

自然冷媒(R290プロパン)を使用した 欧州向け鉄道車両用空調装置

井上武志*
Takeshi Inoue
祖川泰之*
Yasuyuki Sogawa
藤木克洋*
Katsuhiro Fujiki

新宮和平*
Wahei Shingu
小窪 聡†
Satoshi Kokubo

Railway Air Conditioning Systems for European Market Using Natural Refrigerant R290 (Propane)

*三菱電機㈱ 伊丹製作所
†三菱電機クリマット・交通システム㈱

要 旨

持続可能な社会の実現に向けて、冷媒規制の強化が進む中、鉄道空調業界では低GWP(地球温暖化係数)で環境負荷が少ない自然冷媒が求められている。R290(C3H8(プロパン))は優れた冷却性能と低環境負荷を備えた冷媒として注目されている反面、強燃性を持つため、その導入にはリスクアセスメントと火災対策が不可欠である。そこで三菱電機は、欧州規制に適合した安全かつ信頼性の高い鉄道車両用空調装置を開発し、R290を用いた冷凍サイクルを設計・検証した。省冷媒化設計、小型独立冷凍サイクルの複数搭載、ロウ付け部の最適配置、漏洩(ろうえい)冷媒の迅速排出機構を採用することで、環境性能と安全性を両立させ、鉄道車両用空調装置としての実用性を確立した。この成果は、ドイツ(ミュンヘン)の近郊車両用空調装置に採用され、鉄道空調業界でのR290の適用拡大に貢献するものである。

1. ま え が き

イタリアの子会社である三菱電機クリマット・交通システム㈱は、ドイツ(ミュンヘン)の近郊車両向けに自然冷媒R290を使用した鉄道車両用空調装置を受注した。鉄道車両向けにR290を使用した空調装置を受注するのは、日系企業として初になる^(注1)。近年、温暖化ガス削減の観点から冷媒の見直しが進む中、環境に配慮した冷媒の導入が求められている。この開発は、鉄道空調業界での環境負荷の少ない冷媒R290の採用を探るものであるが、R290は強い可燃性を持つため、冷媒漏洩や火災リスクを低減させる対策が必要になる。本稿では、欧州規制に適合する安全かつ信頼性の高いR290を用いた空調システムを開発するために用いた冷凍サイクルの設計とその安全対策について述べる。

(注1) 2024年9月19日現在、三菱電機調べ

2. 従来冷媒から自然冷媒への流れ、規制の変遷

持続可能な開発目標(SDGs)は、2015年に国連加盟国が採択した指針であり、2030年までに貧困、不平等、環境悪化といった課題の解決を目指す。17の目標と169のターゲットを掲げて、経済・社会・環境のバランスを図りながら、誰一人取り残さない社会の実現を追求するものである。そして企業はSDGs達成で重要な役割を担い、温暖化防止や環境汚染対策のためにビジネス戦略を見直す必要がある。特に、脱炭素化の推進やフロン冷媒規制によって、CO₂排出量の削減と環境負荷の低減が求められている。

欧州でのフロンガス規制(通称“Fガス規制”⁽¹⁾)は、HFC(ハイドロフルオロカーボン)、PFC(パーフルオロカーボン)、SF₆(六フッ化硫黄)の排出削減を目的として2006年に公布され、2015年に施行された。製品や機器への規制に加えて、HFCの総量規制によって販売量が段階的に削減されている。

モントリオール議定書キガリ改正(MOP28)は、オゾン層保護及び温暖化対策の一環として、フロン冷媒の生産・使用を段階的に削減する枠組みである。これによって、冷媒及び空調機器メーカーは、低GWP冷媒への移行を迫られている。

また、有機フッ素化合物であるPFAS(Per- and Polyfluoroalkyl Substances)は環境中に長期間残留し、生物への影響が懸念されており、欧州ではPFAS規制によって使用を制限している。2023年の新たな規制案では、一部のフロン冷媒も対象に含まれており、移行期間終了後は使用禁止になるため、今後の動向を注視する必要がある。

