

電力エネルギー供給の将来動向と次世代火力発電技術

Prospects for Electric Power Supply and New Technologies for Future Thermal Power Plants

宮池 潔

■ MIYAIKE Kiyoshi

世界的なエネルギー需要の高まりと、地球温暖化対策の要求というジレンマのなかで、低炭素社会の実現のために、電力エネルギーは原子力や再生エネルギーの活用とともに、火力発電からの二酸化炭素 (CO₂) の排出削減が求められている。なかでも供給と環境への影響が量的にもっとも大きい火力発電の将来の技術動向は重要である。火力発電に求められていることは、より高いプラント効率とCO₂の回収と貯留 (CCS : Carbon Capture and Storage) の実現である。

東芝はこれに応えるため、先進超々臨界圧 (A-USC : Advanced Ultra Super Critical) 蒸気タービンシステムと、石炭火力からのCO₂分離回収システムに焦点を当てて開発に注力している。

With the growth in world energy demand and progress of global warming, the reduction of carbon dioxide (CO₂) emissions from thermal power plants is essential for the creation of a low-carbon society, in addition to the active use of nuclear power and renewable energy resources. In particular, the trends in future technologies for thermal power plants have an important effect on both energy supply and the environment. For thermal power generation, the realization of higher plant efficiency and carbon capture and storage (CCS) are required.

Toshiba is promoting the development of an advanced ultra-supercritical (A-USC) power plant system and technologies to capture CO₂ from coal-fired power plants.

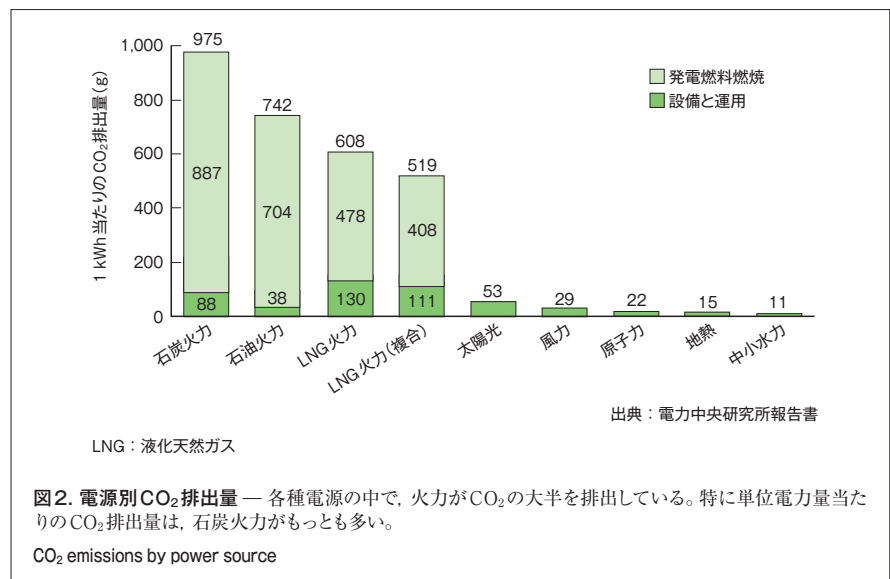
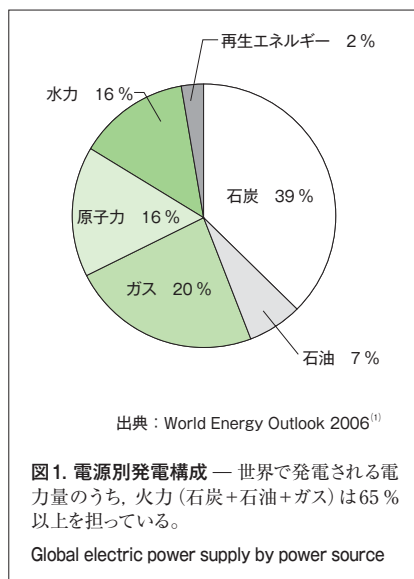
発電システムの現状と地球環境問題に向けた取組み

長い地球の歴史の中で18世紀の産業革命以降、人類のエネルギー使用量は急激に増加した。今日、社会インフラの整備により、われわれは意識することなく大量のエネルギーを日々使用している。

