

高効率ガスタービン実証事業
(1700℃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.....	5
2. 研究開発目標.....	8
2－1 研究開発目標.....	8
2－1－1 全体の目標設定.....	8
2－1－2 個別要素技術の目標設定.....	9
3. 成果、目標の達成度.....	15
3－1 成果.....	15
3－1－1 全体成果	
3－1－2 個別要素技術成果	
3－1－3 特許出願状況等	
3－2 目標の達成度.....	34
4. 事業化、波及効果.....	38
4－1 事業化の見通し.....	38
4－2 波及効果.....	44
5. 研究開発マネジメント・体制・資金・費用対効果等.....	46
5－1 研究開発計画.....	46
5－2 研究開発実施者の実施体制・運営.....	48
5－3 資金配分.....	49
5－4 費用対効果.....	49
5－5 変化への対応.....	51

1. 事業の目的・政策的位置付け

1-1 事業目的

本事業は、我が国の電源構成の約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、発電効率が現状の1500℃級複合発電の52%程度、さらに運用が始まった最新の1600℃級複合発電の54%レベルから57%（送電端、HHV基準）まで向上すれば、二酸化炭素排出量はさらに約6%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現状の1600℃級から世界初の1700℃級に高める。これにより、高温化でリードしてい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、排熱再循環システムを用いた燃焼器については、排ガス中のCO₂濃度が約8%となり、CO₂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CO₂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CO₂排出量（発電効率52%で、0.34kgCO₂/kWh）を約0.03kgCO₂/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手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に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

（CO₂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

1－2－1 低炭素社会づくり行動計画（2008 年 7 月閣議決定）

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－エネルギー革新技术計画」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。

1－2－2 エネルギー基本計画（2010 年 6 月 18 日閣議決定）

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、リプレイ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。

1－2－3 日本再興戦略（2013 年 6 月 14 日閣議決定）

「日本再興戦略 -JAPAN is BACK-」(2013 年 6 月 14 日閣議決定)において、成長戦略を実行・実現するものとして、政権を挙げて優先的に取り組むべき施策を厳選し、3つのアクションプランが打ち出された。

このうちの、「戦略市場創造プラン」は、課題先進国としての現状を攻めの姿勢で捉え、社会課題を世界に先駆けて解決することで新たな成長分野を切り開こうとする、未来を睨んだ中長期戦略である。プランの実行により、課題克服による不安の解消と、成長産業の育成の同時達成を目指すとされている。

より具体的には、エネルギー制約などの社会課題は、今後確実に巨大なグローバル市場を形成。日本はこれら課題の先進国であり、高度な技術力で市場を獲得する潜在力を有するが、

- －規制制度や慣習に縛られていること、
- －ビジネスを展開するインフラが未整備であること、

などにより市場形成に至っていない。世界でも最先端の研究開発でしのぎを削っている分野での取組の遅れは、容易に取り戻すことが困難である。

このため、世界や我が国が直面している社会課題のうち、「日本が国際的に強み」を持ち、「グローバル市場の成長が期待」でき、「一定の戦略分野が見込めるテーマ」として、4テーマのうちの一つとして、「クリーンかつ経済的なエネルギー需給の実現」を選定し、集中改革期間経過後の「2020 年」、中期的な政策展開の観点から「2030 年」を時間軸とし、研究開発から規制緩和に至るまで政策資源を一気通貫で集中投入するための「ロードマップ」を策定することとなった。

(1) 2030 年の在るべき姿

アジアを始めとする新興国での需要の増大、シェールガス革命を経た供給構造の変化、世界及び各地で高まる環境負荷など、変わりゆくエネルギー情勢の中で、低廉な価格で必要なときに必要な量のクリーンなエネルギーを安心して利用できる社会を実現する。また、時間・場所の制限を越え、エネルギー需給の無駄を省き、エネルギーを余すことなく徹底的に活用することにより、環境負荷を減らし、日本全体で最適なエネルギー利用を実現する。

次の3つの社会像を実現したエネルギー最先進国を目指す。

- ① クリーンで経済的なエネルギーが供給される社会
- ② 競争を通じてエネルギーの効率的な流通が実現する社会
- ③ エネルギーを賢く消費する社会

このため、今後取り組むエネルギー構造改革の中で、新たに生まれる技術や事業の芽を着実に育て、大きく発展させることにより、確実に果実を生み、成長を支える環境・エネルギー産業を創造するとともに、多様・双方向・ネットワーク化によるクリーン・低廉なエネルギー社会の構築を目指す。

また、深刻化する地球環境問題の解決にも積極的に貢献していくため、我が国の優れた環境・エネルギー技術の展開を通じて、新興国を始め、世界全体で急速に拡大する環境・エネルギー関連市場を獲得していく。

(2) 個別の社会像と実現に向けた取組

- ① クリーンで経済的なエネルギーが供給される社会

I) 社会像と現状の問題点

エネルギー源の供給途絶や価格の乱高下等、予期せぬエネルギー情勢の変化があったとしても、国民や企業が、いつもと変わらず、低廉な価格で必要な時に必要な量のクリーンなエネルギーを安心して利用できる「エネルギーが身近で使いやすい環境」を目指す。

一方、東日本大震災以降、老朽火力のたき増し等により、火力発電の燃料コストが大幅に増加している。

Ⅱ) 解決の方向性と戦略分野（市場・産業）及び当面の主要施策

高効率火力発電を徹底活用し、エネルギーコストを低減させる。火力電源の新增設・リプレースを原則入札にして効率性・透明性を高めるとともに、環境アセスメントの明確化・迅速化を図り、民間企業が高効率な火力発電（石炭・LNG）に円滑に投資できる環境を整備する。同時に、先進技術開発を加速し、世界最高水準の効率を有する火力発電を我が国で率先して導入するとともに、世界へ積極的に展開する。

○火力発電の技術開発支援

・LNG 火力について、2020 年頃までに 1700 度級ガスタービンの実用化を目指す（発電効率：現状 52%程度→改善後 57%程度）。

1-2-4 総合科学技術会議 環境エネルギー技術革新計画

また、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た(図1参照)。 この中でも 2020 年をターゲットに、57%の発電効率を目指すことが記載されている。



出所：技術戦略マップ2013年9月

図1. 技術ロードマップ（高効率天然ガス発電）

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産学の連携が必要であるが、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(図2参照)。

(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カ国に絞られてつつある(図3参照)。



図2 発電用大型ガスタービンの特徴と、国の関与の必要性

(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は欧米メーカーが大きく、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。

したがって、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、発電効率 57%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。

(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(図 3 参照)。

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。

- わが国は、世界に先駆けて1500℃級ガスタービンを実用化し、本分野をリードしています。
- 欧米は、巨額の研究開発費を投じており、日本は手を緩めるとすぐに競争力を失ってしまいます。
- 優位性を維持するため、1700℃級に必要な革新的技術開発に取り組み、早期に実用化する事が必要です。

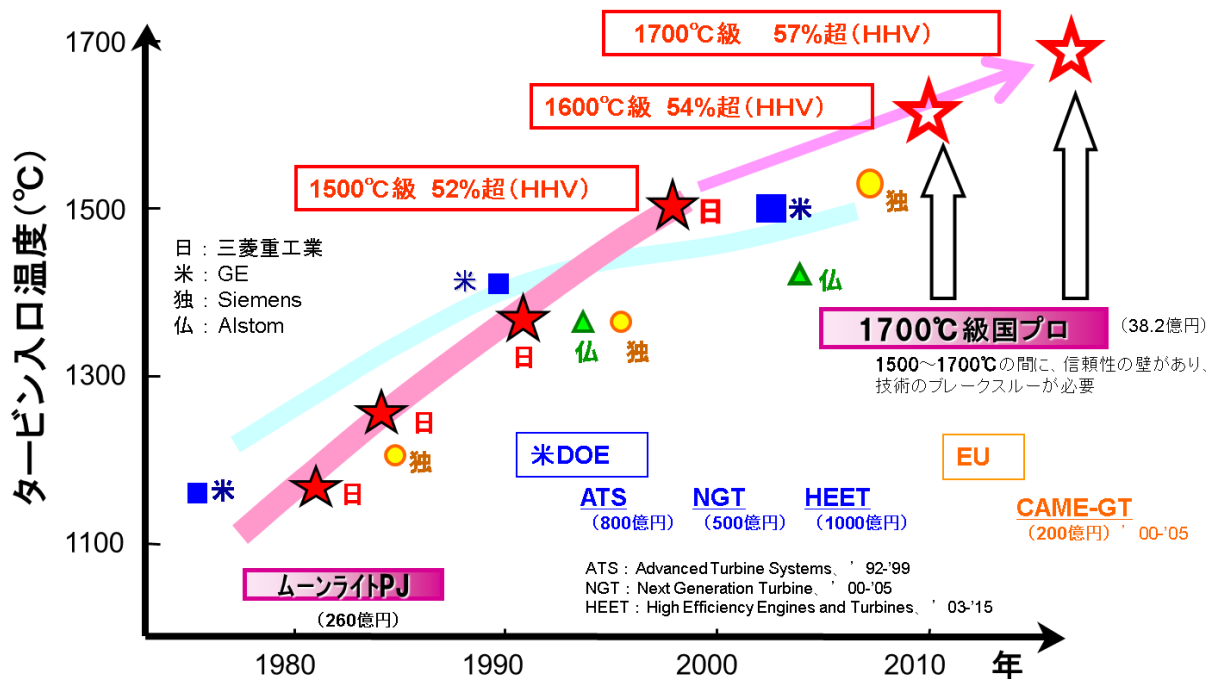


図 3 ガスタービンの高温化と各国の開発競争

（４）補助率の妥当性

本事業は、４年間の要素技術開発（技術開発事前技術検証）とそれを基にした５年間の実証試験の計９年間の計画となっている。

４年間の要素技術開発（技術開発事前技術検証）では、更なる高性能化を狙う（目標を従来の５６％⇒５７％に１ポイント向上）ために、

- 主要コンポーネントの先端要素技術のさらなる高度化
- を狙う。これに加え、以下の要素技術開発が必要となる（図４参照）。
- 主要コンポーネント以外で、設計に必要な先端要素技術
 - 製造に先立ち準備しておくべき、先端製造技術や検査技術
 - 試運転時にガスタービン内部の温度や振動を計測するための特殊計測技術

これらは、いずれも最先端の要素技術であり、実用化のリスクも高いため、産学の連携が必要となる。また、開発には数年間のリードタイムが必要であり、信頼性確保のためには、試行錯誤が必要となるため、最初の４年間の要素技術開発に対しては、２／３の補助率が妥当である。

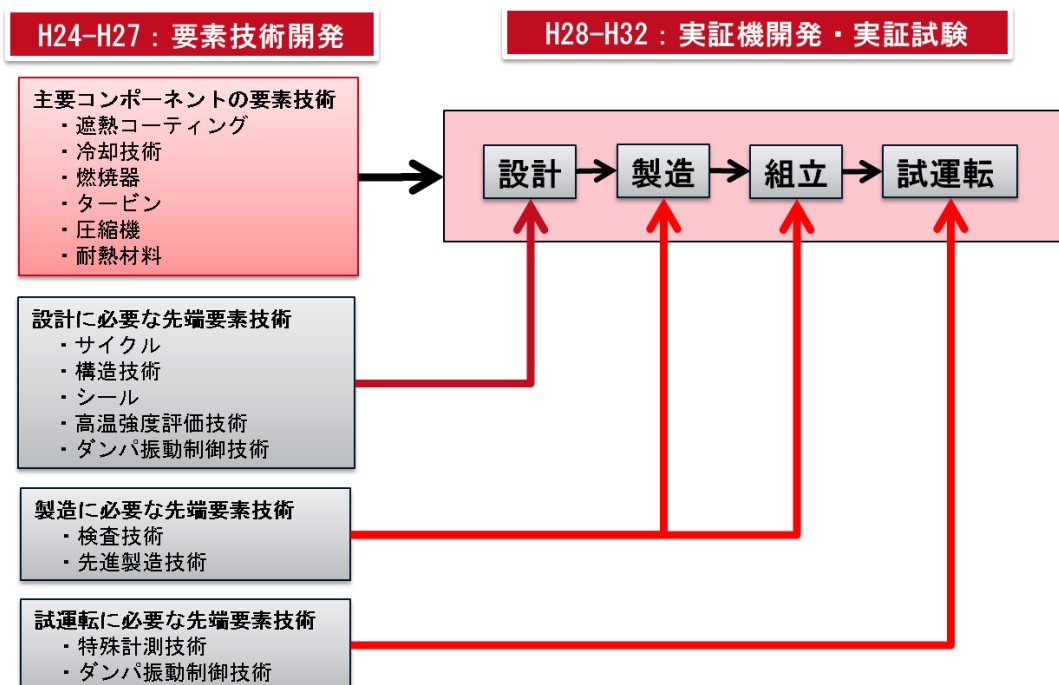


図４ 要素技術開発と実証機開発・実証運転の関係

2. 研究開発目標

2-1 研究開発目標

2-1-1 全体の目標設定

電力産業の保守高度化とリプレイス需要にあった大容量機（コンバインド出力 40 万 kW 以上）の高効率化を目指し、目標送電端効率 57%以上（HHV：高位発熱量基準）を達成するために必要な、1700℃級ガスタービンの技術開発を行い、実証試験により、実用化を図る。

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通して、より効率を高められる可能性が高まったため、目標値を従前の 56%から 57%に改めるに至った。57%は、2020 年市場導入時に世界最高効率で、海外メーカーに確実に先行できる発電効率レベルである。

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（事前技術検証）を行い、システムの成立性をシミュレーション等により確認する。

- ・低 NO_x 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

中間評価時点での目標は以下である（表 1）。

表 1. 全体の目標

目標・指標 (事後評価時点)	目標・指標 (中間評価時点)	設定理由・根拠等
発電効率 57% (高位発熱量基準、送電端)	発電効率 57% (高位発熱量基準、送電端) を達成するために必要な、要素技術の開発目標に向けて、解析や要素試験により、各項目の達成目途を得る。 また、要素試験の実施仕様を明確にして、準備を進める。	2020 年市場導入時に世界最高効率で、海外メーカーに確実に先行できる発電効率を目標とした。

