

特集

石油利用研究の現状と展望

エネルギーとしての石炭資源の再評価

——持続可能なエネルギーシステムへの転換に向けて——

Reevaluation of Coal as Energy Resources

朴 炳 植*

Pyong Sik PAK

1. はじめに

現在の文明社会は化石燃料の大量消費の上に構築されており、現在の化石燃料エネルギー大量消費を将来にわたって長く続けることが不可能なのは良く知られている。このため、現代のエネルギー資源関連の研究者・技術者等の最重要な課題の一つは、持続的発展が可能なように枯渇性のエネルギー資源から太陽エネルギーなどの更新可能なエネルギー資源へ、エネルギー資源の基盤をいかにして転換していくかにある。しかし、現状では更新性のエネルギーの大規模利用は化石燃料の利用に比べ極めて高くつくのが実状である。石油および天然ガスの可採年数が数10年であるので持続可能な社会・エネルギー基盤の構築に残された期間は意外に短い。従って、安価な化石燃料を使用し尽くすまでに、この枯渇性ではあるが安価な資源を利用してエネルギー資源的に自立した社会を構築していくことが不可欠となる。このためには、化石燃料の中では最も量的に豊富な石炭資源をいかにうまく利用していくかにかかっているといっても過言ではなからう。

石炭は資源量が豊富だけでなく、石油と異なり賦存状況にも地域遍在性が少ないので、人類が大量消費を始めた最初の化石燃料であり、現在でも石油に次いで大量利用されているエネルギー資源である。しかし、石炭を燃焼利用する際にはダスト、硫酸化物や窒素酸化物を生成し、利用後には石炭灰が残る、環境面からの問題の多い資源でもあることは事実である。さらに、石炭は天然ガスや石油に比べ単位発熱量当たりの二酸化炭素(CO₂)の発生量が多く、温室効果ガスの排出量の削減の観点からは、その利用を天然ガス等に転換すべきであるという意見も出されている。

大気環境問題については、家庭用の暖房利用等の個

別利用ではなく、集中利用、例えば大規模工場や火力発電所の燃料として利用すれば、徹底した公害防除施設の設置が容易となるので解決は可能であり、現実の石炭利用の方向もそのように進められていると思われる。しかし、地球温暖化防止のためのCO₂の回収が経済的にかかなりの負担となるだけでなく、たとえ回収されても膨大量となるCO₂の処理の解決のめどは立っていないと言えよう。このような観点から、本稿ではCO₂の排出の問題をクリアしながら、安価な石炭資源を利用して更新可能なエネルギー経済を構築していく方策について長期的な観点から展望することにした。

2. 脱石炭シナリオの問題点

極論すれば大気環境性やCO₂排出特性の点で問題の多い石炭資源をエネルギー資源として利用しなくとも原子力エネルギーや太陽エネルギーを利用すればよいのではないかという意見がある。しかしながら、原子力エネルギーの基になるウラン235の資源量は表1に示すように石油資源量と同程度であり¹⁾、核燃料サイクルが成立しないと資源量の問題のため石炭資源を利用しなくとも良いという意見は成立しない。核燃料サイクルの成立は、経済性や放射性廃棄物処理の問題があり、さらにプルトニウムの核兵器への転用性の問題などもあり、パブリックアクセプタンスの点からも、核燃料サイクルの成立は容易ではないと考えられている。

一方、太陽エネルギーは資源量的には問題がなく²⁾、環境性の点でも問題はないものの、大規模利用が可能な地域が遍在しており、このため地球規模のエネルギー輸送が必要となり、太陽エネルギー利用システムのエネルギーペイバック(エネルギー収支)やコストの点から、大規模太陽エネルギー利用システムの実現は容易でないと推定されている。例えば、表2は後の第4節で説明する太陽エネルギー利用CO₂グローバルリサイクルシステム³⁾のエネルギー収支(生産エネルギー

* 大阪大学工学部情報システム工学科助教授
〒565 吹田市山田丘2-1

表1 世界の非更新性エネルギー資源量 (単位: $Q=1.055 \times 10^{21} \text{J}$)

	石油	石炭	天然ガス	ウラン235	合計
究極可採埋蔵量	10.7	257.0	12.2	8.6	289.0
確認可採埋蔵量 (R)	5.6	32.8	4.4	2.3	45.1
年生産量 (P)	0.139	0.119	0.074	0.024	0.356
可採年数 (R/P)	40	276	59	96	127

