

微粉炭燃焼技術の開発

Advanced Development of Pulverized Coal Firing Technologies

田 村 雅 人	エネルギーシステムセクター電力事業部燃焼技術部 部長
渡 辺 真 次	エネルギーシステムセクター電力事業部燃焼技術部
大 野 恵 美	エネルギーシステムセクター電力事業部燃焼技術部
糸 数 龍之介	エネルギーシステムセクター電力事業部燃焼技術部
小 崎 貴 弘	エネルギーシステムセクター電力事業部燃焼技術部

エネルギーセキュリティ上で欠くことのできない石炭を火力発電所で継続使用するためには、炭種の拡大、運用性の向上、クリーン利用の実現が必須である。当社は、これらの社会的要求に対応するため、微粉炭燃焼技術の高度化を目指して、開発プロセスの各ステージにおける現象解明に、大小さまざまな試験設備や数値解析技術を適用している。本稿では、社会的要求に対応して当社が開発した低スラッシングバーナや壺型ローラミルの改善、数値解析技術などについて概説するとともに、新設中の大型燃焼試験設備を紹介する。

IHI has been developing combustion technologies which give very low environmental impact. Various equipment and numerical tools support the development process at each stage. Small- and large-scale test furnaces are used for evaluating actual combustion behaviour. Numerical simulation is also used to assist theoretical understanding. An example of recent development is the realization of very low Air/Coal ratio burners for dried lignite coal firing. Another commercialized burner made it possible to reduce slagging when burning coals which have a low ash melting temperature, such as sub-bituminous coals. The dynamic and static performance of pulverizers, which play a very important role in fuel burning process as pulverized fuel size dominates burnout behaviour, has been improved. This paper gives an outline of recent development of combustion technologies. A large-scale coal combustion test facility which is under construction is also described.

1. 緒 言

数ある発電用燃料のうち石炭は、安価で^ふ貯存量が豊富であり、全世界で広範囲に埋蔵されていることから、エネルギーセキュリティ上欠かすことができない。一方、含有する炭素割合が大きいという性状から単位熱量当たりの二酸化炭素 (CO₂) 排出量が多く、昨今の地球環境問題への関心の高まりから、CO₂ 削減のニーズが大きくなっている。CO₂ 削減要求にこたえるためには、高効率化や CCS (Carbon Capture and Storage) に加えて、カーボンニュートラル (大気中の CO₂ を吸収して成長する植物を燃焼させても大気中の CO₂ の量は変化しない) な木質バイオマスの利用拡大などが求められる。エネルギーセキュリティの観点からは、これまで利用されなかった^{れき}褐炭、亜瀝青炭、半無煙炭、オイルコークスなどに利用燃料を拡大する動きが活発である。

当社では、微粉炭焚き火力発電所での使用燃料の多様化に対応するため、それぞれの燃料に適した燃焼技術を開発してきた。最近では、オイルコークスや半無煙炭を専焼す

ることが可能なバーナおよびスラッシングが厳しい石炭に対して低スラッシング・低 NO_x バーナを実用化した。さらに、微粉炭機の性能向上を目指し、種々の解析・試験を行っている。これらの技術開発には、既設の燃焼試験炉 (基礎燃焼試験設備:PIT, 実証燃焼試験設備:CFT, など) を利用しており、今後も活用していく。さらに、これまで以上に燃焼技術開発を促進するため、新しい燃焼試験設備 (CCTF: Coal Combustion Test Facility) の建設を行っている。

本稿では、既存の燃焼試験炉を用いて当社が開発した低スラッシングバーナや壺型ローラミルの改善、数値解析技術などについて概説するとともに、新設中の大型燃焼試験設備を紹介する。

2. バーナ開発

微粉炭焚きボイラにおける使用炭種は瀝青炭から、褐炭、亜瀝青炭、半無煙炭、オイルコークスなど、より劣質で安価な燃料へ社会的ニーズが移行している。亜瀝青炭は、揮発分が多く燃焼性は良好である反面、水分量が多

