

# 火力発電の高効率化と環境性能向上への取り組み

## Toshiba's Approach to Improvement of Efficiency and Environmental Performance of Thermal Power Plants

持田 尚毅

■ MOCHIDA Naotaka

火力発電はエネルギーソリューションの中核として大容量電力を供給してきたが、近年の社会環境の変化により、更に経済性が高く運用特性の優れた信頼性の高いシステムが求められている。

東芝は多様で高度な市場のニーズを満たすため、高効率化とより優れた環境性能向上への取り組みを重点施策とし、世界最高効率であるコンバインドサイクルプラント、世界でもっとも高度な蒸気条件を持つ石炭焚(だ)き高効率A-USC (Advanced Ultra-Supercritical: 先進超々臨界圧) 発電、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) を分離し回収するエネルギー消費のより少ない CCS (Carbon Dioxide Capture and Storage) 設備など、様々な機器やサービスを提供していく。

Thermal power generation is playing a key role in energy solutions by supplying large amounts of electric power in response to rising demand in the global energy market. In view of the changes that have taken place in the social environment in recent years, there is a strong need for thermal power generation with higher economic efficiency, more flexible operability, and higher reliability.

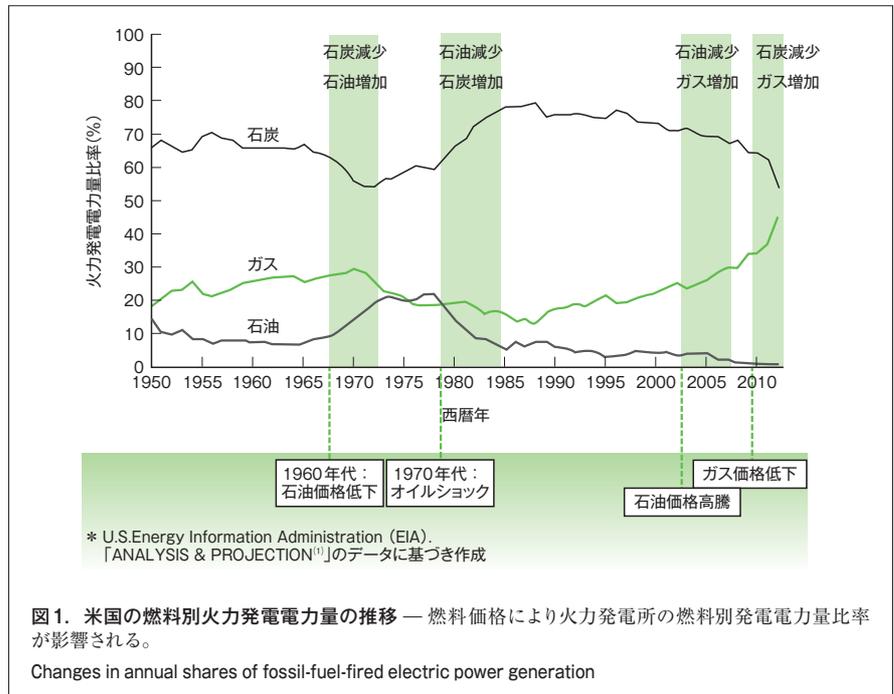
To fulfill these diverse high-level requirements, Toshiba is continuing its efforts to develop technologies for improved efficiency and environmental performance and to deliver a broad range of systems and services, including a combined-cycle power generation system achieving the world's top-level gross efficiency of 62% (lower heat value basis), an advanced ultra-supercritical (A-USC) coal-fired power plant operating under the world's best steam condition, and a carbon dioxide capture and storage (CCS) facility with reduced lower energy consumption.

### 世界のエネルギー環境動向

#### 世界のエネルギー環境

火力発電は、コンバインドサイクルプラントに代表されるガス焚き火力発電と USC (Ultra-Supercritical: 超々臨界圧) プラントに代表される石炭焚き火力発電の大きな二つの流れがある。各々独自の運用特性を持つが、その優位性は燃料となる化石燃料のエネルギー供給環境動向の影響を受けるため、まず、世界のエネルギー供給環境動向について述べる。

近年、今世紀最大のエネルギー革命と言われる“シェール革命”が米国で確立され、天然ガスと石油の増産が推進され始めている。米国以外の他国も追従を試みている。この掘削技術の革命以前における一次エネルギーの可採年数は石油は約40年、石炭は約120年、天然ガスは約60年と言われていたが、2011年のシェールガスの調査報告で天然ガスの可採年数が飛躍的に増加する



