

低炭素化に挑む 火力発電技術

電力中央研究所「電気と環境のフォーラム」

1 火力発電の現状と役割

低炭素社会の実現に向け、①省エネルギー、②電化の促進、③低炭素排出電源の利用の3本柱が重要であることは、前号までに示してきた通りである。第1回では電化推進に向けたシナリオ、第2回では省エネや電化によるCO₂削減ポテンシャルについて明らかにしてきた。本稿では、前述③に関し、低炭素排出電源の利用拡大に向け、高効率化への挑戦が続く火力発電技術について述べる。

現在、電気事業者による発電電力

量の構成比は、火力59%、原子力30%、水力10%、新エネルギーなど1%である。発電量の約6割を占める火力発電は、電力安定供給の大きな柱となっているだけでなく、今後、電化と原子力の利用拡大が進む中、電力需要変動に対応するミドルおよびピーク供給力として、ますます重要な役割を担っていくものと考えられる。一方、2006年度における国内のCO₂排出量は、計11・8億tで、部門別で見ると発電部門は38%を占めている(図1)。原子力、水力、地熱などによる発電はCO₂を発生しないため、発電部門のCO₂は火力発電から排出されたもの

のと考えてよい。発電部門におけるCO₂排出量低減対策としては、原子力発電の着実な利用、バイオマス等再生可能エネルギーの導入、火力発電の高効率化などが挙げられる。図2は、電気事業者によるCO₂排出量を化石燃料の起源別に見たもので、石炭起源が6割弱、ガス起源が3割となっている。従って、CO₂排出原単位の高い石炭火力における高効率化技術の開発が効果的であり、既に高い熱効率を達成しているLNG火力についても、さらなるブレークスルーを目指した技術開発が重要と考えられる。また、近年注目を集めている炭酸ガスの分離回収・



大丸 淳

電力中央研究所 エネルギー技術研究所 プラント工学領域リーダー 上席研究員。「CO₂回収型次世代IGCCシステム」プロジェクト課題責任者、「火力発電の運用・保守技術」基盤研究課題責任者 石炭ガス化複合発電技術の開発および評価、火力発電の運用・保守技術に関する研究に従事。



麦倉 良啓

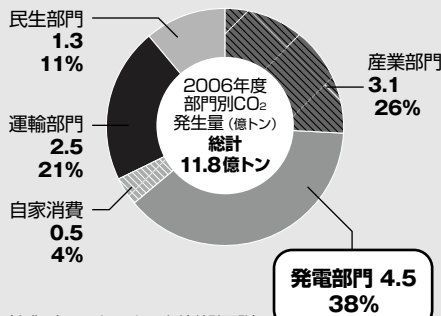
電力中央研究所 エネルギー技術研究所 上席研究員。「低コストMFC発電システム」プロジェクト課題責任者 燃料電池の性能、寿命、経済性の評価およびモデリングに関する研究に従事。



原 三郎

電力中央研究所 エネルギー技術研究所 上席研究員。「石炭ガス化炉」プロジェクト課題責任者、噴流床ガス化技術に関する研究に従事。

図1 国内のCO₂排出量のうち発電設備が占める割合



貯留 (CCS: CO₂ Capture and Storage) についても、中長期的なCO₂削減オプションのひとつとして、その有効性と課題を検討しておく必要がある。そこで、次章以降で低炭素化に挑む火力発電技術の取り組みに焦点を当て、CO₂削減に大きく寄与する高効率化技術や次世代につながる革新技術の概要とその展望について述べる。

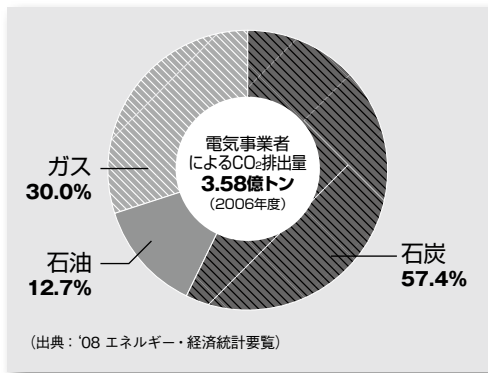


図2 電気事業者による化石燃料起源別のCO₂排出量

2 高効率化に向けた取り組みと展望

わが国の火力発電は、既に世界的に見ても高い効率を達成している(図3)。これは、エネルギーの情勢変化に応じて、石油から石炭、LNGへと燃料転換が図られる中で、長年にわたり高効率化技術の開発に取り組んできた成果によるものである。図4は、わが国の火力発電効率の変遷を示したものである。火力発電の発電効率は、主に「蒸気の高温・高圧化」と「大容量化」により上昇を続けてきた。現在、最新鋭の超々臨界圧ボイラー(USC・蒸気温度600℃)は約40%の送電端効率が得られている。一方、ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせる複合発電では、初号機が導入された後、ガスタービンの燃焼温度が毎年平均20℃という急速な割合で上昇し、1100〜1300℃級、さらには1500℃級のガスタービンが開発され、50%を超える送電端効率を達成している。

