

地球温暖化を考慮した代替物質に関するリスクトレードオフ評価

—従来のリスクトレードオフ研究と何が違うのか—

安全科学研究部門 永翁 龍一

1. AIST-METI-NEDOにおけるリスクトレードオフ評価の研究の最近の動き —リスクトレードオフに挑む—
2. 次世代冷媒に関するリスクトレードオフ評価の問題点
3. 次世代冷媒に関するリスクトレードオフ評価の概要 —冷凍空調機器のLCCP評価を中心として—
4. 次世代冷媒に関するリスクトレードオフ評価の総括

プロジェクトの目的

- リスクが懸念される化学物質を同一用途の物質で代替する場合、代替物質のリスクも同時に評価し、代替によるリスク低減を確認する必要がある
- 被代替物質や代替物質に関する暴露/有害性情報は揃っていない
- 情報が欠如する場合においても、被代替物質と代替物質のリスクを科学的・定量的に比較し、費用対効果等を評価できる「リスクトレードオフ解析手法」を開発する(新エネルギー・産業技術総合開発機構より受託)



プロジェクトの必要性を後押しする背景

- 2002年の「持続可能な開発に関する世界首脳会議」(WSSD)
 - 化学物質の著しい悪影響を最小化する方法で使用・生産することを2020年までに達成(合意目標)
- 2006年の国際化学物質管理会議 (ICCM)
 - 科学的評価に基づくリスク削減等を進めることを定めた化学物質管理に関する戦略的アプローチ(SAICM)を採択(国際的合意文書)
- 欧州でのREACH(Registration, Evaluation, Authorization of Chemicals)施行
- わが国での化学物質審査規制法の改正

- 欠如している暴露や有害性に関して欠如した情報がある場合、それを補完し得る推定手法を開発しなければならない。
- 異なるエンドポイントのリスク同士を比較する必要がある(→ リスクトレードオフ評価の宿命)

(排出削減対策)

- ・排ガス/排水処理装置の導入と運転
- ・装置の密閉化

- 同じ物質による同じエンドポイントのリスクの変化(リスク削減量)を解析
- 排出削減シナリオ毎に暴露量を推定し、リスク削減量を求める
- 増分費用を推定し、費用効果分析の指標を算出する⇒最適な排出削減対策

(物質代替)

- ・代替物質の選択

- 被代替物質と代替物質の同一または異なるエンドポイントのリスクの変化(リスク削減量と増加量の差)を解析
- 被代替/代替物質毎に暴露評価と有害性評価を行い、リスクを判定
- 物質間の同種または異種のリスクを比較することにより、リスクの差分を求める
- 増分費用を推定し、費用効果分析の指標を算出する⇒最適な対策(排出削減対策と物質代替の比較も可能)

- 事業者による評価や行政による規制に活用されるように、以下の項目に対して研究開発を実施する
 - 用途群の特徴とライフサイクルを考慮する暴露情報の欠如補完手法
 - ヒトや生態系への有害性情報の欠如を補完し、リスク比較する手法
 - リスクトレードオフ評価書(洗剤/プラスチック添加剤/溶剤・溶媒/金属類)
 - リスクトレードオフ評価手法の解説書

- 具体的な研究開発項目
 - ① 排出シナリオ文書(ESD)ベースの環境排出量推計手法の確立
 - ② 化学物質含有製品からヒトへの直接暴露等室内暴露評価手法の確立
 - ③ 地域スケールに応じた環境動態モデルの開発
 - ④ 環境媒体間移行暴露モデルの開発
 - ⑤ リスクトレードオフ解析手法の確立
 - ⑥ 4つの用途群の「用途群別リスクトレードオフ評価書」の作成

PR:

本日、本PJの成果物を御用意致しました。ご自由にご持参下さい。

プロジェクトの目的

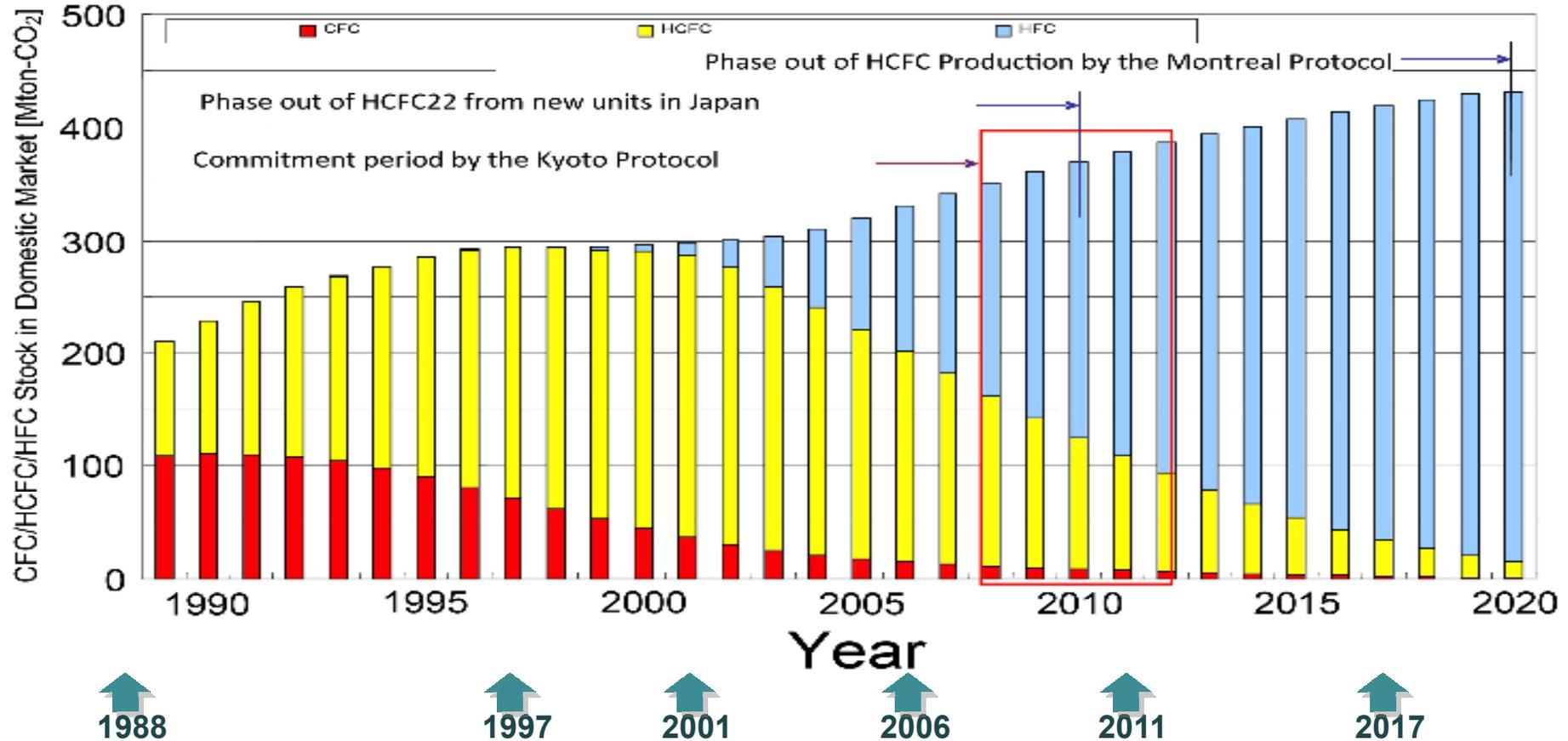
- 現在冷媒として使用されている代替フロン類は温室効果が高く、大気排出により地球温暖化に少なからぬ影響を与えているため、低GWP冷媒への転換が望まれている。
- しかし低GWP化に伴い、冷媒の熱サイクルにおける効率の低下に伴う温室効果ガス排出の増大や、有害性、可燃性、大気中化学反応による副生成物の発生などの問題発生が懸念される。
- そこで、地球温暖化問題の発生を防ぎつつ、新たな物質を次世代冷媒として取り入れるためのリスクトレードオフ評価を実施する。(新エネルギー・産業技術総合開発機構より受託)



