

石炭利用の次世代火力発電システム

Coal Fired Power Generation System for the Next Stage

和田 克夫*

Katsuo Wada

加原 俊樹***

Toshiki Kahara

中川 幸雄**

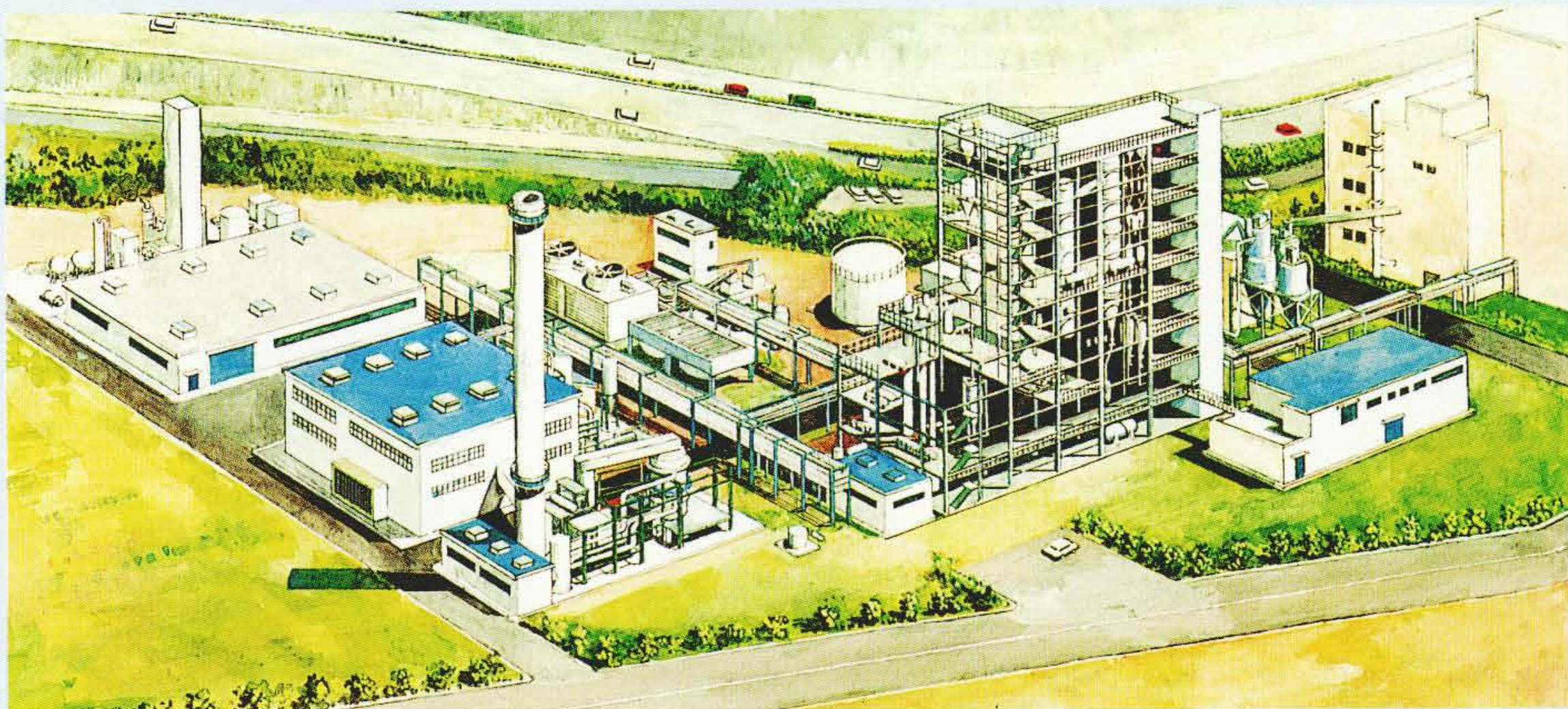
Yukio Nakagawa

日高 貴志夫****

Kishio Hidaka

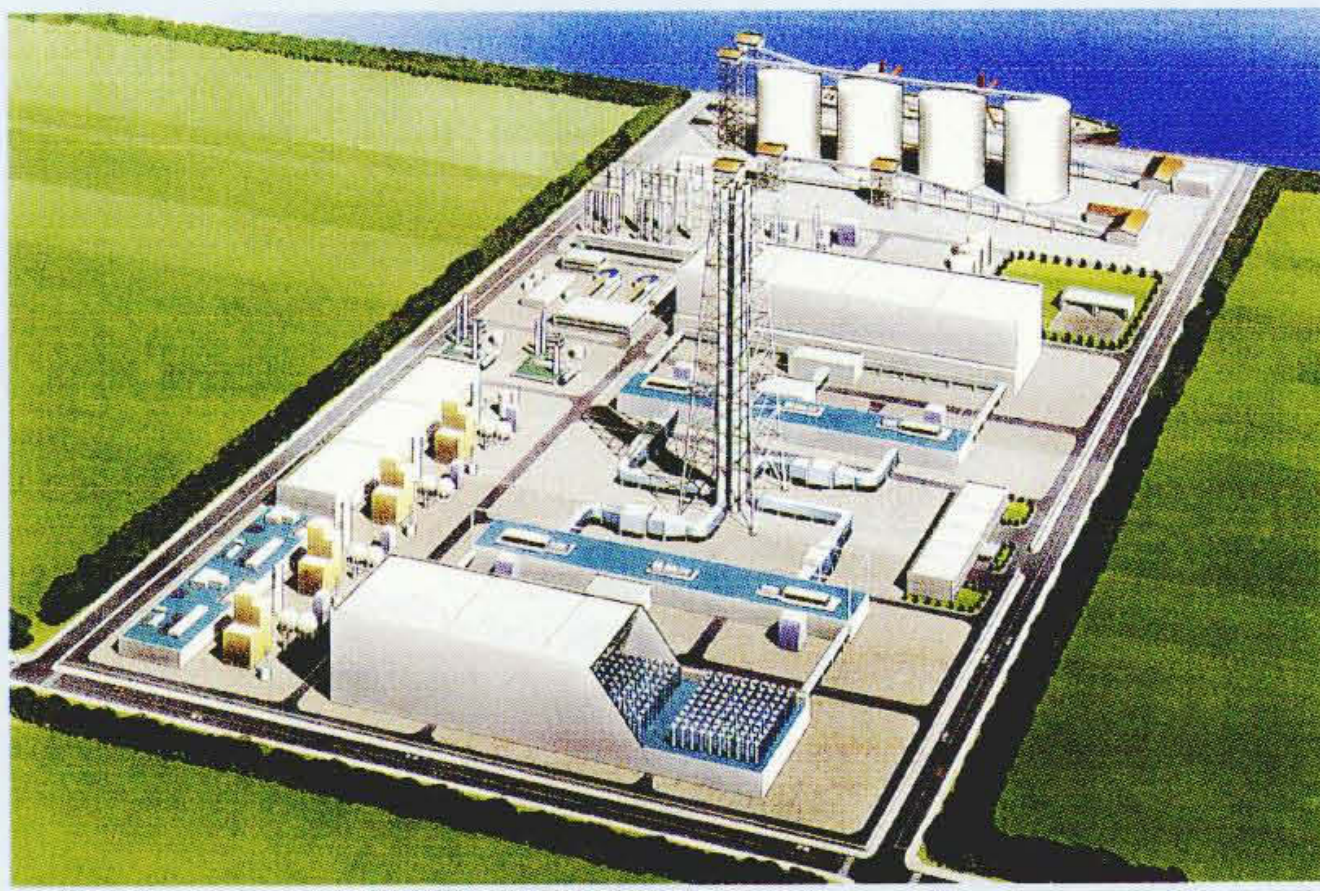
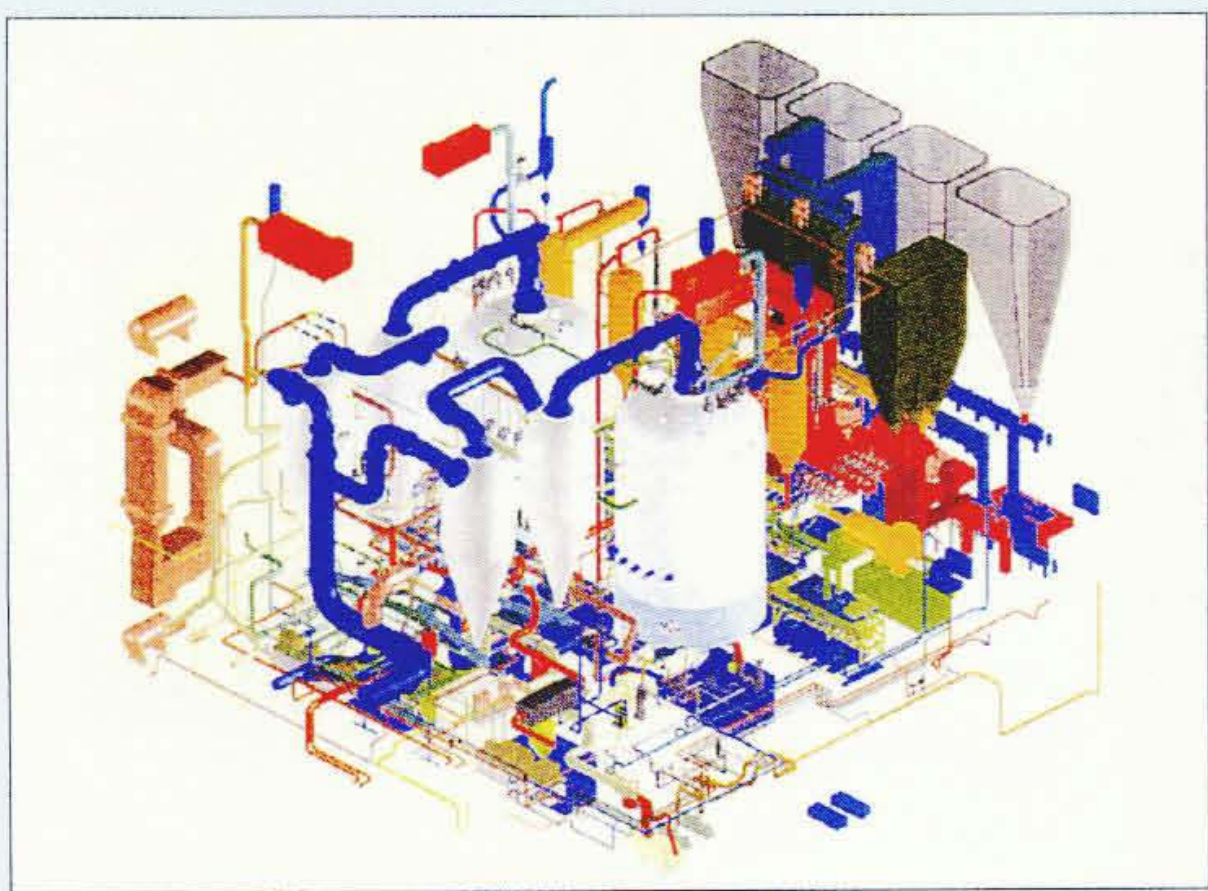
(a) 燃料電池用石炭ガス化パイロット
プラントの構想図

