

A3 冷媒を使用した内蔵ショーケースのリスクアセスメント 及び安全規格

Risk Assessment and Safety Standards of Built-in Refrigerated Display Cabinet using A3 Refrigerants

山下浩司, 加藤俊匡, 池田真治, 阪江覚, 石原茂樹, 小林章,
海沼秀和, 長谷川敬春, 出野裕, 永井洋, 保坂恵子
一般社団法人 日本冷凍空調工業会

Koji YAMASHITA, Toshimasa KATO, Shinji IKEDA, Satoru SAKAE, Shigeki ISHIHARA, Akira KOBAYASHI, Hidekazu KAINUMA, Takaharu HASEGAWA, Hiroshi DENO, Hiroshi NAGAI and Keiko HOSAKA
The Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association
Kikai Shinko Bldg. 201, 3-5-8, Shibakoen, Minato-ku, Tokyo, 105-0011, Japan

In Japan, risk assessments of various appliances had been carried out to establish methods for ensuring the safe use of products using A2L refrigerants, followed by product launches in Japanese market. However, further shift to lower GWP refrigerants is desired in response to the Kigali Amendment. Most of the refrigerants with low GWP are A3 refrigerants with high flammability. Therefore, the Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association have been carried out the risk assessments of built-in refrigerated display cabinets using A3 refrigerants. The details of the risk assessment and established Japanese standards are explained in this paper.

Key Word: Flammable Volume, Duration, Ignition Source, Static Electricity, Risk Assessment

1. はじめに

日本では、2011 年から A2L 冷媒を使用した各種機器のリスクアセスメントを行い、安全に運用する方法を確立し、その後、順次製品展開を行っている。しかし、モンリオール議定書のキガリ改正を受け、更に GWP の小さい冷媒への転換が望まれている。GWP の小さい冷媒には、LFL (Lower Flammability Limit) が小さく、燃焼性が強い A3 冷媒が多く、使用できる最大冷媒充填量が 0.15 kg に制限されていたが、2019 年 6 月に IEC 60335-2-89¹⁾ が Edition 3 に改正され、可燃性冷媒の最大冷媒充填量が緩和された。

日本冷凍空調工業会（日冷工）では、2016 年 7 月から A3 冷媒を使用した内蔵ショーケースのリスクアセスメントを行っており、リスクアセスメントの結果に基づき、機器を安全に使用するための日本の規格（JIS 規格及び日冷工規格）を 2021 年 3 月に制定した。本報では、これらの検討内容について説明する。A3 冷媒の着火源は NEDO プロジェクトの研究結果²⁾に基づいて設定し、リス

クアセスメントを行った。

2. リスクアセスメントの方法

2.1 リスクアセスメントのプロセス及び着火確率の算出方法

可燃性冷媒を使用した機器の着火確率は、可燃域の空間分布を表す空間的遭遇確率、着火源が可燃域と接触する時間率である時間的遭遇確率及び冷媒漏えい発生確率を乗じて式(1)で算出する。空間的遭遇確率は式(2)で計算する。時間的遭遇確

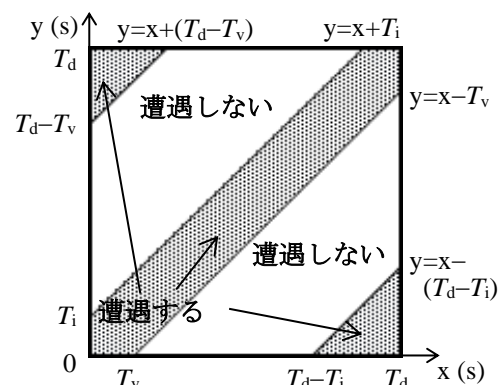


Fig. 1 Image of encounter between ignition source and flammable region

率は、幾何学的確率^{3),4)}の考え方をを用い、Fig.1の遭遇する領域の面積を全領域の面積で除して式(3)で表す。着火源が複数回発生する場合は式(4)で表し、この式で使用時の時間的遭遇確率を計算する。A3冷媒では静電気や電気スパーク等の着火源の存在時間 T_i が短く発生回数 n が多い着火源が多く、式(4)はこの場合の計算精度がよい。作業時の時間的遭遇確率は、漏えいと着火源が作業起因か否かで式(7)～式(10)を使い分ける。ここで、 P_a (式(5))は漏えいが作業時間に発生する確率であり作業起因の漏えいでは1、 P_b (式(6))は着火源が作業時間と遭遇する確率であり作業起因の着火源では1とする。作業に起因しない着火源では1日での着火源発生回数 n を作業時間中の着火源発生回数 $n \times T_s / T_d$ に換算する。係数 k は着火源の発生率や着火源の特定の時間帯への集中度合を考慮した係数である。可燃域継続時間及び平均可燃空間体積は、コンビニエンスストアの床面積ではドア上下隙間の影響が少ないため、密閉空間における式(11)～式(16)⁹⁾を用いる。式(11)～式(16)の風量は、圧縮機や凝縮器を内蔵しているショーケース下部の凝縮器ユニットのファン風量である。その他の値は、各ステージでの設定及び着火源の性質に応じた値に設定する。

$$P = P_i \times P_s \times P_r \quad (1)$$

$$P_s = V_v / V_g \quad (2)$$

$$P_r = (T_i + T_v) / T_d \quad (3)$$

For usage stage;

$$P_i = k \times [1 - \{1 - (T_i + T_v) / T_d\}^n] \quad (\text{at usage}) \quad (4)$$

