

特集 ECS STEP2システムの開発*

Development of ECS STEP2 System

尾形 豪太
Gota OGATA

長谷川 浩也
Hiroya HASEGAWA

鈴木 達博
Tatsuhiko SUZUKI

水鳥 和典
Kazunori MIZUTORI

井川 正彦
Masahiko IKAWA

西野 達彦
Tatsuhiko NISHINO

Public opinion increases to environmental protection in all the earth scale, and fuel efficiency regulation has been strengthened for the global warming gas emission limitation.

ECS is the DENSO original / unique technology, achieving the power-saving air conditioning operation. Since 2009 ECS STEP1 has been already commercialized as the fuel-efficiency-regulation adaptive technology, with more than 10% reduction of annual compressor power consumption for air conditioning.

From January 2013, we launched ECS STEP2 incorporated the New Ejector achieving the significant efficiency improvement; annual 20% reduction of air-conditioner power consumption, as the next-generation DENSO Thermal Group competitive technology.

Key words : Refrigeration Cycle, Ejector, Air-Conditioner

まえがき

近年、地球環境保護の観点からCO₂排出量の削減、省エネルギー化のニーズは益々高まっており、自動車に関しても国内外を問わず燃費規制が強化されている。2020年に向けては、カーエアコンなどを加味した実用燃費低減の取り組みが全世界で検討されており、“カーエアコンの省動力化”は将来のCO₂排出量を削減するうえで重要な課題である。

このような状況に対し、我々はデンソー独自の省動力技術であるエジェクタとエバポレータを一体化した、ECS STEP1 (Ejector Cycle System STEP1) を2009年に製品化している¹⁾。今回開発したECS STEP2は、ECS STEP1から更なる省動力化を狙ったものである。ECS STEP2では、システムの最適化をするARC、およびエジェクタを高効率化する吸引加速、曲面ディフューザといった新技術により大幅な省動力化を実現した。また、開発の過程において、大学との共同研究による気液二相圧縮性数値解析の構築を行った。

本論文ではこれらの新技術、数値解析技術について報告する。

1. ECSの概要

まず、ECSのシステム概要と省動力目標値、およびエジェクタの概要をECS STEP1を用いて説明する。

1.1 システム概要

ECS STEP1のシステムの概要を示す (Fig. 1)。ECS STEP1では、エジェクタとエバポレータが一体化されている (Fig. 1(a))。機器構成は、通常のエバポレータを、このエジェクタ一体型エバポレータに置き換えた形となる。このシステムでは、膨張弁後に冷媒を分岐し、一方をエジェクタ側に流し (駆動流Gn)、他方を風下側エバポレータに流す (吸引流Ge)。空気と熱交換した吸引流は、エジェクタに吸引され、駆動流と合流する。合流した冷媒は、風上側エバポレータで空気と熱交換し、コンプレッサへと流れる (Fig. 1(b))。p-h線図上の挙動は、Fig. 1(c)のようになる。冷凍サイクルの効率を表す指標として、成績係数COP (Coefficient of Performance) があるが、このシステムにおける従来サイクルに対するCOPの向上効果は、

$$\frac{COP_{ECS\ STEP2}}{COP_{STEP1}} = \left(1 + \frac{\Delta i_c}{\Delta i_e}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta i_c + \Delta i_e}{\Delta i}}\right)$$

*2014年7月31日 原稿受理

と表すことができる。さらにシステム全体では、エジェクタの昇圧により圧縮比が低減することによるコンプレッサ自体の効率向上、エバポレータとしても風下側の冷媒流量が少なくなることによる低圧損化や、風下側の温度が昇圧分低くなることによるエバポレータ自体の効率向上効果も含めてCOPが向上する (Fig. 2)。

