

東京大学

先端エネルギー変換工学寄付研究部門

第3回技術フォーラム

# 高効率発電におけるガスタービン技術の進歩



平成22年6月11日

三菱重工業(株)

原動機事業本部長

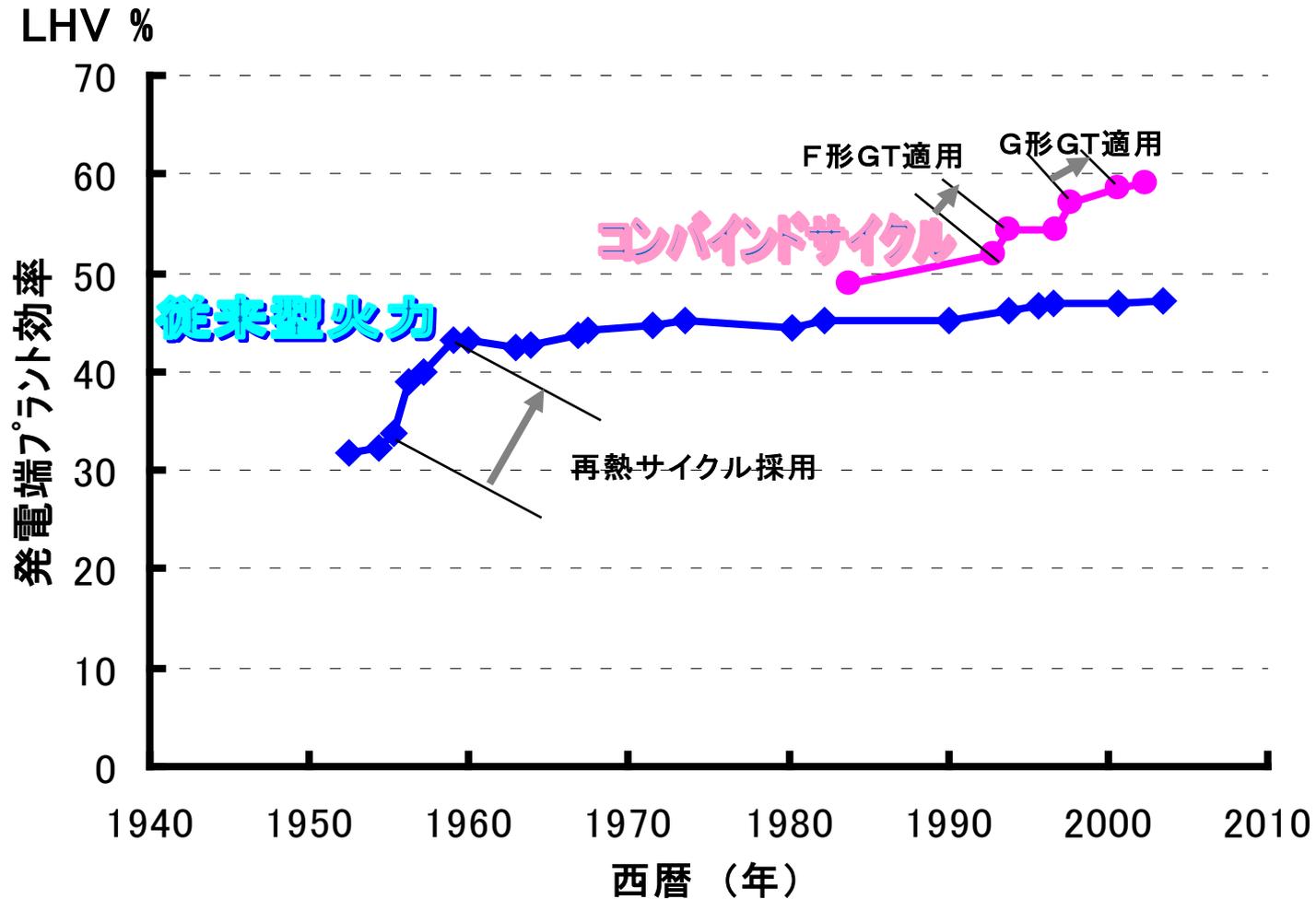
取締役常務執行役員 佃 嘉章

# 目次

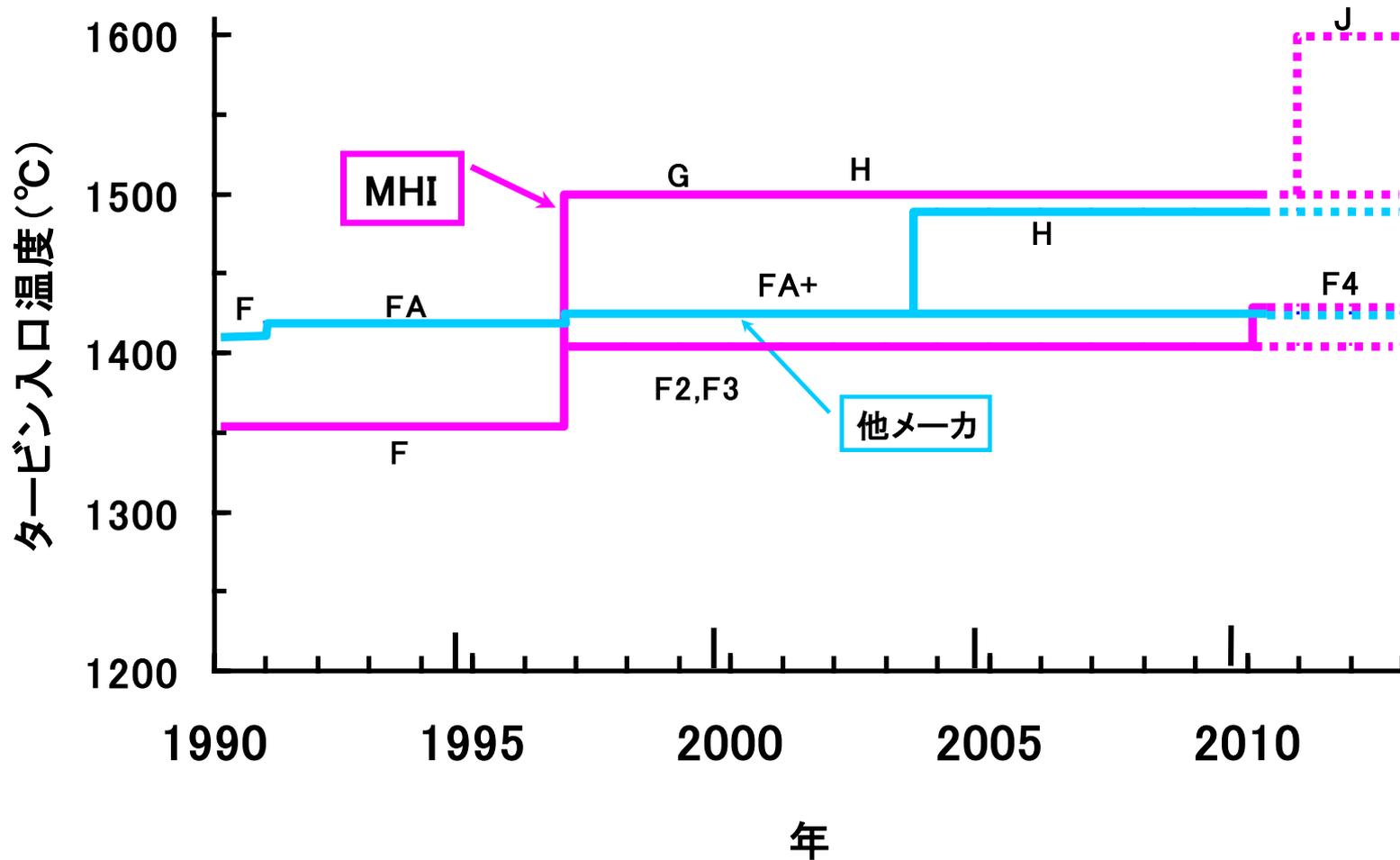
1. 発電方式比較
2. ガスタービンの高温化・高効率化
3. 高効率ガスタービンの要素技術
  - 3-1 高温化
  - 3-2 高効率化
  - 3-3 大容量化
  - 3-4 製造技術
4. 今後の技術開発
5. ガスタービンの応用
  - 5-1 石炭ガス化 IGCC
  - 5-2 BFG焚 GTCC
  - 5-2 原子力 PBMR
  - 5-3 太陽光発電
  - 5-4 燃料電池

