

# 石炭ガス化複合発電 (IGCC) の最新事情と課題

## エネルギーセキュリティ確保と地球温暖化対策の両立

常磐共同火力(株)勿来発電所 石橋喜孝

原子力発電が困難になっている現在、ベースロード電源として石炭火力の稼働率が増加するとともに、新規の石炭火力建設計画も増えている状況にある。しかしながら石炭火力発電にはCO<sub>2</sub>排出量が多いと言う弱点があり、これを克服するために高効率な石炭火力発電技術が求められている。石炭ガス化複合発電 (IGCC: Integrated coal Gasification Combined Cycle) がこの選択肢となり得るか、技術の現状を解説する。

**KEYWORDS : IGCC, coal, gasification, combined cycle, air blown, Clean coal, high efficiency, Nakoso, Joban Joint Power Company**

### I. はじめに

石炭は、他の化石燃料である石油や天然ガスに比べて埋蔵量が多く、かつ世界中に広く分布しているため、価格が低廉であるとともに価格の変動も少ない。今でも世界の発電の約40%は石炭火力が占めている。

日本でも昭和30年代の高度成長は、日本各地で産出された国内炭によって支えられたが、その後、低廉な石油が輸入されるようになり、一時は火力発電は石油に取って変わられたものの、1973年に始まった石油ショック以降、安価な海外炭を使用する石炭火力が復活し、現在は日本の電力量の約3割を担っている。

日本は少資源国である事から、少しでも化石燃料の使用量を減らすべく、どの国より省エネ・省資源に取り組んできた。従来型の火力発電では、蒸気の温度と圧力を高めれば高めるほど効率が向上するため、この開発を進めてきた。例えば超々臨界圧発電 (USC) 技術は、日本が開発した技術であり、既に世界に広く普及している。

さらなる高効率を達成させるためには、LNG火力で主流となっている複合発電を石炭火力の世界にも適用する事であるが、石炭をガス化してこれを可能とする技術がIGCCである。本解説では、日本におけるIGCCの技術開発状況、課題について述べることにする。

なお、空気吹きIGCCのパイロットプラント試験、実証プラント試験は、福島県いわき市にある常磐共同火力(株)勿来発電所構内において行われた。勿来発電所は、常磐炭鉱の低品位炭を使用するために作られた発電所である

が、石炭設備や送電線などのインフラが整っていたことに加え、かつて総合排煙処理システムの開発、石炭流体化燃料であるCWM (Coal Water Mixture) の開発導入が行われた場所であり、石炭の新技术開発への対応力があると評価され、IGCC開発サイトに選定された。



図1 常磐共同火力(株)勿来発電所全景

### II. 高効率石炭火力発電技術の変遷

汽力発電 (ボイラ+蒸気タービン) の歴史は、19世紀後半の産業革命当時に始まったが、当初は圧力と温度が低い亜臨界圧の蒸気条件であったため、発電効率は10%に満たないものであった。その後、蒸気圧力、蒸気温度の上昇と共に、発電効率も徐々に30%台まで向上し、1970年代には始めて超臨界圧 (SC: Super Critical) のボイラが誕生、発電効率は40%程度まで向上した。2000年以降は超々臨界圧 (USC: Ultra Super Critical) のボイラが日本で開発され、現在はこれが主流となっている。現在のUSCは蒸気温度600℃級が主流であるが、700℃級の

"The Latest status and subject of the Air-blown IGCC" :  
Yoshitaka Ishibashi (2015年5月〇〇日受理)

USC (A-USC : Advanced USC) の開発も進められており、これが実現できれば45%以上の発電効率が可能となる。ただし700℃に耐え、かつ経済的に成立する金属材料の開発が課題となっている。

一方、LNG (液化天然ガス) の世界ではガスタービンと蒸気タービンを組み合わせた高効率の複合発電 (CC : Combined Cycle) が1985年に始まり、現在はLNG火力のほとんどが複合発電になっている。石炭の世界でも複合発電の導入を目指し、まずは加圧流動床複合発電 (PFBC : Pressurized Fluidized Bed Combustion) が導入されたが、大型の流動床技術は難しく、日本に3基導入されたのみでその後は普及していない。現在、最も期待されている高効率石炭火力発電技術が、噴流床方式の石炭ガス化複合発電 (IGCC : Integrated coal Gasification Combined Cycle) であり、送電端の発電効率が48~50%が期待できる。

