論説・随筆

フロンフリー空調技術の新展開

New Approaches to the Air-Conditioner without CFC

藤巻誠一郎・藤野 利弘・星田 敏博・中里 孝

Seichiro FUJIMAKI

Toshihiro FUJINO

Toshihiro HOSHIDA

Takashi NAKAZATO

藤巻誠一郎

- 1952年3月生まれ
- 1977年4月、東京ガス㈱入社、1989年6月より商品開発部業務用商品開発センター所属、現在に至る
- 東京ガス㈱商品開発部（〒105 東京都港区芝浦1-16-25）

藤野利弘

- 1952年11月生まれ
- 1978年4月、大阪ガス㈱入社、1989年10月より商品技術開発部小型ガスエアコンプロジェクト所属
- 大阪ガス㈱商品技術開発部（〒550 大阪府西区千代崎3-2-95）

星田敏博

- 1953年9月生まれ
- 1978年4月、東邦瓦斯㈱入社、1985年4月、総合技術研究所・住設機器技術担当、現在に至る
- 東邦瓦斯㈱総合技術研究所（〒476 東海市新宝町507-2）

中里 孝

- 1947年11月生まれ
- 1970年4月、東京三洋電機㈱入社、1988年6月より三洋電機㈱空調冷機事業本部研究センター所属、現在に至る
- 正員、三洋電機㈱空調冷機事業本部（〒370-05 群馬県邑楽郡大泉町坂田180）

1. はじめに

最近の世界的なキーワードである地球環境問題を解決する技術開発として、フロンフリー空調技術が注目されている。フロンフリー空調機としては、従来から吸収冷凍機があり、なかでも水-臭化リチウムを作動媒体とするものの技術開発が進んでいる。空調分野では、1968年にガス直焚吸

収冷温水機（二重効用）が開発されて以来7.5 RTという小容量クラスまで二重効用化により高効率化が図られ、現在では多くのビルで利用されている。しかし、吸収式ではビル空調の大きな流れである個別分散空調に対応できるパッケージエアコンクラスのもの商品化が難しく、新たな冷暖房サイクルの開発が望まれていた。

このような状況の中で、ブルマイヤサイクルを利用した熱駆動形ヒートポンプが空調システムとして注目されている。

ブルマイヤサイクルを利用した熱駆動形ヒートポンプは、ヘリウムガスを作動流体とし、都市ガスなどの高温エネルギーを駆動源として冷暖房を行うもので、1918年に Rudolph Vuilleumier が提唱した「熱により圧力変化・熱移動を引き起こす方法（一般呼称：VM サイクル）」⁽¹⁾を利用したものである。理論上、このサイクルは再生器を持つ閉サイクルであるため、スターリングサイクルと同様に高効率・低公害が最大の特徴と言える。

VM サイクルは極低温を生成する方法として知られており、小形の冷凍装置として主に開発が進められてきた⁽²⁾。このため、冷暖房用途での温度範囲における報告は少ない^{(3)~(5)}。そこで、筆者らはVM サイクルを利用した空調機を試作し、性能評価を行うとともにシミュレーションにより性能予測を行ったので⁽⁶⁾、その結果を踏まえVM サイクルヒートポンプについて概要を説明する。

2. VM サイクルヒートポンプの原理

VM サイクルヒートポンプの基本構成は、図1に示すように、適切な位相差を持たせて連結した二つのディスプレイサ（ピストン）を有する密

閉容器で、容器内には作動流体として流動抵抗の小さいヘリウムガスが封入してある。

ここで、加熱器を加熱しながらディスプレイサのクランク軸を回転させると、容器内の高温再生器および低温再生器において温度こう配が生じ、高温、中温、低温の三つの空間ができる。一方、各空間は熱交換器によって互いに接続されているため圧力はほぼ等しく、ディスプレイサの移動に伴う三つの空間の容積比変化によって、容器内全体のガス圧は連続的に変化する。すなわち図2の動作原理に示すように、ディスプレイサの動きによりヘリウムガスが（高温・低温）再生器により加熱・冷却され、ヘリウムガス全体が昇圧したり減圧したりする。