く、含有する灰の融点が低く、火炉内でのスラッキングが問題となる。また、褐炭は含有する水分量が非常に多いため乾燥プロセスが研究されている⁽¹⁾。

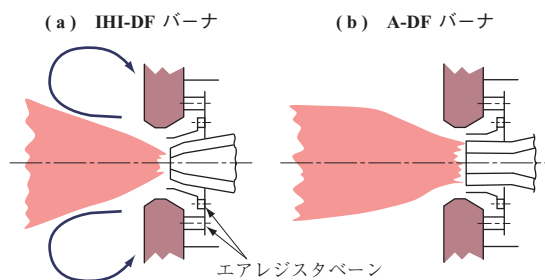
一方、半無煙炭やオイルコークスは、重量当たりの熱量が高いものの揮発分が少ないため、着火性に難がある。本章では、主に亜瀝青炭を対象として実証燃焼試験設備を活用して開発した、スラッキングを抑制する新型バーナと乾燥褐炭を燃焼させる極低 A/C (Air/Coal, 1 次空気と微粉炭の重量流量比) バーナについて概説する。なお、半無煙炭やオイルコークスを専焼するバーナについては、既報文献^{(2), (3)}で報告している。

2.1 A-DF バーナ

発電単価低減のニーズから亜瀝青炭などのいわゆる低品位炭の使用拡大が進んでいる。亜瀝青炭は揮発分が 50 ~ 60 wt% (無水無灰ベース) と多いため、燃焼性は良好である場合がほとんどであるが、含有される灰分の融点が低いことから、バーナスロートなどへのスラッキングの問題が顕在化している。そこで、燃焼安定性および環境性能を犠牲にすることなく、スラッキングを抑制するバーナの開発を行った。

第 1 図に従来型バーナ (IHI-DF バーナ: 以下、DF バーナと呼ぶ) と低スラッキングバーナである A-DF バーナ (Advanced DF バーナ) の比較を示す。DF バーナでは、エアレジスタベーンによる 2 次空気の旋回強度の調整によって、バーナ中心軸近傍に炉内からバーナに向かう循環流 (内部循環流) を形成させる。この高温の還元性雰囲気下に旋回を残した微粉炭流を吹き込むことで安定した着火を確保している。

一方、A-DF バーナでは、微粉炭流の直進性を強化し、2 次空気と微粉炭の混合および微粉炭の外部循環流への飛散を抑制することで、スラッキングを低減している。内部循環流は、DF バーナと同様にエアレジスタベーンで形成されるため、低 NO_x と着火安定性は維持したまま低ス



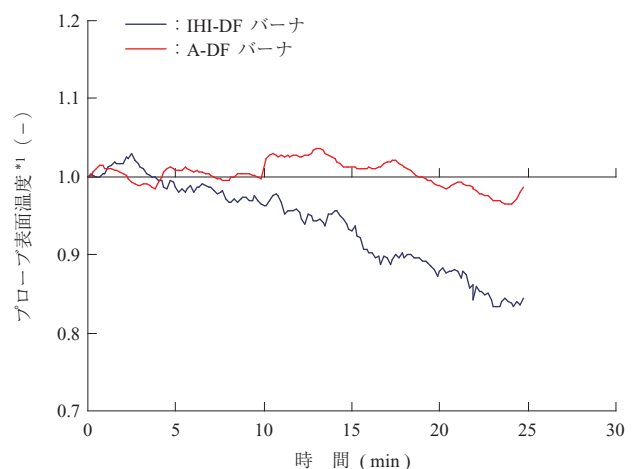
第 1 図 DF バーナと A-DF バーナの比較
Fig. 1 Comparison of DF burner and Advanced-DF burner

ラッキング性を実現した。

A-DF バーナの低スラッキング性は、バーナ近傍に挿入した水冷プローブの表面メタル温度変化を計測することで確認した。第 2 図にそのプローブメタル温度変化を示す。DF バーナでは、スラッキングによって 20 分間で、メタル温度の低下がおよそ 20% であるのに対して、A-DF バーナではメタル温度の低下がほとんどなく、スラッキングが著しく軽減したことを示している。

