

豪州褐炭を利用した 電力向け改質炭製造技術の開発

～低品位炭有効利用技術の開発～

Development of Australian Brown Coal Utilization Technology
for Power Generation
～Development of Low Rank Coal Utilization Technologies～

今村 彰伸 Akinobu IMAMURA
技術開発研究所 石炭技術室

関本 賢一 Kenichi SEKIMOTO
技術開発研究所 石炭技術室

武田 卓 Suguru TAKEDA
技術開発研究所 石炭技術室長

小菅 克志 Katsushi KOSUGE
技術総括部 知財情報管理室長

加藤 健次 Kenji KATO
技術開発研究所 セネラルマネジャー
博士(環境科学)

五十嵐正之 Masayuki IGARASHI
事業創出センター クリーンコール事業推進部
シニアマネジャー

水野 正孝 Masataka MIZUNO
事業創出センター
クリーンコール事業推進部長

抄 録

石炭は電力用、鉄鋼用および化学製品製造用原料などとして、非常に重要な資源である。長期的な石炭資源の安定確保のためには、現在は十分に利用されていない褐炭を使用可能とする技術開発が必要である。褐炭の資源賦存量は多量で全石炭資源の約1/3に相当するが、高水分で発熱量が低く、乾燥すると自然発熱性が高いという欠点を有するため、現在は殆ど産炭地で使用されている。我々は、代表的な褐炭である Loy Yang 炭を原料として、電力向け改質炭を製造する技術を検討した。この結果、乾燥技術および乾留技術の適用により、Loy Yang 炭を電力会社が現在使用している一般炭と同等の発熱量を有する石炭に改質できることがわかった。本論文では、豪州褐炭を電力用燃料として利用するための改質技術開発の背景、技術課題および主な開発成果について述べる。

Abstract

Coal is a very important resource for power generation, steelmaking and chemical materials etc. The expansion of raw coal brands for these industries is very important research theme for the long period. Brown coals are widely distributed all over the world and reach up to around one-third of the coal reserves. However, due to high moisture content, low calorific value and high spontaneous heating of dried coal stockpile, their utilization is limited at the local coal mining area. Development of Australian brown coal reforming technology to suitable for power generation resources has been conducting. As a result, it was clarified that the calorific value of Loy Yang coal was increased equivalent to bituminous coals by using drying and carbonizing technology. This paper describes the background of Australian brown coal reforming technology, research themes and main research results.

1 緒言

石炭は地域偏在性が低いこと、および価格が比較的安定していることから、今後も重要なエネルギー源である。わが国のエネルギー政策における石炭の位置付けをみると、2014年4月に閣議決定された第4次エネルギー基本計画において、石炭火力発電は温室効果ガスの排出量が多いものの、安定供給性や経済性に優れた重要なベースロード電源と位置付けられている。今後も石炭火力発電がその役割を担うためには、安価で安定的な石炭調達が必要である。わが国の電力用一般炭は、インドネシアや豪州などからの輸入量が多いが、近年はインドネシアなどの産炭国における石炭需要量の増加や中国などの大量な石炭購買の影響などにより需給がタイトになってきており、今後の長期的な安定供給が難しくなっている。そこで、わが国の石炭火力発電用に豪州褐炭を改質し、わが国に安価で安定的に輸入するビジネスモデルを検討中である。具体的には、資源量が豊富で低採掘コストの豪州ラトローブ・バレー地区で産出される褐炭に着目している。

褐炭は高水分で発熱量が低く、乾燥すると自然発熱性が高い欠点を有するために、現在はその殆どが産炭地でしか使用されていない。今後、豪州褐炭を改質する技術が確立することは、安全に輸送可能な高発熱量の発電用一般炭代替燃料を製造できることとなり、わが国のエネルギーの長期的な安定確保のために重要な意義がある。

当社は、九州電力(株)および東京電力ホールディングス(株)と共同で豪州褐炭を利用した電力向け改質炭製造技術の開発を実施中である。本論文では、豪州褐炭改質技術の背景、技術課題および主な開発成果について述べる。

2 研究開発の目的と開発課題

2.1 研究開発の目的

本研究開発の背景と狙いについて述べる。豪州は豊富な褐炭資源を保有しており、確認埋蔵量は約720億トン(わが国の石炭火力発電用として200年分以上)である。豪州ビクトリア州で産出される褐炭は、剥土比が低く採掘コストが安価、灰分や硫黄分

が少ないというメリットがあり活用が期待されている。これまでは、①水分が多いために重量当たりの発熱量が低く、輸送効率が非常に悪い。②自然発熱性が高いために長期間の貯蔵や長距離輸送が不可能であるといった点から、地元での地産地消にはほぼ限定されている。(ブリケット等の輸出実績は少量あり)

