

# 石炭ガス化複合サイクル発電

## Integrated Coal Gasification and Combined-Cycle Power Generation

穂 積 重 友\*

Shigetomo Hozumi

### はじめに

ガスタービンの進歩に伴い、在来のスチームタービン単独による発電方式に対して、ガスタービンとスチームタービンを組み合わせた複合発電が、効率と経済性がよりすぐれたものとして、大容量発電プラントにまで普及の段階に入った。これについては、国内・国外での発展の経過と現状が、本誌をはじめ各方面で紹介されている。

最近の大形複合発電プラントの燃料はいずれも天然ガスであるが、一方、火力発電全体について、将来とも燃料として石炭が大きな役割を持つことは言うまでもない。そして、燃料の石炭と高効率の複合発電とを結びつけたものとして、石炭ガス化複合発電（ガス化発電）が、開発途上にある。

ガス化発電の試みは、1970年代初頭に西ドイツで始まった。その後、石油危機を契機とする石炭見直しの気運のなかで、石炭ガス化技術についても各国で多数の開発計画が進められ、そのうちのいくつかは、ガス化発電への発展を旨としたものである。わが国で1974年からスタートしたサンシャイン計画のなかでも、この課題がとりあげられた。そして、米国で石炭処理量1,000t/d,100MW級の実証プラントが、1984年から運転に入っている。

ガス化発電は、同じく石炭から電気へというルートのなかで、在来の微粉炭焚ボイラ/スチームタービンの組合せに比べて、ガス化/ガスタービン/スチームタービンの組合せによって、より高い効率・経済性を旨とするものであるから、石油・天然ガスなどの価格推移が、開発の意義に直接的に影響することはない。しかしわが国では、在来方式の微粉炭火力発電技術が世界最高と言える高いレベルにあるので、これをしのぐべきガス化発電技術の開発にもきびしい課題が課せられる。

\* (財)石炭技術研究所理事・石炭ガス化研究部長

〒100 東京都千代田区神田神保町2-10

従って、西ドイツや米国の開発はもちろん貴重な先例となるものの、そのままわが国に導入して満足できるものではなく、わが国の事情に合わせた独自の開発努力を必要とする。そのために、わが国で現在進行中のプロジェクトは、高効率のガス化はもとよりとして、エネルギーロスが少なくプロセスとしても簡潔な乾式ガス精製と、1,300℃級のガスタービンの石炭ガス化ガスへの適用が、重要な開発要素となっており、発電プラントとしての実証段階への進展は、1990年代後半になるものと思われる。

### 1. 石炭ガス化複合発電のシステム構成

ガス化発電のシステムは、  
石炭のガス化  
ガス化ガスの精製  
精製ガスを燃料とする複合発電

から成る。このそれぞれにいくつかのプロセスがあるが、そのなかで発電の見地から見て適切なプロセスの組合せをとることが、開発方針となる。

#### 1.1 ガス化

ガス化には、ガス化炉のタイプから、次の4種がある。

固定床/流動床/噴流床/溶融床

ガス化炉の圧力について

常圧/加圧

の別があり、またガス化剤としての酸素源には

空気 または 酸素

が用いられる。さらにガス化炉への石炭供給の方法から見ると、

乾式法/湿式（スラリー）法

に分かれる。

ガス化炉としては、適用炭種の広さ、タールによるトラブルがないこと、起動・停止や負荷対応などの観点から、流動床炉あるいは噴流床炉が適している。そして、ガスタービン燃料としては圧力が必要であるか

ら、ガス化炉を加圧型とする方が、常圧型よりも有利である。

ガス化剤に酸素を用いることは、空気吹きに比べてガスの発熱量が高いことは利点であるが、酸素製造設備とそのための所内動力を必要とすることが、負担となる。空気吹きでは、生成ガス中に40～50%（ドライベース）の窒素が含まれ、発熱量が低くなる(1,000～1,300 kcal/Nm<sup>3</sup>)が、ガスタービン燃料として見た場合、窒素・炭酸ガスという不燃成分も、圧力と温度を持ったガスであれば動力に転換されるので、低カロリーガスであることが不利にはならない。それゆえ、ガス化複合発電のためのガス化では空気吹きが重視され、サンシャイン計画のなかでも複合発電指向のプロジェクトには、発足にあたり「低カロリーガス化」の名が冠せられている。

