燃料多様化と負荷追従性に優れた微粉炭燃焼技術の開発

Development of Pulverized Coal Combustion Technology for Fuel Diversification and High Turn Down Capability

丹野 賢二*・牧野 尚夫*
Kenji TANNÔ and Hisao MAKINO

Key Words: Pulverized Coal Combustion, Fuel Diversification, High Turn Down Capability, NO_x Emission, Numerical Simulation

1. はじめに

石炭は可採埋蔵量が多く、また産炭国にも極端な偏りがないので、長期的に安定供給が可能な化石燃料として非常に注目されている。石炭の可採年数（現在、確認されている経済的に採掘が可能な石炭の資源量すなわち可採埋蔵量を、前年の石炭使用量で除算したもの）は100年以上と計算されているが、この数値は、すべての石炭種を含めて計算した値であり、現在、主に使用されている瀝青炭だけしか使用できない場合には、この可採年数は大幅に低下する。石炭の可採埋蔵量が多いという特徴を活かすためには、あらゆる種類の石炭を使用できるようにする必要がある。また石炭は、他の化石燃料に比べて炭素比率が高く、それに伴い地球温暖化に関わりの深い二酸化炭素（CO₂）排出量が多いという問題もある。CO₂排出量を低減するためには、石炭使用量を低減できる高効率な発電方式を採用する必要があり、多様な石炭を使用した場合、それらの全ての石炭種において、高い発電効率を発揮できることが要求される。

CO₂排出低減に関しては、近年ますます要求が厳しくなっており、太陽光、風力、バイオマスなどの自然エネルギー、再生可能エネルギーの利用が拡大されている。しかし、これらの発電方式における出力は、気象状況、季節によって変動するため、安定した電力供給のためには、他の発電方式で、この出力変動分を吸収できるように出力調整をする必要がある。また、電気の需要は昼夜および季節によっても異なるため、電力供給の調整は非常に重要となり、現在その役割は火力発電所が担っている。

すなわち、今後の石炭火力においては、様々な石炭種が利用でき、かつ速やかな出力調整をできることが不可欠となる。本稿では、石炭の主要な発電方式である微粉炭火力における、燃料多様化と高い負荷追従性を達成するために開発されている技術を概説するとともに、今後の展望を述べる。

2. 微粉炭火力の概要と特徴

現在、発電用の石炭火力技術としては、ほとんどがFig.1にフローを示す微粉炭燃焼火力が用いられている。石炭火

Fig.1 Schematics of a pulverized coal-fired power plant.

*一般財団法人 電力中央研究所 エネルギー技術研究所（〒240-1096 神奈川県横浜須賀市長坂2-6-1）
Central Research Institute of Electric Power Industry Energy Engineering Research Laboratory (2-6-1 Nagasaka, Yokosuka, Kanagawa, 240-0196 Japan)

力で使用するほぼ全部の石炭を輸入に頼っている我が国では、オーストラリアなどの産炭国から海上輸送により石炭を搬入し、港での揚炭、ベルトコンベアによる輸送を経て、貯炭場にて保管された後に利用される。以下ではまず、微粉炭火力のフローの概要と特徴について述べる。

発電所近傍の港で受け入れた後の石炭は、屋外貯炭方式または、サイロ等を用いた屋内貯炭方式のいずれかで保管される。この保管場所から、必要に応じて発電設備の方に石炭が送られることになる。石炭を、火力発電用の燃料として利用するにあたっては、搬送しやすく、かつ高効率で燃焼しやすい微粉炭にする方法が容易となる。最近の微粉炭火力では、ローラーミルにより石炭を粉砕し、微粉炭を製造していることが多くなっている。微粉炭の粒子径は、次章で詳しく述べるが、燃焼時の NO_x 生成特性や燃焼効率向上による未燃損失の低減などの環境保全性にも大きく影響するため、その管理は非常に重要である。これまでは中位径 $40\ \mu\text{m}$ 程度が、燃焼特性と粉砕動力のバランスから考え最適とされていたが、最近では、より微細な微粉炭利用時に NO_x や未燃損失分の低減効果が大きくなることを考慮し、ミルの高性能化に伴い、中位径を $10\ \mu\text{m}$ 程度まで細かくして利用する技術なども提案されている。微粉炭燃焼後に発生した熱はボイラにおいて蒸気に伝え、高温・高圧の蒸気で稼働する蒸気タービンにて発電する。ボイラを出た燃焼ガスは、触媒式脱硝装置による NO_x 低減、電気集じん装置による粒子状物質の除去、湿式脱硫装置による SO_x 分離などの排ガス処理を経てクリーンにされた後、煙突から排出される。