本研究開発では、豪州ビクトリア州ラトローブ・バレー地区に多量に存在する、高水分で自然発熱性が高い褐炭を、電力用一般炭並みの品質に改質する技術の確立を目指している。図1に褐炭改質事業化のモデルを示す¹⁾。

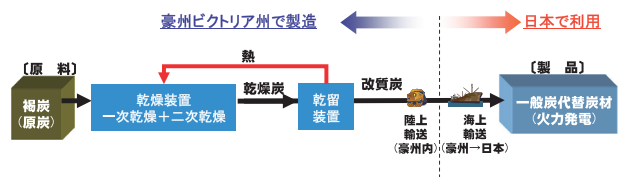


図1 豪州褐炭改質の事業化モデル
Fig.1 Business Model of Victorian Brow Coal Reforming Technology

表1および表2に豪州褐炭 Loy Yang 炭(以下、LY 炭と記載する)の性状を示す。LY 炭は約60%の水分を含んでおり、かつ酸素含有量が約23%と高いため、発熱量が低い。

表1 Loy Yang 炭の工業分析値
Table 1 Proximate Analysis of Loy Yang Coal

全水分 TM(%)	(% , dry)		
	揮発分 VM	固定炭素 FC	灰分 Ash
57.1	50.3	46.4	3.3

表2 Loy Yan 炭の元素分析値および発熱量
Table 2 Ultimate Analysis And Calorific Value of Loy Yang Coal

元素分析値 (% , dry)					発熱量 (HHV)	
C	H	N	S	O	(kJ/kg-wet)	(kJ/kg-dry)
67.8	4.8	0.7	0.3	23.1	11,580	26,990

そこで、自然発熱を起こさない安全な条件で乾燥した後、乾留して揮発分(以下 VM と記載する)を除去(調整)し、発熱量が高い改質炭を製造する技術を開発することとした。本研究開発では、LY 炭の発熱量を電力用一般炭相当の発熱量(27,000kJ/kg-wet 以上)に向上させて、改質炭を製造することを目標とした(図2)。開発成果の適用規模としては、商用化設備の改質炭製造規模を年間1,000万トン、わが国石炭火力発電用石炭の約10%と設定した。

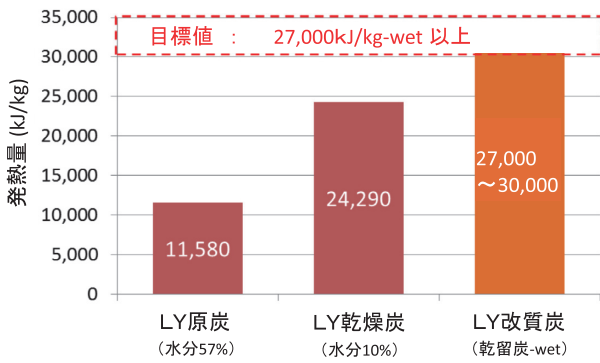


図2 原炭、乾燥炭および改質炭の発熱量の比較(LY炭)
Fig. 2 Comparison of Calorific Values Among Raw Coal, Dried Coal and Reformed Coal (Loy Yang Coal)

2.2 開発課題

豪州褐炭から改質炭を製造する技術課題／目標は、電力用一般炭代替という目的を考慮すると以下の2点である。

- ① 燃焼性、安全性に優れた高発熱量の改質炭製造
- ② 高効率で安定な改質炭製造プロセス確立

本課題解決に向けた、各要素技術の開発課題を以下に示す。

(1) 乾燥技術

原料のLY炭は多量の水分(約60%)を含んでおり、既存の乾燥技術では改質炭製造プロセス内(図3参照)で発生するエネルギーでは不足してしまうという問題がある。改質炭製造プロセス全体の効率化の為に、乾燥用エネルギーを削減し外部エネルギーゼロを達成することが必要である。従って、二次乾燥設備の廃蒸気を一次乾燥設備でカスケード利用する2段乾燥技術²⁾の確立に新たに取り組んだ(乾燥技術課題)。

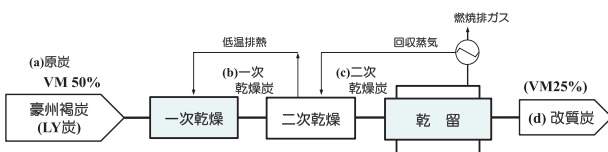


図3 改質炭製造プロセスフロー
Fig. 3 Brown Coal Reforming Process Flow

(2) 乾留技術

本技術は海外炭鉱に設置することを想定しており、オンサイト型設備への適用が前提である。また、改質炭は日本の既設ボイラーへ供給することを想定している為、既設ボイラーで使用可能な石炭条件(熱量、燃焼性等)に適合させる必要がある。その為①安定的かつ容易にVM制御を行い、高精度で