For work stage

$$P_a = T_s / (T_d \times 365) \quad (5)$$

$$P_b = [1 - \{1 - (T_i + T_v) / T_d\}^n] \quad (6)$$

leakage and ignition source caused by work;

$$P_i = k \times [1 - \{1 - (T_i + T_v) / T_s\}^n] \quad (7)$$

leakage not caused by work

and ignition source caused by work;

$$P_i = k \times P_a \times [1 - \{1 - (T_i + T_v) / T_s\}^n] \quad (8)$$

leakage and ignition source not caused by work;

$$P_i = k \times P_a \times P_b \times [1 - \{1 - (T_i + T_v) / T_s\}^{n \times T_i / T_d}] \quad (9)$$

leakage caused by work

and ignition source not caused by work;

$$P_i = k \times P_b \times [1 - \{1 - (T_i + T_v) / T_s\}^{n \times T_i / T_d}] \quad (10)$$

For reach-in refrigerated display cabinet

air flow rate $0 \text{ m}^3/\text{s}$;

$$T_v = 4.61 \times 10^5 \times (M/A)^2 - 4.76 \times 10^3 \times (M/A) + 1.38 \times 10^1 \quad (11)$$

$$V_v = 1.36 \times 10^2 \times (M/A) + 1.34 \quad (12)$$

air flow rate $0.166 \text{ m}^3/\text{s}$;

$$T_v = 1.40 \quad (13)$$

$$V_v = 2.68 \times 10^1 \times (M/A) + 1.08 \quad (14)$$

For horizontal refrigerated display cabinet

air flow rate $0 \text{ m}^3/\text{s}$;

$$T_v = 4.41 \times 10^5 \times (M/A)^2 - 1.42 \times 10^3 \times (M/A) + 3.94 \quad (15)$$

$$V_v = 8.90 \times 10^1 \times (M/A) + 2.58 \quad (16)$$

使用時の着火確率は、凝縮器ユニットのファン運転時及びファン停止時の着火確率を加重平均して求める。リーチインショーケースの庫内漏れには、停止時は式(11)及び式(12)、運転時は式(13)及び式(14)を用いる。ショーケース下部の凝縮器ユニットからの漏えいには、平形ショーケースの式を適用し、停止時は式(15)及び式(16)を用い、運転時は式(17)⁹⁾を満足する風量以上になっており可燃域は生成されないものとする。作業時の値は停止時の式を用いて求める。

$$Q = \frac{5 \times \sqrt{A_0} \times w^{3/4}}{h_0^{1/8} \times \{G \times (1 - F)\}^{5/8}} \quad (17)$$

2.2 リスクアセスメントモデルの設定

リスクアセスメントを行うモデル店舗は、揚げ物等の簡単な調理が可能なコンビニエンスストアとする。コンビニエンスストアは店舗数が多い(約5.6万店舗)ため内蔵ショーケースの普及台数に占める割合が多く、さらに、A3冷媒は静電気や店舗内の電気機器のリレー等でも着火するため、A3冷媒を使用した内蔵ショーケースを設置する場所のうち最も危険な場所であると想定する。リスクアセスメントでは、ショーケースの冷媒回路内の冷媒量はR290が0.5kgとし、店舗内の床面積は84.7m²、天井高さは2.2mとする。この床面積は、コンビニエンスストアの標準的な寸法を想定し、店舗内の別置形のクローズドショーケース、事務所及びトイレを除く床面積(レジ内)として求めたものである。

2.3 ライフステージ

一般に内蔵ショーケースは工場生産された後、倉庫で一時保管されてから使用する店舗に輸送され、店舗内の適切な場所に設置されて使用す

る。使用時に不具合が生じた時は、設置場所で修理するか、その場所では十分な作業が出来ない場合には、ショーケースをメーカーのサービス拠点等に持ち帰り修理後に再設置される。ショーケースが不要になった場合は設置先から撤去し、一時的に倉庫に保管してから廃棄処理されるか、一部のショーケースは整備後に中古品として再設置される。日冷工のリスクアセスメントでは、輸送、保管、設置、使用、修理、撤去までをライフステージとして設定する。

2.4 許容レベルの設定

内蔵ショーケースの日本の普及台数は190万台⁷⁾とする。着火事故は全て致命的な事故であると考え、使用時の許容値は、市場の普及台数に対して100年に1回以下の着火事故が発生するレベルとし 5.26×10^{-9} とした。使用時以外は、職業として常にショーケースを取り扱い、専門的な教育を受けている作業者が携わっているため、許容値は使用時よりも1桁上げることができると考え、 5.26×10^{-8} とした。

2.5 漏えい速度

漏えい速度は、配管の損傷状況によって異なり、噴出漏れ、急速漏れ、微少漏れの3つに区別される⁸⁾。それぞれR32では75、10、1 kg/hであり、R290に換算すると40.71、5.4、0.54 kg/hとなる。漏えい初期には、漏えい発生原因によって決まる孔径での最大漏えい速度で漏えいするが、漏えいが進むと漏えい速度が低下する。そこで、内蔵ショーケースのリスクアセスメントでは、空調機の国際規格IEC 60335-2-40における考え方である4分全量漏れ速度(0.5 kgのR290では7.5 kg/h)を採用する。なお、IEC 60335-2-89では、漏えい速度の計算式が規定されているが、その式で計算した漏えい速度は2.66 kg/hとなり、4分全量漏れ速度の1/2.8となる。なお、ショーケース下部の凝縮器ユニットからの漏えい時、漏えい速度が変化しても可燃空間時空積は殆ど変わらないため⁹⁾、リスクアセスメント上、4分全量漏れ速度を使用することに大きな問題はない。

