

究極の高効率発電 トリプル複合発電システム

平成22年6月11日

東京大学 生産技術研究所

低炭素社会実現のためのエネルギー工学
(東京電力)

橋本 彰

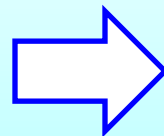
内 容

- トリプル複合発電システムの概要
- 高効率を生み出すエネルギーバランス
- 実用化の課題
- 発電効率と出力
- 石炭ガス化との組合せ
- まとめ

背景

<課題>

- 地球温暖化
- エネルギー問題

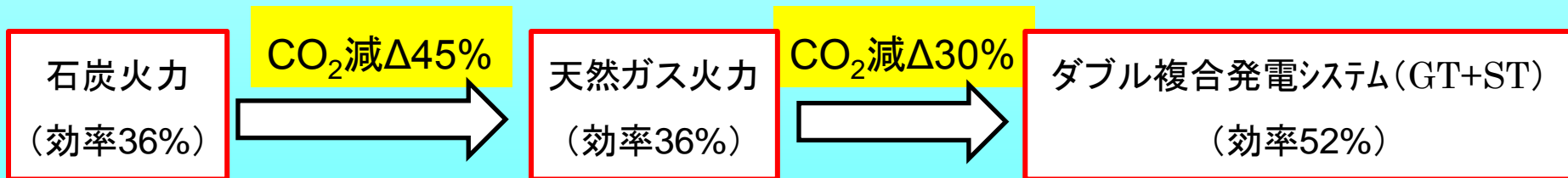


<対策>

- 再生エネルギー
- 原子力発電
- 火力発電システムの高効率化

トリプル複合発電システムの必要性

- 地球温暖化対策のためのCO₂削減



- 現在の日本の天然ガスの発電比率 27%
- 世界中でクリーンでCO₂発生量の少ない天然ガスの需要急増
- 効率を上げて天然ガス輸入量を削減することが必要

CO₂減Δ20%

- 究極の発電効率

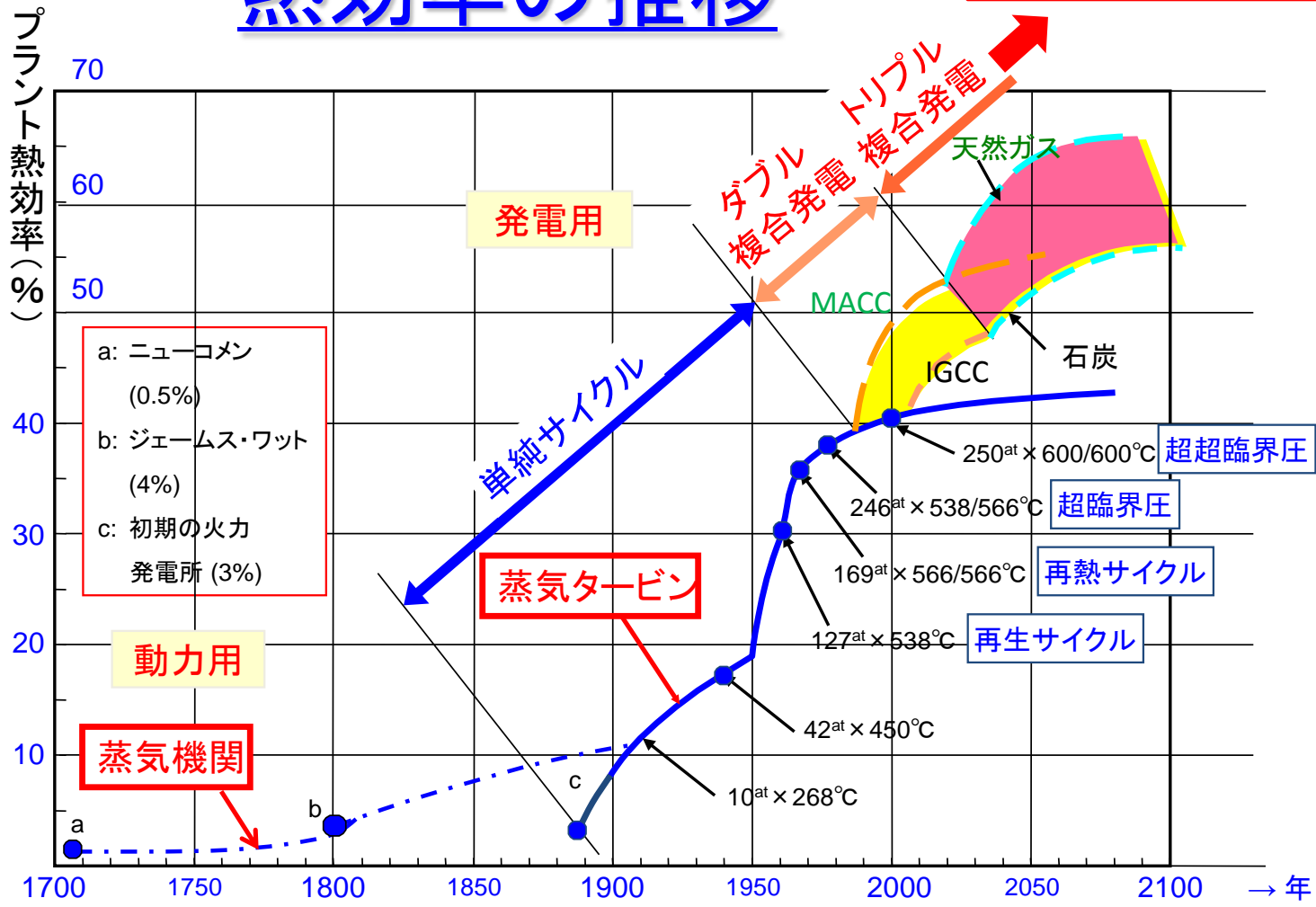


トリプル複合発電システム
(SOFC+GT+ST)
(効率 65%)

