

加圧流動床ボイラの運転実績 —北海道電力(株)苫東厚真発電所第3号機—

Operation Results of PFBC Commercial Plant
with High Temperature Ceramic Filters

原動機事業本部 金子 祥 三^{*1}

長崎造船所 木下 正 昭^{*2} 浦 方 久 隆^{*3}

技術本部 徳田 君 代^{*4} 橋 本 彰^{*5}

加圧流動床 (PFBC) 複合発電プラントは、地球資源の有効利用及びエネルギーセキュリティの観点から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 システムを独自技術にて開発した。同プラントは平成 7 年 5 月の試運転開始以来、加圧流動床複合発電プラントとして技術的な課題をすべて解決し、平成 10 年 3 月に国内初の PFBC 商用プラントとして運転を開始した。

Pressurized Fluidized Bed Combustion (PFBC) plants have attracted considerable attention in high efficiency and CO₂ emission reduction. MHI developed an innovative PFBC plant for Tomato-Atsuma Unit No.3 of Hokkaido Electric Power Co., Inc. (HEPCO), Japan's first commercial PFBC. This plant uses full-capacity ceramic filters operated at 850°C. Trial operation started in May 1995. Problems experienced during initial trial operation included a pressure drop increase in ceramic filters. HEPCO and MHI jointly solved these problems enabling the start of commercial operation in March 1998.

1. ま え が き

エネルギー資源の中で、石炭はその豊富な埋蔵量と広範囲な分布により安定した供給が続くと予想され、今後とも石油、天然ガス、原子力などのバランスの中で重要な役割を演じていくと考えられている。その石炭を利用する高効率発電システムの開発は、CO₂問題を含めた地球環境問題に対する有効な対策となるだけでなく、エネルギー資源の有効利用の見地からも重要な対策の一つとなる。加圧流動床複合発電プラント (PFBC) は、このような石炭利用の高効率発電システムとして近年注目を集めるようになってきた。

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)苫東厚真火力発電所第3号機 (図1参照) として建設し、その後試運転を順調に終了し、同プラントは平成 10 年 3 月に営業運転を開始した。試運転期間中の運転実績はプラント累積発電時間 6 292 h, 100 % 負荷累積発電時間 1 914 h となり、PFBC プラントの商用化に成功した。

本報では、北海道電力(株)苫東厚真火力発電所第3号機の試運転成果を報告する。

2. 加圧流動床複合発電プラントの原理と特徴

PFBC 複合発電プラントは、石炭を燃料とする複合発電プラントである。以下に原理と特徴を述べる。

石炭は、数 mm 以下に粉碎され、脱硫材 (石灰石など) とともにボイラ内へ供給される。燃焼空気はガスタービンで駆動される空気圧縮機によりボイラへ供給され、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層が形成され、石炭は空気圧縮機からの高圧空気と攪拌され、1.0~1.5 MPa (10~15 ata) の加圧下で効率良く燃焼する。層内では、燃焼と同時に脱硫材による SO₂ の吸収が行われる。加圧による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である。

さらに、燃焼温度が 850~900°C と比較的低いことから、NO_x 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、伝熱特性の良好な流動層内に設置した伝熱管により効率良く蒸気へ回収され、蒸気タービンを駆動し発電を行う。ボイラからの燃焼ガスは、サイクロンで粗脱じん、さらにセラミックフィルタで精密脱じんされた後、ガスタービンを駆動する。ガスタービンは空気圧縮機を駆動するとともに、その余剰動力で発電を行う。このため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

