

C-3 東アジアにおける酸性雨原因物質排出制御手法の開発と環境への影響評価に関する研究
(1) 東アジアにおける酸性雨原因物質排出制御手法の開発と環境への影響評価に関する研究
② 酸性雨原因物質の排出制御技術の実用化に関する研究

研究代表者 国立環境研究所大気圏環境部大気反応研究室 畠山史郎

環境庁国立環境研究所

大気圏環境部大気反応研究室

畠山史郎

(委託先) (社) 国際善隣協会 環境推進センター 王青躍・北村必勝・新井哲也

(平成9～11年度 合計予算額 102,962千円)

(平成11年度予算額 32,848千円)

【要旨】

中国中央政府直轄最大都市重慶市では、高硫黄含有率(約2～6%)の石炭を民生ならびに産業用の主要な燃料として、年間約2,533万トン(1999年)が消費され、森林枯損、農業被害、建造物の腐食などの酸性雨被害が顕現化し、呼吸器系疾患による死亡率は中国全域の平均と比較して約3倍であるなど健康被害も顕著である。それらは小規模低層大気汚染(中小工場ボイラー、民生用炉)による石炭燃焼から放出される二酸化硫黄(SO₂)と粉塵による影響が大きいと確認されている。このため、重慶市では、燃料使用量を低減すると共に、都市部におけるSO₂と煙塵による小規模低層大気汚染からの酸性雨原因物質の排出抑制ならびに住民の健康保護対策が急務となっている。

また、中国において、一般的に利用されている湿式選炭技術は、その立地に水資源が必要であり、設備コストがかさみ、高含水スラッジ、廃水処理施設など、プロセス上の複雑さ等の問題から、石炭の選炭率は20%しか達しておらず、大部分の石炭が未処理のまま市場に流通している。そのため自国産の低品位炭(高硫黄・高灰分)にエネルギー源を求めざるを得ない中国などの開発途上国では、石炭燃焼に起因する深刻な大気汚染が生じている。したがって、水資源を必要とせず、設備、ランニングコストなどの面から中国に適合する乾式選炭技術の普及は緊急かつ重要な課題であり、その開発と技術協力に関して、我が国の石炭関連産業にかける期待は極めて大きい。

本研究では、上記のような環境問題を解決するために、バイオブリケット技術の実用化と静電気を利用した乾式選炭装置の開発を行ってきた。

バイオブリケット技術に関しては、1995年度～1996年度にかけて、重慶市における民生用石炭からの酸性雨原因物質の排出抑制対策技術として、現地実用化を目指した製造技術及び燃焼技術を確立し、現地への実証プラントを日中共同で建設した。本研究では、1997年度より現地実証プラントにおいて、これまでの研究の継続としてバイオブリケット技術の現地化を推進するために、燃焼時に硫黄固定、脱硝、脱塵が可能な重慶製のバイオブリケットを開発し、日中共同による特性評価研究を実施し、その高い環境効果並びに経済性効果が確認された。

さらに、1997年度より新たに静電気を利用した乾式選炭装置を開発し、その選炭効果を国内で実験・評価した。また、硫黄分の高い低品位石炭が産出される重慶市南桐炭鉱に乾式選炭研究装置を導入し、技術移転をすると共に、日中共同による選炭実験を実施している。その結果、一般的な湿式選炭に比べて、脱硫率及び脱灰率ともにやや低い、中国側の要求する数字に達しており、低コストが示され、また選炭特性パラメータの最適化によって向上することが可能である。

【キーワード】 酸性雨原因物質、中国重慶市、バイオブリケット、硫黄固定効率、乾式選炭技術

1. 序

中国のエネルギーの約75%を占める石炭の需要は、将来的に増加する傾向があるが、地方の中小炭鉱には、適切な石炭クリーン化技術がないため、採炭される高硫黄分の低品位石炭は未処理のまま市場に流通しており、その多くは、市民生活に密接に関係する民生用コンロや中小規模ボイラー等の低い発生源の燃焼設備に供されている。その結果、中国各地、特に西南地区の都市部（重慶市や貴陽市）では、硫黄含有率の高い石炭（約2～6%）が主要燃料として使用され、高硫黄分の低品位石炭の燃焼に起因する大量の二酸化硫黄（SO₂）及び粉塵が放出されており、大気汚染や酸性雨が顕在化し、それらによる生態系の破壊、農林業の経済的損失、建造物の腐食、健康被害等が発生している。これらの問題は、中国国内だけでなく日本を含む東アジア地域の酸性雨越境汚染の一因となっている。

これらの深刻な大気汚染や酸性雨被害を防止するためには、低品位石炭をクリーン化する技術が必要となる。石炭クリーン化技術による脱硫及び脱塵対策は、酸性雨原因物質の排出抑制、SO₂排出総量規制等の環境政策支援並びに住民の健康保護の観点から最も重要な課題であり、早急な対応が迫られており、中国側からの共同研究に対する強い協力要請がある。

本研究では、現地においてバイオブリケット化による硫黄固定効率およびエネルギー効率を評価すると共に、従来の重慶市市販石炭ブリケットとの燃焼実験の比較を行った成果に基づき、バイオブリケット製造技術の確立を目指して、重慶市の万盛区南桐炭鉱に20万トン/年のバイオブリケット生産工場を建設するための生産システムの適正化と経済性の評価調査を実施した。また、これまでに実施されたバイオブリケットに関する技術移転及び日中共同研究の成果を総合的に評価し、日中双方の見解をまとめると共に、今後の展開について議論した。

同時に、中国重慶市低品位原炭における静電気方式による（静電気セパレータ）乾式選炭技術の実用化に関する日中共同による調査および研究を実施した。重慶市の南桐炭鉱に新たに開発した選炭装置を導入した後、その改良も行い、重慶炭を対象とした選炭特性について、無機質燃焼硫黄分を含む脱硫率・脱灰率、適応粒径範囲、精炭回収率等を検討した。広い粒度範囲にわたる南桐炭の乾式選炭特性に関する知見が得られた。低品位石炭を対象に乾式選炭技術に関して日中共同実験を実施し、現地実用化可能性を探るための第一段階の研究を完了させた。

今後は、これらの結果に基づき、バイオブリケットによる酸性雨原因物質の80～90%排出を抑制するための製造技術および燃焼技術の普及対策を検討していく。また、高硫黄分の石炭燃焼からの酸性雨原因物質排出の総量規制と水質資源保護のための総合的な対策技術として、バイオブリケット製造技術に乾式選炭システムを組み合わせるための要素技術に関する研究開発を推進している。

2. 研究目的

本研究では、日本からの技術提供を含め、現地に適したバイオブリケット成形装置を中国重慶市江北区華新街煤店に設置し、その実証プラント及び燃焼炉の改造までを含めた設計を行う。さらに、現地で試験製造したバイオブリケットと重慶市販石炭ブリケットとの比較実験を行い、強度などの基礎物性ならびに燃焼特性を明らかにする。これらの結果ならびに、原料の供給、エネルギー効率、SO₂排出抑制の面から、酸性雨原因物質排出抑制技術としてのバイオブリケット技術の現地実用化の可能性を評価することを目的としている。また、日中共同研究により添加物等を改良したバイオブリケットの開発ならびに比較燃焼実験を行い、硫黄固定・脱硝効果を定量的に解析する。

同時に、重慶で産出される低品位炭に含まれる硫黄分ならびに灰分の有効利用を目的とした乾式選炭実験研究装置を現地に供与し、静電気方式による乾式選炭技術の実用化に向け、日中共同で基礎開発研究に取り組み、現地の石炭から硫黄分ならびに灰分を効率よく、かつ、水質汚染を引き起こすこと無しに灰分と石炭を選別する乾式選炭技術を確立するため、国内

外で基礎的な実験を行う。

3. 研究方法

3.1. バイオブリケットに関する評価実験

重慶市産石炭、バイオマス(大鋸屑、バガス、モミガラ、稲ワラ等の農林業廃棄物)10~25%、および硫黄固定剤(生石灰、消石灰等等)の混合物を、重慶市江北区のバイオブリケット実証プラント(図1)により高圧成形し、バイオブリケットの試験製造実験を行った。バイオブリケットの燃焼特性を評価するため、重慶市原炭と試験製造したバイオブリケットの燃焼実験を現地の公的機関によって実施した。燃焼装置には、一般家庭用コンロおよび小型ボイラーを用い、同条件下にて、着火性、燃焼特性、煙塵ならびにSO₂排出抑制効果等を評価した。日本国内においては、精密なバイオブリケット燃焼特性解析システムを構築し、燃焼特性ならびに硫黄固定・脱硝率に関して詳細なデータを取得した。また、中国重慶において開発された新型硫黄固定剤をバイオブリケットに混合し、その性能試験を行った。