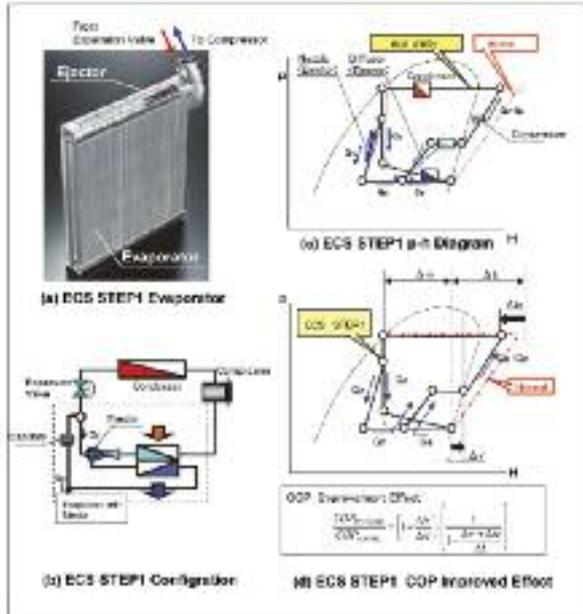


Fig. 1 Overview of ECS STEP1

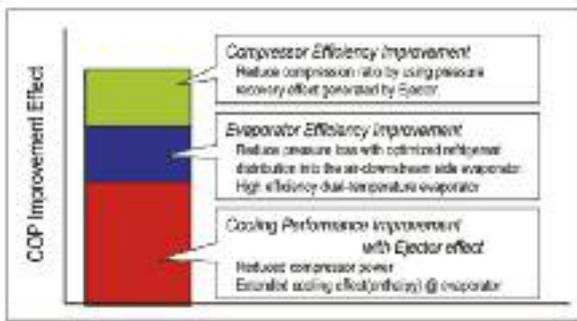


Fig. 2 COP Improvement Effect of Ejector Cycle

1.2 システム省動力目標値

ここで、ECS STEP2の省動力目標値について述べる。規制として最も厳しい欧州CO₂排出量規制をFig. 3に示す。'12年には'05年に対し14.3%，'20年には32.1%のCO₂排出量削減が必要となる。この削減比率に応じた省動力化（'20 35%低減）をカーエアコンでも追従するため、他のアイテムでの向上分（15%）もふまえ、ECS STEP2の省動力目標は従来比20%低減とした。

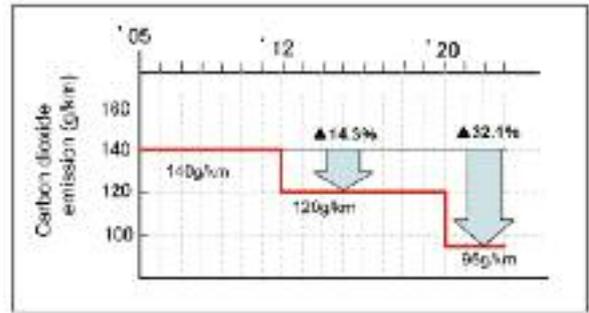


Fig. 3 Regulation of Carbon Dioxide Emission in EU

1.3 エジェクタ概要

次にエジェクタ単体の概要を述べる。エジェクタは、駆動ノズル、混合部、ディフューザ、吸引ノズルより構成され、Fig. 1で示したように使われる。膨張弁後流の気液二相冷媒（駆動流G_n）は、ノズル内で風下側エバポレータ出口圧力以下まで減圧・加速する。これにより吸引流G_eが発生する。ノズルで超音速まで加速した駆動流が、混合部において亜音速の吸引流と混合することで減速し圧力が上昇、ディフューザでは面積拡大することでさらに減速し圧力が上昇する (Fig. 4) ²⁾。このエジェクタ単体のエネルギー変換効率を示す指標として、エジェクタ効率 η_{eje} がある (Fig. 5)。これは、ノズルに流入する駆動流G_nが持つ圧力エネルギーを、どれだけ昇圧の圧力エネルギーに変換できたかを示すものであり、ノズル効率とディフューザ効率の積で表すことができる。このエジェクタ効率が向上するほど、COPも向上する。このとき、冷房能力が向上しつつ消費動力が低減するが、COP = (冷房能力 / 消費動力) であるため、冷房能力を従来同等に設計すれば、さらに省動力となる。