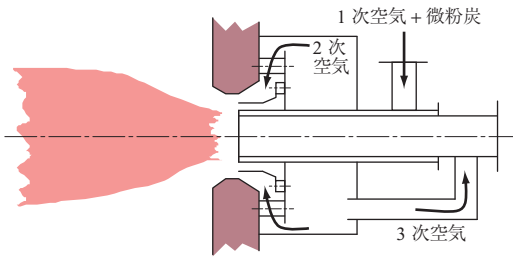
2.2 極低 A/C バーナ

昨今の炭種拡大の動きは亜瀝青炭のみならず、さらに若い褐炭へと広がっている。ただし、褐炭は含有水分が 40 ~ 60% と非常に多く、粉碎したそのままボイラで燃焼させると燃焼効率の大幅な低下を招く。このため、貯存量が豊富であるにもかかわらずその利用は進んでいなかった。これを解決するため、事前に乾燥させるプロセスの実用化が進められており、水分量が 10% 程度に抑えられるようになってきている。しかし、乾燥によって揮発分割合が 40% を超えることとなり、ハンドリングにおける発火性に注意を要する。したがって、乾燥褐炭をバーナまで搬送する搬送用空気は、発火性防止の観点から予熱しない常温空気を採用すると同時にボイラ効率の低下を極力抑制するため、その流量も極力少なくする必要がある。この条件に対応するために極低 A/C バーナの開発を行った。非常に高濃度で炉内に吹き込まれる微粉炭流を適切に燃焼用空気と混合し、着火安定性と燃え切りを確保するため、微粉炭ノズルをリング状とし、微粉炭流の外部と内部から燃焼用空気を供給することとした。第 3 図に極低 A/C バーナ概念を示す。



(注) *1: プローブ初期表面温度に対する相対値を示す

第 2 図 プローブメタル温度変化
Fig. 2 Temperature trend of slugging probe surface



第3図 極低 A/C バーナの概念
Fig. 3 Conceptual diagram of very low A/C burner

3. ミル 開発

原子力発電が一定出力の発電，いわゆるベースロードを担うため，微粉炭焚きボイラは負荷変化を担うミドル電源として，高負荷追従性が要求されている．また，CO₂削減のため，カーボンニュートラルである木質バイオマスで石炭の一部を代替する取組みがなされている．これらのニーズに対して，当社では，低負荷運用と負荷追従性を格段に向上した高性能ミルを開発するとともに，木質バイオマス粉碎ミルの開発を進めている．

3.1 高性能型ローラミル

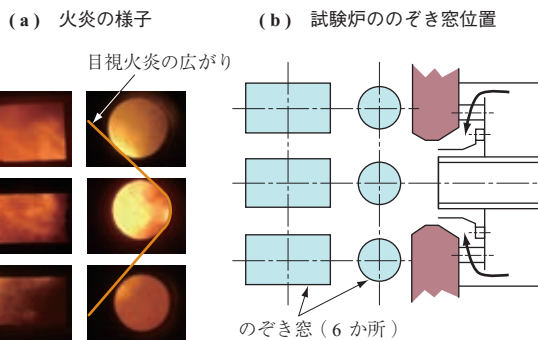
微粉炭焚きボイラでは，使用する石炭を数十 μm に粉碎し，ボイラ火炉内で浮遊燃焼させている．粉碎機としては，消費動力の少なさをから型ローラミルが主流となっており，石炭は回転する粉碎テーブルとローラの間に挟まれて粉碎される．社会的ニーズである負荷追従性と最低負荷引き下げを実現させるため，高性能型ローラミルでは，給炭変化に対してテーブル回転速度を制御する方法を採用した．社内で保有している試験ミルを使用し，テーブル形状の最適化を図るとともにテーブル回転速度の制御方法を，パラメトリックに粉碎試験を行うことで確認した．HGI (Hardgrove Grindability Index) の異なる3種の石炭を使い，テーブル増速による粉碎容量を確認した．第6図に2炭種の確認結果を示すが，HGI : 60程度の石炭において14%のテーブル回転速度の増速で10%の容量増大を確認し，HGIの低い石炭では増大割合がさらに大きくなった．

負荷変化試験では，テーブル回転速度の変化パターンを複数変えて試験を行い，無駄時間と1次遅れを比較した．第7図に，ミル出炭特性（給炭量と微粉炭流量の時間変化の計測例）を示す．テーブル形状とテーブル回転速度制御方法の組合せを選択することで，無駄時間と1次遅れを約35%短縮することが可能となった．