かつて国内の空調業界ではR22冷媒が主流であったが、モントリオール議定書改正に伴い、2020年までに生産が段階的に削減され、R407C及びR410Aへの移行が進んだ。家庭用・業務用空調ではR410Aが使用され、また、鉄道車両用空調では国内で407C、海外でR134aが使用されている。

近年の規制強化によって、家庭用・業務用空調では比較的GWPの低いR32への切替えが進んで、更なる低GWP冷媒へ

の転換も検討されている。また、欧州の鉄道業界では環境負荷軽減の観点から、自然冷媒であるR290を用いた空調装置の需要が拡大している。冷媒の比較については表1に示す。

表1-冷媒比較

	R22	R134a	R407C	R410A	R32	R290
用途	旧式エアコン	カーエアコン	エアコン(R22代替)	エアコン	エアコン	プロパンガス
ODP(オゾン破壊係数)	0.055	0	0	0	0	0
GWP	1810 ^(注2)	1430 ^(注2)	1774 ^(注2)	2088 ^(注2)	675 ^(注2)	0.02 ^(注3)
PFAS規制	対象外	対象	対象	対象外	対象外	対象外

(注2) IPCC第4次報告書による評価基準⁽²⁾
 (注3) IPCC第6次報告書による評価基準⁽³⁾

3. 可燃性冷媒のリスクマネジメント

2章に述べたとおり、空調業界では環境負荷低減を目的とした各種冷媒規制への対応が求められているが、R32やR290は可燃性の冷媒であり、特にR290は強燃性に分類される冷媒である。これらの可燃性冷媒を安全に使用するためには、着火に対する安全性の確保が必要である。

冷媒は、①急速漏洩、②着火源の存在、③可燃域の生成、の三つの条件が全て揃(そろ)った場合に着火する。そのため、可燃性冷媒のリスクアセスメントは、これら三つの条件のそれぞれの確率を掛け合わせることで着火率を求めて、各機器の安全判断基準に従って判定される。このリスクアセスメントは、製品の納入から廃棄(物流・据付け・使用・メンテナンス・廃棄)のライフサイクル全体にわたって評価されるべきである。

$$\text{冷媒への着火率} = \text{①急速漏洩} \times \text{②着火源の存在} \times \text{③可燃域の生成}$$

強燃性冷媒であるR290を使用する場合には、このリスクアセスメントに基づいて、十分な安全対策が必要である。具体的には、冷媒の急速漏洩の発生確率を低減させ、着火源との遭遇率を減少させ、さらに可燃域が生成されないように冷媒量の低減や漏洩冷媒の排出といった対策を講じる必要がある。

4. 欧州向け鉄道車両用空調装置の特徴

公共性の高い鉄道車両用空調装置にR290を導入するに当たって、漏洩冷媒の着火リスクへの対策は不可欠である。特に欧州では、安全対策の一環として、冷凍システムでの冷媒充填量の上限が欧州規格EN(European Norm) 378-1⁽⁴⁾によって規定されている。この上限値は、使用冷媒の可燃性(LFL: 下限燃焼限界)及び空調装置の設置環境に基づいて定められており、これを超える場合は、3章で述べたような使用環境に応じたリスクアセスメントに基づく追加の安全対策が求められる。

標準的な鉄道車両用空調装置は、図1に示すように、室内機と室外機が一体になったユニットタイプであり、車両の屋根上に搭載される。その冷凍サイクルは、関連部品が全てロウ付けによって接合された全密閉構造になっている。

