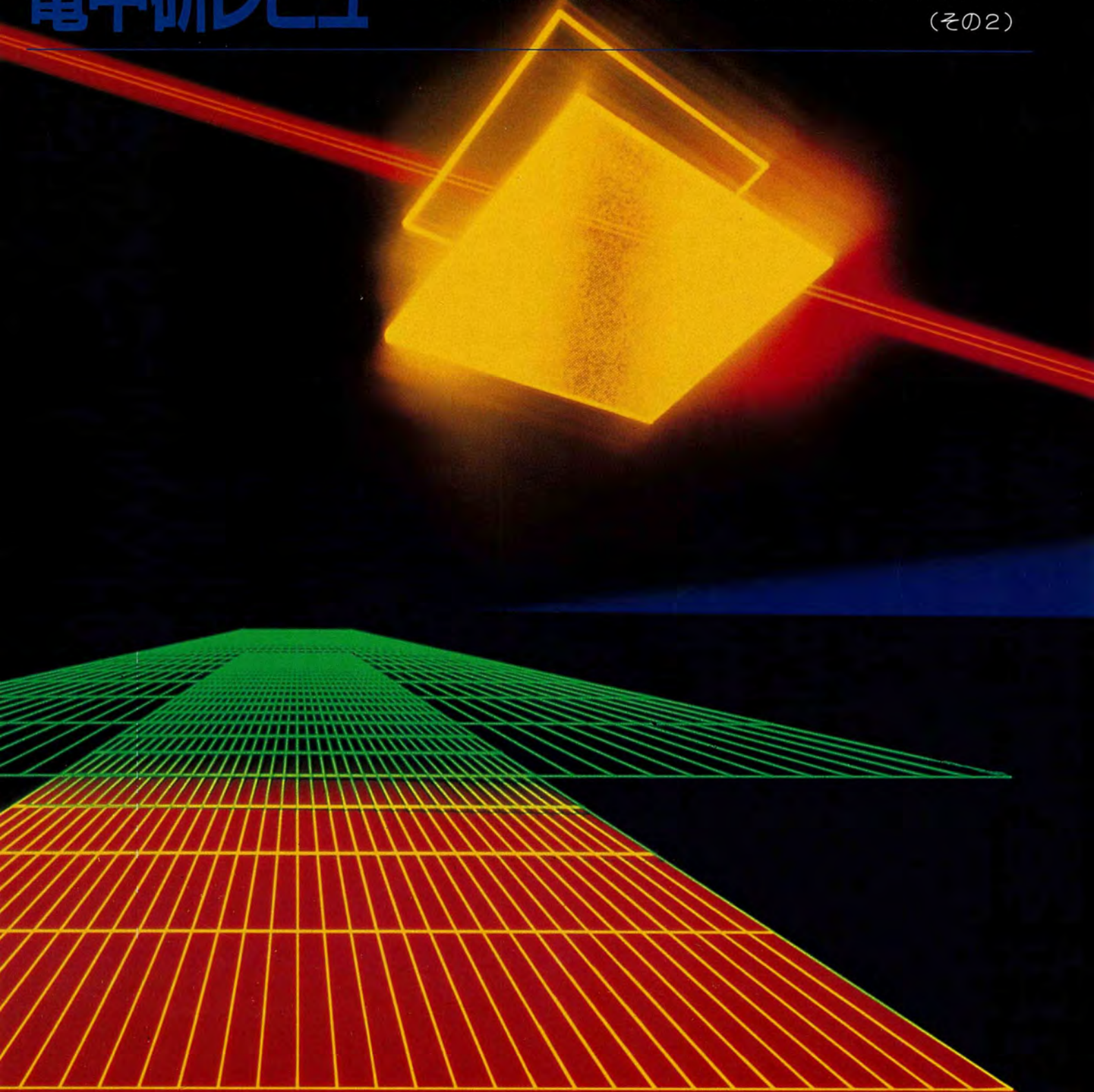


ISM 0914-7896

DENCHUKEN REVIEW

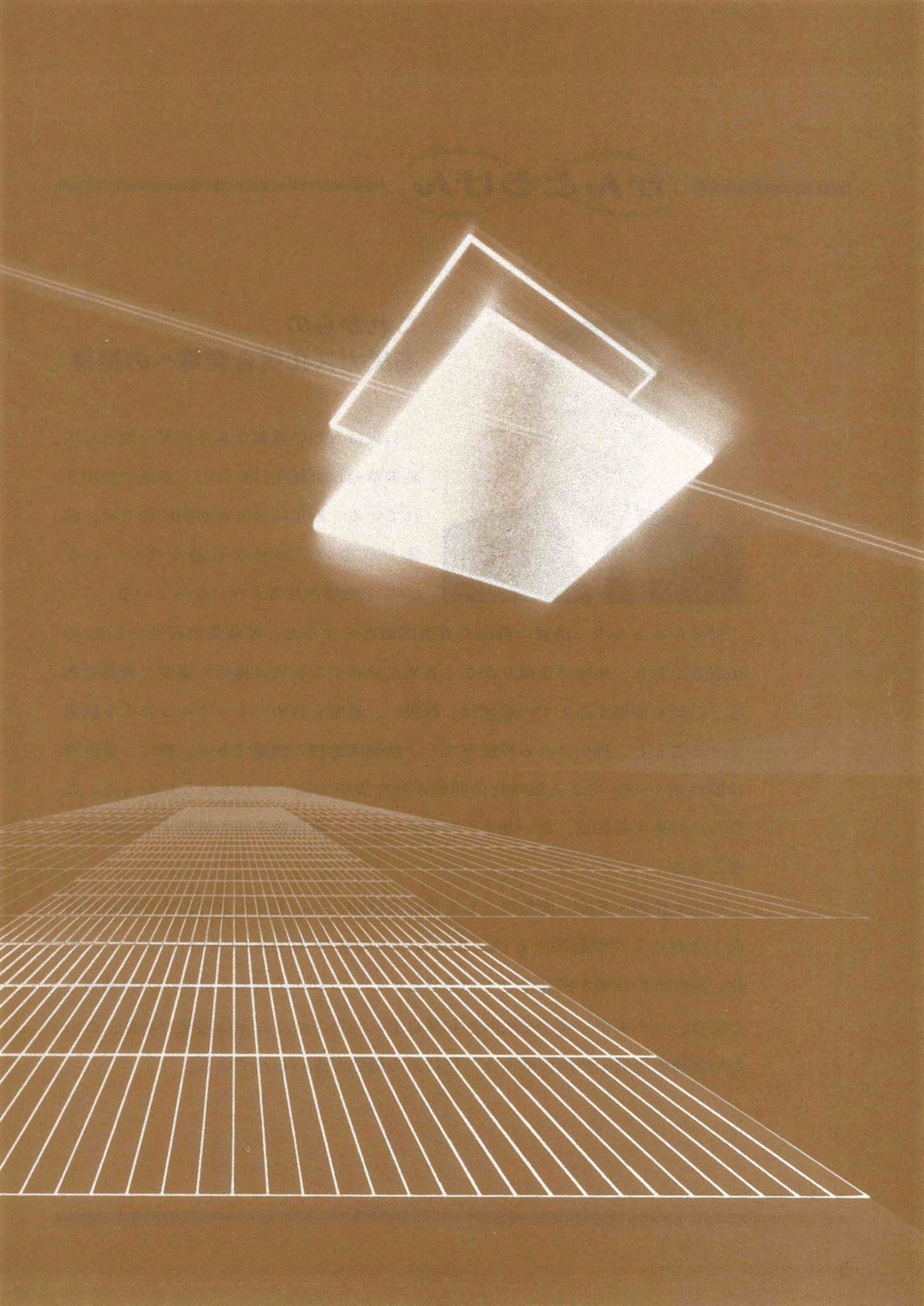
電中研レビュー 石炭ガス化複合発電の実現に向けて
(その2)



NO.23 1989.11

電中研レビュー第23号 ● 目 次
石炭ガス化複合発電の実現に向けて (その2)
編集担当●横須賀研究所 エネルギー部長 石川 浩
横須賀研究所 エネルギー部 調査役 北見 恒雄

巻頭言	石炭ガス化複合発電技術研究組合 理事長 藤井 祐三	2
はじめに	電力中央研究所 常務理事 尾出 和也	5
第1章 石炭ガス化複合発電技術開発の現状		
1-1	●環境と調和した石炭の効率的利用の推進	9
1-2	●石炭ガス化複合発電の概要と内外の開発動向	12
1-3	●当所における研究開発の概要	18
第2章 噴流床石炭ガス化複合発電技術の開発		
2-1	●加圧2段噴流床石炭ガス化技術	23
2-2	●固定床乾式クリーンアップ技術	30
2-3	●低カロリーガス用ガスタービン燃焼器技術	38
2-4	●石炭ガス化複合発電プラントシステム	43
第3章 200T/日パイロットプラント計画		
3-1	●研究開発の概要と当所の取り組み状況	53
3-2	●200T/日パイロットプラント開発の現状	58
第4章 クールウォータープログラム — 石炭ガス化複合発電実証試験計画 —		
4-1	●クールウォータープログラムの計画概要	67
4-2	●クールウォータープログラムの主要な成果	70
第5章 実証プラントに向けての高性能技術の開発		
5-1	●石炭ガス化技術	75
5-2	●乾式クリーンアップ技術	79
5-3	●ガスタービン燃焼器技術	81
5-4	●セラミックスのガスタービン燃焼器・静翼への適用	83
おわりに	電力中央研究所 理事 尾崎 勇造	88
関連する主な研究報告書等		89





これからの 石炭ガス化複合発電への期待

石炭は人類の重要なエネルギー源として、産業革命以来長年に亘り広く多量に使用されている。近年に至りわが国に於ては、液体で取扱いが容易な石油やクリーンなLNGが使用されるようになっている。

世界のエネルギー消費の動向や資源問題からすると、埋蔵量が石油やLNGの10倍近く有り、地域的な偏りがなく各地に分布する石炭は極めて重要な資源である。石炭を使用する上での課題は、取扱い、運搬を含めたトータルコストを低減させることと、排出される燃焼ガスと、燃焼灰処理の問題である。特に、最近では酸性雨やCO₂による温暖化の問題が地球規模で論ぜられるようになった。これらに対処するには、高い効率で石炭を使用し、排出物を極力抑制することが肝要となる。

石炭を使用する際、微粉炭として用いるほか、ハンドリング性および環境性の向上をねらった微粉炭と石油、または水との混合（COM、CWM）、メタノール化、液化等の技術が開発されている。しかし、これらの技術を従来火力に適用した場合、エネルギー効率を現状の40%以上に向上させることは困難であり、このため各種の流動床燃焼技術やガス化技術の研究が進められている。

これらの中で石炭ガス化技術は、高効率ガスタービンと組み合わせが可能であり、エネルギー効率の向上により、排出物の低減に効果を発揮するものと期待されている。また、排出ガスは従来方式の石炭火力より更にクリーンにでき、取り扱いくかった燃焼灰を、ガラス状の処理しやすい状態に変えることができるメリットがあり、石炭ガス化技術は21世紀の有力な発電技術の一つと考えられている。

このため世界各国において、石炭ガス化複合発電技術の開発が進められているが、東京電力と電力中央研究所では、メーカー2社と共同で米国クールウォータープログラムに参加して実証試験を行ってきた。このプロジェクトは本年6月に終了したが、環境適合性の実証や、運転・保守管理技術の取得など多くの成果を上げ、今後の発電技術として有望との見通しを確かめることができた。

一方わが国においても、国のプロジェクトとして、石炭ガス化複合発電技術研究組合が200T/日パイロットプラントを建設中である。ここでは新しい空気吹きによるガス化方式、乾式ガス精製技術、1,300℃級高温ガスタービンなどの技術により、システム効率の向上やコストダウンをはかっている。当面、このパイロットプラントによる研究の成功に向けて全力を傾注すると共に、将来の実用化のためには、パイロットプラントの成果を基にさらに設計の合理化、コストダウン技術の確立が重要になってくるものとする。

ここに21世紀に向けて、石炭ガス化技術が開花することを期待するものである。

石炭ガス化複合発電技術研究組合 理事長

藤井 祐三

電中研石炭ガス化複合発電研究の歩み (1973~1989年)

西暦	電力中央研究所の状況	国内外の状況
1973	重点研究課題に「新・省エネルギー」設定	通商産業省資源エネルギー庁発足
1974		サンシャイン計画、加圧2段流動床石炭ガス化炉(10ata、5T/日、石炭技術研究所)研究開始
1977	高効率複合発電プラントの研究を開始	同上、加圧2段流動床石炭ガス化炉(20ata、40T/日、石炭技術研究所)研究開始
1978		高効率ガスタービン技術研究組合発足(電中研他メーカー13社)
1979	高効率複合発電特別研究室を設置 高効率ガスタービン技術研究組合から超合金、セラミックス、トータルシステム等の要素受託研究を開始	中央電力協議会にガス化技術検討会設置(1980年度に石炭ガス化専門部会と改称)
1980	エネルギー技術開発本部設置(新・省エネルギー技術開発部設置) 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」を作成	新エネルギー総合開発機構と新エネルギー財団が発足
1981	2段噴流床石炭ガス化炉の共同研究を開始(三菱重工業)	
1982	中央電力協議会依頼、石炭ガス化複合発電に関するフィージビリティ・スタディ報告書を作成	米国クールウォータープログラム(1,000T/日噴流床石炭ガス化複合発電)に東京電力、メーカー2社と共同参加
1983	2T/日2段噴流床石炭ガス化基礎実験装置を設置し、実証研究を開始 セラミックガスタービン静翼の共同研究を開始(日立製作所)	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、当所受託)
1984	乾式クリーンアップ、低カロリーガス燃焼器の基礎研究を開始 高カロリーガス用大型セラミック燃焼器を開発	1000T/日噴流床石炭ガス化複合発電プラントの実証運転開始(クールウォーター)
1985	乾式クリーンアップの共同研究を開始(三菱重工業) 乾式集じん・脱硫基礎実験装置を設置し、実証運転を開始、 第4回エネルギー未来技術フォーラムで「電気事業のための石炭新利用技術」発表	産業技術審議会、石炭ガス化複合発電技術評価小委員会を設置 ファインセラミックス利用技術懇談会を設置(中央電力協議会依頼)
1986	石炭ガス化複合発電プロジェクトチーム設置、横須賀研にエネルギー部を設置 石炭ガス化複合発電技術研究組合から2T/日ガス化炉による要素研究を受託し研究を開始	石炭ガス化複合発電技術研究組合の発足と参加(9電力、電源開発、電中研) 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
1987	石炭ガス化用ガスタービン要素実験設備を設置 ガスタービン燃焼器の共同研究開始(東芝) 石炭ガス化複合発電技術研究組合より固定床クリーンアップ特性の受託研究開始	熔融炭酸塩型燃料電池技術研究組合の発足と参加
1988	ガスタービン燃焼器の共同研究を開始(三菱重工業) 第7回エネルギー未来技術フォーラムで「電気事業の先端技術への挑戦-21世紀に向けて-」発表	300kW級セラミックガスタービンの研究開始(NEDO) ファインセラミックス利用技術研究会設置(9電力、電発、中電協、電中研) 新エネルギー総合開発機構が新エネルギー・産業技術総合開発機構と改称
1989	セラミック燃焼器・静翼実圧試験を開始 ガスタービン燃焼器のNO _x 転換率40%を達成 技術研究組合よりガスタービン燃焼器(3社)事前評価試験を受託し研究を開始	クールウォーター実証試験終了 200T/日パイロットプラントで、大型機器搬入の開始

はじめに

常務理事 尾出 和也



近年、地球規模の環境問題がクローズアップされ、特に地球の温暖化対策として、化石燃料からのCO₂排出の大幅な削減が先進諸国に求められている。

一方、石油の需給は現在、比較的安定しているように見えるが、開発途上国の工業化の進展や世界景気の動向などからみて、中長期的には石油価格の上昇は避けられない趨勢にあるという見方が多い。

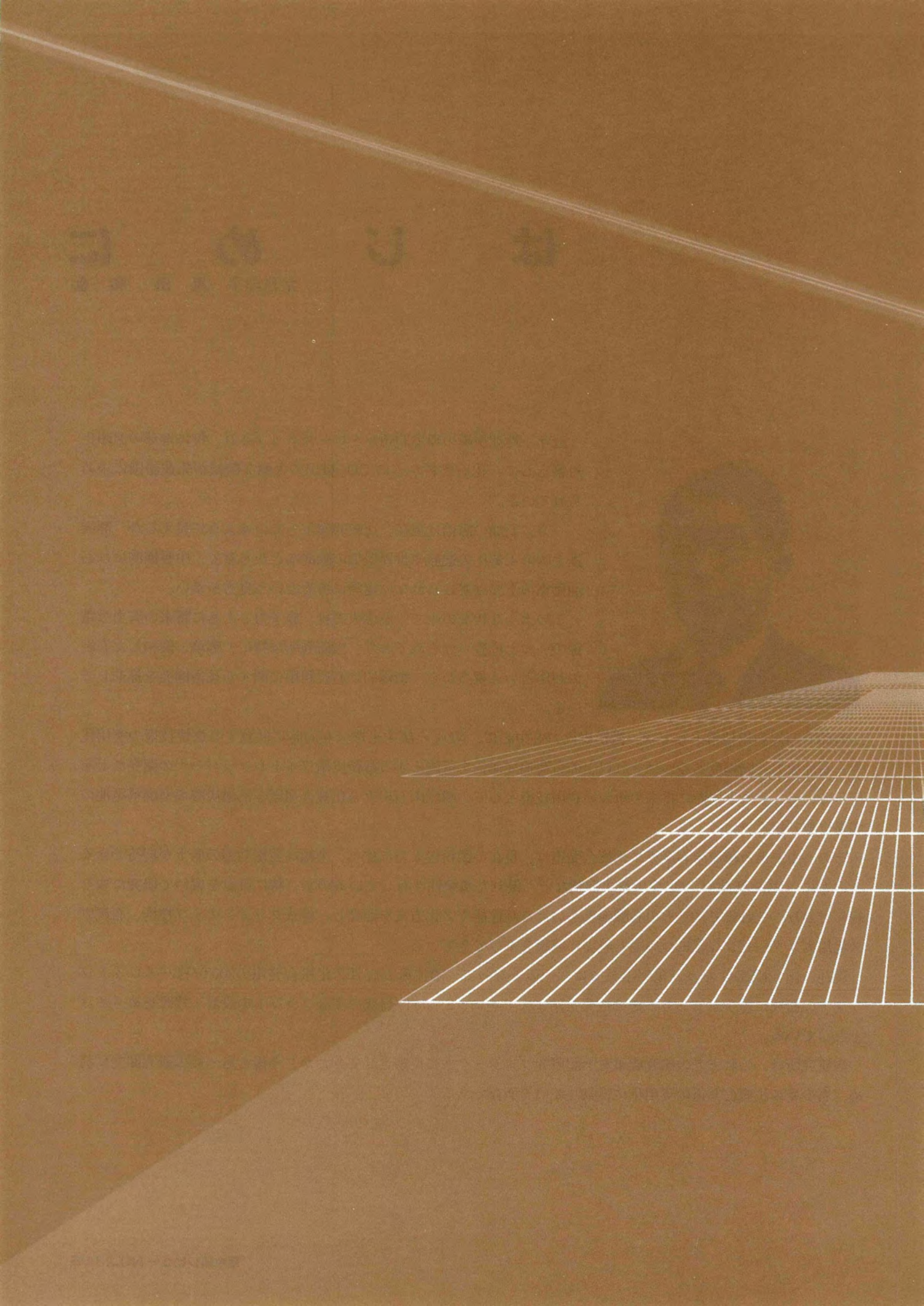
このような状況の中で、石炭火力は、原子力とともに将来の有力な電源の一つと位置づけられており、当研究所は特に、環境と調和した石炭の利用という視点から、積極的に石炭利用に関する技術開発を推進している。

当面の石炭利用技術としては、微粉炭火力を中心に、NO_xと灰中未燃分を同時に低減する燃焼技術の実用化や、石油火力と同程度あるいはそれ以上の負荷追従運転を可能とする微粉炭用ワイドレンジバーナの開発などを行っている。それと同時に将来の新しい利用技術として、噴流床石炭ガス化複合発電と熔融炭酸塩型燃料電池の開発に取り組んでいる。

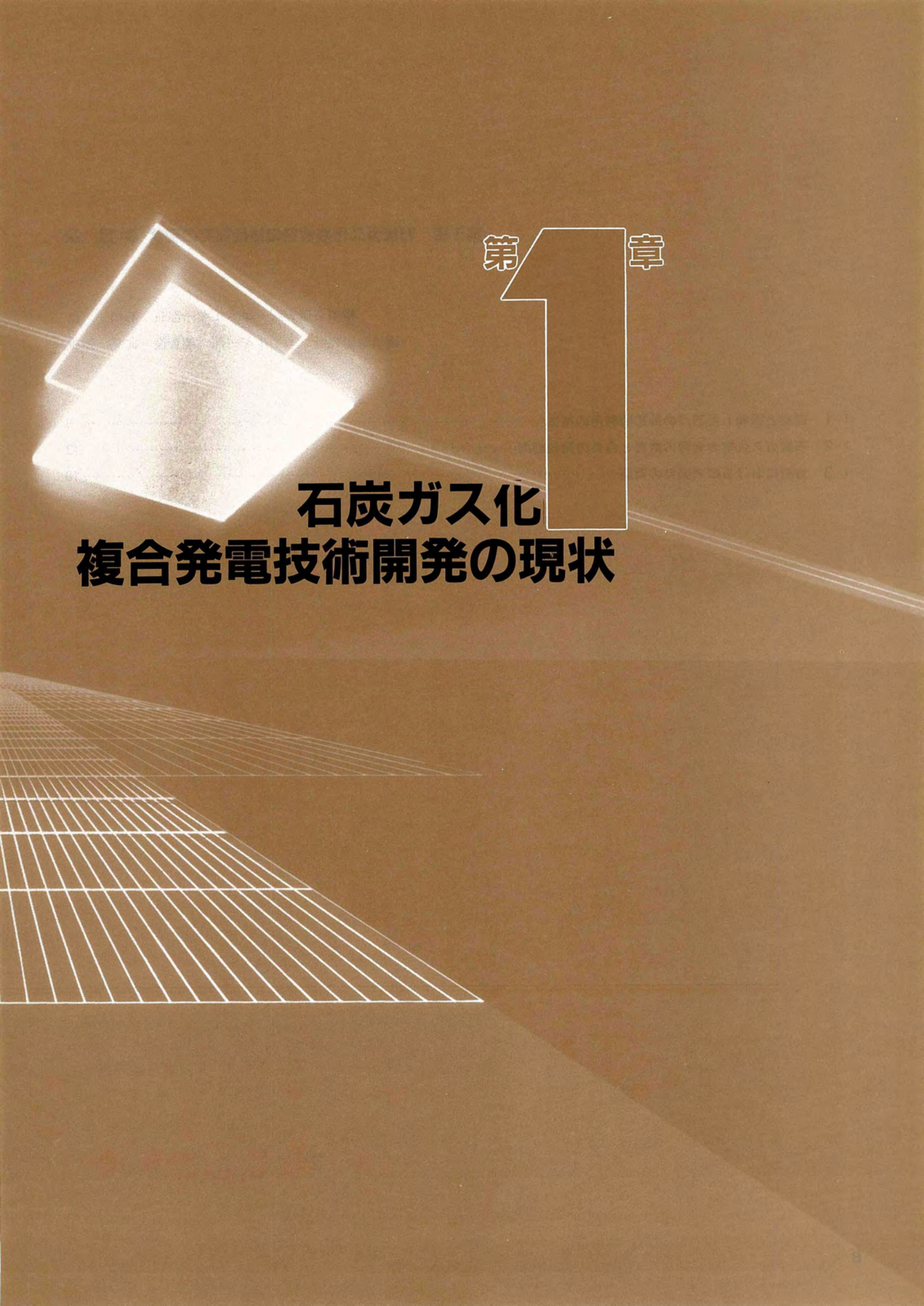
その一つである噴流床石炭ガス化複合発電は、現在の微粉炭火力に比べ、大幅な発電効率の向上が期待できるとともに、NO_x低減やCO₂発生量の抑制など、優れた環境性を有しているので、特に重点を置いて研究に取り組んでおり、これまでに、その心臓部ともいえる高性能ガス化方式を開発し、乾式クリーンアップ技術、石炭ガス化用ガスタービンなどについても着実に成果を挙げてきている。

現在、国、NEDO および電気事業では、一体となって、噴流床石炭ガス化複合発電の200T/日パイロットプラントの研究に着手しており、その成果を踏まえて更に、2,000T/日級の実証プラントの設計・建設をめざすこととしている。

当研究所は、これまでの研究成果を上記研究プロジェクトに反映させてきたが、今後とも一層の研究開発に努め、石炭ガス化複合発電の実用化に貢献していく所存である。



第1章



**石炭ガス化
複合発電技術開発の現状**

第1章 石炭ガス化複合発電技術開発の現状 ● 目 次

横須賀研究所 エネルギー部長 石川 浩
横須賀研究所 エネルギー部 調査役 北見 恒雄

1-1 環境と調和した石炭の効率的利用の推進.....	9
1-2 石炭ガス化複合発電の概要と内外の開発動向.....	12
1-3 当所における研究開発の概要.....	18

1-1 環境と調和した石炭の効率的利用の推進

1-1-1 石炭利用拡大の必要性

ここ数年、かつての石油危機を忘れたかのように、世界の石油需要は軟調傾向にあり、原油価格も1982年の1バレル34ドルを最高に、最近16ドル前後と大幅に下落している。

しかし、長期的にみると、開発途上国の工業化や世界景気の回復による需要の増大傾向、非 OPEC 諸国の原油生産の頭打ちなどが考えられ、将来のエネルギー価格は徐々に上昇していくものと想定される。

このようなエネルギー情勢を考慮すると、エネルギー資源に恵まれず、その大半を海外に依存している我が国では、経済性に優れ、安定供給が可能なエネルギー源として石炭に注目する必要がある。石炭は世界的にみて最も豊富な資源であり、産炭国の多くが環太平洋域に位置していること、ならびに石炭価格は今後とも長期に亘って低位安定の傾向が予測されていることも我が国にとって有利な点である。

1-1-2 石炭と地球規模の環境問題

近年、二酸化炭素（CO₂）濃度の上昇などによる地球温暖化問題が世界的にクローズアップされてきた。1989年9月には我が国で初めての本格的な国際会議である地球環境保全に関する東京会議が3日間に亘って開催され、地球温暖化および開発途上国における開発と環境保全を政策選択のテーマに活発な議論が展開された。

二酸化炭素や硫黄化合物、窒素酸化物などは化石燃料の燃焼により排出されることから、石炭等の化石燃料利用に対する風当たりも強まり、最近では極論としてその使用量を抑

制すべき等の意見まで始めている。

いずれにしても、地球温暖化などの地球環境問題への適切な対応は、今後我が国が石炭利用を進めていく上で、最も重要な課題の一つと言える。

1-1-3 電気事業の石炭火力への期待と方向

地球環境問題への課題が再認識された現状でも石炭は LNG、石油など、他の化石燃料に比較して供給の長期安定性に優れるエネルギー源として期待を担っている。

我が国の電気事業においても、エネルギー供給における石炭への期待から、今後ますます進むと見られるエネルギー利用の電力シフトへの対処の仕方として、石炭火力発電を石油代替電源の一つとし拡充することとしている。

現在、石炭火力の全発電設備容量は約1,100万 kW で、全体の約7%であるが、1989年4月に策定された「平成元年度の電力施設計画の概要」によれば、今後着実に需要が増加し、2000年では約2,500万 kW になり、全体の約12%に増大すると想定している（図1-1-1）。

今後の電源開発を進めるためには、電力の安定供給、発電コストの抑制、環境対策の高度化、系統運用の総合効率化などの基本条件をもとに、最も効率的かつバランスのとれた電源構成（ベストミックス）を目指す必要がある。

石炭火力についても、2000年頃までは技術的な観点から微粉炭火力発電の一層の高度化が、さらに将来的には、環境性、運用性、経済性に優れる石炭ガス化複合発電や加圧流動床燃焼複合発電、石炭ガス化燃料電池複合発電の実用化が期待されている。地球規模環境問題を考慮すると、これら新しい発電方式の研究開発を加速化させることが重要

である。

1-1-4 石炭の効率的利用技術に対する課題と研究状況

石炭の効率的利用とその拡大を図るためには、LNG や石油と異なり、固体でかさばることから、取扱いが煩雑で、燃焼後の灰分も多いなどの石炭のもつ短所を克服して、クリーンに、かつ経済的に利用する技術開発が不可欠である。

電気事業に係る石炭新利用技術の主な研究課題は表1-1-1に示す通りであり、当所では国のエネルギー政策や電気事業のニーズを踏まえ、内外の研究機関の研究状況などを総合勘案して、次の研究に重点をおき、積極的に推進している。

1. 当面の微粉炭火力発電について

- (1) 環境設備の高性能化とコスト低減を目指す新燃焼技術
- (2) 低負荷運用を可能とする新燃焼方式
- (3) 石炭灰の処理・処分

2. 次世代の石炭利用発電について

- (1) 石炭ガス化複合発電技術
- (2) 石炭ガス化燃料電池複合発電技術

微粉炭火力の利用拡大策としては海外炭の発電用炭としての環境適性事前評価、排煙中微量物質の環境影響評価などに引き続き、現在は炉内脱硝による環境設備の高性能化とコスト低減を目指して、窒素酸化物と灰中の未燃分を同時に低減する新燃焼法について研究開発を進めている。また、石油火力と同等の負荷運用を可能にするための微粉炭の濃度・粒度の自動監視装置の開発やこれを用いた負荷調

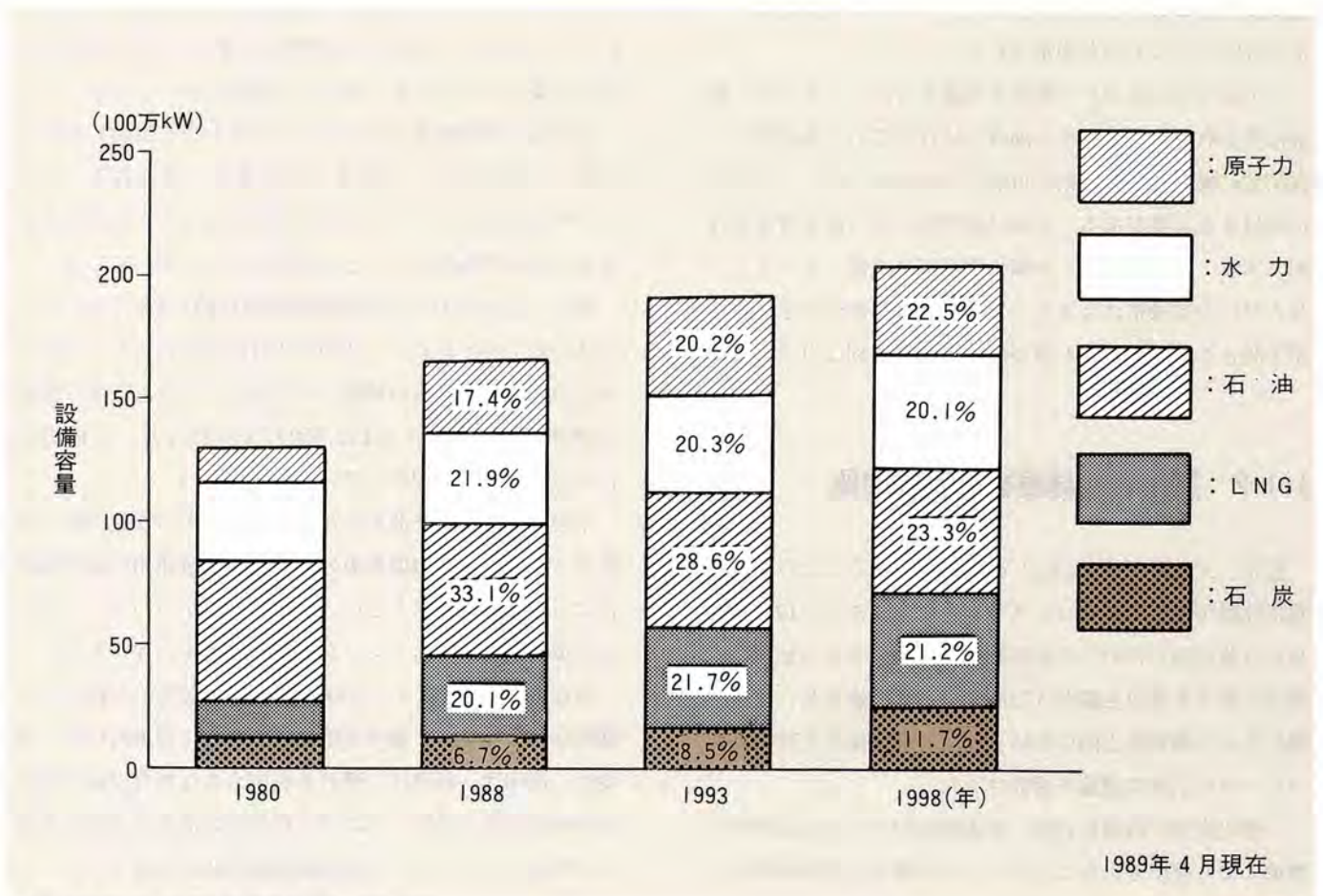


図1-1-1 我が国の電源構成の推移

整範囲の広い新型バーナの開発を進めている。さらに、石炭灰の埋立処分、セメント材料や肥料への有効利用などについても研究を進め、従来よりも一層環境性と経済性を追求した微粉炭火力の実現に向けて技術開発に取り組んでいる。

一方、将来を見通すと、熱効率を飛躍的に向上させ、環境性と経済性の双方を同時に達成する発電方式として、石炭ガス化複合発電と石炭ガス化燃料電池複合発電が有望であり、石炭の効率的利用の本命として重点的に研究開発を進めている。これらの発電方式は、すでに世界的効率レベルにある我が国の微粉炭火力に比べて、さらに、7～13ポイント程度の熱効率向上が見込めるので、CO₂ 放出量は15～30%減少できることが期待される。

石炭ガス化複合発電は石炭をガス化して、ガスタービン

と蒸気タービンで発電する方式である。一方、燃料電池複合発電は石炭ガスを効率良く熔融炭酸塩型燃料電池で電気に変え、さらにその排熱を利用して複合発電を行う方式である。ここでは石炭ガス化複合発電に関する研究について紹介する。

なお、今回の石炭ガス化複合発電の特集にあたり、通商産業省資源エネルギー庁、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）および石炭ガス化複合発電技術研究組合の御好意により、200T/日パイロットプランに係る技術情報を提供戴いたことを付記し、ここに感謝致します。また、石炭ガス化複合発電に関する電中研レビューは、No.4、No.15として既に刊行していますので、ご参照戴ければ辛いに存じます。

表1-1-1 電気事業のための石炭利用技術開発

当面の技術開発課題	
環境対策技術の高度化	硫黄酸化物対策 窒素酸化物対策 ばいじん対策 CO ₂ 低減対策
石炭灰の処理・処分	石炭灰対策
石炭流体化	COM [*] 、CWM ^{**} 技術
次世代の技術開発課題	
微粉炭火力の高性能化	超々臨界圧
石炭ガス化技術	噴流床石炭ガス化複合発電 流動床石炭ガス化複合発電
燃料電池発電技術	熔融炭酸塩型燃料電池複合発電
将来の技術開発課題	
直接発電	MHD（複合）発電

*：Coal Oil Mixture **：Coal Water Mixture

1-2 石炭ガス化複合発電の概要と内外の開発動向

1-2-1 石炭ガス化複合発電の概要

石炭ガス化複合発電のプラント構成を図1-2-1に示す。

まず、石炭ガス化剤（空気または酸素）をガス化炉に投入して石炭をガス化する。次に、ガス化炉で発生した粗生成ガスをクリーンアップ装置で集じん・脱硫し、クリーンな石炭ガス化生成ガスにして、ガスタービン燃焼器に導き、

燃焼させてガスタービンを駆動し、発電する。同時に、ガスタービンの排ガスを排熱回収ボイラーに導き、そこで蒸気を発生させ、その蒸気で蒸気タービンを駆動させ、発電する。

このように、石炭ガス化複合発電は、ガスタービンサイクルおよび蒸気タービンサイクルの2つのサイクルで構成されており、各々の単一サイクルでは到達できない高い熱

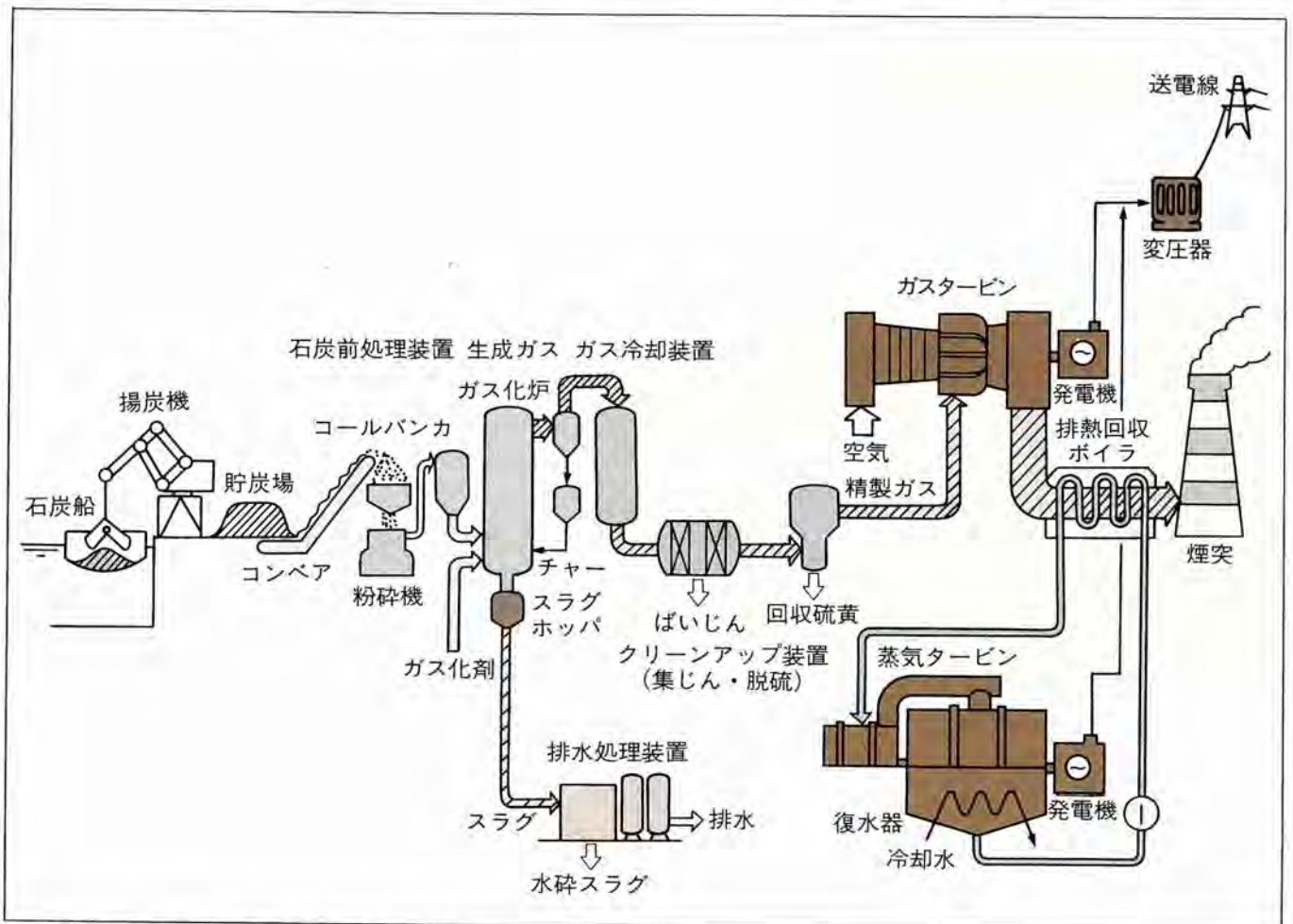


図1-2-1 石炭ガス化複合発電プラント構成図

効率を得ることができる。また、蒸気タービン復水器における放熱量も低減されるため、温排水量が減少するメリットもある。

現在、最新鋭の超臨界圧石炭火力の送電端熱効率は約37%であり、超々臨界圧プラントが開発されても約40%が限界と考えられている。これに対して噴流床式石炭ガス化複合発電では、1,300℃級ガスタービン、乾式クリーンアップ装置が開発されると約44%、1,500℃級ガスタービンでは約49%という高い熱効率が得られることが当所の試算で予測されている。

