

200t/日噴流床石炭ガス化発電パイロットプラントでの研究成果概要

Over View of Test Results the 200 t/d I. G. C. C Pilot Plant

森 光 康 弘*

Yasuhiro Morimitsu

1. はじめに

エネルギー資源のうち、石炭は、石油や天然ガスに比べ世界に広く分布しており、埋蔵量も多いため将来の発電用燃料として期待されているものである。一方、火力発電技術は、地球環境への対応から、より一層の高効率化と環境適合性が求められている。石炭ガス化複合発電は、これらの条件を満たすものとして、国、電力が2000年代の実用化を目指して研究開発を推進している次期火力発電技術である。

2. 石炭ガス化複合発電システムの概要

石炭ガス化複合発電システム構成の概念図を図-1に示す。石炭ガス化複合発電は、石炭をガス化して発生した1,000kcal/m³N程度の石炭ガスをガス精製設備で硫黄化合物やばいじんを取り除いてクリーンにし、ガスタービンに供給して発電する。なお、ガス化炉と熱回収ボイラとで発生した蒸気を合わせて使用し、蒸気タービンを回して発電する複合サイクルを組む発電方式である。

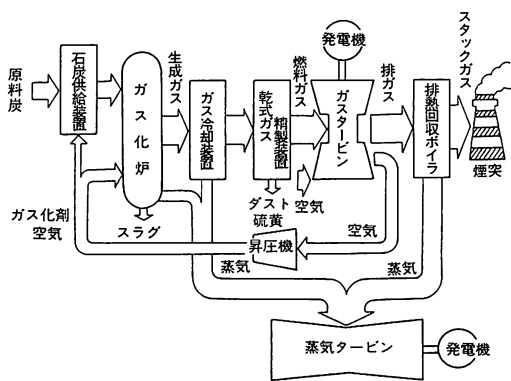


図-1 システム構成概念図

この様に、ガスタービンと蒸気タービンとを組合せた発電システムを構成することにより、発電効率は従来の微粉炭火力より5ポイント以上高くなる。

プラント熱効率の向上が図られるうえ二酸化炭素、硫黄酸化物およびばいじん排出量が削減され、石炭灰はガラス上のスラグとして排出されるなど環境保全性に優れている。

ガス化剤用の空気はガスタービンに直結された圧縮機の空気の一部を使用しており、ガス化炉→ガス精製→ガスタービン→ガス化炉とクローズドサイクルを形成した抽気連携状態で運転する。

3. 勿来パイロットプラントの研究開発

3.1 研究開発の背景

我が国では2度に亘る石油ショックに端を発して、国、民間を挙げたエネルギー政策が展開され、石油を燃料とした高効率で環境性に優れた火力発電技術開発への要請が高まる中で、1983年度から1985年度にかけて新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が電力中央研究所に委託して実施した「噴流床石炭ガス化複合発電技術」のフィジビリティスタディーの結果に基づいて通産省の関係委員会で審議され、パイロットプラント開発の主要方針が決定された。

一方、電力会社としては、1980年に中央電力協議会技術開発推進会議の下部組織として、石炭ガス化専門部会を設けて数年間検討を行った。これらの検討結果を踏まえ、パイロットプラントは、噴流床空気吹きガス化炉、乾式ガス精製、1,300℃級低カロリーガスタービンを組み合わせたシステムが採用され、次ステップの送電端効率43%以上を目標とした実証機単機容量25万kW級への前段として、この約1/10規模の200t/日の容量が適正と判断された。

こうして、1986年度より通産省の補助のもとにNE DOからの委託を受けて、9電力会社、電源開発、電力中央研究所の11法人で構成する石炭ガス化複合発電

*石炭ガス複合化発電技術研究組合 技術部
技術管理室 技術部実証プラント調査室 室長
〒104 東京都中央区銀座3-11-13

技術研究組合（IGC技術研究組合，現理事長 宮原茂悦）が，常磐共同火力(株)勿来発電所の構内に「200t/日噴流床石炭ガス化発電パイロットプラント」を設置して研究開発を実施することとなった。

3.2 200t/日パイロットプラントの研究課題

将来のIGCC技術開発目標を，表1に示す。本目標を達成するため，IGC技術研究組合では，下記の重点課題を中心にその他，プラントシステム全体性能（熱物質バランス），プラント統括制御特性，環境適合性などを開発課題に掲げ，パイロットプラントによる試験研究および各種要素研究を推進した。