酸素の使用には前述のような問題があるが、吸着法や膜分離法で比較的安価に酸素が得られることになれば、ガス化剤としての空気の一部を処理して酸素富化空気にするという考え方も成立するであろう。

加圧ガス化炉への石炭供給は、水スラリーによる湿式法の方が容易な面はあるが、多量の水を炉内で蒸発させることになるので、そのための熱消費が大きくまた生成ガス中の水分が高くなるという不利はまぬがれない。

## 1.2 ガス精製

ガス化発電の意義は、ガスタービンの高温化に負うところが大きい。そして高温ガスタービンのためには、燃料となる石炭ガス化ガスをできるだけクリーンにしなければならない。このことは同時に、発電プラントとしての環境対応にも通じるものであり、ここにもガス化発電の大きな意義がある。

ガス精製は脱硫と脱じんから成るが、なお、ガス中の窒素化合物（いわゆるフェーエルN）も脱去できれば、NO<sub>x</sub>対策上で望ましい。

精製の方法には大別して

湿式/乾式

があり、湿式については脱硫・脱じんともに、化学工場やコークス工場でいろいろなプロセスが実用されている。しかし湿式では、ガス化炉から出る高温ガスの温度を下げることになり、その間に熱回収ははかるとしても、かなりのエネルギーロスはまぬがれない。またこの過程でガス量が減ることも、複合発電の見地からは不利である。これに対して乾式は、温度とガス量なるべく保存することが可能であり、さらに用廃水

の点でも明らかに有利である。

乾式精製（特に脱硫）は、石炭ガス化発電で問題となる高温・高圧の範囲では開発要素の多い課題であるが、スタンディーによれば湿式精製の場合に比べて発電プラント全体の効率で2～3ポイントの上昇が期待できることから、わが国におけるガス化発電実現のためには、この開発は非常に重要な意味を持っている。

### 1.2.1 乾式脱硫

石炭中のSは、ガス化ガス中では主としてH<sub>2</sub>Sになっており、他に少量のCOSがある。ガスと固体脱硫剤（金属酸化物、石灰石など）との接触により、ガス中のH<sub>2</sub>Sを吸収させるという方法が、基本である。これによって硫化物に変わった脱硫剤は、空気酸化によって酸化物に再生する。再生で放出されるSO<sub>2</sub>は、単体Sに還元すれば、ここまで含めて全体が乾式で構成される。

ガスと脱硫剤とを接触させる吸収塔と、硫化した脱硫剤を酸化物に戻す再生塔には、固定床・移動床・流動床の3型式がある。流動床型は、ガス切換えの必要が無く、粒度の細かい脱硫剤で良好な固気接触をさせることができ、再生反応での発熱が均一で熱回収がしやすいことが利点であり、加圧反応塔内での粒子循環がうまくゆけば、すぐれたプロセスとなる。

### 1.2.2 乾式脱じん

脱じんはサイクロンから始まるが、高温ガスタービンの燃料とするには、精密脱じんが必要である。その乾式法としては、電気集じん・バグフィルタ・グラニューラフィルタなどがあるが、高温と高圧装置化という条件からは、グラニューラフィルタが適している。さらに最近のセラミックス工業の発展を見ると、セラミックフィルタによる超精密脱じんも、ガス化発電システムに使えるという期待が持てる。

### 1.2.3 脱窒

石炭中の窒素は、ガス化ガス中では主としてNH<sub>3</sub>になっている。湿式精製であればNH<sub>3</sub>除去は問題ないが、乾式では現在のところ、工業化の見込が持てる方法が無い。従ってこれに対しては、排煙としてのNO<sub>x</sub>対策（たとえば排熱回収ボイラへの脱硝装置組込）を必要とする。

## 1.3 複合発電

複合発電のサイクルとしては、

排熱回収/排気助燃/排気再燃/過給ボイラ/給水加熱

がある。このうち、ガスタービンによる発電の割合が

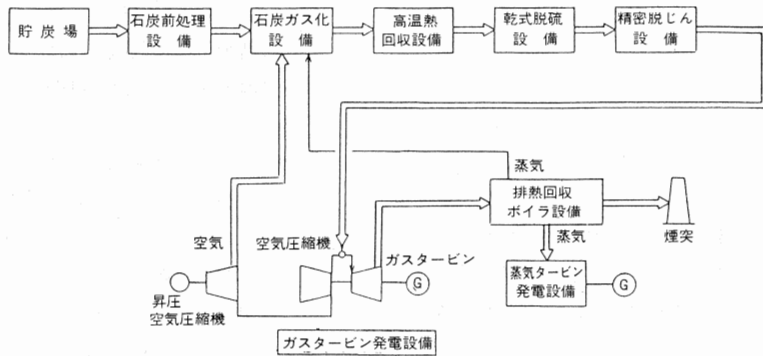


図-1 石炭ガス化複合発電のシステム構成  
(空気吹きガス化、乾式ガス精製、排熱回収複合サイクルの組合せ)