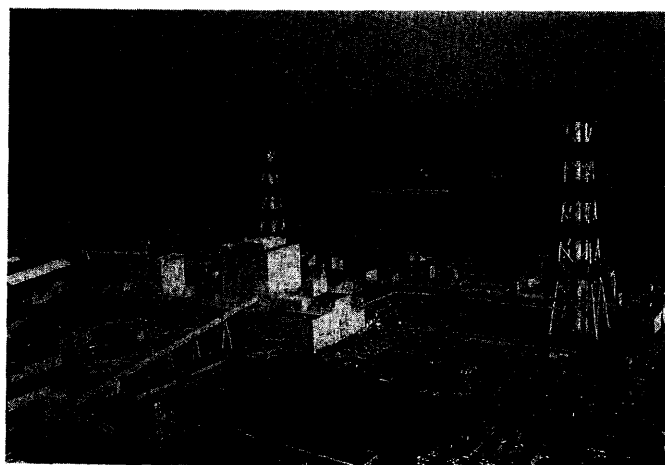


図1 北海道電力(株)苫東厚真火力発電所
View of Tomato-Atsuma power station

*1 原動機技術センターボイラ技術部長

*2 火力プラント設計部次長

*3 火力プラント設計部主務

*4 長崎研究所次長

*5 長崎研究所火力プラント研究推進室長

が構成され高い発電効率が得られる。すなわち従来の微粉炭火力と比較し、相対値で5～10%向上する。

ガスタービンの排ガスは、必要に応じて脱硝装置でNO_xを規制値以下になるよう取除かれ、さらにその熱を排ガスクルーで回収した後、煙突より排出される。

3. 北海道電力(株)苫東厚真火力発電所第3号機

3.1 開発経緯

当社では、加圧流動床複合発電プラントの優位性にいち早く着目し、1980年代後半にはフィジビリティスタディや基礎試験を開始した。そしてそれらの成果を実用化に結びつけ、実機設計データを取得するため、当社長崎研究所に2MWthパイロットプラントを建設し、1990年より試験を開始して本格的に実用化に向けて取組んだ。

パイロットプラント試験では、燃焼特性、環境特性や伝熱特性といった静的な特性だけでなく、負荷変化特性や運転特性など動的な特性についてもデータの取得を行い、さらに周辺機器を含むプロセス技術の確立についても試験を実施した。

これら一連の試験は北海道電力(株)との共同研究として行われ、PFBCを商用機として実用化するための貴重なデータが採取された。その成果を国内初のPFBC商用機となる苫東厚真発電所第3号機の設計に反映した。

3.2 設備仕様

北海道電力(株)苫東厚真火力発電所第3号機は、出力85MWで加圧流動床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2に設備鳥瞰図を、図3に概略系統図を示す。

(1) 石炭・石灰石供給系統

石炭と石灰石の供給は、石炭ガス化炉で培った高い信頼性と効率向上を考慮し、乾式給炭方式を採用した。

石炭は縦型ローラミルで1mm程度に粉砕され、あらかじめ所定の粒度に調整された石灰石とともに、ロックホッパシステムにて常圧ビンから加圧ホッパへ供給された後、分配器にて分配され、ガスタービン圧縮機出口の空気の一部を利用し搬送されて炉内に供給される。最終的には、24本の燃料ノズルに供給される。

表1 北海道電力(株)苫東厚真火力発電所3号機設備概要
Major design particulars of Tomato-Atsuma No.3 of 85 MWe PFBC plant

項目	仕様
形式	加圧流動床複合発電方式
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	
型式	加圧流動床再熱式強制循環型
蒸発量	195 (t/h)
燃焼温度	870°C
蒸気タービン	
型式	単車室単流排気再熱再生復水式
蒸気条件	16.7 MPa×566/538°C
ガスタービン	
型式	開放単純サイクル軸式
圧力	0.95 MPa
温度	831°C
環境値	
ばいじん濃度	28 mg/m ³ N
硫酸化合物	119 ppm
窒素化合物	98 ppm
集じん装置	サイクロン遠心力式 セラミックフィルタ汚過式
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 %

