



低炭素社会の電力供給を支える石炭火力発電技術と粉体工学

Coal Utilization Power Engineering and Powder Technology for the Stable Power Supply in Low-Carbon Society

牧野 尚夫¹, 野田 直希²
Hisao MAKINO¹, Naoki NODA²

¹ 一般財団法人 電力中央研究所 首席研究員

² 一般財団法人 電力中央研究所 上席研究員

¹ Executive Research Scientist, Central Research Institute of Electric Power Industry, JAPAN

² Senior Research Scientist, Central Research Institute of Electric Power Industry, JAPAN

抄 録

石炭は、化石燃料の中で最も賦存量が多く、長期的に安定供給が見込まれる優れたエネルギー源であるが、温室効果ガスとして注目されているCO₂排出量が多い等の課題を有している。石炭を、低炭素社会に適合させつつ利用するための方式として、高効率な発電技術、CO₂回収と組合せた技術および、カーボンニュートラルなバイオマスとの併用技術などの開発状況を、粉体工学的視点から紹介する。また、負荷変動の激しい自然エネルギーの欠点を補う上でも重要な、負荷応答性に優れた石炭火力技術開発における粉体工学の役割を明らかにする。

ABSTRACT

Coal is expected stable supply for the future because minable reserves of coal are more abundant than that of other fossil fuel. But, coal utilization has the problem that emission amount of carbon dioxide (CO₂) becomes large. As the effective method of coal utilization for power generation, high efficiency power generation system, CO₂ capture and storage system and utilization system of biomass in coal fired power plant are investigated. In this paper, the role of powder technology for the development of these power generation systems is introduced. Furthermore, the subject of powder technology for the development of coal fired power plant which has high turn-down ability to support the problem of natural energy including solar power and wind power etc. is explained.

1 はじめに

石炭は、現在のエネルギー供給の大半を占める化石燃料の中で最も可採埋蔵量が豊富であり、産出国に極端な偏りもないため、安定供給性に優れた燃料として、現在だけでなく将来に亘っても重要なエネ

ルギー源であると期待されている。しかし、石炭は固体であるため、気体燃料や液体燃料に比べ輸送に困難が伴い、また塊炭の状態では、完全に反応させるのに時間がかかるという課題もある。これらを改善するためには、石炭を空気に浮遊させて搬送しやすくするとともに、比表面積を増加させて反応性を

向上させることを目的に微粉炭として用いるなど、粉体技術を基にした利用方法が重要となる。

さらに、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、その利用時には、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。加えて、他の化石燃料に比べて炭素含有率が高いため、温室効果ガスとして近年注目されているCO₂排出量も多く、その排出量低減が急務になっている。

本講演では、発電分野における石炭の位置づけと、環境保全に配慮しつつ低炭素化を進めている石炭火力の現状を紹介した後、一層の低炭素化に向けた最新の技術開発の状況を解説する。特に石炭は、微粉炭として利用されることに加え、環境対策装置を始めとする主要構成装置において粉体技術との関わりが多いので、粉体技術の新たな活用という視点から重要になるとと思われる内容についても紹介する。

2 石炭火力の現状と低炭素化に向けた課題

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に示す微粉炭火力発電がほとんどである。微粉炭火力発電所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、インドネシ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、貯炭場にて保管する。

石炭の搬送性と燃焼性を向上させるため、粉砕機

にて、石炭を中位径で40 μm程度の微粉に粉砕して使用する。生成した微粉炭は、燃焼用空気の一部を用いて搬送し、バーナから火炉に噴出させ燃焼させる。微粉炭の燃焼時に発生する熱は熱交換し蒸気を発生させて、蒸気タービンを回し発電している。火炉では石炭中の可燃分の99%以上が燃焼し、残った未燃炭素分は不燃の灰分とともに、後流の排煙処理システムに導入される。また、石炭には、石油や天然ガスに比べて、窒素分、硫黄分、灰分などが多く含まれるため、これらから生成される窒素酸化物(NO_x)、硫黄酸化物(SO_x)、ばいじんの濃度が高くなる。そこで、それぞれ脱硝装置、脱硫装置ならびに集じん装置による環境対策が施されており、これらの排出量は、現在では世界的に見ても最も低い水準にまで抑制されている。

石炭火力から排出されるCO₂量を、天然ガス、石油との比較で図2に示す。図示されるように、石炭利用時にCO₂排出量が最も多くなり、その対策が重要であることが明らかである（電気事業連合会、2015）。

3 低炭素化に向けた技術開発の現状

石炭利用に伴う、CO₂排出量の抑制方法としては、①炭素含有率の低い石炭を用いる、②発電効率の高い方式を利用し、使用石炭量を低減する。③発生したCO₂を回収・分離し、CO₂を貯留するなどが挙げられる。以下では、これらの方法について、開発の現状を述べる。