EAGLE計画と称されるこのプラ
ントでは、酸素吹噴流床ガス化炉を設
置する。



(b) 中国電力株式会社大崎火力発電所
1-1号機器配置・配管ルート検討図

大崎火力発電所1号系列ボイラの
三次元CAD図を示す。白い円柱
はボイラ圧力容器で、手前は2段
マルチサイクロンである。



(c) 石炭ガス化溶融炭酸
塩型燃料電池発電所
の構想図

この発電所は、発電
出力500 MWで、石
炭ガスを燃料として
発電する。

石炭の有効利用を目指して、石炭ガス化複合発電、PFBC(加圧流動床ボイラ複合)発電、MCFC(溶融炭酸塩型燃料電池)発電、およびUSC(超々臨界圧)火力発電での技術開発を推進している。

石炭ガス化複合発電では、HYCOL(石炭利用水素製造)ガス化炉と勿来パイロットプラントガスタービンの実績を踏まえ、次ステップとして、電源開発株式会社の指導の下にEAGLE(燃料電池用石炭ガス製造)プラントを設計中である。

PFBCでは、中国電力株式会社大崎火力発電所1号系列に250 MWeのプラントを納入する計画である。日立製作所は、中国電力株式会社との共同研究による熱入力4 MWt/h試験装置の長期連続運転試験を進めるとともに、

各機器の実寸大モデルを製作し、商用機の信頼性の検証を推進している。

MCFCでは、国家プロジェクトとして、1999年に1,000 kW級パイロットプラント開発を目指して研究開発を推進中である。将来は石炭ガスを燃料とする方式が大容量発電として考えられている。

USC発電では、蒸気条件の改善によるプラントの高効率化を目指し、ボイラやタービンの開発を進めている。現在は600℃が実用段階に入っており、今後さらに蒸気条件は上昇すると思われる。600℃がフェライト系鋼の耐熱限界との認識が強かったが、新材料の開発により、蒸気温度630℃(650℃を目指した)の将来型USC発電プラントの可能性を得た。

*日立製作所 日立工場 **日立製作所 電力事業本部 ***日立製作所 日立工場 工学博士 ****日立製作所 日立研究所 工学博士

1. はじめに

世界的に豊富に埋蔵する石炭を有効利用するため、石炭を燃料とする発電は増加する傾向にある。このため、各種火力発電方式の開発が進められている。その実用化時期を図1に示す。日立製作所は、石炭利用の火力発電システムの高効率化を目指し、次にあげる技術開発や商用機の検証を進めている。

- (1) 次世代火力発電の主流として注目されている石炭ガス化複合発電
- (2) PFBC発電については、熱入力4 MWt/h試験装置から250 MWの商用プラント完成へのスケールアップ検証の推進
- (3) クリーンで高効率な発電方式として期待されているMCFC発電の研究と開発
- (4) USC火力発電では、蒸気温度630℃(650℃を目指した)の将来型USC用の、低価格で高強度なフェライト系鋼の材料技術開発

ここでは、以上の火力発電システムでの各種技術開発について述べる。

2. 石炭ガス化複合発電

石炭ガス化複合発電は、石炭から一酸化炭素を主成分としたガスを作り、これを精製してガスタービンの燃料とし、複合発電を行うものである。

2.1 石炭ガス化複合発電システム構成および各設備の特徴

日立製作所独自の石炭ガス化複合発電システム構成を図2に示す。各設備の特徴は次のとおりである。

石炭をガス化する酸化剤として、空気を用いる方法と酸素を用いる方法とがあるが、酸素酸化方式の開発が先行している。ガス化ガスはダストや不純物を含み、後流設備に有害なため、環境上からもガス精製が必要である。ガス精製の方法として高温ガス精製技術の開発も試みられてはいるが、これは未完成技術のため、化学プラントで実用化されている湿式ガス精製が現実的である。この精製は、ガス化炉を出たガス化ガスを脱じん後、水洗して湿式脱硫を行うものであるが、湿式ガス精製の熱損失を小さくするには、ガス流量を少なくできる酸素酸化方式が有利である。

ガス化炉内では、スラグを溶融して下端に落とすために下部は高温である。上部ではガス化したガス中のチャーが壁面や熱交換器などに付着しないようにガス温度を下げるため、リサイクルガスを入れて冷却する。日立製

