

C-4 東アジアの酸性雨原因物質等の総合化モデルの開発と制御手法の実用化に関する研究

(1) 酸性雨原因物質の制御と評価に関する研究

③ 中国西南部の酸性雨原因物質の排出制御のための総合対策立案手法に関する研究

研究代表者 国立公衆衛生院 地域環境衛生学部 環境評価室 渡辺征夫

厚生省国立公衆衛生院

地域環境衛生学部	環境評価室	渡辺征夫
	環境健康影響室	後藤純雄
仏教大学	社会学部	溝口次夫
(委託先)	(社) 国際善隣協会	後藤康男, 王青躍, 北村必勝

平成7-8年度合計予算額	62,501千円
(平成8年度予算額)	43,250千円)

[要旨] 中国の主な燃料は石炭であるが、その中には数%の硫黄を含有しているものもあり、脱硫のための技術や設備の普及も進んでいないため、二酸化硫黄(SO₂)を主要因とする酸性雨被害が深刻になっている。そこで、特にその影響が深刻な中国西南部の重慶市を対象として、燃料改質による酸性雨原因物質の排出抑制技術の実用化のために、評価手法や現地化まで含めた総合研究を行った。

研究に当たっては、まず、SO₂などの汚染物の排出量や削減効果の評価法を家庭用コンロなどの小型炉で確立することとした。また、同時に、粉炭に消石灰などの脱硫剤や藁などの燃料改質剤を加えた、いわゆる、“バイオブリケット”の現地での製造技術の確立と、その効果を最大にする利用体制の整備や燃焼技術の探索を行った。すなわち、日本および中国で用いられている家庭用焔炉のための燃焼試験設備を作製すると共に、両国の練炭でSO₂、NO₂、COなどの汚染物の排出係数を試験的に求めた。また、バイオブリケットの原材料[主原料(石炭)、バイオマス(藁などの植物繊維)、脱硫剤(消石灰など)]に関する資料収集及び現地調査を行い、それらの性状分析をして、石炭に加えるバイオマスや脱硫剤の相性と混合比率について基礎的に検討した。

また、現地の既存の成型装置の問題点を見極め、その欠点を補う石炭ブリケット製造用の高压成型(3~5 ton·cm⁻¹)の実証プラント(製造能力; 1万ton/年)を現地の技術や機材を最大限に利用して重慶市に設置した。本プラントで試作したバイオブリケットを用いて燃焼試験を行い、従来の現地生産のブリケットと比較検討し、強度、脱硫効率(80~90%)、エネルギー効率等が格段に優れていることを実証した。さらに、現地住民によるバイオブリケットの試用から、臭気や煤塵発生が少ないなど、使用上の評価も高いことを確認した。

[キーワード] 脱硫, 燃料改質, 石炭, ブリケット, コンロ, 燃焼排ガス, 重慶

1. はじめに

中国は世界最大の人口を抱えており、近年の経済発展には目を見張るものがある。しかし、経済発展優先のため、環境汚染に対する取組みは遅れている。特に、酸性降下物や酸性雨による被

害は中国各地で頻発しており¹⁾、中でも人口1,500万人を有する中国西南部の大都市、四川省の重慶市の状況は深刻である。これらの被害は、森林の枯損、農産物の損傷、建造物の腐食などで顕著であり、呼吸器系疾患による死亡率が中国全域の平均の約3倍であるなど健康被害も深刻であり、住民の生活や社会経済の調和ある発展を阻害する大きな要因ともなっている。これまでの研究から、これらの原因は、重慶市が盆地であるなどの不利な地形、大気の流れが中立あるいは安定であるなどの気象条件、稠密な人口、石炭を主とするエネルギー構造などの社会的な要因などが、複合的に作用していることが分かっているが、もっとも有効な対策は、SO₂などの酸性雨や大気酸性化の原因物質の排出制御技術の確立と普及である。

これまでの調査から、原因物質の主要な排出源は、市民の生活に関連の深い小規模施設(中小工場ボイラー、民生用コンロ)や大規模な産業施設であり、そこで用いられている硫黄含有率の高い石炭燃焼に由来するSO₂などのガス状汚染物質と粉塵が汚染をもたらしていると推定されている。特に、数も多く、規模の小さい中小工場のボイラーや民生用のコンロなどは、煙突が無い、有っても低いので、排ガスが狭い空間に放出されるため、より深刻な影響を与えており、それらの発生源への対応が急務となっている。また、同時にそれらの対応の効果を正確に評価するための試験設備や評価手法も現地に合ったものを開発する必要がある。

2. 実験及び調査手法

2.1 コンロ用の燃焼試験設備の作製と燃焼実験

燃焼実験は、既報の方法に準じて行っている。コンロには練炭用を3種、炭火用を1種用い、また、燃料の練炭には、日本製では品川燃料“いっぱつ練炭”，中国製では重慶、長沙、北京などの地域で用いられている市販のもの、木炭には岩手山切炭を利用した。なお、中国製の練炭で送中に砕けて粉状になったものは、水を加えて練り、豆炭状にして用いた。表1に燃料の元素分析結果を示す。

燃焼ガスは、図1のようにコンロ真上の四角錐状のフードで受け、その下流のダクト部から分析用試料ガスを吸引し測定できるようにした。排ガス成分は、N₂、O₂、CO₂、CO、CH₄、N₂Oをマイクロセンサ・ガス分析計(200型日本タイラン製)で、SO₂、CO、NO、NO₂、NO_xを燃焼ガス分析計(Madur Elect. 社製)、SO₂、CO₂、COをマルチガスモニター(T-1302型、Bruel&Kjaer社製)、NO、NO₂、NO_xをNO_xメーター(42S型、サーモエレクトロン社製)により連続測定した。ダクト内の排ガスの流速測定はピトー管の圧変化を精密微差圧計で読みとり、燃焼温度や排ガス温度はK型熱電対で計測し、それぞれ連続的に記録した。なお、この際、排ガスがフード外に出ないようにコンロの周りに金属製の囲いを置いた。

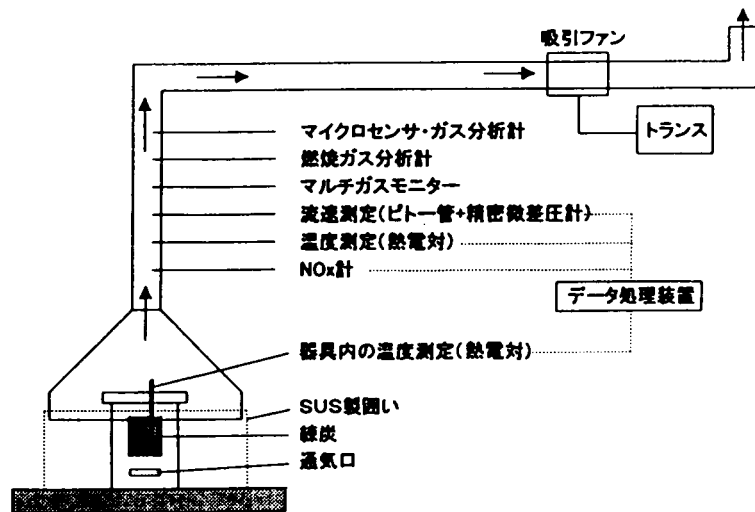


図1 燃焼試験設備

この際、排ガスがフード外に出ないようにコンロの周りに金属製の囲いを置いた。

表 1 燃料の元素分析結果

検体名称	炭素(Wt%)	水素(Wt%)	窒素(Wt%)	硫黄(Wt%)	灰分(Wt%)	水分等(Wt%)
日本木炭	84.6	2.12	0.15	0.01	8.20	4.92
日本練炭	64.7	1.63	0.88	0.32	23.8	8.67
北京練炭	59.3	0.01	0.25	0.24	35.1	5.10
西安練炭	43.2	0.42	0.48	0.38	32.1	23.4
長沙練炭	44.0	0.88	0.63	0.60	48.8	5.09