2.6 冷媒漏えい発生確率

2.6.1 使用時冷媒漏えい発生確率

内蔵ショーケースの使用時の冷媒漏えい発生確率は、調査結果から、噴出漏れ発生確率 5.26×10^{-7} (割合0.05%)、急速漏れ発生確率 1.89×10^{-5} (割合1.89%)、微少漏れ発生確率 9.82×10^{-4} (割合98.06%)とした。下部の凝縮器ユニットからの漏えいでは微少漏れ(0.54 kg/h以下)でも大きな可燃空間が生成されるため⁴⁾、全ての漏えい発生確率の合計値 1.0×10^{-3} を使用時の冷媒漏れ発生確率として、リスクアセスメントを行った。

2.6.2 初期設置時冷媒漏えい発生確率

初期不良のうち冷媒漏えいが発生した機器の件数を出荷台数で除して求めた値 2.11×10^{-4} を初期設置時冷媒漏えい発生確率とし、工場出荷後から設置までの冷媒漏えい発生確率とする。輸送時と設置時の冷媒漏えい発生確率はこれを1/3にした値とを使用し、保管時は長期保管の場合も想定し安全のため初期設置時漏えい発生確率をそのまま使用する。また、リーチインショーケースの割合は調査の結果29.7%であった。リーチインショーケースの庫内漏れ後の扉急開放が発生する割合は、庫内漏れ発生確率50%に、リーチインショーケースの割合を乗じて求める。

2.6.3 作業時冷媒漏えい発生確率

作業に起因する冷媒漏えいは作業ミスによって発生する。修理時及び撤去時の作業起因の冷媒漏えい発生確率は、各作業のシナリオでのヒューマンエラーが発生する頻度から算出する。ショーケースの設置、修理、撤去の作業は、教育訓練された技術レベルの高い専門業者が行うが、作業環境は一様ではない。一般的に、リスクアセスメントは、正常な状態を想定して行うものであり、通常作業のヒューマンエラーは、リラックスした精神状態での値である 1.0×10^{-3} とする⁹⁾。しかし、可燃性冷媒への着火を防ぐために新たに行う作業は、従来とは異なる作業でありかつ注意を要する作業⁹⁾であるため、ヒューマンエラーを 5.0×10^{-2} とする。

3. リスクアセスメント

3.1 使用時の着火確率の計算及び安全対策

コンビニエンスストア店舗内の使用時の主な着火源を Table 1 に示す。A3 冷媒では、電気スパーク、静電気、裸火、高温表面等が着火源となる。電気スパークに関しては、店舗内の各電気機器のリレーの ON/OFF (コーヒーディスペンサー: 1 日 186 回, フライヤー・中華まん加湿器・おでん加熱器: 1 日 10 回), 掃除機の電源コンセントの引き抜き (1 日 2 回, 発生確率 50%), 照明スイッチの ON から OFF への切り替え (1 日 2 回) 等が着火源になるとした。自身以外のショーケースのファンのブラシモータ (普及率 1%) は、その周囲に冷媒の燃焼速度よりも十分に速い気流が流

Table 1 Ignition sources assumed at the usage stage
(a) Electric spark

Name	T_i (s)	n	k	Note
コーヒーディスペンサー	5×10^{-3}	186	1	販売時にリレーが作動
フライヤースイッチ	5×10^{-3}	10	1	20 h の間に 4 h 毎に調理
中華まん加湿装置	5×10^{-3}	10	1	20 h の間に 4 h 毎に調理
おでん加熱装置	5×10^{-3}	10	1	20 h の間に 4 h 毎に調理
電源コンセント	5×10^{-3}	2	0.5	50% の確率で掃除機を 1 日 2 回引き抜き
照明スイッチ	5×10^{-3}	2	1	1 日 2 回スイッチ ON→OFF
コピー機	180	50	1	50 回/日, 使用時間 3 分/回
他の機器のブラシモータ	5×10^{-3}	144	0.01	1 時間に 6 回 ON, 普及率 1%

(b) Static electricity

Name	T_i (s)	n	k	Note
静電気 (リーチインケース扉)	1×10^{-6}	44	0.0935	アイスコーヒー取り出し. 静電気の 10% が可燃域と遭遇
静電気 (オープンケース外装)	1×10^{-6}	22	0.0935	買い物客が金属部分に触れる
静電気 (その他扉)	1×10^{-6}	22	0.0935	買い物客が金属部分に触れる

(c) Open flame

Name	T_i (s)	n	k	Note
電子ライター	5	5	1	1 日 5 人が 5 秒ずつ試し点火
燃焼式暖房機	3.6×10^4	1	0.0001	1 日 10 h 使用. 普及率 0.01%

Table 2 Ignition probability (tolerable value; 5.26×10^{-9})

