

“日本初”R454C 冷媒を用いた 空気熱源循環加温ヒートポンプの開発

“First in Japan” Development of an Air-source Heat Pump Using R454C Refrigerants to Heat Circulation Water



岡田 有二*¹
Yuji Okada

森 孝親*²
Takachika Mori

黒岩 透*²
Toru Kuroiwa

産業分野の省エネルギー化に貢献し、環境に配慮した低 GWP 冷媒を採用した空気熱源循環加温ヒートポンプの製品開発を行い、マイナス 20℃の低外気温でも 75℃の出湯温度と、定格 COP において 3.3 という高い効率を実現した製品を発売した。また開発した製品を実際に生産設備洗浄用温水の加熱源として導入し、その経済性・環境性効果を確認した。既設のガス炊き蒸気ヒータとのハイブリッドシステムにて導入し、ベース熱負荷を本製品が賄うことで、ランニングコスト及び CO₂ 排出量を約 50%低減できる見通しであり、環境負荷の大幅な低減が見込まれる。

1. はじめに

機械部品工場の切削加工後の脱脂工程や部品洗浄工程などの生産プロセスでは、温水を作るため化石燃料を使用した蒸気ボイラや電気ヒータが広く使われているが、最近では優れた効率により省エネルギーに貢献するヒートポンプが用いられるようになってきている。ただし、従来の高温ヒートポンプの多くは、工場の排温水から熱回収する水熱源式のヒートポンプであり、冷温水を循環させる水配管やポンプを設置する必要があるため設置コストが嵩み、更に設置スペースの確保が困難という課題がある。

また、従来のヒートポンプは GWP 値が 1430 から 2090 の冷媒が使用されており、フロン排出抑制法の施行に伴い、地球温暖化への影響を低減する観点から冷媒の低 GWP 化が求められていた。

これらヒートポンプ導入の妨げとなっている設置コスト及びスペースの課題を解決するために、熱源を空気とし、低 GWP 冷媒を採用し環境負荷の低減を図るとともに、高いエネルギー効率と外気温 -20℃でも 75℃の温水取り出しを実現する循環加温ヒートポンプ“Q-ton Circulation”の開発を行った。

2. 開発機の概要

表1に本製品の仕様を、図1に外観を示す。“Q-ton Circulation”は、低 GWP 冷媒である R454C を使用し、外気温 -20℃から 43℃まで 75℃の温水供給が可能な空気熱源式の循環加温ヒートポンプである。本製品の加熱能力及び COP を図2に示す。定格条件である外気温 25℃では COP3.3 という高い値となる。

一般的に空気熱源式ヒートポンプは外気温の低下とともに加熱能力が低下するが、本製品

*1 三菱重工サーマルシステムズ(株)空調機技術部 主席技師

*2 三菱重工サーマルシステムズ(株)空調機技術部

は二段圧縮サイクルの採用により外気温度 -20°C でも 30kW の加熱能力が確保可能である。更に、外気温度 -20°C であっても 75°C の出湯温度が可能である。



図1 製品外観

表1 仕様

型番		EQA401
出力	kW	40 (Max.50)
定格 COP	—	3.3
出湯調整域	$^{\circ}\text{C}$	40~75
作動域	出湯温度 $^{\circ}\text{C}$	40~75
	外気温度 $^{\circ}\text{C}$	$-20\sim 43$
寸法	mm	2048×1350×720
冷媒	—	R454C (10.8kg)
流量	m^3/h	1.72~9.00