高カロリー化を達成する。②乾留生成ガスやタールなどは副生物として回収せずに、プロセス内での乾留熱源および乾燥熱源として有効利用することに取り組んだ(乾留技術課題)。

(3) 成型技術、自然発熱性評価・抑制技術

更に、乾燥および乾留過程で発生する微粉炭の成型技術および乾留によって得られる改質炭の自然発熱性評価・抑制技術確立が課題である。

以上の乾燥および乾留技術課題解決に取り組んだ開発成果について3.1、3.2項にて述べる。

3 主な開発成果

3.1 乾燥技術

乾燥技術では改質炭製造プロセス効率化を図るために、2段乾燥(一次乾燥+二次乾燥)を検討した。一次乾燥設備では水分を60%から50%まで(全乾燥水分量の1/3程度)乾燥し、二次乾燥設備では水分50%から10%程度まで乾燥する。二次乾燥設備については既存の乾燥技術導入を前提として検討し、一次乾燥設備については既存の適用技術が無いことから、今回新たに一次乾燥技術開発を進めた。

一次乾燥技術は、二次乾燥設備から排出される廃蒸気(低温廃熱)を使用する前提とした。廃蒸気使用可能な乾燥方式として空気流動層乾燥方式を採用した。加えて流動層乾燥機内に伝熱管を設置することにより、高熱効率化・コンパクト化を狙った。乾燥条件としては、空気雰囲気での安全性を考慮して、乾燥操作時の石炭温度の上限値を60℃に設定した。

乾燥技術開発は、1)LY炭乾燥特性評価(ラボ乾燥試験)、2)LY炭乾燥試験による乾燥能力・安全性等評価(ベンチスケール試験)、3)蒸気伝熱管付加による熱効率評価(ベンチスケール試験)のステップで検討を進めた。

はじめに、石炭処理量6kg/回(バッチ処理)のラボ乾燥試験装置を用いてLY炭の乾燥特性を調べた(図4)。平均粒径2.1mmのLY炭(原炭の水分59.8%)の試料を用いて、熱風温度120℃の条件でLY炭の乾燥曲線を測定し、LY炭の水分と石炭温度の関係性を調べた。

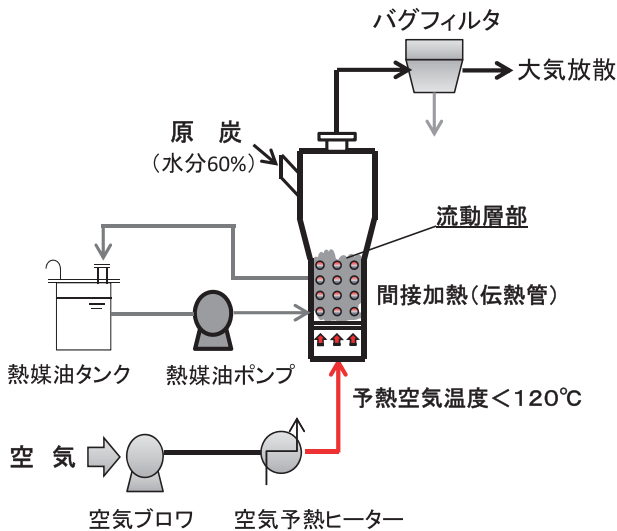


図4 流動層乾燥試験装置の概要(ラボスケール)
Fig. 4 Fluidized Bed Dryer (Laboratory Scale)

実験結果を図5に示す。この結果、LY炭の水分が60%から25%に低下する範囲では、石炭温度は一定の値で推移した。これよりLY炭を乾燥する場合、水分25%超の範囲では石炭の表面付着水分が蒸発し石炭温度が上昇しない恒率乾燥域であることがわかった。

