

熱利用技術の課題と展望

東京大学 生産技術研究所

鹿園直毅

shika@iis.u-tokyo.ac.jp

内容

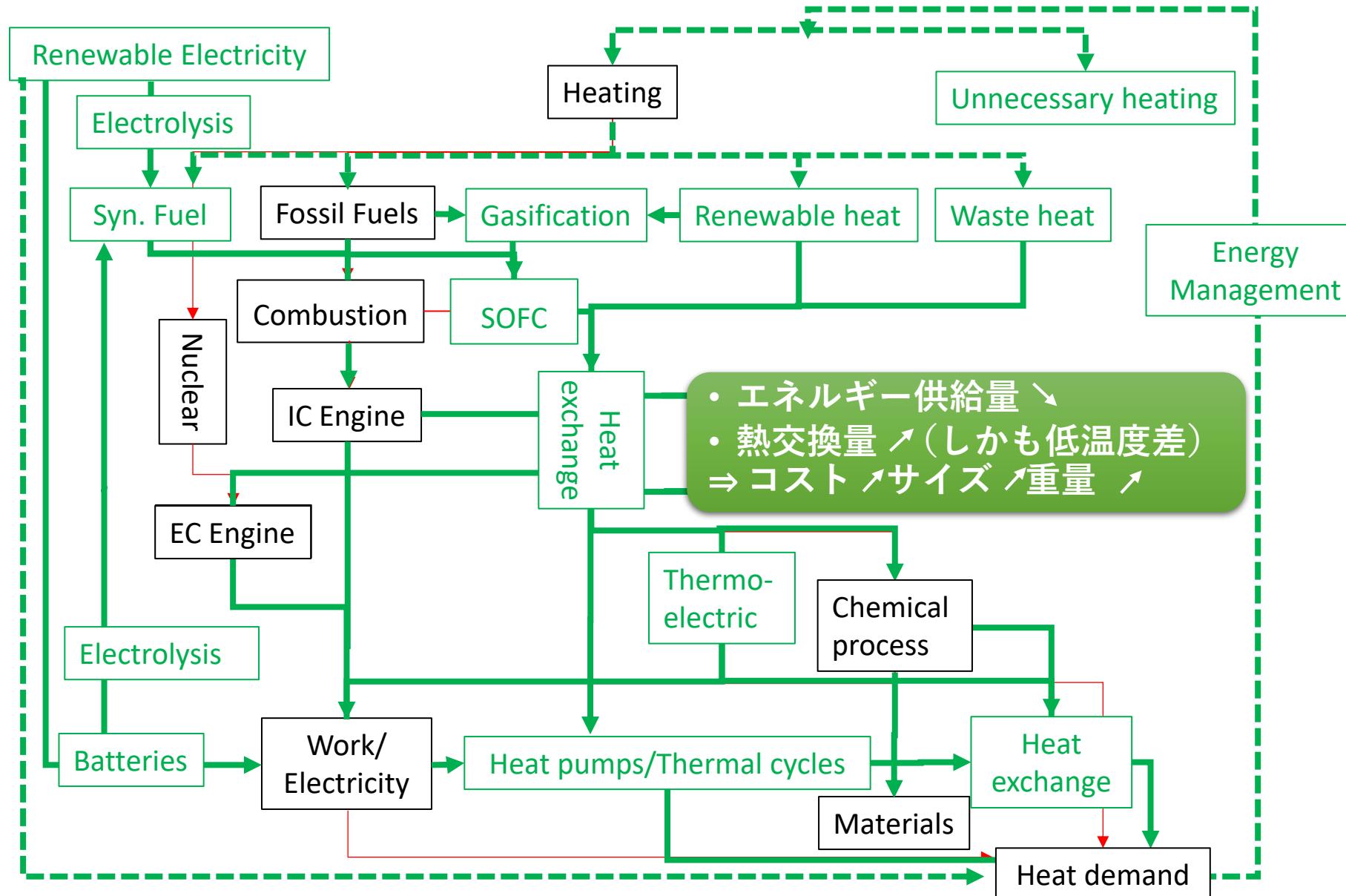
1. 熱機器ハイブリッド化の効果

- 低コスト化
- 高機能化
- 高性能化
- 環境性
- セキュリティー

2. $1+1 > 2$ なハイブリッド技術

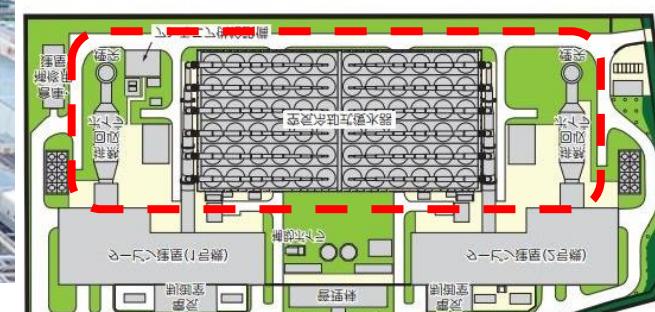
将来のエネルギー利用

→ Conventional energy flow
 → Information flow
 → Material/Energy flow



熱交換の課題

- 神鋼真岡発電所:LNGパイプラインを利用した内陸型コンバインドサイクル 120万kW
 - 熱交換器が敷地の約2/3
 - 大伝熱面積・大構造物
 - 総コストと性能を左右



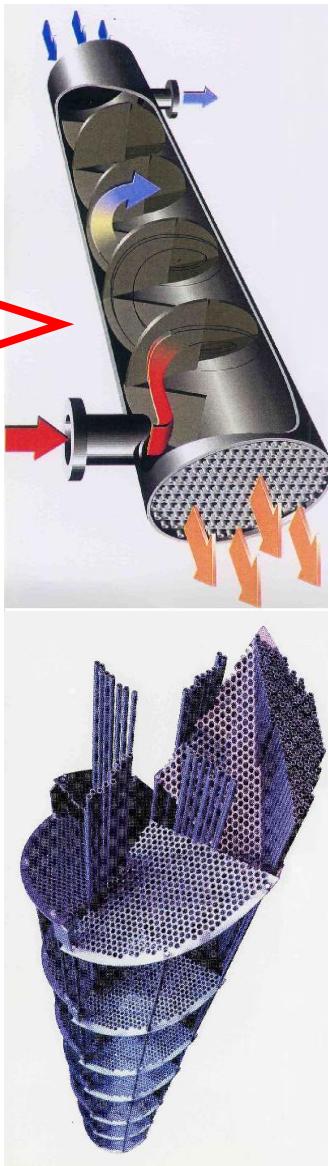
<http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1607/22/news033.html>

<http://www.tokyo-gas.co.jp/IR/library/pdf/anual/1509.pdf>

http://www.mete.go.jp/committee/kenkyukai/safety_security/kankyo_karyoku/pdf/h25_04_02_03.pdf

https://www.kobelco.co.jp/releases/1202084_15541.html

富士石油(株) 袖ヶ浦製油所 4MWカリーナサイクル



蒸発器

- 蒸留塔塔頂ベーパー(116°C)からの熱回収
- 縦型シェル&チューブ×2基
- 41.9 MW
- 高さ 13.7 m
- シェル内径 1.49 m
- ヘリカル(らせん)バッフル

軽量化 × 量産化 × 材料転換

$$\text{熱機器コスト} = \text{固定費} + \frac{\text{材料費}}{\text{重量(面積)}} \times \text{重量(面積)}$$

3因子

① 固定費削減

- ・習熟率90%なら生産量10倍でコスト約3割減(量産技術)
- ・付帯コスト削減(土地代, 施工, 搬送, 支持構造体, メンテ…)

