

石炭ガス化複合発電システム

Integrated Coal Gasification Combined Cycle : IGCC

寺 田 齊*

Hitoshi Terada

1. はじめに

我が国は一次エネルギーの殆どを海外に依存しており、エネルギー供給構造が脆弱であることは否めない。それゆえ、エネルギー源の多様化及びエネルギー消費量の抑制が図られている。1973年のオイルショックを契機に、エネルギー源の多様化、エネルギーセキュリティという観点から、石炭が再評価された。石炭は、石油、天然ガス（LNG）と比較して、化石燃料の中でも埋蔵量が最も豊富であり、かつ広範に分布しており、経済性にも優れた燃料と位置付けられる。

石炭火力発電は、現在では電源構成の一翼を担っており、将来はその優れた燃料供給の安定性、コストの長期的安定性から、原子力に次ぐベース・ミドルの主力電源として期待されている。

一方、気候変動枠組条約など国際的な環境問題への意識の高まりに伴い、CO₂低減のために、火力発電所の効率向上は益々重要となってきた。中でも石炭火力発電は、石油火力発電やLNG火力発電等と比較してCO₂排出量が多く、一層の発電効率の向上と環境負荷の低減を目指した石炭資源利用技術の開発を推進していく必要がある。

こうした中、技術開発が進められている石炭利用高効率発電技術の一つとして、石炭ガス化複合発電（IGCC : Integrated coal Gasification Combined Cycle）がある。

2. 各種IGCC技術概要

石炭ガス化は、石炭を部分酸化することにより、CO、H₂を主成分とする可燃性ガスに転換するもので、古くから化学工業や都市ガス製造用として行われている。IGCCは、その可燃性ガスをガスタービン燃料と

して使用する複合発電方式である。

IGCCは、高温高圧のガス化炉内で石炭をガス化し、次にガス精製装置において生成された石炭ガスからばいじんや硫黄分等の阻害成分を除去する。これは、後流のガスタービンの保護と環境対策を目的として行う。ガス精製後のクリーンなガスはガスタービンに供給し、ガスタービン排熱は排熱回収ボイラにて回収され複合発電を行う。

LNG焚複合発電と同様に、ガスタービンの高温化により、IGCCは50%を超える熱効率の達成が可能である。従来の微粉炭火力に比べ著しい効率改善であり、約20%以上のCO₂ガス削減が可能となる。

またIGCCは燃料段階でガスをクリーンにすることができ、灰処理をスラグ化する場合には埋め立て時に不純物が水へ溶出することなく排出処理されるなど、極めて環境適合性に優れている特徴を持つ。

2.1 石炭ガス化技術

(1) 石炭ガス化炉

ガス化炉の形式は、表1に示すとおり、固定床式（移動床式）、流動床式、噴流床式の3形式がある。固定床式（移動床式）、流動床式は前述の化学工業や都市ガス製造用として使用されている。一方発電用としては大容量化が容易で、負荷追従性に優れた加圧型の噴流床式が適しており、ガス化炉の主流となっている。またガス化炉からの灰分の抜き出し形態で、乾灰式（通常の微粉炭焚ボイラと同様な形態で抜き出す）とスラグ式（灰分を溶融しガラス状に固化した形態で抜き出す）がある。

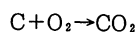
[ガス化炉での反応]

以下に、ガス化炉内における石炭ガス化の主要反応を示す。

・石炭の乾留



・炭素と酸素との反応



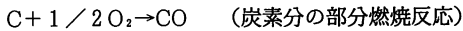
(炭素分の燃焼反応)

* 東京電力㈱技術開発センター技術開発本部
エネルギー・環境研究所石炭グループ

〒230-8510 神奈川県横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1

表1 石炭ガス化炉の種類

形式	固定床式ガス化炉	流動床式ガス化炉	噴流床式ガス化炉
原理図			
ガス化温度	450~900℃	700~900℃	1200~1800℃
石炭粒径	5~30mm 程度	5~6mm 程度以下	0.1mm 以下
代表炉	・ Lurgi 炉	・ KRW 炉 ・ Winker 炉	・ Shell 炉 ・ IGC 炉 ・ Dow 炉 ・ Prenflo 炉 ・ Texaco 炉