これによってCO₂をはじめとする地球温暖化ガスの大気濃度が上昇し、地球上の各地で温暖化や天候不順などの問題を引き起こしており、社会全体での取組みが必要とされている。現状、全エネルギー需要の30%以上を占める電力を作り出す発電システムについても種々の取組みが成されている。

■ 電力需要と環境影響の現状

現在、全世界で年間16兆Wh以上の電力が使用されている。更に、経済成長が続く中国やインドなどのアジア地域を中心に電力需要は急速に拡大しており、2030年には現在の約1.5倍に達すると予測されている。このため、電力エネルギーの環境対策はますます重要に



なっていくものと考えられる。

現在、世界の電力供給は、**図1**に示すような発電方式によって成されている。化石燃料を燃やして発電する火力発電は、全発電量の65%以上を占めている。

一方で、各発電方式によるCO₂排出量を比較したのが**図2**であり、火力発電、特に石炭火力は単位電力量当たりもっとも多くのCO₂を排出している。

■持続可能な社会を目指して

現在、地球温暖化問題に対する国際会議の場では、各国の思わくもあり種々の意見が交換されているが、持続可能な社会と、これを実現するための低炭素社会や循環型社会を推進していく必要性は、今や共通認識となっている。東芝も、東芝グループ環境ビジョンで、革新的技術開発を進めていくことを公約している(**囲み記事参照**)。

現状、発電領域におけるCO₂排出量の大半は、発電電力量の70%以上を担う火力発電から排出されている。したがって、現在主力の火力発電をCO₂排出量のほとんどない原子力発電や再生エネルギー発電へシフトし、電源構成を多様化させることが必要である。

原子力発電は、現在世界中で150基以上が計画されている。原子力発電では運転によるCO₂排出はゼロであるため、1,000 MW級の原子力発電を1基稼働させることにより、石炭火力に比べ約650万t/年のCO₂削減が達成される。当社は、ウェスチングハウス社との連携を機に、沸騰水型軽水炉(BWR, 改良型BWR(ABWR))と加圧水型軽水炉(PWR)の両タイプを扱う唯一のメーカーとして、環境に優しい原子力発電の拡大を積極的に進めている。

一方、クリーンなエネルギー源として再生エネルギーの活用も急速に拡大しつつある。

水力発電は当社も豊富な実績があり、世界市場に展開している。また、当社が得意とする揚水や可変速発電システム

は、風力や太陽エネルギーのように系統運用上不安定な発電方式の欠点を補う効果も併せ持つことから、今後も導入の増加が期待されている。

地熱発電については、現在世界中で9GW以上が発電に利用されており、当社は累計で世界の地熱発電のトップシェアを誇っている。地熱発電に適した地域は限定されるが、今後も積極的に展開していく。

風力発電や太陽エネルギー発電は、低いエネルギー密度ゆえの経済性の不利や、出力の不安定さという欠点を持っているが、自然エネルギーの両雄として普及が進んでいる。特に、インセンティブが高い地域や国の導入が促進されており、今後ともその傾向は継続し、電源構成の多様化が図られるものと見られている。

しかし、こうした努力にもかかわらず、発電量全体が増加するなかで、従来から大きな部分を占める火力発電の構成比率を大幅に低減させるには至っていない。成長する需要を満たす電力の安定供給を維持していくためには、環境

