地殻開発とその課題

佐藤光之助*

Non-Renewable Resources from the Earth Crust and Related Problems.

Konosuke SATO

本日は東京地学協会創立100周年に際し「地殻と人間生活」という公開講演会が行なわれることになり、その1つのテーマとして「地殻開発とその課題」について話をする事になったが、これは地殻開発の立場から人間生活に欠くことの出来ない資源エネルギー問題をとりあげ、1) 資源エネルギーと人間生活、2) わが国の資源エネルギー確保の経過、3) これからの資源エネルギーと地殻開発、4) 地殻開発の課題、について述べたいと思う。

I 資源エネルギーと人間生活

人類はそれぞれの時代において自然環境のなかで自然をうまく利用して生活してきたが、しかし人間の英知と生活レベル向上への志向は唯自然に従応した生活のみでは満足せず、次第に地殻の中に存在する資源エネルギーを求めるとともに、これらと調和した技術の開発によって生活レベルの向上を計るようになった。

石器、金、銀、鉄、銅、宝石などについては先史時代から利用されてきた地下資源である。わが国でも文武天皇の7世紀時代に鉱業政策が打出され、私営の鉱山が認められ1つの重要な産業として発足しており、これによって国産の銅を用いて銅銭を鑄造したのが和銅開珎である。また奈良の大仏は聖武天皇の仏法の信仰と結びついて生まれたもので、熟銅(にぎあがね)約520トンを用いたもので当時の鉱山業の隆盛と金属鉱業技術の高い水準を示すものといえよう。当時は大陸との交流も盛んで遣唐使の旅費は砂金を携帯して支弁していたと云われている。

江戸時代は鉱業の発達した時代で、主な鉱山は幕府あるいは藩の直営として開発されていた。当時は鎖国時代であったが、海外との貿易は幕府によって管理されており、これらの決済には銅などの金属が主として用いられていた。

また家庭用具、刀剣武具などの鉄需要は古くから盛んであったが、鉄産業は次第に発達し、砂鉄、薪炭を使う「たたら製鉄」は中国地方山塊部に集中し、従業員10万余を超える産鉄地帯に発達していった。

欧州では数百年前に製鉄用高炉が誕生している。当初の高炉の還元剤および燃料には木炭が使用されていた。産業革命が近づくにつれ鉄鋼の需要は増大しそれにつれ木炭の需要も著しく増加していき、当時のイギリスは国内の山々ははげ山となるという深刻な事態に立ちいたった。この鉄工業の窮状を救う方法として石炭資源をもつイギリスは石炭を木炭に代わって使う方法を研究し、石炭と鉄とを結合させる方法を発見し(1713)、一躍鉄鋼生産国としての先導的な歩みを始めたのである。

産業革命時代、石炭の登場は蒸気機関の発展をもたらし(1781)。従来水車の出す動力にたよっていたが、蒸気機関によって必要な場所で天候などの制約を受けることなく巨大な動力をつくり出すことが出来るようになった。蒸気機関による工業の発達は石炭などの資源地帯に漸次移動していった。ヨーロッパ

* 金属鉱業事業団

のルール工業地帯、アメリカの五大湖周辺、日本の北九州などがよい例である。

「燃える石」にすぎなかった石炭は製鉄への利用、蒸気機関の発明それに続く産業革命の発展によって、その役割りは飛躍的に増大し以後150年間はエネルギーの主役としての地位を確保していたのである。

19世紀後半から20世紀にかけての石油資源の発見と内燃機関などの発達は石油という新しい巨大なエネルギー資源の誕生のきっかけとなり、さらに石油化学工業の発展によって、石炭を急激に斜陽化させ石油文化とも云うべき経済成長をもたらした。とりわけ先進諸国は大量生産、大量消費の工業化社会を構成していった。

一方金属についてはかつては人間生活の身近な範囲にその使用が限られていたが、工業化社会の発展とともに、より多量の、またより多様な性質の材料として要求されるようになり、我々の社会を維持していく上に不可欠の資源となってきた。現在では金属のみならず、非金属の果す役割りも極めて重要なものとなっている。

このように資源エネルギーの開発利用は人間の英知と発展への志向に基いて行なわれ、新しい社会文化の創造への基礎を作ってきた。しかし資源エネルギーはそれらを含む土地の問題が国際間の争いの原因になってきたこと、またかつては植民地的搾取の対象となったことは歴史の示すところである。現在では石油のようにその偏在性と有限性から戦略物資化された様相を示すようにもなってきた。

一方、資源エネルギーの開発、輸送、精製、利用は自然環境に影響を与えることが重要な問題となってきた。かつてはこれらに対する認識の度合いが低かったこと、またこれらに対する対応策が不十分であったことのため公害問題をひきおこした例は多く、環境保全のための対策が強く要請されている状況である。