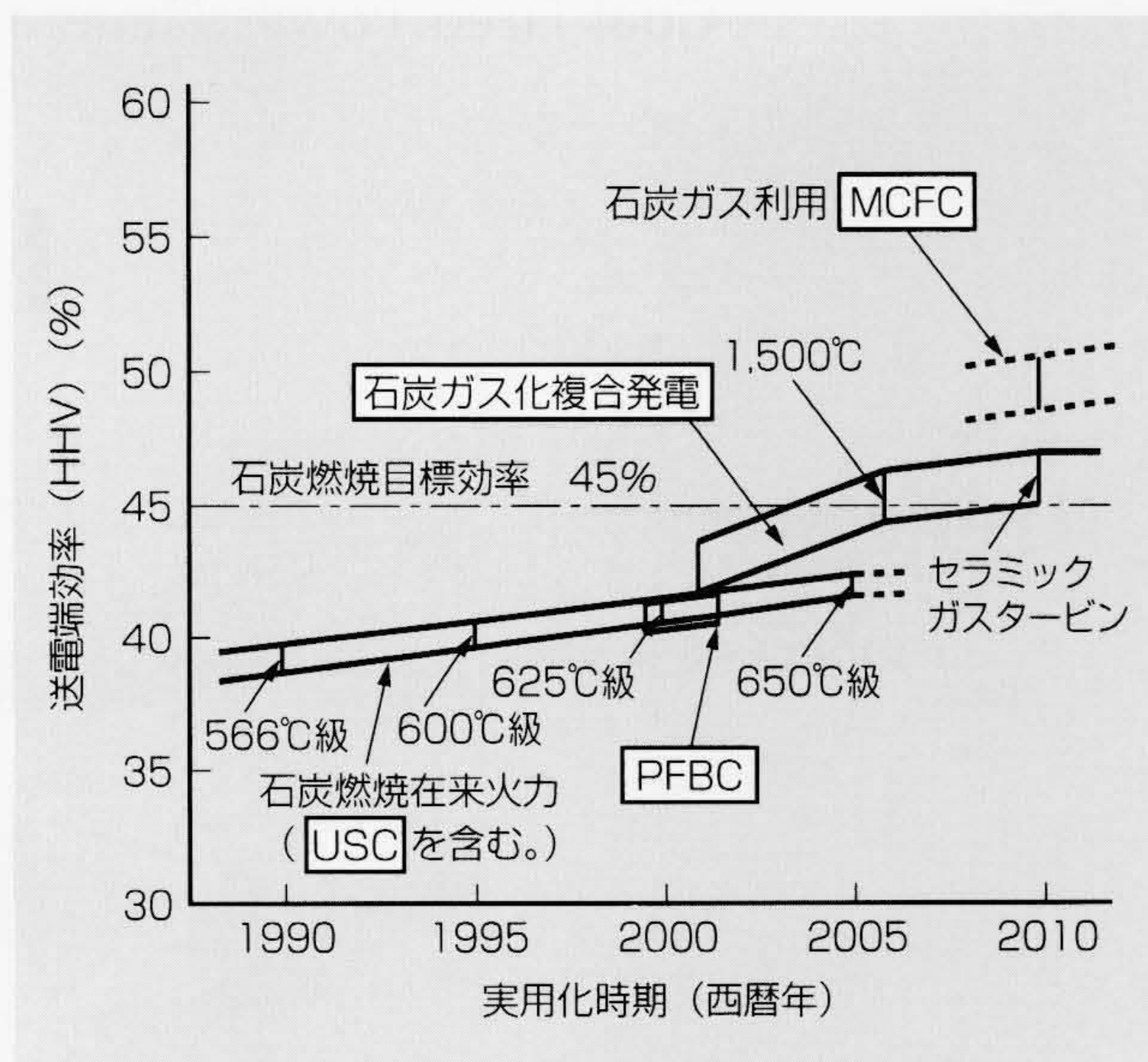


図1 石炭火力の効率向上の見通し

USC、PFBC、石炭ガス化複合発電、MCFCの順で実用化されると予想する。

作所は、さらにくふうを凝らして酸化剤を二段供給とし、下段はスラグ溶融用、上段はガス化作用と冷却効果を持たせてリサイクルガス量のいっそうの低減を図っている（図3参照）。ガス化燃料の発熱量が低いため（約10,460 kJ/Nm³）、ガスタービンでは流量バランスの関係から抽気が必要である。この高圧の抽気空気を受けて加圧TO（Tonnage Oxygen）プラントで酸素と窒素に分離し、酸素はガス化炉へ、窒素はガスタービンへ送る。この窒素は低NO_x化にも有効である。このように、全体をインテグレートするシステムが効率向上に有効である。

