

資源開発工学研究連絡委員会報告

「地球システム工学の体系化に関する報告」  
—— 資源開発工学の面における展望 ——

平成 6 年 3 月 2 5 日  
日 本 学 術 会 議  
資源開発工学研究連絡委員会

この報告は、第15期日本学術会議資源開発工学研究連絡委員会の審議結果を取りまとめて発表するものである。

委員長 原田 種臣（日本学術会議第5部会員、早稲田大学理工学部教授）

幹事 佐々 宏一（京都大学工学部教授）

山崎 豊彦（早稲田大学理工学部教授）

委員 阿部 博之（東北大学工学部教授）

井上外志雄（東京大学工学部教授）

小口 雄康（法政大学工学部教授）

大林 成行（東京理科大学理工学部教授）

小島 圭二（東京大学工学部教授）

小林 直太（中央大学理工学部教授）

関岡 満（防衛大学校教授）

田中 彰一（東京大学工学部教授）

千田 侖（東北大学工学部教授）

樋口 澄志（北海道大学工学部教授）

水田 義明（山口大学工学部教授）

森 祐行（九州大学工学部教授）

若松 貴英（京都大学工学部教授）

## はじめに

1. 本報告作成の経過 .....	1
2. 地球システム工学の体系化に関する地球情報	
2. 1 地球情報の概観 .....	2
2. 2 資源・エネルギーの収支 .....	3
2. 3 資源・エネルギーの探査 .....	11
2. 4 地球環境 .....	15
3. 地球システム工学に関する概念設計	
3. 1 地球規模問題 .....	17
3. 2 資源問題としての側面 .....	17
3. 3 環境問題としての側面 .....	18
4. 結び .....	18

## はじめに

第14期の日本学術会議第5部は、「地球環境問題における工学的研究の在り方について」と題する報告をまとめた。その中で、地球環境と人間活動とを総合して一つのシステムとして捉え、そこにおける物質循環・エネルギー収支のあるべき姿を定量的に評価できる手法を開発し、人間が生存し得る新しい技術体系を構築する学問領域として、「地球システム工学」が提唱された。

資源開発工学は地球システム工学に最も関連の深い学問分野の一つであるから、当研究連絡委員会は、今期、資源開発工学の面から地球システム工学の体系化に取り組むこととした。本報告書はその作業の成果である。まったく新しい取り組みであるため、委員全員の熱心な協力にもかかわらず、報告書の取りまとめ作業は難航し、決定版を作成するには至らなかった。この報告書を試案として、将来さらに完全なものがつくられることを強く期待する次第である。そのためには、地球システム工学に関連の深い他の研連との連携も是非必要と考える。本報告書の試作に当たっても、これら研連の責任者のかたがたに原稿のお目どうしを願い貴重な御意見を頂戴した。しかし時間の関係上、それらを報告書に十分反映させることができなかつたので、今後の検討課題とさせて頂く所存である。

平成6年3月

資源開発工学研究連絡委員会

委員長 原 田 種 臣

## 1. 本報告作成の経過

資源開発工学研連は地球に起因するあらゆる資源の探査・開発・利用等に関し、地球システム工学の立場における統合の場をつくる検討を始めている。

近年、地球に起因する資源を単に並列的思考のみで処理することの不合理性が指摘されるようになってきた。事実、外見上あまり関係がないように見えるもの同士が、水面下のさまざまな個所で複雑に関係し合っていること、あるいは、分類的には並列的要素であっても、相互の境界において新しい領域の誕生が見出されることなどが少くない。したがって相互関係を考えずに並列的分類を行うことは、必ずしも妥当とは言えないようになってきた。

これらの問題を受けて、近年、場の理論、相互相関関係、思考的フィード・バックなどを織り込んだより解析的且つ統合的なシステム化処理が、これまで主流であった並列型分類による体系化に替わって主流になりつつある。

さて、資源開発工学の分野を眺めるならば、この分野の特徴として

1) 目的論と方法論の混在

2) 対象資源の極端な細分化

が挙げられる。したがって、これらの特徴を取り入れながら資源開発工学の体系を地球システム工学のなかに組込むことが、私達に与えられた大きな課題である。

地球システム工学という統一の場は、地球に起因する諸分野を統合するのに最も相応しいことは確かである。しかし上述の通り、資源開発工学のような特徴を持つ分野を一つの場に統合するのは容易でない。当面の問題として、これまで並列的独立現象として扱われてきたことを、境界領域における交錯を考慮して統合する困難を、まず、解決していかなければならない。

例えば資源開発工学を目的論の立場で扱うとすれば、対象とされる資源はまず鉱物資源と非鉱物資源に分類される。さらに鉱物資源は金属・非金属に、金属資源が鉄と非鉄に、また、非金属資源は石油・石炭・天然ガス・石灰石・石材などに分類される。他方地球の物理現象に起因するエネルギー資源は地熱・水力・風力などさまざまに分けられている。これまではこれらの資源がそれぞれの立場で並列的に扱われるのが常識的であった。今後は、これら目的論的对象が統一の場でどのように纏められるべきかは、他研連の目的論的对象の扱いとも関連して、重要な課題となるであろう。

