

加圧流動床（PFBC）複合発電プラントの開発

Development of PFBC Commercial Plant with High Temperature Ceramic Filters

原動機事業本部 金子祥三^{*1} 塚越敬三^{*2}
 内田聰^{*3}
 長崎造船所 木下正昭^{*4}
 技術本部 徳田君代^{*5}

加圧流動床（PFBC）複合発電プラントは、将来の電源構成の中で重要な役割が期待される石炭を燃料とした、高効率発電技術として注目されている。当社は北海道電力（株）苫東厚真発電所第3号機（出力 85 MW）において、高温・高圧下で精密脱じんを行うセラミックフィルタを採用した世界初の PFBC 商用プラントを、独自技術にて開発した。同プラントの 1997 年 12 月までの試運転実績は、プラント累積発電時間 5 621 h, 100 % 負荷累積運転時間 1 712 h, 100 % 負荷最長連続運転時間 562 h であり、PFBC 複合発電プラントとしての技術的な課題をすべて解決し、商用機として良好な運転特性を確認した。

In recent years, considerable attention has been given to the PFBC (Pressurized Fluidized Bed Combustion) plant from the standpoint of high efficiency and reducing CO₂ emissions. MHI has developed an innovative PFBC plant for the Hokkaido Electric Power Co., Inc. (HEPCO) Tomatoh-Atsuma Unit No.3, which is the first commercial PFBC plant in Japan. This plant is equipped with full capacity ceramic filters which operate at 850°C. Its trial operation is now successfully underway and the commercial operation will start in March 1998. Several problems were experienced during the initial stage of trial operation, including a pressure drop increase in the ceramic filters. All these problems were solved one by one the joint efforts of HEPCO and MHI. Load rejection tests, load swing tests, and automatic power control tests were successfully done in the spring, and tests using various kinds of coal were also successfully done in the summer of 1997.

1. まえがき

石炭は、他の化石燃料と比較して世界各地に存在し、かつ圧倒的な埋蔵量を有するため、低価格での安定供給が可能で、将来の電源構成の中で重要な役割を担うものと考えられている。しかし、石炭火力発電においては、単位出力当たりの CO₂ 排出量が多いため、環境適合性と経済性の両立が課題となる。こうした背景の下、石炭を燃料としガスタービンと蒸気タービンを組合せて高効率化を図った加圧流動床（PFBC : Pressurized Fluidized Bed Combustion）複合発電プラントが近年注目を集めている。

当社は、PFBC システムの中核を成す精密脱じん装置として、セラミックフィルタを世界で初めて採用した商用機を、北海道電力（株）苫東厚真発電所第3号機（図1参照）として建設し、現在、1998年3月の営業運転開始を目指して順調に試運転を進めている。

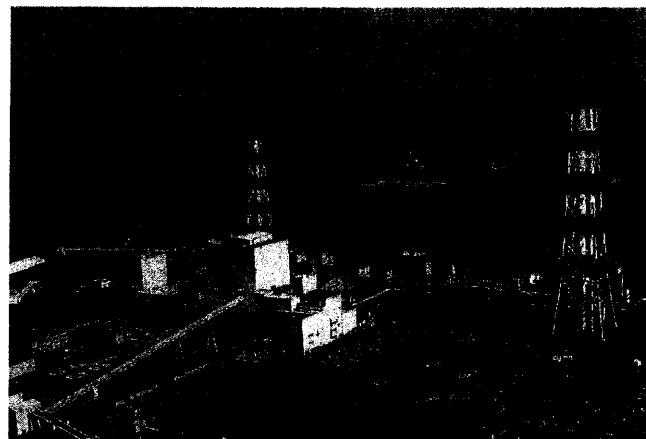


図1 北海道電力（株）苫東厚真発電所

Aerial view of Tomatoh-Atsuma Power Station

る。1997年12月末時点では、プラント累積発電時間 5 621 h, 100 % 負荷最長連続運転時間 562 h を達成する等商用機として良好な運転特性を確認した。

本報では、PFBC プラントの開発経緯から苫東厚真発電所第3号機の設計、建設及び試運転成果までを報告する。

2. PFBC 複合発電プラント

2.1 原理

PFBC 複合発電プラントは、石炭を燃料とし、ガスタービンと蒸気タービンを組合せた高効率複合発電プラントである。以下主要系統を説明する。

まず、燃料である石炭は、数 mm 以下に粗粉碎され、脱硫材（石灰石）と共に圧縮機からの高圧空気によりボイラ内へ搬送される。ボイラ内では、石炭灰や脱硫材の混合物を流動材とする流動床が形成され、層内で燃焼すると同時に脱硫反応が行われる。また、燃焼温度が微粉炭だきボイラに比べて低いことから、NOx の発生を低く抑えることができる。

