

エネルギー安定供給と環境保全に向けた石炭火力高度化に 貢献する粉体工学

Powder Technology for the Development of Advanced Coal Utilization Power Plant Contributing to the Energy Security and Environmental Protection

牧野 尚夫, 野田 直希

Hisao MAKINO, Naoki NODA

電力中央研究所

Central Research Institute of Electric Power Industry

Abstract

Coal is very important energy resource now and for the future, because minable reserves of coal are more abundant than other fossil fuel. Powder technology is one of the most useful key technology for coal utilization from coal mining process to flue gas treatment process after coal utilization for power generation.

In this paper, the role of powder technology in conventional pulverized coal combustion power station is introduced at first. And the development tendency of powder technology for the improvement of conventional pulverized coal combustion power station and the development and progress of higher performance new type power generation system using coal gasification process are discussed.

1. はじめに

石炭は、可採埋蔵量が豊富なことに加え産出国に極端な偏りもないため、安定供給性に優れた化石燃料として、現在の主要なエネルギー源であるだけでなく、将来的にも重要な燃料であると目されている¹⁾。

その一方で石炭は、不燃の灰分を他の化石燃料に比べて多く含み、硫黄分、窒素分などの含有率も高いため、その利用にあたっては、SO_x、NO_x、ばいじん（粒子状物質）など、環境汚染質の排出抑制のための環境対策が重要となる。また、温室効果ガスとして近年注目されているCO₂の排出量も多いため、その抑制も重要な課題となっている。

本稿では、環境保全に配慮しつつ石炭を効率的に利用するための最新技術の開発状況を、粉体工学的視点から紹介する。まず、現在最も良く利用されている微粉炭火力技術に関して、低NO_x燃焼技術や集じん技術、脱硝技術など環境対策技術を中心に粉体工学の貢献内容を解説し、次に、今後の発展が期待される石炭ガス化を利用した新型火力技術に関して、粉体工学の

新たな研究分野への展開という視点から重要になると思われる技術について概説する。

2. 微粉炭火力の高度化に関わる粉体工学

2.1 微粉炭火力の概要と運用状況

石炭を燃料とした火力発電方式として現在の我が国で用いられているシステムは、図1にフロー例を示す微粉炭火力発電がほとんどである。石炭火力で使用する石炭のほぼ全量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などを経て、発電所等の貯炭場にて保管する。

石炭の利用にあたっては、空気輸送しやすく、かつ燃焼しやすい微粉炭にするため粉砕が行われる。最近の微粉炭火力では、図2のようなローラーミルを用いて、中位径40 μ m程度まで粉砕することが多くなっている。微粉炭の粒子径が小さくなると、燃焼時に発生する窒素酸化物(NO_x)の低減(低NO_x燃焼)ならびに未燃損失の低減に効果があるなど、その粒子径

