カーボンニュートラル社会の実現に貢献する自然冷媒を用いた欧州向け家庭用冷温水ヒートポンプ

Overview of the Development of the Residential Air to Water Heat Pump Using Natural Refrigerant to Achieve Carbon Neutrality

福島 秀 *1
Shu Fukushima

藤野 哲爾 *2
Tetsuji Fujino

石田 有賀里 *3
Yukari Ishida

吉川 滉一郎 *1
Koichiro Yoshikawa

水谷 健太 *1
Kenta Mizutani

ヒートポンプ技術を用いた暖房・給湯は，化石燃料を用いた機器と比べて温室効果ガスの排出量が少ないため，カーボンニュートラル実現の主要技術として注目されている。また，地球温暖化係数が高くフッ素化合物である既存冷媒は，欧州では地球温暖化係数が極めて低く自然冷媒であるプロパン（冷媒番号 R290 で示される。以下，R290）への転換が進められている。しかし，R290 は強燃性であるため，高い安全性が求められる。そのような背景から，三菱重工サーマルシステムズ株式会社は，高い安全性と低騒音・高温 75℃出湯等の商品性を両立した新設計の R290 冷媒採用ヒートポンプ室外機 Hydrolution EZY の開発を行った。

1. はじめに

ヒートポンプは冷媒の状態変化を使って熱を移動させるため，燃焼機器と比較した際に同じエネルギーで多くの熱量を得ることができる。また電力を用いるため再生可能エネルギーとの親和性が高い。一方で地球温暖化防止の観点から，2024 年に欧州で施行された F-gas 規制では，Air to Water ヒートポンプ機（空気の熱エネルギーを利用して水を加熱/冷却する機器，以下，ATW 機）の場合，2027 年に冷媒の地球温暖化係数（Global Warming Potential 以下，GWP）を 150 未満に，2035 年にはハイドロフルオロカーボン（hydrofluorocarbon 以下，HFC）冷媒の使用自体を禁止することが規定されている。従来の ATW 機では HFC 冷媒 R32 を使用しているが，GWP が 675 と高く，冷媒変更が急務である。

そのような背景の中，欧州では ATW 機の冷媒として GWP が 3 であるプロパン（R290）への転換が進められている。主な冷媒の特性を表 1 に示す。R290 冷媒の特性として高い凝縮温度の運転により，出湯温度を向上させ，また優れた効率を維持することができる。ただし，R290 は強燃性であるため，漏洩した場合の火災等のリスクを極力低減する設計が必要となる。今回，三菱重工サーマルシステムズ株式会社はリスクアセスメントを通し，高い安全性を確保し，従来のATW機の課題とされる出湯温度の低さと騒音に対して，冷媒特性の活用や騒音源であるファン・圧縮機への諸対策により，これらの課題を解決した家庭用ヒートポンプ冷温水機を開発した。

*1 三菱重工サーマルシステムズ株式会社 空調機技術部
*2 三菱重工サーマルシステムズ株式会社 マーケティング室 主席技師
*3 三菱重工サーマルシステムズ株式会社 空調機技術部 主席技師

表1 主な冷媒の比較

	R410A	R32	R290
GWP (Global Warming Potential)	2088	675	3
燃焼クラス	A1(不燃性)	A2L(可燃性)	A3(強燃性)
臨界温度(℃)	71.3	78.1	96.7
45℃での圧力 (MPa)	2.73	2.79	1.53
冷凍能力(R32=100)*	91	100	54
COP(R32=100)*	98	100	104
冷媒密度(kg/m^3)*	34.6	25	11.7

*蒸発温度 5℃, 吸入過熱度 5k, 凝縮温度 45℃, 圧縮効率 0.7 とした場合

2. Monobloc システムの採用

欧州における家庭向け暖房システムでは，ボイラ等の熱源機で生成した温水を室内機に循環させる方式が一般的である。室内機としてはラジエータによる空調に加え，床暖房システムが広く利用されている。これらの温水供給の熱源をヒートポンプに更新する際，比較的省工事で済むシステムが Monobloc システムである。

