

石炭利用新技術

New Technology for Coal Utilization

川野 敬* Kei Kawano

古賀修二郎* Shūjirō Koga

古江俊樹* Toshiki Furue

過去2回にわたる石油危機を契機に、石油から石炭への燃料転換が図られ、火力発電では、微粉炭燃焼方式を中心として燃焼効率の改善、環境保全対策などの技術開発が推進されてきた。しかし、運用性、環境対策、灰処理など石炭火力特有の問題があり、石炭利用拡大の制約となっている。

日立グループでは、上記制約を低減又は排除し石炭利用拡大を目的に、流動層ボイラ、CWMなどの石炭流体化を例とする新燃焼方式、更には次世代形技術として、石炭ガス化複合発電などの新技術開発に取り組んできた。

現在、これら新技術は実用化の段階に入ったものもあり、本稿では、これら新技術の動向及び現在の技術レベルについて紹介し、石炭火力の将来のあり方を考える一助としたい。

1 緒言

2回にわたるエネルギー危機を経て、重原油主体のエネルギー源は石炭への転換が進み、石炭の有効利用が推進されている。その取扱いについても、時代のニーズに合わせ、従来の化石固体燃料から、CWM(Coal Water Mixture:高濃度石炭水スラリー)などの流体化燃料、更には重原油、天然ガスの性質を求めて、ガス化、液化の新技術開発など多様化しつつあり、また固体燃料でも、微粉炭燃焼から流動媒体中で燃焼させる流動燃焼など、燃焼効率の向上、環境改善を目的とした技術開発がなされてきた。

日立グループでは、早くから基礎研究を始めるとともに、その総合力を結集して、時代の要請にこたえるべく努力しているが、本報告では、実用化レベルに到達し、実績を挙げつつある新技術に焦点を合わせ、その一部について紹介する。

2 流動層ボイラ

流動層ボイラ(以下、FBCと略す。)は広い炭種への適応性、石灰石による炉内脱硫、層内伝熱管の高い熱伝達率、低温燃焼のためクリンカトラブルがないなどの優れた特性を持っている。その特性を検証するため、昭和51年度からベンチスケールテスト¹⁾、若松20t/hパイロットプラントの運転・研究を進めてきた。その成果をもとに、電源開発株式会社若松石炭利用技術試験所²⁾に156t/h(50MW)の実証プラントを建設し、昭和62年3月20日官庁検査に合格し、現在順調に実証運転を行っている。本プラントは、昭和66年度までの5年間にわたり実証運転を続け、次期大形プラントに必要なスケールアップ技術、運転制御の検証、長期運転による信頼性の確認、多銘柄炭燃焼による脱硫性能、経済性の確認などを行うことに

なっている。ここに実証プラントの設備概要及び調整・試運転の結果について紹介する。

2.1 設備概要

2.1.1 プラントの特徴

本実証プラントの規模は蒸発量156t/h(50MW)で、運転中のものとしては国内外を問わず最大級であり、また次期大形事業用ボイラの実用化に必要な以下の特徴を持っている。

(1) 排煙脱硫装置の省略

炉内脱硫が可能で脱硫装置の省略、若しくは簡略化が可能で、脱硫装置の建設コスト、運転コストの低減はFBC最大の特徴である。炉内脱硫に必要な石灰石消費量増加などの運転コスト増加を割り引いても、脱硫装置を必要とする微粉炭燃焼ボイラ(以下、PCFと略す。)に比べて優位性があり、その実証を目的としている。

(2) 多銘柄の海外一般炭を対象としているためCBCを設置

FBCの主燃焼炉(以下、MBCと略す。)は、PCFに比べて燃焼温度が低く、MBC出口の飛散灰中カーボンが多い。この灰中カーボンを再燃焼させるため、再燃焼炉(以下、CBCと略す。)を設置している。我が国で対象としている海外一般炭は、燃料比が1.5~2.4、更には無煙炭などの高燃料比炭も対象となることからPCF並みの燃焼効率を確保できる、MBC-CBC方式の運用特性を実証確認するものである。

なお海外では、捕集灰をMBCへ再供給する灰リサイクル方式を採用しているが、これは石炭中の硫黄分が4~5%と高く、燃焼性の良い石炭を対象としており、灰リサイクルによる未反応CaOの有効活用(Ca/Sモル比の低減)を主目的としているためである。

* バブコック日立株式会社呉工場

(3) 流動層積重ね方式(スタック構造)の採用

海外で単段ベッド、ボトムサポート(ランチタイプ)の採用が試みられているが、ボイラの据付面積が増加する。国内では油燃焼ボイラの石炭転換から普及していくことが考えられ、既設発電所の限られた設置スペースに収納できること、また既設の基礎及び鉄骨、あるいはボイラの一部まで流用することも考えられ、ベッドを積み重ねたスタック構造が優位であり、この信頼性を実証確認するものである。

(4) 超高温蒸気条件の採用

FBC層内伝熱管の高い伝熱特性は、PCFに比べ余裕のある伝熱面配置が可能で、かつ高温蒸気発生に必要な高級材料が少なく済む。このFBCの優位性を実証確認するため、ボイラ出口蒸気温度 $596^{\circ}\text{C}/652^{\circ}\text{C}$ (ステップⅠ/ステップⅡ)を採用している。

2.1.2 設備仕様

(1) ボイラ主要仕様

形式：再熱単胴水管式自然循環・強制循環併用形(屋内式)

蒸発量：156t/h〔MCR(最大連続蒸発量)時〕

最高使用圧力：125kg/cm²ゲージ圧

蒸気温度(過熱器出口)： 596°C (ステップⅠ)

652°C (ステップⅡ)

(再熱器出口)： 595°C

(2) ボイラ構造

ボイラ構造を図1に示す。本ボイラは前述のスタック構造実証のため、流動層を2段積み構造とし、上段ベッドには蒸発器だけを、下段ベッドには二次、三次、最終過熱器及び二次再熱器を配置している。この伝熱面配置によって、蒸発量と蒸気温度の制御を上下段の層温度で調整可能とし、負荷運用性を向上させている。

また多銘柄炭燃焼試験のため、CBCを設置している。

(3) プラント系統

プラント全体系統を図2に示す。MBC-CBC方式を採用しているため、MBC出口に機械式集じん機を設置し、捕集灰をCBC(3セル構成)に分配、供給する方法とし、高濃度輸送システムを採用している。