対策を施した火力発電が必須であり、次世代火力発電技術の導入と拡大なくして、将来の安定的電力供給と地球環境改善の達成は不可能である。

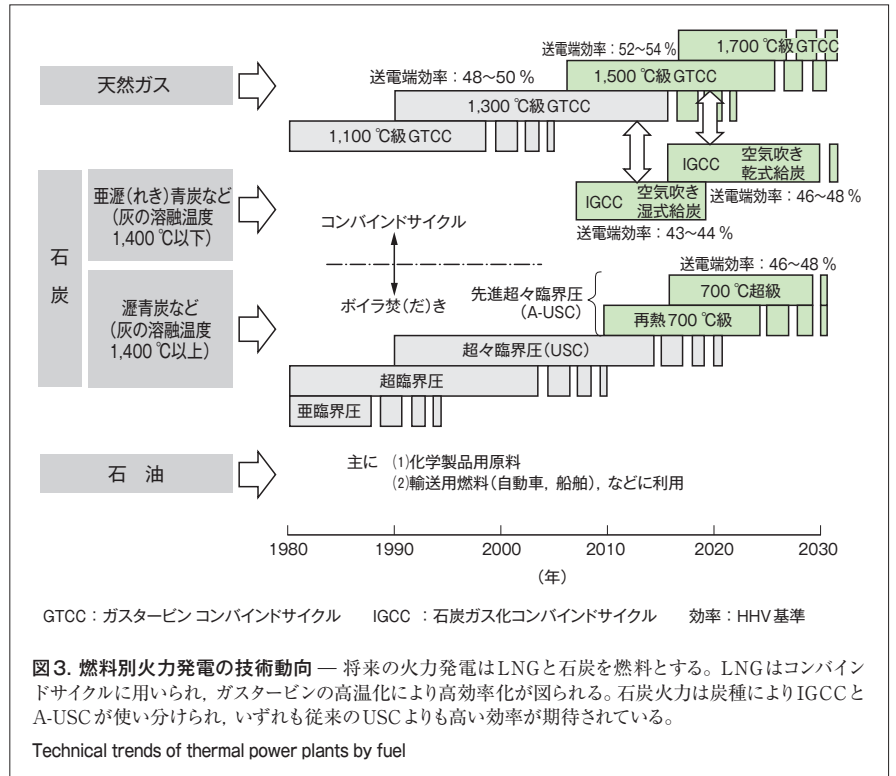
次世代火力発電技術

環境改善を念頭においた次世代の火力発電については、以下に示す三つのアプローチがある。

- (1) プラント効率の向上によって燃料使用量を削減
- (2) 排出されたCO₂を回収し貯留
- (3) CO₂排出量の少ない燃料系への転換(バイオマス燃料混焼を含む)

囲み記事の**図b**に示したIEA(International Energy Agency:国際エネルギー機関)のCO₂排出量削減案では、2050年時点でアプローチの(1)と(3)により全体削減量の7%(33.6億t)、(2)により10%(48億t)が見込まれている。ここでは、これら施策のうち、技術開発要素が高い(1)と(2)について取り上げる。

まず、(1)のプラント効率向上施策については、個々の機器効率の改善とプラン



持続可能な社会実現のために不可欠な低炭素社会

これまで人類の文明の発展は、地球資源の大量消費によって達成されてきた。これによって地球の自然現象にまで影響を及ぼしているのが、現在の地球温暖化に代表される環境問題である。地球資源は無尽蔵ではなく、また環境破壊も無視できない現状を省みたとき、将来に向けて新たな社会の仕組みを築いていかなければならないことは明白である。それが地球生態系と共生し持続していくことを目指した、持続可能な社会と呼ばれるものである。

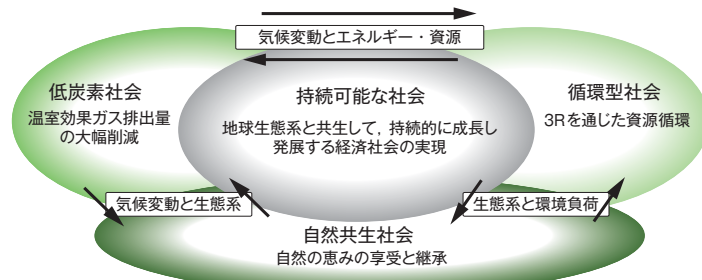
この持続可能な社会を構成する要素が、CO₂など温室効果ガスの排出量を自然が吸収できる量以下とする低炭素社会と、3R (Reduce: 廃棄物削減, Reuse: 再利用, Recycle: 再資源化) を基調とする循環型社会である(図a)。

2008年6月に公表された国際エネルギー機関(IEA)のエネルギー技術予測では、2050年のCO₂排出量を2005年の半分に削減するシナリオを示し(図b)、それに向けた施策を提案している。このシナリオでは、CO₂の大気濃度を450 ppmレベルに保つことを目標としており、これによって地球温暖化は年間2℃台に抑制される。