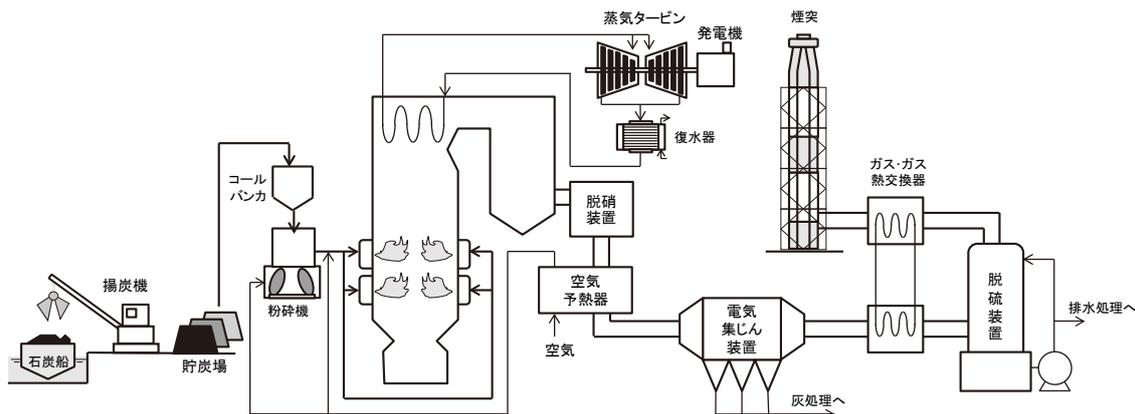


図1 微粉炭火力発電所の概要

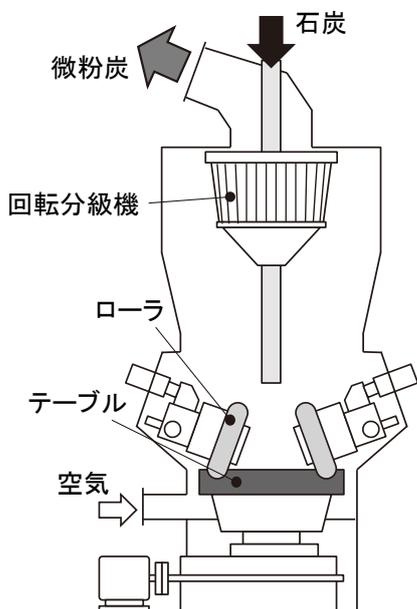


図2 ローラーミルの概要

は、環境保全性にも大きく影響するため、管理が非常に重要となる。また、近年、燃料供給源強化の視点から炭化度の低い低品位炭などが用いられるようになってきていることに加え、再生可能エネルギーとしてバイオマス混合利用が行われるなど、燃料多様化が進められている。これらの新たな燃料に対する粉砕性の評価手法ならびに粉砕条件の最適化技術なども注目されている。

微粉炭火力では、蒸気タービンによる発電が用いられており、火炉で微粉炭を燃焼して発生させた高温の熱を蒸気に伝え、高温・高圧の蒸気によりタービンを駆動・発電する。

微粉炭燃焼後の排ガスは、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、脱硫装置によるSO_x分離などの排ガス処理を経て、クリーンになった後に煙突から排出される。

2.2 微粉炭火力の環境対策と粉体工学の役割

微粉炭の燃焼装置においては、NO_xの生成を抑制すると共に、高い燃焼効率を維持し、生成石炭灰がセメント混和剤などに有効利用しやすい条件である灰中未燃分濃度3%以下にするための高度な燃焼制御技術が必要となる。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、図3に示すような概念の燃焼火炎を実現することが重要と考えられている²⁾。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ようにし、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る事を可能にするための、火炉内微粉炭粒子の挙動制御が求められている。その一つの方法として、バーナから供給する燃焼用空気の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た上で、最も効果的に還元炎形成と燃焼促進を図れる構造のバーナの開発がなされている。このような概念のバーナの採用により、図4に示すようにNO_x・灰中未燃分とも従来方式に比べ大幅に低減できることが明らかになっている²⁾。微粉炭粒子の火炎内挙動制御の高度化は、さらなるNO_xと灰中未燃分の低減のため、今後益々重要になると考えられている。

微粉炭火力の環境対策で、最も粉体と関わりが深いのは電気集じん装置である。本装置は、コロナ放電している電界内で、粒子を帯電捕集するものであり、圧力損失が低く集じん性能も高いため、我が国のほぼすべての微粉炭火力で用いられている。特に最近では、

100℃以下の温度条件で操作することにより、石炭灰の電気抵抗を下げて集じんしやすくする低々温電気集じん技術が導入され、一層高性能で信頼性の高い技術として確立されている。ただ、その一方で近年、微粉炭火力で用いられる石炭種がますます多様化しており、低々温電気集じん装置においても、捕集石炭灰の電気抵抗が高いことによる荷電不良が生じ、性能が低下する石炭種が現れている。図5は、石炭灰の電気抵抗と関係の深い、灰中のNa, K含有率から求めた評価因子と、集じん性能の関係を示している³⁾。Na, Kの含有率低下により、集じん性能も低下し、特にその傾向はNa, Kが少ない領域において顕著である。なお、図中には複数の石炭を混合燃焼させた場合の結果も示すが、混合燃焼で石炭灰中のNa, Kの量を調製することにより集じん性能は十分に改善できることが明らかになっている。

