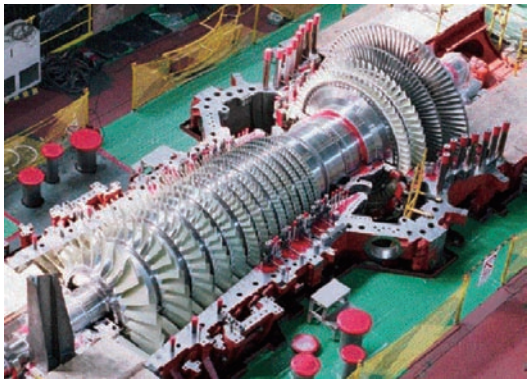
特 集 論 文



1 700 ℃級ガスタービンの要素技術の開発

Development of 1 700 ℃ Class Gas Turbine Technology

塚越敬三[*1] Keizo Tsukagoshi
六山亮昌[*2] Akimasa Muyama
正田淳一郎[*3] Junichiro Masada
岡田郁生[*4] Ikuo Okada
伊藤栄作[*5] Eisaku Ito

1. はじめに

地球環境を取り巻く情勢が深刻化している中，日本では平成17年2月に京都議定書が発効し，1990年の温室効果ガス排出量の6％削減目標を達成する事が求められている．

これを踏まえ，平成19年度税制改正大綱に，平成20年1月より環境税導入を検討することが盛り込まれるなど，削減努力が待ったなしの状況になっている．

一方，CO_2排出量の1/3は，発電によるものであり，発電プラントの高効率化がCO_2排出量削減に有効である．このような状況下で，高効率化を目指して1 700 ℃級高効率ガスタービンの要素技術開発は国家プロジェクトとして推進されている．

2. タービン入口温度向上とコンバインド効率向上

熱サイクル効率向上のためには，サイクル最高温度の向上が有効である．図1にタービン入り口温度とコンバインド熱効率（LHV）を示す．現状のF形の1400℃級及びG形の1 500 ℃級から更に高温化した1 700 ℃級ガスタービンでは，コンバインド熱効率は，62～65％（LHV）となる．

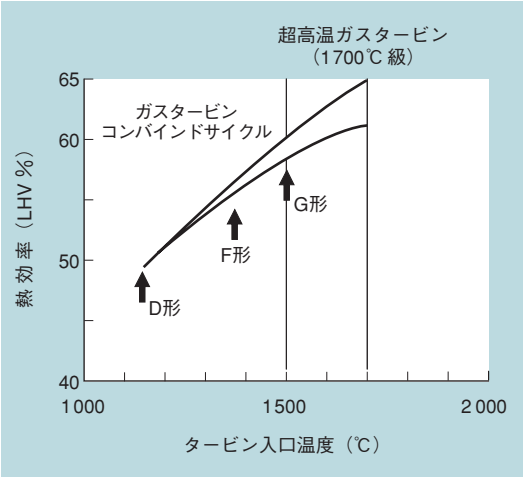


図1　コンバインド効率のトレンド
1 700 ℃級では，熱効率は62％～65％が達成可能となる．CO_2排出原単位は約0.37～0.39 kg/kWhであり，微粉炭焚き従来火力に比べ，1/2程度に削減できる．

3. 1 700 ℃級ガスタービンによるCO_2削減効果

平成19年度税制改正大綱に，盛り込まれた平成20年1月からの環境税導入案によれば，温室効果ガス5 200万トン（日本全体の約4％）低減を見込み，税率は2 400円／炭素トン，税収額は約3600億円が想定されている．燃料別では石炭1.58円／kg，天然ガス1.76円／kgとされ，日本全電源平均に基づく電機換算では0.25円／kWhと発表された．これは，125万kWのベースロード運用（8 000 h）の発電所では，年間25億円に相当する．

一方，1 700 ℃級ガスタービン開発による環境効果については，CO_2排出原単位が約0.37～0.39 kg/kWhであり，微粉炭焚き従来火力に比べ，1/2程度と大幅削減が期待できる．既設の重油焚き，石炭焚き火力発電の30％～50％の発電出力を1 700 ℃級高効率コンバインドプラントに置き換えると，発電所から発生するCO_2発生量の11～19％，国内全体の4～6％が削減可能となる．