# 発電方式と効率

80年代より高効率ガスタービンコンバインドが商用化進展

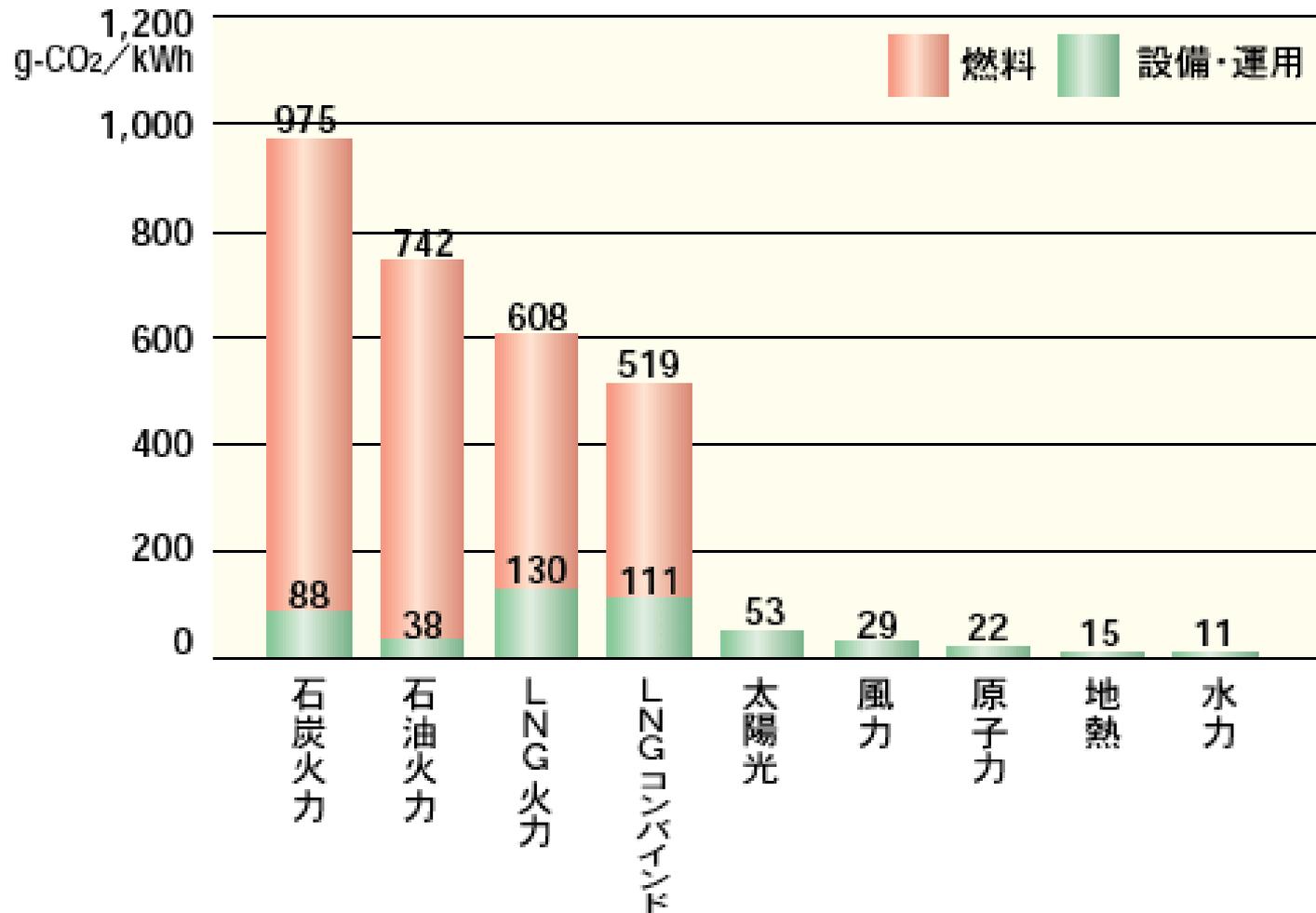


# タービン入口温度の高温化

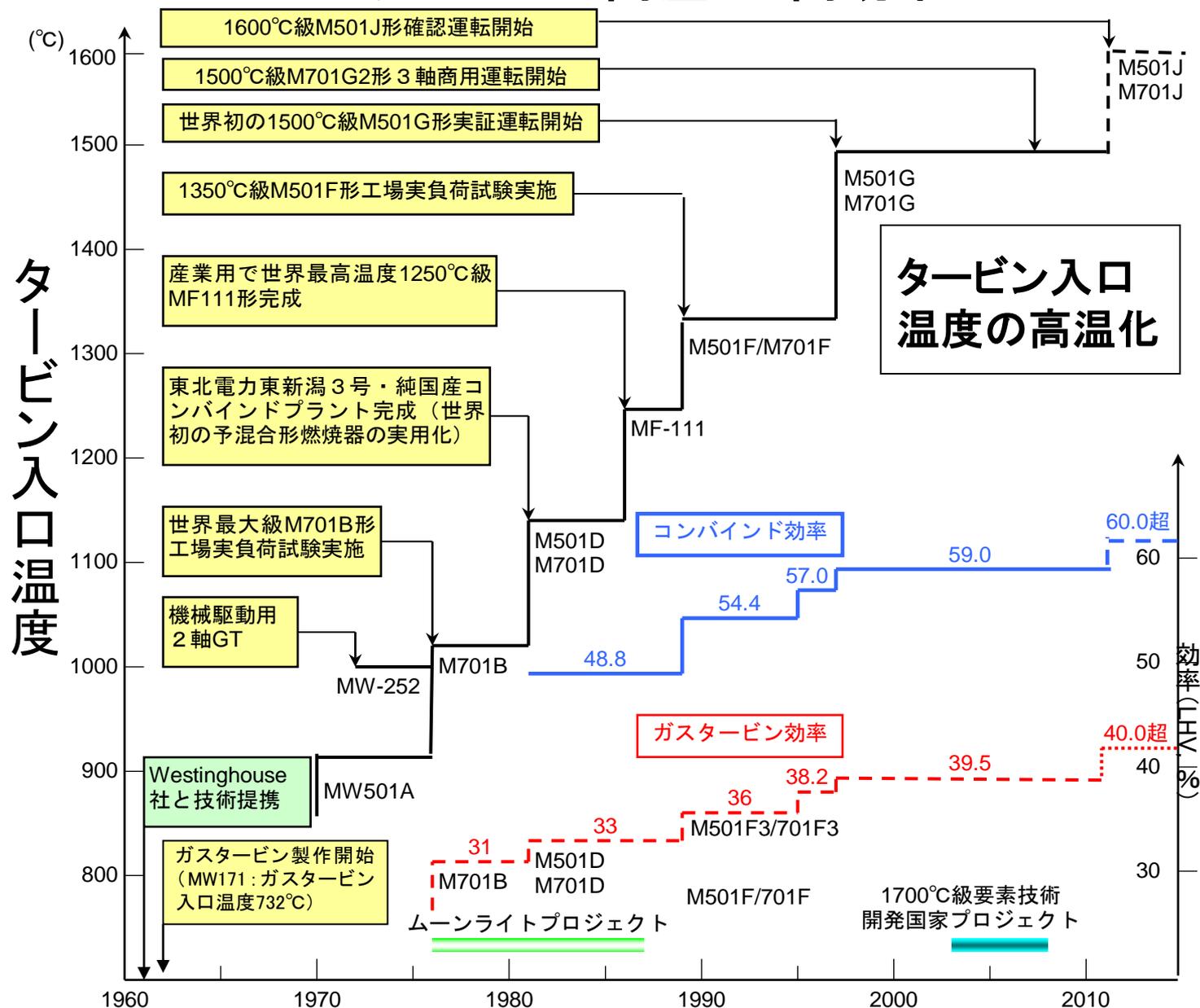


# 発電方式別CO<sub>2</sub>排出量

石炭火力と比べ、LNGコンバインドはCO<sub>2</sub>を50%削減できます



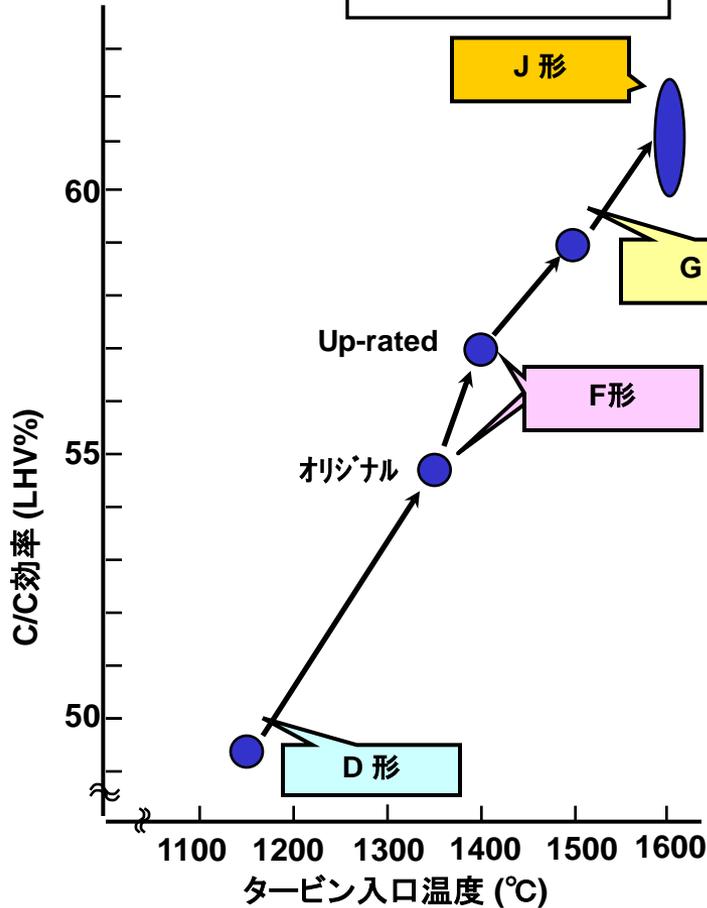
# ガスタービンの高温化・高効率化



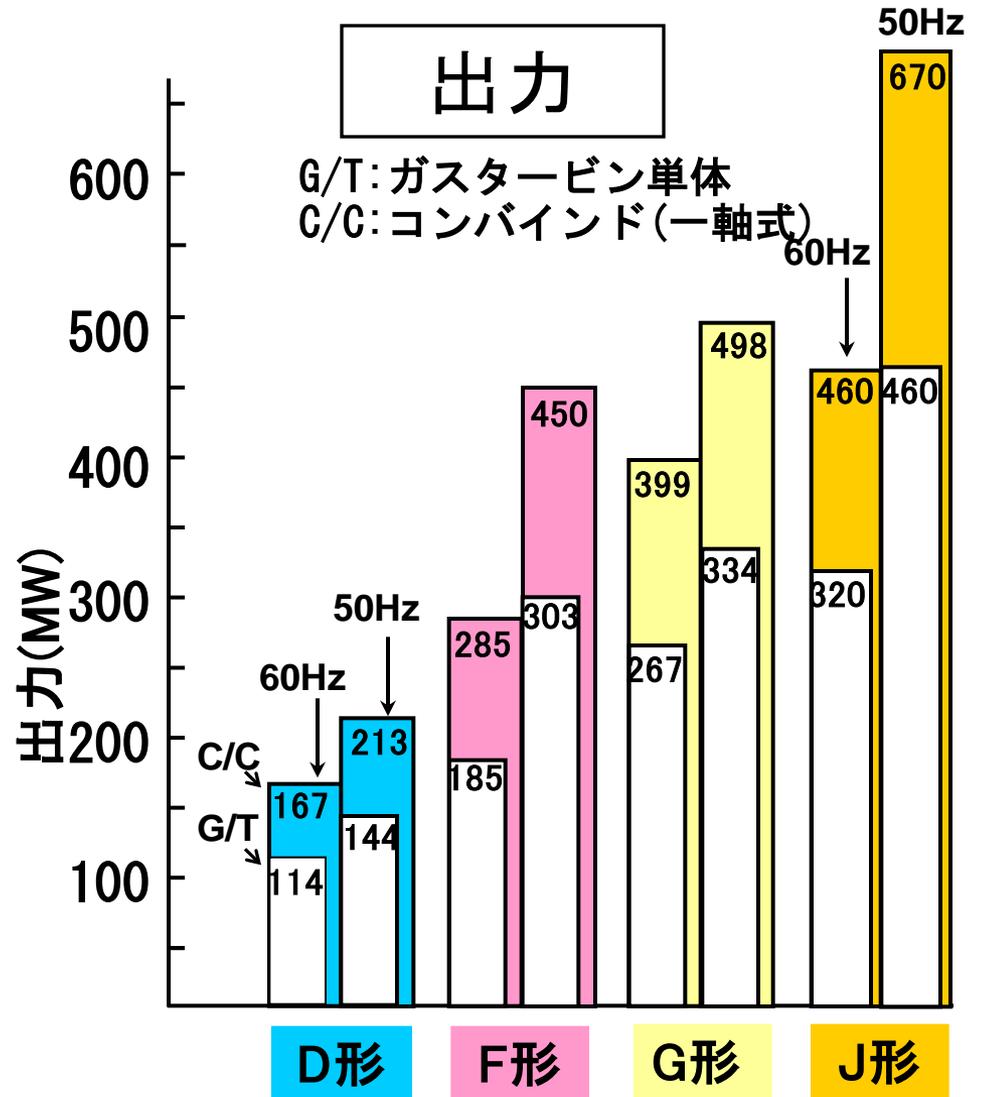
# 大容量GTCC性能

(最新のJ型は60%超)

C/C効率

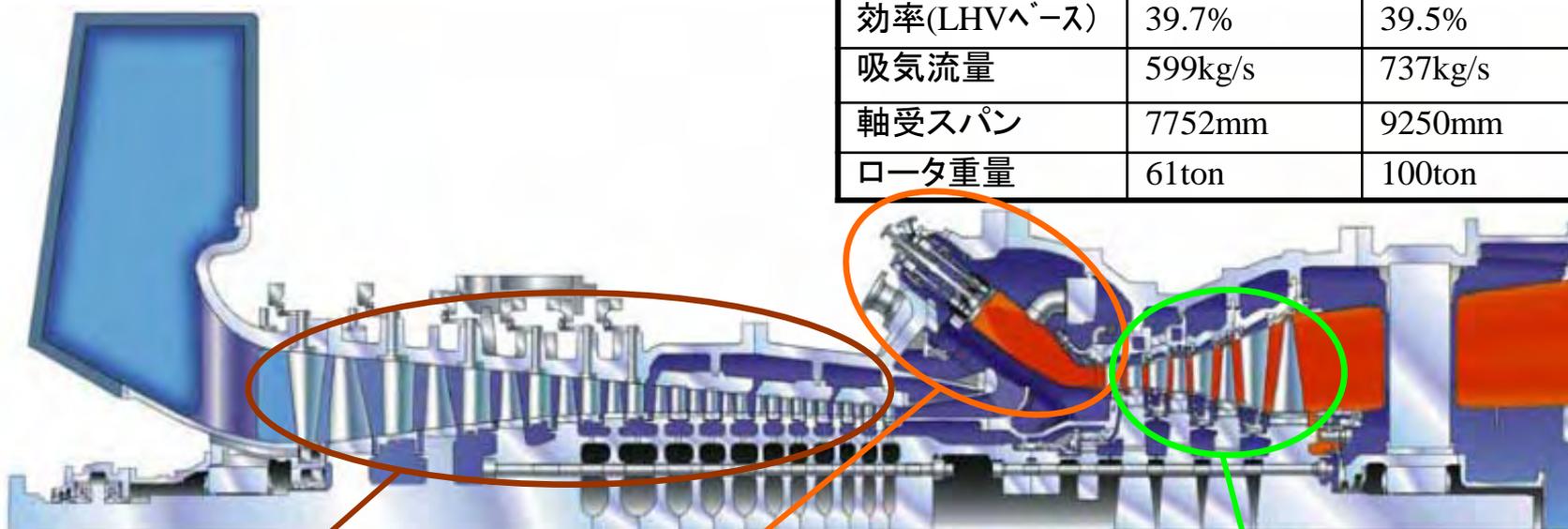


出力



# G形ガスタービンの特徴

	501G (60Hz)	701G (50Hz)
出力(S/C)	267,500kW	334,000kW
効率(LHVベース)	39.7%	39.5%
吸気流量	599kg/s	737kg/s
軸受スパン	7752mm	9250mm
ロータ重量	61ton	100ton



## 圧縮機

段数14 (圧力比21)

