

低品位超高水分炭対応ミル・バーナの開発

Verification of Coal Pulverizer and Burner System for High Moisture Low Grade Coal



高島 竜平^{*1}
Ryuhei Takashima

松本 慎治^{*2}
Shinji Matsumoto

有馬 謙一^{*2}
Kenichi Arima

大丸 卓一郎^{*3}
Takuichiro Daimaru

竹井 康裕^{*4}
Yasuhiro Takei

福井 和司^{*5}
Kazushi Fukui

世界の石炭資源の約半分を占める低品位炭の中で、全水分 50%を越す超高水分炭を従来の微粉炭燃焼ボイラに適用する場合、ミルでの乾燥能力不足、ミル内湿分増加に伴うミル内部や微粉炭管内部への粉砕炭付着に加えて、排ガス乾燥による低 O_2 燃焼、乾燥により発生した水蒸気による低 O_2 化、微粉炭中残留水分により、着火・燃焼性の低下が懸念される。三菱日立パワーシステムズ(株)(MHPS)では、このような低品位超高水分炭を用いた粉砕・燃焼試験により、高湿度雰囲気下でのミル内への粉砕炭付着防止、また安定燃焼を確立する運転条件を確認し、国内外での低品位超高水分炭の利用拡大に向けた製品技術を実証した。

1. はじめに

石炭は埋蔵量が豊富で、埋蔵地域も偏在していないエネルギー資源であることから、石炭焚きボイラによる発電需要は今後も増加することが予想される。

炭種別の可採埋蔵量は、全石炭資源の約 50%が褐炭や亜瀝青炭などの低品位炭で、豪州やインドネシア、米国、欧州などに多く存在している。これら低品位炭は発熱量が低く、重量の約半分が水分であるなどの特徴を持ち、例えば豪州褐炭の場合、重量の約 60%が水分である⁽¹⁾。

このように燃料としてのエネルギー密度が低いことから、現状、高品位炭に比べて世界市場での取引は少なく、ほとんどは採掘現地での消費に限られている。その一方で、将来的な高品位炭の生産量減少に伴い、日本を始めとした諸外国への輸出量が増加することも予想される。

本報ではこのような低品位炭利用拡大を背景に、2013 年度の経済産業省資源エネルギー庁補助事業(国家プロジェクト)である石炭生産技術振興費補助事業“産炭国低品位炭利用技術最適化実証事業”として実施した低品位超高水分炭燃焼システムの開発・実証試験について、その概要を報告する。

2. 超高水分炭燃焼システムにおける課題

現在、欧州や豪州などの山元発電に適用されている褐炭焚き火力発電プラントでは図1左図に示すように、約 1000℃の高温燃焼ガスを火炉から分岐し、ピータホイールミルへ投入して高水分炭を乾燥・粉砕するシステムが採用されている。この従来方式では耐火材で構成される高温ガスシステムやミルの頻繁なメンテナンスが求められること、分岐ラインを持つ特殊な火炉構造が必要となること、東南アジアなどの粉砕性が低い低品位炭へのピータホイールミル適用には注意を要することなどの課題がある。

そこで MHPS では、従来 USC (Ultra Super-Critical: 超々臨界圧) ボイラの基本構造から、必要

*1 技術統括本部総合研究所燃焼研究部 主席研究員 博士(工学)/技術士(機械部門)

*2 技術統括本部総合研究所燃焼研究部 主席研究員

*3 技術統括本部総合研究所燃焼研究部

*4 三菱日立パワーシステムズ(株)ボイラ技術本部ボイラ開発部 主席技師

*5 三菱日立パワーシステムズ(株)ボイラ技術本部ボイラ技術部 主席技師

最小限の構造変更で水分 50%を超える超高水分炭に対応するための製品として、図1右図に示すように対流伝熱部で熱交換した後の低温排ガスを分岐して、瀝青炭向けに豊富な実績を誇る堅型ローラミルへ投入する新システムを提案した。本システムは従来システムに比べて低温の排ガスをミルでの乾燥熱源として利用するものであり、従来システムに比べて低コスト化とメンテナンス頻度の低減を図るとともに、幅広い粉碎特性を有する炭種への対応が可能と考える。