2-1-2 個別要素技術の目標設定

個別要素技術の目標を表2に示す。

表2. 個別要素技術の目標

要素技術	目標・指標 (事後評価時点)	目標・指標 (中間評価時点)	設定理由・根拠等
①低熱伝導率遮熱コーティング	遮熱性を+30%向上 (従来: 1600℃級ガスタービン)	・厚さ 0.5mm 以上で試作し、熱疲労寿命が従来並みであることを確認する。 ・エロージョン試験装置製作および試験着手。	【超高温での遮熱性の大幅向上と、耐久性の両立】 ・遮熱コーティング厚 0.3mm (従来) ⇒0.5mm 以上を狙う。一方で、熱疲労寿命は従来並みを確保する必要がある。 【エロージョン/コロージョンの発生防止】 ・発電用ガスタービン特有のエロージョン/コロージョンに対し、耐久性向上(従来比減耗量Δ50%)を実現する。 【大型3次元翼の高品質確保】 ・航空用GTの3倍以上の大型翼で、溶射ガンの近接距離の制約が大きく、翼の熱変形も大きい条件下で、高品質な被膜を実現する溶射技術(または蒸着技術)を開発する。
②高性能冷却システム	冷却空気量を10%低減 (従来: 1600℃級ガスタービン)	・実機燃焼器を上流に設置した状態でのタービン翼列の気流・伝熱試験による端壁面での詳細データ取得。	【冷却空気流量の大幅削減】 ・ガス温度を約 100℃高めつつ、従来より少ない冷却空気流量で、高温部品の金属表面/コーティング表面の温度レベルを、従来並みに抑える冷却構造を開発する。 【複雑な現象の実験データ取得とシミュレーション技術の開発】 ・燃焼器下流の強い乱れの下で、翼表面近傍での高温ガス流れの挙動や、伝熱への影響を予測可能なシミュレーション技術を開発する。 局所流速精度 ±10%以内

			熱伝達率精度 ±30%以内 ・冷却翼の内部冷却通路内の流れと、翼外部の高温ガス流れの連成効果を考慮し、最大限の冷却効果を得る伝熱評価/冷却設計技術を開発する。 圧力予測精度 ±10%以内
③非定常性制御燃焼技術	NO_x 40ppm（排ガス再循環有り） （従前の目標は 50ppm） 50ppm（排ガス再循環無し）	・排ガス再循環有の条件で、NO_x 40ppm 以下を確認した。 ・レーザーによる気流計測による燃焼器内気流データの取得。 ・レーザー計測による実機燃焼器形態での火炎形状の把握。 ・火炎形状と圧力変動計測を同時計測し、燃焼を不安定にする領域を特定する。	【排ガス再循環を最小限として、超高温での低 NO_x 化を実現】 ・排ガス再循環を最小限（従来 30%⇒5%～0%）とした条件で、NO_x 50ppm を達成する燃焼制御技術を開発する。 【超高温での不安定燃焼発生防止】 ・サイクルの高圧力比化に伴い燃焼用空気温度が高くなる（従来 450℃⇒500℃程度）場合の、燃料の自己着火や逆火などの発生防止。 【燃焼振動の発生メカニズムの理解と発生防止】 ・燃焼振動現象のメカニズムの解明と、評価技術の開発を行う。 ・車室や、流体/燃焼の影響を考慮した音響特性のシミュレーション技術を開発する。 【燃料多様化技術】 ・超高温燃焼で顕著となる燃料成分変化の影響を把握するとともに、油燃料も使用可能な燃料ノズルを開発する。
④超高性能タービン	一軸タービンで、効率 92%以上 （従前の目標は 91%以上）	・タービン効率向上コンセプトの抽出 ・高速回転試験装置により、排	【超高温・高負荷条件での高効率の実現】 ・従来並みの 4 段もしくは 5 段で、目標効率 92%を達成する空力設計技術を開発する。

		気ディフューザの改良効果として、排気の流体損失 50%低減を確認する。 ・モデルタービン試験データによる、動翼-静翼間の翼列干渉効果による励振力の評価メカニズムの考察	【排気損失低減】 ・ガスタービン出口から排熱回収ボイラまでの流体損失を最小とするディフューザコンセプトを開発する。 圧力損失を従来比Δ50% 【シール空気量を低減】 ・高温ガスの混入を防ぎつつ、従来より 10%以上シール空気を低減する流動制御技術を開発する。 【超高負荷での励振力低減】 ・タービン翼に加わる流体変動力が数 10%大きくなるため、励振メカニズムを解明し、励振力の低減を図る。従来比Δ10%。
⑤境界層制御高性能圧縮機	一軸圧縮機で、圧力比約 30 効率 90%以上 (従前の目標は 89%以上)	・モデル圧縮機試験により、前方段の負荷を約 10%高めた条件で、段効率+1%向上を確認する。 ・中後方段に対し、モデル圧縮機試験により、多段条件での動翼チップクリアランス流れデータを取得・評価する。 ・多段モデル圧縮機試験装置の計画、設計	【一軸圧縮機で高圧力比 30 程度の高効率を実現】 ・発電用一軸 15 段程度で、圧力比約 30 の高圧力比を実現する。 ・高圧力比・多段条件での損失発生メカニズムを考察し、最適な境界層コントロールなどにより 3 次元翼形状を開発し、損失を低減する。 効率 90%以上 【一軸・高圧力比圧縮機の安定な起動特性の確保】 ・従来に比べ、起動時に旋回失速やサージなどの不安定事象が発生しやすい。シミュレーション技術の開発適用により、安定な起動特性を実現する。 ※1600℃級 GT 圧縮機から 1700℃級 GT 圧縮器を更に開発する理由: 1700℃級 GT は 1600℃級に比べ圧力比が高くなるため、圧縮機の効率向上や安定した起動特性の確保

			が難しくなる。このような高圧力比かつ1軸 GT にて両者を両立するためには、更なる研究開発が必要である。
⑥超高性能サイクル	発電効率 57% 以上（高位発熱量基準、送電端）を達成可能なシステム構成を考案する。 （従前の目標は 56%以上）	・発電効率 57% 以上のサイクルを実現するための、エクセルギ分析・評価	【エクセルギ分析による効率最大化】 ・エクセルギ理論を活用した新しい視点でのプラント効率最大化技術を開発する。 ・2020 年時点で、欧米他社を確実にリードできる 57%を目標とする。 【超高性能サイクル最適化】 ・現状世界最高の 1600℃級ガスタービンのデータを活用して、超高性能サイクルを実現する。
⑦高機能構造技術	クリアランス周方向偏差 1.0mm 以下	・構造コンセプトの比較検討 ・1600℃級ガスタービンにおける詳細クリアランスデータの取得に向けた準備	【超高温構造の熱変形の制御】 ・回転部と静止部の隙間（クリアランス）を、直径 4 m以上の車室において、周方向偏差が殆どない状態（1.0mm 以下）で制御する技術を開発する。 ・半割れ構造の車室の変形制御技術を開発する。 周方向偏差 1.0mm 以下
⑧高性能シール	・従来ラビリンスシールに比べもれ量を 1/3 に低減 ・シール空気量 10%以上低減	リーフシールの適用に向けた基礎試験データ取得	【大変形追従型高性能シールの開発】 ・従来は適用が難しいとされていた大変形部に採用可能な、大変形追従型高性能シール技術を開発する。
⑨先進製造技術	・長穴加工 L/D>250（従前の目標 L/D>200） ・孔位置誤差 1.0mm 以下	・長穴加工 L/D>250 ・溶接変形の 20%以上低減 ・高強度の中子・鋳型の候補	【タービン長翼の細部を冷却する長穴加工技術】 ・タービン長翼の前縁/後縁のような薄肉部を冷却可能な長穴加工を高精度（1.0mm 以下）で可能とする製造技術を開発する。

	・溶接時の変形 50%以上低減 ・ 鋳造歩留り 90%以上	材抽出	【溶接時の変形低減技術】 ・ 航空用エンジンの 3 倍以上の大きさがあり、溶接時の変形がガスタービン組立時の各部隙間の原因となっている。溶接変形の予測可能なシミュレーション技術を開発し、変形低減する溶接施工法を開発する。 変形を従来比 50%以上低減 【精密鋳造技術の品質確保】 ・ 大型の精密鋳造翼の形状精度を確保するために、中子（セラミクスコア）や鋳型の強度を向上するために、新しい素材を探索・開発する。 ・ 従来に比べ複雑かつ大型の精密鋳造翼では、鋳造条件のコントロールが難しくなるために、鋳造欠陥や強度不足が発生しやすくなる。品質確保のためにシミュレーション技術を駆使して、量産可能なレベルに鋳造技術を高度化する。
⑩超高温強度評価技術	方向凝固翼の強度評価手法の構築	・ 高温域での設計に向けた材料データの取得 ・ 超高温域長時間使用後の健全性確認のための材料データ取得に着手	【方向凝固翼の強度評価技術の確立】 ・ 超高温ガスタービンの冷却翼に用いられる方向凝固翼（単結晶、一方向凝固翼）では、設計応力が高く、結晶方位の局所応力への影響などを無視できなくなる。 ・ クリティカル部位（フィルム孔回りや形状の変化が大きい部分）の高温強度評価技術については、一般的な評価手法では十分な評価ができない。このため、設計/運用条件や製造方法などを考慮した総合的な評価手法が必要である。

⑪特殊計測技術	高温部計測センサーの耐用時間 100hr 以上	・ 高温での動翼振動計測の開発と実機計測 ・ 高温での動翼チップクリアランス計測準備	【特殊計測用センサーの開発】 ・ 超高温ガスタービンでは、従来に比べ高温/高圧/高流速であり、試運転時に必要不可欠な以下の計測技術・センサーは、現状のままでは使用できない。 ・ 燃焼ガス温度計測 ・ タービン翼の表面メタル温度計測（放射温度計） ・ クリアランス計測 ・ 動翼振動計測 それぞれが実機で使用可能なレベルの信頼性を確保する技術開発を行う。
⑫高精度・高機能検査技術	翼内面の複雑形状部の欠陥検知 0.5mm 以下	・ センサ試作 ・ 試計測により、0.5mm のき裂に対し、検知可能であることを確認する。	【タービン翼の内面の欠陥検知技術】 ・ 冷却構造が従来に比べ複雑になるため、製造時や運転後の検査において、特にタービン翼のクリティカル部位における欠陥検知が必要となる。このために、複雑形状に適用可能で、高精度な欠陥検知技術を新たに開発する。
⑬高性能ダンパ振動制御技術	翼振動数のバラツキ 50%低減	・ ダンパの基礎試験を実施し、振動数やダンピングの基礎データを取得する。	【バラツキの小さいダンパ技術】 ・ 超高温ガスタービンでは、励振力自体が従来に比べ大きくなるため、確実な共振回避と一定レベル以上のダンピング確保を可能とする高性能ダンパ・振動制御技術を開発する。

3. 成果、目標の達成度

3-1 成果

3-1-1 全体成果

9年間の最初の4年間は、実証機開発の成功確率を高めるために、以下のような基礎的な要素基礎研究を中心に技術開発を行っている。

- (1) 1700℃級ガスタービンの主要コンポーネント（圧縮機、タービン、燃焼器）の完成度を高めるための要素技術研究
- (2) 主要コンポーネント以外ではあるが、ガスタービン全体のインテグレーションとして必要な機械要素や技術要素について、1700℃級での実機作動に耐えられる必要不可欠な性能向上や信頼性向上を実現するための、基礎研究
- (3) 実証機を製作・運転を支える周辺技術であり、ガスタービンに特化して研究開発が必要な、製造技術や計測技術などの基礎研究やセンサー開発
これらは、事象のメカニズムが不明なものが多く、基礎研究としてリスクが高い技術開発が全体の殆どを占める。

1年半の研究の中間段階としては、すべての項目で順調に進捗しており、予定通り、平成28年度から実証機の開発、実証に向けた準備に着手できる予定である。

3-1-2 個別要素技術成果

(1) 低熱伝導率遮熱コーティング

【超高温での遮熱性の大幅向上と、耐久性の両立】

・遮熱コーティング厚 0.3mm（従来）⇒0.5mm 以上と厚膜としつつ、熱疲労寿命は従来並みを狙う。

【エロージョン/コロージョンの発生防止】

・発電用ガスタービン特有のエロージョン/コロージョンに対し、耐久性向上（従来比減耗量△50%）を実現するために、より緻密な組織を実現するための溶射条件を検討中である。シミュレーションが難しい技術分野であり、基礎データ取得のため、高温高速エロージョン試験装置を新たに開発・製作した。

