コンパクト化学システム研究センター)、田村正則氏、徳橋和明氏、陳亮氏、滝澤賢二氏、近藤重雄氏 (以上、環境化学技術研究部門)、中西準子氏、吉田喜久雄氏、江馬眞氏、田原聖隆氏、井上和也氏、高田亜佐子氏 (以上、安全科学研究部門)。この論文の主たる内容である「リスクトレードオフ評価の枠組み」については永翁龍一氏の努力によるものが大きいことをここに記し、謝意を表す。

注1) ここでは米国試験材料協会の標準試験法 (ASTM E681-01) に則って測定された以下の純物質の燃焼限界値^[4]を用いて混合物の燃焼限界値を計算した。R-1234yf: LFL=6.2、UFL=12.3、R-32: LFL=14.4、UFL=29.3 (単位は全てvol%)。

用語の説明

用語1: 地球温暖化係数 (GWP) : その気体の大気における濃度あたりの温室効果の強さを二酸化炭素を基準にして表したものである。ここでは特に断らない限りIPCC第2次報告書 (1995) のものを用いる。

用語2: 冷媒略称と化学式の関係

冷媒略称	化学式	GWP
R-1234yf	CH ₂ =CF CF ₃	4
R-1234ze(E)	CHF=CHCF ₃	6
R-134a	CH ₂ FCF ₃	1300
R-410A	CH ₂ F ₂ (R-32)と CHF ₂ CF ₃ (R-125)の 1:1 (重量比)混合物	1730
R-32	CH ₂ F ₂	650
R-152a	CH ₃ CHF ₂	140
R-290	CH ₃ CH ₂ CH ₃	6 ^{a)}
R-600a	CH ₃ CH(CH ₃) ₂	7 ^{a)}
R-717	NH ₃	1300
R-744	CO ₂	1

a) IPCC/TEAP (2005)の間接 GWP 値。ただし、R-600a (イソブタン) の値は異性体のブタンの値を示している。

参考文献

[1] J.M. Calm: The next generation of refrigerants – historical review, considerations, and outlook, *International Journal of Refrigeration*, 31 (7), 1123-1133 (2008).

[2] 経済産業省, 産業構造審議会化学・バイオ部会地球温暖化防止対策小委員会(第26回)配付資料1-2 http://www.meti.go.jp/committee/summary/0002410/026_haifu.html (2011)

[3] O.J. Nielsen, M.S. Javadi, M.P. Sulbaek Andersen, M.D. Hurley, T.J. Wallington and R. Singh: Atmospheric chemistry of CF₃CF=CH₂: kinetics and mechanisms of gas-phase reactions with Cl atoms, OH radicals, and O₃, *Chemical Physics Letters*, 439, 18-22 (2007).

[4] B. Minor and M. Spatz: HFO-1234yf low GWP refrigerant update, *International Refrigeration and Air Conditioning*

Conference, Paper 937. Available at <http://docs.lib.purdue.edu/iracc/937> (2008).

[5] B. Minor: HFO-1234yf low GWP refrigerant for MAC applications, Mobile Air Conditioning Climate Protection Partnership Meeting in Washington, DC. (December, 2008) (2008) [cited August 4, 2010]; available from <http://www.epa.gov/cpd/mac/5%20Minor.pdf>.

[6] F. Rinne: HFO-1234yf technology update-part 1, VDA Alternative Refrigerant Winter Meeting 2009, Saalfelden, Austria (February, 2009). [cited August 4, 2010]; available from http://www2.dupont.com/Refrigerants/en_US/assets/downloads/SmartAutoAC/MAC_HFO_1234yf_VDA_022009.pdf (2009)

[7] P. Schuster, R. Bertermann, G.M. Rusch and W. Dekant: Biotransformation of 2,3,3,3-tetrafluoropropene (HFO-1234yf) in rabbits, *Toxicology and Applied Pharmacology*, 244 (3), 247-253 (2010).

[8] 日本冷凍空調学会(2010) 最近気になる用語, HFO-1234yf (2010年8月4日引用) <http://www.jsrae.or.jp/annai/yougo/187.html>.

[9] Honeywell, Material Safety Data Sheet: 2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene, HFO-1234yf (revision date 07/24/2012). [cited April 11, 2012]; available from http://msds-resource.honeywell.com/ehswww/hon/result/result_single.jsp?P_LANGU=E&P_SYS=1&C001=MSDS&C997=C100%3BJ%2BC101%3BMSDS_JP%2BC102%3BJP%2B1000&C100=*%&C101=*%&C102=*%&C005=000000011078&C008=&C006=HON&C013=+ (2012)

[10] American Industrial Hygiene Association: AIHA-WEEL Committee Meeting Minutes of WEEL Fall Meeting, October 1-3, 2008. AIHA Headquarters, Fairfax, VA. [cited August 4, 2010]; available from <http://www.aiha.org/foundations/GuidelineDevelopment/weel/Documents/WEELminutesOct08.pdf>. (2008).

