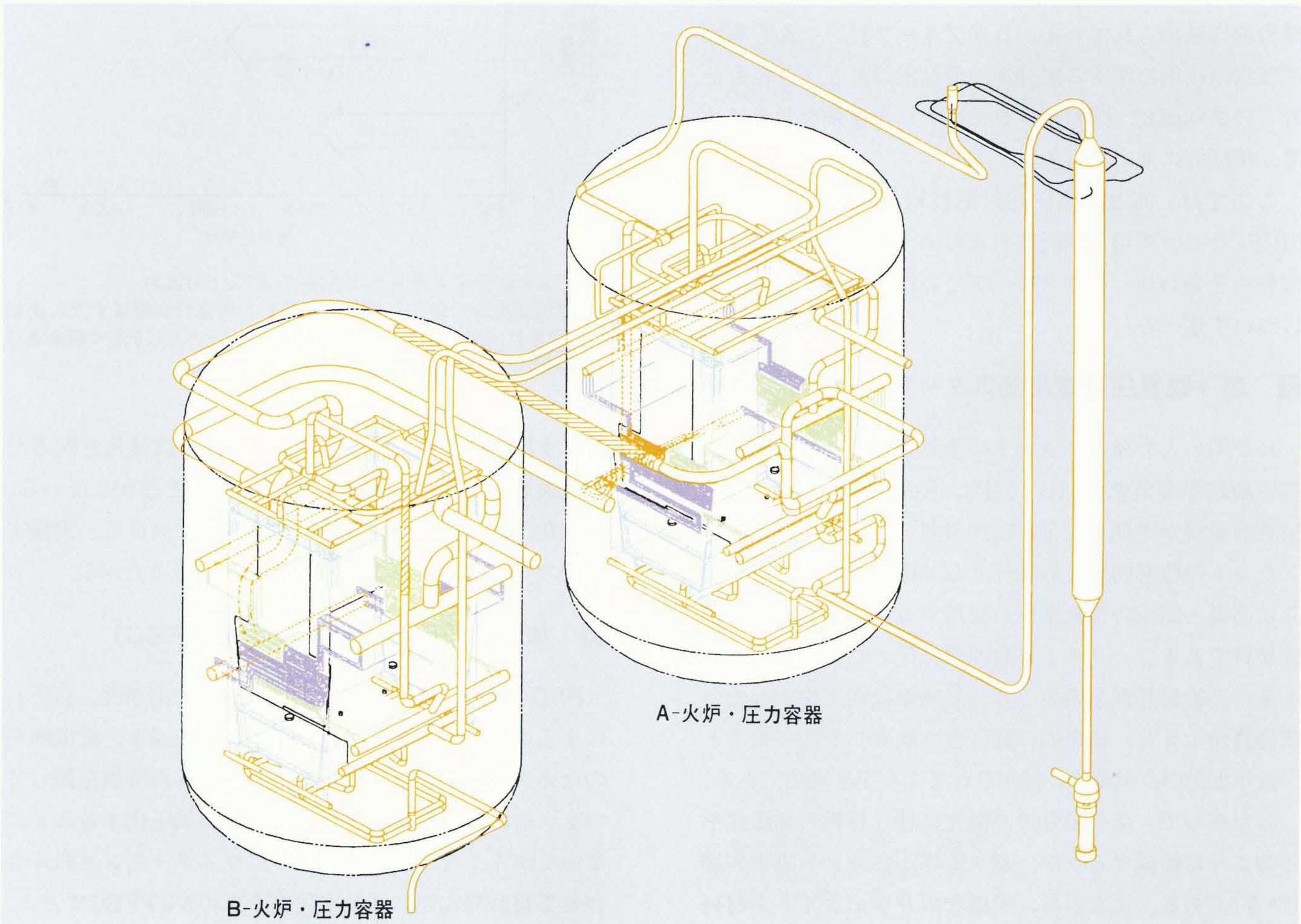
石炭利用の次世代火力発電

Advanced Coal-Fired Power Generation for the Next Stage

塚本守昭*　*Moriaki Tsukamoto*　三島信義*　*Nobuyoshi Mishima*
高木眞人**　*Masato Takagi*　加原俊樹*　*Toshiki Kahara*



2塔式火炉を採用したPFBCボイラ鳥観図
平成11年頃の商用プラント運転開始を目指して，プラント設計，PFBC試験装置による機器連続運転試験などを鋭意進めている。

高温・高圧化対応技術，PFBC(加圧流動床ボイラ複合発電)，IGCC(石炭ガス化複合発電)，MCFC(溶融炭酸塩型燃料電池)など，21世紀での石炭火力の中核となる技術を，日立グループ一体となって開発中である。

