

## <概要>

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が、CO<sub>2</sub>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%と高効率が見込まれ、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のキーテクノロジーの一つが高温型燃料電池で、熔融炭酸塩形燃料電池（MCFC）および固体酸化物形燃料電池（SOFC）の二方式が検討されている。

ここでは、IGFCの技術概要と高温型燃料電池の研究開発動向をまとめる。

## <更新年月>

2007年09月 （本データは原則として更新対象外とします。）

## <本文>

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、石炭は二酸化炭素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）の実現により、二酸化炭素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；Integrated Coal Gasification Fuel Cell Combined Cycle）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。

### 1. 各種の石炭火力発電方式の構成と特徴

先ず、各種の石炭火力発電方式の構成と特徴を比較する（図1）。現在、運用されている石炭火力発電所の大部分は、石炭を直接燃焼させる微粉炭火力方式である。石炭ガス化複合発電（IGCC；Integrated coal Gasification Combined Cycle）は石炭を直接燃焼させず、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。わ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。これらに対し、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、発電効率は微粉炭火力やIGCCを大きく上回る50～55%に達することから、「究極の石炭利用発電技術」と呼ばれている（図2）。

### 2. 石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）の特徴

IGFCには、以下に述べる特長がある。

- 1) 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。
- 2) 環境汚染物質や二酸化炭素の分離除去が容易・・・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、排ガス中に二酸化炭素が高濃度に含まれるため、分離装置により二酸化炭素を相対的に安価に分離除去可能である。分離した二酸化炭素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、温室効果ガスのゼロエミッション化に近づけることができる。

石炭を燃料とする各種発電方式の中ではIGFCは二酸化炭素分離・貯留技術（CCS；Carbon

Dioxide Capture AND Storage) との組合せにおいて、最も排出原単位が小さい (図3)。

### 3. 高温型燃料電池の開発

IGFCの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、燃料の持つ化学的エネルギーを、熱エネルギーの形態を介さずに直接電気エネルギーに変換できる。電解質の種類によって大きく高温型と低温型に分けられるが、IGFCのような大型発電プラント用には、以下の理由で、高温型が適している。

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。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。

高温型燃料電池の方式としては、熔融炭酸塩形燃料電池 (MCFC; Molten Carbonate Fuel Cell) と固体酸化物形燃料電池 (SOFC; Solid Oxide Fuel Cell) がある。それぞれ最適な動作温度があり、MCFCが約600~670℃、SOFCでは約750~1000℃であるが、いずれも高温排ガスを利用した複合サイクル化が可能である。わが国では、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) 熔融炭酸塩形燃料電池 (MCFC)

わが国では、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4)

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。

大型のMW級としては、わが国では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。

IGFC向けの石炭ガスの適用に関しては、わが国では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)

わが国の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、1~5kW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、米国のWestinghouse Electric社 (現、Siemens Westinghouse Power社、SWP社) 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5)。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。

MCFCとSOFCのこれまでの開発実績と現状の取り組みを (図6) にまとめて示す。

### <関連タイトル>

[日本の石炭情勢 \(01-03-01-01\)](#)

[石炭利用技術の新体系 \(01-04-02-04\)](#)

[石炭ガス化燃料電池複合発電の研究開発状況（2）各国の研究開発計画および日本の課題 \(01-04-02-06\)](#)

---

### <参考文献>

（1）渡辺隆夫、前田征児：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、科学技術動向、No.68、9-19（2006年11月）

（2）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）

（3）新井康夫：米国の石炭ガス化事業化動向について、JCOAL Journal vol.3、7-10（2006年1月）

（4）（財）電力中央研究所：石炭ガス化複合発電の実現に向けて、電中研レビュー、第44号（2001年10月）

（5）本藤ら：ライフサイクルCO<sub>2</sub>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）