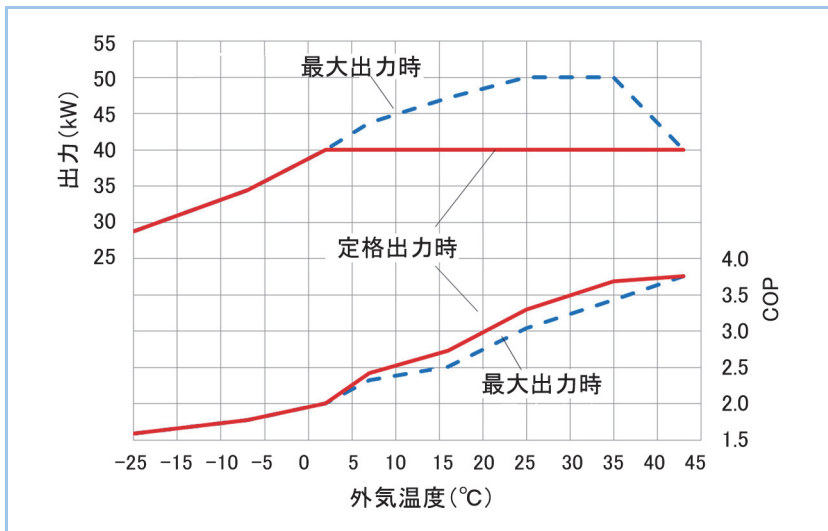


図2 COPと外気温度の関係

3. 低 GWP 冷媒の選定について

本製品に採用する冷媒の選定では、まず製品の要求仕様である、外気温度 -20°C から 43°C の範囲にて出湯温度 75°C を実現することが可能な低 GWP 冷媒とした。図3に各種冷媒の臨界温度、沸点及び GWP を示す。前述の製品要求仕様を満足するためには、既存冷媒である R407C と同等の性能を有することが望ましいと考えた。今回、これを満足する低 GWP 冷媒として R454C と R455A が候補に挙げられた。表2に候補冷媒の物性値を示す。

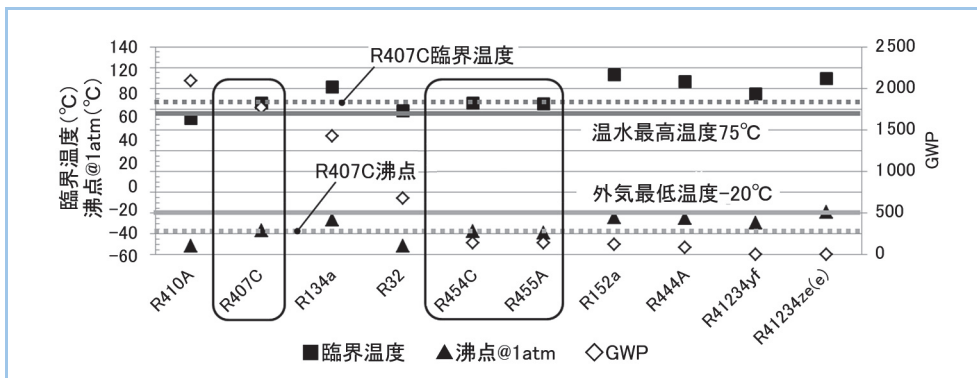


図3 候補冷媒の物性値

表2 候補冷媒の物性値 (NIST REFPROP Ver.10 を使用)

冷媒	R407C	R454C	R455A
GWP	1 620	146	145
混合比 (wt %)	R32/R125/R134a 23/25/52	R32/R1234yf 21.5/78.5	R1234yf/R-32/R-744 75.5/21.5/3
ASHRAE 分類	A1	A2L	A2L
沸点@1 Atm(°C)	-36.6	-37.8	-39.2
臨界温度(°C)	86.1	85.7	85.2

次に、空気熱源式ヒートポンプでは重要となる温度グライドについて比較を行った。

図4に R32/HFO 混合冷媒の温度グライドを示す。R455A の温度グライドは 11.9°C であり、温度グライドが大きく、低外気温時に蒸発熱交がフロストしてしまうおそれがある。一方 R454C の温度グライドは 7.7°C であり、R407C の温度グライド 6.2°C に対し差は小さく、R407C と同等の扱いが可能である。