注) 効率は、高位発熱量基準、送電端効率

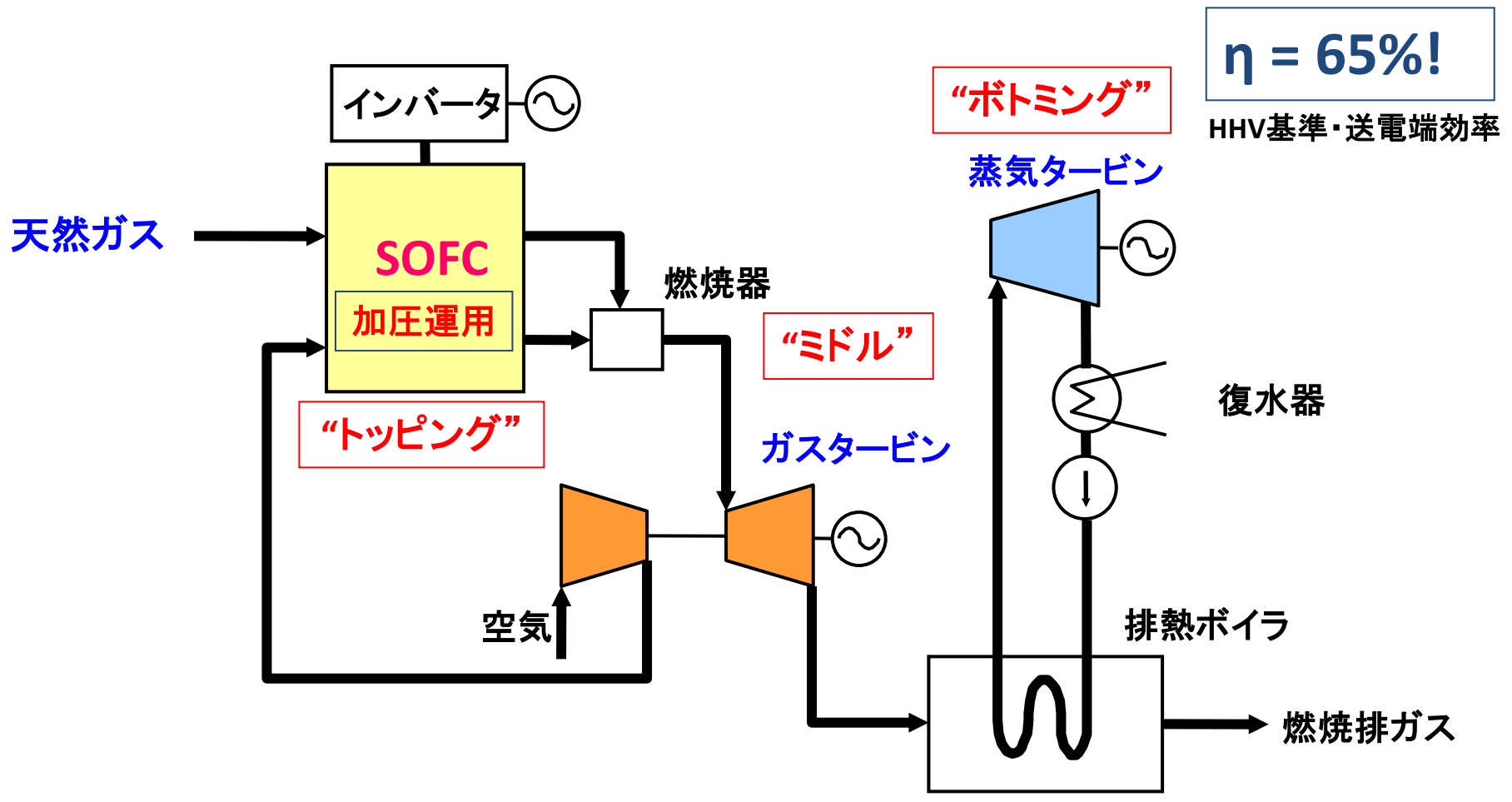
熱効率の推移

固体酸化物燃料電池 (SOFC)
+ ガスタービン + 蒸気タービン



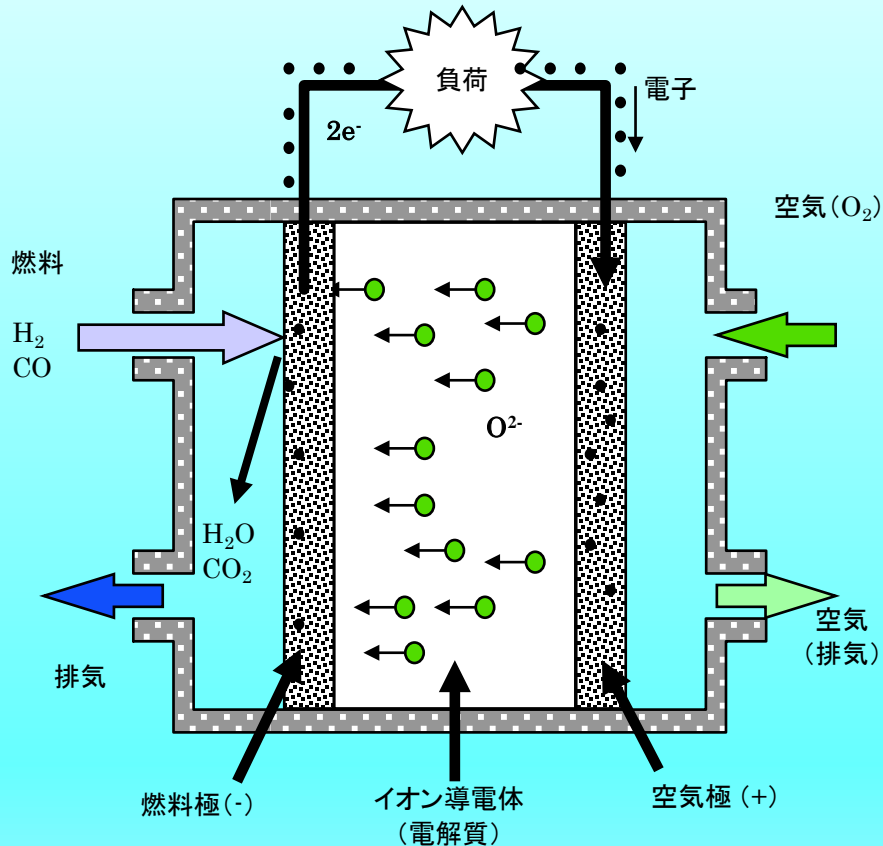
SOFCによるトリプル複合発電システム

(燃料:LNG)