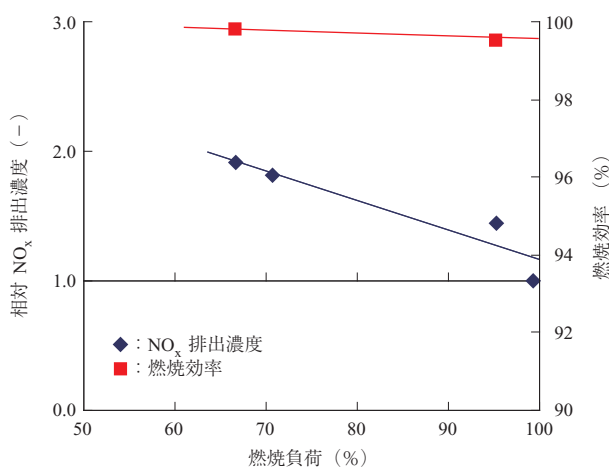
3.2 木質バイオマス粉碎ミル

微粉炭焚き火力での木質バイオマスの利用はすでに多くの事業所で実施されている⁽⁴⁾、⁽⁵⁾．微粉炭焚きボイラ用として計画されたミルで，石炭と混合粉碎する場合には，5 cal%程度の混合率が限界となる．微粉炭焚き火力からのCO₂排出量を低減するため，さらに多くの木質バイオマスを混焼させるニーズも高く，この場合は木質バイオマスを単独粉碎して炉内に投入することとなる（炉内混焼）．

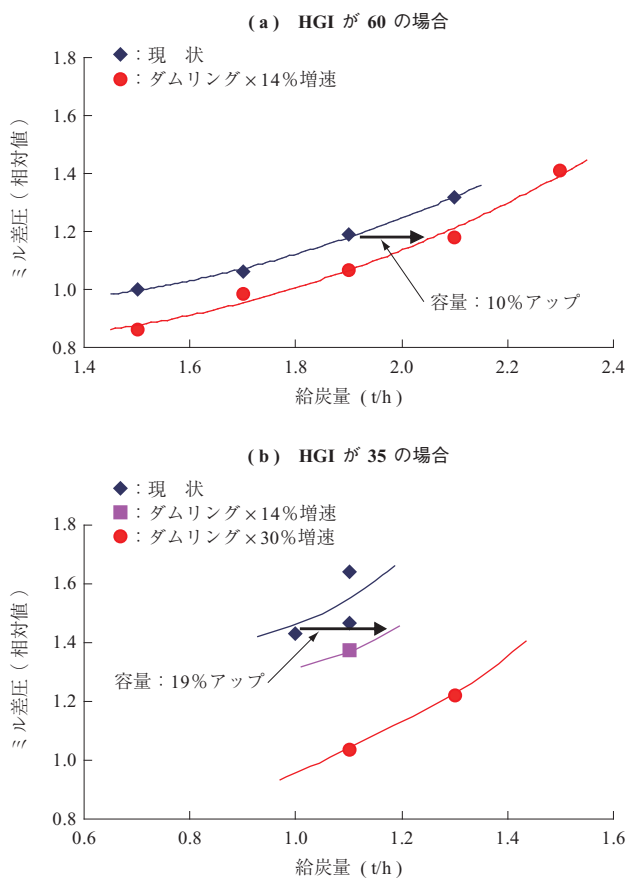
極低 A/C バーナを用いて，乾燥褐炭の燃焼試験を行い，安定した着火と良好な燃え切り性をもつことを確認した．第4図に火炎状況を示す．スロート出口から輝炎が形成され，視野全体で明るく安定した火炎状態が得られている．第5図には，部分負荷時のNO_x排出濃度と燃焼効率特性を示す．部分負荷時には，バーナ部の空気比が増大するためNO_xは増加する．燃焼効率はどの負荷においても瀝青炭並みの高い値を得ている．試験では，50%まで燃焼負荷を低下させ，安定燃焼を確認している．



