

# A3 冷媒を使用した家庭用エアコンの リスクアセスメント結果と今後の対応 Risk Assessment Results for Mini-Split Air-Conditioners using A3 Refrigerant and Future Measures

高市健二, 平良繁治, 南田知厚, 馬場敦史, 田村和己, 板倉俊二,  
三苫恵介, 山本和英, 山下浩司, 上野円  
一般社団法人 日本冷凍空調工業会

Kenji Takaichi\*, Shigeharu Taira\*, Tomoatsu Minamida\*, Atsushi Baba\*, Kazumi Tamura\*,  
Shunji Itakura\*, Keisuke Mitoma\*, Kazuhide Yamamoto\*, Koji Yamashita\*, Madoka Ueno\*

\*the Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association, Kikaishinko Bldg. 201, 3-5-8, Sibakouen, Minato-ku, Tokyo, 151-0011, Japan

Japanese manufactures pioneered the use of A2L refrigerant with low GWP for residential air conditioners. However, due to the issue of global warming in recent years, it is desired to convert to smaller GWP refrigerant. Therefore, the Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association commenced risk assessment of A3 refrigerant for residential air conditioners in 2016. In this report, based on the risk scenarios examined for each life stage, the refrigerant leakage simulation, identification of ignition sources, and planning of countermeasures were described.

Keywords: FTA analysis, A3 refrigerant, Ignition Source, Leakage simulation, 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冷凍空調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た。その後、順次A2Lを採用した製品の展開を行っている。しかし、モントリオール議定書のキガリ改正を受け、更なるGWP値の小さい冷媒への転換が望まれている。GWP値の小さい冷媒には、LFL (Lower Flammability Limit) が小さく、燃焼性が強いA3冷媒が多い。IEC 60335-2-40では、A3冷媒を使用した空調機において、漏えいした冷媒をファンで攪拌することにより、使用可能な冷媒量を増やすことができる内容が次期改正で規定される予定であるが、この規定の安全運用面での問題の有無については慎重に評価する必要がある。

日本冷凍空調工業会（以下日冷工）では、A3冷媒を使用した家庭用ルームエアコン（以下エアコン）の安全性を評価するために、2016年7月からワーキンググループ（以下WG）を作り、リスクアセスメントを開始した。リスクアセスメントでは、使用時だけでなく、作業時も安全に運用できるようにする

ため、ライフステージを設定してステージ毎の安全性評価を行った。

室内と室外について、冷媒漏えいシミュレーションを行い、可燃域の生成状況を定量化した。そして、着火源を抽出し、“輸送・保管”、“据付”、“使用時の室内と室外”、“修理”、“廃棄”の各ステージについてリスクアセスメントを行い、着火確率を許容値以下にするための安全対策を明確にした。本報ではこれらの検討結果について説明する。また、製品化のためには、機器の製造から廃棄まで安全に運用する必要があり、リスクアセスメントの想定外の事象とそれを回避するための提言についても説明する。

## 2. 室内の冷媒漏えいシミュレーション

室内における冷媒漏えいシミュレーションを行った。ここでの検討結果は、室内の使用時及び作業時のリスクアセスメントに使用する。

エアコンの代表的な室内機の使用環境として、床面積を7.0m<sup>2</sup> (2.5m×2.8m)、冷媒はR290とし、冷媒量はIEC 60335-2-40 Ed 6.0（以下IEC規格）にお

いてファン攪拌を行わない場合に当該床面積で許容される最大冷媒量の 200 g にてシミュレーションを行った。また、R290 において、1000 g の HFC 冷媒を使用した製品と同等の性能が得られる冷媒量である 500 g の場合のシミュレーションも行った。この時の床面積は、次期 IEC 規格でファン攪拌を行う場合に許容される 11.88 m<sup>2</sup> (3.3 m×3.6 m) とした。また、どちらの計算においても天井高さは 2.2 m、室内機はその下面が床面から 1.8 m の高さに設置されるものとした。エアコンの対面の壁には幅 800 mm×高さ 4 mm のドア下隙間を想定し、天井面には 200 mm×200 mm の圧力境界を 2 箇所想定した。冷媒漏えい速度は、IEC 規格で採用されている 4 分全量漏れとした。Fig.1 に室内の解析モデルを示す。

冷媒漏えい解析はエアコン停止中（攪拌なし）、運転中（ファン攪拌あり）の双方場合に行った。運転中は空気と冷媒の混合気体が漏出するものとし、風量は Colbourne らの式 (1)（次期 IEC 規格に規定予定）より算出した。

$$Q = \frac{8Y\sqrt{A_0}}{240} \left( \frac{m_C}{LFL} \right)^{3/4} \left( \frac{F^{1/4}}{1-F} \right) \dots (1)$$

Fig. 2 に漏えい終了時（4 分後）の攪拌有無による冷媒濃度分布の違いを示す。攪拌がない場合には、冷媒量 200 g で床面から 0.008 m、冷媒量 500 g で床面から 0.326 m の高さの範囲に可燃域が発生した。攪拌がある場合には、冷媒量 200 g で室内機の吹出位置から水平方向に約 0.1 m まで、冷媒量 500 g で水平方向に約 0.3 m までの範囲に可燃域が発生した。

