

クリーンコールテクノロジーにおける 高温型燃料電池の動向と展望

石炭は世界各地に広く豊富に賦存し、エネルギーセキュリティの点で非常に重要な資源である。一方、石炭はCO₂排出原単位が大きく、地球温暖化防止の観点から、環境調和型石炭利用技術（クリーンコールテクノロジー）の実現によるCO₂発生量低減が求められている。中でも石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）の発電効率は50～55%と見込まれ、究極の石炭利用発電方式として期待され、研究が進展している。

IGFCには、石炭ガス主成分である高温の水素と一酸化炭素を直接燃料に利用できる高温型燃料電池（MCFCとSOFC）が適している。本レポートでは、IGFCの技術概要と、キーテクノロジーである高温型燃料電池の研究開発動向をまとめ、我が国における研究開発推進課題を指摘し、今後望まれる政策対応について提言する。

(1) CO₂削減手段としての位置付け明確化

米国ではCO₂削減手段としてIGFCを含むクリーンコールテクノロジーの位置付けが社会的に認知されており、国のトップダウンでFutureGenとして全体の計画が推進されている。この背景としてCO₂貯留に関する研究の進展が少なからず寄与している。今後、日本でIGFC開発を推進する上では、米国同様CO₂削減手段としての社会的認知を確立し、日本が遅れているCO₂貯留に関する学術研究を一層活発化することが不可欠である。併せてCO₂分離回収・貯留とIGFCの連携を図ることが有効である。

(2) IGFCに向けた高温型燃料電池の課題整理とマイルストーン明確化

IGFC実現には高温型燃料電池だけでなく、石炭ガス化技術やCO₂分離技術などの他の技術分野の進展と、関係者間の連携が不可欠である。現状、石炭ガス化技術やCO₂分離技術は実証化段階にあり、高温型燃料電池に先行しており、このような研究開発段階の不一致により、関係者間の対話と連携が進展しにくい。IGFC向けの高温型燃料電池にとって次のステップであるパイロットプラント実現にあたり想定される技術課題を整理し、課題克服の方策や開発ステップを明確化し、次ステップ移行へのゲート目標設定を明示したマイルストーンの構築が必要である。

(3) 関連する重要技術開発の更なる進展

石炭ガス化技術は全体の発電効率を左右する重要な技術であり、より一層の効率向上に向けた研究開発が望まれる。この分野の基礎研究開発を進展するには、機械工学、材料工学、計算機科学、燃焼工学等、幅広い学術分野の知見を集積した形の研究活動が不可欠である。

(4) 国際協力の可能性検討

これまで進めてきた技術蓄積を元に石炭消費国との連携を深め、IGFC技術開発の国際協力を進めていくことが必要である。クリーンコールテクノロジーには既に完成された技術や、基礎研究、実証等様々な開発段階の技術が含まれる。円滑な協力関係の確立には協力先での知的財産権保護制度の確立が不可欠である。我が国として開発段階のどの時点でどのような協力が可能か整理した上で、将来クリーンコールテクノロジーを必要とするアジア諸国と、技術面および制度面を含む包括的な対話が望まれる。

クリーンコールテクノロジーにおける 高温型燃料電池の動向と展望

渡辺 隆夫
客員研究官

前田 征児
環境・エネルギーユニット

1 はじめに

石炭は我が国の一次エネルギー供給の約二割を占める重要なエネルギー源である。その反面、地球温暖化防止と環境負荷低減の観点からは、石炭は他の化石燃料に比較してCO₂排出原単位や硫黄などの不純物含有量が多いという点で環境負荷が高いと言われており、その欠点を克服する技術については、環境調和型石炭利用技術(クリーンコールテクノロジー)を科学技術動向誌2004年11月号にて取り上げられている。

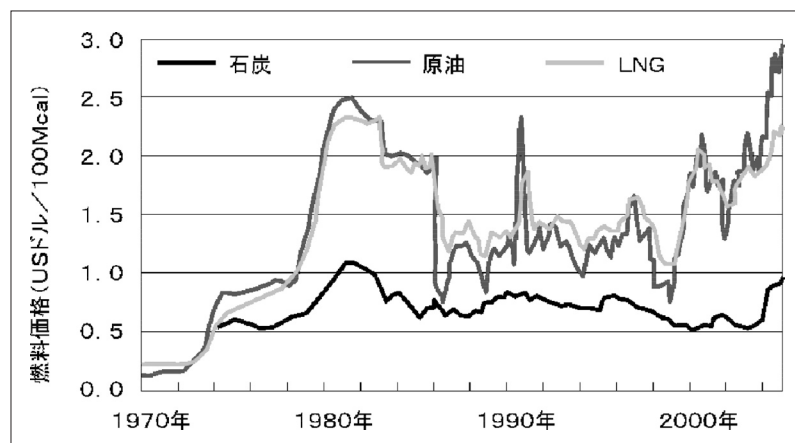
その後、中国を筆頭とするアジア諸国の急速な経済発展に伴う一次エネルギー需要の急増を受けて、世界的に見て賦存量が多く、政情不安定地域に偏在しない石炭資源は、エネルギーセキュリティ面でさらに重要度が増している。昨今の原油価格高騰期においても、石炭資源は安定した低価格で推移しており(図表1)¹⁾、アジア諸国を中心に、今後の経済発展に伴い急拡大する電力需要を賄う一次エネルギー源として、石炭資源の消費量は一層高まると予想されている(図表2)²⁾。

その一方で、異常気象など地球温暖化問題の深刻化から、石炭資源の活用と環境調和を両立させる技術として、クリーンコールテクノロジーの重要性はますます高まっている³⁾。特に、2005年9月

に気候変動に関する政府間パネル(IPCC)が「発電所のCO₂分離回収・貯留技術が、気候変動対策として主要な役割を有する」との結論を発表して以来⁴⁾、海外を中心に、

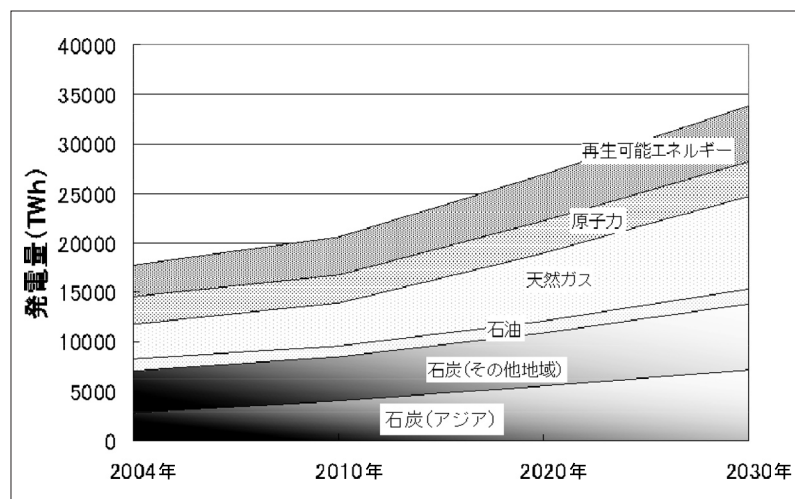
ゼロエミッションに近い究極の発電技術としてCO₂の分離回収・貯留まで含めたクリーンコールテクノロジーの実現を目指した取り組みが活発化している。

図表1 我が国の燃料輸入価格の推移



参考文献¹⁾を元に科学技術動向研究センターにて作成

図表2 世界全体の発電電力量実績と見通し



参考文献²⁾を元に科学技術動向研究センターにて作成

クリーンコールテクノロジーの中でも石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC) は最も高効率で低環境負荷な発電方式とされ、「究極の石炭利用発電技術」と期待されている。IGFC の発電部分には高