以上の結果より、採用する低 GWP 冷媒として R454C を選択した。

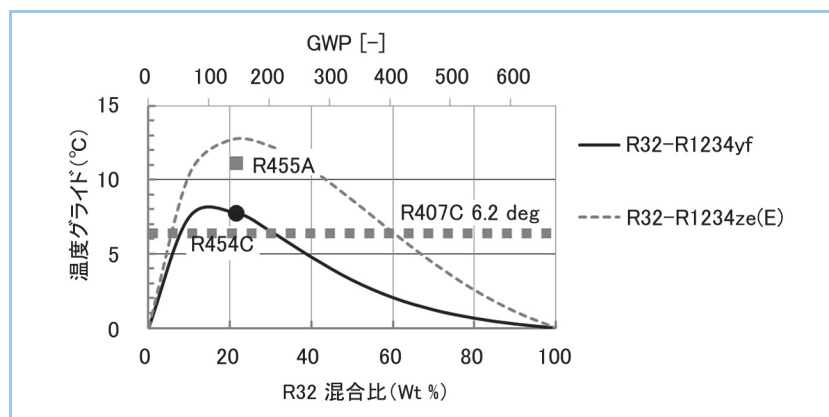


図4 混合冷媒の温度グライド

(NIST REFPROP Ver.10 を使用して計算 使用条件:蒸気, 飽和ガス温度5°C)

4. 二段圧縮サイクル

前述のようにヒートポンプは温水生成の場面で電気ヒータや蒸気ボイラなどの代替技術として高い効率をいかし幅広く使用されている。一方、本製品のように空気熱源式にて低外気温時に高温出湯を実現しようとすると冷媒の圧縮比が非常に大きくなり、効率の低下や出湯温度が制限されてしまうという課題がある。この課題に対し、2台の圧縮機を直列に接続した二段圧縮サイクルを本製品では採用した。

図5に本製品の冷媒回路図、及び、単段圧縮サイクル時と二段圧縮サイクル時の圧縮機の効率特性について示す。単段圧縮サイクルでは圧縮機1台当りの圧力比が大きいため圧縮機の効率が低下するが、二段圧縮サイクルを採用することで圧縮機1台当りの圧縮比を小さくすることが可能となり、更に、圧縮機として最も効率が良いポイントにて運転することが可能となる。結果、単段圧縮サイクル時に比べ 13% の効率向上を得られた。

また、インバータ圧縮機を2台搭載することで、運転効率が最も良い値となるように、冷媒の中間圧力をインバータで制御している。更に、ガスインジェクションを行うことで低外気温での加熱能力の低下を抑制している。

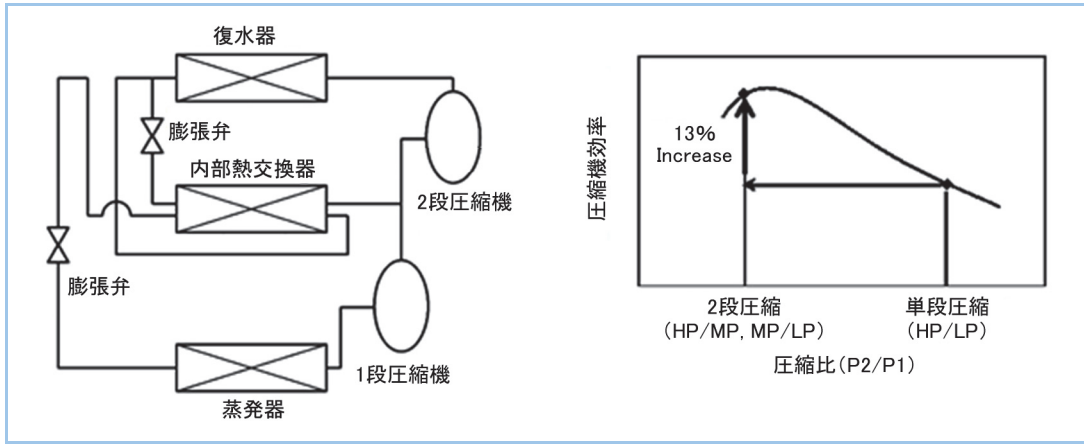


図5 冷媒回路図及び単段・二段圧縮時の圧縮機効率比較

5. 二段圧縮サイクル用圧縮機の最適化

一般的に二段圧縮サイクルにおける低段側圧縮機は、エコマイザサイクルの特性から、高段側圧縮機に対し大きな押しのけ量が要求される。一方、R454C 冷媒は密度が低いため、従来の圧縮機を使用した場合には、押しのけ量が不足し加熱能力低下を招く。圧縮機を大型化・大容量化することで、この能力ダウン分を補うことは可能だが、圧縮機のコストアップに繋がるという課題がある。