日本政府もクールアース50構想のなかで、IEAのシナリオと同等レベルの目標を提案し低炭素社会を推進していくことを内外に示した。このシナリオは大変厳しい目標であり、その実現にはエネルギーの供給から消費に至るあらゆる分野での中長期にわたる革新的技術開発が必要である。

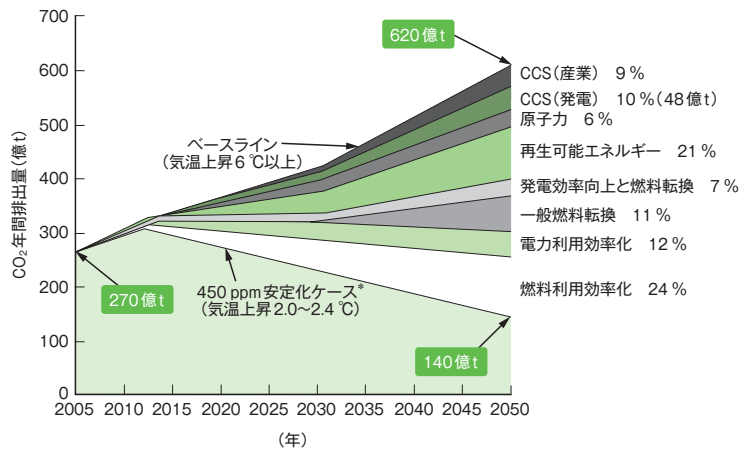
東芝グループは、2007年11月に公表した環境ビジョン2050の中で、あらゆる製品分野に対して製品価値と環境影響、並びに事業プロセスの環境効率を考慮した総合環境効率を、2050年までに2000年の10倍に高める目標を設定した。

エネルギー分野では、図cに示すように、原子力、火力、水力、電力系統、及び新エネルギーの各分野に対し、革新的な環境対応技術の開発を積極的に推進するビジョンを示し、低炭素社会実現を目指している。



出典：21世紀環境立国戦略(2007-6-1閣議決定)⁽¹⁾

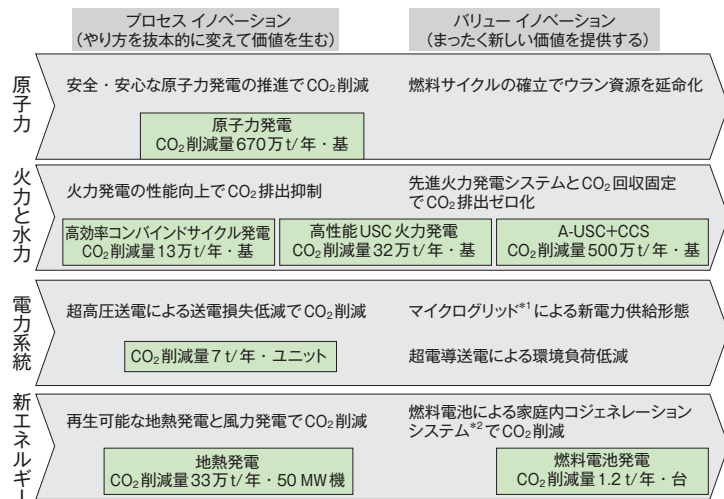
図a 自然との共生を目指した持続可能な社会



出典：Energy Technology Perspectives 2008⁽³⁾

*: IPCC 第4次評価報告書 第3作業部会報告書 カテゴリ-I

図b IEAによる将来のエネルギー起源のCO₂排出量の予測(450 ppm安定化シナリオ)