プロジェクトの必要性を後押しする背景

- CFC (Chlorofluorocarbon) やHCFC (Hydrochlorofluorocarbon)は長い間冷媒として使用されていたが、オゾン層破壊に寄与することが明らかとなったため、HFC (Hydrofluorocarbon) への転換が進められた(モントリオール議定書)。
- HFCは温暖化係数(GWP)が極めて高いことが明らかとなり、1997年12月に行われた地球温暖化防止京都会議において排出削減の対象になった(京都議定書)。
- CFCやHCFCもHFC同様にGWPが高く、今だ一部の冷凍空調機器の冷媒として用いられている。将来的な大気への大量排出による温室効果促進が懸念される。
- 将来のHFCの(特に廃棄時における)大量排出を防ぐには、早期の低GWP冷媒への転換が有効。

【出典】日本冷凍空調工業会資料 産業構造審議会 化学バイオ部会地球温暖化小委員会第20回資料



1988:モントリオール議定書

- CFC/HCFCからHFCへ(ODP=0)
- オゾン層保護が目的

1997:京都議定書

- HFCから次世代冷媒へ(GWP→0)
- 温室効果抑制が目的

**2001:家電リサイクル法
フロン回収破壊法**

- 冷媒の回収義務化

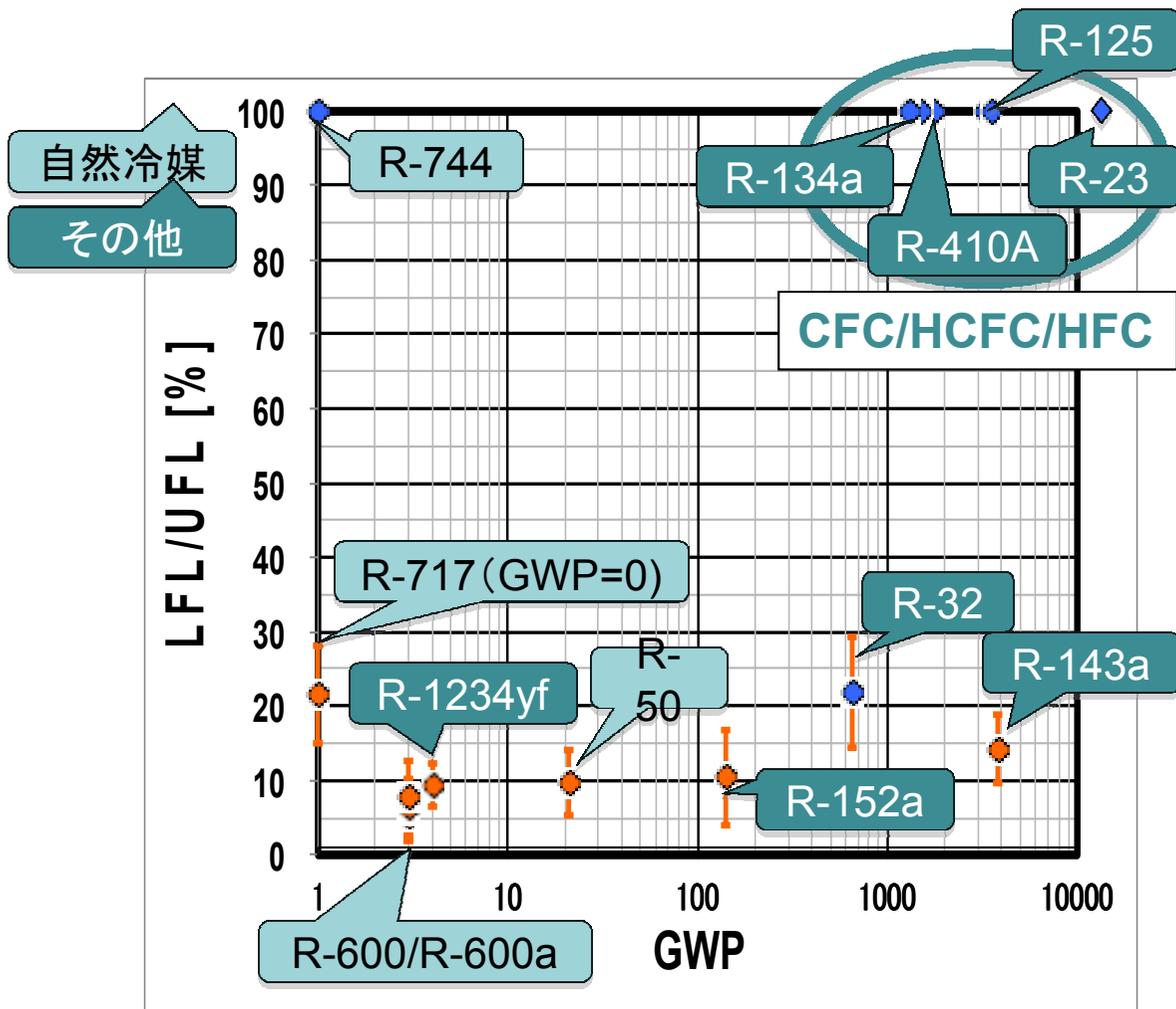
2006:F-Gas規制

- EUでの新型車搭載のエアコン冷媒の低GWP化(<150)を義務づけ(2011)
- モラトリアム期間を経て全車両への適用(2017)

GWPの低い冷媒は、概ね可燃性を有している。

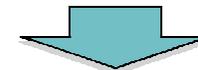
高圧ガス保安法における可燃性の定義

- ① 燃焼下限界が10%以下
- ② 燃焼上限界と下限界の差が20%以上
- ③ その他特に指定されるもの (例: R-717)

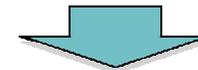


- ◆ 不燃性(高圧ガス保安法)
- ◇ 可燃性(高圧ガス保安法)

GWP<1,000の冷媒は概ね可燃性を持つ(例外はCO₂)。



可燃性冷媒を受け入れていかなないことには、冷凍空調機器の分野での低炭素社会構築への貢献は難しい



可燃性冷媒のフィジカルリスク評価とリスクガバナンスが、冷媒の低GWP化の重要なポイントになる。

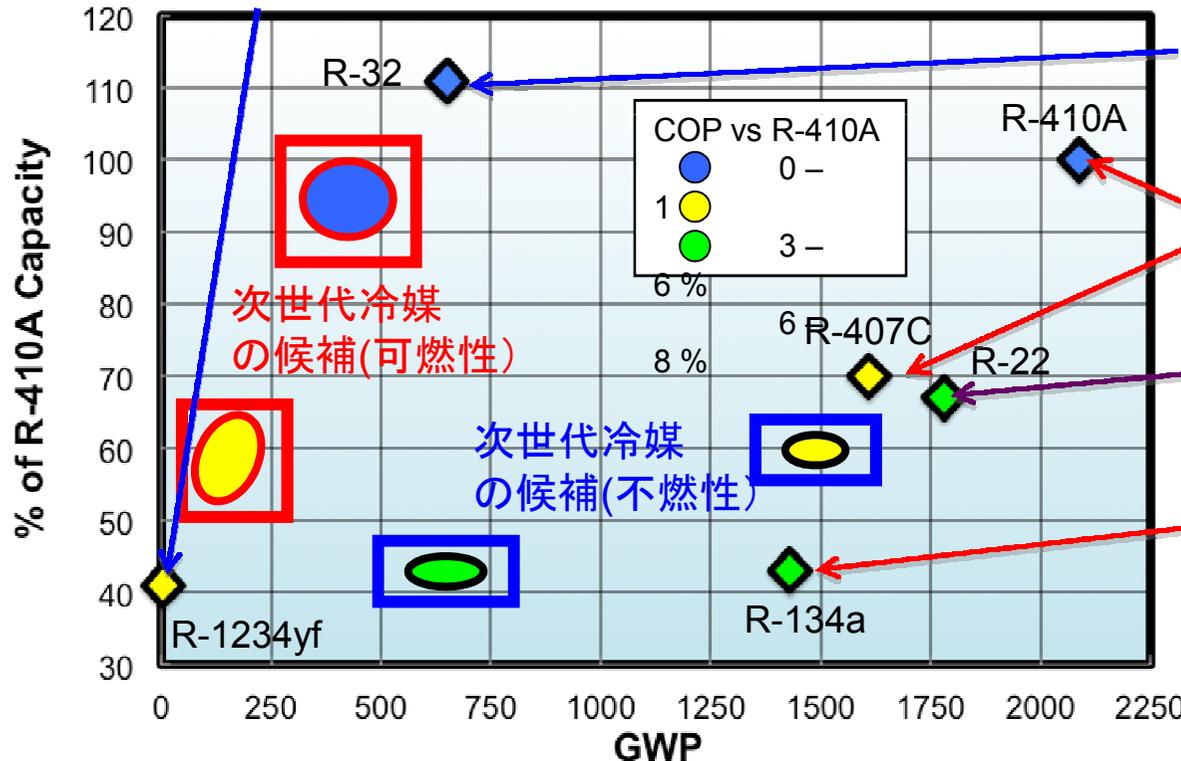
冷媒の低GWP化により、冷媒としての性能にやや難のある物質を
導入せざるを得ない。

