

日本機械学会関西支部 第341回講習会  
新エネルギーシステムのフロンティア技術を学ぶ

これでエクセルギーを理解！ エネルギーシステムの改善実例！

<わかる！つかえる！>

エクセルギーの考え方と使い方・損失低減の具体的方法

日時 2015年11月12日(木)

会場 大阪科学技術センター

元大阪ガスシニアエンジニア  
前大阪大学大学院特任教授  
現大阪大学大学院非常勤講師  
久角 喜徳

## 講演のポイント

省エネルギーは、これまで産業・運輸および民生部門で積極的に図られてきましたが、東日本大震災による原子力発電所の停止に伴う電力不足から、太陽光、太陽熱、地熱、風力などの自然エネルギーの活用とともにコージェネレーションの普及拡大が期待されています。

このような中で、エネルギーの質を電気あるいは動力と同一価値で評価できるエクセルギーが、従来のエンタルピーによる熱力学第一法則では表わせない燃焼、伝熱、混合などエントロピー増加に伴う損失の見える化ができる面で注目されています。

この講義では、大阪ガスが2010年4月から5年間に亘って、大阪大学との共同研究講座で培ってきたエクセルギーデザイン学を多くの皆様にご理解いただき、損失の見える化とその低減を図るエクセルギーデザイン学により、新エネルギーシステムの効率向上並びに従来のエネルギーシステムの効率改善ができるスキルを身につけて頂くことを目指します。

# 講演内容

## 1. はじめに

- 1.1 エネルギーの量は同じでも、質は違う ..... 4
- 1.2 熱の概念だけでは、どういう問題が発生する？ ..... 5
- 1.3 エクセルギーを使うとどんなメリットがある？ ..... 12
- 1.4 エクセルギー解析が普及しない理由と普及に向けての取り組み ..... 15

## 2. エクセルギーの基本

- 2.1 エクセルギーとは ..... 17
- 2.2 エクセルギーとの出会い ..... 20
- 2.3 各種エクセルギーの計算手法 ..... 22

## 3. エクセルギー損失と損失低減策

- 3.1 エクセルギー損失 ..... 39
- 3.2 損失低減策 ..... 50
- 3.3 エクセルギーデザインとその適用事例(地熱バイナリー発電) ..... 58

## 4. エクセルギー解析とその実施例

- 4.1 熱物性推算 ..... 69
- 4.2 エクセルギー評価ソフトウェア ..... 70
- 4.3 ガスタービンコンバインドサイクルシステムのエクセルギー解析 ..... 74
- 4.4 家庭用燃料電池(固体酸化物形)のエクセルギー解析 ..... 78
- 4.5 家庭におけるエネルギーシステムの省エネ評価 ..... 79
- 4.6 コージェネレーション温水の利用向上検討 ..... 88

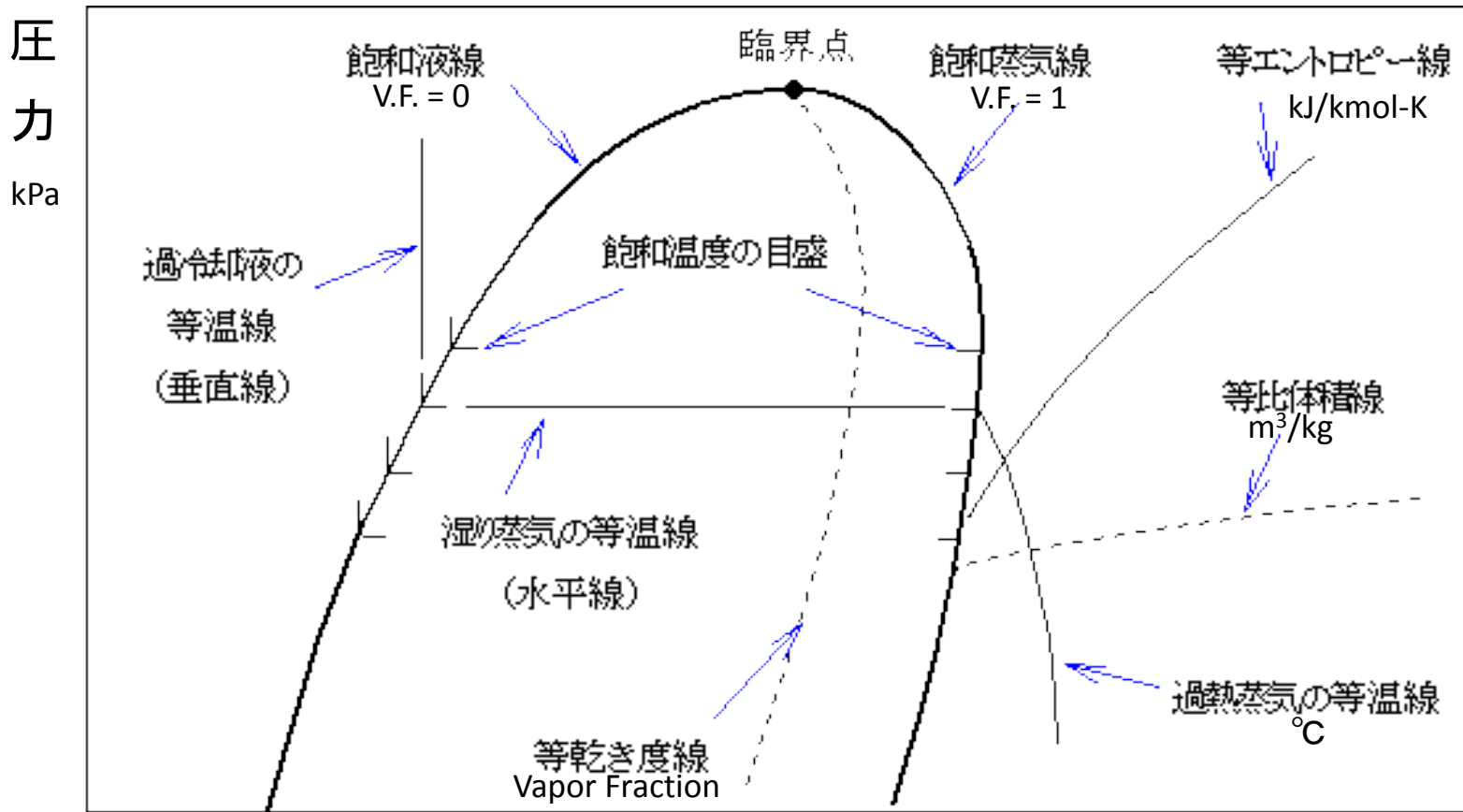
## 5. まとめ

付録:エクセルギー理解度評価試験 ..... 100

参考書文献 ..... 101

# 1. はじめに

## 1.1 エネルギーの量は同じでも、質は違う



圧力-比エンタルピー(モリエ)線図

比エンタルピー  
kJ/kmol

出典: 日本冷凍空調学会 冷凍サイクル

圧力、温度、エンタルピー、エントロピーなどは、この図のある位置を決める状態量であるが、熱(量)は状態量ではなく、圧力や温度レベルの情報を持たない。

## 1.2 熱の概念だけでは、どういう問題が発生する？

ヒートポンプの成績係数(COP)はどこまで上がる？

省エネルギーのために何故 Super Cool Biz 28°C  
Warm Biz 20°C なのか？

蒸気火力からコンバインドサイクルになると何故熱効率が上がる？

LNG火力発電所からの損失は？

未利用熱エネルギーの種類とその価値は？

# ヒートポンプの成績係数(COP)はどこまで上がる？

COP : Coefficient of Performance は便利なエネルギー効率評価指標

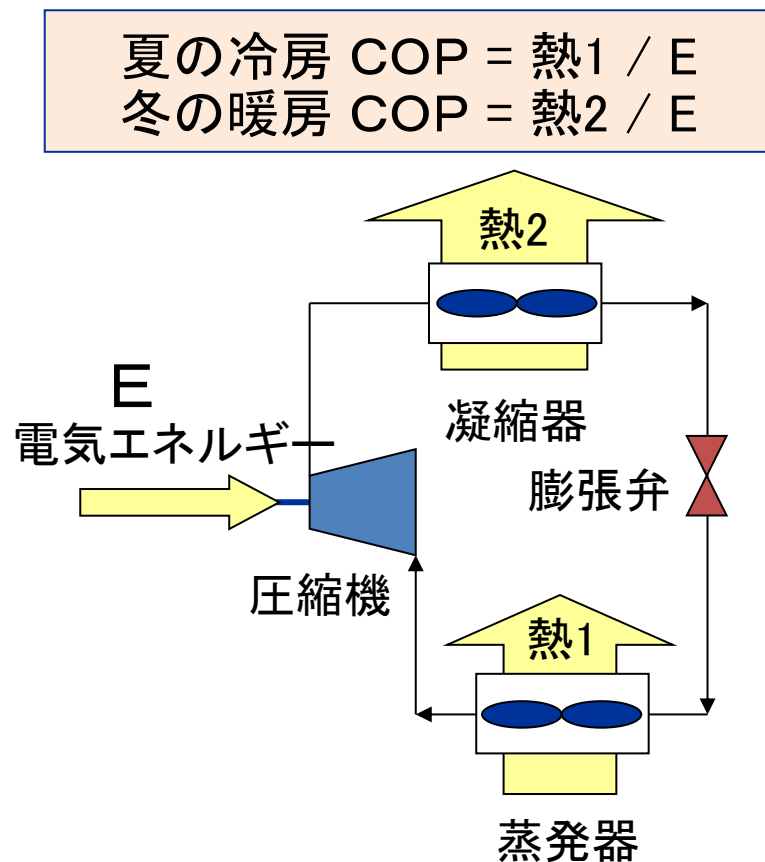
COPは熱量保存則に則る基準のため、エネルギーの質を区別できない

- ◆ COP6.5 世界最高水準のエネルギー消費効率を達成
- ◆ 部分負荷時最高COPは25.3
- ◆ ターボ冷凍機の15年前の機種と比べ年間電力料金は約68%削減
- ◆ ランニングコストの削減とCO2排出量削減に貢献



【大型ターボ冷凍機「GARTシリーズ」】

出典：三菱重工 Press Information  
2014年1月23日 発行 第 5478号



ヒートポンプの機器構成

# 省エネルギーのために何故

スーパークールビズ (Super Cool Biz) 冷房28°C

ウォームビズ (Warm Biz) 暖房20°Cなのか？

熱量保存則では、環境(基準)温度の概念が欠落

ぽかぽかをもうひとつ。



ウォームビズ期間

11月～3月

出典: 環境省ウォームビズ・プラス・ワン



「スーパークールビズ」期間

6月～9月

出典: 政府公報オンライン

冬季外気が0°C以下なら暖房20°Cはありがたい！でも外気が20°C近くなら？

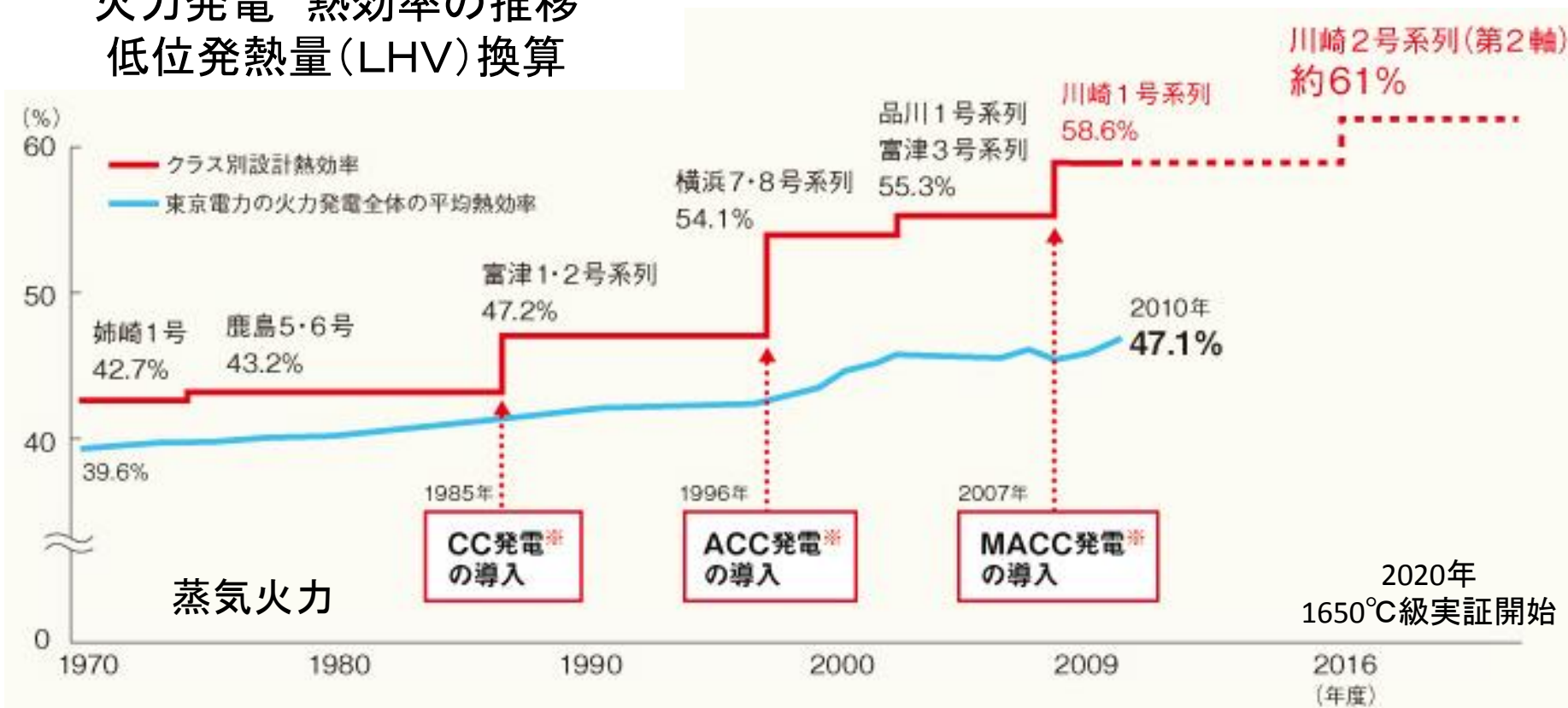
夏季外気が33°C以上なら冷房28°Cはありがたい！でも外気が30°Cまでなら？

# 蒸気火力からコンバインドサイクルになると何故熱効率が上がる？

CC : Combined Cycle

熱量保存則では、活用する熱の質を評価できない

火力発電 熱効率の推移  
低位発熱量(LHV)換算



タービン入口燃焼温度 1100°C → 1350°C → 1500°C → 1600°C

出典: 東京電力火力発電について

出典: 三菱日立パワーシステムズ株式会社  
環境影響評価準備書のあらまし



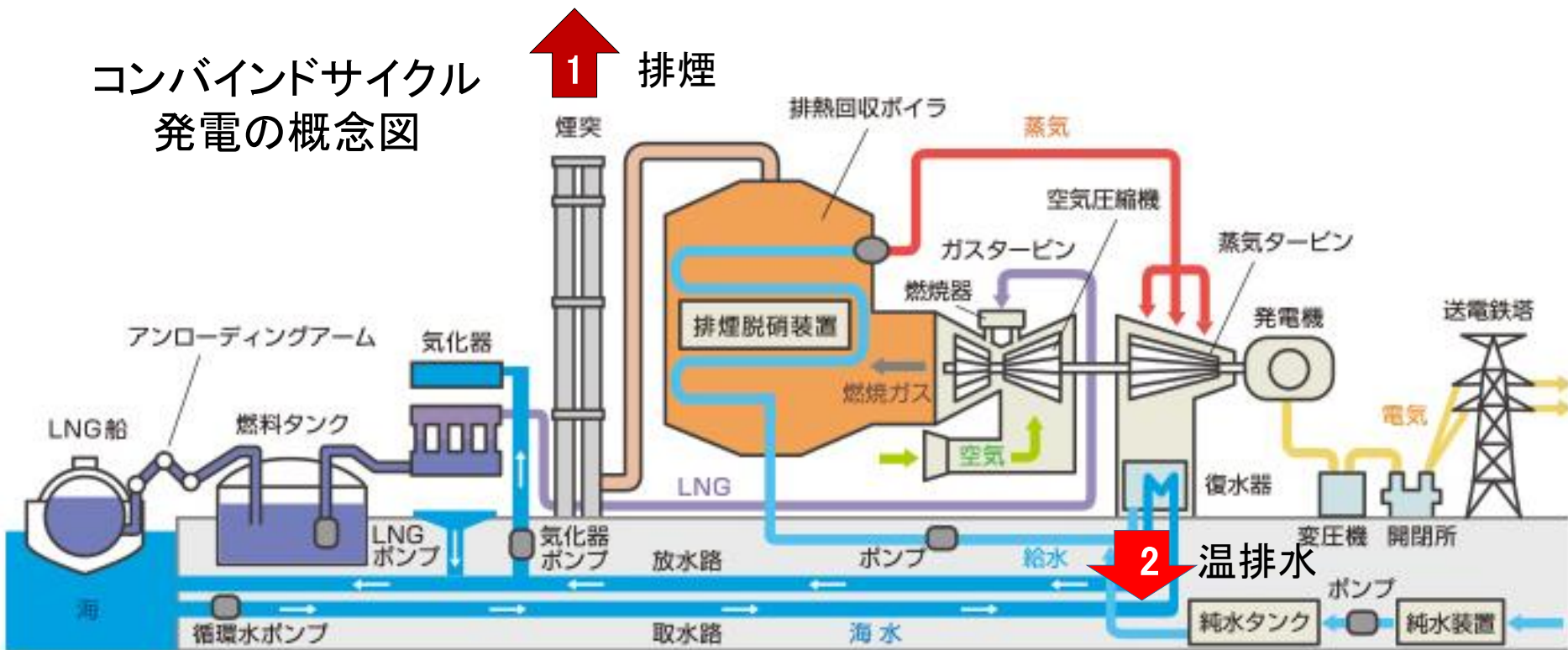
# LNG火力発電所からの損失は？

熱量保存則では、どこで最大の(ホントの)損失が発生しているか評価できない

ここで問題？

熱量保存則での損失として [排煙1] か [温排水2] かどちらが大きい？

コンバインドサイクル  
発電の概念図



出典：関西電力火力発電について

# 未利用熱エネルギーの種類とその価値は？

熱量保存則では、未利用熱エネルギーを動力削減効果として表現できない

LNGは気化熱源が必要なため、その冷熱量を評価できない

表 1.1 未利用エネルギーの種類と特徴

$\varepsilon$ : 熱のエクセルギー率

種類		形態	温度レベル	利用方法	全国の賦存量 (TJ/年)*2	全国の活用可 能量(TJ/年)*2	エクセルギー (GWh/年)
温度差 エネルギー	海水	水	5~25°C	HP*1熱源水、冷却水	8,510,138*3	8,510,138*3	19,950 ( $\varepsilon=0.00844$ )
	河川水	水	5~25°C	HP*1熱源水、冷却水	6,297,806	1,299,484	3,050 ( $\varepsilon=0.00844$ )
	地下水	水	10~20°C	HP*1熱源水、冷却水	—	—	880 ( $\varepsilon=0.0167$ )
	下水	未処理水	5~30°C	HP*1熱源水、冷却水	274,891	189,358	
		処理水	5~30°C	HP*1熱源水、冷却水	—	—	
排熱エ ネルギー	工場排熱	高温ガス	200°C~	発電、熱源、直接利用	1,286,971	1,024,641	57,490 ( $\varepsilon=0.202$ )
		温水	~50°C	熱源水、直接利用		4,860	65 ( $\varepsilon=0.048$ )
		LNG冷熱	~5°C	発電、冷熱源		—	10,940
	発電所	温水(復水器)	~50°C	熱源水、直接利用	2,829,097	2,546,187	11,810 ( $\varepsilon=0.0167$ )
	変電所・地中送電線	冷却水・冷却油	20~40°C	HP*1熱源水	20,389*3	20,389*3	95 ( $\varepsilon=0.0167$ )
	地下鉄・地下街	空気	10~30°C	HP*1熱源水	6,253	6,253	15 ( $\varepsilon=0.00844$ )
	ビル排熱	空気、水	20~40°C	HP*1熱源水	—	—	
廃棄物 エネルギー	ごみ焼却	高温ガス	200°C~	発電、熱源、直接利用	286,181	223,030	12,510 ( $\varepsilon=0.202$ )
		温水(復水器)	~50°C	熱源水、直接利用		—	
	污泥焼却	焼却熱(排ガス)	200°C~	発電、熱源、直接利用	26,109	4,273	240 ( $\varepsilon=0.202$ )
		温排水	~50°C	熱源水、直接利用		18,097	84 ( $\varepsilon=0.0167$ )
その他 エネルギー	雪氷熱	水、空気	~5°C	冷却水	—	—	
	地中熱	水、空気	10~20°C	HP*1熱源水、冷却水	—	—	
	コージェネ余剰熱	蒸気・温水	50°C~	熱源、直接利用	—	—	
合計		—	—	—	19,537,835	13,846,710	117,129

\*1 HP:ヒートポンプ

\*3 「地域熱供給事業における未利用エネルギー活用の可能性調査」NEDO、平成6年3月

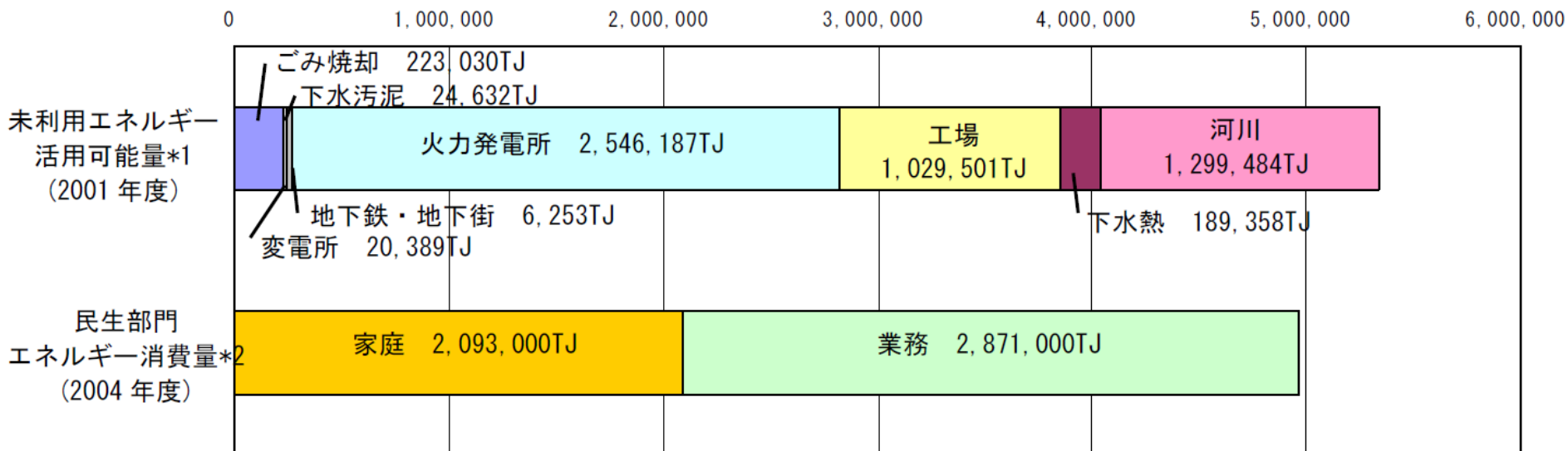
\*2 「平成16年度 新エネルギー等導入促進基礎調査[未利用熱エネルギー導入基盤整備調査]」経済産業省、平成17年3月  
出典:資源エネルギー庁 未利用エネルギー面的活用熱供給導入促進ガイド

LNG冷熱の変換効率を25%とすれば  
29,280GWh 800万世帯の電力供給に相当

# 全国における未利用熱エネルギー活用可能量と 民生部門(家庭・業務)のエネルギー消費量の比較

- ◆ わが国の民生部門のエネルギー消費量とほぼ同規模の **未利用エネルギー** が地域に存在
- ◆ 大気や水域などに捨てられる排熱や、河川水などの温度差エネルギーを、わずかでも有効利用すれば、民生部門や産業部門の省エネルギー対策に極めて有効

熱量保存則では、間違った情報発信になる恐れが



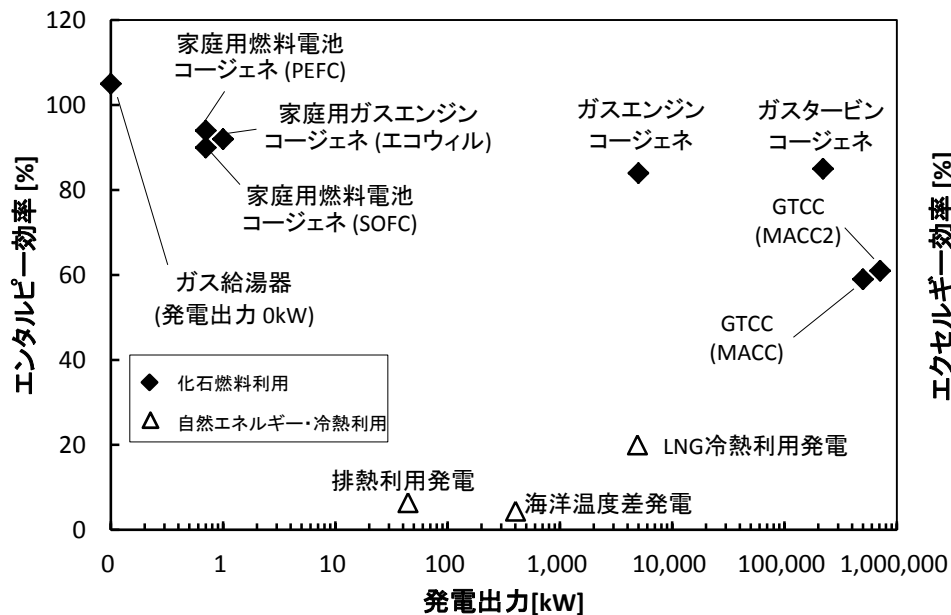
出典:資源エネルギー庁 未利用エネルギー面的活用熱供給導入促進ガイド

## 1.3 エクセルギーを使うとどんなメリットがある？

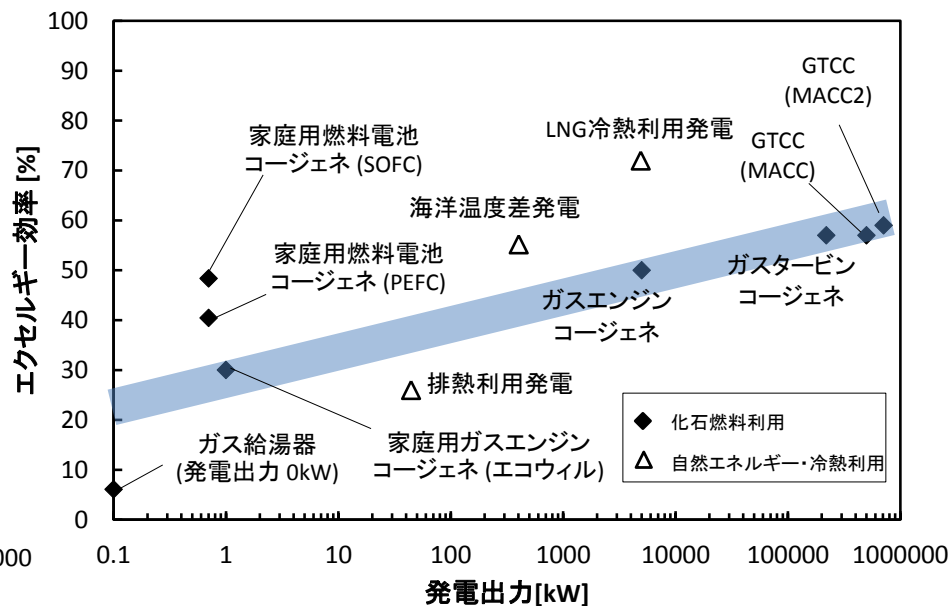
- ◆ 排熱や自然エネルギー利用システムのエクセルギー効率はエンタルピー効率より高い(普及促進に役立つ)
- ◆ 各構成機器の損失の見える化・定量化が効率向上へのヒントとなる
- ◆ エクセルギー効率は熱の質や圧力も考慮できる
- ◆ 給湯器に対するコージェネの省エネ性をPRしやすい
- ◆ 家庭用燃料電池コージェネは発電出力は小さいが高効率
- ◆ 環境温度の概念がある(外気は自然エネルギーでない)

# 各種エネルギーシステムの発電出力と熱効率

- ◆ 潜熱回収式高効率給湯器の低位発熱量基準の効率は約105%  
その温水を給湯利用した場合のエクセルギー効率は約6% (外気7°C条件)
- ◆ LNG冷熱発電の熱源は海水、その約20%が発電に、残りが気化熱に  
エクセルギーでは、LNG冷熱が電力と圧力に変換され、その効率は最高74%



発電出力とエンタルピー効率



発電出力とエクセルギー効率

出典: 堀司、平野駿、久角喜徳、若林努、毛笠明志、p.383、第31回エネルギー・資源学会研究発表会講演論文集(2012)

# エネルギー変換尺度の比較

項目	エネルギー変換尺度		備考
	エンタルピー	エクセルギー	
エネルギーの量	○	○	熱量は状態量ではない
エネルギーの質	×	○	エクセルギーは動力と質的に等価
基準温度の概念	×	○	流体の有効エネルギーを表現可能
圧力の評価	×	○	負圧は定義式から違和感あるが負
組成の評価	×	○	純酸素・純窒素の混合で損失発生
排ガス・放熱損失	○	○	常にエクセルギー<エンタルピー
混合損失	×	○	異温度液体の混合で損失発生
燃焼損失	×	○	純酸素燃焼なら損失を大幅に低減できる
回転機損失	×	○	断熱効率 100%なら損失ゼロ
伝熱損失	×	○	温度差なしの熱交換なら損失ゼロ
減圧損失	×	○	流れの制御や計測でも損失発生

エンタルピー      レンズ付きフィルムカメラ  
 エクセルギー      デジタル一眼カメラ

## 1.4 エクセルギー解析が普及しない理由と 普及に向けての取り組み

---

### 普及しない理由

#### メーカーサイド

- ◆ 計算が煩雑(環境温度も含めてエントロピーの計算が必要)
- ◆ 機器の性能特性(ノウハウ)の公開を嫌う
- ◆ 顧客への商品PRに不利(エクセルギーでは効率が小さくなる)

#### ユーザサイド

- ◆ 熱=エネルギー の教育が浸透 理解がしやすい
- ◆ エントロピー、エクセルギー、エンタルピー 言葉の理解不足
- ◆ 高エクセルギー効率の機器=高イニシャルコスト

#### 教育サイド

- ◆ 学問(数式展開)としての知識教育のみ(体験型教育の不足)
- ◆ 教材不足(良書の絶版)



# 普及に向けての取り組み

数式をほとんど使うことなく、エクセルギーとは何かを比喻で解説し、その普及への取り組みを紹介することでエクセルギー解析の効用を大阪大学から発信してきた。 訪問者数: 59,814 (2010/10/1～2014/9/18)

エクセルギーデザイン共同研究講座  
Exergy Design Joint Research Laboratory

[アクセスマップ](#) [サイトマップ](#)



エネルギー評価尺度をエクセルギーに！  
3C(Change・Challenge・Create)と3E(Enthalpy・Entropy・Exergy)の融合

[Top](#) [エクセルギーとは](#) [研究内容](#) [研究業績](#) [メンバー](#) [アルバム](#) [リンク集](#) [各種情報](#)

エクセルギー評価尺度をエクセルギーに

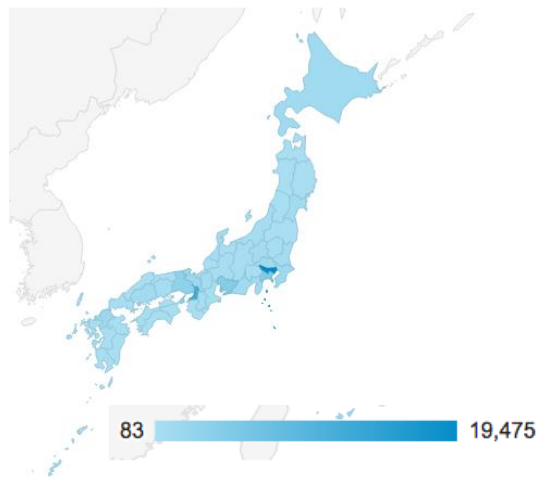
エクセルギーとは

熱などが保有するエネルギーの価値を表す概念。熱源に保有されるエネルギーは、仕事(力学的エネルギー)として取り出せるエネルギーと取り出せないエネルギーとに区分できます。前者を「exergy」または「有効エネルギー」、後者を「energy」または「無効エネルギー」と呼びます。このエクセルギーは熱源の温度の高低などに影響を受け、外気温度など基準とする温度との差が大きいほどエクセルギーは高くなります。高いエクセルギーの熱源に対してはエクセルギーの損失が小さくなるようなエネルギー変換方法を取り入れたり、また低いエクセルギーの熱源もできる限り活用できるシステムが、省エネ・省CO<sub>2</sub>に繋がると考えられます。

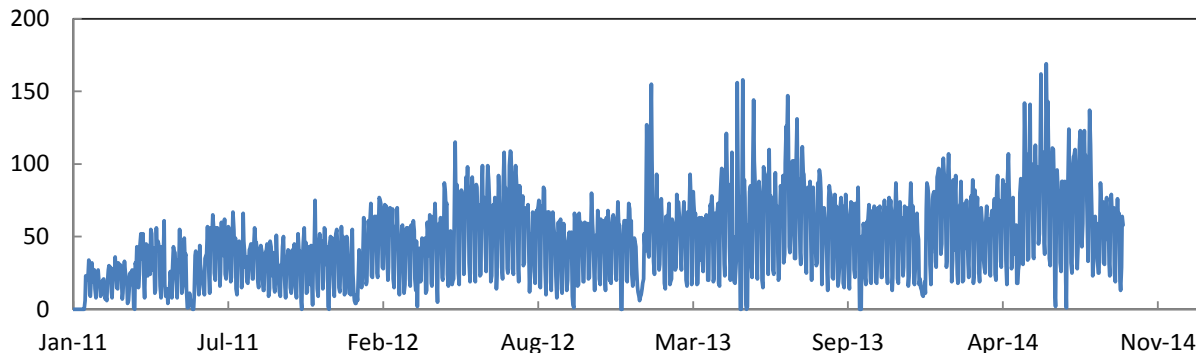
エネルギー評価尺度変更の必要性

なぜ、エクセルギーへの評価則変更が必要なのでしょう。エネルギー倫理の問題として、エントロピーの増大は再生不可能な環境破壊の後始末を未来世代に押し付けるからです。熱量保存則では、このエントロピー増大の評価ができません。たとえば

## ホームページ訪問者の推移



地域 Top 10	訪問者数
Tokyo	19,475
Osaka Prefecture	12,244
Kanagawa	4,776
Aichi	4,407
Hyogo Prefecture	3,230
Kyoto Prefecture	1,676
Fukuoka	1,626
Chiba	1,539
Saitama	1,379
Hokkaido	1,140
すべての合計	64,184





## 2. エクセルギーの基本

### 2.1 エクセルギーとは

対象とするエネルギー（もしくはそれを保有する物）から、それが置かれている「環境」において熱力学的に理論上取り出しうる「仕事」の最大量。

外界の「環境」条件が与えられないと「エネルギー」を正しく捉えられない点が、第二法則に由来するきわめて重要なポイント。

$$E_x = Q \eta = Q(1 - T_o / T)$$
$$= (h - h_o) - (s - s_o) \times T_o \quad (1)$$

ここで  $E_x$ : エクセルギー

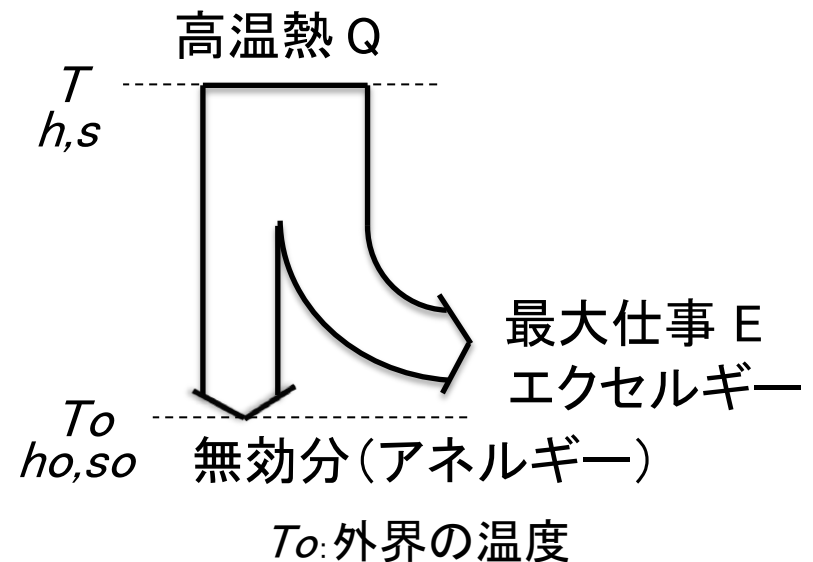
$\eta$ : カルノー効率

$Q$ : 熱量 (エンタルピー)

$T$ : 温度 [K]

$h$ : エンタルピー

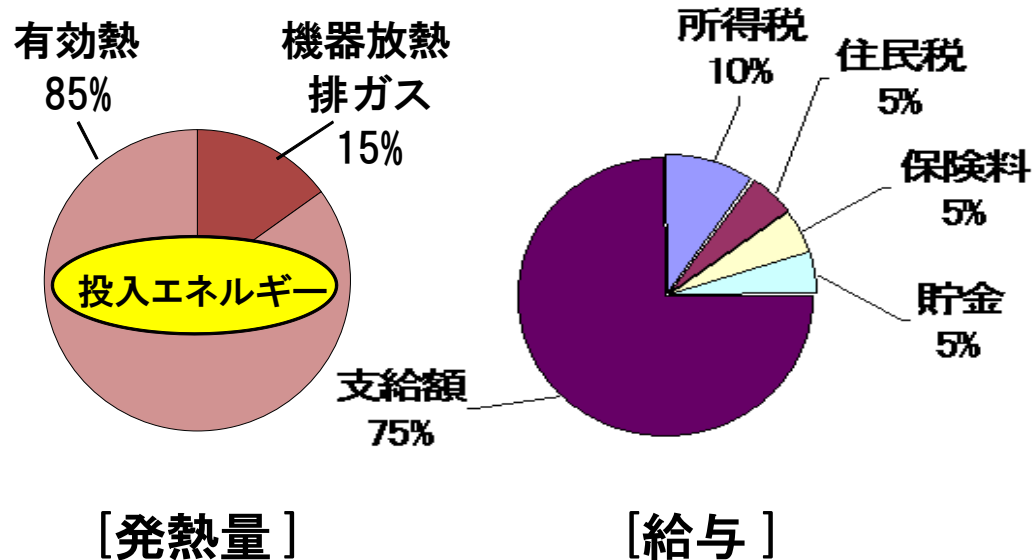
$s$ : エントロピー



添え字  $o$  (outdoor): 外界基準条件 (大気圧, たとえば  $25^\circ\text{C}$ )

# 比喩でエクセルギーを理解する

## 熱力学第一法則[発熱量] と [給与]の類似性



### 熱力学第一法則[発熱量]の熱精算

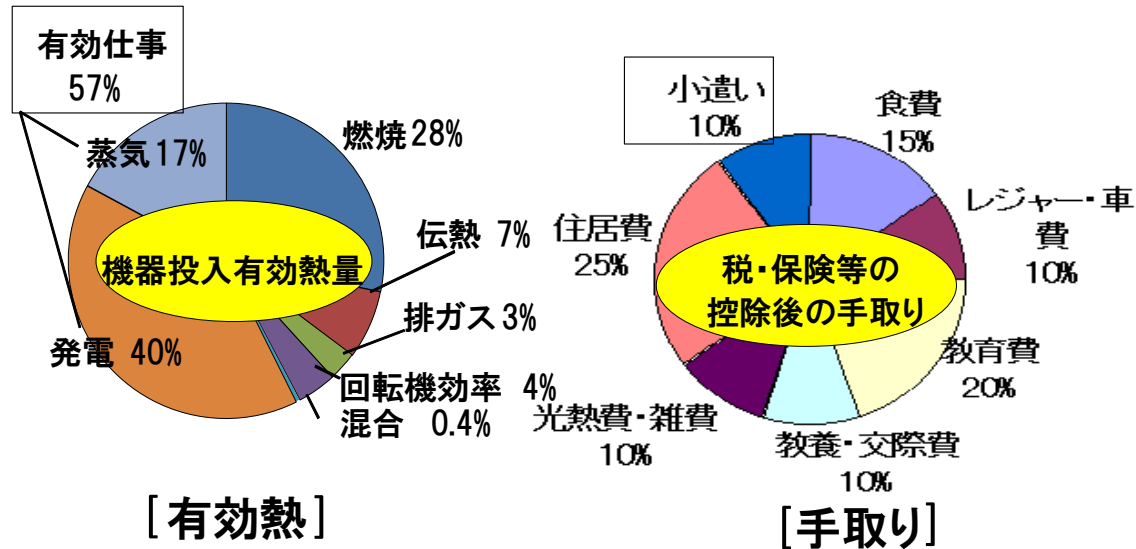
外界条件がない放熱・排熱の損失のみ表示.