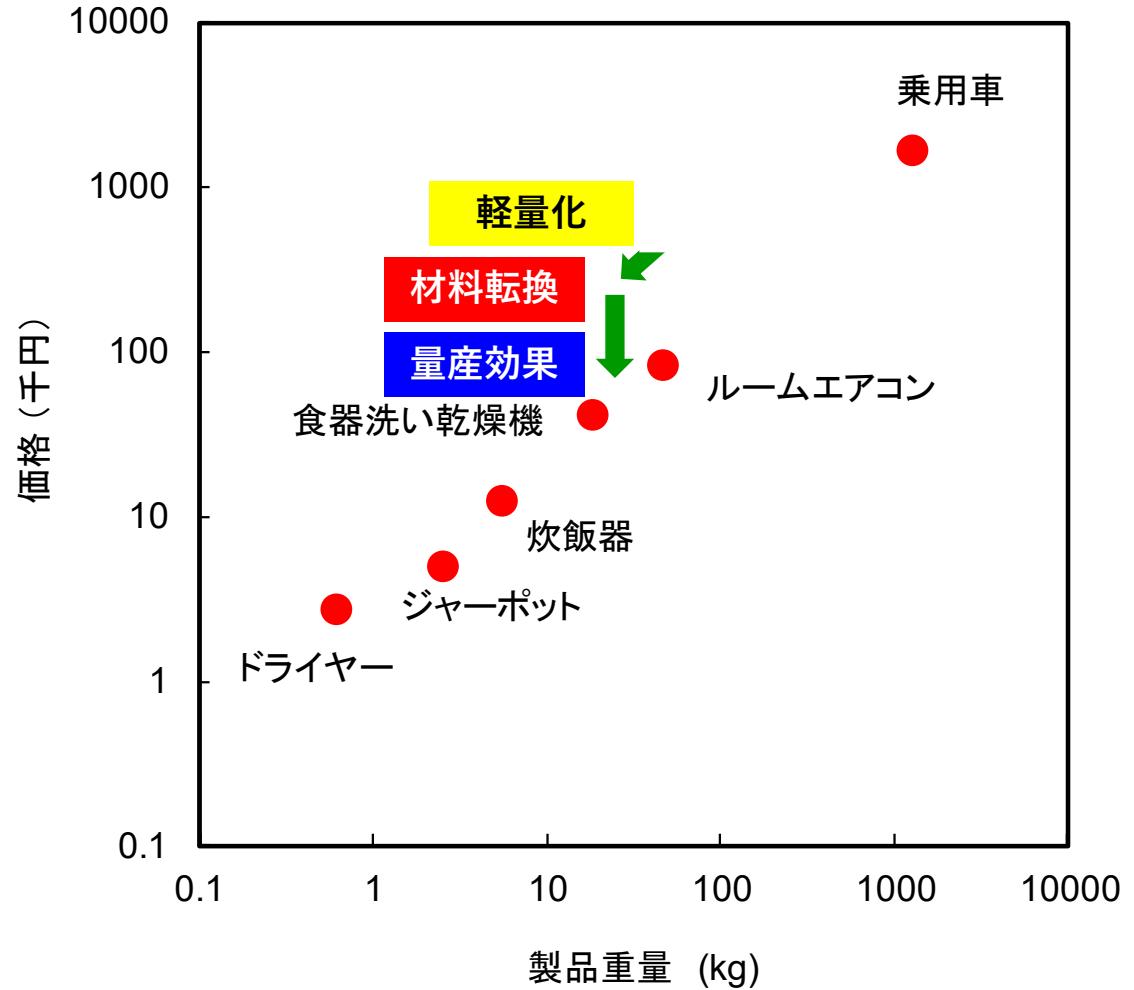
② 安価・薄肉・軽量・低環境負荷な材料への転換

- ・耐食性, 耐熱性, 強度の向上(材料技術)
- ・材料に合わせた新製法(製造技術)と新設計

③ 小型・軽量化

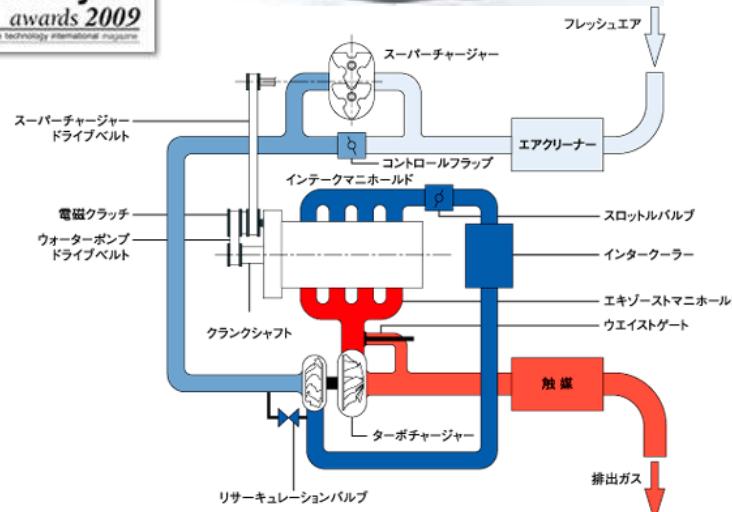
- ・伝熱促進, ファウリング防止, 前面面積縮小

民生品のコスト



ダウンサイ징

TSIエンジン



http://www.volks wagen.co.jp/experience/innovation/innovation_vw_FullFrameset.html

瞬間式温水便座



<http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/adata.dir/jn080804-1/jn080804-1.html>

電気ケトル



1.3kW

<http://www.zojirushi.co.jp/corp/news/2007/071220/CKBA.html>

過給(バックアップ)付き



799x299x672mm (41kg) 460L (75kg)
370L (64kg)

CO₂給湯ヒートポンプ

- CO₂封入量 660 g



700x250x660mm (25kg) 140L (40kg) ガス給湯器 (26kg)
70L (26kg)



プロパン給湯ヒートポンプ

- R290封入量 225 g
- 追い焚き用ガス給湯機(エコジョーズ)付き
→電気ヒーターは???

https://sumai.panasonic.jp/hp/lineup/product.php?id=ippan_uk_sl_460

<https://noritz.co.jp/company/news/2025/20250619-005900.html>
ノーリツ オンラインカタログ
ガスエネルギー新聞 2025年6月23日

ガスファンヒーター+電気ヒーター



Rinnai

https://rinnai.jp/products/living/fan_heater/harmo_point

ガスファンヒーター

- パワフル＆スピーディー, 乾燥しにくい
- ×換気が必要(1時間に1分程度)

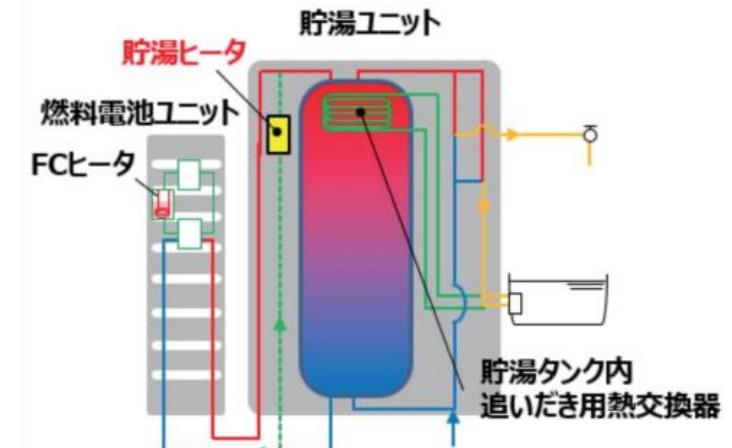
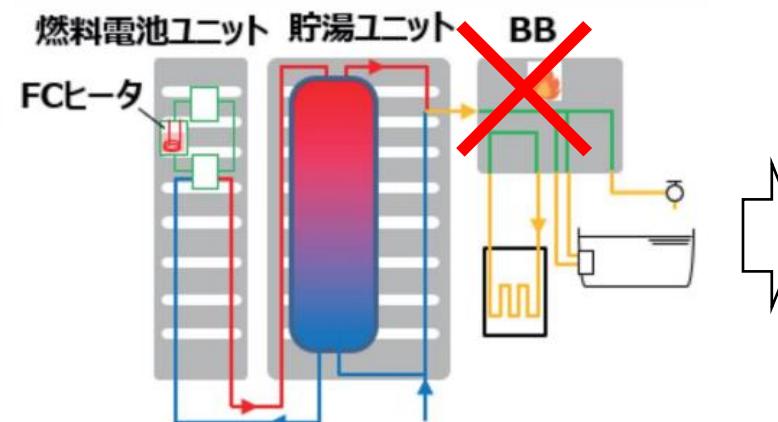
電気ヒーター

- お手軽・空気を汚さない, 持ち運び容易
- ×電気代

エネファームも電気ヒーターでバックアップ



パナソニック株式会社 エレクトリックワークス社 株式会社コロナ

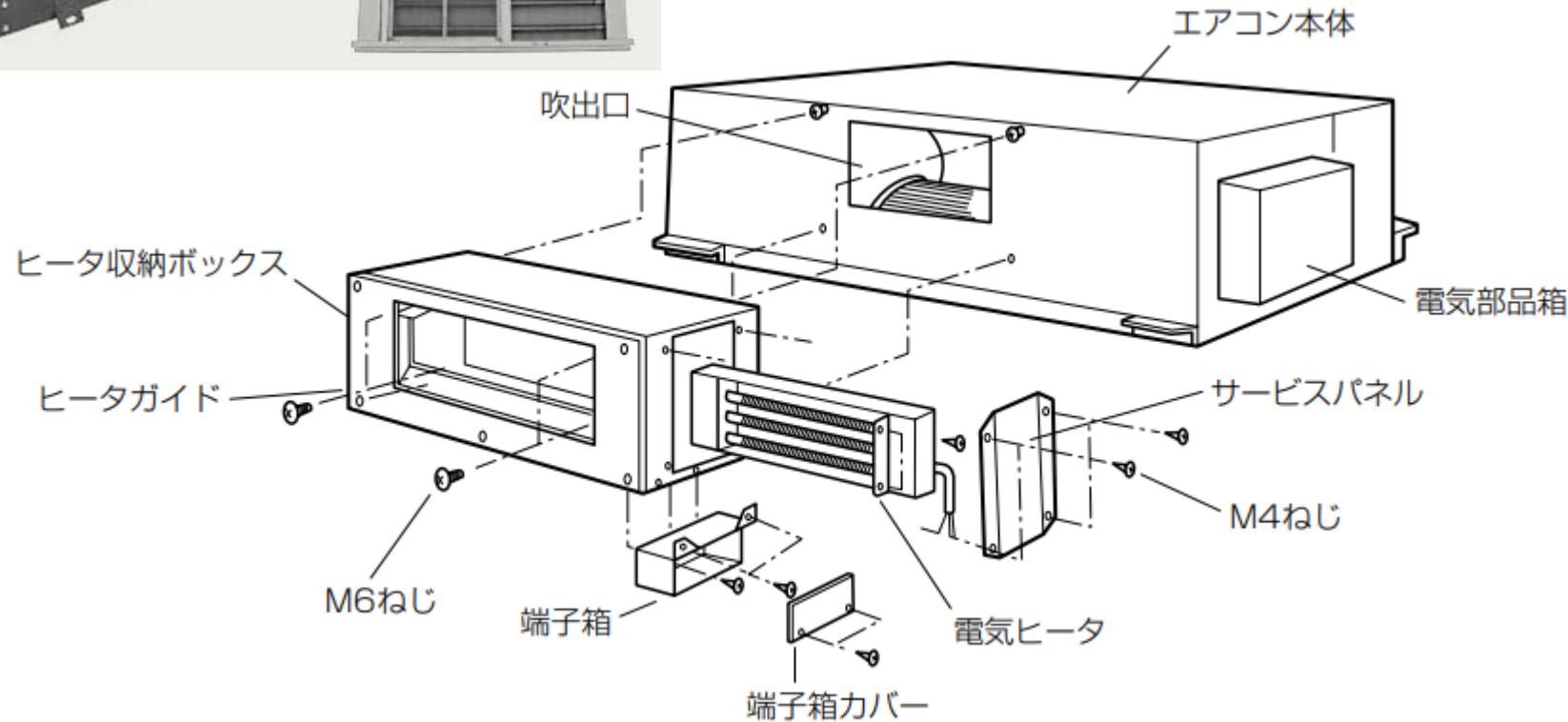


<https://www.corona.co.jp/news/files/aedc857a487b31034c19c5963115dde84a6cc41f.pdf>
<https://news.panasonic.com/jp/press/jn221125-1>
https://www.ace.or.jp/web/gp/pdf/2024/CGS-Award2024_Detail.pdf