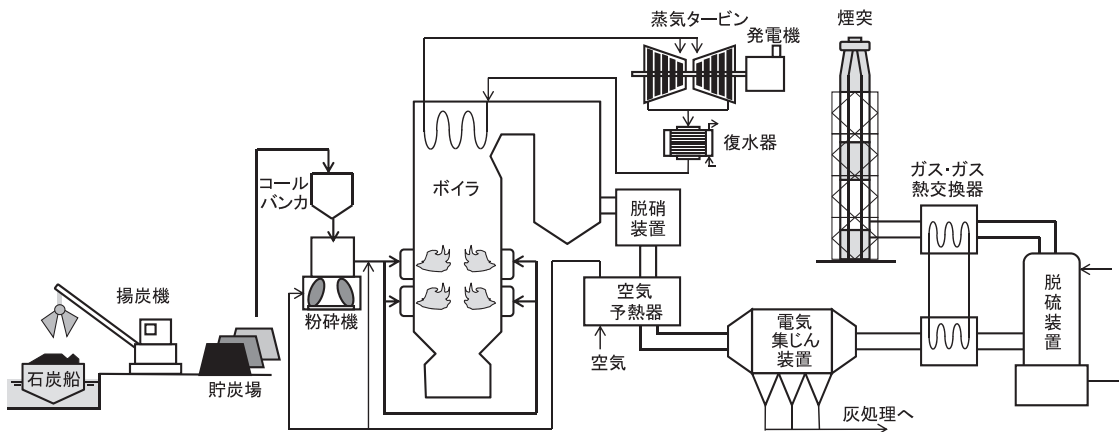


図1 微粉炭火力発電所フロー
Fig. 1 System flow of pulverized coal combustion power station

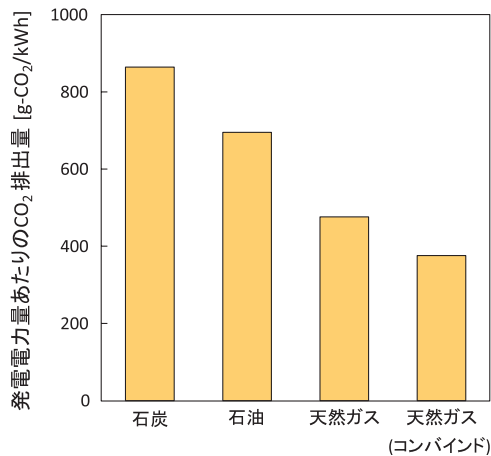


図2 化石燃料の発電電力量あたりのCO₂排出原単位
Fig. 2 CO₂ emission intensity for amount of unit power generation on fossil fuel utilization

3.1 燃料調整によるCO₂排出抑制技術

近年、燃料供給源強化の視点から、微粉炭火力でこれまで用いられてきた瀝青炭に比べ炭化度の低い低品位炭などが用いられるようになるなど、燃料多様化が進められている。炭化度の低い低品位炭は、燃料中の水素含有率が高く、炭素含有率が低いので、瀝青炭に比べてCO₂排出量が少なくできる。その一方で、低品位炭は、水分含有率が高いことなどに起因して、発熱量が低いという問題がある。このように、発熱量の低い石炭を効率的に利用するためには、燃焼技術の工夫が重要である。図3は、燃焼特性の異なる低品位炭を、バーナからの空気注入法の調整で瀝青炭に近い燃焼火炎となるように工夫した結果であり (Ikeda M. et al., 2002)、これらにより低品位炭の微粉炭火力での適用拡大を可能としている。さらに、極端に水分含有量が多い石炭には、改質・高品位化して用いる方法が検討されている。すなわち、

多孔質な石炭粒子中に含まれる石炭中水分の乾燥等による分離技術の適用である。図4は、石炭粒子中の水分を蒸発させずに分離する、ジメチルエーテル(DME)による抽出を用いる乾燥方法の概念を示したものである。DMEは常温・常圧では気体であるが、加圧により容易に液化でき吸湿性があるため、常温のまま石炭中の水分を分離できる。本方法は、まだ基礎研究段階であるが、低所要動力の脱水技術として注目されている (Kanda H. et al., 2008)。これらの石炭の脱水技術により、炭素含有率の比較的低い低品位炭を通常使用されている石炭と同様に使用出来るようにすれば、微粉炭火力で用いる石炭の種類も拡大でき、燃料供給力の強化と共に、CO₂排出量の低減にも貢献できる。