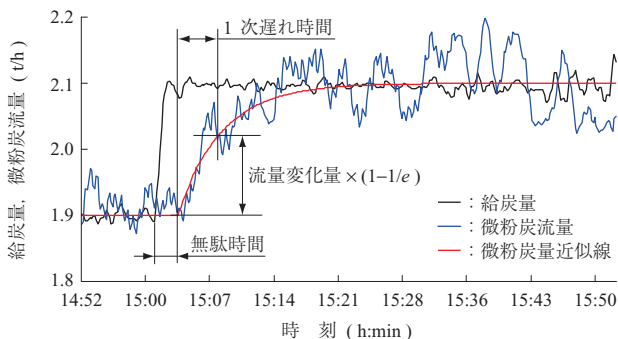
第4図 極低 A/C バーナの火炎状況
Fig. 4 Flame photograph of very low A/C burner



第5図 極低 A/C バーナのNO_x排出濃度と燃焼効率
Fig. 5 Behaviour of NO_x and combustion efficiency using very low A/C burner



第 6 図 テーブル回転数増速による粉碎容量の増大
Fig. 6 Increase of pulverizing capacity by high-speed table rotation



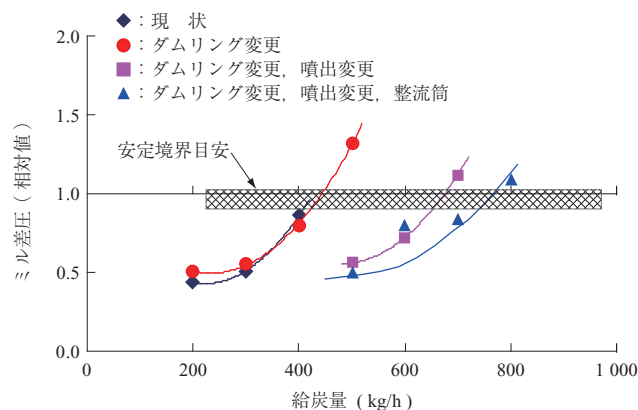
第 7 図 ミル出炭特性

Fig. 7 Measurement result of pulverizer response for step load change

堅型ミルでの木質バイオマス粉碎特性を把握するため、無改造での粉碎試験に加え、テーブルやエアポートの形状などを変更し、木質バイオマス粉碎容量の増大を図った。この結果、第 8 図に示す容量の増大を達成している。

4. 数値シミュレーション

新製品や新技術の開発に当たって、すべてを試験を進めるには時間と費用が膨大となる。特に大型の火力発電所向けボイラなどは、事前に実物を製作して性能を確認するこ



第 8 図 木質バイオマス粉碎容量の増大

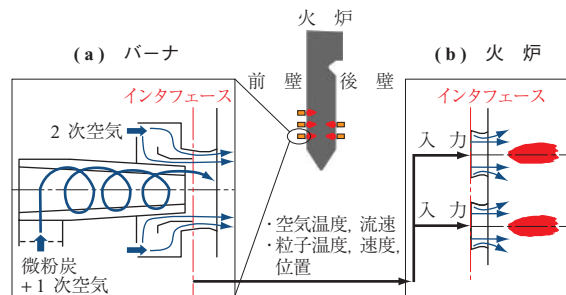
Fig. 8 Increase of pulverizing capacity of woody biomass pulverizing

とは不可能であり、数値シミュレーションを最大限活用して効率的な開発を進めている。本章では、ボイラ火炉設計に活用している燃焼シミュレーションと高性能堅型ローラミルの開発で実施中の分級シミュレーションについて紹介する。

4.1 火炉シミュレーション

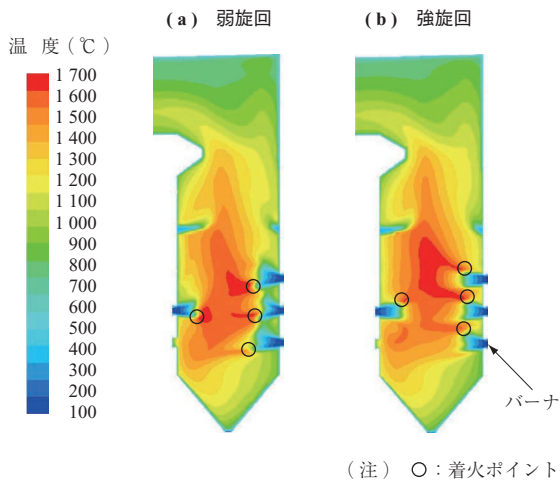
バーナ構造や運転状態が火炉内熱流動状態に与える影響を正確に再現し、ボイラ火炉の性能を把握するため、バーナ入口部から火炉出口に至る領域の全体解析を短時間で行う手法を構築した⁽⁶⁾。解析には、汎用熱流体解析コードの FLUENT を使用している。この解析で重要となる微粉炭燃焼モデルは、ドロップチューブを用いた試験によって得られる揮発過程とチャー燃焼過程のデータを反映した。ここで、解析時間短縮と火炉全体解析の両立のため、バーナと火炉を切り分けて個別に解析する手法を採用した。第 9 図にこの手法の概念を示す。バーナの解析で得られたバーナノズル出口部の情報を火炉の解析の入力として、両者をリンクさせるものである。

