

(技術資料)

改質褐炭 (UBC[®]) ベースの山元直結発電システム

Mine Mouth Power Generation System Based on Upgraded Brown Coal (UBC[®])



柏木健男*¹
Takeo KASHIWAGI



石野裕通*¹
Hiromichi ISHINO



高木隆司*²
Takashi TAKAGI



広瀬 建*³
Ken HIROSE

Lignite (brown coal) is being used only for mine-mouth power generation. The high moisture content in brown coal causes its power-generating efficiency to be considerably lower than that achieved by bituminous coal. Kobe Steel has developed a process for upgrading brown coal by applying a unique slurry dewatering technology. A study has been conducted using the upgraded brown coal (UBC[®]) made from Indian lignite to verify its applicability in improving the efficiency of mine-mouth power generation. As a result, it has been confirmed that UBC-based power generation is superior to the existing lignite-based power generation.

まえがき = 石炭のなかで褐炭は瀝 (れき) 青炭などの高品位炭に比べて炭化の度合いが浅いうえに、脱水や脱炭酸が十分には進行していない。また水分含有率が30~65%と高く、酸素分も20~25%程度と多く含まれている。したがって、同じ質量の石炭と比較すると、水分が多い褐炭は実質的に含まれる有機質 (熱量に転換するもの) の割合が小さくなるため発熱量が低くなる。また、乾燥すると自然発火を起こしやすく、ハンドリングが難しい石炭である。こうしたことから、褐炭は埋蔵量が豊富 (石炭全体の可採埋蔵量の23%に当たる約2,000億トン) であるにもかかわらず、生産量はこの20年以上ほぼ9億トンレベルで推移しており、消費も増えていない。

一方で、褐炭は地質年代的に比較的新しく、地表近くに埋蔵するのが一般的である。このため剥土比が低く、露天掘りが可能で経済的にも有利な条件で採掘できるという利点を持っている。また褐炭には低硫黄、低灰分のもが多く、瀝青炭や亜瀝青炭と比べるとその環境適応性が注目されてきている。

こうした側面を踏まえて、各国では褐炭を改質し、高カロリー化・安定化させることで褐炭を有効活用する技術開発が急がれている。

当社の開発した改質褐炭 (Upgraded Brown Coal, 以下UBC[®]注) という) プロセスは、褐炭の持つ多量の水分を効率的に脱水することにより発熱量を上げることを特徴とする。

本稿では、UBCプロセスの活用のなかで、UBC粉を利用した山元直結発電に焦点を当てて述べる。

脚注) UBCは当社の登録商標である。

1. UBCプロセスの開発

1.1 開発経緯

当社は1970年代より褐炭を対象とした液化プロセスの開発に取り組み、1981年からは独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (New Energy and Industrial Technology Development Organization, 以下NEDOという) の委託を受け、豪州ビクトリア州において日本の他社数社との協働でパイロットプロジェクトを実施した。その結果当社は、褐炭に関する多面的な知見を得、それがUBCプロセスの開発へとつながった。液化プロジェクトの終了後、当社はUBCプロセスの開発に取り組み、2006年から2011年までインドネシアで実施した大型実証プロジェクト¹⁾により技術が完成するに至った。

技術確立までの実績の概要を次節で述べる。

1.2 プラントの建設・運転実績

1990年初頭、当社加古川製鉄所内にベンチスケールプラント (製品ベース0.1t/d) を建設し、UBCの技術的メリットを確認した。その後、褐炭産出国であるインドネシア国において試験用プラント (パイロットプラント - 製品ベース3t/d)、および大型実証プラント (デモンストラーションプラント - 製品ベース600t/d) の両プロジェクトを実施し、UBCプロセスの技術的有効性、経済的有効性を実証した。インドネシアでの実証試験はわが国経済産業省・JCOALの補助事業として、また、インドネシア政府機関の鉱物・石炭技術研究・開発センター (Mineral & Coal Technology Research & Development Center (tekMIRA)) の協力のもとに実施したものである。パイロットプラントと大型実証プラントの概要を表1に、また概観を図1に示す。