ことが確認され、約250年とも言われている。2013年6月の米国エネルギー情報局報告でシェールガス・シェールオイル資源量評価で更に多量の可採量が確

認されている。シェールガスの占める割合は世界の天然ガスの30%強となり、また天然ガスだけでなく、シェールオイルの占める割合は世界の原油の10%強

となると予測されている。

### ■米国の火力発電動向

シェールガスの掘削技術をいち早く確立した米国では天然ガスインフラが完備されており、また土地所有者が地下資源の権益を持っていることもあり天然ガス生産が急増した。熱量当たりの価格が石炭より安価となり、エネルギー源としてガス利用の経済的優位性が明確になった。そのため、図1に示すように、近年米国では火力発電での発電電力量に占める石炭の比率が低下し天然ガスの比率が増加する傾向が顕著となった。

### ■CO<sub>2</sub>排出量と将来のエネルギー

天然ガスはメタン(CH<sub>4</sub>)が主成分であり、燃焼により排出するCO<sub>2</sub>の比率が石炭に比較し低くなる。また天然ガスを高効率のコンバインドサイクル発電で使用することで、更に燃料消費量を抑えられ、図2に示すように石炭焼き火力発電と比較して約1/2のCO<sub>2</sub>排出量となる。

### ■近年の燃料価格地域差

天然ガスの可採量は豊富でCO<sub>2</sub>排出量削減にもなるが、輸送や、限定されている取引市場などの問題を抱えている。そのため石油や石炭のようにグローバルなエネルギー商品にはならず、地域によりその価格が大きく異なっている。現在安価なシェールガスは米国が世界で唯一のサプライヤーであり、米国では天然ガス輸入量は減少し、2020年には米国内生産天然ガス量が米国内消費量を上回ると予測されている。

米国でのシェール革命によるエネルギーバランスの変化で余剰となった米国産石炭は、一時的に欧州への輸出として増加し、近年英国での発電電力量に占める石炭の比率は米国とは逆に増加傾向である。また欧州全体で経済の停滞と石炭価格の低下で天然ガス輸入量は減少傾向である。米国や欧州向けに予定されていた中東での天然ガスは供給が減少し、余力ができ、2011年3月

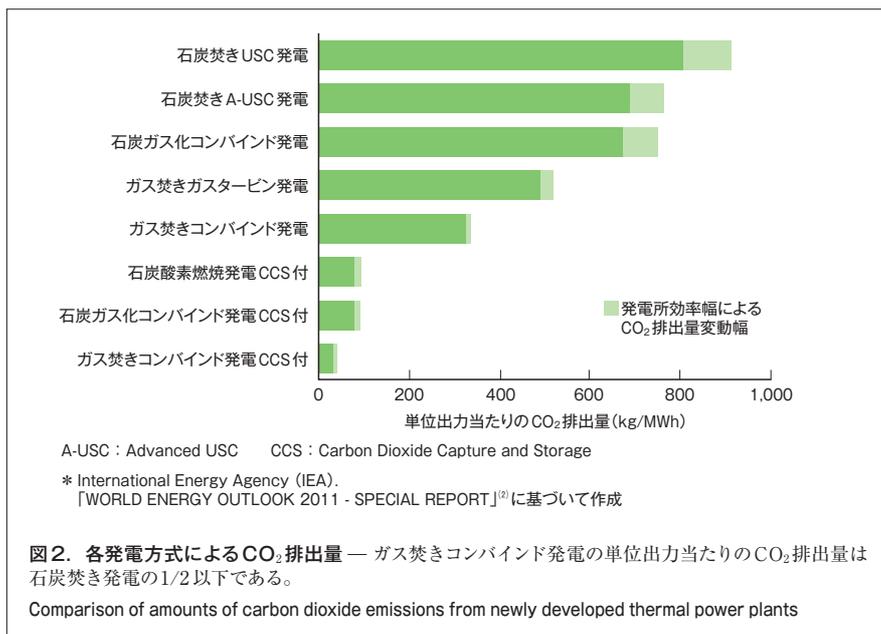


図2. 各発電方式によるCO<sub>2</sub>排出量 — ガス焼きコンバインド発電の単位出力当たりのCO<sub>2</sub>排出量は石炭焼き発電の1/2以下である。  
 Comparison of amounts of carbon dioxide emissions from newly developed thermal power plants