・航空用GTの3倍以上の大型翼で、溶射ガンの近接距離の制約が大きく、翼の熱変形も大きい条件下で、高品質な被膜を実現する溶射技術（または蒸着技術）が必要となる。

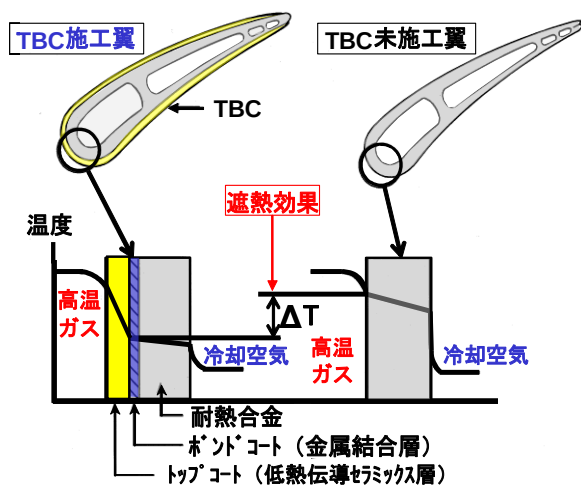


図5 遮熱効果のイメージ

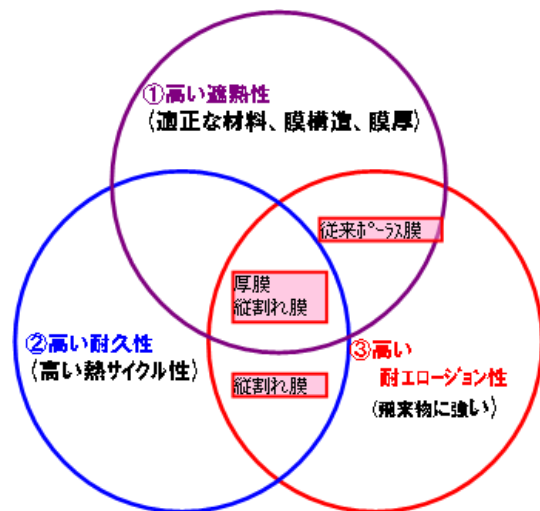


図6 遮熱コーティングに要求される機能



図7 溶射状況の高速度カメラ撮影



図8 高温高速エロージョン試験装置

(2) 高性能冷却システム

実機燃焼器を上流に設置した状態でのタービン翼列の気流・伝熱試験を実施し、シュラウド面（端壁面）での詳細データを取得した。特に壁近傍で渦や乱れの強い領域での境界層（壁面からの距離が2-3mm以内の領域の流れ）を詳細計測し、捩れ境界層が熱伝達率に与える影響を、微視的に調査検討した。

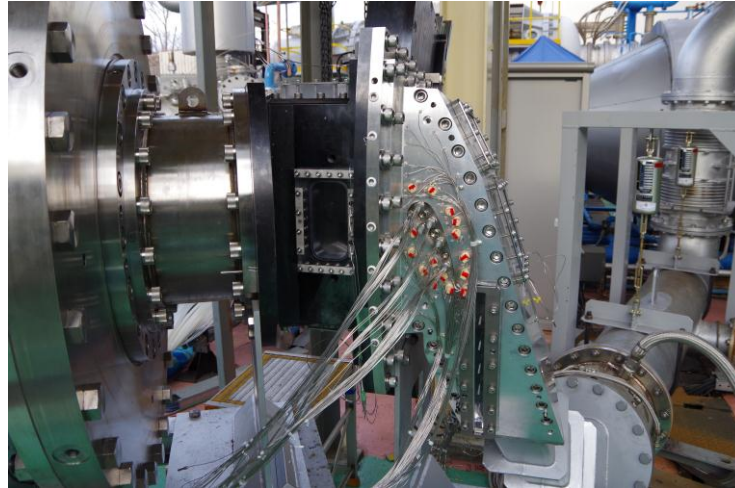


図9 燃焼器-タービン第一段静翼で構成される、燃焼ガス流れ詳細計測試験装置

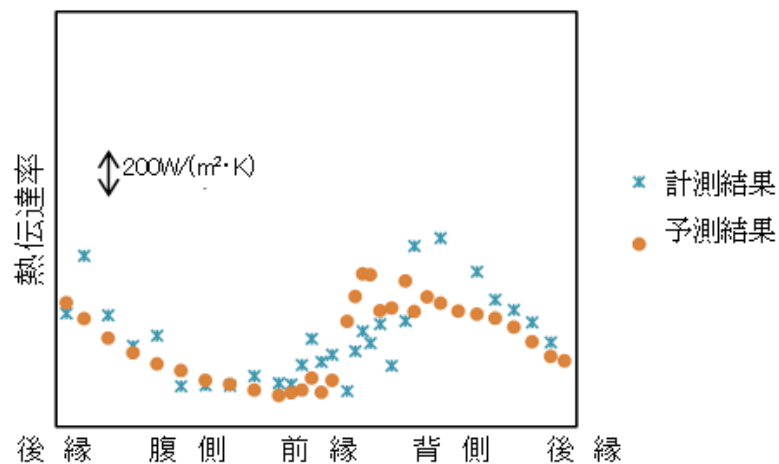


図10 外側シュラウド近傍の翼面熱伝達率分布

(3) 非定常性制御燃焼技術

- ・更なる低 NO_x 化を目指して、レーザー気流計測による燃焼器内流速・乱れデータを取得した。

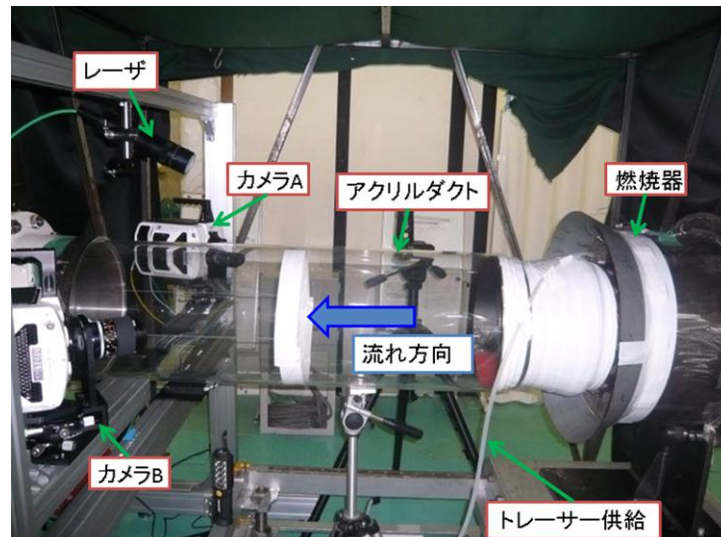


図 1 1 ステレオ P I V の計測状況
(P I V : Particle Image Velocimetry)

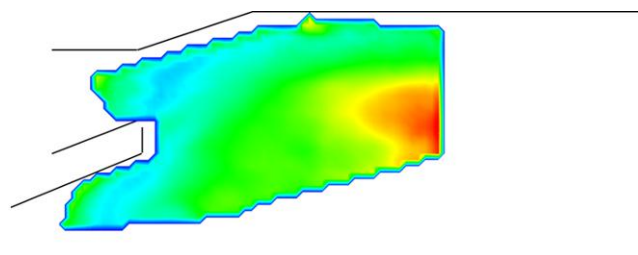


図 1 2 ステレオ P I V による計測事例
(燃焼器内の半径方向の瞬時流速分布)

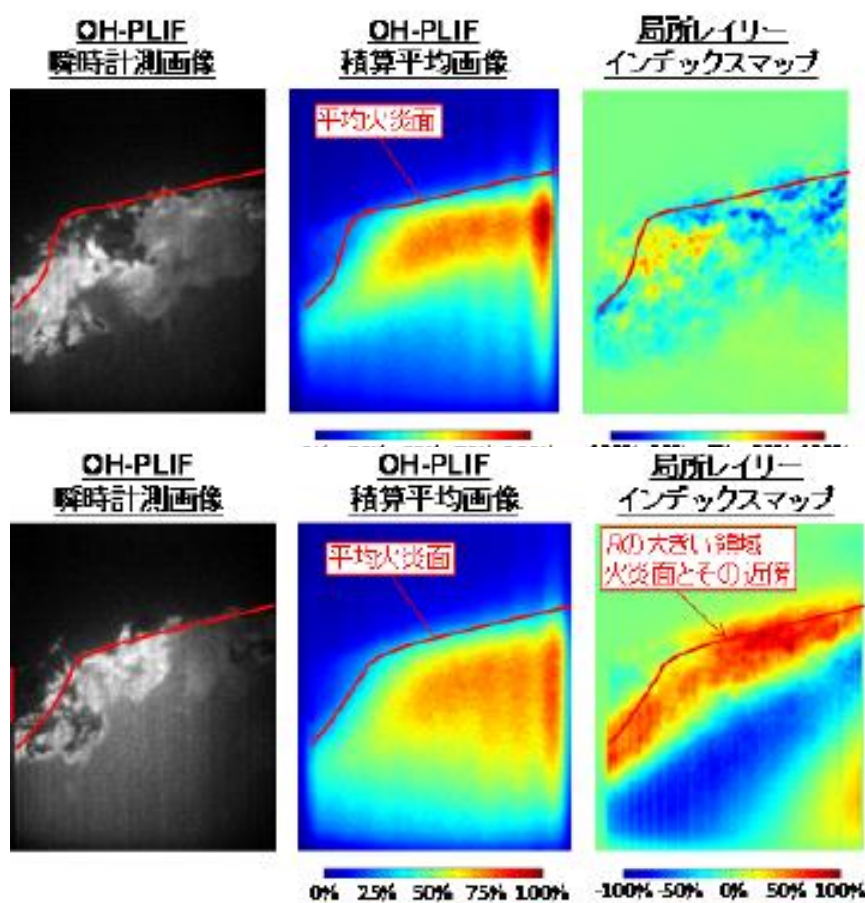
燃料が燃焼反応する際に生じる OH ラジカルをレーザーを用いて計測した。これを計測することにより、燃焼領域を特定することができる。この手法を用いて、実機燃焼器形態での火炎形状（時々刻々変化している火炎形状の瞬時の形状）を計測・把握した。

- ・火炎形状と圧力変動を同時計測し、両者の変動の位相関係を分析することにより、燃焼を不安定にする領域を特定した。

図 1 3
実燃焼器でのレーザーによる
火炎計測状況
(図中 I.I :
Image Intensifier)



上：安定燃焼時



下：燃焼振動発生時
(不安定燃焼時)
右の赤い部分が
不安定燃焼領域
(レイリーインデックス
とは、安定/不安定を
示す指標)

図 1 4 燃焼を不安定にする領域の特定

(4) 超高性能タービン

・タービン効率向上コンセプトの抽出を行い、それらを反映したタービンの試設計を行い、流動解析により効率向上効果を確認した。

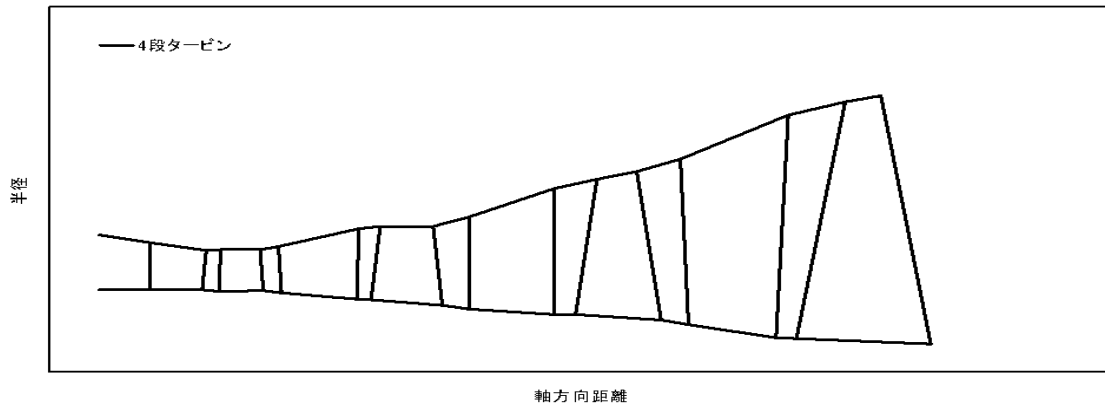


図 1 5 試設計タービン形状

排気ディフューザについても性能向上案を抽出し、高速回転試験装置を用いた改良形状の空力試験を実施し、効果を確認した。

排気損失を従来比でほぼ半減する効果を確認できた。

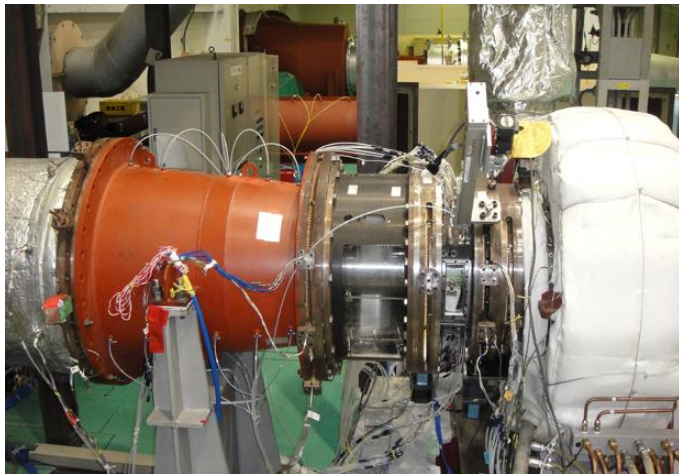


図 1 6 ディフューザ試験装置(上)

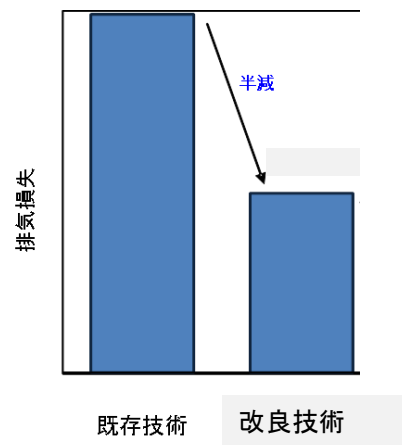


図 1 7 排気損失低減効果(右)

1700℃級の高負荷条件では、従来より大きな流体加振力が動翼に加わる。
 また、高速回転試験装置を用いたモデルタービン試験で、回転している動翼の翼面上の圧力変動を詳細計測し、動翼-静翼間の翼列干渉効果により生じる動翼の励振力（動翼に加わる加振力）の発生メカニズムを考察・評価した。
 その結果、翼面圧力変動の、振幅・位相のいずれも、流動解析で、精度良く予測可能となった。