表2 CO₂グローバルサイクルシステムのエネルギー収支推計結果^{*1}

	太陽エネルギー利用 ^{*2}	水力発電電力利用 ^{*3}
投入エネルギー (Tcal/年)	29969	6201
産出エネルギー (Tcal/年)	17231	17231
エネルギー収支	0.57	2.78

*1: 稼働率70%の100万kWの石炭火力発電システムの排煙からの回収CO₂→CO₂輸送→燃料(メタノール)合成→輸送1回だけの試算結果

*2: オーストラリアの太陽光発電システムを想定

*3: カナダの水力発電システムを規定

／システム構築運営のための投入エネルギー)を試算した例を示す³⁾。ただし、表の試算結果は完成されたリサイクルシステムに対してではなく、排煙からのCO₂回収→CO₂輸送→燃料(メタノール)合成→輸送の1回だけのシステムの試算結果である。表には、参考のため、カナダの水力発電電力を利用する場合の試算結果も示してある。表2から、エネルギー収支比はカナダの水力発電電力を利用する場合2.78と1以上の値を持つのに対し、太陽エネルギー利用の場合は0.57と試算されており、産出エネルギーよりも投入エネルギーの方が多く、従ってエネルギーシステムとしての成立が厳しいという試算結果になっていることがわかる。この試算は機器資材をすべて日本で化石燃料を利用して現在技術水準で建設する、膨大規模の蓄電池システムを電力貯蔵システムとして導入するなどと仮定しているため、前提条件によりこの試算結果が大幅に変わると考えられるものの、太陽エネルギー利用システムの構築が容易でないのは明らかであろう。

3. CO₂回収を前提とした石炭資源の利用

前節では、原子力エネルギーや太陽エネルギーの大規模利用が現在ではまだ極めて困難であることを述べた。表1に示すように石油や天然ガスの可採年数は40～60年と、石炭の200年以上と比べると短く、このため更新可能なエネルギー資源と石炭資源の共用の時代がかなりの期間続くものと予想される。従って、我々の課題はまえがきでも述べたように現在利用可能なエネルギー資源を利用しながら、如何に太陽エネルギーなど更新可能なエネルギー資源に依存した社会を構築

していくかにあるといえよう。本節では、このような観点から石炭資源の利用について評価する。

3.1 石炭資源の部分利用(水素分のみの利用)

石炭資源をCO₂を発生させないという前提で利用する場合についてまず簡単に検討してみよう。米国のスタインバーグは石炭中に含まれる水素分のみを利用するようにすれば、CO₂は発生せず、後に残るのは炭素分(コークス)のみなので排ガスからのCO₂の回収の問題もなく、回収Cの処理(貯留)問題も容易であると提案している⁴⁾。しかし、石炭中の水素含有率は少ないので、これでは熱効率が最大でも24%、平均15%の熱利用効率しか得られないので、経済性・実現性が成立するとは考えにくい。従って、石炭資源の利用は炭素分も利用し発生したCO₂を回収するという前提で利用の方が実現性は高いと考えられる。

3.2 CO₂回収石炭利用システム

石炭資源は先にも述べたように、大規模集中利用するのに適している。以下では、CO₂回収大規模集中利用の例として火力発電システムを取り上げ検討する。

(1) アミン系化学吸収液による発電所排ガスからのCO₂回収

火力発電所からは膨大な量の排煙が大気へ放出されており、その組成の大部分は窒素ガスであり、CO₂ガスは10数%含まれている。この排煙中からCO₂を除去回収するシステムとしては、アミン系化学吸収液を用いて排煙中からCO₂ガスのみを吸収し、CO₂を吸収した吸収液を加熱してCO₂を回収するFT-1プロセスが良く知られている⁵⁾。表3はCO₂除去・回収、および回収CO₂量は膨大となるためその減容のためのCO₂ガ

表3 アミン系吸収液を用いたCO₂回収処理に要するエネルギー (CO₂1トン当たり)

	必要エネルギー
CO ₂ の除去・回収	熱: 1210 kcal ポンプ動力: 0.013 kWh
CO ₂ の液化処理	電力: 0.1036 kWh

ス液化のために要するエネルギーを示した表である。例えば、微粉炭火力発電所にこのプロセスを設けると建設費は約70%増加して、発電所総合効率は約30%程度に低下してしまうが、排煙中のCO₂の90%が回収出来ると試算されている¹⁾。