3. 微粉炭火力における燃料多様化技術

微粉炭火力で多様な石炭を用いる上で、石炭の性状を表す様々な因子に注目する必要があるが、最も重要なのは燃焼性である。石炭中の可燃分を、高温場で容易にガス状に転換する揮発分と、固体状で残留する固定炭素分とに分け、その比率（固定炭素分／揮発分）を示した数値は燃料比と呼ばれ、石炭の炭化レベルを表すとともに、石炭の燃焼性を表す指標としてもよく用いられる。燃料比が大きいほど、石炭の炭化が進み着火しにくい特徴をもつ。これまで、微粉炭火力においては、燃料比が1～2.5程度の適度に炭化した瀝青炭が用いられて来た。しかし近年、世界的な石炭利用量の増大から瀝青炭の入手が困難になり、炭化が進んでいない低品位炭（亜瀝青炭や褐炭）の利用が注目されている。

石炭の燃焼にあたっては、窒素酸化物(NO_x)の生成を極力抑制すると共に、生成する石炭灰を有効利用しやすい性状とするため灰中未燃分濃度を3%以下にできるよう燃焼効率を高く調整するなど、高度な燃焼制御が必要となる。近年、微粉炭燃焼時の NO_x と灰中未燃分を同時に低減するため、Fig.2に示すような概念の燃焼火炎¹⁾²⁾を実現するこ

Fig.2 Concept of advanced combustion technology.

(a) Bituminous coal

(b) Sub-bituminous coal

Fig.3 Oxygen concentration distribution in the burner zone.

とが有効であると考えられている。すなわち、バーナ近傍の高温燃焼火炎の中に微粉炭粒子を長く滞留できるための再循環流を形成し、速やかな酸素消費による NO_x 還元炎の効果的形成と石炭の燃焼促進を図れるように、微粉炭粒子の挙動を制御することが求められている。そのためには、バーナからの空気噴出孔形状や空気注入条件が微粉炭粒子の挙動に及ぼす影響を明らかにし、最も効果的に還元炎の形成と燃焼促進を図れる構造にする必要がある。

Fig.3は、上記の燃焼概念を実現できるバーナで、通常の瀝青炭と亜瀝青炭を燃焼させた場合の火炎内酸素濃度分布を示したものである³⁾。酸素の消費は燃焼の進行と関連するため、酸素濃度分布から燃焼過程を把握することができる。瀝青炭燃焼時の酸素濃度分布を示す上図においては、バーナ噴出孔から火炎が滑らかに広がり、かつバーナ中心軸上では酸素の消費が極めて速く、酸素濃度が2%以下で酸素がほとんど存在しない領域が形成されていることが分

Fig.4 Oxygen concentration distribution in the burner zone in the optimized burner condition for sub-bituminous coal.

かる。この酸素濃度が低い領域は NO_x を分解する還元域となり、 NO_x の効果的な低減に非常に有効になる。これに対し、下図に示す亜瀝青炭の燃焼火炎は、大きく形状が異なる。中心軸上の酸素濃度の低下が非常に遅く、また火炎は、バーナ噴出直後から火炉の外側にまで広がるという極端な傾向を示し、酸素濃度が 2 % 以下となる NO_x の還元炎の効果的な形成も図れていないことが明らかである。

亜瀝青炭の燃焼火炎を酸素濃度分布から分析すると、水分を多量に含んだ状態で火炉内に石炭が注入された際には、まず水分の蒸発が生じるため着火が遅れることが考えられる。また、水分蒸発後の微粉炭は分裂しやすく、かつ多孔性の粒子となるため、火炎外周の旋回流に巻き込まれ、火炎周囲に拡散し易くなっていると考えられる。そこで、微粉炭粒子の噴出流速を抑制し、火炎外周部の旋回流を弱めた場合の酸素濃度分布を **Fig.4** に示す⁴⁾。**Fig.4** は **Fig.3** の下図に比べ、明らかに **Fig.3** の上図の瀝青炭の燃焼火炎に近い火炎構造となっており、バーナからの微粉炭噴出流速の抑制および、旋回流の制御が、石炭粒子の挙動制御に有効に働き、 NO_x 還元炎の形成や、石炭粒子の燃焼促進に有効に働いた事が考えられる。