- ①現状では、家庭用エアコンにおいては年間2%程度の冷媒の大気排出が見込まれている。またエアコン廃棄時の回収率は約27%。よって大量の冷媒が大気排出されている。
- ②冷媒の低GWP化は大気排出による温暖化効果を減少させるが、冷媒としての性能低下により、消費電力増大に伴う間接的な温室効果ガス排出に寄与する懸念がある。

次世代冷媒の候補

低GWPだが性能に難あり

AC Cycle Comparisons:
7°C Evaporator, 47°C Condensing



次世代冷媒の候補

R-1234yfとの混合による
性能向上と低GWP化が期待

現行の冷媒(家庭用/業務用エアコン)
効率がいいが高GWP

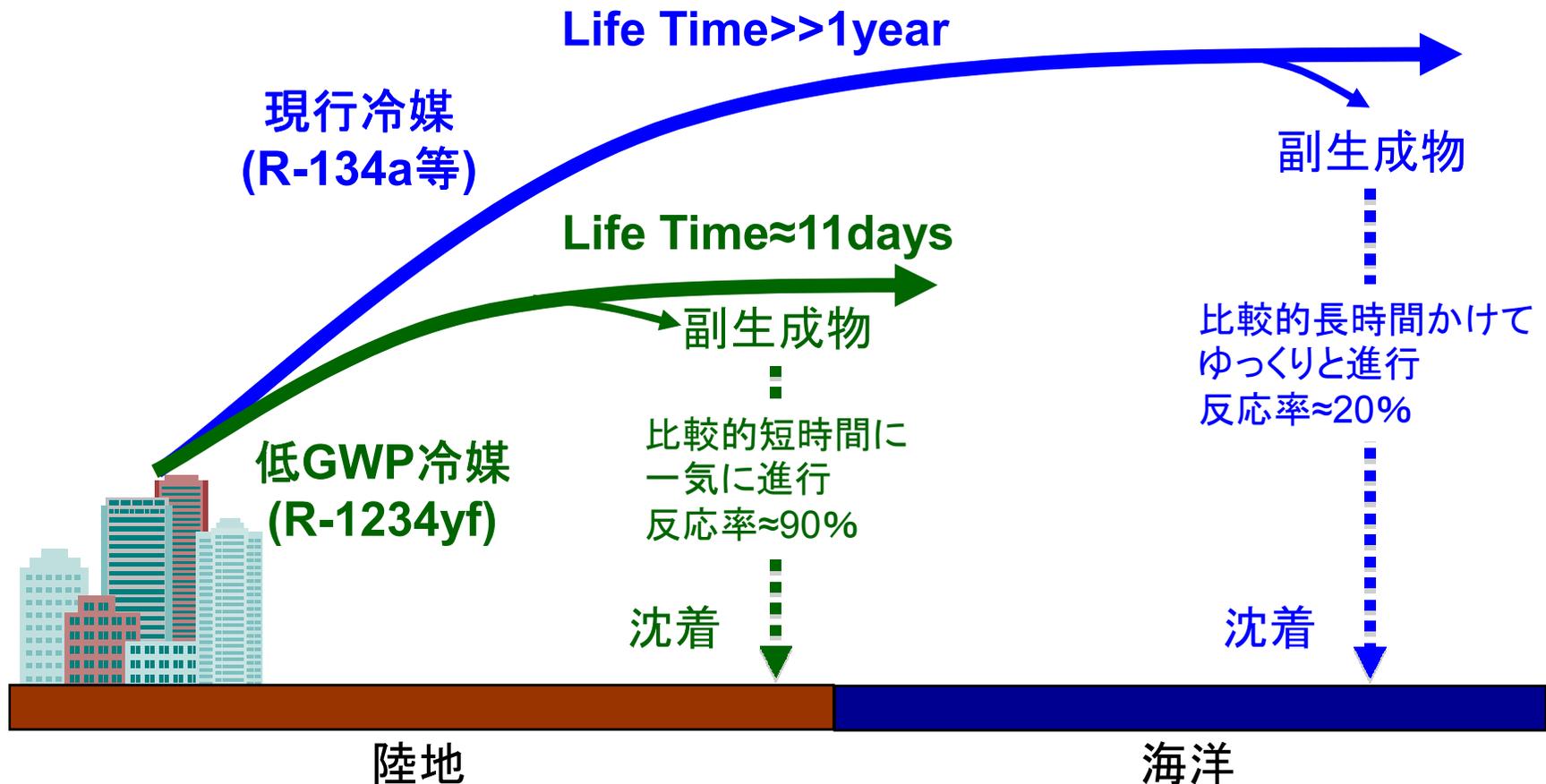
以前の冷媒(家庭用エアコン)
オゾン層破壊等の問題によりR-410A等に代替された

現行の冷媒(自動車用エアコン)
高いGWPが問題

T. Leck: Development and Evaluation of High Performance, Low GWP Refrigerants for Stationary AC and Refrigeration, 2010 NEXT-ACR, Tokyo, 17-18 Dec. 2010. を参考に再作成。

冷媒の低GWP化により、大気中での分解が比較的容易な冷媒の導入を考えざるを得ない。

- ①現状使用される冷媒は、GWPが高いが大気中で化学的に安定である(だからこそ地球温暖化に大きく寄与する)。
- ②冷媒の低GWP化への要望により、大気中での化学的な安定性の小さい冷媒が導入されることになるが、大気中での化学反応による副生成物の発生も同時に起こる。



	自然冷媒 (R-744)	低GWP冷媒 (R-1234yあるいは混 合系)	従来冷媒 (R-410A・R-134a)
ベネフィットになりうる項目	<ul style="list-style-type: none"> • 低いGWP(GWP=1) • 不燃性 • 大気中で安定 	<ul style="list-style-type: none"> • 低あるいは中程度のGWP(R-1234yf: GWP=4) • 比較的良いCOP(混合系・R-134a代替としてのR-1234yf) • 恐らく低毒性 	<ul style="list-style-type: none"> • 高いCOP • 低毒性 • 不燃性 • 大気中で安定(R-134a: 副生成物の発生は小さい)
リスクになりうる項目	<ul style="list-style-type: none"> • 神経毒性(TLV-TWA: 5,000 ppmなのでISO 817ではA1に分類) • 低いCOP • 超臨界状態での熱サイクル適用(給湯など一部の用途に限られる) 	<ul style="list-style-type: none"> • 可燃性(微燃性)(ASHRAE分類では2L) • やや低いCOP(410A代替としてのR-1234yf) • 大気中での化学反応による副生成物(TFA等) 	<ul style="list-style-type: none"> • 高いGWP (R-134a: GWP=1,300) (R-410A: GWP=2,088)

地球温暖化抑制(冷媒低GWP化)のために、リスクになり得るエンドポイントが逆に増えてしまい、結果的に複雑なリスクトレードオフ評価が必要となった。

I. 次世代冷媒を利用する冷凍空調機器のライフサイクル(LCCP)評価

- 1) 新規冷媒に対応して研究開発が実施される冷凍・空調システムの機器製造データや実運転想定データを収集し、ライフサイクル評価の基礎データとする。
- 2) 今後開発が予想される冷凍・空調システムの製品寿命(生産→運転・使用→廃棄)を通じた環境負荷を総合的に評価する。

II. 次世代冷媒冷媒の燃焼特性評価

- 1) 次世代冷媒単体、及び混合系冷媒に対し、空気中での冷媒濃度と燃焼の有無(燃焼限界)との関係を実験的に評価する。
- 2) 次世代冷媒単独、及び混合系冷媒での燃焼速度を測定する。