また、このほかに燃焼システムを解明するために、練炭内部の燃焼排ガスを直接分析することも試みた。測定は、マイクロセンサ・ガス分析計の試料採取針を延長し、直接燃焼部のガスを取り込めるようにした。また、熱電対により試料採取部分の温度も同時にモニターした。

2.2 重慶市での現地調査、バイオブリケット成型器および燃焼装置の設計・設置

まず、重慶市産の石炭の性状や成分をを物理化学的に分析し、その特徴を明らかにした。また、この地域での石炭利用状況、中国式成型炭の流通・生産の実態を調査した。中小工場、民生用の高硫黄含有石炭に脱硫剤やバイオマスを加えてバイオブリケット化し、炉での燃焼実験に先立って脱硫・灰分除去等の可能性を検討し、強度、脱硫効率、エネルギー効率を試験した。また、現地で実用化し得るバイオブリケットの製造・成形技術、燃焼技術の設計、予備的実験を行った。

2.2.1. バイオブリケット実証プラントの設計・設置

実証プラントの試験製造プロセスは、今後の展開を考えて現地化の経済状況に合わせて可能な限り簡単な設計とし、投資額の低減化に努めた。しかも、効率、省エネ、経済性、実用性を損なわないように工夫した。実証プラントの設備は、日本から輸送した成型研究装置一式のほか、現地側が準備した混合機2台、原料供給サイクルフィーダー4台、石炭粉砕機1台及びベルト搬送機6機などの周辺設備から構成されている。なお、今回の実証プラントのバイオブリケット製造能力は、年間生産量で10,000トンを見込んでいる。

バイオブリケット実証プラントはバイオマス、原炭および製造ブリケットの各貯蔵室、それに製造装置設置室等で構成されている。工場の総床面積は490平方メートルであり、ブリケット製造装置室（床面積；140平方メートル、天井高さ；8.2メートル）を本プロジェクトのために新たに建設した。

2.2.2. バイオブリケットの試作

重慶地域において産出する石炭原料にバイオマス(バガス, モミガラ, 稲ワラ等の農作物の廃棄物)を15~30%を配合し、消石灰等の硫黄固定剤を予め配合した混合物を、図2に示すようなタブレットテスト³⁾、及びバイオブリケット実験用成型装置(北海道立工業試験場方式)での高圧

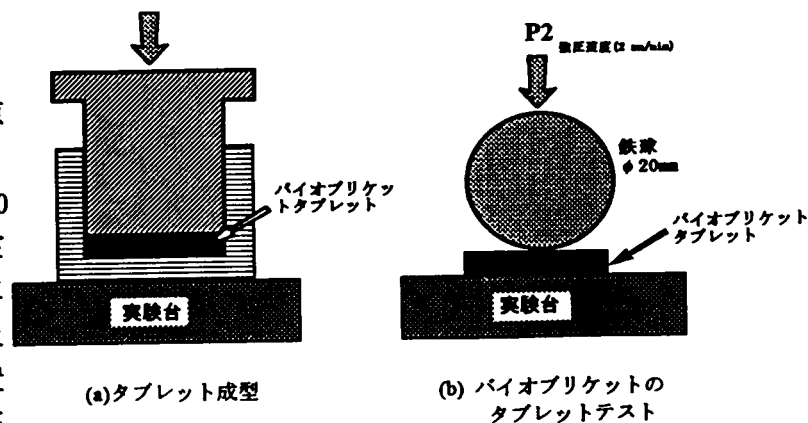


図 2 バイオブリケットの強度実験

成形(約3~5 ton cm⁻¹) プロセス(図3)によって、バイオブリケットを試作した。さらに、現地、重慶市江北区に設置したバイオブリケット実証プラントの成形研究用装置を用いて試作し試験に供した。

2.2.3 バイオブリケットの予備的な燃焼実験

バガスをバイオマスとして用いて試作した少量のバイオブリケットを用いて、燃焼前の全硫黄と完全燃焼後の灰中に含まれる硫黄成分の含有量を測定した。また、バイオブリケットを粉砕した一定量の試料を石英管の中に入れ、電気炉での燃焼実験を行った。流量計で空気供給量を調整し、燃焼温度を測定しながら、燃焼により生成したSO₂をH₂O₂またはNaHCO₃-Na₂CO₃水溶液に捕集し、溶液中の硫酸イオンの濃度を分析し、この濃度から生成したSO₂の量を算出し、バイオブリケット燃焼排ガス中のSO₂濃度を求めた。それらの硫黄成分の分析結果から、SO₂の固定化の可能性を検討した。

同時に、バイオブリケットと原炭との燃焼特性について比較するため、現地でバイオブリケットの比較燃焼実験を実施した。一般家庭用コンロを用いて、バイオブリケットと原炭を各3kg、着火材を0.55kgとし、同じ条件下で燃焼させ、その炉温、火力、着火性等の燃焼特性、燃焼効率、熱効率及び硫黄固定効率を比較した。試験は、現地の公的機関である「中国四川省西南熱功計測センター」に委託した。

2.2.4 バイオブリケット利用に対する現地住民の意識調査

製品が現地で受け入れられる条件を調べるため、重慶市江北城住民委員会に協力いただき、江北区江北城を調査対象地域として、現地調査をした。調査では、あらかじめ実証プラントの成型装置を用いて試作したバイオブリケットを一般住宅とレストラン、十数カ所に配布し試用してもらい、使用上の問題点や普及するための条件をアンケートや聞き取り調査から探った。

このような調査は、関係者や一般住民の環境意識を向上させ、この作業自身がバイオブリケットの普及に効果があると考えられた。

3 結果と考察

3.1 コンロによる燃焼実験

国内産の練炭を用いて、コンロの通気口を開放および閉鎖した場合の燃焼に伴い排出されるCO₂、CO、NO_xの時間変化を見た。燃焼時間は、通気口を開放した場合には閉鎖したときの約3分の1と短くなった。両者の比較から：通気口が開放の状態での最大CO濃度は約1700ppmである

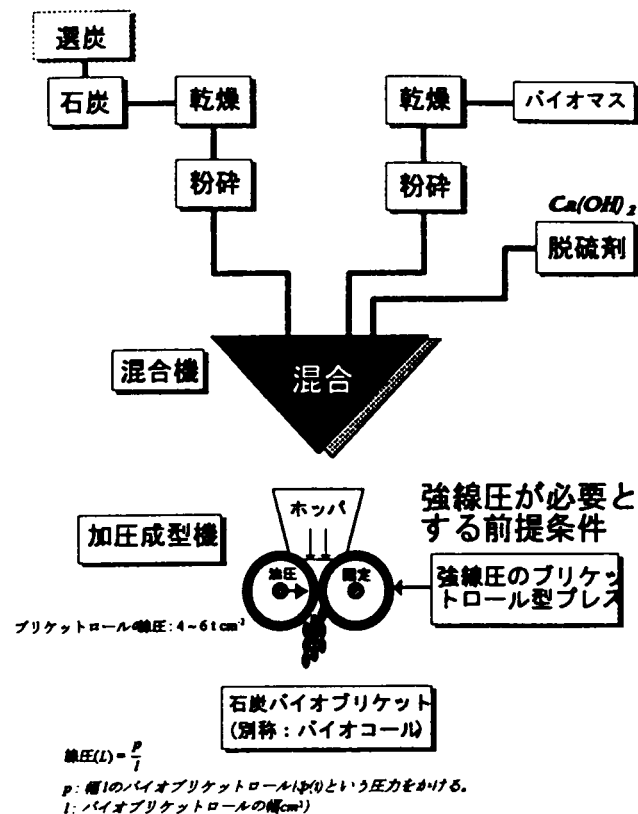


図3 バイオブリケット成形プロセス

が通気口が閉鎖の状態での最大CO濃度は約500ppmに減少した、全燃焼時間を通して条件が異なってもCO総排出量はほぼ同じであった、通気口開放の場合、燃焼の初期にCO₂に比較して相対的にCOの排出量が多くなる、NO_xの変化は通気口閉鎖の方が総排出量が多くなる、SO₂では総排出量・最大濃度とも両者の差はあまりみられなかった、などの現象が観測された。