2.2 世界の動向

欧米では石炭が豊富であり、早くから開発が進められ

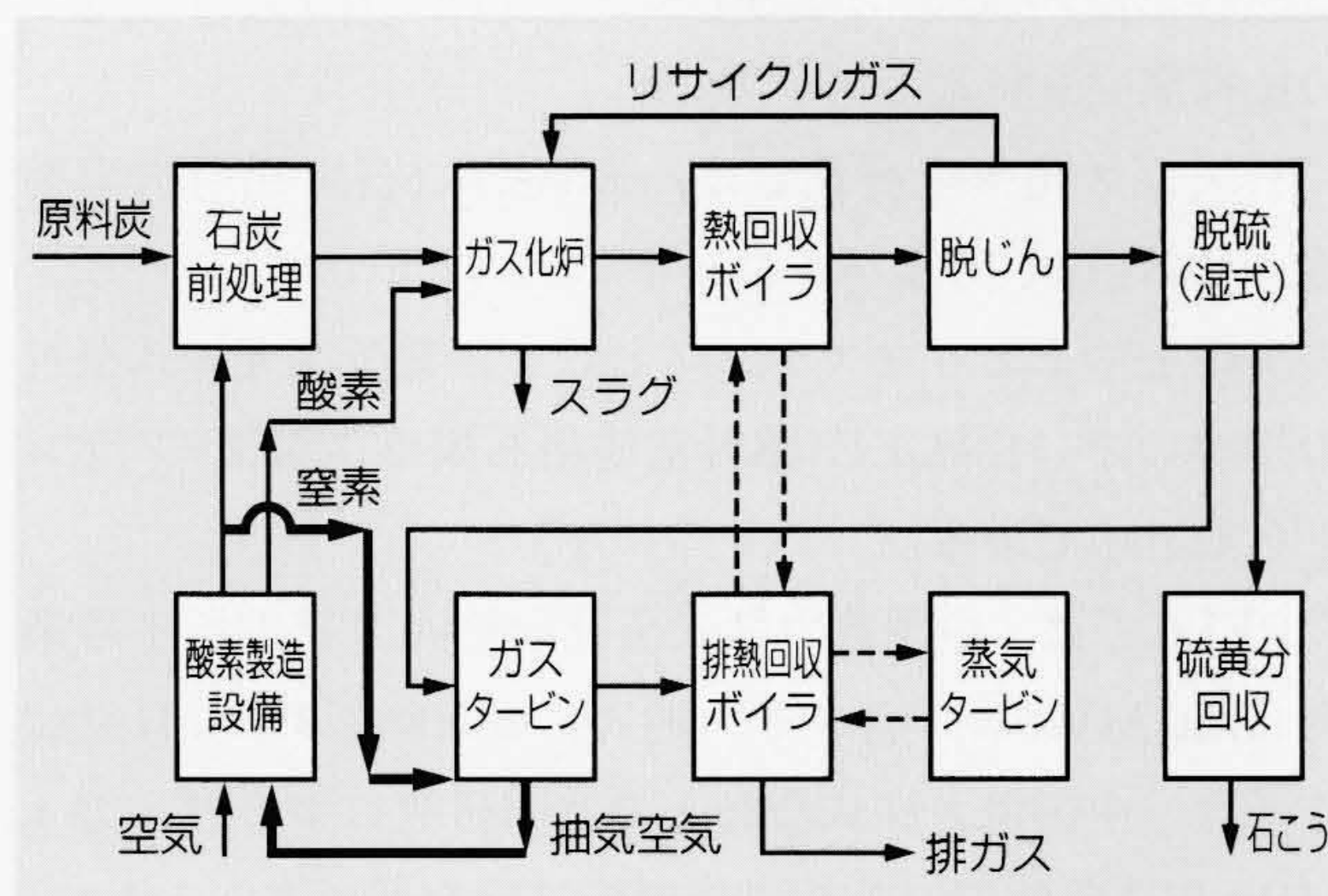


図2 日立製作所独自の石炭ガス化複合発電システム構成

ガスタービン抽気空気を酸素製造設備に送り、生成された窒素をガスタービンに戻すことを特徴とする。

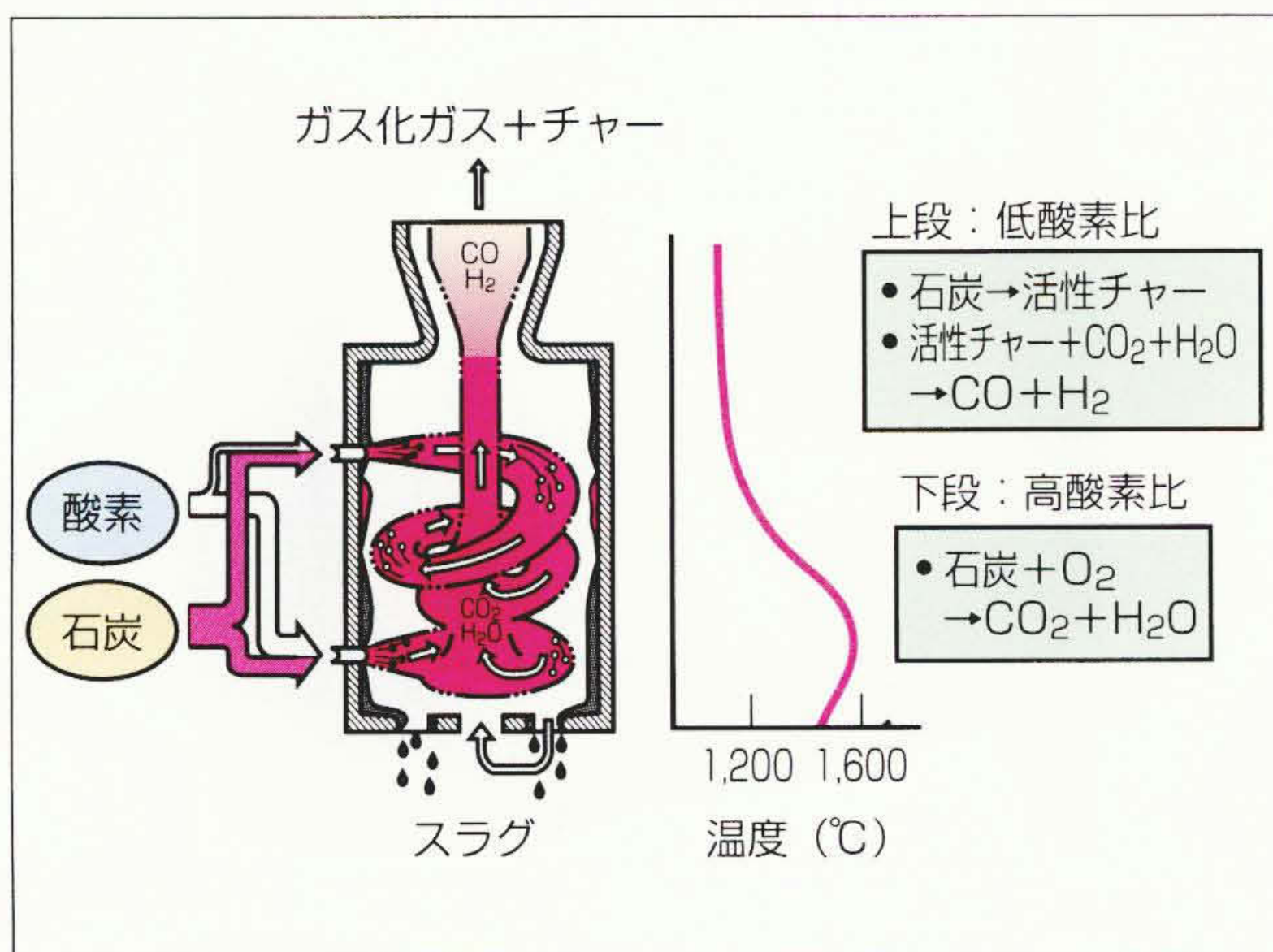


図3 日立製作所独自のガス化炉の原理

酸素を上段と下段に分割して供給し、高効率化と安定なスラグ流化を図っている。

ている。アメリカでは三つの実証プラント(Tampa, Wabash, Sierra Pacific)が³⁾、ヨーロッパでは二つの実証プラント(Dmkolec, Elcogas)がそれぞれ運転中または建設中である。これらのプラントはいずれも湿式ガス精製を採用しており、また、酸素酸化方式が主流である。わが国では勿来パイロットプラント(空気酸化方式)で実験を終了し、実証プラントを検討中である。

2.3 日立製作所の開発経過と今後の展望

本格的なガス化炉開発は、1988年から1993年の袖ヶ浦でのHYCOL炉(給炭量50 t/d)の試験に始まる。この炉は、1,000時間の連続安定運転を達成し、酸素酸化方式の信頼性を実証した。ガスタービンは、1985年から1995年にかけて勿来パイロットプラントで、12.5 MW機の運転研究を行い、低発熱量燃料での安定燃焼および抽気連携(ガスタービン抽気空気をガス化炉へ送り、生成した燃料をガスタービンに戻すクローズド運転)での安定運転を実証した。

今後は、HYCOL炉を発展させたEAGLEプラント(給炭量150 t/d)が電源開発株式会社の指導の下に1997年から試験の予定である。また、中央電力協議会で計画している実証プラントにも参画している。

3. PFBC(加圧流動床ボイラ複合)発電

中国電力株式会社大崎火力発電所1号系列(以下、大崎1号系列と言う。)、250 MWe×2 発電設備の概略系統図を図4に示す。大崎1号系列は、压力容器内に設置した加圧流動床ボイラから発生する蒸気で蒸気タービンを駆動し、二段12基×2 系列マルチサイクロンで除じんした

ガスでガスタービンを駆動する複合発電システムである。流動媒体に石灰石を採用することによって炉内脱硫ができ、SOx発生量を低く抑えることができる。ボイラ型式は2塔・2 火炉式とし、ガスタービン型式は1 軸ガスタービンを採用した。PFBC特有の各種機器の実寸大モデルを製作してスケールアップの検証を行い、実機製作の信頼性を確認した。各実寸大モデルを用いた検証試験の概要について以下に述べる。

3.1 火炉実寸大の部分モデルによる検証

火炉 $\frac{1}{5}$ コールドモデルを作成し、火炉の基本流動特性を把握した。引き続き信頼性最終確認のために実寸大の部分モデルを製作し、層内管に加わる流動変動荷重の確認と、内部構造物による粒子流動阻害の可能性などを把握する。

3.2 ガスタービン入口構造の実寸大モックアップによる検証

火炉からの高温、高圧ガスをガスタービン入口に導入する構造として、圧縮空気とガスの2重管ヘッダ構造を採用した。実寸のヘッダやガスタービンケーシングの部分モックアップを製作して、この構造の組立方法と保守性を検証した。

