

特集 石炭とコークスの明るい未来を語る

石炭は、我が国の一次エネルギー供給の4分の1弱を占めるが、近年、温暖化騒動やLNGの台頭などに目を奪われ、石炭の利用・転換技術開発の重要性が軽視されつつある。しかしながら、石炭が我が国の一次エネルギーに占める比率は1970年以降、現在が最も高い値となっている。このことから、公害問題時代やオイルショックを乗り越え、クリーンかつ効率の良いエネルギーとして石炭が底堅い利用をされていることがわかる。本特集では、石炭の未来を考える上で、大きく分けて発電と製鐵に的を絞り、それらの今後について総括したい。

(編集担当：関根 泰)†

貴重な石炭を大切に使う技術の開発に期待する

三浦 孝一

1. はじめに

東日本大震災で起こった原子力発電所の事故を契機として、世界のエネルギーを巡る状況は以前にも増して流動的となり、近い将来の予測さえ難しくなりつつある。その中で石炭を巡る状況も大きく揺れ動いている。6月14日の朝刊だけでも3つの記事が目についた。インドネシアの首都ジャカルタで開いた世界経済フォーラムの東アジア会議の様子が、「福島第1原子力発電所の事故を受けた議論が活発になった。アジアの経済成長を維持するためにはエネルギー確保が不可欠との考え方は一致したが、原発導入を進めるべきかについては意見が分かれた。…インドの財閥エッサール・グループのルイアCEOは、石炭火力発電の事業を拡大する計画を明かし、インドネシアやアフリカ、オーストラリアなどで炭鉱の買収を進めると表明した。」と報じられている。「モンゴル資源企業相次ぎ海外上場計画」の見出しの中では、「『さあ出発だ』。モンゴル南部のタバントルゴイ炭鉱。砂漠の強い日差しの中、リーダー役の中国人運転手が声を掛けると、車体に中国語が書かれた大型

トラック20台が石炭を満載して一斉に動き出した。中国の国境までは300キロ弱。6時間で到着するという。」という記事が踊る。同炭鉱の埋蔵量は60億～70億トン。うち埋蔵量12億トンの鉱区は海外企業と共同開発する方針で国際入札を実施中で、すでに新規株式公開の引き受け幹事にゴールドマン・サックスと独ドイツ銀行を指名、とある。一方で、「セメント大手石炭購入の時期分散」の見出しのもとに、高騰する石炭を少しでも安く手に入れようとする我が国のセメント業の苦衷が報じられている。また、6月16日の朝刊には、ある日本商社がコロンビアの石炭権益を獲得したことが報じられている。これらがまさに現在の石炭を巡る日本と世界の状況である。

2007年の2月と3月に、EC(European Commission)¹⁾から“Coal of the Future”というタイトルの、MIT(Massachusetts Institute of Technology)²⁾から“The Future of Coal”というタイトルのレポートが相次いで公表された。前者は全52頁の、後者に至っては全192頁にも及ぶ大部のレポートであった。いずれも、急激に進みつつある地球温暖化の中での石炭の位置づけを明確にし、それを政策に反映しようと意図したものであった。

後者は、まず今後の2、30年の間において発電に由来するCO₂の排出量を抑制するのに現実的な方策は次のものしかない結論付けた。

- ・ 発電効率と電力の利用効率を上げる。
- ・ 発電源として再生可能なエネルギー資源(風力、太陽、バイオマス、地熱)の使用量を増やす。



Technologies for Effective use of Valuable Fossil Resource, Coal, and Needed Now

Kouichi MIURA(正会員)