Stage	未対策時	対策時
使用時	2.50×10^{-6}	1.82×10^{-10}

れているためモータが ON する時 (1 日 144 回) のみ着火するとし, ファンは除霜率 (8.3%) とファン故障率 (2.5×10^{-4}) で停止するとした。電気スパークの放電時間は 5 ms とした。業務用コピー機は, 家庭用プリンターとの違いが不明であり, 安全のため, 使用中はずっと着火源になるとし, 1 回 3 min で 1 日 50 回動作するとした。静電気は, 人がショーケースの金属部に触れた時等に発生し, 店舗入口が手動ドアの時は入店時に静電気が放電されるため, 東京の気象データを店舗内温度に換算して求めた湿度 30% 以下の発生率 18.7% に自動ドアの率 50% を乗じて静電気の発生率とし, 発生回数はリーチインショーケースが 1 日 44 回, その他のショーケースは 1 日 22 回, 放電時間は $1 \mu\text{s}^{10)}$ とした。なお, 静電気とファンのブラシモータは放電エネルギーが小さく²⁾, 時空積を 1/2 にして着火確率を計算した¹¹⁾。裸火としては, 店舗に陳列しているライターを 1 日 5 人が各 5 秒試し使用することを想定した。客は店舗内では喫煙しないものとした。また, 燃焼式暖房機 (普及率 0.01%) を 1 日 10 時間使用するとした。高温表面に関しては, 蛍光灯・LED・白熱灯の表面温度, 他のショーケースのデフロストヒータの表面温度は, R290 の自己着火温度未満であり, 着火源とならない。この他に, NITE (製品評価技術基盤機構) の調査データを基に電気機器の発火事故も考慮した。

使用時の着火確率の計算結果を Table 2 の未対策時に示す。着火確率は許容値を超え, 次の安全対策を施すことによって着火確率 (Table 2 の対策時) が許容値以下になった。この時, 遮断弁の故障率は 1.0×10^{-4} とした。なお, 可燃空間時空積を R290 よりも約 10% 大きい R600a での値にしても同じ安全対策で着火確率が許容値以下になることを確認した。

- (1) 凝縮器ユニットファンを除霜時でも運転する。
- (2) 凝縮器ユニットの風量を式(17)以上にする。
- (3) リーチインショーケースの庫内の冷媒漏れを検知し警報する機能及び冷媒漏れ時に庫内

への冷媒漏れを遮断する機能を備える。

3.2 作業時の着火確率の計算及び安全対策

作業時については、着火源が共通しているものもあるため、各作業ステージのシナリオを説明し、その後に作業時の着火源について説明する。

3.2.1 輸送ステージのシナリオ

コンビニエンスストアに設置する内蔵ショーケースの輸送は、一般的にトラックを使用して行われるが、トラック輸送の場合、荷室には着火源が存在しない。そこで、輸送時のリスクアセスメントでは、荷室と運転室が同じ空間にあるワゴン車による輸送を想定する。

ワゴン車による輸送は、現地の修理で凝縮器ユニットを交換する場合に行われる。往路は新品の木枠梱包有、復路は旧品の木枠梱包無しで、凝縮器ユニット単体を冷媒が入った状態で輸送する。ろう付けが必要となる冷媒回路修理を伴う修理が発生した時に凝縮器ユニットの交換作業が発生するとし、ワゴン車輸送率は、冷媒回路修理を伴う修理件数の調査結果を市場普及台数で除した値 8.39×10^{-4} に、交換される凝縮器ユニットに冷媒が入っている確率 5×10^{-3} を乗じて、 4.2×10^{-6} とする。なお、リスクアセスメントは、安全のため、ワゴン車輸送率が1の場合についても行った。ワゴン車の内容積は 2.9 m^3 、乗車人員は積み下ろし作業に必要な人数として2名、最大輸送時間は12時間、平均輸送時間は2時間とする。

3.2.2 保管ステージのシナリオ

ショーケースの保管場所は、工場生産後や海外生産拠点から持ち込まれたショーケースを一時的に保管する中型倉庫と各販売拠点で保有する狭小倉庫に分類され、中型倉庫は 1000 m^2 、狭小倉庫は 15 m^2 とする。

倉庫内でのショーケースの運搬は、フォークリフトや作業員が直接操作する台車等で行う。作業時間は、中型倉庫では5名が1日8時間で月20日、狭小倉庫では2名が1日2時間で月20日とする。倉庫に保管するショーケースは新品と中古品があり、新品はビニール梱包又はビニール梱包

＋木枠の状態、中古品は梱包無し又はビニール梱包を想定する。

3.2.3 設置ステージのシナリオ

新品又は中古品のショーケースを設置することを想定する。新品はビニール梱包又はビニール梱包＋木枠で梱包されており、中古品は梱包無し又はビニール梱包とする。

設置作業には、屋外でトラックの荷台にあるショーケースを地面に降ろすまでの荷下ろし作業、荷下ろしされたショーケースを店舗内の設置場所まで運搬する運搬作業、設置場所で開梱や付属品の取付けを行う据付作業がある。これらの作業で、ショーケース1台あたり、作業員2名で1時間を要する。内訳は、荷下ろし作業で0.2時間、運搬作業で0.1時間、据付作業で0.7時間とする。

年間の設置率は、年間撤去率と同じとし、寿命で交換する確率と店舗が閉店して撤去する確率の合計 1.24×10^{-1} とする。設置ステージでは、新店工事時と営業中の店舗への設置を想定する。

3.2.4 修理ステージのシナリオ

修理には、メーカーやメンテナンス業者のサービス拠点で修理を行う持ち帰り修理、一時的に屋外に移動して修理を行う店外修理、店舗内に設置したまま修理を行う店内修理がある。

年間の内蔵ショーケースの修理率は、修理件数の調査結果を市場普及台数で除して求め、 1.0×10^{-2} とする。また、そのうち、店外修理及び店内修理において、冷媒回路の修理を伴う修理の発生率を 8.39×10^{-2} とする。修理に要する作業時間は、冷媒放出（冷媒廃棄）の時間が1時間、配管切断と冷媒回路部品の交換時間が1時間、冷媒充填の時間が1時間、その他の冷媒回路に関わらない作業の時間が1時間とする。