インプットは、燃料、電力に加え外気など異質なものも同等に扱う

### [給与]の明細

所得税、住民税、保険料など消費税がかからない項目のみ扱う

# 熱力学第二法則[有効熱]と家計簿の類似性



$$\begin{aligned} \text{小遣い} &= \text{支給額} - (1 + \text{消費税}) \times (\text{必要経費}) \\ \text{有効仕事} &= \text{有効熱量} - (\text{外界温度}) \times \Delta S \end{aligned}$$

## 熱力学第二法則[有効熱]の熱精算

外界条件があり燃焼, 伝熱, 混合, 回轉機効率などの損失を電力や動力, 蒸気などの有効仕事と同質で扱う. 投入有効熱量は, 有効仕事と同質のものに限定さて, 外界条件と同じ外気などは含まれない.

## 家計簿

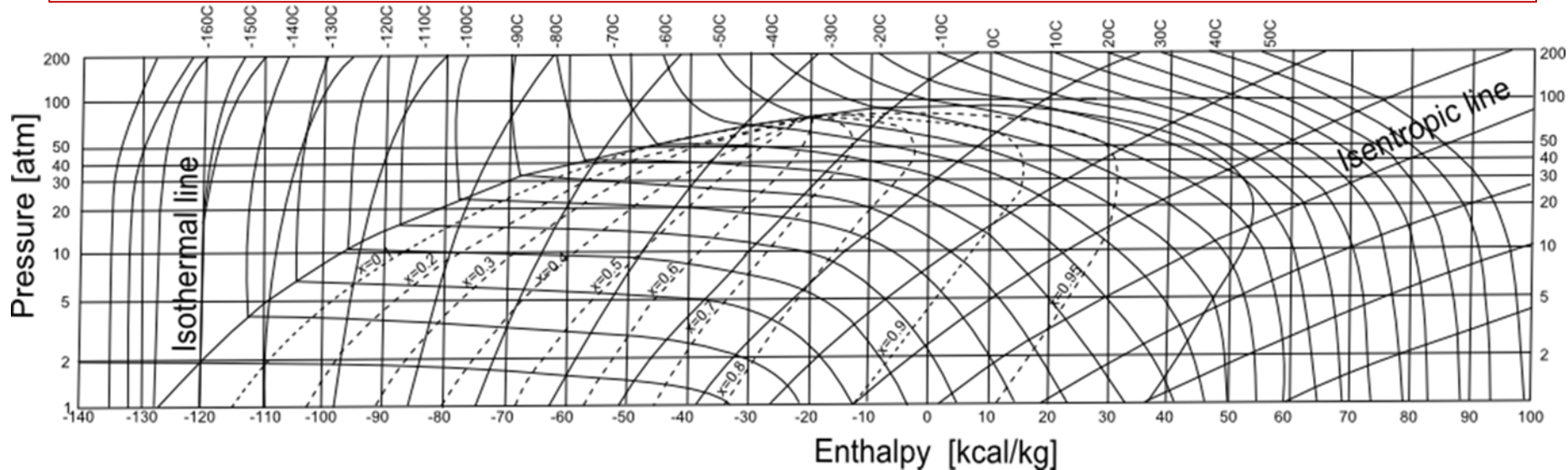
食費をはじめすべてに消費税がかかる経費である. したがって小遣いを増やすには, 先ずは大きな経費の見直しが必要となる

## 2.2 エクセルギーとの出会い

今から40年前、LNG冷熱発電の開発を担当  
冷熱や圧力エクセルギーはどうやって求める？

当時、日本初のエクセルギー専門書である熱管理士教本  
(エクセルギーによる評価と管理1977年)が出版された

LNGの組成は、メタンを主成分にエタン、プロパン、イソブタン  
大気圧での沸点は、約  $-160^{\circ}\text{C}$   
LNG 1トン当たりの物理(冷熱)エクセルギー 約  $250\text{kWh}$  (大気圧)  
化学エクセルギー 約  $14,000\text{kWh}$  (評価温度  $20^{\circ}\text{C}$ )



出典: Shellブルネイ液化天然ガスのモルエル線図

# エクセルギーによるLNGチェーンの現状分析

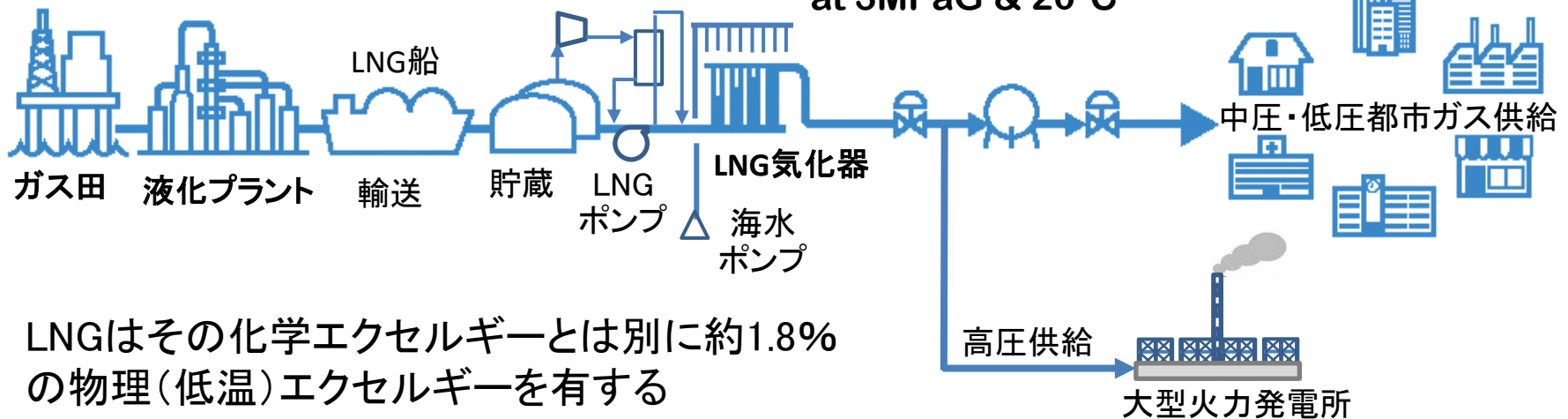
上流(ガス田開発・液化) → 下流(受入・消費)

液化に必要な  
一次エネルギー  
**500 kWh/LNG-t**

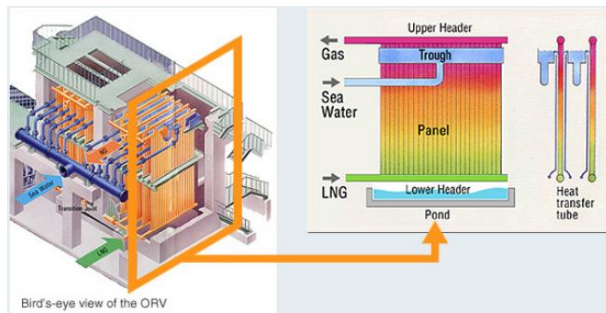
LNGタンク内の  
冷熱エクセルギー  
**249 kWh/LNG-t**

都市ガスの送出  
圧力エクセルギー  
**125 kWh/LNG-t**  
at 3MPaG & 20°C

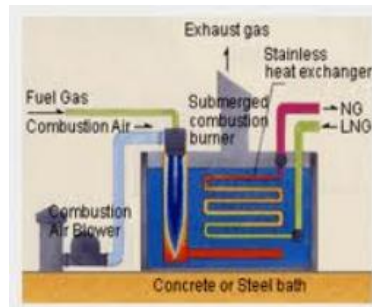
化学エクセルギー  
**14,000kWh/LNG-t**  
**45MJ/Nm<sup>3</sup>**



LNGはその化学エクセルギーとは別に約1.8%の物理(低温)エクセルギーを有する



ORV(Open Rack Vaporizer)



SCV(Submerged Combustion Vaporizer)

LNG冷熱の約半分はガス送出圧力に利用。しかし残りは、気化器で捨てられている

出典:住友精密工業

## 2.3 各種エクセルギーの計算手法

熱エクセルギー

圧力のエクセルギー

定常流動系の物理エクセルギー

化学エクセルギー

混合・分離のエクセルギー

除湿・加湿のエクセルギー

原子核のエクセルギー

電磁気のエクセルギー

光のエクセルギー

# 熱エクセルギー

圧力が一定で環境温度 $T_0$ になるまでに得られる最大仕事

カルノー効率の定義より,

$$W = Q \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (1)$$

相変化時など温度 $T$ が熱移動後も変化しない場合は $W$ が熱エクセルギーとなる.

熱移動後 $T$ が変化する場合に微分を取って,

$$dW = dQ \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (2)$$

とする. 圧力一定の場合,  $dQ$ は,

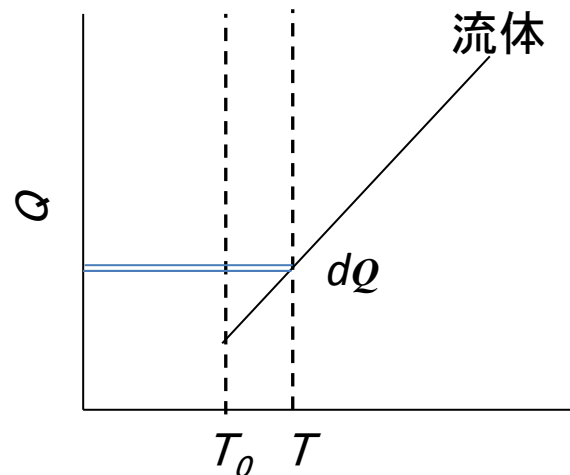
$$dQ = C_p dT \quad (3)$$

となる. 式(2)を $T_0$ から $T$ まで積分すると熱エクセルギー $E_x$ を得る.

$$E_x = \int_{T_0}^T C_p \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) dT \quad (4)$$

更に定圧比熱が温度によって変化しない場合,

$$E_x = C_p \left\{ (T - T_0) - T_0 \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) \right\} \quad (5)$$



## 熱エクセルギーの例題

### 計算例

環境状態を7°Cとすると、138Lの7°Cの水を100°Cまで水を加熱するために54MJを必要とする。この場合のエクセルギーは何MJか？  
また有効比はいくらか？ただし、水の比熱を4.2kJ/kgK一定とする。

### 【解答】

式(5)より単位質量あたりの熱エクセルギーは

$$4.2 \left\{ (100 - 7) - (7 + 273.15) \ln \frac{100 + 273.15}{7 + 273.15} \right\} = 53.31 \text{kJ/kg}$$

$$53.31 \text{kJ/kg} \times 138 \text{ kg} = 7370 \text{ kJ} = 7.37 \text{MJ}$$

環境状態と水温が等しいため、有効比はエクセルギーを加熱量で割った値となる

$$\frac{7.37}{54} = 0.136$$



# 圧力のエクセルギー

環境圧力 $p_0$ になるまでに得られる最大仕事

圧力 $p$ の気体が環境圧力になるまでに外界にする仕事である圧力のエクセルギー $Ex_p$ は

$$Ex_p = \int_{P_0}^P -pdV$$

理想気体で温度 $T$ 一定とすると, 状態方程式より

$$pdV + Vdp = 0$$

$$\therefore dV = -\frac{V}{p} dp = -nRT \frac{dp}{p^2}$$

よって,

$$Ex_p = \int_{P_0}^P nRT \frac{dp}{p} = nRT \ln \frac{P}{P_0}$$

## 圧力エクセルギーの例題

### 計算例

高压導管の圧力を4MPa(G)とした場合の圧力エクセルギーを求めよ。またLNGの冷熱エクセルギーを240kWh/t, 都市ガスの化学エクセルギーを41.4MJ/Nm<sup>3</sup>とした場合, 冷熱エクセルギーは都市ガスの化学エクセルギーの何%になるか。ただし, 一般ガス定数R=8.314 kJ/(K kmol), 環境温度を25°C, 環境圧力を大気圧(101.325kPa), 都市ガスおよびLNGの分子量を18.37kg/kmolとする。

### 【解答】

高压導管の圧力エクセルギーは,

$$8.314 \times (25 + 273.15) \times \ln \frac{101.325 + 4000}{101.325} = 9173 \text{ kJ/kmol}$$

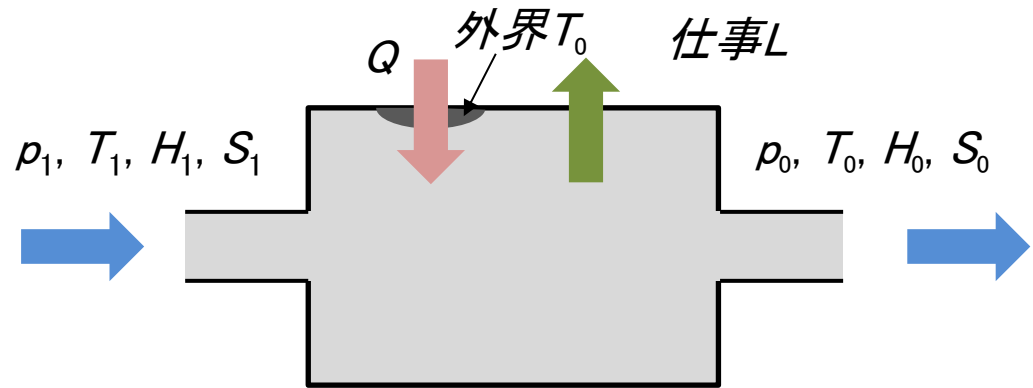
$$9173 \text{ kJ/kmol} = 9173 / 1000 / 22.4 = 0.4095 \text{ MJ/Nm}^3 \quad (139 \text{ kWh/t})$$

240kWh/tをMJ/Nm<sup>3</sup>に単位変換すると,

$$240 \text{ kWh/t} = 240 \times 3.6 \times \frac{18.37}{1000 \times 22.4} = 0.7086 \text{ MJ /Nm}^3$$

$$0.7086 / 41.4 \times 100 = 1.71\%$$

# 定常流動系の物理エクセルギー



熱力学の第一法則より,

$$dH = \delta Q - \delta L$$

エントロピーの定義より,

$$dS = \frac{\delta Q}{T_0} \quad (\text{熱の出入りは周囲温度の等温で行われる})$$

上式より,  $\delta Q$  を消去,

$$\delta L = dH - \delta Q = dH - T_0 dS$$

状態1から0まで積分. 仕事Lを物理エクセルギー $E_p$ に置き換え

$$E_p = (H_1 - H_0) - T_0 (S_1 - S_0)$$

熱と圧力のエクセルギーをまとめた式

# 化学エクセルギー

物理エクセルギーを用いた動力回収

熱→媒体の温度上昇(内部エネルギー増加)→体積膨張→ $pV$ 仕事発生

化学結合エネルギーを用いた動力回収

化学結合エネルギー → 電気エネルギー(燃料電池),

化学結合エネルギー → 熱エネルギー(燃焼)

を扱うにはギブスの自由エネルギーを利用する.

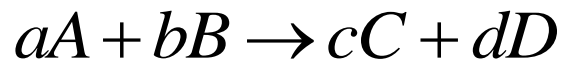
ギブスの自由エネルギー

等温・等圧の理論最大仕事

$$G = U + pV - TS = H - TS$$

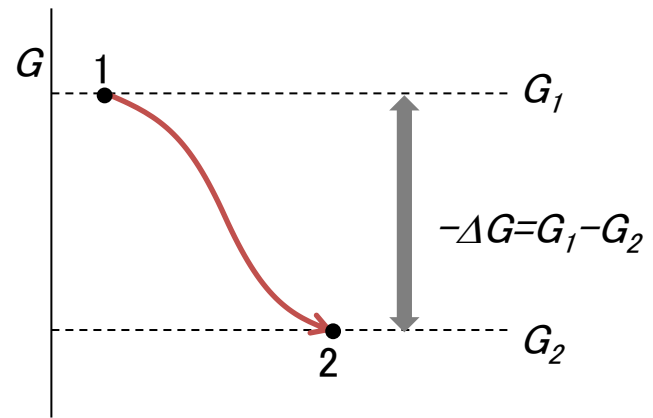
化学エクセルギー

$$E_c = -\Delta G = G_1 - G_2$$



1: 反応系

2: 生成系

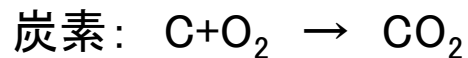


反応のプロセス

# ギブスの自由エネルギーによる炭素、水素の計算例

- ① 環境状態は25°C, 1atmとする.  
この条件での値を標準化学エクセルギーと言う.
- ② 環境状態に含まれる酸素, 窒素, 二酸化炭素, アルゴン, 水(液)の化学エクセルギーは0とする.
- ③ 任意物質の化学エクセルギーの計算

空気中に含まれない炭素と水素のエクセルギーは,



$$\Delta G_f^\circ = -394.389 \text{ kJ/mol}$$

$$-\Delta G_f^0 = \{Ex_c(C) + Ex_c(O_2)\} - \{Ex_c(CO_2)\}$$

モル生成自由エネルギー

$$394.389 = \{Ex_c(C) + 0.0\} - \{0.0\}$$

$$Ex_c(C) = 394.389 \text{ kJ/mol}$$

物体1molを生成するために必要となる自由エネルギー.  
この場合はCO<sub>2</sub>の値を参照



$$\Delta G_f^\circ = -237.141 \text{ kJ/mol}$$

$$0.0 + 237.141 - 0.0 = 237.141 \text{ kJ/mol}$$

$$10.6 \text{ MJ/Nm}^3$$

## 標準化学エクセルギーの計算例

メタン: $C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	$\Delta G_f^\circ = -50.768 \text{ kJ/mol}$	
	$-50.768 + (394.389 + 2 \times 237.141) = 817.90 \text{ kJ/mol}$	36.5MJ/Nm <sup>3</sup>
エタン: $2C + 3H_2 \rightarrow C_2H_6$	$\Delta G_f^\circ = -31.886 \text{ kJ/mol}$	
	$-31.886 + (2 \times 394.389 + 3 \times 237.141) = 1468.32 \text{ kJ/mol}$	65.6MJ/Nm <sup>3</sup>
プロパン: $3C + 4H_2 \rightarrow C_3H_8$	$\Delta G_f^\circ = -23.430 \text{ kJ/mol}$	
	$-23.430 + (3 \times 394.389 + 4 \times 237.141) = 2108.30 \text{ kJ/mol}$	94.1MJ/Nm <sup>3</sup>
ブタン: $4C + 5H_2 \rightarrow C_4H_{10}$	$\Delta G_f^\circ = -21.147 \text{ kJ/mol}$	
	$-21.147 + (4 \times 394.389 + 5 \times 237.141) = 2742.11 \text{ kJ/mol}$	122.4MJ/Nm <sup>3</sup>

化学種	E <sup>0</sup> [kJ/mol]	化学種	E <sup>0</sup> [kJ/mol]
H <sub>2</sub>	237.1	CO	257.2
H	321.8	CO <sub>2</sub>	0.0
O	231.7	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1467.4
O <sub>2</sub>	0.0	N	455.5
OH	152.8	NO	86.6
H <sub>2</sub> O	0.0	NO <sub>2</sub>	51.3
C	394.4	N <sub>2</sub>	0.0
CH	1073.7	AR	0.0
CH <sub>4</sub>	817.9	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2108.2

メタン(都市ガス)のエクセルギー解析に必要な標準化学エクセルギーを抜粋。  
 値は計算の定義やエンタルピー, エントロピーの値が文献ごとに異なることに注意

# 化学エクセルギー

実用上は標準化学エクセルギーの合計値とする.  $E_c = \sum_n E_i^0$

標準エクセルギーに表3-1の組成を用いて13A, LPガス, 水素ガスの化学エクセルギーを計算すると

$$13A : 36.5 \times 0.889 + 65.6 \times 0.068 + 94.1 \times 0.031 + 122.4 \times 0.012 = 41.3 \text{ MJ/Nm}^3$$

$$\text{LPガス} : 94.1 \times 0.65 + 122.4 \times 0.35 = 104.0 \text{ MJ/Nm}^3,$$

$$\text{H}_2 : 10.6 \text{ MJ/Nm}^3$$

と表3-1の値とほぼ等しい.

燃料の場合はRantの近似式を使う場合もある.

$$\text{石炭} \quad e = \text{HL} + 2440 w \quad \text{kJ/kg}$$

$$\text{炭化水素：液体} \quad e = 0.975 \text{ HH}$$

$$\text{気体（メタン除く）} \quad e = 0.95 \text{ HH}$$

$$\text{メタン} \quad e = 0.92 \text{ HH}$$

w : 石炭の湿分, kg/kg

HL : 低位発熱量 (LHV ; Low Heat Value), kJ/kg

HH : 高位発熱量 (HHV ; High Heat Value), kJ/kg

表 3-1 都市ガス事業に関連する燃料の化学エクセルギー

燃料の種類	主成分 (モル%)	低位発熱量 LHV (MJ)	高位発熱量 HHV (MJ)	化学 エクセルギー Ex (MJ)	Ex/HHV
大阪ガス の供給ガス	メタン 88.9	40.4	45.0	41.4	0.920
	エタン 6.8				
	プロパン 3.1				
	イソブタン 1.2				
LPガス (1種2号)	プロパン 65	101	113	106	0.938
	ブタン 35				
水素ガス	水素 100	10.8	12.8	10.5	0.820

出典:久角喜徳, 中西重雄, 毛笠明志, エクセルギーデザインの理解と応用 続管理士教本, 大阪大学出版(2012).

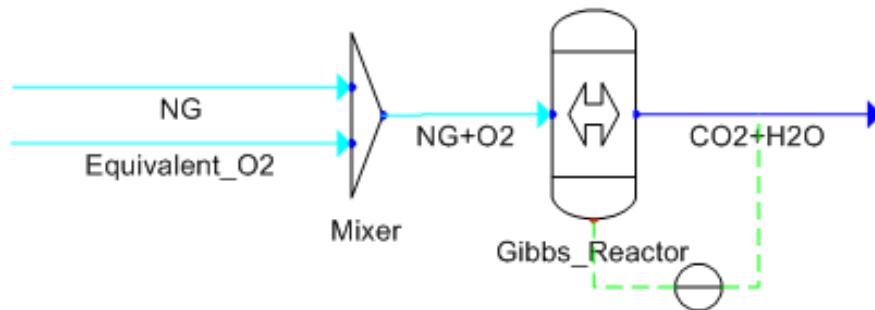
元素及び化合物の化学エクセルギーはJIS Z9204-1991有効エネルギー評価方法通則解説による.

# プロセスシミュレータによる 都市ガスの化学エクセルギー計算例

NG  
 In.T \*25.0 [C]  
 In.P \*101.33 [kPa]  
 In.Mass Flow 18.37 [kg/h]  
 In.Mole Flow \*1.00 [kmol/h]  
 In.Fraction.METHANE \*88.9 [%]  
 In.Fraction.ETHANE \*6.8 [%]  
 In.Fraction.PROPANE \*3.1 [%]  
 In.Fraction.ISOBUTANE \*1.2 [%]

NG+O2  
 T 25.0 [C]  
 P 101.33 [kPa]  
 In.S 179.493 [kJ/kmol-K]  
 In.Exergy 1.4 [kJ/kmol]  
 In.Mole Flow 3.2490 [kmol/h]

CO2+H2O  
 T 25.0 [C]  
 P 101.33 [kPa]  
 In.S 98.618 [kJ/kmol-K]  
 In.Exergy 2.6 [kJ/kmol]  
 In.Mole Flow 3.3320 [kmol/h]  
 In.Mole Fraction  
 METHANE 0 [%]  
 ETHANE 0 [%]  
 PROPANE 0 [%]  
 ISOBUTANE 0 [%]  
 OXYGEN 0 [%]  
 CARBON DIOXIDE 35 [%]  
 WATER 65 [%]



Equivalent\_O2  
 T \*25.0 [C]  
 P \*101.33 [kPa]  
 In.Mole Flow \*2.2490 [kmol/h]

Convergence\_calculation\_of\_heat\_removal  
 OP \*2.780E+5 [W]

$$Ex_c = (h - h_0) - (s - s_0) \times T_0$$

$$= 278 \times 3.6 - (179.5 \times 3.25 - 98.6 \times 3.33) \times 298.15 / 1000 = 924.9 \text{ MJ/kmol}$$

$$= 41.3 \text{ MJ/Nm}^3$$



# 混合・分離のエクセルギー

環境状態の組成を基準とした物質のエネルギー価値.  
混合物はそれを構成する純物質の和よりも小さくなる.

理想気体の場合 
$$e = RT_0 \sum_{i=1}^k x_i \ln \frac{x_i}{x_{i0}}$$

## 計算例

環境組成を酸素21%vol., 窒素79%vol.とすると, 25°C, 1atmの純酸素および純窒素の比エクセルギーは何kJ/molか?

ただし, 環境状態を25°C, 1atm, 一般ガス定数 $R=8.314 \text{ kJ}/(\text{K kmol})$ とする.

酸素: 
$$8.314 \times (25 + 273.15) \times \ln \left( \frac{1}{0.21} \right) \times \frac{1}{1000} = 3.87 \text{ kJ/mol}$$

窒素: 
$$8.314 \times (25 + 273.15) \times \ln \left( \frac{1}{0.79} \right) \times \frac{1}{1000} = 0.584 \text{ kJ/mol}$$

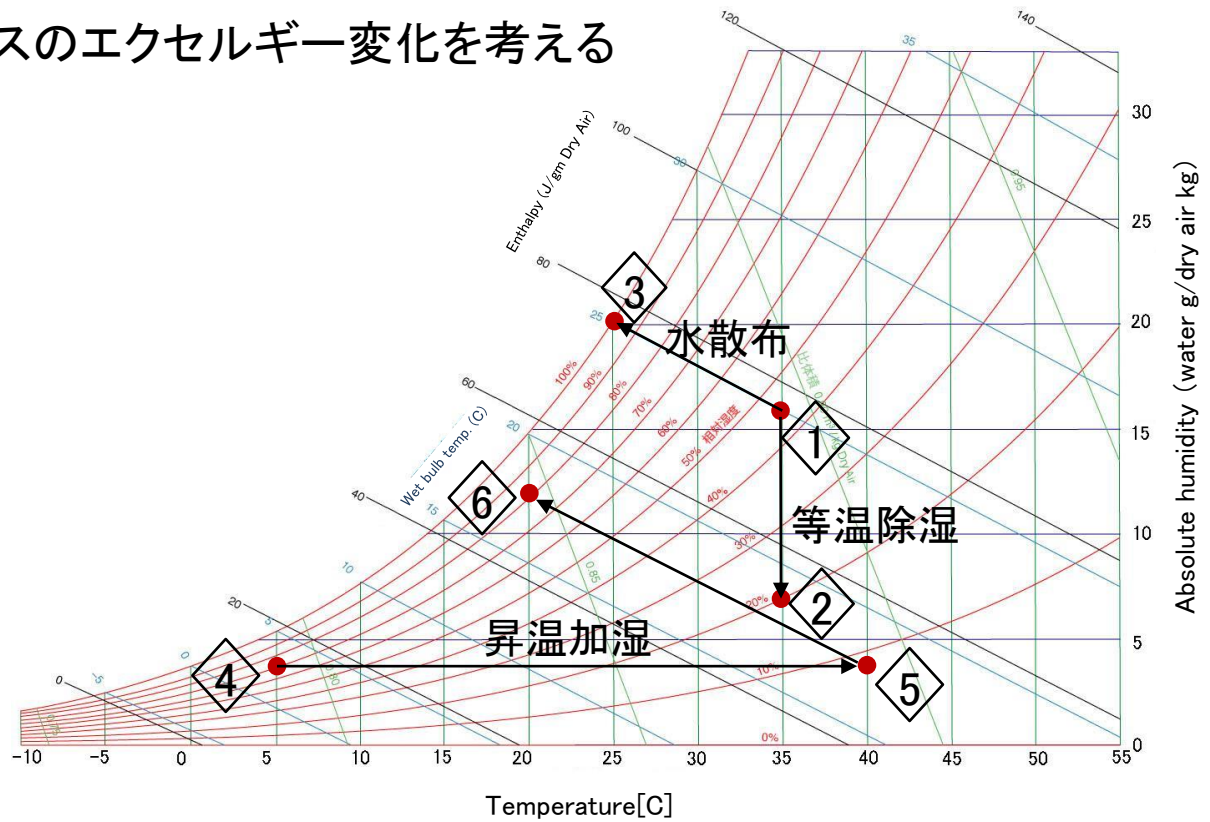
# 除湿・加湿のエクセルギー

標準状態に対して、湿り空気の湿度変化による拡散エクセルギー $E_d$ は

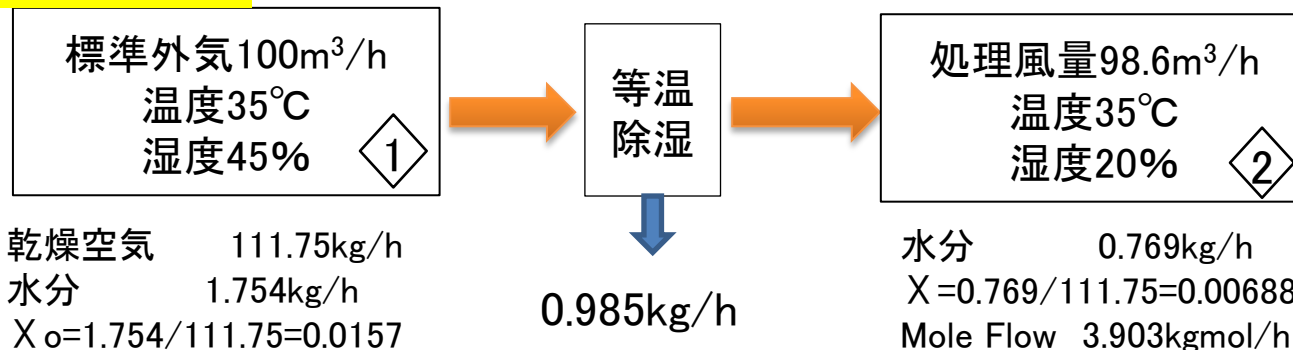
$$E_d = \frac{R}{M_w} T_0 \left\{ (0.622 + x) \ln \left( \frac{0.622 + x_0}{0.622 + x} \right) + x \ln \left( \frac{x_0}{x} \right) \right\}$$

ここで、 $R$  は気体定数 (=8.314 kJ/kmol·K),  $M_w$  は水の分子量 (=18.015)  
 $x$  は空気の絶対湿度 (kg/kg) である. 添え字0は外界条件を表す.

3つのプロセスのエクセルギー変化を考える



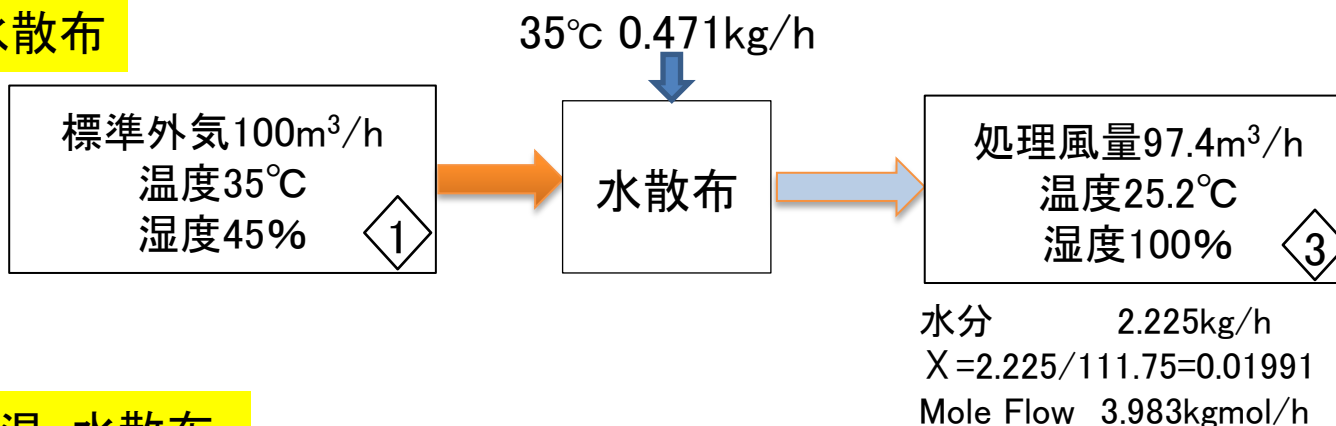
## 等温・除湿



$$E_d \quad 2.05 \text{ kJ/kmol}$$

$$2.22W$$

## 水散布



$$E_d \quad -1.27 \text{ kJ/kmol}$$

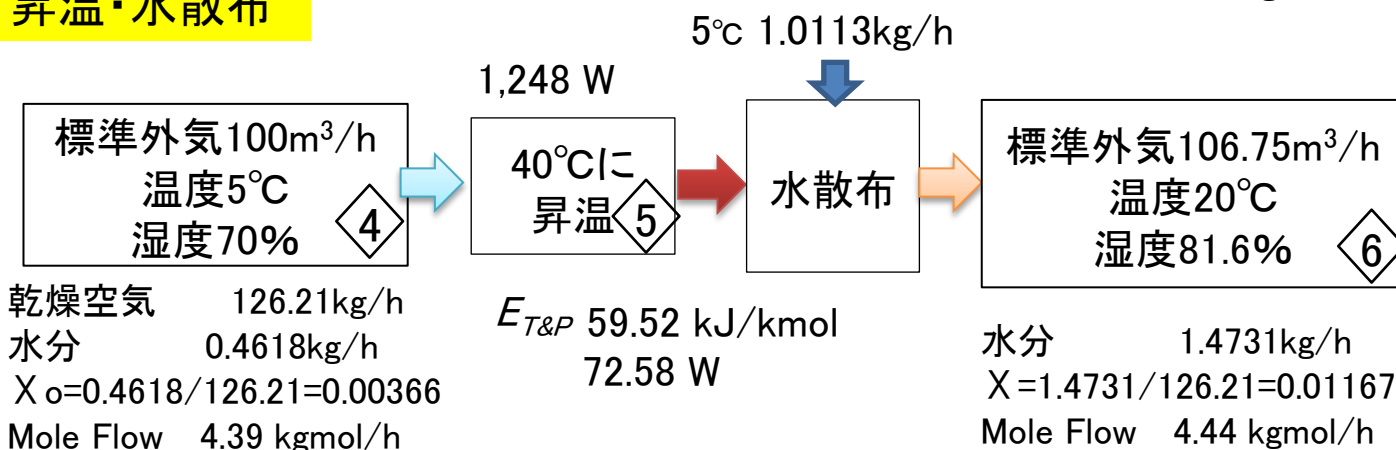
$$-1.41W$$

$$E_{T\&P} \quad 4.70 \text{ kJ/kmol}$$

$$5.20W$$

$$E \quad 3.79W$$

## 昇温・水散布



$$E_{T\&P} \quad 59.52 \text{ kJ/kmol}$$

$$72.58 W$$

$$E_d \quad -2.77 \text{ kJ/kmol}$$

$$-3.42W$$

$$E_{T\&P} \quad 21.96 \text{ kJ/kmol}$$

$$27.09W$$

$$E \quad 23.67 W$$

# 原子核のエクセルギー

核燃料は核反応によって極めて高い温度の熱エネルギーとなるから、原子核燃料のエクセルギーは質量欠損によって放出されるエネルギーと等しくなる。

## 核燃料(核分裂物質)のエクセルギー

$$\begin{aligned}\bar{E}_{n-u} &= \Delta H_{th-o} + \Delta M \cdot c^2 - T_0 \left( \Delta \bar{S}_0 + \Delta \bar{S}_{mix} \right) \\ &\quad + \bar{R}T_0 \left[ n_{Xe} \ln \frac{P_0}{P_{Xe}} + n_{Kr} \ln \frac{P_0}{P_{Kr}} \right] \\ &\cong \Delta M \cdot c^2\end{aligned}$$

質量欠損によって放出されるエネルギー

$\bar{E}_{n-u}$	原子核燃料のモルエクセルギー
$\Delta H_{th-o}$	核分裂前後の熱エンタルピーの減少
$\Delta M$	核分裂による質量欠損
$c$	真空中の光速
$\Delta \bar{S}_0$	核分裂前後の標準エントロピーの減少量
$-\Delta \bar{S}_{mix}$	分裂生成物質の混合エントロピーの和
$n_{Xe}, n_{Kr}$	$^{235}\text{U}$ 1molから生じたXeとKrのモル数
$P_{Xe}, P_{Kr}$	それらの気体の分圧

信澤寅男, エネルギー工学のためのエクセルギー入門, オーム社(1980), pp.60-61.

# 電磁気のエクセルギー

理論上は電気エネルギーはすべて仕事に変換できる

## 静電エネルギー(コンデンサ)

$$U_e = \frac{1}{2} QV$$

$U_e$ : コンデンサの静電エクセルギー

## 電磁エネルギー(コイル)

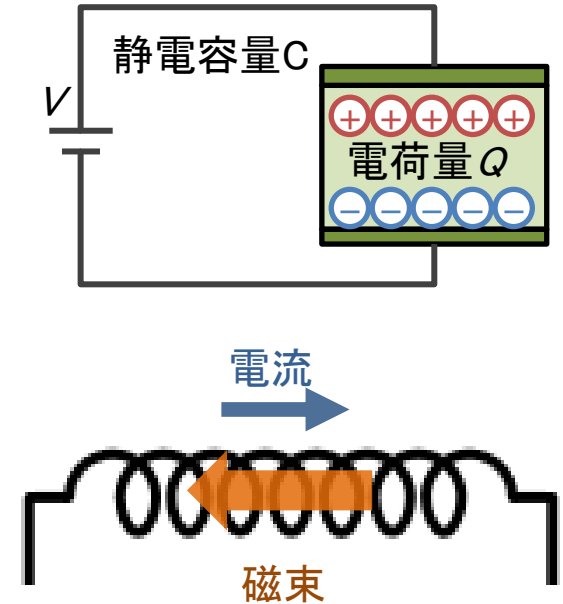
$$u = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu_0}$$

$u$ : 単位体積あたりに蓄えられるエネルギー,  $B$ : 磁束密度,  
 $\mu$ : 真空の透磁率

## 電流エネルギー

$$P = VI \quad (\text{直流})$$

$$P = VI \cos \theta \quad (\text{交流})$$



信澤寅男, エネルギー工学のためのエクセルギー入門, オーム社(1980), pp.60-61.

# 光のエクセルギー

$$\varepsilon = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5.65 \times 10^{-8} T^3 (T - T_0)$$

$\varepsilon$ : 光エクセルギーの流れ密度

$k$ : ボルツマン定数  $1.3806488 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$

$c$ : 真空中の光速  $299\,792\,458 \text{ m/s}$

$h$ : プランク定数  $6.62606957(29) \times 10^{-34} \text{ J s}$

$T$ : 熱放射体(黒体)の温度

$T_0$ : 外界温度

信澤寅男,  
エネルギー工学のためのエクセルギー入門, オーム社(1980),pp.60-61.