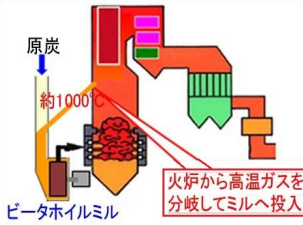
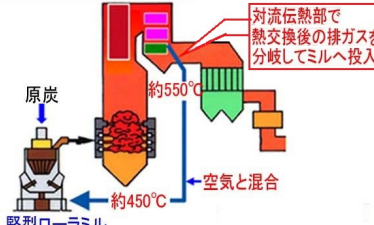
システム	従来システム	MHPS 低温排ガス循環システム
概略 系統図		
再循環 ガス温度	1000℃	550℃
ミル型式	ビータホイルミル	堅型ミル
微粉度	200#pass40～50%程度(推定)	200#pass70～80%
特徴	・高温ガスシステムのメンテナンス頻度が高い ・粉碎性が高い欧州褐炭等での実績は多いが、粉碎性が低い低品位炭への適用性は低い	・従来よりも低温のガスをミルの乾燥熱源として使用し、低コスト化とメンテナンス頻度低減を図る。

図1 超高水分炭焼きボイラシステムの比較

本システムに類似のシステムとしてMHPSではモンゴル褐炭(全水分 44%)を対象とした排ガス再循環システム⁽²⁾による堅型ローラミルの運転実績があるが、水分 50%を超えるような超高水分炭を適用する際には、ミル内の湿度がこれまで以上に高くなり、粉碎炭の付着発生や乾燥能力不足によるミル運転の不安定化が懸念された。また、高水分炭の乾燥には多量の排ガスが必要となる上、ミル内の乾燥により発生した水蒸気によって、従来の瀝青炭、亜瀝青炭運用時に比べてバーナ部1次ガス中の O_2 濃度が低下するとともに微粉炭中残留水分も増加する。このため、バーナ部での着火や燃焼状態の不安定化が懸念された。

そこで本研究では、超高水分炭のミルでの粉碎・乾燥性能の把握と、高湿分低 O_2 雰囲気下でのバーナ安定着火・燃焼性についての検証試験を実施した。

表1に今回立案した超高水分炭への対応システムの計画条件を示す。原炭水分の増加に伴いミルで乾燥に必要な熱量が増加するため、本システムではミル入口ガス温度の高温化により対応する計画である。このときミル出口における微粉炭中の水分計画値は 30%とし、必要なミル入口ガス温度は 450℃程度と想定した。

本計画では原炭中の水分蒸発に伴い、ミル出口ガス中の水蒸気濃度が増加し、バーナ部1次ガス中の O_2 濃度は9%程度まで低下することが予想された。このように新システムでは従来の瀝青炭や亜瀝青炭での運用実績を逸脱するミルやバーナの運用条件において、安定的に粉碎性・燃焼性を確保できることを確認する必要がある、粉碎・燃焼試験によりその性能を検証した。

表1 超高水分炭対応システムの計画条件

項目		MHPS システムの従来実績		新システム計画
炭種		亜瀝青炭	モンゴル褐炭	超高水分炭
ミル	原炭全水分	27%	44%	55%
	排ガス再循環	無し	有り	有り
	入口ガス温度	280℃	400℃	450℃
	出口ガス温度	60℃	70℃	75℃
	出口相対湿度	60%	60%	85%
バーナ	微粉炭水分	16%	22%	30%
	1次ガス中 O_2 濃度	20 vol. %	10 vol. %	9 vol. %

3. 石炭ミルによる粉砕・乾燥試験

堅型ローラミルにおける超高水分炭の粉砕及び乾燥特性を把握するために、三菱重工業(株)総合研究所設置の石炭ミル試験設備を用いた粉砕・乾燥試験を実施した。

図2に粉砕試験設備の系統図を示す。本試験では実機と同型式の堅型ローラミルを用い、ミル内の相対湿度が従来瀝青炭の運用時よりも高い雰囲気下での連続運転特性と乾燥特性を把握した。粉砕試験設備は瀝青炭適用時の基準粉砕容量が 2.6t/h であり、通常の瀝青炭試験時に対して、ミル入口ガス温度の高温化を図るために、入口部に LPG による助燃バーナを設置し、微粉炭管系統と集塵装置に関してはヒータでの温度保持により系統の結露発生を防止した。