- ①空気吹き加圧2室2段噴流床ガス化炉
 - ・ガス化性能
 - ・微粉炭ドライフィード特性
 - ・溶融スラグ排出特性
- ②乾式ガス精製（酸化鉄による流動床脱硫とグラニューラベッド脱じん）
 - ・高温高圧状態での脱硫，再生，還元性能
 - ・脱じん性能
- ③低カロリー燃料用ガスタービン
 - ・低カロリー石炭ガス燃焼特性
 - ・ガス化炉との連携運転性能

表1 噴流床石炭ガス化発電プラント技術の開発目標

<ul style="list-style-type: none"> ・実用化時期；遅くとも西暦2000年頃 ・規模；250MW以上（単機容量） ・熱効率；送電端効率 43%以上 （乾式ガス精製及び1,300℃級ガスタービン基準） ・経済性；微粉炭炭灰火力の発電コストを下まわること。 ・環境適合性；SO_x，NO_x，ばいじん等の環境影響が既存石油火力並であること。また，灰処理対策が微粉炭火力より容易なこと。 ・炭種適合性；燃料比，灰融点の異なる広範囲な炭種の利用が可能なこと。 ・運用特性；起動，停止，負荷追従性火力同等以上であること。 ・信頼性；微粉炭火力並であること。

3.3 プロジェクトの経緯

IGC技術研究組合が設立された昭和61年6月から現在までのプロジェクトの実績工程を図-2に示す。パイロットプラントの設計は組合設立時から開始され平成3年2月に建設工事が竣工した。以後，平成8年2月まで5年間，運転試験研究を中心に3種類の石炭（太平洋炭，モーラ炭，ワークワース炭）を用いて行った。

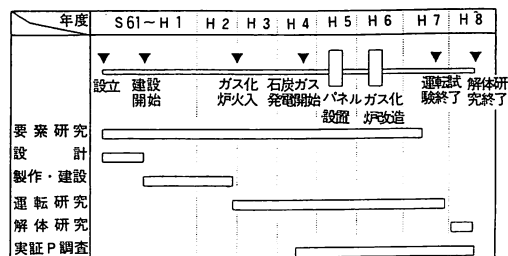


図-2 プロジェクト実績行程

累積運転時間は，ガス化炉4,770時間，ガス精製2,981時間，ガスタービン1,643時間を記録した。

本プロジェクトは，パイロットプラントの運転研究を主眼においたものであるが，パイロットプラントの設計および運転に必要な各種のデータの取得等を目的とした要素研究，パイロットプラント運転後の各種材料等の耐久性を確認する解体研究，また，パイロットプラントをスケールアップした場合の性能予測検討等を行う実証プラント調査を実施した。

3.4 200t/日パイロットプラントの設備概要

図-3に200t/日パイロットプラントの基本構成図を示す。本プラントは，空気吹き加圧2室2段噴流床ガス化炉，乾式ガス精製および低カロリー燃料用ガスタービンを主体に構成されているが，その他，起動時等の生成ガスを処理するための保安環境設備，実証規模燃焼器（1缶分）により各種燃焼試験が実施可能な実圧実寸燃焼器試験設備等で構成されている。なお，IGCプラントではガスタービン排熱回収による蒸気およびガス化炉生成ガス熱交換器による発生蒸気を利用しての蒸気タービン発電も行うが，蒸気系は既存技術であるので本プラントでは設置していない。

4. 研究主要成果

4.1 ガス化炉設備

ガス化炉は，加圧2段噴流床型で，ガス化剤には主として空気を使用する方式である。石炭消費量は200t/日，炉内圧力は26atgであり，COおよびH₂を主成分とする1,000kcal/m³N程度の低カロリーガスを生成する。

石炭は微粉砕した後ロックホッパにて加圧後，空気にてガス化炉内へ気流搬送される。生成ガス中のチャーは，サイクロン・電気集じん器で捕集されリサイクルガスによりコンバスタに戻され燃焼される。石炭中の灰分は，溶融スラグとしてコンバスタ下部のスラグタップから炉底に落下して，水中で急冷水砕されてガラス

