ヒートポンプ用高性能凝縮器の研究* (EHD凝縮器の実用化研究)

山下 勝也*¹, 熊谷 幹夫*¹, 渡辺 裕*¹
矢部 彰*², 竹谷 隆夫*², 菊地 健太郎*²

A Study of a High Efficiency Condenser in a Heat Pump (The Development of an EHD Condenser)

Katsuya YAMASHITA, Mikio KUMAGAI, Yutaka WATANABE,
Akira YABE, Takao TAKETANI, and Kentaro KIKUCHI

In FY 1984, a national project called "The Development of a Super Heat Pump Energy Accumulation System" had been started by the MOON LIGHT PROJECT PROMOTION OFFICE of the Agency of Industrial Science and Technology. In this project, experimental study was carried out for a practical condenser by utilizing EHD phenomena. This report introduces results of the EHD effect on a vertical tube with three types of electrode at atmospheric pressure, and results of the EHD effect on a vertical tube bundle at high pressure. As a result, the condensation heat transfer coefficients of three types of electrode have been increased over about 3-4.2. Also, the condensation heat transfer of tube bundle has been achieved at the level of a single tube.

Key Words: EHD, Heat Pump, Condensation Heat Transfer, Vertical

1. 緒 論

ヒートポンプは、わずかな動力を用いて低温の熱源から熱をくみ上げ、高温の熱出力を得ることのできるエネルギー効率の高い技術で10年以上前の石油ショック以降、世界的な脱石油、省エネルギー施策の一つとして開発が行われてきている。

このような時勢の中、昭和59年度より、通産省工業技術院ムーンライト計画「スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システムの研究開発」プロジェクトにおいて、大形省エネルギー技術の研究開発が進められている。このプロジェクトは、非共沸混合媒体を使用し、従来の2倍程度のCOP(ヒートポンプの成績係数)を達成する高効率ヒートポンプと、一般産業用として需要の高い150~300°C程度の高温熱出力を実現する高温出力形圧縮式ヒートポンプの2種類のヒートポンプに、ケミカル蓄熱装置を組合せたシステムの研究に取り組んでいる。このシステムは、夜間電力によりヒートポンプを運転し、高性能ケミカル蓄熱装置に蓄熱し、

昼間の冷暖房、産業用熱源として使用するシステムである。このシステムを実現すると、夜間電力の使用、電力使用ピークの低減により、電力需要の負荷平準化が達成され、省エネルギーに大きく貢献するものと期待されている。

プロジェクトの中では、ヒートポンプのCOPを向上させるために、各種熱交換器の高性能化が重要な開発課題となっている。その中で、新エネルギー総合開発機構(NEDO)からの委託を受けて、150°C熱出力の高温出力形圧縮式ヒートポンプシステムにおける凝縮器に対して、静電気をかけて凝縮熱伝達を促進し、凝縮器の高性能化をはかるEHD凝縮器(電気流体力学的凝縮器)の研究開発が実施されている。

高温出力形ヒートポンプの凝縮器は、150°Cの熱水を出力することを目的とするもので、作動媒体の有機物媒体を凝縮させることにより水を加熱するものである。この有機物作動媒体は表面張力が小さいので、凝縮形態は膜状凝縮になり、熱伝達を決定するのは、凝縮液膜の厚さであり、熱伝導率の小さい有機物作動媒体は凝縮熱伝達率が小さい。それゆえ、水側の対流熱伝達に比して、約1/10で、凝縮熱伝達を向上させることが、そのまま凝縮器の高性能化につながる。

また、一方では、この種の有機物作動媒体は、最近

* 昭和62年11月11日 第25回シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和63年6月8日。

*¹ 正員、(株)東芝 (〒230 横浜市鶴見区末広町2-4)。

*² 正員、工業技術院機械技術研究所 (〒305 つくば市並木1-2)。

サイリスタなどの冷却媒体として使われているように、電気伝導度が小さく、強い電界を付与することができ、EHD現象を利用するのに適した媒体でもある。

このEHD現象とは、電界をかけたときに生じる現象を総称して呼ばれ、この現象を適用して凝縮熱伝達を促進させた凝縮熱交換器が、EHD凝縮器である。

EHD凝縮器では、凝縮液膜表面近傍に高電圧を印加した線電極を設置し、線電極と伝熱管との間に不平等電界をかけることにより、凝縮液体のEHD的な引出し現象を生じさせ、凝縮液体を線電極に吸引し、それを排出することにより、凝縮液伝熱面上の凝縮液の膜厚を薄くして、凝縮熱伝達を促進させている⁽¹⁾。