SOFC: Solid Oxide Fuel Cell (固体酸化物形燃料電池)

SOFC(固体酸化物形燃料電池)の原理と特長

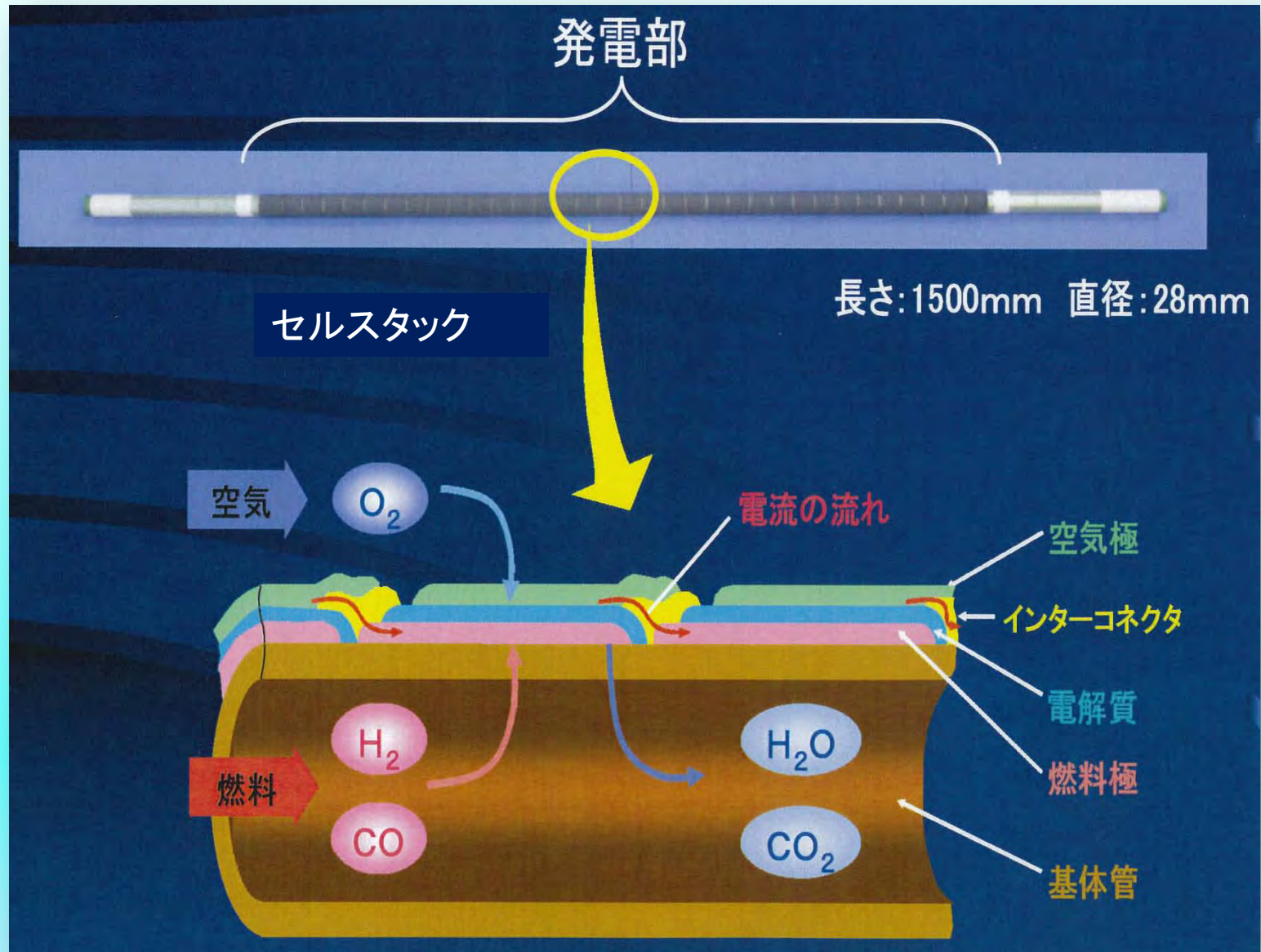


SOFCの原理

SOFCの特長

- 作動温度: $900 \sim 1000^\circ C$
→ガスタービンのトッピングサイクル
- 電解質内を O^{2-} が移動
→ H_2, CO が燃料に使える
→石炭ガス化ガスがそのまま使える
- 内部改質
→種々の燃料に使える
→メタン、プロパンがそのまま使える
- 構成要素がすべて固体
→耐久性・メンテナンス性に優れる

円筒形SOFCの構造例



モジュールの構成例(1/2)

モジュール: ユニット容量の拡張性の高いカートリッジ構成

- カートリッジ: セルスタック(Φ28mm × L1500mm) 104本を千鳥配列
- サブモジュール: カートリッジを4列横並べ

Fuel
(approx. 500°C)

Insulation

Upper lead

Generating portion
(approx. 900°C)



Appearance of sub-module

Insulation

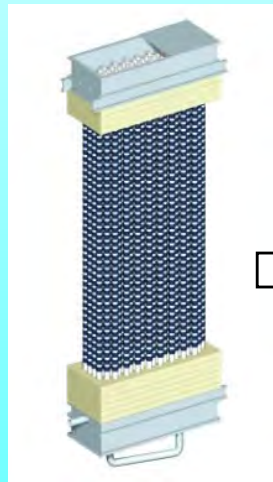
Air
(approx. 500°C)