### III. IGCC開発の歴史

#### 1. 欧米でのIGCC開発

表1に示す通り、IGCC実証試験開発は、1994年頃、オランダ、スペイン、米国でほぼ同時期に始まった。当時はこれらのプロジェクトは世界のIGCC 4大プロジェクトと呼ばれた。これらIGCCの共通の特徴は、酸素で石炭をガス化する酸素吹きガス化炉を用いている事である。

表1 世界のIGCCプロジェクト

プロジェクト	Buggenum オランダ	Puertollano スペイン	Wabash River 米国	Tampa 米国	Nakoso 勿来 日本
ガス化炉形式	酸素吹き 乾式給炭 Shell	酸素吹き 乾式給炭 Plenflo	酸素吹き 湿式給炭 E-Gas™	酸素吹き 湿式給炭 GE	空気吹き 乾式給炭 MHI
石炭消費量	2,000 t/d	2,600 t/d	2,500 t/d	2,500 t/d	1,700 t/d
発電端出力 (GT温度)	284 MW 1,100℃級	335 MW 1,300℃級	297 MW 1,300℃級	315 MW 1,300℃級	250MW 1,200℃級
実証試験 開始時期	1994年1月	1997年12月	1995年10月	1996年9月	2007年9月

酸素吹きの石炭ガス化炉は化学工業の世界では100年以上の歴史があり、アンモニア製造、メタノール製造、ガソリン合成等に広く実用化されている。欧米で開発が進んでいるIGCCのガス化炉は全て化学工業用のガス化炉を転用した酸素吹き方式である。化学工業では製品の純度が重要であるため、不純物としての窒素の混じらない酸素吹き方式を使用してきたが、発電用途に使用した場合には、酸素製造に多くの動力を使用してしまうため、送電端の発電効率が低くなってしまふ。

一方、日本でのIGCC開発は、欧米に比べて約10年遅れたものの、酸素製造動力が不要で、より高い送電端効率が得られる空気吹きガス化方式を開発・採用した。

#### 2. 国内でのIGCC開発

空気吹きIGCCの開発は、下記の3ステップで行われた。

- ① 2 t /日規模の小型ガス化炉試験 (1983~1995)  
実施主体：電力中央研究所、三菱重工
- ② 200 t /日規模のパイロットプラント試験  
実施主体：IGC研究組合 (1991~1996)  
費用負担：国補助90%、残りは電力会社負担
- ③ 1700 t /日規模、出力250MWの実証試験 (2007~2012)  
実施主体：(株)クリーンコーポラー研究所  
費用負担：国補助30%、残りは電力会社負担

①→②へのスケールアップ比率は100倍と大きかったため、②のパイロットプラント試験では様々なトラブルが発生したが、ガス化炉の改造を行いながら、最終的には安定運転を達成した。

②→③へのスケールアップ比率は8.5倍であり、10倍以内の妥当なスケールアップ比率であったため、③のIGCC実証試験はほぼ計画通り順調に進捗した。②と③の試験は、常磐共同火力(株)勿来発電所の構内で行われた。

空気吹きIGCCの開発は約32年間に亘って進められてきたが、商用機設計に必要な、信頼性、環境性、高効率、炭種適合性、経済性、運用性等に関する全てのデータを取得できたことから、平成25年3月末をもって実証試験を終了することになった。

研究終了後、(株)クリーンコーポラー研究所は常磐共同火力に吸収合併され、出力250MWのIGCC実証機は商用転用され、現在は勿来発電所10号機として稼働を継続している。(本プラントは海外から「勿来IGCC」と呼ばれている。)

なお、国内では(株)大崎クールジェンによって、酸素吹きIGCCの開発も進められている。こちらは単なる高効率発電だけでなく、水素製造や燃料電池複合発電 (IGFC) と言った多目的の将来技術の開発も目的としているため、酸素吹きIGCCを選択している。現在、広島県の大崎上島で166MW級のIGCCプラントを建設中である。

