

公表データにみる中国のSO₂排出 の実情と問題点

—ボイラをめぐる問題を中心に—*

池田 明由

1 はじめに

中国の人口規模、今後の経済成長の見通しなどを考慮すると、その環境汚染問題は、世界的に放置できない問題であることがよく議論される。とくに中国に地理的に近い日本では、たとえば、中国起源のSO₂によって酸性雨が引き起こされているのではないかなどの心配の声も良く耳にする。実際に中国の環境汚染が日本に影響を与えているどうかは今後明らかにされていく問題なのであろうが、近隣に位置する先進国として、少なくとも日本は中国の環境保全に対して無責任ではいられないと思う。

そのような中で近年、ODA などを通じて、日本が中国の環境保全対策に対してかなり積極的に取り組んでいることが報告されている。しかし、そうした取り組みも必ずしもすべてうまく行っているわけではないようである。たとえば、中国内陸部の代表的重化学工業都市である重慶の発電所では、1992年ごろ湿式排煙脱硫装置が造られた。ところが、設計仕様に燃料が合致しない、装置稼動のための電力消費量が大きいの理由により、予期した成果をあげていないということである（文献

*本研究は1996年度早稲田大学特定課題研究助成費の下でなされた。また同時に本研究は、慶應義塾大学産業研究所吉岡完治教授を中心とする、KEO 東アジア環境・エネルギーデータベース作成・分析プロジェクトの一環としてなされている。

[9]。確かに、湿式による脱硫方法は排煙に含まれる SO_2 の99%近くを除去できるため、汚染基準の厳しい日本では必要不可欠であるが、一方で多量の電力を必要としメンテナンスの費用もかかるという。電力不足が伝えられる中国において、日本と同じ湿式による脱硫を行うことが本当にふさわしいかどうかは疑問の余地がある。もしかしたら中国では、脱硫効率は60%程度であったとしても、電力を使わず、安価でできる脱硫方法を広く普及させることの方が、一層効果的であるかもしれない。つまり中国のような発展途上にある国々においては、環境保全のための技術は高度であればあるほど望ましいとは限らず、たとえそこそこの性能であっても、経済その他の現地条件に見合った対策の方が最終的には望ましい成果があげられるのではないだろうか。ここで重要なことは、環境保全のためのどのような技術が現地に見合っているか、技術の高さと費用の高さにどう折り合いをつけ、どうしたら最大の成果を期待できるかを正確に見極めていくことだろう。そのために必要なのは、現地の状況の綿密な把握である。

本研究ではそのような目的のために、環境問題を SO_2 による大気汚染問題に絞った上で、中国における SO_2 汚染の現状と問題点をきめこまかく分析していこうとする。研究ではまずはじめに、中国で公表されているデータを詳細に検討した。その結果わかったことは、中国で現在経済的側面からもっとも脚光を浴びているいわゆる沿岸地域のほかに、内陸地域（四川省）や東北地域（遼寧省）などで、 SO_2 汚染に問題があることがわかった。しかもそれらの地域では、一般にもっとも SO_2 排出的と考えられやすい重化学工業のほかに、軽工業や非工業（サービス業や一般家庭）に起因すると見られる SO_2 排出がおおきな影響を持っていた。軽工業や一般家庭における SO_2 排出源はひとつひとつの排出規模は小さいが、数が多くしかも広範囲に分散しているから、対策の施

しやすさという点では、排出源が限られた場所に集中している重工業よりもずっと難しいといえる。

そこで本研究では、中国のSO₂汚染の厳しい地域の中でもとくに遼寧省およびその省都瀋陽市の現状に着目することにする¹⁾。また小規模発生源からのSO₂問題が重要という問題意識から、SO₂排出源となるエネルギー燃焼装置としては重工業から民間にまでもっとも幅広く分布している、ボイラにとくに着目した。いったいボイラは工学的にどのような特性を持っているのかを把握した上で、現在、工学者たちの間で中国のSO₂対策としてどのような方法が有効と考えられているのかをサーベイする。そして遼寧省瀋陽市では、じっさいにボイラの稼動状況がどのようなものであるかを簡単にみしてみる。ただし、中国のボイラの現状に関するデータは非常に限られていて、今のところ十分満足できる分析は不可能であった。その意味で本研究は未完成であるが、しかし今後の研究展開に向けてのファーストステップとして重要な知見を得ることができたと思う。