・炭素と水蒸気との反応



・炭素と水素との反応



(2) ガス化剤

石炭をガス化するためのガス化剤としては、一般に空気または酸素が使われる。通常、空気を使用する場合を空気吹き、酸素を使用する場合を酸素吹きと呼ぶ。発生するガスの組成、発熱量はガス化剤により異なり、空気吹きの場合では1000kcal/m³N (LHV) 程度の低カロリー、酸素吹きの場合では2500kcal/m³N (LHV) 程度の中カロリーとなる。これらはガス化炉の型式、ガス化炉温度及び圧力、原料である石炭の化学組成及び石炭供給法などによっても影響される。

(3) 石炭供給方式

石炭のガス化炉への供給方式では、石炭を粉砕して乾燥状態で供給するドライフィード(乾式)と、粉砕した石炭を水スラリーにして供給するスラリーフィード(湿式)がある。

2.2 ガス精製技術

ガス精製は、後流のガスタービン燃料としての入口制限条件及び環境排出基準を満足させる目的で行う。従来複合発電用の燃料にはLNGや清浄な液体燃料が用いられており、石炭燃料をガスタービンに使用することはできなかった。これは、高温ガスに曝されるタービン翼の健全性を維持するため、金属分、硫黄分、固

形分等のタービン阻害成分に厳しい制限があるためである。石炭は固形燃料であるうえに、灰分や硫黄分等を含むため、ガスタービンを使用するにあたっては、石炭を高圧の燃料ガスに転換する必要に加えて、阻害成分を許容値以下まで精製する必要がある。

またガス燃料の形でガス精製処理を施した方が、燃焼後に排煙処理を行うよりも処理ガス量が少なく、かつ機器もコンパクト化でき効率的となる。

ガス精製技術は、有害成分を除去するガス精製装置、ばいじんを除去する脱塵装置から構成され、湿式法と乾式法がある。

(1) 湿式ガス精製方式

一般に湿式法は水スクラバーによる脱塵設備と、化学吸収法もしくは物理吸着法による湿式脱硫設備から構成される。既に広く石油精製、化学工業分野において商業的に実用化されており、実績が多い。この方式は、アルカリ金属やアンモニアが除去できるため、ガスタービンの信頼性、環境保全の面からは有利である。しかし、石炭ガスの顕熱が損失されるため、熱効率的には不利となる。

近年、チャー・リサイクルを目的として、湿式法においても、セラミックフィルタによる脱塵が併用されている。

(2) 乾式ガス精製方式

乾式法には、セラミックフィルタまたは移動床式の乾式脱塵設備と、流動床式、固定床式、移動床式に大別される脱硫設備等から構成される。この方式は、湿式法と比較して高い温度レベルで処理されるためガス

表2 海外IGCCプラント開発状況

プロジェクト名	プナム	プエルトヤノ	パッサリバ	タンパ	ピネロパイン
発電所位置	オランダ	スペイン	アメリカ	アメリカ	アメリカ
設置形態	新設	新設	既設リパブリック	新設	新設
プラント容量 (送電端/発電端)	284MW /253MW	335MW /300MW	296MW /262MW	322MW /250MW	107MW /100MW
石炭処理量	2000t/日	2570t/日	2544t/日	2300t/日	880t/日
ガス化炉型式	Shell 炉 加圧1段噴流床	Prenflo 炉 加圧1段噴流床	Dow 炉 加圧2段噴流床	Texaco 炉 加圧1段噴流床	KRW 炉 加圧流動床
ガス化剤	酸素吹き	酸素吹き	酸素吹き	酸素吹き	空気吹き
給炭方式	ドライフィード	ドライフィード	スリ-フィード	スリ-フィード	ドライフィード
脱硫方式	湿式法	湿式法	湿式法	湿式法 (+乾式移動床)	乾式流動床
脱塵方式	セラミックフィルタ	セラミックフィルタ	メタルフィルタ	湿式スクラバ	セラミックフィルタ
ガスタービン型式	シーメンス社 V94.2	シーメンス社 V94.3	GE 社 7FA	GE 社 7FA	GE 社 7FA
実証試験開始年	1994/1	1996/9	1995/8	1996/7	1996/8
現在の状況	商用運転中	実証運転中	実証運転中	実証運転中	試運転中

