

高効率ガスタービン実用化技術開発  
(1700°C級ガスタービン)

評価用資料

平成25年11月13日

資源エネルギー庁電力・ガス事業部電力基盤整備課

三菱重工業株式会社

## 目 次

1. 事業の目的・政策的位置付け	1
1-1 事業の目的	1
1-2 政策的位置付け	2
1-3 国の関与の必要性	3
2. 研究開発目標	7
2-1 研究開発目標	7
2-2 全体の目標設定	7
2-3 個別要素技術の目標設定	8
3. 成果、目標の達成度	9
3-1 成果	9
3-1-1 全体成果	9
3-1-2 個別要素技術成果	12
3-1-3 特許出願状況等	16
3-2 目標の達成度	20
4. 事業化、波及効果	22
4-1 事業化の見通し	22
4-1-1 要素技術開発成果の既存機種への適用、実用化について	23
4-1-2 1700℃級ガスタービンの事業化の見通しについて	24
4-2 波及効果	25
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等	28
5-1 研究開発計画	28
5-2 研究開発実施者の実施体制・運営	29
5-3 資金配分	30
5-4 費用対効果	31
5-5 変化への対応	33

## **B 高効率ガスタービン実用化技術開発**

### **B1 1700℃級ガスタービンの実用化技術開発**

#### 1. 事業の目的・政策的位置付け

##### 1-1 事業目的

本事業は、震災以降、我が国の電源構成比率の約 9 割を占める火力発電の高効率化を図り、エネルギーセキュリティの確保及び地球環境問題双方に対応すべく、世界をリードする高効率ガスタービンの実用化に向けた技術開発を実施する。

高効率天然ガス火力発電は、他の化石燃料に比べて環境負荷が少ない天然ガスを燃料とし、ガスタービンと蒸気タービンの双方を利用する複合発電技術に代表される。ガスタービン技術の性能向上により、発電効率が事業発足時の 52%（送電端、HHV 基準。）から 56%まで向上すれば、二酸化炭素排出量は約 8%の削減が可能である。

##### (1) 事業の科学的・技術的意義

本事業は、複合発電の熱サイクル温度を事業発足時の 1500℃級から世界初の 1700℃級に高める。これにより、高温化における我が国のリードを確保する。前例がない未知の領域での技術開発となるため、燃焼技術、冷却技術、遮熱コーティング、空力技術などで、独創性の高い新技術の開発が必要となる。

また、排ガス再循環システムを用いた燃焼器については、排ガス中の CO<sub>2</sub> 濃度が約 8%となり、CO<sub>2</sub> 回収が効率的に実施可能な濃度レベルとなる。これが可能となれば、元々CO<sub>2</sub> 排出原単位が一般の火力発電の中で最も小さい複合発電の CO<sub>2</sub> 排出量（発電効率 52%で、0.34kgCO<sub>2</sub>/kWh）を約 0.03kgCO<sub>2</sub>/kWhと現状比の約 1/10 以下に出来る可能性がある。

さらに 1700℃級ガスタービンが実現できれば、石炭ガス化発電 IGCC にも応用可能であり、1700℃級 IGCC が実現可能となる。このほかに、燃料電池とガスタービンの組合せによるハイブリッドサイクルや、原子力発電の夜間電力を利用して製造した水素燃料を用いた複合発電も可能となる。これらは、エネルギーセキュリティ上重要な将来技術であるが、多様な燃料を使用可能な高温ガスタービンは、これらの革新的な技術の実用化において中核となる技術である。

##### (2) 社会的・科学的意義

(CO<sub>2</sub> 削減効果)

地球温暖化問題に対応する CO2 削減効果は、前述のとおりである。

( 高温化技術の波及効果)

超高温・1 万 G を超える高遠心力の厳しい条件下で 1 年以上の連続運用が求められる発電用ガスタービンは、ロケットエンジンなどと同様、あらゆる機械製品の中でも最も技術の裾野が広く、且つ、先進性の高い機械のうちのひとつであり、高い完成度が求められる。従って、燃焼、伝熱、材料、空力など複数の分野に跨る本プロジェクトの波及効果は非常に大きい。特に高温化技術は、科学技術的にその実用的な目標を与えるという観点でも重要である。

## 1-2 政策的位置付け

世界の温室効果ガスの排出を 2050 年までに半減するという長期目標を達成するため、革新的な技術開発の重要性が掲げられており、2008 年 7 月に閣議決定された「低炭素社会づくり行動計画」において、2050 年までに二酸化炭素の排出を現状から 60～80%削減するという目標が掲げられている。このような 2050 年に向けた削減努力に対して、経済産業省では「Cool Earth—エネルギー革新技術計画」を設定し、「高効率天然ガス火力発電」を含む 21 分野の技術の開発による目標達成を目指している。これを受け、本計画では、技術開発ロードマップの着実な実施が必要とされている。

また、エネルギー基本計画(2010 年 6 月 18 日閣議決定)において、「その他の火力発電については、新增設・更新の際には、原則としてその時点における最先端の効率を有する設備の導入を目指す。」と謳われており、1700℃級ガスタービンに代表される超高温高効率ガスタービンは、現状最も高効率の火力発電技術として、リプレースにおける大容量機のエネルギー効率向上に寄与できる技術である。

一方、総合科学技術会議の環境エネルギー技術革新計画において、高効率天然ガス発電技術のロードマップが示されている(図 1-1)。この中では 2020 年をターゲットに、57% (\*注) の発電効率を目指すことが記載されている。

\*注：本事業開始時では、送電端効率 56% (HHV) を目標としていたが、H24 年度以降の事業では、技術開発の進展や 1600℃級ガスタービンの実績を踏まえ、より効率を高められることが分かった。一方、2020 年時点で欧米他社を凌駕できる効率が必要であることから、目標値を 57%に改めるに至った。



図1-1 技術ロードマップ (出所：技術戦略マップ2013年)

### 1-3 国の関与の必要性

火力発電の高効率化のためには、燃焼、材料等の革新的な技術開発が必要であるが、研究開発成果の商業性や投資回収可能性に係るリスクが大きく、民間企業のみでは対応できない研究開発分野である。実用化まで長期のリードタイムと多大な研究開発投資を必要とする技術開発を推進するには、官民がその方向性を共有する事が不可欠である。

#### (1) 国家エネルギー戦略における位置づけと開発競争のスピード

各国家において、エネルギーセキュリティ・経済性・環境問題の解決の全てに深く関係するため、その先進性・困難性にかかわらず、ガスタービンの高温化はスピードが非常に速く、国家間の開発競争は熾烈を極める。発電用ガスタービンは、1980年代初頭の複合発電システムの導入以降、年間約20℃という早いペースで燃焼温度の高温化が進み、熱効率が改善してきた。熾烈な開発競争の中、高温化に対して技術的に開発が可能な国は、米・独・日の3カ国に絞られてきた。

#### (2) 本技術分野における我が国の優位性

我が国は、世界に先駆けて1500℃級のガスタービンを実用化し、発電効率52%

を達成しており、本分野をリードしている。しかし、世界市場でのシェアで我が国は本事業開始時点で 10%程度であり、欧米メーカーが大きくシェアを有するとともに積極的な技術開発を進めている中で、我が国の優位性は予断を許さない状況にある。

従って、厳しい国際競争の中で我が国のリードを保つためには、一刻も早く革新的な技術を実用化して実機に展開する必要がある。このため、1700℃級ガスタービンの開発に取り組むことにより、効率 56%の実用化を目指し、革新的な技術開発を推進する必要がある。

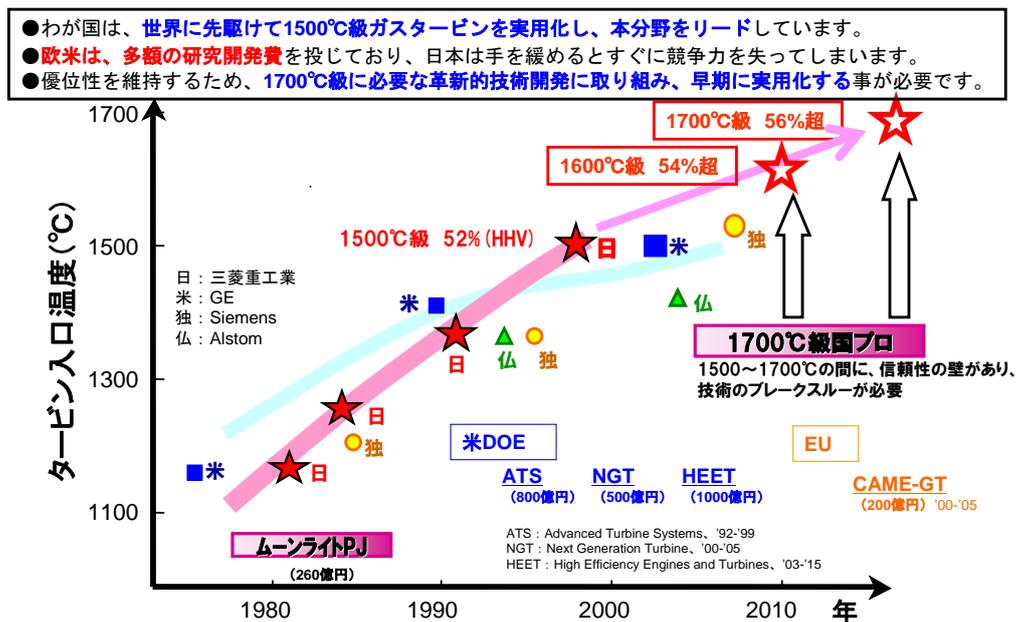


図 1-2 各国のガスタービン技術に関する国家プロジェクトと各国の高温化のトレンド比較（事業発足当時）

### （3）米国 DOE 支援による技術開発

1700℃級ガスタービンの開発は、石炭ガス化複合発電等、他の発電技術にも適用可能な重要技術であり、米国においてもエネルギー省（DOE）の High Efficiency Engines and Turbines Programs により国家的な支援の下で技術開発が進められている。我が国においても、産学官の連携の下、着実な技術開発により早期の実用化、実証運転による信頼性の確立等を図ることが必要である。

