

エジェクタ冷凍サイクル適用の CO₂ 冷媒ヒートポンプ式自動販売機

Heat Pump Vending Machine Equipped with CO₂ Ejector Refrigerating Cycle

鶴羽 健 TSURUHA, Takeshi

山上 雄平 YAMAGAMI, Yuhei

松原 健 MATSUBARA, Takeshi

富士電機は、飲料用自動販売機の冷凍機に CO₂ 冷媒とハイドロフルオロカーボン冷媒を採用しているが、CO₂ 冷媒の使用圧力がハイドロフルオロカーボン冷媒より高いため、圧縮機を駆動する電力も大きくなるという課題があった。そこで、使用圧力が高いことを利用し、損失していたエネルギーを回収するエジェクタを採用するとともに、エジェクタを最適に制御する冷凍機を開発し、飲料用自動販売機に搭載した。冷凍機の成績係数（COP）の向上によって、従来機に比べ消費電力量を 25% 低減できる。

Fuji Electric has been utilizing CO₂ refrigerants and hydrofluorocarbon refrigerants in the refrigeration units used in its beverage vending machines. However, compared with hydrofluorocarbon refrigerants, CO₂ refrigerants have a higher operating pressure and thus require a larger amount of power to drive the compressor. To solve this issue, We have adopted an ejector to recover the lost energy by using the high operating pressure, developed a refrigeration unit that optimally control the ejector, and fitted it into our vending machines. Coefficient of performance (COP) improvement in the refrigeration unit has enabled the vending machine to reduce power consumption by 25% compared with conventional ones.

1 まえがき

ノンフロン化による地球温暖化抑止に貢献することを目的として、CO₂ 冷媒を用いた冷凍機にエジェクタ^(注1)を搭載した飲料用自動販売機を開発し、従来比 25% の省エネルギー（省エネ）を達成した。CO₂ 冷媒の圧力の高さを利用して、従来は損失していた冷媒のエネルギーを回収することにより圧縮機の動力を低減し、高効率化を実現した。

2 開発の背景

富士電機は、飲料用自動販売機が 2002 年に「エネルギーの使用の合理化等に関する法律」（省エネ法）に基づく特定機器の指定を受けたこともあり、消費電力量の低減に努めてきた。現在の飲料用自動販売機における電力消費の 80~90% が、飲料の保温や保冷を行うために使われている。その電力消費の低減のためのこれまでの代表的な技術には、富士電機が 2008 年に開発して製品に適用したヒートポンプ技術などがある。飲料用自動販売機に用いる冷媒には、CO₂ 冷媒とハイドロフルオロカーボン冷媒がある。両者を比較すると CO₂ 冷媒は温暖化係数が低いものの、使用圧力が高いため^(注2)に圧縮仕事^(注2)が高くなり、効率が低下するという課題がある。

一般に、熱交換器などの効率が限界に近くなる中、さらなる効率向上を図るため、車載用冷凍機や給湯機においてエジェクタ⁽¹⁾の採用が進んでいる。飲料用自動販売機においてもエジェクタを用いた冷凍サイクルを実現し、CO₂ 冷媒

〈注1〉 エジェクタ：214 ページ「解説1」を参照のこと

〈注2〉 圧縮仕事：圧縮機を運転するために必要な熱力学的なエネルギーを指す。

の圧力が高いという特長を生かしたノンフロン化による地球温暖化抑止に貢献することを目的とした。

3 開発の狙いと課題

3.1 実使用条件下における省エネルギーの課題

一般的な自動販売機では三つに分かれた室を、図1に示すように四季に合わせて冷却と加熱を切り替えている。その消費エネルギーの大半は、商品温度を維持するために使われる。

飲料用自動販売機のエネルギー効率の測定方法は、JIS B 8561：2007 で定められている。春季・秋季の冷熱モード、すなわち左室が加熱、中室と右室が冷却のとき（HCCモード）の消費電力量を測定することが規定されている。

東日本大震災以降の社会的要請に応えるため、夏季のピーク消費電力の低減と、年間消費電力量を改善することが課題である。

後者の年間消費電力量低減という課題に対し、冷凍機の冷却のみの運転（CCCモード）とヒートポンプ運転（HCCモード）の両方の成績係数（COP：Coefficient of Performance）が最大になるようバランスさせることで解