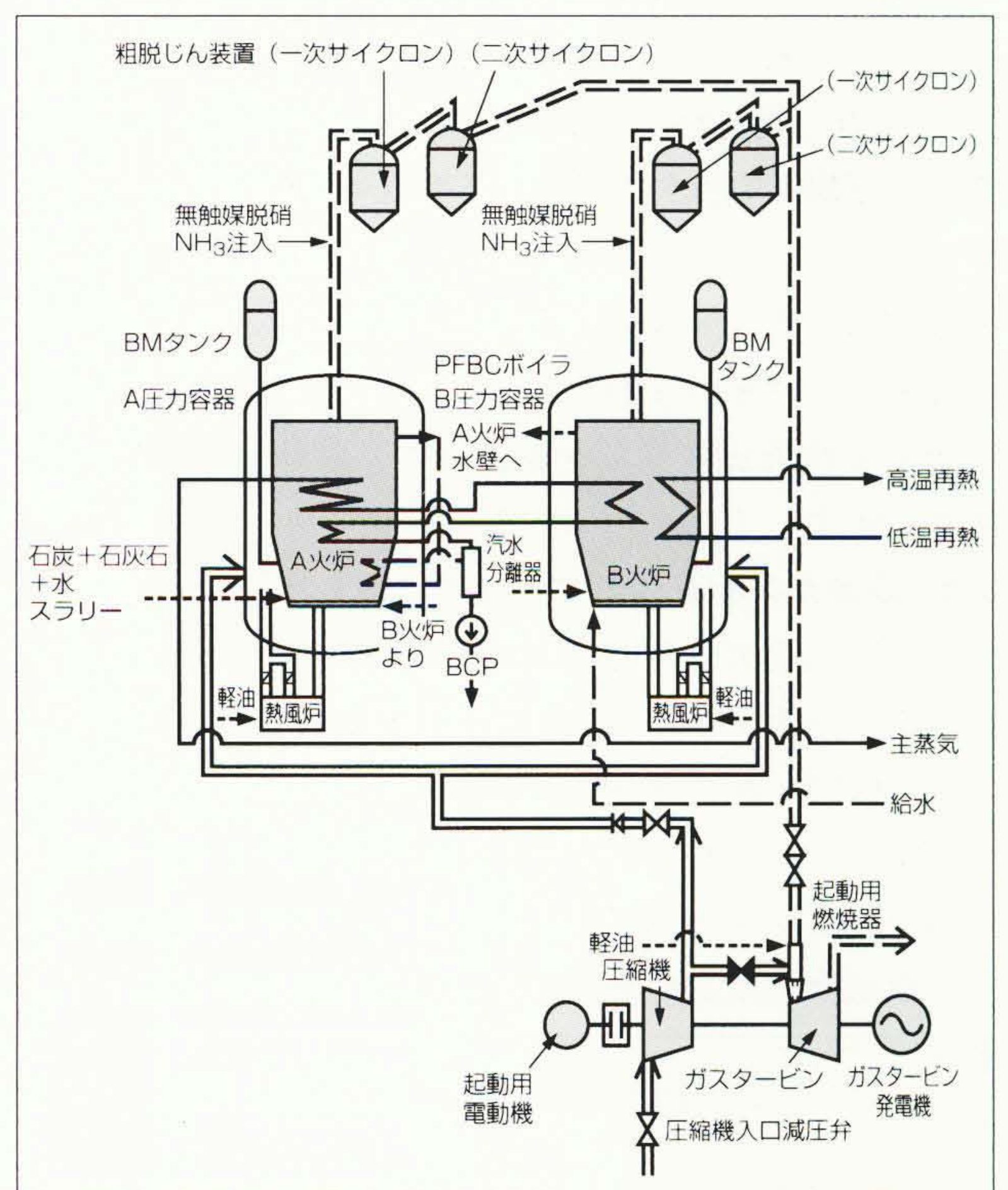


図4 大崎1号系列ボイラ・ガスタービンの概略系統

A火炉側に蒸発器、一次過熱器、最終過熱器を配置し、B火炉側に二次、三次過熱器と再熱器を配分した2塔・2 火炉式ボイラである。

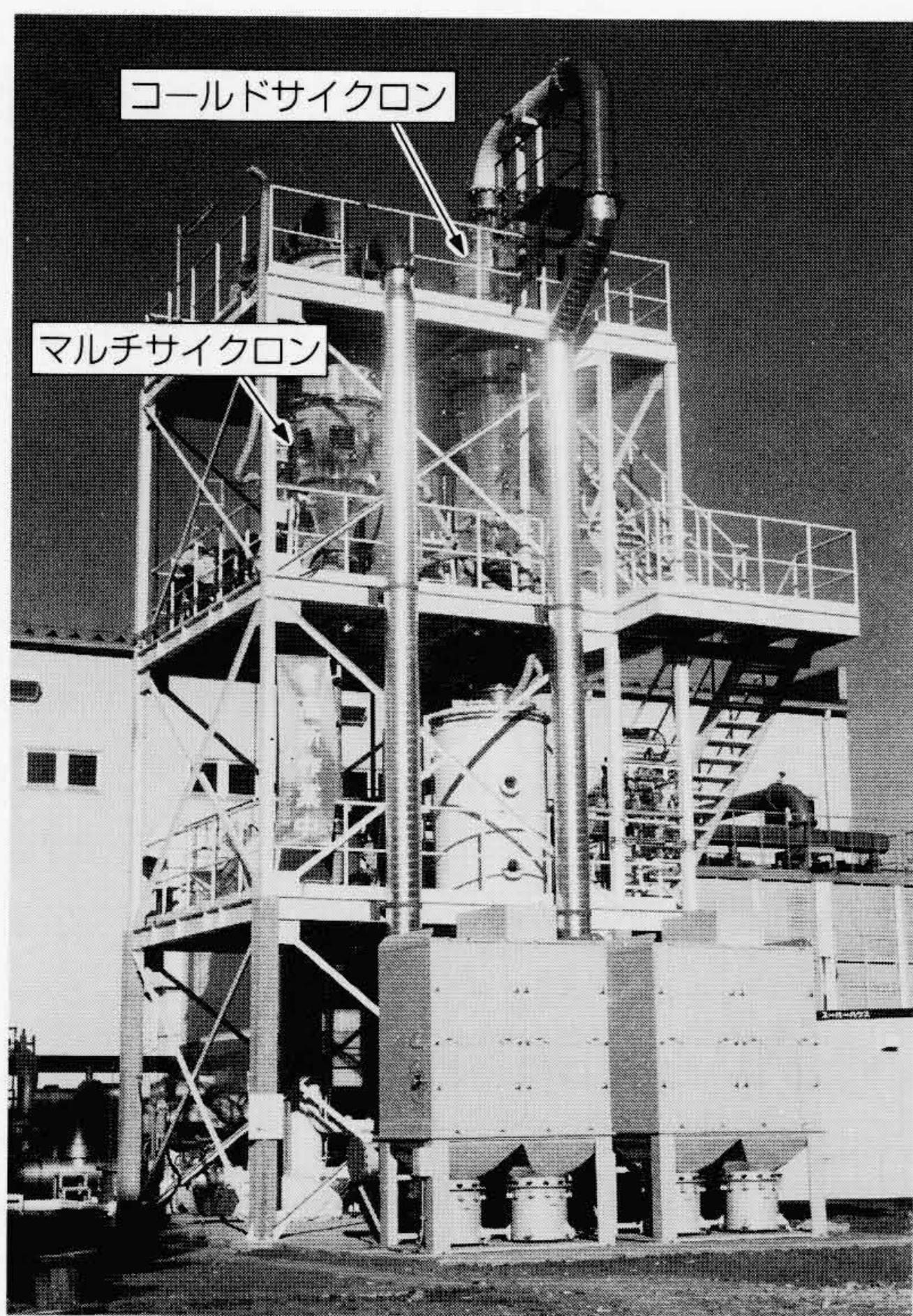


図5 実寸大サイクロン試験装置

この装置の左側は $\frac{1}{5}$ 縮小12基マルチサイクロンを、右側は実寸大コールドサイクロン1基を示す。

3.3 サイクロン脱じん性能のコールドモデルによる検証

大崎1号系列の脱じん方式には二段サイクロン方式を採用した。サイクロン効率の確保が、プラント下流機器の安定運用上不可欠である。このため、実寸大コールドサイクロンエレメントを製作し、脱じん性能の確認試験を行った。また、実機は容器内収納型で12基のマルチ化となるので、その $\frac{1}{5}$ 縮小コールドモデルを作り、単体との脱じん性能比較検証を実施した。試験設備の全体を図5に示す。

3.4 高温ガス配管の実寸大試作による検証

実機の高温ガス配管には内部断熱単管方式を採用した。また、サイクロンを火炉圧力容器の外部に配置したため、火炉とガスタービンを連絡する高温ガス配管を長くした。これによってヒートスポットが生じない信頼性の高い高温ガス配管を検証するため、実寸大の高温ガス配管を試作した。高温ガス配管の試作例を図6に示す。

4. MCFC(溶融炭酸塩型燃料電池)発電

MCFC発電は、水素と酸素を電気化学的に反応させて電気エネルギーを取り出すものであり、化学力発電とも呼ばれている。MCFCの発電反応では、カソードで空気

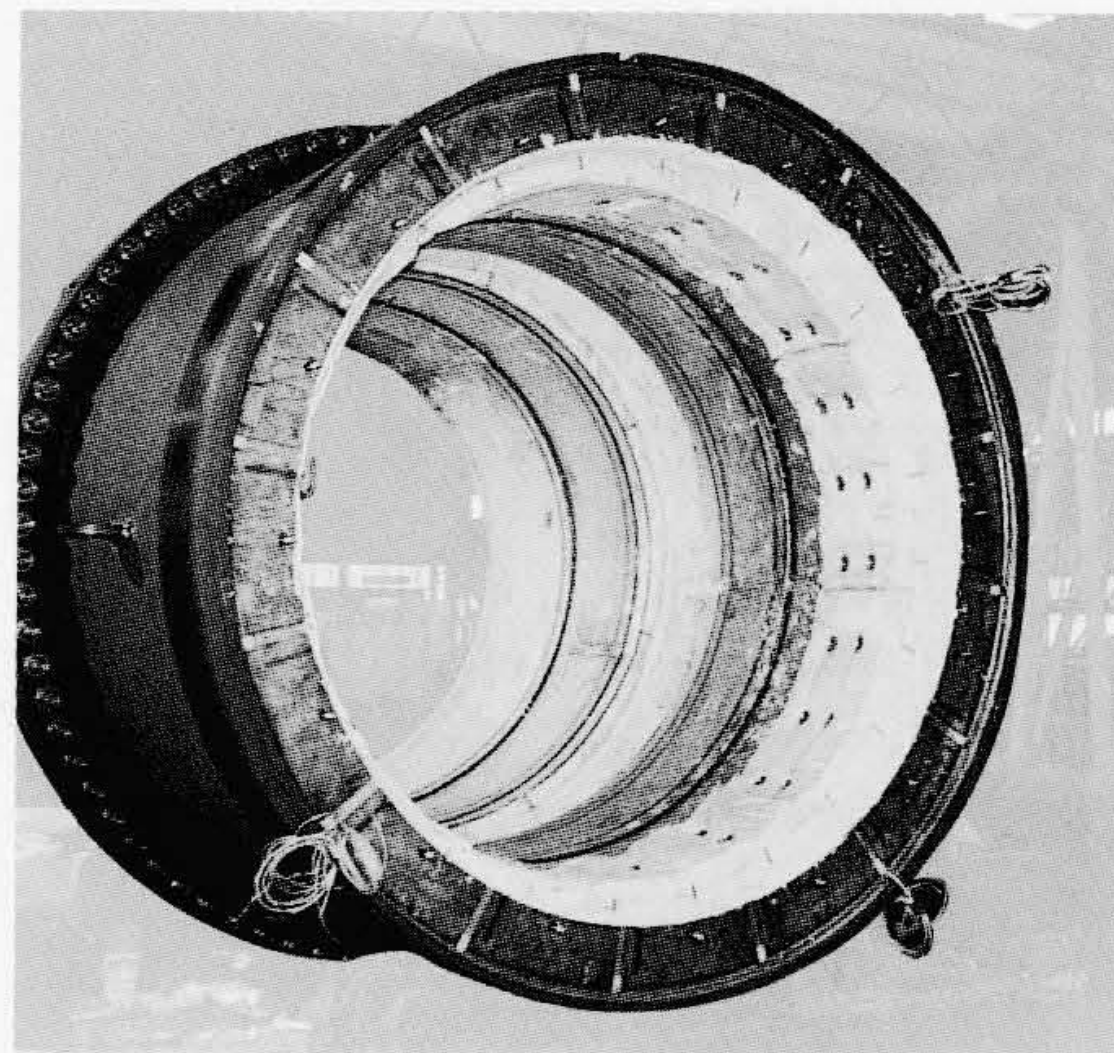
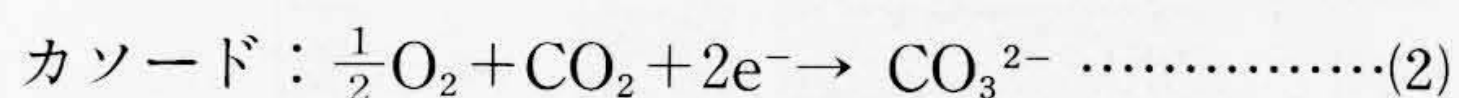


