

# DENCHUKEN REVIEW

石炭ガス化複合発電の実現に向けて  
実証機開発の支援と将来への研究展開

電中研レビュー No.44 2001.10



財団法人 電力中央研究所

編集担当 横須賀研究所 研究コーディネーター 佐藤 幹夫  
エネルギー機械部 犬丸 淳

巻頭言	株式会社クリーンコールパワー研究所取締役社長 大西 博康	3
石炭ガス化複合発電研究のあゆみ		6
はじめに	理事 深田 智久	8
第1章 石炭ガス化複合発電技術開発の経緯と現状		9
1-1	技術開発の背景	11
1-2	石炭ガス化複合発電の方式と特徴	13
1-3	海外における開発経緯と最新動向	16
1-4	我が国における開発経緯と最新動向	19
1-5	250MW実証機計画の概要	20
コラム	石炭ガス化複合発電のLCA解析	24
第2章 石炭ガス化複合発電の技術課題		27
2-1	実証機における技術課題	29
2-2	当研究所が取り組む実用化に向けた研究課題	31
コラム	フラックス添加・混炭による高灰融点炭の高性能ガス化	34
第3章 石炭ガス化炉の特性と炉内現象評価技術の開発		37
3-1	研究の背景	39
3-2	石炭ガス化炉の特性と炉内現象	40
3-3	石炭ガス化炉数値シミュレーション技術	42
3-4	石炭ガス化反応特性の解明	46
3-5	石炭ガス化炉における灰生成・付着挙動の解明	51
3-6	今後の展開	57
コラム	石炭中の鉱物について	58
第4章 ガス精製技術の開発		59
4-1	研究の背景	61
4-2	セラミックフィルタ集じん技術の開発	62

4 - 3	固定床脱硫・脱ハロゲン技術の開発 .....	66
4 - 4	今後の展開 .....	70
	コラム：湿式ガス精製技術について .....	72
第5章	ガスタービン燃焼器技術の開発 .....	73
5 - 1	研究の背景 .....	75
5 - 2	ガスタービン燃焼器技術 .....	76
5 - 3	今後の展開 .....	80
	コラム：希釈用空気、サーマルNO <sub>x</sub> とフュエルNO <sub>x</sub> .....	81
第6章	プラントシステム技術.....	83
6 - 1	研究の背景 .....	85
6 - 2	システム性能解析評価ツールの開発 .....	85
6 - 3	今後の展開 .....	89
	コラム：DME併産型石炭ガス化複合発電 .....	91
第7章	低コスト化およびさらなる高効率化に向けた研究 .....	95
7 - 1	石炭ガス化スラグの有効利用方策 .....	97
7 - 2	燃料電池複合発電技術開発の現状と課題 .....	101
	コラム：燃料電池の原理 .....	108
	コラム：重質油ガス化複合発電の現状と課題 .....	109
おわりに	————— 理事 浜松 照秀	115
	引用文献・資料等 .....	116

#### 表紙

250MWIGCC実証プラントのイメージ図  
(株)クリーンコールパワー研究所殿提供)

#### 扉

石炭ガス化炉数値シミュレーション結果の一例。  
ガス化炉内での粒子の動きを示す。



# 巻頭言

---



資源の乏しい我が国において、エネルギーセキュリティを確保するためには、電源のベストミックスが特に重要である。1973年のオイルショック前には、エネルギー源別の電源構成比は、原子力3%、石油火力57%、LNG火力6%、石炭火力7%、水力27%であったものが、原子力、LNG火力、石炭火力の導入を進めた結果、1999年度末には、原子力20%、石油火力22%、LNG火力27%、石炭火力11%、水力20%とバランスの取れた電源構成比となってきた。

石炭については、価格が低廉でかつ安定しているという大きなメリットがある一方、デメリットが二つある。一つは、石炭中に硫黄分や灰分を含むために、大気汚染防止対策に最大限の配慮が必要なことである。公害を経験した我が国では、オイルショック以降の石炭火力の導入に当たっては、高性能の脱硫装置、脱硝装置、電気集塵機を開発導入し、現在の石炭火力の大気環境諸元は石油火力と比較しても極めてクリーンなものになっている。二つ目は、石炭は炭素が主成分であるため、燃焼に伴ってCO<sub>2</sub>が他の燃料に比較して多く発生するということである。地球温暖化防止が叫ばれる昨今、石炭火力の導入を抑えるべきとの議論もあるが、何とか解決策を見出し、エネルギーセキュリティの確保と地球温暖化対策を両立させる必要があり、この問題に対する最も現実的な答えが、石炭を燃料として高効率発電が可能な石炭ガス化複合発電（IGCC）であると考えている。LNG火力の分野では複合発電技術の開発導入が進み、これによりLNG火力の飛躍的な効率向

---

上と経済性向上が図られた訳だが、IGCCはこの技術を石炭にも活用しようとするものである。

日本のガス化への取り組みは比較的早く、1974年には国の主導で流動床方式の石炭ガス化の研究がスタート、1982年には一部電力と電力中央研究所が米国のクールウォータープロジェクト（噴流床酸素吹きIGCC、発電出力12万kW）に参画、1983年からは電力中央研究所と国内メーカーが噴流床空気吹きIGCCに着目し、2トン/日のガス化炉試験を行った。これらの経緯を経て、国、9電力会社、電源開発株式会社および電力中央研究所が共同で空気吹き噴流床IGCCの開発に取り組むこととなった。1986年から1996年の間、国家プロジェクトとして200トン/日規模のパイロットプラント試験を福島県の勿来で実施し、空気吹きIGCCの成立性が実証されたのは、周知の通りである。

しかし、パイロットプラントの成果を持って、IGCCの商用化が達成された訳ではない。IGCCを商用技術とするためには、20～30万kW級の実証プラント試験が必要とされたが、この実施に当たっては様々な議論があった。200トン/日のパイロットプラント試験が終了した頃、電力自由化が始まり、さらに電力需要が伸び悩む中で、果たして多額の研究投資をしてまでIGCC開発をすべきかどうかというものであった。しかし、国と電力が約2年間に亘って議論を行った結果、資源の乏しい我が国で、今後のLNGや石油の価格動向等を考えれば、やはり石炭エネルギーを放棄することはできないこと、このためには高効率な石炭利用発電技術であるIGCCを全力を上げて開発すべきであるということ、また商用化に向けた実証プラント開発は民間主導の体制で行うべきこと等が、全体の合意事項となった。

これらの合意の下に、2001年6月15日、日本の電力9社および電源開発の共同出資

---

---

によって、株式会社クリーンコールパワー研究所が設立された。今後、これまでの研究成果を踏まえ、上記の出資10社と電力中央研究所による共同研究として、クリーンコールパワー研究所が実施主体となり、IGCC研究開発の最終段階としての実証プラント試験に取り組ませていただくことになった。

IGCCは、既に欧米で30万kW級プラントの開発が進められており、日本は後発と言わざるを得ない。しかし、欧米のIGCCはいずれも酸素吹きであり、酸素製造に多くの所内動力を消費するため、必ずしも送電端効率は高くない。また、いずれの海外プロジェクトも天然ガスが使用可能であるためか、石炭専焼での信頼性も十分な状況でない。日本で開発しようとしているIGCCは世界最高の効率と信頼性が狙えるIGCCと信じている。これまでの発電プラントはほとんどが海外からの輸入技術であったが、空気吹きIGCCは数少ない国産技術であり、是非とも成功させたい。

後発である有利さも生かし、海外IGCCに追い付き、追い越して、日本で開発をした空気吹きIGCCを世界に売り込んで行きたいものである。

なお、パイロットプラントでは、高効率を指向して乾式ガス精製を採用したが、実証機では時期尚早として、若干効率を犠牲にして湿式ガス精製としている。是非、湿式ガス精製で安定運転を達成した後は、より高効率を狙える乾式ガス精製を適用し、日本のIGCCをより魅力あるものに仕上げたいものである。この面で古くから乾式ガス精製の開発に取り組んでいる電中研への期待は大きい。

株式会社 クリーンコールパワー研究所  
取締役社長

大 西 博 康

## 石炭ガス化複合発電研究のあゆみ

西 暦	当 研 究 所 の 状 況	内 外 の 状 況
1974( S49 )		<ul style="list-style-type: none"> <li>・サンシャイン計画による流動床石炭ガス化炉（5トン/日、石炭技研）の研究開始</li> </ul>
1979( S54 )		<ul style="list-style-type: none"> <li>・中央電力協議会に「ガス化技術検討会」設置（1980年に「石炭ガス化専門部会」と改称）</li> </ul>
1981( S56 )	<ul style="list-style-type: none"> <li>・調査報告書「石炭ガス化複合発電に関する当面の研究課題について（280062）」を作成</li> <li>・加圧二段噴流床石炭ガス化炉開発の共同研究を開始（三菱重工業(株)、1981～1989年度）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・資源エネルギー庁が「火力新技術研究会」を設置し、21世紀に向けた火力新技術の開発方針を検討</li> </ul>
1982( S57 )	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中央電力協議会からの依頼研究として、石炭ガス化複合発電に関するフィージビリティ・スタディに関する報告書を作成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・資源エネルギー庁が「火力新技術調査委員会」を設置、石炭ガス化複合発電の開発方針を取りまとめ</li> <li>・米国クールウォータープログラムに当研究所、東京電力、メーカー2社が共同参加</li> </ul>
1983( S58 )	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2トン/日石炭ガス化基礎実験装置を設置し、試験研究を開始</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・資源エネルギー庁（NEDO）、噴流床石炭ガス化複合発電のフィージビリティ・スタディを実施（1983～1985年度、当研究所受託）</li> </ul>
1984( S59 )	<ul style="list-style-type: none"> <li>・乾式ガス精製、低カロリーガス燃焼器の基礎研究を開始</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・クールウォータープログラム（1000トン/日テキサコ炉）実証運転開始</li> </ul>
1985( S60 )	<ul style="list-style-type: none"> <li>・乾式ガス精製の共同研究を開始（三菱重工業(株)、1985～1989年度）</li> <li>・乾式集じん・脱硫基礎実験装置（2トン/日規模）を設置し、試験研究を開始</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・NEDO「パイロットプラントの基本計画」を取りまとめ</li> <li>・総合エネルギー調査会石油代替エネルギー部会石炭ガス化委員会および産業技術審議会新エネルギー技術開発部会石炭ガス化特別委員会にて、パイロットプラント実施計画が承認される</li> </ul>
1986( S61 )	<ul style="list-style-type: none"> <li>・石炭ガス化複合発電技術研究組合（NEDO）より、パイロットプラントの要素研究を受託し、設計に貢献</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・石炭ガス化複合発電技術研究組合が設立（200トン/日パイロットプラントの設計開始）</li> <li>・火力原子力発電技術協会に噴流床石炭ガス化安全設計委員会を設置</li> </ul>
1987( S62 )	<ul style="list-style-type: none"> <li>・石炭ガス化用ガスタービン要素実験設備を設置し、ガスタービン燃焼技術の研究を開始</li> </ul>	
1989( H1 )	<ul style="list-style-type: none"> <li>・石炭ガス化複合発電技術研究組合（NEDO）からの受託研究として、パイロットプラントにおけるメーカー3社の実圧実寸ガスタービン燃焼器事前評価試験を実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・クールウォータープログラム実証運転終了</li> </ul>



西 暦	当 研 究 所 の 状 況	内 外 の 状 況
1990( H2 )	・石炭ガス化複合発電用1300 級低NOx燃焼器を開発	
1991( H3 )	・2トン/日炉によるパイロットプラント実供試炭事前評価試験を実施(受託研究、1991、1992、1995年度) ・亜鉛フェライトを用いた高性能乾式脱硫技術の開発を開始	・200トン/日パイロットプラントの運転開始
1992( H4 )	・ガス化スラグ有効利用技術の開発を開始(1992～1995年度、太平洋セメント(株)との共同研究)	
1993( H5 )	・2トン/日炉によるスラッキング現象再現試験を実施し、トラブル解決に貢献(受託研究)	
1994( H6 )	・ガス化炉数値解析技術の開発を開始 ・超高温・加圧型燃料反応実験装置(PDTF)を設置し、ガス化反応性解明研究を本格化 ・超重質油ガス化研究を開始(1994～1998年度、中部電力(株)、三菱重工(株)と共同研究、1999年度～、電中研所内研究)	・デムコレック284MW実証プラント運転開始(オランダ)
1995( H7 )	・石炭ガス化複合発電用1500 級低NOx燃焼器を開発	・パイロットプラントで789時間の連続運転を達成 ・ワバッシュリバー296MW実証プラント運転開始(米国)
1996( H8 )	・石炭・石炭灰の物性解明と炉内粒子挙動モデリング技術の開発を実施(1996～1999年度、出光興産(株)石炭研究所との共同研究) ・乾式脱ハロゲン技術の開発を開始	・パイロットプラント計画終了(1996年度)
1997( H9 )		・実証プラントフィージビリティ・スタディを実施(1997～1998年度、NEDOが東京電力(株)に委託、9電力、電発、電中研による電力共同研究)
1998( H10 )		・プエルトヤノ335MW実証プラント運転開始(スペイン)
1999( H11 )	・ガス化炉数値解析ツール等を用いた実証機支援研究を実施(1999年度～、中電協依頼研究) ・ガス化スラグ有効利用技術の開発を実施(1999年度～、太平洋セメント(株)と研究会設置)	・250MWIGCC実証機計画スタート(9電力、電発、電中研による電力共同研究)
2001( H13 )		・実証機計画の実施主体、(株)クリーンコールパワー研究所設立

# はじめに

理事 横須賀研究所長 深田 智久



今回のレビューの「はじめに」を書くに当たり、私自身、万感の思いがこみ上げ、感激一入のものがあります。

と言うのは、今から遡ること20年前、官民一体となって21世紀に向けての火力技術は如何にあるべきかを考える「火力新技術研究会」が組織され、そこで私も、若き血を燃やしつつ、新たな火力分野の主力新技術はどのようなものがあるのかを熱く議論したのでした。その中で、エネルギーセキュリティー、環境そして高効率化の観点から、将来必ずや、我が国における火力の主役の一つを担うものと位置付けたのが石炭ガス化複合発電であり、それが今日の姿に20年を経て育ってくれたからです。

その研究会では、石炭ガス化複合発電については、その技術のキーになるガス化炉につき、プロセス開発炉、パイロット炉、デモ炉、コマーシャル炉等の段階を考え、規模として決めにくいパイロット炉につき、複合のガスタービンの将来規模を想定し、ガスタービン燃焼器一缶分が実圧、実負荷で試験できる200トン/日の値を考え出したことも懐かしく思い出されます。

研究者として、技術者として、発想段階から実証化段階まで、その技術の成長を見られることの喜びは計り知れないものがあり、このような事例は、個人的にも珍しいのみならず、火力分野における技術開発という視点からも、稀有のものと言えるのではないのでしょうか。

この喜びは、これまで営々とこの技術開発を引っ張ってこられた、国、電力、技術研究組合そしてメーカーの多くの方々のご努力により与えられたものと感謝しておりますし、更には、今日(株)クリーンコールパワー研究所が設立され、実用化に向け、力強く歩み始めたのを見るにつけ、ますます倍化されるものでもあります。

電中研としては、この夢の実現に向かい、プロセス開発炉とも言うべき2トン/日炉を駆使し、ガス化炉の基本技術を開発すると共に、200トン/日の勿来のパイロットプラントはもとより、今日の実証機に至るまで、信念と使命感を持って、研究に、技術開発に、全精力を傾けてまいりました。そして今後も、実証機の運転、さらには商用化に向け、ガス化技術は無論、それと同時に研究開発を行っているガス精製技術、ガスタービン技術等について、ハード・ソフト両面から研究を進展させ、世界に誇れる国産技術としての石炭ガス化複合発電技術を確固たるものにしていく覚悟であります。

第 1 章

1

石炭ガス化複合発電  
技術開発の経緯と現状

## 第1章 石炭ガス化複合発電技術開発の経緯と現状 目次

	横須賀研究所 エネルギー機械部 犬丸 淳	
	横須賀研究所 エネルギー機械部 原 三郎	
1 - 1	技術開発の背景 .....	11
1 - 2	石炭ガス化複合発電の方式と特徴 .....	13
1 - 3	海外における開発経緯と最新動向 .....	16
1 - 4	我が国における開発経緯と最新動向 .....	19
	株式会社クリーンコールパワー研究所 技術部長 石橋 喜孝	
	株式会社クリーンコールパワー研究所 技術部 寺田 斉	
1 - 5	250MW実証機計画の概要 .....	20
	経済社会研究所 本藤 祐樹	
コラム	石炭ガス化複合発電のLCA解析 .....	24



犬丸 淳（1984年入所）  
入所より現在に至るまで、石炭ガス化研究に従事。これまで、2トン/日ガス化炉を用いた空気吹きガス化基本技術の開発、ガス化炉内のガス流れ、溶融灰の挙動等に関する研究を行ってきた。この間、IGC組合に出向しパイロットプラント計画に参加。今後も、クリーンコールパワー研究所を強力に支援し、IGCCの実用化・本格導入のために努力していく所存です。



原 三郎（1987年入所）  
これまで石炭ガス化に関する研究に携わり、ガス化性能の評価を中心に、さらに、200トン/日パイロットプラントや実証機計画に加わってきました。現在は、石炭ガス化に加え、オリマルジョンや残渣油などの超重質油ガス化についても研究を行っています。今後は、引き続きガス化複合発電の実用化に向けて研究を進めるとともに、低品位炭のガス化技術や化学原料・合成燃料併産型の新しいシステムについての検討も行っていきたい。



石橋 喜孝（1979年東京電力(株)入社）  
1990年7月、環境部環境技術課副長。  
1993年7月、火力部課長（石炭技術担当）。  
1997年7月、火力部火力エンジニアリングセンター石炭グループマネージャー。  
1999年2月、エネルギー・環境研究所 石炭技術グループマネージャー。  
2001年6月、クリーンコールパワー研究所 技術部長。



寺田 斉（1993年東京電力(株)入社）  
1998年東京電力(株)エネルギー・環境研究所 石炭グループ。  
2001年6月(株)クリーンコールパワー研究所 技術部。



本藤 祐樹（平成4年入所）  
主に環境面および経済面からの技術評価に関する研究に従事。これまでに、発電技術の環境対策コスト分析、LCAによる発電技術の評価、産業連関表を利用したLCA手法およびデータベースの開発などを実施した。

## 1 - 1 技術開発の背景

資源に乏しい我が国において、エネルギーセキュリティーの観点から、豊富な埋蔵量を有する石炭資源の活用は必要不可欠である。また、地球温暖化問題への対応から、CO<sub>2</sub>排出量削減のためできる限りプラントの高効率化を図る必要がある。これらの課題を満足でき、21世紀の石炭利用火力発電の主力を担う発電方式として、高効率で環境性に優れた石炭ガス化複合発電（IGCC：Integrated coal Gasification Combined Cycle）の早期実用化が強く望まれている。

石炭ガス化複合発電は、以下のような特徴を持つ。

- 1) 埋蔵量が豊富で世界中に広く分布する石炭資源を利用できる。特に灰付着トラブル等の観点から、既設の微粉炭火力発電所では困難であった灰融点の低い石炭の利用が可能であるため、エネルギーセキュリティーの確保、利用炭種の拡大に寄与できる。
- 2) 熱効率が高いため、発電電力量あたりの二酸化炭素、硫黄酸化物、窒素酸化物、ばいじんの発生量を低減でき、またプラント出力に対する蒸気タービン出力の割合が小さいため温排水の発生量を低減できるなど、環境性に優れている。
- 3) 石炭中の灰は、ガラス質の溶融スラグとして排出されるため、未燃炭素がほとんど含まれず金属類の溶出がない。また、微粉炭ボイラからのフライアッシュに比べ、埋立て容積が約半分で済む。

さらに、石炭ガス化複合発電が普及すれば、LNGに対する価格牽制力としての効果も期待できる。

石炭ガス化複合発電商用機（600MW級）の送電端熱効率は、46%（HHVベース、湿式ガス精製、1500級GT）～48%（HHVベース、乾式ガス精製、1500級GT）と試算されている。さらに、将来は燃料電池との組み合わせにより50%以上の送電端熱効率も可能とされている。

図1-1-1は、通産省資源エネルギー庁が取りまとめた

高効率発電技術体系である<sup>(1)</sup>。石炭ガス化複合発電は、石炭を利用した高効率発電技術の中でも、今後開発すべき重要な中核技術として位置づけられている。

このような背景のもとで、2010年頃にIGCC技術を確立し、2020年～2030年に石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）技術を確立することが目標とされている。

当研究所では、21世紀前半の電力需給と各種電源開発をシナリオ的に想定し、発電によるCO<sub>2</sub>排出量の試算を行い、CO<sub>2</sub>抑制方策の効果を検討している<sup>(2)</sup>。本検討では、2010年における新設原子力導入量を電事審計画値の7割と想定し、2030年～2050年で火力発電の効率が現状水準の場合と高効率の新技术を導入した場合について試算を行っている。図1-1-2は、検討で想定した高効率石炭火力発電の導入シナリオを示す。図1-1-3は、2050年までのCO<sub>2</sub>排出量の推移をシナリオごとに示したものである。表1-1-1に、想定したシナリオを示す。この結果から、以下のことが言える。

- (1) 火力発電の効率が現状水準のまま推移すれば、いずれの火力構成比でも21世紀中葉のCO<sub>2</sub>排出量は、1990年の値を上回る（図1-1-3中、① - ②、⑤ - ⑥）。
- (2) 2030年以降では火力発電の高効率化によるCO<sub>2</sub>排出量抑制効果が大きくなり、LNGおよび高効率石炭火力の導入割合に応じて、CO<sub>2</sub>排出量を1990年の値以下（図1-1-3中、⑦ - ⑧）、あるいは1990年の値近く（図1-1-3中、③ - ④）まで抑制できる。

この検討結果が示すように、火力発電の高効率化はCO<sub>2</sub>排出量抑制の観点から不可欠である。特に、長期的なエネルギーセキュリティーのために石炭火力は必要な技術であり、その高効率化を図るためには石炭ガス化複合発電の導入拡大が最も効果的である。

石炭ガス化複合発電は、現在想定されている石炭火力新技术の中で、将来最も高い効率を狙える技術であり、我が国が保有すべき極めて重要な技術であることは明白である。

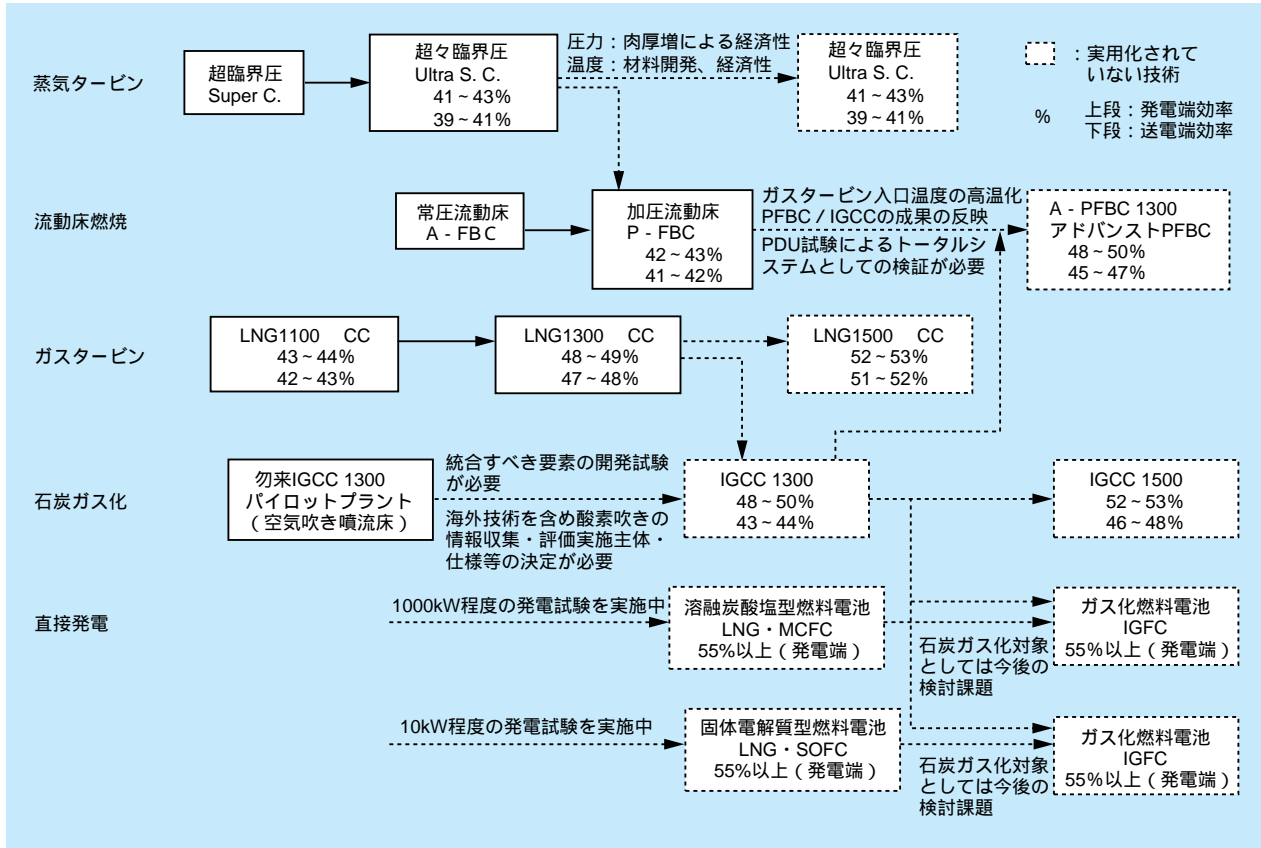


図1-1-1 石炭高効率発電技術体系

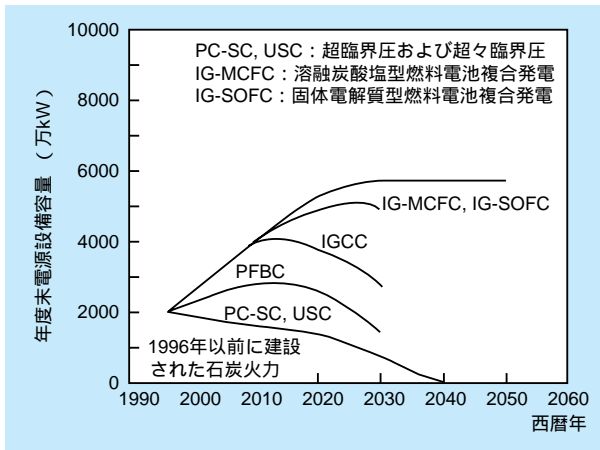


図1-1-2 高効率石炭火力発電の導入シナリオ例

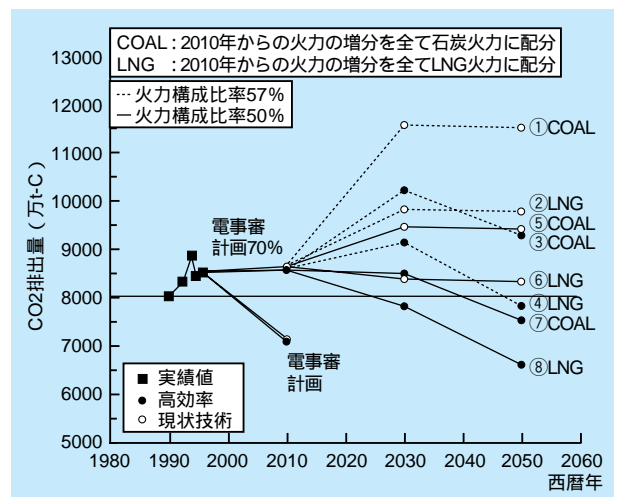


図1-1-3 電源構成の各シナリオにおけるCO<sub>2</sub>排出量

表1-1-1 2030～2050年における火力発電の導入量の想定

	2030～2050年	火力発電の効率	2010年からの火力の増分量の配分	図中の番号
火力補填シナリオ	需要に不足する分を全て火力で補填する。(火力構成比57%) 火力設備容量1.7億kW 火力発電量0.65兆kWh	現状水準	全て石炭	①
		高効率	全てLNG	②
	需要に不足する分を全て非化石で補填する。(火力構成比50%) 火力設備容量1.5億kW 火力発電量0.55兆kWh	現状水準	全て石炭	③
		高効率	全てLNG	④
非化石エネルギー補填シナリオ	需要に不足する分を全て非化石で補填する。(火力構成比50%) 火力設備容量1.5億kW 火力発電量0.55兆kWh	現状水準	全て石炭	⑤
		高効率	全てLNG	⑥
	需要に不足する分を全て非化石で補填する。(火力構成比50%) 火力設備容量1.5億kW 火力発電量0.55兆kWh	現状水準	全て石炭	⑦
		高効率	全てLNG	⑧

## 1-2 石炭ガス化複合発電の方式と特徴

石炭ガス化複合発電は、図1-2-1に示す通り、石炭ガス化設備を中心に、ガス精製設備（脱じん、脱硫）、複合発電設備等、より構成されるが、各構成設備の組み合わせにより種々のシステムが考えられる。IGCC構成設備の代表的な方式とその特徴を以下に示す。

### 1-2-1 石炭ガス化設備

石炭ガス化設備は、ガス化炉の方式、ガス化剤の種類、石炭供給方式などにより分類される。

#### (1) ガス化炉方式

石炭ガス化炉は、供給石炭の粒径や炉内での石炭の流動状態、灰の排出形態から、固定床方式、流動床方式、噴流床方式に大別される。発電用としては、大容量化が容易で負荷追従性に優れた噴流床方式が適しており、現在、国内外で開発が行われているIGCCの大部分は、加圧型噴流床方式ガス化炉を採用している。加圧型噴流床方式においても、ガス流れにより上昇流方式と下降流方式、炉形状・バーナ配置により二室二段、一室二段、一室一段に分類される。

#### (2) ガス化剤種類

ガス化剤としては、酸素や空気を用いるのが一般的で

ある。酸素吹きでは、発熱量 $10.5\text{MJ}/\text{m}^3_{\text{N}}$  ( $2500\text{kcal}/\text{m}^3_{\text{N}}$ )程度の中カロリーガスが得られる。空気吹きに比べ生成ガス流量が少ないことからガス化炉はコンパクトになるが、空気分離装置の所要動力が大きくなり、送電端効率の面でやや不利となる。また、空気分離装置で副生する窒素をガスタービン燃焼器に噴射して $\text{NO}_x$ 発生を抑制するとともに、動力を回収する方式も採用されている。

空気吹きでは、発熱量 $4.2\text{MJ}/\text{m}^3_{\text{N}}$  ( $1000\text{kcal}/\text{m}^3_{\text{N}}$ )程度の低カロリーガスが得られる。空気吹きの場合でも微粉炭やチャーの加圧・搬送用、シール・パージ用の不活性ガスを製造するための空気分離装置が必要となる。ガス化炉安定運転範囲の拡大や生成ガス発熱量の向上のために、この不活性ガス製造用空気分離装置で副生される酸素をガス化剤空気に混入する、酸素富化空気吹きも採用されている。

#### (3) 石炭供給方式

ガス化炉への石炭供給方式としては、微粉炭を気流搬送で供給するドライフィード方式とスラリー（CWM：Coal Water Mixture）化して供給するスラリーフィード方式がある。

スラリーフィード方式は、ガス化炉への加圧供給が容易であり、多くの実績がある。しかし、部分燃焼で発生した熱の一部が、スラリー水の蒸発熱として奪われるこ

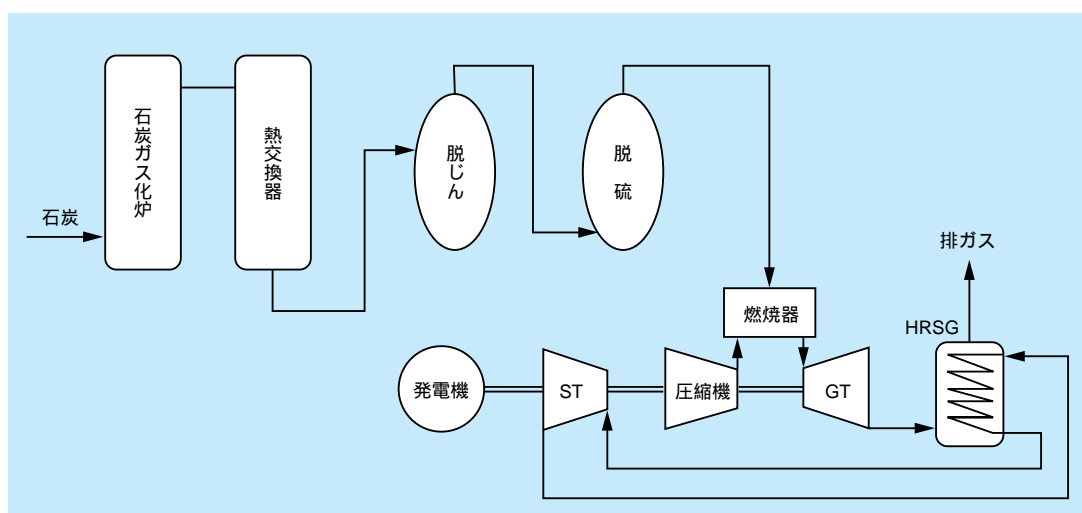


図1-2-1 石炭ガス化複合発電の基本システム構成

と、湿式ガス精製と組み合わせた場合には冷却過程での水蒸気損失が大きいことなどから、熱効率はドライフィードに比べ低くなる。

一方、ドライフィード方式は、熱効率的には有利であるが、微粉炭を加圧するためのロックホッパシステムおよび各バーナへの定量分配システムが必要となり、スラリーフィード方式に比べ設備構成が複雑となる。

国内外で開発が行われている主要な加圧型噴流床方式石炭ガス化炉を表1-2-1に示す。

### 1-2-2 ガス精製設備

IGCCにおけるガス精製設備（脱じん・脱硫）としては、低温の湿式ガス精製方式と高温の乾式ガス精製方式がある。

#### (1) 湿式ガス精製方式

水スクラバによる脱じんと化学吸収法、物理吸着法あるいは直接酸化法による湿式脱硫から構成される。湿式ガス精製方式では、生成ガス中のアルカリ金属やアンモニアが除去されるため、ガスタービンの信頼性や環境安全性の面からは有利であるが、ガスの顕熱損失および水蒸気や水溶性ガスの損失により熱効率的には不利である。近年、湿式脱硫とセラミックフィルタあるいはメタルフィルタによる乾式脱じんを併用する方式も採用されている。

#### (2) 乾式ガス精製方式

セラミックフィルタやメタルフィルタまたは移動床による脱じん、流動床または固定床による脱硫から構成される。さらに脱じんと脱硫を一体化した移動床同時脱硫脱じん技術も開発されている。乾式ガス精製の場合、ガスの顕熱損失が少なく熱効率面では有利であるが、生成ガス中のアンモニアが除去されないため、ガスタービンでのフュエルNOx発生を抑える低NOx燃焼技術が必要となる。

### 1-2-3 複合発電設備

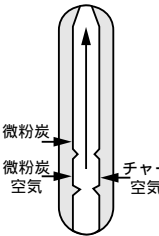
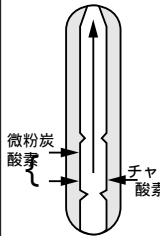
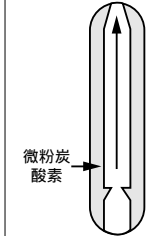
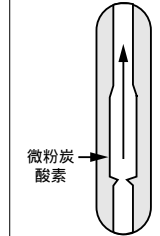
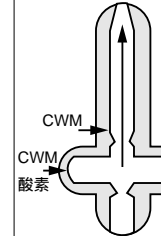
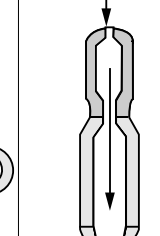
#### (1) ガスタービン

石炭ガス用ガスタービンは、LNGや軽質油用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。石炭ガスは発熱量が約4.2MJ/m<sup>3</sup><sub>N</sub>～10.5MJ/m<sup>3</sup><sub>N</sub>の低～中カロリーガスで、LNGの発熱量に比べ5～10分の1と低いため、これに対応した安定燃焼技術が必要である。特に起動用燃料から石炭ガスへの切り替え時の安定性に注意が必要である。また、LNG等に比べ石炭ガスの火災温度は低いため、サーマルNOxの発生量は少なくなるが、石炭ガス中にアンモニアが含まれている場合は、フュエルNOxへの転換を抑制する低NOx燃焼技術が必要となる。

#### (2) 排熱回収ボイラー（HRSG）、蒸気タービン

HRSGや蒸気タービンについては、既存のLNG複合

表1-2-1 国内外で開発中の主要な加圧型噴流床ガス化炉

	電中研/三菱炉 (IGCC実証機)	日立炉 (EAGLE)	シェル炉	ブレンフロー炉	ダウ炉	テキサコ炉
型式	二室二段	一室二段	一室一段	一室一段	二室二段	一室一段
ガス流れ	上昇流	上昇流	上昇流	上昇流	上昇流	下降流
石炭供給	ドライ	ドライ	ドライ	ドライ	スラリー	スラリー
ガス化剤	酸素富化空気	酸素	酸素	酸素	酸素	酸素
概念図						



発電や汽力発電での技術を適用可能である。IGCCの特徴としては、次節に述べる通りガス化炉後流の熱交換器でも熱回収を行い、複合発電設備側と水・蒸気系のインテグレーションをすることが可能な点である。この結果、ガスタービンと蒸気タービンの出力比は、LNG複合発電ではおよそ2：1であるのに対し、IGCCではおよそ1：1と蒸気タービンの出力割合が高くなる。

また、通常の微粉炭火力と比較した場合、IGCCのプラント出力に対する蒸気タービン出力の割合は約50%程度であることから、プラント出力当たりの温排水量を低減することが可能となる。

#### 1-2-4 インテグレーション技術

IGCCの大きな特徴は、ガス化炉、ガス精製、複合発電設備、空気分離装置等の主要構成機器間で空気や水・蒸気等の物質や熱エネルギーを有機的に結合して高効率を達成していることである。IGCCの主なインテグレーション技術を以下に記す。

##### (1) 空気系のインテグレーション

ガス化剤である酸素あるいは不活性ガス製造のための空気分離装置への空気供給方法として次の3つがある。

##### ① フルインテグレーション

全ての空気をガスタービン圧縮機からの抽気でまかなう。(図1-2-2(a)で原料空気圧縮機がないもの。)

##### ② パーシャルインテグレーション

空気の一部を別置き原料空気圧縮機から供給する。(図1-2-2(a))

##### ③ インテグレーション無し

全ての空気を別置き原料空気圧縮機から供給する。(図1-2-2(a)で抽気空気がないもの)

また、酸素吹きの場合は、空気分離装置で副生する窒素をNO<sub>x</sub>発生抑制と動力回収のためガスタービン燃焼器に投入する方式(図1-2-2(a))、空気吹きの場合は、空気分離装置で副生する酸素をガス化剤空気に混入する方式(図1-2-2(b))も採用されている。

##### (2) 水・蒸気系のインテグレーション

ガス化炉後流の熱交換器、複合発電設備の排熱回収ボイラ等における熱回収方法を最適化するため、水・蒸気系のインテグレーションが行われ、単圧、復圧、3重圧、さらに、再熱・再生の有無などが加わり、多種多様なシステムが構成される。

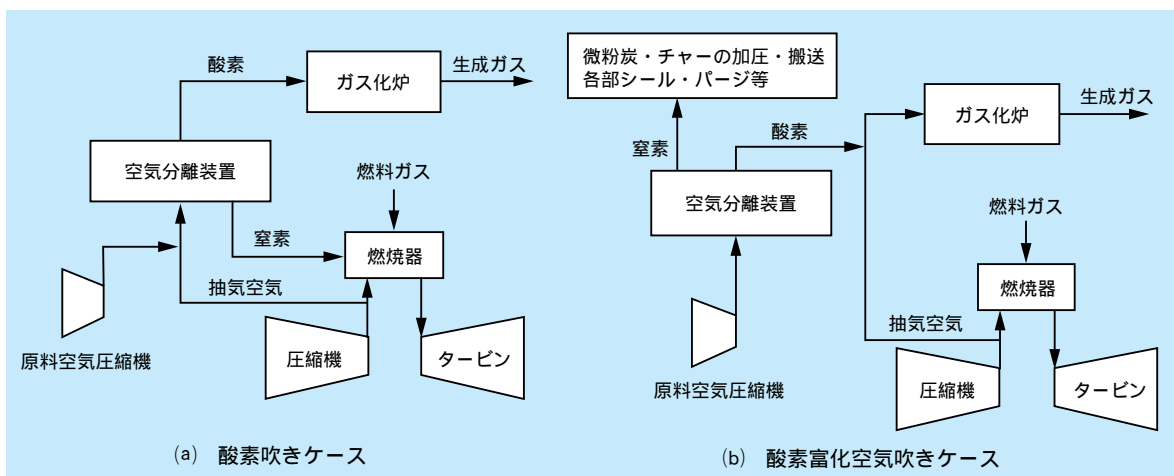


図1-2-2 空気系のインテグレーション

# 1 - 3 海外における開発経緯と最新動向

石炭ガス化炉の開発の歴史は古く、1920年代に都市ガスや化学原料の製造用として実用化されている。発電用ガス化炉の開発は1970年代より本格化し、西独のSTEAG社が政府の援助のもとに、1972年頃からKellerman発電所で170MWの固定床方式による世界初のIGCC運転を行った。図1-3-1に、IGCC用ガス化炉の開発の歴史を示す<sup>(3)</sup>。一般に、石炭処理量が数トン/日規模のベンチプラントによる研究からスタートし、数十～数百トン/日規模のパイロットプラントを経て、千～二千トン/日級の実証・商用炉へと開発が進められている。

近年、IGCC用ガス化炉の開発は噴流床方式が主流となり、本格的な実証計画としては、1984年から5年間運転を行ったクールウォーター計画(米国、テキサコ炉)をはじめとして、現在運転中の、デムコレック(オラン

ダ、シェル炉)、ワバッシュリバー(米国、ダウ炉)、タンパ(米国、テキサコ炉)、プエルトヤノ(スペイン、プレフロー炉)の4大プロジェクトがあげられる。

クールウォーター計画では、噴流床方式ガス化炉による世界初のIGCC実証運転(発電出力120MW)が行われ、熱効率(送電端)は30%前後と低いものの、安定した運転が行えることを実証した。我が国も出資共同体(JCWP:東京電力<sup>(株)</sup>、<sup>(株)</sup>電力中央研究所、<sup>(株)</sup>東芝、石川島播磨重工業<sup>(株)</sup>が参加)を組織し、実証試験に参加した。

表1-3-1に、現在運転中の主要な実証・商用プラントの概要および最近の技術動向を示す。

いずれも、ガス化方式には酸素吹き噴流床、ガス精製には湿式が採用されている。これまでの主なトラブルとして、灰付着、セラミックフィルタの破損、ガスタービ

2001年6月現在

ガス化方式	1970	1975	1980	1985	1990	1995	備考
電中研/三菱炉 (IGCC実証機) [空気吹き噴流床]				電中研横須賀 2t/日	勿来 200t/日PP	実証炉FS	2007年に実証炉運転予定
日立炉 (EAGLE) [酸素吹き噴流床]			1t/日炉(日立)		50t/日PP(HYCOL)	若松EAGLE PP	2002年に、EAGLE試験開始予定
CE炉 [空気吹き噴流床]	70年代初頭から発電用ボイラの基礎技術を基に開発に着手	ウィンザー 120t/日常圧炉PP		加圧型検討		スプリングフィールド(米) 600t/日DP	スプリングフィールド計画は、経済情勢を理由に中止
テキサコ炉 [酸素吹き噴流床]	モンテペロー 15~25t/日PP	オーベルハウゼン 150t/日(プロセスガス供給)		クールウォータープロジェクト(米) 1000t/日DP		タンパ(米) 2300t/日CP	タンパ: 1996年運転
シェル炉 [酸素吹き噴流床]	50年代初頭から開発に着手	アムステルダム(蘭) 6t/日PP ハーブルグ 150t/日PP			ディアパーク(米) 250t/日DP	ブナム(蘭) 2000t/日CP	ブナム: 1998年1月より商用運転開始
ダウ炉 [酸素吹き噴流床]	70年代初頭から開発に着手	ブラクマイン(米) 12~35t/日PP		ブラクマイン(米) 1600t/日DP	ブラクマイン(米) 2400t/日CP	ワバッシュリバー(米) 2600t/日CP	ワバッシュリバー: 商用運転中
プレフロー炉 [酸素吹き噴流床]	40年代から開発に着手されたコッパーストチック法を基に開発	ハンブルグ(独) 150t/日PPでシェルと共同開発		フルステンハウゼン(独) 48t/日PP		プエルトヤノ(西) 2600t/日CP	プエルトヤノ: 1998年運転
HTW炉 [流動床]	20年代から開発に着手されたウィングラー法を基に開発、常圧150t/日規模は56年に試験開始	Freohen(独) 34t/日PP		Berrenrath(独) 720t/日DP		コブラ計画 ケルン(独) 3600t/日CP	コブラ計画は中止。チェコ400MW IGCC計画有り(2003年運転予定)
ルルギ炉 [酸素吹き固定床]	ルーネン(独) 360t/日PP	58年からPP試験開始	ウェストフィールド(英) 350t/日PP		ウェストフィールド(英) 600t/日DP		ケンタッキー(米) BGL 400MW IGCC計画有り(2002年運転予定)

PP: パイロットプラント  
 DP: 実証プラント  
 CP: 商用プラント(補助を受けて建設され、実証運転の後商用運転を行うものも含む)  
 →: 現在でも炉が存在し、試験運転を行っていると思われるもの

図1-3-1 IGCC用ガス化炉開発の歴史

表1-3-1 海外IGCCプロジェクトの最新動向

プロジェクト	Demkolec (オランダ)	Wabash River (アメリカ)	Tampa (アメリカ)	Puertollano (スペイン)
方式	シェル炉 (ドライフィード/酸素吹き) 湿式ガス精製	ダウ炉 (スラリーフィード/酸素吹き) 湿式ガス精製	テキサコ炉 (スラリーフィード/酸素吹き) 湿式ガス精製	ブレンフロー炉 (ドライフィード/酸素吹き) 湿式ガス精製
プラント出力	発電端284MW (送電端253MW)	発電端296MW (送電端262MW)	発電端322MW (送電端250MW)	発電端335MW (送電端300MW)
実施主体	Demkolec	Global Energy, PSI Energy	タンパ電力	Elcogas
スポンサー	・オランダ発電事業者連合SEPにより設立されたデムコレック社	・Global EnergyとPSI Energy ・DOE(CCT-IV)から50%の補助金 (最終的には41%補助)	・タンパ電力 ・DOE(CCT-III)から50%の補助金 (最終的には26%補助)	・EUの共同プロジェクトとして設置されたエルコガス社 ・ECから約9%の補助金
スケジュール	1990年 着工 1994年1月 実証試験開始 (GT不具合により実証試験1年延長) 1998年1月 商用運転開始	1990年9月 着工 1995年8月 石炭ガス化開始 1995年11月 実証試験開始 (試験期間3年間)	1994年7月 着工 1996年7月 ガス化運転開始 1996年9月 実証試験開始 (試験期間4年間)	1993年4月 着工 1996年10月 天然ガス炊試運転開始 1997年11月 石炭ガス化開始 1998年3月 石炭ガスでGT運転開始
運転状況	(主要なトラブル) ・大塊スラグによるスラグ取出口の閉塞 ・GT燃焼器の燃焼振動 ・セラミックフィルタの破損  (運転実績) ・総運転時間: 15000時間 (H10/12月末) ・最大連続運転時間: 1050時間 (H11/10月末)  (その他特記事項) ・低品位炭や石炭コースによる低コスト化を検討中	(主要なトラブル) ・シンガス熱交換器管の塩素濃縮と部材の初期残留応力による応力腐食割れ発生 ・セラミックフィルタの破損 ・精製ガス中の塩素によるCOSコンバータ触媒の劣化 ・GT燃焼器ライナーにクラック  (運転実績) ・総運転時間: 14275時間 (H11/10月末) ・最大連続運転時間: 2200時間以上 (H12/10月末)	(主要なトラブル) ・GGHチューブリークによるGT損傷があり現在GGTを全て撤去 ・スクラパー出入口部の生成ガス配管エロージョン ・シンガス熱交換器の灰詰まり  (運転実績) ・総運転時間: 10010時間 (H10/12月末) ・最大連続運転時間: 1250時間 (石炭ガス&LNG) ・ガス化炉累計運転時間: 1278時間 (H11/10月末) ・ガス化炉最大連続運転時間: 1154時間 (H12/10月末)	(主要なトラブル) ・GT燃焼振動により燃焼器バーナ全数取り替え ・GTバーナのオーバーヒートが発生  (運転実績) ・総運転時間数: 593時間 ・最大連続運転時間: 100時間 ・ガス化炉累積運転時間: 1278時間 ・ガス化炉最大連続運転時間: 182時間 (H11/10月末)
送電端効率	・計画 41.1% (HHV) ・実績	・計画 39.7% (HHV) ・実績 37.5% (HHV)	・計画 37.8% (HHV) ・実績 39.7% (HHV)	・計画 41.5% (HHV) ・実績

ン燃焼器の燃焼振動等が報告されている。これらのプラントは、運開後まもないプエルトヤノを除き、現在は概ね順調な運転が可能となりつつある。しかしながら、種々のトラブル報告や連続運転時間の伸び悩み等から推察すると、直ちに我が国へ商用機として導入できる状況にはないものと考えられる。表1-3-2に、これらのプラントでの主なトラブル経験とそれらに基づく実証機への反映事項を整理して示す。

なお、乾式ガス精製については、プラント熱効率の2ポイント程度の上昇が期待できるため、将来必要な技術として我が国が先行的に開発を進め、勿来200トン/日パイロットプラントにおいて、流動床方式(200トン/日規模)、固定床方式(20トン/日規模)等の運転研究が終了している。海外でも米国を中心に開発・運転計画が進められているが、詳細な報告は未だない。主要なIGCC用ガス精製方式の概要を表1-3-3に示す。なお、タンパにおける乾式ガス精製試験は中止が決定している。

IGCC用ガスタービンについて、メーカーごとに比較す

る。プナム発電所に採用されたシーメンス社は、タービンロータ軸を対象として両側にサイロ型燃焼器を2筒配置し、それぞれの燃焼器にはデュアル燃料タイプのハイブリッドバーナを複数本配置している。ノズルの中心には、天然ガス用バーナを配置し、その外周に空気およびガス化燃料用の旋回羽根を持つ。一方、アルストーム社では、EVバーナを用いて旋回空気中に中カロリー燃料を噴射して急速に希釈混合し、サーマルNOxを抑制する燃焼方式について研究がなされており、アニュラー型燃焼器構造を採用している。また、GEではマルチキャン・マルチバーナ型燃焼器を採用しており、同時に、窒素、水蒸気等の希釈ガスを燃焼器のヘッドエンドから燃焼用空気中に噴出させる研究もなされている。このように、主要なガスタービンメーカーのシーメンスウェスチングハス、アルストーム、およびGE各社は従来から保有する天然ガス焼きガスタービンの構造の相違から、それぞれ異なった特徴を有するガスタービンを開発している。

表1-3-2 海外プラント運転実績と実証機への反映事項

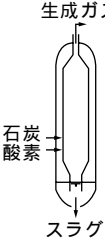
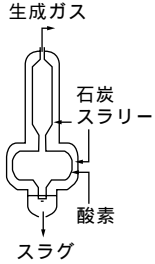
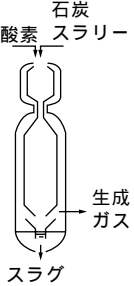
ガス化炉概念図		運 転 実 績	実証機への反映事項
ブフナム (オランダ) 	ガス化炉設備	・塊状、針状スラグ堆積によるスラグ払い出し不良発生 出口弁大口径化	・シミュレーション、試験炉による事前検証 ・スラグクラッシャー大型化
	ガス精製設備	・セラミックフィルタの割れ発生 フィルタ固定構造の変更	・フィルタ支持・固定構造の適正化 ・破損時の早期検知とバックアップ対策
	複合発電設備	・ガスタービン燃焼振動発生 燃焼器・バーナ設計変更	・実圧実寸燃焼試験実績の検討・評価
	全体システム	・フルインテグレーション (ASU-GT) での制御不良 起動用空気圧縮機設置	・空気分離装置 (ASU) は別置き空気圧縮機により、単独運転
ワバッシュリバー (アメリカ) 	ガス化炉設備	・SGC入口部に灰堆積発生 流路形状、流速変更 ・塩化物濃縮によるSGC伝熱管の腐食・応力腐食割れ SGC補修	・シミュレーション、試験炉による事前検証 ・スーツプロアの設置 ・温度管理の徹底による塩化物濃縮防止
	ガス精製設備	・塩化物によるCOS転換触媒の劣化 上流にスクラバー設置、触媒種変更 ・セラミックフィルタの割れ メタルフィルタに変更	・耐ハロゲン性触媒の採用 ・フィルタ支持・固定構造の適正化
	複合発電設備	・ガスタービン燃焼器ライナーにクラック 燃料ノズル・ライナー交換	・実圧実寸燃焼試験実績の検討・評価
タンバ (アメリカ) 	ガス化炉設備	・輻射型ガス冷却器上部シール部リーク 設計変更、運転手順確立 ・対流型冷却器でガス温度低、結露により灰付着 輻射型冷却器設計変更 ・石炭性状変化によるスラグトラブル 一部設備改造	・シール部設計の適正化 ・監視計測手法の検討 ・熱交換器設計の適正化 (パイロット炉実績、基礎試験、シミュレーション) ・炭種による影響の事前評価
	ガス精製設備	・ガス熱交における腐食、灰堆積・ガス流速上昇・エロージョンによりガスリーク 設計変更検討中	・温度管理 (起動、停止、部分負荷) の徹底 ・ガス熱交設計の適正化
	複合発電設備	・ガス熱交の腐食・粗ガスリークによるタービン翼損傷 熱交バイパス、フィルター設置	・タービン翼デポジット特性の解明