1976年 京都大学大学院工学研究科化学工学専攻博士課程退学

現在 京都大学工学研究科化学工学専攻
連絡先: 〒615-8510 京都市西京区京都大学桂

E-mail miura@cheme.kyoto-u.ac.jp

2011年6月23日受理

† Sekine, Y. 平成22、23年度化工誌編集委員(9号特集主査)
早稲田大学先進理工学部応用化学科

- ・化石燃料を利用する発電所でCO₂を回収し、それを永久に隔離する。
- ・原子力発電を増やす。

そして、地球温暖化の危険性は事実であるが、石炭はそのような状況の中でも引き続き大量に使われるという前提に立って、CO₂排出削減に貢献する方策は何かという観点から検討を進め、CO₂の回収・隔離（CCS：CO₂ capture and sequestration）が石炭を使用しながらもCO₂を削減できる実現可能な究極的な技術であると結論し、大規模なCCSプラントの技術、経済、環境面からの実証試験に最優先で着手すべきだと強調した。実際、この路線に従ってFUTURE GENと呼ばれるプロジェクトが、世界中から資金を集めて推進された。

一方、ECから出されたレポートは、単位エネルギー当たり低コストである、世界中に広く分布している、ならびにR/P（可採資源量／生産量）比が大きい、という石炭の3つの利点が、2030年においても有効かという観点から検討をおこなった。その結果、2007年までの5年間で石炭のR/P比が277年から155年（最近の統計では120年程度にまで減少）に減少したことが如実に示すように、①石炭の可採埋蔵量は石油や天然ガスのそれより急激に減少する、②石炭を生産・輸出できる国は極めて限られ、石炭市場は非常にリスクを含んだものとなる、③採炭条件の悪化、インフラ整備のコスト高などにより、石炭生産コストは徐々に増加して、石炭資源の確保は困難になると予測し、石炭すらも手に入らなくなる可能性がある」と結論した。

MITのレポートは世界最大の石炭資源量を誇る米国の、一方のECのレポートは十分な資源を持たないEU諸国の事情を反映したものといえる。現在の石炭を巡る状況は、どちらかと言えば、ECのレポートの予測通りに進行しているように見える。このような、状況の中で、石炭の利用に関わる化学工学の研究者・技術者はどのように対応していけばよいのであろうかを考えてみよう。

2. 世界のエネルギー需給の現状と将来における石炭の役割

まず、統計資料に基づいてエネルギー需給の現状・見通しと、その中での石炭の位置づけを概観しよう。

2.1 世界のエネルギー需給の現状と将来

1980年から2030年までの世界の一次エネルギー消費の燃料・資源別の変遷と予測を図1に、国別の一次エネルギー消費の変遷を図2に示す³⁾。図1より、世界のエネルギー消費量は大きく増加し続けており、それを石油、天然ガス、石炭が担ってきたことと、2030年においてもこれら化石資源が一次エネルギー消費の大部分を占めるのがわかる。

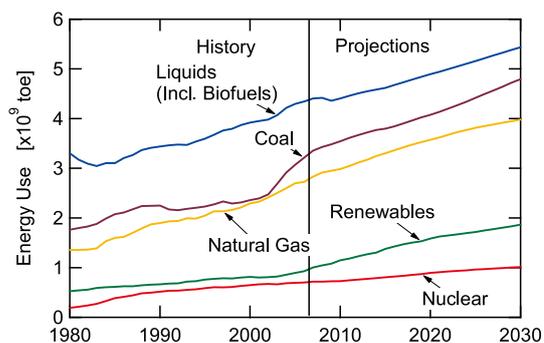


図1 燃料・資源別の世界の一次エネルギー消費の変遷と予測³⁾
(単位石油換算トン(toe))

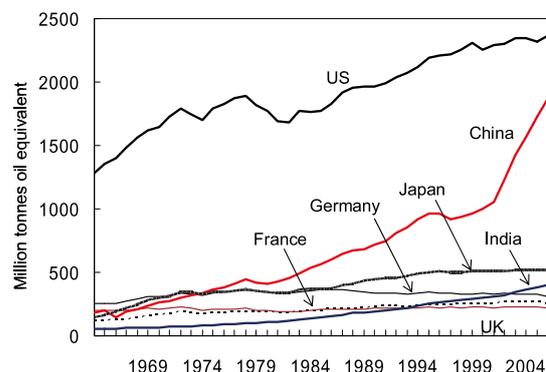


図2 国別の一次エネルギー消費の変遷³⁾
(単位：石油換算10⁶トン)