攪拌がない場合は、冷媒が室内機の真下に漏えいし、床面から可燃空間が積層していくため、可燃空間体積を床面積で除した値が概ね床面からの可燃域

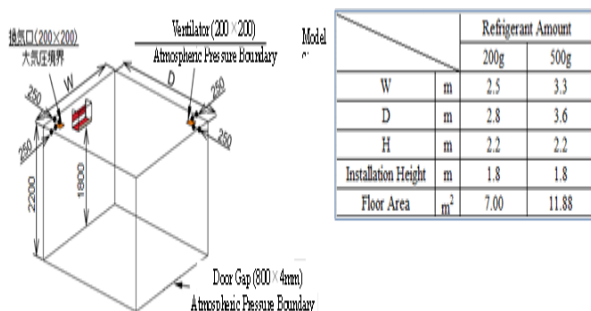


Fig. 1 Analysis Space Model

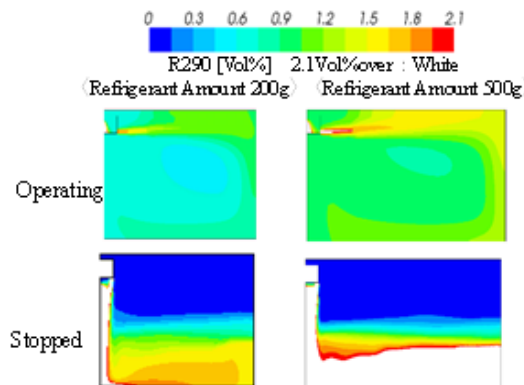


Fig. 2 Refrigerant Concentration Distribution after 4 Minutes

の高さとなる。

以上、室内使用時の冷媒漏えいシミュレーションからは、漏えい冷媒の攪拌に関する Colbourne らの提案式は有効であり、着火に至る程の有意な大きさの可燃域は生成されないことを確認した。ただし、室内機の吹出口の近傍に可燃域が生成されるため、着火源の位置によっては危険になる場合もあり得ることには注意が必要である。

### 3. 室外の冷媒漏えいシミュレーション

室外（ベランダ）における冷媒漏えいシミュレーションを行った<sup>2)</sup>。ここでの検討結果は、室外の使用時及び作業時のリスクアセスメントに使用する。

日本の住宅には戸建住宅と共同住宅がある。戸建住宅における室外機の設置方法は、ベランダ設置、地面直置き設置、壁面設置、屋根置き設置、軒下天吊り設置などがある。また共同住宅における室外機の設置方法は、ベランダ設置、共用廊下設置、専用ミニベランダ設置などがある。この中で、漏えいした冷媒が最も溜まりやすい環境は壁で覆われたベランダである。特に共同住宅の場合、避難経路を確保するため、共用スペースには設置できない場合があり、ベランダ設置が多く見受けられる。そこで、三方向を壁で覆われたベランダに室外機を設置することを想定して、冷媒漏えいシミュレーションを行った。Fig.3 にベランダ設置のシミュレーションモデルを示す。幅 5 m、奥行き 1.2 m、天井高さ 2.1 m のベランダを想定し、手すりの高さは 1.1 m とした。ベランダが隣室のベランダと接する場合は、ベランダ

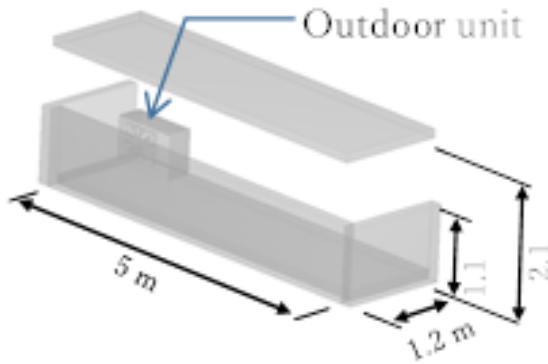


Fig.3 CFD model of balcony

間の壁の下部に隙間が設けられるが、隣室のベランダと接しない独立ベランダも存在する。可燃域はこの場合が最も大きくなるため、ここでは独立ベランダを想定した。また、床面にはφ50 mm程度の排水口が設けられるが、解析によって、その影響はあまり大きくないことが分かったため、排水口は設けなかった。室外機の設置形態として、地面直置き設置、壁面設置、軒下天吊り設置の3つの場合を想定した。

冷媒はR290で冷媒量は200g, 500g, 1000gとし、冷媒漏えい速度は4分全量漏れとした。熱交換器の空気吸込み面より均一に漏えいするとし、漏えい濃

度はR290が100 vol%とした。

Fig.4に解析結果を示す。冷媒量500gの室外機を床面に設置した場合、可燃域継続時間は1900秒に達した。また、床面より設置高さが高くなると、壁面設置で1206秒、軒下天吊り設置で939秒と可燃域継続時間が短くなった。一方、床面に設置した場合、冷媒量を1000gにしても、平均可燃空間体積は、冷媒量500gの場合とあまり差異がなかった。これは、冷媒量1000gの場合、床面近傍にUFL (Upper Flammability Limit) 以上の濃度空間が生成されたことに関係していると考えられる。なお、最小ファン風量で室外機ファンが稼働している場合、冷媒量1000gの場合に対してのみ、極めて小さな可燃域の生成が確認された。

#### 4. リスクアセスメントの方法

##### 4.1 リスクアセスメントのプロセス

リスクアセスメントとは、着火に至るシナリオを可能な限り多く抽出し、冷媒漏えい発生確率、可燃域の空間分布である空間的遭遇確率、着火源と可燃域の時間的遭遇確率を乗じて、着火確率を定量化す

