

CO₂ヒートポンプ給湯機用 スクロータリー二段圧縮機の開発

Development of Two Stage Compressor for CO₂ Heat Pump Water Heater



佐藤 創^{*1}
Hajime Sato

木全 央幸^{*2}
Yoshiyuki Kimata

堀田 陽平^{*2}
Yohei Hotta

後藤 利行^{*3}
Toshiyuki Goto

水野 尚夫^{*4}
Hisao Mizuno

小林 寛之^{*5}
Hiroyuki Kobayashi

省エネルギー・地球温暖化防止の点から、CO₂ヒートポンプ給湯機の普及が拡大している。本報では、業務用CO₂ヒートポンプ給湯機向け高効率圧縮機の開発について紹介する。CO₂冷媒の課題である高差圧・高作動圧力を解決でき、かつ、ヒートポンプ給湯機の運転特性に最も適した圧縮機構として、開発機では世界で初めてロータリー式とスクロール式を組み合わせた二段圧縮構造を採用した。これにより、高い信頼性に加え、幅広い条件での高効率運転が可能となった。本開発機を搭載した業務用CO₂ヒートポンプ給湯機“キュートン”は、従来機対比大幅な加熱能力とエネルギー効率の向上を得られ、これまで困難とされてきた寒冷地へのヒートポンプ給湯機導入を達成することができた。

1. はじめに

省エネルギー・地球温暖化防止の観点から、給湯・暖房の分野では従来のオイル炊きによる加熱からヒートポンプを用いた加熱への移行が進みつつある。自然冷媒であるCO₂は、地球温暖化係数が低く、不燃性であることに加え、冷媒物性上高温給湯が可能である。このため、家庭用を中心にヒートポンプ給湯機用冷媒として広く普及してきており、その動きは、業務用、産業用へも広がりつつある。一方、CO₂冷媒は作動圧力が高く、圧縮機の漏れ損失、機械損失が大きくなるため、ヒートポンプ給湯機の性能向上には、これら損失の低減が不可欠である。

筆者らは、上記課題を解決する業務用CO₂ヒートポンプ給湯機に用いる新構造圧縮機を開発した。開発機は、スクロール機構とロータリー機構を組合せた二段圧縮構造を採用することで、圧縮機の漏れ損失、機械損失の低減を可能にした。さらに、中間ガスインジェクション機構により、幅広い運転条件で高加熱能力、高効率を達成した。

本報では、今回開発した新構造二段圧縮機“スクロータリー圧縮機”の高効率化、高信頼性化に向けた取組みと、スクロータリー圧縮機を搭載した業務用CO₂ヒートポンプ給湯機について紹介する。

2. スクロータリー圧縮機の構造

今回ヒートポンプ給湯機用の冷媒として採用したCO₂と、ほかの代表的な冷媒との特徴比較を表1に示す。現在冷凍空調機器で一般的に使用されている代替フロン冷媒(HFC冷媒)は、地球温暖化係数が大きいいため、地球温暖化係数の小さい冷媒への転換が冷凍空調業界における課

*1 技術統括本部名古屋研究所 工博

*2 冷熱事業本部空調機技術部

*3 技術統括本部名古屋研究所

*4 冷熱事業本部空調機技術部グループ長

*5 冷熱事業本部品質保証部部長

題の1つになっている。一部の機器ではアンモニアや炭化水素が冷媒として採用されているが、これらの冷媒は毒性や燃性を有することから、冷凍空調機器全般に広く普及するには至っていない。これに対し、CO₂は燃性がなく、毒性も小さいことに加え、冷媒物性上高温の給湯に適していることから、家庭用ヒートポンプ給湯機分野では普及が進みつつある。一方、CO₂冷媒はほかの冷媒と比べて作動圧力が高く、これにより漏れ損失や機械損失が増加するため、これらの損失を低減して高効率、高信頼性を維持できる圧縮機構造を策定することが最大の課題となる。