ヒーター付きエアコンも、かつては普通に存在

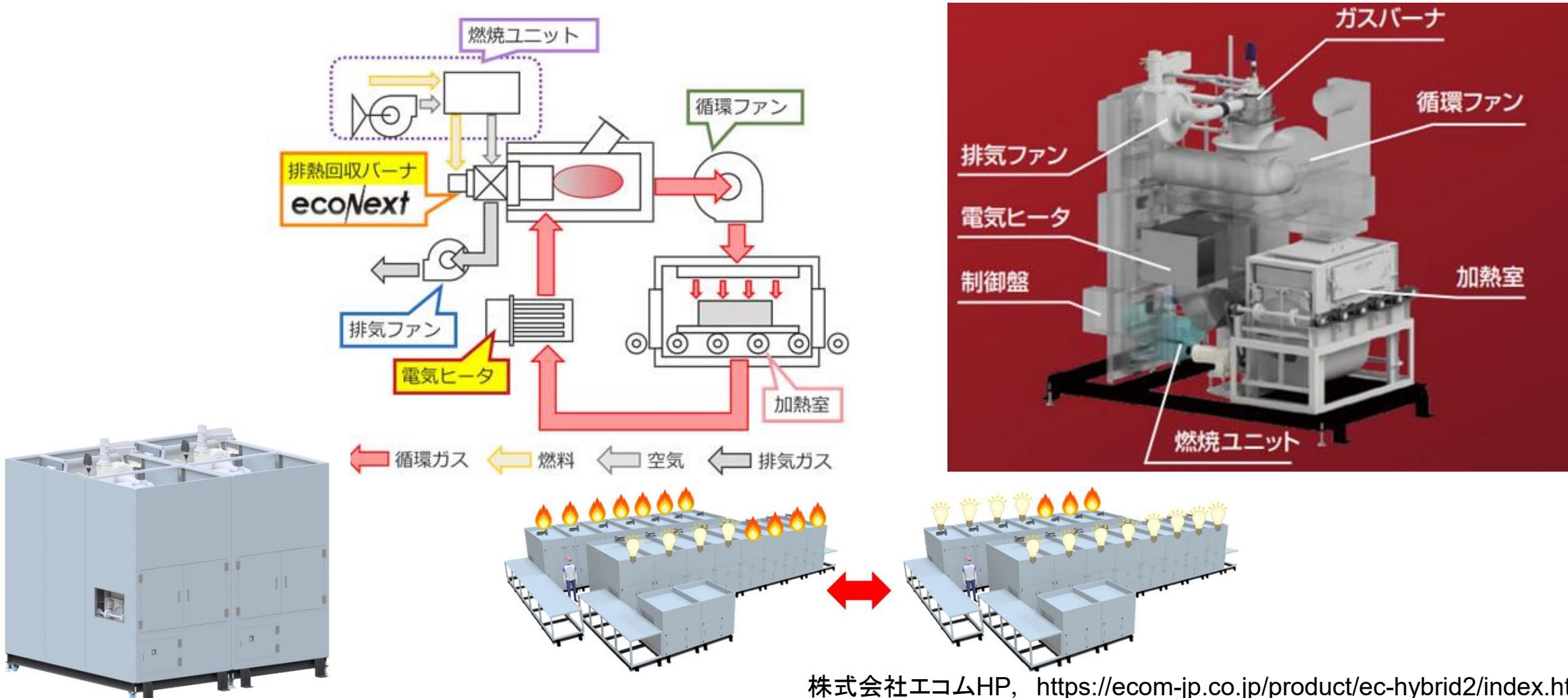


日本シーズ線株式会社HP
<http://www.npsw.co.jp/product/productH/pkg.html>



ハイブリッド熱処理炉

- 中部電力株式会社とエコムの共同開発
- 高出力で急速に加熱可能なガスバーナと、高精度な温度制御ができる電気ヒータのハイブリッド
- 炉毎に電気・ガスを切替えることでDRIに対応可能



熱移動の2つの視点

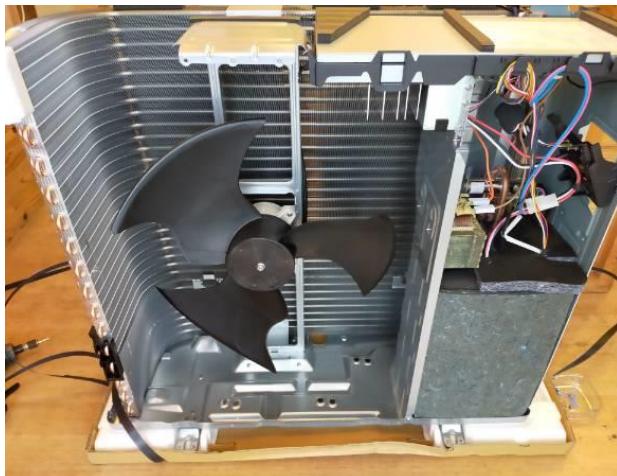
① 伝熱の視点

$$Q = K \times A \times \Delta T$$

K : 熱通過率 [W/m²K]

A : 伝熱面積 [m²]

ΔT : 温度差 [K]



② 熱輸送の視点

$$Q = \rho c_p \times G \times (T_2 - T_1)$$

G : 体積流量 [m³/s]

T_1 : 流体の入口温度 [K]

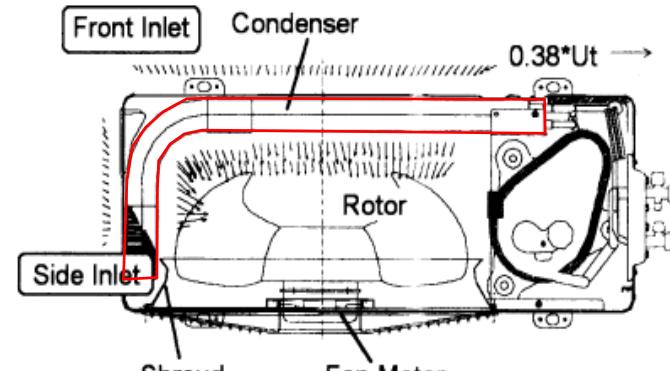
T_2 : 流体の出口温度 [K]



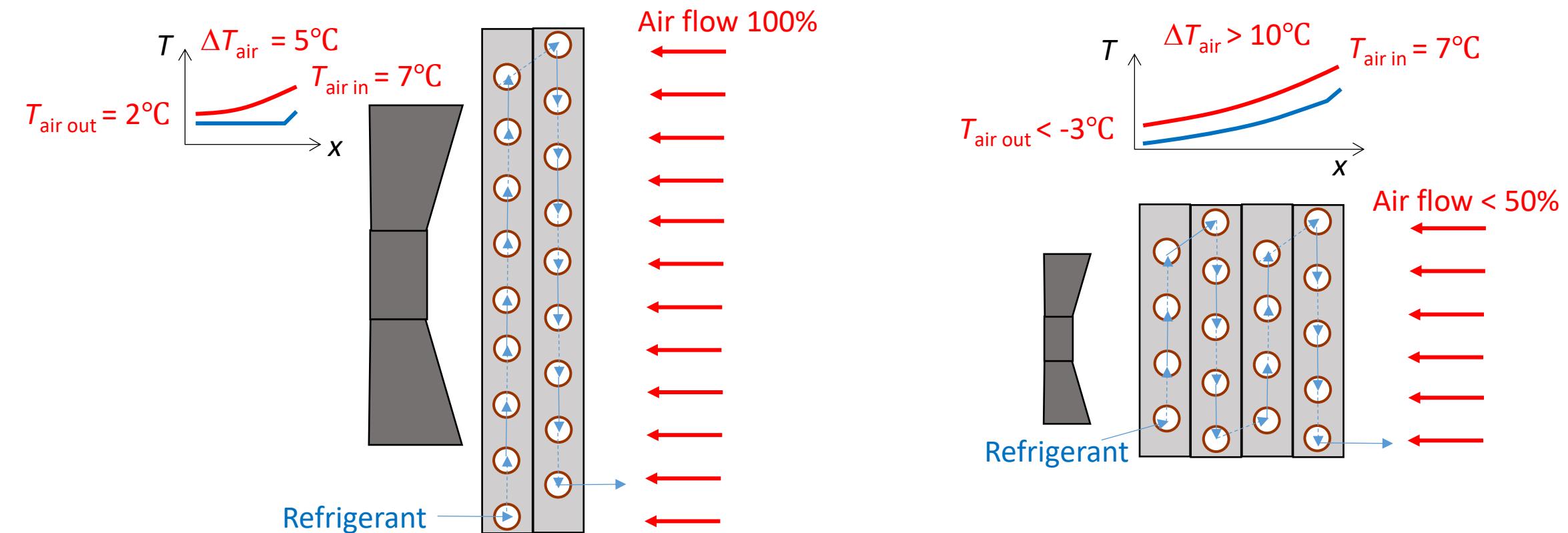
- 温度グライド($T_2 - T_1$)で作動流体の**体積流量**は決まる
 - **体積流量**で熱交換器の**前面面積**は決まる (ファン動力・騒音の制約)
 - 热交換器の伝熱面積ではなく**前面面積**で**筐体体積**は決まる
- ⇒ 温度グライド($T_2 - T_1$)を大きくできれば、**筐体体積**を小さくできる

熱交換器の向流化

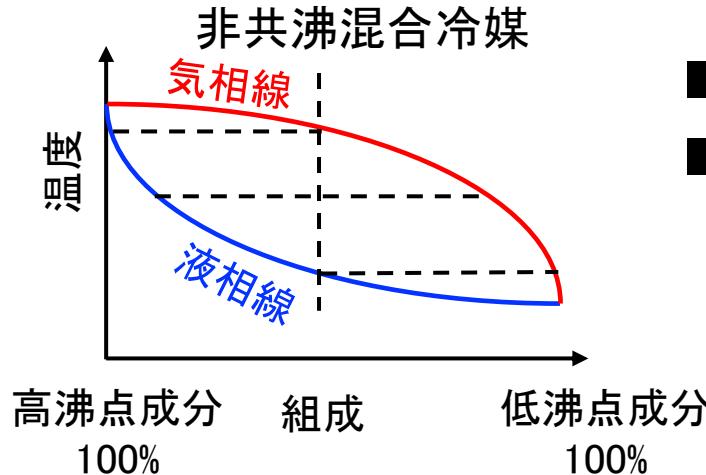
- ・ 温度グライドで、風量が決定
- ・ 風量が決まると、熱交換器の前面面積とファン径が決定
- ・ 热交換器前面面積とファン径が決まると、筐体寸法が決定
⇒ 温度グライドで筐体寸法が決定



