

4. 石炭燃焼と利用技術の現状と開発動向

Current Status and Development Trends of the Utilization Technology and Coal Combustion

2. 低炭素社会に向けた石炭燃焼技術の現状と開発動向

Current Status and Development Trend on Coal Combustion in Low Carbon Society

株式会社IHI 山田 敏彦*
小牧 晃洋*

1. はじめに

石炭燃焼を利用した火力発電設備は、現在の粉碎された微粉炭を炉内に吹き込み、燃焼、伝熱するシステムが、1918年に米国の発電設備に初めて導入されて以降、その安全性と信頼性の進展、燃料供給システムの最適化、利用可能な石炭燃料種の拡大などを続け、現在では最も信頼のある、かつ安価で環境規則にも対応した大容量可能なシステム⁽¹⁾となっている。しかしながら、石炭の燃焼時に排出される温室効果ガス(CO₂)が、急激な気候変動をもたらすとして、2015年11~12月にかけて開催されたCOP21のパリ協定⁽²⁾のとおり、早急なCO₂排出削減が求められている。

そこで、本稿では、石炭燃焼に根差した火力発電設備での低炭素化への取組みとして、CO₂回収技術の一つである酸素燃焼技術について、その現状と開発動向について述べる。

2. 空気燃焼と酸素燃焼

石炭の燃焼過程において、石炭の主成分はC分であり、燃えることでCO₂が発生する。このことを活用し、積極的に燃焼排ガス中のCO₂濃度を高くした上でCO₂を回収し、低炭素化に寄与しようというのが、酸素燃焼⁽³⁾である。

2.1 酸素燃焼の概念

空気燃焼は、石炭を空気で燃焼する方式であるのに対し、酸素燃焼は、空気分離装置(Air Separation Unit: ASU)で空気から分離・製造した高濃度のO₂を用いて

石炭を燃焼する方式である。燃焼に寄与しないN₂をあらかじめ分離しているため、理論的には排ガス中のCO₂濃度を90dry%以上まで高めることができる。図1に空気燃焼と酸素燃焼の概念図を示す。

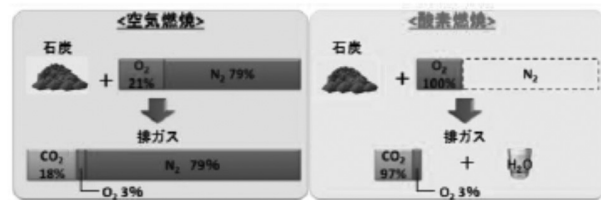


図1 空気燃焼と酸素燃焼の概念図

2.2 酸素燃焼を利用したCO₂回収発電システム

図2には、酸素燃焼技術を利用したCO₂回収発電システムを示す。本システムでは、ボイラおよび排煙処理システムに加え、酸素をボイラに供給するための空気分離装置、酸素燃焼排ガスを精製し、液化CO₂を得るCO₂回収装置(CO₂ Purification Unit: CPU)が必要となる。酸素燃焼では、燃焼後発生する排ガスはCO₂とH₂Oが主成分となり、高CO₂濃度を実現できる。そして、CO₂を液化回収する圧縮および冷却の過程で排ガス中の水分や非凝縮性ガスを取り除き、酸素燃焼排ガスからCO₂を回収する方法が本システムのコンセプトである。

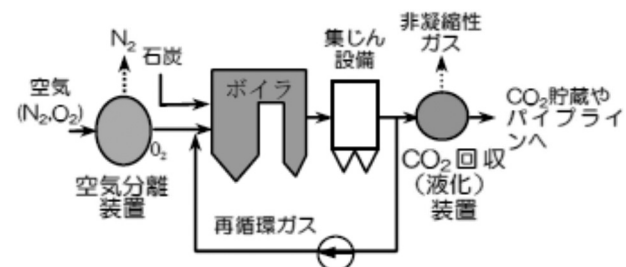


図2 酸素燃焼を利用したCO₂回収発電システム

*Toshihiko YAMADA

Akihiro KOMAKI

(IHI Corporation)