図6 高温ガス配管の実寸大試作

高温ガス配管(φ2,450)に内部断熱材と内部スリーブ管を取り付けた様子を示す。

中の酸素と炭酸ガスが電子を受け取って炭酸イオンを生成する。アノードでは水素と炭酸イオンが反応し、炭酸ガスと水蒸気を生成して電子を放出する。この電子が外部回路を回ってカソードに至る間に、電気エネルギーとして使用される発電反応は、次式によって表される。



石炭ガス化ガス中には水素と一酸化炭素が多量に含まれる。水素はそのまま、一酸化炭素は電池内で次式に示すように水素に変換されてから燃料になる。



石炭ガス化ガスを用いるMCFC発電システムの一例を図7に示す。石炭ガス化炉でガス化された燃料はガス精製装置を経た後、燃料電池のアノードに供給される。一方、カソードには空気に燃料の一部を加えて燃焼させ、空気と炭酸ガスの混合ガスにしたものが供給される。

MCFCは650℃付近で運転されるので、排ガスで膨張タービン(ガスタービン)や蒸気タービンを駆動させて電気エネルギーを回収することができる。石炭ガス化ガスを用いるMCFC発電方式は、発電効率50～52%が期待されている。現在、MCFCは通商産業省工業技術院ニューサンシャイン計画の一環として開発が進められている。1999年度に1,000 kW級パイロットプラントを開発して運転する計画であり、その中間評価として、1992年度に開発した100 kW級MCFCスタックを図8に示す。電極面積1.2 m²のセルを88枚積層したものであり、電流密度150 mA/cm²、ガス圧力5 ataで出力113 kWが得られた。