の顕熱損失が少なく、熱効率的には有利であるが、現在、技術的に開発段階にある。

乾式法の脱硫剤を大別すると、鉄・亜鉛・銅などの金属酸化物と、リチウム・ナトリウム・カリウムなどのアルカリ炭酸塩、錫などの熔融金属に区分される。現在は、金属酸化物、アルカリ炭酸塩について研究が進められている。

2.3 ガスタービン技術

IGCCに用いるガスタービンは、LNG焚などに開発された高温ガスタービン技術をベースとしているが、適用に当たっては、石炭ガス燃料の特殊性を考慮しなければならない。石炭ガスは、軽油やLNGと比較して発熱量が約1/3～1/10であり、燃焼器を専用に開発する必要がある。

また石炭ガスには、腐食性成分やダスト等の不純物が含まれ、ダストによる冷却空気孔のが閉塞や、アルカリ金属化合物の表面付着による腐食現象等が懸念され、ガスタービン翼に対する腐食等の影響を検証しておかなければならない。

一方、翼の耐食コーティングとしての各種合金コーティングや、遮断コーティングとしてセラミックコーティングの研究が進められており、不純物に対する制限値が緩和できる可能性がある。

3. 海外の石炭ガス化複合発電開発状況

欧米においては、IGCCは次世代の石炭火力の本命として、既に250MW～330MW級の実証プラントが試運転段階もしくは商用運転段階にある。我が国ではパ

イロットプラントの運転試験が終了した段階であり、欧米に一步遅れを取っている状況である。海外の開発状況を表2に示す。

(1) プナム・プロジェクト

- ・オランダ電力庁の全額出資
- ・デモレック社がプナムにあるマース中央発電所に発電端出力284MW・送電端出力253MWの実証プラント
- ・1990年 建設着手
- ・1994年1月 実証運転開始
- ・1998年1月 商用試験運転開始
- ・酸素吹き噴流床方式Shellガス化炉、湿式サルフィード脱硫設備、及びジーメンス社V94.2ガスタービン
- ・天然ガスによる複合発電での運転も可能

1997年に最長609時間の連続運転を行い、ガス化炉では10炭種以上の石炭が使用されている。実証運転を1997年末で終了し、1998年は商用試験運転と位置付けている。

(2) プエルトヤノ・プロジェクト

- ・スペインのEndesas、フランスのEDF及びイタリアのENELなどが出資・設立したElcogasコンソーシアムがスペインのプエルトヤノに発電端出力335MW・送電端出力300MWの実証プラント
- ・1993年4月 建設着手
- ・1996年9月 LNG焚試運転開始
- ・1997年12月 石炭ガス化開始
- ・1998年4月 石炭ガス化発電開始
- ・酸素吹き噴流床方式Prenfloガス化炉、アミン方式

湿式脱硫設備、及びジメンス社V94.3ガスタービン

- ・天然ガスによる複合発電での運転も可能

(3) ワッシュリバー・プロジェクト

- ・米国エネルギー省の資金援助
- ・デステック社及びPSIエネルギー社が共同でPSI社インディアナ州ワッシュリバー発電所1号機を発電端出力296MW・送電端出力262MWの石炭ガス化複合発電プラントにリパワリングする実証プラント
- ・1993年9月 建設着手
- ・1995年8月 ガス化運転開始
- ・1995年12月 実証運転開始
- ・酸素吹き噴流床Dowガス化炉, アミン方式湿式脱硫設備、及びGE社7FAガスタービン

本プロジェクトは既設のインフラストラクチャを使用することで、総建設費を抑制すると共に、既設火力に比べて環境特性の向上及び発電効率の向上をはかっている。

(4) タンパ・プロジェクト

- ・米国エネルギー省の資金援助

- ・タンパ電力がフロリダ州ポーク発電所に発電端出力322MW・送電端出力250MWの実証プラント

- ・1994年7月 建設着手
- ・1996年7月 ガス化運転開始
- ・1996年9月 実証運転開始

- ・酸素吹き噴流床Texacoガス化炉, 100%容量のアミン方式湿式脱硫設備と10%容量の乾式移動床脱硫設備、及びGE社7FAガスタービン
- ・累積ガス化発電運転時間約7500時間