Monobloc タイプのシステム図を示す(図 1)。従来型ATWシステムは冷媒と水の熱交換を行う水熱交が室外機の外部に設置されているのに対し，Monobloc は室外機内部に配置されている。これにより，Monobloc は従来型と比較して室外機が大型化するとのデメリットはあるものの，冷媒配管の内蔵によりシステム全体としては省スペース化を実現でき，また現地工事が水配管のみであるため作業が容易であるとのメリットがある。そして，最大のメリットは R290 冷媒を使用する場合は，現地据付け工事時に不適切な作業による冷媒漏洩リスクがない安全性を備えていることである。

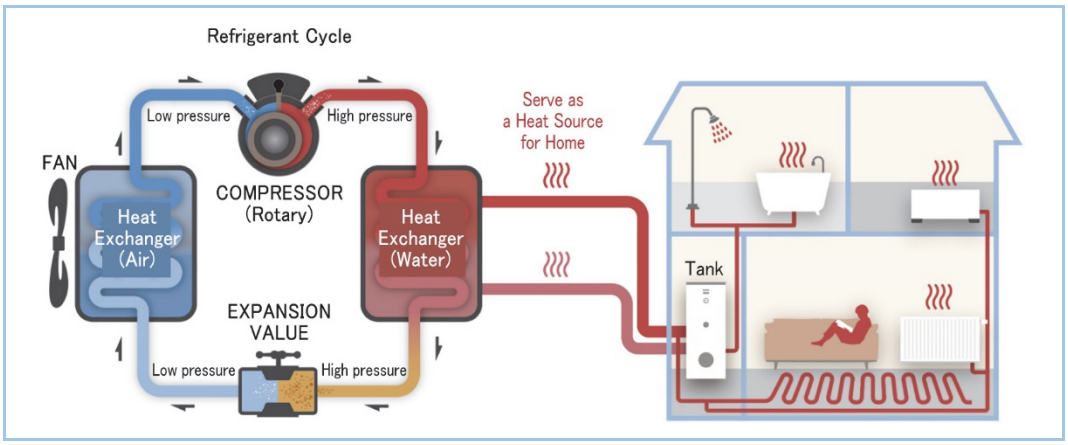

図1 Monobloc システムの概要

3. R290 冷媒に対するリスクアセスメント

前述のとおり，R290 冷媒は強燃性を有するため，製品ライフサイクル全般にわたる安全性の確保は大きな課題である。そのため，安全法規・規格の遵守に加え，社内安全基準を策定し，ユニット仕様に組み込むこととした。社内基準の策定にあたり，危険事象の特定を目的としたリスクアセスメントを行った。

3.1 リスクアセスメントの進め方

社内有識者と欧州販売拠点と共同で組織した作業グループを立ち上げ，製品のライフサイクルを輸送・保管，据付け・試運転，使用，修理，廃棄の 5 つに分類，それぞれの段階に対してリスクアセスメントを実施した。強燃性冷媒採用時の最大リスクは冷媒漏洩に伴う火災である。冷媒の着火には以下の 3 つの条件が重なる必要がある。①冷媒漏洩の発生②冷媒濃度が着火濃度

2.1vol%以上となる可燃領域の生成③着火源の存在。作業グループごとに，これらのリスクが発生する事象を網羅的にリストアップし，製品のハードウェア・ソフトウェア・教育等での対策を策定した(図 2)。本報では，据付け・試運転，使用，修理段階におけるリスクアセスメントによる危険事象抽出とその対策及び，教育インフラを紹介する。