[11] 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 ADMER-PRO Ver.0.8β 技術解説書 http://www.aist-riss.jp/software/admer-pro/ADMER-PRO_V08B_techdisc.pdf (2011)

[12] 産業技術総合研究所 安全科学研究部門 ADMER-PROウェブサイト <http://www.aist-riss.jp/software/admer-pro/> (2012).

[13] 井上和也, 安田龍介, 吉門洋, 東野晴行: 関東地方における夏季地表オゾン濃度のNO_x, VOC排出量に対する感度の地理分布: 第1報 大小2種類の植物起源VOC排出量推定値を入力した場合の数値シミュレーションによる推定, *大気環境学会誌*, 45 (5), 183-194 (2010).

[14] A.G. Berends, J.C. Boutonnet, C.G. De Rooij and R.S. Thompson: Toxicity of trifluoroacetate to aquatic organisms, *Environmental Toxicology and Chemistry*, 18, 1053-1059 (1999).

[15] 遠藤和広, 松嶋弘章, 高久昭二: HFO1234yf冷媒ルームエアコンの性能評価第2報: 改良試験性能評価, 2010年度日本冷凍空調学会年次大会, 金沢 (2010).

執筆略歴

梶原 秀夫 (かじはら ひでお)

1996年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。日本学術振興会研究員 (PD)、科学技術振興事業団 CREST 研究員、新潟大学大学院自然科学研究科助手、助教授を経て 2005年に産総研(化学物質リスク管理研究センター)に入所。専門は化学工学。現在は安全科学研究部門主任研究員として発生源・排出シナリオ解析を中心に化学物質の暴露・リスク評価に従事。この論文では、評価シナリオ設定と大気経路暴露評価を担当。



査読者との議論

議論1 検討対象の選定

質問 (立石 裕:産業技術総合研究所つくばセンター)

用語が一貫していないので断言はできませんが、内容から判断する限り、この論文では、「家庭用空調機器」に使用される冷媒を中心に議論しているものと思います。しかし、世の中には当然業務用空調機器や、自動車等の移動体用の空調機器、さらには、家庭・業務用冷蔵・冷凍機器等、類似の冷媒を使用する多くの機器が存在しており、温暖化対策の観点からは、これらすべてを考慮した議論が必要はなはず。論文の趣旨から包括的なサーベイをする必要はありませんが、少なくとも以下のリマークが必要ではないでしょうか？

- ・冷媒の使用量からみた、家庭用空調機の位置付け
- ・業務用機器との関連性
- ・家庭用に限定することによる、トレードオフ評価枠組みへの影響の有無

回答 (梶原 秀夫)

温暖化対策の観点からは、冷凍空調機器全体に対する家庭用空調機器の割合を示すことは重要であると考えます。3章で、冷凍空調機器全体に対する業務用、家庭用、自動車用機器に用いられる冷媒量の比率について、冷媒排出量の数値を使って説明しました。また家庭用機器と業務用機器との関連については、「業務用機器に比べ家庭用機器は機器寿命が短いため、低 GWP 冷媒への代替による温室効果ガス排出削減への効果がより早期に現れると考えられ、家庭用機器での検討結果は、業務用機器での検討にも活用できると期待される。」としました。

また、評価対象を家庭用空調機器に限定することによる、トレードオフ評価枠組みへの影響についてですが、環境特性(オゾン層破壊、GWP 値)、燃焼特性、有害性、分解生成物については、家庭用空調機器に限定した場合も、その評価結果に大きな影響を与えないと思われませんが、LCA 評価については現行冷媒の省エネ性能、GWP、機器の使用時間、運転条件等が評価結果に大きな影響を及ぼすと考えられます。その点について6章に追記しました。

議論2 評価スキームの考え方

質問 (立石 裕)

表1の評価の枠組みは全体の根底となる重要なものであり、この論文がシンセシオロジーの論文たりえるポイントだと思いますが、なぜこのような形になったのか、明確な説明がないまま、アプリアーリに導入されているので、違和感があります。ここの項目はいわば当たり前の内容であり、著者の創意はどこにあるのか、なぜ個々の評価項目がこの内容でこの順番で選択されているのでしょうか？またこの項目を評価するために必要な技術の説明も抜けています。あとでてきはしますが、例えば、第一段階で、なぜ「微燃性」まで許容されるのでしょうか？