Installation Condition	Leakage Amount Time	200 g		500 g		1000 g	
		240 sec	600 sec	240 sec	600 sec	240 sec	600 sec
Floor mounted	Concentration distribution						
	Duration	776 sec		1900 sec		3546 sec	
	Averaged volume	1.22 m <sup>3</sup>		2.96 m <sup>3</sup>		2.73 m <sup>3</sup>	
Steel stand mounted	Concentration distribution						
	Duration	292 sec		1206 sec		2126 sec	
	Averaged volume	0.20 m <sup>3</sup>		2.83 m <sup>3</sup>		3.87 m <sup>3</sup>	
Eaves mounted	Concentration distribution						
	Duration	260 sec		939 sec		1711 sec	
	Averaged volume	0.05 m <sup>3</sup>		2.47 m <sup>3</sup>		3.73 m <sup>3</sup>	

Fig. 4 Concentration distribution, the duration and time averaged volume of flammable region within the balcony for different installation conditions

ることである。そしてその定量化された着火確率が許容レベルになるまで見直しを行い、リスクを低減する安全対策を決定する一連のプロセスと定義される。本章では、リスクアセスメントを行うために必要な、モデル設定、許容レベルの設定、冷媒漏えい発生確率、着火確率の算出方法について説明する。また、リスクアセスメントの対象とするライフステージについても説明する。

#### 4.2 リスクアセスメントモデルの設定

リスクアセスメントの対象は、ミニスプリットエアコンと称される主に家庭で使われる壁掛け式のエアコンであり、冷房定格能力で 2.2 kW から 5.0 kW クラスを対象とした。冷媒は R290 とし、IEC 規格で安全対策が必要ない場合である 200 g のエアコンが 7 m<sup>2</sup> (4.5 畳相当) の部屋に設置された時と 1000 g の HFC 冷媒機器と同等性能となる 500 g のエアコンが 11.88 m<sup>2</sup> の部屋に設置された時を想定した。

#### 4.3 許容レベルの設定

エアコンの日本の普及台数は 1 億台とする。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、普及台数に対して 100 年に 1 回以下の事故発生となる 10<sup>-10</sup> 台/年とした。なお、使用時以外の輸送・保管、据付、修理、廃棄の作業時に該当する各ステージでは、専門的な教育を受けている作業者が携わるため、許容値は使用時よりも 1 桁上げることができると考え、10<sup>-9</sup> 台/年とした。

#### 4.4 冷媒漏えい発生確率

冷媒漏えい発生確率は、調査結果から 0.4 %/年とした。冷媒漏えいのうち、室内機での微少漏れと急速漏れの割合は、それぞれ 94%、6%とした。また、室外機に関しても、同様の調査結果から、微少漏れと急速漏れ（噴出漏れを含む）の割合は、それぞれ 88%、12%とした。

作業時の作業起因の漏えいは、配管接続ミスなどの作業ミスによって発生するため、シナリオに基づきヒューマンエラーの発生頻度から設定した。

#### 4.5 着火確率の算出方法

着火確率は、空間的遭遇確率、時間的遭遇確率及び冷媒漏えい発生確率を乗じて Eq. (2) から算出される。また空間的遭遇確率は Eq. (3) で計算する。

$$P = P_s \times P_t \times P_r \quad (2)$$

$$P_s = V_v / V_g \quad (3)$$

ここでそれぞれの記号は以下の通りである。

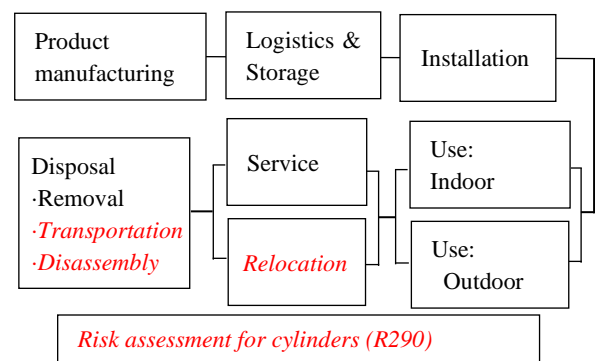
$P$ : 着火確率	-
$P_r$ : 冷媒漏えい発生確率	-
$P_s$ : 空間的遭遇確率	-
$P_t$ : 時間的遭遇確率	-
$V_g$ : 対象空間体積	m <sup>3</sup>
$V_v$ : 平均可燃空間体積	m <sup>3</sup>

なお、着火確率の算出の詳細に関しては、内蔵ショーケースのリスクアセスメントに関する論文<sup>3)</sup>に記載している。

#### 4.6 対象とするライフステージ

一般的にリスクアセスメントは、製造から廃棄までのライフステージが対象となる。Fig. 5 に、今回検討しているリスクアセスメントの対象範囲と対象範囲外を示す。“輸送・保管”，“据付”，“使用時の室内と室外”，“修理”，“廃棄”が対象範囲であり、Fig.5 にて赤斜体字で示した項目は、リスクアセスメントの対象範囲外である。以下、対象範囲外とした理由を記す。