石炭の燃焼により発生した熱は、層内に配置した伝熱管により効率良く吸収され、蒸気が発生される。発生蒸気は蒸気タービンへ導かれ、発電を行う。

一方、ボイラからの燃焼ガスは、サイクロンで粗脱じん、セラミックフィルタで精密脱じんされた後、ガスタービンへ導かれる。ガスタービンでは、発電を行うとともに空気圧縮機を駆動する。

ガスタービンの排ガスは、脱硝装置により NOx を除去された後、排熱回収給水加熱器により熱回収されて、煙突から排出される。

2.2 システムの特徴

(1) 高い熱効率

ボイラは、加圧下における高い酸素分圧の下で石炭を燃焼し、

*1 原動機技術センターボイラ技術部長

*4 火力プラント設計部次長

三菱重工技報 Vol. 35 No. 1 (1998-1)

*2 原動機技術センター主管兼タービン技術部次長

*5 長崎研究所次長

*3 火力プロジェクト部プラント技術二課長

十分な滞留時間を確保して熱吸収できることから、99%以上の高い燃焼率を得ることができる。また、発電効率は、ガスタービンと蒸気タービンを組合せた複合発電システムにより、従来の微粉炭火力と比較し、相対値で約5~10%向上する。

(2) 高い環境適合性

石灰石を脱硫材として炉内に投入することにより、燃焼と同時に脱硫を行うことができる。しかも、加圧流動床ボイラでは、層高を4~5mと高く取ることが可能ため、十分な滞留時間を確保して熱吸収が可能で、低いCa/Sモル比で高い脱硫率が得られる。

NOxについては燃焼温度が850~870°Cと低いため、サーマルNOxがほとんど発生しないこと、更に高い層高のため層内還元物質による還元作用を十分期待できることから、NOxを低く抑えることができる。

ばいじんについては、ボイラ出口のサイクロン及びセラミックフィルタにより、ガスタービンの許容濃度以下とするとともに、環境規制値を十分満足するレベルまで脱じんを行う。

(3) 設備設置スペースの低減

加圧によるボイラのコンパクト化や脱硫装置が不要となることから、省スペース化が可能となる。350MW級の商用プラントの場合、同規模の微粉炭火力と比較し、20~30%程度の省スペースが可能となる。

3. PFBCの技術開発経緯

IEA (International Energy Agency) のプロジェクトとして英、米、独の3箇国の出資により、1980年に世界初のパイロットプラント（出力60MW）が運転を開始し、その後1984年まで続けられた。さらに、その後スponサが英国電力庁となり、EPRI (Electric Power Research Institute)、DOE (Department of Energy) 等の参加を得て、1987年まで試験が継続された。その他、スウェーデン、独及び米国などで15MW規模程度までのパイロットプラントで試験が行われている。そして、1990年代に入つて、スウェーデン、スペイン、米国において70MW級の実証プラ

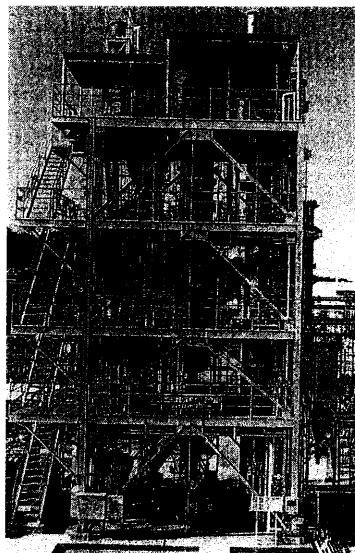


図2 2 MWthパイロットプラント
加圧流動床ボイラを開発するに当たり、諸特性を把握するために長崎研究所に設置したパイロットプラントの外観を示す。
2 MWth pilot plant

ントが相次いで運転を開始した。

当社では、常圧流動床ボイラにおける豊富な経験や加圧下での基礎研究の成果を基に、1985年ごろからPFBCの開発に着手した。まず、加圧流動床燃焼における特性を確認するため、小型加圧試験装置を用いて燃焼特性、NOx特性及び脱硫特性等の基本特性を把握することができた。さらに、1989年には2MWthのパイロットプラント（図2参照）を建設し、本格的に実用化に向けて取組んだ。