Lower lead

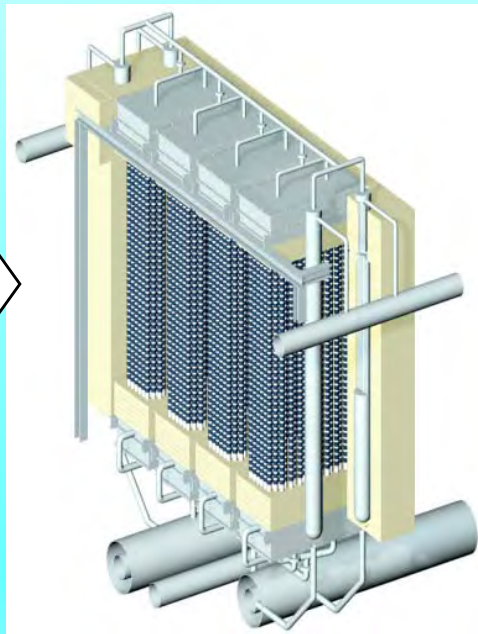
Convection heat transfer
Radiant heat transfer of cells
Cell reaction heat in generating portion
Equilibrium reaction heat of fuel

モジュールの構成例(2/2)

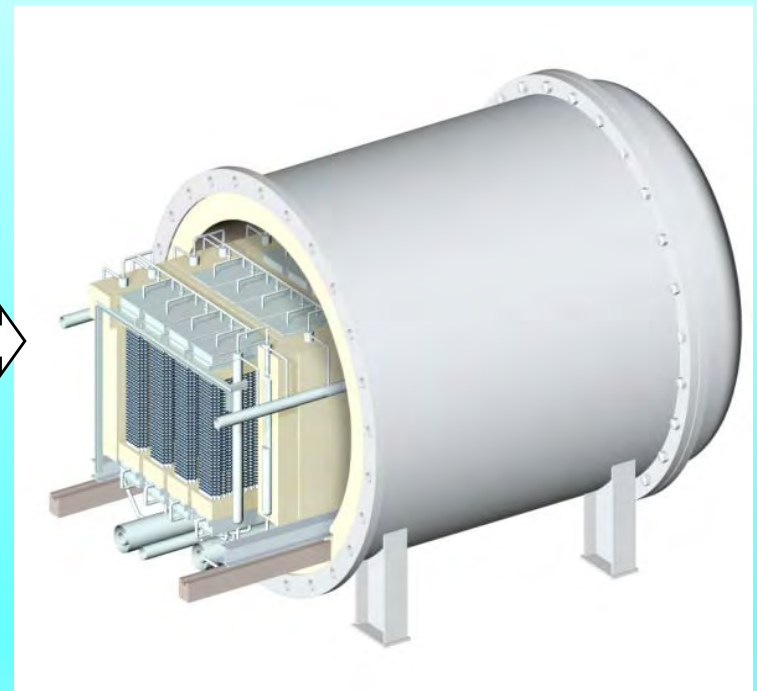
サブモジュールを圧力容器内に配列し、
モジュールを構成



Cartridge
(104 cells)



Sub-module
(4 cartridges)



Module

トリプル複合発電システムの特長(1/2)

1. トッピングサイクルの排熱はミドルサイクルの入熱

- トッピングサイクルで消費したエネルギーは、放熱ロスを除き全て電気エネルギーとなる
- ミドルサイクル・ボトムサイクルは現在、最高効率を示すガスタービン/蒸気タービン複合発電システム(MACC)

⇒ 究極の高効率発電

MACC
53%



トリプル複合発電
65%

HHV,送電端

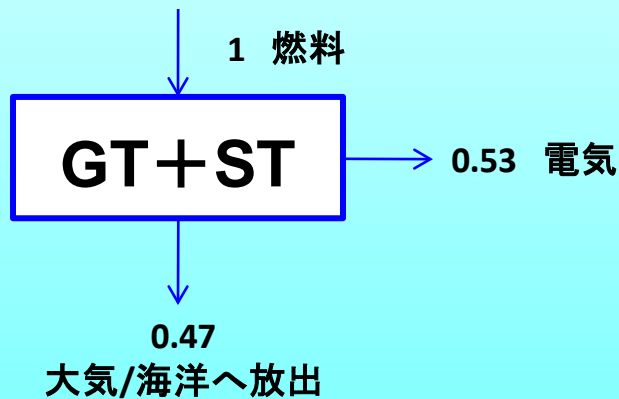
トリプル複合発電システムの特長(2/2)

2. 既設MACCへの追設を想定すると

- 排出ガスの量と温度は変わらない
- 復水器からの放熱量は変わらない
- トッピングサイクル(SOFC)の出力分、
プラント出力が増加する

高効率を生み出すエネルギーバランス

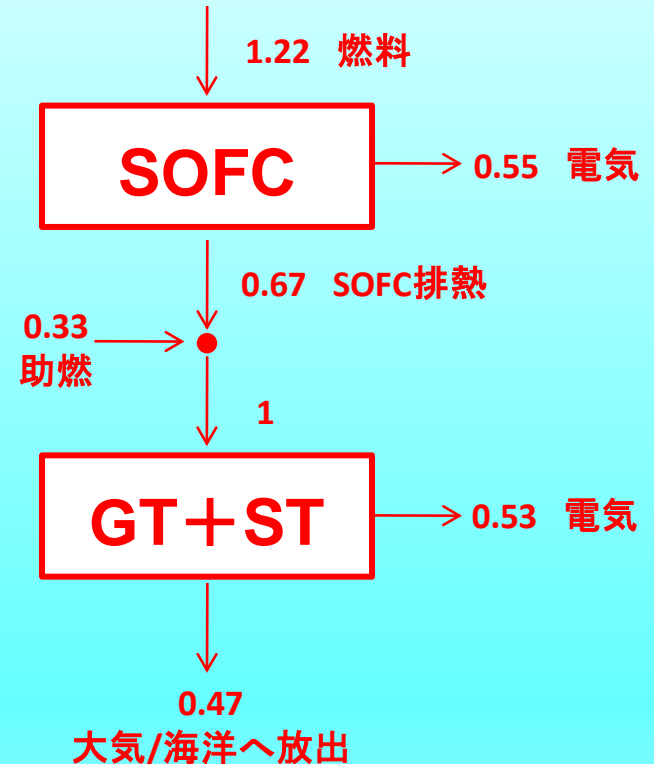
ダブル複合発電システム 1500°C級ガスタービン



$$\text{効率} \quad \frac{0.53}{1} \rightarrow 53\%$$

出力 0.53

トリプル複合発電システム 1500°C級ガスタービン



$$\text{効率} \quad \frac{0.55 + 0.53}{1.22 + 0.33} \rightarrow 70\%$$

出力 0.55 + 0.53 → 1.08(約2倍)