- ・製品の製造：各社のノウハウがあるため。
- ・エアコンの移設：基本的に“運搬”と“据付”の



Note: The stages in red area are not included in the JRAIA risk assessment

Fig. 5 Life stages covered by risk assessment

2つのステージを合せたものと考えたため。

- ・廃棄：廃棄工程は、撤去、リサイクル工場までの運搬、解体に分けられるが、リスクアセスメントでは撤去のみを対象としたため。

## 5. リスクアセスメント

### 5.1 使用時の着火確率の計算及び安全対策

#### 5.1.1 使用時室内の着火確率の計算

使用時の室内の着火確率の算出には、2章の冷媒漏えいシミュレーションで得られた可燃空間時空積を使用した。壁掛け室内機からの漏えい速度を変化させた冷媒漏えいシミュレーションを行った。その結果、微少漏れの場合は4分全量漏れよりも平均可燃空間体積が3桁小さくなったため、それを考慮した加重平均として、リスクアセスメントに使用する平均可燃空間体積を求めた。なお、室内では、人の移動に伴うドアの開閉や冷暖房時の扇風機の併用などの付加因子が考えられ、これらは可燃空間を小さくする方向に作用するが、その寄与度を定量化できないため考慮していない。

室内の着火源について検討する。A3冷媒であるR290の着火源は、裸火、高温表面、スパークに分けられる。Table 1に室内に存在する潜在的な着火源を示す。裸火は、ライター、ロウソク、ガスコンロなどであり、A2L冷媒、A3冷媒共に、接触すると確実に着火する。高温表面は、電気ヒータやホットプレート類などであり、A3冷媒は自己着火温度が低いため、着火する可能性が高い。スパークは、人体による静電気スパークと電気機器類による電気スパークに分けられる。電気スパークには、掃除機などのブラシモーターから発生するスパーク、電気機器のサーモスタットやリレー接点から発生するスパーク、コンセントの抜き差しや照明用スイッチのON/OFFによるスパークなどがある。Table 1の中から、冷媒漏えいシミュレーションで得られた可燃域の高さと室内に存在する着火源の存在高さを比較して着火源を特定した。ファン送風による攪拌がない場合は、エアコンの真下から床面までの間にも可燃空間が生成されるため、熱源が室内機の真下で使用される場合

Table 1 Potential Indoor Ignition Sources

Types of Ignition Sources		Potential Ignition Sources
Open Flames		Cigarettes during Smoking (including Lighters), Candles (for Religious Event and Aromatherapy)
		Oil Stoves, Gas Cooktops, Portable Butane Stoves
High-Temperature Surfaces		Electric Stoves
Sparks	Charges	Static Electricity, Laser Printers
	Brush Motors	Electric Shavers, Printers
	Thermostats	Kotatsu(tables with electric foot warmers), Electric Stoves, Irons, Toasters, Hairdryers
	Relays	Air Purifiers, Dehumidifiers, Vacuum Cleaners, Dryers, Electric Carpets, Rice Cookers, Microwave Ovens
	Others	Plugging/Unplugging of Power Plugs, ON/OFF of Lighting Switches

には、着火源となり得る。この着火源が室内機の真下で使用される確率は検討の結果10%とした。

特定した使用時室内の着火源をTable 2に示す。使用時室内の特定した着火源は、裸火ではタバコ、石油ストーブ、ロウソク、高温表面では電気ストーブ、スパークではレーザープリンター、電気シェーバー、電気こたつ、電気ストーブ、アイロン、ドライヤー、空気清浄機、除湿機、掃除機、電子カーペット、調理器具、照明用スイッチ、コンセントの抜き差しであった。これらの着火源について、ライフスタイルも考慮して、各着火源の持続時間と発生回数を設定した。一方、存在高さを考慮することによって着火源にならないと判断したものには、ロウソク、コンロ、調理器具、ドアノブに接触した時に発生する静電気、照明用スイッチのON/OFFなどがあげられる。なお、着火源の特定は、NEDOプロジェクトの研究結果<sup>4)</sup>も考慮して行った。

検討の結果、冷媒量が200gの場合は着火確率が $2.61 \times 10^{-11}$ とファン攪拌なしに許容値以下となった。一方、冷媒量が500gの場合、未対策時の着火確率は許容値を超えたが、安全対策としてファン攪拌を行うことによって着火確率は $1.32 \times 10^{-11}$ となり、許容値以下となった。

#### 5.1.2 室外使用時の着火確率の計算

使用時室外の着火確率の算出には、3章の冷媒漏えいシミュレーションで得られた可燃空間時空積を使用した。室外の可燃域に影響を与える因子として

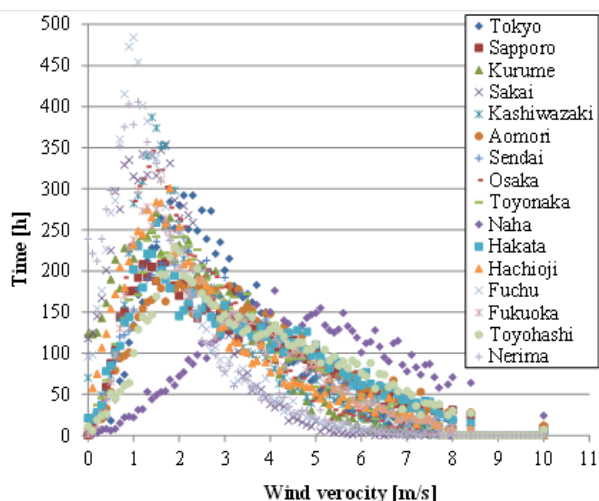


Fig.6 The appearance time length of each wind velocity in 16 cities in Japan

は、ベランダの壁下の隙間、自然風などが考えられる。このうち、室外機の周囲では、通常、自然の風が吹いており、これが着火確率に大きな影響を与える。Fig. 6 に日本の代表都市における各風速の年間累積発生時間を示す。各地域によってばらつきはあるものの、おおよそ 1.0 m/sec から 2.0 m/sec の間の発生頻度が高い。このデータから、自然風の発生頻度は、0.3 m/s 以下が 2.5 %、0.3m/s 超 0.5 m/s 以下が 2.3 %、0.5 m/s 超が 95.2 %であった。風速 0.3 m/s、0.5 m/s の時の冷媒漏えいシミュレーションも行い、風速 0.3 m/s 以下 (0 m/s で代表)、0.3~0.5 m/s (0.3 m/s で代表)、0.5 m/s 超 (0.5 m/s で代表) の時の着火確率をそれぞれ算出し、これらの加重平均として