この研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構の

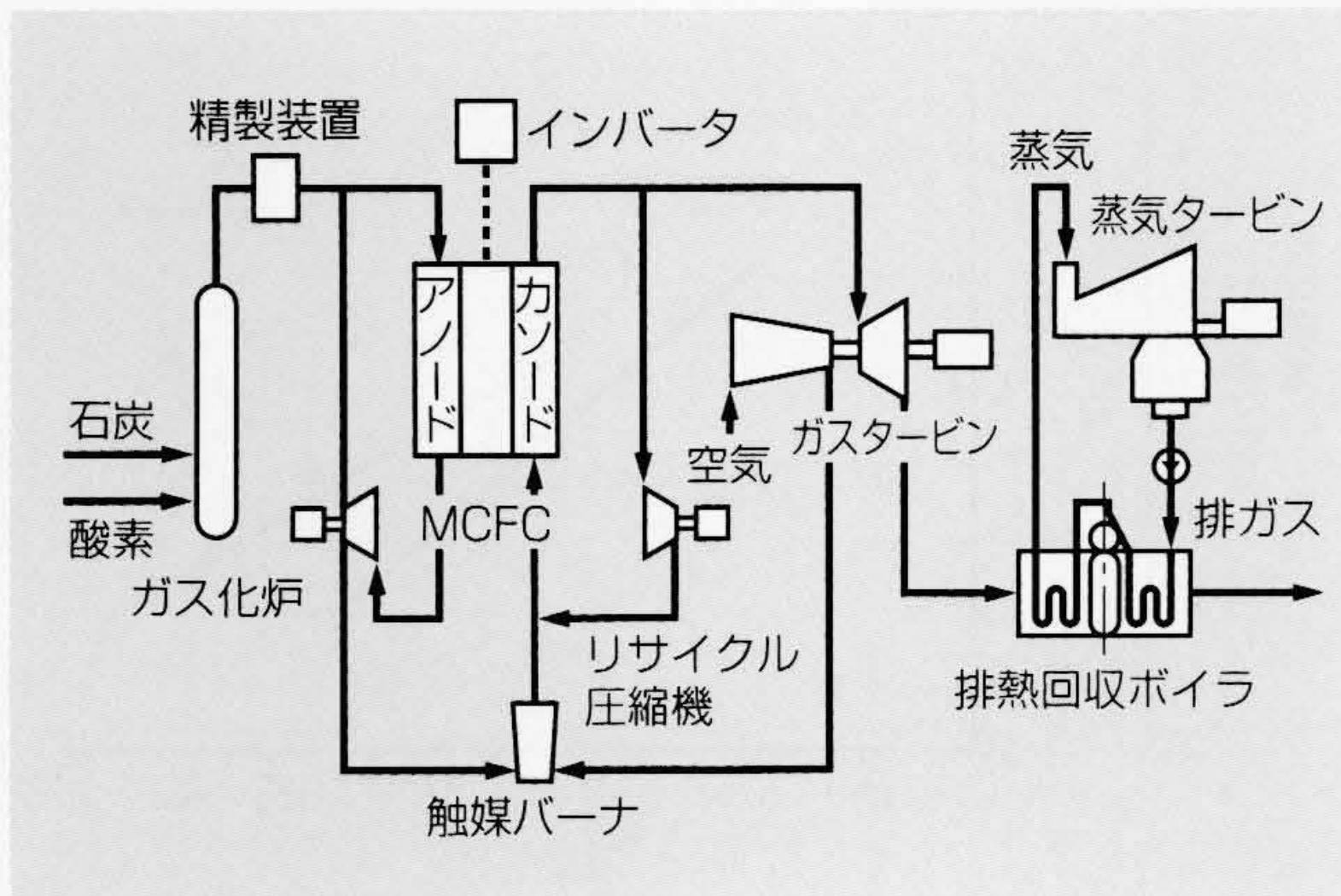


図7 石炭ガス化MCFC発電システム

石炭ガス化ガスを燃料電池のアノード反応ガス(燃料)として用いる発電システムである。

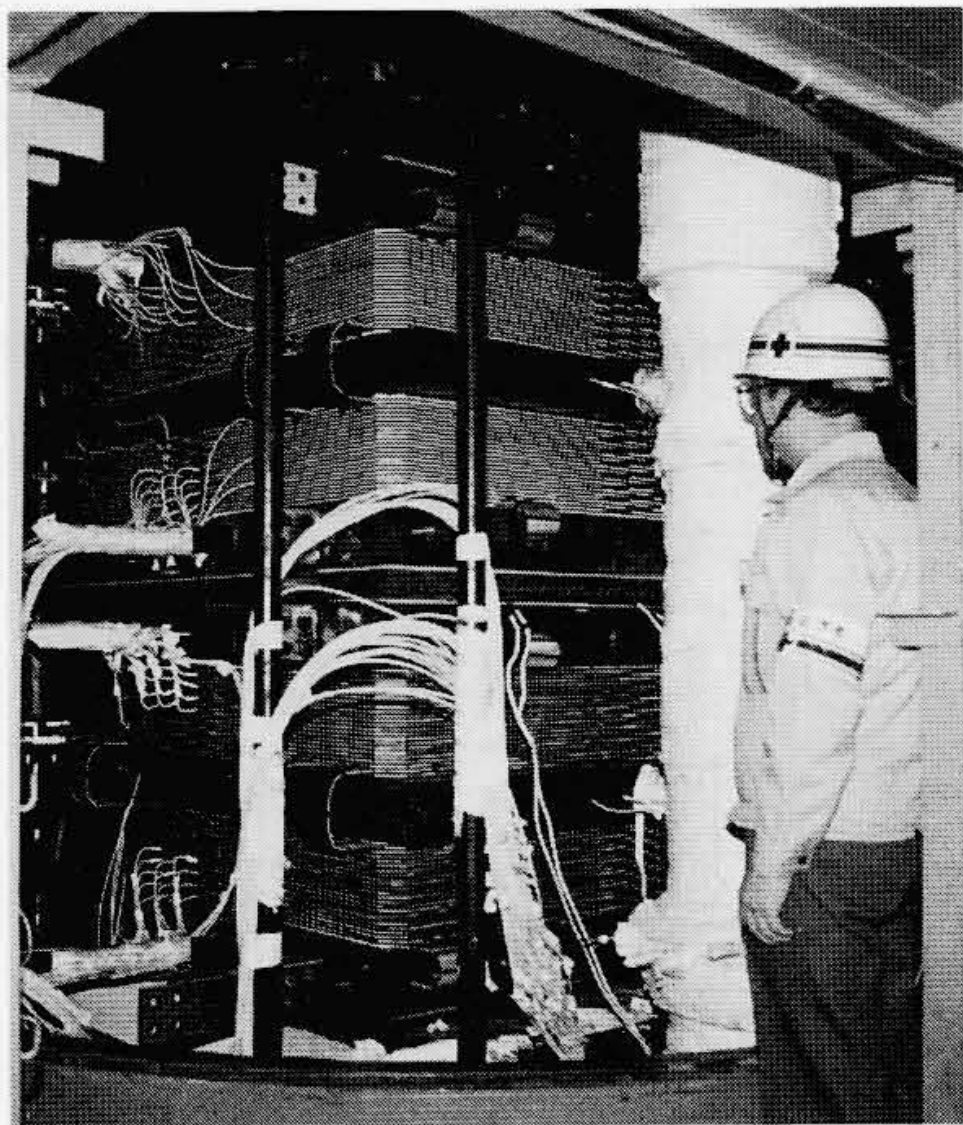


図8 100 kW級MCFCスタック

電極面積1.2 m²のセルが88枚積層されている。

委託研究に基づいて、熔融炭酸塩型燃料電池発電システム技術研究組合からの分担研究として実施したものである。MCFC発電方式の実用化のためには、今後、長寿命化と低コスト化が大きな研究開発課題である。これらの課題を克服し、その早期実用化を目指す考えである。

5. USC(超々臨界圧)火力発電

USC火力発電は蒸気条件を超高温・高圧化して高効率化するもので、現状では25 MPa・600℃が実用化されている。近年、次世代火力発電システムとして、30 MPa・630～650℃級のUSC火力発電の開発に関する共同研究が、国の補助の下に電源開発株式会社とプラントメーカーで実施されている。USC火力発電の開発で最も重要な課題は、ボイラ過熱器出口管寄せやタービンロータのような大型構造部材に適用できる材料を開発することである。

5.1 ボイラ

ボイラ過熱器出口管寄せ用の材料としては、高温強度を重視すればオーステナイト系耐熱合金が優れているが、熱膨張係数が大きく、管寄せの大型化に伴って熱応力が増大するため、運用性が制約される。したがって、熱膨張係数が小さいフェライト系耐熱鋼の開発が不可欠となる。現状のボイラ用フェライト系耐熱鋼として火STPA28(9Cr-1Mo-Nb-V)があるが、約600℃が上限温度である。蒸気温度を630℃以上にするには火STPA28を上回る耐熱材料が必要のため、WあるいはCoを添加したNF616(9Cr-0.5Mo-1.8W-V-Nb)、HCM12A(11Cr-0.4Mo-2W-Cu-V-Nb)および、NF12(11Cr-2.6W-Mo-Co-V-Nb)の実用化研究を行っている。

開発材をボイラ用鋼管として試作し、火力技術基準に基づいて設定した許容応力を現用の火STPA28と比較して図9に示す。フェライト系高強度鋼の許容応力レベルは、火STPA28と比べて30～50℃上昇しており、30 MPa・630℃級USCボイラの過熱器出口管寄せの肉厚は、従来の製造実績である150 mm以下で設計できることを確認した。また、溶接性・曲げ加工性・耐食性についても試験を行い、ボイラ用耐圧部材として実用できる見通しを得た。

蒸気圧力を上昇させるためには、節炭器や水壁などの中低温部材の高強度化も必要になる。現状では、節炭器には炭素鋼、水壁にはCr-Mo鋼がそれぞれ使用されているが、調質熱処理を施した高強度鋼や、Vを添加したCr-Mo鋼が30 MPa級のUSCボイラ用中低温部材として有効であることを確認した。