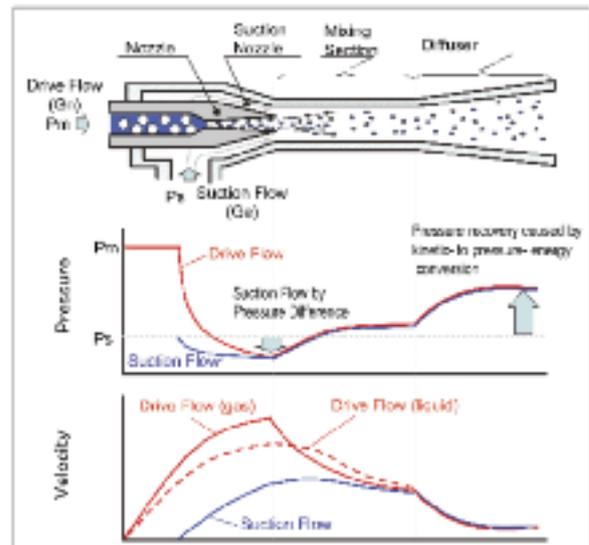


Fig. 4 Ejector Operating Principle

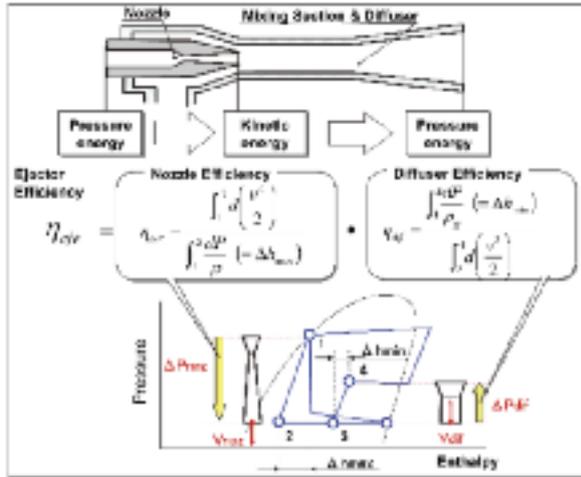


Fig. 5 Ejector Efficiency η_{eje}

2. 新省動力化技術検討① ARCによるシステム最適化

ECS STEP2での省動力効果向上に向けて、まずシステムの最適化を行った。ECSはFig. 2に示したとおり、風下エバポレータの冷媒をエジェクタで吸引・昇圧し、風上側エバポレータに冷媒を流す冷凍サイクル構成である。このような冷凍サイクルの性能（COP、冷房能力）は、エジェクタの昇圧が一定ならば、蒸発温度の低い風下側エバポレータの冷媒流量 G_e が大きいほど向上する。しかし、エジェクタは流体ポンプであり、吸引流量 G_e が低いほど昇圧量が高く効率が高くなる特性を持つ。このため、システム性能が最大となる流量比 G_e/G_r （ G_r ：全体流量 G_n+G_e ）が存在する（Fig. 6）。従って、風下エバポレータの冷房能力を、より少ない流量で最大化することができれば、エジェクタの昇圧量が高いところで使うことができ、システム性能（COP、冷房能力）を最大化できると考えた。

この課題に対して、ARC（Active Flow Ratio Control）を考案した（Fig. 7）。これは、膨張弁出口の気液二相冷媒に対し、エジェクタにつながる冷媒流路（エバポレータジョイント部）にて旋回力を付与、旋回力を維持するようにエジェクタに流入させ気液を旋回分離する。その結果、エジェクタ内に設けた風下エバポレータへとつながるオリフィス（絞り）に液冷媒のみが流れ、ノズルには、残った二相冷媒が分配されるものである。ARCの採用によるサイクル状態の変化をp-h線図上で示す（Fig. 8）。風下側エバポレータの冷房能力は、 $Q_{風下} = G_e \cdot \Delta h_{hade}$ と表せる。ARCにより、風下側エバポレータの入口のエンタルピが減少するため、 Δh_{hade} を増やすことができる。その分 G_e を低

減でき、より少ない流量比で作動させることが可能となる。またノズルは、ガス割合が大きく膨張エネルギーの大きいところで使えるようになるため、よりエジェクタを効率よく使えるようになる。

