

「CO2削減とイノベーション」研究会 第15回研究会報告

「高効率・高温ガスタービンの開発と工業化」 2012.2.9

正田淳一郎 氏

(株)三菱重工業(株) 原動機事業本部 ガスタービン技術部 部長

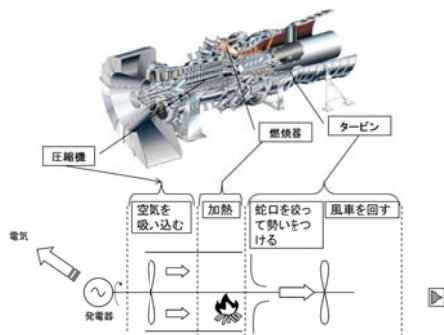


2009年9月、当時の日本国首相は、国連の演説において、「2020年までに温室効果ガス排出量を1990年比25%削減する」という目標を、国際公約として掲げた。昨年の大震災を受けて公約撤回の動きもないではないが、この25%の削減案は、原子力発電所の新設を前提にしても大きな足かせといわざるをえない。そもそも日本の場合、CO2削減に関する意識がすでに高く、技術革新も相当に進んでいる、いう現状があるからである。そこで、今回の研究会では、火力発電におけるガスタービンの高温・高効率化世界一を実現した、三菱重工業の正田氏にお越しいただき、その開発経緯とそれを支える問題意識、さらには将来的な展望について詳しくお話をうかがった。

【講演要旨】

ガスタービン(C1)を用いた火力発電において、近年、増えているのが、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドサイクル発電(C2)である。ガスタービンを使って発電した後、その排熱を利用してつくった蒸気で蒸気タービンを回転させ、もう一度電気をつくるという発電方式である。高効率のガスタービンは、高い排ガスエネルギーを有するので、そこに蒸気タービンを組み合わせれば、高いプラント効率を達成できる。すなわち、同じ量の燃料でも、通常の火力発電より多くの電力をつくるのが可能になるため、結果としてCO2の排出量を抑えることにつながるわけである。

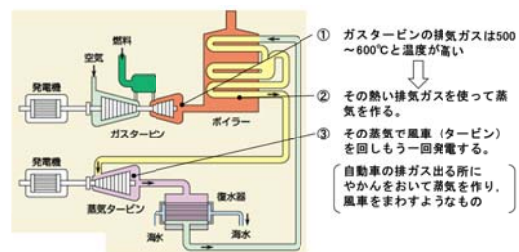
発電用ガスタービンのしくみと構造



C1¹²

コンバインドサイクル発電

ガスタービンを使って発電した後、その排熱を利用して作った蒸気により蒸気タービンを回転させ、もう一度発電。



C2¹³

地球温暖化防止の上からCO2削減が世界的な課題になっている今、三菱重工業がガスタービンの開発に力を注いでいる意義も、まずはこの点にある。しかし、理由はそれだけにとどまらない。化石燃料のなかで最も燃費のよいガスタービンは、コストを安く抑えることができる。加えて、発電量を変えやすいという点で運用性が非常に高く、必要に応じて発電量を調整しやすいため、再生エネルギー増加で発電量変動増加が予想されるなか、そのニーズも高まっている。さらには、震災の影響もあり、建設期間が非常に短く、緊急時に対応性がよいことも、ガスタービンの特徴として注目を集めつつある。

ただし、高温で焚けば燃費がよくなり、CO2排出量も抑えられるとはいえ、高い温度で長時間、発電しつづけるという状況は、高温下でのガスタービン自体の耐久性、および、NOx(窒素酸化物)発生による環境負荷といった問題を生む。三菱重工では、タービンの羽根(C3)のデザイン、コーティング、材質に独自の工夫を施しているほか、空気と燃料を混合させて燃焼させる予混合燃焼器(C4)にも工夫を盛り込むなど、いくつかのキーテクノロジーによって問題を解決しつつ、低NOxでありながら、タービン入口温度1600°C、熱効率61.5%という、世界最高レベルの出力と効率を実現した。

また、開発プロセスとしては、研究・開発・実証実験の各部門を一つのエリア(高砂)に集約させており、組立工場の横に実際の発電所をつくって、初号機の運用を検証しつつ開発を進めている。さらに、国のプロジェクトとして補助金を得ながら要素技術開発を推し進め、それらを順次適用して性能向上に努めており、1700°C級超高温ガスタービン実現の可能性も見えはじめています。その一方で、太陽熱とガスタービンを組み合わせるなど、従来の技術的な蓄積を活かして新たな取組み(C5)への着手も進めている。

(文責:藤井由紀子)

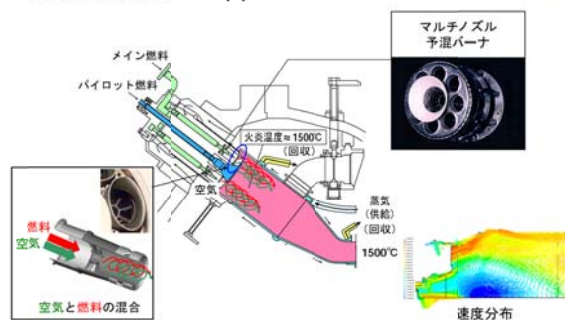
**タービン入口温度上昇
(タービン動静翼 冷却構造の変遷)**

C3 22

タービン入口温度	1150°C	1400°C	1500°C
タービン1段静翼	インサート (インフィニティ)冷却 フィルム冷却 ピンフィン冷却	インサート (インフィニティ)冷却 フィルム冷却 ピンフィン冷却 TBC	シャワーヘッド冷却 全面フィルム冷却 ピンフィン冷却 TBC
材 料	ECY768 (Co基合金)	MGA2400 (Ni基合金)	MGA2400 (Ni基合金)
タービン1段動翼	マルチホール冷却	ピンフィン冷却 シャワーヘッド冷却 フィルム冷却 TBC	全面フィルム冷却 シャワーヘッド冷却 ピンフィン冷却 TBC
材 料	U520 (Ni基合金)	MGA1400-DS (Ni基合金)	MGA1400-DS (Ni基合金)

