

微燃性冷媒リスク評価研究会

最終報告書

—概要版—

平成 28 年 8 月

公益社団法人 日本冷凍空調学会

免責事項

本最終報告書（概要版）に記載している内容については、最新の技術情報に基づき万全を期して作成しておりますが、掲載された情報の正確性を保証するものではありません。また、本最終報告書（概要版）に掲載された情報・資料を利用、使用する等の行為に関連して生じたいかなる損害についても、本学会並びに著者は何ら責任を負いません。

著作権

本最終報告書（概要版）の著作権は執筆者が有しています。許可なく全体あるいは一部の転載、複製はお断りします。

微燃性冷媒リスク評価研究会 最終報告書－概要版－

2016年8月22日

編集 日本冷凍空調学会 微燃性冷媒リスク評価研究会

発行所 公益社団法人 日本冷凍空調学会

〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町13-7

日本橋大富ビル5階

TEL 03-5652-3223 FAX 03-5623-3229

1. 序 論

微燃性冷媒リスク評価研究会について

オゾン層保護の観点から CFC 冷媒や HCFC 冷媒の使用が規制され、HFC 冷媒への転換が進んでいるが、地球温暖化係数（GWP）値の高い HFC 機が普及するにつれ、使用時の冷媒漏えいや廃棄機器から回収されない冷媒の大気漏えいが多いことが問題になり、その抜本的な解決のためには、GWP 値の低い冷媒への転換が急務であることが認識されてきた。

冷凍空調の主要分野で冷媒の低 GWP 化を図るためには、微燃性冷媒を使いこなす必要があるが、これまで、冷凍空調機器での冷媒の使用、充填、回収、輸送、保管についての安全を定める冷凍保安規則や一般高圧ガス保安規則において微燃性冷媒の取り扱いに関する規定がなく、プロパンなどの強燃性冷媒と同様の厳しい扱いが求められてきた。そこで、産業界からは微燃性冷媒の燃焼性の強さに応じた、取り扱い規制の緩和が要望されてきたが、そのためには、科学的知見に基づいた微燃性冷媒のリスク評価が必要と認識されてきた。

低 GWP 冷媒は微燃性を有することが多いため、低 GWP 冷媒の使用を促進するため、科学的知見に基づいた微燃性冷媒のリスク評価の必要性が叫ばれ、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「高効率ノンフロン型空調機器技術の開発」プロジェクト（2011～2016 年）の中で、諏訪東京理科大学、九州大学、東京大学、産業技術総合研究所などが冷媒の安全性の研究を進めた。一方、日本冷凍空調工業会や日本自動車工業会はそれ以前から冷凍空調機器や自動車用エアコンに微燃性冷媒を適用するときのリスク評価を始めていた。日本冷凍空調工業会では、製品分野ごとに微燃性冷媒のリスク評価を実施するワーキンググループを設置し、設置条件の影響や着火源の存在になどについて個別に審議した。これら知見を集約し、第三者の目で客観的な評価を行う目的で、2011 年から 2016 年まで日本冷凍空調学会の中に「微燃性冷媒リスク評価研究会」を設置し、活動を行った。

国内外の冷媒規制動向

空調冷凍機に使用される冷媒は、オゾン層保護と地球温暖化防止という二つの課題の中で揺れ動いている。もともとオゾン層保護を目的としているモントリオール議定国会議でも、近年は冷媒の地球温暖化影響に対する対応の議論をしている。米国は HFC 冷媒温暖化削減計画をカナダ・メキシコと共同でモントリオール議定書締約国会議に提出している。この削減計画のベースラインは 2005 年から 2008 年の HFC と HCFC の温室効果総量とされている。先進国は 2033 年に HCFC を含めた HFC の温暖化係数換算で総量を 85%削減しようという非常に意欲的な内容である。今後、冷媒の温暖化対策の議論が進められることになった。

日本では 2015 年 4 月、フロン排出抑制法が施行された。この法律の基本的な方向性は、フロン類の大気中への排出を抑制するため、フロン類の「使用の合理化」及び業務用等製品に使用されるフロン類の「管理の適正化」を大きな二本柱にして、製造から廃棄までライフサイクルの各段階において 4 つの対策とその取組主体を明確にしたことである。「使用の合理化」とは温室効果の少ないフロン類の製造や量を削減することである。「管理の適正化」とは排出状況を把握することにより全体の排出量を抑制することである。以上の方向性に沿って、「フロン類の製造業者」、「フロン類使用製品の製造・輸入業者」、「業務用冷凍空調機器の管理者」に対して、その責任の判断の基準となるべき事項を定め公表している。総量削減目標は 2030 年に BAU 比で△52%である。

欧州は 2015 年 1 月に欧州 F ガス規制（EC Regulation No842）改訂を行った。今回の改正はこれまでの規制の他に、用途ごとの GWP 規制やプレチャージを含む冷媒の総量管理を含めた対策により、2030 年に 2009-12 年の平均 CO₂ 換算総量を 79%削減する目標を設定している。F ガス規制のポイントは 3 つである。

- ① HFC の販売側の規制（HFC 販売業者にクォータを付与して管理）。これは販売枠を与えることを意味するが、全体の 89%を既存業者が権利を持ち、残りの 11%を新規事業者に配分するものである。
- ② 輸入される空調機の冷媒も 2017 年以降はクォータが必要となる。

- ③ 機器の冷媒の GWP 規制. これは段階的に行われると言われている. 定置用冷凍・冷蔵機器の規制が優先され 2018 年から, 次に 2021 年にはマルチ型セントラル冷凍, シングルスプリットは 2024 年から規制される予定である.