この昇圧時には、ヘリウムガスの温度が上がり、中温熱交換器に放熱し、減圧時にはヘリウム

ガスの温度が下がり加熱器および低温熱交換器から吸熱する。

以上のように、密閉した容器内のヘリウムガスを加熱・冷却することで圧力変化を発生させ、中温空間部に設けた中温熱交換器への放熱を利用し暖房、給湯を行い、低温空間部に設けた低温熱交換器からの吸熱を利用して冷房を行うことができる。以上の動作が、クランク軸の1回転中に行われる。この結果、クランク軸を連続的に回転（毎分1000回転）させることにより、放熱・吸熱作用が連続的に行われ空調機としての働きが得られる。

3. VM サイクルヒートポンプの構造

著者らが試作した VM サイクルヒートポンプの構造を図3に示す。シリンダとディスプレイサと二つの熱交換器および再生器を一組とし、これら二組がL字形に配置され、各々のシリンダが連結管で接続されている。二つのディスプレイサは、クランク機構によって連結され、90度の位相差を持って運動する。クランク軸には電動モータが接続されており、起動と能力を変化させるための回転数制御に用いられる。ただし、低温側のディスプレイサロッドが出力ピストンの働きをするため、ロッド径を最適化することにより、自立運転時は電動モータの助けが不要となる。

燃焼器は、都市ガスを燃料とし空気予熱器を持つスワールバーナである。空気予熱器は、コルゲートフィンによって十分な面積を確保している。

図1 VM サイクルヒートポンプの基本構成

図2 VM サイクルヒートポンプの動作原理

加熱器は、耐熱合金を用いた多管式熱交換器で、フィンが装備していない。3個の中温および低温熱交換器は、ともに細管のシェルアンドチューブ方式でステンレス鋼を使用している。また、高温側と低温側の再生器は焼結金網で出来ており、現在は同一形状のものを使用している。

クランクケースは、球状黒鉛鋳鉄製でバッファ室を兼ねている。従って耐圧容器とするため円筒形となっている。

全体として、システムの外部に動力を取り出す必要がないことから、完全な密閉構造に出来る。

4. VM サイクルヒートポンプの性能

4.1 サイクルについて VM サイクルは、先に述べたように再生器を備え、各空間での等温圧縮・膨張と等容加熱・冷却行程を基本とし、作動温度範囲で凝縮しない気体を作動流体として使用する閉サイクルである。

理想サイクルの T - S 線図を図 4⁽³⁾ に示す。2本の等温変化の線と2本の等容変化の線に囲まれた二つのサイクルによって構成され、各々の面積は等しく、高温と中温で囲まれたサイクルは、中温と低温で囲まれた冷凍サイクルの駆動源となっている。それぞれのサイクルにおいて、等容冷却時に外部に捨てる熱を再生器によって蓄熱し、等容加熱時に熱再生することでカルノーサイクルと等価になる。なお、サイクルポイントは図2の作動原理に示すポイントと対応する。図示された記

図3 VM サイクルヒートポンプの構造図

号を用いて理論効率 COP_T を表すと、次式のようになる。

冷房時 COP_{TC}

$$= Q_C / Q_H = \int P_C dV_C / \int P_H dV_H$$

$$= T_C (T_H - T_M) / T_H (T_M - T_C)$$

暖房時 $COP_{TH} = (Q_{M1} + Q_{M2}) / Q_H$

$$= \int P_M dV_M / \int P_H dV_H$$

$$= T_M (T_H - T_C) / T_H (T_M - T_C)$$

ただし、 P_C, P_M, P_H : 低・中・高温室の圧力

V_C, V_M, V_H : 低・中・高温室の容積

しかし、実際の機器においては各種の損失を伴うため、理論効率よりも低い効率となる。効率の低下をもたらす損失は、熱損失（伝導損失・再生器損失・シャトル損失）や圧力損失および機械損失である。