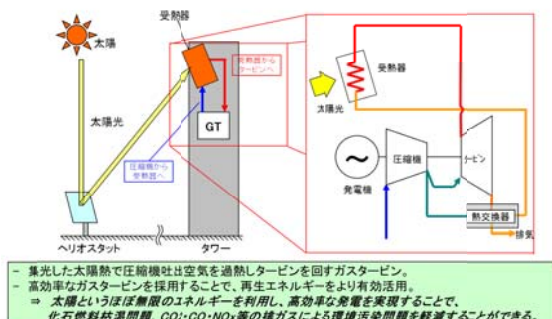
低NOx予混合燃焼器(2)

C4 27



太陽熱ガスタービンの概要

C5 53





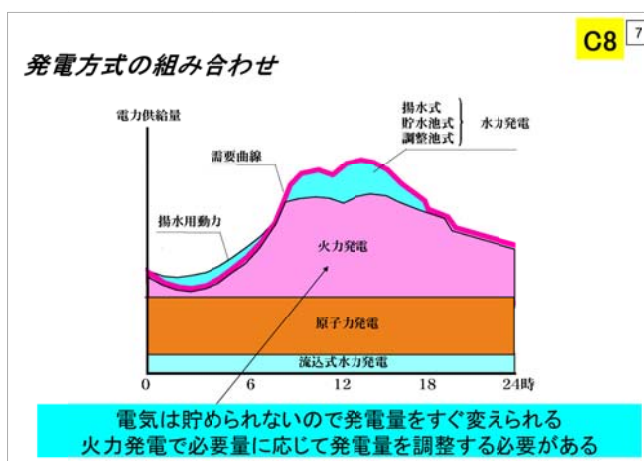
ガスタービンコンバインド発電の意義—CO2 発生量・コスト・運用性

以下、正田氏講演録からの抜粋

正田談:CO2削減の今、なぜガスタービンなのか。ガスタービンの高性能化にわれわれがなぜ血道を上げているのか。これについて、まずご説明します。

一番単純な理由としては、CO2 排出量の問題があります。熱効率が一番高いので、化石燃料を使った火力発電の中ではCO2 発生量が一番少ないんですね。これがひとつ、ガスタービンコンバインド発電の意義です。LNG のコンバインドは、石炭火力に対して、CO2 排出量が半分ぐらいになります。ただ、当然のことながら、原子力は運用ではほとんど CO2 を出しませんから、原子力とか、リニューアブルとくらべますと、多くなっています。

次に、重要な切り口になっているのが、発電コストです。お客様である電力会社様、一般家庭の電力消費者の方にも発電コストは非常に重要です。ガスタービンコンバインドの場合、石炭火力の 2~3



割方、発電コストが安く済んでいるのですが、当然これは、燃費がいいから安い、ということです。ですから、1 番目と2 番目については、「燃費がいいから」という同じパラメーターで括れる、と思います。

それから、ニーズが高まっているという点で一番大きいのが、運用性がいいことです。最近、電力会社様との共同研究など、ニーズを聞く機会がよくあるんですけども、やはり運用性に対するニーズが

高まっている、というふうに認識しております。電気は朝から昼にかけてピークがあって、それがだんだん下がっていくんですが、電気は貯められないので、デマンド吸収が必要、ということです。発電量をすぐに変えられれば、必要量に応じて発電量を調整することができます。原子力でベースを取って、火力でピークを取る。そのピークの CO2 もできるだけ出さず、コストも下げるためにできるだけ効率を上げたいということが、ガスタービンコンバインドのニーズになっている、と認識しています。

また、ガスタービンは建設期間が非常に短く、緊急対応などにも便利です。たとえば、昨年に関東大震災がございましたけれども、この震災で新しいガスタービンのニーズが出てきました。たとえば、東京電力様からご依頼があって、千葉に緊急に建設した発電所があるのですが、約 4 ヶ月の短期間で建設と試運転を完了しています。この発電所は 334MW を 3 台ですから、400~500 万世帯ほどを補える発電所なんですけれども、3 月の震災後、5 月から建設を開始しまして、夏場のピークの 8 月には発電をして東京地区の電力不足に貢献しました。

以上のように、化石燃料の中では一番熱効率がいいので CO2 も少ない。そして、そのためにコストも少ない。これがガスタービンの一つの特徴です。また、ジェットエンジンと同じような機械ですので、車のアクセルを踏んだら発電量がすぐ変わると同様、発電量を変えやすいことも大きな特徴です。