本稿で述べるR290を使用した開発機は、この屋根上搭載型ユニットに、次の三つの安全対策を施したことを特徴とする。

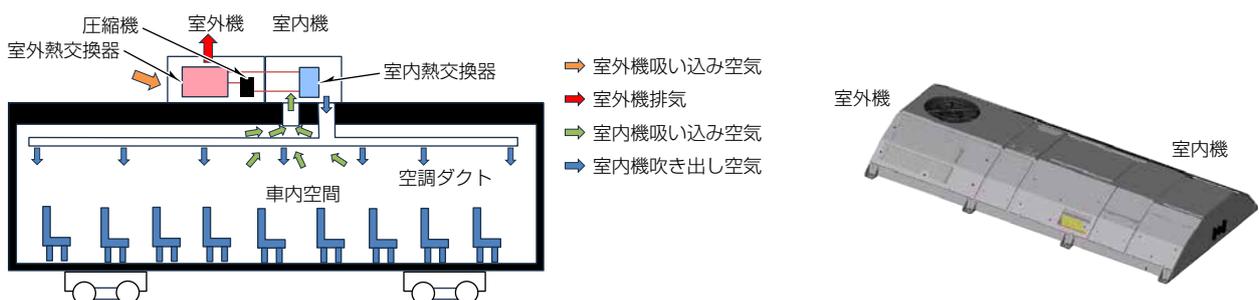


図1-屋根上搭載型ユニットタイプ鉄道車両用空調装置

4.1 小型冷凍サイクルのマルチ搭載化

R290を欧州向けの鉄道車両用空調装置に採用するに当たって、EN 378-1⁽⁴⁾への適合が求められる。本稿で述べる空調装置は、ドイツ向けの全長約17m、床面積約40m²の鉄道車両の屋根上に搭載されるものであり、その設置環境に基づいて、R290の充填限界m_{max}は次のEN 378-1に示された算出式によって求められる。

$$m_{\max} = 2.5 \times \text{LFL}^{5/4} \times h_o \times A^{1/2}$$

- ・ LFL(R290下限燃焼限界) : 0.038kg/m³
- ・ h_o(空調装置設置高さ) : 2.2m
- ・ A(設置空間の床面積) : 40m²

この計算によるとR290の充填限界は583gになる。

また、欧州地区のこのクラスの鉄道車両1両あたりに必要な冷房能力は一般的に約32kWであるが、従来のR407Cを使用した冷凍サイクルと同様の設計を適用した場合、1台の空調装置に必要なR290の量は、充填限界の約9倍に相当する5,000gになる。そこで、熱交換器の設計を改良し省冷媒化を実現した。具体的には表2に示すように、熱交換器のチューブを細管化しその配列ピッチを拡大することによって熱交換器の内容積を従来の約1/4に削減した。この設計によって冷媒量を削減し、従来と同等の性能を維持しつつ、1両あたりの必要冷媒量を2,000gまで抑制した。

さらに、この冷媒を独立した四つの小型冷凍サイクルに500gずつ分割して充填することで、EN 378-1の規定内に収めて、下限燃焼限界未満とした。これによって火災のリスクに対する特別な安全対策やリスクアセスメントが不要となり、空調装置の高い安全性を担保できた。

表2-熱交換器の諸元比較

	R407C(従来機)	R290(開発機)
チューブ径の細管化(mm)	外径6(厚さ0.21)	外径5(厚さ0.36)
チューブ列ピッチの拡大(mm)	13.00	17.32
チューブ段ピッチの拡大(mm)	15.00	20.00
フィンピッチの縮小(mm)	3.50	2.00
室内熱交換器容積(ℓ)	80.5	62.1
内チューブ内容積(ℓ)	10.1	2.6
室外熱交換器容積(ℓ)	98.3	62.0
内チューブ内容積(ℓ)	12.3	2.6

それに加えて、四つの冷凍サイクルを搭載する設計は、安全性確保だけでなく、次の点でも鉄道車両用空調装置に適している。

(1) 客室温度の快適制御

各冷凍サイクルのON/OFF制御によって、0%、25%、50%、75%、100%の5段階で冷房能力を調整できるため、客室温度を適切に維持することが可能になる。

(2) 高い冗長性と信頼性

4系統の独立した冷凍サイクルが高い冗長性を確保し、列車の安定運行にも貢献する。地球温暖化の進行に伴って外気温が高くなり、車内快適性向上のため、空調装置の重要性は一層高まっている。公共性の高い鉄道車両では、空調装置の冗長性の高さが列車の健全な運行に直結する重要な要素になる。

この開発機は、これらの要件を満たす設計になっており、安全性・快適性・信頼性のバランスを兼ね備えた空調装置である。

4.2 室内領域での冷媒配管のロウ付けレス化

空調装置内の室内領域で冷媒が漏洩した場合、リターン口と吹き出し口を介して室内領域と客室が連通しているため、漏洩した冷媒が客室へ流入する可能性がある。冷媒の充填量は安全基準で定められた限界値未満とするが、客室への冷媒漏洩リスクは可能な限り低減すべきである。