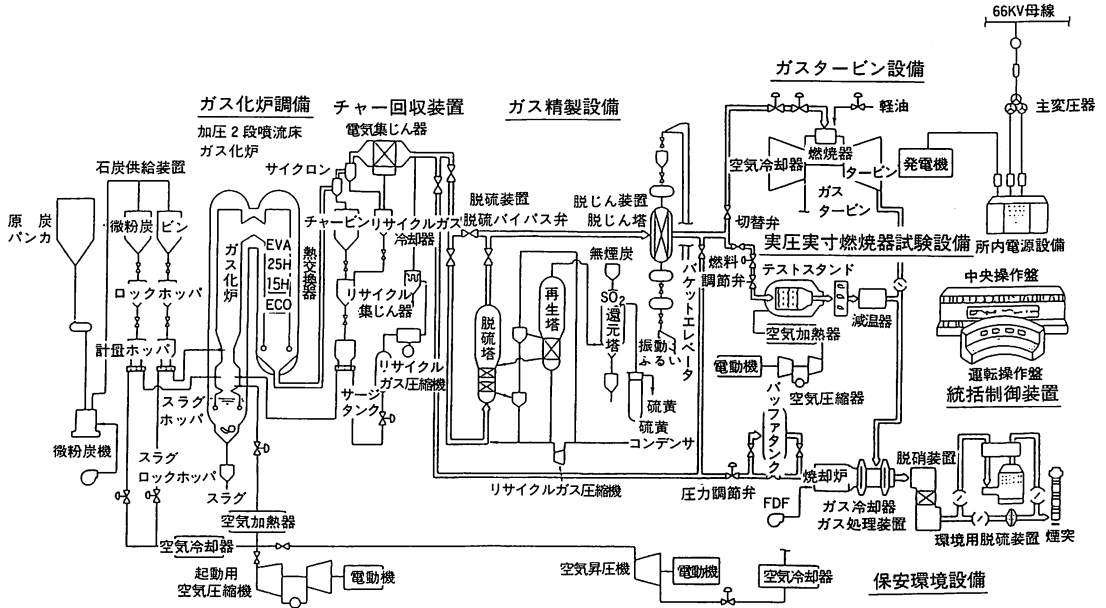


図-3 200T/日石炭ガス化パイロットプラント基本構成図

状の小粒体となり系外に排出される。運転開始当初は、炉内スラッキングおよびスラグ塊堆積等連続運転を阻害するトラブルが生じたが2回のガス化炉改造（コンバスタ出口スロート部形状変更等）でそれも改善された。

また、ガスタービンでの燃焼安定を確保する目的で不活性ガス製造過程で副製される酸素（回収酸素）をガス化剤空気に混入し酸素濃度上げて用いた。

(1) 炭素転換率

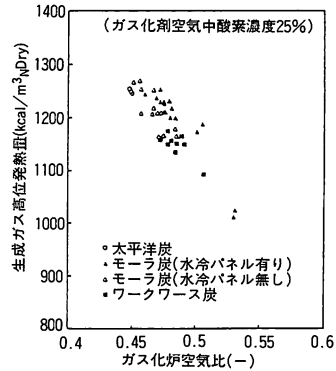
炭素転換率（生成ガス中炭素流量/ガス化炉投入石炭中炭素流量×100）は、常に目標値（98%以上）を上回り99%以上の結果であった。また、スラグ中の未熟カーボンは、0.1%以下であった。

(2) 生成ガス発熱量

図-4に、太平洋炭、モーラ炭およびワークワース炭によるガス化試験時の生成ガス発熱量と空気比の関係を示す。図中には、ガス化剤空气中酸素濃度25vol%のデータを記載した。生成ガス発熱量は、ガス化炉空気比に強く依存し、空気比の低下に伴い増加する。ガス化炉空気比0.45~0.53の範囲で1,000~1,280kcal/m³N-dryの生成ガス高位発熱量が得られた。