4. 国家プロジェクトの概要

このように，1 700 ℃級ガスタービンに対する市場の期待は大きい．しかし，航空用ガスタービンでは，最大負荷条件は離陸時の数分間のみであるのに対し，発電事業用の大型ガスタービンでは年間8 000 h以上の連続運用が求められる．このため，現在実用化されている1 500 ℃級に比べ，はるかに厳しい1 700 ℃級の条件で，性能と信頼性を両立するための要素技術開発が必須となる．

*1 高砂製作所技監・技師長
*2 高砂製作所ガスタービン技術部長
*3 高砂製作所ガスタービン技術部ガスタービン統合開発グループ長
*4 技術本部高砂研究所材料強度研究室長
*5 技術本部高砂研究所ターボ機械研究室主席

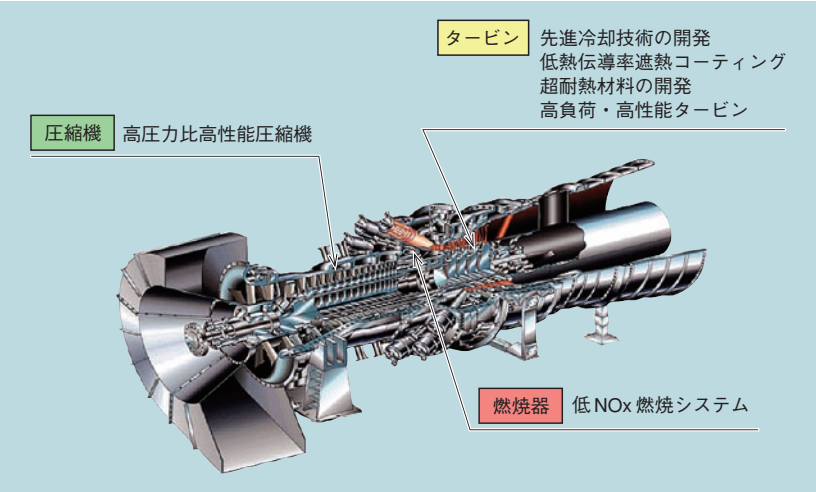


図２　１700 ℃級ガスタービンの要素技術開発
１700 ℃ガスタービンの実現のために必要となる６つの要素技術を国家プロジェクトで実施中である．

本プロジェクトでは，１700 ℃級ガスタービンに必要な６つの要素技術（燃焼器，冷却，耐熱材料，熱遮蔽コーティング，タービン空力，圧縮機空力）開発を実施中である（図２）．

開発に当たっては，従来とは異なる開発手法を採用して，既存の概念にとらわれない革新的な技術開発を目指している．例えば，低熱伝導率熱遮蔽コーティングについては，社内で開発した電子構造に基づく材料ナビゲーションシステムを適用することにより，従来の試行錯誤的な開発手法と異なり，理論的･解析的に候補材を探索することに成功した（図３）．

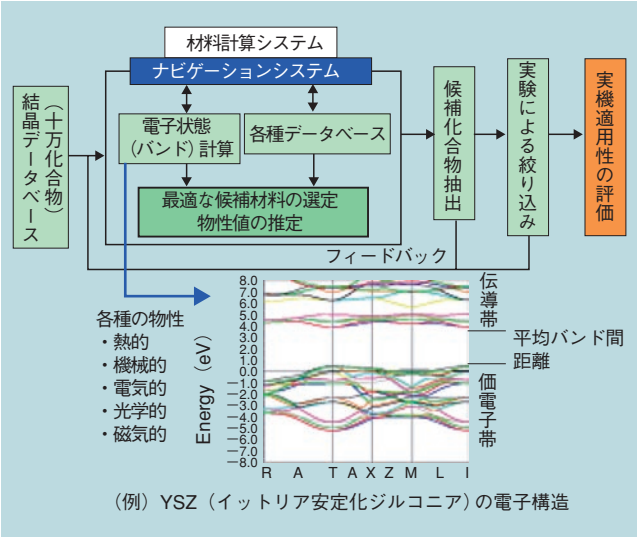


図３　第一原理計算を活用した革新的コーティング材料の開発フロー
新開発の，電子構造に基づく材料ナビゲーションシステムにより，革新的なコーティング材料を抽出した．従来とは全く異なるアプローチにより要素技術開発を進めることにより，現状の１500 ℃より数段厳しい１700 ℃の技術的な壁に挑む．

