発電のための石炭ガス化システム*

穂 積 重 友**

The Coal Gasification Systems for Power Generation

Shigetomo HOZUMI

は じ め に

1973/74年のオイルショック以来、いわゆる石炭の見直しが始まった。見直しと言われるのは、1960年代の世界的な石油の進出まで、石炭はエネルギー源の大宗として、また製鉄用コークスや都市ガスあるいは化学工業の原料として、格段の地位を占めていたからである。そのころまでのエネルギー需給予測はもっぱら、将来のエネルギー供給不足と、それに対応するための石炭生産増強の必要性を指摘していた。その石炭が、石油とさらに天然ガスにも押されて、コークス製造をのぞくすべての分野で、著しく後退したのである。

15年ほどの石油全盛時代のあと、再び石炭に大きく期待せざるを得なくなり、まず、以前は主として石炭を使っていた発電とセメント工業の分野で、燃料の転換が始まった。発電については石油火力発電所の新設禁止の国際的申合せが行なわれており、セメント工業では石炭への切換えが既に大幅に進んでいる。しかしそれは、単に昔の姿に戻るのではなく、この間の消費規模の拡大と環境保全要求の高度化に対応する技術改善が加えられている。しかし、化学工業原料も含めて石炭利用をさらに拡大するためには、石炭の流体化が必要である。流体化は、石炭後退の大きな原因の一つでもあった個体であることの不利を解消するという重要な意味を持っている。それゆえに近年、世界各国で石炭のガス化・液化の技術開発が、活発に推進されているのである。

このうちでガス化は、かつて燃料ガスや原料ガスの製造に商業化した技術であるが、その時代には無かった技術として、石炭ガス化発電が注目されるようになった。以下、この新しい技術の概要について、展望を試みる。

1. 石炭からのガス

石炭からガスを得る方法には、大別して次の二つがある。

乾 留：空気をしゃ断した状態で石炭を加熱すると、ガスが発生し、あとにコークスまたはチャーが残る。

ガス化：石炭を高温下でガス化剤（空気、酸素、水蒸気など）と反応させる。コークスやチャーもこのガス化の原料になり得る。高温を得るためには通常、原料の一部を燃焼させる。

乾留はもともと、製鉄のためにコークスをつくる方法として18世紀初頭に始まった。副生するガスやタールは、当初は厄介物扱いされたが、同世紀末からガスは照明用や燃料用に、また19世紀後半になるとタールも合成染料や薬品の原料として、利用されるようになった。乾留では、コークスを目的とすればガスは副産物であり、ガスを目的とすればコークスが副産物となる。石炭による都市ガス製造は、後者の典型である。

ガス製造を主目的に、石炭や乾留副産物であるコークスを原料とし、ガス化剤を作用させてガスを得る方法が開発されたのは、19世紀末である。そして1920～30年代には、酸素製造技術の確立に伴って、酸素をガス化剤として中カロリー燃料（主として都市ガス）や合成原料（主としてアンモニア合成）のガスを製造する技術が、ドイツで実用化した。

第二次大戦をはさんで1950年代まで、数種のガス化炉が商用化され、いわゆる石炭化学工業が活発に進展した。Lurgi 炉、Winkler 炉、Koppers-Totzek 炉はその代表である。わが国でも、これらの炉の導入や、改良開発・自主開発が進められた。

その後の石油時代に、石炭ガス化は一部の国をのぞいてほとんど影をひそめ、その技術開発も停滞してしまった。そして今ふたたび、石炭への復帰にあたって、上にあげたガス化炉（これらは第1世代と呼ばれている）は

* 昭和57年5月19日本会第68回例会において発表

** (財)石炭技術研究所 理事 石炭ガス化研究部長
昭和57年4月8日受理

直ちに採用が可能であり、現にその動きも始まっているが、この間に石油ベースで発達した技術に経済性を持って代替するべく、ガス化の効率向上や装置の小形化を目ざして、いわゆる第2世代のガス化炉の開発がさかんでいる。その開発プロジェクトの数は、米国をはじめとして世界各国で数十にのぼり、それらの大部分は、上述の目的のために、高温化・高压化を志向している。このうち10件ほどはパイロットプラント段階に進み、さらにデモンストレーションプラントの計画が動き始めたものもある。なお第3世代のガス化法として、ガス化のために