$$\text{ファン動力} = \Delta P \times \text{風量}$$

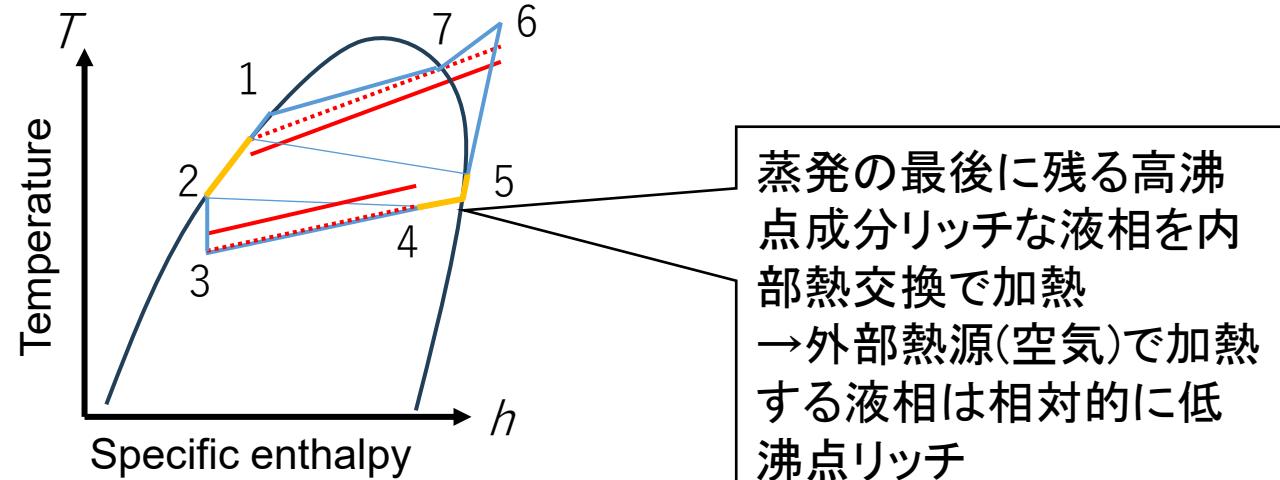
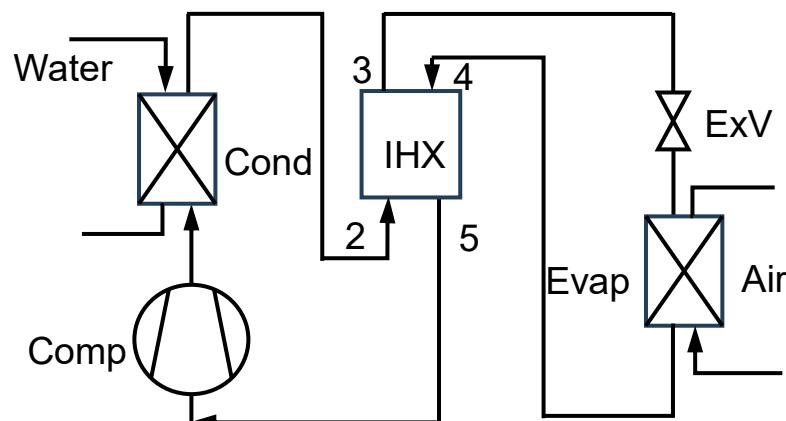


非共沸混合冷媒サイクル(冷媒のハイブリッド?)



- 热源との热交換温度差が小さい
- 設計の基本的な考え方
 - ・ 高圧側(凝縮器) → 高沸点(同じ圧力でも高温)成分リッチに
 - ・ 低圧側(蒸発器) → 低沸点(同じ圧力でも低温)成分リッチに

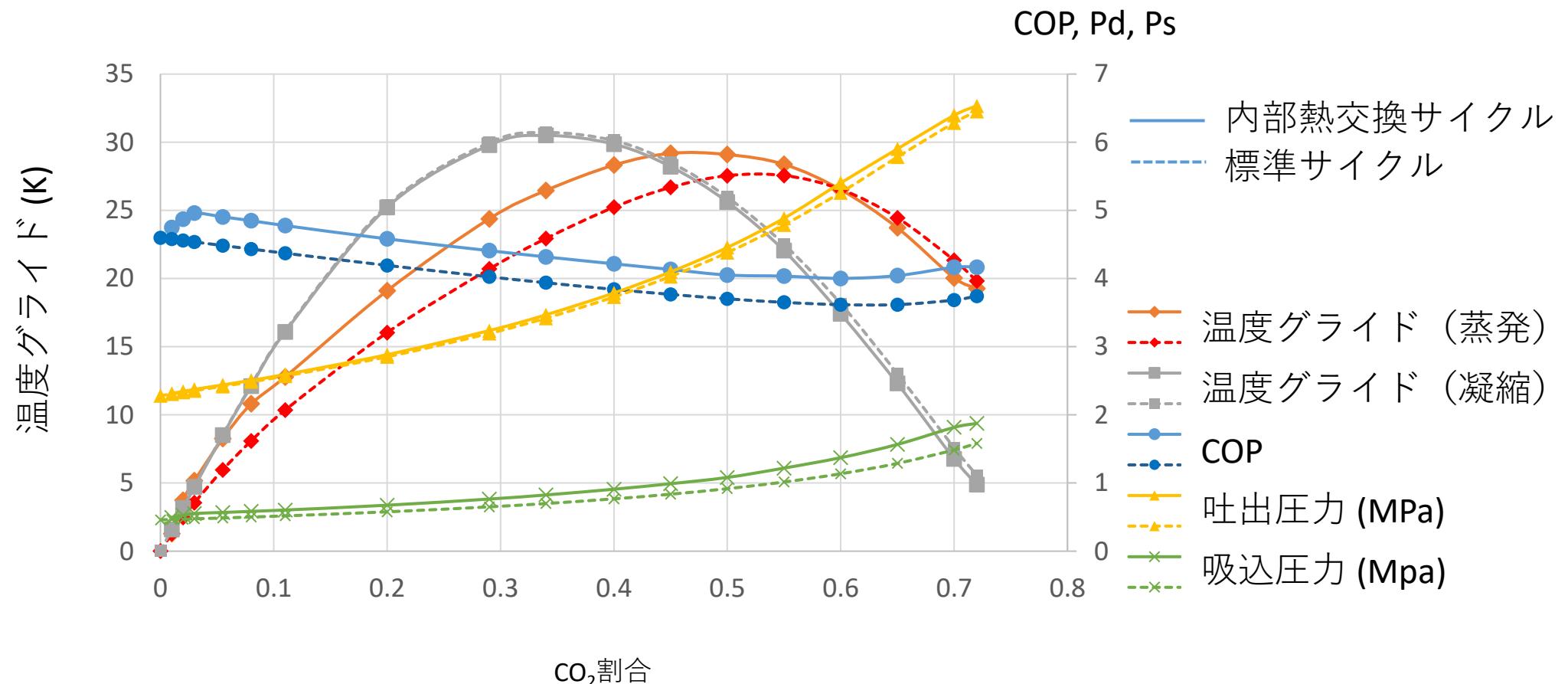
内部熱交換(Internal heat exchange)サイクル



自然冷媒

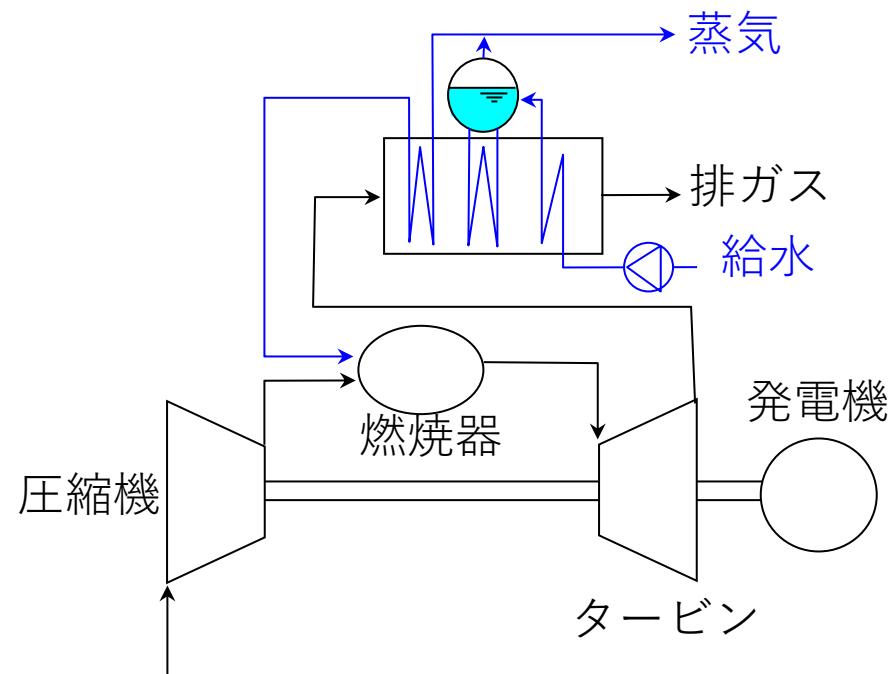
	Boiling point [°C]	Critical point [°C]	Critical pressure [MPa]
CO2	-78.6	31.13	7.38
Propylene	-47.47	91.21	4.55
Propane	-41.96	96.89	4.25
Dimethyl ether	-24.63	127.38	5.34
Isobutane	-11.60	134.81	3.63
Butane	-0.34	152.13	3.80
Pentane	36.21	196.7	3.37

CO₂+Propane

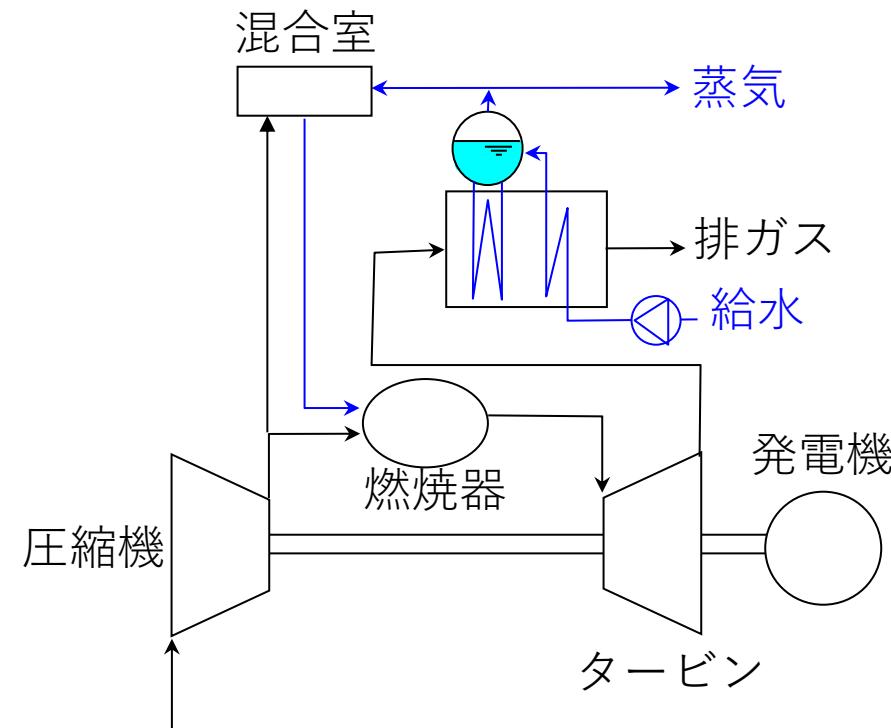


空気と水のハイブリッド

■ Chengサイクル



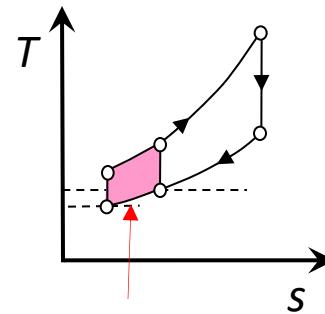
■ FLECSサイクル



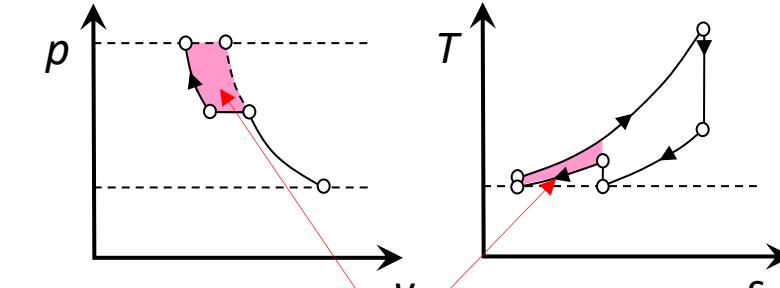
- 蒸気(熱)と電力の出力が可変 (熱電可変)
- 蒸気タービン無しで蒸気エンタルピーも回収(発電時)
- コージェネレーション(熱電併給)用として1980年代半ばから普及