次に北米の動きについては, 米国オバマ大統領は行政施策として Climate Action Plan を強化し, 米国環境省 EPA は冷媒認証制度 SNAP (Significant New Alternatives Policy) を使って, 高 GWP 冷媒を禁止し, 低 GWP 冷媒を認可することで冷媒対策を進めている. 近々に SNAP 登録から外され実質的に禁止される冷媒は R404A と R507A, スタンドアローンの冷凍機やベンディングマシーンでは R134a や特定の HFC 混合冷媒である. カナダの動きは日欧に近い. 具体的な機器に応じて GWP 規制値と規制開始年を発表している.

もう一つの大きな動向は, 途上国においてモントリオール議定書の HCFC フェーズアウト計画がスタートしていることであろう. 国連の指導もあり, 多くの途上国は, このフェーズアウト計画を機会に, オゾン層破壊がなく温暖化影響の少ない冷媒に転換することを進めている.

国内外の冷媒安全規格動向

現在, 低GWP冷媒転換の最大の課題は, これらが微燃性であることに対する懸念である. 前述のように R410Aの代替冷媒候補で不燃性(A1)の冷媒で有望なものはなく, 妥当なGWPを持つものは全て微燃性(A2L)である. よって課題はこれらの微燃性冷媒の安全性を担保できるか, あるいは各国の安全規格や国際安全規格に対応できるか, である. このように温暖化対策と可燃性はトレードオフの関係にある. 注目すべき国際規格にはISO, IECがある.またEN (欧州規格) やASHRAE (米国学会規格), GHS(国連規格)も重要である.

現在, これらの国際規格や各国の規格において, 微燃性冷媒を取り扱うための規格改定作業が進みつつある. ASHRAE34, ISO817, ISO5149 はすでに改定作業を終了し改訂版が発行されている. IEC60335-2-40 と GHS は改定作業中. 以下の規格の現状を紹介している.

- ① ISO817 (Designation and safety classification)
- ② ISO5149 (Mechanical refrigerating systems used for cooling and heating Safety requirement)
- ③ IEC 60335-2-40 (Safety of household and similar electrical appliances)
- ④ GHS (The Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals)

可燃性冷媒と微燃性冷媒との差は, 燃え易さと燃えた後の危害度が大きく違うことである. 微燃性冷媒は燃焼下限濃度(LFL)が比較的大きく, 最小着火エネルギーが大きい. よって着火確率は非常に小さくなる. 燃焼速度と燃焼エネルギーは燃えた後の危害の大きさに影響する. 微燃性冷媒は両方とも小さいので燃えた時の危害も小さい. 燃焼性規格において国際規格と日本国内では燃焼等級は異なっている. この大きな理由は3つある. 一つは試験方法の違い, 判断する燃焼範囲の違い, そして最も大きな違いは冷凍空調機器の中で使われる場合の定義と, 一般ガスとして使われる場合の定義が異なることである.

日本では2016年3月9日の産業構造審議会保安分科会高圧ガス小委員会において高圧ガス保安法冷凍保安規則の規制緩和の方向性が打ち出され, R32, R1234yf, R1234ze(E)の3冷媒を「不活性」に位置づけるという方向性である. ただし, 技術上の基準に必要な措置を講ずるという条件付きである. 必要な措置というのは

- ・これらの微燃性冷媒が漏洩した時に滞留しないような構造にすること
- ・滞留の恐れがある場所には検知・警報の設備を設けること

である.

国際的にも規制緩和が進んでいる. 2010年にはASHRAE34が改定され微燃性クラス(2L)が区分された. 2013年にはIEC60335-2-40Ed.5が改定され微燃性冷媒において例えばフレア管継手等が使用可能となった. 続いて2014年にISO817とISO5149が相次いで改定され微燃性冷媒の使用規格がほぼ固まった. 現在, IEC60335-2-40の改定審議が続いており2017年に規制緩和される見通しである.

2. 燃焼特性

本章では、微燃性冷媒を中心に代表的な基礎燃焼特性について報告した。種々の燃焼特性について実際に冷媒が使用される環境における最悪の条件まで考慮し、温度・湿度依存性等についても報告した。

燃焼限界の温度依存性に関しては、一般の可燃性ガスの場合 White 則で基本的に説明できることが知られている。微燃性化合物の R717, R32, R143a も例外ではないことが分かった。しかし、R1234yf および R1234ze(E)については White 則による予測よりも温度依存性がかなり大きいことが分かった。

燃焼限界の湿度依存性に関しては、R717, R32, R143a などに対して水蒸気は不燃性ガスとしてしか働かないが、R1234yf および R1234ze(E)など分子内のフッ素原子が水素原子数よりも多い化合物に対しては燃焼性を促進する効果があることが判明した。R410A, R410B, R134a 等の不燃性冷媒は、60°C で相対湿度 50%RH の湿度では可燃性になることが判明したが、これも同様の理由によると考えられる。

燃焼限界の測定に主として用いられている方法として、冷媒関連ガスについては ASHRAE 法と高圧ガス保安法一般則 A 法（以下、保安法 A 法という）がある。R32, R143a, R152a 等のガスを測定対象として両者の値を比較した結果、保安法 A 法ではいずれの場合も ASHRAE 法に比べて可燃範囲が広がることが判明した。なお、保安法 A 法で着火源となる溶断金属線を白金線の代わりに 0.2mm 径のモリブデン線を用いると、ASHRAE 法に近い測定値が得られることが分かった。

燃焼速度の温度依存性に関しては、評価した代表的な冷媒の燃焼速度は絶対温度の凡そ 2 次に依存することが分かった。湿度影響に関しては、R32 の燃焼速度は絶対湿度の増加に伴い緩やかに減少した。R1234yf および R1234ze(E)の燃焼速度は、絶対湿度の増加に伴い、大幅に増加することが分かった。

