

# アジアの発展途上国のための 持続可能なエネルギーと環境技術

定方正毅

〈東京大学〉

## 1. はじめに

この講演で私は、中国を含む発展途上国における環境および経済問題を解決するための研究を提案したい。近年、発展途上国の環境汚染はますます深刻になりつつあり、地球環境の危機に通じている。発展途上国における環境の汚染と破壊の原因は次の二つである。

- 1) 貧困
- 2) 人口の急増

しかし貧困と人口は密接に関係している。朝日新聞によると、各国の妊娠回数は一人当たり年収と逆比例の関係にある (Fig. 1)。一人当たり年収が1000ドル/年以下だと、妊娠率は3倍にも急増する。それ故、経済発展が開発途上国における環境問題の解決策であるようにさえ思われる。しかしながら先進国の歴史は、経済成長はエネルギー消費の増加を伴い、それがCO<sub>2</sub>とSO<sub>2</sub>を増加させている。だから発展途上国は、先進国がたどった経済成長と同じ道をたどるべきではない。中国やインドなどの発展途上国は、Fig. 2 に示す新しい近道「トンネルルート」をたどるべきである。発展途上国が必要とする技術は、一般に次の性質をもっている。

- 1) インプットが低く、インパクトの低い製造技術
- 2) 経済成長に役立つ環境保護技術

先進国から発展途上国への環境技術の移転がいま急務である。しかし先進国でこれまで使われてきた技術の移転は、費用が高く、操作が難しく、エネルギー消費が多いため、ほとんど成功しなかった。これでは発展途上

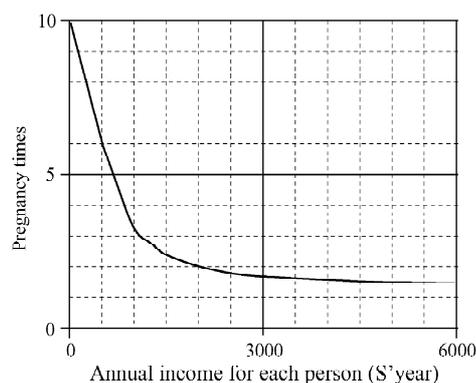


Fig. 1 Average of pregnancy times vs annual income for each person

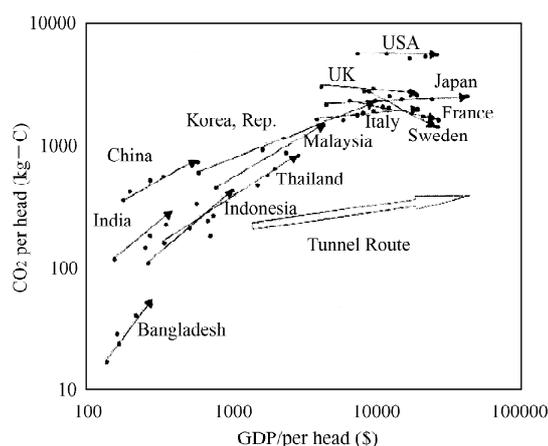


Fig. 2 CO<sub>2</sub> emission per head vs GDP per head (1975-1995)

国の経済成長と矛盾する。発展途上国で受け入れられる環境技術の要件は次のようである。

- 1) 発展途上国の経済的、技術的、社会的状態に適したもの
- 2) エネルギー節約に役立つもの
- 3) 役に立つ副産物を生み出すもの
- 4) 新しい雇用をうみだすもの

この発表では、エネルギーと環境の技術を例にして、発展途上国にとって持続可能という観点から有用な技術とシステムについて提案する。

## 2. 発展途上国のための石炭利用技術

石炭は中国の主要なエネルギー資源の一つである。石炭利用が原因となる環境問題を解決し、さらに石炭利用効率を向上させるには、発展途上国に適した次のような技術を開発する必要がある。

### 1) 石炭燃焼技術

発展途上国のローカルな大気汚染の主原因の一つである中小規模の燃焼炉から排出される SO<sub>x</sub> を減少させるためには、それぞれの炉に脱硫装置をつけるよりも、燃料を改良するほうが望ましい。高圧練炭燃焼法は燃料改良法の一つである。この方法では、原料炭を 1 ミリ以下に粉碎し石灰粉と混合する。石炭と石灰の混合物を高圧練炭装置に送り、1 t/cm<sup>2</sup> から 3 t/cm<sup>2</sup> で加圧し練炭に変える。この方法で SO<sub>x</sub> の除去率 60～70% を実現でき、ボイラー効率を 10～20% 向上させられる。