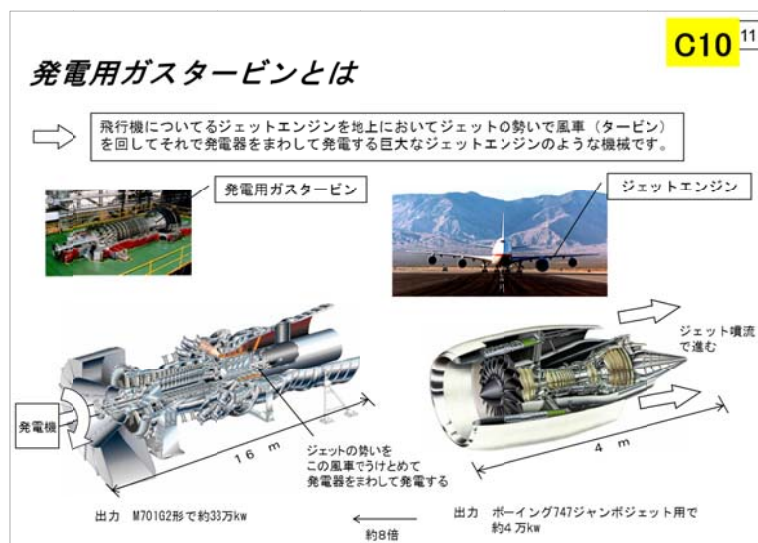
ガスタービンのしくみ、コンバインド発電のしくみ

正田談: 発電用ガスタービンとはどういうものかと申しますと、ジェットエンジンを地上に置いて、その後ろに風車を付けて、それでぐるぐると発電機を回す。ごく簡単にいうと、そういった機械です。ジェットエンジンというのは、空気をかき込んで火を付け、ジェットを出して飛ぶという機械ですが、ガスタービンの場合は、後ろに風車をつけて、その勢いを全部回転エネルギーで取ってしまうわけです。ただ、ガスタービンは飛ばなくていいので、金属で丈夫にがっちり作ります。だから、非常に重たい。そこが

ジェットエンジンとは違うところで

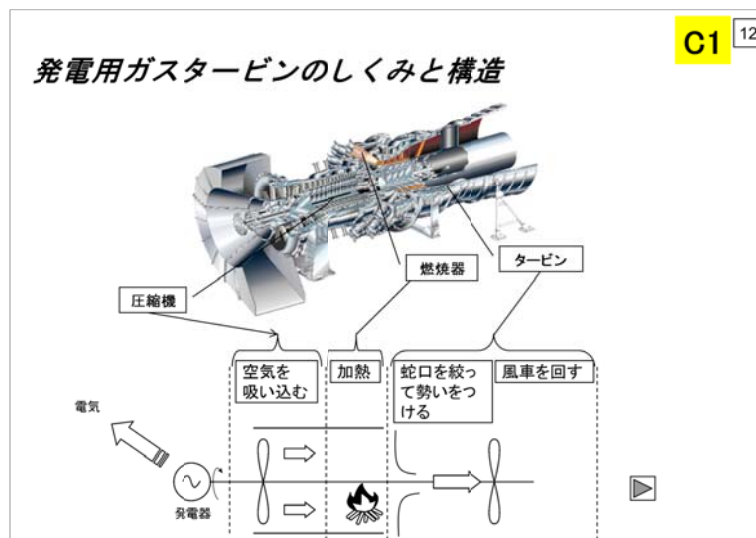
す。

たとえば、千葉に建設した緊急電源用のガスタービン (701G2 形) ですと、長さが 16m で 33 万 kw なので、ジャンボジェットの 8 倍ぐらいのジェットエンジンを地面に置いているという、そうご理解をいただければいいと思います。扇風機のお化けみたいなものを前に 16 個つない



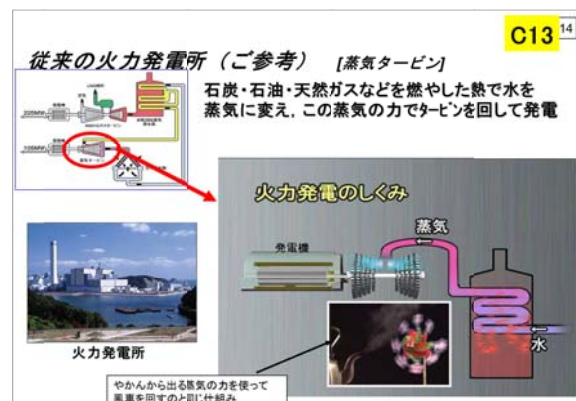
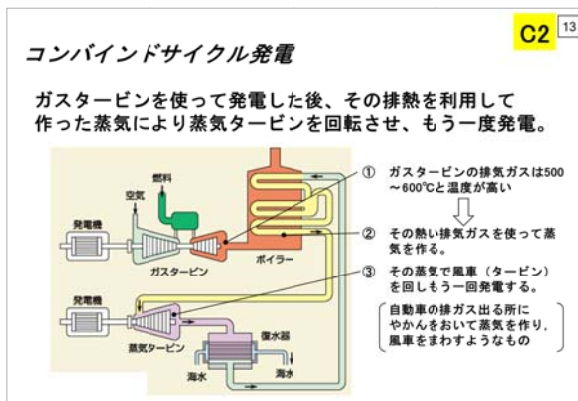
掻き込んで入れます。また、その後ろに 16 個の燃焼器、これは缶みたいなものですが、それが付いていますので、そこに燃料を入れてぽつと火を付けます。すると、ガスが温められて勢いがつくんですが、蛇口を絞ることでさらに勢いをつけて、それを羽根車に当ててぐるぐるっと回します。そして、その力で