原稿受領日 平成28年9月1日

現在のところ、火力発電設備での酸素燃焼適用においては、従来の空気燃焼ボイラ技術の利用を考えている。それゆえ、空気燃焼と同等の伝熱性能を確保するために、発生した排ガスを再循環し O_2 と混合するシステムとなる。これより、ボイラ入口 O_2 濃度を制御でき、火炎温度を空気燃焼と同等程度に調整できる。よって、ボイラ耐圧部はもとより、空気燃焼ボイラに大幅な改造を加えることなく、既設プラントで酸素燃焼運転が可能となる。

酸素燃焼ボイラシステムの特長は以下のとおりである。

- 燃焼前に N_2 を分離するため、燃焼後の排ガスから高濃度 CO_2 を直接回収し、そのまま貯留、または利用することが可能である。
- 酸素富化により、燃焼効率の向上が期待できる。
- 排ガス量が減少するため、同条件の空気燃焼ボイラよりボイラ効率が高い。また、給水系統とボイラ系統を連携することで、より効率化が可能である。
- 燃焼排ガスを炉内に再循環すると、排ガス中に含まれる NO_x が還元されるため、 NO_x 排出量が低減する。このため、脱硝装置の設置が不要となる可能性がある。
- 排ガス量が減少することにより、脱硫装置を小型化できる。
- 新設ボイラに加え、既設ボイラへの酸素燃焼適用改造も可能である。既設ボイラ改造の場合には、ボイラ耐圧部を改造することなく、非耐圧部の改造で対応可能である。

2.3 燃焼雰囲気の違い

上述のとおり、酸素燃焼では、通常の空気(N_2/O_2)下での燃焼と異なり、 CO_2/O_2 下での燃焼となる。表1に、 N_2 と CO_2 の物性値をまとめた。本表からわかるとおり、 N_2 と CO_2 で、質量ベースの熱容量は同等下であるが、密度が異なるために容積ベースの熱容量が大きく異なっているのが確認できる。また、この他に放射率も CO_2 が高くなっており、輻射伝熱においては留意する必要がある。なお、 H_2O も放射率の高いガスとして知られている。そのため酸素燃焼では、プロセスに応じて、 H_2O 濃度が高くなることもあり、 CO_2 と合わせて、 H_2O についても、留意する必要がある。

表1 N_2 と CO_2 の分析値⁽⁴⁾

物性	単位	N_2	CO_2
密度	kg/m ³	0.569	0.894
熱容量	kJ/kgK	1.08	1.08
	kJ/m ³ K	0.615	0.966
動粘性率	m ² /s	5.12×10^{-5}	3.00×10^{-5}
熱伝導率	W/mK	4.58×10^{-2}	4.31×10^{-2}
熱拡散率	m ² /s	7.49×10^{-5}	4.48×10^{-5}

注) 1気圧, 600Kにおける値

3. 微粉炭酸素燃焼の特性

酸素燃焼については、基礎試験、火炉などの解析、パイロット試験装置を使用した燃焼試験、30MWe級の実証プラントでの実証試験が行われてきている。

3.1 火炎伝播(着火)