11日に発生した東日本大震災後のわが国への緊急供給増加に対応できたことになる。

ジャパンプレミアムということばが茶の間でも聞こえるように、天然ガスはグローバル商品ではなく、アジア向け、特にわが国向けの取引価格は高額である。アジアにガス取引所がなく、大口消費の火力発電向けに産ガス国と長期にわたって石油連動制で契約しているのが要因に挙がっている。30数年前のオイルショック後に石油からの脱却を目指し、天然ガス輸入価格を石油より安価

で、石油価格連動とし長期契約を締結し、国内での石油消費を低減し石油脱却に成功してきた。しかし近年、リーマンショック後、アラブの春から継続する中東での政情不安定により石油価格が高止まり、わが国が輸入する天然ガス価格が図3に示すように高額となり、更に大震災後の緊急輸入で現在は米国市場価格の約4~5倍の価格となっている。

火力発電での発電原価は建設費による固定費と燃料費保守費による変動費から構成されるが、変動費の比率が大きく、つまり燃料価格に大きく影響される

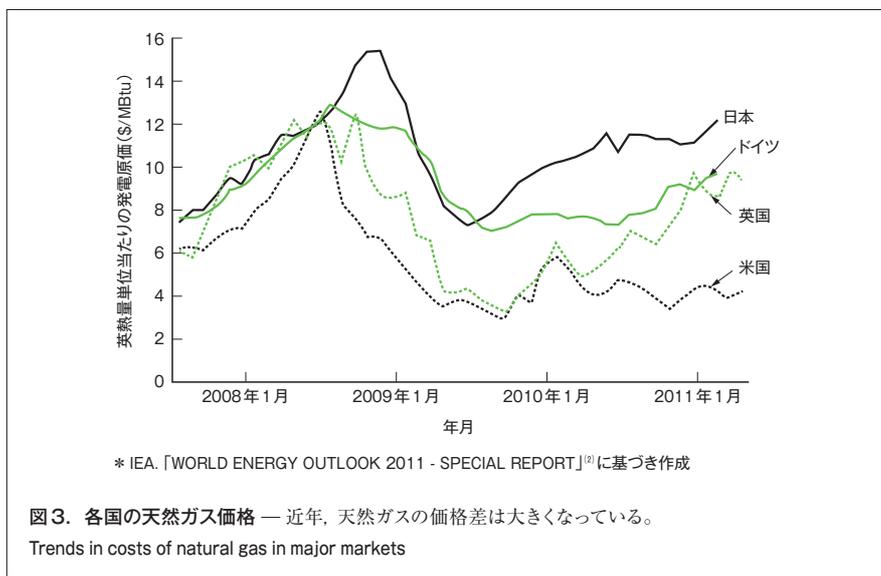


図3. 各国の天然ガス価格 — 近年、天然ガスの価格差は大きくなっている。  
 Trends in costs of natural gas in major markets

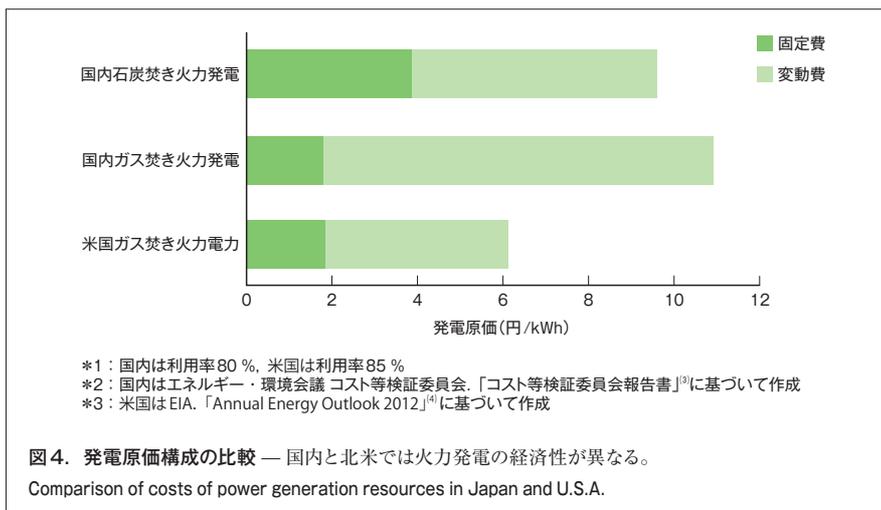


図4. 発電原価構成の比較 — 国内と北米では火力発電の経済性が異なる。  
Comparison of costs of power generation resources in Japan and U.S.A.