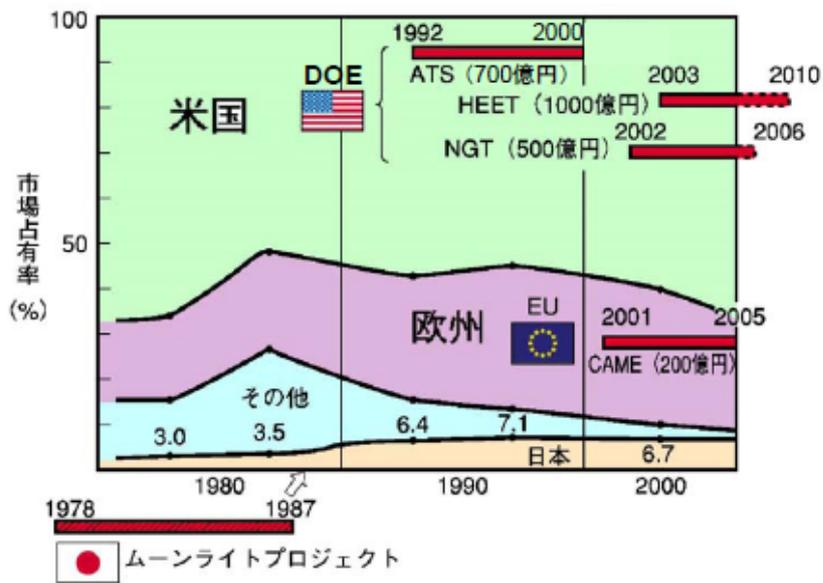


図 1-3 ガスタービン技術に関する各国家プロジェクトとシェア実績の推移

(4) 省庁間連携

なお、1700℃級ガスタービンの実現の為に不可欠な耐熱材料の開発は、基礎的材質の研究が必要となるため、文部科学省の所掌とし、省庁間で連携をとって技術開発を進めている。

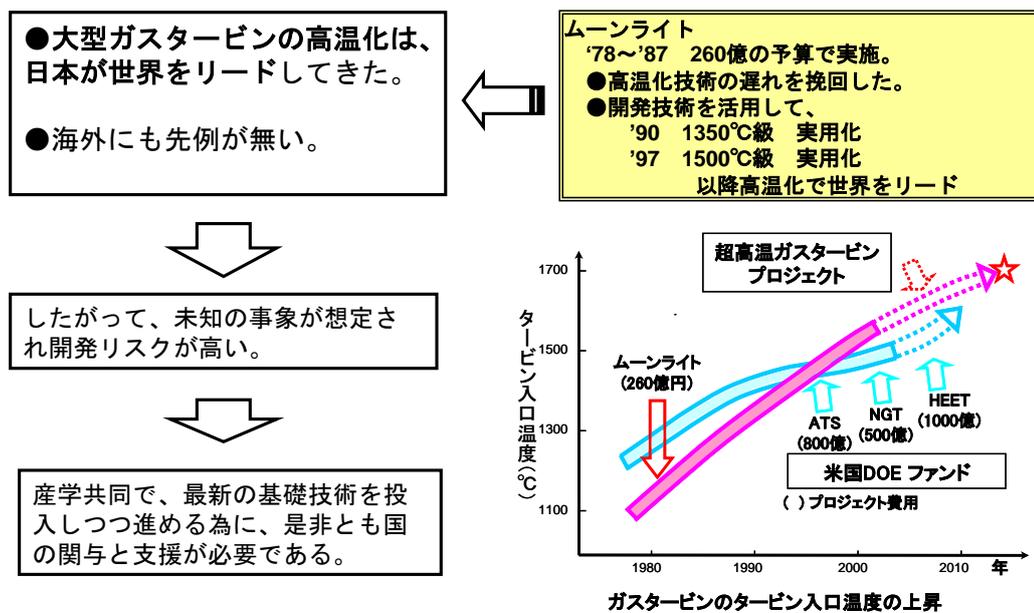


図 1-4 ガスタービンの高温化と国家の関与の必要性

1987年終了の国家プロジェクト“ムーンライトプロジェクト（1350℃級）”の技術を活かして1990年度に1,350℃級が実用化し、1997年以降の1500℃級の実用化につながった。国家プロジェクトをきっかけに、我が国は大容量ガスタービンの高温化技術、すなわち、

- ・ 高温での安定燃焼技術と低エミッション技術
- ・ 高温条件下でのタービン・燃焼器の高性能冷却技術  
（冷却空気量を低減し、熱サイクル性能を向上する技術）
- ・ 高温条件下でのタービン・燃焼器の高信頼性・高耐久性設計技術
- ・ 高温条件下での高負荷空力技術
- ・ 高温時の大型ロータ・大型車室の高耐久性設計技術

などの点で世界に追いつき、リードしてきた。

## 2. 研究開発目標

### 2-1 研究開発目標

電力産業の保守高度化とリプレース需要にあった大容量機（コンバインド出力 40 万 kW）の高効率化を目指し、目標送電端効率 56%以上、CO<sub>2</sub> 排出量 8% 削減（事業発足時同容量機比）を達成するために必要な、1700℃級ガスタービンの実用化を図る。そのため、1700℃級ガスタービンの実用化に必要な以下の要素技術開発を行い、システムの成立性をシミュレーションにより確認する。

- ・ 排ガス再循環システム／低 NO<sub>x</sub> 燃焼器の開発
- ・ 高性能冷却システムの開発
- ・ 低熱伝導率遮熱コーティング（TBC: Thermal Barrier Coating）の開発
- ・ 高負荷・高性能タービンの開発
- ・ 高圧力比高性能圧縮機の開発
- ・ 超耐熱材料の開発（文部科学省のプロジェクト→NEDO 先導研究）

### 2-2 全体の目標設定

表 2-1 全体の目標

目標・指標	設定理由・根拠等
1. 実機を設計するために必要な要素技術を、より実機に近い条件で評価・検証する。	より実機に近い条件で新技術を評価することにより、技術課題を明確にする。新たに判明した課題に対して、改良案を立案し、速やかに改良効果を確認することにより、実機開発のリスクを低減する。
2. 新開発の要素技術を適用した場合に、送電端効率 56%以上（HHV）を達成可能であることの見込を得る。	
3. 高圧高温試験用の装置を製作し、実機相当条件で NO <sub>x</sub> 50ppm 以下を安定的に実現できることを確認する。	

## 2-3 個別要素技術の目標設定

表 2-2 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標	設定理由・根拠等
排ガス再循環システム／低 NO <sub>x</sub> 燃焼器の開発	高圧燃焼試験装置を製作し、1700°C実機相当圧で NO <sub>x</sub> 排出量 50ppm 以下の実現可能性を確認する。	従来の脱硝装置を大幅に増強することなく、煙突出口 NO <sub>x</sub> を従来並みにする NO <sub>x</sub> として設定した。  送電端効率 56% (HHV) 達成のため、各要素効率は、信頼性と性能を両立しつつ、世界最高レベルの目標となるよう、各要素目標値に割り振った。
高性能冷却システムの開発	冷却要素に対する回転、乱れなどの影響を評価し、冷却空気量 30%低減（事業発足時比）の実現可能性を確認する。	
低熱伝導率 TBC* の開発	遮熱効果を現状材 (YSZ) より 20%低減可能な候補材を選定し、実翼への最適な成膜条件を求め、 実機相当熱サイクル疲労試験にて耐久性を確認する。	
高負荷・高性能タービンの開発	モデルタービンを用いて効率を計測し、1500°C級に比べ 30% 高い負荷条件において、1軸タービン、段数従来並みで、効率 91%以上の実現が可能か確認する。 3次元設計について、空力・伝熱への影響を把握する。	
高圧力比高性能圧縮機の開発	モデル圧縮機で効率レベルを計測し、圧力比 30 以上において、1軸圧縮機、段数従来並みで、効率 89%以上の実現が可能か確認する。 起動特性や抽気室の空力特性への影響を評価する。	