図2からは、全世界の2007年度における総エネルギー使用量約111億toe (tons oil equivalent) のうちでエネルギー消費量の最も多い国は米国で、その量は23.6億toeにも達し、総エネルギー使用量の21.3%を占めることがわかる。ついで、中国18.6億toe(16.8%)、ロシア6.9億toe(6.2%)と続き、日本は第4位で、5.2億toe(4.7%)を占める。ちなみに、これらを人口1人あたりの消費量に換算すると、それぞれ、米国7.7toe、中国1.4toe、ロシア4.9toe、日本4.0toeとなる。次に、図中の国で、一次エネルギーに占める石炭の割合を大きい順に示すと、中国70.4%、インド51.4%、ドイツ27.7%、米国24.3%、日本24.2%、英国18.2%となる。全世界で石炭が占める割合は28.6%に達し、石油の35.6%に続く。また、天然ガスは23.8%、原子力は5.6%である。

このようなエネルギー需要の増加に伴って、エネルギー由来のCO₂の発生量は2007年の300億トンから2035年の420億トンに増加する。この増加分の3/4は中国、インドと中近東諸国での発生量の増加に、97%は非OECD国での発生量の増加によるものと予想される。OECD諸国のCO₂発生量は2020年に最大に達した後に徐々に減少するが、2030年においてヨーロッパと日本の排出量のみが現

在の排出量を下回ると予想されている。

次に、化石資源がどの程度の量使えるかについてみてみよう。BPのStatistical Review of World Energy 2008⁴⁾によると、石油、天然ガス、石炭の可採埋蔵量(R)と年生産量(P)の比R/Pは表1のようになる。石油と天然ガスのR/P値はここ数年ほとんど変わっていない。これに対して、石炭のR/P値は、つい数年前までは200年以上と言われていたが、最近では毎年減り続けて133年になっている。石油、天然ガス、石炭を合わせた可採埋蔵量は約7500億toeである。これらの数字が将来のエネルギー供給を考える数字になるであろう。

化石資源	石油	天然ガス	石炭
確認可採埋蔵量(固有単位)	1兆2400万bbl	177兆4000m ³	8475億トン
確認可採埋蔵量(石油換算)	1686億トン	≒1600億トン	≒4200億トン
可採埋蔵量/年生産量 (R/P)	41.6	60.3	133

Statistical Review of World Energy 2008 (BP)

表1 化石資源の確認可採埋蔵量とR/P比

2.2 主要国の石炭の資源量と可採年数

図3に、2007年における主要産炭国の石炭資源の確認可採埋蔵量(R)と、それを2007年の産炭量(P)で除したいわゆる可採年数(R/P)を示す³⁾。石炭資源は、無煙炭と瀝青炭(Bituminousと表示)、亜瀝青炭と褐炭(Sub-B, Ligniteと表示)に分けて示した。米国の埋蔵量が2372億トン(図の単位ショートトンに0.907を乗じて通常トンに換算、以下同じ)と最大で、ロシア1570億トン、中国1145億トン、オーストラリア766億トン、インド564億トンと続き、この5カ国で全確認可採埋蔵量の76.3%を占める。よく石炭資源は、石油に比べて世界中に広く分布していると言われるが、必ずしもそうではないことがわかる。ただ、石油と異なり先進国にも大量に埋蔵しているのが特徴である。次に、各国の可採年数(R/P)に注目すると、米国228年、ロシア543年、オーストラリア194年、インド122年と大きいのが、中国は46年に過ぎない。これは、中国の産炭量・消費量が近年大きく増えているためである。1998年の統計では石炭の可採年数の世界平均は269年であったが、2004年以降164年、155年、147年と減少し、2007年には133年まで減少している。この間、確認可採埋蔵量には大きな変化はみられないので、可採年数の減少は中国などで生産量が大きく増加していることに由来している。133年という可採年数は、石油の41年、天然ガスの60年に比べると依然として大きいのが、可採年数は産炭量(消費量)が増えれば小さくなる。さらに、注目しておくべきなのは、可採埋蔵量の中の約半分を亜瀝青炭、褐炭・亜炭と呼ばれる低品位の石炭が占めている点である。特に、褐炭は水分が多い、発熱量が低い、さらに場合によっては灰分が多いなどが原因で、現在は産炭地近郊でしか利