表1-3-3 国内外におけるガス精製技術の開発動向

プロジェクト名	ガス化炉形式	集じんプロセス	脱硫プロセス
デムコレック (オランダ)	乾式給炭 酸素吹き 一段噴流床	サイクロン+ セラミックフィルタ+ 湿式スクラバ	湿式：化学/物理吸収 スルフィノールM法
タンバ (アメリカ)	スラリー給炭 酸素吹き 一段噴流床	湿式 (ガス量100%) スクラバ	湿式 (ガス量100%) MDEA法
		乾式 (ガス量10%) サイクロン+ メタルフィルタ	乾式 (ガス量10%) 移動床
ワバッシュリバー (アメリカ)	スラリー給炭 酸素吹き 二段噴流床	メタルフィルタ+ 湿式スクラバ	湿式：化学吸収 MDEA法
プエルトヤノ (スペイン)	乾式給炭 酸素吹き 一段噴流床	セラミックフィルタ+ 湿式スクラバ	湿式：化学吸収 MDEA法
ピニオンパイン (アメリカ)	乾式給炭 空気吹き 流動床	サイクロン+ セラミックフィルタ	乾式：流動床
200トン/日パイロット プラント (福島県いわき市)	乾式給炭 空気吹き 二段噴流床	乾式 (ガス量100%) グラニューラベッド	乾式 (ガス量100%) 流動床
		乾式 (ガス量10%) ポーラスフィルタ	乾式 (ガス量10%) 八ニカム固定床

# 1 - 4 我が国における開発経緯と最新動向

## 1-4-1 I G C C 開発経緯

我が国で事業用IGCCとして開発が進められている噴流床方式石炭ガス化複合発電技術について、その開発経緯を記す(図1-4-1)。

噴流床石炭ガス化複合発電については、1980年12月に中電協技術開発推進会議の小委員会として石炭ガス化専門部会が設置され(～1986年9月)さらに、火力新技術研究会(1981年12月～1983年7月)火力新技術調査委員会(1982年3月～1983年9月)での検討の結果、大容量化、炭種適合性、環境保全性、負荷応答性等に優れた噴流床方式の石炭ガス化複合発電技術開発を官民一体となって進めることとなった。

こういった流れの中で、当研究所は中電協からの依頼を受け、石炭ガス化複合発電技術調査及びパイロットプラントの概念設計を実施した(1981、82年度)。引き続き、当研究所はNEDOからの委託を受け、パイロットプラント基本計画策定のためのフィージビリティ・スタディ(FS)を実施した(1983～1985年度)。

このFSの結果を受け、NEDOは、「パイロットプラントの基本計画」を1985年度に取り纏め、総合エネルギー調査会石油代替エネルギー部会石炭ガス化委員会及び産業技術審議会新エネルギー技術開発部会石炭ガス化特別委員会に諮問し、噴流床石炭ガス化複合発電パイロットプラント計画を実行に移すこととなった。

1986年6月に10電力会社と当研究所から成る石炭ガス化複合発電技術研究組合(IGC組合)が設立され、勿来200トン/日パイロットプラント計画を開始した。ガス化炉については、1982年度より当研究所と三菱重工業(株)が2トン/日炉により開発を行ってきた空気吹き加圧二段噴流床方式が、ガス精製については、夕張40トン/日パイロットプラントで開発を行ってきた流動床脱硫・移動床脱じんが採用された。

当研究所は、1982年度～1995年度に2トン/日ガス化炉の運転を行い、空気吹き加圧二段噴流床ガス化炉の基本技術を確立した<sup>(4)</sup>。20銘柄(約40種)のガス化特性を確認するとともに、フラックス添加や混炭による高灰融点炭の融点降下方策を開発し、高灰融点炭を高性能でガス化できることを確認した<sup>(5)</sup>。また、2トン/日ガス

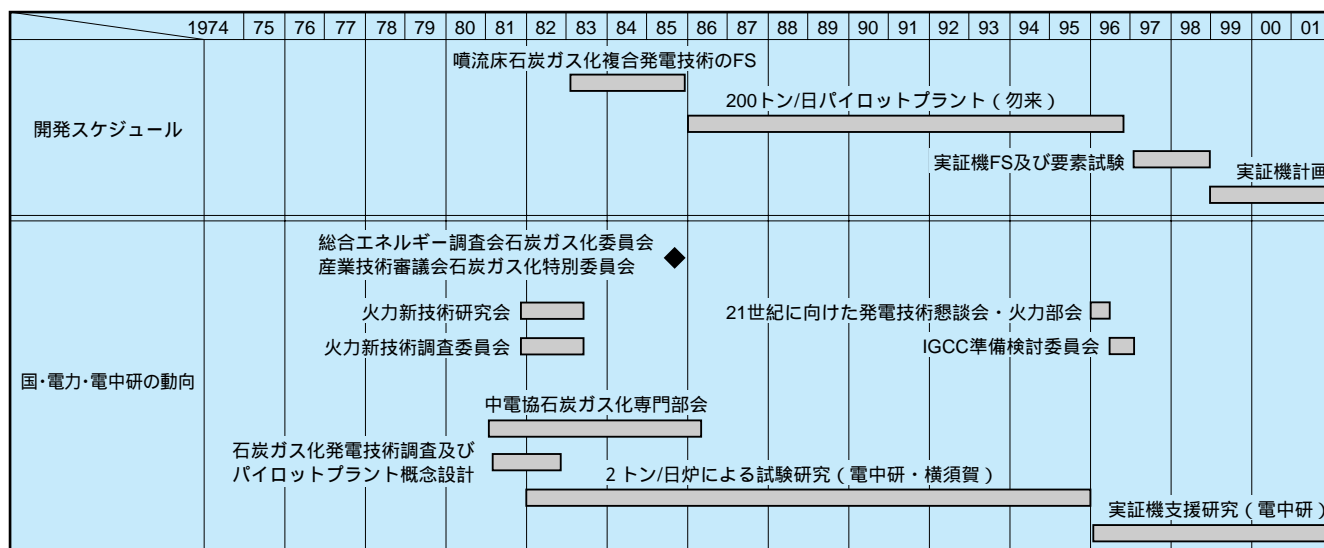


図1-4-1 我が国における噴流床石炭ガス化複合発電技術の開発経緯

化炉を活用し、パイロットプラントのガス化炉設計データを取得した。以下の10項目の研究成果が、パイロットプラントの設計および運転に反映された。

①ガス化炉形状（炉内流動試験）、②水冷スラグホール、③電気集塵機（EP）、④ガス化炉材料選定、⑤チャーの生成ガス搬送、⑥微量ガス成分把握、⑦パイロットプラント候補炭の事前検証、⑧熱交換器伝熱特性、⑨遮断弁の耐久性、⑩スラグホップ水の水质調査

パイロットプラントは、1991年度より運転が開始され、スラッキングトラブルに苦しんだものの、最終的にはこれを克服して789時間の連続運転時間を達成し、1996年度に成功裏に終了した<sup>6)</sup>。

勿来パイロットプラントの成果を踏まえ、実証機計画に関する検討が行われ、1996年6月に21世紀に向けた発電技術懇談会・火力部会の中間報告として、IGCCの位置づけ、開発の重要性が取り纏められ、1997、98年度に実証機FSを実施することとなった。また、IGCC準備検討委員会（1996年8月～1997年3月）において、実証機FSの位置づけの再確認と前提条件等の検討が行われた。

実証機FSは、NEDOより東京電力(株)に委託されたが、10電力会社及び当研究所が共同研究契約を締結し、東京電力(株)に各法人からの出向・派遣者が集結し、実施された。本FSの結果、勿来方式ガス化炉（酸素富化空気吹き加圧二段噴流床方式）と湿式ガス精製（MDEA）の組み合わせが最も高い評価を受けた。

1999年度より、上記の電力共同研究として実証機計画がスタートした。1999年度～2000年度は東京電力(株)が、2001年度以降は(株)クリーンコールパワー研究所が

実施主体となり計画を推進している。

## 1-4-2 その他の開発動向

### (1) 噴流床方式多目的ガス化技術

サンシャイン計画において、1983年度より噴流床方式多目的ガス化技術に関する検討が行われた。その検討結果に基づき、1986年度に石炭利用水素製造ガス化技術の開発が開始され、(株)日立製作所が1981年度より開発を行ってきた酸素吹き加圧二段噴流床方式ガス化炉を採用した50トン/日パイロットプラントが袖ヶ浦に建設され、1991年度から1993年度にかけて運転が行われた（HYCOL計画）。引き続き、1995年度より燃料電池用石炭ガス製造技術として本ガス化技術の開発（EAGLE計画）が進められており、電源開発(株)の若松総合事業所において、150トン/日パイロットプラントの運転が2002年度より開始される予定である。

### (2) 加圧CPC

25トン/日、2MPa、空気または酸素富化空気吹きガス化炉の開発が、石炭利用総合センター（CCUJ）、川崎重工業(株)、中部電力(株)、電源開発(株)により電源開発(株)若松総合事業所において行われ、1999年度をもって終了した。

### (3) 多目的石炭転換技術

100トン/日、0.3MPa、酸素吹きガス化炉の開発が、CCUJ、新日鐵(株)他7社により北九州市の新日鐵(株)八幡製鉄所において行われ、2000年度をもって終了した。

## 1-5 250MW 実証機計画の概要

2001年6月、(株)クリーンコールパワー研究所が電力共同出資により設立され、国からの補助を受け事業主体としてIGCC実証機プロジェクトを実施することとなった。空気吹きIGCC開発の最終段階に入った、実証機プロジェクトの概要と計画について以下に述べる。

### 1-5-1 実証プラント試験の概要

実証プラントの概要を表1-5-1に示す。

表1-5-1 実証プラントの概要

出力 (石炭使用量)	250MW級 (約1700トン/日)
方式 ガス化炉 ガス精製 ガスタービン	空気吹き噴流床ドライフィードガス化 湿式ガス精製(吸収液MDEA)、石膏回収 1200 級
目標熱効率	発電端48% (LHVベース)、46% (HHVベース) 送電端42% (LHVベース)、40.5% (HHVベース)

(1) 出力規模

出力規模は、パイロットプラントから実証プラントへのスケールアップ比率と、実証プラントから商用プラントへのスケールアップ比率の双方を鑑み、適正な値を選定する必要がある。

パイロットプラントから実証プラントへのスケールアップ比率は、海外プラントの実例(4~10倍程度)を参考として約8倍、実証プラントから商用プラントへのスケールアップ比率については、過去の電力プラントのスケールアップ実績(最大2.12倍)を参考にして2倍程度を選定し、結果として実証プラントの出力規模を250 MWとした。

(2) 方式

方式としては、空気吹きガス化炉と湿式ガス精製の組み合わせを採用する。1997年度に実施された実証試験

に向けたフィージビリティスタディ(FS)において選定された方式である。

パイロットプラントでは、より高効率を得られる乾式ガス精製を採用した。試験において目標性能は達成したものの、実証プラントに採用するには機器信頼性・環境性に課題が多く、IGCC実証プラントを確実に成功させる狙いから、実証プラントには比較的技術課題の少ない湿式ガス精製を採用することとした。ガスタービンは出力を250 MWに抑えるため、1200 級を採用することとした。

(3) 熱効率

目標熱効率は1200 級ガスタービンでは高効率化には限界があるが、新鋭大容量微粉炭火力と同程度の送電端効率40.5%を設定した。実証試験でIGCCの総合的な検証がなされれば、商用段階では1500 級ガスタービンの採用により、送電端効率で46~48%を達成できると見込んでいる。

IGCCシステムの構成を図1-5-1に示す。

1-5-2 実証プラントの目標

実証プラントとして達成すべき目標を表1-5-2の通り定めた。表1-5-3に示すIGCCの商用化時点で求められる信頼性、熱効率、環境性、炭種適合性、経済性の水準

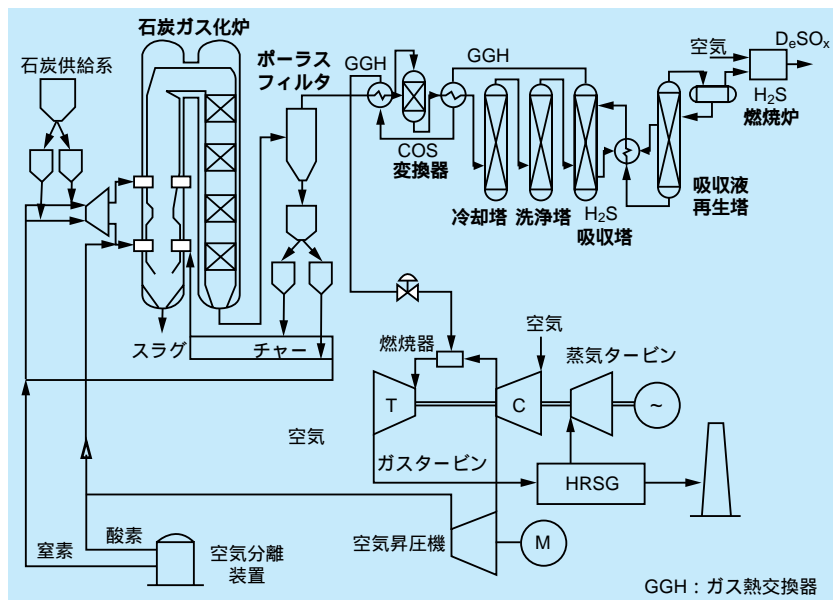


図1-5-1 IGCCのシステム構成

表1-5-2 実証プラントの達成目標

指 標	水 準
信頼性	年利用率70%以上の見通しが得られること
熱効率	送電端効率 42% (LHV) 40.5% (HHV)
環境性	SOx : 8 ppm (16%O <sub>2</sub> 換算) NOx : 5 ppm (16%O <sub>2</sub> 換算) ばいじん : 4 mg/m <sup>3</sup> N (16%O <sub>2</sub> 換算)
炭種適合性	微粉炭火力に適合しにくい灰融点の低い石炭(灰溶融度1400 以下)を使用し、安定運転ができること
経済性	発電原価が微粉炭火力と同等以下となる見通しを得ること

表1-5-3 商用化時点で求められる水準

指 標	水 準									
信頼性	年利用率70%以上									
熱効率	<table border="0"> <tr> <td>発電端</td> <td>送電端</td> <td></td> </tr> <tr> <td>51%</td> <td>46%</td> <td>1500 級ガスタービン/湿式ガス精製の場合 (HHV)</td> </tr> <tr> <td>53%</td> <td>48%</td> <td>1500 級ガスタービン/乾式ガス精製の場合 (HHV)</td> </tr> </table>	発電端	送電端		51%	46%	1500 級ガスタービン/湿式ガス精製の場合 (HHV)	53%	48%	1500 級ガスタービン/乾式ガス精製の場合 (HHV)
発電端	送電端									
51%	46%	1500 級ガスタービン/湿式ガス精製の場合 (HHV)								
53%	48%	1500 級ガスタービン/乾式ガス精製の場合 (HHV)								
環境性	SOx : 8 ppm (16%O <sub>2</sub> 換算) NOx : 5 ppm (16%O <sub>2</sub> 換算) ばいじん : 4 mg/m <sup>3</sup> N (16%O <sub>2</sub> 換算)									
炭種適合性	瀝青炭に加えて、亜瀝青炭等の灰融点の低い、より低質な石炭を利用して安定運転ができること									
経済性	発電原価が微粉炭火力と同等以下									

を基に設定された。

(1) 信 頼 性

実証プラントは、商用プラント並の信頼性を検証するという趣旨から、ベース電源として必要な年利用率を確保できることとした。

(2) 熱 効 率

実証プラントにおいては、規模が比較的小さいこと、ガスタービン性能が商用規模のものより劣ることを勘案すると、送電端効率 40.5% 程度となる。それでも 1000MW 級大容量微粉炭火力の送電端効率とほぼ同等であり、妥当な水準と考えられる。

実証プラントで IGCC の総合的な検証がなされれば、商用段階では大容量で高性能な 1500 級ガスタービンの採用により、高い熱効率が達成されると見込んでいる。

(3) 環 境 性

SOx、NOx、ばいじん等の排出濃度が最新鋭の微粉炭火力と同等で、熱効率の向上により発電電力量あたりの排出量が低減されることを目標とした。

(4) 炭種適合性

商用段階では幅広い炭種適合性が求められるが、微粉炭火力向けの炭種によるガス化はすでに勿来パイロットプラントで検証済みである。

実証プラントでは主として、微粉炭火力に不向きであり IGCC に適していると考えられる、低灰融点炭を使用することとする。

(5) 経 済 性

今後大規模電源においても、競争入札による導入の決定が行われていく所である点も踏まえ、少なくとも既存の超々臨界圧微粉炭火力 (USC) と同等程度の経済性の確保が必要である。

1-5-3 実証プラント試験スケジュール

現在計画中の実証プラント試験スケジュールを表 1-5-4 に示す。実証プラント試験は 1999 年度から 2009 年度までの 11 年間で計画され、「事前検証試験」と「実証試験」の 2 つの工程に大別される。

今後は事前検証試験の成果を反映して、2001 年度より実証プラントの基本設計・詳細設計に入り、実証プラ



表1-5-4 実証プラント試験スケジュール

年度	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
事前検証試験		事前検証試験									
実証試験			基本設計・詳細設計				建設			運転試験	
環境アセスメント			環境アセスメント								

ントの建設を2004年度から、運転試験を2007年度から開始する計画としている。建設に先立ち環境アセスメントを行う必要があり、実証プラントの設計と並行して実施する計画としている。図1-5-2に実証プラントの完成予想図を示す。

1-5-4 研究開発の実施体制

実証プラント試験の開発体制を図1-5-3に示す。IGCC実用化に至る最終段階として、民間主導の開発体制を構築するため、電力9社および電源開発(株)が出資する(株)クリーンコールパワー研究所が設立された。出資10社と(助)電力中央研究所および(株)クリーンコールパワー研究所の12法人は共同研究契約を締結し、実証プラント試験を推進していく。

(株)クリーンコールパワー研究所は、実施主体として、30%を国からの補助金及び、残る70%を参加電力11法人からの分担金を基に実証プラント試験を推進している。また研究員は、各法人からの出向者および派遣者により構成されている。

実証プラント試験の開発計画は、いよいよ本格的な段階に入った。事前検証試験の成果など、実証プラントの信頼性向上に向けたデータも確実に収集されつつあり、今後の実証プラント設計に生かしていくこととしている。

空気吹き噴流床IGCCは、既に十余年をかけて開発を進めてきた我が国独自の石炭の高効率発電技術である。12法人が一丸となり、日本の電力に適用しうる高効率、高信頼性で、かつ経済性に優れたIGCCの早期実用化に向けて、全力を挙げていく計画である。

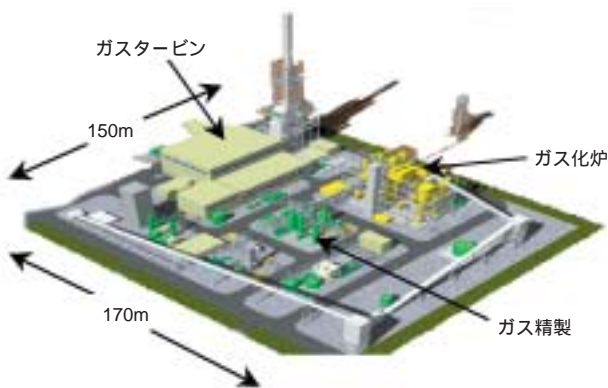


図1-5-2 実証プラントの完成予想図

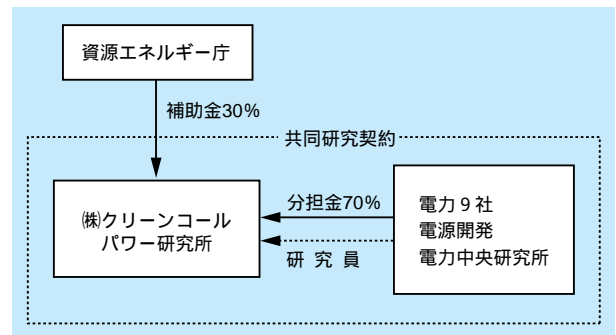


図1-5-3 実証プラント試験の研究開発体制

## コラム：石炭ガス化複合発電のLCA解析

### 1. はじめに

石炭火力は、供給および価格の安定性に優れていることから、ベースもしくはミドル供給力を担う電源として期待されている。しかし、石炭はその燃焼に伴う熱量あたりの大気汚染物質の排出量が他の燃料と比較して多いという問題点がある。とりわけ、温室効果ガスの排出は重大な問題である。

当研究所では、2010年頃の技術確立を目指して研究開発が進められている石炭ガス化複合発電（IGCC）を取り上げ、現在利用されている平均的な微粉炭火力と比較してどの程度のCO<sub>2</sub>削減効果があるのか、また、地球温暖化の観点からみて石油火力やLNG火力と比べて十分な競争力を持つか否かについて検討した。

### 2. ライフサイクルアプローチ

発電に伴うCO<sub>2</sub>排出量を考えるとき、発電燃料が燃焼する際に排出されるCO<sub>2</sub>のみを思い浮かべてしまいがちである。しかし、実際には、発電燃料の生産や輸送、発電所の建設などに伴いCO<sub>2</sub>は排出されていることにも着目すべきである。一般に、資源の採取から、製造、使用、廃棄に至るすべてのプロセスを踏まえて環境負荷を評価する方法は、広くはライフサイクルアプローチ（LCA）と呼ばれている。

地球温暖化という観点から発電技術进行评估する場合には、1 kWh（送電端）あたりのライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量（式1）が、指標として有効である。これは、発電所の耐用年間に於いて排出される温室効果ガス量を、その期間中の総発電量（送電端）で割ることで求められる。CO<sub>2</sub>以外の温室効果ガスは、GWP（地球温暖化ポテンシャル）を用いてCO<sub>2</sub>量に換算される。ライフサイクルにわたり排出される温室効果ガスは、発電燃料の燃焼による直接排出、設備建設、設備運用、設備解体に伴う間接排出の4つに大きく分けられる。このうち、発電所などの設備建設に伴うCO<sub>2</sub>排出量の推計が最も煩雑である。一般に、ライフサイクルからの排出量を推計するためには、そのライフサイクルに含まれるプロセスをひとつずつ検討する手法（積み上げ法）が採用される。しかし、発電システムのように多種多様な製品で構成されている設備の製造および建設のプロセスをひとつずつ把握するのは極めて困難である。そこで、設備の製造および建設に伴うCO<sub>2</sub>排出量については、産業連関

表を用いて推計する手法（産業連関法）が有効である。本研究では、積み上げ法と産業連関法の長所を生かした融合手法を利用して、ライフサイクルにわたるCO<sub>2</sub>排出量を推計している。なお、分析手法の一般論の詳細については文献(1)を参照されたい。

ライフサイクルCO<sub>2</sub>排出原単位 [g-CO<sub>2</sub>/kWh(送電端)]

$$= \frac{(\text{発電燃料} + \text{設備建設} + \text{設備運用} + \text{設備解体})[\text{g-CO}_2]}{\text{耐用年間の発電電力量(送電端)}[\text{kWh}]}$$

式1（1 kWhあたりのライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量）

### 3. 検討対象とライフサイクルの定義

表1に、検討対象とした石炭ガス化複合発電（IGCC）プラントと従来型微粉炭火力発電プラントの仕様を示す。

IGCCと従来型いずれも、図1に示す範囲をライフサイクルとして設定した。発電燃料となる石炭は、海外炭と国内炭を利用するとし、その比率は近年の実績に基づき想定した。海外炭は複数の国から輸入しており、その輸入比率も近年の実績に基づいた。海外炭は、炭鉱から積出し港までディーゼル機関車で輸送し、そこから、コールセンターなどを經由せずに発電所へ船舶輸送されるとした。国内炭は炭鉱近くの港から発電所までの船舶輸送のみを考慮した。発電所で発生した石炭灰は、

表1 検討対象とした発電プラント

	IGCC	従来型
設備容量 (MW)	643	643
利用率	70%	70%
発電効率 (発電端)	51.0%	39.6%
所内率	9.9%	6.9%
耐用年数 (年)	30	30

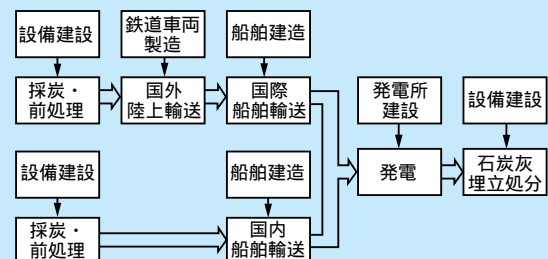


図1 石炭火力のライフサイクル

有効利用することなくすべて埋立て処分されるとした。

## 4. 結果

### 4.1 従来の微粉炭火力との比較

IGCCのライフサイクルにおけるCO<sub>2</sub>排出量は779g-CO<sub>2</sub>/kWhと、従来型の965g-CO<sub>2</sub>/kWhに比べて、186g-CO<sub>2</sub>/kWh少ない(図2)。効率改善による発電用石炭の燃焼に伴う直接排出量の減少が大きく効いている。他方、間接排出量は見かけ上ほとんど変化はない。ただし、内訳をみると、IGCCでは、発電時に必要とされる水酸化ナトリウムなどの消耗資材の増加により、発電運用時のCO<sub>2</sub>排出量は従来型に比べて4g-CO<sub>2</sub>/kWh多い。逆に、IGCCでは発電効率の向上により、従来型微粉炭に比べて必要とされる発電用石炭量が少なく、石炭の採掘や輸送に伴うCO<sub>2</sub>排出量が4g-CO<sub>2</sub>/kWhほど減少する。その結果、間接排出量は増加分と減少分が打ち消しあい、見かけ上ほとんど同じとなる。また、石炭採掘時に漏洩するメタン量は、従来型に比べてIGCCは必要となる石炭量が少ないため、IGCCが9g-CO<sub>2</sub>/kWh少ない。

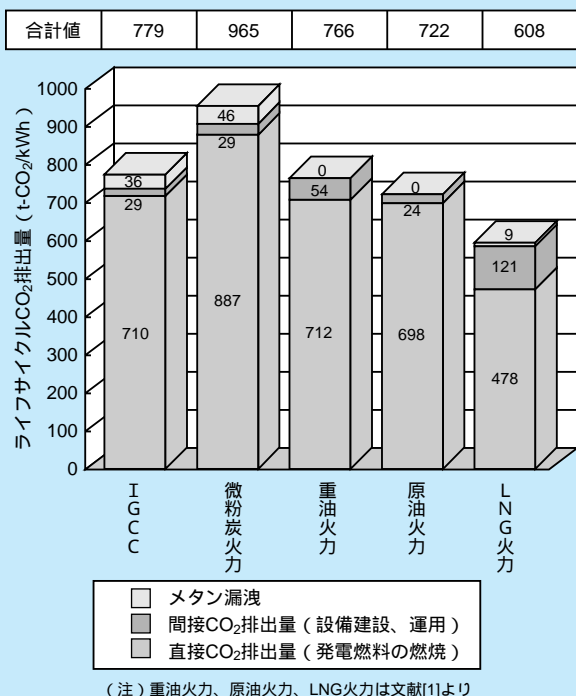


図2 火力発電技術のライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量

1 本研究の従来型のライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量が、文献(1)における石炭火力の値と異なるのは、発電用石炭の熱量が異なるためである。

IGCCと従来型とでは、それぞれに適した石炭が異なるため、その性状、輸入国、採炭時の漏洩メタン量などが異なる可能性もある。ただし、これらの前提条件が異なっても、表1で示された設計どおりの技術特性が実現されるならば、IGCCの大きな優位性は変わらない。

### 4.2 他の火力発電技術との比較

地球温暖化の面からみたIGCCの環境特性は、LNG火力には及ばないが、現状の平均的な重油火力とほぼ同程度であると認められる(図2)。直接排出量は、IGCCと重油火力とでほぼ同じである。他方、石炭採掘時に漏洩するメタンが原油採掘時に比べて多いために、メタン漏洩量についてはIGCCの方がやや多い。漏洩メタンの回収および有効利用が確立されれば、IGCCの間接排出量は減少する可能性がある。なお、発電燃料の性状の違いによるCO<sub>2</sub>排出係数の差異、そして、発電燃料の輸入国の想定、などに結果が依存することを踏まえる必要がある。

以上のことから、設計通りの送電端効率が達成されるならば、IGCCは現状の平均的な重油火力技術と比べて十分競合できるものであるといえる。

## 5. まとめ

石炭は、供給安定性や価格安定性の面から優れているにも関わらず、環境面からダークなイメージを持たれる傾向があることは否めない。しかし、CO<sub>2</sub>(メタンを含む)排出量に関しては、IGCC技術と現状の平均的な重油火力技術との間にほとんど差は無い。IGCCは、CO<sub>2</sub>排出量が多いという石炭の短所を最小限にとどめ、上述した長所を生かすための技術であると言える。

資源小国である我が国は、特定の電源に依存することは避けねばならず、経済、安全保障、環境などの様々な制約の基に最適な電源構成を組む必要がある。環境制約を満たしつつ、電源選択の幅を広げるために、今後、IGCC技術はじめとしたクリーンコールテクノロジーの研究開発が期待される。

## 参考文献

- (1) 本藤祐樹、内山洋司、森泉由恵、「ライフサイクルCO<sub>2</sub>排出量による発電技術の評価」、電力中央研究所報告Y99009、(2000)



第 2 章

# 2

石炭ガス化複合発電の  
技術課題

## 第2章 石炭ガス化複合発電の技術課題 目次

株式会社クリーンコールパワー研究所 技術部 和田 潤

2 - 1	実証機における技術課題 .....	29
	横須賀研究所 研究コーディネーター 佐藤 幹夫	
	横須賀研究所 エネルギー機械部 犬丸 淳	
2 - 2	当研究所が取り組む実用化に向けた研究課題 .....	31
	横須賀研究所 エネルギー機械部 原 三郎	
	横須賀研究所 エネルギー機械部 芦沢 正美	
コラム：フラックス添加・混炭による高灰融点炭の高性能ガス化.....		34



和田 潤（昭和58年東京電力(株)入社）  
 平成3年度に勿来パイロットプラントの運転が始まって以来、火力部、エネルギー・環境研究所勤務を通じてIGCCに関与。平成13年6月、(株)クリーンコールパワー研究所設立とともに同社へ出向。研究開発グループ所属。



佐藤 幹夫（1975年入所）  
 これまで、重・原油等の噴霧燃焼、微粉炭燃焼技術および石炭ガス化燃料のガスタービン燃焼技術に関する研究に携わり、各種海外炭の燃焼特性評価や石炭ガス化複合発電用ガスタービン燃焼器の開発等を行ってきました。今後とも、石炭および重質油等を用いる複合発電やガスタービン技術など、火力発電技術の高効率化に貢献していきたいと思っております。

犬丸 淳（10ページに掲載）

原 三郎（10ページに掲載）



芦沢 正美（1988年入所）  
 これまで石炭ならびに超重質油ガス化研究に携わってきました。石炭ガス化では、主に灰融点降下剤添加による高灰融点炭の高効率ガス化技術について、また、超重質油については、ガス化基本特性の評価を中心に研究を行ってきました。現在では、ガス化炉内現象の解明に向け、特に粒子のガス化反応速度解析について研究を進めています。今後は反応性の観点から燃料の評価が行える研究を実施していきたいと思っております。

## 2 - 1 実証機における技術課題

石炭ガス化複合発電（IGCC）開発は、250MW級実証機の建設計画の段階にきている。実証機試験の目的は、IGCC商用化の一手手前の最終ステップとして、商用機に近い規模のIGCCプラントを設計・建設・運転することにより、わが国の商用発電プラントとして求められる信頼性、環境性、高効率性、経済性等を総合的に検証することにある。本節では、それに向けた個別の技術課題について述べる。これらの技術課題については、**㈱**クリーンコールパワー研究所が主体となり、電力共同研究として取り組んでいる。

### 2-1-1 技術課題の分類

実証機に向けた技術課題は、次の4つに大別することができる。

#### (1) 発電システムとしての信頼性・安全性の確保

IGCCは、従来の火力プラントと異なり、化学プロセスを含み、機器点数が多く、複雑な物質・エネルギーのやり取りがあるため、故障確率が高く、また1つの機器の不具合が複雑に作用して予想外のトラブルに至る懸念がある。また、有害なガスを取り扱うということも従来プラントにない特徴である。そのため、トータル発電システムとしての信頼性・安全性をいかに確保するかが技術課題となっている。

#### (2) ガス化炉を中心としたスケールアップに伴う課題

ガス化炉は、化学反応・燃焼・流れ、伝熱等が複雑に作用する反応装置であり、スケールアップに伴い相似性が崩れて想定外の事象が発生する可能性があり、そのリスクはスケールアップ比率とともに増大する。今回の実証機は、その後の商用機へのスケールアップ比率を、ボイラ等で実績のある2倍以内に抑制する規模としたため、逆に勿来パイロットプラント（昭和61年度～平成8年度）からのスケールアップ比率は約8倍と大きい。いかに正確に挙動を予測し、かつ想定とのずれを吸収する設計を行うかが課題となる。

#### (3) 勿来パイロットプラント試験研究後、方式変更された要素技術

勿来パイロットプラント試験研究は、当時目標とされていた運転時間や環境性等は達成したが、現状でのニーズに対応するため、実証機では方式変更した箇所がある。ガス精製方式を乾式から湿式に変更したのを代表例として、要素技術レベルの方式変更も随所で行われている。これらの変更方式の中には信頼性の検証が必ずしも十分でないものがあり、実証機での信頼性向上が技術課題となっている。

#### (4) コストダウン

電力自由化が進展するなかでIGCCを普及させるためには、次なる商用化時点では確実に他の発電方式に対する経済的優位性が確保されるよう、実証機段階からプラントコストや運転保守費の低減を視野に入れた取組が必要となる。

### 2-1-2 設計研究と事前検証試験

平成11年度から3年間、実証機開発の初期ステップとして「設計研究」および「事前検証試験」が行われている。

設計研究は、実証機の信頼性・安全性向上に資する設計手法を確立して、後の実証機設計に備えるものである。化学プロセスや航空宇宙技術等で実績のある信頼性評価手法「HAZOP(操業偏移解析)」などを導入して、潜在的危険性を未然に摘出し対策を施す手法を確立しつつある。また、万一の有害ガスの漏洩災害を想定しその影響を評価する「拡散シミュレーション」、プラントの負荷変化や緊急停止を模擬した動特性を解析する「ダイナミックシミュレーション」等に取り組んでいる。

事前検証試験は、方式変更技術のうち、適用実績がないなど特に信頼性に課題があるものを中心に試験装置で検証するもので、実証機でのトラブルを未然に解決するとともに、設計に必要な諸特性を取得するものである。**図2-1-1**にそのあらましを示す。

事前検証試験の対象はガス化炉、ガス精製、ガスター

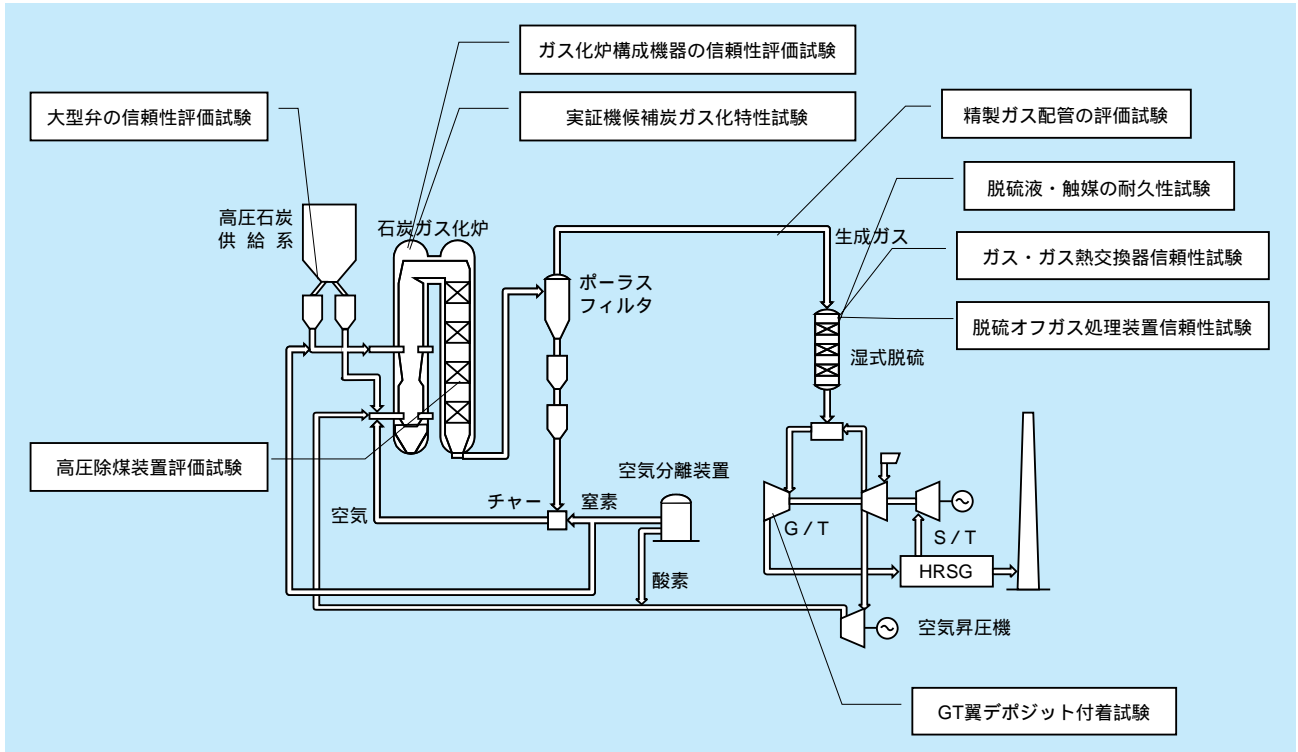


図2-1-1 事前検証試験項目

ピンに及んでいるが、特に重点的に実施しているのがガス化炉である。ガス化炉は、勿来パイロットプラント試験後、安全性や信頼性を確保するため、表2-1-1に示すように大幅な方式変更があり、あわせてガス化炉のスケールアップ手法についても見直しが行われたため、変更後のガス化炉の動作を検証することは最重要課題とされた。これを検証するため、平成10年度に三菱重工業(株)長崎研究所構内に24トン/日ガス化試験装置(図2-1-2)を設置して、平成13年にかけてガス化試験を実施中

ある。平成12年度末までに4炭種、のべ約700時間のガス化運転を行い、変更箇所の基本動作のほか、ガス化特性、各部の耐久性を検証してきた。一部大型弁やスタートブロワなどについては、実証機と実寸・実圧の条件での試験を実施している。

設計研究と事前検証試験は平成13年度で完了し、14年度以降は実証機の着工に向け、設計に専念することとなる。その設計を効率的に行えるよう、実りある成果を求めて取り組む所存である。

表2-1-1 ガス化炉における主な方式変更

	勿来パイロットプラント	実証機
微粉炭加圧	シリアルロックホッパ	パラレルロックホッパ
微粉炭搬送	空気/微粉炭濃度 低	窒素/微粉炭濃度 高
微粉炭計量	テーブルフィーダ	粉体流量計+絞り弁
チャー回収	サイクロン+EP	サイクロン+ポラスフィルタ
チャー搬送	リサイクルガス	窒素
シingasクレー除媒	ショットクリーニング	スタートフロア



図2-1-2 24トン/日ガス化試験装置



## 2-2 当研究所が取り組む実用化に向けた研究課題

当研究所では、2トン/日炉、200トン/日炉ならびに海外プラントにおける運転実績の分析結果を踏まえ実証機に向けた研究課題を設定し、実証機の設計・運転信頼性のより一層の向上を目的として実証機支援研究を進めている。本節では、当研究所が実証・商用機に向けて取り組む研究課題について、その概要を紹介する。

### 2-2-1 石炭ガス化技術

海外プラントの運転実績から見た実証機に向けた検討課題については、1-3節にて紹介した。ここでは、石炭ガス化技術について、2トン/日炉および200トン/日炉による成果、それらに基づく実証機に向けた課題を紹介する（表2-2-1）。200トン/日炉では、3炭種について

表2-2-1 2T/日炉、200T/日炉による研究成果と実証機に向けた研究課題

	2T/日炉での主な成果	200T/日炉での主な成果	実証機に向けた研究課題
ガス化特性 (生成ガス発熱量、生成チャー量・性状等)	<ul style="list-style-type: none"> <li>約20炭種のガス化特性を取得</li> <li>200T/日炉候補炭・実供試炭のガス化試験を行い、設計・運転条件の検討に反映</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3炭種のガス化試験により各炭種のガス化特性を取得</li> <li>酸素富化による生成ガス発熱量増大効果を確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>酸素富化率の影響、炭種の影響、運転条件の影響評価</li> <li>スケールアップによる影響評価</li> </ul>
微粉炭供給系、チャー回収・供給系の運転特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>ロックホッパーシステムによる乾式給炭技術に関するノウハウを蓄積</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>テーブルフィーダ方式でオーバーフロー現象を経験</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>新しい搬送方式の運転特性、信頼性</li> <li>大型粉体弁の長期信頼性</li> <li>セラミックフィルターの耐久性・信頼性</li> </ul>
炉内スラッキング特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>200T/日炉スラッキング現象再現試験により現象解明、改造案に反映</li> <li>伝熱管灰付着時の伝熱特性基礎データを取得</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉内スラッキング現象が発生、炉改造により解決</li> <li>熱交部チャー堆積特性、付着時の伝熱性能を把握</li> <li>除灰装置の効果を確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ガス化炉内灰挙動からみたスケールアップ手法の評価</li> <li>炭種による熱交伝熱性能低下の評価</li> </ul>
溶融スラッグの排出特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>高灰融点炭に対するフラックス添加及び混炭技術の有効性を確認</li> <li>スラッグタップ形状のノウハウ取得、200T/日炉改造案に反映</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>フラックス添加及び酸素富化によるスラッグ排出性改善効果を確認</li> <li>スラッグタップ形状変更によりスラッグ排出性改善</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>炭種による排出性評価</li> <li>スラッグタップの適正な設計検討</li> <li>スラッグ排出監視の自動化</li> <li>スラッグクラッシャーの耐久性・信頼性</li> </ul>
運転特性	<ul style="list-style-type: none"> <li>空気吹き加圧二段噴流床方式ガス化炉の起動・停止要領を確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>789時間連続運転での安定運転性を確認</li> <li>抽気連携状態でGT出力変化率10%/分の追従安定性を確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>発電プラント全体としての起動・停止要領の検討</li> <li>プラント動特性解析</li> <li>プラント安全性評価</li> </ul>
材料	<ul style="list-style-type: none"> <li>テストピースによる実ガス耐腐食性の基礎データを取得</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>解体研究により要部材質の減肉、腐食状況を把握</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>各部材料の適切な選定</li> <li>腐食速度見積もりの高精度化</li> </ul>
ガス化炉スラッグの有効利用	<ul style="list-style-type: none"> <li>約10炭種のスラッグについて、セメント製造原料等への適用性を確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリート用細骨材等として利用可能であることを確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>低コスト有効利用指針の作成、JIS化の推進</li> <li>高付加価値化</li> </ul>

ガス化試験が行われ種々のトラブルを経験した。いくつかのトラブルについては、2トン/日炉から200トン/日炉へのスケールアップ手法に関する問題点が指摘されている。これら二つのガス化炉の運転実績より、実証機においては、スラッキングトラブル発生を防ぐための炉内ガス・粒子の流動解析、コンバスタにおける灰捕集率とチャー循環量の予測・評価、スラグホールまわりの伝熱流動解析による溶融スラグ排出性のチェック、炭種の違いによる熱交換器チャー堆積伝熱機構の解明等が特に重要であると考えられる。

海外プラントの運転実績および2トン/日炉および200トン/日炉の経験に基づき整理した、石炭ガス化技術を中心とした主要な研究課題を図2-2-1に示す。実証機の設計・運転において重要となる課題は、200トン/日炉からのスケールアップに関するもの、信頼性向上およびコストダウンに関するものに大別される。前述の課題の他に

も重要な課題として、プラント安全性評価、性能評価・安全確保のための監視計測項目の検討・提案、コストダウンに関する各種の研究課題が挙げられる。図2-2-1に示した課題のうち石炭ガス化技術に関するものについては、現在、実証機支援研究として積極的に取り組んでいる。

## 2-2-2 ガス精製技術

ガス精製技術は、ガスタービンの保護、環境保全の観点からIGCCプラントにおいて極めて重要な技術である。実証機のガス精製装置としては、セラミックフィルタによる集じん装置と湿式脱硫装置の組み合わせが計画されている。当研究所は、これまでにセラミックフィルタの開発を行うとともに、より一層の高効率化を目指した乾式ガス精製技術の開発を進めている。

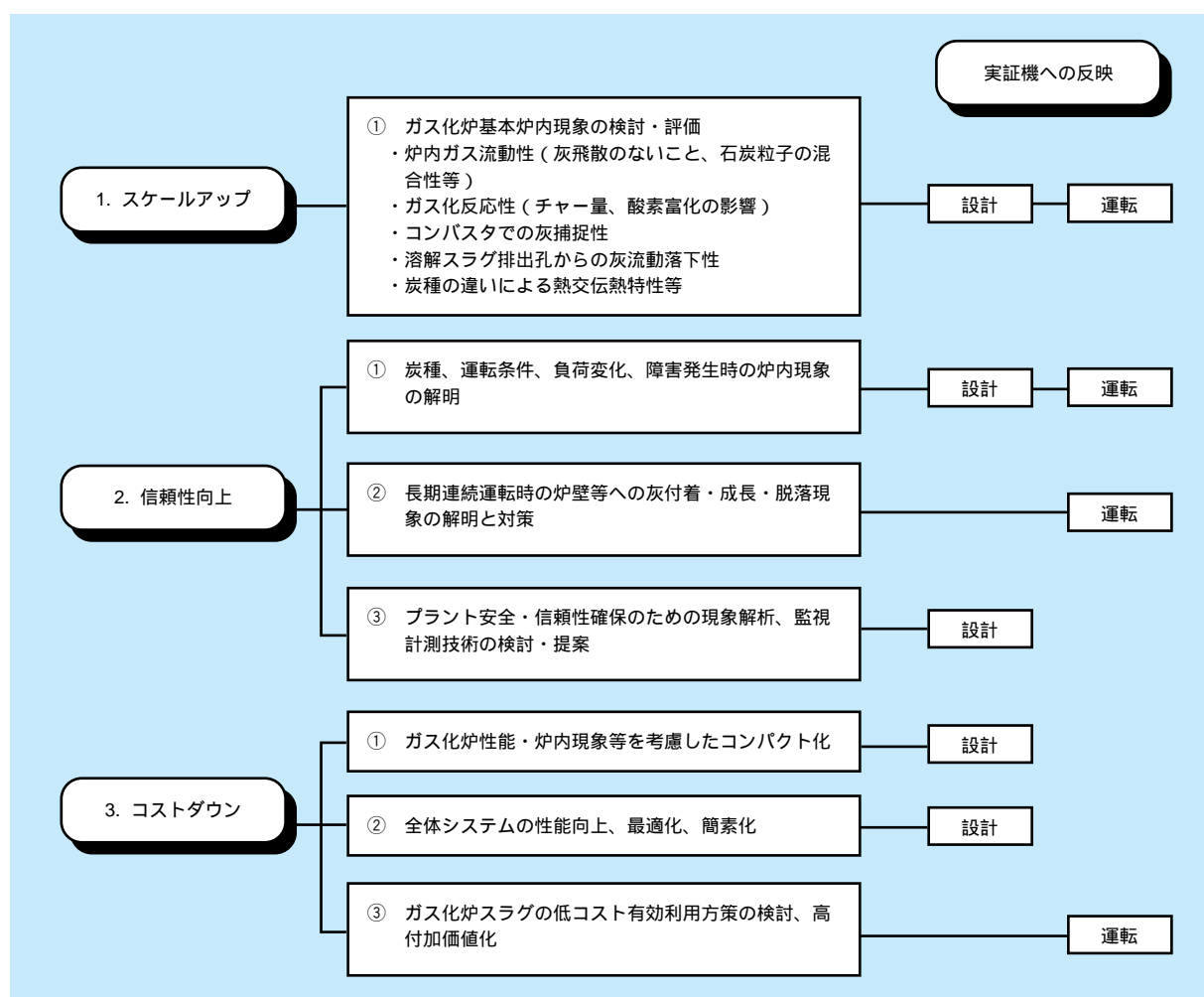


図2-2-1 当研究所が取り組む実証機に向けた研究課題

### (1) セラミックフィルタ

セラミックフィルタの課題としては、以下があげられる。

- ・フィルタの素材の選定
- ・集じん性能の確保
- ・集じん装置構造の最適化
- ・ダスト性状と圧力損失の関係の解明
- ・逆洗手法の最適化
- ・フィルタの耐久性

これまでの研究開発により、要素技術としてはほぼ開発の見通しが得られている。今後、実用化に向けて残された課題として、長期寿命化が最も重要と考えられる。

### (2) 乾式脱硫

硫黄化合物を100ppm以下まで除去できる酸化鉄系ハニカム脱硫剤の性能は、勿来パイロットプラントにおける20トン/日固定床ガス精製装置において既に実証されている。現在、環境規制の強化および石炭ガス化燃料電池複合発電を視野に入れた、硫黄化合物を1ppm程度まで低減できる高性能な脱硫剤の開発を進めている。この脱硫剤の開発においては、①炭素析出による脱硫剤の崩壊防止、②目標脱硫性能の確保、③再生法の最適化、④長期信頼性の確保が課題となる。当研究所は、既に高性能な亜鉛フェライト脱硫剤の開発に成功しており、今後は長期信頼性の確保が最も重要な課題となっている。

### (3) アンモニア、ハロゲン、重金属の乾式除去技術

将来、石炭火力の環境保全性に対する要求が厳しくなることが予想されるため、アンモニア、ハロゲン化物、微量重金属についても、乾式除去技術が必要となる可能性がある。当研究所では、先ず石炭ガス化燃料電池複合発電を視野に入れた、乾式脱ハロゲン技術の開発を進め、ハロゲン化物を1ppm程度まで除去できるアルミン酸ナトリウムハロゲン化物吸収剤を見出した。現在、再生・再利用法および反応方式（固定床、移動床等）の選定が重要な課題となっている。アンモニアについては分解・

除去技術の調査および基礎検討、微量重金属についてはプラント内での挙動解明を進めている。

## 2-2-3 ガスタービン燃焼器技術

当研究所は、ガスタービン燃焼器技術に関し、これまで石炭ガス化低カロリー燃料用1300級ガスタービン燃焼器の開発を進め、より一層の高温化による熱効率の向上と低NO<sub>x</sub>化を目指し、1500級燃焼器の研究開発を実施した。また、海外では、酸素吹きガス化方式による様々な複合発電システムが開発されていることから、将来わが国の電気事業において導入が予想される各種ガス化複合発電方式のガスタービン燃焼器技術についても検討を進めてきた。

ガスタービン燃焼器技術の開発課題は、ガス化方式およびガス精製方式により異なる。ガス化炉におけるガス化剤が空気の場合は燃料発熱量が4.2MJ/m<sup>3</sup><sub>N</sub>（1000kcal/m<sup>3</sup><sub>N</sub>）程度の低カロリー燃料となり、燃焼安定性が課題となり、ガス精製に乾式法を用いる場合は、さらに、ガス化燃料中のアンモニアに起因して生成されるフュエルNO<sub>x</sub>を低減する必要がある。一方、ガス化剤に酸素を用いる場合には、ガス化ガスは8.4～12.6MJ/m<sup>3</sup><sub>N</sub>（2000～3000kcal/m<sup>3</sup><sub>N</sub>）程度の中カロリー燃料となり、LNGよりも火炎温度が高くなり、サーマルNO<sub>x</sub>の低減が重要になる。また、一層のプラント熱効率の向上には、乾式ガス精製が重要であり、その際、サーマルNO<sub>x</sub>と同時にフュエルNO<sub>x</sub>の低減が必要になる。

## 2-2-4 その他の重要な課題

当研究所では、IGCCプラントシステムの性能向上、最適化、簡素化を行うための汎用解析ツールとして、「発電システム熱効率解析用汎用プログラム」の開発を進めている。

また、コストダウンに向けてガス化炉スラグの有効利用方策の検討を実施中である。

## コラム：フラックス添加・混炭による高灰融点炭の高性能ガス化

### 1. はじめに

石炭ガス化炉では、炉内に投入するガス化剤空気の量を少なくし、空気比（式1）を下げた運転を行えば、生成ガス発熱量や冷ガス効率といったガス化性能は高くなる。

噴流床方式石炭ガス化炉では、石炭中の灰分を溶融スラグとして排出させるため、炉内の温度を灰の融点以上になるよう運転しており、灰融点の高い石炭（高灰融点炭）をガス化する場合は、炉内温度を高温に保つためにガス化剤空気の投入量を多くし、高空気比で運転する必要がある。その結果、高灰融点炭では、ガス化性能が低下する傾向にある（図1）。