3.2 石炭火力高効率化によるCO₂排出抑制技術

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CO₂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としては、蒸気タービンの蒸気条件高温・高圧化による発電効率向上が図られているが、伝熱管材料の高温耐久性の点からは大幅な高温化は困難な状況である。そこで、大幅な発電効率向上に向け、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が進められている。石炭火力において、発電効率の大幅向上が期待できるシステムとしては、石炭をガス化することで気体燃料と同様に扱うようにし、この石炭ガスによりガスタービンや燃料電池などの高性能発電装置を駆動させ、さらに蒸気タービンと組み合わせる複合発電方式 (石炭ガス化複合発電方式、石炭ガス化燃料電池複合発電方式)

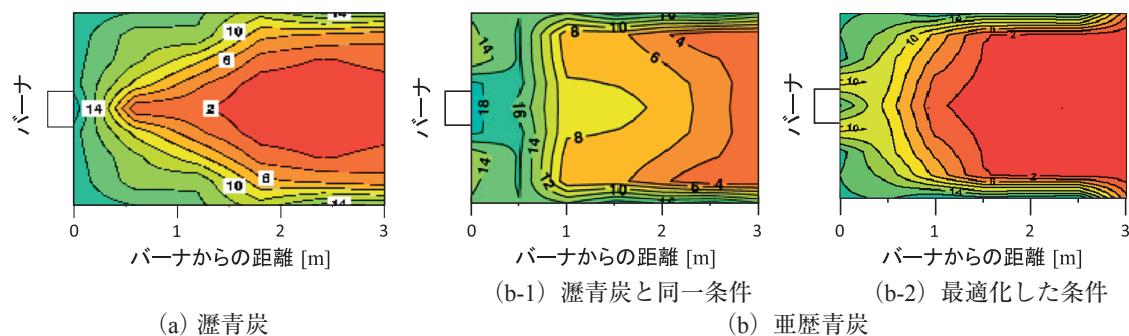


図3 瀝青炭と亜瀝青炭の火炎形状
Fig. 3 Flame shape of the bituminous coal and sub-bituminous coal combustion

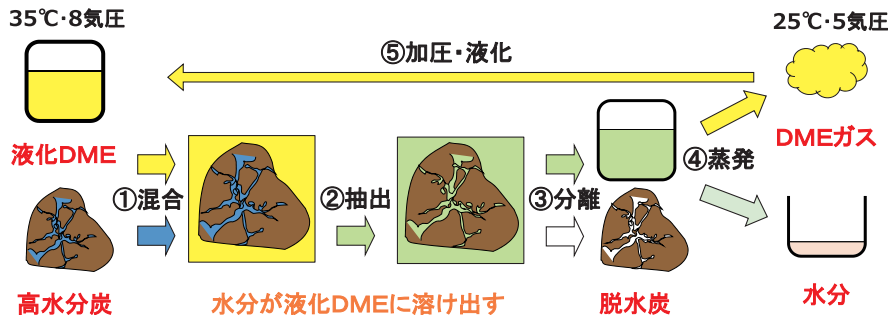


図4 DMEを用いた脱水技術の概要
Fig. 4 Concept of the extraction method using dimethyl ether (DME)

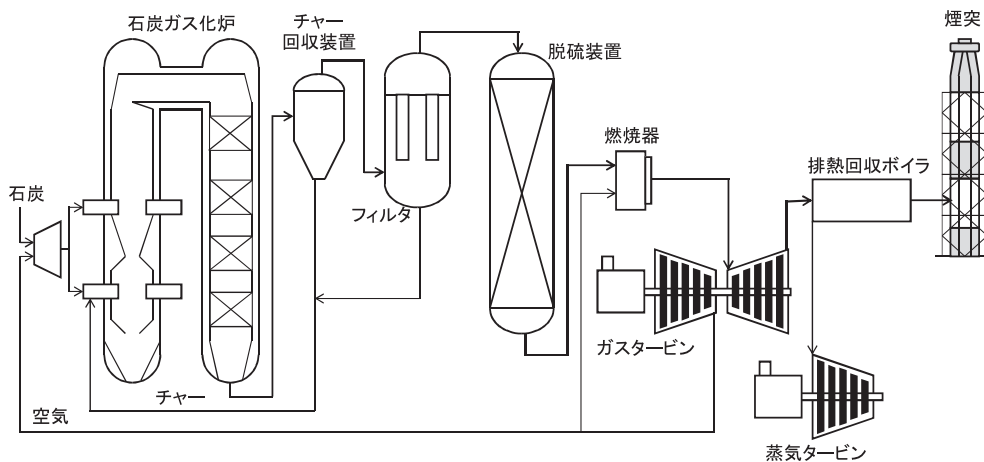


図5 石炭ガス化複合発電方式の概略
Fig. 5 System flow of integrated coal gasification combined cycle (IGCC)