CO₂回収の効果の評価の例は多いが、その1例として、エネルギー需要の高需要シナリオと低需要シナリオの2シナリオについて、1983年から2027年までの45年間のCO₂累積排出量とエネルギー供給システムの総システムコスト(資本費、燃料費、運転保守費の総計)の推定結果を図-1に示す¹⁾。図から、CO₂回収をしない基本ケースに比べCO₂の回収を行うCO₂回収処理ケースでは、システムコストの比率としてはわずかの増加によりCO₂を大幅に減少出来る(削減量は②のカーブ

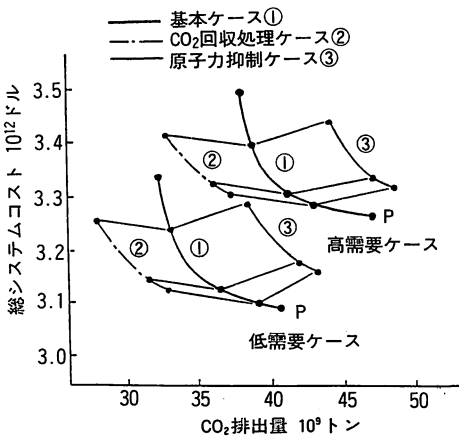


図-1 45年間のCO₂排出量とエネルギー供給システムの総コストとのトレードオフ

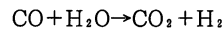
の点と①の基本ケースのカーブの点Pの横軸の値の差で求められる)と推計されていることが分かる。この例の示すように、CO₂回収処理の技術はCO₂放出量削減に有効であると推定されている検討結果は多い。

ただし、これは回収CO₂の深海投棄が可能であるという前提の基での検討結果であり、CO₂の深海投棄が技術的・経済的に可能であっても海洋生物環境への影響など未知の問題があるので、CO₂の大量投棄が果たして許されるかどうかは別問題である⁶⁾。この意味から、回収したCO₂は投棄するよりも有効利用する方向で解決策を探るほうが、当初は困難すぎて現実性がないように考えられても真の解決に導く可能性が高いと思われる。

(2) 燃料改質によるCO₂回収複合発電システム

表3から分かるように、回収CO₂の液化のエネルギーはCO₂回収のエネルギーに比べて小さいと推計されている。従って、CO₂を回収するエネルギーシステムではCO₂回収にともなう効率低下を如何に少なくするかが重要となる。東大の松橋らは、CO₂の回収が効率的に行えるエネルギー利用システムの例として図-2に示すような石炭利用発電システムを提案している⁷⁾。このシステムの特徴は以下のである。

- (a) 石炭をテキサスコ炉においてCOとH₂を主成分とするガスに熱分解する。
- (b) 熱分解ガスはダーティなので、脱塵、脱硫、脱硝のクリーン化処理を行う。脱硫は次のシフト反応のための触媒を被毒させないようにかなり徹底した脱硫を行う必要がある。なお、熱分解ガスは高温なのでこのクリーン化処理の前に熱回収を行い、蒸気を発生させる。回収蒸気はスチームタービンで発電利用するものと仮定された。
- (c) クリーン化ガスの主成分はCOとH₂であるが、この内のCO成分を次のシフト反応によってCO₂とH₂よりなる燃料ガスに改質する。



このシフト反応によってCOの持つ熱量がH₂燃料に転化される。

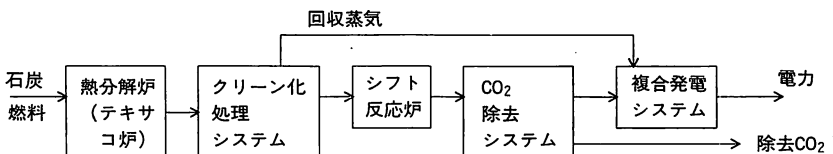


図-2 CO₂回収を行う石炭ガス化複合発電システムの概略構成

表4 燃料改質によるCO₂回収複合発電システムの発電効率の推定結果

プラント名	CO ₂ の回収について	発電効率
プラントA	CO ₂ 未回収	42.1%
プラントB	燃焼前回収（セレクトゾール）	36.1%
プラントC	燃焼後回収（FT-1プロセス）	33.5%

(高発熱量基準)