ことになる。国内の石炭焼き火力発電とガス焼き火力発電の発電原価は、図4に示すように、ガス価格高騰により変動費が高額となり、石炭焼き火力発電が経済的となる。またガス価格の安価な米国では、ガス焼き火力発電の発電原価は非常に安価になる。

一次エネルギーを輸入に頼るわが国では、低価格ガスを求め、米国で建設されている数多くの天然ガス液化プラントのうちいくつかのプロジェクトが日本企業主導で展開中で、米国シェールガスを液化し、海上輸送で輸入することが計画されている。実現に向けDOE（米国エネルギー省）と同省内のFERC（米国連邦エネルギー規制委員会）の許可取得に努力している。

このように、エネルギー動向が地域により異なり、各地域における火力発電の将来動向に影響を与えている（[囲み記事参照](#)）。

## わが国のエネルギー動向

### 国内電力供給環境の変動

わが国は石油依存脱却後、原子力、石炭、及びガスのベストミックスでエネルギー問題を解決してきたが、大震災で大打撃を受け、更に原子力発電設備の深刻な事故により電力供給確保が危機的状態に陥った。わが国は、エネルギーソリューションのあり方を根本から考え直す必要性を突き付けられた。わ

が国のエネルギー施策を再度明確にしようと、国のレベルで議論され、その対策に努力している。

その議論の中で、再生可能エネルギーやコージェネレーション発電が着目されている。前述のように化石燃料の可採年数は限定されることと環境問題を配慮すると、再生可能エネルギーの利用は将来必須であるとの考えから、その推進のため買取制度が2012年に開始された。しかし短期的には大電力の安定供給発電設備にはなりづらく、発電原価を火力発電や原子力発電と同等の10円/kWh前後程度にするには、時間を掛けて解決しなければならない課題が多い。熱と電力の両方を考慮した総合エネルギーを効率よく利用するコージェネレーションの場合でも、更なる推進にはガス供給インフラの整備が必要である。

近年、数年後には成果が出せる可能性があり期待されているのが、民間の電力需要のコントロールである。時間帯別電気料金設定が2012年に国内でも試験され、電力需要が高い夏季昼間の時間帯の電力料金を上げることで、最大使用電力量を抑える効果が確認され、スマートメータを設置して運用することの電力安定化への効果が期待されている。

このように、各種の検討が進められており、将来の電力安定供給が変わろうとしている。大震災直後の緊急用新規火力発電所の建設には、東芝は短期間で

大型ガスタービン発電設備を納入して2012年夏前に稼働させ貢献している。また、停止した原子力発電の代替として大容量の火力発電への期待が大きく、ガス焼き火力発電をベース運用として新たに稼働するために、より経済性の高い高効率の機種が要求された。

更に、後述する火力発電所の入札制度が2013年に開始され、利用可能な最良の技術（BAT: Best Available Technology）を満足する経済性と環境特性の高い石炭火力発電への要求があった。

このように国内における火力発電に対する要求は、ますます多様化し石炭焼き火力発電とガス焼き火力発電の両方を使い分け、高効率化と環境特性向上のための技術を更に開発していく必要がある。

また今後は、再生可能エネルギーの増大を考慮すると、電力系統周波数制御機能などの電力系統運用上の要求も増加する。

更に、効率の悪い老朽化した石油火力発電所を稼働させて電力供給不足を防いでいる現在の電力供給状態（[図5](#)）から脱却するため、既設の老朽火力発電所を高効率の機種へリプレースすることによる経済性改善も求められる。

### ■三つのE

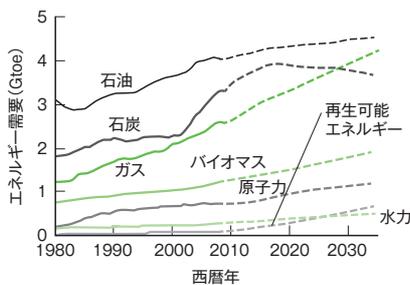
火力発電で呼ばれる三つのEとは、経済成長、エネルギー安定供給、及び環境保全である。これらのバランスのとれた成長と達成が社会生活における目標になる。これは世界全体でも、またわが国でも同じである。