温型燃料電池と呼ばれる方式の燃料電池が用いられ、この技術については我が国でも活発に研究開発が進められてきた。

本レポートでは、IGFC の技術概要と、キーテクノロジーであ

る高温型燃料電池の研究開発動向をまとめる。次に、海外動向との比較から、日本における高温型燃料電池研究開発推進の課題を指摘し、今後望まれる政策対応について提言する。

2 石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC) を中心としたクリーンコールテクノロジーの概要

高効率発電に資するクリーンコールテクノロジーとして、石炭ガス化複合発電 (IGCC) については、科学技術動向 2004 年 11 月号で詳述されているため、ここでは簡単に示す。IGCC は石炭を直接燃焼させず、石炭をガス化した燃料 (石炭ガス) の燃焼エネルギーでガスタービンを駆動し、さらに排熱で得た蒸気で蒸気タービンを駆動する複合発電方式である。蒸気タービンとガスタービンを組合せ、カスケードなエネルギー利用により高効率発電が可能である。我が国では商用発電プラントの 1/2 程度の規模での実証プラントが建設中であり 2007 年から運転に入る予定であるが、海外では既に商用発電プラントが稼働している⁵⁾。また、CO₂ 貯留と組み合わせた商用発電プラントの計画も複数進行中である⁶⁾。

IGFC は、IGCC に更に高温型燃料電池を組合せたトリプル複合発電方式である。図表 3 に、

IGFC の特徴を、従来の石炭火力や IGCC と比較してまとめた⁷⁾。IGFC の発電効率が微粉炭火力や IGCC を大きく上回る 50 ~ 55% に達することが、「究極の石炭利用発電技術」と呼ばれている理由の一つである。

図表 4 に IGFC を中心としたクリーンコールテクノロジーの全体概要を示す。高効率な発電が可能だけでなく、以下に述べる特長がある。

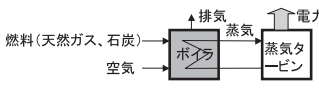
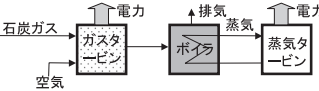
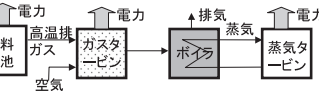
- 適用炭種が幅広く、石炭資源の有効活用が可能…従来の微粉炭火力では、含有水分量が多く発熱量が低い低石炭化度炭 (亜瀝青炭や褐炭) を使用しにくかったが、IGCC や IGFC では、低石炭化度炭でも比較的容易にガス化して燃料として使用可能である。
- 環境汚染物質や CO₂ の分離除去が容易…ガス化後にガス精製装置を設置することで容易に環境

汚染物質を除去可能である。また、排ガス中に CO₂ が高濃度に含まれるため、CO₂ 分離装置により CO₂ を相対的に安価に分離除去可能である。分離した CO₂ をパイプラインやタンカー輸送し、地中や海洋に隔離・貯留することで、CO₂ ゼロエミッション化に近づけることができる。

各種発電方式の CO₂ 排出原単位を図表 5 に示す。石炭を燃料とする発電方式の中では IGFC は CO₂ の分離・貯留技術 (CCS) との組合せにおいて、最も CO₂ 排出原単位が小さい^{8, 9)}。

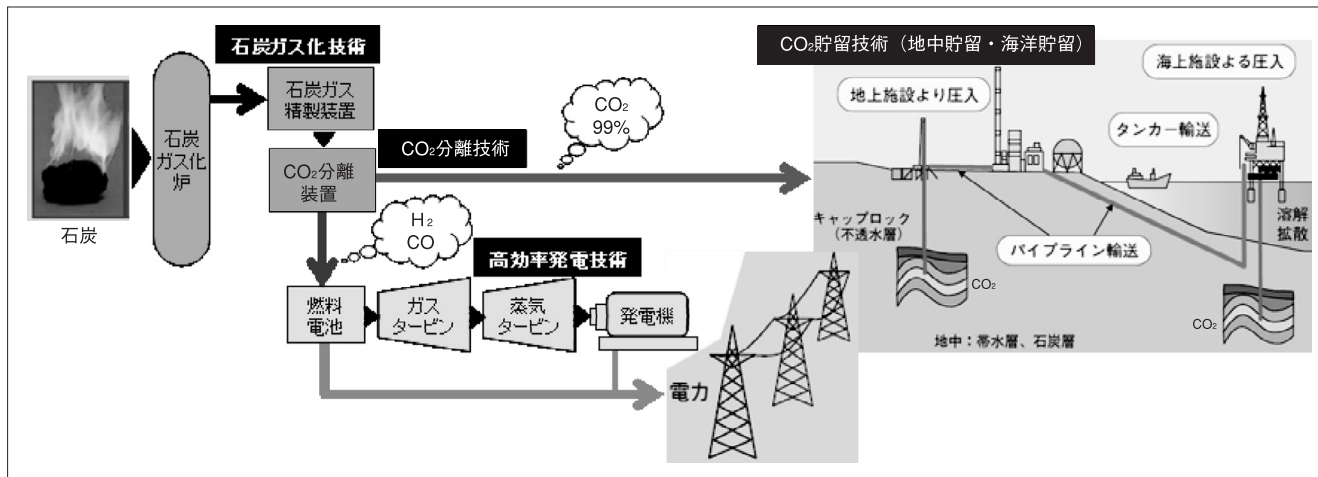
IGFC を中心としたクリーンコールテクノロジーに関連する技術分野は、キーとなる高温型燃料電池だけでなく、石炭ガス化・精製技術、CO₂ 分離技術、CO₂ 貯留技術 (地中貯留 / 海洋貯留)、と多岐にわたる。次にクリーンコールテクノロジー各分野の研究開発動向について、世界全体での科学技

図表 3 各種石炭火力発電方式の比較

方式	構成	発電方式	発電効率 (HHV、送電端)	適用炭種
従来石炭火力 (微粉炭火力)		蒸気タービン	42 ~ 43%	瀝青炭
石炭ガス化複合発電 (IGCC)		ガスタービン 蒸気タービン	46 ~ 48%	瀝青炭 低石炭化度炭
石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC)		高温型燃料電池 ガスタービン 蒸気タービン	50 ~ 55%	瀝青炭 低石炭化度炭