脱硝装置においてはセラミックスの触媒が用いられており、その製造に粉体工学が関わることは言うまでもないが、近年注目されている課題としては、長期間の使用により触媒表面に石炭灰粒子が付着して、触媒性能の劣化が生じることが挙げられる。脱硝触媒には様々な形状があるが、ハニカム形状を例にすると、図6に示すように、6～9 mm程度の細い矩型の流路が並列に多数組み合わせられた構造となる。触媒に流入する前の煙道は、数十m規模の大きさであり、この大きな煙道を通して流れていたガスが、触媒入口部で分割されて、数mmオーダーの細い流路に流れ込むことになる。すなわち、レイノルズ数が大きく乱流状態であったガスが、触媒の細い流路に入ることによりレイノルズ数が極端に低下した状態になり、層流状態へと遷移していくと思われる。ガス中に含まれる石炭灰粒子に着目すると、煙道内において乱流状態でランダムに

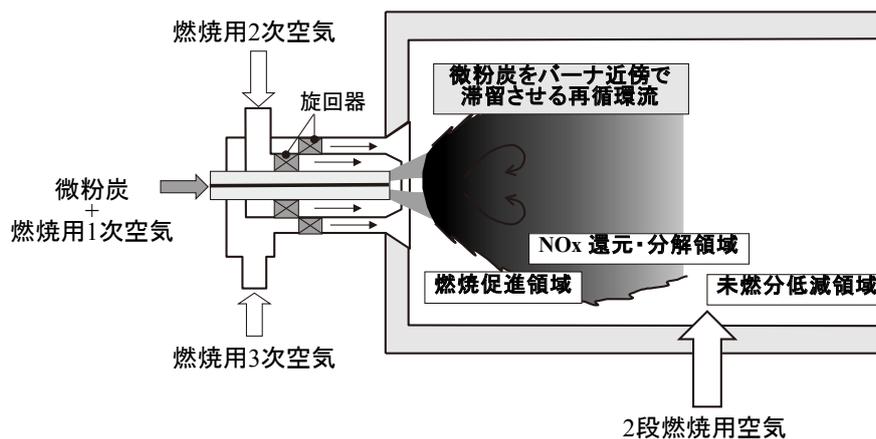


図3 低NOx 燃焼方式の概念

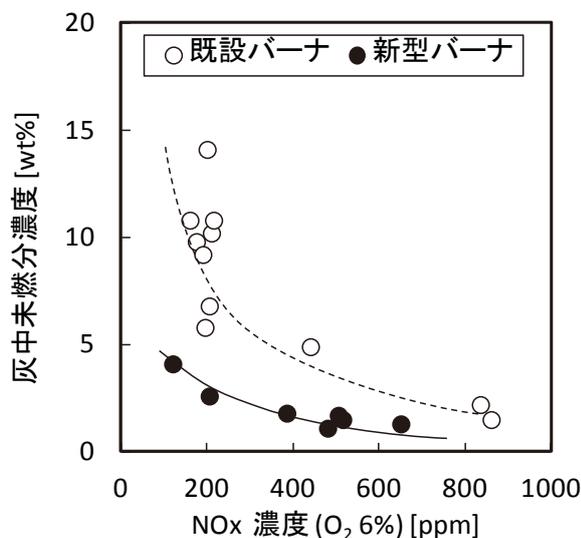


図4 新型低NOx バーナのNOx・灰中未燃分濃度

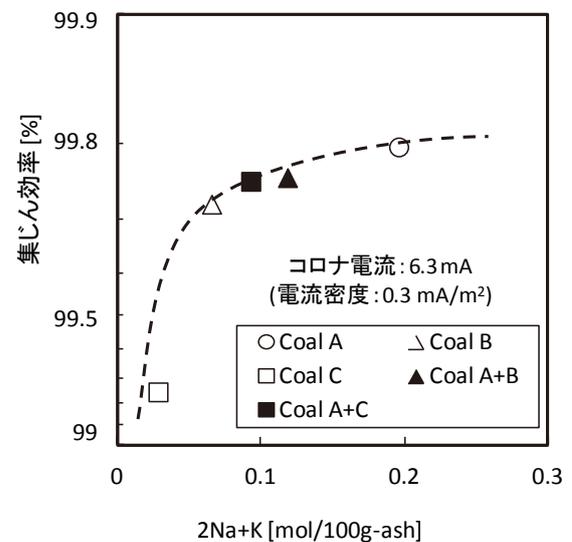