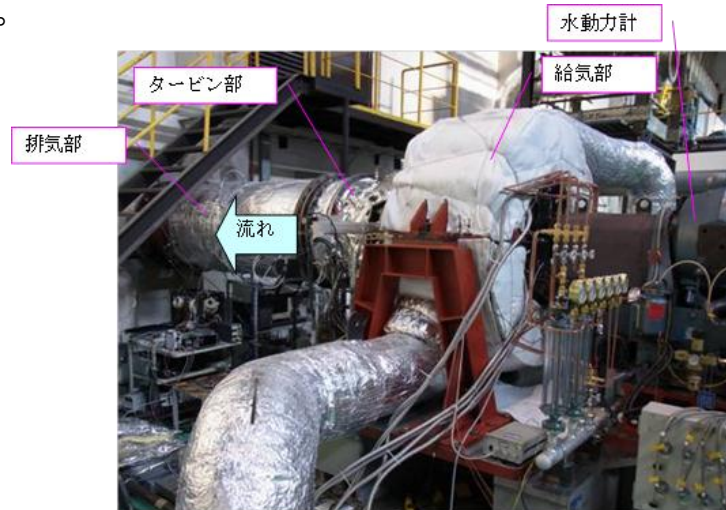


図 1 8 高速回転翼列試験装置

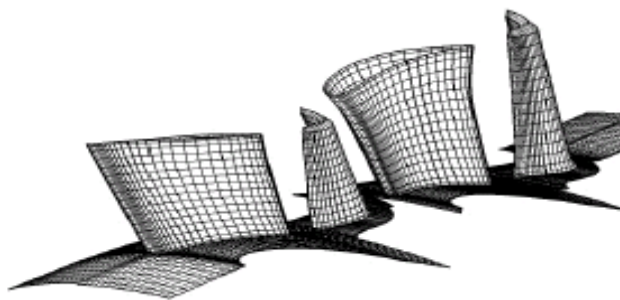


図 1 9 流動解析用メッシュ
 (メッシュは間引いて表示)

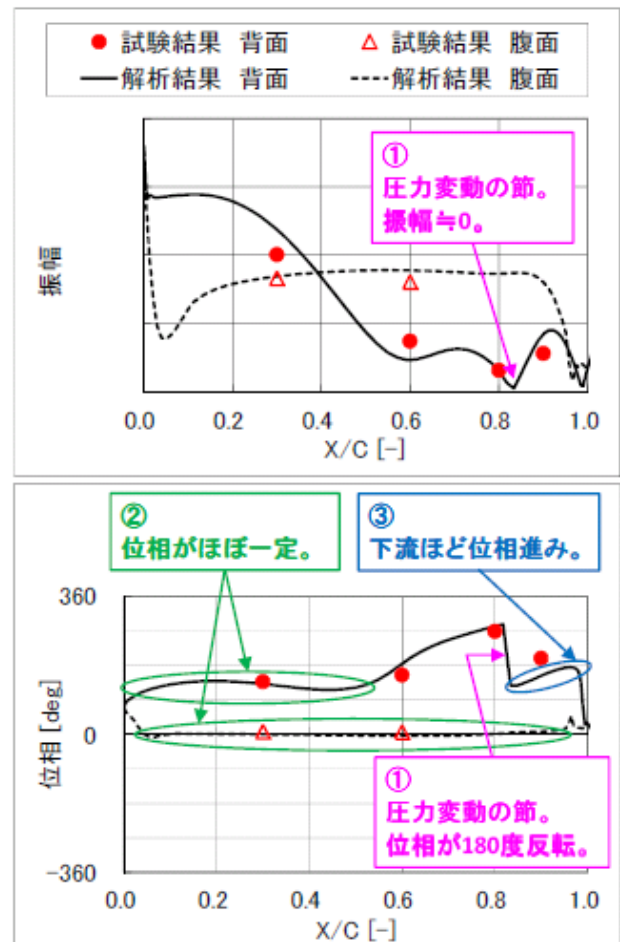


図 2 0 1 段動翼の圧力変動データ
 計測値と解析値の比較
 上：振幅、下：位相

（５）境界層制御高性能圧縮機

・高速回転試験装置を用いた前方段モデル圧縮機試験により、設計点での段圧力比を約１０％高くし、スパン方向の圧力比の分布をよりフラットにすることにより、１％以上の段効率向上の目途を得た。



図 2 1 圧縮機前方段の高速回転試験装置

・高速回転試験装置を用いた中後方段モデル圧縮機試験により、多段圧縮機で上流から境界層などが蓄積された条件で、動翼先端部と静止部（ケーシング）との隙間の流れ（クリアランス流れ）を、高応答圧力センサなどを用いて、詳細計測した。

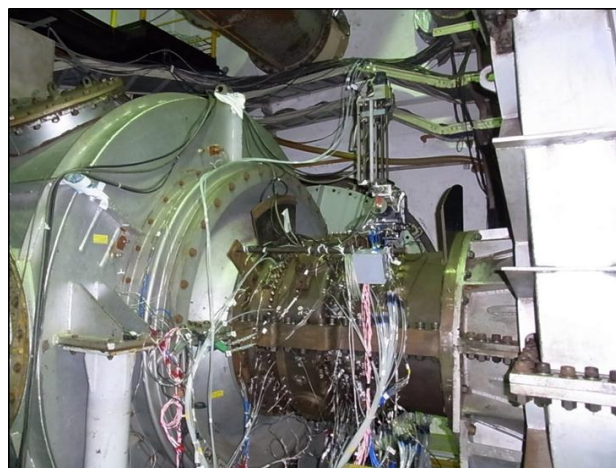


図 2 2 圧縮機中後方段の高速回転試験装置

・さらに、従来より段数を増やし、入口案内翼や可変静翼、抽気室など備えた多段モデル圧縮機試験装置の計画、設計を実施し、一部製作に着手した。

(6) 超高性能サイクル

エクセルギ理論を活用し、プラントの各コンポーネントにおけるエクセルギー損失を定量評価した。損失低減策を検討し、プラント構成や圧力・温度などの条件を最適化することにより、効率の最大化を図る。

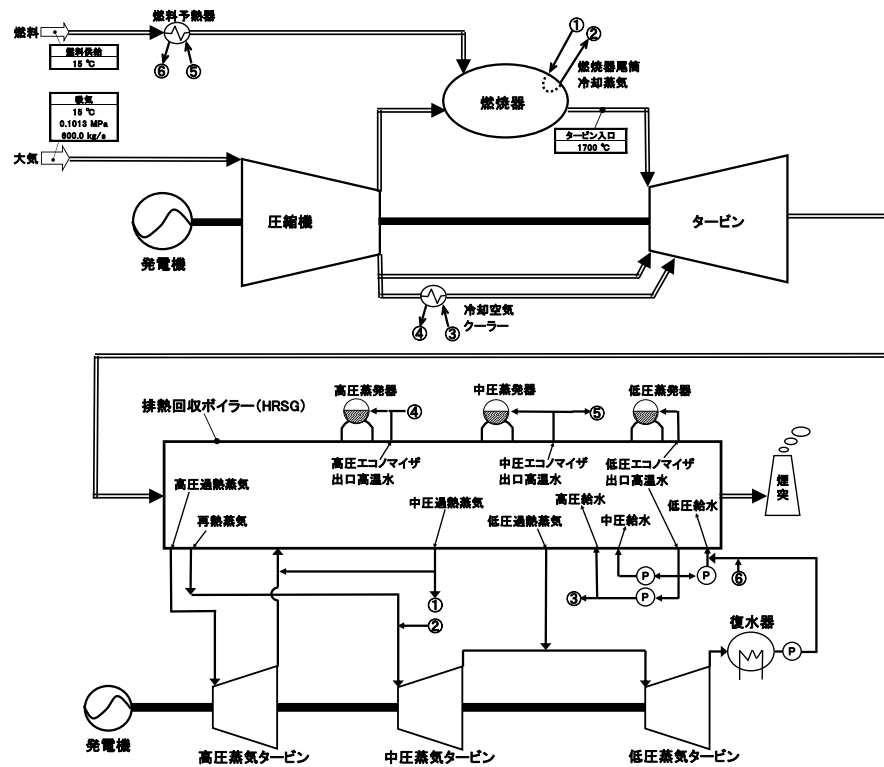


図 2 3 解析対象のコンバインドサイクル

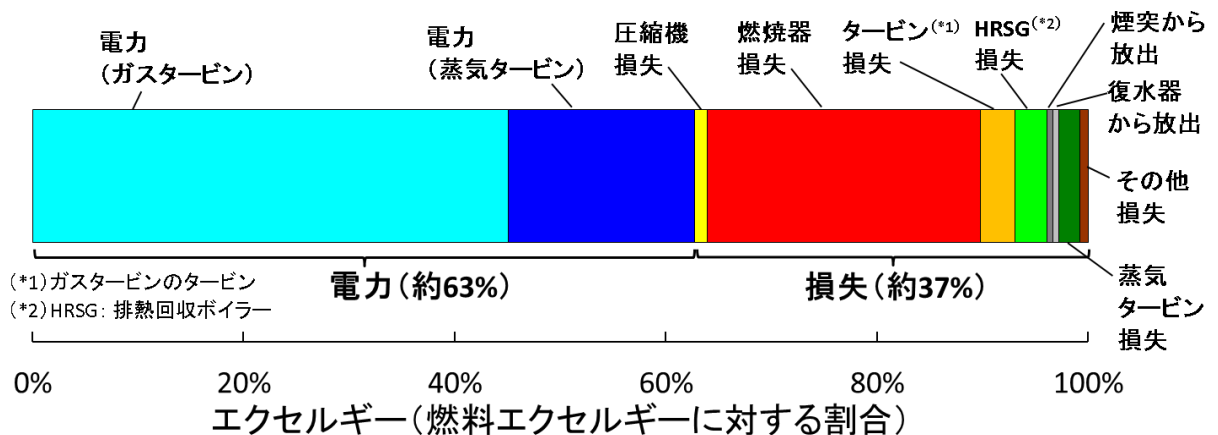


図 2 4 燃料エクセルギーを 100%とした場合の、プラントのエクセルギー分析結果

(7) 高機能構造技術

直径約4mのケーシングは、数mm～10mm以上の熱変形が発生する。この変形量を制御し、回転方向に均一な回転系部品と静止系部品との隙間（特に、圧縮機やタービン翼の先端のチップクリアランス）を確保するための構造案を検討中である。

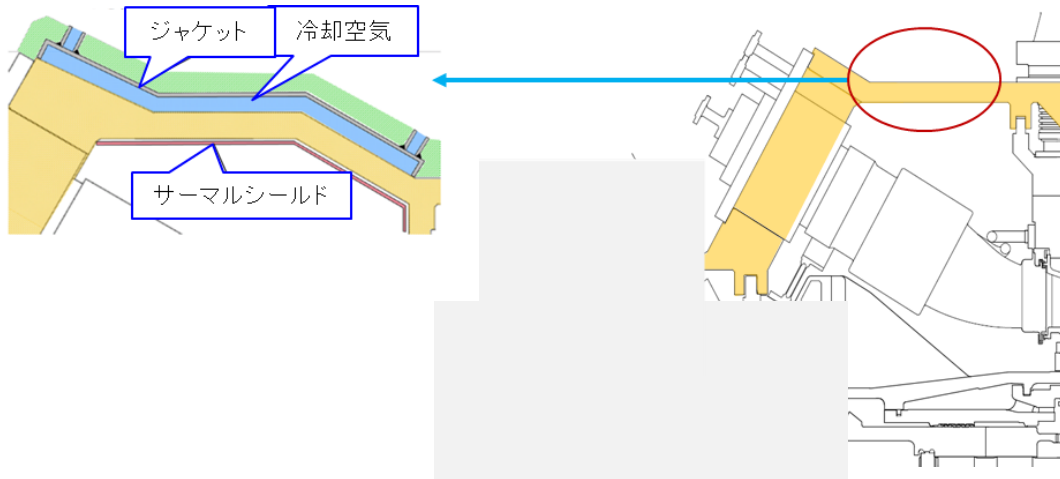


図25 チップクリアランス低減のための、構造検討事例

(8) 高性能シール

回転系部品（ロータなど）と静止系部品（翼環やケーシングなど）との隙間（クリアランス）は、高温作動時に熱変形などにより数mm～10mm以上も変形し、漏れ空気が大きくなってしまふ。このため、両車の大変形に追従する高性能シールとして、リーフシール（金属の薄板を多層に重ねた高性能シール）の開発のために、以下の試験装置を製作し、試験実施中である。

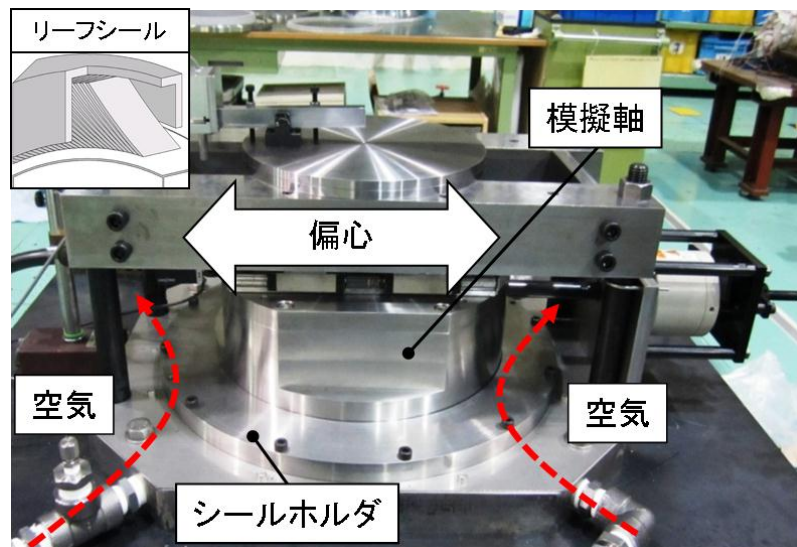


図26 リーフシール特性試験装置

(9) 先進製造技術

方向凝固翼（単結晶翼および一方向凝固翼）の精密鑄造時の結晶性欠陥を抑制するためには結晶健全性改善を狙った高強度（薄肉化）鑄型の開発が不可欠である。計算材料シミュレーションにより、セラミックスの特性予測を行い、試作候補組成の抽出を行う手法を構築した。

