

エネルギー機器学(第9回)

冷凍空調サイクル

平成29年度講義予定

1. (10/ 4) 伝熱の応用と伝熱機器
2. (10/11) 輻射伝熱
3. (10/18) 相変化を伴う伝熱
4. (10/25) 沸騰伝熱
5. (11/ 8) 流動沸騰
6. (11/15) 凝縮を伴う伝熱
7. (11/22) 熱交換器の基礎
8. (11/27(月))[水曜日課] 物質伝達
9. (12/ 6) 蒸気タービン・ガスタービン複合発電
10. (12/13) 冷凍・空調・コージェネレーション
11. (12/20) 定期試験

様々なエネルギーシステム

コージェネレーション



家庭用燃料電池
コージェネレーションシステムHP

エコキュート



オール電化 HP

エアコン



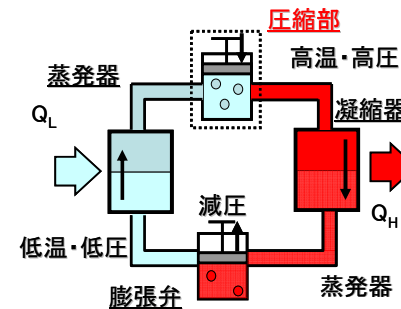
パナソニックHP

エネルギー効率が高いものの・・・

熱交換器などの機器が大容量であるため、システム全体が大きくなり、スペースの制約が支障となっている

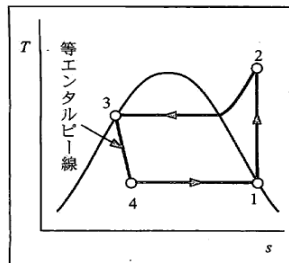
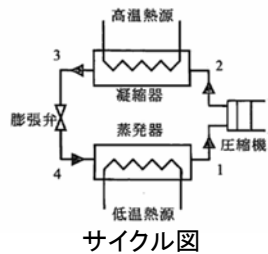
システムの小型化が進められることによって普及が加速し、現在のエネルギー消費を格段に抑えられることが期待される。

単段蒸気圧縮冷凍サイクル

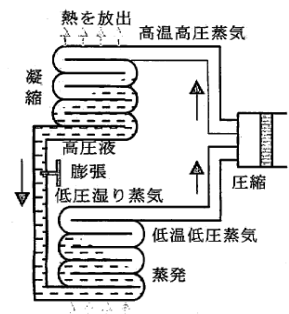


- 単段蒸気圧縮冷凍サイクルは、気体の冷媒を圧縮機で圧縮し、凝縮器で冷却して圧力が高い液体をつくり、膨張弁で圧力を下げ、蒸発器で低温で気化させ気化熱で熱を奪い取る冷凍機の熱サイクルである。

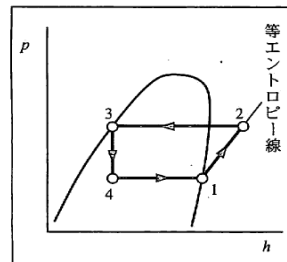
蒸気圧縮式冷凍サイクル



T-s 線図

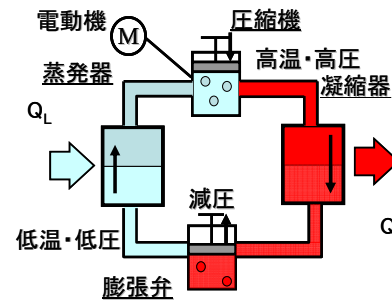


サイクル内の冷媒流動



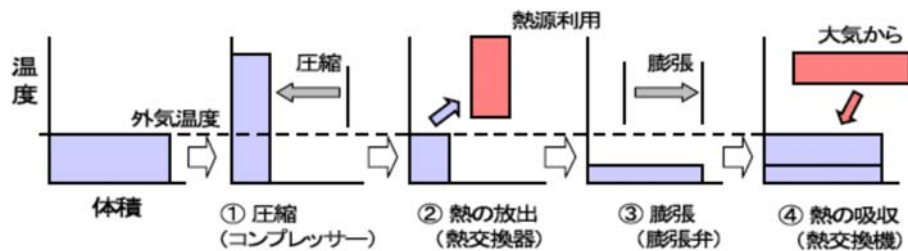
P-h 線図

ヒートポンプシステム



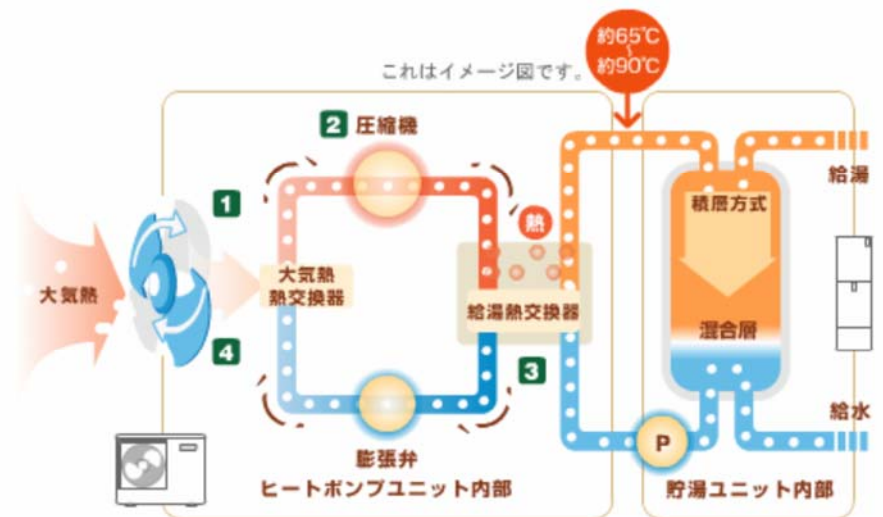
- 熱媒体を用いるヒートポンプによる熱移動では可逆(逆の順番も可能)な発熱現象と吸熱現象を共に利用する。
- 冷暖房では、熱媒体を減圧する事により周囲より温度を下げ室内(冷房時)または屋外(暖房時)の空気から吸熱させる。
- 周囲から吸熱した熱媒体を加圧することにより温度を上げ、屋外(冷房時)または室内(暖房時)の空気に対して発熱させる。

ヒートポンプの作動原理

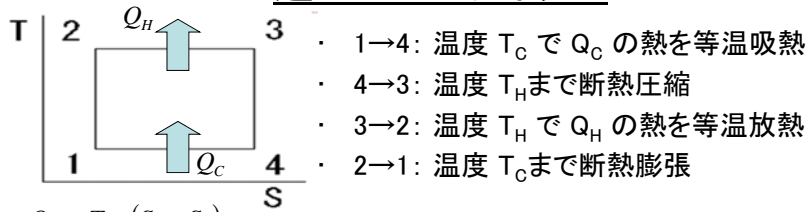


- ① コンプレッサーで、冷媒を圧縮すると圧力と温度が上がる。
 - ② 熱交換器で、温度の上がった冷媒より熱をとり、熱源として利用。
 - ③ 圧力の高い冷媒を、膨張弁で膨張させ圧力を下げると、冷媒の温度は外気温度より低くなる。
 - ④ もうひとつの熱交換器を使い、冷くなった冷媒を空気で温める。
- ①-④のプロセスによって、空気の熱を集めて熱源として利用できる。
熱交換器を逆にすることによって冷房・冷凍にも使える。
同時に使うと暖房と冷房・冷凍が同時にできます。

ヒートポンプ式給湯器



逆カルノーサイクル



- ・ 1→2: 温度 T_C で Q_C の熱を等温吸熱
- ・ 2→3: 断熱圧縮
- ・ 3→4: 温度 T_H で Q_H の熱を等温放熱
- ・ 4→1: 断熱膨張

$$Q_H = T_H \cdot (S_2 - S_3)$$

$$Q_C = T_C \cdot (S_4 - S_1) = T_C \cdot (S_3 - S_2)$$

$$W = -(Q_H + Q_C) = (T_H - T_C) \cdot (S_3 - S_2)$$

冷凍サイクルの理論成績係数

$$(COP)_R = \frac{Q_C}{W} = \frac{T_C}{T_H - T_C}$$

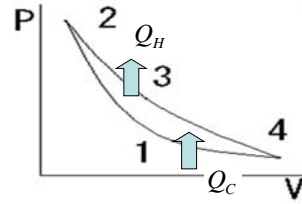
ヒートポンプサイクルの理論成績係数

$$(COP)_H = \frac{Q_H}{W} = \frac{T_H}{T_H - T_C} = \frac{T_C}{T_H - T_C} + 1 = (COP)_R + 1 > 1$$