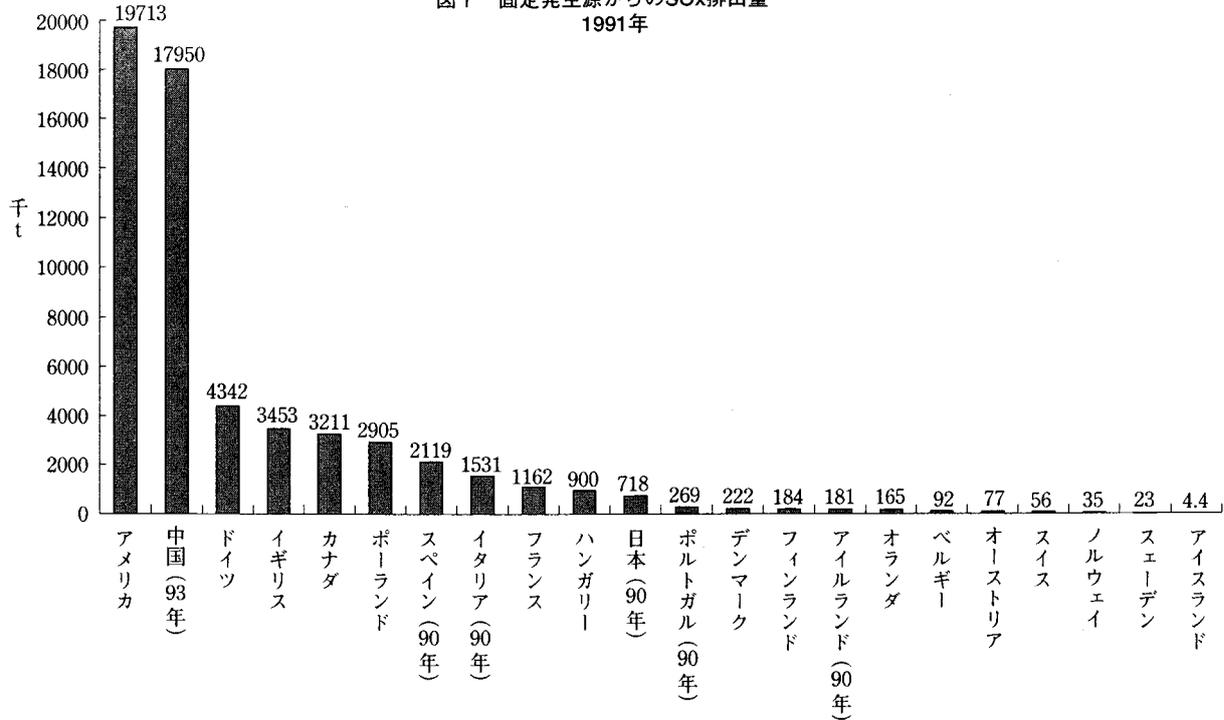
2 統計で見た中国のSO₂汚染問題

2.1 世界の中の中国の状況

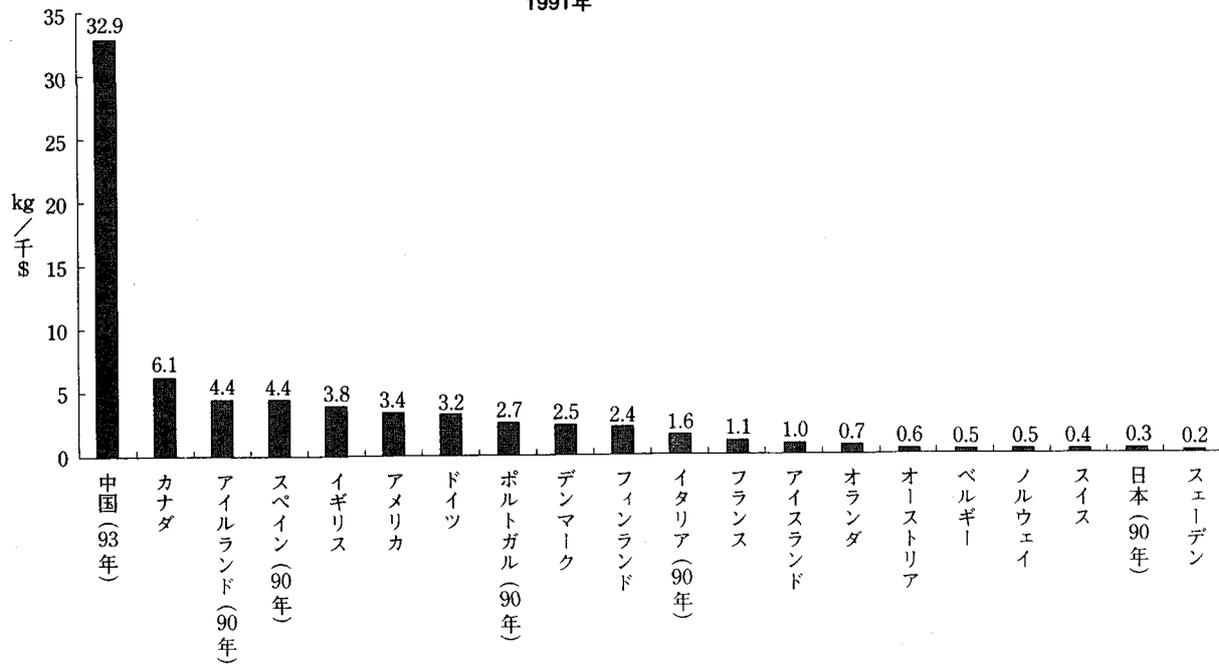
まず、中国のSO₂汚染が国際的に見てどのようなものであるかを見るために、その排出状況をOECD統計と比較してみる。図1によると中国の年間のSO₂排出量は約1800万tであり、OECD諸国中第1位の排出国であるアメリカの2000万tに並んで大きい。OECD第2位のドイツでは、約400万tの排出であるからアメリカおよび中国のSO₂排出は群をぬいているといえる。ちなみに、日本の排出量は年間70万t程度である。

1) これまでに四川省およびその省都成都市の環境問題については、学際的な研究を行っている。文献[2]を参照。

図1 固定発生源からのSOx排出量
1991年



出典：OECD Environmental Data 1995

図2 GDP単位あたりSO_x排出量
1991年

出典：OECD Environmental Data 1995

この数字を経済規模との関係で評価するために、各国の GDP 単位あたり SO₂排出係数を比較したのが図 2 である。すると、同じ1000ドルの GDP を生産するのに排出される SO₂は中国で33kg, アメリカ3.4kg, 日本0.3kg といった水準である。大まかに言って、アメリカの排出係数は日本の10倍、中国は100倍である。また、OECD 諸国中この排出係数をもっとも大きいのはカナダの 6 kg/千ドルであるから、中国の排出係数が群を抜いているということになる。今後、中国は世界の成長センターであることが見込まれるだけに、この事は重大な問題である。

2.2 中国国内の状況

良く知られているように、近年の中国のエネルギー消費量はおおきく伸びており、1978年には5.7億 t (石炭換算値)であったのが、88年には9.3億 t, 93年には10.7億 t と15年間にほぼ倍増している。もちろんその間に名目 GDP はそれ以上に伸びているから、GDP 1 万元あたりのエネルギー消費量は78年の約16t から93年には 4 t 以下と1/4以上落ちている。しかし、絶対量の伸びの大きさとこれからの中国の成長可能性を考えると、かなり厳しい状況といえそうである。さらに中国では、消費エネルギーの 4 分の 3 以上を石炭に依存している。SO₂汚染問題からいうと、固体燃料の石炭は液体燃料の石油にくらべて、燃料中の硫黄分の除去が技術的に難しく、脱硫困難な燃料といわれている。そのような燃料にエネルギー消費の大部分を依存せざるをえない中国の事情が、SO₂問題をさらに大きくしている。

中国国内の経済事情を、『中国国家統計年鑑』によって省別にみてみる。まず、国内生産額でみた経済規模の5大省は、沿岸地域の広東、山東、江蘇省、ついで内陸地域の四川省、東北の遼寧省であり、これら 5 省で中国の国内総生産額の38%を占める。このうち、広東省では第 3 次

産業の比率が34%で他省より高く、江蘇省と遼寧省では第2次産業の比率が57%と高い。また四川省では第1次産業が32%と相対的に高いことが特徴である(図3)。もし、発展段階に応じて産業構造の比重が第1次産業から第3次産業に順次移行するというペティ=クラークの法則が当てはまっているとすれば、中国の経済規模の大きい省には発展の程度に格差があるということになる。また図4では、これらの省の工業生産額とその軽-重工業の構成比率についてみた。すると、四川省、遼寧省は沿岸地域に比べて重工業の比率が高く、とりわけ、遼寧省は工業活動の4分の3を重工業が占めている。国家統計年鑑による分類方法では、重工業にはいわゆるエネルギー多消費型の素材産業(鉄鋼、窯業など)のほかに、機械工業も含まれている。しかし遼寧省の場合、先進的機械工業よりは鉄鋼や化学産業が中心産業であり、工業活動によるエネルギー消費が環境汚染に与える影響は大きいといえる。図5ではこれら経済5大省の1990年から93年にかけての3年間の成長率を示したが、それによると、沿岸の諸省に比べて四川省や遼寧省では成長が遅いことがわかる。

図6と7はこれら5大省におけるSO₂排出状況を示している。まずこれら5つの省は、中国全体のSO₂排出量のうちの38%を排出しており、中でも山東省と四川省の排出量が特に多い。これら2省では非工業活動からのSO₂排出が大きいことが特徴である。²⁾一方、ついでSO₂排出の大きい江蘇省と遼寧省では、排出の4分の3が工業からの排出に占められている。また経済活動1単位当りのSO₂排出量や、SO₂除去率を見ても、広東省を除くと沿岸地域でも良くない状態である。

また広東省においてさえ、SO₂の除去率は27%に過ぎず、排煙脱硫の

2) 文献[2]の研究から四川省についてわかったことは、同省で産出される石炭は他省産のものに比べて硫黄含有率が高く、また同省の人口規模が中国第1位であるため、生活に必要な燃料消費に起因するSO₂排出が大きくなっている。

図3 中国5大省の国内総生産額 (GDP)