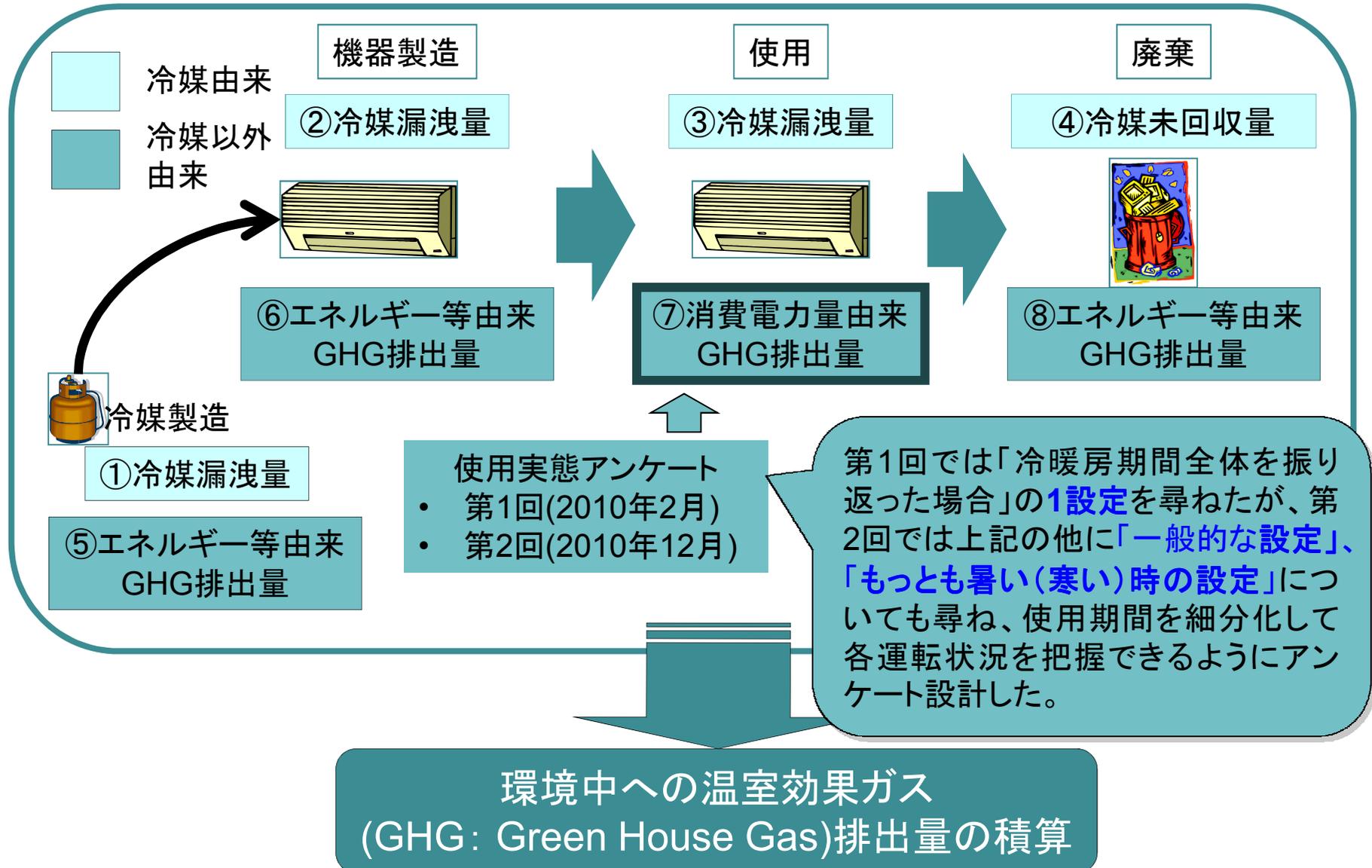
III. 次世代冷媒冷媒の有害性評価

- 1) 次世代冷媒とその大気中分解物、さらにそれらの構造類似物質について、既存の有害性試験結果の妥当性や不足試験項目の有無などについて調査する。
- 2) ヒト健康リスク評価に用いる有害性エンドポイントとそのヒト無毒性量等々を評価する。

IV. 次世代冷媒冷媒の暴露・リスク評価

- 1) 冷媒の大気中への放出を想定した場合について、大気中での移流拡散挙動から暴露評価、及び対流圏でのオゾン生成による大気汚染由来の健康リスク評価を実施する。
- 2) 冷媒の室内での漏洩を仮定し、冷媒の室内での濃度分布の予測からヒト暴露影響と燃焼可能性を評価する。
- 3) 有害性・暴露・燃焼性を考慮した、室内利用時におけるリスクトレードオフ評価を実施する。

ライフサイクルアセスメント(LCA: Life Cycle Assessment)の評価範囲



●対象製品

定格冷房能力:2.2kW
使用期間:12年間

●エアコン設置場所

地域・・・IV: 関東地域
住宅・・・戸建
部屋・・・居間

●冷媒漏えい率及び回収率

		割合
漏洩率	製造時	0.2%
	使用時	2%/yr
回収率	廃棄時	26.7%

参考: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21回)
[2009年3月17日]

●電力のCO₂排出係数

0.453kg-CO₂/kWh

参考:JEMAI-LCA pro[(社)産業環境管理
協会・(独)産業技術総合研究所]

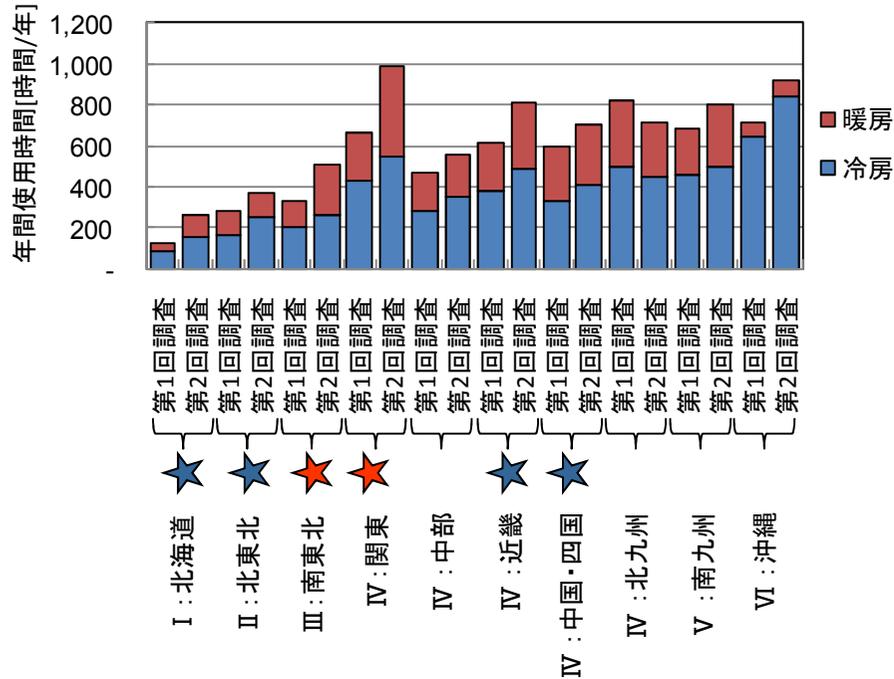
●冷媒特性

	地球温暖化 係数(GWP)	冷媒充填量 [kg/台] ¹⁾	R-410Aを機銃 とした場合の使 用段階での消 費電力量の増 減率[%]
現行冷媒(R-410A)	2,088 ²⁾	1.2	
R-32	650 ²⁾	1.0	-2% ³⁾
次世代冷媒(R-1234yfと R-32を63.8:36.2の重量 比で混合) ⁴⁾	416	1.1	+3% ⁵⁾
F-Gas規制を想定した仮 想冷媒	150	1.1	0%
R-1234yf	4	1.1	+5% ⁶⁾