II わが国の資源エネルギー確保の経過

わが国が近代化社会への発展の過程で資源エネルギー確保はどのように進められて来たかをふり返ってみたいと思う。

幕末期に衰退の極に瀕していた金属鉱山は明治政府によって国有化され、海外技術の導入による採鉱、製錬部門が近代化され、次第に復興していった。これらの鉱山も他の産業と同様次第に民間に払い下げられ民間企業としての鉱業が確立されその生産が急速に進展し、財閥形成の基礎を築くのに大きな役割りを果たした。特に銅については明治前半から国内の需要を満すのみならず、ちょうど世界的に電化の時代に入っていたこともあって、電線の材料としてわが国の輸出商品となっていった。亜鉛は銀、銅、鉛などの製錬を妨げるものとして害物視されており、わが国には亜鉛製錬技術はなかったが、真鍮や亜鉛鉄板などの需要の増加によって1913年頃から亜鉛製錬が始められた。

日本には以前から砂鉄を原料とするたたら製鉄が行なわれていたが、明治政府になって洋式製鉄技術の育成に努めるとともに、たたら製鉄の改良にも力を入れた。磁鉄鉱を原料とする高炉操業は幕末にすでに成功していたが、明治になって釜石鉱山の鉄石を使用する官営釜石製鉄所を発足させている。官営八幡製鉄所設立に際しては新潟県赤谷鉱山等の鉄鉱石、二瀬炭鉱の石炭の使用を予定していたが、実際操業の段階には中国大陆から大冶鉄山の鉄鉱石を輸入するようになった。

日露戦争以後南満州鉄道株式会社が設立され、大陸の資源確保のため満州各地の地質調査が始められている。1909年当時の地質調査所長木戸忠太郎等によって鞍山付近において膨大な鉄鉱床が発見された。

日本における石炭の利用はまず製塩用燃料として始まり、幕末の外国貿易開始後は石炭の輸出および外国船舶への石炭補給が行なわれた。一方近代社会の発展とともに石炭の需要は増大し、まず九州筑豊地域への中央資本の進出が始まり、石炭業は産業としての形態を整えていった。さらに各地の炭田開発が行なわれ、明治29年に1,000万トン、大正2年に2,000万トン、昭和15年には5,600万トンの最高出炭量が記録されている。この間中国大陆においても各地で炭田開発が行なわれた。

日本の石油業は新潟から生まれている。明治に入り北海道開拓使の招きで来日したライマンは政府の依

頼により明治9年本邦石油の調査を行っているが、信越2県の総油量は米国ペンシルバニア州における2個の油井から出る油量にすぎないと述べている。その後多くの調査が実施されたが、その規模は小さく海外の石油に依存せざるを得なかったのである。

石油資源に乏しいわが国では唯一の海外油田として北樺太の油田の利権を確保したが、今日主要な石油産出国となっているところの開発はすでに米、英、蘭、仏の石油企業が多国籍化しつつ着手していたのである。すなわち、石油開発は約120年前にアメリカで始まり、19世紀後半から20世紀初めにかけて世界各地に拡がり、1930年代には巨大油田のあるアラビア半島へと発展していった。1930年代にはこれらの大企業は国際石油カルテルを結成し、世界中の石油価格をアメリカの石油価格に準じて調整したので、中東の石油生産からは莫大な利潤が上がるようになったのである。

このような国際情勢のなかでわが国が自主的に開発出来るような地域は余り残されてなく、また探鉱開発技術についても先進国の新しい情報は入り難かったものと思われる。19世紀末にロイヤル・ダッチ・シェルが開発に成功したスマトラ油田を含む南方油田はわが国にとって羨望の地と考えられるようになり、南進論の基をなしたように思われる。

石油資源の確保に苦勞していたわが国では一方において人造石油をつくる計画が進められていた。当時わが国の液体燃料総需要を400万キロリットルと推定し、その半分の200万キロリットルを人造石油に依存する計画がたてられ、昭和12～18年の7カ年計画で達成する方策が進められた。これらは撫順頁岩油、石炭液化、石炭低温乾留の振興を計ることであった。人造石油の生産実績としては昭和18年が最高で27万キロリットルに達した程度で、計画には遠く及ばなかったのである。

中国大陆に進出したわが国は豊富な天然資源、特に地下資源に期待をかけていた。石油の探鉱も小規模に行なわれ、また人造石油のための頁岩、石炭の採掘試験も行なわれたが、石油問題の解決を得ることが出来ず、終に南方油田確保という無謀ともいえる方向に進んでしまったのである。

戦後の日本はまず国内資源に依存せざるを得なかった。昭和21年末石炭、鉄を超重点増産の対象とする方針がうち立てられた。終戦時には石炭は年産2,200万トン程度に落ちこんでしまったが、以後傾斜生産によって徐々に回復していき昭和36年には戦前の水準の5,600万トンに達している。しかし昭和30年代に入るとエネルギー革命の進展によって石炭は石油にその地位を追われ出炭量は徐々に減少し現在は年間出炭量は2,000万トンを割るようになってしまった。

石油についても戦後国内石油資源の開発促進のための施策が行なわれたが、国内油田の産出量は極めて少く、経済の成長に伴って国産原油の比率は年々低下する一方であった。このような状況の時に昭和33年(1958)山下太郎がサウジアラビアとクエートの中立地帯の沖合の石油利権を入手しカフジ油田を発見したことはわが国の石油開発史上特記されることと思われる。昭和35年(1960)にはインドネシア北スマトラ油田の復旧再開のために経済協力をする事になり、そこから原油を受けとることになった。このように昭和30年代前半に2つの海外石油開発事業が始められた。