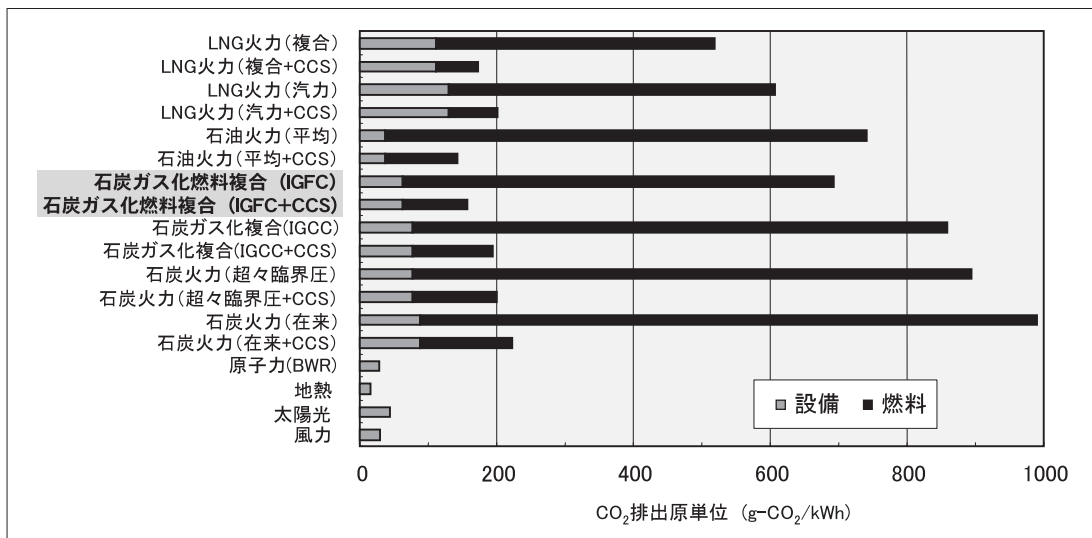
参考文献⁷⁾ を元に科学技術動向研究センターにて作成

図表4 石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC) によるクリーンコールテクノロジー



参考文献²⁾を元に科学技術動向研究センターにて作成

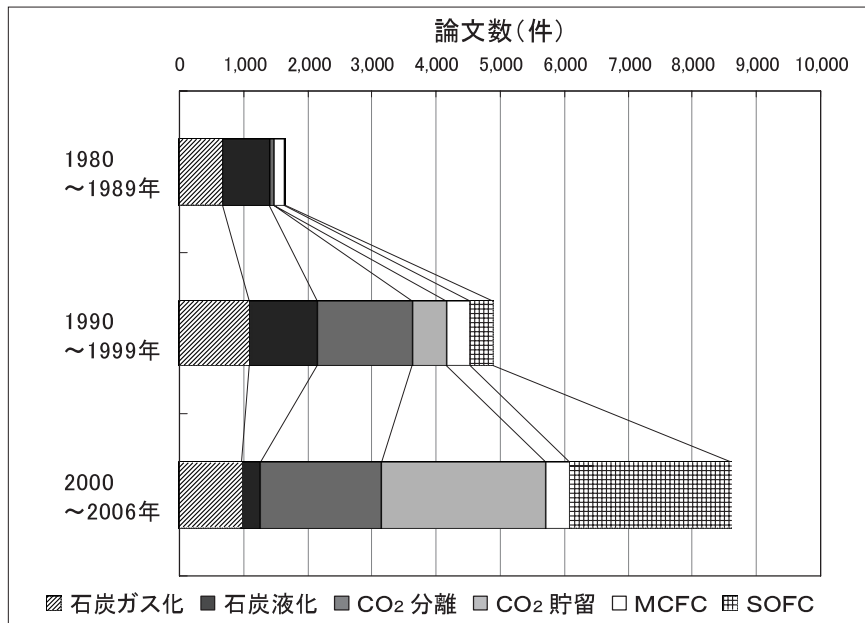
図表5 各種発電方式のCO₂排出原単位比較



参考文献^{4, 8, 9)}を元に科学技術動向研究センターにて作成

術論文数の推移で示す (図表6)。80年代には石炭液化技術の研究が大半を占めていた。これは70年代の二度のオイルショックのために、当時は主として石油代替を目的とした石炭の有効活用に主眼がおかれていたことを反映している。90年代以降は地球温暖化問題が顕在化したため、石炭ガス化技術と高温型燃料電池(MCFC、SOFC)技術関連の研究開発が活発化している。近年は特にCO₂ゼロエミッション化実現を目指したCO₂分離とCO₂貯留技術の研究開発が急増していることが注目される。

図表6 世界全体でのクリーンコールテクノロジー関連の科学技術論文数推移



Thomson社“Web of Science”データを元に科学技術動向研究センターにて作成
論文言語: All Languages

3 石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC) の研究開発状況 ●●●●●●●●●●

3 - 1

高温型燃料電池の 開発状況¹⁰⁾

「究極の石炭利用発電」である IGFC にとって、最も重要なキーテクノロジーは高効率発電を実現する燃料電池である。燃料電池は大きく高温型と低温型に分けられるが、高温型は以下の理由で IGFC に適している。

- ①高温運転であるため、石炭ガスの主成分である水素、一酸化炭素の電極反応が進みやすく、石炭ガスをそのまま燃料として使用できる。これに対して低温型燃料電池の場合、低温運転であるため電極反応が進みにくく、電極反応活性を高めるために高価な白金触媒を必要とする。また石炭ガス中の一酸化炭素は白金触媒に吸着被毒の恐れがあり、一酸化炭素除去装置の追加など、システムが更に複雑化する。
- ②高温排ガスを利用して、ガスタービンや蒸気タービンとの複合サイクル化が容易で、システム全体の発電効率を飛躍的に向上することが可能となる。

高温型燃料電池には、溶融炭酸塩形燃料電池 (MCFC) と固体酸化物形燃料電池 (SOFC) がある。動作温度は、MCFC が約 600 ～ 670℃、SOFC では約 750 ～ 1,000℃ であるが、高温排ガスを利用した複合サイクル化が可能である。現在、MCFC と SOFC の両方式が並行して開発されており、以下、個別に開発の状況をまとめる。

(1)溶融炭酸塩形燃料電池 (MCFC)

我が国では、1980 年代初めから国家プロジェクトで MCFC が検討され、1MW 級プラントが開発された。その成果は、都市ガスを念頭においた分散電源用 300kW 級燃料電池システムとして発展し、愛知万博会場において会期中に 2 機が実証運転された。発電効率は最大 51% (LHV、発電端) を達成した。これら 2 機の設備は、2006 年度に中部臨空都市 (常滑市) に移設され、引き続き運転が継続されている (図表 7)¹¹⁾。

海外では、米国とドイツの企業がクロスライセンスによって 250kW 級常圧システムを開発し、発電効率約 47% (LHV、送電端) を達成している。本ユニットはすでに全世界に 50 台以上の出荷実績を持ち、運転時間 2 万 5 千時間を越えたユニットもある。電気と熱を供給可能で、下水処理場 (汚泥消化ガス利用)、製造業 (天然ガス・都市ガス、炭坑メタンガス利用)、ホテル・病院・大学・電力品質向上など、様々な分野に適用されている¹²⁾。

大型の MW 級としては、我が国では 1999 年に (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) において、事業用電源向け天然ガス利用 1MW 級加圧プラントが運転された。また、米国では 1997 年に都市ガス利用 2MW 常圧プラントが運転され、2004 年に下水処理場消化ガス利用 1MW 級プラントが開発されている¹⁰⁾。

IGFC 向けの石炭ガスの適用に関しては、我が国では 10kW 級スタックを用いて適用可能性の検証がなされ、特性の安定性が確認されている段階にある。また、石炭ガスに含まれる各種不純物が

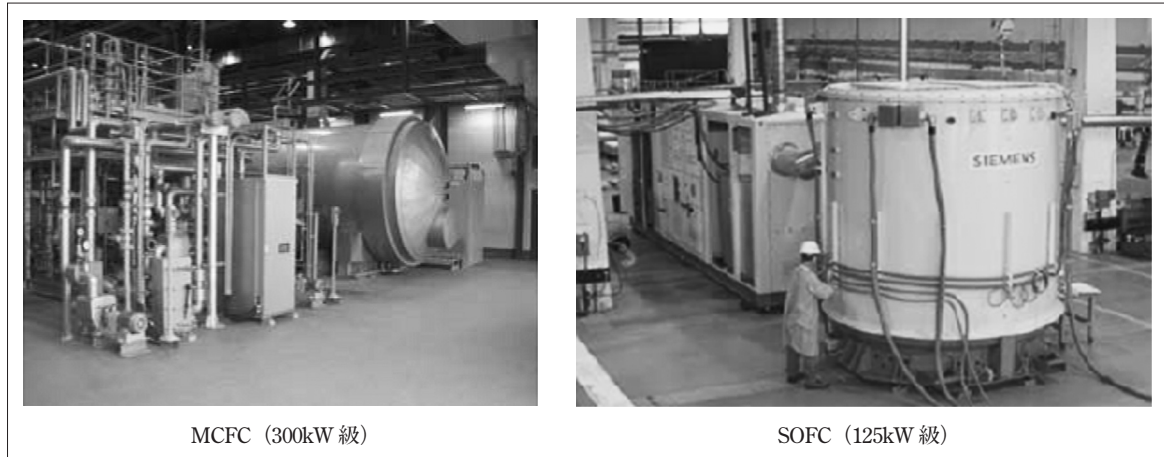
MCFC スタック部材に与えるダメージも詳細に調べられている。ppm オーダーの濃度の不純物がセル電圧に与える影響や劣化メカニズムが解明され、不純物許容濃度も明らかにされている。