フィラメント温度	2800 K
外界温度	293 K
光エクセルギー	3,109,402 W/m <sup>2</sup>
フィラメント入力	100 W
線径	0.07 mm
コイル径	2 mm
巻き数	6
線長	37.68 mm
発光投影面積	0.00000084 m <sup>2</sup>
光エクセルギー	2.61 W
エクセルギー効率	2.6%

## 色温度 (単位=Kケルビン)

リゲル(オリオン座)  
青白色 約12000 K  
シリウス(おおいて座)  
白色光 約10000 K

太陽  
黄色光 約5500 K

ベテルギウス  
(オリオン座)  
赤色光 約3000 K

熱放射で発光している物体の温度はその物体の色から知ることができる。例えば恒星の表面温度は星の色から温度を知ることができる。温度が高い物体ほど、明るい光を出すのである。

12000

7000

6500

5300

5000

4200

4000

3500

3000

2800

2000

1900

1500

光源の色を熱放射する物体の温度に換算して表した数値を色温度という。蛍光灯は色温度が高いが実際に温度が高いわけではない。

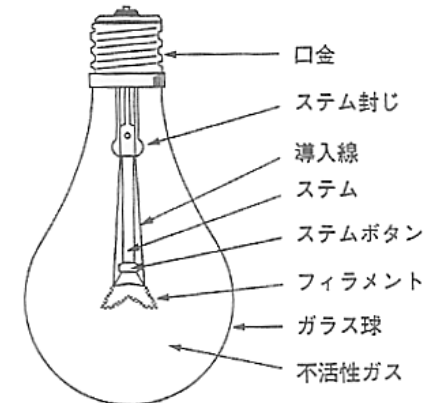
カメラのストロボ

蛍光灯(昼白色)

蛍光灯

白熱灯

ローソク



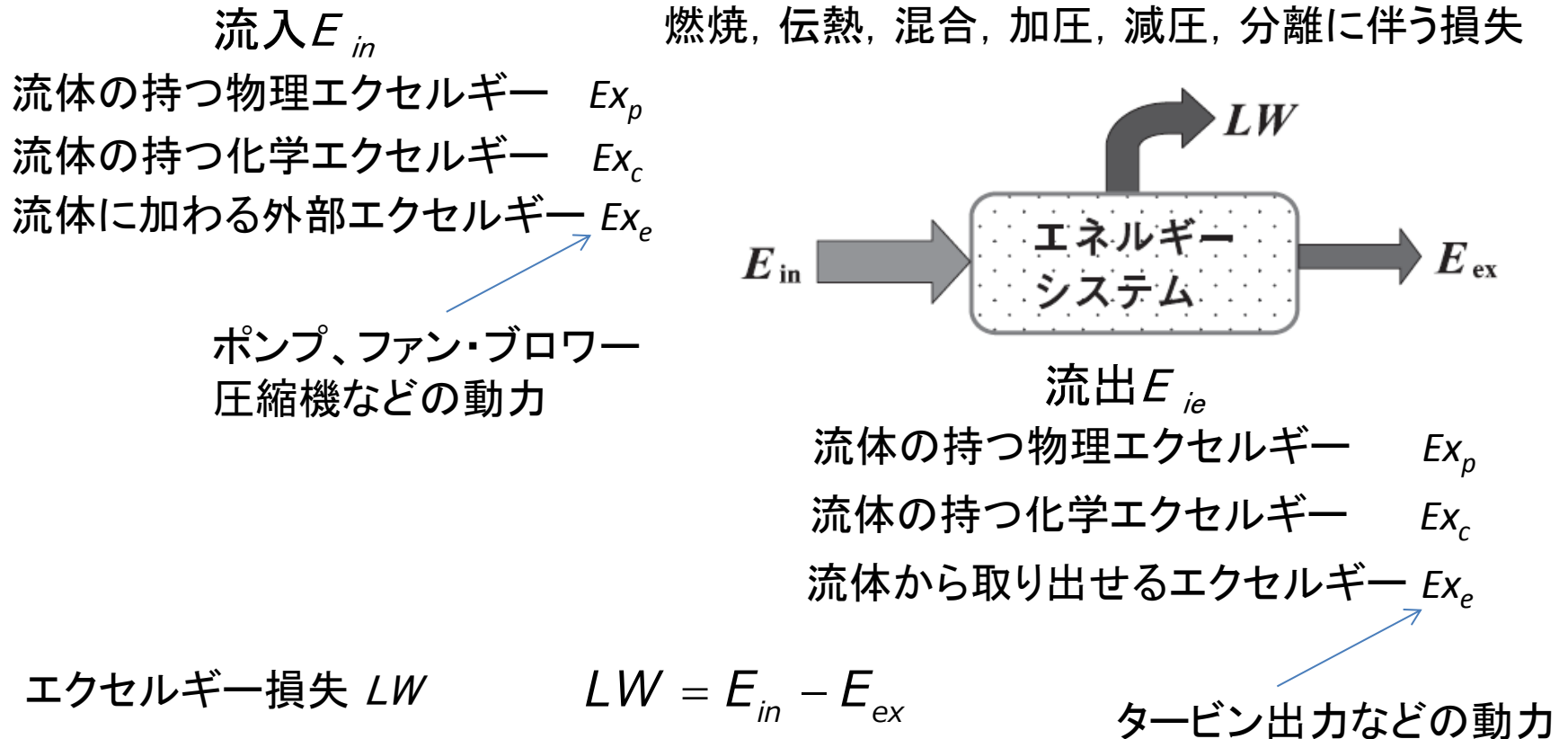
白熱電球の構造

出典web: 白熱電球のしくみ: 夜明け前

# 3. エクセルギー損失と損失低減策

## 3.1 エクセルギー損失

燃焼, 伝熱, 混合, 加圧, 減圧, 分離のプロセスで熱量は保存されていても, 非可逆性に伴う損失(エクセルギー損失)は発生する.



# エクセルギー損失算定の手順

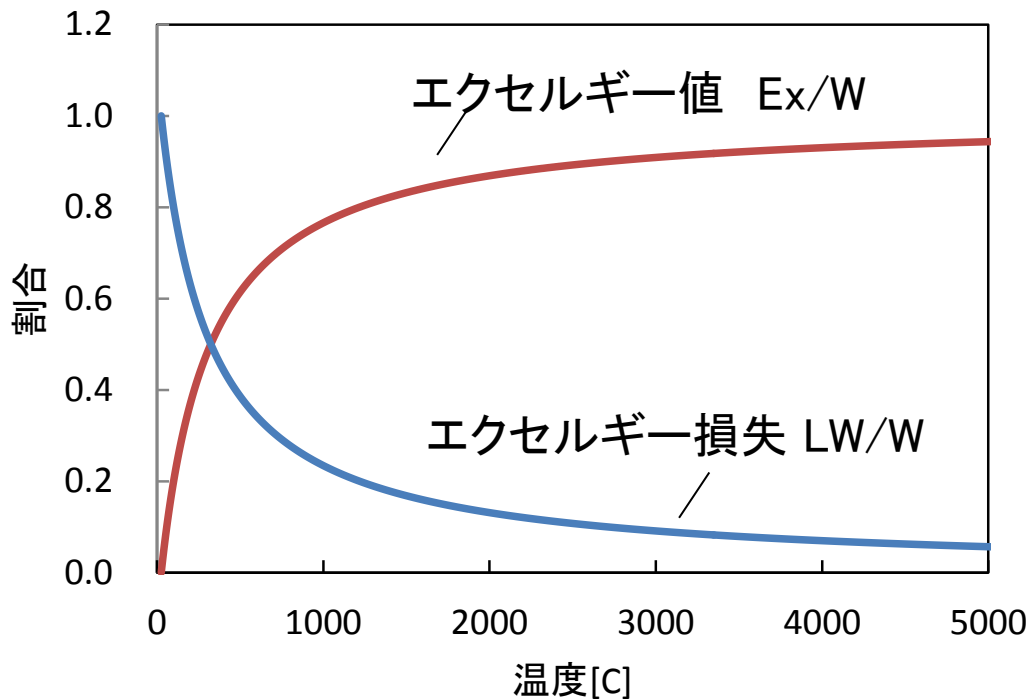
- ①エンタルピーをベースとした熱勘定によりエネルギーシステムに出入りするエネルギーに関する諸量を決定.
- ②外界およびそれと平衡する状態を決定. 通常は外気温度と大気圧力を用いるが, たとえば冷熱発電の場合は, 利用できる熱源となる海水温度を用いる.
- ③プロセスの流路毎にエンタルピーとエントロピーを求め, ②で決定した外界条件によるエンタルピーとエントロピーを用いて, 式(1)よりエクセルギーを算出する.
- ④システムあるいは構成機器毎に流入するエクセルギーの総和  $E_{in}$  と取り出せる仕事を含めた流出するエクセルギーの総和  $E_{ex}$  を求める. ここで, 燃料を燃焼させる機器では, 流出するエクセルギーの総和  $E_{ex}$  が流入するエクセルギーの総和  $E_{in}$  より大きくなる. そのため,  $E_{in}$  に燃料の化学エクセルギーを加えておく必要がある.
- ⑤エクセルギー損失  $LW = E_{in} - E_{ex}$  を求める.

なお, エクセルギーは理論上発生しうる仕事の限界であるから, エクセルギー損失  $LW$  が負になることはない. いったん減少したエクセルギーが自生的に増加することは第二法則に反しており不可能である.



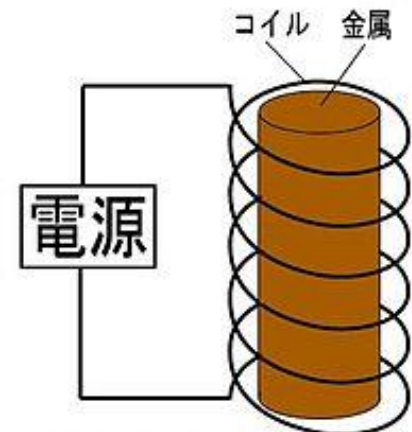
# 仕事あるいは電力の熱流への直接変換

電気から熱への変換は高温の場合、損失が少ない。低温では損失大。  
エクセルギー損失 $LW/W$ は $100^{\circ}\text{C}$ で73%。  $3000^{\circ}\text{C}$ で8%。



エクセルギー値  $Ex = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) W$

エクセルギー損失  $LW = \left(\frac{T_0}{T}\right) W$

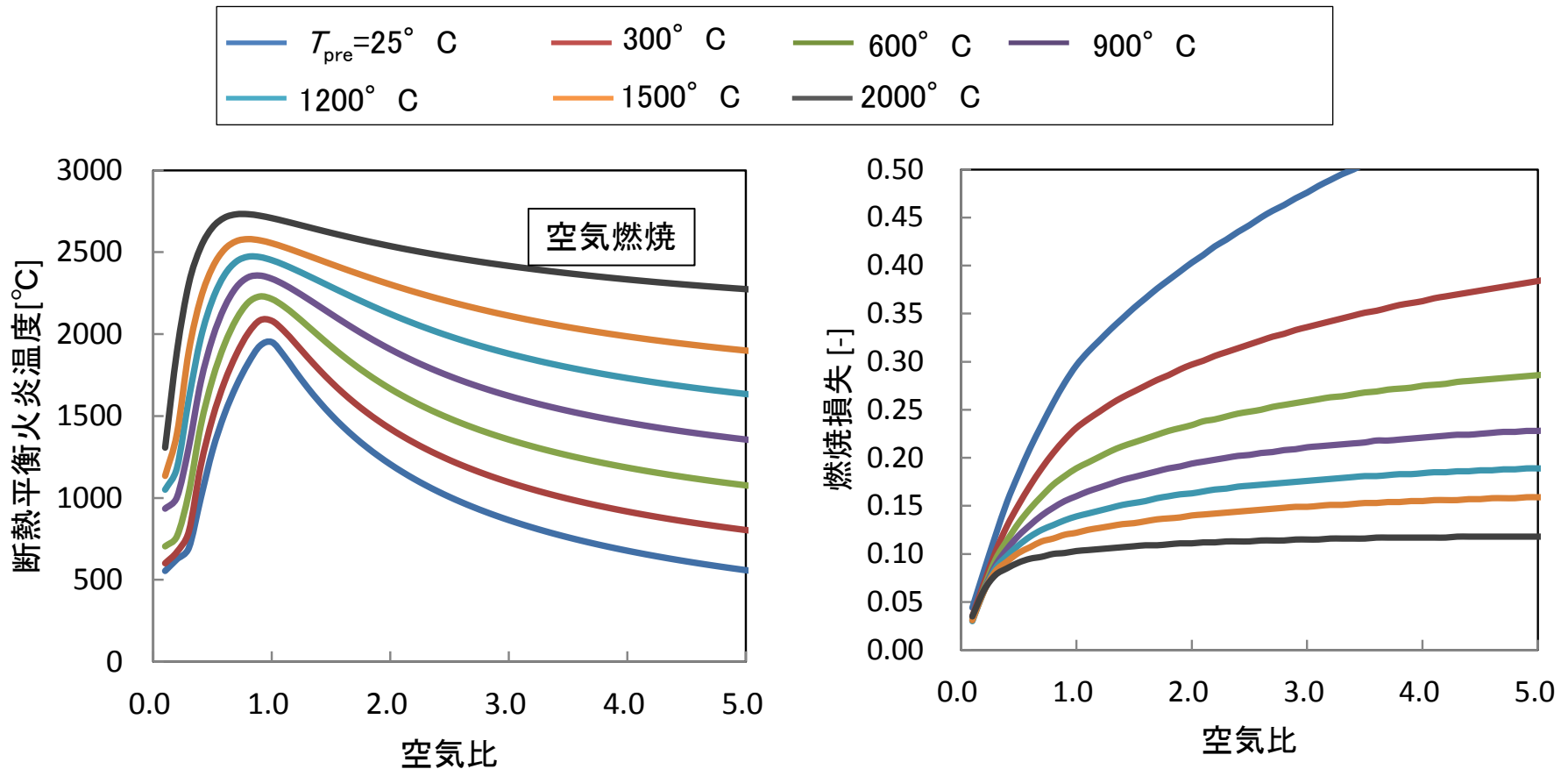


【誘導加熱の仕組み】

エクセルギー損失と温度の関係 (基準温度 $0^{\circ}\text{C}$ )

# 燃烧

化学エクセルギーを熱へ変換. 25°Cで理論酸素量の空気で燃烧させると約30%の損失. 混合気を予熱すれば, 燃烧損失は低減. 予熱温度を900°Cとすると, 損失は約16%に.



燃烧のエクセルギー損失 (基準温度25°C, 燃料:メタン, 酸化剤:空気)

# ガス給湯器やガスコンロでの燃焼損失の計算例

都市ガス1モルを1500°C(空気比1.53)で燃焼させ効率91%で回収

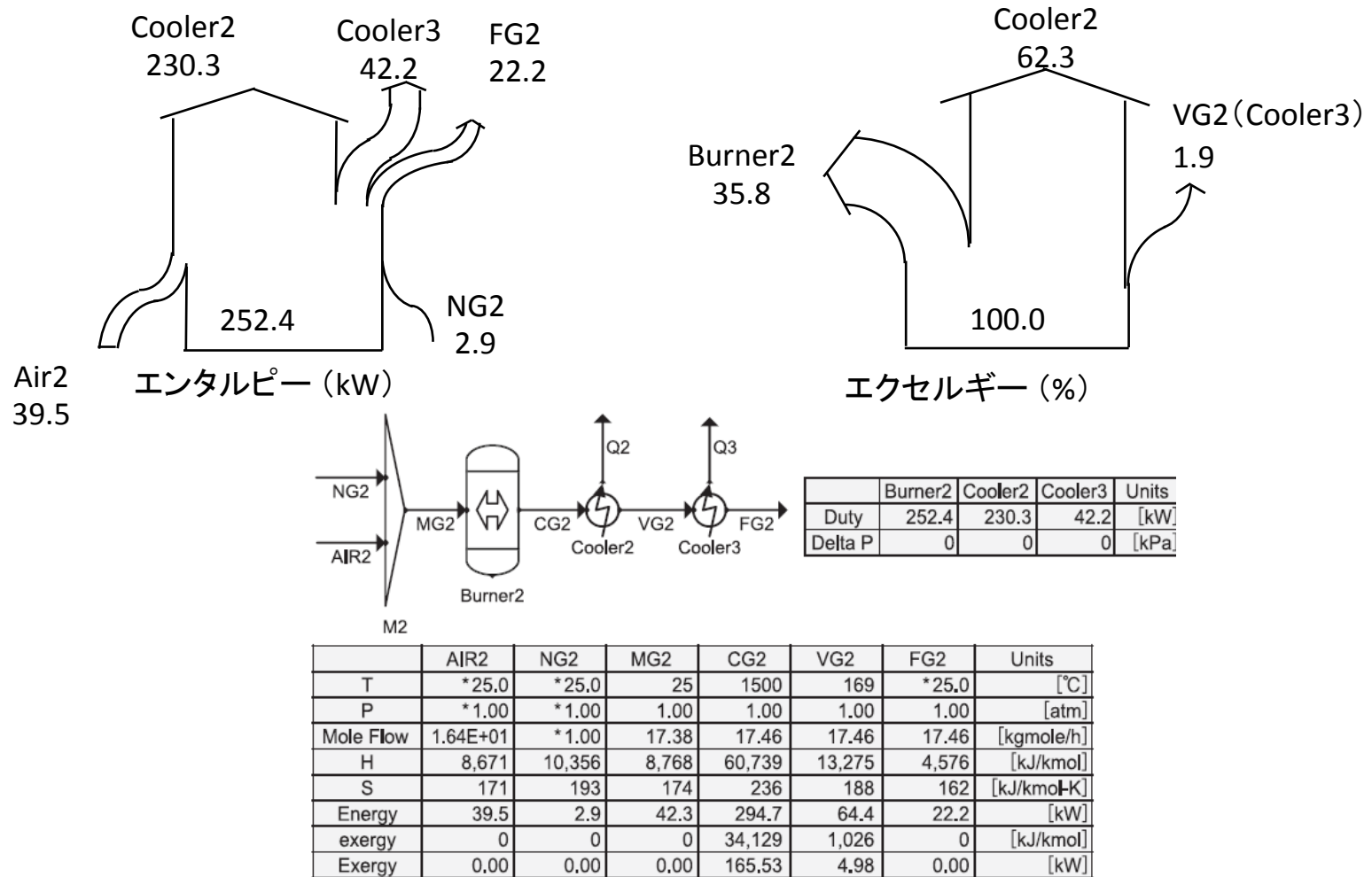


図3-5 燃焼によるエクセルギー損失

# 伝熱

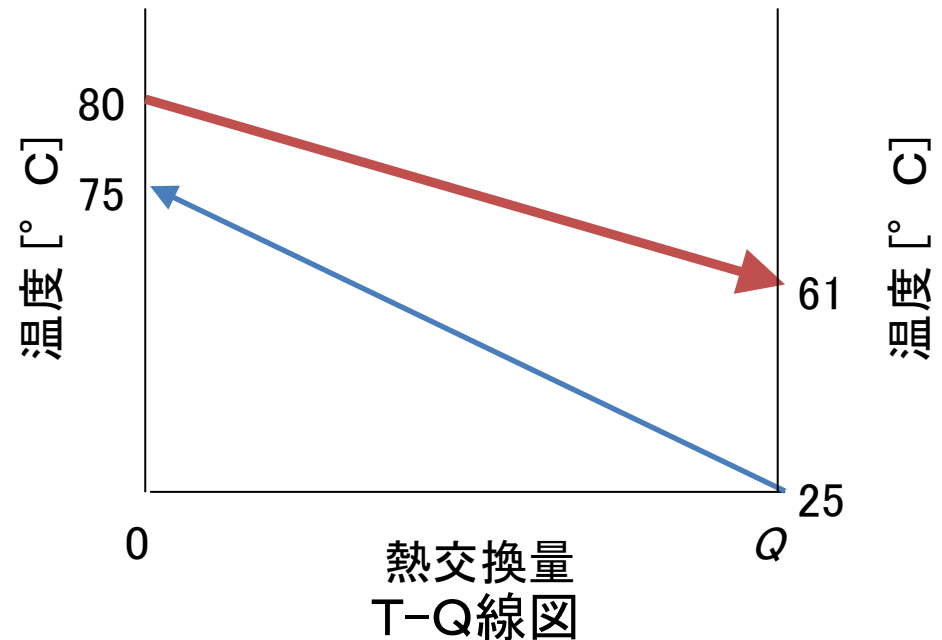
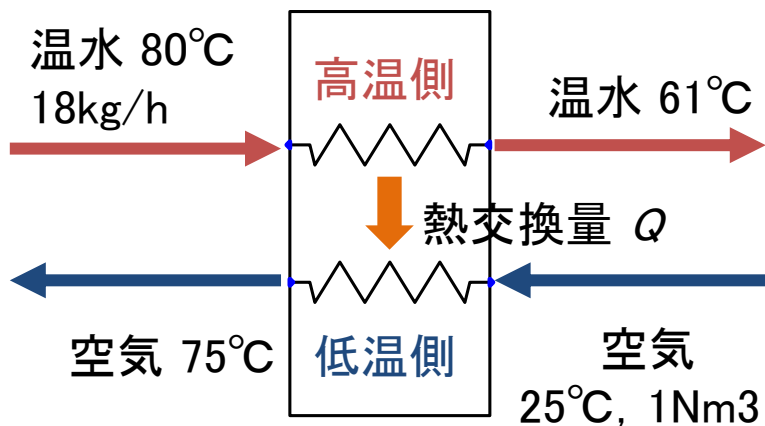
高温側と低温側での熱移動による損失.  
熱交換器の場合は, 伝熱と圧力損失の合計となる.

$$\begin{aligned} LW &= (E_{in,h} + E_{in,c}) - (E_{ex,h} + E_{ex,c}) \\ &= (E_{in,h} - E_{ex,h}) + (E_{in,c} + E_{ex,c}) \end{aligned}$$

高温側のエクセルギー損失

低温側のエクセルギー損失

添え字hは高温側, cは低温側を示す



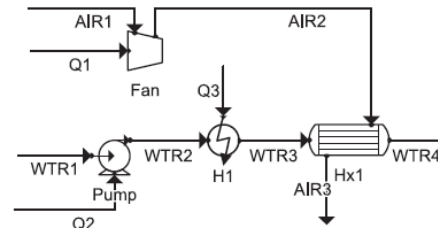
空気を温水で加温する熱交換器の例

# 伝熱損失の計算例

熱交換器のエクセルギー損失LWでは、流体間の温度差に起因する損失に加えて、各流体の圧力損失に起因する損失も合わせて評価することができる。

圧力損失を0に設定すれば、純粹に温度差に起因する項を求めることができ、この値から圧力損失による項を逆算できる。

	Fan	Pump	H1	Hx1		Units
				tube	shell	
Duty	1.70	1.26	1,163	405		[W]
Delta P	0.1	100	50	50	0.1	[kPa]
Efficiency	*40	*40				[%]
UA				25,97		[W/K]



	AIR1	AIR2	AIR3	WTR1	WTR2	WTR3	WTR4	Units
T	*25.0	25.2	*75.0	*25.0	25.0	*80.0	60.9	[°C]
P	*1.00	1.001	*1.00	*1.00	1.99	1.49	*1.00	[atm]
Mole Flow	*1.00	1.00	1.00	*1.00	1.00	1.00	1.00	[kgmole/h]
H	8,598	8,605	10,064	-34,497	-34,493	-30,305	-31,764	[kJ/kmol]
S	163.75	163.76	168.29	70.75	70.76	83.65	79.41	[kJ/kmol-K]
Energy	2,388	2,390	2,796	-9,583	-9,581	-8,418	-8,823	[kW]
exergy	0.00	2.40	110.80	0.00	2.10	346.3	152.6	[kJ/kmol]
Exergy	0.00	0.67	30.78	0.00	0.58	96.19	42.39	[W]

図 3-7 熱交換器におけるエクセルギー損失

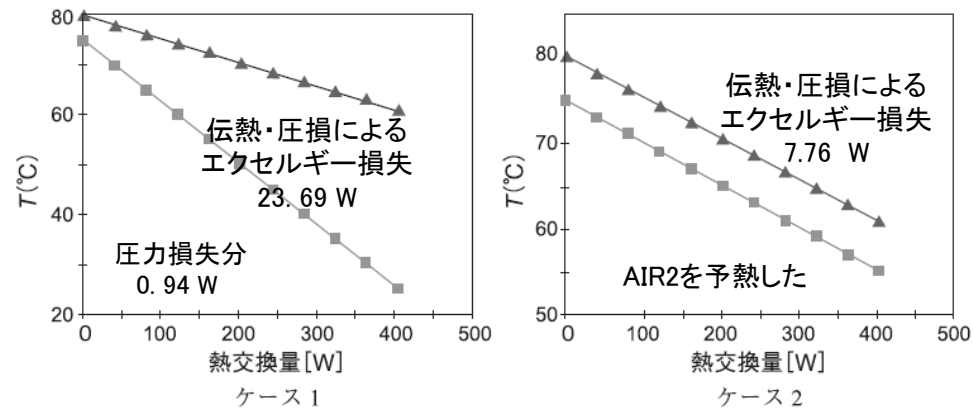
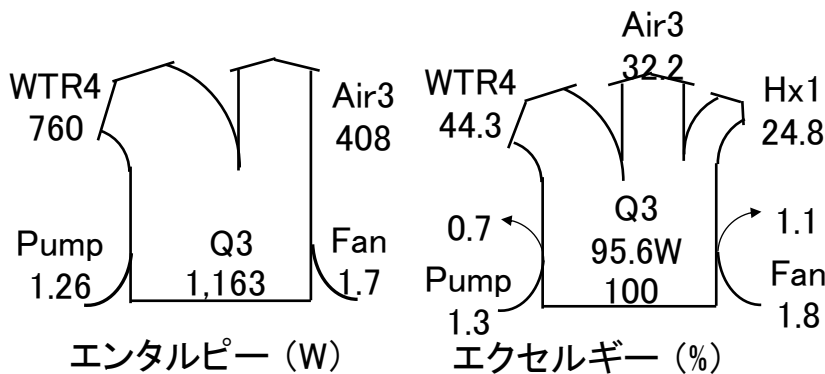


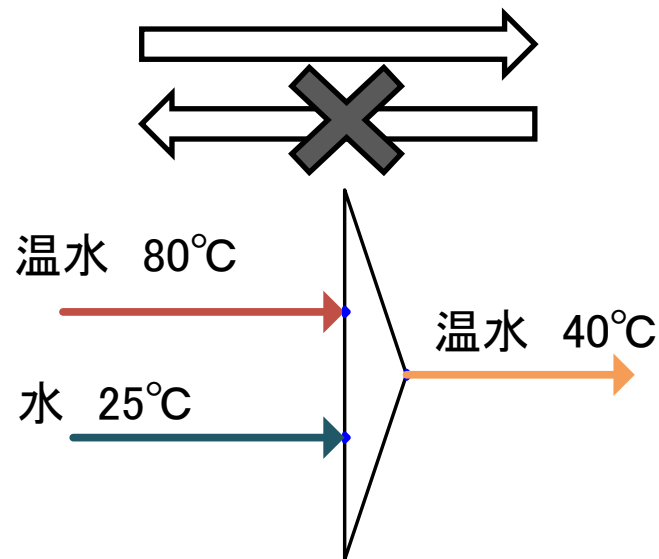
図 3-8 温水-空気の温度熱負荷特性

圧力損失に起因するエクセルギー損失は伝熱損失に比べ相対的に小さい値だが、ファンやポンプは、それ自体の断熱効率の他にモータの効率も損失に加わるため、熱交換器の省エネルギー設計を進める上では、流体の圧力損失を低減させることも重要なポイントである。

# 混合

異なる温度の流体を混合するときが発生する損失.

熱を加えることなく40°Cの温水から80°Cの温水を生成できない.  
→ 不可逆性の増加 = エクセルギー損失



温水と水との混合

# 混合の計算例

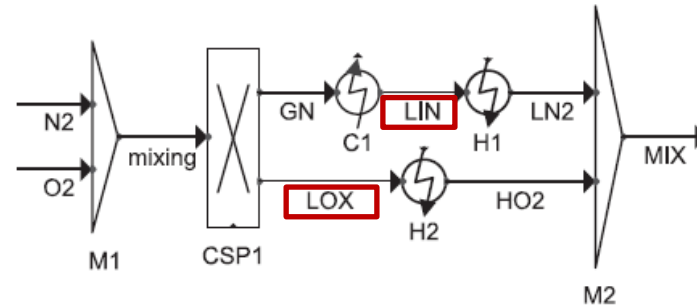
混合はエントロピーの増加により、エクセルギー損失 $LW$ の大きな源となる。逆の操作である分離に理論上必要なエクセルギーはグイ・ストドラの式 $T_0 \Delta S$ で与えられる。温度の異なる同一物質の等圧混合の場合、両者の流量比の加重平均の温度となるが、これを元の状態に戻すには流れを元の比率に分割して加熱、冷却すれば良い。

空気液化分離の流量は $112 \text{ Nm}^3/\text{h}$   
 空気 $1 \text{ Nm}^3$ 当たりの理論液化必要動力

$$29156 \div 112 = 260 \text{ Wh}$$

実際の空気液化分離プラントでは圧縮機や熱交換器、膨張弁などのエクセルギー損失 $LW$ があるため、 $1 \text{ Nm}^3$ 当たり約4倍の $1 \text{ kWh}$ を必要とする。

	CSP1	C1	H1	H2	Units
Duty	-10.77	6.17	12.55	4.39	[kW]



	O2	N2	mixing	GN	LIN	LN2	LOX	HO2	MIX	Units
T	*25.0	*25.0	25.0	-195.9	-195.9	*0.0	-183.1	122.3	25.0	[°C]
P	*1.00	*1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	[atm]
Mole Flow	*1.00	*4.00	5.00	4.00	4.00	4.00	1.00	1.00	5.00	[kgmole/h]
H	8,678	8,669	8,671	2,201	-3,352	7,942	-4,212	11,589	8,671	[kJ/kmol]
S	166	167	171	127	55	164	56	174	171	[kJ/kmol-K]
Energy	2.41	9.63	12.04	2.45	-3.72	8.82	-1.17	3.22	12.04	[kW]
exergy	0	0	0	5,365	21,232	32	20,032	393	0	[kJ/kmol]
Exergy	0.00	0.00	0.00	5,961	23,591	36	5,565	109	0.00	[W]
N2	*0.00	*100.00	80.00	100.00	100.00	100.00	0.00	0.00	80.00	[%]
O2	*100.00	*0.00	20.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100.00	20.00	[%]

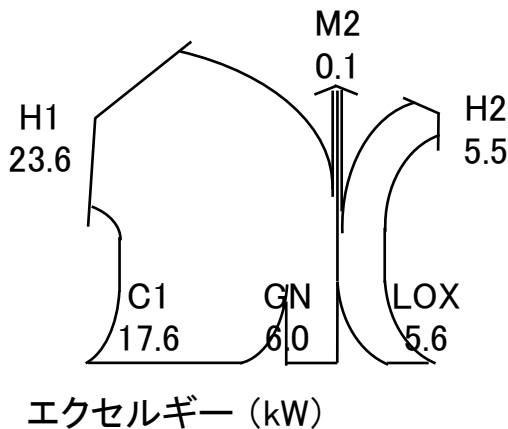


図 3-9 酸素-窒素の混合と分離モデル

# 加圧・減圧

加圧・減圧は100%の効率で実現できないため、エントロピー増加による損失を生じる。

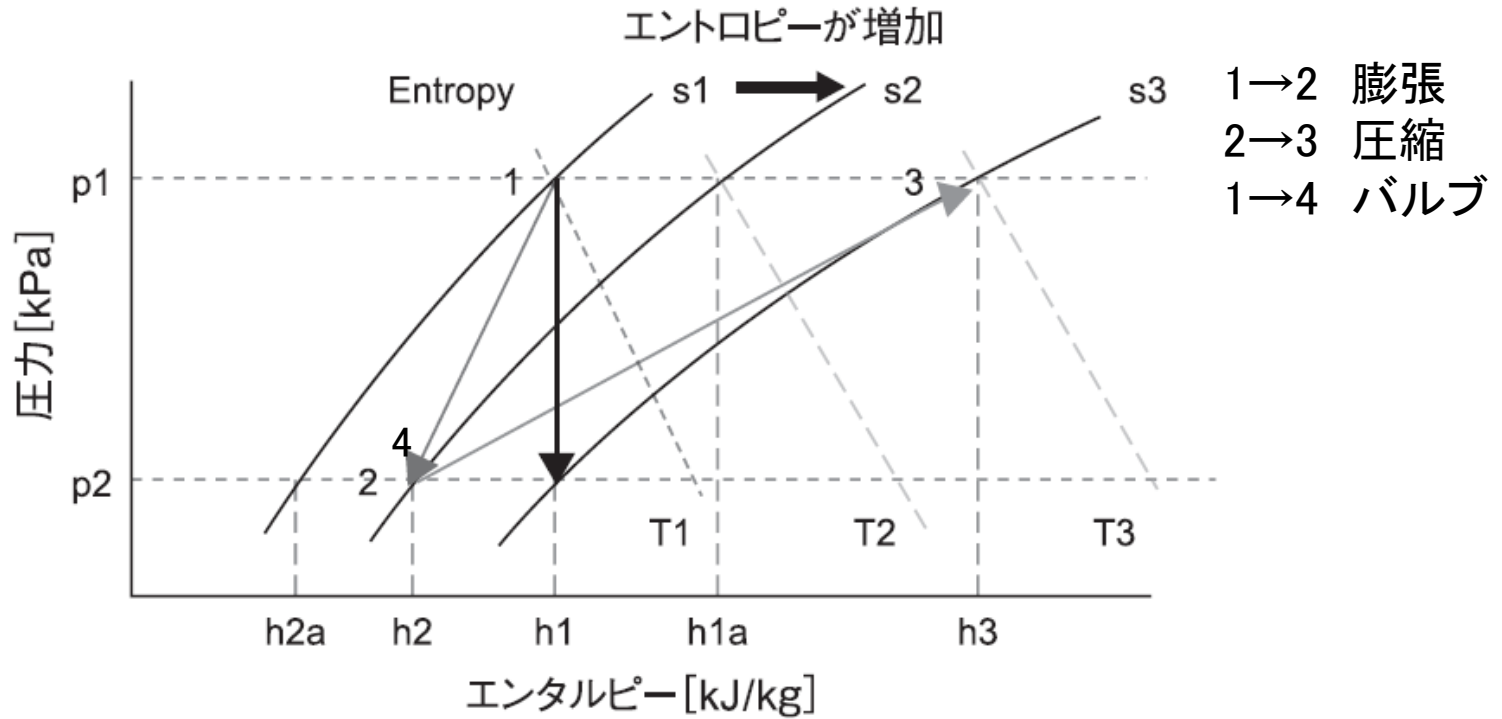


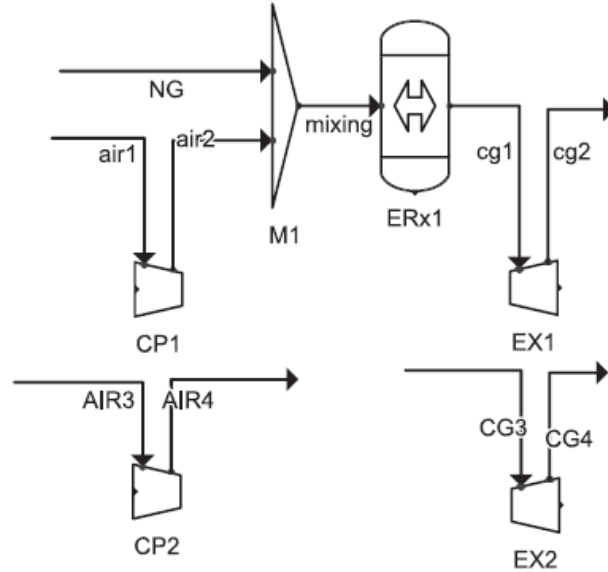
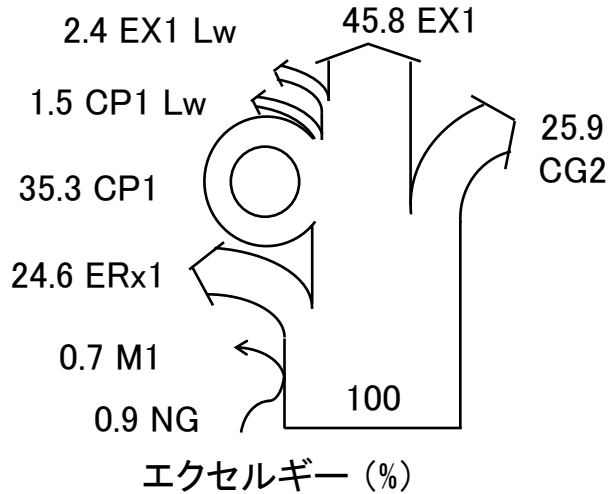
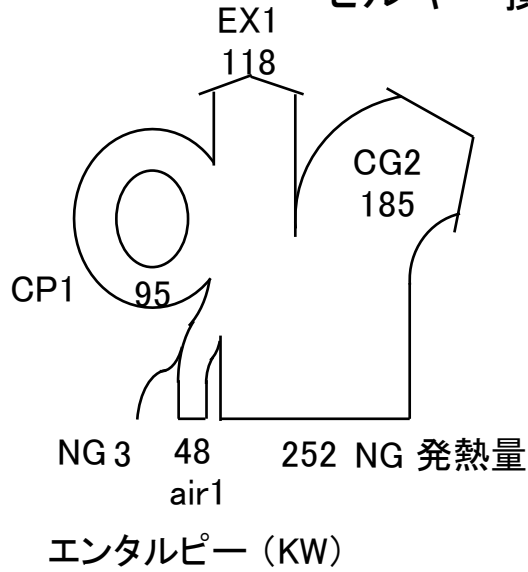
図 2-7 回転機の効率やバルブによるエントロピー増加



# 圧縮・膨張

1700°C級ガスタービンの事例で膨張および圧縮過程のエクセルギー損失LWを計算する。

	CP1	CP2	ERx1	EX1	EX2	Units
Duty	95.0	84.0	*0.00	213.0	237.0	[kW]
Efficiency	*88.0	*100		*90.0	*100.0	[%]