消炎距離に関しては、温度、圧力依存性を R32 と R717 について評価することにより、微燃性冷媒の消炎距離と燃焼速度の相関式を標準条件のみから様々な温度・圧力条件まで拡張することができた。消炎距離は、質量燃焼速度にほぼ反比例することが分かった。消炎距離の湿度影響に関しては、60°C 50%RH までの高湿度条件で評価を行った。R1234yf の消炎距離は湿度の増加に伴い急激に減少し、60°C 50%RH では標準条件（25°C 0%RH）の 1/5 程度まで減少することが分かった。

最小着火エネルギーに関しては、微燃性冷媒を評価可能な測定方法が確立されていないことから、統一的手法で評価した消炎距離の値と熱損失理論を用いて推算した。得られた微燃性冷媒の最小着火エネルギー値は、人体からの静電気火花のエネルギーよりも大きく、また微燃性冷媒の消炎距離は人体からの静電気火花の放電可能な距離よりも大きいことが分かり、人体からの静電気火花は微燃性冷媒の着火源とならないことが分かった。また、AC100V, 1200W のヘアドライヤーの切断時にコンセント内で生じる電気火花も、微燃性冷媒の着火源とならないことが分かった。

電磁開閉器からの火花においても、R32 や R1234yf の火炎が開閉器外部に広がることは無かった。その理由を明らかにするため、消炎直径という指標を導入した。R32 や R1234yf の消炎直径は、一般的な電磁開閉器が持つ間隙のサイズよりも大きく、仮に開閉器接点のスパークにより着火が起こった場合にも、火炎は間隙を抜けて開閉器筐体の外部まで出てくることは無いことが分かった。消炎直径の湿度影響に関しては、消炎距離とほぼ同程度の湿度影響が表れることが分かった。

冷媒の熱分解に関しては、微燃性冷媒及び従来の不燃性冷媒 R134a および R22 の熱分解について流通式反応管を用い、反応温度、濃度、反応時間を種々変えて、これらの実験条件と分解生成物の関係に関する基礎的なデータを取得した。代表的な微燃性冷媒の熱分解開始温度は、R22 の熱分解開始温度よりも高いことが分かった。

上記で得た知見を基に、実用上の燃焼特性評価の例として、東京、ジャカルタ、リヤドの気候における燃焼特性値を求めた。R290 および R32 については、3 地域とも、25°C0%RH の標準燃焼特性と大きく変わらなかった。一方、R1234yf については、3 地域とも、25°C0%RH の標準燃焼特性よりも燃焼性が増加した。特に乾燥地帯であるリヤドにおいても、その湿度影響の方が温度影響よりも大きいことが分かった。

3. 事故シナリオに基づく安全性評価

地球環境保護の観点から、オゾン層破壊係数がゼロでかつ地球温暖化係数の小さい冷媒の開発と実用化が、世界的に求められている。これを満たす代替候補冷媒は、わずかではあるが燃焼性を有するため、実用化に向けては、実際の冷媒取扱シチュエーションを想定したリスク評価が必要となる。そこで、想定される冷媒取扱シチュエーションにおいて洗い出された事故シナリオについて、その危険性を実験的に評価した。

(1) 取扱シチュエーション#1：暖房機器と A2L 冷媒搭載空調機器を同時使用した場合

家庭用空調機器に搭載される程度の量の A2L 冷媒が 4 畳半室内に漏洩しても、暖房機器による着火や火炎伝播は起こりえない、②熱分解生成物となるフッ化水素 (HF) 発生能力は現行冷媒と同等程度、③室内にいくらかの気流がある場合、HF 濃度が高くなる傾向があることが明らかになった。

(2) 取扱シチュエーション#2-(a)：A2L 冷媒滞留空間内で市販ライターを使用した場合

A2L 冷媒が滞留した空間内で圧電ガスライターを使用した場合、いずれの実験ケースでも着火は認められず、滞留冷媒への火炎伝播も見られなかった。石油ライターの場合は、ライターに定常火炎が形成され、これにより周囲の冷媒へ火炎が伝播する現象が見られた。

(3) 取扱シチュエーション#2-(b)：A2L 冷媒がピンホール等から噴出漏洩した場合

配管の破断を想定して 4 mmφ のピンホールから冷媒を蒸気圧で漏洩させたところ、燃焼範囲となるのは漏洩口から下流側 100 mm、鉛直上下方向に 50 mm 程度であり、実際の作業環境中で想定される着火源よりも過剰に大きなエネルギーを与えても、冷媒噴流全体への火炎伝播は認められなかった。

(4) 取扱シチュエーション#2-(c)：A2L 冷媒がサービス・メンテナンス機器内に漏洩した場合

回収機等のサービス・メンテナンス用機器内で冷媒が漏洩した場合を想定した。回収機に適当なスリットを取り付けることにより、冷媒の滞留を極短時間に抑えられ、着火を防止できることが確認された。

(5) 取扱シチュエーション#2-(d)：ポンプダウン時のディーゼル爆発

ヒートポンプの冷媒回収時にはポンプダウンを行うが、誤操作により冷媒潤滑油混合気に空気が混入し、断熱圧縮され温度上昇し、自己着火燃焼が発生する爆発事故が起こる。ディーゼル爆発を想定した実験装置を製作し、冷媒や潤滑油の違いによる自己着火燃焼の発生条件を明らかにした。結果として、事故の発生条件は冷媒の燃焼性とは直接的な関係がないことが判明した。

(6) 取扱シチュエーション#3：多室型空調機の急速漏洩を想定した安全性評価

着火源よりも上方にあって、かつ、燃焼範囲内にある冷媒量が、火炎伝播速度や圧力上昇といった燃焼挙動に大きく影響を及ぼすことが分かった。これを表す指数として、燃焼速度に対する当量比の影響も考慮した“有効可燃冷媒積”を導入することにより、濃度分布曲線や LFL, UFL, 着火源高さといった事前に既知にできるパラメータのみで、火炎伝播速度をある程度予測可能であることを示した。