2.2 試運転の概要

昭和61年10月27日、石炭の流動燃焼を開始、以降調整、試運転を実施し、昭和62年3月20日官庁検査に合格した。その後、順調に実証運転を続けている。

図3に試運転実績工程を示し、表1に官庁検査時の運転データと計画値との対比を示す。

試運転時に使用した石炭は窒素分1.7%、全硫黄分0.9%の

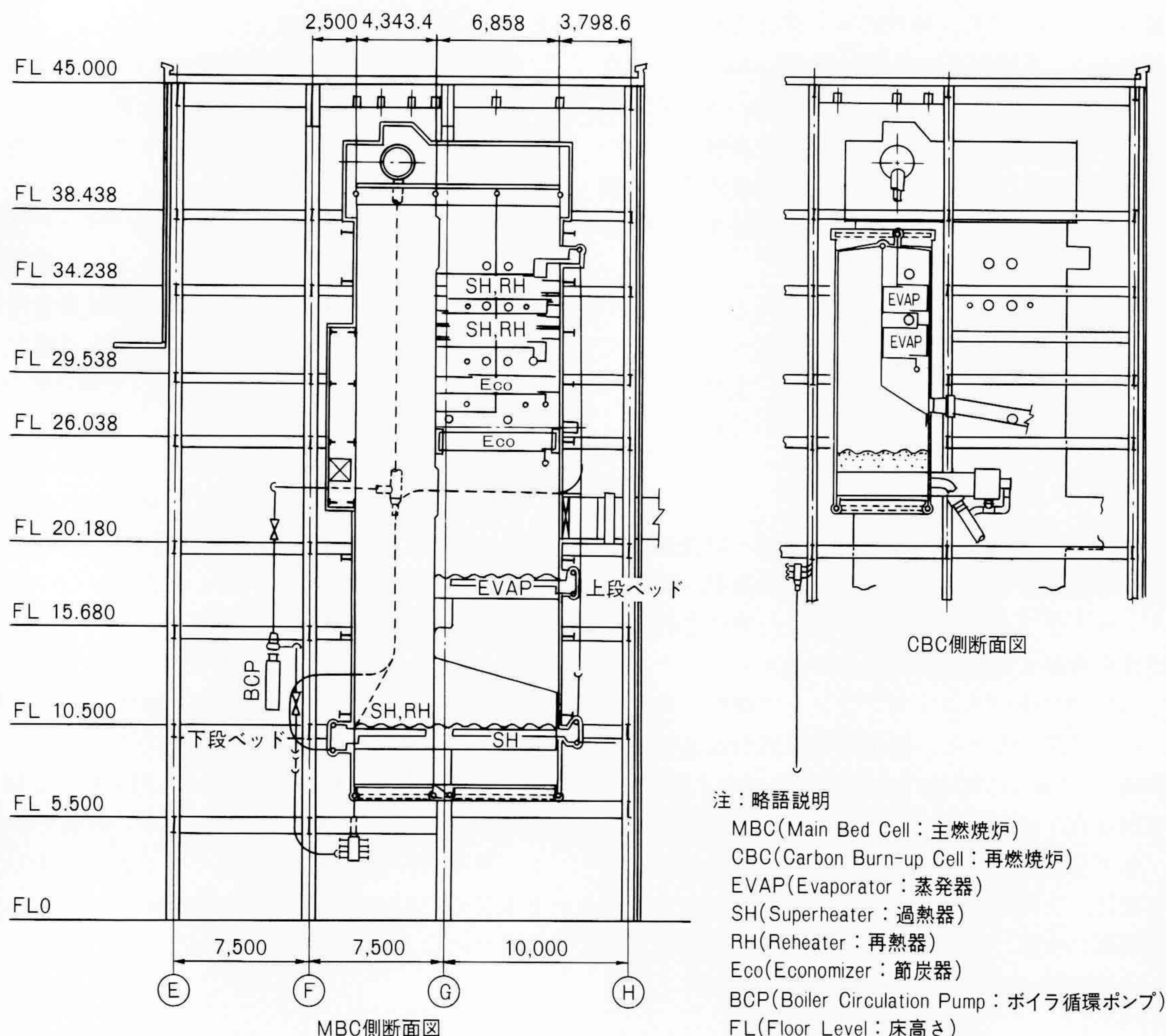


図1 156t/h流動層ボイラ側断面図 156t/h流動層ボイラの側断面を示し、MBC、CBCを設置している。MBCは2段積みベッド構造としている。

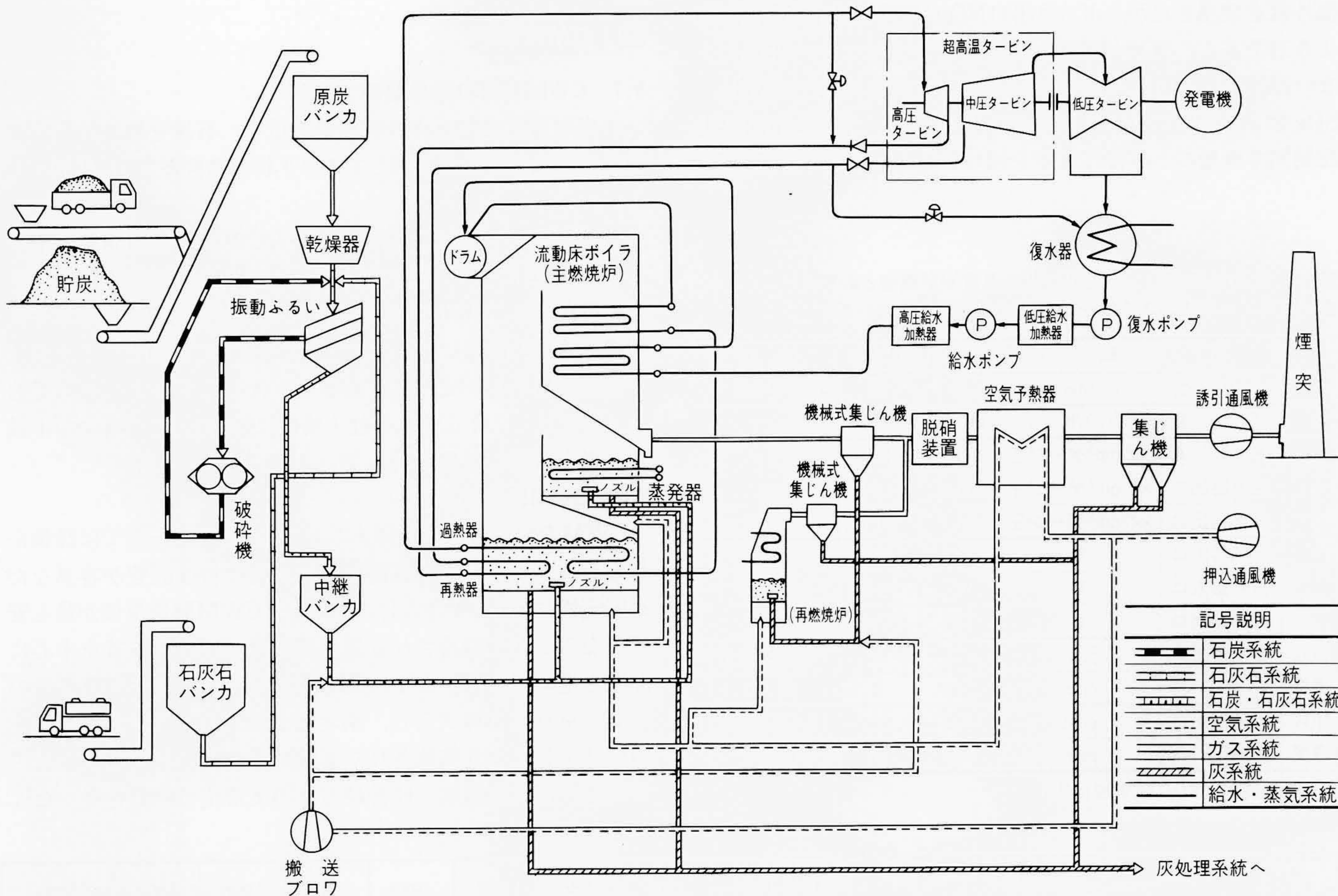


図2 156t/h流動層ボイラプラント全体系統図 流動層ボイラ全体系統を示し、CBCの設置、排煙脱硫装置の省略、石炭及び石灰石供給系にFBCの特徴を示している。

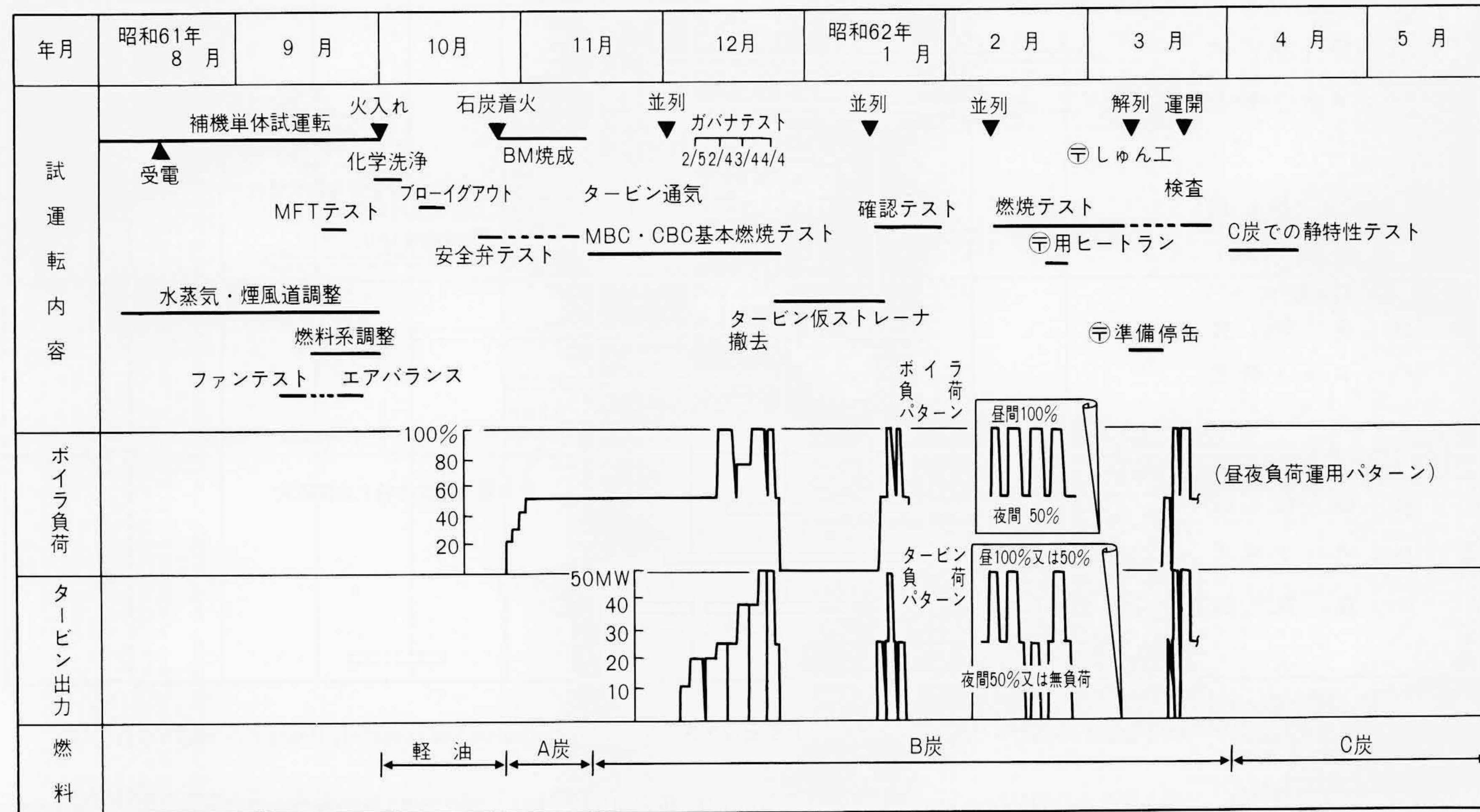


図3 試運転実績工程表 試運転実績工程を示し、計画工程どおり消化して開発製品にもかかわらず従来PCF(Pulverized Coal Firing Boiler)並みの工程となっている。