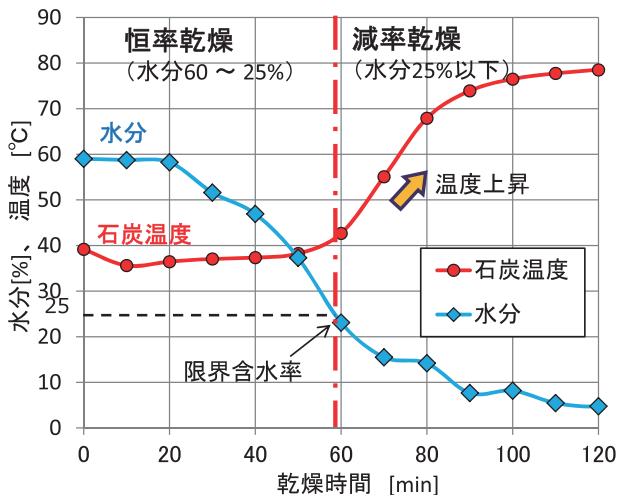


図5 ラボ試験装置におけるLY炭乾燥試験結果(6kg/回)
Fig. 5 Experimental Result of Loy Yang Coal Drying Tests Using Laboratory Scale Experimental Apparatus (6 kg/charge)

次に、連続式の一次乾燥試験装置(ベンチスケール試験)を用いて、LY炭の乾燥試験を行った。図6に一次乾燥試験装置の概要を示す。一次乾燥試験装置は流動層方式であり、褐炭処理量500kg/h 蒸発水分量130kg/hの能力をもつ。試験方法としては、はじめに、原料褐炭を粒径10mm以下に粉砕し受け入れホッパーに投入する。次に、乾燥機内に粉砕し

た褐炭を定量供給し、蒸気を用いた予熱器・加熱器によって約120℃まで加温された熱風を媒体として流動化し乾燥する。褐炭は熱風からの直接伝熱と同時に乾燥機に設置した蒸気伝熱管からの間接伝熱によって水分50%まで乾燥される。

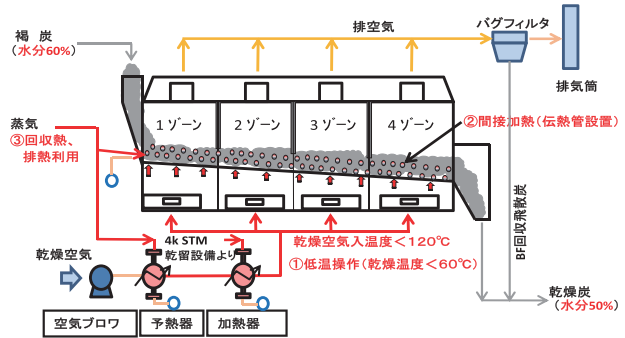


図6 一次乾燥機の概要
Fig. 6 Outline of 1st Drying Apparatus

乾燥試験における石炭温度推移を図7に示す。LY炭を水分58%から50%まで乾燥する場合、石炭温度は自然発熱がない温度条件(60℃以下)の約50℃以下で推移し、自然発熱の危険性がない安全な条件でLY炭を一次乾燥できることがわかった²⁾。

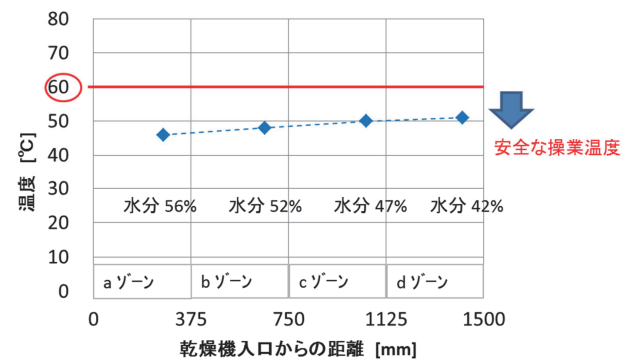


図7 ベンチ試験装置における石炭温度推移
Fig. 7 Trend of Coal Temperature during Coal Drying Using Bench Scale Experimental Apparatus

次に蒸気伝熱管効果を検証する為、一次乾燥試験装置において蒸気伝熱管の加熱条件を変えて連続乾燥試験を行った。実験条件を表3に示す。流動層内に吹き込んだ加熱空気は120℃、蒸気伝熱管の温度は100℃である。

表3 流動層の乾燥試験条件(ベンチスケール)
Table 3 Experimental Condition of Fluidized Bed Dryer (Bench Scale Unit)

	石炭処理量 (kg/h)	滞留時間 (min)	熱風温度 (°C)	熱風風量 (Nm ³ /h)	空塔速度 (m/s)	伝熱管温度 (°C)
伝熱管加熱あり	500	12	120	2500	2.1	100
伝熱管加熱なし	500	12	120	2500	2.1	加熱無し