図3に、微小重力下において、容器内に微粉を浮遊させた後、中心にて、伝熱線により着火させた場合の火炎伝播挙動⁽⁵⁾を示す。

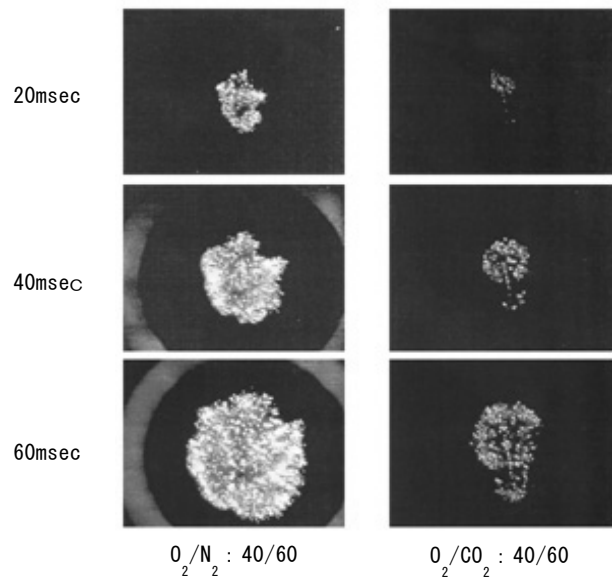


図3 微小重力下における着火、火炎伝播挙動

これは、雰囲気の違いによる火炎伝播(着火)特性を確認しようとするもので、本図は、同じ O_2 濃度40%で、 N_2 雰囲気と CO_2 雰囲気での違いを着火後の時間経過ごとに示したものである。その結果、明らかに CO_2 雰囲気では、着火した微粉から、次の微粉へ火炎が伝播していく速度が遅く、またその輝度は暗いものとなっているのが確認できる。

これは、 CO_2 の容積ベース熱容量が大きいことに起因したものと推測され、輝度が暗いことは、ボイラ火炉内

における輻射伝熱に大きく影響を及ぼすことが容易に推測できる。そこで、CO₂雰囲気では、燃焼場におけるO₂濃度を高め、燃焼場の改善を図ることで、N₂雰囲気と同等の火炎伝播(着火)特性を有することが示唆されたものである

3.2 火炎

図4に、実証プラント(30MWe, 前面燃焼ボイラ)における炉内の火炎状況を示す。本図は、空気燃焼時の火炎と、酸素燃焼において持込O₂濃度(ボイラ流入ガス量に対するO₂濃度)を変化させた時の火炎状況を示したものである。

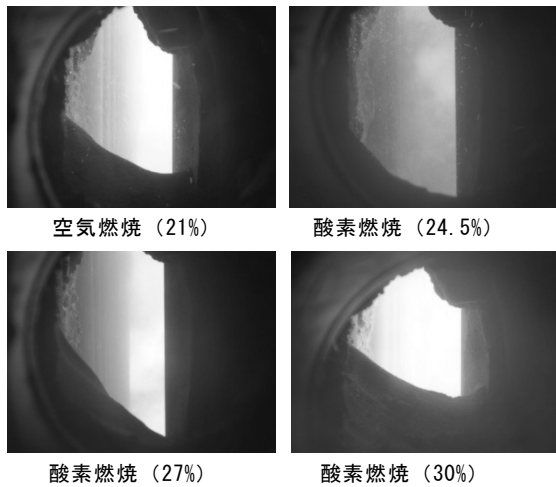


図4 炉内の火炎状況

本図から、酸素燃焼では、燃焼場への持込O₂濃度を变化することで、大きく火炎輝度が変化することが見て取れる。持込O₂濃度が変化することは、一定量の微粉炭を燃焼する必要があるため、O₂量は変わらず、再循環し混合するガス(主成分はCO₂)量が変化するため、持込O₂濃度30%では、ガス量が一番少ないために、火炎温度が高く、輝度も高いものとなっている。一方、持込O₂濃度24.5%では、暗く温度も低い雰囲気になっているのが確認できる。これは、実際に火炉壁における収熱量が持込O₂濃度により変化したことからも火炎温度が変化したことを確認できている。

なお、断熱火炎温度の試算では、酸素燃焼の持込O₂濃度27%では、空気燃焼よりやや低い断熱火炎温度になっているにも拘らず、ほぼ同等の火炉壁収熱量であったことも確認できている。これはCO₂による放射(吸収率)率が高いことが起因しているものと考えられる。

3.3 燃焼特性

実証プラント(二段燃焼なし、脱硝・脱硫装置なし、ボイラ+熱交換器+バグフィルタのプロセス)にて、運転条件を変更した時のボイラプロセス出口におけるNO_x、SO₂/SO₃、灰中未燃分、Hgの特性について確認した⁽⁶⁾。

3.3.1 排出NO_x

図5に、空気燃焼と酸素燃焼時の煙突入口換算NO濃度を示す。換算NO濃度は、実CO₂濃度と換算CO₂濃度12%の比を実NO濃度に乗じたもので12%CO₂換算NO濃度となり、NO排出量を相互比較する時に簡便的に利用しているものである。