実用化の課題(1/2)

1. 発電原価から推定する目標設備費

	ダブル複合発電システム (円/kWh)		トリプル複合発電システム (円/kWh)
燃料代	4	⇒	3.3
設備費	2	⇒	→3
その他	1	⇒	1
CO2評価 (CO ₂ トン¥5,000)	ベース	⇒	-0.3
合計	7		7

$$\text{設備費} 3\text{円}/kWh \times 1.9 = 2\text{円}/kWh \times 1 + x \times 0.9$$

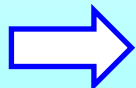
$x = 4.1\text{円}/kWh \implies 20\text{万円}/kW$ をクリアーできるか？

実用化の課題(2/2)

2. 量産技術

MACC 500MW

SOFC 200MW

の組合せ  700MW

セルスタック 200W/本として1,000,000本

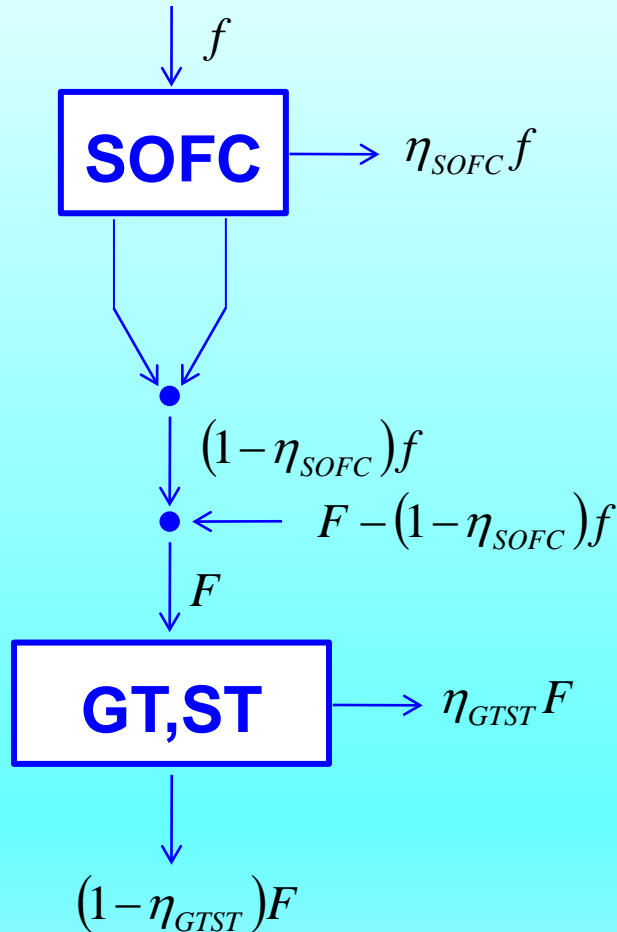
 量産技術が信頼性・価格に及ぼす影響大

3. 耐久性検証

10年以上の耐久性の検証

発電効率と出力比

トリプル複合発電システム（燃料：LNG）



発電効率

$$\frac{\eta_{SOFC} f + \eta_{GTST} F}{f + F - (1 - \eta_{SOFC}) f}$$

出力比

$$\frac{\eta_{SOFC} f + \eta_{GTST} F}{\eta_{GTST} F}$$

トリプル複合発電システム（燃料：LNG）の発電効率

発電効率： η

$$\eta = \frac{\eta_{SOFC}f + \eta_{GTST}F}{f + F - (1 - \eta_{SOFC})f} \quad \dots (1)$$