3.2.5 撤去ステージのシナリオ

撤去ステージでは、ショーケースを廃棄するために、店舗内から撤去する場合を想定する。この時、内蔵ショーケースは、冷媒回路内に冷媒が入った状態で移動する。

年間の内蔵ショーケースの撤去率は、寿命で交

換する確率 7.69×10^{-2} と店舗が閉店して撤去する確率 4.70×10^{-2} を合計し 1.24×10^{-1} とする。撤去に要する作業時間は 1 時間とする。撤去は、営業廃止店舗から撤去する場合と営業中の店舗から撤去する場合を想定する。

3.2.6 各作業ステージの着火確率の計算及び安全対策

輸送、保管、設置、修理、撤去の各作業ステージでの主な着火源を Table 3 に示す。各ステージの作業パターンから、各着火源の使用時間及び発生回数を設定した。営業中の店舗内での作業では、使用時の着火源 (Table 1) も考慮した。作業者の喫煙では、1 本あたりの喫煙時間を 5 分、その内、赤火になる時間を 40 秒、ライター着火時間を 5 秒とし、男性の作業者を想定し、喫煙率を 28.2%、喫煙本数を 1 本/h とした。修理時及び撤去時は、作業開始前に運転中のショーケースの電源を抜くことを想定し、その確率は、ショーケースの下部に電源がある確率 50% とショーケース運転中に電源を抜く確率 50% を乗じた 25% とした。放電時間は 5 ms とした。電動ドライバーはブラシモーターが着火するとし、その存在率は 5%、放電時間は 3 s、発生回数は 10 回とした。静電気は、作業者がショーケースの金属部に触れた時、輸送時のキー接触時等に発生するとし、放電時間は $1 \mu\text{s}^{10)}$ で、発生回数は各作業のシナリオに応じて設定し、輸送時 1.1 回、保管時 1 回、設置時 2 回、修理時 2 回、撤去時 1 回とした。屋外での作業時は東京の気象データの湿度 30% 以下の発生率 3.2%、店舗内での作業時は店舗内温度に換算した湿度 30% 以下の発生率 18.7% を静電気の発生率とした。静電気と電動ドライバー (ブラシモーター) は放電エネルギーが小さく²⁾、可燃空間時空積を 1/2 にして着火確率を計算した。冷媒回路に関わる修理作業では、ろう付けバーナーによる部品交換作業を各 2 分で 2 箇所付け外しするとした。着火確率の計算結果を Table 4 の未対策時に示す。各ステージのシナリオで最も着火確率が大きい場合 (輸送時はワゴン車輸送率 1、設置時は狭小倉

Table 3 Ignition sources assumed at the work stage

(a) Common				
Name	T_i (s)	n	k	Note
作業者の喫煙 (裸火)	4.5×10^1	1/h	0.282 /person	喫煙本数 1 本/人/h, ライター着火 5 sec, 煙草赤火 40 sec, 喫煙率 28.2%
(b) Transportation				
Name	T_i (s)	n	k	Note
キー接触 (静電気)	1.0×10^{-6}	1.1	0.0468	1.1 回, 放電率 25% (0.25×0.187 =0.0468)
(c) Storage				
Name	T_i (s)	n	k	Note
静電気	1.0×10^{-6}	1	0.064	作業者が触る (中古・カバー無) (2 人×0.032 =0.064)
燃焼式暖房機 (裸火)	7.2×10^2	1	0.082	使用期間 120 日/年. 使用率 25% (0.25×120/365 =0.082)
(d) Install, repair or removal				
Name	T_i (s)	n	k	Note
使用時着火源	-	-	-	表 1 参照
電源コンセント (電気スパーク) (修理時及び撤去時)	5.0×10^{-3}	2	0.25	ショーケースの電源引き抜き. 発生率 25%
電動ドライバー (ブラシモーター)	3.0	10	0.05	ネジの付け外し. 発生率 5%
静電気 (静電気放電)	1.0×10^{-6}	1-2	0.187 /person	ショーケースとの接触
ろう付けバーナー (裸火) (修理時のみ)	1.2×10^2	4	1	2 min×4 箇所

Table 4 Ignition probability (tolerable value; 5.26×10^{-8})

Stage	未対策時	対策時
輸送時 (ワゴン車輸送率 1 の場合)	1.12×10^{-5}	1.02×10^{-9}
保管時 (狭小倉庫, 中古品)	3.25×10^{-6}	3.65×10^{-8}
設置時 (営業中店舗)	7.65×10^{-8} (荷下ろし; 3.77×10^{-10} , 運搬; 1.20×10^{-8} , 据付; 6.41×10^{-8})	6.85×10^{-9} (荷下ろし; 4.28×10^{-13} , 運搬; 1.20×10^{-9} , 据付; 5.65×10^{-9})
修理時 (店内修理)	2.18×10^{-5}	1.23×10^{-8}
撤去時 (営業中店舗)	3.00×10^{-7}	2.81×10^{-8}

Table 5 Safety measures for work stage

Stage	Safety measures
輸送時（ワゴン車）	1. 製品への火気厳禁の注意喚起表示 2. 携帯形漏えい検知器を携行し漏えい検知後に換気
保管時	1. 静電気防止のための手袋着用 2. 製品及び梱包材への火気厳禁の注意喚起表示
設置時	1. 静電気防止のための手袋着用 2. 製品への火気厳禁の注意喚起表示 3. 携帯形漏えい検知器を携行し漏えい検知後に作業中止
修理時	1. 静電気防止のための手袋着用 2. 携帯形漏えい検知器を携行し漏えい検知後に作業中止 3. 店内修理では、冷媒の廃棄時及び充填時に機器の周囲の通風を良くし、着火源となる全ての機器の電源を遮断する
撤去時	1. 静電気防止のための手袋着用 2. 製品への火気厳禁の注意喚起表示 3. 携帯形漏えい検知器を携行し漏えい検知後に作業中止