*¹ エンジニアリング事業部門 新鉄源本部 石炭プロジェクト室 *² エンジニアリング事業部門 新鉄源本部 石炭プロジェクト室 (現 ㈱神鋼エンジニアリング&メンテナンス)
*³ エンジニアリング事業部門 新鉄源本部 石炭プロジェクト室 (現 エンジニアリング事業部門 新鉄源本部 営業・事業推進部)

表1 パイロットプラント, デモンストレーションプラントの概要
Table 1 Outline of pilot plant and demonstration plant

	Location	Capacity (t/d) (product basis)	Duratio (construction~ operation)	Purposes
Pilot plant	Indonesia (Palimanan, Jawa)	3	2001~2004	Confirmation of technical viability
Demonstration plant	Indonesia (Satui, Kalimantan)	600	2006~2011	Collection of data for design, construction and operation of commercial scale plant



図1 600t/d UBC大型実証プラント外観
Fig. 1 Outside view of 600t/d demonstration plant

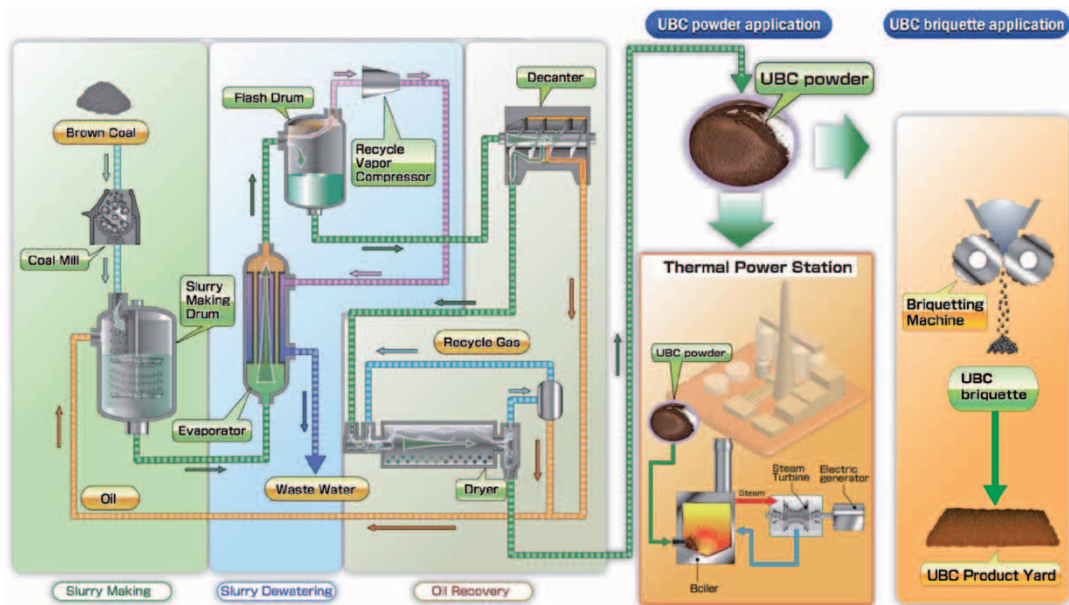


図2 UBCプロセスフロー
Fig. 2 Process flow of UBC

1.3 UBCプロセスの概要

UBCプロセスの概略フローを図2に示す。原料褐炭を粉砕機 (Coal Mill) で5 mm以下に粉砕し、熱媒体となる軽質油と混合・攪拌 (かくはん) してスラリーを作る。このスラリーを蒸発器 (Evaporator) で加熱することにより褐炭中の水分を蒸発させる。140~150℃、3気圧程度の比較的穏やかなプロセス条件のもとで高水分を含有する褐炭を効率的に脱水処理する。褐炭から蒸発した水分蒸気は気液分離器 (Flash Drum) でスラリーと分離する。この副生蒸気を圧縮機 (Recycle Vapor Compressor) で圧縮して高温蒸気とし、蒸発器の熱源として再利用することによって潜熱を有効利用し、熱効率の向上を図っている。気液分離器で分離回収した石炭・軽質油スラリーは遠心分離機 (Decanter) で軽質油と石炭ケーキに固液分離し、軽質油はスラリー化のた