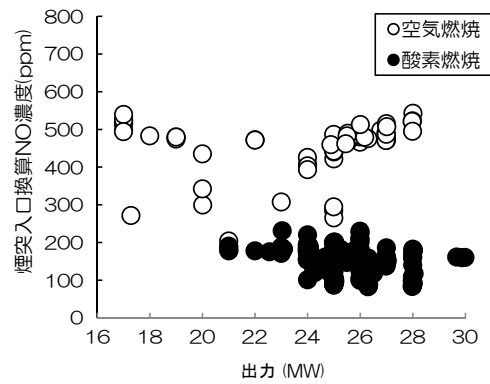


図5 空気燃焼/酸素燃焼における換算NO濃度

図5からは、酸素燃焼時換算NO濃度が、空気燃焼時に比較し、1/2~1/3に減じているのが確認できる。これは、再循環排ガス中に存在していたNOが、火炎場に流入することで、還元されたことによる⁽⁷⁾。

3.3.2 排出SO₂/SO₃

図6に換算SO₂濃度、図7に実SO₃濃度のプロセス内挙動を示す。

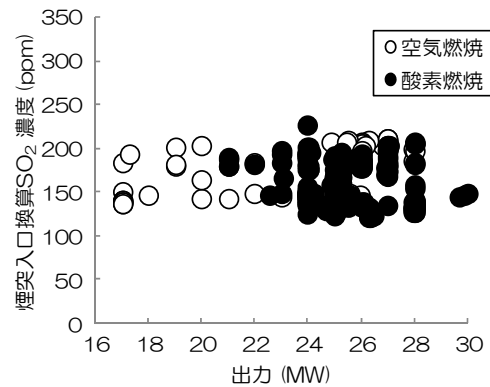


図6 空気燃焼/酸素燃焼における換算SO₂濃度

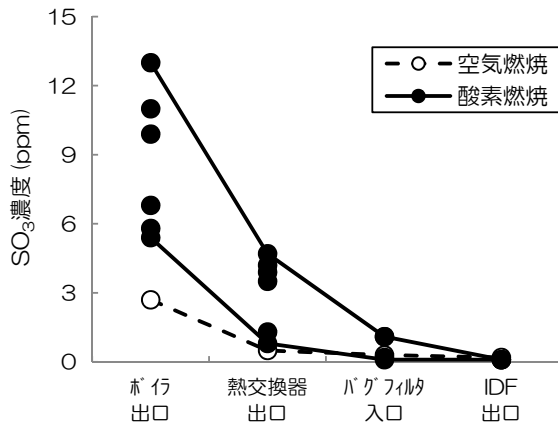


図7 空気燃焼/酸素燃焼における排出SO₃

図6からは、空気燃焼と酸素燃焼における12%CO₂換算SO₂濃度は、大きく変わらないことが確認できた。当初、酸素燃焼では、より高濃度な実SO₂濃度になることで、灰中のCaやMg分などと反応促進されるものと考えていたが、本実証プラントにおいては、灰成分の影響から大きく変化がなかったものである。

図7から、ボイラ出口でのSO₃濃度は、空気燃焼に比べ、酸素燃焼にて高濃度となるが、熱交換器やバグフィルタなどを通過することで、SO₃が灰に吸着され、結果的にIDF出口においては、空気燃焼時とほぼ同等で、十分低い値を示すことが確認された。事実、熱交換器やバグフィルタのホッパ部に堆積していた灰の分析を行った結果、S分が検出されたことを確認している。

3.3.3 未燃分

図8に、各種石炭における灰中未燃分を示す。石炭は、燃料比1.9~2.8の4種類の豪州炭（一部25%のブレンド）を用いたもので、試験は、各石炭燃焼においてほぼ

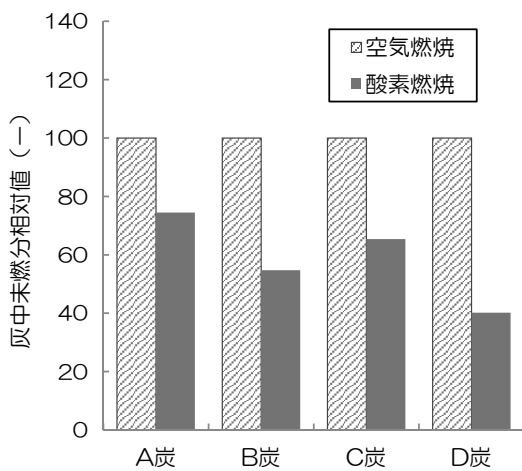


図8 空気燃焼/酸素燃焼時の灰中未燃分

同一負荷で行い、比較したものである。酸素燃焼は、空気燃焼と火炉収熱がほぼ同等となる持込O₂濃度27%で実施した。また、灰中未燃分の値は、各機器ホッパからの灰をサンプリングし、重量平均にて算出したものである。