一方資源開発工学を方法論の立場でみても同様なことがいえる。ここでは物理的方法や化学的方法に基づく扱いが複雑に交錯しながら併存している。したがって方法論的对象に対しても前述の問題点は当然存在するのである。

このような特徴を踏まえ、当研連は資源開発工学に属する各分野を地球システム工学の場に統合する前段階的作業を試みることにした。しかし現時点において地球システム工学の概念が、全研連共通に確定されているとはいえない。このような状態のもとで、資源開発工学各分野をそれ自体を損なうことなく、地球システム工学のなかでの立場を確保する作業を行うことは極めて困難である。それにこの作業に特に期待されるのは、資源開発工学内部での境界領域の相関性や他の研連分野との境界領域における共通議論の場を創造していくことである。

当研連は、この課題に取り組む作業手順として、まず各資源分野の洗い出し、次いで、分野間相互の交錯性の整理、さらに地球システム工学にまとめるのに必要な共通フォーマットの作成の順に行っていくことにした。

その第一段階としてワーキング・グループを設定し、各委員の専門分野に応じて、対象資源を分類し、それぞれを同一フォーマットで纏めることにした。

この報告はワーキング・グループが各委員に委嘱した第一段階の作業成果である。この成果を基礎として、当研連は今後フォーマットの作成・境界領域の処理を経て、順次地球システム工学への統合を進めていく方針である。

## 2. 地球システム工学の体系化に関する地球情報

### 2. 1 地球情報の概観

地球システム工学は「地球システム」の工学的研究であり、「地球」のシステム工学的研究ではない。地球システムは気圏・水圏・地圏・生物圏より構成されるが、対象範囲をどのように設定するかは研究者により意見の異なる点である。工学・理学・農学においてこれらの対象の部分的分野を専攻とする学科が存在している。それらとの関係をどのように設定するかも種々な意見のある所である。地球システム工学に属する研究者は最終的にはこれら4圏を統合したものに到達することが望ましいが、その過程においては各人の立場・関心・バックグラウンド等により異なるコースを取ることは当然なことであろう。

地球システム工学の定義を行うことは困難であるが、目的あるいは目標については臆気ながら形が見える可能性がある。与えられた課題である「必要な地球情報」を検討するのに目的・目標を先に掲げてそれに付与してゆく方法もあれば、現在可能な地球情報より目的・目標を決めることもあり得る。方法に拘らずに目的・目標と地球情報を羅列することを最初の段階としてよいのではないかと思われる。目的・目標を表すキーワードとしては地球環境、地球調査、原・材料資源開発、エネルギー資源開発、土木・建設の5分野がある。

与えられたテーマについて関連する地球情報を以下に記す。

#### (1) 地表面における物質循環状態の把握

物質としてはCO<sub>2</sub>と酸性物質のようなエネルギーに関連するもの、フロンのように製造業に関連するもの、農薬のように地表の生物に関連するものがある。これらの内我々に関係するものはCO<sub>2</sub>と酸性物質である。これらは人類の活動を支えるエネルギー消費に関係して発生したものである。

CO<sub>2</sub>に関しては、発生源、空気中の分布、海水との相互作用は他分野で精力的に行われており、CO<sub>2</sub>の大気中からの隔離方法の研究が我々の課題であると思われる。隔離場所としては海中と地中があるが、情報ではなく具体的な手段の可能性の検討が必要である。酸性物質対策は鉱山開発の副産物として長年にわたる技術の蓄積がある。その活用を検討する必要がある。

必要と考えられる情報：

CO<sub>2</sub>：発生量，発生源，回収法，回収可能量，回収物の品質，CO<sub>2</sub>の物性

CO<sub>2</sub>-水系の挙動，CO<sub>2</sub>フラッドの挙動

酸性物質：発生量，発生源，大気中での移動，地表物質との反応

中和反応の種類と効果

が挙げられる。

## (2) 地下浅層帯における物質循環の把握

この物質循環は水に溶解した物質を対象にしていると考えられる。地下水の流れ，岩石の吸着性などは従来からの守備範囲にある。対象地域は限定された範囲であり，観測体制と対策について検討することが必要である。観測体制としては，観測坑井による圧力・流速・方向・資料採取等の情報収集がある。対策としては地下に流さないことであるが，既汚染されたものの拡散を防ぐ方法とそれの除去手段の検討がある。

必要と考えられる情報：

地下 水汚染物質の種類と性質・汚染物質と岩石との反応性

地下 水の流れの方向と量・地下水中の濃度・地下深度による汚染分布

## (3) 地下深層の状態把握

地下深層の捕らえ方は人により異なるものである。土木・建設関係では数十メートルから100メートルが深層である。石油・天然ガス・地熱関係では4,000メートル以深、学術掘削では10,000メートル級，地球物理学ではマントル内部のようなものを呼んでいると思われる。ここでは地殻内部に限定する。地下の状態の観測の仕方は，地球物理学的な地表での観測と坑井による直接的な観測とある。