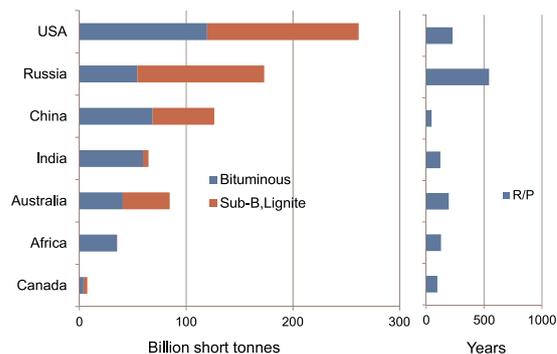


図3 主要産炭国の石炭の確認可採埋蔵量(R)と可採年数(R/P)³⁾
(単位: ショートトン, 本文ではトンに換算)

用されていないが、R/Pは褐炭をも含んだ年数である。

2.3 主要産炭国の産炭量・消費量と国際取引量

世界最大の石炭の生産国・消費国である中国は、2007年に13億toeの石炭を生産し、ほぼ同量の石炭を消費している。第2位の米国は6億toeの石炭を生産・消費している。2国で、世界の石炭消費量の実に59.4%の割合を占めている。このように、石炭の大部分が産炭国で使われていることが石油や天然ガスとは大きく異なる点である。国際的に取り引きされた石炭は9億1700万トンで総生産量の約17%に過ぎない⁴⁾。最大の石炭輸出国はオーストラリアで輸出量は2.44億トンである。これに、インドネシア2.02億トン、ロシア1億トン、コロンビア6700万トンと続く。一方、輸入国の筆頭は日本で1.82億トンも輸入しており、全世界の輸入量の20%を占めている。これに続くのは、韓国8800万トン、台湾6900万トンである。我が国の輸入量の多さが図抜けて大きい。

さらに、石炭は石油や天然ガスに比べて低価格で価格変動も少ないといわれてきたが、最近の石油価格の上昇につれて、原料炭(コークス用石炭)、一般炭いずれの価格も大幅な上昇傾向にある。例えば、長年40 \$/ton程度の価格で推移してきた原料炭価格は300 \$/tonにも達しようとしている。しかし、単位エネルギー当たりの価格は、依然として石炭は石油や天然ガスに比べて1/3~1/2のレベルで推移している。

2.4 エネルギー需給における石炭の役割のまとめ

以上、概観してきたことは次のように要約される。

- ①石炭のR/Pは130年程度で、石油の40年、天然ガスの65年程度よりは現時点では大きい。しかし、石炭資源の約半分は国際市場で取引されない低品位炭が占めている。さらに、石炭資源保有量上位5カ国で確認可採埋蔵量の3/4以上を占め、石炭資源も偏在している。
- ②今後も石炭は世界中で使われ、2030年においても一

次エネルギーの29%を占め、96億トン(49億toe)が使われる。

- ③石炭の消費量の増加の80%強をアジアが占め、2030年には中国、インドの2国の消費量が全世界消費量の60%弱を占める。
- ④石炭の国際取引量は生産量の17%に過ぎない。この割合は2030年まで大きく変化しない。また、価格は石油や天然ガスの1/2~1/3で推移している。
- ⑤他のエネルギー資源と同様、我が国で使用する石炭のほとんどが輸入されており、我が国は、国際市場の石炭の約20%を輸入している。
- ⑥石炭は石油や天然ガスに比べて単位エネルギー当たりの二酸化炭素発生量が多い。また、環境汚染物質の排出量も多いなどの環境制約が多い。