中国、北京付近で使用されている練炭についての点火から燃焼終了までの排ガス成分の変化の例を図4に示す。排ガス成分の排出パターンには、COやCH₄のように燃焼の初期や追加の練炭を加えたときに高濃度を示すものと、SO₂やNO_xのように燃焼の進行（CO₂の排出）と比較的よい相関を持って変動するものとの2種がみられた。

また、比較のために行った木炭では、通気口を開放して測定を行った結果、COの変化は練炭と同様、燃焼初期に高濃度のピーク（1600ppm）が観測された。しかし、SO₂とCH₄は木炭の燃焼では観測されなかった。

排出係数：EF, (g/g燃焼炭素量) は次式で求めた。

$$EF = [\sum (C_n \cdot F \cdot T) M_{nw}] / [V \cdot W_c] \quad \text{--- (1)}$$

C_n; 排ガス中のn成分濃度, F; 排ガス流量, T; 持続時間, M_{nw}; n成分の分子量, V; 1モル量の体積, W_c; CO₂濃度から算出した燃焼炭素量

表2の排出係数は、測定数も少なく確定的なものではないが、空気の取り込み状態が最もよい条件の例でも汚染物のうちでCOの排出が最も量的に多かった。SO₂, NO_x, CH₄はおおよそ同程度で、20mg/g以下であった。SO₂は、脱硫剤を混入しない限り燃料中の硫黄分からの推算値と一致すると予測され、上記例では、北京練炭、日本練炭とも、燃焼率を勘案するとおおよそ一致していた。

練炭内部の燃焼ガスの分析結果は図5のようになった。なお、図5の採取位置とは練炭の上面を0cmとし、その面から何cmだけ内部で採取したかということを表している。この図より練炭の内部ではCO₂よりもCOの方が多く、濃度も10%を越えていて、練炭上面から4~5cm内部では約

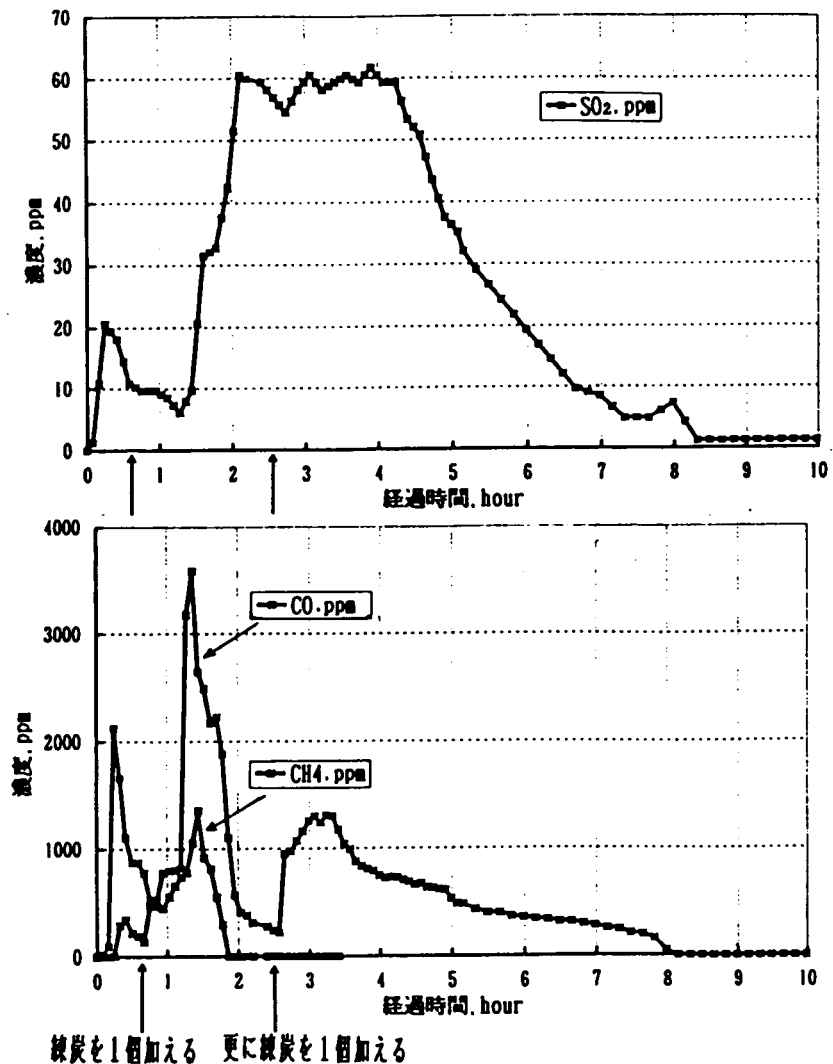


図4 中国練炭燃焼排ガス変化

表 2 各汚染ガスの排出係数 EF_i [mg/g・燃料]

燃料	空気供給量	汚染ガス			
		CO	NO _x	SO ₂	CH ₄
日本練炭	少	61-141	0.17-8.0	1.1-5.0	0.80-2.5
	多	46-120	0.41-2.0	2.4-7.2	0.46-6.2
日本木炭	少	92	0.76	1.2	0.55
	多	103-322	0.64-1.4	0.67-0.89	0.42
中国練炭	多	74-93	2.4-2.6	5.3-9.3	0.13-7.8

4倍となっており、燃焼は、まずCOが生成してそれがCO₂に変換されることにより成立していることが判る。また、燃焼部で生成した%オーダーのCOは、練炭部から出ると直ちに周囲の酸素と化合し、CO₂に変化することも判った。しかし、一部のCOが酸化されないでCOのまま放出され、ppmオーダーの排ガス濃度として観測された。このCOの酸化促進が今後のCO排出低減化の課題である。

3.2 重慶市における石炭使用状況とSO₂排出についての基礎調査

重慶市は中国西南地域の工業都市であり、または、長江上流地域の経済の中心でもある。重慶市は11区、3市および7県からなり、総面積は23,114km²、人口は約1,500万人、市街地の人口は約500万人である。1992年の年間エネルギー総消費量は標準石炭換算で1,525万トンであり、その内、石炭の消費割合は73.6%に当たる。地域別に見ると、石炭消費は市街区に集中し、全市の石炭消費量の54.2%を占め、市街区での単位面積当たりの石炭使用量は近郊県の30倍を超え、全市平均よりも20倍近く高った。

全市の石炭消費量の上昇傾向は80年代に入ってから顕著であり、「重慶市の国民経済・社会発展の“八五”計画と十年計画」によると、重慶市の1995年から2000年の石炭消費量はそれぞれ1,700