連続乾燥試験において、蒸気伝熱管加熱有-無における熱バランスから単位床面積あたりの蒸発水分量を導出した結果を図8に示す。伝熱管加熱を付加することにより蒸発水分量が2倍に増加することを確認した。本結果より、蒸気伝熱管設置により、熱風量を増やすことなく乾燥能力を上げることができ(高熱効率化)、設備のコンパクト化が可能となることがわかった。

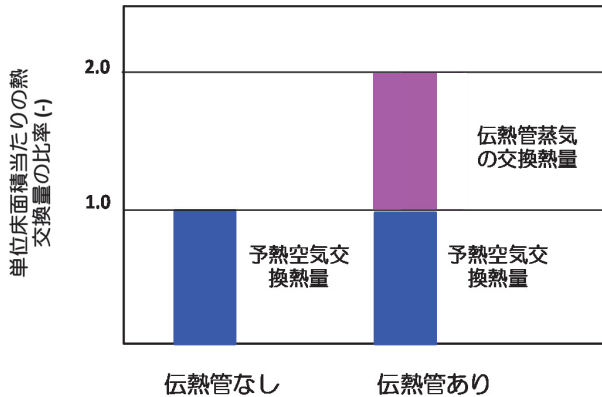


図8 乾燥設備の熱交換量(ベンチ試験)
Fig. 8 Comparison of Heat Exchange Volume in Fluidized Bed Dryer (Bench Scale Unit)

乾燥技術開発成果をまとめると、以下の通りとなる。LY炭のラボ乾燥試験を行い、乾燥特性を評価した結果、水分25%超の範囲では石炭温度が上昇しない恒率乾燥域であることがわかった。LY炭乾燥試験(ベンチスケール試験)により、加熱空気を媒体とした流動層式乾燥技術により、熱効率が高く、安全性および経済性に優れた一次乾燥設備を設計することがわかった。その為、二次乾燥設備の廃蒸気を一次乾燥設備でカスケード利用でき、改質炭製造プロセスとして外部エネルギーゼロ達成に目途を得た。今後は、一次乾燥設備のスケールアップ検討を行い、乾燥システムの最適化を図る。

3.2 乾留技術

本研究開発では、LY炭を乾留して得られる改質炭の性状を調べるとともに、高発熱量化を評価した。

実験に使用したLY炭と電力会社で使用されている石炭(比較炭)の工業分析値および元素分析値を表4に示す。各石炭の揮発分を比較すると、LY炭のVM(50.3%)は、電力用の各石炭(Coal A(ボイラ用亜瀝青炭)46.0%, Coal B(ボイラ用瀝青炭)36.1%,

Coal C(ボイラ用瀝青炭)33.0%), および Coal D(コークス用瀝青炭)20.6%に比べて高い値を示す。

表4 LY炭および比較炭の性状
Table 4 Analysis of Used Coals

石炭	元素分析 [mass%, d.a.f.]					工業分析 [mass%-dry]		
	C	H	N	S	O	FC	VM	Ash
Loy Yang Coal	70.1	5.0	0.7	0.3	23.9	46.4	50.3	3.3
Coal A	71.6	5.1	1.1	0.2	22.0	49.9	46.0	4.2
Coal B	78.4	5.0	1.0	0.3	15.4	52.5	36.1	11.4
Coal C	81.3	5.0	2.1	0.6	10.9	53.4	33.0	13.5
Coal D	88.6	4.7	1.9	0.5	4.2	68.7	20.6	10.7

図9に乾留実験に使用したベンチスケール乾留試験装置の概要を示す。乾留には石炭処理量540kg/hの外熱式キルンを用い、水分約15%に乾燥処理したLY炭を乾留温度400℃~650℃まで乾留し、乾留温度と改質炭VMの関係を調べた。