今後は、より水分の多い石炭の利用や、灰分含有率の高い石炭の利用、粉碎性が悪く大きな微粉炭粒子径の石炭の利用、さらには極端に炭化が進み高燃料比で着火の悪い石炭の利用など、さらに多様な石炭を利用していく必要があると思われる。微粉炭粒子の大きさ、ならびに共存する水分や灰分が、微粉炭の燃焼過程や火炎内微粉炭粒子挙動への影響の解明を行うとともに、燃料比が高く揮発分が少ない石炭を速やかに着火させるための最適粒子径の把握などを行い、あらゆる石炭種に対して、 NO_x の発生抑制と燃焼効率の向上が可能となる、微粉炭粒子径の制御ならびに火炎内微粉炭粒子挙動の高度な制御方法を確立することが非常に重要となる。火炎内の微粉炭粒子挙動、ひいては燃焼反応の制御を行う上では、従来の実験的手法に加えて、近年普及の著しい数値シミュレーションの利用も有効であると考えられる。しかし、現象の複雑な微粉炭燃焼の分野で数値シミュレーションを活用するためには、その精度を確認する必要がある。**Fig.5** はラボスケールの微粉炭噴流バー

(a) Particle position

(b) OH radical

Fig.5 Instantaneous spatial distributions of (a) coal particle and OH radical.

ナを対象に数値シミュレーションを行い、その結果得られた微粉炭粒子位置、および反応帯の指標である OH ラジカルの分布を実験結果と併せて示したものである⁵⁾。図より、微粉炭粒子位置、および反応帯の位置が数値シミュレーションにより良く捉えられていることがわかる。このように、詳細な計測が適用可能なスケールの実験との比較を十分に行った上で、その精度が十分に保証された数値シミュレーション技術を活用していくことにより、高度な燃焼制御技術をより短期間かつ低コストで開発できるようになると考えられる。

4. 微粉炭火力の負荷追従性向上技術

電気の需要は、既に述べたように季節、昼夜などの条件によって大きく異なるため、需要に応じて供給量を調整する必要がある。微粉炭火力においては、負荷を下げるために微粉炭供給量を低減するとバーナ内搬送用空気中の微粉炭濃度が低下し、燃焼が不安定になるという問題点がある。一方、搬送用空気量を減少させると、送炭管内で微粉炭が沈降し易くなり、微粉炭供給が不安定になる。そこで、微粉炭粒子をバーナ内の局所に濃縮させ、部分的に搬送用空気中の微粉炭濃度を増加し、着火を安定させる技術が開発されている。

Fig.6 は、石炭を濃縮することが可能なワイドレンジバーナを用いることにより、安定燃焼できる最低負荷が改善される効果を示したものである⁶⁾。約2倍に濃縮できれば、石炭種に関わらず、最低負荷を半分まで低減できることが明らかである。微粉炭燃焼用バーナで、石炭を濃縮する方法として最も簡単な方法は、サイクロンなどのように石炭を濃縮できる装置をバーナ直前に設置し、微粉炭の高濃度流と低濃度流とに二分した後、それぞれをバーナから供給する方法が挙げられる。しかし、バーナ前にサイクロンを設置することは、バーナが大型化するなどの問題がある。そこで、バーナ内部に簡単な微粉炭濃縮装置を設置することが必要となる。

Fig.7 は、バーナ内部の微粉炭流に旋回を与え、その旋回流で微粉炭を濃縮しようとする概念のワイドレンジバーナを示したものである⁶⁾。微粉炭流はバーナ外周部に接線方向から流入し、旋回流を形成する。微粉炭粒子は旋回力によりバーナ外周部に寄せられている。バーナ内部には、台形状のリングを設置してあり、このリングは外周部に寄せられた微粉炭を直進させるとともに、旋回流を弱める効果を持つ。台形リングをバーナ出口近傍に置けば、バーナ外周部に濃縮した状態の微粉炭をそのまま噴出でき、リングを

バーナから離せば、一旦濃縮した微粉炭流が徐々に拡散により均一濃度になった状態で噴出できる。すなわち、低負荷時は台形リングをバーナ出口側に寄せて微粉炭を濃縮した状態で噴出させ、高負荷時には台形リングをバーナ出口から離して濃縮しない状態で噴出させることで、負荷に関わらず微粉炭濃度を、ほぼ均一にできるバーナである。このような構造のバーナにより、濃縮時には外周部の微粉炭濃度を、管内平均濃度の2倍にまで濃縮できるため、通常の微粉炭バーナの最低負荷(40%)を、その半分(20%)まで低減できた。その一方で、旋回を使って濃縮するため、バーナからの微粉炭噴出時にも旋回力が残っており、 NO_x 還元炎形成に必要な再循環流に微粉炭が乗り難いという欠点もあった。

Fig.8 は、旋回力を用いずに微粉炭を濃縮するために開発されたバーナであり⁷⁾、旋回流のない流れ場においても、流線式のリングにより滑らかに微粉炭を外周部に濃縮でき、Fig.7のバーナとほぼ同等の濃縮機能を有することが

Fig.6 Relationship between minimum load and fuel ratio for each burner.