石炭ガス化複合発電プラントは石炭ガス化炉、クリーンアップ装置、ガスタービンなど、構成要素が多く複雑で、各要素の運転性能や耐用寿命などから見た最適条件は、必ずしもトータルシステムの最適条件とは一致しない場合が多い。従って、各要素の特性を活かした、システム全体として調和のとれた石炭ガス化複合発電プラントを構成することが重要である。

1-2-2 内外の開発動向

内外の主要な石炭ガス化炉の開発状況を表1-2-1に示す。

石炭ガス化炉の形式は、大別して固定床方式、流動床方式、噴流床方式がある。固定床は、1980年代中葉に開発研究が一段落し、流動床も我が国北海道夕張市における40T/日規模の開発研究を最後に、1987年に一段落している状況である。噴流床方式に関して、テキサコ炉等は既に原料生産部門で商用化されているが、発電用としては実用化研究を目指したクールウォーター計画が所期の成果を得て、1989年6月に終了した。また、最近ではダウケミカル社によるダウ炉が1989年4月より運転されており、オランダKEMAの計画では、シェル炉による250MWプラントが1994年運転開始の予定である。さらに、我が国では、石炭ガス化複合発電プラントの開発を目指した高性能噴流床石炭ガス化炉（200T/日パイロットプラント）の開発が官民を挙げて推進されている。

当所も、開発の基本計画策定に参画するとともに、国の計画にあわせ鋭意研究開発を実施している。なお、200T/

日パイロットプラントで採用されているガス化炉の基本的な形式は、当所と三菱重工業の共同研究を反映したものとなっている。

一方、石炭ガス化複合発電に係わる技術開発の中心は、ガス化炉から徐々に、クリーンアップ、高温ガスタービンへと移ってきている。

内外の主要なクリーンアップ技術開発の現状を表1-2-2に示す。

クリーンアップ技術に関しては、現在湿式技術が実用化されているが、湿式方式を石炭ガス化複合発電プラントに採用した場合、乾式方式に比べて約2～3%程度の効率低下があり、省エネルギーの追求やCO₂排出量を低減するためにも、乾式技術の開発が望まれている。

乾式クリーンアップ技術は、開発途上の技術であり、脱硫技術と脱塵技術に分けられる。現在では乾式脱硫技術は、流動床と固定床によるものが検討されている。流動床技術については、我が国では、石炭技術研究所の夕張試験所においてサンシャイン計画で30T/日規模相当のものが検討され、一応の成果を得たことから、それを由来における噴流床200T/日パイロットプラント計画に採用されることになった。しかし、表1-2-2に示すように、現在では、セラミック技術等の急速な進展にともなって、米国DOEモルガンタウンエネルギー技術センター（METC）、電中研—三菱重工をはじめ、固定床による脱硫技術の検討が盛んになっており、今後の技術動向を注視する必要がある。

また、将来技術として移動床方式の技術検討も24T/日規模のものがGE社により開始されており、当所の2T/日ガス化炉における基礎的検討結果のスケールアップしたものと同形であり、その成果が注目される。

乾式脱塵技術に関しては、電気集塵器方式、移動床グラニューラフィルタ方式、セラミックフィルタ方式など並行して検討が進められているが（表1-2-3）、セラミック技術の進展からセラミックフィルタ方式が今後大いに注目される。

高温ガスタービン技術に関しては、高温耐熱合金を用いた天然ガス燃ガスタービンで1,150℃級のものが現在、商用機として稼働中であるが、さらに1,200℃、1,300℃級の開発導入が予定されている。また、さらに高温、高効率化を目指したセラミック利用のガスタービン開発も盛んであ

表1-2-2 内外の乾式クリナーアップ技術の開発状況(脱硫)

開発機関	主スポンサー (設置場所)	形式 容量	温度 圧力(ata)	用途	開発年度			
					設計	製作	運転	
石川島播磨 石炭技研 電 発	通産省 (夕張市・勿来)	流動床 5T/日	400~500℃ 20~26	ガス化発電 (流動床ガス化) (噴流床ガス化)	1974~1976	1976~1978	1978~1980	1980~1982
		30T/日			1980~1982	1982~1984	1984~1986	
		200T/日			1986~1988	1988~1990	1990~1992	
電中研 三菱重工	電中研 三菱重工 (横須賀市)	固定床 2T/日	300~500℃ 20	ガス化発電 (噴流床ガス化)	1982~1983	1983~1985	1985~1990	
		固定床 24T/日	540~650℃ 21	ガス化発電 (固定床ガス化)	1979~1980	1980~1982	1982~1990	
KRW Energy Systems	DOE (アメリカ)	固定床+炉内 15T/日	540~650℃ 16	ガス化発電 (流動床ガス化)	1983~1984	1984~1986	1986~1987	
		固定床+炉内 550T/日	540~650℃ 19	ガス化発電 (流動床ガス化)	1986~1987	1987~1989	1989~1990	
GE Environmental Systems GE Corporate Research and Development	DOE (アメリカ)	移動床 24T/日	570~620℃ 21	ガス化発電 (固定床ガス化)	1985~1986	1986~1988	1988~1992	
		固定床+炉内 15T/日	570~760℃ 25	ガス化発電 (噴流床ガス化)	1987~1988	1988~1990	1990~1992	
Texaco	DOE (アメリカ)	固定床+炉内 15T/日	570~760℃ 25	ガス化発電 (噴流床ガス化)	1987~1988	1988~1990	1990~1992	

表1-2-3 内外の乾式クリーンアップ技術の開発状況 (脱塵)

開発機関	主スポンサー (設置場所)	方式 容量	温度 圧力	用途	開発年度			
					'75	'80	'85	'90
Cottrell Environmental Systems	— (アメリカ)	電気集じん器 約2000m ³ N/h	800~900℃ 5~10atm	加圧流動床 (PFBC)	■	■	■	■
Denver Research Institute	— (アメリカ)	電気集じん器 200~350m ³ N/h	700~900℃ 6.4~10atm	メタノール燃焼	■	■	■	■
Univ. Essen	— (西ドイツ)	電気集じん器 1,300m ³ N/h	600~1200℃ 1~20atm	—	■	■	■	■
川崎重工	— (日本)	グラニューローベッド 6,000m ³ N/h	150℃ 21atm	高炉ガス	■	■	■	■
川崎重工 石炭技術 電 発	通産省 (夕張市)	グラニューローベッド (5t/d) 150m ³ N/h	300~400℃ 8 atm	ガス化発電 (流動床ガス化)	■	■	■	■
川崎重工 石炭技術 電 発	通産省 (夕張市)	グラニューローベッド (40t/d) 4,500m ³ N/h	460℃ 21atm	ガス化発電 (流動床ガス化)	■	■	■	■
電中研—三菱重工	電中研—三菱重工 (横須賀市)	ポーラスフィルタ (2 t/d) 400m ³ N/h	300~400℃ 18~20atm	ガス化発電 (噴流床ガス化)	■	■	■	■
旭硝子 石炭技術 電 発	通産省 (夕張市)	ポーラスフィルタ 450m ³ N/h	450℃ 19atm	ガス化発電 (流動床ガス化)	■	■	■	■
Westinghouse	METC (DOE) (アメリカ)	ポーラスフィルタ 28~142m ³ N/h	540~870℃ 10~17atm	ガス化発電 (流動床ガス化)	■	■	■	■
Westinghouse	METC (DOE) (アメリカ)	ポーラスフィルタ 3,000~6,000m ³ N/h	800℃ 7~10atm	加圧流動床 (PFBC)	■	■	■	■
電気事業	通産省 (勿来)	グラニューローベッド 200t/d	400~500℃ 20atm	ガス化発電 (噴流床ガス化)	■	■	■	■

 設計
  製作
  運転
  予定

る (表1-2-4)。

セラミックガスタービンは、比較的小型のもの開発として、自動車用、コジェネレーションシステム用が検討されている。電気事業用ものは、当所と東京電力において、

燃焼器、静翼等へのセラミック利用研究が実施されている。このようにセラミックガスタービンの開発はこれからであり、今後の進展が期待される。 ●

表1-2-4 発電用セラミックガスタービンの開発状況

名称	開発主体 (共同研究)	開発対象	容量 タービン 入口温度	用途	開発状況
発電用セラミック ガスタービンの 開発	電研 日立	燃焼器 静翼	20MW級 1,300℃ 1,500℃	石炭ガス化 複合発電用 ガスタービン	要素技術 (84-90) 組立試験 (90-94) 大型化、高温化 (90-96)
石炭ガス化高温ガ スタービン用のセ ラミック開発と適 用研究	東京電力 東芝 三菱 日立	燃焼器 静翼 動翼	20MW級 1,300℃	石炭ガス化 複合発電用 ガスタービン	基礎 (85) 要素技術 (88-89) 組立試験 (90-91)
300KW級 セラミックガス タービンの研究 開発 (通産省)	IH 日立 日川 京セラ 住友精密 ヤマハ 新潟鉄工 日本鋼管	燃焼器 静翼 動翼 熱交換器 その他	300kW 1,350℃	コジェネ用 ガスタービン	セラミック材 (90-95) 要素技術 (90-95) 設計試験運転 (90-95)

1-3 当所における研究開発の概要

1-3-1 研究の背景

当所は国や電気事業における将来のエネルギー政策やニーズを踏まえ、早期に石炭ガス化複合発電の技術開発の重要性を認識し、我が国に適した方式の検討等に着手し、国、電力会社、メーカーとともに将来の実用化に向けて組織的に研究を推進している。

我が国に適した省エネルギー性、経済性の高い噴流床石炭ガス化複合発電技術を開発するためには、

- ① 石炭ガス化技術
- ② 乾式クリーンアップ技術
- ③ ガスタービン技術
- ④ プラント評価技術

の4課題について技術開発を推進する必要がある。幸いにして、当所はこれら4課題に関する専門分野を保有しており、その研究能力を最大限に発揮することによって、電気事業の総合的な研究機関として、また石炭ガス化複合発電技術研究組合を構成する一員として、この技術開発に挑戦している。

当所における石炭ガス化複合発電技術の研究開発の目標、特徴、設備等を表1-3-1に示す。これまでの火力発電が、高温高圧の蒸気を発生してタービンを駆動するのに対し、石炭ガス化複合発電は、さらに、その上流側で石炭をガス化し、それを燃料としてガスタービン発電を行う点に特徴がある。

また、発電の高効率化を図るため、ガス化したガスを高温加圧の状態、ガス精製する必要がある。さらに、空気吹きガス化を採用することからガスタービン燃料としての石炭ガスは、従来の天然ガス等の約10分の1程度の発熱量となり安定して高温に燃焼させる必要がある。

これらは、電気事業としては、未経験の技術であるため、新たに技術開発する必要がある。以下に当所における主要な研究の概要について紹介する。

1-3-2 噴流床石炭ガス化複合発電プラントシステムの評価

200万kW級実用プラントのシステム構成について、石炭供給方式（ドライかスラリーか）、ガス化剤（空気か酸素か）、クリーンアップ方式（乾式か湿式か）を組み合わせた8方式を選定し、経済性、実用可能性などの面から総合評価を行った。

この結果、熱効率、発電コストなどの点に優れる最適システムは、ガス化炉への石炭供給はドライ方式とし、ガス化剤に空気を使い、生成ガスのクリーンアップは乾式とする組み合わせであることを明らかにした（電中研レビューNo.15参照）。

本研究成果は200T/日パイロットプラントの開発計画策定に反映されている。

1-3-3 加圧2段噴流床石炭ガス化炉の開発

1982年から三菱重工業と共同で1日に2tの石炭をガス化できる実験炉を開発・設置し、研究を進めている。

我が国の発電用として要求されるガス化炉の性能は、高効率化、大容量化、広範囲な炭種適合性、環境保全性、負荷応答性などをすべて満足することが重要であり、これまでの実験炉の成果により、これらの開発目標を達成できる

る見通しを得た。

在来型のガス化炉と大幅に異なる点は、

- (1) 空気ガス化を達成するためにガス化炉を上下2室2段に分割し、灰の溶融化に必要な高温部の維持とガス化反応を充分行わせる中温部の維持を容易にしたこと
- (2) 負荷応答性に優れたスパイラル型水冷壁構造を採用し、高信頼性を確保したこと、およびファインセラミック製スラグタップ構造を開発し、スラグの流動・排出を容易にしたこと
- (3) 石炭供給に流動分配器を採用したドライ・加圧供給方式を考案し、高効率化を達成したこと

である。

この実験炉は1989年8月末現在、累積ガス化時間1,513時間であり、灰溶融点が約1,200～1,600℃までの16炭種についてガス化試験を実施し、ガス化基本性能と炭種拡大化についての貴重な成果を得た。同時に水流モデルおよび3次元流動シミュレーションにより、この実験炉を大型化できる見通しをえた。そして、この実験炉は国の200T/日パイロットプラント計画の原型炉として採用されており、パイロットプラントの設計のためのホットモデルとして活用された。

表1-3-1 当所の石炭ガス化複合発電技術開発の概要

	トータルシステム	ガス化炉	クリーンアップ	ガスタービン
目標	高効率、経済性、環境性、運用性を追求した発電システム	空気吹き加圧2段噴流床ガス化炉の開発	固定床乾式クリーンアップ技術の開発	低カロリーガス燃焼空気抽気型ガスタービンの開発（低カロリー燃焼器の開発）
従来技術との主な相違点	空気吹き・加圧噴流床ガス化炉、乾式クリーンアップ、低カロリーガス燃焼ガスタービンからなる発電システムは世界初である。 酸素吹き・加圧噴流床ガス化炉、湿式クリーンアップ、中カロリーガス燃焼ガスタービンからなるシステムはクールウォーターで実証済みである。	化学プラントでは酸素吹き加圧ガス化炉は実用化されている。空気吹きのものは殆どない。	湿式のもの実用化されているが、乾式ものは、夕張市における30T/日規模が世界最大。 固定床は、当所2T/日規模が最大。	ガスタービンから空気を抽気してガス化炉へガス化剤とするものは世界初。 高カロリー、中カロリー燃焼のものは実用化されている。低カロリー石炭ガス燃料は、夕張で常圧のもの知見がある。
研究設備（研究内容）	・石炭ガス化複合発電動特性解析装置 ・大型計算機（プラントの構成機器を調和させ最適なシステム運用を図るため計算機プログラムを開発体系化している。）	・2T/日石炭ガス化基礎実験装置（ガス化特性の把握、運転信頼性等の確認。）	・2T/日乾式集じん・脱硫基礎実験装置（2T/日ガス化炉のガスを利用できる固定床、移動床等の実験設備。模擬ガスによる実験も可能。）	・ガスタービン要素実験設備 ・セラミックガスタービン要素実験設備（模擬ガスによるT/日規模の常圧・加圧低カロリーガス燃焼実験が可能。低カロリーガスの安定燃焼法の確立。 低NOx化燃焼技術の開発 セラミック燃焼器、静翼の確立。）



200T/日パイロットプラント・実証プラントの開発へ反映

1-3-4 乾式クリーンアップ技術の開発

クリーンアップ装置には湿式と乾式の2方式がある。湿式については、クールウォータプログラム¹の1,000T/日石炭ガス化複合発電実証プラントに組み込まれ、すでに技術がほぼ確立されている。

乾式については、ガス化炉からの生成ガスを400℃程度の高温でクリーンアップするので、石炭ガスの顕熱損失が少なく、湿式に比べてプラント熱効率を高くとれる特徴がある。

また、石炭ガス化複合発電は、将来的には中間負荷用としての機能をも要求されることが想定されるので、負荷変動幅が大きく、かつ負荷応動性に優れることが重要なポイントとなり、これらを満足するクリーンアップ技術の開発を目指す必要がある。

当所は、実験室規模での要素研究成果を踏まえ、1985年11月に三菱重工業と共同で、ガス化炉と同容量ガスが処理できるベンチスケールのプラントを建設し、試験を行っている。

具体的には、2T/日ガス化炉からの実ガスを用いた研究成果、およびこれを用いた各種の乾式クリーンアップ方式を比較評価した結果、固定床方式が最も良好であるとの結論をえた。この方式では、脱硫については、ハチの巣状に作ったセラミック担体の内壁に酸化鉄を含浸させた脱硫剤を用いる方式であり、集じんについては、セラミック筒の壁に微細孔を無数に作り、その孔を通してばいじんを除去するポーラスフィルター方式を採用している。

これらの研究成果をもとに、200T/日パイロットプラント規模での開発を電気事業大として推進する意義があるものとの評価がえられた。

1-3-5 ガスタービン技術の開発

ガスタービン技術については、天然ガス燃100MW級のものが実用化されているが、低カロリーの石炭ガスを燃料とするガスタービンは、未だ実用化されていない。このため低カロリーガスを高温で安定して燃焼させるための新し

い燃焼器の開発が課題である。

当所では1,300℃級の空冷燃焼器を開発するための燃焼技術研究を推進中であり、1986年度に実圧、1/2実寸級の燃焼器、および常圧実寸級燃焼器1缶分が試験できる実験設備を設置し、1987年度以降本格的な研究を実施している。この結果、低カロリーでも充分安定燃焼が可能であり、燃焼器ライナの冷却も問題がないことが明らかとなった。また、NO_x低減法の検討が重要であり、現在NO_x低減化のための研究開発を推進中である。この結果等は、国の200T/日パイロットプラント計画に反映されている。

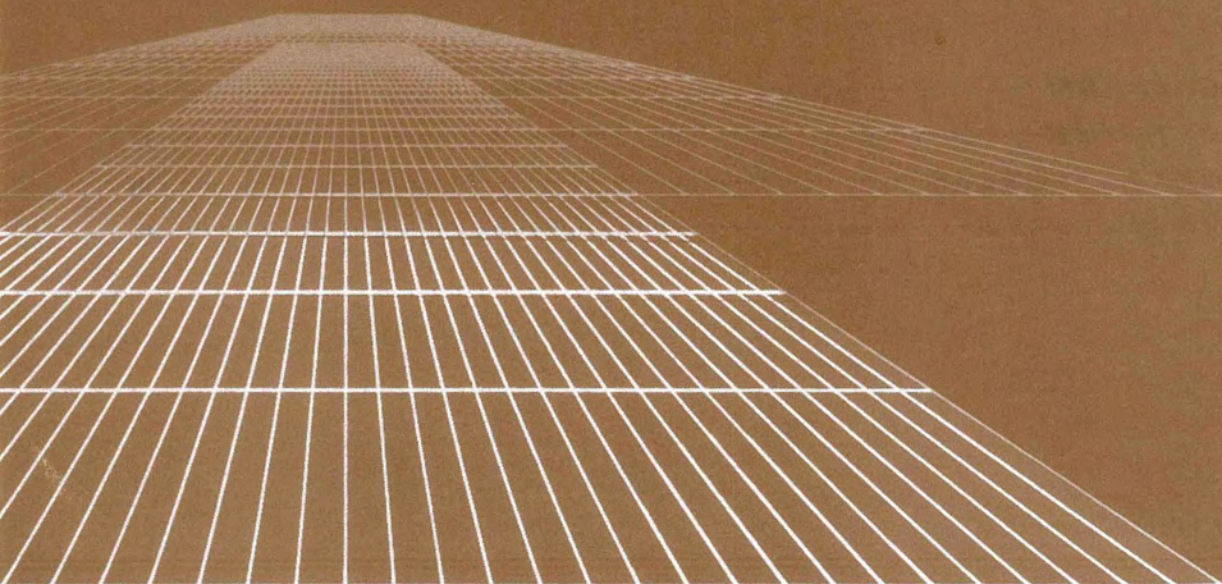
さらに、将来の高温化に備えて、ファインセラミックを利用した燃焼器や静翼の開発研究を実施している。

セラミックス燃焼器については、1,500℃級実証試験を終了し、好結果を得ている。また、セラミック静翼の開発も着々と成果をあげており、日立製作所との共同で2年間の基礎研究の成果を踏まえ、加圧下で翼列試験を行うなど、実用化に向けて着実な研究展開を図っている。

このほか、高温や腐食、浸食に耐える単結晶材などの超合金の実用化評価や、超低NO_x化を指向した接触燃焼技術、翼の水冷技術など、新素材の活用や新しいアイデアによる次世代技術についても、鋭意、研究開発を実施している。

第 2 章

噴流床石炭ガス化
複合発電技術の開発



第2章 噴流床石炭ガス化複合発電技術の開発 ● 目次

横須賀研究所	エネルギー部長	石川	浩
エネルギー部	複合発電研究室長	浜松	照秀
複合発電研究室	主査研究員	三巻	利夫
複合発電研究室	主査研究員	森塚	秀人
複合発電研究室	担当研究員	犬丸	淳
複合発電研究室	担当研究員	原	三郎
	石炭技術研究室長	田中	隆
石炭技術研究室	主査研究員	中山	稔夫
石炭技術研究室	主査研究員	伊藤	茂男
石炭技術研究室	担当研究員	白井	裕三
燃焼技術研究室	主任研究員	佐藤	幹夫
燃焼技術研究室	主査研究員	二宮	徹
燃焼技術研究室	担当研究員	中田	俊彦

2-1	加圧2段噴流床石炭ガス化技術	23
2-2	固定床乾式クリーンアップ技術	30
2-3	低カロリーガス用ガスタービン燃焼器技術	38
2-4	石炭ガス化複合発電プラントシステム	43

2-1 加圧2段噴流床石炭ガス化技術

2-1-1 研究の背景

石炭ガス化複合発電を実用化する上で、発電用に適した石炭ガス化炉の開発は最も重要な技術課題の一つである。ガス化炉の型式は、概ね固定床方式、流動床方式、噴流床方式の3方式に大別される。

近年、発電用としては大容量化が比較的容易な噴流床方式ガス化炉の開発が主流となりつつあり、国内外で活発に研究開発が進められている。

当所は、1983年に空気吹き加圧2段噴流床方式を採用した2T/日石炭ガス化基礎実験装置を設置し、三菱重工業と共同で技術開発を推進中である。

また、1986年度から国・電気事業による200T/日パイロットプラント計画が開始され、その炉型式として当所が開発した上記方式が採用された。

2-1-2 2T/日石炭ガス化基礎実験装置の概要

(1) ガス化の原理

ガス化炉は、下部のコンバスタと上部のリダクタ（含ディフューザ）から構成されている。ガス化炉を上下に区分することにより、それぞれの石炭量および空気量を独立に調整することができ、ガス化炉全体として低い空気比（ガス化炉投入空気量/投入石炭が完全燃焼するのに必要な理論空気量）で運転しながら、コンバスタを比較的高温に保つことができる。このため、ガス化剤として酸素を用いなくても空気吹きによる灰の熔融排出が容易であり、排

出スラグ中の未燃分がほとんどないなど、従来の噴流床ガス化炉に比べ多くの優れた特徴を有している。

コンバスタは、微粉炭とチャー（サイクロンで捕集した未燃炭素と灰分）を高温で燃焼させ、リダクタでガス化するための高温熱源を発生するとともに、石炭中の灰分を熔融スラグとして排出させる極めて重要な機能を有している。

ディフューザでは、コンバスタから上昇してくる高温ガスと微粉炭を混合させ、石炭の熱分解を促進させる。

さらに、リダクタにおいて、チャー石炭と燃焼ガスの吸熱還元反応すなわち石炭のガス化反応が行われる。

(2) 実験装置の概要

2T/日石炭ガス化基礎実験装置の系統を図2-1-1に示す。

① 石炭前処理設備

石炭は、反応性を高めること、均一性を保つこと等を目的として粉砕機により200メッシュ（74 μ m）パス90%以上に微粉碎・乾燥される。

② 微粉炭供給設備

微粉炭はコンベアによってまずストレージビン（常圧）に供給され、加圧ロックホッパおよび計量ホッパを経て、空気搬送によりガス化炉内に定量供給される。

③ ガス化炉本体

コンバスタ部は水冷壁構造であるが、リダクタ部については小型による熱放散を抑えるため、耐火材内張り構造としている。また、炉内圧力は20kg/cm²abである。

④ チャー供給設備

生成ガス中のチャー（生成チャー）はサイクロンで捕集され、ロックホッパ、計量ホッパを経て、再びコンバスタ内へ投入される（リサイクルチャー）。

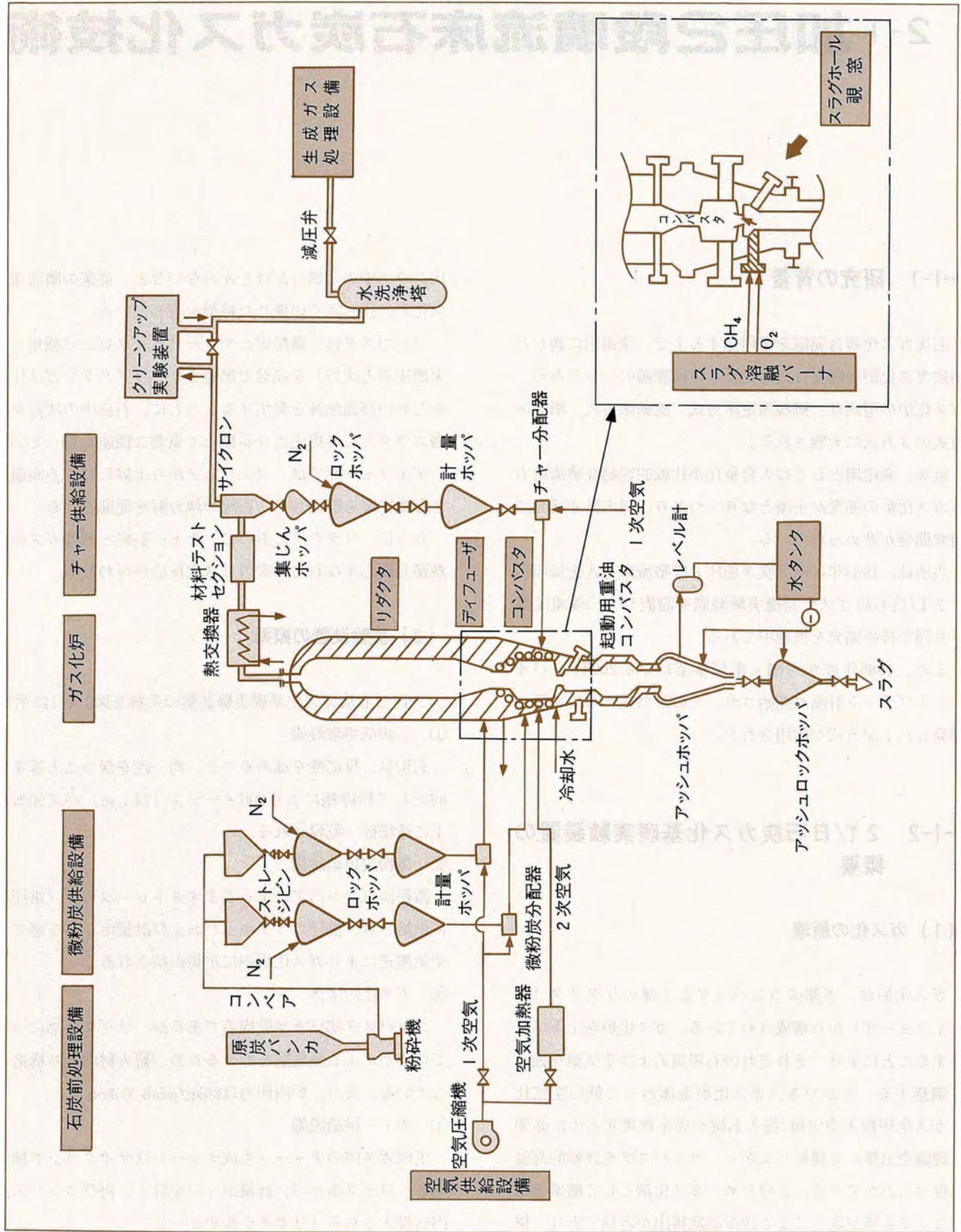


図2-1-1 2 T/日石炭ガス化基礎実験装置の系統

⑤ スラグ排出設備

コンバスタ内で熔融スラグとなった石炭灰は、アッシュホッパ内の水で急冷・破碎され、アッシュロックホッパで減圧した後、一定時間毎に排出される。

⑥ 生成ガス処理設備

生成ガスは、焼却炉で焼却され、集じん、脱硫処理が行われた後大気中へ放出される。なお、1985年11月に乾式クリーンアップ実験装置を設置し、接続運転が可能となっている。

2-1-3 研究の内容および主な成果

1983年7月より2 T/日炉を用いたガス化試験研究を開始した。

これまでの運転実績は1989年8月現在で

累積ガス化時間 1,513時間、

石炭ガス製造量 552,280m³N、

使用炭種 16炭種（国内炭1炭種、海外炭15炭種）

である。

主な成果は次の通りである。

(1) 運転特性の把握

2 T/日炉は初めての炉型式である上、微粉炭の乾式加圧供給、高濃度高温チャーの回収、熔融スラグの安定排出等これまで経験のない技術が必要となり、その基本特性を把握すると同時に運転技術を確立することが重要である。

これまでの約6年間にわたる運転経験から、ガス化炉運転に関する多くのノウハウを取得し、加圧2段噴流床炉の運転技術をほぼ確立することができた。

2 T/日炉の設備自体にも、冷却器設置、スラグホール視窓の設置、スラグ熔融バーナの設置、スラグ破碎機の設置など数多くの改良を加えている。これらの設備改良により、ガス化性能、高圧可燃性の粉体、ガス化のプロセスに関する信頼性を大きく向上させることができた。特にスラグ流動排出性、チャー回収・供給性能の向上とスラグの炉壁固着（スラギング）の低減に大きな効果が認められた。

(2) 炭種適合性およびスラグ熔融排出性の把握

2 T/日炉ではこれまでに、図2-1-2に示すように灰流動点が1,500℃を超える高灰融点炭を含め、広範囲の炭種に

表2-1-1 生成ガスの性状例

項目	単位	炭種			
		国内 A' 炭	米国 B 炭	豪州 A' 炭	豪州 H 炭
空気比	—	0.49	0.48	0.51	0.50
CO	vol %	20.0	19.9	20.2	20.1
CO ₂	vol %	6.2	5.4	6.1	5.8
H ₂	vol %	7.7	8.0	6.6	7.0
H ₂ O	vol %	6.8	5.9	3.6	5.2
CH ₄	vol %	1.0	0.7	0.2	0.2
N ₂	vol %	57.6	59.4	62.6	61.0
Ar	vol %	0.7	0.7	0.7	0.7
HHV (wet)	kcal/m ³ N	934	911	830	840
HHV (dry)	kcal/m ³ N	1,002	968	861	886

ついてガス化試験を行った。その結果、いずれの石炭においても安定して燃料用石炭ガスが得られることを確認した。

また、噴流床方式ガス化炉においては、スラグの定常排出が極めて重要な研究課題であるが、これについても、セラミック内張り型スラグ排出口の採用ならびにコンバスタガス温度等の運転条件の適正化により、空気吹きであってもスラグの安定排出が達成できた。

特に、スラグホール視窓によるスラグ排出状況の直接監視およびスラグ溶融バーナの使用により、スラグの定常排出が困難な高灰融点炭でも、従来に比較してガス化炉の運転が容易になった。図2-1-3に溶融スラグの落下状況例を示す。

(3) ガス化基本性能の把握

2 T/日炉の性能評価の考え方を図2-1-4に示す。2 T/日炉はチャー回収供給系を有しており、以下に示す様な性

能評価を行う必要がある。

- ① チャー回収・供給系を含めた全体の性能評価（図中実線領域内）
- ② チャー回収・供給系を含めないガス化炉単体の性能評価（図中点線領域内）
- ③ コンバスタ部だけの性能評価（図中一点鎖線領域内）

ここでは、代表的な4炭種について①の全体性能を中心に述べる。

① 生成ガス性状および発熱量

2 T/日炉で生成したガスの性状の代表例を表2-1-1に示す。高温ガス化プロセスであるため、生成ガス中にタール分は全く検出されない。

生成ガス発熱量は空気比に強く依存し、750~1,000 Kcal/m³N（空気比0.56~0.46）の範囲にある。また、生成ガス発熱量は、リサイクルチャー量によっても変化する

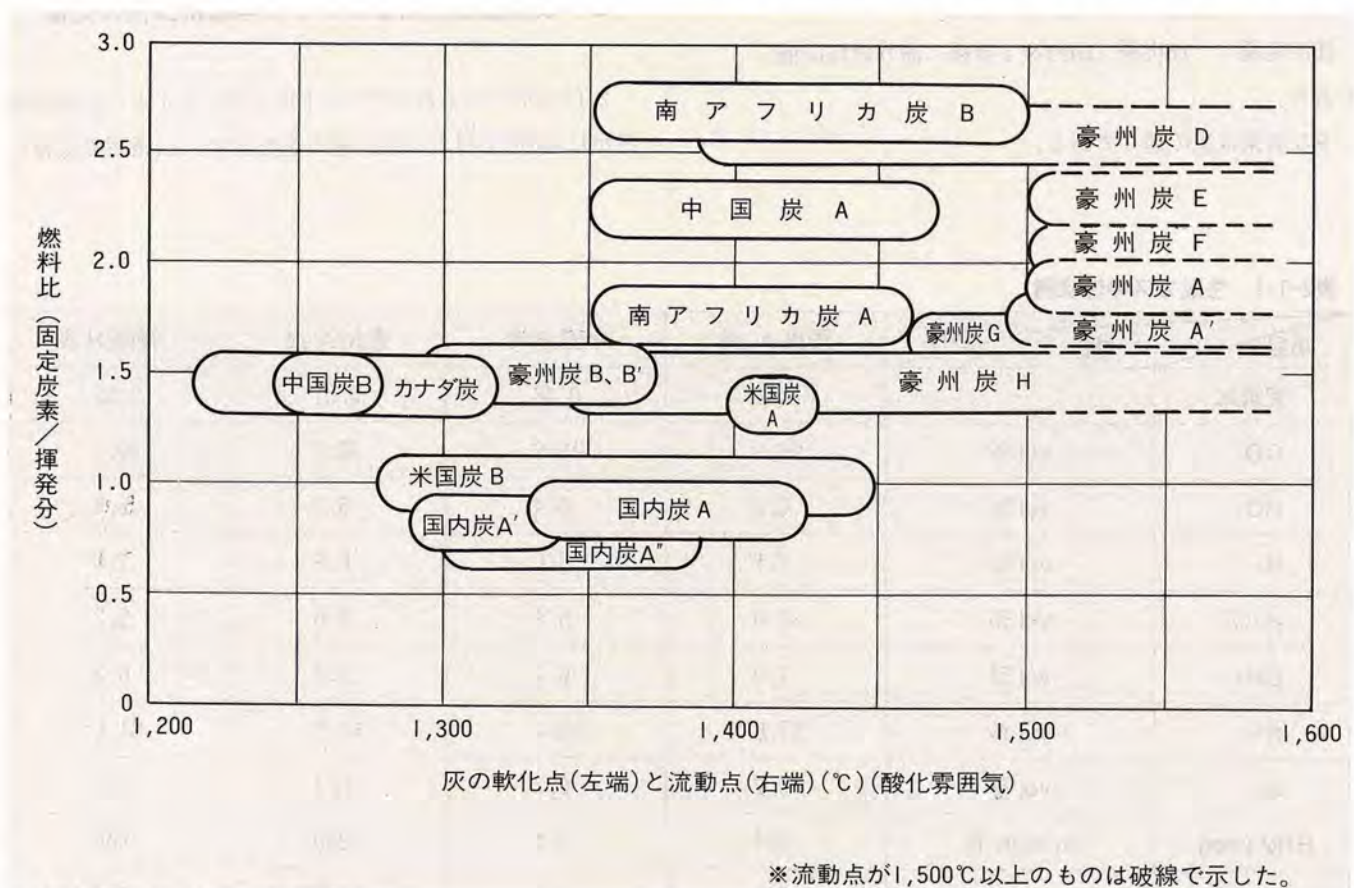


図2-1-2 2 T/日炉試験炭の性状

ため、生成チャーを全てリサイクルするという理想的な場合についてガス化炉廻りの熱物質収支に基づき推定計算を行った。その結果、生成チャーを全てリサイクルすれば、炭種による差は小さくなることがわかった。

② 冷ガス効率

冷ガス効率は、本実験の範囲内では空気比の低下に伴い増加する傾向にあり、50～65%（空気比0.56～0.46）の範囲にある。冷ガス効率も生成ガス発熱量と同様にリサイクルチャー量の影響を受けるが、生成チャーを全てリサイクルすれば炭種間の差異は小さくなる。

③ 炭素転換率

2 T/日炉では、排出スラグ中に未燃炭素がほとんど含まれていないことから、炭素転換率はチャー回収供給系の性能に左右される。チャー回収・供給系の性能が安定していれば、炭素転換率は図2-1-5に示す様に、炭種によらず90%以上の高い値が得られる。

④ リサイクルチャーの影響

チャーのリサイクル量のガス化特性に及ぼす影響は大であるが、それを定量的に評価するには、単にガス化炉への投入チャーの量のみでは、定量化が難しく、新たな評価指標が望まれていた。そこでカーボンリサイクル率を次式で定義した。

$$\text{カーボンリサイクル率} = \frac{\text{リサイクルチャー中の炭素量 (kg/h)}}{\text{生成チャー中の炭素量 (kg/h)}} \times 100$$

カーボンリサイクル率で炭素転換率を整理したものが図2-1-6である。これにより、リサイクルチャーによって炭素転換率がどの程度影響を受けるかを定量的に把握することが可能となった。