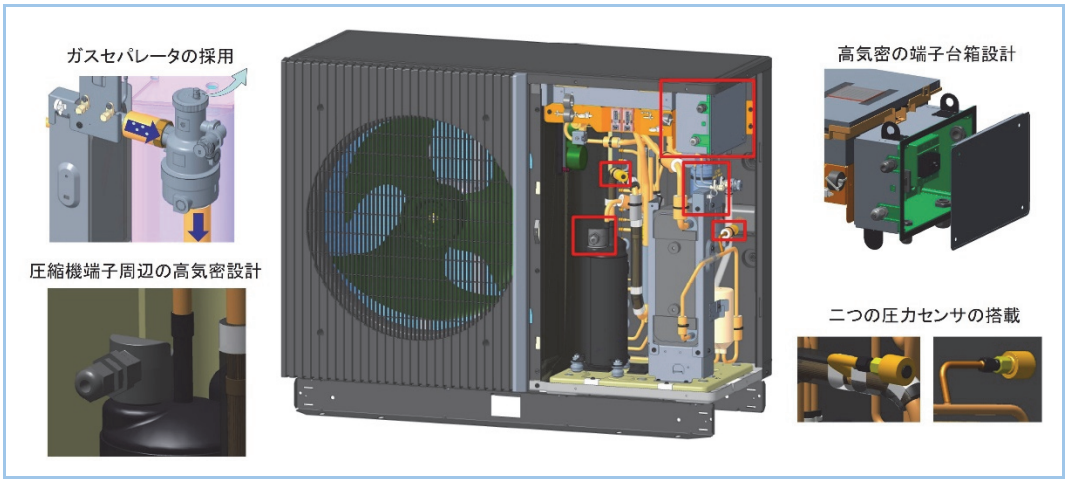

図2 安全対策のユニットへの反映

3.2 据付け・試運転段階での危険事象と対策

ユニットを据付け場所(住宅)まで輸送したのち，据付け業者により据付け及び試運転が行われる。

(1) 据付け場所の選定が不適切であると，冷媒漏洩時の冷媒滞留による着火濃度到達や周囲の着火源からの着火リスクが高まる。そのため，半地下や機械室などの換気が不十分な場所に対して据付け禁止とするなどの厳しい据付け制限を設けた。また，後述する冷媒漏洩シミュレーションの結果を基に，冷媒漏洩時に着火濃度に至る可能性のあるユニット周囲領域を特定し，その領域に発火源となりうるものを設置しないよう案内・教育を実施することとした。

(2) 据付け作業や修理作業中のリスク低減は作業者の熟練度に依存しており，製造者での管理が難しい。そのため，作業者が冷媒漏洩に迅速に気付けるように，作業時には冷媒検知器を携行するよう案内・教育することとした。

(3) 据付け作業において，電源と室外機を配線接続する際に作業内容を誤ると短絡により着火源となるリスクが生じる。電源短絡時に周囲の冷媒濃度が着火濃度未満であれば冷媒に着火しないため，配線を接続する端子台は新設計の高気密端子台箱に設置することとした。気密性の確保により漏洩した冷媒が端子台付近に滞留し着火濃度に至るリスクが大幅に低減される。

3.3 長期間の使用による危険事象と対策

長期間の使用は，運転振動による配線の擦れや経年劣化による短絡リスクが懸念される。

(1) 機能品の配線接続が不適切である場合，ほこり等が端子部に堆積し短絡に至る可能性がある。そのため，機械室内に設置される圧力センサや膨張弁などの機能部品については，配線と機能部品が一体となったものを採用し，短絡によるリスクを低減した。

(2) 圧縮機端子は冷媒回路周辺に搭載する部品として最も高い電流が流れるため，故障時のリスクが他部品に比べて高いと考えた。そこで，圧縮機端子部を密閉性の高いカバーで覆い，当該部が着火濃度に達しないよう対策を講じた。

(3) 冷媒と水の熱交換を行う水熱交器において破損が発生した場合，冷媒が水回路を介して室内に到達する恐れがある。そのため，水回路内の冷媒を水回路外に排出する機能を持つガスセパレータをユニット内に搭載した。ガスセパレータにはカバーを取り付け，冷媒が機械室内の下部に流れるようにした。

(4) リレーなどの一部の電子部品は通常使用時では問題とはならない微小スパークが生じる可能性があり，着火濃度の冷媒が充満した環境下ではリスクとなる。そのため，スパークのリスクがある機能部品（リレー及び圧力スイッチ，サーモスタット等）については通常使用時に発火する恐れのない防爆認証取得品を採用した。

