

■ 技術賞内容紹介 ■

フロンを使わない次世代冷暖房給湯システムDDHPの開発

寺田 房夫*・吉田 昌司**

Fusao Terada Shoji Yoshida

川本 博史***・木村 淳一****

Hiroshi Kawamoto Jun-ichi Kimura

1. 開発の背景

大気の温暖化と、フロンガスによるオゾン層破壊に端を発した地球の環境問題は、世界の各国に劇的な対応を迫りつつある。

即ち、1989年5月の「オゾン層の保護に関するヘルシンキ宣言」において、先進諸国は、特定フロン¹⁾の2,000年までの全廃に合意している。

また様々な国際会議において、特にヨーロッパ諸国から、大幅なCO₂発生削減計画が提案されていることは周知のとおりである。

空調機器供給の当事者である筆者らは、これらの動きに重大な関心を有している。

現在のところ、電気式ヒートポンプの冷媒であるフロン-22は、特定フロンに指定されていない。しかし、その温室効果係数は小さいながら存在し、将来ともこれまでどおり使用できる可能性は微妙な段階にある。

また、CO₂排出問題について言えば、一次燃料の単位発熱量あたりのCO₂発生量は、その種類により異なる。大まかには、LNG : 石油 : 石炭 = 1 : 1.4 : 2 である。

従ってLNGを主原料とする都市ガスは、SO_x、NO_x排出が少ないことも相まってクリーンな燃料と言える。

もう一つの背景は、エネルギー使用の平準化である。電力の需要は、空調機器の運転によって夏にピークを示す。その一方、ガスの需要は夏に落ち込む傾向があり、冷房の一部をガスで行えれば、電力、ガスの需要の平準化に役立つ。

以上の観点から、以下に示すDDHPは、都市ガス

を燃料とし、高効率で低公害なため、これまで述べてきた諸問題を解決する手段として、まさにぴったりのシステムであり、社会的にも開発の意義は大きいと考える。

2. DDHPの紹介

2.1 概要

DDHP (Direct Drive Heat Pump) は、ブルマイヤサイクルという熱サイクルを利用した空調機である¹⁾。

これは密閉容器内のガスを加熱・冷却することによって生じる圧力変化を利用し、直接冷凍サイクルを動かし、空調をおこなうものである。電気や動力などへのエネルギー変換部分が少ないため、システムの効率が高くエネルギーの有効利用に役立つ。

また、このブルマイヤサイクルは、スターリングサイクルと似ており、スターリングエンジン技術の応用が可能である。

三洋電機は、通産省ムーンライトプロジェクトを通して、スターリングエンジンの研究開発を6年間行ってきた²⁾。また東京ガス、大阪ガス、東邦ガスも長年にわたりスターリングエンジンの研究を手がけてきた。

当初、一般的には超低温用の冷凍機器として開発が行われていたブルマイヤサイクルを、空調機器へ応用するにあたっては、これらの研究の成果が大いに活かされている。

2.2 構造と原理

DDHPは、2つのディスプレイサピストン/4つの熱交換器(加熱器、中温熱交換器2個、冷却器)/2つの再生器を有する密閉容器から構成され、その中には作動ガスとして、ヘリウムガスが約100気圧封入してある。(図-1参照)