表1 各種冷媒の特徴比較

		地球温暖化係数	毒性	燃性	圧力(20℃) (MPa)
代替フロン冷媒 (HFC 冷媒)	R410A	2090	小	なし	1.34
	R134a	1430	小	なし	0.47
自然冷媒	NH ₃ (アンモニア)	1 以下	大	小	0.76
	C ₃ H ₈ (プロパン)	3	小	大	0.74
	CO ₂ (二酸化炭素)	1	小	なし	5.63

筆者らは、上記課題を解決すべく、圧縮段数、ハウジング圧力、圧縮形式の点から開発機の基本構造を検討した。表2に圧縮機構造の違いによる性能比較を示す。これにより、業務用 CO₂ 給湯機向け圧縮機に最もふさわしい構造として、下記(1)~(3)を採用した。

(1) 二段圧縮構造

CO₂冷媒の高圧と低圧の圧力差は、従来のHFC冷媒と比べて数倍大きくなる。このため、差圧により隙間漏れが増加し、圧縮機効率が低下するだけでなく、軸受など摺動部に作用する荷重も増加し、圧縮機信頼性を低下させる。このため、二段圧縮構造を採用し、一段あたりの差圧を低減させることが、効率、信頼性の確保の面で有効である。

また、開発機は、システム性能及び給湯能力を増加させるため、ガスインジェクション機構を設置することとした。その場合、二段圧縮構造を採用することで、一段目と二段目の間にインジェクションでき、単段圧縮で圧縮室内へ直接インジェクションする場合に比べて、インジェクション時の混合損失を低減できる。

(2) 中間圧ハウジング

前述のとおり、CO₂冷媒の運転圧力は従来のHFC冷媒よりはるかに高いため、ハウジング内の圧力はハウジング厚さ及び圧縮機重量に大きな影響を与える。その影響は、業務用途や産業用途のように圧縮機が大型になるほど大きくなり、圧縮機の小型軽量化のためにはハウジング設計圧力を低くすることが求められる。このため、開発機ではハウジング圧力として中間圧を採用し、ハウジングに吐出圧力が直接作用しないようにすることで、圧縮機の小型軽量化を実現した。

表2 圧縮機構造による性能比較

圧縮段数	ハウジング 圧力	圧縮形式		ハウジング 肉厚	ガス インジェクション	信頼性		効率		
		低段側	高段側			低段側	高段側	低段側	高段側	
単段	吐出圧			-	-					
	吸入圧			+	-					
二段	中間圧	スクロール	スクロール	+	++	+ *2	+ *2	+	++	
		スクロール	ロータリー	+	++	++	-	+	+	
	ロータリー	スクロール	+	++	++	++	++	++		
	吸入圧	ロータリー	ロータリー	+	++	++	-	++	++	+
		スクロール	スクロール	+	+ *1	+ *2	+ *2	+	++	
		スクロール	ロータリー	+	+ *1	++	-	+	+	
ロータリー		スクロール	+	+ *1	-	++	++	++		
ロータリー	ロータリー	+	+ *1	-	-	++	+			

*1 低段側と高段側の接続配管が必要
*2 シャフト中間部への給油ポンプ設置が必要

(3) スクロール機構とロータリー機構の組合せ採用

圧縮形式は圧縮機の性能・信頼性を決める最も重要な要素の1つである。特に二段圧縮機の場合は、低段側、高段側それぞれについて、運転特性に基づいて適切に圧縮形式を選択する必要がある。容積型圧縮機の圧縮形式としては、レシプロ式、スクリュー式、スクロール式、ロータリー式などが知られているが、本開発機では、ヒートポンプ給湯機の運転特性に最も適した圧縮機構として、低段側にロータリー式、高段側にスクロール式を採用した。世界初となるロータリー式とスクロール式の組合せ採用により、高い信頼性に加え、幅広い運転条件での高効率化が可能となった。

図1に開発機の構造を示す。本開発機は、スクロール式とロータリー式の両方の構造を有することから、以降“スクロータリー圧縮機”と称する。

本圧縮機は、中央にブラシレス DC モータを配置し、モータの上下に2つの圧縮機構を配置した。一段目のロータリー圧縮部はモータの下側に設置されており、アキュムレータを介して吸入管に接続している。二段目のスクロール圧縮部はモータの上側に設置されており、吐出チャンバを介して吐出管に接続している。