ガスサイクルと蒸気サイクルのハイブリッド

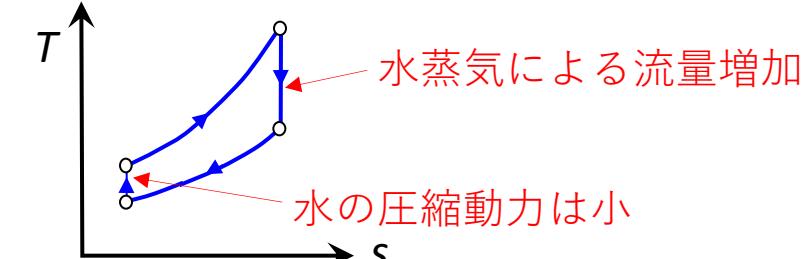
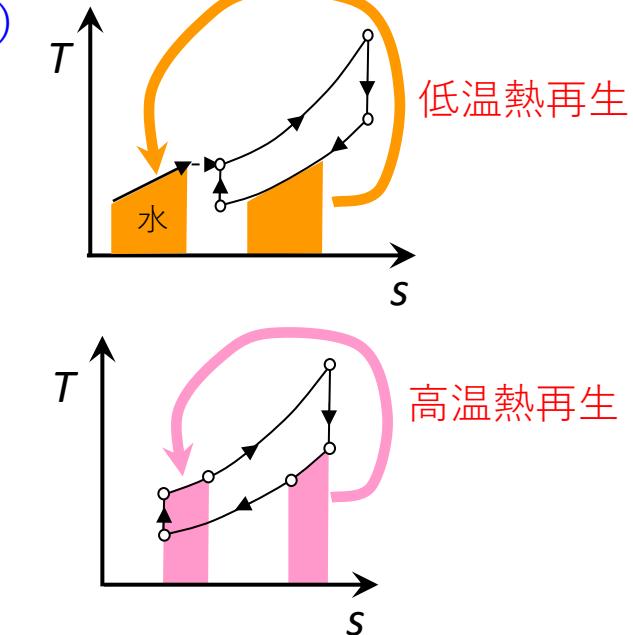
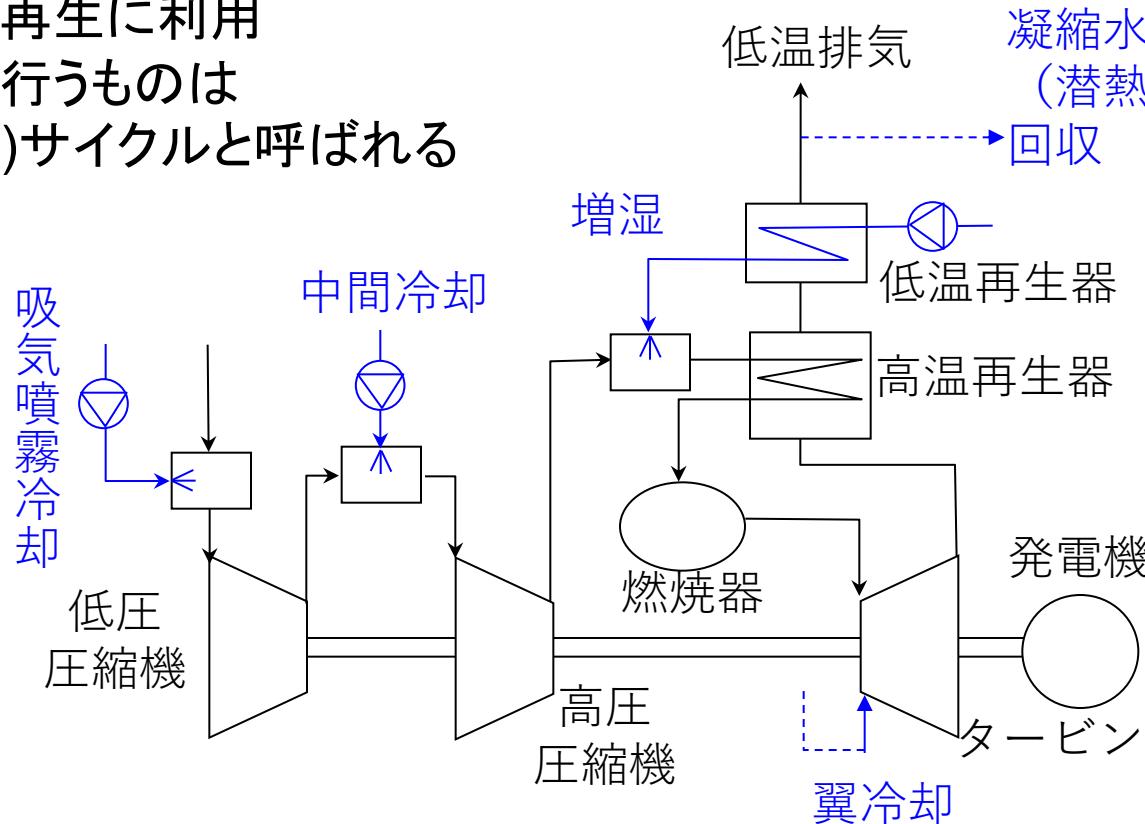
- 水を作動流体, 冷却剤, 再生に利用
- 中間冷却, 増湿, 再生を行うものは
HAT(Humid Air Turbine)サイクルと呼ばれる



吸気冷却による出力増



中間冷却による圧縮動力減少



水蒸気による流量増加

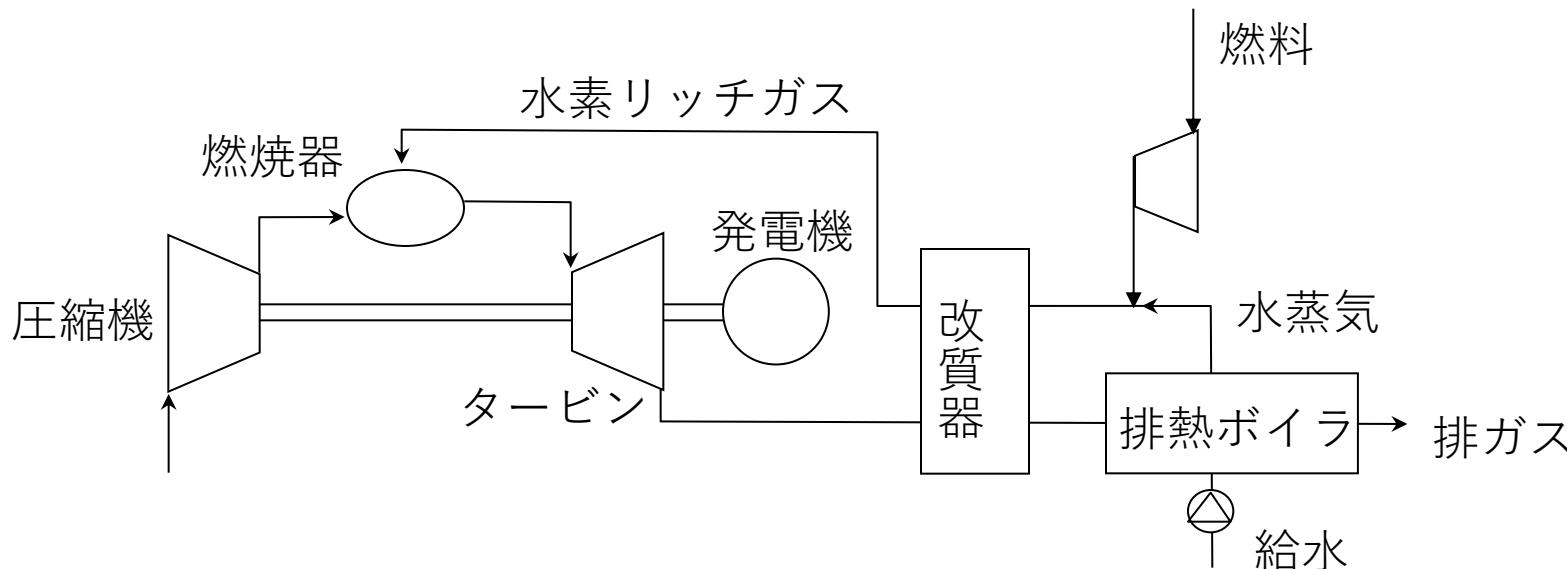
水の圧縮動力は小

熱機関排熱と吸熱反応のハイブリッド

- 排熱で水蒸気改質(吸熱反応)の熱を供給
- 燃料の化学エンタルピーを増大

メタン	$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$	165.0 kJ/mol	(吸熱反応)
メタノール	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{CO}_2 + 3\text{H}_2$	49.5 kJ/mol	(吸熱反応)
DME	$\text{CH}_3\text{OCH}_3 + 3\text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow 2\text{CO}_2 + 6\text{H}_2$	122.6 kJ/mol	(吸熱反応)