(7) 実際の事故シナリオを想定した実大着火実験

狭小カラオケルーム内に A2L 冷媒が漏洩・滞留し、テーブル上のろうそくに着火した場合を想定した実大着火実験を実施した。R32, R1234ze(E)いずれの場合も、全量漏洩した場合に UFL となる冷媒量が漏洩し、かつ、換気運転停止時にのみ着火した。圧力上昇は約 4 kPa で、 K_G 値に対するスケール効果は見られなかった。

4. 危険度評価

Difluoromethane (R32, CH₂F₂) や 2,3,3,3-tetrafluoropropene (R1234yf, CH₂=CF₂CF₃), trans-1,3,3,3-tetrafluoropropylene (R1234ze(E), CHF=CHCF₃) は次世代の冷媒として期待されている一方、これらの冷媒はわずかに燃焼性(微燃性)を有しているため、据え付け作業時や運転時の事故などで環境中に漏洩した場合の燃焼安全性を確認する必要がある。従来型の空調機器用冷媒の利用による地球温暖化への対策として、ASHRAE(2010) は微燃性冷媒向けに新たな燃焼区分(2L)を追加して新規冷媒の利用基準を定めるなど、次世代冷媒への転換促進に向けた環境づくりを進めている。

本研究では、微燃性冷媒の基礎的な燃焼特性の評価と冷媒利用時の燃焼爆発影響評価を行うため、一連の安全性評価を行った。

密閉型の大型球形燃焼容器(524L)を整備して浮力を考慮した微燃性冷媒の燃焼試験を実施した。圧力計測や映像観察により、遅い燃焼速度による浮力の効果などの影響のもとで火炎伝播速度や燃焼速度 S_u 、爆発強度指数 K_G 値、到達圧力 P_{max} などを評価して燃焼特性を整理し、基礎データを取得した。

実規模での燃焼を想定し、15L 小型燃焼容器、524L 大型燃焼容器を用いて実施した燃焼試験の結果から、 K_G 値の規模効果について検討を行った。水素やプロパンなどは規模効果を持つことが知られているが、微燃性冷媒および比較対象のアンモニアともに、今回評価した容器容量範囲においては K_G 値について目立った規模効果は見られなかった。また、燃焼試験で圧力計測とともに実施している高速度カメラによる映像観察においても、火炎面の皺構造の発現や乱流燃焼への遷移の兆候は見られなかった。

R1234ze(E)など、燃焼特性が温度・湿度に依存することが知られており、大型球形容器に昇温制御・水分添加制御できる環境を整備して、昇温・湿潤条件での燃焼特性について調査した。R32 は高温・湿潤条件にかかわらない燃焼性を示すが、R1234yf、R1234ze(E)は高温・湿潤条件依存性を示し、特に R1234ze(E)は室温・乾燥条件では不燃の一方で、高温・湿潤条件で可燃性を示すようになる。高温・湿潤条件を含む一連の条件において爆発強度指数 K_G 値、到達圧力 P_{max} が最大となる値を求めた。

産業界でよく用いられ、また燃焼特性が知られているアンモニアについて、これまで実施してきた試験設備を用いて同一条件で試験し、微燃性冷媒の燃焼特性と直接的な比較を行った。これまで評価してきた条件においては、R32、R1234yf、また高温・湿潤条件での R1234ze(E)についても、アンモニアと同程度の燃焼性であることが示された。

火炎や電気放電などの他に、高温表面なども着火源になりえる。燃焼性ガスと空気の混合ガスが高温表面に接触した場合に発火する最低の温度が自然発火温度となるが、その温度は測定方法により異なる。ASTM E-659 試験法にもとづいた自然発火温度の計測を実施し、R1234yf、R1234ze(E)、R32、 NH_3 それぞれについて同一条件で試験を実施した。R1234yf、R1234ze(E)については、試験温度が下がるにつれて急激な温度上昇が現れるまでの遅延時間も延びていき、R1234yf については 357°C、R1234ze(E)については 356°Cにおいて目視による発火が確認されたが、それら以下の試験温度では、目視による発火は確認されず、急激な温度上昇も見られなくなった。R32 については発熱までの遅延時間は R1234yf や R1234ze(E)ほどに温度依存性がみられず、発火する場合はおおよそ 10 秒程度で判定ができた。R32 は 478°Cにおいて目視による発火判定ができた。一方、アンモニアについては一般に自然発火温度として 651°Cが報告されているが、目視による発火判定が困難であった。

実験を再現する燃焼モデルの検討を行い、数値シミュレーションに導入した。実験が困難な実規模での燃焼挙動の評価や、今後開発される新規冷媒にも本アプローチを適用していくことが可能と思われる。

密閉ではなく、部分的に開口部を持つ半密閉容器での燃焼試験を行い、容器内圧力の緩和効果について調査した。R32 と R1234yf について、円や矩形(正方、縦長、横長)など開口部の形状や面積、濃度を変えて実験を行い、緩和圧力への影響を評価した。実験条件下では、形状の違いによる影響ははっきりと現れなかった。実際の漏えいシナリオから最大漏えい量および濃度勾配から可燃領域を推定し、開発した燃焼モデルを用いた燃焼シミュレーションにより到達圧力を評価・検討することが可能である。

5 リスク評価手法について

日本冷凍空調工業会（以下、日冷工）のワーキンググループでは 2011 年から微燃性冷媒のリスク評価を行ってきた。そのリスク評価手法について、R32 や R1234yf 等を対象に燃焼性に関して推進してきた内容をもとに説明した。図 5.1 の IEC の Guide51 の評価プロセスに、燃焼性で検討した項目を追記する形で示した。記号 a から t はそれぞれ以下の項目である。