超々臨界圧発電用蒸気タービンについては，蒸気温度650℃を目指したフェライト系新ロータ材料の開発を推進している。PFBCについては，平成11年ごろの商用プラント運転開始を目指してプラント設計および熱入力4MW試験装置によるPFBC機器の長期連続運転試験を進めている。また，石炭ガス化に関しては，酸素吹き噴流層ガス化炉の開発を進めている。この方式のガス化炉を用いたIGCCを概念設計し，43%以上の送電端効率が得られる見通しを得た。さらに，1,000 kW級MCFCパイロットプラント開発のなかで110 kW発電に成功した100 kW級電池スタックでは，現在，その発電性能，寿命を向上するための改良研究に取り組んでいる。

* 日立製作所 日立工場　** 日立製作所 機電事業部

1 はじめに

21世紀では，石炭火力は原子力に次ぐベース電源として期待されている。そのため，多炭種対応技術，環境保全のためのクリーンな石炭利用技術，地球温暖化防止のための高効率石炭利用技術などの技術開発が，各方面で精力的に進められている。日立グループは，これら石炭高度利用技術に関する開発を，自社内はもとより電力会社との共同研究，国家プロジェクトへの参画などを通じて，積極的に進めている。

ここでは，高温・高圧化対応技術，PFBC，IGCC，MCFCなど，実用化間近にある石炭火力の高効率化技術に焦点を合わせ，日立グループでの技術開発状況の一端について述べる。

2 超々臨界圧発電用蒸気タービン

わが国の火力発電プラントの蒸気条件は，昭和42年に初の超臨界蒸気条件(24.1 MPa，538/566 ℃)である600 MW容量機が運開した後，約20年間にわたり事業用火力プラントの標準的な蒸気条件として採用されてきた。さらに高温・高圧の蒸気条件を採用するためには，主要構成材料であるフェライト系耐熱鋼に代えてオーステナイト系の高級耐熱鋼を必要とし，熱効率は向上するものの設備費が上昇し，結果的に経済性が成立しなかったことが長年上記の蒸気条件が採用されてきた主な理由である。

したがって，蒸気条件の高温化に伴う材料の高級化をどのように軽減するかが，超々臨界圧プラント実現の鍵(かぎ)である。すなわち，可能な限りフェライト系材料の適用が必要になる。

フェライト系ロータ材料の実用化の流れを**図1**に示す。同図は600 ℃，10万時間クリープ破断強度と対比して，ロータ材料の実用化の流れを示している。年々改良され，高温強度の高い材料が実用化されつつあることがわかる。

日立製作所は昭和50年代の後半から，蒸気タービンの基幹部品であるロータ材料の開発，実証に取り組んできた。この開発のなかで蒸気温度593 ℃級を目指して開発した改良12Cr鋼ロータ材料(フェライト鋼)はすでに実機に採用され，かつ現在注目されている600 ℃級にも使用されつつある。

さらに，蒸気温度650 ℃を目指したフェライト系高温材料の開発[1]を進めている。新開発材料では，高温で安定な析出強度を図るため，Mo当量(＝Mo＋1/2W)を保ったままMoをWに置き換え，あわせて固溶強化を図るため置換型のCoを添加し，かつ侵入型のBを添加している。