高温原子炉の熱を用いる方法や、水素をガス化剤とする方法の研究も始まっている。

このようにガス化炉やガス化プロセスの開発は多彩であるが、基本的な型式は次の4種である（第1図）。

固定床（実用例：Lurgi 炉）

流動床（実用例：Winkler 炉）

噴流床（実用例：Koppers-Totzek 炉）

熔融浴床

ガス化炉の中で石炭（炭素）とガス化剤とが接触しておこる反応には、第1表に示したようにいくつかあり、

第1図 石炭ガス化炉の基本型式（1980年世界エネルギー会議資料）

第1表 石炭ガス化の分類とガス化反応

	乾 留	低カロリーガス化	中カロリーガス化	高カロリーガス化
ガ ス 化 例	—	空 気, 水 蒸 気	酸素, 水蒸気, 水素	同 左
主 要 反 応	乾 留	乾 留, 発生炉ガス反応 水性ガス反応	左 記 の 外 に 水 添メタン化反応	左 記 の 外 に シフト転換反応 メタン合成反応
主要有効ガス成分	水 素, メ タ ン	水素, 一酸化炭素	左記の外にメタン	メ タ ン
ガ ス 発 熱 量 (kcal/Nm ³)	5,000~6,000	800~1,500	2,000~8,000 (5,000)	8,000~10,000 (5,000)
ガ ス 主 用 途	工業燃料(都市ガス)	発 電 用 燃 料	工業燃料, 合成原料	左記の外に都市ガス

(A) 乾 留

(B) チャーとガス化剤の反応

〈炭素と酸素との反応〉

〈炭素と水蒸気との反応〉

〈炭素と水素との反応〉

(C) ガスの改質

これらが同時に複雑に進行することになる。そして、主としてガス化剤の種類に応じて、ガスの有効成分と従って発熱量に差が生ずる。その使い分けは、目的とするガスの用途によって選択される。

ガス化ガスの用途として、かつての石炭時代には無かった新しいものに、天然ガスの代替と、ガス化発電がある。前者は、水素をガス化剤とする水添メタン化反応や、酸素をガス化剤として得た原料にさらにガス改質の工程を加えてメタンをつくるプロセスで(第1表)、天然ガス資源についての見通しと天然ガスパイプラインが既にゆきわたっていることを背景に、米国がその開発に特

に熱心である。

もう一つの新しい展開であるガス化発電は、新しい発電システムによって在来の発電方式を上まわる発電効率を達成するとともに、きびしい環境規制にも対応しようとするものである。

2. 石炭からの発電

石炭を燃料とし、ボイラで蒸気を発生させ、蒸気機関を動かして発電する方法は、歴史が古い。現在では、微粉炭燃焼と高温高圧の蒸気タービンの組合せで、規模は1基で1000MW級に達し、排煙処理も含めて、ほとん

ど完成された技術と言える。これに対して、石炭による新しい発電技術として短中期的に注目されるものに、COM 熱焼、流動床燃焼、ガス化発電がある。これらの技術の位置づけは、次のように見ることができる。

COM 燃焼

微粒炭燃焼と同程度に微粉碎した石炭を重油と混合して流体化することにより、石炭のハンドリング上の不利を解消できる。これを燃料とするのであるから、発電システムそのものは、ボイラもタービンも在来型で、燃料だけが変わることになる。微粒炭だきがのちに石油だきに変更された設備は COM への転換が容易であるが、元来の石油火力発電設備でも、大がかりなボイラ改造は必要だが、COM 燃焼への転換の可能性はある。

COM は石油との混合であるから、脱石油ではなく省石油ということになるが、流体化のために加える液体として水やメタノール（これも石炭ガス化ガスから合成する）を使えば脱石油が達成されるわけで、この方向の研究も注目されている。

流動床燃焼

発電システムのうち、ボイラが変わることになる。流動床燃焼は、伝熱特性が良く、燃料の微粉碎の必要が無く、高灰分炭やスラッジ状の燃料も使用でき、ボイラのモジュール化が可能であるなどの特徴と共に、特に期待されるのは、流動床に石灰石やドロマイトを加えることにより 炉内脱硫ができ、また燃焼温度が低いので NO_x 生成が抑制されるということである。小形・中形の一般用ボイラでは既に実用期に入ったが、発電用の大形ボイラについては開発過程にある。