Table 2 Identification of Ignition Sources

Types of Ignition Sources	Potential Ignition Sources	Heights of Ignition Sources		Height of Presence of Flammable Space (during operation/stop)		Ignition or No Ignition (during operation/stop)		
				Refrigerant 200 g	Refrigerant 500 g	Refrigerant 200 g	Refrigerant 500 g	
Open Flames	Cigarettes	155 cm	Standing	1.705 m /0.008 m	1.510 m /0.326 m	No/Yes*	Yes/Yes*	
		65 cm	Seated			No/Yes*	No/Yes*	
	Candles for Religious Event	74-130 cm				No/Yes*	No/Yes*	
	Aroma Candles	40-50 cm	Bedside			No/Yes*	No/Yes*	
		70 cm	Bay Window			No/Yes*	No/Yes*	
	Oil Stoves	20-35 cm				No/No	No/Yes	
	Gas Cooktops	80-90 cm				No/No	No/No	
Portable Butane Stoves	80-90 cm	Kitchen	No/No			No/No		
	40 cm	Living Room	No/No			No/No		
High-Temperature Surfaces	Electric Stoves	30 cm or less				No/No	No/Yes	
Sparks	Charges	Doorknobs (Static Electricity)	90-130 cm				No/No	No/No
		Laser Printers	74-150 cm				No/No	No/Yes
	Brush Motors	Electric Shavers	155 cm			Standing	No/Yes*	Yes/Yes*
			65 cm			Seated	No/Yes*	No/Yes*
	Thermostats	Kotatsu (tables with electric feet warmers), Electric Stoves, Irons	30 cm or less		No/No	No/Yes		
			Toasters	80-104 cm		No/Yes*	No/Yes*	
		Hairdryers	180 cm	Standing	No/Yes*	Yes/Yes*		
			55 cm	Seated	No/Yes*	No/Yes*		
	Relays	Air Purifiers, Dehumidifiers, Vacuum Cleaners, Electric Carpets	30 cm or less		No/No	No/Yes		
			Microwave Ovens	80-104 cm		No/Yes*	No/Yes*	
Rice Cookers			50-100 cm		No/Yes*	No/Yes*		
Others	Plugging/Unplugging of Power Plugs	25 cm or less		No/No	No/Yes			
	ON/OFF of Lighting Switches	110-120 cm		No/Yes*	No/Yes*			

着火確率を算出した。

室外ベランダの着火源としては、使用者の喫煙やガス石油温水機器の裸火、他のエアコン室外機に関連する電気スパークが考えられる。また、人が金属製ドアノブなどと接触した場合に発生する静電気スパークも考えられる。このうち、ガス石油温水機器の裸火やスパークに関しては、燃焼ファンの動作により攪拌されるため、着火源としなかった。また、可燃域内にあるエアコン室外機は着火源にならないとの報告があり着火源としなかった。

検討の結果、冷媒量が 500 g の場合の室外使用時の着火確率は  $1.15 \times 10^{-11}$  となり、未対策で許容値を下回った。しかし、これは、室外の着火源が少ないことに起因する結果であり、3 章で示したように、ベランダには多大な可燃域が生成されるため、想定外の設置状況が発生した場合には非常に危険な状態になる可能性がある。

### 5.1.3 使用時のまとめ

室内及び室外の使用時の着火確率を Table 3 にまとめた。使用時の室内では、着火源の高さ位置、放電エネルギーの大小、漏えい速度と可燃空間時空積の関係を考慮することにより、安全対策としてファン攪拌を行った後、500 g の R290 での着火確率が許容値以下になった。使用時の室外では、自然風を考慮することによって、500 g の R290 での着火確率が許容値以下になった。また、リスクアセスメントは 1000 g の R32 についても行ったため、Table 3 には、その結果も合わせて記載した。

Table 3 Ignition probability of usage  
(tolerable value;  $1 \times 10^{-10}$ )

Refrigerant	R290 with countermeasure		R32
Category	Mini-split AC (wall mounted)		
Refrigerant amount	200 g	500 g	1000 g
Usage (indoor)	$2.61 \times 10^{-11}$	$1.32 \times 10^{-11}$	$1.68 \times 10^{-13}$
Usage (outdoor)	$7.03 \times 10^{-14}$	$1.15 \times 10^{-11}$	$1.38 \times 10^{-21}$