海外炭を使用した³⁾が、ボイラ出口NO_x(窒素酸化物)値は計画より若干高く、SO_x(硫黄酸化物)値は計画値に比べ非常に少ない値を示している。その後炭種を変えた試験結果ではNO_x、SO_xとも計画値に近づく傾向を示しており、今後5年間の実証期間で炭種ごとの特性試験を続けていくことになっている。

表1 試運転実績 出力及び蒸気温度が計画値どおり満足しており、また煙突入口の排ガス性状が計画値を十分満足している。

項 目		単 位	計画値	実績値	備 考
定 格 出 力		MW	50	50	石炭はB炭
蒸 発 量		t/h	146.77	148.39	――
蒸気 圧力	ド ラ ム	kg/cm ² ゲージ圧	117	113	――
	過熱器出口	kg/cm ² ゲージ圧	106.1	104	
	再熱器出口	kg/cm ² ゲージ圧	24.2	24.7	
蒸気 温度	過熱器出口	℃	596	595	――
	再熱器入口	℃	421	415	
	再熱器出口	℃	595	594	
SOx 濃度	ボイラ出口	ppm	176	9	(O ₂ 未補正值)
	煙 突 入 口	ppm	176	9	(同 上)
NOx 濃度	ボイラ出口	ppm	200	221	(O ₂ 6%換算値)
	煙 突 入 口	ppm	100	81	(同 上)

注：略語説明 SO_x(硫黄酸化物)

3 CWM燃料

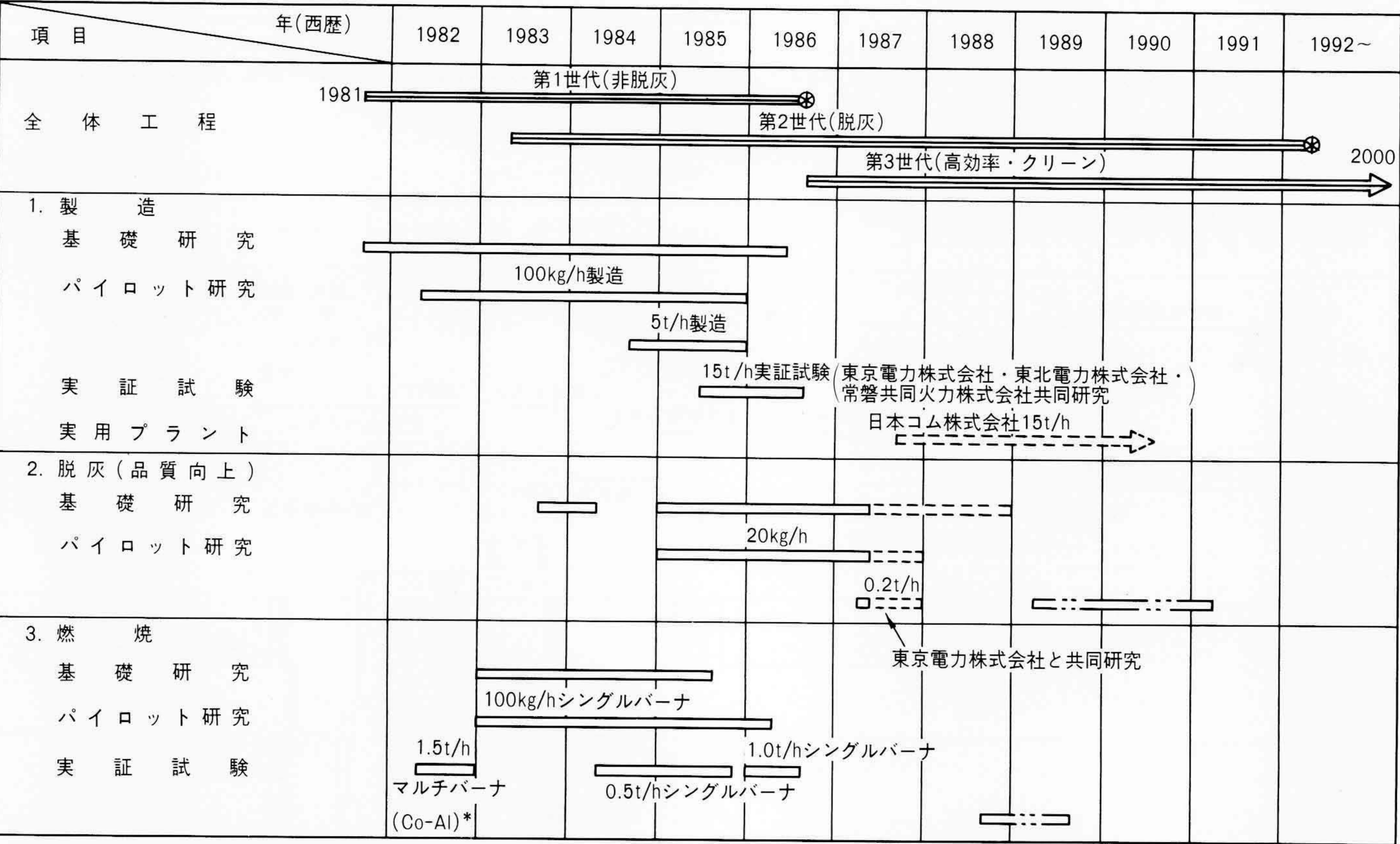
3.1 CWM技術の開発経緯

石炭利用拡大のための新技術として、石炭を微粉碎し水と微量の添加剤を混合調整してスラリー状の燃料とするCWMがある。

日立グループでは、昭和55年からCWMの技術開発に着手し^{3),4)}、図4に示す工程に基づきCWM技術の確立を図ってきた。現在では、CWMの製造及び燃焼技術の開発を完了させ実用機へ適用の段階にある。また、次世代のCWMとして良質化を図った脱灰CWMの製造技術も並行して実用化を進めており、バブコック日立株式会社工場内に200kg/hのパイロット試験設備を設置し試験を行っている⁵⁾。

3.2 CWM製造技術

CWMの製造方法は各種あるが³⁾、日立グループでは設備が最もシンプルとなり、高濃度化に重要な粒度調整が容易なため安定性に優れているだけでなく、CWM製造原価が最も安価となることが期待される湿式高濃度一段粉碎方式を中心に開発を進めてきた。また、昭和60年8月から翌年10月までの期間、東京電力株式会社、東北電力株式会社及び常磐共同火力株式会社により実施された実証試験に共同研究会社として参画し、湿式高濃度一段粉碎方式の実用化の検証を行った⁵⁾。



注：略語説明 CWM(Coal Water Mixture)

* 米国Alfred University Research Foundation, Inc.の高濃度 石炭水スラリーの商標で、Coal-Alfred University Research~の頭文字(アンダーライン)をとったものである。