めの熱媒油として再利用する。石炭ケーキは、乾燥機 (Dryer) を用いて石炭ケーキに残留した軽質油をさらに回収する。乾燥機の油分回収率を高めるために乾燥機内に循環ガス (Recycle Gas) を流して軽質油分の乾燥を促進した後、油蒸気を含んだ循環ガスを冷却、凝縮して軽質油を回収し、再利用する。これにより残留油分が0.5%まで低減された水分ゼロのUBC粉を得る。

高水分褐炭の脱水プロセスとして、UBCプロセスは他にも以下の特徴を有する。

(1) 高いエネルギー効率

油中スラリー脱水方式は、他の改質プロセスに比べて、脱水時の温度および圧力条件がマイルドであるうえに、蒸発器において高い伝熱係数が得られ、さらに脱水時に発生した蒸気を圧縮して熱源として再利用し、蒸気の潜熱を回収することにより高いエ

エネルギー効率を実現できる。

(2) 安価な機器の採用が可能

熱交換器、遠心ポンプ、気液分離器等は汎用的で安価な機器が使用できる。

(3) 低環境負荷

高いエネルギー効率により、他の改質プロセスに比べてCO₂排出量が少ない。また、化学反応を伴わないプロセスのため、有害な有機性汚染排水を生成しないので排水処理の負荷が小さい。

製品の活用としては二つおりのルートがある。一つは乾燥機を出たUBC粉をさらに成型機に通してブリケット状にするもので、これは製品を長距離、安定的に輸送する場合に適用される。もう一つは、UBC粉を隣接する発電所に直接投入するもので、水分がゼロにできるUBCプロセスの特色を最大限に活用し、高効率の発電を可能にするものである。本稿ではこの活用について述べる。

2. 現状での褐炭の限定的用途

上述のとおり、褐炭の可採埋蔵量は約2,000億トンあるが、地域的に見ると、ヨーロッパ、オセアニア、アジア、北米の順で埋蔵量が多くなっており、アフリカ、中東、中南米には褐炭の賦存が見られない。現状、褐炭の利用という点では、地域・国として見ても非常に限られた範囲で使用されているのみであり、それも決して効率が良いとはいえない状況下での利用となっている。

褐炭は高水分を含有するために離れた消費地まで輸送するには輸送効率が悪く、また輸送中の自然発火が懸念される。このため、山元でそのまま生焼き（なまだき）発電に利用しているのが実状である。褐炭生焼き発電は建設費の高い特殊なボイラを使用する必要があることに加えて、燃料となる褐炭の発熱量が低いために発電効率が低いことから発電コストも高くなる。

2.1 現状の褐炭生焼き発電システム

オーストラリア、ドイツ、ポーランド、インドなどの褐炭産出国で実績のある褐炭生焼き発電では一般に、ボイラでの燃焼前にフラッシュミル乾燥方式によって褐炭中の水分を脱水している。このような褐炭生焼きボイラとしては一般にタワーボイラが使われており、その概略フローを図3に示す。この方式は、ボイラの最高温度となる火炉上部から約900℃の燃焼排ガスを抽気して石炭ミルに導入し、ミルで粉碎された石炭粒子はこの燃焼排ガスによって乾燥ダクト内に搬送される。乾燥ダクト内を通過する際に褐炭中の水分は2～10秒で急速加熱・蒸発し、粉碎された褐炭は乾燥される。燃焼排ガスの熱量は水分の蒸発に使われてその温度は急速に低下し、石炭から蒸発した水分とともにボイラに戻される。

最終的に燃焼排ガス中の水蒸気は潜熱を回収されないまま煙突から大気に放出されており、この大きな熱損失が要因となって送電端発電効率は20数%から30%程度にとどまっている。また、この高水分のためにボイラでの熱密度が低く、一般の瀝青炭焼きボイラに比べてサイズが大きくなって建設費が高くなる。