このアラビア石油の成功は国際的に大きな反響をよび、当時ソ連、欧米に旅行中の私は各地で日本の石油開発事業の評価を聞かされたものである。しかしその反面国内的には石油開発に対する容易な考え方を生んだことは否定出来ないように思われる。

昭和42年(1967)石油開発公団が設置され海外石油探鉱開発促進に関する施策が行なわれるまでには相当時間が掛ったといえよう。

このような経過をたどっている間に各国は油田開発に大いに力を注いでいた。同じ敗戦国であるイタリアでも1953年にすでにENI(炭化水素公社)が設立され、新しい探鉱装置等を充実させ国内、海外の石油、天然ガスの探鉱開発に集中的に力を注いでいた。

一方わが国から石油資源に期待がもてないと思われていた中国は終戦後しばらくして新しい中国とし

で発足し、鋭意石油探鉱を行いその建国10年までには東北の黒竜江省の大慶油田を始め幾多の油田開発に成功し石油産出国としての第1歩をふみ出している。勿論新中国成立後ソ連、ルーマニア等の産油国からの技術導入があったが、大規模な探鉱活動によって幾多の油田を発見し、陸成堆積層にも大きな油田が期待出来ることを実証したのである。ソ連においては1955と1960年の間に石油で2.3倍、天然ガスで6.5倍の生産量の拡大を行っているが、昭和37年には当協会が共催して「ソ連における石油鉱業の発展について」の講演会も開催されている。

戦後の石油事情は著しい変化を示している。中東地域の数多くの大油田の発見、従来は陸上が主体であったものが、次第に沖合大陸棚に開発の手が広がってきた。これらにより石油供給過剰時代をつくり出していったのである。1960年代のわが国の高度成長時代は石炭から石油への変換が行なわれ、非常に安い便利なエネルギーを利用して経済成長が進められたと云えよう。

1960年代にはわが国は中東から1バーレル当り1ドル70セント程度の安い石油を輸入していた。これは戦前に比べると $\frac{1}{8}$ の価格と云われている*。アメリカは1950年当時全世界の産油量の半分以上の2.7億トンを生産していたが、次第にそのシェアは減り中東に追越されていき、石油輸入国に転落していったのである。アメリカは国内石油の価格は5ドルであったので関税障壁をめぐらし5ドルの石油を使っていたわけである。西ドイツやイギリスは外国からだけの資源に依存することの不安、また国内の石炭産業の規模が大きいために急激に石油に転換することが出来ずエネルギー源として石炭を相当使っていた。西ドイツで掘られた石炭から電気をおこすと、バーレル当り7ドルの石油を使うのと同じくらい費用がかかったと云われている。

このように安いエネルギーに依存して高度経済成長を果して来たわが国は1970年代に入って深刻なエネルギー問題に直面するようになり、従来のエネルギーの優位性が一転して最も深刻な立場に立たされるようになったのである。

このような情勢のなかで、わが国においては脱石油の声がにわかに高くなり、石炭、原子力、水力、地熱等によるエネルギー確保およびサンシャイン計画による代替エネルギーの技術開発の施策が進められるようになった。

戦後金属鉱物資源調査として製鉄原料の自給度を高めることを目指し、砂鉄、磁硫鉄鉱等の未利用鉄資源の開発調査が行なわれたが、鉄鉱資源は世界的に豊富に存在することから、鉄鋼業の拡大に伴いほとんど海外資源に依存するようになった。

ウラン資源の調査は1954年から地質調査所の手によって始められ、人形峠において礫岩型砂岩型鉱床が始めて発見され、引続いて東濃鉱床等が見つかった。現在は動燃事業団、金属鉱業事業団、民間企業によって国内、海外の探鉱が行なわれている。

非鉄金属鉱物資源については金属鉱業事業団によって広域調査、精密調査、企業探鉱という三段階方式がとられており、また海外についても探鉱開発が進められているとともに国際技術協力の立場からの調査も継続的に行なわれている。

わが国は古くから鉱山開発が行なわれ、大正初期には米国に次いで世界第2位の産銅国であったが、戦後の急激な産業の発展時代に入ると金属も国内鉱だけでは需要に応じきれず、鉱石の大部分を海外より輸入して精錬を行うようになってきた。最近国内鉱山は鉱量の枯渇、品位の低下等から国際競争力に勝てず休山するものが増加しているが、一方では地下に潜在する鉱床の発見によって新しい鉱山の誕生、あるいは、古い鉱山での新しい鉱床の発見による再生も行なわれている。

非金属鉱物資源の開発は数多く行なわれているが、石灰石鉱業はセメント工業などの原材料として重要なものであり、大きな産業として発展して来た。昭和53年には1億7,000万トンの鉱石を国内で自給している状態である。

* 堺屋太一：わが国エネルギー問題の現状と課題、による。

III これからの資源エネルギーと地殻開発

最近、中東諸国を中心とする石油産出国が石油の供給量および価格の面で世界の石油市場に大きな影響を及ぼすようになり、エネルギー危機の到来が真剣に受けとめられるようになってきた。このようなエネルギー事情に対処する方策が必要とされているが、地球上に存在するエネルギー資源を未利用のものも含めてより有効に利用する方策を打出していくことが重要な問題となってきた。