図5 集じん性能に及ぼす石炭灰組成の影響

運動していた粒子が触媒部に流入し、しばらくは乱れによる触媒壁面への衝突を継続した後、徐々に流れ場の層流への遷移に応じて壁面に衝突し難い状態に変化している。図6は、触媒内粒子付着量の流れ方向の変化を数値計算により推定した結果を示したものである⁴⁾。触媒壁面への粒子付着は、ガス流れが乱流状態を保っている触媒入口部で大きくなることを示しており、この結果は、使用済み触媒の分析結果とも良く一致している。今後は、触媒入口部の石炭灰粒子挙動の制御により、触媒劣化を抑制する技術開発へと展開することが期待されている。

3. 新型石炭火力開発に関わる粉体工学

3.1 新型石炭火力の概要と開発状況

我が国の微粉炭火力は世界で最も高い発電効率を示しているが、さらなる二酸化炭素排出量の低減および石炭使用量の節減のため、石炭火力の発電効率を一層向上させる試みが続けられている。微粉炭火力の高効率化技術として、蒸気タービンにおける蒸気条件の高温・高圧化による発電効率の改善が図られているが、発電効率をより一層向上させるため、微粉炭火力とは異なるまったく新しい発電システムの開発も進められている。石炭火力の発電効率を大幅に向上できるシステムとしては、ガスタービンや燃料電池などの高性能