微粉炭 1 次空気流の旋回強度を変えて解析した結果のうち炉内ガス温度分布を第 10 図に示す。第 10 図 - (a) は弱旋回、- (b) は強旋回条件であり、チャー燃焼速度：



第 9 図 解析方法概念

Fig. 9 Conceptual diagram of analytical method

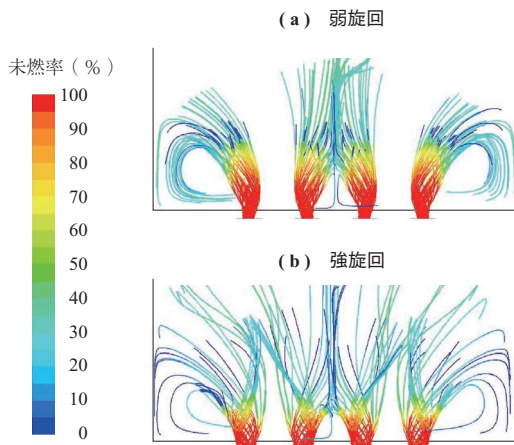


第 10 図 炉内ガス温度分布
Fig. 10 Gas temperature magnitude

$2 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ の位置を図中○（仮に着火ポイントと呼ぶ）で示す。弱旋回と強旋回を比較すると、弱旋回で着火ポイントがバーナから離れることが分かる。これは、微粉炭の旋回が弱いために内部循環流が形成されにくいことに起因している。なお、2 次空気の旋回強度は変更していない。

解析領域をバーナと火炉に分割することで、短時間での解析が可能となった。また、バーナ構造や運用条件を反映した火炉解析となり、ボイラの設計に活用することで、最適設計のボイラを提供することが可能となった。

第 11 図に、バーナ断面での微粉炭粒子の軌跡を示す。粒子の軌跡は、未燃分で色分けしている。弱旋回（第 11 図 - (a)）条件では、粒子の直進性が高く、まとまった挙動となっている。一方、強旋回（第 11 図 - (b)）条件では、遠心力によって粒子が広がってばらついている。また、特に弱旋回条件では水平方向での流れが隣同士で干渉



第 11 図 微粉炭粒子軌跡
Fig. 11 Pulverized coal particle trajectory coloured by burnout level

するため、中央の 2 本の火炎は火炉中心に寄り、端の 2 本の火炎は側壁に寄ることが分かる。

4.2 ミル分級シミュレーション

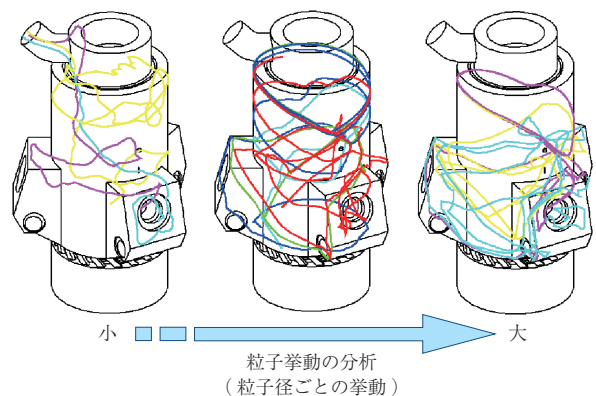
微粉炭焚きボイラでの未燃分低減のため、ミルでの分級効率の向上が不可欠であり、これは、ミル動特性やミルそのものの大きさにも影響する。そこで、パラメトリックな形状検討や運用条件を加味するため、分級性能の数値シミュレーションによる評価を行った。解析には、汎用熱流体解析コード STAR-CD を使用した。回転式分級機周りの流れは、マルチフレーム法で回転運動を模擬した。シミュレーションを進めるに当たり、試験ミルを用いてコールドフロー試験による分級機の性能評価を行い、シミュレーションの検証データとした。第 12 図にシミュレーションによるミル内部の微粉炭粒子挙動を示す。