4. 北海道電力(株)苦東厚真発電所第3号機

4.1 設備仕様

北海道電力(株)苦東厚真発電所第3号機は、出力85MWでPFBC複合発電プラントとして我が国初の商用機である。

表1に設備概要を、図3に設備鳥かん図を、図4に概略系統図を示す。

表1 北海道電力(株)苦東厚真発電所第3号機設備概要

Major design particulars of Tomatoh-Atsuma No. 3 of 85 MW PFBC plant

| 項目 | 仕様 |
|----------|---------------------------|
| 形式 | PFBC複合発電方式 |
| プラント出力 | 85.0 MW |
| ガスタービン出力 | 11.1 MW |
| 蒸気タービン出力 | 73.9 MW |
| ボイラ | PFBC再熱式強制循環型 |
| 型式 | 195 t/h |
| 蒸発量 | 870°C |
| 燃焼温度 | |
| 蒸気タービン | 単車室単流排気再熱再生復水式 |
| 型式 | 16.6 MPa×566/538°C |
| 蒸気条件 | |
| ガスタービン | 開放単純サイクル一軸式 |
| 型式 | 0.95 MPa |
| 圧力 | 831°C |
| 温度 | |
| 環境値 | |
| ばいじん濃度 | 28 mg/m³N (6% O₂換算) |
| 硫酸化物 | 119 ppm (実O₂ベース) |
| 窒素化物 | 98 ppm (6% O₂換算) |
| 集じん装置 | サイクロン遠心方式 セラミックフィルタ渦過式 |
| 脱硫方式 | 石灰石による炉内脱硫方式 |
| 脱硝装置 | 乾式アンモニア接触還元式 |
| 最低負荷 | 30% |
| 負荷変化率 | 3%/min |
| 発電端効率 | 40.1% |

