

特 集 論 文

石油コークス専焼発電プラント
運転実績Continuous Operation and Maintenance
Results of Power Station with Petroleum
Coke Firing Boiler

平 山 靖 記^{*1}
Yasunori Hirayama

牧 浦 秀 治^{*2}
Shuji Makiura

菱 田 正 志^{*3}
Masashi Hishida

荒 川 善 久^{*4}
Yoshihisa Arakawa

山 本 禎 久^{*5}
Yoshihisa Yamamoto

岡 元 章 泰^{*6}
Akiyasu Okamoto

石油コークス（以下 PC：Petroleum Coke）は石油精製で発生する副産物である。近年は石油精製での深絞り技術発展に伴い、より低揮発分・低品位化した PC が世界的に過剰となる事が予想されている。これを発電用燃料として使用すれば、今後 5～20 年間で最も経済性が高い燃料になると見込まれる。こうした状況を背景に当社は、（株）フロンティアエネルギー新潟向けに PC 専焼発電プラントを建設し、2005 年 7 月から営業運転を開始した。重油など助燃燃料との混焼による PC 焚きボイラが多い中、PC 専焼で安定燃焼可能な発電用大型ボイラとして国内外の注目を集めている。本報では通常運転と、2006 年 4 月の初回定検実績も含めた、PC 専焼発電プラント技術の特徴を紹介する。

1. PC（石油コークス）とは

PC は石油精製で生じる副産物である（図 1）。ガソリン・重油などの主要燃料を精製した減圧蒸留残渣油（VR）をコーキング装置にかけ、ガス中から灯油・軽油分を抽出した残留分である。

表 1 に代表的な瀝青炭や VR との比較を示す。PC は瀝青炭の約 1.24 倍の発熱量を有している。発熱量で試算するに、同一発電量に対し、PC は瀝青炭の 8 割（1/1.24）の量で済むと判断できる。また一般燃料よりも硫黄分や重金属を多く含み、かつ揮発分が少ないためボイラでの燃焼時に、伝熱面に硫化還元腐食や

表 1 計画 PC と他燃料との一般的な性状比較

	PC	瀝青炭	VR
高位発熱量（気乾）(kJ/kg)	34893	28180	41850
揮発分（気乾）(wt%)	9.9～13	26.2	—
固定炭素（気乾）(wt%)	87～90	56.3	20～30
硫黄分（無水無灰）(wt%)	<6.5	0.40	4.0～6.0
バナジウム（ppm）	<1500	—	<300

高温酸化腐食が発生し、安定燃焼・運転が難しいことから低品位燃料として位置付けられており、一般的に瀝青炭より燃料費が安価である。したがって発電コストとしても、瀝青炭焚き発電プラントに対して十分な競争力を有している。

当社ではこの点に着目し、瀝青炭焚き発電プラントと比較して低コストであり、かつ資源の有効活用にもつながる、PC 専焼発電プラントを建設した。

2. PC 専焼発電プラント実現へ

本計画では、燃料安定供給の観点から従来品と比較して高硫黄・高バナジウム PC の使用を前提とした。そのため安定燃焼以外にも、硫黄による硫化腐食や、バナジウムによる高スラッキング性への対策も必要で、以下の技術課題を解決する必要があった。本項ではこれらを個別に紹介する。