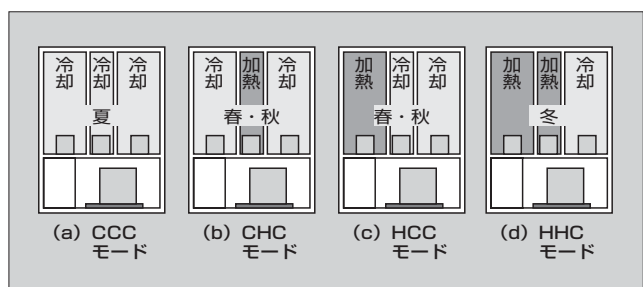


図1 飲料用自動販売機の四季と運転モード

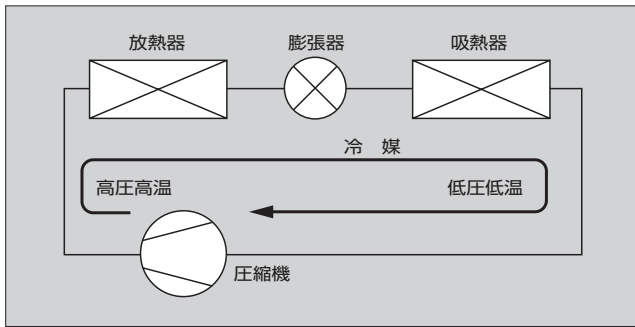


図2 冷凍機の基本原理

決することにした。

3.2 エネルギー消費低減のポイント

飲料用自動販売機では、図2に示すとおり冷媒を介して外気に熱を放出する必要があり、放熱器の冷媒温度は設置環境温度より10K程度高い30~50℃程度でなければならない。一般的なフロン系の冷媒では、その圧力は1~3MPa程度である。これに対しCO₂冷媒は、圧力7.4MPa、温度31℃において臨界点を持つため、放熱に必要な外気温度より高い温度を作るためには、圧力は超臨界状態の8~10MPaにする必要がある。その結果、圧縮機の冷媒圧縮部は高い圧力差を受ける。したがって、冷媒圧縮のための動力エネルギーが大きくなり、エネルギー効率が低下するという課題があった。

そのため、従来、放熱器の大型化や内部熱交換器の設置、2段圧縮式回路などの方策をとっていたが、冷凍機のCOPは、ハイドロフルオロカーボン冷媒を用いた冷凍機の60%程度と低かった。そこで、エジェクタを用いることでCOPの向上を実現した。

4 エジェクタ搭載ヒートポンプ冷凍機の構成と新技術

4.1 開発項目

今回の開発目的は加熱・冷却運転のCOPの最大化であり、そのための開発項目は次のとおりである。

- (a) CO₂冷媒を用いたエジェクタ効果の理論値
- (b) 三つの蒸発器が並列である飲料用自動販売機の冷凍機回路へのエジェクタの適用
- (c) 給湯機用エジェクタの飲料用自動販売機への適用
- (d) 飲料用自動販売機の設置環境に対する信頼性の確保

4.2 CO₂冷媒を用いたエジェクタ効果の理論値

開発したエジェクタの内部構造を図3に示す。駆動流としてエジェクタに流入する冷媒が、直径が細いノズル部を通過する際に流速が上昇する。流速の上昇に伴って圧力が低下するため、吸引流側から流体を引き込む力が生まれる。二つの流体は混合部で合流し、その後のディフューザ部で減速し昇圧される。流路はなるべく乱れが少なくなるように設計されており、そのことで次に示す効果が最大化され