- a. 「評価対象範囲の選定」
- b. 「リスクアセスメント手法の選択」

- c. 「ライフサイクルのステージ選択」
- d. 「エアコン設置環境の設定」
- e. 「ハザード（危害の程度）の予測」
- f. 「許容値（事故発生確率）の設定」
- g. 「冷媒漏洩率と漏洩速度，漏洩量，初期漏洩濃度の調査設定」
- h. 「可燃時間空間体積（可燃時空積）の計算」
- i. 「着火源の予測と着火性の区別」
- j. 「FTA 作成と精査」
- k. 「R-Map での評価」
- l. 「リスク許容可否の判断」
- m. 「リスクの低減」
- n. o. p. 「g,h,i と同じ FTA 要素の見直し」
- q. 「FTA 再作成と再精査」
- r. 「R-Map での評価」
- s. 「リスク許容可否の判断」
- t. 「製品化（要件確認）と市場フォロー」

また実際に着火確率を求める過程としては，事象間の独立性が高い点，また発生確率の計算が容易である点から FTA を

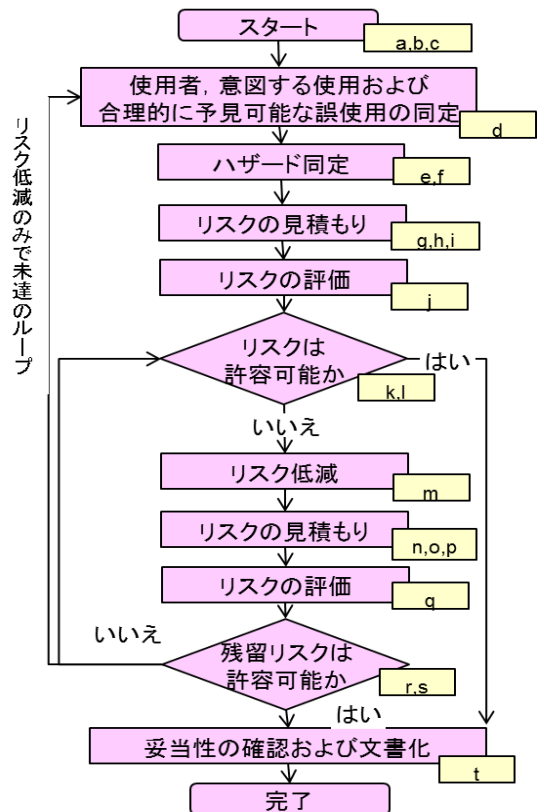


図 5.1 IEC の Guide51 とリスク評価手法

使用した．さらにリスクマップ（R-Map）の考え方を参照している．リスク評価の対象機器の範囲の設定については，当初はミニスプリットエアコン（家庭用エアコン），ビル用マルチエアコン，チラーの区分とした．

リスク評価手法

リスク評価手法を具体的に実施し，リスク見積もりを行うためには前項の a から i の項目を設定し明確にしなければならない．具体的にはリスクアセスメントの許容値の項目としては，独立行政法人製品評価技術基盤機構の資料から家庭用エアコンやビル用マルチエアコンでは，「100 年に 1 回の致命的事故が発生しても安全と見なす」との仮定を採用した．一方，チラーは産業用途に近い設備なので「10 年に 1 回」を採用している．

以下，家庭用エアコンでは漏洩条件の設定の項目としては IEC60335-2-24 の 4 分間で全量漏洩するとした．可燃となる空間体積の項目は 7m² の最小室内空間，可燃時間空間体積の項目では東大での CFD 計算の結果を反映した．着火源の予測と着火性の区別の項目に関しては裸火を着火源と看做し，また FTA 作成時に課題となるヒューマンエラーの発生確率は 10⁻³ などリスク見積もりに必要な基礎項目を整理した．それらが揃ったのち，実際の FTA を作成し着火確率を求めた．この FTA をライフサイクルの輸送保管，据付け，使用，サービス，廃棄などステージごとに詳細に展開し確率値を求める．その求められた値が許容値以下であれば，基本的にはリスク評価は完了となる．許容値以上の場合は，2 つの方向で見直しを行う．一つはリスク低減を具体的な対策から試行することである．二つ目は FTA の中でリスク値を上げているクリティカルパスを見出し，その仮定された事象の数字の精度を上げることでリスク値が下げられないか検討することである．いずれにしてもこの見直し試行のループを FTA で繰り返し許容値以下となるまで実施する．5 章には，その評価手法の手順や背景となる考え方を簡単に記述してある．またビルマルチエアコン，パッケージエアコンやチラーのリスク評価について，家庭用エアコンとの差異を記述した．

リスク評価手法のまとめ

東京大学や諏訪東京理科大，産業総合研究所化学部門などの協力により日冷工のミニスプリットエアコン

SWG (I) で進めてきたリスクアセスメントを中心に、リスク評価手法として整理した。

一般論でまとめたくはないがエアコンでのリスク評価は、機器が大きくなるほど冷媒充填量が増し、また電源容量も大きくなることから、FTA 解析ではリスクが高くなる傾向となる。その対策として機器そのもので遮断弁を設け冷媒漏洩量を減らすのか、またファンを高速回転させることで濃度希釈するような対応とするのか、別置き拡散ファンや排気装置で冷媒濃度を下げる対応とするのか、設置区画外にある電源遮断装置で着火源をなくすことや警報装置などで人的対応を行うなど、リスクを回避する選択肢は多い。また設置時の冷却システムの気密性の確認とそれら点検に基づく安全確認届出や機器の定期点検などを法規格で強制し、リスク回避することも可能である。各機器の特性や設置条件、使用条件、また利便性やコストも考え、最良の対応手段を選択すべきである。リスク評価手法はこのような具体的対応を考えることで、実効性を有することとなる。