最も大きく、従って発電効率が高いのは排熱回収サイクルであり、ガスタービンの高温化性指向と相まって、この方式が最も重視される。

1.4 石炭ガス化複合発電プラント

ガス化発電プラントの主構成要素を以上のように整理してみると、わが国で在来型の石炭火力発電を上まわるシステムとして、図-1に示す構成が考えられる。すなわち、

- 乾式給炭・加圧・空気吹きをのガス化
- 加圧・高温・乾式のガス精製
- 排熱回収サイクルの複合発電

の組合せである。

2. 石炭ガス化複合発電の先例

2.1 西ドイツ

石炭鉱業の共同電力会社であるSTEAG社が1960年代末から計画を練り、1972年にKellermann発電所に170MWのガス化発電設備を完成し、試験に入った。これは、できる限り既成技術を組み合わせてガス化発電を実現して見せるというデモンストレーションの意味が強いものと思われる。そのためにプラント構成は、

- ガス化はLurgi社の加圧固定床炉の空気吹き  
(酸素吹きでは多くの実績がある)
- ガス精製は水洗浄  
(生成ガスの一部で熱炭酸カリ溶液による湿式脱硫試験)
- 複合発電は過給ボイラサイクル  
(ガスタービンは当時の実用レベルとして入口温度810℃なので、このサイクルを採用)

となっている。

このプラントは1972~77年にわたり延べ約1万h(最長連続は約100日)の運転をし、発電効率として設計値

の発電端36.7%・送電端35.1%に対してほぼそれに近い実績データが報告されている。固定床ガス化であるため原料石炭のサイズが5~6mm以上という制約やタール発生の問題があり、これらの対策を考慮し湿式脱硫も組み入れた500MWプラントの試算として発電端効率38%(ガスタービン入口880℃)という値も示されていたが、その後の実際の展開は報じられていない。

2.2 米国

カリフォルニア州の Southern California Edison電力会社の Cool Water発電所で1984年6月から運転が始まったクールウォーター計画が有名である。これは石炭処理量1,000t/d、100MW級のガス化発電実証プラントで、その基本構成は、

ガス化がスラリー給炭で酸素吹きのTEXCO加圧噴流床炉(熱回収型)

(クエンチ型で重質油分解等にも実績があり、わが国でも宇部で1984年夏からアンモニア合成用ガスを製造する石炭ガス化プラントが商用運転)

ガス精製は水洗浄と湿式脱硫

複合発電は排熱回収サイクル(ガスタービン入口温度1,100℃級)

という組合せである。これからわかるように、この計画も手堅い構成でまずシステムを実証することが重視されているようで、比較的順調に運転でき、1985年末で累計7,300h(最長連続27日)に達し、送電端効率は設計値を上まわる31%の値が得られているという。この効率は将来、スラリーの予熱や濃度上昇、酸素の純度をガス化剤として必要かつ十分な程度まで下げること、複合サイクルにおける蒸気条件の改善などにより、36%程度まで向上可能で、ガスタービン温度がさらに高くなればそれ以上の効率が期待できるとされている。

### 3. わが国の石炭ガス化複合発電技術の開発状況

先に述べたように、わが国ではガス化発電の開発目標レベルが高い。新鋭の大形微粉炭火力プラントの送電端効率が37～38%という高水準に達し、さらに超々臨界圧により40%近くまでの向上も指向されているからである。加えて、商用プラントとしての運用性・信頼性はもとより、高度の環境保全性、わが国の電力用炭調達の事情に関連する広い炭種適応性も要求される。

このような高効率ガス化発電を旨とする開発は、サンシャイン計画の一環として1974年に、(財)石炭技術研究所が受託者となり、電源開発(株)と有力プラントメーカーの協力参画のもとにスタートした。