複数候補材の組成について、鑄型原料調整・スラリー調整条件等決定し、特性評価用鑄型試験体の製作プロセスを構築した。

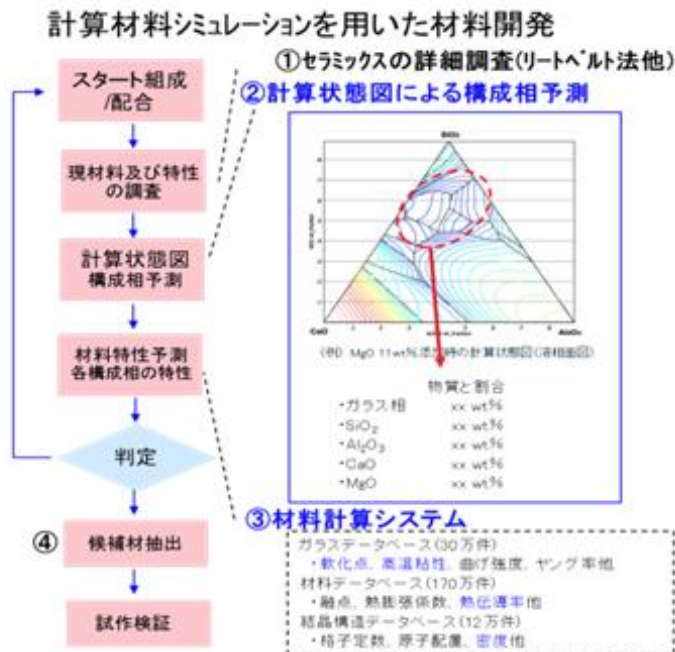


図 2 7 材料シミュレーションを用いた材料開発

ガスタービンを構成する部品は複雑な形状のものが多く、溶接組立が製造プロセスとして多用される。一例として、安定した施工が可能なレーザー肉盛溶接工法の静翼冷却通路への適用と、条件最適化により、変形を低減する形状や溶接条件を検討し、変形を 20%低減する目途を得た。



図 2 8 冷却通路の溶接状況(レーザー工法)

(10) 超高温強度評価技術

タービン翼など高温部品のメタル温度が上昇するため、高温で長時間使用された場合の材料強度を含め、材料強度に対し、従来より緻密な、設計評価が必要となる。このため、以下の二項目の主催データ取得を実施している。

- ・高温域での設計に向けた材料データを取得（表3）
- ・高温域での長時間使用後の健全性確認のための材料データ取得（表4）

表3 引張試験・熱疲労試験・高サイクル疲労試験マトリックス
(高温域での設計に向けた材料データの取得)

材質	温度		
	700℃	900℃	1000℃
方向凝固材 0°	●	●	●
方向凝固材 90°	●	●	●
普通鑄造材	●	●	●

表4 超高温域長時間使用後の健全性確認のための材料データの取得

加熱時効条件				試験 種類	材料			
時効温度 (℃)	時効時間							
	無	3000～5000h	10000～20000h					
800	●	◎	○	熱疲労 (LCF)	(動翼材) 普通鑄造材			
900		◎	○					
950		◎	○					
1000		◎	○					
900	●	◎	○	疲労 (HCF)		(静翼材) 普通鑄造材		
1000		◎	○					
800	●	◎	○	引張 硬さ			方向凝固材 0deg/90deg	
900		◎	○					
950		◎	○					
1000		◎	○					
800	●	◎	○	組織 観察				
900		◎	○					
950		◎	○					
1000		◎	○					

●：H25 年度取得済、◎：H25 年度取得予定、○：平成 26 年度以降取得予定
(注：単結晶材については、別途データ取得中)

(11) 特殊計測技術

1700℃級の超高温条件では、試運転時に必要不可欠な計測項目（燃焼ガス温度／タービン翼の表面メタル温度／回転動翼と静止しているケーシングとの隙間（チップクリアランス）／回転動翼の振動）に対して、従来の計測技術やセンサーでは、耐久性などが問題となり正確なデータを計測することが困難となる。これらに対し、実機で使用可能とするための技術開発として、センサの開発や計測技術の改良などを行う。

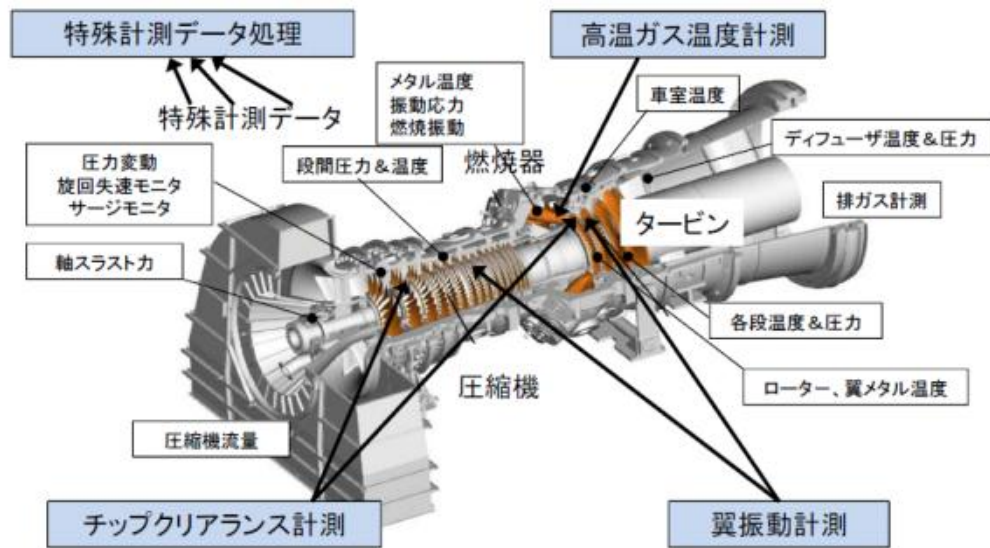


図 29 実証機での特殊計測項目例（一部）



図 30 ファイバー式ガス温度計測プローブ

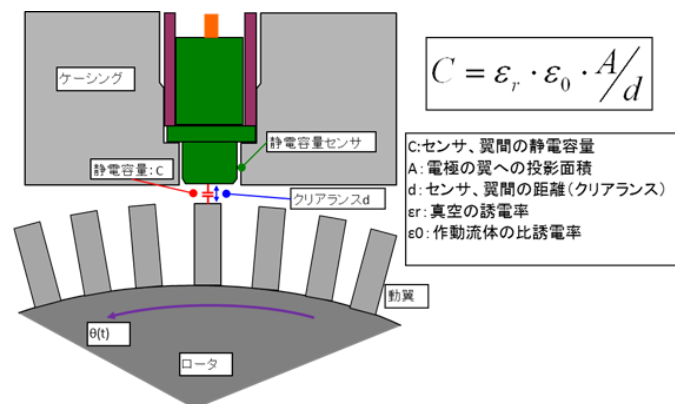
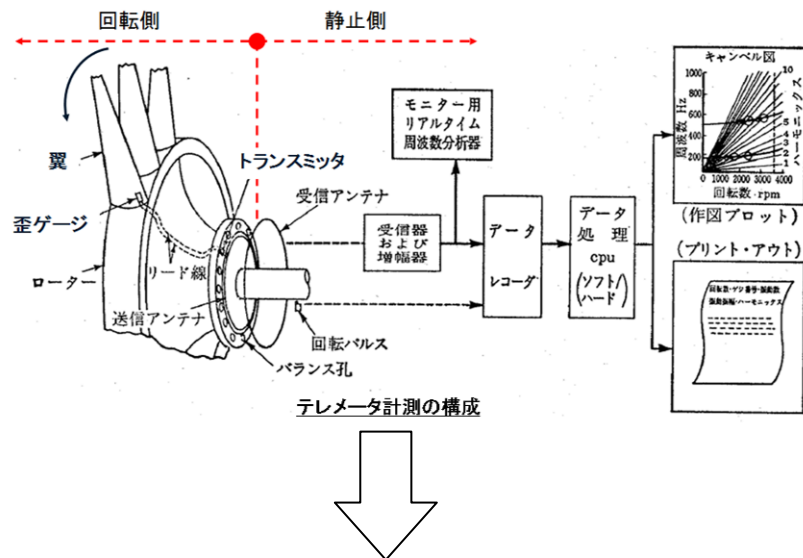


図 31 チップクリアランス計測概要

高温タービンの非接触翼振動計測技術を、1600℃級 J 形ガスタービン実機のタービン第一段動翼で、試計測を行い、手法の妥当性を確認した。

(従来) テレメータ計測では、動翼にひずみゲージを貼り付け、リード線をロータ端に取り出して、テレメータで計測していた。



(新) センサを静止側に設置し、動翼の振動を非接触にて計測
歪みゲージに匹敵する精度で回転中の全動翼の振動数、振幅、位相を計測することが可能

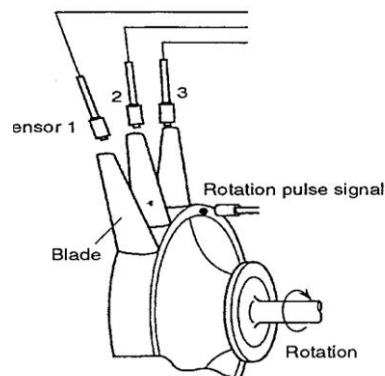


図 3 2 高温タービンの非接触翼振動計測技術

(12) 高精度・高機能検査技術

φ0.7mmの細径ファイバースコープと蛍光剤によるき裂強調手法で、実翼を模擬した冷却孔付近の約0.5mmのき裂検出ができることを確認した。

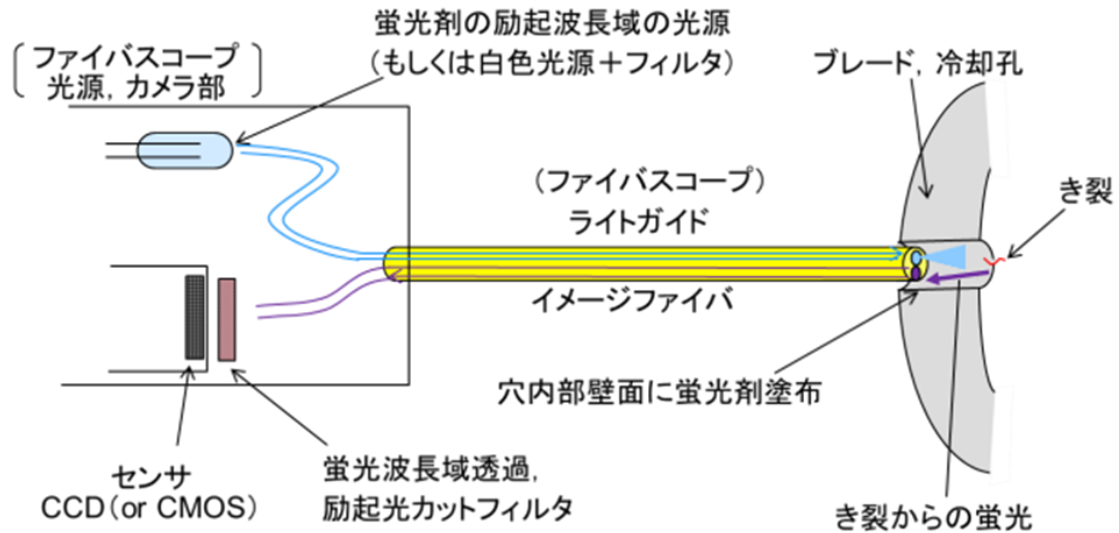


図 3 3 ファイバースコープによるき裂蛍光観察のイメージ

(13) 高性能ダンパ振動制御技術

超高温ガスタービンでは、タービン動翼に加わる流体加振力自体が、従来に比べ大きくなるため、確実な共振回避と一定レベル以上のダンピング確保を可能とする高性能ダンパ・振動制御技術が必要となる。

隣り合うタービン動翼間に設置されるダンパの基礎試験として、しゅう動試験装置によるダンパ接触特性取得、及び、非接触加振による模擬翼の振動特性取得試験を実施し、振動数やダンピングの基礎データを取得した。

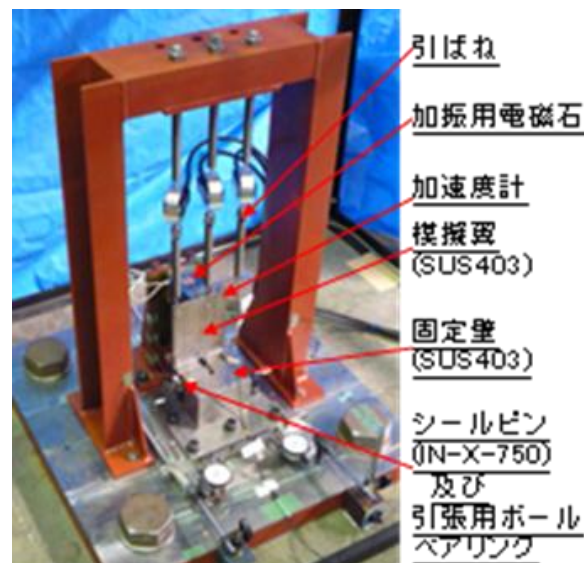


図 3 4 非接触加振による模擬翼の振動特性取得

3-1-3 特許出願状況等

表彰、特許、論文、投稿、発表回数などを以下に示す。

本事業開始後約１年半で、国内外の電力会社などに 70 回のご視察を頂いた。

表 5. 特許・論文等件数

要素技術	表彰	論文	投稿	発表	特許	電力会社 ご視察
件数	1 件	6 件	7 件	15 件	22 件	70 回

表 6 表彰・論文・投稿・発表などのリスト

	題目・メディア等	時期
表彰	産官学連携推進会議 日本経団連会長賞 「1700℃級ガスタービン 冷却技術の開発」	H25. 9
論文		
	日本ガスタービン学会誌 第 40 巻 6 号「ガスタービンの主要コンポーネントや吸排気の CFD と最適化」	H24. 11
	三菱重工技報 Vol. 50 No. 1 (2013) 新製品・新技術特集 「1700℃級ガスタービン排ガス再循環による低 NOx 燃焼器システムの開発」	H25. 1
	日本ガスタービン学会誌 「発電用ガスタービンの高温・高効率化の進展と将来展望」	H25. 1
	電気協会報 「超高温ガスタービンの現状」	H25. 1
	日本ガスタービン学会誌 「タービンにおける可視化技術の活用」	H25. 8
	三菱重工技報 Vol. 50 No. 3 (2013) 発電技術特集「1600℃級 J 形技術を適用した発電用高効率ガスタービンの開発」	H25. 9
	．．．．	
投稿		
	日刊工業新聞社 「進化する火力発電」	H24. 10
	電気新聞「長期実証 8000 時間超え、J 形高信頼性を実証」	H24. 12
	電気新聞「空冷式 J 形商用化」	H24. 12
	NEDO HP 「NEDO ドキュメントサイトシリーズ」	H24. 12
	電気新聞「台湾から GTCC 受注」	H25. 9
	電気新聞「最新鋭火力の建設、MACC II プロジェクト」	H25. 9