国際的に、発電設備を導入する場合入札方式を採用して競争原理で経済性を求める。国内でも、2012年9月に“新しい火力電源入札の運用に係る指針”が公示され、電源調達に入札による競争原理が導入され、発電原価による評価方法が規定されている。

また、CO<sub>2</sub>排出量が実行可能な範囲内で低減されているかを審査する基準としてBATが採用され、現時点でもっと

## 発電設備の将来動向と各地域における火力発電の動向

現在、世界で一次エネルギーは、石油がもっとも多く消費され約4 Gtoe（石油換算トン）で、その次に石炭が3.4 Gtoe、そしてガスが2.7 Gtoeとなっている。シェール革命後の将来予測では図Aに示すように、2030年には石炭の消費よりもガスの消費が多くなるとしており、2011年にはIEA（International Energy Agency）から“Are we entering a golden age of gas?”という題名の特別の報告がされガスの黄金時代への流れを予測している<sup>2)</sup>。

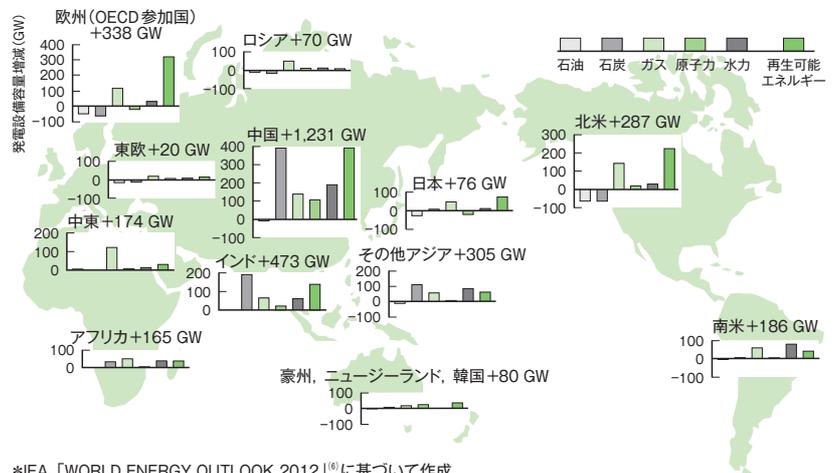


\*IEA. 「WORLD ENERGY OUTLOOK 2011 - SPECIAL REPORT」<sup>2)</sup>に基づいて作成

図A. 世界のエネルギー需要予測 — ガスの需要が増加し2030年には石炭を抜く。

一次エネルギーのうち電気エネルギー変換向けに消費されるのは、石油はわずかに7%で、石炭は66%、ガスは41%である。化石燃料による電気エネルギー変換には発電所の建設が必要であるが、その発電設備容量の増加量（2010年実績量と2030年予測量の差）を図B及び表Aに示す。全体では火力発電所は1,310 GW増加と予測され、再生可能エネルギー発電の1,388 GWとほぼ同等の増加予想である。火力発電設備容量の増加量の内訳は、石油焼き火

力発電は174 GW減少、石炭焼き火力発電は601 GW増加、ガス焼き火力発電は883 GW増加で、ガス焼き火力発電の増加がもっとも多い。しかしその傾向は各地域で一律ではなく、図Bに示すように北米や欧州（OECD（経済協力開発機構）参加国）では石炭焼き火力発電が減少しガス焼き火力発電が顕著に増加するが、中国やインドの新興国では依然として石炭焼き火力発電の増加がガス焼き火力発電と比較して顕著に増加すると予測されている。



\*IEA. 「WORLD ENERGY OUTLOOK 2012」<sup>6)</sup>に基づいて作成

図B. 地域別の発電設備容量増加予測 — 2010年から2030年までに、先進国ではガス焼き火力発電の増加が見込まれ、新興国では石炭焼き火力発電の増加が顕著である。