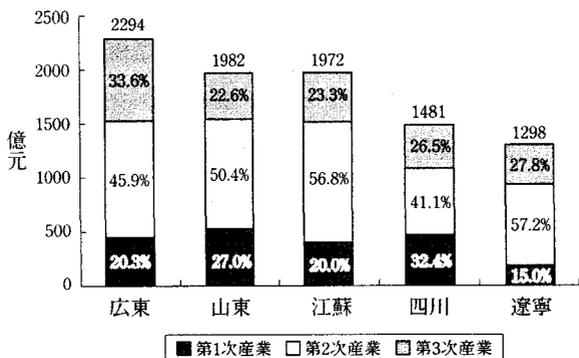


図4 中国5大省の工業生産額

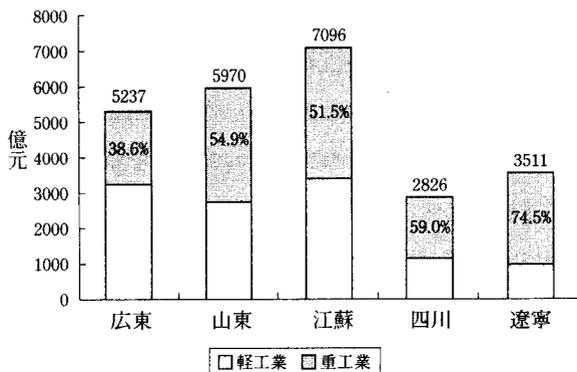
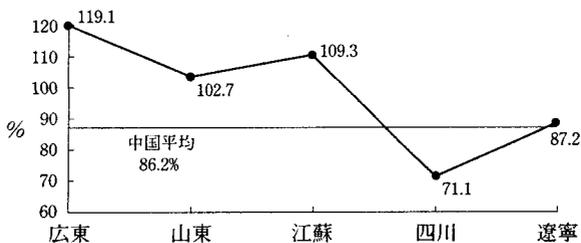
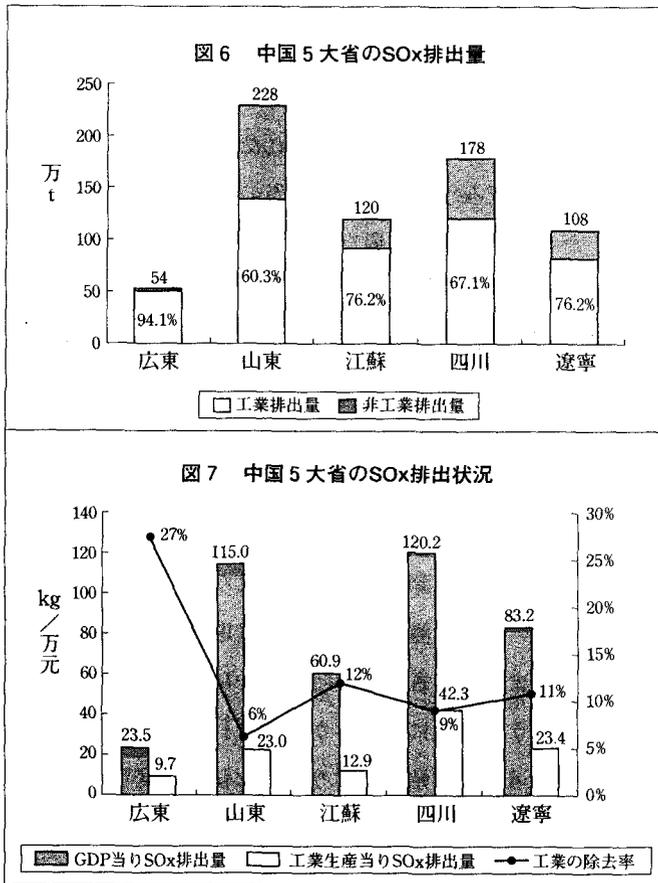


図5 中国5大省の成長率 (1990年~93年)



出典：中国国家統計年鑑1994



出典：中国国家统计局年鑑1994

徹底している日本の状況に比べると改善の余地が多そうである。

このように、中国におけるSO₂対策は残された問題の方が多いという状況だが、沿岸地域についていえば、経済のダイナミズムに比較的富んでいて、日本をはじめ外国企業の直接投資なども活発であることを考えると、楽観はできないものの、ある程度経済メカニズムの中で対策が進んでいくこともありえるだろう。つまり、同地域では直接投資などの

過程で海外の先進的な環境保全技術が導入されていく可能性があり、また産業構造が軽工業に比重をおいていることも楽観的要素となる。それに比べると、四川省や遼寧省では重工業偏重の産業構造である上に、活発な成長や外資の進出からやや取り残された感があり、問題はより深刻といえるのではないだろうか。これらの省の環境対策については、より政策的な“上から”の誘導が重要な意味を持つと思う。

そこでつぎに、中国国内でも第2次産業比率が高くしかも重工業の占める割合がきわめて大きい遼寧省について、やや詳しく見ていきたいと思う。³⁾

3 遼寧省の状況

遼寧省は旧満州国であり、その省都瀋陽は旧奉天である。遼寧省は土地がやせているが、鉱物資源が豊かであったため、古くから重化学工業が盛んであった。いまでも瀋陽では、かなり旧式の工場設備が以前のまま使われている。また遼寧省には瀋陽のほかに大連、鞍山などの大きな都市がある。そのうち大連には日本からの直行便もあり、そのため近年海外直接投資が軌道に乗り始めており、また鞍山は遼寧省全体の鉄鋼業生産のうち56%を占める重工業都市である。図8に見るとおり、遼寧省では過去から一貫して第2次産業が経済成長を牽引してきた。さらに図9のとおり、毛沢東時代の大躍進の政策以来、一貫して重工業偏重の政策が取られおり、工業活動の4分の3以上が重工業である。しかも近年の改革・対外開放政策の中で、その傾向はさらにつよめられている。

環境問題についていうと先に見たように遼寧省のSO₂排出量は年間

3) 文献[2]で一方の四川省に関して必要と考えられた政策としては、同省は中国唯一の天然ガスの産地であることから、硫黄含有率の高い石炭に替えて天然ガスを普及させること、工業よりは民間、重工業よりは軽工業やサービス業のSO₂排出問題が深刻であったことから、それら小規模発生源の対策を優先させること、などがある。

図8 遼寧省の国民総生産指数(1952=100)