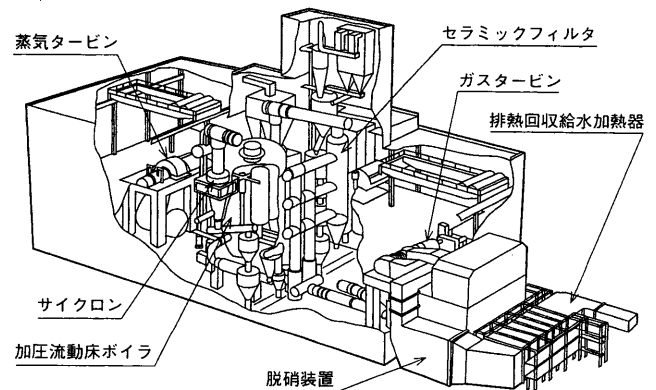


図2 北海道電力(株)苫東厚真火力発電所第3号機
Bird's-eye view of Tomato-Atsuma PFBC plant

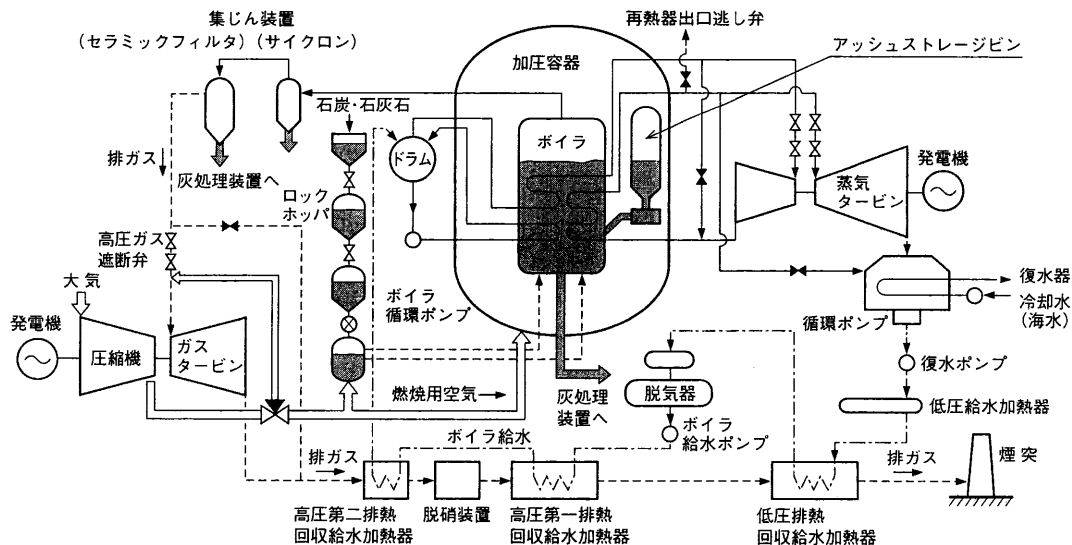


図3 北海道電力(株)苫東厚真火力発電所第3号機概略系統図
Flow schematic of Tomato-Atsuma PFBC plant

(2) 流動床ボイラ

ボイラ蒸発量 195 t/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 16.7 MPa×566/538°C である。

流動層の燃焼温度は約 870°C で、流動層内は蒸発器、過熱器、再熱器の各セルに分割され、それぞれの伝熱面が挿入されている。ボイラの負荷変化は層高制御により行われる。流動材の移動を行う層高制御装置は、夕張 40 t/d 流動床石炭ガス化炉に採用し実績のあるパルス制御式 L パルプと、新たに開発した蒸気エゼクタにて吸引する方式を組合せた方式とし、パイロットプラントにて検証し実機に適用した。

(3) 集塵装置

ボイラから出た燃焼ガスはサイクロンにて約 80 % のダストが捕集され、次にセラミックフィルタにて残りの 99 % 以上が脱じんされた後、ガスタービンに流入する。一定時間ごとに逆洗を行いフィルタ表面に付着したダストをはく離させ下部ホッパに落下させる。

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。セラミックフィルタの構造を図 4 に示す。

(4) ガスタービン

ガスタービンは三菱 MW-151 P 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 0.95 MPa、温度 831°C である。なおガスタービン出口には排熱回収給水加熱器が設けられ、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 in を採用した。入口蒸気条件は 16.7 MPa、566/538°C である。