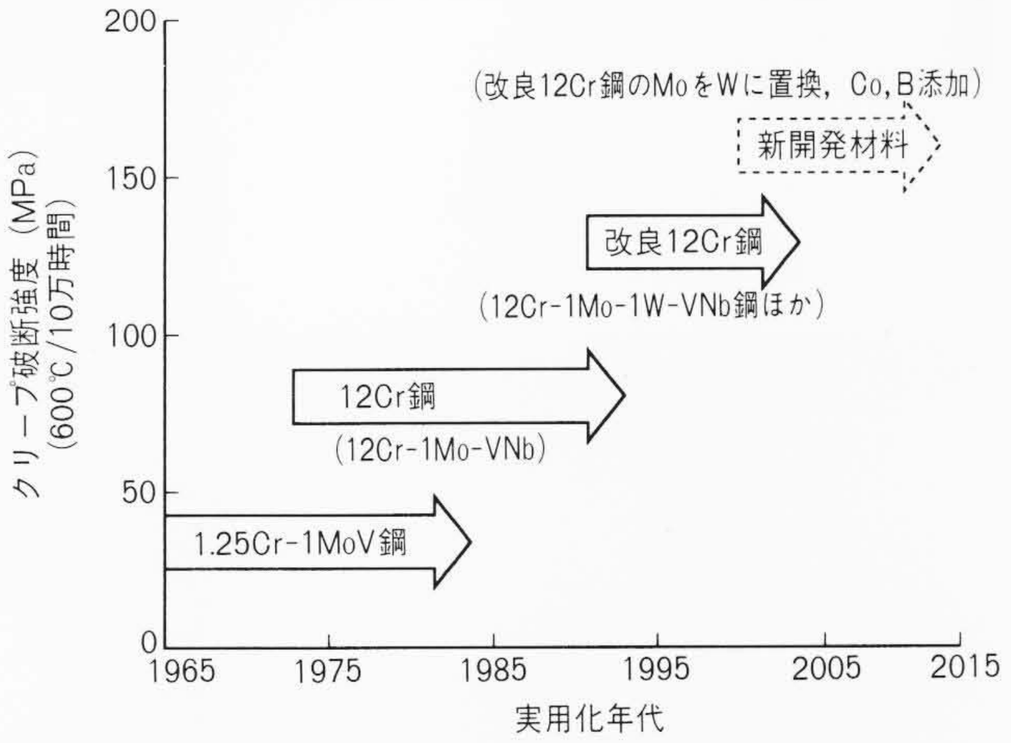


図1 フェライト系ロータ材料の実用化の流れ
蒸気温度593 ℃級を目指して開発した改良12Cr鋼はすでに実機に採用され，600 ℃級にも採用されつつある。さらに650 ℃級高温材料の実用化開発に取り組んでいる。

現在，この新開発材料の早期実用化に向けて，実機実物大のロータの試作などの開発に取り組んでいる。

3 加圧流動床ボイラ複合発電(PFBC)

FBC(流動床ボイラ)は，広い炭種への適用性，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優れた特徴を持っている。このFBCの特徴を生かしたまま加圧化することによってボイラを小型化し，さらにガスタービンと組み合わせて複合発電化し高効率化するものが，PFBCである。

日立グループではこれまで蓄積してきたFBCの技術をベースに，平成元年からPFBCの開発に着手し，熱入力150kWベンチ炉，2 MW試験設備などによって要素技術の開発を進めている。

さらに，ボイラの運転特性の把握や機器の信頼性を検証するために，熱入力4 MW PFBC試験研究設備を中国電力株式会社火力発電技術センター内に設置した。この設備の外観を**図2**に示す。この設備を用いて，平成6年度から長期連続運転試験を，平成7年度には炭種拡大試験などを実施する予定である。