必要と考えられる情報：

土木・建設関係：地質、地下水の流れと量

資源開発関係：資源の分布，存在状態，地層の性質

探査技術，掘削技術，開発技術，流体の性質

学術掘削：地質学上の特性，設定目標

## 2. 2 資源エネルギーの収支

### (1) 金属資源

金属資源としては鉄鉱石，銅，鉛，亜鉛，ニッケルなどのいわゆる卑金属鉱石，錫，チタン，クロム，タングステン，モリブデン，その他の金属鉱石，近年注目を集めるようになった希土類（レアアース）など，広範囲に亘っている。

鉄鉱石に関してはわが国の年間の見掛け消費量<sup>1</sup>は127,919,000トン（1989年度実績）であり，海外依存度は99.8%に及んでいる。日本への供給元はオーストラリア，ブラジル，インドが全体の85%（焼結鉱の原産地を考慮すると90%）を占めている。（表1）

また，わが国の銅，鉛，亜鉛，ニッケルの消費量と国内鉱による自給率はそれぞれ1,577,000トン(0.8%)，417,000トン(4.8%)，814,000トン(15.6%)，159,000トン(0.0%)

(1990年度、括弧内は自給率)となっている。表2にこれらの供給元とそれぞれの供給割合を示す。

表1 わが国に対する鉄、銅、鉛、亜鉛、ニッケルの供給国と供給割合(%)  
(1990)注<sup>2</sup>

国名	鉄	銅	鉛	亜鉛	ニッケル
中国			0.7	3.3	
タイ			5.6	0.2	
フィリピン	3.9	12.2		0.1	22.5
マレーシア		3.2			
インド	16.6	0.3			
インドネシア		7.5	0.1		30.1
ニューカレドニア					47.4
パプアニューギニア		7.1			
オーストラリア	43.0	6.8	26.7	51.4	
南ア	3.8	0.9	8.3	0.8	
カナダ	1.5	27.5	28.5	11.4	
U. S. A		12.9	1.9	7.2	
チリー	3.2	9.5		2.2	
ブラジル	24.1	0.4			
ペルー	0.7	3.0	23.9	18.8	
その他	3.2	8.7	4.3	4.6	0.0
合計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
合計量(トン)	125,290,037	3,522,535	279,535	1,186,231	3,337,710

注1 生産量+輸入量-輸出量

注2 表の数字はいずれも精鉱を含む。文献[6]による。

希土類は蛍光体、磁石、ガラス添加剤、触媒、研磨剤、セラミックス、電池、超電導材料などに用いられており、近年ハイテク産業の伸びに従ってこれら元素の資源への関心が高まっている。しかるにハイテク技術においては研究開発に伴ってターゲットとなる元素が激しく変動することに特徴があり、資源開発にも大きな影響を及ぼす傾向がある。セリ



ウムを筆頭に、Nd, Sm, La, Y, Euなどの希土類元素のわが国における消費量は全体で年間約2,000トン（1992年）である。希土類の資源は種類が多く、単独に賦存せずに、バストネサイト、モナザイト、ゼノタイム、その他の鉱物の中の置換金属として産出する。世界的に見ると中国にその大部分が賦存している。

金属資源の動的可採年数（消費量の伸びを考慮した生産量と埋蔵量の比）は表2のようになっている。

表2 各金属資源の動的可採年数(1985) ([5]による)

元素名	動的可採年数
Fe	47
Cr	38
Ni	36
Mn	29
Mo	35
Co	36
Cu	27
Pb	22
Zn	20
Sn	14
W	35
Al	59
Hg	19
Ag	16
Au	21
Pt	55

#### 参考文献

- [1] 井野口康正：海外よりの鉱石輸送費について，資源と素材，Vol.109 400-407（1993）
- [2] 大竹信彦：製鉄資源の輸送費，資源と素材，Vol.109 409-416（1993）
- [3] 西川有司：レアメタルの経済，資源と素材，Vol.109 441-446（1993）
- [4] 大島信三：用途からみた希土類，資源と素材，Vol.109 478-481（1993）
- [5] 西山孝，安達毅：鉱物資源枯渇と耐用年数，資源と素材，Vol.109 473-477（1993）
- [6] 日本関税協会：日本貿易月報/'90.12, 176--177（1991）

## (2) 非金属鉱物資源

非金属鉱物資源（工業原料鉱物資源）は原始時代から人類にとって重要であった。人類が用いた最初の鉱物資源は石であって、初めは整形しない石を用いた。約20万年前の旧石器時代には石（珪岩等）を細工することを覚え、石（チョーク）から顔料を作ることも覚えた。新石器時代には黒曜石等を磨いたり孔を開けたりして道具を作り、粘土を原料として土器を作り、石器と並んで用いた。金属器が使われるようになってからも、工業原料鉱物資源の重要性は減らなかった。エジプトのピラミッドに用いられた石灰岩や花崗岩のように建築材料として用いられたし、粘土は引き続き土器、陶磁器の原料として重要であった。中世の間も工業原料鉱物資源の利用方式には本質的な変化はなかったが、近代、特に19世紀、20世紀には著しい変化がみられ、新しい物質が農業、窯業、冶金業や光学・製紙・ゴム・食品工業へ応用され、現在は、半導体原料としてのシリコンに代表されるような新しい利用方法が進んでいる<sup>[1]</sup>。