シフト反応の結果として生成するCO₂は、物理的回収法の1つであるセレクトゾール・プロセスを採用してこの燃料改質の段階で取除く。セレクトゾール・プロセスの適用はCO₂の分圧が高いほど望ましく（3.5kg/cm²以上）、このプロセスにおいて通常の場合効率悪化の主原因はCO₂分圧を高めるためのガスの圧縮である。しかし、今の場合テキサコ炉自体が加圧型ガス化炉でガス化炉からの燃料ガスは既に充分な圧力を持っているので、さらに圧縮する必要がない。このため、セレクトゾールによるCO₂回収の効率悪化は比較的小さくなるという特徴がある。

これをスタインパーク提案の排気ガスからのアミン系化学吸収液による除去システム（FT-1プロセス）と比較すると、次の二点からこの方法が有利となる。

①燃焼前のガスからCO₂が除去されるため、空気が混入しないのでガス全体の体積が燃焼排ガスに比べると3.5～5倍小さい。従って、CO₂回収装置が小さくなり建設コストが節減される。②上と同じ理由で、CO₂濃度が燃焼排ガスに比べると3.5～5倍高いので、エントロピーの観点から、CO₂回収に要するエネルギーが少なくなり、高効率でCO₂回収を行うことができる。

表4に効率算定結果を示す。ここで、CO₂を回収しない石炭ガス化複合発電のプラントをプラントA、燃焼前のCO₂回収にセレクトゾール・プロセスを用いるプラントをプラントB、またFT-1プロセスによって燃焼後の排煙よりCO₂回収を行うプラントをプラントCと呼んでいる。表より、CO₂回収を組み込んだプラントBの発電効率は36.1%（高発熱量基準）となって（CO₂の圧縮液化による効率低下分3.08%を含む）、CO₂未回収のプラントAの効率42.1%に比べると14.3%効率が低下するものの、プラントCの発電効率33.5%と比較すると、かなり高効率（相対値で7.76%高い）になると推定されていることが分かる。

（3）酸素燃焼方式によるCO₂の回収

前項で述べた燃料ガス改質を行うシステムでは、窒素分の多い燃焼後の排煙中からCO₂を除去・回収する

問題は回避できるのでCO₂回収による効率低下は少なく済むものの、システム実現のための問題点として膨大な量の石炭の熱分解ガスをシフト反応装置で処理する必要性があり、これが発電システムの経済性の低下を招くとともに、信頼性の低下を招く可能性がある。

これに対して、阪大の朴らは排煙中よりCO₂を化学吸収液を用いて除去・回収する必要がなく、シフト反応プロセスや混合ガスからH₂を分離するプロセスの必要性もなく、かつ排ガス中のCO₂の回収が容易となる、酸素燃焼方式に基づいたCO₂回収発電システムを提案するとともに、その特性について検討している⁹⁾。以下これについて紹介する。

化石燃料の主成分は炭化水素であり一般にC_mH_n（m, nは自然数）で表される。従って、空気ではなく酸素（O₂）を燃料の燃焼用に用いると、燃焼ガスはCO₂とH₂Oを成分としたガスとなり、空気燃焼の場合と異なりN₂は実際上含まれない。（なお、酸素で燃焼させると一般に高温となりすぎるため、冷却のためのガスが必要になるが、これにはCO₂ガス、排ガスや水蒸気などを再循環あるいは注入すれば良い。）高温ガス利用後の低温の排ガスは復水器に導びくと、排ガス中に含まれる水蒸気分は復水され、CO₂はガスとして回収される。このように、酸素燃焼方式の場合は排ガスの冷却という単純な操作のみでCO₂ガスを排ガス中から回収することが出来るので大規模なシステムに適用できる。

本方法では、ただし燃料の燃焼用に酸素が必要となる。大量の酸素は空気を深冷分離することにより得られるが、この際にエネルギーが要求される。この方法は、理論エクセルギー的に検討すると最も不利であるという推定結果もあるが⁹⁾、この推定では酸素は液体酸素の形で得るとして推定している。しかし、実際には気体の酸素を得ればよいので、この欠点はかなり改善される。また、酸素の深冷分離は今世紀の初めに開発された技術であり信頼性の点で問題がない、本方法は吸収法や吸着法と異なり発生CO₂を原理上100%回収出来る、という特徴がある。さらに、酸素燃焼方式は従来の空気燃焼方式と異なり、都市の大気汚染源として大問題となっているサーマルNO_xの生成がないので環境性の点でも優れているという特徴がある。なお、将来的には太陽エネルギー等の更新性のエネルギーを利用して、水を電気分解して大量の水素エネルギーを製造する必要があると考えられているが、水の電気分解の際には水素の燃焼に必要な量の酸素が副生する