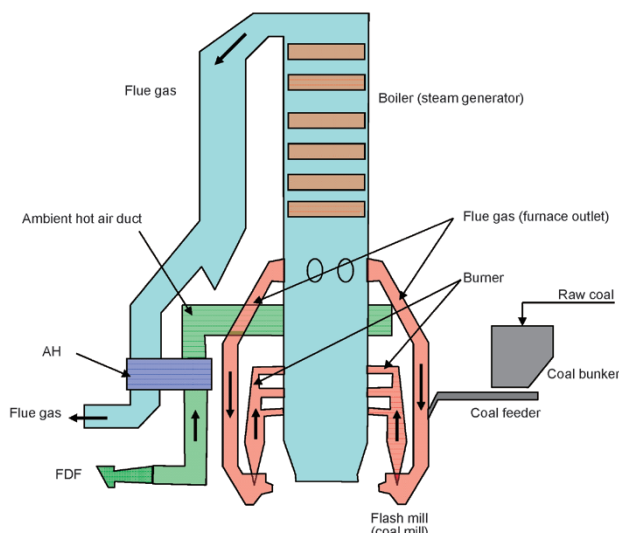


図3 褐炭生焼きボイラ（タワーボイラ）概略フロー
Fig.3 Schematic flow of lignite fired boiler (tower boiler)

これに対して当社が開発したUBCプロセスでは、事前処理として効率的に脱水する技術を用い、高水分の褐炭を水分ゼロの高発熱量石炭（UBC粉）に改質することができる。そのUBC粉を高効率発電システムに供することにより、従来の褐炭生焼き発電システムに比較して、発電コストを低減しつつCO₂排出量を大幅に低減できるものである。

当社は、NEDO平成24年度「石炭高効率利用システム案件等形成調査事業」の委託業務として「インドにおける改質褐炭（UBC）ベース低CO₂排出型発電プロジェクトの案件形成調査」²⁾を実施した。その委託業務において明らかになったUBCベースの山元直結発電の優位性を3章に記す。

2.2 インドの褐炭生焼き発電

NEDO調査事業の対象としたインド褐炭の性状の平均値は、水分52%、灰分4.5%、揮発分25%、固定炭素18.6%、発熱量2,830kcal/kg（高位）であり、従来法の対象とした褐炭生焼き発電所は、出力210MWの亜臨界タワーボイラで、送電端効率は29.15%（HHV = 高位発熱量ベース）である。

これに対して、褐炭をUBCプロセスで改質し、UBC粉を最新鋭の1,000MW高効率発電プラントに投入した場合の優位性を検討した。その概要を次章で紹介する。

3. UBCベースの山元直結率発電

3.1 UBC製造試験および燃焼試験

インド褐炭のUBCプロセスへの適応性を確認するため、褐炭サンプルのラボ試験に加え、インドネシアにあるパイロットプラントにおいて製造試験を実施した。またパイロットプラントで製造した10トンのUBC粉を日本のボイラメーカーに送り、燃焼試験を実施した。

その結果、UBCプロセスによるインド褐炭の改質に問題はないうえに、UBC粉の燃焼性は良好で超々臨界（ultra super critical, 以下USCという）ボイラでも問題なく使用できること、さらに灰中未燃分が少ないことも利点として確認できた。

3.2 発電プラントへのUBCプラントの組み込み

図4にUBCプラントを発電プラントに組み込んだ場合の概略フローを示す。UBCプラントで製造されたUBC粉は約60℃に冷却された後にUBC粉サイロに貯蔵され、そこからUBC粉供給ビンを通してそのままボイラに投入される。そのため、発電プラント側では通常は必要となる石炭粉砕ミルが不要となる。また、UBCプラントではエネルギーとして蒸気と電力を必要とするが、蒸気は発電プラントから一部が抽気され、また電力は所内動力の一部として供給されることにより、全体を統合したシステムとしてエネルギー効率の最適化を図っている。

3.3 発電効率の改善効果

水分52%のインド褐炭をUBCプロセスにより水分ゼロに改質し、熱量を2,830kcal/kg (HHV) から5,900kcal/kg (HHV) まで上昇させることにより、USC発電設備の導入が可能となる。