### IV. 空気吹きIGCCの設備概要と特徴

#### 1. IGCCの設備概要

IGCCは、ガス化炉設備、ガス精製設備、複合発電設備から構成され、全体系統を図2に示す。

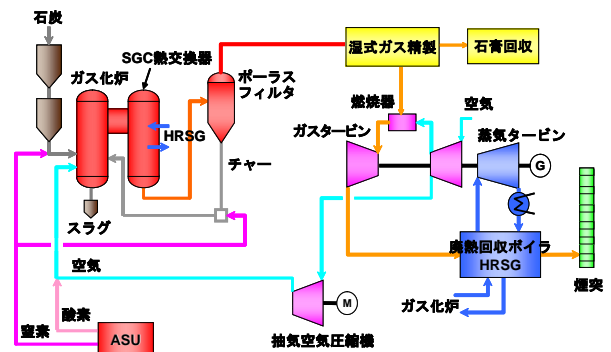


図2 空気吹きIGCCの系統図

ガス化炉は約30気圧と高圧であり、石炭は微粉炭機で粉碎された後、窒素で約30気圧に加圧され、ガス化炉内に投入される。窒素で加圧するのは石炭の自然発熱を防止するためであり、この窒素を生成するため空気分離設備 (ASU) を持っている。

石炭はガス化炉内で石炭ガスとなり、ガス精製設備で不純物が除去された後、ガスタービンの燃焼器で燃焼される。ガスタービンの排気ガスは排熱回収ボイラを通過して煙突から排出される。この排熱回収ボイラで発生する蒸気、およびガス化炉のSGC熱交換器 (SynGas Cooler) で発生する蒸気を合わせて蒸気タービンを駆動する。ガスタービンと蒸気タービンの二つのパワーで発電機を回す。すなわち複合発電を行う。

LNG複合発電では通常ガスタービンと蒸気タービンの出力比率は約2:1であるが、IGCCではガス化炉側からも蒸気が発生するため、この比率が約1:1となる。

## 2. ガス化の原理

石炭のガス化反応とは部分燃焼である。石炭中の炭素は完全燃焼すれば全てCO<sub>2</sub>になるが、空気比0.4程度で部分燃焼させることにより、カロリーを持ったCOガスとH<sub>2</sub>ガスが生成し、ガスタービンの燃料となる。

ガス化反応を起こすためには1,800℃程度の高温が必要となる。酸素吹きガス化炉であれば高温の維持が容易であるが、空気吹きでは難しい。これを可能とするため、ガス化炉を燃焼室とガス化室に分けた二室二段噴流床方式の空気吹きガス化炉を開発した。(図3参照)

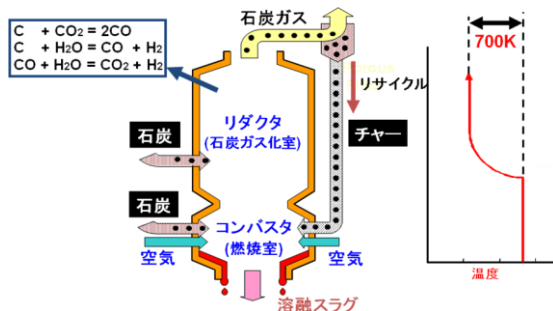


図3 空気吹き石炭ガス化の原理

石炭中には通常10%程度の灰分が含まれるが、灰分は約1,800℃に維持した燃焼室で溶融し、スラグとして排出される。燃焼室の炉壁保護には、耐火材ではなく、セルフコーティング方式を採用している。すなわち溶けたスラグが旋回流によって炉壁に付着し、高温の輻射熱から炉壁を守る。ガス化反応はガス化室で起こるが、この反応は吸熱反応であるため、約700℃の温度低下がある。

また、ガス化反応は部分燃焼であるため、石炭はガス化室を一回通過するだけでは完全ガス化は出来ず、未燃分としてチャーが残る。このチャーはフィルターで分離し再びガス化炉に戻すことにより、全ての炭素分をガス化する。

## 3. ガス精製の原理

ガス精製は湿式を採用している。ガス化炉からの石炭ガス中には、窒素化合物 (NH<sub>3</sub>)、硫黄化合物 (H<sub>2</sub>S)、塩素化合物 (HCl) 等の不純物が含まれており、これらを取り除かないとガスタービンの燃料とする事は出来ない。水溶性のNH<sub>3</sub>とHClは水で、H<sub>2</sub>Sはアミン吸収液で除去する。吸収したH<sub>2</sub>Sは石膏に変換し売却できる。

乾式のガス精製が採用できればより高い効率が得られるが、まだ技術課題が残っており、湿式を採用している。

## 4. IGCCのメリット

IGCCには、下記の5つのメリットがある。

### (1) 発電効率の向上

IGCCの発電効率は、採用するガスタービンの燃焼温度が高いほど上昇する。燃焼温度1500℃級のガスタービンを採用した場合には、従来の微粉炭火力に対して、約2割の送電端効率の向上が可能であり、その分だけ石炭の使用量が減り、CO<sub>2</sub>排出量も減らすことができる。