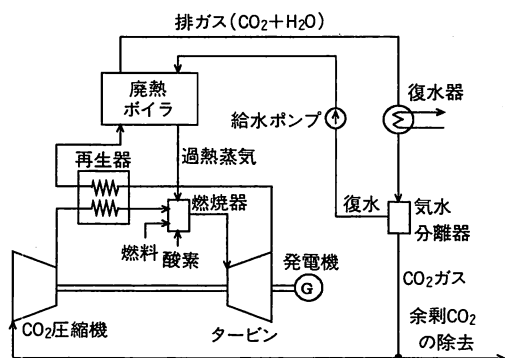


図-3 二酸化炭素回収準密閉型2流体ガスタービン発電システムの構成

ので、この酸素が利用できるという可能性もある。

図-3に、酸素燃焼方式の発電システムの構成の1例を示す。本システムはCO₂をメインの作動流体とし、過熱蒸気をサブの作動流体とする準密閉型2流体ガスタービン発電システムである⁸⁾。本システムではクリーン化済みの石炭ガス燃料をガスタービン燃焼器に噴射して酸素で燃焼させる。燃焼器へ流入する作動流体ガスは、CO₂圧縮機で圧縮されたCO₂ガスならびにタービン排気ガスの排熱を利用して製造される過熱蒸気である。燃焼器出口の高温の燃焼ガスはタービン発電機の駆動に利用される。タービン排気ガスはまだ十分に高温でかなりのエネルギーを含んでいるので廃熱ボイラに導かれ、ここで発電電力の増大および発電効率向上のための燃焼器噴射用の過熱蒸気の製造に利用される。廃熱ボイラを出た排ガスは復水器に導かれ、ここで排ガス中に含まれる水蒸気分は復水され、この復水は過熱蒸気発生用の給水として再利用される。

復水器出口の復水されずに残ったガスの主成分はCO₂であり、このガスは余剰分を除いてガスタービンのメインの作動流体として再利用される。余剰ガス（含まれるCO₂の量は燃料の燃焼により生成されるCO₂の量にほぼ等しい）はCO₂を100%に近い高濃度で含むのでメタノール合成のためのCO₂資源として有効利用することができる。なお、酸素燃焼方式のCO₂回収発電システムとして準密閉型コンバインドサイクル発電システムとすることも可能である。この場合、構成はやや複雑となるものの、より高効率化を図ることが出来る¹⁰⁾。

準密閉型2流体ガスタービン発電システムの発電効率は、必要となる高圧酸素の製造動力および回収CO₂

の液化動力を考慮に入れても、真発熱量ベースで46.7%と推定されている⁸⁾。しかし、この結果はクリーン化済みの石炭ガス燃料を基準としているので、石炭燃料ベースの効率で評価する必要がある。石炭からクリーン化ガスを得るにはエネルギーの損失があるが、この損失のかなりの部分は蒸気の形で回収される。酸素燃焼方式のCO₂回収発電システムでは、廃熱利用回収蒸気があると、この蒸気を作動流体として利用すれば作動流体ガスの圧縮動力が不要となるため、投入燃料熱量ベースで65%以上の発電効率を持つ高効率な発電システムを構築出来ると推定されているので¹¹⁾、これらの得失を総合して全体システムとしてどれだけの効率を有するかを評価する必要があるが、これは今後の課題として残されている。

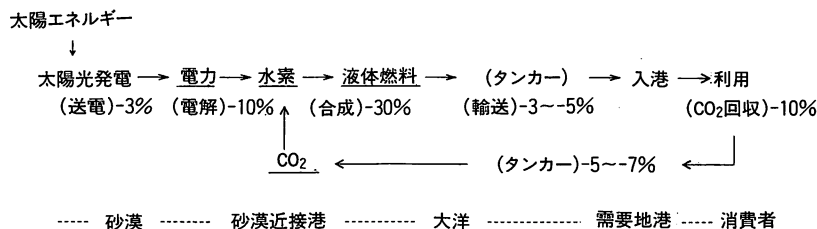
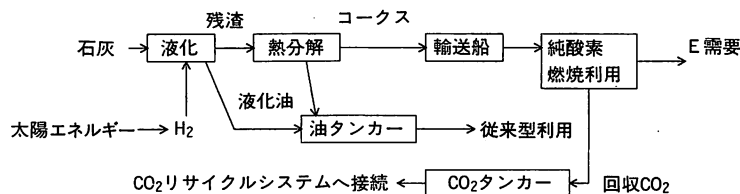
4. 太陽エネルギーと石炭資源の相互利用