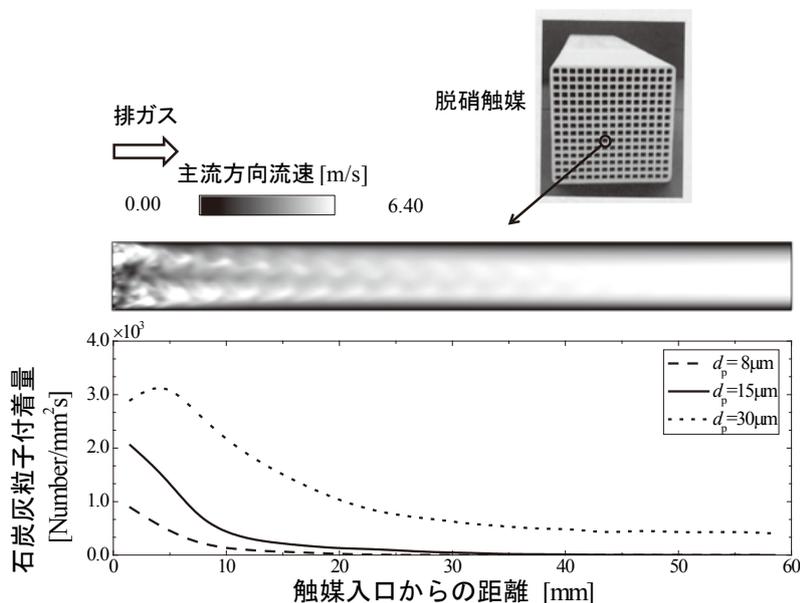


図6 脱硝触媒の構造とガス流速および付着石炭灰分布

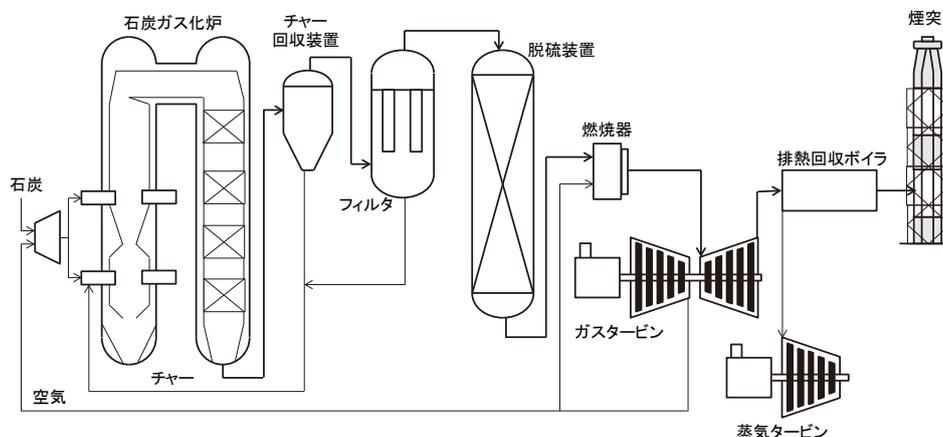


図7 石炭ガス化複合発電方式の概要

発電装置をシステムに組み込み、蒸気タービンと組み合わせた、石炭ガス化複合発電方式および石炭ガス化燃料電池複合発電方式などが挙げられる。

石炭ガス化複合発電方式は、図7に示すように粉碎した石炭を低空気比でガス化し、発生した可燃性ガス中に含まれる粒子状物質や硫化水素などの不純物を除いた後にガスタービンで燃焼し、生成した高温ガスで直接ガスタービンを作動し発電する。さらに、その廃熱を蒸気で回収した後、蒸気タービンでも発電する。このように、ガスタービンと蒸気タービンという二種類の発電装置を複合させているために高い発電効率が期待できる方式である。石炭をガス化するまでの貯炭管理や前処理については、基本的に微粉炭火力と大きな差異はない。また、石炭ガス化炉についても、微粉炭の燃焼装置とは空気比や操作圧力条件の違いなどはあるものの、粉体の高温反応装置という点では共通している部分が多い。石炭ガス化炉と微粉炭燃焼装置とで大きく異なる点としては、石炭ガス化炉においては炉内で石炭灰を溶融させ、ガス化炉底部より排出する点が挙げられ、溶融石炭灰粒子のガス化炉壁への衝突・分離技術の確立さらにはその高度化が重要となる。なお、石炭ガスをガスタービンに導入させるためには、ガスタービン上流にて高温・高圧条件のガスを脱硫・集じんなどによりクリーンにしておく必要がある。これらのクリーン化には、発電効率の一層の向上という視点からは、高温で操作できる乾式ガス精製技術の適用が不可欠であり、高温集じん装置の開発や、硫化水素などのガス状不純物を分離する乾式吸収剤の開発が重要になる。また、高温で利用するガスタービ

ンの寿命延伸のためには、高温材料技術の高度化も望まれている。

図8には、石炭ガス化燃料電池複合発電方式のフローを示す。石炭ガスを発生させクリーンにするまでは、石炭ガス化複合発電と共通の部分が多く、本システムにおいて固有となる主な粉体技術としては、燃料電池に用いる粉体材料の開発・高度化ならびに、その成形技術が挙げられる。