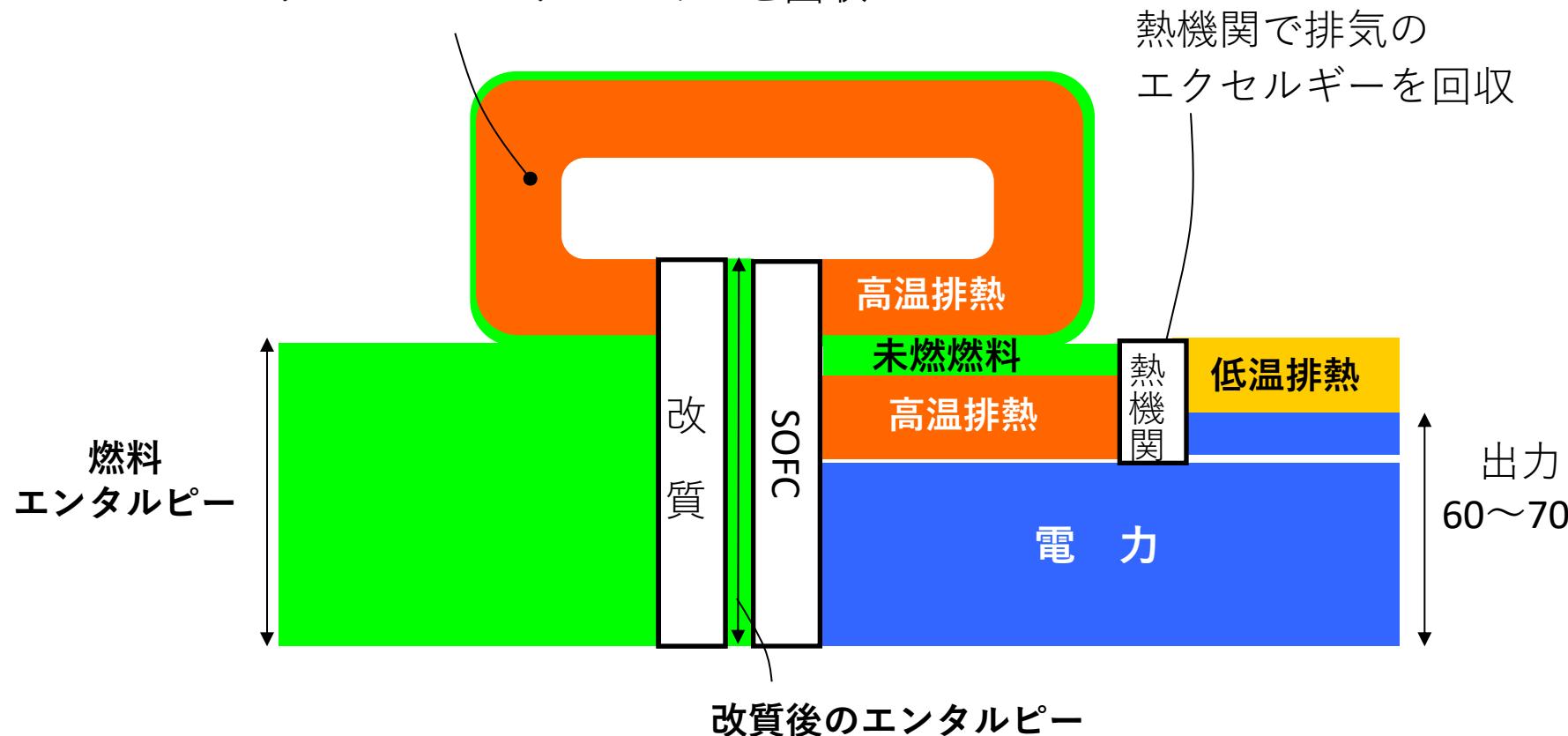
改質前よりも改質後の方が酸化反応のエンタルピー変化が大きくなる



高温燃料電池+熱機関+改質器のハイブリッド

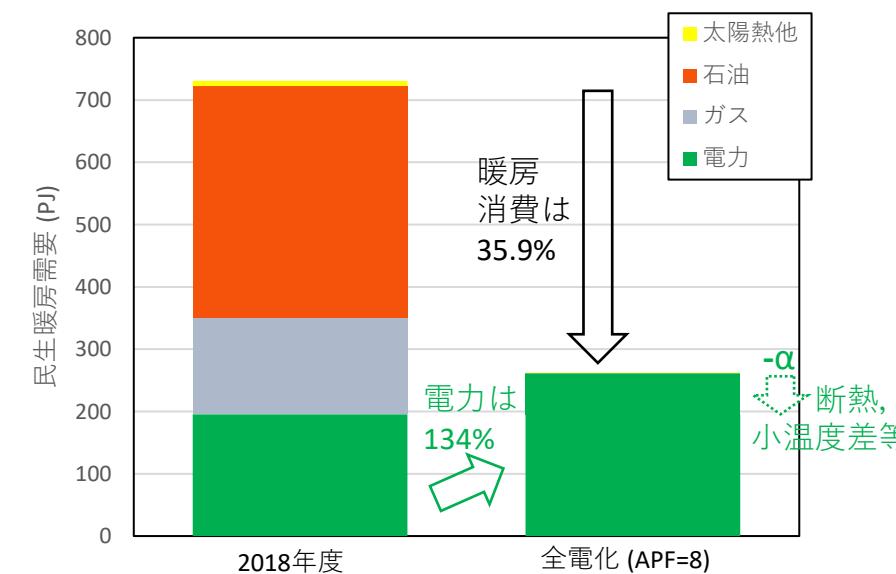
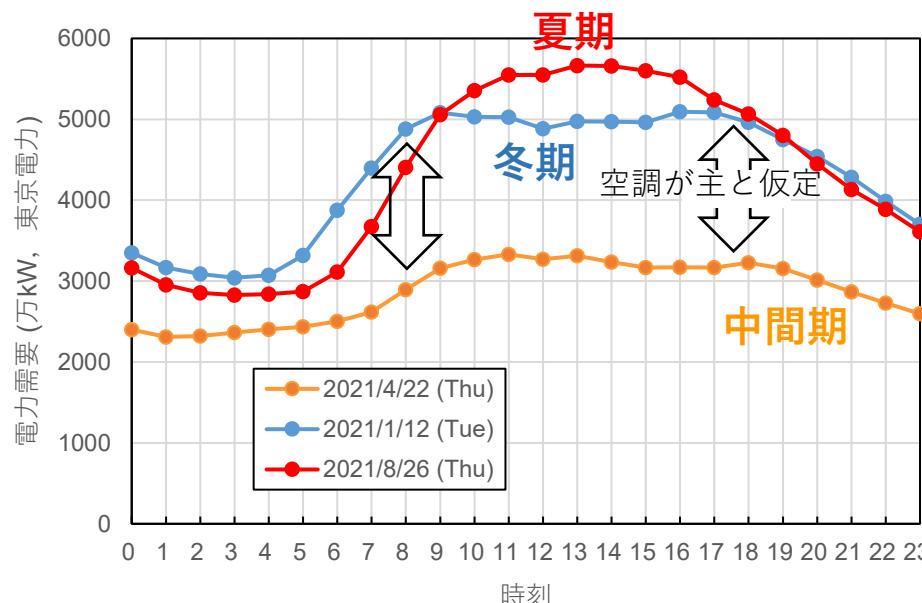
■ 化学再生+電気化学反応+熱機関

排熱でメタンを水素に改質し、排熱の
エンタルピーとエクセルギーを回収



空調を蓄熱化することの朝夕ピーク電力へのインパクト(概算)

- 「空調ピーク電力需要 = 夏季・冬季最大需要 - 中間期需要」と第一次近似
 - ・ 東電の最大需要日(平日)
 - 17~18時: 冷房・暖房とも約2000万kW
 - 8~9時: 冷房約1500万kW, 暖房約2000万kW
- 10電力の電力需要が設備容量に比例と仮定
 - ・ $17844\text{万kW(10電力)} / 5858\text{万kW(東電)} = 3.05\text{倍}$ (2019年8月実績)
 - 電力10社で約6000万kWの朝夕ピーク需要
- COP=8のエアコンで空調を全電化し, 将来暖房需要が2018年度実績のまま不变と仮定電力消費は1.34倍に増加(朝夕電力需要が6000→8000万kW)
 - 朝夕の空調ピークのために約8000万kWのバックアップが必要
 - 蓄熱は?

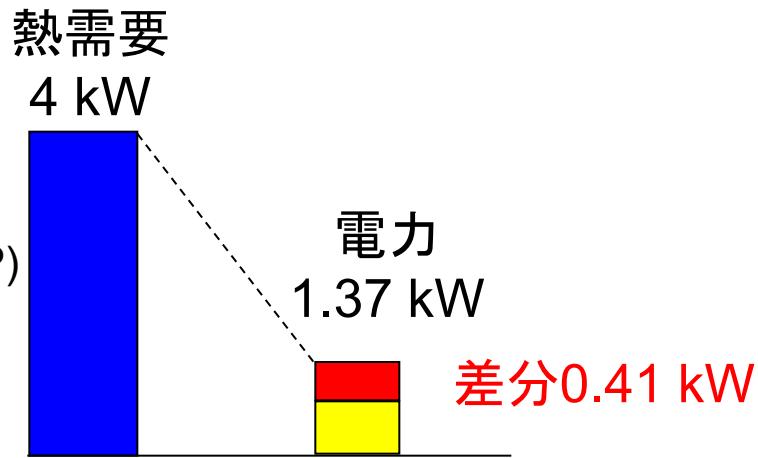


基本は高COPでピークカット

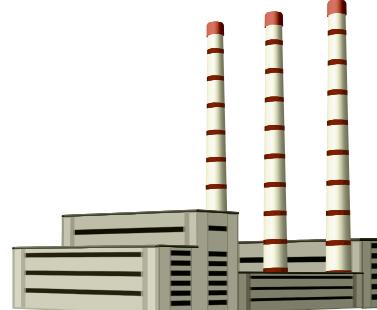
- 高COP機は通常時の省エネに加えて、ピーク時の電力供給設備コストも抑制できる