4.1 持続可能エネルギーシステム

石炭資源は豊富なエネルギー資源ではあるが、いずれ枯渇するという問題がある。また、化石燃料の利用にともない発生・回収されるCO₂量は膨大であり、深海投棄がもし許されないとすると、その処理に困ることになる。この二つの問題を解決する持続可能なエネルギーシステムとして、図-4に示すCO₂グローバルサイクルシステムが提案されている^{2),12)}。これは遠隔砂漠地の無限に近い太陽エネルギー資源を利用して水の電気分解により水素を製造し、この水素とエネルギー需要地からの膨大量の回収CO₂とを合流させて、メタノールなどの輸送容易な燃料に転換させることにより、エネルギー資源の確保と物質リサイクルとを達成しようとするシステムである。図-4には砂漠地太陽発電電力を起点として入力エネルギーがどれほど需要末端へ届くか、各ステップの減損率を見積った結果も示してある。産地エネルギーの残存率を積算して行くと、需要地港着まででおおよそ55%（楽観ケースで60%、悲観ケースで40%）と推計されている¹²⁾。ただし、この推計には設備建設のためのエネルギーのペイバックは無視されている。

遠隔の太陽エネルギーが地球の共通資源となるためには、獲得・輸送・利用などの技術開発に加えて、①CO₂抑制への強い環境ニーズの高まり、②良質の化石資源枯渇の顕在化、の二つの社会的条件が必要であろう。

石油・天然ガスなどが供給ピークを越す2025年頃あるいは温室効果ガスによる地球温暖化が実現される頃

図-4 CO₂ グローバルリサイクル・システムのフローとシステム各段階のエネルギー減損率見積り結果図-5 石炭資源の利用とCO₂ グローバルリサイクルエネルギーシステムの立ち上げ

がCO₂グローバルリサイクルシステムの経済基盤成立の時期と予想されている。しかし、化石燃料の減衰期に入っても自然エネルギーとの長期共存体制は続くと考えられている。幸か不幸か、炭素リサイクル率を100%に近づけるのは困難なので、太陽エネルギーの利用および資源の枯渇により縮小された化石燃料消費には炭素リサイクル欠損分を補う役が期待される。

逆に言うと、CO₂グローバルリサイクルシステムの経済性は当面悪いので、エネルギー資源の枯渇と回収CO₂の処理の両問題を解決する持続可能なエネルギーシステムを構築していくために、安価で豊富な石炭資源を積極的に利用していくことが肝要となる。

4.2 持続可能エネルギーシステム立ち上げのための石炭資源の利用

持続可能エネルギーシステム立ち上げのための石炭資源の利用の案を図-5に示す¹³⁾。この案では図-5に示すように、石炭ならびに遠隔砂漠地の太陽エネルギー利用製造水素を利用してまず液化油を合成し、この液化油をエネルギー需要地に輸送し利用する。（従来の石炭液化の努力目標は出来るだけ水素を節約することであるのに対し、この場合は太陽水素を出来るだけ多く石炭に添加することが目的となるので、技術開発目標が逆転することに注意されたい。）次に、石炭液化の残渣を熱分解すると、残渣のほとんどはコークスとなり、同時に少量の液化油も得られる。コークスは輸送して前節で述べた純酸素燃焼利用するとCO₂の回収は極めて容易となる。そして、この回収CO₂をCO₂グ

ローバルエネルギーシステムへ組み入れ、メタノールを合成し、自動車用燃料等に利用していくのである。

このようにすると、安価な石炭資源をクリーン利用しながら、石炭保有エネルギーの25%（回収CO₂のメタノール転換利用もいれるとおおよそ50%）ほどの太陽エネルギーも遠隔地利用していくことが可能となるため、グローバルエネルギーシステム立ち上げに大いに貢献出来るものと期待されている¹³⁾。

5. おわりに

エネルギー消費量が大きくなり、煤塵、SO_x、NO_xなどの大気汚染物質をまき散らすエネルギーシステムが大気環境保全のため許されなくなった。このため、現在ではかなりのコストをかけて脱塵、脱硫および脱硝を行うようになっている。同様に、近い将来温室効果ガスであるCO₂をまき散らすエネルギーシステムが地球環境保全のため許されなくなり、大きなコストを要してもCO₂を回収せねばならないようになる可能性が高いことは否定できない。