従って、高灰融点炭を高性能でガス化するためには、灰融点を降下させる技術を開発し、ガス化剤空気の投入量を抑えた低空気比での運転を可能にする必要がある。

$$\text{(式1) 空気比} = \frac{\text{ガス化炉投入空気量}}{\text{ガス化炉投入石炭の理論燃焼空気量}}$$

### 2. 石炭灰の組成と灰融点の関係

石炭灰の融点は、灰分組成によって決まる。一般的に、石炭灰中の $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ （酸性成分）は灰融点を高める作用があるのに対し、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ （塩基性成分）は灰融点を下げる作用がある。

当研究所の2トン/炉で使用した石炭について、灰融点を酸性成分と塩基性成分の比で表される酸性度（酸性成分/塩基性成分）で整理した結果を図2に示す<sup>(1)(2)</sup>。灰融点と酸性度との間には良い相関が観られ、低灰融点炭は塩基性成分を、高灰融点

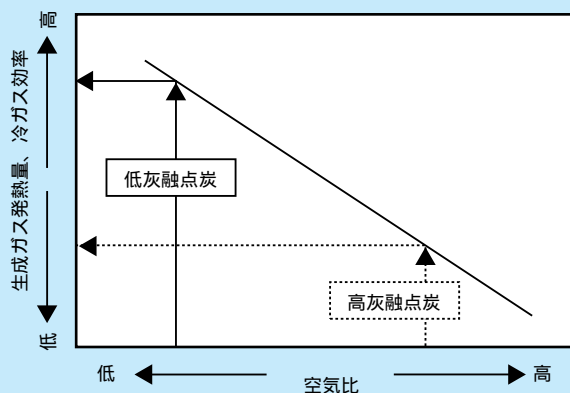


図1 空気比とガス化性能の関係

炭は酸性成分を多く含んでいることがわかる。

従って、高灰融点炭に灰融点を下げる作用のある塩基性成分を融点降下剤（フラックス）として添加するか、塩基性成分を多く含んだ低灰融点炭を混炭することにより、灰融点を降下させることが可能である。

### 3. フラックス添加・混炭による灰融点降下特性

塩基性成分であればフラックスとして使用可能と考えられるが、ガス化炉構成材料や後流設備への影響、入手の容易さ、価格などを考慮すると、 $\text{CaO}$ を石灰石（ $\text{CaCO}_3$ ）の形で添加することが最も実用的と考えられる<sup>(1)</sup>。

代表的な高灰融点炭である豪州炭にフラックスとして石灰石を添加した場合および $\text{CaO}$ を多く含む低灰融点炭である中国炭を混合した場合の灰融点降下特性を図3に示す<sup>(2)(3)</sup>。

豪州炭の灰融点は、1673 と非常に高温であったのに対し、フラックス添加の場合、灰中 $\text{CaO}$ 含有率（式2）が約30%で約1270 まで降下している。また、混炭の場合は、中国炭の混合率が20%で1405 まで降下している。このように、フラックス添加、混炭により、灰融点を大きく降下させることが可能である。

$$\text{(式2) 灰中CaO含有率} = \frac{\text{灰中CaO量}}{\text{灰量(添加CaO量を含む)}} \times 100$$

### 4. ガス化性能の向上効果例

当研究所の2トン/日炉を用い、豪州炭のみのガス化試験、フラックス添加及び中国炭との混炭ガス化試験を実施し、ガス化性能の向上効果を確認

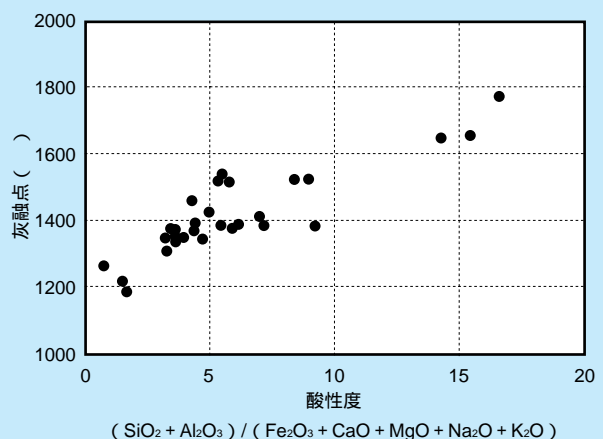


図2 灰融点と灰分組成の関係

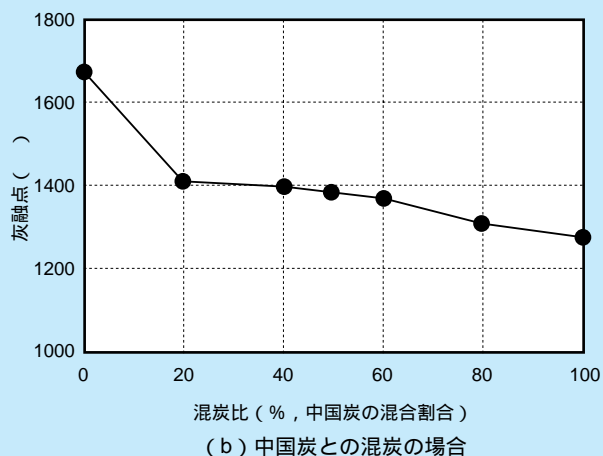
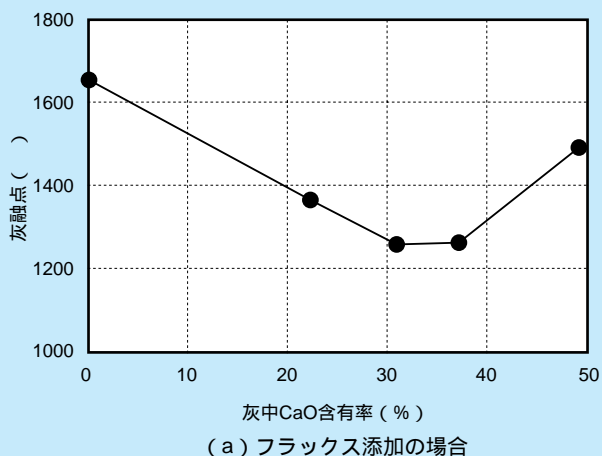


図3 豪州炭の灰融点降下特性

表1 フラックス添加・混炭によるガス化性能向上効果例

	下限空気比	生成ガス発熱量
豪州炭のみ	0.55	3.03MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
フラックス添加	0.48	3.38MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
中国炭との混炭	0.46	3.97MJ/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>

した。

豪州炭のみの場合は、溶融スラグを安定して排出させるために、空気比を0.55以上で運転する必要があった。これに対し、表1に示すようフラックス添加の場合には0.48まで、混炭の場合には0.46まで空気比を下げる事が可能であった。この結果、生成ガス発熱量は3.03MJ/m<sup>3</sup><sub>N</sub>（豪州炭のみ）から3.38MJ/m<sup>3</sup><sub>N</sub>（フラックス添加時）、3.97MJ/m<sup>3</sup><sub>N</sub>（混炭時）まで向上させることが出来た<sup>(2)(3)</sup>。

このように、石炭中灰分を溶融排出させる噴流床方式ガス化炉にとって不向きと考えられる高灰融点炭に対しても、フラックス添加や低灰融点炭との混炭を行うことにより、高性能でガス化を行うことが可能である。

#### 参考文献

- (1) 芦澤ほか9名、「噴流床石炭ガス化炉のフラックス添加による高性能化 - 添加剤の評価と灰融点降下特性 -」、電中研報告 W89027、(1990)
- (2) 芦澤ほか5名、「高灰融点炭の高性能ガス化技術の開発 - フラックス添加法と混炭法の比較・検討 -」、電中研報告 W91034、(1992)
- (3) 犬丸ほか5名、「混炭による高灰融点炭高性能ガス化技術の開発 - 灰融点降下およびガス化基本特性に関する検討 -」、電中研報告 W90017、(1991)



第 3 章

# 3

石炭ガス化炉の特性と  
炉内現象評価技術の開発

第3章 石炭ガス化炉の特性と炉内現象評価技術の開発 目次

横須賀研究所	エネルギー機械部	犬丸 淳	横須賀研究所	エネルギー機械部	原 三郎
横須賀研究所	エネルギー機械部	芦沢 正美	横須賀研究所	エネルギー機械部	大高 円
横須賀研究所	エネルギー機械部	渡辺 裕章	横須賀研究所	エネルギー機械部	梶谷 史朗
横須賀研究所	エネルギー機械部	市川 和芳	横須賀研究所	エネルギー機械部	沖 裕壮

3 - 1	研究の背景	39
3 - 2	石炭ガス化炉の特性と炉内現象	40
3 - 3	石炭ガス化炉数値シミュレーション技術	42
3 - 4	石炭ガス化反応特性の解明	46
3 - 5	石炭ガス化炉における灰生成・付着挙動の解明	51
3 - 6	今後の展開	57
コラム	石炭中の鉱物について	58

犬丸 淳 (10ページに掲載)

原 三郎 (10ページに掲載)

芦沢 正美 (28ページに掲載)



大高 円 (1994年入所)

これまで、石炭ガス化に関する研究に携わり、数値シミュレーション技術による石炭ガス化炉内現象の解明に取り組んできました。今後は、石炭ガス化複合発電の実用化に向け、石炭ガス化炉の設計および運転支援を目的とした炉内現象評価ツールの開発を進めて行く予定です。



渡辺 裕章 (1998年入所)

石炭ガス化炉内の伝熱流動状態の把握、ガス化炉性能評価等のための数値シミュレーション技術の開発を行ってきた。現在、開発した数値シミュレーション技術を使った石炭ガス化炉設計・運転支援ツールの開発、超重質油ガス化炉の数値シミュレーション技術の開発等に従事している。



梶谷 史朗 (1993年入所)

これまで、石炭ガス化の研究に携わり、高温高圧におけるガス化反応性を解明するとともに炭種による反応性の違いを明らかにしてきました。今後は、石炭ガス化複合発電プラントの実用化と燃料拡大技術に貢献するために、ガス化反応性の予測技術の確立に取り組んでゆきたいと思っております。



市川 和芳 (1991年入所)

入所後、2トン/日炉を用いた適合炭種拡大技術や灰付着性評価に関する研究に携わってきました。また、1995年より2年間、石炭ガス化複合発電技術研究組合に出向し、200トン/日パイロットプラントによる運転試験研究において、ガス化炉およびプラント全体性能の評価を行いました。現在は、ガス化炉内および熱交換器管への灰付着現象の解明およびその予測手法の開発を目指した研究に取り組んでいます。今後は、さらに、スラグ有効利用方策の拡大を目的にスラグ排出プロセスの高度化を図って行きたいと考えています。



沖 裕壮 (1989年入所)

これまで、微粉炭火力や石炭ガス化に関する研究に携わり、低負荷対応型微粉炭バーナの開発や、ボイラおよびガス化炉で生成する石炭灰の特性評価を行ってきました。今後は、ガス化炉生成灰の特性を予測する技術の開発研究を通じ、石炭ガス化複合発電技術の実用化に貢献したいと思っております。



## 3 - 1 研究の背景

石炭ガス化炉は、石炭ガス化複合発電（IGCC）プラントの中核をなす技術であり、石炭ガス化炉の性能および信頼性を確保することが、プロジェクトを成功に導く必要条件となる。

当研究所では、これまでの2トン/日炉、200トン/日炉ならびに海外プラントでの運転経験から、石炭ガス化炉の実用化に向けた研究課題を整理し、当研究所が取り組む課題を設定した（第2章2節参照）。

実証機成功の鍵を握るガス化炉の信頼性をより一層向上させるためには、スケールアップ技術、炭種による影響評価技術、灰に起因する諸障害の対策技術等を確立する必要があり、当研究所ではこれらの課題を解決するため、図3-1-1に示すような、①ガス化炉数値解析技術の開発、②実験による炉内現象の解明とモデル化、③石炭・灰基礎物性の解明、を3本柱とする支援研究を実施している。

まず、種々の実験設備を活用してガス化炉内の諸現象を解明し、現象のモデル化を行う。それらを、数値シミュレーションに導入することによって、実験結果に基づいた、確度の高いガス化炉内現象予測・評価技術の開発を目標としている。また、石炭・石炭灰の性状、微細構造、形態等の基礎物性の解明およびデータベース化は、現象の理解や炭種による影響を解明する上で極めて重要である。図3-1-1中の石炭ガス化研究炉は、平成15年度に当研究所横須賀研究所に設置予定の研究設備である（3-6節参照）。

これにより、「IGCC設計・運転評価ツール」の確立を図り、大型ガス化炉設計に必須のスケールアップ効果の予測、炭種や運転条件が変化した場合の炉特性変化の予測・評価、トラブル発生時の現象解明と対策検討、コンパクト化等によるコストダウンの検討などに貢献していきたいと考える。

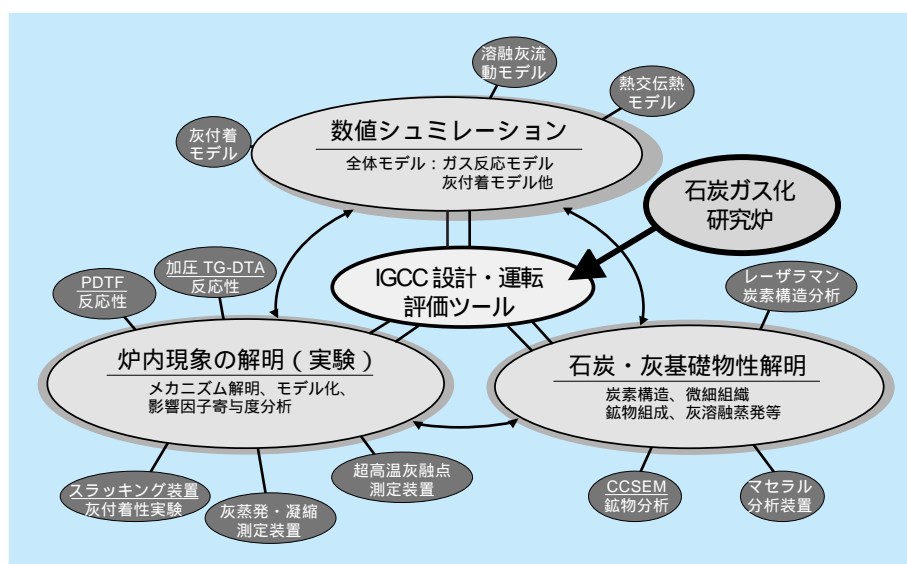


図3-1-1 当研究所における石炭ガス化研究の取り組み

## 3-2 石炭ガス化炉の特性と炉内現象

石炭ガス化炉には第1章で述べたような様々な方式があるが、いずれの方式についても求められる機能は、極論すれば、石炭を効率良くガス化し、所定の性状のガスを得るとともに、石炭中の灰分を安定して系外に排出することである。この機能を満足し、より高効率で信頼性の高いガス化炉とするためには、炉内で生じている様々な現象を解明することが重要である。

本節では、当研究所がこれまでに実施してきた石炭ガス化研究で得られた知見、200トン/日炉での経験や国内外で開発されているガス化炉に関する情報などに基づき、特に重要と考えられる、石炭のガス化反応特性とガス化炉内での灰の挙動について、その概要を述べる。なお、次項以降では、(酸素富化)空気吹き二段噴流床方式ガス化炉を念頭に置いて記すが、他方式のガス化炉についても基本的には共通するものと考えられる。

### 3-2-1 石炭のガス化反応特性(図3-2-1)

ガス化炉内に投入された石炭は、熱分解により揮発分

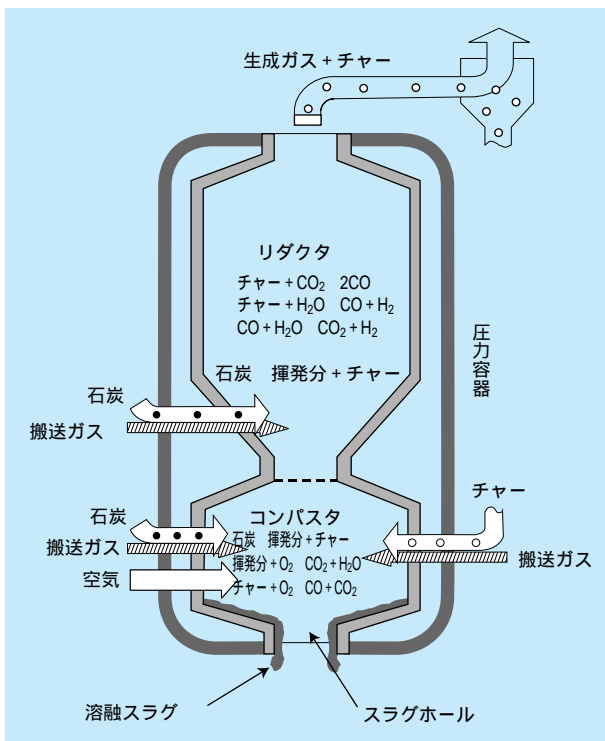


図3-2-1 炉内でのガス化反応

とチャー(未燃炭素と灰分から成る微小粒子)になる。チャー中の未燃炭素は、さらにCO<sub>2</sub>やH<sub>2</sub>Oによりガス化されるが、完全にはガス化されずに生成ガスとともにガス化炉より排出される。この生成ガス中のチャーは、ガス化炉の効率向上のため、回収・リサイクルされるが、その量は炭種や運転条件により大きく変化する。従って、ガス化炉の性能予測、ガス化炉反応部の容積やチャーの回収・リサイクル設備の容量の適正化等を行うためには、ガス化炉から排出されるチャーの量を精度良く見積もる必要があり、それを可能にするには、実機に相当する高温・高圧下でのガス化反応特性を解明することが重要となる。

### 3-2-2 ガス化炉内での灰の挙動(図3-2-2)

ガス化炉内での灰の流れは基本的には以下の通りである。コンバスタ部に投入された石炭・リサイクルチャー中灰分は溶融スラグとして壁面に捕捉され系外に排出されるものと捕捉されずにリダクタ部へ運ばれるもの(キャリアオーバー灰)とに分けられる。このキャリアオーバー灰とリダクタ部に投入された石炭中の灰は、チャー粒子としてガス化炉から排出され、コンバスタ部にリサイクルされる。

このような灰の流れの中で、2トン/日炉や200トン/

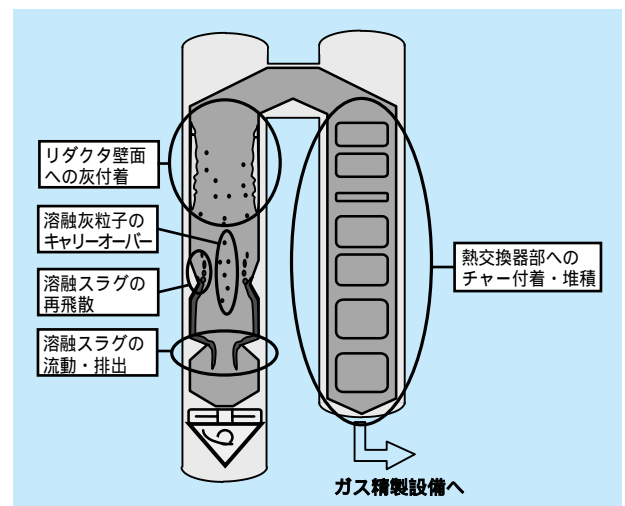


図3-2-2 灰に関する重要な炉内現象

日炉で経験したトラブル、あるいは、国内外のガス化プラントの情報から、解明すべき灰に関する重要な現象としては、①コンバスタ部での熔融スラグの流動・排出、②リダクタ壁面への灰付着、③ガス化炉後流の熱交換器でのチャー付着・堆積、が考えられる。

#### (1) 熔融スラグの流動・排出特性

コンバスタ部では熔融スラグは、壁面に捕捉されコンバスタ底部のスラグホールから排出される。ガス化炉を運転する上で、このスラグホールからの熔融スラグの安定排出は必要不可欠なものである。スラグホールからの熔融スラグの排出性を評価するためには、灰の熔融特性の検討が必要であり、コンバスタ部を模擬した還元雰囲気下での各種石炭灰の軟化・熔融特性を明らかにすることが重要となる。また、スラグホール形状の影響に関する検討も必要となる。

このようなスラグホール周りの現象に加え、200トン/日炉では、一旦壁面に捕捉された熔融スラグの一部が、コンバスタ出口部（スロート部）の強い旋回上昇流により飛散し、リダクタ部壁面に付着・成長するという現象（スラギング現象）が生じ、大きな運転障害となった。200トン/日炉では、炉形状に変更を加え、スロート部の流速を低減することにより、この現象は解決された。しかしながら、熔融スラグ飛散現象に関する定量的検討は十分ではなく、熔融スラグの物性（粘性、表面張力等）を考慮した模擬流体によるコールド試験などから、各種因子が飛散現象に及ぼす影響を定量的に評価し、発生条件を明らかにする必要がある。

#### (2) リダクタ壁面への灰付着特性

前述の熔融スラグの飛散現象が無くとも、リダクタ内に存在する、コンバスタ部からのキャリーオーバー灰あるいはリダクタ投入石炭中の灰が壁面に付着し、長時間運転の妨げになる可能性がある。灰融点以上の高温雰囲気であるコンバスタ部を通過したキャリーオーバー灰とリダクタ投入石炭中の灰とでは粒子の温度履歴が大きく異なるため、その性状（粒径・形状・含有鉱物質等）に

差異が生じていると考えられる。さらに、リダクタ内を通過する間に性状が変化すると考えられる。従って、これらリダクタ内に存在する灰粒子の壁面への付着性を評価するためには、リダクタ内での灰粒子の性状とその変化をCCSEMなどの高度分析機器を活用して明らかにするとともに、壁面への付着性との定量的な関連付けを行う必要がある。

#### (3) 熱交換器部へのチャー付着・堆積特性

ガス化炉設備としては、ガス化炉本体の後流側に熱交換器が設置され、熱回収を行う。200トン/日炉では、伝熱管へのチャーの付着・堆積により、時間とともに伝熱性能が低下するため、除煤装置による伝熱管の清掃を定期的に行っていた。この伝熱性能の低下傾向は、炭種により大きく異なっており、チャー量の多い炭種よりもチャー量の少ない炭種の方が、低下傾向が激しくなるケースも確認された。このことから、伝熱性能への影響を評価するためには、チャー量の違いだけでなく、チャーの性状（組成、粒径、安息角などの粉体特性等）が付着・堆積特性に及ぼす影響を明らかにする必要がある。

前項までに述べたよう、石炭ガス化炉の特性を評価するためには、各種現象を解明することが極めて重要である。さらに、実際のガス化炉内では、個々の現象は単独に起こるものではなく、互いに影響を及ぼし合っており、一つの条件が変われば全てに影響を及ぼすため、現象解明研究で得られた結果を、実機の設計や運転に具体的に反映していく手法として、数値シミュレーション技術の活用も必要になる。

石炭ガス化炉内の各種現象の実験的解明とモデル化を行い、その結果を反映した確度の高い数値シミュレーション技術を開発することにより、スケールアップの影響も含めたガス化炉の最適設計、安定運転条件の検討やトラブルシューティング等の運転支援が可能となる。当研究所が進めている現象解明研究と数値シミュレーション技術の開発について、次節以降に述べる。

## 3 - 3 石炭ガス化炉数値シミュレーション技術

### 3-3-1 数値シミュレーション技術の必要性和位置付け

石炭ガス化炉を設計するためには、炉内現象の予測・評価技術が不可欠である。例えば、ガス化炉の形状・寸法を決定するためには、炉内に投入される微粉炭の滞留時間および反応速度を予測し、その反応性を評価する必要がある。また、石炭ガス化炉の運転においても、炉内現象の予測技術は重要であり、炉内現象を把握することにより、炭種に応じた適切な運転条件を設定することが可能となる。

炉内現象予測・評価技術のひとつとして、計算機による数値シミュレーションが挙げられる。数値シミュレーションの長所は、実験に比べ条件変更が容易な点にある。例えば、実際の炉において炉形状やバーナ配置等を変更するためには、長い工事期間と多額の費用が必要となるが、数値シミュレーションでは、解析格子や入力条件を変更するだけである。石炭供給量や炭種等の条件変更も、運転条件や石炭分析値に基づいて入力条件を変更することにより、容易に行うことができる。

石炭ガス化炉を対象とした数値シミュレーションでは、ガス流動、粒子輸送、伝熱、化学反応等の様々な炉内現象を考慮するため、多くの解析モデルが導入される。解析モデルの導入には、目的とする炉内現象の実験に基づくモデルパラメータの設定が必要となる。また、数値シミュレーション結果の妥当性を確認するには、比較のための試験データが不可欠である。さらに、数値シミュレーション結果から炉内現象を評価するためには、石炭ガス化炉に対する多くの知見が必要とされる。

当研究所は、2トン/日試験炉および200トン/日パイロット炉の運転を通じ、多くの知見を取得し、膨大な試験データを保有している。また、高温高圧下における微粉炭の反応性<sup>(1)</sup>、石炭中灰分の壁面付着性<sup>(2)</sup>といった個々の炉内現象解明を目的とする実験装置を開発し、研究を行っている。これらの石炭ガス化炉に対する知見や試験データをベースに、実験に基づく解析モデルを数値シミュレーションに取り込むことにより、さらに確度の高い数値シミュレーション技術を開発することが可能となる。

当研究所では、この技術を応用することにより、炉スケールアップ効果を含む炉設計評価および炭種・運転条件変更、トラブルシューティング等の運転支援に向けたツール(図3-3-1)構築を目指し、研究を進めている。

### 3-3-2 石炭ガス化炉数値シミュレーションの概要

ガス化炉内現象は、流動、伝熱、反応の3つに大別される。それぞれの現象に対し、本数値シミュレーションで採用した主な解析手法と解析モデルを以下に示す。

まず流動であるが、気相は弱圧縮性乱流とし、乱流モデルには標準的なk-モデル<sup>(3)</sup>を採用した。粒子輸送は、粒子群の移動を代表粒子によって模擬するLagrangianモデル<sup>(4)</sup>によって解いた。気相と粒子の相互作用は粒子に作用する流体力の反作用を気相流動において考慮し、粒子間の衝突は無視した。壁面に衝突した粒子は、粒子の温度履歴と液相率から壁面への付着を判定する灰付着モデルにより取り扱った。

伝熱については、乱流熱拡散を含む対流伝熱、粒子散乱を伴う輻射伝熱および化学反応に伴う反応熱を考慮した。輻射伝熱はDiscrete Transfer法<sup>(5)</sup>によって解かれ、気相および粒子相の輻射物性は、ガス組成分布や粒子濃度分布によらず一定とした。粒子温度は、気相と粒子間の対流伝熱および後述のチャーガス化反応に伴う反応熱のバランスから求められる。

気相反応は、シフト反応を含む5つの総括反応を考慮した。反応速度は渦消散モデル<sup>(6)</sup>による乱流混合速度と化学反応速度<sup>(7)(8)(9)</sup>から求めている。粒子反応は、熱分解反応とチャーガス化反応を考慮した。後者のモデル化に不可欠な高温高圧下のチャーガス化反応速度には、当研究所のPDTFとTGによる実験データを用いた梶谷らの提案する実験式<sup>(1)</sup>を採用した。

以上を取りまとめ、図3-3-2に示す。なお、解析手法および解析モデルの詳細については文献<sup>(10)</sup>を参照して頂きたい。

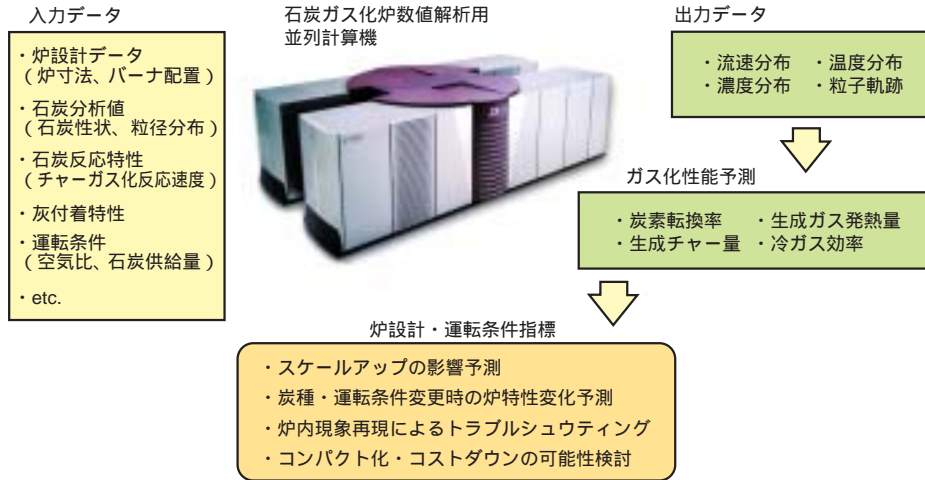
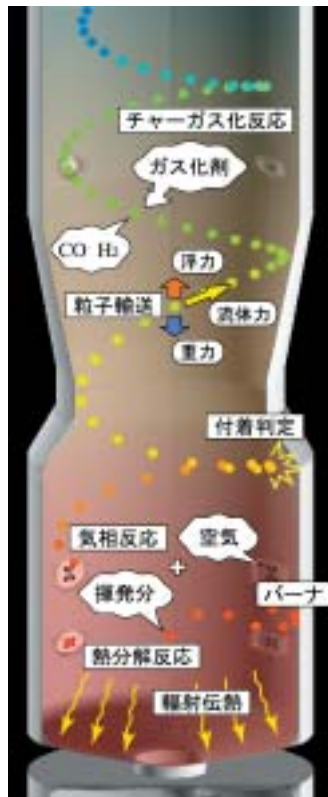


図3-3-1 炉設計・運転支援ツールの概念図



ガス化炉内現象数値解析技術の概要

- 流れ場：三次元弱圧縮性乱流  
 解析手法：Finite Volume Method  
 Hybrid Upwind Differencing Method  
 SIMPLEC Algorithm  
 乱流モデル： $k-\epsilon$  2 方程式モデル  
 固気二相流：Eulerian-Lagrangian Method  
 輻射伝熱：Discrete Transfer Method  
 熱分解反応： $C_mH_nO_l$  ( $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ )  
 気相反応： $CH_4 + 1/2O_2 \rightarrow CO + 2H_2$   
 $H_2 + 1/2O_2 \rightarrow H_2O$   
 $CO + 1/2O_2 \rightarrow CO_2$   
 $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$   
 $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$   
 チャーガス化反応： $C + (1 - \alpha) O_2 \rightarrow CO + (\alpha - \beta) CO_2$   
 $C + H_2O \rightarrow CO + H_2$   
 $C + CO_2 \rightarrow 2CO$   
 解析格子：Multi Block、Body Fitted Coordinates

図3-3-2 炉内現象モデル

3-3-3 数値シミュレーション結果の例

数値シミュレーションによって明らかとなった炉内現象の例を以下に紹介する。

最初に示すのは、2トン/日炉に対する数値シミュレーション結果<sup>10)</sup>である。参考のため、図3-3-3に2トン/日炉の解析格子を示す。図3-3-4は、炉中心軸上のガス温度分布である。数値シミュレーション結果は実験値に比べ多少低めの温度分布となっているが、両者はほぼ同

様な傾向を示しており、良い一致を示している。図3-3-5に炉中心軸を含む縦断面におけるガス温度分布およびH<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>Oの質量濃度分布を示す。リダクタバーナの後流でガス温度が低下し、CO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oが消費されH<sub>2</sub>とCOの濃度が上昇しているのが分かる。これは熱分解反応を終えた微粉炭粒子(チャー粒子)のガス化反応(吸熱反応)によるものと考えられる。図3-3-6と図3-3-7は、炉内空気比<sup>(注1)</sup>をパラメータとした場合の炉

(注1)：ガス化炉投入空気量/石炭およびチャーの理論燃焼空気量

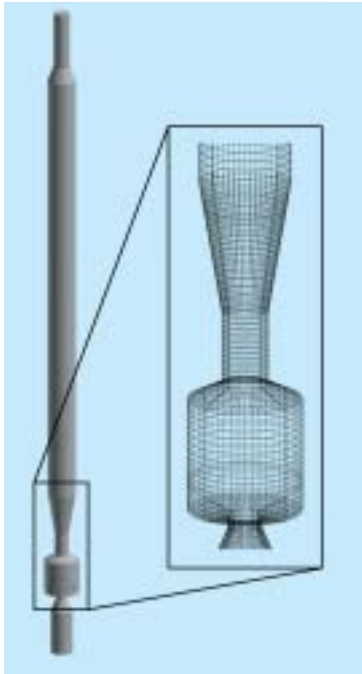


図3-3-3 解析格子

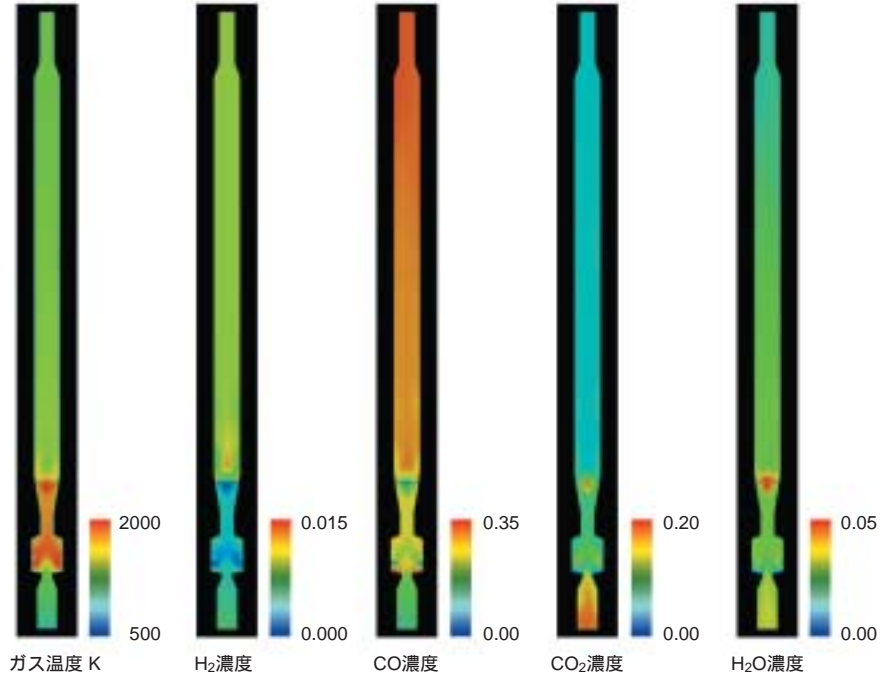


図3-3-5 ガス化炉内ガス組成分布（質量分率）

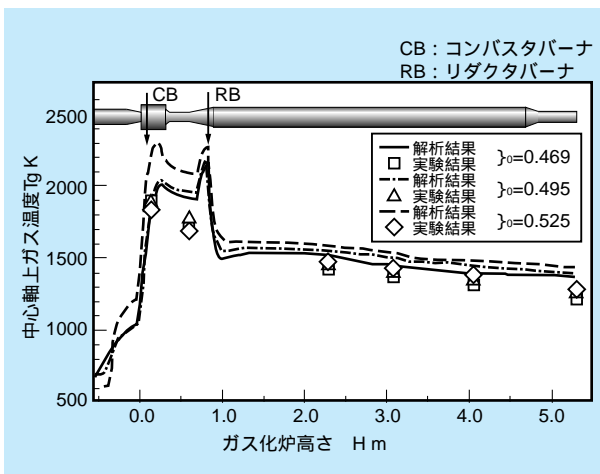


図3-3-4 ガス化炉中心軸上ガス温度分布

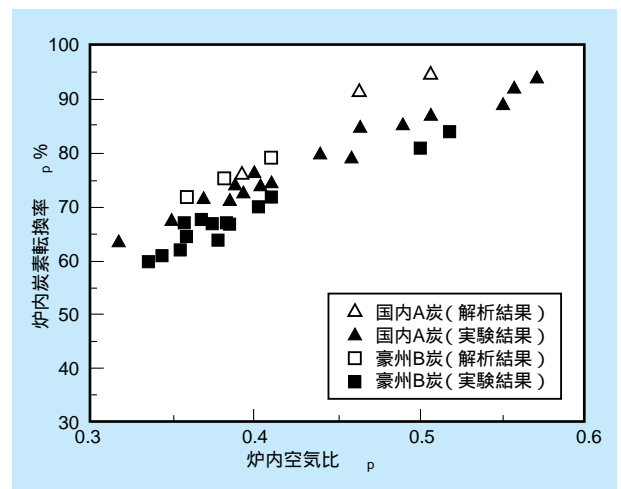


図3-3-6 炉内炭素転換率

内炭素転換率<sup>(注2)</sup>と生成チャー量を示したものである。炉内炭素転換率は、炉内空気比の増加に伴い高くなるのが、実験から明らかにされている。数値シミュレーションは、その定性的な傾向を良く再現していることが分かる。また、数値シミュレーションは、国内A炭に比べ豪州B炭の方が低い炉内炭素転換率を示す実験結果の傾向も再現している。同様に、生成チャー量についても、炉内空気比に対する傾向および炭種による傾向の違いが、数値シミュレーションにより良く捉えられている。

(注2)：生成ガス中炭素量/石炭およびチャー中炭素量

次に、200トン/日クラスの石炭ガス化炉において、炉形状およびバーナ配置変更を行った場合の数値シミュレーション結果<sup>(1)</sup>を示す。図3-3-8は、炉中心軸を含む縦断面の流速分布を比較したものである。炉形状およびバーナ配置の変更により、スロート部の中心に弱い下降流が発生している。図3-3-9は、炉壁面の剪断応力（垂直成分）を比較したものである。剪断応力は壁面を流下する溶融スラグを飛散させる原因のひとつと考えられる。炉形状およびバーナ配置の変更により、溶融スラグの飛散が懸念されるスロート部壁面での剪断応力は、約1/4に低減されているのがわかる。

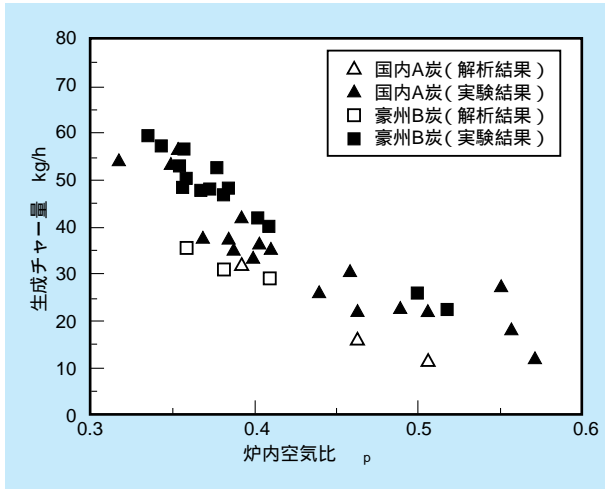


図3-3-7 生成チャー量

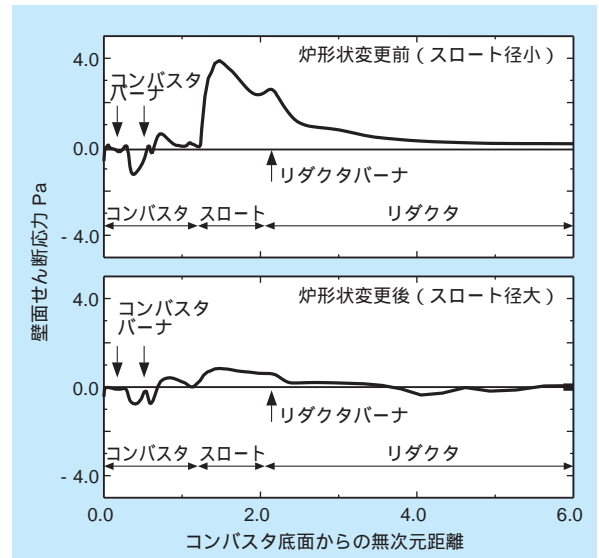


図3-3-9 壁面せん断応力分布

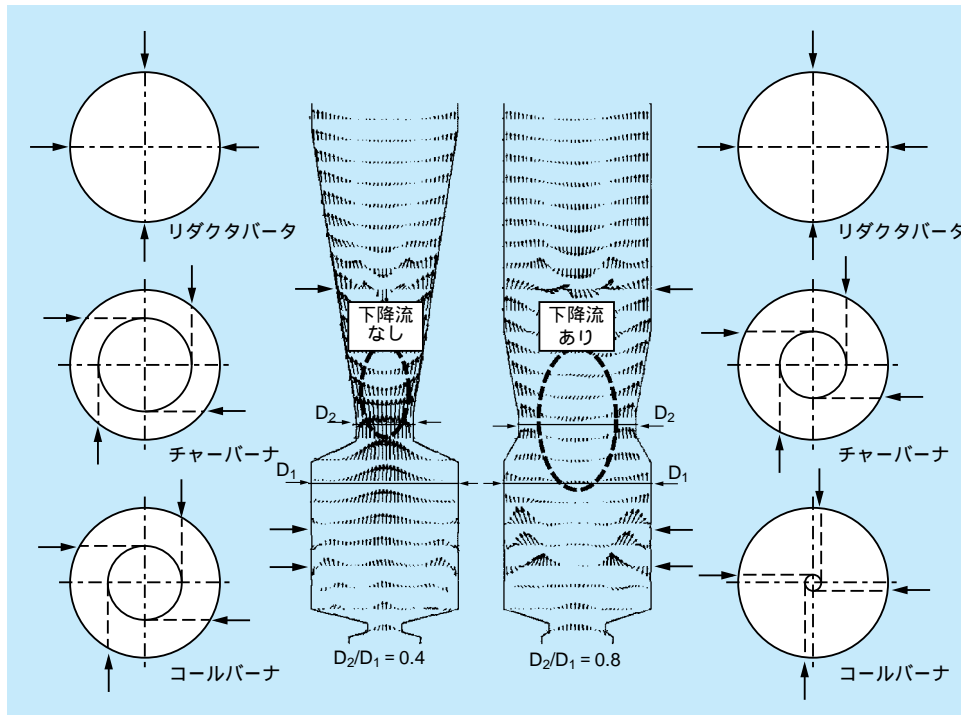


図3-3-8 流速ベクトル分布

### 3-3-4 まとめ

本数値シミュレーション技術を活用することにより、様々な条件での炉内現象を定性的に比較することが可能となる。現状において、炉内現象の定量的な予測は難しいと思われるが、定性的な傾向を把握することにより、石炭ガス化炉の設計支援、運転条件の最適化、トラブル発生時の原因説明が期待される。また、解析モデルの改

良等により、数値シミュレーションの予測精度が向上すれば、定量的な炉内現象の予測も可能と思われる。

今後は、平成15年度に設置予定の石炭ガス化研究炉を活用し、数値シミュレーションの予測精度向上に向けた解析モデルの改良を行う。さらに、石炭ガス化炉の長期連続運転において、非常に重要な課題である溶融スラグの炉外への安定排出に関し、数値シミュレーションにより、相変化を伴う溶融スラグの流動伝熱現象を予測し、溶融スラグ排出性やスラグホール形状の検討を行う。

## 3 - 4 石炭ガス化反応特性の解明

### 3-4-1 石炭ガス化炉内における反応の概要

石炭の反応性は炭種により大きく異なるため、ガス化炉の設計や運転条件の決定、性能予測や性能評価には石炭の反応性に関する知見が必要不可欠である。例えば、空気吹き二段噴流床ガス化炉では、多くの未燃炭素（チャー）が炉出口から排出されるのでそのチャーをリサイクルする。そこで、チャー生成量を正確に予測することがチャー系容量の最適設計につながり、また、負荷や空気比などの運転条件や炭種を変更したときの生成チャー量の変化を予測することがガス化炉の安定運転のために必要である。

噴流床ガス化炉内での主要な反応を表3-4-1にまとめる。高温の炉内に投入された石炭は急速熱分解され、揮

発分や一部のチャーは燃焼し、その燃焼熱を使ってチャーのガス化反応が起こる。チャーとは石炭が熱分解されて残った固定炭素分と灰分から成る固体である。チャーは酸素や二酸化炭素、水蒸気によってガス化され、これらのガスをガス化剤と呼ぶ。なお、空気吹き二段噴流床ガス化炉内の各部での反応は図3-2-1で示した通りである。チャーのガス化は燃焼よりも著しく反応速度が遅く、また、炭種などによって反応性が大きく異なるため、ガス化炉の設計にはチャーのガス化反応速度が必要である。しかし、噴流床ガス化炉の場合では、流動層ガス化炉などとは異なり炉内が高温になるため、ガス化反応は迅速に進むがガス化剤の拡散の影響が大きくなり、これまでに豊富に行われている低温で大気圧下でのガス化反応性の研究結果をそのまま使うことができない。噴流床ガス化炉はガスタービンと組み合わせるために炉内圧力が

表3-4-1 石炭ガス化炉内で起こる主な反応

<b>石炭熱分解反応</b> 石炭 揮発成分 + チャー	石炭を加熱するとガスやタール分が放出される。高温炉内での急速熱分解は数百ミリ秒で完了する迅速な反応である。
<b>燃焼反応</b> $\text{揮発成分} + a\text{O}_2 \rightarrow b\text{CO}_2 + c\text{H}_2\text{O}$ $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ $2\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO} \text{ (O}_2\text{ガス化)}$ $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$	ガス化炉では理論量よりも少ない空気や酸素が投入される。燃焼反応で生じた熱と二酸化炭素や水蒸気がチャーのガス化反応に使われる。
<b>チャーガス化反応</b> $\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO} \text{ (O}_2\text{ガス化)}$ $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO} \text{ (水性ガス化)}$ $\text{C} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 \text{ (水素化反応)}$	チャーガス化反応は吸熱反応なので、ガス化の進行とともに炉内温度は低下する。空気吹き2段噴流床炉ではコンバスタ出口の高温の燃焼ガスにリダクタ石炭が投入されるため、リダクタでの急速熱分解とCO <sub>2</sub> ガス化が支配的となる。また、スラリーフィード炉などでは水性ガス化の効果が大きくなる。
<b>気相反応</b> $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2 \text{ (シフト反応)}$ $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + 3\text{H}_2 \text{ (メタン改質)}$	高温炉内では迅速にシフト平衡へ達する。高温ほど一酸化炭素は増加し、メタンは減少する。



2.5 ~ 3MPa程度で運転され、炉内温度は1800 程度まで達することがある。そこで、当研究所では1800 、2.5MPa (25気圧)までの実験が可能で世界的にもトップクラスの仕様をもつ超高温・加圧型燃料反応実験設備 (PDTF)を開発し、これまでにデータがほとんどない超高温高圧下での石炭ガス化反応性の研究を行っている。

### 3-4-2 石炭の反応実験

石炭の反応解析には熱天秤 (TG) が一般によく用いられている。TGは天秤の試料皿の部分に電気炉を備え、試料を加熱しながら重量変化を測る装置である。容易でかつ高精度な測定が可能だが、高温ガス化のような速度の速い反応実験には適さない。一方、DTF (Drop Tube Furnace) は縦型の管状電気炉で、炉頂から固体試料を落とし、炉内で反応した生成ガスや固体を分析して反応解析を行う装置である。石炭やチャーがガス中に分散される気流層反応炉なので、実炉と同等な反応場での高温実験が可能である。図3-4-1に示す当研究所のPDTFは加圧型のDTFで、実機の高圧化炉に相当する

超高温高圧下での実験が可能である。また、炉底から挿入したサンプリングプローブを上下にトラバースすることによって滞留時間を制御し、炉内の流動はプラグフローと仮定して解析を容易にした。実験にあたっては、まず、常圧型DTF (ADTF) を用いて窒素ガス中で微粉炭を熱分解してチャーを調整し、次に、PDTFを用いて窒素希釈したガス化剤中に再びチャーを投入してガス化実験を行い、サンプリングプローブによって反応凍結して捕集したガスやチャーの組成分析や性状分析から反応解析を行った。

### 3-4-3 ガス化反応速度解析

チャーのガス化は気固反応なので、反応の進行とともにチャー粒子の反応界面が変化して反応速度が変わるため、粒子の反応をモデル化する必要がある。基本的なモデルとして、図3-4-2(a)の容積モデル、グレインモデル、細孔モデルなどが広く用いられている。容積モデルは、粒子内で均一に反応が起こるとしたもので、グレインモデルは一つの粒子はさらに小さい球形微粒子(グレイン)

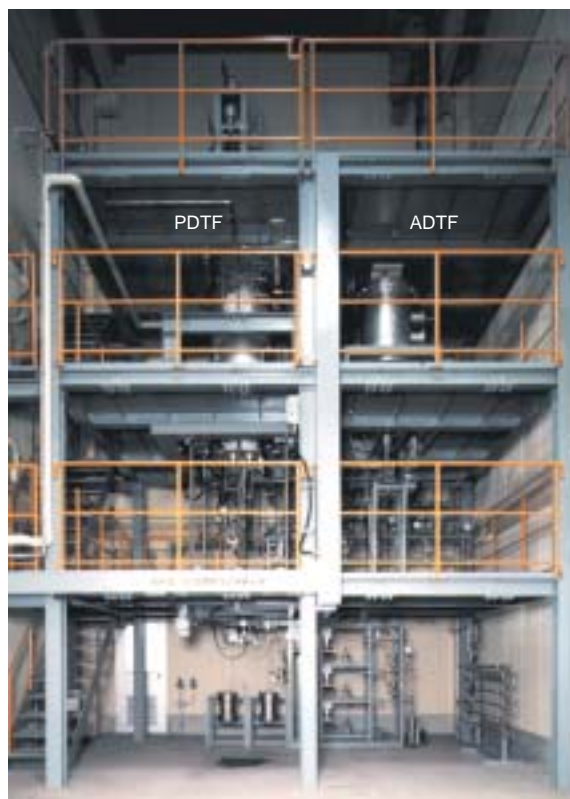
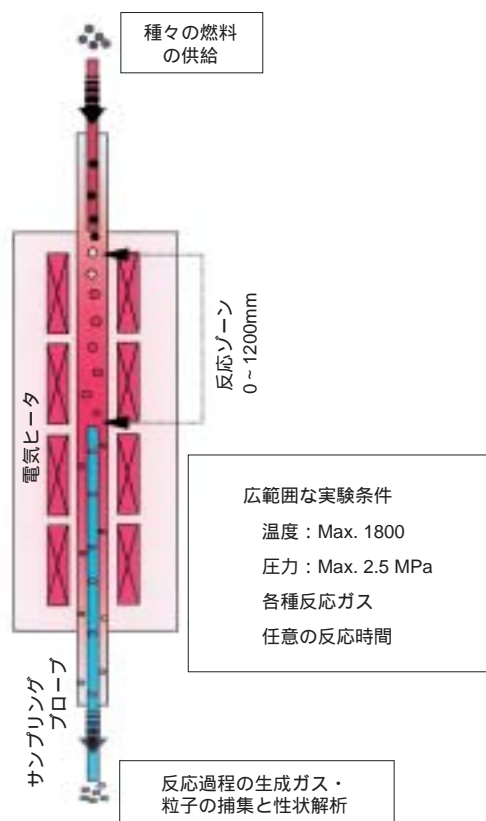


図3-4-1 超高温・加圧型燃料反応実験設備 (PDTF) の概要

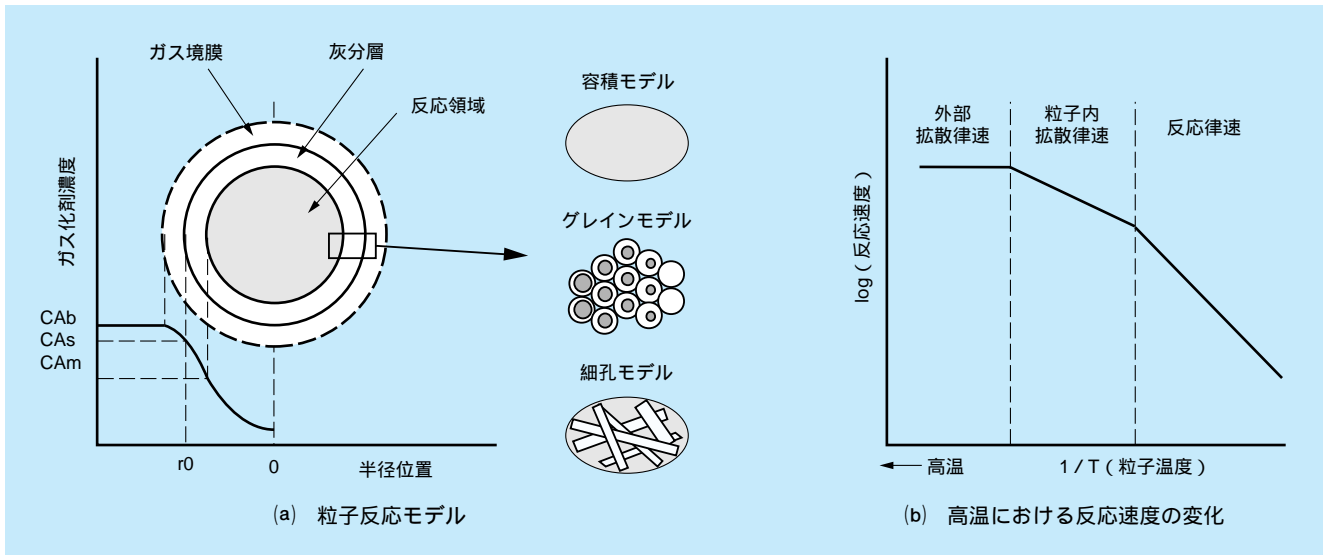


図3-4-2 石炭（チャー）の反応の概念図

の集合体と考え、それぞれのグレインの表面で反応が起こるとする。細孔モデルでは粒子内部には多くの細孔が存在し、細孔の内表面で反応が起こるとする<sup>(1)(3)</sup>。これらを検討したところ、チャーのガス化反応には細孔モデルが適しており、細孔モデルに使われる細孔構造係数によって様々な炭種の構造の違いを表現することが可能である<sup>(1)(3)</sup>。しかし、反応速度の変化と比表面積の変化が必ずしも一致せず、また、細孔構造係数を物理的な分析から求めることができないため、細孔モデルにも改良の余地があると考えられる。