- 1) <http://www.meti.go.jp/committee/materials2/downloadfiles/g81209b10j.pdf>
- 2) IPCC第四次報告書
- 3) 古浜功吉「日本における冷凍空調機器の環境評価(LCCP)事例」
- 4) 高圧ガス保安法で不燃性ガスとなる混合比においてGWPが最小となるもの。DuPont/Honeywell社が大量供給を前提に試験的に作成した混合冷媒の一つもこの組成に近いものを持つ。
- 5) DuPont/Honeywell公表データからの推定値
- 6) 遠藤和広「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

1台当たりの年間使用時間

「設定を特定しなかった」場合

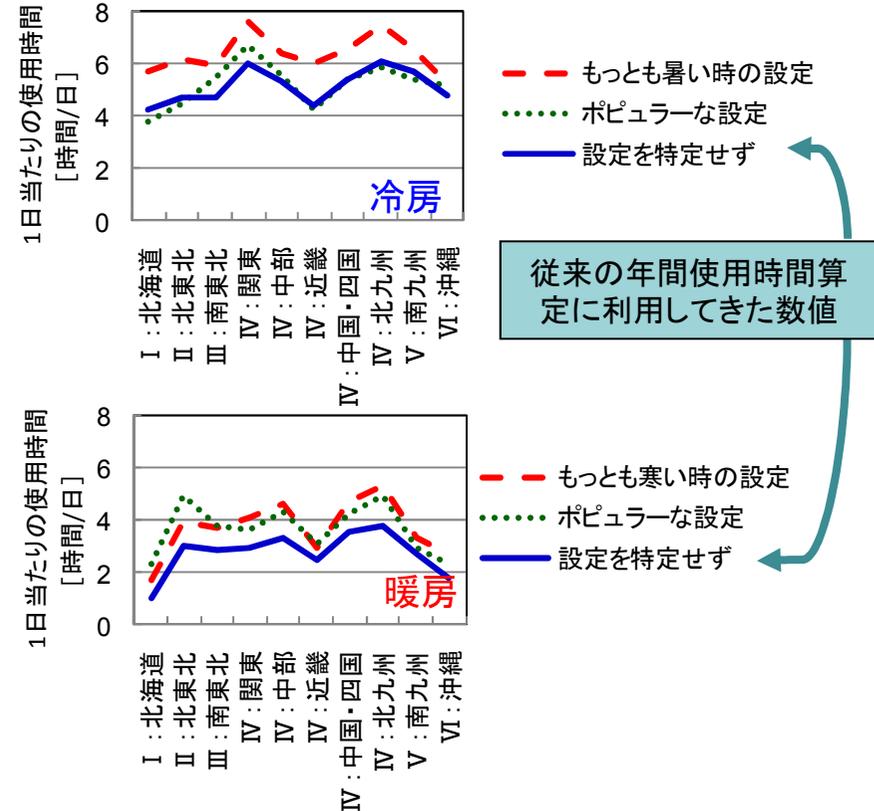


- ★ 第1回と第2回の冷房使用時間に有意差あり(p<0.05)
- ★ 第1回と第2回の暖房使用時間に有意差あり(p<0.05)

第1回と第2回の数値について、地域ごとに母平均の有意差を確認できた

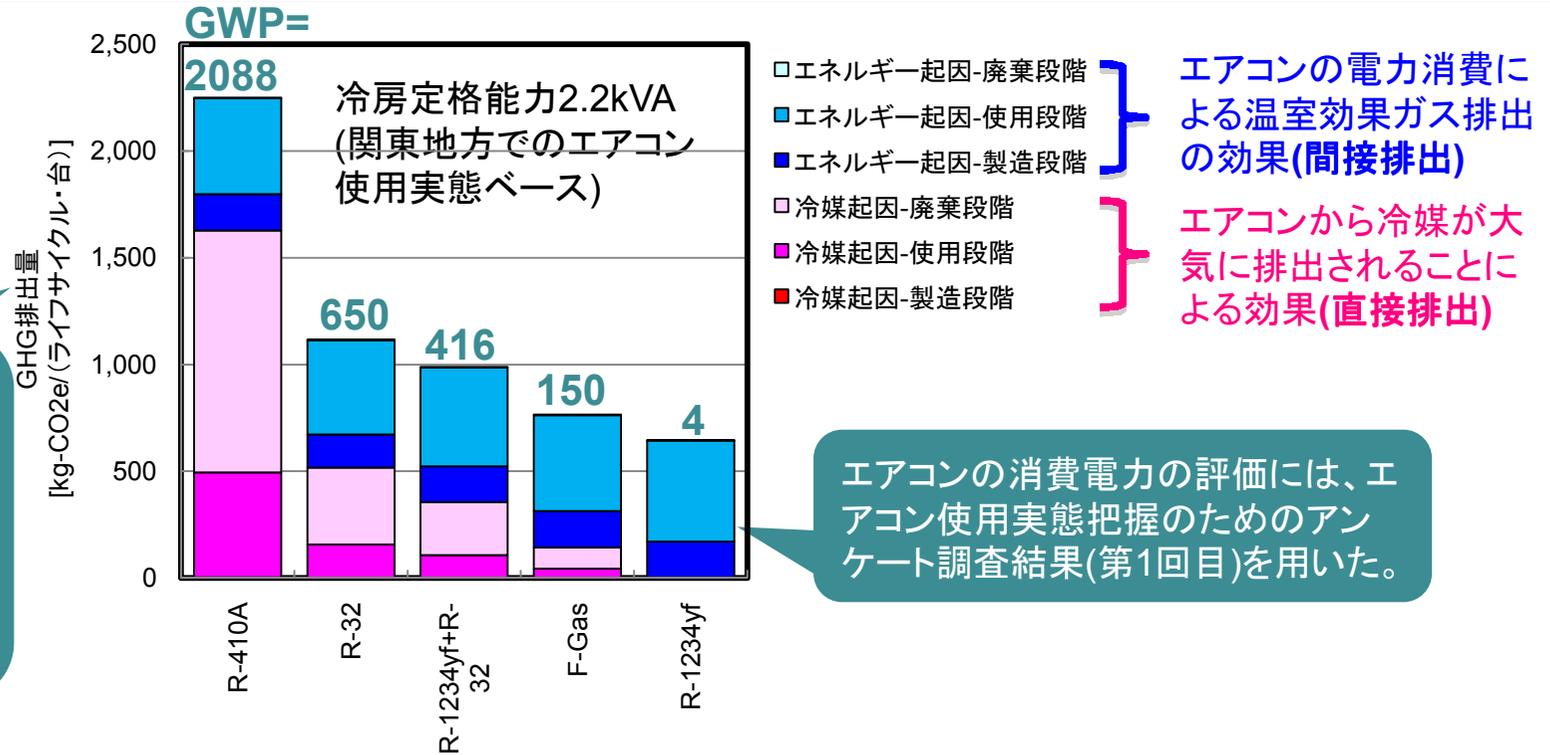
1日当たりの使用時間

(第2回調査結果)