ここで

W: 外部から供給された有効仕事 T: 絶対温度 S: 気体のエントロピー

Q: 熱量 P: 気体の圧力 V: 気体の体積



主要冷媒の熱物性値

冷媒	化学式	沸点 (°C)	臨界温度 (°C)	臨界圧力 (MPa)	LT ^a (年)	ODP ^b	GWP ^c	可燃性 ^d
CFC-11	CCl ₃ F	23.7	198.1	4.41	75	1.0	4000	不燃
CFC-12	CCl ₂ F ₂	-29.8	111.8	4.12	111	1.0	8500	不燃
HCFC-22	CHClF ₂	-40.8	96.2	4.99	15	0.055	1700	不燃
HCFC-123	CHCl ₂ CF ₃	27.7	183.7	3.67	1.6	0.02	93	不燃
HCFC-141b	CH ₂ CCl ₂ F	32.2	204.2	4.25	8	0.11	630	6.5~15.5
HCFC-142b	CH ₂ CClF ₂	-9.3	137.2	4.12	19	0.065	2000	7.8~16.8
HFC-23	CHF ₃	-82.0	25.9	4.82	260	0	11700	不燃
HFC-32	CH ₂ F ₂	-51.7	78.4	5.83	5.0	0	650	13.6~28.4
HFC-125	CHF ₂ CF ₃	-48.5	66.3	3.63	29	0	2800	不燃
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	-26.2	101.2	4.07	13.8	0	1300	不燃
HFC-143a	CH ₃ CF ₃	-47.3	73.1	3.81	52	0	3800	8.1~21.0
HFC-152a	CH ₂ CHF ₂	-25.0	113.5	4.49	1.4	0	140	4.0~19.6
二酸化炭素	CO ₂	-78.4	31.06	7.38	-	0	1	不燃
アンモニア	NH ₃	-33.4	132.5	11.28	-	0	0	16~28
プロパン	C ₃ H ₈	-42.1	96.7	4.25	-	0	3	2.3~9.5
イソブタン	C ₄ H ₁₀	-11.7	135.0	3.65	-	0	3	1.8~8.4
混合物								
R404A	HFC-125/143a/134a	-46.8	72.0	3.72	-	0	3300	不燃
R407C	HFC-32/125/134a	-43.6	85.6	4.61	-	0	1500	不燃
R410A	HFC-32/125	-51.6	71.5	4.92	-	0	1700	不燃

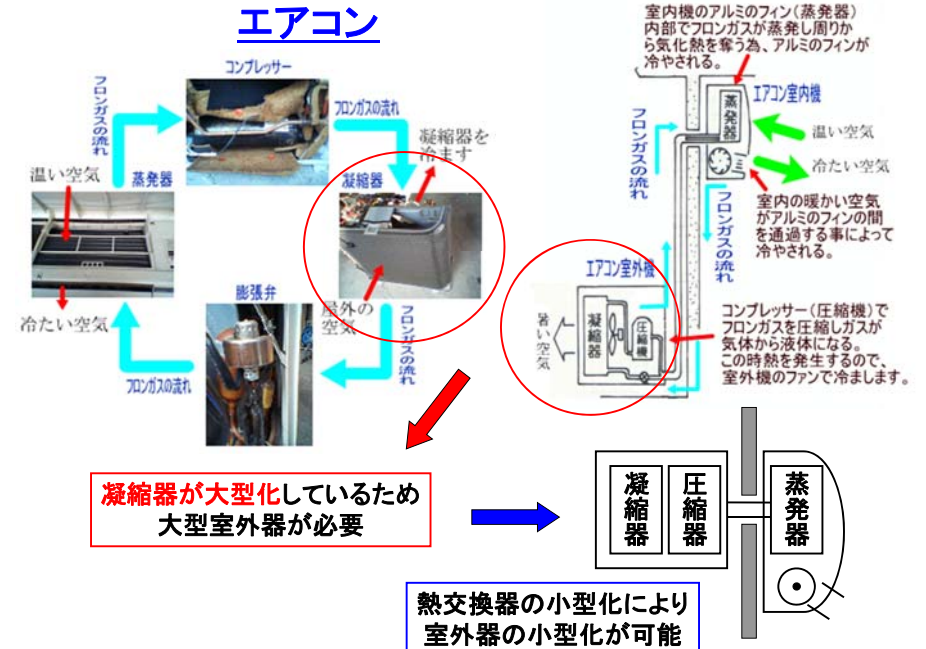
a: 大気圏での寿命

b: 成層圏オゾン層破壊能 (CFC-11 を 1 とした相対的な値)

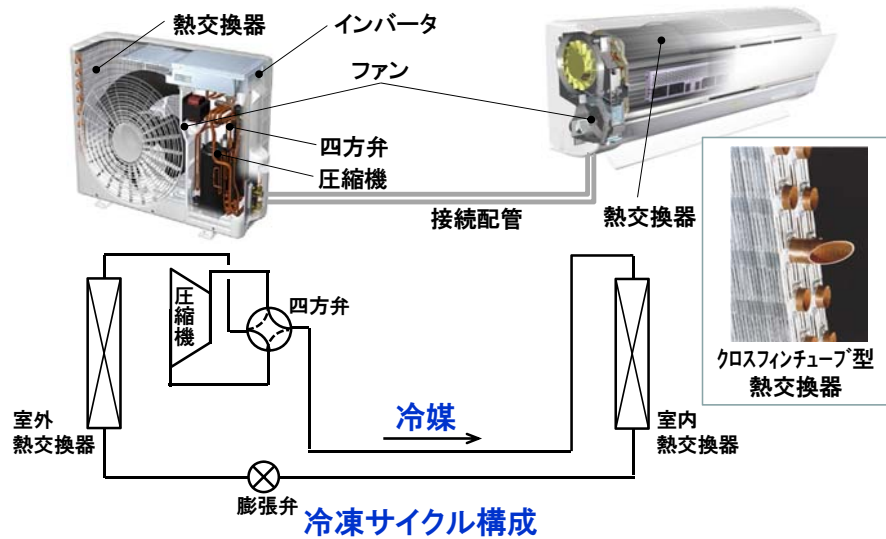
c: 地球温暖化能 (二酸化炭素を 1 とした相対値で、100 年間の評価値)

d: 爆発限界で、空気中の容積%を示す

家庭用冷房空調機



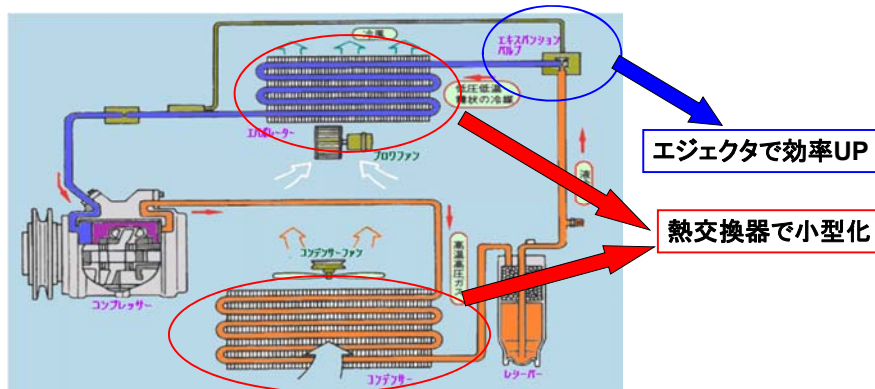
空調機の構成と冷凍サイクル



空調機の効率は冷凍サイクル効率が支配的

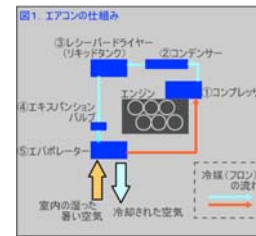
カーエアコン

カーエアコン



1. コンプレッサーによって圧縮された冷媒が半液体の状態ではコンデンサーに入る。
2. 冷媒はコンデンサーファンの風によって冷却され、さらに液化が進みレシーバーへ送られる。
3. レシーバーでは液化できなかった僅かな冷媒を液冷媒と分離する。
4. 液冷媒は膨張弁の微小なノズル穴からエバポレーター内へ噴射され気化する。
5. 気化した冷媒はエバポレーター周りの熱を奪っていき、それによってエバポレータが冷やされる。
6. ブロウファンの風によって冷風を起こす。
7. 車内の空気中の水分は冷えたエバポレーター表面で凝縮され水滴となり、車外へ放出される。
8. エバポレーターを出た冷媒はコンプレッサーに戻り再び圧縮される。