このように高い発電効率を達成し

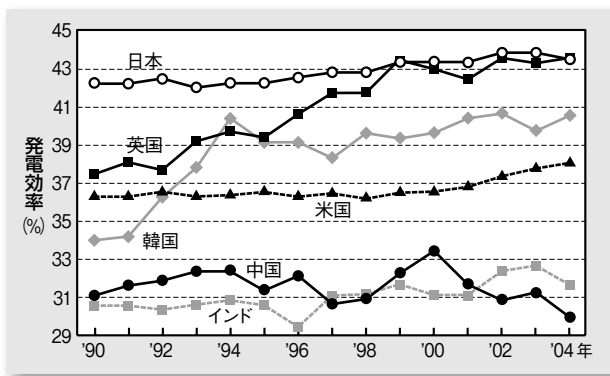


図3 主要国における火力発電効率(電事連資料を基に作成)

ているわが国ではあるが、さらなる火力発電の高効率化を目指し、さまざまな革新技術の開発努力が続けられている。火力発電については、蒸気温度を700℃まで高めた次世代超々臨界圧(A-USC)の開発が、

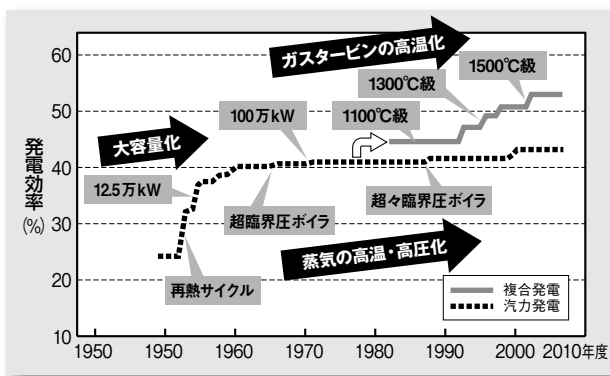


図4 わが国における火力発電効率向上の経緯(発電効率は、当該年度に運転開始したプラントのうち最も高いものを示している)

08年度より国プロとして開始された。また、LNG複合発電では、1700℃級ガスタービンの実現に向けた要素技術開発が国プロにより進められている。一方、石炭ガス化複合発電(IGCC)は、石炭火力

発電における高効率化の切り札として着実に開発が進められている。本技術により48%の送電端効率の達成も可能であり、将来大容量燃料電池が開発されれば50%を超える石炭火力発電の実現も夢ではない。

ところで、火力発電の高効率化により、将来どれほどCO₂削減に寄与できるであろうか。例えば、火力の平均発電効率を現状から5%（絶対値）向上させると、発電電力量当たりのCO₂を10%以上削減することができる。さらに燃料をLNGなど炭素含有量の少ない燃料に転換すれば、併せて大きな効果が期待できる。電気事業からのCO₂排出量について、1990年比で半減するためのシナリオを電中研が検討した結果、1500℃級ガスタービンLNG複合発電やIGCCなどが順次導入され火力発電の高効率化が進展することにより、特段CO₂削減対策を講じない場合に比べて、50年では約0.5億t/年のCO₂削減が可能であることがわかった。CO₂排出量を半減させるためには様々な対策技術を総動員する必要がある。