2. 1 ミルダイレクトシステムによる PC 専焼技術

固形燃料を安定燃焼させるには、燃料を微粒子に粉

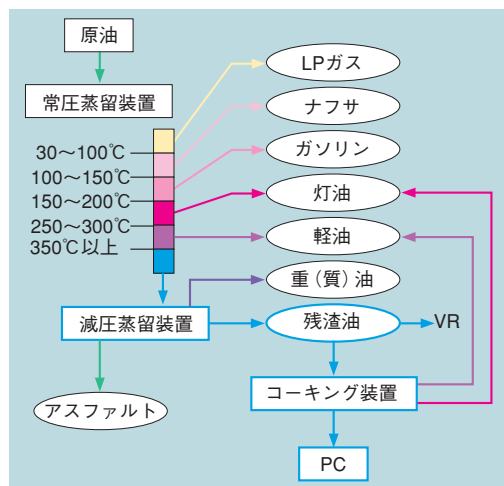


図 1 PC 生成過程概要

^{*1} 長崎造船所プラント建設部建設課

^{*2} 長崎造船所プラント建設部長

^{*3} 長崎造船所ボイラ技術部長

^{*4} 長崎造船所ボイラ技術部主幹

^{*5} 長崎造船所ボイラ技術部ボイラ設計課

^{*6} 長崎研究所燃焼・伝熱研究室主席

砕して、燃焼用空気と共に火炉内へ吹き込み、火炉の輻射熱で自然着火させる方式がある。これは石炭焚きボイラでは一般的に実用化されている技術で、A/C (Air by coal) と呼ばれる。微粉燃料に対する燃焼兼燃料搬送用空気量を少なくするほど、燃料濃度が濃くなるために着火が安定する。そのため難燃性固形燃料ではA/Cを低く設定する。

A/Cを容易に小さくできるシステムとして、粉碎燃料をビンに捕集して払い出すビンシステムが知られており(図2)、1980年代に実用化され始めたPC専焼ボイラも、このビンシステムを適用したものである。

これに対しダイレクトミルシステム(図3)は、サイクロンや微粉燃料を貯めるビンなどの設備が不要なので、立地スペースや運転・補修コスト低減といった点で有利であるが、A/C下限値がビンシステムと比較して高く、PCを安定着火させるためには技術的な課題も残っていた。

当社では建設・発電コスト低減の観点からダイレクトミルシステムの採用を念頭に技術的検討を行った結果、これら課題についても克服できると判断し、ダイレクトミルシステムによるPC専焼技術を採用した。

A/C低減が難しい点を補うため、次の技術によってPCの安定着火を図ることにした。

2. 1. 1 バーナ配置の最適化

図4は瀝青炭焚きボイラで実績の多いCCF (Circular Corner Firing) 燃焼方式と、CUF (Circular Ultra Firing) 燃焼方式のバーナ配置および火炎を比較したものである。

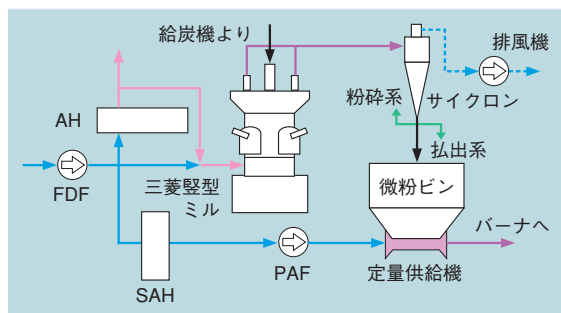


図2 ビンシステム（間接燃焼方式）

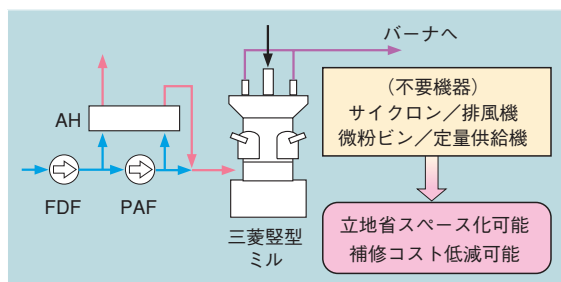


図3 ダイレクトミルシステム（直接燃焼方式）

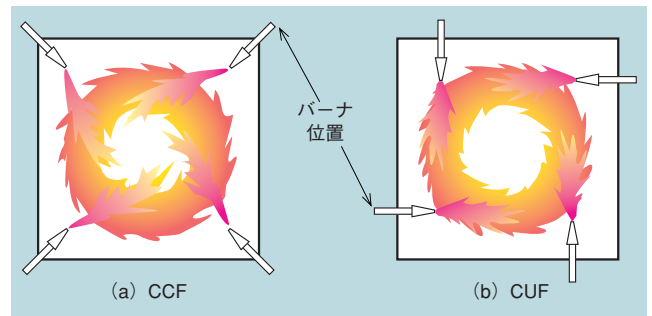


図4 CCFとCUFの比較

CUF燃焼方式は、輻射強度の高い火炉壁中央寄りにバーナを配置し、各火炉壁からのバーナ火炎で旋回燃焼を形成させることにより、難燃性PCを低負荷でも安定着火させることができる。当社ではこのCUF燃焼方式を採用した。