カーエアコン



基本的にはエアコンなどの冷凍サイクルと同じ
ただし、通常の冷凍サイクルと異なり、
コンプレッサー エンジン動力を利用して稼動

レシーバードライヤーを備えており、
液化しきれなかった冷媒や、不純物、水分を取り
除く。不可変動に備えて一時的に冷媒を蓄える。

機能

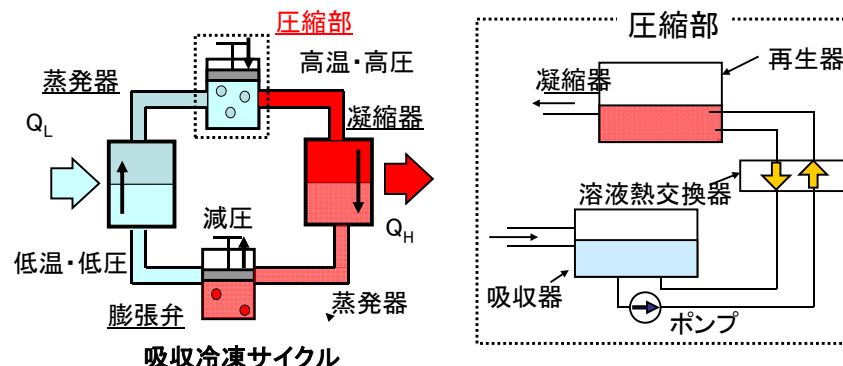
室内の温度を下げられるだけでなく、乾燥した送風によりフロントガラスや
サイドガラスの霜取りや曇り取りを行う機能も持つ

デメリット

エンジンの動力を利用してコンプレッサーを駆動させるため、エンジンの負担
が大きくなり、燃費が悪くなる。

吸収式冷凍機

吸収冷凍サイクル

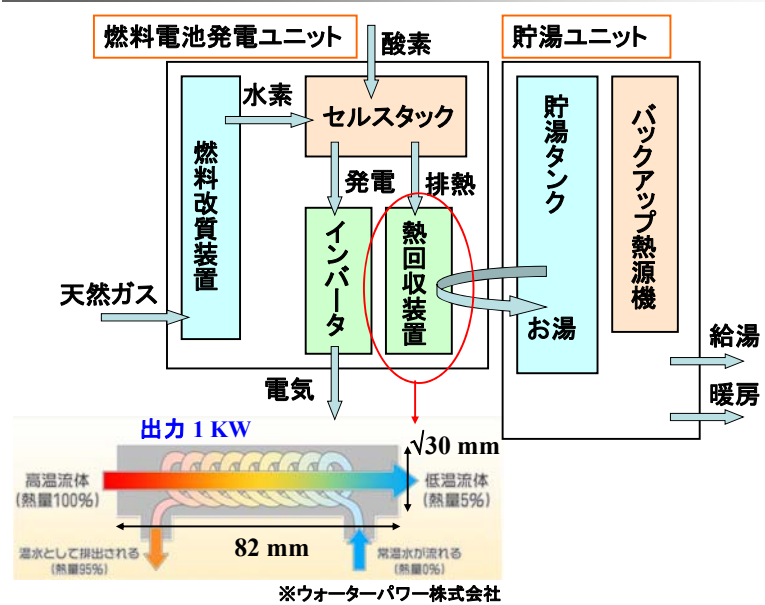


通常の冷凍サイクル(蒸気圧縮式冷凍サイクル)では圧縮機を電気によって駆動させるが、吸収冷凍サイクルではこの圧縮工程を熱エネルギーによって行う。

- 冷媒-吸収剤
- 水-臭化リチウム系: 大型建物の冷房専用機 ※ヒートポンプとしては使用不可
 - アンモニア-水系: ヒートポンプとして使用可能 ※成績係数は低い

コージェネレーション

家庭用燃料電池(エネファーム)



※ウォーターパワー株式会社

エネファーム 家庭用燃料電池コージェネレーションシステム



191-TB01+136-CF01



191-ES01+136-CF01

燃料電池発電ユニット

効率(高位発熱量基準)

総合効率:72%以上 発電効率:31.5%以上 (700W)

総合効率:54%以上 発電効率:27%以上 (250W)

効率(低位発熱量基準)

総合効率:80%以上 発電効率:35%以上 (700W)

総合効率:60%以上 発電効率:30%以上 (250W)

寸法(mm)

191-TB01 高さ895×幅890×奥行300 104 kg

191-ES01 高さ900×幅900×奥行350 135 kg

排熱利用給湯暖房ユニット(136-CF01)

貯湯温度 60℃ 貯湯タンク容量 200L

寸法(mm) 高さ1900×幅750×奥行440

質量 105 kg (満水時 305 kg)

現在のエネファームは設置スペースが限られているため、小型化させることが普及の課題！

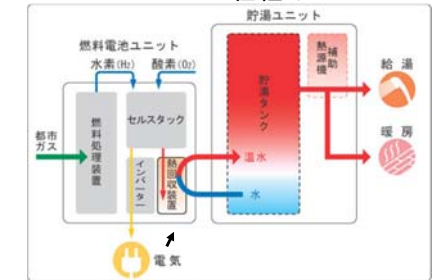
エネファームHP

燃料電池



左: 燃料電池ユニット
右: 貯湯ユニット
(エコジャパンHPより)

LIFUELの仕組み



※燃焼・風圧の違いは補助熱源機で行います。
必要な設置スペース: 幅3.5m×奥行1.3m×高さ2.6m

燃料電池システム用熱交換器の開発



燃料電池システム用熱交換器

材質: SUS316L、Niロウ付け

流体: 液液・気液タイプ

寸法: 73×205 mm

横ルフトヴァッサーグローバル

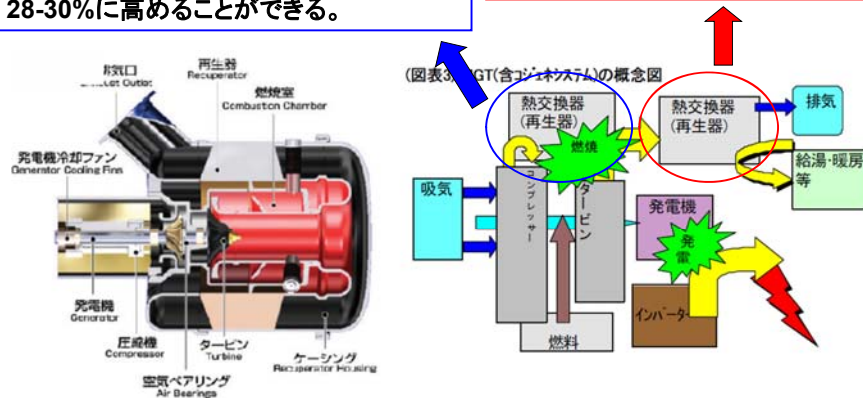
<http://www.hotfrog.jp>

戸建住宅に限定

マイクロガスタービン

MGT 単独での発電効率は15%程度だが、再生器を取り付けることにより発電効率を28-30%に高めることができる。

コージェネシステムを利用することで、エネルギー効率が70-80%に高まる。



熱交換器の小型化によりシステムの小型化が可能
熱交換器の高効率化により高いエネルギー効率が実現

エコキュート

エコキュート

ヒートポンプ技術を応用し、CO₂冷媒を用いて空気の熱で湯を沸かす電気給湯機



メリット

- 深夜電力を利用した場合給湯にかかる光熱費が抑えられる。
- 二酸化炭素は地球温暖化係数が1で代替フロン₁₃₀₀と比べて環境負荷が低い。
- 不燃性ガスなのでガス漏れしても安全。