また、ジエチルエーテルの凝縮熱伝達促進には、約10倍の効果があつたにもかかわらず、フロンの伝熱促進には、3倍程度の効果しか見いだされていない、主に平等電界をかけることにより生じる凝縮液のEHD的な気液界面不安定現象⁽²⁾に対して、前述の液体のEHD的な引出し現象と併用することにより、EHD的な凝似滴状凝縮現象を安定に生じさせることに成功し、かつ、凝縮伝熱面から排除した凝縮液体を、空間内に液滴として放出することなく、他の伝熱管には影響を与えずに導液部を通して、下部凝縮液のために輸送することができ、高い伝熱促進性能を実現している⁽³⁾。

本研究では、以上のような基礎研究の成果をもとにEHD凝縮器を実用化するうえで重要となる凝縮伝熱管1本当たりの平均熱伝達率と表面過冷度の関係および、電極の製作性まで考慮し、電極形状の改良および高性能化、管群にした場合の伝熱性能、さらには、ヒートポンプへの応用を考えた高温高圧下の伝熱促進性能を検討した。

2. 記 号

- A : 伝熱面積 m^2
- C : 作動媒体の電気伝導度 s/m
- d_0 : 伝熱管外径 m
- d_i : 伝熱管内径 m
- E : 電界強度 V/m
- h_i : 管内側熱伝達率 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- h_c : 凝縮熱伝達率 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- I : 電流 A
- K : 熱貫流率 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- k : 電極と伝熱面との距離 m
- l : 伝熱管の有効長さ m
- Nu : ヌッセルト数
- Nu^* : 凝縮数

- P : 圧力 Pa
- Pr : プラントル数
- Q : 熱負荷 W
- q : 熱流束 W/m^2
- Re : レイノルズ数
- Re_i^* : 膜レイノルズ数
- S : 凝縮量 m^3/s
- T : 作動媒体温度 $^\circ\text{C}$
- t : 水側温度 $^\circ\text{C}$
- ΔT_m : 対数平均温度差 $^\circ\text{C}$
- u : 管内流速 m/s
- V : 電圧 V
- W : 消費電力 W
- ρ : 作動媒体液密度 kg/m^3
- ν : 動粘性係数 m^2/s
- λ : 熱伝導率 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
- γ_M : 伝熱管の熱低抗 $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$
- ϵ_0 : 真空の誘電率 F/m
- ϵ_1 : 液の比誘電率
- σ : 表面張力 N/m
- g : 重力の加速度 m/s^2
- h_{fg} : 潜熱 J/kg

3. 実験装置および方法

凝縮伝熱管は、設置面積が小さく、かつ凝縮液体を除去するというEHD凝縮器の特徴をいかしやすい鉛直な伝熱管を選び実験した。実験装置は、鉛直な伝熱管の近傍に設置する電極形状の最適化を図ることを目的とし、R-113で大気圧状態の伝熱性能を評価する大気圧熱ループ試験装置(図1)と、R-114で高圧条件下において、管群構成の電極を設置した高圧凝縮テストセクション(図2)を含む高圧熱ループ試験装置である。

図1に示す大気圧熱ループ試験装置は、試作電極による凝縮状況を観察するために、テストセクションは透明な塩化ビニール樹脂で製作されており、伝熱管は外径25.4 mm、肉厚1.2 mm、有効長1.08 mの銅管を使用した。実験方法は、まず装置内に混入している不凝縮ガスを真空ポンプにて十分に排除してから行い、温水タンクの電気ヒータにより、テストセクションの熱負荷を調整し、直流電圧発生装置により電極に印加する電圧値を設定し、温度と圧力が十分に定常になったことを確認した後、計測を行う。なお、管内を流れる冷却水は、水側の熱伝達率を大きくし、冷却水の温度上昇ができる限り小さくなるように、十分な循環量を取っている。