## 5.2 作業時の着火確率の計算及び安全対策

使用時以外の輸送・保管、据付、修理、廃棄の作業時のリスクアセスメントに関して説明する。輸送・

保管のステージは他の作業時と共通項が少ないため、独立した形でリスクアセスメントを実施した。また、据付、修理、廃棄には、2 章及び 3 章で説明した漏えいシミュレーション（ファン攪拌無）で求めた可燃空間時空積を使用した。作業時の漏えいは配管接続ミスなどによって発生するため、急速漏れ相当になると考え、4 分全量漏れの時の可燃空間時空積を使用した。着火源については各作業ステージで共通しているものと特有のものがあり、各作業ステージの着火に至るシナリオを作成し、それを基に、各作業ステージの着火源を抽出し、着火確率を算出した。

### 5.2.1 輸送・保管ステージのシナリオ

エアコンの輸送・保管ステージは、工場での製品完成後から一般的には以下の①から⑤の工程順序で進められる。

- ①工場から製品を出荷（トラックによる輸送）
- ②中大型倉庫での保管
- ③中大型倉庫からの出荷、販売店などへの納入（トラックによる輸送）
- ④販売店などの狭小倉庫での保管
- ⑤狭小倉庫からの出荷、据付現場への納入（小型車両による輸送）

これらの工程のうち、着火源の発生と製品（冷媒が充填されている室外機）からの冷媒漏えいが同時に発生する場合として、中型倉庫保管、狭小倉庫保管、ワゴン車輸送の 3 つを想定した。

エアコンの保管場所は、工場生産後や海外生産拠点から持ち込まれた後に一時的に保管する中型倉庫（1000 m<sup>2</sup>）と各販売拠点で保有する狭小倉庫（15 m<sup>2</sup>）に分類される。これらの倉庫内では、フォークリフトや台車などでエアコンを運搬する。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。

ワゴン車の輸送では、車内内容積は 2.9 m<sup>3</sup>、乗車人員は積み下ろし作業に必要な人数として 2 名、平均輸送時間は 2 時間とし、ワゴン車での輸送頻度は 100 % とする。なお、トラックによる輸送は、輸送環境において可燃域が生じた場合でも可燃域内に着火

源が存在しないためリスクは無いとした。また、輸送での荷降ろしの際は、荷室扉を開けた瞬間から内部の空気が循環、拡散するため着火確率は無視できるレベルと考え、シナリオから除外した。

### 5.2.2 据付ステージのシナリオ

エアコンの据付作業は一般的に以下の手順で行われる。

- ①据付場所を確認し、室内機、室外機を設置場所へ搬入する。
- ②室内側に据付板を取り付け、壁に穴をあける。
- ③室内機に配線を取り付け、配管接続を行い、壁に設置する。
- ④室外機に配線を取り付け、配管を接続する。
- ⑤真空引きを行い、冷媒漏えい検査を実施する。
- ⑥室外機の操作弁を開放し、室外機内のプレチャージ冷媒をシステム内に充填する。
- ⑦電源を入れて試運転を実施する。

据付作業の発生頻度はミニスプリットエアコンの設計上の標準使用期間から10年に1回とし、作業時間は室内側1.5時間、室外側1.5時間の合計3時間とした。

### 5.2.3 修理ステージのシナリオ

エアコンの室内側での修理作業としては、接続配管を外し冷媒漏えいの可能性がある「室内機の交換作業」、サービスマンが電動ドライバーなどを使用する「基板の交換作業」、作業による静電気が発生する可能性がある「パネルの交換作業」を想定した。

また、室外側での修理作業としては、ろう付け作業が発生する「圧縮機及び弁類の交換作業」、接続配管を外し冷媒漏えいの可能性がある「室外機の交換作業」を想定した。

修理作業の発生頻度は調査結果から10%とし、各作業時間はそれぞれ1時間とした。

### 5.2.4 廃棄ステージのシナリオ

エアコンの廃棄の全体の流れを Fig. 7 に示す。廃棄ステージは、撤去、リサイクル工場までの運搬、解体に分けられるが、リスクアセスメントは撤去の

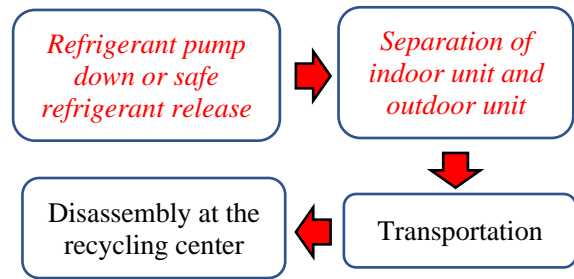


Fig. 7 Flow of disposal

みを対象とした。その他の工程については6章で言及する。

エアコンを廃棄する際には、まず、ポンプダウン運転により、冷媒を室外機に回収する。エアコンが故障していて運転できない場合には、室外機の閉止弁を閉止し、室内機と内外接続配管中の冷媒を大気放出する。その後、内外接続配管を取り外し、設置場所から室内機と室外機を撤去する。取り外した空調機は建物から搬出され、リサイクル法に基づき、リサイクルセンターに運搬された後に解体される。

この撤去廃棄段階の各工程に対して、リスクアセスメントでは、Fig. 7 に赤斜体字で示すポンプダウンや室内機と室外機の分離作業を行う撤去作業を想定した。撤去作業の発生頻度は10年に1回とし、作業時間は1時間とした。

### 5.2.5 各作業ステージの着火源

各作業ステージでのシナリオを想定し、着火源を抽出した。主な着火源の持続時間と発生回数を Table 4 に示す。各作業ステージでの共通の着火源は喫煙を想定した。ただし、室内での作業時には喫煙はし