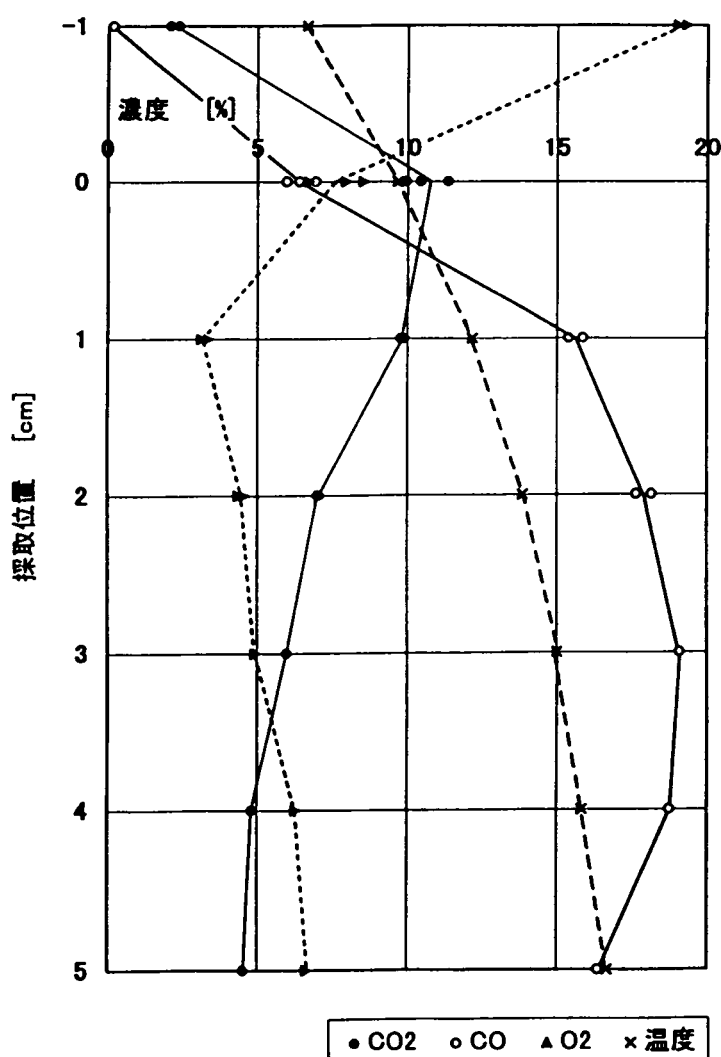


図5 試料採取位置と濃度の関係

万トンから2,250万トンに達すると予測されている。

1994年の重慶市の石炭燃焼によるSO₂排出推定量は85万トンであり、中国全国のSO₂排出総量の5%を占め、1 km²あたりのSO₂排出量は全国平均値より20倍も高い。また、煤塵の排出量も毎年約20万トンに達している。今後の都市開発、経済発展および人口増加により、重慶市の汚染物の排出量はさらに増加し、一層の大気汚染に見舞われると懸念されている。

実際、重慶市の都市部での、SO₂の年間平均濃度は1991年～1995年の5年間で約130 ppbであり、環境基準の未達成率は各年で68.9%、62.8%、43.9%、55.6%、66.1%であり、そのSO₂排出の強度は全国平均値の22倍を超え、最も深刻であることがわかる。また、SO₂排出強度の季節変化の特徴は、冬季>秋季>夏季という順序になっており、1994年の冬には、連続的に酸性の“黒雨”が観測された。このような状況は、今後も基本的に変化せず、SO₂の大気中の平均濃度は、市街区で130 ppb、近郊区で70 ppbの高レベルに留まると予測されている。

3.3 バイオブリケット生産に関わる基礎調査

3.3.1 重慶市産の石炭の性質

重慶市には国営の鉱務局が5ヵ所（松藻、南桐、永榮、天府、中梁山）あり、計22ヵ所の炭鉱があり、年間900万トン強の石炭を生産している（1995年度）。県及び地方の国営中小型炭鉱は42ヵ所あり、年間生産量は200万トン強である。郷鎮企業の小型炭鉱は800ヵ所余りあり、年間生産量は600万トン強である。この地域全体として、1985から1995年にかけての10年間の石炭の年間生産量は1200～1700万トンの間で安定している。

国営の五大鉱務局及び中小型の炭鉱、郷鎮企業の炭鉱などが生産している原炭は高硫黄分の低品位石炭であり、硫黄含有量は平均的に2～6%の範囲にあり、灰分は15～35%である。表3に南桐石炭鉱務局魚田堡炭鉱の原炭の性状分析結果を例として示す。

表3 重慶市南桐礦務局の石炭の性状分析結果
炭鉱：南桐魚田堡炭鉱

項目	石炭	
	4号原炭	混合原炭 (4号炭+6号炭)
水分,%	0.58	0.68
灰分,%	14.2	19.4
揮発分,%	16.6	16.5
固定炭素,%	68.6	63.4
総発熱量kcal/g	7.39	6.87
全硫黄,%	3.4	2.6
不燃性硫黄,%	0.09	0.09
燃焼性硫黄,%	3.3	2.5
HGI※	94.2	122

※HGI(粉砕指標)値; 高いほど成型容易

石炭中の硫黄分は細かく分散しており、既存のクリーンコール化技術を用いた場合、灰分はある程度まで除去できるが、相当量の硫黄分が残留することがわかった。また、原炭の多くは粉炭（重慶地域南桐炭鉱の場合、< 3 mm, 約75%）であり、そのまま燃焼すると大量粉塵が発生する。そのため、かつて重慶市政府から生焚き禁止令が下されたことがあったが、実際に有効な対策とはならなかった。そのためには、むしろ選炭、成型炭製造、脱硫などの技術導入が有効であり、重慶市では、すでに多くの成型炭製造を設備している。しかし、それらは方式が単純で、施設の老朽化が進んでおり、生産される成型炭の燃焼効率は低く、上記の問題の基本的な解決には至っていない。従って、新たなバイオブリケット技術を現地化して、硫黄分の灰への固定などの対策が必要となっている。

3.3.2 バイオブリケットと重慶市販の成型炭との比較

重慶地域の市販の成型炭は一般的に粉炭50~80%、粘土あるいは泥状石炭(俗称：煤泥)20~50%を加えて成型されている。しかし、成型時に加えられている圧力が低い(0.1~0.3 ton·cm⁻¹)ため、成型炭の多くは輸送中に砕けてしまい、燃焼時の未燃分の損失が大きく、省資源、省エネルギーの面で欠点となっている。製造上の問題点としては、原料の粉炭の水分が多く、硫黄固定剤を配合した場合でもその効果は低く、また結合剤の粘土を均一に配合できる混合機を使用していないため、成型後に原料がロールに付着しやすく、そのために連続的に生産することは難しいといった欠点もある。

表4 重慶市の原炭と大鋸屑による成型特性実験

本研究では、日本で開発されたバイオブリケット製造装置²⁾を現地用に改良・試作することを考えている。設計仕様として、重慶地域の石炭を主原料(70~85%)に、副原料としてバガス、モミガラ、稲ワラ等の植物繊維を15~30%を配合し、さらに高い硫黄含量の石炭の場合は消石灰等の脱硫剤を加えて、3~5ton/cm²の高圧で室温下

原炭へのバイオマスの添加量 (%)	原炭と大鋸屑	原炭と木粉 (日本製木粉)
	強度(kg/cm ²)	強度(kg/cm ²)
10	64	90
20	114	160
30	239	300

原炭と大鋸屑は未処理のまま、木粉の粒径は2mm以下。

で成型することにしてはいる。バイオマスが結合剤として作用し、また、高圧で成型するので粘土などの結合剤を添加せずとも、通常の見取り扱いに十分な強度を有すると予測される。

重慶市産の原炭とバイオマスによる成型特性に関するタブレットテストの結果(表4)から、バイオマスを10~20%程度を配合することによって、十分な強度のあるバイオブリケットが生産可能であることが分かった。本研究では、実際に原炭にバイオマスを10~30%を配合し、消石灰等の硫黄固定剤を予め配合した混合物を、バイオブリケット実験用成型装置(北海道立工業試験場方式)及び重慶江北区華新街煤店に設置したバイオブリケット成型機の2種の装置を用いてバイオブリケットを試作した。図3に示したような高圧成形(3~5 ton·cm⁻¹)の場合、バイオマスの圧密化は剪断変形を伴った圧縮力のもとで進み、その際の石炭粒は一部破壊を伴いながら、バイオマス粉とともに塑性変形を受け、除圧時にはその変形

表5 バイオブリケットの試作・初期的燃焼実験結果

(1) バイオブリケット (日本側の配合比)	
大鋸屑	~25%
中梁山炭鉱の原炭 (S%=3.8)	~75%
硫黄固定剤 : Ca(OH) ₂	Ca/S = ~1.5
一個あたりの重量	~30 g
耐圧強度	50~90 kg
硫黄固定率	~85%
特徴：着火性優れている。	

(2) 改良型ブリケット(重慶側の配合比)	
バインダー	10~20%
中梁山炭鉱の原炭 (S%=3.8)	80~90%
硫黄固定剤	Ca/S = ~2.0
一個あたりの重量	~28 g
耐圧強度	40~50 kg
硫黄固定率	~90%
特徴：耐水性良好	

原炭と大鋸屑の粒径 : < 3 mm.