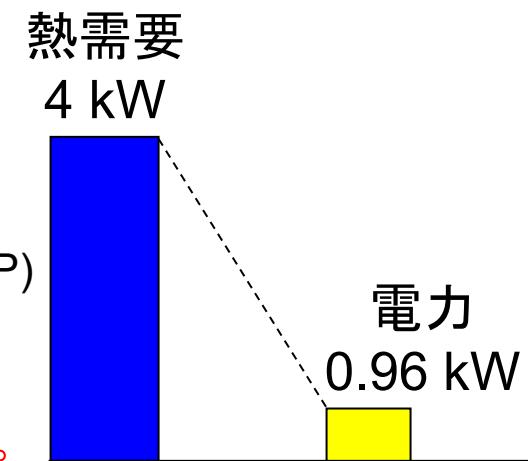
廉価版
(ダイキンS405ATEP)
COP = 2.92
9.5 万円



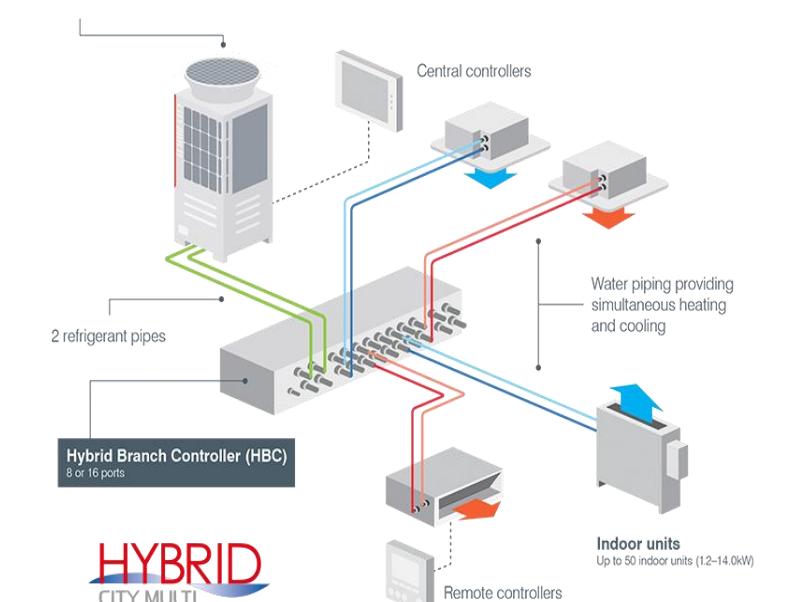
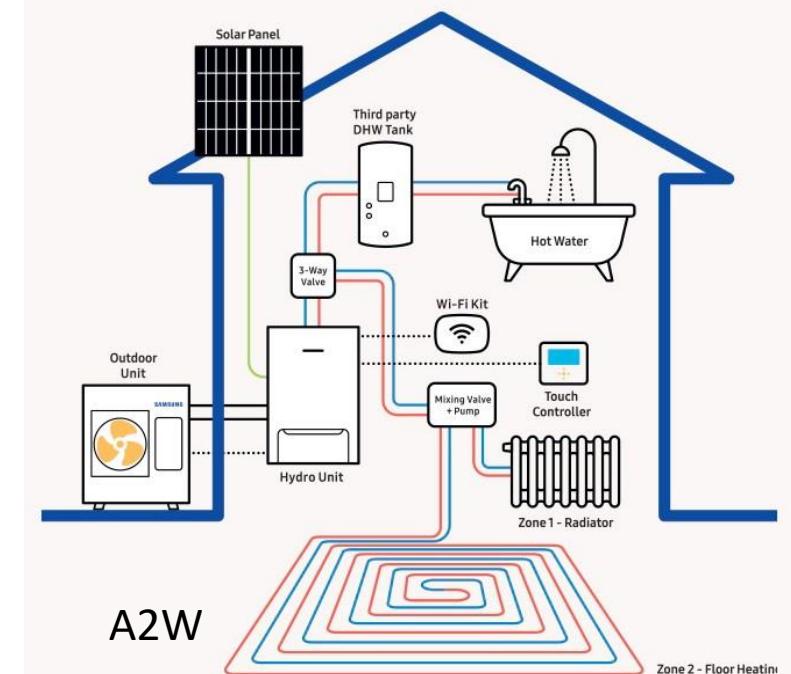
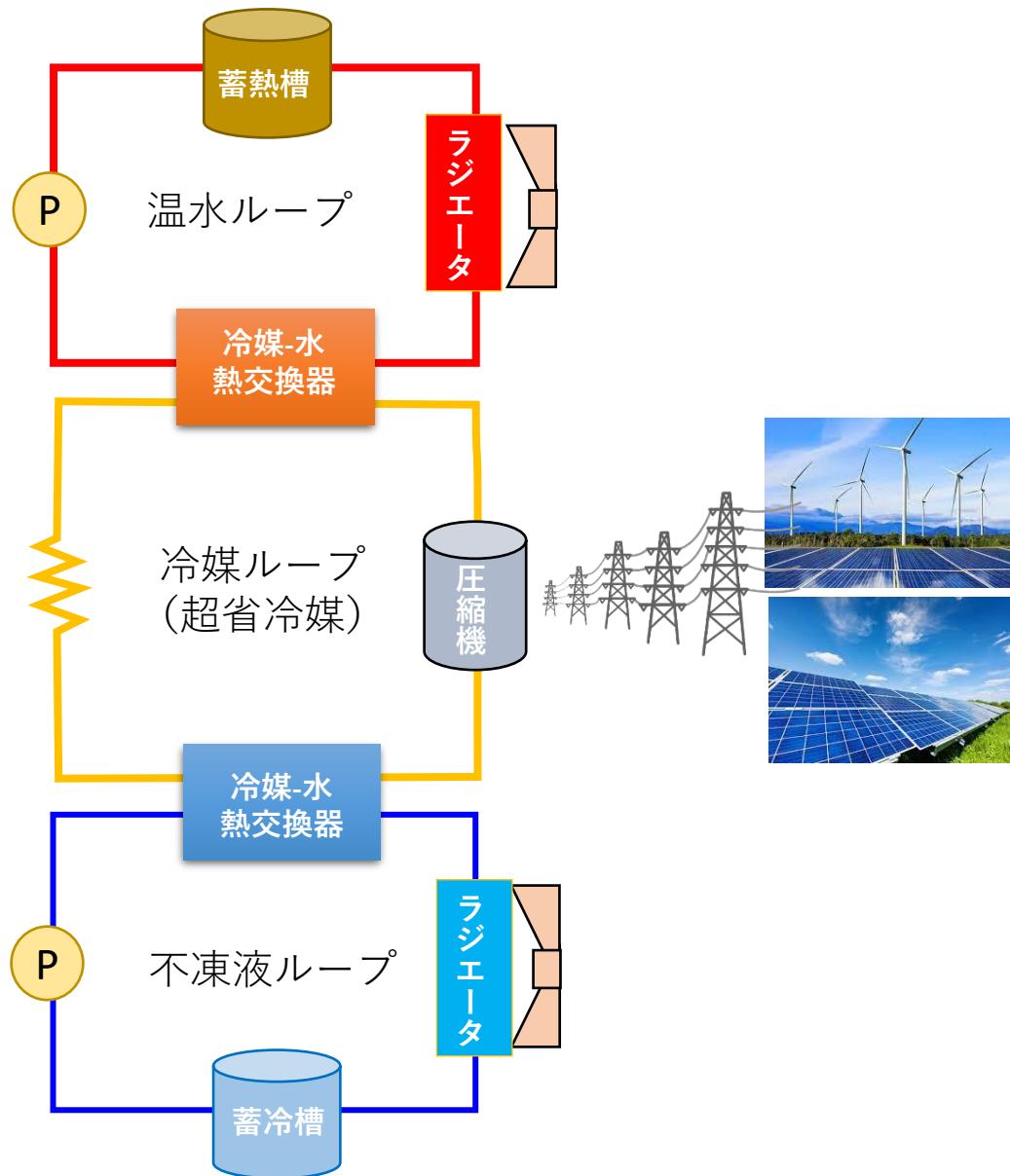
6.2万円
(@15万円/kW) 12.3万円
(@30万円/kW)



高性能機
(ダイキンS404ATGP)
COP = 4.15
14.4 万円
4.9万円アップ



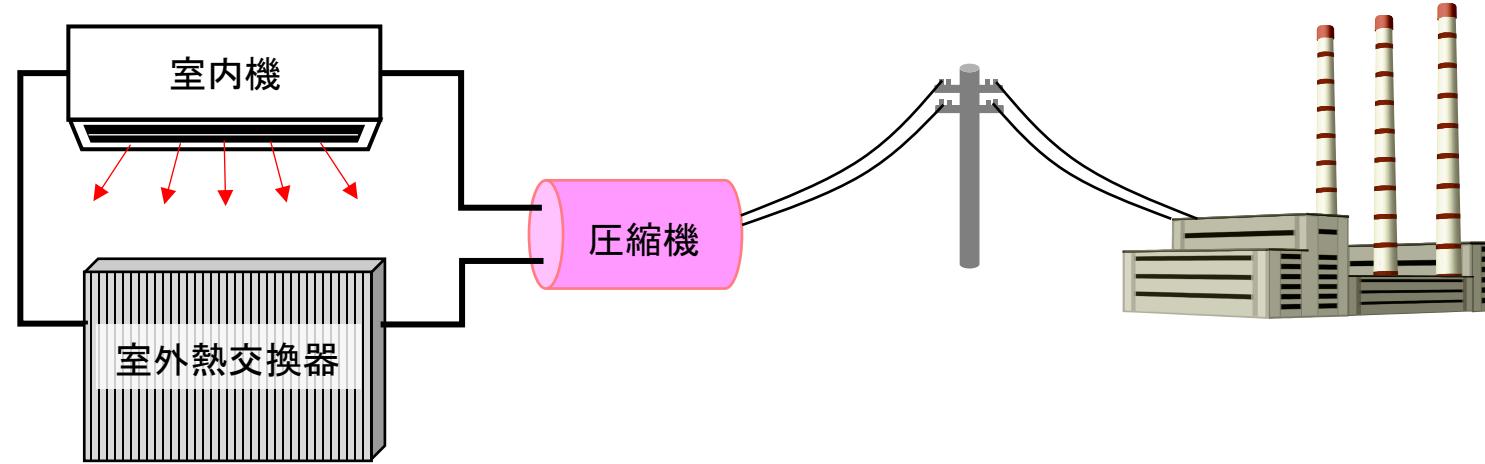
冷凍サイクル+水ループ



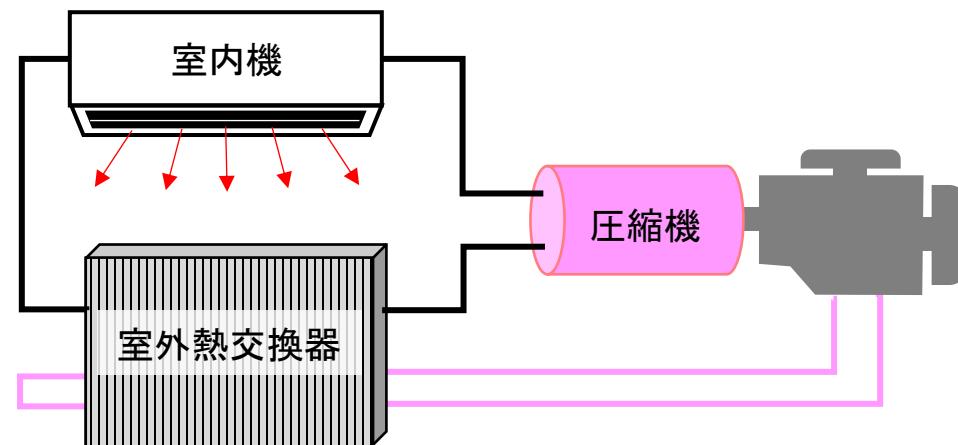
三菱電機、水ループマルチエアコン
<https://www.mitsubishi-electric.co.nz/hvrf/r32-hvrf-what-is-hybrid-vrf.aspx>