このプロジェクトは、北海道夕張市に試験プラントを置き、ガス化のプロセス開発ユニットとして5t/d規模の加圧2段流動床ガス化炉の運転試験から始まり、乾式ガス精製・ガスタービン要素試験を含めた40t/d規模に発展した(図-2)。40t/dプラントの運転は、1982年にガス化が本格的な試験に入り、84年からはその実ガスによる乾式ガス精製試験と、その精製ガスによるガスタービン要素試験が続いており、1987年度に終了が予定されている。

これと平行して、この試験成果を取り入れての実証プラント(1,000t/d、1,100℃級ガスタービン、100MW級)の基本設計が、新エネルギー総合開発機構(NEDO)/電源開発によって進められている。

一方この間、電力業界におけるガス化発電への関心も高まり、噴流床ガス化をベースとするシステムの検討が始まった。これもナショナルプロジェクトとして、

1983～85年にNEDO/(財)電力中央研究所でフィージビリティスタディーが行われた。

これらの進捗状況にもとづき、1985年4～8月に、総合エネルギー調査会・産業構造審議会のもて、高カロリーガス化も含めて石炭ガス化に関する技術開発の今後の進め方について検討され、方向づけが示された。

それによれば、わが国のガス化発電では、ガス精製では乾式法を、ガスタービンでは1,300℃の温度レベルを旨とする必要性が、あらためて認識されている。そして噴流床プロジェクトとしては、1986～92年の7年計画で200t/d規模のパイロットプラント試験を行う。乾式ガス精製は、先行している40t/d規模の夕張プラントの知見がベースとなってスケールアップされ、ガスタービンについては、夕張プラントにおける低圧での初期要素試験から、実圧試験へとステップアップされ、さらに小形ガスタービンの運転試験も加わる。

流動床ガス化をベースとする1974年からのプロジェクトは1987年度に完了するが、ガス化反応やガス化炉に関する基礎的な知見・経験は噴流床ガス化にも役立つものであり、また上述のようにガス精製・ガスタービンの課題は共通するところが多い。この見地から、1988年以降、夕張プラントは噴流床ガス化200t/dプロジェクトのスケジュールに関連させながら、これを支援する要素試験に活用してゆくこととなっている。