上述のようにシミュレーションによって、ミル内部の流れを把握し、分級シミュレーションを組み合わせることで、分級効率を向上させる分級機形状および運転条件について検討を行っている。

5. 大型燃焼試験設備と開発の高度化

当社では、今後の市場ニーズと開発スピードアップのため、既設の試験設備に加え CCTF の建設を決定し、2011 年 5 月の本格稼働を目指している。CCTF は、微粉炭焚き火力発電所のシステム構成と同じ排煙処理設備と酸素供給設備を備え、火炉・環境設備の一貫性能評価および酸素燃焼を可能とする世界最大級の試験設備となる。さらに、発生する排ガスは CO_2 化学吸収装置に導入され、種々の試験が行われる。CCTF 構成機器を第 1 表に、鳥かん図を第 13 図に示す。

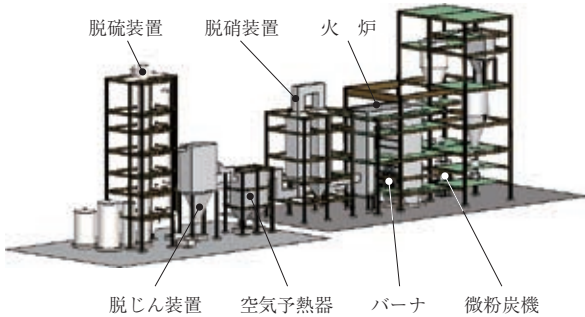
CCTF では、ボイラプラントでの重要機器である微粉炭機およびバーナの開発に加え、火炉設計計画にも活用す



第 12 図 ミル内部の微粉炭粒子挙動
Fig. 12 Pulverized coal particle trajectory in roller mill

第 1 表 CCTF の構成機器
Table 1 CCTF equipment

構成機器	実施試験
火炉, 微粉炭機, バーナ, 排煙処理設備, 酸素供給設備	実機構成機器での大型燃焼試験, 酸素燃焼試験



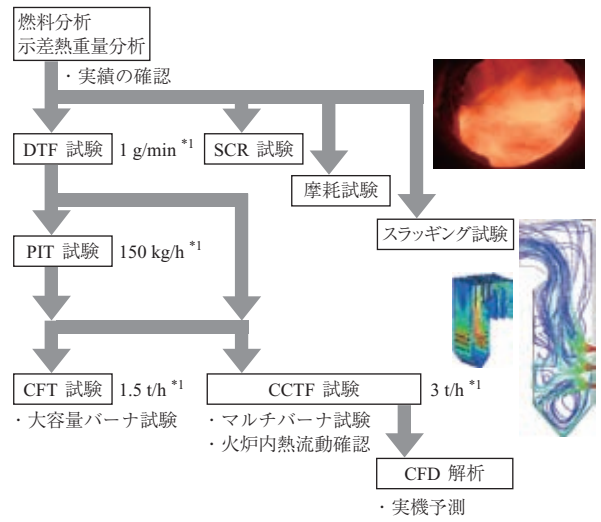
第 13 図 CCTF 鳥かん図
Fig. 13 Bird's-eye view of CCTF

る予定である。微粉炭機で製造される微粉炭は、バーナに供給されるが、いったん微粉炭ビンにためる間接燃焼方式と直接バーナに供給する直接燃焼方式を選択可能とした。微粉炭機は、寿命評価と振動評価を可能とするように構造を検討・設計し、実稼働時のデータ採取を行う。火炉と微粉炭バーナの配置による火炉内の熱流動状態は、ボイラの重要な要素である火炉収熱を左右する。CCTF では、バーナ配置を変更可能とし、それに伴う各種データを採取し、今後の火炉設計に活かしていく。また、排ガス再循環ラインと酸素貯蔵設備を具備し、低炭素社会実現に向けた酸素燃焼の特性評価を種々の石炭で行うことが可能である。