2. 1. 2 PC専用バーナの開発とPC粉碎技術

バーナには、石炭焚き低NO_x燃焼バーナとして定評のある最新型バーナをベースに、濃淡分離性能及び保炎機能の強化を図ったPC焚き専用バーナを採用した(図5)。

またミル（燃料粉碎机）では、燃焼性改善のために“#200パス95%以上”という高微粉度の実現に向け、最新型の回転式分級機を内蔵した堅型ミルを採用した。

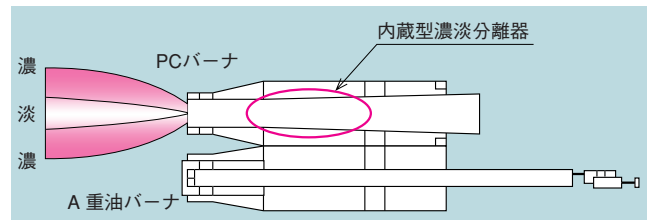


図5 難燃性石油コークス専用バーナ

2. 2 高バナジウムによる熔融灰対策

酸化バナジウムは表2のように、酸素化含量やその他燃料性状によっては低融点灰を形成し、スラッシング・ファウリングによりボイラの連続運転に支障を来す可能性がある。

そこで実機を模擬した灰付着特性確認試験装置を作成し、灰の付着・剥離特性を把握した上で、チューブピッチとスツップロウ配置を最適化した。またMgO系燃料添加剤を投入し、灰融点を上昇させることで伝熱管表面での熔融灰生成を軽減している。

表2 酸化バナジウム化合物

化合物	融点(℃)	化合物	融点(℃)
V ₂ O ₄	1970	Na ₂ O・3V ₂ O ₅	560
V ₂ O ₅	690	10Na ₂ O・7V ₂ O ₅	573

2. 3 高硫黄分、高バナジウムによる腐食対策

腐食対策については、炉内からAHにかけて場所ごとに対策が異なる。それぞれ以下にまとめる。

2. 3. 1 火炉水冷壁・バーナゾーン

VR 焼きボイラ等で実績のある高 Cr 溶射被膜を施工し、水冷壁を保護している。

2. 3. 2 過熱器

高温部に高 Cr ステンレス鋼管を採用し、腐食減肉対策としている。

2. 3. 3 脱硝装置

灰付着防止のため、ピッチの大きい触媒を採用した。また除灰装置には蒸気式スツブロワを採用せず、振動によって付着灰を除去する音波式スツブロワを採用した。

2. 3. 4 回転式空気予熱器 (AH)

硫酸灰による低温端エレメント腐食対策として、AH 空気側入口に蒸気式空気予熱器 (SAH) を配置して AH 出口排ガス温度を酸露点以上に保つとともに、低温端エレメントにセラミックスを採用し、エレメントの腐食劣化及び灰詰りを軽減した。

3. 設備概要と運転状況

3. 1 主要機器仕様と設備概略系統

<ボイラ>

型式：単胴自然循環型 最大蒸発量：428 t/h
 蒸気条件：12.95 MPa × 541 °C (再熱器なし)
 燃料：PC 専焼 (通常運転) / A 重油 (起動・助燃)
 バーナ段数：PC3 段 (ダイレクト着火) / A 重油 2 段
 主蒸気温度制御：給水スプレイ式 (1 段のみ)
 通風方式：平衡通風 (火炉ドラフト：- 0.2kPa 制御)

<タービン>

型式：単車室衝動反動式軸流排気型再生復水タービン
 蒸気条件：12.45 MPa × 538 °C
 定格速度：3 000 min⁻¹
 排気条件：- 93.3 kPa
 タービン段落数：高压 13 段 / 低压 3 段
 抽気段数：5 段