「第三の波」の筆者トフラーは、「再生不能のエネルギー資源は産業技術の発展のための助成金のようなもの」といっている¹⁴⁾。助成金のなくなる前に自立できる産業技術を開発するのが我々世代の歴史的使命であるといえよう。石炭資源はこの意味からは我々に与えられた最も大きな助成金であり、これを活用して自立可能な成熟した産業技術社会、すなわち持続可能なエネルギーシステムを構築すべきである。

石炭のクリーン化利用ができれば、オイルシェールやオイルサンドなどダーティ燃料の利用も可能になり、これは持続可能なエネルギーシステム構築に残される期間を延長するのに寄与し、枯渇性エネルギー利用システムから持続性のある更新性エネルギー利用システムへのスムーズな移行を助けるものと期待される。

一層の発展が必要な技術は、石炭のガス化、石炭熱分解ガスのクリーン化、高効率ガスタービン、酸素燃焼タービン、CO₂回収、石炭液化、CO₂利用メタノール合成などの技術であり、これらの技術の発展によりクリーンな石炭資源の利用が促進され、自然エネルギーの利用が進み、石油および天然ガス資源の消費が抑制され、次世代により多くの化石燃料資源が残されることが望まれる。

本稿では、持続可能なエネルギーシステムの構築に向けて石炭資源を如何に利用していくかについて、筆者の主観的な観点から展望した。紙数の関係から、多くの重要な技術・問題について言及できなかったことを許されたい。

参 考 文 献

- 1) 伊原：エネルギー資源と環境，地質ニュース，427号，pp. 14～25 (1990-3)
- 2) 佐野：「エネルギーと地球環境の同時解決を目指して」，エネルギー・資源，Vol. 11，No. 2，pp. 101～106 (平2-3)
- 3) 内山：自然エネルギーによるCO₂グローバルリサイクルシステムの可能性調査，5.2 節，新エネルギー・産業技術総合開発機構・地球環境産業技術研究機構・エネルギー資源学会 (平5-3)
- 4) M. Steinberg：An Option for the Coal Industry in Utilizing Fuel Resources with Reduced CO₂ Emissions，BNL-42228，Brookhaven National Laboratory (1989-5)
- 5) Steinberg M. et al：「A System Study for the Removal, Recovery, and Disposal of Carbon Dioxide from Fossil Fuel Power Plants in the U.S.」，BNL 35666，Brookhaven National Laboratory (1984)
- 6) 石谷・松橋・大村・竹田：CO₂回収-海洋投入システムの経済性評価，エネルギー・資源，Vol. 14，No. 1，pp. 85～90 (1993)
- 7) 松橋・石谷・朴：石炭ガス化複合発電における効率のCO₂回収方法の検討，電気学会論文誌B，Vol. 112，No. 6，pp.531～537 (1992-6)
- 8) 朴・中村・鈴木：「二酸化炭素回収石炭ガス利用効率発電システム」，電気学会論文誌B，Vol. 110，No. 2，pp. 115～162 (平2-2)
- 9) 山下・赤井：CO₂回収を考えた燃料システム，化学技術誌MOL，Vol. 28，No. 5，pp. 46～51 (1990. 5)
- 10) 朴・鈴木：酸素燃焼方式に基づいたCO₂全回収発電システム，化学工学シンポジウムシリーズ38，CO₂対策技術と基礎研究，pp. 68～73，化学工学会 (平5-12)
- 11) 朴・鈴木：飽和蒸気を作動流体として利用するCO₂回収無公害高効率発電システム，電気学会論文誌B，Vol. 113，No. 3，pp. 266～272 (平3-3)
- 12) 佐野：自然エネルギーによるCO₂グローバルリサイクルシステムの可能性調査，4.7 節，新エネルギー・産業技術総合開発機構・地球環境産業技術研究機構・エネルギー資源学会 (平4-3)
- 13) 佐野：自然エネルギーによるCO₂グローバルリサイクルシステムの可能性調査，5.1.3 節，新エネルギー・産業技術総合開発機構・地球環境産業技術研究機構・エネルギー資源学会 (平5-3)
- 14) A. Toffler：the Third Wave，Chp. 10，William Morrow and Company (1980)