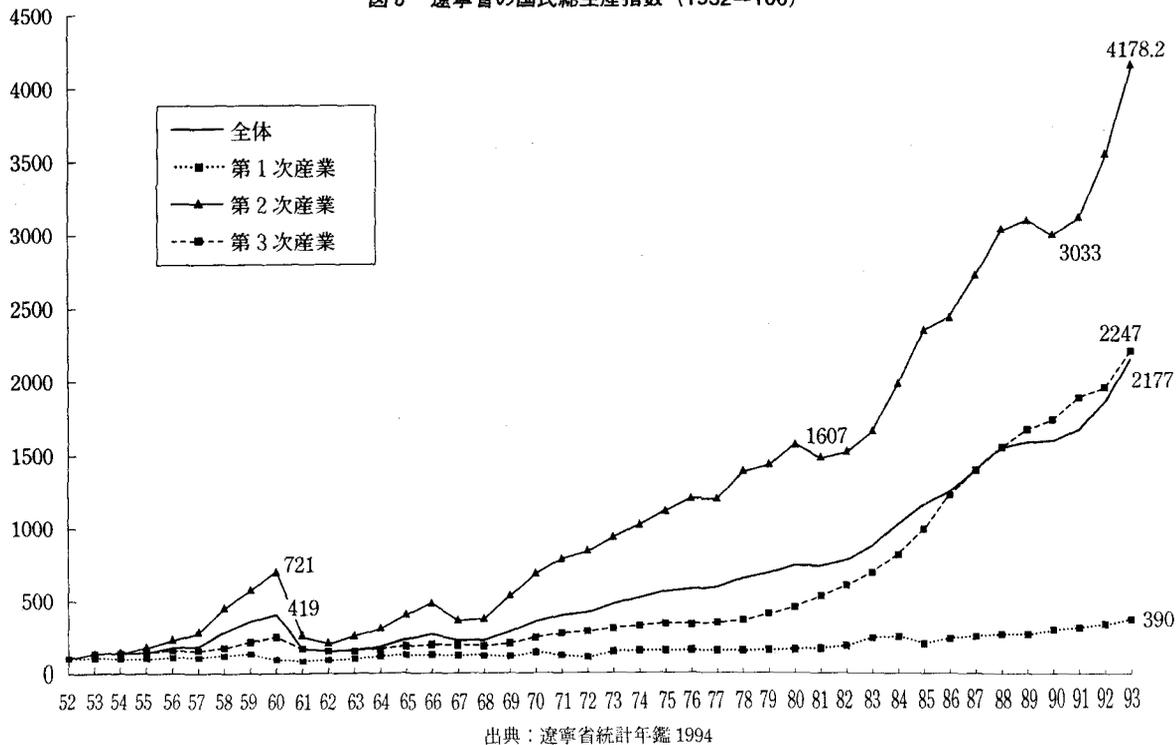
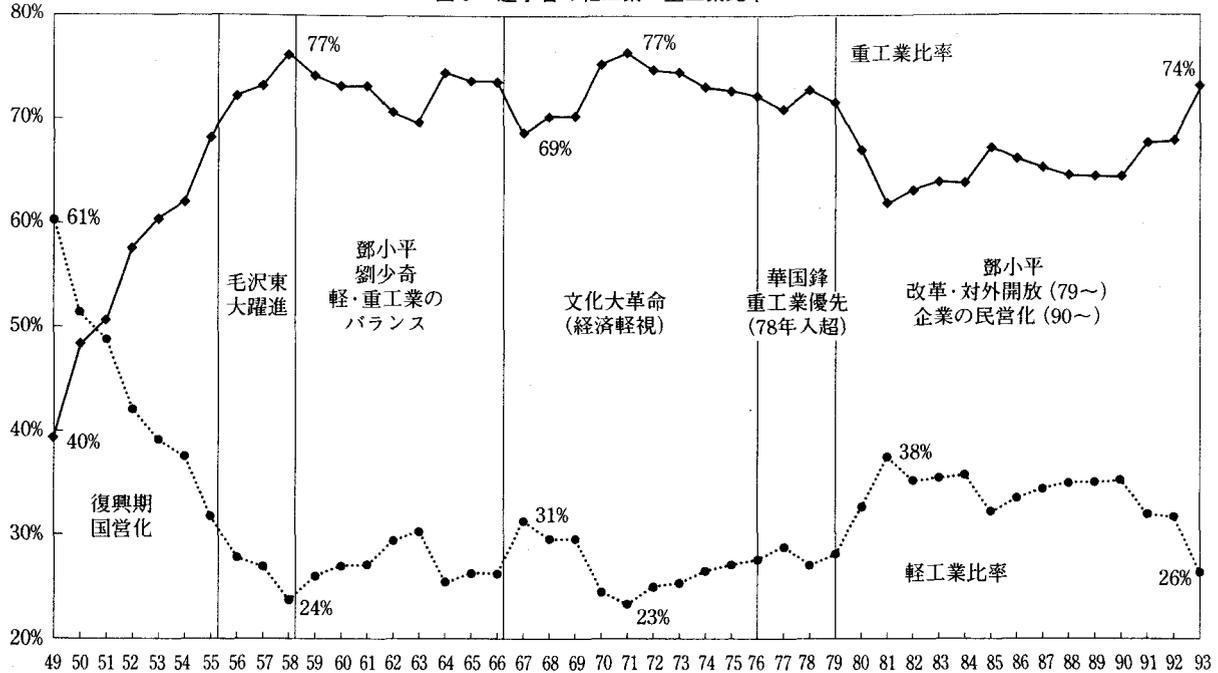


図9 遼寧省の軽工業—重工業比率



出典：遼寧省統計年鑑1994

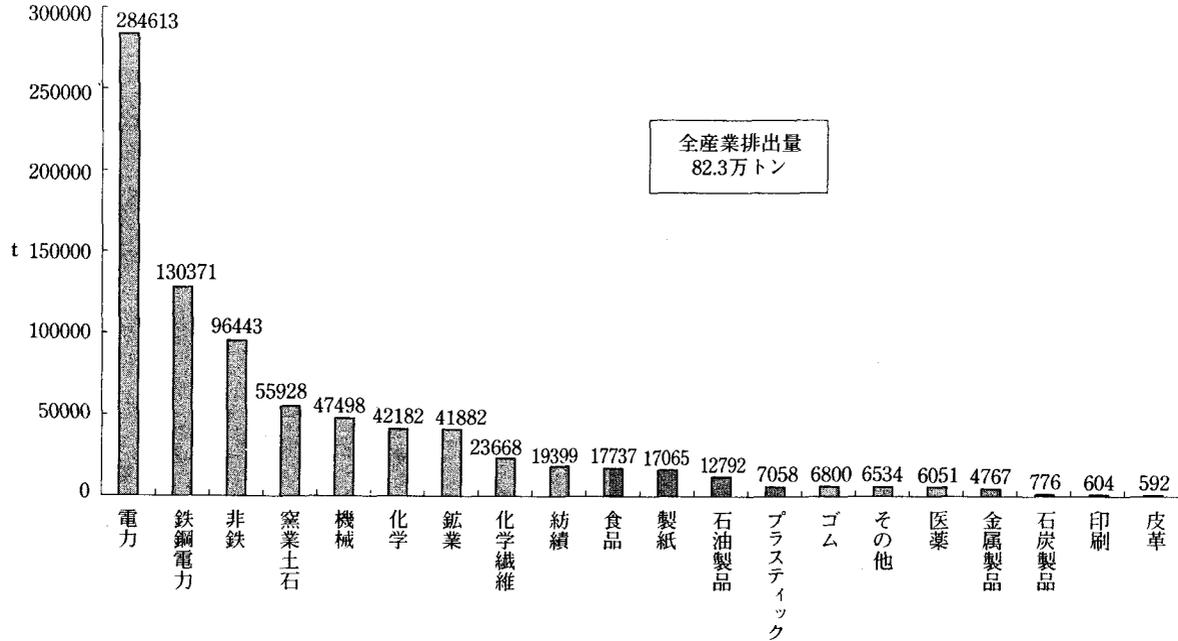
108万tであり、これは日本全体の年間排出量の1.5倍である。また、排出量のうち4分の3が工業からの排出であるが、工業生産単位あたりの排出係数をみると遼寧省は沿岸地域の広東省や江蘇省の2倍近く、またSO₂の平均除去率は11%で広東省の23%と比べると低かった。図10では同省内のSO₂排出状況を産業別に図示した。すると、発電からの排出が28.5万tと最も多く、全工業排出の34.6%を占めている。それに続いて鉄鋼、非鉄、窯業土石などのエネルギー多消費型重工業からの排出が多く、これら4つの産業だけで遼寧省の工業全体にしめる70%のSO₂排出を説明することになる。

つぎに図11から13で、遼寧省の中の経済規模の3大都市の状況を見てみる。図11の国内生産額では、省都の瀋陽市が遼寧省中第1位の規模である。産業構成比を見ると瀋陽市では他の2都市に比べて第2次産業比率が低く第3次産業比率が高くなっている。また工業生産に限ってみても、瀋陽市はやはり全省中第1の生産額であり、そのうちの75%が重工業に占められている(図12)。しかしこの重工業比率は、鞍山の92%に比べれば低い値である。

SO₂排出についてみると瀋陽市からの排出は22万tで、遼寧省全体の21%を占め、省内第1位の排出都市である。また、GDP単位あたりのSO₂排出係数を見ると55kg/万元となっており、これは大連の24kg/万元、鞍山の36kg/万元と比べてたかくなっている。

このように重工業中心の遼寧省の中でもとくにおおきなSO₂排出都市である瀋陽市について、いったいどのような状況なのか、そして改善策としては何が望ましいかを探るために、瀋陽市が市中のボイラの分布や稼動状況について行った調査がある。ボイラについてとくに調査がされた理由は、ボイラがSO₂排出源となるエネルギー燃焼装置としては、大規模な工場から民間にまで広く使われている装置だからである。この