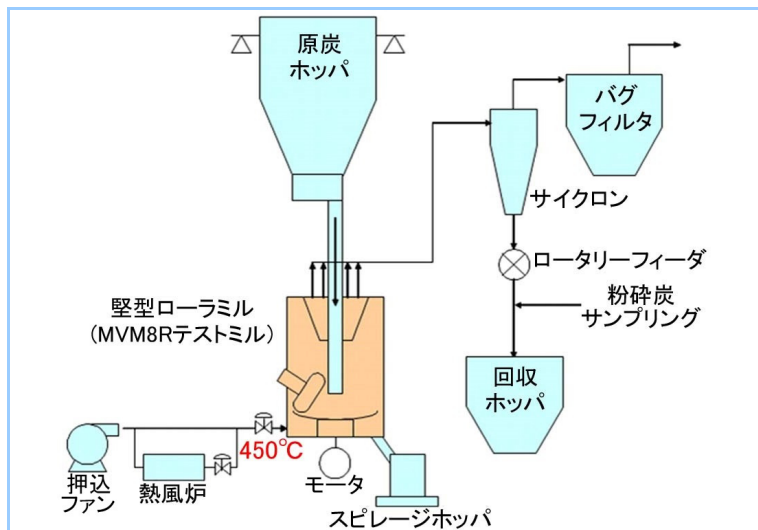


図2 粉砕試験設備系統図

表2に供試炭性状を示す。本試験で供試した豪州産褐炭の受入れ時の原炭水分は 61.4%と、従来の瀝青炭や亜瀝青炭に比べて非常に高い値を示しており、塊状に凝集した粒子も確認された。これらがミルにおける粉砕性・乾燥性に及ぼす影響を本試験で確認した。

表2 供試炭性状

項目	単位	供試超高水分炭(豪州炭)
外観	—	
全水分(受入れ時)	wt%	61.4
水分	wt%	23.6
固定炭素	wt%	34.7
揮発分	wt%	41.0
灰分	wt%	0.78
高位発熱量	kcal/kg	4953

表3に粉砕試験条件を示す。実機ミル運転計画条件を対象に、安定した粉砕、乾燥が可能な適正条件を把握するために、原炭水分を3条件(45%, 50%, 55%)に変化させてミルの運転特性データを取得した。

また、ミル出口相対湿度による運転状態の変化を確認するために微粉炭流量と1次ガス量の比率(固気比)とミル出口ガス温度を調整し、相対湿度を 47~94%の範囲で段階的に増加させ、運転状況と粉砕テーブル上への凝集物の発生有無などその上限を確認した。

出口相対湿度 85%の雰囲気においては、2時間の連続運転後も粉砕テーブル上に残った微粉炭は乾燥した状態で、通常の瀝青炭粉砕後の状態とほぼ同じ状態であることが確認された。

さらに固気比の増加によりミル出口の相対湿度を増加させたところ、相対湿度 94%の条件では運転中のローザリフトの漸増が確認され、停止後の粉碎テーブル上には湿った粒子の凝集物が確認された。本結果を基に全水分 55%までの超高水分炭を安定的に粉碎・乾燥するために確保すべきミル出口における相対湿度の上限値を確認することができた。

表3 粉碎試験条件

項目		新システム計画	検証試験計画
炭種		超高水分炭	超高水分炭
ミル	原炭全水分	55%	45, 50, 55%
	入口ガス温度	450℃	～450℃
	出口ガス温度	75℃	67～75℃
	出口相対湿度	85%	47～94%

図3にミル粉碎炭の乾燥率と相対湿度の関係を示す。

乾燥率は投入原炭の全水分に対する蒸発水分量の割合として次式にて算出した。

$$\text{乾燥率}(\%) = \frac{\text{蒸発水分量}(\text{kg/h})}{\text{投入原炭全水分量}(\text{kg/h})} \times 100$$