最後にリスクアセスメントは、あくまでもこれから製品化する機器の事前評価であり、その製品化にどのようなハザードが存在しそのハザードの危害の大きさと発生確率から看過できる事象か、対処すべき事象かを区別する道具でしかない。製品開発技術者はこの道具をうまく使いこなし安全でかつコストリーズナブルな商品を社会に提供することが義務であるとともに、残留リスクや「想定外のリスク」についても積極的に開示していくことが必要であろう。

6. ミニスプリットエアコンのリスク評価

2011 年から開始したミニスプリットエアコン（家庭用エアコン）のリスク評価は対象製品の全てで評価を終了した。家庭用エアコンの燃焼性のハザードに対するリスク評価については、冷媒リークシミュレーション、着火源評価、FTA の評価などから着火確率が許容値以下になるようにリスク低減を図ってきた。以下、今回のプロジェクトのリスク評価で得られた壁掛け形エアコンの冷媒差による FTA 結果、家庭用エアコンでリスクが高い 1 対 1 接続の床置き形ハウジングエアコンとマルチ接続の床置き形ハウジングエアコンの FTA 結果について簡単に概括する。また本レポートの前半に報告された実大着火実験についても簡単に記述する。

リスクアセスメントの手法

リスクアセスメント結果の事故発生確率（許容値）については製品評価技術基盤機構の資料から、国内の家庭用エアコン（小型ミニスプリットエアコン含む）の総台数 1 億台をベースに、使用時の目標を 10^{-10} 台/年以下とした。同様に床置きエアコンでは総台数が 1 桁小さいことから 10^{-9} が使用時の目標となる。なお使用時以外のステップでは職業人としての義務感などで許容度が大きくなると考え、許容値は使用時の 10 倍程度大きくなっても受容されるとした。

リスクアセスメントの検討は、室内漏洩空間を床面積 7m^2 、高さ 2.4m の小部屋とし東大で行われた冷媒リークシミュレーションの結果や「プロパン使用ルームエアコンのリスクアセスメント」で試行した可燃域の存在などから、可燃時空積を求めた。また着火源については諏訪東京理科大、産業技術総合研究所、DOE/CE/23810-92 報告書などを参照し、日本の家庭内にある低電圧の電気機器や電子式ライター、喫煙中の煙草、人間に起因する静電気は、ほとんど着火しないと判断し、裸火を着火源と仮定した。その他、漏洩条件の設定やヒューマンエラーの発生確率などを調査し、それら調査内容を FTA として作成しリスク評価の着火確率を求めた。

家庭用エアコンのリスクアセスメントの結果

以上の設定で家庭用エアコンの冷媒差によるリスク評価を行った。1 対 1 接続の通常壁掛け形エアコンの見直しリスクアセスメントでのハザード発生確率（着火率）が R32, R1234yf とともに使用時でほぼ 10^{-10} 、輸送、据付け、サービス、廃棄時で 10^{-9} 以下と許容値を下回ったので、それ以上のリスクアセスメント検討は行わなかった。

なお従来の R410A 家庭用エアコンに微燃性冷媒を適用する場合に、R1234yf は性能や効率を従来と同等にするには、熱交換器を約 1.4 倍に大きくし、新たに大型の圧縮機を開発し、その信頼性を確保する点に注意が必要である。

シングル床置き形ハウジングエアコン、マルチ床置き形ハウジングエアコンでは見直しリスクアセスメントを行っても、前記の許容値より大きくなった。そのため設置状況の確認やサービス実態の調査、日本家屋を中心とした部屋の開き戸や引き戸の隙間調査を行い、より使用実態に近いリスクアセスメントを再度実施した。ミニスプリットエアコンの一形態であるハウジングエアコンの床置きの使用時の許容値は 10^{-9} であり、それ以外の物流、据付けなどの許容値は 10^{-8} なので、ほぼ許容値を満足する数字となっている。

実大着火実験への考え方

このプログレスレポートの前半で、小空間での微燃性冷媒の実大着火実験結果が報告され R32 や R1234ze(E)が急速漏洩し LFL を越えた濃度で、裸火から着火すると、インパクトのある燃焼が生じた。現象としては燃焼速度がかなり遅い爆燃が生じたと考えている。この現象を宜的に「微弱な爆燃」とする。この現象に関して家庭用エアコン、チラー、パッケージエアコンやビルマルチエアコンの各リスクアセスメント SWG の過去の検討結果から「微弱な爆燃」が、可燃域の生成や着火源の存在からほとんど発生し難いことに言及している。

まとめ

ミニスプリット SWG (I) では家庭用エアコンの壁掛け形設置で R32 および R1234yf でのリスクアセスメントを検討し、課題がないことを確認した。また R32 のハウジングエアコンのリスクアセスメントも検討し、設置空間の制限や漏洩検知後の室内機ファンによる拡散などの対策を講じ、住宅の実態を考慮すれば問題なく使用できることを確認した。リスクを下げるためミニスプリット SWG (I) では据付けやサービス時に使用するマニュアル改訂も行った。具体的には日冷工が発行した「R32 冷媒使用家庭用エアコンの配管施工マニュアル」(日本冷凍空調工業会内部資料)として、サービスマニュアルや据付け説明書への注意喚起など、R32 を使用する時に実施できる対策を提案し文書化した。