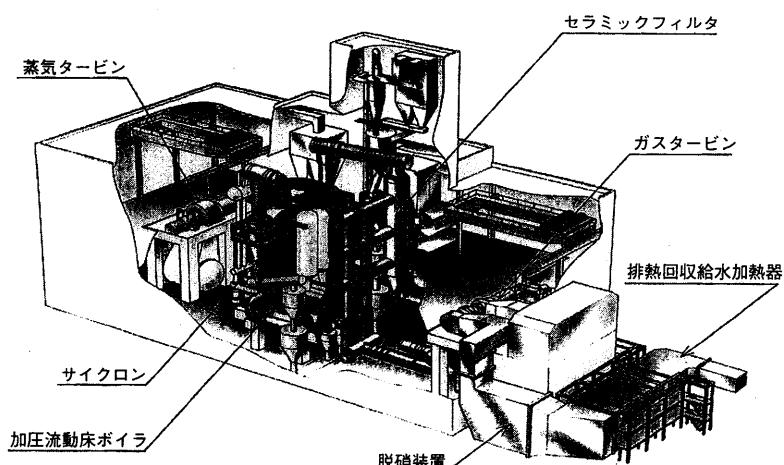


図3 北海道電力(株)苦東厚真発電所第3号機設備鳥かん図
Bird's-eye view of Tomatoh-Atsuma PFBC plant

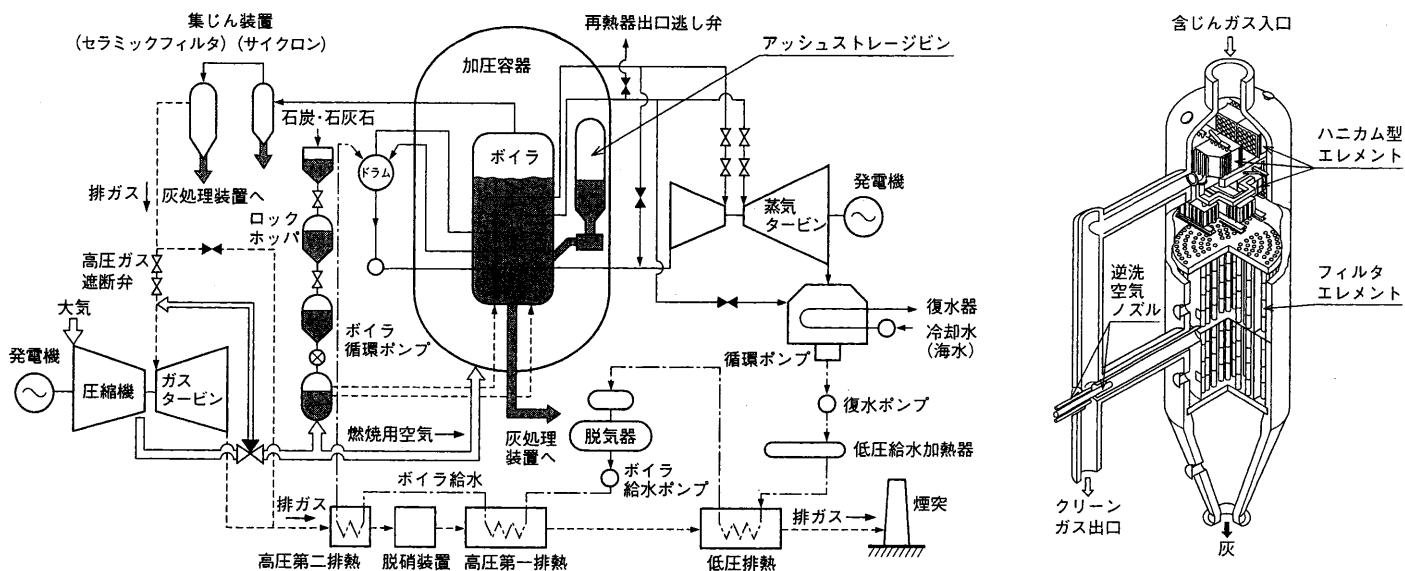


図4 北海道電力(株)苫東厚真発電所第3号機概略系統図
Flow schematic of Tomatoh-Atsuma PFBC plant

(1) 石炭・石灰石の供給系統

石炭と石灰石の供給は、高効率と信頼性を考慮し、乾式給炭方式を採用した。

石炭は堅型ローラミルで約1mmに粉碎され、常圧のビンに石灰石と共に供給され、ロックホッパで加圧後分配器に分配され、気流搬送されて炉内に供給される。

(2) 流動床ボイラ

ボイラは、蒸発量195t/hの強制循環型の再熱式で、蒸気条件は蒸気タービン入口にて16.6MPa×566/538°Cである。

流動床の燃焼温度は約870°Cで、蒸発器、過熱器、再熱器の各セルに分割され、流動床内にそれぞれの伝熱面が挿入されている。負荷変化は層高制御により行われる。なお、プラントは寒冷地であることを考慮し、屋内型となっている。

(3) 集じん装置

ボイラから出た燃焼ガスは、サイクロンにて粗集じん、セラミックフィルタにて精密脱じんされた後に、ガスタービンに導かれる。初期計画したセラミックフィルタの構造を図5に示す。

セラミックフィルタは、当初20%容量のハニカム型と80%容量のチューブ型を設置していたが、試運転の結果からダスト閉そくの心配がないチューブ型にすべて統一した。

(4) ガスタービン

ガスタービンは、三菱MW-151P型を採用した。これは一軸型でタービン3段、空気圧縮機19段にて構成されている。入口ガス圧力は0.95MPa、温度831°Cである。なおガスタービン出口には排熱回収水加熱器(SGC)が設けられ、熱回収を行っている。また、煙道中に脱硝装置(SCR)が設置されている。

(5) 蒸気タービン

蒸気タービンは、単車室単流排気の再熱再生復水式三菱SRT-35.4インチを採用した。入口蒸気条件は16.6MPa、566/538°Cである。

(6) 制御装置

プラント制御装置としては、CRTディスプレイを用いた三菱DIASYS-DDC(Direct Digital Control)方式が採用され、負荷変化はAPC(Automatic Power Control)により、また起動・停止はAPS(Automatic Plant Start-up & Shutdown

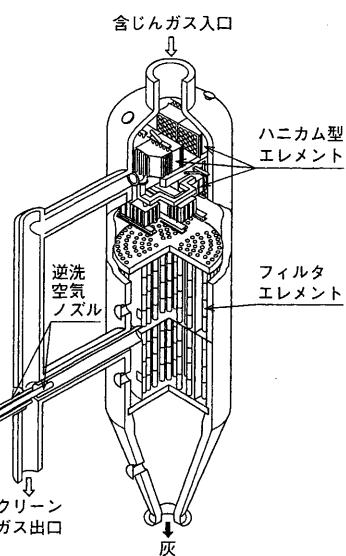


図5 セラミックフィルタ構造図
北海道電力(株)苫東厚真発電所第3号機向けに初期計画したセラミックフィルタを示す。
Ceramic filter for Tomatoh-Atsuma PFBC plant