図10 遼寧省の産業別SOx排出量



出典：遼寧省統計年鑑 1994

図11 遼寧省3大都市の国民総生産

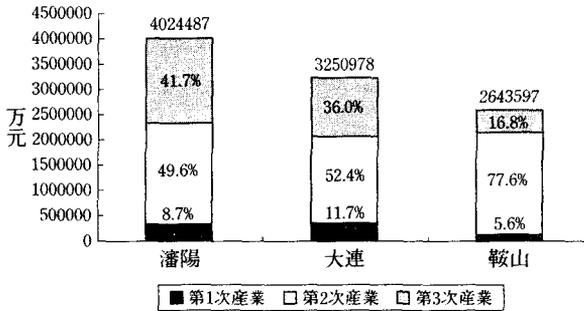


図12 遼寧省3大都市の工業生産額

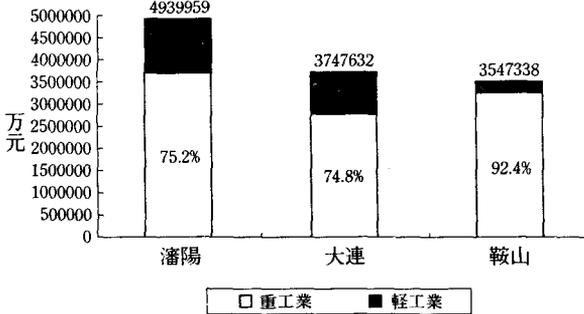
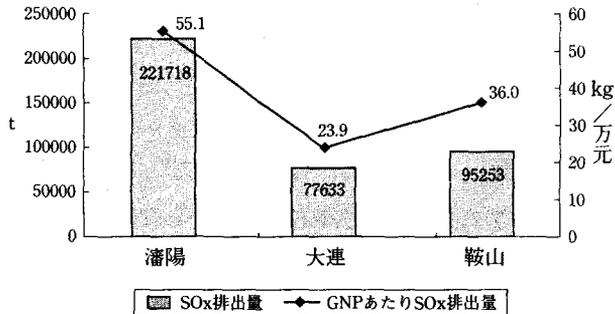


図13 遼寧省3大都市のSO_x排出量



出典：遼寧省統計年鑑1994

調査は、完全な結論を得るにはなお不十分な面が残されているが、それを分析することで瀋陽市ひいては中国の工業が抱える問題をある程度明らかにできるだろう。しかしその分析について述べる前にまず、ボイラとは何か、またそれを稼働させる際にどうしたらSO₂排出を少なくできるかという問題について、工学分野の研究をサーベイしておきたい。

4 ボイラについて

先に述べたとおり、ボイラは大規模工場から小規模工場や家庭まで広く使われているエネルギーの燃焼装置である。そこで中国のエネルギー問題、環境問題改善に対する具体的施策を検討するにあたり、まずボイラをその検討課題として取り上げる。本章では、ボイラの技術的特性やSO₂排出削減のための具体策について、工学的分野の情報を報告する。このうち、SO₂削減策にはつぎの2とおりがある。

1. SO₂排出の原因となる燃料の使用量を減らすための省エネルギー対策を行う。
2. 燃料または排煙の脱硫という、SO₂除去策を行う。

以下では、まず第1節でボイラそのものの分類について述べたうえで、第2節で第1のSO₂削減策としてのボイラのエネルギー効率の改善対策について、また第3節で第2の削減策として中国で実現可能な脱硫技術について現在開発中のものも含めて概観する。

4.1 ボイラの分類

ボイラは本体の型式あるいは燃焼方式のちがいに応じて、次のように分類される。各分類と、それぞれの特徴は以下のとおりである。

1. 本体型式による分類
 - (a)丸ボイラ (立てボイラ, 炉筒煙管ボイラ等)

- (b)水管ボイラ（ドラムが1つのもの、2つのもの）

2. 燃焼方式による分類

- (a)ストーカ（火格子）式（固定、れん条、揺動、往復動、下込め等）
- (b)流動層燃焼
- (c)微粉炭：効率は良いが、設備費、運転費が高価。

文献 [3] にしたがって、各ボイラの特徴をまとめると次のとおりである。まずボイラの形式別に、丸ボイラは低圧小容量の用途に適し、水管ボイラはさらに細かい形式の違いによって小形から高圧大容量の用途にまで用いられる。

また燃焼方式の違いから、各特徴をまとめると以下のとおりである。

1. ストーカ式

- (a)中小容量ボイラに適している。
- (b)動力費が少ない。
- (c)フライアッシュが少ない。

2. 流動層燃焼

- (a)低温燃焼なので、NO_xの発生を小さくできる。
- (b)石灰石を石炭に混入することで、炉内脱硫が可能である。（日本のあるメーカーの循環式流動層ボイラにおける実験では、最大80～90%の脱硫効果が得られた。また一般的には50～60%の脱硫効果があり、これは乾式脱硫装置を取り付けたのと同等の効果である。湿式脱硫装置によれば95%以上の脱硫効果があるが、この場合ボイラで取り出されたエネルギーの7～8%が脱硫のための動力として使われる。）
- (c)低炭質の石炭に有効。
- (d)大規模な石炭粉碎装置がいらないので、設備費や動力費が節約

できる。

3. 微粉炭燃焼

- (a)燃焼効率が低い。
- (b)低炭質でもよく燃焼しうる。
- (c)設備費，維持・動力費がかさむ。

4.2 ボイラ効率とその改善策

ボイラでは，投入された燃料のエネルギーは蒸気として回収されるか，排ガスの熱として失われたかのどちらかである（そのほかボイラの装置表面からの放熱などもあるが，これはネグリジブル・スモールである）。そこでボイラ効率の計算には，

1. 投入エネルギーに対して蒸気として回収されたエネルギーの比率を求める方法（直接法，入出熱法）
2. 投入エネルギーに対して排ガス熱として失われたエネルギーの比率を求め，その1からの残差として間接的に求める方法（間接法，熱損失法）

の2つがある。それぞれの計算方法は以下のとおりである。

1. 入出熱法によるボイラ効率 η_1

$$\eta = \frac{(h_s - h_w) \cdot S}{Q}$$

ただし h_s ：発生した蒸気1 tあたりのエンタルピ

h_w ：水1 tあたりのエンタルピ

S：発生蒸気量 (t)

Q：投入した燃料の熱量

2. 熱損失法によるボイラ効率 η_2

(a)燃料組成に基づいて，燃料1単位をちょうど燃焼させるのに必

要な理論空気量 A_0 を計算する。

- (b)実際に1単位の燃料を燃焼させることから発生した排ガス量 G を調べ、理論空気量 A_0 に対する実際の排ガス量 G_{pm} の比 (空気比 m) を計算する。
- (c)空気比 m に対する低圧比熱 C_{pm} を求める。
- (d)次式から効率を計算する。

$$1 - \eta_2 = \frac{G \cdot C_{pm} \cdot (T - T_0)}{q}$$

ただし G : 燃料単位あたり排ガス量

m : 空気比

C_{pm} : 所定の空気比のもとでの低圧比熱

T : 廃ガス温度

T_0 : 大気温度 (25°C)

q : 投入燃料1単位あたり熱量

このうち第1の入出熱法による測定の方がより直接的な方法といえるが、それに必要な情報の収集が難しい。それに対し第2の熱損失法による測定に必要な情報は比較的収集しやすいため、市全体のボイラ効率について広範に検討したいという場合にはこちらの方法をとる方が現実的である。しかしながら、現状では中国のボイラについて第2の方法の測定を行うにも十分な情報が得られていないため、今後さらに情報収集に努力していきたいと考えている。