量の大きいバイオマス粉が成形物の結合剤として作用し、通常の見取り扱いは十分な強度を有するバイオブリケットができる。これを用いて燃焼試験した結果、従来の重慶市販の粘土を配合した低圧成型炭と比較して、煤煙、SO₂等の発生量が極めて少なく、着火性、燃焼性も良く、未燃分の損失が少なく熱効率が高いことが分かった。バイオマスを加えたことで揮発分が多くなり、フレーム(炎)が長くなったため、小型ボイラー用の燃料にも適したものとなった。

重慶市産の原炭にバイオマスを加えて成型特性を試験した結果；石炭を主原料（70～85%）として、これに副原料としてバガス・モミガラ・稲ワラ等の農産廃棄物を15～30%を配合し（なお、高硫黄石炭の場合は消石灰等の硫黄固定剤を予め配合した混合物についてバイオマスを使用せず）、改造した高圧成型の石炭ブリケット実験用装置によって、室温で十分な強度のあるバイオブリケットを生産できた。すなわち、現地でのバイオブリケット試作実験では、石炭原料とバイオマスを天日で四日間乾燥し、消石灰を混入（水分；5.7%）すると、表面が滑らかで、成形率が高く、かつ強い破壊力(50～90 kg)に耐えるバイオブリケットが製造できることが分かった。

3.3.3 バイオブリケット用の脱硫剤の選択

燃焼性硫黄分を固定化するために、消石灰(Ca(OH)₂)、生灰石(CaO)、石灰石(CaCO₃)等が硫黄固定剤として使用され、原炭の燃焼灰のX線回折分析等の結果では、Ca(OH)₂の硫黄固定効果が最も高いことが分かった。バイオブリケットは、今後、低い煙突を持つ小規模な中小ボイラーへの利用が主であるので、民生用燃料としての研究を進めるとともに、より高い炉温にも適する硫黄固定剤を開発する必要がある。

3.3.4 バイオマスと脱硫剤の資源

重慶近郊の主な農作物は、米、トウモロコシ、小麦、大麦、高粱などがある。1985年以降の10年間の調査結果によると、それらの農作物の作付面積、産出量、収穫時期は比較的安定しており、10年間の農作物の総面積は2000万ムーの間に安定している。その内、食料作物の面積は1700万～1800万ムー（1ムー（畝）

=6.722畝 = 666.7 m²）、米の面積は630万～650万ムー、トウモロコシの面積は260万～280万ムー、小麦は340万～400万ムー、大麦は13万～20万ムー、高粱は20万～30万ムーである。バガス、モミガラ、稲ワラ等の農作物の廃棄物の供給は比較的安定している。また、木材加工工場からのオガクズの多くが利用されず、山積みになされており、年間約30万トンが使用可能と見積もられた(表6)。脱硫剤となる石灰岩の埋蔵量は4億トン以上であり、1985年からの10年間の石灰石生産量は150～200万tonであった。

3.3.5 バイオマスの成分分析

重慶市万盛地区で採集したトウモロコシと高粱の茎や藁の試料について、成分・性状分析を行った。表7に示したように、トウモロコシと高粱の硫黄含有量はそれぞれ0.7%と0.26%であり、中国一般地域より一桁も高いことがわかった。さらに、水溶性イオン成分含有率（乾燥ベース）を測定し、その結果を表8に示した。バイオマス副原料中の硫黄含有率は三分類される。即ち、0.01%以下の硫黄分を含む木屑と、0.01%～0.1%までのモミガラ、トウモロコシの藁及び高粱の藁、そして0.1%以上の稲藁、雑草及び麦藁である。

実際の低汚染燃料として最も重要な特性は燃焼性硫黄分含有率が低いことである。また、瀋陽のモミガラの硫黄分含有率は重慶市のモミガラより低かったにもかかわらず木屑より高かった。ここで測定した中で高濃度であった第三のグループに属するバイオマスの硫黄含有率は正常な植物の葉中の硫黄元素濃度の範囲(0.1～0.3%)に一致していた。この結果は、大部分の無機硫酸塩は

表 6. 重慶市におけるバイオマスの産出量

バイオマスの種類	産出量 (10 ⁶ トン/年)
稲藁	2.0～2.2
麦藁	1.0～1.2
トウモロコシ殻と藁	2.3～3.0
野生雑草	～3.24
高粱(コウリヤン)藁	2.5～2.7
その他の植物廃棄物	～5.36
大鋸屑	～0.3
総産出量	16.4～18.0

しばしば葉に蓄積すること、第一及び二グループに分類されたバイオマスは葉の割合が少ないことによると考えられる。

表9に示したように、木屑は燃焼後の灰分が最も少なく、かつ燃焼排ガスとして排出される硫黄分も最も少ないことが分かった。従って、残存灰分量並びに燃焼排ガス中の汚染物質濃度という観点から考えた場合、木屑がバイオブリケットとして最適な副原料の一つであると言える。

表 7. 重慶市原炭、バイオブリケット(B.C. *)の測定値

成分と項目	天府炭鉱		南桐炭鉱		松藻炭鉱		バイオマス		
	原炭	B.C.	原炭	B.C.	原炭	B.C.	トウモロコシ茎・藁	大鋸屑	高粱茎
水分 (%)	1.2	2.0	3.1	3.3	1.2	2.0	7.3	6.5	7.7
灰分 (%)	22.1	23.4	30.2	30.9	14.4	17.6	6.3	0.9	14.9
揮発分 (%)	17.5	28.2	17.0	27.2	14.6	26.0	82.4	91.0	73.8
固定炭素 (%)	59.2	46.4	49.7	38.6	69.8	54.4	4.1	8.1	3.6
総発熱量 (kcal/kg)	6,510	5,680	5,600	4,890	7,180	6,190	4,200	4,440	4,200
全硫黄 (%)	2.40	1.89	3.30	2.69	2.50	2.05	0.70	0.07	0.26
不燃性硫黄 (%)	0.73	1.61	0.40	2.39	0.21	1.68	0.08		0.05
燃焼性硫黄 (%)	1.67	0.28	2.90	0.30	2.29	0.37	0.62		0.21
粉碎質(HGI)**	95		122		114				

* B.C. の成型に際して原料混合比は全て重量比で石炭80：パガス20とした(乾燥ベース、%)。脱硫剤(消石灰)の添加量はCa/S = 1.5とした。硫黄の測定値は全て無水基で示した。

** HGI(粉碎指標)値が高いほど成型しやすい。

*** 原炭とバイオマスの粒径: < 3 mm.

表 8 バイオマスの水溶性成分 (乾燥ベース、%)

成分	水分	Na	N	K	Mg	Ca	Cl	P	S
バイオマス									
大鋸屑-1	7.90	0.00	0.00	0.05	0.001	0.006	0.014	0.00	0.00
大鋸屑-2	14.70	0.00	0.00	0.03	0.003	0.020	0.027	0.00	0.00
大鋸屑-3	6.64	0.00	0.00	0.04	0.002	0.019	0.010	0.00	0.00
大鋸屑平均値	9.70	0.00	0.00	0.04	0.002	0.015	0.017	0.00	0.00
稲茎	9.10	0.00	0.02	0.27	0.007	0.007	0.188	0.00	0.02
トウモロコシ茎	8.95	0.02	0.09	1.15	0.050	0.038	0.964	0.02	0.07
高粱	7.86	0.02	0.08	1.21	0.029	0.036	1.416	0.02	0.08
稲藁	8.43	0.02	0.08	1.71	0.065	0.022	1.112	0.02	0.17
雑草	8.78	0.03	0.09	1.08	0.035	0.024	0.692	0.04	0.18
麦藁	9.12	0.01	0.09	0.86	0.016	0.017	0.697	0.03	0.18
稲茎 a)	6.60	0.00	0.01	0.28	0.001	0.006	0.090	0.00	0.01

a) 中国瀋陽市の試料

表 9. バイオマスの灰分、不燃性硫黄と燃焼性硫黄の含有率(%)