従来の褐炭生焚き発電と比較した場合の発電効率の改善は表2のとおりである。ケース1、すなわちUBC設

備と亜臨界発電を組み合わせたケース（発電設備を従来法と同等の亜臨界条件とした場合）における発電効率は32.60%となり、従来法からの改善率は11.8%となる。一方ケース2、すなわちUBC設備と超々臨界発電を組み合わせたケース（主検討ケース）における発電効率は34.45%となり、対従来型からの改善率は18.2%となる。ケース1、2ともにUBC設備の稼動に必要な蒸気および動力は後続の発電プラントより供給を受ける条件である。

ケース3、すなわちUBC製品（粉）を超々臨界発電に投入し、UBC設備を稼動させるのに必要となる蒸気および動力は別供給されるものと想定した場合の発電効率は40.63%となり、従来法からの改善率は39.4%となる。

3.4 褐炭使用量および排出CO₂の削減効果

1,000MW発電を想定した場合の従来法からの褐炭使用量とCO₂排出の削減効果は表3に示すとおりである。ここでは、送電端での出力が同じとして比較している。発電効率が上がり、(同量の発電を行うための) 使用褐炭量が少なく済むという効果から、CO₂排出量が削減さ

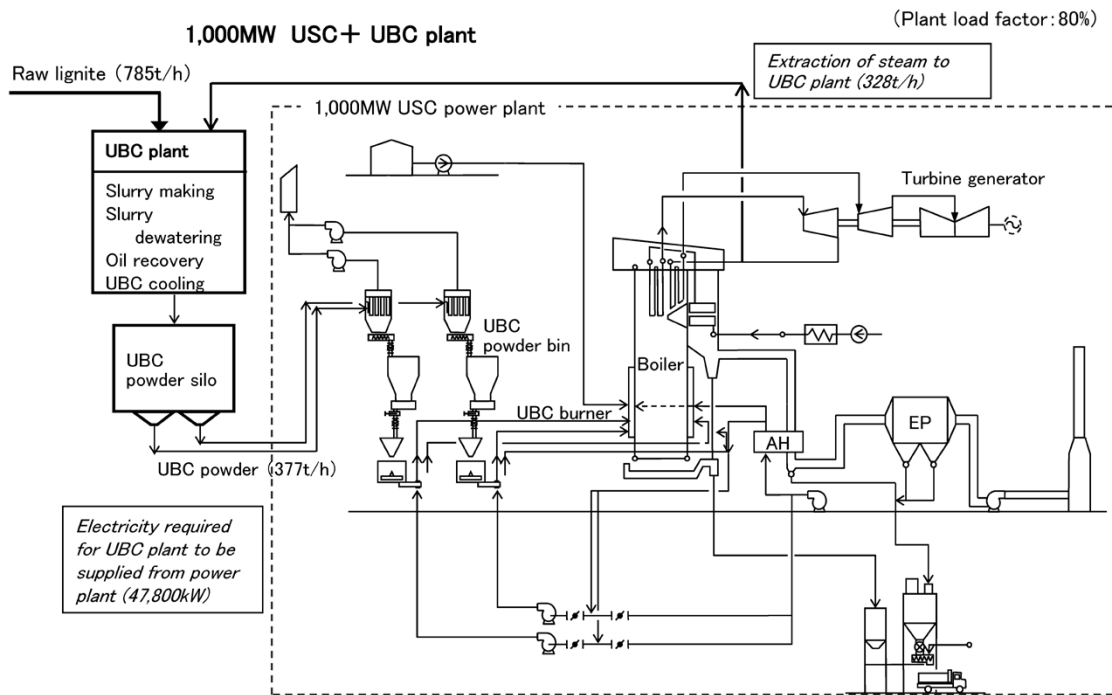


図4 UBCベース発電プラントの概略フロー
Fig. 4 Schematic flow of UBC based power plant

表2 発電効率の改善効果

Table 2 Effect of improving power generation efficiency

		Power generation efficiency (%) (sending end, HHV basis)	Improvement from conventional (%)	Remarks
Conventional Power Generation				
	Lignite-fired Sub-Critical Plant	29.15	NA	Data from operating Plant
UBC based Power Generation				
1	Integrated UBC-fired sub-critical plant	32.60	11.8	Energy used for UBC plant is deducted
2	Integrated UBC-fired ultra super critical plant	34.45 (40.90:LHV basis)	18.2	Energy used for UBC plant is deducted
3	Non Integrated UBC-fired ultra super critical plant	40.63 (42.70:LHV basis)	39.4	Energy used for UBC plant is not deducted