私の計算によると、中国で最も汚染のひどい重慶の中小規模の燃焼装置に高圧練炭燃焼システムを適用することができれば、環境改善とエネルギー節約をともに実現することができる。

### 2) 石炭のガス化

発展途上国では、家庭の調理と暖房および中小規模の工場のための石炭燃焼がローカルな大気汚染と屋内汚染の主原因の一つである。この問題を解決する方法の一つが清浄な都市ガス供給システムである。現在、都市ガスは中国では 146 の大都市の 3000 万世帯に供給されている。しかしながら大部分の中小都市には都市ガス供給システムがなく、家庭暖房は石炭の直接燃焼に依存している。ローカルな大気環境を改善しエネルギーの利用効率を向上させるために、都市ガス供給システムの普及が期待される。

Horio 教授とそのグループは、中国各県にある従来の地域アンモニア生産工場の近くに、肥料を副産物として生産する都市ガス製造工場を建設することを提案している。このプロセスは発展途上国の条件に適合している。というのは、これまでのアンモニア工場を利用することができ、硫安肥料を生産できるからである。それは中国の農業生産を増加するであろう。

### 3) 脱硫プロセス

現在、大部分のアジアの発展途上国の火力発電施設は脱硫装置を備えていない。いくら

かの脱硫装置は日本などの先進国から、ODA や円借款で供給されているが、技術の供給や移転はまだ技術発展途上国に広がっていない。その理由は、価格が高いことと、先進国から供給される脱硫装置が、発展途上国のボイラーから出る汚い排ガスに適していないからである。先進国のボイラーからの排ガスは比較的きれいである。特に、日本で一般的な石灰石膏プロセスは、費用が高い上に大量の水と大規模な廃水処理装置を必要とするので、発展途上国では採用されていない。

中国のような発展途上国が受け入れることのできるプロセスの条件は、(1)乾式プロセス、(2)低コスト、(3)有用な副産物、である。上の条件に適合する実現可能なプロセスは次のようである。

- ① 副産物として硫化水素をつくるプロセス
- ② 副産物として硫安をつくるプロセス
- ③ 乾式で高効率の石灰石膏プロセス

中国では、硫化水素と硫安は農業用肥料や工業原料として非常に有用である。だからプロセス①と②は、もしも商業化することができれば、発展途上国に広く受け入れられるであろう。これまでの乾式プロセスには脱硫性が低く、副産物としての石膏の価格も低いというデメリットがあるが、もしも石膏の新しい用途が開発され、脱硫性が高まれば、乾式プロセス③は受け入れられるであろう。

#### 4) 石炭フライアッシュ利用技術

石炭燃焼の重要な問題の一つは、燃焼後の残留灰の処理である。中国では、石炭灰を利用する技術は1950年以来開発されてきた。1990年には、1800万トンの灰が有効に利用された。利用率は26.5%で、日本の約半分である。現在、石炭灰は建築材料、例えば煉瓦、ブロックとセメント、炭鉱の充填材料などで、最近中国では路盤や土壌の改良に広く使われている。

酸性雨と沙漠化を同時に解決するために、われわれは脱硫プロセスで浄化した石膏をナトリウム土壌の改良に使うことを提案したい (Ref. 4)。このシステムは、中国の食糧問題の解決にも有効であろう。

### 3. これまでの要約

発展途上国における環境問題の真の原因は人口増加と貧困である。先進国の石炭利用技術と環境保護技術は、コストが高く、エネルギー消費が多いので、発展途上国の経済成長を妨げ、環境を悪化させる傾向さえある。発展途上国が受け入れ可能な技術は、安く、安全で、発展途上国の雇用機会を増すものであるべきである。これらの技術は、これまでの技術の延長上には開発できない。われわれは発展途上国の厳しい要求に合うことのできる新しい原則を基礎に革新的技術を発展させる必要がある。

#### 4. 発展途上国のエコトピア社会をいかにして実現するか

21世紀に、人々は Fig. 3 のようなエコトピア社会の実現を望んでいる。そこでは太陽、風力、バイオマスなどの自然エネルギーに依存しており、物資はすべてリサイクルされ、人々は自然と調和した生活を享受している。