探索したコーティング材料を実際に調合し焼結体を試作し，熱伝導率の計測に供した．その結果，上述のナビゲーションシステムによる予測通り，各温度条件において目標の従来比 20％低熱伝導率であることが確認された（図４）．平行して実設計で必要な物性値の計測も実施している．

一方，熱遮蔽コーティングを実機に適用するためには，溶射プロセスを確立する必要がある．そこで，熱疲労試験で使用するテストピースを用いて，溶射中の粒子の速度分布や温度分布を計測することによりプロセスの最適化検討を行った．施工したコーティング材はマクロ観察により健全な組織であることを確認した（図５）．現在までに熱疲労試験を実施し，優れた熱遮蔽効果を保ちつつ，従来と同等の寿命が得られることを確認済みである．

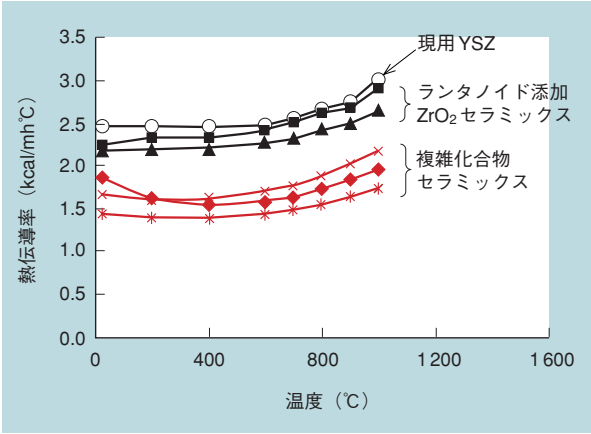


図４　試作セラミックス焼結体の熱伝導率測定結果
第一原理計算により探索したセラミックスは，目標を満足する低熱伝導率であることが確認された．新しい材料開発の手法の有効性も合わせて確認できた．

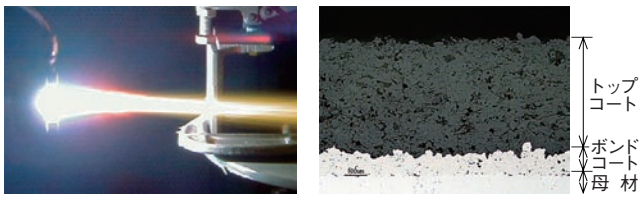


図５　低熱伝導率熱遮蔽コーティングの溶射状況と皮膜写真
開発したコーティング材を溶射し，コーティング皮膜の成膜性を確認した．従来比 20％低熱伝導率で，熱疲労寿命は従来と同等の結果を得た．

また，1 700 ℃条件でのエミッションに関しては燃焼温度上昇に伴い NOx が指数関数的に高くなってしまうため，従来の予混合燃焼器では環境規制を満足できなくなる．そこで NOx 低減のため，排ガス再循環システムが計画されている（図６）．排ガス流量の約３割をガスタービンの吸気に循環させ，燃焼空気の酸素濃度を低減し NOx 発生を抑制する．これに加え，最新の燃焼解析技術を駆使して，新型燃焼器開発に取組んでいる．百万分の一秒程度の時間刻みで局所燃焼反応や，燃焼により発生する複雑な流体乱れや渦構造の解析事例を示す（図７）．これまでに，大気圧燃焼試験により，実圧換算で 30 ppm 代の NOx 値が計測された．今後は，より高圧条件での燃焼試験を行う．

一方，1 700 ℃条件での実運用では，高温部品の冷却技術が成否の鍵を握る．約 10 年間の 1 500 ℃級ガスタービンの運用実績に基づき，高性能冷却システムを検討中であるが，従来比 200 ℃のガス温度上昇に伴い，より木目の細かい冷却構造が必要となる．一例として，インピンジ冷却，対流冷却，フィルム冷却を組合わせた高性能微細冷却構造と，その伝熱基礎データを示す（図８）．

次に，超高温耐熱材料の開発では，航空エンジン用に開発された第５世代単結晶材 TMS196 などを参考に，大型翼として発電用の長時間運用に適した耐久性と経済性を兼備する材料を開発している．クリープ耐用温度（図９），熱疲労寿命，高温酸化特性などの試験を実施中である．