高温炉内での反応は、上記モデルによる活性点での化学反応だけでなく、ガス化剤の拡散速度が影響を与えるようになる。図3-4-2(b)のように、高温になると化学反応速度は加速するが、チャー粒子の中をガス化剤が拡散する速度が化学反応速度と同程度かむしろ遅くなるため、化学反応速度が粒子の反応速度を決める領域から粒子内拡散速度が律速となる領域に遷り、反応速度の温度依存性が小さくなる。さらなる高温では、粒子の周囲（バルク）から粒子外表面へのガス化剤の供給が最も遅い外部拡散律速と呼ばれる領域になり、反応速度の温度依存性がほとんどなくなる。

PDTFとTGによるチャーのガス化実験結果を解析し、低温から高温までの反応速度を求めた。図3-4-3(a)には各ガス化剤に対するガス化反応速度を、図3-4-3(b)には二酸化炭素ガス化反応速度の炭種による違いを、表3-4-2には細孔モデルに基づく反応速度式と速度パラメー

タを示す<sup>(1)(3)</sup>。ガス化反応は全圧よりもガス化剤分圧の影響が強いことが分かり、その圧力影響（反応次数 $n$ ）や温度の影響（活性化エネルギー $E$ ）などを明らかにした。なお、図3-4-3(a)のように酸素による燃焼・ガス化は迅速な反応であるので、反応速度の遅い二酸化炭素と水蒸気によるガス化が律速となり、ガス化炉設計には酸素よりも二酸化炭素や水蒸気によるガス化反応速度が重要である。以上の速度解析の結果、二酸化炭素と水蒸気について同じ温度、ガス化剤分圧において比較すると、水蒸気によるガス化反応速度は二酸化炭素よりも5倍以上早いことが分かった。また、炭種による反応性を比較すると、炭種によりチャーのガス化反応速度が10倍近く違うこと、高温において拡散律速領域へ遷りやすいものと遷りにくいもののあることが分かった。反応律速領域で $E$ や $n$ の値に対して、粒子内拡散律速領域では見かけの活性化エネルギーが約 $E/2$ 、見かけの反応次数が $(1+n)/2$ となることが解析的に示されており、本結果はほぼこれに従っている。前節で述べたように、炉内数値解析において本反応速度データをそのまま導入することで精度のよい計算結果を得ることができた。

### 3-4-4 ガス化反応性に及ぼす影響因子

上述のようにチャーの反応速度は炭種により大きく異なる。このようにチャーの反応性に影響を与える主な因子として、炭素構造、細孔構造、ミネラル成分の触媒効

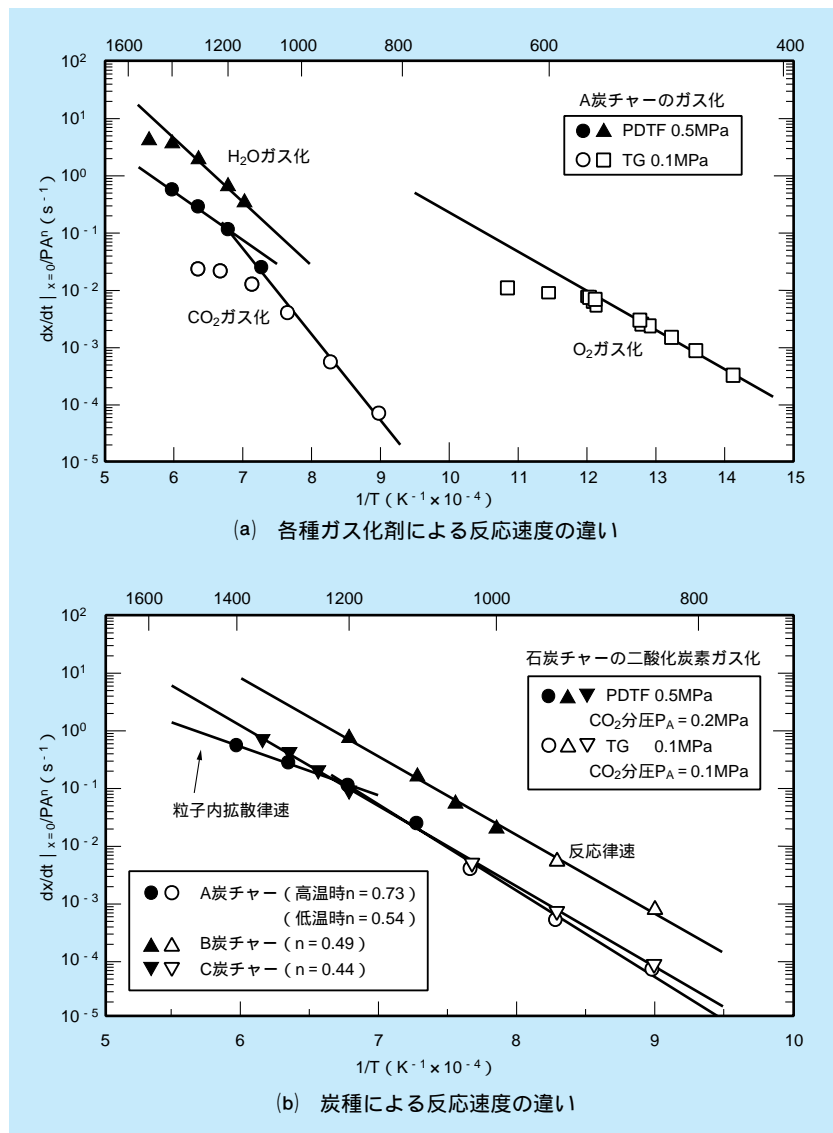


図3-4-3 チャーの初期ガス化反応速度のアレニウスプロット

表3-4-2 チャーのガス化反応速度式

細孔モデルに基づく反応速度式		$x$ : 反応率 [·] $t$ : 時間 [s] $P_A$ : ガス化剤分圧 [MPa] $T$ : 温度 [K] 気体定数 $R = 8.314 \times 10^{-3} \text{kJ/mol K}$				
$\frac{dx}{dt} = A_0 \cdot P_A^n \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \cdot (1-x) \cdot \frac{1}{1 - \ln(1-x)}$						
炭種	A 炭チャー				B 炭チャー	C 炭チャー
ガス化剤	CO <sub>2</sub>		H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
適用範囲	高温 (1200 以上) 粒子内拡散律速領域	低温 (1200 以下) 反応律速領域	高温	低温 反応律速領域	高温～低温 反応律速領域	高温～低温 反応律速領域
細孔構造係数	3	3	3	14	0.1	3
反応次数 $n$	0.73	0.54	0.86	0.68	0.49	0.44
活性化エネルギー $E$	163 kJ/mol	283 kJ/mol	214 kJ/mol	130 kJ/mol	261 kJ/mol	266 kJ/mol
頻度因子 $A_0$	$6.78 \times 10^4$	$1.09 \times 10^9$	$2.45 \times 10^7$	$1.36 \times 10^6$	$1.23 \times 10^9$	$2.64 \times 10^8$

供試チャーは常圧DTFにより窒素気流中1400 で微粉炭で急速熱分解して調整した。  
平均粒径はA炭チャーが43 μm、B炭チャーが44 μm、C炭チャーが20 μmであった。

果などが考えられる。まず、炭素構造に関してはチャーの熱履歴との関係が深い<sup>10)</sup>。図3-4-4(a)のように、微粉炭を異なる温度で熱分解して生成したチャーに対して、二酸化炭素によるガス化反応速度を同一条件で測定したところ、高温で熱分解されたチャーほど反応性が悪く、また、PDFTにより急速加熱されたチャーよりも低速加熱で調整したチャーほど反応性が悪かった。この原因は、図3-4-4(b)に示すように炭素の結晶構造の成長度合（黒鉛化度）に起因することがわかった。つまり、黒鉛化の進んだチャーほどガス化しにくい。

また、チャー粒子表面には、顕微鏡では見ることのできないマイクロ孔（孔径2 nm以下）と呼ばれる微小な細孔構造がよく発達している。この細孔構造の発達程

度は高温での粒子内拡散律速領域の現れ方に影響すると思われる。図3-4-3(b)のA炭チャーはC炭チャーよりも複雑な細孔構造をもつことが分かっている。また、粒子内拡散は粒径の影響も受けると考えられる。

さらに、触媒効果をもつミネラル成分としてはイオン交換性のカルシウムとナトリウムがよく知られている。図3-4-3(b)のB炭にはカルシウムの含有量が多く、その触媒効果が現れていると考えられる。

以上のような因子がガス化反応へ影響をおよぼすことが分かったが、未だその定量的な把握がなされていない。そこで、われわれはそれぞれの因子ごとに定量的に検討し、高温高压下での反応速度を予測する手法を確立してゆきたい。

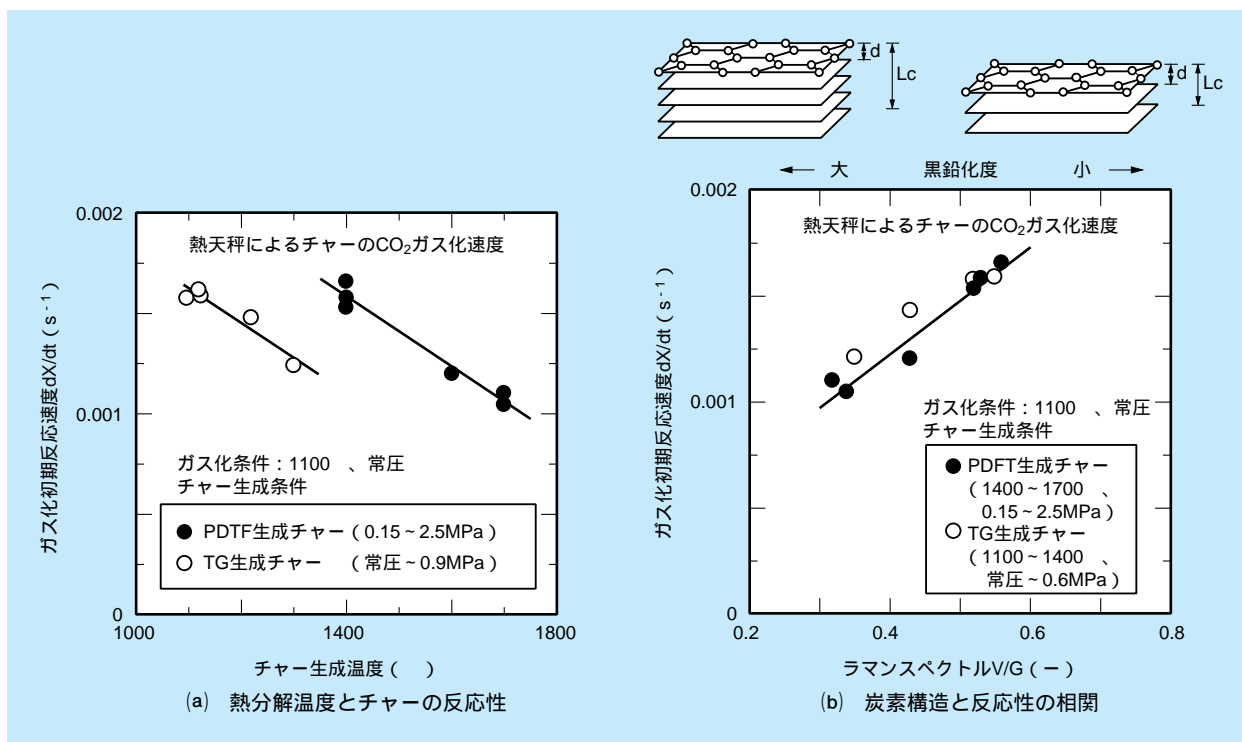


図3-4-4 石炭の熱分解温度および炭素構造がチャーのガス化反応性へ及ぼす影響

# 3 - 5 石炭ガス化炉における 灰生成・付着挙動の解明

## 3-5-1 ガス化炉内灰付着・成長現象

ガス化炉を運転する上で特に問題となるのは、チャーおよび灰粒子がガス化炉内壁や熱交換器に付着・堆積することによる諸障害である。これらは、伝熱阻害を引き起こすばかりでなく、運転継続をも困難に至らしめることがある<sup>(15)</sup>。微粉炭ボイラ内の灰挙動については国内外で多くの研究例があるが、ガス化炉内については未解明な点が多く、灰付着性評価手法が十分確立されているとは言い難い。ガス化炉内の灰付着・成長現象は、図3-5-1に示すような3つの現象に分類できる。炉内に投入された石炭中鉱物質（石炭から独立に存在する鉱物質も含む）は、まず、熱分解および燃焼・ガス化反応の進行過程で、石炭から放出され、溶融・未溶融鉱物粒子、未反応炭素が生成される（灰生成現象）。次にこれら粒子は、ガス流れによる慣性力あるいは熱泳動力によりリダクタ壁面へ衝突し、付着あるいは反発する（灰付着現象）。さらに付着粒子同士が時間の経過とともに焼結し、構造が緻密化する（灰焼結現象）。当研究所では、各基礎特性の

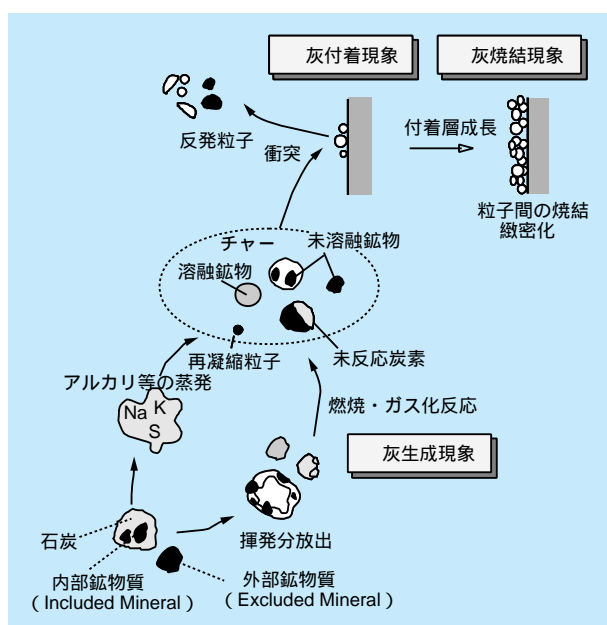


図3-5-1 石炭ガス化炉内灰挙動

解明およびモデル化を行い、それらとガス化炉内数値解析コードを組み合わせた灰付着性予測ツールの開発を進めている。図3-5-2にガス化炉内灰付着性予測ツールのフローを示す。本ツールでは、まず、CCSEM (Computer Controlled SEM) により微粉炭中鉱物の分析を行い、この結果からチャー生成モデルを用いて、チャー中鉱物の粒径、組成および含有形態（可燃成分に内包された Included mineral か反応に伴い可燃成分の外部に放出された Excluded mineral かの区別、図3-5-1）を予測する。次にこれら生成粒子性状を初期条件として数値解析を実施し、粒子の壁面衝突時に灰付着モデルにて付着/反発を判別し、炉内位置毎の付着量を求める。さらに、焼結モデルにて付着層の構造、有効熱伝導率を予測する

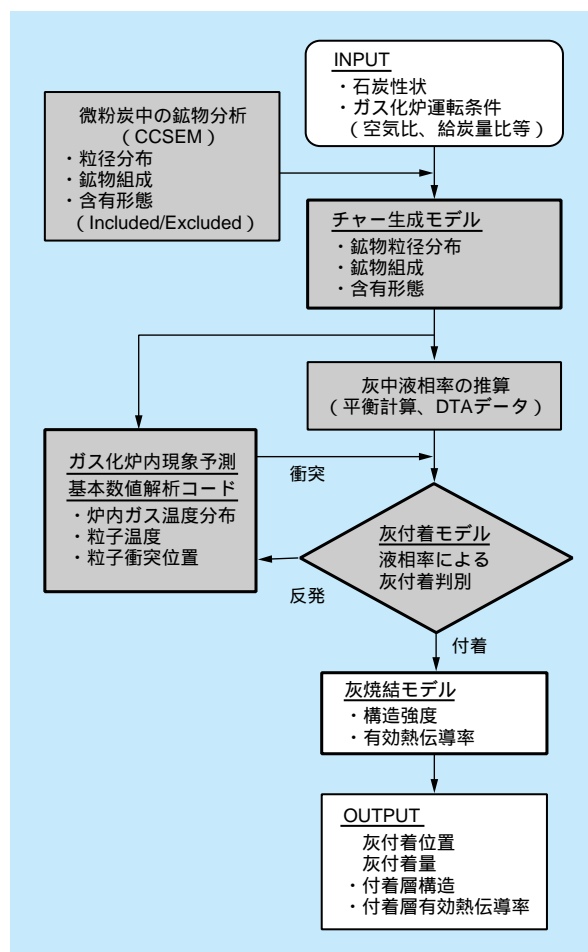


図3-5-2 灰付着性予測ツールのフロー図

ものである。本節では、これらの内、CCSEMを用いた灰生成現象解明に向けた研究と灰付着モデルならびにそれをガス化炉内数値解析コードに導入した灰付着解析結果について紹介する。

### 3-5-2 ガス化生成灰特性の予測<sup>(6)</sup>

#### (1) リダクタ部で生成する灰の特性把握

前述したように石炭ガス化炉では、リダクタ壁面への灰の付着やガス化炉後流へのチャー（灰を含む）の堆積が問題となる。コンバスタ生成灰の大半は壁面で捕集されスラグとして排出されるため、リダクタから後流における灰の付着、堆積特性を評価するには、リダクタ生成灰の諸特性（特に溶融状況）に対する炭種や運転条件の寄与度を把握する必要がある。しかし、リダクタ生成灰の特性を検討した例はなく、ガス化炉捕集サンプルの詳細な分析が求められている。

#### (2) 石炭灰の特性を正確に予測するために

石炭灰の炉内への付着特性は、従来も微粉炭ボイラの伝熱性能確保等のために検討されており、種々の付着特性指標が提案されてきた。しかし、実炉における灰の付着性と必ずしも一致した傾向になく、高い信頼性を持った指標でないことが指摘されている<sup>(17)(18)</sup>。これは従来の指標が灰分の平均組成から算出されるためと考えられる。もともと石炭は、植物が長時間かけて炭化した、いわば植物の化石であり、灰分は付近の土砂の混入などに起因する鉱物粒子である。従って、産炭地の土質の影響を強く受け、生成灰の特性も炭種によって大きく異なる。様々な鉱物粒子の混合体の特性を、平均組成だけから評価しようとしても限界があり、鉱物的観点からの解析が有効である。付着特性を例にとると、平均的な融点の高低よりも、リダクタ部の温度域で溶融する低融点鉱物の粒子量の方が指標として適するものと考えられる。

CCSEMは、走査電子顕微鏡をベースとした自動分析装置で、数千点の灰粒子を1つ1つ分析し、その粒径、形状(溶融状況)、鉱物組成(融点)、含有形態(図3-5-1、Included MineralかExcluded Mineralか)等のデータを収集し、統計的解析によりサンプル中の灰の特徴を評価することができる。図3-5-3は灰の溶融性などの検討に用いられる三相図であるが、CCSEMを用いれば、平均

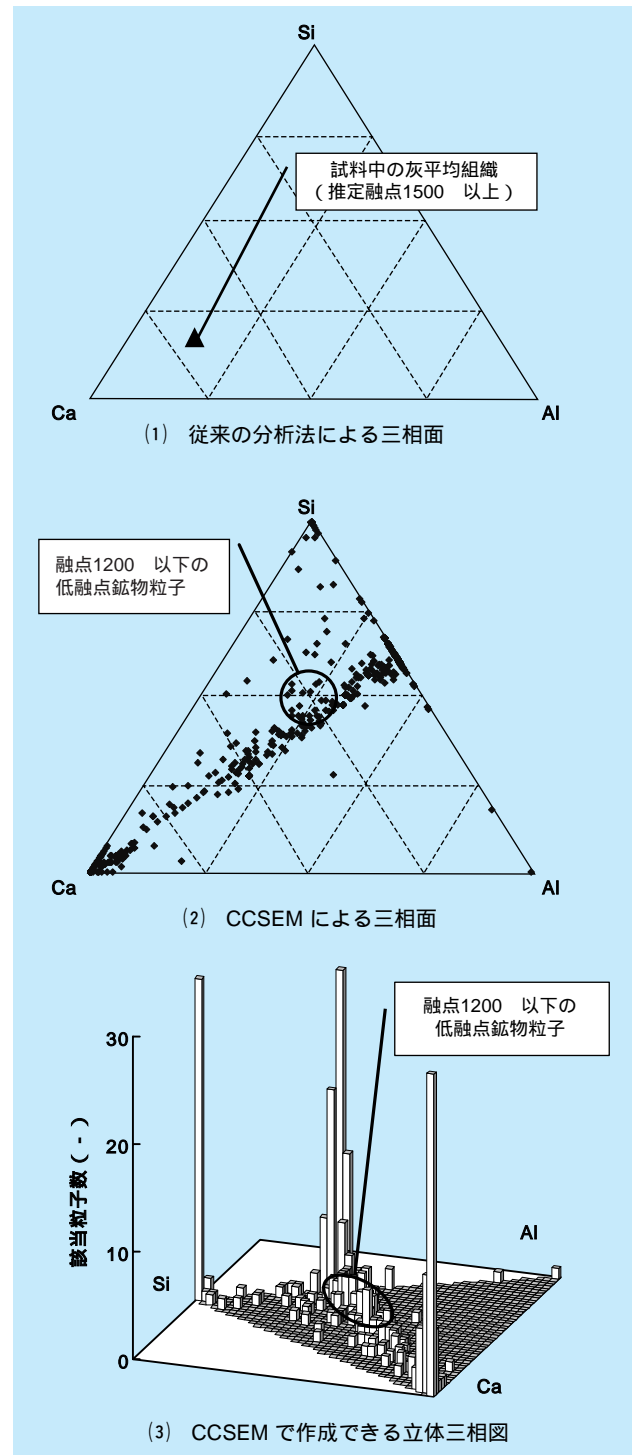


図3-5-3 CCSEM 分析と従来法の比較

組成 1 点のデータしかえられなかった従来の分析 ( 図 3-5-3(1) ) と比べ、低融点の鉱物粒子がどの程度含まれているかを詳細に把握できることがわかる ( 図 3-5-3(2)、(3) )。

#### (3) CCSEM による解析事例

図3-5-4は、粒子の軌跡などに影響する生成灰粒径の

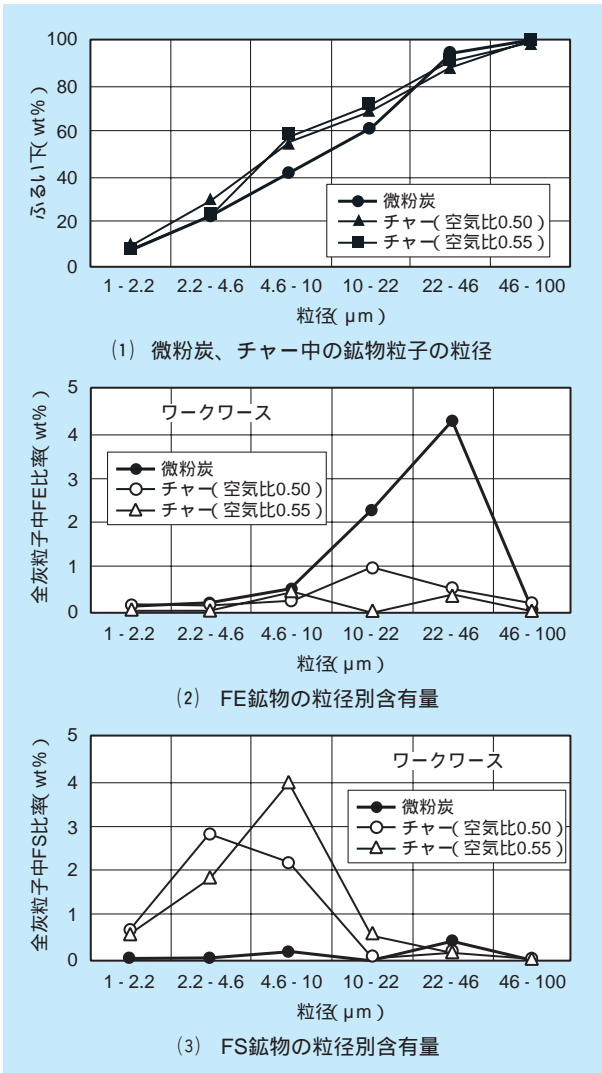


図3-5-4 微粉炭、チャー中の鉱物粒径分布

変化を考察した例である。図3-5-4(1)はガス化炉出口捕集チャーとリダクタ投入微粉炭中の灰粒子の粒径分布を比較したもので、ガス化反応により灰粒子の粒径が微細化すること、空気比の影響はあまり大きくないことがわかる。

次に灰粒径が微細化した原因について、鉱物的観点から考察した。CCSEM分析では、一般に石炭中の鉱物質を三十数種の鉱物に分類するが、このうちPyrite (黄鉄鉱  $FeS_2$ ) などともと石炭に含まれる鉄系鉱物 (FE) と、これら鉄系鉱物が高温雰囲気下で反応して生成すると考えられる鉄シリケート系鉱物 (FS) に注目し、その粒径分布を整理した (図3-5-4(2),(3))。

その結果、微粉炭中のFEは10 ~ 46  $\mu m$ 程度の比較的大きな粒子であったが、チャー中にはほとんどみられなかった。一方、反応前の微粉炭にはほとんどみられ

なかったFSは、チャー中には2.2 ~ 10  $\mu m$ 程度の比較的小さな粒子として検出された。このことから、チャー中灰粒子微細化の一因は、石炭中の鉱物粒子が他の鉱物と接触、反応して溶融することによる微細なシリケート粒子の形成であると考えられる。

当研究所PDTFチャーのXRD解析結果などから、Excluded Mineralは高温ガスに直接さらされるが、可燃成分 (炭素分) に内包されたIncluded Mineralは、吸熱反応が支配的なガス化反応場では高温ガスの熱的影響が比較的小さくなると考えられる。従って低融点鉱物でもIncluded Mineralの形態であれば高温下でも溶融しない可能性があり、灰の含有形態を把握することは、灰付着特性を評価する上で重要といえる。当研究所はCCSEMにより、空気比が高いほどガス化炉出口における全灰粒子中のExcluded率 (wt%) が增大することを明らかとした (図3-5-5)。

また、CCSEMでは粒子の形状認識も可能である。前述したチャーサンプル中に含まれるExcluded粒子の一部は球状となっており、これはコンバスタで高温に曝され溶融し、リダクタへキャリーオーバーしたものと推察される。CCSEM分析結果とチャー生成量・性状から求めた、ガス化炉出口における球状Excluded粒子量は、炉内温度が高くキャリーオーバー灰量が増える高空気比条件ほど増大することがわかった (図3-5-6)。このような溶融粒子は高い付着性を持つと考えられ、上記の情報はガス化炉内の灰付着モデルを検討する上で極めて有効である。

今後は、炭種や運転条件を様々に変化させたデータを蓄積し、ガス化によって生成する灰粒子の特性を予測す

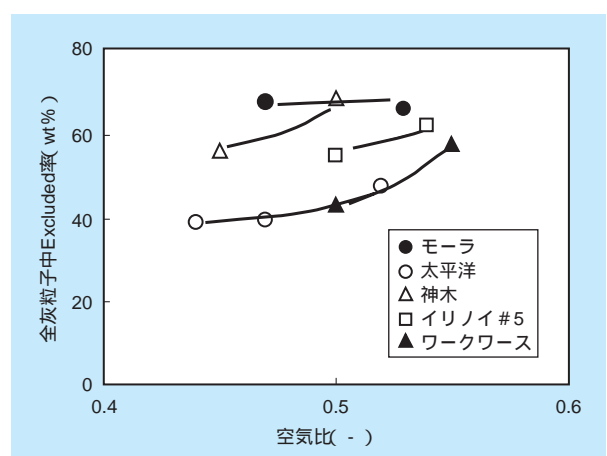


図3-5-5 空気比と全灰粒子中Excluded率の関係

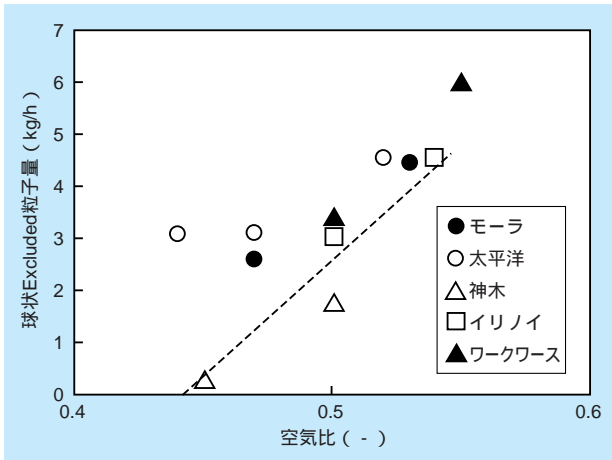


図3-5-6 空気比と球状Excluded粒子量の関係

るモデルの構築を目指す。

### 3-5-3 灰附着判別モデル

#### (1) 研究のアプローチ

2トン/日炉および200トン/日炉での経験から、炉内の灰附着状況は、運転条件や炭種により様々に変化することがわかっている<sup>(19)(20)</sup>。すなわち、灰附着現象には、灰の溶融特性と炉内の温度場および流れ場が強く影響を及ぼすと言える。図3-5-7にガス化炉内の温度分布を示す。炉内ガス温度は、コンバスタ部では灰を溶融排出するため

1500 (1773K)以上の高温であるが、リダクタ部に投入された石炭の熱分解・ガス化反応により、急速に低下し、ガス化炉出口では約1000 (1273K)程度となる。このため、ガス化炉内には、明確に温度履歴が異なる、多様な溶融状態の灰粒子が存在する。従来、灰附着性評価には、灰融点や塩基度などから推測する手法がとられているが、これらの断片的な情報では、急激に変化し、かつ連続した温度分布を持つガス化炉内全域への灰附着性評価は困難である。また、粘性による推算も提案されているが<sup>(21)~(23)</sup>、ガス化炉のリダクタ領域は灰粘性の測定が困難な灰軟化点以下であるため適用できない。本研究では、温度変化に伴う灰溶融性変化に着目し、灰軟化点以下の領域を対象に灰附着性と灰溶融性の相関について調べ、炭種間で生じる附着性の相違について検討を行った。

#### (2) 灰溶融性指標

灰の溶融開始から流動までの連続した溶融状態変化を定量的に示す指標として、灰中に生成した溶融相の割合、すなわち灰中液相率を算出した。算出手法としては、平衡計算、示差走査熱量分析(DSC)、画像解析などによる試みもあるが、当研究所では、比較的簡便であることから、超高温示差熱分析(DTA)<sup>(24)</sup>より算出する手法を採用した。図3-5-8に示差熱分析結果の一例を示す。この手法は、DTA曲線で囲まれた全吸熱量と各温度毎の

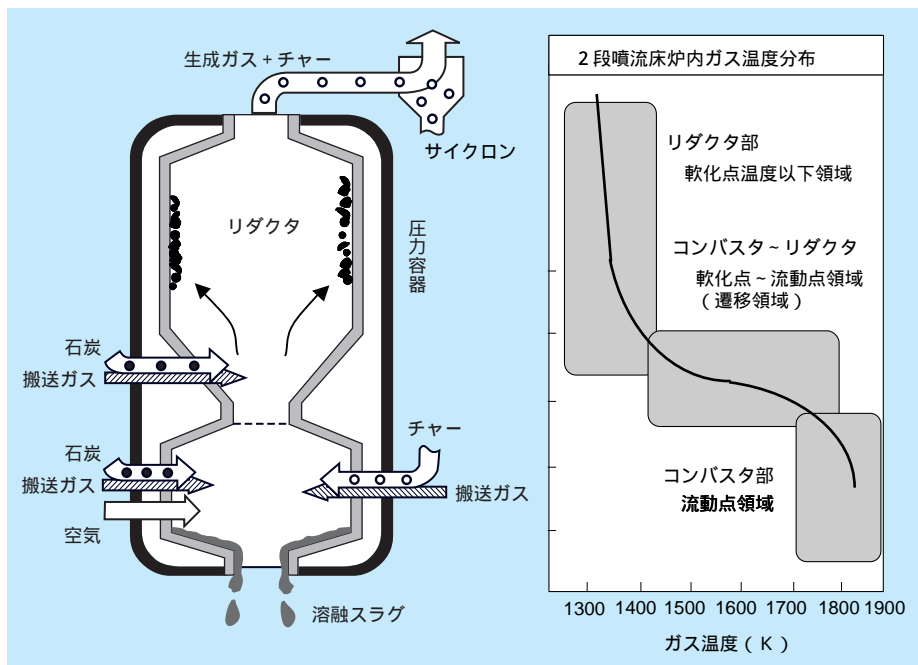


図3-5-7 二段噴流床ガス化炉内温度分布例



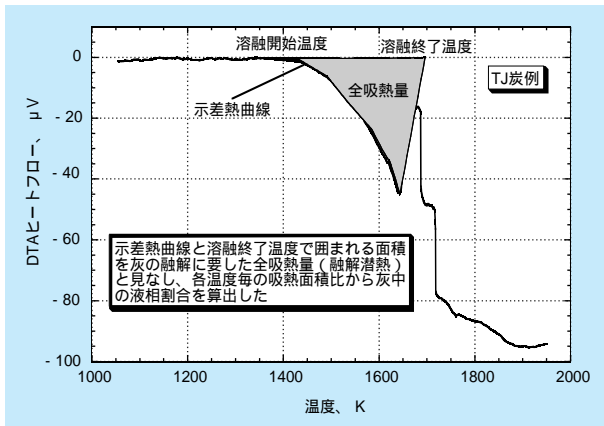


図3-5-8 示差熱分析結果の一例 (TJ炭)

吸熱量の比から算出するものである。灰溶解性の異なる国内TJ炭、豪州MC炭など5炭種の灰中液相率を図3-5-9に示す。図からも明らかなように、灰中液相率は、軟化点温度以下から急激に増加し、その傾きは炭種により大きく異なる。

### (3) 灰付着実験

灰付着実験には、図3-5-10に示す粉体落下型電気炉を使用した。電気炉内には直径50mm、長さ1mのアルミナ管を設置し、管上部より約650mmの位置にガス化炉内壁を模擬した灰付着テストプローブを挿入した。本プローブは、SUS304製円盤の上に、2トン/日炉リダクタ壁と同材質の耐火材を施工し、付着面を水平面に対して約60度の角度（安息角）に傾けて設置した。アルミナ管内のガス温度を1473K～1873K間で100K毎に変えて灰の熔融状態を変化させ、表面温度を873Kのテストプローブに衝突させて4炭種の灰の付着性を調べた。

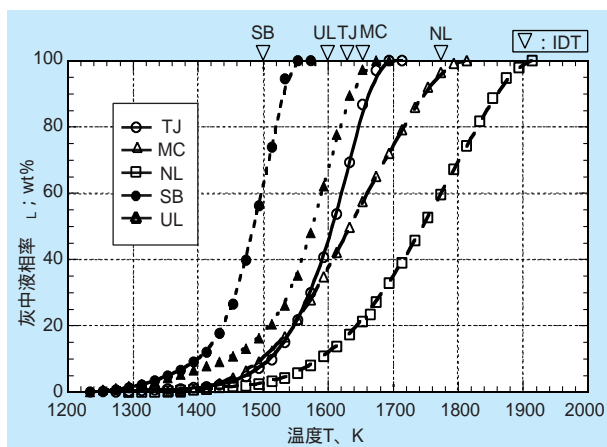


図3-5-9 灰中液相率の比較

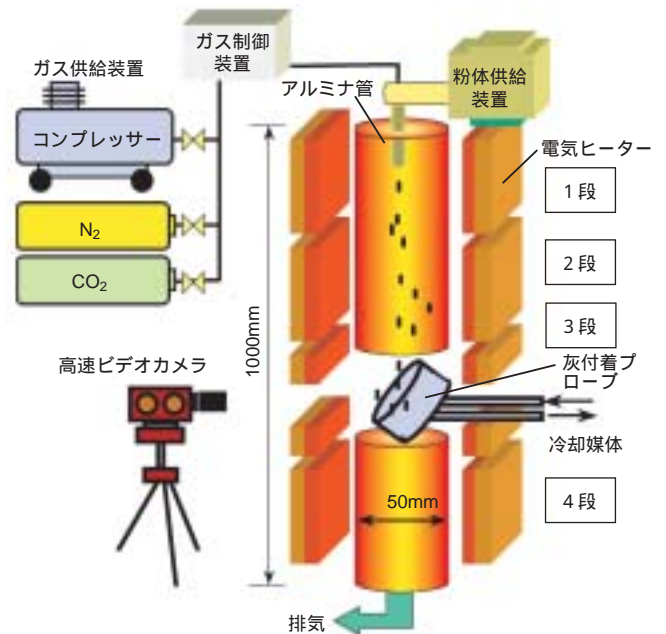


図3-5-10 灰付着特性基礎試験装置

各温度条件において、テストプローブ上に付着した灰量と衝突した灰量の比から付着率を算出し、前述のDTAより算出した灰中液相率との相関をとると、図3-5-11の通り、良い相関が見られ、炭種によらず灰中液相率から灰付着性を推定可能であることがわかった<sup>25)</sup>。

### (4) 灰付着判別モデルの構築

以上の結果から、灰中液相率を基に灰付着率を判断する基本概念（図3-5-12）をたて、灰付着判別モデルを構築した。図3-5-13に石炭ガス化シミュレーションに組み込むための付着判別アルゴリズムを示す。コンパス

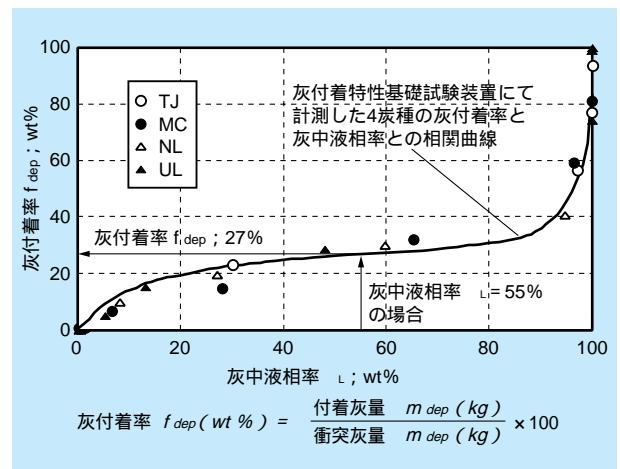


図3-5-11 灰付着率と灰中液相率の関係

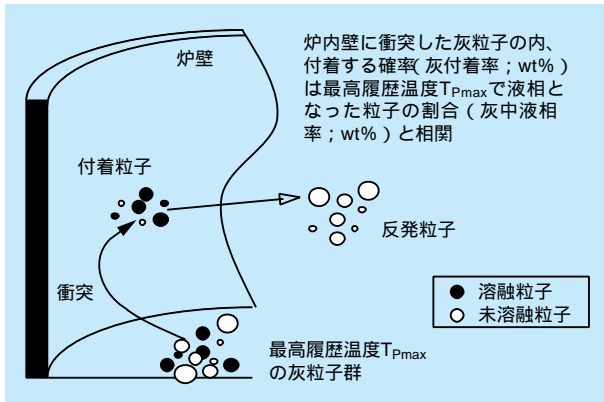


図3-5-12 灰付着判別の基本概念

タ壁は、溶融スラグが流下しているため、衝突した灰粒子は100%付着するとした。リダクタ壁に衝突した灰粒子は、最大履歴温度に基づく灰中液相率に従い灰付着率が算出され、付着判別される。

### 3-5-4 灰付着数値解析

構築した灰付着判別アルゴリズムを当研究所で開発した石炭ガス化炉数値解析コード<sup>(10)</sup>に導入し、2トン/日ガス化炉を対象にTJ炭の空気比  $=0.46$  および  $=0.59$

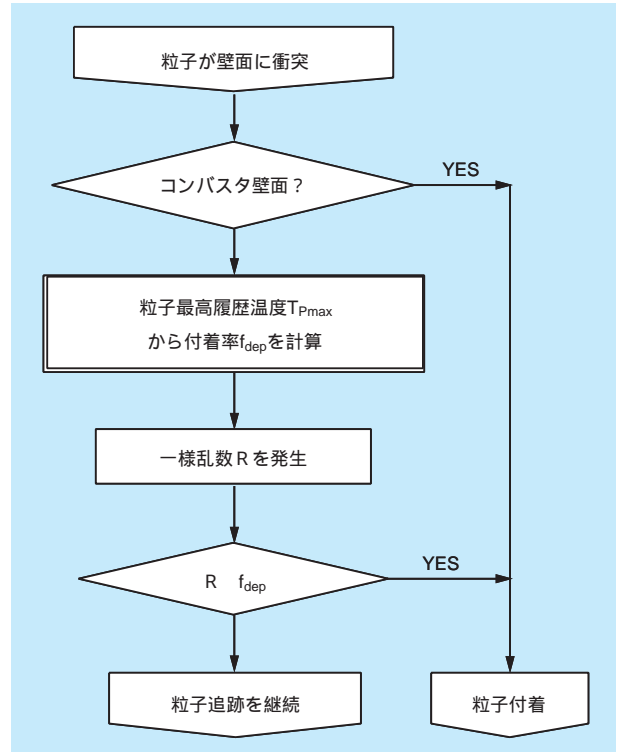


図3-5-13 灰付着判別アルゴリズム

の2条件について解析を行い、運転条件が灰付着性に及ぼす影響をみた。解析結果として、図3-5-14に示すガス化炉壁面への単位面積当たりの灰付着量分布が得られ

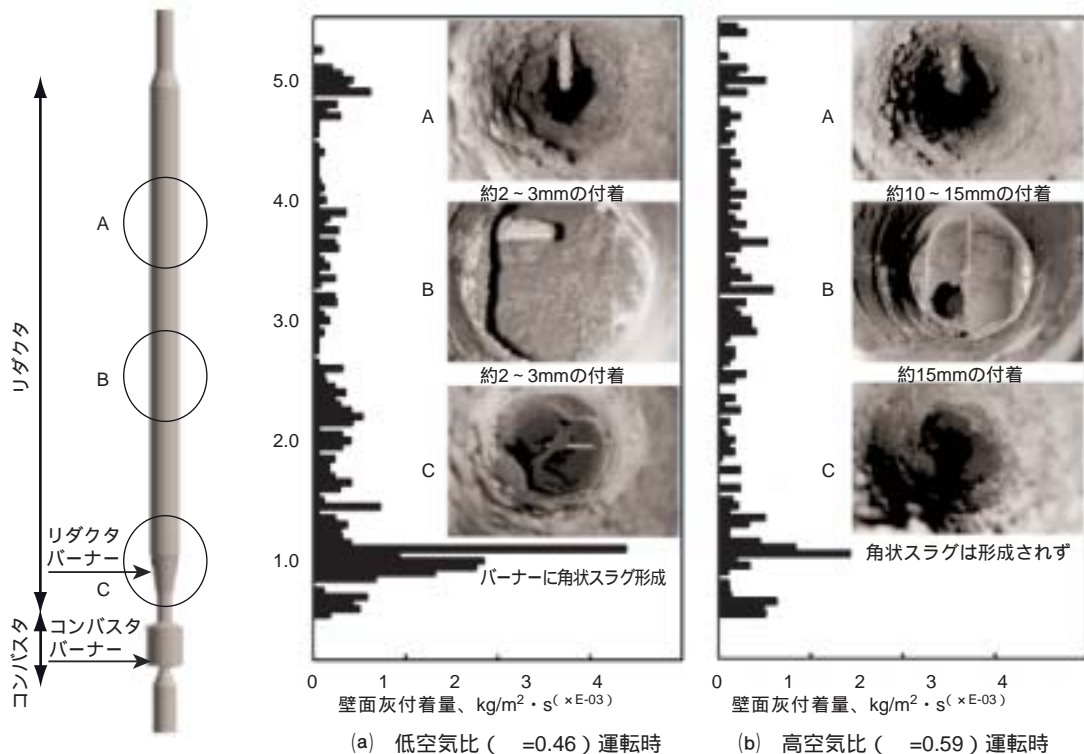


図3-5-14 2トン/日炉を対象とした灰付着解析結果

た。低空気比の  $\phi = 0.46$  の場合、リダクタバーナ近傍への著しい付着が見られ、バーナ先端部に角状スラグの形成が予想される。リダクタ壁面においても、コンバスタを通過した灰およびリダクタ供給石炭中の灰による付着が予測される。一方、高空気比の  $\phi = 0.59$  の場合、 $0.46$  の場合に比べて、リダクタバーナ周辺への灰付着量は少なく、むしろリダクタ中段から上段にかけての付着量が増加した。これらの解析結果は、ガス化試験後の炉内灰付着結果とも定性的に良く一致した<sup>29)</sup>。

引き続き、実証機および商用機の設計・運転支援に向けた評価技術の確立をめざす。数値解析手法の改良・高度化はもとより、基礎実験装置や高度分析装置を駆使してガス化反応特性の解明、灰・チャーの生成・付着機構の解明・モデル化を進め、シミュレーションへの導入を図る。また、炭種の違いによりガス化炉特性が大きく変化することが予想されるため、炭種評価技術の開発に重点を置き検討を進める予定である。

IGCC さらに、将来は海外機を含む様々な方式の

以上、灰粒子の温度変化に伴う連続的溶融過程を灰中液相率で与え、付着/反発挙動をこれに基づき確率的に判別するモデルを構築した。

当所で開発した石炭ガス化炉数値解析コードに同モデルを導入することにより、従来困難であった灰軟化点以下の領域を含むリダクタ部全域にわたり、灰付着性予測が可能となった。

今後はさらに、付着物の焼結性を考慮し、伝熱阻害量を評価するモデルの構築へと研究をすすめる予定である。

## 3 - 6 今後の展開

IGCCの導入が予想されるため、これらの炉内現象を解析・評価できるツールの開発が望まれる。当研究所では、これらの課題に対応するため、様々なガス化炉方式に対応でき、炉内現象の詳細な計測・解析が可能な2～3トン/日規模の研究用ガス化炉を平成15年度に設置し、実験技術と計算技術を両輪とするガス化炉の総合評価技術を開発することによって、IGCCの実用化・本格導入に貢献していきたいと考えている。

## コラム：石炭中の鉱物について

石炭中の鉱物は、(1)石炭の元となった植物に含まれていた無機成分、(2)混入した周囲の土砂、(3)石炭層形成後に、地下水や熱水から移行した無機成分から形成されているが、量的には、(2)が大部分を占めるといわれており<sup>(1)</sup>、石炭中に含まれる主な鉱物としては、石英 ( $\text{SiO}_2$ ) や粘土鉱物 (Kaolinite ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )、Illite ( $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) など)、Calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) や Dolomite ( $\text{Ca,Mg}(\text{CO}_3)_2$ ) などの炭酸塩鉱物、Pyrite ( $\text{FeS}_2$ )、Gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) などがあげられる<sup>(2)</sup>。

高温の炉内で生成する石炭灰の溶融特性 (付着特性) などを精度よく予測するためには、化合物組成ではなく、鉱物組成に基づいて検討することが重要と考えられており、石炭中に含まれる鉱物が高温にさらされたときに発生する形態変化 (結

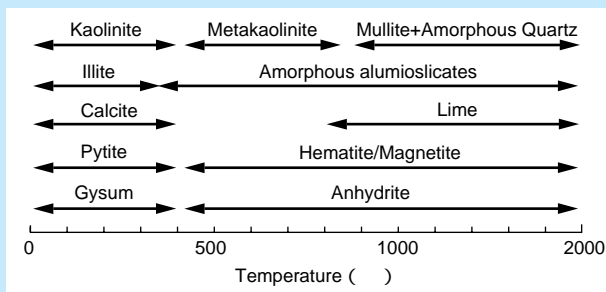


図1 石炭含有鉱物の高温での反応<sup>(2)</sup>

晶構造が変化し別の鉱物となる。図1<sup>(2)</sup>)や高温での平衡組成 (図2<sup>(2)</sup>) について研究が進められている。

## 参考文献

- (1) 二宮、「火炉内の石炭灰の溶融・付着現象の解明」、日本エネルギー学会誌、Vol.77、No.3、(1998) pp. 177-186
- (2) Godon Couch、「Understanding slagging and fouling during pf combustion」、IEA Coal research、(1994)

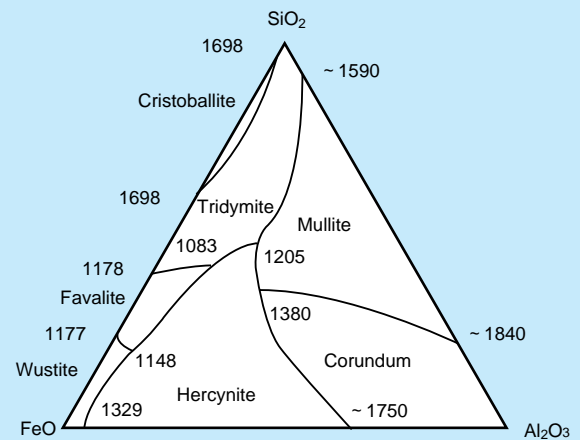


図2 FeO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>系の高温平衡組成

第 4 章

# 4

ガス精製技術の開発

## 第4章 ガス精製技術の開発 目次

横須賀研究所	エネルギー化学部長	牧野 尚夫
横須賀研究所	機能材料部	伊藤 茂男
横須賀研究所	エネルギー化学部	白井 裕三
横須賀研究所	エネルギー化学部	布川 信

4 - 1	研究の背景	61
4 - 2	セラミックフィルタ集じん技術の開発	62
4 - 3	固定床脱硫・脱ハロゲン技術の開発	66
4 - 4	今後の展開	70
コラム	湿式ガス精製技術について	72



牧野 尚夫（昭和54年入所）

入所以来、集塵技術の高性能化、高温化ならびに関連する粉体物性の計測などに関わりと共に、微粉炭の低NO<sub>x</sub>燃焼技術、低負荷時の安定燃焼技術などの開発を行ってきた。現在は、微粉炭火力の燃料供給源の強化に向けて、亜漚青炭、褐炭など低品位炭の高度燃焼技術の開発に取り組むと共に、未利用な石炭種を導入する際の、精度のよい適性判定法の確立を図っている。今後は、低品位炭を一層使いやすくするための高品位化技術に力を入れたいと思っている。



伊藤 茂男（1983年入所）

火力発電所におけるばいじん計測を始まりとして、石炭ガス化乾式ガス精製のセラミックフィルタ等、ガス-粒子分離の研究を行ってきた。その後、火力発電所からのCO<sub>2</sub>回収、微量物質研究や超微粒子材料などの研究に従事している。



白井 裕三（1983入所）

石炭ガス化ガス中の硫黄硫黄化合物を高温で除去する乾式脱硫技術の開発研究を実施して来ました。現在は、開発した脱硫剤の信頼性評価を実施すると共に、ガス化や燃焼などで使用する前に石炭中の灰分や水分を除去する脱灰・脱水技術の研究も進めています。今後は、従来の微粉炭火力に関する研究分野にも手を広げ、石炭の微粉炭火力への適性を評価する研究を進めていきたい。



布川 信（1993年入所）

これまで石炭ガス化ガスのクリーンアップ技術に関する研究に携わり、乾式脱硫剤、ハロゲン化物吸収剤の開発を行ってきました。現在は、石炭に含まれる微量物質の挙動解明と排出抑制技術についても検討しています。今後は、乾式ガス精製システムの実用化に向けた研究を進めると共に、石炭を効率よくクリーンに利用するための技術開発を行います。

## 4 - 1 研究の背景

ガス化炉で発生した石炭ガスは未反応のチャーや灰分、硫黄等の不純物を含んでおり、ガスタービンで燃焼する前にタービン保護、ならびに環境保全対策のため、集じん、脱硫からなるガス精製を行う必要がある。その要求性能は、ガスタービン保護と環境保全の両面から決定され、運転圧力はガス化圧力に、温度は配管材料や脱硫方式などに基づいて定められる。ガス精製のうち、ガス温度を下げて吸収液等を用いる方法を湿式ガス精製、高温のままで行う方法を乾式ガス精製という。湿式法は石油精製等で実用化が進んだ方法であり、一方の乾式法は開発途中のものであるが、プロセスの熱効率の向上、システムの簡素化等が期待できる方法である。我が国の火力発電所は、環境対策においては既に世界をリードする立場にあり、新たに開発するプロセスは効率向上を達成することが至上命題であるため、当研究所は乾式ガス精製の開発に取り組んだ。