回答 (梶原 秀夫)

表1に示した評価の枠組みについて設定根拠の説明が不足しているというご指摘を受けて、4章の冒頭に設定根拠について追記しました。追記内容の概略は「本来は統一指標を設定して比較するのが理想的だが、そのような評価技術が確立していないため複数の項目を直列につないだ段階的スクリーニングとした。」というものです。個々の項目を評価するために必要な技術について追記しました。燃焼特性評価での「微燃性」の扱いについてですが、ISO817とASHRAE34での可燃性の分類はClass1:不燃性、Class2L:微燃性、Class2:低燃性、Class3:強燃性となっており、スクリーニングとしては明らかな燃焼性を持っている物質を除外するのが目的であるため、Class2とClass3を除外した、ということ強調した記述に修正しました。

質問 (田尾 博明:産業技術総合研究所環境管理技術研究部門)

この論文は、リスクトレードオフを考慮して、次世代冷媒を選定する方法論を提案したのですが、これまでにどのような評価法が提案され、それらの既存の評価法に比べて本評価法の新規性、独創性が何処にあるのかを明示することが重要と考えます。そのためには、過去にどのような評価がなされ、何が問題であり、本法ではその問題を克服するため、どのようなアイデアを取り入れたのかを示す必要があるのではないのでしょうか。この論文にも、「R-1234yfが自動車用空調機器用冷媒として有力な代替候補物質である。」とあり、これまで何らかの評価がなされていると考えられますが、それと比べて、何が進歩しているのかを示せないのでしょうか。

回答 (梶原 秀夫)

自動車用空調機器用冷媒として R-1234yf を評価した既存の方法論では、有害性、燃焼性、冷媒特性等の個々の評価項目ごとに、評価対象となっている候補物質を単独で、あるいは現行の冷媒物質との比較の形で、問題の有無を確認する方法がとられてきました(例えば、参考文献 [4])。しかし1章で述べたように、冷媒に用いられる物質は歴史的に見て、これまで多くの変遷をとげてきています。それは、時代ごとに評価項目が変わったり追加されたりしてきた結果と言えます。それゆえ今後も冷媒物質がさらなる代替の変遷をたどる可能性もあります。そのような状況で重要なのは、各時代での意思決定において、何を判断基準としたのかを明示しておくことと思われ。この研究では、各評価項目と判断基準について一覧表の形(表1の評価の枠組み)を示した上で、多くの対象物質からスタートして徐々に絞り込むスクリーニング形式をとっています。このことで、冷媒選択の歴史の中で、今回の意思決定を位置づけることができるといえる長所があると考えられます。そのことを6章の最後とアブストラクトに追記しました。

また、自動車用空調機器用冷媒のこれまでの評価とこの研究で対象とした家庭用空調機器用冷媒の評価の違いについては、3章に追記しました。両者の評価の主な違いは、それぞれの現行冷媒が異なるため達成すべき冷媒性能が異なる、ということです。

議論3 評価対象から外すことの妥当性

質問 (立石 裕)

5.4.1でR-744について「必要なデータが見当たらず、LCA 評価ができないので、評価対象から除外した」と記されていますが、このようなある意味恣意的な除外が許されるのでしょうか？少なくとも、具体的にどのようなデータが不足しており、それが無いと有意な評価ができない理由を明記するとともに、今後の検討によっては候補対象となりえることをリマークすべきではありませんか？

回答 (梶原 秀夫)

「データがないため評価対象から除外した」という記述のみでは、恣意的との誤解を招く恐れもあるため、5.4.1に「ただし R-744 を家庭用空調機器の冷媒として実装した際の省エネ性能低下による CO₂ 排出量増加等のデータが把握できれば、以降に提示する R-1234yf 等に対する LCA 評価と同列の評価と冷媒としての適性判断は可能であると思われる。」と追記し R-744 も候補物質であることを示し、6章にも「また、データの不足によって LCA 評価ができなかった R-744 については、家庭用空調機器に実装した際の省エネ性能低下による CO₂ 排出量増加に関するデータを取得し評価を行うことが課題であることがわかった。」と今後の検討課題について明示しました。

質問 (田尾 博明)

評価に必要なデータがないから候補物質から外すというのでは、評価の信頼性が担保できないのではないのでしょうか。有力候補物質であれば、足りないデータは取得して評価に用いるべきと考えます。