大容量PFBCプラントの構成を**図3**に，設備概要の一例を**表1**に示す。

この設計では，効率向上はもとより据付け期間の短縮，運用性の向上，環境適合性に考慮を払っている。主な特徴を以下に述べる。

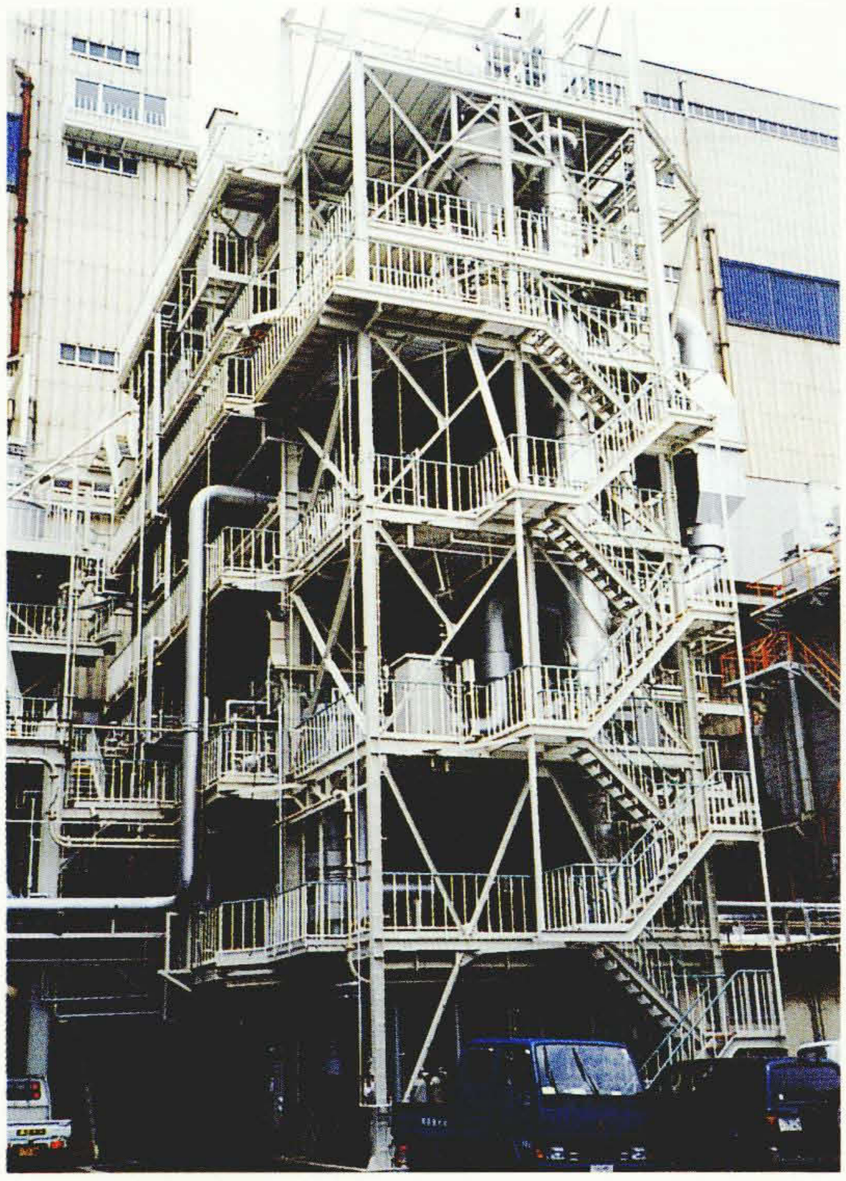


図２　熱入力４MW PFBC試験研究設備
中国電力株式会社火力発電技術センター内に設置し，PFBCボイラの運転特性の把握や機器信頼性の検証試験を進めている。

(1)　２塔式火炉の採用

ボイラを二つの独立した流動床火炉で構成し，そのうちの１塔を過熱器用，他の１塔を再熱器用として，役割を分担させる構成としている。この構成により，それぞれの流動床火炉の独立な出力調整が可能となる。そのため，再熱器の常用水スプレー系が不要となり，PFBCプラントの熱効率を向上できる。また，それぞれの圧力容器が小型となるため，その一体輸送が可能となり，据付け期間を短縮できる。２塔式火炉を採用したPFBCボイラの鳥観図を９ページの写真に示す。

表１　250 MW級PFBC複合発電設備の計画概要
信頼性の高いプラントの完成に向けて，プラント設計，各種試験に取り組んでいる。

項　目	設　備　概　要
出　力	250 MW
ボイラ	加圧流動床再熱式貫流型(バブリング型) 最大蒸発量：約515 t/h 層温度：約865℃ 炉内圧力：約0.88 MPa 石炭および石灰石供給方式：ペーストフィード
ガスタービン	単純解放サイクル一軸型
蒸気タービン	くし形再熱再生復水式 蒸気条件：16.6 MPa，566/593℃
石　炭	海外炭
環境対策設備	脱硫：石灰石による炉内脱硫 脱硝：無触媒脱硝＋有触媒脱硝 脱じん：２段シングルサイクロン＋電気集じん器
煙　突	高さ　200 m

(2)　高性能環境対応機器の採用

石灰石をボイラ火炉内に投入して脱硫するとともに，火炉出口にアンモニアガスを注入して無触媒で排ガス中のNOxを分解する。その下流に設置した２段のシングルサイクロンによってダストを除去した排ガスをタービンに導入し，さらにガスタービンからの排ガス中のダストを集じん装置で除去するとともに，NOxを排熱回収熱交換器内に設置した有触媒脱硝装置によって分解することにより，環境にやさしいプラントとしている。

(3)　ペーストフィード方式の採用

石炭および石灰石の供給には，石炭の燃焼性およびプラント運用性に優れた湿式のペーストフィード方式を採用した。また，この方式の採用により，乾式に比較して燃料ノズル本数を低減でき，火炉および圧力容器貫通部を少なくできる。