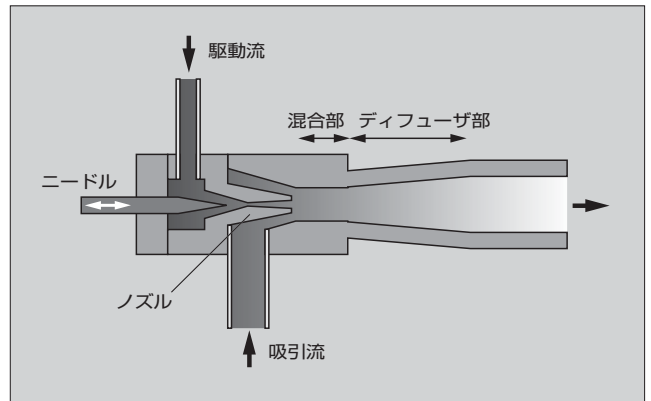


図3 エジェクタの内部構造

る。

図4は、横軸がエンタルピ、縦軸が圧力のグラフであり、CO₂冷媒を用いた従来の飲料用自動販売機の冷凍サイクル線図である。冷凍サイクルの膨張行程が等エンタルピ膨張から理想的な等エントロピ膨張、すなわち流体の乱れがない膨張とすることでエネルギー損失を小さくする。乱れによるエネルギーの損失を回収し、圧縮機動力を低減することを示している。

エネルギー損失について、エジェクタを用いた場合の効果を計算した。圧力が下がる膨張行程に乱れがない場合は等エントロピ変化となり、等エンタルピ変化よりも膨張後の圧力差の分だけ圧縮仕事が減る。蒸発温度-10℃、高圧9.0MPa、ガスクーラ出口温度40℃、内部熱交換器高圧出

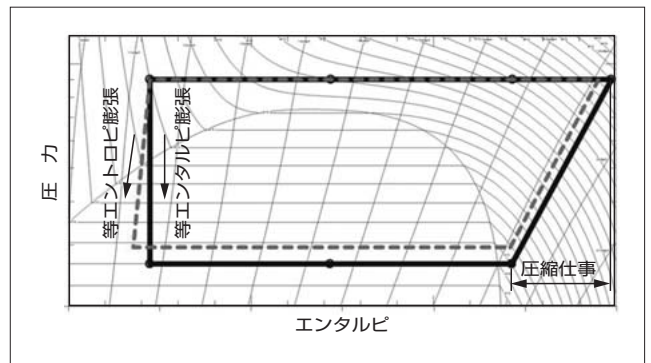


図4 CO₂冷媒飲料用自動販売機の冷凍サイクル線図

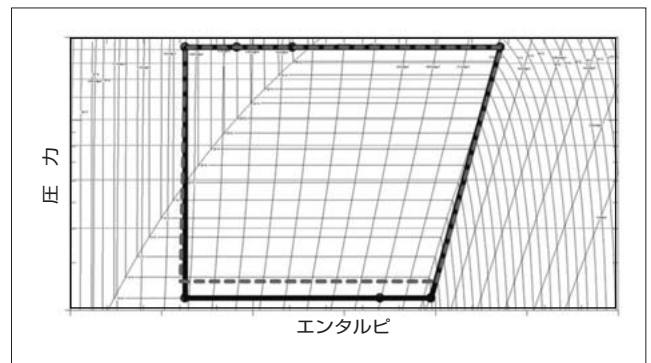


図5 ハイドロフルオロカーボン冷媒飲料用自動販売機の冷凍サイクル線図

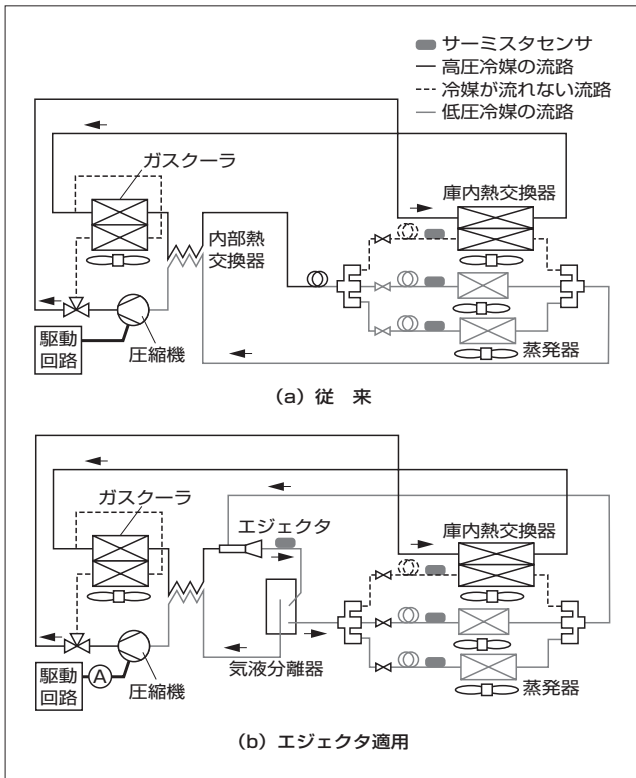


図6 CO₂ 冷媒ヒートポンプ冷凍機回路 (HCC モード)