第2回調査では複数の設定を把握できたので、より信頼度の高いデータを作成できる可能性がある

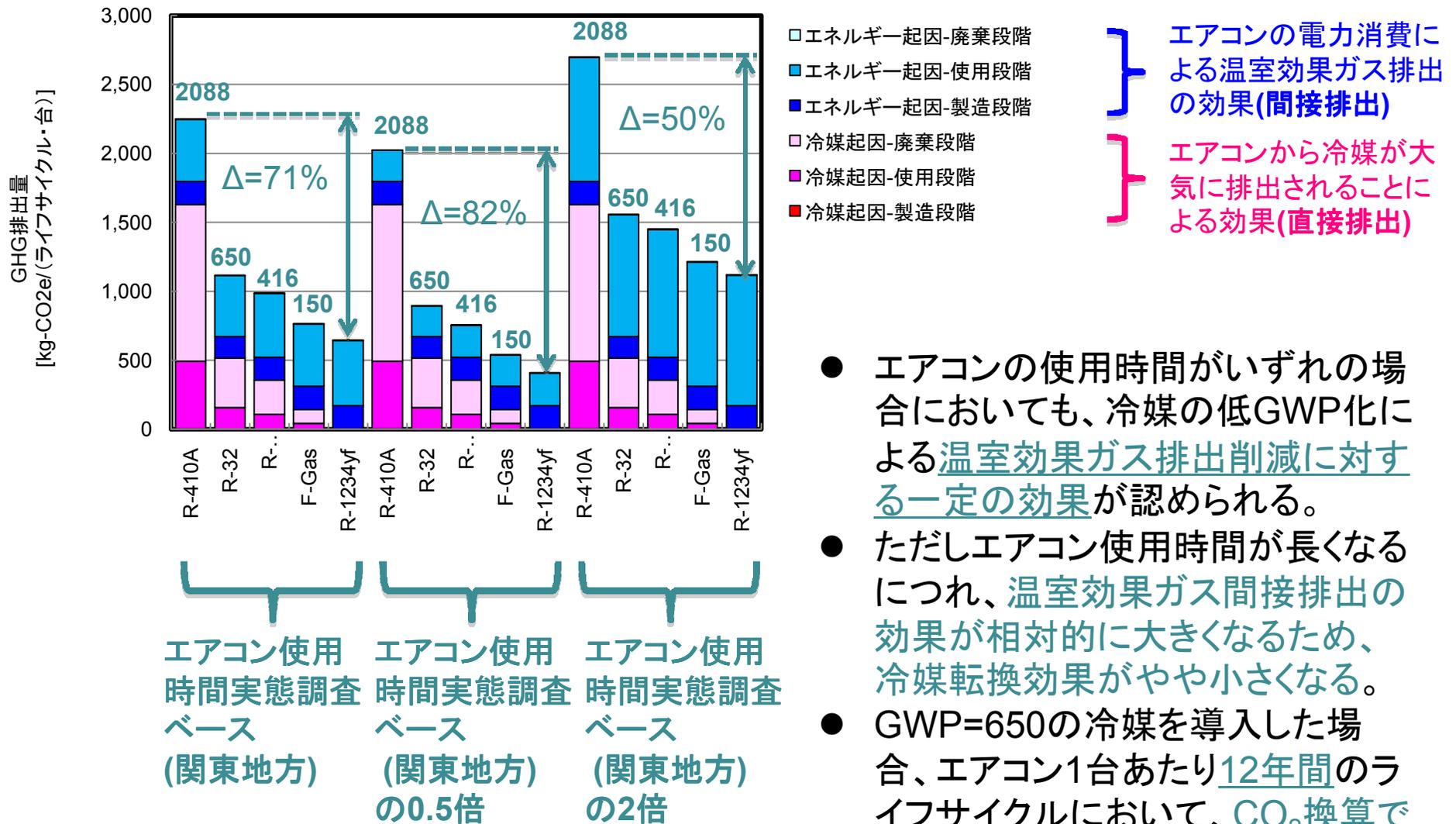
日本国内における『家庭用エアコン』に着目した使用の実態が相当に解明された



エアコンの寿命を12年と仮定した、家庭用エアコン(2.2kVA)一台あたりの温室効果ガス排出量のCO₂換算値

エアコンの消費電力の評価には、エアコン使用実態把握のためのアンケート調査結果(第1回目)を用いた。

- 現行冷媒(R-410A)を用いた家庭用エアコンによる温室効果ガス排出のうち、72%が冷媒の大気排出(直接排出)起因。電力消費(間接排出)由来のものはわずか28%に過ぎない。
- 冷媒のGWPを低いものに転換することは、温室効果ガス排出削減に対する効果が極めて大きい。
- 現行冷媒と次世代冷媒候補群の温室効果ガス排出削減の効果を比較したところ、冷房定格能力2.2kWの小型家庭用エアコンでは、GWP=400~600程度のものでも温室効果ガス排出削減にはかなりの効果が期待できることがわかった。
- 2回にわたって実施した使用実態アンケート調査の結果を統合することにより、関東地域でのエアコン使用段階の消費電力量の算定し、温室効果ガスの直接排出量を可能な限りの精度で推定した上で冷媒転換に関する政策導入効果を事前評価することができた。

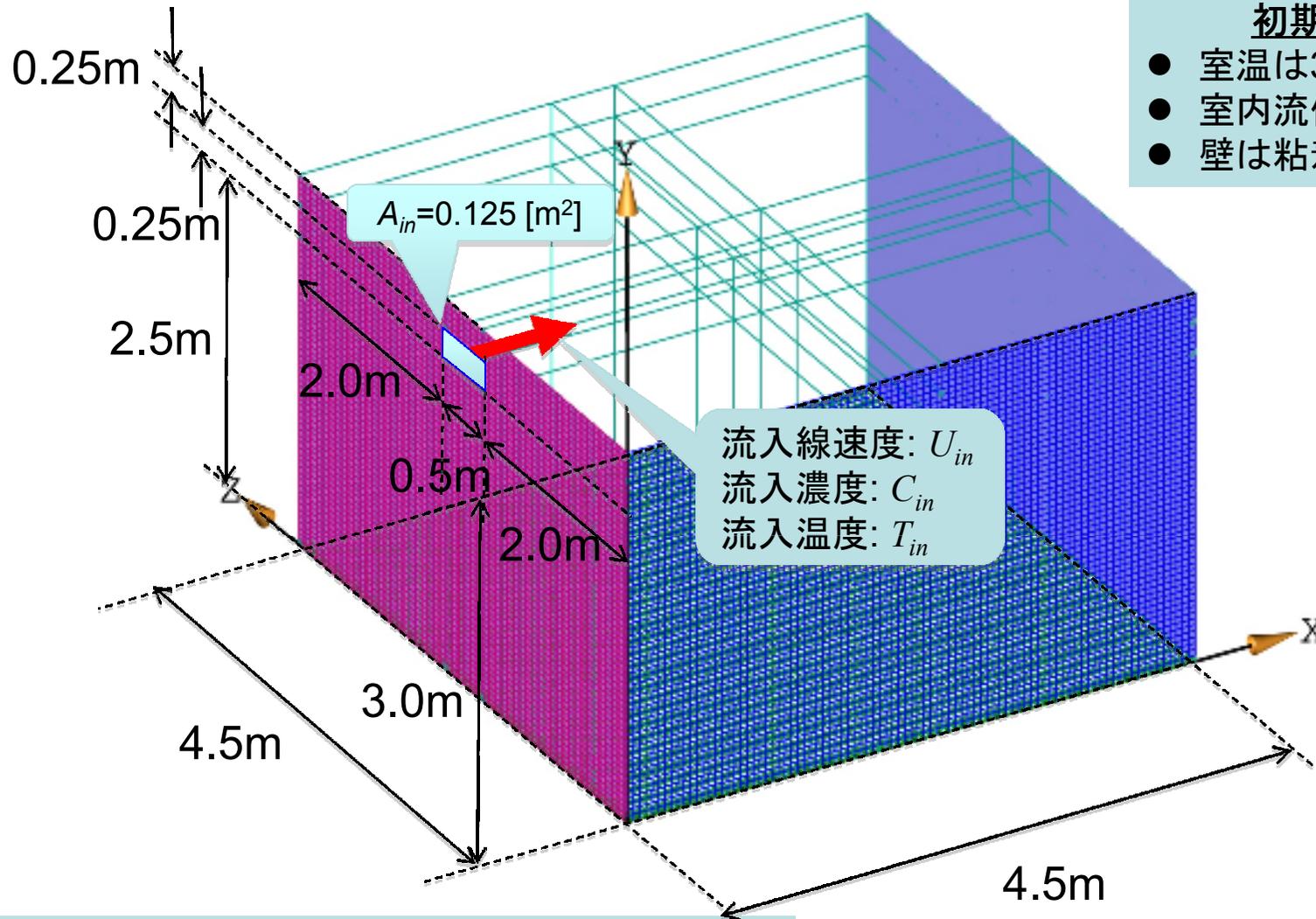


室内暴露評価において特に考慮すべき濃度限界

- 有害性の観点からは、急性毒性に関するエンドポイントにおける濃度を把握することが重要
 - 急性吸入毒性(LC50) 400,000 ppm
 - 心感作性 120,000 ppm