現在、採掘・生産され、利用されている工業原料鉱物は多種多様であるが、主な鉱物を挙げると、石灰石、珪石、珪砂、ろう石、耐火粘土、ドロマイト、かんらん石、ベントナイト、長石等がある。グループ別にみると、珪質資源（白珪石、軟珪石、珪砂）、長石質資源（長石、アプライト、風化花崗岩）、熱水性粘土質資源（ろう石、陶石、カオリン、セリサイト）、堆積性粘土質資源（耐火粘土：木節・蛙目・頁岩粘土等）、炭酸塩鉱物資源（石灰石、ドロマイト）、その他の原料鉱物資源（タルク、ベントナイト、酸性白土、ゼオライト等）となっている<sup>[2]</sup>。

世界の非金属鉱物資源（工業原料鉱物資源）の埋蔵量は金属資源の埋蔵量より多い。特に、海洋における存在量を考慮に入れれば一層多くなる。非金属鉱物資源の世界の産出量は、建築材料90億トン、工業原料鉱物（ポーキサイト0.88億トンを含む）7.5億トン、となっており、燃料（石炭、石油）68.5億トン、鉱石精鉱9.3億トン、鉄鋼6億トン、金属1900万トンに比較しても量的に極めて重要である<sup>[1]</sup>。

### 参考文献

- [1] 長沢敬之助, M・クズヴァルト: 工業原料鉱物資源, p.3-5, (1989), 修学館(東京)
- [2] 須藤 定久: 熱水性粘土質資源—その現状と将来—, 資源地質特別号, 13, p.119-127, (1992)

## (3) 水資源

地球は水の惑星とも呼ばれ、その存在は地球環境の形成や、生物の生命活動に重要な役割を果たしてきている。地球上の水の総量は表1の様に見積もられている。

人間の活動に必要な淡水の大部分は氷雪として存在し、直接利用できるのは地下水、湖、沼沢、河川である。水は「蒸発」と「降水」として循環しており、資源量よりも降水量の多寡や地下水脈の有無によって、必要量が供給されているか否かが問題となる。

世界でどれくらいの水が使われるであろうかを予測したのが、図1である。2000年には約6000Km<sup>3</sup>の水が必要とされている。今後の水資源の利用については、

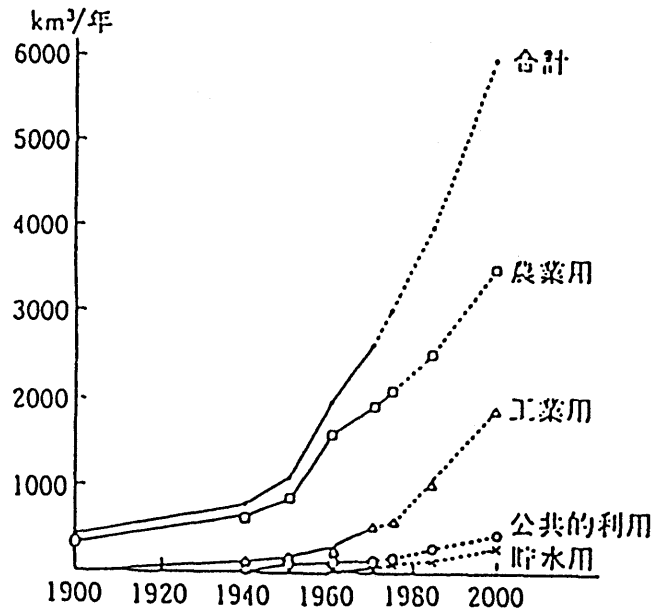
- 1) 節水
- 2) 下水道、産業排水の再利用の拡大

- 3) 浄水設備
  - 4) 海水の淡水化プラント
  - 5) ダム、治水林等の建設
- などが考慮されるべきであろう。

表3 水の総量(国連水会議資料, 1977)

項目	水量(百万km <sup>3</sup> )	
	総量	うち淡水
海水	1338.	
地下水	23.4	10.53
土壤中	0.0165	0.0165
氷雪	24.0641	24.0641
地下水(凍土)	0.3	0.3
湖	0.1764	0.091
沼沢	0.01147	0.1147
河川	0.00212	0.00212
大気中	0.0129	0.0129
生物内	0.00112	0.00112

図1 世界の水の使用量



#### (4) 石炭

石炭は世界の一次エネルギー消費量の約30%をこれまで供給し続けてきたし、IAE事務局の予測によれば、西暦2000年、2005年になっても、この傾向は変わらないものとされている。世界のエネルギー資源確認可採埋蔵量及びそれを年産出高で除した可採年数は

石油	9,991億バーレル	45年
天然ガス	119兆m <sup>3</sup>	56年
石炭	10,755億トン	328年
ウラン	232万トン	68年

とされており、石炭はケタ違いの資源量を有している。れき青炭と無煙炭に限った可採埋蔵量では、米国が1,127億トンと世界の22%を占めて最も多く、次いで旧ソ連1,040億トン(世界の約20%)、中国622億トン(同12%)と続いている。