(4) 適正なリサイクルチャー量

ガス化炉の運転に際しては、投入石炭量、投入空気量、チャー量等が時々刻々変化するため、これらの関係を把握



図2-1-3 スラグホール視窓より観察した熔融スラグ落下状況

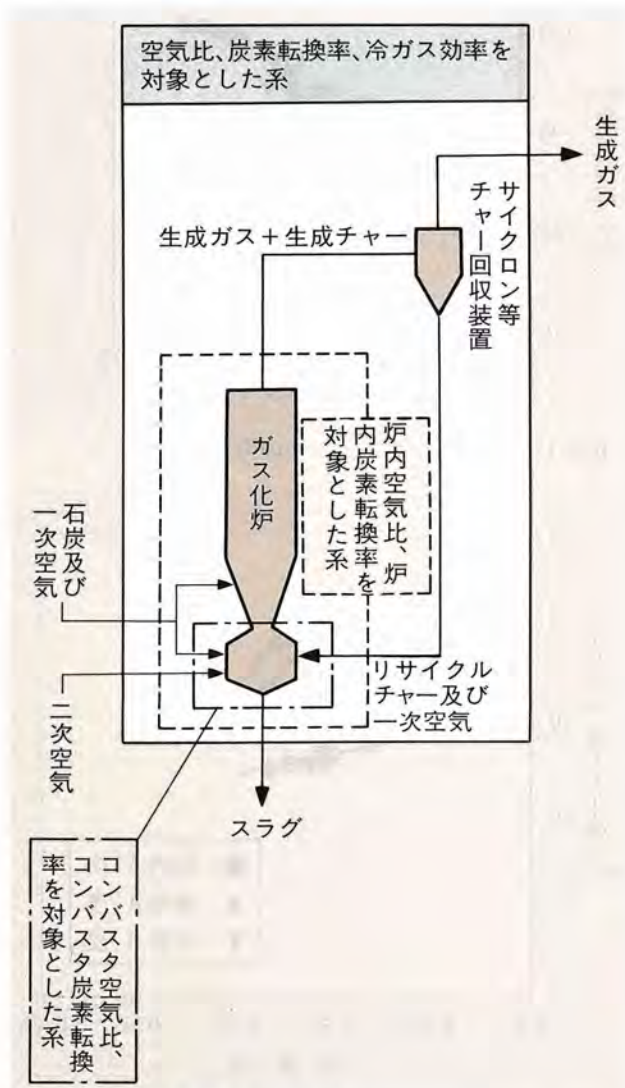


図2-1-4 性能評価の考え方

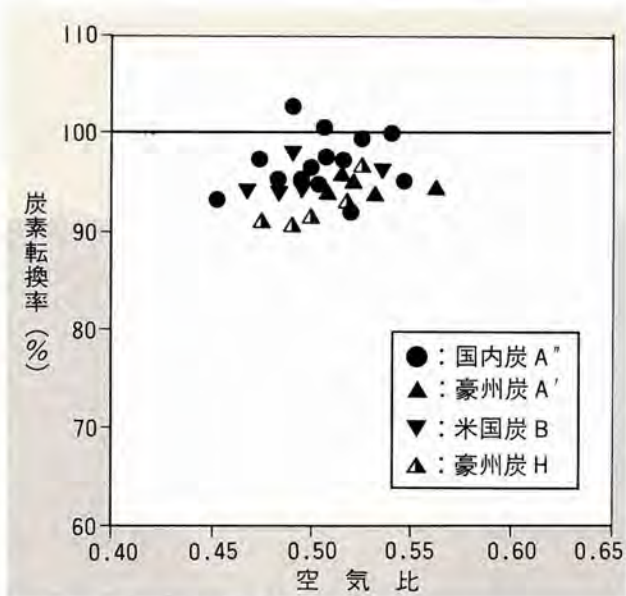


図2-1-5 炭素転換率

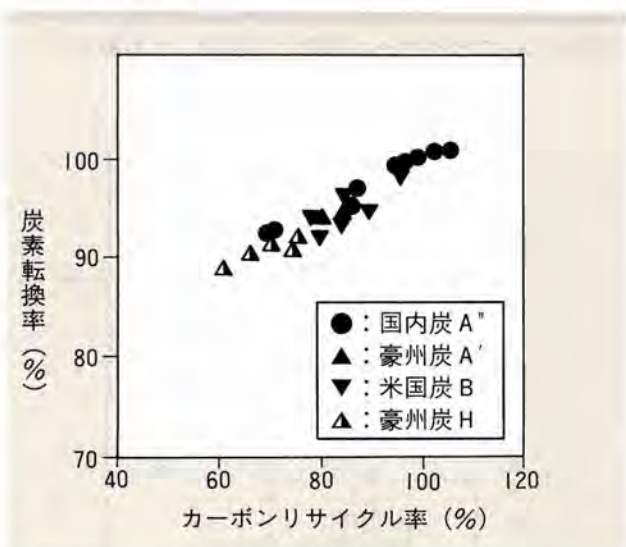


図2-1-6 リサイクルチャーの影響

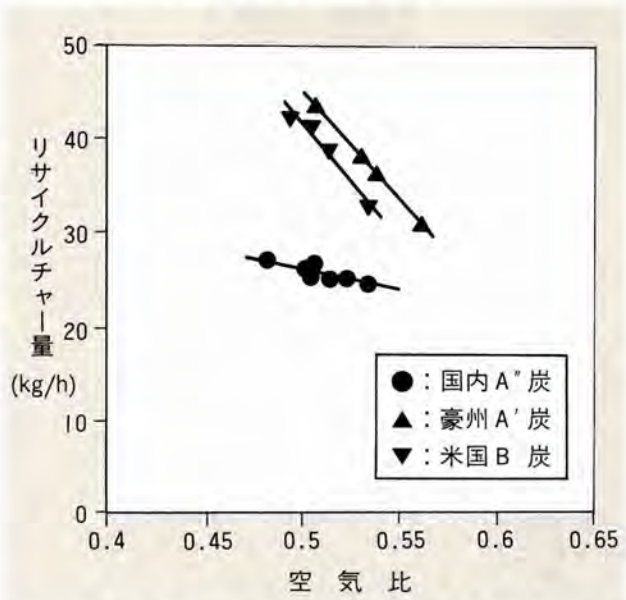


図2-1-7 チャー全量回収時のリサイクルチャー量

し、運転条件に応じて適切に操作する必要がある。とくに、チャー量については、サイクロンでの捕集効率の変動、ホッパでの貯留があるため、ガス化条件を最適にするようにリサイクル量を適正化することが重要である。すなわち、ガス化性能は生成チャーを全てリサイクルする時に最高になるので、この時のチャー量を予め知ることができれば、これを実際のリサイクルチャー量の目標値とすることができる。

これまでの特性データの解析、理論検討により生成ガス発熱量、リサイクルチャー量とその性状についてある程度データを取得すれば、生成チャーを全てリサイクルした時のチャー量を求めることが可能である（図2-1-7）。

2 T/日炉のみならず大型炉においても、所要のデータを事前に取得することにより、投入石炭および空気量に対する適切なリサイクルチャー量の運転目標値をオンラインで運用に供用できることが判明した。

(5) スラッグの環境保全性の確保

2 T/日炉から排出されるスラッグは、図2-1-8に示すようにガラス質の粒状となり、微粉炭火力からのフライアッシュに比べ取り扱いが容易である。また、スラッグ中には未燃炭素がほとんど含まれておらず、ガス化炉型としても優れていることを実証した。さらに、水中での溶出試験の結果、スラッグからの有害成分の溶出もないことがわかった。このように、排出スラッグは環境保全性に優れており、埋立てや骨材など幅広い利用が期待できる。

(6) 微量ガス成分

生成ガス中には、 H_2S 、 COS 、 NH_3 等の微量ガスが含まれており、これらは配管等の材料腐食、 NO_x 生成等の原因となる。

2 T/日炉サイクロン出口において、これら微量ガス成分の分析を行った結果、 H_2S 、 COS の硫黄化合物濃度は、石炭中のS含有率の増加とともに増大し、 NH_3 濃度は空気比の低下に伴い上昇することがわかった。

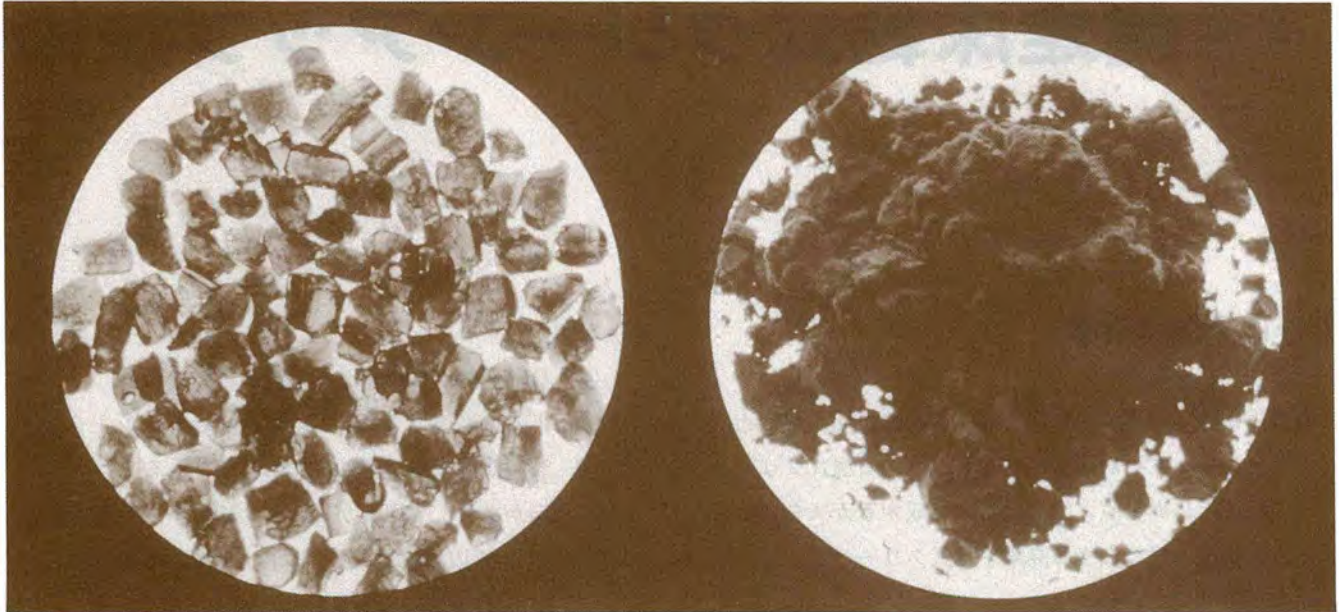


図2-1-8 2T/日炉排出スラグ(左)と微粉炭火カフライアッシュ(右)

2-1-4 今後の予定

200T/日パイロットプラントの運転研究を支援するとともに、大容量ガス化炉の実用化に向けて、以下の項目を中心に試験研究を継続して実施する。

① 超高灰融点炭ガス化技術の確立（フラックス添加、混炭）

② コスト低減技術の開発

③ 運転条件影響評価（スラギング特性、微量ガス成分の挙動把握）

今後も、加圧2段噴流床方式のより一層の高効率化、信頼性の向上ならびに低コスト化を目指し、鋭意研究を進める予定である。

2-2 固定床乾式クリーンアップ技術

2-2-1 研究の背景

熱効率が高い石炭ガス化複合発電の特徴を活かすためには、クールウォーター計画などで知られている湿式クリーンアップ技術とは異なり、ガス化炉で生成するガスを高温高圧のまま脱硫・集じんする高効率乾式クリーンアップ技術の開発が不可欠である。

当所は、1985年度に横須賀研究所に乾式集じん脱硫基礎実験装置を設置して、三菱重工業と共同で、固定床乾式クリーンアップ技術の開発を進めている。

固定床乾式クリーンアップは、実際の発電システムを考

えた場合

- ① 負荷変動への速やかな応答が可能である
- ② どんな石炭ガスにも対応が可能である
- ③ 装置が簡素で、運転操作が容易である

等の利点があり、実用性が高いガス精製システムである。

当所は、固定床乾式クリーンアップ技術に関し、

- ① 2 T/日装置による集じん・脱硫性能の評価
- ② ポーラスフィルタ集じん技術
- ③ ハニカム固定床脱硫技術
- ④ ガス還元硫黄回収技術

について研究開発を進めてきた。

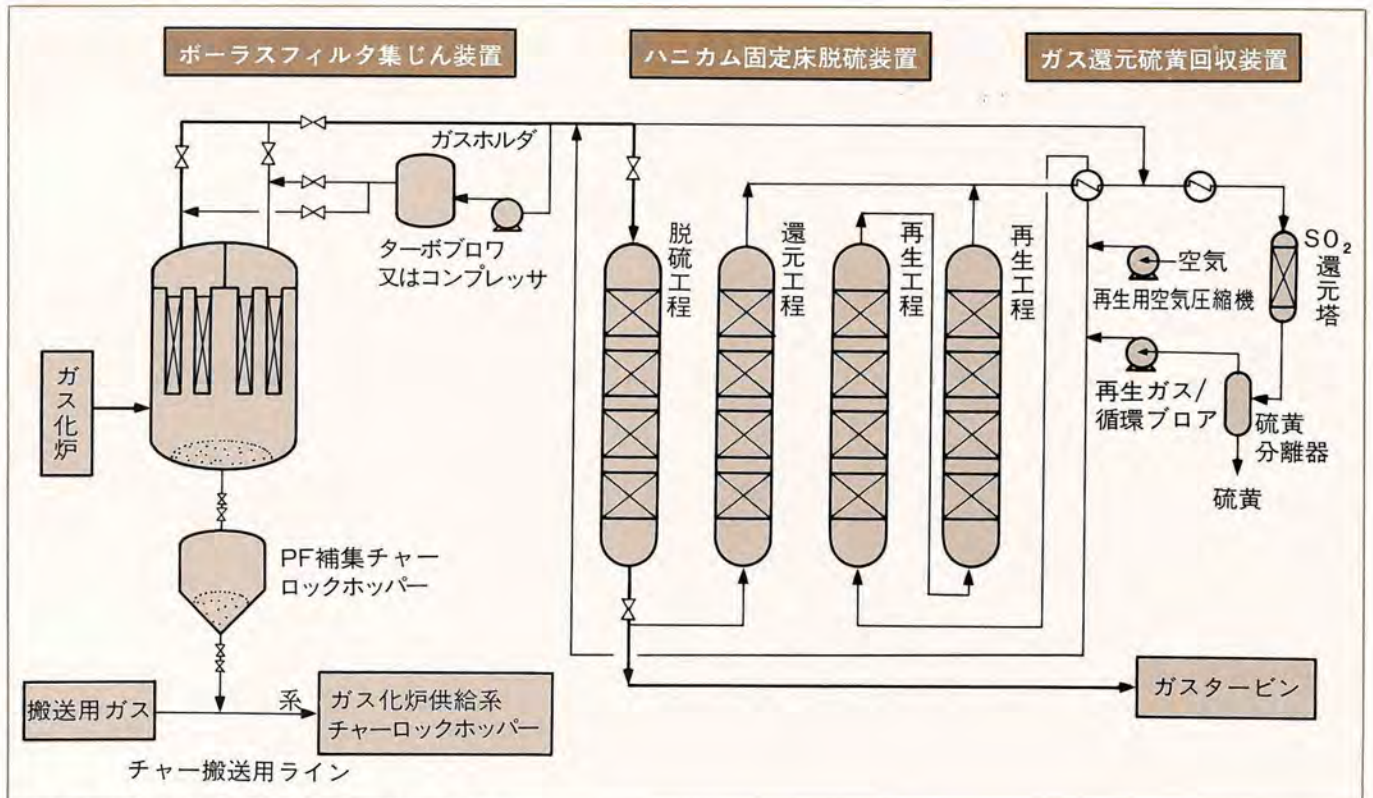


図2-2-1 固定床クリーンアップシステム

2-2-2 固定床乾式クリーンアップの概要

固定床乾式クリーンアップは、図2-2-1にその構成を示すが、石炭ガス中のチャーと呼ばれるばいじんを除去するためのポーラスフィルタ集じん装置、硫化水素、硫化カルボニル等の硫黄分を除去するためのハニカム固定床脱硫装置、および除去した硫黄分を単体硫黄として回収するためのガス還元硫黄回収装置からなる。

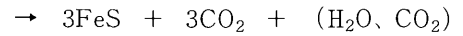
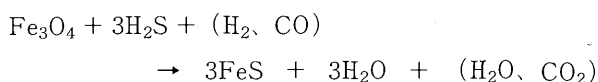
ポーラスフィルタ集じん装置には、セラミック製のフィルタエレメントが内蔵されている。石炭ガス中のばいじんは、ガスがフィルタ濾材の外側から内側へ通過する間に濾材表面にて捕集される。表面に捕集ダスト層が形成されると、このダスト層においても捕集されるようになり、2つの捕集機構により集じんされる。

集じんを続けると、この捕集ダスト層が厚くなり、ここを通過するガスの圧力損失が増加する。そこで、ある程度の圧力損失になるとこの層のダスト層を払い落とす必要が生じる。ダストの払い落としは、集じん後の精製ガスを、フィルタ濾材の内側から流すことで行う。このポーラスフィルタ集じん装置では、石炭ガス中のばいじんを取り除く集じん工程と、フィルタ表面から捕集したばいじんを払い落とす逆洗工程とを繰り返す事により、連続的に運転される。

そのため、装置は、フィルタを格納する圧力容器内を複数室に分けて集じん・逆洗工程を連続的に繰り返すか、または、圧力容器を複数設置し、容器ごとに集じん・逆洗工程を行わせる必要がある。集じん・逆洗工程を繰り返す上で、逆洗工程を行った後に次の逆洗工程に移るまでの時間を、逆洗インターバルという。

脱硫装置には、反応塔内に酸化鉄を含んだ脱硫剤が充填してある。脱硫剤は、長期間使用するため、活性面および圧力損失の面で有利と考えられるハニカム型構造の脱硫剤を用いる。ハニカム型脱硫剤の中にガスを通すことにより、含有する硫黄化合物（ H_2S 、 COS 等）が脱硫剤中の酸化鉄（ Fe_3O_4 ）との化学反応により吸収・除去される。

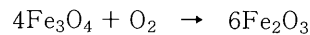
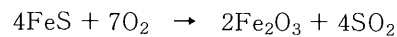
この工程を脱硫工程といい、反応は次の式で表わされる。



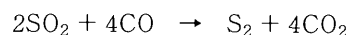
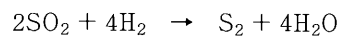
一定時間脱硫を行うと、脱硫剤中の Fe_3O_4 は硫化鉄（ FeS ）となり、活性が低下してくる。その時には、バルブを切り替えることにより石炭ガスを他の反応塔へ通し、連続的に石炭ガス中の硫黄化合物を吸収除去させる。一方、硫黄分を吸収して活性の低下した脱硫剤は、少量の酸素を含有する再生ガスにより再生される。

再生工程を開始する際の脱硫剤の化学形態は、硫化鉄層（ FeS ）、硫化鉄とマグネタイト（ Fe_3O_4 ）の混在層、マグネタイト層の3つに区分される。再生ガスは、反応塔下部より塔内へ導入され、酸素（ O_2 ）により脱硫剤中の鉄分がヘマタイト（ Fe_2O_3 ）へと酸化される。

反応式は次式で表わされる。

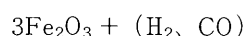


脱硫剤の再生工程で発生した SO_2 含有ガスは、ガス還元硫黄回収装置へ送られる。ガス還元硫黄回収装置では、 SO_2 含有ガスと石炭ガスの一部を混合させて、単体硫黄を生成させる。石炭ガスには、水素（ H_2 ）と一酸化炭素（ CO ）が含まれており、これらの還元性ガスで SO_2 を還元し、単体硫黄とする。この時の主反応式を以下に示す。



一方、再生工程後の酸化鉄の化学形態は、ヘマタイト（ Fe_2O_3 ）で存在する。脱硫工程では、マグネタイト（ Fe_3O_4 ）の形態である必要があるため、 Fe_2O_3 を Fe_3O_4 へと還元する。この工程を脱硫剤還元工程と言う。脱硫剤還元工程では、石炭ガス中の水素（ H_2 ）もしくは一酸化炭素（ CO ）を還元剤として用いる。

次式で表わされる脱硫剤還元工程により、脱硫剤が再度脱硫工程へと切り替えられ再使用される。



以上、ハニカム固定床脱硫装置では、複数塔の反応塔を脱硫工程・再生工程・脱硫剤還元工程と順次バルブ操作によりガス流路を切り替えて、連続的に運転する。また、再生工程で発生する SO_2 は、ガス還元方式硫黄回収装置で、

石炭ガスとの連続的な反応により単体硫黄として回収される。

2-2-3 研究の成果

(1) ポーラスフィルタ集じん技術

① 高性能フィルタエレメントの開発

石炭ガス中には、高濃度（500～2,000ppm 程度）の硫化水素（ H_2S ）を含んでいるため、フィルタエレメントは、高温腐食性ガスに耐える必要がある。さらに、集じん性能が高く、かつ、目詰まりせずに長期間の使用に耐える構造のフィルタを開発しなければならない。そのため、石炭ガス用のフィルタ素材には、耐熱衝撃性、耐硫黄腐食性の点から現状では炭化珪素（SiC）を選定した。

また、フィルタ内へのダスト粒子の侵入を防止するため、気孔径を微細化した際、フィルタエレメントの圧力損失が大きくなるようにしなくてはならない。このため、フィルタ表面のみを微細構造とし、フィルタ本体は、ガスが通過しやすいように粗大粒子で形成される複層構造のものを開発した。

2 T/日噴流床石炭ガス化炉からの石炭ガスを用いた、ポーラスフィルタ集じん装置の集じん性能結果を図2-2-2に示す。石炭ガス中には、石炭ガス化炉の運転条件の変化に伴い、ばいじん濃度が3～50 g/m³Nと変動している。しかし、装置出口での精製ガス中のばいじん濃度は、絶えず測定限界以下であり、集じん性能目標値としての10mg/m³N以下を十分に満足するものであった。また、この集じん性能は、石炭ガス中のばいじん濃度には依存しないことから、本フィルタエレメントは、幅広い濃度範囲の石炭ガスに適応でき、高性能であることが判った。

② スケールアップ設計因子の把握

本フィルタエレメントは性能的には十分なことから、スケールアップに必要な設計因子を定量化し、長期信頼性について検討した。ポーラスフィルタ集じん装置の長期性能を評価するには、次の4項目を考慮した。

- i) フィルタ圧力損失の上昇特性
- ii) 逆洗インターバルの推算
- iii) ベース圧力損失の長期特性
- iv) 逆洗インターバルの経時変化特性

ポーラスフィルタの長期性能を検討するには、フィルタ目詰まり状態を表しているフィルタの圧力損失に注目するのがよい。

図2-2-3は、フィルタの圧力損失を経時的に示したものである。図中(1)で示したのが集じん工程時における圧力損失の上昇特性である。

時間経過と共に圧力損失は上昇し、 ΔP_H で示した最大圧力損失に到達する。その時、逆洗が行われ、圧力損失が ΔP_L まで回復する。図中(2)で示す逆洗インターバルは、逆洗前後の圧力損失の差（ $\Delta P_H - \Delta P_L$ ）を圧力損失上昇速度で除することにより得られる。集じん工程・逆洗工程を繰り返すと共に、ベース圧力損失（ ΔP_L ）が僅かではあるが上昇する。最大圧力損失（ ΔP_H ）を一定とした場合、ベース圧力損失が上昇することにより逆洗インターバルが短くなる。そのため、集じん・逆洗工程の長期繰り返し時におけるベース圧力損失の長期特性を評価することにより、逆洗インターバルの経時変化を求めることができる。

図中(1)で示した集じん工程時の圧力損失の上昇特性は、石炭ガス中のばいじん濃度、集じん流速、ばいじん性状に依存する。この圧力損失上昇速度は、ばいじん濃度に比例し、集じん時のガス流速の2.6乗、比表面積の2乗に比例することがわかった。

③ 長期信頼性評価

フィルタエレメントの逆洗には、精製ガスの一部を用いて行う。方法としては、精製ガスを逆洗ブロウによりほぼ同圧にしてフィルタに導入させる逆風逆洗法と、精製ガスをターボブロウまたはコンプレッサで昇圧し、瞬時にガスを導入する高圧逆洗法がある。

図2-2-4は、ベース圧力損失の長期特性として、逆洗回数と逆洗後のベース圧力損失係数との関係を示したものである。ベース圧力損失係数は逆洗回数の増加に伴い、両対数的に増加し直線関係にあった。

これは、模擬ガスを用いた常圧・常温下での試験結果と、

ベンチスケールプラントでの加圧・高温下での試験結果と同じ傾向を示していた。これによりフィルタを長期的に使用した際のベース圧力損失を推定できるようになった。

以上の結果、ベース圧力損失の経時変化を予測できたことより、最大圧力損失を一定以下に保つための逆洗インターバルの経時変化の予測が可能となった。本逆洗インターバルの予測法により長期的な特性を予測したところ、条件にもよるが、本フィルタエレメントは、5,000回程度の集じん・逆洗工程の繰り返しに対しては問題なく、十分

実用化が可能と判断された。

(2) ハニカム固定床脱硫技術

① 脱硫剤の開発

図2-2-5は、2 T/日ガス化炉からの石炭ガスを用いて連続脱硫試験を実施した結果の一例である。精製後の石炭ガス中の全硫黄濃度は、目標値としての100ppm以下であり、複数塔の反応塔を一定の時間で順次切り替えて運転するこ

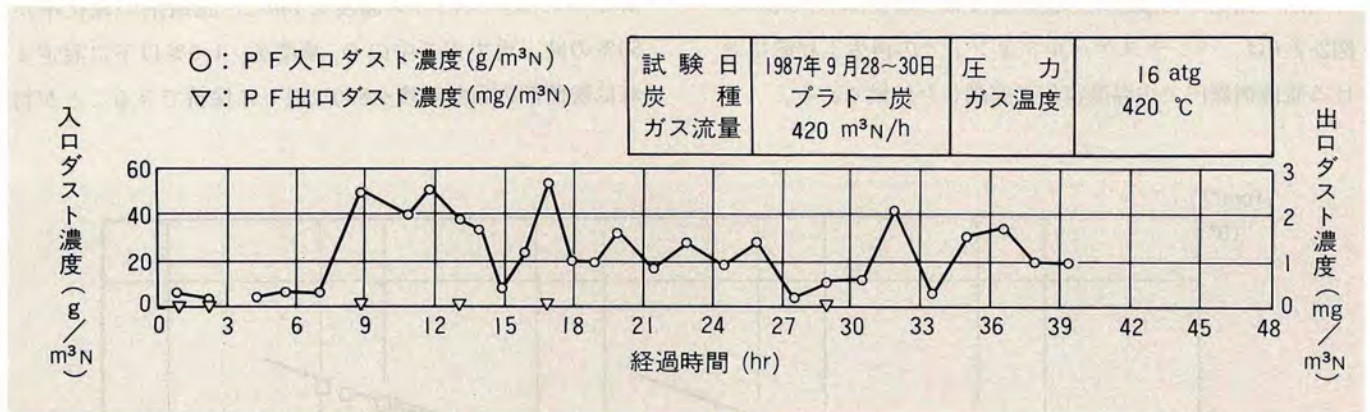


図2-2-2 長時間実ガスシリーズ試験結果

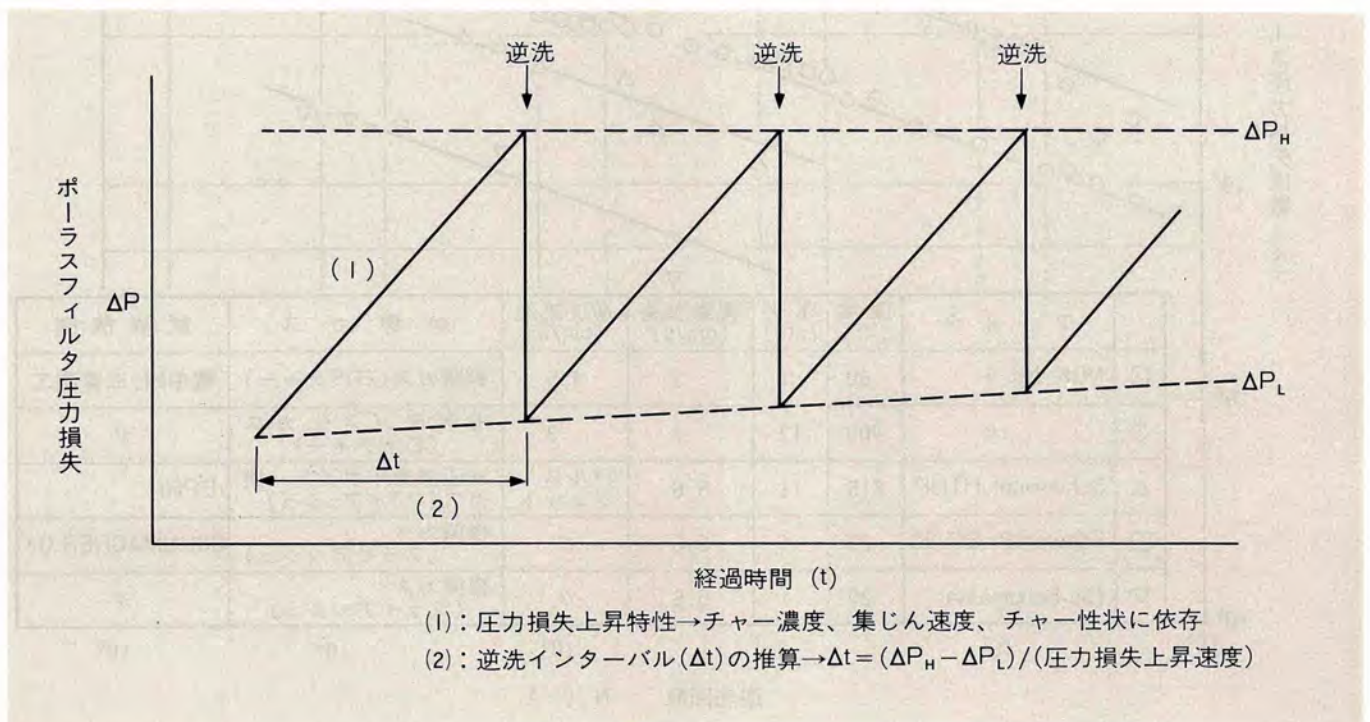


図2-2-3 ポーラスフィルタ圧力損失変化の概念

とにより、連続的に高い脱硫性能を保持できることが判った。また、起動時や、負荷低減時に想定される300℃程度の低温度域においても、本脱硫剤は、高い脱硫性能を維持し、十分実用性の高いものであった。

② 再生反応特性評価

再生工程時に起こる反応は、発熱反応である。そのため、再生工程での反応熱による温度上昇が脱硫剤の耐熱温度以下となるような運転条件を設定しなければ、脱硫剤性能の低下の原因となる。

当所で開発した脱硫剤の耐熱温度は、現在800℃である。図2-2-6は、ベンチスケールプラントでの再生工程時における脱硫剤層内の温度変化を実測した結果である。

再生ガスは、脱硫工程時の石炭ガスの流れる方向とは逆の反応塔下部より導入される。そのため、鉄の形態がマグネタイトの形で存在している4段目から酸化反応が開始する。マグネタイトの酸化反応は急激に進行するため、3段目の脱硫剤(図中B)にて最高温度を記録する。その最高温度は、本結果では650℃程度であった。これは、当所で開発した再生工程時の温度特性シミュレーション結果とよく一致した。

脱硫剤層内最高温度は、①再生ガス温度、②再生ガス中O₂濃度、③再生ガス量、④脱硫工程時の脱硫剤硫化率で決定される。入口ガス温度を400℃、脱硫剤の硫化率が50%の時、再生ガス中のO₂濃度を、1.5%以下に設定すれば脱硫剤の耐熱温度を800℃以下に保持できることが判

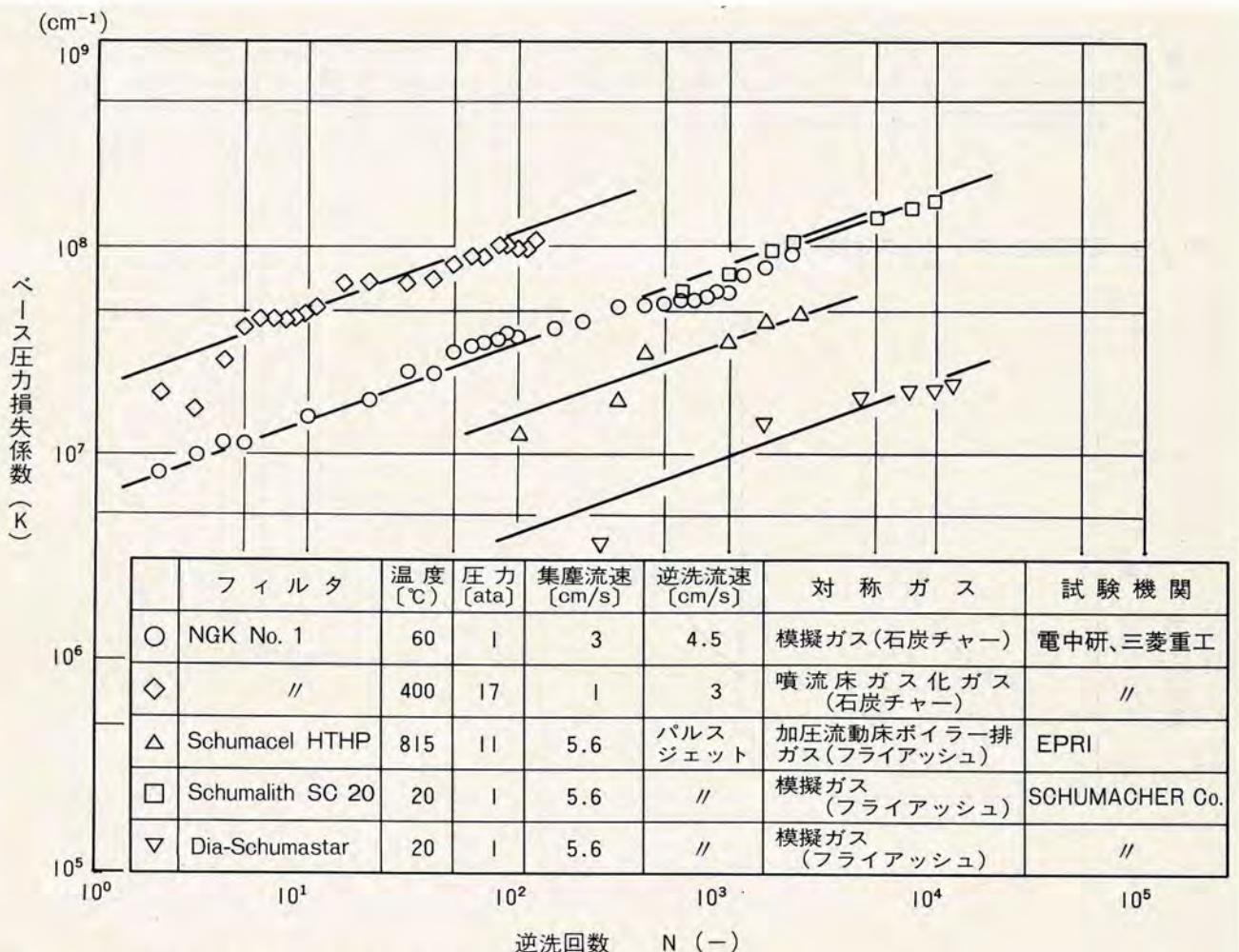


図2-2-4 ベース圧力損失係数と逆洗回数との関係

明し、再生工程での運転条件範囲を把握することができた。

③ 長期信頼性評価

当所が開発したハニカム型脱硫剤の性能が高いことから、実用化の上でさらに長時間の使用に対する脱硫剤の信頼性について検討した。

脱硫剤の性能は、図2-2-7に示されるように繰り返し20回程度までの初期段階において、若干低下する。しかし、それ以降は、安定した性能を保持しているのが判る。パイロットプラント以上の規模の装置設計には、この安定化した脱硫剤性能で行うため、装置全体に影響は与えない。但し、この初期性能低下分を加味しておかなければ、装置容

量が決定できない。そのため、初期性能低下因子について検討を行った。

・ 脱硫・再生工程を繰り返した時の残留硫黄量を求めたところ、繰り返し15回まで増加しており、それ以降は安定した量であった。この傾向は、繰り返し初期の脱硫剤性能低下の傾向と同様であった。また、脱硫剤の細孔容積、比表面積等の物理量変化を測定したところ、繰り返し10回程度までは、これらの物理性状が変化し、それ以降は安定化していた。本傾向も、残留硫黄量変化と同様に、脱硫剤の性能低下と同じ傾向であった。