7. スプリットエアコン (店舗用パッケージエアコン) のリスク評価

微燃性冷媒を使用したスプリットエアコン (店舗用パッケージエアコン、以下店舗用 P A C) のリスクアセスメントを、先行するミニスプリットエアコンとビル用マルチエアコンの評価を参考に、それらのシステムとの相違点を明確にして、同様の手法で実施した。まず、指標となる許容されるリスクレベルは、市場で 100 年に一度重大事故が発生するレベル以下とした。着火事故発生確率は、冷媒漏洩発生確率と、冷媒リークシミュレーションから求まる可燃空間発生確率と、その空間内の着火源存在確率を掛け合わせて求めた。各ライフステージ (輸送保管、据付け、使用、修理、廃棄) 毎に、想定されるリスクモデルを 3 段階にわけて設定し、リスクシナリオに応じた F T A より着火事故確率を算出した。

第一次では、代表的な設置モデルとして、現地追加冷媒充填しない冷房定格能力 14.0 k W 以下の室内事務所天井設置、室外地上設置、中型倉庫保管を選定した。

第二次では、室内床置き設置を除く 14.0 k W 以下のシステムで、比較的风险が高くなると思われるモデルを選定した。室内外接続配管長及び冷媒量は最大とした。室内条件は、着火源存在確率の高い「厨房」、密閉度の高い「カラオケルーム」を、室外条件は、「各階設置」、「半地下設置」、「狭小設置」を選定した。輸送保管についても、「狭小倉庫」、「ワゴン車輸送」を追加した。

第三次では、室内床置き設置も含み 30.0 k W 以下の全ての店舗用 P A C を対象にリスクの高くなるモデルを選定した。室内条件は、漏洩冷媒が高濃度で滞留し易い「床置き設置」、室内空間に対する冷媒充填量の高い「氷蓄熱システム」を追加した。

一般的に使用される代表モデルである第一次リスクアセスメント結果では、着火事故発生確率は許容され

るレベル以下となり、安全対策は不要となった。第二次、第三次の一部のシビアモデルでは、安全対策が必要となった。

室外条件では、「半地下設置」「狭小設置」の作業時及び使用時にリスクが高くなった。作業時は、冷媒回収作業ミスによる可燃域の発生や活線作業ミスによるスパークの発生等のヒューマンエラーと、着火源としてロウ付けバーナーの存在確率が支配的なリスク発生要因となり、「作業員への教育」と、「冷媒漏洩検知センサーの携行」が、効果的な安全対策となった。半地下設置の使用時は、一定冷媒許容充填率を超える設置（半地下深さ $\geq 1.2\text{m}$ 、冷媒充填量 $> 1/2 \times \text{LFL} \times A$ （設置床面積） $\times 1.2$ ）の場合、滞留する高濃度の漏洩冷媒を除去するために、「冷媒漏洩時の強制換気あるいは機器の強制送風攪拌運転（ただし、最小風速 $\geq 4.0\text{m/s}$ 、かつ半地下深さ $\leq 2\text{m}$ 、かつ吹出し口から壁までの距離 $\leq 3\text{m}$ ）」が有効な安全対策となった。また、狭小設置に対しては、「最低1面0.6mの通路開口を確保」すれば許容レベル以下となることがわかった。

室内条件では、「床置き設置」が、前述した室外条件同様、漏洩した冷媒が高濃度で滞留しやすく安全対策が必要となった。作業時は、室外条件同様、「作業員への教育」と、「冷媒漏洩検知センサーの携行」が、効果的な安全対策となった。使用時は、「冷媒漏洩時の機器の強制送風攪拌運転」が有効であった。なお、今回、評価検討したシビアモデルケースは、冷媒量、設置床面積等、現在市場で設置されている条件に基づいて選定している。

リスクを低減するために求められる安全対策について、微燃性冷媒を使用する業務用エアコン製品ガイドライン（JRA4070）、安全確保のための施設ガイドライン（JRA GL-16）等にまとめ、周知させていく予定である。

8. ビル用マルチエアコンのリスク評価

地球温暖化影響の低い微燃性冷媒 R32 や R1234yf を使用したビル用マルチエアコンのリスクアセスメントを行い、室内・室外の使用時や据付・修理・廃棄時における、最も厳しい各設置ケースにおける着火確率を求めた。冷媒漏洩速度や急速漏洩の発生確率は、漏洩部品サンプルの穴径調査や急速漏洩に伴う顧客やサービスマンの申告数から求めた。未対策の事故確率が許容値を超えた場合には、事故の発生を100年に1回以下とするための安全対策を提案した。これらの安全対策により、着火事故の発生を100年に1回以下とし許容レベル以下のリスクに低減出来ることを明らかにした。今後は、これらの安全対策を JRAIA の安全基準としてまとめ市場への浸透を図る。

また、微燃性冷媒を用いる場合において、安全対策が不要な許容冷媒充填量を決める際の安全係数について詳細に検討を行い、冷媒が滞留しやすい床置き機や振動による配管破損時に噴出漏れを起こす可能性がある室内圧縮機搭載型の室内機を除いて、安全係数を1/2としても十分安全であることが判った。現在我が国で進められている規制改革の動きの中で、微燃性冷媒に関しても実用化を容易にすべく冷凍保安規則の改訂が進められているが、安全係数の緩和提案に関してはとりわけ慎重に議論が行われることが予想される。更に、安全係数の値が ASHRAE や ISO などの国際的安全規格と異なることもあり、今後は、中期的な観点から、安全係数に関する議論を更に深めていくことが望まれる。

9. チラーリスクアセスメント

冷温水を用いたセントラル空調用熱源機には、主に R134a や R410A の HFC 冷媒が用いられている。しかしいずれも GWP が 1000 を超えているため、地球温暖化への影響が懸念され、GWP の低い R1234ze(E) や R1234yf、R32 などが注目されている。一方、これら冷媒は微かな燃焼性があり、使用するにはリスクアセスメント（以下、RA）を実施し、許容できないリスクを排除することが必要である。