\* TBC : 遮熱コーティング (Thermal Barrier Coating )

### 3. 成果、目標の達成度

#### 3-1 成果

##### 3-1-1 全体成果

平成20年度から平成23年度にかけ、計画どおりに実用化技術の開発を進め、表3-2で示した要素技術について、それぞれ新コンセプトの効果を確認した。より実機に近い条件で実用化技術試験を実施し、

- ・ 実際の設計適用に当たっての副作用の有無の確認
- ・ 定格条件以外の作動条件における各技術の効果確認
- ・ 製作上の制約などを考慮した条件での形状検討
- ・ 実機形状への製造・施工プロセスの検討

を行い、研究室レベルの基礎技術から、より実用的な技術の開発を進めた。

上記の最新の研究成果を反映したシミュレーションにより、送電端効率56%以上、CO2排出量8%削減（事業発足時同容量機比）の実現可能性を確認し、実証機開発の足がかりを得た。

さらに、1500℃級ガスタービンの運用経験に基づき、上記の革新的な新技術のうち実用化レベルに達したと判断された技術を即座に活用することにより、世界初の1600℃級ガスタービンの開発に成功し、初号機の商用運転開始を達成した。

表3-1 全体の成果

目標・指標	目標の達成状況
1. 実機を設計するために必要な要素技術を、より実機に近い条件で評価・検証する。	1. 各要素で実機相当条件で新技術を評価した。
2. 新開発の要素技術を適用した場合に、送電端効率56%以上（HHV）を達成可能であることの見込を得る。	2. 最新の要素技術を適用し、予測効率で56%を上回る見込を得た。
3. 高圧高温試験用の装置を製作し、実機相当条件でNOx50ppm以下を安定的に実現できることを確認する。	3. 製作した高温高圧試験装置にて燃焼試験を実施し、実機相当条件でNOx50ppm以下を安定的に実現できることを確認した。

本技術開発における、要素技術開発項目ごとの主な成果を以下の表 3-2 に示す。

表 3-2 要素技術開発項目ごとの主な成果

項目	目標・指標	目標の達成状況
排ガス再循環システム／低NO <sub>x</sub> 燃焼器の開発	高圧燃焼試験装置を製作し、1700℃実機相当圧でNO <sub>x</sub> 排出量 50ppm 以下の実現可能性を確認する。	排ガス再循環を模擬できる高圧燃焼試験装置を製作した。実機相当圧力の燃焼試験により 1700℃低酸素燃焼での燃焼特性を把握し、NO <sub>x</sub> 排出量 16ppm を安定燃焼状態で達成できることを確認した。
高性能冷却システムの開発	冷却要素に対する回転、乱れなどの影響を評価し、冷却空気量 30%低減（事業発足時比）の実現可能性を確認する。	高性能フィルム冷却、微細冷却構造などの新コンセプト冷却要素試験を実施し、冷却効率 20%以上向上した。 これらを組み合わせた冷却翼を製作し、高温高圧燃焼場における初段静翼の冷却性能を実測した。その結果所定のメタル温度以下であることを確認し、実機での冷却空気量 30%低減の実現可能性に目途を得た。
低熱伝導率 TBC*の開発	遮熱効果を現状材 (YSZ) より 20%低減可能な候補材を選定し、実翼への最適な成膜条件を求める。 実機相当熱サイクル疲労試験にて耐久性を確認する。	従来とはまったく異なる第一原理計算を用いた材料探索手法などにより候補材を複数選定した。 溶射皮膜での実機相当熱サイクル試験により、遮熱効果を 20%低減しつつ、現状材並の寿命を確保できることを確認した。  更に、複雑形状物への施工基礎技術を開発し、今回開発した TBC*を 1600℃級ガスタービンの第 1 段動・静翼に適用した。その結果、2200 時間運転後（平成 23 年度末）の検査にて健全な状況であることを確認した。

\* TBC : 遮熱コーティング (Thermal Barrier Coating )

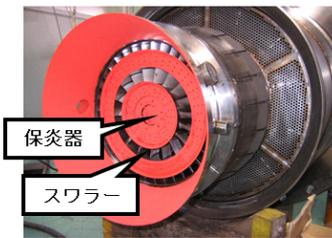
<p>高負荷・高性能タービンの開発</p>	<p>モデルタービンを用いて効率を計測し、1500℃級に比べ 30%高い負荷条件において、1軸タービン、段数従来並みで、効率 91%以上の実現が可能か確認する。</p> <p>3次元設計について、空力・伝熱への影響を把握する。</p>	<p>新開発の高性能プロファイルと、翼・端壁一体設計新コンセプト 3次元翼型を組み込んだ回転翼列要素試験を実施し、1500℃級ガスタービンに比べ 30%高い負荷条件において、実機換算で 91.3%の効率を達成可能であることを確認し、伝熱への影響も確認した。</p> <p>更に、ディフューザのストラット形状の改良や入口速度分布の改良などの新しいアイデアの導入により、タービン効率の更なる向上が期待できることを確認した。</p>
<p>高圧力比高性能圧縮機の開発</p>	<p>モデル圧縮機で効率レベルを計測し、圧力比 30以上において、1軸圧縮機、段数従来並みで、効率 89%以上の実現が可能か確認する。</p> <p>起動特性や抽気室の空力特性への影響を評価する。</p>	<p>大型ガスタービンで要求される 1軸圧縮機を想定したモデル圧縮機を用いて回転翼列要素試験を実施し、新コンセプトの 3次元設計翼により、実機換算で 89.3%の効率を達成可能であることを確認した。</p> <p>安全に起動可能であることと、抽気室の空力への影響を把握した。</p>

### 3-1-2 個別要素技術成果

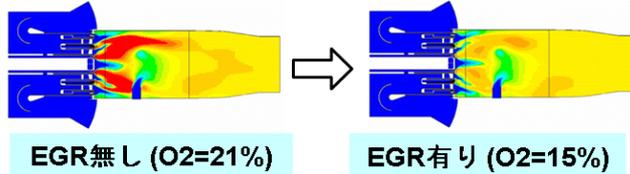
#### (1) 排ガス再循環システム／低 NOx 燃焼器の開発

排ガス再循環を模擬できる高圧燃焼試験を製作し燃焼試験を実施。NOx は実機換算で16PPM @ 15%O2 (< 目標50ppm) を達成する見込みを得た。

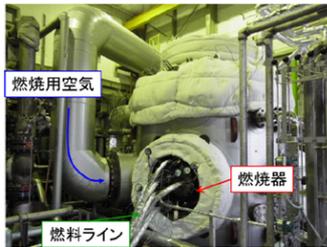
##### 新コンセプト試作燃焼器



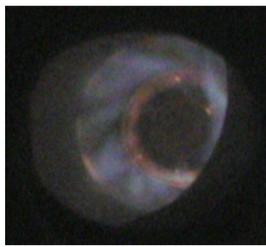
##### 低酸素燃焼による局所の燃焼温度の低減



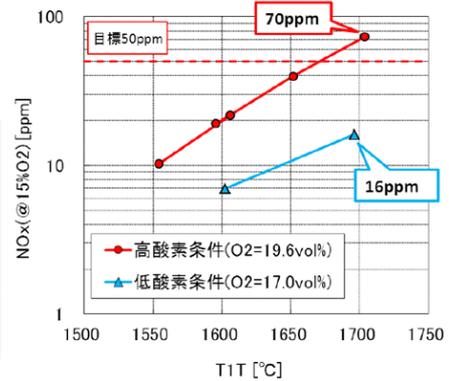
##### 高圧燃焼試験設備



##### 燃焼状況



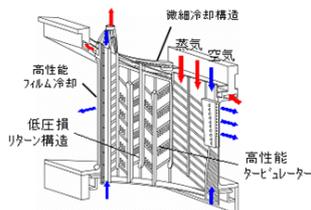
##### NOxの計測値



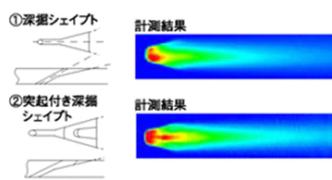
#### (2) 高性能冷却システムの開発

先進冷却要素技術を開発し、実機を模擬した条件において、フィルム冷却効率を把握した。また、高温高圧燃焼場において冷却性能を実測し、所定のメタル温度以下であることを確認し、従来機に比べ、冷却空気量30%削減の目処を得た。