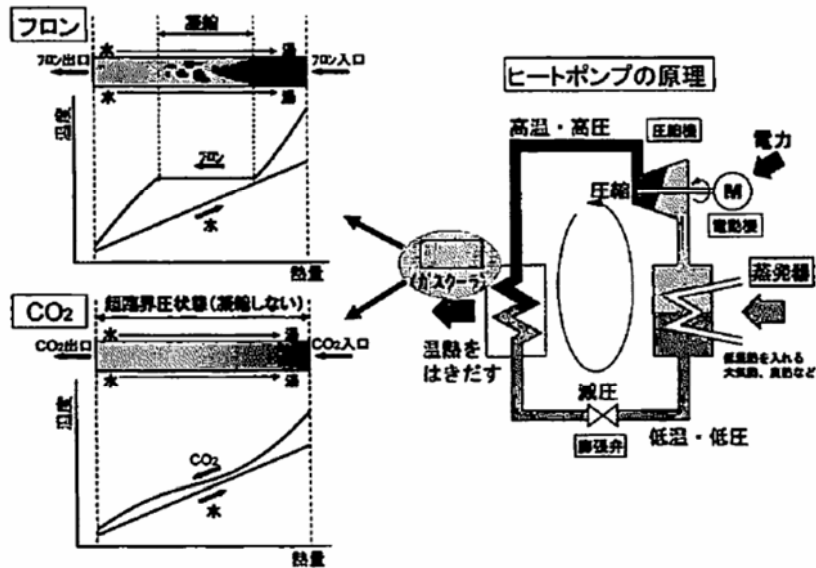
デメリット

- 従来の給湯器と比較し高価である。 → 本体料金 40万前後＋工事費
- ある程度のスペースを必要とする。
- 瞬間的な湯沸しができない。
- 修理費用が高価である。 室外機の寿命は3万時間、約10～15年で交換が必要

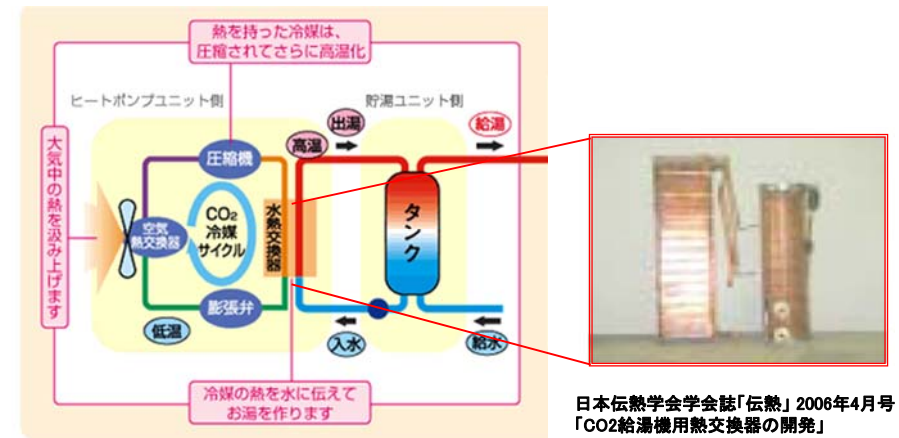
冷媒物性の比較

	HFC134a	CO ₂
Molecular mass (kg/kmol)	102.03	44.01
Boiling temperature (°C)	-26.2	-78.5
Critical temperature (°C)	101.2	31.1
Critical pressure (MPa)	4.07	7.38
Pressure at 0°C (MPa)	0.293	3.485
Latent heat of vaporization at 0°C (kJ/kg)	198.4	231.6
Vol. refrigeration capacity at 0°C (kJ/m ³)	2860	22600
Coefficient of performance (COP) (0 °C/50 °C)	4.1	3.2
Global warming potential (GWP)	1300	1

CO₂冷媒ヒートポンプシステム



エコキュート



水熱交換器部が10～12MPaと高圧

COP(加熱能力/消費電力)増大のためには

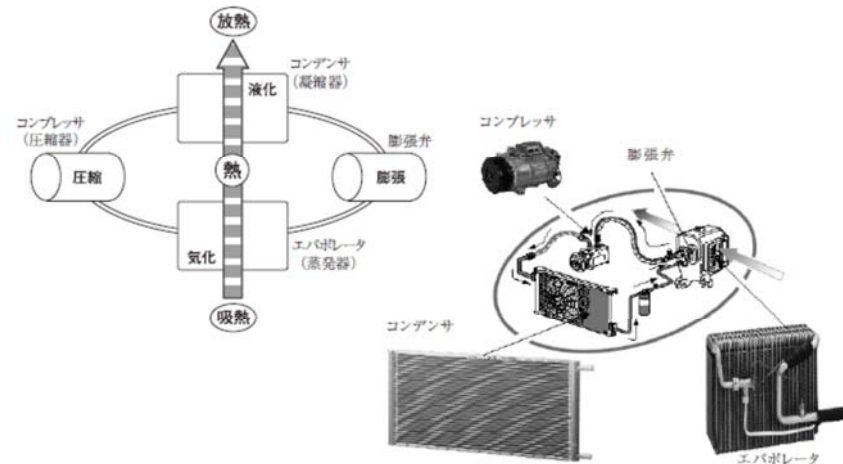
圧縮機の負荷軽減

高効率の熱交換器

熱交換器

熱交換器とは

熱を一方の物質から他方の物質へ伝える機器



冷凍サイクルにおける熱交換器

熱交換器の応用先

パソコン、自動車、燃料電池、エコキュート、発電プラント、エアコン、冷蔵庫、ボイラーなど

エコキュート用熱交換器の仕様

Table 3 Specifications of "Eco Cute" (18-22)

	デンソー	三洋電機	ダイキン	松下電器
圧縮機	可変スローク (低圧ドーム) 4.5cm ³ /rev	可変2段圧縮 ロータリー 3.3cm ³ /rev	可変スイングベン	可変スローク
給湯熱交換器 (図7)	内径3.2mm冷媒配管2パスを水流路に巻き付けたコンパクト熱交換器(a)	冷媒配管3本を水配管に接触させる伝熱管(c)	冷媒配管を巻き付けてロウ付けした水流路を平面上に蚊取り線香状に巻き上げた熱交換器(b)	3重管構造(超複雑知識付き)で伝熱面積を向上させた高効率給湯熱交換器(d)
熱出力	4.5/6.0kW	4.5kW	4.5kW	4.5/6.0kW
定格COP	3.95/4.17	(4.02)	4.02	4.21/4.20
備考	6kW多機能機に適用可能	寒冷地用でタンク内給湯熱交換器を試験		酸素供給

(2003年以降モデル)

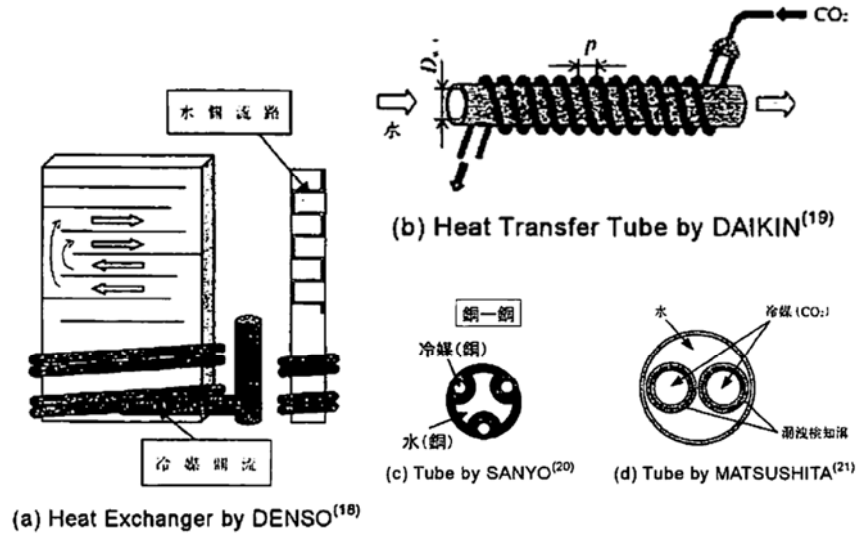
各種冷媒の物性値比較

	名称	オゾン破壊係数	地球温暖化係数	可燃性	毒性	臨界圧力 (MPa)	臨界温度 (C)
自然冷媒	二酸化炭素	0	1	無し	-	7.38	31.1
	プロパン	0	3	強燃性	-	4.25	96.7
	アンモニア	0	ほぼゼロ	弱燃性	+	11.3	132.3
HFC	R134a	0	1300	無し	-	4.06	101.1
	R410A	0	1900	無し	-	4.77	70.2
	R407C	0	1600	無し	-	4.63	86.1
HCFC	R22	0.055	1700	無し	-	4.99	96.2