ただし文献 [3] [4] [5] によれば、ボイラの型式別、燃焼方式別のボイラ効率は表1～2のとおりである。表によるとボイラの型式別には、同じ丸ボイラでも立てボイラより炉筒煙管ボイラの効率の方が良く、水管ボイラでは大形のほうが効率がよい。また燃焼方式別には、同じストーカ形式でもチェーンストーカよりは階段式の方が良く、流動層ボイ

表1 ボイラの型式別効率比較

型式		ボイラ効率
丸ボイラ	立てボイラ	55～70%
	炉筒煙管ボイラ	75～85%
水管ボイラ	小形	75～88%
	中大形	85～92%

文献 [4]

表2 ボイラの燃焼方式別効率比較

燃焼方式	ボイラ効率
チェーンストーカ*	53.2～57%
段階式ストーカ*	68.4～78.2%
循環式流動層**	89.5%

*文献 [5]

**メーカー資料よりの試算値

ラはさらに良い。

さてSO₂削減策において、間接的ではあるが基本的な対策として、省エネルギー対策がある。SO₂は燃料中に含まれる硫黄分が燃焼によって空気中の酸素と結合することから発生するのであるが、そもそも燃料を使う量が小さければ発生するSO₂も少ないはずである。ボイラにおける省エネ効果は、上の1または2の方法で計算されるボイラ効率の上昇という形でとらえられるが、文献 [4] によるとそれはつぎのような方法で改善され得る。

1. 空気比の改善
2. 放散熱量の低減
3. 排熱の有効利用

このうち1. については燃料を燃やすために空気比を大きくすると、その分だけ排ガス量が増えるため、それによる熱損失が大きくなる。したがって、空気比を正確に制御すると熱損失が削減され、ボイラ効率があがる。しかしもし性能の良くない炉において、空気を無制限に送り込

むことで石炭を完全燃焼させようとする、熱効率は非常に悪くなる。

2. の放散熱量の低減についてであるが、これは炉壁断熱の改良、燃焼炉における挿入・抽出扉からの空気侵入の低減が有効とされる。四川省成都市における調査によると、ボイラ操作者の知識不足から石炭挿入口を開けっぱなしにしたまま操業をしているケースの多いことが指摘されている。

3. の排熱の有効利用については、エコノマイザー（節炭器）や空気余熱器がある。これらの装置は排ガスの余熱を利用して、ボイラの給水を予熱したり、燃焼用の空気を予熱したりするもので、これによって排ガスのもつ熱エネルギーを回収することができ、省エネ・ボイラ効率改善ができる。文献 [3] によれば排ガス温度を10度下げると、ボイラ効率が約10%改善されるということである。さらに、燃焼装置がとくに大量の排ガスを発生させる場合には、排熱ボイラを併設することが望ましいとされる。しかし、排ガスの熱回収は必ずしもすればするほど良いというものではなく、ガス温度は最低120°C以上、できれば170°C以上が望ましいとされる。というのは、ガス温度が120°C以下になると、排ガス中に含まれるSO₂から高い濃度の硫酸が生成され、装置の金属面を著しく腐蝕してしまうからである。

ところでボイラの効率は空気比をおとし、排ガス量を減らすことによって改善されると述べたが、東京都における調査によれば、ボイラは大型になるほど空気比が小さくなることが観察されている（文献 [6]）。表3の3欄ではボイラの容量（1時間あたり蒸気発生量 t/h）が大きくなるに連れて空気比がどの程度減少するかを、東京都の液体燃料ボイラの調査結果をもとに示している。そのとき、ある仮定のもとで熱損失法を用いてボイラ効率を計算すると、一番大きいボイラと小さいボイラでは4%程度、効率が違ってくる。

表3 容量別ボイラ効率の試算結果

ボイラ容量 t/h	酸素濃度 %	空気比 ⁽¹⁾	石炭当り 排ガス量 m ³ N/kg	(仮定) 低圧比熱	ボイラ 効率 ⁽²⁾ %	(相対比)
～3	10.9	2.08	16.61	1.37	89.95	0.96
3～8	9.7	1.86	14.87	1.37	94.00	0.97
8～30	7.4	1.54	12.39	1.36	92.56	0.99
30～	5.4	1.35	10.82	1.35	93.55	1.00

(1) 昭和58年の東京都の調査における液体燃料ボイラに関する平均値

(2) 遼寧省産の石炭(大同炭)を使うことを仮定
排ガス温度=150度として計算

以上で注目されることは、ボイラの効率はとりわけ大きな設備の入れ替えをしなくても、空気比を正確にするよう注意したり、石炭の挿入口をこまめに閉めるなどの管理を徹底することだけでも改善できる、ということである。つまり、燃焼装置や燃焼状態の適切な管理能力—熱管理技術—が、ボイラ効率上昇のための重要なファクターと考えられる。日本では昭和54年6月に省エネルギー法が施行され、大量のエネルギーを所定基準以上に消費するような工場を“熱管理工場”として指定し、そこではエネルギー管理者を選定しなくてはならないことを義務づけた。このように熱管理を徹底するだけで、石油ショック以降、鉄鋼産業では約30%のエネルギーを節約できた、という報告もある(文献[7])。

熱管理による省エネは設備投資はゼロに近いと考えられるから、資源の乏しい発展途上国において、まずとられるべき対策であろう。そのうえでさらにエコマイザーなどの装置を取り付ける、なるべくボイラの設置を地域的に集約化して大型化をはかる、流動層などの新しい技術を導入する、などの積極策が打ち出されていくことが望ましいだろう。

なお、参考までに日本の各産業で使われている自家発電用あるいは生産工程用ボイラでは、どのどのボイラ効率が達成されているかを、マクロデータに基づいて入出熱法により試算した。計算に用いたデータ

表4 日本の製造業のボイラ効率

	自家発電	生産工程	
	ボイラ 1基当り 平均容量 t/h	ボイラ 1基当り 平均容量 t/h	ボイラ 効率* %
12 食料品	39.1	3.3	93
13 飲料・たばこ	36.0	5.8	97
14 衣服・その他の繊維製品	25.8	5.1	93
15 繊維工業		4.9	61
16 木材・木製品	27.5	5.8	1151
17 家具・装備品		2.7	206
18 パルプ・紙・紙加工品	90.1	7.1	102
19 出版・印刷・同関連		3.9	86
20 化学	121.4	6.4	112
21 石油製品・石炭製品	109.0	22.9	112
22 プラスティック製品	52.5	4.6	90
23 ゴム製品		5.2	94
24 なめし革・同製品・毛皮		4.2	77
25 窯業・土石製品	63.6	3.5	101
26 鉄鋼	142.8	9.7	98
27 非鉄金属	38.6	4.6	101
28 金属製品		2.3	
29 一般機械器具		4.7	
30 電気機械器具		4.3	
31 輸送用機械器具	38.1	7.31	95
32 精密機械器具		3.0	
33 武器		6.0	90
34 その他の製造業		3.1	

*自家発電用と生産工程用の平均値

【石油等消費構造統計】に基づいて入出熱法により計算

投入エネルギー量に廃材、廃熱による分は含まれていない

は平成2年『石油等消費構造統計』であり、その結果は表4に示されている。表中、空欄の部分はオリジナルデータが秘匿値となっていて計算ができなかった。結果をみると、ボイラ効率が木材関係の産業を中心に100%を大きく超えてしまっている。これは本計算の投入エネルギーのなかに廃材やごみの燃焼エネルギーや廃熱エネルギーなどが含まれていないためとみられる。いずれにしても、日本の産業用ボイラの効率はか