バイオマス	大鋸屑-1	大鋸屑-2	大鋸屑-3	稲茎	高粱	稲藁	雑草	トウモロコシ茎	麦藁	稲藁 ^{a)}
灰分(%)	3.4	1.7	1.7	15.4	13.1	17.0	16.8	12.5	8.2	9.0
不燃性硫黄	0.004	0.005	0.005	0.029	0.141	0.158	0.155	0.169	0.214	0.012
燃焼性硫黄	0.001	0.007	0.003	0.022	0.086	0.171	0.184	0.072	0.185	0.011

a) 中国瀋陽市の試料

3.4 バイオブリケットの特性

3.4.1 バイオブリケットの脱硫効率

バイオブリケットの製造は始めたばかりであるので、長期の燃焼実験に供し得るだけ量がないので、系統的な燃焼特性試験はまだ実施していない。現段階では、重慶市の3種類の石炭から試作したバイオブリケットを用いて、燃焼前の全硫黄と完全燃焼後の灰中に含まれる硫黄成分の含有量を測定した(表7)。

硫黄固定剤のCa(OH)₂をCa/S=1.5の割合で配合すると、燃焼性硫黄は、それぞれ、天府炭；0.28/1.67=16.8%，南桐魚田堡炭；0.30/2.90=10.3%，松藻炭；0.37/2.29=16.2%まで低減された。また、揮発分は原炭に比較していずれも10%余り多くなった。したがって、天府、南桐、松藻炭を原料としたバイオブリケットの分析値から推測されるように、石炭75~80%，バイオマス20~25%，消石灰をモル比Ca/S=1.5の割合で配合したバイオブリケットでは、SO₂を元の20~30%まで低減でき、さらに、粉塵軽減対策にも有効であった。

バイオブリケットは発熱量の低いバイオマス(約4,200kcal/kg)とCa(OH)₂を配合するため、発熱量が低く、灰分は多くなるが、先に述べたようなバイオブリケットの特性で、破損、未燃による損失が少なくなるので、最終的な熱効率は高くなる。

同時に、重慶において日本配合方法によるバイオブリケット及び重慶配合方法による石炭ブリケットを日中共同で試作した。バイオブリケットの燃焼実験は重慶市環境科学研究所の研究チームが行い、また、熱効率や硫黄固定効率に関しては、中国四川省西南熱功計測センターが試験した。表5はその初期的燃焼実験の結果であり、両方の高い硫黄固定効率(85~90%)が確認されている。バイオブリケットの着火性が良好であることに対し、石炭ブリケットは耐水性のよい特徴が認められた。今後、その配合についてさらなる実験を行う予定である。

3.4.2 バイオブリケットの燃焼特性

バイオブリケットの燃焼特性について、中国四川省西南熱功計測センターに委託し試験した。試験には、一般家庭用コンロを用い、原炭と着火材を用いて、その炉温、平均火力、着火性、燃焼保持時間、熱効率等を調べた。その結果は、すべての点でバイオブリケットが原炭よりも優れていることが分かった。すなわち、表10に示すように、着火性、火炎保持時間、総燃焼保持時間、総蒸気発生量と熱効率については、バイオブリケットが13分、120分、248分、4,720gと25.5であったのに対し、原炭生焚きでは、各々20分、51分、178分、2,920gと20.5、などと低い水準に止まった。実用面で考えると、バイオブリケットを使用するで、単位量当たりの総蒸気発生量が2倍あるので、同量の燃料でも炊事可能な時間を倍に延長できることになる。

図6~図8に燃焼排ガス中の一酸化炭素、水温変化及びコンロ入り口温度と炉壁温度の変化を示す。実験結果から、原炭だけよりも、バイオブリケットの方が着火しやすく、一酸化炭素の発生も少なく、燃焼状況もかなり良くなったことが分かる。また、原炭燃焼時には、刺激性の臭

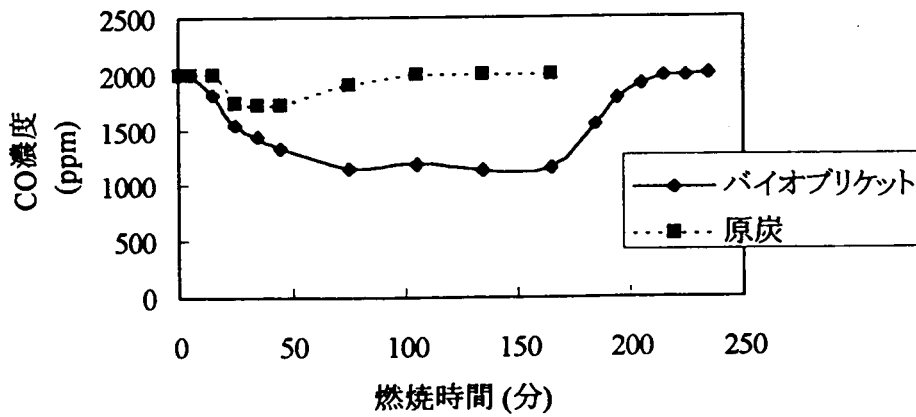


図 6. バイオブリケットと原炭燃焼時の排ガス中の一酸化炭素の濃度経時変化

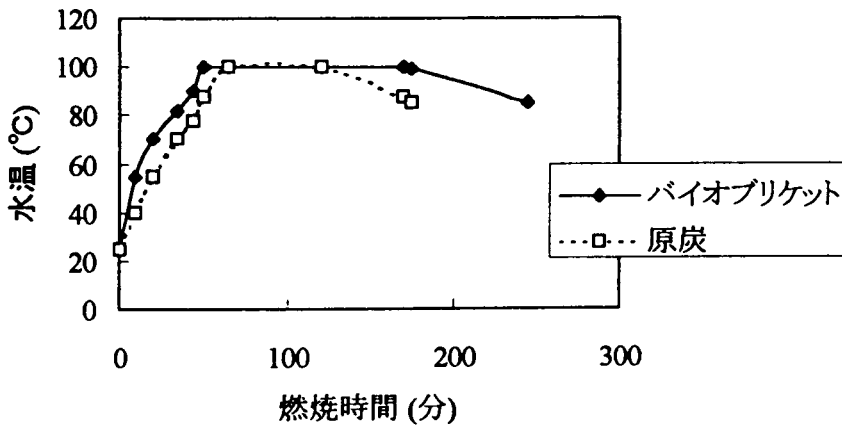


図 7. バイオブリケットと原炭燃焼時の水温経時変化

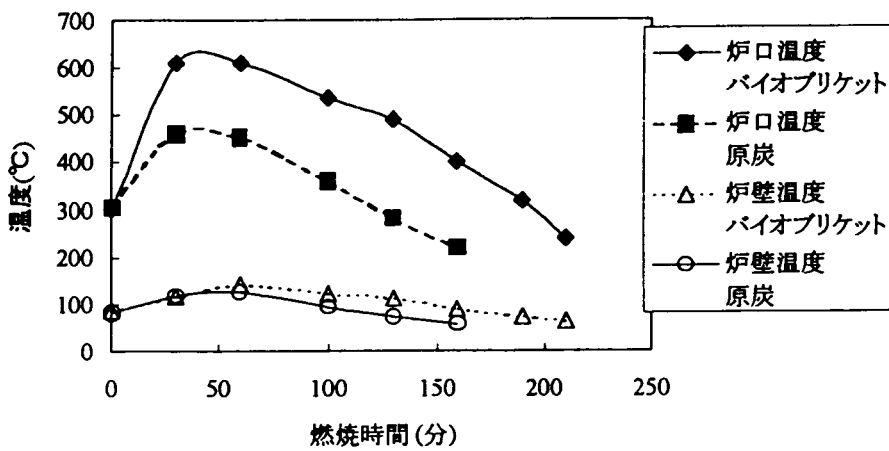


図 8. コンロの炉口と炉壁温度の経時変化

いがあったが、バイオブリケットを燃焼する時にほとんどなかった。石炭残灰の測定結果、原炭よりバイオブリケットの方が残灰中の炭素含有率がかなり低いことも注目された。

表 10 バイオブリケットと原炭の燃焼特性の比較

項目	記号	単位	バイオブリケット	原炭
着火性 ¹⁾	T _D	分	13	20
火炎出現までの時間	T _s	分	36	45
強い火力維持時間	T _w	分	120	51
炊事可能時間	T _K	分	212	133
総燃焼時間	T _R	分	248	178
総蒸気発生量 ²⁾	D ₂₂	g	4,720	2,920
熱効率 ³⁾	η	%	25.5	20.5
平均火力	H _P	g/分	22.2	21.9
平均炉口温度	t _K	℃	586	
平均炉壁温度	t _b	℃	95	91.2