### 4. 石炭技術研究所夕張プラントの概況

夕張プラントの主要部分は、

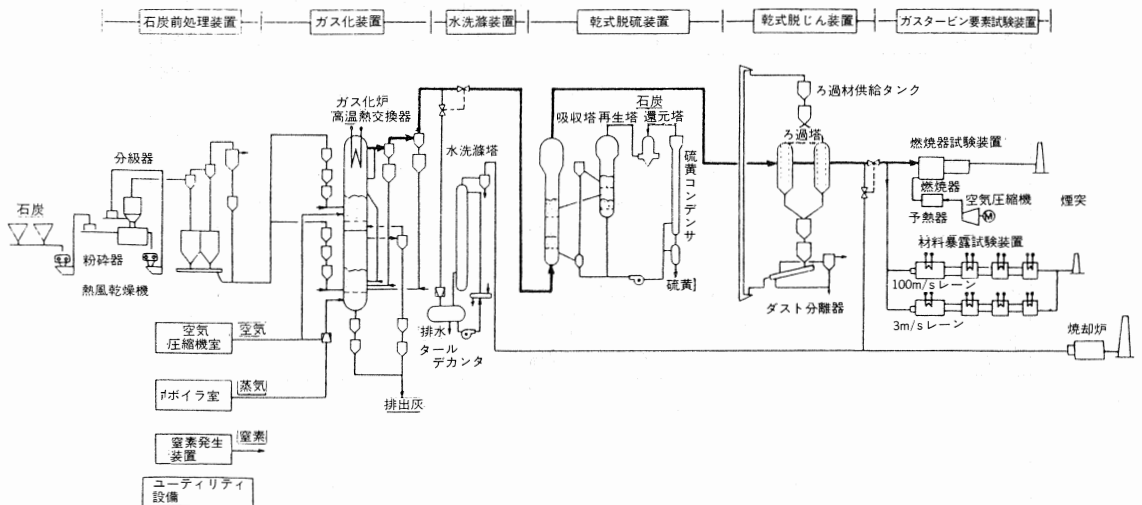


図-2 40t/日パイロットプラント(石炭技術研究所夕張試験場)の主要フロー

ガス化装置  
 乾式脱硫装置  
 乾式脱じん装置

ガスタービン要素試験装置

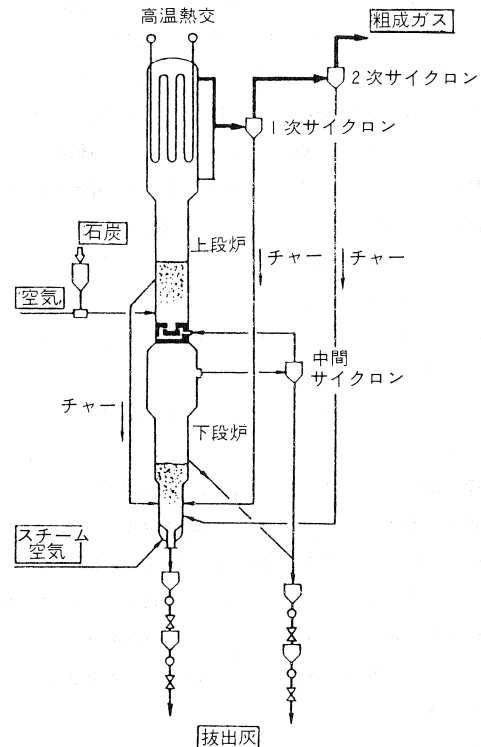
から成り、石炭前処理・ユーティリティ・ガス焼却などの設備が付属する(図-2参照)。

4.1 ガス化

石炭処理量公称40t/dの空気吹き20 atgの加圧2段流動床炉(図-3)で、トップサイズ5~6 mmの石炭をロックホッパにより乾式供給する(当初はスクリーフィーダ、現在は気流搬送)。炉温は上下段とも900~1,050°Cの範囲であり、高温熱交によりガス化炉出口ガス温度を600~700°Cにする。ガス化試験データの例を表1に示す。ガス化効率は目標値を上まわる結果が得られている。ガスには少量のタールが含まれているが、軽質化しており、乾式ガス精製の温度レベルでトラブルをおこすおそれはなく、最終的にはガスタービン燃焼器で燃焼されることになる。

ガス化適用炭種の範囲拡大が重要なテーマで、そのための要素研究は、10kg/hの小形加圧流動ガス化試験装置によるガス化反応性の試験と、常圧ホットモデルによるクリンカ生成条件の試験によって幅広く進められ、その一部について40t/d 炉での試験が始まるところである。

石炭化度が高い(燃料比が大きい)石炭に対しては、炉温を上げ、給炭量を絞る(粒子の流動層内滞留時間



外径1.5m 高さ24m

図-3 40t/日ガス化炉概念図

表1 40t/日ガス化試験データの例：1985年7月

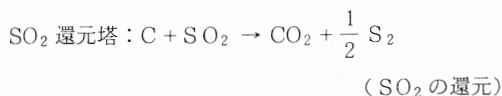
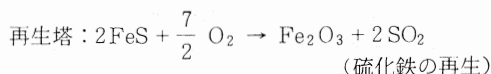
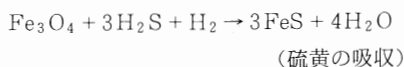
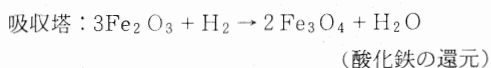
原料石炭 (太平洋炭)				2次サイクロン出口ガス					
発熱量	kcal/kg (湿)	6,285	温度	°C	539				
水分	% (湿)	3.8	発生量	N m³/h (湿)	6,129				
灰分	% (乾)	15.8		(乾)	5,156				
炭素	% (乾)	65.3		N m³ (乾)/石炭t	3,723				
給炭量[C]	kg/h	1,385	発熱量	kcal/N m³ (乾)	HHV 1,280				
ガス化条件					LHV 986				
炉圧	atg	20	水分	vol % (湿)	15.9				
炉温	上段	°C	982	ダスト	g/N m³ (乾)	2.1			
	下段	°C	978	タール	g/N m³ (乾)	0.5			
ガス化剤	空気	上段	N m³/h	2,485	乾ガス組成 (%)	H₂	15.8	C₂H₄	—
		下段	N m³/h	998		CO	15.1	C₂H₆	—
	計 [A]	N m³/h	3,483	CH₄		3.6	N₂	52.7	
	水蒸気(下段)[S]	kg/h	989	CO₂		12.1	Ar	0.6	
	A/C	N m³/kg	2.51	冷ガス効率		%	75.8		
S/C	kg/kg	0.71	炭素転換率	%	97.8				
炭素収支 %									
	下段炉	2次サイクロン	2次サイクロン出口				不明分		
	排出灰	排出チャー	ガス	ダスト	タール				
炭素 (固形物炭素分)	0.3 (1.3)	1.0 (49.8)	97.8	0.9 (61.3)	0.3 (100で計算)	-0.4			