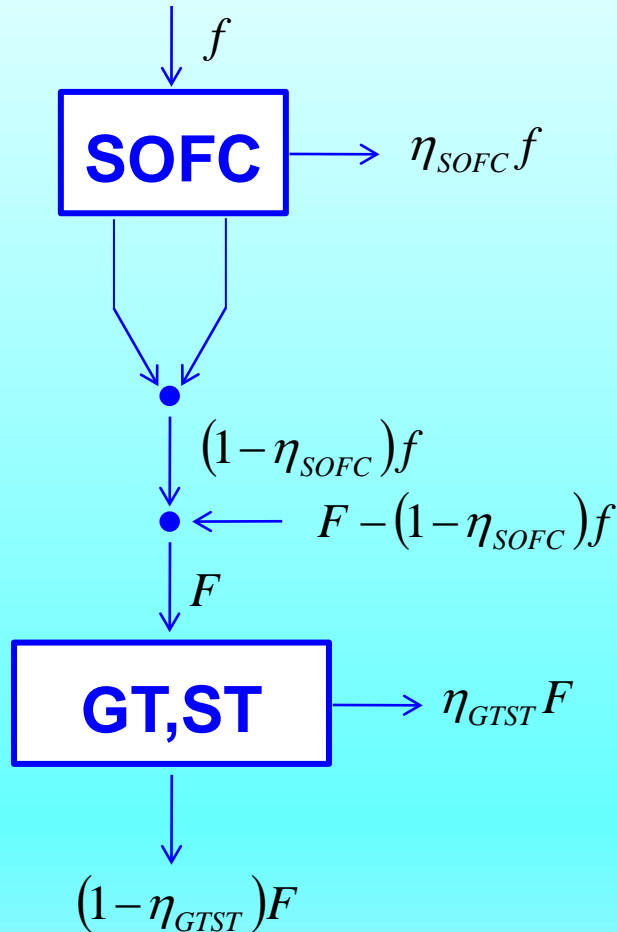
SOFC燃料割合： γ

$$\gamma = \frac{f}{f + F - (1 - \eta_{SOFC})f} \quad \dots (2)$$

(1)、(2)式を変形する。

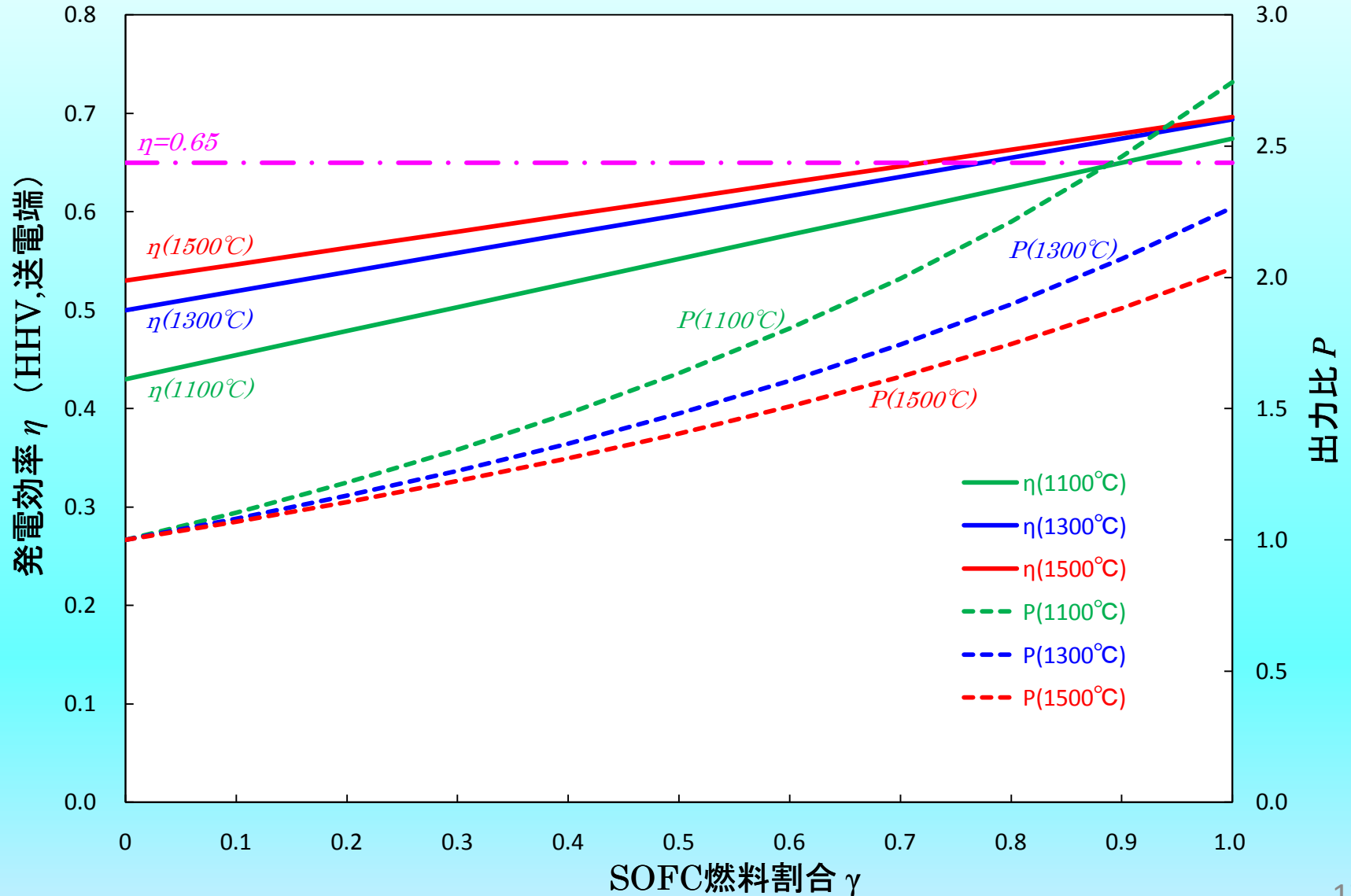
$$\eta = \eta_{SOFC}(1 - \eta_{GTST})\gamma + \eta_{GTST} \quad \dots (3)$$
$$= \eta_{GTST}(1 - \gamma \eta_{SOFC}) + \gamma \eta_{SOFC}$$

$\dots (4)$



発電効率と出力比

トリプル複合発電システム（燃料：LNG）



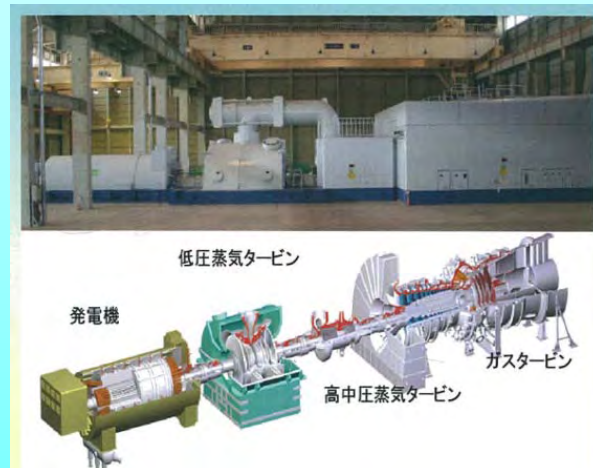
石炭ガス化との組合せ



勿来石炭ガス化
実証プラント



加圧形SOFC
(NEDO委託研究 MHI報告書より)