### 高性能翼型

高負荷 / 高性能設計



圧縮機第1段動翼

## 燃焼器

本数 20本

- 蒸気冷却
- 予混合ノズル
- 空気バイパス機構



燃焼器

## タービン

段数 4段

- 全面フィルム冷却
- TBC (Thermal Barrier Coating)
- 一方向凝固翼
- 3次元翼型



第1段静翼

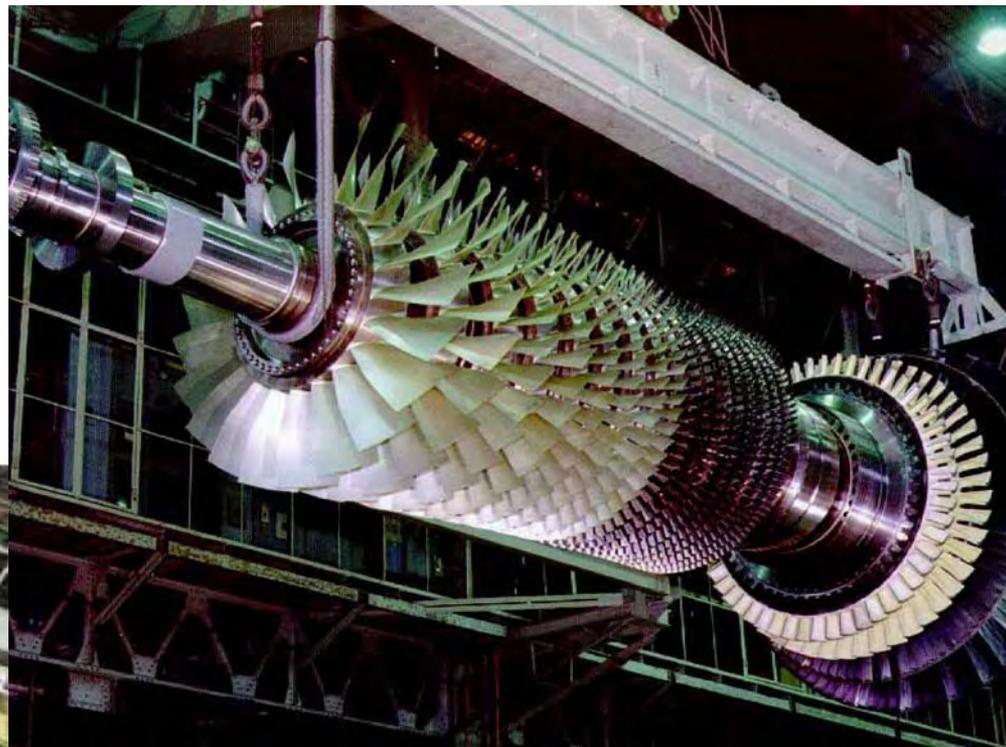
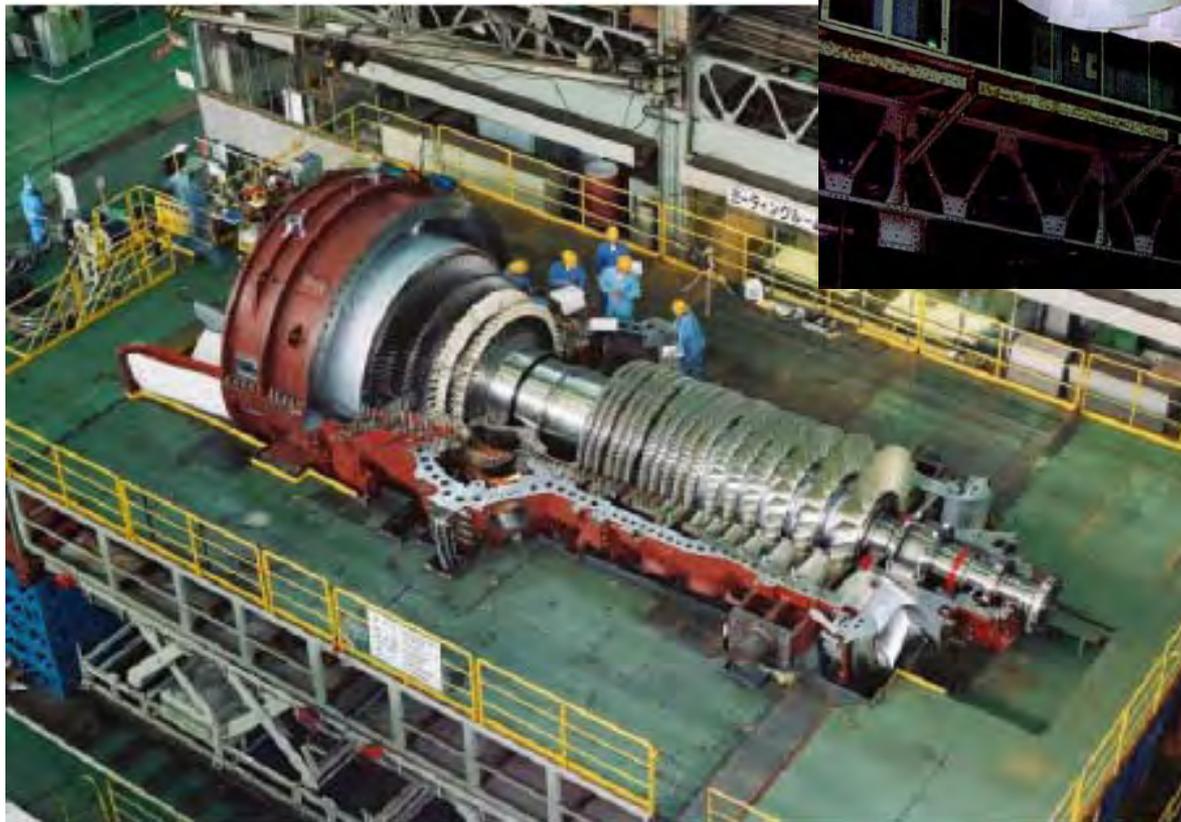


第1段動翼

\*CDA:  
Controlled  
Diffusion  
Airfoil

\*\*MCA:  
Multi  
Circular  
Arc

# G型ガスタービン ローター



# Best Gas-fired Project受賞

当社のM701G2プラントが「Project of the Year Awards 2008」の「Best Gas-fired Project(本年度運開プラントの世界ー)」に選出。

(Power Engineering社主催)



(2008年12月1日)

- M701G2ガスタービンを採用。
- C/C効率 59.1%。
- NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>排出量が少ないことが評価された。



# 日本発の技術でCO2削減に貢献

G形ガスタービン技術

国家プロジェクト

1700℃級高温ガスタービンの要素開発

➤ 国家プロジェクトと自社技術により開発完了・商用化に着手

➤ 世界最大出力・最高水準効率

ガスタービン出力 : 約32万kW

コンバインド出力 : 約46万kW

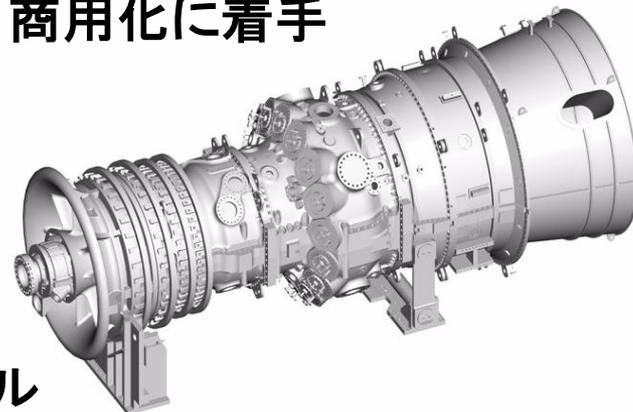
発電端熱効率 : 60%(LHV)以上

(60Hz機,ISOベース)

➤ 窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)の発生も従来機と同レベル

～同規模の石炭焼き火力発電と比較し、CO<sub>2</sub>排出量を約50%低減可能(当社比)～

➤ 平成23年度(2011年)出荷案件からの商談に対応可能



日本から発信する最新技術で、世界のCO2削減に貢献

# 今後の技術開発動向(ガスタービンの更なる適用拡大)

1) 天然ガス焚コンバインドサイクル  
更なる高温化／高効率化



1700°C級ガスタービン  
熱効率：62% LHV以上

2) 燃料多様化による  
発電コストの低減



石炭ガス化コンバインドサイクル  
(IGCC)

3) 燃料電池を利用した  
更なる高効率化



燃料電池  
ハイブリッドコンバインドサイクル

4) 安全な原子力利用



原子力利用ヘリウムガスタービン  
(PBMR)