これまでの瀝青炭や亜瀝青炭を用いた試験結果から、水分 40%以下の石炭の乾燥率と相対湿度の関係は図中の点線の特性を示すことが判明している。

本試験から水分 45%を超える石炭では、ミル出口での乾燥率が水分 40%以下の瀝青炭や亜瀝青炭に比べて高くなる傾向が確認された。この乾燥特性の差異は、原炭の全水分量だけではなく石炭性状や水の存在形態に依存するものと推定される。

以上より、従来の瀝青炭や亜瀝青炭の実績に基づいて構築された計画値に比べてより多くの乾燥熱量が必要となるため、一次通風系統の計画に際しては注意が必要である。このため、石炭性状に応じたミルの熱収支予測精度向上のために、今後もデータ蓄積を継続する必要がある。

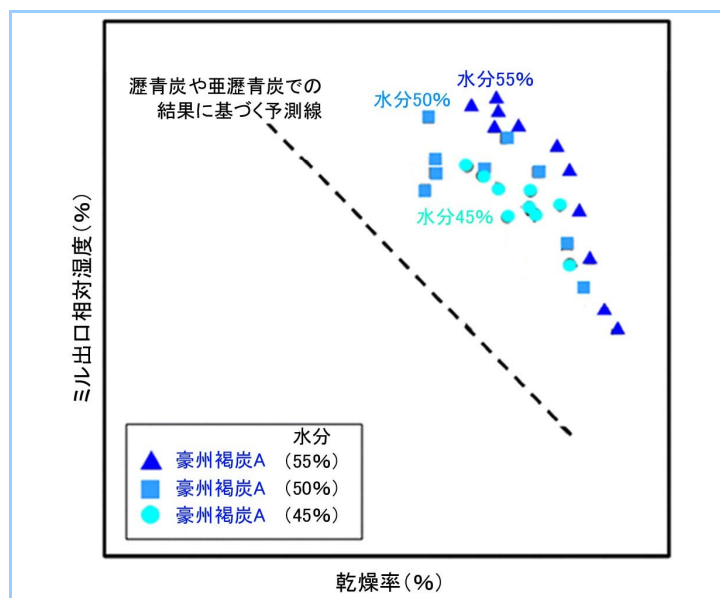


図3 ミル粉碎炭の乾燥率と相対湿度の関係

4. 低 O₂ 雰囲気微粉炭燃焼バーナの実証

前節での粉碎・乾燥試験から全水分 55%の超高水分炭を全水分 30%程度まで乾燥・微粉碎した計画条件では、蒸発水分を含むバーナ部1次ガス量に対する石炭固形分の比率(固気比)は 0.2 程度となり、また1次ガス中の O₂ 濃度は9%程度まで低下する。この条件を反映し、単一バーナ燃焼試験設備を用いて排ガス再循環と水蒸気による低 O₂ 条件下での燃焼試験を実施した。

図4に単一バーナ燃焼試験設備の外観と系統図を示す。本試験では排ガスによるミル内での乾燥・粉砕を想定しており、実機と同様に再循環排ガスファンにより1次ガス中 O_2 濃度を低下させて試験を実施した。

また、本設備ではミルによる粉砕とバーナでの燃焼を別々に試験するため、ミル内で蒸発する水蒸気は補助ボイラにより製造した蒸気を投入してミル出口ガス条件を模擬した。火炉後流部の燃焼完結域には、実機と同様に燃焼用空気を主バーナ燃焼部とは別に二段燃焼用空気 (Additional Air) として投入し、炉内に NO_x 還元域を形成させて低 NO_x 燃焼を再現した。

供試バーナには MHPS の低 NO_x A-PM (Advanced Pollution Minimum) バーナを使用した。A-PM バーナはノズル外周と内周間で微粉炭を濃淡分離することによる低 NO_x 燃焼と、石炭バーナノズルに保炎板を設け炉内輻射を効率的に利用し安定した着火を同時に実現している。さらに、二段燃焼との組合せで良好な低 NO_x 特性を得ることができ、未燃カーボン率低減や適用可能炭種の拡大を実現している⁽³⁾。