1) 着火材 : 0.55 kg

2) テスト用水 : 5.98 kg

3) 熱効率の低い一般家庭用コンロ使用

4) バイオブリケットと原炭試料 : 3.0 kg

3.5 バイオブリケットの経済性とその需要予測

バイオブリケットは原炭に比較して加工費と設備投資差額の分だけ高くつくが、その省エネ等の燃料特性も含めて評価すると、そのコストが原炭の2倍以下であれば、バイオブリケットの特性から言って、十分に市場性は望める。現段階では、原炭の1.5~2.0倍を想定し、その価格以下のものを製造することを目標としている。目安として、現地調査から得られた重慶の成型炭の原料及び副原料の入手価格の一例を表11に要約した。

表11 重慶の成型炭コストに関する一部資料

項目名	原料コスト	他 (レート: 1元 = 12円)
1. 原料		
原料炭	元 ¥ 90/トン	工場渡し (瀝青炭)
加工後原料炭	元 ¥ 130/トン	粘土等添加、成型炭生産会社へ納入
成型炭価格	元 ¥ 150/トン	市場価格
練炭価格	元 ¥ 150/トン	市場価格
原料用粘土	元 ¥ 30/トン	工場渡し
原料炭	元 ¥ 150/トン	重慶市内市場価格
精炭(洗・選炭後)	元 ¥ 250/トン	重慶市内市場価格
2. 副原料		
石灰	元 ¥ 80/トン	
バガス	元 ¥ 100/トン	
高粱	元 ¥ 80/トン	
大鋸屑	元 ¥ 50/トン	
麦藁、籼穀(モミガラ)、稲藁(ケワラ)、トウモロコシ茎について現在調査続行中		

3.5.1. バイオブリケットの短期需要量の予測

いくつかの統計資料を元に、以下のような短期の需要概要を推定した。

- (1) 市内低所得者層の総需要量推計: 32万世帯 (人口110万人) × 2t = 64万トン/年。
- (2) 小飲食店の総需要量推計: 重慶市全体の飲食サービス業経営数は46,350店、その内、飲食店数

31,204店、サービス業は15,146店。この内、集体企業は9,275店、個人経営は32,765店である。小飲食店は集体、個人と考えられる。総計は約42,000となる。この内、市内にあるものは2万店と推計される。飲食店の年間成型炭使用量を一軒あたり50トンとすると100万トン/年となる。

(3) ホテル、学校、その他事業体の総需要量推計：(調査続行中) 推計50万トン/年(1トン以下のボイラー数から推計可能)。

(4) 市内小企業の小型ボイラー用の総需要量推計：(調査続行中) 推計50万トン/年(1トン以下のボイラー数で推計可能)。

以上の(1)~(4)を合計すると脱硫成型バイオブリケットの短期需要量は260万トン/年と推計される。

3.5.2 バイオブリケットの長期需要量の予測

1997年度から重慶市は中央直轄市になり、地域の拡大と農村人口の増加に伴い、下記通りの長期の需要量が予測されている。

(1) 農村部の民生用：1994年において農民1100万人、世帯数275万世帯(世帯人口4人)。農村民生用の内、沼気10%、薪炭40%として、原炭使用農家50%、1世帯2tonで、現在の石炭の総使用量270万ton/年と推定される。農村では薪炭を自分で取得しているため、原炭使用量が低い。95年末の原炭の価格は1ton = 100元(江津市)で、したがって普及には時間かかる。10年後の普及率を1/3とみると、約100万トン/年の需要と見積もられる。

(2) 農村の郷鎮企業用：1994年の農村郷営・村営企業数2.57万社で、この内、工業企業を70%とすると、1.8万社になる。工業企業の使用量は不明であるが、ほぼ1企業あたり30トンとすると54万トンで、今後の発展を考えると、10年後には約100万トンと見積もられる。

以上(1)と(2)の合計から長期需要量は約200万トン/年と推定される。

3.5.3 バイオブリケットの普及時間およびSO₂排出低減量の推定

(1) 2~3年間の緊急普及量は市内低所得層用として64万トン。約75%硫黄固定化率(硫黄平均含有量3.5%とする)で、SO₂低減量は4.62万トン/年。

(2) 3~5年先の市内小ボイラー用200万トン、SO₂低減量14万トン/年。

(3) 5~10年先には農村用(郷鎮企業用含む)200万トン、SO₂低減量14万トン/年。

(4) 現在、重慶市全体で84万トン近いSO₂が降下していると推測される。中央直轄市になってから、これは今後増大していく恐れがあり、地域拡大に伴い、民生用・農村用から発生・増加する可能性も予測される。

本対策を実行することで、SO₂の排出量を、2~3年後には4.62万トン/年、5年先には18.62万トン/年、10年後には32.6万トン/年を削減できる可能性がある。対策をしない場合は、民生用・農村用燃焼から発生するSO₂の量は10年後に2倍に増加すると予測されが、対策を実施することで、現在よりも少なくすることも可能となる。

3.6 バイオブリケットに対する住民の反応と意識調査

日本で最もひどかった四日市市塩浜地区の呼吸器疾患率は9.5%であった。重慶市市街区は、その時のSO₂濃度の約2倍であり、渝中区では34.3倍に達する。呼吸器疾患による死亡率は177.9人/10万人、肺癌の死亡率は1973年の21.8人/10万人から、1992年の62人/10万人にまで上昇している。なお、低所得者層は前述のように、炊事用に非脱硫成型炭を利用しているので、正確な数値はないが、彼らの呼吸器疾患率はこの数値よりかなり高いと思われる。

重慶市江北区江北城において、民家とレストランの十数カ所を対象にバイオブリケットを試供

し感想を求めたところ、市民は、我々が想像していた以上に、環境に対して敏感であること、経済性と品質に対しても敏感であることを知った。その中で特に多く寄せられたバイオブリケットに対する意見は、「i)臭わない。ii)着火が速く、使用しやすい。iii)火力が強く、炊飯、中華料理作りに適している。vi) 価格については市価の20%程度、1.5~2.0倍くらい高くても早急に買い求めたい」などであった。

今後、重慶市江北区により大型のバイオブリケット実証プラントの建設を予定しているが、これらの調査を通じて、その普及の目途が立ったように思う。それにより、市民の生活と密接に関連している地域の高密度な汚染が減少し、呼吸器系疾患の被害の軽減、住みやすい環境の実現、さらに酸性雨被害の軽減に貢献できるものと期待している。

また、適切な時期を置いたアンケート調査などを通じて、継続的に現地一般住民の考え方を把握するように努めると共に、技術者と環境行政担当者の環境改善意欲を増進させ、住民の環境意識を向上させ、各種階層における環境啓蒙教育活動の自発的参加を促すようにすることも重要である。

4. おわりに

本研究では、まず、従来の練炭や木炭からの燃焼生成物についての調査法と、汚染物の排出係数を求める手法について検討した。このような手法の開発は、今後、燃料改善の効果をより厳密に評価する上で不可欠なものである。