4.2 シミュレーションによる性能予測 コンピュータによるシミュレーション・コード⁽⁷⁾（質量・運動量およびエネルギー保存則と理想気体の状態方程式、さらに再生器蓄熱材のエネルギー式を採用した多分割モデル、ただし、熱伝導ロスを経験値）による VM サイクルヒートポンプの性能予測結果を図5に示す。これは、低温側の排除容積が 400 cc 弱の試作機の例である。ただし、これらの値には燃焼器効率は含んでいない。

暖房時の成績係数は、 T - S 線図での高温側の入熱をすべて利用できるのと、加熱器からの熱伝導ロスが暖房に回収されるため、高い値を示している。しかし、熱伝導ロスは冷房時の効率を低下

図4 VM サイクルヒートポンプの T - S 線図

図 5 VM サイクルヒートポンプの性能予測結果

させるため、耐圧容器としての強度を保ちつつ、薄肉化を図る必要がある。

5. システムの特徴

5.1 高いシステム効率 VM サイクルは、理想的にはスターリングエンジンとスターリング冷凍機の組み合わせと同様な理論効率 (= カルノー効率) となるので高い効率が期待できる。暖房時にはヒートポンプサイクルにより、低温熱交換器から吸収した熱が加熱器で吸収した熱に加えられて中温熱交換器から放熱されるため、高いシステム効率が生まれる。また、外気温の低下の影響も圧縮式ヒートポンプに比べて小さい。現在開発中のシステムでは、目標 COP を暖房・給湯時 1.5、冷房時 0.8 としている。

5.2 低公害性 ガスの連続燃焼のため、クリーンな排気 (NO_x 値 150 ppm 以下, O_2 0% 基準) で騒音も小さくすることが可能である。また駆動部にかかる力が小さいため、この面からも騒音・振動が低レベルとなる。さらに作動流体にヘリウムガスを使用していることから、フロンによる環境汚染問題の心配もない。

5.3 冷房・暖房・給湯が同時に可能 冷水と温水が同時に取り出せるため、合理的な冷暖房・

給湯システムが構築できる。

5.4 メンテナンスが簡単で長寿命 ディスプレサ上下の圧力差が小さいため、駆動部品にかかる力はスターリングエンジンに比べ格段に小さく、無潤滑運転が可能である。したがって、オイル供給のためのメンテナンスが不要となる。また、燃焼器は外燃式のためメンテナンスが容易である。これらの理由から VM サイクルヒートポンプは長寿命が期待できる。

6. まとめ

VM サイクルヒートポンプは、地球環境問題に対応できる多くの特徴を持っている。またすでに開発の進んでいるスターリングエンジンの技術が応用でき、短期間での実用化が期待されている。しかし、三つの温度域が金属でつながっているため熱伝導ロスの低減が難しく、冷房時の COP がなかなか向上しない。また、小さな機器容積で冷暖房能力を出そうとすると、内部圧力、回転数を上げる必要がある。さらに効率を上げようとする高温空間の温度を上げなければならず、高圧容器としての安全性確保とともに耐熱材料などのコストの観点からも商品化の最適ポイントを見付けるのが難しい。

文 献

- (1) Vuilleumier, R., Method and apparatus for inducing heat changes, U.S. Patent No. 1275507, (1918).
- (2) Walker, G., *Cryocoolers Part I Fundamentals*, (1983), Plenum Press.
- (3) Eder, F.X., A thermally actuated heat pump, *Int. Journal of Refrigerator*, 5-2 (1982).
- (4) Kuehl, H.D., Richter, N. and Schulz, S., Computer simulation of a Vuilleumier cycle heat pump for domestic use, *Proc. 21st IECEC*, Paper No. 869125, (1986), 555.
- (5) 酒井・本田・川尻, ビルマイヤサイクルヒートポンプの研究, エネルギー・資源研究会第 8 回研究発表会講演論文集, (1989), 14.
- (6) 藤巻・寺田・ほか 4 名, ブルマイヤ・サイクルを用いた新冷暖房装置 DDHP の開発, 日本冷凍協会学術講演会講演論文集, (1990), 65.
- (7) 関谷・寺田, ブルマイヤサイクル機関のシミュレーションモデル, 第 68 期日本機械学会全国大会講演論文集, No. 900-59, Vol. C (1990), 273.

(原稿受付 1990 年 11 月 14 日)