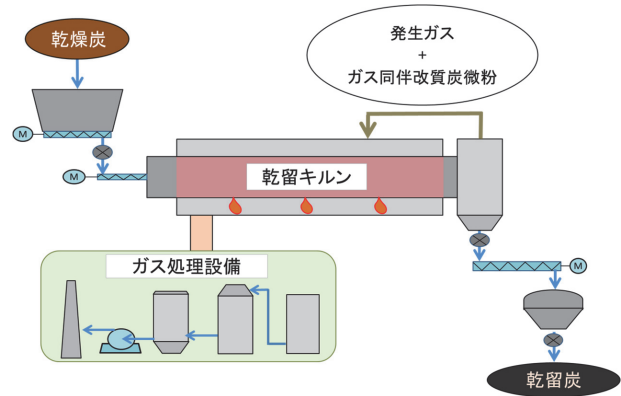


図9 乾留試験装置
Fig. 9 Experimental Apparatus of Reforming Test

乾留試験結果を図10に示す。乾留時の炭材温度と改質炭のVMとの間には、強い相関関係が得られた。

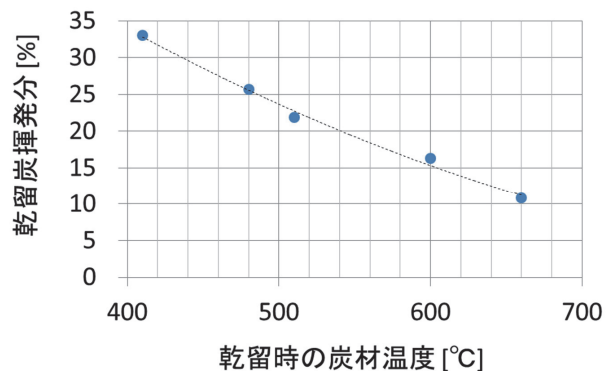


図10 炭材温度と揮発分の相関
Fig. 10 Relationship between Reforming Temperature and Volatile Matter

実験結果を基に熱経済性に有利な運転条件を検討した結果、VM25%の乾留炭を製造する場合、乾燥および乾留工程に必要な熱量と乾留工程で発生する副生ガス等の熱量が同等となるため、熱経済性に最も有利な操業点であると計算された。VM25%の乾留炭を製造する乾留温度は480℃であり、この乾留温度で得られる改質炭のVMを測定した結果、揮発分のばらつきが1%以下で精度よく乾留できることがわかった³⁾。

表5に乾留温度を変化させて得られた各乾留炭の工業分析値および元素分析値を示す。乾留によりVM10.8~33.0%の乾留炭を製造した結果、乾留炭の炭素割合(C)は原炭の70.1%から77.8~90.2%まで上昇し、酸素含有量は原炭の23.9%から17.0~5.9%まで減少した。

表5 改質炭の性状変化
Table 5 Properties of Loy Yang Coal and Reformed Coal

炭材温度 [°C]	元素分析 [mass%, d.a.f.]					工業分析 [mass%-dry]		燃料比 [-]
	C	H	N	S	O	FC	VM	
Loy Yang Coal	70.1	5.0	0.7	0.3	23.9	46.4	50.3	0.9
乾留炭410	77.8	4.1	0.9	0.3	17.0	64.5	33.0	2.0
乾留炭480	79.5	3.5	0.9	0.2	15.9	70.3	25.7	2.7
乾留炭510	82.5	3.1	1.0	0.2	13.2	75.3	21.9	3.4
乾留炭600	85.6	2.7	1.0	0.2	10.4	81.0	16.3	5.0
乾留炭660	90.2	2.7	0.8	0.3	5.9	84.7	10.8	7.8

図11に乾留に伴うLY炭の発熱量の変化を示す。この結果、VMと発熱量の間には相関関係があり、LY炭をVM21.9~33.0%に乾留することにより、電力会社が使用している一般炭(Coal A, Coal B, Coal C)と同等の発熱量に改質されることがわかった。VM33.0%の改質炭は、燃料比(FC/VM)が2.0

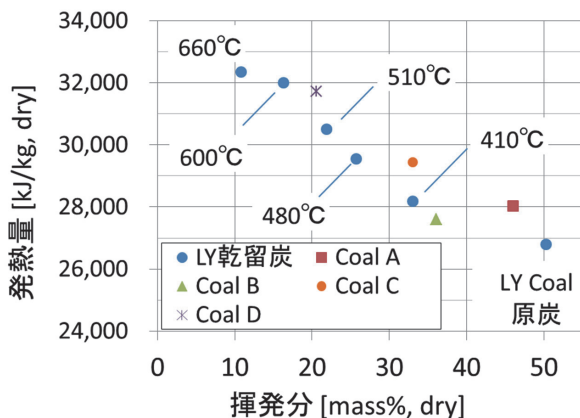


図11 揮発分と発熱量の関係
Fig. 11 Relationship between VM and calorific value

となりCoal C(1.6)と近い値となることがわかった。

LY炭を乾留して得られる改質炭(乾留炭)の元素分析値について、H/C(水素/炭素比)とO/C(酸素/炭素比)の関係をコールバンド⁴⁾を用いてプロットした結果を図12に示す。石炭は石炭化度の上昇に伴って、脱水(H₂O)反応、脱メタン(CH₄)反応および脱炭酸(CO₂)反応が進行するため、コールバンド上の右上から左下に向かって、曲線的に推移する。これに対して、LY炭を乾留する場合は、コールバンド上で石炭化度の進行に伴う変化とは異なり、O/Cの値が同等の亜瀝青炭や瀝青炭のH/Cに比べて、LY乾留炭のH/Cの値が小さい、すなわち含水素量が少なくなる。この原因は、乾留工程では脱メタン反応および脱水反応の比率が脱炭酸(CO₂)反応に比べ高いためと推察した。石炭中の水素は発熱量としては14,420kJ/kgと高いが、燃焼反応時に生成水を発生させ、ボイラ効率を低下させる要因となる。このため、含水素量が少ないLY乾留炭(改質炭)は発熱量が同等の瀝青炭・亜瀝青炭に比べてボイラ効率の向上が期待される。