そこで、更なる安全性向上のために、図2に示すように空調装置内部のレイアウトの設計を改良した。従来は室内領域に含まれていた室内熱交換器のヘアピンチューブと配管の接続エリアを、新たに“第2室外領域”として設けて、さらに第1室外領域と第2室外領域に挟まれた室内領域を貫通する配管にはロウ付け接合のないシームレス配管を採用した。

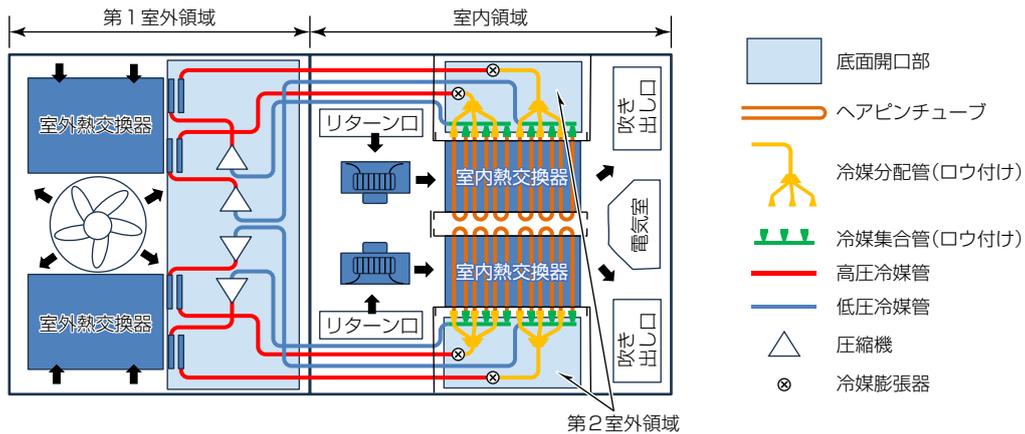


図2-冷凍サイクル部品のレイアウト図

この設計変更によって、冷媒漏洩リスクの高いロウ付け箇所を室内領域から完全に排除し、客室への冷媒漏洩リスクを極めて低く抑えることができる。

4.3 ロウ付けエリアでの漏洩冷媒の排出対策

ロウ付けエリアを室内領域の外に配置したものの、そのロウ付けエリアで冷媒が漏洩した場合でもエリア内に滞留しない対策が必要である。そこで、開発機ではロウ付けされた部品が配置されている領域の底面に開口部を設けた。図2に示す水色のエリア(底面開口部)がその開口部に該当する。

R290は空気よりも比重が大きいため、ロウ付けエリアで漏洩しても装置底面に移動し、開口部を通じて外部へ放出される。鉄道車両用空調装置は、屋根上に設置されて周囲は開放空間であり、漏洩した冷媒は拡散されて濃度が可燃領域まで上昇することはなく、安全が担保できる。

5. む す び

地球温暖化防止の観点から、鉄道車両用空調装置へのR290の適用に当たり火災対策を検討し、安全かつ信頼性の高い冷凍システムの設計方法を提案した。特に、欧州の冷媒規制EN 378-1⁽⁴⁾に基づいた充填量の抑制、小型冷凍サイクルのマルチ搭載化、室内領域のロウ付けレス化、冷媒漏洩時の迅速な排出機構など、実用性と安全性を兼ね備えた設計が有効であった。これによって、鉄道空調業界でのR290の適用拡大に向けた重要な一歩を踏み出すことができた。今後は、更に広範な実地試験と運用データを基に、安全性と効率の更なる向上を目指した研究を続けていく。

参 考 文 献

- (1) European Union : Regulation (EU)2024/573
<https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/573/oj/eng>
- (2) 気候変動に関する政府間パネル(IPCC) : 第4次評価報告書 (2007)
- (3) 気候変動に関する政府間パネル(IPCC) : 第6次評価報告書 (2021)
- (4) European Standards : EN 378-1 Refrigerating systems and heat pumps - Safety and environmental requirements - Part 1: Basic requirements, definitions, classification and selection criteria