なり良く、廃棄物等の有効利用によってさらに化石エネルギーの節約効果をあげているようである。たとえば食料品産業では生産工程用のボイラの蒸気発生量は平均3.3t/hと小さいが、効率は93%となっている。しかしそれでも、衣服・その他の繊維製品の61%やなめし皮・同製品・毛皮の77%のように、平均ボイラ効率の低い分野もある。

4.3 脱硫技術について

さてSO₂削減対策において、ボイラ効率をあげることは省エネを通じて非常に大きな効果を持つが、より積極的な対策としては脱硫技術の導入が望ましい。文献[8]によれば、脱硫を行う方法には、つぎのようなものがある。

1. 燃料を燃やす前に工夫する。
 - (a)燃料から硫黄分を除去する。
 - (b)燃料に脱硫剤を混ぜる。
2. 脱硫剤を炉内に投入し、燃料の燃焼と同時に脱硫する。
3. 燃焼後、排煙脱硫する。
 - (a)湿式（吸収液にSO₂を吸収させる。）
 - (b)乾式（固体の吸収剤にSO₂を吸収させる。）
 - (c)半乾式（乾式の効率の低さを補うために煙道に水を散布する。）
 - (d)その他の新しい方法

まず、1-aについて燃料から硫黄分を取り除く方法としては、物理的に除去する、化学的に除去する、生物を利用して除去する、という方法があるが、それぞれ十分な脱硫が不可能、コストがかかる、時間がかかるといった欠点がある。また1-bについて、燃料の石炭を粉碎し脱硫剤（石灰石）を混ぜて固めたものをブリケット呼ぶが、石炭をそのまま使わずブリケット化することによって脱硫ができる。ブリケット化

では燃料の大きさがそろえられるため、脱硫と同時に燃焼効率をあげることができる。

次に2についてであるが、これは流動層燃焼や微粉炭燃焼の方法がとられる場合に用いられる。しかし現段階ではまだこれらの方法に、技術的課題も残っている。

3. の排煙脱硫のうち、湿式脱硫はもっとも脱硫効率が高く（90～99%）優れているが、大量の用水が必要、ランニングコストが高いなどの問題がある。乾式脱硫は、用水を必要としないという利点はあるものの、必ずしも十分な脱硫効果が得られない。その他の新しい方法としては、乾式脱硫の脱硫剤を微粒子化して脱硫効率をあげようとする超微粒子法、コークス炉ガスから回収されたアンモニアなどを利用した脱硫方法などがある。とくにアンモニアによる脱硫では脱硫の副生物として硫安が製造されるが、これは肥料として商品価値をもつため脱硫を行うことが経済的なプラス効果をももたらす。しかし、これらの方法はまだ実用レベルにはなく、今後の技術開発が期待されている。

しかしどの方法によるにせよ、脱硫をするには少なくとも大きな初期投資が必要である。したがって費用と脱硫効率との兼ね合いで、中国の国情に見合う方法を模索していく必要がある。技術者たちによって良いと推奨される脱硫方法は、まず発電所などの大規模発生源においては、排煙脱硫の湿式法、半乾式法、超微粒子法、アンモニア脱硫法である。また中小規模の発生源においては、半乾式の排煙脱硫、流動層ボイラ化、燃料のブリケット化が実現可能性もあり良いとされている。それぞれの方法をとった場合の脱硫効率と脱硫費用を表5-1と5-2に示す。中小規模発生源においては、燃料のブリケット化がコストも極端に安く、中程度の効率も得られることから望ましい方法と考えられる。これに加えて最近では、“バイオブリケット技術”の研究が進められている。これ

表 5-1 大規模発生源における排煙脱硫法

	湿式法	半乾式法	超微粒子法	アンモニア 脱硫法
脱硫率	90%	80%	70%	70%
脱硫費 (円/kWh)*	0.782	0.282	0.140	-0.126**

文献 [8]

* 中国で脱硫を行った場合の発電単位あたり費用

** アンモニアはコークス炉からの余剰を利用。

副生物の硫安は販売し収入を得る。

表 5-2 中小規模発生源における脱硫方法

	半乾式 排煙脱硫	流動層 ボイラ化	ブリケット化
脱硫率	80%	80%	60%
脱硫費 (円/t)*	2020	2328	380

文献 [8]

* 中国で脱硫を行った場合の石炭 1 t あたり費用

は粉碎した石炭におがくずや稲わら等の農業廃棄物と消石灰を混合し高圧で成型するという技術である。この方法で造られたブリケットによれば約90%の脱硫効果が得られるばかりでなく、廃棄物の有効利用、石炭使用量の削減といった効果も見込まれる。また、このブリケットによると他の健康有害物質の発生も相当に押さえられるという。今後中国の経済成長がさらに持続するとすれば、このような技術の早期実用化が望まれる。

5 遼寧省瀋陽市のボイラの状況

先に中国の中でも有数の重化学工業地域である遼寧省およびその省都瀋陽市の経済と環境の状況を公表データに基づいて見てきたが、そこでのSO₂排出状況はあまり良いとは言えない状態であった。中国の工業地域におけるSO₂汚染といっても、いったい何が根本的な要因なのか、どこにどのような対策をすればもっとも効果的なのかを探るために、こ

ここでは瀋陽市の中心部について行われたボイラの実態調査の結果を整理してみたい。

瀋陽市は中心市街区5区と郊外4区、および4つの県から成り、総人口は658万人、そのうち約半数が中心5区に居住する。まず、瀋陽市当局の調査によると瀋陽全体のSO₂排出22万tのうち、中心市街区の和平区、瀋河区、大東区、皇姑区、鉄西区の5区における排出量は16万tで、市全体のほぼ4分の3の排出が中心地域からなされている。さて、これらの中心地域について瀋陽市では、SO₂排出源となる燃焼装置としては発電所から民間にまで最も広範に分布しているボイラについて、地区別調査を行った。すなわち、市内各区をさらに小地区に分けて、その小地区内に存在するボイラの台数、容量（1時間当たり蒸気発生量t/h）、年間石炭消費量、SO₂排出量などが報告されている。また、中心地域に立地する「重点企业」と認定された約70企業について、それらが保有するボイラを含むSO₂排出源に関して、稼動時間、石炭消費量、排煙温度、SO₂排出量等を別途調査したり。これらの調査によってカバーされるSO₂排出は、ボイラの地区別調査については中心地域からの全排出量（16万t）のうちの56%、重点企业調査については87%である。

まず、ボイラの地区別調査に基づいて、ボイラの台数、容量（t/h）、年間石炭消費量の分布を比較すると、石炭消費量は発電所が立地する大東区と鉄西区に集中している反面、台数と容量は比較的平均に5つの区に散らばっていることが見られた。ただし、石炭消費量では全体の10%を占めるにすぎない和平区に、台数では31%ものボイラが集中していることは注目される。

さらに各区のなかで地区別に、ボイラの1台あたり平均容量（t/h）を

4) ただしこれらの調査で報告されているSO₂排出量は石炭消費量に一律のSO₂排出係数をかけたものである。

計算し、平均容量階級別に地区の頻度分布（すなわちボイラの平均容量がどの程度である地区がもっとも多いか）をみたところ、繁華街である和平区、瀋河区では平均容量が比較的小さい（平均2.1～2.6t/h）地区の数が多く、重点企業の多い工業地域である大東区、皇姑区、鉄西区には平均容量が相対的に大きい（平均3.7～4.8t/h）地区数が多かった。このうち、鉄西区では平均容量が大きな地区もある反面、比較的小さな地区が多いことも注目された。大東区、鉄西区で平均容量が特に大きい地区が見られたが、これは同区に発電所があるためと考えられる。参考までに表4の日本の製造業における1基当りボイラ容量（生産工程用）の平均値を見ると、軽工業の食料品で3.3t/h、繊維で5.1t/h、また重化学工業の化学6.4t/h、鉄鋼9.7t/hといった水準であった。瀋陽市と日本についてのこれらの数字を直接に比較することには限界があるとしても、瀋陽市にあるボイラの規模は小さいものが多そうだと推測される。