の開発が進められている。

石炭ガス化複合発電方式では、図5に示すように粉砕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燃焼器で燃焼し、生成した高温ガスで直接ガスタービンを作動して発電する。さらに、その排熱を回収し蒸気を発生させて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。石炭ガス化炉の代表的な例として、わが国で実証試験を終了して商用機レベルに達した空気吹き二段噴流床方式を用いて、その原理を説明する。

図6は、空気吹き二段噴流床方式のガス化炉構造を示したものであり、下段をコンバスタ、上段をリダクタと呼ぶ。下段では、投入した石炭を理論空気比に近い条件で燃焼させ高温の燃焼ガスを発生させる。このガスに上段で新たに石炭を投入し、酸素が

不足した還元雰囲気にして、可燃性の水素と一酸化炭素を含む石炭ガスを発生させる。

この可燃性ガスを、ガスタービンあるいは燃料電池で利用すれば、高効率で発電できるが、石炭中には不純物を含むため、そのままでは天然ガスのように使用できない。まず灰分については、ガス化炉のコンバスタ部を高温にすることにより灰は熔融しガス化炉壁に衝突した後、火炉下部に流下してスラグとして排出される。スラグとして除去しきれなかった灰分は未燃炭素粒子と混在してガス化炉の後流に排出されるため、集じん装置で分離・回収され、ガス化炉にリサイクルされる。集じん装置としては、金属やセラミックスの粒子を焼結したフィルターなどが開発されている。また硫黄分については、石炭ガス中では硫化水素の形態が主となる硫黄化合物として存在し、その除去が重要となる。硫黄化合物の除去には、湿式吸収法が実用化されているが、湿式装置ではガス温度を低下させねばならず発電効率の低

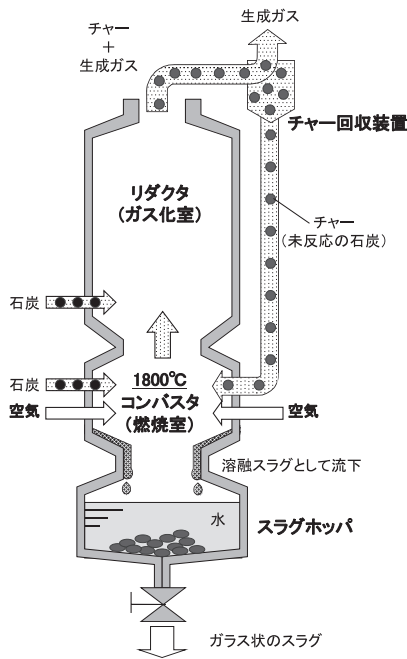


図6 空気吹き二段噴流床のガス化炉構造
Fig. 6 Concept of air blown two-stage type entrained bed gasifier

下を生じるため、高温でガスを処理できる乾式装置の実用化が期待されている。乾式脱硫法としては、鉄や亜鉛の氧化物粒子を用いた吸収剤の開発が進められており、既に吸収性能的には十分に適用に耐えるものが開発されている。今後、大型プラントとして、長時間の性能安定性、信頼性などが確認されれば、実用機においても採用されるようになると期待される。

これらの装置を経てクリーンになったガスは、ガスタービンで燃焼され発電に供される。ガスタービンでの発電効率を高くするためには、燃焼によって発生するガスが高温であるほど望ましい。現在、一層の高温化のための研究が進められており、その開発項目の一つとして、高温材料の開発、冷却技術の開発、材料表面コーティング技術の開発なども行われている。石炭ガス化複合発電の発電効率は、ガス精製方式やガスタービン操作温度など、様々な条件によって幅があるものの、図7に示すように、最高で48%程度が見込まれており、現在の最新の微粉炭火力に比べてCO₂排出量が15%以上も低減できる見通しが得られている(経済産業省, 2007)。

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いが、

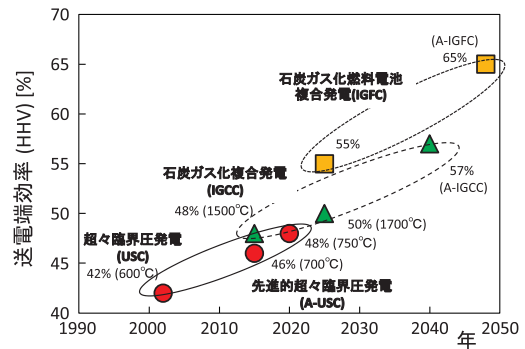


図7 各種発電方式の導入見込みと発電効率
Fig. 7 Prospect of the utilization of new type high efficiency power generation systems and generation efficiency