(5) 冷媒回路内に二つの圧力センサを搭載することにより，運転中の冷媒圧力の変動を綿密に監視し，異常を迅速に検知することを可能とした。

3.4 修理段階での危険事象と対策

ユニットに異常が発生した際に，サービスマンが現地に赴き修理を行う。

(1) 冷媒回路中の機能品を交換する際，まず冷媒回路から冷媒を取り除く必要がある。この作業手順が不適切であると冷媒漏洩リスクが増加する。このため防爆設計された冷媒回収機を用いた作業手順について動画や資料を作成し案内・教育を行うこととした。

(2) 冷媒回収した後に圧縮機などの機能品を交換する際，従来冷媒機では配管同士のろう付け部のろうを外して，配管を取り外す。しかし，冷媒が冷媒回路から完全に抜けていない状態でのろう外しはリスクを伴う。そのため，機能部品交換時には冷媒配管をカットして取り外し，その後ろう付け部のろう外しをする手順とした。これにより，ろう外し時には冷媒回路が開状態となっているため，冷媒残留リスクが大幅に低下した。

3.5 教育インフラ検討

強燃性である R290 製品を市場に投入するにあたり，リスクアセスメントチーム，法規調査チーム，契約チーム，教育トレーニングチームの各チームにて，販売体制・契約事項の整理と各作業者向けの教育プログラムを作成した。教育は紙面及び動画を用いて実施する。

4. 冷媒漏洩の実機検証と冷媒漏洩シミュレーション

リスクアセスメントにより，冷媒漏洩時のシミュレーションを実施した。シミュレーション結果では機械室内は密閉度が高いため，漏洩後 1 時間以上経過しても着火濃度 2.1vol%を下回らないこと，及び噴出する冷媒により機械室内の圧力が 180Pa 程度上昇することがわかった。機内の圧力が上昇すると，着火源リスクのある端子台箱や圧縮機端子部への冷媒侵入リスクが上昇する。

その対策としてベース（底板）にφ60 の排出孔を設置することとした。冷媒は空気より比重が大きいため，排出孔から抜けることで機械室内の圧力上昇を抑制できる。またファンによって機械室内の漏洩冷媒を攪拌・排出することで，約 10 分で機械室内の冷媒濃度を着火濃度の 1/2 である 1.05vol%未満とできることがわかった（図 3，図 4）。サービスマンが現地に到着するまでに着火濃度を下回るため，安全である。またベースにφ60 の孔を開けることで，ユニット下側に冷媒検知器をかざすことにより，据付け・サービス時に機械室内に冷媒が漏れているかの確認が容易になる。

またファンによる漏洩冷媒の攪拌は室外機周囲の可燃領域が形成されることを最大限防ぐ効果があることも分かった（図 5）。

シミュレーション結果により対策内容の有効性は確認できたため，それらの対策を具備した実機確認を実施した。その結果，ファンの攪拌により，冷媒濃度が冷媒漏洩終了後，8 分程度で 1.05vol%まで低下することを確認し，解析の妥当性を検証することもできた。また，電源端子台箱と圧縮機端子カバーについても着火濃度 2.1vol%には達せず安全性が担保されていることを確認した。