(4)　ガスタービン起動用燃焼器の採用

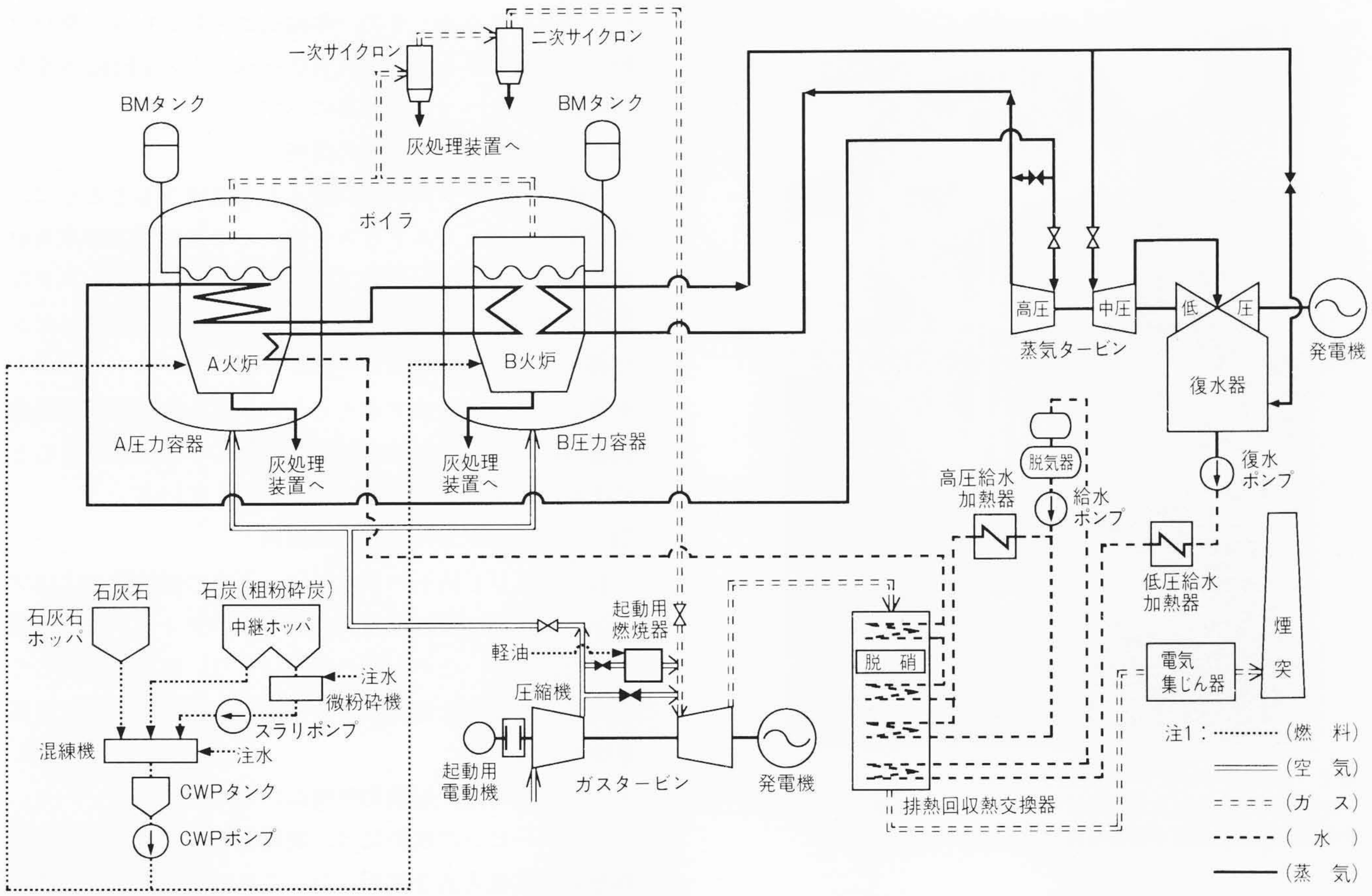
ガスタービンの起動には，電動機とガスタービン燃焼器を並用する方式を採用した。これにより，起動特性の改善を図っている。

今後，ここで述べた試験設備による各種試験を精力的に進めるとともに，その結果を設計に反映することにより，信頼性の高い商用プラントの完成に取り組んでいく考えである。

4　石炭ガス化複合発電(IGCC)

石炭ガス化技術に関しては，昭和56年から自社内に設置した１t/d PDU(Process Development Unit)により，それまで開発してきた流動床ガス化技術をベースに噴流層ガス化方式の開発研究を開始し，高効率かつ多目的に利用可能な加圧噴流層方式の１室２段旋回型ガス炉(日立式ガス化炉)を開発した。このガス化炉は，通商産業省工業技術院・NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)のHYCOL(石炭利用水素製造技術研究組合)のガス化技術として採用された。この国家プロジェクトとして千葉県袖ヶ浦市に建設された50 t/dパイロットプラント[2]は，平成３年６月から運転研究に入り，当初の目標を達成して平成６年４月に運転を終了した。その詳細については，この号掲載の別論文で紹介しているので参照されたい。

一方，IGCCについては，同じく国家プロジェクトで



注2：略語説明 BM(ベッド材)，CWP(石炭・水ペースト)

図3 PFBCプラントの構成 PFBCボイラを二つの独立した流動床火炉で構成した2塔式のPFBCプラントである。

ある200 t/d規模の空気吹き噴流層石炭ガス化発電パイロットプラントの開発に参画し，1,300℃級石炭ガス化用13 MWガスタービン設備，大型ガスタービン燃焼器試験設備，および保安環境設備を担当している。このパイロットプラントは平成3年から試運転に入り，石炭ガスによるガスタービンの発電に成功している。

ここでは，酸素吹き噴流層ガス化炉を用いた日立式IGCCの概念設計について述べる。

4.1 日立式IGCCの構成

IGCCの熱効率を天然ガス複合発電に近づけるための一つの方法は，ガス化炉の効率を高めることはもとより，生成した石炭ガスからのエネルギー損失を可能な限り小さくし，ガスタービンの出力比率を増大させることである。その第一の方法は，石炭ガスを高温のままガスタービンに導入することであり，ガスタービンで許容する程度までガス中のダスト，硫黄，アルカリ金属などを高温で除去する高温乾式ガス精製技術や制御弁などの耐高温機器の開発が進められている。