この課題を解決するために本製品では、三次元スクロール圧縮機(1)を採用し、大容量化を図ることで低密度による能力低下を防止した。外形寸法を変更せずにこれらの要求を満足させるため、以下の構造設計を行った。

- (1) 三次元スクロールの採用 (3D スクロール)
- (2) スクロールインボリュートの再設計
- (3) 回転軸バランスの最適化
- (4) 吐出ポートの拡大

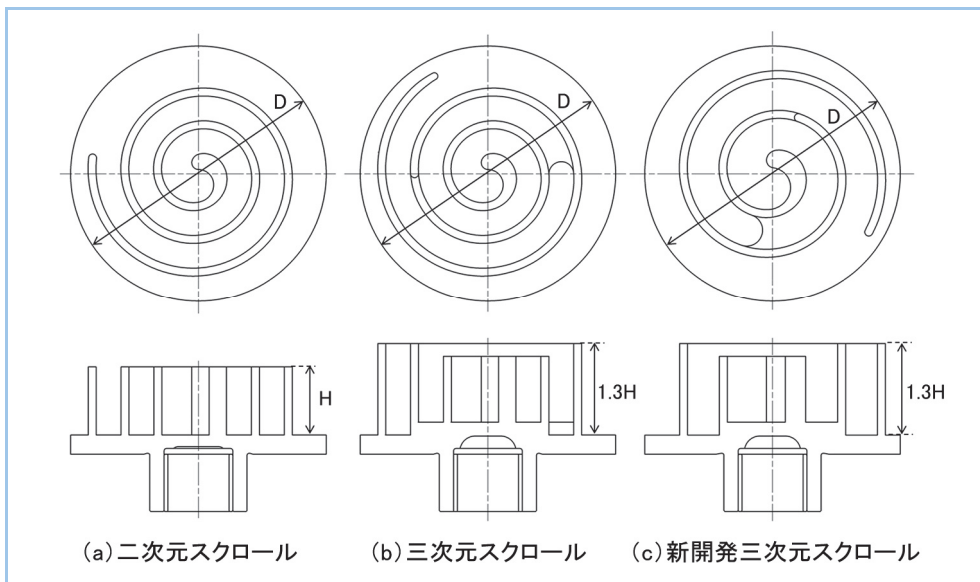


図6 スクロールの概要

図6にスクロールの概略を示す。(a)の二次元スクロールに対し、(b)の三次元スクロールでは1.4倍の押しのけ量を実現したが、大容量のシステムに対応するため、押し退け量の更なる拡大が必要であった。通常ラップ高さの増長と径の拡大が押しのけ量増加に用いられるが、耐久性の低下や外形寸法の増大を引き起こす可能性があった。そこでスクロールインボリュートの見直し、及び

巻き数の見直しにより更なる押し退け量の拡大を実現した。図6(c)に新しいスクロールインボリュートを示す。巻き数を減少させることで内容積比を最適化した。単純に押し退け量を増加させるだけの変更を行うと、一段目の圧縮行程で過圧縮となってしまう効率の低下を招くが、スクロールインボリュート及び巻き数見直しを行った結果、押し退け量を増加させながら圧縮比の低減が可能となった。

6. 信頼性・安全性・サービス性

本製品で採用している R454C 冷媒は、家庭用エアコンや業務用エアコンに一般的に使用されている R32 と同じ微燃性 (A2L) 冷媒である。ただし、R32、R1234yf と異なり、特定不活性ガスに指定されていないため、冷媒の取扱いに関しては、リスクアセスメントを構築し、安全性を確保した。冷媒を回収・充填する際に必要な届出の内容や、屋内設置の場合には冷媒漏えい検知器と換気装置の設置が必要になることをお客様へ説明している。