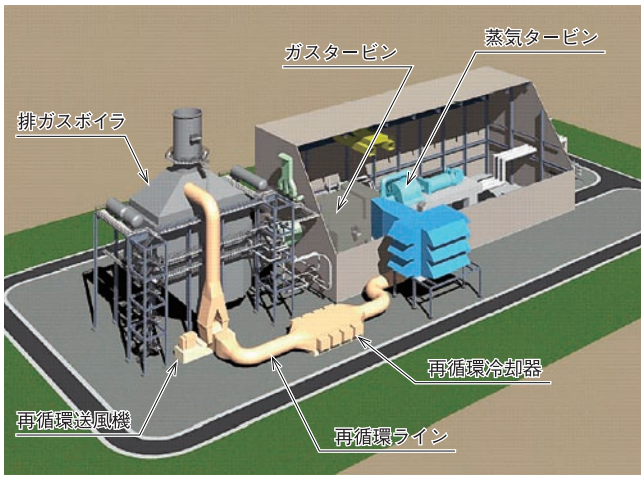


図６　１700 ℃級発電所のイメージ
高温化に伴い，排ガス中の NOx を低減するため 1 700 ℃級ガスタービンでは排ガス再循環方式が計画されている．

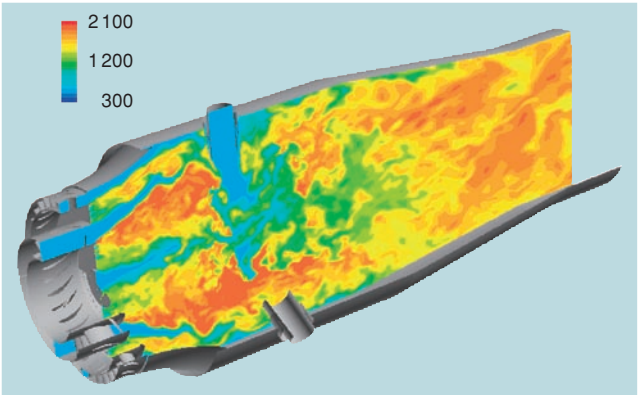


図７　１700 ℃級燃焼器の燃焼解析（ガス温度分布）
百万分の一秒程度の時間刻みで，燃焼現象を従来に比べより忠実に解析した燃焼解析事例．燃焼による複雑な流れの乱れや渦がとらえられている．