(5) ピノン・パイン・プロジェクト

- ・米国エネルギー省の資金援助
- ・シエラパシフィック電力がネバダ州トレシー発電所に発電端出力107MW・送電端出力100MWの実証プラント
- ・1995年2月 建設着手
- ・1996年8月 LNG焚試運転開始
- ・1998年1月 石炭ガス化開始
- ・空気吹き流動床方式KRWガス化炉, ガス化炉炉内脱硫と乾式移動床脱硫による脱硫、及びGE社6FAガスタービン

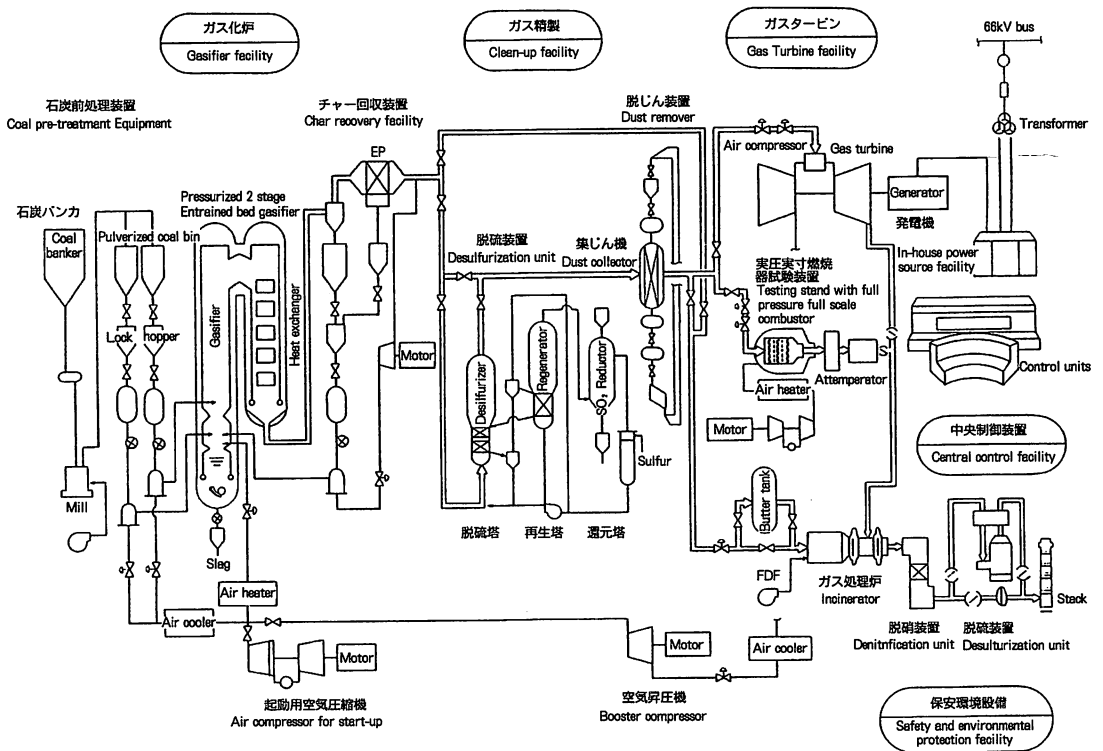


図-1 200t/日噴流床石炭ガス化発電パイロットプラント系統図

4. 国内の開発状況

4.1 200t/日噴流床石炭ガス化発電パイロットプラント

本プロジェクトは、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業として、1986年度から1996年度の11年間に渡り石炭ガス化複合発電技術研究組合（IGC組合）によって実施された。

このパイロットプラントは欧米において開発が主流となっている酸素吹き石炭ガス化炉と湿式ガス精製を組み合わせたシステムではなく、空気吹きガス化炉と乾式ガス精製装置で構成されている。ガス化剤に空気を使用することで所内動力を低減し、乾式ガス精製装置を採用するなど、より高効率を目指した、世界に例のない独自システムを採用している。