<発電機>

出力 (発電端)：122 223 kVA / 110 000 kW

図 6 に本発電プラントの設備概略系統を示す。

3. 2 運転状況

PC 専焼負荷帯は、計画どおりボイラ負荷 35 ~ 100 % であることを確認した。一般的な瀝青炭焼きボイラの専焼負荷帯と比較して、遜色のないものである。

図 7 に実機の PC バーナ火炎を示している。100 % 負荷、35 % 負荷とも安定した燃焼状態であり、難燃性 PC に対する安定燃焼技術が当初の性能を発揮した結果である。

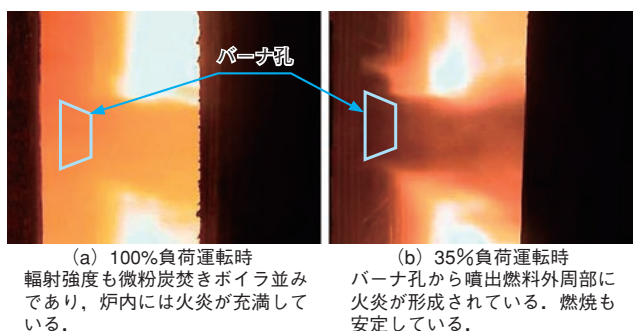


図7 PC 専焼時の PC バーナ火炎

3. 3 燃焼灰の処理方法

炉底灰は水封式炉底コンベア、フライアッシュ (以下 FA : Fly Ash) は真空引きにて回収している。灰処理設備としては石炭焼き発電プラントと同じだが、高硫黄分灰であるため、炉底コンベア / FA 処理設備それぞれで、以下の工夫をしている。