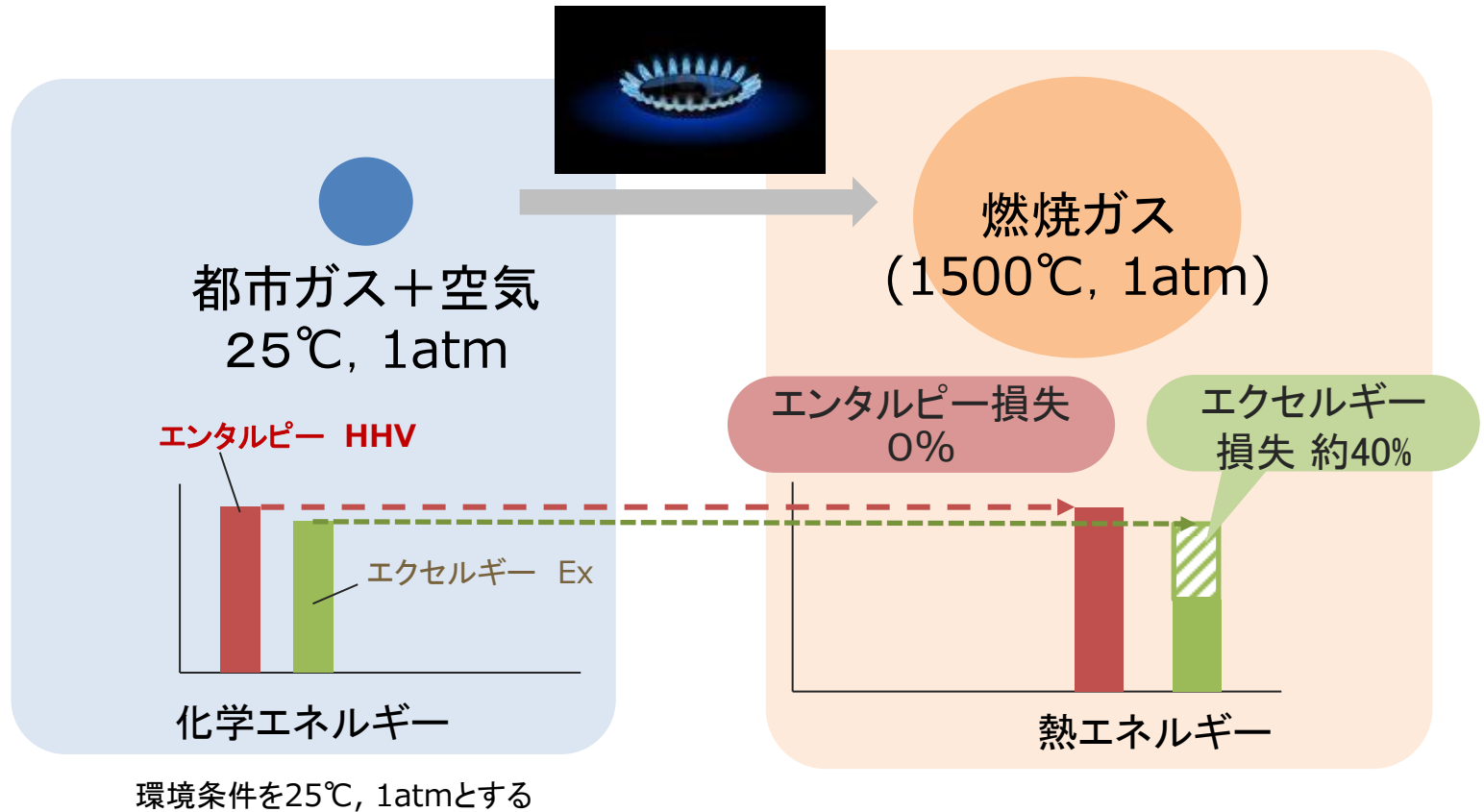
	NG	air1	air2	AIR4	mixing	cg1	cg2	CG4	Units
T	*25.0	*25.0	584	520	539	1,700	728	611	[°C]
P	*34.54	*1.00	35	*34.54	35	35	*1.00	*1.00	[atm]
Mole Flow	*1.0	20.00	20.02	20.02	21.00	21.00	21.11	21.11	[kgmole/h]
H	9,555	8,671	25,782	23,729	25,011	67,948	31,598	27,559	[kJ/kmol]
S	162	171	174	171	176	209	214	209	[kJ/kmol-K]
Energy	2.7	48.0	143.0	132.0	146.0	398.0	185.0	162.0	[kW]
exergy	8,539	0	16,369	15,058	15,721	49,021	11,392	8,632	[kJ/kmol]
Exergy	2.37	0.00	91.03	83.74	91.71	285.96	66.80	50.62	[kW]

図 3-11 膨張と圧縮におけるエクセルギーの流れ

## 3.2 エクセルギー損失低減策

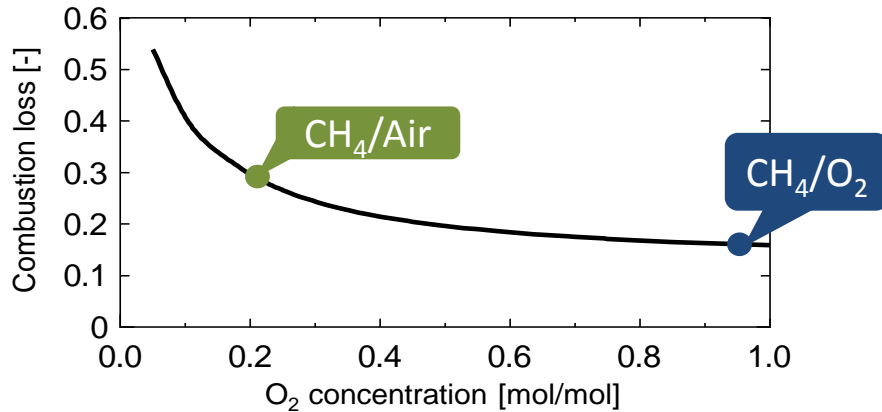
### 燃焼損失低減手法

燃焼損失は化学エネルギーを熱という物理エネルギーに変換する際に生じる損失であり、エンタルピー評価では損失として生じない。

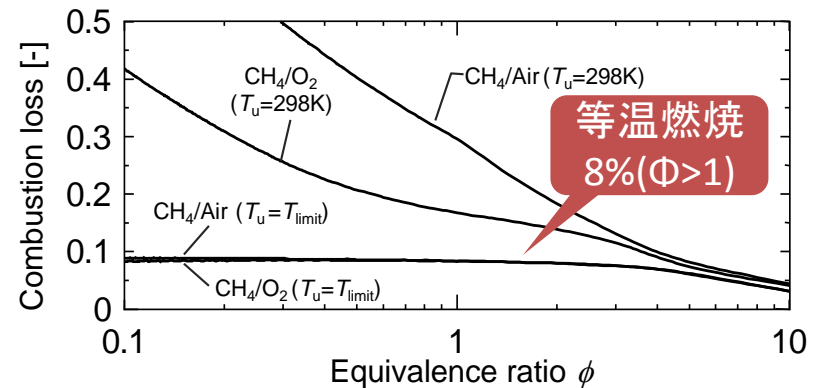


ここで化学燃料のエクセルギー率 ( $Ex/HHV$ ) は  
都市ガス13A:0.92 LPガス(1種2号):0.938 水素:0.82

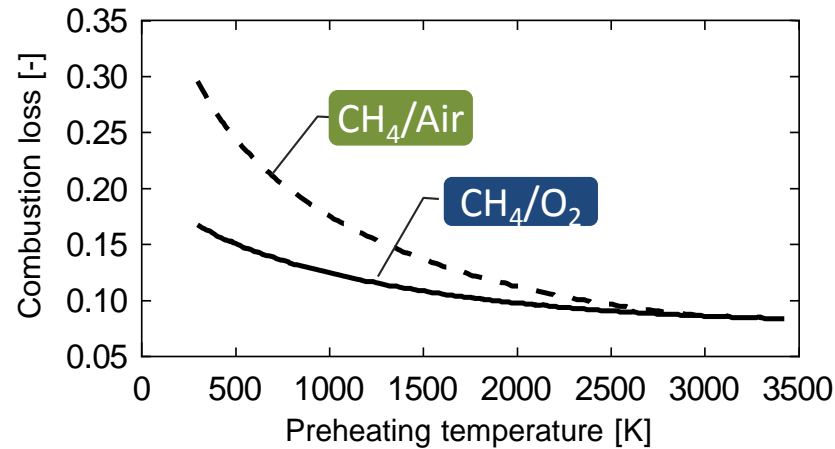
# 酸化剤の酸素濃度、予熱温度、当量比による燃焼損失の増減



酸素濃度の影響 (当量比1.0)



当量比と予熱温度の影響



予熱温度の影響 (当量比1.0)

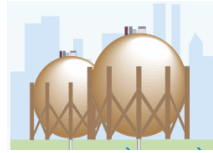
当量比1.0以下では未燃の化学エネルギーが残存するため、見かけ上、燃焼のエクセルギー損失が低下する

出典: 第35回国際燃焼シンポジウム

Exergy Analysis on Effective Utilization of Methane/Air and Methane/Oxygen combustion  
Tsukasa Hori\*, Akeshi Kegasa\*, Akane Nagasaki\*, Yosuke Shiraga\*, Yoshinori Hisazumi\*

# 被加熱物の昇温レベルに対するエクセルギー率

熱は高い温度ほどエクセルギー率は高い。  
燃料は燃料種でエクセルギー率が異なる。



水素  $\epsilon_f = 0.82$   
LPG  $\epsilon_f = 0.938$



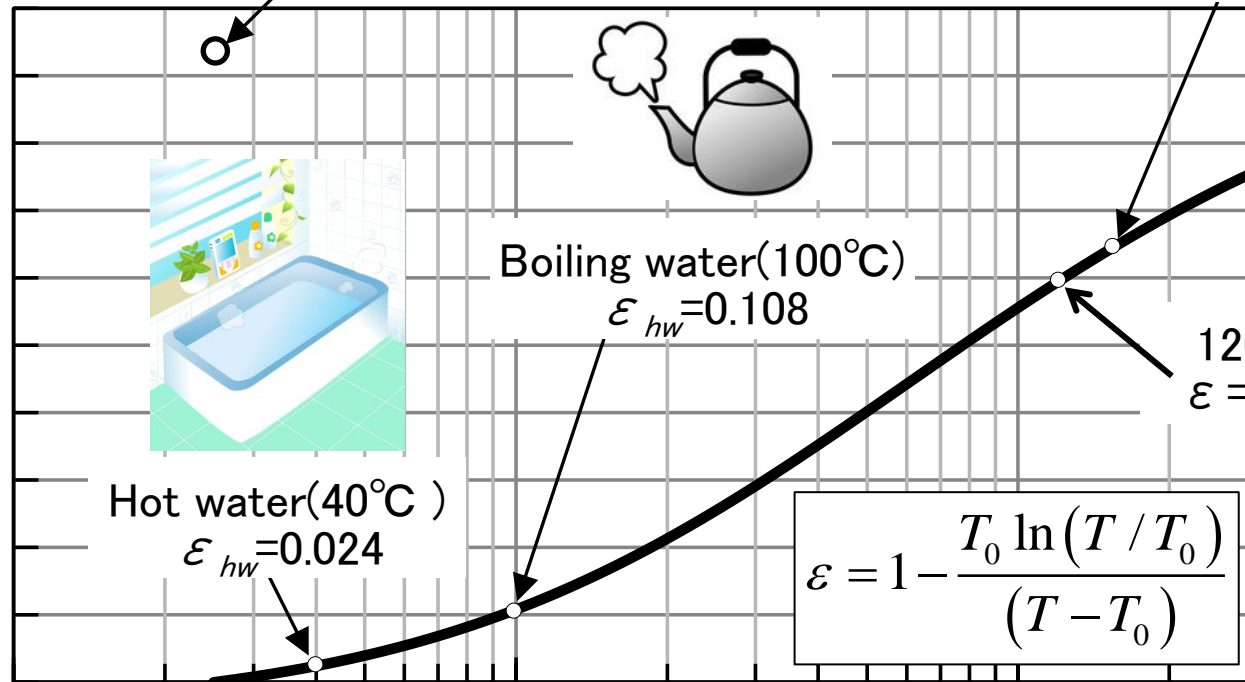
Electricity ( $\epsilon = 1.0$ )

City Gas ( $\epsilon_f = 0.92$ )

Flame (1500°C)  
 $\epsilon = 0.640$

エクセルギー率  $\epsilon$

1.0  
0.9  
0.8  
0.7  
0.6  
0.5  
0.4  
0.3  
0.2  
0.1  
0.0



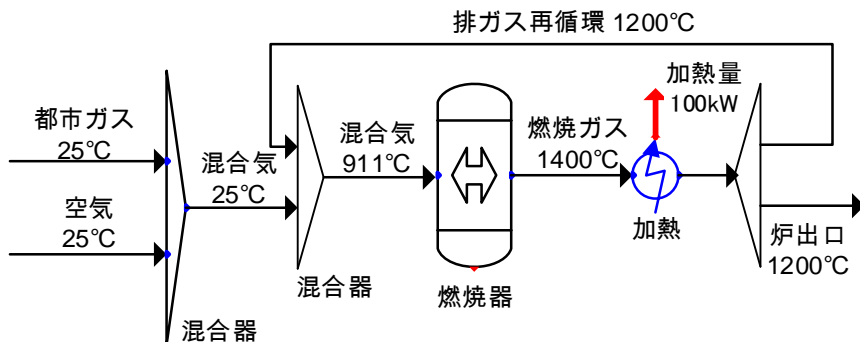
10 25 100 1000 3000  
Substance Temperature  $T$  [°C]

物質の温度とエクセルギー率の関係 ( $T_0 = 25^\circ\text{C}$ )

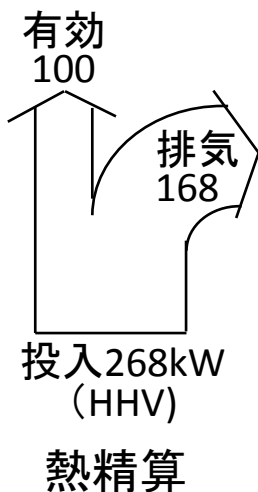
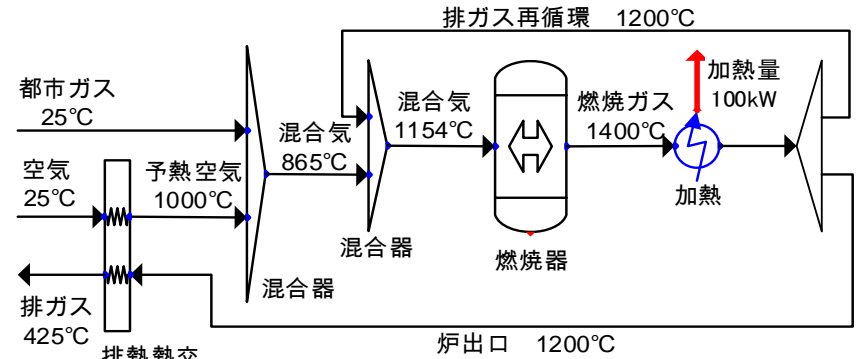
# 空気燃焼加熱炉システムの熱精算比較

被加熱物を初期温度 $25^{\circ}\text{C}$ より $1200^{\circ}\text{C}$ に加熱. 加熱量は $100\text{kW}$   
 従来バーナとリージェネバーナの空気比を1.1

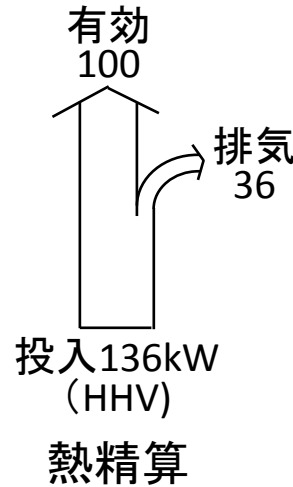
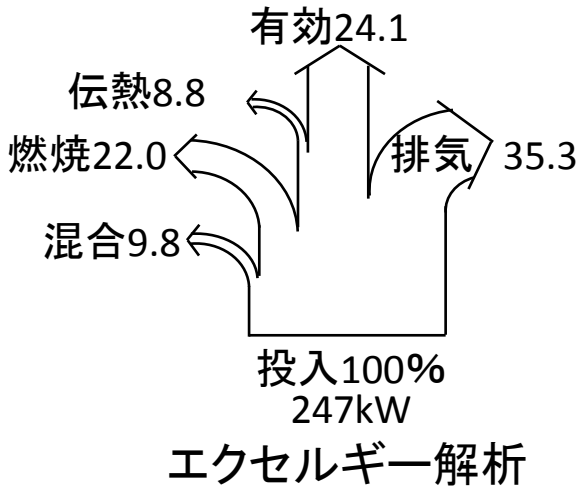
サーマル $\text{Nox}$ 低減のため排ガス再循環による燃焼温度を $1400^{\circ}\text{C}$   
 放熱、循環システムを無視



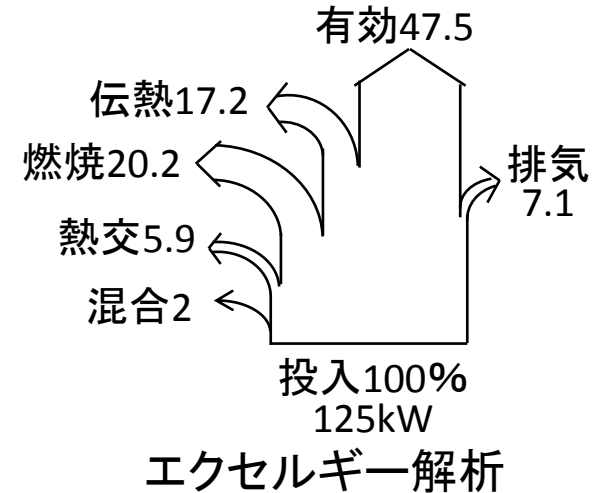
1200°Cのエクセルギー率 0.595



従来空気バーナ

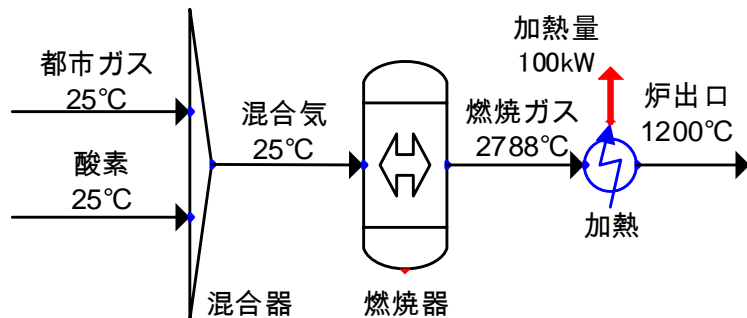


リージェネ空気バーナ

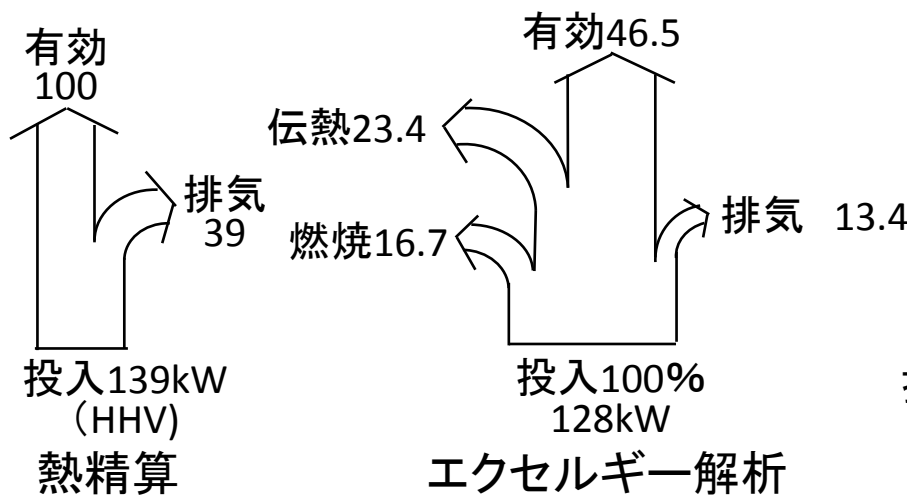
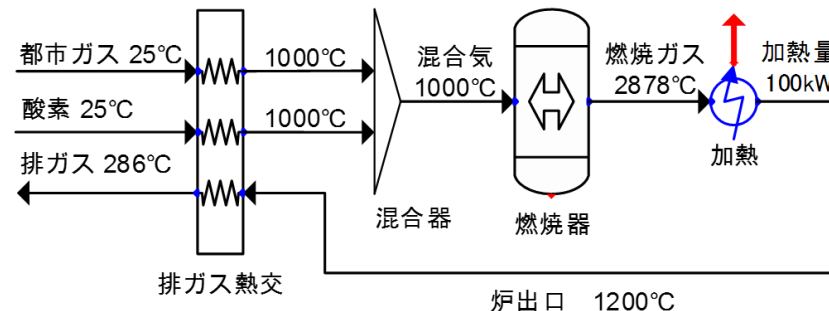


# 酸素燃焼加熱炉システムの熱精算比較

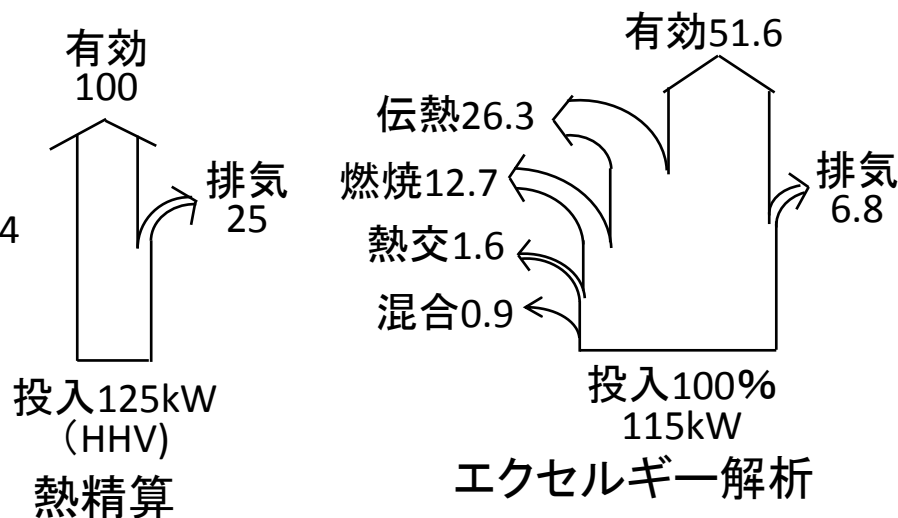
被加熱物を初期温度 $25^{\circ}\text{C}$ より $1200^{\circ}\text{C}$ に加熱. 加熱量は $100\text{kW}$   
 従来バーナとリージェネバーナの酸素比を1.1  
 放熱、循環システムを無視



1200°Cのエクセルギー率 0.595



従来酸素バーナ



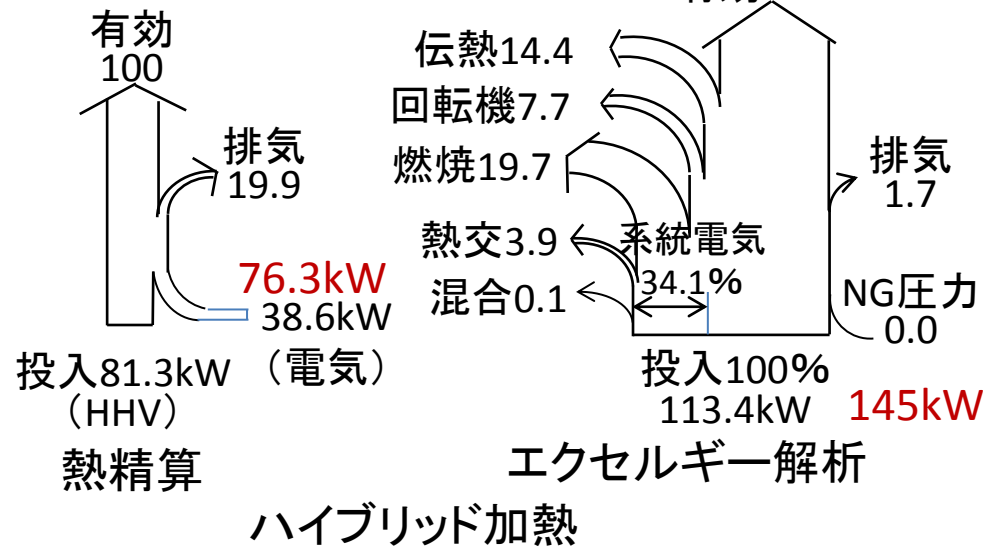
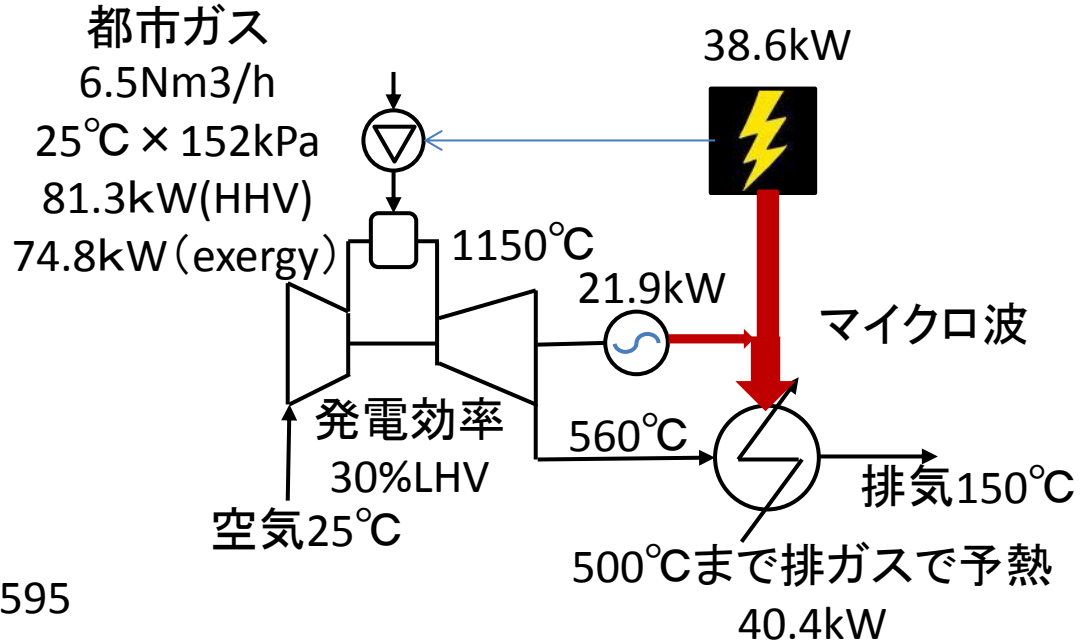
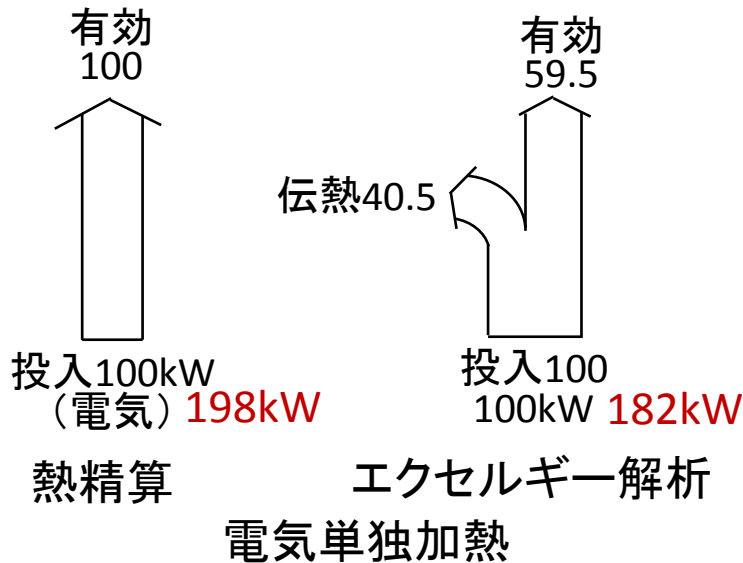
リージェネ酸素バーナ

# 電気単独加熱とハイブリッド加熱システムの熱精算比較

最新天然ガス焼きGTCCの受電端  
エクセルギー効率を55%と仮定  
HHV 50.6%



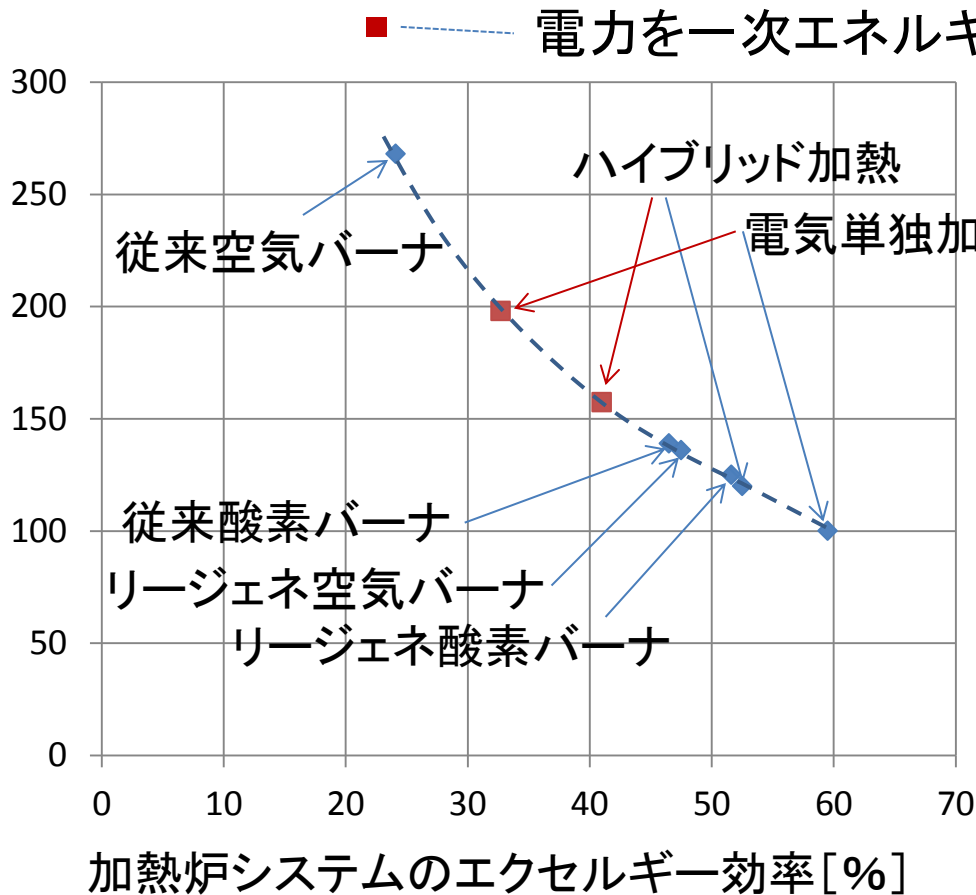
1200°Cのエクセルギー率 0.595



# 被加熱物に100kWの熱を与え1200°Cに加熱する場合 の各種方式における有効率と投入エネルギー関係

システムのエクセルギー効率により投入エネルギー量を推測できる

熱精算における投入エネルギー[kW:HHV]



酸素バーナを用いるシステムでは、酸素製造用の電力消費分が加わるため、実際にはシステムのエクセルギー効率は低下し、投入エネルギーは破線上を上昇する。

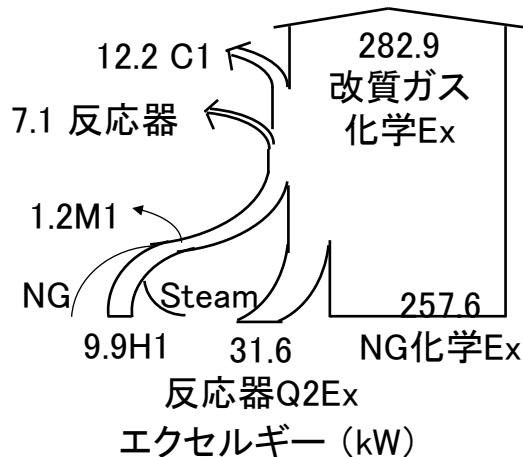


# 化学反応を応用

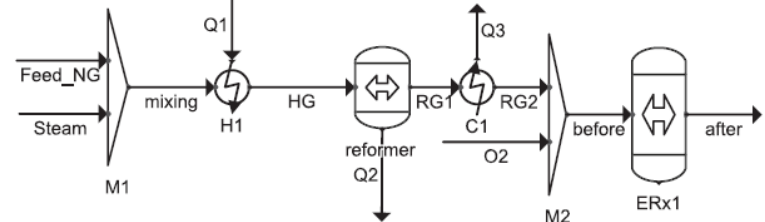
電池反応が関与しない限り, 出力は生成物の化学エクセルギーと反応熱のエクセルギーである. 化学反応条件は目的とする生成物の収量から決まるので, その条件下でエクセルギー損失LWを少なくして, 熱移動をいかに利用するか, および生成物の持つ物理エクセルギーをどう活用するかがエネルギーシステムの効率を上げる問題となる.

化学反応においてもエクセルギー損失LWが発生し投入された天然ガスの化学エクセルギーに対する割合は約2.8%となる.

実際には, 改質反応器への投入エクセルギーは31.6 kWより大きくなるので, この化学反応によるエクセルギー損失LWは, もう少し大きくなる.



	H1	reformer	C1	ERx1	Units
Duty	18.9	-46.7	31.2	336.4	[kW]
Delta P	*0.00	*0.00	*0.00	*0.00	[kPa]



	Feed_NG	Steam	mixing	HG	RG1	RG2	O2	before	after	Units
T	*100.0	100	99.6	*650.0	*650.0	*25.0	72.2	*25.0	25	[°C]
P	*1.00	*1.00	1	101.33	1	1	*1.00	1	1	[atm]
Mole Flow	*1.00	*1.70	2.7	2.7	4.38	4.38	1.81	6.63	5.03	[kgmole/h]
H	13,483	12,418	12,812	38,029	29,473	3,872	10,084	5,978	-24,090	[kJ/kmol]
S	203	198	205	246	207	155	170	165	89	[kJ/kmol-K]
Energy	3.75	5.86	9.61	28.52	35.89	4.72	5.07	11.01	-33.67	[kW]
exergy	343	8,899	4,129	17,294	10,007	0	101	0	0	[kJ/kmol]
Exergy	0.10	4.20	3.10	12.97	12.18	0.00	0.05	0.00	0.00	[kW]
CH4	*88.90	*0.00	32.93	32.93	7.40	7.40	*0.00	4.89	0.0	[%]
C2H6	*6.80	*0.00	2.52	2.52	0.00	0.00	*0.00	0.00	0.0	[%]
C3H8	*3.10	*0.00	1.15	1.15	0.00	0.00	*0.00	0.00	0.0	[%]
iC4H10	*1.20	*0.00	0.44	0.44	0.00	0.00	*0.00	0.00	0.0	[%]
H2O	*0.00	*100.0	62.96	62.96	13.54	13.54	*0.00	8.95	76.8	[%]
CO	*0.00	*0.00	0.00	0.00	13.16	13.16	*0.00	8.70	0.0	[%]
CO2	*0.00	*0.00	0.00	0.00	6.04	6.04	*0.00	3.99	23.2	[%]
H2	*0.00	*0.00	0.00	0.00	59.86	59.86	*0.00	39.56	0.0	[%]
O2	*0.00	*0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	*1.00	33.91	0.0	[%]

図 3-10 天然ガスの水蒸気改質モデル

## 3.3 エクセルギーデザイン学とその適用事例

### エクセルギーデザイン学

エクセルギーデザイン学とは、プロセスシミュレータを用いて、熱交換器の伝熱性能(UA もしくはmin Approach)また圧力損失特性(Pressure Drop)と、回転機械の断熱効率(Adiabatic Efficiency)を加味して、最適な機器構成をモデリングし、エクセルギー解析より求まる損失を機器性能の向上や運用条件の変更により最小化させ、有効エクセルギーの増大を図る手法である。

PDCA サイクルすなわちPlan-Do-Check-Action は、業務改善のため繰り返し回していく手法として知られている。

エクセルギーデザイン学では、この手法と同様に Process Modeling(プロセス作成), Exergy Analysis(エクセルギー解析), Loss Evaluation(損失評価), Payback Review(投資回収評価)を何度も繰り返し、現行技術レベルにおいて、CO<sub>2</sub>低減に対する寄与も加味しながら、最大限の経済的効果が得られるプロセスを決定する学問領域である。



図2-10 エクセルギーデザインのサイクル

# プロセスシミュレータを用いたエクセルギー計算

エントロピーやエンタルピーの計算は理想気体の状態方程式  $PV = nRT$  が基本。実際には係数補正で精度を上げた実在気体の Peng Robinson などの状態方程式を使う。

たとえば、LNG のモリエル線図では、まず組成が与えられ、次に状態量である温度、圧力、乾き度のうち2つの条件が決められると実在気体の状態方程式により、残りの状態量その他、エンタルピー、エントロピーが求められる。

なおエンタルピーやエントロピーは、相対値を問題にするため、基準点となる0点は、問題にされない。

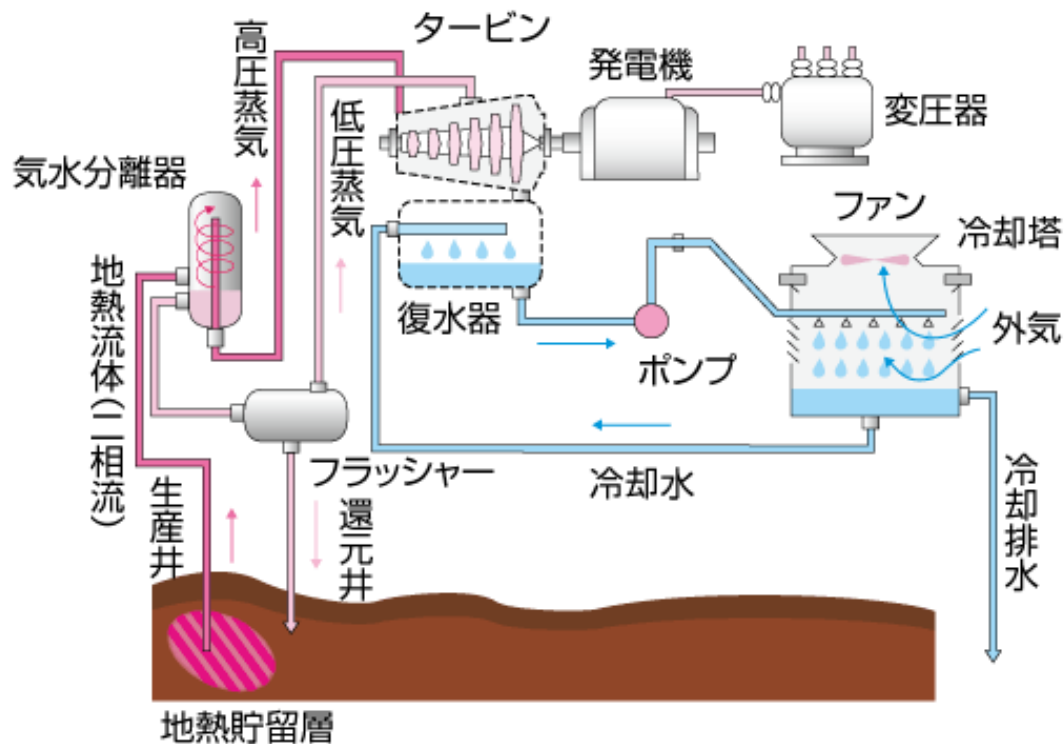
プロセスシミュレータ VMGSim と、エクセルギー計算用 Excel ソフトで瞬時にシステムのエクセルギー評価が行える。

## 経験則による実在気体の状態方程式

	Soave Redlich Kwong	Peng Robinson
	$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b)}$ $Z^3 - Z^2 + (A - B - B^2)Z - AB = 0$	$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b) + b(V-b)}$ $Z^3 - (1-B)Z^2 + (A - 2B - 3B^2)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0$
where		
$b =$	$\sum_{i=1}^N x_i b_i$	$\sum_{i=1}^N x_i b_i$
$b_i =$	$0.08664 \frac{RT_{ci}}{P_{ci}}$	$0.077796 \frac{RT_{ci}}{P_{ci}}$
$a =$	$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j (a_i a_j)^{0.5} (1 - k_{ij})$	$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j (a_i a_j)^{0.5} (1 - k_{ij})$
$a_i =$	$a_{ci} \alpha_i$	$a_{ci} \alpha_i$
$a_{ci} =$	$0.42747 \left( \frac{RT_{ci}}{P_{ci}} \right)^2$	$0.457235 \left( \frac{RT_{ci}}{P_{ci}} \right)^2$
$\alpha_i^{0.5} =$	$1 + m_i (1 - T_{ri}^{0.5})$	$1 + m_i (1 - T_{ri}^{0.5})$
$m_i =$	$0.48 + 1.574 \omega_i - 0.176 \omega_i^2$	$0.37464 + 1.54226 \omega_i - 0.26992 \omega_i^2$ When an acentric factor > 0.49 is present HYSYS uses following corrected form: $0.379642 + (1.48503 - (0.164423 - 1.016666 \omega_i) \omega_i) \omega_i$
$A =$	$\frac{aP}{(RT)^2}$	$\frac{aP}{(RT)^2}$
$B =$	$\frac{bP}{RT}$	$\frac{bP}{RT}$

# 地熱バイナリー発電システムへの エクセルギーデザイン学の適用事例

## 地熱発電(フラッシュ蒸気方式)



フラッシュ発電のしくみ

出典: JOGMEC, ENAA/蒸気発電

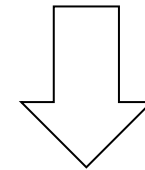
# 地熱発電(バイナリー方式)