5) 自然エネルギーに  
よるCO2ゼロ発電



太陽熱ガスタービン

# 3. 高効率ガスタービンの要素技術

## ガスタービンの技術進歩

### 3-1 高温化

- － 燃焼技術 低NO<sub>x</sub>化
- － 冷却技術
- － 材料技術

### 3-2 高効率化

- － タービン空力技術

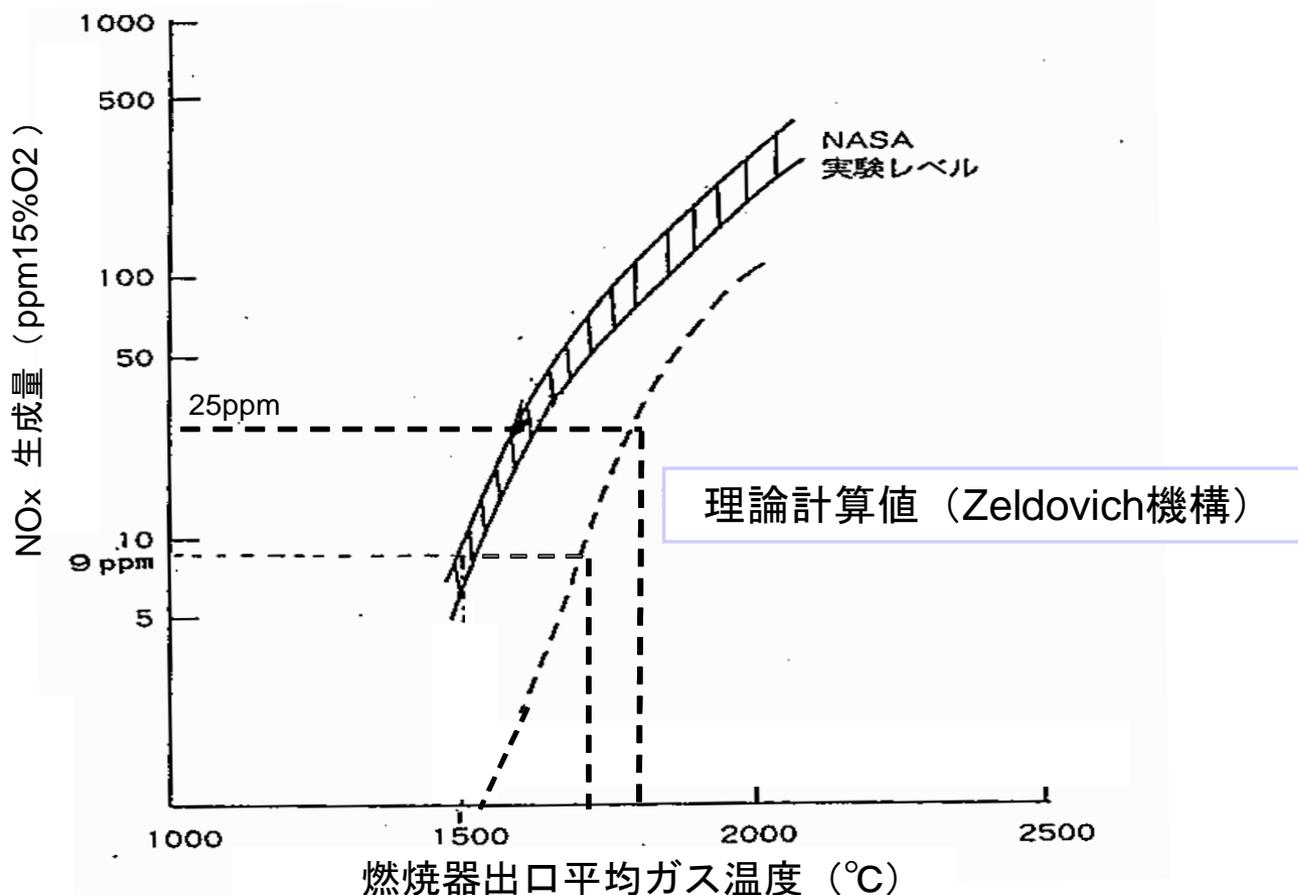
### 3-3 大容量化

- － 圧縮機空力技術

### 3-4 製造技術

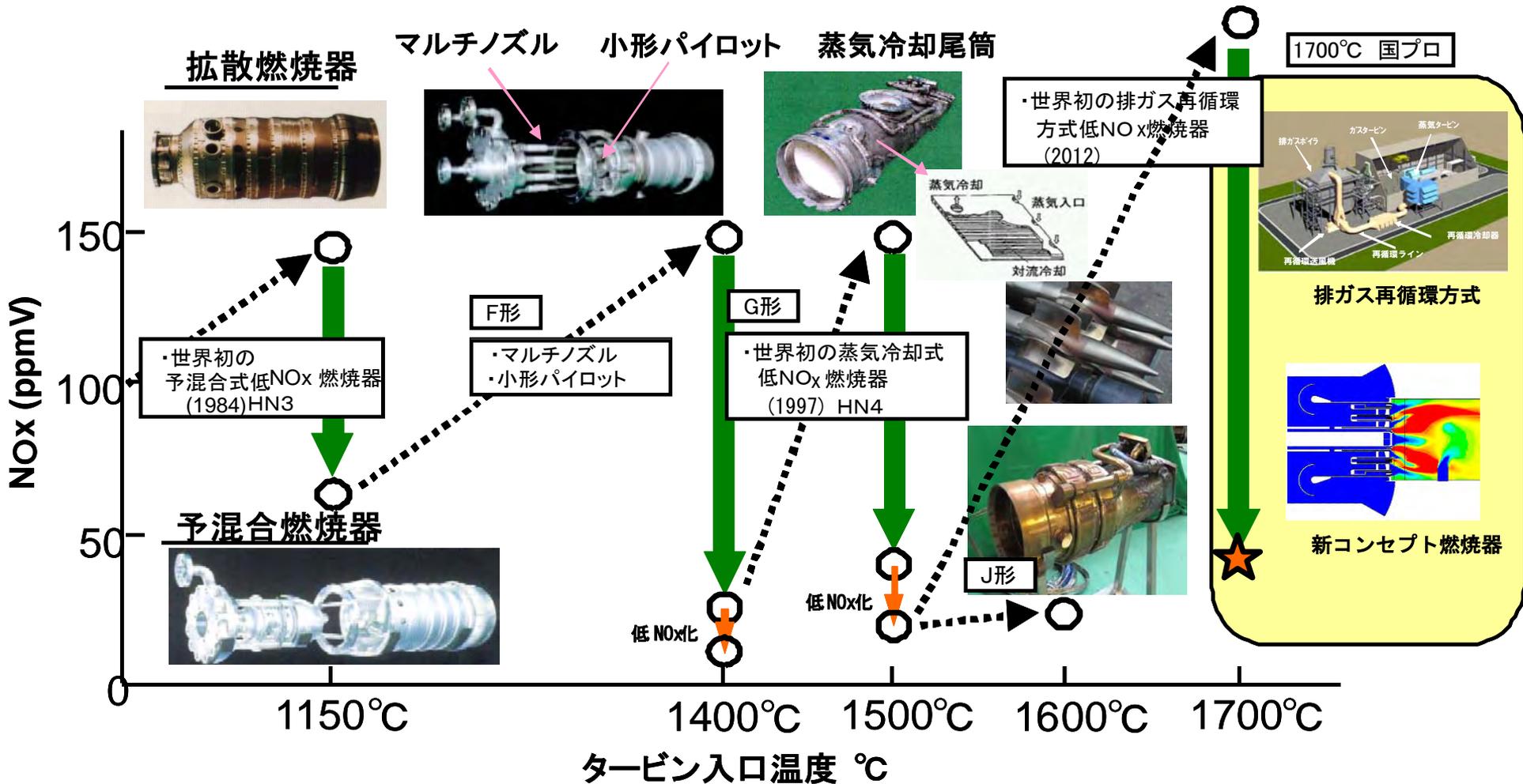
# NO<sub>x</sub>生成

- サーマルNO<sub>x</sub>は理論的には1500°C以上で顕著に生成
  - NO<sub>x</sub>:9ppm以下・・・1700°C以下にガス温度抑制必要
  - 25ppm以下・・・1800°C以下にガス温度抑制必要
- このため予混合燃焼とすることで、混合気の均一化、低温燃焼を達成



# 高温化と低NO<sub>x</sub>燃焼器開発の変遷

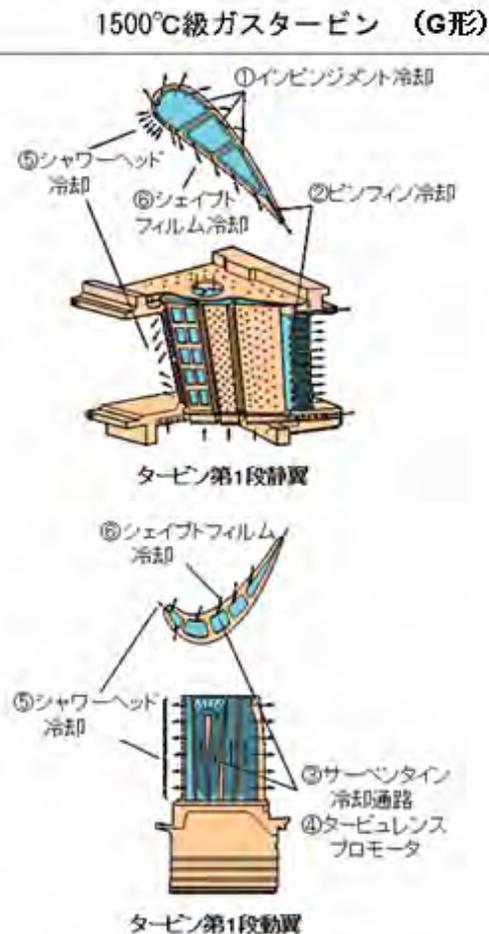
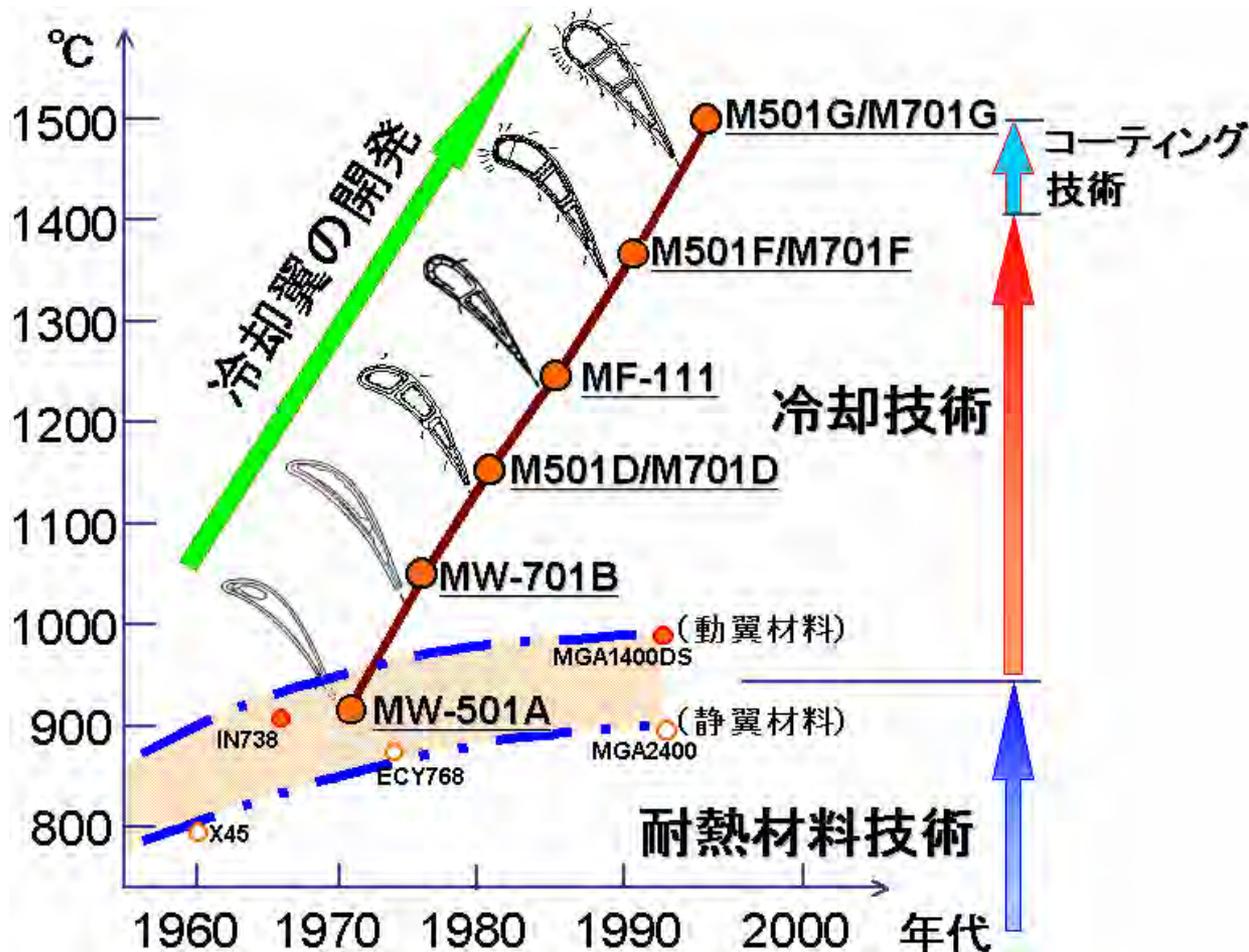
燃焼器出口ガス温度の上昇に対し、NO<sub>x</sub>は指数関数的に上昇するが、新技術の適用により低NO<sub>x</sub>化を達成してきた。