様々な不純物による燃料電池材料劣化の懸念があるので、ガス精製はより多様な物質に対応できることが望まれる。燃料電池としては、高効率化の観点から、固体氧化物形燃料電池や熔融炭酸塩形燃料電池などの高温用燃料電池の適用が期待されている。これらの燃料電池を構成する電極材料の高性能化、信頼性向上は非常に重要であり、様々な粉体材料の開発・高度化ならびに、その成形技術がますます重要となる。燃料電池で発電した後のガスは、石炭ガス化複合発電と同様にガスタービンでの発電、蒸気タービンでの発電に供されるため、発電効率が非常に高くなる。図7には、石炭ガス化燃料電池複合発電の発電効率の見通しも示すが、石炭ガス化複合発電以上に高効率が期待できることが明らかになっている。

3.3 CO₂ 回収・貯留技術による排出抑制技術

石炭ガス化複合発電や石炭ガス化燃料電池複合発電の開発は、着実にCO₂排出量を低減できるものの、相対値として20%前後の低減であり、極端にCO₂排出量を低減させる必要が生じた時には、CO₂を分離・回収した上で隔離貯留する方法を検討せざるを得ない。本節では、CO₂回収・貯留技術の開発の状況を解説する。

CO₂回収技術としては、主な方式として図9に示す三つの方法が検討されている。一番シンプルな方式としては、微粉炭火力発電所において脱硫装置の後流にCO₂濃縮回収装置を設置する方法が挙げられる。CO₂濃縮回収装置としては、化学吸収法、物理吸収法、物理吸着法、膜分離法などが検討されているが、最も開発が進んでいる方法は、アミン系の吸収液を用いた化学吸収法であり、既に実用化レベ

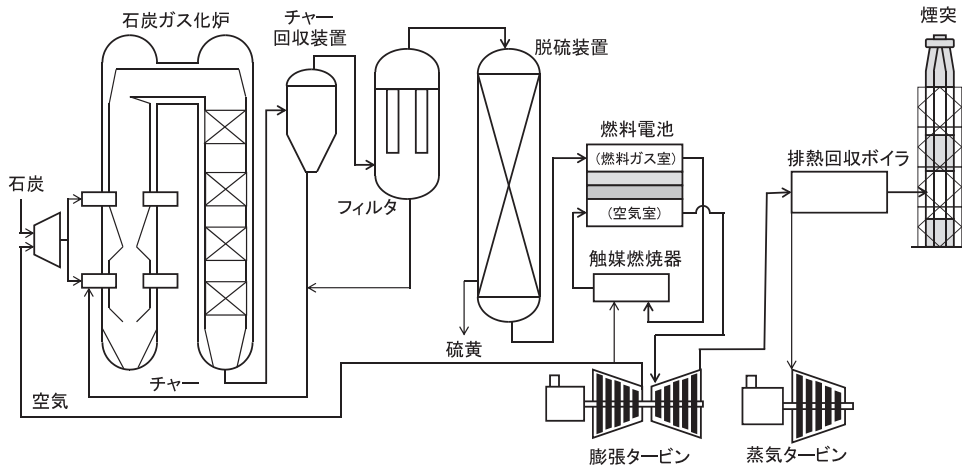


図8 石炭ガス化燃料電池複合発電方式の概略
 Fig. 8 System flow of integrated coal gasification fuel cell combined cycle (IGFC)