●水封式炉底灰コンベア

循環式シール水のため、炉底灰硫黄分によりシール水が酸性に偏る。このため苛性ソーダを注入し、水質を中性に自動制御している。

●FA 処理設備

灰輸送管内の温度が低下すると、灰中の硫酸あるいは硫酸化合物が空気中の水分を吸湿して粘性を帯びてくる。このため灰輸送管の空気取入口に

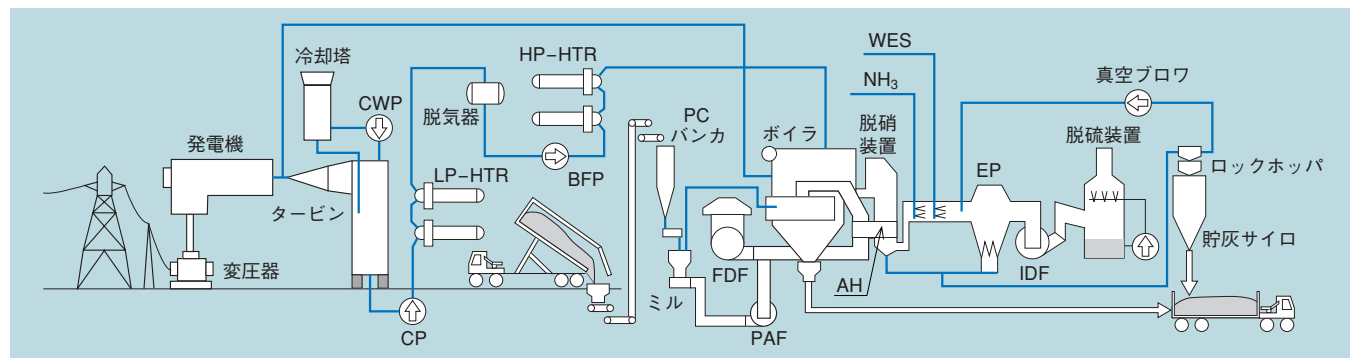


図6 設備概略系統



図8 炉内・煙道機器灰付着状況

SAHを設置し、かつ冬季の気温低下対策として灰輸送管にスチームトレースを設置して、灰輸送管内温度を酸露点以下としない設備としている。

4. 初回定検での設備点検結果

2006年4月、約30日間で初回定検が実施された。タービン／発電機については開放点検を実施せず、主にボイラ及び付属設備の点検を実施した。

以下に各部の点検結果をまとめ、当ボイラに採用した技術の評価を行う。

4. 1 溶融灰対策

基礎研究に基づいてチューブピッチとスリーブブロワ配置とを最適化した結果、過熱器及び節炭器エレメントにはチューブ間ブリッジを伴うような強固な灰付着はなく、連続運転にとって良好な灰付着状態を保つことができることを確認した。図8は耐圧部の灰付着状況だが、過熱器／節炭器共にブリッジもなく、良好であることが分かる。

4. 2 腐食対策

4. 2. 1 耐圧部（火炉／過熱器／節炭器）

火炉下部については溶射被膜の残留膜圧、それ以外の耐圧部については肉厚計測を行って高温酸化腐食に対する評価を行った。結果、溶射被膜・耐圧部肉厚とも健全で、溶射被膜と燃料添加剤による腐食対策も計画どおり機能していることを確認した。

4. 2. 2 脱硝装置

3層の触媒層があるが、最上流側層（第1層）の上流側に若干の灰付着・目詰まりがあった程度で、予想範囲に収まっている（図9）。ピッチ拡大触媒と音波式スリーブブロワの組合せにより、脱硝触媒に対する灰堆積防止策が当初の機能を発揮した結果である。

4. 2. 3 AH

AHについても全エレメント（高・中・低温）について目詰まり・腐食は発生しておらず、またバスケットやシール部についても同様であった。一例として図



図9 脱硝装置内部点検

10に高温端・低温端エレメントの写真を示す。

AH スリーブブロワを高温・低温両側に配置した。運用は以下の通りである。

高温側：1回／週運転

低温側：3回／日運転

結果、連続運転中も顕著な差圧の上昇はなかった。上記AH スリーブブロワ運用も適正であったと判断する。

4. 3 水洗

ユニットを停止した場合、高硫黄分灰が吸湿、硫酸

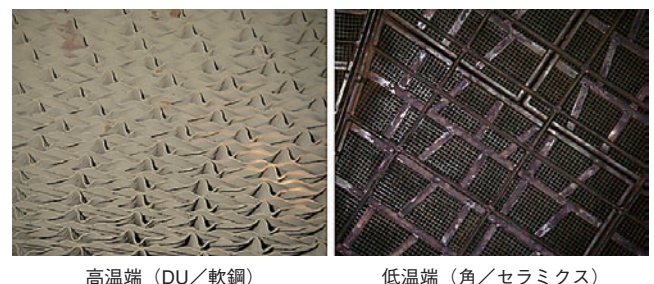


図10 AHエレメント目詰まり状況

化することにより、特にボイラ排ガス系統上の機器で腐食が発生することが懸念される。

この対策として、長期停止（3日間以上を目安）の場合はEPを水洗することとしている（図11）。



AH 水洗・排水状況

EP 水洗・灰排出状況

図11 煙道機器水洗状況

5. 今後の課題

前述のとおり、PC専焼ボイラの安定運転に関しては一定の成果を取めたが、FA処理では、連続運転や定検時作業性の一部に課題も発生した。

本項ではこの事例を紹介し、PC専焼ボイラのFA処理設備に対する改善案をまとめる。

5.1 灰処理設備の閉塞（連続運転中の事例）

5.1.1 FAシステム概要

真空ブロワ（100%容量機×2；1台予備）による真空引きFA処理装置で、バグフィルタによって搬送空気と分離した灰を、ロックホッパを介して貯灰サイロに貯灰する。これを定期的に貯灰サイロからトラックへ払い出している。

真空領域である灰輸送管と、大気開放である貯灰サイロとを分離し、バグフィルタで分離したFAを確実に貯灰サイロへ落下させる機構には、ロックホッパ方式を採用した（図12）。