これらの要約から見えることは、グローバルな観点からは、石炭資源は十分に存在し、今世紀の貴重なエネルギー資源である。しかし、石炭利用に際しては環境制約を克服するための諸対策が不可欠である、という2点に集約される。しかし、国別にみるとその様相は大きく異なる。2大石炭生産・消費国の中国、米国にとっては自国で産出する石炭を効率よくかつクリーンに利用することが課題であるが、わが国では石炭を如何に確保するかが最初の課題である。世界的に見れば石炭資源は十分にはあるが、我が国には存在しないのである。エネルギー自給率が4%（原子力を準国産エネルギーとみなすと16%）に過ぎない我が国にとっては、これは石炭に限ったことではないが、このようなエネルギー状況の深刻さと特殊性を十分に認識した対応が不可欠である。

3. 我が国の石炭エネルギー政策と技術開発計画

エネルギーと石炭を巡る世界中のこのような急激で先行き不明な動きに対して、経済産業省HPによると、石炭は我が国のエネルギー政策上、次のように位置付けられている。

「石炭は、地球温暖化対策の観点から、世界的によりクリーンで効率的な石炭利用の促進が求められており、CCSと組み合わせたゼロエミッション石炭火力の実現等が国際的な共通課題となっております。また、近年、石炭価格の高騰やアジアにおける需要拡大等、石炭資源を巡る環境は大きく変化しており、こうした変化に適切に対応することが、世界最大の石炭輸入国であり、石炭のほぼ全量を輸入に頼っている我が国の課題です。それらの課題を踏まえ、クリーン・コール・テクノロジー(CCT)の普及及び海外炭の安定供給確保を二大柱として政策を推進しております。」

このような基本方針に則って、我が国では1970年代から、国を挙げて環境調和型石炭利用技術(CCT)の開発が推進されてきた。図4に、平成22年度の我が国の石炭関連の予算がどのように使われたかを示す。革新的CCTの開発、優れた我が国のCCTの海外への技術移転、石炭の安定供給の確保、さらには情報発信と人材育成の強化が課題として設定され、多岐にわたる技術開発と産炭国との関係強化が図られている。これらの開発テーマのいくつかが本特集で紹介される。

我が国の大学・研究機関においては、当然のことながら上の4つの課題に関連して種々の試みがなされている。そのいくつかも本特集で紹介される。

平成22年度予算(石炭関係)の体系

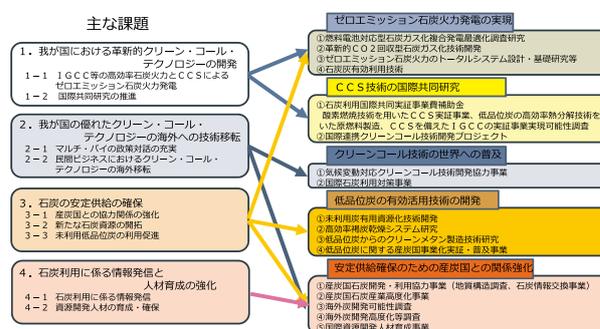


図4 我が国の石炭関連予算の用途 (資源エネルギー庁ホームページより引用)

4. 褐炭の効率的な利用を目指して

上述のように、石炭の需給が緊迫する中で、石炭の可採埋蔵量の約30%を占めながら、今までは主として産炭地での利用に限定されていた褐炭に注目が集まりつつある。図5に、オーストラリアのビクトリア州にあるLoy Yang 褐炭の広大な露天掘り炭鉱とそれに隣接する火力発電所の写真を示す。一般に褐炭の炭層は厚く、大規模な露天掘りが可能である。しかし褐炭は、多量の水分を含む、多量の灰分を含むものが多い、発熱量が低い、乾燥すると自然発火しやすい、などの問題を抱えており、褐炭を国際的に利用して行くためにはこれらの問題を解決する技術の開発が求められている。

我々は、これらの課題を解決する方法として、褐炭の溶剤処理に注目して研究を進めてきている。まず、褐炭を非極性の溶剤中で150℃程度まで加熱すると構造が緩和されて褐炭中の水が液体のまま溶剤側に移行することを見出し、それが効率的な非蒸発の褐炭脱水法となり得ることを示した⁵⁾。次いで、褐炭を非極性溶剤中で350℃程度まで