風車を回して、その向こうの先についた発電機を回して発電をする。簡単に言うと、そういう仕組みの機械です。



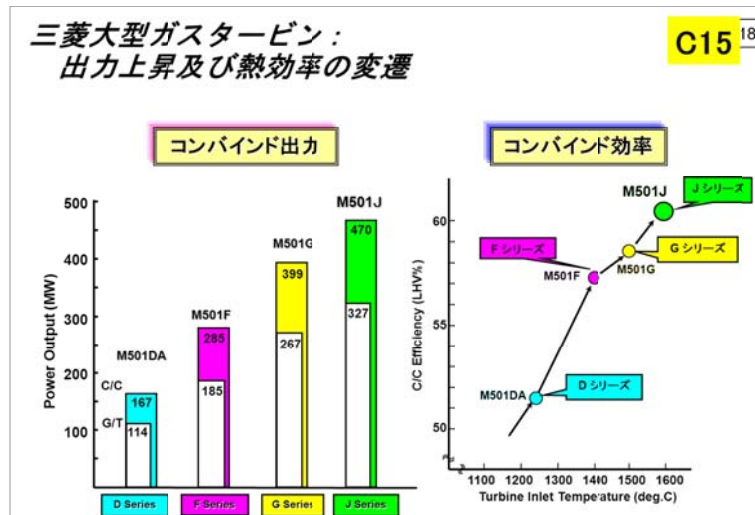
ただし、ガスタービンは排気ガス温度が 600°C ぐらいと、まだ結構温度が高くて、このまま捨ててしまうのはもったいないので、後ろにボイラー、要はやかんみたいなものを付けて、お湯を沸かして蒸気を出して、その蒸気でもう 1 回、蒸気タービンをぐるぐる回しています。“1 粒で 2 度おいしい” みたいな発電方式です。だから、入れられた燃料は、ガスタービンでも発電するし、排気ガスでもう 1 回お湯を沸かし、蒸気を作って回すので、燃費を 1.5 倍ぐらい上げることができます。これがコンバインド発電です。これに対して、従来のような普通の火力発電所ですと、単純に石炭などでお湯を沸かして、それを羽根車に当ててぐるぐる回してという発電方式なので、ガスタービンに比べると 3 分の 2 ぐらいの燃費しか出ません。

それでは、ガスタービン、およびガスタービンコンバインドサイクルは、どうやったら燃費がどんどん上がっていくかですが、車でもアクセルを踏めば踏むほどスピードが出るのと同じことで、タービンに燃料をどんどん入れて、できるだけ温度を上げてパワーを出しますと、燃費もよくなって儲かりますし、CO2 も下げられる、ということです。ですから、ガスタービンの歴史というのはこの温度を上げていく歴史になっています。ただ、発電用のガスタービンは 2 年間、ノンストップで高い温度で回らないといけません。したがって、テクノロジーとしては、高い温度で火が焚ける燃焼器、そして、そのような炎にさらされてもちぎれない羽根、これをどうやって作るか、というところがキーポイントになっています。



高効率ガスタービンを実現するキーテクノロジー①—羽根の技術

正田談: 当社のガスタービンの歴史ですが、F形というのが1994年度に大河内賞をとったタイプです。この時、タービンの熱量はだいたい1350°Cで、熱効率が55%ぐらいでした。その後、改造してF形は1400°Cくらいになっています。続いて、1500°CのG形、そしてこの2月、1600°CのJ形を出しまして、このJ形は国家プロジェクトで開発した技術を適用したものですけれども、59%ぐらいだったG形の熱効率が、今61.5%にまで上昇してきている、という状況にあります。



三菱重工では、高砂製作所というガスタービン製造工場の中に実物の発電所を持っています。組立工場のすぐ横に、T地点という330メガワットの実際の発電所がありまして、初号機はこの実際の発電所運用の中で検証します。高砂は関西地区にありますので、関西電力さんのグリッドにつながっていきまして、実際にここで発電をして、実発電所運用をして実際の使用状況の中で検証、ニーズ把握する、といった開発プロセスで動いています。そして、これは三菱重工の開発プロセスとして、非常に特徴的な部分です。震災後は連続給電運用中で、現在は関西地区の1つの重要な給電ポイントになっています。

では、具体的にどういうことをやって熱効率を上昇させているかというのを、1500°CのG形を例にご説明します。キーテクノロジーは燃焼器とタービンです。できるだけ高い温度で火を焚くために燃焼器にいろいろ工夫をしています。また、高い温度でも羽根がちぎれないような工夫をいろいろ施しています。さらに、高性能翼型の圧縮機で効率よく風をかき込むような工夫もしています。



まず、タービンの羽根の技術についてですが、金属というのはどんなにいいものを使っても 900°C ぐらいしかもたないので、どの羽根も 800°C から 900°C に抑えないと壊れてしまうんですね。したがって、タービンの羽根は空気で冷やして 900°C 以下になるように設計しています。簡単に申し上げますと、アリの通る穴のような空気の流れる通路を羽根の中に作って、空気を入れることで羽根を冷やしています。羽根の中にいろいろな形をしたブツブツを入れますと、それが冷却を促進して冷えるんです。そのためにはどんな形が一番いいか、そういったところを工夫して、できるだけ少ない空気で冷やして羽根を持たせる、ということをしています。これが 1 つ目です。空気でいかに上手に冷やすか。そのデザインのノウハウですね。