冷媒ガスはアキュムレータを通過した後、一段目圧縮室に吸入され、中間圧力まで圧縮される。圧縮されたガスはハウジング内に吐出される。インジェクションガスはハウジングに備えられたガスインジェクションポートよりハウジングに吸入され、一段目で圧縮されたガスと混合される。その後、二段目圧縮室に吸入され、吐出圧力まで圧縮される。圧縮されたガスはハウジング頂部の吐出管を通過して圧縮機外に吐出される。

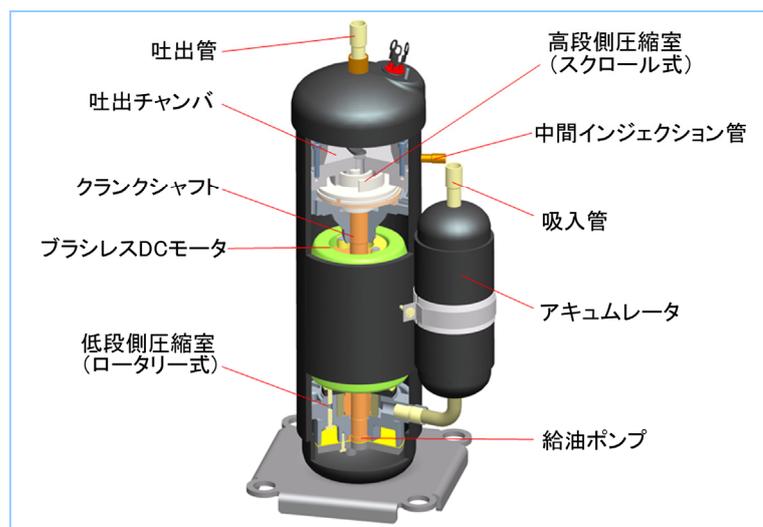


図1 スクロータリー圧縮機の構造

3. スクロータリー圧縮機の効率特性

新構造スクロータリー圧縮機の効率向上を検証するため、開発機と従来の単段スクロール圧縮機の効率比較を行った。図2にスクロータリー圧縮機と、従来の単段スクロール圧縮機における、運転圧力比に対する効率変化を示す。図2において、縦軸は圧縮機効率を従来機の圧力比3の効率で除した値である。従来機では、運転圧力比が大きくなると、漏れ損失及び機械損失が増加し、効率が著しく低下していたが、開発機では、スクロータリー二段圧縮構造の採用により、運転圧力比が大きくなっても効率の低下はわずかである。従来機と比較すると、圧力比3の条件で+15%、圧力比4以上の条件で+30%以上の効率向上が得られ、幅広い運転条件で大幅な高効率化を達成することができた。

次に、スクロータリー圧縮機を搭載したシステムでの性能向上を評価するため、外気温度、入水温度の異なる4つの条件について、従来機の単段サイクルと、二段圧縮ガスインジェクションサイクルとで性能比較を行った。図3に従来機を搭載した単段サイクルに対するスクロータリー圧縮

機を搭載した二段圧縮ガスインジェクションサイクルの給湯能力、エネルギー効率 (COP: Coefficient of Performance = 加熱能力/消費電力) の向上量を示す。いずれの条件でも従来サイクルからの改善を得ているが、外気温が低い条件ほど、ガスインジェクションによるガスクーラの冷媒流量増加と、二段圧縮による圧縮機効率改善によって、改善量は大きくなり、条件 D では、約 25% の加熱能力向上、約 50% の COP 向上を得ることができた。