一方このような工業化社会を支える原材料資源についても、低廉かつ安定した供給体制を保つことが重要な課題である。

ところで、わが国は国産資源に乏しくエネルギー供給構造がきわめて脆弱な体質であるので深刻な問題となっているわけである。このためには石油依存度の低減、非石油エネルギーの多様化、特に新しいエネルギー資源の開発の方策が打出されており、また国際的にもエネルギー大量消費国であるわが国がこれらの努力をすることが要望されているところである。

地球上に存在するエネルギー資源については地殻中から開発生産される非再生資源と地球上の自然エネルギーのような再生可能資源とがある。前者は主として化石資源であって石油、天然ガス、タールサンド、油母頁岩、石炭、ウラン等があげられる。後者は太陽、風力、海洋（波力、海洋温度差等）、植物（バイオケミー）等のこれから開発されていく新しいエネルギー源である。地熱は現在生きている資源であり、両者の中間的性格のもので、適切な管理のもとでは半永久的に使用することが可能と思われるものである。

地殻から生産される非再生資源はエネルギーの濃集したものを採取して利用するので経済的にすぐれたものであるが、地球上の資源賦存について地域性があるためこの不均衡を是正するため国際協調のもとで適切な配分を行ってきたものである。しかし最近では資源の有限性が云われるようになり、急激に戦略物資化してきたが、これに対しては地球上の資源の埋蔵量、発見量からみた適切な生産を維持することによる安定供給の路を確保することが基本となるように思われる。

自然エネルギーを利用する方法は時間的に変化の多い非常に薄いエネルギーを如何に濃縮貯蓄するかなどの技術の確立にかかっている。地域に密着しての利用が主となり、規模の大きい経済的な供給が可能かどうかは今後の技術開発にかかっているように思われる。またこの種のエネルギー源は地球上の地球物理的条件さらに国土の広がり、人口密度等地理的条件によっても相当格差を生ずるものであろう。

最近、Amory B. LOVINS によってエネルギー政策の基本方針としてソフトエネルギーパスが提唱されている。これはエネルギー供給の中心を化石燃料や原子力を利用する大規模集中的なシステム（ハードエネルギーパス）によるのではなく、太陽熱、風力等の再生可能エネルギー（ソフトエネルギーパス）によっていわば小規模分散型のシステムによるべきという意見が出されている。またこのシステムによると今までのように充分にエネルギーを供給することがむずかしくなるので、省エネルギーを行うことに依存するという考え方である。これによって永続的平和への道が可能であると提言している。

これは我々の生活をエネルギー的にみて数分の1ないし1桁程度ひき下げることを意味しているように思われる。ソフトエネルギーのみに限定したシステムはなかなか受け入れ難いように思われるが、ハード、ソフトエネルギーを二者択一的に扱わず、弾力的に活用していくことはこれからの課題であらう。

しかし当分の間、ソフトエネルギーはハードエネルギーの補間的役割りを果すものと思われる。

ちなみに、現在、過去の日本人の1日当りのエネルギー消費量は、たきぎ時代は1,000~2,000 cal. 昭和初めの石炭最盛期は約13,000 cal. 現在は100,000 cal. 弱である。

我々は金属、非金属、石材その他の資源を古くから地殻から求めて来たし、今後もそのような道をたどるものと思われる。さらに従来利用されていなかった未利用資源が将来開発利用される可能性は多分に考えられるものである。このように我々の社会を構成する原材料などの資源は大部分地殻に依存せざるを得

ないものといえよう。

以上述べたようにこれからの資源エネルギーは従来にも増して地殻に依存する度合は強く、地殻開発はこれからも人類にとって極めて重要な仕事として発展していくように考えられる。

IV 地殻開発の課題

今日世界の経済大国になったわが国は資源エネルギー確保にいろいろと苦勞をして来たが、前にも述べたようにこの問題について長期的、総合的視野にたった施策が必ずしも充分であったかどうか、この点先進諸国に比べていささか立遅れているように思われる。特に資源エネルギーの消費について世界有数の国であるわが国が世界における資源エネルギーの探鉱開発に貢献した度合は僅かなものと云わざるを得ない状態である。

戦後わが国は資源エネルギーを貿易上の対象として扱いそれらの有利な条件での確保に成功し、著しい経済発展の基を築くの寄与してきたが、今後は資源大消費工業国として国際社会のなかで長期的、総合的立場にたつて問題に対処する必要にせまられるものと思われる。特に地球上における資源エネルギーの賦存とその限界、探鉱開発動向、資源地域の立地条件等を充分考慮して施策を進めることが基本的な課題のように思われる。

例えば、石油の究極埋蔵量は地質学的にみると2兆バーレルと云われており、可採埋蔵量は6,500億バーレル程度わかっているが、毎年の生産量の増加、発見量の低下により、最近では生産量210億バーレル/年が発見量150億バーレル/年を相当オーバーしてしまい石油資源の寿命に不安をもたらしていること、さらにこのような効率的かつ大量供給可能なエネルギー資源としての石油に対する認識が高まったことによる産油国の強い姿勢に影響され石油危機に直面するようになってきたわけである。従って世界的にみればまず埋蔵量、発見量にバランスした生産量を保つことが安定供給確保の基であり、資源エネルギー大消費国の日本の立場からすれば埋蔵量、発見量の増大のためさらに一層の努力が必要と思われる。