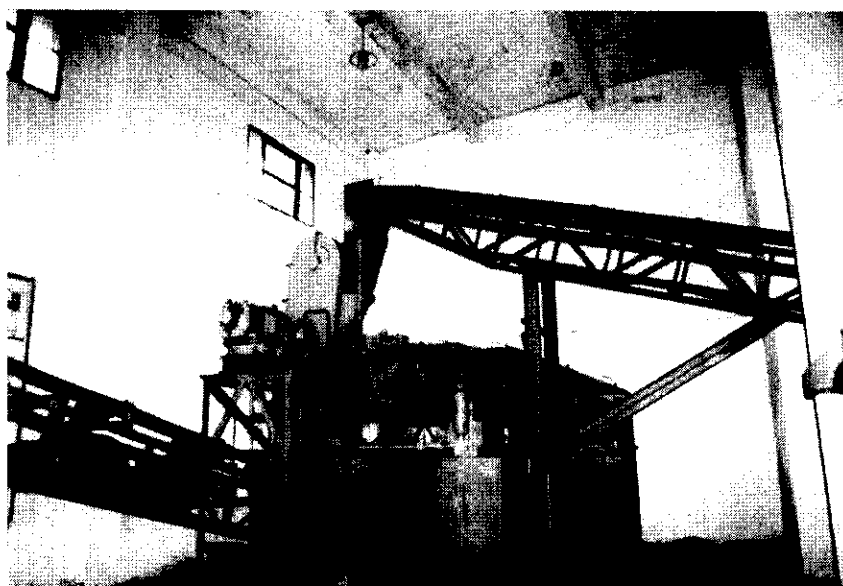


図1 重慶市江北区に設置した実証プラントの成形装置

3.1.1. バイオブリケットの試作

重慶製バイオブリケットは、硫黄固定剤として従来の石灰石や消石灰でなく、現地の溶接剤生産工業等からの混合廃棄物を再利用している(Ca/S=1.5)。バイオマスは主に大鋸屑(20wt.%)を用いた。製造プロセスは、重慶市に導入した実証プラントを用いて高圧成形(3~5トン/cm²)し、実用に耐える可搬性を有するピロー型のバイオブリケットを試作した。また、日本国内においても、高圧成形研究装置を用いてアーモンド形のバイオブリケットを試作した。本研究では、「重慶製」と明記しないバイオブリケットは、硫黄固定剤として消石灰を利用しており、重慶市で市販されている硫黄固定効果のない従来のブリケットを石炭ブリケットと称呼する。

3.1.2. 燃焼実験

精密な日本国内燃焼実験では、電子天秤付き温度制御型電気加熱炉を用い、硫黄固定・脱硝効果や燃焼解析を実施した。中国製の民生用コンロ及び中小ボイラーでの燃焼実験では、中国の公的測定機関である「中国四川省西南熱功計測センター」に計測を依頼した。

3.1.3. 経済性評価と調査

重慶市の代表的な国営炭鉱である南桐炭鉱に年産20万トン規模のバイオブリケット生産プ

ラントを建設する場合の経済性について、重慶市計画委員会と環境保護局の許可を得て、重慶市石炭管理局、南桐鋳務局、中国煤炭工業部重慶設計研究院と共同して、建設場所の選定、市場性調査と評価を実施した。

3.2. 乾式選炭特性に関する研究実験

開発した乾式選炭装置の模式図と写真を図2に示す。

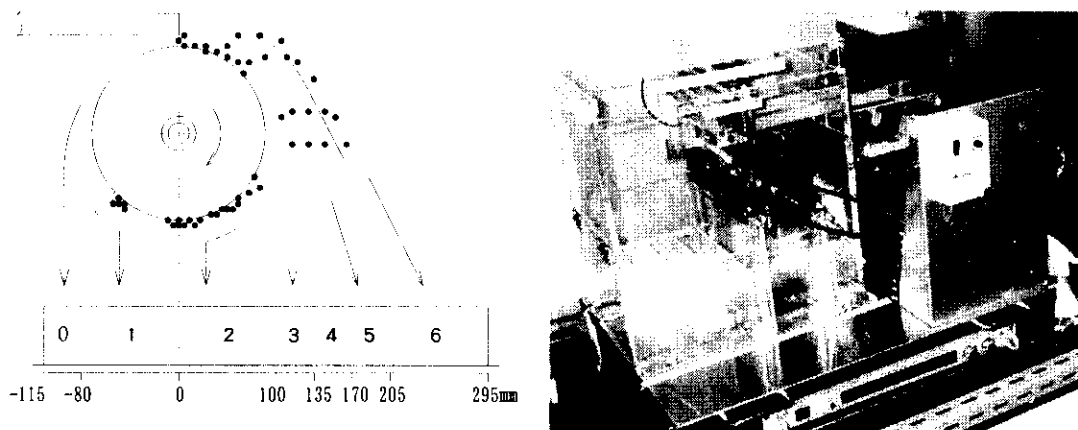


図2 小型乾式選炭実験装置（日本国内）

石炭はフィーダによって一定の周速度で回転しているドラムセンター直上に落下させる。落下した石炭は電極によってドラムに付着するもの、飛散するものが下部に設置した7個の箱に選別される。なお、無通電状態では3の箱へすべての石炭が落下する。電極には梯子状電極と針電極の2種類を石炭粒径に応じて適用した。石炭の選別方法は精炭を飛散させる方法とドラムに付着させる方法を用いた。

処理量の異なる3種類の装置を開発した。小型乾式選炭研究装置と改良型乾式選炭研究装置は、日本において実験を行い、ベンチスケールの現地実験用乾式選炭研究装置（図3）は、重慶南桐炭鋳に搬入し、日中共同研究実験室に設置され、選炭工場の研究チームによる選炭実験を行うと同時に、研究装置の部品改良と適正改造実験も日中共同にて実施してきた。

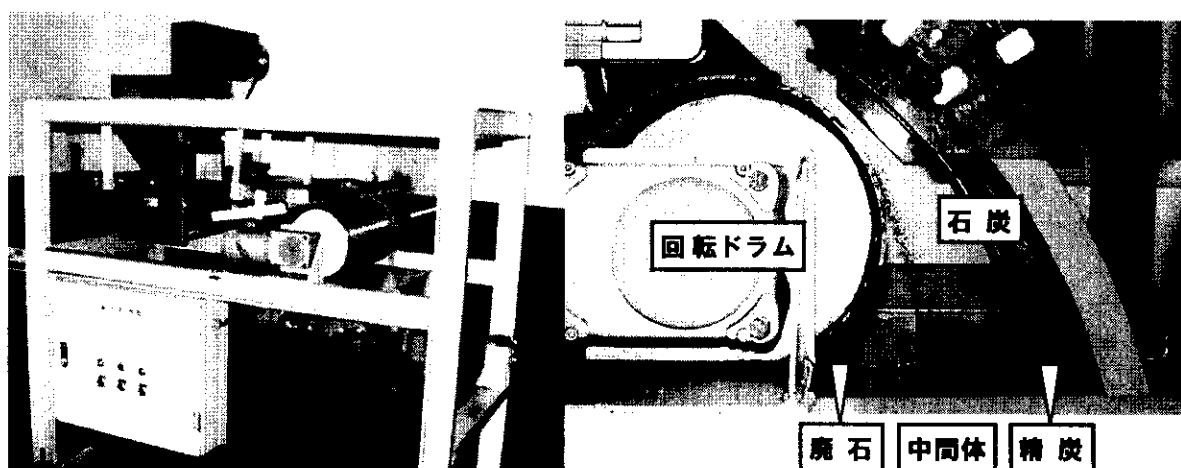


図3 中国重慶市南桐炭鋳に導入したベンチスケールの乾式選炭実験装置

石炭サンプル（2 mm以下）は、回転ドラムと線電極との間の高電界中に導かれ、粒子自信の持つ物理的特性だけでなく、電極の位や形状、ドラムの回転速度、印可電圧等の因子に応

じ、飛躍もしくはドラムへ吸着し、①～⑥の回収箱へ落下する。したがって、本ポロ背巢による最適な選炭特性を得るには、多くの試行錯誤が必要となる。ちなみに、無通電状態の場合、全ての石炭サンプルは③に落下する。選炭特性は分離した石炭サンプルの重量、硫黄分、灰分、発熱量等から評価する。