しかしながら現在、環境破壊はとくに発展途上国で急速に進行中である。例えば中国では、毎年2000km<sup>2</sup>の割合で砂漠化が進行している。熱帯林の消失もタイでは著しい。発展途上国における環境破壊のもう一つの原因は、町一村一森林の間の共生関係の破壊である。Fig. 3 で示すように、農地が劣化し穀物生産が減少するとき農民は村を離れて町へ行く。町の人口は増え、空気や水が汚染される。汚染された空気や水は、農地や村のまわりの森林に害を与える。その結果、農地の生産性が低下し、さらに農民の町への移動を加速する。一方、農地が劣化すると、農地を増やすために、農民は村のまわりの森林を切らざるをえなくなる。農地のまわりの森林の減少は土地の生産性を低下させる。それは、森林が農地に天然の肥料を供給し、洪水を防いで、土地生産力にとって重要な表土の流失を防いでいるからである。したがって共生関係の破壊を阻止し、経済成長と環境の浄化につながるような正の連鎖サイクルを創り出すことが急務となる。

以下に述べるのは、町と村と森林の共生関係を実現させることのできる技術の例である。

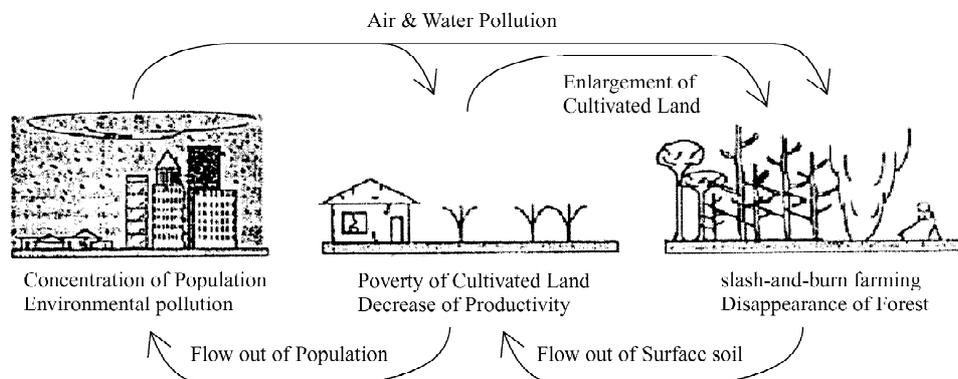


Fig. 3 Chain cycle to poverty and Environmental pollution

#### 5. 脱硫石膏を用いたアルカリ土壌の改良

土地の誤った利用によって世界の多くの灌漑地で土壌のアルカリ化が急激に拡大している。いったんアルカリ化した土壌は、植物にとっては、塩類化による場合よりも悪い。植物成長にとっての悪影響は、通気性の阻害、根系深度の制限、栄養分摂取や植物の代謝の阻害、根の表面腐食やナトリウム毒性などである<sup>1</sup>。

中国の乾燥・半乾燥地域のうちで、アルカリ土壌の総面積は320,000km<sup>2</sup>に達している<sup>2</sup>。日本および中国の土壌学者の調査で明らかになった最も重要な事実、中国の半乾燥地域に分布しているモリソルの50,000km<sup>2</sup>以上が、アルカリ化にさらされていることである<sup>3</sup>。

したがって、モリソルの生産性は比較的高いので、アルカリ化にさらされているモリソルの回復は、中国の食糧自給にとって好ましい結果を生むことになる。

土壌のアルカリ化は、交換可能なナトリウムの比率の高い、しばしば炭酸ナトリウムや重炭酸ナトリウムが存在するため pH が 8.5 を超えて 9 から 10 にもなるような条件での、土壌形成で特徴づけられる。アルカリ土壌を改良するには、二段階のプロセスがとられる。第一段階は交換可能なナトリウムのカルシウムとの置換で、第二段階はそのナトリウム塩を土壌から溶脱することである。作物が生育中の石灰質土壌の溶脱でアルカリ土壌を回復させることもできるが、そのプロセスは通常は緩やかである。交換可能なナトリウムのカルシウムとの置換に利用されている方法のうちでは、石膏（水和硫化カルシウム）が最も利用されている物質である<sup>4</sup>。それは植物に無害であり、取り扱いやすく、溶解性も中程度である。

しかしながらアルカリ土壌の回復材に石膏を用いる方法は、中国ではうまく実行されてこなかった。その主原因に、中国では石膏の需要が高いという事情があり、土壌の改良材としての散布に利用できなかった。だから中国では、脱硫プロセスからの石膏をナトリウム土壌の改良材に使うことが考えられよう。先進国で最も普及している脱硫プロセスは、湿式ライムスラリー法で、その副産物が純粋な石膏である。一方、発展途上国では、建設コストと維持コストが低いという理由で、半乾式プロセス法が採用される傾向にある。