地球全般にわたる資源エネルギーの存在可能性を検討するためには、これらが化石資源であり長い地質時代の経過をたどって蓄積された地球上の莫大な財産であるということを充分考えるべきであろう。この点地学および関連技術の果す役割りは極めて大きいものと云えよう。すなわち1)地殻の構成、2)地殻構造発達史からみた鉱床形成機構、3)地殻中の鉱床形成の物理化学的過程、4)鉱床の種類、規模、分布等の観点から地球上の資源量の推定を試みることである。新しい地球科学の発展の著しい今日、これらに基いた地球上の資源量の把握を常に試みていることは我々人間社会にとって重要な指針を与えるものと思われる。

地殻中の新しい鉱体の発見は直接的に資源確保に役立つのみならず、地球上の可採埋蔵量の増大を意味し長期安定供給の基を強化するものである。

新しい鉱体の発見にはどのような考え方で探査を行うか、またどのような技術を使うかが主要な課題である。探査概念は地殻、鉱床に関する上述の要素によって組み立てられるし、探査技術については地質調査、物理探査、地化学探査、試すい等が行なわれている。例えば前にも述べた中国の大慶油田等の発見は当時考えられていた陸成堆積物には大きな油田は存在しないという概念を打ち破って勢力的な各種の探査を実施し大油田の発見をもたらしたものと云われている。またかつて油田探査が行なわれたが終に成功しなかった地域において新しい地震探鉱技術の発展によってあらためて油田の探査に成功し開発に至った例は数多くある。またわが国においてはグリーンタフ地域における地殻の発達、これに伴う黒鉱々床の形成、鉱床形成に伴う諸現象の解明ならびに関連探査技術の進歩によって幾多のかくされた鉱体を発見しており、わが国鉱業界の進展に寄与している。

このように地殻に関する学問知識および探査技術の発展によって、従来顧みられなかった地域で新しい鉱体の発見をもたらすことが可能と思われる。従って地殻中に存在する資源量の限界は、地殻に関する科

学技術の発展の度合に応じて拡大していくものと云えるであろう。

これからの資源エネルギーの安定的確保のためには地球上の埋蔵量の把握、新しい鉱体の発見が不可欠と思われますが、このためには資源評価、資源探査活動を幅広く進めるとともにそれらの根底となる地殻に関する科学技術の発展を計ることが基本的課題のように思われる。

次に石油、石炭、地熱、金属鉱物等の資源についての問題点を述べることにする。

石油資源：エネルギー源の歴史的変遷を見ると薪—石炭—石油・天然ガスの過程をたどって来たが、石油は効率の高いエネルギーでかつ液体であるため生産、輸送等が非常に便利なこと、石炭よりは燃焼による汚染度が少ないなど有利な点が多く、石炭に代って石油時代をつくり出した意義は充分うかがえるものである。今後の社会においてエネルギーを石油にどの程度依存出来るかを見極めることは重要なことで、これによって工業化社会の維持に重要な影響を与えるものと思われる。このような情勢のもとでかくされている石油資源の発見、埋蔵量の増大のため努力することが世界的な課題であろう。

わが国は石油資源の探鉱開発に関しては前にも述べたようにおくれで出発したものであって、石油多消費国としては探鉱開発体制、研究開発、教育等の面で弱体と云わざるを得ない。探鉱開発投資はある程度行なわれるようになったが、国際的に通用する技術力をもってオペレーターの役を果し得る企業は限られている。また国際的にみて探鉱開発投資にしても石油消費量に比べれば著しく低いものである。自由世界の石油の11%程度を消費するわが国が探鉱開発投資については最近3%程度行っているにすぎないし、以前はさらに僅かなものであった。今日までの世界の石油開発へのわが国の寄与は極めて低いものと思われる。

地球上の新しい地域への探鉱活動の拡大については辺地、深海、極寒地等の条件の悪い地域に多くが向けられるであろう。このような悪条件のもとでの探鉱開発のための技術力の強化も重要な課題と思われる。

石炭資源：石油危機が叫ばれるようになるとこれに代る膨大な量の代替エネルギーが必要となり、石炭が見直されるようになってきた。石炭はヨーロッパや北アメリカにおける産業革命の原動力となったもので、1世紀以上の間工業用、家庭用の主燃料であったものである。

地球上の石炭資源については多くの埋蔵量が推定されており、潜在的採掘可能な石炭は12兆バーレル石油相当(1,000バーレル石油≒210トン石炭)で石油の究極埋蔵量の6倍、経済的に採掘可能な石炭の量は3兆バーレル石油相当で石油可採埋蔵量の約5倍に相当する。既知資源の大部分は北アメリカ、ソ連と東ヨーロッパ、西ヨーロッパ、中国、オーストラリア等に埋蔵されている。石炭資源の埋蔵量は非常に大きな数字となっているが、資源の賦存状態、立地条件などによってそれらの経済性が大きく左右されるものと思われる。近年主要な石炭資源保有国での石炭開発を目指して、欧米の石油あるいは非鉄金属等の巨大企業の進出は目覚ましいものである。例えばオーストラリアにおいては1985年の生産の76%（出資比率分だけでは42%）、輸出量の68%（同上46%）に影響を与えうるまでになっていると推定されている。同様に米国、カナダでもかなりの影響力を持つに至っているようである。