本研究では、重慶市南桐炭鉱の低品位粉炭である褐炭、瀝青炭の切込み炭をバイオブリケット用に粉砕した微粉炭（粒径：2 mm以下）の持つ物性により異なる帯電特性を利用した静電気セパレータ乾式選炭実用化研究装置を設計ならびに製作した。選炭装置による石炭中の灰分ならびに硫黄分除去のための選炭実験は、現地ならびに国内において行われ、選炭効率に与える粒度範囲の影響を明らかにした。それらの結果をもとに、石炭の粉砕、乾燥、分級等の前処理条件及び原料粉砕時の石炭質と無機質の分離性、石炭質の石炭化度等の炭質特性と石炭粒径との関連でそれぞれの方式の組み合わせによる粒度範囲の広い石炭の乾式選炭の可能性を検討した。

また、選別効率は湿式法（浮沈試験）、工業分析、硫黄および発熱量から評価した。さらに、顕微鏡観察によって原炭及びその精炭、廃石中の石炭質と無機質の分布状態および選別効率を、CaF₂を内部標準物質としたX線回折法により、石炭中の無機系燃焼性硫黄である黄鉄鉱の除去の効果を、石炭の低温灰化（約200℃）の試料から燃焼性硫黄中の無機系硫黄含有量を求めた。

重慶市南桐炭鉱選炭工場において、図3に示しているベンチスケール（1700（高）×2000（幅）×（奥）mm）の乾式選炭装置を設置し、技術移転後、現地技術者による選炭実験が開始された。選炭条件は次の通りである。

表1 重慶南桐炭鉱における選炭実験条件

電極形状	線（密）、線（粗）、針電極
電 圧	12000~15000 V
電極位置	12箇所（1-0~1-3, 2-0~2-3, 3-0~3-3）
石炭供給速度	1.25 cm/s（石炭層3mm, 幅400mm）
ドラム回転速度	4.5rpm, 6.13 cm/s
電流	< 10 ⁻¹ mA
処理量	63 kg/時間

4. 結果および考察

4.1. 酸性雨原因物質の排出抑制効果

4.1.1. バイオブリケット燃焼速度の解析

バイオブリケット燃焼器具の基本設計のため、経験的手法では対処が困難であり、理論的根拠に基づく設計が必要となる。そこで、本研究では、バイオブリケット燃焼の数学的モデルを確立し、それをを用いて検証することによって、定量的な燃焼特性を明らかにすることができる。

前述のように、バイオブリケットの燃焼は、（1）揮発成分の放出とその燃焼、（2）チャーの燃焼、の二つの段階で進行しており、前者は体積モデルが、後者は、未反応核モデルが適用できる。バイオブリケットの形状は球形と近似し、燃焼前後で体積と形状が変化しないと仮定すると、数学的モデルの計算値と実験結果が非常によく一致していることが確認された（図4）。この数学的モデルは、様々なバイオブリケットの燃焼特性を予測し、効率のよい燃焼器具の開発に応用することが検討されている。

バイオブリケット試験製造と成形特性試験の結果より、表面の滑らかでかつ高破壊強度（50～90 kg）のバイオブリケットが製造するには、天日および乾燥装置によって原料の水分を5.7%以下に保つ必要があることが明らかになった。バイオブリケットの燃焼実験の結果、バイオ

ブリケットは重慶市市販の石炭ブリケットに比較して煤煙、一酸化炭素 (CO) ならびにSO₂などの汚染物質の排出量が大幅に抑制された。また、バイオマスの添加により、揮発分が増大し、火炎が長くなり、燃焼速度が速くなるだけでなく、チャーの燃焼段階においても揮発分が放出および燃焼するため、チャー内部の空隙が石炭ブリケットよりも大幅に増大する。そのためバイオブリケットは酸素の有効拡散係数が増大し、結果として着火性、燃焼性が向上し、未燃分損失が低下するのである。すなわち、バイオブリケットの燃焼効率、バイオマスが添加されているために向上した。

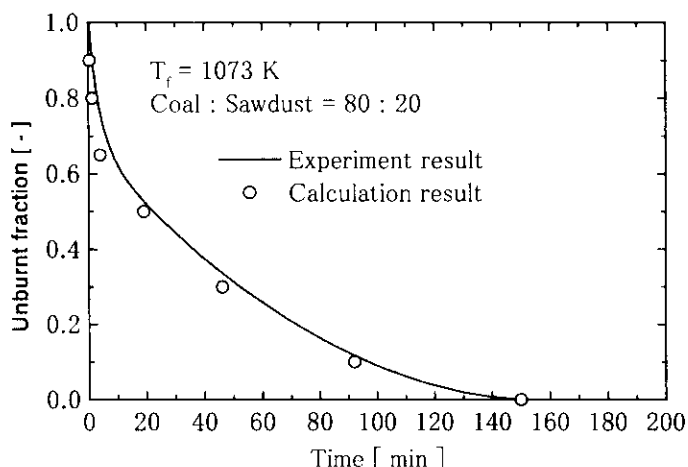


図4 燃焼実験と理論解析との比較

石炭に含まれる硫黄分は、バイオブリケットに混合される硫黄固定剤によって燃焼灰に硫黄固定される。一般的には石灰石を硫黄固定剤として用いるが、中国重慶で新開発した硫黄固定剤は、チャーの燃焼段階だけではなく、揮発成分の燃焼段階において生成したSO₂を効果的に硫黄固定する事が確認され、その効果は、従来の硫黄固定剤の2倍以上であることが明らかとなった。また、この新型硫黄固定剤は、脱硝機能も兼ね備えており、その効果はパルプ黒液を硫黄固定剤として用いたときよりも良好な結果が得られた。

4.1.2.硫黄固定効果

重慶製バイオブリケットは、全硫黄含有率が平均で約4 wt.% (無水ベース)の中国重慶地域で産出する南桐炭、バイオマスとして大鋸屑を使用している。重慶型の特徴は、硫黄固定剤として、溶接剤生産工場等からの工業廃棄物を用いていることである。その添加量はある。石炭とバイオマスの混合割合は80:20。試料の粒径は3mm以下、成形圧力は約295MPa、ブリケット形状はピロー形状である。燃焼実験には、及び温度制御機構付き電気加熱燃焼炉を、実証試験には、中国製の民生コンロや中小ボイラーを使用した。

図5は、電気炉による重慶製バイオブリケットと石炭ブリケット (硫黄固定効果なし)の燃焼排ガス中のSO₂濃度の経時変化を示している。着火後、揮発分の速い燃焼からSO₂濃度のピークが出現し、チャーの燃焼では長時間の緩慢な燃焼により、SO₂濃度は比較的一定値を維持していることなどから、バイオブリケットの燃焼過程は、1) 燃焼初期の揮発分の放出、2) その後のチャーの燃焼、の二つの段階で進行すると考えられる。

また、重慶製バイオブリケットは、チャーの燃焼段階だけではなく、揮発成分の燃焼段階においても硫黄固定効果を有していることがわかる。また、重慶製バイオブリケットの硫黄固定効果は、消石灰を硫黄固定剤として使用したバイオブリケットと同程度であり、貝殻及び石灰石を利用したバイオブリケットよりも高く、非常に優れていることが判明した(図6)。

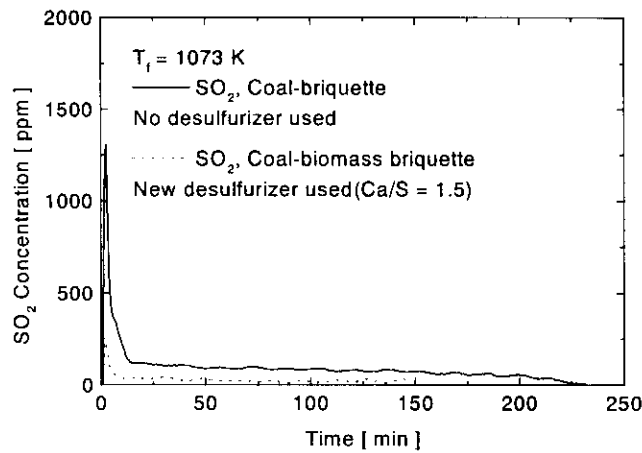


図5 バイオブリケット燃焼によるSO₂排出濃度の経時変化

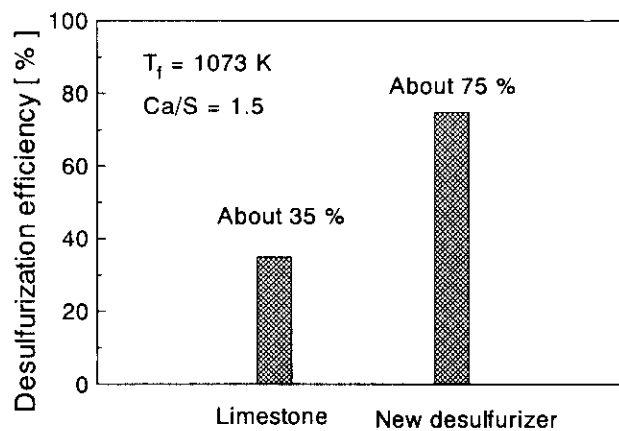


図6 硫黄固定剤の違いによる硫黄固定率の比較

実証試験として民生用コンロ、工業用煉瓦炉、ストーカーボイラーを用いた燃焼実験の結果、バイオブリケットの硫黄固定率、脱塵率はそれぞれ75~85%、66~96%の範囲であり、実用的に十分な性能が示された。