5.1.2 ロックホッパフラップ弁への灰噛み込みと系統閉塞

ロックホッパ方式では、貯灰サイロ上に2つのタンクを設置し、各タンクを仕切る弁で真空領域と大気開

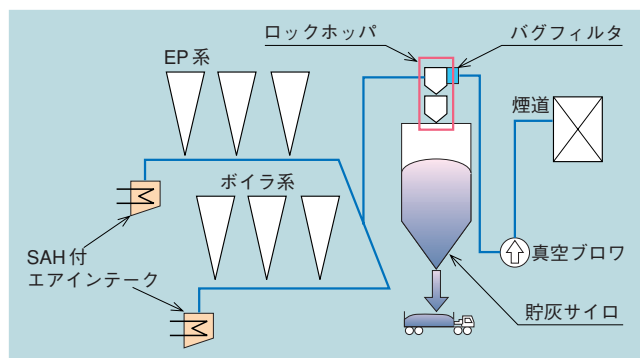


図12 FA処理設備概要

放領域とを交互に仕切り、FAを下方へ移送する（図13(a)～(c)参照）。

各ホッパを仕切る弁には種々あるが、今回はフラップ弁を採用した。

フラップ弁はスライドゲートやロータリーバルブと比較して灰を巻き込んで摺動する部分が少ないため、灰による磨耗を受け難いという利点がある。一方、フラップ弁のシートに異物を噛み込むと、真空領域と大気開放領域とを仕切ることができず、灰詰まりを起こすことがある。これを説明したのが、図13(d)～(f)である。

図中(d)のようにフラップ弁シート部に隙間ができると、下部フラップ弁が開いた時に図中緑矢印のように真空領域に向かう流れができる。このため、下部ホッパ内で灰色矢印のようにFAが巻き上がるので、下部フラップ弁全閉時、下部ホッパ内に一部FAが残留する（図中(e)）。この状態で(f)のように上部ホッパからFAが供給されると、下部ホッパには計画量以上のFAが溜まる。これを繰り返すと下部ホッパが徐々にFAで埋まり、最終的には上部フラップ弁まで溜まる。

そのため灰処理系統が閉塞し、ユニットの連続運転に支障を来す。

5.1.3 板状化したFA

フラップ弁を点検すると、シート面に板状化したFAが挟まっていることが多い。この現象は特に、EP水洗後のユニット起動時に発生することが多い。板状灰はEP水洗後の残存FAがEPケーシング内で吸湿・固化して、板状に剥離したものと推定される。