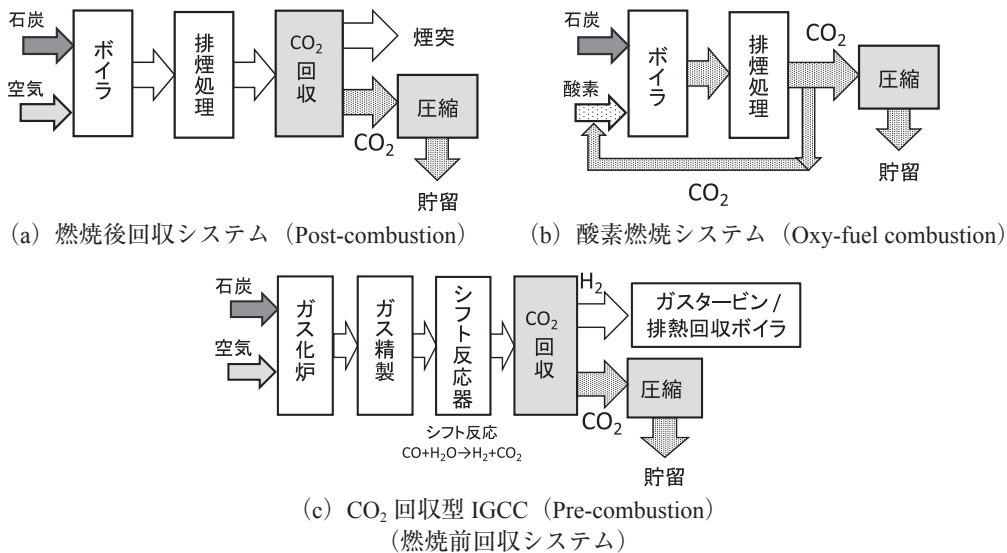


図9 火力発電に対する各種CO₂回収技術
 Fig. 9 CO₂ capture methods on thermal power plant

ルにあると言ってよい。次の酸素燃焼法は、空気を酸素と窒素に分離し、酸素で微粉炭を燃焼することで排ガス中のCO₂純度を高め、CO₂を濃縮装置なしで回収する方式である。酸素燃焼では燃焼温度が非常に高くなるので、排ガスを循環させ、排ガスにて酸素を希釈した条件で燃焼させる。本法は、CO₂を濃縮せずに回収できるだけでなく、燃焼時に発生するNO_xを低減できるなどのメリットを有することが分っており、小さな規模の発電所ではあるが、実証試験も行われている。しかし、これらの微粉炭火力からCO₂を回収する方式は、微粉炭火力の発電効率を相対値で約20%~30%低下させると見込まれて

いる。これに対し、発電効率の高い石炭ガス化複合発電からCO₂回収を行う方法として、燃焼前回収方式が検討されている。本方式は、石炭ガスに水蒸気を注入しシフト反応を起こさせることにより、H₂とCO₂を主成分とするガスにしてCO₂を分離した後に、H₂をガスタービンに流入させて複合発電を行うものである。石炭ガス化複合発電の発電効率が高い事に加え、高圧かつCO₂濃度の高いガスからCO₂回収を行うため、比較的高い発電効率に出来る。これらの方式について、発電効率の試算例を図10に示すが、いずれにしてもCO₂を回収しない方式に比べ、かなりの効率低下が見込まれている(DOE, 2007)。

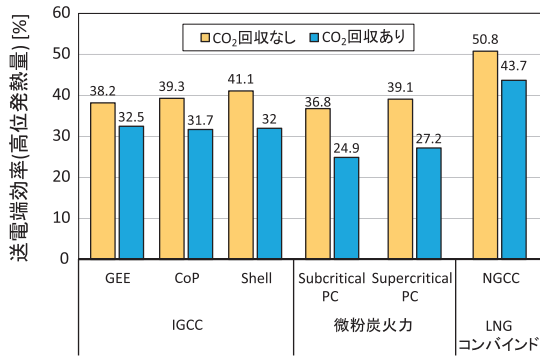


図 10 各種発電方式の CO₂ 回収時の発電効率の試算例
 Fig. 10 Comparison of generation efficiency of coal power plant with and without CO₂ removal

CO₂ 回収に伴う効率低下を抑制するために、報告者らが現在検討している方式が、O₂-CO₂ 吹きクロズドサイクル IGCC である (沖ら, 2014)。本方式は、図 11 に示すように、石炭ガス化複合発電に酸

素燃焼を組み合わせた方式である。すなわち、ガス化炉、ガスタービン燃焼器ともに、酸素と循環排ガスとの混合ガスで反応させるものである。酸素燃焼方式と同様に CO₂ を濃縮せずに回収できることに加え、ガス化炉の還元雰囲気では循環ガス中の CO₂ もガス化剤として作用するためガス化効率が上がることで、CO₂ はガスタービンの作動流体として特性が優れていることにより、高い発電効率が期待できる方式である。図 12 には、本方式の発電効率を示すが、CO₂ をほぼ 100% 回収しても、CO₂ を回収しない最新の微粉炭火力並の発電効率を示せることが明らかになっている。また、本方式は燃料電池との組合せも可能であり、その場合には一層の効率向上が期待できる。今後、本方式の実現に向け、様々な要素技術の開発を進めて行く予定である。