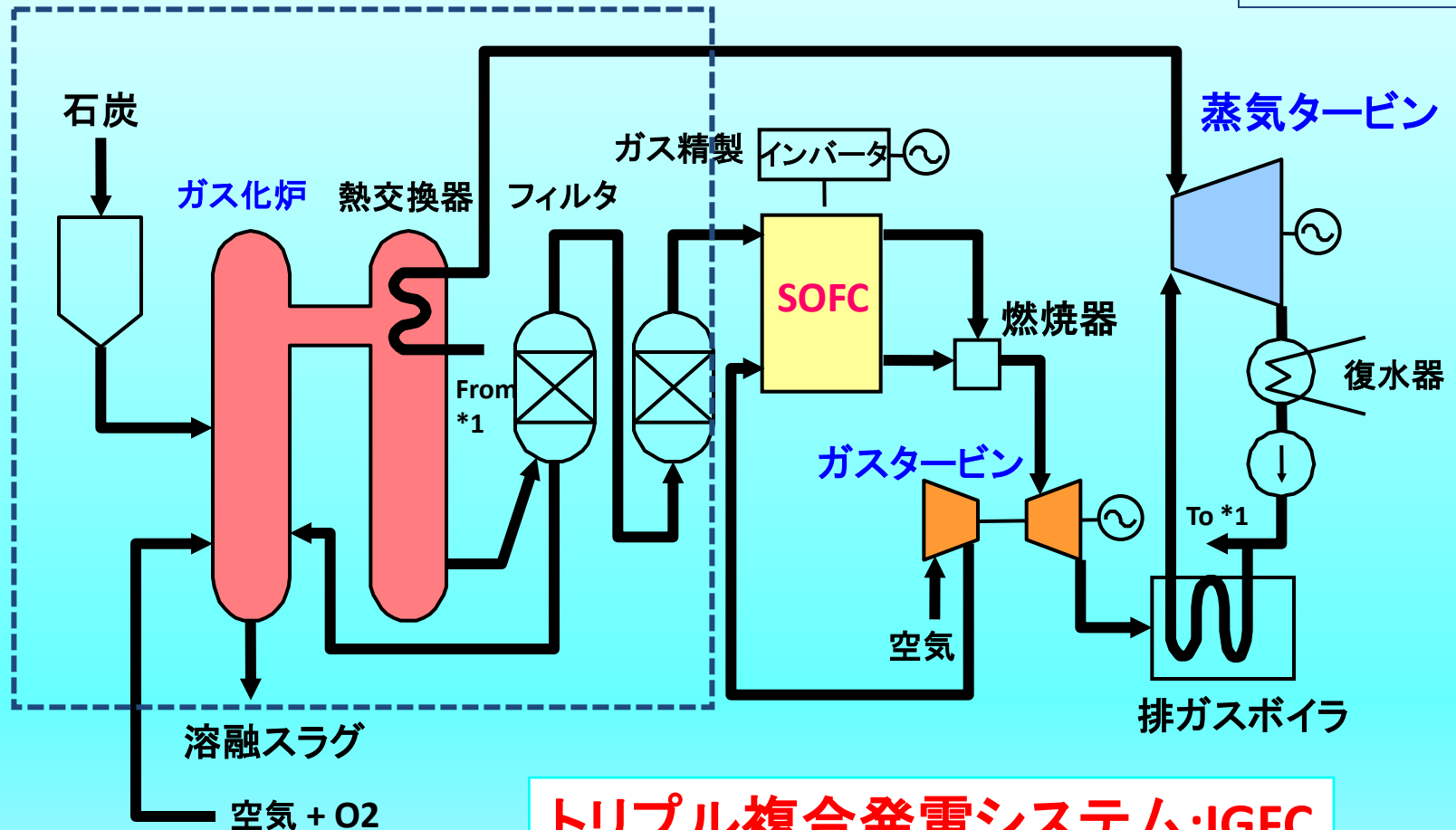
東電川崎
1500°C級ガスタービン
MACC

トリプル複合発電システム(石炭)

(石炭ガス化との組合せ)