- 燃焼特性の観点からは、燃焼限界に関する濃度を把握することが重要
 - 燃焼限界(FL) 65,000～123,000 ppm

室内暴露評価においては、ある漏洩シナリオの元で、室内における冷媒の濃度と上記の濃度範囲の大小関係を正確に見極め、そのリスクを適切に判断することが重要。



- 初期・境界条件**
- 室温は30°Cで一定
 - 室内流体は完全制止
 - 壁は粘着かつ断熱条件

- 流体力学的な解析条件**
- 室内流体、冷媒とも非圧縮性ニュートン流体
 - Boussinesq近似の導入
 - 流体密度は一定

シナリオ No.	機器の稼働	漏洩線速度 U_{in} (m·s ⁻¹)	風量 Q_{in} (m ³ ·s ⁻¹)	漏洩時間 t_{leak} (s)	搭載冷媒量 S (mol)	漏洩濃度 C_{in} (mol·m ⁻³)
1	稼働	0.5	0.0625 =132.3 ft ³ ·min ⁻¹	600	15 =1.71 kg	0.4 =10,000 ppm
2	非稼働	0.05	0.00625 =13.23 ft ³ ·min ⁻¹	600	15 =1.71 kg	4.0 =100,000 ppm

(101.3 [kPa], 303.15 [K])

漏洩冷媒濃度の決定

断面積 A_{in} の送風口より均一な線速度 U_{in} と一定濃度 C_{in} にて $0 \leq t \leq t_{leak}$ にわたって閉鎖空間内に漏洩した冷媒量は、充填全冷媒量 S に等しいと考える。

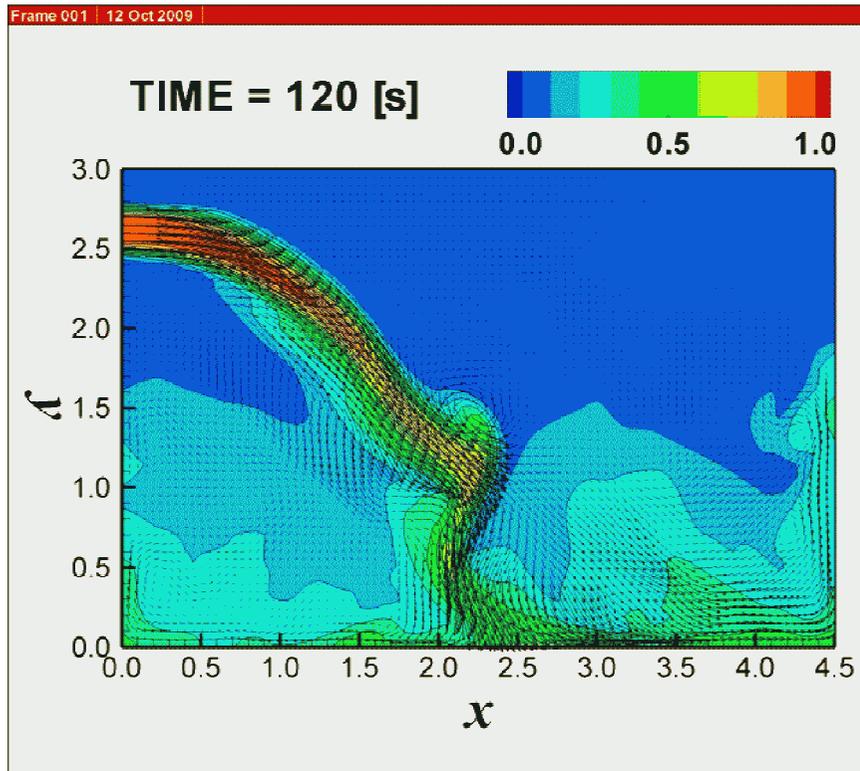
$$A_{in} \int_0^{t_{leak}} UC dt = S \quad \rightarrow \quad C_{in} = \frac{S}{A_{in} U_{in} t_{leak}} = \frac{S}{Q_{in} t_{leak}} = \frac{V}{Q_{in}}$$

$$\because Q_{in} = A_{in} U_{in}, \quad V = S/t_{leak}$$

漏洩速度
風量

- 冷媒漏洩濃度は、漏洩冷媒の風量と漏洩速度（あるいは漏洩量とその漏洩が完了する時間：漏洩時間）が設定することにより、簡単に見積もることができる。
- 冷媒漏洩濃度が定量化出来れば、CFD技術を駆使した室内暴露評価が可能である。

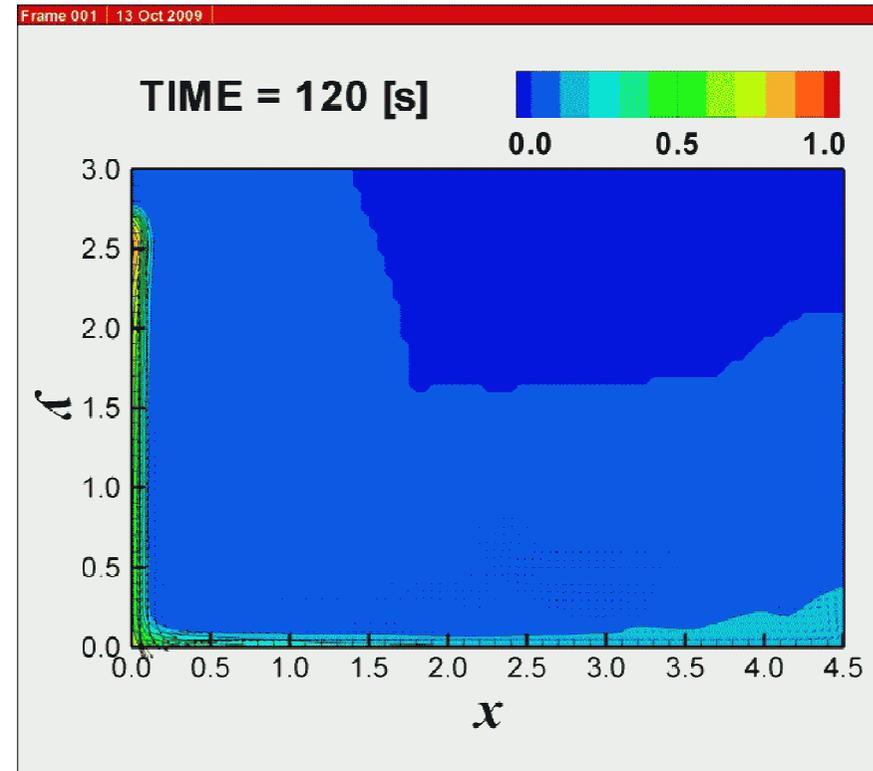
シナリオ1: 機器稼働時の冷媒漏洩



送風口での冷媒濃度は10,000 [ppm]