Table 4 Ignition sources of work

Ignition source	Motion time (s)	Number of motions (times/day)	remarks
Common: Smoking of worker	$4.5 \times 10^1$	1time/h	Number of smokers 1 / person / h, lighter ignition 5 seconds, Tobacco red fire 40 seconds, smoking rate 28.2%
Transport (wagon car)			2 hours, 2 workers
Static electricity (contact of key and door handle)	$1.0 \times 10^{-6}$	4 time/person	Key after rubbing the seat, door contact 3 times / person, After undressing key, door contact 1 time / person
Storage (small warehouse)			2 hours, 2 workers, 15 m <sup>2</sup>
Oil stove	$3.6 \times 10^3$	2	Usage period 120 days / year. Oil stove usage rate 25%
Install, repair, removal			1 hours, 1 workers
Ignition source during use			See "Ignition source during use"
live-line working	$5.0 \times 10^{-3}$	1time/h	Occurrence rate of forgetting to check breaker / energization $10^{-4}$
electric screwdriver	3.0	2	Attaching and detaching screws. Incidence 50%
Brazing burner	$1.2 \times 10^2$	2	Removal and installation 2times



ないものとした。輸送時にはキー接触時に静電気が発生するものとした。保管時には石油ストーブを使用するものとした。据付、修理、撤去では、使用時の着火源の他に、活線作業、電動ドライバー、ろう付けバーナーなどを着火源として想定した。

### 5.2.6 各作業ステージの着火確率の計算及び安全対策

各作業ステージの着火確率を算出した。結果、許容値を超えたため、安全対策を検討した。可燃性冷媒の着火源についての教育に加え、輸送・保管ステージでは Table 5 の安全対策、据付、修理、撤去ステ

Table 5 Safety measure for transportation and storage

Safety measure	Method	Procedure
Label for fire attention	A fire caution label is displayed on the air-conditioned outdoor unit.	All procedure
Elimination of ignition sources	Education to eliminate ignition sources in the same room in the warehouse according to guidelines etc.	Storage for warehouse
Use of portable leak detector	Regulations for ensuring ventilation, reducing the refrigerant concentration, and carrying and using a portable leak detector by opening windows when a refrigerant leak occurs.	Transportation by wagon car
Measures to prevent electrification and ignition in the car	In order to prevent discharge ignition by a charged human body, a metal start key is insulated, or a discharge plate is installed near the key cylinder on the vehicle body.	Transportation by wagon car

Table 6 Safety measure for installation, repair and removal

Safety measure	Method
Use of portable leak detector	If refrigerant leaks during work, the combustible area is reduced by ensuring ventilation by stopping the work and opening windows.
Wearing work gloves against static electricity	In order to reduce the generation of static electricity by workers during work, it is stipulated to wear an antistatic carrier.
Prohibition of using brush motor type electric screwdriver	Prohibition of using a brush motor type electric screwdriver that is an ignition source

Table 7 Ignition probability of working with countermeasures (tolerable value;  $1 \times 10^{-9}$ )

Refrigerant		R290 with countermeasures		R32
Category		Mini-split AC (Wall mount)		
Refrigerant amount		200g	500g	1000g
Logistics	Warehouse	$5.1 \times 10^{-13}$	$1.1 \times 10^{-10}$	$2.3 \times 10^{-14}$
	Van	$8.9 \times 10^{-11}$	$1.8 \times 10^{-10}$	$5.1 \times 10^{-13}$
Installation	in	$1.2 \times 10^{-12}$	$1.9 \times 10^{-10}$	$3.9 \times 10^{-14}$
	out	$8.5 \times 10^{-12}$	$4.5 \times 10^{-11}$	$2.7 \times 10^{-15}$
Service/Repair	in	$2.7 \times 10^{-15}$	$4.2 \times 10^{-12}$	$1.9 \times 10^{-17}$
	out	$2.6 \times 10^{-10}$	$2.6 \times 10^{-10}$	$2.0 \times 10^{-12}$
Removal	in	$2.7 \times 10^{-12}$	$1.3 \times 10^{-12}$	$2.2 \times 10^{-16}$
	out	$9.2 \times 10^{-13}$	$2.3 \times 10^{-12}$	$4.7 \times 10^{-15}$

ージでは Table 6 の安全対策をすることによって着火確率が許容値以下となった。Table 7 に安全対策実施後の各作業ステージでの着火確率を示す。作業時に、安全対策を適切に実施することで、着火確率を許容値 ( $1 \times 10^{-9}$ ) 以下にできることを明確化した。

今後、これらを反映した日冷工規格を作成する予定である。

## 6. リスクアセスメントの想定外事象の考え方と提言

リスクアセスメントは、想定したシナリオに基づいて、適切に運用されることを前提に行われる。しかし、実際には、リスクアセスメントでは想定していない状況が発生する可能性もある。その考え方と提言について記載する。

### 6.1 リスクアセスメントでの想定外の考え方

リスクアセスメントにおける想定外の事象について説明する。これらが発生すると、実際の着火事故を増加させることが容易に想像できるが、これらの危険性を定量化することは非常に困難である。

#### ① 廃棄回収

廃棄時にエアコンが適法なルート以外で回収される場合がある。経産省・環境省の調査によると、6割近いエアコンが適法なルート以外で回収されており、この場合、冷媒が適切に回収・処理されているか不明である。冷媒の回収には処理費用が必要になるため、適切な方法以外で大気中に放出しているようであれば、着火事故が増加する可能性を否定できない。また、不用品回収業者が、リユース、スクラップ処理をする場合も同様のリスクを生じる。