国内のバイナリー発電施設

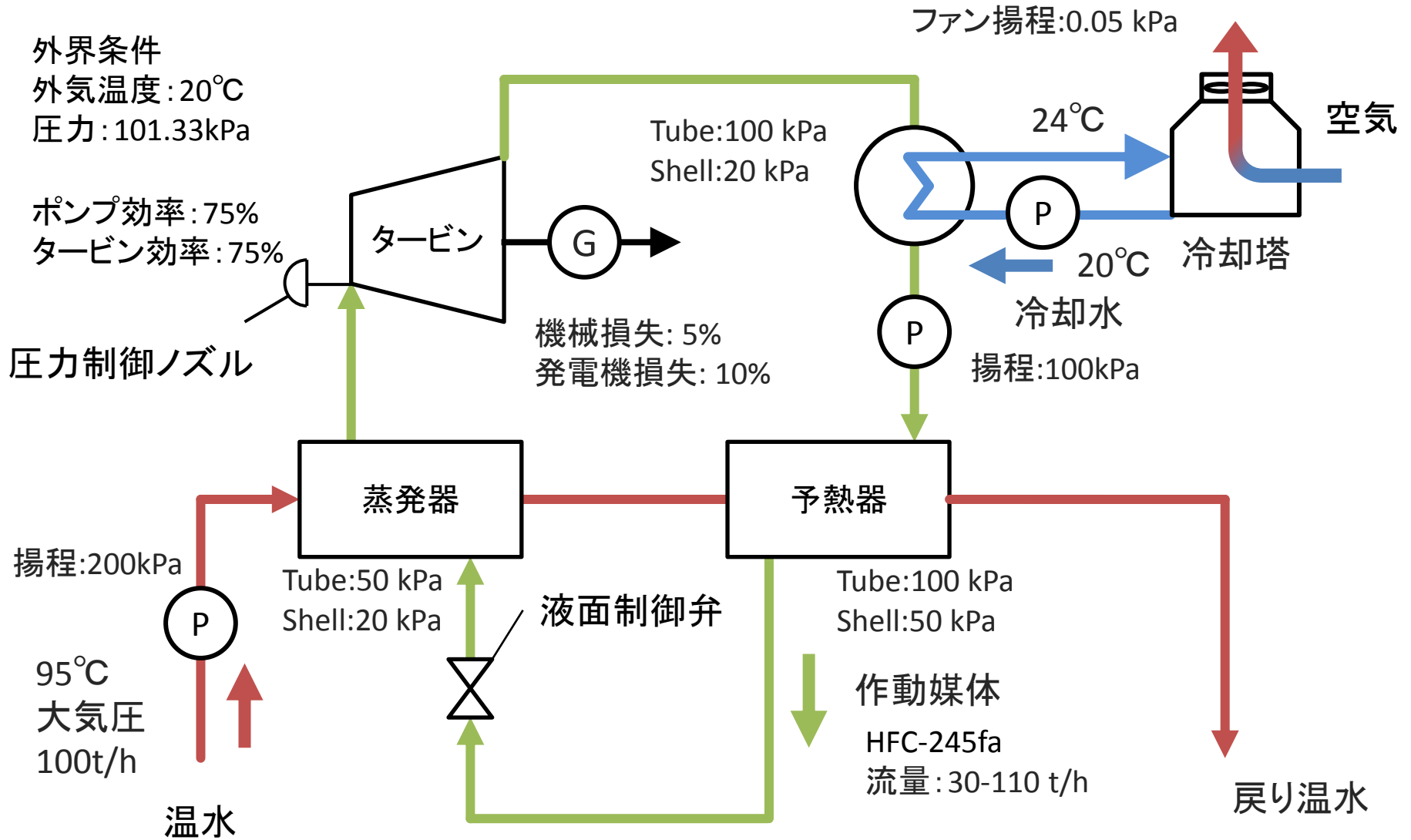
フラッシュ発電では利用できなくなった生産井や温泉水による発電方式FIT設備認定された中で運転が開始されている5件は全て温泉発電。

温泉バイナリー発電は利用できる地熱水の水量並びに熱エクセルギーが低い  
ため、熱水や熱媒体の循環、あるいはその冷却に要する自家使用電力が発電出力の最大40%を占め、事業性に大きく影響を及ぼす。



エクセルギー解析により、バイナリー発電の最大損失を抽出・改善し、プロセスの経済性をIRR法およびNPV法により評価する。

# 現行一段バイナリー発電

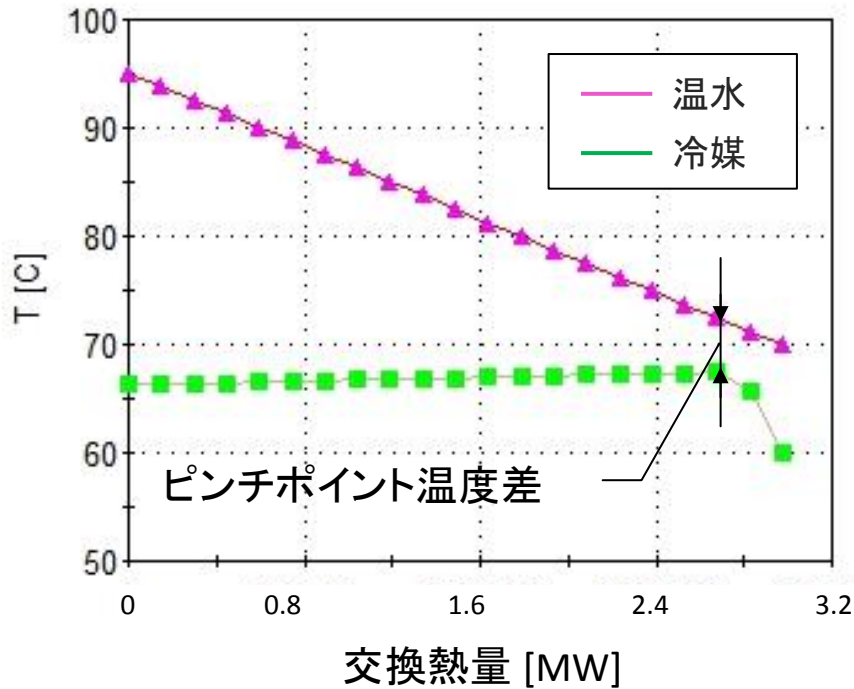


バイナリー発電の基本フロー

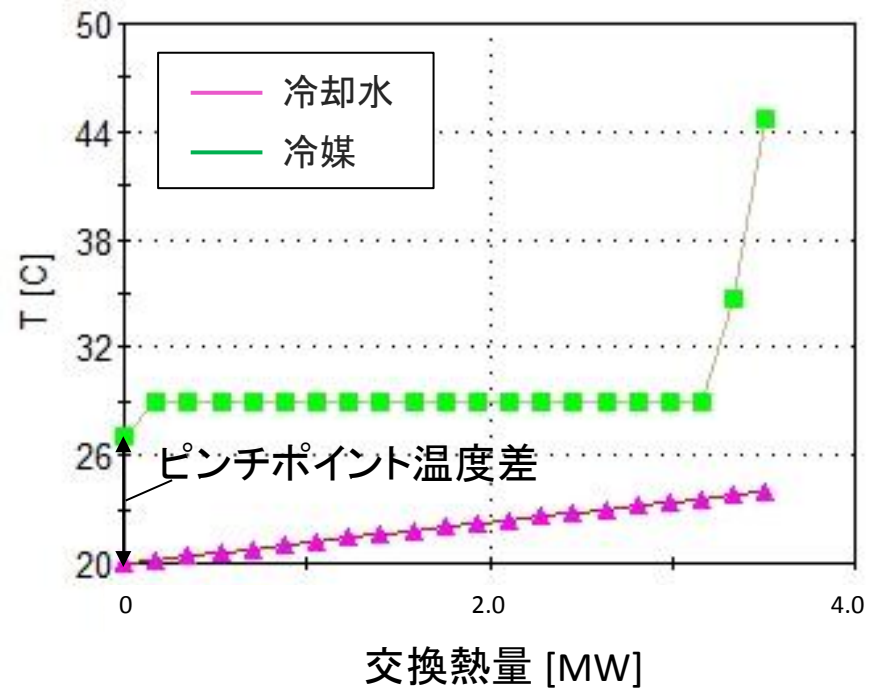
# 蒸発器並びに凝縮器の想定温度差

- ピンチポイント温度差

蒸発器: 5°C 凝縮器: 7°C 予熱器: 10°C



(a)蒸発器

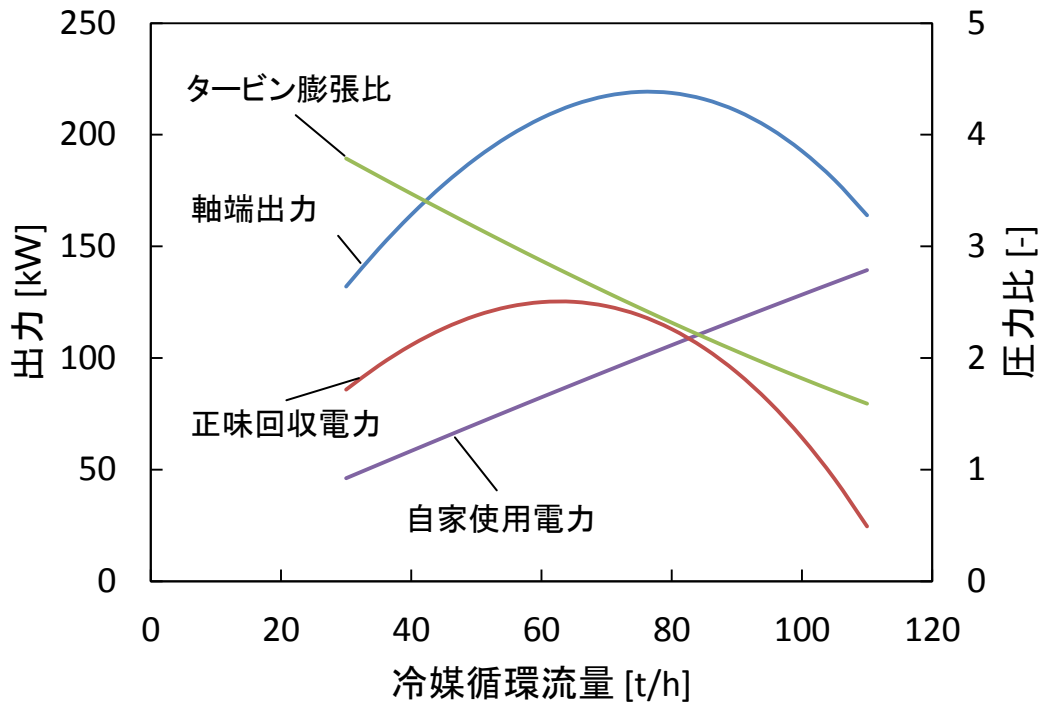


(b)凝縮器

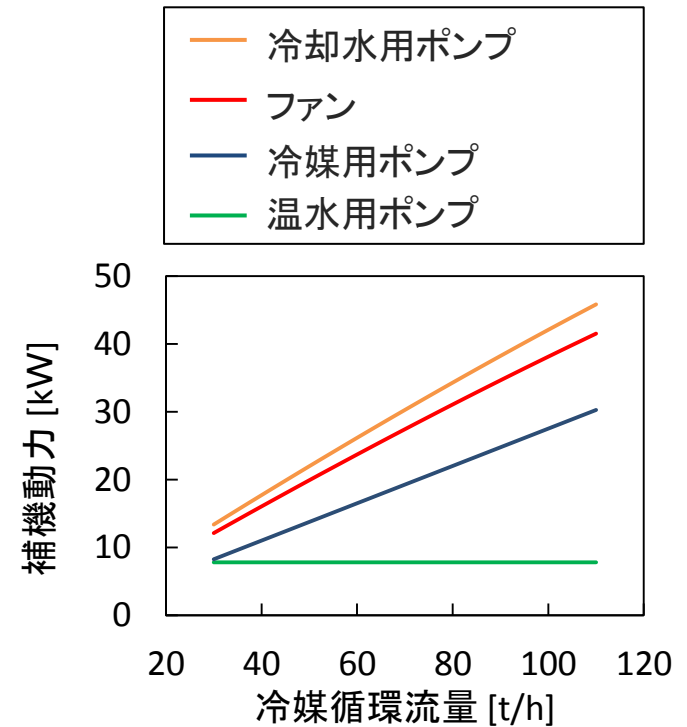
T-Q線図

# 冷媒循環量に対する予想特性

タービン入口圧力の上昇に伴い,冷媒流量は減少するためタービン出力がピーク値を持つ.



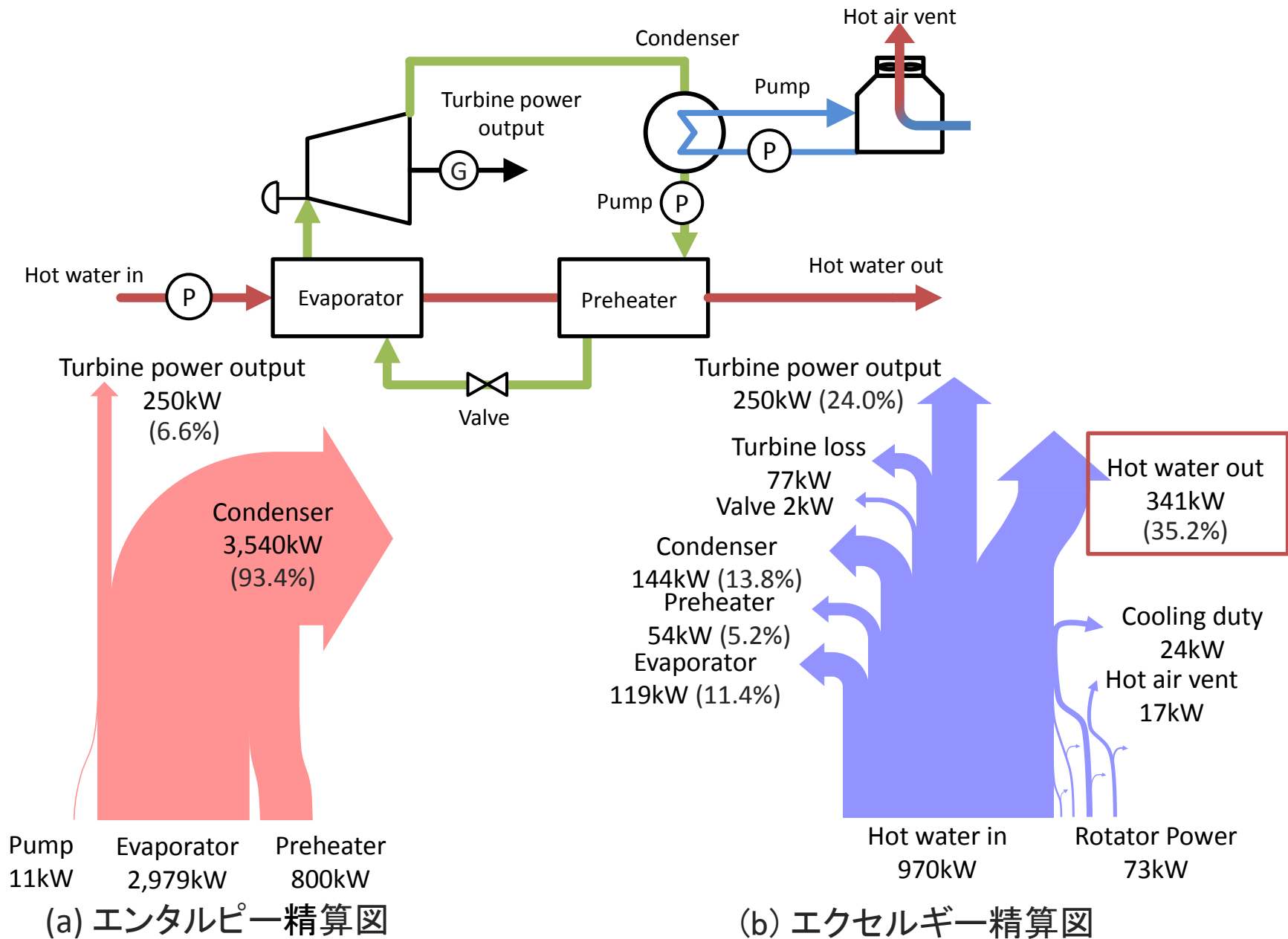
冷媒流量と出力の関係



自家使用電力の内訳



# 最大のエクセルギー損失は戻り温水の熱エクセルギー

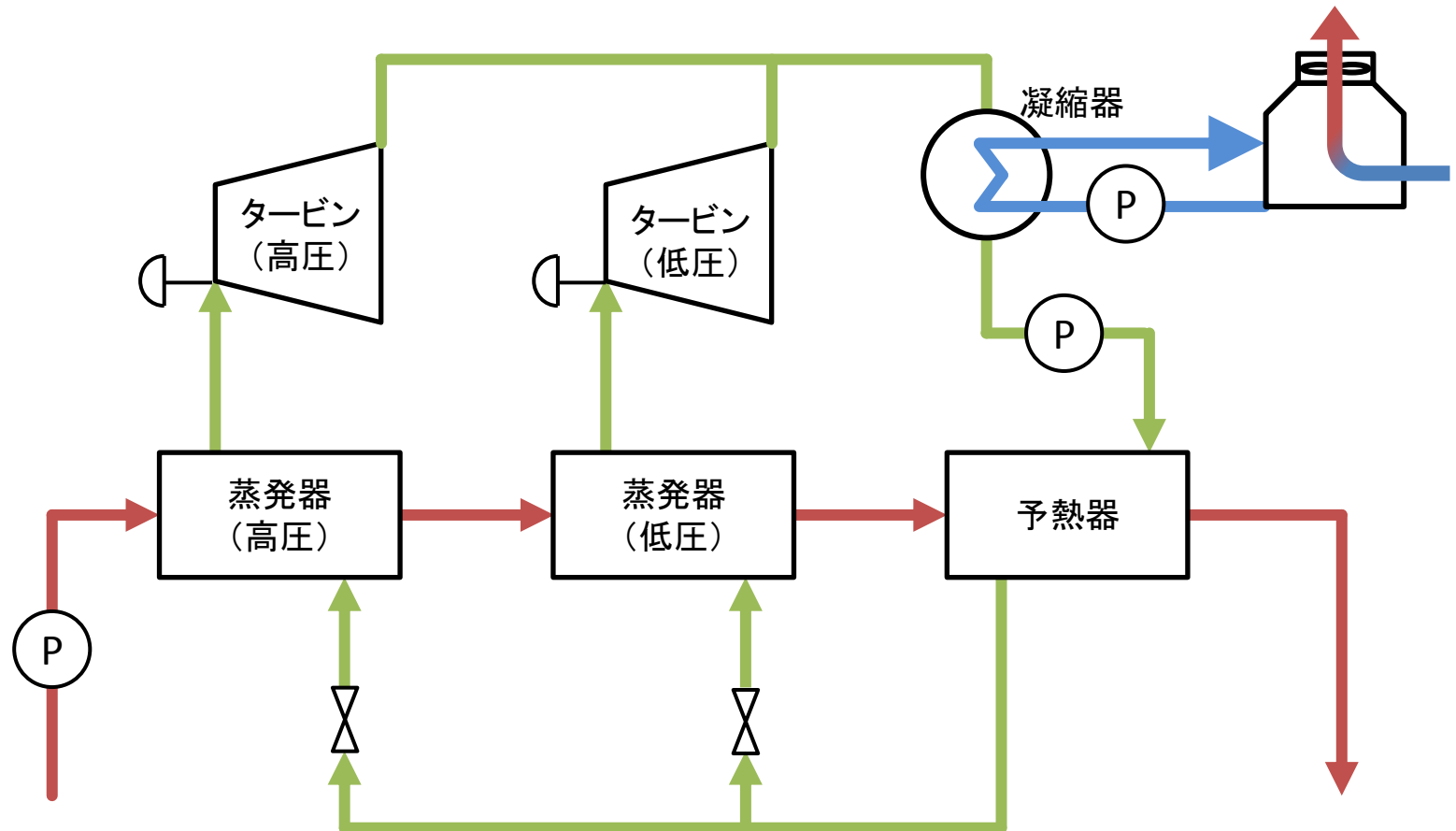


# エクセルギーデザインによる回収電力向上検討

向上策1: タービンと蒸発器を追加.

戻り温水の熱エクセルギー回収と蒸発器の伝熱損失を低減.

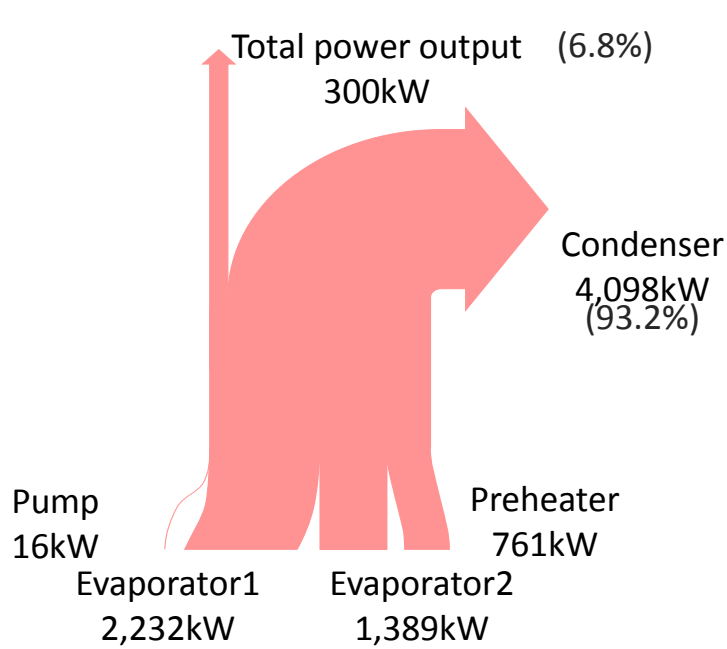
向上策2: 蒸発器、凝縮器に伝熱促進管を、また予熱器にプレート熱交を採用.



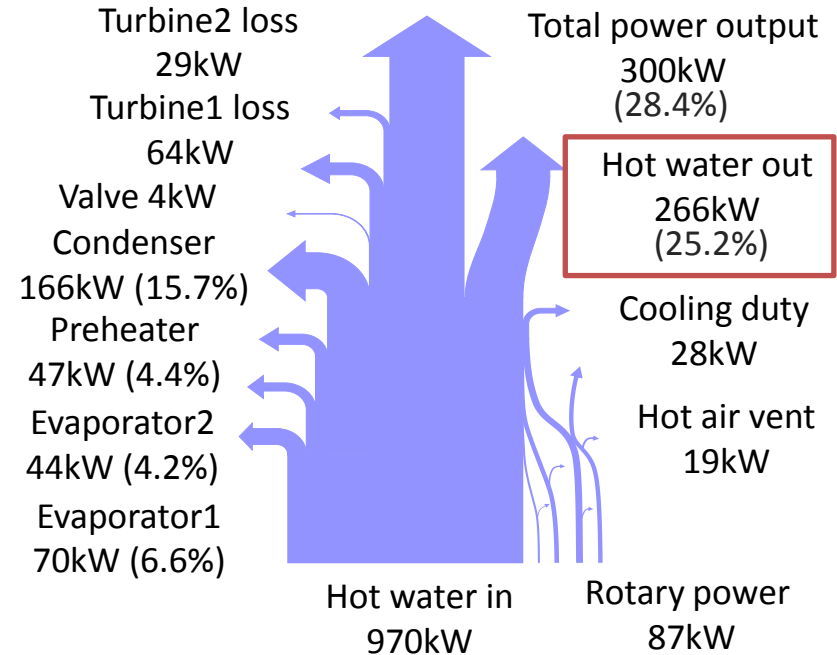
# 向上策1の効果

(単位:エクセルギーkW)

	一段	二段	差異
軸端出力	250	300	+50
戻り温水	341	266	-75
伝熱損失	317	327	+10



(a) エンタルピー精算図



(b) エクセルギー精算図

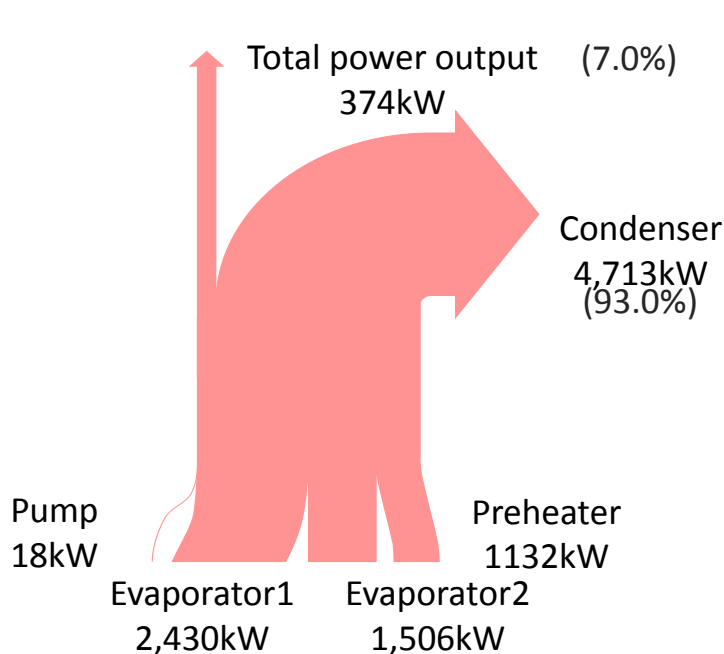
# 向上策1 + 向上策2 の効果

向上策2 : ピンチポイント温度

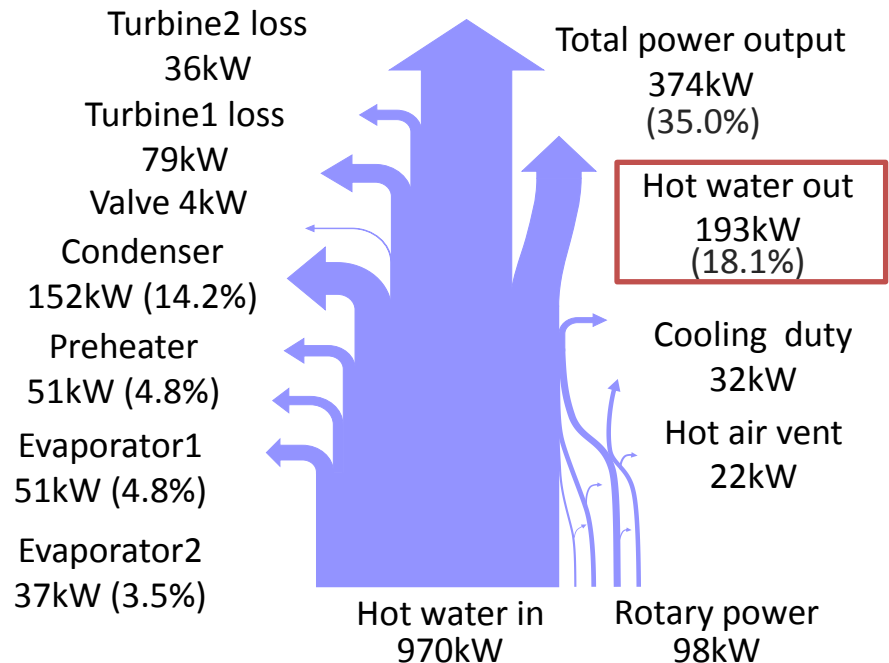
蒸発器: 5°C → 2°C 凝縮器: 7°C → 2°C 予熱器: 10°C → 5°C

(単位: エクセルギー kW)

	一段	二段 & 伝熱	差異
軸端出力	250	374	+124
戻り温水	341	193	-148
伝熱損失	317	291	-26



(a) エンタルピー清算図



(b) エクセルギー清算図

# 4. エクセルギー解析とその実施例

## 4.1 熱物性推算

計算対象成分: 都市ガス成分、水、水素、窒素、酸素、CO、CO<sub>2</sub>

物性値計算

入力値

1. EOS(状態方程式)の選択

Advanced\_Peng-Robinson

2. 組成の入力

Advanced\_Peng-Robinson  
Advanced\_Peng-Robinson  
Peng-Robinson  
Steam95

物質名	モル分率
METANE	0.889
ETHANE	0.068
PROPANE	0.031
ISOBUTANE	0.012
HYDROGEN	0
OXYGEN	0
CARBON MONOXIDE	0
CARBON DIOXIDE	0
NITROGEN	0
WATER	0

クリア Normalized 都市ガスの物性

3. 物性値計算のタイプを選択

- P-T(圧力と温度)
- P-V(圧力とVapor fraction)
- T-V(温度とVapor fraction)

4. 初期条件の入力

温度 25 C  
 圧力 101.325 kPa  
 Vapor fraction 0.0  
 5. エクセルギーの環境温度と環境圧力を入力  
 環境温度 25 C  
 環境圧力 101.325 kPa

0°C、大気圧のエンタルピーHは、0でない。  
 Exergyは、評価温度を0°Cとすると0となる。  
 LNG1ton = 1,219Nm<sup>3</sup> (22.4/18.37 × 1000)

水はSteam95(JSME蒸気表と同等)を選択

環境条件下(25°C)での冷熱エクセルギー 17054/18.37/3.6  
 = 257 kWh/LNG1ton

7MPa高圧・常温天然ガスの圧力エクセルギー  
 151 kWh/NG1ton  
 (LNG冷熱エクセルギーの約59%相当)

供給ガスの発熱量

真発熱量 9,654 kcal/Nm<sup>3</sup> 40.4MJ 11.2kWh

総発熱量 10,752kcal/Nm<sup>3</sup> 45.0MJ 12.5kWh

供給ガスの化学エクセルギー(評価温度25°C)

9,890kcal/Nm<sup>3</sup> 41.4MJ 11.5kWh

LNG1ton=1,219Nm<sup>3</sup>

LNG1tonの化学エクセルギー 14,020kWh

Vapor fraction	0.00
T	-160.29 C
P	101.33 kPa
H	-5769.1 kJ/kmol
S	81.90 kJ/kmol-K
Molecular Weight	18.37
Mass Density	461.7592 kg/m <sup>3</sup>
Cp	55.493 kJ/kmol-K
Thermal Conductivity	0.1882 W/m-K
Viscosity	1.5405E-004 Pa-s
MolarV	0.049 m <sup>3</sup> /kmol
Exergy	17053.949 kJ/kmol

Vapor fraction	1.00
T	25 C
P	7000.00 kPa
H	8705 kJ/kmol
S	154 kJ/kmol-K
Molecular Weight	18.37
Mass Density	63.44 kg/m <sup>3</sup>
Cp	51.85 kJ/kmol-K
Thermal Conductivity	0.0409 W/m-K
Viscosity	1.27E-005 Pa-s
MolarV	0.290 m <sup>3</sup> /kmol
Exergy	10022 kJ/kmol

## 4.2 エクセルギー評価ソフトウェア

エクセルギーの概念を普及させるために、講座のホームページにプロセスシミュレータとクラウドコンピューティングを用いて、次の「5つの分類のエネルギーシステムのエクセルギー評価ソフトウェア」を構築した。

今後、随時完成したシステムの掲載を行う予定です。

分類A:都市ガスから動力または電気を取り出すシステム

- [ガスタービン\(ブレイトンサイクル\)](#)
- [ガスエンジン\(オットーサイクルやディーゼルサイクル\)](#)
- [燃料電池\(SOFC\)](#)

分類B:温熱や冷熱から動力または電力を取り出すシステム

- [LNG冷熱利用システム](#)
- [排熱利用システム\(ランキンサイクル\)](#)

分類C:給湯・暖房の熱供給システム

- [ガス給湯暖房機\(通称エコジョーズ\)](#)
- [吸着・吸収材を用いた給湯暖房システム](#)
- [自然冷媒ヒートポンプ\(通称エコキュート\)](#)
- [フロン系冷媒を用いたヒートポンプ](#)

分類D:冷房および除湿システム

- [エアコン](#)
- [デシカント](#)
- [吸収式](#)

分類E:自然エネルギー利用

- [海洋温度差発電](#)
- [太陽熱温水器](#)
- [水噴霧冷却](#)

[アクセスマップ](#) [サイトマップ](#)

エクセルギーデザイン共同研究講座  
Exergy Design Joint Research Laboratory



エネルギー評価尺度をエクセルギーに！

3C(Change・Challenge・Create)と3E(Enthalpy・Entropy・Exergy)の融合

Top

エクセルギーとは

研究内容

研究業績

メンバー

アルバム

リンク集

各種情報

エクセルギー評価尺度をエクセルギーに

エクセルギーとは

熱などが保有するエネルギーの価値を表す概念。熱源に保有されるエネルギーは、仕事(力学的エネルギー)として取り出せるエネルギーと取り出せないエネルギーとに区分できます。前者を「exergy」または「有効エネルギー」、後者を「anergy」または「無効エネルギー」と呼びます。このエクセルギーは熱源の温度の高低などに影響を受け、外気温度など基準とする温度との差が大きいほどエクセルギーは高くなります。高いエクセルギーの熱源に対してはエクセルギーの損失が小さくなるようなエネルギー変換方法を取り入れたり、また低いエクセルギーの熱源もできる限り活用できるシステムが、省エネ・省CO<sub>2</sub>に繋がると考えられます。

エネルギー評価尺度変更の必要性

なぜ、エクセルギーへの評価則変更が必要なのでしょう。エネルギー倫理の問題として、エントロピーの増大は再生不可能な環境破壊の後始末を未来世代に押し付けるからです。熱量保存則では、このエントロピー増大の評価ができません。たとえば

# エネルギーシステムのエクセルギー評価ソフトウェア 解説

エクセルギーデザイン共同研究講座  
Exergy Design Joint Research Laboratory



エネルギー評価尺度をエクセルギーに！  
3C(Change・Challenge・Create)と3E(Enthalpy・Entropy・Exergy)の融合

Top エクセルギーとは 研究内容 研究業績 メンバー アルバム リンク集 各種

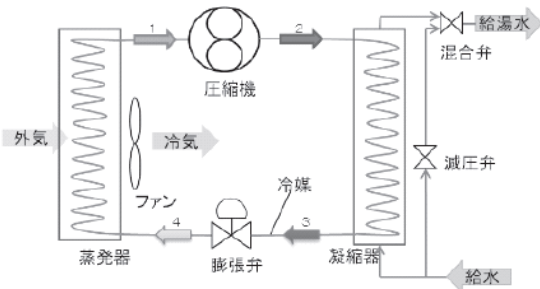
解説

## 自然冷媒ヒートポンプ給湯機「通称:エコキュート」構成機器の損失の見える化体験

### エコキュート

2001年に世界で初めて販売された自然冷媒ヒートポンプ(通称エコキュート)は、2009年10月に累計200万台を突破した深夜電力を利用して給湯ができる製品です。沸き上げ温度は、約65℃(中間期および夏期)~約90℃(冬期高温)で外気-10℃~43℃で運転ができ、年間給湯効率は機種により2.8~3.5といわれています。ただし、沸き上げ完了から実際にお湯が使われるまでの放熱などの影響により、実際の年間給湯効率は1.9とする報告もあります。年間給湯効率は、消費者の使用実態を考慮に入れ、1年を前提としてある一定の条件のもとでヒートポンプ給湯機を運転した時の単位消費電力量あたりの給湯熱量を表したものです。各メーカーのカatalogには、中間期、夏期、冬期高温時の加熱能力や消費電力が記載されています。

ここでは、エコキュートの構成機器のエクセルギー損失の見える化を体験してもらいます。このモデルは、プロセスシミュレータVMGSimを用いて、以下の入力条件を適切に設定することで、自然冷媒ヒートポンプ(通称エコキュート)の蒸発器や凝縮器の温度-熱量(T-Q)特性、並びに各構成機器のエクセルギー損失や有効エクセルギーの値を表示できます。なお、各熱交換器の圧力損失や回転機械の効率、室外機風量は、カタログスペックから予想した値を採用しており、ここでは変更することができません。



エコキュートの計算ソフト

入力/出力項目

### 入力条件

外気温度	エクセルギー評価のための外界の評価温度に相当し、夏期なら25℃、冬期なら7℃が目安になります。
相対湿度	蒸発や必要風量に影響を与えます。
給水温度	給湯として使用する場合は環境温度に近い温度となり、夏期なら24℃、冬期なら9℃が目安になります。暖房運転では温水が循環するため、温度は高くなります。
沸上温度	約65℃(中間期および夏期)~約90℃(冬期高温)となります。貯湯タンクでの放熱等を考慮して、冬期の沸上温度を高くしています。
給湯温度	給水と混合して使用に適した温度とします。給湯として使用する場合は42℃程度ですが、暖房利用では沸上温度と同じ温度とします。
圧縮機入力	温水出力が夏期4.5kW、中間期・冬期高温6.0kWになる値とします。
圧縮機吐出圧力	90℃出湯では12MPa前後、65℃出湯では10MPa前後となります。実機では、圧縮機の吐出圧力は、凝縮器の伝熱性能(総括伝熱係数×伝熱面積:UA)により決まります。
圧縮機の効率	圧縮機の効率を設定します。70%~85%が目安になります。
放熱量	圧縮機からの放熱量を設定します。300W~600Wが目安になります。
冷媒蒸発温度	冷媒の蒸発温度を高めれば、圧縮機に入る冷媒の質量流量が増え、温水出力を上げることができます。しかし、製品の蒸発器伝熱性能(UA)がほぼ一定のため、外気温度や冷媒の乾き度(蒸発熱量)により決まります。
冷媒凝縮温度と給水温度との差	この値を小さくできれば、蒸発器に入る冷媒の乾き度を下げ、外気入熱を増やせます。しかし、凝縮器で温度交差が生じるため、吐出温度の上限(120℃前後)内で、圧縮機の吐出圧力を上げる必要があります。

### どんなことがわかるか！

- 冷媒(二酸化炭素)の圧縮機入口圧力、出口の温度、圧力、質量流量
- エネルギー変換におけるエクセルギー損失
- 外気が冷却および給水が昇温されて得る有効エクセルギー

体験してほしいこと

### 是非体験してほしいこと

- 外気7℃、相対湿度96.6%、給水温度9℃、沸上温度90℃、給湯温度42℃、圧縮機入力1950Wの入力条件において、約6.0kWの温水を得ることができます。これをエンタルピー、つまりCOP(エンタルピー熱効率)で評価すると3.04(304%)となり、投入電力以上のエネルギーが回収できることになります。しかし、これをエネルギーの値を表すエクセルギーで評価すると有効温水は約18%となります。また、COPやエクセルギー効率を他のシステムと比較する場合は、電力の二次エネルギー基準から一次エネルギー基準に換算する必要があります。これは、受電端での発電効率(HHV)を乗じることで換算できます。
- エコキュートでは給水と給湯との混合、圧縮機での圧縮、膨張弁での減圧時に大きなエクセルギー損失が生じます。また、貯湯タンクに蓄熱する場合は、実際に使用する時間までに生じる貯湯タンクからの放熱損失が発生します。
- 給水温度が上がると、有効温水のエクセルギー効率は低下します。凝縮器での伝熱損失は低減しますが、蒸発器に入る冷媒の乾き度が増え、膨張弁での減圧に伴う損失が増加することが原因です。例えば冬期の条件で給水温度が35℃以上になると、乾き度は約0.4を超えます。

Copyright © 2010 Exergy Design Joint Research Laboratory. All Rights Reserved.