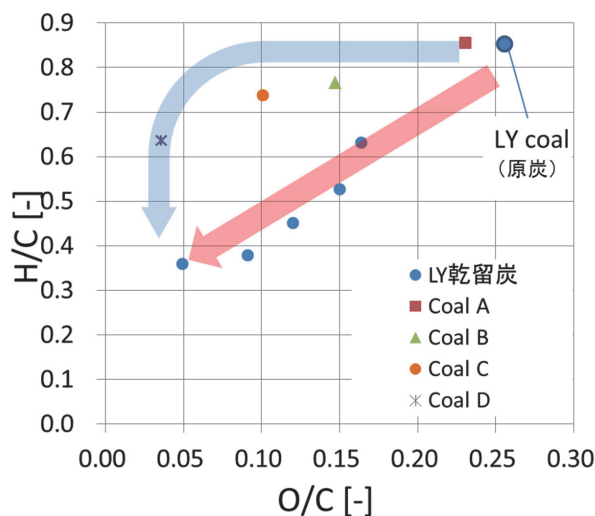


図12 Loy Yan炭と改質炭のH/CとO/Cの関係
Fig. 12 Relationship between H/C and O/C of Loy Yang Coal and Reformed Coal

表6にベンチスケール乾燥・乾留試験により製造したVM16%~VM33%の改質炭(乾留炭)の性状を示す。改質(乾燥, 乾留)することで含酸素成分が優先して取り除かれ乾留炭の炭素成分が増加し、発熱量が高くなった。VM16% : 29,530kJ/kg, VM22% : 29,200kJ/kg, VM33% : 27,175kJ/kgといずれも27,000kJ/kg以上の発熱量を示し、瀝青炭(一般炭)

の発熱量(24,000~26,500kJ/kg)と同等以上の高い発熱量を得ることができた。

表6 LY炭および改質炭の性状
Table6 Properties of Loy Yang Raw Coal and Reformed Coal

	単位	豪州褐炭(LY炭)					瀝青炭		亜瀝青炭	
		原炭(参考)	乾燥炭 TM10	乾留炭			A	B	A	B
全水分	%	57.1	10.0	7.8	4.3	3.6	12.4	13.5	25.1	28.0
水分	(%, air dry)	20.8	10.0	3.3	2.8	2.7	1.9	5.0	14.7	13.0
灰分	(%, air dry)	2.5	2.8	2.8	2.7	2.4	11.4	10.6	1.3	2.6
揮発分	(%, air dry)	40.4	41.2	16.2	21.9	33.0	33.1	35.0	42.5	43.4
燃料比	—	0.90	0.90	4.81	3.31	1.88	1.62	1.41	0.98	0.94
高位発熱量	(kJ/kg)	11,580	24,290	29,530	29,200	27,175	26,470	24,240	21,750	20,230
低位発熱量	(kJ/kg)	10,320	23,100	28,780	28,440	26,260	25,210	23,100	20,380	18,790
炭素	(%, dry)	68.7	←	83.2	80.1	75.8	73.0	69.5	72.9	70.2
水素	(%, dry)	5.40	←	2.63	3.03	4.01	4.79	4.34	4.38	4.88
窒素	(%, dry)	0.68	←	0.99	0.96	0.83	1.77	0.90	1.00	1.11
硫黄	(%, dry)	0.32	←	0.20	0.21	0.26	0.54	0.28	0.12	0.23

図13にLY炭の改質炭の比表面積をDFT法およびBET法で測定した結果を示す⁵⁾。改質炭の比表面積は瀝青炭約10~20m²/g⁶⁾に比べて200~800m²/gと大きい値を示している。先に実施された燃焼性評価試験で良好な燃焼性のデータが得られており、ボイラ効率が向上すると推察される。

また、LY炭は灰分量および硫黄分量が少ないため、その乾留により得られる改質炭はボイラ燃焼時の灰処理量の削減および脱硫処理費用削減効果も想定される。さらに、改質炭に含まれる窒素分が少ないため、燃焼中のNO_x発生量が減少すると考えられる。