(2)固体酸化物形燃料電池 (SOFC)

我が国の SOFC 開発プロジェクトとしては、2004 年までに 10kW 級のモジュールが開発され、引き続き都市ガス、石油系燃料利用の小・中規模分散型電源市場への投入に力点を置いたシステム技術開発計画 (2004 ～ 2007 年度) において、コージェネレーション向け (10 ～ 20kW 級) ならびにコンバインドサイクル向け (200kW 級) の開発が行われている。SOFC を小型電源として利用しようとする動きも盛んであり、1 ～ 5 kW 級システムによる家庭用のモニター実証も計画されている。

より大型の SOFC については、米国で積極的に開発されており、100kW 級常圧システムが、1997 年からオランダ、ドイツ、イタリアと設置場所を移しながら実証運転されている。本システムの発電効率は 46% (LHV、送電端) ある。また、2000 年から 2003 年にかけては 200kW 級加圧ハイブリッドシステムが開発され、3,300 時間の運転を行った。その際の発電効率は 53% (LHV、直流発電端) とされている。現在、同社は常圧 125kW 級システムの開発に注力している (図表 7)¹³⁾。一方、英国の Rolls - Royce 社も 1MW 級システムを目指した開発を進めており、2005 年には 60kW 級までの発電を実施した⁸⁾。MCFC と SOFC のこれまでの開発実績と現状の取り組みを図表 8 にまとめて示す。

図表7 高温型燃料電池の外観



出典：参考文献^{10, 13)}

図表8 高温型燃料電池の開発実績と現状の取組み

	日本		海外 (米国)	
	MCFC	SOFC	MCFC	SOFC
実証容量	150 ~ 1,000kW	1 ~ 40kW	250 ~ 2,000kW	5 ~ 200kW
実証効率 (HHV)	41% (送電端、300kWシステム※)	41% (送電端、1kW 級システム)	43% (送電端、250kW システム)	47% (スタック直流+ MGT 交流基準※)
実証寿命	5,000h (1MW システム) 12,000h (10kW スタック) 50,000h (セル、加圧)	7,000h (10kW スタック)	25,000h 以上 (250kW システム)	16,600h (100kW システム、 スタック交換有り) 70,000h (セル、常圧)
現状の適用先	事業用電源 (天然ガス)	分散電源 (都市ガス)	分散電源 (都市ガス)	分散電源 (都市ガス) 軍事・通信電源
IGFC 対応における課題	●大型化低コスト化	●不純物影響の解明 ●長寿命化 ●システム化 ●大型化低コスト化	●IGFC に適した方式見直し (加圧、外部改質) ●大型化低コスト化	●不純物影響の解明 ●長寿命化 ●システム化 ●大型化低コスト化

※は参考値 (計算による補正などによる)

参考文献¹⁰⁾ を元に科学技術動向研究センターにて作成

3 - 2

各国の関連する研究開発計画の比較

(1)米国の FutureGen 計画および SECA 計画

米国ではエネルギー省 (DOE) を中心に、CO₂ ゼロエミッション石炭ガス化発電プラントの実現を目指す、「FutureGen 計画」を推進中である。2003 年 2 月にブッシュ大統領により「FutureGen 計画に 10 箇年で総予算 10 億 US ドルを投入する」と表明されている¹⁴⁾。石炭ガスを燃料とし、H₂ 併産と CO₂ 回収・貯留も同時に行う発電システムの実証運転を目標としている。米国は石炭ガス化技術分野

においては、世界で最も開発に先行しており、オイルメジャーを中心に商用 IGCC 技術がすでに確立されている。高温型燃料電池については、FutureGen 計画の一環の計画である「SECA (Solid State Energy Conversion Alliance) 計画」¹⁵⁾ において、2000 年から DOE 傘下の研究機関である National Energy Technology Laboratory (NETL) が中心となって開発されている。SECA 計画では、2010 年までに定置用、移動用、軍用など広範な用途に共通して適用可能な 3 ~ 10kW のコアモジュールを開発予定で、大幅な低コスト化 (400US ドル / kW) を目標としている。SECA 計画には 6 つの企業チームが参加し、それぞれの特徴ある

SOFC 技術を適用した開発を独立して進めている。各企業チームは、国立研究所、大学、その他の研究機関によって支援される体制となっている。これら SECA 計画の成果は 2010 年以降、FutureGen 計画の石炭ガス化発電プラントに組み込まれる計画となっている。

この他、環境保護局と DOE において、石炭ガス化発電と CO₂ 回収・貯留に関する詳細なコスト検討を行っており、CO₂ 回収コストを 24US ドル / CO₂ - t と試算している¹⁶⁾。

(2)オーストラリアの COAL21 計画

オーストラリアは世界第一位の石炭輸出国である。エネルギー安全保障と環境調和を両立するクリ

ーンコールテクノロジー確立を目指し、連邦政府、州政府、石炭産業、電力業界が協働する形で、「COAL21計画」と呼ばれるプログラムを2004年3月に発表し、推進している¹⁷⁾。オーストラリアでは豊富な地下貯留のポテンシャルを生かし、炭素貯留リーダーシップフォーラム(CSLF)を主導している。CSLFでの成果を元に、中国、インドの両国と、CO₂地中貯留評価プロジェクトを開始している。ただし高温型燃料電池の研究開発はそれほど活発ではない。

(3)中国のGreenGen計画

中国の発電産業は95%が石炭火力に依存しており、クリーンコールテクノロジーに対する社会的要求が非常に大きい。90年代後半より、石炭ガス化技術の研究開発に取り組んできた結果、米国の技術をベースに噴流床二段ガス化方式の純国産技術確立に至っている^{18,19)}。これを元に石炭ガス化燃料電池複合発電システムと

CO₂分離回収貯留システムの実証化を目指した「GreenGen計画」と呼ばれる国家プロジェクトを2004年に開始した。さらに2005年には、中国華能集団公司在米国のFutureGen計画に参画を表明している。一方、クリーンコールテクノロジーの独自技術開発にも目を向けて、2006年2月に発表された「国家中長期科学技術発展計画」のなかでは、優先研究課題として位置づけられている。高温型燃料電池については、ようやく基礎研究が開始された段階である。