3.2 新型石炭火力の確立に向けた粉体工学の役割

石炭ガス化炉は高温・高圧で操作されるため、内部を完全に可視化することが困難であり、ガス化炉内部の粒子挙動を把握するためには、数値計算に頼らなければならない部分も多い。図9は、ガス化炉内部の粒子挙動の概要を示しているが、実際にはガス流速分布、粒子径、粒子運動の初期条件および、粒子の溶融状態などにより大きく異なる。これらの粒子挙動を、様々な形状およびスケールのガス化炉に対して、幅広い操作条件においても解析できるような手法を開発し、炉底からの石炭灰排出量など、実際の装置で得られる結果との比較により、一層信頼性・汎用性の高いものへと改善を進めている状況にある。

石炭ガスをガスタービンに供給する上で必要なガス精製技術のうち、高温集じん用にはセラミックスや金属粒子を焼結したフィルタが注目されており、既に集じん性能的には十分に要求を充たすものが開発されている。今後の課題としては、長期間使用した場合の寿命延伸が最重要となる。そのような観点から、低圧力損失で目詰まりを生じ難いフィルタの開発が強く望ま

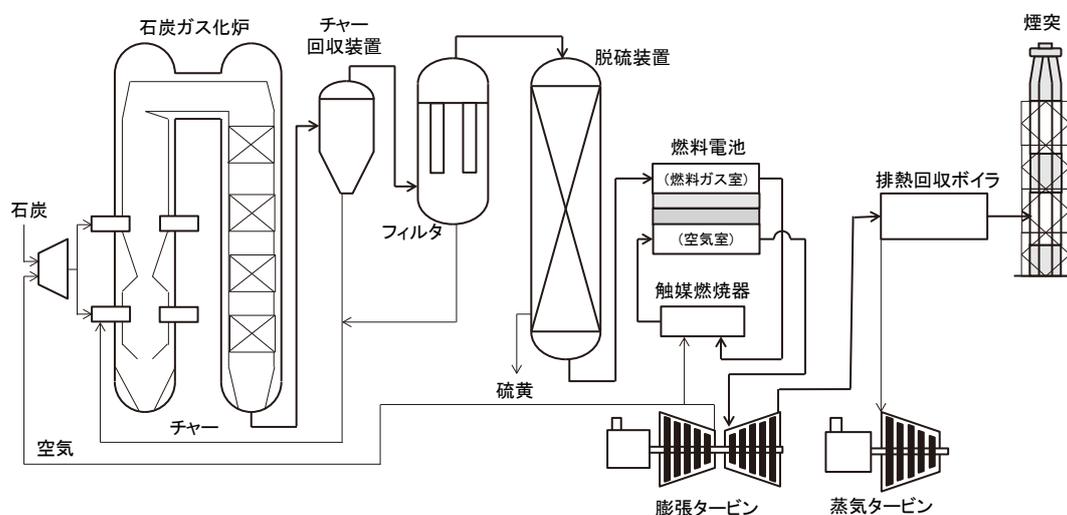


図8 石炭ガス化燃料電池複合発電方式の概要

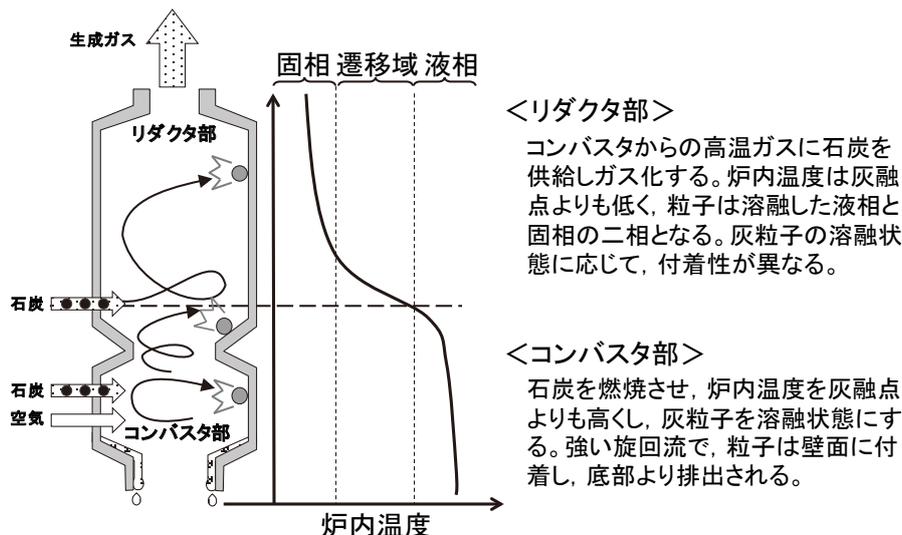


図9 石炭ガス化炉内部の粒子挙動の概要

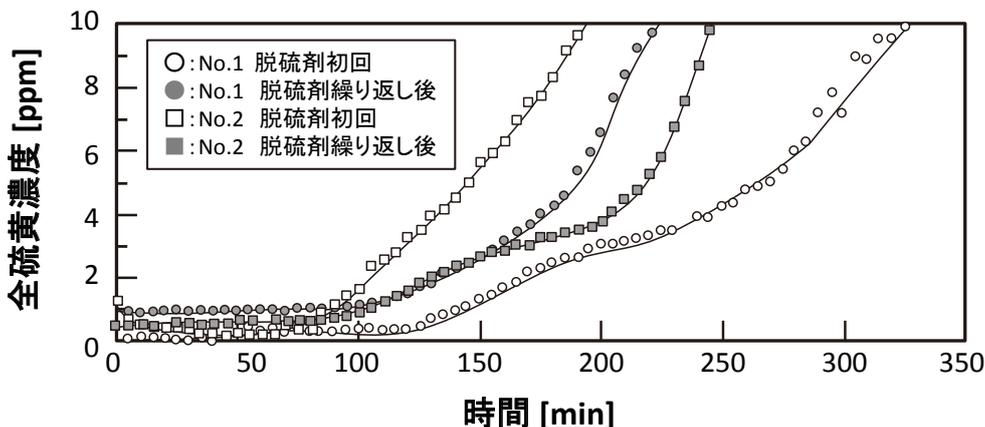