ガス化発電

近年のガスタービンの発達に伴ない、これを蒸気ター

ビンとを組み合わせた複合サイクル発電システムが注目されるようになった。複合サイクル発電は、完成度が高く、効率向上の余地がほとんど残されていない在来の蒸気タービン単独サイクルの発電に比べて、ガスタービン技術の向上すなわち入口温度の上昇につれ、それを上まわる効率の達成が可能だからである（第2図）。

この複合サイクル発電は、天然ガスや灯油などのクリーン燃料を用いて 100MW 級で実現し、在来方式に匹敵する効率が得られている。わが国でも日本国有鉄道川崎発電所の例があり、またムーンライト計画のなかの高効率ガスタービンの開発は、最終目標として入口温度 1,500°C を目指すものである。

このような複合サイクル発電の長所と、発電燃料としての石炭とを、ガス化を仲介として結びつけるのが、ガス化発電である。ガス化ガスは高温ガスタービンの燃料にできる程度にクリーン化するから、環境汚染源となる物質（S 分とダスト）は、燃焼前に十分に除去される。高温ガスタービン用として要求されるガスのクリーン度は、環境保全面からの要求よりもきびしいと考えられる。また燃焼排煙に比べて数分の一、加圧式ならば数十分の一から百分の一の体積のガスを処理するので、装置は著しく小形になる。

ガス化複合サイクル発電では、ガス化と精製の段階でエネルギーのロスがあるから、元来のクリーン燃料を使う場合に比べて発電効率が幾らか低くなることは避けられないが、それでも、やがて在来方式を上まわることが期待できるのである（第2図）。

効率の面から見て、精製を含むガス化プラントと発電設備とは、直結するのが有利である。この場合は発電所の中にガス化プラントを持つわけで、発電システム全体が変わることになる。

3. ガス化発電システム

ガス化発電では上に述べたように、主要部分としてガス化とガス精製と複合サイクル発電とが、直結されて一つのシステムを構成する（第3図）。そしてこの各構成部分について、いくつかの方式があり、それぞれ特徴を持っている。またこの主要部分に、原料前処理・ガス化剤供給・熱回収・灰処理・廃水処理や、場合によっては未燃分処理・排煙最終処理なども加わる。全体システムの組合せは、原料石炭の性状、各種の立地条件、発電所の性格、そのほか多くの要因を考慮して、選択されることになる。ガス化発電はこれからデモンストレーションに進もうという段階にある技術であるから、もちろん、デモプラント建設の決定にあたっては、システムの各部について信頼性を含む技術レベルがどの程度かということも、重要な問題である。

第2図 複合サイクル発電の熱効率の概念図

第3図 石炭ガス化複合サイクル発電
(排熱回収サイクル)の概念図

3.1 ガス化

発電のためのガス化法として一般的に考えられる組合せは、次の通りである。

ガス化炉	ガス化圧力	ガス化剤
固定床	常 圧	空 気
流動床	加 圧	酸 素
噴流床		水蒸気

現在、発電用として重視されているガス化炉は、流動床と噴流床である。ガス化炉の運転にとって大きな影響を持つ灰の熔融性の点から見ると、流動床は灰融点の高い石炭に、噴流床は灰をスラグにして排出するので灰融点の低い石炭に、向いていると言える。固定床は、後述するようにこれまで唯一の実証規模ガス化発電プラントに採用されたが、原料石炭の粒度・粘結性に制約があることや、ガス化炉からのタール生成が避けられないなどの点で、問題が多い。

常圧か加圧かという点では、ガスタービン用として燃料ガスには圧力(20気圧程度まで)が必要だから、加圧方式が、炉の小形化のメリットもあるので、本命と見られる。しかしそのためにはもちろん、高圧にかかわる装置上の問題、特に高圧系への石炭の供給と高圧系からの灰の排出の問題を、十分に解決せねばならない。