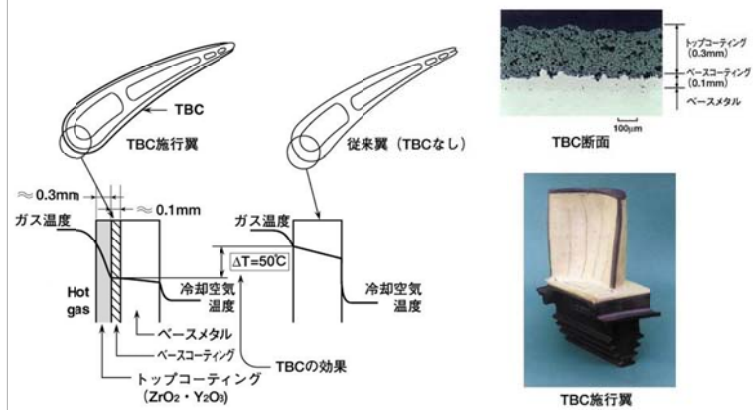
タービン入口温度上昇 (タービン動静翼 冷却構造の変遷)

C3 22

タービン入口温度	1150°C	1400°C	1500°C
タービン 1 段静翼			
材 料	ECY768 (Co 基合金)	MGA2400 (Ni 基合金)	MGA2400 (Ni 基合金)
タービン 1 段動翼			
材 料	U520 (Ni 基合金)	MGA1400-DS (Ni 基合金)	MGA1400-DS (Ni 基合金)

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

C18 24



2 つ目が、TBC コーティング。遮熱コーティングといいます。羽根を見ますと、金属なのにたまご色をしていますけど、これが遮熱コーティングです。これは何かと言いますと、羽根の金属の表面をセラミックスでコーティングしているんですね。マグカップにお湯を入れても熱くありませんが、金属のカップに入れると熱くて持てないですよね。瀬戸物って非常に熱が伝わりにくいんです。そういった熱伝導率の低さを利用して、羽根の表面にセラミックを付けています。しかし、お察しがつくと思うんですけど、金属の上に瀬戸物を付けるというのは非常に難しい技術です。金属は熱したら伸びます。それに対して、セラミックは熱してもあまり伸びないので、金属とセラミックとでは伸び差ができて、パリパリパリっとはがれてしまう。ですから、金属の上にこのセラミックをどうやって剥げないように付けるかがキーテクノロジーになってきます。ボンドコートといいますけど、要は接着剤です。ボンドを挟んで瀬戸物と金属の間をなじませている、という感じです。

このように、内側では羽根の形を工夫して空気の流れをつくる。一方、外側はマグカップみたいにセラミックにして熱い空気が伝わらないようにする。そういう工夫で温度を下げることをやっているわけですが、もうひとつ、そんなに冷やさなくても持つように、金属材料自体を丈夫にすればいいじゃないか、というアプローチがあります。粒界といって、通常、金属というのは冷えて固まっていく時に、ブツブツとした発泡スチロールみたいな形になります。当然、タービンの温度を上げていくと、そういったブツブ

ツの切れ目からばりばりばりっと切れていってしまいます。とすれば、その継ぎ目がないようにすれば当然強くなるわけです。特に、羽根は回っていますから、遠心力で引っ張られているので、引っ張られる側に継ぎ目のない特殊な金属を、最新機には使っています。一方向凝固翼 (Directionally Solidified) と言うんですけれども、木の柾目みたいに縦方向にしか金属の組織がないので、その方向にひっぱられることに対しては非常に強い材料です。ちなみに、これはどうやって作るかといいますと、金属は鋳型に入れて冷やしていきますが、普通に冷やしていくといろんな方向から冷えていくのでブツブツができてしまうんですが、金属を加熱した炉に入れて、それを引き下げて下から冷たいところに出していくと、冷え方が霜柱状になりまして、組織が縦だけになるので、ものすごく強くなるわけです。