	MPSA プレスリリース「J-Series Update」	H25. 9
発表	日本ガスタービン学会 40 周年記念講演会 「産業用ガスタービンの最新技術動向と展望」	H24. 4
	13th World Conference on Investment Casting & Exposition 「 Hot parts of MHI industrial gas turbine by precision casting 」	H24. 4
	ASME TurboExpo2012 「 Future Gas Turbine Products and Their Enabling Technologies」	H24. 6
	Global R&D Forum 2012 「MHI status and Trends of Gas Turbine」	H24. 7
	ACGT 「Yesterday, Today and Tomorrow of Gas Turbines 」	H24. 8
	日本金属学会 H24 年度秋季大会 「 γ' 相析出強化型 Ni 基合金の開発・実用化」	H24. 9
	第 40 回日本ガスタービン学会定期講演会「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
	日本ガスタービン学会 2012 年度ガスタービンシンポジウム パネルディスカッション	H24. 10
	日本溶射学会 中部支部第 11 期・第 8 回溶射技術研究会 「高温環境への溶射技術適用」	H25. 3
	日本材料学会 第 6 1 期第 5 回 高温強度部門委員会 「高温ガスタービン用先進遮熱コーティングの開発状況」	H25. 5
	ASME TurboExpo2013 「 Future Gas Turbine Products and Their Enabling Technologies」	H25. 6
	第 41 回日本ガスタービン学会定期講演会 「高温ガスタービンタービン動翼の振動強度検証」	H25. 10
	第 41 回日本ガスタービン学会定期講演会 「ウェーク干渉を受けるタービン動翼の圧力変動評価」	H25. 10
	第 41 回日本ガスタービン学会定期講演会 「ガスタービン燃焼器内の火炎変動可視化技術の開発」	H25. 10
	The 3 rd Annual Gas Turbine World China Summit 「 Key Technology Development for Next Generation High Temperature Gas Turbines (NGGT)」	H25. 10

3-2 目標の達成度

研究開発の目標に対する達成度を以下に示す。現時点での中間目標は全て達成した。

表 8. 目標に対する成果・達成度の一覧表

要素技術	目標・指標 (中間評価時点)	成果 (中間評価時点)	達成度
①低熱伝導率遮熱コーティング	・厚さ 0.5mm 以上で試作し、熱疲労寿命が従来並みであることを確認する。 ・エロージョン試験装置製作および試験着手。	・厚さ 0.5mm 以上の成膜条件で、熱疲労寿命が従来並みであることを確認した。 ・エロージョン試験装置を製作し、試験に着手した。	達成
②高性能冷却システム	・実機燃焼器を上流に設置した状態で、タービン翼列の気流・伝熱試験による端壁面での詳細データ取得。	・実機燃焼器を上流に設置した状態でタービン翼列の気流試験・伝熱試験による端壁面での詳細データを取得した。	達成
③非定常性制御燃焼技術	・排ガス再循環有の条件で、NOx 40ppm 以下を確認した。 ・レーザーによる気流計測による燃焼器内気流データの取得。 ・レーザー計測による実機燃焼器形態での火炎形状の把握。 ・火炎形状と圧力変動計測を同時計測し、燃焼を不安定にする領域を特定する。	・排ガス再循環有の条件で、NOx 16ppm を確認した。 ・レーザーによる気流計測による燃焼器内気流データを取得した。 ・レーザー計測により実機燃焼器形態での火炎形状を把握した。 ・火炎形状と圧力変動計測を同時計測し、燃焼を不安定にする領域を特定した。	達成
④超高性能タービン	・タービン効率向上コンセプトの抽出 ・排気ディフューザの改良を行い、排気の圧力損失を 50%低減する。 ・モデルタービン試験データによる、動翼-静翼間の翼列	・タービン効率向上コンセプトを抽出し、それらを盛り込んで試設計を行い、シミュレーションによりその妥当性を確認した。 ・高速回転試験により、排気ディフューザの形状変	達成

	干渉効果による励振力発生 のメカニズムの考察	更の効果を確認、現状より 50%圧力損失低減を確認 した。 ・モデルタービン試験によ り、動翼-静翼間の翼列干渉 効果による励振力のデー タを取得した。シミュレー ションと比較することによ り、現象のメカニズムを 考察した。	
⑤境界層制 御高性能圧 縮機	・モデル圧縮機試験により、 前方段の負荷を約10%高め た条件で、段効率+1%向上を 確認する。 ・中後方段に対し、モデル圧 縮機試験により、多段条件で の動翼チップクリアランス 流れデータを取得・評価す る。 ・多段モデル圧縮機試験装置 の計画、設計	・モデル圧縮機試験によ り、前方段の負荷を約10% 高めた条件で、段効率+1% 向上を確認した。 ・モデル圧縮機試験によ り、多段条件での動翼チッ プクリアランス流れデー タを取得し、シミュレーシ ョンと比較することによ り評価を行った。 ・多段モデル圧縮機試験装 置の計画、設計を実施し、 一部製造に着手した。	達成
⑥超高性能 サイクル	・発電効率57%以上のサイク ルを実現するための、エクセ ルギ分析・評価	・基本的なサイクル構成に て熱サイクル評価を行い、 発電効率57%以上の達成 目途を得た。 ・エクセルギ分析により、 損失が発生している部位 を定量的に評価し、優先的 に性能向上すべき部位を 評価・特定した。	達成
⑦高機能構 造技術	・各種構造コンセプトの比較 検討 ・1600℃級ガスタービンにお ける詳細クリアランスデー タの取得に向けた準備	・構造コンセプトを考案 し、その比較検討を実施し た。 ・1600℃級ガスタービンに おける詳細クリアランス	達成

		データの取得に向けた準備を実施した。(11 月に計測予定)	
⑧高性能シール	リーフシールの適用に向けた基礎試験装置の製作とデータ取得	リーフシールの適用に向け、基礎試験装置を製作した。試験を実施し、基礎データ取得した。	達成
⑨先進製造技術	・長穴加工 L/D>250 ・溶接変形の 20%以上低減 ・高強度の中子・鋳型の候補材抽出	・長穴加工を実施し、L/D >250 を達成した。 ・レーザー溶接工法の静翼冷却通路への適用により、変形を 20%低減する目途を得た。 ・複数候補材の組成について、鋳型原料調整・スラリー調整条件等決定し、特性評価用鋳型試験体の候補材を抽出した。	達成
⑩超高温強度評価技術	・高温域での設計に向けた材料データの取得 ・超高温域長時間使用後の健全性確認のための材料データ取得に着手	・高温域での材料データを取得した。 ・超高温域での長時間使用後の条件を模擬するため、加熱時効処理試験に着手した。H25 年度末には、5000hr 後のデータを取得完了予定。	達成
⑪特殊計測技術	・高温での動翼振動計測技術（非接触）の開発と実機計測 ・高温での動翼チップクリアランス計測技術の開発と、実機計測準備の実施	・実機ガスタービンで、燃焼器着火後の高温条件での、タービン動翼振動計測技術を開発し、データを取得した。 ・高温での動翼チップクリアランス計測のためのセンサーを開発し、実機計測の準備を行った。(11 月に計測予定)	達成
⑫高精度・	・直径 $\phi 0.7\text{mm}$ のき裂検知極	・直径 $\phi 0.7\text{mm}$ の極小ファ	達成

高機能検査 技術	小センサの試作と計測手法 の開発 ・試計測の実施により、検知 精度 0.5mm 以下を達成する。	ーバースコープを用いた き裂検知極小センサーを 試作した。 ・直径 0.5mm のき裂検知の 目途を得た。	
⑬高性能・ ダンパ振動 制御技術	・ダンパの基礎試験を実施 し、振動数やダンピングの基 礎データを取得する。	・ダンパ試験装置を製作 し、振動数やダンピングの 基礎データを取得した。こ れらのデータを基に改良 ダンパの検討に着手した。	達成

4. 事業化、波及効果について

4-1 事業化の見通し

(平成 23 年度までの研究開発の成果と実用化状況)

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てきた。

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（H23 年度に実施）を通じて、実用可能なレベル、すなわち、実機ガスタービンの設計に着手可能なレベルに引き上げた。

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は、あらゆる機械製品の中でも最も技術の裾野が広く、か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。

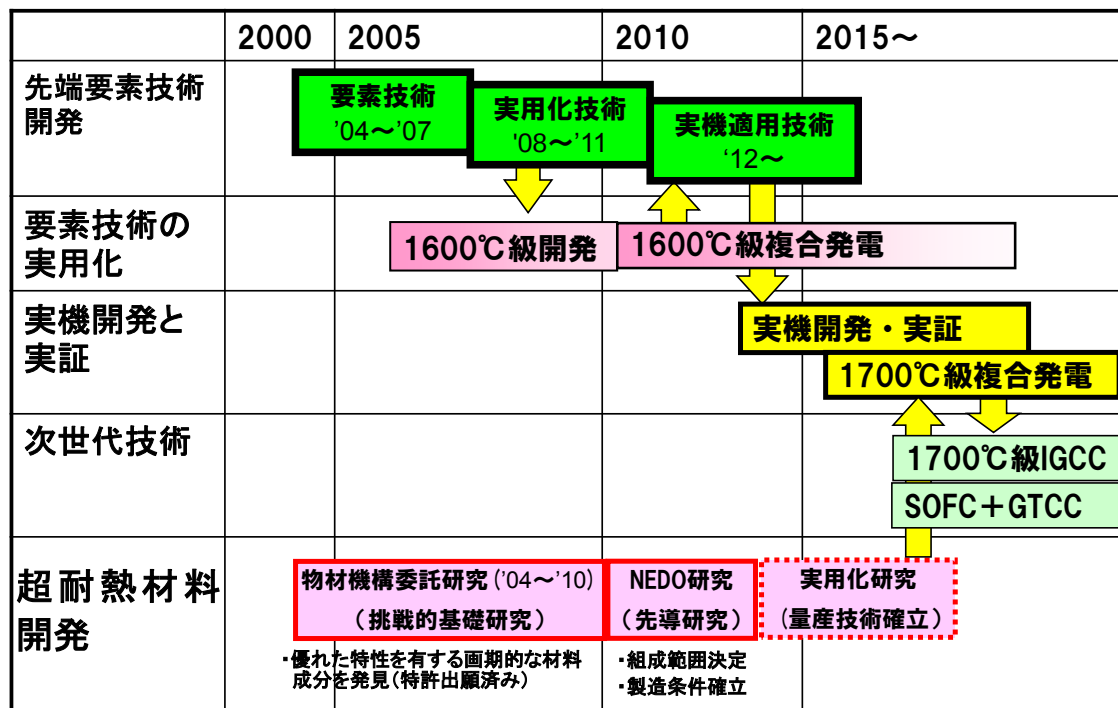
したがって、1500℃級から 1700℃級に、一足飛びに 200℃高温化することは大きなリスクを伴うことも事実である。そこで、ガスタービンの高温化における我が国のリードを保ち、かつ、1700℃級ガスタービンの実現の足掛かりとするために、本プロジェクトと並行して、1600℃級ガスタービンの開発を実施した。すなわち、我が国の 1500℃級の経験を基礎としつつ、本プロジェクトの要素試験・解析・モジュール試験を経てその有効性や信頼性が確認できた革新的要素技術を活用して、世界で初めてとなる 1600℃級 J 形ガスタービンを開発した。

本プロジェクトの成果を活用・実用化した 1600℃級 J 形ガスタービンを用いて、現状の 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った。(Step-2 である実用化技術開発と並行して、三菱重工業(株)にて、平成 23 年 2 月に試運転を実施した。)

引き続き、平成 24 年度から、実証事業として、実証機の開発の準備を進めている。平成 28 年度より 1600℃級での運用実績を蓄積しつつ 1700℃級の実証機の設計・開発を行い、平成 32 年度に 1700℃級での実証試験を行なう。

表 9 に、1700℃級ガスタービン実用化のロードマップを示す。

表 9 1700℃級ガスタービン実用化のロードマップ



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や、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少ないため、三菱重工業（株）高砂製作所内実証発電設備の 1600℃級ガスタービンにて、平成 25 年度より一部試験適用し、実績を評価した上で量産機に展開予定である。

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℃～1600℃級ガスタービンへ新技術を展開することにより、H20 年度からの 10 年間で平均約 2%発電効率を向上する。

● 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 30～50 台/年に競争力が向上するため、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）

先進国および途上国のいずれも、電力需要が伸びており、引き続き、ガスタービンの市場規模は 40GW レベルで拡大傾向である。

また、非在来ガスが利用できるようになり、算出国では燃料価格が低下、一方、ガスを輸入に頼るアジア諸国では、燃料価格の高騰と高止まりと、環境問題の深刻化により、クリーンで経済的な高効率ガスタービンの需要が伸びている。