乾式ガス精製はガスタービン保護のための高性能集じん技術、ならびに環境対策のための脱硫技術からなり、微粉炭火力発電を上回る環境性能を有するものが必要とされる。要求性能としては、集じん、脱硫ともに400程度、2MPaの条件において、それぞれ入口ダスト濃度 $10\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ に対し出口 $10\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 以下、入口硫化水素濃度2000ppmに対し出口100ppm以下と、過酷な条件下で高い性能が求められた。そのため、当研究所は昭和56年より要素試験を開始し、昭和59年を準備期間として、昭和60年から平成元年までの5年間、三菱重工業(株)と共同研究を行い、乾式ガス精製方式の確立を図った。この間、両者で実験室下の要素試験を分担し合うとともに、2トン/日ガス化炉に併設して同規模の乾式集じん脱硫基礎実験装置(図4-1-1)を設置し、実際の石炭ガスを用いた高温高圧下のガス精製プロセスの開発を行った<sup>(1)(2)</sup>。集じん技術にセラミックフィルタを採用し、酸化鉄ハニカム脱硫剤を用いた固定床ガス精製方式がそれである。共同研究、ならびに所内の自主研究で初期の目標を達成し、平成5年からは福島県勿来共同火力において進められていた200トン/日パイロットプラントに20トン/日規模の固定床乾式ガス精製パイロットプラントを併設し、より大規模の試験が行われた。本プロジェクトは、200



図4-1-1 2トン/日乾式集じん脱硫基礎実験装置

トン/日ガス化炉から石炭ガスの供給を受けるため、石炭ガス化複合発電技術研究組合と三菱重工業(株)の共同開発プロジェクトに資源エネルギー庁が協力する形で実施された。固定床方式は20トン/日規模においても良好な成績を収めており、以後、セラミックフィルタはガス化炉チャー回収装置として位置付けられ、固定床脱硫方式は乾式ガス精製の最有力候補となっている。

IGCCに続いて石炭ガスを燃料電池に使用するための研究が始まり、ここでも乾式ガス精製技術の適用が図られている。集じん技術としてセラミックフィルタはIGCCのみならず燃料電池用に要求される性能も満たしており、新たな開発課題は生じていない。一方、脱硫についてはIGCCの出口濃度100ppm以下を1ppm以下までに低減するよう高性能化が要求された。そこで、新たに脱硫剤を探索し、IGCC用の脱硫剤開発で得た知見を適用して、燃料電池用の脱硫剤の開発を進め、要求仕様を満たす脱硫剤の開発に成功している。また、この技術によってIGCC用の乾式脱硫の高性能化が可能となり、環境規制の強化が進んだ場合にも対応できるようになっている。なお、燃料電池用の石炭ガス精製に関して、脱硫に加えて、新たにハロゲン化物についても1ppm以下まで除去することが要求された。そのため、脱硫剤開発の知見を適用してハロゲン化物吸収剤を試作し、出口濃度1ppm以下という要求性能を達成している。

将来、火力発電への環境保全性の要求はさらに強化されると予想されるため、最近ではこれまで乾式ガス精製

では問題視されていなかったアンモニア、ハロゲン、微量重金属についての対応が求められている。石炭ガス中には石炭中の窒素化合物が転換したアンモニアが含まれ、ガスタービンで燃焼中にNO<sub>x</sub>に転換する。またハロゲン化物、微量重金属は現在の排ガス規制には含まれていないが、将来の規制強化に備えて、対応をしておく必要のあるものである。湿式ガス精製では、これらの物質は脱硫装置ならびにその前段に置かれる水洗塔でほぼ除去される（図4-1-2）。乾式ガス精製では、ハロゲンについては燃料電池用に開発した吸収剤の適用が可能であり（図4-1-2）、アンモニアに起因するNO<sub>x</sub>については既存の脱硝技術での対応、またはアンモニア分解技術の開発が必要である。ハロゲン、アンモニアに比べ対策が困難

であるのが微量金属で、今後の乾式ガス精製の重要な課題となると考えられる。

このような状況のもとで提案されてきたのが湿式法と乾式法の中間的な位置付けとなる半乾式法(ハイブリッドガス精製)である。このプロセスは脱硫については乾式法を採用し、その後、高温の吸収液を用いてハロゲン、微量金属をダストとともに除去するものである。熱効率の低下をできるだけ抑えており、不純物の除去性能は湿式ガス精製に劣らないとされるが、その性能は実験的に十分に明らかにされたものではない。また排水処理を伴うため、乾式ほどのプロセスの簡素さを達成することは困難と考えられる。

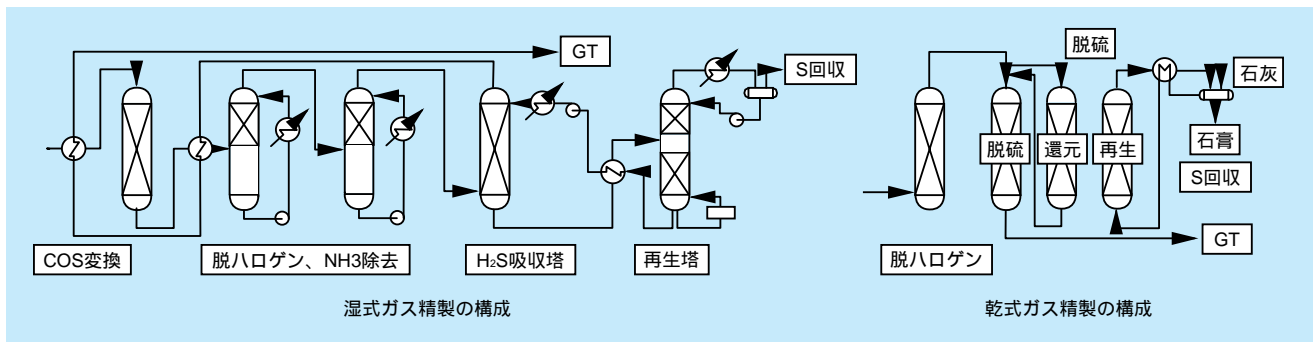


図4-1-2 ガス精製のプロセス構成

## 4 - 2 セラミックフィルタ集じん技術の開発

IGCCのガスタービン保護には、集じん装置出口のダスト濃度が10mg/m<sup>3</sup><sub>N</sub>以下と比較的高い集じん性能を要求されるため、各種方式を検討した結果、当研究所はセラミックフィルタを採用した。セラミックフィルタは、多孔質のセラミックスを用いて、ダストを含んだガスを濾過する方式で、フィルタ表面にダストを捕捉し、極めてクリーンなガスを得ることができる。ただし、フィルタ上に捕捉したダスト層は、適宜流れを逆流させて払い落とす必要がある。セラミックフィルタは、各種方式の中でも捕集性能は最も優れ、出口ダスト濃度は入口条件によらず1 mg/m<sup>3</sup><sub>N</sub>以下を容易に達成する。その一方、

長期使用の際の目詰まりや、セラミックス材料の長期信頼性、集じん、払い落としの際の圧力変動などが問題点となる。

セラミックフィルタはIGCC、PFBC用に開発が競われており、PFBCの1Mpa、850℃でテストされたフィルタは、集じん性能や圧力損失については大きな問題が生じなかったが、試験中の破損が頻繁に生じたため、破損原因の究明に重点が置かれた。熱的、化学的な劣化、機械的な障害等の調査が行われ<sup>(3)(4)(5)</sup>、当研究所も熱衝撃解析やフィルタ素材の劣化について検討を行っている。一方、IGCCでは温度が400℃クラスと比較的低いため、



化学的な劣化は余り問題とならず、熱衝撃対策、圧力損失、払い落とし等、集じん装置の最適設計を中心に開発を進めた。

### (1) セラミックフィルタの課題

セラミックフィルタは高温高圧集じんでは中心的な位置付けにあり、多くの機関で開発が進められている。その課題には、フィルタの素材、装置構造、逆洗システム、寿命評価などが挙げられるが、各機関が独自の考えに従って取り上げているのが実情で、バグフィルタの延長上の設計を行ったため、高温高圧条件に適さない設計によるトラブルが散見された。当研究所は設計者ならびに運転するユーザ側の観点を併せて、セラミックフィルタの課題として、フィルタ素材、集じん性能、圧力損失と逆洗効果、耐久性を取り上げ、実験室規模での基礎試験ならびに2トン/日炉で発生させた実ガスを用いた高温高圧下の集じん試験によって、課題を克服した<sup>(6)</sup>。

### (2) フィルタの素材と構造

セラミックフィルタは多孔体を濾過材として、その表面にダストを捕集し、表面に堆積したダストを適宜ガスを逆流させて払い落とす逆洗操作を行う。その際、逆洗ガスには比較的低い温度のガスを使用しているため、フィルタ素材に急激な温度変化が生じ、熱衝撃によって破損するおそれがある。実際に当初使用したアルミナ系のフィルタは熱衝撃によって破損する傾向が見られたため、耐熱衝撃性材料の炭化珪素フィルタを採用し、熱衝撃による破損を回避した。

またセラミックフィルタの捕集性能は、フィルタ単体

の性能よりもフィルタ上に堆積したダスト層に依存する。実際の集じん操作ではダスト層が高性能フィルタの役目を果たすため、フィルタは表面でのダスト層の形成と内部へのダスト粒子の侵入を防止できればよい。そのため、当初採用したフィルタは平均細孔径25 $\mu\text{m}$ の単層構造のものであった。試験開始当初は問題が見られなかったが、ある炭種のガス化では集じん装置に流入するチャーの平均粒径がサブミクロン域となり、フィルタ内部へのチャーの侵入が急速に進んだ。その結果、逆洗による圧力損失の回復が低下するため、図4-2-1に示す表層のみを緻密にし内部の細孔を粗くした複層構造を採用した。実験室における0.5 $\mu\text{m}$ ～25 $\mu\text{m}$ までの細孔のフィルタ試験、ならびに実ガス試験における数 $\mu\text{m}$ 細孔のフィルタの試験結果から、表面を数 $\mu\text{m}$ 程度の細孔にすれば、チャーのフィルタ内部への侵入は防げることが分かった。

### (3) 集じん性能

石炭ガスを用いた高温高圧集じん試験、実験室での集じん試験のいずれにおいても、入口ダスト濃度に関わらずフィルタ出口のダストは検出されなかった。フィルタ出口でダストが計測される場合、配管内の汚れあるいはフィルタ取り付け部からのダストリークであることが多く、取り付け方式によってはある程度のリークは発生する。当研究所はフィルタと取り付け金具の間をグランドパッキンによりシールし、ダストリークをほぼ完全に防止できることを確認している。

### (4) 集じん装置の構造

セラミックの多孔質焼結チューブの一端を塞ぎ、もう

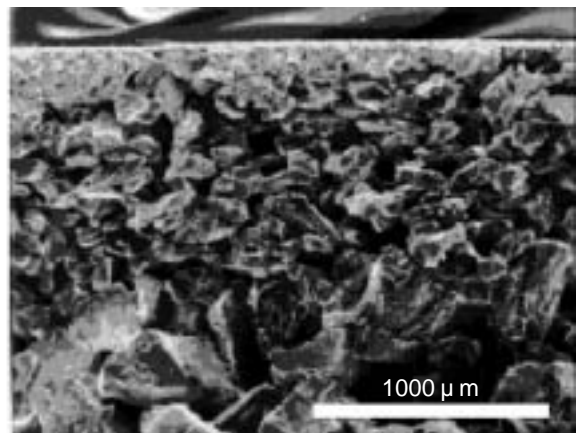


図4-2-1 セラミックフィルタの外観と断面

一端にフランジ部を作ってつり下げの形のをキャンドルフィルタと呼んでいる。またチューブ状のフィルタエレメントをキャンドルと呼ぶこともある。図4-2-2はフィルタを圧力容器に収容する際の写真であるが、フィルタチューブの下端を塞ぎ、チューブ内側を通した金属ロッドで吊り下げている。このようなフィルタもキャンドルと呼ばれる場合がある。当研究所の取り付け形式は400クラスの集じんに特化したものであり、ロッドに取り付けたバネで熱膨張を吸収している。またフィルタと金具の隙間をグランドパッキンでシールできるためダストリークにも強い。集じん装置としての大きな課題はスケールアップであり、多数のフィルタを圧力容器内に収容する装置構造の工夫が必要となる。独Schumacher社のクラスター構造<sup>(7)</sup>、EPRI (Electric Power Research Institute) およびWestinghouse社のTier構造<sup>(8)</sup>、LLB社 (Lurgi Lentjes Babcock Energietechnik GmbH) の倒立構造<sup>(9)</sup>などは独特の構成をとっており、コンパクト化またはダストシール性の向上を狙っているが、いずれの方式も一長一短がある。

#### (5) ダスト性状と圧力損失

フィルタは集じん中のダスト堆積による圧力損失の増加と、堆積したダストを払い落とす回復操作を交互に繰り返すため、圧力損失の増加減少の変動が起こる。また、目詰まりによって圧力損失は長期間にわたって徐々に上昇していくことが多い。ダスト層の圧力損失の上昇が速ければ逆洗を頻繁に行う必要が生じ、逆洗所要動力の増加をもたらす。また逆洗前の差圧が大きすぎると、逆洗効果の低下の原因となりうる。そこで、当研究所ではダスト層の圧力損失をダスト濃度、集じん流速、ダスト粒



図4-2-2 セラミックフィルタの圧力容器への収容

径分布などの関数として表すとともに、集じん、逆洗の操作のシミュレーションによって、集じん装置の適切な設計、ならびに安定した運転ができる条件を見出すことを可能とした<sup>(10)(11)</sup>。

#### (6) 逆洗

フィルタ上に堆積したダストを払い落とす逆洗は、クリーンガスを連続して逆流させる逆流逆圧方式、またはフィルタのクリーンサイドに高圧の圧縮ガスを瞬間的に噴射し、短時間の逆圧または逆流によって捕集ダストを払い落とすパルスジェット方式(図4-2-3)が採用され、最近パルスジェット方式が増えている。いずれも経験的な設計であり、逆洗のメカニズムが十分解明されていない。この逆洗システムの適切な設計を可能とするため、逆洗システム設計の鍵となる因子を解析し、その影響を把握した<sup>(12)</sup>。フィルタ内にジェットを噴射してから、フィルタを逆洗流が透過するまでの時間は0.1秒以下であり、通常のパルスジェット逆洗では流れは定常に達している。また逆洗流れはフィルタ内で一様ではなく先端部で大きくなっている。このような特性を解明するため、ジェットの質量流量、運動量、エネルギーと周辺ガスの温度、圧力、集じん差圧、フィルタの抵抗、ノズル径、ベンチュリ - 口径、フィルタ径等を入力とする、逆洗時の流動解析モデルを作成し、各種因子の効果を定量的に評価することを可能とした。その結果、ベン

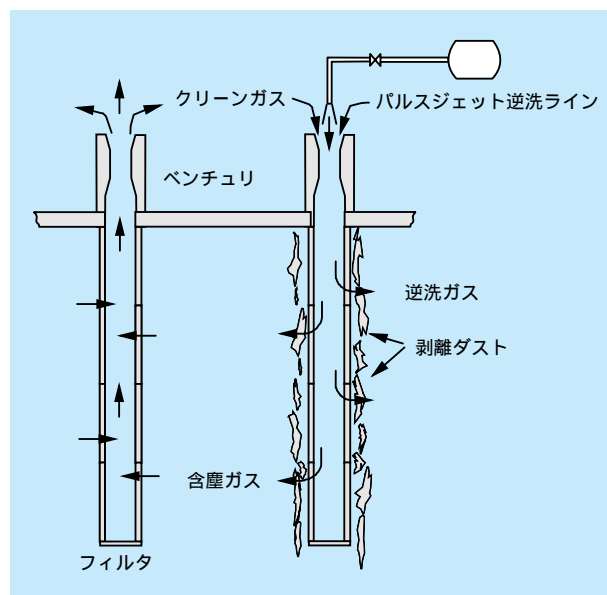


図4-2-3 パルスジェット逆洗の概念

チュリには、ジェットが同伴するガス量を増やす効果があり、その口径には適切なサイズがあること、逆洗ガス源の圧力は2.5MPaの石炭ガスに対しては5MPa程度必要であること、これらの数値がフィルタの抵抗やサイズ、パルスジェット配管に依存し、また集じん装置の運転条件に深く関わることを明らかにした。

パルスジェット逆洗の主な特徴をまとめると、以下のよう述べるができる。

- ① 抵抗が大きいフィルタでは、フィルタ内部の圧力分布は比較的平坦となるが、抵抗が小さく、内径と長さのバランスが悪いフィルタでは先端部のみが大きく、逆洗ガス入口近くの効果が低下する。
- ② 逆洗ガスの流出によって、フィルタ先端では軸方向流速が低下し、それに伴う動圧から静圧への変化として先端の圧力が上昇する。圧力波の反射と捕らえる研究も見られるが、反射波とは異なる。
- ③ フィルタ全体にわたって逆洗差圧を得るには、ベンチュリなどの助走区間の設置が必要である。
- ④ 適当なスロート径のベンチュリを用いれば、ジェットは周辺ガスを同伴し、流入ガス温度ならびに逆洗差圧を高めることができる。
- ⑤ 逆洗前の集じん差圧が大きいと逆洗差圧が低下し、同伴流は得られず、ジェットの吹き戻りが生じるようになる。

逆洗システムの設計の際には、これらの影響を予測し、適正な運転範囲を見出す必要がある。

#### (7) フィルタの耐久性

セラミックフィルタを長期間使用すると、目詰りあるいは素材の劣化によって、いずれはエレメントを再生または交換する必要が生じる。その耐用期間が短ければ、経済的に成立たず、また経済性に見合うものであっても、プラントの運転計画やエレメント交換などのためにあらかじめ時期を設定しておく必要がある。このことから、フィルタの耐久性の評価は、セラミックフィルタの実用化にあたっての重要な課題の一つである。

フィルタの目詰まりが進むと、払い落とし直後の圧力損失が増加するため、逆洗間隔が確保できず集じん操作が困難になる。またこの圧力損失の増加はフィルタの逆洗効果を低下させ、目詰まりがより速く進む悪循環をもたらす可能性がある。このため圧力損失の長期的な変化

を調べることが多くなされたが<sup>(13)</sup>、ある程度の時間が経過すると安定するのか、それとも上昇を続けるのか未だ明らかではない。ベースライン圧損の上昇の原因はフィルタ内部へのダストの侵入、払い落としの際に残留するダストの増加などが要因として考えられるが、現在ではフィルタ表層の細孔径をある程度小さくしておけばフィルタ内部へのダスト侵入はほとんど無視でき、逆洗システムの適切な設計とあわせて圧力損失の増加をかなりの程度抑制できると考えられる。さらに、複層構造フィルタでは、目詰りが進んだフィルタの表面に残留するダストを除去すると、圧力損失が回復することを確認した<sup>(14)</sup>。残留ダストの除去には燃焼、洗浄、いずれも効果があり、フィルタを年1回程度クリーニングすることで大幅な寿命向上が図れると考えられる。

#### (8) 固定床パイロットプラント

横須賀研究所で実施された2トン/日乾式クリーンアップ試験の後、セラミックフィルタは勿来IGCCで20トン/日固定床パイロットプラントとして試験された(図4-2-4)。フィルタエレメントは外形11cm、長さ4.5mと大型化が図られ、パルスジェット逆洗が採用された。集じん装置の設計に関してフィルタ内の流れ、逆洗システム、圧力損失についてシミュレーションを行い、設計の妥当性を検証した。勿来パイロットプラントでは集じん性能、払い落とし性能とも良好で、300時間の連続試験

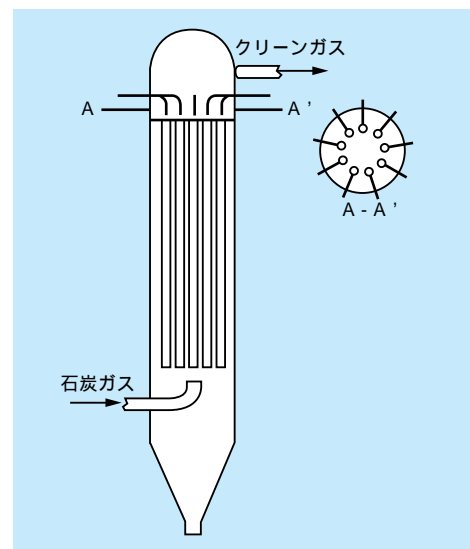


図4-2-4 20トン/日固定床乾式集じん試験におけるセラミックフィルタ

を問題なく終了している。

### (9) ま と め

IGCC、PFBCなどの高効率発電技術の開発が進められる中で、高温集じんは発電プロセス実現のためのキーテクノロジーである。なかでもセラミックフィルタは最も実用に近いと考えられ、本節ではその基本的な課題と評価に関して、捕集性能、圧力損失、払い落とし、耐久性について述べた。フィルタは現状で十分な捕集性能を有

しており、現在ではガス化炉チャー回収装置として位置付けられている。当研究所は平成4年度でIGCC用セラミックフィルタの所内研究を終了し、その後は勿来固定床ガス精製プロジェクトへの協力、あるいは超重質油ガス化の集じん装置としての研究開発を行い、小型装置での性能検証はすでに終了している。メーカーでは、大型プラントでの長期運転による実証段階での改良が今も進められている。一日も早い実用化を期待してやまない。

## 4 - 3 固定床脱硫・脱ハロゲン技術の開発

### 4-3-1 脱硫技術

#### (1) 固定床脱硫技術の概要

固定床脱硫は400～500の温度条件下で、金属酸化物を用いた脱硫剤に石炭ガス中の硫黄化合物（ $H_2S$ 、 $COS$ ）を吸収させ、石炭ガスから硫黄分を除去する技術である。図4-3-1に示すように使用後の脱硫剤を再生して使用することを前提としている。この脱硫剤を開発するに当たっては、以下の事項を考慮して検討を進める必要がある。

炭素析出による脱硫剤の崩壊が生じない。

- ② 目標濃度まで除去できる。
- ③ 再生でき、長期間使用できる。

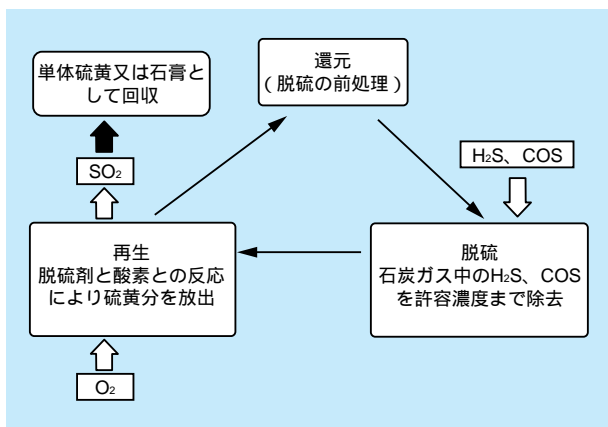


図4-3-1 脱硫・再生反応サイクル

図4-3-2に固定床脱硫システムを示す。このシステムは3塔を有し、還元、脱硫および再生の3工程を順次切り換えることにより連続的に脱硫を行う。また、硫黄分を吸収した脱硫剤を酸素と反応させ、二酸化硫黄（ $SO_2$ ）を放出させて再生する。この再生反応は発熱反応であるため、脱硫剤温度が耐熱温度（800）を超えないように、硫黄回収後の再生ガスをリサイクルして、酸素濃度が1.5%程度となるように空気を希釈して再生に用いる<sup>(15)</sup>。20トン/日固定床ガス精製パイロットプラントでは、硫黄化合物を100ppm以下に除去する酸化鉄系ハニカム脱硫剤<sup>(16)(17)</sup>（図4-3-3）を用い、その性能を検証した<sup>(18)</sup>。現在では、石炭ガスを熔融炭酸塩型燃料電池にも利用できるように、硫黄化合物を1ppm以下まで低減できる高性能な亜鉛フェライト脱硫剤の開発を進めている。

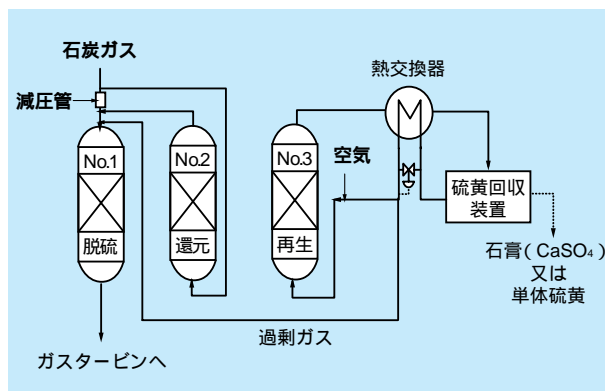


図4-3-2 固定床脱硫システム

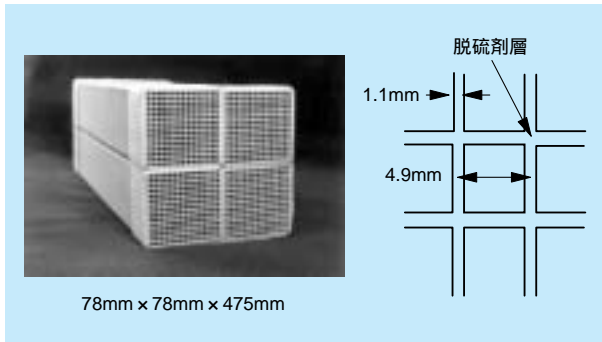


図4-3-3 酸化鉄系ハニカム脱硫剤

## (2) 亜鉛フェライト脱硫剤の選定

石炭ガス中の硫黄化合物を 1 ppm 以下に除去するには、鉄成分主体の脱硫剤では達成が困難であり、亜鉛成分の添加が不可欠である<sup>(19)(20)</sup>。一方、再生の容易さからは鉄成分を含んでいた方が好ましく、そこで 1 ppm 以下まで除去できる亜鉛成分と再生が容易な鉄成分とを組み合わせた亜鉛フェライトを主に、種々の亜鉛系酸化物脱硫剤を調製し、比較評価を行った<sup>(21)</sup>。表 4-3-1 に当研究所で調製した主な脱硫剤の性状、図 4-3-4 に脱硫時の破過特性を示す。本脱硫剤は、沈殿法で得られた亜鉛系酸化物粒子の粉末と酸化チタン (TiO<sub>2</sub>) 粒子とを混ぜて焼成したものである。

これらの中では、シリカ (SiO<sub>2</sub>) を添加した亜鉛フェライト脱硫剤 (No.1、No.2) が、出口濃度 1 ppm 以下を長く維持できた。SiO<sub>2</sub> の添加は亜鉛フェライト粒子の微細化と、炭素析出の抑制に効果があると考えられる。

この結果から、SiO<sub>2</sub> を添加した亜鉛フェライト脱硫剤 (No.1、No.2) を高性能脱硫剤として選定した<sup>(22)(23)</sup>。図 4-3-4 に示す初期性能では、No.1 の方が No.2 よりも 1 ppm

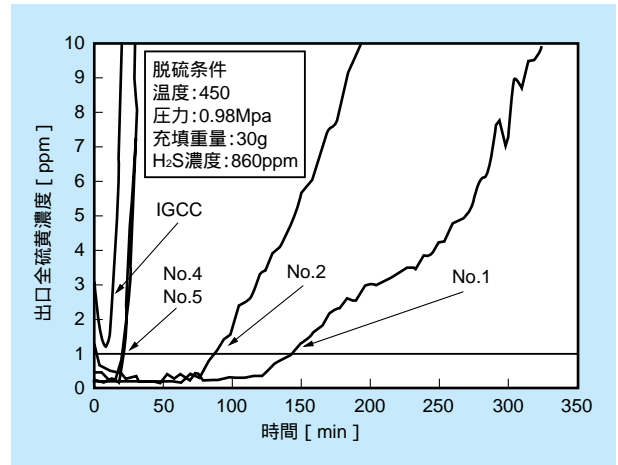


図4-3-4 各種脱硫剤の破過特性

以下を維持する時間が長い、脱硫/再生を繰り返すと 1 ppm 以下を維持する時間 (1 ppm 破過時間) は両者ともほぼ同じとなる。このため、当研究所では、現在のところ No.1 と No.2 を同等に評価しており、以後、No.2 脱硫剤の試験結果を用いて研究成果を示す。

## (3) 再生条件の選定

亜鉛フェライト脱硫剤は、脱硫時に硫黄化合物を吸収して硫化亜鉛 (ZnS) と硫化鉄 (FeS) となる。反応後の脱硫剤は、酸素濃度 1.5% 程度のガスと反応させ、亜鉛フェライト (ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) に戻すが、再生ガス温度が大きな影響をもつ。図 4-3-5 に示すように 350 °C では、再生時に残留する硫黄分が多く、600 °C では、脱硫剤に含有する亜鉛フェライト粒子の表面積が減少するため、450 °C で再生した場合に比べ、再生後の脱硫性能が低下する。この結果から最適温度は 450 °C であることが判明

表4-3-1 調製脱硫剤の性状

名称	使用金属酸化物粒子の概要		成分含有率 (wt%)		比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	硫黄分吸収容量 (mmol/g)	
	粒子形態	製法	Fe	Zn		計算値	実測値
No.1	ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub>	アンモニア共沈法	9.8	4.5	31	2.44	2.58
No.2	ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub>	尿素共沈法	8.9	5.3	34	2.40	2.57
No.3	ZnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	尿素共沈法	9.8	5.3	8	2.57	
No.4	ZnSiO <sub>4</sub> -SiO <sub>2</sub>	アンモニア共沈法	0	15.7	10	2.40	0.30
No.5	ZnO	アンモニア共沈法	0	17.2	4	2.63	1.05
IGCC用	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	アンモニア共沈法	14.2	0	35	2.54	2.5~2.7

\* 炭素析出が生じ、脱硫剤が粉化したため脱硫できなかった

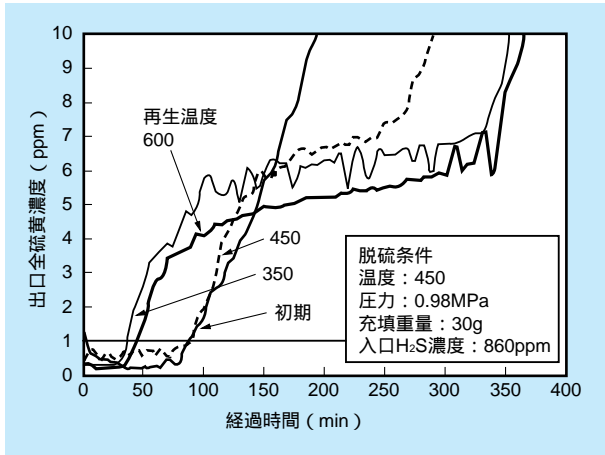


図4-3-5 脱硫性能に及ぼす再生温度の影響

した<sup>24)</sup>。

(4) 初期脱硫/再生繰り返し特性

図 4-3-2 に示すように、再生ガスは硫黄回収装置を通して循環使用するため、一部のSO<sub>2</sub>が再生ガス中に残留する。そのためガス温度を450 とし、再生繰り返しにおける残留SO<sub>2</sub>の影響を検討した<sup>25)</sup>。

図 4-3-6 に再生ガス中のSO<sub>2</sub>濃度を0、0.1、0.2%とし、10～20回の脱硫/再生繰り返しを行った際の硫黄分吸収容量の変化を示す。再生ガス中のSO<sub>2</sub>の有無に関わらず硫黄分吸収容量は低下を続けている。比較用に示した酸化鉄系ハニカム脱硫剤では、硫黄分吸収容量は早期にほぼ一定となり、安定化するが、亜鉛フェライト脱硫剤は安定化するのに時間がかかることが示された。また、SO<sub>2</sub>濃度が高いほど硫黄分吸収容量の低下が大きくなっ

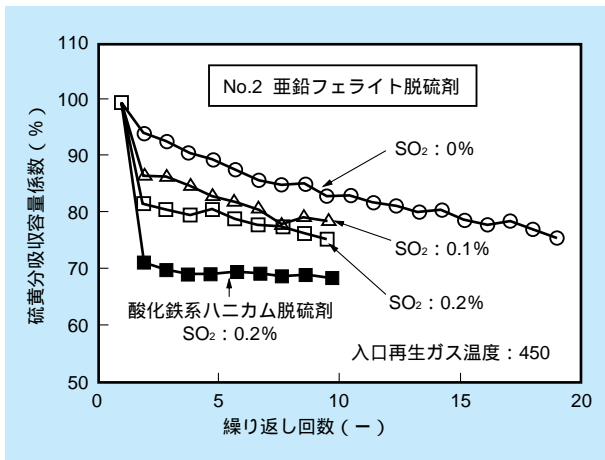


図4-3-6 脱硫/再生繰り返し時の硫黄分吸収容量の変化

ている。

図 4-3-7 に脱硫/再生を10～20回繰り返した後の破過特性を示す。再生ガス中にSO<sub>2</sub>が存在しても10～20回の再生を繰り返した脱硫剤は、出口濃度1 ppm以下を維持できることが確認できた。また、SO<sub>2</sub>濃度が高いほど1 ppmを維持する時間は短くなるが、SO<sub>2</sub>を含まないガス(SO<sub>2</sub>: 0%)による再生では、1 ppm破過時間は初期からほとんど変化していない。このことから再生後の脱硫性能の低下を防ぐためには、再生ガス中のSO<sub>2</sub>を極力減らすことが重要であり、固定床脱硫システムでは回収効率の高い石灰石-石膏法等の高性能な硫黄回収装置を設置することが望ましいと考えられる。

以上、固定床脱硫システムにおいて石炭ガス中の硫黄化合物を1 ppm程度まで除去可能で、かつ、再生の繰り返しが可能で、亜鉛フェライト脱硫剤を見出した。

今後は、脱硫剤の長期信頼性を確立すること、およびパイロットプラントにおいて亜鉛フェライト脱硫剤を用いた固定床脱硫システムを検証することが重要な課題である。

4-3-2 乾式ハロゲン化物除去技術

石炭ガスに含まれるハロゲン化物には塩化水素(HCl)、フッ化水素(HF)等がある。その濃度は炭種やガス化方式によって異なるが、それぞれ50～500ppm、5～50ppm程度と考えられる。これらのハロゲン化物は酸性の腐食性物質であるため、発電システムの構成機器の保護、ならびに排ガス中の酸性ガス成分低減の観点から、

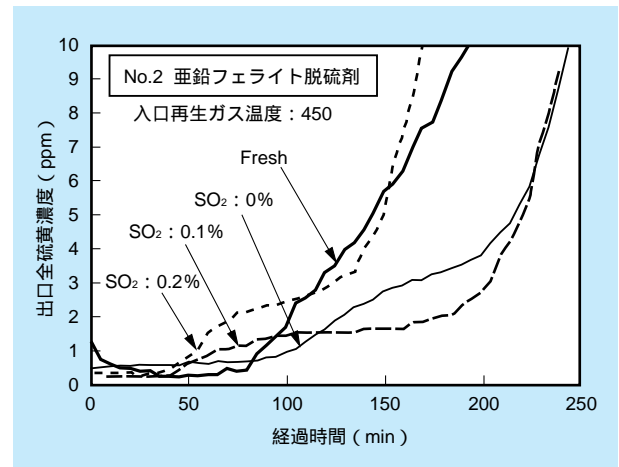


図4-3-7 脱硫/再生繰り返し後の破過特性

石炭ガスから除去することが望ましい。ハロゲン化物は水溶性物質であるため、湿式ガス精製ではある程度までの除去が期待される。しかし、湿式法はガス温度を常温程度まで低下させなくてはならず、また排水処理などの設備も必要となる。そのため、当研究所では、より簡素なシステムで効率よく不純物を除去する乾式ガス精製技術の開発を進め、ハロゲン化物を除去対象とした乾式吸収剤の研究を実施している。

(1) 吸収剤の選定

乾式のハロゲン化物除去ではハロゲン化物と吸収剤との化学反応を利用するため、その吸収剤に適用する物質の選定が重要となる。表4-3-2に示すように、熱力学計

表4-3-2 熱力学計算によるハロゲン化物除去性能の推定

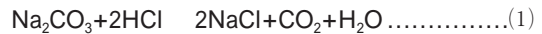
反応物質	600K( 327 )		700K( 427 )		800K( 527 )	
	HCL	HF	HCL	HF	HCL	HF
ナトリウム系*						
バリウム系*						×
カリウム系*				×		×
リチウム系*			×		×	
ストロンチウム系*			×		×	
カルシウム系*	×		×		×	
鉄系***	×	×	×	×	×	×
ニッケル系**	×	×	×	×	×	×
銅系***	×	×	×	×	×	×
亜鉛系**	×	×	×	×	×	×

: 1ppm以下まで除去可能  
 : 10ppm以下まで除去可能  
 × : 10ppm除去不可能

石炭ガス雰囲気における安定形態  
 \* : 炭酸塩 \*\* : 酸化物 \*\*\* : 金属  
 評価条件 圧力 : 10atm  
 CO : 20% CO<sub>2</sub> : 5% H<sub>2</sub> : 8%  
 H<sub>2</sub>O : 5% H<sub>2</sub>S : 1% N<sub>2</sub> : Balance

算から種々の物質について石炭ガス中の塩化水素、フッ化水素の除去性能を推定した結果、ナトリウム系の化合物が最も有望であることが判明した<sup>(26)</sup>。

空気吹きガス化炉を想定した模擬石炭ガスを用いた試験から、ナトリウム化合物の一種である炭酸ナトリウムが石炭ガス中の塩化水素と



の反応が進行することが確認された。図4-3-8に示すように、炭酸ナトリウムは石炭ガスに含まれる200ppmの塩化水素を1ppm以下に除去できる。しかし、1ppm以下を維持する時間は短く、1ppm破過時まで反応したナトリウムは装填した量の8%程度にとどまった。そのため、ハロゲン化物を効率よく除去するよう、ナトリウム成分の反応性を高める必要があることが判明した<sup>(27)(28)</sup>。

(2) ナトリウム系吸収剤の合成

ナトリウム成分の反応性を高めるため、炭酸ナトリウムとアルミナを組み合わせたナトリウム系吸収剤を合成した。吸収剤の例を図4-3-9に示す。吸収剤のX線構造解析から、吸収剤の主成分はアルミン酸ナトリウム(NaAlO<sub>2</sub>)であり、石炭ガス中の塩化水素と

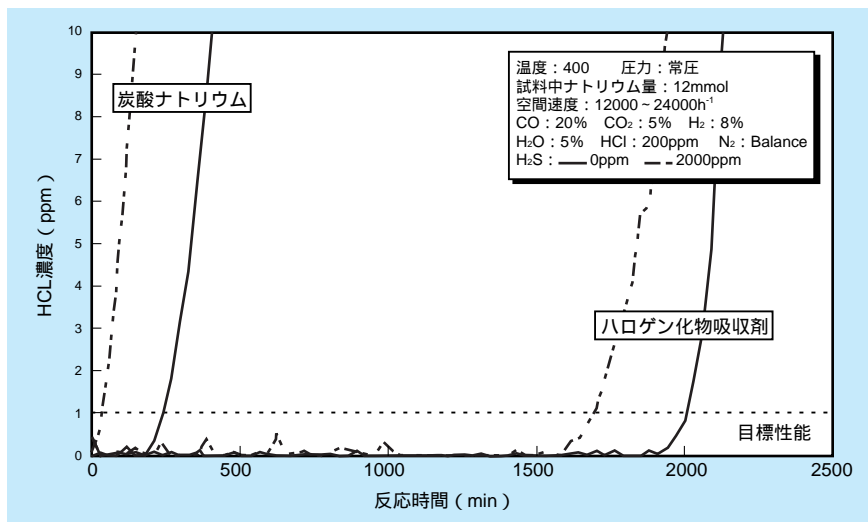
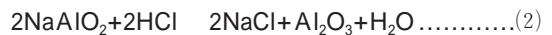


図4-3-8 塩化水素の除去性能



図4-3-9 試作したナトリウム系吸収剤

の反応が進行することが確認された。このナトリウム系吸収剤は図4-3-8に示すように石炭ガスに含まれる200ppmの塩化水素を長時間にわたって1ppm以下に除去できる。装填した吸収剤に含まれるナトリウム量は炭酸ナトリウムと同量であるため、1ppm破過時間の増加は反応性の向上を意味する。本試験では、1ppm破過時までには反応したナトリウムは装填した量の68%程度と、炭酸ナトリウムの場合の8倍以上となった<sup>27)28)</sup>。

### (3) 硫黄化合物の影響

石炭ガスには不純物として硫黄化合物が含まれる。そこで、石炭ガスに含まれる硫黄化合物の一つである硫化水素を模擬ガスに添加したところ、図4-3-8に示すように、炭酸ナトリウムでは1ppm以下までの除去ができなかったことが判明した。炭酸ナトリウムと塩化水素の反応が硫化水素によって、阻害されたためと考えられる。一方、アルミン酸ナトリウムを反応成分とするハロゲン化物吸収剤では硫化水素の影響は小さく、硫化水素が

2000ppm含まれる石炭ガスからも塩化水素を1ppm以下まで除去できることが確認された。この結果は硫黄化合物を除去する前段階でハロゲン化物の除去が可能であることを示しており、ハロゲン化物による乾式脱硫剤の劣化も防ぐことができることが判明した<sup>27)28)</sup>。

### (4) 使用済み吸収剤の再利用

使用済みの吸収剤は、低コスト化、および省資源の観点から、使い捨てとするのではなく、再利用して繰り返して使用できることが重要である。そのため、使用済みの吸収剤に湿式処理を施してアルミニウム成分を回収し、それを原料に再度アルミン酸ナトリウムを含む吸収剤を調製する手法を明らかにした。再調製した吸収剤は新品の吸収剤と同様に、石炭ガスに含まれる塩化水素を1ppm以下まで除去できる。これにより、ハロゲン化物吸収剤の構成成分であるアルミニウムについてリサイクルが可能となった<sup>29)</sup>。

以上のように、アルミン酸ナトリウムを反応成分とするハロゲン化物吸収剤によって、石炭ガスに含まれるハロゲン化物を乾式で極めて低濃度まで除去する技術に見通しが得られた。石炭ガス化複合発電用の乾式ガス精製システムの実現に向け、吸収剤がより高い除去性能を発揮するための最適な合成条件ならびに使用条件等の把握、吸収剤の低コスト化を目指した使用後吸収剤の活用方法についての検討を進めるとともに、セラミックフィルタ集塵技術、固定床脱硫技術と組み合わせることを念頭においたハロゲン化物除去システム化の開発研究が必要と考えられる。

## 4 - 4 今後の展開

石炭ガスの精製技術はガスタービンの保護、環境保全の観点から不可欠な技術であり、特に高温で処理する乾式ガス精製技術は、IGCCの高効率化のために極めて重要な技術である。既に集じん、乾式脱硫については実証機に移れる段階に達しており、脱ハロゲンは開発の見通しが立ったと言える状況にあるが、実用化にあたっては、いくつかの解決すべき課題が残されている。

集じん技術として最も有望と考えられるセラミックフ

ィルタは、極めて集じん性能が高く、システムも簡易であり、また連続運転のために不可欠なフィルタの逆洗方式も、ほぼ確立されており、残された課題の中では長期寿命が最も重要なものと考えられる。セラミックフィルタの寿命に影響を与える因子としては、微粒子によるフィルタの目詰まり、ならびにガス中あるいは粒子中の腐食性物質によるフィルタの劣化が挙げられる。これらについては、最終的には実ガスを用いた長期間の検討によ



り解明が可能となるものであり、早急な試験検討が望まれる。

乾式脱硫技術においては、当研究所が開発した亜鉛フェライト脱硫剤は、脱硫性能が極めて高く、IGCCだけでなく、燃料電池に石炭ガスを利用する場合にも十分適用できる方式であり、その実用化における課題としては、脱硫・再生の繰り返し使用による脱硫性能の低下が挙げられる。既に、短期的には繰り返し連続使用可能との見通しを得ているが、繰り返し使用に伴う若干の性能低下傾向も見られており、今後はこの劣化を如何に抑制し、長期的に性能を維持していくかが重要となる。

乾式脱ハロゲン技術については、アルミン酸ナトリウム ( $\text{NaAlO}_2$ ) を基にした吸収剤の開発により、既に塩化水素 ( $\text{HCl}$ ) の除去は十分可能になったものの、本吸収剤のフッ化水素 ( $\text{HF}$ ) の除去性能についてはまだ明らかになっておらず、早急にフッ化水素の除去特性を明確にする必要がある。さらには、本吸収剤の再生または再利用法を確立し、吸収剤の繰り返し使用あるいはアルミニウム成分を回収して再利用するなどの部分繰り返し使用を可能にすることがコスト低減のためには不可欠であり、同時に、一層性能の良い吸収剤の製造方法の確立も重要になると思われる。

一方、アンモニア ( $\text{NH}_3$ ) の除去については、まだ要素技術としても確立されたものがないのが現状であり、

高性能な方式の開発が望まれている。しかし、アンモニアについては、燃焼器で  $\text{NO}_x$  に転換した後に、 $\text{NO}_x$  を除去することでの対応も可能であり、新たなアンモニア除去方式の検討にあたっては、常に脱硝装置による  $\text{NO}_x$  分解との比較を行いつつ、有利となる方式を採用していく必要がある。

高効率な IGCC の早期実現においては、これらの個々の技術を組み合わせた最適な乾式ガス精製システムを早急に確立することが重要であるが、近年の環境保全に対する気運の高まりから、新たに考慮すべき課題として微量物質の抑制が必要となる可能性もある。石炭利用時に排出される微量物質については、その環境影響なども未だ明確ではなく、既存微粉炭火力における実態等も完全には把握されていないのが実状である。今後、その挙動や影響解明等を慎重に行いつつ対処していくべき問題と考えられる。しかも、微量物質の排出は、乾式ガス精製だけの問題とは言えず、湿式ガス精製を採用した場合にも、考慮する必要が生じる可能性がある。今後は、微量物質に対する規制の動向ならびに、石炭ガス化複合発電システムにおけるそれらの物質の詳細挙動解明等を行いつつ、新たな対策を必要とする物質については、タイムリーかつ着実に、排出抑制対策技術の開発を行っていくことが望まれる。

## コラム：湿式ガス精製技術について

### (1) 湿式技術の概要

ガス精製システムの構成は、図に示すようにベンチュリースクラバーや水スクラバーによる、ダスト、アンモニアおよびハロゲン化物（HCl HF）の除去、COS変換器によるCOSのH<sub>2</sub>Sへの転換、湿式脱硫装置によるH<sub>2</sub>Sの除去から成る。水スクラバーでは、200 程度の温度で石炭ガスからダスト、アンモニアおよびハロゲン化物が除去される。その後、石炭ガスを蒸気で250 程度まで加熱し、脱硫装置において除去し難いCOSをCOS変換器でH<sub>2</sub>Sに変換する。このガスを40 程度まで冷却し、湿式脱硫装置にてH<sub>2</sub>Sを除去する。H<sub>2</sub>Sを吸収した後の液は再生塔に送られ、減圧・加熱することにより、H<sub>2</sub>Sを放出し、再生される。H<sub>2</sub>Sは硫酸、硫黄、石膏などとして回収される。脱硫後のガスは、蒸気等により再加熱されてガスタービン送られる。また、ダスト除去に乾式のセラミックフィルターを用いた場合には、脱硫後のガスを、ダスト除去後の200～250 のガスと熱交換し、加熱してガスタービンに送るシステムとなっている。

#### (1) 水スクラバー

水スクラバーにおいては、ガス中のダストを除去することを主な目的とするベンチュリースクラバーおよび微量なダストおよびアンモニアや塩化水素などの水溶性のガス成分を除去するスプレー塔、棚段塔などの方式がある。ガス温度は、200 程度であり、ガスの冷却も兼ねている。また、COS変換器の前流に加え、脱硫装置の前流にも水スクラバーを設置しているプロセスもあり、この場合には40 程度までガスを冷却して運転される。

現在では、高圧水を噴霧するベンチュリースク

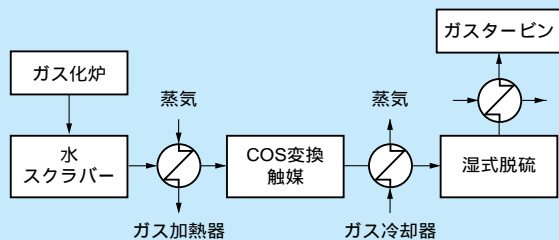


図 湿式ガス精製プロセス

ラバーはあまり使われず、乾式の金属フィルターやセラミックフィルターが使われるようになっていく。

#### (2) COS変換器

触媒を使って反応(1)を促進させ、COSを脱硫装置で吸収しやすいH<sub>2</sub>Sに転換させる装置である。



操作温度は200～300 程度であり、触媒により異なる。COS変換器は、MDEA（メチルジエタノールアミン）法などのCOS吸収性能が低い脱硫法を用いた場合に設置される。また、塩化水素等による触媒の劣化から、水スクラバーがCOS変換器の前流に設置されているが、塩化水素による劣化については、明確ではなく、塩化水素に耐えうる触媒もある。

#### (3) 湿式脱硫装置

硫黄化合物（H<sub>2</sub>S、COS）を除去する方法として、硫黄化合物を液に溶解させて吸収する物理吸収法、硫黄化合物と吸収液とを化学反応させて吸収する化学吸収法が主に使われている。

代表的な物理吸収法には、メタノールを用いたRectisol法、ポリエチレングリコール・ジメチルエーテルを用いたSelexol法などがある。Rectisol法では-60～-40、Selexol法では、-40～-5 の低温条件で運転される。一方、代表的な化学吸収法には、前述したMDEA法の他にもスルフォランとDIPA（ジイソプロパノールアミン）を用いたSulfinol法などがある。運転温度は40 程度である。

吸収法の特徴を述べると、物理吸収法は、COSも同時に除去できるが、CO<sub>2</sub>を多く吸収するため、吸収液の再生に多くのエネルギーを消費する。化学吸収法は、CO<sub>2</sub>の吸収量が少ない反面、COSの除去性能が低く、COS変換器が必要となっている。現在稼働しているIGCCプラントでは、CO<sub>2</sub>の吸収が少なく、消費エネルギーが少ない、MDEAなどの化学吸収法が用いられている。

第 5 章

# 5

ガスタービン燃焼器  
技術の開発

## 第5章 ガスタービン燃焼器技術の開発 目次

横須賀研究所 研究コーディネーター 佐藤 幹夫  
横須賀研究所 エネルギー機械部 長谷川武治

5 - 1 研究の背景 .....	75
5 - 2 ガスタービン燃焼器技術 .....	76
5 - 3 今後の展開 .....	80
コラム：希釈用空気、サーマルNO <sub>x</sub> とフュエルNO <sub>x</sub> .....	81

佐藤 幹夫 (28ページに掲載)



長谷川武治 (平成3年入所)

これまで、空気吹き石炭ガス化低カロリー燃料および湿式ガス精製による酸素吹きガス化中カロリー燃料を用いるガスタービン低NO<sub>x</sub>燃焼器の技術開発に取り組み、それぞれ低カロリー燃料用1500級ガスタービン燃焼器および中カロリー燃料用ガスタービン燃焼器を開発してきた。今後は、システムの簡素化ならびにより一層の発電効率の向上を目的に、乾式ガス精製による酸素吹きガス化中カロリー燃料の超高温・低NO<sub>x</sub>燃焼技術に関する研究に取り組むと共に、あらゆる石炭ガス化方式に対応可能なガスタービン燃焼技術の確立を目指した研究に取り組む。

## 5 - 1 研究の背景

わが国では、現在、空気吹き噴流床石炭ガス方式による実証プラント導入に関するプロジェクトが進められている。一方、欧米では、酸素吹き石炭ガス化方式による複合発電が主流となっており、既に実証プラントによる調整運転の段階にある。また、各地の立地条件により、石炭だけでなく重質油やバイオマスなどを用いる各種ガス化発電方式に関する研究も進められている。

表5-1-1に各種石炭ガス化方式によるガスタービンの技術課題を示す。ガス化剤に空気を用いる場合、ガス化燃料は一酸化炭素（CO）、水素（H<sub>2</sub>）と少量のメタン（CH<sub>4</sub>）を主要な可燃性成分とし、燃料組成の70%程度を窒素（N<sub>2</sub>）や二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）などの不燃性成分が占める（図5-1-1）。このため、燃料発熱量は約4.2MJ/m<sup>3</sup>（1000kcal/m<sup>3</sup>）と低く、LNG燃料の約1/10となる。また、LNG等の高カロリー燃料と異なり不燃性成分を多く含むため火炎温度が低く、燃焼器を設計する場合、供給する燃料量に対する空気量もLNGを燃料とした場合に比較して大幅に低下する。そのため、燃焼安定性の確保が重要となる。

また、ガス精製をプラント熱効率上有利な乾式で行う場合、ガス化の過程で石炭中窒素化合物から生成されるアンモニア（NH<sub>3</sub>）は除去されずに燃焼器に供給され、ガスタービンの燃焼過程で窒素酸化物（フュエルNO<sub>x</sub>、

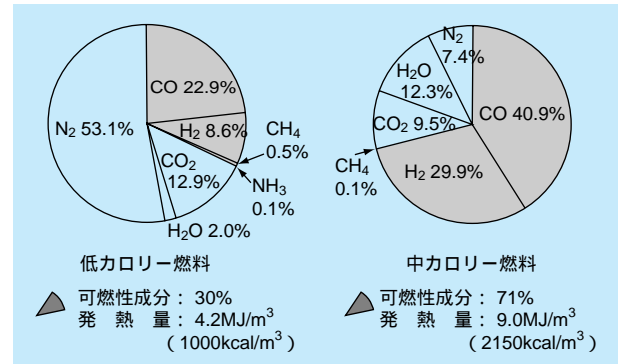


図5-1-1 石炭ガス化燃料の組成例

コラム参照)となり、排出されるNO<sub>x</sub>の大半を占める。このため、乾式ガス精製を用いる石炭ガス化燃料用ガスタービン燃焼器では、燃料中アンモニアに起因するフュエルNO<sub>x</sub>を低減する燃焼技術の開発が必要である。