庫での中古品の保管、設置時・修理時・撤去時は営業中の店舗内作業）に、着火確率が許容値を超えた。そして、可燃性冷媒の取扱教育（禁煙、着火源の教育等）に加え、Table 5の安全対策を取ることによって、着火確率（Table 4の対策時）が許容値以下になった。なお、可燃空間時空積をR290よりも約10%大きいR600aでの値にしても同じ安全対策で着火確率が許容値以下になることを確認した。

3.2.7 狭小店舗に対するリスクアセスメント

駅ナカの狭小コンビニを想定したリスクアセスメントも行った。R290 0.5 kg、店舗面積 24 m²とし、着火源は調査結果に基づいて設定した。結果、同じ安全対策を取ることによって全てのステージで着火確率が許容値以下となった。

4. 日本の法律（高圧ガス保安法）

高圧ガス保安法では、冷凍能力が3トン未満の冷媒回路内における高圧ガスが適用除外となっている。しかし、これは冷凍保安規則（冷凍則）に関してのことである。冷凍則の適用を受けるものを除き、炭素数が3又は4の炭化水素を主成分とする冷媒は液化石油ガス保安規則の適用を受け、それ以外の冷媒は一般高圧ガス保安規則の適

用を受ける。機器から大気への冷媒の放出（冷媒の廃棄）、冷媒の回収、機器への冷媒の充填に関して、一般高圧ガス保安規則又は液化石油ガス保安規則が適用されると、20日前までの届け出が必要となり、実質、機器の修理ができなくなってしまう。そこで、日冷工では、これを緩和すべく、経済産業省との折衝を重ねた。その結果、2020年7月に、大気への冷媒の放出（冷媒の廃棄）及び充填に関して、次の判断がなされた。これによって、修理時等に届け出なしに現地での冷媒の廃棄及び充填を行うことが可能となった。

「圧力を変更するための処理設備を使用しない差圧による冷凍能力が3トン未満の冷凍装置からの冷媒の廃棄及び差圧による冷凍能力が3トン未満の冷凍装置への冷媒の充填は高圧ガス保安法の適用除外である」

なお、A2、A3冷媒の回収に関しては、高圧ガス保安法の適用除外にならないため、20日前までの届け出が必要となり、実質、現地での修理時にA2、A3冷媒の回収はできない。

5. 国際規格及び日本の規格

IEC 60335-2-89は業務用冷凍冷蔵機器に関する国際規格である。2019年6月にEdition 3に改正された。IEC 60335-2-89では、可燃性冷媒はA2L冷媒、A2冷媒及びA3冷媒を指す。

JIS C 9335-2-89¹²⁾は、IEC 60335-2-89を和訳し必要なデビエーション（国際規格との差異）を加えた規格であり、IEC規格のEdition 3に対応する改正を行った。JRA 4078¹³⁾及びJRA GL-21¹⁴⁾は、A3冷媒を使用した内蔵ショーケースのリスクアセスメント結果を基にした日冷工規格である。いずれも2021年3月22日に制定された。これらを総称して日本の規格と呼称する。

これら国際規格及び日本の規格について、主な内容を説明する。

5.1 最大冷媒充填量

IEC 60335-2-89で、最大冷媒充填量は、LFLの13倍と1.2kgのうち小さい値と規定された。R290

の場合、LFL が 0.038 kg/m^3 であり、最大冷媒充填量は 0.494 kg となる。

A2L 冷媒は、A2 冷媒及び A3 冷媒よりも燃焼性が低いが、IEC の規定では 1.2 kg までしか充填できない。しかし、空調機の国際規格 IEC 60335-2-40 では、燃焼性の違いから A2 冷媒及び A3 冷媒では LFL の 26 倍、A2L 冷媒では LFL の 52 倍まで充填できる。そこで、日本の規格では 1.2 kg の上限を無くし、冷媒の燃焼性区分によらず LFL の 13 倍まで充填できる規定とした。R1234yf の場合、LFL が 0.289 kg/m^3 であり最大冷媒充填量は 3.76 kg となる。この内容は次の改正に向けて IEC に提案した。

5.2 最小設置床面積

IEC 60335-2-89 で、 0.15 kg 超の可燃性冷媒が充填された機器を設置する部屋は、冷媒量が部屋の容積に対し LFL の $1/4$ となる最小設置床面積以上の床面積を持っていないと規定された。 0.494 kg の R290 を充填した機器は 23.7 m^2 以上の床面積の部屋に置かなければならない。

日本の規格でも、同じ内容を規定した。ただし、日冷工規格では、冷媒量によらず (0.15 kg 以下でも)、最小設置床面積以上の床面積の部屋に設置しなければならない規定とした。

5.3 冷媒漏えい試験

IEC 60335-2-89 で、 0.15 kg 超の可燃性冷媒充填機器は、規定の冷媒漏えい試験を行い、機器の周囲に可燃域が生成されないことを確認しなければならないことが規定された。試験は規定の漏えい速度 (0.494 kg の R290 の場合は 2.66 kg/h) で行う。リーチインショーケース等の扉や蓋のある機器では庫内に全冷媒量を漏えいさせた後に扉や蓋を開ける。機器周囲の冷媒濃度は、5 秒以下の間隔で測定し、測定開始から 5 分を超えた後は LFL の $1/2$ を超えてはならない。