あり、その中で火力発電の高効率化も重要な役割を担うことは言うまでもない。

3 夢の超高効率 LNG 発電への挑戦

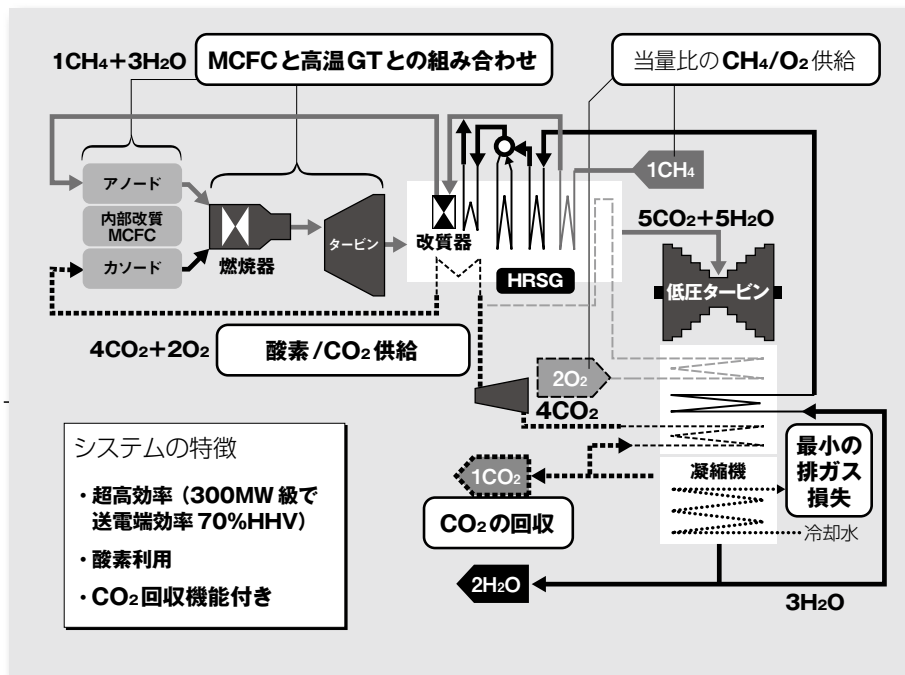


図5 超高効率ハイブリッドLNG複合発電システムの概念

LNG火力発電は既に高い発電効率を獲得しているが、新たな革新技術を導入すれば60%以上の高効率を達成することが可能になる。電中研では、燃料電池とガスタービンのハイブリッド複合発電を行うことにより、送電端効率70%という超高効率が達成可能なシステムを提案している[1]。本システムは、高温形燃料電池である熔融炭酸塩形燃料電池(MCFC)、ガスタービン要素技術、ならびにシステム解析技術の知見を結集して構築したシステムであり、技術的には十分達成可能なシステムと考えられる。システムの概念を図5に示す(300MW級システムを想定)。本システムは、「反応成分の濃度が高いほど高効率」「容積当たりの出力が小さい」などの特徴を持つ燃料電池と、「低カロリーの燃料でも燃焼温度が同じならほぼ効率が同じ」「比出力が極めて大きい」などの特徴を持つガスタービンを融合させた「ハイブリッドシステム」である。このようなハイブリッドシステムは、これまでにもさまざまなものが提案されているが、発電効率と

としては60〜65%が限界であった。しかしながら、本システムではそれぞれの発電システムの特長を最大限に生かすことで、70%の超高効率が期待できる。すなわち、本システムでは、当量比のLNGと酸素を供給することで、排ガス流量を減らして排ガス損失の最小化を図るとともに、燃料電池で反応できなかったLNGと酸素はガスタービン燃焼器で燃焼し、高温の燃焼ガスでガスタービンを駆動して発電する。ガスタービンを出た排ガスは、排熱回収ボイラへ送られ、水や燃料、CO₂などを加熱し、最終的に低圧ガスタービンを駆動して、再度発電する。このように、燃料電池と高・低圧のガスタービンというトリプル発電が可能となる。また、低圧タービンを出た排ガスは、水分が凝縮された後は最終的にCO₂のみとなるため、必要であれば全量回収することも可能である。本システムが実現できれば、超高効率とCO₂回収の効果により、CO₂排出量を大幅に削減することが可能となる。

ここでシステムの中核となる燃料

電池には、MFCを採用した。燃料電池には、MFCのほかに、家庭用や自動車用として固体高分子形燃料電池（PEFC）、家庭用や大型電源用として固体酸化物形燃料電池（SOFC）があるが、燃料電池の基本構成単位である単セルの面積においては、MFCが10・000cm²級であるのに対し、ほかの燃料電池では数100cm²級にとどまり、大形化においてはMFCが現状では最も適している。また、高温形燃料電池であるSOFCを用いた複合発電システムも多数提案されているが、SOFCの運転温度は900〜1000℃と高く、熱交換器や配管などの運転条件が厳しいのに対し、MFCの運転温度は700℃以下であり、ステンレス系の材料が使用できるので、現状の材料でシステムを構成することが可能である。本システム実現に当たった最大の課題は、中核となる燃料電池の大型化と低コスト化、および寿命である。長期的な安定性に関しては、電中研において燃料電池の加圧条件における寿命試験としては最長の単セルによ