本章では一般財団法人日本冷凍空調工業会において専門技術者らによって実施された火災・火傷事故に関する RA について報告する。対象機器は主に機械室に設置する水冷チラーおよび屋外に設置する空冷ヒートポンプで、冷凍能力は約 7.5~17500kW である。設置環境の特定できない移動式チラーは対象外とした。

リスクアセスメントリスト

冷媒漏えい事故データから噴出漏れ，急速漏れ，微小漏れの発生確率を算定し，冷媒漏えい時の可燃空間の時空積を解析により算定した．さらに着火源の評価そして存在確率の数値化し，それら可燃空間と着火源が遭遇し火災となる確率を算定した．これら評価は6つのLS毎に実施し，それぞれ異なる着火源が存在することに注意して整理した．算定にあたり標準的な条件を設定した上で過小評価とならないよう注意した．

- (1) 機器回りの着火源では，4台の空調用熱源機を想定し隣接する機器の発停回数を考慮した．
- (2) 冷媒漏えい時の可燃空間の解析結果より，標準容積109m³の機械室では2回/h×2系統の4回/hとする構成を安全対策とした．機械換気の故障率はダクト用ファンの 2.5×10^{-4} 件/(年・台)を用いた．
- (3) LSのうち使用者が直接関わらない物流と廃棄は事故確率から除外したが数値は示した．
- (4) 機械換気が存在しない確率を1%，据付・廃棄のLSでは工事中として50%とした．
- (5) 機械換気が無い場合は，漏れ頻度で機械室全体が可燃空間として存在するものとした．
- (6) 換気のある微小漏れでは可燃空間が存在しないとして可燃空間の存在確率を0とした．
- (7) 可燃空間の存在確率を可燃空間の時空積[m³・min]/対象空間[m³]×8760[H]×60[min]として定義する．空冷ヒートポンプの場合は防音壁で囲まれている領域を対象空間とした．
- (8) 火災発生頻度を過小評価しないために，それぞれ着火源が可燃空間全体に均等にあると仮定した．たとえば，人が使用するライター裸火は床面表面付近にも存在するとしている．
- (9) 可燃空間の時空積は，使用される可能性の高い冷媒，水冷チラーではR1234ze(E)，空冷ヒートポンプではR32での計算結果を用いた．

火災の事故確率

対策前として示した火災発生確率は換気が無い条件で，微燃性冷媒ガスが漏えいすると必ず可燃域ができて着火源の存在頻度で着火するとした確率である．噴出漏れ，急速漏れ，微小漏れすべてが合算された発生頻度であり，使用者が直接関わるLSの確率の合計が 1.32×10^{-4} 件/(台・年)となる．この値を用いて，具体的に，全体の1%が狭小な換気の無い機械室であるとして火災事故確率は 1.32×10^{-6} 件/(台・年)と評価「許容できない」と見た．主な対策が適切な換気であって，対策後の火災事故確率は，使用者が直接関わるLSにおいて 3.89×10^{-12} 件/(台・年)であり，「起こりえない」と評価できる．これら値は水冷チラーが標準的な機械室に設置され，空冷ヒートポンプが防音壁の中に設置されたモデルを想定したものである．

安全を担保するための技術的な要求事項

本リスクアセスメントで得た安全を担保すべき要件を示す．なお，これら要件は可燃性ガスを使用する際に参照すべき安全規格EN1127-1，IEC60079sとの整合を取った．また機械室内は冷媒漏えい時にIEC60079-10で規定される危険区域を生成しないように，安全対策として換気を確保することが必須であることを示した．

(1) 換気

- ・ 床面近くの低い位置より排気し，冷凍設備最上面より高い位置から給気する機械換気装置とし，原則として外部押し込み方式とする．
- ・ 機械室容積109 m³を基準に4回/h以上の常時換気を備える．192m³以上の場合は2回/hが良い．
- ・ 換気装置は機械室外から操作可能とする．
- ・ 故障によるリスク低減策として，機械換気装置は2系統で構成する．
- ・ 機械室の機械換気装置の正常動作を冷凍機の起動インターロックとして構成する．
- ・ 機械換気装置，冷媒検知器，漏えい警報装置とUPS等の独立電源は，機械設置時と製造メーカーが推奨する周期で点検を実施し，記録を保管すること．

(2) 冷媒ガス漏えい検知警報設備

- ・ 冷媒の滞留しやすい位置にセンサー部を設けた冷媒検知器を1つ以上設置する．
- ・ 冷媒検知器および漏えい警報装置は，無停電電源(UPS)等の独立電源で動作するものであること．

- ・ 冷媒検知器は漏えい警報装置による警報機（音および光）に連動し、機械室の外から確認できるものであること。

(3) 火気の持ち込み禁止

- ・ 裸火のある暖房機器，給湯機，コンロ等の機械室持ち込みは禁止する。
- ・ 禁煙，火気使用厳禁とする。

まとめ

冷媒漏えい事故データから想定される漏えい速度で微燃性冷媒 R1234ze(E)，R1234yf，R32 が漏えいした場合，可燃空間は小さく短時間である。また，これら冷媒の燃焼性から着火源も限定的であることが確認され，火災事故確率は低く抑えられると推定することができる。しかし，冷媒漏えい事故の発生頻度は小さくなく，機械室の換気状況も不確定であるため，安全対策として機械室に 2 系統の常時機械換気等を備えることとした。その結果，屋外設置の空冷ヒートポンプと安全対策を講じた場合の機械室設置の水冷ヒートポンプの火災事故確率は 3.89×10^{-12} 件/(台・年) となり 10 年に一度より著しく小さく，許容できないリスクは残らないことが確認された。したがって安全に微燃性冷媒を水冷チラーおよび空冷ヒートポンプに用いることが出来るといえる。