(4)日本の開発計画

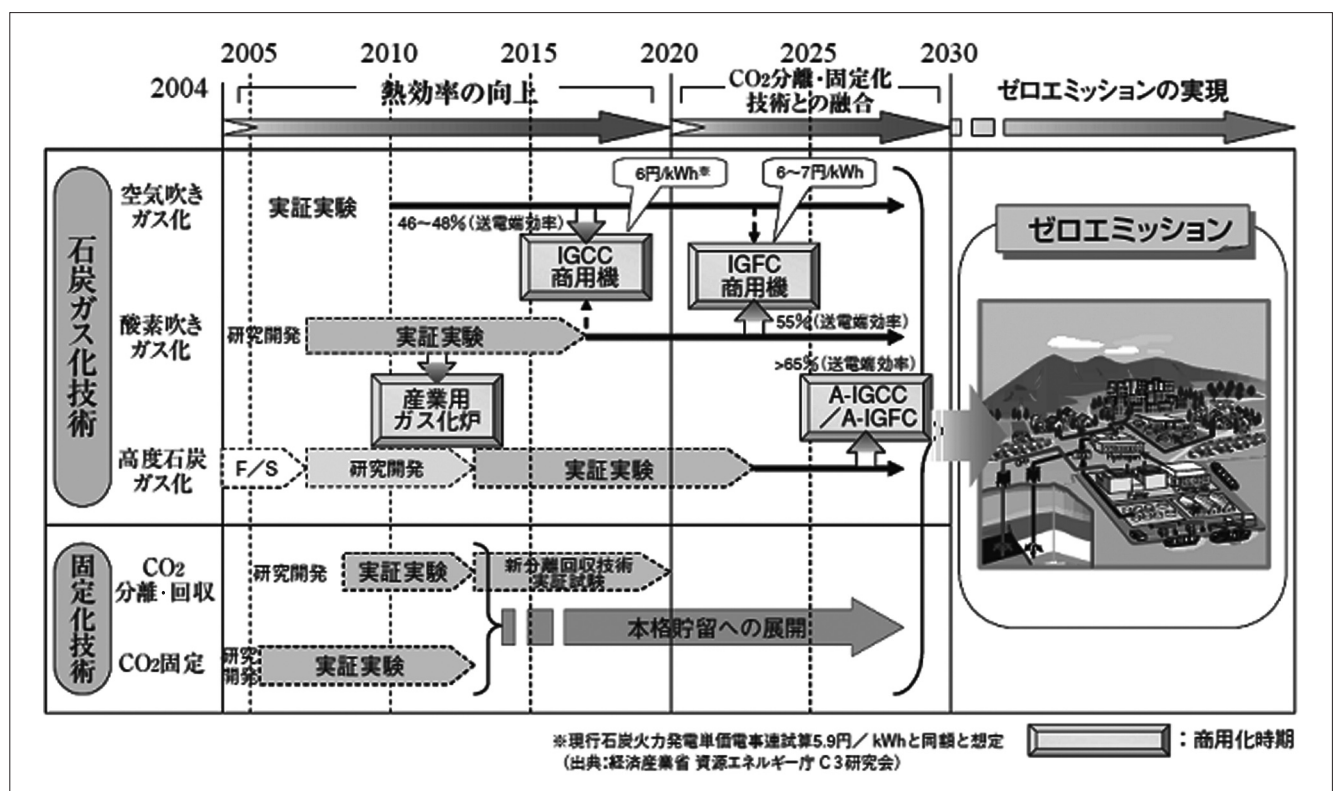
IGFCにも適用可能な我が国独自の石炭ガス化技術の確立を目指したEAGLE (Coal Energy Application for Gas Liquid & Electricity)プロジェクトが、NEDOと電源開発(株)の共同で1995年に開始された。2002年に石炭ガス化パイロットプラントの実証運転を開始し、これまでに当初計画通りの成果を順調に達成しており、高温型燃料電池

に適用可能なガス組成に精製するシステムを既に確立した。最終の2006年度には、次の検討段階に向けて大型化技術検証および米国産、オーストラリア産、中国産、インドネシア産に炭種を拡大して試験を実施しており、次年度以降、商用プラントに近い石炭処理量1000t/日級(IGCC換算15万kW相当)の実用化プラントの設計の検討に入る予定である²⁰⁾。石炭ガス化装置とCO₂分離回収装置を組合せた実証試験が2007年に開始される計画であるが、その先に高温型燃料電池を組み合わせるまでの道筋は明確にされていない。

また、CO₂地中貯留に関しては、(財)地球環境産業技術研究機構において実証試験が実施されているが²¹⁾、石炭発電プラントと組み合わせた実証試験計画は具体化していない。

資源エネルギー庁が2030年以降のゼロエミッション社会の実現に向けたロードマップを策定して

図表9 クリーンコールテクノロジーのロードマップ



出典：参考文献²²⁾

いるものの(図表9)²²⁾、現在までのところ、関連する要素技術開発が別個のプロジェクトとして実施されており、全体システムとしての実証計画は具体化していない。(1)~(3)に見てきたとおり、米国、オーストラリア、中国では石炭ガス化発電プラントとCO₂分離および地中貯留を一体化したクリーンコールテクノロジー全体の実証計画が具体的にスケジュール化されているのとは対照的である。

3 - 3

我が国における石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC) 実現に向けた課題

(1) CO₂ 削減手段としての位置付け明確化

IGFC が地球温暖化対策におけるCO₂削減手段としての有効性を示すには、CO₂分離回収とCO₂貯留まで含めたクリーンコールテクノロジー全体の将来像が明確化している必要があり、それには特にCO₂貯留技術に関する学術研究の進展が不可欠である²³⁾。

前項に示したとおり、米国ではCO₂削減手段としてのIGCCおよびIGFCの位置付けがはっきりしており、IGCC (IGFC) 発電プラ

ントとCO₂貯留を一体化した全体計画が具体化されている。

このような両国の状況の違いを生む背景を探る目的で、クリーンコールテクノロジー関連の科学技術論文の状況を比較する。80年代以降の日米のクリーンコールテクノロジー関連技術科学技術論文数を調べてみると、米国がトップで5,283件(シェア34%)であるが、日本も第二位の15,687件(シェア15%)で、それほど遜色ないレベルにある。しかし、個別の要素技術分野に注目して科学技術論文生産数の推移を見ると、日米両国では大きく異なる傾向が見られる(図表10)。

米国の傾向としては、従来は石炭ガス化、石炭液化分野が盛んであったが、近年はCO₂分離、CO₂貯留技術に研究の重点がシフトしていることがわかる。特にCO₂貯留技術については、米国の科学技術論文シェアは全世界の50%に達し、他国を大きくリードしている。米国でIGFCを含むクリーンコールテクノロジーがCO₂削減手段として有効性が認知されている要因に、CO₂貯留に関する研究の進展が少なからず寄与していると思われる。

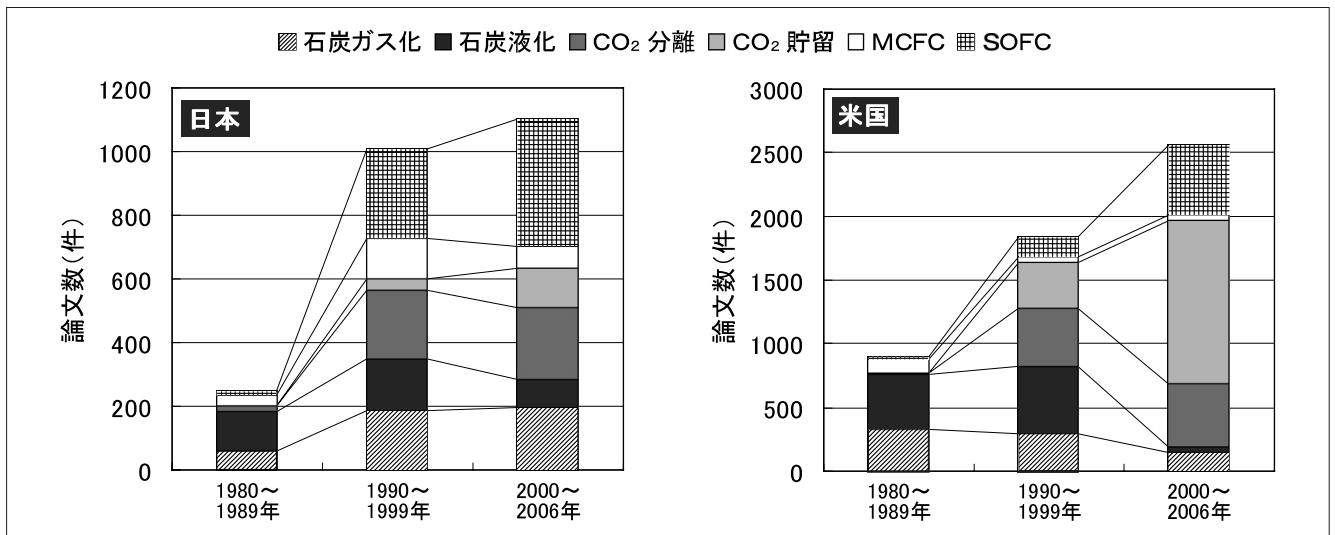
一方、日本においては、石炭液

化、石炭ガス化、高温燃料電池、CO₂分離の技術分野については米国と互角かむしろ凌駕している。しかしCO₂貯留に関しては、米国に大きく出遅れている。肝心のCO₂貯留技術の学術研究の進展が無いままであるがゆえに、IGFCを含むクリーンコールテクノロジーについて、CO₂削減手段としての位置付けが十分議論できない状況にあると思われる。