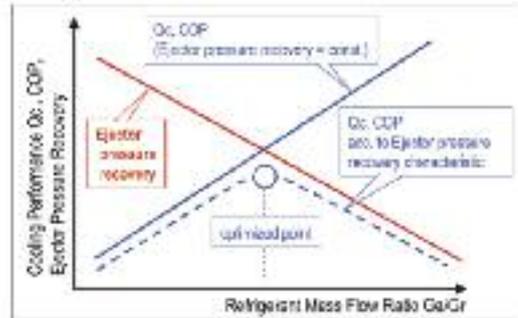


Fig. 6 Refrigerant Mass Flow Ratio vs Q_c , COP, Ejector Pressure Recovery

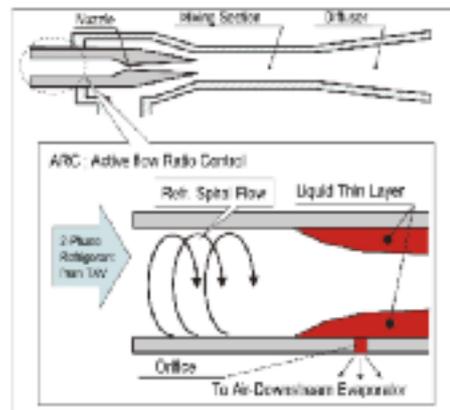


Fig. 7 Overview of ARC

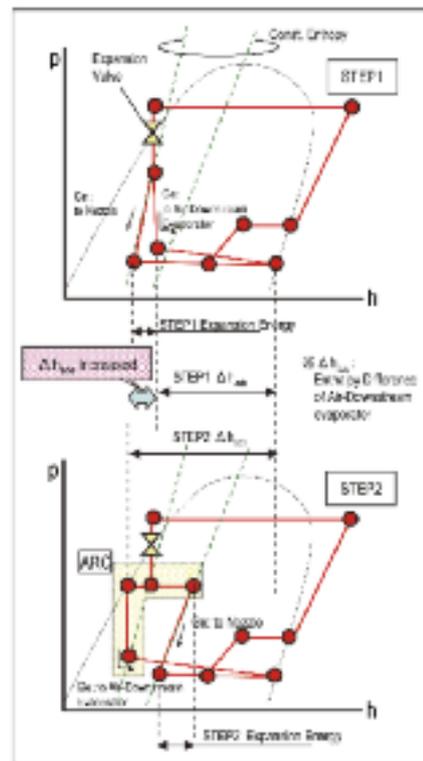


Fig. 8 Comparison on p-h Diagram

3. 新省動力化技術検討② エジェクタの高効率化

3.1 エジェクタ単体目標値

ARCの効果も踏まえエジェクタ単体の目標値を検討した。ECS STEP2では、先に述べたとおり、流量比もCOPに影響を与える。そこで、最大効果を得られる流量比を設計の狙いとした (Fig. 9)。また、(1.1) で述べたように、圧縮比低減によるコンプレッサ自体の効率向上や、ARCを採用したことにより、従来よりも、さらに風下側エバポレータの低圧損化もできる。これらを含め、エジェクタ効率 η_{eje} と年間省動力効果の関係を示したものがFig. 10である。この関係から、システム全体として省動力目標▲20%が達成可能な $\eta_{eje} \geq 30\%$ 以上を単体の目標値とした。

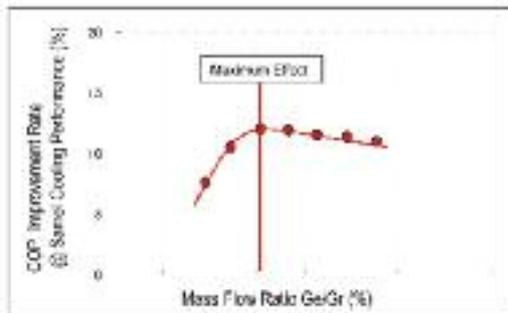


Fig. 9 Mass Flow Ratio G_e/G_r @ Maximum Effect

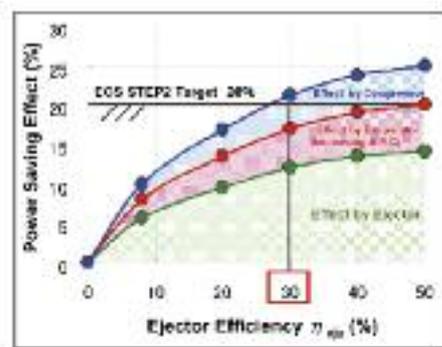


Fig. 10 Target of Ejector Efficiency (η_{eje})