ガス化剤に空気を使うのはいわゆる低カロリーガス化であるが、それでも 1000kcal/Nm^3 以上のガスは得られ、ガスタービン燃料として使用可能である。そして、空気と水蒸気がガス化剤だから、どちらも系内から取ることができる(第3図)。酸素を使うことには、中カロリーのガスになるので燃焼の安定性が良く高温も出しやすいなどの利点があるが、酸素プラントとそのための動力を必要とする点が、問題である。しかし、装置の小形化などのメリットも加えて、システム全体としてのフィージビリティスタディーで酸素ブローの方が有利という結果を出している例もある。

合成原料ガスの製造は酸素ブローにせねばならないが、現在ガス化炉を開発中のメーカーでは、同型式の炉で酸素ブローなら合成原料ガスが、空気ブローなら複合サイ

クル発電用ガスがつかれるということを目ざす傾向が見られる。

3.2 ガス精製

ガス精製の主課題は、脱じんと脱硫と脱硝であり、精製の程度は、高温ガスタービンに支障を来さない(特にダストとS)ことが目標である。方法は、湿式と乾式に大別され、それぞれに常圧式と加圧式が考えられる。ガス化が加圧であれば、もちろん精製も加圧式にしなければならない。

湿式精製は化学工業などで実用化している種々のプロセスが応用できるが、処理温度が低い(100°C 以下)ので、ガス化炉から出る高温のガス(700°C 以上)の顕熱を無駄にしないために、入念な熱回収(蒸気発生、ボイラ給水予熱、精製ガス加熱など)を必要とする。

ガス化発電では、ガスの顕熱の利用が全体システムの効率向上にとって重要な問題なので、この点からは、乾式精製に魅力がある。乾式は、用廃水の面からも有利である。

乾式脱じんは、静電気集じん機やバグフィルタが大形装置でも実用化しているが、高温で加圧下という条件への適用はむずかしい。この条件に対して有望と見られるのは、けい砂などの粒子の層でろ過するグラニュラベッド法である。高温ガスタービン用燃料としてどの程度のダストが許されるのかについては、まだ定説と言えるものがないが、 10mg/Nm^3 オーダかそれ以下が要求され、粒子のサイズや形状にも制約があるものと考えられる。

高温乾式脱硫は、特に発電用のような大容量について、他分野での実用例がなく、これからの開発課題である。ガス中に含まれる H_2S の吸収剤としては、ドロマイト、酸化鉄、酸化銅、酸化亜鉛などがあるが、高圧下でも脱硫率が下がらず、有機硫黄化合物も吸収し、材料として豊富で安価であるなどの点で、酸化鉄が有望と見られる。

高温乾式脱硝については、まだ期待の持てる方法がない。また、フューエル NO_x のほかに、燃焼過程で生ずるサーマル NO_x の問題があり、これに対してはガス精製とは別に、ガスタービンのコンバスタでの NO_x 生成抑制と、必要ならば排煙脱硝によって対処しなければならない。

なお、ガスタービンではアルカリ金属化合物が腐食にとって特に有害とされている。高温乾式精製では、これが蒸気のまま通過しないような温度(500°C 程度まで)ということも、考慮する必要がある。アルカリ金属化合物の問題では、ガス化の段階でこれになるべくガスに含まれないようにすることも、重要である。それには、ガス化温度が低い方が有利であると言われる。

3.3 複合サイクル発電

ガスタービンと蒸気タービンとを組み合わせた複合サイクル発電には、次の方式がある（第4図）。

排熱回収方式：ガスはまずガスタービンで熱燃させ、その高温排気を排熱回収ボイラに通して蒸気発

生をする。

過給ボイラ方式：ガスを加圧式のボイラで燃焼させて蒸気発生をし、ボイラの排気でガスタービンをまわす。

排気助燃方式：排熱回収方式の変形で、ボイラで排熱だけでなく燃料も熱源として使用する。

ガス化発電で高効率を目指すには、ガスタービンの材料や冷却法の開発とともに、低カロリーガス的高温安定低 NO_x 燃焼のためのコンバスタの改良開発が、課題である。ガスタービンの高温化は、耐熱金属材料や翼の空冷によって、大形機の現状で入口温度が約1100℃ のレベルに達している。より高温を目指して、金属材料の耐熱コーティングや翼の水冷やさらにセラミック材料の利用などが研究されている。