以上により繰り返し初期の性能変化は、再生工程時の残留硫黄量からの推定値と、物理性状の変化からの推定値と

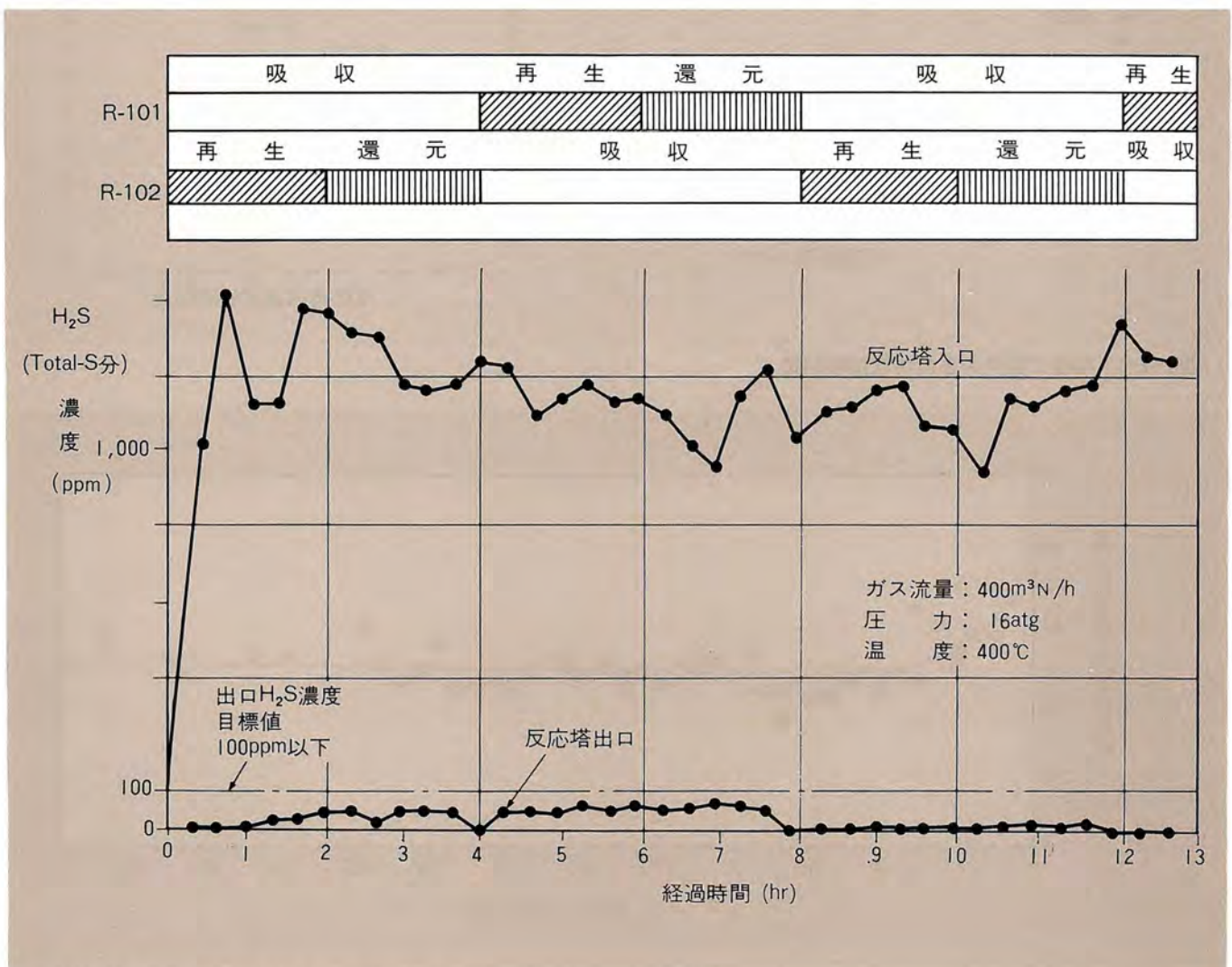


図2-2-5 ハニカム固定床脱硫・再生試験結果

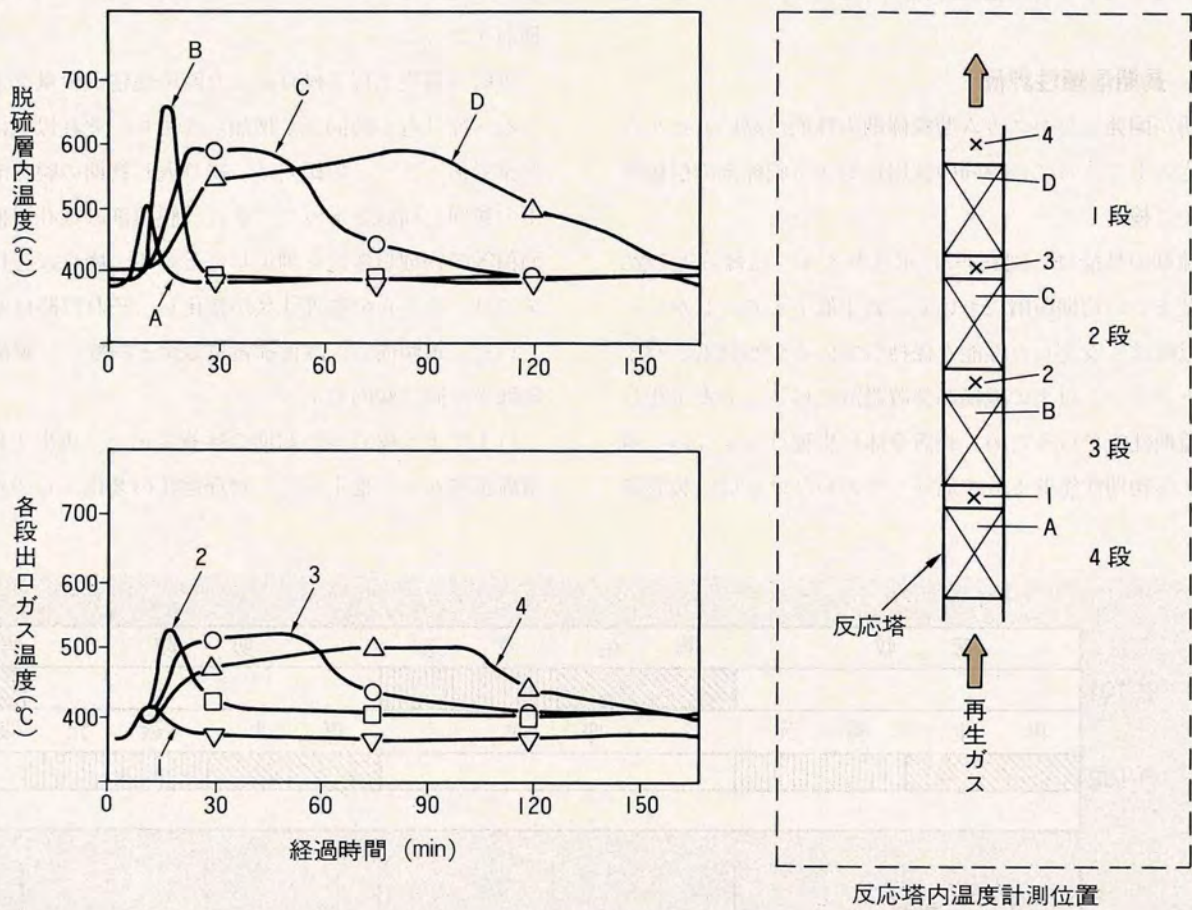


図2-2-6 再生工程時の温度特性試験結果

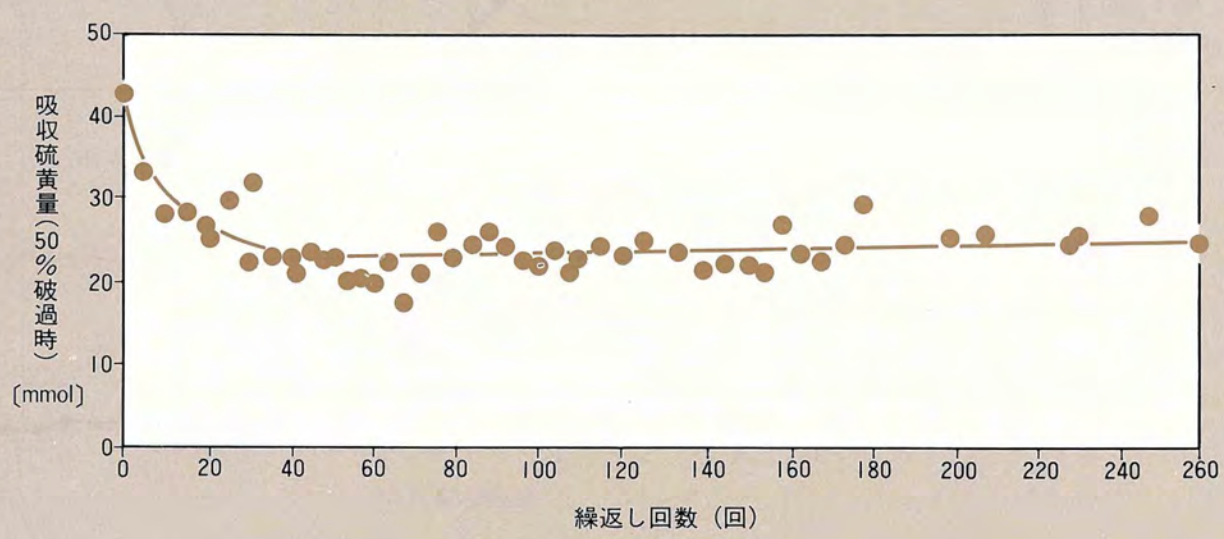


図2-2-7 脱硫剤の長期脱硫・再生繰返し特性

2つの要因により表され、実験値とよく一致したことから、これらの2つの要因に起因していることが判明した。しかし、前述のように、繰り返し20回以降は、性能が安定化しているため、なんら問題となるものではない。

また、本脱硫剤の性能や強度に影響し得るもう1つの因子として石炭ガスからの炭素析出をあげることができる。炭素析出とは、脱硫剤還元工程や脱硫工程時に石炭ガスに含まれるCO、CO₂などが還元されて、固体の炭素含有物質となり、脱硫剤中に析出することである。

もし、炭素析出が生じた場合、脱硫性能の低下や脱硫剤の割れを生ずる恐れがある。そこで脱硫剤への炭素析出の影響評価を行った。

石炭ガス中に硫化水素(H₂S)が存在しない時、脱硫剤中には0.1wt %程度のごくわずかな炭素が析出していた。しかし、石炭ガス中に25ppm以上のH₂Sが含有している時、炭素析出は全く観測されなかった。これは、本脱硫剤および石炭ガス中のH₂Sが炭素析出を抑制する効果を持っているためと考えられる。実際の石炭ガスには、数100ppm以上のH₂Sを含有していることから、炭素析出は

起こらないことが確認された。

以上の検討結果により、本脱硫剤は高い性能を長期間の使用に対して維持することから、固定床乾式クリーンアップ技術に十分適応できることが確認できた。

得られた結果より、ポーラスフィルタ集じん装置では、フィルタの圧力損失上昇特性を解明し、逆洗インターバルの経時変化予測が可能となった。このことから、長期寿命を予測できる見通しを得た。また、ハニカム固定床脱硫装置では、再生工程時での温度特性を解明し、最適再生条件を把握することができた。同時に脱硫剤の脱硫・再生工程繰り返し時における初期性能低下因子を解明した。これらの成果から、本システムは、高い性能を持ち、かつ、信頼性も高いことを実証し、パイロットプラント規模以上の装置設計に不可欠なデータの取得ができた。固定床乾式クリーンアップ技術に関するベンチスケールプラントでのデータの取得はほぼ終わり、今後は、さらに本システムの実用化を図る研究開発を引続き実施すると共に、大型化した装置での一貫システムの検証が重要と思われる。 ●

2-3 低カロリーガス用ガスタービン 燃焼器技術

2-3-1 研究の背景

省エネルギー性が高く、高性能、低コストの石炭ガス化複合発電システムの開発においては、燃焼効率の高い、環境保全性に優れた高温ガスタービン燃焼器の開発が、ガスタービンの高温化技術の中でも重要な課題である。

当所は、石炭ガス化用1,300℃級ガスタービン燃焼器の開発を行うために、空気吹き噴流床石炭ガス化炉から生成される燃料と同一組成の低カロリーガスを用いた150MW級ガスタービンの実寸燃焼器による常圧燃焼試験と1/2寸燃焼器による高圧燃焼試験が実施可能な設備を設置し、1987年から本格的な研究開発に着手した。

2-3-2 研究の目的

石炭ガス化炉から生成される燃料は、①不燃性成分が多量に含まれているため、発熱量が天然ガスと比べて約1/10と低く、②主要可燃性成分が燃焼性の悪いCOであり、③燃料中に窒素酸化物の発生要因となるNH₃を含有するなどの特徴を有し、これらが高負荷燃焼で広い運転範囲を要求されるガスタービン燃焼器の開発を困難にしている。

以下では、これまで、その性質が明確にされていなかった燃焼器の燃焼特性、NO_x排出特性、燃焼器壁面温度特性などを明らかにした結果について述べる。

2-3-3 主な開発課題

従来のLNGなどの高カロリー・クリーン燃料と性状が

大幅に異なる石炭ガスを用いる高温ガスタービン燃焼器技術の確立には、次の開発課題を克服する必要がある。

① 構造適正化技術

空気吹き石炭ガス化燃料は発熱量が低いため、燃焼器に供給する燃料流量は従来の高カロリー燃料と比較して非常に多い。そのため、スワラー構造や燃焼器の空気配分設計等の最適化を図る必要がある。

② 高負荷・安定燃焼技術

空気吹き噴流床石炭ガス化燃料は、発熱量が低く、主要可燃性成分がCOであることから、ガスタービンの広範囲な運転条件に対して安定燃焼を維持することが重要である。このため起動方法、部分負荷運転も含めた安定燃焼技術の確立を図る必要がある。

③ 燃焼器環境保全技術

石炭ガス化燃料中に含まれるNH₃は燃焼の過程で容易にNO_xに転換するため、低NO_x燃焼器の開発が不可欠である。さらに環境保全性の上から、ガスタービンの広範囲な運転条件に対して、COの排出量を抑制する燃焼技術の確立が必要である。

④ 燃焼器壁面冷却技術

石炭ガス化用1,300℃級ガスタービン燃焼器においては、希釈用空気を含む燃焼器壁面冷却空気量は、LNGを燃料とする場合の約80%程度と少ない。そのため、従来より冷却効率の優れた壁面冷却構造が必要である。また、石炭ガス化燃料の火炎温度は低いと考えられるので、要求される冷却性能を実験的に評価することが重要である。

2-3-4 石炭ガス化用ガスタービン要素実験設備

当所は、噴流床石炭ガス化複合発電におけるガスタービン用金属燃焼器およびセラミック燃焼器等の研究開発を効率的に推進することを目的として、石炭ガスと同一組成の燃料を供給し、フルスケールの燃焼器試験を含む、広範囲な条件のガスタービン要素研究が可能な「石炭ガス化用ガスタービン要素実験設備」を設置した。設備の全体系統を図2-3-1に示す。その主な特徴を以下に示す。

- ① 空気吹き噴流床石炭ガス化炉の生成ガスとほぼ同一組成の低カロリーガス燃料の製造供給が可能である。
- ② 燃料ガスの発熱量、組成 (CO/H₂ 濃度比) が容易に変更可能である。
- ③ 150MW 級ガスタービン燃焼器の 1 缶分について実スケールでの常圧燃焼試験が可能である。
- ④ 150MW 級ガスタービン燃焼器の 1 缶分について1/2寸法大での高圧燃焼試験が可能である。

2-3-5 供試燃焼器

石炭ガス化用ガスタービン燃焼器開発の第1段階として、3缶の150MW級実寸燃焼器と同型の1/2寸燃焼器 (CGT1001、1002、1003、2001の4缶) を設計、試作し燃焼試験を実施した。

CGT1001燃焼器は本研究開発の基本となる燃焼器であり、安定燃焼に留意して設計した。CGT1002燃焼器は空気配分をCGT1001燃焼器と同じくして、二次空気の貫通力を大きくして混合を強化したものである。CGT1003燃焼器は、NO_xの生成を抑制するためにリッチ・リーン燃焼法*を採用したものである。CGT2001燃焼器はCGT1001燃焼器の1/2寸モデルであり、高圧燃焼試験により燃焼器特性に及ぼす圧力の影響を検討するためのものである。

*：一次燃焼領域を燃料過濃 (Rich) とし、二次燃焼領域を燃料希薄 (Lean) とするフュエル NO_x 低減燃焼法

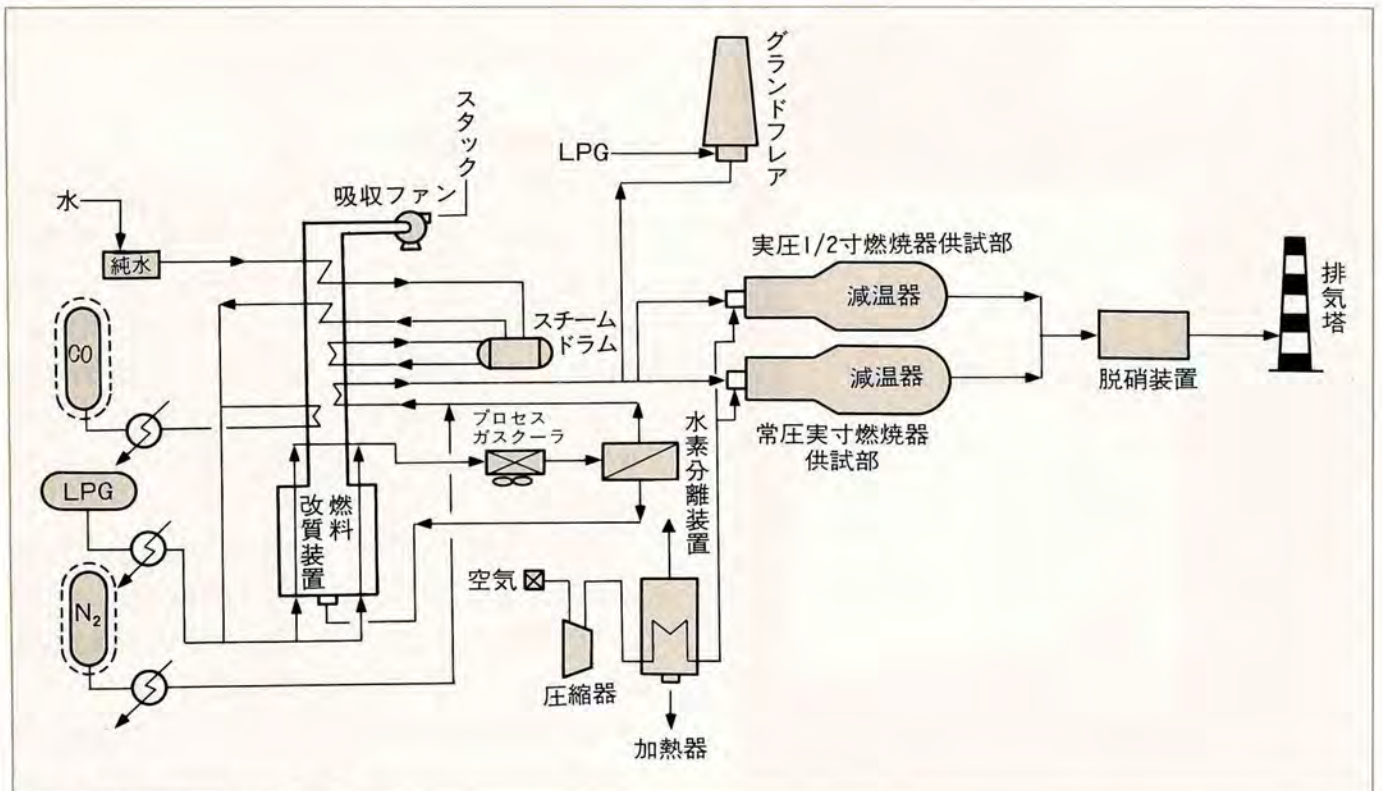


図2-3-1 試験設備の全体系統

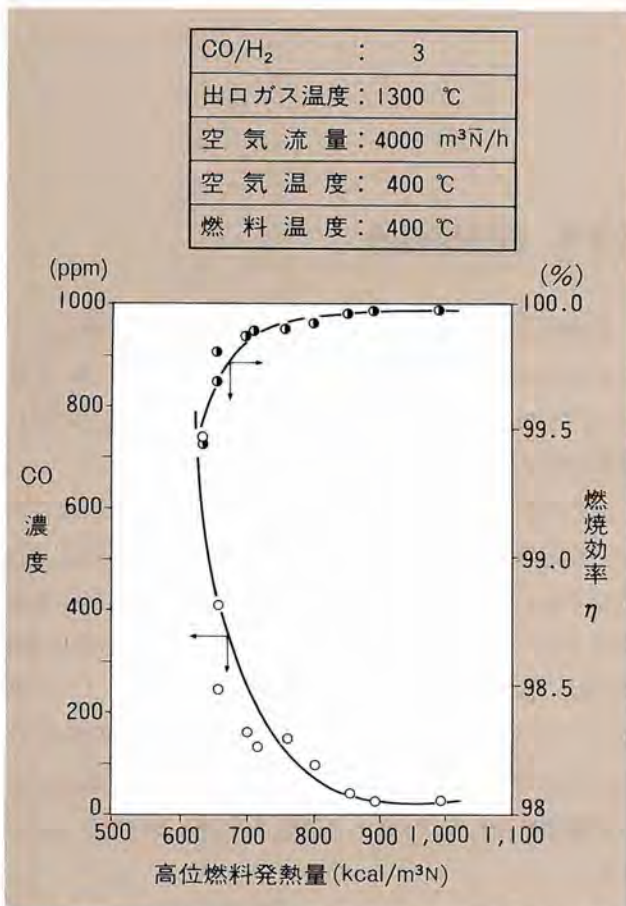


図2-3-2 燃料発熱量とCO排出特性、燃焼効率の関係

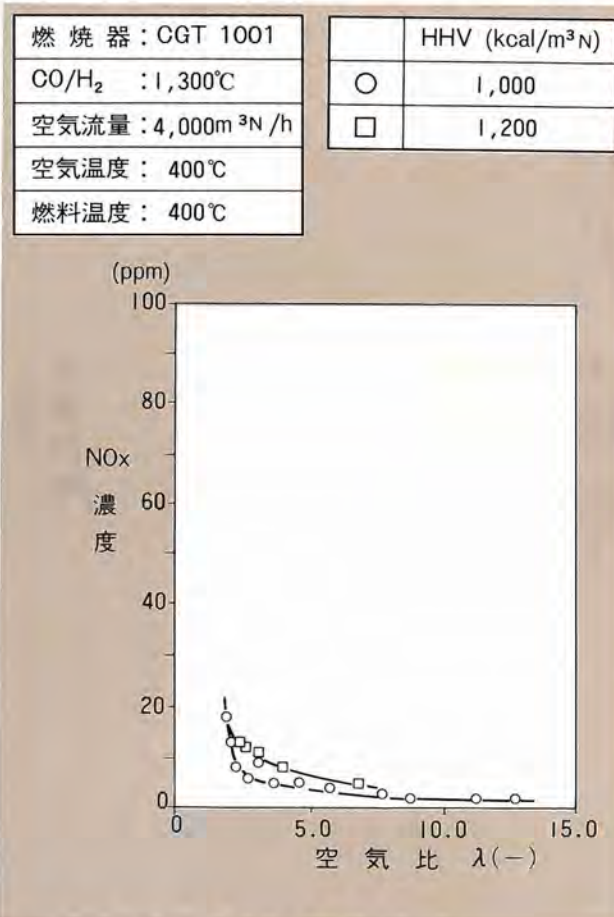


図2-3-3 サーマルNO_x排出特性

2-3-6 研究の成果

(1) 150MW 級燃焼器による常圧燃焼試験

①燃焼特性

石炭ガス化燃料の発熱量は、石炭種やガス化条件によって変化するため、石炭ガス化用ガスタービン燃焼器の開発においては、発熱量変化に対する燃焼特性を把握しておかなければならない。そこで、燃料発熱量 (HHV) 1,000kcal/m³N を標準として設計した供試燃焼器 (CGT1001型) において、燃料の発熱量変化に対する燃焼特性を検討した。図2-3-2に、燃料発熱量とCO排出濃度、燃焼効率の関係を示す。

発熱量の低下に伴い、燃焼性が悪化するためCO濃度は増加し、燃焼効率が低下する傾向を示している。しかしながら、発熱量が700kcal/m³N程度まで低下しても燃焼性は比較的良好であり、630kcal/m³Nまで低下しても燃焼効率を99.5%以上確保することが可能であった。

以上のことから、石炭ガスの発熱量は天然ガスの約10分の1程度と非常に低いものの、ガスタービン燃料として十分使用可能であることが明らかになった。

②NO_x 排出特性

燃焼に伴って生成されるNO_xは、空気中のN₂の高温酸化によるサーマルNO_xと燃料中の窒素分に起因するフュエルNO_xがあり、それぞれ生成機構が異なる。天然ガスなどの燃料中に窒素分を含まないクリーン燃料を用いるガスタービン燃焼器では、サーマルNO_xの生成が問題となるが、石炭ガス化用ガスタービン燃焼器では、サーマルNO_xと共に燃料中のNH₃に起因するフュエルNO_xが生成される。

石炭ガス化用ガスタービン燃焼器のNO_x排出特性を検討するに際し、まずサーマルNO_xの排出特性について検討した。図2-3-3はCGT1001燃焼器における燃焼器出口空気比 (λ) とサーマルNO_x濃度 (ppm) の関係を示したものである。燃料発熱量が1,000kcal/m³Nの場合、燃焼器出口ガス温度を1,300°Cとする定格条件時 (λが約2.2) におけるサーマルNO_x濃度は約15ppmであった。石炭ガス化低力

ロリー燃料の火炎温度は、高カロリー燃料である天然ガスなどと比較するとかなり低いため、サーマル NO_x 生成濃度が低かったものと考えられる。すなわち、石炭ガス化燃料中に NH₃ が含まれない場合の NO_x 排出濃度は極めて低いレベルであった。

次に、石炭ガス化燃料中に NH₃ が1,000ppm 含まれる場合の NO_x 排出特性を検討した。図2-3-4は、λと NO_x 排出濃度および燃料中の NH₃ から NO_x への転換率の関係を各燃焼器について示したものである。

CGT1001と CGT1002は安定燃焼を主眼に設計されたもので、とくに低 NO_x 燃焼法を採用していない燃焼器である。CGT1001燃焼器の場合、燃焼器出口ガス温度を1,300℃とするλが約2.2の条件において、NO_x 転換率は約70%であり、その時の NO_x 排出濃度は約300ppmであった。同条件下におけるサーマル NO_x 濃度が15ppmで

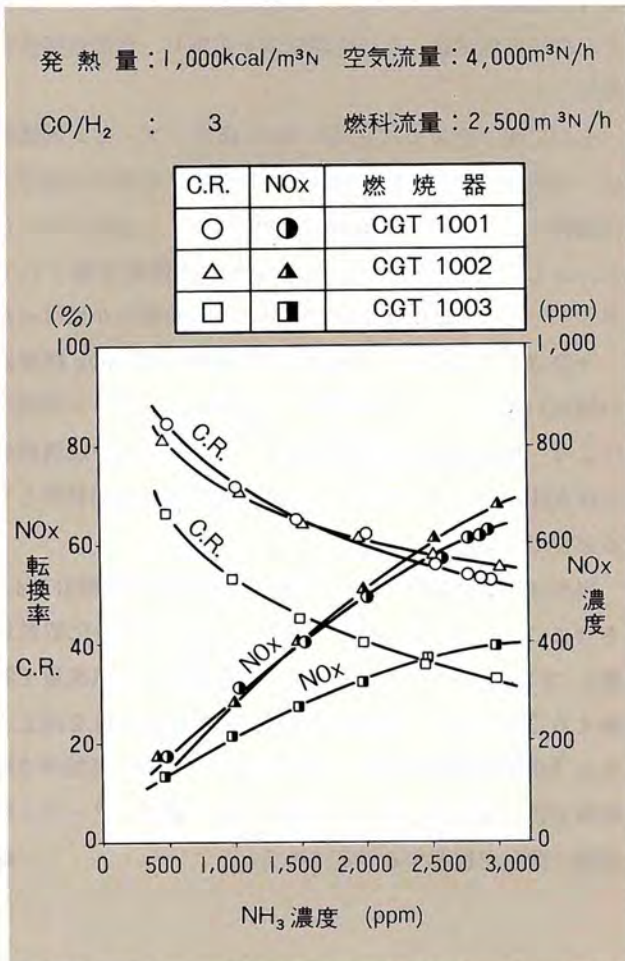


図2-3-4 燃焼中アンモニア濃度とNO_x排出特性の関係

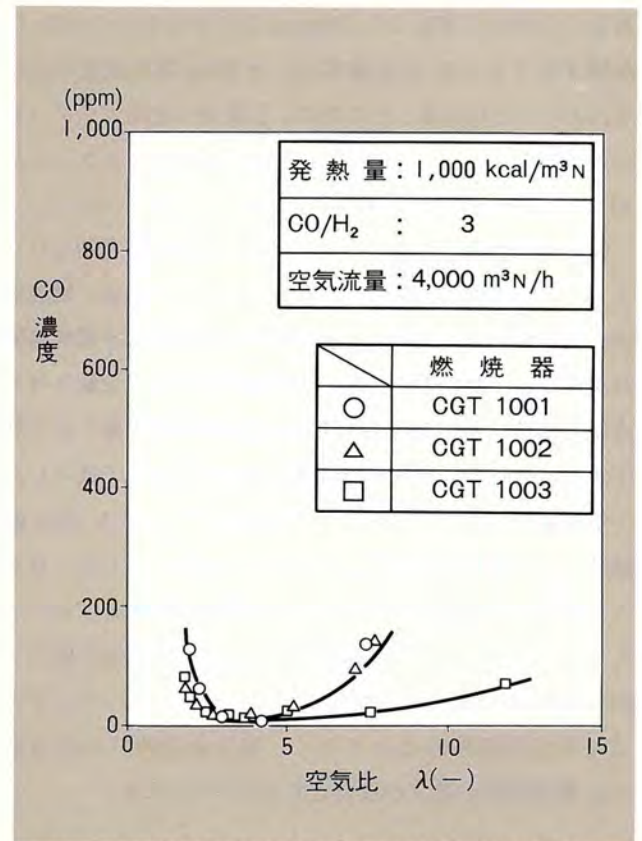


図2-3-5 燃焼器出口空気比とCO排出濃度の関係

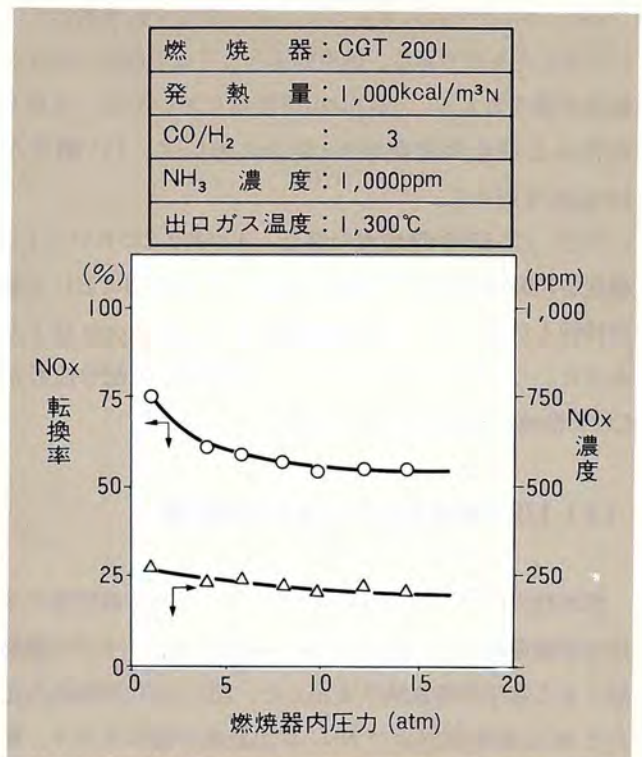


図2-3-6 燃焼器内圧力とNO_x排出特性の関係

あることから、NH₃が1,000ppm含まれる場合のNH₃に起因するフュエルNO_x濃度は、全NO_x排出濃度の95%を占めることになる。そのため、石炭ガス化用ガスタービン燃焼器においては、燃料中のNH₃に起因するフュエルNO_xの低減燃焼技術が不可欠であることが明かである。

CGT1003燃焼器は、フュエルNO_xの低減に有効なリッチ・リーン燃焼法を採用したものである。これは、燃焼器内の空気配分を工夫することにより一次燃焼域を燃料過濃な条件とし、燃料中のNH₃を燃焼過程でN₂に分解させる方法である。定格条件時のNO_x転換率は約50%にまで低下すると同時に、NO_x排出濃度も約200ppmまで低下した。

本結果から、リッチ・リーン燃焼法がフュエルNO_x低減法として有効であることが明らかになった。しかしながら、低NO_x燃焼法を採用したCGT1003燃焼器においてもガスタービンの部分負荷時に相当する高空気比側で、NO_x転換率が増大する傾向がある。そのため、ガスタービンの定格条件時だけでなく、部分負荷時における低NO_x燃焼技術の確立が重要であると考えられる。

③ CO 排出特性

図2-3-5は空気比に対するCO排出濃度を各燃焼器について示したものである。燃焼効率としては全体的に良好な結果が得られたが、CGT1001燃焼器においては、λが2近傍および低負荷側の7.5以上において、CO濃度が100ppmを越えた。

一方、CGT1003燃焼器の場合、λが約2.2においてCO濃度が100ppm以下になるとともに、低負荷側における排出特性も改善され、λが10程度においても50ppm以下であった。これは、リッチ・リーン燃焼の空気配分設計がCOの低減に有効であったことを示している。

(2) 1/2寸燃焼器による高圧燃焼試験

燃焼器内圧力がNO_x排出特性、メタル温度特性等に及ぼす影響を検討するため、CGT1001型の1/2寸モデル燃焼器による高圧燃焼試験を実施した。図2-3-6に燃焼器内圧力とNO_x転換率およびNO_x排出濃度の関係を示す。燃焼器内圧力を変化させる時は、燃料と空気の総流量から計

算される器内平均断面流速が一定となるようにした。

一般にサーマルNO_xの生成に及ぼす圧力の影響としては、NOの生成速度(mole/cm³・sec)が圧力の1.5乗にほぼ比例することや、ガスタービン燃焼器の排出濃度が圧力の約0.5乗に比例することなどが知られているが、フュエルNO_xの生成に及ぼす圧力の影響についてはいまだ十分に検討されていない。本試験結果によれば、燃焼器内圧力の上昇に伴いNO_x転換率、NO_x排出濃度ともに減少する傾向があることが明らかになった。

2-3-7 まとめ

以上の成果を要約すると以下の通りとなる。

空気吹き噴流床石炭ガス化用ガスタービンの150MW級実寸燃焼器およびその1/2寸燃焼器を設計・試作し、それぞれ常圧燃焼試験、高圧燃焼試験を実施し、燃焼器特性を評価した。

その結果、石炭ガス化用1,300℃級ガスタービン燃焼器は、天然ガスなどに比べ発熱量が10分の1程度の石炭ガス化燃料でも安定かつ効率的に燃焼できることを明らかにした。さらにフュエルNO_xを低減させる燃焼技術としてリッチ・リーン燃焼法が有効であることが明らかになった。

今後は、さらにNO_x排出特性に優れた低NO_x燃焼器の開発が望まれる。このためには、リッチ・リーン燃焼法により一層の低NO_x化を目指し、スワラ近傍の燃焼領域の保炎性を向上させながら、可能な限り燃料過濃状態とする必要がある。

当所は、主燃焼室に副室を設け、保炎性を飛躍的に向上させることにより低NO_x化をはかる「保炎強化型燃焼器」、また空気バイパス弁を用い燃焼器への空気流量を制御することにより、部分負荷時のNO_x排出特性を向上させる「空気制御型燃焼器」等を含めて、さらに高効率で環境保全性に優れた石炭ガス化用1,300℃級ガスタービン燃焼器の開発を推進する予定である。 ●

2-4 石炭ガス化複合発電プラントシステム

2-4-1 研究の背景

資源エネルギー庁より NEDO を経て、1983年度から 3 ケ年で実施した噴流床方式石炭ガス化複合発電のフィージビリティスタディにおいて、我が国に適したプラント構想の評価・選定を行った。

その結果

- ① ドライフィード・空気酸化・加圧 2 室 2 段噴流床炉
- ② 乾式クリーンアップ

による発電方式が、最も高い評価を得た。

当所では、本方式による図2-4-1に示す石炭ガス化複合発電プラント実用化の鍵となる要素技術開発を推進すると共に、プラントシステムとして、信頼性、熱効率、負荷応動性、炭種適合性に優れた商用機の開発を目指して、システム評価技術の研究開発に取り組んでいる。

2-4-2 研究の目的

石炭ガス化複合発電プラントは、従来の火力発電プラントにないシステム構成を有している。

特に空気吹き加圧 2 段噴流床方式ガス化炉を採用した複合発電プラントでは、ガス化炉へ供給される燃料系、空気系並びに蒸気・水系がともに次のようにシステム内で複雑に循環供給され、性能・特性の相互干渉を引き起こす。

- ① ガス化剤である空気をガスタービン圧縮機より抽気して供給
- ② ガス化炉で生成したチャーを回収しコンバスタへ供給
- ③ ガス化炉水冷壁、熱交換器、排熱回収ボイラ各機器を熱回収用蒸気・水が循環

このため、発電プラントとして想定される種々の状況下で、プラントシステムとしての機能を最大限に発揮させるためには、各構成機器の特性を把握するのみでなく、構成機器特性の変化がプラント全体の性能や運用性等に与える影響を解明し、総合的な視点から解析・検討・評価を行うことが肝要である。

以上のことを踏まえ、本研究は、前述した要素機器の研究成果・知見をプログラム体系化し、電気事業に最も適した石炭ガス化複合発電プラント像を明確化し、実証プラントの早期実現に資することを目的として実施している。

2-4-3 研究の内容

本研究は、1983～85年度の NEDO・F/S から着手し、図2-4-2に示す検討ステップで、シミュレーション技術の向上を図りながら、最適な石炭ガス化複合発電プラント像の確立を目指している。

(1) シミュレーション技術開発

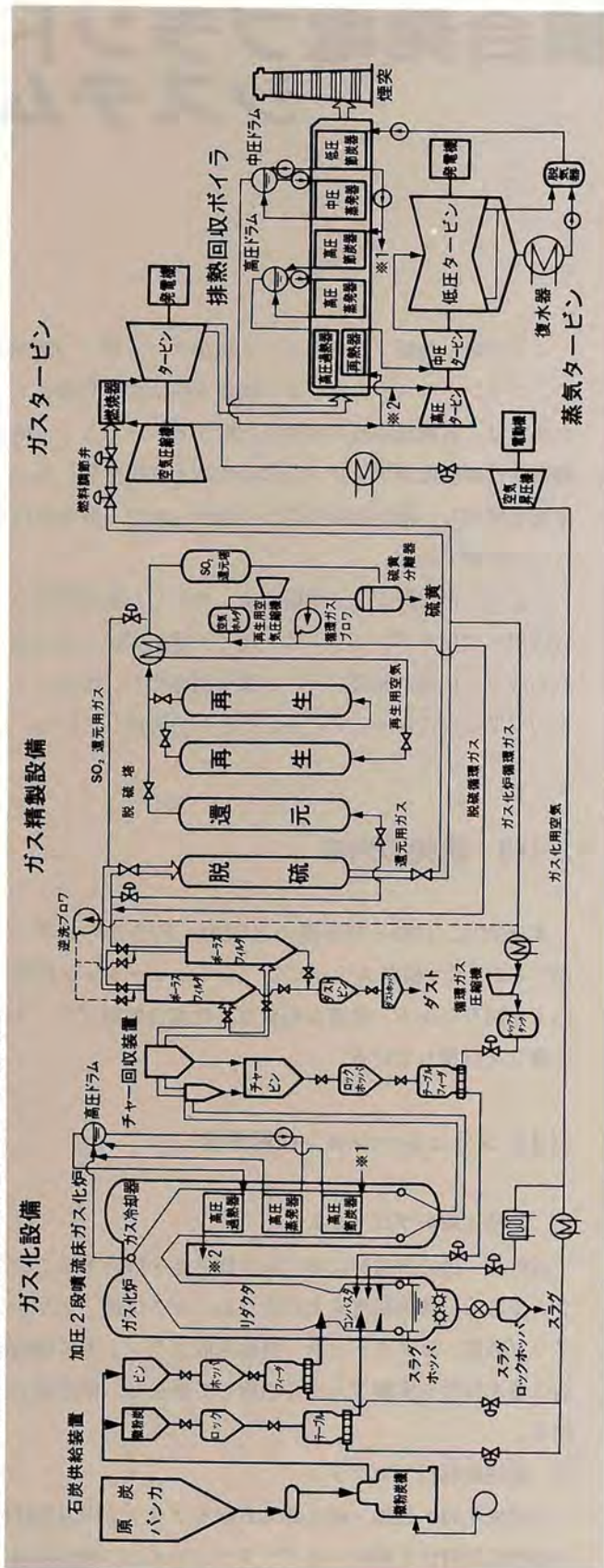
① 静特性解析プログラム

設計点、部分負荷時における全体性能を解析するプログラムである。解析精度を上げるため、ガス化炉、クリーンアップ装置、ガスタービン、排熱回収プラント等各構成機器の基本特性を実験データを活用して修正し、精度向上を図る。

② 動特性解析プログラム

負荷変化時、起動・停止時におけるプラント内各部状態の過渡変動特性を解析するプログラムである。構成機器、

図2-4-1 噴流石炭ガス化複合発電プラント構成図



配管等ボリューム要素による状態変動の時間遅れを加味したモデリングを行う。

③ 制御システム解析プログラム

プラントの制御系を模擬するプログラムで、デジタルコントローラを用いてプラント特性、各種協調制御システムのモデリングを行う。

(2) 性能評価手法の確立

石炭ガス化複合発電プラントを構成する各設備の熱・物質収支と整合のとれた性能評価指標の定義式を提案し熱流れ図を用いた全体プラントの性能評価手法の確立を図る。

これまでは、個々の機器特性や性能を解析したり、効率のみを計算するプログラムは存在したが、総合的な立場からプラントを評価する手法が望まれてきた。

特にガス化炉の各操作が全体性能に与える影響を推定することとし、次の検討評価を行う。

- ① 生成ガスによるチャー搬送時のガス化性能推定と操作量設定に関する検討・評価
- ② コンバスタ/リダクタ給炭量変化特性解析・評価
- ③ 混炭時ガス化性能の推定・評価
- ④ 酸素富化時ガス化性能の推定・評価
- ⑤ CWM 利用時のガス化性能検討・評価

(3) プラント動特性と協調制御方式の開発

プラントの運用性向上を図るため、動特性を解析し、それに基づいた統括制御方式を検討する。

① プラント過渡応動特性把握

燃料切替特性、空気源切替特性、負荷変動特性、起動・停止特性などの解析・評価を行う。

② 協調制御方式の開発

ガス化炉協調方式、ガスタービン協調方式、ガス化炉ーガスタービン協調方式などを比較検討する。

(4) スケールアップ性能

2 T/日ガス化炉の実験データを基に、将来の実用プラ

ントなどの特性を推定する。例えば、2 T/日ガス化炉等要素機器特性と物理式に基づくパイロットプラント、実用プラントの性能推定、パイロットプラントの設計データに基づく性能推定と実用プラントの性能推定、パイロットプラントの試験結果と特性データに基づく実用プラントの性能推定など、順次推定精度を高めながら検討を進める。

2-4-4 研究の成果

表2-4-1に石炭ガス化複合発電プラントのシミュレーションプログラムの開発状況を示す。本プログラムを用いてこれまで解析、検討を行った中で、主要な成果は次の通りである。