この濃度は、R-1234yfの急性有害性のエンドポイントに対するNOAELや燃焼下限界(LFL)よりも遙かに小さく、リスクの懸念がない。

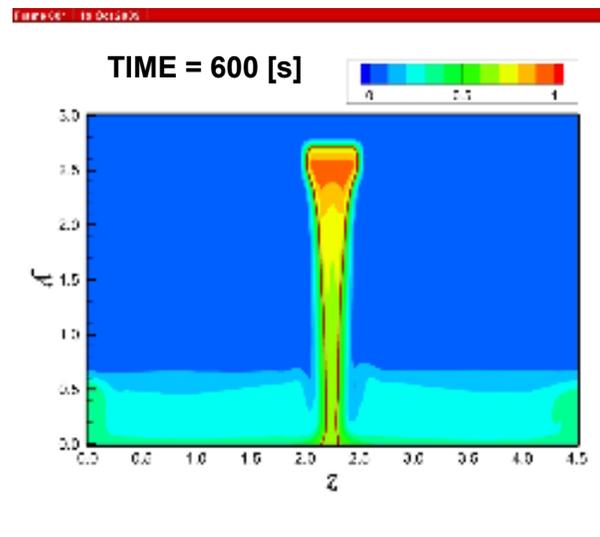
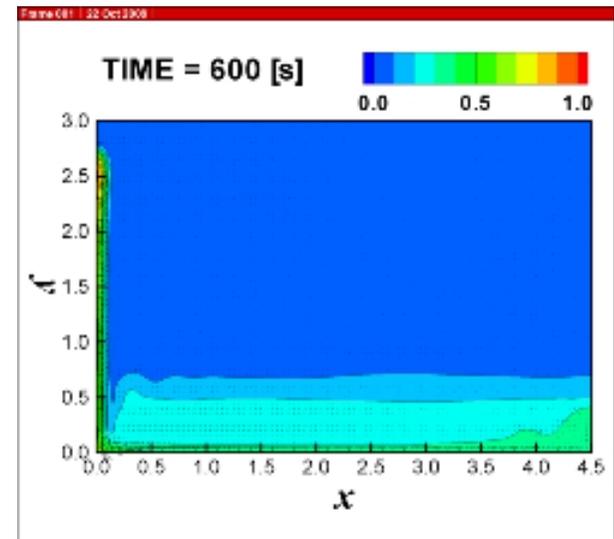
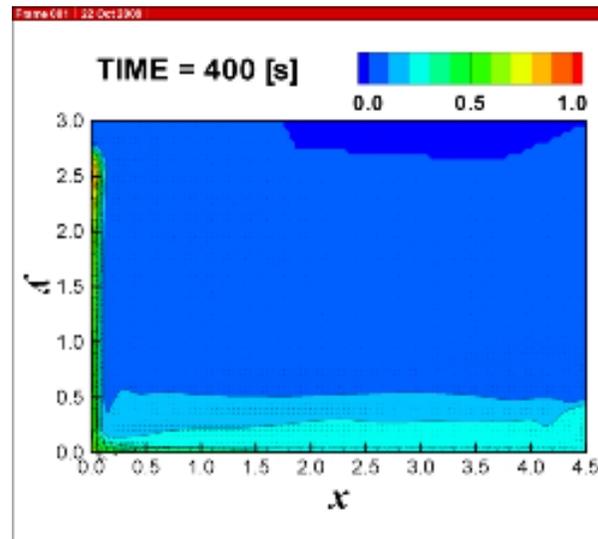
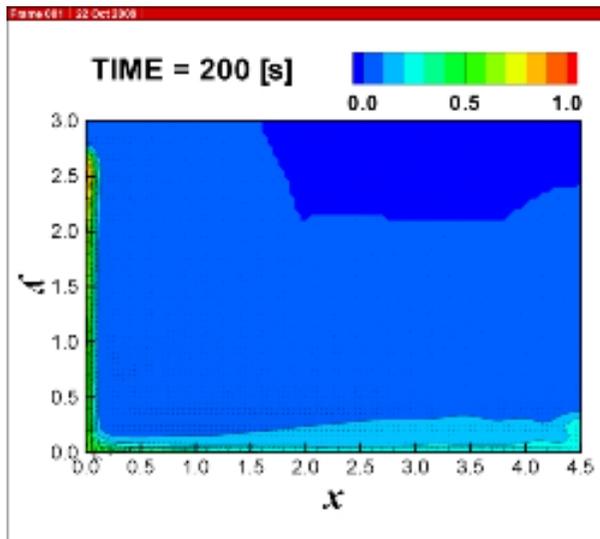
シナリオ2: 機器非稼働時の冷媒漏洩



送風口での冷媒濃度は100,000 [ppm]

この濃度は、R-1234yfの急性有害性のエンドポイントのNOAELよりやや小さいが、燃焼下限界(LFL)よりも高い。よって詳細なリスク評価の実施が必要となる。

シナリオ2: 機器非稼働時の冷媒漏洩

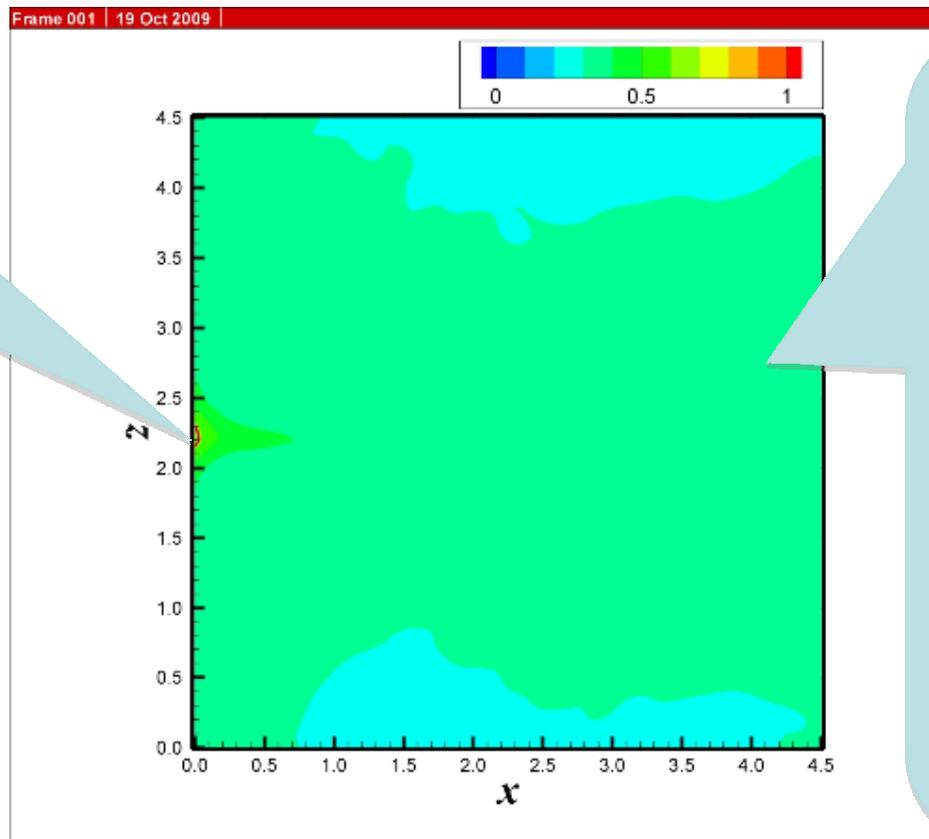


本室内暴露評価より、漏洩冷媒への着火のリスクは極めて小さいと考えられる。

理由1: 漏洩濃度がLFLより高い領域の周辺では、最大0.4m/sの漏洩冷媒による流れが発生している。これはR-1234yfの燃焼速度0.015m/sよりも遙かに速い(R-1234yfに火炎が発生しない、あるいは発生した火炎を維持出来ず消炎する可能性が高い)。

理由2: 漏洩濃度がLFLより高い領域の総体積は、極めて小さく、殆どが壁面に沿った薄い領域しかなさない。従って着火そのものの可能性が低い上に燃焼の伝播が発生しにくい(火炎を拡大可能とするような冷媒漏洩になり得ない)。

漏洩した冷媒の濃度がLFLを超える領域がわずかに発生する。



- 漏洩した冷媒の床面での濃度は、大半の部分で50,000[ppm]以下。これは、心感作性に対する許容濃度120,000[ppm]の半分以下、急性致死性に対する許容値の1/8である。
- 床面平均濃度は、部屋全体の平均濃度(6,140[ppm])の8倍以上の高濃度となる。

本室内暴露評価より、漏洩冷媒へのヒト健康へのリスクは極めて小さいと考えられる。

理由1: 床面(0.05m)での漏洩冷媒濃度は大半の部分で50,000[ppm]以下であり、急性致死性(400,000[ppm])、あるいは心感作性(120,000[ppm])といった急性毒性の許容値よりも小さい。

理由2: この濃度分布は、15[mol](≈ 1.7 kg)の冷媒が全て漏洩した場合を仮定しており、このような漏洩が発生する確率は極めて低い。

理由3: 漏洩冷媒が高濃度に達するのは床面のごく近傍(<0.1m)のみであり、漏洩後600[s]後においても、床面0.5mでの濃度は約30,000[ppm]以下でしかない。

- 現状の関東地域でのエアコンの1日あたり使用時間から推定した温室効果ガスの直間比率を評価することにより、GWP=400～600程度の冷媒への転換による温室効果ガス排出削減は十分に大きいと期待できることがわかった。
- 温室効果ガス排出削減を狙った冷媒転換においては、GWPは、冷媒転換をめぐるリスクトレードオフ評価のための評価指標の一つに過ぎない。
- 室内での冷媒漏洩の際に、有害性と燃焼性の観点からの暴露評価を行うための漏洩のシナリオと評価の実例を示した。その結果、冷媒の漏洩に対する適切なリスク管理は可能と考える。
- 北海道地域など寒冷地域では、エアコンではない暖房機器(石油やガスによるストーブ等)に暖房のかなりの部分を依存していると推定される。化石燃料から電力への転換による温室効果ガス排出削減効果を定量化してみたい。