る6・5万時間運転に成功している。しかし、MFCの電極として使用している酸化ニッケルが溶解して析出し、内部的な短絡が発生する現象がCO₂分圧に比例して加速されるため、現状技術では1万時間弱でMFCを交換する必要がある。今後、対策技術の開発が不可欠である。

4 低炭素化に向けたIGCC技術の開発

●IGCCの特徴

IGCCは、図6に示すように、固体燃料である石炭を空気や酸素等をガス化剤として石炭ガスに転換する石炭ガス化設備、石炭ガスに含まれる不純物を除去するガス精製設備、精製後の石炭ガスをガスタービン燃料として発電を行う複合発電設備から構成され、以下の特徴を持つ。

①高い発電効率…IGCCの最も大きな特徴は、その高効率性にある。わが国の最新鋭微粉炭火力は、世界的にも最高水準の発電効率であり、送電端で40〜41%（HHV）に達している。これに対し、IGCC（わが国が開発を行っている空気吹き

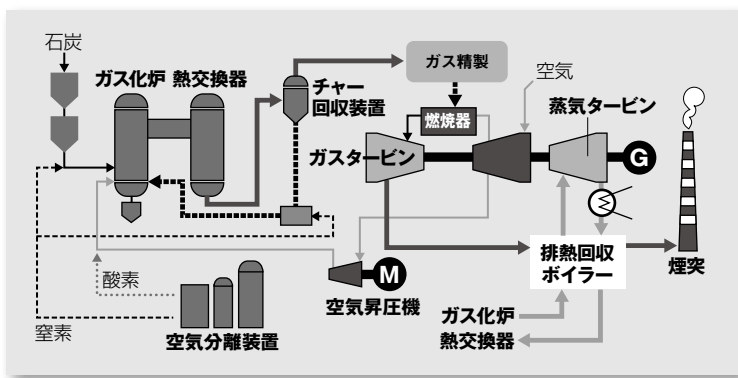
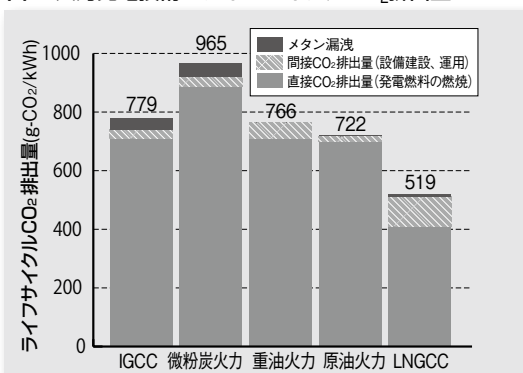


図6 IGCCシステムの構成例(空気吹きIGCCの場合)

IGCCの場合)では、1300℃級ガスタービンで43〜44%、1500℃級ガスタービンでは46〜48%まで向上する。このため、発電

図7 火力発電技術のライフサイクルCO₂排出量



電力量当たりのCO₂、SO_x、NO_x、ばいじんの排出量を低減することが可能である。図7は、電中研が試算した各種火力発電技術におけるライフサイクルCO₂排出量(発電電力量当たり)であり、IGCCのCO₂排出量は、ほぼ重油火力並みであることが分かる。微粉炭火力と比べると、効率向上により直接排出量が減少するため、CO₂排出量を約20%低減可能である。

②石炭灰の有効利用・石炭中に含まれる灰は、ガス化炉内で一旦溶融状

態となり、それが水で急冷された後、ガラス状の固化スラグとして排出される。このため、従来型石炭火力に比べ、容積がほぼ半分になる。また、この固化スラグからは、有害成分の溶出も無く、骨材などへの有効利用が可能である。

③適用炭種の拡大・IGCCでは、灰付着トラブルなどの観点から微粉炭火力発電所で使い難い、灰融点の低い石炭の利用が可能であるため、エネルギーセキュリティの確保、利用炭種の拡大に寄与できる。

●IGCCの開発動向

欧米では90年代半ばより、300MW級のIGCC実証・商用計画が進められ、現在4つのプラントが運転を行っている。いずれのプラントも、ガス化剤として酸素を用いる酸素吹きIGCCである。これに対し、わが国では酸素吹きに比べ、送電端効率の向上が期待できる空気吹きガス化技術によるIGCCの開発を進めてきている。200t/日規模のパイロットプラントプロジェクト、実証機FSや要素研究を経て、99年度よりIGCC実証機計画がス