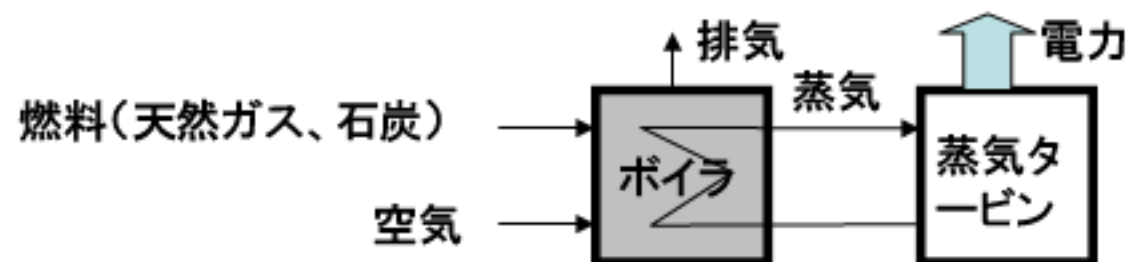
（6）（財）電力中央研究所：燃料電池発電技術（MCFC 実用化への挑戦）、電中研レビュー、第51号（2004年3月）

（7）（独）NEDO技術開発機構：2005年日本国際博覧会新エネルギー等地域集中実証研究、パンフレット

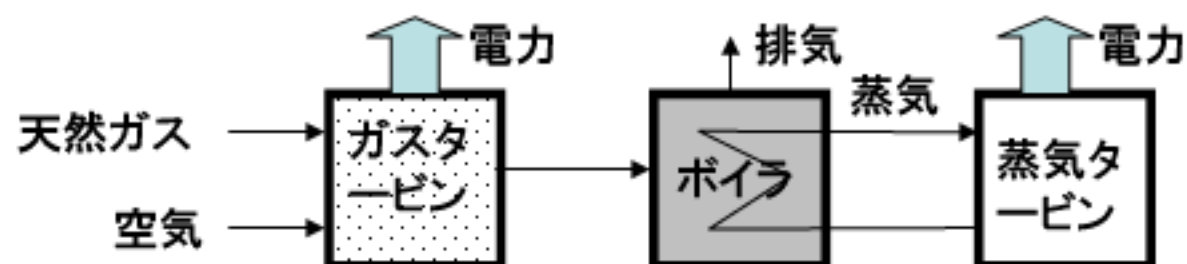
（8）IPCC：CO<sub>2</sub>回収・貯留に関する特別報告書（2006年9月）

---

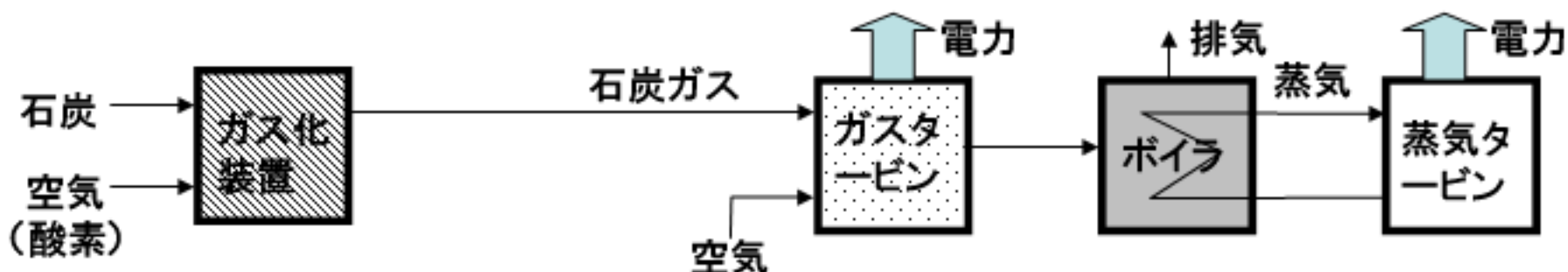
従来火力



天然ガス複合  
(ACC)



石炭ガス化複合  
(IGCC)



石炭ガス化燃料  
電池複合(IGFC)