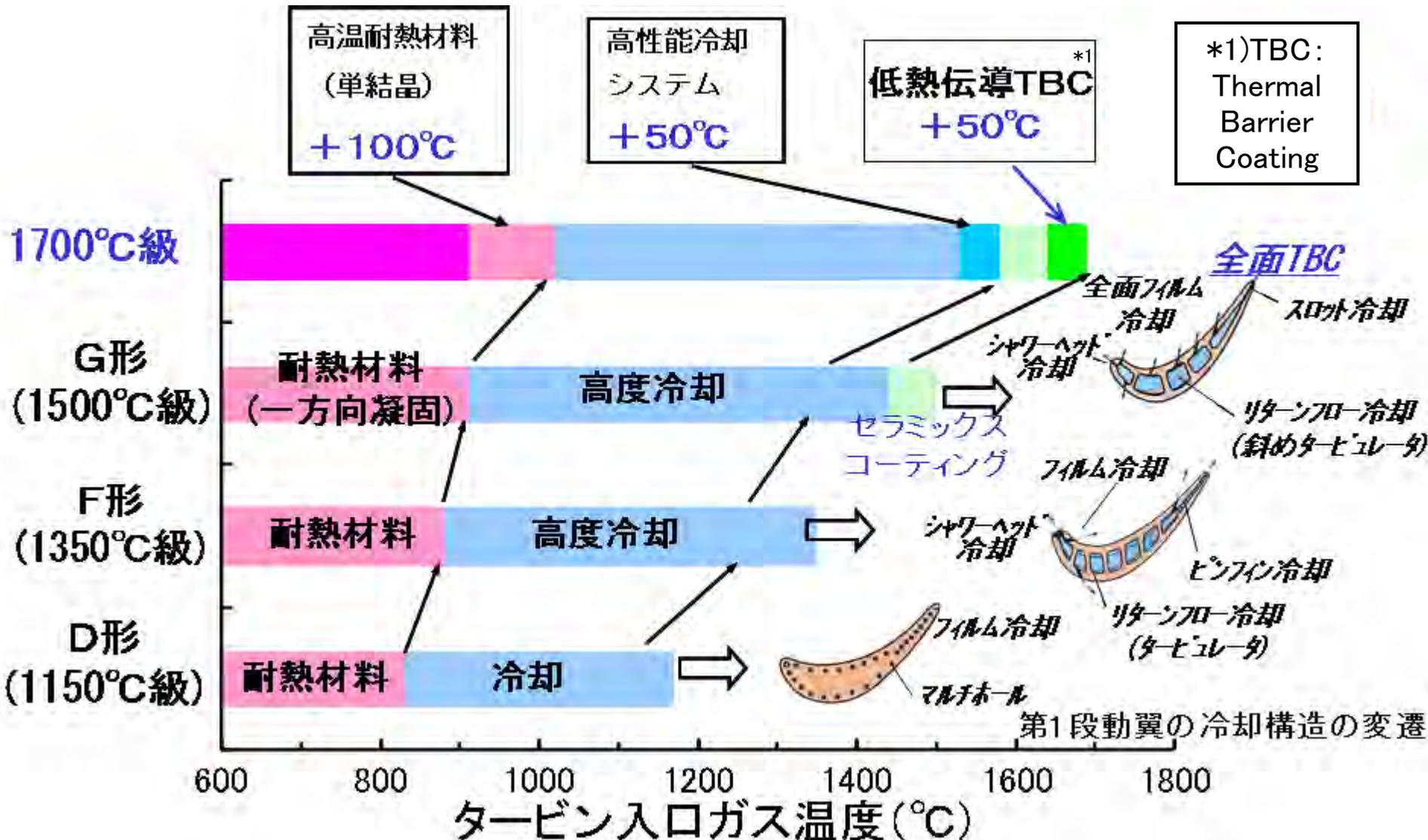
# 高性能冷却システム

## 高温化に対する冷却技術の役割

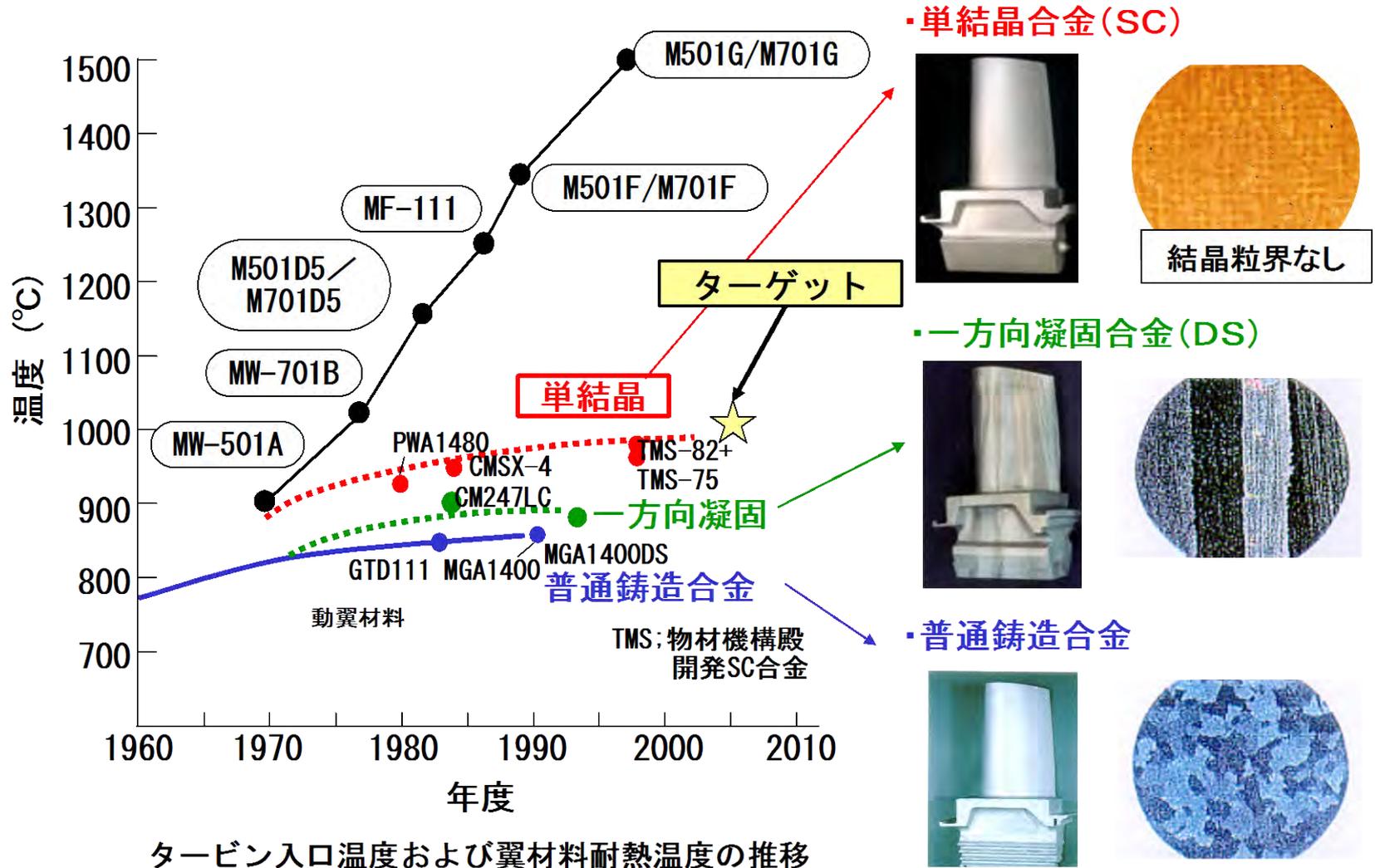
高温化に伴い冷却空気の増加が必要となりますが、高性能冷却方式を採用し、冷却空気の増加を抑制



# 高温化達成のための要素技術の役割

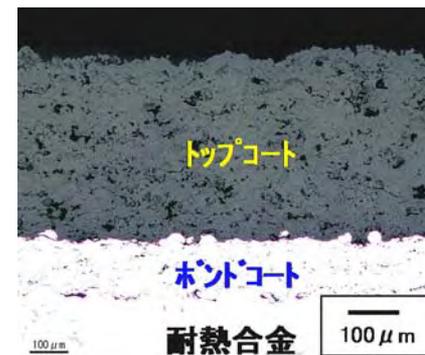
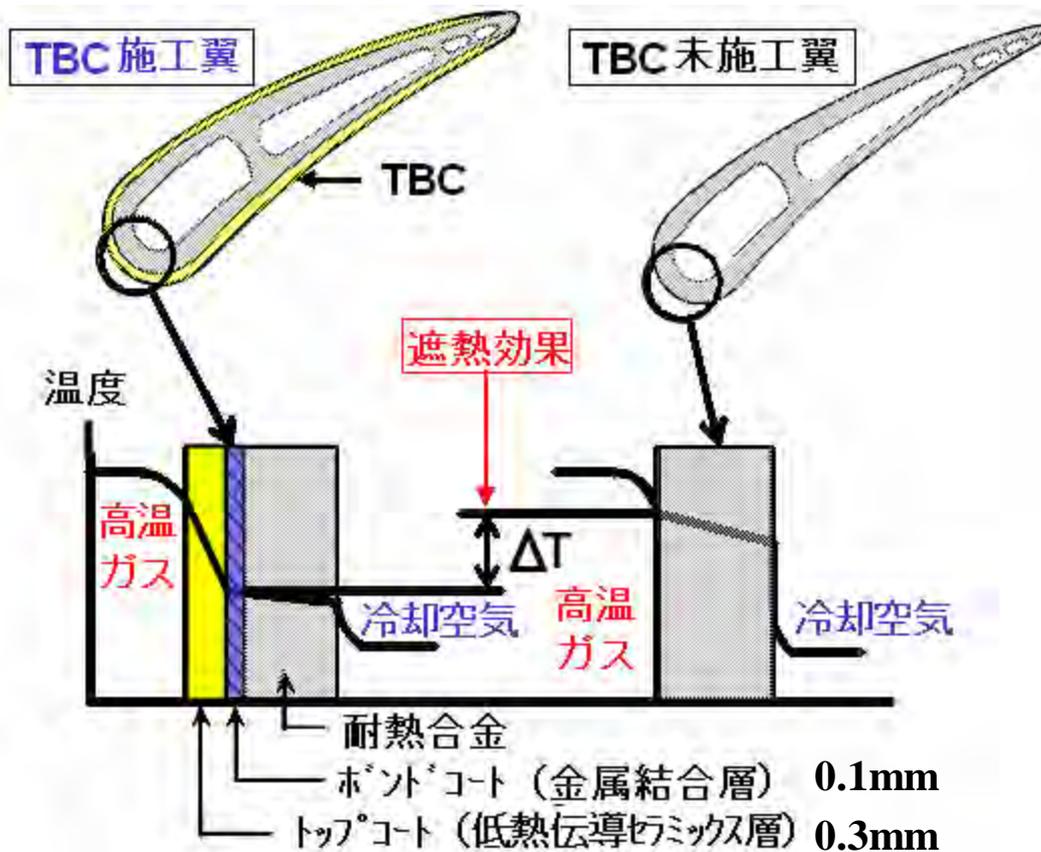


# 高温化と耐熱材料開発の変遷



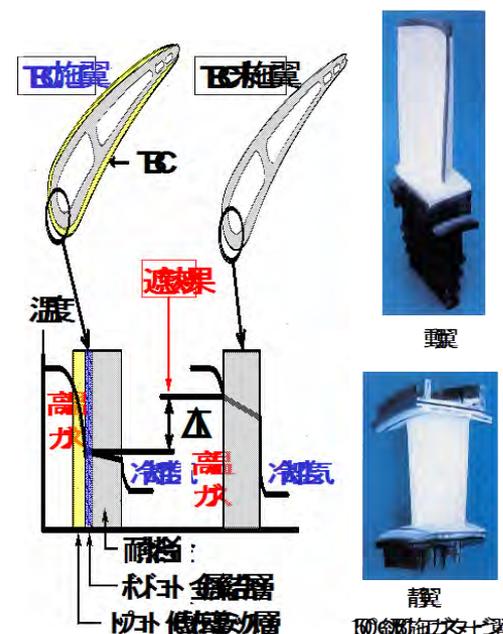
# 低熱伝導率遮熱コーティング

## TBCの遮熱原理とTBC施工翼の例



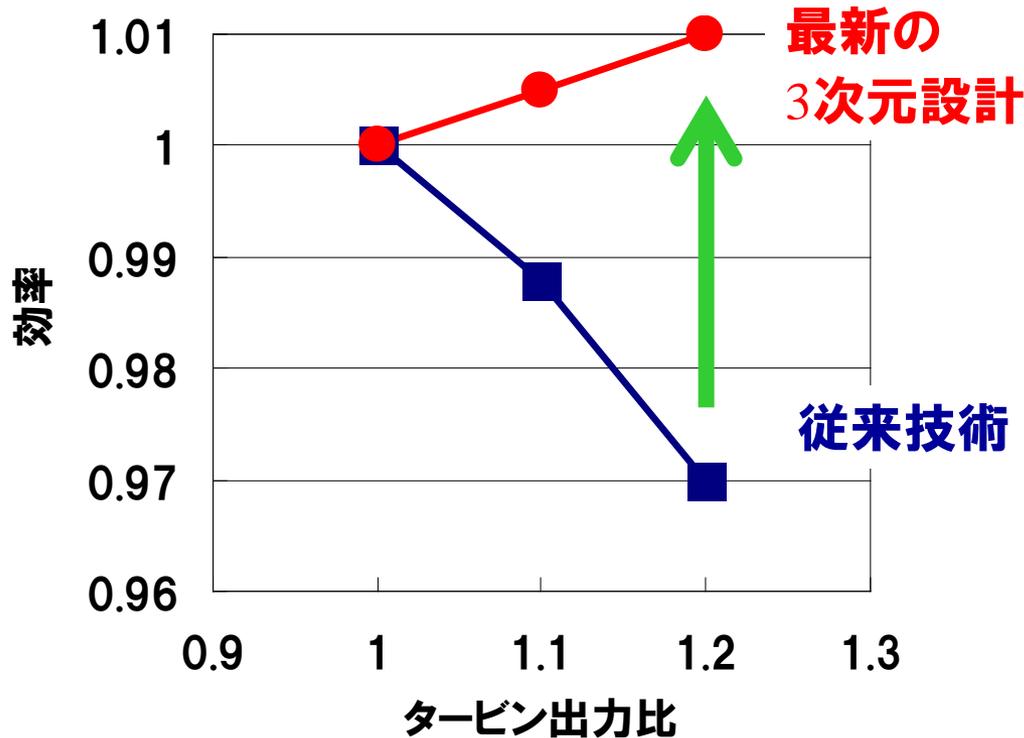
TBCのマイクロ組織

トップコートは低熱伝導率のセラミックス層で構成されている。  
ボンドコートは耐熱合金とトップコートとの間に形成される。  
耐熱合金は高温ガスにさらされるため、酸化防止層として機能する。



# 高負荷・高性能タービンの開発

## 高温化に対するタービン高性能化の役割

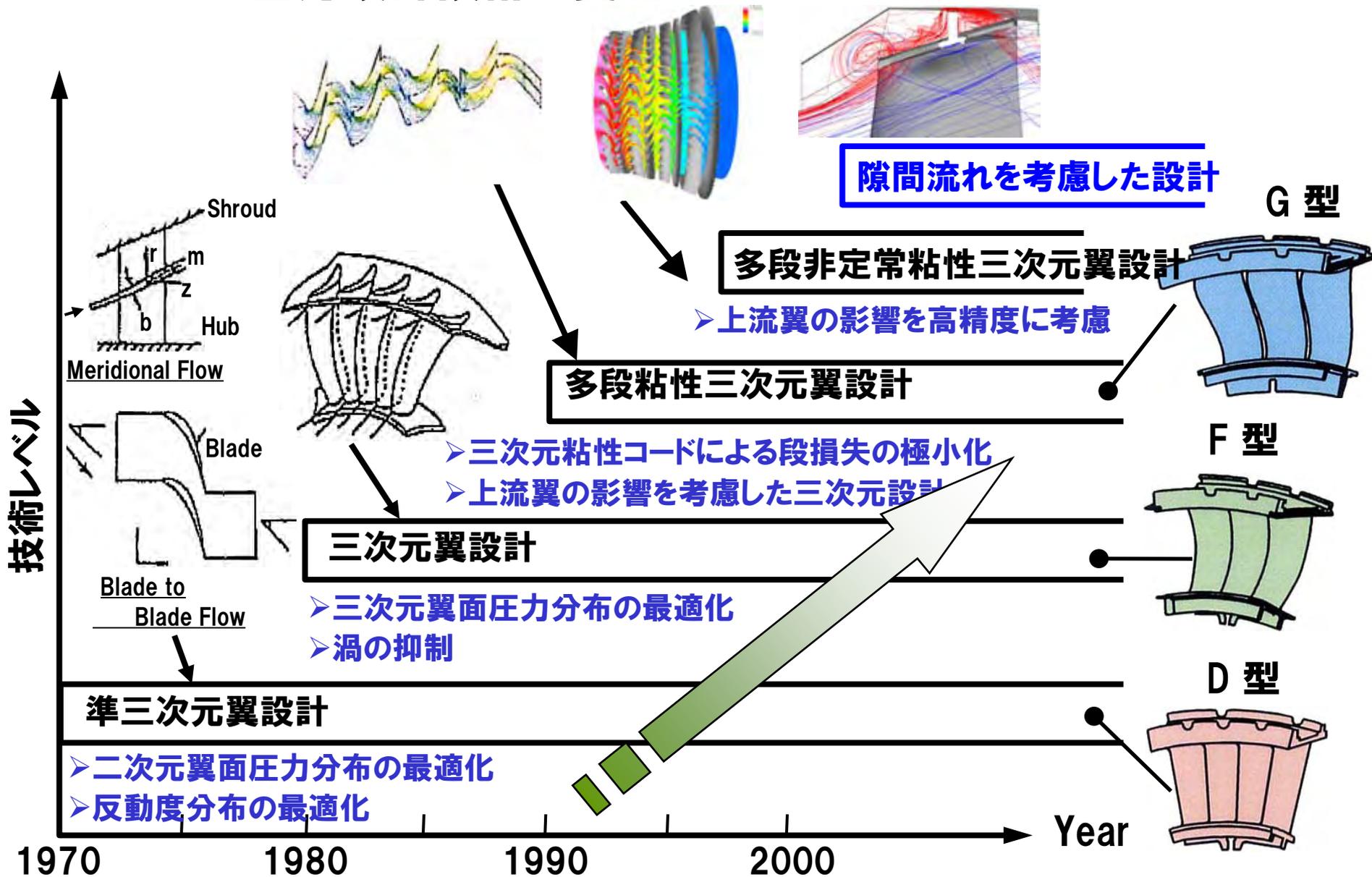


- 高負荷高性能翼の開発
  - －翼列試験
- 3次元エンドウォール翼の開発
  - －低速回転翼列試験による2次流れの現象解明
  - －シミュレーションによる2次流れ低減のコンセプト検討
  - －高速回転翼列試験による高マッハ数域での性能向上量確認
- 高精度多段非定常流れ解析技術の検証