(3) 冷ガス効率

冷ガス効率と空気比の関係を図-5に示す。図中には、生成ガス発熱量と同様、ガス化剤空气中酸素濃度25vol%のデータを記載した。なお、冷ガス効率の定義



$$\text{ガス化炉空気比} = \frac{\text{ガス化炉投入空気流量}}{\text{ガス化炉投入石炭の理論燃焼空気量}}$$

図-4 生成ガス発熱量 vs ガス化炉空気比

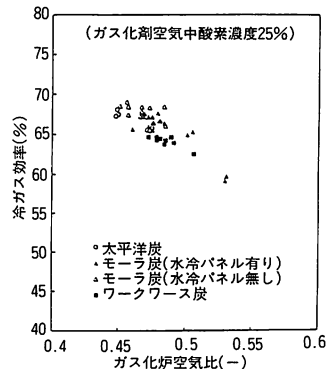


図-5 冷ガス効率 vs ガス化炉空気比

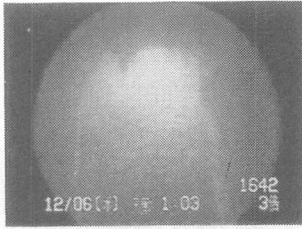


図-6 スラグタップからのスラグ流下状況

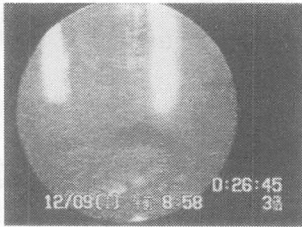


図-7 炉底部のスラグ流下状況

を下式に示す。冷ガス効率は、生成ガス発熱量と同様、ガス化炉空気比に強く依存し、ガス化炉空気比の低下に伴い増加する。ガス化炉空気比0.45～0.53の範囲で約60～70%の冷ガス効率が得られ、空気比0.48以下では計画値（67%）をほぼ満足した。

$$\text{冷ガス効率 (\%)} = \frac{\text{生成ガスの化学熱 (kcal/h)}}{\text{ガス化炉投入石炭の化学熱 (kcal/h)}} \times 100$$

(4) 溶融スラグの排出状況

豪州炭（モース炭、ワークワース炭）は、灰融点が高いため、それぞれ灰融点を降下させる目的で石灰石（CaCO₃）を石炭中に添加し試験を実施した。事前に石灰石を添加した場合の灰溶融性を調査し、灰中の

CaO含有率が7～25%になるように添加量を調整した結果、熔融スラグは十分な流動性を保ち安定に流下した。なお、太平洋炭は灰融点が低いことから、石灰石無添加でも十分な流動性が得られた。図-6、7にワークワース炭でのスラグ流下状況（スラグタップ部および炉底部の写真）を示す。

4.2 ガス精製設備

ガス精製設備の系統図を図-8に示す。脱硫装置は、石炭ガス中の硫黄分（H₂S、COSなど）を酸化鉄系脱硫剤（破碎鉄鉱石）で除去する脱硫塔、脱硫剤に吸収された硫黄分を再生ガス（O₂含む）で再生する再生塔、さらに脱硫剤再生時に発生するSO₂ガスを炭素還元法により還元し、単体硫黄として回収する還元塔および硫黄回収装置で構成される。

脱じん装置は、主として集じん機とろ過材の移送装置からなる。集じん機内には、2層2列のろ過層からなるグラニューラベッドがあり、充填されたるろ過材を循環しながら石炭ガス中のダストを除去する。また、ろ過材移送方式として常圧エレベータ方式と10分の1規模の加圧気流搬送方式がある。

(1) 脱硫性能

脱硫塔流動層温度と脱硫装置出口硫黄濃度を図-9に示す。目標値は負荷変化時等における一時的な温度降下による性能低下を考慮して、脱硫装置出口硫黄分（H₂S + COS）濃度110ppm以下に設定した。脱硫装置出口硫黄濃度は、流動層内温度上昇するに従い低下する傾向が見られ、約400℃以上において脱硫装置出口硫黄濃度は、30ppm前後となり、良好な結果が得られた。また、各炭種別の脱硫性能の結果を表2に示す。全炭種を通じてみても、入口硫黄濃度230～1,380ppmに