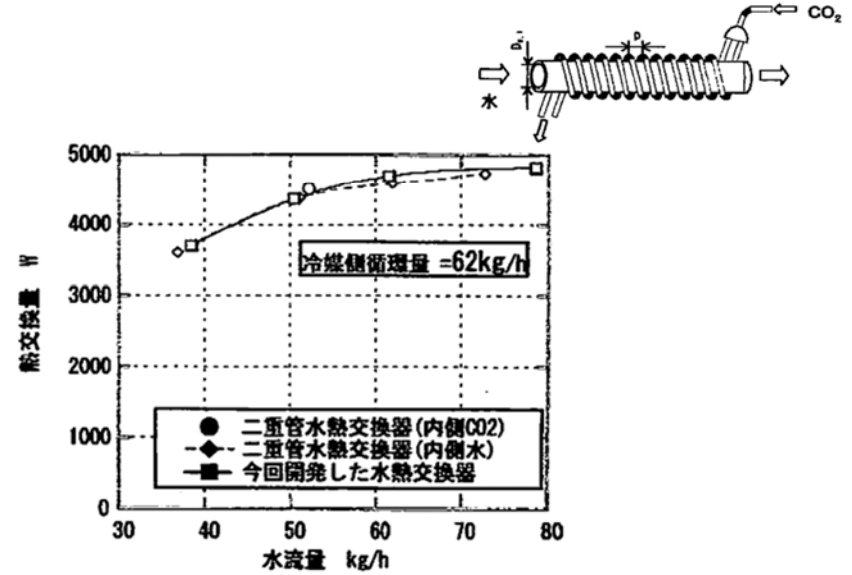
REFPROP Version6.01より

CO₂冷媒を用いた場合、約6kWの熱交換性能があれば適用可能

エコキュートに実装されている熱交換器



D社製熱交換器の性能



マイクロチャンネル積層型熱交換器の研究開発

筑波大学阿部金子研究室

熱交換器の小型化・高性能化が必要

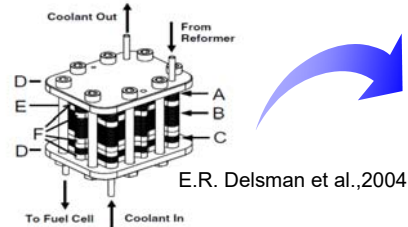
小型エネルギー機器

CO₂冷媒ヒートポンプ
燃料電池, マイクロガスタービン

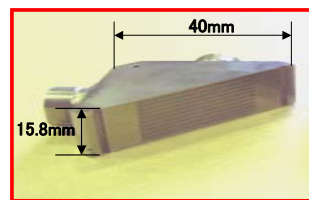
従来型の熱交換器は高効率実現のため大型化システム全体のスケールは熱交換器が支配的

マイクロチャネル熱交換器の開発

MEMS・ボルト締め



拡散接合



強度不足により使用環境が制限

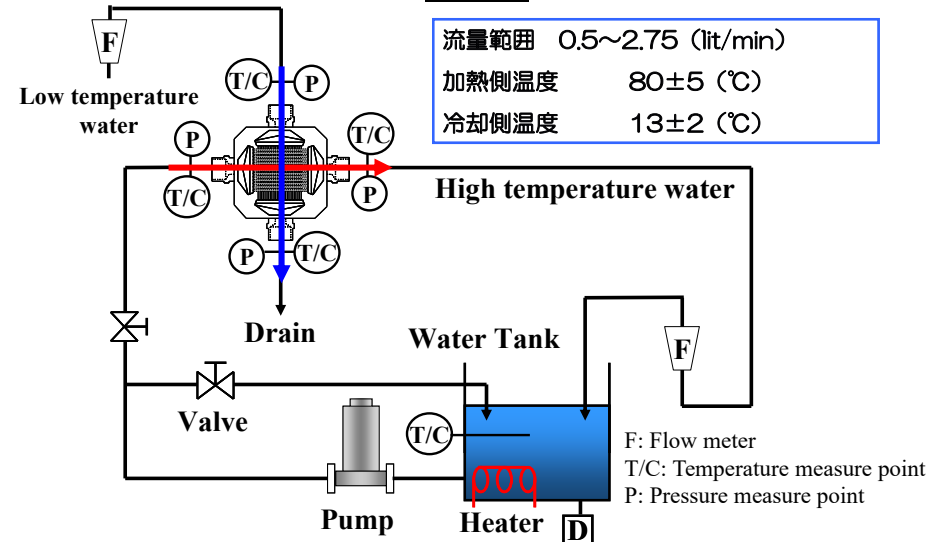
高圧・高流速条件下で使用可能

実験装置

水-水の伝熱流動特性

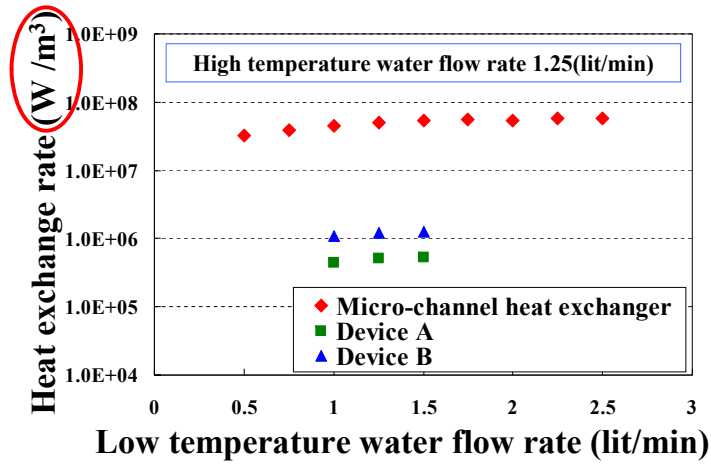
実験条件

流量範囲 0.5~2.75 (lit/min)
 加熱側温度 80±5 (°C)
 冷却側温度 13±2 (°C)



伝熱性能の比較結果

水-水の伝熱流動特性

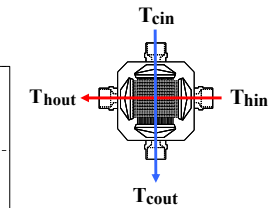
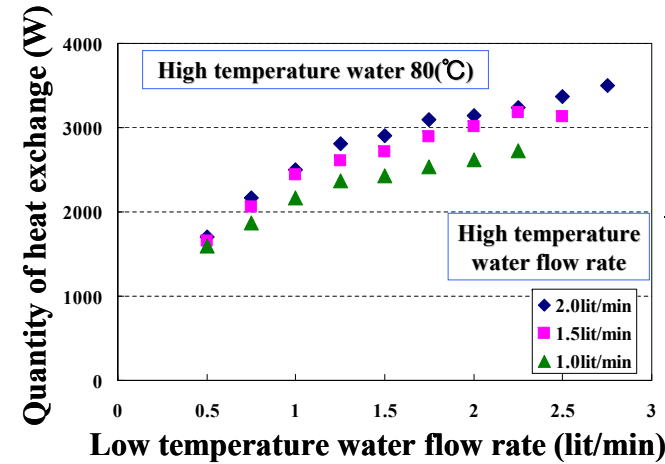


従来の熱交換器に比べおよそ100倍の性能

システムの大幅な小型化が可能

熱交換量

水-水の伝熱流動特性



熱交換量

冷却側の受熱量

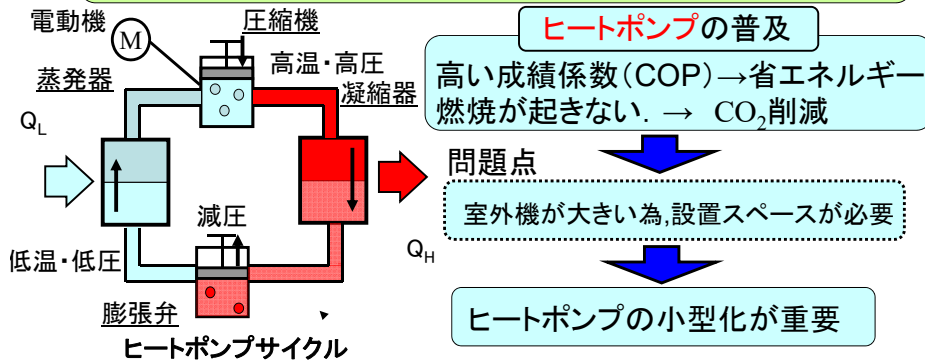
$$Q = V\rho C_p (T_{\text{cout}} - T_{\text{cin}})$$