以上より、開発機は寒冷地でのヒートポンプ給湯・暖房や冷凍・冷蔵など、温度差の大きい条件で運転される用途で特に高い優位性があることを確認した。

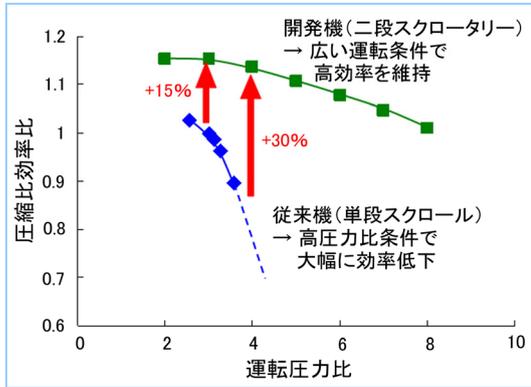


図2 運転圧力比に対する効率変化

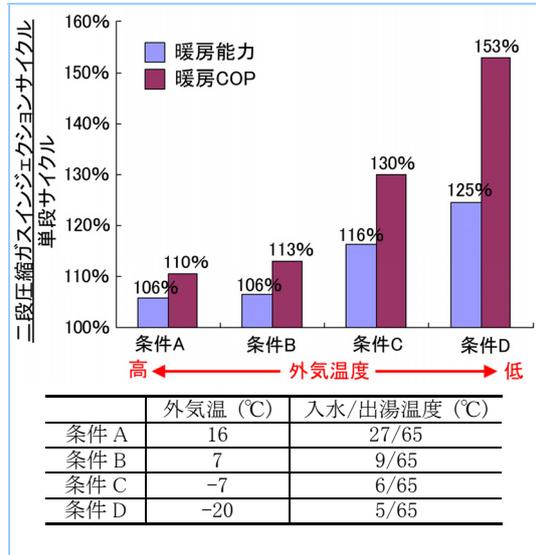


図3 運転条件ごとの性能向上量

4. 圧縮機信頼性確保に向けた取組み

CO₂ 冷媒の圧力差は従来の HFC 冷媒と比べて数倍大きいので、軸受など摺動部に作用する荷重も従来冷媒対比大幅に増加する。このため、これまで開発されてきた CO₂ 冷媒用圧縮機には、摺動面へのコーティングや、軸受面圧低減など、信頼性確保のために様々な対策が必要であった。しかし、本開発機は二段圧縮構造を採用することで、1段あたりの差圧を従来の HFC 冷媒に近いレベルにまで低減しており、軸受など摺動部への負荷も HFC 冷媒用圧縮機と同等にまで低減させることが可能となった。