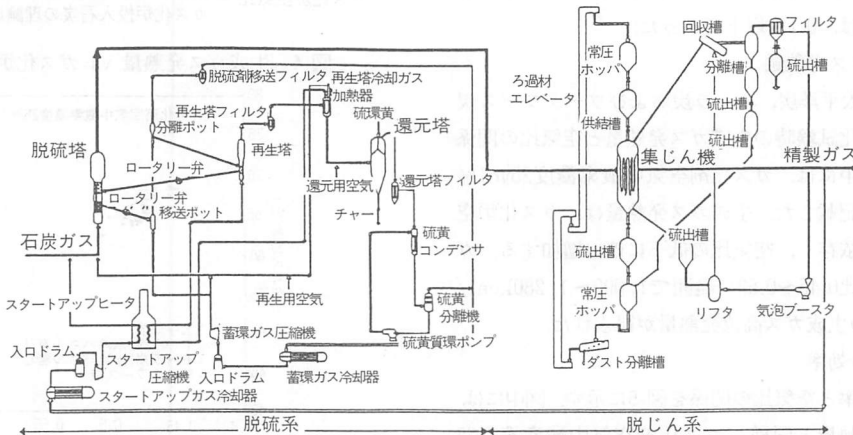


図-8 ガス精製設備フロー図

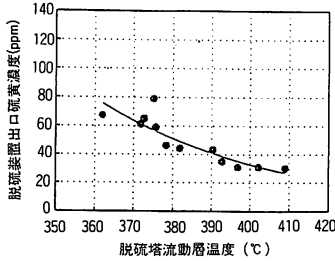


図-9 脱硫塔流動層温度と出口硫黄濃度

表 2 脱流性能

	入口硫黄濃度 (ppm)	出口硫黄濃度 (ppm)	脱流効率* (%)
太平洋炭	230~460	26~70	72~92
モーラ炭	370~780	29~79	83~95
高硫黄炭	810~1380	37~86	81~97
ワークワース炭	640~720	36~56	91~94
目標値	1,379	110以下	-

※(1 - 脱流装置出口硫黄分/脱流装置入口硫黄分)×100(%)

表 3 脱じん性能

	入口ダスト濃度 (mg/m ³ N)	出口ダスト濃度 (mg/m ³ N)	脱じん効率 (%)
太平洋炭*	18~600	0.2~9.0	90.2~99.8
モーラ炭	22~267	0.1~4.2	88.9~99.8
高硫黄炭	28~200	0.1~0.7	97.8~99.9
ワークワース炭	34~94	0.1~0.4	98.8~99.9
目標値	2400	30以下	-

※印：EP荷電停止および脱流装置バイパスによる高濃度ダスト試験時のデータを含む。

スト濃度は、どの炭種についても目標性能 (30mg/m³N以下) を十分に満足している。ただし、入口ダスト濃度については、かなり低い値となっており、これはガス化炉出口ダスト濃度が低かったことに加え、上流設備の脱硫装置にて、ダストの一部が捕集されたものと考えられる。

4.3 ガスタービン設備

ガスタービンは、発熱量が1,000kcal/m³N程度と、LNG燃料の約1/10の低カロリーガスを安定して燃焼させ、LNGガスタービンと同レベルの燃焼器出口温度を確保する技術を目指して開発したものである。燃焼器出口温度1,260℃の燃焼器6缶を有する単純サイクル型を採用し、発電機出力は12.5MWである。本パイロットプラントでは、ガス化炉のガス化剤用空気として、ガスタービン空気圧縮機の吐出空気を一部抽気して、ガス化炉へ送気するシステム構成となっている。また、次ステップとしての実証機用ガスタービンの燃焼器の1缶について、安定燃焼性、高効率冷却効果、低NO_x等を試験研究するため、実圧実寸燃焼器試験装置を設置している。図-10にガスタービン設備概略系統図を示す。

(1) 低カロリー石炭ガス燃焼特性

運転研究におけるデータと過去の要素研究データ等から、安定燃焼領域と不安定燃焼領域を発熱量と燃空比で整理した。その結果を図-11に示す。同一発熱量では燃空比が低いほど燃焼状態が不安定となり、燃料切替時の燃空比が低い時でも安定燃焼させるためには、燃料ガス発熱量がおよそ800kcal/m³N, LHV (w) 以上と推測される。

(2) 負荷しゃ断試験

負荷しゃ断時の最大速度は、図-12に示す。4/4負荷からの負荷しゃ断時においても定格速度の106%で制限値 (110%以内) 以下であり、満足すべき結果を得た。

4.4 プラント運転特性

(1) 負荷運転特性

本パイロットプラントにおける負荷運転特性として、設計炭における定格負荷連続運転時のトレンドを図-13に示す。本運転時は、後に述べるプラント協調モードにて制御されており、ガスタービン出力が定格一定 (12.5MW) となるようにガス化炉入力が調整されるため、昼夜の大気温度変動により、コンバスタ石炭量、チャー供給量が周期的に変動し、生成ガス流量もそれに伴い変動する。また、生成ガス発熱量が安定して得