4.1.3.脱硝効果

パルプ黒液を脱硝剤として配合したバイオブリケットの燃焼初期段階におけるNO_x濃度は、バイオマスに揮発分として多くの窒素が含まれているため、石炭ブリケットよりもやや高い。しかし、総NO_xの発生量は、バイオブリケットの方が石炭ブリケットよりも低減される。同様の効果が、重慶型の硫黄固定剤にも見られ、それは、パルプ黒液よりも高い脱硝率を示した。

4.1.4.地球温暖化原因物質の排出抑制効果

従来の石炭ブリケットに比べてバイオブリケットの蒸気発生量は約2倍高く、1) 原料であるバイオマス(15~25%)は循環性資源であるために二酸化炭素の排出係数がゼ

表2 燃焼実験結果

	バイオ ブリケット	石炭 ブリケット
着火時間 (min)	20	31
総燃焼時間 (min)	173	120
熱効率(%)	31.6	21.6
添加剤含有率(%)	28.7	23.1
石炭含有率 (%)	71.3	76.9
蒸気発生量 (g)	4,996	2,530
省石炭率 (%)	53.3	—
硫黄固定率 (%)	79.5	—

※) 民生用コンロで2kgを燃焼

ロ（IPCCより）と見なせる、2）単位熱量当たりに消費する石炭量が節約できる（表2）、等から地球温暖化原因物質である二酸化炭素の排出抑制効果を持っている。例えば、重慶市に年間100万トン規模のバイオブリケット生産プラントの建設を想定した場合、中国煤炭工業部重慶石炭設計研究院との共同調査の結果、バイオマスの添加（20%）及び燃焼効率・熱効率の向上（20%）によるCO₂排出削減量は、82万トン/年に達することが明らかとなった。

4.2. バイオブリケット技術の経済性調査

重慶市の代表的な国営炭鉱である南桐炭鉱に年産20万トン規模のバイオブリケット生産プラントを建設する場合の経済性について、日中共同調査を実施した結果を表3に示す。技術の中核となる成形機は日本製を、その他の混合機や乾燥機等の周辺設備は中国で調達するとプラント建設総投資額は、5,809万元（約8億円）となる。バイオブリケット製造コストは、原料、人件費、ランニングコスト等を考慮して、1トンあたり213元、販売価格は245元となる（レート：1元=13円）。この場合、8年以内で投資額の回収が可能であると試算されている。販売価格は、従来の石炭ブリケットの1.5~2.0倍程度高いが、燃焼効率の向上や汚染物質排出抑制に伴う酸性雨、健康被害の低減効果などを考慮すると、費用対効果は大きいともいえる。

4.3. 乾式選炭の国内研究結果

表3 20万トン/年規模工場の経済性試算

4.3.1. 石炭の組成

低品位の切込み炭には、石炭層が生成されていく過程で、種々の鉱物から構成される堆積岩（主に泥岩）が伴い、その粉碎物は石炭粒子のほかに、物理的、化学的特性の異なる鉱物組成から成る一種の混合物である。したがって、乾式法による脱灰を検討するためには、切込み炭中に含まれる鉱物、特に石炭燃焼中に450℃の比較的低温度で分解してSO₂放出の原因となる黄鉄鉱（FeS₂）を主体とする鉱物の存在、その多寡について予め調べておく必要がある。そのようなことから切込み炭中の鉱物組成についてX線回折法により検討した結果（図7）、予測されるように灰分量と関連を持つ石英、方解石、粘土鉱物のカオリナイト、さらには燃焼性硫黄分と関連する黄鉄鉱（FeS₂）が確認された。それらの石炭中の鉱物質成分、特に黄鉄鉱を選別することが、乾式法の開発を進める目的である。

設計規模	20（万トン/年）
プラント建設総投資	5,809（万元）
バイオブリケット製造コスト	213（元/トン）
販売価格	245（元/トン）
年間の税金	727（万元）
年間の利益	680（万元）
投資の回収期間	84（月）
投資の利益率	11.7（%）

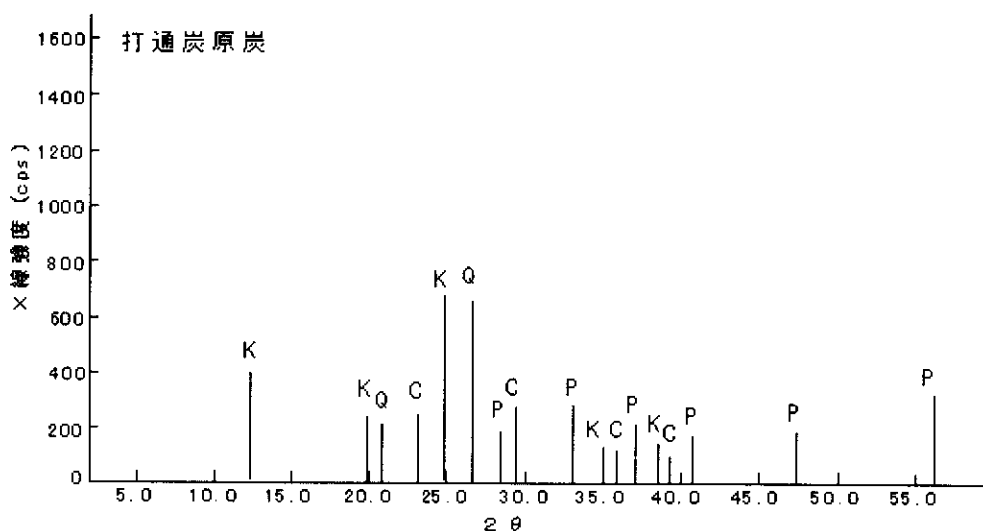


図7 打通切込み炭のX線回折結果

図8に顕微鏡で観察した例を示す。いずれの精炭ともピトリニットの組成成分を主体とする石炭粒子であるが、その中には微粒子状の黄鉄鉱（輝白色）を含むものも見られる。そのような黄鉄鉱粒子は微粉碎して単離されなければ、精炭として回収されることになる。一方、廃石では比重の大きい単離した黄鉄鉱に加えて、カオリナイト等の粘度鉱物に、石英、方解石等を含む泥岩（黒色）或いは炭質頁岩（暗色）粒子から構成されている。一部には打通炭廃石のように、ピトリニットを基質として、その中に黄鉄鉱粒子を含むものも見られるが、それは比重の大きい鉱物質を含むことにより、全体として比重 1.60 g/cm^3 を超えたことにはほかならない。