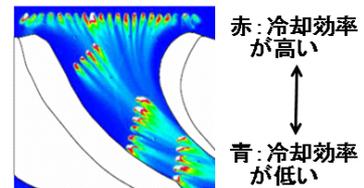
##### 1700°C級冷却コンセプト例



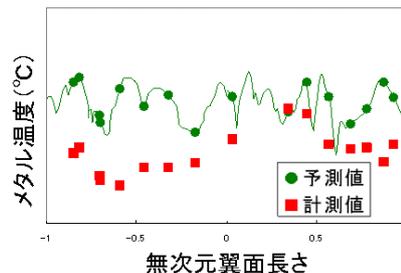
##### 先進冷却要素の開発例



##### 回転試験での冷却効率

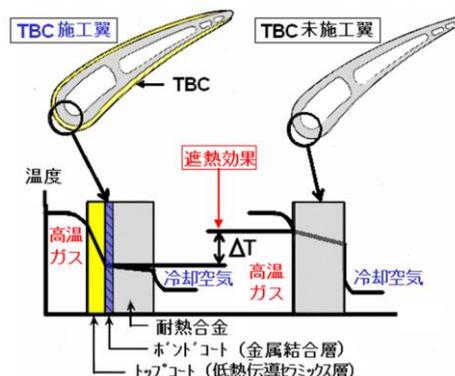


##### 高温高圧燃焼場での試験結果



### (3) 低熱伝導率 TBC の開発

#### 遮熱コーティング TBC (Thermal Barrier Coating) のイメージ図



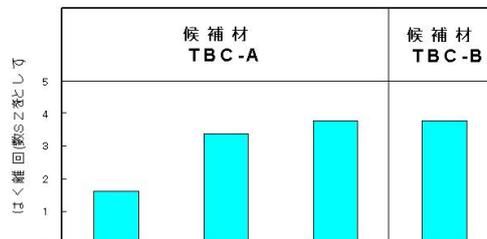
遮熱効果を20%向上したセラミクス材(目標を満足)を開発し、実機ガスタービンと同様に温度勾配を付与するため、CO<sub>2</sub>レーザを用いた熱サイクル試験を実施し、先進セラミクスを用いたTBCの耐久性は通常のYSZと同等以上であることを確認した。



(a)レーザ熱サイクル試験装置



(b)熱サイクル試験状況



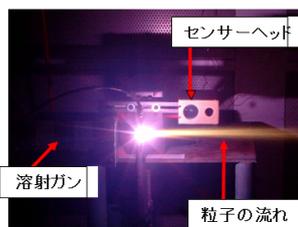
(c)熱サイクル試験結果 (最高TBC表面温度: 1400℃  
TBC内温度差: 500℃)

開発したセラミクス材を用い、実翼への施工を想定した溶射条件の最適化を実施した。

#### 実翼へのプラズマ溶射施工状況

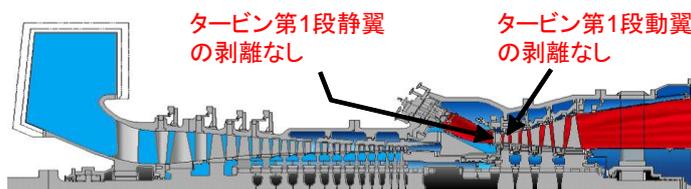


#### プラズマ溶射施工条件の最適化



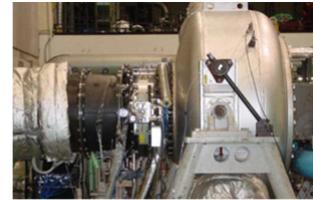
開発したセラミクス材を第1段階・静翼に施工し、1600℃級ガスタービンにおいて長時間の耐久試験を実施しました。その結果、剥離などの問題が発生しないことを確認した。

#### 1600℃級ガスタービンでの第1段階・静翼 遮熱コーティングの 運転後点検結果



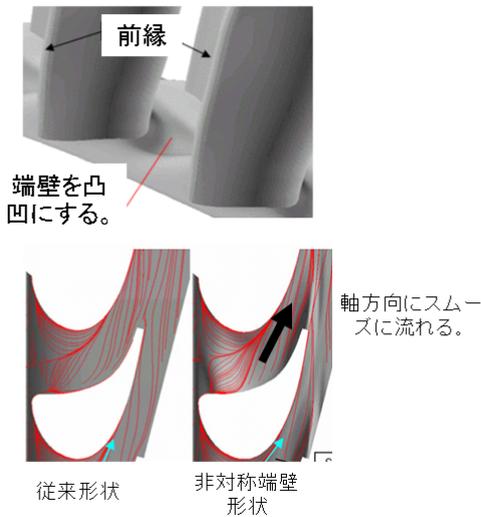
#### (4) 高負荷・高性能タービンの開発

実機流れを模擬した回転試験に加え、実レイノルズ数での高速翼列試験を実施し、先進3次元設計コンセプトを検証しました。その結果、**実機相当で効率91.3%(>目標91%)を達成可能である目処**を得た。