将来的には、現在LNG火力で採用が始まっている1,600℃級ガスタービンを採用することにより、約50%の送電端効率が可能となる。(図4参照)

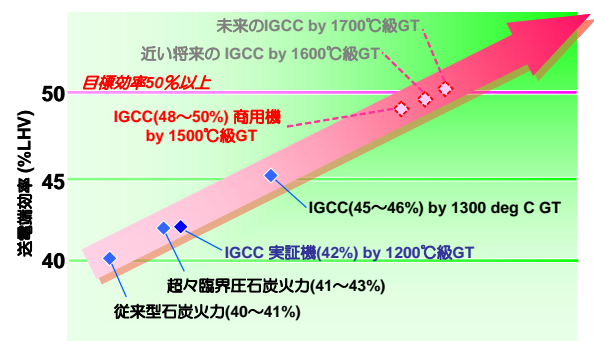


図4 空気吹きIGCCによる発電効率の向上

### (2) 環境特性の向上

IGCCでは、ガスタービンで燃焼する前の燃料ガスの段階で不純物を取り除くので、煙突から排出されるSO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、ばいじんの量も低減できる。(表4参照)

またCO<sub>2</sub>排出量原単位については、1,500℃級ガスタービンを採用した場合、重油火力と同等になる。

### (3) 適用炭種の拡大

従来石炭火力とIGCCでは、利用に向けた炭種が少し異なる。従来石炭火力では、石炭灰がボイラ内で溶融することを嫌うため、豪州炭のように灰融点の高い石炭を好む。一方IGCCでは石炭灰はガス化炉内で溶融して排出するため、むしろ灰融点の低い石炭が適する。いわゆる低品位炭 (亜瀝青炭等) は一般的に灰融点が低く、IGCCではこれらの石炭が利用可能となる。

### (4) 灰の有効利用拡大

石炭灰をガラス状の溶融スラグとして排出するため、従来石炭火力から排出されるフライアッシュに比べて灰

の体積がほぼ半減される。またガラス質となっているため微量成分の溶出も無い。スラグは小石状であるため、土木工用材料への有効利用が可能である。(図5参照)



図5 石炭灰スラグの有効利用

(5) 用水使用量の削減

IGCCは複合発電設備であるため、復水器の冷却水量(温排水量)を約30%削減できる。

また、従来石炭火力では排煙脱硫装置に大量の水を使用するが、IGCCでは生成ガスから直接脱硫するため、用水使用量を大幅に削減できる。

V. 勿来IGCCの設備と運転状況

1. 勿来IGCCの設備構成

勿来IGCCの設備仕様を表2に、設備全景写真を図6に示す。

表2 勿来IGCCの設備仕様

出力	250 MW		
石炭消費量	約 1,700 t/日		
方式	ガス化炉	空気吹き&乾式給炭	
	ガス精製	湿式(MDEA)+石膏回収	
	ガスタービン	1200℃級(50Hz)	
目標熱効率	発電端	48% (LHV)	46% (HHV)
	送電端	42% (LHV)	40.5% (HHV)
環境特性 (目標値)	SOx排出濃度	8 ppm	(16%O <sub>2</sub> 換算)
	NOx排出濃度	5 ppm	
	ばいじん排出濃度	4 mg/m <sup>3</sup> N	

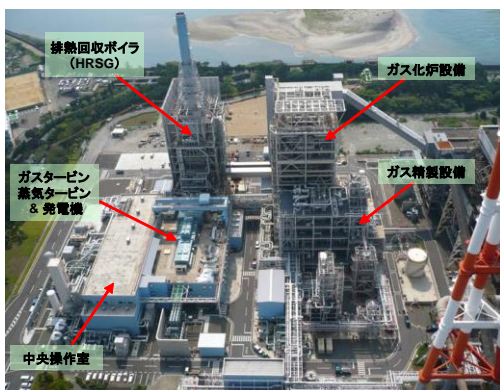


図6 勿来IGCCの設備全景

勿来IGCCは研究設備として計画したので、その出力は商用機の約半分の25万kWとした。このため燃焼温度1200℃級のガスタービンを採用したので送電端効率は42% (LHVベース) に留まっているが、商用段階においては1,400℃~1,600℃級ガスタービンを採用することにより出力50~70万kW、送電端効率48%~50%が達成できる見込みである。