表A. 地域別の発電設備容量増加量

燃料別	発電設備容量増加量 (GW)												
	日本	豪州、 ニュージー ランド、韓国	インド	中国	その他 アジア	北米	南米	欧州 (OECD 参加国)	東欧	ロシア	中東	アフリカ	合計
石油	-29	-3	1	-5	-8	-65	-3	-47	-15	-5	5	0	-174
石炭	4	6	192	408	109	-67	5	-63	-12	-12	1	31	601
ガス	46	18	65	137	56	147	58	115	19	52	119	52	883
原子力	-25	21	19	104	6	16	6	-19	6	12	7	5	157
水力	6	4	58	191	83	25	79	32	9	13	11	39	551
再生可能エネルギー	74	34	138	397	60	230	41	321	14	10	31	38	1,388
合計	76	80	473	1,231	305	287	186	338	20	70	174	165	3,405

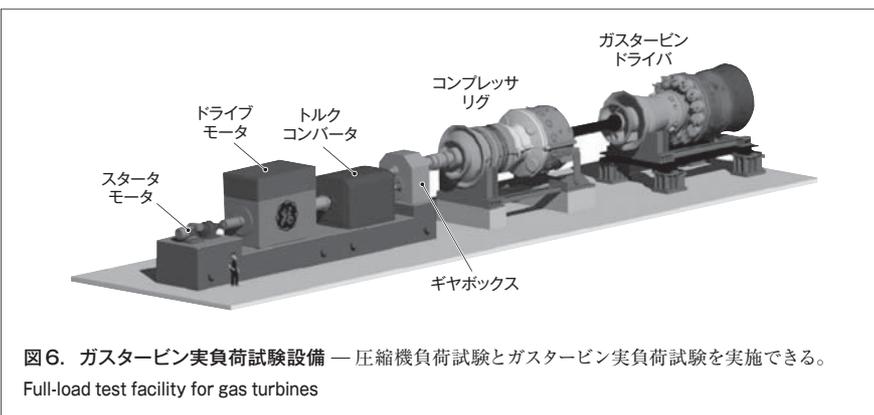
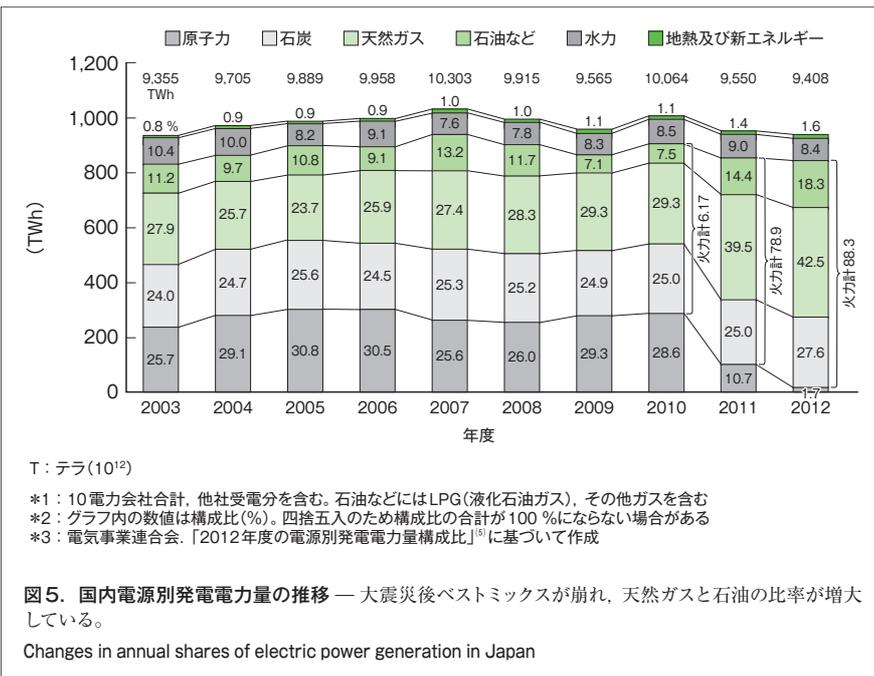
\*1：発電設備容量増加量は、2010年実績量と2030年予測量の差。四捨五入のため、合計値が合わない場合がある  
\*2：IEA. 「WORLD ENERGY OUTLOOK 2012」<sup>6)</sup>に基づいて作成

も進んでいる石炭焼き火力発電とガス焼き火力発電の技術要素が集約されて明示され、火力発電の環境評価基準として幅広く適用される見込みである。更に、CO<sub>2</sub>を分離して回収するCCS（Carbon