3.2 エジェクタ高効率化手段の検討

上記の目標を達成するためのエジェクタの高効率化手段 (吸引加速, 曲面ディフューザ) の考え方について説明する。

3.2.1 吸引加速

混合部・ディフューザ部は、風下側エバポレータ出口からの吸引流 G_e と、ノズルから噴出された超音速の駆動流 G_n を混合し、減速することで運動エネルギーを、

圧力エネルギーに変換するデバイスである。ノズルから噴出する駆動流と、吸引流が混合する際、その速度差により渦が発生して損失が生じる。従って、この駆動流-吸引流間の速度差を減らせば、入口近傍での損失が低減できると考えられる。しかし、駆動流を減速させることはノズル効率の低下と同義であり効率向上につながらない。そこで、吸引流を減圧・加速させることができれば、速度差による損失を低減でき、さらに、吸引流を加速することで、その運動エネルギーも昇圧のエネルギーに利用でき、回収できるエネルギーの増加も見込めると考えた。ただし、システムとして意味のある昇圧は、風下エバポレータ出口からの昇圧である。そのため、(単体としての昇圧の増加分 > 吸引流の減圧分) となっていなければならない。そこで、減圧量を最適化することで効率向上できると考えた。この内容を Fig. 11 に示す。先に述べた単体としての昇圧を ΔP_{eje} 、システムとして意味のある昇圧を ΔP_{sys} と表記する。

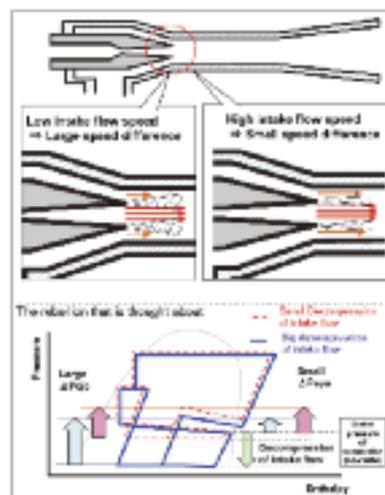


Fig. 11 Concept of Acceleration Suction Flow

3.2.2 ディフューザ曲面化

従来エジェクタの昇圧過程を見ると、混合部出口近傍で圧力が一定となる特徴がある (Fig. 4)。これは従来エジェクタが、混合部にて液の運動エネルギーを圧力エネルギーに変換しながら、気液をほぼ均質流にした後、ディフューザの面積拡大により減速させ、さらに昇圧させるという設計思想であったためである。しかし、エネルギー損失がなければ圧力は一様に上昇するはずであり、この圧力挙動から、混合部内でのエネルギー損失が大きいと推定される。

そこで、混合部・ディフューザ部での昇圧メカニズムの詳細を検討した。混合部・ディフューザ部では液

の持つ運動エネルギーを圧力に変えることで昇圧する。運動エネルギーを圧力エネルギーへと変換するためには、液滴に働く抗力相当が、圧力エネルギーに変化すると考えられる。すなわち混合部内では、気液の速度差が大きくなると、液のもつエネルギーがガスに伝わりづらいつと考えられる。よって、混合直後以降は、積極的なガスの減速により、ガスの運動エネルギーを圧力エネルギーへ変換すると共に、液とガスの速度差を作ることで液の運動エネルギーを圧力エネルギーに変換する必要がある。そこで、ガスが減速できない従来のエジェクタの断面積変化のない混合部形状を廃止し、ディフューザを含めて緩やかに流路形状が拡大していく曲面拡大形状にすることで、効率向上が可能であると考えた。

3.3 数値解析の構築

エジェクタ効率向上アイテム（吸引加速、ディフューザ曲面化）を織り込み詳細設計を進めるためには、ノズル内で衝撃波が発生する過膨張現象や、昇圧過程での気相・液相冷媒間のエネルギー授受などを計算できる、圧縮性・相変化も考慮した気液二相流の数値解析技術が必要であった。そこで今回、豊橋技術科学大学と共同でノズル、ディフューザ部の新たな数値解析を構築した³⁾。その精度検証結果をFig. 12に示す。使用した冷媒はR134aで、ノズルの実験結果は、ノズル出口背圧を変化させた場合のノズル内での静圧分布の変化を確認したものである。この実験時のノズル流量は、ノズル出口背圧を変化させても流量が一定であるため、チョークしていることが確認できている。したがって、ノズル末広部では超音速に加速しており、ノズル出口背圧を上げた場合に見られるノズル出口近傍での静圧の上昇原因は、衝撃波の発生によるものである。一般的に気体での衝撃波発生時には急激な静圧上昇が発生する⁴⁾。ノズル内の超音速二相流では、上述のとおり衝撃波が発生するものの気相と液相（液滴）の速度非平衡、温度非平衡現象が生じている。このため、衝撃波発生時には、気相は急速に減速・圧力上昇するが、液相（液滴）はその減圧加速過程で増加した運動量をもっているため緩やかに減速・圧力上昇していく。この速度緩和現象のため、ノズル内の高速二相流特有のゆるやかな圧力上昇を生じる衝撃波発生となる。このような実験結果に対し、ノズルの計算結果は非常に一致しており、ノズル内の高速二相流特有の衝撃波の影響まで、ほぼ捉えることができるほど数値計算精度が高いことが確認できた。次に、ディフューザ