図4 CWMの開発工程 第1世代のCWM(Coal Water Mixture)については、研究開発を終了し、第2世代(脱灰CWM)の研究段階へ移行している。

※) 本パイロット試験は、東京電力株式会社技術研究所との共同研究として実施中である。

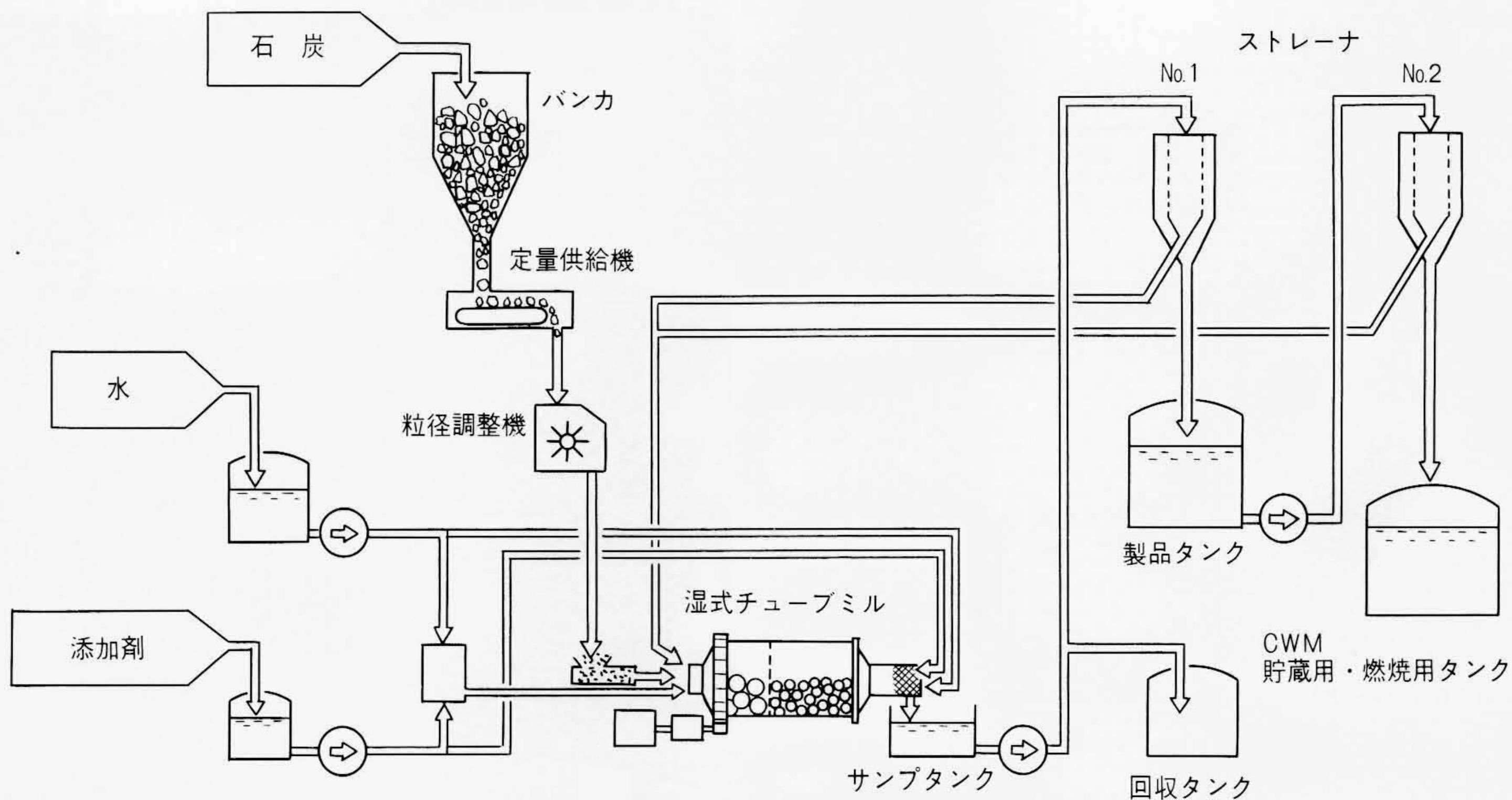


図5 日立湿式高濃度CWM製造設備系統図 実証試験で採用した15t/h容量のCWM製造設備の系統図を示すもので、シンプルで高品質のCWMの製造が可能な系統となっている。

本実証試験は、国内炭1炭種、海外炭5炭種の計6炭種を使用し、延べ2,200時間以上(CWM製造量3万3,700t)の運転を行った。製造したCWMの濃度は炭種により差異はあるが、約62~68%である。図5に本実証試験で使用した湿式高濃度一段粉碎方式のCWM製造設備の系統図を示す。湿式ミルは粉碎効率の向上、添加剤量の低減を目的として開発した高濃度二室形チューブミルで、石炭と同時に所定の比率でミル入口と出口側にそれぞれ水と添加剤を供給し、粉碎混合することによってCWMが得られる⁶⁾。

本システムは原炭の水分をミル入口で計測し、水の供給量を調整する制御システムを採用している。図6に本制御システムの制御特性の一例を示す。原炭の水分量の変動に対し給水量がよく追従し、一定な性状のCWMが得られることが確認された。

以上述べたように、CWMの製造技術については、一定品質のCWMを安定連続して生産可能であることを実証するとともに、実用機としての設備機器・システム設計及び運用方法の見通しを得た。

3.3 CWM燃焼技術

CWMは多量の水分を含み、更にバーナノズルからの噴霧特性として微粒化を促進するため、微粉炭バーナの5~10倍の速度で燃料を噴射する必要がある。この結果、CWMは着火遅れや安定燃焼性及びバーナアトマイザの摩耗などの課題を持っている。

日立グループでは、

- (1) 新形アトマイザ(R-ジェット)による微粒化の向上
- (2) 新形エアレジスタによる燃焼空気の混合促進と還元領域拡大

などの採用により、保炎性の向上とNOx-未燃分の特性を改善したCWM用高効率、低NOxバーナを開発した。更にこのアトマイザは、摩耗部をセラミックス製とし耐久性の向上を