再生器は熱トラップの働きをするため、容器内作動

* 三洋電機(株)空調事業本部研究センター所長

** 東京ガス(株)商品開発部 所長

*** 大阪ガス(株)都市エネルギー営業部 マネージャー

**** 東邦ガス(株)総合技術研究所 副所長

〒370-05 群馬県邑楽郡大泉町坂田180

* 1 : フロン-11, 12, 113, 114, 115

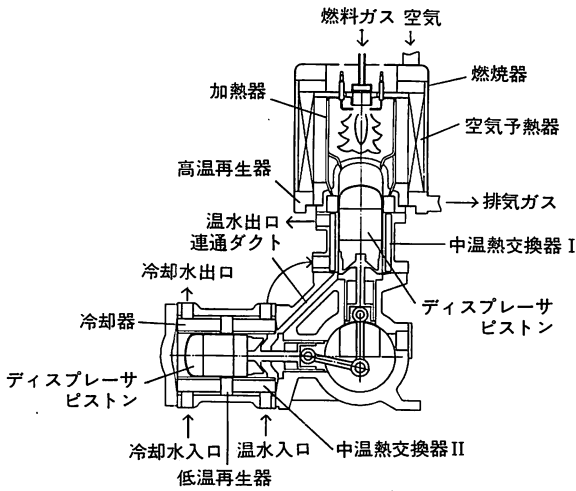


図-1 DDHPエアコン本体部概略図

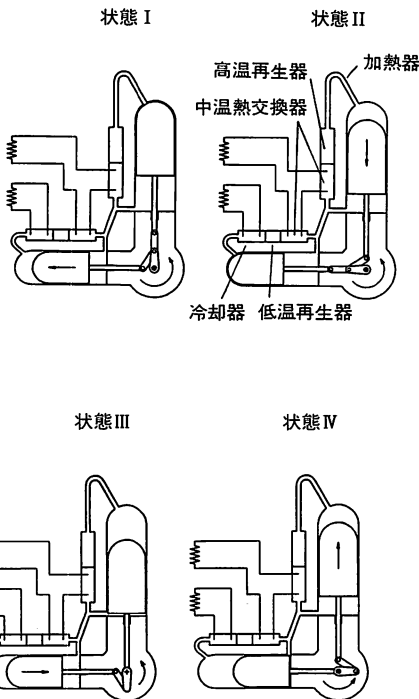


図-2 DDHPの動作

室は、高温空間、中温空間、低温空間の3つの温度レベルの空間に分けられる。また再生器は、ガスの通過に対してほとんど抵抗がないため、作動室全体のガス圧力は常に一様となる。

ここで、加熱器を燃焼器で加熱し、中温熱交換器、冷却器を循環水で冷却しながら、2つのディスプレイ

サピストンを90度の位相差（高温側先行）で動かすと、その動きに合わせて内部のガスが高温側⇔低温側へと移動し、作動室全体の圧力が増減（約90⇔110気圧）する。（図-2参照）

低温側ディスプレイサピストンが左端にくると、高温側ディスプレイサピストンは上から下へ動き、ガスは低温から高温側へ移動し平均温度の上昇と共に全体の圧力も上昇する。この圧力上昇によって中温空間の温度が上がり、その熱を中温熱交換器から温水として取り出す。（図-2、状態II）

また、低温側ディスプレイサピストンが右端にくると、高温側ディスプレイサピストンは下から上へ動きガスは高温側から低温側へ移動し、平均温度の下降と共に全体の圧力も減少する。この圧力減少によって低温空間の温度が下がるため、冷却水から熱を奪う。（図-2、状態IV）

同様に図-2、状態Iでは、中温熱交換器から温水が取り出せ、図-2、状態IIIでは加熱器から熱が入り込む。

DDHPはこれらの動作により、冷房、暖房・給湯が同時に可能となる。

2.3 開発技術

DDHPシステムの実用化のために、以下のような技術開発を行った。

(1) 高度のシミュレーション解析

熱交換器の内部を多数の要素に分割したシミュレーションを実施し、熱交換器の最適設計に利用した。

(2) 高負荷低公害燃焼器の開発

加熱器に熱を与える燃焼器は、コンパクトな高密度、高性能燃焼と、家庭用ボイラなみのクリーン排気（例えばNO_x150ppm）が要求される。

従って、燃焼室の形状を工夫し、火炎形状と加熱チューブのマッチングに配慮した。

(3) 駆動部のオイルレス化

ディスプレイサピストンリングや駆動部品のメンテナンスフリーを実現するため、グリースやシール材、軸受け部品などを、材料、形状の面から多数調査した。

(4) システム制御技術

専用マイコンを用いて、燃焼器、温度、回転数など多くのパラメータを同時に制御しながら、家庭用エアコン並みの使い易さを追求した。

2.4 特長

(1) 高いシステム効率

原理的にカルノーサイクルと等しい効率が期待で

きる。目標値としては、冷房COP:0.8, 暖房COP:1.5を決定した。特に暖房COPの高さが目につく。

(2) 冷房、暖房・給湯が同時に可能

冷房、暖房・給湯が同時にできるため、需要形態の複雑な、現代のオフィス、レストラン、家庭でのマルチ利用などに最適である。

(3) 低公害で環境にやさしい

作動ガスがヘリウムで、フロンを使わないためオゾン層破壊や地球温暖化への影響が小さい。

また連続燃焼のため、排気ガスはクリーンであり、圧力変動がゆるやかなため、低騒音で低振動運転が可能である。

(4) メンテナンスフリー

ディスプレイサ・ピストン上下の圧力差が少なく、機械駆動部分にかかる荷重が小さい。従って駆動部品のオイルレス化が可能となり、システムのメンテナンスフリーが達成できる。