乾留技術開発成果をまとめると以下の通りとなる。LY炭のベンチスケール乾留試験を行い、乾留

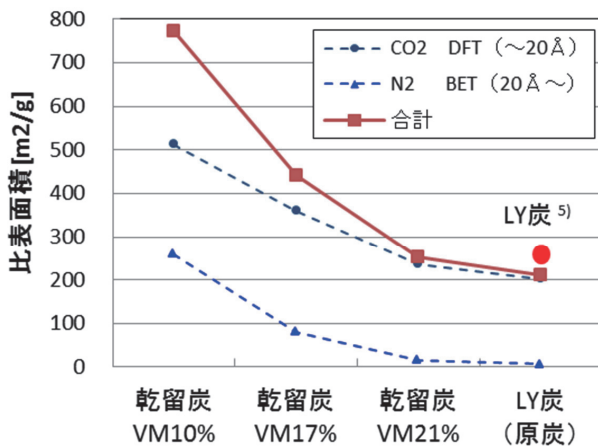


図13 改質炭とLY炭の比表面積
Fig.13 Surface area of Loy Yang Coal and Reformed Coal

特性を評価した。その結果、乾留温度を制御することによりVM量を精度よく制御でき、VM量を制御することで安全に目標の一般炭同等以上の高発熱量化が可能となった。また、得られた改質炭は、高含炭素量、低含水素量、高い比表面積を示し、高発熱量に加え良好な燃焼性が期待できることがわかった。

本研究開発では乾燥、乾留技術についてラボ試験、ベンチスケール試験等を用い研究開発を推進した。その結果、豪州褐炭から改質炭を製造する技術課題(①燃焼性、安全性に優れた高発熱量の改質炭製造、②高効率で安定な改質炭製造プロセス確立)に一定の目途を得た。現在、引き続きスケールアップ検討等に取り組んでいる。

乾燥および乾留以外の開発課題として、乾燥および乾留過程で発生する微粉炭を効率よく成型する技術を開発中である。また、乾留によって得られる改質炭の自然発熱性⁷⁾⁸⁾を評価中である。これらの内容については、次回、詳細を報告する予定である。

4 結言

わが国の電力用石炭資源を長期的・安定的に確保するために、豪州褐炭を電力向けに改質する技術を開発中である。改質炭製造プロセスを構成する乾燥技術、乾留技術および成型技術を高度化することにより、製品である改質炭の品質、安全性および経済性が向上する。今後は、ラボ試験およびベンチ試験から得られた成果を基に商業機スケールへ展開すべく、全体システムの検討、装置化、スケールアップ技術および装置運用等の技術検討を進めて行く。また、改質炭の自然発熱性評価について、詳細な検討を行う予定である。

【謝 辞】

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)事業「ゼロエミッション石炭火力技術開発プロジェクト」の一環として実施された。NEDOのご支援および九州電力(株)、東京電力ホールディングス(株)のご協力に対して謝意を表す。

参考文献

- 1) 小菅克志, 五十嵐正之, 加藤健次, 高橋洋一, 犬丸哲郎, 井上肇, 桑原隆: 豪州褐炭由来電力向け改質炭製造プロセスの開発, 第26回日本エネルギー学会大会発表要旨集, No1-3-1, (2017)
- 2) 関本賢一, 武田卓, 小菅克志, 加藤健次: 褐炭乾燥設備の開発, 第54回石炭科学会議 発表要旨集, No1-24 (2017)
- 3) 今村彰伸, 小菅克志, 加藤健次: Loy Yang 炭乾留による性状変化, 第26回日本エネルギー学会大会発表要旨集, No1-3-2(2017)
- 4) D. W. van Krevelen : COAL, Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam-Oxford-New York, (1981)p. 172-174
- 5) Edited by R. A. Du0rie : *The Science of Victorian Brown Coal: Structure, Properties and Consequences for Utilization*, Butterworth Heinemann Ltd., Oxford-London -Boston- Munich- New Delhi- Singapore-Sydney- Tokyo-Toronto-Wellington, p. 191 (1991)
- 6) 大塚一雄, 宮腰宏, 佐藤博: 石炭の表面反応に関する研究, 日本鉱業会誌, 91, 759-763(1975)
- 7) 三浦孝一, 藤墳大裕: 低品位炭の自然発火の機構とその制御技術, 日エネ誌, 93, 1054-1065(2014)
- 8) 三浦孝一: 乾燥石炭を大気にさらした時の温度上昇の測定, 日エネ誌, 94, 1169-1172(2015)