* Lignite: total moisture 52%, calorific value 2,830kcal/kg (HHV)
UBC powder: total moisture 0%, calorific value 5,900kcal/kg (HHV)

表3 褐炭使用量およびCO₂排出の削減効果
Table 3 Reduction of lignite consumption and CO₂ emission

	Study results				Remarks
	Power output	UBC production (Mt/y)	Lignite consumption (Mt/y)	CO ₂ emission (Mt/y)	
①UBC-fired ultra super critical plant	1,000 MW (generating end) 891 MW (sending end)	2.64	5.50	5.69	
②Conventional lignite-fired sub-critical plant	957 MW (generating end) 891 MW (sending end)	—	6.51	6.73	・Existing facility is 210MW sub-critical. ・Sending-end output is adjusted to the above ①.
Reduction of lignite consumption and CO ₂ emission	—	—	1.01 (②-①) (approx. 16% reduction)	1.04 (②-①) (approx. 16% reduction)	

<Premises of the study>・Lignite : total moisture 52%, calorific value 2,830kcal/kg (HHV), carbon 28.22%
・Plant load factor : 80% (7,008 h/y)

れる効果を生み出す。従来型の発電に比べて年間褐炭使用量が約100万トン、CO₂排出量が約100万トン、ともに約16%の削減効果が期待できる。

4. UBCベースの山元直結発電システムの利点

褐炭生焚き発電に比較して、事前処理としてUBCプロセスを活用した山元直結発電の利点をまとめると以下のとおりである。

- (1) 高効率発電が実現される
 - ・高カロリーUBC粉を燃料として使用（全水分50%以上の褐炭が全水分0%に）
 - ・高カロリーUBC粉は超々臨界ボイラ（USC）にて問題なく燃焼
- (2) CO₂排出量が少ない
 - ・褐炭使用量が少ないため
- (3) 操業費用が低い
 - ・高効率発電（高効率発電設備の導入が可能）
- (4) 鉱山寿命の延長
- (5) 発電設備の投資額が低い
 - ・通常大規模かつ高コストであるタワー型ボイラが不要
 - ・石炭微粉化設備が不要（燃料がUBC粉のため）

また、

- ・同等品位の一般炭に比べて水分が0%のため、より高い発電効率を有する

・より高い燃焼性を有するため、灰中未燃分が低いという利点を有し、一般炭の代替になり得る。

むすび=UBCプロセスは、褐炭という埋蔵量は膨大ながら現状では限定的にしか利用されていない、いわば未利用資源を有効活用するものである。

世界のエネルギー需要が伸び続けているなか、高品位炭の枯渇が懸念されている。かかる状況下、現状では未利用の状態にある褐炭をUBCプロセスにより有効活用することの意義は大きく、褐炭をそのまま使用して発電を行う褐炭生焚き発電（限定的な地域で実施されている）の場合と比べて発電効率が上がり、その結果CO₂排出の削減が可能となる。今後、インドなどの褐炭の賦存する国において本技術の普及が大いに期待される。

本稿で紹介したUBCプロセスの開発は、経済産業省/JCOALの補助を受け、インドネシア政府機関の鉱物・石炭技術研究・開発センター（tekMIRA）の協力の下になされたものであり、またUBCベース山元直結発電の検討はNEDO補助事業として実施された。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 木下 繁ほか. R&D神戸製鋼技報. 2010, Vol.60, No.1, P.71.
- 2) 平成24年度NEDO成果報告書. 石炭高効率利用システム案件等形成調査事業. 管理番号2013000000625.