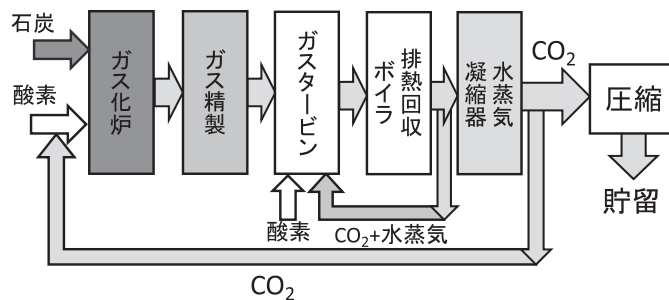


図 11 O₂-CO₂ 吹き石炭ガス化複合発電システムのフロー例
 Fig. 11 System flow of O₂/CO₂ blown IGCC

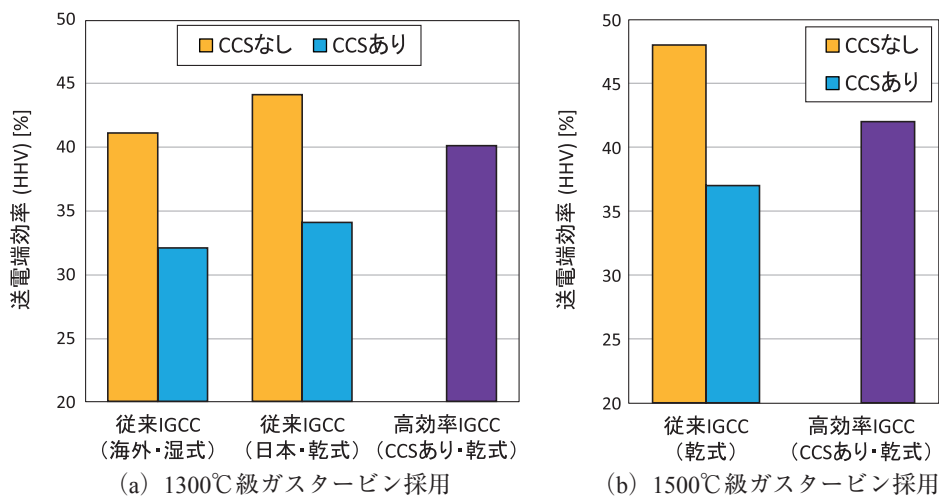


図 12 O₂-CO₂ 吹き石炭ガス化複合発電システムの効率試算例
 Fig. 12 Power generation efficiency of O₂/CO₂ blown IGCC

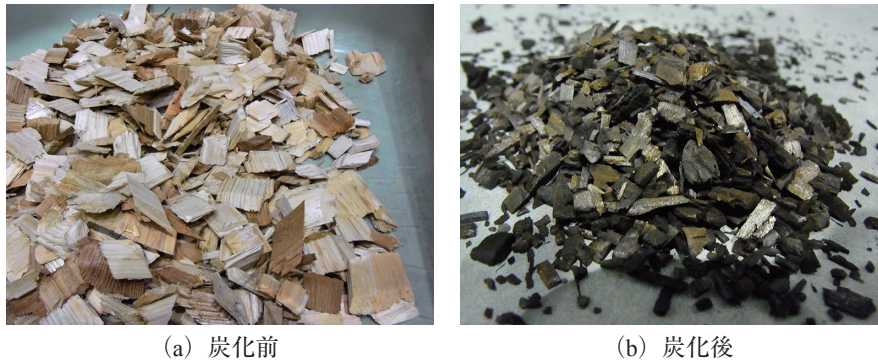


図 13 木質チップの炭化前後の外観
Fig. 13 Appearance of wood tip before and after the carbonization

4 再生可能エネルギー利用拡大時の石炭火力の役割

CO₂ 排出抑制の視点からは、再生可能エネルギーの利用も重要となる。再生可能エネルギーの中で、石炭火力と最も関わりの深いバイオマスの利用に関しては、微粉炭火力への混焼利用などが進められている。しかし、バイオマスは粉碎性に難点があり、石炭に対して数%しか混焼できないのが現状である。この問題点を解決する技術として、バイオマスを乾燥するだけでなく燃料性状を化石燃料に近づけられる炭化技術が注目されている。本技術は、バイオマスをキルンなどの装置で乾留し、炭化燃料を製造するものである。図 13 は、炭化したバイオマスの外観を原料の外観とともに示す。炭化により、外観も石炭に近づいていることが分かる。炭化により、可燃分の一部を失うことになるが、その一方で石炭と混合した際の粉碎動力の増加が抑えられる。炭化バイオマスを成形して密度を石炭に近くすれば、混焼割合を大幅に増大できるようになるため、バイオマス

の大量導入に対応できる技術として有望である。

自然エネルギーとして期待の大きな、太陽光、風力などは、気象条件によって出力が大きく変動するため、その変動を、他の発電技術による出力調整で吸収する必要がある。これらの出力調整の多くは火力発電設備で行うことが期待されており、微粉炭火力の出力調整技術の向上が望まれている。微粉炭火力で出力を低下させる際には、石炭の供給量を減少させる必要があるが、微粉炭搬送用の空気量を減らすと搬送が困難になるので、空気量はあまり低減できず、バーナから噴出する微粉炭の濃度が低下して燃焼が不安定になる。これまで、微粉炭燃焼で低負荷時に生じる燃焼不安定を改善するための装置として、図 14 に示すような微粉炭粒子のバーナ外周部への濃縮装置などが開発されてきた (Makino H. et al., 1999)。今後、濃縮機能が高く、かつ応答性の早い技術の開発が行えれば、自然エネルギーを一層有効に使用できるようになると考えられる。