以上のように、空気で冷やす。瀬戸物で守る。材料も強くする。こういう 3 つの技術で羽根をちぎれないようにする、というのがわれわれが取り組んできた技術です。

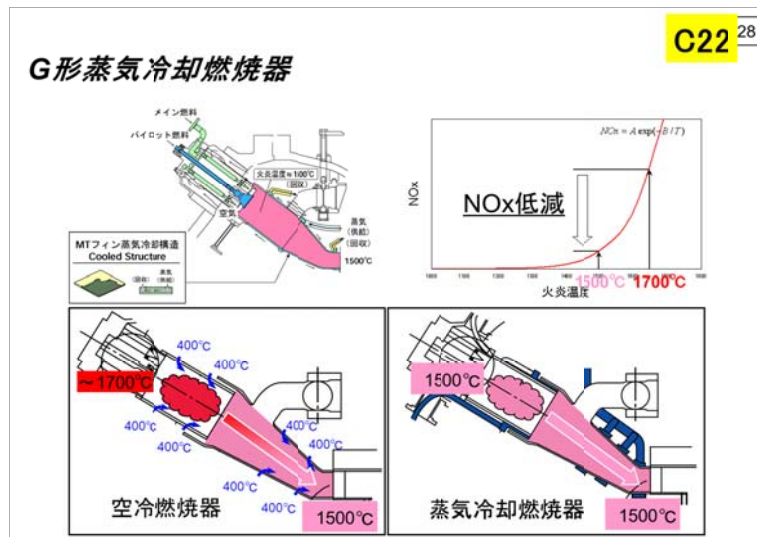
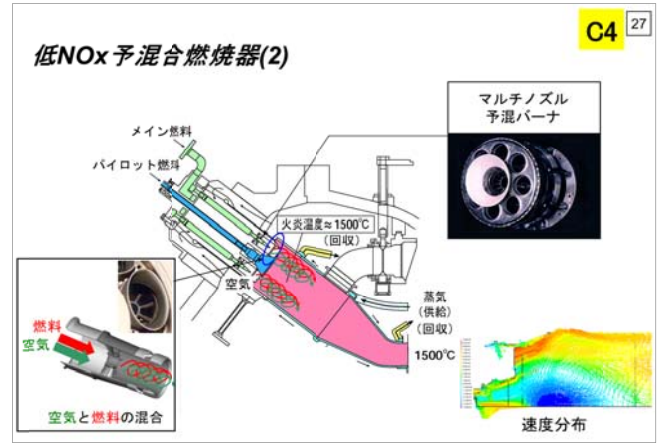
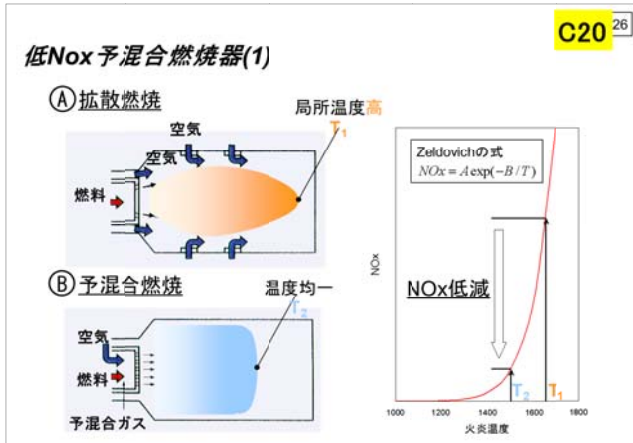


高効率ガスタービンを実現するキーテクノロジー②—燃やす技術

正田談: 次は燃やす技術です。羽根が高温下でも持つようになったのはいいんですが、燃料をどんどん入れて温度を上げていくと、指数関数的に窒素酸化物 (NOx) がいっぱい出てしまうんですね。この NOx は光化学スモッグの原因になるということで、当然、どんな自治体、ないしは外国でも大気汚染規制がございます。ですから、温度は上げたいけれども、NOx は上げたくない。ここがジレンマになっています。ちょっと温度を上げると NOx が増えてしまう。ここが燃やす側のテクニカルバリアーになっています。

では、どうやって解決するかですが、混合燃焼器です。家庭用のコンロなどは拡散燃焼といって、たとえば蝋燭の炎などはそうですが、内炎は温度が低いけれども外炎が高い。拡散燃焼というのはあれと同じです。燃料を入れるところと、それを燃やすための酸化剤としての酸素 (空気) が入るところを別々にしておくと、ここは温度が低いけど、ここは非常に温度が高い、といったムラ焼けになります。そうすると、平均として温度が抑えられたとしても、温度が高い部分から NOx が出てきて、結果として NOx の発生量が非常に高くなってしまいます。

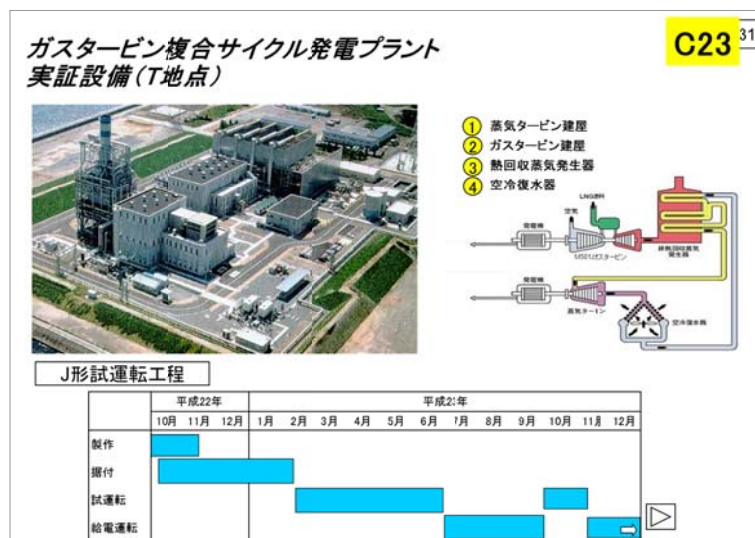
しかし、空気と燃料をよく混ぜておいて均一に燃やしますと、NOx の発生量は理論的には最小になります。これが混合燃焼の技術です。この G 形の混合燃焼器で説明いたしますと、真ん中が鉛筆の芯みたいになっていて、そこから燃料を噴き出すんですが、そこに風車みたいなものを付けることによって、空気が回って混ざって燃料が均一に燃焼する、という仕組みになっています。しかし、空気を多く混ぜると、火炎の安定を保つのが非常に難しくなります。ですから、火炎を安定させながらよく混ぜて、ほわっと出すというのが、技術としては難しいんです。要は、混ぜ方のテクニックみたいなところで何とかしている、というのが実態です。