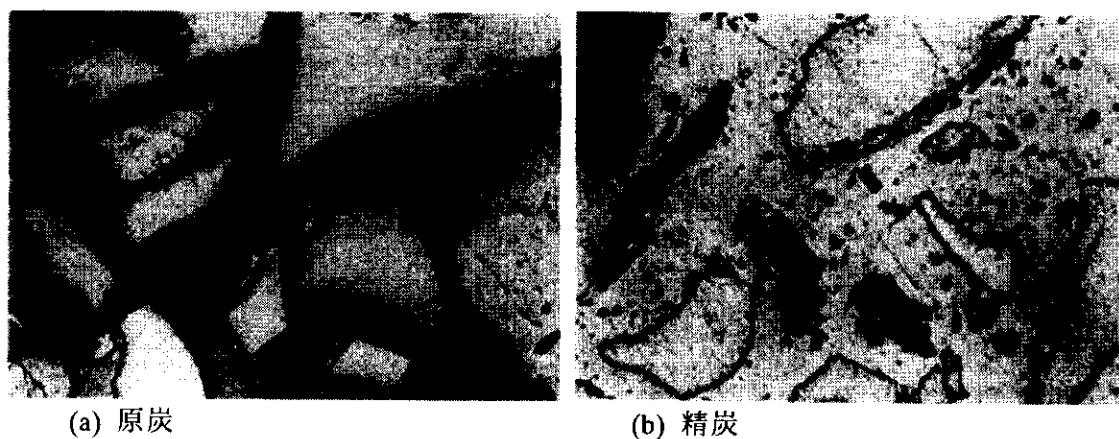


図8 中国炭の顕微鏡写真：粒度 $0\sim 2\text{ mm}$

4.3.2. 小型乾式選炭装置での選炭結果

実験用石炭には中国重慶直轄市の中梁山炭、打通炭、南桐魚田堡炭、日本の太平洋炭の4炭種を用い、電圧、石炭粒径、電極形状を変えて石炭からの硫黄分と灰分の除去実験を行ない、原炭との比較を実施した。中国産石炭は日本で市販されている石炭とは違って、選炭されていないため、灰分量が多く、また大気汚染の原因となる硫黄分が極めて多量に含まれている。これに対して、太平洋炭は硫黄分が極めて少ない。したがって、選炭実験の重点は中国炭では脱硫、脱灰におき、太平洋炭では脱灰においた。粉塵爆発の危険のある粒径 0.125 mm 以下の石炭を除き、 $0.125\sim 2.0\text{ mm}$ の粒径範囲の石炭を乾式選別実験に供した。なお、石炭の粒径は 0.125 mm 以下、 $0.125\sim 0.250\text{ mm}$ 、 $0.250\sim 0.500\text{ mm}$ 、 $0.500\sim 1.000\text{ mm}$ 、 $1.000\sim 2.000\text{ mm}$ の5フラクションとした。粒径が 0.5 mm 以下の石炭では針電極を用いてドラムに精炭を付着させ廃石を飛散させた。粒径が 0.5 mm 以上の石炭では梯子電極を用いて、廃石をドラム下部周辺に落下させ精炭をドラムに付着あるいは飛散させた。ドラムの周速度は 16.7 cm/s 、原炭サンプルの水分は3%、給炭量は約 8 kg/h 、電圧は 12000 V とした。

また、精炭、中間物、廃石の区別は灰分含有量で判定したため廃石と中間物では硫黄含有量が逆転することがある。また、精炭の判断基準は市販石炭に分析値に近いもの或いは原炭よりも硫黄分、灰分が減少しているものとした。

石炭の選別実験では、どの粒径においても灰分含有量が低下すると硫黄含有量が低下する傾向がある。この結果は静電気によって石炭が精炭と廃石とに効果的に選別されたことを示している。特に打通炭では粒径が $1.0\sim 2.0\text{ mm}$ のサンプルを選別したとき（図9）4の位置に落下したサンプルは、硫黄含有量が約20%、灰分含有量は約45%となった。この位置の石炭（全サンプル重量の5.6%）を除去すれば、25%の脱硫率、10%脱灰率が得られる。また、複数回にわたる選炭操作をすることによって実用的な精炭（クリーンコール）が得られた。また、

重慶市中梁山炭の場合、精炭の収率57.6%、脱灰率11%、脱硫率30.4%という結果を得た。重慶市南桐魚田堡炭及び梁寧省南票切込み炭についても同様の結果となった。

日本の太平洋炭の場合には原炭の硫黄分含有量が少なく今回の実験では脱灰に重点を置き、粒径0.125mm以下を捨て精炭だけを回収した場合、収率は66.0%、その灰分は29%から14%へ減少し、品質が向上し、市販品の灰分値とほぼ等しくなった。

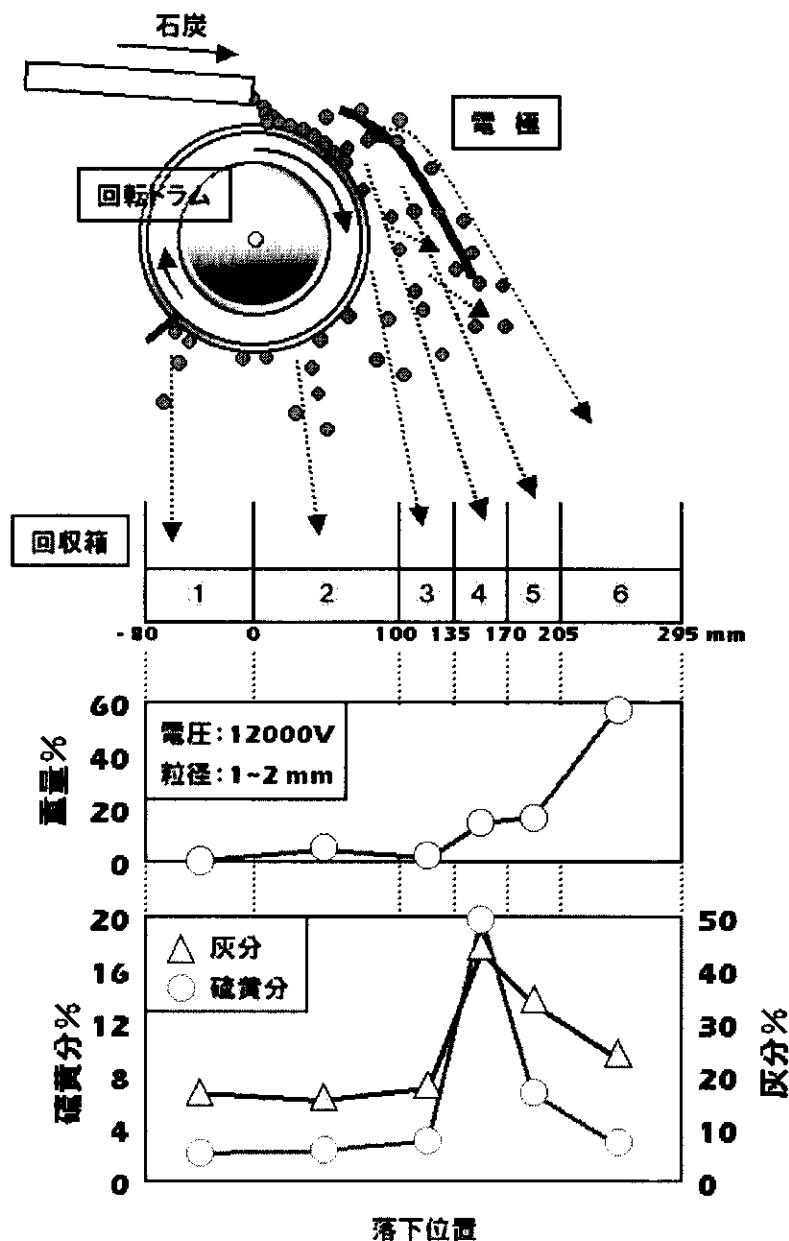


図9 各位置に落下したサンプル中の硫黄分と灰分の分布 (重慶市打通炭)

4.3.3.改良型乾式選炭装置での選炭結果

重慶南桐切込み炭を0.125mm以下、0.125~0.5mm、0.5~2.0mmの3種類に分級し、改良型乾式選炭装置 (処理能力1トン/時間) を用いて選炭実験を行った。実験フローと選炭結果を図10に示す。

選炭の結果、精炭は原炭と比較して、灰分は29%から20%、全硫黄分は3.29%から2.34%に減少し、また総発熱量は5,870kcal/kgから6,660kcal/kgに向上した。一方、廃石は13.4%程度残

存し、その総発熱量は4,260kcal/kgであり、その灰分は29%から48.6%、全硫黄分は3.29%から8.45%に増加したことが分かった。

このとき精炭の収率は86%と高く、実用的な選炭結果が得られた。石炭1トンを選炭処理するのに必要な電力消費量は1.0kW以下と、極わずかであり、湿式選炭に比べて、はるかにランニングコストが低く抑えられる。