このように日本でCO₂貯留に関する研究が進展しない要因として、CO₂貯留技術には資源探査、地質学の知見が必要であるのに、その分野が産学ともに不足している点が挙げられる。米国には、これら分野でノウハウを豊富に蓄積する資源メジャーや基礎研究拠点が多数存在するが、日本には少ない。今後、日本でCO₂貯留技術を進展させるには、これらの分野の充実、あるいは海外の進んだ研究拠点と積極的に連携することが必要で、いずれにおいても政府の支援が必要と考えられる。

経済全体が低成長段階にある我が国では、事業用発電設備市場が既に飽和しており、電力各社の新規設備投資意欲は縮小している。近年の国内電力市場自由化は、この傾向に拍車をかけている。CO₂

図表10 日米のクリーンコールテクノロジー関連技術の科学技術論文シェア推移



Thomson社“Web of Science”データを元に科学技術動向研究センターにて作成
論文言語: All Languages

削減手段としてのIGFCの位置付けがはっきりしない限り、顧客サイドの電力各社が積極的にIGFCを採用する意欲も高まらない。それに伴い、高温型燃料電池関連メーカー側では、電力各社以外の需要家も期待できる中容量の分散電源用途向けの開発を優先させることとなり、IGFC向けの研究開発に資源が投入されにくい。

このような悪循環を断ち切り、IGFCを含むCCTの社会的意義を明確化し、全体計画を具体化する上で、海外との連携も視野に入れながらCO₂貯留関連の学術研究へ一層注力することが望まれる。

(2)高温型燃料電池の石炭ガス化燃料電池複合発電(IGFC)へ適用課題整理とマイルストーン明確化

IGFC実現には高温型燃料電池だけでなく、石炭ガス化技術、ガス精製技術やCO₂分離技術などの他の技術分野の進展と、関係者間の連携が不可欠である。現状我が国では、石炭ガス化技術やCO₂分離技術はIGCCを想定した実証化段階にあり、IGFC向けとして的高温型燃料電池の技術開発レベルに先行している。このような研究開発段階の不一致は避けられないものであるが、関係者間の対話と連携を進展しづらくしている面もある。

確かに高温型燃料電池の実用化への技術的ハードルはまだ高いが、特にMCFCについては、ベンチスケールでの耐久性や石炭ガス中の不純物影響把握、最適な水素製造方式の確立など、IGFCに向けた基礎段階での諸課題は、日本では既にクリアしている。次のステップであるパイロットプラントスケールのIGFCを実現する上で、高温型燃料電池に関して想定される技術課題を整理して図表11に示す。今後、クリーンコールテ

クノロジー関係者間で全体計画についての議論を深めるためには、高温型燃料電池の関係者が率先し、図表11に示した課題を克服する上で取るべき方策や開発ステップを明確化し、次ステップに移行する際のゲートとなる目標設定を明示したマイルストーン構築が必要である(図表12)。

現状IGFC向けのMCFCとSOFCはこれまで別個に開発が進められており、開発進展状況に差が生じている。特にSOFCについては、石炭ガス対応検討は殆どなされておらず、劣化メカニズ

ムや許容濃度について未解明の部分も多い。場合によっては材料開発まで遡った検討が追加が必要となることも想定される。この点、MCFCについては既にクリアしており、IGFC実現に向けて現時点ではMCFCの方がより現実的に近い位置にあると言える。IGFC向け高温型燃料電池の方式選定をいつまでにどのような基準で行うか明確化するにあたっては、基礎研究開発段階の進展を踏まえ、総合的な視点からの議論が必要である。

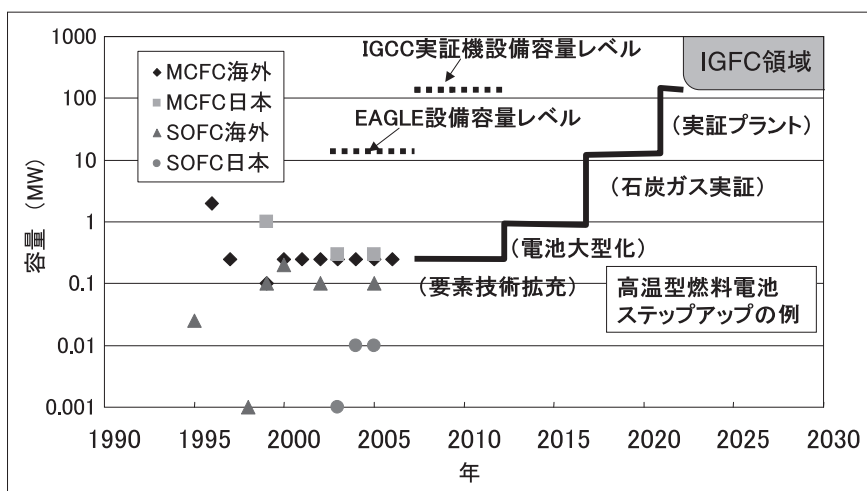
その上で、IGCCで先行する石

図表11 石炭ガス化燃料電池複合発電(IGFC)実現に向けた諸課題

	課題	内容
石炭ガス化装置	ガス化方式の最適設計	空気を石炭ガス化酸化剤に用いた場合に窒素分によって電池圧損が増大し、ガスリークの可能性。電池動作圧力と関連するガス化圧力とともに電池内ガス流路やシステム全体構成の再設計
	IGCC向けガス化装置からの改良点の明確化	燃料電池の性能を最大限に発揮できるシステム再設計とそれに合致するガス化設備の改良
	CO ₂ 分離機能付加による最適システム設計	CO ₂ 分離装置追加にともなうシステム再設計と改良
ガス精製装置	精密ガス精製方式の確立	電池許容レベルを達成する精密ガス精製方式の開発
燃料電池	石炭ガス中不純物許容濃度の解明	ppmオーダーの硫黄化合物、ハロゲン化合物、窒素化合物によるNi触媒機能への影響解明。耐不純物レベルの解明
	適切な電池形式選定	改質方式(内部/外部)も含めて、然るべき時点でMCFCとSOFCの比較・選定
	石炭ガス適用時のメタネーション現象解明	石炭ガス主成分のCOとH ₂ からのメタン生成・発熱反応による電池構造や運転条件の見直し

科学技術動向研究センターにて作成

図表12 パイロットプラントスケール実現までのマイルストーン例



科学技術動向研究センターにて作成

炭ガス化技術の進捗と、燃料電池の大容量化達成時期を見極めつつ、両者一体のシステム構築を具体的な計画の早期立案が望まれる。これによって IGFC の方向性が明示され実用化が促進される。