2. 勿来IGCCの運転状況

(1) IGCC実証機時代の運転成果 (2007~2012)

ガス化炉の安定運転はスラグの流下状況を見るとわかる。この様子を図7に示す。燃焼室下部のスラグホールから二筋のスラグが連続的に流れ落ちているが、これがガス化炉安定運転の証拠である。

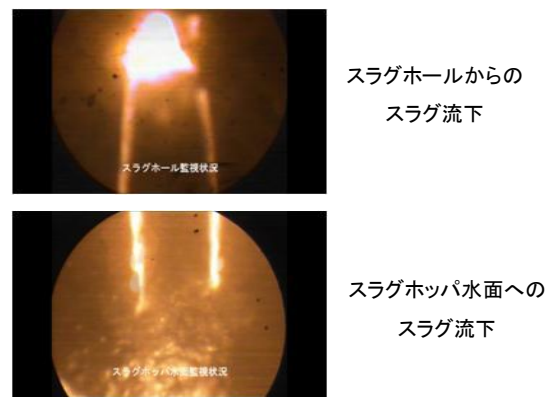


図7 スラグの流下状況

また、性能試験結果の一例を表3に示す。測定データはほぼ設計値どおりであることがわかる。ガスタービンと蒸気タービンの出力比はほぼ1:1、発生する生成ガスの組成はCOが約30%、H<sub>2</sub>が約10%、発熱量は5MJ/m<sup>3</sup>N程度であること等が特徴である。

表3 性能試験結果の一例

	設計値	試験結果
大気温度	15℃	13.1℃
発電端出力	250 MW	250.0 MW
ガスタービン出力	128.9 MW	124.4 MW
蒸気タービン出力	121.1 MW	125.8 MW
送電端効率(LHV)	42%	42.4%
ガス化炉 冷ガス効率	73%	75.3%
炭素転換率	>99.9%	>99.9%
石炭ガス 発熱量	4.8 MJ/m <sup>3</sup> N	5.2 MJ/m <sup>3</sup> N
組成 CO	28.0%	30.5%
CO <sub>2</sub>	3.8%	2.8%
H <sub>2</sub>	10.4%	10.5%
CH <sub>4</sub>	0.3%	0.7%
N <sub>2</sub> 他	57.5%	55.5%
環境性能 (16% O <sub>2</sub> 換算)	<目標値>	
SOx	8 ppm	1.0ppm
NOx	5 ppm	3.4 ppm
煤塵	4 mg/m <sup>3</sup> N	<0.1 mg/m <sup>3</sup> N

2007年9月に試験運転を開始し、半年後に定格出力250MWの安定運転を確認、一年後には当初目標の2,000時間連続運転を達成できた。その後、耐久性試験、炭種変化試験、運用性拡大試験等を行い所要の成果を得た。5年半に亘る実証運転試験の成果を表4に示す。

表4 実証運転試験の成果

項目	目標	成果
システムの安全性	定格出力での安定運転、異常時の安全停止を確認	定格出力250MWでの安定運転を確認(H20/3)
環境性	ばい煙濃度(煙突出口) 目標:SOx:8ppm NOx:5ppm ばいじん:4mg/m <sup>3</sup> Nの達成	目標ばい煙濃度以下を確認(H20/3) 実績値: SOx:1.0ppm NOx:3.4ppm ばいじん:0.1mg/m <sup>3</sup> N
信頼性	2000時間(夏季3ヶ月間相当)の連続運転の達成	連続運転2,039時間を達成(H20/9) 震災復旧後連続運転2,238時間を達成(H23/11)
炭種適合性	設計炭(中国神華炭)以外の石炭についても安定運転を確認	北米PRB亜煙青炭、インドネシア亜煙青炭、 コロンビア炭、ロシア炭、カナダ炭等
高効率性	目標送電端効率42%の達成	送電端効率42.9%を達成(H21/1)
耐久性	5000時間耐久運転試験後、設備の開放点検を行い検証	・年間5000時間運転到達(H22/6) ・開放点検により設備に重大な損傷なしを確認 ・大地震(震度6弱)でも倒壊せず、耐震性を確認
経済性	商用機における建設費、運転費保守費等を総合的に評価	商用機の発電原価は、従来型石炭火力と同等以下となる可能性あり
運用性	火力プラントとしての運用性の向上	従来型石炭火力並の運用性を確認(H23/3) (起動時間15時間、最低負荷36%、負荷変化率3%/分等)