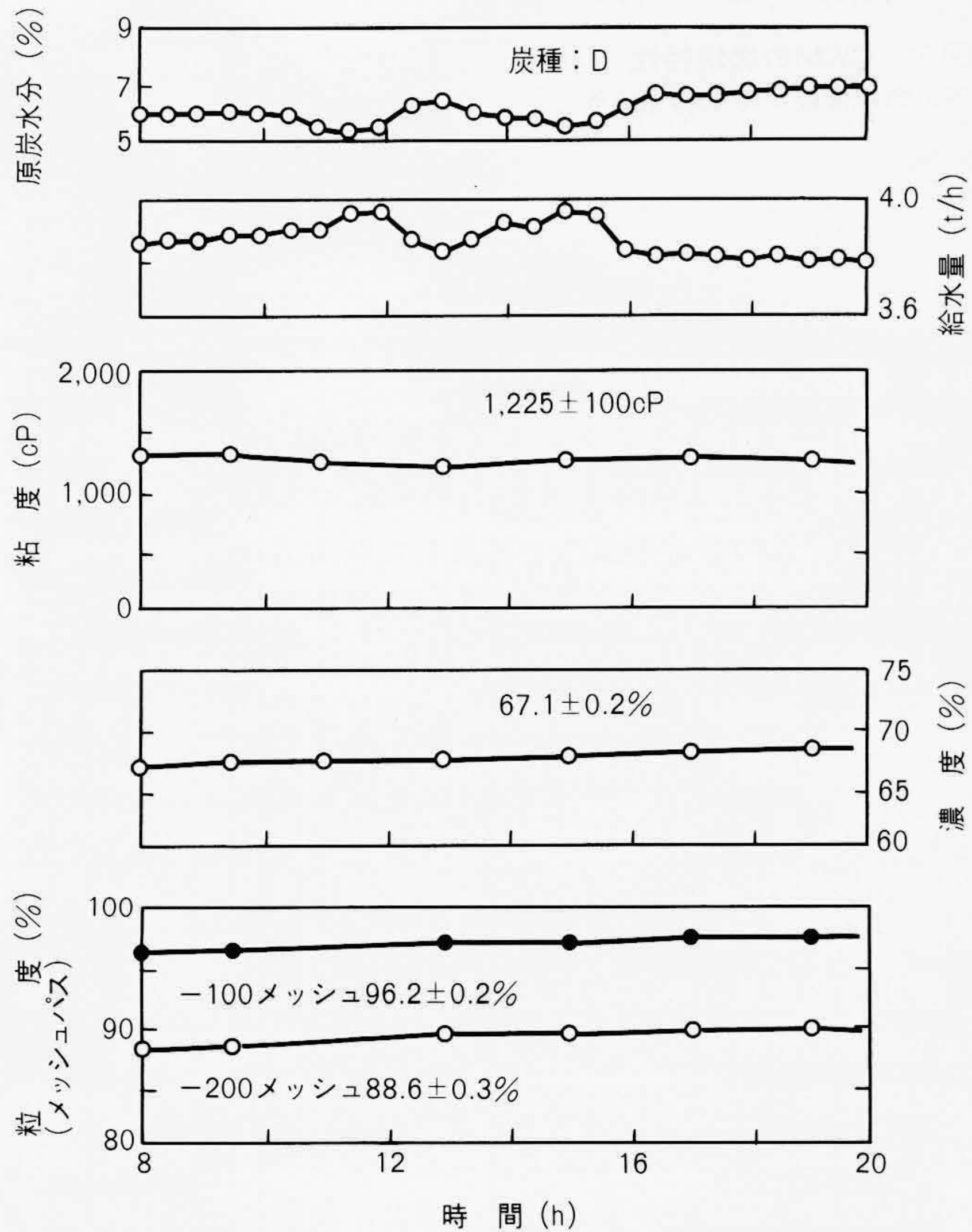
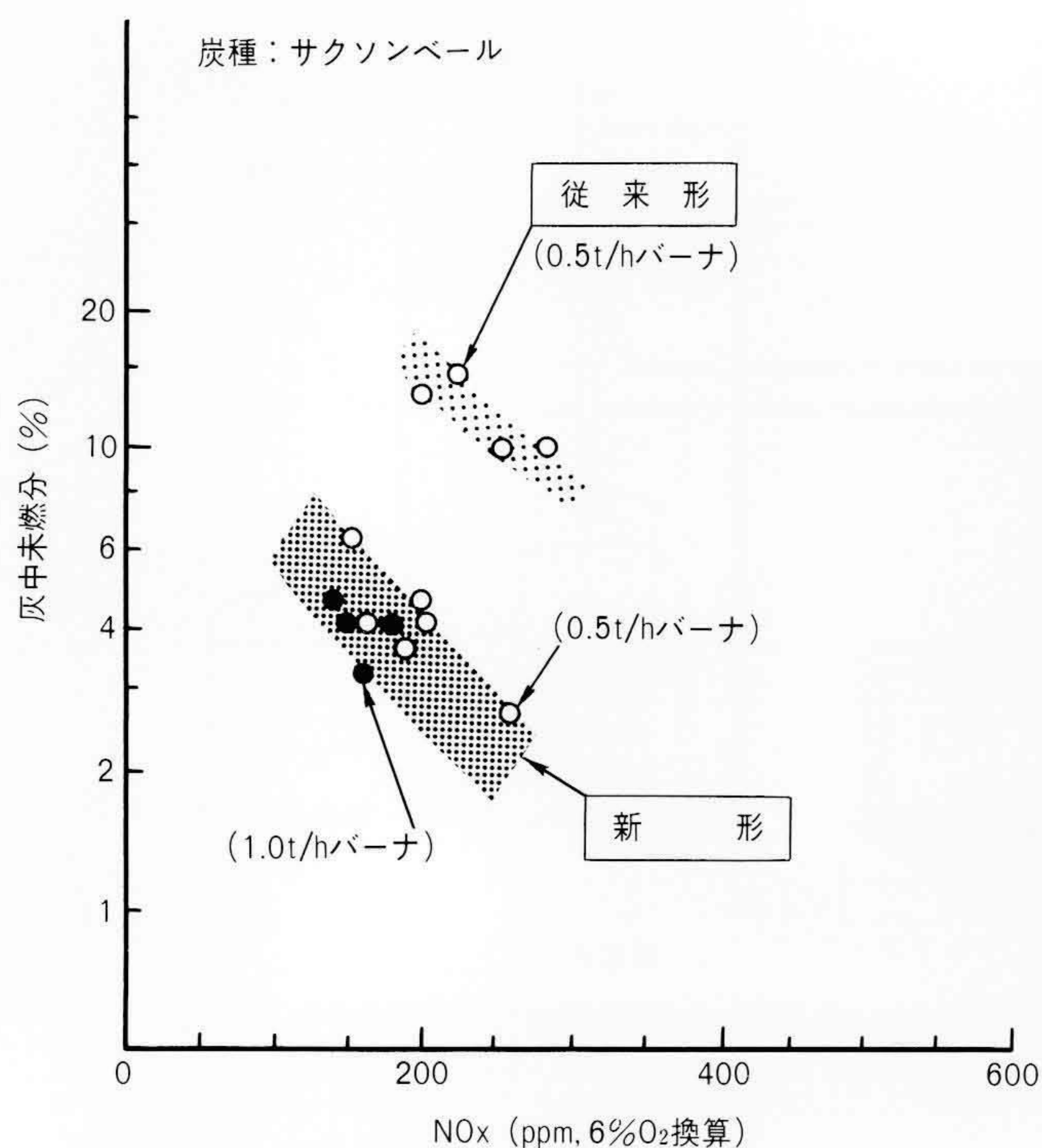


図6 CWM製造システムの制御特性 実証試験でのCWM製造システムの制御特性の一例で、原炭水分の計測値に対し給水量が精度よく制御され、均一な性状のCWMが製造される。

図った。図7に、本新形バーナと従来形バーナの燃焼試験結果を示す。新形バーナでは、NOx-未燃分を微粉炭燃焼のレベルにまで低減可能なことが確認された。



注：略語説明 NO_x(窒素酸化物)

図7 CWMの燃焼特性 CWM用新形バーナでは、微粉炭燃焼と同等の燃焼性能が得られている。

3.4 脱灰CWM製造技術

石炭中に含まれる灰分を除去する方法には、化学反応を利用する方法と物理的に分離を行う方法とがある。日立グループでは、従来の浮遊選鉱法を改良した新方式の物理的分離方法を中心に、脱灰CWM製造プロセスの実用化を進めている。

この脱灰法は、HFCC(Hitachi Flotation Coal Cleaning)法と称し、微粉碎した低濃度石炭スラリー中に捕収剤を空気とともに気化供給し、石炭粒子を捕収剤の薄い油膜気泡に選択的に付着、浮上させるものであり、捕収剤量の低減と脱灰性能の向上が図れるだけでなく、高濃度化にも有利となる特徴を持っている。

図8に東京電力株式会社との共同研究により開発した200kg/h脱灰CWM製造パイロットプラントの全景を示す。

脱灰性能は炭種、分離条件などの影響を受け、更に炭分回収率との関係上一律に評価することは難しいが、おおむね50～70%程度の脱灰率が得られる。また、脱灰により灰中成分のスラリー化への悪影響を低減できるため、幾つかの炭種では、非脱灰のCWMに比較して1～2%高濃度化できることも確認されている。

3.5 今後の方針

以上述べたように、CWMの製造及び燃焼技術については、実用化できることを確認するとともに、実用機の設計、運用手法を確立した。今後はよりいっそうの経済性、運用性及び信頼性の向上を目標に技術の改善を図り、更に高品質なCWMの利用が可能となるよう積極的に推進する考えである。