IGFC は先の長い技術であり、石炭ガス化関連技術開発と燃料電池開発との協調を取りながら開発のステップを明示することにより、技術進展の段階にあわせた息の長い開発支援が初めて可能となるであろう。

(3) 関連する重要技術開発の更なる進展

IGFC の実現には、高温型燃料電池のみならず幅広い周辺技術開発の進展が不可欠であるが、石炭ガス化技術についてはより一層の効率化が望まれる。現在、日本での石炭ガス化技術開発は IGCC 開発の一環として、IGFC に先行して進められており、IGFC にはそれら成果の活用が期待できる。

特に EAGLE 計画で開発中の「二段旋回流型ガス化炉」は、米国の石炭ガス化技術と比較して、幅広い炭種対応可能である点で優れる。

また、さらに一歩進んだ次世代型の石炭ガス化技術として、エクセルギー回収型ガス化技術が考案されており、これを組み合わせた Advanced IGFC (A - IGFC) では、石炭を低温 (700 ~ 900℃) でガス化し、ガス化に必要な熱を高温ガスタービンや燃料電池の排熱を再利用することで発電効率が 70% に達すると試算されている (図表 13)^{24, 25)}。2007 年度から、東京大学を中心に、この分野の基礎研究が開始される予定であるが、ここでは機械工学、材料工学、計算機科学、燃焼工学等、幅広い学術分野の知見を集積した形での研究活動が不可欠である。

(4) 国際協力の可能性検討

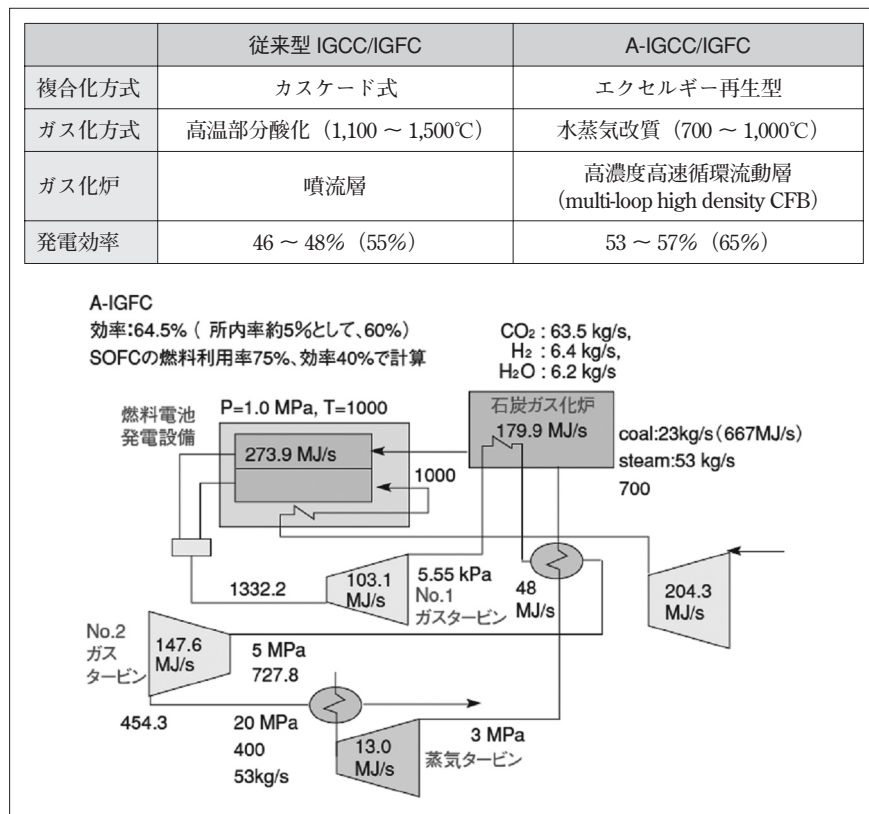
今後、日本がこれまで進めてきたクリーンコールテクノロジーに

関する技術蓄積を元に、中国を初めとする石炭消費大国との連携をより深め、IGFC 技術開発の国際協力を進めることが望まれる。中国、インドを中心にアジア諸国では、急激な経済成長とともに石炭への依存拡大が見込まれている。エネルギー確保や環境保全の面から、IGFC を含むクリーンコールテクノロジーは非常に重要な技術に位置づけられている。他のアジアの石炭消費国への IGFC 導入は、同じアジア域内に位置する我が国にとっても、エネルギー需給や地球環境問題の観点で望ましい。これらアジア諸国では、電力需要の拡大とともに、石炭発電インフラの構築がこれから急激に進むことが予測されるため、日本で開発したクリーンコールテクノロジーの導入先という面でも、日本国内以上に大きく期待できる。

その際、クリーンコールテクノロジーは研究開発途上の段階にあることから、円滑な協力関係の確立には協力先での知的財産権保護制度の確立が不可欠である。我が国として開発段階のどの時点でどのような協力が可能か整理した上で、将来クリーンコールテクノロジーを必要とするアジア諸国と、技術面および制度面を含む包括的な対話が望まれる。

また、米国が主催し、日本、韓国、豪州、中国、インドの計 6 カ国が参加する「クリーン開発と気候に関するアジア太平洋パートナーシップ (Asia - Pacific Partnership on Clean Development and Climate : APP CDC)」では、クリーンコールテクノロジーに関するタスクフォースを設置しており、次回 2007 年の閣僚会議までに技術開発プログラム策定や CO₂ 貯留の促進を目標としている²⁶⁾。このように活発化する国際的な活動に関して、積極的に貢献していく必要がある。

図表 13 Advanced - IGFC (A - IGFC) の構成と特徴



出典：参考文献²⁵⁾

4 おわりに

石炭ガス化燃料電池複合発電(IGFC)は、石炭を燃料とする発電方式の中で、最も高効率でCO₂排出削減につながる方式である。昨今の原油価格の高騰と、途上国における今後のエネルギー需要拡大に対応し、我が国のエネルギーセキュリティ、地球環境保全の観点から、開発に力を入れるべき技術の一つと言える。しかしながら、我が国ではクリーンコールテクノロジーに関わる個別の要素技術を統合した全体システムの構築にいたる道筋が明確でなく、実証計画も具体化していない。

今後、IGFCの早期実現に向けて、以下の提言をしたい。

(1) CO₂削減手段としての位置付け明確化

IGFCが地球温暖化対策におけるCO₂削減手段として有効であることを示すには、CO₂分離回収とCO₂貯留まで含めたクリーンコールテクノロジー全体の将来像を明確化する必要がある、それには日本でも不足しているCO₂貯留技術に関する学術研究の進展が不可欠である。米国ではCO₂貯留に関する学術研究進展の結果、CO₂削減手段としてクリーンコールテクノロジーおよびIGFCの位置付けが社会的に認知され、国のトップダウンで、IGCC(IGFC)発電プラントとCO₂貯留を一体化した全体計画が具体化されており、我が国でも同様の全体計画の具体化が必要である。その中で、IGFCの位置付けを明確化すべきである。今後、日本におけるIGFCを含むクリーンコールテクノロジーがCO₂削減手段として社会的認知を獲得するには、先ず前提として、日本で遅れているCO₂貯留に関する学術研究を一層活発化することが不可欠である。