一方，第二の方法としては，石炭ガスの温度を下げたとしても，石炭ガスの潜熱ロス，顕熱ロスを可能な限り小さくすることである。

日立式IGCCは，上記の第二の方法によっている。すなわち，開発課題が少なく実証された信頼性の高い方式の

表2 日立式IGCCプラントの構成
開発課題が少なく，実証された方式の組み合わせによってIGCCを構成している。

主構成機器	形式
ガス化炉	加圧噴流層方式の酸素吹き1室2段旋回型ガス化炉
ガス精製	
脱じん	乾式脱じん(サイクロン＋フィルタ)
脱硫	湿式脱硫
硫黄回収	単体硫黄回収
ガスタービン	高温200 MW級
蒸気タービン	再熱混圧複流排気式復水型
HRSG	三重圧再熱型(脱硝装置組込み)
空気分離	深冷分離法

注：略語説明 HRSG(排熱回収ボイラ)

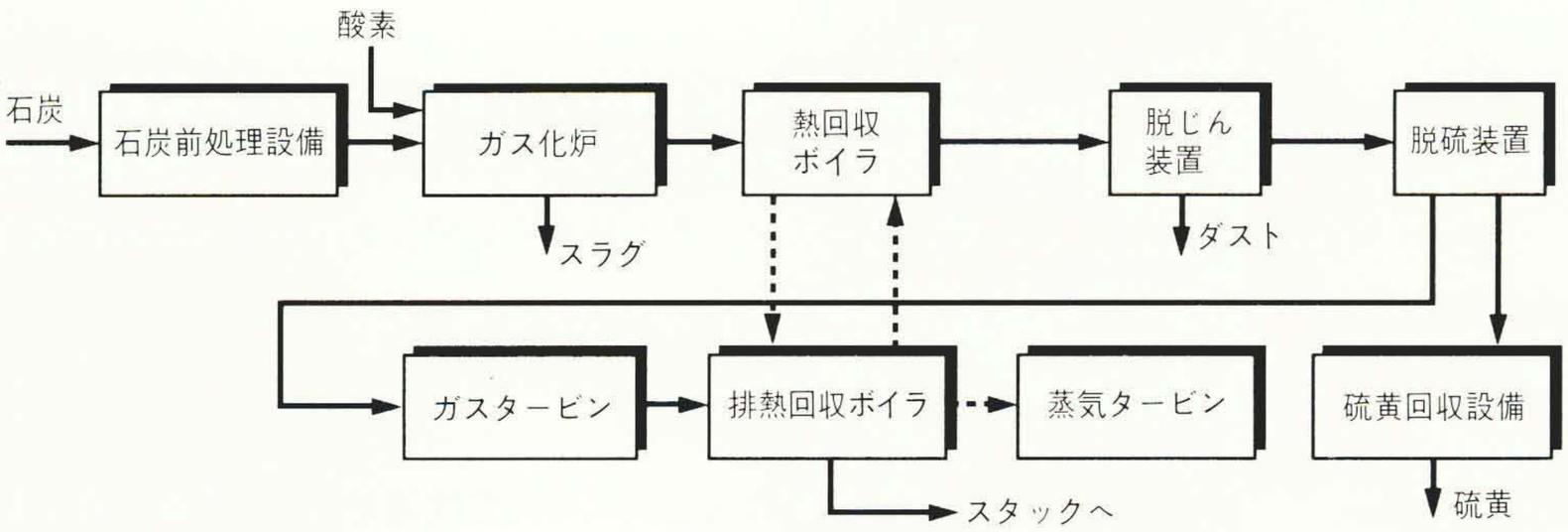


図4　IGCCプラントブロックフロー
石炭ガス化炉の容量はガスタービン1台の燃料消費量に合わせ，プラントの主要機器は各1基で構成した場合を示す。

組み合わせにより，早期実現および高い発電効率を達成することを目標として，酸素吹き噴流層ガス化と，石炭乾式供給および湿式ガス精製を組み合わせて構成した。日立式IGCCプラントの主要構成機器を**表2**に，ブロックフローを**図4**に示す。

日立式ガス化炉で生成される石炭ガスの発熱量は比較的高く，石炭処理量に対する生成ガス量が少ない。また，石炭乾式供給方式では石炭をガスによって搬送するため，ガス化炉での水の蒸発潜熱による損失がほとんどない。そのため，日立式IGCCでは，湿式ガス精製での損失(生成ガスの顕熱ロス，H_2O，CO_2の損失)が少なく，高い熱効率が期待できる。

4.2　日立式IGCCの予想性能[3)]