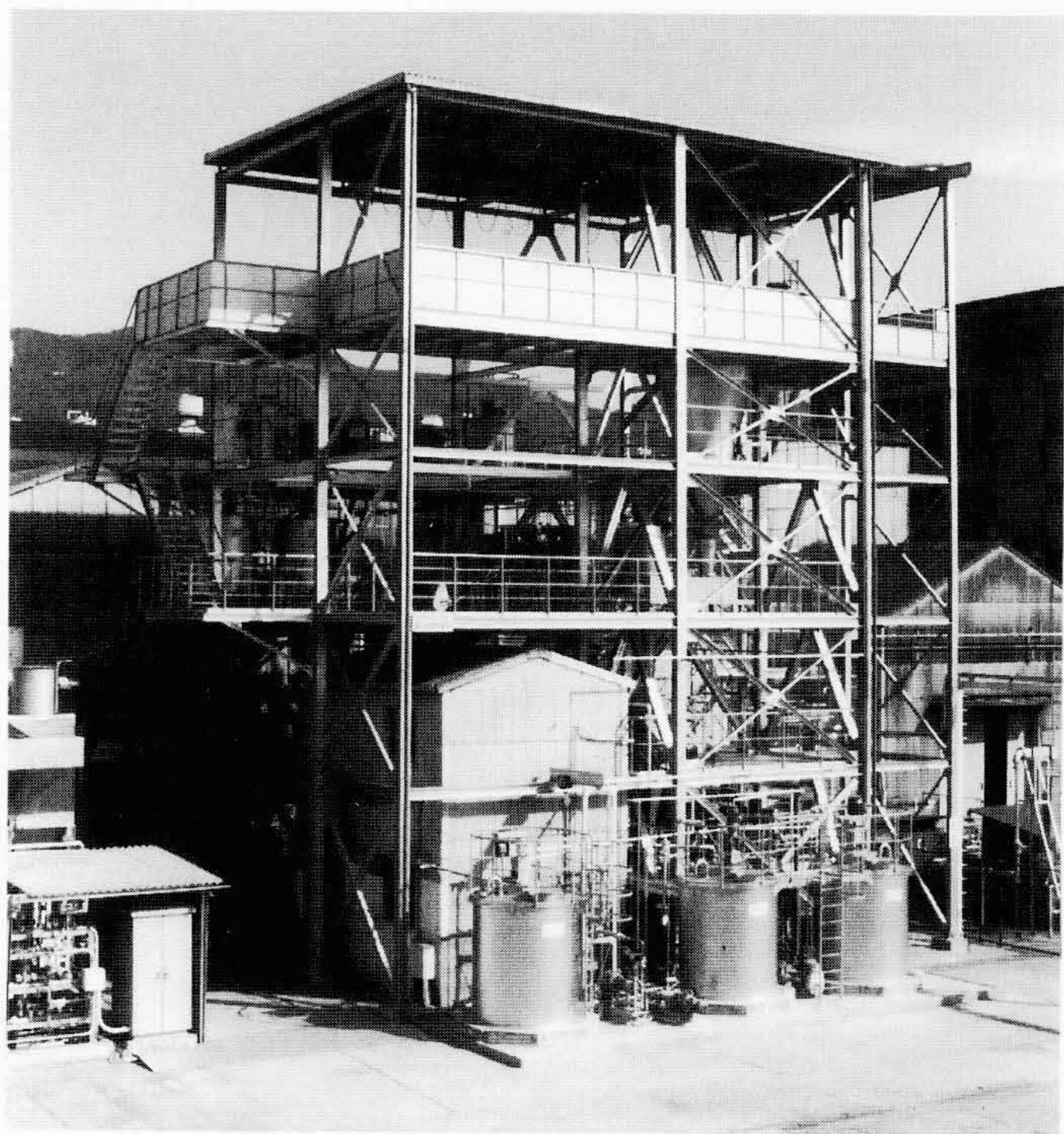


図8 HFCC法採用による200kg/h脱灰CWM製造パイロット試験プラント HFCC(Hitachi Flotation Coal Cleaning)法を採用した200kg/h脱灰CWM製造パイロット試験プラントの全景を示すもので、粉碎、脱灰、脱水などの設備から構成されている。

4 石炭ガス化

4.1 石炭ガス化技術の開発経緯

石炭のガス化技術は、発電用及び化学原料用石炭ガス発生技術として、実用化のための研究が各方面で進められている。日立グループでは、昭和56年10月自社内に図9に示す石炭供給量1t/dのPDU(Process Development Unit：噴流層ガス化基礎試験装置)を設置し、高効率ガス化が得られる1室2段加圧ガス化方式を開発した⁷⁾。本方式は、昭和61年度から通商産業省工業技術院及びNEDO(新エネルギー総合開発機構)の石炭利用水素製造技術開発のガス化技術として採用され、50t/d規模のパイロットプラント研究が進められている。

一方、石炭ガス化複合発電技術用のガス化炉は、国内では総合発電効率の面から、高温乾式ガス精製プロセスの開発を前提に空気吹きガス化方式を指向している。日立グループでも、前記の1t/d PDUを用いて、空気吹きの試験を行って空気吹きガス化特性を明らかにし、酸素吹き、空気吹き両方式でのガス化が可能なガス化技術を開発した。

4.2 石炭ガス化複合発電システムの構成

日立石炭ガス化複合発電システムは、前述の1室2段加圧噴流層ガス化炉を用い、酸素吹き、空気吹きいずれの場合でも対応が可能で、広い石炭種が使用できるものである。酸素吹きの場合は、湿式ガス精製システムと組み合わせ、発電効率は多少低くなるが、同時に脱硫と脱じんができシンプルなシステムとなる。空気吹きの場合は、高温脱硫、高温脱じんを行う乾式ガス精製システムの開発が必要であるが、高い発電効率が得られる。現在、乾式ガス精製システムについて、

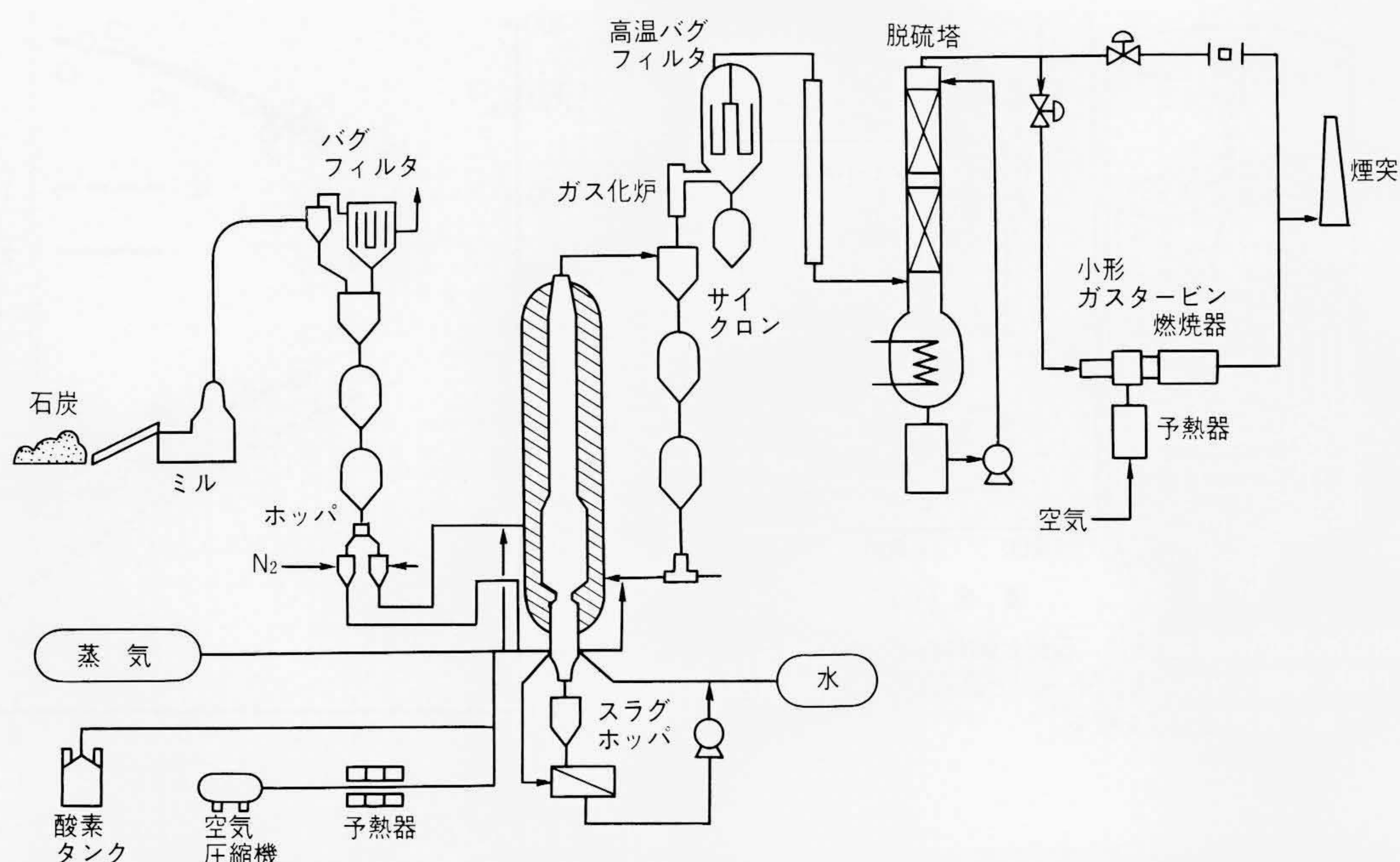


図9 噴流層ガス化PDU(Process Development Unit)フローシート 石炭処理量1.0t/d, 最高圧力9 kg/cm²ゲージ圧, 酸素吹き, 空気吹きの実験が可能である。

日立製作所の研究所を中心に鋭意開発研究に取り組んでいる。
図10に石炭ガス化複合発電プラント構成図を示す。

4.3 日立噴流層ガス化炉の原理

日立噴流層ガス化炉は、上段及び下段の複数バーナによってガス化炉内に旋回流を形成させ、サイクロン効果によりガス化炉内での反応石炭粒子の滞留時間の増大を図るとともに、上段と下段の酸素と石炭の比率を変えることによって、生成するチャーの反応性を向上させ、石炭中の炭素分のガスへの転化率を向上させている。また、生成する石炭灰分スラグの安定流下を図っている。図11に日立ガス化炉の原理図を示す。本ガス化炉を用いた前述のPDUによる試験結果例を酸素吹き、空気吹きについて図12に示す。また、図13に空気吹きの場合の1段ガス化と2段ガス化の効率比較を示したが、2段ガス化の効果が分かる。

4.4 日立ガス化炉の特徴

日立ガス化炉の特徴は、前述の1室2段噴流層方式による高効率、多炭種適用性が基本であるが、その他、石炭供給方式に気流供給方式の採用、また構造面ではガス化部を耐火材付き水冷壁構造、熱回収部を水冷壁構造として信頼性を高め、かつコンパクトなガス化炉としている。これら構造面では石炭燃焼サイクロンボイラ、事業用石炭燃焼ボイラ、化学装置用高压機器で培われた技術が生かされている。