図 5-1 解説ページの例 (エコキュート)



# エネルギーシステムのエクセルギー評価ソフトウェア 計算

エコキュート

計算条件の入力

入力条件

外気温度	3 °C
外気の相対湿度	88.6 %
結露温度	9 °C (8°C-60°C)
沸上温度	90 °C
結露温度	42 °C
圧縮機入力	1960 W
圧縮機吐出圧力	12.5 MPa
圧縮機の効率	78 %
送熱量	600 W
冷媒蒸発温度 (T <sub>1</sub> )	-3 °C
冷媒凝縮温度 (T <sub>2</sub> )	8 °C
結露温度	8 °C
電力の一次エネルギー換算係数	9280 kJ/電力(1kWh)

計算開始ボタン

計算結果

外気の状態	4.9 °C
外気の流れ	1,412 m <sup>3</sup> /h
外気出口温度	0.9 °C
結露流量	2.30 L/min
沸上温中流量	1.05 L/min
送熱量換算	4,663 W
冷媒循環流量	79.2 kg/h
ファン入力	31 W
投入電力	1,981 W
蒸発出力	6,013 W
COP	3.04
COP (一次エネルギー換算)	1.38

T	2°C
P	3.225 MPa
過熱度	5°C

T	136°C
P	12.5 MPa

T	-2.7°C
P	3.225 MPa
Vapor Frac.	0.03

T	17.0°C
P	12.5 MPa

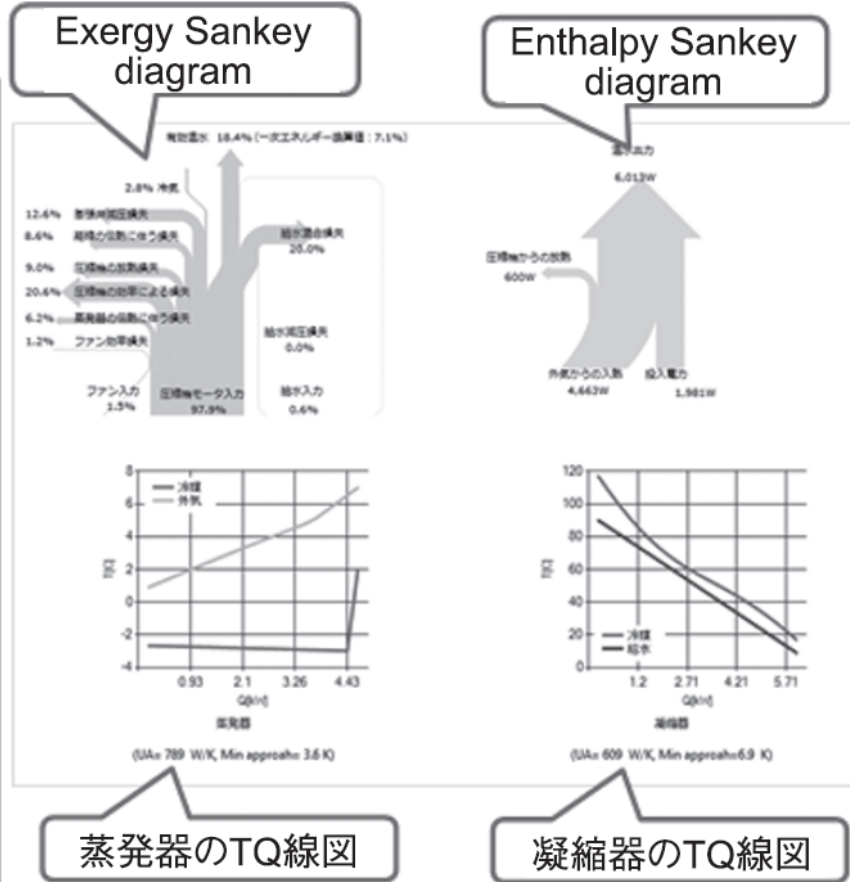


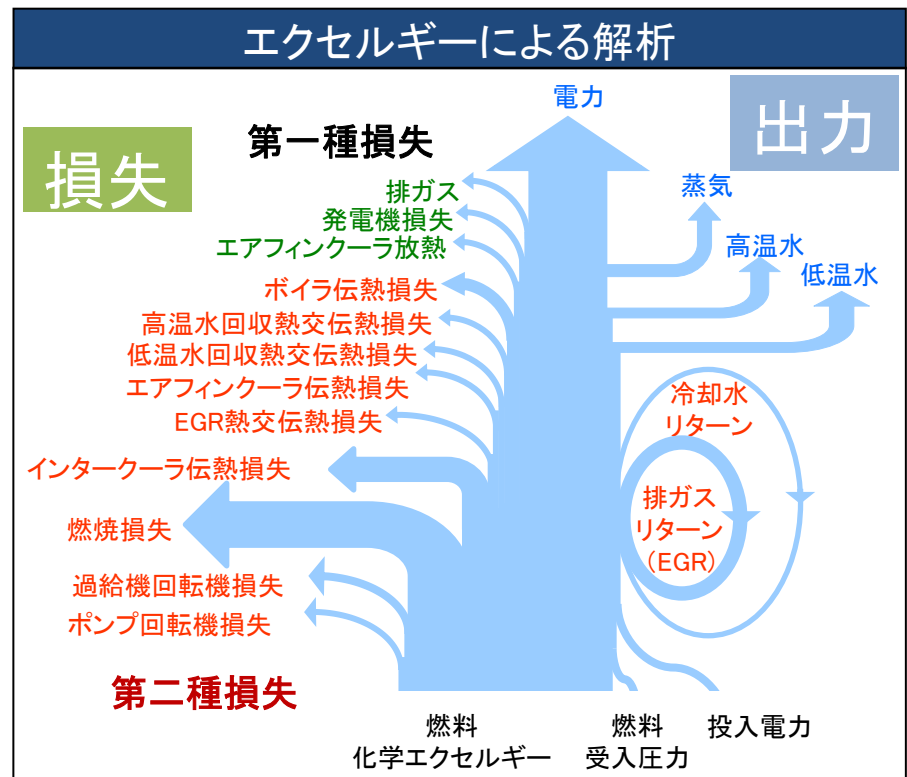
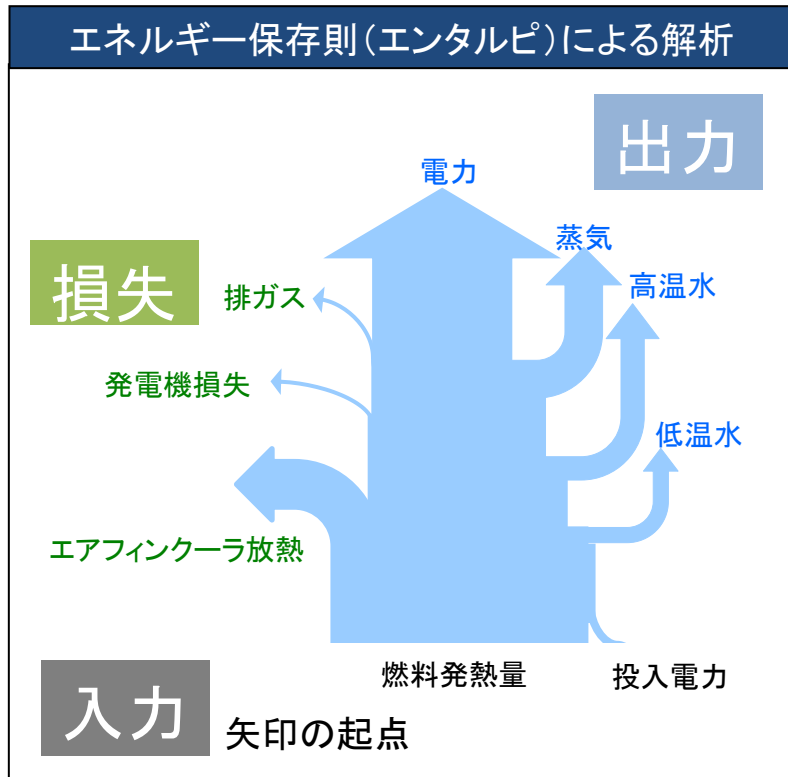
図 5-2 計算ページの例 (エコキュート)



# エクセルギー解析はシステム効率向上支援手法

- ◆ 反応(燃焼), 伝熱, 混合, 回転機の損失を見える化
- ◆ 要素開発の優先順位, システム見直しを考えるツール

インプットを下側, 損失を両サイド, 有効分を真上の矢印で表す。  
 矢印の太さを値と対応させることで, 入力, 有効, 損失をわかりやすく表示できる。  
 エンタルピー, エクセルギーに関わらず利用できる。



ガスエンジンコージェネでの解析例 (産業用の一例)

# 4.3 ガスタービンコンバインドサイクルシステムのエクセルギー解析

- ◆ 燃焼によるエクセルギー損失が28.3%. 熱交換器で6.9%
- ◆ 蒸気温度が高温のため、蒸気のエクセルギーは17%と大きい
- ◆ 発電効率は低いがエクセルギーの総合効率はガスエンジンより高い

## 入力項目

外気温度	25	C
燃料流量	50,000	Nm3/h
NG受入圧力	1.5	MPa(G)
タービン入口設定		
燃焼温度	1500	C
燃焼器内圧力	2.2	MPa(G)
燃焼器ノズル圧損	500	kPa
NG昇圧機効率	80	%
タービン効率	90	%
空気圧縮効率	88	%
給水ポンプ効率	75	%
給水温度	20	C
飽和蒸気温度	280	C
過熱蒸気温度	450	C
排ガス温度	150	C
初期値		計算開始

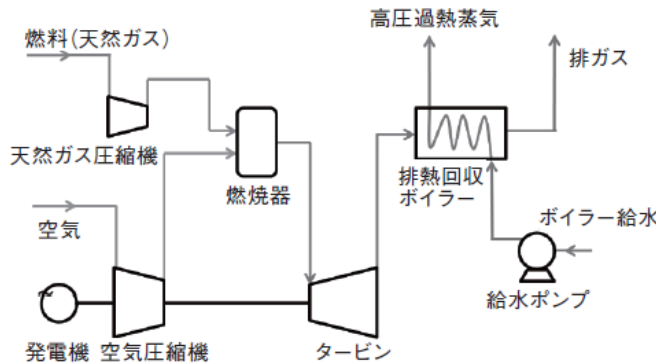


図 5-3 ガスタービンコージェネレーションのモデル

タービン出力	233,144	kW
空気圧縮動力	230,596	kW
NG圧縮動力	1,086	kW
給水ポンプ動力	684	kW
各種圧縮機吐出圧力	3	MPa(G)
NG圧縮機吐出温度	71	C
空気圧縮機吐出温度	533	C
評価温度まで排ガス放熱量	122,388	kW
タービン出口ガス温度	686	C
boiler min approach	110	C
燃焼空気流量	1,201,652	Nm3/h
蒸気発生量	275	t/h
CO <sup>2</sup> 排出量	115	t/h
蒸気圧縮	6	MPa
ボイラー KA	1,398,629	W/K
NG投入熱量	561,279	LHV : kW
NG投入化学エクセルギー	585,000	kW
燃焼流量	41	t/h
TIT 収束値	1,500	

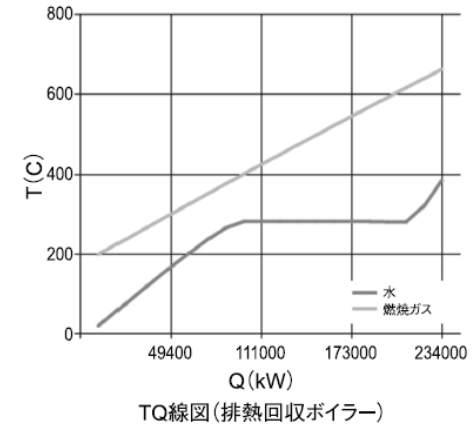


図 5-4 ガスタービンコージェネレーションの計算結果とボイラの T-Q 特性

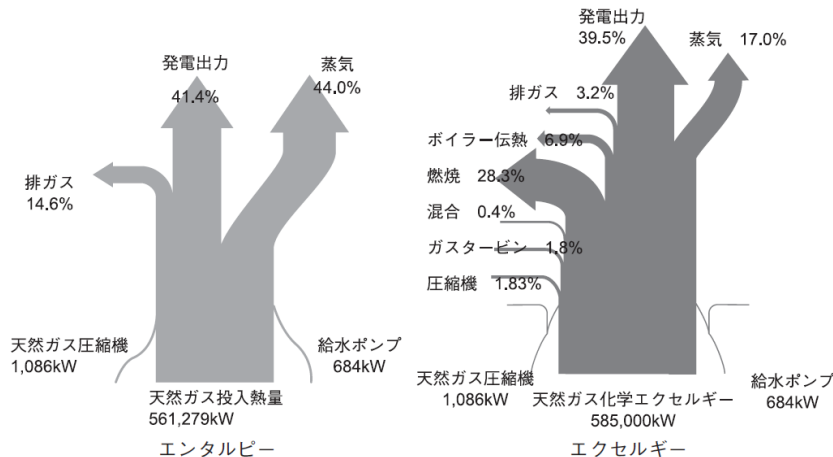


図 5-5 ガスタービンコージェネレーションのエネルギー精算図

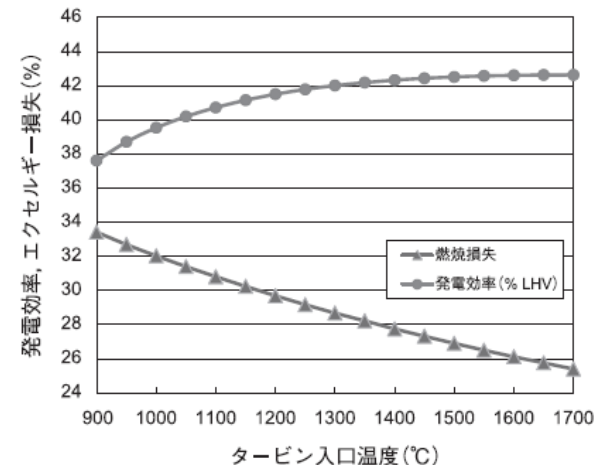


図 5-6 タービン入口温度と発電効率および燃焼損失の関係

# 最新GTCCの稼働状況と設備仕様



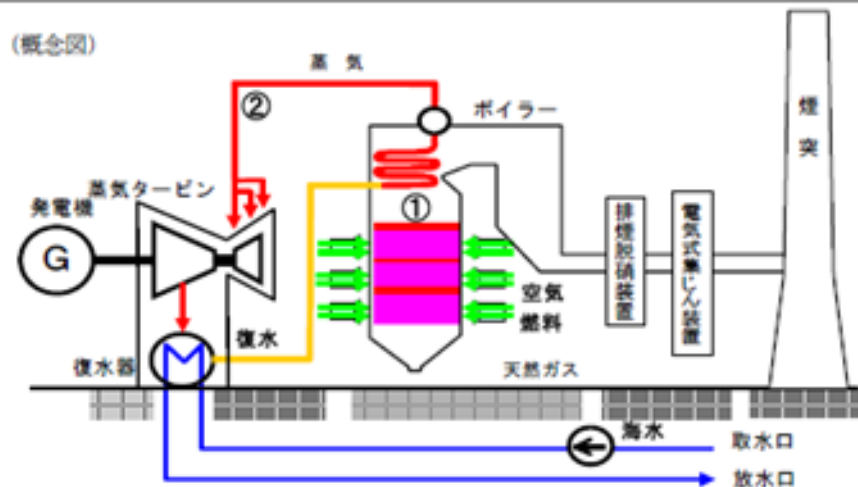
関西電力株式会社 姫路第二発電所

<姫路第二発電所の設備更新工事の概要>

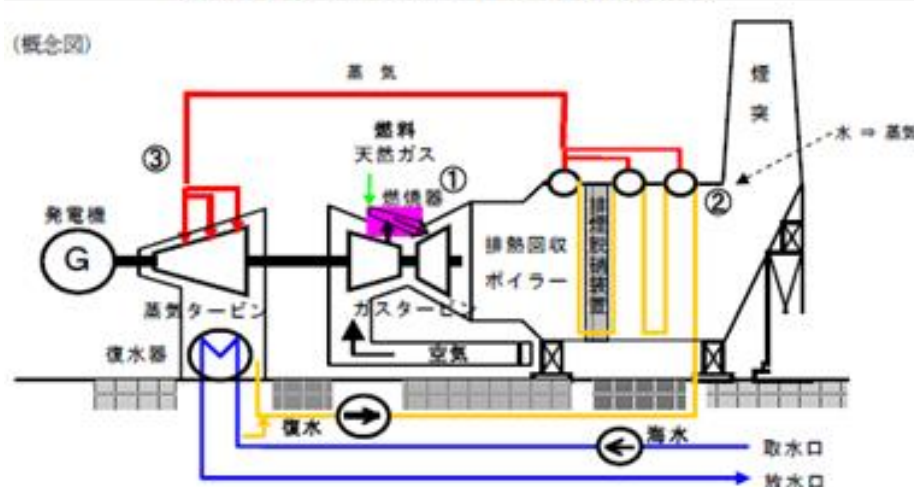
	設備更新前	設備更新後
所在地	ひめじししかまぐめがとまわちよう 兵庫県姫路市飾磨区妻鹿常盤町	
発電方式	汽力発電方式	コンバインドサイクル発電方式
発電所出力	255万kW (25~60万kW×6基)	291.9万kW (大気温度4℃) (48.65万kW×6基)
使用燃料	天然ガス	天然ガス
発電端熱効率 (低位発熱量基準)	約42%	約60%
CO <sub>2</sub> 排出原単位	0.470kg-CO <sub>2</sub> /kWh	0.327kg-CO <sub>2</sub> /kWh
営業運転開始	昭和38年10月(1号機) ~48年11月(6号機)	平成25年8月(1号機) ~27年3月(6号機 予定)

既設1~4号機については廃止済み。

現状 (汽力発電方式)

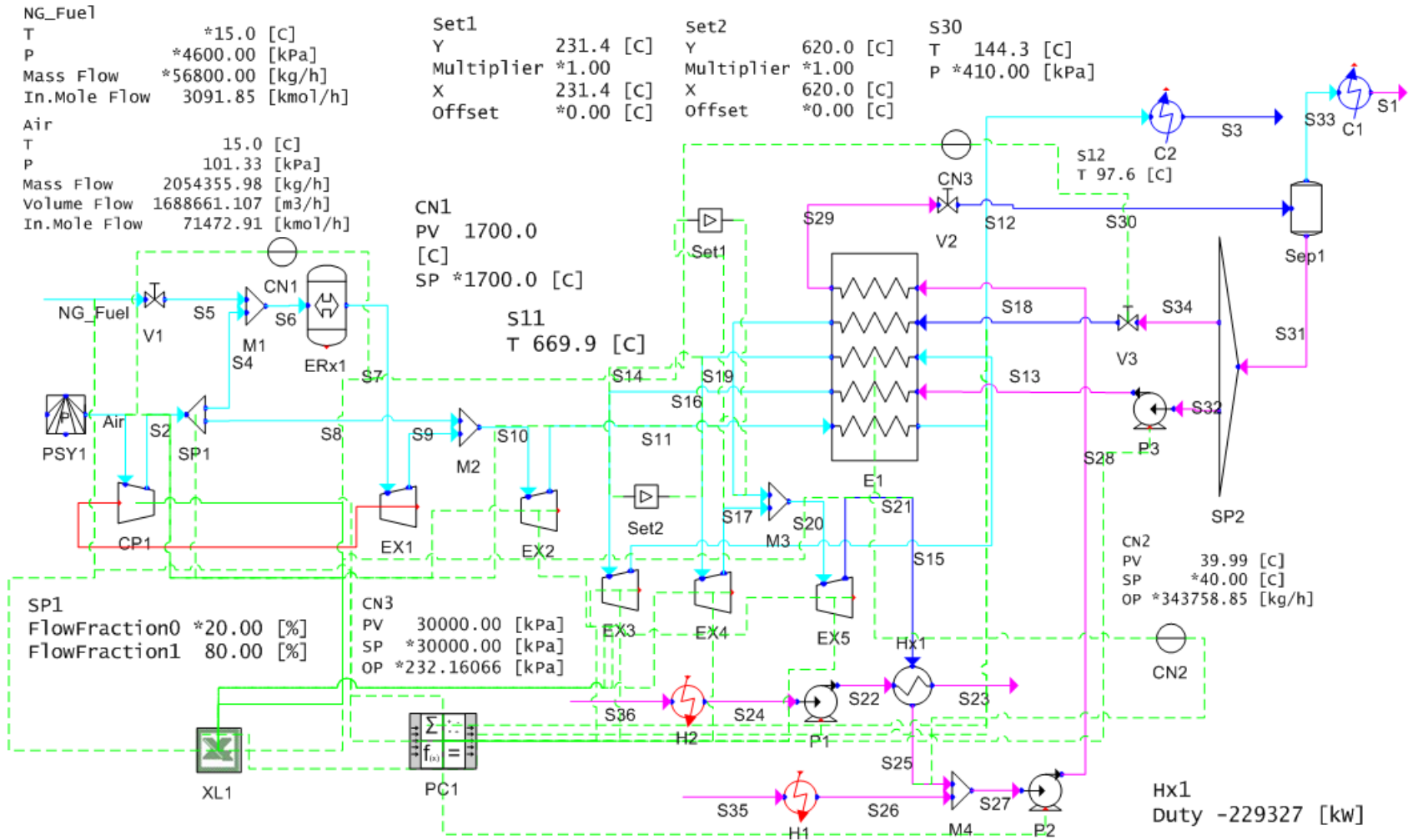


設備更新後 (コンバインドサイクル発電方式)



出典: 関西電力ホームページ

# 1700°C級GTCCのVMGSimによるモデリング



**CP1**  
 Duty 285.38 [MW]  
 Efficiency \*89.00 [%]  
 Pressure Ratio \*26.00

**EX2**  
 Duty 341.53 [MW]  
 Efficiency \*90.00 [%]

**H1**  
 Duty 1.178E-2 [MW]

**C1**  
 Duty 386 [kW]  
**C2**  
 Duty 145059 [kW]

**S29**  
 T \*145.0 [C]  
 P 418.10 [kPa]  
 Mass Flow 344261.13 [kg/h]  
 In.VapFrac \*0.00

**EX3**  
 Duty 55.70 [MW]  
 Efficiency \*88.00 [%]  
 Pressure Ratio \*19.00

**EX4**  
 Duty 63.08 [MW]  
 Efficiency \*90.00 [%]  
 Pressure Ratio \*19.00

**EX5**  
 Duty 39.65 [MW]  
 Efficiency \*90.00 [%]  
 Pressure Ratio 14.16

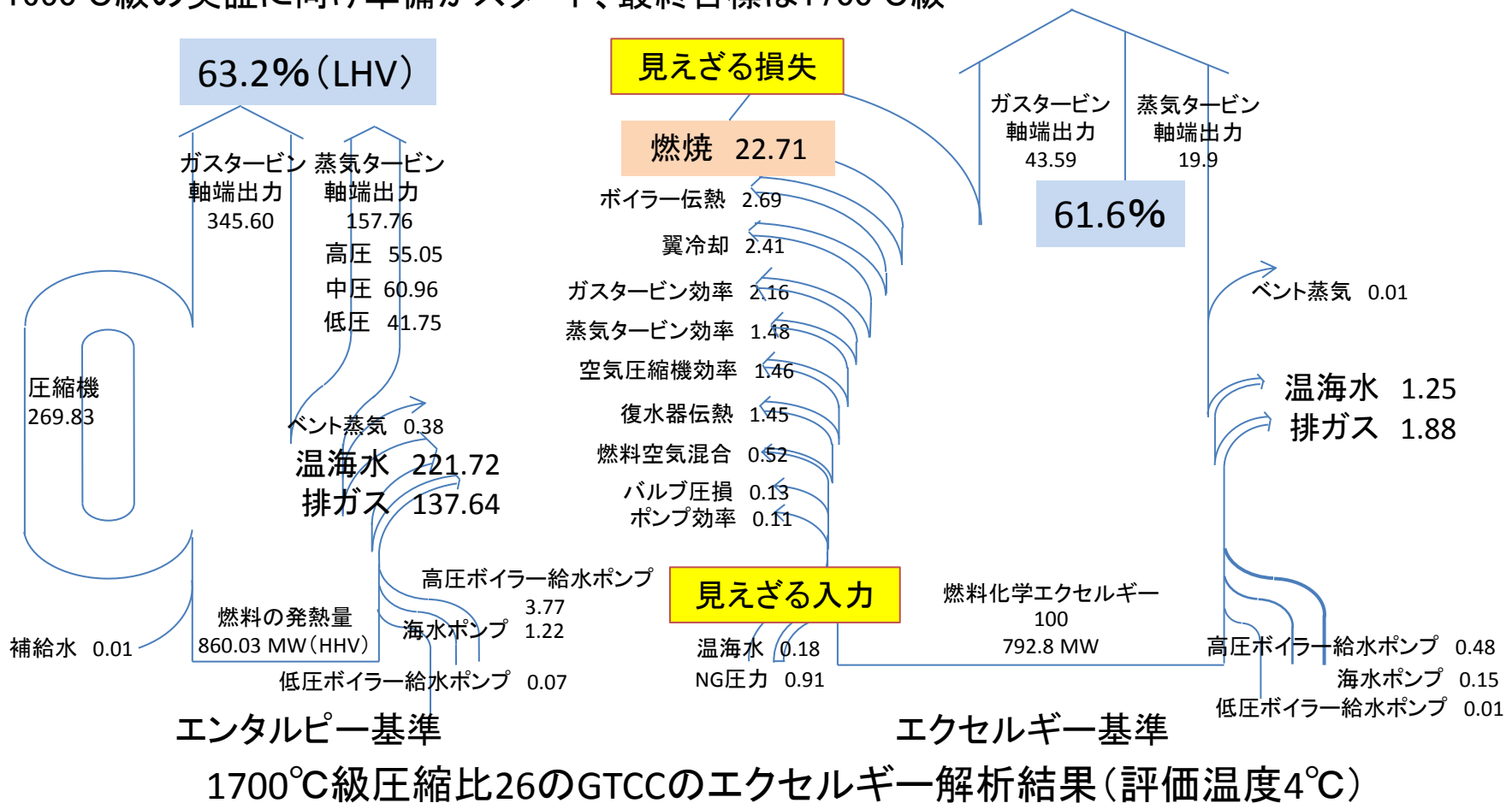
**S21**  
 VapFrac 0.9829  
 T 35.0 [C]  
 P 5.50 [kPa]  
 Mass Flow 343758.85 [kg/h]

# 大規模集中発電のエクセルギー評価

現在1600°C級が関西電力姫路第二発電所 1~6号機にて実運用中  
 発電端熱効率 $\eta$ は、61.5% (LHV) **エクセルギー効率 60%** 単機出力486.5MW  
 (都市ガス13Aの低位発熱量40.4MJと化学エクセルギー41.4MJ)  
 最大のエクセルギー損失は、**燃焼で約24.3%**と伝熱で**約6.5%**  
 残りのほとんどがタービンや圧縮機の効率による損失  
 ガスNm<sup>3</sup>単価73円とした場合、燃料の原単位は11.06円/kWh(深夜電力B相当)  
 1650°C級の実証に向け準備がスタート、最終目標は1700°C級

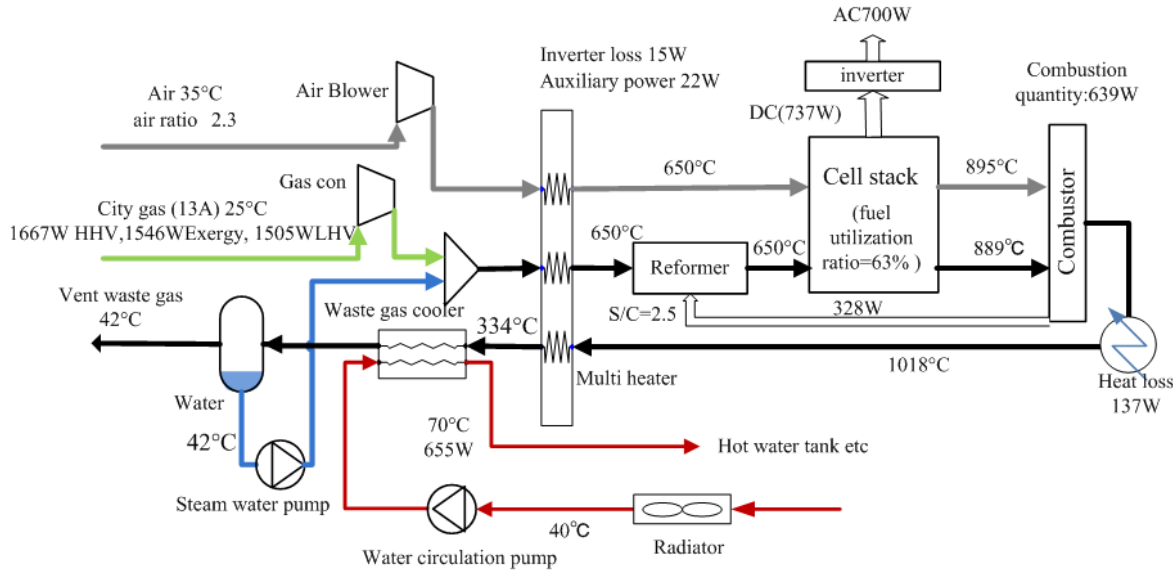


出典: 関西電力HP

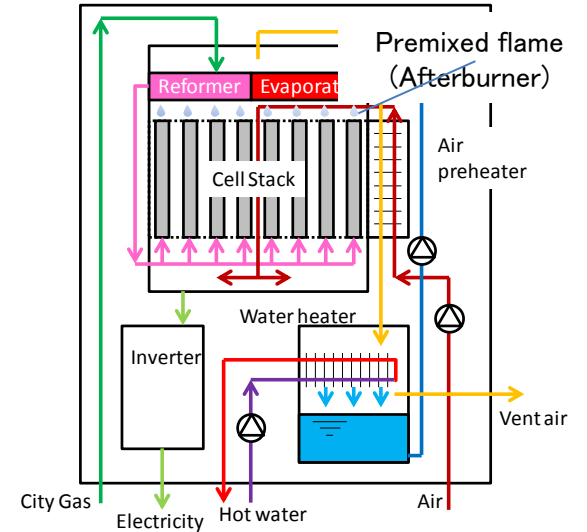




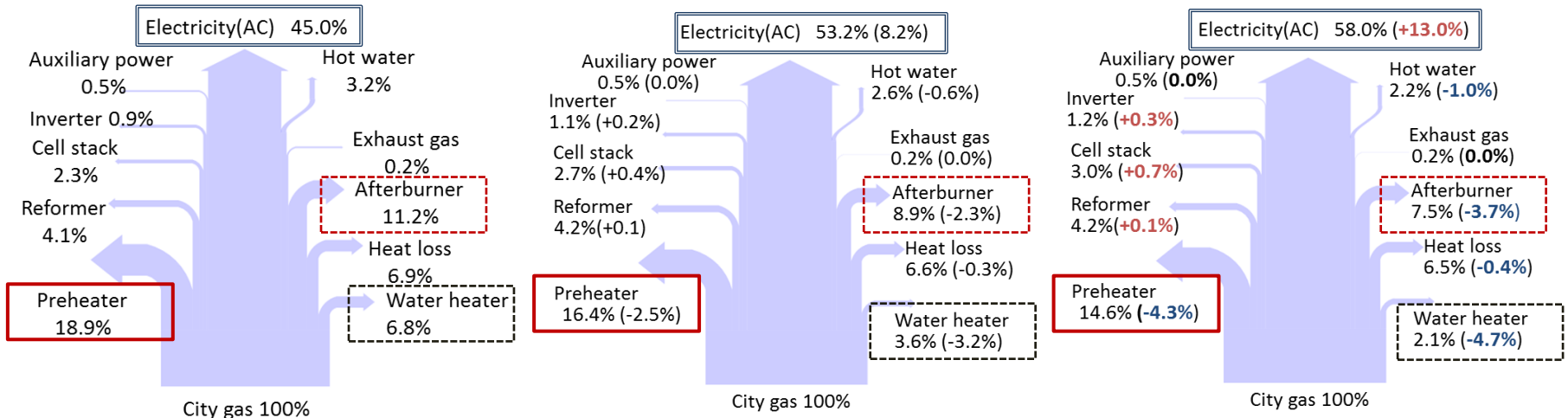
# 4.4 家庭用燃料電池(固体酸化物形)のエクセルギー解析



現行発電効率46.5%(LHV)機の運転予想値



家庭用SOFCの基本構成



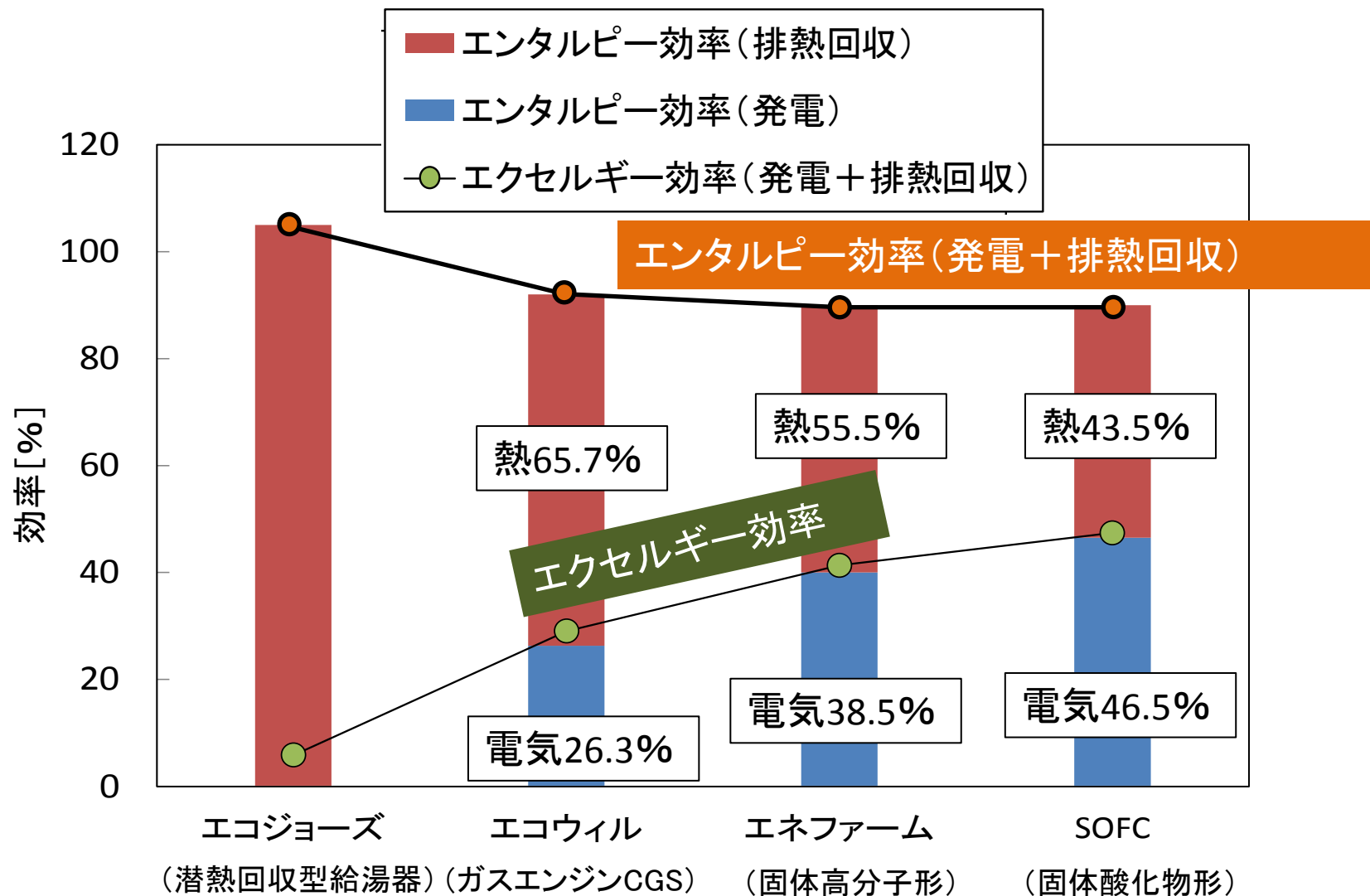
現行機(発電効率46.5%LHV)

55%機

60%機

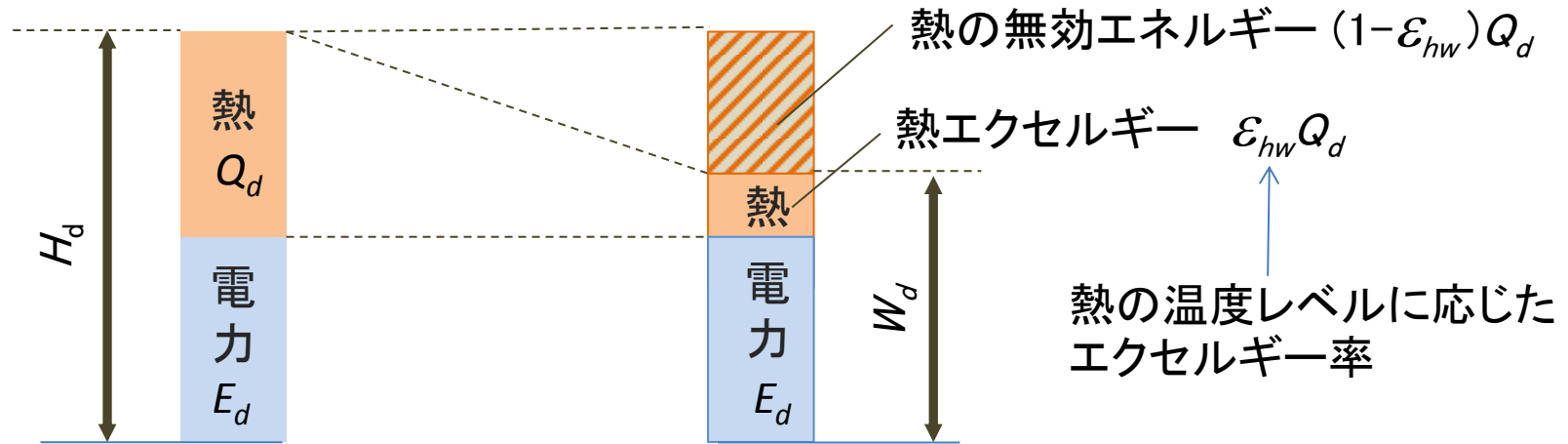
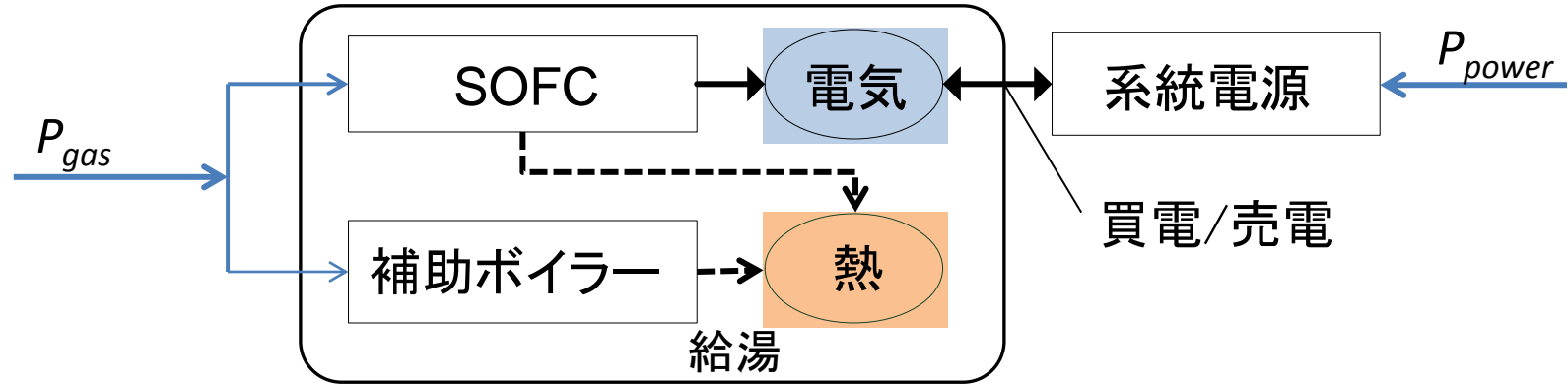
## 4.5 家庭におけるエネルギーシステムの省エネ評価

質の異なる出力がある場合、エンタルピー効率は省エネ性と相関がない



給湯器, 各種コージェネレーションシステムの効率(LHV)

# 戸建住宅のエネルギー需要に対する一次エネルギー消費の関係



エンタルピー需要

$$H_d = E_d + Q_d$$

エンタルピー効率

$$\eta_h = \frac{H_d}{P} = \frac{E_d + Q_d}{P}$$

エクセルギー需要

$$W_d = E_d + \varepsilon_{hw} Q_d$$

エクセルギー効率

$$\eta_e = \frac{W_d}{\varepsilon_f P} = \frac{E_d + \varepsilon_{hw} Q_d}{\varepsilon_f P}$$