を長くすることが、高いガス化効率を得るための基本的な要件である。これを実用炉について見れば、高石炭化度炭を対象とするときは、炉径を大きく設計するということになる。

炉温については、クリンカを生成しないという条件から、許容上限の制約がある。この点ではもちろん、灰の融点の高い石炭（豪州炭はそういうものが多い）が、流動床ガス化に適している。

### 4.2 乾式脱硫

酸化鉄を脱硫剤とする2段の加圧流動床吸収塔と、硫化した脱硫剤を再生する同方式の再生塔と、再生塔から出るSO<sub>2</sub>を単体Sにする還元塔から成る（図-4）。この間の主要反応は、次の通りである。



酸化鉄は吸収塔で硫化鉄になり、吸収塔下段からオーバーフローして気流搬送により再生塔の上段に入る。再生塔の下段から、再生済みの酸化鉄は再生塔下段からオーバーフローして吸収塔に戻る。温度は、吸収塔が450℃前後、再生塔が700～800℃である。

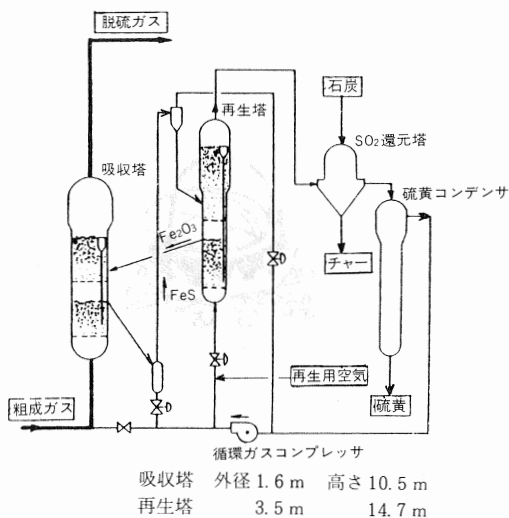


図-4 高温乾式脱硫装置

このプロセスでは、再生・還元の過程からの排ガスを循環させ、系外に出さないことが、一つの大きな特徴である。これによって、複雑な排ガス処理を伴う湿式法や固定床乾式法に比べて、全体プロセスは簡潔になる。そして、再生・還元の反応での発熱はガス循環によりメインのガス流に加えられる。このことはガス化発電における乾式ガス精製による効率メリットに対して、温度の保持ということに劣らぬ貢献をする。

開発のポイントは、高压容器間での粒子循環と、粒子によるガスシールの問題である。夕張プラントではこの点につき、装置機能・運転手法に多くの経験を積み、改善を重ねて、完成に近づきつつある。

脱硫性能としては、高硫黄炭を想定した脱硫入口ガスのH<sub>2</sub>S濃度3,000ppmに対し、脱硫率95%で設計してある。現在の試験は、輸入電力用炭のS分を考慮してH<sub>2</sub>S 1,500ppm程度までの範囲で実施しており、脱硫率約90%の結果が得られている。ガス中の水分が高いと反応平衡の関係で脱硫率が低くなるので、現在のガス中水分17%程度でのこの値は、ガス化炉で水分低下の目標としている10%程度になれば、脱硫率95%も達成可能と見込まれる。