実際のアルカリ性フィールドで、アルカリ土壌が石膏で改良可能かどうかを調べるために、中国で野外実験が行われた。場所は、瀋陽市の中心から北へ 150km に位置する康平県のアルカリ土壌地であり、期間は 1996 年 5 月から 9 月である。これらの地域ではトウモロコシが主食であることを考慮して、ナトリウム性土壌でのトウモロコシの生育を調べた。湿式プロセスと半乾式プロセスによる石膏を、異なる混合比で、各単位面積ごとに混ぜ合わせ、各単位土壌について化学分析を行った。3 と 4 単位は石灰なしの参照地域とした。石灰粉を均等に散布して、深さ 20cm までの土壌とスコップで混合した。

トウモロコシの実は種まき後 4 か月で収穫した。石膏の混合比が同じ場合には、湿式プロセス（1, 5, 7）による石膏と半乾式プロセスによる石膏（2, 6, 8）では差はなかった。得られた結果は以下のようである。

- 1) アルカリ土壌表面に重量比 1 % の副産物を使用したところ、非アルカリ土壌とほぼ同じ小麦とトウモロコシの収穫があった。使用効果は 3 年間続いた。
- 2) 副産物の使用時から 3 か月以内に、アルカリ土壌の pH と ESP は非アルカリ土壌の正常値まで減少した。
- 3)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{CaCO}_3$  およびフライアッシュ混交によるアルカリ土壌の pH に対する付加的効果は認められなかった。

## 6. バイオブリケットを使用した森林回復と CO<sub>2</sub> の減少

中国では全 SO<sub>2</sub> と CO<sub>2</sub> の 70 % 以上が、主としてストーカー型炉の中小規模の工業ボイ

ラーの石炭からでる。中国にはこの型の炉が45～50万個もあり、各炉に脱SO<sub>x</sub>装置を取り付けることはほとんど不可能である。工業炉からのSO<sub>2</sub>の抑制に最も可能性のある方法は、ブリケット燃焼法である。というのはSO<sub>2</sub>の排出は、カルシウムをブリケットと混ぜることによって60～70%減少させることができ、燃焼効率を高めることでボイラー効率を50%から60または70%も増加させることができるからである。しかしながら、ブリケット燃焼には若干の不利益もある。ブリケット炭のコストは原料炭のそれよりも1.5ないし2倍高く、燃焼時によく黒煙をだす。北海道工業研究所の丸山博士が20年以上も前に発明したバイオブリケットはブリケットよりも優れている。バイオブリケットは次のような利点を持っている。

バイオブリケットは、その中に20～30%のトウモロコシの葉や小麦の茎などのバイオマスを混ぜたものである。バイオブリケットには次の利点がある。

- 1) 農業副産物は無料だから、コストが安い。
- 2) 点火しやすいから、燃焼時の煤の排出が著しく減少する。
- 3) ブリケットに20～30%のバイオマスを混ぜることで、CO<sub>2</sub>排出を20～30%減少できる。

われわれは、日本製のバイオブリケット製造機を瀋陽に導入し、瀋陽環境保護庁の援助でバイオコールの生産を始めた。近い将来に、バイオブリケット燃焼の実験結果を報告できることを希望している。

## 7. 要 約

結論として、中国のような発展途上国の環境問題の解決にとって最も重要なことは、環境破壊を起こさずに人々を豊かにすることである。その目的のために、われわれは発展途上国の農業地域を、技術と政策の視点から、いかに発展させることができるかを研究すべきである。

---

### 文献

- 1 Buringh, P., Introduction to the study of soils in tropical and subtropical regions, 29-44, Center for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen (1970)
- 2 S. Matsumoto and M. Aoki, Journal of the Japan Institute of Energy, 74, 1023 (1995)
- 3 S. Matsumoto, Zhao, Q. G., J., Zhu, S., and Li, L., Soil Salinization and its Environmental Hazard on Sustainable Agriculture in East Asia and Neighboring Regions, Global Environment, 1, 75-81 (1998)
- 4 F. Iino, N. Aoki, Y. Nitta, S. Matsumoto and M. Sadakata, Journal of the Japan Institute of Energy, 76, 119-124 (1997)

(原文は英語。邦訳 榎根 勇)