また、重慶産の石炭質を物理化学的に分析し、形態別硫黄成分、その分散特性、現在の石炭利用状況、成型炭の流通・生産の実態等の調査を行い、石炭をそのまま用いた時の問題点を明らかにした。さらに、中小工場、民生用の高硫黄含有石炭に硫黄固定剤やバイオマスを加えてバイオブリケット化し、燃焼に伴う硫酸化合物と粉塵の排出抑制等の可能性を検討し、強度、硫黄固定効率、エネルギー効率などの点で従来よりも優れた燃料になることを確認した。そして、いくつかの統計資料などから、重慶市における特に民生用石炭からの酸性雨原因物質の排出抑制対策として、バイオブリケットの製造技術、燃焼技術の有効性を明らかにした。

さらに、重慶市に日本で開発されたバイオブリケット製造用の実証プラントを設置して、現地産の原炭とバイオマスと消石灰からバイオブリケットを製造し、強度、エネルギー効率、SO₂排出抑制などを試験し、酸性雨原因物質の排出抑制技術として有効であることを確認した。また、製造したバイオブリケットを試用した住民から意見の聴取し、今後の普及の展望を得た。

近年、重慶市においても天然ガスの利用が進んできているが、中国の現状を考えれば、天然ガスの利用は市の中心部に限り、可能な限り化学工業の原料用に回し、豊富な石炭資源を民生用に利用することを考えるべきである。その際、汚染を最小限に押さえるため、バイオブリケット普及はきわめて有効であると考えられる。その場合に以下の2点が肝心である。

(1) 末端価格を、原炭市価の120%前後、高くても2倍以内にするように、バイオブリケットの製造コストを低下させること。

(2) バイオマス副原料が比較的安く安定に取得できるようにすること。

普及が進んだ場合の供給体制としては、その製造は大型企業よりむしろ中小企業に任せ、3~5万tonの小規模のプラントを需要地に近い場所に分散的に配置することが良いであろう。また、製造されたバイオブリケットについては、その品質を保証するため、所管官庁（重慶市の担当部局など）による品質検定の制度化をするなど、高品質バイオブリケットの普及と共に信頼性の確保も考えておく必要がある。

謝 辞

本研究では、練炭や木炭の燃焼実験と排出汚染物の評価については、主に国立公衆衛生院で行い、中国重慶市でのプラント建設や現地調査は、社団法人国際善隣協会内に設置した日中合同委員会が主に実行した。本委員会には、衛生院の関係者と共に、公立の試験研究機関並びに大学等の研究者、企業の技術者に参加いただき、協力を賜った。特に、元北海道工業試験場長の丸山敏彦氏、埼玉大学工学部教授の坂本和彦氏には、現地調査をはじめ、プロジェクトの全般にわたって協力を賜った。また、重慶市環境保護局、重慶市環境科学研究所、重慶市煤炭工業管理局、重慶市鋼鉄設計院、中日友好環境センターなどの中国の諸機関の協力も頂いた。また、燃焼実験では、孫恵欣、相内更子、田中弘充の諸姉、諸兄にご助力を頂いた。協力、助力賜った皆様に深く感謝する次第である。

参考文献

- 1) 孫恵欣, 渡辺征夫, 溝口次夫; 中国における環境の現状と保全対策, 環境技術, 23, 517-524, (1994).
- 2) 丸山敏彦; 地球環境問題で息を吹返したバイオコール技術, 技術の助っ人「コーセツシ」(中小企業庁技術課監修), 同友館, p. 169-180 (1993).
- 3) T. MARUYAMA and C. MIZOGUCHI; Briquetting and combustion characteristics of coal-wood composite fuel (Biocoal), 4th International Symposium on Agglomeration, June, Ed. C. E. Capes, AIME, Toronto, Canada (1985).

研究発表の状況

[論文]

- 1) 溝口次夫; 中国の環境汚染の現状, 公衆衛生研究, 64, 13-29 (1995).
 - 2) 溝口次夫; 東アジア地域の酸性雨原因物質の制御技術に関する研究, 資源環境対策, 31, 225-229 (1995).
- 3) 渡辺征夫, 中西基晴, 前田恒昭, 畠山史郎; 遠隔地および下部対流圏における大気中 Peroxyacylnitrates 類の観測調査手法の開発, 大気環境学会誌, 31, 213-223, (1996)

[学会等報告]

- 1) 渡辺征夫, 孫恵欣, 相内更子, 石井忠浩; 練炭, 木炭などの固形燃料からのCO, NOx などの大気汚染物質の排出量の推定, 第36回大気汚染学会講演要旨集, p. 333 (1995).
- 2) 渡辺征夫, 田中弘充, 石井忠浩, 相内更子; 練炭などの民生用固形燃料での燃焼条件と汚染物排出量との関係, 第37回大気環境学会講演要旨集, 堺, p. 283(1996)
- 3) 溝口次夫, 王青躍, 坂本和彦, 丸山敏彦, 渡辺征夫, 羅仁学; 中国重慶市における石炭燃焼による大気汚染現状調査, 第37回大気環境学会講演要旨集, 堺, p. 280 (1996)
- 4) 王青躍, 丸山敏彦, 坂本和彦, 溝口次夫, 渡辺征夫, 羅仁学; バイオブリケットの試作及び重慶市販ブリケットとの比較研究, 第37回大気環境学会講演要旨集, 堺, p. 281 (1996)
- 5) 坂本和彦, 王青躍, 王梯, 溝口次夫, 丸山敏彦, 渡辺征夫; 石炭バイオブリケット技術による脱硫可能性の研究, 第37回大気環境学会講演要旨集, 堺, p. 282 (1996)
- 6) 渡辺征夫, 庭野知子, 高瀬享子, 泉克幸; 光音響吸収型ガス分析計による温室効果ガスおよびSO₂の分析-Ⅱ, 第37回大気環境学会講演要旨集, 堺, p. 445 (1996)

- 7) 畠山史郎, 村野健太郎, 向井人史, 酒卷史郎, 坂東博, 渡辺征夫, 田中茂, 駒崎雄一 ; I G A C 調査 (2) アジア大陸と日本の間の海洋上空の S O₂ の空間分布, 第37回大気環境学会講演要旨集, 堺, p. 338 (1996)
- 8) 渡辺征夫, 相内更子, 高瀬享子, 富田潤一 ; 高性能ポータブル型測定機による発生源および環境調査でのガス状化合物の分析, 日本分析化学会第44年会講演要旨集, p. 217 (1995).
- 9) 溝口次夫, 松本光弘, 王青躍, 周燕榮 ; 中国重慶市の大気汚染と健康被害(第1報), 第37回大気環境学会, p. 279 (1996)
- 10) Qing-yue WANG, Toshihoko MARUYAMA, Kazuhiko SAKAMOTO and Tsuguo MIZOGUCHI ; Development of coal-biomass briquette technology for suppression of environmental emissions in domestic and small-size combustor of Chongqing area. Papers of Japan-China Symposium on Air Pollution (The 5th Japan-China Symposium of JCSTEA Series), Tokyo, p.351-356 (1996).
- 11) Wei WANG, Shidong GAO, Jun WANG, Kazuhiko SAKAMOTO, Qing-yue WANG, Tsuguo MIZOGUCHI and Toshihoko MARUYAMA ; Atmospheric pollution caused by coal combustion and its countermeasure - fluoride pollution and its control. *ibid*, Tokyo, Japan, (1996).
- 12) Qing-yue WANG, Kazuhiko SAKAMOTO, Tsuguo MIZOGUCHI, Toshihoko MARUYAMA and Ren-xue LUO ; Characteristics of coal-biomass briquette and its desulfurizing efficiency. Papers of International Workshop on Acid Deposition, The National Institute For Environmental Studies, Tsukuba, Japan, p.141-148 (1996).
- 13) Ikuo Watanabe, Hiromitsu Tanaka, Kouko Aiuchi, Tadahiro Ishii ; Emission of gaseous pollutant from the combustion of briquet at cooking stove, Abstracts of 7th Asian Chemical Congress, Hiroshima, p.108 (1987).