4.5 今後の課題

以上述べたように、1t/d PDU試験によって、高効率で、運転制御性に優れた1室2段噴流層ガス化炉を開発し、ガス化特性を研究してきたが、今後更に実用化に向けて、大形スケールアップの研究を推進する計画である。また、空気吹きガス化プロセスに不可欠の乾式ガス精製についての開発研究

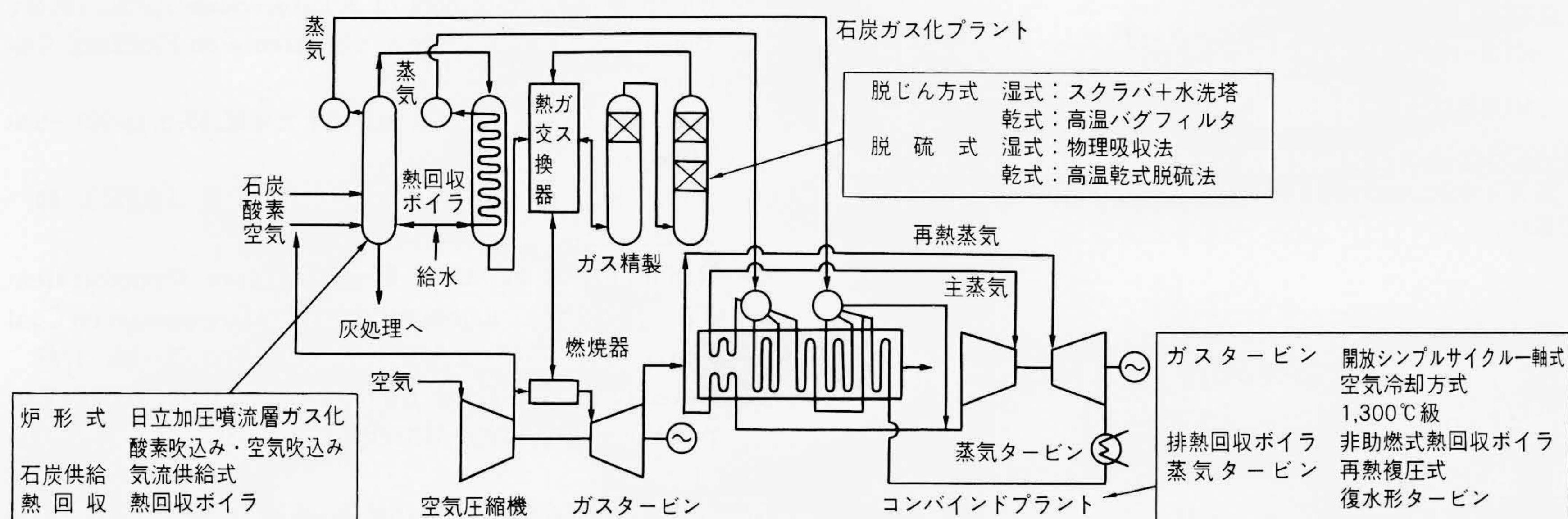


図10 石炭ガス化複合発電プラント構成図 酸素吹き、空気吹きの場合の1段ガス化と2段ガス化の効率比較を示したが、2段ガス化の効果が分かる。

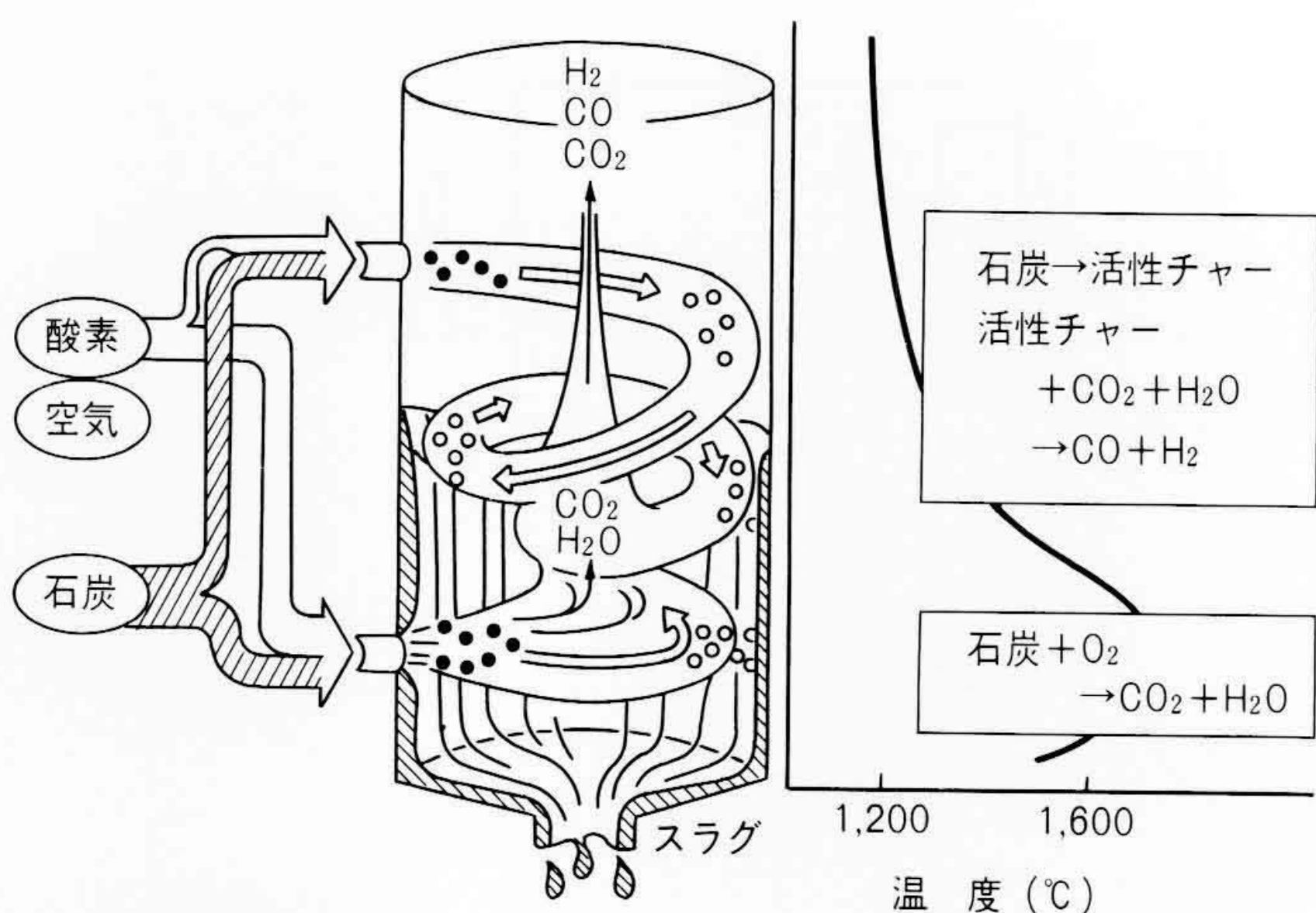
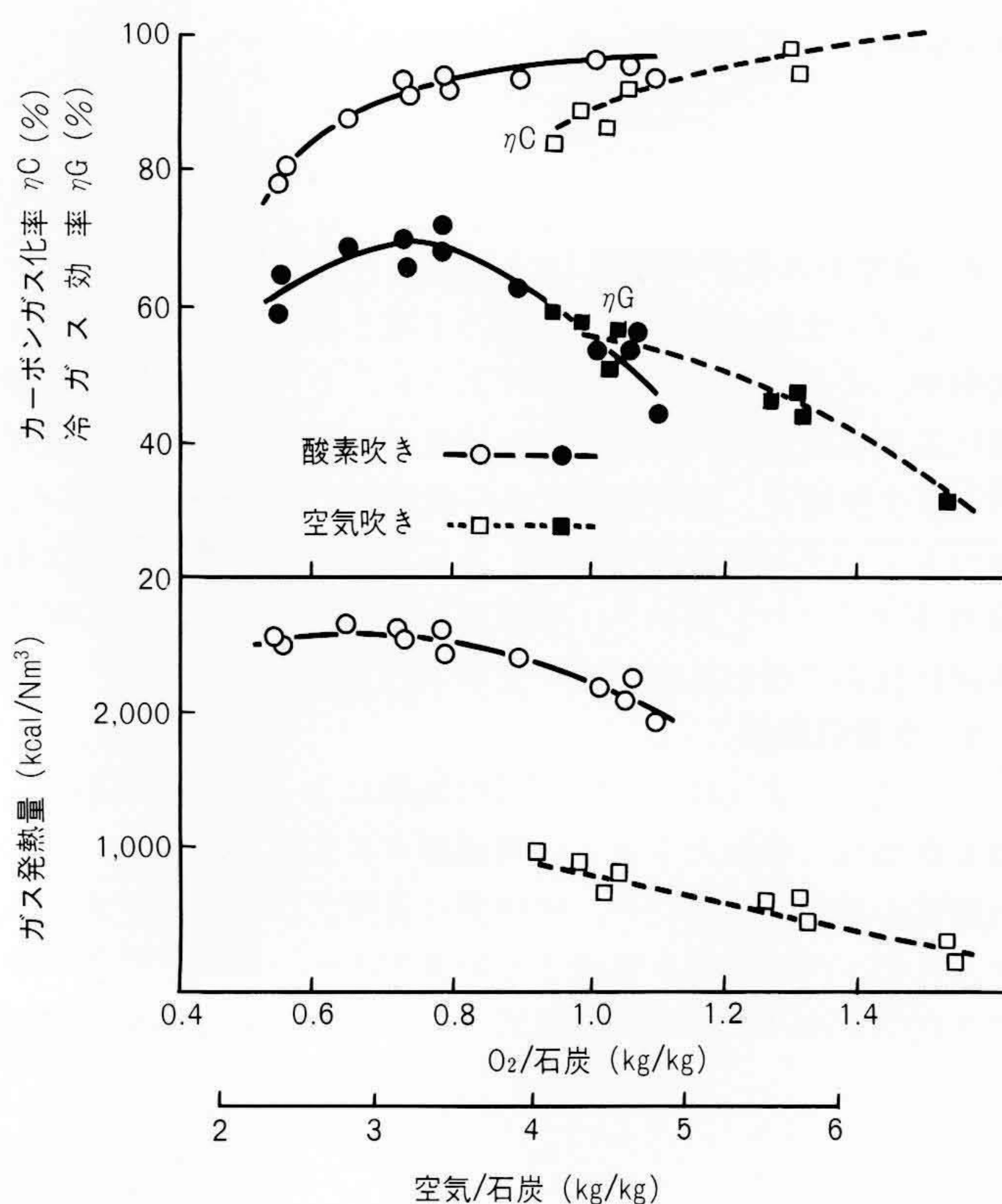