V : 流量(kg/s)
 ρ : 1000(kg/m³)
 C_p : 4.19(kJ/kg·K)

230(g)の非常に小さな熱交換器で1500~3500(W)の伝熱性能

ヒートポンプシステムへの適用

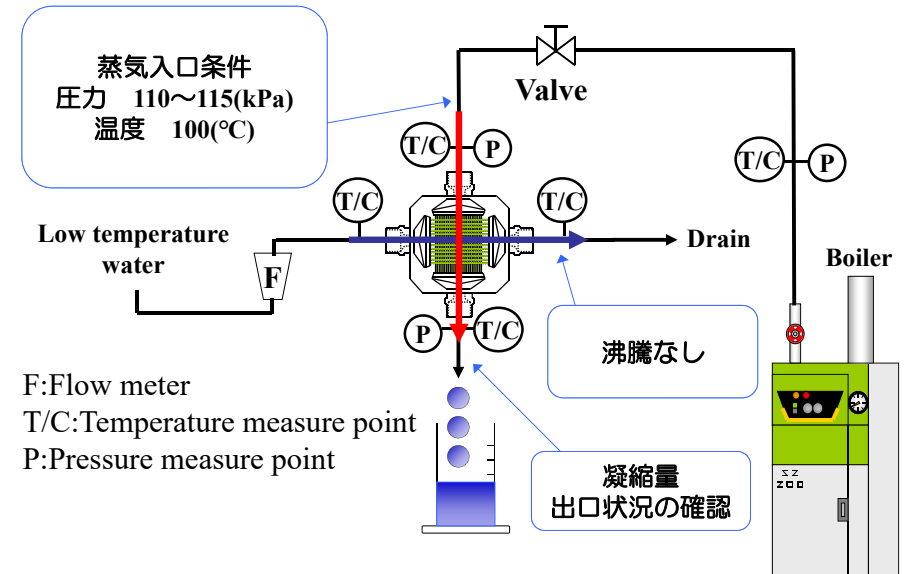
エネルギーおよび地球温暖化問題への対策
 冷暖房用と給湯用機器の省エネルギー化およびCO₂削減



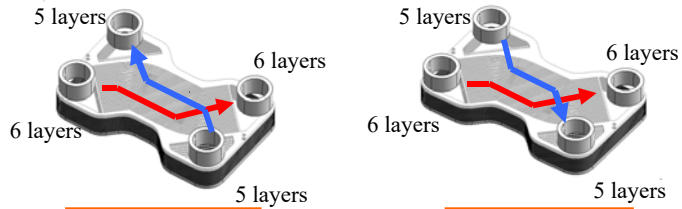
凝縮器として適応する蒸気インジェクターの小型化を実現させることで、ヒートポンプのシステムの小型化と省エネルギー化を目指す。

凝縮実験装置

水-蒸気の伝熱流動特性



新しい熱交換器の試作



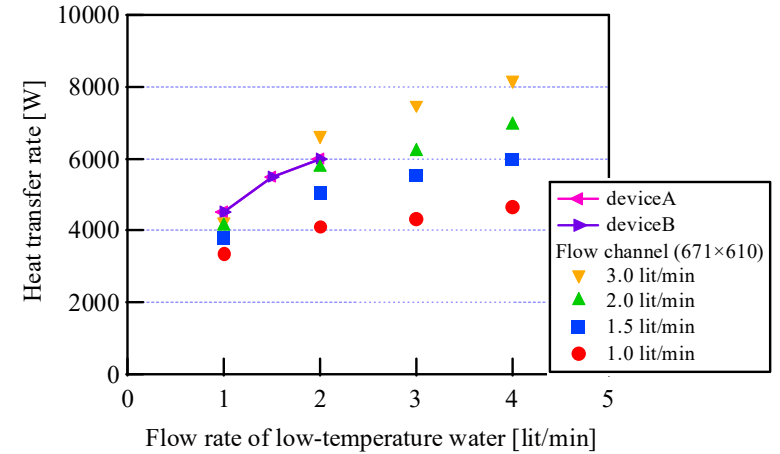
Counter flow

Parallel flow

		流路径 [mm]	積層数 [層]	流路数 [本/層]	全流路数 [本]	流路長 [mm]	伝熱面積 [m ²]
①	高温側	0.5 × 0.5	6	31	186	66	0.0218
	低温側		5		155		0.0182
②	高温側	0.25 × 0.25	6	61	366	66	0.0215
	低温側		5		305		0.0179
③	高温側	0.25 × 0.25	11	61	671	66	0.0393
	低温側		10		610		0.0358

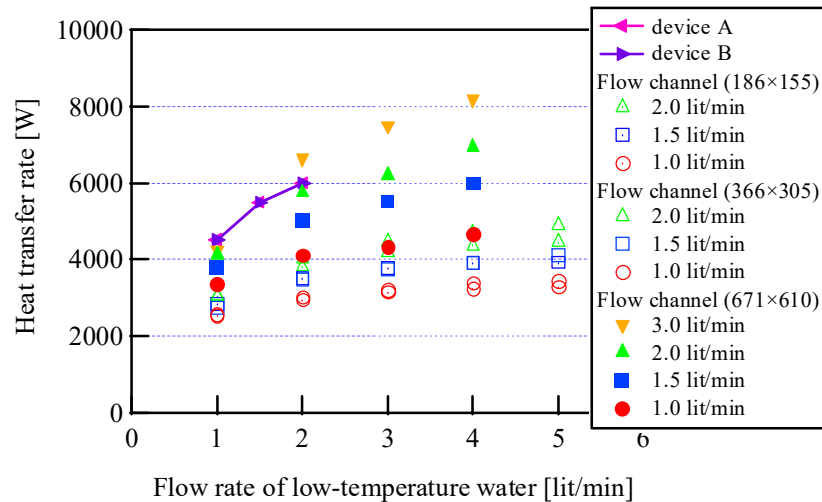
既存の熱交換器との比較

(0.25mm × 0.25mm, 671本 × 610本)



単位体積あたりの熱交換量が100倍以上であるだけでなく、全熱交換量でも、既存の熱交換器の性能を凌駕している

熱交換量に及ぼす積層数の影響



全熱交換量はチャンネル積層数に線形に相関

マイクロチャンネル内の流動挙動

マイクロチャンネルの凝縮挙動の研究報告は数件 (HFC134a等)