(5) 燃料の多様性

外燃機関のため、ガスのほかにも太陽熱、高温排気ガス、液体燃料など幅広い熱源の利用が可能である。

3. DDHPの基本的設計

3.1 設計の基本的考え

DDHPは、図-3に示すようにスターリングエンジンと良く似た構造である。

但しDDHPは、ロッドシールホルダーの上部空間が全て作動室なのに対し、スターリングエンジンの作動室は、ピストン上部の空間なのが違う点である。すなわちDDHPは、作動ガス（ヘリウム）の温度分布

変化により、その圧力が決定されるのに対し、スターリングエンジンは、温度分布変化と作動室の容積変化によって作動ガス圧力が決定される。

このため両者の設計手法は多くの点で重なっている。ここでDDHPの高効率設計に際し、注意しなければならない項目と、そのための対策を列举してみる。

(1) 冷・暖房能力のアップ

- i 排除容積の増加 ii 設計圧力の増加
- iii 各熱交換器伝熱面積の増加と死容積の低減

(2) 熱損失の低減

- i 耐圧容器の薄肉化 ii 再生器熱容量の増加

(3) 機械損失の低減

- i 転がり軸受けの採用
- ii ピストンリング、ロッドシールの最適化

(4) 軸出力の増加

- i 低温側ピストン・ロッド径の増加
(上記ロッドは機器を駆動させる出力ピストンとしての働きがあるため)

3.2 諸元決定の考え方

(1) 排除容積と設計圧力

冷・暖房能力は、排除容積と作動圧力にほぼ比例するため、能力に応じた排除容積、および封入ガス圧を決定する必要がある。

但しボアメストロークの関係は、耐圧容器であるため出来るだけボアを小さくしたい一方で、シールの耐久性とシャトル損失を考慮すると、ストロークも小さくしたほうが有利である。従って、これらを総合的に判断し、両者を決定しなければならない。

(2) 加熱器

加熱器に対しては、性能向上のため伝熱面積の増

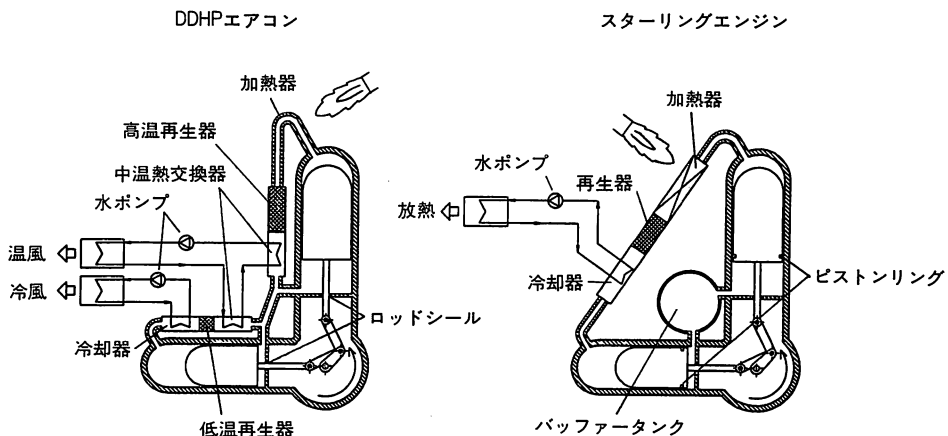


図-3 DDHPエアコンとスターリングエンジン

加が求められる一方で、死容積の増加は最小限とする必要がある。

加えて、加熱器の材料については、それが温度、雰囲気との両面とも非常に厳しい環境にあり、耐久性を重視する必要がある。

a 伝熱面積と死容積

加熱器内の熱伝達率は、圧力が高くなるため高い値を取るが、その一方、管外の熱伝達率の大幅な改善は難しい。従って、熱交換器としての性能は管外で規制される。

b 加熱管の材料

加熱器に要求される性質は、耐熱性と耐酸化性である。いくつかの材料についての検討結果と試験結果を以下に示す。

□ 供試品名

SUS309B, Incoloy-800 (40%Feベース)