での実験結果と計算結果を比較する。実験結果は2種類のディフューザ形状での昇圧特性を確認した結果である。実験値と計算値はほぼ一致しており、ディフューザ内部形状の最適化に活用できると判断した。

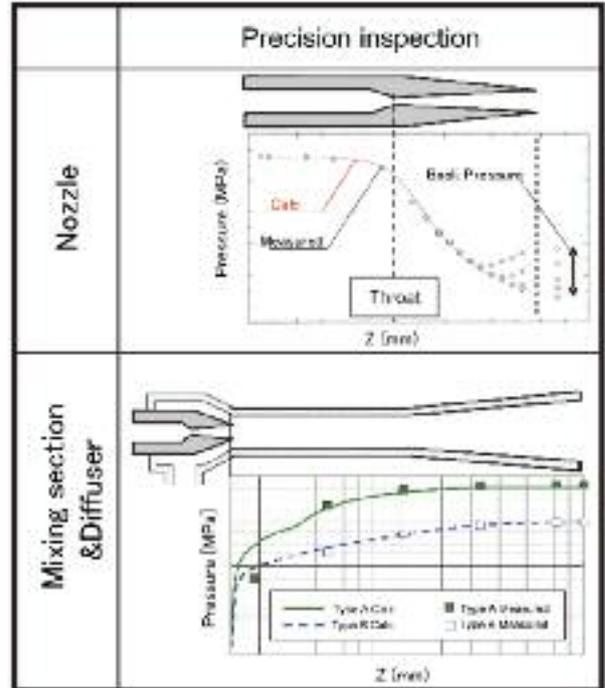


Fig. 12 Precision Inspection

3.4 数値解析による効果確認

以上の数値解析を用いて現状分析と、高効率化構想の効果を確認した。

まず、ベースとなる曲面形状は、昇圧過程が等エントロピに推移すると仮定して決定した。この形状をベースに吸引加速量（＝減圧量）の最適化を行った。予測どおり、吸引加速が大きいほど単体としての昇圧は向上していくが、システム昇圧はピークを持っている（Fig. 13）。以上のアイテムをすべて織り込み、STEP1エジェクタの昇圧過程と比較したものをFig. 14に示す（比較のために流量比は同等とした）。吸引加速の効果により、混合部入口付近での粘性損失の増加を抑制しつつ、合流後の液・ガスの運動エネルギーが効率よく昇圧エネルギーに変換されている様子が確認できる。最終的な昇圧エネルギーもARCによる膨張エネルギー増加分を上回る向上効果が確認できた。