口温度 20℃、圧縮機吸引過熱度 5K において、エジェクタの有無による差異は、理論上の圧縮仕事が 3.1 kJ/kg 低減し、10.3% の COP の向上となり得る。

一方、図 5 に示すようにハイドロフルオロカーボン冷媒で同様に効果の計算を行ったところ、圧縮仕事低減効果の上昇は 4.2% であり、CO₂ 冷媒の場合より低い。エジェクタは CO₂ 冷媒に対して、より多くの圧縮仕事低減効果を発揮する。

4.3 三つの蒸発器が並列である飲料用自動販売機の冷凍機回路へのエジェクタの適用

図 6 に、CO₂ 冷媒ヒートポンプ冷凍機回路 (HCC モード) を示す。図 6 (b) がエジェクタを適用した回路であり、エジェクタと気液分離器を追加するとともに、エジェクタの出口にサーミスタセンサを、圧縮機駆動回路に電流計をそれぞれ配置した。気液分離器では、エジェクタから出た低圧冷媒の液相部を蒸発器へ、残りを圧縮機へ戻すようにした。その際、液相冷媒と共に蒸発器側へ流出する冷凍機油は圧縮機側へ戻さなければならないため、オイル戻しの機構を設けるなどの工夫を行った。

4.4 給湯機用エジェクタの飲料用自動販売機への適用

飲料用自動販売機に採用するエジェクタは、給湯機用エジェクタをベースに飲料用自動販売機用に開発した可変ニードルエジェクタである。給湯機と飲料用自動販売機における冷凍機の仕様の相違点を表 1 に示す。

自動販売機の冷媒循環量は給湯機の約 1/7 と少量のため、可変ニードル弁の開度を閉塞ぎりぎりまで絞って使う必要

表 1 給湯機と飲料用自動販売機における冷凍機の仕様の相違点

項目	給湯機	飲料用自動販売機
冷媒循環量	50 kg/h	7 kg/h
用途	加熱	加熱と冷却
蒸発器の数	1	3
1日当たりの発停回数	数回	数10回

がある。さらに、自動販売機では、図 6 のように蒸発器 3 個が並列に設置されており、加熱や冷却の対象室数の切り替えのような急激な変動に追従して冷媒循環量を適正に保つために、小流量で応答性の高い制御が求められる。

そこで、エジェクタの制御量に対して速やかに応答する物理量を計測し、フィードバック制御を行う方式を開発した。物理量には、圧縮機の入力電流とエジェクタ出口の温度を用いることにした。

4.5 冷凍加熱能力と COP の最大化

3章の開発の狙いでも述べたとおり、冷凍機の冷却のみの運転 (CCC モード) とヒートポンプ運転 (HCC モード) の両方の COP が最大になるようバランスさせることが必要である。しかし、回路は一つであり、冷媒封入量も季節ごとで変えられないため、それらの負荷の相違からくる必要となる冷媒循環量の変化を、圧縮機の回転数とエジェクタの弁開度の調整によって対応した。

HCC モードにおける加熱 COP と冷却 COP の測定結果の例を図 7 に示す。この例では、加熱と冷却を同時に行う HCC モードにおいて、エジェクタの弁開度を変化させたときの COP を示しており、加熱 COP と冷却 COP を合算した全 COP において、従来比 124% を超える値を達成した。また、負荷変動に応じて弁開度を制御し、冷却能力と加熱能力を調整できることが分かった。