上述の CCTF に加え、社内保有の各種燃焼試験設備と数値解析技術を組み合わせ、効率的な技術開発を行うことが可能であり、この燃焼技術開発プロセスを第 14 図に示す。

それぞれの設備と使用目的について、バーナ開発を対象に以下に述べる。まず燃料分析と示差熱重量分析によって、適用する燃料の性状把握を行ったうえで、必要に応じて Drop Tube Furnace (DTF) での燃焼試験、脱硝試験、摩耗試験、スラッキング試験を行い、実機適用のための設計データを採取する。DTF 試験では、還元雰囲気での揮発分放出過程やチャー燃焼過程のデータによって、後述する数値解析の微粉炭燃焼モデルを構築する。

次に、150 kg/h の基礎燃焼試験設備 (PIT) を利用して、バーナ構造の最適化を図る。この際、試験用バーナの詳細構造や運用条件の設定変更確認に数値解析を活用し、試験対象とするバーナ構造を絞り込む。その後、実証燃焼試験設備 (CFT) での大容量バーナ試験で、単体バーナの性能



- (注) ・ DTF : Drop Tube Furnace
 ・ PIT : Perpendicular Industrial Combustion Test Furnace
 ・ CFT : Demonstration Combustion Test Furnace
 ・ CCTF : Coal Combustion Test Facility
 ・ CFD : Computational Fluid Dynamics
 ・ SCR : 脱硝装置
 *1 : それぞれの試験規模 (燃焼量)

第 14 図 燃焼技術開発プロセス
Fig. 14 Development process of combustion technologies

確認を行う。

これまで、これ以降を数値解析で確認していたが、今後は、必要に応じてマルチバーナ試験が可能である CCTF で性能評価を行う。CCTF の計測データは、数値解析の比較検証データとしても活用し、火炉内の熱流動状態やバーナ配置の最適化などを精度良く予測できるように解析技術の高度化を図っていく。

開発プロセスの各ステップで CCTF を含めた最適な試験装置や数値解析を適用することで、これまで以上に高精度に、かつ短期間で燃焼性能を把握・評価することが可能となる。

6. 結 言

微粉炭焚きボイラのバーナや微粉炭ミルを対象に当社の低環境負荷を目指した最新の燃焼装置技術について解説した。低炭素社会およびエネルギーセキュリティの実現、ならびに発電単価の低減を可能とするために、高効率・低環境負荷燃焼技術への期待がますます高まっている。当社では、大型燃焼試験炉を中心に、大小の試験設備での試験と高度な数値解析技術を組み合わせることで、市場ニーズに柔軟に応じた、スピードをもった技術開発を進めている。

今後ともミル・バーナを含め、微粉炭焚きボイラの燃焼技術の開発を継続・加速することによって、さまざまな市場要求に迅速に対応した技術・商品展開を行っていく。

参考文献

- (1) 重久卓夫：石炭(13)低品位炭の改質技術 日本エネルギー学会誌 Vol. 86 No. 10 2007年10月 pp. 822 - 827
- (2) 須田俊之, 高藤 誠, RIECHELMANN Dirk, 平田哲也, 佐藤順一：高温空気燃焼技術の微粉炭燃焼への適用 石川島播磨技報 第44巻 第3号 2004年5月 pp. 199 - 208
- (3) 渡辺真次, 須古敏行, 藤森俊郎, 須田俊之, 高藤誠：低揮発分炭バーナの開発 IHI 技報 第48巻 第1号 2008年3月 pp. 32 - 37
- (4) 中川賀之, 吉高恵美：木質バイオマスの石炭焚ボイラにおける混焼技術の開発 火力原子力発電 Vol. 56 No. 2 2005年2月 pp. 134 - 138
- (5) 大野恵美, 氣駕尚志, 鈴木孝平：微粉炭焚きボイラでのバイオマス利用技術 石川島播磨技報 第44巻 第6号 2004年11月 pp. 384 - 389
- (6) T. Tanaka, S. Watanabe, M. Tamura：A Study on the Analytical Method for Boiler Linked with Burner Flow-Pattern 6th Asia-Pacific Conference on Combustion Nagoya Japan (2007.5) pp. 20 - 23