このように石炭には、

- 1) 資源量の豊富
- 2) 供給国に政治制の安定国が多いこと
- 3) 低価格

などの長所がある。従って、世界全体での石炭需要は現在 35億トン程度であるものが、2000年には約42億トンに達するものと見込まれる。わが国でも、現在 1.1億トンであるが、2000年、2010年には約1.4億トンの需要が見通されている。

1991年における世界の石炭生産については、第1位の産出国は中国で1,086百万トンを生産し、世界の生産量の32%を占めている。次いで米国823百万トン(24%)、旧ソ連409百万トン(12%)、インド222百万トン(7%)、南アフリカ177百万トン(5%)、オーストラリア168百万トン(5%)、ポーランド141百万トン(4%)の順となっている。

将来の円滑な石炭需給のために解決されるべき問題点としては

- 1) 東南アジア連合(ASEAN)諸国等の需要急増に対する石炭輸出国の増産計画の対応性
- 2) 石炭の燃焼が地球環境に与える悪影響(CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, 灰)
- 3) 炭鉱から排出されるメタンガスが地球温暖化に与える影響

などがあげられる。

#### (5) 石油・天然ガス

世界の石油、天然ガスの資源量と資源の収支を、それぞれ表4および表5に示す。(石油鉱業連盟1991)注<sup>3</sup>

石油については、原始埋蔵量(資源量)7兆1584億 bbl、究極資源量(一、二次回収による可採資源量)1兆9780億 bbl、回収率 27.6%であり、EOR(三次回収)の原始埋蔵量に対する回収率は、油価が30~40/bblの範囲で推定すると、2.3%に過ぎない。また残存確認埋蔵量は、9982億bbl、原油生産量は 5898万bbl/dであり、可採年数は 46.4年である。原油の残存確認埋蔵量は、中東 66%、ラテンアメリカ 12%で、ほぼ 80%を占める。

オイルサンドの原始埋蔵量は、原油換算で 2.1~2.8 兆bbl、カナダとベネズエラで 92%を占めている。現状の回収率は、カナダで 36%、ベネズエラで 17%という試算がある。オイルシェールの原始埋蔵量は、約 3兆bblで、USAとブラジルで 90%を占める。開発の対象となるのは、原始埋蔵量の 5~10%といわれている。両者の原始埋蔵量は、原油のそれが約 7兆bbl であることと比べるとかなりの量である。

天然ガスについては、究極埋蔵量は約一京cfである。残存確認埋蔵量は、4234cf、総生産量は 88.7cf/y であり、可採年数は 48 年である。また残存確認埋蔵量は旧共産圏と中近東で 70%を占める。天然ガスには、原油随伴ガスと非随伴ガスとがあり、前者は原油の開発に左右され、回収率を一律に論じられないが、後者は 60~70%である。非随伴ガスは旧共産圏の、随伴ガスは中近東に多い。天然ガスは輸送コストが高く、流通量が小さく、原油生産時に燃焼させてしまう量も多い。非在来型の鉱床に着いては、本格的な探鉱が行われていないため、資源量は未知である。

注<sup>3</sup>石油鉱業連盟(1991):石油・天然ガス等の資源に関するスタディによる。

表 4 原油資源総括表 (1989年末現在)

地 域	既発見埋蔵量		累計生産量		残存確認埋蔵量		1989年原油生産量			可採年数	未発見資源量		究極資源量		注1) 回収率 (推定) %	注1) 原始埋蔵量 (推定)		EOR増油量		
	億 bbl	%	億 bbl	%	億 bbl	%	億 bbl	%	平均日産 万 b/d		R/P	億 bbl	%	億 bbl		%	億 bbl	%	億 bbl	%
										1989 年末					1989 年末					
アジア・オセアニア	482	2.4	239	1.1	243	1.1	324	20.5	207	3.8	689	3.5	25	2,756	3.9	91	3.3			
西ヨーロッパ	342	1.7	174	0.8	168	0.8	370	12.4	286	5.3	628	3.2	25	2,512	3.5	88	3.5			
中東	8,264	66.2	1,655	13.0	6,609	52.2	1,551	116.8	-	-	6,381	32.3	28	22,789	31.8	114	0.5			
アフリカ	1,078	6.0	480	3.8	598	4.7	554	29.5	612	11.3	1,690	8.5	27	6,259	8.7	188	3.0			
ラテン・アメリカ	1,967	12.2	752	5.9	1,215	9.6	644	51.7	516	9.5	2,483	12.6	25	9,932	13.9	238	2.4			
アメリカ	1,773	2.6	1,510	11.8	263	2.1	788	9.4	859	15.7	2,632	13.3	34	9,624	13.4	346	3.6			
カナダ	206	0.7	139	1.1	67	0.5	159	11.5	434	8.0	640	3.2	27	14,081	19.7	-	-			
ソ連	1,659	5.8	1,080	8.3	579	4.5	1,214	13.1	2,143	39.4	3,802	19.2	23	3,022	4.2	602	3.4			
中国	362	2.1	147	1.1	215	1.7	277	21.3	333	6.1	695	3.5	23	609	0.9	-	-			
他先進国	93	0.3	68	0.5	25	0.2	37	17.9	47	0.9	140	0.7	23	-	-	-	-			
世界合計	16,226 (100%)	100.0	6,244 (38.5%)	48.0	9,982 (61.5%)	72.0	5,888	46.4	注2) 5,437	100.0	19,780	100.0	27.6	71,584	100.0	1,667	2.3			
OPEC	10,276	77.3	2,560	19.9	7,716	59.8	2,134	99.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
非OPEC (除先進国)	3,836	14.5	2,389	18.9	1,447	11.1	2,236	17.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
自由世界 共産国	14,112 2,114	91.8 8.2	4,949 1,235	37.9 9.6	9,163 819	70.0 6.2	4,370 1,528	57.4 14.7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