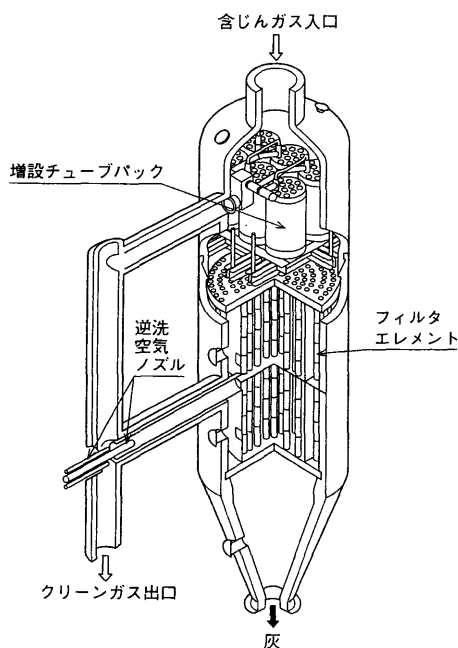


図4 セラミックフィルタ構造 北海道電力(株)苫東厚真火力発電所3号機向けのチューブ型に換装後のセラミックフィルタの構造を示す。
Ceramic filter for Tomato-Atsuma PFBC plant

(6) 制御装置

プラント制御装置としては、CRT Display を用いた三菱 DIASIS-Direct Digital Control 方式が採用され、負荷変化あるいは起動・停止等は全自動運転が行えるようになっている。

3.3 スケジュール

表2に本プラントの開発と実用化のスケジュールを示す。

1990年10月に北海道電力(株)との共同研究を開始し、本プラントの開発と実用化のスタートとなった。共同研究では、その後2年間にわたり2 MWth パイロットプラントでの燃焼試験と85 MW プラントの基本計画を行った。その後、各機器の設計・製作が当社長崎造船所(加圧容器、流動床ボイラ、セラミックフィルタ、蒸気タービン及び制御装置)並びに高砂製作所(ガスタービン)にて行われ、現地においても1993年6月に着工となり、本格的な工事が開始された。そして1994年11月にはボイラモジュール(加圧容器、流動床ボイラ、サイクロン、セラミックフィルタ、主要配管を含む)の海上輸送が行われた。1995年5月にガスタービンスピン運転をもって試運転が開始され、1998年3月に商用運転を開始した。その後順調に運転され現在に至っている。

3.4 試運転実績

(1) 概要

1995年5月の試運転開始から1998年3月までの試運転期間中の運転実績は、次のとおりである。

プラント累積運転時間 : 6292 h

100 % 負荷累積発電時間 : 1914 h

100 % 負荷連続発電時間 : 562 h

1997年3月には、客先社内試験として蒸気タービン (S/T) 及びガスタービン (G/T) の各認可出力試験 (S/T : 75.3 MW, G/T : 13.6 MW) と 4/4 負荷遮断試験を、同年12月にはプラント性能試験を実施し、良好な結果を得た。

さらに、多炭種燃焼試験として、基準炭のほかに、高硫黄分炭、高水分炭及び高灰分炭の計4炭種を用いて各種試験を実施し、各炭種特性を把握し今後の運転指針を得た。

(2) 環境特性

ばいじん、SO_x 及び NO_x 共に、表3に示すとおり良好な特性を確認した。

① ばいじん特性 : 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 硫黄化合物 : 硫黄分 0.9 % の高硫黄分炭で試験を行い、Ca/S モル比 3 にて SO_x 濃度 10 ppm 以下での運転が可能であることを確認した。

③ 窒素化合物 : 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) での運転が可能であることを確認した。

(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。中給運用を模擬した負荷変化特性結果を図5に示す。

(4) 最低負荷

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

(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月より実施し、良好な結果を得て調整を終了した。

表2 開発及び実用化スケジュール
Schedule of development

項目	年度	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
北海道電力(株)との共同研究 基本計画		■	■	■					
設計・製作			■	■	■	■	■		
土木工事・据付					■	■	■	■	■
試運転							■	■	■