日本、米国、アジアを中心に、1400℃級→1500℃級→1600℃級へ主力機が移行しつつある。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。

（環境適合性）

ここ数年、地球温暖化に対するニーズが高まっており、CO₂ 排出原単位で比較すると、1500℃級複合発電は 0.34 kg-CO₂/kWh に対して、1700℃級複合発電では、0.31 ～ 0.32kg-CO₂/kWh であり、既存複合発電の CO₂ 排出原単位を下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 CO₂ 濃度を高くすることができ、CO₂ 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）

従来機と比較して、1700℃級複合発電設備の実用化に対する懸念事項として、信頼性確保が挙げられる。

信頼性確保については、

- 主要コンポーネントの先端要素技術の高度化
- に加え、以下の三種類の要素技術開発を並行して進める。
- 主要コンポーネント以外で、設計に必要な先端要素技術
 - 製造に先立ち準備しておくべき、先端製造技術や検査技術
 - 試運転時にガスタービン内部の温度や振動を計測するための特殊計測技術
- これらを、実施中の 4 年間で事前検討することにより、実設計に入る前のリスク低減を図る（図 4 参照）。
- さらに、上述のように
- 1600℃級 J 形ガスタービンに新技術を先行適用
- することにより、総合的な信頼性向上が可能となる。

（経済性）

- ・超高効率機は、主にベースロード運用されるために、特に有利となる。
 - ・シェア拡大の具体的なマーケットとして、特に、燃料価格の高い地域で、超高効率機の需要が高い。
 - ・これに相当する地域として、東アジア（日本含む）、東南アジアが有望である。特にアジアでの電力需要の伸びが予測されており、超高効率ガスタービンの市場としても大きい。
- 一例として、既に、国プロ技術を適用した 1600℃級 J 形ガスタービンは、
- | | |
|----|------|
| 日本 | 6 台 |
| 韓国 | 10 台 |
| 台湾 | 6 台 |
- の受注を得ている。（平成 25 年 10 月時点）

・日本メーカーは、特に、このアジア市場で最も高いシェアを有しており、実績と顧客からの信用面で有利である。

・一方、シェールガスの影響で、天然ガス価格が低下した北米でも、大電力事業者を中心に、ベースロード運用を前提とした超高効率機の需要が高まってきている。

・発電事業者の視点で、経済性を具体的な数字で評価すると以下となる。
尚、コンバインドサイクルの発電所の建設費は、Gasturbine World 誌に記載されている代表的な数字を用いて評価する。

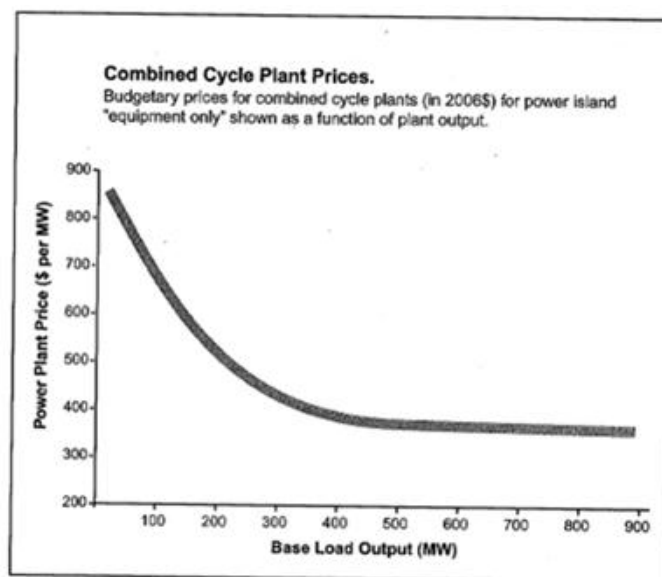


図 3 5 発電設備コストの比較(コンバインドサイクル)

(出典) Gas turbine World 2008 より

・ 超高効率ガスタービンをを用いた発電設備は、従来の複合発電設備を含む、あらゆる火力発電設備よりも効率面で優れているため、系統運用上も運用優先順位は高いものと考えられ、ベースロード運用されることが多い。この場合の利用率は、一般に年間約 90 % に達する。

本プロジェクトのガスタービンは
超高効率機なのでベースロード運用を基本とする。

↓ 効率機を
優先的に運転

	運転パターン							年利用率
	月	火	水	木	金	土	日	
ベースロード運用								90%
WSS (Weekly Start Stop) 運用								70%
DSS (Daily Start Stop) 運用								50%

運転パターンの条件

計画停止期間: 30日とします。

ベースロード運転: 100%負荷運用。

WSS運用: 平日100%負荷運用。週末32時間停止。

DSS運用: 平日16時間は100%負荷運用、平日夜間8時間停止。週末32時間停止。

図 3 6 運転パターンの違いによる利用率比較

- ・ 図 3 5 より、仮に 500MW の発電設備を想定すると、固定費は約 200 億円。
- 図 3 6 より、年間 8000hr のベースロード運用を想定すると、
 - ・ 年間総発電量は $4 \times 10^6 \text{MWh}$ 。
 - ・ 効率 57%HHV での燃料発熱量は、年間 $7 \times 10^6 \text{MWh} = 24 \times 10^6 \text{MMBtu}$
 - ・ 天然ガスの価格を、仮に $10\$/\text{MMBtu} = 1000\text{¥}/\text{MMBtu}$ ($1\$ = 100\text{¥}$) とする。

(注) 平成 25 年の夏季のガス価格は、

ガス価格が高い日本・韓国などでは、 $17\$/\text{MMBtu}$ 程度

ガス価格が低い米国（シェールガス）では、 $3\$/\text{MMBtu}$ 程度

とされており、その平均値は、 $10\$/\text{MMBtu} = 1000\text{¥}/\text{MMBtu}$ となる。

この場合、年間の燃料代は、約 240 億円/年と計算される。

すなわち、固定費に比べ、燃料代が相対的に高く、超高効率発電では、燃料代節約の効果が圧倒的に大きいことがわかる（表 1 0 参照）。我が国のように、ガス価格が高い場合は、500MW の発電設備を年間 8000hr 運用すると、発電効率を 52%→57%に高めることにより、年間 39 億円程度の燃料代の節約となる。

表 1 0 発電効率を 5 2 %⇒5 7 %とした場合の年間の燃料代の差

燃料価格	発電効率 5 2 %	発電効率 5 7 %	燃料代の差
1 7 \$ / M M B t u	4 4 7 億円	4 0 8 億円	Δ 3 9 億円
1 0 \$ / M M B t u	2 6 3 億円	2 4 0 億円	Δ 2 3 億円

4-2 波及効果

本技術開発により、世界最高効率の 1700℃級ガスタービン技術確立に向けて順調に技術開発が進んでいる。

本技術により、既成ガスタービンより化石燃料単位の発電電力量を高めることが可能となり、限られた化石燃料の有効利用、発生 CO₂ 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 形ガスタービンの開発に適用された。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上のメリットに加え、発生 CO₂ 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、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 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。

図2や表10に示すように、発電用ガスタービンは、経済性が高く、かつ、効率改善の経済効果（燃料代低減効果）が大きい。一方で、効率改善には、高度な技術が必要なため、技術開発の達成度が市場シェアに直結する場合が多い。

日本は、徐々にシェアを伸ばしてきたが、2009年以降は、リーマンショック後の急激な円高のため世界市場で苦戦を強いられた。しかし、国産技術を反映したJ形ガスタービンの市場投入（国内電力向け）により2010年-2012年はシェアが躍進した。

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

本事業の研究開発計画について、以下のとおり示す（図37、表11参照）。本事業は、4年間の要素技術開発（技術開発事前技術検証）とそれを基にした5年間の実証試験の計9年間の計画となっている。事業開始4年目の実証機建設前に中間評価を行い、補助率も含め事業の見直しを行う予定である。

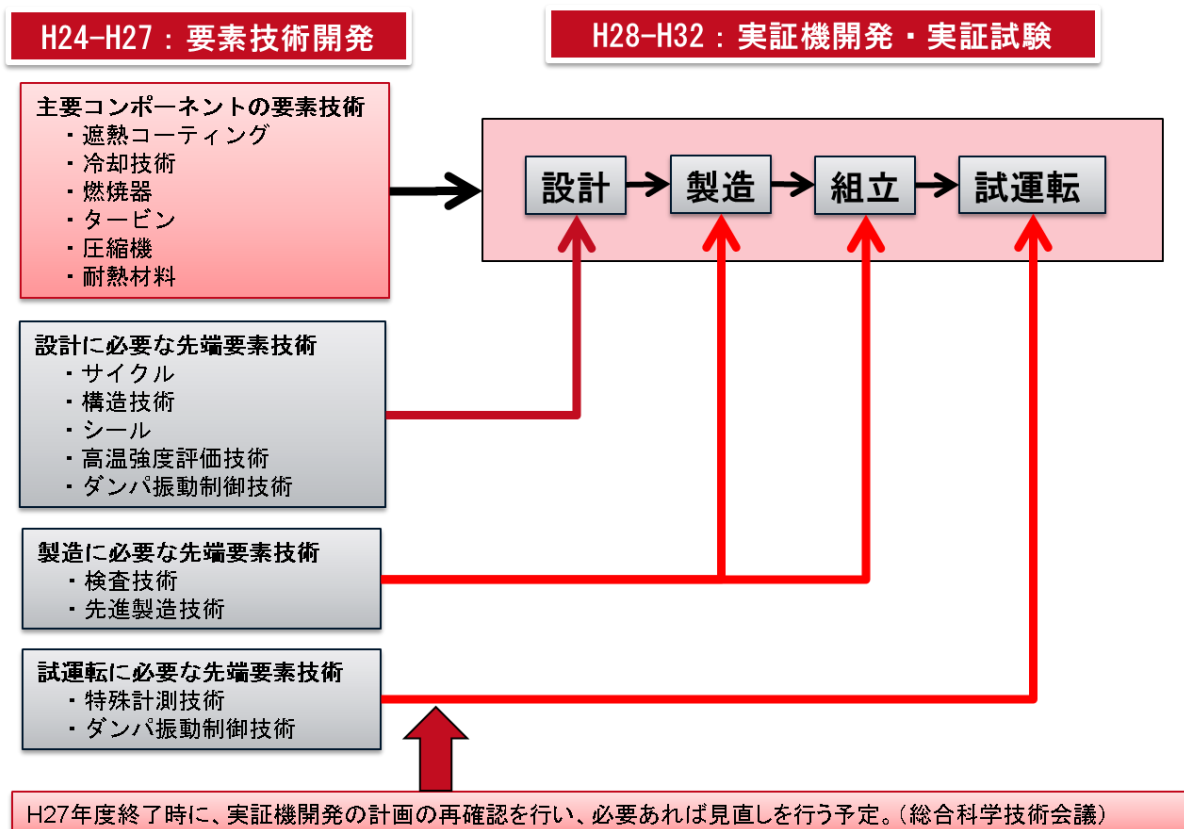


図37 4年間の要素技術開発と5年間の実証試験

（参考）総合科学技術会議「高効率ガスタービン技術実証事業費補助金」の評価結果：平成23年11月より抜粋

「事業の開発フェーズに応じた的確な計画の見直しについて」

本事業は、4年間の要素技術開発（技術開発事前技術検証）とそれを基にした5年間の実証試験（約1年間の実証機設計、約2年間の実証機建設、約2年間の実証試験検証）の計9年間の計画となっている。

経済産業省においては、産業構造審議会評価小委員会で、3年ごとの中間評価と事業終了時の事後評価を実施し、また、これとは別に、事業原課が主体となって事業評価検討会を設置して事業開始4年目の実証機建設前に中間評価を行い、補助率も含め事業の見直しを行うとしている。

表 1 1 . 研究開発計画 (H24 年度～H27 年度の要素技術開発)

	H24 年度	H25 年度	H26 年度	H27 年度
①低熱伝導率 遮熱コーティング	材料改良基礎検討 皮膜構造改良 コンセプト検討	材料計算・粉末試作 熱応力解析・ 密着力評価	TBC 試作・基本特性評価 短時間劣化評価	皮膜構造適正化 長時間劣化評価 燃焼試験翼施工
②高性能冷却 システム	基本コンセプト検討 コンセプト検証 解析・試験	システム概念設計・解析 要素検証試験	システム詳細設計・解析 冷却システム検証試験	改良設計 装置製作 燃焼 翼列試験
③非定常性 制御燃焼技術	基本コンセプト検討 要素解析・ 気流試験	要素燃焼試験 要素解析・気流試験	装置設計・燃焼試験 製作 解析・気流試験	改良・製作 燃焼試験 解析・気流試験
④超高性能 タービン	基本コンセプト 要素解析 翼列試験 検討	要素解析・翼列試験 改良コンセプト検討	要素解析 翼列試験 設計製作 モデル タービン 試験	改良設計 製作 モデル タービン 試験
⑤境界層制御 高性能圧縮機	境界層制御 コンセプト検討 要素解析・ モデル翼試験	境界層制御 改良検討 モデル圧 縮機試験	多段圧縮機 設計製作 多段圧縮機 試験	改良設計 製作 多段圧縮機 試験
⑥超高性能 サイクル	基本コンセプト検討	基本サイクル解析	改良サイクル解析	最終サイクル解析
⑦高機能構造技術	基本コンセプト 要素解析・ク リアランス計 測試験 検討	要素解析・ク リアランス計 測試験 クリアランス制御装置設計	設計・ク リアランス制 御試験 製作	改良設計・ク リアランス制 御試験 製作
⑧高性能シール・ 高性能軸受	基本コンセプト 要素解析 検証試験 検討	要素解析・検証試験 改良コンセプト検討	要素解析 検証試験 改良設計	試験装置 製作 実機模擬 特性試験
⑨先進製造技術	施工法 検討 コーティング・溶接 基礎試験	コーティングシミュレーション 成膜状態基礎評価 溶接シミュレーション、 施工状態基礎評価	条件最適化、膜性能評価 実部品成膜プログラム開発 条件最適化、溶接性能評価 実部品施工プログラム開発	実部品成膜検証・評価 実部品施工検証・評価
⑩超高温強度 評価技術	基本コンセプト 要素解析・ 材料試験 検討	要素解析・疲労試験 損傷評価基礎試験	要素解析・疲労試験 損傷評価検証試験	構造モデル試験・解析
⑪特殊計測技術	調査研究 基本コンセプト検討 要素試験	特殊計測システム設計製作 検証試験	改良検討 実機適用	改良製作 高圧燃焼翼列試験適用
⑫高精度・高機能 検査技術	基本コンセプト 要素技術 基礎試験 検討	解析評価 センサ試作 センサ性能 評価試験	センサ設計・モックアップ 製作 検証試験	センサ改良・実機検証 製作 試験
⑬高性能ダンパ・ 振動制御技術	基本コンセプト検討 要素解析・要素試験	要素解析・要素試験	改良コンセプト検討 振動解析・振動試験	振動解析・振動試験