注: 1) 石炭連 (1986) に基づく。

2) 未発見資源量については中東を除く。

表 5 天然ガス資源総括表 (1989年未現在)

地 域	既発見埋蔵量		注1) 累計生産量 1989年末		残存確認埋蔵量		1989年天然ガス生産量(推定)			商業化率 (推定) %		1989年天然ガス商業量			未発見資源量		注2) 究極資源量	
	兆 cf	%	兆 cf	%	兆 cf	%	年生産量		R/P	%	年商業生産量		兆 cf	%	兆 cf	%		
							1989	年末			兆 cf	%					兆 cf	%
アジア・オセアニア	363.1		46.1	7.5	317.0		5.75	6.5	55.1	80	4.60	6.3	68.9	5.8	0.1	368.9	3.6	
西ヨーロッパ	327.8		130.3	4.7	197.5		7.56	8.5	26.1	90	6.80	9.2	29.0	147.5	3.2	475.3	4.6	
中東	1,406.2		72.2	31.5	1,334.0		5.76	6.5	231.6	63	3.63	4.9	367.1	-	-	1,162.7	11.3	
アフリカ	312.6		28.7	6.7	283.9		5.85	6.6	48.5	40	2.34	3.2	121.6	193.7	4.2	506.3	4.9	
ラテン・アメリカ	333.0		96.1	5.6	236.9		5.78	6.5	41.0	60	3.47	4.7	68.3	155.0	3.4	488.0	4.8	
アメリカ	927.1		763.9	3.8	163.2		20.83	23.5	7.8	86	17.92	24.3	9.1	641.3	13.8	1,568.4	15.3	
カナダ	190.1		93.1	2.3	97.0		4.89	5.5	19.8	85	4.16	5.7	23.3	585.6	12.7	775.7	7.6	
ソ連	1,915.1		365.1	36.6	1,550.0		20.32	33.0	52.9	96	28.15	38.3	55.1	2,862.6	61.9	4,777.7	46.6	
中国	48.7		15.7	0.8	33.0		0.78	0.9	42.3	67	0.52	0.7	63.5	32.8	0.7	81.5	0.8	
他共産圏	67.3		46.3	0.5	21.0		2.20	2.5	9.5	92	2.02	2.7	10.4	-	-	52.1	0.5	
世界合計	5,891.0 (100%)		1,657.5 (28.1%)	100.0	4,233.5 (71.9%)		88.72	100.0	47.7	83	73.61	100.0	57.5	注3) 4,624.3	100.0	10,256.6	100.0	
OPEC	1,896.0		143.5	41.4	1,752.5		14.26	16.1	122.9	54	7.63	10.4	229.5	-	-	-	-	
非OPEC (除共産圏)	1,963.9		1,086.9	20.7	877.0		42.16	47.5	20.8	84	35.29	48.0	24.9	-	-	-	-	
自由世界 共産圏	3,859.9 2,031.1		1,230.4 427.1	62.1 37.9	2,629.5 1,604.0		56.42 32.30	63.6 36.4	46.6 49.7	76 95	42.92 30.69	58.3 41.7	61.3 52.3	- -	- -	- -	- -	

注：1) 累計生産量は、年によっては商業生産量(推定)を加算したものである。

2) 石炭連(1986)に基づく。

3) 未発見資源量については中東及び他共産圏を除いてある。

## (6) 物理系エネルギー資源・・・地熱

一般に、地熱資源量または開発可能量の推定に用いられる方法としては以下に述べるものが考えられている：(1)貯留層の体積、温度を推定して貯留エネルギーを算出する容積法、(2)既開発地域における単位面積当たりの発電量を求め、これに開発可能面積を乗じて総発電可能量を求める地熱地域面積法、(3)既地熱発電地域における開発前の自然放熱量と開発後の熱採取量の比を求め、対象地熱地域からの総放熱量にこの比を乗じて、開発可能量を求める自然放熱量法、(4)地熱流体の起源が天水であることから、全降水量から発電可能量を算出する地下包蔵水量法（日本地熱調査会，日本の地熱資源，198pp., 1970）。