ガスタービン高温化による効率向上のメリットが最もよく生かせるのは排熱回収方式であり、これが今後の複合サイクル発電での本命となる。

500MW 以上の大形商用発電所は、ガスタービンの単機容量に応じて、ガス化炉・ガスタービンの組合せの複数系列と、7基の排熱回収ボイラとで構成されることになると考えられる。それで、この場合のガス化/ガスタービンの1系列を動かすことがガス化発電の実証段階になるわけで、その規模は、これに見合う排熱回収/蒸気タービンを合わせて、100MW 級である。

4. ガス化発電技術の開発の概況

わが国では、1974年に発足したサンシャイン計画の中にガス化発電技術の開発がとりあげられた。財団法人石炭技術研究所が委託を受け、北海道夕張市に5t/日と40t/日のプラントを設け、ガス化・ガス精製（高温乾式）と生成ガスの燃焼によるガスタービンの材料試験・コンバスタ試験までの段階を実施中である。ガス化は、加圧2段流動床方式であり、原料には太平洋炭を用いている。この開発には、電源開発㈱と有力プラントメーカーが参画し、国立研究機関も協力している。

実証段階としては、1000t/日、100MW 級の規模で、新エネルギー総合開発機構が委託を受け、電源開発㈱が石炭技術研究所と連繋しながら基本設計を進めている。なお電力業界では、流動床方式とともに噴流床方式にも、関心を寄せている。

石炭のガス化・液化に特に熱心な米国では、いくつかのガス化発電技術開発プロジェクトの計画・構想がある。その代表的なものが Cool Water プロジェクトで、酸素ブローで加圧噴流床式の Texaco ガス化炉を用いた100MW 級実証プラントの建設が始まった。石炭は水スラリーで供給し、精製は湿式である。

過給ボイラ方式

排気助(再)燃方式

排熱回収方式

第4図 複合サイクル発電の種類

米国ではこのほかに、加圧流動床式の Westing House 炉、常圧噴流床式の CE 炉、加圧噴流床式の KBW 炉を用いる提案や構想が提示されているが、まだ具体化はしていない。

ガス化技術の歴史が古い西ドイツでは、加圧固定床式で合成原料ガス製造に実績のある Lurgi 炉を用いた170 MWのガス化発電プラントを、1972年に実現した。開発主体は石炭鉱業の共同電力会社である STEAG 社で、当時のガスタービン技術のレベルから、過給ボイラサイクルを採用した。1977年末までに累計1万時間の運転をし、多くの経験・知見を得たが、その後は休止している。

西ドイツではそのほかに、VEW 電力会社が、噴流床で部分ガス化し、ガスはガスタービンに、チャーは排熱回収ボイラの助燃に用いるシステムを開発中である。はじめは常圧式でスタートしたが、その後、加圧式に方向転換し、パイロットプラント (240t/日) を計画中である。

英国では、ガス公社 (BGC) が Lurgi 炉の下部を高温化し灰を溶融排出する Slagging Lurgi 方式 (酸素ブロー) を開発中で、米国からの委託により発電用ガス製造の試験も実施した。

また石炭公社 (NCB) では、加圧流動床ガス化と加圧流動燃焼とを組み合わせる方式を考え、ベンチスケールの試験を実施中である。

オランダと西ドイツで、常圧噴流床式の Koppers-Totzek 炉を加圧式にした Shell-Koppers 炉が共同開発され、これをもとに Shell 社が、やはり 100MW 級のガス化発電実証プラントの計画を進めている。

む す び

石炭ベースの発電で、高効率化ときびしい環境規制への合理的な対応の可能性に対する期待から、石炭ガス化複合サイクル発電の技術開発に、関心が持たれている。この新しい発電システムを構成する主要部分であるガス化とガス精製と複合サイクル発電の技術内容を概観し、内外の技術開発の動向を簡単に紹介した。

発電プラントには特に高い信頼性が要求されるから、なお開発を要する個々の課題が多い。従って実証としては、はじめから高効率が達成できなくても、まずシステム全体としての信頼性を重視されることになる。現在進行中の開発活動のうち、テンポの早いものが実証試験の段階に進むのは、1980年代後半と予測される。