タートし、01年6月には実施主体となるクリーンコールパワー研究所が電力共同出資により設立された。実証機の主な仕様を表1に、全景を図8に示す。ガス化炉型式は、電中研と三菱重工が共同でプロセス開発を行った空気吹き二段噴流床炉であり、実証機から商用機へのスケールアップなどの観点から実証機出力は250MW規模で、1200℃級ガスタービンが採用されている。04年8月の現地工事開始後、順調に建設工事が進められ、07年10月にガス化炉石炭ガス化運転が開始された。08年3月7日にプラント負荷100% (250MW) に到達し、6月～9月には、長時間連続運転試験に成功した。引き続き、09年度までに、炭種拡大や耐久性評価などの各種試験が実施される予定である[2]。

IGCC実証機は、技術の根幹にかかわるようなトラブルの発生もなく、計画通りに運転試験が行われており、わが国独自の高效率な空気吹きIGCC技術は、先行していた海外の酸素吹きIGCC技術に肩を並べる開発レベルに到達したと言える。

表1 IGCC実証機の仕様

出力	250MW級 (石炭処理量: 約1700トン/日)
方式	空気吹きドライフィード二段噴流床炉 湿式ガス精製 (MEDA) + 石膏回収 1200℃級ガスタービン
目標熱効率 LHV (HHV)	発電端 48% (46%) 送電端 42% (40.5%)
環境特性 (目標値)	SO _x : 8ppm (O ₂ 16%換算) NO _x : 5ppm (O ₂ 16%換算) ばいじん: 4mg/m ³ N (O ₂ 16%換算)

●IGCCの普及に向けて

電中研は、IGCCの中核となる石炭ガス化技術について、2t/日石炭ガス化基礎実験装置(2t炉)による空気吹きガス化炉のプロセス開発や200t/日パイロットプラントの設計・運転支援を実施し、空気吹きIGCCの基盤技術確立の中心的役割を担ってきた。さらに、実証機の設計検討段階では、数値シミュレーション技術などを駆使してガス化炉特性の予測評価や炭種評価を中心に支援研究を行い、現在も3t/日石炭ガス化研究炉を活用した実

証機の運転支援を行っている。今後は、IGCC技術の確立と普及に向けて、引き続き実証機計画を支援していくとともに、商用IGCCの運用性向上やさらなる高効率化を達成するため、適合炭種の拡大、運転・障害予知システムの開発、乾式ガス精製システムの開発に取り組み予定である。

5 CCSの動向と次世代発電技術の提案

● CCSにかかわる動向

近年欧米を中心に、中長期的な温暖化防止対策オプションのひとつとして、CCSの導入に向けた動きが活発化している。05年の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）で、CCSに関する特別報告書^[3]が採択されて以来、CCSは有力な温暖化対策のひとつとして注目され、欧米を中心に多くの導入計画が発表されている。ただし、現時点でCO₂貯留を商業的に行っているのは3カ所のみであり、発電とCCSを組み合わせた実施例はない。EUでは、15年のCCS義務化も視野に積極的な

展開を見せており、現在12以上の実証プロジェクトがある。しかしながら、現時点でCCS建設を最終決定したものはない模様であり、実現するのは3〜5プロジェクトとも言われている。また、英国では、300MW以上の燃焼後回収システム（後述）に資金補助を行うことを決定しており、09年末までにプロジェクトを選定する予定である。米国では、08年1月にFutureGen計画の大幅な変更があり、国の補助は300MW以上の商用機が対象となった（IGCC以外の方式も可）。一方、わが国においても、08年5月に日本CCS調査が設立され、同年7月に閣議決定された「低炭素社会づくり行動計画」の中で、CCSについては09年度以降早期に大規模実証に着手し、20年までに実用化を目指すとの明記されるなど、CCSにかかわる情勢が大きく変化している。

● CCSの現状と課題

既存のCO₂回収型発電システムは、燃焼後回収システム（Post Combustion）、酸素燃焼システム（Oxy-fuel Combustion）、燃焼前回

回収システム（Pre Combustion）の3種類に大別される。燃焼後回収システムでは、CO₂回収により発電効率は約2割低下し、発電コストは約1.5倍になるとの報告がある^[3]。さらに、CO₂の輸送・貯留も含めた場合、