Dioxide Capture and Storage）の開発を促進し、2030年までにはCCS導入が必要条件となる見込みである。

### 高効率化への取組み

発電原価を低減し、またCO<sub>2</sub>排出量を可能な範囲で低減するには、最適となる発電方式（ガス焼き火力発電と石



炭焼き火力発電)の選択もあるが, 更に大きく二つのアプローチがある。一つはプラントの熱効率向上により単位発電電力量当たりのCO<sub>2</sub>排出量を削減することであり, もう一つは燃焼ガスからCO<sub>2</sub>を分離して回収することである。

プラント及び蒸気タービン, 発電機の効率向上について, 以下に述べる。

### ■高効率コンバインドサイクルプラントのガス焼き火力発電への適用

当社は約30年前から世界で圧倒的なガスタービン技術を持つGeneral Electric Company (以下, GE社と略記)と技術契約を結び最新高効率コンバインドサイクルプラントを提供してきた。近年GE

社は, 図6に示す設備で圧縮機実負荷試験やガスタービン実負荷試験を実施し開発検証を加速化しており, 現在ではガスタービンは進化し1,600℃級の熱効率40% (低位発熱量基準:LHV) を超える効率にまで達している。このガスタービンと当社の高効率蒸気タービンを組み合わせて最適化を図り, 発電原価を低減し環境特性を向上させた世界最高<sup>(注1)</sup>の熱効率62% (LHV) を持つガス焼き火力発電を提供できる。

この技術が認められ, 2012年に中部電力(株)から西名古屋発電所7号系列の発電端出力2,316 MW発電端熱効率

(注1) 2013年10月現在, 当社調べ。

62% (LHV) 超の設備を受注した。

### ■A-USCの石炭焼き火力発電への適用

石炭焼き火力発電の熱効率向上施策として蒸気サイクルの蒸気条件を向上させる手段がある。当社は高温対応材料の開発を長年継続して実施し, 常に最新鋭高効率石炭焼き火力発電をリードしてきた。

また, 蒸気条件を更に向上させ高位発熱量基準(HHV)で送電端効率46%以上を得ることを目標にA-USC (Advanced USC:先進超々臨界圧)の蒸気条件を35 MPa, 700℃, 二段再熱720℃として開発を進めている。この目標値は, 現在のUSCと比較して約10%の効率向上と, 同等のCO<sub>2</sub>排出量削減が見込まれる(図7)。

### ■蒸気タービンと発電機の効率向上

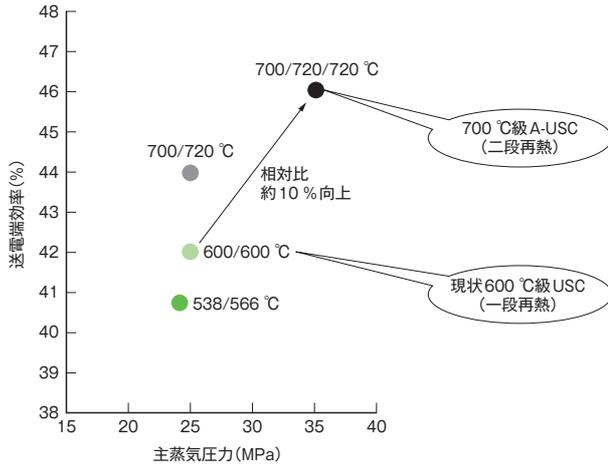
当社は, 石炭焼き火力発電やコンバインドサイクルプラントに適用する蒸気タービンや発電機に対しても継続的に効率改善を推進している。

各種の性能向上技術は, 東芝グループの(株)シグマパワー有明が運用する三川発電所に設置された, 実機と同一条件での蒸気タービン実負荷試験設備(図8)を用いて検証試験を実施し, 信頼性ある性能向上のための技術開発を加速している。

## 環境性能向上への取組み

石炭もガスも化石燃料は炭素を主成分としており, 燃焼による酸化反応でCO<sub>2</sub>を排出することは避けられない。火力発電でCO<sub>2</sub>排出削減をするにはCCSは必須の技術である。当社は, 燃焼後回収方式に焦点を当て, 2009年(株)シグマパワー有明 三川発電所内に石炭焼きボイラ排ガス中のCO<sub>2</sub>10 t/日をアミン系化学吸収液を用いて分離回収するパイロットプラントを建設し, 実証試験を継続している(図9)。