図10 脱硫剤の吸収性能（初期と再生後）

れている。

一方、硫化水素やハロゲン化合物などの乾式除去においては、脱硫用には鉄系あるいは鉄・亜鉛系の吸収剤の開発が進められており、微粉炭火力で用いられる脱硝触媒などと同様のハニカム形状に調整された吸収剤の使用が期待されている。ハロゲン化合物の除去に対してはアルミン酸ナトリウム吸収剤などの開発が進められている。このような固体吸収剤は、原材料粒子を微細化することで大きく性能を向上させることができる。また、粒子内の細孔構造制御も、大きく性能を改善するための重要な課題の一つである。ただ、これらの固体吸収剤は、長時間の使用のためには再生して繰り返し使用されることが多く、再生時のシンタリング等による劣化抑制も不可欠である。図10には、初期粒子径の異なる脱硫剤について、新品および再生後の

吸収性能を示すが、新品での性能と再生後の性能には必ずしも関連性はなく、最初に高性能を示したとしても、その性能を再生後も維持できるとは限らないことが明らかである⁶⁾。これらの様々な点を考慮した上での、吸収剤の粒子径や細孔構造の最適化が今後の重要な課題となる。

石炭ガス化複合発電などで利用されるガスタービンは高温の燃焼ガスで作動させるため高効率にできるが、その表面は高温ガスに触れることになり、高価な耐高温材料を利用する必要がある。耐高温用の金属材料の開発に加え、その表面に耐熱用の遮熱コーティングを行う技術の開発、コーティング用材料の開発など、粉体材料の視点も含めて粉体工学の活用が期待される。