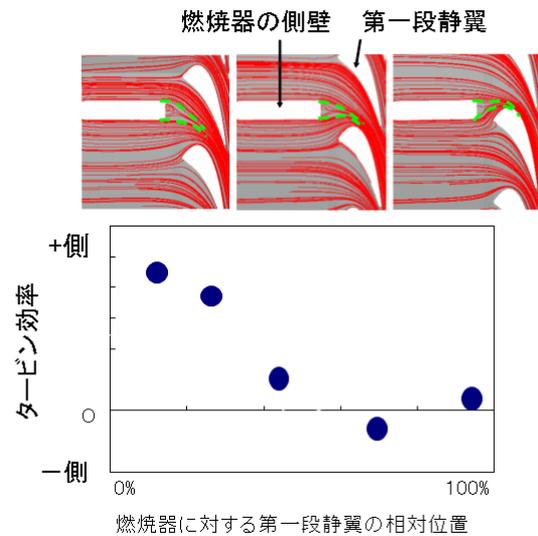


高速回転翼列試験装置

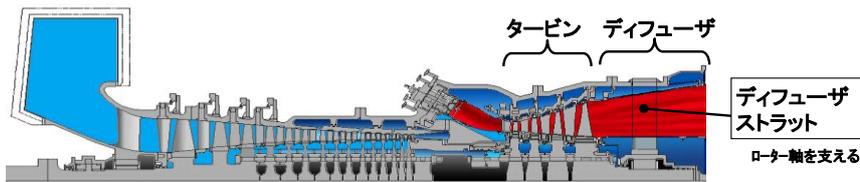
#### 先進3次元設計コンセプト



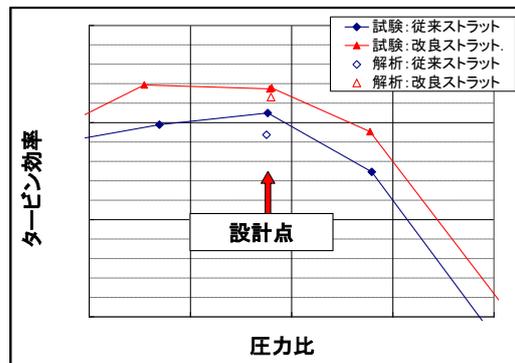
#### 燃焼器とタービンの配置最適化



ディフューザストラットの断面形状を最適化することで、**タービン全段効率が向上**することを試験にて確認した。



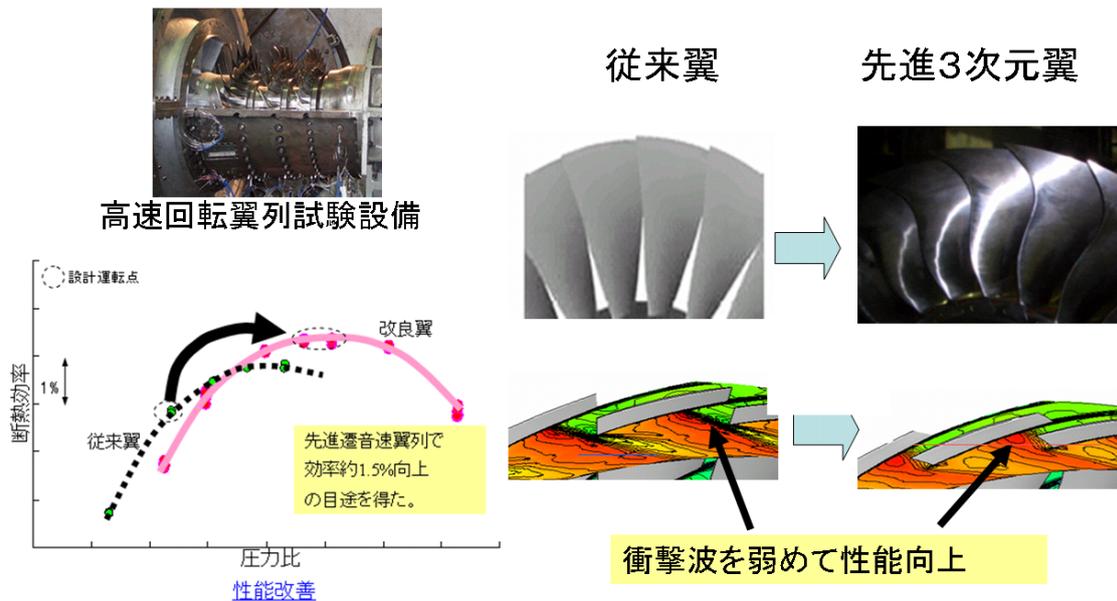
#### 断面形状の最適化によるタービン効率向上



## (5) 高圧力比高性能圧縮機の開発

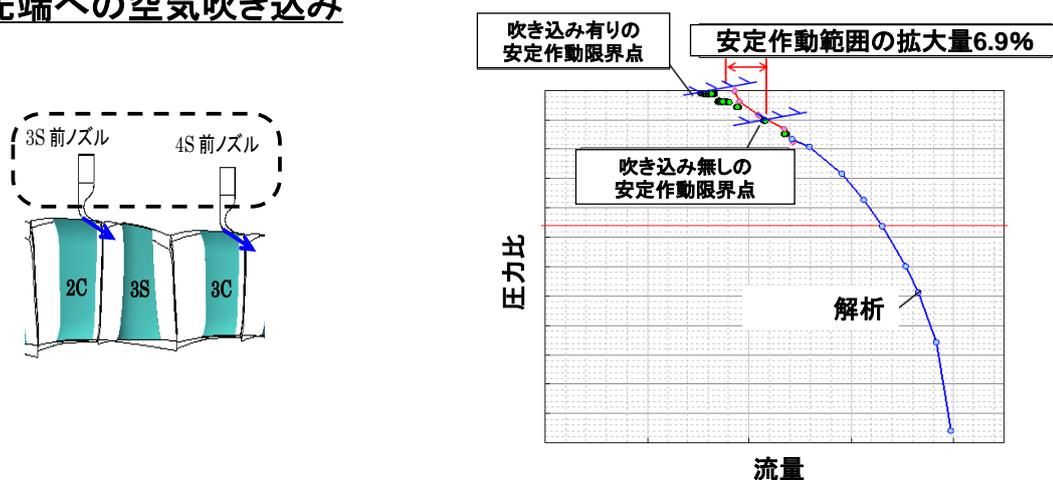
先進3次元空力設計技術により、遷音速段では衝撃波を制御、亜音速段では2次流れを制御することにより、いずれも性能を約1%以上向上しました。高速回転翼列試験により、実機での効率は89.3%(>目標89%)を達成可能であることを確認した。

さらに、起動条件も含めた運用性の確認を実施した。



安定作動範囲の拡大を狙い、翼の先端に空気を吹き込む方式を採用し、安定作動範囲を6.9%拡大できる結果を得た。

### 翼先端への空気吹き込み



### 3-1-3 特許出願状況等

本実用化技術開発の開始から申請を行った特許・論文等の総件数を表 3-3 に示す。また、それぞれの内容について、リスト化したものを表 3-4 に示す。

表 3-3 特許・論文等件数

論文数	投稿	発表	特許等件数 (出願含)	電力会社の 視察回数
5	10	42	37	210

表 3-4 論文、投稿、発表、特許リスト

(論文)

	題目・メディア等	時期
論文	三菱重工技報 VOL. 45 NO. 1 「火力プラントの高効率化への取り組み」	H20. 1
	三菱重工技報 VOL. 46 NO. 1 「高性能ガスタービンの最新空力設計技術」	H21. 1
	三菱重工技報 VOL. 47 NO. 1 「超高温ガスタービンの要素技術の開発」	H22. 1
	三菱重工技報 VOL. 47 NO. 1 「CO2 回収型 IGCC クリーンコール技術の商用化」	H22. 1
	三菱重工技報 VOL. 48 NO. 3 「超高温ガスタービンの要素技術の開発」	H23. 7

(投稿)

	題目・メディア等	時期
投稿	月刊「ターボ機械」 35 周年記念特集「地球温暖化対策とガスタービン」	H20. 7
	電気評論 「高効率天然ガス火力発電<高効率複合発電の実績と 1700℃級ガスタービンの要素技術開発>」	H20. 7
	火力原子力協会特集号 「今後のコンバインドサイクル発電設備の動向」	H20. 7
	日本ガスタービン学会誌 9 月号 「1700℃級ガスタービンの空力技術」	H20. 9

	日本ガスタービン学会第36回定期公演会「高負荷タービンへの3次元エンドウォールの適用」	H20.10
	月刊「ターボ機械」11月号「次世代コンバインドサイクルシステム実用化の進展と課題」	H20.11
	日本ガスタービン学会誌3月号「ガスタービン高温化技術の開発」	H21.3
	配管技術「ガスタービンコンバインドサイクルプラントへの取り組み」	H21.5
	エネルギー・資源学会「低炭素社会への挑戦」 「天然ガスを燃料とする火力発電 コンバインドサイクル」	H22.1
	エネルギー・資源学会 Vol.31 NO.2(2010)特集 大型火力発電の革新技術「1700℃級ガスタービンの技術開発」	H22.3

(発表)

	題目・メディア等	時期
発表	大阪大学第2回FDセミナー「1700℃超高温ガスタービン要素技術開発(国プロ)への取り組み状況について」	H20.1
	日本ガスタービン学会 第36回セミナー「1700℃級ガスタービン用TBCの開発状況」	H20.1
	第20回翼列研究会「タービン非対称エンドウォールに関する研究」	H20.3
	(社)火力原子力発電技術協会 エネルギー・新発電技術に関する講演会「次世代高温ガスタービン開発への取り組み」	H20.4
	中部電力セミナー「1700℃級ガスタービンの技術開発」	H20.5
	日本機会学会年次大会「1700℃級ガスタービン高性能フィルム冷却の開発」	H20.6
	動力シンポジウム2008「1700℃級ガスタービン燃焼器のLES解析」	H20.6
	ASME Turbo Expo 2008 Panel Discussion 「The Pathway Forward Future Products and Technology」	H20.6
	ASME Turbo Expo 2008 「Development of Combustor with Exhaust Gas Recirculation System for the Next Generation Gas Turbine Combined Cycle」	H20.6
	ASME Turbo Expo 2008 Panel Discussion 「Towards 2020 - Materials Needs for Advanced Gas Turbines of the Future」	H20.6

日本ガスタービン学会第36回定期公演会「高負荷タービンへの3次元エンドウォールの適用」	H20.10
The 4 <sup>th</sup> International Gas Turbine Conference「Introduction of the Next Generation 1700°C Class Gas Turbine Engine Development Project」	H20.10
岩手大学システム理工学系シンポジウム「エネルギー環境問題への重工・重電メーカーの取り組み」において、「ガスタービンプラントの高効率化」	H21.1
社) 火力原子力発電技術協会講演会「次世代高温ガスタービン要素技術開発」	H21.1
日本内燃機関「Development of Combustor with Exhaust Gas Recirculation System for the Next Generation Gas Turbine Combined Cycle」	H21.3
ASME Turbo Expo 2009 基調講演 「Long Term Perspectives & Sustained R&D Efforts are the Keys to Success」	H21.6
ASME Turbo Expo 2009 Panel Discussion 「The Pathway Forward Future Technology」	H21.6
Proceedings of the ASME Turbo Expo 2009, GT2009-59783, 「DEVELOPMENT OF KEY TECHNOLOGIES FOR THE NEXT GENERATION 1700C-CLASS GAS TURBINE」	H21.6
ACGT2009「Large Frame Gas Turbines Latest Development for High Efficiency」	H21.9
日本ガスタービン学会第37回定期公演会「回転動翼プラットフォームにおけるフィルム冷却に関する研究」	H21.10
International Conference on Power Engineering-09 「DEVELOPMENT OF ADVANCED TECHNOLOGIES FOR THE NEXT GENERATION GAS TURBINE」	H21.11
International Conference on Power Engineering-09 「DEVELOPMENT OF COMBUSTOR WITH EXHAUST GAS RECIRCULATION SYSTEM FOR THE NEXT GENERATION GAS TURBINE」	H21.11
東大生産技研講演会 「1700°Cガスタービンの開発状況—要素技術開発について—」	H22.1
PowerGen Europe Amsterdam 「Development of a New 1,600°C Turbine Inlet Temperature Large Frame Gas Turbine for High Combined Cycle Efficiency」	H22.5