リーチインショーケースの庫内に全冷媒量が漏えい後に扉を急に開けると、庫外に大きな可燃域が生成される⁴⁾。A3 冷媒では、静電気や店舗内の電気機器のリレー等が着火源となるため、可燃

域の生成が短時間であっても、可燃域内に着火源が存在すれば容易に着火に至る可能性がある。しかし、IEC 60335-2-89 では、測定開始から 5 分以内は大きな可燃域が生成されたとしても可燃域が生成されないとみなされてしまう。日本の規格では、リスクアセスメント結果に基づき、測定開始から 5 分間の測定免除時間を削除し、測定開始から可燃域の生成を許容しない規定とした。そして、庫外の可燃域の生成防止のために、庫内の漏えい検知警報手段と冷媒回路遮断装置を規定し、これらを備えれば庫内からの冷媒漏えい試験を不要とした。

また、漏えい速度に関しては、JIS C 9335-2-89 では IEC 60335-2-89 と同じ独自式での規定とした。

一方、空調機の国際規格 IEC 60335-2-40 では 4 分全量漏れ速度で規定されている。そこで、日冷工規格では安全のために 4 分全量漏れ速度を採用した。 0.494 kg の R 290 の場合、4 分全量漏れ速度は 7.41 kg/h となり、IEC 式の計算値 2.66 kg/h の約 2.8 倍になる。さらに日冷工規格では、凝縮器ユニットからの漏えいに関して、除霜時も式(17)⁹⁾を満たす風量で凝縮器ファンを運転させることとし、この時、凝縮器ユニットからの冷媒漏えい試験を不要とした。この式の風量で可燃域ができないことは冷媒漏えい解析で確認済みである⁴⁾。

5.4 表面温度

IEC 60335-2-89 では、漏えいする可燃性冷媒にさらされる表面の温度が冷媒の自己着火温度から 100 K を減じた温度を超えてはならないと規定されている。

しかし、A2L 冷媒は燃焼性が低いため、空調機の国際規格 IEC 60335-2-40 においては、A2L にさらされる表面の温度は $700 \text{ }^\circ\text{C}$ を超えてはならないと規定されている。そこで日本の規格では、A2 冷媒及び A3 冷媒は自己着火温度から 100 K を減じた温度、A2L 冷媒では $700 \text{ }^\circ\text{C}$ を超えてはならないと規定した。この内容は次の改正に向けて IEC に提案した。

5.5 機器への表示及び作業時の安全担保

日冷工規格では、各作業ステージの着火確率を許容値以下にするために、機器及び梱包に Fig. 2 に示す特別な警告ラベルを表示することを規定した。また、静電気を防止する手袋の着用、漏えい検知器の携行及び発報後の作業中止等の作業時の着火リスク低減のための規定も設けた。更に、店内修理に関しては、Fig. 3, Fig. 4 に示す回収袋等を使った大気への冷媒放出（冷媒廃棄）方法と、冷媒放出時及び冷媒充填時に、店内の換気を良くし、着火源となる全ての機器の通電を遮断することを規定した。

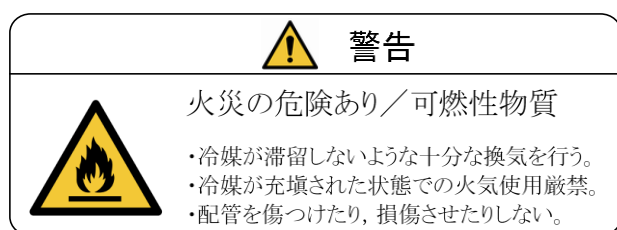


Fig. 2 Example of warning label

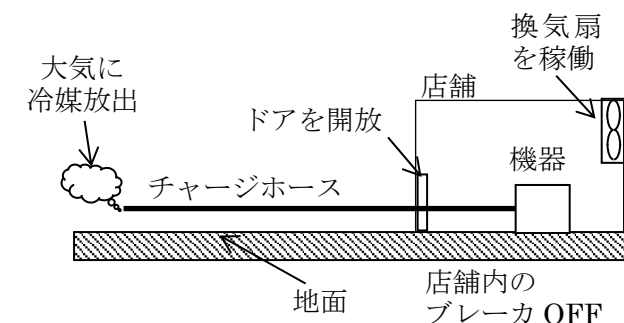


Fig. 3 Example of refrigerant release during in-store repair (1)

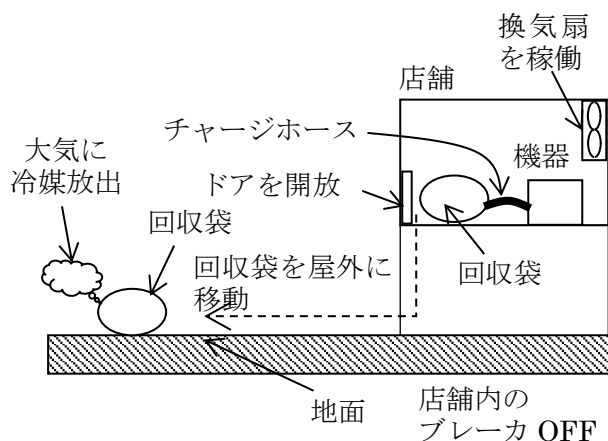


Fig. 4 Example of refrigerant release during in-store repair (2)