CO<sub>2</sub>回収のために使用されるエネル

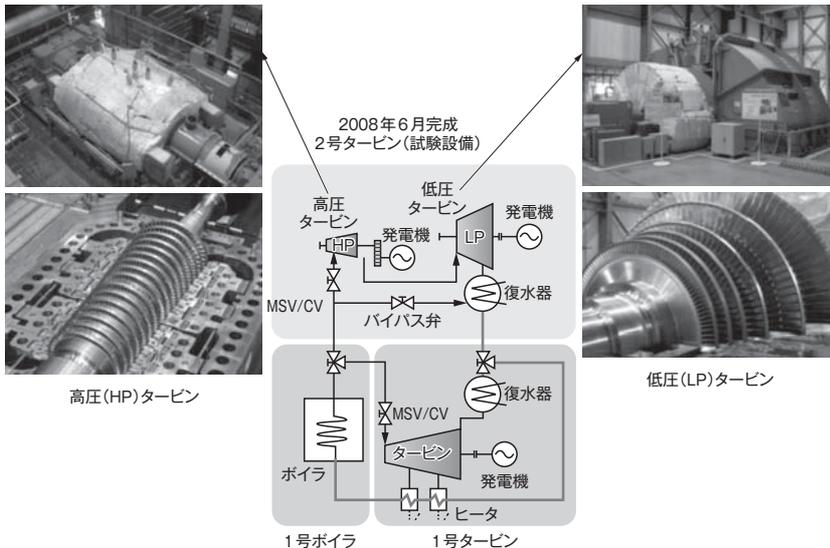


\*温度表記は、主蒸気温度/再熱蒸気温度、又は主蒸気温度/再熱蒸気温度/二段再熱蒸気温度を表す

図7. 蒸気条件と送電端熱効率 — 蒸気を高温化することにより高効率化を図る。  
Relationship between critical steam condition and thermal efficiency at transmission end



図9. CO<sub>2</sub>分離回収パイロットプラント — CO<sub>2</sub>回収の長期試験を継続中である。  
CO<sub>2</sub> capture pilot plant in continuous operation since 2009



MSV：主蒸気止め弁 CV：主蒸気加減弁

図8. 蒸気タービン実負荷試験設備 — 高性能蒸気タービン開発の検証を加速化できる。  
Full-load test facility for steam turbines

## 文献

- (1) U.S. Energy Information Administration (EIA). "Fuel Competition in Power Generation and Elasticities of Substitution". ANALYSIS & PROJECTIONS. 2012-06, 24p.
- (2) International Energy Agency (IEA). "ARE WE ENTERING A GOLDEN AGE OF GAS?". WORLD ENERGY OUTLOOK 2011, Special Report. 2011, 127p.
- (3) エネルギー・環境会議 コスト等検証委員会. コスト等検証委員会報告書 (平成23年12月19日). 2011, 82p.
- (4) EIA. Annual Energy Outlook 2012. 2012-06, 239p.
- (5) 電気事業連合会. 2012年度の電源別発電電力量構成比. <[http://www.fepec.or.jp/about\\_us/pr/sonota/\\_icsFiles/afiedfile/2013/05/17/kouseihi\\_2012.pdf](http://www.fepec.or.jp/about_us/pr/sonota/_icsFiles/afiedfile/2013/05/17/kouseihi_2012.pdf)>, (参照 2013-10-18).
- (6) IEA. WORLD ENERGY OUTLOOK 2012. 2012, 668p.

ギーの低減化の技術開発を推進しており、CCS設置の環境調和型火力発電の経済性確保に努めている。

## 低炭素社会の実現に向けて

電力安定供給における社会情勢はめまぐるしく、大きく、そして急速に変化している。現在、火力発電は電力供給の過半を担っており、また将来にわたり継

続して安定供給しなければならない。

そのなかで当社はCO<sub>2</sub>排出量を低減する高効率の火力発電の高い技術とCO<sub>2</sub>を分離して回収する最新技術を持っている。この技術でわが国の発展に貢献し、また世界の低炭素社会確立に向け推進できることは当社技術者の喜びであり誇りでもある。今後も低炭素社会の実現に向け活動を推進していく。



持田 尚毅  
MOCHIDA Naotaka

電力システム社 火力・水力事業部技監。  
コンバインドサイクル発電の計画及び建設に従事。  
日本ガスタービン学会、日本エネルギー学会会員。  
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.