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捗」	H22.6
ASME Turbo Expo 2010 Panel Discussion 「The Pathway Forward Future Technology」	H22.6
ASME Turbo Expo 2009, GT2009-59783, 「DEVELOPMENT OF KEY TECHNOLOGIES FOR THE NEXT GENERATION 1700C-CLASS GAS TURBINE」	H22.6
ASME Turbo Expo 2009 基調講演 「Long Term Perspectives & Sustained R&D Efforts are the Keys to Success」	H21.6
ASME Turbo Expo 2009 Panel Discussion 「The Pathway Forward Future Technology」	H21.6
Proceedings of the ASME Turbo Expo 2009, GT2009-59783, 「DEVELOPMENT OF KEY TECHNOLOGIES FOR THE NEXT GENERATION 1700C-CLASS GAS TURBINE」	H21.6
ACGT2009「Large Frame Gas Turbines Latest Development for High Efficiency」	H21.9
ASME Turbo Expo 2010, GT2010-23233, 「DEVELOPMENT OF KEY TECHNOLOGIES FOR THE NEXT GENERATION GAS TURBINE」 ★ASME Best Paper 賞受賞	H22.6
日本金属学会 本多記念講演 湯川記念講演 『火力発電プラントへの溶射技術の応用』	H22.10
ASME Turbo Expo 2011 「DEVELOPMENT OF KEY TECHNOLOGIES FOR THE NEXT GENERATION HIGH TEMPERATURE GAS TURBINE」	H23.6
第39回日本ガスタービン学会定期講演会(松本)「1700℃級ガスタービン排ガス再循環システムの燃焼器開発」	H23.7
International Gas Turbine Congress 2011 Osaka 「Progress in Technology Development for the Next Generation High Temperature Gas Turbine」	H23.11
International Gas Turbine Congress 2011 Osaka 「Aero and Aero-Thermal Characteristics of Turbine Rotor Blade's Platforms」	H23.11
International Gas Turbine Congress 2011 Osaka 「Development of Combustor with Exhaust Gas Recirculation system for 1700℃ class Gas Turbine」	H23.11

	International Gas turbine Congress 2011 Osaka 「Development of Advanced Thermal Barrier Coating for the Next Generation Gas Turbine」	H23.11
	ASME Turbo Expo 2012 Electric Power / Panel Session 「The Pathway Forward: Future Gas Turbine Products and Their Enabling Technologies」	H24.6
	産学官連携推進会議<第11回>イノベーションジャパン 2012 「日本経済団体連合会会長賞：1700℃級ガスタービン冷却技術の開発」	H24.9
	第40回日本ガスタービン学会定期講演会（釧路）「1700℃級ガスタービン排ガス再循環システムの燃焼器開発」	H24.10

### 3-2 目標の達成度

研究開発の目標に対する達成度を表3-5に示す。目標は全て達成した。

表3-5 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標	成果	達成度
全体の目標	コンバインド効率 56%以上 (HHV)	最新のデータを反映した予想値は56% (HHV)を上回る目途を得た。	達成
排ガス再循環システム/低NOx 燃焼器の開発	NOx 排出量 50ppm 以下	実機相当圧力で NOx 排出量 16ppm を確認した。	達成
高性能冷却システムの開発	冷却空気量 30%低減 (事業発足時比)	冷却空気量 30%低減 (事業発足時比) の目処を得た。	達成
低熱伝導率 TBC の開発	遮熱効果を現状材 (YSZ) より 20%向上	遮熱効果を現状材 (YSZ) より 20%向上低減した。	達成
高負荷・高性能タービンの開発	1500℃級ガスタービンに比べ 30%高い負荷条件において、1軸タービン、段数従来並みで、効率 91%以上	回転翼列試験により 91.3%の効率達成の目処が得られた。	達成

高圧力比高性能圧縮機の開発	圧力比 30 以上において、1 軸圧縮機、段数従来並みで、効率 89%以上	回転翼列試験により、89.3%の効率達成の目標が得られた。	達成
総合評価	—	目標を全て満足している。	達成

## 4 事業化、波及効果について

### 4-1 事業化の見通し

1700℃級ガスタービン実用化に当たっては、1500℃級ガスタービンの開発で得られた知見の延長線上での開発が困難であり、全く未知の領域での開発が必要となることから、以下の実用化までのロードマップに示すように、段階を踏んで開発を進めることによりリスク低減を図り確実に技術開発を進めることとしている。

表 4-1 1700℃級ガスタービン実用化のロードマップ

	2000	2005	2010	2015~
先端要素技術開発		要素技術 '04~'07	実用化技術 '08~'11	実機適用技術 '12~
要素技術の実用化		1600℃級開発		1600℃級複合発電
実機開発と実証				実機開発・実証 1700℃級複合発電
次世代技術				1700℃級IGCC SOFC+GTCC
超耐熱材料開発		物材機構委託研究 ('04~'10) (挑戦的基礎研究) ・優れた特性を有する画期的な材料成分を発見(特許出願済み)	NEDO研究 (先導研究) ・組成範囲決定 ・製造条件確立	実用化研究 (量産技術確立)

これまでの検討を通じて、1700℃級ガスタービンの実現の為に必要となる燃焼、材料等の革新的な要素技術の完成度を、各要素試験や解析検討、より実機に近いモジュール試験を通じて、実用可能なレベルであることを確認した。

前述のように、各国家において、エネルギーセキュリティ、経済性、環境問題の解決の全てに深く関係するため、その先進性・困難性にかかわらず、ガスタービンの高温化はスピードが非常に速く、国家間の開発競争は熾烈を極める。従って、厳しい国際競争の中でわが国のリードを保つためには、一刻も早く当該技術を実用化して実機に展開する必要がある。

一方で、およそ 700℃~900℃の高温・1万 G を超える高遠心力の厳しい条件

下で 1 年以上の連続運用が求められる発電用ガスタービンには、あらゆる機械製品の中でも最も技術の裾野が広く、且つ、先進性の高い機械のうちのひとつであり高い完成度が求められる。従って、1500℃級から 1700℃級に、一足飛びに 200℃高温化することは大きなリスクを伴うことも事実である。そこで、ガスタービンの高温化における我が国のリードを保ち、且つ、1700℃級ガスタービンの実現の足掛かりとするために、本プロジェクトと並行して、1600℃級ガスタービンの開発を実施した。

すなわち、我が国の 1500℃級の経験を基礎としつつ、本プロジェクトの要素試験・解析・モジュール試験を経て、その有効性や信頼性が確認できた革新的要素技術に関しては即時実用化することにより、世界で初めてとなる 1600℃級 J 形ガスタービンを開発した。現在、2011 年 2 月からの試運転でデータを取得し、同年 12 月に関西電力様に商用機を出荷した。2013 年 8 月からは商用運転に入っており、高効率かつ安定的な電力供給に貢献している。

事業発足当時の 1500℃級から 100℃高温化した未知の世界での運用実績を蓄積すると共に、実運用を通じてしか知ることの出来ない技術課題の抽出を行なっている。

#### 4-1-1 要素技術開発成果の既存機種への適用、実用化について

高性能冷却システムと、低熱伝導率遮熱コーティングなどについては、既存機へ適用する場合の改良範囲が比較的小さいため、1500℃級ガスタービン(\*)の性能向上を目的にタービン翼への適用を実施した。具体的には、三菱重工業(株)高砂製作所内の 1500℃級ガスタービンにて、試験適用して実績を評価し、量産機に展開した。

- (\*) 1500℃級は、現在世界トップの高温レベルであるが、既に 10 年間の実績があり、高温部のガス温度分布やメタル温度などのデータが揃っているため、新技術を適用可能と判断した。

他の要素についても、複数の既存機種への適用を予定しており、1700℃級の実用化に先立ち、以下の大きな効果を期待している。

- 国プロ技術導入効果により、効率向上が加速
  - 1400℃～1500℃級ガスタービンへ新技術を展開することにより、H18 年度からの 10 年間で平均約 2% 発電効率を向上した。
  - 世界初の 1600 度級ガスタービンの開発により、発電効率を 54% (HHV) 以上へ向上した。

- CO2 削減効果（国内）
  - ガスタービン効率向上分 約 450 万トン（10 年間）
  - 微粉炭焚火力からガスタービンコンバインドへ置換 約 1500 万トン（10 年間で 5 プラントと仮定した場合）
- 経済効果
  - 上記効率向上により、技術開発競争が熾烈な市場において、大型ガスタービン 20 台/年から 30～40 台/年に競争力向上
  - 3000 億円～5000 億円の経済効果が期待できる。

#### 4-1-2 1700℃級ガスタービンの事業化の見通しについて

##### （市場規模）

先進国および開発国のいずれも、電力需要が伸びており、ここ数年で、40 ギガワット→45 ギガワットに世界市場が拡大した。特に、燃料価格の高騰と高止まり、環境問題の深刻化により、高効率ガスタービンの需要が伸びている。

日本、米国、EU、アジアの一部を中心に、1400℃級→1500℃級へ主力機が移行している。引き続き、超高性能機へ移行していくことは確実であり、大型ガスタービンの台数で年間 200 台程度の市場規模は十分期待できる。したがって、現在高温化で世界をリードしているわが国が、先行開発をしていくことは需要側からの期待も大きい。

##### （環境問題）

ここ数年、地球温暖化に対するニーズが高まっている。

経団連の自主行動計画である電気事業連合会の CO2 排出原単位の目標

1990 年：0.42kg-CO<sub>2</sub>/kWh ⇒ 2010 年：0.34kg-CO<sub>2</sub>/kWh

（原子力を含むすべての発電設備の平均値）

に対して、1700℃級複合発電では、0.31 ～ 0.32kg-CO<sub>2</sub>/kWh であり、目標を上回る初の火力発電システムとなる。

さらに、1700℃級で検討している EGR（排ガス再循環システム）を用いることにより、排ガス中の CO<sub>2</sub> 濃度を高くすることができるため、CO<sub>2</sub> 回収を他のどの火力発電システムより、安価に実現することが可能となる。