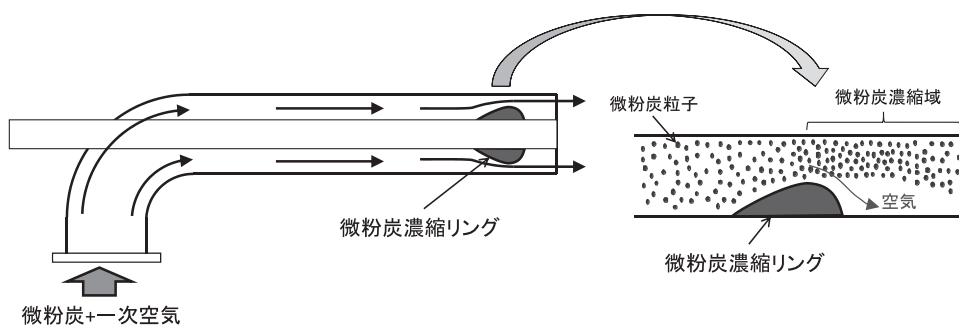


図 14 微粉炭の濃縮機構の概念図
Fig. 14 Structure of the burner with the streamlined ring for the concentration of coal particles

5 おわりに

石炭は長期的に安定供給が見込める、今後も重要なエネルギー源の一つであるが、炭素含有率が高いため、低炭素社会の構築のためには、様々な技術開発により CO₂ 排出量の削減を図っていく必要がある。

CO₂ 排出量削減方法として最も確実で、かつ燃料使用量の節約にもつながる方法は、発電効率の向上であり、石炭ガス化複合発電、石炭ガス化燃料電池複合発電などのガス化技術を活用した発電システムの開発・実用化が着実に進められている。また、石炭火力からの CO₂ 排出量大幅削減のためには CO₂ 回収・貯留を組み合わせた方式の開発も注目されており、高効率発電との両立の視点からは、石炭ガス化を利用した CO₂ 回収技術の開発が重要となってい

る。一方、再生可能エネルギーとして注目されているバイオマスの石炭火力への利用や、太陽光や風力発電などの出力変動を合理的に吸収できる石炭火力の開発により、バイオマスや太陽光、風力などの一層の導入を可能とし、低炭素化に大きく貢献することも可能である。

これらの低炭素化に貢献できる石炭火力発電技術の開発に関しては、それを構成する様々な装置において、粉体バンドリング技術が重要となってくる。今後は、粉体工学のさらなる活用により、高効率化、燃料多様化、CO₂ 回収などの幅広い視点から石炭火力の高度化を進め、低炭素社会の構築と、エネルギーの安定供給の両立を着実に進めて行くことが重要であると考えている。

References

- 1) DOE (Department of energy), Cost and performance baseline for fossil energy plants, (2007), <www.netl.doe.gov/File%20Library/Research/Energy%20Analysis/Publications/Rev-2b-Vol-1b-IGCC_final.pdf>
- 2) Ikeda M., Makino H., Kozai Y., Emission Characteristics of NO_x and Unburned Carbon in Fly Ash of Sub-bituminous Coal Combustion, JSME International Journal, Series B, 15(3) (2002) 506–511.
- 3) Kanda H., Makino H., Miyahara M., Energy-saving drying technology for porous media using liquefied DME gas, Adsorption, 14(4) (2008) 467–473.
- 4) Makino H., Kimoto M., Endo Y., Development of Advanced Low NO_x and Wide Range Burner for Pulverized Coal Combustion, The Thermal and Nuclear Power, 50 (1999) 790–798.
- 5) 沖 裕壮, CO₂ 回収型次世代 IGCC 技術の開発状況, 日本ガスタービン学会誌, 42 (2014) 292–296.
- 6) 経済産業省, Cool Earth—エネルギー革新技術計画及びエネルギー技術戦略 2008, (2007), <www.enecho.meti.go.jp/category/others/for_energy_technology/pdf/cool-earth-hontai.pdf> accessed 06.10.2016.
- 7) 電気事業連合会, 原子力・エネルギー図面集 2015, (2015), <fepc-dp.jp/pdf/07_zumenshu_j.pdf> accessed 03.08.2016.

〈著者紹介〉



牧野 尚夫 Hisao MAKINO

〔経歴〕 1979年、京都大学大学院工学研究科化学工学専攻修士課程修了。同年、電力中央研究所入所、エネルギー化学部長、研究参事などを経て、2012年から同所・首席研究員、工学博士

〔専門〕 粉体工学、燃烧工学

最近は、石炭の次世代ガス化技術や火力設備の数値シミュレーション技術の開発などに従事している。

〔連絡先〕 makino@criepi.denken.or.jp



野田 直希 Naoki NODA

〔経歴〕 1998年、名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻修士課程修了。同年電力研究所入所、工学博士

〔専門〕 粉体工学、化学工学

最近は主に火力発電所の環境対策技術や石炭中の重金属類の挙動解明等に関わる研究に従事している。

〔連絡先〕 n-noda@criepi.denken.or.jp