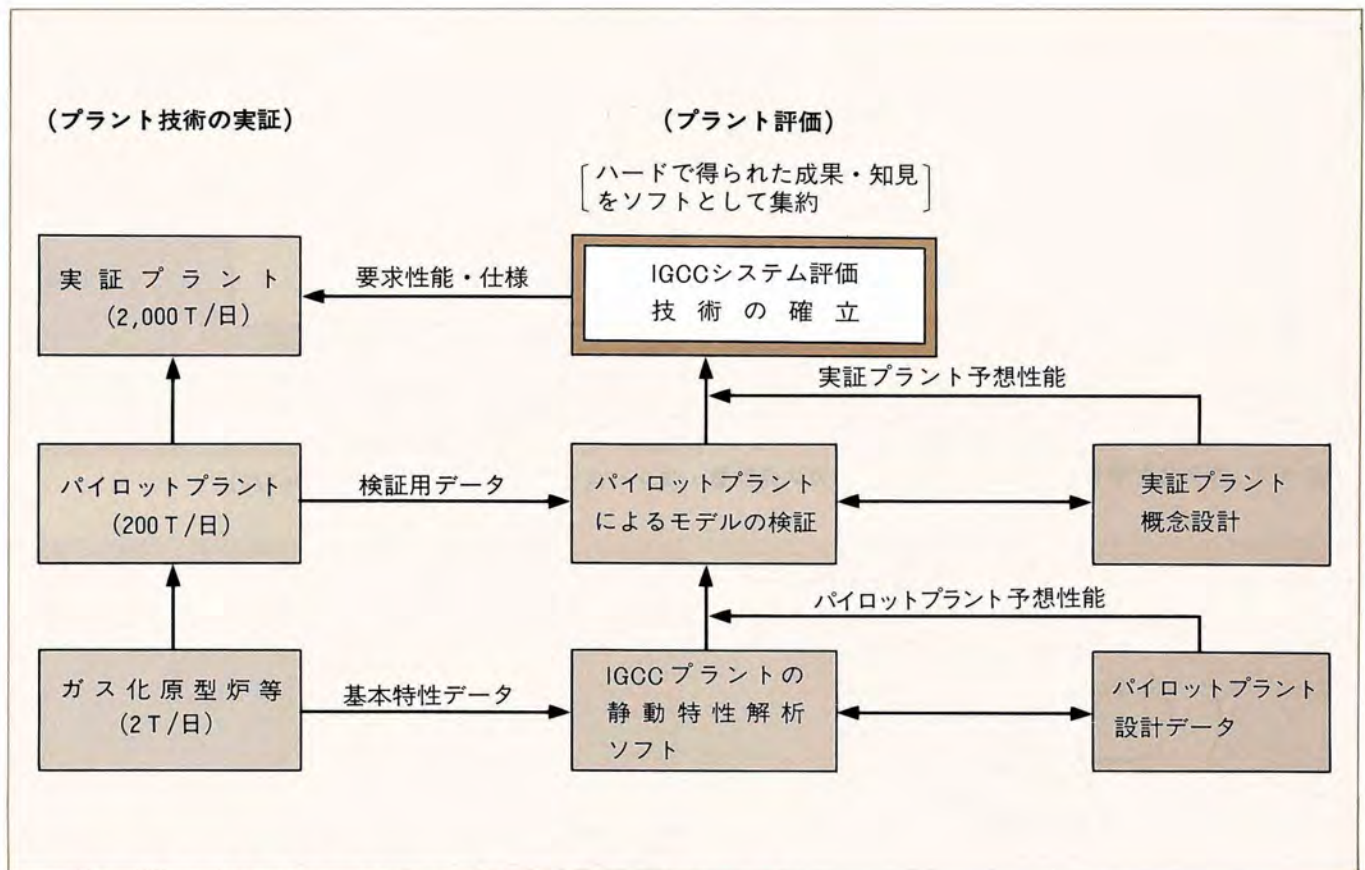


図2-4-2 石炭ガス化複合発電(IGCC)プラント評価技術検討ステップ

表2-4-1 ガス化複合発電シミュレーションプログラム開発の状況

構成設備	特性模擬範囲	静 特 性		動 特 性		制御システム
		定 格	部 分 負 荷	最低負荷～定格	起 動・停 止	
ガ ス 化 炉		2	0	2	0	2
ガ ス 精 製		1	0	1	0	1
ガ ス タ ー ビ ン		3	3	3	0	1
排熱回収ボイラ蒸気タービン		3	0	3	0	1
総 合		1	0	1	0	1

0：モデリング検討中

2：ベンチプラント規模実験データによる検証・改良

1：基礎方程式中心の物理モデル

3：パイロットプラント規模実験データによる検証・改良

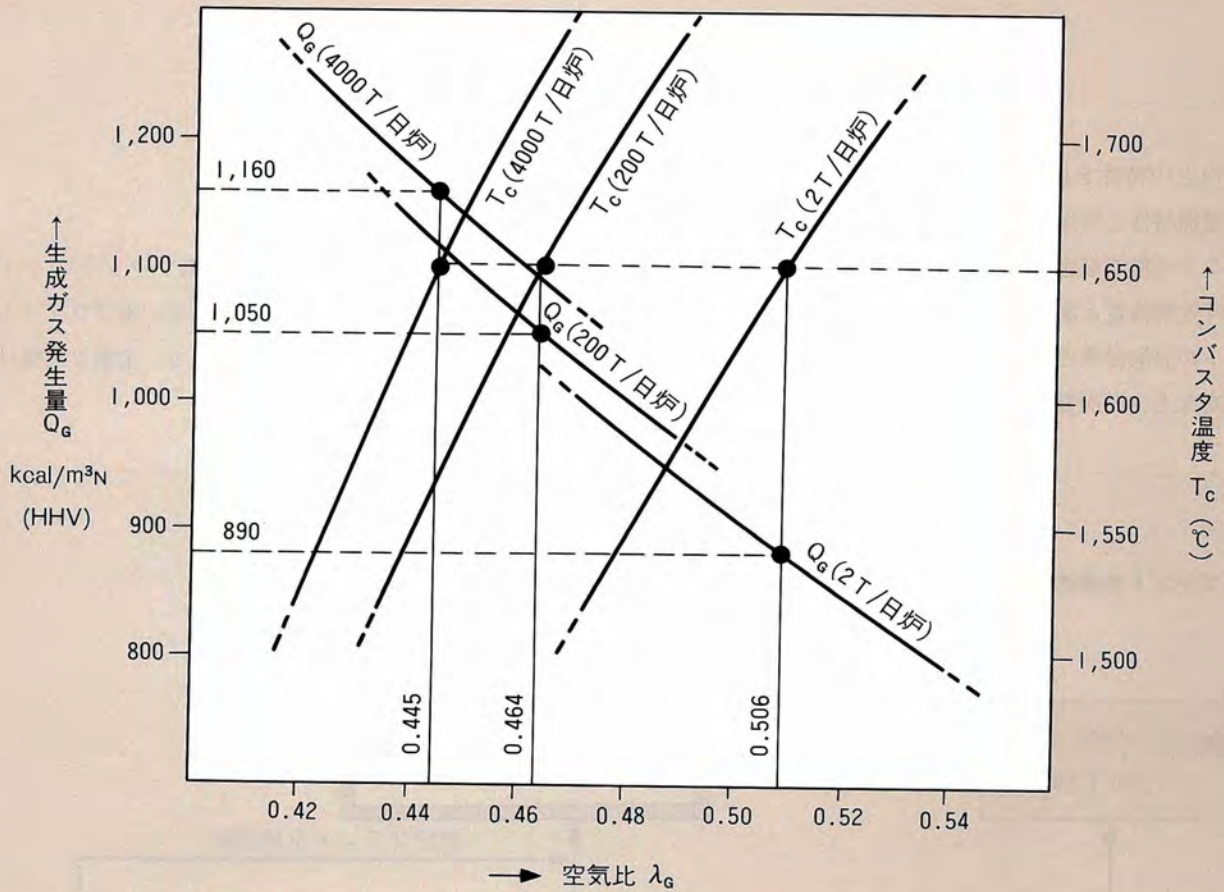


図2-4-3 ガス化炉容量に対する空気比と生成ガス発熱量・コンバスタ温度の関係 (C炭 C/R=4/6)

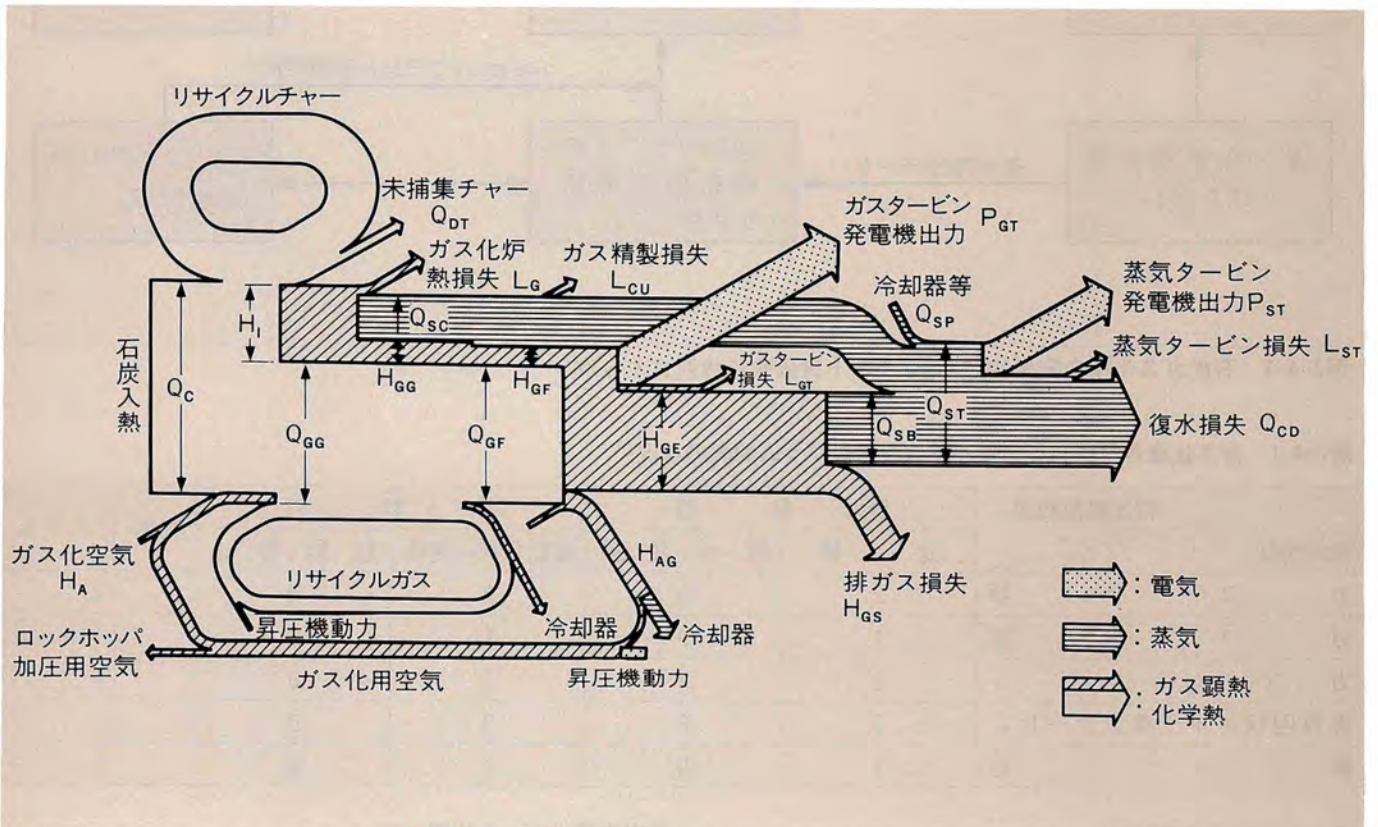


図2-4-4 噴流床石炭ガス化複合発電プラント熱流れ図

(1) ガス化炉スケールアップ時の性能推定

2段噴流床方式石炭ガス化炉においては、スラグの安定排出に必要なコンバスタ温度の維持と空気比の設定並びに、ガス化性能の推定が重要である。

図2-4-3に、ガス化炉容量を2T/日→200T/日→4,000T/日とスケールアップしていった場合の、空気比とコンバスタ温度、生成ガス発熱量との関係を示す。ガス化炉容量が増大することにより、ガス化炉容積に対する表面積の割合が低下することにより、スラグの安定排出に必要なコンバスタ温度を維持するために必要な空気比は小さく

て済む。このため生成ガス発熱量はガス化炉容量の増大とともに大きくなる。

(2) 性能評価指標の確立

各設備の熱・物質収支と整合のとれた性能評価指標の定義を行い、石炭入熱から電力へのエネルギー変換過程を明確化するため、エネルギーを化学熱、ガス顕熱、蒸気顕熱および電気に分けて示す熱流れ図(図2-4-4)を考案し、全体プラントの性能評価を行う手法の構築を行った。

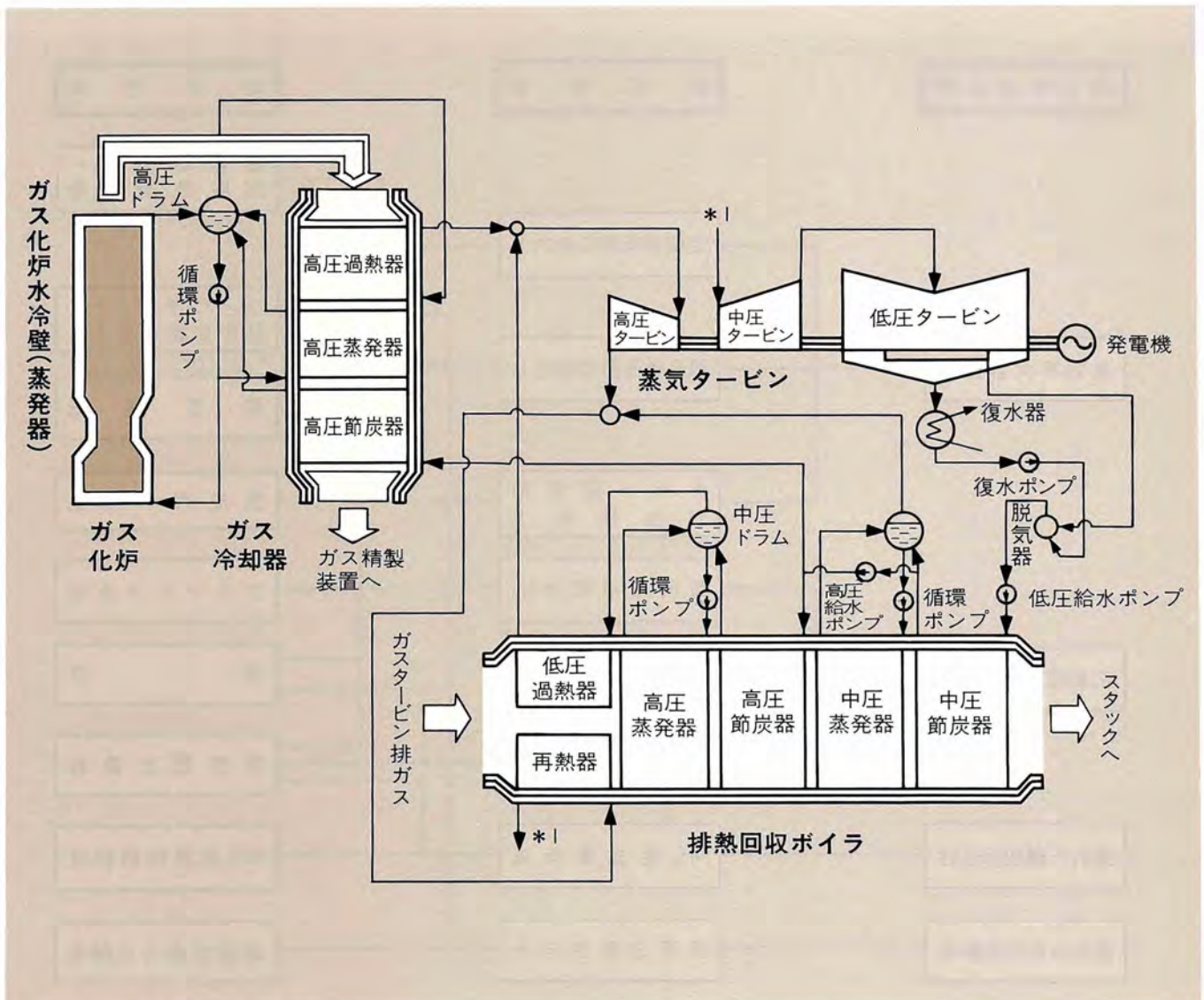


図2-4-5 熱回収システム

(3) 生成ガスによるチャー搬送時のガス化性能推定・評価

2 T/日ガス化炉では、ガス化炉で発生したチャーをコンバスタへリサイクルする搬送用ガスとして空気を用いている。

一方200T/日パイロットプラントでは、チャーの温度が約350℃（2 T/日炉では、50～100℃）と高温になるため、安全性を考慮して、チャー搬送用ガスとして、生成ガスを用いる計画になっている。

そこで、生成ガスを用いたチャー搬送時の影響評価を

行った結果、コンバスタ温度を維持するために若干2次空気量を増やす必要があり、そのためガス化炉の冷ガス効率は低下するものの、石炭ガス化複合発電プラントとしての性能には、ほとんど影響を与えないことを明らかにした。

(4) コンバスタ/リダクタ給炭量比変化時におけるガス化性能解析・評価

空気吹き加圧2室2段ガス化炉においては石炭をコンバスタ、リダクタに供給し、コンバスタ部では、スラグの安定排出に必要な温度維持とリダクタ内反応に必要な熱の供

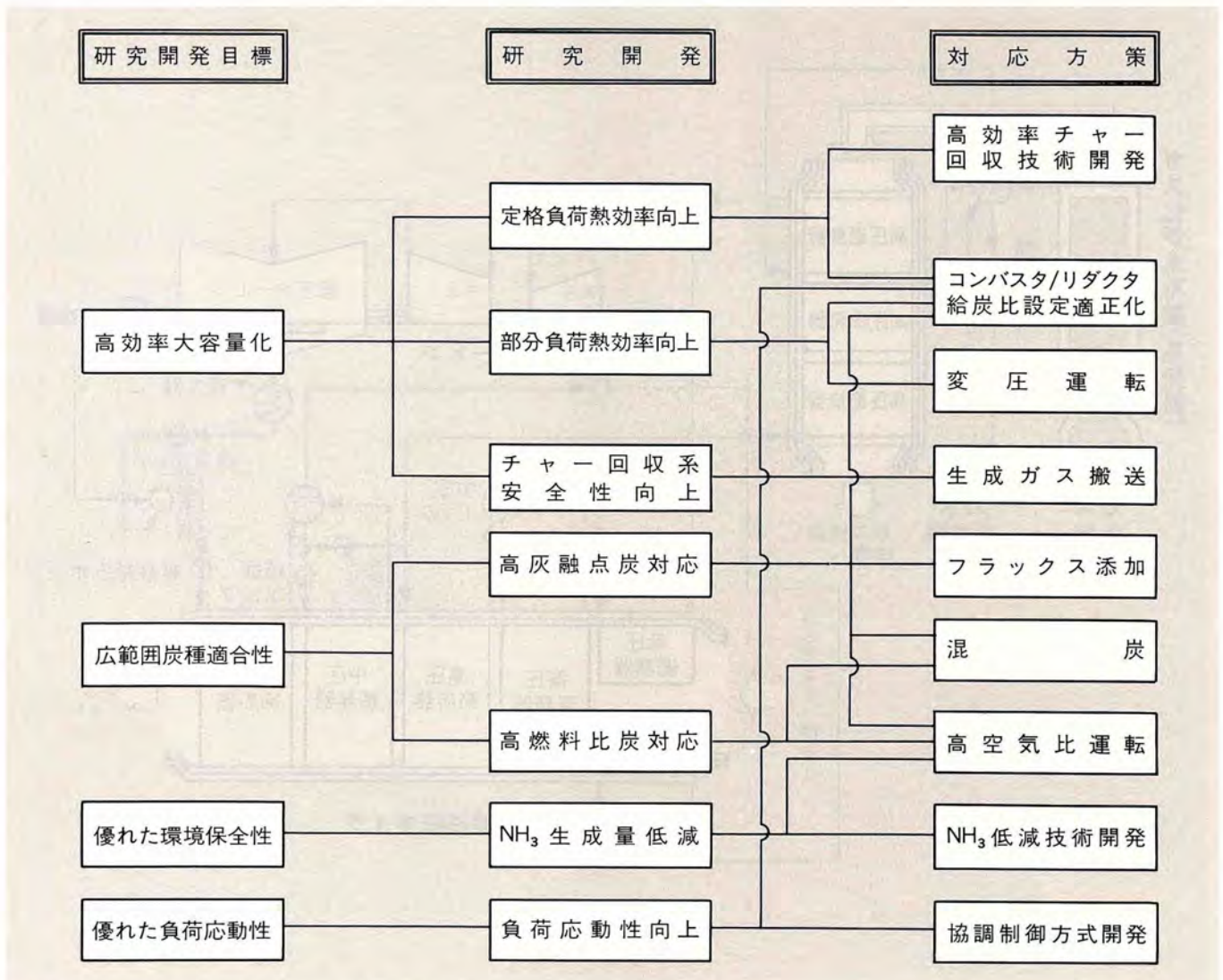


図2-4-6 性能向上のためのガス化炉運転方策

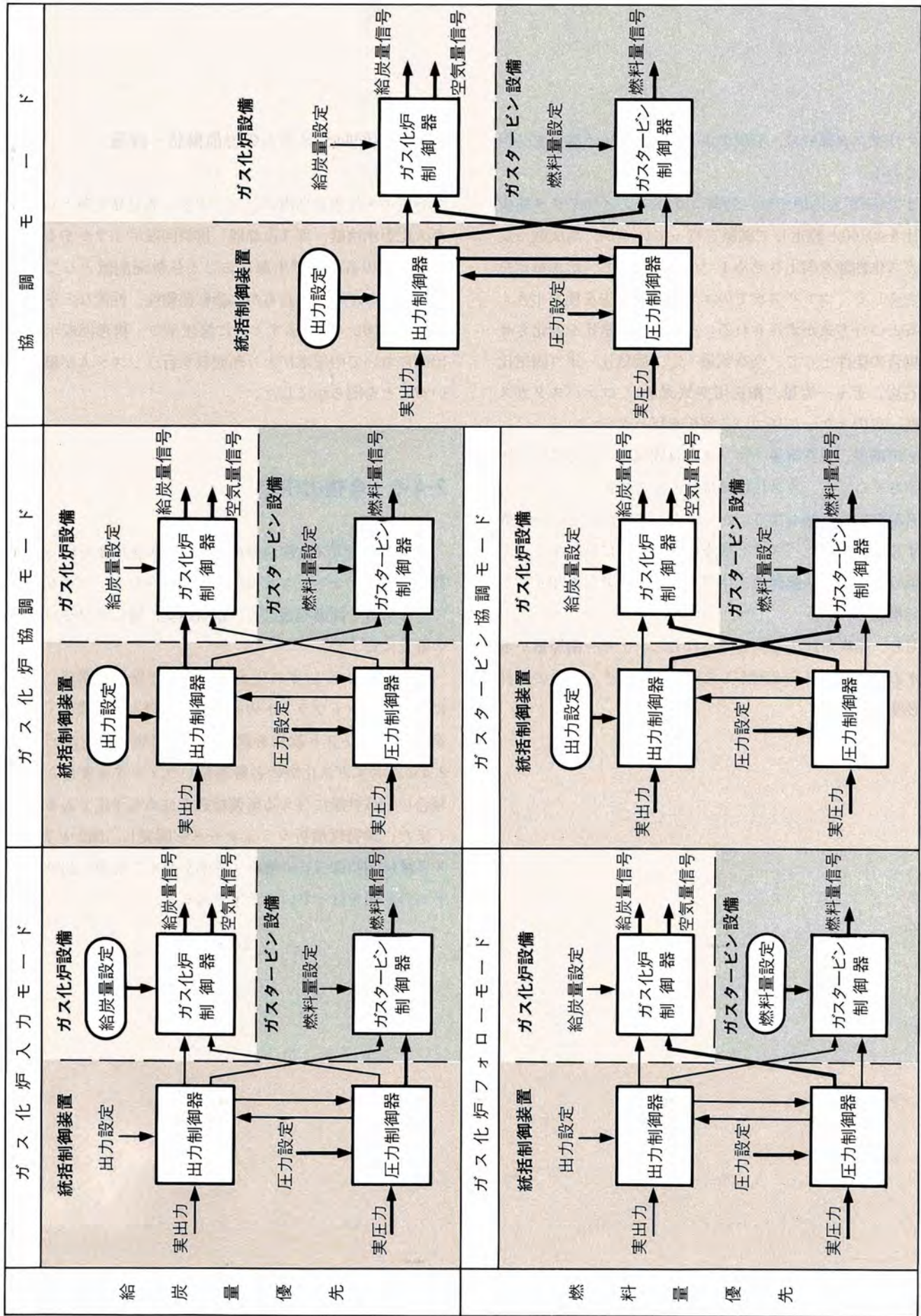


図2-4-7 石炭ガス化複合発電各種制御モード

給、リダクタ部では、石炭のガス化反応という機能を分担している。

2 T/日ガス化炉では、通常コンバスタ／リダクタ給炭量比を40/60と設定して試験を行っているが、高灰融点炭のガス化性能を向上させる1つの方法として、給炭量比を小さくして、コンバスタでのエネルギー損失を極力小さくするという方式が考えられる。そこで給炭量比を変化させる場合の条件として、全空気量一定、固気比一定（固気比＝石炭、チャー流量／搬送用空気流量）、コンバスタガス温度一定の3ケースについて解析を行った。

その結果、全空気量一定、または固気比一定で給炭量比を小さくしても、ガス化性能はほとんど変化せず、コンバスタ温度の上昇幅も小さいが、コンバスタ温度を一定に維持するようにコンバスタ2次空気量を適当に制御することにより、生成ガス発熱量、冷ガス効率が顕著に増加するものと推定された。

但し、給炭量比を減少させると共に、チャー循環量が増加するため、これらを勘案したリサイクルチャー系の設計が必要となる。

(5) 熱回収システムの性能解析・評価

石炭ガス化複合発電プラントの主な蒸気発生源としては、ガス化炉水冷壁、ガス冷却器、排熱回収ボイラがある。

これらの各蒸気発生源における伝熱面配置としては、種々のものが考えられるが、運転信頼性、性能などを考慮すると、図2-4-5に示すように混圧型で、排熱回収ボイラ出口において中圧水により熱回収を行うシステムが優れていることを明らかにした。

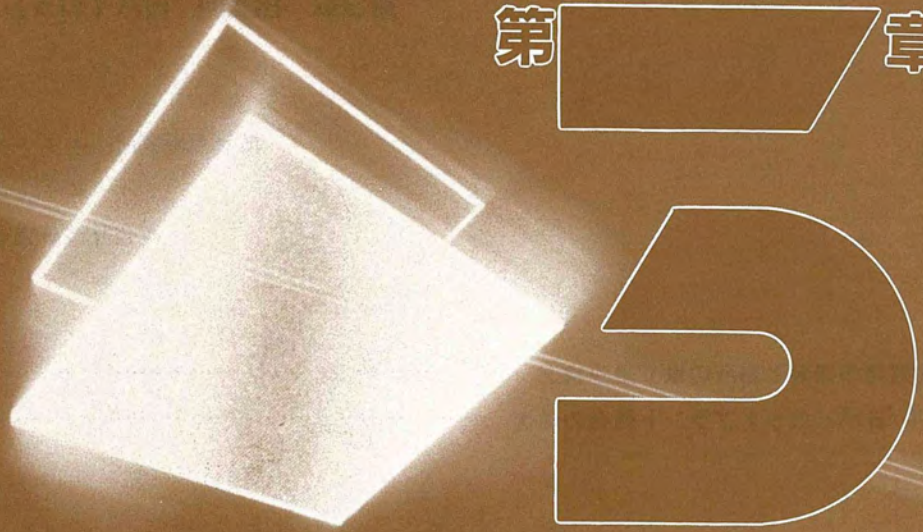
2-4-5 今後の予定

噴流床石炭ガス化複合発電プラントの実用化を図るため、総合的なプラントシステムのシミュレーションプログラムによる解析・評価を通じて、電気事業に適したプラント像の確立に資する。

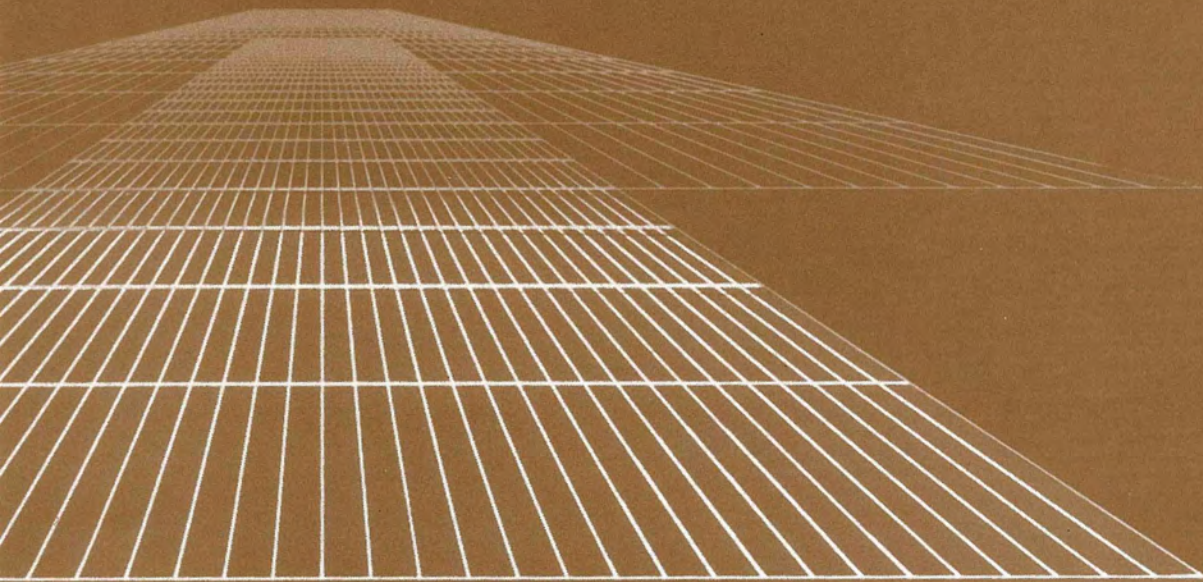
このため2 T/日ガス化炉等による要素技術開発、さらにはパイロットプラントの研究開発で得られる成果・知見を基に適宜ソフト改良を進め、その解析精度を高めて図2-4-6に示すガス化炉の各種運転パラメータを変化させた場合の全体性能に与える影響把握を進める予定である。

また、動特性解析シミュレータを開発し、図2-4-7に示す各種協調制御方式の解析・評価を進め、最適な制御システムの開発を行っていく予定である。

第  章



200T/日パイロットプラント計画



第3章 200 T/日パイロットプラント計画 ● 目 次

横賀須研究所 エネルギー部 調査役 北見 恒雄
エネルギー部 調査役 渡辺 正敏
複合発電研究室 主査研究員 森塚 秀人

3-1 研究開発の概要と当所の取り組み状況.....	53
3-2 200 T/日パイロットプラント開発の現状.....	58

3-1 研究開発の概要と 当所の取り組み状況

3-1-1 研究開発の背景

2度に亘る石油ショックを契機として、官民を挙げた新エネルギー政策模索の中から発電用燃料としての石炭の見直しとともに、省エネルギー性等に優れた石炭ガス化複合発電技術開発への要請が高まった。

当所も1980年5月、長期電力需給問題研究会石炭新利用方式評価分科会の中で「石炭新利用技術開発の現状と課題」を取り纏め、石炭ガス化技術開発の重要性を認識していた。

その一方、電気事業大では、中央電力協議会石炭ガス化専門部会を設置するとともに、火力新技術研究会において検討を行った結果、官民一体となって石炭ガス化複合発電技術開発に本格的に取り組むこととなった。

これを受けて当所は、中央電力協議会からの要請により「石炭ガス化複合発電技術の全般調査」等を行うとともに、それに引続き NEDO から石炭ガス化複合発電技術の確立に向けて、基本計画策定のためのフィージビリティスタディ (NEDO・F/S) を受託した。中央電力協議会依頼の調査では、国内メーカーが保有する技術で開発可能な石炭ガス化複合発電所の機器構成、環境性、送電端効率等を検討し、我が国の国情に適合した石炭ガス化複合発電技術の方向性を提案した。(電中研レビュー No.4 参照)

また、NEDO・F/S においては、当所がこれ迄培ったガス化炉技術、クリーンアップ技術、ガスタービン技術、システム技術に基づいて各種噴流床石炭ガス化複合発電方式を比較検討したうえで、石炭ガス化複合発電プラントとして、空気吹き、ドライフィードによるガス化炉、乾式クリーンアップ装置、1,300℃級ガスタービンからなるシステム構成をイメージし、これを実現するための開発計画の

中核となるパイロットプラント開発推進の諸元、例えば、その必要規模、開発工程、必要開発課題等の検討結果を提示した。

NEDO では、これを受け「パイロットプラントの基本計画」を1985年度に取り纏めた。

この基本計画は、総合エネルギー調査会石炭ガス化小委員会と産業技術審議会石炭ガス化特別委員会との合同委員会に諮問され、実行に移すこととなり、我が国に適した石炭ガス化複合発電技術の確立を目的として石炭ガス化複合発電技術研究組合 (IGC 組合) が設立され現在に至っている。

当所も IGC 組合設立に参画し、設立後は研究員の出向派遣とともに、これを支援するため、当所の独自研究ならびに研究分担を鋭意実施している。

以下 IGC 組合で鋭意開発推進中の200T/日パイロットプラントの基本計画ならびに、それに関連して当所が受託して行っている研究成果の概要について示す。

3-1-2 研究開発概要

石炭ガス化複合発電技術の開発目標と主な研究開発課題を表3-1-1に示す。

(1) 200T/日石炭ガス化パイロットプラント推進体制

本プロジェクトを推進するにあたり設立された IGC 組合は、当所および10電力会社より成る我が国初のユーザーのみの技術研究組合である。

IGC 組合は NEDO からの受託を受け研究を実施するものであり、パイロットプラントの建設・試験にあたっては、その建設地である常磐共同火力の協力を得ることとしている。研究所要資金530億円はその9割を国の補助金、残りを組合員からの賦課金でまかなうものである。

なお、乾式クリーンアップ技術については、石炭技術研究所夕張試験場40T/日パイロットプラントの乾式クリーンアップ設備による支援研究を別途70億円の予算にて実施する。

(2) パイロットプラントの概要

200T/日パイロットプラントは、空気吹き加圧2段噴流床ガス化炉、クリーンアップ（酸化鉄による流動床脱硫と珪砂によるグラニューラフィルタ集じんの組合せ）、低カロリーガスタービンの研究開発を行うことを3本柱とし、図3-1-1に示す構成になっている。なお、ガス化複合発電プラントとして本来ガス化炉熱交換器、排熱回収ボイラで発生する蒸気で蒸気タービンを駆動して発電するが、排熱回収蒸気系については、既に実用化されているため、本パイロットプラントでは設置せず、計算機シミュレーションで

補完することとしている。以下に各設備の概要を述べる。

① ガス化炉設備は、プラントの高効率化を目指し、石炭供給方式として空気による微粉炭搬送方法を、ガス化剤として空気を、炉型式として水冷壁構造加圧2段噴流床炉を採用した。

石炭処理量は、実プラント用ガスタービンの燃焼器1缶分の燃料ガスを発生することを考慮して200T/日とした。また、ガス化圧力はガスタービン圧力比が14.2であるので、圧損を考慮して27kg/cm²Aとし、ガス化温度は噴流床ガス化炉の特徴である炉底より灰を熔融状態で取出すため、1,600～1,700℃としている。

② クリーンアップ設備は、プラントの効率化を目指して乾式を採用しており、石炭技研夕張試験場において運転試験を実施しているものと同方式である。ただし粗脱塵にサイクロンおよび電気集じん方式のものをガス化炉付属設備として設置し、クリーンアップ設備には約3g/m³N以下のダストを含むガスが入ってくるものと想定している。

クリーンアップ設備では、脱硫方式として酸化鉄系脱硫剤を用いた流動床方式を、硫黄回収方式として炭素還元法を、精密脱塵にはグラニューラフィルタ方式を採用している。

なお、将来の技術動向から固定床脱硫等についても技術

表3-1-1 石炭ガス化複合発電技術開発目標と主な研究開発課題

開 発 目 標	開 発 対 象	新 開 発 課 題	主 な 研 究 開 発 課 題																	
規模 250MW以上(単機容量)	空気吹きガス化炉 加圧 ガス化炉	石炭のガス化 および クリーンアップ ガスタービン 燃 料	高圧可燃性粉体供給 (弁、バーナ、燃料遮断装置など) チャー回収および供給 スラグ連続排出 高温可燃性ガス精製	(共通課題) 大型化技術 シミュレーション技術 材料技術 製造技術 最適化技術																
熱効率 送電端43%以上	微粉炭気流搬送系 (ドライフィード)	<table border="0"> <tr> <td rowspan="2" style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">(</td> <td style="text-align: center;">高 温</td> <td rowspan="2" style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">高 圧</td> </tr> <tr> <td rowspan="2" style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">(</td> <td style="text-align: center;">高バイジン</td> <td rowspan="2" style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">高S分</td> </tr> <tr> <td rowspan="2" style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">(</td> <td style="text-align: center;">NH₃</td> <td rowspan="2" style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">可燃性</td> </tr> <tr> <td rowspan="2" style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">(</td> <td style="text-align: center;">低カロリー</td> <td rowspan="2" style="font-size: 2em; vertical-align: middle;">)</td> </tr> <tr> <td></td> </tr> </table>	(高 温)	高 圧	(高バイジン)	高S分	(NH ₃)	可燃性	(低カロリー)		低カロリーガス高温低 NO _x 安定燃焼 ガス化剤抽気ガスタービン 生成ガスカロリー変動対応 保護、防護技術	
(高 温)																
	高 圧																			
(高バイジン)																		
	高S分																			
(NH ₃)																		
	可燃性																			
(低カロリー)																		
経済性 微粉炭焚石炭火力並	乾式クリーンアップ装置 低カロリーガス焚ガスタービン (1,300℃級)	スラグ排出																		
環境性 既存石油火力並	統括制御システム	(高温 高浸食性)																		
炭種適合性 広範囲な炭種が可能	保護・防護システム																			
運用性 微粉炭火力と同等以上																				
信頼性 微粉炭焚石炭火力並																				