これらの方法によって、1970年以来数回の資源量評価が行われて来た。最近、容積法による評価が行われたので、この報告（宮崎芳徳他，地質調査所報告，275，17-43，1991）に基づいて説明する：日本全国を15ブロックに分け、各ブロック毎に、重力基盤深度、キュリー等温面深度、地熱井温度検層等のデータから貯留層体積、貯留層総エネルギー量を計算し、最後に基準温度をコンデンサ温度の40℃（高温資源対象）または15℃（中・低温資源対象）とした有効総熱量と発電効率を0.4とした発電量（高温資源対象）を求めた。

結果は以下の通りである：150℃以上の高温熱水対流型資源量は、有効総熱が $48.5 \times 10^{18}$ J，発電量が2054万kW・30年（この内、200℃以上の蒸気発電対象資源が582万kWで200℃以下のバイナリ発電対象資源が1472万kW）；90-150℃の中温熱水系地熱資源量は、貯留層総エネルギー量が $800 \times 10^{18}$ J，有効総熱量が $48 \times 10^{18}$ J；42-90℃の低温熱水系地熱資源量は、貯留層総エネルギー量が $1370 \times 10^{18}$ J，有効総熱量が $82 \times 10^{18}$ J。また、重力基盤深度以深の基盤内1kmの岩石熱量を考慮して深部地熱系資源量は4342万kW・30年と推定されている。

一方、現在稼働中及び今後10年間に稼働予定の地熱発電所の総発電量は57万kWであるので、200℃以上の蒸気対象資源量評価の10%に相当する。

## 2. 3 資源・エネルギーの探査

### (1) 石油探査技術の今後の動向

将来のエネルギー需給予測によると、少なくとも21世紀中葉までは、石油・天然ガスが依然として大勢を占めるというのが一般的である。増加する石油の消費量を吸収しつつ、埋蔵量/消費量を増大していくには、新規の油・ガス田の発見が必要である。しかし、ここ10数年来埋蔵量5億バレル以上の巨大油田の発見がないことからみて、今後は堆積盆地縁辺部の中小規模の油・ガス田の探査・開発に向かわざるを得なく、さらに、地理的にもアクセスの困難な僻地、深海、極地などに進出せざるを得なくなっているのが実情である。

したがって、探査技術としては複雑な構造形態とトラップの把握のために、探査技術の高精度化、物性解釈および総合解釈技術の確立が必要である。具体的には、石油・天然ガス探査における新規技術としては、以下のことがあげられる。

### 1) 石油・天然ガスの生成、移動、集積のメカニズムの解明

3次元の地質モデルを設定し、計算機により層位封塞型トラップおよび玄武岩などの非在来型トラップへの生成、移動、集積をシミュレーションする。

### 2) 人工知能化を含めた探査データの総合評価、解釈技術の確立

地下構造形態およびその物性値の解釈、地質、地化学、物理探査、坑井資料などの莫大なデータを駆使して総合的に行うことが必要である。そのためには各種データのバンキングとコンピュータグラフィック技術を含んだワークステーションによる総合解釈システムを構築しなければならない。

### 3) 物性解釈

地下構造内部に石油・天然ガスが賦存すると、そうでない場合に比べて、弾性波伝播速度、密度、比抵抗値などの物性値が変化する。したがって、これら物性値を物理探査データから精度よく求めることができれば探査精度の向上が期待できる。

### 4) S波の利用による調査

従来の反射法地震探査におけるP波を用いた解釈に加えてS波データを併用することにより、ポアソン比などの新しい物性値を用いた解釈が可能となる。

### 5) 3次元調査の普遍化

地下構造形態が微細で複雑になるほど従来の2次元調査ではそれを完全には把握することが困難な場合がある。3次元調査のためのコスト低減を図りつつ、その高精度化を実施し、3次元調査を普遍的に実施する必要がある。

## (2) 石炭の探査に関する今後の展望

石炭の探査については新地域での探査のほか、採掘中の炭鉱周辺での生産に直結した探査があり、何れも石炭産業にとって欠かせない要素となっている。世界では石炭資源の開発と並行して、より条件の良い石炭資源を求めて常に探査活動が実施されており、より効率的かつ精度の高い石炭資源探査への期待が今後ますます大きくなるものと考えられる。将来に発展が期待されている技術分野の主なものをあげると以下の通りである。

### 1) 地表地質調査

探査区域の設定及び探査・開発手法を絞り込むため炭田堆積盆構造解析や評価技術、有限要素法を使う浸透流解析等による水文・水理（ゆう水量、地下水量等）調査技術、その試験・分析のガイドラインの設定（国際規格化等）及び機器分析の自動化技術。

### 2) 試すい技術

正確・急速でコア採取率が高く、安価で安全で速やかに地質情報を把握するため、先端駆動式等の急速作孔技術、作孔方向維持・変更（指向性作孔）技術、ロッド着脱を含む自動作孔技術、海上ボーリング技術。

### 3) 物理探査

陸上での探査技術としては、山間部での探査を能率良く行える屈曲測線探査技術及び3次元（3D）探査技術、能率良くデータ取得ができるデジタルテレメトリ方式（有線）及び小型高分解能受信器によるデータ伝送技術、S波を用いた浅層反射探査