EHP+バックアップ

- EHP + 電力供給

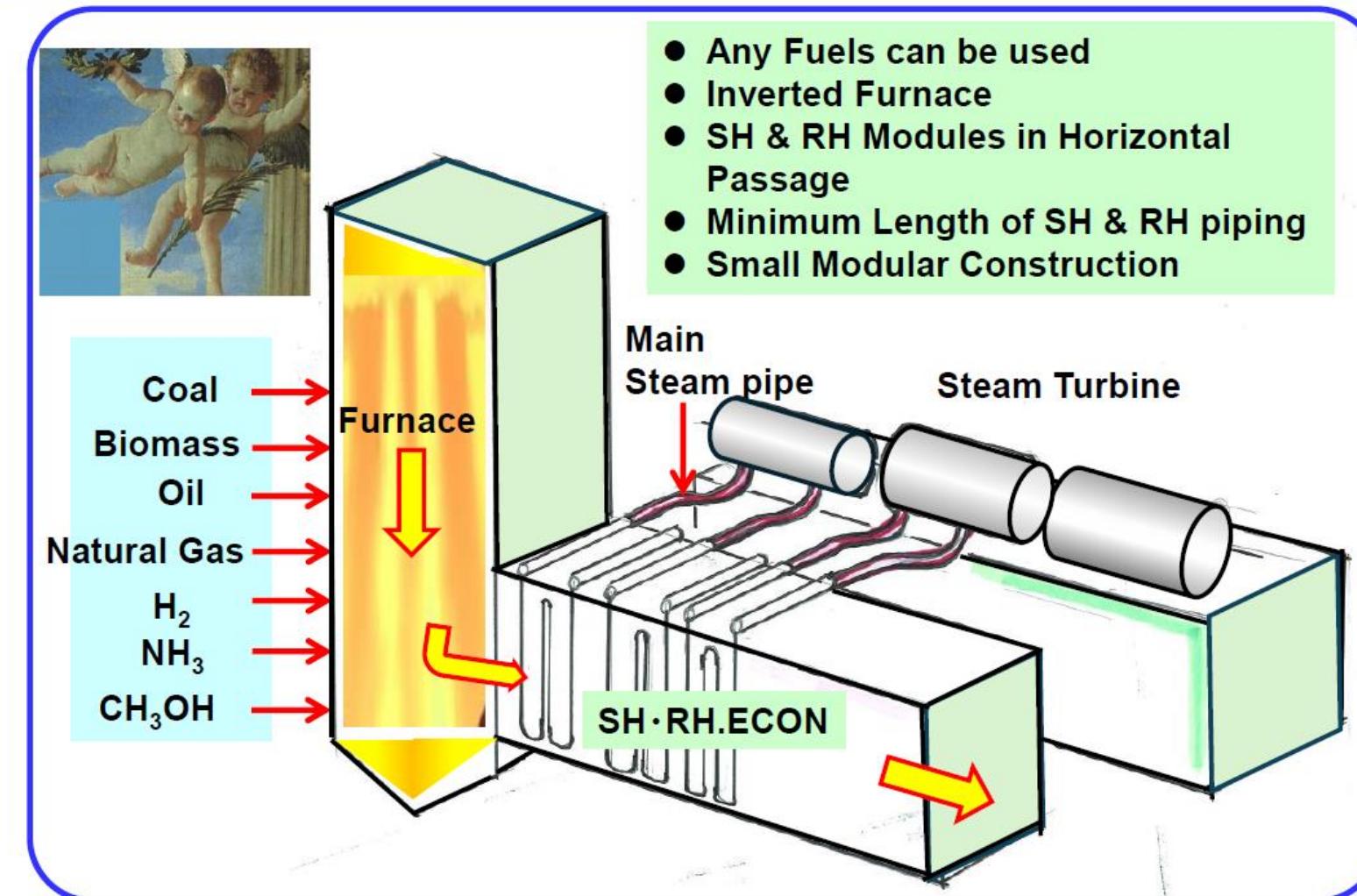


- EHP + エンジン = EHP+GHP ハイブリッド



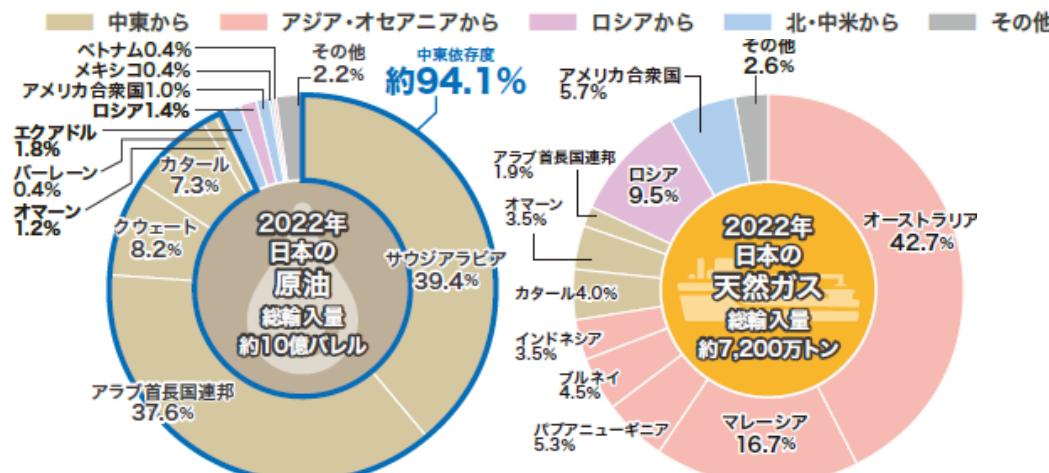
燃料のハイブリッド化(Fuel flexibility)

Flex-USC ANGEL BOILER



備蓄

- 石炭は中東依存度が0%であるとともに、豪州、インドネシア、ロシアなど、近距離かつ海洋のチョークポイントを通過せずに調達可能であり、地政学的リスクが低い。
- また、石炭は常温で固体であり気化することができなく、他の燃料と比較して爆発の危険性も低いことから、野積みも可能であるなど保管が容易。国内備蓄量は1ヶ月ほどあり、自然発火対策など適切な管理を行う事で備蓄性を確保し、レジリエンス向上に貢献可能。



燃料の備蓄性

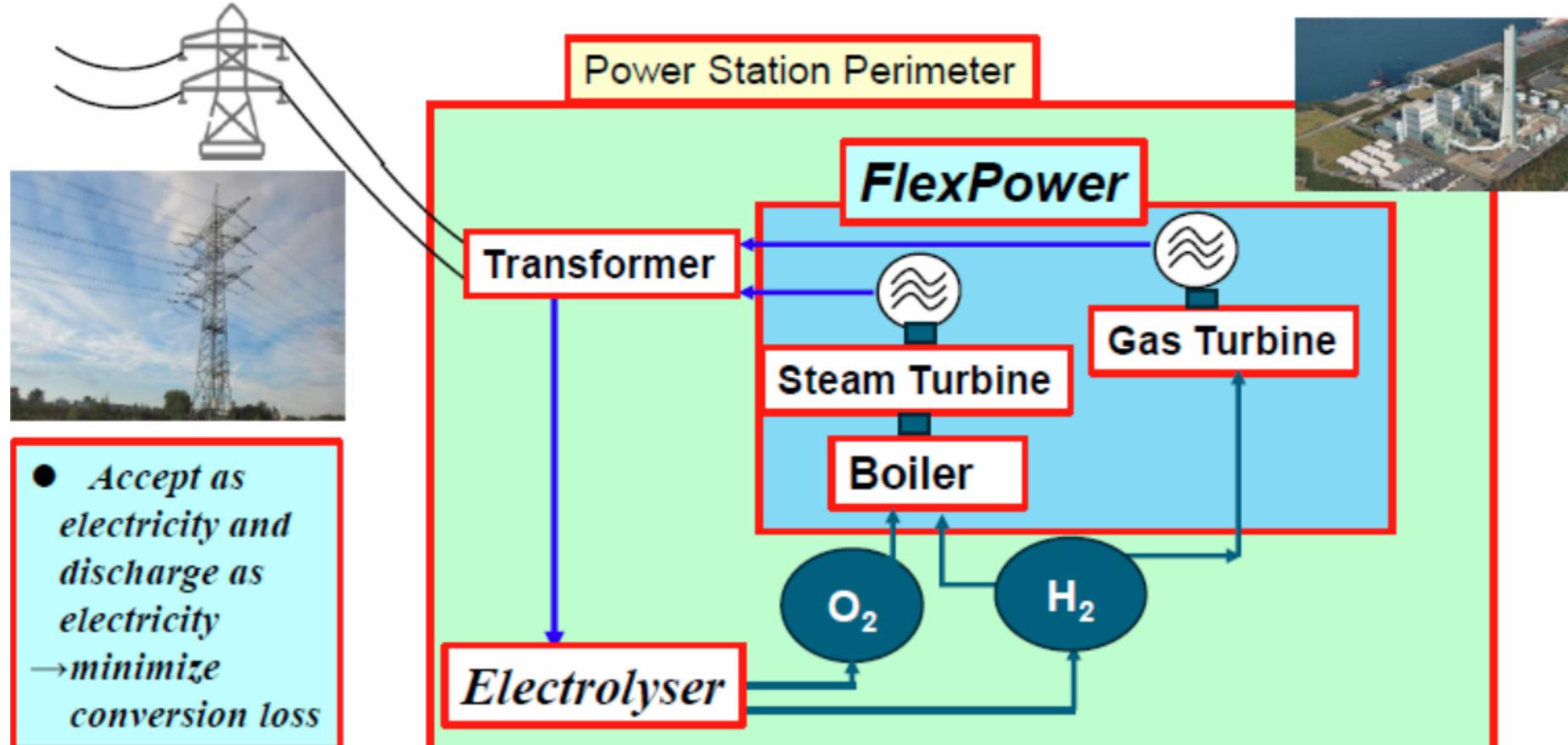
燃種	一般的な在庫日数	特徴
石炭	約30日分	常温で固体であり、保管が容易。
LNG	約10~20日分 ※電力会社の日数、ガス会社は20~30日分	常温で気体であり、保管が難しい。
石油	約200日分	常温で液体であり、保管が容易。

<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-3.pdf>

<https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2023/01.html>

水電解とのハイブリッド

●Conversion will be done within the Boundary



まとめ

■単体では限界

- コスト, フットプリント, 省エネ, CN, セキュリティー, 安全性, …

■様々な組み合わせで

- ダウンサイ징
- 作動流体の混合
- 発熱と吸熱
- 再エネと熱
- …

■単なる組み合わせ以上のメリットを打ち出せるか？

- 流量削減
- 省HFC
- Fuel flexibility
- 電解酸素利用
- …