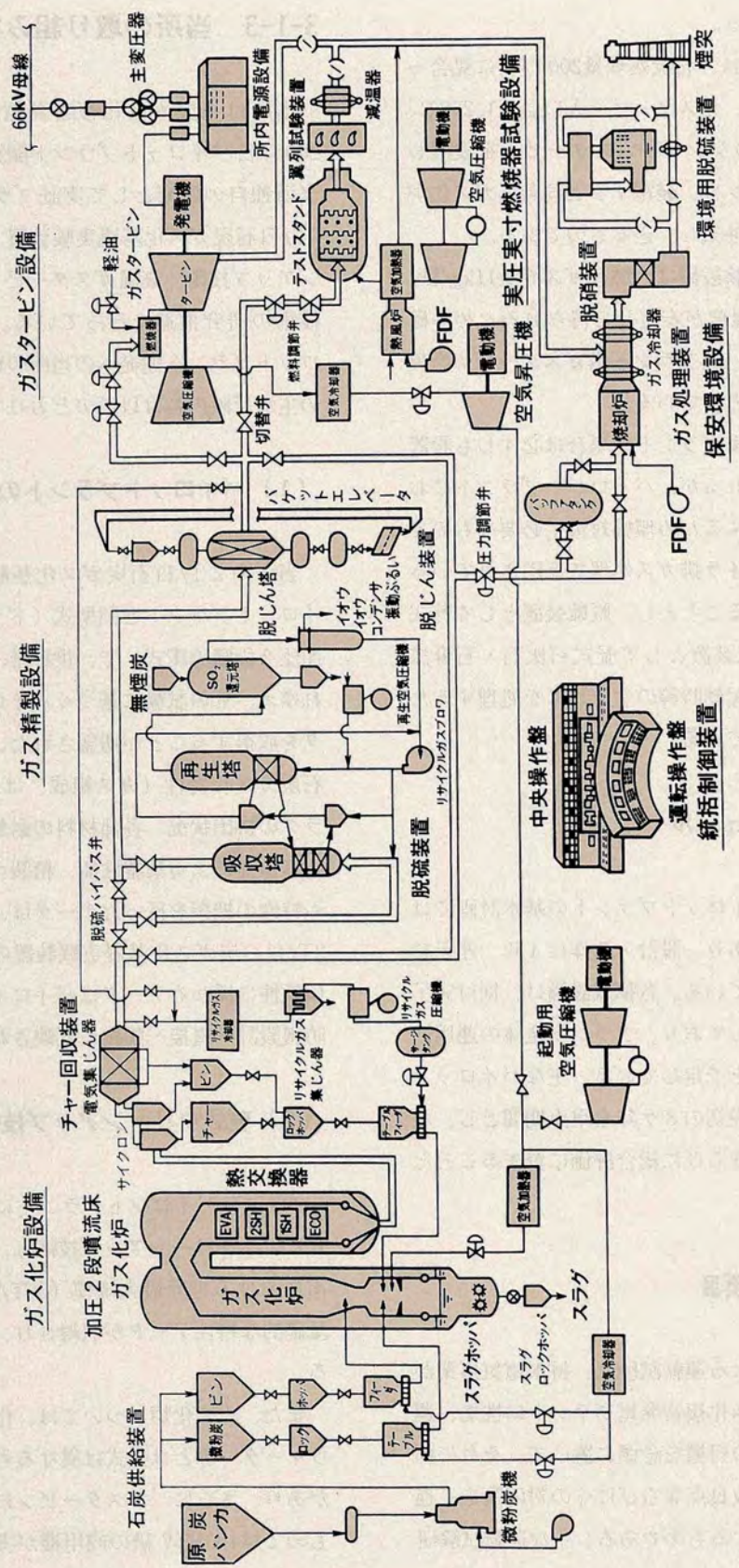


図3-1-5 200 T / 日石炭ガス化パイロットプラント基本構成図

検討を行うこととしている。

③ ガスタービン設備は、石炭処理量200T/日に見合った発生ガスを燃料とする、ガスタービン入口温度1,260℃、発電機出力12.5MW級のシンプルガスタービンを設置している。このガスタービンは、発電すると同時にガス化炉へガス化剤として空気を抽気して送るものである。

④ 実圧実寸燃焼器試験設備は、燃料ガス流量11kg/秒、燃焼器出口1,300℃級の温度が安定して得られるための確認試験を行うものであり、実プラント用ガスタービン燃焼器1缶の試験を行うこととしている。

⑤ 保安環境設備は、実プラントの場合は必ずしも設置の必要性はないと考えられるが、パイロットプラントにおいては各種の試験を実施するため環境対策上必要なものである。従って、既存のボイラ排ガス処理で採用されている最も確実な技術を採用することとし、脱硫装置として乾式NH₃接触還元法と、脱硫装置として湿式石灰石・石膏法を採用している。その他起動時等の生成ガスを処理するためのガス処理炉を設置している。

(3) 研究開発スケジュール

200T/日石炭ガス化パイロットプラントの基本計画では、研究開発期間は7ケ年であり、設計・製作に4年、運転試験研究に3ケ年を予定している。各構成設備は、据付完了次第試運転に入ることとしており、プラント全体の運用性試験は、終わりの2ケ年を予定している。主なパイロットプラントの要素研究は、最初の3ケ年を重点期間とし、パイロットプラントの設計ならびに総合評価に資することとしている。

(4) 運転試験研究の項目

パイロットプラントによる運転試験は、将来電気事業が運用するであろう石炭ガス化複合発電プラントの性能、運用性、環境性、信頼性等の目標を念頭に置いて、それに到達するための開発課題、改良点ならびにその対応策を、運転試験を通じて確認検証するものである。主な運転試験研究の項目を表3-1-2に示す。

3-1-3 当所の取り組み状況

当所は石炭ガス化複合発電技術の確立を図るため、200T/日パイロットプラント開発推進に協力するとともに当所独自の研究として実証プラントの在り方を踏まえて2T/日石炭ガス化基礎実験装置、固定床方式によるクリーンアップ技術、高温ガスタービン技術、トータルシステム技術の研究推進を行っている。そのうち、200T/日パイロットプラント開発への当所の取り組み方および研究成果の主な反映内容は以下のとおりである。

(1) パイロットプラントの設計への反映

当所の2T/日石炭ガス化基礎実験装置は、200T/日パイロットプラントと同型式（ドライフィード、空気吹き、加圧2段噴流床式）で、世界唯一運転中のものである。それゆえ、その試験に基づくパイロットプラントの設計データを取得することが切望された。例えば、各種炭種による石炭ガス化特性（ガス組成、ばいじん量など）、灰熔融スラグの排出状況、各部材料の耐熱、耐食特性等の把握、電気集塵器による集塵性能、精製ガスによるチャーリサイクル特性の把握を行ったデータは、設計に反映された。また、2T/日石炭ガス化基礎実験装置の運転経験に基づく安全性、信頼性に係わるデータはパイロットプラントの安全保護、防護設計へ直接・間接に反映されている。

(2) 乾式クリーンアップ技術の総合的推進

200T/日パイロットプラントに採用されている流動床方式によるクリーンアップ技術は、1980年度より北海道夕張市における世界最大規模（30T/日相当）の試験により、基礎的な特性データが取得され、一応の成果は得られている。

また、ガス化炉については、化学プラントや米国クールウォーター等とは型式は異なるものの実用規模の運転経験があり、さらに、ガスタービンについても天然ガス焚きのものでは100MW級の商用機が実用化され、クールウォータープロジェクトにおいて石炭ガス化ガス（約

2,400Kcal/m³N) のものが良好に稼働した実績をもつ。

これらに比べ、乾式クリーンアップ技術は、北海道夕張市におけるものを除けば、世界でもベンチスケール規模の実験段階である。それゆえ、乾式クリーンアップ技術は、未だ初期の開発段階と見做し、石炭ガス化複合発電技術の確立のためには、流動床方式によるもののみならず、200T/日パイロットプラント開発のバックアップとして他の代替技術も検討し、プロジェクト成功に万全を期すべきものと考えられる。

この考え方に基づき当所は、NEDO・F/S 段階から一貫して固定床クリーンアップ技術等についても検討し、200T/日パイロットプラント開発においても、IGC 組合技術委員会レベルで固定床クリーンアップ技術の検討推進を提案し、国の受託の中で流動床方式と併せ検討し、プロジェクトにおける取り組み方を定めるための資料を提出している。

(3) 低カロリー石炭ガスの燃焼特性評価の反映

商用化されている天然ガスが約 1 万 Kcal/m³N と燃えや

すいガスであるのに比べ、開発中のガス化炉から発生する石炭ガスは、一酸化炭素が多くかつ約 1,100Kcal/m³N と発熱量が低く、安定な燃焼、低 NO_x 化への要求への対応を満たすことが難しいと予想された。それゆえ、当所における燃焼基礎実験装置にて開発候補 3 タイプの常圧実規模燃焼器についてその燃焼特性を評価し、最適な燃焼器開発の指標を提示することとしている。

(4) 200T/日パイロットプラント運転試験計画の検討

当所は、2 T/日石炭ガス化基礎実験装置の運転ならびにこれ迄の火力発電所の動特性、伝熱特性試験の実施経験に基づいて、200T/日パイロットプラントの必要な試験項目などの検討を行い、1991年度から予定されている200T/日パイロットプラントの運転試験に際する試験項目、試験条件、計測点、測定個所等、試験計画策定に関する資料提供を行っている。

表3-1-2 パイロットプラントによる運転試験研究の項目

石炭供給・ガス化炉	クリーンアップ	ガスタービン	プラントシステム
a. ガス化基本特性・最適ガス化条件の把握	a. 精製基本特性・性能把握	a. 燃焼器の着火・起動特性	a. プラント全体性能
b. 炭種適合性	b. 長時間運転性能	b. 燃焼器全負荷特性	b. 運転特性・制御性
c. スラグ安定排出性	c. 負荷変化性能	c. 燃焼器排ガス性能	c. 安全性
d. ロックホッパシステムの作動性	d. 起動、停止および非常停止性能	d. ガスタービン基本特性・性能把握	d. 環境性
e. 耐火材性能の検討	e. 炭種適合性	e. ガスタービン抽気特性	e. 廃棄物処理・有効利用技術
f. 起動・停止性能、負荷変化特性	f. 吸収剤への微量成分影響	f. ガス化炉・ガスタービン連携運転性能	
g. 実証炉へのスケールアップ技術	g. ガス精製系総合特性	g. 負荷遮断等非常停止性能	
h. 熱交換器伝熱性能		h. ガスタービン総合性能	
i. 各種材料腐食性評価			
j. ガス化炉総合特性			

3-2 200T/日パイロットプラント 開発の現状

3-2-1 要素研究開発

200T/日パイロットプラントを設計・建設するに当たって、これまでに当所が行ってきた2 T/日炉等による試験データ・運転経験、重電諸メーカーが保有する技術ノウハウの他、要素試験装置による種々の要素研究開発が必要となり、表3-2-1に示す項目について各要素について研究開発が実施された。

当所は、1983年度より2 T/日炉、固定床乾式ガス精製実験設備により主要機器の研究開発を進め、200T/日パイロットプラント計画の立案に際してNEDO・F/S等を通じて基盤的役割を果たしてきた。パイロットプラント計画がスタートしてからは、2 T/日ガス化試験等による研究を分担研究として実施している。当所で実施している要素研究開発課題は表3-2-1に太字で示している。

以下にガス化炉に関する代表的な研究成果について概説する。

200T/日パイロットプラントの原型炉である2 T/日炉を用いて、ガス化特性の研究として、ガス化性能、アンモニア発生量、供給系ハンドリング性、チャーハンドリング性、スラッキング性およびスラグ排出性について検討した。

石炭は炭種によりその性状が著しく異なるが、ガス化特性に最も大きく影響を与えるのは、灰溶融点であることが判明した。

図3-2-1に石炭の空気比（理論完全燃焼空気量に対するガス化空気量の比）に対する生成ガス発熱量と、コンバスタ温度の関係を示す。

生成ガス発熱量は、炭種によらず、ほぼ空気比により決まる。低灰融点炭は、低いコンバスタ温度で運転が可能であり、空気比を絞ることが出来るので高いガス化性能が得

られる。逆に高灰融点炭は、コンバスタ温度を高く保つ必要があるため、空気比の高い運転となり、ガス化性能が低くなる。NO_xの原因となるアンモニアの発生量は、空気比を絞ると多くなる傾向があり、1,000ppmを越えるものも見られた。

次に、パイロットプラントの設計に大きく反映された例として、生成ガスによるチャー搬送とガス化炉形状・バーナ配置の検討について述べる。

1986年度にメーカにおいて高圧可燃性粉体基礎特性の測定が行われ、その結果、チャーの着火温度は加圧下において低くなることが判明し、安全性確保の観点から、チャーの搬送に酸素を含まない生成ガスを用いることが検討された。そこで翌年度、生成ガスによるチャー搬送装置を当所2 T/日炉に設置し、生成ガスによるチャー搬送を行った場合のガス化特性の影響について試験を行った。

その結果チャーの水分による凝集を避けるため、生成ガス温度を露点以上に保てばチャー搬送は問題が無く、ガス化特性はチャー空気搬送の場合とほとんど変わらないことが確認され、パイロットプラントで採用することとなった。

ガス化炉内の流動状況はガス化炉形状、バーナ配置により変化し、ガス化特性、特にスラッキング性に大きく影響を及ぼすものと考えられる。そこで当所では、水流モデル流動解析装置を用い、200T/日炉の1/10アクリルモデルを作り、ガス化炉内流動解析を実施した。

その結果、コンバスタの旋回流によってリダクタからコンバスタへのガスの逆流が認められ、コンバスタ内径およびディフューザ内径がそれぞれ1,500mm→1,200mm、600mm→480mmに縮小された。

また図3-2-2に示すように、リダクタ上部、ガス冷却器上部にガスのよどみ部が出来、チャーの堆積が予測された。

表3-3-1 パイロットプラント計画における要素研究開発課題一覧

ガス化炉	ガス精製
<p>1. ガス化特性の研究</p> <p>a. パイロットプラント候補炭試験</p> <p>b. 連続ガス化試験</p> <p>2. 高圧可燃性粉体系の信頼性と安全に関する研究</p> <p>a. 高圧可燃性粉体連続供給装置の開発</p> <p>b. 高圧可燃性粉体自動バーナの開発</p> <p>c. 緊急燃料遮断装置の検討</p> <p>d. 高圧可燃性粉体基礎特性の把握</p> <p>e. 容器内着火爆発時の保安技術の研究</p> <p>3. 高温チャー回収系における性能と保安の研究</p> <p>a. 常圧模擬ガスによる高温チャー回収装置の検討</p> <p>b. 2T/日炉高温・高圧・実ガスチャー回収試験装置の試験</p> <p>c. 生成ガスによるチャー搬送装置の試験</p> <p>4. ガス化炉要部構造の研究</p> <p>a. ガス化炉形状・バーナ配置検証</p> <p>b. 高温高圧エキスパンションの検討</p> <p>c. 水冷スラグタップの開発</p> <p>d. 水冷スラグタップ試験</p> <p>e. スラグクラッシュ構造・破碎特性の検討</p> <p>5. 高ばいじん下における熱交換器伝熱特性の研究</p> <p>a. 常圧管群伝熱試験による伝熱特性の研究</p> <p>b. 実ガス条件下熱交換器チャー付着評価</p> <p>6. ガス化ガス雰囲気下における材料の信頼性の研究</p> <p>a. 高温常圧下での材料の高温腐蝕性の研究</p> <p>b. 低温高圧下での材料の低温腐蝕性の研究</p> <p>c. 高ばいじん下での材料の摩耗性の研究</p> <p>d. ガス化炉材料実ガス腐蝕摩耗試験</p> <p>7. 測定・計測技術の開発</p> <p>a. 超高温温度計の開発 (2色温度計)</p> <p>b. 超高温温度計の試作試験 (熱電対)</p> <p>c. 連続ガス分析計の開発</p> <p>d. 自動チャー分析計の開発</p> <p>e. 粉体レベル計、流量計の開発</p> <p>8. ガス化炉付属機器構造の研究</p> <p>a. ガス化炉用スートブロウ装置の開発</p> <p>b. ガス化炉用弁類の研究</p> <p>c. ガス化炉用弁類実ガス試験</p> <p>9. 立体モデルによる保安空間と安全対策の研究</p> <p>a. 立体モデルによるプラントレイアウトの検討</p> <p>10. 物性調査要素研究</p> <p>a. 石炭・チャーの反応性の把握</p> <p>b. スラグ粘度の測定</p> <p>c. 微量ガス成分分析</p> <p>11. 水質調査要素研究</p> <p>a. スラグ排水および水洗浄塔水の水質調査、排水処理の検討</p> <p>b. スラグおよびチャーの溶出試験</p>	<p>(脱硫装置)</p> <p>1. 装置の大型化および構造の最適化研究</p> <p>a. 脱硫装置の大型化および構造最適化</p> <p>b. 溢流条件の最適化</p> <p>2. 脱硫剤仕様の最適化研究</p> <p>a. 脱硫剤仕様の最適化</p> <p>3. 構成機器の最適化と信頼性の研究</p> <p>a. 耐熱、耐摩耗、耐蝕材料の最適化</p> <p>b. 粉粒体弁の選定</p> <p>(脱じん装置)</p> <p>4. ろ過材に関する研究</p> <p>a. ろ過条件の最適化</p> <p>b. ろ過材ダスト分離方法の最適化</p> <p>c. ろ過材の気流搬送および気流によるダスト分離に関する研究</p> <p>5. 制御・監視における信頼性向上に関する研究</p> <p>a. ダストモニターの改良</p> <p>b. レベル計の信頼性向上</p> <p>6. 脱じん装置本体構造の大型化研究</p> <p>a. 高温軸受の開発</p> <p>b. 脱じん装置本体の熱応力解析</p> <p>(固定床ガス精製)</p> <p>7. 硫黄回収装置の研究</p> <p>a. ガス還元反応とクラス反応の評価</p> <p>8. 脱硫塔自動切替弁の研究</p> <p>a. 最適切替弁の選定</p> <p>9. 固定床ガス精製システムの検討</p> <p>a. 固定床ガス精製特性の研究</p> <p>b. 固定床ガス精製装置の概念設計</p>
	ガスタービン
	<p>1. ガスタービン～石炭ガス化炉運転特性の研究</p> <p>a. ガスタービンシステムの最適設計</p> <p>2. 石炭ガス化燃料の安定燃焼技術の研究</p> <p>a. 燃焼の安定化</p> <p>3. 燃焼器の燃料切替技術の研究</p> <p>a. パイロットプラント用ガスタービン燃焼器の開発</p> <p>4. 高性能冷却翼の冷却性能の研究</p> <p>a. パイロットプラント用ガスタービン冷却翼の開発</p> <p>5. 実証機用大型ガスタービン燃焼器の開発</p> <p>a. 低負荷における安定燃焼方式の研究</p> <p>b. 低NOx燃焼方式の研究</p> <p>c. 高効率冷却方式の研究</p>
	全体制御
	<p>1. 複合発電全体システムの研究</p> <p>a. 全体シミュレーションの開発</p> <p>b. 全体制御のシステムの確立</p>

(注) 太字は当所研究分担項目

そこで再度設計変更を行い、ガス化炉上部形状、ガス冷却器上部形状が変更され、200T/日炉の最終形状が決定された(図3-2-3)。

その他、セラミックハイブリッド型水冷スラグタップ、トラバース型熱電対、スラグ流動監視窓、スラグ溶融バーナ等は、2T/日炉運転経験から見て200T/日炉に適用予定または適用することが望ましい技術として提唱している。

3-2-2 建設工程

200T/日パイロットプラントの研究開発組織としてIGC組合が発足(1986年6月)した時点でパイロットプラント建設地点は、福島県いわき市常磐共同火力勿来発電所1～3号ユニットの跡地に決定しており、1986年度には、パイロットプラントのレイアウトの検討、それにとまなうプラント騒音予測等を実施した。

1987年度に入り、パイロットプラント建設に関する現地説明(福島県いわき市)を行い、9月12日建設申し入れを行った。本プラントは小容量ながらガスタービン発電機を有するため、発電所となり、電気事業法70条による自家用発電プラントとして同年12月12日工事計画許可申請(仙台通産局)を行い、翌年1月22日に許可を受けた。

本石炭ガス化発電所は、従来にない全く新しい発電プラントであるため、ガス化炉は電気事業法に安全審査基準等の該当項目が無く、別途火力原子力発電協会に噴流床石炭ガス化複合発電安全設計調査検討委員会を設け、基準に係わる資料作りを進めている。

工事計画の許可を受け、1988年1月25日勿来発電所に準備事務所が開設され、1月27日安全祈願祭ののち、土木準備工事が開始された。4月1日には、IGC組合勿来事務所が正式に発足し6月1日より本工事が開始された。

また、1988年度末には、ガス化炉をはじめパイロットプラントの主要機器が工場において完成し、1989年4月10日に現地立柱式が行われ、機器据付が開始された。本年7月には、ガス化炉の吊り上げが無事終わり、現在は来年11月のガス化炉試運転に向けて、補機、配管等の据付が進んでいる状況である。

図3-2-4にパイロットプラント完成予想図を示す。

3-2-3 試験研究計画

パイロットプラントは、基本構成図(図3-1-1)に示すように、ガス化炉設備、クリーンアップ設備、ガスタービン設備および実圧実寸燃焼器試験設備の他に、各設備を単独運転した場合にも環境性を満たすために保安環境設備を有している。

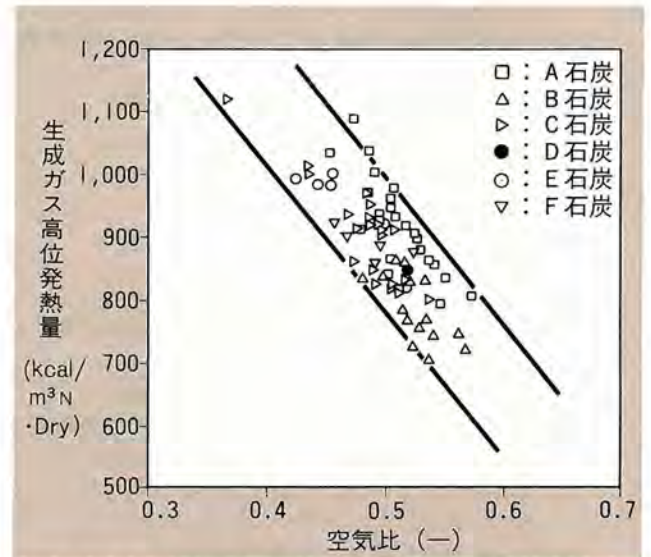


図3-2-1(a) 空気比と生成ガス発熱量の関係

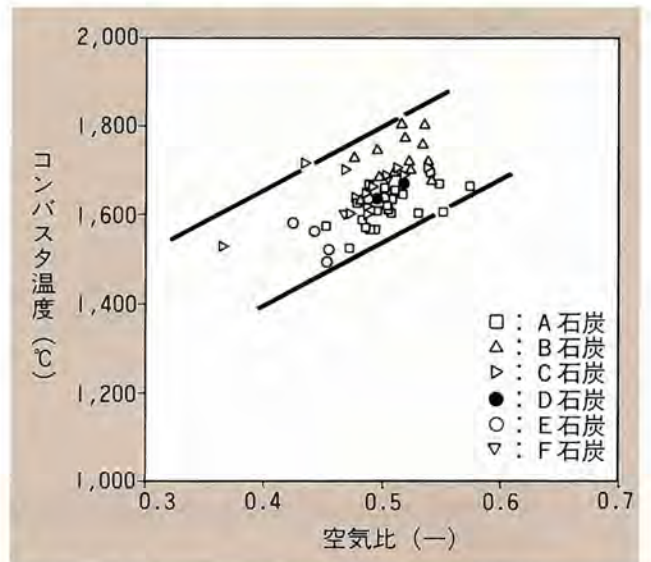


図3-2-1(b) 空気比とコンバスタ温度の関係

図3-2-5にパイロットプラント基本運転モードを示す。パイロットプラントは、先ず①、②に示す機器単独試験より始め、次に③、④のガス精製設備の調整運転を行い、各設備が完全に動くことを確認する。

パイロットプラントの起動は、ガス化炉とガスタービンをそれぞれ個別に起動して、一時⑦の運転モードとし、それからガスタービン燃料を軽油から生成ガスに切替え、最

後にガス化用空気を起動用空気圧縮機からガスタービン抽気昇圧機に切替える。これにより蒸気系を除く石炭ガス化複合発電プラントの総合運転状態⑥となる。総合運転試験が成功した時点でメーカ受取試験を行うとともに国の使用前試験を行う予定となっている。

以降、石炭ガス化複合プラントに要求される特性をパイロットプラントで実証するための試験研究を進めていくが、

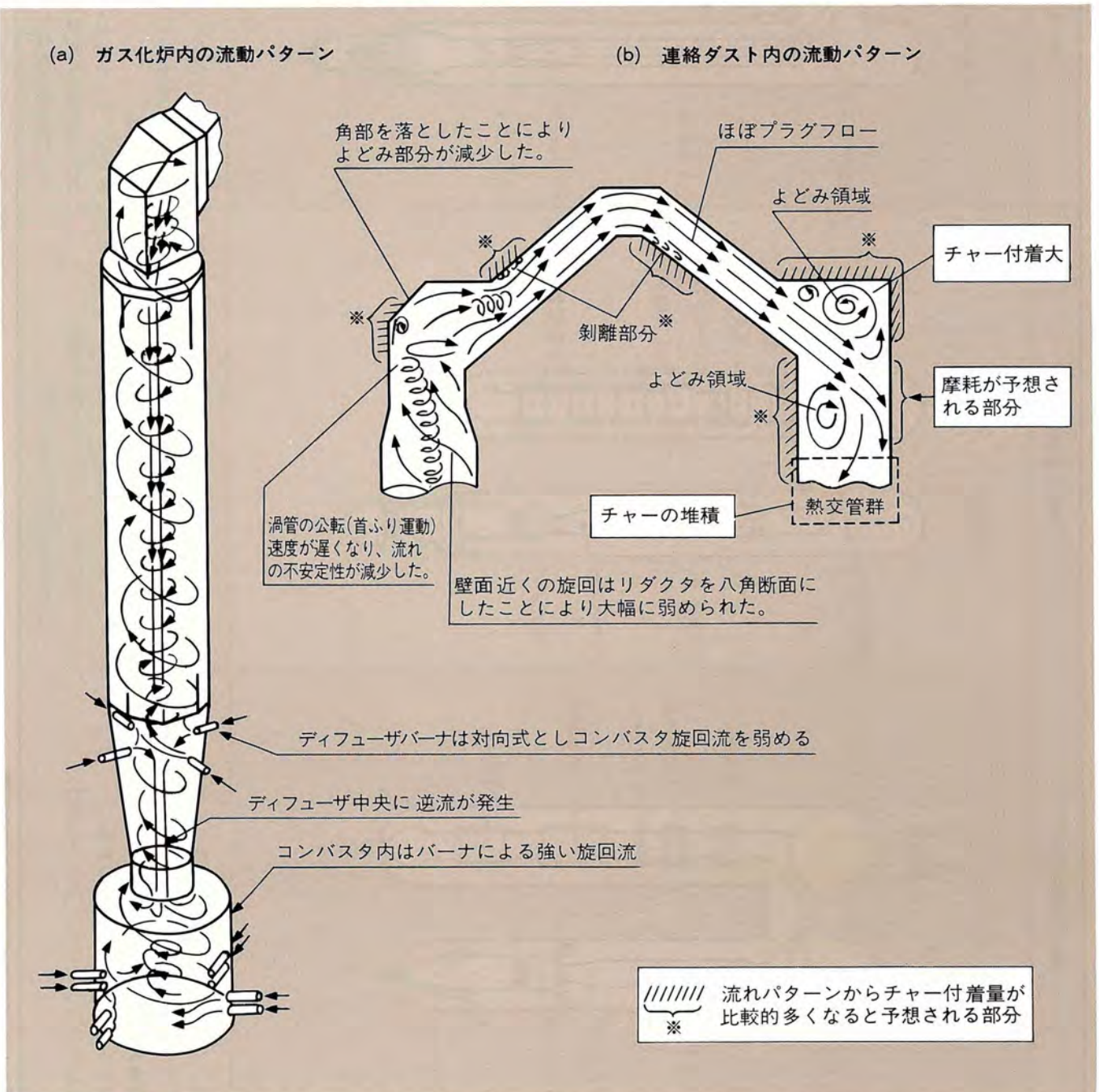


図3-2-2 水流モデルによるガス化炉内流動解析

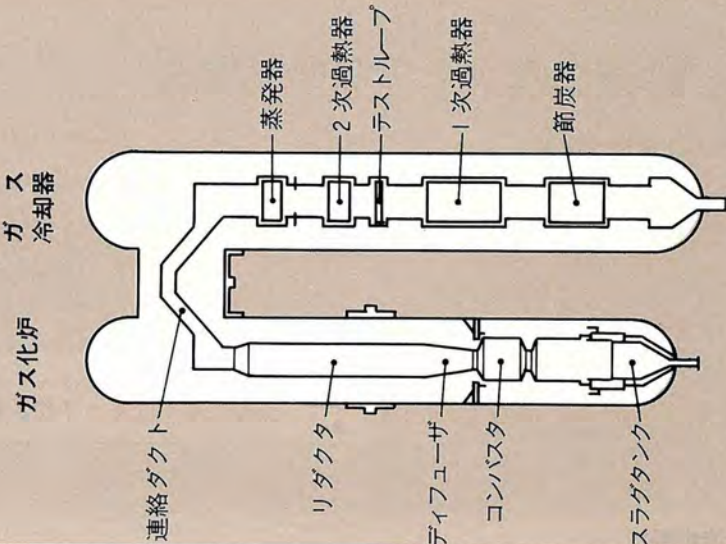
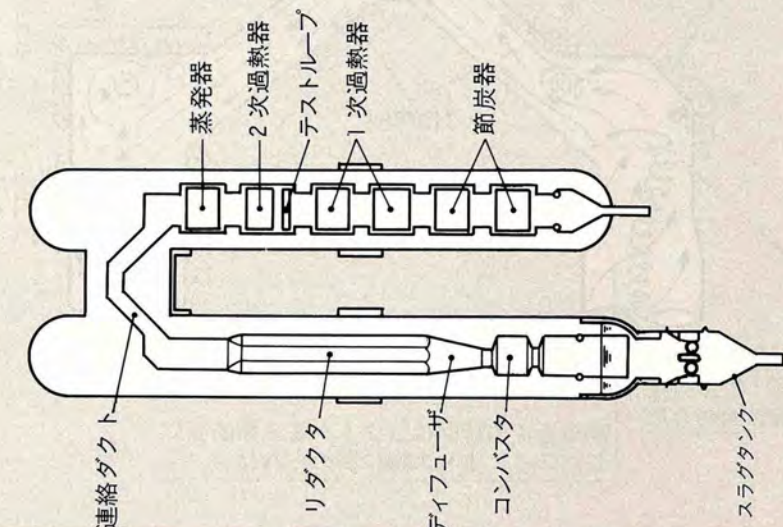
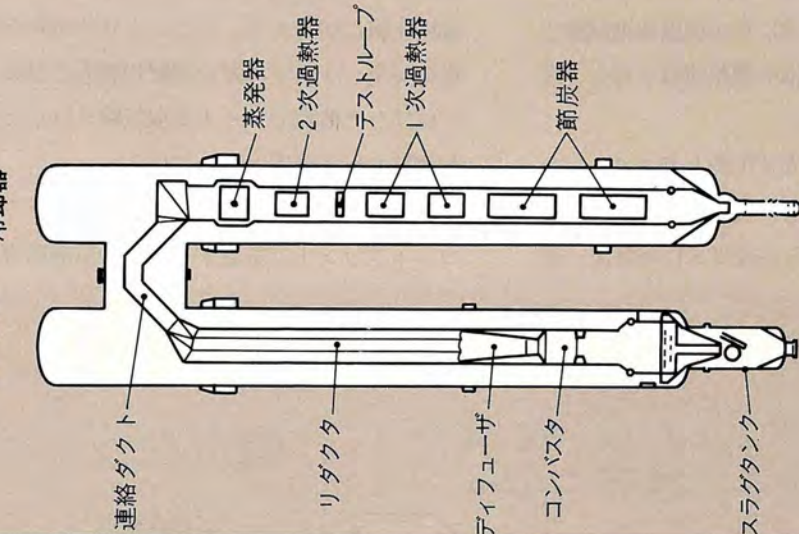
1985年度基本設計	1986年度詳細設計	1987年度最終設計
<p>ガス化炉 ガス冷却器</p>  <p>連絡ダクト リダクタ ダイフューザ コンバスタ スラグタンク</p> <p>蒸発器 2次過熱器 テストループ 1次過熱器 節炭器</p>	<p>ガス化炉 ガス冷却器</p>  <p>連絡ダクト リダクタ ダイフューザ コンバスタ スラグタンク</p> <p>蒸発器 2次過熱器 テストループ 1次過熱器 節炭器</p>	<p>ガス化炉 ガス冷却器</p>  <p>連絡ダクト リダクタ ダイフューザ コンバスタ スラグタンク</p> <p>蒸発器 2次過熱器 テストループ 1次過熱器 節炭器</p>
<p>コンバスタ (φ1.5m)、ダイフューザ (φ0.6m) リダクタ (φ1.2m) の円筒形。 連絡ダクトは、4角の山形とし、ガス化炉、ガス冷却器の基本構造が固まる。 生成ガスによるスタートプロワを検討。</p>	<p>コンバスタ (φ1.2m)、ダイフューザ (φ0.48m) の円筒形、リダクタ (1.2m) の8角形、リダクタ上部の角を落とす。 スラグタンクを直漬方式に変更。 スラグクラッシュヤ(ダブル歯)を検討。 ガス化炉を吊下げ方式に変更</p>	<p>コンバスタ底部スラグタック上部構造変更。 リダクタ上部およびガス冷却器上部のダクト形状を変更。 スラグクラッシュヤ(シングル歯)に変更。 ガス冷却器伝熱面積を増加。 ガス冷却器除灰装置にショットクリーニング採用。</p>

図3-2-3 200 T / 日炉形決定の経緯

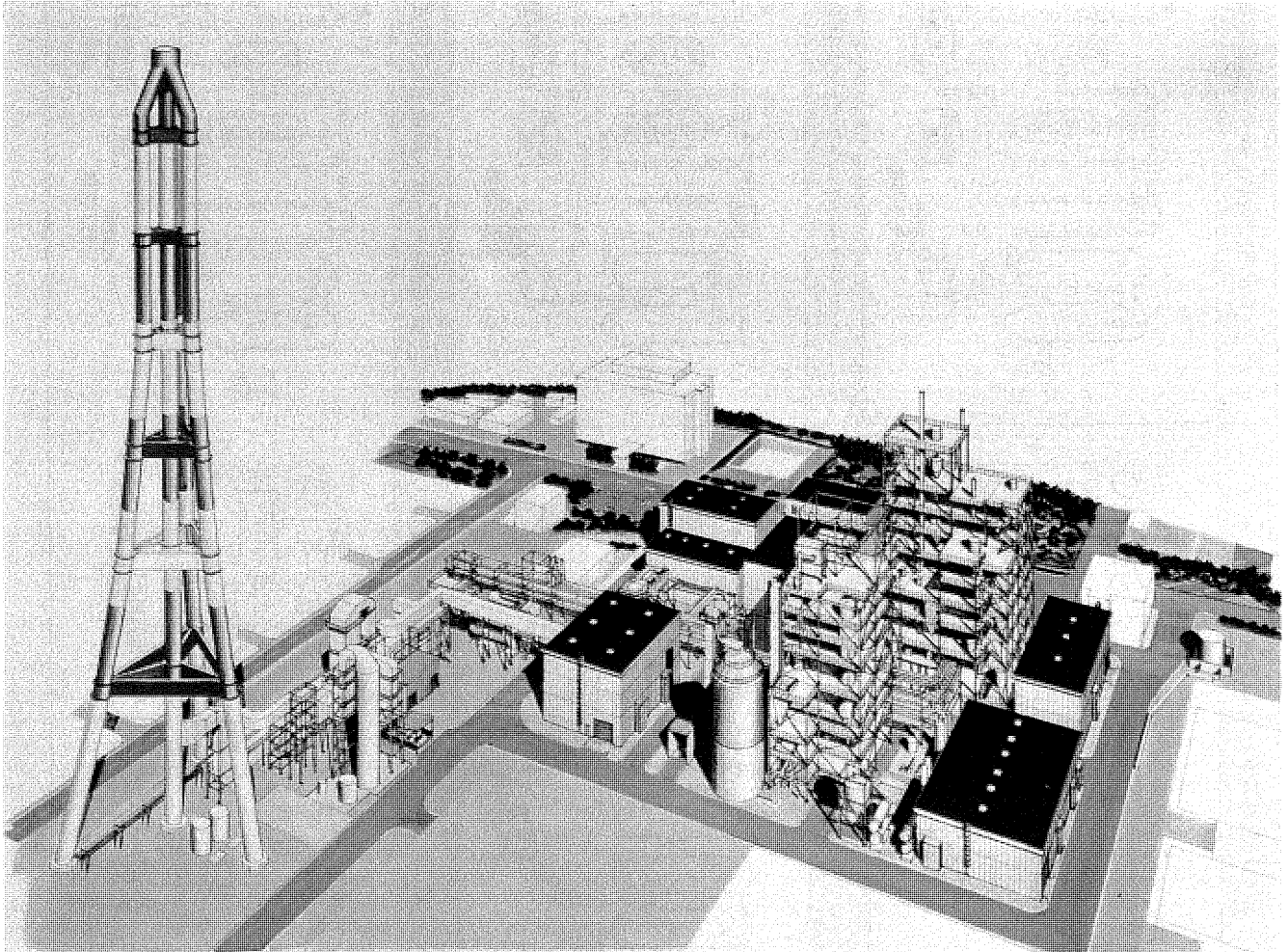


図3-2-4 パイロットプラント完成予想図(IGC組合提供)

その期間としては、使用前検査後約2年半程度必要であると考えられる。(定検・自主解放調査期間を含む)。

試験研究の基本的思想は以下の通りである。すなわち、使用前検査までの単体試験、組合せ試験は、ガス化特性の良好な石炭1炭種を選定して行い、機器のならし、運転の習熟をその主目標とし、特に安全運転に留意し、プラントの初期不具合を洗い出す。

次に同一または同様にガス化特性の良好な石炭を用いてパイロットプラントの性能試験(定格・部分負荷)、運用性試験(負荷変化試験、最低負荷、負荷遮断試験)を行い、パイロットプラントの特性を十分に把握し、必要な点は設備の改良を行う。

最後に、炭種適合性試験を実施する。炭種としては基本的には燃料比・灰融点の低いものから高いものへ、順番に行っていく予定である。

このようにして得られたパイロットプラント運転データは、十分に解析・検討を行うとともに、次の実証プラントの予想性能、設計仕様のために有効活用していくこととしている。

なお、本第3章の記述は、IGC組合で開発中の200T/日パイロットプラントの技術情報にもとづくものであり、本電中研レビュー刊行に際し、NEDOならびにIGC組合よりご協力頂いたことを、ここにあらためて感謝します。●

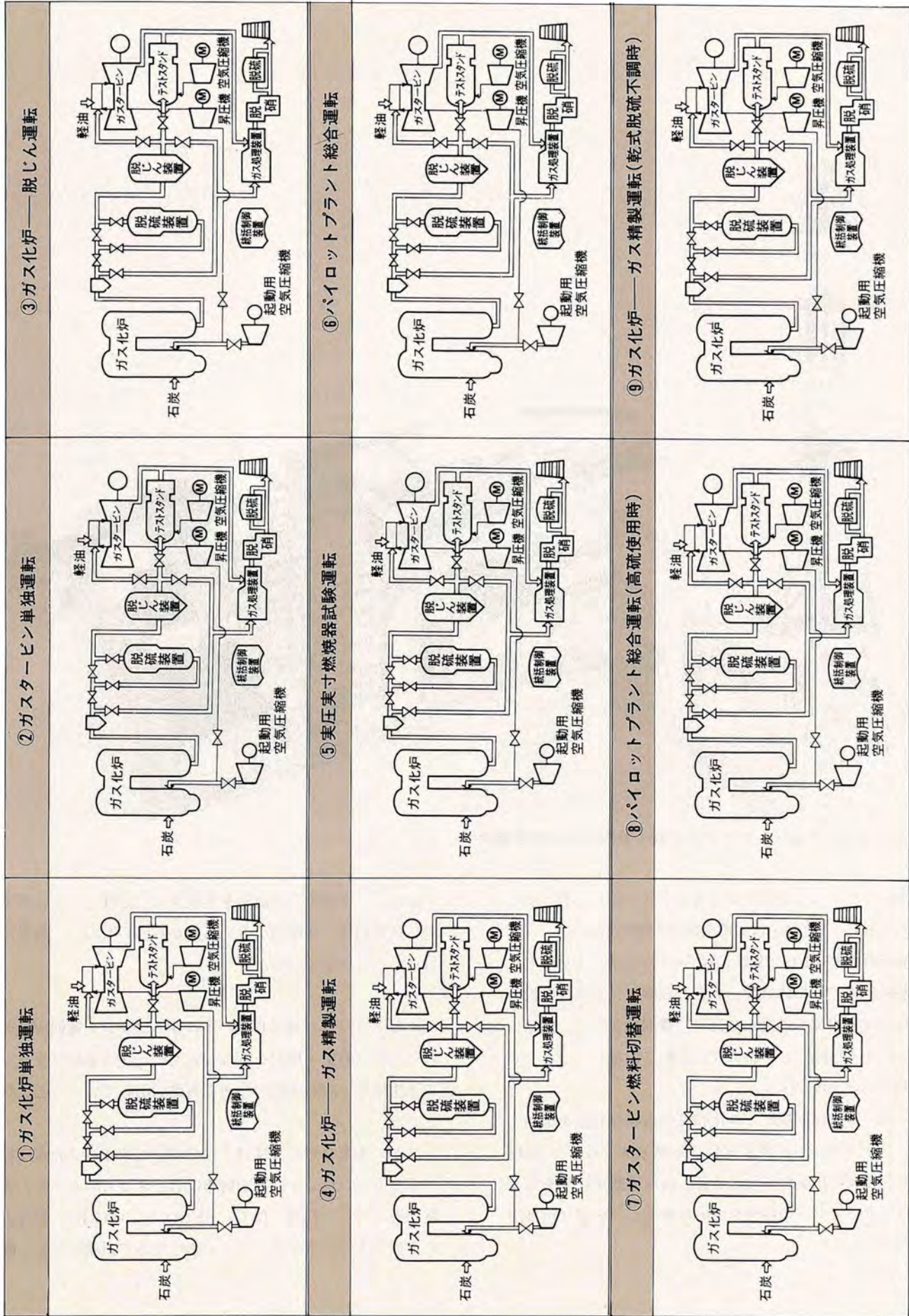


図3-2-5 パイロットプラント基本運転モード説明図

第 4 章

4

クールウォータープログラム

— 石炭ガス化複合発電実証試験計画 —

第4章 クールウォータープログラム ● 目次

— 石炭ガス化複合発電実証試験計画 —

管理部 次長 石森 岐洋

横須賀研究所 エネルギー部 複合発電研究室 主査研究員 三巻 利夫

4-1	クールウォータープログラムの計画概要	67
4-2	クールウォータープログラムの主要な成果	70

4-1 クールウォータープログラムの の計画概要

クールウォータープログラムは、米国サザンカリフォルニア・エジソン社（SCE 電力）のクールウォーター発電所構内に、石炭処理量1,000T/日、発電出力12万kWの石炭ガス化複合発電プラントを建設し、実証運転を行い、石炭ガス化複合発電システムの技術的成立性を実証する日米共同開発プロジェクトである。本プロジェクトは、5年間にわたるプラント実証運転により所期の目的を達成し、この程成功裏に終了した。