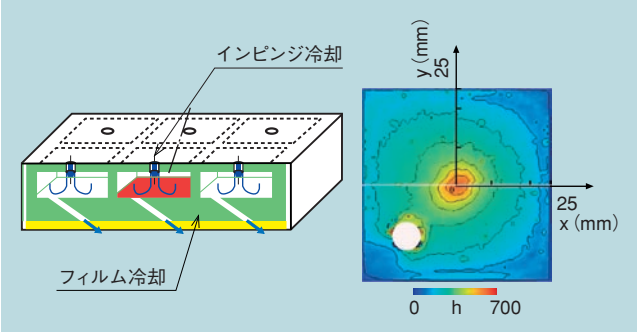


図８　微細冷却構造案と熱伝達率分布データ
インピンジ冷却，対流冷却，フィルム冷却を組み合わせた高性能微細冷却構造を考案し，伝熱基礎データを取得した．

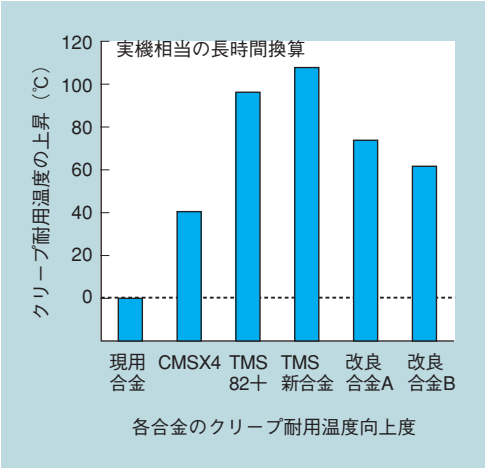


図９　超高温耐熱合金候補材のクリープ耐用温度向上度
大型ガスタービン翼として高温強度と経済性を兼備する種々の合金候補材の特性試験を実施している．

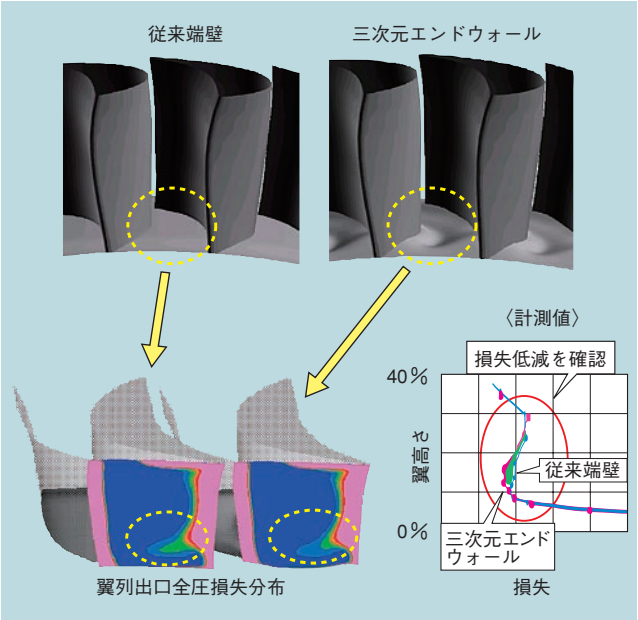


図 10　高負荷高性能タービンの三次元エンドウォール
従来比約 30 ％空力負荷が高い条件で，2 次流れ損失を低減する先進三次元エンドウォールの効果を回転翼列試験で確認した．

最後に，1 700 ℃の高負荷・高圧力比において，性能向上を達成するためのタービン・圧縮機の先進空力技術が必要となる．大容量の発電用ガスタービンでは，信頼性ある一軸構造・従来並の段数という条件下での技術開発となるため，二軸もしくは三軸の設計が可能な航空用ガスタービンのタービン・圧縮機とは異なる技術課題が発生する．まず，タービンでは空力的な負荷が従来比約 30 ％高くなり，翼列の 2 次流れ損失の低減が重要となるため，先進三次元エンドウォールを検討した（図 10）．圧縮機については，一軸で従来以上の高圧力比で安全に起動・運用でき，従来比 1 ％効率向上が可能な新コンセプト圧縮機を開発中である（図 11）．

本稿で部分的に紹介した革新的な要素技術の開発により，1 700 ℃級ガスタービンの実用化が現実のものとなりつつある．

5. ま　と　め

経済産業省資源エネルギー庁，文部科学省，（独）物質・材料研究機構よりご支援いただき，現在 3 年目の研究を順調に実施中である．また，国内の主要大学とも協力している産官学連携プロジェクトでもあり，国内の総力を結集して，次世代の 1 700 ℃級ガスタービンの技術開発を進めていく．

さらに，開発中の冷却技術やコーティング技術などは，1 400 ℃級 F 形，1 500 ℃級 G 形などの既存機に対しても展開可能である．国家プロジェクトの技術を広範囲かつ早期に展開して，お客様のニーズや環境問題へ貢献する所存である．

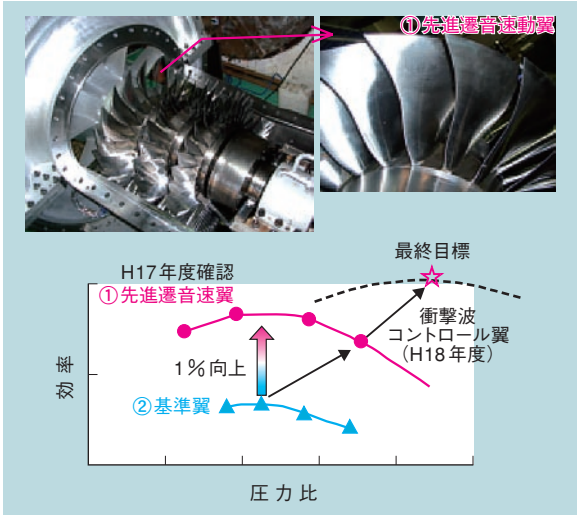


図 11　新コンセプト遷音速圧縮機
先進遷音速圧縮機翼列の回転試験を実施し，従来比 1 ％の効率向上を確認した．さらに高圧力比条件での性能向上を目指す．

塚越敬三

六山亮昌

正田淳一郎

岡田郁生

伊藤栄作