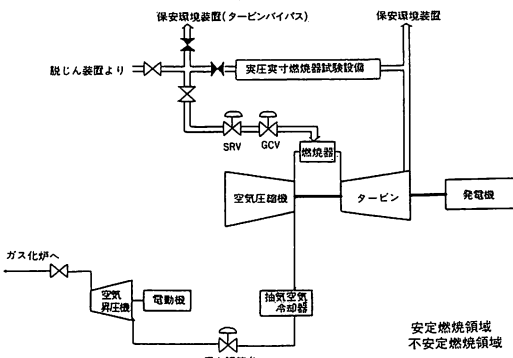


図-10 ガスタービン設備概略系統図

対して、出口硫黄濃度26~86ppmと目標性能を満足できる結果を得た。

(2) 脱じん性能

各炭種別の脱じん性能の結果を表3に示す。出口ダ

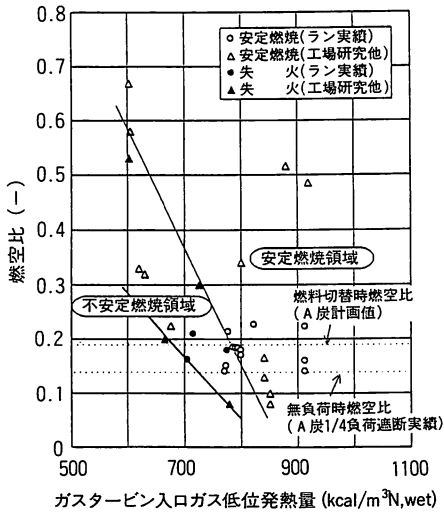


図-11 燃焼器の安定燃焼範囲

られている。

ECO出口のガス温度を見ると周期的な波形がみられるが、これは熱交換器へのチャー付着による伝熱阻害を改善するために同ガス温度480°C到達を目安にショットクリーニングを実施していることによるものである。

(2) 統括負荷圧力制御性

本プラントにおける全体制御システムは、各設備を

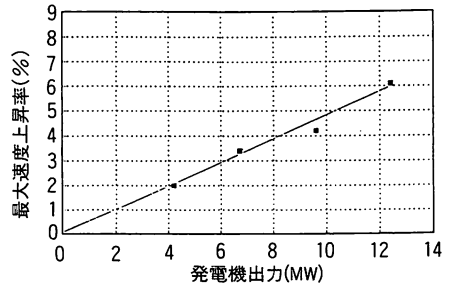


図-12 負荷しゃ断時の最大上昇率

安全かつ効率的に運転するための設備毎ローカル制御装置とそれらを統括する統括負荷圧力制御装置からなる。統括負荷圧力制御装置は、プラント全体を協調的に制御するものである。統括負荷圧力制御の運転モードは表4に示すとおり制御対象の相違により5モードに分類される。

(3) 負荷変化特性

運転制御モードの中で最上位のプラント協調モードを使用し、負荷変化率10%/分で負荷変化幅5 MWの負荷降下、上昇を実施した結果を図-14に示す。最大負荷偏差0.48MW、最大圧力偏差0.19kg/cm²とそれぞれの制御偏差が管理値(0.625MW, 0.5kg/cm²)以内に制御されることを確認した。