System)によって全自動で運転が行えるようになっている。

4.2 設計、製作と建設

(1) 設計

本プラントの基本計画は、当社の原動機技術センターで行われた。また、設計に際しては、長崎研究所に設置された2MWthパイロットプラントほかにおける数々の研究成果が有効に活用された。

(2) 製作

PFBC(加圧容器、流動床ボイラ)、セラミックフィルタ、蒸気タービン、脱硝装置及び制御装置は、長崎造船所で製作された。また、ガスタービンは高砂製作所で製作された。

(3) 建設

建設場所が寒冷地であることを考慮し、PFBCは長崎造船所にて大型モジュールとして組立てを完了し、現地にはバージ船にて海上輸送した。PFBCモジュールには加圧容器(流動床ボイラを内蔵)、サイクロン、セラミックフィルタ、主要配管が組込まれており、総重量は3000tである。これを長崎から北海道まで約10日間で輸送した。

4.3 試運転実績

(1) 概要

1995年5月にガスタービンスピiningを行い、本格的な試運転を開始した。

なお、1997年12月までの試運転実績は次のとおりである。

プラント累積発電時間：5621h

100%負荷累積運転時間：1712h

100%負荷連続運転時間：562h

562hの100%負荷連続運転は、1997年12月4日から12月28日にかけて実施した。

同年3月には、客先社内試験として蒸気タービン及びガスタービンの各認可出力試験(S/T: 75.3MW, G/T: 13.6MW)と4/4負荷遮断試験を実施し、良好な結果を得た。

さらに、多炭種対応試験として、基準炭のほかに、高S炭、高水分炭及び高灰分炭の計4炭種を用いて各種特性確認を

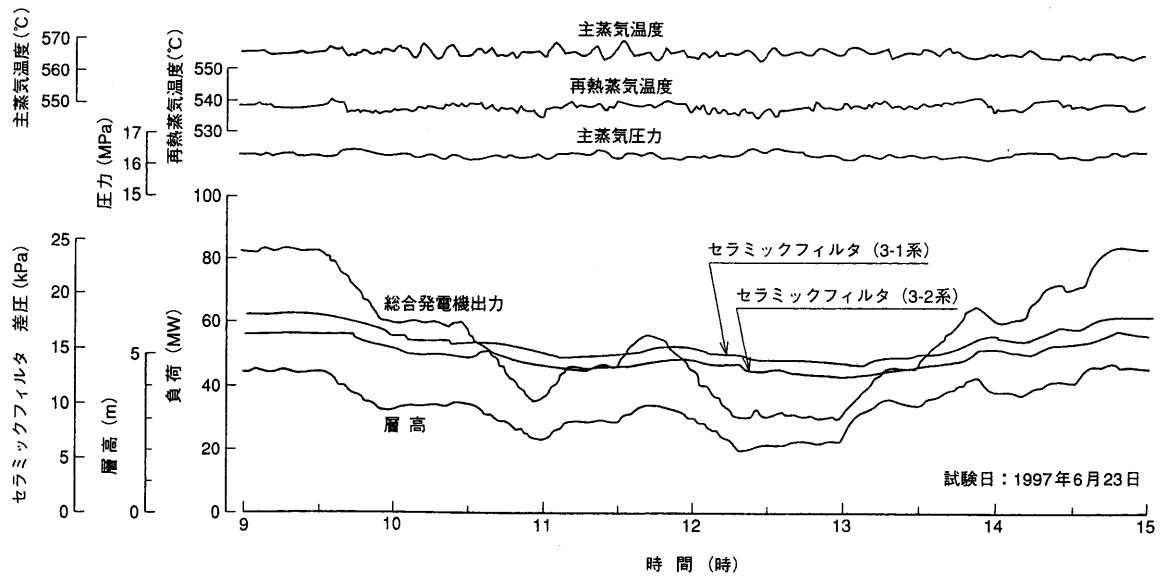


図 6 負荷変化特性確認試験 1997年6月23日に行った中給運用を模擬した負荷変化特性確認試験結果を示す。
Operation results of load swing test