計測は、2種類の凝縮量(伝熱管に沿って流下した凝縮量、電極により排出した凝縮量)と、冷却水の出入口温度、R-113の蒸気温度より凝縮熱伝達率を算出し、電極を流れる電流を計測することにより、消費電力を算出した。

一方、同様の方法により、図2に示す管群構成の高圧凝縮テストセクションをR-114を用いて伝熱性能を計測した。テストセクションは、伝熱管に外径25.4 mm、肉厚1.2 mm、有効長1.38 m SUS管を使用し、管配列を50 mm ピッチの千鳥配列で、冷却水を6パスにしてある。

図1 大気圧熱ループ試験装置の概略

図2 高圧凝縮テストセクション

4. 試作電極形状

図3に試作した3種類の電極の形状を示す。図3(a)のらせん電極は、図4にらせん形状を示すが、線電極をらせん状に巻き、線電極に吸引した凝縮液をらせん状に流下させ、遠心力により排出する構成になっている。この凝縮液の排出作用により伝熱管に沿って流下する凝縮液膜を全体的に薄くし、凝縮熱伝達を促進させるものである。

図3(b)および図3(c)の電極形状は、らせん電極に格子電極および平板電極を組合せたもので、らせん電極により薄膜化した液膜に、格子電極および平板電極により液膜表面にじょう乱を起こし、EHD的な擬似滴状凝縮現象を生じさせて、凝縮熱伝達を促進させるものである。今回新たに考案した図3(b)の電極は、らせん電極を保持するための縦棒に沿って液膜の滴状化現象が生じていたことに着目し、らせんの保持と、滴状化促進の二つの役割を同時に果たし、しかも、製作の観点からも比較的容易と考えられる細線を並べた電極形状とし、格子電極と呼んでいる。なお、電極と伝熱面の間げきを一定に保つため、格子電極の縦棒にテフロン製のスペーサを取付けている。今回使用した、図3(b)の電極の詳細は図4に示すようにらせん電極の外側に垂直細線を設置したものである。

また、図3(c)の電極は、らせんで覆われていない伝熱面部分に、曲板状の電極を設定したものであり、らせんと平板電極の組合せ電極と呼んでいる。この電極の特徴として、曲板の内側の伝熱面に対向する面に、セラミックあるいはテフロン製の電気絶縁材を0.1 mm程度コーティングしてあり、これにより、凝縮液体が平板電極に凝縮液体の液柱をつくっても、液柱がすぐに離れるようにしてある。この原理は、テフロンなどの電気絶縁材の電気伝導度が、フロン液の電気伝導度に比べて十分に小さいので、凝縮液体の液柱が電極間に生じると、電圧の大部分がテフロンなどの薄膜にかかって、フロン液柱内の電界が弱まり、液柱が保持で

図3 電極の形状例

きなくなり落下する。一方液柱ができていないときには、フロン蒸気の電気伝導度は、テフロンなどの電気伝導度よりずっと小さいため、テフロンなどは高電圧電極と等電位に保たれ、電極間に電界が生じて、EHD的な擬似滴状凝縮現象を生じさせることができる。

なお、実験には直流の高電圧を使用し、凝縮熱管を陰極とし、接地した。

5. 大気圧下の凝縮実験結果および考察

5.1 らせん電極の場合 図5~7にらせん電極の凝縮熱伝達率、凝縮液排出率、消費電力の特性を示す。

これらの図における算出は以下の式を用いた。

$$Q = S \cdot \rho \cdot h_{fg} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta T_m = (t_2 - t_1) / \ln \{ (T_s - t_1) / (T_s - t_2) \} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$K = q / \Delta T_m \quad (q = Q/A) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$Re = u \cdot d_i / \nu_w \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$h_i = Nu \cdot \lambda_w / d_i \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\gamma_M = d_0 / 2 \lambda_M \cdot \ln(d_0 / d_i) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$h_c = \{ (1/K) - (1/h_i)(d_0/d_i) - \gamma_M \}^{-1} \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$W = I \cdot V \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\Delta T = q / h_c \quad \dots\dots\dots (10)$$