一方、ガス化剤に酸素を用いる場合、ガス化燃料は発熱量が9～13MJ/m<sup>3</sup>の中カロリー燃料となり、火炎温度はLNGよりも高くなり、空気中の窒素に起因して生成するサーマルNO<sub>x</sub>（コラム参照）が高い濃度で排出されると予想される。

さらに、酸素吹き石炭ガス化複合発電では、現在、ほとんどのプラントで湿式ガス精製が採用されているが、より一層プラント熱効率を向上させるためには、乾式ガス精製の採用が不可欠であり、この場合、生成ガス中のアンモニアに起因して生成されるフュエルNO<sub>x</sub>が多量に排出される。このため、乾式ガス精製を採用する酸素吹きガス化複合発電には、サーマルNO<sub>x</sub>とフュエルNO<sub>x</sub>を同時に低減する燃焼技術が必要となる。

当研究所では、これまでに、乾式ガス精製を採用する空気吹き石炭ガス化低カロリー燃料用1300級<sup>(1)</sup>および1500級低NO<sub>x</sub>燃焼器<sup>(2)~(7)</sup>の開発研究を進めると共に、湿式ガス精製による中カロリー燃料を対象に、1300級低NO<sub>x</sub>燃焼器<sup>(8)~(10)</sup>について開発を進めてきた。

表5-1-1 石炭ガス化燃料用ガスタービン燃焼技術の開発課題

		ガス化剤	
		空気	酸素
ガス精製方式	湿式	<ul style="list-style-type: none"> <li>低カロリー燃料</li> <li>課題：燃焼安定性の確保</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>中カロリー燃料</li> <li>課題：サーマルNO<sub>x</sub>低減</li> </ul>
	乾式	<ul style="list-style-type: none"> <li>低カロリー燃料</li> <li>課題：フュエルNO<sub>x</sub>低減と燃焼安定性の確保</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>中カロリー燃料</li> <li>課題：サーマルNO<sub>x</sub>とフュエルNO<sub>x</sub>の同時低減</li> </ul>

## 5 - 2 ガスタービン燃焼器技術

### 5 - 2 - 1 石炭ガス化低カロリー燃料用 1500 級燃焼器の開発

#### (1) 技術課題

図5-1-1に示すように、石炭ガス化低カロリー燃料は、LNG等の高カロリー燃料と異なり不燃性成分を多く含むため火炎温度が低い。石炭ガス化燃料とLNGの主成分であるメタン(CH<sub>4</sub>)の理論断熱火炎温度を比較すると、CH<sub>4</sub>の最高火炎温度は当量比<sup>注1)</sup>が1.05の時に約2200 であるのに比較して、本研究で対象とする石炭ガス化低カロリー燃料の場合は当量比が1.0の時に約1700 と500 程度低い。このため、低カロリー燃料用燃焼器ではLNG等の高カロリー燃料の場合に比較して燃焼安定性の確保が重要となる。

また、乾式ガス精製による空気吹き石炭ガス化燃料を用いたガスタービン燃焼器では、燃料中NH<sub>3</sub>に起因するフュエルNO<sub>x</sub>を低減する燃焼技術の開発が必要である。

さらに、より一層の熱効率向上を目的として、石炭ガス化低カロリー燃料用ガスタービンの高温化を図る場合、燃料量に対する空気量が低下し、冷却空気量が減少する。すなわち、1500 級燃焼器で供給する総空気量は、従来の1300 級燃焼器の場合の約70%と大幅に減少する。したがって、燃焼器の高温化にともない燃焼器壁面の冷却を強化する必要があるにもかかわらず、冷却空気量が減少するため、壁面冷却技術の高性能化を図る必要がある。

以上のことから、乾式ガス精製を用いる石炭ガス化低カロリー燃料用1500 級ガスタービン燃焼器の開発に際して、以下の課題を考慮した設計が必要となる。

保炎性能の向上

- ② フュエルNO<sub>x</sub>低減燃焼技術
- ③ 壁面冷却技術の高性能化

#### (2) フュエルNO<sub>x</sub>低減燃焼法

乾式ガス精製を用いる石炭ガス化低カロリー燃料用ガ

注1) 一定量の空気ですべて燃焼できる燃料の何倍の燃料が投入されたかを表す量

スタービン燃焼器を開発するにあたり、燃料中のNH<sub>3</sub>に起因して生成するフュエルNO<sub>x</sub>の抑制が重要となる。燃料中のNH<sub>3</sub>などの窒素分に起因するフュエルNO<sub>x</sub>を抑制する燃焼技術として二段燃焼法(リッチ・リーン燃焼法)が知られており、石炭ガス化低カロリー燃料を用いるガスタービン燃焼器に二段燃焼法を採用した場合のフュエルNO<sub>x</sub>の基本的な生成特性について、小型バーナを用いた燃焼実験により調べた<sup>①)</sup>。その結果、石炭ガス化低カロリー燃料の場合も、一次当量比を1以上の燃料過剰条件とすることでフュエルNO<sub>x</sub>の抑制が可能であることが明らかになった。また、低カロリー燃料中にCH<sub>4</sub>が0.5%含まれる場合、フュエルNO<sub>x</sub>の生成を最小とする一次当量比は約1.6であることもわかった。

#### (3) 開発した低カロリー燃料用燃焼器の特徴

石炭ガス化低カロリー燃料を対象に開発した1500 級燃焼器の概略を図5-2-1に示す。本燃焼器は、以下のような特徴を持つ。

- ① 部分負荷時における燃焼安定性を確保するために、燃焼器入口部に副燃焼室を設け、常に安定した火炎を形成させることにより、保炎性能の向上を図った。
- ② 燃料中のNH<sub>3</sub>に起因して生成するフュエルNO<sub>x</sub>を抑制するために、二段燃焼法を導入し、一次燃焼領域の当量比を小型バーナ実験結果から1.6に設定した。また、燃焼器構造には一次燃焼領域と二次燃焼領域を明確に分離した二室構造を採用し、二段燃焼を強化した。
- ③ 燃焼器の二次空気の混合を緩慢にし、一次燃焼領域への二次空気の巻き込みを抑えることで一次燃焼領域の燃料過濃条件を確保し、一層の低NO<sub>x</sub>化を図った。
- ④ LNG燃料に比較して、燃料量に対する空気量が大幅に低下するため、希釈用空気(コラム参照)を削除するとともに、尾筒を二重構造にしてインピンジメント冷却とし、尾筒の冷却用空気を燃焼器壁面冷却に再利用することで、冷却空気量の不足を補った。また、副燃焼室と一次燃焼領域に、インピンジメント冷却とフィルム冷却を組み合わせた積層冷却構造を採用し、冷却効率を高めた。

上記の設計に基づいて設計、試作した150MW、1500

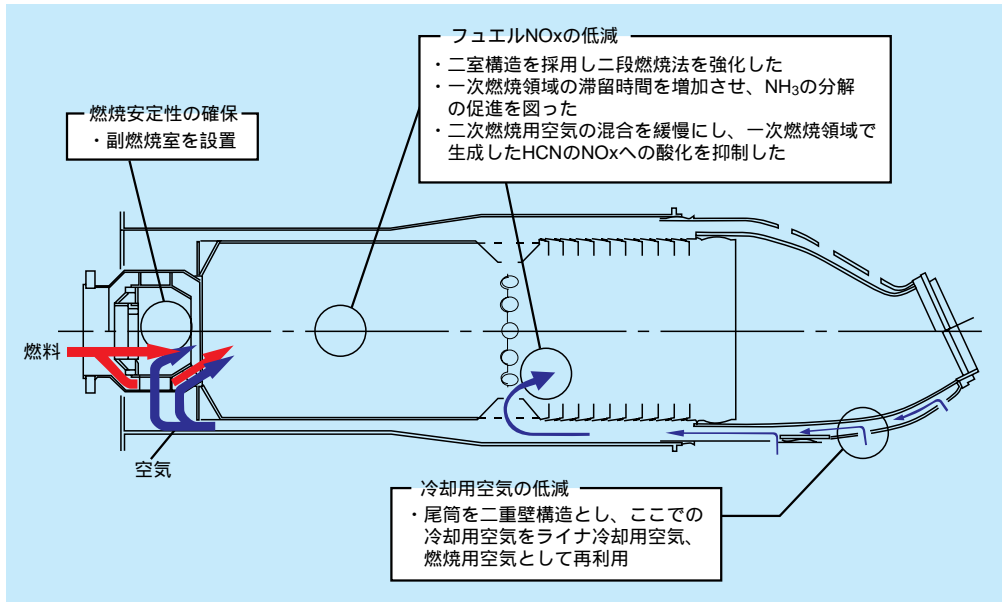


図5-2-1 低カロリー燃料用1500 級燃焼器の構造と特徴

級燃焼器の外観を図5-2-2に示す。

#### (4) 燃焼試験設備

図5-2-3は、試作した燃焼器の燃焼試験に用いた試験設備の概要を示す。本設備では、LPGをCO<sub>2</sub>と水蒸気で改質した後、水素分離膜によってCO/H<sub>2</sub>モル比を調整し、窒素を添加して燃料発熱量を調整し、また、必要に応じてNH<sub>3</sub>を添加して模擬石炭ガス化燃料を製造する。燃焼器については、150MW級実サイズ燃焼器一缶の常圧燃焼試験と、その約1/2サイズの燃焼器の高圧燃焼試験(1.6MPa)が実施できる。

#### (5) 燃焼試験結果

実サイズの燃焼器を用いた常圧燃焼試験とその1/2サイズの燃焼器を用いた高圧燃焼試験を実施し、燃焼器性能を評価した。以下では、1/2サイズ燃焼器を用いて、IGCCの実際の運用条件を想定した燃焼試験を実施し、

燃焼器の性能を検証した結果を述べる。

図5-2-4は、燃料中にNH<sub>3</sub>が1000ppm含まれるとした場合の、ガスタービン負荷とNO<sub>x</sub>転換率および燃焼効率の関係を示す。石炭ガス化燃料の専焼となるガスタービン負荷約25%以上の条件では、NO<sub>x</sub>転換率は40%(16% O<sub>2</sub>換算でNO<sub>x</sub>排出濃度は60ppm)以下、燃焼効率はほぼ100%を達成できた。

また、燃焼器壁面温度については、最も高温となる定格相当条件においても燃焼器壁面全般にわたり材料の耐熱許容温度(850~900)以下に抑制することができた。

以上のことから、開発した石炭ガス化低カロリー燃料用1500級燃焼器は、無負荷条件を除くガスタービンの全負荷帯で安定、かつ低NO<sub>x</sub>燃焼が可能であり、1500級燃焼器として優れた性能を示した<sup>(7)</sup>。

### 5-2-2 石炭ガス化中カロリー燃料1300級燃焼器の開発

#### (1) 技術課題

ガス化剤に酸素を用いる石炭ガス化中カロリー燃料は、組成の7割以上を可燃性成分が占め、燃料発熱量としては9~13MJ/m<sup>3</sup>と高く、空気吹き石炭ガス化低カロリー燃料と比較して2~3倍程度の発熱量となる。そのため、石炭ガス化中カロリー燃料は、低カロリー燃料と比較して火炎温度が最大で600も上昇する。また、すべ

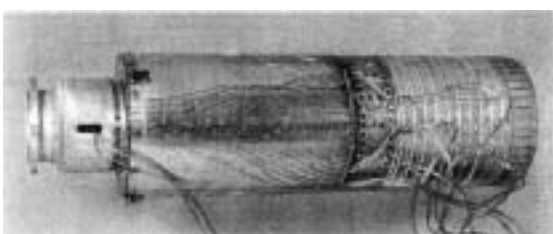


図5-2-2 低カロリー燃料用1500 級燃焼器の外観

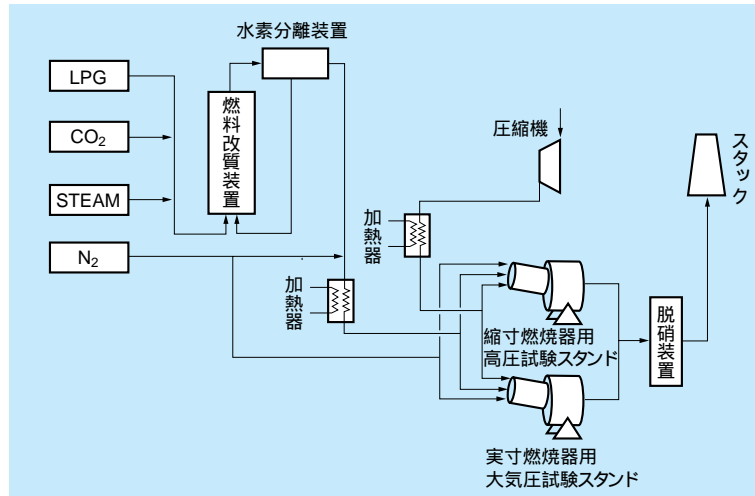


図5-2-3 試験設備系統図

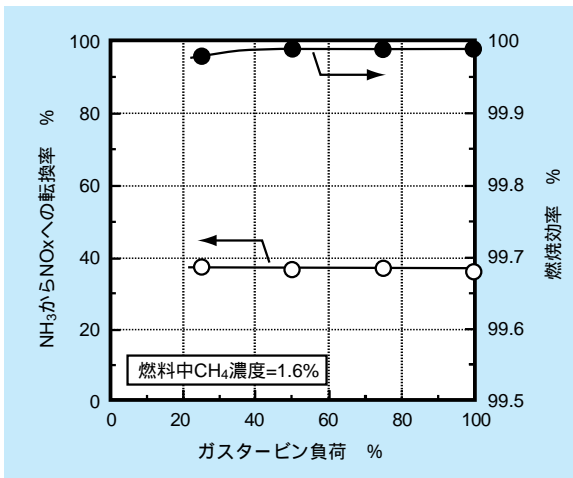


図5-2-4 低カロリー燃料用燃焼器の燃焼特性

での当量比においてLNGの主成分であるCH<sub>4</sub>の理論断熱火炎温度を上まわり、空気中の窒素に起因するサーマルNO<sub>x</sub>が相当量生成されるものと懸念される。そのため、従来の酸素吹きIGCCでは、酸素製造設備で生成されるプラント余剰窒素を燃料に予混合してガスタービンへ供給することにより、ガスタービンの低NO<sub>x</sub>化が図られている。しかしながら、圧力の高い燃料に窒素を注入する場合、窒素の昇圧動力が増加し、プラント熱効率の低下を招くため、熱効率に有利な低NO<sub>x</sub>燃焼器技術の開発が重要である。

## (2) 窒素供給方式

酸素製造装置にて副成品として空気から分離製造される窒素は、ガスタービン低NO<sub>x</sub>燃焼技術への有効利用

が可能である。窒素を低NO<sub>x</sub>燃焼技術に利用する方法によっては、窒素の昇圧動力が異なり、プラント熱効率（送電端）に影響する。すなわち、従来の方式のように、窒素をガス化燃料に注入して、低カロリー燃料として燃焼器に供給する方式から、窒素の昇圧動力を最も低減できる、燃焼器へ直接供給する方式まで様々である。この窒素の昇圧動力がプラント熱効率に及ぼす影響について解析により検討した結果、窒素を燃焼器へ直接供給するか、または、燃焼用空気に注入して供給した場合、従来の方式に比較して、プラント熱効率（送電端）は約0.3%（絶対値）向上する<sup>(10)</sup>ことが明らかになった。そこで、窒素を燃焼器へ供給する低NO<sub>x</sub>燃焼方式について、小型バーナを用いた燃焼実験により検討した<sup>(10)</sup>。

実験では、実際のガスタービン燃焼器における二次空気の流入を考慮した二段燃焼時におけるサーマルNO<sub>x</sub>排出特性について、窒素を燃料または空気に混合して供給した場合、窒素を供給しない場合についての検討を行った。窒素を供給する場合、窒素はバーナから供給する燃料または空気に全量予混合して燃焼室へ供給するものとした。窒素を供給しない場合に比較して、燃料またはバーナ空気に窒素を混合して供給することによりサーマルNO<sub>x</sub>排出濃度は大幅に低減でき、しかも、バーナ近傍の当量比を1.3以上とすることによりサーマルNO<sub>x</sub>をさらに低減できることがわかった。このことから、窒素は燃料ノズルから供給するものとし、さらに、バーナ外周に空気噴射ノズルを設けて、燃料過剰な火炎を外周から急速に希釈する方式を採用することとした。



### (3) 開発した中カロリー燃料用燃焼器の特徴

試作した中カロリー燃料用1300級燃焼器の特徴を図5-2-5に示す。バーナでは、燃料ノズルと空気ノズルの外周に窒素噴射ノズルを配置し、バーナ近傍で燃焼ガスを窒素により急速に希釈し、ガス温度を低下させると共に、部分負荷時には窒素をバイパスし、燃焼用空気に混合して供給する構造とした。これにより、バーナ近傍の局所高温域を減少させ、サーマルNOxの生成を抑制できると同時に、低負荷時には窒素をバイパスして保炎性を確保できると考えられる。

また、窒素の供給に伴い空気比が低下するため、尾筒壁を二重構造とし、尾筒の対流冷却に用いた冷却用空気を燃焼器壁面の冷却用および燃焼用空気として再利用する構造とした。さらに、高温になると予想される二次空気孔近傍には、燃焼器ライナ壁面にフロースリップから空気を吹きつける構造とし、冷却効率の向上を図った。

### (4) 燃焼試験結果

図5-2-6は、窒素/燃料供給量比率を0.3kg/kgで一定とした条件下で、ガスタービン運用条件における燃焼特性を示す。NOx排出濃度はガスタービン負荷の上昇に伴い緩やかに増加する傾向を示すものの、定格負荷相当条件においても11ppm（16% O<sub>2</sub>換算）以下に抑制でき

た。これは、窒素をバーナから供給することにより一次燃焼領域における局所高温領域を効果的に減少させ、NOx生成を抑制できたためと考えられる。一方、燃焼効率については、ガスタービン低負荷で窒素を燃焼空気に混合して、燃焼器へバイパスして供給することにより、低負荷条件での燃焼安定性を改善でき、石炭ガス化燃料の専焼となるガスタービン負荷約25%相当以上で、燃焼効率はほぼ100%を確保した。また、保炎特性については、石炭ガス化燃料専焼による負荷遮断相当まで燃焼安定性を確保した<sup>10)</sup>。

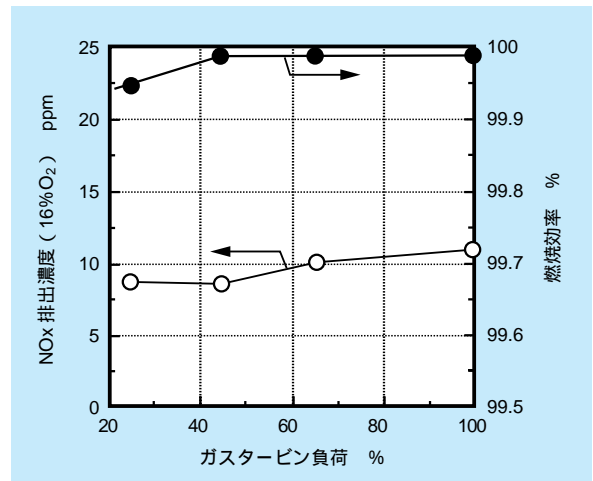


図5-2-6 中カロリー燃料用燃焼器の燃焼特性

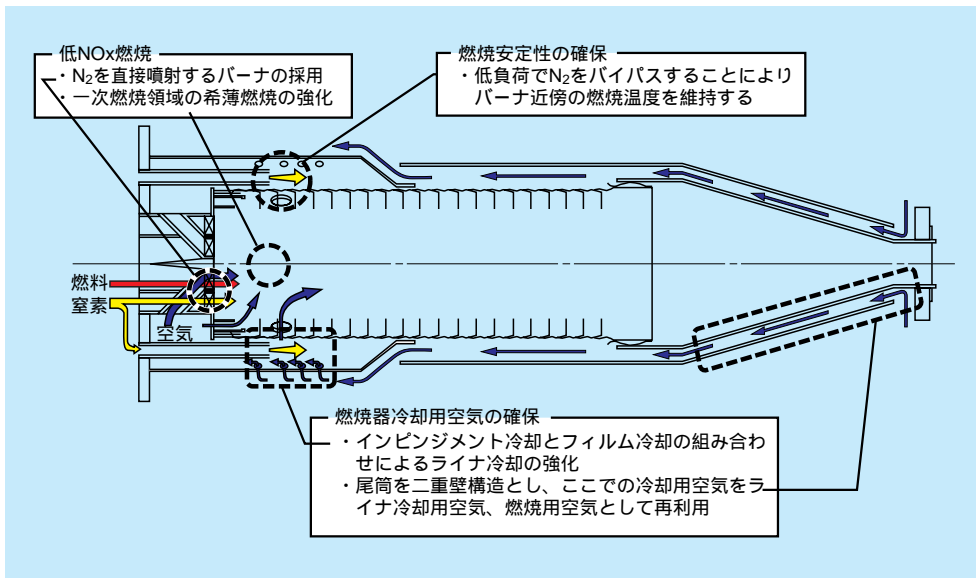


図5-2-5 中カロリー燃料用燃焼器の構造と特徴

## 5 - 3 今後の展開

当研究所では石炭ガス化用ガスタービン燃焼器の開発について、乾式ガス精製を用いる低カロリー燃料用1500級低NO<sub>x</sub>燃焼器技術<sup>(2)~(7)</sup>および湿式ガス精製による酸素吹きガス化中カロリー燃料用低NO<sub>x</sub>燃焼器技術<sup>(8)~(10)</sup>を確立した。今後は、より一層の熱効率の向上を目的に、乾式ガス精製を採用する中カロリー燃料のガス

タービン燃焼器技術を開発すると共に、これまで培ってきたガス化燃料用燃焼技術についてデータベースを作成することにより、将来、実用化が期待される空気吹きから酸素吹きまでにわたる各種石炭ガス化複合発電方式のガスタービン技術を確立する。

## コラム：希 釈 用 空 気

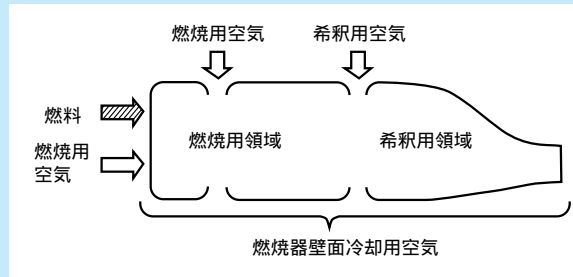


図 燃焼器概念図

燃焼器へ導入する空気には以下の3つの役割がある。

- 1．燃焼用空気：燃料と混合させて燃料をより良く燃焼させるために用いられる空気
- 2．冷却用空気：燃焼器の壁温を材料の耐熱許容温度以下にまで冷却するために用いられる空気
- 3．希釈用空気：燃焼ガスの温度を平均化し、燃焼器出口でのガスの温度分布をタービンが許容できるものとするために用いられる空気

## コラム：サーマルNO<sub>x</sub>とフュエルNO<sub>x</sub>

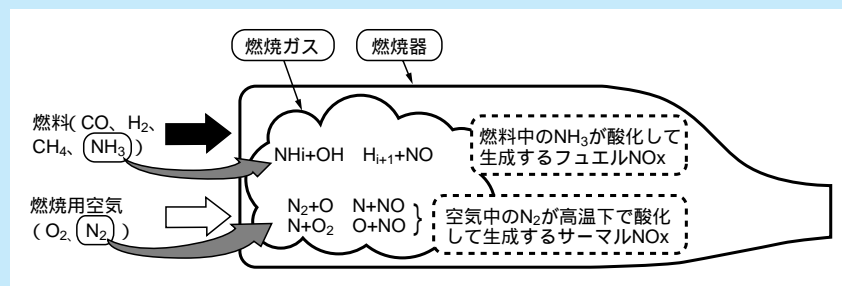


図 サーマルNO<sub>x</sub>とフュエルNO<sub>x</sub>の生成機構

乾式ガス精製方式を採用する石炭ガス化複合発電では、ガスタービン燃焼器で発生するNO<sub>x</sub>はサーマルNO<sub>x</sub>とフュエルNO<sub>x</sub>の2つあり、それぞれ、以下の様な特徴がある。

- 1．サーマルNO<sub>x</sub>：1600 以上の高温の燃焼ガス状態で、空気中の窒素が酸素と反応して、生成されるNO<sub>x</sub>をいう。
- 2．フュエルNO<sub>x</sub>：燃料中に含まれるNH<sub>3</sub>などの窒素化合物が燃焼器内で酸化してNO<sub>x</sub>となるものをいう。



第 6 章

# 6

プラントシステム技術

## 第6章 プラントシステム技術 目次

横須賀研究所 エネルギー機 械 部 幸田 栄一  
 横須賀研究所 エネルギー機 械 部 高橋 徹  
 横須賀研究所 エネルギー機 械 部 長 三巻 利夫

6 - 1 研究の背景 .....	85
6 - 2 システム性能解析評価ツールの開発 .....	85
6 - 3 今後の展開 .....	89
コラム : DME併産型石炭ガス化複合発電 .....	91

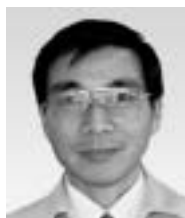
横須賀研究所 エネルギー機 械 部 船山 保男



幸田 栄一(平成2年入所)  
 当研究所に入所した当初は熔融炭酸塩型燃料電池の研究開発に従事し、その後IGCCやCAES、水素燃焼タービンなどの各種新型発電システムの解析・評価を行ってきました。現在は、これらの解析・評価と同時に、発電システムを解析するための手法およびプログラムの開発も行なっています。  
 今後は、IGCCの実用化に向けソフト面からの研究を進めるとともに、新型のみならず既設も含め、火力発電の高効率化に寄与していきたい。



高橋 徹(1997年入所)  
 これまでに発電システムのシステム解析に関する研究に携わってきました。現在は、それに加え、分散型エネルギーシステムについても研究を行っています。今後は、ガス化複合発電の実用化に向けて、ガス化複合発電の高効率化の研究を行っていきたく考えています。



三巻 利夫(1978入所)  
 これまでガス/蒸気複合発電、石炭ガス化複合発電等の熱効率解析、動特性シミュレーションに関する研究に携わり、新型火力発電プラントの性能解析・評価結果を踏まえた研究計画の立案・推進に従事してきました。今後引き続き石炭ガス化複合発電の実用化に向けたシステム評価研究を進めるとともに、サイクルの改良による新たな高効率ガスタービン利用システムの研究や需要家サイドを含むトータルなエネルギーシステムの省エネ性の評価研究に取り組んでいきます。



船山 保男(昭和42年東京電力(株)(鶴見火力発電所)入社)  
 昭和52年、東電学園大学部卒業  
 昭和66年、火力部火力設計課  
 昭和60年、開発研究所石炭ガス化研究室  
 平成2年、石炭ガス化複合発電技術研究組合 出向  
 平成8年、エネルギー・環境研究所石炭研究室主任研究員  
 平成9年、横須賀火力発電所保修部課長  
 平成11年、電力中央研究所派遣 横須賀研究所プラント熱工学部 上席研究員、現在に至る

## 6 - 1 研究の背景

### 6-1-1 はじめに

IGCCシステムと一口に言っても、第一章で紹介したように様々なガス化炉形式、ガス精製方式があり、また、使用するガスタービンの形式や蒸気系の構成方法にも多くの選択肢がある。さらに、将来的には燃料電池と組み合わせたシステムも考えられている。このように多数の選択肢が考えられる中から目標とするシステムを明確にして開発を進めるためには、多くのシステムを同一条件で解析し、比較評価する必要がある。

また、システムを評価するための指標としても、熱効率、経済性、信頼性、運用性、環境性など、様々なものが考えられる。中でも熱効率解析はシステム全体の熱物質収支計算を行なうものであり、システム全体の熱効率を求めるだけでなく、各機器の設計条件を明らかにするものであり、プラントの計画や設計、運用など様々な検討のベースとなるものである。

当研究所では、これまでに個々のシステム毎に熱物質収支計算プログラムを開発し、様々な発電システムの解析評価を行なって、その開発計画の策定などに資してきたが、ここでは、IGCC発電システムの熱効率解析・評価研究に関する近年の取り組みを紹介する。

### 6-1-2 汎用熱効率解析ツール開発の重要性

IGCCシステムは、通常の発電システムと較べ多くの

機器から構成されている上に、作動媒体も気体だけでなく、液体や固体、あるいは二相流までも含まれる、非常に複雑な系である。このため、従来は様々なシステム構成毎に専用の熱効率解析プログラムを開発して性能解析を行っていた。ところが、このように個々に専用プログラムを用いて計算することには次のような問題点がある。まず、新たな工夫を加えたシステム構成を考案したとき、その性能を解析するために、新たにそのシステム用の計算プログラムを開発しなければならず、時間も労力もコストもかかる。また、複数のシステムの計算結果が得られていても、全て別々の計算プログラムで計算されたものでは計算の前提条件や計算方法が統一されていないため、それらの結果を横並びで比較することができない。さらに、IGCCシステムの成立性を評価するためには、IGCCシステムのみでなく微粉炭火力やPFBCなどの競合技術についても同一条件のもとで性能解析を行なって、比較評価する必要がある。

そこで、当研究所では、平成10年度より様々な発電システムの熱効率を解析することのできる汎用プログラムの開発を進めてきた<sup>(1)</sup>。本章では、このプログラムについて、その概要とIGCCシステムの熱物質収支計算に基づく熱効率解析・評価のための諸機能、および今後の展開について述べる。

## 6 - 2 システム性能解析評価ツールの開発

### 6-2-1 発電システム熱効率解析汎用プログラムの概要

図6-2-1に当研究所で開発した発電システム熱効率解

析汎用プログラムの実行画面例を示す。図を見れば分かるように本プログラムはWindowsアプリケーションとして作成されているため、基本的な操作を簡単に行なうことができる。

システムの設計から計算に至る操作は、図に示すよう

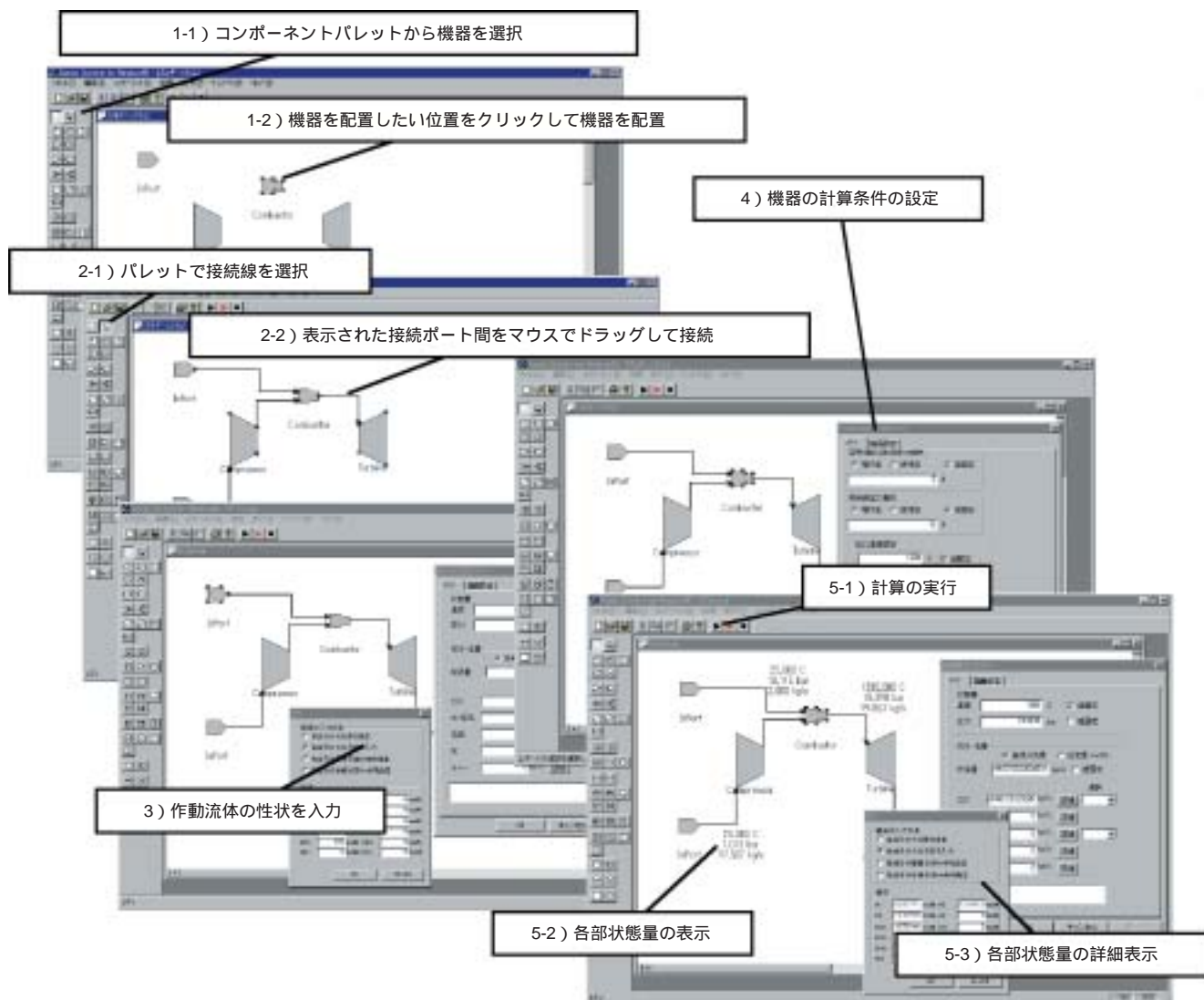


図6-2-1 発電システム熱効率解析汎用プログラム

に、必要な機器を配置してそれらを接続し、様々な計算条件を設定して、計算実行ボタンを押すという流れであり、マウス操作を中心として直感的且つ簡便に行なえるものとなっている。

システム全体の熱物質収支の計算には当研究所で独自に開発した高速計算アルゴリズムを用いているので、様々な計算条件のもとで高速に計算を行なうことが可能である。

## 6-2-2 IGCC システム性能解析のための機能

### (1) 機器モデル

各種 IGCC システムの熱物質収支計算を行うため、下記の機器モデルを開発している。

#### a. 石炭ガス化炉

石炭ガス化炉として、実証機計画の事前検討で取り上げられた、図6-2-2に示す4種類のガス化炉のモデルを組み込んでいる。図中、赤い三角印が機器への作動流体の流入を、青い三角が機器からの流出を示している。例として、図中一番左の電中研 - 三菱炉について、各ポートに接続するラインの種類を示す。

次に、モデル内の計算式について簡単に触れる。石炭ガス化炉内は、固体粒子を含む複雑な流れ場の中で様々な反応が同時進行する、非常に複雑な系である。したがって、ガス化炉内の伝熱・流動・反応などのモデリングは、第3章で示したように別途実施している。本システムでは、シフト反応など反応速度の速い反応は化学平衡の状態にあるものとして、また、石炭粒子のガス化など



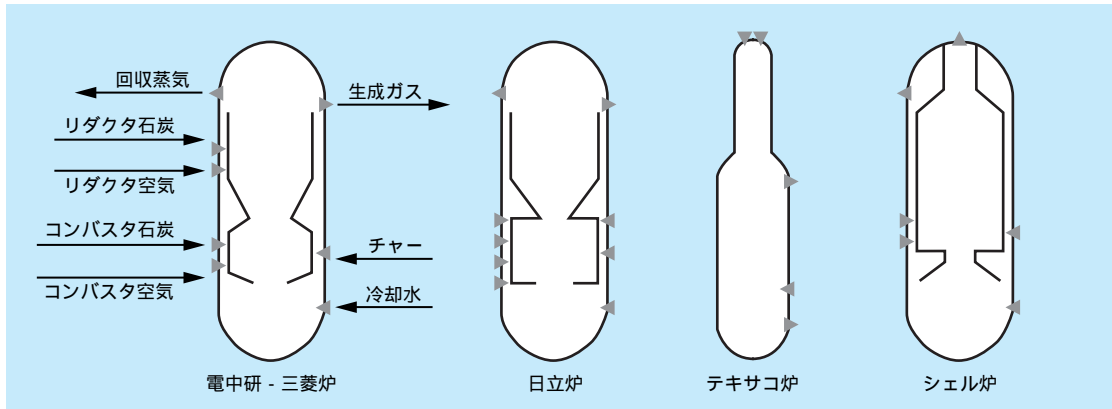


図6-2-2 ガス化炉モデル

反応時間の遅いものに関しては炭素転換率等を設定値として与えて計算するものとなっている。また、水冷壁への伝熱量に関しても、ガス化炉への総入熱に対する炉壁への伝熱割合を設定値として与えて計算するものとなっている。

例として、電中研 - 三菱炉について計算するために設定しなければならない値を示すと、

- ・ 炉内炭素転換率
- ・ コンバスタ炭素転換率
- ・ 放熱ロス割合
- ・ スラッグ捕集効率
- ・ コンバスタ空気比又はコンバスタ温度
- ・ リダクタ空気比又はリダクタ温度
- ・ 給炭量比 (コンバスタ投入石炭流量/リダクタ投入石炭流量)
- ・ 炉壁への伝熱割合 (コンバスタ及びリダクタ)
- ・ 各部圧力損失

となっている。これらをもとにガス化炉出入り口の熱物質収支計算を行ない、生成ガスの組成や空気比、ガス化効率などを算出する。

#### b. ガス精製設備

ガス精製用の機器モデルとしては、表6-2-1に示す各種機器モデルが組み込まれている。

これらの機器モデル内部の計算式は、それぞれ次のようになっている。まず、乾式の各種脱流設備に関しては各種の触媒を用いた場合の平衡定数などのデータが揃っているため、触媒の種類を選択することで自動的に除去効率を計算するものとなっている。現時点では亜鉛フェライト、チタン酸亜鉛及び酸化鉄の中から選択可能とな

表6-2-1 ガス精製設備機器モデル

集じん設備		サイクロン
		フィルタ
		ポアスフィルタ
		移動床集じん設備
脱硫設備	乾式	固定床脱硫設備
		移動床脱硫設備
	湿式	流動床脱硫設備
その他		化学吸収塔
		COSコンバータ
		脱硝設備
		水洗塔

っている。一方、湿式脱硫設備に関しては脱硫剤に関する詳細データの入手が困難であるため、脱硫効率を設定値として与えて計算するものとなっている。また、集じん設備に関しても、集じん効率を設定値として与えて計算するものとしている。

#### c. その他

上記の機器モデルの他に、他の発電システムでも用いられる機器モデルとして、表6-2-2に示す各種機器のモデルが組み込まれており、石炭ガス化燃料電池複合発電も含む様々なシステムの性能解析が可能である。

#### (2) 作動媒体の物性値計算式

##### a. 石炭

石炭の物性としては実証機設計候補炭を中心に、現在

表6-2-2 その他機器モデル

回転機器	膨張タービン
	ガスタービン
	蒸気タービン
	圧縮機
	ポンプ
熱交換器	熱交換器
	復水器
	水分離装置
	冷却器
	加熱器
燃料電池	MCFC
	SOFC
その他	燃焼器
	増湿塔

4炭種について、灰性状も含めた石炭性状をデータベースとして持っている。さらに、任意の石炭性状を設定して計算することも可能である。

b. 水・蒸気

発電システムの作動流体として最も多く使われている水・蒸気の物性計算には、最新の蒸気表である、

IAPWS (国際水・蒸気表会議) のIF-97<sup>(2)</sup>を採用しており、従来の蒸気表の適用範囲である800、100MPaまでの領域に加え、圧力が10MPa以下であれば、2000まで信頼性の高い計算結果を得ることが出来る。

c. その他気体成分

その他のガス成分については、文献(3)の式を基本とし、ここに含まれていない成分についてはNIST (National Institute of Standard and Technology, 米国) がWEB上 (<http://webbook.nist.gov/chemistry/>) で公開している式を用いている。

6-2-3 熱物質収支計算例

図6-2-3に簡単なシステムの熱物質収支計算例を示す。ここでは設定した値を赤丸で囲っているが、このように燃焼器出口温度を設定値として与え、燃料流量を設定せずに計算を実行すれば、必要な燃料流量が計算される。逆に、燃料流量を設定して、燃焼器出口温度を計算結果として得ることもできる。このように、合理的な条件が設定されていれば任意の計算条件下で熱物質収支計算を行なうことが可能である。図6-2-4に本プログラムを用いて計算したIGCCシステムの熱物質収支計算例を示す。このように複雑なシステムでも、パソコン上で短時間で

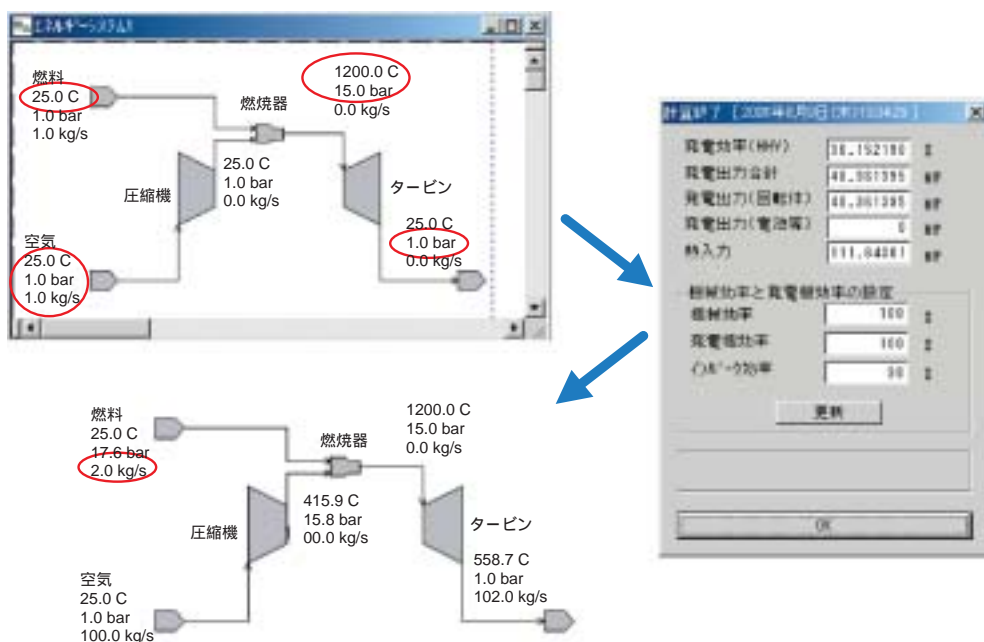


図6-2-3 計算例 (単純ガスタービンサイクル)

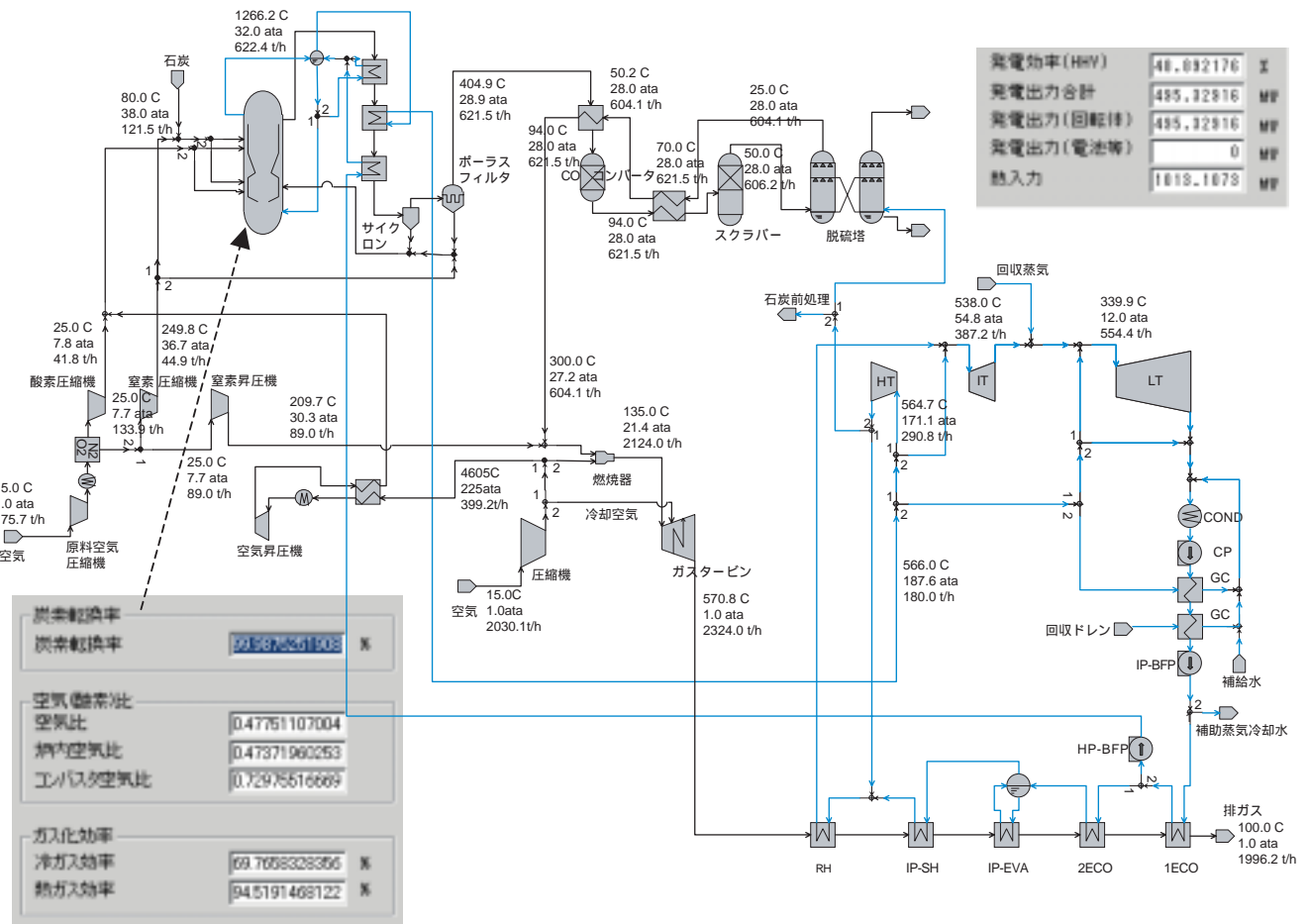


図6-2-4 IGCCシステムの熱物質収支計算

熱効率解析を行うことが可能であり、炭種や大気条件、あるいは各機器の効率等が変わった場合の影響なども即座に計算することが出来る。さらに、ガス化炉やガス精

製設備等の機器の変更や、蒸気系の組み換えなどを行なってシステムの最適化の検討を行なうことも容易である。

## 6 - 3 今後の展開

以上述べたように、既に4種類 of ガス化炉を含む様々な機器モデルを開発しており、多様なIGCCシステムの熱効率解析が可能であるが、今後、より一層の実プラントに即した機器のモデル化と操作性の向上などを目指して、以下に示すようなプログラムの機能増強を行なう計画している。

さらに、本プログラムを用いて実証プラントの性能解析・評価、将来的には商用プラントの一層の高効率化を目指して種々のIGCCシステムの解析・評価研究を進めていく計画である。

### (1) 計算精度の向上

作動流体に含むことのできる成分数の追加や、化学反応及び気液平衡計算式の拡充など、物性値計算用関数群を増強し、より詳細な解析を可能とする。

また、将来的には第3章で述べたガス化炉内シミュレーション技術など、個々の機器に関する研究の成果を反映させて、より一層の計算精度の向上を目指す。

### (2) 操作性の向上

本プログラムは、設定された条件が合理的でありさえ

すればどの値を設定しても計算することが可能である。しかし、このように柔軟な条件設定が可能であるため、IGCCシステムのような複雑なシステムの解析を行なう場合には、計算条件の設定が難しくなっている。そこで、条件設定を支援する機能の追加を考えている。

### (3) 計算機能の増強

現時点では定格負荷時の熱物質収支計算を行う機能しか持っていないが、部分負荷特性解析や、さらには動特性解析を行う機能の追加を進めている。

### (4) 実証プラントの性能解析・評価

実証プラントを詳細にモデル化し、以下に示すような解析・評価を行ないたいと考えている。

- ・空気比、給炭量比などの各種操作パラメータがプラント全体性能に与える影響の検討。
- ・設計条件（炭素転換率、放熱ロス割合、スラグ捕集効率、炉壁への伝熱割合など）の相違が全体性能に与える影響についての検討。
- ・炭種の違いがプラント全体性能などに与える影響の検討。
- ・プラント運転状態の解析による、設計性能との相違に関する要因分析。

### (5) 商用プラントのシステム解析・評価研究

さらに、以上述べたプログラムの機能増強などと並行して様々なIGCC発電システムの検討を進め、より高性能なシステムを提案して行きたいと考えている。

## コラム：DME 併産型石炭ガス化複合発電

### 1. はじめに

現在、石炭はLNGや石油と比較して熱量単価が約1/3と安く、原子力に次ぐベース電源若しくはミドル電源用燃料と位置付けられ、高効率発電が可能なIGCCの開発が行われている。IGCCでの石炭ガス化ガスは、発電用燃料以外に合成燃料（メタノール、F-T油、DME等）用の原料ガスとしても活用可能である。IGCCと合成燃料製造とを組み合わせ、重複設備を統合した合成燃料併産型IGCCシステムが提案されており、このシステムでは、発電側と合成燃料製造側の負荷を調整することにより、IGCCをピーク対応用として運用しながら合成燃料を安価に製造できる可能性がある。当研究所では、合成燃料として、物性がLPGに近く環境性にも優れているDMEを取り上げ、DME併産型IGCCシステムについて、技術的・経済的観点から、その実現性の検討を実施した。

### 2. 設備構成と運用方法

図1に基本システム構成を、表1に検討ケースを示す。本検討では既に商業化されている酸素吹きスラリーフィード・クエンチ型ガス化炉と湿式ガス精製（MDEA）をベースとし、DME製造設備は、NKKが開発を行っているプロセスを想定した。運用方法については、ガス化炉・ガス精製は常時定格運転とし、昼間は発電を主に、夜間はDME製造を主に行うパターンとした（表2）。

### 3. 検討結果

#### 3.1 熱効率

本システムでは、DME製造設備からのオフガス

$$(\text{注}) \text{エネルギー利用効率} = \frac{\text{送電電力 (kW)} \times 860 \text{kcal/kWh} + \text{DME製造量 (kg/h)} \times \text{DME発熱量 (kcal/kg)} \times 100}{\text{石炭投入量 (kg/h)} \times \text{石炭発熱量 (kcal/kg)}}$$

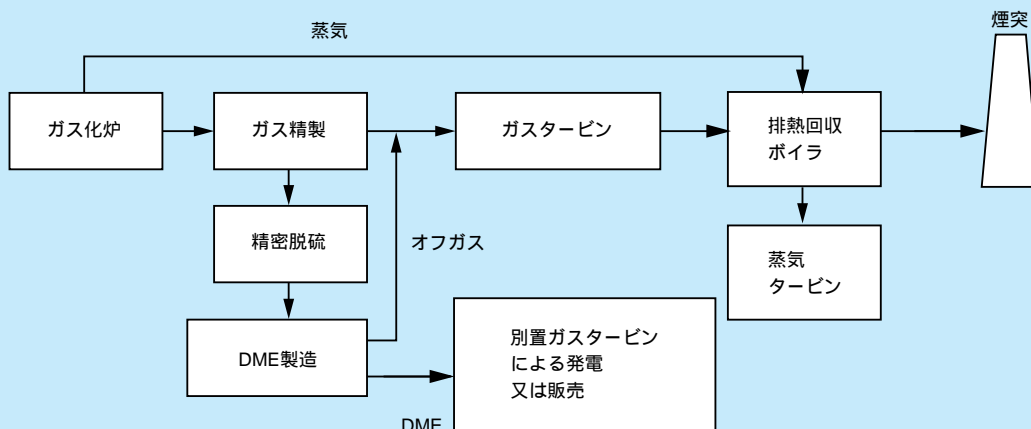


図1 DME併産型IGCC基本システム構成

をガスタービンに供給することにより、システム全体としての効率向上を図っている。発電とDME製造を併せたエネルギー利用効率<sup>(注)</sup>は、表3に示す通り、夜間（主にDME製造）は52%、昼間（主に発電）は42～43%であった。クエンチ型IGCCは約36%であるから、約6%（絶対値）向上することになる。

### 3.2 経済性

#### (1) 発電原価

発電設備は表2に示すパターンで運転するため、設備利用率は約20%である。その結果、発電原価は、ケース1で16.0円/kWh、ケース2で10.6円/kWh、ケース3で9.9円/kWhとなり（表4）、ケース2及び3は、ピーク用電源として採算に乗る可能性があることがわかった。

#### (2) DME製造原価

DME製造原価を表5に示す。本検討では、ガス化炉、ガス精製及び共通設備建設費をIGCC側で負担させ、DME側の固定費を小さくするようにしている。その結果、DME製造原価はケース1及び2で2.0円/Mcal、ケース3で1.2円/Mcalとなり、輸入LPG（1.9～3.6円/Mcal）やLNG（1.7～2.2円/Mcal）と比較して十分の競争力を持つことがわかった。