#### ② 据付、修理

リスクアセスメントにおいて、エアコンの据付や修理は、エアコンの知識、技術などの訓練を受けた作業者が、正常な心理状態の下で行うことを前提としている。しかし、使用者が自ら取り付け作業を行う場合や引越業者がエアコンを移設する場合などは、訓練を受けていない人が作業を行うことになる。さらに、急いで作業を行う場合は、ミスを誘発する可

能性がある。リスクアセスメントではヒューマンエラーを  $10^3$  として扱うが、このような場合は想定よりもヒューマンエラーが大きくなる可能性がある。

### ③ 想定しない事故事象

一般的に、リスクアセスメントでは、故意に行われるエアコン室外機への放火や、使用中の室外機の持ち去りなども想定外の事象である。

## 6.2 リスクアセスメントでの想定外に対する提言

現在、市場で普及している A2L 冷媒である R32 を使用したエアコンのリスクアセスメントも、想定外の事象を考慮して行ったわけではないが、実際の着火事故は殆ど発生していない。これは、以下の理由により、R32 が A3 冷媒よりも着火し難いためと考えられる。

- ① R32 の着火源は A3 冷媒に比べて種類が少ない。
- ② R32 の最小着火エネルギーは A3 冷媒と比べて大きい。
- ③ R32 の LFL は 13.5 % であり、A3 冷媒よりも大きいいため、可燃域が生成され難い。

一方、R290 は、着火源の種類が多く、最小着火エネルギーが R32 の約 80 分の 1 と小さいため容易に着火する。また、R290 は LFL が 2.02 % と小さいため容易に可燃域が生成される。従って、R290 エアコンの実用化のためには、前節に記載した想定外の事象を如何に排除するかが重要となる。

以下に、R290 を冷媒として実用化するための方策を提言する。

### ① エアコンの冷媒が適正に回収・処理されるための取り組みの強化

家電リサイクル制度を含めたエアコンの冷媒の回収・処理に関するインフラ整備を検討する必要がある。特に人が介在する場合の安全性を担保することが重要である。

### ② エアコン据付や修理を行う作業員への資格制度

可燃性冷媒を取り扱う作業に関して、講習や実地訓練を行う資格制度を整備する必要がある。この資格制度は、冷凍空調に関連する団体が行うことも考えられるが、公的な資格制度である方が望ましい。

## 7. まとめ

A3 冷媒を使用したエアコンの冷媒漏えいシミュレーション及びリスクアセスメントを行い、以下の知見を得た。

- ① 室内の冷媒漏えいシミュレーションを行い、漏えい冷媒のファン攪拌に関する Colbourne らの提案式の有効性を確認した。ただし、その提案式による攪拌では、吹出口近辺に可燃空間が生成されるため、着火源の状況によっては危険になる場合もあり得る。
- ② 室内における A3 冷媒の着火源を抽出し、冷媒漏えいシミュレーションで得られた可燃域の高さと室内の着火源の存在高さを比較し、室内の着火源を特定した。
- ③ 冷媒漏えいシミュレーションによって、ベランダでの可燃域の生成状況を定量化し、ベランダには多大な可燃域が生成される可能性があることを示した。ベランダには着火源が少ないため、リスクアセスメントの結果、危険という判断には至らなかったが、想定外の設置状況が発生した場合には非常に危険な状態になる可能性をはらんでいる。
- ④ 各ライフステージにおけるリスクアセスメントを行い、着火確率を許容値以下にするための、ライフステージ毎の安全対策を明確化した。今後、その内容を反映した日冷工規格を作成する予定である。
- ⑤ リスクアセスメントの想定外の事象の考え方を説明し、機器を安全に運用するための提言を行った。今後、A3 冷媒を使用したエアコンを製品化し、安全に運用するためには、エアコンの冷媒が適正に回収・処理されるための取り組みの強化とエアコンの据付や修理を行う作業員への資格制度の構築が必要である。

## 謝辞

本研究は、日冷工の参加企業であるパナソニック、ダイキン、東芝キャリア、日立ジョンソンコントロール空調、富士通ゼネラル、三菱重工サーマルシス

テムズ、三菱電機、シャープの各社の委員により実施された。またオブザーバーとして、堀和貴様、山口広一様、橋元任彦様、佐々木俊治様、藤利行様、川島充様のご協力を頂いた。ここに深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) K.Tamura,et.al.: "Ignition Sources at the Stage of Usage for Mini-Split Air-Conditioner using A3 Refrigerant", Proc. 15<sup>th</sup> IIR-Gustave Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, 1069 (2020).
- 2) A.Baba,et.al.: "Study on risk assessment of air conditioner using R290", Proc. the 25<sup>th</sup> IIR International Congress of Refrigeration, TS-405. 5 (2019).
- 3) K. Yamashita, T. Kato, S. Ikeda, S. Sakae, S. Ishihara, A. Kobayashi, H. Kainuma, T. Hasegawa, H. Deno, H. Nagai and K. Hosaka: "Risk Assessment and Safety Standards of Built-In Refrigerated Display Cabinet using A3 Refrigerants", International Symposium on New Refrigerants and Environmental Technology 2021, M162 (2021.10).
- 4) T. Imamura, "Progress achieved at Suwa University of Science", 2020 Progress Report Part 2: Safety and risk assessment of next-generation refrigerants, JSRAE, pp. 29-46 (2021). (in Japanese).