6. まとめ

A3 冷媒を使用した内蔵ショーケースのリスクアセスメントを行い、その結果を基に作成した日本の規格の主な内容を説明し、国際規格との比較を行った。

内蔵ショーケースでは、輸送から撤去まで冷媒回路に冷媒が入った状態で行われる。日冷工のリスクアセスメントは、一体型の機器としては厳しめの条件で行った。しかし、店内修理では、冷媒回路からの冷媒の廃棄及び充填が行われるため注意が必要である。特に、食品保管用途等では修理時間に制約がある場合もあり、ミスを誘発する可能性もある。そのため、日冷工規格では、店内修理に関しては、ミスが多く発生しても着火事故に繋がり難い安全対策を規定した。

内蔵ショーケースは、撤去後、産業廃棄物として廃棄される。機器の廃棄に関してはリスクアセスメントを行っていないが、日冷工では、機器が安全に廃棄されるようにするため、可燃性冷媒を使用した内蔵ショーケースの廃棄手順を規定したマニュアルの作成も進めている。

規格の内容が周知され、機器が市場で安全に運用されることを期待する。

謝辞

本研究は、日冷工参加企業である三菱電機、オカムラ、サンデン・リテールシステム、ダイキン工業、東芝キャリア、中野冷機、パナソニック、フクシマガリレイ、富士電機、ホシザキ、三菱電機冷熱応用システムの各社の委員によって実施された。また、オブザーバとして、堀和貴様、山口広一様、半田誠様、小野口昌宏様、白井瑛一様、堀田丈智様のご協力を頂いた。ここに深く感謝申し上げます。

NOMENCLATURE

A	: floor area, m^2
A_0	: area of air outlet, m^2
F	: coefficient (safety factor), equal to 0.25
G	: LFL, kg/m^3
h_0	: height of centerline of air outlet, m

k	: coefficient, –
M	: refrigerant amount, kg
n	: frequency of ignition source in a day, –
P	: ignition probability, –
P_a	: probability of leakage during working time, –
P_b	: probability of ignition source encountering working time, –
P_r	: refrigerant leak probability, –
P_s	: spatial encounter probability, –
P_t	: temporal encounter probability, –
Q	: air flow rate of outlet air, m ³ /s
T_d	: one day, s
T_i	: duration of ignition source, s
T_s	: working time, s
T_v	: duration of the flammable region, s
V_g	: volume of target space, m ³
V_v	: mean flammable volume, m ³
w	: refrigerant leak rate, kg/s

参考文献

- 1) IEC 60335-2-89:2019, “Household and similar electrical appliances - Safety - Part 2-89: Particular requirements for commercial refrigerating appliances and ice-makers with an incorporated or remote refrigerant unit or motor-compressor”, (2019.6).
- 2) 今村友彦, “公立諏訪東京理科大の進捗”, 2020年度プログレスレポート 第2部 次世代冷媒の安全性・リスク評価, 日本冷凍空調学会, pp. 29-46, (2021).
- 3) 岡部靖憲: “確率・統計—文章題のモデル解法—”, 朝倉書店, 東京, pp. 131-133 (2010)
- 4) http://izumi-math.jp/W_Takakura/k_kakuritu/k_kakuritu.pdf: (高倉亘: “幾何学的確率に関する教材について”) (2020).
- 5) 山下浩司, 加藤俊匡, 池田真治, 阪江覚, 石原茂樹, 小林章, 海沼秀和, 長谷川敬春, 出野裕, 永井洋, 保坂恵子: “A3 冷媒を使用した内蔵ショーケースのリスクアセスメントのための冷媒漏えい解析”, 環境と新冷媒国際シンポジウム 2021, M161 (2021.10).
- 6) D. Colbourne and K. O. Suen: “Minimum Airflow Rates to Dilute R290 Concentrations Arising from Leaks in Room Air Conditioners”, Proc. 13th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, 1104 (2018).
- 7) 三菱総合研究所: “平成 27 年度エネルギー使用合理化促進基盤整備事業 (機械器具等

の省エネルギー対策の検討に係る調査) 報告書”, (2016.2).

- 8) “Risk Assessment of Mildly Flammable Refrigerants Final Report 2016”, JSRAE, (2017.3).
- 9) David J. Smith: “Reliability, Maintainability and Risk 8th Edition: Practical Methods for Engineers”, Eighth Edition, Elsevier, pp. 395-397 (2011).
- 10) 吉田孝博, 久保田啓吾, 澤井丈徳, 増井典明: “帯電した人体からの放電電流波形の時間一周波数解析”, 静電気学会誌, Vol. 31 (No. 3), pp. 113-118 (2007).
- 11) K. Yamashita, Y. Sakamoto, T. Kato, S. Ishihara, A. Kobayashi, H. Kainuma, M. Sato, K. Osawa, H. Nagai, Y. Anzai: “Study on CFD Analysis of Refrigerant Leakage and Ignition Source about Built-In Refrigerated Display Cabinet using R290”, Proc. 13th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, 1255 (2018).
- 12) JIS 9335-2-89:2021, “家庭用及びこれに類する電気機器の安全性 - 第 2-89 部: 業務用冷凍冷蔵機器及び製氷機の個別要求事項”, (2021.3).
- 13) JRA 4078:2021, “可燃性冷媒を使用した内蔵形冷凍冷蔵機器の冷媒漏えい時の安全機能要求事項”, 日冷工, (2021.3).
- 14) JRA GL-21:2021, “可燃性冷媒を使用した内蔵形冷凍冷蔵機器の冷媒漏えい時の安全確保のための施設ガイドライン”, 日冷工, (2021.3).