石炭の採掘には坑内掘、露天掘が行なわれているが、坑内採掘は労働集約的であり賃金の上昇が石炭の価格に直接影響を与えること、坑内採掘が安全と健康のため厳しい規制がかけられることなどが問題となるであろう。石炭の大幅の増産のためには露天掘りの拡大が必要となるが、これは地域の環境、経済、社会問題に大きな影響を与えるものである。石炭生産にはこれらの不確実な因子が大きく影響を及ぼすもので、今後石油に代るエネルギーとして大量生産を行う場合如何にしてこれらを解決していくかが大きな課題のように思われる。

石炭の輸送、利用の面でもむずかしさがある。固体である石炭の輸送は流体である石油、天然ガスに比べて環境的、社会的影響、設備の充実に對して充分配慮することが必要であろう。さらに例えば石炭と石油の混合体（COM：Coal-Oil-Mixture）のような新しい方式による技術の確立も考慮すべきものと思わ

れる。

石炭利用の面では排煙、灰の処理の問題がある。もし適当な管理をせずに多量の石炭を燃やせば空気を汚染し環境や天候に影響をもたらす恐れも考えられる。あまり環境等に影響を与えないように石炭を燃やすための公害対策技術の向上は石炭利用の拡大に通ずるものと思われる。灰の処理についてはこれを未利用資源の立場からその活用を検討すべきであろう。

石炭の液化ガス化の技術開発は最近わが国では昭和49年（1974）から代替エネルギー技術開発のサンシャイン計画の1つとしてとり上げられており、現在加速的にこの計画を推進する方策が進められている。

石炭液化の歴史は古く、前にも述べたように戦前から石油資源の乏しい日本、ドイツにおいて燃料自給政策の一環として行なわれた。また戦後米国は石油不足時代を予想してこの研究を行ったが、間もなく中東大油田発見によって中止の状態であったが、1960年頃から再び石炭利用研究を開始している。現在では先進諸国でこの種の技術開発を進めているが、自国内で石炭増産の期待がもてないわが国としては炭質と液化技術、開発された技術の活用方式とのかね合いから海外の資源確保と液化技術開発とを今後どう結び付けていくかは重要な課題と思われる。

地熱資源：地殻中の地熱現象は各地質時代に認められるものであるが、現在利用し得る熱エネルギーとしては地殻中の新しい地熱現象を対象と考えねばならない。

地熱資源は地球内部からの熱によるもので熱源としてはマグマ貫入による局所的な熱源とマントルの高まりのような地域的拡がりをもつ熱源とが推定されており、前者は数 km～10 km 程度、後者は20 km 以上の深度とされている。

10 km 以浅に賦存する熱量を対象とした場合、基礎資源量として 3×10^{26} cal 以上の熱量の包蔵が期待され、化石燃料資源から得られる熱量に劣らないものと推定されている。

地下の熱エネルギーを採取する方法としては現在のところ地熱流体を採取しこれから熱エネルギーをとる方法がとられており、一般的には地下にある天然に形成されている地熱流体が対象となるが、天然の地熱流体の存在しない高温岩体の場合には、人工的に水を注入し地熱流体を涵養し、この地熱流体を採取する方法が研究されている。

火成活動によって生じた浅い局所的な熱源の場合には貫入岩体および周辺岩石からなる高温熱源に循環水が近づき対流によって加熱され地熱熱水系が形成される。これを火山性地熱資源とよんでいるが、熱源からの熱の供給、地下水の挙動、貯留層の発達状態によって熱水型、蒸気卓越型、高温岩体型など色々の形態をとっている。

この種の地熱資源は新生代の火山活動および造山運動の活発な地域に賦存しており、環太平洋火山帯、地中海、ヒマラヤ造山帯、東アフリカ地溝帯および大西洋中央海嶺系に属する地域等において認められている。

新生代の造山運動に伴って生じた褶曲山脈の周辺部に発達する堆積盆地から高温熱水が産出しエネルギー源として使用されている例がある。この熱源は地域的なマントルの高まりによるものと推定されており、非火山性地熱資源あるいは堆積性地熱資源といわれている。ハンガリー盆地、ソ連の山間盆地などは代表的なものとして知られており、時にはこれらの熱水貯留層が異常高圧層となって熱エネルギーとともに力学的エネルギーを有するものがあり Geopressure 型地熱資源とよばれている。米国のメキシコ湾盆地、ハンガリーのカルパチヤ盆地などに認められている。

地熱エネルギーの利用は他の資源とは異なり開発地点において他のエネルギーに変換するか、開発地点周辺の直接的利用に限定される。地熱発電は電気エネルギーへの変換を行うもので、天然蒸気を使った低温、低圧の火力発電に相当するものである。