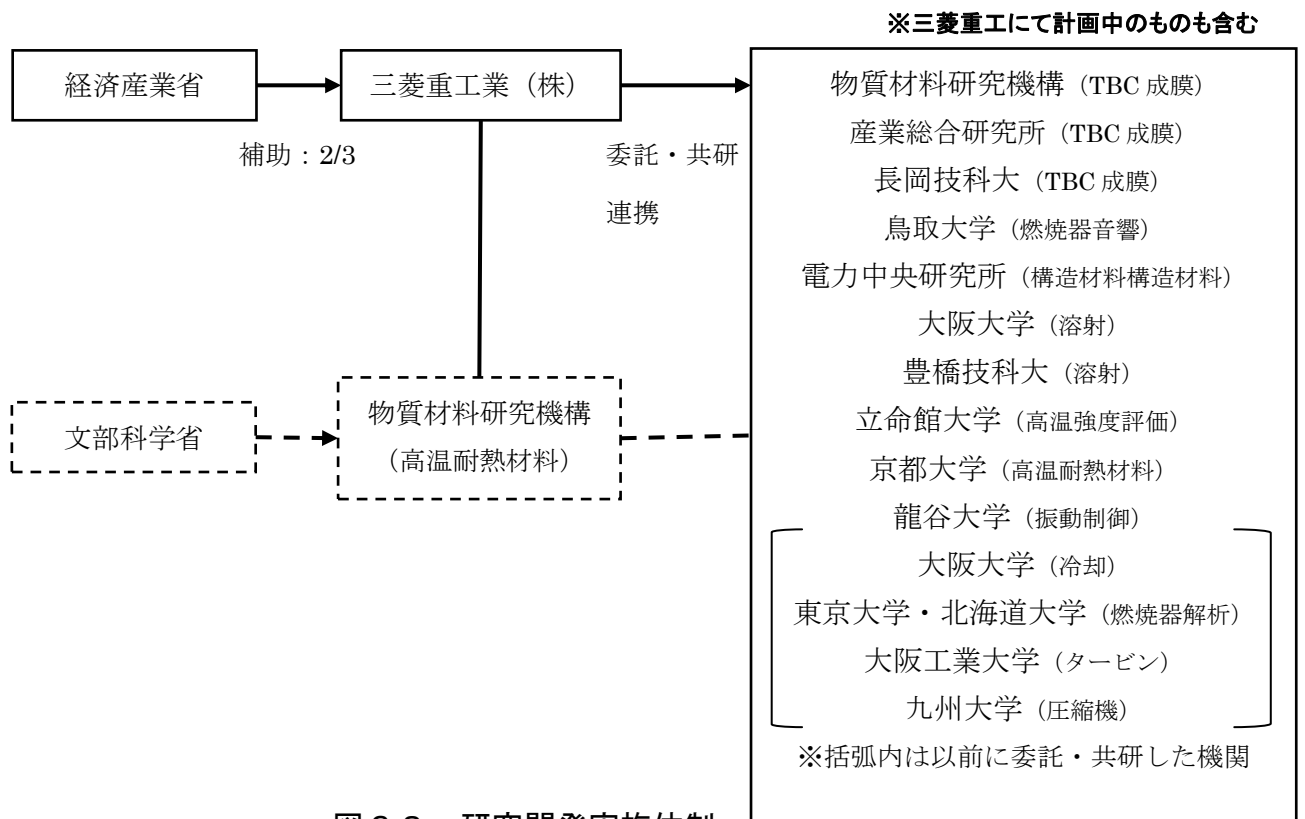
5-2 研究開発実施者の実施体制・運営

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)が経済産業省資源エネルギー庁より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、大阪工業大学等が参加、または参加計画である(図38 参照)。

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))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(独)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



5-3 資金配分

本事業の9年間の各技術開発の資金配分を以下に示す（表12参照）。

表12. 資金配分 （単位：百万円）

年度：平成	24～32	計
要素技術開発	6,316	14,046
設計	1,970	
製作	4,500	
試運転	1,260	

5-4 費用対効果

本事業には2年間で約24億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57%（HHV）の達成に向けた技術開発に目処をつけるなどの成果をあげた。

さらに、老朽化した石炭、石油、LNG 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イス需要が高まっており、この場合は、効率の向上が大きくなるため、さらに大きな燃料削減効果が期待できる。

【CO2削減量】

1700℃級の高効率ガスタービンを開発した場合、既設の石炭、石油、LNG 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CO2発生量の10～17%（*）が削減可能である（表13、図39参照）。

（*）我が国の電気事業全体からのCO2排出量約4億トンとの比較。なお、ベースは、（財）電力中央研究所出典の「わが国における電源構成の推移（後出）」に基づいている（図40参照）。

また、排ガス再循環システムではCO2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、CO2排出原単位は0.03kg-CO2/kWh程度とできる。

表13 1700℃級複合発電によるCO2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 ₂ 削減量	全発電所から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

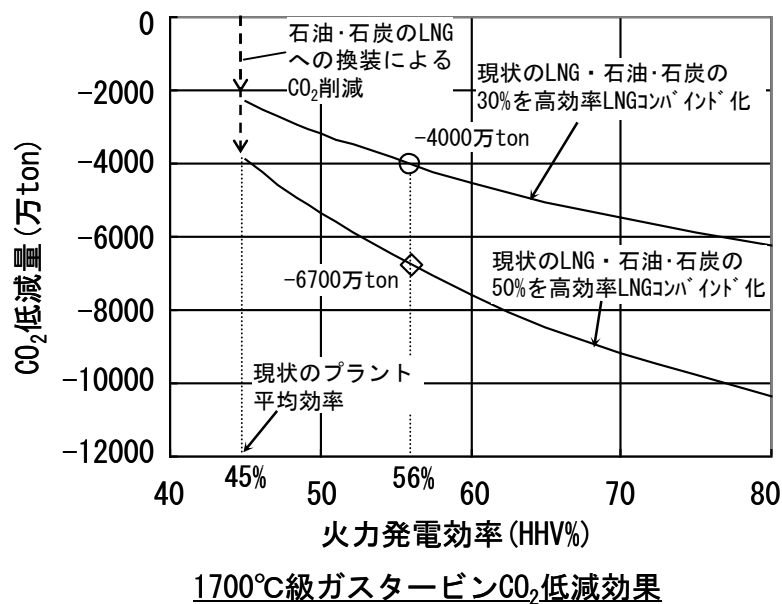


図 3 9 1700°C級ガスタービン導入による CO₂ 低減効果

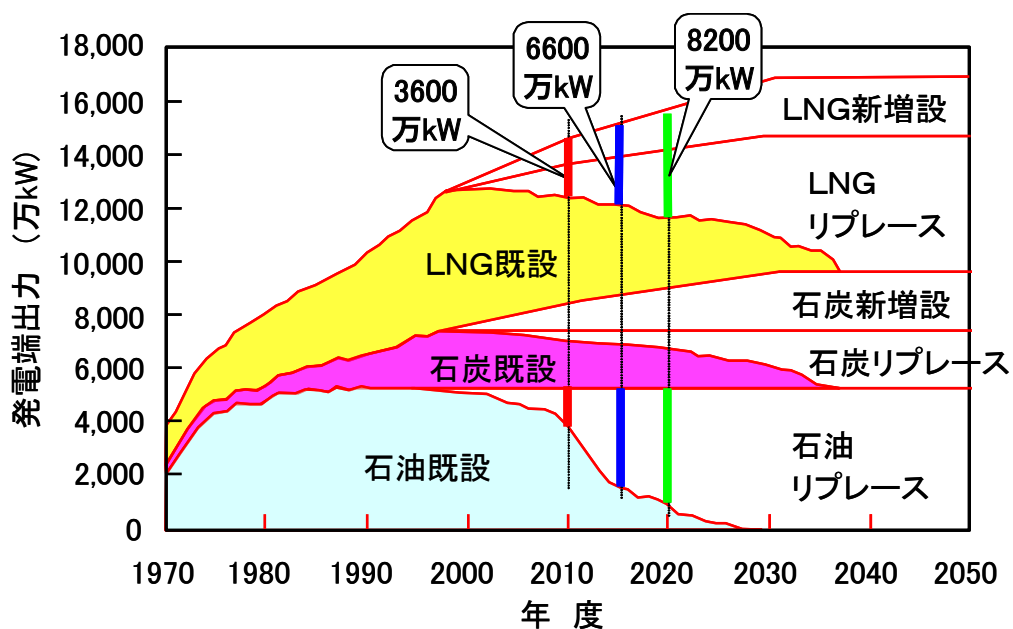


図 4 0 わが国における電源構成の推移 (プラント寿命 40 年)

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)

【省エネ効果】

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。

我が国のように、ガス価格が高い場合（17\$/MMBtu 程度）は、500MW の発電設備を年間 8000hr 運用する場合を想定すると、発電効率を 52%→57%に高めることにより、年間 39 億円程度の燃料代の節約となる。（表 10）

5-5 変化への対応

5-5-1 環境問題への対応

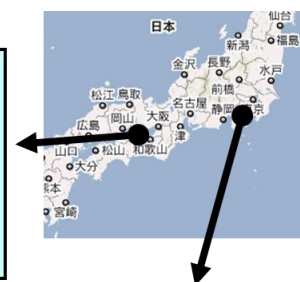
環境問題の高まりにより、温室効果ガスの排出量低減に対する要求が高まっている。このため、風力発電や太陽光発電などの自然エネルギーの普及に拍車がかかっている。天候に左右される自然エネルギーの普及とともに、負荷吸収能力の高い大容量の電源が必要となるが、この点でガスタービンは最適である。また、化石燃料を使用する火力発電についても、より CO₂ 排出原単位の小さいクリーンな燃料として LNG が選択されることが多くなっている。本プロジェクトで開発中の技術により可能となる、超高温高効率ガスタービンを用いたコンバインド発電は、このような市場のニーズ・トレンドに沿っており、有効な技術開発である。

5-5-2 国内リプレイス需要への対応

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イ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 形ガスタービンの開発を行い、高効率を前提とした発電設備のニーズに応えた（図 4-1 参照）。

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。

図 4 1 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)
1600℃級ガスタービンの高効率を前提とした発電設備

5-5-3 急速な円高とその後の景気減退時のシェア確保

我が国は、大型電力事業用ガスタービンの導入に関して徐々にシェアを伸ばしてきたが、2009（平成 21 年）年以降は、リーマンショックに伴う急速な円高のため世界市場で苦戦を強いられている。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(国内電力向け)により2010 年（平成 22 年）～2012 年（平成 24 年）はシェアが躍進した。

5-5-4 東日本大震災後の原発稼働停止に伴う電力不足への対応

東日本大震災後は、原子力発電所の稼働停止に伴う電力不足が大きな懸念事項となった。

1700℃級ガスタービンの要素技術を適用して開発された 1600℃級 J 形ガスタービンの試運転は、平成 23 年 2 月に実施された。1600℃条件到達後、種々の試験が実施され、重要な検証項目として実施中であった 100 時間連続運転の終了間際に 3 月 11 日の大地震が発生した。

試運転後、電力会社からの要求により、1600℃級 J 形ガスタービンは、多くの特殊計測用のセンサーをつけたまま発電を継続し、夏季重負荷期の発電ニーズに無事応えることができた。これは開発直後のガスタービンとしては極めて異例なことである。

結果として、わずか一年半後の平成 24 年 12 月には、ガスタービンとして十

分な実績として判断される 8000 時間の総運転時間に到達した。

図らずも、運転時間蓄積により、高温部品や遮熱コーティングの長期信頼性検証データや、性能面での経年劣化データ、季節変化による作動条件や性能の大気温度特性データを多く取得することができ、本研究にも活用している。

5-5-5 短期間での発電開始ニーズへの対応

新規の複合発電設備は、通常 2 年程度の建設期間が必要であるが、ガスタービン単体で発電を開始することもできる。大型ガスタービンでも全長は約 15 m 程度であり、工場で組立てた後、輸送し現地に設置することができる。

従って、工期がわずか数か月で発電を始めることが可能となる。

このため、ガスタービン単体で排気ガスをそのまま排出する場合の騒音低減や、NO_x 低減なども開発時に考慮することとした。

さらには、蒸気発生源としての排熱回収ボイラがない場合の運用が必要であるため、燃焼器の冷却媒体として蒸気ではなく空気を使用する「空冷燃焼器」も視野に入れた開発を行うこととした。

(注) 東日本大震災後の電源不足に対応するため、約 6 か月で大型ガスタービンによる発電を現地に設置し発電を開始した例がある。図らずも、大型ガスタービンが緊急時に適した電源であることが実証されている。

5-5-6 自然エネルギーの普及に伴う運用性ニーズへの対応

検討中のガスタービンは、大容量であるため、わずか 1 分間で発電量を約 50MW 増減させることができる。この「高い負荷変動吸収能力」により、風力発電や太陽光発電の発電量の変動を広域でカバーし、再生可能エネルギーの普及を促進することができる。

このように運用性として、急速起動や負荷変化能力も考慮して構造検討を実施する。