##### （信頼性確保）

事業発足時の 1500℃級と比較して、1700℃級複合発電設備の実用化に

対しての懸念事項として、信頼性確保が挙げられる。

信頼性確保については、通常の高スタービンと同様、要素技術開発に引き続き、実用化技術開発を実施することにより、実設計に入る前のリスク低減を図る。また、上述のように 1500℃級高スタービンの経験を活かし、また、1600℃級 J 形高スタービンに先行適用することにより、総合的な信頼性向上を行うことが可能となる。

(経済性)

事業発足時の 1500℃級と比較して、1700℃級複合発電設備を実用化する場合、設備のコストアップが懸念事項としてある。これについては、プラント全体に占める高スタービンのコスト割合が、約 15%程度と少ないため、性能向上（約 53%→56%）による燃料消費量低減効果と比較することにより、十分な経済性があると判断される。(Gas Turbine World 2006 Handbook より概算)

複合発電のプラント初期設備費を 100 とした場合の金額の概略比較を示す。

・複合発電のプラント初期設備	100
・高スタービン本体	約 15
・1700℃級によるコストアップ(仮に 10%~20%とする)	約+1.5~3.0 (A)
・1年間の燃料代(ベースロード運用)	200~300
・1700℃級導入による燃料代低減(+3/53)	Δ11~Δ17 (B)

コストアップ額(A)よりも、燃料代低減額(B)のほうが圧倒的に大きく、経済的には、性能向上のメリットが大きい。

1700℃級高スタービンの要素技術開発には、国内外の電力会社から高い関心を寄せられており、これまでに多くの電力会社の要求により、延べ約 210 回の視察・報告会を開いている。

開発事業化には、立地も含め、これらの電力会社の協力が不可欠であり、将来の事業計画について交渉していく。

#### 4-2 波及効果

本技術開発により、世界最高効率の 1700℃級高スタービン技術確立の目処を得た。本技術により、既成高スタービンよりも少ない燃料で発電することが可能となり、限られた化石燃料の有効利用、発生 CO<sub>2</sub> 量の削減に貢献することが

出来る。

上述のように、開発した革新的な技術のうち、実記適用可能と判断されたものは、世界初の 1600℃級 J 形ガスタービンの実用化に適用された。これにより、我国のコンバインド発電技術の優位性を保つことが出来る。また、1500℃級をはじめとする既存のガスタービンへの技術的適用も進められており、大型の発電用ガスタービン全体の競争力強化の点で波及効果は大きい。

さらに、高効率高温ガスタービンは、石炭ガス化発電 IGCC の主機の一つとして、そのまま適用可能である。1700℃級の IGCC が実現すれば、燃料の多様化によるエネルギーセキュリティー上のメリットに加え、発生 CO<sub>2</sub> 量の大幅な削減が期待できる。

- ・ 高効率ガスタービンの開発により、国家的に補助されて伸長している欧米のメーカーに対して、高い競争力を有する高性能ガスタービンの製造が可能になり、国内・海外の新規プラントに対して国産機の受注増大、外貨獲得が見込めるので、国内関連産業への波及効果も含めて国益になる。(米国エネルギー省(DOE)の国家プロジェクトでは米国ガスタービンメーカー、大学に 1992 年から 10 年間で約 800 億円を投資。また、EU でも、要素技術開発を実施中。)
- ・ 現在急拡大する中国市場への進出の代償として、中国メーカーへの技術移転を要求される。将来中国との競争で生き残るためには、ガスタービンに適用される高度総合機械技術のエッセンスである要素技術を次のステップに進化させる国家プロジェクトが、日本産業界にとっても重要な意味を持つ。
- ・ 本プロジェクトで開発される超高温ガスタービン技術は、本技術は、LNG 焚き複合発電以外に、
  - ・ IGCC 用ガスタービンの高効率化
  - ・ 将来の水素(\*)燃焼ガスタービン(\*)IGCC からの水素製造、原子力夜間電力による水素製造に展開可能である。いずれに対しても総合効率を決めるキーテクノロジーであり、今後の燃料多様化、エネルギーのベストミックスに対して有効な技術となるため、日本産業界の競争力強化のために非常に価値がある。

1700℃級ガスタービンは、次世代発電の基盤を担う共通キー技術。

- エネルギーの安定供給  
燃料多様化---LNG、石炭IGCC、水素（原子力夜間電力で製造）  
のいずれにも適用可能
- 環境にやさしい  
火力発電システムの中で最も安価にCO2回収が可能
- 卓越した経済性
- 負荷調整能力

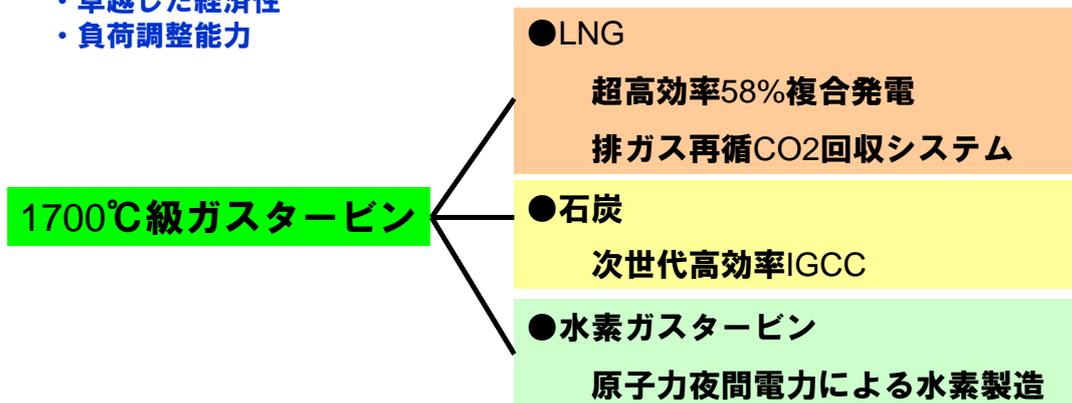


図4-1 次世代発電技術の基盤を担う共通技術

5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等

5-1 研究開発計画

表5-1 研究開発計画

	H20年	H21年	H22年	H23年
高圧力比高性能 圧縮機	前方段モデル試験 中間段モデル試験	改良設計	改良モデル圧縮機試験	圧縮機モジュール試験
高負荷高性能タービン	高圧段モジュール試験 高精度流動解析	低圧段モジュール試験	改良モジュール試験	
高性能冷却システム	冷却コンセプト検討 実用化モジュール試験装置検討	高圧高温翼列設計	供試翼、試験装置製作 中圧高温翼列試験	高温高圧翼列試験
排ガス再循環システム／低NOx 燃焼器の開発	燃焼器基本計画 高圧燃焼装置基本計画	実用燃焼器製作 詳細設計	実用化サイクルシステム検討 高圧燃焼装置製作	高圧燃焼試験
低熱伝導率遮熱 コーティング	経年変化特性評価 実用化溶射条件及び	材質改良 寿命評価技術	試験翼への成膜 高品位実用化成膜技術	
予算額(百万円)*	324	559	615	689

※補助金ベース

## 5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本研究開発は、公募による選定審査手続きを経て、三菱重工業(株)が経済産業省からの補助金を受けて実施した。また、再委託先として大阪大学、九州大学、北海道大学、大阪工業大学が参加した。

また、研究開発の実施に当たっては、研究開発を統括するためのプロジェクトリーダー(三菱重工業(株) 伊藤栄作)を任命した。

さらに、超耐熱材料の開発にあたっては、他の要素技術に比べてより基礎的な研究からスタートする必要があること、技術開発に時間がかかることなどの理由により、省庁間連携として文部科学省と物質・材料研究機構が、委託先である三菱重工業(株)と研究を実施した。

○ プロジェクトリーダー： 三菱重工業(株) 伊藤栄作

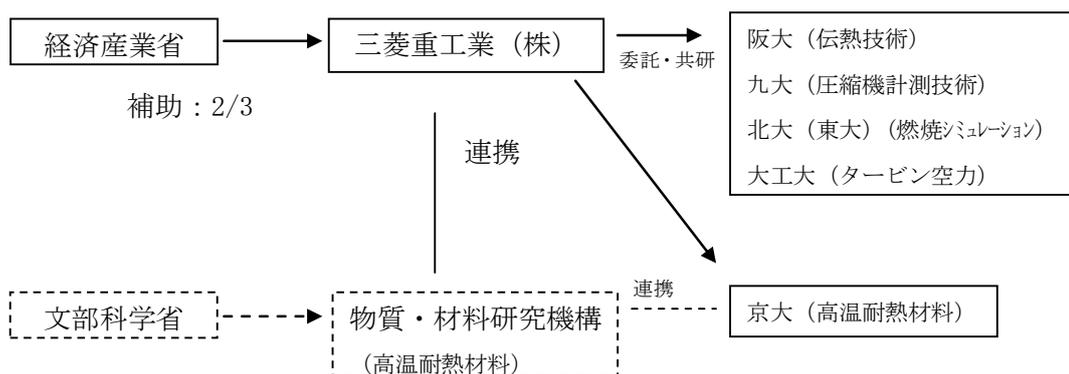


図5-1 研究開発実施体制

### 5-3 資金配分

表 5-2 資金度配分

(単位：百万円)