現在、蒸気卓越型地熱資源としては米国のガイサーズ、イタリアのラルデレロ、日本の松川等、熱水型地熱資源としてはニュージーランドのワイラケ、メキシコのセロプリエト、日本の八丁原、葛根田等におい

て商業ベースの開発が行なわれている。高温岩体型地熱資源については米国のニューメキシコにおいて熱出力5,000KWの熱抽出に成功し、熱出力2~5万KWプラントの研究開発を始めるところである。

米国のガイサース地区発電所は110MWのプラントを1単位とし開発を進め、現在850MWに達し、さらに開発を進めていく計画をもっている。蒸気卓越型地熱資源は経済性にすぐれており、以前から大型石油火力発電所のコストと太刀打出来るものと云われていた。わが国の松川地熱発電所も経済的にすぐれたものと云えよう。

熱水型地熱資源の場合には蒸気のみでなく熱水を伴うもので、この熱水は環境保全のため地下に還元している。従って経済性は蒸気卓越型よりは劣るが、今後は熱水発電の技術開発、その他の技術改善によって経済性を高めていくことが可能と思われる。現在わが国では岩手県葛根田、大分県八丁原等において5万KW規模の発電が行なわれているが、これらの地区においても今後さらに開発が展開されると思われる。

世界有数の火山国であるわが国では数少ない国産エネルギー資源である地熱資源の開発を促進することは必要と思われるが、このために大規模深部地電発電のための調査研究が進められている。これは深部に存在する地熱資源の実体の究明、これらの開発に伴う環境保全技術の確立、探査、掘削技術の確立等を目ざすものである。地熱資源の実体の究明のためには、地質構造、後期新生代火山活動、関連する熱源、水文学的環境、熱構造（熱流量、地熱流体の化学成分、変質鉱物の種類とその分布等から推定）ならびに地熱貯留層の解明が必要となり、このためには各種地質調査、物理探査、地化学探査等の地熱資源に対する探査技術の確立、地熱掘削技術の確立が重要な課題となっている。

しかし一方、地熱資源の開発の歴史は浅く、また複雑な火山活動に関連する異常現象を取扱うことから未解決の問題が数多く残されており、このような地熱現象に関する地球科学的研究の発展が期待されているところである。

金属鉱物資源：非常に古い歴史をもつ銅、金、鉄のような各種の金属の利用は工業化社会のなかで急速に伸展を示し、これからもさらに拡大していくものと思われる。この種の資源に関しては、現時点では石油資源のような資源有限説は一般の人々の関心を引くまでには至っていないが、最近になって金属の供給の限界についての論説などが次第に見られるようになってきた。将来の社会にとって代替のむずかしい金属は代替が考えられるエネルギーよりも本質的に重要な課題を抱えているようにも考えられる。

地殻中の資源量については最近いくつかの論文が出されており、わが国でも関根（1962）、矢島（1976）、立見*（1979）、茂木（1979）などによって論じられている。またB. J. SKINNERは鉄、アルミニウム、チタンなど地球化学的に豊富な金属と銅、鉛、亜鉛、金、銀、水銀など地球化学的に乏しい金属について地殻中の品位一量の分布曲線**を示している。これらは目下の処定性的な表現に止っているようであるが、今後さらに多くのデータからの検討を行うべき問題と思われる。しかしSKINNERの示した分布曲線の意義は同じ金属であっても地球化学的に豊富な金属と乏しい金属とでは利用し得る地殻中の資源量の限界が異なることを示している。地球化学的に乏しい金属については採掘品位を下げても経済的に供給可能量は増加せず、ある限界をもつものであると論じられている。米国において行なわれた非再生金属鉱物資源研究集会（1976）においてはこの考え方に基礎をおいて金属鉱物資源確保の討議が行なわれている。

今から20数年前に石油資源の限界についてあまり気に掛けなかった我々は金属鉱物資源量について今後資源の実体の把握および地球科学的検討を進めていくことは欠かせない課題と思われる。

一方世界の金属鉱物資源の探査開発が進むにつれ先進開発国では地表に徴候をもつ鉱床については大部分が探査開発され、これからは潜頭鉱床をさがし開発しなければならない時代に入っているように思われる。このような傾向は古い歴史をもつわが国の鉱山業においてはすでに以前から経験しているところであ

* 立見辰雄博士には講演後有益な資料を賜わりここに厚く御礼申上げる。

** 茂木 睦：地学からの資源論、地学雑誌 Vol. 88, No. 4, 1979, 第14図参照。

る。米国においても1960年以降新鉱床の発見率が急激に落ちこんでしまった。これは地表に示徴を求める露頭探査から深部の潜頭鉱床の探査へと大きく変化していったため探査技術が充分対応出来ず、従来のテンポで新鉱床が発見出来なかったためと云われている。

従来地表附近に賦存する低品位大規模鉱床の露天掘開発による大量生産は金属の供給に大きな役割りを果たしてきた。これからのこの種の鉱床の開発は鉱床賦存の深部化、エネルギー多消費の制約、鉱害対策等によって色々と制約を受ける場合が多くなる。このため新しい開発技術の確立に努力が向けられているが、さし当ってはむしろ高品位鉱床の効率的開発に多くの関心が払われているように思われる。