本章では、クールウォータープログラムに関し、計画概要および主要成果につき紹介する。

4-1-1 プロジェクト概要

クールウォータープログラムは、噴流床式石炭ガス化炉を用いた石炭ガス化複合発電システム（Integrated Coal Gasification Combined Cycle, 略称 IGCC）としては、世界最初の実証試験プロジェクトである。

（1）発足の経緯

1970年代、石油危機を契機として、米国の電気事業は石炭の利用拡大に関し、クリーン利用技術の開発を重視して検討を始めた。

1978年、SCE社（Southern California Edison Co.）とテキサコ社（Texaco, Inc.）は、新しい石炭利用発電方式「石炭ガス化複合発電（IGCC）システム」に着目して予備検討を行い、このシステムが熱効率、発電コスト的に微

粉炭火力発電と競合しうるとの結論を得た。

この結論に基づき、1979年に上記2社はIGCC開発計画を提案し、基本契約を締結した。1980年には、EPRI（Electric Power Research Institute）、GE社（General Electric Co.）およびベクテル社（Bechtel Power Corp.）が、本プロジェクトへの参加を表明した。

我が国においても石炭利用拡大は重要な課題となっており、1982年2月、IGCCの将来性を重視して、東京電力、東芝、石川島播磨重工および当所は、共同体（Japan Cool Water Program Partnership, 略称 JCWP）を結成して上記プロジェクトに参加した。

（2）実証試験の目的・スケジュール

クールウォータープログラム（CWP）の目的は下記の通りである。

- ① 商用規模のIGCCシステムの実証
- ② 同システムの環境適合性の確認
- ③ 石炭の性状変化への適合性の実証、等

CWPプロジェクトの工程・スケジュールは、次の通りである。

1978年～1979年に予備エンジニアリング、1980年2月より本格的エンジニアリングを開始した。プラント建設は1981年12月に開始され、約2年4ヶ月後の1984年4月に予定より1ヶ月早く建設が完了した。引き続き同年5月より試運転を開始した。数回にわたる調整運転を経て、同年6月24日より公式に実証運転を開始した。

4-1-2 プロセス・設備概要

(1) プラントの主要諸元

① 石炭ガス化炉

炉型式	Texaco 式加圧噴流床炉
処理量	約1,000T/日

② クリーンアップ装置

脱じん	ベンチュリースクラバ法
脱硫	Selexol 法

③ 複合発電装置

型式	GE STAG 107E
出力(発電端)	120MW
ガスタービン	65MW
蒸気タービン	55MW

(2) プロセス構成

CWP プラントおよびそのプロセスフローを図4-1-1

および図4-1-2に示す。石炭をミルで微粉碎して濃度約60%の水スラリーを調製し、これを石炭とほぼ同重量の酸素ガスとともにガス化炉に吹込み、高温化学反応により一酸化炭素と水素を主成分とする粗製燃料ガスを得る。石炭中の灰分は炉内で熔融し、ガス化炉下部の輻射型ガスクーラのサンプル(水溜め)に落下し、水砕後ロックホッパーを経由してプラント系外に排出される。

ガス化炉で発生した粗製燃料ガスは、ガスクーラ(ガス冷却・熱回収装置)を通過させた後、水スクラバ、脱硫装置で精製し、ガスタービンに導き発電に供する。

高温のガスタービン排出ガスによって発生した蒸気は、ガスクーラ部で副生した蒸気と合わせて蒸気タービンを駆動し発電する。

(3) 構成機器

① 石炭スラリー調製装置

石炭スラリー製造用の装置として、石炭粗粉碎用(4メッシュ以下)の乾式ミルと水スラリー製造用の湿式回転



図4-1-1 クールウォーター実証プラント全景

ミルをシリーズに設置した。

② 石炭ガス化装置・酸素プラント

ガス化炉は円筒形耐圧構造で、内部は耐火レンガが内張りされている。石炭スラリーは、炉頂から単一バーナーにより炉内に噴射される。炉内圧力は42kg/cm²、温度は1,260℃～1,540℃である。

ガス化炉の後流側には、水冷壁構造のガスクーラ（輻射型クーラおよび対流型クーラ）が設置されており、高温の粗製燃料ガスより顕熱を回収し、圧力112kg/cm²の飽和蒸気を発生させる。

酸素は Airco 社所有の酸素プラントより供給された。このプラントは空気より深冷分離方式で99.5%純度の酸素を製造し、1,000T/日級の供給性能を有する。

③ ガス精製装置

ガスクーラを出た粗製燃料ガス中のダスト（未反応炭素、微粒灰）は、水スクラバにより水中に分離回収される。

脱じん装置（水スクラバ）を出たガスは、さらに冷却さ

れて脱硫装置に送られる。硫化水素を主成分とする硫黄化合物は Selexol 方式（物理吸収法）により除去されるが、脱硫率は97%で設計されている。

硫黄化合物を吸収した Selexol 液は、再生装置に送られ硫黄化合物を放出した後、循環使用される。再生装置から排出する高濃度の酸性ガスは、Claus 装置で単体硫黄に転換される。この装置から排出するガスには微量の硫黄化合物が含まれているが、SCOT 法（テイルガス処理装置）にてクリーン化される。

④ 複合発電装置

精製された燃料ガスは複合発電装置へ送られる。この装置はガスタービン発電機、排回収ボイラ（HRSG）、蒸気タービン発電機から構成されている。ガスタービンは、入口温度1,100℃級 GE 社のモデル7,000シリーズを石炭ガス用に改造して使用した。ガスタービンからの高温排ガスは、HRSG で過熱蒸気（圧力102kg/cm²、温度508℃）を発生させ、蒸気タービン発電機を駆動する。

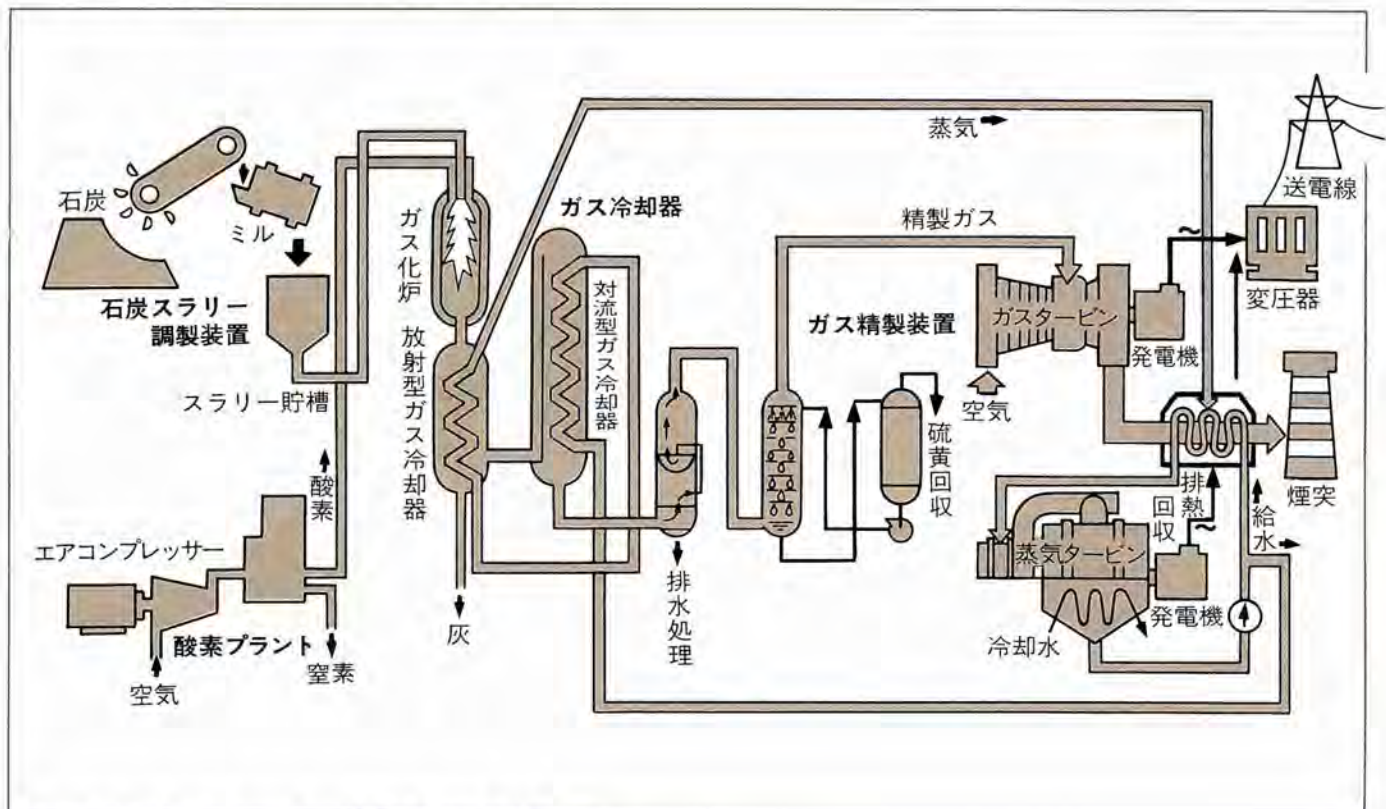


図4-1-2 クールウォーター実証プラントの構成図

4-2 クールウォータープログラムの 主要な成果

4-2-1 CWP プラント実証運転実績

(1) 運転実績

クールウォータープログラム（CWP）では、プラント建設後、数回の試運転・調整運転を行ったが、第10次運転（Run No.10）で「石炭処理量600T/日以上で10日間以上の連続運転」という米国政府との契約に記載された厳しい規定をクリアし、1984年6月24日より公式に実証運転を開始した。以降、比較的順調に運転試験が実施され、計画通り本年（1989）6月に実証運転を終了した。なお、最終

表4-2-1 CWP プラントの運転実績
(1984年6月～1989年1月)

項目	通 算 値
石 炭 処 理 量	1,132,848トン
発 電 電 力 量	2,779,153 MWh
設 備 利 用 率	58.7%*
運 転 時 間	27,116時間

* 後半期（1987、1988）：約70%

表4-2-2 供試石炭の性状

	サフコ炭	イリノイ No.6炭	ピッツバーグ No.8炭	レミントン炭
発熱量(HHV Dry)	6,830kcal/kg	7,200kcal/kg	7,940kcal/kg	7,030kcal/kg
燃 料 比	1.42	1.48	1.30	1.80
灰 分	8.7%	10.2%	6.4%	13.6%
硫 黄 分	0.31%	3.6%	2.6%	0.41%
灰 溶 融 点	1,230℃	1,290℃	1,330℃	1,480℃以上 (1,370℃)

() 内は、灰分に対して30%の石灰石を投入後の値

運転試験は本年1月23日をもって完了している。

CWP プラントの実証運転実績を表4-2-1に示す。準商用レベルの運転実績が得られた。

(2) 炭種適合性

CWP プラントにおける標準炭はサフコ炭（SUFCO 炭、Southern Utah Fuel Co.）である。この炭種による試験を主体としたが、さらに米国東部で産出する高硫黄炭としてイリノイ No.6 炭（Illinois No.6）およびピッツバーグ No.8 炭（Pittsburgh No.8）、また豪州で産出する高灰融点の代表としてレミントン炭（Lemington）につき、運転試験を実施した。

表4-2-2に各供試石炭の主な性状を示す。

高硫黄炭試験では、懸念された高濃度の硫黄化合物も Selexol 脱硫装置により97%以上除去され、米国の環境排出基準値を大中にクリアした運転が可能であることが実証できた。

高灰融点炭に関しては、噴流床方式ガス化炉では灰の熔融温度以上で運転を行わなければならないため、炉材の耐熱性という課題もありガス化が困難とされていた。この炭

種試験では、石炭スラリーに灰の融点降下剤である石灰石を投入した。この手法により、高灰融点炭の溶融温度を下げる事ができ、サフコ炭の場合と類似した運転特性でガス化が可能であることを実証した。

(3) 運転性能

CWP プラントでは、サフコ炭（米国西部低硫黄炭）を用いた場合の発電効率は、送電端で31.7%である。東部高硫黄炭（イリノイ No.6 炭、ピッツバーグ No.8 炭）および豪州高灰融点炭（レミントン炭）試験で実測された発電効率と併せて表4-2-3に示す。

CWP プラントにおける発電効率は、炭種、運転条件により多少異なるが、いずれも30%程度であり、我が国の最新鋭の石炭火力発電と比較し10ポイント弱低くなっている。これは、本格的な石炭ガス化複合発電システムの実証を最重要視するとともに、プラント建設費を低く抑えることに重点を置き、熱効率面を犠牲にした（設計値、29.8%）結果である。

CWP 方式の大型商用石炭ガス化複合発電プラントが実現した場合であるが、CWP 運転実績より、発電効率は送

電端で約40%程度が期待できる。プラント規模は送電端出力で360MW（発電端出力、418MW）である。

この効率は、1,300℃級のガスタービンの採用、再熱蒸気サイクルの採用など、現時点ではほぼ確立されている技術によるシステムの最適化だけで達成可能な予測効率である。

(4) 環境特性

CWP プラントにおけるガスタービン排出ガスの環境特性は、極めて優れたものであることが実証された。サフコ炭試験にて確認された環境排出値（SO_x、NO_x、ばいじん）を表4-2-4に示す。

米国連邦政府の新設石炭火力プラント用の環境規制値（NSPS 基準値）を大巾にクリアしており、また規制の厳しいカリフォルニア州でプラント運転するための CWP 用の EPA（環境保護庁）規制値も満足する値となっている。

米国東部産の高硫黄炭の試験においても、SO_x 排出濃度が幾分高くなったが、サフコ炭とほぼ同様なクリーンな発電となることが実証された。

石炭に含まれる灰は、高温ガス化炉内で溶融状態（スラ

表4-2-3 運転性能（炭種試験）

ケース	設計炭	サフコ炭	イリノイ No.6炭	ピッツバーグ No.8炭	レミントン炭
スラリー濃度 (%)	60.0	60.4	63.5	63.3	62.9
発電端効率 (%)	37.5	39.5	36.2	39.2	39.9
所内率 (%)	20.9	19.7	19.9	18.3	20.3
送電端効率 (%)	29.8	31.7	29.0	32.0	31.8

表4-2-4 環境排出値

	NSPS 基準値	CWP 規制値	SUFCO 炭実績
SO _x	約 86ppm * 1	10ppm * 4	5ppm
NO _x	約 250ppm * 2	27ppm * 5	27ppm
ばいじん	約 25mg/m ³ N * 3	8mg/m ³ N * 4	1mg/m ³ N

* 1 : 0.30 Lbs/10⁶ Btu 換算値

* 2 : 0.60 Lbs/10⁶ Btu 換算値

* 3 : 0.03 Lbs/10⁶ Btu 換算値

* 4 : EPA 地域規制値

* 5 : サンプルナーディ、地方規制値

グ)となり、ガスクーラ下部で水砕され系外に排出される。CWPプラントからのスラグは未反応炭をほとんど含まず、その外観は炭種により異なるが、緑色ないし黒色の粒径1～5mmのガラス状物質である。排出したスラグは、溶出試験等により、すべてカリフォルニア州の環境規制値をクリアする物質であることが確認された。

(5) 運転信頼性

CWPプラントでは、前述した通り準商用レベルの運転実績が得られた。

プラント停止原因に関しては、炭種試験、定期点検等を実施するための予定停止の他に、各種不具合による自動・手動停止がかなり生じた。しかしながら、プロジェクトの終了時まで、これら不具合に関連した問題点はほとんど解決されている。

4-2-2 経済性

CWPプラントの建設資金は2億6,300万ドルであり、発電コスト(運転・維持費のみ)は、実績として10.6セント/kWhとなった。

発電コストはかなり高いが、酸素プラントを所有していないこと、石炭を短期契約で鉄道輸送で入手していること、熱効率を犠牲にせざるをえなかったことなど、CWPプラントに特有な原因が含まれている。

EPRIが中心となり、CWP運転実績に基づき、CWPタイプの本格的な商用IGCCプラント(発電端出力418MW、送電端出力360MW)を提案して、発電コスト(運転維持費のみ)の試算を行った結果では、2.3セント/kWhとなっている。

4-2-3 成果・将来展望

クールウォータープログラムにおける実証運転により得られた主要成果を、以下にまとめて記載する。

① 石炭ガス化複合発電(IGCC)システムの技術的成立性の実証

IGCCが技術的に成立することを、世界で初めて実証した。プラント運転信頼性もかなり高く、将来石油高騰の事態等には、商用プラントを実現できる見通しが得られた。我が国の電気事業が重視する豪州炭(高灰融点炭)に関しても運転手法を開発し実証した。

② IGCCの環境保全性の確認

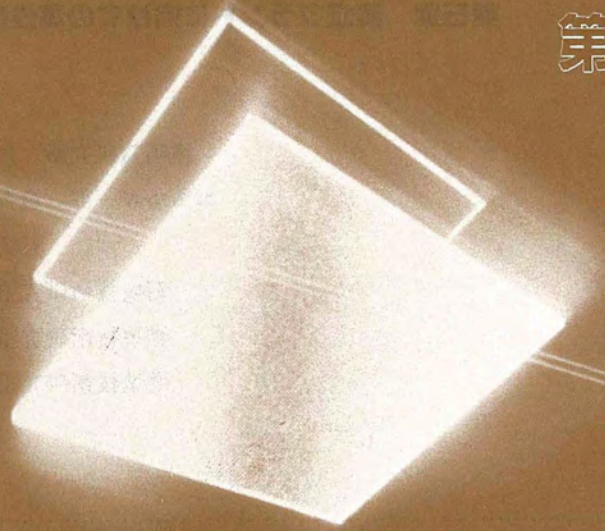
期待された通りの優れた環境特性を確認した。近年、地球規模での環境保全が重視されているが、この観点からもIGCCが有用な発電システムであることを実証した。高硫黄炭供用時も環境特性は優れたものであり、この結果は使用可能炭種の拡大という面からも貴重な成果である。

③ 発電経済性の把握

IGCCプラントの建設コスト、発電コスト等に関し確実な情報が得られ、IGCCの発電経済性、実現性に関し、確度の高い予測・将来展望が可能となった。

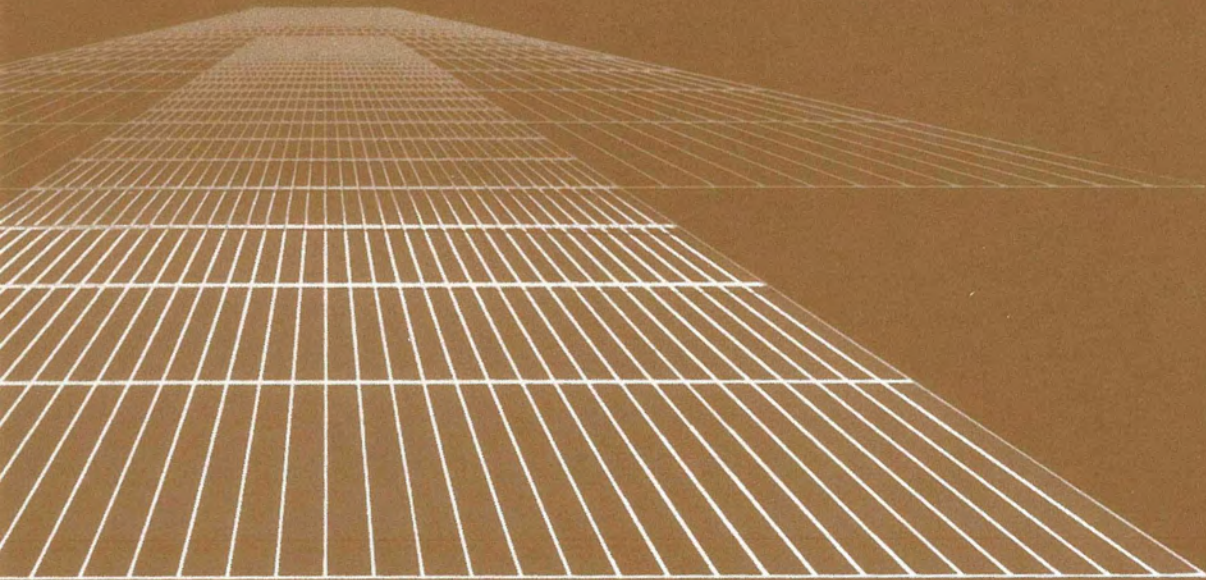
当所では、クールウォータープログラムの成果を、運転特性、熱効率、環境特性、経済性などの観点より総合評価検討し、我が国の電気事業に適した新しいタイプの高効率石炭ガス化複合発電システムの開発に資することにしている。

第 章



5

**実証プラントに向けての
高性能技術の開発**



第5章 実証プラントに向けての高性能技術の開発 ● 目次

横須賀研究所 エネルギー部長 石川 浩
エネルギー部 複合発電研究室長 浜松 照秀
石炭技術研究室長 田中 隆
石炭技術研究室 主査研究員 中山 稔夫
燃焼技術研究室 主任研究員 佐藤 幹夫
燃焼技術研究室 主査研究員 久松 暢

5-1 石炭ガス化技術	75
5-2 乾式クリーンアップ技術	79
5-3 ガスタービン燃焼器技術	81
5-4 セラミックスのガスタービン燃焼器・静翼への適用	83

5-1 石炭ガス化技術

5-1-1 実証プラント全体像の構築

(1) 低コスト・高性能化のために

本発電方式の実用化において

- ① 在来火力が長い年月をかけて成熟したこと
- ② これまでにないシステム構成であること
- ③ 今世紀中に実用化したい

という背景がある。

このような背景にあって、計画的、合理的に開発が進められつつあるが、要素技術研究の進展に伴い、プラント全体像の構築・改善を行い、本来の目標にかなったものにしていく必要がある。

すなわち、実証用あるいは商用の石炭ガス化炉プラント

は、可能な限り低コストで、満足できる性能をもつこと、かつ運転信頼性の高いことが前提で、このために全体像との整合性のある要素技術開発課題を整理することが肝要である。

ところで、図5-1-1は空気吹き加圧2室2段噴流床炉の基本方式開発から実用プラントに至る開発の流れを示したものである。

同図に関連して、第3章に紹介したパイロットプラントは、当所が開発してきたガス化方式を中心に、各要素プラントをスケールアップしたもので、各ハード技術、全体技術の基本を開発・検証するものである。したがって、一部にはパイロットプラント固有の条件、装置構成が含まれている。現時点では止むを得ない面もあると考えるが、実用のプラントは要素技術の研究成果を活用し、より低コスト

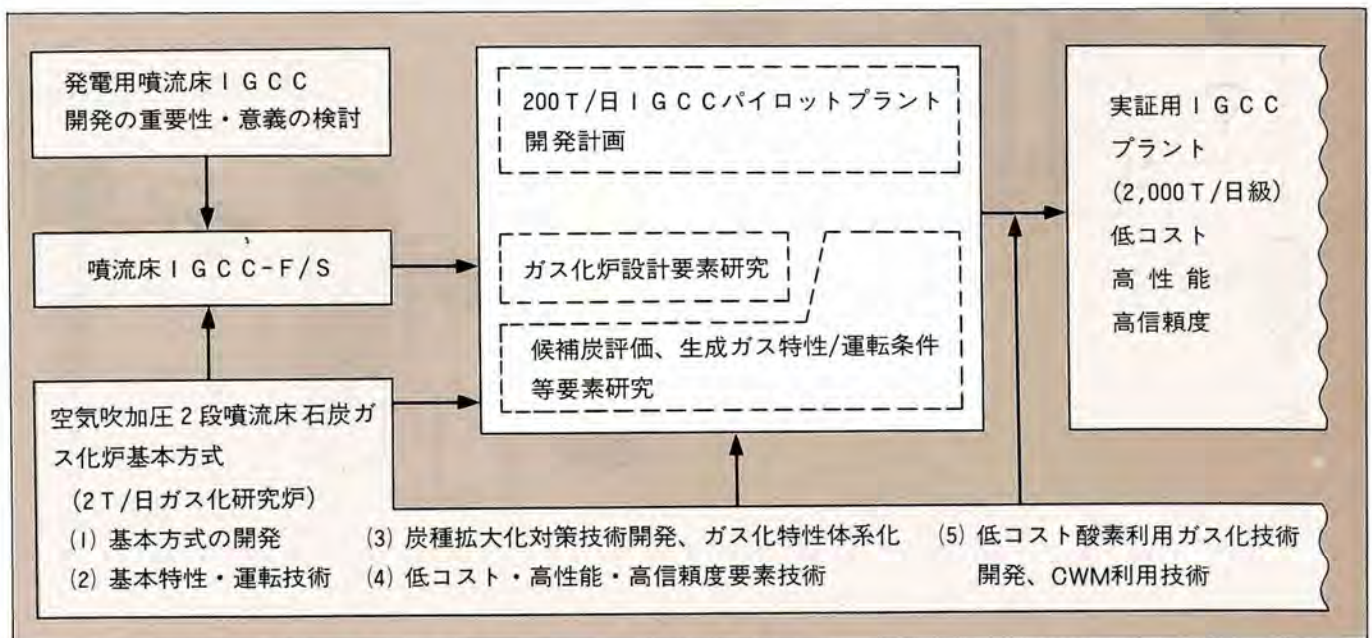


図5-1-1 IGCC実用化の流れと石炭ガス化技術研究の位置づけ

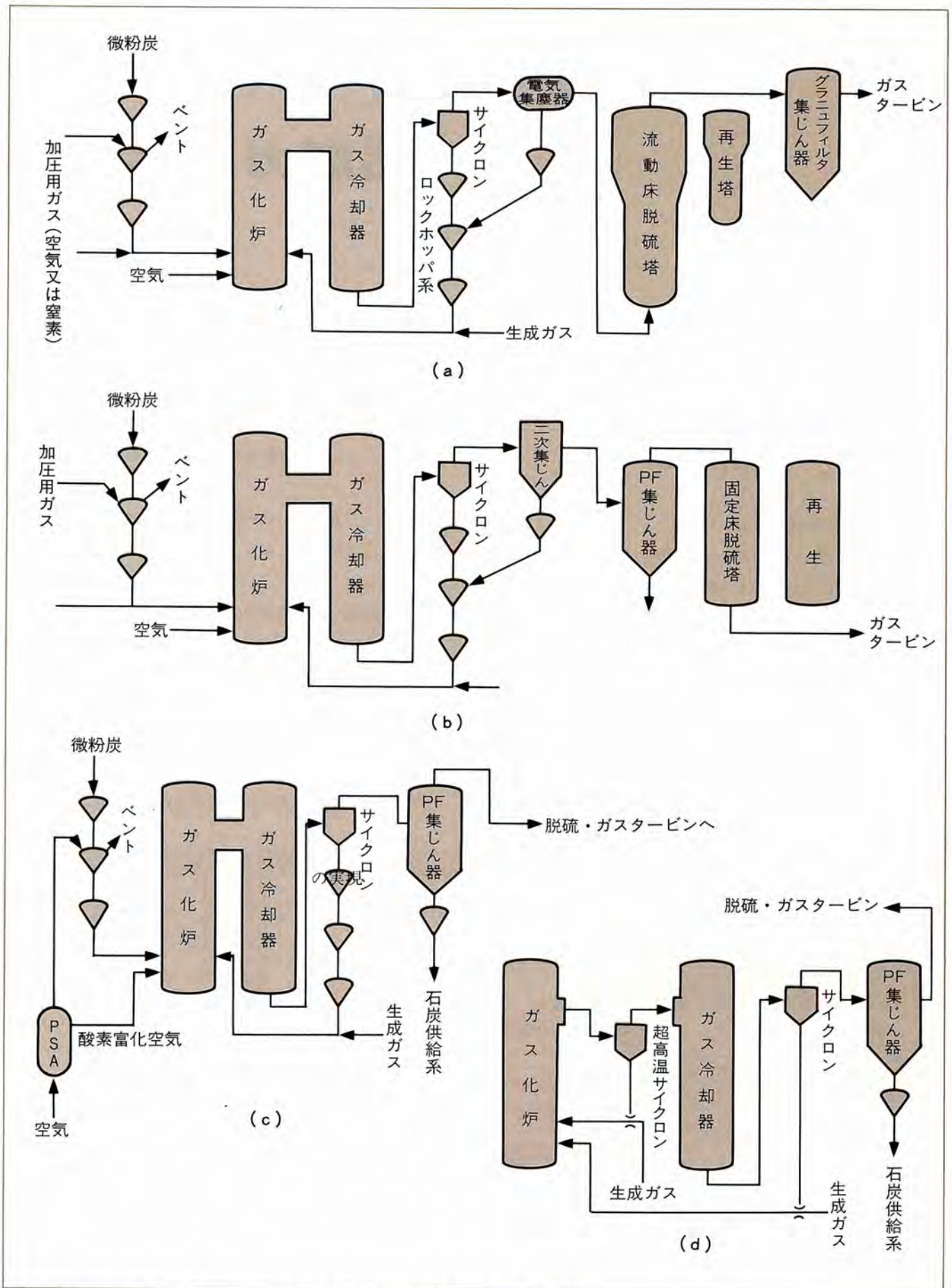


図5-1-2 実証プラントのための石炭ガス化炉周辺システム構成改良変化例

化、高性能化、高信頼度化を同時に満たす方向でプラント像を構築すべきであろう。

一方、当所の2 T/日石炭ガス化基礎実験装置を中心とした研究は、基本方式の開発、パイロット設計要素研究などにより原型炉としての役割を果たしてきた。今後は、我が国特有の燃料事情に基く適用炭種拡大化技術の開発、ガス化特性の把握、性能評価指標の体系化を行うとともに、実証プラントに向けての一層の低コスト化、高信頼度化に係わる要素技術の開発を進める段階に来ている。

このような観点から、実証プラントの全体像を石炭ガス化プラント中心に整理する。その前提として、プラントの高効率化をめざすため、

- ① 微粉炭供給を加圧ロックホッパ空気搬送（ドライフィード）方式とし、
- ② チャー回収の高信頼度化を図るため生成ガス搬送と

を念頭におく必要がある。2 T/日炉のこれまでの成果（2-1、2-4参照）から、ガス化プラントの全体効率はチャー回収率に大きく依存し、同時にプラントのコスト低減はチャー回収系にはほぼ限定されるといっても過言ではない。

そこで、図5-1-2にガス化プラント周辺に関わるシステム構成の改良の例を示す。

図中の(a)は、200T/日パイロットプラントの方式であり、(b)は、当所提案の固定床方式による乾式クリーンアップ方式を採用したものである。石炭供給用加圧ロックホッパ系は加圧用搬送ガスを必要とし、このための搬送用不活性ガス確保とガス化剤（酸素）確保を両立させることができる。PSA を利用した酸素源の利用による酸素富化ガス化方式(c)が有望となると考えられる。また、チャー回収系は、将来の高温化技術を採用したロックホッパ方式以外の低コスト型(d)とすることも重要課題と考える。今後さらに高信頼度化、高性能化を目指しながら低コスト化を狙ったシステムの改良は種々考えられ、そのための要素技術研究が実証プラントの構築に必要である。

例えば、生成ガス中にはアンモニアが含まれ、ガスタービン燃焼器で一部 NO_x に転換される。現在のところ、ガス化プラントは安定かつできるだけ高効率な運転を優先す

るため、発生したアンモニアを分解する方策は構じてなく、ガスタービンを含む下流で措置を構ずる必要がある。そのため、ガスタービンの低 NO_x 燃焼技術の開発研究と同時に、脱硝設備費低減または不要とするため、アンモニア分解技術の研究開発も今後重要となると考える。

（2）高い運転信頼性のために

本石炭ガス化方式の基本プロセスの特徴は、

- ① 微粉炭・生成チャーなど燃料粉体を加圧下で取扱うこと
- ② 炉内で灰を熔融し、固体スラグとして排出すること
- ③ 炉内は極めて高温であること
- ④ システム構成、運転制御操作量とも在来にないものなどである。

この特徴から、できるだけ広範囲の炭種に対してスラグ排出が安定し、かつ炉内のクリンカ、スラギングトラブル、熱交換器系を含む炉内の流路阻害などが生じないこと、石炭・チャー供給ライン（バーナ）の支障を防ぐことなどの設計上、運転上の配慮が重要である。

新しい発電プラントの運転信頼性は、ある意味では性能最終目標達成に優先するといっても過言ではない。したがって、信頼性確保のためには、一応の性能が得られる範囲でガス化炉各部の現象に関する知見を集積し、実証プラントなどの設計に反映しなければならない。

また、以上の信頼性確保のために、厳しい条件下での炉内状態監視・計測技術の開発と材質の選定ならびに劣化特性等に関する知見の集積が不可欠である。

5-1-2 実証プラントのための要素研究開発課題

前節で述べた実証プラントに向けての研究開発の狙いに基づき、パイロットプラントにおける研究に照らし合せながら、当所として取り組むべき今後の課題を整理した。その概要を表5-1-1に示す。

表中の課題はガス化炉各部に対応しているが、その狙い

は単一の目標にとどまらず、当然実用化技術としてあらゆる目標を念頭においた研究を進めねばならない。

低コストな酸素製造法として期待される PSA 法 (Pressure Swing Adsorption) は、酸素富化空気あるいは高濃度酸素が得られると同時に、低酸素濃度空気 (不活性) も得られ、微粉炭加圧供給系に望ましいカバーガスを手に入れる。したがって酸素富化空気をガス化剤として使用すれば生成ガス発熱量の向上、炉内温度の高温化が容易

で、より高灰融点の炭種適合性が期待できる。

一方、我が国に導入量の多い豪州炭は超高灰融点炭もあり、電気事業用としての運転信頼性の確保、高性能化のために、フラックス (融点降下剤) 添加、混炭が効果的である。当所の予備的な実験でもその効果を確認しており、空気量抑制ができるので、生成ガス発熱量向上が可能となる。これらの研究は、噴流床方式ガス化炉の世界的評価を確たるものとするためにも重要な課題である。 ●

表5-1-1 実証用石炭ガス化プラントのための要素研究開発課題

	課 題	目 標
ガス化方式	<ul style="list-style-type: none"> PSA 酸素製造法による高性能酸素富化ガス化 フラックス添加、混炭ガス化特性 	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">高性能化</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">高信頼度化</div> </div> <p style="font-size: small; margin-left: 20px;">〈低コスト化〉 〈炭種拡大〉</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">高信頼度化</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">高性能化</div> </div> <p style="font-size: small; margin-left: 20px;">〈炭種拡大〉</p>
炉本体	<ul style="list-style-type: none"> 炉内スラギング特性の解明 適正バーナ構造 炉内監視技術 (スラグ排出状況自動監視、スラギング状況検知等) 運転・制御手法の確立 (操作量) 	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: auto;">高信頼度化</div>
チャー回収系	<ul style="list-style-type: none"> 低コスト・高性能チャー回収技術の開発 	<div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-bottom: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">低コスト化</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">高性能化</div> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: auto;">高信頼度化</div>
その他	<ul style="list-style-type: none"> アンモニア発生量低減技術 アルカリ金属の挙動解明 排出スラグの有効利用技術 	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: auto;">低コスト化</div>

5-2 乾式クリーンアップ技術

石炭ガス化複合発電用乾式クリーンアップ技術としては、当所が開発を進めてきた固定床乾式クリーンアップ以外に、流動床乾式クリーンアップ技術があげられる。流動床乾式クリーンアップ技術とは、流動床方式脱硫装置、グラニューラフィルタ集じん装置と炭素還元方式硫黄回収装置の組合せからなる。本技術は、石炭技術研究所で40T/日流動床ガス化炉パイロットプラントにより、その運転実績がかわられて、200T/日パイロットプラント計画に採用されている。

当所では、前述のように、固定床乾式クリーンアップ技術の開発を1985年より本格的に進め、本技術が十分に実現が可能であることをベンチスケールプラントにより実証した。今後は、さらに大型化したパイロットプラント装置により総合システム評価を行い、実用規模プラントに向けた技術開発を続けていく必要がある。

乾式クリーンアップ技術をさらに高性能化を図るという観点では、次の項目が挙げられる。

- (1) 高脱硫性能化
- (2) 装置の小型化
- (3) アンモニア低減技術

以下に各項目に対する現時点での問題点等を記す。

(1) 高脱硫性能化

当所で開発を進めている固定床乾式クリーンアップ技術用の脱硫剤には、酸化鉄 (Fe_2O_3) 系を用いている。本脱硫剤を用いた場合、空気をガス化剤とする噴流床方式石炭ガス化炉からの石炭ガスを精製すると、化学平衡により硫黄分が少なくとも30ppm程度は残存する。石炭ガス化複合発電システムでは、クリーンアップ装置出口での精製ガス中硫黄分濃度が、目標値として100ppm以下とされているため、酸化鉄系脱硫剤を用いた乾式クリーンアップ技術により十分対応が可能である。

今後、乾式クリーンアップ技術の応用として、種々の分野へ適応させることも望まれている。その一例として、当所が開発を進めている熔融炭酸塩型燃料電池発電システムが挙げられる。燃料電池発電システムは、燃料ガス中の水素や一酸化炭素を空気中の酸素と反応させて電気を発生させるもので、

- ① 化学反応で発電するので効率が高い
- ② 環境影響上殆ど問題ない
- ③ ビルなどの需要地の近くに分散できることや火力代替としても使用できる

などの特長があり、実用化が期待されている。しかし、燃料源に石炭ガス化ガスを用いた場合、石炭ガス中に含まれる硫黄分や他の酸性微量成分が燃料電池の性能に悪影響を与える。そのため、これらの不純物質はできる限り低濃度（硫黄分濃度として1ppm以下）であることが望まれる。従って、本発電システム技術を確立するためには、さらに高性能な乾式クリーンアップ技術の開発を、特に高性能な脱硫剤の開発とシステム評価が重要である。