図11 日立噴流層ガス化炉の原理図 石炭と酸素あるいは空気を、ガス化炉の上部、下部に分割して供給し、チャーと高温ガスを適切に接触させることによって高いガス化効率を得る。



ガス化効率

$$\eta_C (\text{カーボンガス化率}) = \frac{\text{ガス化カーボン量}}{\text{石炭中カーボン量}}$$

$$\eta_G (\text{冷ガス効率}) = \frac{\text{ガス発熱量}}{\text{石炭発熱量}}$$

図12 PDUによる試験結果例 空気吹きは酸素吹きに比べ、N₂の影響により冷ガス効率は低くなり、生成ガスのカロリーも1,000kcal/Nm³より低い。

も、基礎研究段階ではあるが有望な見通しを得ており、鋭意推進中である。

5 結 言

石炭利用新技術の例として、流動層ボイラ、CWM燃料及び

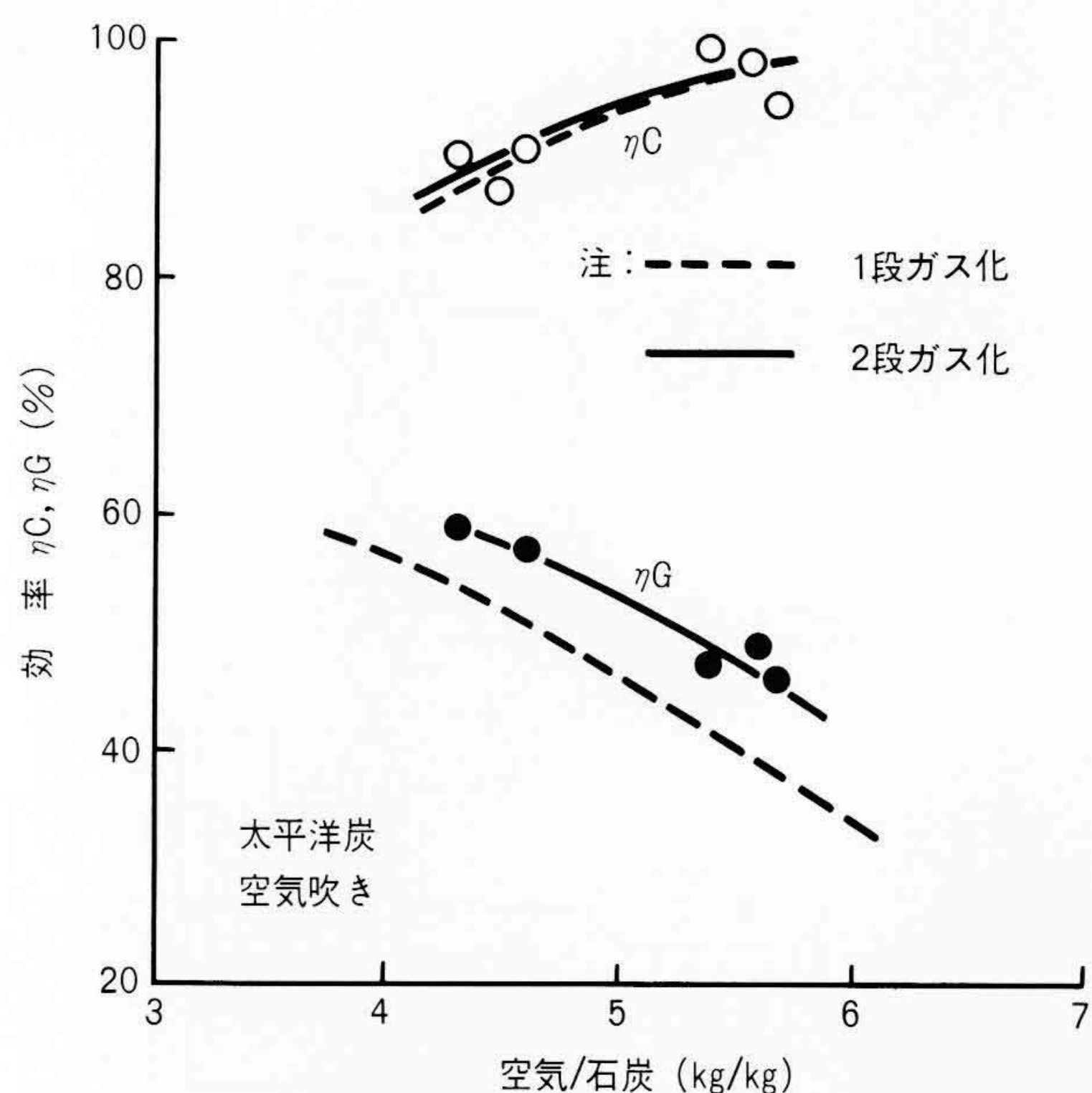


図13 2段ガス化の効果 2段ガス化にすると、1段ガス化に比べてカーボンガス化率はほぼ同等であるが、冷ガス効率は向上することが分かる。

石炭ガス化について紹介したが、新しい技術の開発は多岐にわたり枚挙にいとまがない。新技術のニーズは安定した質の良いエネルギー源を提供することにあるが、それぞれの技術には一長一短があり、その特徴を知って開発を進めることが必要である。流動層ボイラでは、燃焼効率の向上及び環境改善にとどまらず、幅広い性状の燃料を受け入れることも大きな特長であって、利用技術の展開が期待できる。CWM燃料では、スラリー状燃料の特長に満足することなく、石炭特有の灰を除去することでより良質な燃料とすることが可能となり、付加価値も高まる。このように一口に石炭利用新技術といってもその新技術には幅広い可能性が秘められており、日立グループでは技術開発に当たって、日夜研さん(鑽)に励んでいる。

参考文献

- 1) 清水, 外: 20t/h流動床ボイラ, パイロットプラント, 火力原子力発電, **33**, 2, pp.37~51(1982-2)
- 2) Ôki, et al: Development of A Large-Scale AFBC Utility Boiler, Eighth International Conference on Fluidized-Bed Combustion, Vol.1
- 3) 高橋, 外: CWM利用技術, 火力原子力発電, **36**, 9, pp.921~930(1985-9)
- 4) 正路, 外: 高濃度石炭-水スラリー技術の開発, 日立評論, **66**, 2, 119~124(昭59-2)
- 5) R. Shirato, et al: Coal Water Mixture Demonstration Test at Nakoso, Eighth International Symposium on Coal Slurry Combustion and Technology, May 27~30, 1986
- 6) Development of Highly-Loaded Coal-Water Mixture Preparation Technology, Hitachi Review, **34**, 2, pp.95~100(1985-2)
- 7) 小山, 外: 噴流層石炭ガス化技術, 日立評論, **66**, 2, 113~118(昭59-2)