表3 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% 脱硝装置入口: 200 ppm

注) *1: 6% O₂換算 *2: 実 O₂ベース

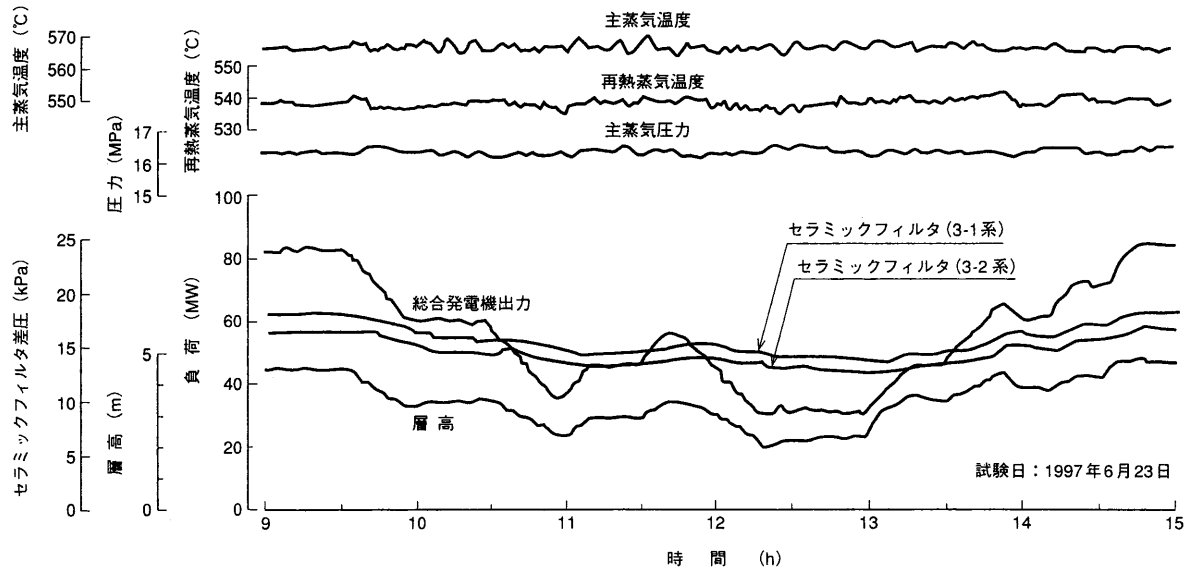


図5 負荷変化特性確認試験結果 平成9年5月から6月にかけて行った中給運用を模擬した負荷変化特性確認試験結果を示す。
Operation results of load swing test

(6) プラント性能

1997年12月にプラント性能試験を実施した。この結果定格負荷での発電端効率、41.2%あることを確認した。これは同規模、同蒸気条件での微粉炭火力と比較して、約10%良好な値となっている。

(7) 加圧流動床ボイラ

流動床の燃焼温度は約870°Cで、層内の温度アンバランスも小さく、また燃焼試験時の灰中未燃分は、1.5%程度と低い値が維持されており、良好な燃焼が行われていることが確認された。

PFBCの特徴として負荷変化を層高制御にて行うが、本プラントの層高制御装置にはパルス制御式Lバルブ(負荷増加時)と蒸気エゼクタによる吸引方式(負荷減少時)を採用した。前述のとおり所定の負荷変化に十分対応可能であることを確認した。

(8) 燃料供給設備

燃料供給設備としては、乾式給炭方式を採用し、ロックホッパシステムにて加圧した後、分配器から一次空気に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。ロックホッパシステムにおいては、常圧系と加圧系間の気密を保つためボール弁タイプの気密弁が採用されており、そのサイクルタイムごとに開閉が繰返される。同弁の作動回数は既に10,000回を超

えているが特に問題なく運転されており、その信頼性、耐久性が確認された。燃料搬送管については試運転当初、燃料詰り等の問題が発生したが、パージ方法の改善等対策実施後は順調に運転を続けている。

(9) セラミックフィルタ

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。しかしながら試運転当初高負荷帯での差圧上昇が課題となったため、ダスト閉そくの心配のないチューブ型へ換装した結果、計画どおりの差圧で安定した運転が可能となった。

4. ま と め

PFBCとして国内初の商用プラントとなる苫東厚真発電所第3号機は、本報に記載したとおり順調に試運転が進捗し、基準炭については計画どおりの性能確認を終了した。また、1997年7月からは多炭種確認試験を実施し予想どおりの特性を確認し、1998年3月に営業運転を開始した。

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、PFBC技術をベースに更に画期的な高効率プラントとしての高度加圧流動床複合発電システム(A-PFBC)の開発を行っている。