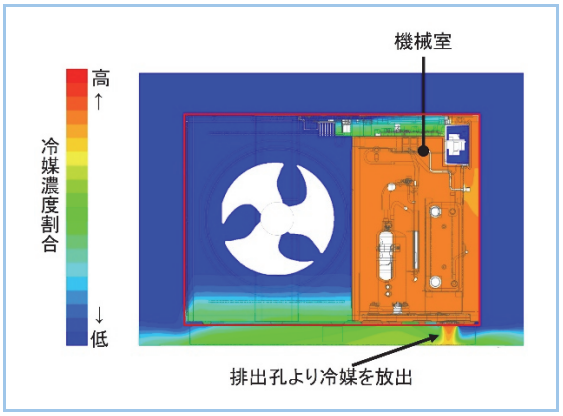

図3 ユニット内の冷媒濃度分布

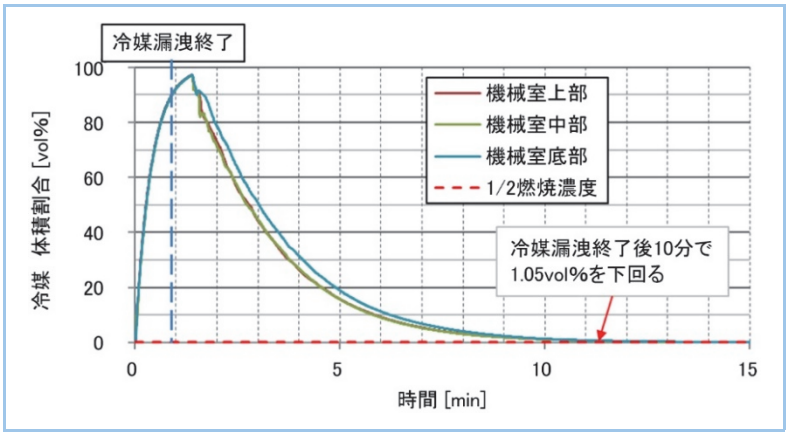

図4 ファン稼働時の冷媒濃度の推移

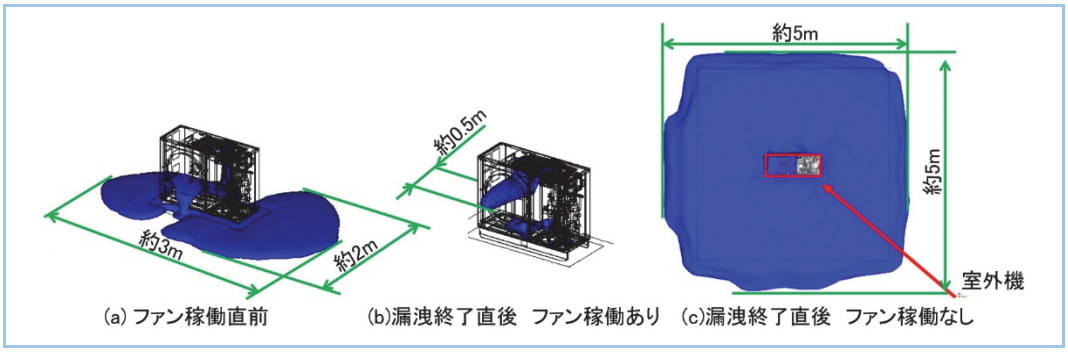

図5 室外機周囲の冷媒濃度 1.05vol%領域(俯瞰図)

5. 商品性向上技術

ヒートポンプ冷温水機として求められる性能及び安全性に加え，市場競争力を向上させるため以下の機能追加に取り組んだ。

5.1 低騒音化

ヒートポンプ冷温水機は住宅の壁面など使用者に近い環境に設置されることが多く，ボイラ対比騒音が大きくなる傾向があることから，低騒音化に取り組んだ。ユニットの主要な騒音源として，ファンと圧縮機の 2 つが挙げられる。まず，ファンを現行機対比で大型化し，同一風量時のファン回転数を抑えることで低騒音化を実現した。次に，圧縮機の騒音対策としてベースと専用ゴムダンパーのみで接続されたサブベース上に防振ゴムを介して圧縮機を搭載した。この二重防振構造により圧縮機の振動及びその伝播を抑えて騒音を低減した。更に，従来機とは異なり圧縮機を覆う箱型パネルと，そのパネル内側全面にも吸音性の高いインシュレーションを貼付した。これらの対策により，現行機と比較して，最大能力時の騒音値を 7dB 低減した(図 6)。