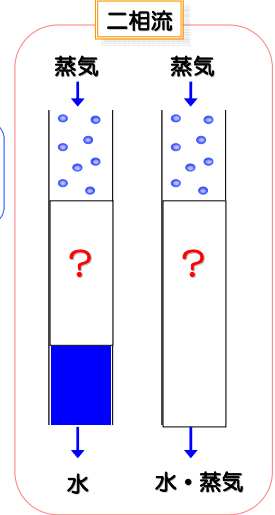
単管可視観測実験

マイクロチャンネル内の気液二相流では重力よりも表面張力の影響が大きくなり通常スケールの管内凝縮挙動とは異なる可能性



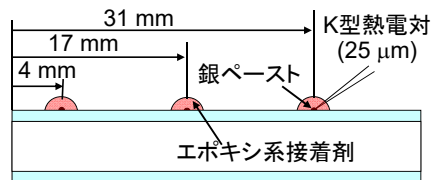
各種パラメータにおけるフローパターンの観測・伝熱特性の定量評価

本研究においては熱交換器としての性能評価

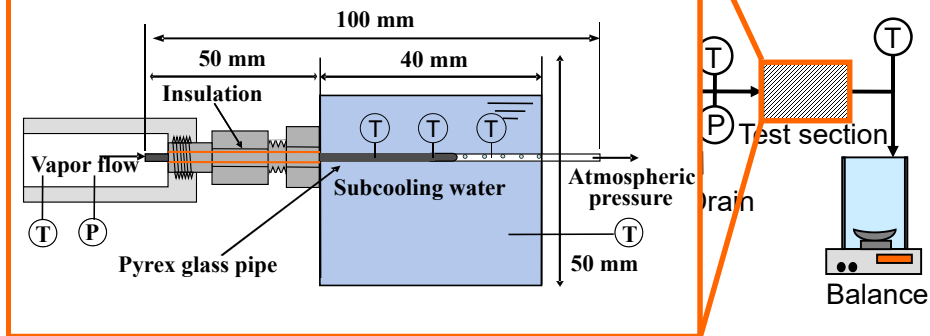


実験装置及び実験条件

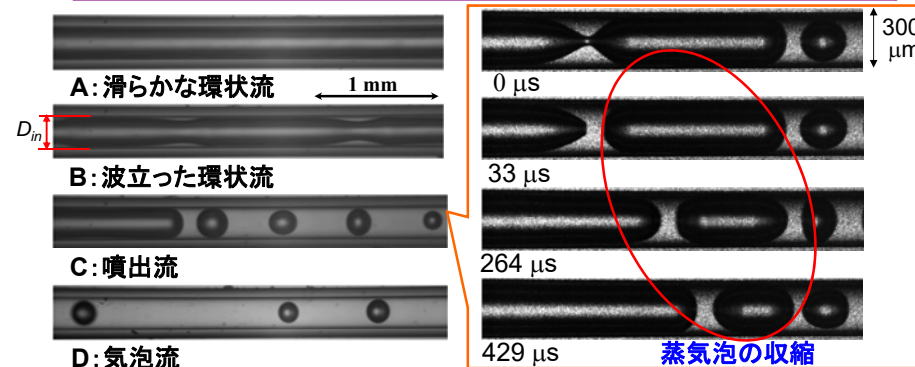
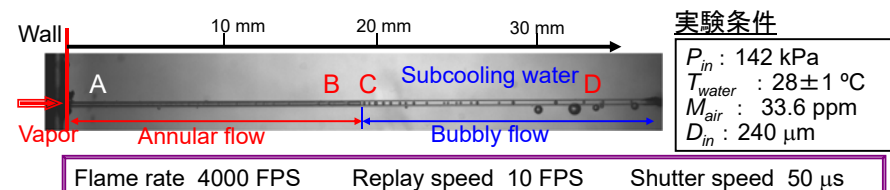
入口蒸気圧力 : 108 - 182 [kPa]
 サブクール水温 : 20 - 74 [°C]
 不凝縮性ガス濃度 : 4.2 - 33.8 [ppm]



Test section



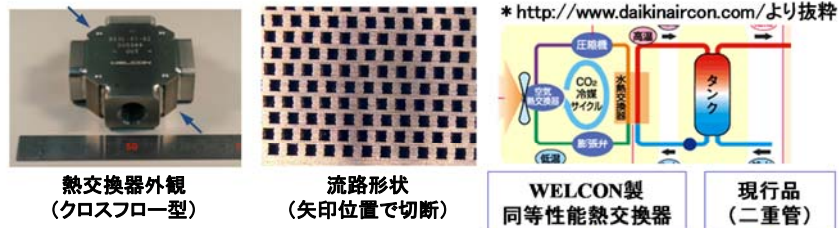
流動様式



環状流長さが凝縮に対して支配的である可能性

エコキュート用熱交換器との比較

CO2冷媒ヒートポンプ(エコキュート)の水熱交換器 加熱能力4.5kW



他社熱交換器 (伝熱学会誌、ダイキン工業株式会社カタログ、他社実施例)

(適用例) 排液温度制御用熱交換器の製作

要求仕様(半導体機器製造装置用)

1. 高温側

- 温度: 95°C ⇒ 45°C
- 流量: Max 3.0 L/min

2. 冷却水

- 温度: 13.5°C
- 流量: 約 3.0 L/min

3. 装置サイズ

- 150mm x 300mm x 240mm 以内

半導体工場への設置例

熱交換器設置前



熱交換器設置後



限られた空間での要求仕様を実現

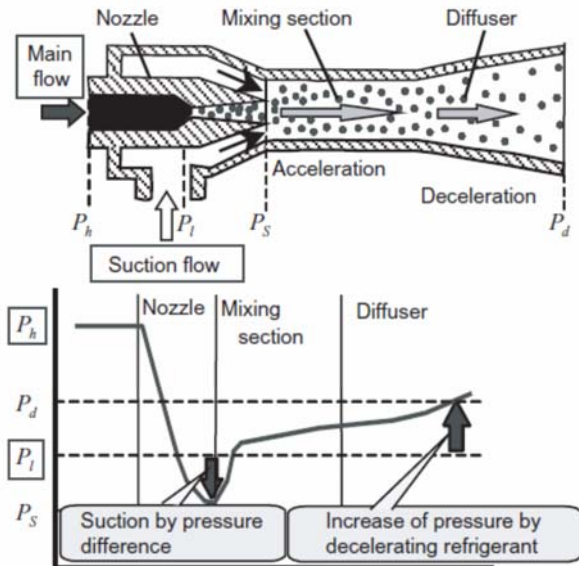
高温 Hot DIW 側

1.5L/min 93°C ⇒ 41.8°C (Target < 50°C)

低温 PCW 側

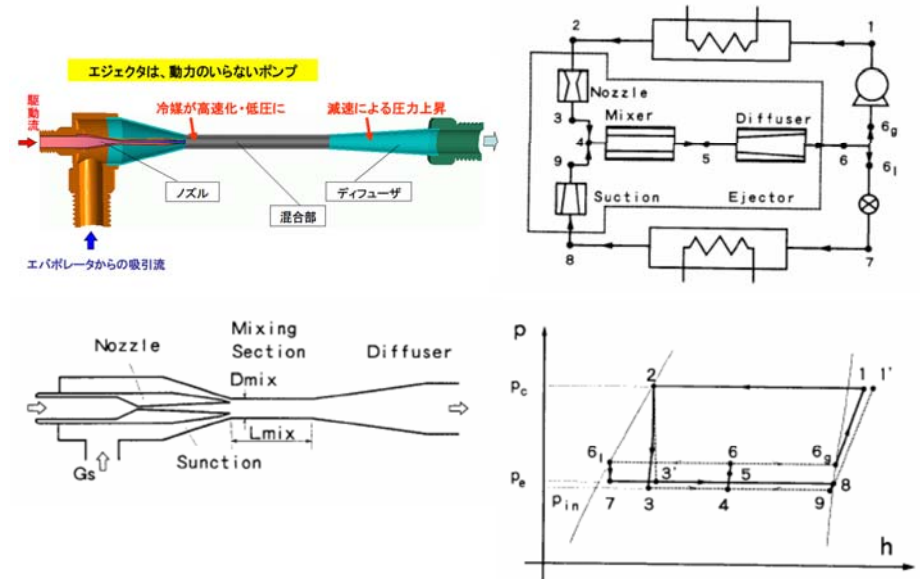
3L/min 13°C ⇒ 37.5°C

エジェクターシステム内の圧力挙動

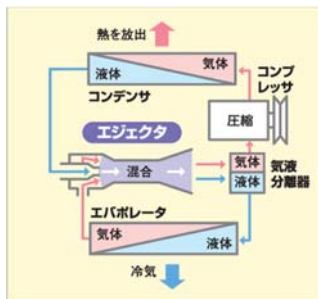


エジェクターサイクル

エジェクターサイクル



エジェクタサイクル



膨張弁 → **エジェクタ** にすることにより、

① 膨張時の渦の発生を抑制し、等エントロピー膨張が生じる。

→ 渦発生で損失していたエネルギーを冷媒の運動エネルギーとして回収ができる。

② 回収したエネルギーを、混合部・ディフューザで圧力エネルギーに変換して昇圧する。

→ 圧縮機の吸引圧力を増加させ効率が向上する。

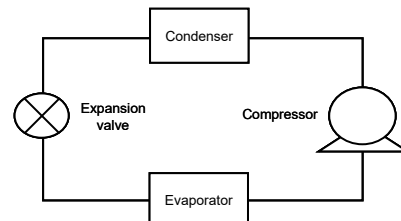
→ 蒸発器入口の冷媒状態は液体となるため、蒸発器内の圧力損失低減・熱伝達率増加などの効果による性能向上