発電コストは回収なしに比べて2倍程度になるものと想定されている。いずれのシステムでも、発電効率の大幅な低下やコスト上昇が大きな課題となっており、それらを解決する革新的な発電システムの開発が望まれている。また、300MW級微粉炭火力の

場合、CO₂は約150万t/年（回収率90%の場合）回収される。海外と異なり、わが国では大量のCO₂を貯留する適地が少ないことや、輸送・貯留の具体的な方法に関する技術面、法制面の課題など、今後、検



図8 IGCC実証機の全景

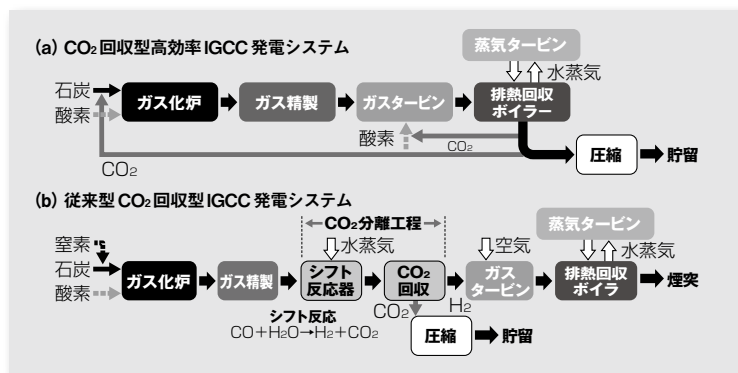


図9 新たな概念によるCO₂回収型高効率IGCCシステム

(a) が新たに提案したシステムで、排ガスのCO₂を循環させることでCO₂の分解工程が不要となり、(b)の従来型システムに比べて、高効率化およびシステムの簡素化が可能となる。

討・整備すべき事項が山積している。

● 新たな概念によるCO₂回収型高効率IGCCの提案

電中研では、将来CCSを実施する必要が生じた時の革新的オプションの提供を目指し、CO₂を回収しながら高い効率を維持し、プラントの簡素化などによるコスト低減も期待できる、新しいCO₂回収型高効率IGCCシステムを提案している[4]。本システムの構成を従来型の燃焼前回収システムと比較して図9に示す。本システムは、回収したCO₂を効果的に利用する新たな酸素-CO₂吹き石炭ガス化炉と、リサイクルした排ガスに酸素を混合して燃焼させるクロースドガスタービンを組み合わせたもので、酸素燃焼と燃焼前回収を融合したシステムといえる。本システムのガス化性能の試算を行った結果、酸素、CO₂で石炭をガス化すると、CO₂のガス化促進効果(C+CO₂↓2CO)によって、従来の酸素・N₂吹きガス化に比べて、ガス化炉性能が向上することが分かった。また、プラントの発電効率を試算した結果、従来

の方式ではCO₂を回収すると送電端効率(HHV)は、40%前後から32%程度まで低下してしまうのに対して、本システムでは1300℃級ガスタービンの場合に40%以上と、極めて高効率でCO₂回収型発電を実現できる可能性があることが分かった。ただし、実用化に向けては、①システムの最適化、②ガス化炉性能向上効果の実証、③脱高CO濃度ガス雰囲気下での脱硫剤中への炭素析出対策、④クロースドガスタービンの最適設計と適切な制御方法などの課題がある。本システムの実現性について、これらの課題を踏まえた上で、今後、詳細な検討評価を進める予定である。

わが国で開発中のIGCC技術は、発電分野では非常にまれな純国産技術であり、研究開発の開始から25年以上を経てようやく実用化段階に入った。今後は、内外での普及促進に向けた、さらなる技術開発を行っていくことが重要である。また、超高効率LNG発電およびCO₂回収型高効率IGCCについては、現時点ではシステム解析による可能性

が示された段階であり、コスト評価も含めた実現可能性評価を早急に進める必要がある。CCSについては、中長期的な温暖化対策オプションとなる可能性があるため、CCS導入に伴う効果と課題を明確にした上で、将来に備えて技術開発は着実に進めておくことが肝要と考える。

参考文献

- [1] 幸田栄一、高橋徹・日本ガスタービン学会 第32回ガスタービン定期講演会講演論文集、(2004/10)
- [2] 石橋喜孝・日本ガスタービン学会 第36回ガスタービン定期講演会講演論文集、(2008/10)
- [3] IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage, Cambridge, Univ. Pr. (2005/12)
- [4] 犬丸淳ら・第44回石炭科学会議発表論文集 日本エネルギー学会 (2007/10)