PC専焼発電プラントでは、石炭灰のEPと比較して、プラント寿命の中でEP水洗の機会が多い。そのため板状灰の形成を考慮した、FA処理設備の工夫が

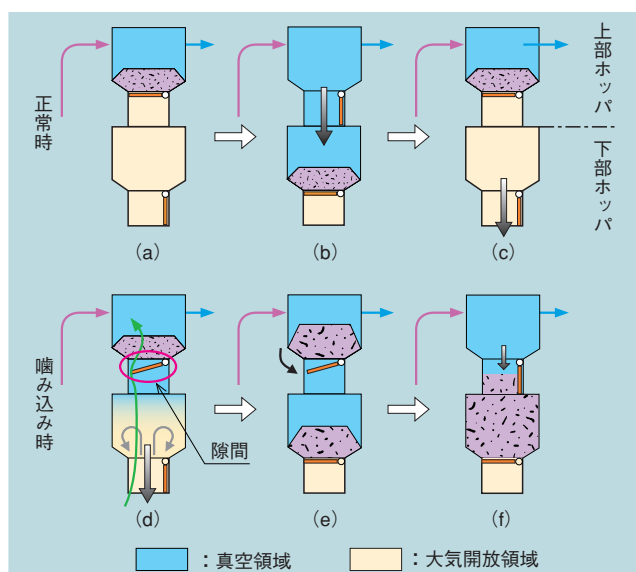


図13 ロックホッパ灰移送方式

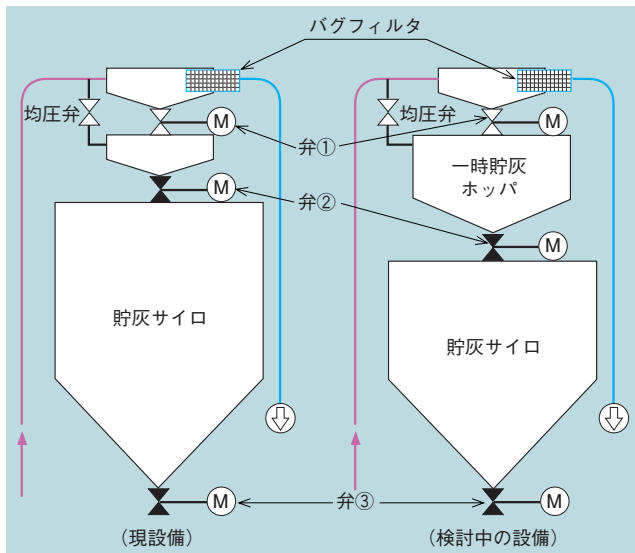


図14 FA処理設備改善提案

必要である。

5. 1. 4 FA設備の改善案

上記トラブル防止のため、以下の設備を検討している（図14）。

FA処理では、“ボイラ出口灰処理⇒灰輸送管清掃⇒EP灰処理⇒灰輸送管清掃⇒ボイラ出口灰処理⇒…”のサイクルで灰を処理している。

現設備では弁①／②を交互に常時開閉して灰を移送するので、弁の開閉回数が多い。そのため板状灰を噛み込む確率も高い。

これに対し検討中の設備では、中間のホッパを“一時貯灰ホッパ”と称し、EP灰処理1サイクル分の灰を貯灰できる容量を持たせ、灰輸送管清掃中に一時貯灰ホッパの灰を貯灰サイロへ移送する方式とする。こうすれば各弁の開閉回数が減るため、板状灰噛み込みによる灰処理トラブルを減らすことが期待できる。

5. 2 EP入口煙道清掃（定検作業中の事例）

本発電プラントでは、脱硫排液をEP入口煙道に噴霧して水分を蒸発させ、固形分をEPで捕集する形式で処理するWES（Waste Elimination System）を採用している。そのため、連続運転後にはEP入口煙道に灰が堆積する（図15）ので、これを定検時に除去する必要がある。

煙道内の灰を排出するため、煙道下面に堆積灰排出用の直管シュートを設置した。しかし灰出し作業中にシュート途中で灰が閉塞した場合、これを除去する手段がない。そのため定検時にはこれを使用せず、ダクトマンホールから灰を排出している。

今後の類似プラントではこの点を考慮し、灰排出作業の効率アップを目的に、マンホールサイズの最適化や、ダクト外部歩廊の作業スペース確保などの改善が



図15 EP入口煙道灰堆積状況

必要である。

6. ま と め

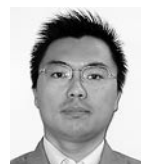
難燃性燃料の安定着火や耐圧部の腐食対策、灰付着特性の把握といった各種課題を克服し、発電用としては低品位燃料であるPCを使用して、石炭焚きユニット並みの発電設備として運用することに成功した。これは発電コスト競争力を得るという点だけではなく、エネルギーの有効活用という点でも価値の高い技術と考えている。

技術的に概ね成功した本発電設備だが、長期安定運用を確立する上では、灰処理設備など、ボイラ本体の運転をサポートする設備に改善の余地がある。今後はこれらを改善し、安定電源設備としてお客様から信頼いただける設備の構築を目指すものである。

末筆ながら、本報執筆にあたり、(株)フロンティアエネルギー新潟をはじめ、お客様各位に多大なるご指導・ご協力を賜りましたこと、改めてお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 荒川善久ほか、難燃性コークス専焼ボイラの計画と運転実績、三菱重工技報 Vol.42 No.3 (2005) p.112



平山靖記



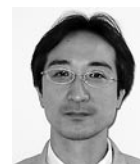
牧浦秀治



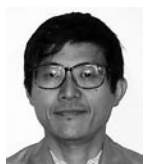
菱田正志



荒川善久



山本禎久



岡元章泰