*1: 比較的小規模なエリア内に複数の分散型電源を導入し、全体を制御及び運用することで、効率的な運転を行うシステム。

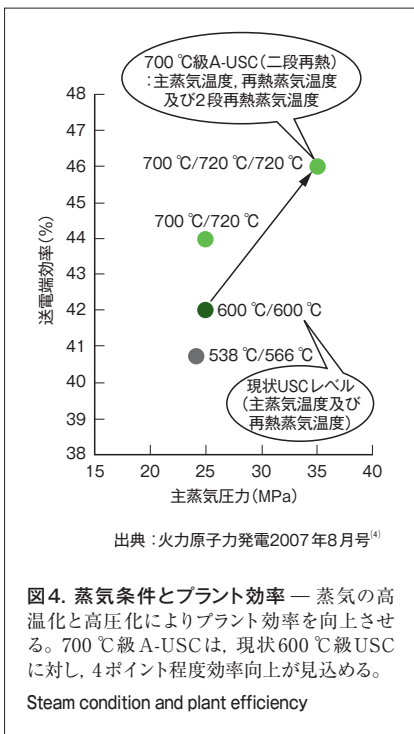
*2: 発電時の廃熱を利用して、暖房や給湯などに利用するシステム。

図c 東芝グループのエネルギービジョン

トシステム熱効率の改善という二つの手法があり、それぞれの取組みが必要である。また、使用する燃料によっても機器構成やシステムが異なるので効率改善技術施策も異なってくる。火力発電の燃料として今後とも主に用いられるのは、天然ガスと石炭であるが、それぞれに対応したプラント効率向上技術の開発が図3に示すように進められている。これらをまず述べ、引き続いて(2)のCO₂の回収と貯留 (CCS: Carbon Capture and Storage) について、その技術を述べる。

■天然ガス火力

天然ガスは、図2にも示したようにもともと石炭に比べてCO₂排出量の少ない燃料であるが、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたガスタービンコンバインドサイクル (GTCC) 発電によって、高い効率を達成し、いっそうのCO₂の削減を可能としている。コンバインドサイクル発電ではガスタービンの高温化がプラント効率向上に大きく寄与する。現在、1,300℃級から1,500℃級に移行しつつあり、そのプラント効率は送電端



高位発熱量基準 (HHV: Higher Heating Value) 効率で52~54%が見込まれる。当社はGEと共同で1,500℃級のH System™(注1)を開発しており、2008年7月には東京電力(株)富津火力4号系列4-1号機の運転を開始した。今後も、プラント効率向上に向けてガスタービンの開発は進められる。

■石炭火力

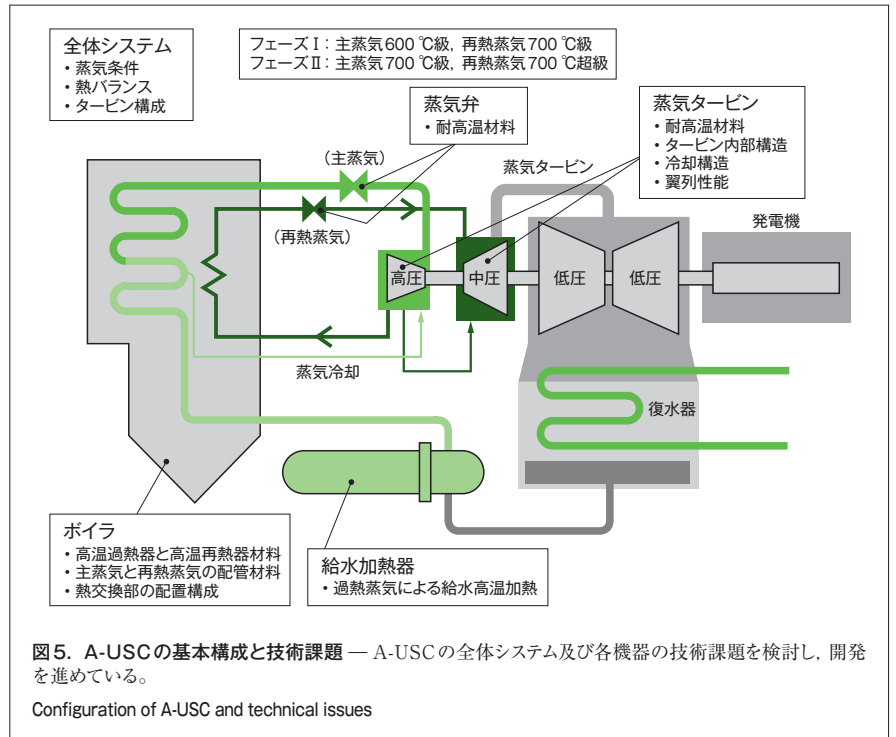
石炭を燃料とする火力発電は、現状はボイラで石炭を燃焼するシステムが主体であり、これまでも亜臨界から超臨界、超々臨界と蒸気条件を高温、高圧化してプラント効率を改善してきた。現在、最新鋭の超々臨界圧 (USC: Ultra Super Critical) 火力プラントは、HHV効率で約42%が得られている。石炭火力の領域では、いっそうの高効率化を目指し、先進超々臨界圧 (A-USC: Advanced USC) 蒸気タービンシステムと、石炭ガス化コンバインドサイクル (IGCC: Integrated Coal Gasification Combined Cycle) という二つの異なるシステムの開発が行われている。