瀋陽市中心部のボイラについて以上をまとめると、和平区のような繁華街には民生用と思われる小規模ボイラが多数偏在すること、中心的工業区である鉄西区でも比較的小規模のボイラが多いことなどを問題点として指摘できるだろう。前に見たとおりボイラは大規模である方が燃料効率が良く、またSO₂対策も施しやすいといわれていることから、これらの観察事実は今後注意深く検討されていかなければならない問題点と思われる。また、同調査によるとボイラの平均容量がおよそ4倍になると、平均石炭消費量はおよそ8倍になるといった関係が見られる。この事は大型ボイラほど稼働率が高いのではないかということ、逆に言えば中小ボイラの中には低い稼働率のものがある可能性を示していると考えられる。もしそうだとすれば、あまり使われていない中小ボイラの地域的な共同利用等を考えることにより、ボイラ的大型化をはかり、熱効率とともにSO₂除去効率を改善していくというような対策が効を奏す

るかもしれない。

つぎに重点企業に関する調査結果について試みる。それによると、重点企業は大東区、皇姑区、鉄西区に集中しているが、大東区、鉄西区の発電所以外に大きなSO₂排出源となっているのは皇姑区の一般機械、輸送機械、鉄西区の一般機械などの工場である。瀋陽市には鉄鋼など基礎素材関係の大規模工場はあまりなく、発電所を除けば機械産業が主要エネルギー消費産業となっている。機械産業は基礎素材産業に比べると、クリーンな産業であり、また生産額単位あたりのエネルギー消費係数は小さいと考えられるから、このような状況は今後の瀋陽市の環境改善成果に明るい見通しを与えていると思う。

ただ、重点企業調査の結果には重要な問題点も見出される。それは、第1に排煙温度が145～150度と低いこと、第2は石炭1tの消費に対する排気量が平均6910m³と小さいことの2点である。まず排煙温度についてであるが、排煙による無駄な放熱が少なくなるという意味では温度が低いことはよさそうに思われるが、先にみたとおりあまり温度が低いと機器の金属腐食が引き起こされる。文献〔3〕によれば、排煙温度が120度以下だとそのような腐食が起こるため、腐食防止という観点からは温度は170度以上であることが望ましく、もし150度以下ならば機器に腐食防止策を施すことが必要であるとされている。瀋陽市でそのような防止策が取られているかどうかは不明であるが、もし取られていないとすれば機器の劣化につながり、燃焼効率や環境保全に大きな影響を与えるかもしれないので注意が必要であろう。

また石炭1tあたりの排気量についてであるが、瀋陽地区でもっとも多く使われているのは大同炭と呼ばれる石炭であるが、この石炭を1t燃やすためには、理論上7890m³の空気が必要である。7890m³は石炭の完全燃焼のためにどうしても必要な極限值であり、日本では通常そのよ

うな量の1.3倍程度⁵⁾の空気が送入される。送られた空気は排煙となるから、排煙量が燃焼に要した空気量とみてよい。瀋陽市ではその排煙量が燃焼に必要なとされる量を下回るということについて、なぜそのような調査結果となったのかを今後調べていく必要がある。

現在のところ瀋陽市で操業している個別ボイラに関する詳しい情報はほとんどない。ただし、ボイラ容量の大きい(10t/h~35t/h)いくつかの事例について、そのボイラ形式を報告した記録がある。それによると、これらのボイラはすべて水管ボイラであり、燃焼形式としては30事例中21例がチェーンストーカ、4例が固定ストーカ、5例が流動層である。中国において望ましいとされる流動層ボイラの普及はあまり見られないようである。さらに現地の報告では、流動層ボイラの使用目的は燃料効率の改善でもSO₂の削減でもなく、ストーカ式のボイラでは使用できないような劣悪な石炭を使うことにあるという。このように現在のところ流動層ボイラは、普及率があまり高くないばかりでなく、その本来の機能を十分発揮しているとは言えない状況といえそうである。

6 今後の展望

以上をまとめてみる。まず中国のSO₂問題を解決するための対策として技術者の間で考えられているのは、ボイラ効率の改善という観点から、1. 燃焼設備の大型化、2. 熱管理技術の徹底、また脱硫という観点から、3. 燃料の改善、4. 排煙脱硫の促進、である。

これらの対策と瀋陽市の現状を考え合わせた場合、有効と思われる具体策としては、まず1. について、大型化によりボイラの燃焼効率が良

5) 送入される空気量は多くても少なくともいけなく、多すぎると排煙量が増え、排煙による放熱で熱効率が悪くなる。また少なすぎると不完全燃焼になり、燃料の無駄遣いを引き起こす。このように、燃焼に際してちょうどよい空気を送ることができるよう、細かな監視をすることはエネルギー効率に大きく影響する。

くなることから、稼働率の低い小規模ボイラを地域的に集約化して、大型ボイラの共同利用等を進めていくことである。つぎに2. については、排煙温度、送入する空気量の管理などを行えば、ボイラそのものを新設しなくても運用上の注意によってエネルギー効率を改善できる。さらにきめ細かい管理は、装置の耐久性も高めていくであろう。設備費に比べて人件費の割安な中国では、このような努力は比較的しやすいのではないだろうか。また3. については、現状ではやはり数の多い小規模ボイラにおけるSO₂対策として、石炭のブリケット化が急がれるべきであろう。もちろんブリケット化による脱硫効率はたとえば日本の湿式脱硫などに比べればかなり劣るが、極めてやすいコストである程度の脱硫効果が期待できるという意味で中国の現状にふさわしいといえるだろう。最後に4. については、中国にふさわしい排煙脱硫の方法として流動層ボイラが推奨されている。流動層ボイラは、脱硫費用が安く、また質の悪い石炭でもある程度の効率が期待できるためである。しかし、瀋陽市では現在のところ流動層ボイラはまだその機能を十分発揮する形では使用されていないようであり、今後、日本等の援助を通じてこのような装置が普及していくことが望まれる。また日本などの先進国は、たとえば流動層ボイラの開発研究のように、本国では必ずしも適用できなくても、中国には非常に有用と考えられるような環境技術の開発研究に取り組んでいくべきであると思う。

現段階では、まだデータも十分ではなくこれ以上の詳しい考察は不可能であった。しかし今後、さらに各方面の情報収集を通じて、以上のようなSO₂対策の実現可能性、実現に必要な具体的方法、実現によって得られる効果などについて、さらに研究を進めていきたいと考えている。また中国ばかりでなく、現段階において世界の経済発展センターといわれる東南アジア地域全体についても研究を進めていきたいと考えている。

参考文献

- [1] 山崎正和『新版熱計算入門III—燃烧計算—』(財)省エネルギーセンター
- [2] 山田辰雄・橋本芳一編(1995)『中国環境研究』勁草書房
- [3] 日本機械学会『機械便覧』
- [4] 『燃料便覧』
- [5] 『化学工学便覧』
- [6] 東京都環境保全局大気保全部(1985)『窒素酸化物排出量削減技術マニュアル』
- [7] 黒田昌裕・木地孝之・吉岡完治・早見均・和田義和(1996)『中国のエネルギー消費と環境問題』通商産業研究所
- [8] 定方正毅他「科学研究費報告書」
- [9] 坂本和彦(1997)「中国における酸性雨問題」日本化学会主催『第8回酸性雨問題研究会シンポジウム』