その結果、各石炭において、酸素燃焼時灰中未燃分は、空気燃焼時に比べて、40~70%まで減じているのが確認できる。これは、ボイラ内通過総ガス量が、酸素燃焼では空気燃焼より少なく、炉内高温部でのガス（灰）滞留時間が長かったことによる。また、酸素燃焼では、高O₂濃度の燃焼ガスを供給しており、微粉の着火性の改善が寄与した可能性がある。

3.3.4 水銀

図9に、豪州炭の酸素燃焼時におけるボイラプロセス内のHg挙動について示す。

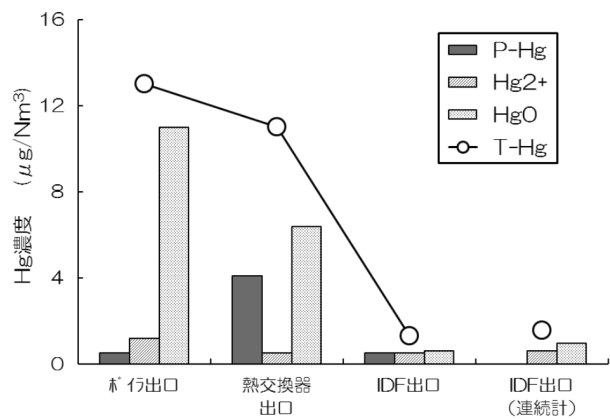


図9 酸素燃焼時のHg挙動

酸素燃焼では、ボイラプロセスの後流に、酸素燃焼排ガスを精製し、所定の純度までCO₂を高純度化し取り出すCO₂回収装置が必要となる。このCO₂回収装置の熱交換器などでは、その材質にAlが使用され、低温高圧下のガス中にHgが存在すると、Alが腐食（アマルガム腐食）することが良く知られている。これを回避する必要があり、石炭中Hgの挙動を確認したものである。

図9から、IDF出口では数μg/Nm³の総Hg濃度となっている。Hgは、活性炭（カーボン）に吸着することで良く知られている。IDF上流に設置されたバグフィルタには、未燃分（カーボン）を含んだ灰が付着しており、これにより大きくガス中Hg濃度が減少していることが確認できた。なお、数μg/Nm³でCO₂回収装置に導かれたHgは、CO₂回収プラント内の圧縮、冷却過程

でガス中から除去され、最終的に熱交換器入口で数 ng/Nm³以下まで低減することを確認している。

3.4 火炉内伝熱特性

酸素燃焼においては、前述したように、雰囲気ガスの熱容量、ガス放射（吸収）特性が、従来の空気燃焼とは大きく異なることから、当初から火炉壁での収熱特性について懸念されていたものである。

図10には、実証プラントにおける火炉収熱を予測した結果を示す⁽⁸⁾。空気燃焼をベースに、酸素燃焼において、3種類の持込O₂濃度にて、検討したものである。図をみて明らかのように、酸素燃焼では、持込O₂濃度27%の 때가、空気燃焼とほぼ同等の収熱量を示しているのが確認できる。これは、実際の運転においても、同様の結果であった。また、酸素燃焼時の持込O₂濃度変化においても、高い持込O₂濃度の時は、上述したように火炎温度が高く、図10と同様、実際に収熱量が高くなっていることを実証プラントにて確認している。