### 4.3 乾式脱じん

粒度約1mmの硅砂をろ過材とするグラニューフィ

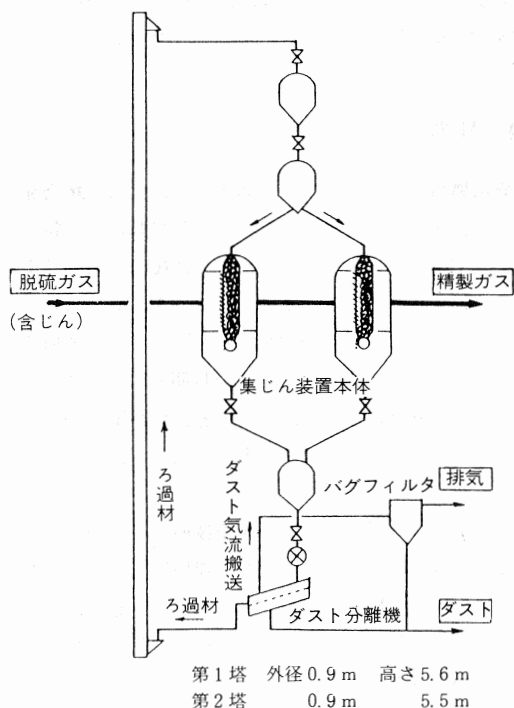


図-5 高温乾式脱じん装置

ルタで、厚さ150～250mmのろ過層3層を、2塔の圧力容器に収めてある(図-5)。ダストを捕収したろ過材は、圧力容器から出して、ふるいと気流によりダストを分離したのち、循環させる。

入口のダスト濃度 $3\text{ g/Nm}^3$ を出口で $5\text{ mg/Nm}^3$ 以下にするという設計で、試験結果としては $1\text{ mg/Nm}^3$ 以下のデータも多数得られている。出口ではダスト濃度がこのように低いので、得られるダストサンプルがごく微量であり、組成・粒度分布の把握がむずかしい問題として残されている。

#### 4.4 ガスタービン要素研究

大形ガスタービンの燃焼器はマルチチャン型であり、その1本を実寸・低圧で試験する装置と、高速・低速の燃焼ガス流による材料暴露試験装置がある(図-2参照)。供試燃焼器は、燃料が低カロリーの石炭ガス化ガスであり、それを高温で燃焼させ、かつ $\text{NO}_x$ 生成をできるだけ抑制するということを主課題として設計されたものである。

水洗浄ガスによる予備試験を経て、現在は乾式精製ガスによる試験が続いている。太平洋炭のガス化ガスを用いて、 $1,100^\circ\text{C}$ 級燃焼器の燃焼特性(燃焼効率、安定性、均一度など)は所期の結果が得られ、フェーエルNの $\text{NO}_x$ 転換率は50%程度におさえられた。乾式精製ガス燃焼による材料試験は、1985年度末で累計暴露時間370hに達し、さらに1,000hを目標に累積してゆく。

#### 4. おわりに

発電燃料としての石炭と、商用段階に入った複合発電とを、石炭ガス化・ガス精製を介して結合する新しい発電システムとして、石炭ガス化複合発電の技術開発が進められている。そのシステムを構成する各プロセスにはいくつかの種類があり、それについて概観した。プロセスの組合せは開発の時期やねらいによって異なり、外国における開発の例と、わが国で1974年からサンシャイン計画の一環として始まったプロジェクトを紹介した。

わが国では既成の石炭火力発電技術のレベルが高いので、ガス化発電にも高い効率・運用性・信頼性が要求される。この観点から、システム構成としては、

空気吹き乾式給炭の加圧ガス化(流動床、噴流床)  
高温乾式ガス精製  
高温( $1,300^\circ\text{C}$ 級)ガスタービンによる排熱回収サイクル複合発電

の組合せが目標とされている。

ナショナルプロジェクトとして、流動床ガス化による40t/dプラントの試験が進行中で、噴流床ガス化による200t/dプラントの運転試験は1989年開始の予定である。これらの成果をもとに、1990年代には実証プラントが具体的に計画されることになるであろう。

#### 参考文献

- 1) エネルギー・資源; エネルギー・資源研究会. Vol. 6 No. 1 (1985. 1)
- 2) 通商産業省工業技術院サンシャイン計画推進本部編; 新エネルギー技術開発ビジョン, 通商産業調査会, S. 60, 10.
- 3) 火原協会講座⑩; 複合発電, 社団法人火力原子力発電技術協会, S. 60, 6
- 4) 石炭技術研究所; 石炭利用技術研究発表会講演集 S. 54. 石炭ガス化発電システムと夕張テストプラントの現況  
S. 55. 石炭ガス化ガスの乾式脱硫技術  
S. 56. 夕張試験場における低カロリーガス化試験  
S. 57. 石炭資源と石炭ガス化  
S. 58. 石炭ガス化発電  
S. 59. 石炭の加圧流動ガス化特性に関する試験  
S. 60. 夕張流動床ガス化プラントの開発状況