一次エネルギー

$$P = P_{gas} + P_{power}$$

$\varepsilon_f$ : 燃料のエクセルギー率

$\gamma$ : 熱電比  $Q_d/E_d$

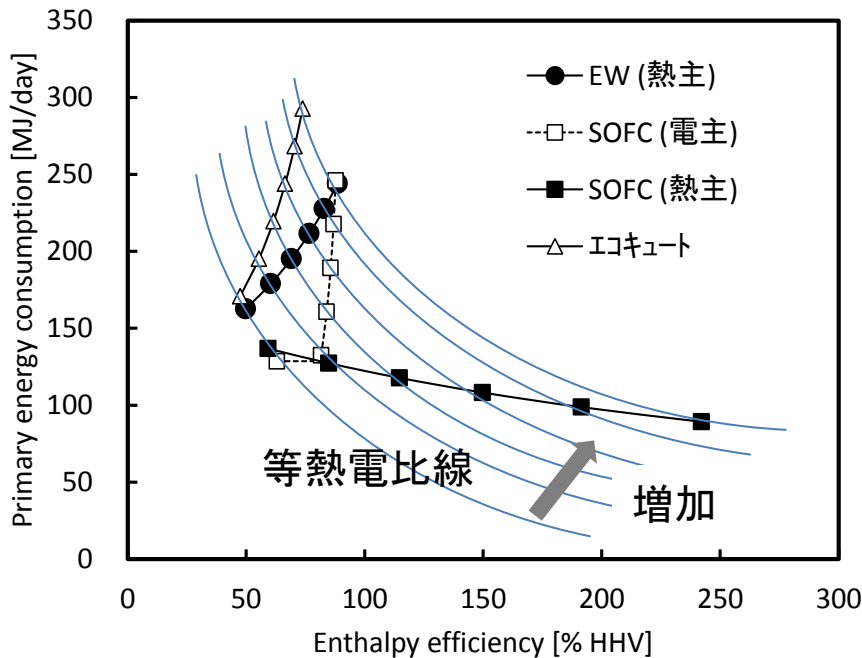


# 家庭向け各種エネルギー供給システムの 一次エネルギー使用量比較

$$P = (E_d + Q_d) / \eta_h$$

$$= (1 + \gamma) E_d / \eta_h$$

給湯器出力(熱電比)が増えるとエンタルピー効率 $\eta_h$ は向上するが、一次エネも増加。

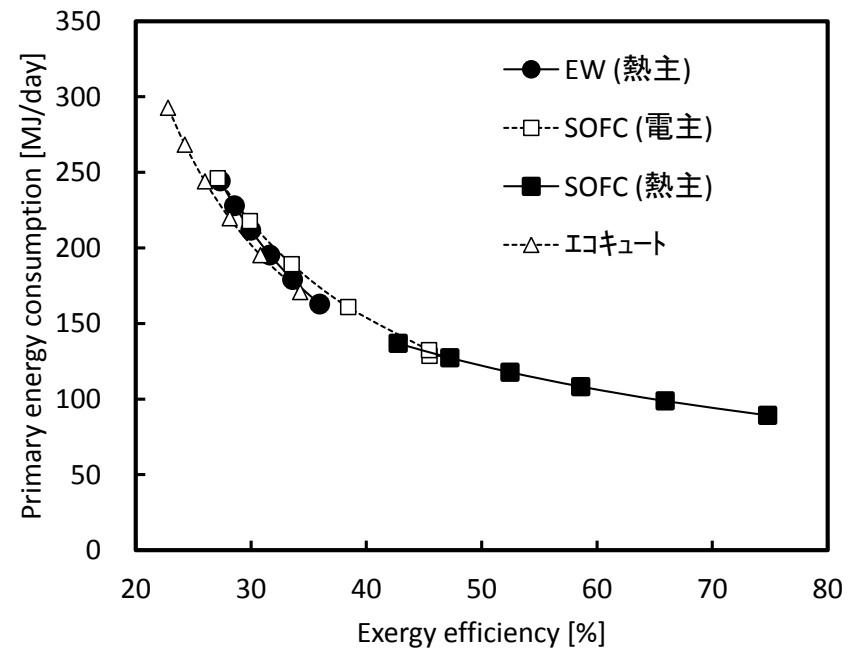


エンタルピー効率と一次エネルギー消費量の関係

$$P = (E_d + \varepsilon_{hw} Q_d) / \varepsilon_f \eta_e$$

$$= W_d / \varepsilon_f \eta_e$$

エクセルギー需要が決まれば、熱電比によらず、エクセルギー効率 $\eta_e$ が高いほど省エネになる



エクセルギー効率と一次エネルギー消費量の関係

# 省エネ性は、エクセルギー需要 ( $W_d$ ) に対する一次エネルギー消費量 ( $P$ ) の割合 $P/W_d$ の大小により定義できる

エンタルピー効率では

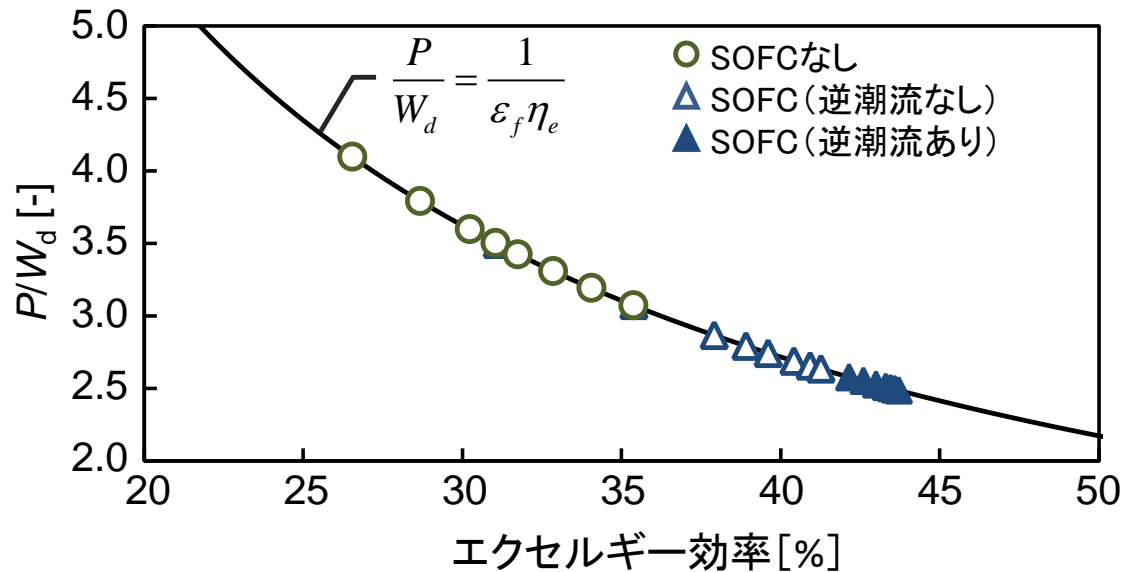
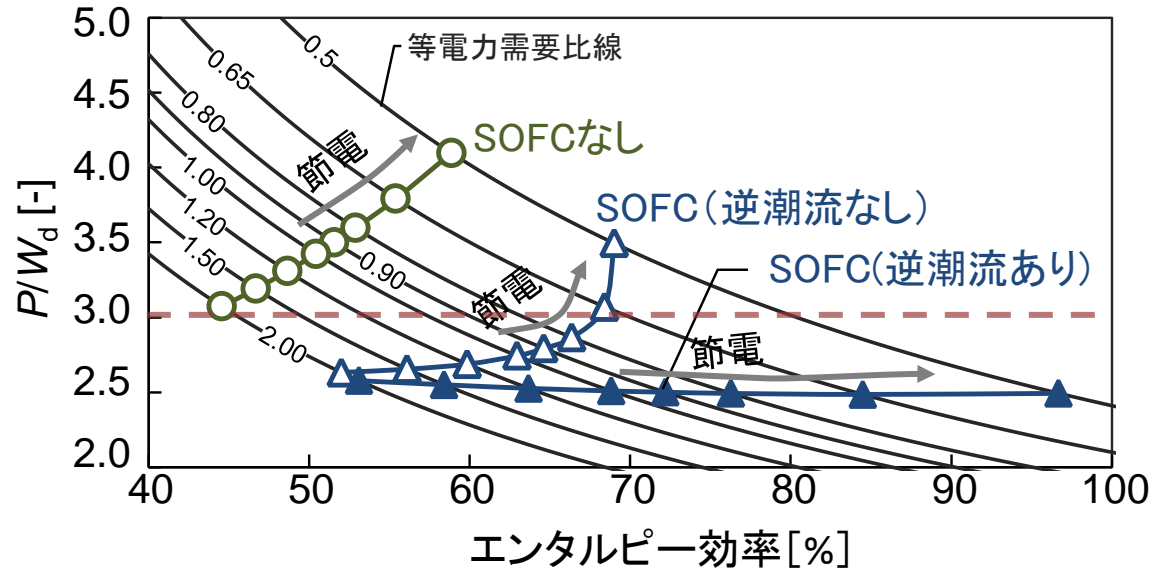
$$\frac{P}{W_d} = \frac{1+\gamma}{1+\varepsilon_{hw}\gamma} \frac{1}{\eta_h}$$

省エネ性  $P/W_d$  は機器構成のエンタルピー効率と熱電比  $\gamma$  で決まる.

エクセルギー効率では

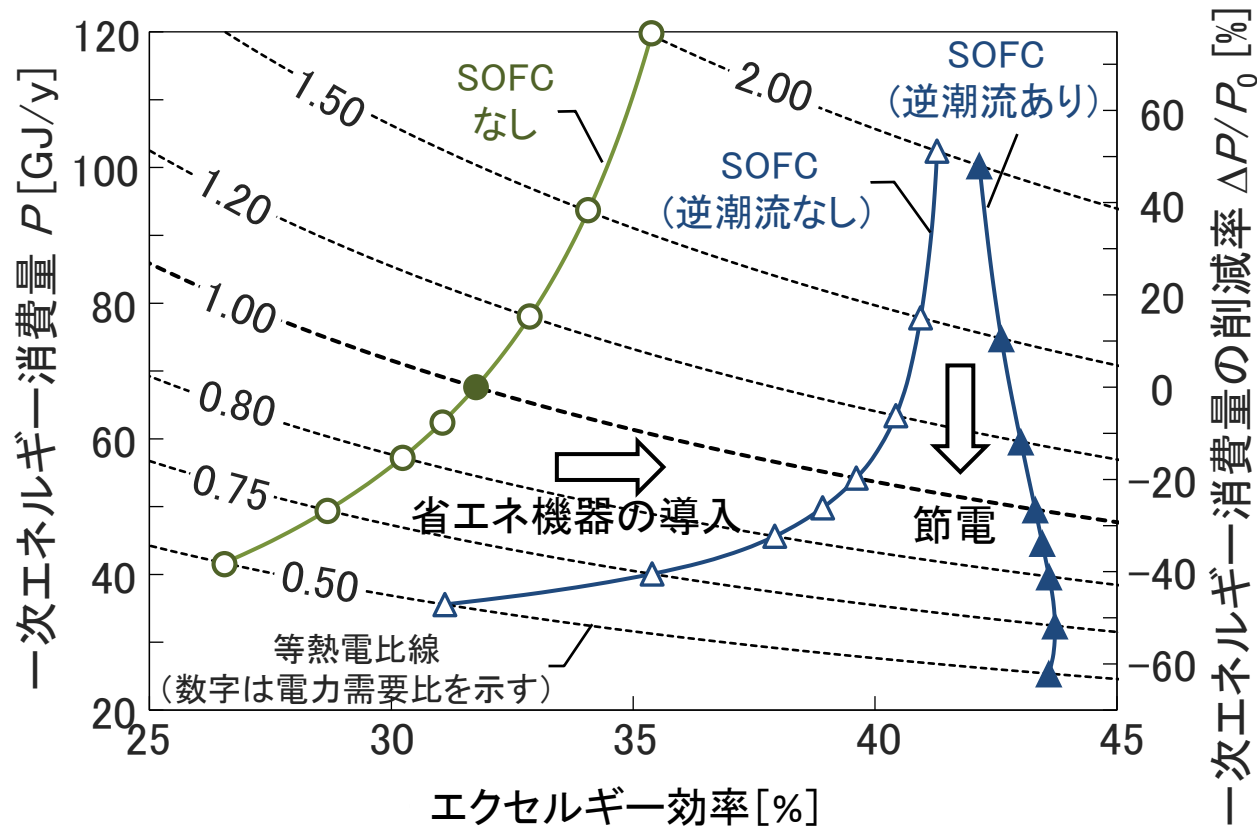
$$\frac{P}{W_d} = \frac{1}{\varepsilon_f \eta_e}$$

省エネ性  $P/W_d$  は機器構成や熱電比  $\gamma$  に拘わらず、一つの特性曲線で表すことができる.



# 一次エネルギー消費量とエクセルギー効率の関係

- 一次エネ:小 & エクセルギー効率:大 → 理想
- 一次エネ:小 & エクセルギー効率:小 → 省エネ機器導入が必要
- 一次エネ:大 & エクセルギー効率:大 → 節約(我慢)が必要



参考文献: 堀司, 後藤稔, 久角喜徳, 若林努, 毛笠明志, エクセルギーによるエネルギー変換システムおよび居住者行動の省エネ評価  
エネルギー・資源, Vol.35, No.4, pp.64(2014)

# 戸建て住宅を対象とした年間一次消費エネルギー解析

## ■ 建物概要

木造2階建て, 延床面積120m<sup>2</sup>, 断熱(H11相当), 4人家族

## ■ 温度・湿度

大阪(住宅事業建築主の判断基準の地域区分IVb,  
2006年の岡山, 1時間ごとのデータ)

## ■ 空調負荷

住宅事業建築主の判断基準のIVb, 部分間欠冷房のデータ  
(暖房20°C, 冷房27°C/60% (就寝時 28°C/60%))

出典: 住宅事業建築主の判断基準, <http://ees.ibec.or.jp/documents/index.php>

## ■ 給湯負荷

修正M1モード

## ■ 照明・家電の電力負荷

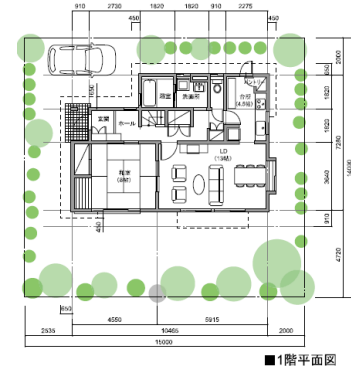
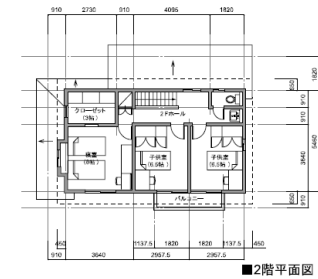
自立循環型住宅・都市基盤整備支援システム委員会で  
設定した負荷

## ■ 厨房

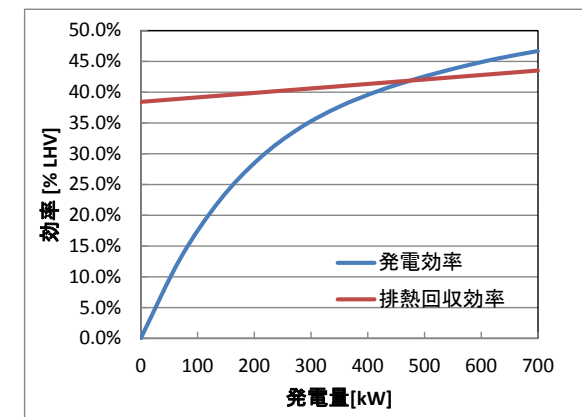
未考慮

## ■ CGS

固体酸化物形燃料電池, 部分負荷特性考慮,  
補助給湯器90%HHV, タンク90L, 放熱なし。

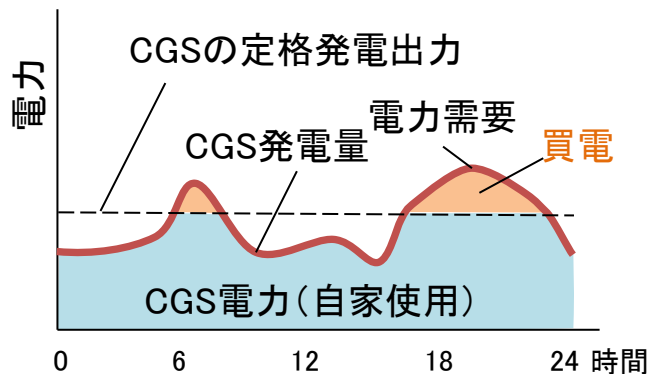


## 想定の戸建て住宅

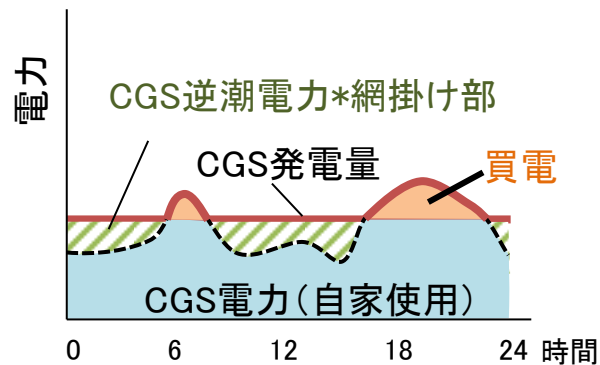


## 現行SOFC機の部分負荷特性

# SOFCの運転モードと外気条件による消費電力



電力負荷追従運転(逆潮流なし)

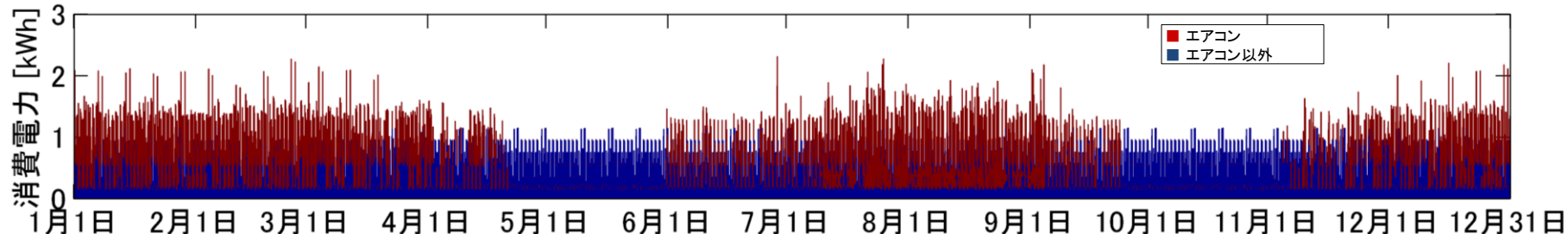
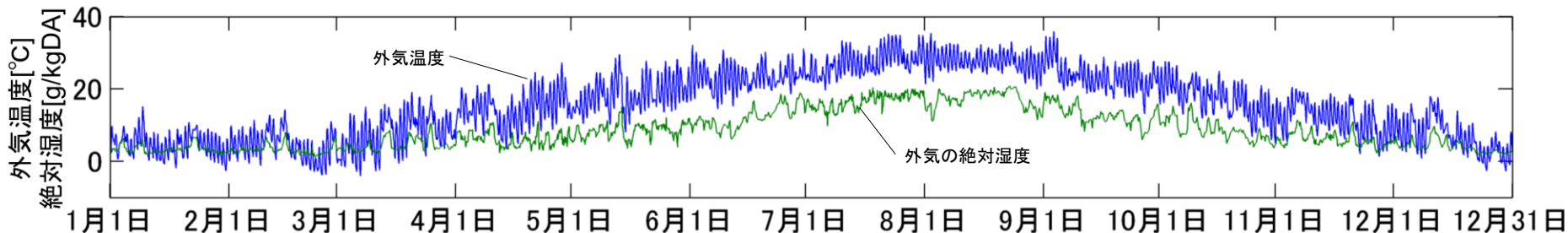


24時間定格運転(逆潮流あり)

## 年間の電力・給湯需要

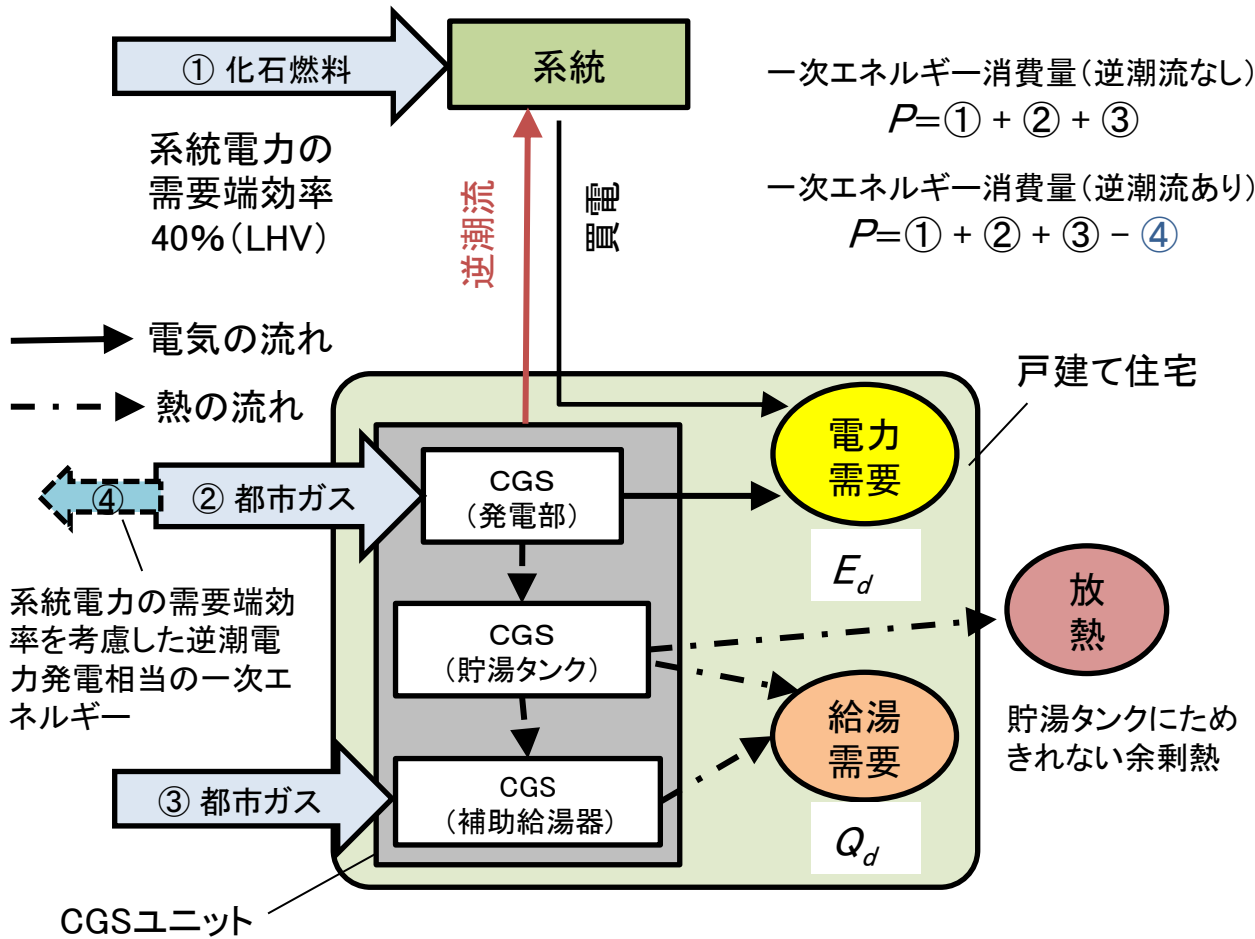
電力需要 kWh	5318
エアコン以外	3996
エアコン	1322
給湯需要 kWh	4160
熱電比	0.78

SOFCの運転モード(逆潮流ありではSOFCを常に定格の高い発電効率で運転可能)



外気の温湿度および消費電力の推移(1時間毎に試算)

# 一次エネルギーとシステムのエクセルギー効率計算手法



一次エネルギー消費量 (逆潮流なし)

$$P = ① + ② + ③$$

一次エネルギー消費量 (逆潮流あり)

$$P = ① + ② + ③ - ④$$

エンタルピー効率  $\eta_h$

$$\eta_h = \frac{E_d + Q_d}{P}$$

エクセルギー効率  $\eta_e$

$$\eta_e = \frac{E_d + \varepsilon_{hw} Q_d}{\varepsilon_f P}$$

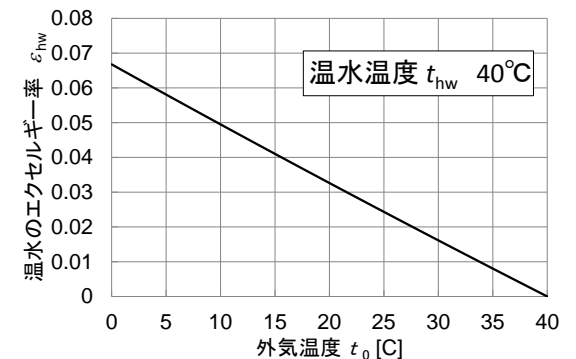
都市ガスのエクセルギー率  $\varepsilon_f$

$$\varepsilon_f = 0.92$$

温水のエクセルギー率  $\varepsilon_{hw}$

$$\varepsilon_{hw} = 1 - \frac{T_0 \ln(T_{hw}/T_0)}{(T_{hw} - T_0)}$$

$T_0$  : 外気温度 [K],  $T_{hw}$  : 温水温度 [K]

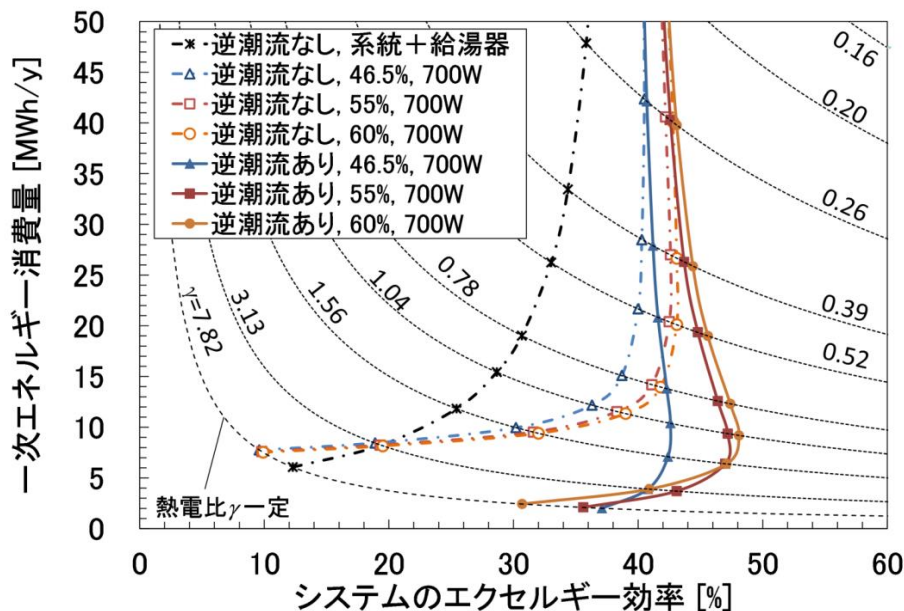


戸建て住宅のエネルギー収支

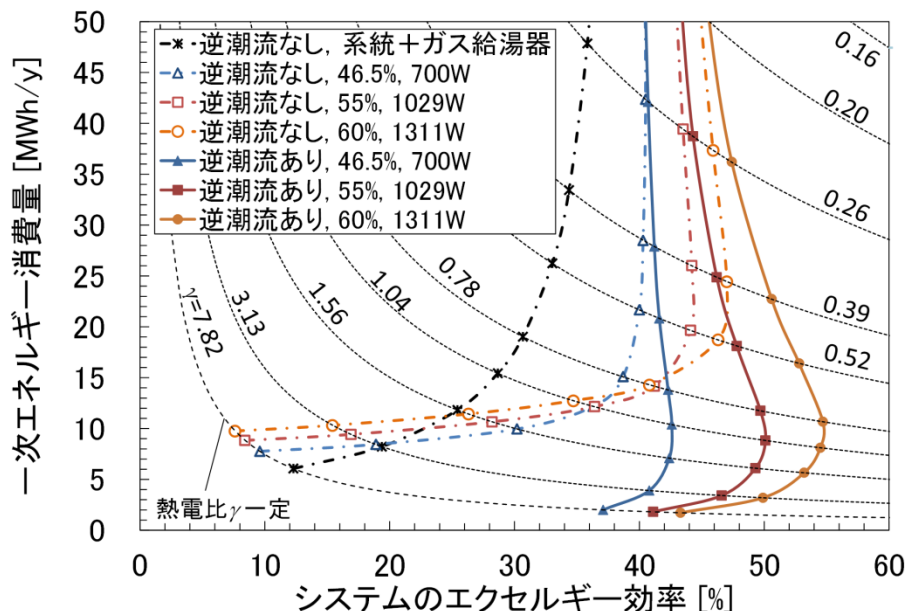
補助給湯器による40°C温水の利用が増えると  $\varepsilon_{hw}$  が0.02~0.06と小さいため  $\eta_e$  が低下する

# 発電出力と逆潮流有無の検証

- ◆ 発電出力700Wでも逆潮流ありで高い一次エネルギー削減効果が得られる  
ただし給湯需要を賄えきれないため、エクセルギー効率 $\gamma$ は50%に達せず
- ◆ 発電出力に応じて発電効率を高めた機器では、電力多消費行動でも一次エネルギーを削減できるが、逆潮流ができれば、節電行動で大幅に一次エネルギーを削減可能
- ◆ 夏季および中間季において温水利用のデシカント空調機ができれば、更に省エネに



発電出力700W一定での逆潮流有無の効果



発電出力アップと逆潮流有無の効果

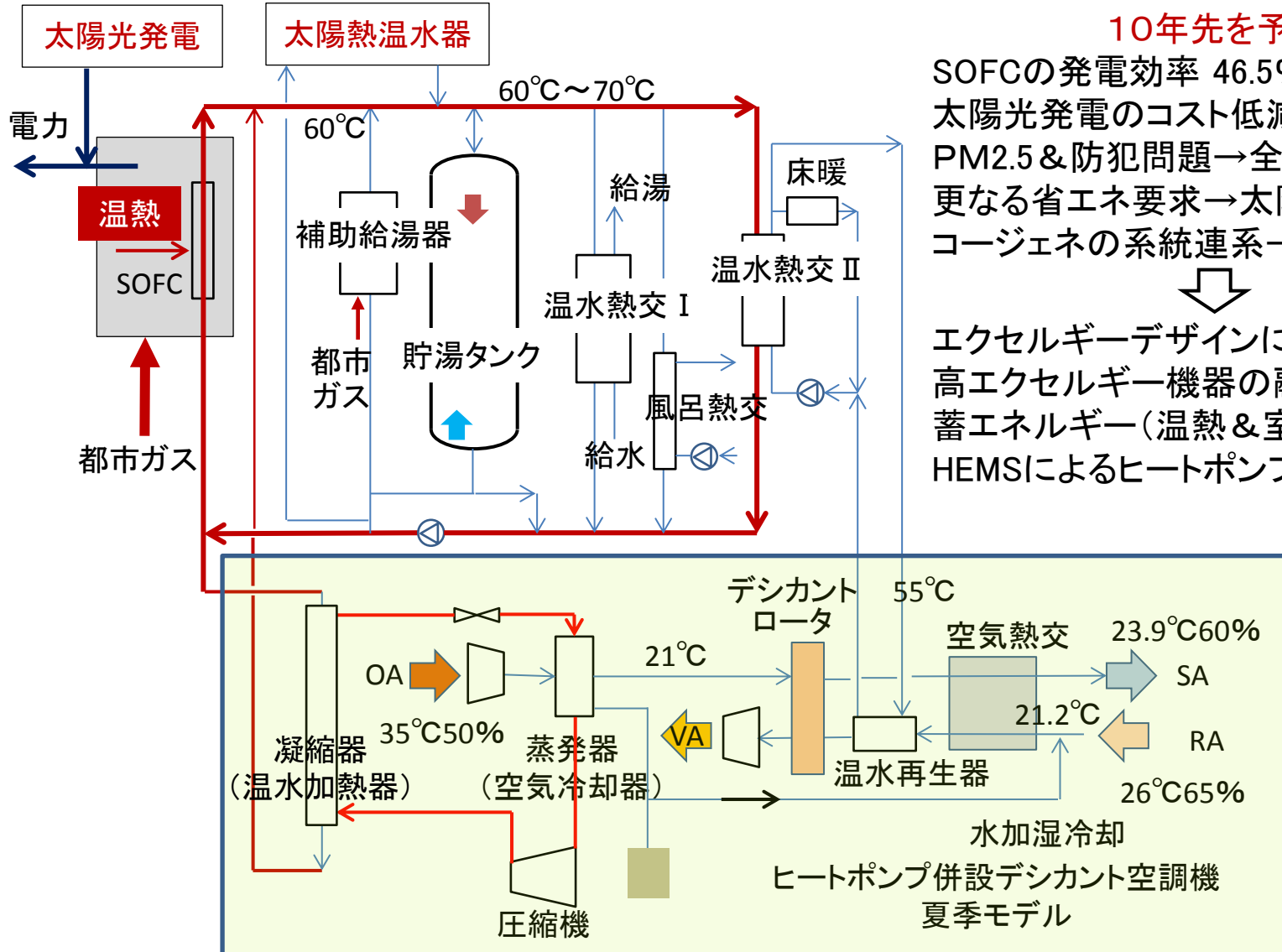
給湯需要量一定条件下の熱電比の増減による  
年間一次エネルギー消費とシステムのエクセルギー効率の特性



# 4.6 コージェネレーション温水の利用向上検討

## 10年先の家庭内エネルギーシステム

### 高効率 SOFC+デシカント+ヒートポンプ+太陽エネルギー利用



10年先を予見する

SOFCの発電効率 46.5%→55~60%  
 太陽光発電のコスト低減→ダブル発電  
 PM2.5 & 防犯問題→全館空調の普及  
 更なる省エネ要求→太陽熱の活用  
 コージェネの系統連系→買取価格低い



エクセルギーデザインによるひらめき  
 高エクセルギー機器の融合  
 蓄エネルギー(温熱&室内絶対湿度)  
 HEMSによるヒートポンプ給湯器制御

冬季モデル

OAがRAに  
 RAがOAに

SAがVAに  
 VAがSAに



# 快適空調を実現するには温度・湿度・気流の制御が必要

人体の熱的快適性に影響する要素は空気温度(DB乾球温度)だけでない！

## ■快適環境の評価指標 その1

### ◆新有効温度：ET\*

湿り空気線図上で、OT作用温度とRH相対湿度により囲われた範囲をもって環境が快適かどうかを判断する。なお、同一着衣量、代謝量において各環境を比較する指標。

注：作用温度 = (DB乾球温度 + MRT平均放射温度) / 2

(表-1) 室内の快適条件 (風速 0.08 ~ 0.13m/s)

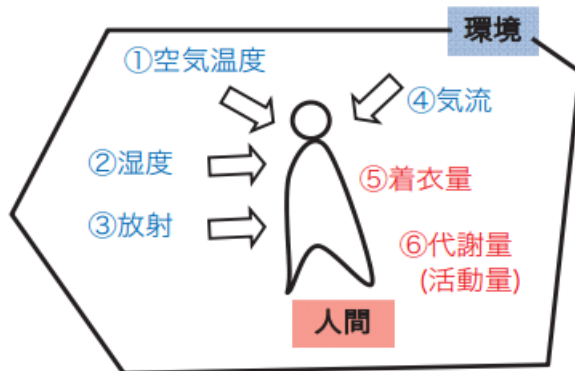
		日本人	アメリカ人
夏期	ET	21 ± 2℃	21.5 ± 2.4℃
	RH	40 ~ 60%	30 ~ 70%
冬期	ET	18 ± 2℃	19.5 ± 2.2℃
	RH	45 ~ 65%	30 ~ 70%

ET：有効温度 (Effective Temperature)

RH：相対湿度 (Relative Humidity)