③ エジェクタは構造が容易で、故障が少なく保守が容易で、今までのシステムに組み込める。

エジェクタを用いた冷凍サイクル

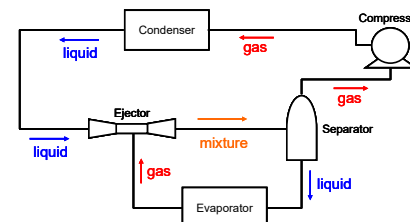
他の応用例：デンソーが実用化プリウスの燃費を1.5%向上

従来冷凍機とエジェクタサイクル冷凍機

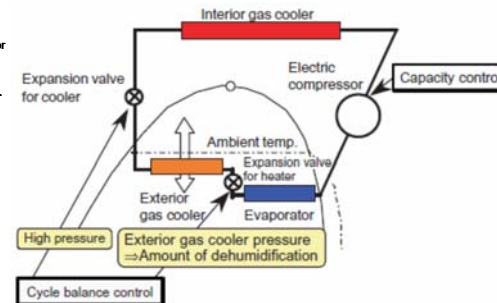


従来の冷凍機

- 膨張弁に代ってエジェクタを採用
- エジェクタにより膨張と流体の駆動
- コンプレッサ負荷を低減



エジェクタサイクル冷凍機

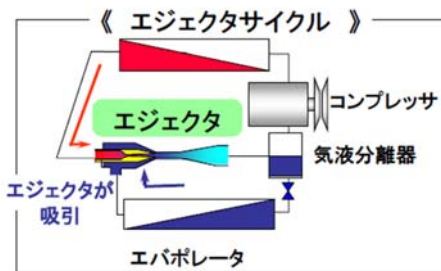
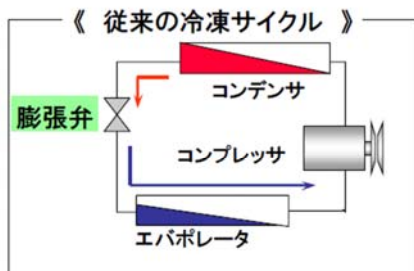


エジェクタサイクル

TECHNOLOGY

冷凍機、エアコンの効率を向上し、省エネに大きく貢献

エジェクタサイクルとは？



膨張弁に代わってエジェクタを採用。

エジェクタの役割は「冷媒の膨張」+「冷媒を循環させるポンプ」です。

エジェクタの主な利点は

① 膨張弁では渦の発生として捨てていた膨張損失エネルギーを動力として回収します。

② つまりポンプの役目をするため、コンプレッサの仕事減らすことができます。

従来サイクルでは冷媒の循環はすべてコンプレッサの役割でした。

エジェクタの採用によりコンプレッサを回すために使う燃料や電気を減らすことができます。

DENSO

サーバ冷却

サーバ冷却

現在用いられているのは

ヒートシンク(放熱器)

+

ファン

発熱する機械・電気部品に取り付けて、熱の放散によって温度を下げることを目的にした部品

強制対流を生じて熱を移動ファンをつける場合とつけない場合では設計が異なる。

特徴

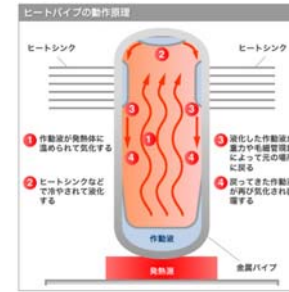
- ・ 主に材料としては熱が伝導しやすいアルミや銅
- ・ ヒートシンクの性能は熱抵抗によって表され、熱抵抗が小さいものほど性能が高い。



マザーボード上のヒートシンク

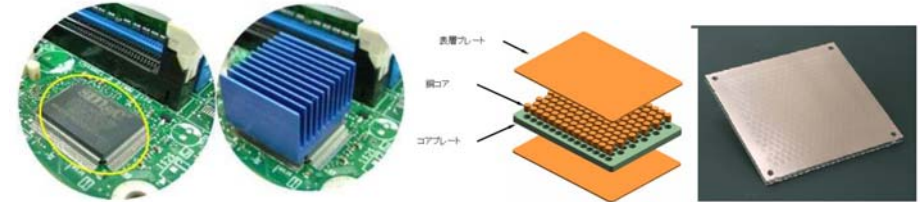
→ 左の図のように、フィンを設置し剣山状にすることで表面積が広くなり、熱が効率よく放熱される。

PC冷却(ヒートシンク)



サイズ(W×D×H): 96×96×138mm

ヒートシンクの性能向上により、ファンやヒートシンクの数の改善が可能

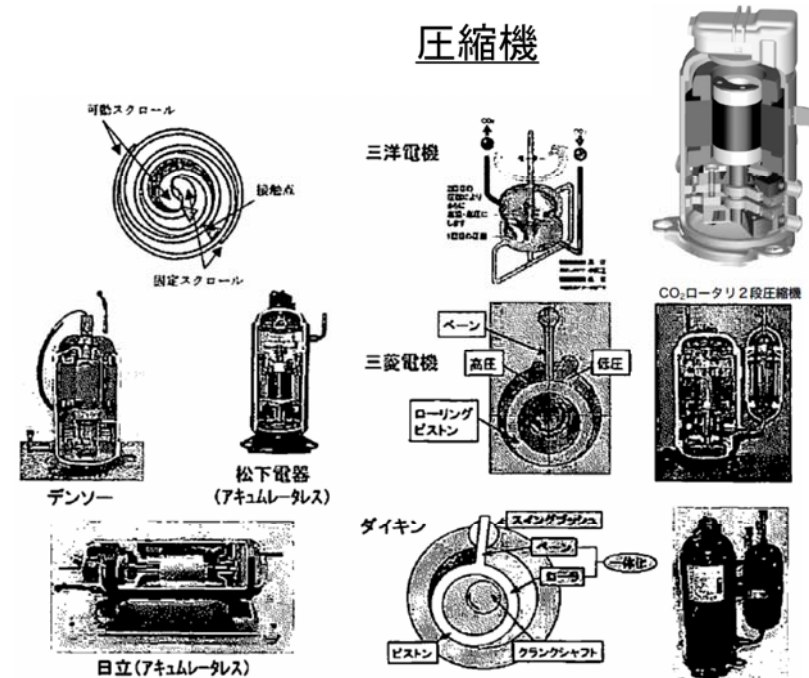


既存のヒートシンク W20×D20×H14mm

(株)WELCON 総厚 5mm

圧縮機

圧縮機



問題10-1

- HFC-134aを冷媒とする基本冷凍サイクルがある。
- 冷房運転をしているときの蒸発温度は $10(^{\circ}\text{C})$ 、凝縮温度は $50(^{\circ}\text{C})$ であった。このときの冷房成績係数を求めよ。
 - 暖房運転をしているときの蒸発温度は $0(^{\circ}\text{C})$ 、凝縮温度は $40(^{\circ}\text{C})$ であった。このときの暖房成績係数を求めよ。

問題10-1回答の方針

- (1) HFC-134a冷媒の $10(^{\circ}\text{C})$ の時の飽和蒸気の比エンタルピと比エントロピは、

$$h_1 = 404 \text{ (kJ/kg)} \quad s_1 = 1.722 \text{ (kJ/kg}\cdot\text{K)}$$

等エントロピ変化とすると、 $50(^{\circ}\text{C})$ の飽和圧力 $P_1 = 1.32 \text{ (MPa)}$

に対する比エンタルピは

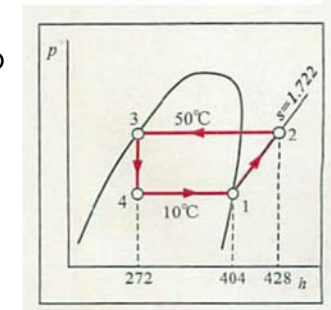
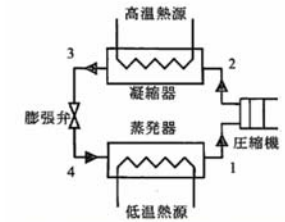
$$h_2 = 428 \text{ (kJ/kg)}$$

であるから、状態3は、飽和液であるので、その比エンタルピは、

$$h_3 = 272 \text{ (kJ/kg)}$$

また、 $h_4 = h_3$ であるから、このときの冷房成績係数は、

$$(\text{cop}) = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} =$$



問題10-1回答の方針

- (2) HFC-134a冷媒の $0(^{\circ}\text{C})$ の飽和蒸気の比エンタルピと比エントロピは、

$$h_1 = 399 \text{ (kJ/kg)} \quad s_1 = 1.727 \text{ (kJ/kg}\cdot\text{K)}$$

等エントロピ変化とすると、 $40(^{\circ}\text{C})$ の飽和圧力

$$P_1 = 1.02 \text{ (MPa)}$$

の交点の状態1に対する比エンタルピは

$$h_2 = 425 \text{ (kJ/kg)}$$

であるから、状態3は、 $0(^{\circ}\text{C})$ の飽和液であるので、その比エンタルピは、

$$h_3 = 256 \text{ (kJ/kg)}$$

であるので、このときの暖房成績係数は、

$$(\text{cop}) = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1} =$$