Fig.7 Concept of the wide-range burner.

Fig.8 Concept of the CI-α burner.

(a) Instantaneous distribution of streamwise velocity

(b) Vertical distributions of concentration ratio

Fig.9 Flow and concentration ratio behavior.

明らかになっている。さらに、旋回流を用いていないため、3章で述べた NO_x 発生量が低く燃焼効率の高い技術との両立が可能であり、現時点では最も優れた燃焼技術であると考えられる。

今後は、3章での記述と同様に、多様な石炭種に対しても低負荷での安定燃焼を達成できる必要があり、しかも、出力変動の大きな自然エネルギーなどの導入に応じて、さらなる負荷変動能力の向上、最低負荷の低減が必要とされると思われる。そのためには、バーナに容易に組み込め、しかも微粉炭の濃縮機能が高く、かつ濃縮率を速やかに調整できる微粉炭バーナの開発が必要である。そのための基礎検討として、濃縮機構周りを対象とした数値シミュレーション技術の開発も進められている。**Fig.9**は濃縮機構周辺の流れ場の構造および濃縮率である⁸⁾。数値シミュレーションにより、濃縮機構周辺の流れの構造や、それにより引き起こされる濃縮現象がよく捉えられていることがわかる。数値シミュレーションを活用することにより、バーナ開発にむけた実験回数を大幅に低減できるものと考えられる。

微粉炭など粉体の濃縮には、これまで述べたように、気流の方向転換などによる慣性力の利用が簡便であるが、さらなる濃縮性能向上、さらには、慣性力の弱い微粒子の濃縮を行うためには、静電気力や熱泳動力などの他の作用を用いた粉体挙動制御方法の利用も有効であると思われる。

また、微粉炭粒子径の微細化は微粉炭の着火性の向上にも有効であり、高度濃縮法の開発とともに、微粉炭粒子径を一層微細にできる粉碎技術の確立なども今後重要になる

ものと思われる。

5. おわりに

賦存量が豊富で、今後も主要な化石燃料と考えられている石炭の利用法として最も一般的な微粉炭火力において、その供給力強化のための燃料多様化技術、ならびに電力需要の変動に対して適切に対応できる負荷追従性向上技術について、最新の研究成果を紹介するとともに、今後期待される技術を概説した。

燃料多様化においては、様々な石炭種に対して低い所要動力で効果的な微粉碎が可能な技術を開発するとともに、バーナ噴出後の微粉炭と燃焼用空気との混合過程を最適化し、高い燃焼効率を維持したまま NO_x 発生を抑制できる燃焼技術の開発が重要となる。そのためには、バーナ噴出空気の噴出角度、流量比、旋回強度が粉体挙動に及ぼす影響を詳細に解明し、最適な粉体挙動制御技術を確立することが必要になる。

一方、負荷追従性の改善においては、微粉炭粒子の微細化による燃焼性向上と、バーナからの噴出直前に、微粉炭粒子濃度の大幅濃縮を図れるバーナの開発が重要となる。そのためには、前述した高性能な微粉碎機に加え、静電気など粉体挙動に大きな影響を持つ粉体の移動作用を効果的に活用した濃縮法を確立することが必要である。

これらの技術が実現し、ほとんどの石炭種が微粉炭火力で活用可能になることに加え、炭化していないバイオマスの利用も可能になるなどの燃料多様化が促進されるとともに、電力の必要需要に応じた高速な負荷変化が可能で、一層スマートな微粉炭火力発電技術が確立されることを祈っている。

参考文献

- 1) 牧野尚夫、木本政義：化学工学論文集、**20** (1994) 747-757.
- 2) 牧野尚夫、木本政義、氣賀尚志、遠藤善彦：火力原子力発電、**48** (1997) 702-710.
- 3) M. Kimoto, M. Ikeda, H. Makino, T. Kiga and Y. Endo: JSME International Journal, Series B, **41** (1998) 1071-1078.
- 4) M. Ikeda, H. Makino and Y. Kozai: JSME International Journal, Series B, **45** (2002) 506-511.
- 5) S.Y. Ahn, T. Syoji, H. Watanabe, N. Hashimoto and K. Tanno: 35th International symposium on combustion (2014).
- 6) 小谷田一男、沖裕壮、宮前茂広、氣賀尚志：火力原子力発電、**45** (1994) 280-288.
- 7) 牧野尚夫、木本政義、氣賀尚志、遠藤善彦：火力原子力発電、**50** (1999) 790-798.
- 8) 山本晃、中嶋朗、丹野賢二、辻博文、白井裕三：化学工学会第79年会 (2014).