350 MW級の日立式IGCCを概念設計し，蒸気サイクルを適正化してプラント性能を予想した。なお，ガスタービンについては実用化段階にある最新の動翼入り口温度1,300℃級の高効率・大容量ガスタービンを採用している。プラント予想性能を**表3**に示す。この検討の結果，送電端効率43%以上を達成できる見通しを得た。さらに，蒸気温度566/566℃を採用することにより，送電端効率43.4%が期待でき，酸素吹き噴流層ガス化炉を用いたIGCCは，十分成立する見通しを得ている。

表3　日立式IGCCのプラント予想性能
送電端効率として43.2%が期待でき，近い将来に実用化可能なIGCCとして魅力ある方式と考える。

項　　目	性　　能
石炭処理量	99.8 t/h(2,400 t/d)
発熱量	29.73 MJ/kg(HHV)
酸素純度	95 vol.%02
主蒸気条件	16.6 MPa-538/538 ℃
燃料ガス発熱量	11,940 kJ/kg(LHV)
燃料ガス温度	400 ℃
大気温度，湿度	20 ℃，60%
発電端出力	400.7 MW
(ガスタービン出力)	(225.5 MW)
(蒸気タービン出力)	(175.2 MW)
所内動力	51.7 MW
送電端出力	349.0 MW
発電端総合効率	49.6%HHV
所内率	12.9%
送電端総合効率	43.2%HHV

5　溶融炭酸塩型燃料電池(MCFC)

MCFCの発電原理は電気化学反応に基づいており，その熱効率はカルノーサイクルには制限されない。そのため，ガスタービンを用いた従来の複合発電に比較して飛躍的な熱効率向上が期待できる。また，MCFCでは，天然ガスのほか石炭ガスなど種々の燃料が使用できる。したがって，石炭ガス化とMCFCを組み合わせた発電方式(IG-MCFC)は，IGCCの次の石炭火力を担う発電技術として期待されている。