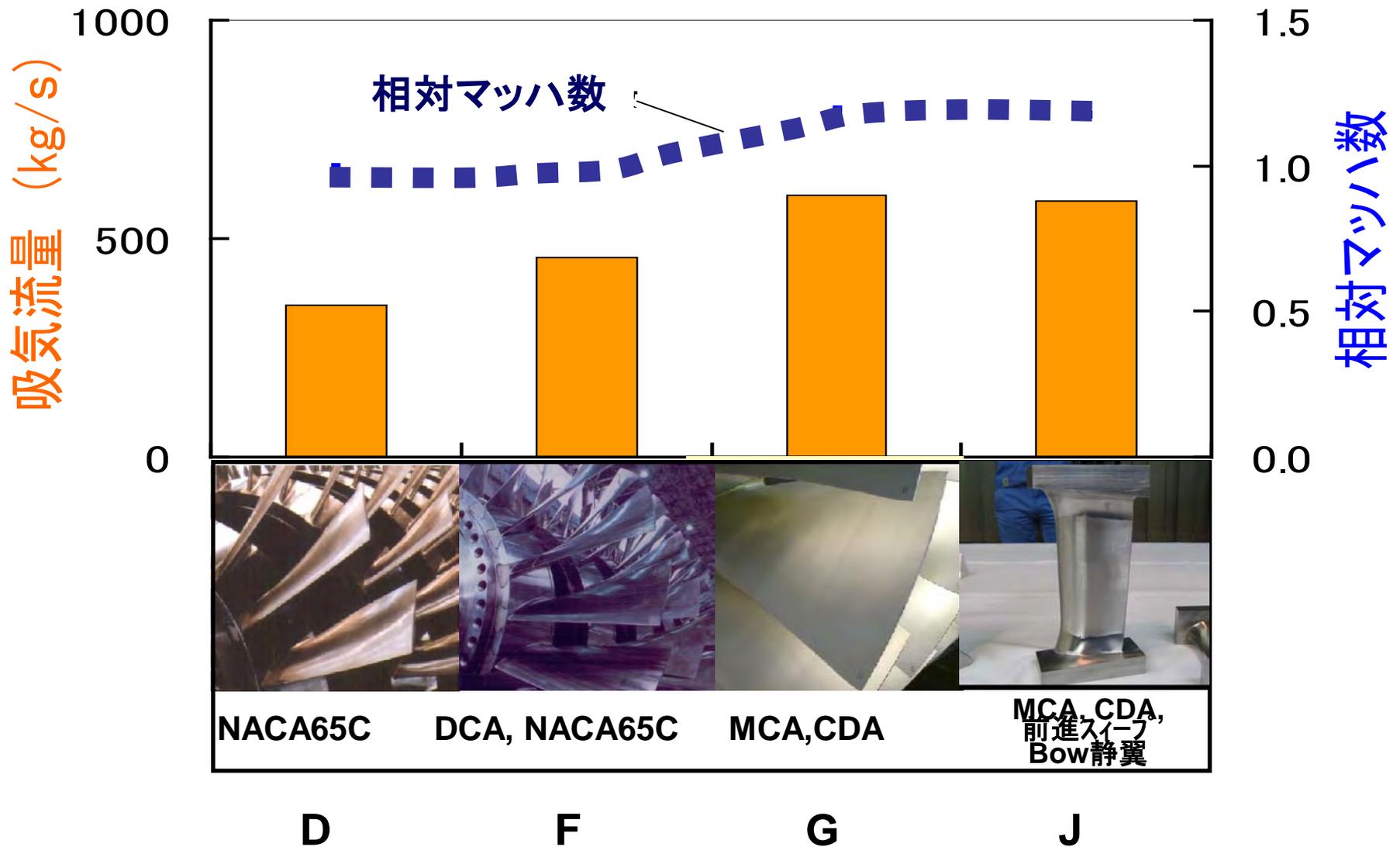


高温化に伴い出力増加(高負荷化)

# タービン空力設計技術の変遷



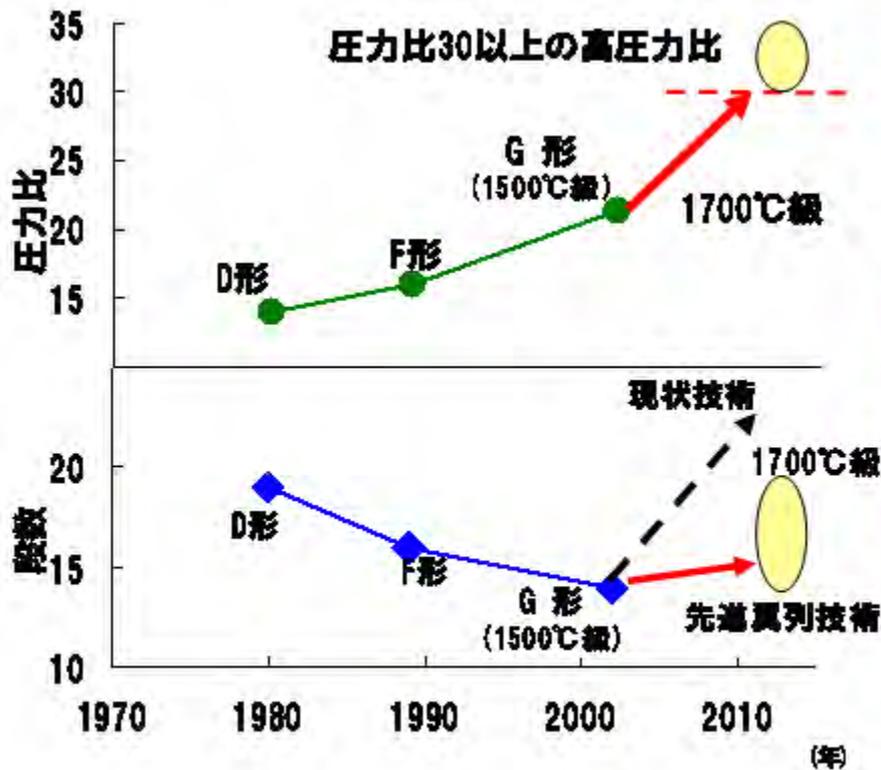
# 3600rpm機 吸気流量の比較



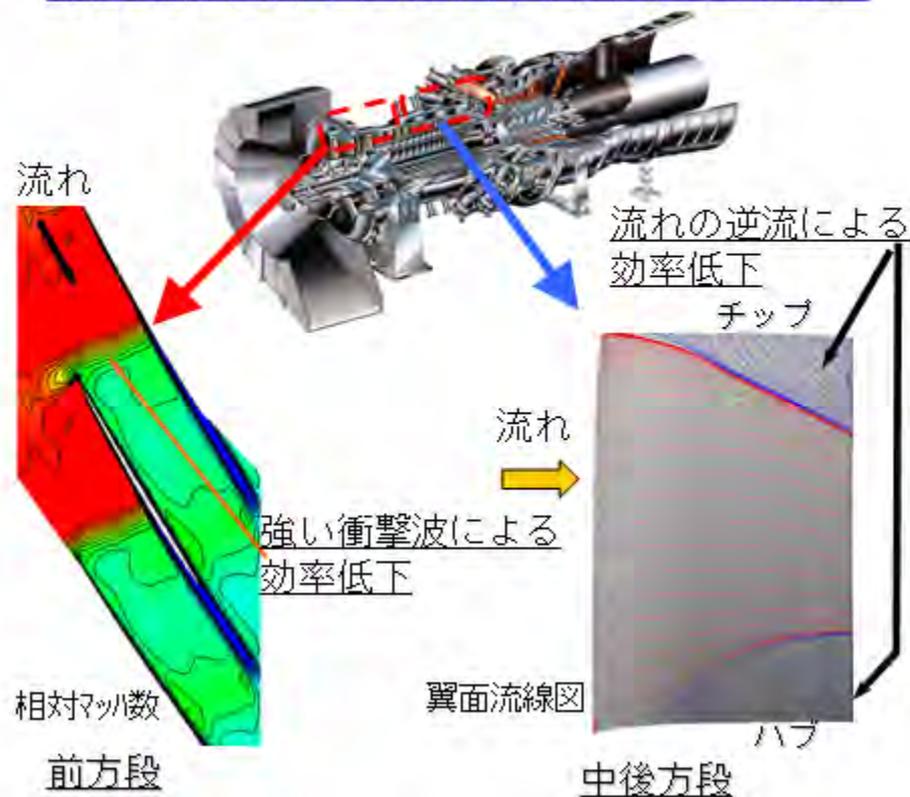
# 高圧力比・高性能圧縮機

## 現状の技術と目標

- ・ 前方段：先進遷音速翼列の開発
- ・ 中後方段：先進亜音速翼列の開発



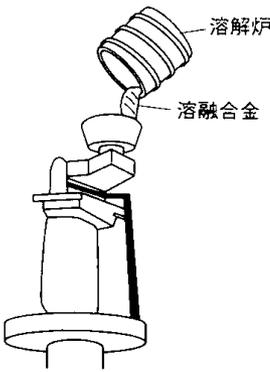
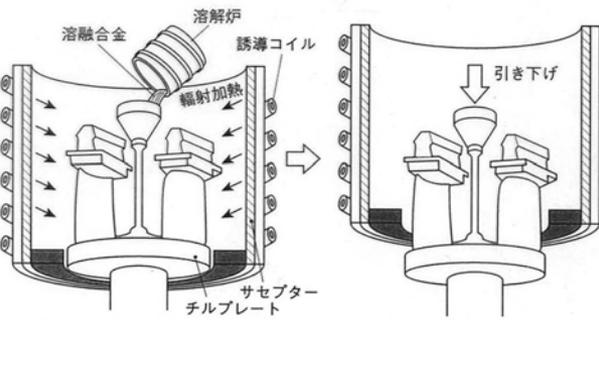
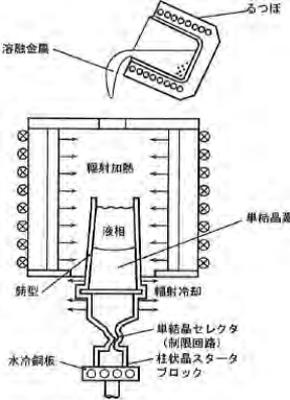
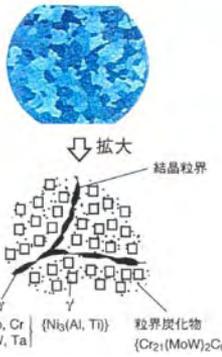
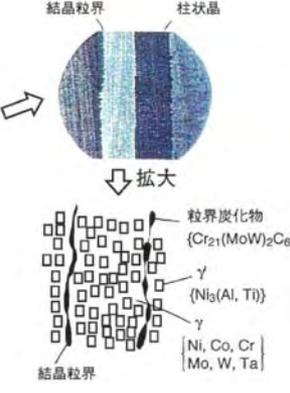
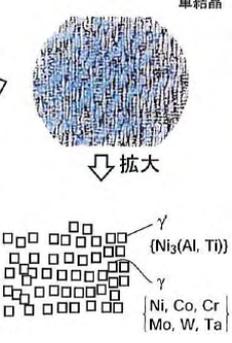
1段当たりの圧力比を増加すると、圧力勾配の増加により、効率低下が問題となる。



# 精密鑄造翼

- 普通鑄造法と一方向凝固鑄造法及び単結晶鑄造法

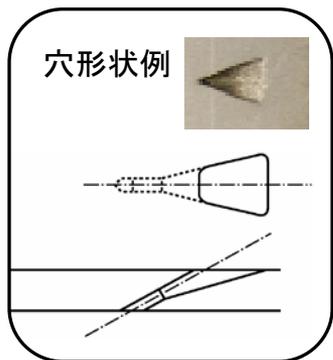
- ・ 普通鑄造法 (CC) : 加熱した鑄型に溶けた金属を流し込む方法
- ・ 一方向凝固鑄造法 (DS): 鑄型を一定温度に加熱して金属を鑄型内部に溶けた状態で維持し、一方向から凝固させて結晶成長方向をコントロールする方法
- ・ 単結晶鑄造法 (SC) : DSの一方向に成長させた結晶から1個の結晶のみを成長させる方法