二段圧縮構造特有の課題として、一段目、二段目双方の圧縮機部への適切な給油がある。図4にスクローター圧縮機における潤滑油と冷媒ガスの供給経路を示す。

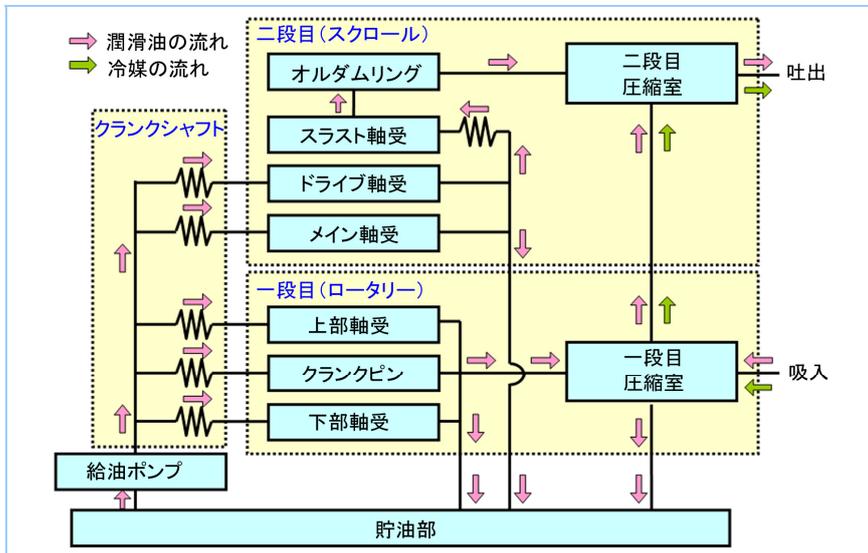


図4 圧縮機内の冷媒と潤滑油の流れ

本開発機はクランクシャフトの下端部に容積式のオイルポンプを備えている。圧縮機底部の貯油部よりオイルポンプによりくみ上げられた潤滑油は、クランクシャフト内部に設置された給油孔を通して一段目、二段目それぞれのジャーナル軸受に給油され、その後、一部の潤滑油はほかの摺動部や圧縮室内に供給される。圧縮機の信頼性を確保するためには、全ての摺動部に適切な量の潤滑油を供給する必要があるが、本開発機では、各軸受の必要給油量と、供給経路の圧損を考慮して、オイルポンプの容量と供給経路の寸法諸元を最適化した。これにより、全ての摺動部に適切に給油することが可能となった。

5. スクローターリー圧縮機の業務用給湯機への適用

今回開発したスクローターリー圧縮機は、当社で新規開発した業務用 CO₂ ヒートポンプ給湯機“キュートン”に搭載されている⁽¹⁾。キュートンの特徴は以下のとおりである。

- ・ スクローターリー圧縮機を用いた二段圧縮＋中間圧ガスインジェクションサイクルを採用。
- ・ 定格加熱能力(30kW)を外気温度-7℃まで維持可能
- ・ 業界最高水準の COP4.3(中間期条件)を達成
- ・ 外気温度-25℃の極寒条件でも 90℃給湯が可能

図5に外気温度に対する加熱能力、COP の変化を示す。従来のヒートポンプ給湯機は、外気温度の低下につれて加熱能力も低下してしまうことから、寒冷地での導入に制約があった。しかしながら、本システムでは、スクローターリー圧縮機を用いた二段圧縮＋中間圧ガスインジェクションサイクルの採用により、定格条件のみならず、低外気温度条件でも高い加熱能力と COP を達成し、これまで困難であった寒冷地へのヒートポンプ給湯システムの導入を可能にした。

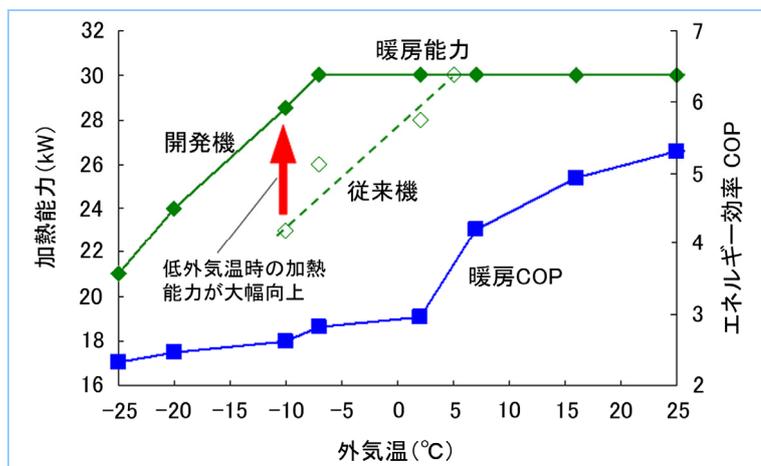


図5 外気温に対する加熱能力、COP の変化

6. まとめ

業務用 CO₂ヒートポンプ給湯機向け圧縮機として、スクローターリー二段圧縮機を開発した。世界初となるロータリー式とスクロール式の組合せ採用、及び中間圧ガスインジェクションの採用により、高い信頼性に加え、幅広い条件での高効率運転が可能となった。本開発機を搭載した業務用 CO₂ヒートポンプ給湯機“キュートン”は、従来機対比大幅な加熱能力と COP の向上を得られ、これまで困難とされてきた寒冷地へのヒートポンプ給湯機導入を達成することができた。今後も、圧縮機の高性能化を推進し、省エネルギーで地球にやさしい製品をお客様に提供していく所存である。

参考文献

- (1) 冷熱事業本部ヒートポンプ事業推進室, 外気温度-25℃まで使用可能な業務用CO₂ヒートポンプ給湯機“キュートン”を開発, 三菱重工技報 Vol.48 No.4 (2011) p.86~88