以上の開発材料について、実際のボイラ環境下での実缶試験を実施中であり、系年変化の程度を調査して実用

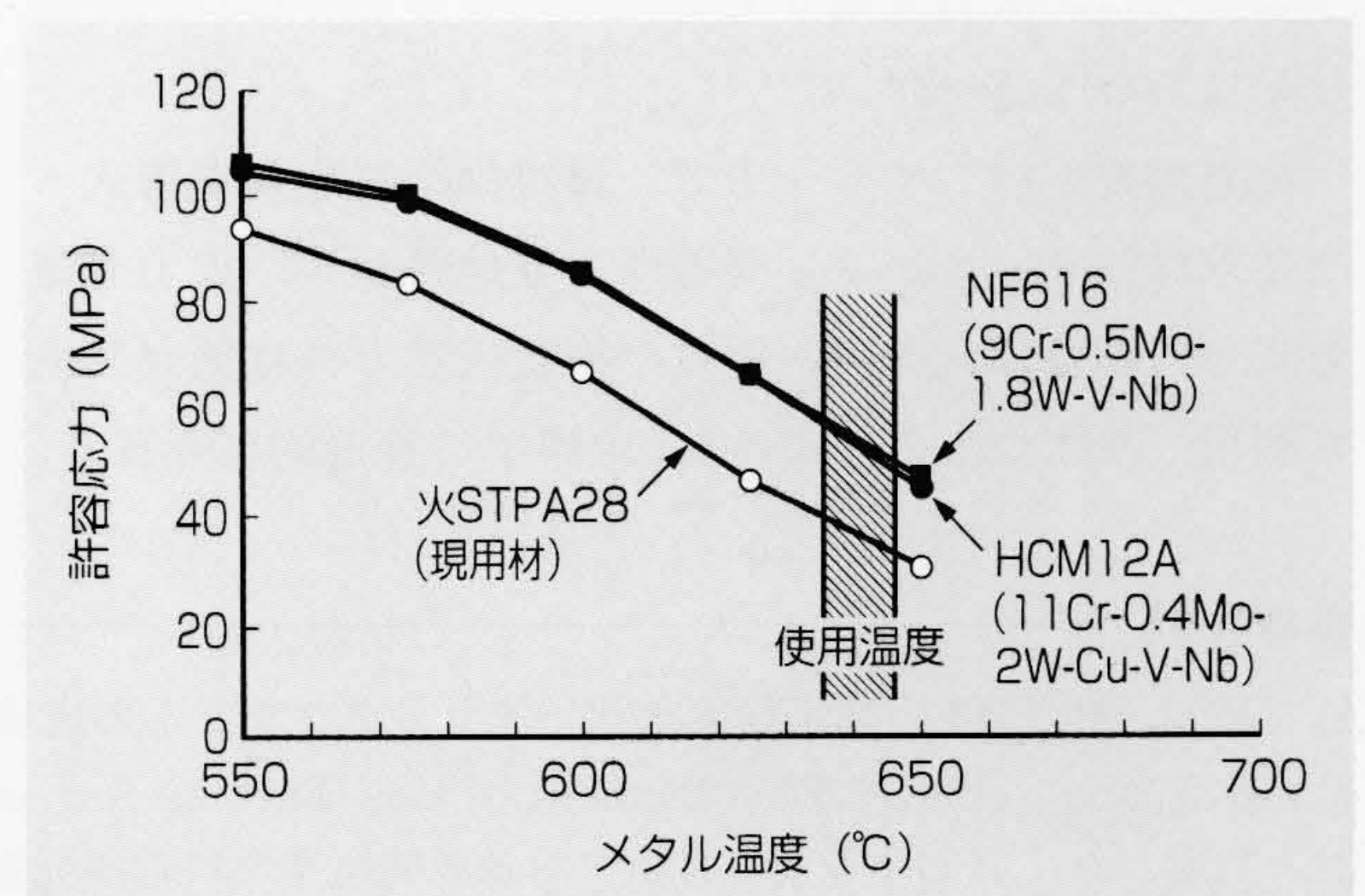


図9 USCボイラ用フェライト系高強度鋼の許容応力

WあるいはCoを添加したフェライト系高強度鋼は、USCボイラ用耐圧部材として実用できる見通しを得た。

性を検証する計画である。

5.2 タービン

タービン材料ではロータシャフトが特に重要であり、日立製作所が独自でHR1100(Hitachi Rotor for 1,100°F: 10.5Cr-1.2Mo-W-V-Nb)やHR1200(Hitachi Rotor for 1,200°F: 11Cr-2.6W-0.2Mo-V-Nb-Co-B)の材料開発を行っている。新ロータ材であるHR1200では、クリープ破断強度を向上させるためにHR1100鋼(本号掲載の別論文「電力機器の革新を担う材料基盤技術」の「2.1.1 USC用タービンロータ材」を参照)に対してWを増量し、さらにCoやBを新たに添加したところに特徴がある。また、長時間での経時的な高温強度の劣化を防止するためにCやNの添加量を減少させている。W, Mo, Bを含むことから、大型化に際して、従来の真空炭素脱酸法では凝固偏析が生じやすい。このため、従来の真空炭素脱酸後のインゴット作製過程にエレクトロスラグ再溶解法を導入することにより、この課題を解決した。特にHR1200では、CoやBの添加によって材料の高温強度が向上したため、高温変形抵抗が増大する。ロータの製造に際しては鍛造割れの問題がある。このため、鍛造温度の適正化と鍛造変形の制御により、割れ発生のない大型ロータ製造に成功した。

この試作品から鍛造性、熱処理法、および材料強度に関する総合的な評価を行った。HR1100とHR1200での大型実体ロータ材のクリープ破断強度を比較して図10に示す。10万時間クリープ破断強度で比較すると、100 MPaでの耐用温度はHR1100で600℃、HR1200で650℃である。以上のような合金設計により、HR1200の耐用温度を630～650℃に向上することができた。

6. おわりに

ここでは、火力発電システムでのさまざまな技術開発などについて述べた。

電力需要が増大する一方で、環境保全対応発電方式への要求は強まっている。発電所の立地難から、火力発電方式への期待は大きい。現在の液化天然ガスは低コストで利用しやすいものであるが、世界中に普遍的に存在し、

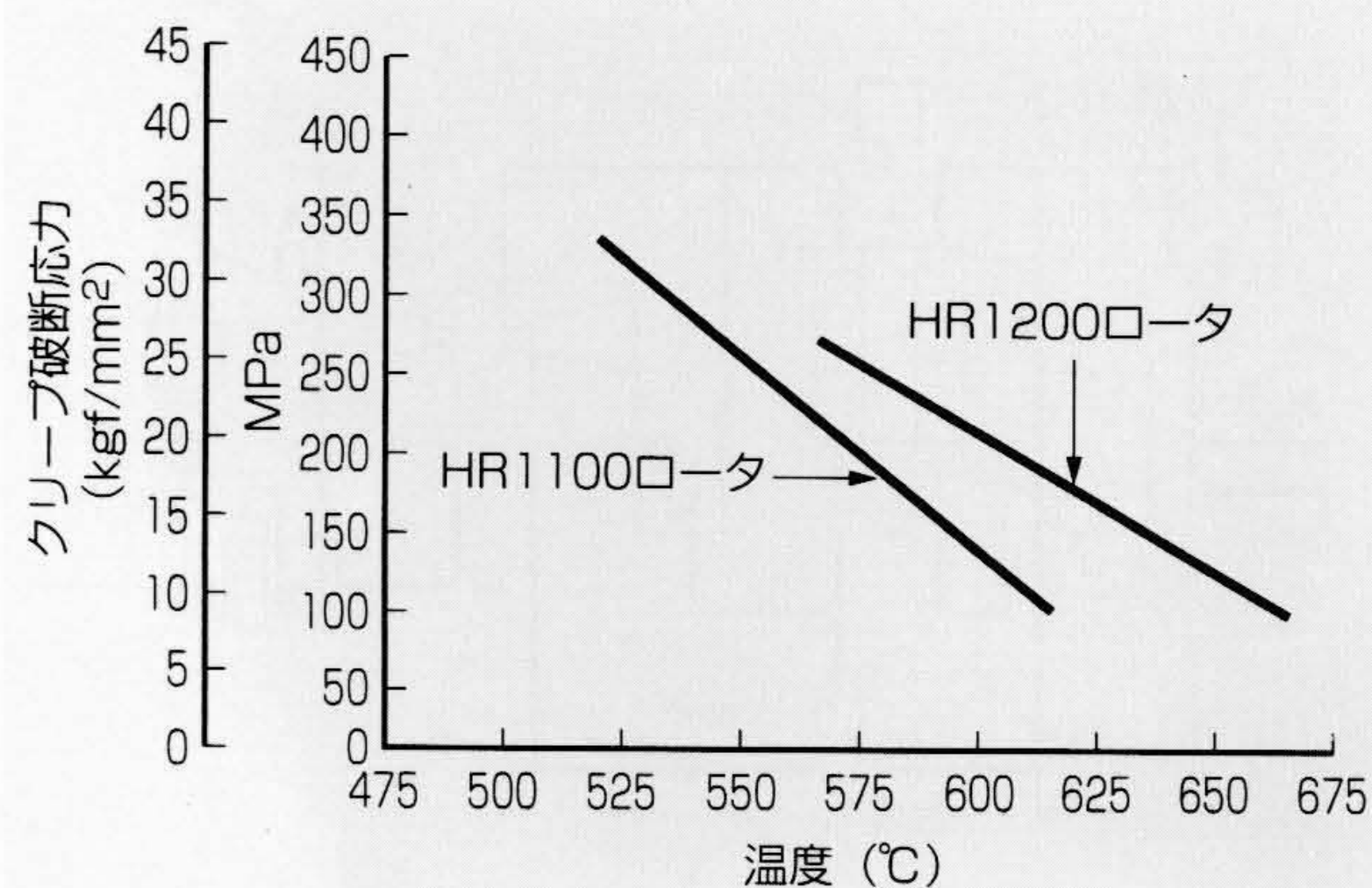


図10 HR1100とHR1200での大型実体ロータ材のクリープ破断による耐用温度の比較

応力レベル100 MPaではHR1100の耐用温度は600℃程度であるが、HR1200では約650℃まで上昇する。

その埋蔵量も豊富で安定な石炭の有効利用は今後の主軸となると考えられる。

石炭ガス化複合発電は、石炭の有効利用技術として高効率・環境性良好・多炭種対応(特に低品位炭)などの優れた素質を持っており、今後の開発によって信頼性および価格競争力をつけることにより、最有力技術になるものと考えられる。

PFBCについては、4 MWt/h試験の実績を反映するとともに、ここで述べた実寸大モデル試験設備による各種試験を精力的に進め、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。

MCFC発電方式は現在、燃料電池本体の開発が精力的に進められている段階であり、実用化までにはまだ時間がかかると考える。しかし、長期信頼性とコスト低減が実現すれば、将来有望な発電方式として注目される。

USC技術では、630℃(650℃を目指した)の発電プラント用に材料開発を行い、低価格で高強度なフェライト系鋼の適用の可能性を見出した。この材料は、発電の高効率化を目指した将来型USC用として、国内外で注目されている。

参考文献

- 1) 高木, 外: HYCOL石炭ガス化パイロットプラントの成功, 日立評論, **76**, 10, 705～710(平6-10)
- 2) K.Wada, et al.: Development of Gas Turbine for Air-Blown Gasification, ASME Paper 96-GT-88(1996)
- 3) 加原, 外: 高効率発電を目指す溶融炭酸塩型燃料電池発電システム, 日立評論, **74**, 11, 833～838(平4-11)
- 4) 菊池, 外: 超々臨界圧(USC)発電の技術開発, 日本機械学会第5回動力・エネルギー技術シンポジウム'96講演論文集, 7-12(1996-11)
- 5) 金子, 外: 蒸気温度650℃を目標としたタービン材料の開発, 火力原子力発電, No. 468, Vol. 46, 968-977(1995)