（1）設備概要

図-1に本パイロットプラント系統図を示す。プラント構成は、石炭処理量200t/日級乾式給炭方式、空気吹きの加圧2段噴流床方式ガス化炉、酸化鉄脱硫剤を用いた流動床脱硫装置、グラニューベツト方式集塵機による高温乾式ガス精製装置、出力12500kWの1260℃級開放単純サイクル軸型ガスタービン及び実証機用大型ガスタービン燃焼器試験設備から成り、全て国産技術に基づいている。

ガス精製装置については、近年の技術開発の進展を受けて、ポーラスフィルター（セラミックフィルター）方式集塵機、20t/日乾式固定床ガス精製装置（酸化鉄ハニカム脱硫剤使用の脱硫装置）、及び4t/日移動床方式同時脱硫脱じん装置がプラント内に併設され、1993年から試験を実施した。

（2）プロジェクト経緯

本パイロットプラントは1986年度に基本設計、1987年度に詳細設計を行い、1988年1月から福島県いわき市の常磐共同火力（勿来）発電所内に建設を開始し、1991年2月に完成した。運転研究ではガス化炉内の灰付着等の課題があったが、それら課題を全て解決し、1995年3月に約1ヶ月間の連続安定運転に成功した。その後も各種のデータを取得し、1996年2月に運転研究を終了、1996年に解体研究を実施し、パイロットプラント段階の技術検証をほぼ完了した。

1991年6月に石炭ガス化運転を開始、1992年7月には空気吹きガス化炉と乾式ガス精製による世界で初めての石炭ガス化発電に成功した。1996年2月までには、累積ガス化4770時間、累積発電1643時間を達成した。

この期間にIGC組合は国内・海外3炭種について、ガス化炉、ガス精製、ガスタービン及び大型ガスタービン燃焼器の性能、運転制御のデータ取得やプラント全体の負荷制御特性などの把握を行った。

4.2 実証プラントのフィージビリティスタディ及び要素研究

200t/日噴流床石炭ガス化発電パイロットプラント試験は1996年度に成功裏に終了したものの、計画当初から10年以上の年月が経ってしまっており、燃料情勢や環境規制の大幅な変革、従来型石炭火力発電技術の向上が見られた上、欧米諸国ではIGCC実証試験が相次いで計画され試運転に入るなど、IGCC技術開発が置かれている社会情勢は大きく変化してきていた。IGCCの開発を推進するに当たっては、国内技術及び海外技術動向を見直し、現在の我が国により適するIGCCシステムを再検討する必要が生じた。

このため、1997年度から2年間の予定で、NEDOが電力会社に委託して、次期IGCC実証試験の方向性を定めるべく、実証プラントのフィージビリティスタディ及び要素研究が実施されている。

（1）フィージビリティスタディ

現時点でのIGCC実証試験プラントに相応しい方式を選定することを目的として、国内外のIGCCシステムについてフィージビリティスタディ（FS）を行っている。本FSは、200t/日噴流床石炭ガス化発電パイロットプラントで採用された方式を中心に、ガス化剤の種類、石炭供給方式、海外の代表例を抽出した結果、数ケースについて検討を行い、相互の比較評価を行った。評価項目としては、信頼性、保全性、経済性、熱効率、環境特性、自主技術度等の観点から行った。1997年度に比較評価は終了しており、後述のように当面開発を推進すべき1方式のIGCCが選定された。

（2）要素研究

200t/日噴流床石炭ガス化発電パイロットプラントからの課題技術、スケールアップにおける技術、及び将来の商用プラントに繋がる技術等、実用化に向けて技術的検証が必要な要素技術については、現在要素試験を実施し評価を行っている。

研究テーマは、ガス化炉技術、ガス精製技術、ガスタービン技術の各種IGCC技術について、200t/日噴流床石炭ガス化発電パイロットプラントにおける課題解決のための要素研究を中心に、幅広い角度から選定している。