一方、燃料電池はガス燃料の持っている化学的エネ

ルギーを直接電気エネルギーに変換するもので、水の電気分解の逆反応で発電している。直接発電方式であるため、高い発電効率が期待できる。燃料電池としては、発電用には高効率の視点から高温型の電池が注目されているが、中でも固体酸化物形燃料電池(SOFC)は大幅な高温化が期待できる方式である。ただし、すべてを固体材料で作成しているため、材料間の接触抵抗の低減、異なる材料の熱膨張率の差異の制御などが必要となり、原料となる粉体材料の調整ならびに、成型後にも材料性能を維持できるようにすることなど、その開発に向け粉体工学の果たすべき役割は極めて大きい。

4. おわりに

化石燃料の中で、最も供給安定性に優れ、今後も重要なエネルギー源と目される石炭の利用法について、環境保全性の視点から粉体工学との関わりや、今後のさらなる技術進展に向けた粉体工学の役割を概説した。

現在の主な石炭利用法である微粉炭火力においては、微粉炭の燃焼制御、電気集じん装置の性能向上、脱硝装置触媒の石炭灰による劣化評価など、様々な課題に対して粉体工学が重要な貢献を果たすことを明らかにした。石炭火力の発電効率を一層向上させるための石炭ガス化複合発電火力、石炭ガス化燃料電池複合発電火力などの新型火力においては、石炭ガス化炉内での熔融粒子分離技術や高温集じん技術、さらには乾式吸収剤および燃料電池材料などの高機能材料の開発など、一層幅広い視点から粉体工学が重要となることを紹介した。

粉体工学の積極的な活用により、供給安定性に優れた石炭火力の高効率化、クリーン化が、一層促進されることを祈念している。

引用文献

- 1) 経済産業省, “エネルギー白書2013”, エネルギーフォーラム.
- 2) 牧野尚夫, 木本政義, 気駕尚志, 遠藤喜彦: “微粉炭用新型低NO_xバーナの開発”, 火力原子力発電, Vol.48, pp.64-72 (1997).
- 3) 野田直希, 牧野尚夫, 葛西慎一, 中村秀樹, “微粉炭火力用低低温電気集じん装置の集じん性能に及ぼす石炭と石炭灰性状の影響”, 粉体工学会誌, Vol.50, No.2, pp.100-107 (2013).
- 4) 丹野賢二, 黒瀬良一, 道岡武信, 牧野尚夫, 小森悟, “ハニカム流路内の流れ挙動が気流中の粒子の壁面付着特性に及ぼす影響”, 粉体工学会誌, Vol.49, No.10, pp.738-744 (2012).
- 5) H. Watanabe, K. Ichikawa, M. Otaka and J. Inumaru, Numerical simulation of coal ash particle behavior in entrained flow coal gasifier, Proceedings of the Fourth ASME/JSME Joint Fluid Engineering Conference, FEDSM2003-45744, Hawaii, USA, 2003.7.6-11.
- 6) 白井裕三, 小林誠, 布川信, “鉄・亜鉛系酸化物脱硫剤の高温下におけるH₂S除去特性”, 日本エネルギー学会誌, Vol.77, No.11, pp.1100-1110 (1998).

Captions

- Fig. 1 Flow of conventional pulverized coal combustion power station
- Fig. 2 Overview of roller mill for coal
- Fig. 3 Concept of advanced low-NO_x combustion technology for pulverized coal
- Fig. 4 Effect of advanced low-NO_x burner on NO_x concentration and unburned carbon concentration in coal ash
- Fig. 5 Influence of coal ash property on collection efficiency of advanced low temperature electrostatic precipitator
- Fig. 6 Gas flow pattern and adhesion distribution of coal ash in the catalyst cell for selective catalytic de-NO_x equipment
- Fig. 7 Flow of integrated coal gasification combined cycle power generation system
- Fig. 8 Flow of integrated coal gasification and fuel cell combined cycle power generation system
- Fig. 9 Outline of the behavior ash particle in entrained bed coal gasifier
- Fig. 10 Performance of desulfurization sorbent (Comparison of new sorbent and regenerated sorbent)