普通鑄造翼 (CC)	一方向凝固翼 (DS)	単結晶翼 (SC)
<p>(普通鑄造法)</p>  <p>溶解炉 溶融合金 溶融合金</p>	 <p>溶解炉 溶融合金 誘導コイル 輻射加熱 引き下げ サセプター テルプレート</p>	 <p>溶融合金 溶融合金 輻射加熱 液相 単結晶莖 鑄型 輻射冷却 単結晶セレクタ (制限回路) 柱状晶スタータ ブロック 水冷銅板</p>
 <p>最大850mm</p>  <p>結晶粒界 γ (Ni<sub>3</sub>(Al, Ti)) γ (Ni, Co, Cr) Mo, W, Ta 粒界炭化物 {Cr<sub>21</sub>(MoW)<sub>2</sub>C<sub>6</sub>}</p>	 <p>最大720mm</p>  <p>結晶粒界 柱状晶 γ (Ni<sub>3</sub>(Al, Ti)) γ (Ni, Co, Cr) Mo, W, Ta 粒界炭化物 {Cr<sub>21</sub>(MoW)<sub>2</sub>C<sub>6</sub>}</p>	 <p>最大300mm</p>  <p>単結晶 γ (Ni<sub>3</sub>(Al, Ti)) γ (Ni, Co, Cr) Mo, W, Ta</p>

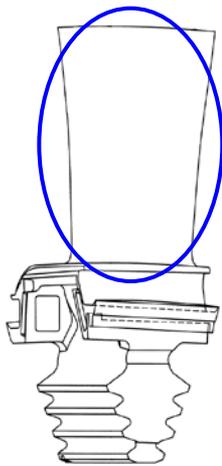
( CC: Conventional Casting, DS: Directionally Solidified, SC: Single Crystal 写真は当社で製作した最大の動翼サイズ )

# Ni基耐熱超合金の高精度加工～冷却穴加工～

## ・ 放電/電解加工



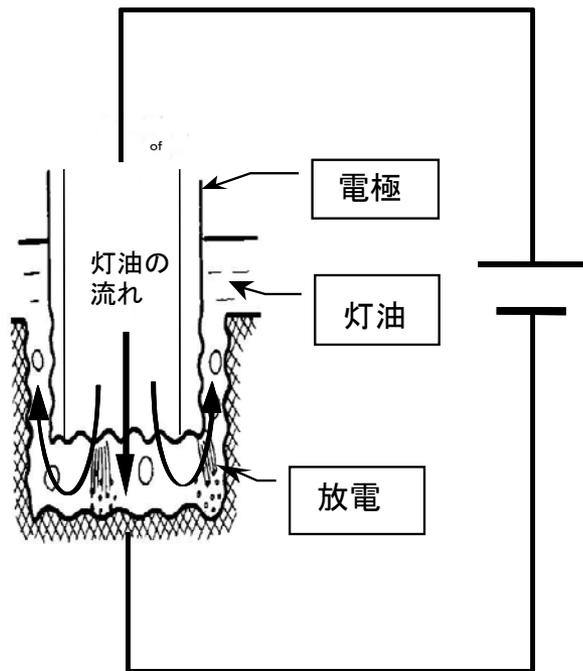
冷却穴加工部位



加工対象部位

(G形タービン1段動翼)

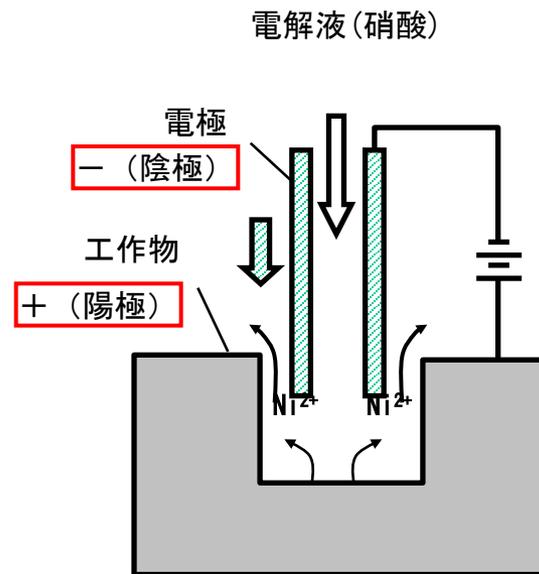
### 放電加工 (EDM)



放電による熱で金属を溶かして加工する。

様々な形状の冷却穴加工が可能。

### 電解加工 (ECM)



硝酸電解加工模式図

工作物と電極間に電解液を流し、電圧を加えることで工作物を溶解させて加工。

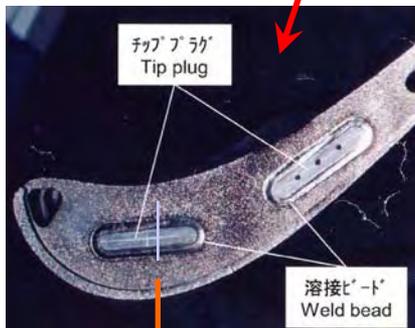
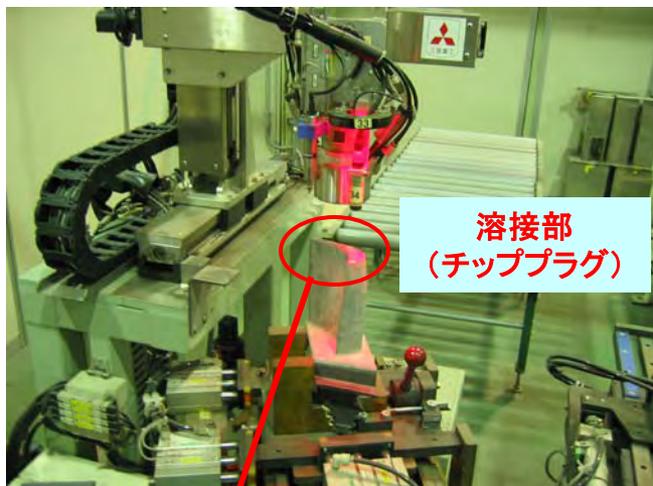
長距離穴加工向。

# 高密度エネルギー加工～動静翼への溶接・穴あけ～

## ・レーザー溶接

### 動翼チッププラグのレーザー溶接

難溶接材のNi基超合金に対し、レーザーを用いて**HAZ割れを抑えた溶接**を実施する。



ビード断面

### 静翼翼面の高速穴あけ加工

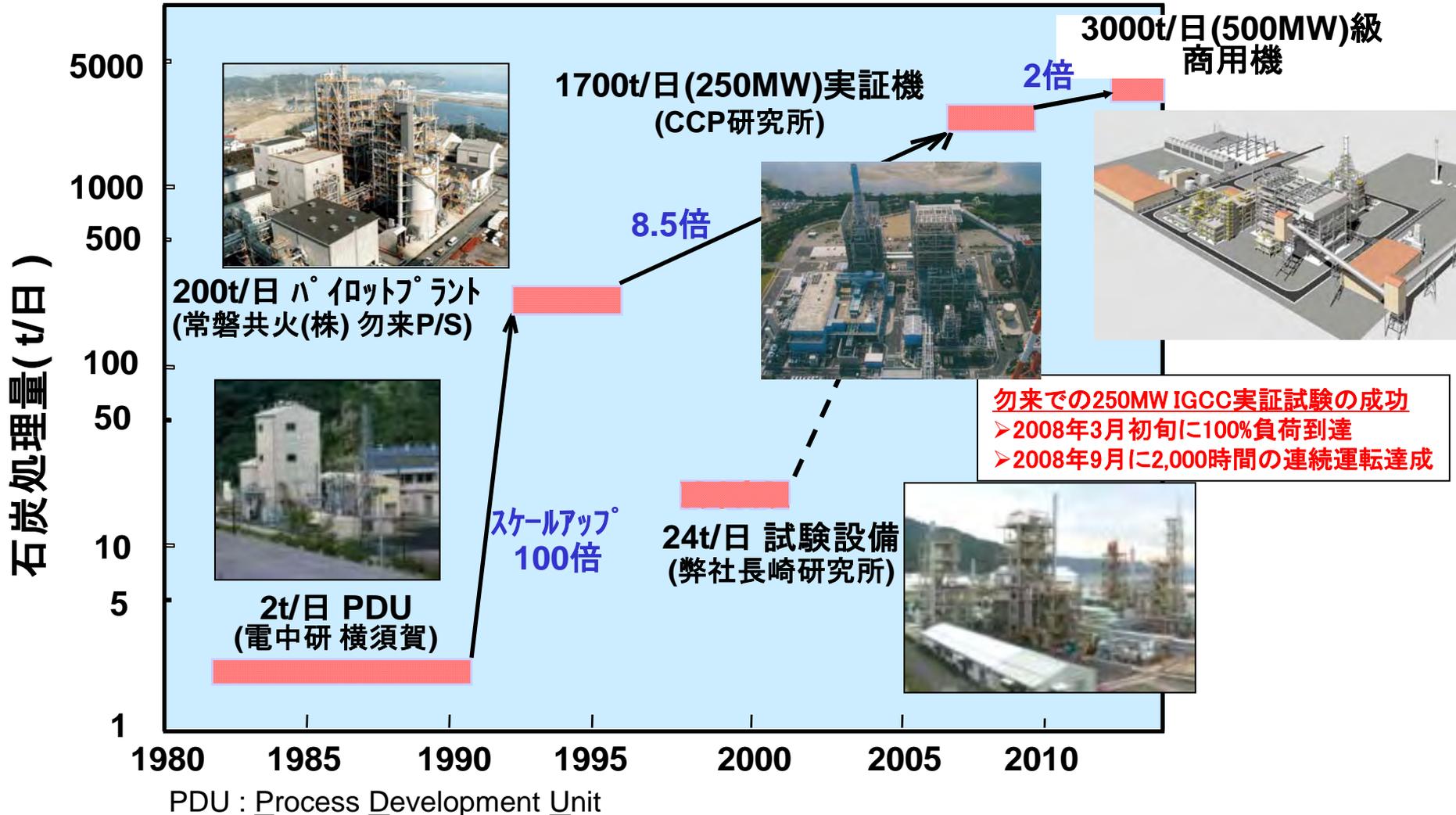
レーザーを用いて、**10sec/穴**の高速穴あけ加工を行う



(バックプロテクトが必須のため、タービン動翼は放電加工で穴あけを行います。)

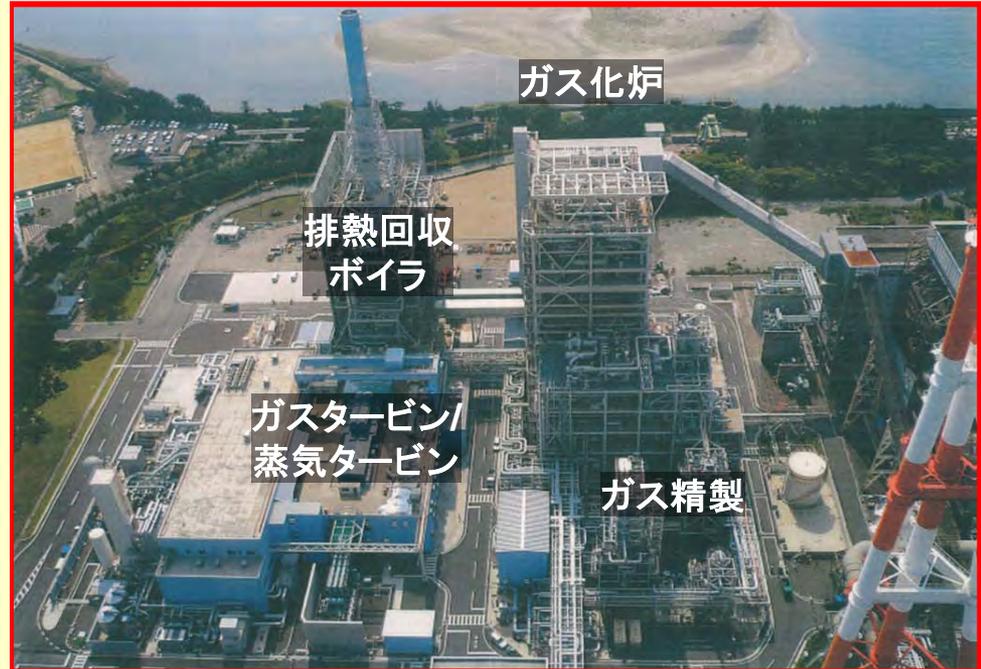
# 石炭ガス化 IGCC 空気吹きIGCC開発の変遷

石炭ガス化複合発電(IGCC)技術は、実証段階を終えて、次期商用機を計画中。



# 勿来250MW IGCC実証機

- 目的 **発電プラントとしての信頼性の確認**
- 出力 250MW級
  - 仕様
    - ガス化炉 空気吹き乾式給炭
    - ガスタービン 1,200℃級
    - ガス精製 湿式(アミン系溶液)
  - 送電端効率(HHVベース) 40.5%  
(LHVベース) 42%  
(商用機: 46~48%)
  - 実証試験期間 H19年~H21年度