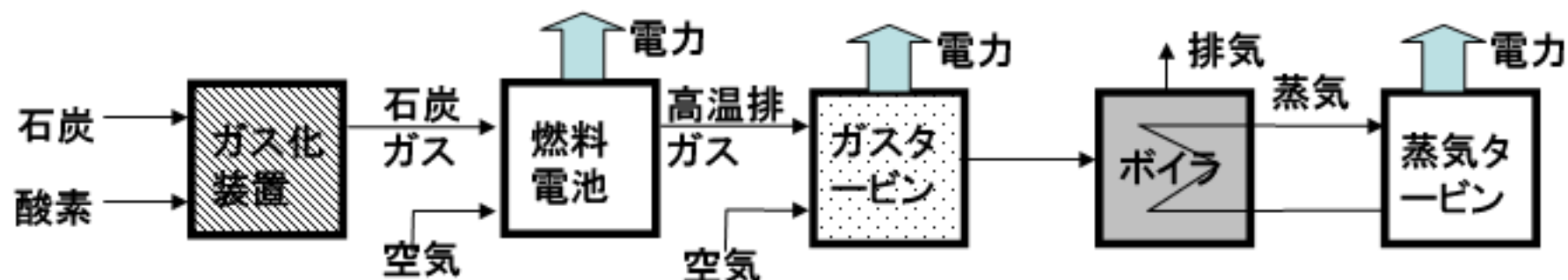


図1 各種石炭火力発電方式の比較

[出典](財)電力中央研究所:石炭ガス化複合発電の実現に向けて、電中研レビュー、第44号、13(2001年10月)、  
<http://criepi.denken.or.jp/jp/pub/review/No44/>



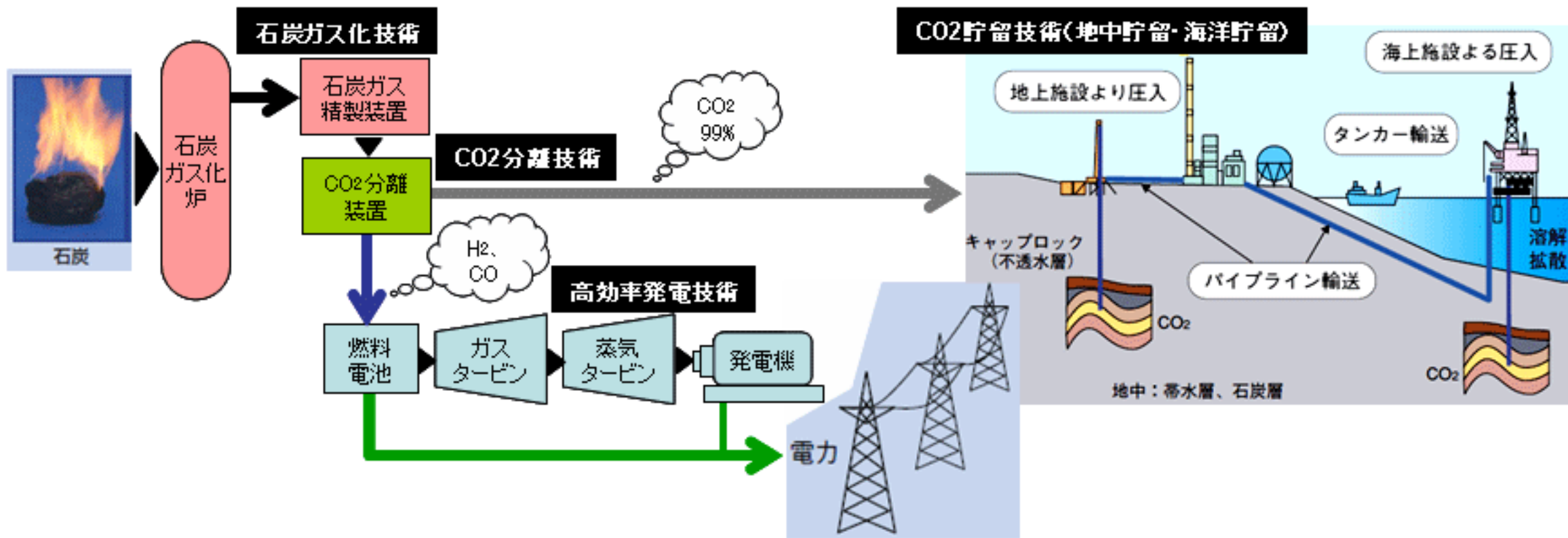
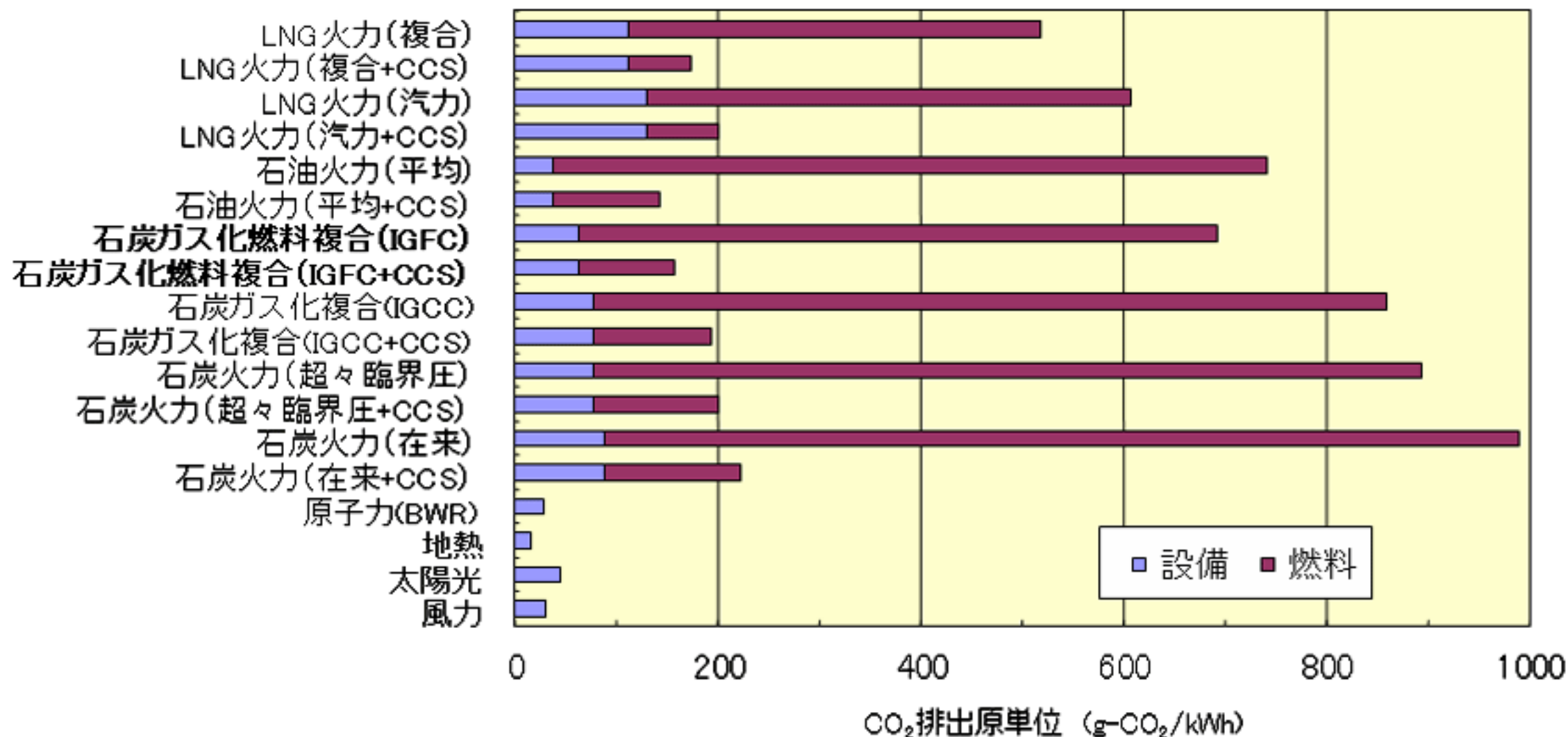


図2 石炭ガス化燃料電池複合発電(IGFC)のシステム構成

[出典] 渡辺隆夫、前田征児: 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、  
科学技術動向、No.68、11(2006年11月)



下記の出典をもとに作成した

### 図3 各種発電方式の二酸化炭素排出原単位の比較

[出典]本藤ら:ライフサイクルCO<sub>2</sub>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)



**図4 熔融炭酸塩形燃料電池(MCFC)  
300kW級システムの外観**

**[出典] 渡辺隆夫、前田征児：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、科学技術動向、  
No.68、13(2006年11月)**





図5 固体酸化物形燃料電池(SOFC)  
125kW級システムの外観

[出典] 渡辺隆夫、前田征児: 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、科学技術動向、No.68、13(2006年11月)



	日本		海外(米国)	
	MCFC	SOFC	MCFC	SOFC
実証容量	150～1000kW	1～40kW	250～2000kW	5～200kW
実証効率 (HHV)	41%(送電端、300kWシステム、計算値)	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交流基準による計算値)
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に適した方式採用(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

図6 国内外の高温型燃料電池の開発状況

[出典] 渡辺隆夫、前田征児：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、科学技術動向、No.68、13(2006年11月)