(2) 商用転用後の運転状況 (2013～)

商用転用後の勿来IGCCでは、IGCCとして世界最長の連続運転3,917時間を達成することができた。このときの負荷カーブを図8に示す。

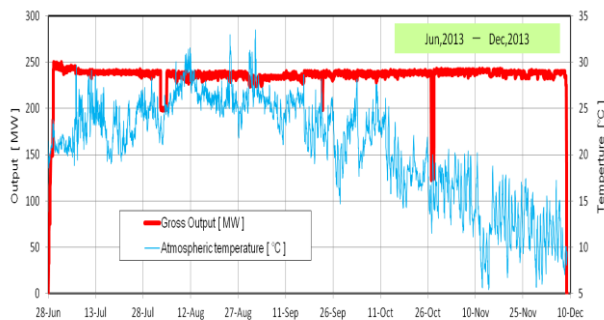


図8 IGCC世界最長連続運転時の負荷カーブ

途中3回ほど設備の故障で負荷低減をしたが、ほぼ定格出力で連続運転ができた。ただし、もともと勿来IGCCは研究設備として建設された設備であり、予備機が少ない等の制約もあり、現時点での暦日年間利用率は50%程度である。2015年度には長期間の設備耐力強化工事を予定しており、改造後は利用率をさらに向上させていく予定である。

## VI. IGCCの普及に向けて

### 1. 福島復興IGCCの建設

勿来IGCCの成功を受け、東京電力が福島復興の一環として、勿来発電所隣接地および広野火力発電所構内に2基の大型IGCCの建設計画を進めている。現在環境アセスメントの途中であり、2020年の運転開始を予定している。燃焼温度1,400℃級のカスタービンを採用することにより、出力は540MW、発電効率(送電端)は48%となる計画である。

### 2. 普及に向けての課題

IGCCは多くのメリットを持っているが、強いて言えば

機器点数が多く、設備が複雑になることがデメリットと言える。このため部品レベルの故障確率が高まり信頼性の維持が大変であること、また建設費が従来型に対して若干高くなることが課題となる。

信頼性に関しては、日本の高い技術力でカバーしながら、福島復興IGCCでは従来石炭火力を超える高稼働運転を目指している。

建設費に関しては、福島復興IGCCは大型IGCCの初号機であり、いわゆる特注設計となるため若干割高なものになってしまう。しかし、複数号機建設以降はメーカーであるMHPS(三菱日立パワーシステムズ)において生産ラインが整い、また習熟化が進むことにより、十分価格競争力のあるレベルになることを期待している。

### 3. IGCCの発展型(CCS、IGFC)

火力発電からCO<sub>2</sub>をさらに削減する技術としてはCCS(CO<sub>2</sub>回収貯留: Carbon Capture & Storage)がある。従来型の石炭火力では、ボイラで燃焼後にCO<sub>2</sub>を回収することになるが、IGCCの場合には燃焼前にCO<sub>2</sub>回収できる特徴があり、必要とする動力が低減できる。しかしながら回収技術の検証、地中処分後のCO<sub>2</sub>挙動解明、コスト負担等まだまだ課題が多い。

またIGCCの次の世代の高効率発電として、燃料電池複合発電(IGFC: Integrated coal Gasification Fuel cell Combined cycle)がある。燃料電池、ガスタービン、蒸気タービンによるトリプル複合発電を行うことで、55%以上の送電端効率が期待できる。現時点では燃料電池のコストが課題であるが、将来的に日本を代表する技術に育って行くことを期待している。

### 4. 海外への展開

日本の石炭火力は、海外の石炭火力に比べると発電効率が高い。一方、米国、中国を始めとして、世界では古くて効率の悪い石炭火力が多数稼働しており、これらをIGCCにリプレース出来れば、日本にIGCCを導入するより地球温暖化防止への寄与度は高くなる。IGCCを日本に導入すれば2割程度のCO<sub>2</sub>削減であるが、海外に導入すれば3割～4割のCO<sub>2</sub>削減につながる。

以上、日本で独自に開発した空気吹きIGCCが世界に普及し、地球温暖化防止に貢献できることを期待したい。

以上

#### 著者紹介

石橋 喜孝(いしばし よしたか)  
(現職) 常磐共同火力(株) 勿来発電所  
石炭ガス化発電事業本部 本部長  
(専門分野/関心分野) 石炭火力高効率発電