(2) 装置の小型化

固定床乾式クリーンアップは、ポーラスフィルタ集じん装置、ハニカム固定床脱硫装置、ガス還元法硫黄回収装置で構成される。本システムの実用化をさらに促進するためには、性能の向上と共に、建設コストの低減を目指した装置の小型化を図ることが肝要である。性能を維持、向上させながら装置を小型化するためには、

- ① より多くの石炭ガスを長期間にわたって安定して処理できるポーラスフィルタエレメントの開発
- ② 石炭ガス中の硫黄分をより速く、より多く吸収できるハニカム型脱硫剤の開発
- ③ より優れた硫黄還元触媒の開発

が挙げられる。これらの技術の開発により、装置の建設コストが低減され、石炭ガス化複合発電システムの実現性がより一層促進される。

(3) アンモニア低減技術

ガス化炉から生成した石炭ガス中には、石炭中の窒素分が主にアンモニア (NH_3) として存在しており、ガスタービンにおける燃焼により窒素酸化物 (NO_x) となって大気中に放出される。特に、当所で石炭ガスの精製技術として研究開発を進めている乾式クリーンアップ技術では、石炭ガスから NH_3 を除去することができない。そのため、石炭ガス中の NH_3 が環境保全上問題とならないように、ガスタービンでの低 NO_x 燃焼技術の開発および脱硝装置の設置等の対策を行う必要がある。

空気をガス化剤とする噴流床方式石炭ガス化炉からの石

炭ガス中 NH_3 濃度は、石炭の種類、ガス化炉運転条件等により変動するが、おおよそ数100から2,000ppm 程度までの範囲で存在する。前述のように、この NH_3 は、ガスタービンにおける燃焼により NO_x となるため、その濃度はできる限り低濃度であることが望ましい。現在は、石炭ガスをガスタービンで燃焼させた後の排ガス処理部に脱硝装置を設けて、その対策が図られている。

今後は、この環境保全設備の建設・運転コストの減少が可能となる NH_3 低減技術の開発研究が必要である。本技術に関する研究内容としては、

- ① NH_3 低減触媒の開発
- ② NH_3 低減触媒の性能・信頼性評価
- ③ 経済性評価
- ④ 乾式クリーンアップ技術システム評価

等があげられ、本技術の開発によりさらに乾式クリーンアップ技術の高性能化が期待される。 ●

5-3 ガスタービン燃焼器技術

5-3-1 研究の背景

石炭ガス化用1300℃級ガスタービンの実用化に際し検討すべき研究開発課題は多く存在するが、これまでの検討結果からとりわけ、燃料中のNH₃に起因するフュエルNO_xを抑制する低NO_x燃焼技術の高性能化が必要であることが明らかになった。

2章3節では、フュエルNO_xを低減するための燃焼技術として、リッチ・リーン燃焼法が有効であることを述べた。リッチ・リーン燃焼においては初期の燃焼領域と後流の燃焼領域のバランスを図り、燃焼器の1次燃焼域を燃料過濃条件とすることが重要である。

しかし、石炭ガス化燃料はCOを主要可燃性成分とする低カロリー燃料であるため燃えにくく、1次燃焼域を燃料過濃条件とするほど保炎性が低下する。そのため、1次燃焼域を超燃料過濃条件としても保炎が十分に確保されるような低NO_x燃焼技術の開発が望まれる。

図5-3-1は副室付保炎強化燃焼器（CGT4005）の概観を示す。主燃焼室に副室を設け副室からの高温燃焼ガスにより1次燃焼地域の保炎性が向上するよう設計している。



図5-3-1 副室付保炎強化燃焼器の概観

5-3-2 副室付保炎強化燃焼器による低NO_x燃焼技術

図5-3-2は燃料中のNH₃濃度が1,000ppmの場合の出口空気比λとNO_x排出濃度およびNO_x転換率を各燃焼器について示す。既に述べたようにCGT1001燃焼器は安定燃焼に主眼を置いて空気配分設計をしたもので、低NO_x燃焼法は採用されていない。CGT1003燃焼器はCGT1001燃焼器をベースに燃焼器の空気配分を変更し、低NO_x燃焼法であるリッチ・リーン燃焼法を採用している。CGT4005燃焼器は図5-3-1に示した副室付保炎強化燃焼器で、燃焼器に副室を設けることにより、リッチ・リー

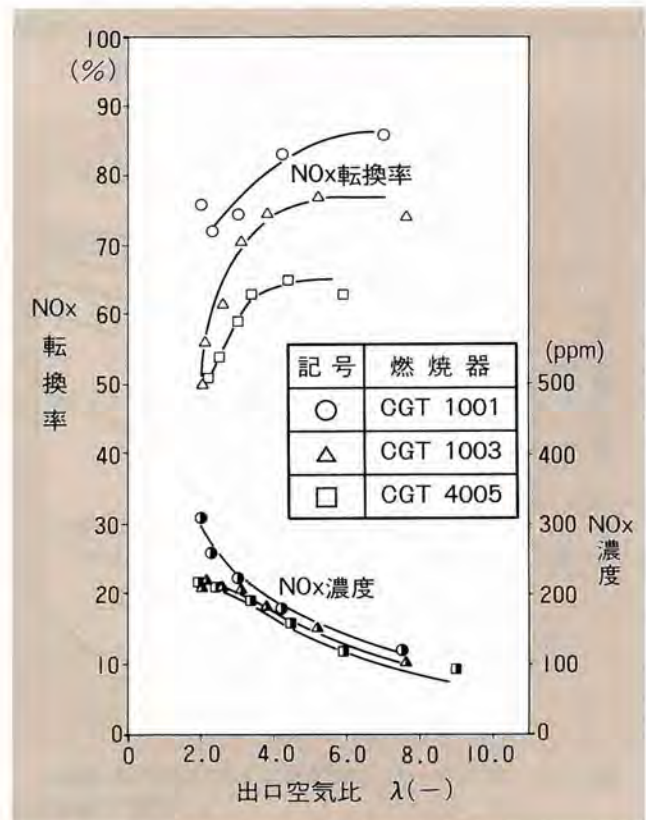


図5-3-2 空気比とNO_x排出特性の関係

ン燃焼法の強化を図ったものである。

図5-3-3から、CGT4005燃焼器のNO_x 転換率特性は基本型燃焼器よりも大幅に改善されている。すなわち、定格条件時のNO_x 転換率は、CGT1003燃焼器とほぼ同じであったが、空気比が増大するガスタービンの部分負荷時のNO_x 転換率は大幅に低下している。

以上の結果から、主燃焼室に副室を設け1次燃焼域の燃焼安定性を向上させることにより、リッチ・リーン燃焼法の強化を図った副室付保炎強化燃焼器は、石炭ガス化用低NO_x 燃焼器の高性能化に対する今後の方向性を示しているものと考えられる。

5-3-3 次世代型の超低 NO_x 燃焼器の開発を目指して

石炭ガス化燃料中にNH₃が、1,000ppm含まれる場合、燃焼排ガス中のNO_x濃度を45ppm(O₂12%換算)以下とするには、図5-3-3に示されるように、NH₃からNO_xへの転換率を20%以下としなければならない。これは現在の

燃焼技術では極めて困難と考えられる。そのため、現時点では、ガスタービン燃焼器出口に排煙脱硝装置を設置することとしている。もし、石炭ガス化複合発電システムにおいて排煙脱硝装置が不要となれば、システムの経済性は飛躍的に向上する。

当所では、石炭ガス化燃料中のNH₃を燃焼器に供給される前に分解・除去する方法について検討を開始した。当所は、燃焼器による低NO_x燃焼技術と事前のNH₃除去方法を組み合わせることにより、将来、排煙脱硝設備を不要とする石炭ガス化複合発電システムを目指して、今後ともガスタービン技術の高度化にチャレンジすることとしている。

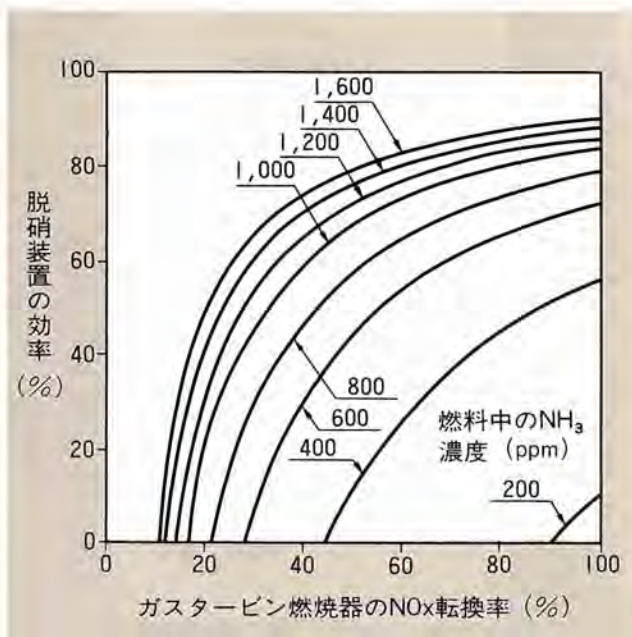


図5-3-3 ガスタービン燃焼器におけるNO_x転換率と排ガス脱硝効率 (煙突出口のNO_x濃度を45ppm(O₂12%)とした場合)

5-4 セラミックスのガスタービン 燃焼器・静翼への適用

5-4-1 研究の背景

複合発電プラントの熱効率はガスタービンの性能に大きく左右され、その高効率化は主にガスタービンの高温化および冷却空気の低減によって達成される。

今日、耐熱合金の開発と冷却技術の進歩によりタービン入口温度は次第に上昇しているが、金属材料を使用する限り、耐熱性の問題からガスタービンの高温化による熱効率の向上には限界があると予想される。

一方、ファインセラミックスは従来の耐熱合金に比べて耐熱性、耐蝕・耐摩耗性に優れており、これをガスタービンに適用できれば、ガスタービンの高温化と冷却空気の低減化により、複合発電プラントの熱効率は図5-4-1のように飛躍的に向上する。

このため当所では、石炭ガス化複合発電プラントの高効率化をめざしてセラミックガスタービンの開発を進めている。

なお、当所では金属製ガスタービンの改良開発として単結晶超合金翼を三菱金属と共同で研究開発している。このタービン動・静翼は、将来のセラミック製タービン翼のつなぎ役として位置付けており、今後のガスタービンにメリットがあるものと考えている。

この超合金翼は、ニッケルを60~70%含んだニッケル基単結晶超合金にレニウムを0.1%混ぜたものであり、従来の超合金並みの強度に加え耐蝕性を高めたことにより石炭ガス化ガス対応として期待されている。

5-4-2 開発課題

セラミックスは耐熱性に優れる反面、脆く割れやすいなど、構造材としての信頼性に欠けるという欠点を有してい

る。セラミックスの材料開発は急速に進歩しており、材料性能は著しく改善されてきている。しかしながら、脆性材料としてのセラミックスの欠点を材料技術のみで克服し、セラミックガスタービンの信頼性を確保することは当面きわめてむずかしいと考えられる。

したがって、セラミックガスタービンの早期実現のためには、材料開発のみならず、脆性材料であるセラミックスに適した構造設計法とガスタービン運転法の開発が重要である。

構造設計法の開発においては、従来の金属材料の使用を前提とした構造設計にとらわれることなく、セラミックの特徴を活かしながらセラミック部品に応力を極力発生させないような新しい構造設計概念の構築が必要である。

また、運転法の開発においては、ガス温度の急変によってセラミックスに熱衝撃が加わるような運転は極力避けるべきであり、ガスタービン緊急停止時においても必要以上に燃料の瞬時遮断をすることなく安全に停止できる制御システムの開発が必要である。

このような考えに基づき、当所では20MW ガスタービン用セラミック燃焼器および静翼の開発とガスタービン運転法の開発を行っている。

5-4-3 セラミック燃焼器の開発

当所ではこれまでに、セラミックタイル型（かん合型）燃焼器とセラミック繊維型燃焼器を開発した。これらはいずれも分割したセラミックタイルあるいはセラミック繊維を金属壁内周に内張りしたものであり、構造強度材として金属を、遮熱構造材としてセラミックスを使用した複合構造をとっている。

タイル型燃焼器はセラミックス特有の構造設計によって

信頼性は著しく向上しており、急速燃料遮断を含む累積約150時間、出口ガス温度1,500℃の常圧燃焼試験においても、セラミック部品に異常は認められていない。しかし反面、構造が複雑で部品数も多いため、重く、製造・組立てが容易でないなどの問題がある。

一方、セラミック燃焼器の構造簡素化、軽量化などを目的に開発された繊維型燃焼器はセラミックスの分割化をさらにおし進めたものといえる。セラミック繊維成形体は軽量で、柔軟性、弾力性を持ち、また、全体が微細に分割化された状態にあるため、熱応力はほとんど発生せず、特に耐熱衝撃性に優れているという特徴を有する。また、燃焼器壁面の冷却はセラミック繊維層による浸み出し冷却であり、出口ガス温度1,500℃の常圧燃焼試験において、その

優れた遮熱特性が確認された。しかし、高温ガスによる繊維の劣化および剥離が問題であることが明らかとなり、その防止が今後の課題として残されている。

このため、当所では現在、タイル型と繊維型の長所を活かして、セラミックタイルとセラミック繊維を組み合わせた複合型燃焼器の開発を日立製作所と共同で進めている。

複合型燃焼器ライナは図5-4-2のように、耐熱衝撃性を考慮したハニカム状セラミックタイルとセラミック繊維を金属壁内面に内張りした構造である。セラミック繊維はセラミックタイルによって高温ガスから保護されると同時に、タイルと金属壁間の遮熱・緩衝層として機能する。したがって、タイルは繊維の弾力によって柔軟に支持固定され、振動、熱膨張などを容易に吸収できるとともに、組み立が

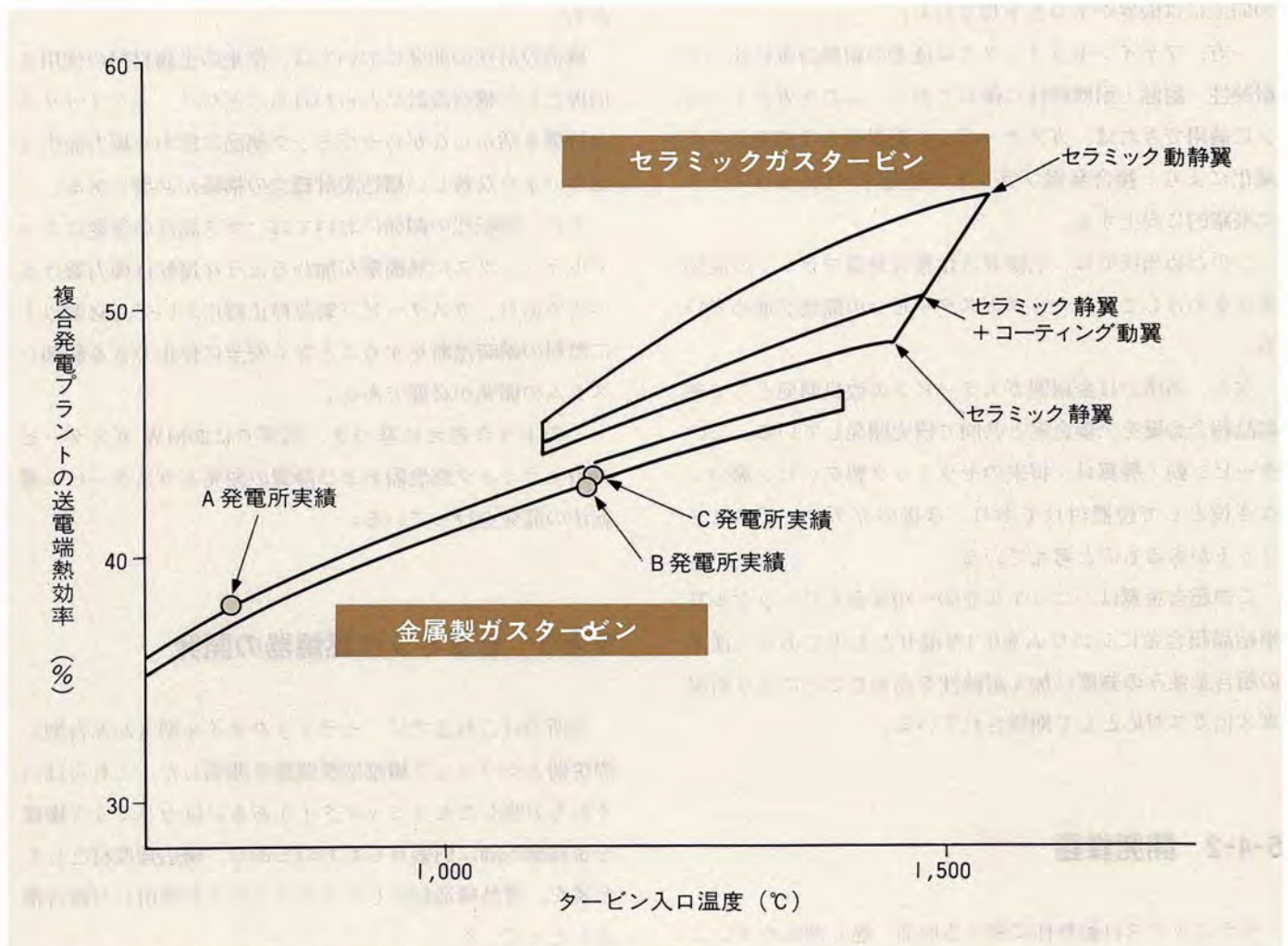


図5-4-1 複合発電プラントの熱効率 (LNG 複合発電の場合)

容易である。

石炭ガス化燃料用複合型燃焼器の設計・試作においては、セラミックタイルは常圧焼結炭化珪素(P.L.-SiC)、セラミック繊維は炭化珪素繊維とし、壁面の冷却空気は全空気量の約10% (金属燃焼器の約1/3) とした。燃焼器内圧14.5ata、出口ガス温度1,300℃ (実機ガスタービンと同一条件) の高圧燃焼試験の結果、本燃焼器は燃焼負荷率 $4 \times 10^7 \text{kcal/m}^3 \text{h ata}$ (従来燃焼器の2~3倍) においても燃焼効率ほぼ100%の高負荷安定燃焼が可能であることが明らかとなった。

これは、高温のセラミックライナ壁が壁面近傍における燃焼反応を促進したためと考えられる。しかしながら、セラミックタイルには、燃焼空気孔部の局所冷却による熱応力が原因と思われる若干の破損が認められた。このため現在、燃焼空気とタイルの接触を防止する空気ガイドの設置、タイル分割位置の変更などの構造改良を実施中である。

5-4-4 セラミック静翼の開発

図5-4-3は日立製作所と共同で開発した20MW ガスタービン用第1段セラミック静翼の構造概略である。セラミック

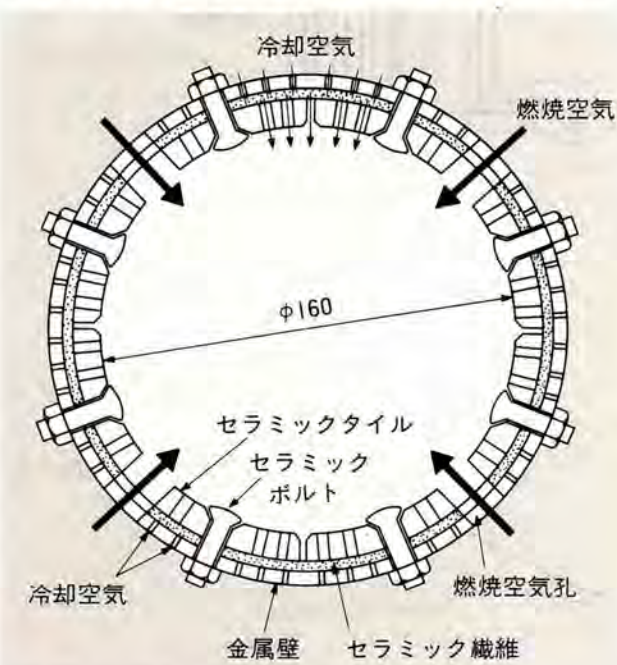


図5-4-2 燃焼器の断面構造

ク静翼の場合も、高温ガスに曝される部分のみをセラミックスとし、力の伝達が必要とされる部分には金属を使用した複合構造となっている。すなわち、セラミック翼 (セラミックシェル) 内に金属製翼芯 (金属コア) が貫通しており、金属コアは静翼取付構造を有する金属製の上・下サイドウォール支持板を連結している。

また、セラミックス製のサイドウォールは、セラミックシェルにかん合・固定されている。そして、これらセラミックスと金属の間には変型緩衝層を兼ねた遮熱層が設けられている。特に、セラミックシェルと金属コアの間に挿入される遮熱層の厚さはわずか3mmであるため、遮熱層をセラミック繊維等による多孔質構造とし、金属コアに開いた空気孔から若干の冷却空気を遮熱層に流すことによって、セラミックスから金属に流れる熱を防ぐ方式を採用した。

P.L.-SiC製セラミック静翼を5枚配置した翼列の常圧試験を実施した結果、本セラミック静翼に必要な冷却空気量は、最新の金属製空冷翼の1/10以下と極めて少ないこと、また、この冷却空気量が確保されれば、金属コア温度は翼外面のガス条件にあまり左右されないことなど、本静翼の遮熱構造が極めて優れた遮熱性能を有することが明らかとなった。

一方、セラミック静翼の信頼性の観点ではセラミックシェル後縁中央部の熱応力が問題となる。特に、ガスタービン緊急停止時にはシェル後縁の中央部に大きな熱衝撃応力が発生するため、これがセラミック静翼の致命的な破壊原因となる可能性がある。

そこで、構造設計によるセラミック静翼の信頼性向上を図るために、セラミックシェルを翼高さ方向で二分割した。この二分割型セラミック静翼5枚を円弧状に配置した翼列の高圧試験 (ガス温度約1,300℃、圧力約15ata、実機ガスタービンと同一条件) の結果、本静翼の必要冷却空気量は前述の常圧試験同様極めて少なく、その優れた冷却性能が確認された。また、セラミックシェルおよびサイドウォールには熱応力が原因と思われる若干のクラックの発生が見られたが、シェル後縁部を起点とするクラックの発生はなく、シェル分割化による後縁部の熱応力緩和効果は明らかである。クラック発生は試験時に必要量以上の冷却空気お

よびシール空気が流れたことによるセラミックスの局所冷却が原因である可能性が高く、今後は冷却空気とシール空気の流量および流路構造の適正化が重要と考えられる。

しかしながら、これらの結果は初の高圧試験としてはほぼ満足できるものであり、今後のセラミック静翼開発の見通しを得ることができた。

5-4-5 セラミックガスタービンの運転法

従来の金属製ガスタービンの信頼性評価には、通常の起動・停止にともなう繰り返し負荷による疲労破壊等が重要視され、緊急停止時に発生する熱衝撃負荷は設計寿命中数回程度であり、それによるガスタービンの損傷は少ないと評価されてきた。そのため、従来のガスタービントリップシーケンスでは、トリップ信号によりガスタービン発電機を瞬時に電力系統より切り離し、燃料を遮断する方法がとられている。これに対してセラミックガスタービンの場合、緊急停止時の瞬時燃料遮断による熱衝撃負荷はガスタービンの致命的な破壊原因となる可能性があるため、セラミックガスタービンに適した緊急停止運転法を確立することが重要である。

そこで、従来のガスタービントリップシーケンスの設計思想を見直し、トリップ信号を次のように分類した。

- ① 瞬時に燃料遮断が必要なトリップ信号（燃焼器失火、燃料漏れなど燃料システムのトラブル）
- ② 燃料の遮断時間に若干の裕度が許容されるトリップ信号（電力システムのトラブルや軸振動など機械的トラブル）

また、実際のガスタービンでは電力系統トラブルによるトリップがほとんどであることを考慮し、上記②のトリップ信号に対して電力系統と瞬時に切り替え可能な負荷抵抗器を持つシステムを考案した（なお、①のトリップ信号についての対策は今後の検討課題として残される）。

このシステムでは、②のトリップ信号により系統遮断器を開いてガスタービン発電機を電力系統と切り離すと同時に、流体抵抗器と接続して短時間ガスタービン負荷を吸収させることができる。このため、タービンのオーバースピンを抑制しながら緩やかな燃料遮断操作を行うことが可能

となり、タービン入口温度の急激な降下を防止して、セラミック機器に加わる熱衝撃負荷を緩和することができる。

このようなガスタービン緊急停止法を採用した1,300℃、20MW 石炭ガス化複合発電用ガスタービンのシミュレーション結果と第1段セラミック静翼（P.L.-SiC製一体型セラミックシェルを持つ静翼）に発生する最大熱衝撃力の計算結果を図5-4-4に示す。

図中 $\tau=0$ は流体抵抗器を接続せず、圧縮機吐出放風弁および入口案内翼の操作のみを行った場合で、 $\tau=2.5$ および $\tau=5.0$ はこれらの操作に加えて流体抵抗器を接続し、

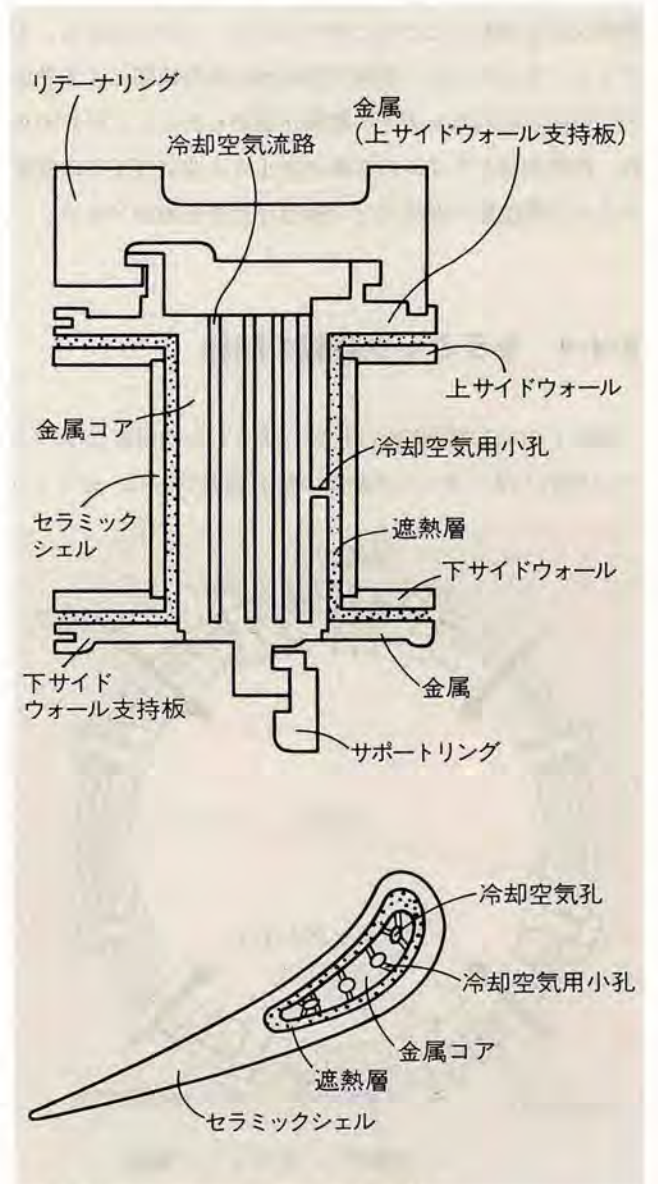


図5-4-3 セラミック静翼の構造概略

燃料遮断弁の遅れ時定数をそれぞれ2.5秒、5.0秒とした場合である。

燃料遮断弁の操作速度制御を行わない場合、タービン入口におけるガス温度および圧力が急激に降下するのに対し、燃料遮断弁の遅れ時定数を大きくするにつれてガス温度と圧力の降下は緩やかになる。その結果、セラミック静翼に生ずる最大熱応力は定常時よりわずかに増加するにとどまっている。

本システムによる緊急停止法は、ガスタービン本体の機械的トラブルや電力システムのトラブルに基づくトリップにきわめて有効であり、セラミックガスタービンの開発に大きな展望を開くものと考えられる。

5-4-6 今後の予定

以上、当所におけるセラミックガスタービン開発の現状について述べたが、得られた成果は、いずれもセラミックガスタービンの実用化に対して明るい見通しを与えるものである。

今後は、開発中のセラミック燃焼器および静翼を改良し、信頼性向上を図るとともに、ガスタービンの大型化ならびに石炭ガス化複合発電用セラミックガスタービンシステムの検討を進める予定である。 ●

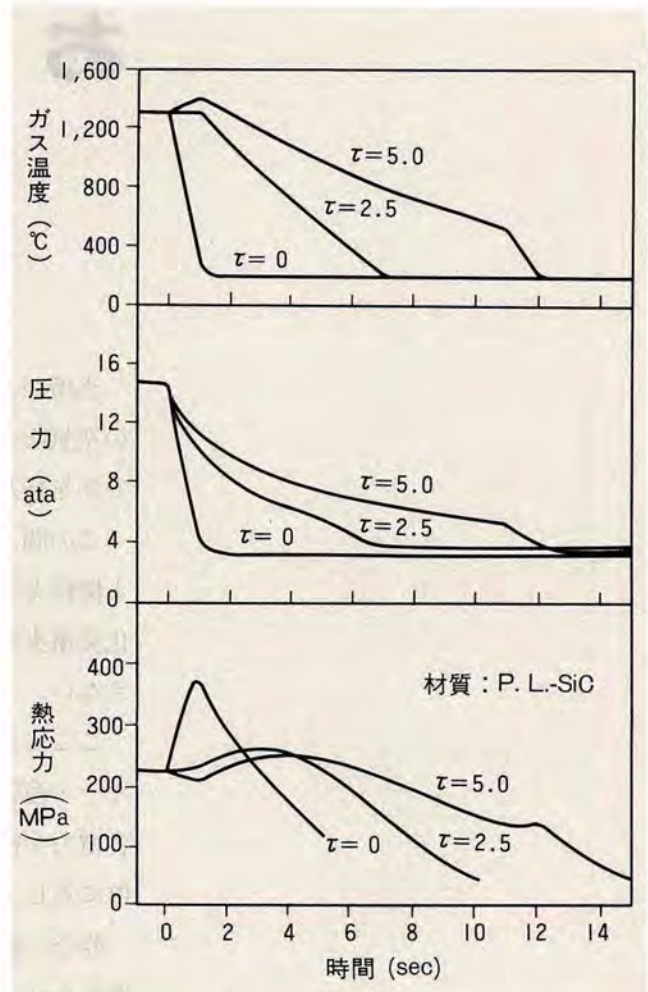


図5-4-4 トリップシミュレーション結果と最大熱応力の時間変化

お わ り に

理事 横須賀研究所長 尾崎 勇造

当所が、昭和48年に石炭ガス化複合発電の研究に着手し、世界最初の空気吹き加圧2段噴流床式ガス化炉実験装置を設置してから早くも6年を経た。

この間、幾多の技術的困難に遭遇したが、関係方面の暖かいご指導と関係者のたゆみない努力によって、開発は順調に進展し、石炭ガス化発電実用化の先導的役割りを担うことができたことは真に欣快にたえない。

ここに、通商産業省資源エネルギー庁殿、工業技術院殿、新エネルギー・産業技術総合開発機構殿、石炭ガス化複合発電技術研究組合殿、各電力会社殿、三菱重工・日立・東芝の各共同研究メーカ殿の関係各位に対し、深く感謝する次第である。

昨今、地球環境問題の顕在化のなかで、エネルギー政策の見通しが進められようとしているが、石炭は他の化石燃料に比し、長期に亘り安定して供給できるエネルギー源として不変の期待を担っている。とりわけ、環境性、運用性、経済性に優れる石炭ガス化複合発電の早期実用化が注目されている。

当所は、200トン/日パイロットプラントの成功に全面的な協力を行うとともに、次のステップの実証プラントに向けての高性能化技術の研究開発にも積極的に取り組むこととしている。今後とも関係各位のご指導ご鞭撻を心からお願いしたい。

関連する主な研究報告書等

●1-1～3●

1. 「新・省エネルギー 新たな役割をめざして」電研レビューNo. 4 (1982.7)
2. 「石炭ガス化複合発電の実現に向けて」電研レビューNo.15 (1986.6)
3. 「経済構造調整とエネルギー展望に関する調査報告書(昭和63年度経済企画庁調査)」経企庁(1989)
4. 「石炭ガス化複合発電技術の開発状況」燃料協会誌 Vol.66 No. 2 (1987)

●2-1 (5-1)●

1. 「2 T/日加圧二段噴流床石炭ガス化炉特性」電中研 研究報告：W86010、EW86008 (1986)、W87023、EW87005 (1987)、W88018、W88019 (1989)
2. 「噴流床石炭ガス化炉特性解析ソフトウェアの開発—生成ガスによるチャー搬送時の2 T/日炉ガス化性能予測—」電中研 研究報告：W88016 (1988)
3. 「石炭ガス化中のNH₃の挙動把握」電中研 研究報告：W88036 (1989)
4. 「石炭ガス化複合発電」電気評論 1986 9月号
5. 「石炭ガス化複合発電の性能評価手法とガス化炉基本特性」電中研 研究報告：W88022 (1988)
6. 「加圧2段噴流床石炭ガス化炉の開発」火力原子力発電 Vol.38 No. 6 (1987)

●2-2 (5-2)●

1. 「ポーラスフィルタ集じん装置の逆洗インターバルの推算」電中研 研究報告：W87026 (1988)
2. 「石炭ガス化用ポーラスフィルタの寿命評価手法に関する考察」電中研 研究報告：W87043 (1988)
3. 「石炭ガス化用乾式脱硫剤の長期信頼性」電中研 研究報告：W87033、W87045 (1987)、W88007、W88012 (1988)
4. 「石炭ガス中におけるチャーの粒径分布測定」電中研 研究報告：W88011 (1988)
5. 「石炭ガス化用脱硫剤の加圧下における性能」電中研 研究報告：W88033 (1989)
6. 「石炭ガス化用ポーラスフィルタの高圧逆洗」電中研 研究報告：W88034、W88035 (1989)
7. 「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 Vol. 39 No. 4 (1988)
8. 「石炭ガス化複合発電用乾式ガス精製システムの開発」燃料協会誌 Vol. 68 No. 4 (1989)

●2-3 (5-3)●

1. 「低カロリーガス燃焼に関する研究」電中研 研究報告：285041、285068 (1986)、W86034 (1987)、W87030 (1988)、W88028 (1989)
2. 「石炭ガス化用ガスタービン燃焼器の開発」電中研 研究報告：W87035、W87036 (1988)、W89010 (1989)
3. 「石炭ガス化用ガスタービン燃焼器におけるライナー壁温の予測手法」電中研 研究報告：W88001 (1988)
4. 「石炭ガス化燃料の燃焼反応解析」電中研 研究報告：W88008 (1988)
5. 「水流モデル可視化手法によるガスタービン燃焼器内の流動混合特性」電中研 研究報告：W89001 (1989)
6. 「石炭ガス化複合発電用ガスタービン要素実験設備」火力原子力発電 Vol.39 No.12 (1988)
7. 「石炭ガス化用ガスタービン燃焼器の開発」火力原子力発電 Vol.40 No. 8 (1989)
8. 「石炭ガス化低カロリー燃料の燃焼(第1報)、(第2報)」日本機械学会講演論文集 No. 871-2 (1987)
9. 「石炭ガス化用ガスタービン燃焼器の低NO_x燃焼法に関する研究(第1報)、(第2報)」第16回ガスタービン定期講演会講演論文集(1988)
10. 「石炭ガス化燃料の燃焼反応解析」第17回ガスタービン定期講演会講演論文集(1988)
11. 「Development of a Low-NO_x LBG Combustor for Coal Gasification Combined Cycle Power Generation Systems」ASME Paper 89-GT-104
12. 「COMBUSTION CHARACTERISTICS OF COAL DERIVED GASEOUS FUEL」ICCS(1989)TOKYO

●2-4●

1. 「石炭ガス化複合発電プラントの熱回収システム性能解析プログラムの開発」電中研 研究報告：W86031 (1986)
2. 「石炭ガス化スラグ灰の有効利用法に関する調査」電中研 研究調査報告：W88047 (1989)
3. 「石炭ガス化複合発電の性能評価手法とガス化炉基本特性」電中研 研究報告：W88022 (1989)
4. 「石炭ガス化複合発電システムの熱効率解析手法」日本機械学会論文集 Vol. 52 No. 484(1986)

●3-1~2●

1. 「石炭ガス化複合発電」火力原子力発電 Vol. 38 No.10(1988)
2. 「R&D of a 200T/D Pilot Plant For Entrained Flow Coal Gasification Combined Cycle Power Generation」The 2nd Japan-China Symposium on Coal and Chemistry, Japan (1988)

●4-1~2●

1. 「クールウォータ石炭ガス化複合発電プラントの運転状況について」電中研 研究報告：N86901、N86902 (1986)

●5-1/2-1に同じ●

●5-2/2-2に同じ●

●5-3/2-3に同じ●

●5-4●

1. 「構造用セラミックの熱物性」電中研 研究報告：W86027 (1986) W87042 (1987)
2. 「セラミックガスタービンのトリップシミュレーション」電中研 研究報告：W87002 (1987)
3. 「セラミック繊維型燃焼器の開発」電中研 研究報告：W88037 (1989)
4. 「高温ガスタービン用複合型セラミック燃焼器の開発」電中研 研究報告：W88038 (1989)
5. 「触媒燃焼のガスタービン燃焼器への適用性の検討」電中研 総合報告：W05 (1989)
6. 「高負荷燃焼器に関する研究」動力 Vol. 35, No.173(1986)
7. 「高温高速燃焼ガス流中セラミック部材の耐久性」日本ガスタービン学会誌 Vol. 14, No.54(1986)
8. 「セラミック・金属かん合型燃焼器」日本ガスタービン学会誌 Vol. 15, No.59(1988)

電中研レビュー NO.23

●平成元年11月20日発行

●編集兼発行・財団法人 電力中央研究所 広報部
東京都千代田区大手町1-6-1[大手町ビル7階]☎100
☎03 (201) 6601(代表)
●印刷・株式会社 電友社

本 部／経済研究所

東京都千代田区大手町1-6-1 ☎(03)201-6601 ☎100

我孫子研究所 千葉県我孫子市我孫子1646 ☎(0471)82-1181 ☎270-11

赤城試験センター 群馬県勢多郡宮城村苗ヶ島2567 ☎(0272)83-2721 ☎371-02

柏江研究所／原子力情報センター／ヒューマンファクター研究センター

東京都柏江市岩戸北2-11-1 ☎(03)480-2111 ☎201

横須賀研究所 神奈川県横須賀市長坂2-6-1 ☎(0468)56-2121 ☎240-01

UHV塩原実験場 栃木県那須郡塩原町関谷1033 ☎(0287)35-2048 ☎329-28

編集後記

紅葉前線も南下の足を早めた今日この頃、冬の訪れが近いことを感じさせます。

電中研レビュー第23号「石炭ガス化複合発電の実現に向けて(その2)」をお届けいたします。

本号では、「巻頭言」を石炭ガス化複合発電技術研究組合理事長 藤井 祐三 様にお願ひしました。ご多忙中にもかかわらず快くご寄稿をいただき、心からお礼を申し上げます。

当研究所における石炭ガス化複合発電に関する研究は、着手以来10年を越え、節目節目での研究成果は、着々とそ

の実現のためのステップを進めております。

これまで、石炭ガス化複合発電に関しては、1986年に電中研レビュー第15号としてお届けしておりますが、本号ではその後の研究成果にポイントを置いて取りまとめをいたしました。第15号から本号にいたる研究開発の軌跡の先には、200T/日の噴流床石炭ガス化複合発電のパイロットプラントや、さらには2,000T/日級の実証プラントの輪郭が見えてくることと思います。

当研究所における研究開発に日頃よりご協力頂いております関係機関および諸氏にこの場をお借りしてお礼申し上げますとともに、本冊子が、電力各社をはじめ、関係諸機関の皆様にお役に立つことができれば幸いに存じます。

R