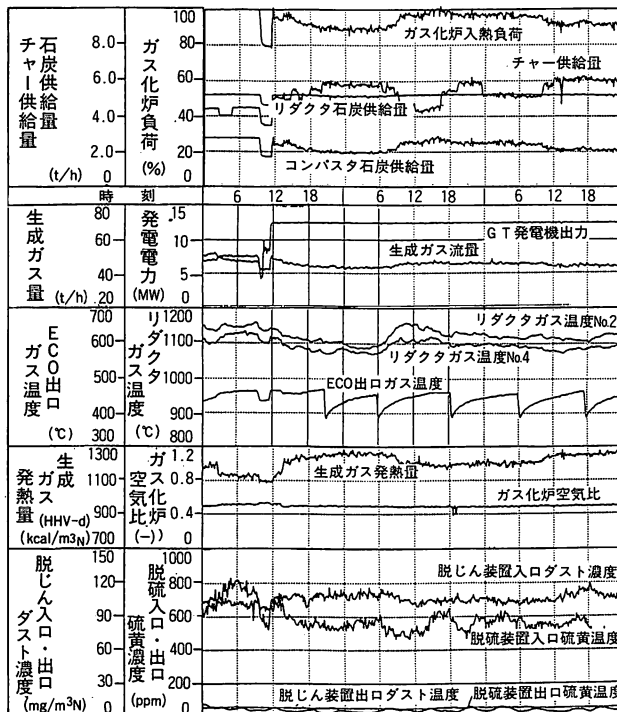


図-13 定格運転時のプロセス状態量

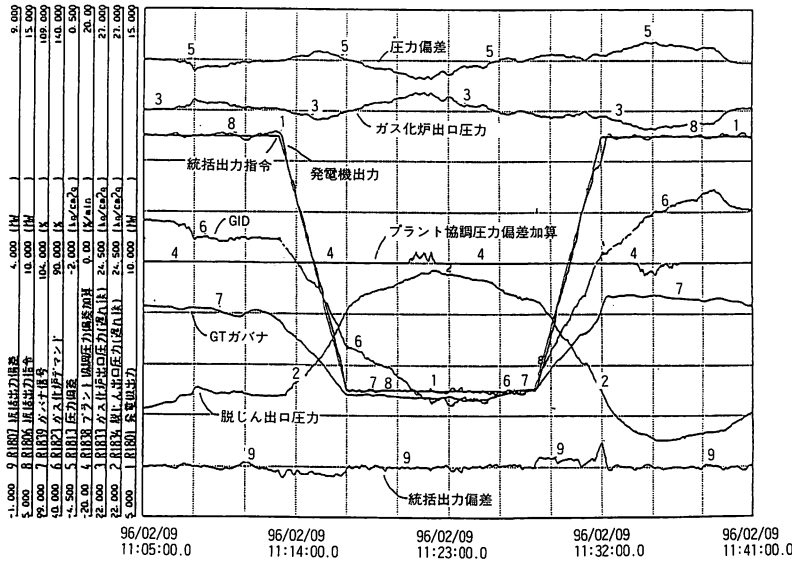


図-14 負荷変化試験結果 (プラント協調モード：負荷変化率10/分，負荷変化幅5 MW)

表 4 統括負荷圧力制御モード

制御モード	制御対象 分担		プロセスガス圧力	
	GT	ガス化炉	GT	ガス化炉
ガス化炉入力モード	—	—	○	—
GT出力モード	—	—	—	○
ガス化炉協調モード	—	○	○	—
GT協調モード	○	—	—	○
プラント協調モード	○	—	修正*	○

* 圧力偏差±0.15kg/cm²以上で圧力修正動作

表 5 大気関係測定結果

項	目(単位)	測定結果	目標値*1
SO _x	濃度換算値 (ppm)*2	7.0~15.6	20
NO _x	濃度換算値 (ppm)*2	6.0~14.7	24
ばいじん	濃度換算値 (mg/m ³)*1	0.8~7.2	11

* 1 ばい煙発生施設届出書 (電気関係報告規則による) 添付書類「ばい煙に関する説明書」による届出値を目標値とした。

* 2 O₂濃度16%換算値

表 6 ガス化炉排出スラグ組成分析 (太平洋炭)

単位: wt%

	湿分	強熱減量	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Total
ガス化スラグ	0.1>	+0.1	50.5	23.7	5.6	9.2	2.4	1.61	1.12	0.2	94.33
フライアッシュ(参考)	0.1	1.0	51.9	26.0	5.4	7.3	2.7	1.02	1.11	0.5	97.03

表 7 スラグ溶出試験結果 (モーラ炭代表例)

単位: mg/l

	Cd	Pb	Cr(vi)	As	CN	T-P	T-Hg	R-Hg	PCB
溶出試験結果*1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
判定基準*2	<0.1	<1	<0.5	<0.5	<1	<1	<0.005	非検出なこと	<0.003