その良好な着火・燃焼性から本バーナは難燃性低揮発分燃料である石油コークスのミル直接燃焼システムにも適用されており⁽⁴⁾、本システムで想定している低 O_2 雰囲気での安定した着火を確保する観点から、その良好な着火・燃焼性に着目し、供試バーナに採用した。

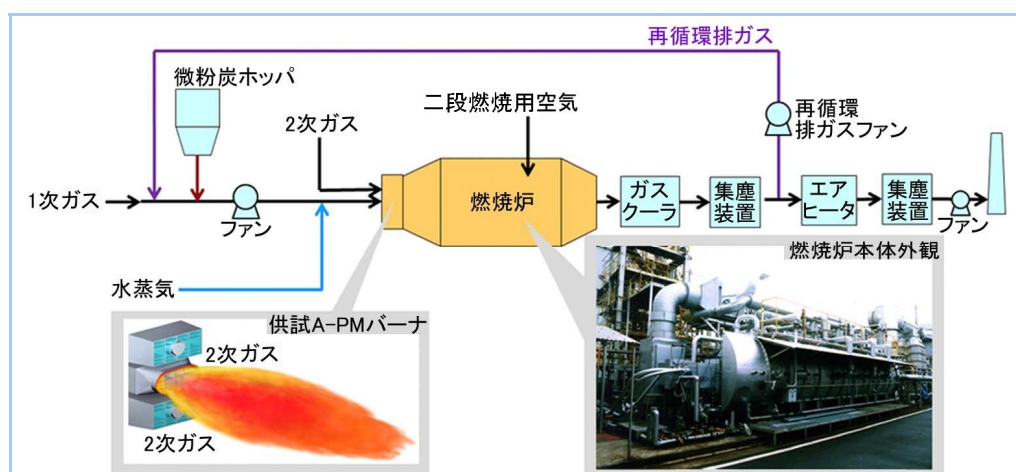


図4 単一バーナ燃焼試験設備の外観と系統図

表4に燃焼試験供試炭の性状を示す。供試炭として水分 62.8%の豪州産褐炭を用い、テストミルによる粉砕・乾燥試験の結果を微粉炭の製造条件へ反映した。供試時の微粉炭粒径については、褐炭などの低品位炭は炭化度が低く揮発分量が高いため、乾燥後の微粉炭自体の燃焼性は高いことが想定されたため、通常の瀝青炭に比べて粗めの200#パス72%に粉砕した。また、微粉炭の水分は 28.8%にて燃焼試験を行った。この程度の水分が残存していても粒子の表面は乾いた状態で、粒子の凝集などは見られなかった。

表4 燃焼試験供試炭性状

項目		単位	受入れ時	粉砕後
外観		—		
粒子サイズ		—	数 10mm (塊混入有)	200#pass72%
全水分		wt%	62.8	28.8
工業分析	固定炭素	wt%	16.4	31.4
	揮発分	wt%	19.9	38.1
	灰分	wt%	0.84	1.6
	燃料比 (固定炭素と揮発分の比)	—	0.82	0.82
	高位発熱量	kcal/kg	2247	4300

表5に燃焼試験条件を示す。燃焼量は 618kg/h で一定とし、排ガス再循環による1次ガスの固気比を 0.2 として、O₂濃度を 11.2%から 5.0%の範囲で変化させた際の着火状況を確認した。次にミル計画運用時のバーナ噴出条件で炉出口 O₂濃度を变化させて NO_x や未燃カーボン率などの排ガス特性を確認した。

表5 燃焼試験条件

項目	単位	1次ガス中 O ₂ 濃度変化	炉出口 O ₂ 濃度変化
微粉炭水分	%	28.8	
微粉度	200#pass	72%	
微粉炭供給量	kg/h	618	
バーナ負荷	%	100	
1次ガス中 O ₂ 濃度	vol%-wet	5.0~11.2	8.8
1次ガス温度	℃	75	
炉出口 O ₂ 濃度	vol%-dry	2.7	2.0~3.5
AA*率	%	30	
狙い	—	排ガス再循環運用に 対する着火安定性確認	ミル計画運用条件での NO _x , 未燃分特性把握