MCFCは昭和56年度から国家プロジェクトとして取り上げられた。日立製作所は当初からこのプロジェクトに参画し，MCFCの開発を進めてきた。

平成5年に開発した加圧100 kW級スタック本体を**図5**に示す。加圧100 kW級スタックは，カソードガスを

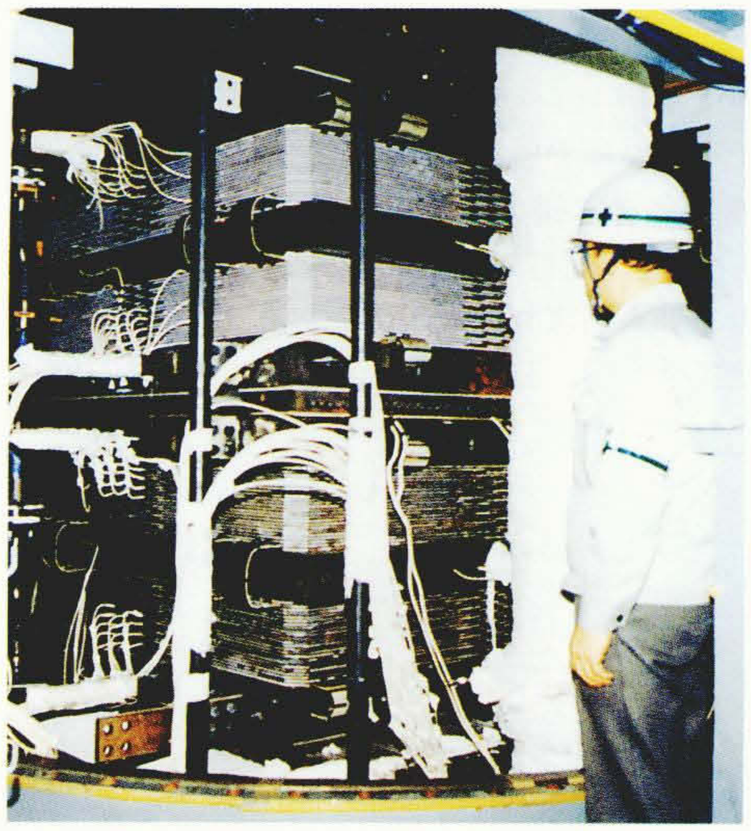


図5　加圧100 kW級スタック本体
複合大容量型セルを22枚積層した50 kW級モジュールを上下に2個配置して，100 kW級スタックを構成している。

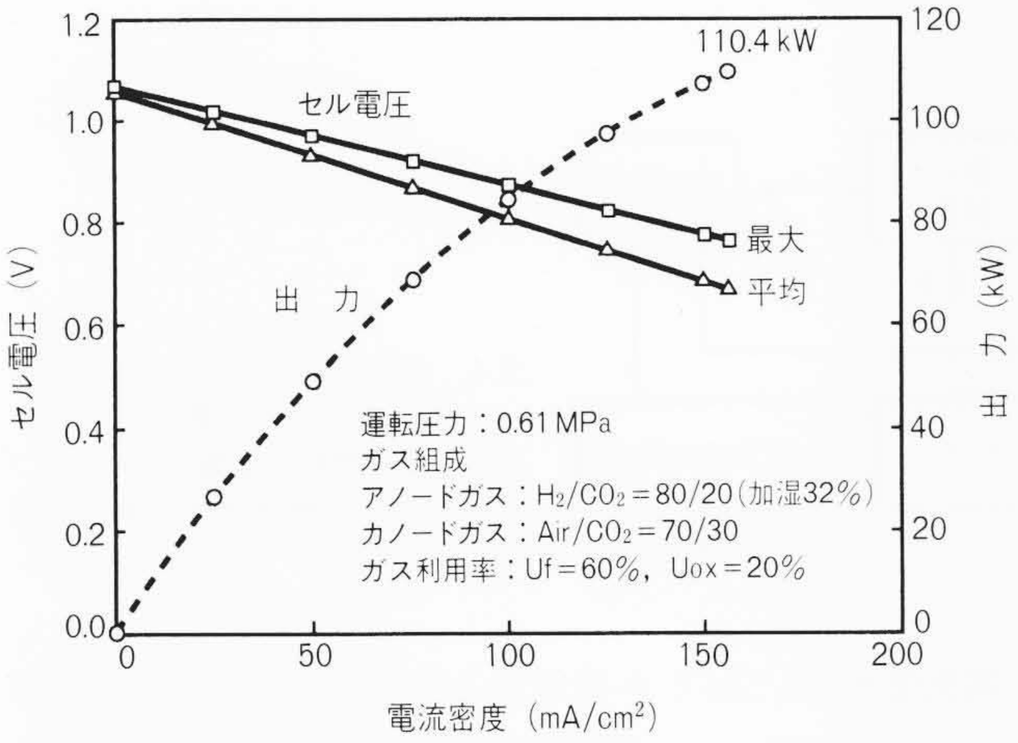


図6 加圧100 kW級スタックの初期特性
初期特性確認試験で110.4 kWの出力を得た。さらに効率および信頼性を改善するための開発を推進中である。

供給する中間ヘッダの上下にそれぞれ配置された2個の50 kW級モジュールで構成している。おのおのの50 kW級モジュールは，有効電極面積1.21 m²の複合大容量型セルを22枚積層したものである。

この加圧100 kW級スタックの初期特性を確認するための工場内試験[4]を平成5年3月に実施した。その結果，**図6**に示すように，電流密度150 mA/cm²で110.4 kWの出力が得られることを確認した。その後，このスタックは赤城総合試験所で種々の試験が実施された。

赤城総合試験所での試験終了後，その加圧100 kW級スタックを再び日立工場に持ち帰り，下側の50 kW級モジュールの運転を続け，5,000時間以上の運転時間を達成した。

これらの結果を基に，平成8年度建設開始を目指す1,000 kW級MCFC発電パイロットプラントの開発に向け，電池スタックの効率や信頼性を改善するための開発を推進中である。

6 おわりに

石炭利用の次世代火力発電技術として，高温・高圧化対応技術，PFBC，IGCCおよびMCFCについてその開発の一端を述べた。新しい技術の開発は多岐にわたり枚挙にいとまがない。石炭をクリーンかつ高度に利用する「クリーンコールテクノロジー」という点では，これらの技術の目指すところは同じである。

日立グループでは，今後とも「クリーンコールテクノロジー」開発の一翼を担うべく，技術開発に積極的に取り組んでいく考えである。

なお，ここで紹介したHYCOLのガス化炉，200 t/d IGCCパイロットプラントのガスタービンなど，およびMCFCの電池スタックは，新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)殿からの委託研究成果の一部である。また，日立式IGCCの概念設計は，東京電力株式会社殿からの依託研究成果の一部である。さらに，PFBCの各種試験，プラント設計の遂行には中国電力株式会社殿のご指導をいただいた。関係各位に対し深く感謝する次第である。

参考文献

1) 金子：超々臨界圧蒸気タービン用材料開発，第71期日本機械学会通常総会講演会予稿集，新技術開発レポート(超々臨界圧発電の技術的課題とその克服)(1994-3)
2) 小山，外：石炭利用技術の一翼を担う水素製造用石炭ガス化プラント，日立評論，**74**，4，333～338(平4-4)
3) 佐々木，外：酸素吹き石炭ガス化複合発電システムの概念設計研究，日本機械学会論文集(B編)，**59**，566，2660～2665(1993-9)
4) 加原：複合大容量型燃料電池，溶融炭酸塩型燃料電池発電技術研究発表会講演要旨集，201～209(1994-2)