表 2 環境特性
Environmental characteristics

| 項目 | 単位 | 環境規制値 | 通常運転時 | 備考 |
|--------|-----------------------------------|-------|-------|------------------------|
| ばいじん濃度 | mg/m ³ N ^{*1} | 28 | 5以下 | |
| SOx 濃度 | ppm ^{*2} | 119 | 10 | S分: 0.9%, Ca/S: 3 |
| NOx 濃度 | ppm ^{*1} | 98 | 40 | N分: 1.6%, 脱硫入口 200 ppm |

注) * 1 6% O₂換算 * 2 実O₂ベース

実施し、良好な結果を得た。

(2) 環境特性

ばいじん、SOx 及び NOx 共に、表 2 に示すとおり良好な特性を確認した。

①ばいじん特性：セラミックフィルタについては当初高負荷帯での差圧上昇が課題であったが、1997年1月にハニカム型フィルタ部をチューブ型フィルタへ換装した結果、セラミックフィルタは計画どおりの差圧で安定した運転が可能となった。また、ばいじん濃度は 5 mg/m³N 以下と極めて低い値で維持されている。

②硫黄酸化物：S 分 0.9 % の高 S 分炭で試験を行い、Ca/S モル比 3 にて SOx 濃度 10 ppm 以下の運転が可能なことを確認した。

③窒素酸化物：基準炭 (N 分 1.6 %) で試験を行い、空気比 1.2 にて脱硝入口 200 ppm、出口 40 ppm (6% O₂換算) での運転が可能なことを確認した。

(3) 負荷変化率

1997年5月から6月にかけて協調制御モードでのAPC調整を実施し、高負荷域では 3%/min、低負荷域では 2%/min での良好な負荷追従性を確認した。中央給電指令（中給）による運用を模擬した負荷変化特性結果を図 6 に示す。

(4) 最低負荷

最低負荷は計画 30 % に対し、燃焼性、NOx 特性等も問題なく、安定した運転が可能なことを確認した。

(5) 起動特性

APS 制御装置を用いた全自動起動の調整を 1997 年 5 月から実施し、良好な結果を得て調整を終了した。図 7 に制御装置と中

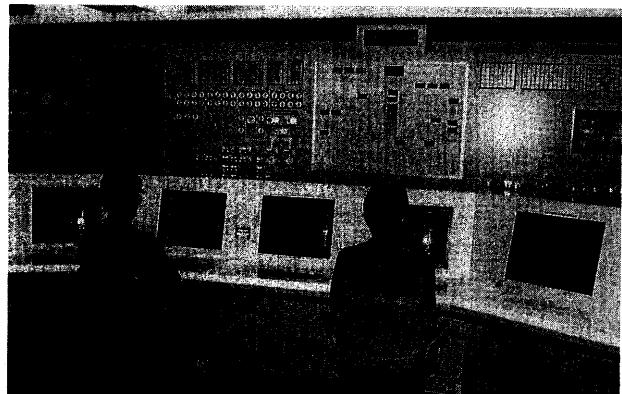


図 7 中央制御室（三菱 DIASYS-DDC 制御装置） 北海道電力(株)苫東厚真発電所第3号機の中央制御室を示す。
Control room of Tomatoh-Atsuma Power Station No.3 (Mitsubishi DIASYS Control System)

央制御装置を示す。

(6) 燃料供給設備

燃料供給設備としては、ドライフィード方式を採用し、ロッ クホッパにて加圧した後、分配器から一次空気にて炉底の燃料ノズルに気流搬送するシステムを採用している。試運転当初、燃料詰り等の問題が発生したが、対策実施後は順調に運転を続いている。燃焼試験時の灰中未燃分は 1.5 % 程度と低い値を維持している。

5. ま と め

PFBC として国内初の商用プラントとなる北海道電力(株)苫東厚真発電所第3号機は、本報に記載したとおり順調に運転が進捗し、基準炭についての各種特性確認試験をすべて終了して、1997年7月から多炭種確認試験に移行し、良好な結果を得て終了した。今後は、長期安定連続運転を確認した後、1998年3月の営業運転開始を予定している。

当社としては、この良好な結果を基に大容量 PFBC の設計を行うとともに、更に画期的な高効率プラントとしての A-PFBC “POSEIDON” の開発を行っている。