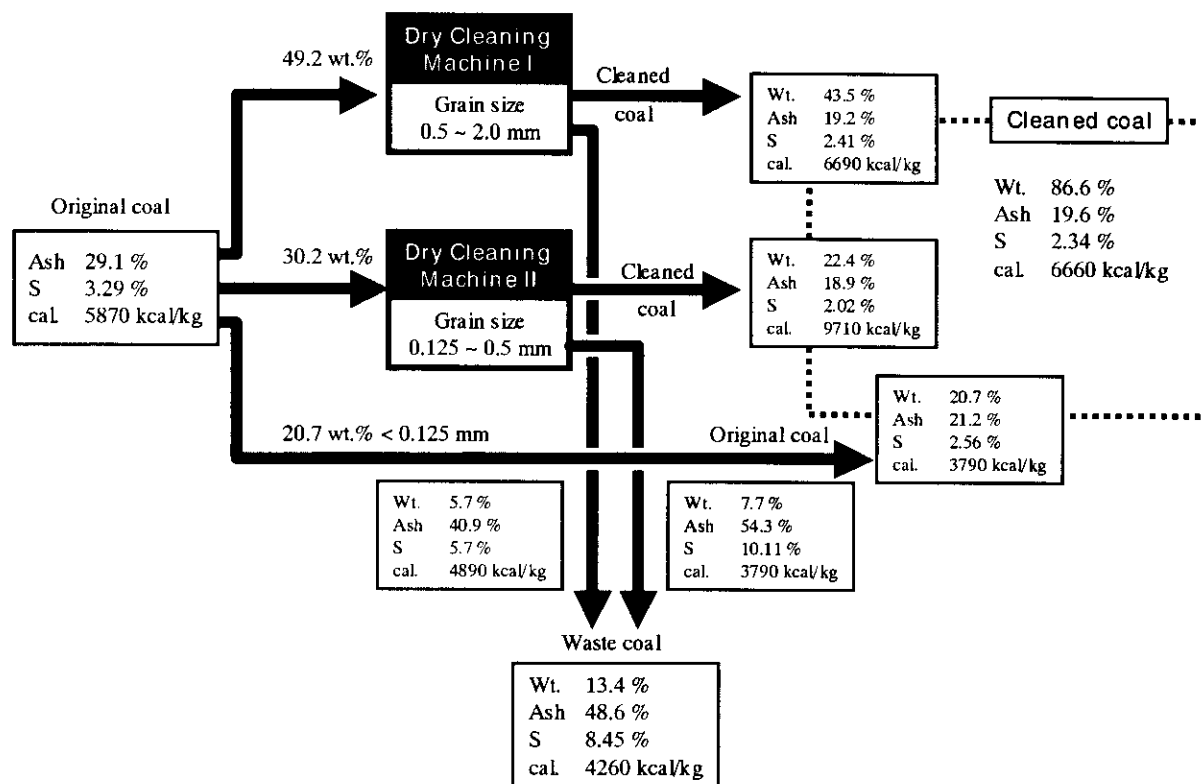


図10 南桐炭鉱の静電乾式選炭結果（灰分、硫黄分は無水ベース）

4.4. 乾式選炭に関する日中共同研究とその評価

重慶市の中梁山炭、大同炭、南桐魚田堡炭（以下南桐炭）の3炭種および太平洋炭の切込み炭を乾式選炭技術の基礎研究用試料とし、粉碎し、0.125~2.0 mmの粒径範囲の選別対象とした。重慶産石炭は、選炭されていないため、灰分量が多く、また大気汚染の原因となる硫黄分が極めて多量に含まれている。これに対して、太平洋炭は硫黄分が極めて少ない。

4.4.1. 乾式選炭実用化研究装置の実験結果

日本側技術者と現地技術者との技術交流、実験計画に関する打ち合わせを行い、現地技術者によって、表1に示す条件で選炭実験が実施された。

ラダー（密）電極：電極位置3箇所、12000~15000V

ラダー（粗）電極：電極位置2箇所、12000~15000V

針電極：電極位置2箇所、11000~15000V

図11に線電極を利用した場合の乾式選炭の収率に与える電圧と粒径の影響を示す。収率は、0.125~0.5 mmの範囲でやや低くなるが、0.5mm以上は、同程度であった。また、いずれの粒径範囲においても電圧が12000Vから15000Vまでに増加するにつれ、収率も増加する傾向が観測された。線電極の選炭結果は、密及び粗電極を問わず、同様な傾向になった。密電極の方が、選炭による脱灰・脱硫効果は高い結果となったが、最適な線電極の密度について明らかにするには、詳細な検討が必要になる。

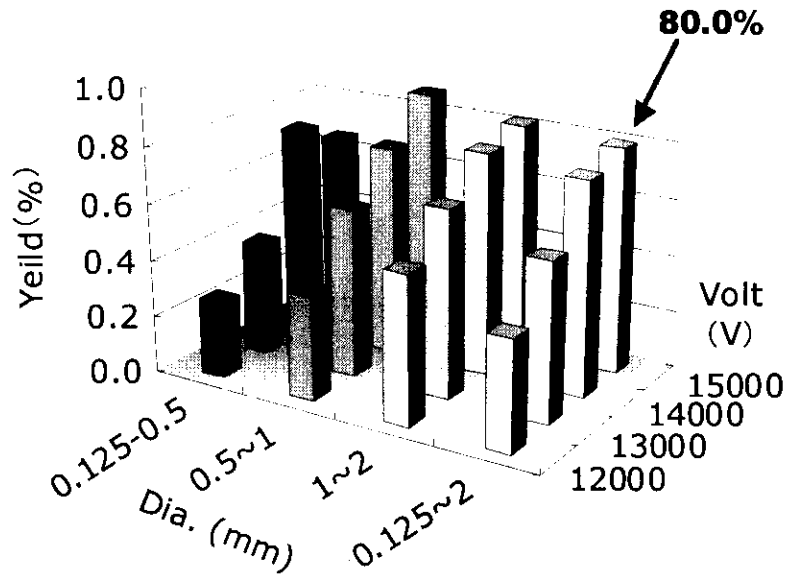


図 1 1 収率に与える電圧と粒径の影響

また、選炭効果については、脱硫完善度から判断した、線（密）、線（粗）、針電極で得られた最適な選炭条件における結果を表 4 に示す。

表 4 各電極における最適条件による選炭結果

線（密）電極	電極位置：1-1		電圧：15000V			
	石炭粒径（mm）					
	0.125-0.5	0.5~1	1~2	0.125~2		
収量（%）	65.9	87.8	82.1	80.0		
脱灰率（%）	3.6	0.5	28.1	11.5		
脱硫率（%）	13.2	28.2	45.3	31.6		
脱硫完善度（%）	8.7	24.8	37.3	25.3		

線（粗）電極	電極位置：1-1		電圧：15000V			
	石炭粒径（mm）					
	0.125-0.5	0.5~1	1~2	0.125~2		
収量（%）	64.1	85.6	61.8	72.3		
脱灰率（%）	2.1	3.4	24.8	11.4		
脱硫率（%）	17.6	27.2	43.0	31.3		
脱硫完善度（%）	11.3	23.4	26.6	22.7		

針電極	電極位置：2-2		電圧：13000V			
	石炭粒径（mm）					
	0.125-0.5	0.5~1	1~2	0.125~2		
収量（%）	9.7	73.2	73.7	55.8		
脱灰率（%）	-15.1	-6.3	20.5	2.0		
脱硫率（%）	-39.5	17.8	38.4	19.3		
脱硫完善度（%）	-3.8	13.1	28.4	10.8		

ここで、脱硫完善度（%）とは、中国における選炭結果の標準化方法（中国標準選炭評価法：MT/T623-1996）の一つで、下記の計算式によって算出される。

$$\text{脱硫完善度 (}\%) = \frac{r_c (S_{df} - S_{dc})}{S_{df} (100 - A_{df} - S_{df})} \times 100$$

r_c : 収率 A_{df} : 原炭の灰分
 S_{df} : 原炭の硫黄分 S_{dc} : 精炭の硫黄分

表4に示したように、線（密）電極による選炭効果は、線（粗）と針電極と比較してもっとも良好である。また、0.125~2 mmの粒径の石炭中で、1~2 mmのものがもっとも選別されやすいことが分かった。

図12に示したように、精炭の収率は80%と良好で、灰分と硫黄分は、20.0%から17.7%、4.1%から2.8%にそれぞれ減少し、脱灰率11.5%、脱硫率31.5%と算出された。廃石は、1%と極めて少なく、中間物は19%であった。実用型乾式選炭による国内実験によって示したように、中間物をさらに選炭すれば、選炭効率を高めることが可能である。また、廃石と中間物の硫黄分をより濃縮できれば、将来、硫黄資源としての有効利用も考えられる。