また、法定冷凍トン数は3トン未満 (2.99 トン) であり、高圧ガス保安法の対象外となることから設置工事時やサービス時の事前の届出は不要である。

サービス面においては、24 時間遠隔監視システムの採用により、不測のサービス対応においても、現地での復旧活動が迅速に対応可能である。

7. 省エネルギー性

2018 年9月から食品工場の洗浄槽加温を目的としたフィールドテストを実施中である。2018 年9月から2019年3月までの運転データから、年間でのランニングコストとCO₂排出量の低減効果を予測した結果を表3に示す。電気料金は本製品が消費した電力量の実測値から算出した。また、本製品導入前のランニングコストは、本製品の加熱能力から既設ボイラの燃料消費量を逆算することで省エネルギー効果の比較を行った。フィールドテストにおけるシステム図を図7に示す。

表3 ランニングコスト及びCO₂排出量の予測結果

			Gas boiler	Heat pump	Reduction
エネルギー消費量	Gas	N m ³	369		
	Electricity	kWh		828	
ランニングコスト		×1000JPY	24	12	49.8%
原油換算エネルギー消費量		GJ	15	8	46.1%
CO ₂ 排出量		ton-CO ₂	0.8	0.4	53.0%

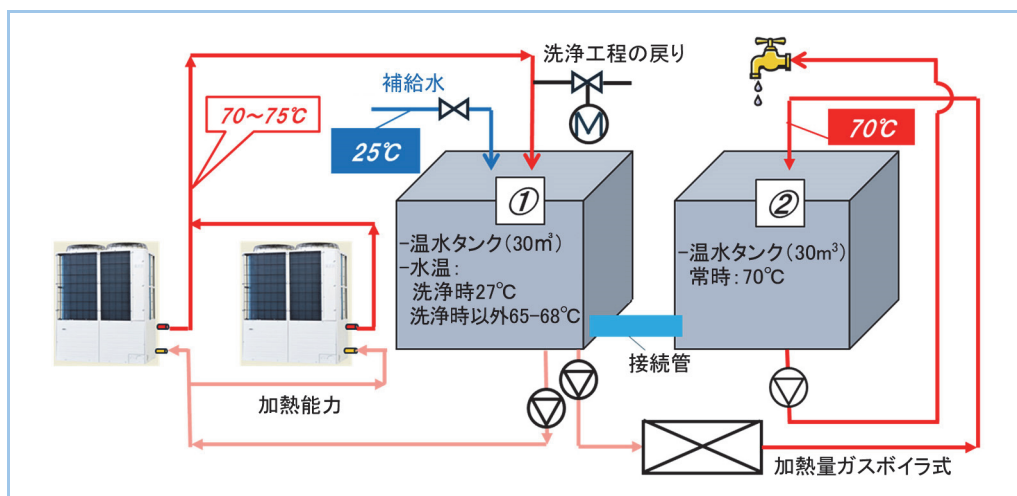


図7 食品工場洗浄槽加温システムの比較

結果、ランニングコストは従来比 50%となり、半減し、CO₂ 排出量は従来比 53%となった。今後は、連続運転の時間を伸ばすことで COP の向上が期待でき、年間ではランニングコスト、CO₂ 排

出量ともに、約 54%まで低減が見込める。

また、原油換算エネルギー使用量も4割以上の低減が可能であり、改正省エネ法によりエネルギー削減が義務付けられているお客様にも導入のメリットがある。

8. まとめ

- (1) GWP 値 146 の冷媒 R454C を日本で初めて採用し、環境負荷を大幅に低減した。
- (2) 二段圧縮冷凍サイクルの採用により、外気温 -20°C から 43°C の幅広い範囲で 75°C の高温出湯が実現した。また、定格 COP3.3 の高い効率で大幅な省エネルギーを実現し、産業及び業務分野でのヒートポンプ導入の機会が増加すると考えられる。
- (3) 空気熱源方式により排温水の確保やポンプの設置・配管工事を不要とした簡単設置を可能とし、設置導入の妨げとなっていた設置コスト及びスペースの課題を解決した。

参考文献

- (1) M. TANIGUCHI, H. SATO, Y. TAKASU1 and Y. KIMATA, Development of Large Capacity 3D Scroll Compressor for First Stage of Two-stage Compression System, 24th International Compressor Engineering Conference at Purdue, July 9-12, 2018, Paper 1232.