ところで、金属鉱床は石油、石炭、地熱等の鉱床に比べて水平的拡りは限られた範囲に濃集されている場合が多く、また鉱化作用という異常な現象に伴う不確定要素に大きく支配されるため石油、石炭の場合に比べて地質構造との対応が複雑であることから、新しい潜頭鉱床の発見には幾多のむずかしさが残されている。勿論今日まである程度の潜頭鉱床の発見に成功して来たが、これからの資源の供給のためには潜頭鉱床の開発に依存する割合が段々と多くなっていくことを考えれば、潜頭鉱床に対する効率的な探査技術を開発していくことは極めて重要な課題のように思われる。

V む す び

人間社会は地殻からの資源エネルギーによって著しい発展をとげ、これからも我々の社会を維持していくためには大部分の資源エネルギーを地殻から求めざるを得ないと思われる。狭い国土のなかで工業化社会を作ってきたわが国は資源エネルギーの大部分を海外に依存してきたが、これからもその傾向は長く続くものと思われる。

最近石油に関し地球上の資源量および発見量と工業化社会における資源消費量との間の均衡がくずれ、国際協調による資源の配分に摩擦が生ずるようになってきた。これは現在石油を中心としておこっているが、将来他の資源エネルギーについてもこのような恐れがないとはいいい切れないように思われる。

このためには資源エネルギーの利用面の改善を計るとともに、地球上の新しい資源の発見、資源量の増大に努め、資源の安定した国際的配分の環境を作っていくことは資源大消費国である工業先進国の務めのように考えられる。

わが国は資源小国であるといってただ安易に海外の資源にたよるだけでなく、自らが資源に関する科学技術の振興を計り、世界の資源量の把握ならびに探鉱開発活動の積極的推進を計ることが重要な課題のように思われるのである。

参 考 文 献

- 1) 片山信夫 (1965) : 地下資源の歴史, Energy Vol. 2, 2.
- 2) 通商産業省鉱山石炭局 (1971) : 資源問題の展望.
- 3) 石油資源探査技術に関する基礎資料 (1974) : 科学技術庁資源調査所資料第26号.
- 4) 金属鉱物資源探査技術に関する基礎資料 (1974) : 科学技術庁資源調査所資料第27号.
- 5) 黒岩俊郎 (1979) : 資源論ノート, ダイヤモンド社.
- 6) 堺屋太一講演録 (1979) : 我が国エネルギー問題の現状と課題, 通商産業調査会.
- 7) 中国経済研究所編 (1975) : 中国資源総覧.
- 8) 齊藤 隆, 神原 達 (1979) : 中国の石油, 石油の開発, Vol. 12, 3, 4, 5.
- 9) オルージェフ, エス.エー. (1963) : ソ連における石油鉱業の発展について, 地学雑誌, Vol. 72, 1
- 10) 総理府編 (1977) : 時の動き, 明日のエネルギー.
- 11) エイモリー, ロビンス著, 室田泰弘, 槌屋治紀訳 (1979) : ソフトエネルギーパス—永続的平和への道—, 時事新報社.
- 12) 産業技術審議会 (1979) : サンシャイン計画の加速的推進戦略, 一中間とりまとめ—.
- 13) 矢部 孟 (1978) : わが国石油開発の新しい展開, 石油技術協会誌, Vol. 43, 5.
- 14) グリフィス, E. D. クラーク, A. W. (1979) : 代替エネルギーとしての石炭, サイエンス Scien-

tific American 3 日本版

- 15) 資源, No. 205, 石炭利用技術の研究—特集, 資源協会.
- 16) 資源エネルギー庁石炭部監修(1979): コール・ノート, 資源産業新聞社.
- 17) 佐藤光之助(1977): わが国の地熱エネルギー開発をいかに発展させるか, 地熱, Vol. 14, 3.
- 18) ——(1979): 物理探鉱技術の歩みと展望, 物理探鉱, Vol. 32, 2.
- 19) 陶山淳治(1978): エネルギー資源としての地熱開発. 地熱発電に関する講演要旨, 新技術開発事業団.
- 20) 関根良弘(1962): 鉱石元素の濃集と地殻における現出頻度との関係, 鉱山地質12.
- 21) 矢島淳吉(1976): 世界の銅, 鉛, 亜鉛鉱床の規模について, 一定量的な鉱床論の試み—その1, その2. 鉱山地質26.
- 22) 立見辰雄(1979): 総鉱物資源量見積りのための1つの試み, 鉱山地質29(4).
- 23) 茂木 陸(1976): 地学からの資源論, 地学雑誌, Vol. 88, 4.
- 24) SKINNER, Brian J. 立見辰雄訳 (1978): A second iron age ahead?, 日本の科学と技術 19 (191).
- 25) Report On The Workshop “Research Frontiers in Exploration For Non-Renewable Resources ” (1976): The Pennsylvania State University.
- 26) Report on The Workshop on Mining Geophysics—Geophysics Applied to Detection and Delineation of Non-Energy Non-Renewable Resources. (1976): The University of Utah.
- 27) 鉱物資源探査技術調査団報告(1978): 米国における鉱山物理探査及びリモートセンシング技術, 金属鉱業事業団.