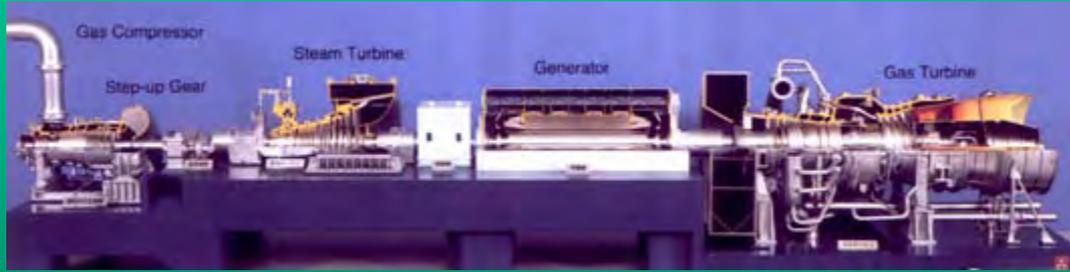
2001年度	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	設計			製作/据付			実証試験		

- 2,000時間連続運転を成功裏に終了 (2008年度)
- 5,000時間耐久性運転を実施中 (2009~10年度)

# BFG(高炉ガス) 焚GTCC

高炉ガス: 製鉄プロセスにおいて鉄鉱石とコークスを還元反応させる際に付随的に得られる低カロリーの高炉ガス(天然ガスの約1/10)

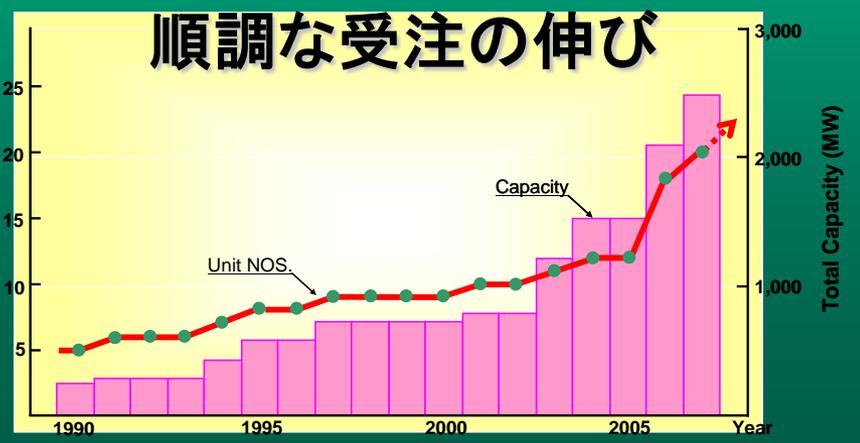
150MW級 約50 m  
300MW級 約60 m



世界最大のBFG 焚きGTCC (M701F適用)  
君津共同火力(株) 2004年運開



アジア地区を中心とした  
戦略的拡販



(出展: 当社予想)

# 原子力 PBMRの概要

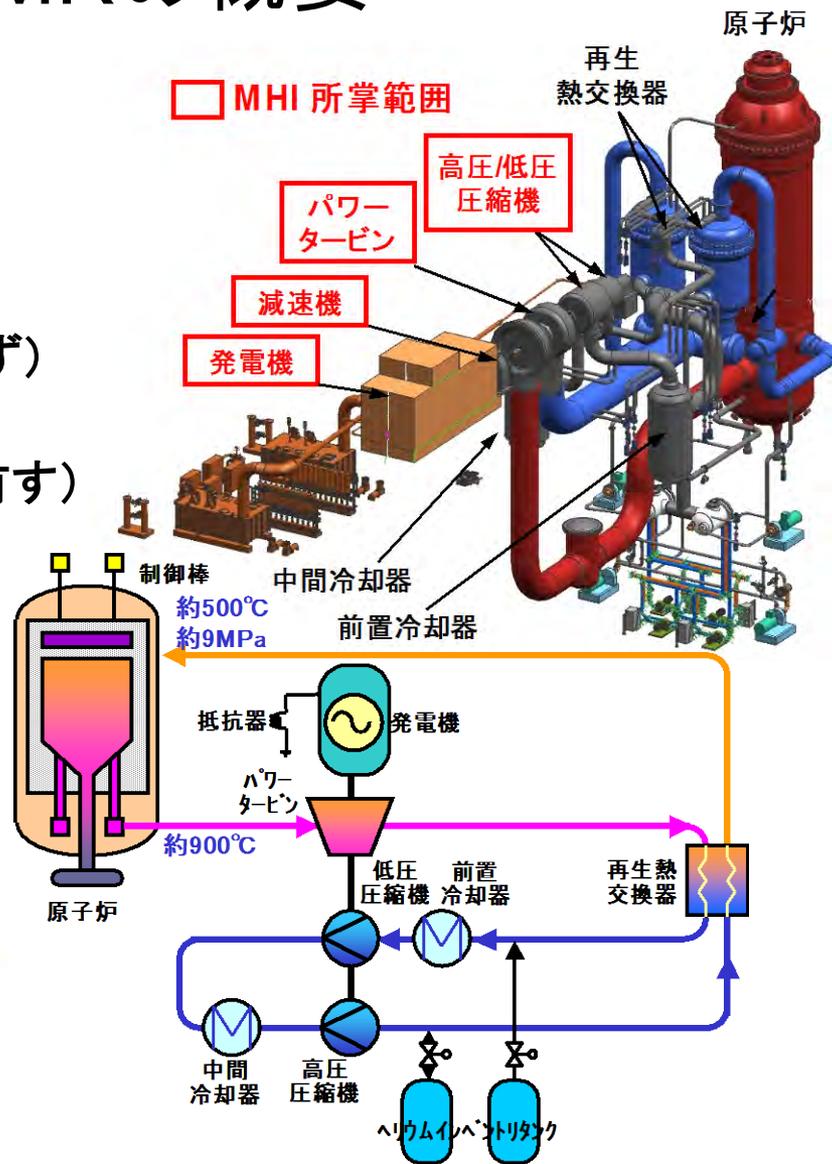
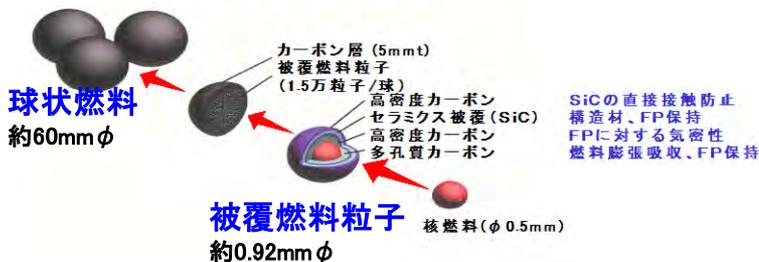
## 開発の狙い

- 分散型電源としての小型原子力発電及び複数モジュール設置による大容量化対応

## 特徴

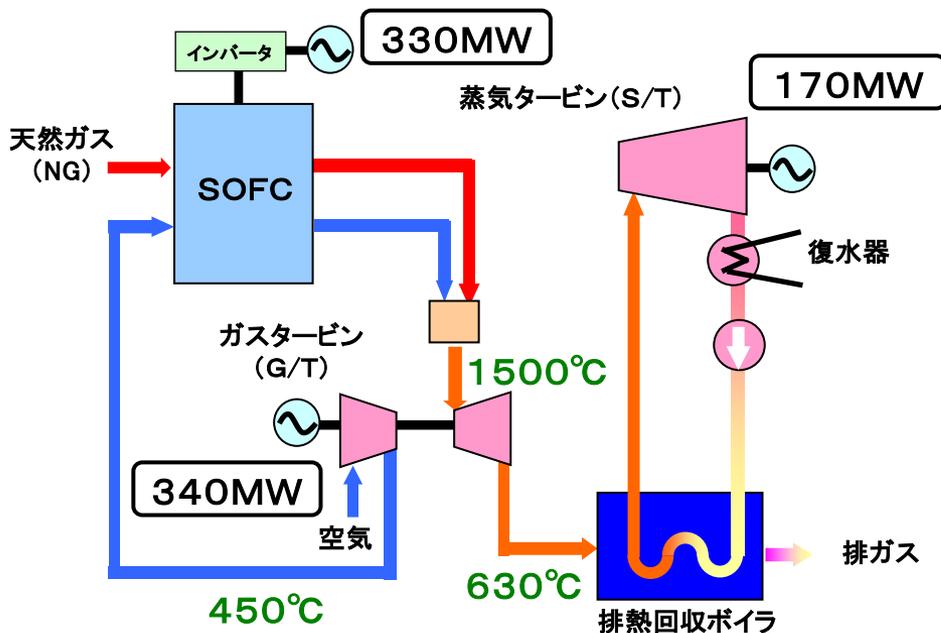
- 核・化学的に安定なヘリウム冷却材(放射化せず)
- セラミクス被覆粒子燃料により炉心溶融なし
- 格納容器なし(セラミクス被覆がFP格納機能を有す)

電気出力/熱出力	165MWe/400MWt
原子炉出入口温度	約 900°C/約 500°C
原子炉圧力	約 9MPa
原子炉圧力容器	約φ6m×約20mH
燃料形式	ペブルベッド型



# 燃料電池 事業用大規模SOFC複合発電システム

## 800MW級SOFC複合発電システム(2020～)



ヒートバランス例



SOFC+G/T+S/T複合発電プラント鳥瞰図

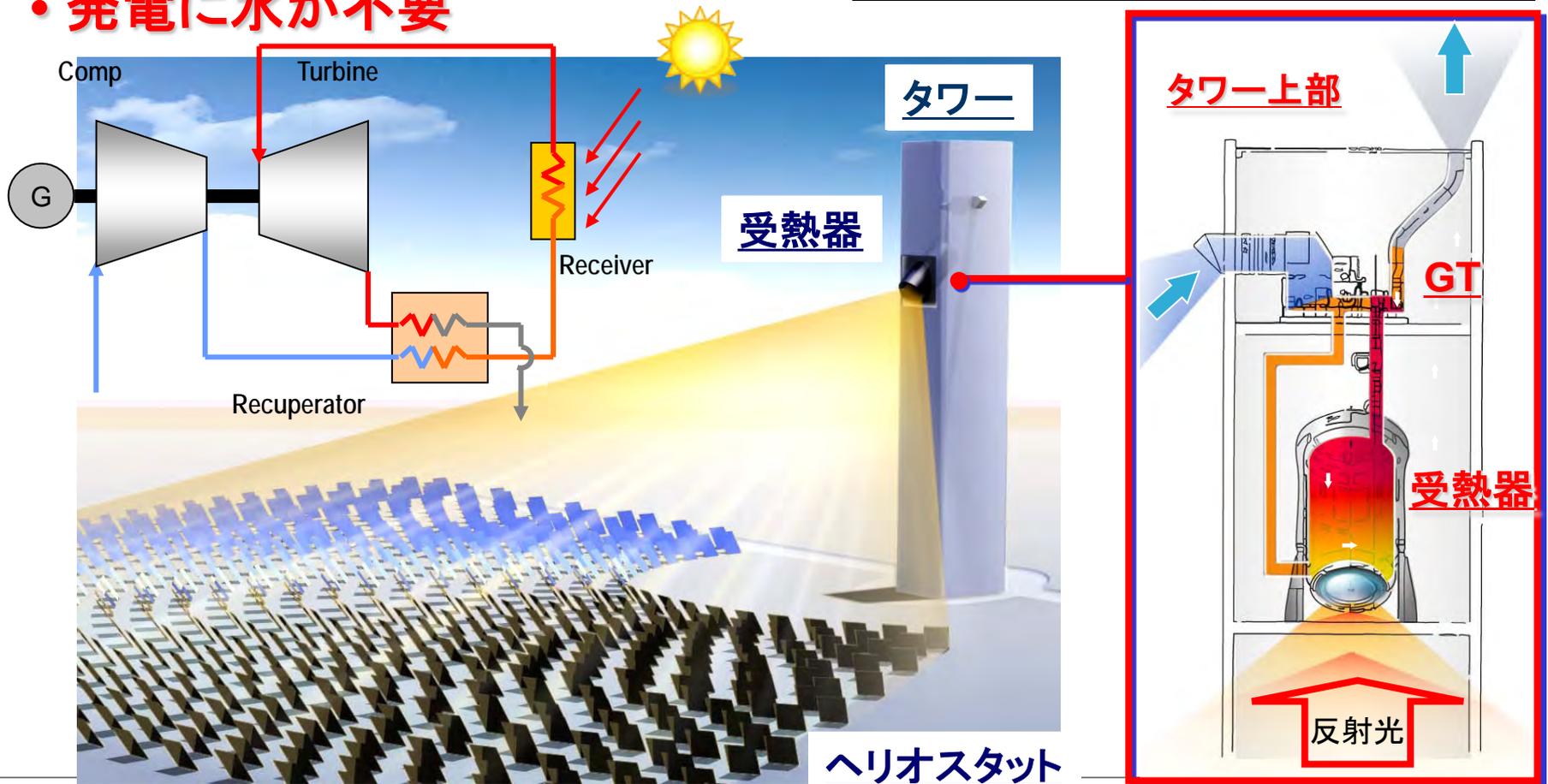
システム出力 840MW  
発電効率(送電端) 70%-LHV

# 太陽熱発電 太陽熱GT発電の概要

## ★ 特徴

- 高効率（総合効率30%以上）
- 発電コスト 低
- 発電に水が不要

Heliostats Field Area	200,000m <sup>2</sup>
Tower Height	110m
Max. Temp	850 – 900 degC
GT Power	10MW





この星に、たしかな未来を