もうひとつ、燃焼器自体への工夫もあります。一番温度が高くなる部分ですので、あまり温度を上げると燃焼器が持たなくなる、ということがあります。ですから、G形とJ形という最新鋭のガスタービンでは、燃焼器の壁に蒸気を入れて冷やしています。幸いコンバインドサイクルですから、後ろで蒸気が発生しています。その蒸気タービンの蒸気を少しだけ借りまして、壁に小さい穴を開けたところに入れて冷やします。もちろん、使った蒸気はもったいないですから、また蒸気タービンにもどして仕事をさせるといふ、そういった仕組みになっています。

実は、これにはさらなる利点があります。たとえば、空気を壁に入れて冷やしている通常の燃焼器の場合、空気はだいたい 400℃ぐらいになりますので、燃焼機で燃やしたガスは出てくる時に 400℃の

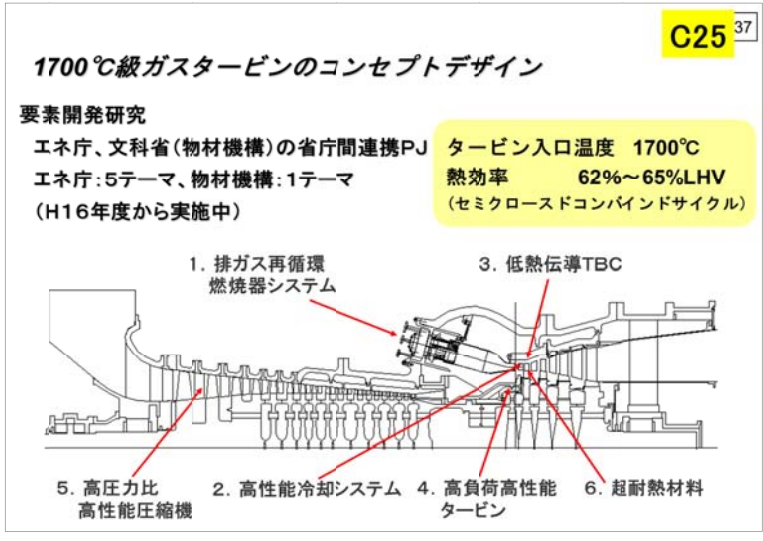
空気で薄まります。だから、燃焼器出口で 1500°Cにしたかったら、薄まってしまっても 1500°Cになるように 1700°Cくらいで燃焼させなければならないんですね。そうすると、混合燃焼器で一所懸命に燃やしたとしても NOx は上がってしまう。それに対して、G 形や J 形の場合は、蒸気冷却していますので、余計なものが入ってきませんから、空気が入っても薄まりません。1500°Cであれば 1500°Cで焚けばいいわけです。壁を冷やしてくれるし、低い温度でたけるので NOx が下がるということで、ここでもまた“1 粒で 2 度おいしい”技術になっています。というので、温度を上げて壁も持つし、NOx も上がらない、というアプローチを取っています。



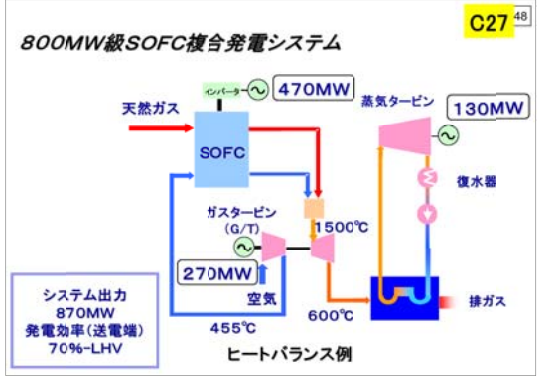
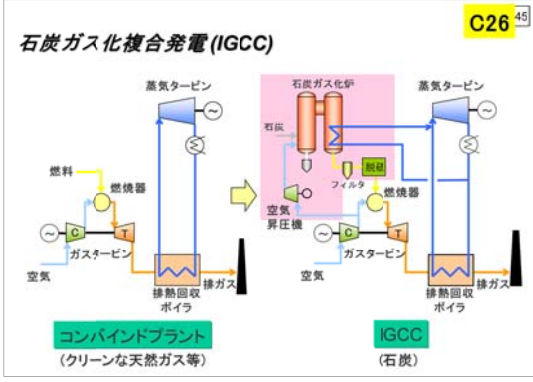
将来技術の動向—1700°Cガスタービン

正田談: 1600°C、61.5%という高温・高効率の世界まで来たわけですが、最後に、今後は何をどうやっていくか、ということについてお話したいと思います。いろいろありますが、5 つほどアプローチを考えています。

一番最初ですが、「温度を上げたら燃費が上がる」ということの延長を、頑張ってやっていって 1700°Cを目指す。直球のわかりやすいアプローチです。1500°C、1600°Cと来たから、次は 1700°Cということなんですが、これは現在、国家プロジェクトでエネルギー庁、文部科学省からプロジェクトとして補助金をいただきながら技術開発を実施中です。平成 16 年度から実施しておりまして、これは排ガス再循環燃焼器システム、高性能冷却システム、低熱伝導 TBC (先進遮熱コーティング)、高負荷高性能タービン、高圧力比高性能圧縮機、超耐熱材料といった、いろいろな技術開発をやっていくというプロジェクトになっています。実は、1600°Cの J 形ガスタービンの TBC は国家プロジェクトで作ったものですし、冷却穴の開け方の工夫も、この国家プロジェクトの高性能冷却システムの成果を適用しています。タービンの羽根の形も、国家プロジェクトの成果の適用のおかげで達成できています。