●A-USC

A-USCは主蒸気条件を現状USCの600℃、25MPa級から700℃級、35MPaとし、更に再熱蒸気温度も700℃超級(720~750℃)を目標とするものである。図4に示すように、A-USCでは送電端効率で46%以上を達成することが可能と考えられている。

A-USCの基本構成と技術課題を図5に示す。このシステムのもっとも大きな技術課題は、ボイラや、蒸気弁、蒸気タービンなどの高温材料の開発である。当社は、高温クリープ特性の優れた大型タービン軸材開発で既に大きな成果を上げている。2008年度より国家プロジェクトも立ち上がる予定で、当社もこれに参画する。このA-USCの開発では、プラント効率は送電端HHV効率で46~48%を目標としている。

また、当社では、オプションとして再熱蒸気だけ高温化するシステム(図5中のフェーズI)も検討を進めている。この場合、主蒸気条件は現在のUSC仕様である600℃、25MPa級とし、蒸気圧力の低い再熱蒸気だけ700℃級に高温



(注1) H System™は、GEの商標。

化するものである。この場合高温部材の必要材料強度が大幅に軽減されることから、高温部についても既存材料が適用できるため、短時間で火力プラントの高効率化を達成することができる。更に、この再熱だけ高温化するシステムは、既設プラントの改造にも適用が可能である。

● IGCC

IGCCは、石炭をガス化しガスタービンと蒸気タービンのコンバインドサイクルに適用するものである。このシステムでは石炭ガス化の部分でエネルギーを要するが、コンバインドサイクルの高効率を生かすことができる。IGCCもガスタービンの高温化により効率が向上するが、1,500℃級のガスタービンを用いた場合で、プラント効率としてA-USCと同様に送電端HHV効率で46～48%と見込まれている。

IGCCとA-USCは適する石炭種が異なることもあり、両技術は将来の石炭火力を二分して担っていくものと考えられている。

■ CCS

化石燃料から排出されるCO₂を分離して回収し、地中や海中に貯留することで大気中のCO₂の増加を抑えようとするのがCCSである。CCSは、図6に示すように、CO₂の分離回収、輸送、及び貯留というプロセスになる。このCCSを実現するためには、経済性、安全性確認、法制化、及び社会のコンセンサスなどの課題がある。

これらのうち、経済性については、特にCO₂分離回収に要するエネルギーが大きいことが問題である。現状では発電エネルギーの20～25%をCO₂の分離回収に要する。したがって図7に示すように、前述したA-USCや、IGCC、GTCCといった次世代火力発電技術により高効率化を図っても、CCSによって効果を目減りさせてしまうことになる。このCCSを含めた火力発電の経済性は、CCS実現への大きな障害となるため、よりエネ

ルギー効率の良いCO₂分離回収技術が望まれている。

CO₂の分離回収方法には大別して三つの方法がある。

- (1) 燃焼後回収方式 ポイラやガスタービンの燃焼後、排ガスからCO₂を分離し回収する方式
- (2) 燃焼前回収方式 IGCCにおいて石炭ガス化の過程でCO₂を分