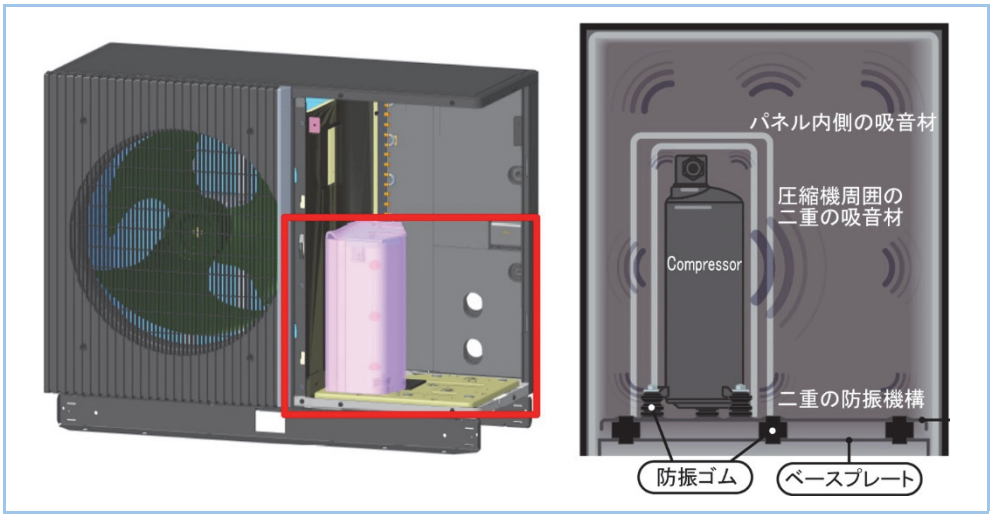

図6 低騒音化のための構造

5.2 高温出湯 75℃

ヒートポンプ冷温水機はボイラ代替として採用されることが多いため，ボイラに近い高温出湯が求められている。また，高温出湯はタンクに溜めるエネルギー増加によるタンク小型化，レジオネラ等への衛生対策でも有利になる。R290 冷媒の特性として，従来の R32 冷媒と比較して低圧で高凝縮温度を実現可能である。よって，最大出湯温度を従来の R32 冷媒機の 60℃に対し，R290 冷媒の新機種では冷媒制御と R290 冷媒用として最適化した圧縮機により，室外温度-25℃～43℃の広い範囲で 75℃の高温出湯を可能とした。

5.3 欧州向けデザイン

本開発機の販売先である欧州では性能や価格に加えて特にデザイン面の要求が強い。新たな顧客層を獲得するため，本開発機は従来機からデザインを刷新し，欧州住宅に調和する黒色とした。

ユニット前面のファンガードはユニット外観の印象に大きな影響を与えるため，シルバーの縦ラインをアクセントとする樹脂ファンガードを採用した。斜め方向からはファンが見えにくい構造や前面パネルの縦ラインと並行する凹凸形状が特徴で，多様な設置環境に調和しつつも，力強く印象的な外観デザインを実現した(図 7)。

図7 製品外観

5.4 その他の特徴

(1) 欧州期間効率性能(エネルギークラス)で最高ランク A+++(床暖条件)を実現した。

(2) R290 冷媒採用と冷媒量の削減により，冷媒封入に対する CO_2 換算で，従来比 99.8%削減した。

(3) 従来機種との仕様比較を表 2 に示す。

表2 従来機種との仕様比較

	従来機種	開発機種
型式	FDCW71VNX-W	FDCM71VNX-P
冷媒種類(封入量)	R32(1.84kg)	R290(0.85kg)
最大騒音値	69dB(A)	62dB(A)
暖房期間効率	4.50(A++)	4.61(A+++)
最大出湯温度	60℃	75℃
運転範囲	-20～43℃	-25～45℃

6. まとめ

地球温暖化係数の低い自然冷媒 R290 を採用した家庭用ヒートポンプ冷温水機の開発を行った。R290 は強燃性であり製品に高い安全性が求められるため，法規・安全規格に加え，製品ライフサイクル全体のリスクアセスメントを実施し，その内容を製品設計と販売・教育資料に反映した。また，安全対策については解析と実機試験を行い，効果を定量的に評価した。更に，商品性向上のために高温出湯，低騒音化やデザインの刷新等を行った。

この開発を通して R290 を用いたヒートポンプ室外機全般の開発基盤を築いた。本開発にて 6.0kW 機と 7.1kW 機を先行市場投入するが，今後は大能力機の開発や異なる仕様の製品開発を行い，ラインナップを拡充していく。今後も自然冷媒プロパンを採用したユニットの継続的な開発を進め，カーボンニュートラルへ貢献していく。