さらに、圧縮機の運転周波数とエジェクタの弁開度を変

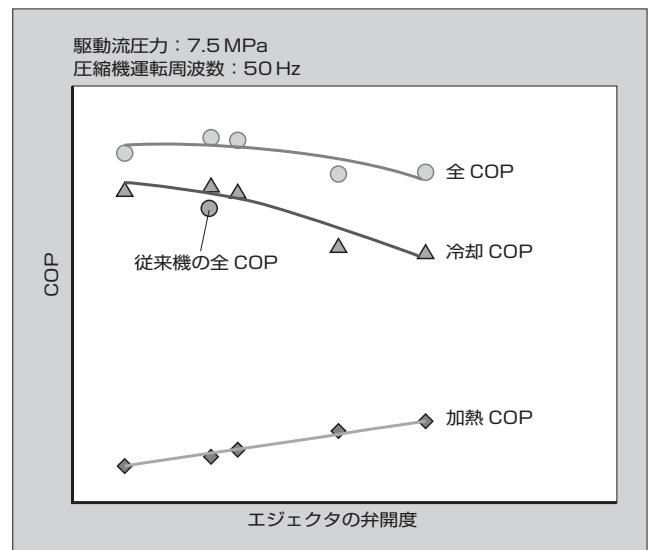


図 7 HCC モードにおける加熱 COP と冷却 COP の測定結果の例

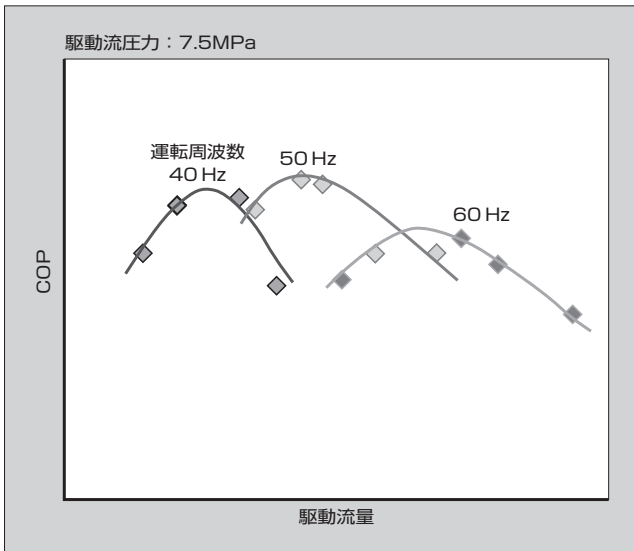


図8 圧縮機運転周波数別 COP の測定結果の例

化させた場合の COP の測定結果の例を図 8 に示す。この特性から、圧縮機運転周波数とエジェクタの弁開度を適切に制御し、駆動流量を最適にすることで、エジェクタの能力を最大限発揮させ、COP の最大化が図れることが分かった。

そこで、周囲温度と庫内温度から推定した熱負荷に対して、パラメータ化しておいた最適な蒸発温度と圧縮機運転周波数を決定し、所定の蒸発温度を得られるようにエジェクタの弁開度を微調整する制御とした。冷却対象室数の変更などの大きな負荷変動の際には、エジェクタ出口温度と蒸発器入口温度を検知しながらフィードバック制御を行いつつ、圧力の監視となる圧縮機の入力電流を検知しながらさらに補正を掛け、効率が最大となる冷凍サイクルを維持する制御とした。

4.6 飲料用自動販売機の設置環境に対する信頼性の確保

表 1 に示したように、給湯機に比べて飲料用自動販売機の一戸当たりの発停回数は一桁多い。飲料用自動販売機におけるエジェクタ出口温度は常に氷点下となり、運転中には雰囲気中の水分が凝固し、停止時には氷が融解する。もし、部品のろう付部にボイドや引け巣などの接合不具合が