年度 平成	20	21	22	23	合計
排ガス再循環システム／低 NO <sub>x</sub> 燃焼器の開発	70	224	260	263	817
高性能冷却システムの開発	56	77	84	108	325
低熱伝導率 TBC の開発	78	85	94	115	372
高負荷・高性能タービンの開発	59	90	84	97	330
高圧力比高性能圧縮機の開発	61	83	93	106	343
合計	324	559	615	689	2187

#### 5-4 費用対効果

本事業には4年間で約22億円の補助金が投じられ、ガスタービンを用いたコンバインドサイクルとしては世界最高の発電効率である56%（HHV）を達成する目処をつけるなどの成果をあげた。

さらに、石炭石油焚きの老朽火力発電設備の高効率コンバインドサイクル発電設備へのリプレース需要が高まっており、この場合は、効率の向上量が大きくなるため、さらに大きな燃料削減効果が期待できる。

1700℃級の高効率ガスタービンを開発した場合、既設の重油焚き、石炭焚き火力発電の30%～50%の発電出力を1700℃級複合発電に置き換えると、発電所から発生するCO<sub>2</sub>発生量の10～17%（\*）が削減可能である。

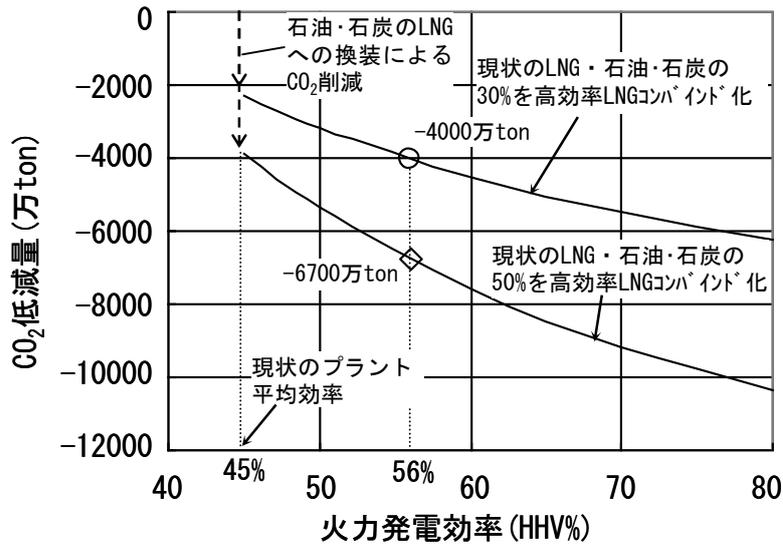
（\*）我が国の電気事業全体からのCO<sub>2</sub>排出量約4億トンとの比較。なお、ベースは、電中研予測の図5-3の「わが国における電源構成の推移（後出）」に基づいている。

また、排ガス再循環システムではCO<sub>2</sub>回収が、他のシステムより低コストで実現可能となる可能性がある。この場合は、CO<sub>2</sub>排出原単位は0.03kg-CO<sub>2</sub>/kWh程度とできる。

既設の火力発電所の30%～50%を1700℃級ガスタービン高効率コンバインドプラントに置き換えると、原油換算で1300万～2200万トン/年の省エネ効果がある。

表5-3 1700℃級複合発電によるCO<sub>2</sub>削減効果／省エネルギー効果

置きかえる既存発電所の割合	CO <sub>2</sub> 削減量	全発電所の排出量に占める割合	省エネルギー効果 (原油換算)
30%	4000万ton/年	10%	1300万トン
50%	6700万ton/年	17%	2200万トン



1700°C級ガスタービンCO<sub>2</sub>低減効果

図5-2 1700°C級ガスタービン導入によるCO<sub>2</sub>低減効果

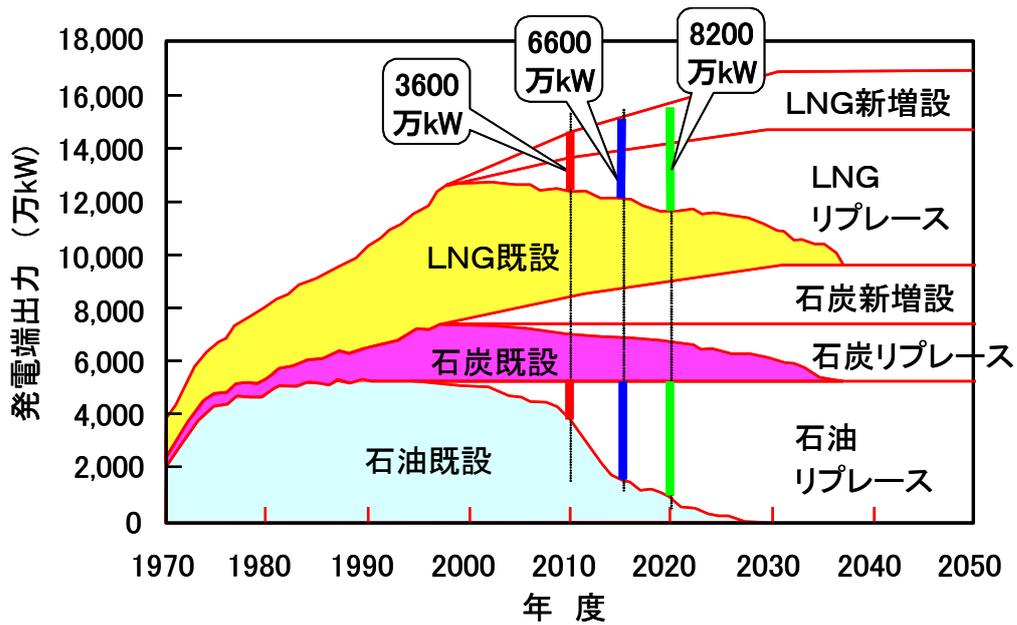


図5-3 わが国における電源構成の推移（プラント寿命40年）

出典：電力中央研究所「第18回エネルギー未来技術フォーラム」（1999.11.2）

## 5-5 変化への対応

### (環境問題への対応)

環境問題の高まりにより、温室効果ガスの排出量低減に対する要求が高まっている。このため、風力発電や太陽光発電などの自然エネルギーの普及に拍車がかかっている。天候に左右される自然エネルギーの普及とともに、負荷吸収能力の高い大容量の電源が必要となるが、この点でガスタービンは最適である。また、化石燃料を使用する火力発電についても、よりCO2排出原単位の小さいクリーンな燃料として天然ガスが選択されることが多くなっている。本プロジェクトで開発中の技術により可能となる、超高温高効率ガスタービンを用いたコンバインド発電は、このような市場のニーズ・トレンドに沿っており、有効な技術開発である。

### (国内リプレース需要への対応)

一方、このような環境負荷の小さい発電設備に対する要求と並行して、先進国では導入後30年以上を経た老朽火力のリプレース需要が急速に高まりつつある。このような発電設備では、経済性が重要視されるため、発電効率の高い最新鋭のガスタービンを用いたコンバインド発電が選択される場合が多い。このようなニーズにいち早く応えるために、本事業で開発した革新的な要素技術のうち、実機適用可能と判断された技術を活用して、世界初の1600℃級J形ガスタービンを開発し、商用機として実用化した。

#### 関西電力姫路第二発電所(2013年運用開始、292万kW、M501J×6台)

公開された環境アセス資料より抜粋

●最新鋭の1,600℃級ガスタービンを採用した世界最高水準の高効率コンバインドサイクル発電方式に設備更新することで、発電端熱効率(低位発熱量基準※)が約42%から約60%に向上します。

●発電電力量あたりの燃料費とCO2排出量を共に約30%低減することができます。



項目	現状	設備更新後
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	255.0万kW (25.0万kW×1基、 32.5万kW×2基、 45.0万kW×1基、 60.0万kW×2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%

#### 東京電力

川崎発電所  
(2016年度、142万kW、2台)

公開された環境アセス資料より抜粋。  
(機種などは未定)

図5-4 1600℃級ガスタービンの高効率を前提とした国内発電設備の計画

(出典：公開された環境アセス資料より)

(急速な円高の影響と対応)

我が国は、徐々にシェアを伸ばしてきたが、2009 年は、リーマンショックの急速な円高のため世界市場で苦戦を強いられた。しかし、国プロで開発した技術を反映した 1,600℃級 J 形ガスタービンの市場投入により 2010 年以降はシェアを伸ばしてきている。