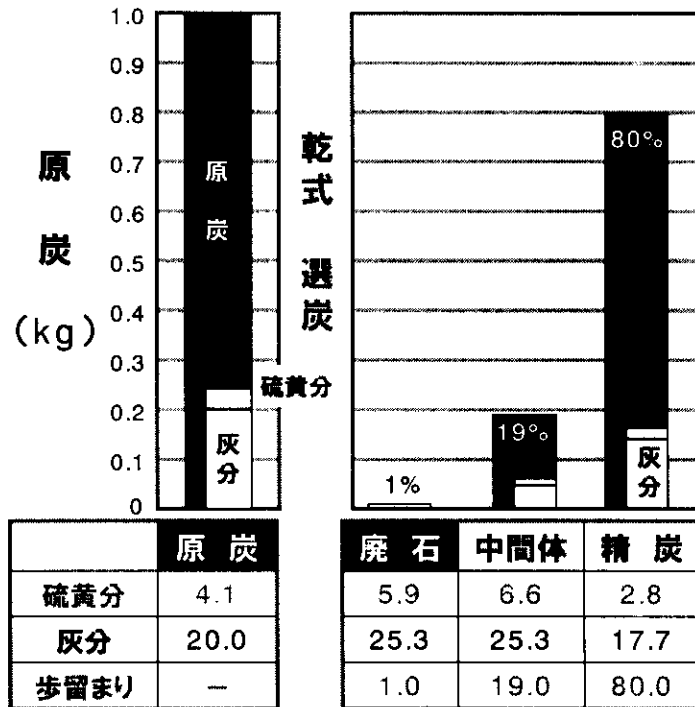


図12 最も選炭効果の高い結果（線（密）電極位置1-1、15000V）

4.4.2.各装置に関する選炭結果の評価

本研究で実験した小型、実用型、ベンチスケールの乾式選炭装置および重慶市南桐炭鉱で実施されている湿式プロセスによる選炭効果を表5にまとめる。乾式選炭の脱硫・脱灰率は、湿式選炭のそれに比べると、やや低い結果となったが、従来選炭されずに廃棄もしくは未処理のまま練炭などに成形され、燃焼に供されていた0.5mm以下の微粉炭も対象としていることを考慮すれば、選炭による脱硫・脱灰効果は大きいといえる。また、収率は、湿式選炭よりも高くなるため、より脱硫・脱灰に重点をおいた選炭条件、例えば、電極の位置や集料箱の位置等の調整によって、選炭効果の向上が期待される。特に、南桐炭鉱で実施したベンチスケールの選炭実験では、電極の位置、回収箱の位置等の調整はほとんど行っていないために、今後の検討次第では、さらなる脱硫・脱灰率の向上が期待できる。また、静電気式の乾

式選炭プロセスは、資源やエネルギーの消費量が、湿式プロセスよりも圧倒的に少ない。湿式選炭では、石炭1トンを選炭するのに水3トン、電力13~15kWを必要とするが、乾式選炭では、水資源は必要とせず、消費電力も1kW以下で済む。このように乾式選炭は、水資源に乏しい中国向けの選炭技術であり、ランニングコストを低く抑えることができる省エネルギー型の選炭技術ともいえる。

表5 各装置に関する選炭結果の評価

	重慶市南桐炭鉱 湿式選炭	小型 乾式選炭装置	実用型 乾式選炭装置	ベンチスケール 乾式選炭装置
実施場所	重慶市南桐炭鉱	日本	日本	重慶市南桐炭鉱
対象石炭	南桐炭	南桐炭	南桐炭	南桐炭
対象石炭粒径 (mm)	0.5~50	0.125~2	0.125~2	0.125~2
水資源 (t/t-石炭)	3	0	0	0
消費電力 (kW/t-石炭)	13~15	未測定	0.9	< 1
収率 (%)	70	86	86.6	80
脱硫率 (%)	59	29	28.9	31.6
脱灰率 (%)	41	31	32.6	11.5
発熱量変化 (%)	+8.3	+13	+13.5	—

5. 本研究により得られた成果と今後の展望

本研究では、比較的低コストで実現可能性が高く、即効性のあるバイオブリケット技術と静電気式乾式選炭技術の2つの石炭クリーン化技術についての研究を実施した。

実験室規模の研究によって、バイオブリケットの燃焼性向上、粉塵排出低減、硫黄固定・脱硝などの効果を明らかにした。また、実証プラントで試験製造されたバイオブリケットは民生用コンロで高い硫黄固定効果を示した。しかし、中国では、一般的に中小ボイラーが使用されており、その燃焼炉温度は約1100~1300℃であり、通常のカルシウム系硫黄固定剤では、硫黄固定効率40~50%にとどまってしまう。将来、重慶市全域、さらには中国各地域においてバイオブリケットを普及するためには、中小ボイラーの改造ならびにバイオブリケットに適したボイラー設計等を行わなければならない。

バイオブリケット技術の日中共同研究では、工業廃棄物を硫黄固定剤とした新しい重慶製バイオブリケットを重慶市に建設した実証プラントにより製造し、その燃焼特性を評価した。その結果、重慶製バイオブリケットは高い硫黄固定効果と脱塵効果だけでなく、脱硝効果も確認された。また、経済性調査の結果、バイオブリケットの費用対効果は大きく、その生産事業は現地事業として実現可能であることが確認された。このバイオブリケットの現地化研究は、1998年10月に重慶市にて開催された「日中専門家評価会議」において国内外から高い評価を得ている。さらに、本研究の成果である「重慶モデル」を活用して、中国遼寧省鞍山

市では、年間1万トンのバイオブリケット生産工場が建設され、1999年10月1日から生産が始まっている。今後、このバイオブリケット技術は、日中両国関連機関・組織の努力により、日中環境開発モデル都市事業の重点地域と並列して、中国の内陸地域、東北地域と遠隔地域における大気汚染の改善に役立つことが期待されている。

静電気式の乾式選炭技術の開発研究では、小型、改良型、現地実験用の3種の装置を開発し、中国炭を利用した国内における選炭実験及び重慶市南桐炭鉱への技術移転並びに日中共同研究を実施した。その結果、一般的な湿式選炭に比べて、脱硫率及び脱灰率ともにやや低いが中国側の要求する数字に達しており、水資源が不要で前処理や乾燥等の工程を必要としないため、低コストで実現できることが示された。すなわち、静電気方式の乾式選炭技術は、従来の湿式選炭技術に比べて、

水資源が不要

すべて一回の乾式選炭、ランニングコストは1/10程度

プロセスが単純で、現地での改良や応用が容易

等の開発途上国向けの特徴を有している。乾式選炭の脱硫率や脱灰率等の選炭効率は、湿式選炭に比べるとやや劣るが、選炭特性パラメータの最適化によって向上可能である。また、従来の湿式選炭では、0.5mm以下の石炭は選炭されずに廃棄されており、3mm以下の選炭効率も非常に悪いと報告されている。したがって、この2~3mm以下の石炭に適用する乾式選炭は、採掘の機械化の普及によって増加が見込まれている微粉炭の選炭技術として現地化できる可能性が十分にある。今後、複数段階プロセスの乾式選炭により、その選炭効果を図りたい。

乾式選炭技術の基礎開発研究では、バイオブリケット用石炭の原料として、重慶産出の低品位炭を対象に静電気方式による乾式選炭実験を行い、選炭特性を明らかにし、広い粒度範囲にわたる微粉炭の乾式選炭に関して多くの知見が得られた。現状では、小規模の実用化研究装置であり、試料である炭種も少なく基礎的検討の段階ではあるが、今後これらの結果をもとにバイオブリケットの製造工程と組み合わせる乾式選炭システムの要素技術開発を推進し、実用化を目指したい。

また、この乾式選炭によって選別された廃石は硫黄分が10%程度に濃縮されており、一種の硫黄資源といえる。現在、中国では肥料用硫黄資源を大量に輸入しているため、乾式選炭技術に廃石を利用した硫安、石膏等の生産技術を組み合わせることで、その実用性はより高まると思われる。今後は、上述したような乾式選炭技術の実用化に向けた日中共同研究を推進すると共に、バイオブリケットのさらなる普及拡大のためのガス化等に関する応用技術の開発を推進し、計画している。

近い将来、重慶市における石炭バイオブリケット製造技術ならびに乾式選炭技術の実用化によって、住民生活と密接に関連している小規模低層煙源による呼吸器系疾患の被害を軽減させるものと期待されている。