*AA: Additional air (二段燃焼用空気)

図5に1次ガス中 O₂濃度低減時の燃焼状況を示す。1次ガス中 O₂濃度を 11.2%から徐々に低減したところ、O₂濃度 6.6%までは安定した着火を確保できた。実機におけるミル計画運用時の O₂濃度は9%でありベース条件での燃焼性に問題が無いと判断できる。さらに、安定燃焼性を確保できる範囲を確認するために O₂を低減したところ O₂濃度 5.0%では火炎揮度が低下し、バーナ部周辺の熱流束が低下し、安定燃焼を継続することが困難な状況となった。

図6に炉出口 O₂濃度変化時の排ガス特性を示す。安定した着火を確保できる条件においては、瀝青炭に比べて NO_x, 未燃カーボン率が低く良好な燃焼性を示すことが確認された。

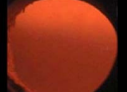
炭種	微粉炭水分 (wt%)	1次ガス中O ₂ 濃度 (vol%-wet)	バーナノズル近傍 の燃焼状況
瀝青炭 (参考)	2.0	21.0	
超高水分炭	28.8	11.2	
		6.6	
		5.0	

図5 1次ガス中 O₂濃度低減時の燃焼状況
(バーナ負荷 100%, 炉出口 O₂濃度 2.7vol.-%-dry)

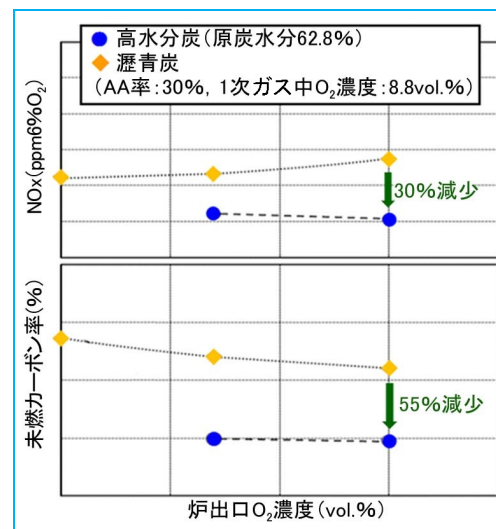


図6 炉出口 O₂濃度変化時の排ガス特性

5. まとめ

将来的な利用拡大が予想される水分 50%を超える超高水分炭を高効率微粉炭火力に適用するために新たなミル・バーナ燃焼システムを考案し、検証試験により以下の成果を得た。

- ミル内部への粉碎炭付着抑制のための出口相対湿度上限値を確認するとともに、超高水分炭では瀝青炭や亜瀝青炭よりも乾燥率が高い傾向を確認した。今後、石炭性状による乾燥特性データ蓄積により、炭種に応じた乾燥特性に基づいた熱計算手法の精度を向上していく必要がある。

- ・ A-PM バーナの適用により, バーナ部1次ガスの固気比 0.2 で O_2 濃度が6%まで低減した条件下でも安定した着火を確保でき, 瀝青炭に比べて低い NO_x / 未燃カーボン率特性を確認した。

これらの成果を実機詳細設計へ展開し, お客様の超高水分炭利用のニーズに応えていく。

(謝辞)

本報は2013年度の経済産業省資源エネルギー庁 石炭生産技術振興費補助事業として実施しました。資源エネルギー庁関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- (1) Clarke et al., 2010 Survey of Energy Resources, World Energy Council, United Kingdom, (2010).
- (2) 木下正昭ほか, モンゴル褐炭焚きボイラ燃焼設備リハビリ工事, 火力原子力発電, Vol.61 No.8, (2010) p. 694~702
- (3) Sato.S et al., RETROFIT APPLICATION OF MITSUBISHI LOW NO_x SYSTEM, POWER-GEN 2000 International, (2000).
- (4) 荒川善久ほか, 難燃性石油コークス専焼ボイラの計画と運転実績, 三菱重工技報, Vol.42 No.3, (2005) p.112~115