図5 ビクトリア褐炭の広大な露天掘り炭鉱とそれに隣接する火力発電所(著者撮影)

昇温加熱すると、カルボキシル基などの含酸素官能基が選択的に分解して H_2O 、 CO_2 として取り除かれる。適当な処理時間の後に高温でろ過すれば、生成物を抽出物と残さ(Residue)に分離できる。さらに、抽出物は室温でも溶剤に可溶性成分(Soluble)と室温では溶剤に不溶性成分(Deposit)に分けられる。8種類の褐炭についてこの方法を適用したところ、生成ガスはほぼ H_2O と CO_2 のみであり、Soluble, Deposit収率はともに20~30%に達し、それらは全く水を含まない上に灰分の含有量も極めて少ないことが示された。さらに、すべての固体生成物の酸素含有率は大きく低下し、相対的に炭素と水素の含有率が増加した。特に注目すべき結果は、Solubleの元素組成は、図6のH/C対O/Cダイアグラムに示すように、炭素:81~83%、水素:7~8%、酸素:8~10%で、すべての褐炭についてほぼ同じであった。さらに、H-NMRで測定した水素分布、分子量分布、熱的特性もほぼ同じであり、提案法は種々の褐炭から均質な生成物を多量に得る方法となり得る可能性が示唆された。さらに、図6の元素組成から予想されるように、Soluble, Deposit, Residueそれぞれの発熱量は大きく増加したが、興味深いことにそれらの発熱量にそれぞれの収率を乗じて足し合わせた発熱量は乾燥基準の原炭の発熱量よりも若干大きかった。このことは、提案法は褐炭のもつ発

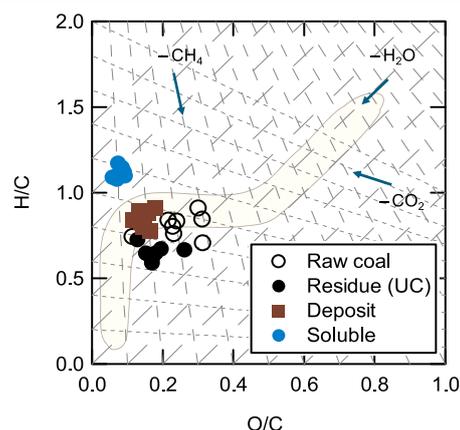


図6 8種類の褐炭を溶剤処理して得られた抽出物残さの元素組成⁶⁾

熱量を失うことなく褐炭を脱水・改質できる効率的な方法であることを示している⁶⁾。このような技術が近い将来の褐炭の効率的な利用法として実現されることを期待している。

5. おわりに

石炭を使うと CO_2 を大量に排出するから石炭を使うのを控えよう、と言うのはやさしい。しかし、それでは何ら問題の解決にはならない。我が国は、エネルギーの96%を海外に依存しており、石炭も99%以上を輸入に頼っている。原子力利用のあり方については今後真剣な議論が進められて行き、太陽光などの自然エネルギーなどの導入も徐々に進んで行くであろうが、我が国にとっては、石炭を含めた多様なエネルギー資源を大切に使う技術の開発が、エネルギーの安定供給の面でも、国際的な排出権の取引や共同実施をおこなううえでも不可欠なのである。

引用文献

- 1) European Commission, "Coal of the Future," EUR 22644 EN (Feb., 2007)
- 2) MIT, "The Future of Coal, ISBN 978-0-615-14092-6 (March, 2007)
- 3) British Petroleum : BP Statistical Energy Review of World Energy 2008
- 4) World Coal Institute : Coal Facts 2008 ed.
- 5) Miura, K., K. Mae, R. Ashida, T. Tamura and T. Ihara : *Fuel*, 81, 1417 (2002)
- 6) Xian, L., 長谷川祐介, 蘆田隆一, 三浦孝一 : 第47回石炭科学会議, 講演No. 57, 岐阜(2010)