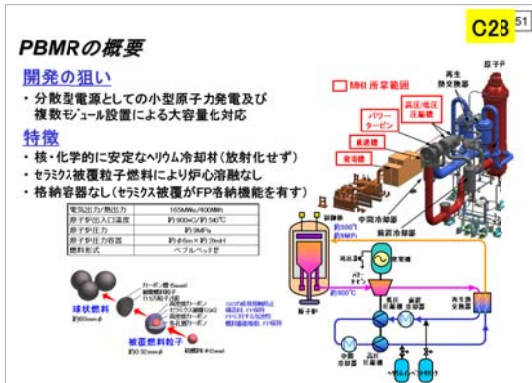


2 番目は、石炭ガス化ですね。IGCC。燃費が上がらなくても、石炭は天然ガスより大量にあって安いからです、安ければ発電コストとしては安いだろうということで、石炭をガス化してコンバインに使っています。これは今、勿来でパイロットプラントが回っているところです。ちょうどこの 1 月の終わりに 15000 時間の運転時間を超えてきておりまして、これは世界で最も長時間運転している IGCC プラントになっています。



3 番目が、SOFC(燃料電池)を使った高効率化です。自動車とか、ガス会社さんとか、いろいろやっておられますけれども、実は燃料電池で電気を起こした後の捨てたガスというのは、まだよく燃えるガスなんです。ですから、それをガスタービンに入れてガスタービンを回して、またその後ろで蒸気タービンを回すと、今までは 1 粒で 2 度おいしいだったのが、1 粒で 3 度おいしくなって、70%ぐらいは出るだろう、と考えられています。ただ、これは理屈の上では非常にいいんですけど、やはり難しいのは燃料電池の大型化です。燃料電池も私どもの長崎造船所で開発しておりまして、2005 年には「愛・地球博」で 40kW の小さいものを導入して運転させていただいております。それから、2007 年は NEDO との委託研究で、200kW ぐらいのものを、これには小さいガスタービンを付けて、小さいんですけどトリプルコンバインド発電のようなことをして、52%の発電効率を出しています。3000 時間ぐらい回っているというような状態です。これを大型化していくところがキーテクノロジーかな、と思っていま

す。

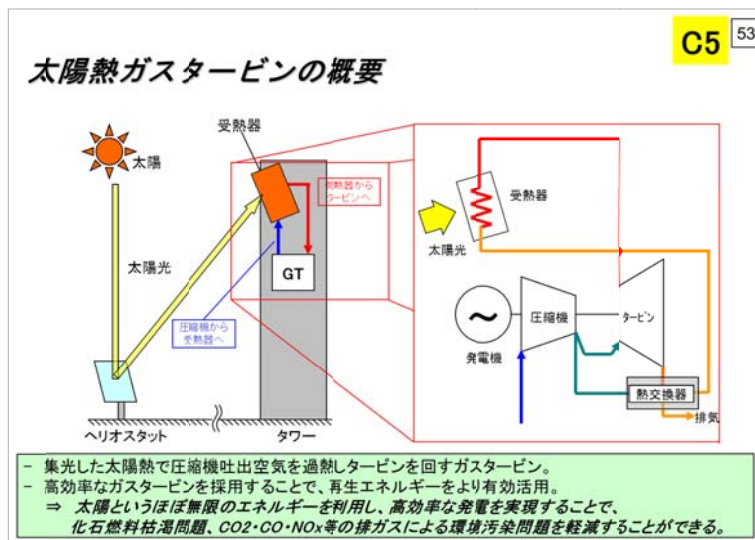


4 番目ですが、以前は安全に原子力に使うガスタービンというのもFSいたしました。要は、空気かわりにヘリウムを使い圧縮機から出したヘリウムを、燃焼器の代わりに原子力のお釜を使って 900℃まで暖めて発電しましょう、というガスタービンです。

最後は、ちょっと変化球なのですが、CO2 削減のために太陽熱でガスタービン発電をするというアプローチもご紹介します。太陽の熱で空気を暖めてタービンを回します。要は、太陽を燃焼器の代わりにし

ましょう、というガスタービンです。ガスタービンの宿命として、化石燃料を焚いている限り CO2 が出てしまいますので、燃料をやめて太陽熱で流体を加熱して、CO2 を出さないガスタービンを作る、というのがこのコンセプトです。実は去年、オーストラリアでパイロット的なものを回して、850℃まで温度を上げた実績がございます。運動場みたいな広いところにたくさんの鏡を置いて、それらの鏡を全部タワーの先端に向けて光を集めるんですが、その集めた光で圧縮機から出た空気を暖めて、暖めた空気でタービンを回す、という仕組みです。

以上、従来通りの高温化による高効率化という直球の方式に加えて、紹介させていただいた4つのアプローチ、そうした変化球もあわせて、今後も環境にやさしく、低コストで使いやすい発電設備を開発できれば、と考えております。



本講演録の著作権は、ご講演者もしくは一橋大学イノベーション研究センターに帰属しています。本講演録に含まれる情報を、個人利用の範囲を超えて転載、もしくはコピーを行う場合には、一橋大学イノベーション研究センターによる事前の承諾が必要となりますので、以下までご連絡ください。

【magicc プロジェクト事務局】 藤井由紀子

一橋大学 イノベーション研究センター内

〒186-8603 東京都国立市中 2-1

TEL. 042-580-8434 e-mail:yukifuji@iir.hit-u.ac.jp