図5は、伝熱管の平均凝縮熱伝達率を縦軸に、管の外壁面と飽和蒸気温度との差である表面過冷度を横軸にとり、らせん電極の実験データを整理したものである。

図4 らせん電極およびらせん+格子電極

図5 らせん電極の伝熱特性

る。

図5中の破線は、Nusseltによる静止飽和蒸気の理論式(12)から算出したものである。また、実線は、上原らの波状流膜状凝縮の経験式(13)より算出したものである。

$$Nu^* = 1.47 Re_i^{*-1/3} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$Nu^* = 1.25 Re_i^{*-1/4} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$Nu^* = h_c (\nu_F^2 / g)^{1/3} / \lambda_F$$

$$Re_i^* = (4ql) / (\mu \cdot h_{fg})$$

図5より明らかなように、電極に電圧を印加しない場合は、式(13)の上原らの経験式と良く一致した。電極に凝縮液が吸引され、排出し始めるのは、8 kV以降で、電圧値が9 kV以上になると、凝縮熱伝達が大きく促進され、3倍弱まで達し、15 kVまでその促進度はほぼ同じである。しかし、表面過冷度を大きくすると、若干促進度が落ちる傾向を示している。

一方、図6に示す凝縮液の排出率は、電圧値とともに上昇し、11 kVにてピークを示し、約80%強まで達する。また、そのときの消費電力は、図7のようになり、電圧値とともに上昇するが、熱負荷が0.5~2.5 kWであるのに比較して、0.1~0.3 Wと約0.01%程度であり、問題にならないほど小さい。

5.2 らせん+格子電極・らせん+平板電極の場合

図6 らせん電極の凝縮液排出率

図7 らせん電極の消費電力

らせん電極に格子電極と平板電極を設置した組合せ電極の凝縮熱伝達率の特性を図8, 9に示す。これらの図も、表面過冷度を横軸、凝縮熱伝達率を縦軸に取り、図8, 9中の実線は、電圧値0 kVにおいて良く一致した上原らの経験式から算出したものである。そして設定電圧は、らせん電極にて凝縮液を十分に排出し得た10 kVから電圧値を上げた。

図8は、らせん + 平板電極の試験結果で、表面過冷度約3°C、電圧値16 kVにて、約4倍弱の促進度を達し、平板電極による凝縮熱伝達の促進効果が認められ

図8 らせん + 平板電極の伝熱特性

図9 らせん + 格子電極の伝熱特性

る。一方、図9に示す、らせん + 格子電極は、表面過冷度約3°Cで、電圧値18 kVにて約4倍以上の促進度に達している。なお、凝縮伝熱面と各電極部の距離は、らせん電極で2.0 mm、格子電極で2.5 mm、平板電極では1.9 mmである。

また、2種類の電極ともらせん電極とは異なり、印加電圧値を上げていくと、凝縮熱伝達の促進度も向上する傾向を示し、特に、らせん + 格子電極の14 kV以降に、その傾向が顕著にでている。このときの凝縮液膜の観察写真を図10に示す。図10は、らせん + 格子電極における表面過冷度約15°Cの液膜状況である。この写真から液膜表面に粒状化現象が見られ、電圧値の増大とともに、その粒の粒径が微細化し、個数が増加しているのが観察できる。

図9の上昇が、この液膜表面の粒状化現象に対応しているので、この粒状化現象が伝熱促進に有効であることがわかる。このことから、この2種類の組合せ電極は、らせん電極による凝縮液排出作用と、格子および平板電極によるEHD的な擬滴状凝縮化の相乗効果により、伝熱促進できていることが確認できた。

なお、電場による液膜表面じょう乱作用を利用する凝縮熱伝達促進に対して、Didkovsky-Bologa⁽²⁾は、スリット付平板電極の場合に、整理式(14)を提示しているので、この整理式をらせん + 格子電極に適用すると図11のようになる。

$$Nu^* = 0.003 \times \left(\frac{q \cdot l}{\mu \cdot h_{fg}} \right)^{-1/3} \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon_1 E^2 k}{\sigma} \right)^{1/2} \times \left(\frac{Ck^2}{\epsilon_0 \epsilon_1 \nu} \right)^{0.175} \dots \dots \dots (14)$$

なお、図11における代表長さ l は、らせん電極による凝縮液の排出率(x)を考慮に入れて、 $l = l(1-x)$ で算出した。図11より全体的にらせん + 格子電極のほうが、整理式を上回っている。特に、表面過冷度の小さい3, 5°Cにおいて顕著である。このことはEHD的