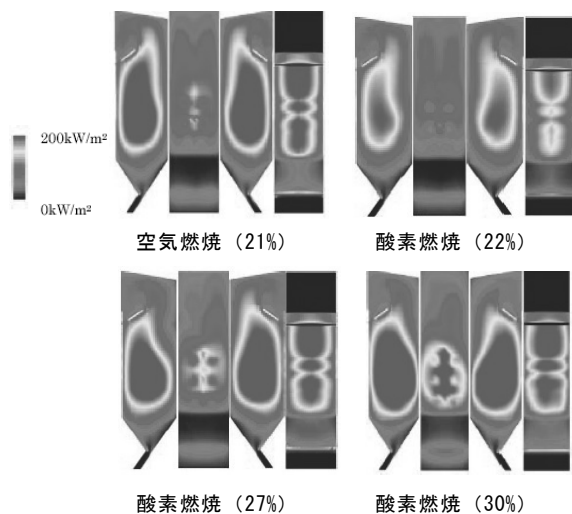


図10 火炉収熱分布

4. 酸素燃焼の開発動向

酸素燃焼について、日本で研究開発を開始して、まもなく30年が経とうとしている。ラボベースの基礎研究から開始され、解析、燃焼試験、プラントへの適用検討、実証試験と発展し、現在、石炭火力発電設備でのCO₂回収方法の一つとして、商用化に向けて取り組んでいるところである。酸素燃焼は、空気分離装置やCO₂回収装置が必要で、そのコスト低減、必要動力低減が、本技術の導入、普及展開に向けて大きな課題となっている。

また、法制・規制などによるCO₂削減要求、インセンティブの確保についても、実現に向けた課題となっている。

このような中、空気分離装置から併産されるN₂の有効利用、CO₂回収性状に合わせた最適プロセスの構築などの技術的な検討がなされている⁽⁹⁾。

世界に目を移すと、本技術を通用し、中国で大型酸素燃焼CCSプロジェクトが進められている⁽¹⁰⁾。その他、米国では加圧石炭酸素燃焼、酸素燃焼PFBCの検討に加え、酸素製造などの研究開発が進められている⁽¹¹⁾。

5. おわりに

低炭素社会に向けた石炭燃焼技術として、火力発電設備におけるCO₂回収方法の一つである酸素燃焼について、石炭燃焼の面から解説した。

酸素燃焼からのCO₂回収型石炭火力発電は、ゼロエミッション化が可能なものであり、急激な気候変動抑制、環境負荷物質低減という社会の要請に応えることができるものである。今後の進展に期待したい。

謝 辞

本酸素燃焼技術の研究開発、実証においては、経済産業省資源エネルギー庁、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構の支援を得て、電源開発株式会社、三井物産株式会社、一般財団法人石炭エネルギーセンター、豪州連邦政府、クイーンズランド州政府、CS Energy, ACALET, Glencore, Schlumbergerの協力を得て、実施したことを記し、ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1)「Ⅲ. 燃焼技術 1. ボイラ燃焼技術 (1)微粉炭燃焼技術」火力原子力発電Vol.50 No.10 (1999)
- (2)「COP21とパリ協定の概要」火力原子力発電Vol.67 No.3 (2016)
- (3)「Ⅳ. CO₂の回収、利用、搬送と貯留 1)酸素燃焼によるCO₂回収」火力原子力発電Vol.60 No.10 (2009)
- (4)「Heat Transfer」9th edition (2002)
- (5)「Effect of carbon dioxide on flame propagation of pulverized coal clouds in CO₂/O₂ combustion」Fuel 86 (2007)
- (6)「CO₂を排出しない石炭火力発電所の商用化に向けてーカライド酸素燃焼プロジェクトの成果ー」火力原

- 子力発電 Vol.67 No.719 (2016)
- (7) 「NO_x REDUCTION MECHANISM IN COAL COMBUSTION WITH RECYCLED CO₂」 Energy Vol.22 No.2/ 3 (1997)
- (8) 「発電プラントのゼロエミッション化に向けて」 IHI 技報 Vol.52 No.1 (2012)
- (9) 「酸素燃焼発電プラントの商用化への取組み」 IHI 技報 Vol.55 No.1 (2015)
- (10) 「The Global Status of CCS: 2015」 GCCSI (2015)
- (11) 「Energy Department Invests \$28 Million to Advance Cleaner Fossil Fuel-Based Power Generation」 DOE-NETL News Releases (2016)