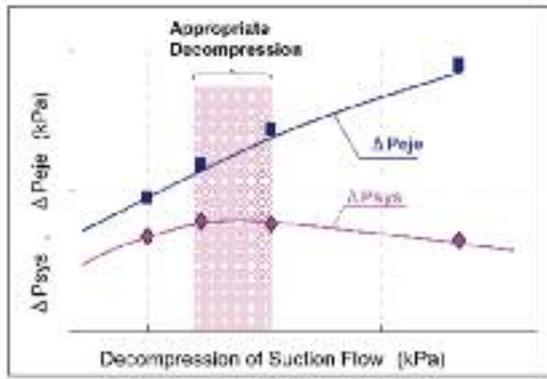


Fig. 13 Appropriate Decompression

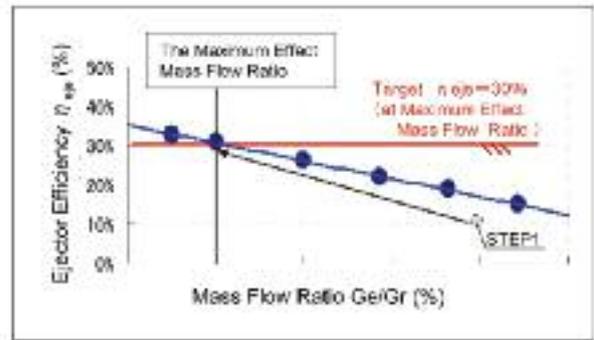


Fig. 16 Result of Measured Ejector Efficiency η_{eje}

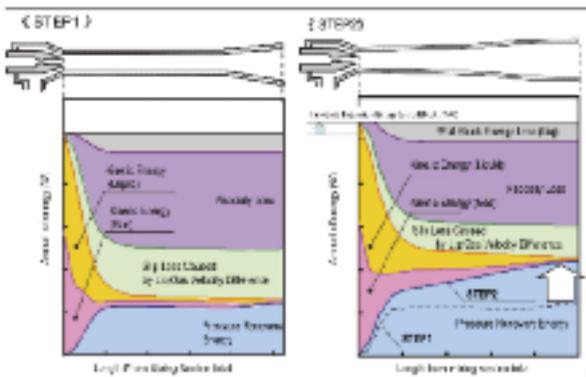


Fig. 14 Energy Detailed Observation in Diffuser

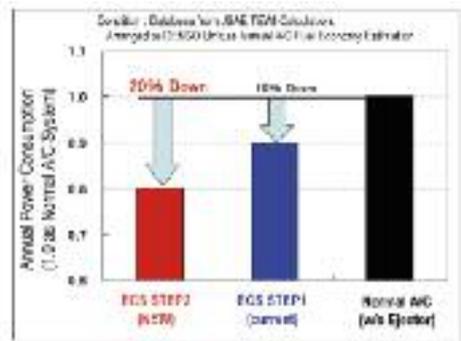


Fig. 17 Comparison Annual Power Consumption

4. 効果の実証

以上のアイテム（ARC，吸引加速，曲面ディフューザ）を織り込んだエジェクタと，これを一体化したエバポレータをFig. 15に，この製品での効率向上効果をFig. 16示す。狙い流量比での $\eta_{eje} > 30\%$ を達成している。また，各条件に稼働時間割合を加味した年間省動力効果をFig. 17に示す。目標の従来比20%低減を達成した。

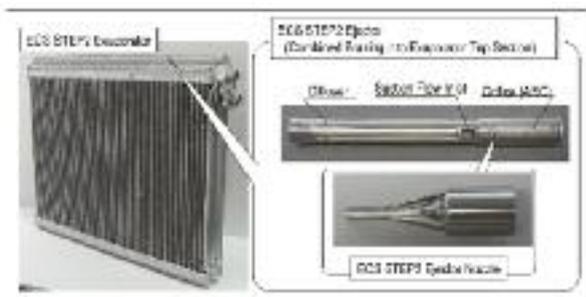


Fig. 15 ECS STEP2 Evaporator with Ejector

むすび

今回の取り組みの成果をまとめる。

- ① ARC，吸引加速，ディフューザ曲面化という新たなアイテムを考案し，システム消費動力を従来比20%低減した。
- ② 圧縮性，相変化を考慮した数値解析を，豊橋技術科学大学との共同研究により構築した。
- ③ 関連特許 13件（10件権利化済）
- ④ 本製品は，2013年1月より量産化している。

<参考文献>

- 1) 五丁，他：“エジェクタを適用した高効率カーエアコンシステム”，自動車技術会学術講演会前刷集，No.80-10（2010）
- 2) 武内，他：“二相流エジェクタを適用した冷凍サイクル”，空気調和・衛生工学会論文集，No.70（1998），pp.31-37
- 3) 若原，他：“エジェクタ内流れ予測技術開発”，自動車技術会学術講演会前刷集，No.82（2012）
- 4) 松尾一泰：“圧縮性流体力学”，理工学社

<著者>



尾形 豪太
(おがた ごうた)
熱システム開発部
エジェクタおよび、エジェクタ
を用いた冷凍サイクル技術開発
に従事



長谷川 浩也
(はせがわ ひろや)
熱システム開発部
エジェクタおよび、エジェクタ
を用いた冷凍サイクル技術開発
に従事



鈴木 達博
(すずき たつひろ)
熱システム開発部
エジェクタおよび、エジェクタ
を用いた冷凍サイクル技術開発
に従事



水鳥 和典
(みずとり かずのり)
熱機器製造3部
エジェクタおよび、マグネット
クラッチにおける生産技術開発
に従事



井川 正彦
(いかわ まさひこ)
熱機器製造3部
エジェクタおよび、マグネット
クラッチにおける生産技術開発
に従事



西野 達彦
(にしの たつひこ)
熱交換器開発部
エバポレータの開発・設計に
従事