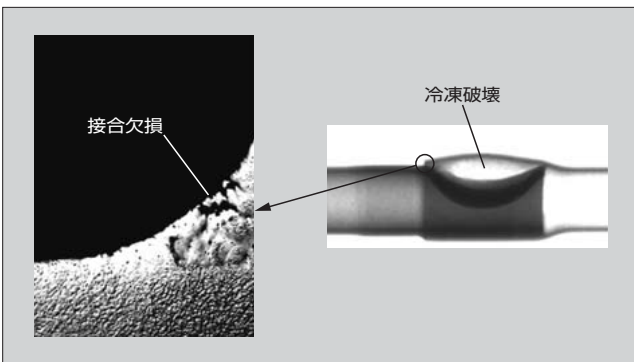


図9 ろう付部の接合欠損と冷凍破壊の例

表 2 CO₂ 冷媒冷凍機搭載の飲料用自動販売機の性能

項目	開発機	CO ₂ ヒートポンプ機2	CO ₂ ヒートポンプ機1
冷媒	CO ₂		
圧縮機駆動方式	可変速	可変速	一定速
ヒートポンプ回路	○	○	○
エジェクタ	○	—	—
冷却加熱COP比	1.57	1.25	1
冷却COP比	1.41	0.97	1
発売年月	2015年4月	2014年12月	2011年11月
JIS表示値*	440 kWh/y	585 kWh/y	895 kWh/y
トップランナー基準値	1,068 kWh/y	1,081 kWh/y	1,086 kWh/y
トップランナー達成率	242%	184%	121%

*JIS表示値：JIS B 8561：2007の区分Ⅲに準じた測定方法による値

あると、その中にため込まれた水分が、凝固融解の作用により体積の膨張収縮を繰り返し、図 9 に示すような冷凍破壊につながるがよく知られている。

そこで、詳細な断面観察を行うなど、工程検証と実機検証を繰り返し実施して最終的な品質保証を行った。

5 飲料用自動販売機の性能

5.1 省エネルギー性能

表 2 に、新技術による機器を搭載した飲料用自動販売機の性能を示す。CO₂ 冷媒冷凍機において難しいとされてきた効率向上について、HCC モードにおいては 124%、CCC モードにおいては 140% の COP の向上を達成し、庫内間熱交換方式のヒートポンプ式自動販売機においては、ハイドロフルオロカーボン冷媒冷凍機との差異を大きく縮めることができた。JIS B 8561：2007 に定める測定方法による年間消費電力量は 440 kWh/y、省エネ法に定めるトップランナー目標値 1,068 kWh/y に対する達成率は 242% となり、同一庫内容積を持つ低圧系冷媒も含めた自動販売機で最高水準の省エネ機となった。

5.2 今後の展開

今回の取り組みでは、エジェクタの採用により、冷凍機の COP の大幅な向上を達成した。しかし、図 4 に示した冷凍サイクル線図から、その効果を最大限生かすには、よりエンタルピーの高い点における膨張行程で使うことが有効であることが分かる。給湯機での適用技術を生かし、自動販売機における CO₂ 冷媒冷凍機では難しいと考えられている加熱のみの運転に挑戦したい。

6 あとがき

地球にやさしい自然冷媒 CO₂ を用いた飲料用自動販売機において、搭載する冷凍機にエジェクタを適用したことで、CO₂ 冷媒の省エネルギーの可能性を広げることができた。今回の取り組みは冷凍機の COP の向上によって、地球

温暖化抑止に一定の貢献を果たしたと考える。しかし、今後の展開にも述べたとおり、加熱側の性能についてはまだ改善の余地がある。本サイクルを加熱側に適用することで、今のヒートポンプの弱点を克服することにより地球温暖化抑止をさらに推進していく所存である。

本機器の開発にご協力いただいた株式会社デンソーの関係各位に謝意を表す。

参考文献

- (1) 竹内裕嗣. 世界初エジェクタサイクルの製品化. デンソーテクニカルレビュー. 2005, vol.10, no.1, p.18-23.
- (2) 井下尚紀. CO₂冷媒対応缶飲料自動販売機. 富士時報. 2009, vol.82, no.4, p.(15)-(18).



鶴羽 健

自動販売機などにおける冷凍機の開発設計に従事。現在、富士電機株式会社食品流通事業本部三重工場設計第二部課長。



山上 雄平

自動販売機などにおける冷凍機の開発設計に従事。現在、富士電機株式会社食品流通事業本部三重工場設計第一部主任。空気調和・衛生工学会会員。



松原 健

自動販売機などにおける冷凍機の研究開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所応用技術研究センター熱応用システム研究部主任。電気学会会員。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。