T=15°C V=14kV
(hc=1680 W/m²K)

T=15°C V=16kV
(hc=2100 W/m²K)

T=15°C V=18kV
(hc=2450 W/m²K)

図10 凝縮液膜の観察結果(らせん + 格子電極)

図 11 式(14)の無次元整理

図 12 $Nu^*-Re_1^*$

な擬滴状凝縮現象と、らせん電極による凝縮液の排除とを組合せるという著者らの伝熱促進方法が、電場による液膜表面じょう乱作用により、液滴状に伝熱面から凝縮液を飛散させ、凝縮液膜を薄くしようとする方法よりも、高い伝熱促進割合を示していることを意味しており、らせん電極と格子電極を組合せる伝熱促進方法が有効であることが実証された。

また、本研究で試作した3種類の電極形状による凝縮熱伝達の性能を、膜レイノルズ数と凝縮数の関係として図12に示す。図12より、平均熱流束一定の条件に対して、らせん+格子電極は電圧をかけないときの約6倍、Nusseltの解に対して約9倍の伝熱促進性能を示している。

6. 高圧下での管群による試験結果および考察

ヒートポンプの凝縮器としての性能を予測するため、媒体としてR-114を用い、らせん電極を管群構成にして、圧力0.75 MPa、凝縮温度70°Cのもとで凝縮熱伝達を計測した結果を図13に示す。凝縮熱伝達率および表面過冷度の算出方法は、大気圧の場合と同じで、らせん電極の寸法も全く同じである。図13中の実線も

図 13 管群構成のらせん電極の伝熱特性

やはり上原らの波状流膜状凝縮の整理式から算出したもので、電圧値0kVのデータと良く一致した。電圧値8kVから凝縮液を吸引、排出し始めるが、10、12kVでは、大気圧の結果ほど十分に凝縮伝熱を促進できない。しかし、14kVまで上げると、約3倍弱まで促進している。これはのぞき窓からの観察により推測すると、12kV以下の電圧値では、らせん電極により排出した凝縮液が排出棒から飛散し、隣接した伝熱管へ再付着したためと考えられる。しかし、14kVではこの凝縮液の飛散が見られないので、大気圧の結果と同等の促進度が得られたものと思われる。このことから、高圧の影響、および管群にしたことによる伝熱性能の低下はなく、伝熱管1本の基礎実験で実証された性能が、実際の管群構成の熱交換器でも実現することが推測できる。

7. 結 言

鉛直凝縮伝熱管の周りに、高電圧を印加した電極を設置し、凝縮熱伝達を向上させるEHD凝縮器において、各種電極を試作し、単管および管群構成での実験を行い、以下の結論を得た。

(1) らせん電極、らせん+格子電極、らせん+平板電極の各電極形状における熱伝達率と表面過冷度の関係を実験的に明らかにし、らせん+格子電極の場合には、表面過冷度一定の条件で、電圧0kVの場合に比べて約4.3倍、Nusseltの解と比較して約5.2倍まで増大すること、熱流束一定の条件では、電圧0kVの場合に比べて約6倍、Nusseltの解と比較して約9倍まで増加することを明らかにし、らせん電極による凝縮液体の排除と、格子電極によるEHD的擬滴状凝縮現象化とを組合せる凝縮熱伝達の促進方法が有効であることを実証した。

(2) らせん電極を使用したEHD的な伝熱促進を、管群構成にした場合、管群にしたことによる伝熱性能の低下はなく、1本の伝熱管での伝熱促進性能が、

管群構成の熱交換器でも実現することを実証した。

終わりに、本研究はムーンライト計画の一環として開発されており、今回の発表に際して、新エネルギー総合開発機構(NEDO)およびスーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム技術研究組合の方々から多くのご助言と資料提供をいただきましたことに深く感謝する。

文 献

- (1) 矢部・ほか3名, *Proc. 7th Int. H. T. Conf.*, 5(1982), 189.
- (2) Didkovsky, A. B., ほか1名, *Int. J. H. M. T.*, 24-5(1981), 811.
- (3) 矢部・ほか4名, *Proc. 8th Int. H. T. Conf.*, 5(1986), 2957.
- (4) 甲藤・ほか4名, 伝熱学特論, (昭59), 128.