単にデータがないから評価を行わないとするより、その判断が合理的と考えられる他の事実があれば、それらを記載すべきではないでしょうか。あるいは、そのようなデータの取得と評価を、今後の課題として記述すべきではないでしょうか。コメント2に記したように、不足するデータを公開し、実験する価値が高いことを外部に知らせることも、評価の大きな役割と考えます。

回答 (梶原 秀夫)

評価の全体枠組みの中で、不足するデータを示し、追加すべき調査や実験を示すことは大変重要なことですので、そのような記述に修正しました。具体的には、5.4.1に「R-744を家庭用空調機器の冷媒として実装した際の省エネ性能低下によるCO₂排出量増加等のデータが把握できれば、以降に提示するR-1234yf等に対するLCA評価と同列の評価と冷媒としての適性判断は可能であると思われる。」と追記し、6章にも、そのようなデータを取得し評価を行うことが課題であることを記しました。

議論4 評価スキームの一般化

質問 (田尾 博明)

この論文は、次世代冷媒といった個別の問題だけでなく、リスクトレードオフを考慮して物事を決定する場合の方法論としても一般化できるように思います。手法としては、スクリーニングと詳細検討の組み合わせであり、評価データの取得方法としては、既存データがあるものはデータマイニングによる取得、既存データがないものは実験またはアンケートによる取得になると思います。今回は自ら実験、アンケートを行ってデータを取得されたようですが、必要なデータを公開することによって大学、研究機関、企業等からの自主的なデータ提供を促す方法等も有効と考えられます。個別の冷媒の選定から、リスクトレードオフを考慮して物事を決定する方法へと一般化することにより、今後の新たな評価方法を提案できるのではないのでしょうか。

回答 (梶原 秀夫)

この論文の意義の一つは、リスクトレードオフを考慮した意思決定にとって、意思決定のプロセスを段階的に示し、複数ある評価項目と各評価項目での判断基準の提示を行うことが重要であることを実例を通して示していること、と言えると思います。また、評価に必要なデータがどのような種類のものか、そのデータがあることによつてどのような評価ができるのかを示すことが重要であることも同時に示しています。この論文のそのような意義を6章の最後とアブストラクトに加えしました。

議論5 評価実験の意図

質問 (田尾 博明)

脚注に、「ここでは米国試験材料協会の標準試験法 (ASTM E681-01) に則って測定された以下の燃焼限界値についての文献値 [4] を用いて計算した。」とありますが、この 55.4 % という値は実験結果 (図1) から求めたのではなく、文献値から計算できるということでしょうか? そうするとこの実験は何のために行ったのでしょうか? LFLの実験は文献値が正しいことを確認するためですか? それともこの実験は文献にはない最大燃焼速度を求めることに意味があるのでしょうか? 私の理解不足かも知れませんが、実験の目的を明確に記述したほうがよいと思います。

回答 (梶原 秀夫)

燃焼特性評価のための実験の目的の記述が不明確でした。実験の主たる目的は、R-1234yfとR-32の混合物において、純物質のLFLとUFLから推定される混合物のLFLとUFLが、実験値と一致することを確認することですので、そのことが明らかになるようにこの論文と脚注を修正しました。この論文では5.1の第2パラグラフに「燃焼実験を行いR-1234yf/R-32混合系において燃焼限界値の測定値が、混合比を用いてル・シャトリエの法則によって予測される値と一致するかどうかを明らかにした」とし、脚注には「純物質の」という追記を行いました。

議論6 有害性評価

質問 (田尾 博明)

R-32やR-744に対する有害性評価は行ったのでしょうか? 特に、R-32に対する有害性評価が必要だと思います。行っていないければ、その理由 (他所で実行済みなど?) を書くことよいのでは。5章の5.1、5.3、5.4ではR-1234yfとR-32に対する検討が行われていますので、5.2でも何らかの記述をしておくことよいと思います。

回答 (梶原 秀夫)

R-32やR-744は冷媒としての使用実績があるため、有害性評価は行いませんでした。5.2の冒頭に以下のような記述を追記しました。「R-1234yf、R-32、R-744のうち、R-1234yf以外は現行の冷媒として使用実績があり、有害性は低いと考えられるため、ここではR-1234yfを有害性評価の対象とした。R-32はR-410Aの構成成分であり、R-744はヒートポンプ式給湯器の冷媒として用いられている (用語2参照)」。それと同時に、用語2の表においてR-410Aの説明欄に、構成成分の化学式に併記して冷媒略称 (R-32等) を追記しました。また、用語2の表にミスタイプがありR-744とすべきところがR-747となっていましたので修正しました。