4.3 実証試験プラントの方式概要

1997年度のFSにおいて選定された実証試験プラントの方式を以下に示す。

- ・空気吹き加圧2段噴流床方式のガス化炉
- ・ドライフィードの石炭供給方式
- ・湿式ガス精製方式

空気吹き2段噴流床石炭ガス化炉は、高い燃焼温度と効果的なガス冷却を同時に実現するシステムであり、同ガス化炉に採用した発電プラントは酸素吹きプラントに比べ酸素製造動力が少なく、高い送電端効率が得られる。更に、石炭スラリによる湿式給炭に比べ水分の潜熱ロスがない乾式給炭を採用している。

ガス精製装置については、効率面では乾式脱硫方式が有利であるが、近年高まっている環境ニーズに対して必ずしも技術的に満足できる段階でないため、信頼性を重視し、実績の多い湿式脱硫方式を採用することとした。

更にFSでは、200t/日噴流床石炭ガス化発電パイロットプラントの成果を反映し、システムの簡素化および設計の合理化を行い、信頼性および経済性の向上等を図るべく検討実施している。詳細については今後の更なる検討によるところとなる。

- ・微粉炭およびチャーの搬送媒体を空気及びリサイクルガスから窒素に変更
- ・セラミックフィルタを採用し、EPの廃止
- ・脱硫設備で除去される硫黄分は硫黄回収型から石膏回収型へ変更

環境性能については、従来の微粉炭火力と同等以上となっている。灰処理はスラグ化することで容積がほぼ1/2になり灰捨場が半分になると共に、非溶出性を持ち取り扱いが容易になる。

5. IGCCの必要性と今後の課題

はじめに述べた様に、石炭火力発電は将来ベース・ミドルの主力電源として期待されている。一方では地球環境問題への社会的意識の高まりから、石炭火力発電については一層の高効率化と高い環境特性を要求される。このような社会情勢に対して、IGCCは以下のような特徴が期待される発電技術である。

(1) 高効率化と高い環境特性

IGCCは石炭火力発電技術の中でも高い効率を期待でき、微粉炭火力に比較し、石炭消費量が10%程度低

減され、CO₂排出量も10%程度削減される。さらに、高温ガスタービンの技術開発の進展に伴い、一層の高効率化が期待され、CO₂排出量も20%程度低減が見込まれる。

(2) 燃料ソースの拡大

微粉炭火力は石炭の中でも灰融点の高い石炭の燃焼に適しているが、IGCCは灰融点の低い石炭や比較的低位の今後利用拡大が望まれる石炭にも適合可能である。

また石炭以外の低質燃料（残さ油、オリマルジョン、石油コークス等）にも適用可能性があり、燃料ソースの拡大が図られる。

(3) 石炭灰の減量化

石炭灰がスラグとして排出されるので、微粉炭火力から排出される石炭灰（フライアッシュ等）に比べて、容積は半分で済み、灰捨場のコスト及び環境へのインパクトが低減される。

(4) 温排水の低減

複合発電であることから、微粉炭火力に比べて温排水は約30%低減される。

(5) 石炭ガス化技術の利用拡大

石炭ガス化技術は、燃料電池との組み合わせによる応用等、次世代の高効率発電に活用できる基盤技術である。

将来商用機としてのIGCCプラントを開発するには、200t/日噴流床石炭ガス化発電パイロットプラントから適正なスケールアップ比率を有した規模の実証試験を実施することが必要とされている。

実用化へ向けては技術的課題が残されており、現在、各機器及びシステム全体としての信頼性、環境特性、経済性等を検討するとともに、技術的検証が必要な要素技術については試験を実施し評価を精力的に行っている。今後は更に信頼性向上と建設コスト低減に向けた機器の簡素化、設備諸元の見直しや、海外技術の動向をも視野に入れながら、本技術を開発・育成していくことが重要と考えられる。

参考文献

- 1) 火原協会；入門講座 複合発電（改訂版）、火力原子力発電、Vol.49 No.10（1998）
- 2) 通産省資源エネルギー庁公益事業部発電課編；21世紀に向けた石炭火力発電技術の展開、（1996）、大蔵省印刷局