SUS310S, Inconel-600 (70%Niベース)

Hastelloy X (50%Niベース)

調査結果によればHastelloy Xが最も良い高温強度特性を示している。次いで良い特性を示したのがInconel-600であるが、その他は類似した特性を示した。

耐酸化性試験の判定は、目視と重量変化測定によった。各供試品ごとの試験結果は、温度レベルにより若干の差が見られたもののHastelloy XとInconel-600が優れておりSUS309Bが最も劣っていた。最終的には、上記の性能結果にコストのファクターを含めて選定することになる。

(3) 冷却器及び中温熱交換器

これらの熱交換器は、外壁面が水で冷却されているため、外部熱伝達率が大きく、従って加熱器とは異なり、熱交換器としての性能は、主に内部の熱伝達率によって決定される。熱交換器内部の熱伝達率は、圧力の増加や内部流速の増加によって改善が可能である。

しかし内部のガス流速を上げると、圧力損失も増えるため、設計の最適化にはシミュレーションや実験の積み重ねが不可欠である。

(4) 再生器

再生器においては、死容積の低減と熱容量の増加が大事である。その一方、圧力損失の低減にも注意しなければならない。

高温再生器の場合、その上下の温度差が大きいことから熱容量が重要になり、低温再生器においては、

交換熱量が少ないことから、圧力損失の低減が重要になってくる。

(5) 駆動部品

駆動部品の強度計算は、内燃機関や圧縮機の場合と同じであるが、ここでは慣性力、ガス圧による荷重について述べる。

a 慣性力の計算

$$F_R = \frac{W_R}{g} r \omega^2 (\cos \theta + \rho \cos 2 \theta) \dots\dots(1)$$

ただし、 F_R : 往復動慣性力 kg

W_R : 往復動部重量 kg

r : クランク半径 m

ω : 角速度 = $\pi N / 30$ rad/s

N : 回転数 rpm

ρ : 連桿比 = r / ℓ

ℓ : 連接棒長さ m

g : 重力加速度(9.8) m/s^2

b ガス圧による力

クランクケースと作動室との間の差圧がピストンロッドに働き、連接棒を介してクランク軸に荷重として働く。



図-4 DDHP外観図

表1 目標仕様

項目	仕様 (室外機)
COP _c	0.8 (冷房能力: 9000Kcal/hr)
COP _h	1.5 (暖房能力: 17000Kcal/hr)
寸法	幅970mm×奥行380mm×高1400mm
重量	150kg
騒音	55dB (A)
消費電力	400W (熱媒循環ポンプを除く)

$$F_G = 10^4 \pi d^2 \Delta P / 4 \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし、 F_G : ガス圧による荷重 kg

d : ピストンロッド径 m

ΔP : 差圧 kg/cm²

ΔP は、ほぼ高温側のピストンの動きに同期して変動している。

慣性力とガス圧による力との合力は、二つの接続棒の位置によって決定されるので、その合力を求めてクランクピン部、各軸受部にかかる応力、荷重を計算しなければならない。

(6) 動力発生

DDHPは条件が合えば、補助モータの助けを借りず、自立運転することができる。

その動力発生は、低温側のピストンロッドにあり、発生動力は封入ガス圧とロッドの断面積に比例する。

但しロッド径の増大は、ロッド部でのシール特性の低減や、駆動部軸受負荷の増大につながるため、

その径の決定には総合的検討が必要となる。なお、システム全体の外観を図-4に、また目標仕様を表1に示す。

4. まとめ

DDHPは、フロンレス、クリーン排気という今日の特長を有しており、また商品機能の面では、高効率で冷房、暖房・給湯が同時に可能、かつメンテナンスフリーという特長を持っている。

筆者らは、このように社会的要請に合致し、かつ経営的にも魅力のあるDDHPの改善を進め、実用化に結びつける予定である。

参 考 文 献

- 1) 藤巻, 寺田, 他: 「ブルマイヤ・サイクルを用いた新冷暖房装置DDHPの開発」
平成元年度日本冷凍協会学術講演会講演論文集P65~P68
- 2) 松栄, 中里, 他: 「汎用スターリングエンジン(第2集)」
三洋電機技報 VOL.21 No.1 P74~P82 1989年2月