離し回収する方式

- (3) 酸素燃焼ボイラ方式 ボイラ燃焼に空気の代わりに酸素を用いることにより、燃焼排ガスをほとんどCO₂とし、分離を不要とする回収方式

当社はこれらの方式のうち、燃焼後回収方式に焦点を当てて開発を行っている。燃焼後回収方式は、ガスタービン燃焼排ガスにもボイラ燃焼排ガスにも

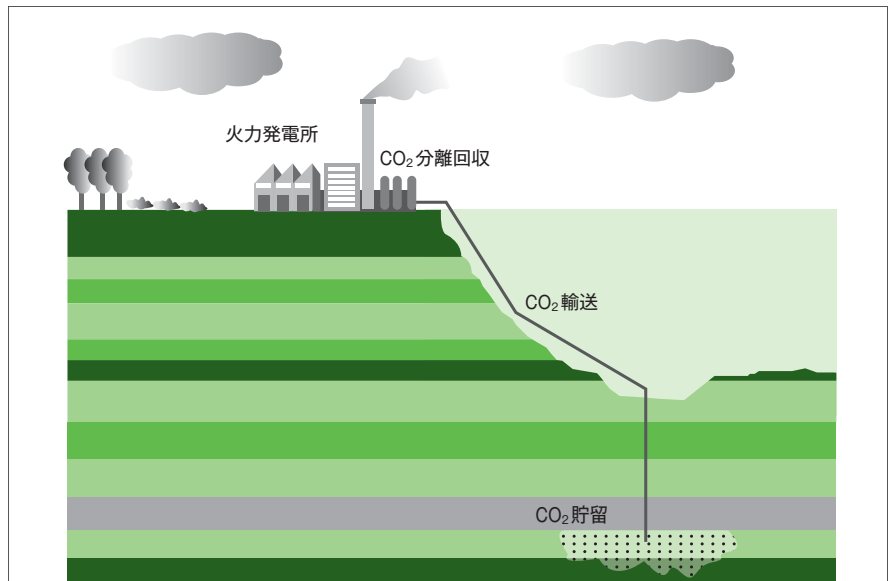


図6. CCSの例 — 火力発電所から排出されたCO₂がパイプラインを通して輸送され、海底の地底に貯留される。
Example of CCS

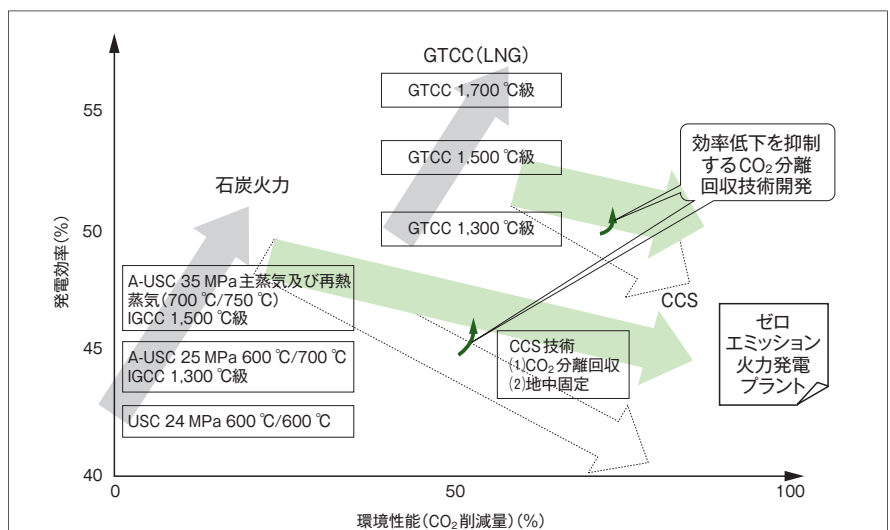


図7. 次世代火力発電の効率と環境性能 — 次世代火力発電により効率の向上が見込まれるが、CCS適用により効率が低下するため、高効率(経済的)CCS技術が必要である。
Plant efficiency and environmental performance of next-generation thermal power plants

適用できるうえ、新設プラントだけでなく既設プラントにも適用が可能であり、CCSの広範囲かつ迅速な展開が期待できる。

CCSの実用化には経済的な成金が不可欠であるが、それらは、設備の初期コストや運転コストにとどまらず、燃料費や炭素税などの経済環境が大きく影響する。そのなかでEOR (Enhanced Oil Recovery) と呼ばれる技術は、CO₂の油田への注入によりオイルの増産が期待できることから経済性が成立しやすいため、CCSの実用化はEORから普及すると考えられている。

環境調和型火力発電の実現にむけて

電力エネルギーの電源構成は、今後ますます多様化が進むと考えられるが、それでもなお火力発電は世界の電力エネルギーの安定供給源として、発電量の過半を担っていかなければならない。そのためにも、前章で述べた環境調和に向けた新しい技術を早期に実用化し、広く展開していくことが必要である。