6. 国際共同研究の状況

国際共同研究計画名：日中環境保護協力協定

協力案件名：東アジアにおける酸性雨原因物質排出制御手法の開発と環境への影響評価に関する研究

カウンターパート：王之佳（中国国家環境保護総局国際合作司）、徐淑碧（重慶市環境保護局）、周学明（重慶市石炭管理局）、

候杰臣（重慶市南桐鋳務局選炭工場）

参加・連携状況：バイオブリケットの燃焼実験を実施し、乾式選炭研究装置を導入して共同実験も行ってきた。

7. 研究結果の発表状況

- (1) 王青躍、丸山敏彦、坂本和彦、羅仁学、溝口次夫、渡辺征夫、高世東：中国重慶市における石炭バイオブリケットの試作実験、第38回大気環境学会、D112, pp. 313 (1997)
- (2) 坂本和彦、王青躍、丸山敏彦、溝口次夫、羅仁学、渡辺征夫：試作バイオブリケットに関する燃焼実験、同上、D113, pp. 314 (1997)
- (3) 溝口次夫、王青躍、坂本和彦、丸山敏彦、小島麗逸、新家増美、羅仁学、渡辺征夫：石炭バイオブリケットに関する重慶市民評価、同上、D114, pp. 315 (1997)
- (4) 王青躍、上出光志、丸山敏彦、谷口克典、坂本和彦、中国重慶市低品位石炭における乾式選炭の基礎調査、第11回エアロゾル科学・技術討論会、B32, pp284 埼玉大学 (1998/8)
- (5) 王青躍、呂国慶、羅仁学、坂本和彦、金熙濬、畠山史郎、丸山敏彦、上出光志および溝口次夫、中国重慶試作バイオブリケットに関する燃焼特性実験Ⅱ、第15回エアロゾル科学・技術研究討論会、B32, pp290 埼玉大学(1998/8)
- (6) Qing-yue WANG, Kazuhiko SAKAMOTO, Toshihiko MARUYAMA, Tsuguo MIZOGUCHI, Shiro HATAKEYAMA, Ren-xue LUO and M KAMIDE, Development and Studies on Coal-biomass Briquetting Process as An Emission Control Technique for Precursors of Acidic Deposition in Chongqing, China, *The paper of 11th World Clean Air And Environment Congress*, Durban, South Africa, Vol.2,7C-4(1998.9)
- (7) 王青躍、呂国慶、金熙濬および成瀬一郎、ピロー形状のバイオブリケット燃焼速度の解析、第39回大気環境学会年会、2F1130, pp371 札幌 (1998.10)
- (8) 王青躍、呂国慶、羅仁学、坂本和彦、丸山敏彦、畠山史郎、溝口次夫および上出光志、重慶実証プラントによる脱硫・脱硝可能な石炭バイオブリケット、第39回大気環境学会年会、2F1130, pp372 札幌 (1998.10)
- (9) 王青躍、谷口克典、上出光志、丸山敏彦、坂本和彦、畠山史郎、呂国慶、中国低品位石炭における静電気選炭装置の開発研究、第39回大気環境学会年会、2F1115, pp370 札幌 (1998.10)
- (10) 王青躍、新井哲也、上出光志、丸山敏彦、坂本和彦、畠山史郎、溝口次夫、谷口克典、中国低品位石炭の有効利用のための静電気方式による乾式選炭装置の開発、第40回大気環境学会、1999.10
- (11) 王青躍、新井哲也、坂本和彦、畠山史郎、羅仁学、溝口次夫、丸山敏彦、石炭バイオブリケットに関する燃焼実験および日中共同評価研究、同上、1999.10
- (12) 王青躍、坂本和彦、丸山敏彦、畠山史郎、溝口次夫、羅仁学、新井哲也、中国における石炭バイオブリケット（緑色豆炭）生産技術の実用化、同上、1999.10
- (13) Qing-Yue Wang, Guo-Qing Lu, Hee-Joon Kim, Toshihiko Maruyama, Kazuhiko Sakamoto and Shiro Hatakeyama: "Combustion Characteristics of Elliptical Coal-Biomass Briquette", *Atmospheric Sciences and Applications to Air Quality 6th International Conference*, Beijing, China(1998.11)
- (14) Qing-Yue Wang, Guo-Qing Lu, Kazuhiko Sakamoto, Toshihiko Maruyama, Tsuguo Mizoguchi, Shiro Hatakeyama, Hee-Joon Kim and Xu-Hui Dong: "Practical Study on Coal-Biomass Briquette for Air Pollutant Emission Control in Chongqing, China", *Atmospheric Sciences and*

Applications to Air Quality 6th International Conference, Beijing, China(1998.11)

(15) 王青躍、中国の大気環境汚染問題－現状と将来－、環境技術, 27, 616~623, 1998

(16) 王青躍、中国における地域完結循環型総合環境保護対策の一環としての石炭バイオブリケット(緑色豆炭)生産技術の現地実用化、環境管理, 35, 1999

本研究成果の一部について、日本放送協会（NHK）とテレビ朝日の報道が四回あった。

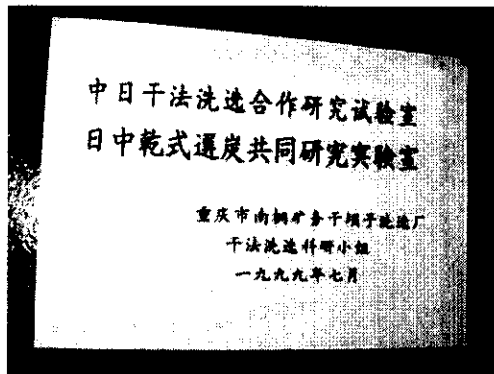
- 1) ニュース特集：日中合作の重慶大気汚染対策 1998/4/13 NHK
- 2) BS特集：動き出した日中環境協力 1998/4/23 NHK
- 3) BSアジア情報交差点中国シリーズ：大気汚染を減らせ 1998/5/3 NHK
- 4) 忘れられた発明品「緑色豆炭」の復活 1999/4/18 テレビ朝日
- 5) 日本の技術協力で生き残り中国炭鉱 NHK ニュース9 1999/11/5 NHK
- 6) BSアジア情報交差点：生き残り中国炭鉱 1999/11/13 NHK



NHK ニュース9



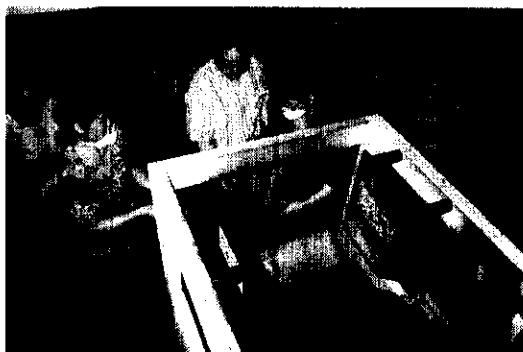
BSアジア情報交差点



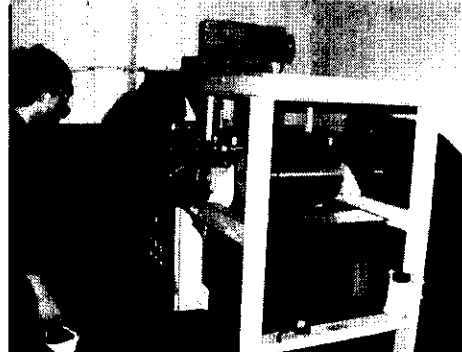
(a) 日中共同選炭実験室



(b) 選炭装置の荷ほどき

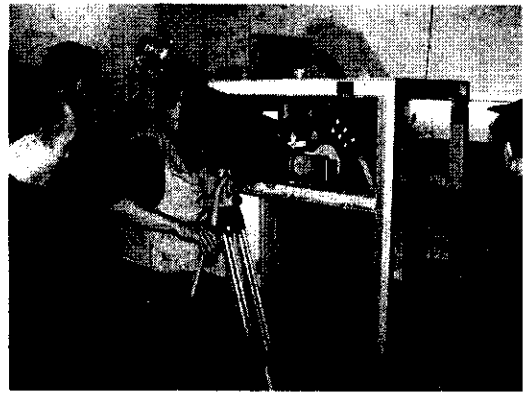


(c) 選炭装置の組立



(d) 選炭装置の最終調整

南桐炭鉱干選子選炭工場への選炭装置の据え付け



日本人専門家による乾式選炭実験の視察（左）及びNHKによる取材（右）



浮沈選炭実験



縮分実験



硫黄分析装置



予備実験



中日乾式選炭技術共同研究シンポジウムの様子（重慶南桐）