#### (3) プラント建設費

IGCC、DME設備の推定建設費を表6に示す。

### 3.3 実用化にむけた技術課題

各構成設備の開発段階や技術課題を表7に示す。

表1 検討ケース

設 備	方 式	ケース1 (基本ケース)	ケース2 (スケールアップによる経済性向上)	ケース3 (参考ケース)
ガス化炉	酸素吹き・スラリー フィード・クエンチ型	118 t/h 1系列	130 t/h 2系列	92 t/h 2系列
ガス精製	湿式ガス精製	同 上	同 上	同 上
ガスタービン (石炭量相当)	GE F型	F7FA 1台 (78 t/h × 1)	F9FA 2台 (118 t/h × 2)	F9FA 2台
DME製造	直接製造方式 (NKK)	51 t/h 1系列	111 t/h 1系列	111 t/h 1系列
燃料種別		石 炭	石 炭	重質残渣油

表2 設備運用パターン

	発 電 設 備	D M E 設 備
平日の昼間 (8:00~17:00)	定格出力運転(燃料は石炭ガス化ガスとDME製造装置からのオフガス)	運転維持の為に必要な最低量製造運転
土日祭日の終日 及び平日の夜間 (17:00~8:00)	部分負荷運転(燃料はDME製造装置からのオフガス。この電力で所内動力を賄い、若干の送電が可能)	定格量製造運転

表3 エネルギー利用率

		ケース1		ケース2		ケース3	
		昼 間	夜 間	昼 間	夜 間	昼 間	夜 間
発電電力	MW	306	120	880	286	880	286
ガスタービン	MW	197	80	572	186	572	186
蒸気タービン	MW	109	40	308	100	308	100
所内電力	MW	47	54	123	146	123	146
IGCC設備	MW	38	38	106	106	106	106
DME設備	MW	9	16	16	40	16	40
送電電力	MW	259	66	757	140	757	140
送電端熱効率	%	40	-	41	-	41	-
DME製造量	t/h	19	51	17	111	17	111
エネルギー利用率	%	43	52	42	52	42	52

表4 発電原価

		ケース1		ケース2		ケース3	
		昼 間	夜 間	昼 間	夜 間	昼 間	夜 間
固定費分	円/kWh	14.5	0	9.1	0	9.1	0
燃料費分	円/kWh	1.5	0	1.5	0	0.8	0
合 計	円/kWh	16.0	0	10.6	0	9.9	0

表5 DME製造原価

	ケース1		ケース2		ケース3	
	円/トン	円/Mcal	円/トン	円/Mcal	円/トン	円/mcal
固定費分	4,163	0.60	3,591	0.52	3,591	0.52
燃料費分	11,518	1.67	11,732	1.70	6,621	0.96
夜間電力売電補正 <sup>(注)</sup>	1,732	0.25	1,797	0.26	1,797	0.26
合計	11,062	2.02	10,530	1.96	5,419	1.22

(注) 夜間電力売電補正：夜間発電電力を1.5円/kWhで売電した収入

表6 プラント建設費

		ケース1	ケース2	ケース3
プラント建設費	億円	605	1,108	1,108
IGCC設備	億円	518	955	955
DME製造設備	億円	87	153	153

表7 各構成設備の技術レベル

設 備		開発段階	技 術 課 題
ガス化炉	酸素吹きスラリーフィード・クエンチ型		ガス化炉で熱回収をしないので熱効率が低く、通常36%（送電端HHV）程度
	同上（重質残渣油）		同 上
	空気吹きドライフィード・排熱回収型		高効率（46～48%）が可能であり、実証プラント計画を推進中
湿式ガス精製（MDEA）			顕熱損失が大きく、乾式より熱効率が約1～2%下がる。
精密脱硫装置（亜鉛吸着方式）			吸着後は廃棄物となり、処理が難しい
複合発電設備			特になし
DME製造設備			触媒の寿命、製造コストの低減、DME転換率の向上、スケールアップ技術の確認、長時間連続運転の確認

：商業レベル      ：実証レベル      ：パイロットレベル      ：ベンチレベル

クエンチ型ガス化炉はアンモニア製造用として、LNGコンバインドは発電プラントとして既に商業運転されている技術である。IGCCは欧米で実証試験が進行中であり、日本でも(株)クリーンコールパワー研究所が発足して実証機計画が進行している段階である。

精密脱硫装置については亜鉛吸着法が実用化されているが、再生利用できないので大量使用した場合の廃棄処理の方法に課題が残されている。

DME製造の技術的課題は、①エネルギー転換効率の更なる向上（現状は約80%）②触媒の長寿命化と製造コストの低減、③プラントとしての長期安定運転の検証などが想定される。

#### 4. 今後の展開

本検討は既存の資料<sup>(1)(2)</sup>をベースに概略の試算を行ったものである。今後は、設備構成、機器容量及び運転方法などの最適化検討が必要である。DME設備から発生する中圧蒸気も取り込んだ蒸気系の最適化、ガス系の顕熱回収による損失低減及び、ガス・空気系圧力の動力回収など最適化検討を行えば、更に効率の向上が期待できる。

#### 参考文献

- (1) 石炭利用総合センターDME研究会提出資料、NKK
- (2) IGCC発電プラント - EPRIの設計とコストの研究（EPRIガス化会議資料、1998年）





第 7 章

7

低コスト化およびさらなる  
高効率化に向けた研究

第7章 低コスト化およびさらなる高効率化に向けた研究 目次

	横須賀研究所 エネルギー機械部	市川 和芳
	我孫子研究所 高レベル廃棄物処分研究プロジェクト(兼)材料構造部	山本 武志
7-1 石炭ガス化スラグの有効利用方策 .....		97
	横須賀研究所 エネルギー化学部 渡辺 隆夫	横須賀研究所 エネルギー化学部 吉葉 史彦
	横須賀研究所 エネルギー化学部 河瀬 誠	横須賀研究所 エネルギー機械部 森 則之
7-2 燃料電池複合発電技術開発の現状と課題 .....		101
コラム：燃料電池の原理 .....		108
	横須賀研究所 エネルギー機械部 木戸口和浩	横須賀研究所 エネルギー機械部 原 三郎
		横須賀研究所 エネルギー機械部 芦沢 正美
コラム：重質油ガス化複合発電の現状と課題 .....		109

市川 和芳 (38ページに掲載)



渡辺 隆夫 (1981年入所)  
MCFCのスタック性能評価、スタック運転技術、電池シミュレーション、MCFCとSOFCに関する発電システム解析を行ってきた。  
現在、MCFCを中心とした経済性評価や導入方策の検討や燃料電池全般の研究を推進している。



河瀬 誠 (1993年入所)  
これまで熔融炭酸塩形燃料電池に関する研究に携わり、燃料として石炭ガス化燃料を用いた場合の電池性能に対する不純物の影響評価を中心に研究を行っている。さらに、燃料電池の高出力化のため、高性能な電極の開発に取り組んでいる。  
今後も、引き続きガス化複合MCFC発電の実用化に向けて不純物の影響評価、高性能な電極の開発の研究を進める。



森 則之 (1987年入所)  
高温ガスタービン用セラミック燃焼器、セラミック静翼、ならびに固体酸化物形燃料電池の構造設計、試験を通してセラミックスを発電機器に適用する研究を行ってきた。  
現在、ガスタービンの監視、異常検知システムに関する研究に従事している。

原 三郎 (10ページに掲載)



山本 武志 (1993年入所)  
フライアッシュの有効利用に関して、その諸特性とそれを混和したコンクリートの性能評価に関する調査研究に従事。フライアッシュのアルカリシリカ反応抑制効果やボゾラン活性の早期評価手法を開発。現在は、高レベル廃棄物処分のための人工バリアの性能評価に関する調査研究にも従事。セメント水と化合物の変遷現象を解明したい。



吉葉 史彦 (1993年入所)  
これまでMCFCに関する研究に携わり、スタック内部状態解析及び10kW級スタック運転研究を中心に行ってきた。現在は、石炭ガス化MCFC発電システムの解析及び石炭ガス化ガスを用いたMCFCスタックの発電試験を実施している。今後は、引き続きIG/MCFCの実用化に向けて研究を進めるとともに、廃棄物ガス化ガスを燃料とした場合のMCFCスタック発電特性等を明らかにして行きたい。



木戸口和浩 (1995年入所)  
これまで、オリマルジョンなどの重質油ガス化に関する研究に携わり、ガス化複合発電の実用化に向けた中部電力、三菱重工業との共同研究、2t/dガス化研究炉を用いた燃料特性評価を行ってきた。その一方で、ガスタービン燃焼器内の燃焼状態監視システムの検討、開発も行っている。今後は、残渣油、CWMなど多種多様な燃料のガス化特性評価を行うとともに、ガス化炉を含めた燃焼器全般において計測システムの検討、開発を行って行きたい。

芦沢 正美 (28ページに掲載)

## 7-1 石炭ガス化スラグの有効利用方策

### 7-1-1 石炭ガス化スラグの特徴

噴流床石炭ガス化プロセスでは、石炭中に含まれる灰分は、炉内で生成ガスと分離され系外へ排出される。この灰分は、微粉炭ボイラから排出されているフライアッシュが各分野で利用されているのと同様にその特徴を活かした有効利用が期待されている。以下に石炭ガス化スラグの特徴について述べる。

#### (1) 石炭中灰分の全量がガラス状固化スラグの形態で排出される

石炭ガス化炉における石炭灰排出プロセスを図7-1-1

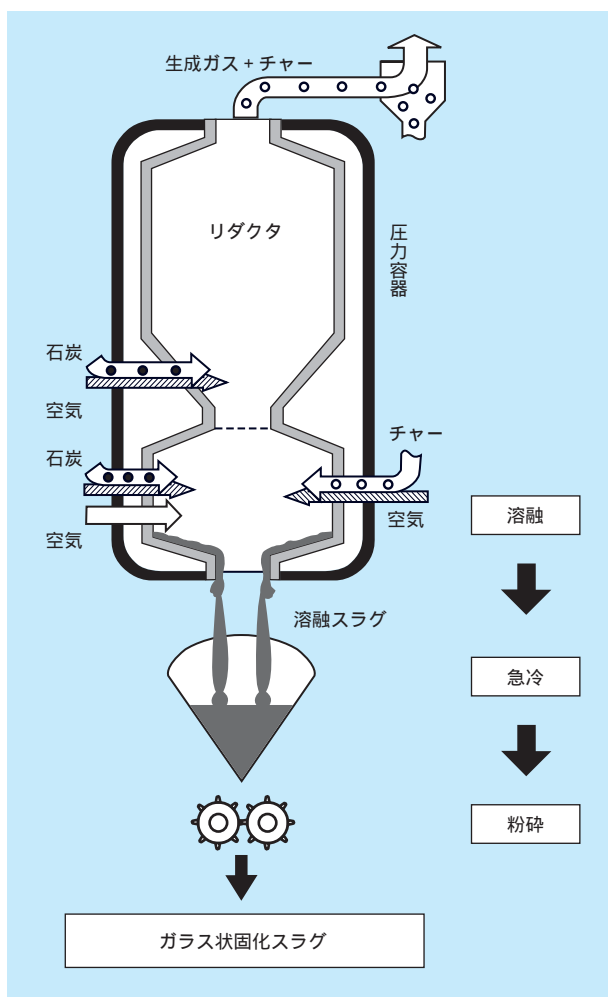


図7-1-1 石炭ガス化スラグ排出プロセス

に示す。噴流床ガス化炉においては、灰分を熔融状態にて常温の貯水槽に流下させ、急冷・固化させた後、粉碎し排出する。

このため、石炭灰は図7-1-2に示すようなガラス状固化スラグの形態で排出され、重量あたりの容積が大幅に減少し、灰の置き場面積が大幅に低減できる。また、取り扱いも容易になる。

#### (2) スラグ中に未燃炭素分を含まない

ガス化スラグの組成分析結果を原炭中灰分組成と比較し、表7-1-1に示す。ガス化スラグ組成は基本的に石炭中に含まれている灰分組成と同等であることがわかる。



図7-1-2 ガス化スラグとフライアッシュ

表7-1-1 ガス化スラグ組成例

	単位	豪州 M 炭		豪州 W 炭	
		原炭灰	ガス化スラグ	原炭灰	ガス化スラグ
SiO <sub>2</sub>	wt%	51.6	53	66.80	64.30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	wt%	26.42	26.74	24.40	23.80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	wt%	12.34	10.94	3.73	4.89
CaO	wt%	2.99	3.13	1.15	2.22
TiO <sub>2</sub>	wt%	1.41	1.34	1.14	1.27
MgO	wt%	1.19	1.19	1.35	1.57
SO <sub>3</sub>	wt%	1.22	0.08	0.03	0.03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	wt%	0.25	0.21	0.10	0.16
Na <sub>2</sub> O	wt%	0.67	0.64	0.32	0.55
K <sub>2</sub> O	wt%	1.33	1.39	0.83	1.00

また、石炭中灰分のほぼ全量がスラグとして排出されるため、品質的にも安定しており、また未燃分を全く含まない長所がある。

### (3) 水中への溶出成分がほとんどない

次にガス化スラグの水中溶出試験結果を表7-1-2に示す。ガス化スラグは固化体であるため、水中に長時間保持しても溶出成分がほとんどなく、産業廃棄物の溶出判定基準、土壤環境基準を十分クリアした、環境保全性に優れた性質であることが確認されている。

石炭ガス化スラグはこれらの特徴を持つことから、様々な用途での有効利用が期待されている。

## 7-1-2 セメント・コンクリート分野での利用方策検討

我が国電気事業におけるフライアッシュの有効利用内訳を表7-1-3に示す。電気事業で発生したフライアッシュの総排出量は430万トンの内、有効利用されているのは約300万トンである。その内訳では7割以上がセメント・コンクリート分野で利用されていることがわかる。ガス化スラグも組成的にはフライアッシュと同様であることから、コンクリート分野での利用が期待できると考えられる。そこで当研究所は、ガス化スラグ有効利用方策の確立の第一歩として、太平洋セメントと共同で2トン/日炉および200トン/日炉より排出されたガス化スラグを用いて、コンクリート用混和材、骨材、セメント原

表7-1-3 電気事業フライアッシュ利用内訳

用途	使用量(トン)	利用率(%)
電力工事に用	12,619	0.41
FAセメント用	197,270	6.43
生コン用	89,181	2.91
セメント原料用	2,016,593	65.72
人口軽量骨材用	36,634	1.19
道路路盤材用	48,560	1.58
アスファルトフィラー用	521	0.02
融雪剤用	187	0.01
肥料用	38,862	1.27
土壤改良材	26,641	0.87
下水汚水処理剤	805	0.03
土木工事に用	54,522	1.78
炭坑充填材	105,636	3.44
地盤改良材	12,325	0.40
製鉄用	2,155	0.07
建材ボード用	134,439	4.38
二次製品用	14,870	0.48
その他	276,825	9.02
有効利用合計	3,068,645	100
有効利用率(%)	68.5	

平成10年度利用分、出典：石炭灰ハンドブック

料としての適合性について検討を行い(図7-1-3)、評価を行った<sup>(1)(2)(3)</sup>。以下にその検討結果について述べる。

### (1) 混和材としての検討

セメントの一部代替材料としてコンクリートに用いる材料を混和材と称する。混和材としての性能を評価するためにモルタル試験を実施した。ただし、モルタル試験法は当時(平成7年)の規格であるフライアッシュJISA 6201-1991に従っている。セメント重量の30%をガス

表7-1-2 ガス化スラグの溶出試験結果(豪州M炭)

単位：mg/l

項目	ガス化スラグ(豪州M炭)	産業廃棄物の溶出判定基準		土壤環境基準
		埋立処分	海面埋立	
1	アルキル水銀化合物	ND (<0.0015)	ND	ND
2	Hgまたはその化合物	ND (<0.0005)	<0.005	<0.0005
3	Cdまたはその化合物	0.0003	<0.3	<0.01
4	Pbまたはその化合物	0.004	<3	<0.01
5	Asまたはその化合物	0.002	<1.5	<0.01
6	CN化合物	ND (<0.1)	<1	ND
7	有機リン化合物	ND (<0.1)	<1	ND
8	PCB	ND (<0.0005)	<0.003	ND
9	Cuまたはその化合物	0.0009	<3	<3
10	Znまたはその化合物	0.005	<5	<5
11	6価Cr化合物	ND (<0.001)	<1.5	<0.05
12	pH	8.1	<9	

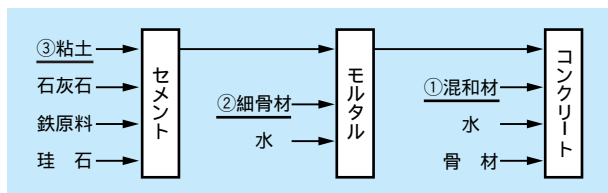


図7-1-3 セメント・コンクリート製造過程における検討材料

化スラグ微粉末で置換・混和した。各ガス化スラグ微粉末の物性値とモルタル試験結果を表7-1-4に示す。ガス化スラグ微粉末を混和したモルタルでは、単位水量低減効果および強度発現性が十分に得られ、混和材として十分な性能を発揮することが示された。また、一般的なフライアッシュを用いた場合と同等の強度発現性を得るためには、ガス化スラグの粉末度をブレン値<sup>(注1)</sup>で4000cm<sup>2</sup>/g以上にすることが認められた。

### (2) 細骨材としての検討

コンクリートには通常、砂や砂利、石などを混合し、これらを骨材と呼んでいる。5 mm以下のものを細骨材、5 mm以上のものを粗骨材と呼ぶ。ガス化スラグを粉砕処理し、粒度調整を施しコンクリート用細骨材を準備した。5種類の細骨材試料に対してコンクリート用砕砂(JIS A 5004)、高炉スラグ細骨材(JIS A 5011)、フェロニッケルスラグ細骨材(JIS A 5011)の各規格に示される物性値(密度、吸水率、含水率、単位容積質量、実績率)<sup>(注2)</sup>を評価し、絶対乾密度のみが規格値以下で

はあるが、その他の物性値は規格に適合することを確認した(表7-1-5)。ガス化スラグ骨材を用いたモルタル試験により、一般的な砕石を用いた場合に比べ流動性および強度が若干劣るが、配合によっては、砕石と同等の強度となることが示された。また、ガス化スラグ細骨材を用いたモルタル硬化体を薄片処理し、実体顕微鏡によりペーストと骨材界面を観察したが、アルカリシリカ反応による反応生成物は認められなかった(図7-1-4)。ガス化スラグ骨材の絶対乾密度が低いために、実用施工時に配合設計および施工において配慮が必要となるが、十分に使用可能であると考えられた。

### (3) セメント原料としての検討

1トンのセメントを製造する際に、原料として石灰石、粘土、ケイ石、鉄原料を各々1080kg、220kg、60kg、30kg使用し、1450℃の焼成キルンでクリンカー塊を造粒する。そのクリンカー塊に35kgの石膏を添加し、粉砕することによりセメントを製品化している。現在は、天然の粘土原料の代替として、石灰石および各種スラグが多く用いられている。平成12年度時点でセメントの需要量は8200万トンであり、セメントクリンカー用の粘土原料としてガス化スラグを用いる場合には、定常的に一定量の有効利用が見込まれる。

本実験では、太平洋セメント(株)のK-2キルンを用いてガス化スラグを粘土原料の一部代替として利用した焼成試験を行なった。セメントクリンカー焼成キルンでは、

表7-1-4 微粉末スラグを混和材としたモルタル試験結果

試料名	比重(-)	粉末度		単位水量比(%)	圧縮強度比(%)		
		ブレン値(cm <sup>2</sup> /g)	44 μmふるい残分(%)		7日	28日	91日
豪州M炭	2.57	3070	12.7	95	58.5	75.6	83.0
	2.57	3980	5.2	97	60.0	80.6	87.5
	2.57	4950	1.4	97	64.0	86.3	94.7
豪州B炭	2.53	3950	1.1	100	69.4	83.8	96.8
豪州D炭	2.62	3970	3.6	96	65.3	81.1	95.4
豪州L炭*1	2.62	3970	6.3	98	72.4	81.1	93.5
豪州L炭*2	2.72	3940	4.3	98	73.4	84.6	104.3
フライアッシュ	2.24	3400	11.7	96	81.7	80.5	93.5
JIS規格値	1.95 <	2400 <		102 >		60 <	70 <

\*1は灰融点降下剤(CaO)を10%、\*2は30%添加している。

(注1) 比表面積

(注2) 単位容積に最大限充填できる体積割合

表7-1-5 ガス化スラグ細骨材の物理特性試験結果

試料名	表乾比重	絶乾比重	吸水率 (%)	含水率 (%)	単位容量質量 (kg/l)	実績率 (%)	
ガス化スラグ	豪州M炭	2.33	2.32	1.24	0.04	1.75	76.0
	豪州B炭	2.49	2.47	0.50	0.04	1.81	73.2
	豪州D炭	2.06	2.03	1.10	0.04	1.76	86.4
	豪州L炭*1	2.37	2.34	0.32	0.10	1.70	71.8
	豪州L炭*2	2.35	2.31	0.78	0.11	1.72	73.6
砕砂	2.61	2.60	1.59	0.37	1.80	70.0	
コンクリート用砕砂規格 JIS A 5004		2.5以上	3.0以下			53以上	
高炉スラグ細骨材規格 JIS A 5011		2.5以上	3.5以下		1.45以上		
高炉スラグ粗骨材規格 JIS A 5011		A : 2.2、 B : 2.4以上	A : 6.0、 B : 4.0以下		A : 1.25、 B : 1.35以上		
フェロニッケルスラグ細骨材規格 JIS A 5011		2.7以上	3.0以下		1.50以上		

\* 1は灰融点降下剤 CaO を10%、\* 2は30%添加、A種：粒径40～5mm B種：粒径25～5mm

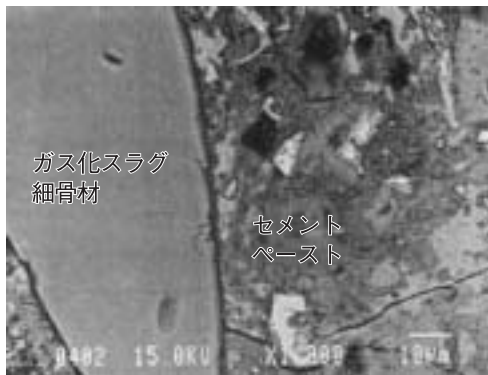


図7-1-4 ガス化スラグ細骨材を混入したモルタル硬化体の組織観察

スポット的に使用原料を変化させないことが望まれており、定常的に一定の組成配合となるように原料を調合している。本実験における試料の量が限られていたために、多量のガス化スラグを短時間に焼成キルンに投入せずにクリンカー 1 トンあたり 4 kg のガス化スラグを投入することにした。得られたガス化スラグ使用セメントの組成例を表7-1-6に示す。ガス化スラグを用いたセメントの物性値およびそのセメントを用いたコンクリートによる物性値評価試験の結果から、在来品と同じ製品を製造

表7-1-6 ガス化スラグを使用したセメントの化学組成例

単位：wt%

項目 原料	強熱 減量	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
スラグセメント	1.8	20.9	5.0	2.8	64.9	1.6	1.9	0.35	0.43
通常セメント	1.7	20.9	5.1	2.9	65.1	1.3	2.0	0.38	0.42

出来ることが示された。ただし、従来の天然粘土およびフライアッシュ等の微粒子とは異なりガス化スラグの場合は、焼成キルン投入前に微粉砕する工程が必要となるために、在来品製造時に比べてエネルギー消費量が若干多くなることが懸念された。

以上、ガス化スラグをセメント・コンクリートの分野で有効利用する際の諸特性評価を行ない、コンクリート用混和材、コンクリート用細骨材、およびセメントクリンカー製造用原料として使用する際に十分な性能が得られることを示した。ただし、これらの各利用法において破砕・粉砕工程が必須となるために、各製品製造時に追加的なエネルギー消費が必要となる。この点に関しては検討の余地が残された。

### 7-1-3 ガス化スラグ有効利用方策の拡大に向けて

当研究所では、ガス化スラグの付加価値化とともに大量消費が果たせる新しい有効利用分野の探索が必要であるとの認識から、現在、前述の有効利用方策以外に高付加価値型の人工骨材製造技術の開発に取り組んでいる。これには、現状のスラグ性状および形状に基づいて利用方法を検討するだけでなく、利用するためには、どのような性状であるべきか考え、スラグ排出プロセスの改良も踏まえた検討を行う必要がある。

## 7 - 2 燃料電池複合発電技術 開発の現状と課題

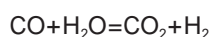
### 7-2-1 研究の背景と現状

燃料電池発電は、これまでの火力発電方式と異なる電気化学反応を利用した発電方式である。発電原理が従来の火力発電と異なることから、高い発電効率が期待できるばかりではなく、燃焼過程を含まないことによりNOxをほとんど排出しないなど環境適合性にも優れるといった特長を有する。当研究所では、石炭ガス化燃料を用いて、IGCCをさらに上回る高効率複合発電を目指した高温形燃料電池の技術開発を進めている。

燃料電池では、燃料と酸化剤の連続的な供給により、燃料の持つ化学エネルギーが直接・連続的に電気エネルギーに変換され、同時に反応生成物や熱が生成される。一般に反応物は燃料側ではH<sub>2</sub>、酸化剤側ではO<sub>2</sub>であり、生成物はH<sub>2</sub>Oである。現在、H<sub>2</sub>を燃料として用いるのは特殊な用途に限られ、実用的には化石燃料である天然ガスを改質したり石炭をガス化してH<sub>2</sub>を得ることが一般的である。このとき改質反応やガス化反応に伴ってCO<sub>2</sub>も生成される。このように、燃料電池発電システムにおける全体の反応は、原燃料となる天然ガスや石炭を燃焼させ、H<sub>2</sub>OやCO<sub>2</sub>が生成され、同時に電力が得られる点で、従来の火力発電技術と同等である。

燃料電池にはいくつかの種類があり、低温形と高温形に大別できる。低温形の燃料電池（りん酸形（PAFC）、固体高分子形（PEFC））は電極反応の進行を促進するために、電極内部に白金（Pt）触媒を分散担持させているが、PtはCOとの結合力が強く触媒能が低下するため、燃料ガス中のCO濃度を極力低いレベルに抑制することが求められる。また、動作温度も200以下となり、排熱の利用にも制約がある。

これに対して高温形の燃料電池（熔融炭酸塩形（MCFC）、固体酸化物形（SOFC））は、動作温度がそれぞれ600～700、800～1000と高く、Ptが不要であるばかりでなく、次のシフト反応



によって、COがH<sub>2</sub>に変換され、高濃度のCOを含む石炭ガス化ガス燃料を直接利用することができる。さらに、燃料電池から排出される高温・高圧のガスによって、ガスタービンや蒸気タービンによる動力回収を組合せた複合発電が可能となり、プラント全体の効率をより高めることが可能となる。石炭ガス化複合燃料電池発電システムの効率は、MCFC、SOFCともに50%（発電端、HHV）を越え、SOFCで数%高い値が試算されている。

当研究所では、MCFCやSOFCを適用した天然ガス燃料の高効率の発電システムを想定する一方、石炭ガス化燃料を利用した高効率の複合発電システムを最終的な石炭利用形態と位置づけて、その技術開発を進めている<sup>(4)(5)</sup>。石炭のガス化は加圧条件で行われ、ガス化炉から高温の蒸気が得られるので、発電システムとしてはMCFCと共に、ガスタービン（GT）、蒸気タービン（ST）を利用することが考えられる。石炭を利用したMCFCによる複合発電システムの構成を図7-2-1に示す<sup>(6)</sup>。ガス化された石炭ガスはガス精製装置（ポラスフィルタ、湿式脱硫装置）を通してMCFCの燃料極に供給され、ガス中のH<sub>2</sub>が反応に用いられる。空気極では空気中のO<sub>2</sub>が反応するが、空気は、未反応の可燃ガスや反応によって生じたCO<sub>2</sub>を含む燃料排ガスと混合され、燃焼されてからMCFCの空気極に供給される。これに伴って、MCFCの空気極には反応に必要なO<sub>2</sub>とCO<sub>2</sub>が供給される。高温高圧の排空気は最終的には膨張タービンに供給されて動力回収され、さらに排熱回収される構成となっている。これら燃料電池を大規模な石炭ガス化燃料電池複合発電システムとして実現するためには、電池本体技術の開発はもとより、石炭ガス中に含まれる不純物対策、システム化技術など数多くの開発を今後進めていく必要がある。

現在、燃料電池に関しては、当研究所の他、各メーカー、電力会社、ガス会社が幅広い技術開発を進めている。全般的には自動車用や家庭用としての適用が期待されている低温形のPEFC開発が盛んであるが、高温形燃料電池の開発は、高効率の定置用発電技術として着実に進められている。MCFCに関しては、国の計画において、

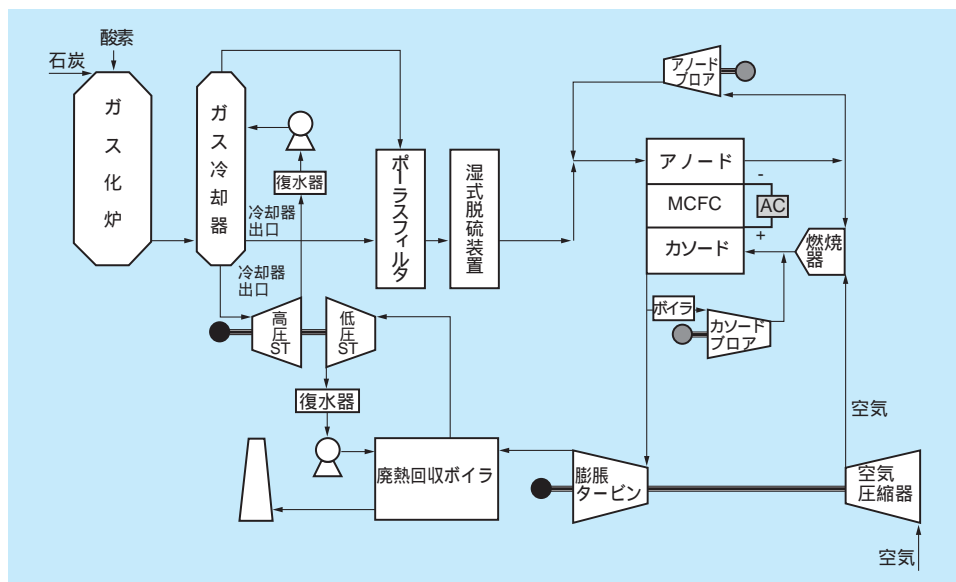


図7-2-1 石炭ガス化MCFC複合発電システムの構成  
(アノードガスリサイクルシステム)

天然ガス燃料の1,000kW級プラントの実証試験が平成11年度に行われ、45%の発電効率を達成している。現在、平成12～16年度の計画において、より高効率を目指した天然ガス利用の高圧電池モジュール開発(1.2MPa)が進められており、当研究所では、熔融炭酸塩型燃料電池発電システム技術研究組合の一員として、国の計画の中で、その基本要素である10kW級スタックの長期耐久性の試験評価や長寿命化開発を進めている。また、石炭ガス利用に関する基礎研究も進め、電力会社との共同の受託分担研究として、小型単セルによる石炭ガス中に含まれる代表的な不純物による電池性能への影響について試験評価を行っている。さらに当研究所では、MCFCの燃料多様化に向けての所内研究も進めており、石炭ガスの適用はもちろんのこと、類似した組成を持つ廃棄物ガス化炉との組み合わせによる発電方式の検討も実施している。それらの研究の中で、石炭ガス化燃料組成による基本的な電池性能への影響や適用組成範囲の検討を実験的に進め、性能予測のための相関式の開発などに努めている。

SOFCに関しても、国では数kW級モジュール開発を進め、平成13年度から4ヶ年の予定で、5～20kW級の熱自立モジュール開発を進めている。当研究所では、SOFCを将来的にはMCFCを上回る高効率複合発電技術につながる技術として捉え、高効率化を達成するための目標として、1000動作の全セラミック製SOFCを

設定し、各種構成材料に重点を置いた開発を進めてきた。その一環として、国の開発計画においては低コスト化を目指した材料開発を進めたほか、それに先立ち、高効率を達成するための天然ガスや石炭を用いた発電システムの効率解析も実施してきた。さらに近年では、より高効率が期待できる電極支持形の薄膜電解質構造のSOFCに注目し、本構造を適用したスタック開発を所内研究として進めている。

関連する技術としてはさらに、燃料電池用の石炭ガス製造を目的として、EAGLE計画が進められている。本計画ではガス化関連の試験が平成18年度まで予定されており、その後燃料電池を接続した試験が想定されている。

## 7-2-2 熔融炭酸塩形燃料電池(MCFC)複合発電技術

石炭を用いたMCFC複合発電システムを実現するための技術課題を中心に述べる。

### (1) 石炭ガス化燃料中の不純物の影響評価

MCFCの利用形態の1つとして、石炭ガス化燃料を用いる大規模高効率発電プラントが期待されているが、石炭には硫黄や塩素など多種類の不純物が含まれている。そこで、石炭ガス化燃料中に含まれる不純物のMCFCへの影響を検討し、ガス精製装置の精製目標値への指針



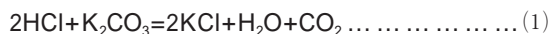
を得る必要がある。平成6年度からMCFCへの不純物の影響を解明するため国家プロジェクトが進められており、現在、当研究所、北海道電力(株)、四国電力(株)、北陸電力(株)、(株)日立製作所が参加している。各社の自主研究を含め、燃料側の不純物としてH<sub>2</sub>S、HCl、NH<sub>3</sub>、HFを取り上げ、酸化剤ガス中の不純物としてSO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>を取り上げてMCFC性能への影響を評価している。

① H<sub>2</sub>Sの影響<sup>(7)(8)(9)</sup>

H<sub>2</sub>Sのセル電圧への影響は燃料中のCO濃度が高いほど大きくなる。これはH<sub>2</sub>Sがアノード(Ni)表面に化学吸着することで、Niの触媒機能が低下し、シフト反応(H<sub>2</sub>O+CO=H<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub>)が遅くなり、発電反応の主反応物質であるH<sub>2</sub>が欠乏するためである。したがって、ある程度の水素濃度の高い燃料であれば、図7-2-2に示すように、H<sub>2</sub>S添加初期は電圧低下が大きいものの運転時間2000時間以降ではほぼ無添加の場合とほぼ同等な性能を示し、発電反応へのH<sub>2</sub>Sの影響は小さい。

② HClおよびHFの影響<sup>(10)</sup>

HClによる電極反応への影響は極めて小さいものの、添加したほぼ全量のHClが(1)式の反応によりKClとなるため、電解質ロスが促進される。この電解質ロスによりMCFC性能(電圧、寿命)が低下する。



すなわち許容できる電解質ロス量が把握できればHCl

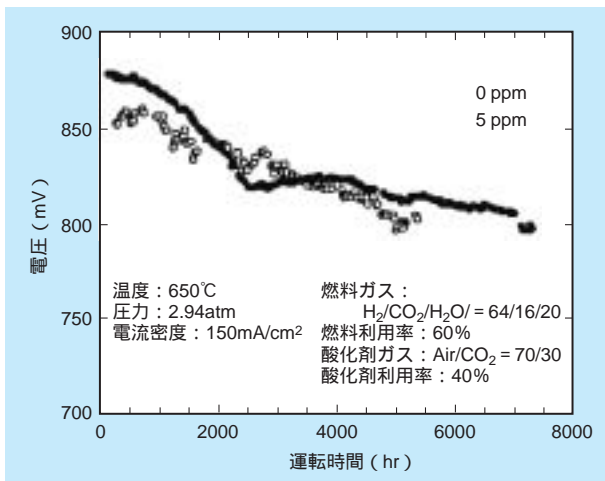


図7-2-2 長時間運転におけるH<sub>2</sub>Sの影響

の許容濃度を設定することができる。

HFの影響は、HClと同様に電極反応への影響は極めて小さい。またHClに比べ炭酸塩との反応性は低く、電解質ロスへの影響は小さい。

③ NH<sub>3</sub>の影響<sup>(11)</sup>

電池性能への影響は極めて小さく、添加されたNH<sub>3</sub>のほぼ全量が電極反応また電池構成部材と反応することなく排出される。

④ NO<sub>x</sub>の影響

NO<sub>x</sub>添加により内部抵抗が増加し、電池電圧は低下する。しかしながら、図7-2-3に示すように、継続的にNO<sub>x</sub>はカソード側から電解質に溶解するが、アノードにおいて燃料ガス中のH<sub>2</sub>とNO<sub>2</sub>・またはNO<sub>3</sub>・が反応し、N<sub>2</sub>としてアノード排ガス中に放出されるため、電解質中にはほとんどNO<sub>3</sub>・またはNO<sub>2</sub>・は蓄積されない。このため内部抵抗増加原因となる物質の生成も鈍化し、結果的に電池性能の低下はほとんど起こらない。またこの結果は、供給されたNO<sub>x</sub>がN<sub>2</sub>に還元されることを示しており、MCFCのように燃料ガスと酸化剤ガスが電解質板によって仕切られている物は脱硝機能を持ち合わせていることを示している。

⑤ SO<sub>x</sub>の影響<sup>(12)</sup>

電圧の経時変化はH<sub>2</sub>S添加の場合と類似した傾向にある。しかし、カソード流路部材は、SO<sub>2</sub>と炭酸塩より腐食が進行しやすく、通常のカソード流路部材に用いられているSUS316Lよりも耐腐食性の高い材料を用いる必要がある。

以上、当研究所を中心として実施した石炭ガス化燃料中の各種の不純物による電池特性への影響評価について

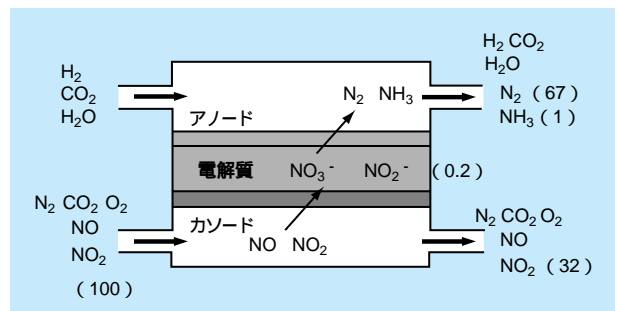


図7-2-3 電池内でのNO<sub>x</sub>の挙動

述べた。今後は石炭ガス化 MCFC 複合発電 (IG-MCFC) の実用化に向けて、多種の不純物の複合的な影響について明らかにしていく必要がある。

(2) システム構成と性能解析<sup>6)</sup>

MCFC に、石炭ガス化燃料や廃棄物ガス化ガス等の多様な燃料を適用するには、長期的な安定性確保のためこれらのガスに対する MCFC の耐久性を検証するばかりではなく、可能な限り高い電池電圧すなわち高い発電効率とするため最適なガス組成条件を電池部分で達成するシステムを構成することが重要である。石炭ガス模擬ガスに不純物を添加したガスを電池に供給した場合の発電試験等では、アノード流路内部においてシフト反応が未平衡状態となることにより、電池の性能が低下することが報告されており<sup>(7)(8)</sup>、このような実電池における発電特性をシステム熱物質収支に反映させることも、実用的なシステム構成のためには重要となる。本節では、IG-MCFC プラントシステムの熱物質収支解析を行い、MCFC 部分におけるガス条件等について、実電池の発電限界を考慮した場合のシステム解析結果について述べる。解析に当たっては、アノード流路内で不純物等の影響によりシフト反応が未平衡状態となった場合を想定し、シフト反応未平衡状態がシステム全体の特性に与える影響を調べた。なお、検討の対象としたシステムは、アノード出口ガスをアノード

ド入口に再循環させるアノードガスリサイクルシステム (図7-2-1) 及び、アノードガスリサイクル系を省略しアノード出入口間に熱交換器を設けたアノード熱交換システム (図7-2-4) である。

解析に適用した石炭ガス化燃料組成を表7-2-1に示す。石炭ガス化燃料組成の場合、天然ガス組成と比較して、CO成分の濃度が高くなっていることが特徴となる。一方近年の電池試験によれば、MCFCを安定に運転するためには運転条件にある程度の許容範囲があることが明らかになりつつある。表7-2-2には、本解析において適用した運転制約要因とその条件をまとめて示す。これらのガス組成や運転条件を考慮することにより、システム性能の解析結果をより精確に得ることが可能となる。

アノードガスリサイクルシステムの構成図については既に図7-2-1に示した。本システムにおけるアノードガスリサイクルの目的は、アノード入口部分における炭素析出を防止することである。炭素析出に関する解析の結果、炭素析出防止のために必要なアノードガスリサイク

表7-2-1 天然ガス改質ガスと石炭ガス化燃料の主な組成

	石炭ガス化燃料 (本検討)	天然ガス (参考)
H <sub>2</sub> /CO/CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	29/69/1/1	48/8/7/36
備考	酸素吹き湿式ガス精製システムにおけるガス組成	外部改質システムにおけるガス組成

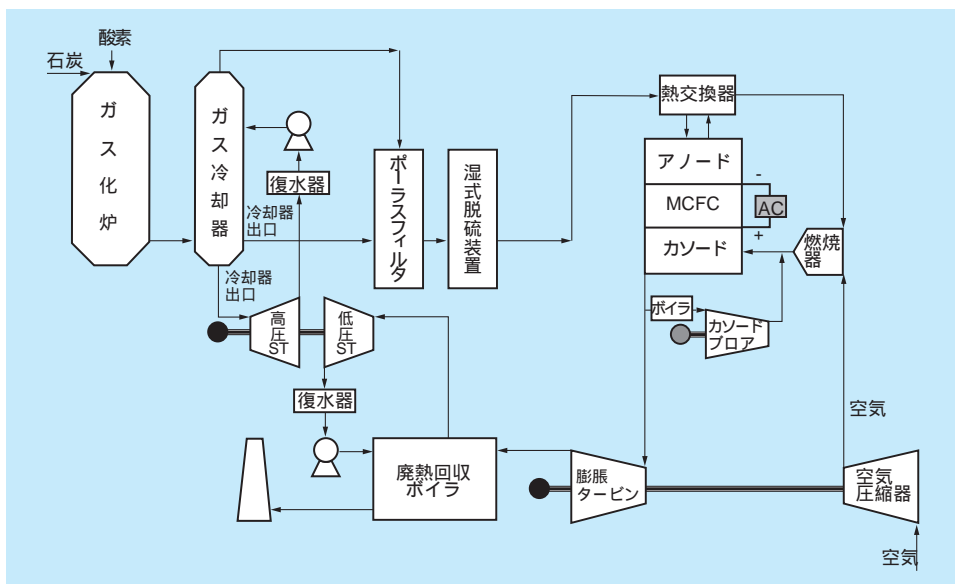


図7-2-4 石炭ガス化MCFC複合発電システムの構成 (アノード熱交換システム)

表7-2-2 解析に考慮した電池の運転制約要因とその条件

項目	運転制約条件	選定理由
アノード入口ガス条件	炭素非析出条件	最も炭素が析出しにくい条件
アノード出口水素濃度	1%以上	実セル発電試験結果から選定
カソード入口炭酸ガス分圧	0.1MPa以下	長期に亘りNi短絡を起こさないための目標値

ル率は80%程度となることが分かった。図7-2-4にはアノード熱交換システムの構成図を示す。本システムではアノードガスリサイクルを省略することにより、アノード入口における炭酸ガス濃度が低くなるため、発電には有利なガス組成となっていることが特徴となる。本システムの場合、炭素析出防止のためには、アノードガスに蒸気を添加する必要があるため、廃熱回収系からの蒸気供給を伴うシステムとなっているとともに、アノード入口におけるガス温度を所定の温度に上昇させるため、アノード出口ガスとの熱交換を行うシステム構成となっている。炭素析出ガス条件に関する検討の結果、アノード熱交換システムの場合、燃料ガスへの蒸気添加量は約60%程度となることが分かった。

続いて、アノード流路内部におけるシフト反応が未平衡状態となり  $(H_2 \cdot CO_2) / (CO \cdot H_2O)$  の値が低下した場合について、アノード出口水素濃度に関する解析を行った。シフト反応が平衡状態に達していないことについては、 $K = \{(H_2 \cdot CO_2) / (CO \cdot H_2O)_{未平衡}\} / \{(H_2 \cdot CO_2) / (CO \cdot H_2O)_{平衡}\}$  の値を解析に導入し、Kの値を1以下の範囲で変更することによりシステムの熱物質収支解析に反映させた。図7-2-5に、Kの値が0.4程度に低下した場合について、アノード出口における水素濃度を設定燃料利用率に対して示す。アノード出口における水素濃度が1%程度以上となる領域が、アノード熱交換システムの場合に大きくなっていることがわかる。本検討より、アノード熱交換システムはアノードガスリサイクルシステムより燃料利用率を高く設定した運転が可能であることが分かった。

一方、カソード側システム構成に注目すると、検討を行ったシステムではカソードガスリサイクル系にボイラ

アノード出口水素濃度が低下すると、電池の発電性能は急激に低下するが、その目安は約1%程度と推定されている。また、これまでの石炭ガス化模擬ガスを用いた単セル試験では、電池内部でシフト反応が未平衡状態となり、 $(H_2 \cdot CO_2) / (CO \cdot H_2O)$  の値が0.4程度に下がる場合があることが明らかとなっている。

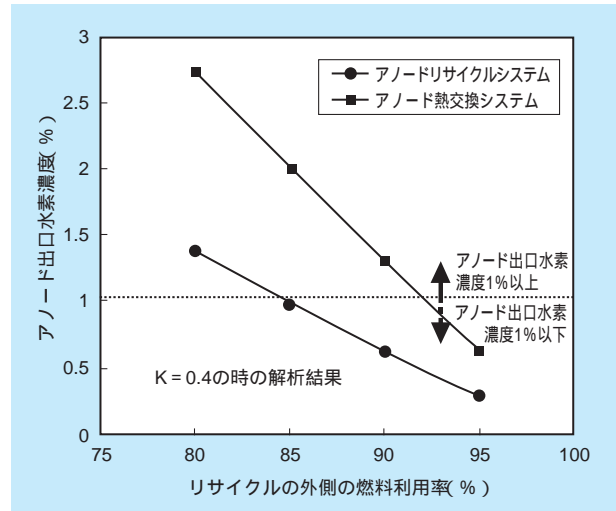


図7-2-5 アノード出口水素濃度のプラント燃料利用率依存性

$$[K = \{(H_2 \cdot CO_2) / (CO \cdot H_2O)_{未平衡}\} / \{(H_2 \cdot CO_2) / (CO \cdot H_2O)_{平衡}\}]$$

ーを設置し、電池からの熱量を蒸気タービンに回収することによりシステム全体の熱効率を向上させるような構成となっている。スタックはカソードリサイクル系での熱回収及び空気圧縮機からの供給空気により冷却されるため、カソードリサイクル系での回収熱量が大きくなると、システムへの供給空気量も少なくなり、システム効率が上昇する。しかしながら、システムへの供給空気量の減少は、相対的なカソード炭酸ガス分圧の上昇を伴うため、Ni短絡の観点からシステム運転条件の制約が発生してくる。ここでは、カソードリサイクル系から蒸気タービンへの回収熱量をパラメータとした場合の、システム効率とカソード炭酸ガス分圧の関係について解析を実施した。システム熱効率とカソード炭酸ガス分圧についての検討結果を図7-2-6に示す。アノードリサイクルシステムはカソード炭酸ガス分圧を低下させるために熱効率の低下を伴うのに対し、アノード熱交換システムの場合、逆に熱効率の上昇を伴うことが分かった。

以上の結果からアノード熱交換システムは、石炭ガス化燃料のような高CO濃度、低H<sub>2</sub>濃度燃料に対して、幅広い燃料利用率で運転可能であり、カソード炭酸ガス分圧を低減させた条件にも十分対応可能なシステムであると考えられる。

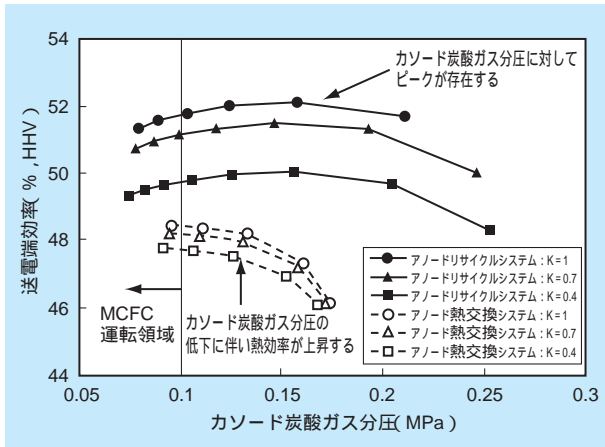


図7-2-6 カソード炭酸ガス分圧と熱効率の関係

カソードガスリサイクル系における熱回収量をパラメータとした解析  
プラント燃料利用率はアノード出口水素濃度=1%となるように設定した  
[ $K = \frac{(H_2 \cdot CO_2 / (CO \cdot H_2O))_{床平衡}}{(H_2 \cdot CO_2 / (CO \cdot H_2O))_{平衡}}$ ]

### 7-2-3 固体酸化物形燃料電池 (SOFC) 複合発電技術

当研究所では、石炭を利用するSOFC複合発電システムについても検討を実施してきた<sup>(13)</sup>。構成の一例を図7-2-7に示す。本構成は、微粉炭を空気でガス化し、乾式クリーンアップによるガス精製を行うシステムである。SOFCに流入する燃料は熱交換器により加熱され、空気

はリサイクルブローを用いて昇温する。空気側にリサイクルブローを用いることで、システムに流入する空気流量を低減でき、GTでの圧縮機動力の低減、HRSG (排熱回収ボイラ) での回収熱量の増大が図れる。このように、SOFCによる複合発電システムも、MCFCと同様にGTやSTとの組み合わせによって構成されるが、最も大きな違いは、MCFCでは燃料極の排ガスを空気で燃焼したガスが空気極に供給されているのに対して、SOFCでは空気極には空気のみが圧縮機から直接供給されており、未反応物を含む排燃料と排空気は電池から排出された後に燃焼されてGTに送られている点にある。システム解析に用いた電池での運転条件を表7-2-3に、効率解析を行った結果を表7-2-4に示す。表7-2-4中には、例示したシステムをシステム1として示すとともに、ガス化条件を変更した場合の効率もシステム2、システム3として併せて示した。なお、システム2、3では、

表7-2-3 解析に用いたSOFCの運転条件

電池電圧	0.725V
燃料利用率	75%
電池運転温度*1	1000℃
電池入口ガス温度	925℃
電池運転圧力	1.0MPa

\*1: 電池の出入口ガス温度の平均

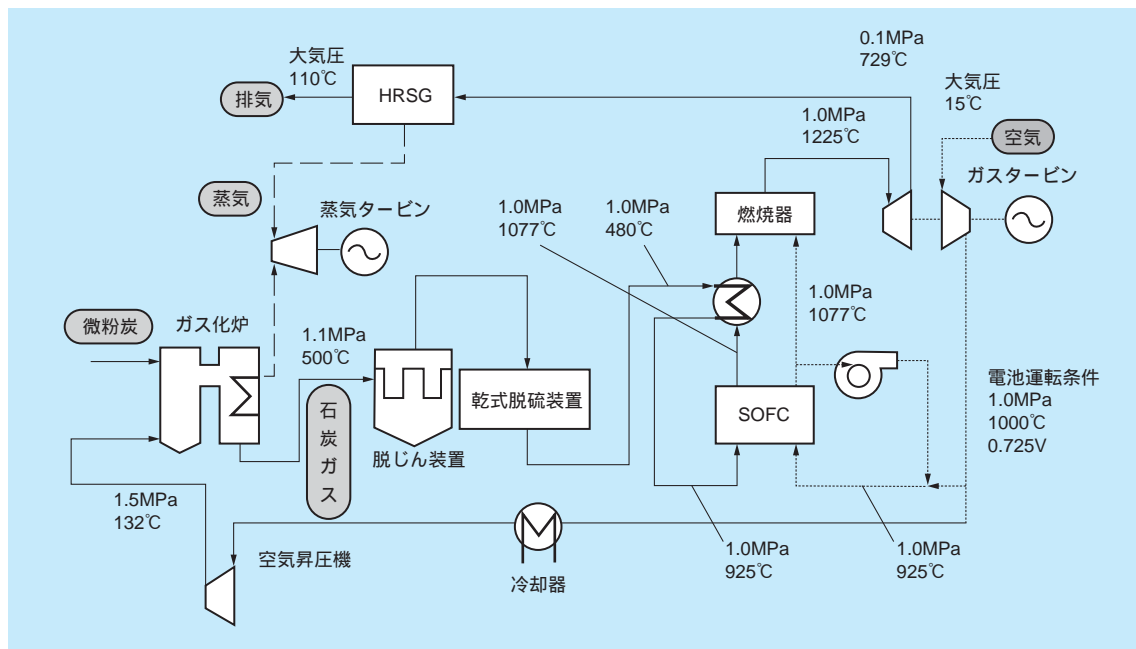


図7-2-7 SOFCを用いた発電システムの構成例  
(ガス化剤: 空気、ガス精製: 乾式クリーンアップ)

表7-2-4 SOFCを用いた発電システムの効率

	ガス化炉条件		効率( HHV% ) [ 発電端/送電端 ]
	ガス化剤	石炭供給	
システム1	空気	微粉炭	58.6/53.4
システム2	酸素	微粉炭	60.9/53.8
システム3	酸素	CWM	58.3/51.4

酸素製造設備が必要であり、ガス化剤の製造、昇圧にかかわる動力を別途考慮した。

ガス化に係わる設備以外の構成および運転条件は、極力同じとなるように解析を行っているため、表7-2-4の結果は、各システムの最適化を図って得られたのではない。また、効率はSOFCの運転条件、機器効率に大きく依存するものであるが、本解析条件では、いずれのシステムでも、おおむね50%を越える送電端効率が期待できる結果を得た。なお、微粉炭で石炭を供給するガス化方式では、酸化剤の種類にかかわらず、同程度の送電端効率となった。