(2) IGFCに向けた高温型燃料電池の課題整理とマイルストーン明確化

IGFC実現には高温型燃料電池だけでなく、石炭ガス化技術、ガス精製技術やCO₂分離技術などの他の技術分野の進展と、関係者間の連携が不可欠である。現状、石炭ガス化技術やCO₂分離技術はIGCCを想定した実証段階にあり、IGFC向けの高温型燃料電池開発に先行している。このような研究開発段階の不一致は避けられないものであるが、関係者間の対話と連携を進展しづらくしている面もある。高温型燃料電池の一部では実際にはベンチスケールでの耐久性や石炭ガス中の不純物影響把握など、IGFCに向けた基礎段階での諸課題は既にクリアしている。今後、クリーンコールテクノロジー関係者間で全体計画についての議論を深め、次のステップであるパイロットプラントスケールIGFCを実現するためには、高温型燃料電池の関係者が率先し、高温型燃料電池に関して想定される技術課題を整理し、課題を克服する上で取るべき方策や開発ステップを明確化し、次ステップに移行する際のゲートとなる目標設定を明示したマイルストーンの構築が必要である。

(3) 関連する重要技術開発の更なる進展

IGFCの実現には、高温型燃料電池のみならず幅広い周辺技術開発の進展が不可欠である。とりわけ石炭ガス化技術は全体の発電効率を左右する重要な技術であることから、より一層の効率向上に向けた研究開発が望まれる。この分野の基礎研究開発を進展するには、機械工学、材料工学、計算機科学、燃焼工学等、幅広い学術分

野の知見を集積した形での研究活動が不可欠である。

(4) 国際協力の可能性検討

これまで進めてきた技術蓄積を元に石炭消費国との連携を深め、IGFC技術開発に関する国際協力を進めていくことが必要である。その際、IGFCをはじめとするクリーンコールテクノロジーは研究開発途上の段階にあり、円滑な協力関係の確立には協力先での知的財産権保護制度の確立が不可欠である。我が国として開発段階のどの時点でどのような協力が可能か整理した上で、技術面および制度面を含む包括的な対話が望まれる。

謝辞

本稿の執筆にあたり、東京大学堤敦史助教授、東京工業大学 未包哲也助教授、経済産業省資源エネルギー庁資源・燃料部石炭課には、全般にわたって貴重なご意見、ご助言ならびに資料を提供いただきました。独NEDO環境技術開発部 矢内俊一主任研究員、鴻上享一主査、燃料電池・水素技術開発部 氏家孝主任研究員、(財)石炭エネルギーセンター企画調整部 新井康夫部長、堺義明部長代理、技術開発部 秋本明光部長、(財)地球環境産業技術研究所 大隈多加志 主席研究員、(株)クリーンコールパワー研究所技術部 坂田裕之課長代理には貴重な資料と参考情報を提供いただきました。ここに関係の皆様へ厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本エネルギー経済研究所、「石炭需給・価格の動向と今後の利用について」、2006年1月
- 2) 日本エネルギー経済研究所、「ア

- ジア／世界エネルギーアウト
ック 2006」、2006 年 10 月
- 3) 経済産業省資源エネルギー庁、「新・国家エネルギー戦略」、2006 年 5 月
 - 4) IPCC 「CO₂ 回収・貯留に関する特別報告書」、2006 年 9 月
 - 5) 新井「米国の石炭ガス化事業化動向について」、JCOAL Journal vol. 4 (2006 年 3 月)、p7 : http://www.jcoalar.jp/publication/jcoajournal/dfiles/JCOAL_Journal-3.pdf
 - 6) Harry Audus, 「An Update on CCS : Recent Developments」, 2nd IEA Workshop on Legal Aspects of Storing CO₂, 2006 年 10 月 17 日 : <http://www.iea.org/Textbase/work/2006/carbon/4.pdf>
 - 7) 電中研レビュー第 44 号「石炭ガス化複合発電の実現に向けて」、2001 年 10 月
 - 8) 本藤ら、「ライフサイクル CO₂ 排出量による発電技術の評価—最新データによる再推計と前提条件の違いによる影響—」、電力中央研究所報告 研究報告 Y99009、2000 年
 - 9) 内山洋司「私たちのエネルギー現在と未来」、培風館、1996 年
 - 10) 電中研レビュー第 51 号「燃料電池発電技術」、2004 年 3 月
 - 11) 独NEDO 技術開発機構「愛・地球博パンフレット」 : http://www.nedo.go.jp/expo2005/file/for_general_j.pdf
 - 12) FCE 社ホームページ : <http://www.fce.com/>
 - 13) Lucerne Fuel Cell Forum Abstracts 2006
 - 14) Victor Der, 「FutureGen - “Zero Emission” Energy from coal」, 2006 年石炭国際会議予稿集、(財)石炭エネルギーセンター、2006 年 9 月 5 日 : <http://www.jcoalar.jp/publication/kokusaikaigi/pdf/CCD2006/>
 - 15) <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/distgen/seca/>
 - 16) US EPA, 「Environmental footprints and costs of Coal-based IGCC and pulverized coal technologies」, 2006 年 7 月 : <http://www.epa.gov/airmarkets/articles/IGCCreport.pdf>
 - 17) John Karas, 「Low Emission Technology for coal: The Australian Contribution」, 2006 年石炭国際会議予稿集、(財)石炭エネルギーセンター、2006 年 9 月 5 日 : <http://www.jcoalar.jp/publication/kokusaikaigi/pdf/CCD2006/CCD2006SymposiumE.pdf>
 - 18) 川村「中国における石炭ガス化事業の動向」、日本エネルギー学会誌、第 85 巻第三号 (2006 年 3 月)、p.179
 - 19) Gao Shinwang 「Near Zero Emission Coal Based Power Generation in China - GreenGen Project」 2006 年石炭国際会議予稿集、(財)石炭エネルギーセンター、2006 年 9 月 5 日 : <http://www.jcoalar.jp/publication/kokusaikaigi/pdf/CCD2006/CCD2006SymposiumF.pdf>
 - 20) 鈴木、「EAGLE プロジェクトの現況」 2006 年石炭国際会議予稿集、(財)石炭エネルギーセンター、2006 年 9 月 5 日
 - 21) RITE CO₂ 地中貯留プロジェクトホームページ : <http://www.rite.or.jp/Japanese/project/tityu/tityu.html>
 - 22) 経済産業省資源エネルギー庁クリーン・コール・サイクル (C3) 研究会中間報告、「2030 年を見据えた新しい石炭政策のあり方」、2004 年 6 月
 - 23) OECD/IEA, 「Discussion paper for 2nd IEA/CSLF Workshop on legal aspects of carbon capture and storage」, 2006 年 10 月 17 日 : <http://www.iea.org/Textbase/work/2006/carbon/2.pdf>
 - 24) NEDO, JCOAL 「日本のクリーンコールテクノロジー」 : <http://www.jcoalar.jp/cctinjapan/cctinjapan.html>
 - 25) 堤、「エクセルギー再生技術による次世代 IGCC/IGFC」、CCT Journal 第 11 号、2004 年 8 月 : http://www.brain-c-jcoal.info/publication-files/oldccuj/cct-journal/CCT_Journal-11.pdf
 - 26) 経済産業省、「クリーン開発と気候に関するアジア太平洋パートナーシップ第 1 回閣僚会合結果について」、2006 年 1 月 12 日 <http://www.meti.go.jp/press/20060112003/app-set.pdf>

執筆者



客員研究官
渡辺 隆夫

(財)電力中央研究所 エネルギー技術研究所
<http://criepi.denken.or.jp/jp/index.html>

工学博士。燃料電池の性能評価技術、高性能化技術、システム化技術の開発に従事。専門は電気工学、電気化学。現在、燃料電池を中心としたエネルギー・環境分野の技術開発を進めている。



環境・エネルギーユニット
前田 征児

科学技術動向研究センター
<http://www.nistep.go.jp/index-j.html>

工学博士。企業にてエネルギー関連の貯蔵・変換システム開発および事業開発に従事。専門は電気化学、材料工学。現在、エネルギー・環境分野の科学技術政策およびイノベーションマネジメントに興味を持つ。