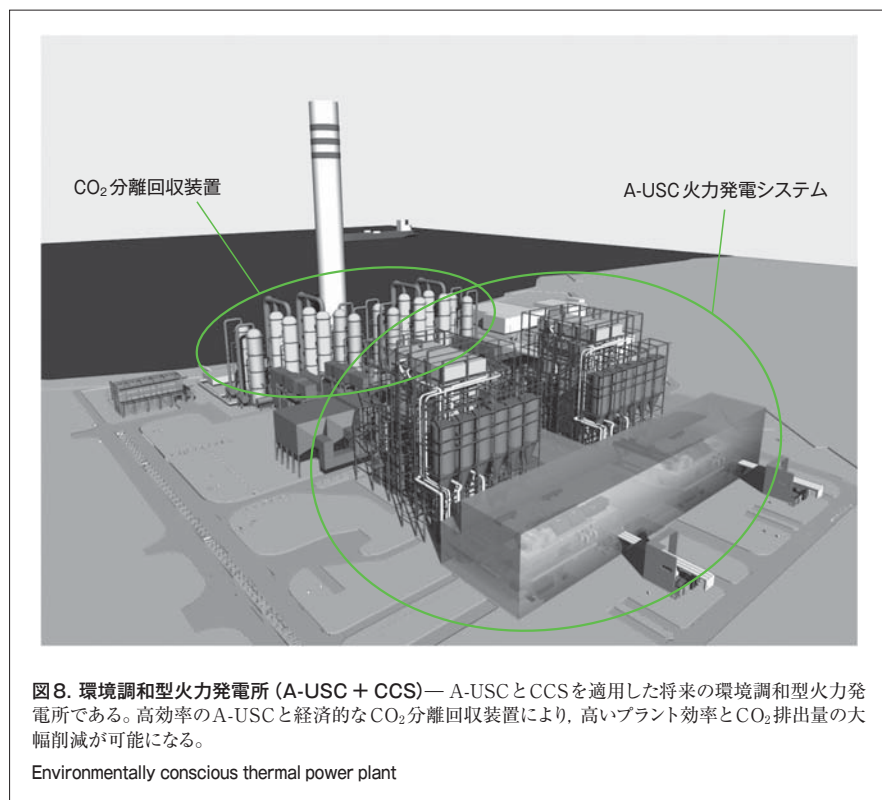
当社ではこのような目標を早期に達成させるために、実際の小型火力発電設備でもある蒸気タービン試験設備⁽⁵⁾

を2008年6月に開設し、まず蒸気タービンをはじめとする機器効率向上技術の検証をスタートさせた。この設備では、今後A-USCの要素技術の検証も行っていく計画である。

更にCO₂分離回収技術の検証についても、2009年の試験開始を目標に検証装置を建設予定である。当社は、こうした次世代火力発電に向けた開発計画に基づき、**図8**に示すような高効率A-USCと経済的CCSを組み合わせた環境調和型火力発電の早期実用化を達成させ、世界の電力安定供給と地球環境改善に貢献していく。

文 献

- (1) International Energy Agency. "World Energy Outlook 2006 Edition". World Energy Outlook. (<http://www.worldenergyoutlook.org/2006.asp>), (参照2008-7-16).
- (2) 環境省. 21世紀環境立国戦略(2007年6月1日閣議決定). (http://www.env.go.jp/guide/info/21c_ens/21c_strategy_070601.pdf). (参照2008-7-16).
- (3) Energy Technology Perspectives 2008-Scenarios and Strategies 2050. IEA (International Energy Agency), 2008, 650p.
- (4) 藤川立誠, ほか. USCタービンの開発. 火力原子力発電. 611 (2007年8月号), 2007, p.16.
- (5) 佐々木隆, ほか. 蒸気タービン試験設備の完成. 東芝レビュー. 63, 8, 2008, p.44-47.



宮池 潔
MIYAIKE Kiyoshi

電力システム社 火力・水力事業部技監。
発電機の設計及び火力発電システムの技術開発に従事。機械学会、CIGRE 会員。
Thermal & Hydro Power Systems & Services Div.