各システムごとの効率、損失の内訳を図7-2-8に示す。システム1のGTはガス化用の空気を供給するため、その動力分を差し引いて電気出力を算出し、システム2、3では、ガス化炉へのガス供給にかかわる動力は酸素製造設備で消費する動力としている。そのためシステム1では、他のシステムよりも、GTから回収できる電気出力は小さくなっているが、システム全体の消費動力も少

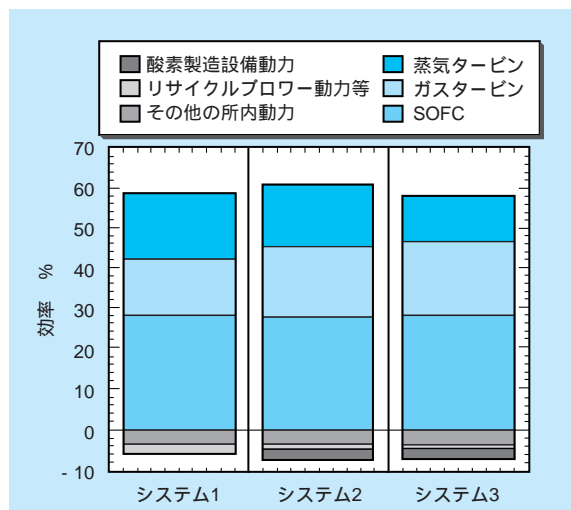


図7-2-8 各システムの効率、損失の内訳

なくなっている。また、石炭を石炭・水スラリー (CWM) で供給するシステム3では、CWM中の水分が気化熱を奪い、ガス化炉で回収できる蒸気量が減少するため、蒸気タービンで回収できる出力が低下している。

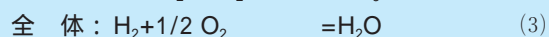
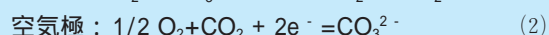
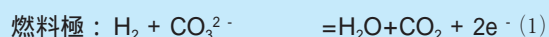
SOFC複合発電システムはこのように高効率なシステムとして期待できる。今後、石炭ガス組成に対するSOFCの発電特性、燃料中に含まれる微量成分の影響などを明確にすると共に、高温で作動する熱交換器、リサイクルブローワなどを必要とするなど技術的な課題を解決して行く必要がある。

## コラム：燃料電池の原理

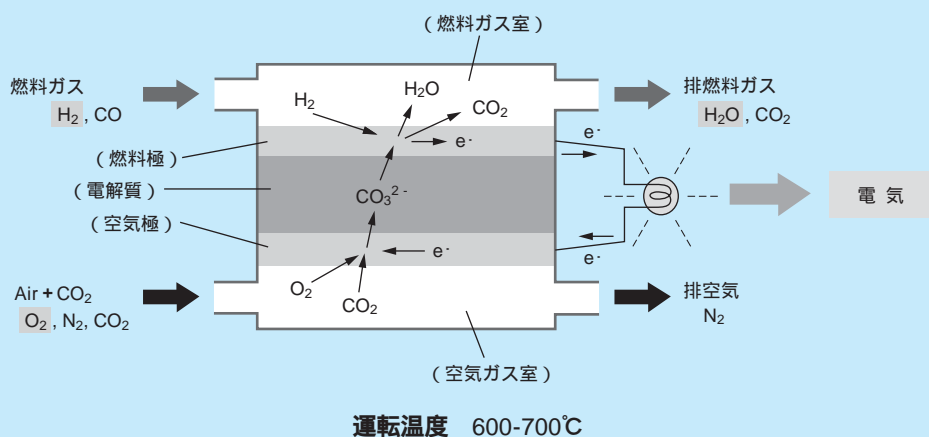
燃料電池による発電は、直接型発電といわれる。燃料電池では、燃料の化学エネルギーを電気エネルギーに直接変換しており、通常の火力発電プラントのようにボイラー、タービン、発電機を通しての、エネルギー形態の変化がなく、高い発電効率を実現できる。

燃料電池は通常、イオン導電体となる電解質とその両側に配置される燃料極（アノード）と空気極（カソード）の2枚の電極、さらにその両側に、電極反応に必要な燃料ガスと空気（酸化剤ガス）を供給するためのガス流路で形成されている。電解質と電極は反応に関与し、アクティブコンポーネントと呼ばれることもある。燃料電池には、いくつかの種類があり、通常、構成する電解質によって区分される。

石炭ガス化燃料電池複合発電としての利用が期待されるMCFCを例に、その発電原理を図に示す。MCFCでは反応に関与するイオンは $\text{CO}_3^{2-}$ であり、電池内部では以下の一連の反応がおこる。



空気極では、供給された $\text{O}_2$ と $\text{CO}_2$ が外部開路からの $\text{e}^-$ と反応して $\text{CO}_3^{2-}$ を生成し、燃料極では、供給された燃料ガス中の $\text{H}_2$ が、空気極側から電解質を通して移動してきた $\text{CO}_3^{2-}$ と反応して $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ と $\text{e}^-$ を生成する。 $\text{e}^-$ が外部の負荷回路を經由し、空気極側に戻って、空気極側の反応に関与する。一連の反応で、 $\text{e}^-$ が外部回路を流れることにより、発電が行われることになる。また、全体の反応は(3)式に示すように、 $\text{H}_2$ と $\text{O}_2$ から $\text{H}_2\text{O}$ が生成される反応に他ならず、 $\text{H}_2$ の持つ化学エネルギーが電気エネルギーに変換されることが分かる。これらの反応を起こさせる一組の電池をセルと呼び、発生する電圧は通常1V弱である。したがって、大出力を得るためには、セルを何層にも積層して高電圧を得るスタック（積層電池）を構成して用いている。セル間の電気的な接続ならびに燃料ガスと空気との分離にはセパレータと呼ばれる上下両面にガス流路を備えた部材が適用される。スタックの出力は全体の電圧と電極面積に比例する電流との積によって決まる。実際には、電極反応に伴う若干の抵抗の存在によって、内部で発熱が起こり、その分だけ、電気エネルギーに変換される割合は減少する。



## コラム：超重質油ガス化複合発電の現状と課題

### 1. はじめに

エネルギー資源に乏しく、そのほとんどを海外に依存している我が国では、燃料の多様化、ならびにエネルギーの高効率利用が重要な課題となっている。新種燃料として近年注目されているオリマルジョン™（BITOR社の登録商標）や、石油精製の際に副生される残渣油等の超重質油は、火力発電の代替燃料として有望視されている。また、高効率利用の観点から、ガスタービンをを用いたガス化コンバインド発電（以下：IGCC）への適用<sup>(1)</sup>が求められている。

超重質油のガス化技術に関しては、テキサコ法、シェル法等<sup>(2)</sup>があり、水素などの原料ガスの製造方法として以前から利用されている。また、近年残渣油を燃料としたIPPにおける有効な発電方法として注目されている。しかし、電気事業用として超重質油IGCCを採用するには、コスト低減、CO<sub>2</sub>排出量削減といった観点からプラント全体における効率の向上が必要不可欠となる。さらに、平成10年3月の卸売り電力自由化制度の導入以降、実用化にあたっては、これまで以上のコスト削減が求められる時代となった。

そこで、当研究所では、燃料性状に応じた最適なガス化炉容積の選定など、合理的な設計を可能とする数値解析ツールの開発に着手するとともに、高効率達成のための運転条件の確立や、数値解析の精度向上、ならびに検証を可能とする「新種液体燃料ガス化研究炉」を開発し、平成12年2月に竣工させた<sup>(3)</sup>。現在、将来の低品位炭CWMも視野に入れ、ガス化炉の合理的な設計・運用を支援するための研究展開を推進中である。

### 2. 超重質油について

超重質油と呼ばれるものには、世界各地で産出される天然ピチューメン、重質原油、および製油所で副生されるアスファルト、残渣油等がある。このうち、ベネズエラで産出される天然ピチューメンのオリノコータルをエマルジョン化し、重油並のハンドリング性を持たせたオリマルジョン™は、国内では北海道電力釧路内火力発電所などで利用されている他、海外でもデンマーク、カナダなどに普及している。表1に超重質油と呼ばれる主な燃料の性状例を示す。

超重質油は、一般に室温では固化しているため、その利用にあたっては、高温で取り扱う必要がある。製油所の副産品として産出される残渣油等を

表1 超重質油の性状の例

項目	単位	オリマルジョン™	アスファルト
発熱量	kcal/kg	7100	9900
灰分	wt%	0.18	0.06
残留炭素	wt%	12.8	22
粘度	cSt(100 )		3900
硫黄	wt%	2.8	5.2
窒素	wt%	0.46	0.4
Na	wtppm	14.2	70
V	wtppm	380	165

オリマルジョン™については、当所分析値

利用する場合、そのプラントを製油所に併設し、輸送、および保温コストの低減を図るなどの工夫をしている。一方、オリマルジョン™などのエマルジョン化されているものについては、輸送、保管に関しては容易であるが、流体の特性上、ポンプや流調弁の選定、長期保存時のエマルジョンの劣化への注意が必要となる。これら超重質油には、ガスタービンを腐食させる因子である硫黄分、ナトリウムなどが多く含まれており、高効率化が期待できるIGCCプラントの開発にあたっては、これらの除去技術の確立が必要不可欠となる。

### 3. 超重質油IGCCプラント

図1に現状の技術段階で実用化が期待される超重質油IGCCプラントの構成例を示す。1300～1500の高温でガス化された超重質油の生成ガス中には、灰分、未燃炭素、および材料腐食因子となる硫黄分、ナトリウム、カリウム等が含まれるため、ガスタービンに通気するにあたっては、生成ガスを脱じん設備、および脱硫設備にて精製し、クリーンなガスを得る必要がある。

脱じんに関しては、高い脱じん性能、低圧力損失等の特徴を持つセラミック製のポーラスフィルタを圧力容器内に設置し、灰分および未燃炭素を含んだダストを捕集する方法が実用段階にある。従来の水スクラバによる脱じんよりも生成ガス温度を450程度に保つことができ、プラント全体として高効率化が期待できる。また脱硫に関しては、商用規模で実績があるのは湿式法であるMDEA方式である。酸化鉄等を主成分とした脱硫剤を用いて脱硫を行う乾式法は、高温状態のまま連続処理を行うので高いプラント効率が見込めるため、早

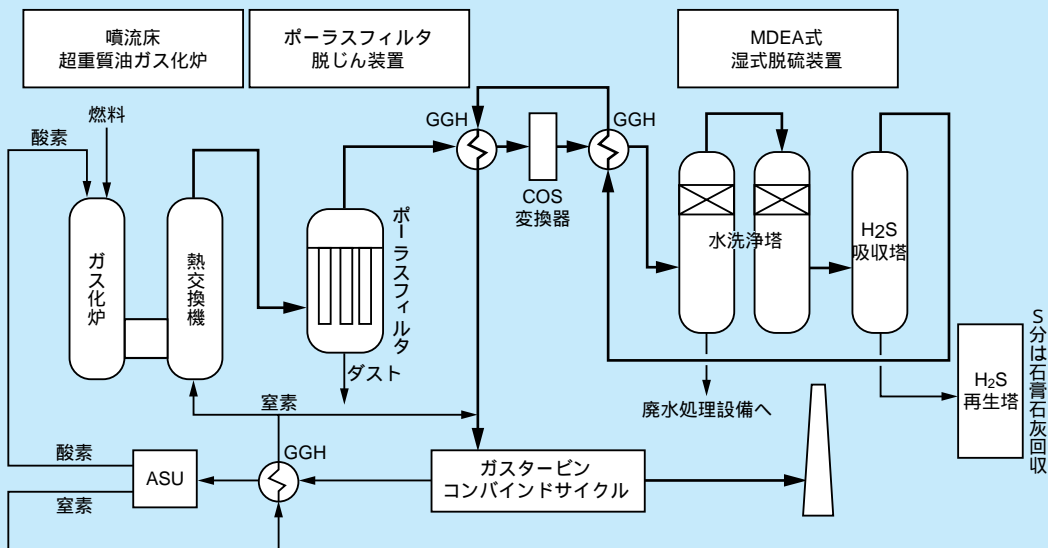


図1 超重質油IGCCプラント構成例

期実用化が期待される。

#### 4. 当研究所における超重質油ガス化試験研究<sup>4)</sup>

平成12年に完成した新種液体燃料ガス化研究炉の外観を図2に、実験設備全体の系統概略を図3に示す。

本実験設備は、酸素・窒素・空気のガス供給設備、燃料タンクおよびポンプ、ガス化炉本体、生成ガス処理設備等から構成されている。各部の温度、圧力、流量などの状態量や、生成ガス組成はオンラインで把握でき、反応生成物についてはバッチ式でサンプリング後、分析を行っている。

ガス化炉本体は、燃料処理量が日量約2トンで、ガスタービンによるコンバインド発電を想定し、加圧下(1.9MPa)で運転を行っている。ガス化燃料用のメインバーナは炉頂部に設置されており、その他、炉内昇温用のA重油バーナとその着火用メタントーチが備えてある。炉構造は、外郭より压力容器一体型の水冷ジャケット、断熱材、耐火材が施工されており、実験炉研究で問題となるヒートロスをおさえた設計としている。生成ガスは、ガス冷却器(熱交換器)で冷却後、焼却炉で燃焼され、脱じん、脱硫設備を経て、大気に放出される。

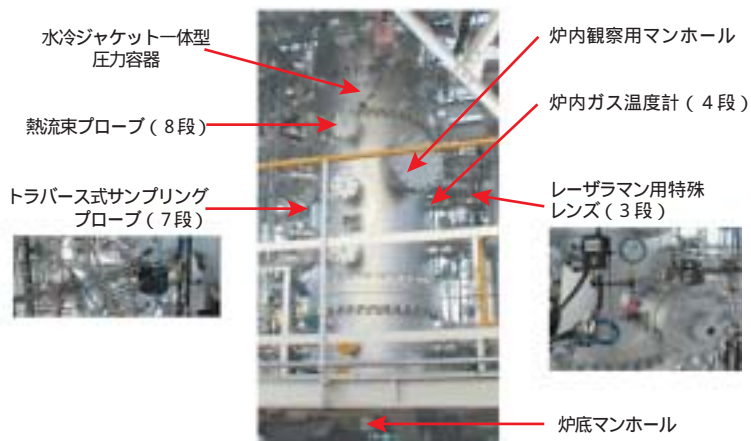


図2 新種液体燃料ガス化研究炉外観



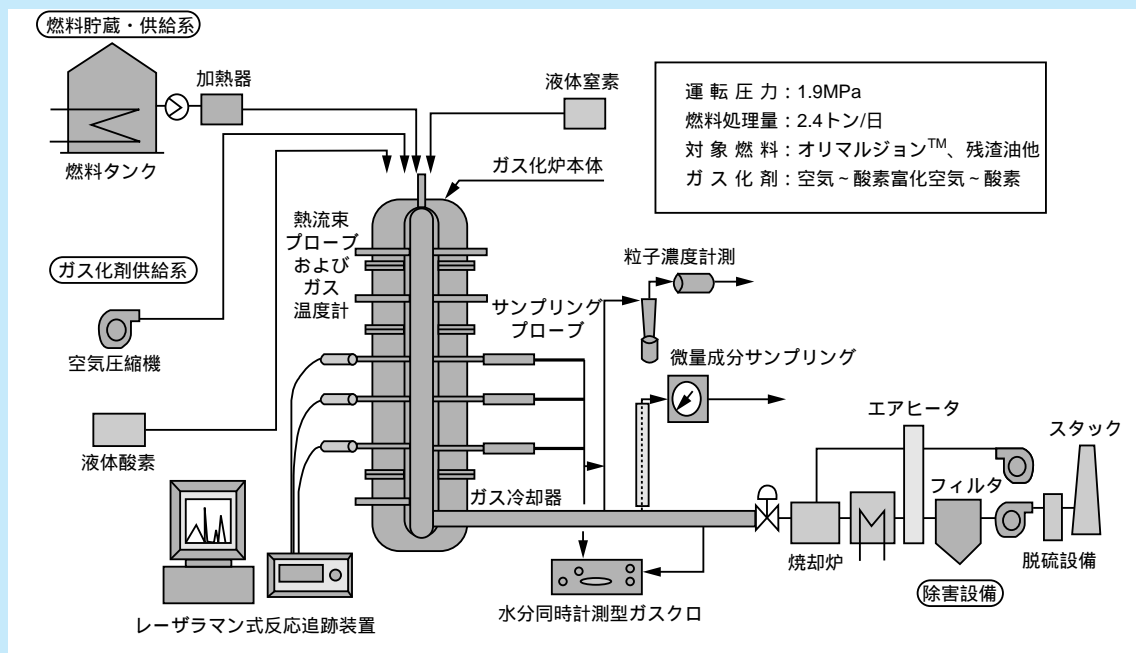


図3 新種液体燃料ガス化実験設備系統概略図

「新種液体燃料ガス化研究炉」では、オリマルジョン™のガス化を平成12年に累積で166時間22分実施した。ガス化炉投入酸素量を変化させ、生成ガス発熱量をはじめ、炭素転換率、冷ガス効率などの各種ガス化効率を把握した。酸素比とこれらのガス化効率との関係を図4に示す。生成ガス発熱量は9.5～10.5MJ/m<sup>3</sup><sub>N</sub>、炭素転換率は97%以上、冷ガス効率は75～80%の値を得た。表2に生成ガス性状の例を示す。可燃性成分であるCO、H<sub>2</sub>は、それぞれ約40%の値を得た。

また、本ガス化炉には、炉内でのガス組成や粒

表2 オリマルジョン™ガス化試験によるガス組成の一例(酸素化: 0.38)

ガス組成	組成の一例
CO	38.7vol%
H <sub>2</sub>	39.4vol%
CH <sub>4</sub>	0.1vol%
CO <sub>2</sub>	8.7vol%
H <sub>2</sub> O	11.9vol%
H <sub>2</sub> S	8900ppmv
COS	280ppmv
N <sub>2</sub> など	残り

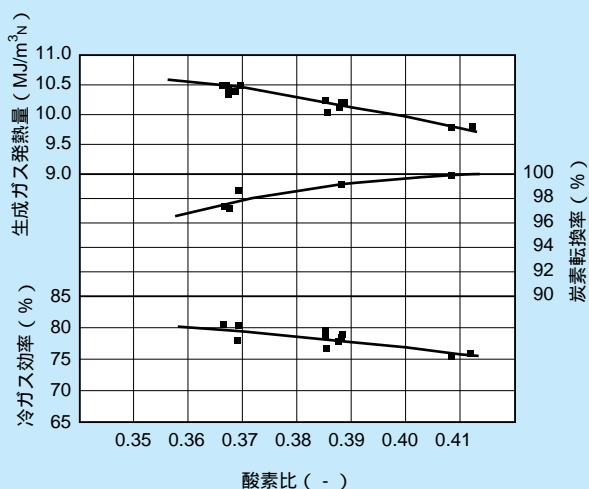


図4 各種ガス化特性

子反応率などの変化を評価するため、図5に示すとおりガス化反応途中の粒子、およびガスをサンプリングするプローブ(反応凍結プローブ)や、炉内ガス組成の非接触計測を可能とするレーザーラマン分析装置、炉壁熱流束プローブをガス化炉縦方向に多段設置し、データの蓄積をはかっている。反応凍結プローブ、熱流束計で得られたデータは数値解析技術の開発、および検証に用いられ、確度の高い炉内現象解析ツールの開発を実施してい

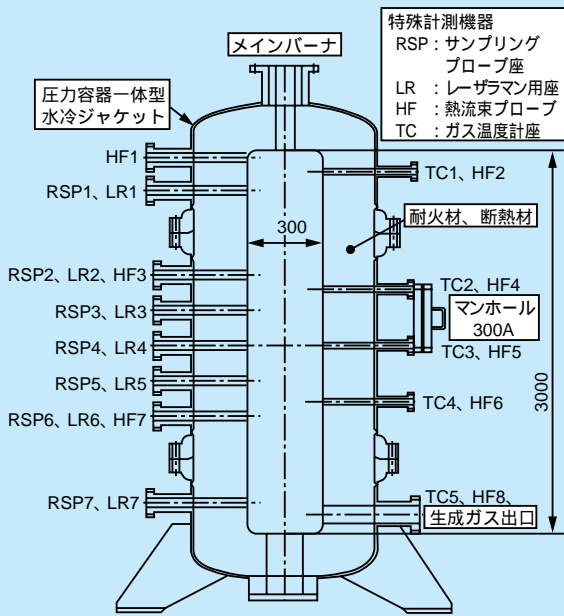


図5 特殊計測座の配置図

る。図6、図7、図8に平成12年度に実施した数値解析結果の例を示す。ガス化炉内温度分布、また各種ガス組成分布は数値解析結果と実験値とで良い一致を示しており、解析ツールに導入したオリマルジョン™の微粒化機構のモデルや気相反応モデル等はおおむね妥当であると考えられる<sup>(5)</sup>。

### 5. 海外の重質油ガス化複合発電プロジェクトの動向

海外ではここ数年の間に、酸素吹き噴流床タイプのテキサコ炉、シェル炉を用いたIGCCプロジェ

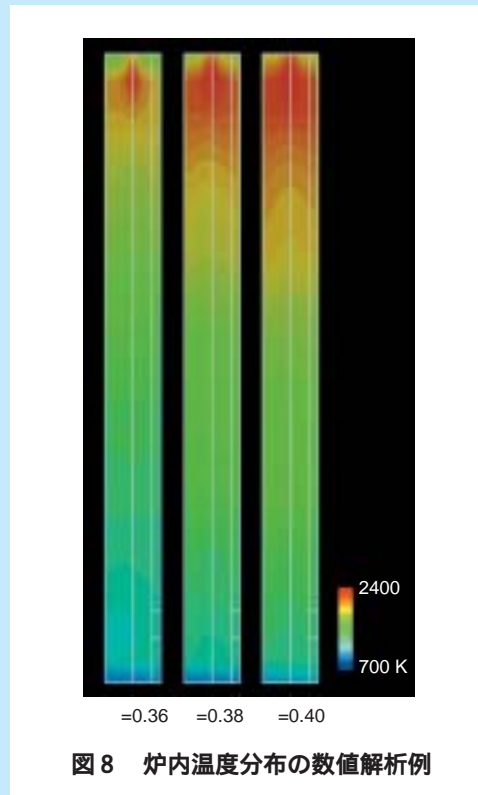


図8 炉内温度分布の数値解析例

クトがいくつか実施され始め、すでに一部商用運転されているものもある。表3に現在行われているIGCCプロジェクトの一覧を示す。これらはほとんどが製油所に併設されており、製油所からの残渣油を用い、発電以外にも水素製造を行うなどして発電コストを補っている。燃料の多様化の観点から、残渣油IGCCプロジェクトは今後、ますます増えるものと推定されるが、電気事業用として本

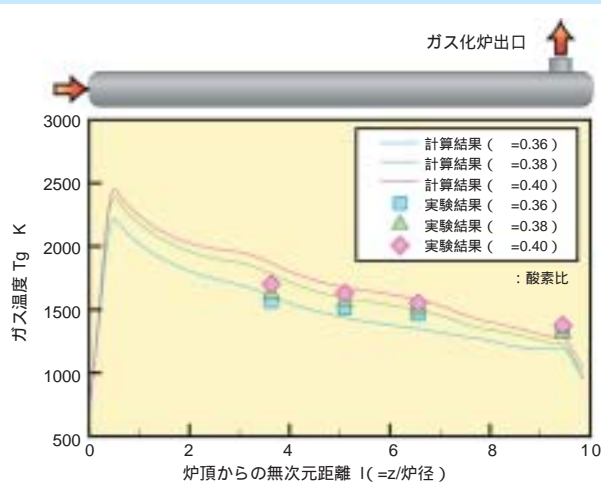


図6 ガス化炉中心軸上ガス温度分布の実験値との比較

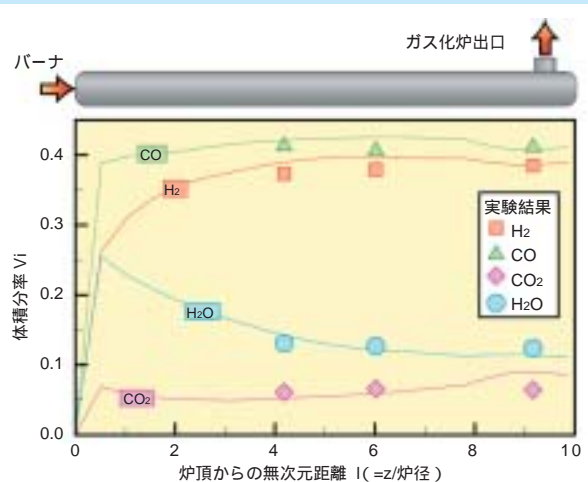


図7 炉内ガス組成分布の実験値との比較 (酸素比: 0.36)

表3 超重質油IGCCのプロジェクト一覧

プロジェクト名(国名)	ガス化炉形式	燃料	適用	出力	運開年	備考
El-Dorado (USA)	Texaco : 160T/D	Petcoke/残渣油	Cogen	35MW	1996	商用運転中
Shell Pernis (Netherlands)	Shell : 1650T/D (3基)	減圧残渣	Cogen/H <sub>2</sub>	127MW	1997	商用運転中
ISAB (Italy)	Texaco : 3498T/D (2基)	残渣油	Power/H <sub>2</sub>	562MW	1999	1999年7月にガス化開始
SARAS (Italy)	Texaco : 4156T/D (3基)	残渣油	Cogen/H <sub>2</sub>	551MW	2000	2000年4月にガス化開始
Api (Italy)	Texaco : 1370T/D (2基)	残渣油	Power	250MW	2000	2000年7月にガス化炉100%負荷運転達成
Delaware (USA)	Texaco : 2535T/D (2基)	Petcoke	Power	240MW	2000	Repowering 2000年7月にガス化開始
EDF (France)	Texaco	Sludge	Power	400MW	2003	
日石三菱(日本)	Texaco	残渣油	Power	350mW	2003	
PIEMSA (Spain)	Texaco : 4680T/D (2基)	残渣油	Power/H <sub>2</sub>	935MW	2004	
IOCL (India)	Shell	Petcoke	Power/H <sub>2</sub>	180MW	2004	
Agip (Italy)	Shell	残渣油	Power	-	-	

技術を採用するにあたっては、乾式の脱じん、脱硫設備を導入するなど、高効率な発電プラントの実現が不可欠である。

## 6. おわりに

有限な資源である化石燃料を有効に活用することは、人類にとって避けられない課題である。現在おもに使用している原油、天然ガス等は、21世紀中頃には需要と供給のバランスが厳しくなることが予想されている。今後、現在ほとんど利用されていない超重質油を積極的に導入していくことは、資源の枯渇という実状から考えても必須のことであり、また、これらの燃料を使用していく上で、プラント効率、環境適合性の向上が必要となる。これらの要求を満たした超重質油ガス化IGCCの近い将来での実現が必要不可欠であり、当研究所では、多種の燃料のガス化試験を実施し、実用化の際に設計、運用の支援に用いることが可能な各種ガス化性能データの取得を行うとともに、確度の高い数値解析技術の開発を今後とも続けていく。

## 参考文献

(1) 滝真人、石村雅士、芦沢正美、伊藤茂男、荒

木剛夫、太田一広、田地正憲、「超重質油ガス化コンバインド発電技術の開発研究 - ガス化・ガス精製特性の解明と実機実現可能性の検討 - 」、火力原子力発電、51(7)、(2000)、p. 866-872

(2) (社)重質油ガス化委員会、「重質油のガス化」、丸善、(1973)

(3) 芦沢正美、木戸口和浩、原三郎、大高円、渡邊裕章、犬丸淳、佐藤幹夫、「新種液体燃料ガス化研究炉の開発 - ガス化炉の設計・運転ノウハウの確立に向けて - 」、電中研報告 W00003、(2000)

(4) 原三郎、木戸口和浩、芦沢正美、犬丸淳、「新種液体燃料ガス化研究炉による超重質油ガス化特性の解明 - 炉内でのガス化反応特性に関する検討 - 」、電中研報告 W00015、(2001)

(5) 渡邊裕章、大高円、原三郎、犬丸淳、芦沢正美、梶谷史朗、木戸口和浩、「超重質油ガス化炉数値解析技術の開発 - 天然超重質油エマルジョン燃料を対象とした解析手法の検討 - 」、電中研報告 W00013、(2001)



# お わ り に

理事 浜松 照秀



近代的なエネルギー利用は16世紀半ば英国を救った石炭に端を発する。爾来膨大な化石燃料需要を起し、資源争奪の歴史に加えて地球温暖化問題という人類全体でないと背負えない「新しい十字架」を出現させた。京都会議(1997年)で人類共通の十字架であることを認識した意義は大きい。将来の削減目標や方策の議論の段階で経済活動基盤そのものを争う図式に変わりつつある。

この問題が炭素量の少ない燃料種にシフトするといったイージーな対応で済むほどわが国のエネルギー事情に余裕はない。今日のエネルギー専門家は、エネルギーの

ためにヒステリックに戦禍をくぐった経験を、自らの努力に反映していくことが重要と考える。

今後数十年の時代の困難に解を見出すために、原子力・再生可能エネルギー、天然ガス、石炭により、安価でバランスのとれた強靱なセキュリティ確保に向けた、Breakthroughが重要である。技術オリジナルは経済のセキュリティに不可欠である。石炭IGCCを、オリジナルを軽視しがちな第三者の評論の材料にならないように、必要な技術として「使える」ものに仕立てるエンジニアの使命感に委ねたい。

一つの発電技術は一人の人間の理解を超える巨大な技術体系である。したがってIGCC技術開発の進展に伴って専門家(集団)から専門家(集団)へ技術移転に特段の配慮が重要である。取得したノウハウ・成果を受け取る身になって渡す努力と、満点であろうはずもない成果報告を受け取って「使える」技術にすることが、エンジニアにとって独創の旗手となる道と考える。

本レビューは、IGCC技術の礎としてこれまでの成果をなんとか系統的にまとめたもので、大方の叱正をいただきながら、技術の実証・確立に役立てていただけたら望外の喜びである。

## 引用文献・資料等

### 第1章

- (1) 「21世紀に向けた石炭火力発電技術の展開 - 21世紀に向けた発電技術懇談会・火力部会 - 中間報告」、通商産業省資源エネルギー庁公益事業部発電課編、(1996)
- (2) 浜松、「第4回石炭利用国際会議 - 石炭発電の将来展望と環境対策」予稿集、NEDO、CCUJ、2001年1月、pp. 3-17
- (3) 火力原子力発電創立50周年記念誌、(社)火力原子力発電技術協会、(2000) pp. 288-294
- (4) 例えば、犬丸ほか5名「2T/D加圧二段噴流床石炭ガス化炉特性 - 運転研究成果および代表的炭種の試験結果 - 」、電中研報告 W88019、(1988)
- (5) 例えば、芦澤ほか5名「高灰溶融点炭の高性能ガス化技術の開発 - 高効率運転のためのフラックス添加率、混炭比率決定手法の検討 - 」、電中研報告 W93025、(1994)
- (6) 荒木、花井、「200t/日石炭ガス化発電パイロットプラントでの研究成果」、日本エネルギー学会誌、第75巻第9号、(1996) pp. 839-850

### 第3章

- (1) 梶谷史朗、原三郎、犬丸淳、松田裕光、進藤学、「石炭チャーのガス化反応速度解析 - 第3報 二酸化炭素によるガス化反応における炭種の影響 - 」、電中研研究報告 W00020、(2001)
- (2) 市川和芳、渡邊裕章、大高円、犬丸淳、「石炭ガス化炉内灰付着・成長現象の予測手法の開発 - 灰付着モデルを導入した数値解析による2T/日ガス化炉内灰付着性予測 - 」、電中研研究報告W00008、(2001)
- (3) B. E. Launder and D. B. Spalding, *Comp. Meth. in Appl. Mech. Eng.*, vol. 3, (1972), p. 269
- (4) R. Clift, J. R. Grace and M. E. Weber, "Bubbles, Drops and Particles"; Academic Press, (1987)
- (5) F. C. Lockwood and N. G. Shah, "A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures"; 18th Symp. Int. on Combust., (1981), pp. 1405-1414
- (6) W. Polifke, K. Dobbeling, D. Sattelmayer, G. Nicol and P. C. Malte, "A NO<sub>x</sub> prediction scheme for lean-premixed gas turbine combustion based on detailed chemical kinetics"; *J. Eng. Gas Turbines and Power*, vol. 118, (1996), pp. 765-772.

- (7) W. P. Jones and R. P. Lindstedt, "Global reaction schemes for hydrocarbon combustion"; *Combust. Flame*, vol. 73, (1998), pp. 233-249
- (8) C. K. Westbrook and F. L. Dryer, "Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames"; *Combust. Sci. Tech.*, vol. 27, 1981, pp. 31-41
- (9) P. K. Gururajan, P. K. Agarawal and J. B. Agnew, "Mathematical modeling of fluidized bed coal gasifiers"; *Trans. IChemE*, vol. 70, (1992), pp. 211-238
- (10) 渡邊裕章、大高円、犬丸淳、石炭ガス化炉数値解析手法の開発 - 2T/日炉におけるガス化性能評価 - 、電中研研究報告W99015、(2000)
- (11) 大高円、渡邊裕章、犬丸淳、石炭ガス化炉数値解析手法の開発 - 200T/日炉を用いた炉内灰挙動に対する予測評価手法 - 、電中研研究報告W99038、(2000)
- (12) S. K. Bhatia and D. D. Perlmutter, "A Random Pore Model for Fluid-Solid Reactions: I. Isothermal, Kinetic Control"; *AIChE J.*, vol. 26, (1980), pp. 379-385
- (13) 梶谷ほか4名、「石炭チャーのガス化反応速度解析 - 第2報 ガス化反応モデルの検討と高温高圧下におけるガス化反応速度 - 」、電中研報告W99018、(2000)
- (14) 梶谷ほか1名、「石炭ガス化反応に及ぼす初期熱分解条件の影響 - 高温・高圧における熱分解チャーの物理的性状とそのガス化反応速度の検討 - 」、電中研報告W97020、(1998)
- (15) 荒木・ほか1名、200T/日石炭ガス化発電パイロットプラントでの研究成果、日エネ誌、75-9 (1996) 839-850
- (16) 沖ほか3名、「石炭ガス化炉で生成する灰粒子の付着特性予測手法の開発」、電中研報告W99039、(2000)
- (17) 寺前、山下、「講座『黒もの分析の今日と明日(Ⅰ)』」、日本エネルギー学会誌、(1997) Vol.76、No.10、pp. 988-994
- (18) Godon Couch、「Understanding slagging and fouling during pf combustion」、IEA Coal research、(1994)
- (19) 芦沢ほか3名、石炭ガス化炉におけるスラギング抑制方策の検討 - ガス化炉壁面温度と運転条件がスラギング特性に及ぼす影響 - 、電力中央研究所研究報告 W92037、(1993)
- (20) 芦沢ほか7名、石炭ガス化炉におけるスラギング挙動の解明 - 2T/日炉による灰付着層の伝熱的検討 - 、電力中央研究所研究報告W94031、(1995)
- (21) L.E.Barta, Prediction of fly ash size and chemical

- composition distributions: the random coalescence model. In : Proceedings of the 24th symposium on combustion, Sydney, NSW, Australia, 5-10 Jun., ( 1992 )
- (22) J. M. Beer et al., From coal mineral matter properties to fly ash deposition tendencies : A modeling route. In: Proceedings of the Engineering Foundation Conference on inorganic transformations and ash deposition during combustion, Palm Coast, Florida, USA, 10-15 Mar., ( 1991 ) 71-94
- (23) P. M. Walsh et al., Deposition of bituminous coal ash on an isolated heat exchanger tube : Effect of coal properties on deposit growth., Prog. Energy Combust. Sci., Vol. 16., ( 1990 ) 327-346
- (24) 芦沢ほか4名、石炭ガス化スラグ排出に関する運転指標の確立 - 超高温域における灰融点測定技術の開発と灰の溶融特性 - 、電力中央研究所研究報告 W91012、( 1991 )
- (25) 市川ほか3名、ガス化炉内における石炭灰付着・成長機構の解明 - 灰溶融性と付着性の相関性検討 - 、電力中央研究所研究報告W98013、( 1999 )
- (26) 市川ほか1名、ガス化炉内における石炭灰付着・成長機構の解明 - 第2報 粒子毎温度、粒径、速度同時計測による灰付着挙動の解析 - 、電力中央研究所研究報告W99017、( 2000 )
- (7) Durst, M. : Proc. Second EPRI Workshop on Filtration of Dust from Coal-Derived Reducing and Combustion Gases at High Temperature, No. 11, EPRI ( 1992 )
- (8) Dennis, R.A., T.E. Lippert, G.J. Bruck, M.A. Alvin and M.J. Mudd: Proc. Tenth Particulate Control Symposium and Fifth Int. Conf. on Electrostatic Precipitation, ( 1993 ) , p. 1-14
- (9) Newby, R. A. and R. L. Bannister : MPS, 13, 9, ( 1993 ) , p. 59
- (10) 伊藤茂男、田中隆、河村敏、「石炭ガス化用セラミックフィルタの圧力損失に対するチャー回収サイクロンとダスト性状の影響」、粉体工学会誌、33(7)、( 1996 ) p. 547-552
- (11) Ito, S., T. Tanaka and S. Kawamura, " Changes in pressure loss and face velocity of ceramic candle filters caused by reverse cleaning in hot coal gas filtration, " J. Powder Technology, 100, ( 1998 ) , p. 32-40
- (12) Ito, S., " Pulse Jet Cleaning and Internal Flow in a Large Ceramic Tube Filter, " Gas Cleaning at High Temperature, Blackie A&P ( 1993 ) , p. 266-279
- (13) 伊藤茂男、牧野尚夫、田中隆、河村敏、「ポーラスセラミックフィルタの耐久性評価手法に関する考察」、エアロゾル研究、5(2)、( 1990 ) p. 136-141
- (14) 伊藤茂男、河村敏、小村重徳、「石炭ガス化チャーの集塵におけるセラミックフィルタの燃焼再生特性」、化学工学論文集、21(2)、( 1995 ) p. 265-271
- (15) 白井裕三、布川信、中山稔夫、「固定床脱硫システムの評価 - 実証プラントシステムとその運転特性予測」、電中研報告W96004 ( 1997 )
- (16) 白井裕三、中山稔夫、小林誠、「石炭ガス化複合発電用固定床脱硫システムの評価 - 脱硫/再生繰り返し試験による運転条件の検討」、電中研報告W92035 ( 1993 )
- (17) 「環境に優しい石炭利用技術」、電中研レビューNo. 30 ( 1994 )
- (18) 中山稔夫、荒木成光、高島英章、高橋昭浩、「石炭ガス化複合発電用乾式ガスクリーンアップ技術開発 - 乾式ガスクリーンアップ3方式の開発状況 - 」、日本エネルギー学会誌、75、(5)、( 1996 )
- (19) 小林誠、中山稔夫、白井裕三、「石炭ガス化溶融炭酸塩型燃料電池(MCFC)発電用精密脱硫剤の開発 - 第1報乾式脱硫剤の高性能化の方策」、電中研報告W92005 ( 1992 )
- (20) 小林誠、中山稔夫、白井裕三、「石炭ガス化溶融炭酸塩型燃料電池 ( MCFC ) 発電用高性能脱硫剤の開発 - 第2報高性能脱硫剤候補物質の基本脱硫特性」、電中研報告

#### 第4章

- (1) 渡辺正敏、牧野尚夫、伊藤茂男、白井裕三、田中隆、末弘貢、河村敏、「石炭ガス化複合発電用乾式クリーンアップ技術開発」、火力原子力発電、39(4)、( 1988 ) p. 365-376
- (2) 中山稔夫、松田裕光、伊藤茂男、白井裕三、小林誠、田中隆、「石炭ガス化複合発電用固定床クリーンアップシステムの開発」、火力原子力発電、43(2)、( 1992 ) p. 54-60
- (3) Semler, C. E. and W. T. Bakker: Proc. Int. Conf. On Fluidized Bed Combustion, ASME, ( 1993 ) , p. 1259-1264
- (4) Valentino, K. R., N. R. Brown, J. J. Brown, jr. and W. T. Bakker: Proc. 1993 Int. Conf. on Fluidized Bed Combustion, ASME, ( 1993 ) , p. 1375-1383
- (5) Sawyer, J., J. J. Brown and N. R. Brown : Proc. Eleventh Annual Gasification and Gas Stream Cleanup Systems Contractors Review Meeting, DOE/METC-91/6123, vol. 2, DE92001102, ( 1992 ) , p. 429-437
- (6) 伊藤茂男、山口哲正、「セラミックフィルタの開発課題と性能評価法」、日本エネルギー学会誌、77(3)、( 1998 ) p. 193-199

W92026 (1993)

- (21) 小林誠、布川信、白井裕三、渡辺正敏、「石炭ガス化溶融炭酸塩型燃料電池 (MCFC) 発電用高性能脱硫剤の開発 第3報 高活性亜鉛フェライト適用脱硫剤の基本脱硫性能」、電中研報告W93002 (1993)
- (22) 白井裕三、小林誠、布川信、渡辺正敏、「石炭ガス化溶融炭酸塩型燃料電池発電用高性能脱硫剤の開発 - 鉄・亜鉛系脱硫剤の試作とその脱硫性能」、電中研報告W94006 (1995)
- (23) 白井裕三、小林誠、布川信、「鉄・亜鉛系酸化物脱硫剤の高温下におけるH<sub>2</sub>S除去特性」、日本エネルギー学会誌、77、(11)、(1998)、p. 1100-1110
- (24) 白井裕三、小林誠、布川信、「石炭ガス用高性能乾式脱硫剤の開発 - 亜鉛フェライト脱硫剤の最適再生条件の検討 -」、電中研報告W98018 (1999)
- (25) Kobayashi, M., H. Shirai, and M. Nunokawa, "Investigation on Desulfurization Performance and Pore Structure of Sorbents Containing Zinc Ferrite", Energy & Fuels, 11, (1997), p. 887-896
- (26) 布川信、小林誠、白井裕三、中山稔夫、「石炭ガス用ハロゲン化物乾式吸収剤に関する調査」、電中研調査報告W97001 (1997)
- (27) 布川信、小林誠、白井裕三、「石炭ガス精製用ハロゲン化物吸収剤の開発 - 炭酸ナトリウムの塩化水素反応特性とナトリウム系吸収剤の試作 -」、電中研研究報告W98003 (1997)
- (28) Nunokawa, M., M. Kobayashi, and H. Shirai, "Hydrogen Chloride Removal from Hot Coal-Derived Gas with Sodium-Based Sorbents," Gas Cleaning at High Temperatures : 4th International Symposium & Exhibition, (1999), p. 685-695
- (29) 布川信、小林誠、白井裕三、「石炭ガス精製用ハロゲン化物吸収剤の開発 - 吸収剤の再生あるいは再利用に関する検討 -」、電中研研究報告W00032 (2001)

## 第5章

- (1) 例えば、中田ほか6名、「石炭ガス化用ガスタービン燃焼器の開発 - 第7報、二室保炎強化型燃焼器の性能評価 -」、電中研報告W90011、(1990)
- (2) 中田ほか3名、「石炭ガス化複合発電用1500級ガスタービン燃焼器の開発 - 第1報、燃焼器設計と燃焼試験結果 -」、電中研報告W91048、(1992)
- (3) 二宮ほか3名、「石炭ガス化複合発電用1500級ガスター

ビン燃焼器の開発 - 第2報、水流モデル可視化手法による燃焼器構造の検討 -」、電中研報告W92040、(1993)

- (4) 中田ほか3名、「石炭ガス化複合発電用1500級ガスタービン燃焼器の開発 - 第3報、1500級燃焼器の試作とその性能評価」、電中研報告W92041、(1993)
- (5) 二宮ほか2名、「石炭ガス化複合発電用1500級ガスタービン燃焼器の開発 - 第4報、1500級燃焼器の低NO<sub>x</sub>燃焼技術 -」、電中研報告W93032、(1994)
- (6) 二宮ほか2名、「石炭ガス化複合発電用1500級ガスタービン燃焼器の開発 - 第5報、1500級燃焼器の設計と高圧燃焼特性 -」、電中研報告W94027、(1995)
- (7) 長谷川ほか4名、「石炭ガス化複合発電用1500級ガスタービン燃焼器の開発 - 第6報、ガスタービン運転条件における基本性能評価 -」、電中研報告W95017、(1996)
- (8) 長谷川ほか2名、「石炭ガス化中カロリー燃料の基礎燃焼特性」、電中研報告W94020、(1995)
- (9) 長谷川ほか5名、「石炭ガス化中カロリー燃料用ガスタービン燃焼技術の開発 - 基礎燃焼特性と燃料ノズル包囲型室素直接噴射燃焼器の基本性能 -」、電中研報告W99026、(2000)
- (10) 長谷川ほか5名、「石炭ガス化中カロリー燃料用ガスタービン低NO<sub>x</sub>燃焼器の開発」、電中研報告W00011、(2001)
- (11) 山内ほか2名、「低カロリーガス燃焼に関する研究 (その5)」、電中研報告W88028、平成元年5月

## 第6章

- (1) 幸田、高橋、三巻「発電システム熱効率解析汎用プログラムの開発」当研究所報告W99034、(2000)
- (2) R. Fernandez-Prini, R. B.Dooley, "Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam", the International Association for the Properties Water and Steam, (1997)
- (3) N.Matsunaga, T. Hoshino and A.Nagashima "Critical Assessment of Thermodynamic Properties Data of Combustion Gasses for Calculating the Performance of Gas Turbine" 1983 Tokyo International Gas Turbine Congress

## 第7章

- (1) 市川和芳、犬丸淳、芦沢正美、原三郎、三巻利夫、中野毅弘、遠藤孝夫、岡村隆吉、「石炭ガス化スラグのコンクリート材料への適用性評価 - その1 コンクリート混和材としての検討 -」、電力中央研究所研究報告 W92047、



- (1993)
- (2) 金津努、山本武志、中野毅弘、高橋毅、三巻利夫、犬丸淳、芦沢正美、原三郎、市川和芳、白坂優、岡村隆吉、井上和重、遠藤孝夫「石炭ガス化スラグのセメント・コンクリート分野への適用性評価」、電力中央研究所総合報告U30、(1996)
  - (3) T. Tanosaki, M. Matsumoto, M. Nanbu, K. Inoue, T. Kanazu, T. Yamamoto, K. Ichikawa, "Utilization of IGC Slag to Cement-Concrete Material", International Conference on Ash Behavior Control in Energy Conversion, Systems, 化学工学会/NEDO, 横浜、(1998)
  - (4) 渡辺、「電力用大規模燃料電池技術」、化学工学 Vol. 65、No. 10、(2001) p. 534
  - (5) 渡辺ら、「電気事業におけるMCFC導入の可能性」、電力中央研究所報告依頼報告W98514、(1999)
  - (6) 吉葉ほか、「石炭ガス化MCFC発電システムの検討 - 実発電限界を反映したシステム構成とその性能解析 - 」、電力中央研究所報告研究報告W00037、(2001)
  - (7) 奥田ら、「石炭ガス化模擬ガスによるMCFC発電性能」、日本機械学会 第7回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集、(2000) p. 162
  - (8) 河瀬ら、「MCFC特性に対するH<sub>2</sub>Sの影響Ⅰ」、電気化学会電気化学および工業物理化学Vol. 66、No. 4、(1998) p. 449
  - (9) 河瀬ら、「MCFC特性に対するH<sub>2</sub>Sの影響Ⅱ」、電気化学会電気化学および工業物理化学Vol. 67、No. 4、(1999) p. 449
  - (10) 平賀ら、「MCFCに対する塩化水素の影響」、燃料電池開発情報センター 第4回燃料電池シンポジウム B2-4、(1997) p. 325
  - (11) 河瀬ほか、「MCFC特性に対するNO<sub>x</sub>の影響」、電気化学会電気化学および工業物理化学 Vol. 68、No. 8、(2000) p. 645
  - (12) 岡島ら、「溶融炭酸塩形燃料電池への不純物ガス(硫酸化物)の影響」、燃料電池開発情報センター 第7回燃料電池シンポジウム B1-10、(2000) p. 228
  - (13) 森ら、「固体電解質型燃料電池の研究開発 - システムの研究 - 」平成7～9年度、NEDO委託業務成果報告書、(1995～1997)



## 既刊「電中研レビュー」ご案内

- NO. 32 「人間と技術の調和に向けて ヒューマンファクター研究 」1995. 3
- NO. 33 「放射線ホルミシス 研究の意義と取り組み 」1996. 3
- NO. 34 「ガスタービン研究 高効率発電の主役を担う 」1997. 1
- NO. 35 「地下の探査・可視化技術」1997. 5
- NO. 36 「送電線コンパクト化技術の開発 高分子材料の適用 」1998. 3
- NO. 37 「乾式リサイクル技術・金属燃料FBRの実現に向けて」2000. 1
- NO. 38 「大気拡散予測手法」2000. 3
- NO. 39 「新時代に向けた電力システム技術」2000. 6
- NO. 40 「原子燃料サイクルバックエンドの確立に向けて」2000. 11
- NO. 41 「需要家と電気事業のエネルギーをトータルで考える  
需要家の特性解明と省エネ技術 」2000. 11
- NO. 42 「原子力発電所の人工島式海上立地」2001. 1
- NO. 43 「酸性雨の総合評価」2001. 2

## 編集後記

電中研レビュー第44号「石炭ガス化複合発電の実現に向けて」をお届け致します。

今回ご紹介致します「石炭ガス化複合発電（IGCC）技術」は、資源の乏しい我が国において、エネルギーセキュリティと地球温暖化の観点から、官民が一体となり、豊富な埋蔵量を有する石炭資源を、環境に優しく高効率に活用できる火力発電の発電方式として20年以上の歳月を経て、研究開発を行って参りました貴重な成果を紹介するものであります。

我が国での事業用IGCCとして開発が行われている噴流床方式石炭ガス化複合発電技術の開発経緯を振り返りますと、本文にも記載のとおり、1980年12月に中電協技術開発推進会議の小委員会としての石炭ガス化専門部会が設置されて以来、火力新技術研究会、火力新技術調査委員会での各種検討を経て、大容量化、炭種適合性、環境保全性、負荷応答性等に優れた噴流床方式の石炭ガス化複合発電技術を官民一体で開発することとなり、これにより本技術開発が本格的にスタートしたと言えます。

このような流れの中で、当研究所も中電協からの依頼を受け、石炭ガス化複合発電技術調査及びパイロットプラントの概念設計を実施すると共に、その後、NEDOからの委託を受けて、パイロットプラント基本計画策定のためのフィージビリティ・スタディ（FS）を実施しました。そこでの結果は、NEDOによりパイロットプラントの基本計画として取り纏められ、国の各種委員会に諮問され、パイロットプラン計画は実行に移される事となりました。

その後、1986年には10電力会社と電中研から成る石炭ガス

化複合発電技術研究組合が設立され、勿来200トン/日のパイロットプラント計画が開始され、1991年度より運転が開始され、スラッキングトラブルに苦しんだものの、最終的には789時間の連続運転時間を達成し、1996年度に成功裡に終了しました。本成果は、実証機計画に関する検討に用いられ、実証機FSがNEDOより東京電力に委託されました。実施には、東京電力を中心とした10電力会社及び当研究所による共同研究契約を締結し、各法人の協力の下、FSが実施されました。その結果を踏まえ、1999年度より、電力共同研究として実証機計画がスタートし、2000年度までは東京電力が、2001年度6月より、日本の9電力会社と電源開発の共同出資で設立された㈱クリーンコールパワー研究所が実施主体となり、計画を推進中であります。

このように、官民一体となって実施して参りましたIGCCの技術開発。同技術による発電が普及すると、LNGに対する価格牽制力としての効果や、将来は燃料電池との組み合わせによる50%以上の送電端熱効率も可能とされており、現在想定されている石炭火力新技術の中では最も高い効率を狙える、我が国にとって保有すべき重要な技術であります。

今回のレビューでは、これまでの研究開発の経緯や、そこから生まれた成果を詳しく紹介し、日本が世界に誇れる21世紀の国産技術であるIGCC技術について、少しでも皆様のご理解の一助となれば幸いです。

最後になりましたが、本レビューで巻頭言をお引受け頂きました㈱クリーンコールパワー研究所取締役社長大西博康様には、心より御礼申し上げます。



---

## 電中研レビュー NO.44

平成13年10月31日

編集兼発行・財団法人 電力中央研究所 広報部  
☎100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 [大手町ビル7階]  
☎(03)3201-6601(代表)  
E-mail : [www-pc-ml@criepi.denken.or.jp](mailto:www-pc-ml@criepi.denken.or.jp)  
<http://criepi.denken.or.jp/index-j.html>  
印刷・株式会社 電友社

---

本部 / 経済社会研究所 ☎100-8126 東京都千代田区大手町1-6-1 ☎(03)3201-6601 我孫子研究所 ☎270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646 ☎(0471)32-1181  
柏江研究所 / 情報研究所 / 原子力情報センター 横須賀研究所 ☎240-0196 神奈川県横須賀市長坂2-6-1 ☎(0468)56-2121  
ヒューマンファクター研究センター / 低線量放射線研究センター / 事務センター 赤城試験センター ☎371-0241 群馬県勢多郡宮城村苗ヶ島2567 ☎(027)283-2721  
☎201-8511 東京都柏江市岩戸北2-11-1 ☎(03)3480-2111 塩原実験場 ☎329-2801 栃木県那須郡塩原町関谷1033 ☎(0287)35-2048

---