出典：ウエットマスター(株) 空気調和における加湿と加湿器

## ■温熱環境の『6要素』



出典：ヒートポンプ蓄熱センター 空調設定温度と快適性

### 例：夏のオフィス環境

クールビズ (半袖シャツ)  
座った状態  
ほぼ無風

#### a：標準状態

DB28℃、RH50%  
⇒MRT=OT=ET\*=28℃  
やや暑い

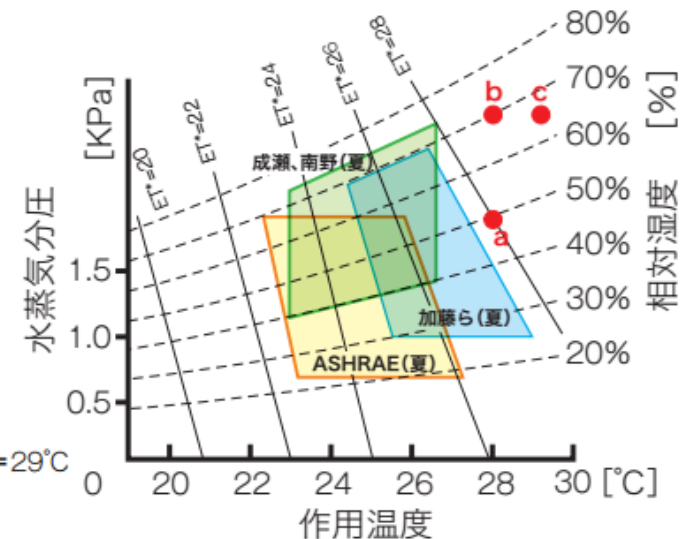
#### b：湿度が高くなると・・・

DB28℃、RH70%  
⇒ET\*=29.5℃  
蒸し暑い

#### c：さらに日射が強くなると・・・

DB28℃、RH70%  
OT = (MRT(30℃) + DB28℃) / 2 = 29℃  
⇒ET\*=30.5℃  
かなり蒸し暑い

「DB乾球温度28」は  
準快適から不快まで幅が広い！

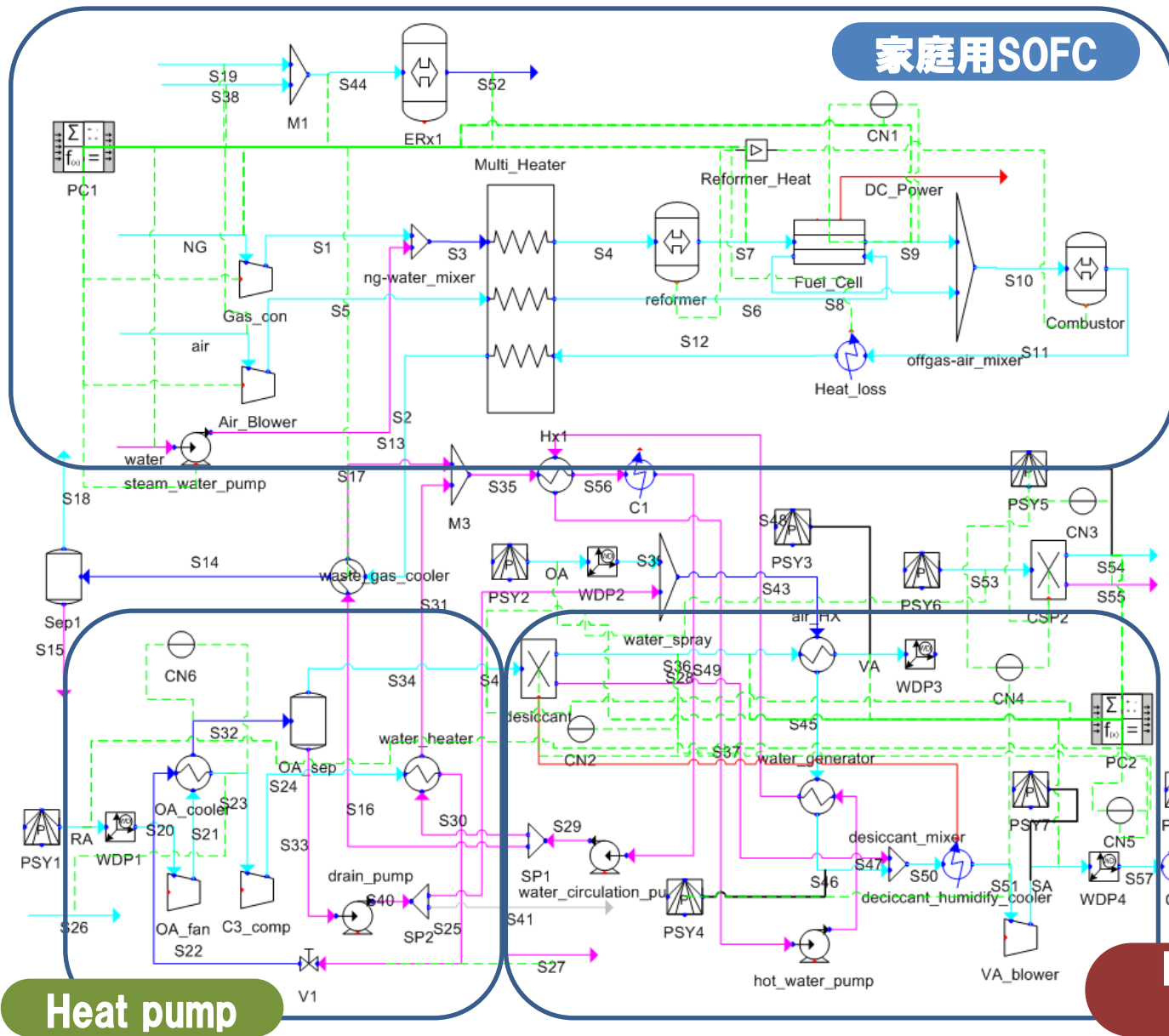


図：湿り空気線図上における至適温湿度域

注：クールビズ (半袖シャツ)、座った状態の場合

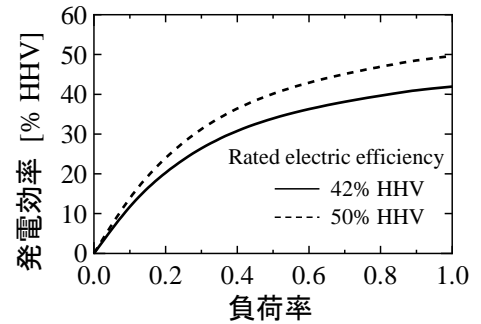
出典：建築・設備の省エネルギー技術指針 非住宅編/空気調和・衛生工学会

# 燃料電池SOFCを用いた次世代家庭用空調給湯システムの構築とその評価



## 家庭用SOFC

SOFC現行仕様  
 発電効率 46.5%  
 総合熱効率 90%



## システムコンセプト

- ・電力需要の平準化
- ・快適空調の実現
- ・温水の高度活用
- ・高エクセルギー効率

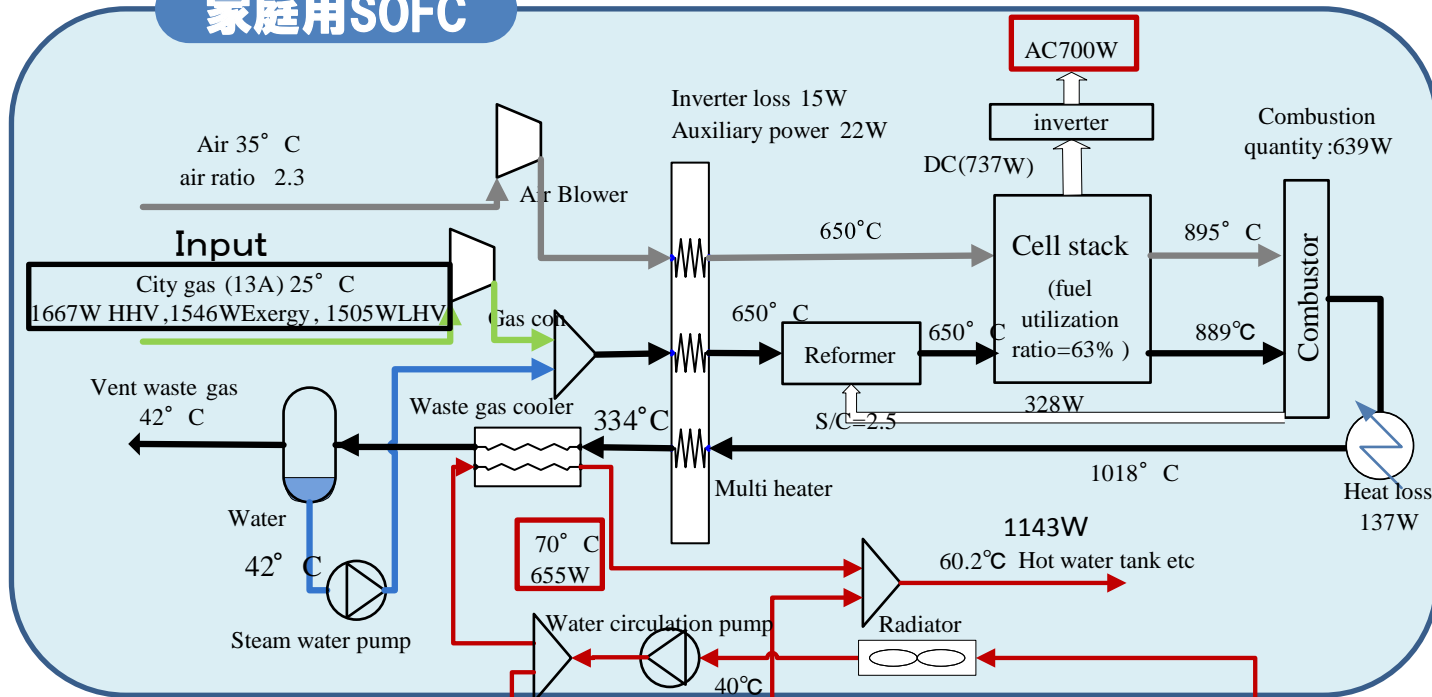
## Heat pump

## Desiccant air conditioner

# 運転性能評価

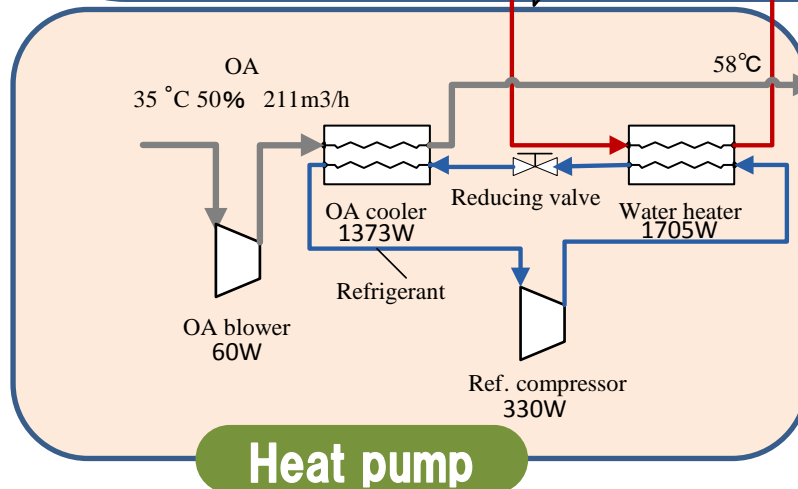
(夏季運転ケース)

## 家庭用SOFC

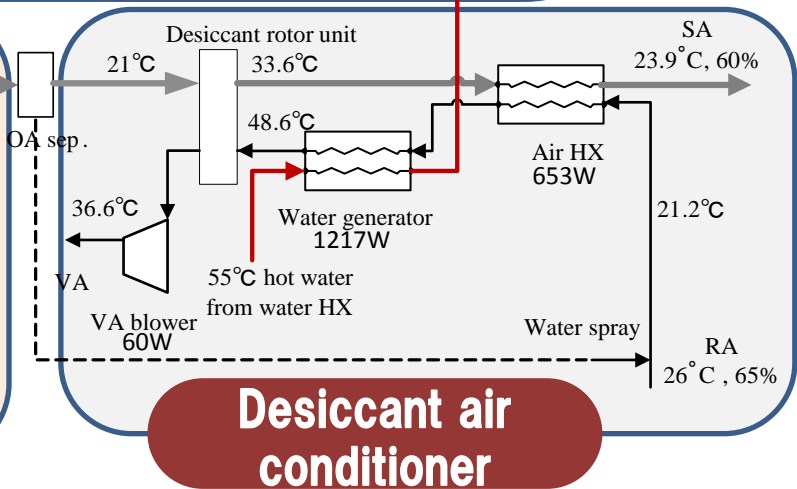


利用可能電力 240W  
 外気冷却負荷 2026W  
 温水回収量 655+1705W  
 再熱負荷 1217W  
 Heat pump COP  
 冷却 3.43  
 温水 5.16  
 除湿量 1.8kg  
 冷却 0.52  
 吸着 1.28

## Heat pump

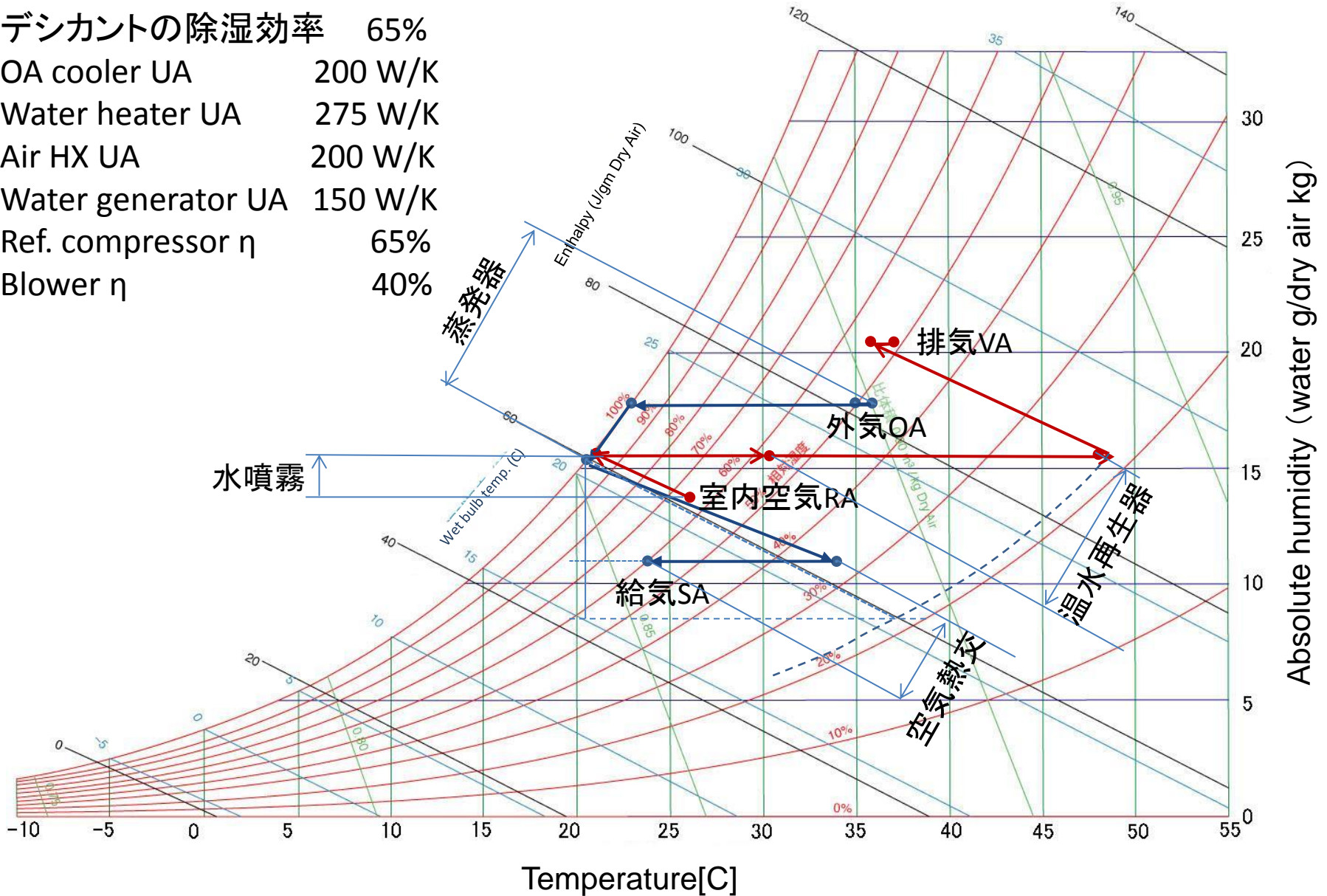


## Desiccant air conditioner



# ヒートポンプ利用型デシカント空調システムの空気線図 (夏季運転ケース)

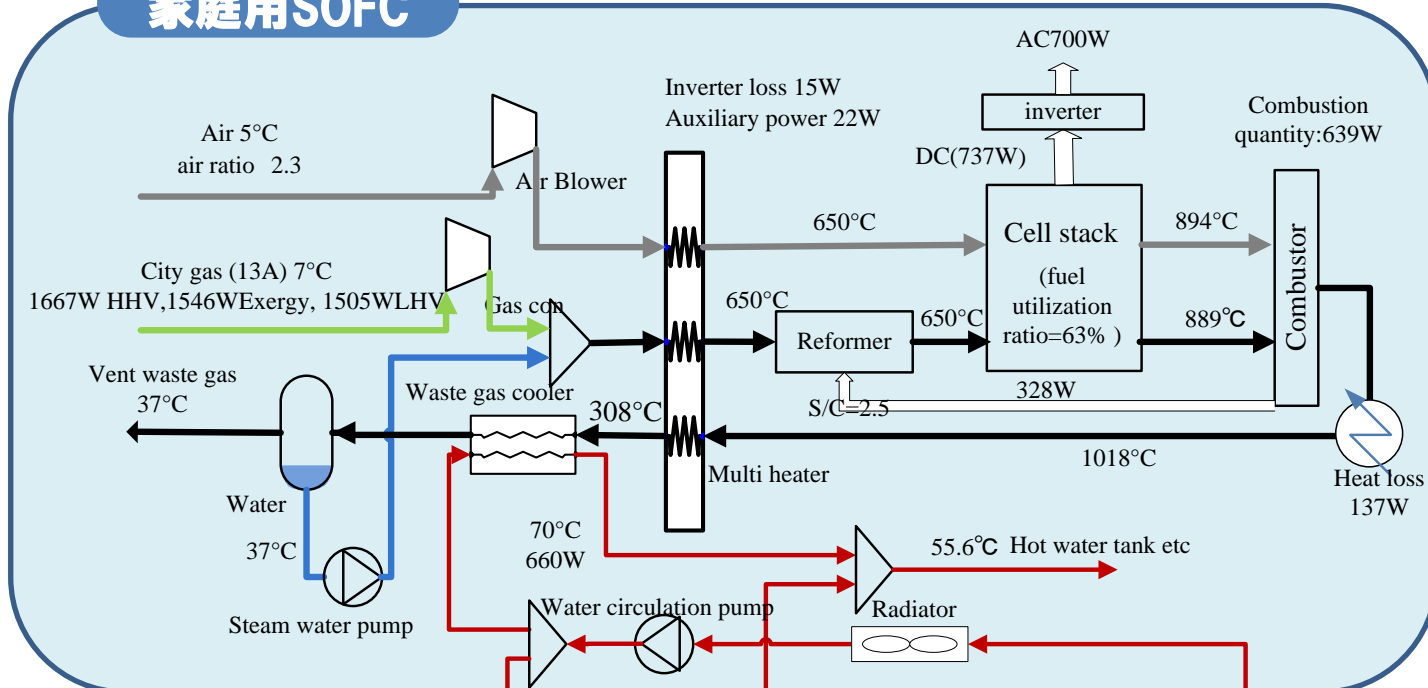
- デシカントの除湿効率 65%
- OA cooler UA 200 W/K
- Water heater UA 275 W/K
- Air HX UA 200 W/K
- Water generator UA 150 W/K
- Ref. compressor  $\eta$  65%
- Blower  $\eta$  40%



# 運転性能評価

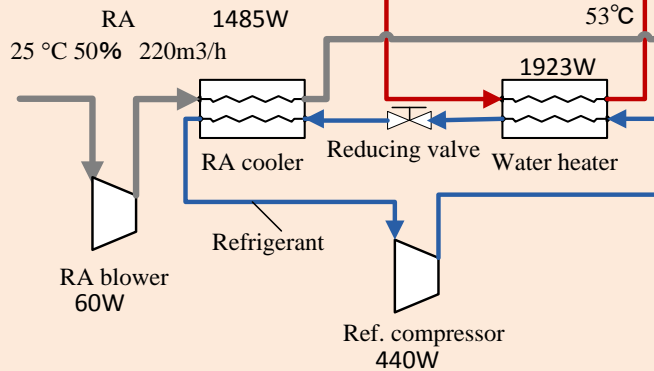
(冬季運転ケース)

## 家庭用SOFC

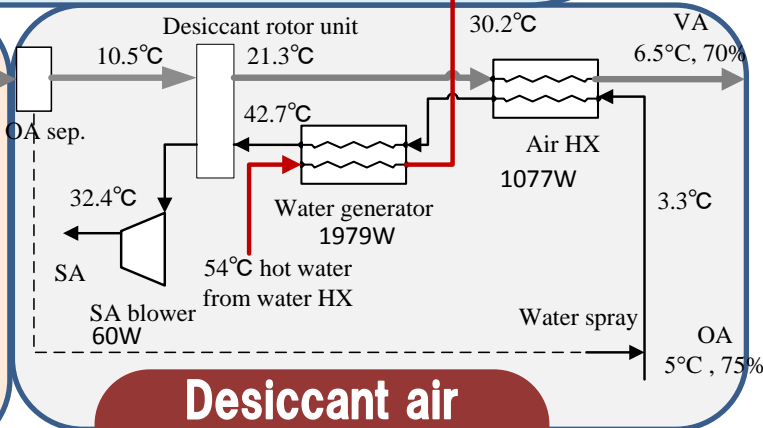


利用可能電力  
130W  
外気暖房負荷  
3056W  
温水回収量  
660+1923W  
再熱負荷  
1979W  
利用可能温水  
604W  
Heat pump COP  
冷却 2.91  
温水 4.37  
加湿量1.45kg  
冷却 0.52  
吸着 0.93

## Heat pump



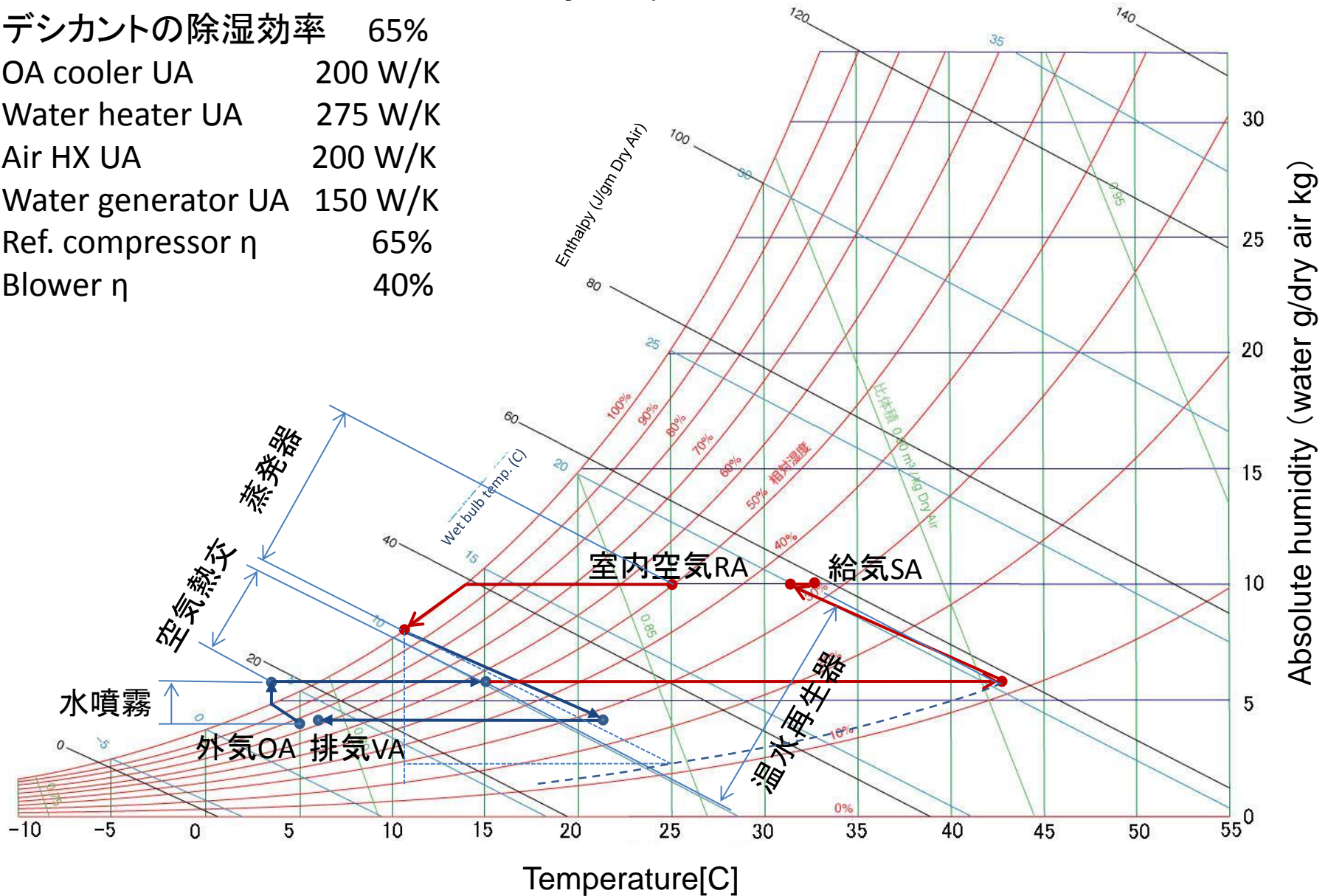
## Desiccant air conditioner





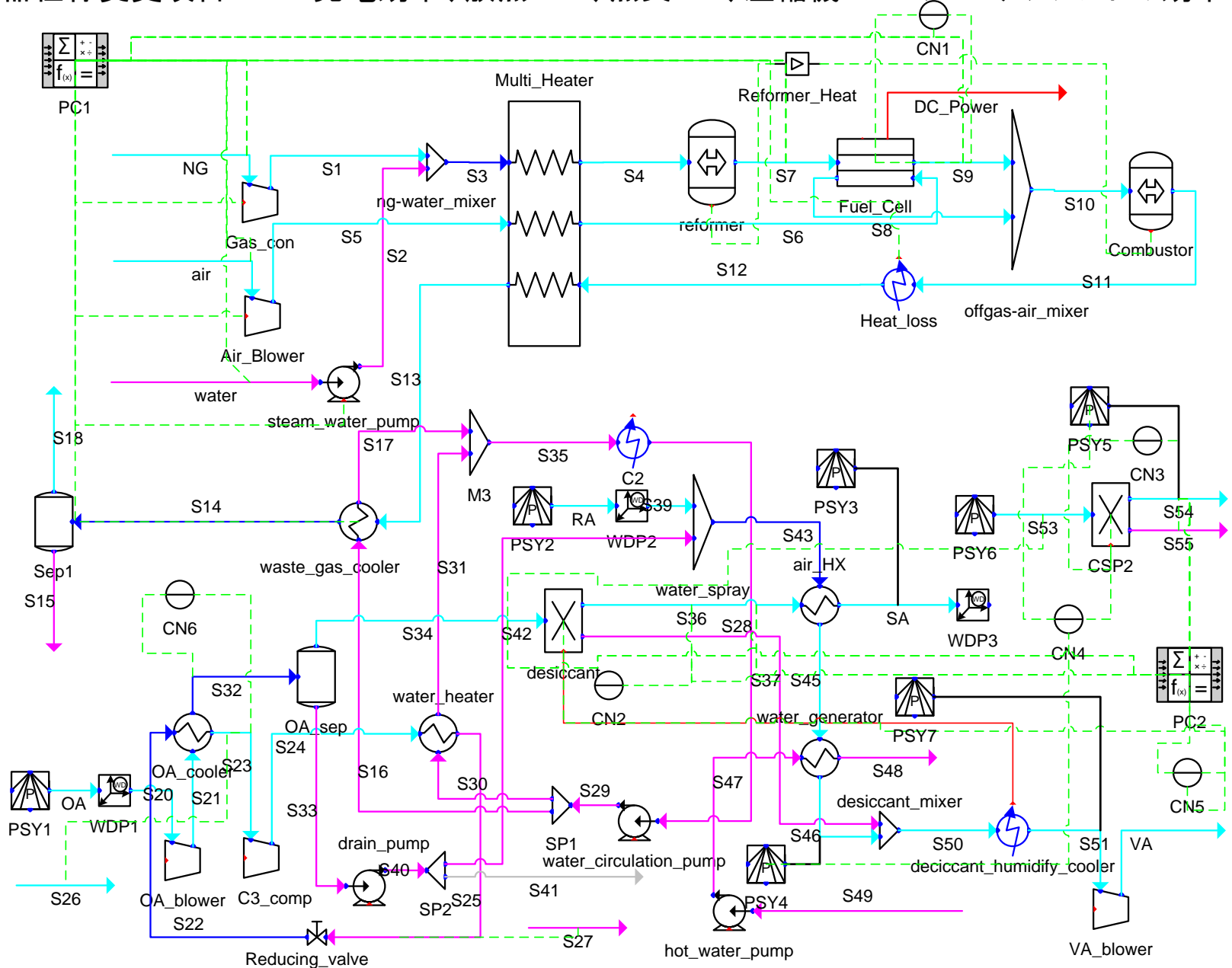
# ヒートポンプ利用型デシカント空調システムの空気線図 (冬季運転ケース)

デシカントの除湿効率	65%
OA cooler UA	200 W/K
Water heater UA	275 W/K
Air HX UA	200 W/K
Water generator UA	150 W/K
Ref. compressor $\eta$	65%
Blower $\eta$	40%



# 燃料電池SOFCを用いた次世代家庭用空調給湯システムのプロセスモデリング

機器仕様変更項目：SOFC発電効率、放熱ロス、熱交UA、圧縮機・ブローワー・デシカントの効率



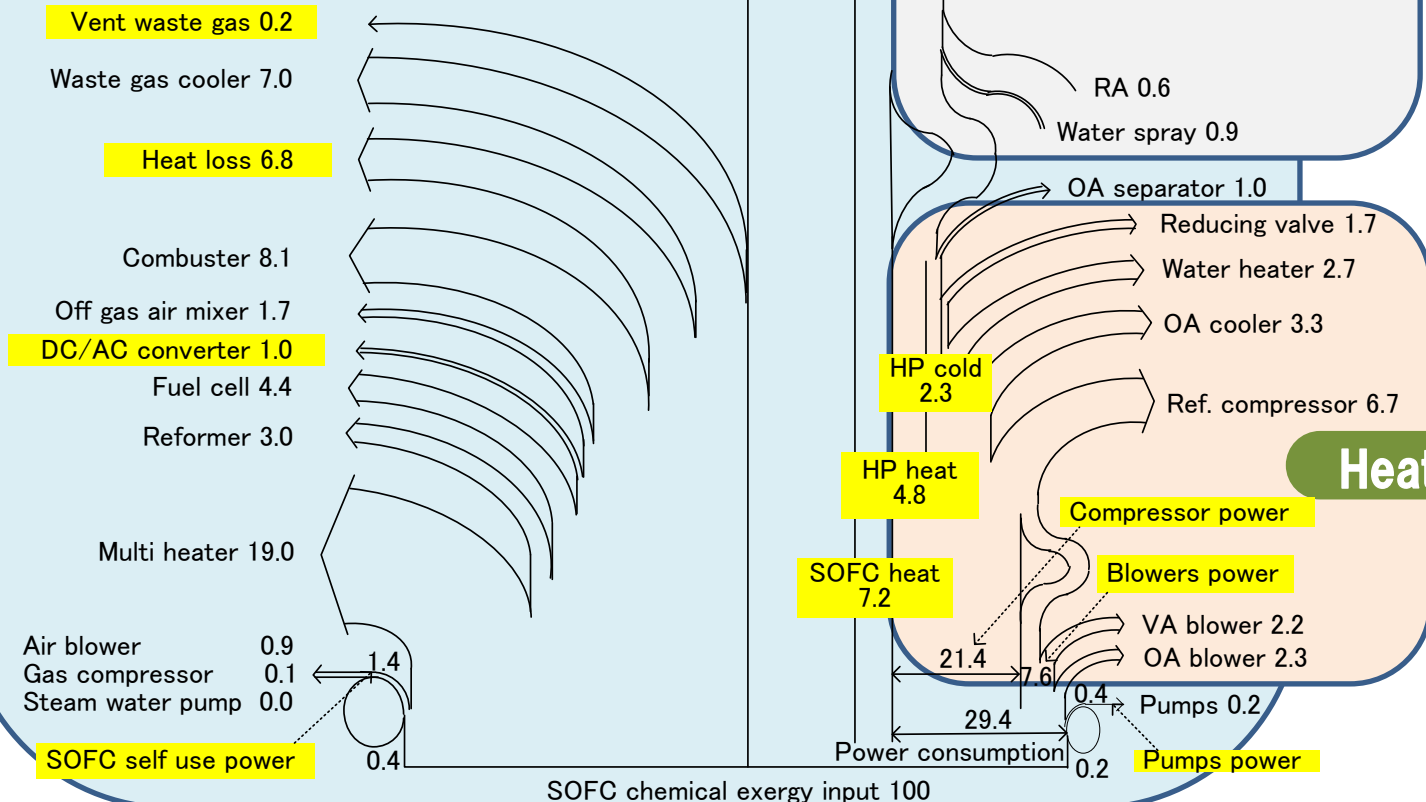
# 燃料電池SOFCを用いた次世代家庭用空調給湯システムのエクセルギー熱精算図

## 家庭用SOFC

黄色塗りつぶし箇所は、  
エンタルピーで表示可。

エクセルギー熱精算図で複雑システム全体像の見える化が可能。

主たるエクセルギー損失は  
Multi heater, Combustor, Waste gas cooler, Heat loss, Ref. compressor



Desiccant air conditioner

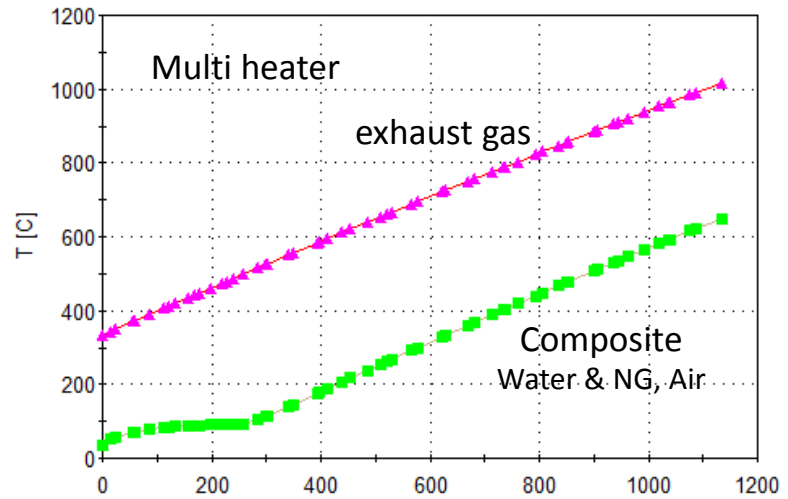
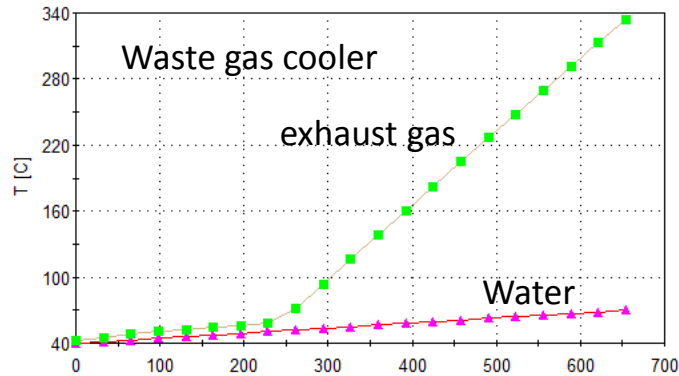
Heat pump



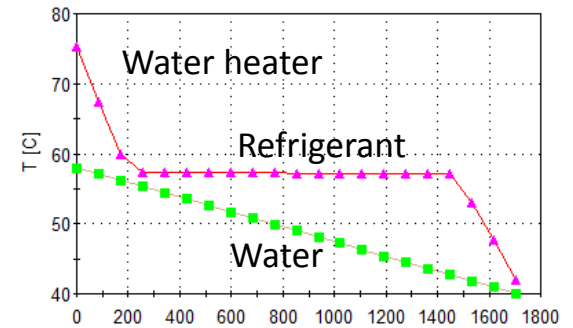
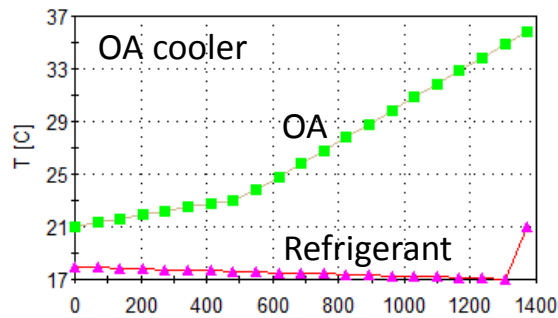
# 各構成機器の伝熱特性 T-Q線図

横軸: Heat Duty [W]

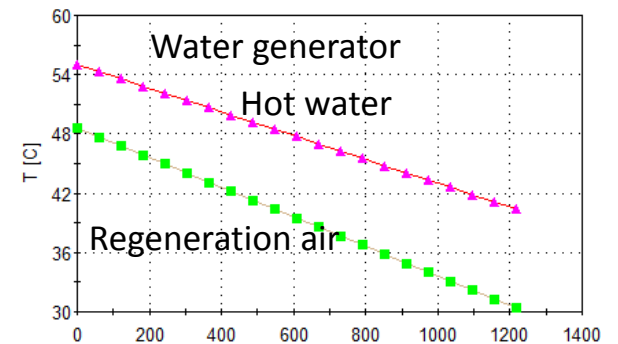
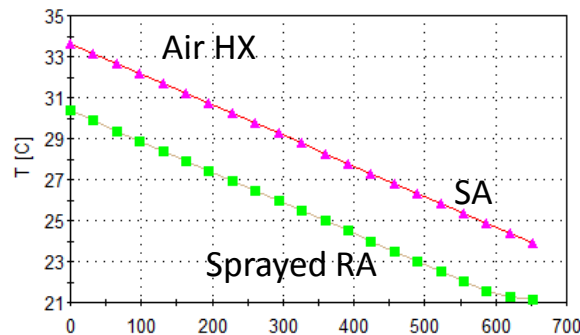
## 家庭用SOFC



## Heat pump



## Desiccant air conditioner



# エクセルギーデザインによる提案システムの将来性能予想

## 性能改善項目

SOFC発電効率(LHV)	46.5%	→	60%
冷媒圧縮機断熱効率	65%	→	80%
Blower断熱効率	40%	→	50%
デシカント除湿効率	65%	→	75%
OA cooler UA	200W/K	→	250W/K
Air HX UA	200W/K	→	300W/K
Water Generator UA	150W/K	→	200W/K

## 期待される効果

Utility power	250W	→	340W
SA dew point	15.7°C	→	14.2°C
SA 温度	23.9°C	→	23.4°C

55インチ4Kテレビの視聴が可能  
夏季、高原の涼しさを屋内にて体感

## 5. まとめ

- ✓ モリエ線図によるエンタルピーの大小だけでは、エネルギーの質を表せない。
- ✓ 未利用エネルギーの価値は、エクセルギーで評価すべきである。
- ✓ 燃料を燃焼で動力・電力に変換するガスシステムの効率、出力に応じ増加する。
- ✓ エンタルピーをレンズ付きフィルムカメラとすれば、エクセルギーはデジタル一眼カメラ。
- ✓ 日本ではエクセルギー解析が普及しない背景がある。
- ✓ エネルギーシステムの有効収支は、エンタルピーでは給与、エクセルギーでは小遣い。
- ✓ エクセルギーは約190年前にカルノーにより、熱量保存則の前に定義された。
- ✓ エクセルギーには物理と化学の2種類があり、プロセスシミュレータで定量化できる。
- ✓ 燃料を熱の形態で利用する場合、燃焼・伝熱・混合等のエクセルギー損失評価が必要。
- ✓ システムのエクセルギー効率向上は、一次エネルギー削減につながる。
- ✓ 新システムの設計では、エクセルギーデザイン学によるPDCAが必須となる。
- ✓ 熱精算は、エンタルピー（出力定量化）とエクセルギー（損失定量化）の両者で行なう。
- ✓ 送電線からの電力と競合するには稼働率、温水利用率と居室の快適性アップが必要。
- ✓ SOFCを用いた次世代家庭用給湯空調システムの燃焼損失は僅か8%。改善余地あり。

## 付録: エクセルギー理解度評価試験

エクセルギーに関する以下の設問において、○×で答えよ

- ◆ 夏季外気 $35^{\circ}\text{C}$ と冬季外気 $15^{\circ}\text{C}$ における室温 $25^{\circ}\text{C}$ の空気は、ほぼ同じ価値をもつ。
- ◆ エントロピー増加にともなう損失は、燃焼・伝熱・機械効率・混合の4つである。
- ◆ ヒートポンプは外気のエネルギーを利用して、温水の熱エクセルギーを生み出している。
- ◆ LNGの冷熱エクセルギーは、ガスの高圧送出に有効利用されている。
- ◆ ガスタービンコンバインドサイクルにおける最大の損失は、復水器での伝熱損失である。
- ◆ 燃料電池の発電効率を高めるためには、熱回収システムの高効率化が必須である。
- ◆ 13A都市ガス、LPガス、水素の化学エクセルギーは、高位発熱量より低い。
- ◆ 自然冷媒ヒートポンプ給湯器システムの損失の多くは、給湯時の給水との混合である。
- ◆ 地熱温水発電システムのエンタルピー熱効率は、エクセルギー発電効率より高い。
- ◆ 夏季水噴霧による空気冷却は、等エンタルピー変化であり、エクセルギーに変化はない。
- ◆ ガスタービンの燃焼温度高温化による発電効率向上は、膨張比増加のみの効果による。
- ◆ 高温予熱された燃料ガス(例えばメタン)と純酸素の当量燃焼の損失は、ほぼゼロである。
- ◆ エンタルピー精算図のすべての表示項目は、エクセルギー精算図で表すことができる。
- ◆ 高エクセルギー効率のシステムは、常に経済性が高いとは言えない。
- ◆ エクセルギーの基本的な概念は、熱量保存則の前に考え出された。
- ◆ 日本においてエクセルギー評価が普及しないのは、計算が煩雑なためであり、その他の理由はない

## 参考書文献

- 1) 久角喜徳, 堀司, 朴燦容, 毛笠明志:次世代LNG気化発電システムの研究, エネルギー・資源, Vol.35, No.3, pp.46(2014)
- 2) 堀司, 後藤稔, 久角喜徳, 若林努, 毛笠明志:エクセルギーによるエネルギー変換システムおよび居住者行動の省エネ評価, エネルギー・資源, Vol.35, No.4, pp.64(2014)
- 3) 柴垣大貴, 久角喜徳:未利用熱等の小規模バイナリー発電のエクセルギー解析による効率改善とその経済性検討, 2-3, 第31回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, pp.6(2015)
- 4) 堀司, 久角喜徳, 若林努, 毛笠明志:家庭用SOFCのエクセルギーデザイン, Vol.23, No.12, pp5-11日本工業出版, クリーンエネルギー(2014)
- 5) 堀司, 毛笠明志, 長崎茜, 白神洋輔, 久角喜徳:燃焼炉のエクセルギー解析, Vol.51, No.1, PP.27-33, 工業加熱2014年1月号
- 6) 久角喜徳:特別寄稿LNGとエクセルギー, Vol.52, No.220, PP.56-61, 伝熱2013年7月
- 7) 久角喜徳:LNG冷熱発電, 機械工学便覧 応用システム編, γ5 エネルギー供給システム, 未利用エネルギー, pp.198-201, (社)日本機械学会, 2005(分担執筆)
- 8) 久角喜徳, 堀司, 若林努:ITを利用したエネルギー変換機器の効率評価システムの構築, ,vol.20 No.6, pp.9-13, クリーンエネルギー2011,6月号

# < 質疑応答 >