* 1 「産業廃棄物に含まれる金属などの検出方法 (昭和48年2月17日, 環境庁告示13号)」に基づいた溶出試験結果

* 2 「金属等を含む産業廃棄物に係わる判定基準を定める総理府令 (昭和48年2月17日, 総理府令第5号)」に定められた判定基準

(4) プラントの熱収支

定格時においてプラント性能試験を行い, 熱物質収支評価を行った。一例として図-15にモーラ炭ガス化時のヒートフローを示す。石炭入熱に対するGT出力の割合は約17.3%であった。また, 石炭入熱に対するガス化炉発生蒸気顕熱の割合は, 約20%となった。ガス化炉の冷ガス効率は67.7%となり計画値を満足した。

(5) 環境適合性

プラント定常運転 (ガス化炉+ガス精製+ガスタービン連携運転) 時の煙突入口におけるSO_x, NO_x, ばいじん測定結果を表5に示す。

プラント定常運転時のSO_x, NO_x, ばいじんの濃度は, 目標値以下の値であった。なお, 起動から定常運転までの移行時についても, 目標値を下回るレベルであった。

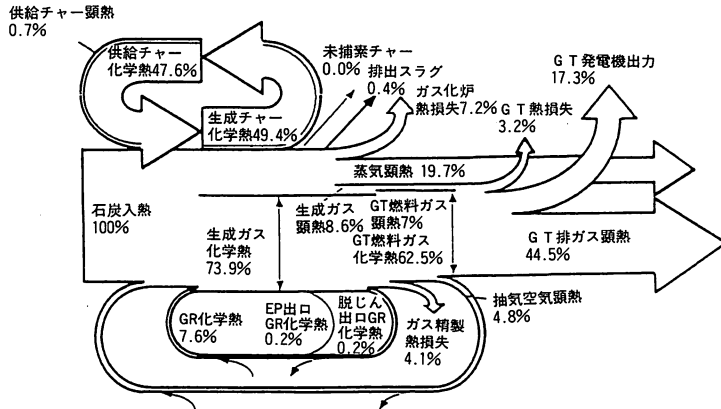


図-15 プラント熱流れ図（モーラ炭・水冷パネル有り）

ガス化炉より排出されるスラグの組成および溶出試験結果を表6, 7に示す。ガス化スラグは、成分的にはフライアッシュと同等であるが、水中への溶出成分がないことから、埋め立てなどに対しても環境上の問題がない。さらに、ガラス化率の高い、粒状の固体として排出されるため、ハンドリングもしやすく、灰捨て場面積も削減が図れる見通しである。なお、スラグの有効利用方策については、要素研究にて実施しており、セメント用粘土代替材、コンクリート用細骨材等への利用が可能であることを確認している。

5. 実証機概念設計検討

1992年10月から、次ステップ実証機（1,500t/日～2,600t/日）についての概念設計を行っており、勿来パイロットプラントの運転成果を反映して検討を実施している。

5.1 実証機の熱効率

高効率を目指した最新型ガスタービンを採用することにより、発電端効率は49%以上、送電端効率は目標値43%を十分に満足する結果が得られている。

5.2 実証機の発電原価

実証機は、単機容量が250MW～400MWと最近の微粉炭火力（1,000MW規模）より小規模であること、また、初号機であることなどから、微粉炭火力に比較して割高となると予想される。

5.3 高い負荷変化率

勿来パイロットプラントの運転では10%/分の負荷変化に余裕をもって対応したことから、実証機において蒸気タービン系を組込んだとしても、5～6%/分の負荷変化は可能であると考えられる。しかし、起動・停止には時間を要することから、ベース火力またはミ

ドル火力として運用されることになろう。

6. おわりに

海外でのIGCCプロジェクトは、酸素吹き、湿式ガス精製を採用したものが主流であり、現在、実証段階にある。

これに対し、200t/日パイロットプラントプロジェクトでは、国産技術の空気吹きガス化炉、乾式ガス精製を採用し、11年間の研究開発により、性能・運用面、環境安全性などの各開発課題に対し、所期の成果を得ることができた。当システムは、国内はもとより海外からの関心も大変高くなっている。

IGC技術研究組合は平成9年3月解散するが、引き続き国・電力において、実証機に向けての検討が行われる予定であり、近い将来には我が国においても、実証機の運転が開始されるものと大いに期待している。

引用文献

- 荒木成光, 花井義春; 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)
- 花井義春; 200t/d噴流床石炭ガス化発電パイロットプラントの運転成果
火力原子力発電, Vol. 47 No. 5 1996, 5