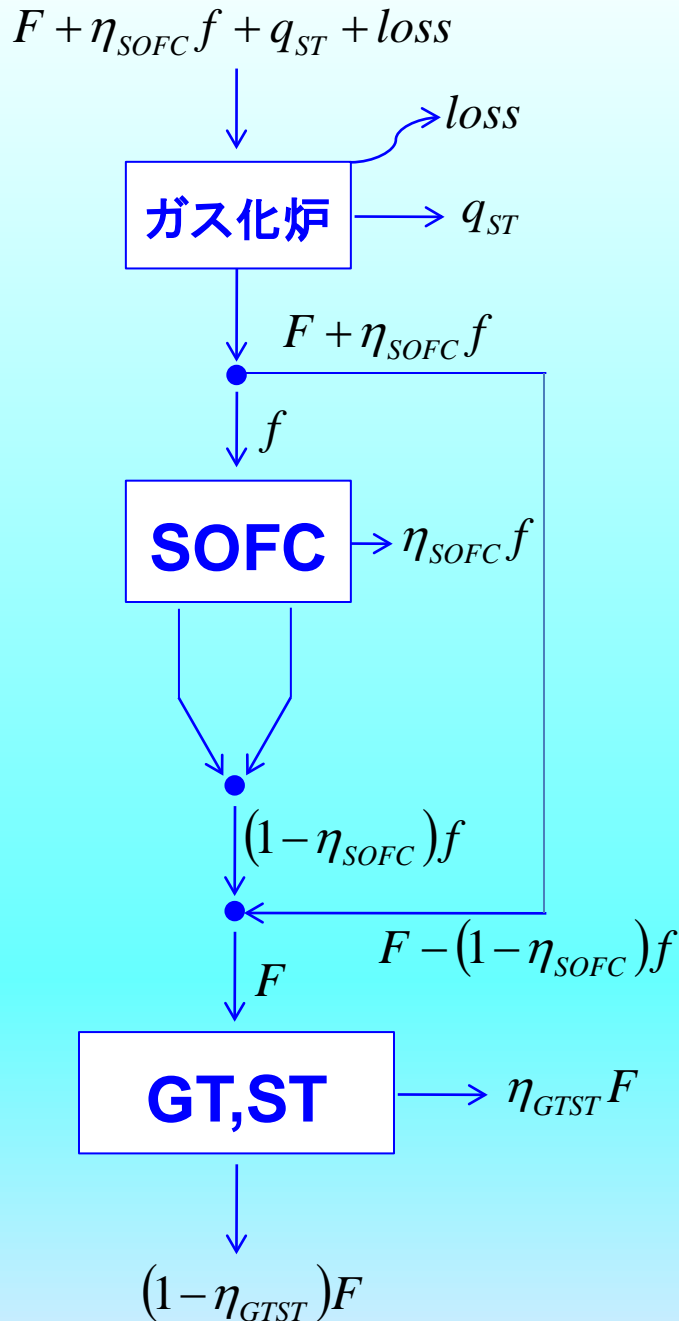
ガス化炉およびガス精製

$\eta = 55\%$!



トリプル複合発電システム:IGFC
SOFCとIGCCの組み合わせ

発電効率と出力比(石炭ガス化)



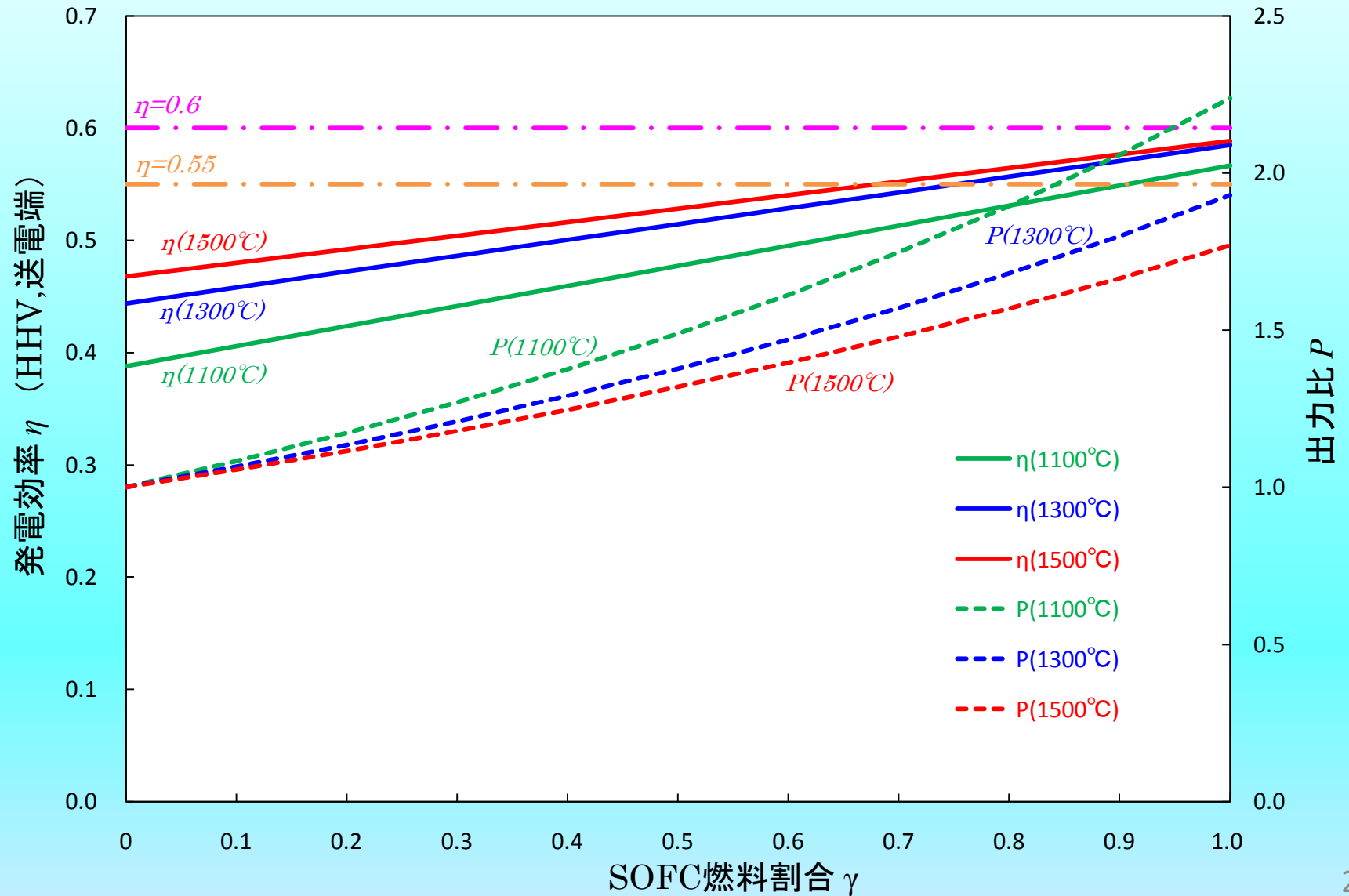
発電効率

$$\frac{\eta_{SOFC} f + \eta_{GTST} F + \eta_{ST} q_{ST}}{F + \eta_{SOFC} f + q_{ST} + loss}$$

出力比

$$\frac{\eta_{GTST} F + \eta_{ST} q_{ST} + \eta_{SOFC} f}{\eta_{GTST} F + \eta_{ST} q_{ST}}$$

発電効率と出力比(石炭ガス化)



まとめ

- トリプル複合発電システムでは65%の発電効率(HHV,送電端)が期待できる。
- 既設MACCへの追設を想定すると出力は1.5～2倍増加するが、排ガス量・温度、復水器からの放熱量など大気/海洋へ放出する熱量は同じとなる。
- 実用化の課題は、設備費、量産技術と耐久性検証。
- 石炭ガス化と組合せると55%の発電効率(HHV,送電端)が期待できる。



御清聴ありがとうございました