技術，反射断面評価のためのVSP技術，炭層中を卓越して伝播するチャンネル波を利用して断層等の異常構造を調べる炭層内地震探査技術やクロスホールトモグラフィ。

海上での探査技術としては，高分解能調査のための多チャンネル・ショートストリーマ及び小容量振源利用技術，無線テレメトリ方式やベイケーブル方式による浅海探査技術，精密な船位測量及び潮流によるケーブルの曲がり検知技術等を用いた海上での3D探査技術。

データ処理技術としては，演算の高度化，入出力データの拡大，画像処理技術等データ処理技術の高度化，ノイズ除去処理等のデータ処理技術。

#### 4) その他物理探査技術

詳細な堆積盆の解析・評価のための技術の一部として，断層，ホルスト・グラベン構造，しゅう曲構造，堆積盆の基盤の形状や炭層及び堆積物の層厚の変化の概略を把握するための重力探査技術，同じく堆積の厚さや広がりや地域全体の基盤構造を把握するための空中磁力探査技術。

#### 5) 解析・解釈技術

生の物理探査データから地下構造を推定するワークステーション利用解析技術、想定モデルより地下構造を解明するモデリング（シミュレーション）技術。

#### 6) 関連技術

ジオトモグラフィ技術等石油探査技術，微量ガス分析によるフィンガプリント地化学探査技術，キュリー点調査法及び微小地震探査による地温計測・高温地域調査技術，地質断面解明用のアレイMT法，必要な石炭探査上の諸事項を広域に手を下さずに調査できるリモートセンシング技術等，並びにこれら他の分野における関連探査技術。

### (3) リモートセンシング

#### 1) リモートセンシング技術

リモートセンシングは，手法論から見れば，画像の性質，画像の線形処理，画像の変換処理，特徴の抽出，位置の認識，3次元計測，テクスチャ解析と言った基礎技術を集大成して用いる認識技術の応用として位置づけられる。その利用範囲は極めて広く，資源，エネルギー，災害，環境，地質，気象，農林水産，海洋，漁業，地理等がある。

現在では，センサーを航空機や人工衛星に搭載して観測・収集したデータ（一般には数値データ）のことを狭い意味でのリモートセンシングデータと言っている場合が多い。前者を航空機リモートセンシング，後者を衛星リモートセンシングと言って区別する場合もある。これらのリモートセンシングデータを収集・処理・解析・評価する技術を総称してリモートセンシングと呼んでいる。

特に，衛星リモートセンシングの場合には，地球上の観測だけでなく他の惑星探査も可能になるとともに，広域の範囲を瞬時に観測出来る（広域性，同時性）こと，同じ地域を長期間にわたって周期的に繰り返し観測出来る（周期性）ことに特徴を有し

ており、従来から用いられてきた航空写真では全く得られないものである。しかも、スペクトル帯域、つまり波長帯を複数の帯域に分割する観測技術は単なるフィルム写真では得られない技術的展開が期待されている。衛星リモートセンシングは地球や惑星の資源探査および性状のモニタリング機能として不可欠の手段であると言っても過言ではない。

人工衛星の大型化に関する技術開発の速度は著しいものがあり、衛星リモートセンシングは新しい実用化の時代に向けて急速に進展している。

## 2) 地熱資源探査へのリモートセンシングの利用

1972年に米国の地球観測衛星LANDSAT-1の運用が開始されて以来衛星及び航空機から種々の電磁波を用いたリモートセンシングによる地熱資源探査技術は発展を続けている。ここでは、航空機を用いたリモートセンシングについて述べる。

### ①赤外線リモートセンシング

赤外線リモートセンシングによって得られた地熱地域の地表面温度分布に対し、地表面の熱収支方程式に基いて、地表面付近の気象要素をパラメータとして、放熱量分布を求める公式が提出され、この方法を低高度を飛行するヘリコプタで測定した狭い範囲の詳細な地表面温度分布に適用するために、撮像対象域の特徴を記録するTVカメラを赤外線撮像装置に組み込んだ同視野撮像装置が開発され、日本各地における地熱地域からの放熱量が求められている。また、対流放熱量が伝導放熱量に比して大きい場合には基盤岩内に多くの割れ目があり、その逆も成立するとの考えに基づいて、放熱量データから地熱資源のリザーバーに関係する地下の透水係数を推測する理論が構築され、澄川・乳頭他6地域に適用し、地熱井から得られたデータと比較してよい結果が示されている。

### ②キュリー点探査方法

強磁性鉱物が急激に磁化を失うキュリー温度は磁性鉱物の室内実験データや実測温度勾配との比較から考察すると地殻を構成する岩石に対しては400℃以上となり、キュリー点深度は400℃を越える温度の等温面である。地下が高温である地熱地域においてはキュリー等温度深度が地表面に近づいていることを用いて地下深部の温度分布を推定するのが空中磁気探査キュリー点法の原理である。この方法を高度約1400mを飛行する航空機に適用して、1981-1983年に日本全国の探査が行われた。推定キュリー点深度が8km以浅の地域はほぼ第四紀の火山地帯に、15km以深の地域は新第三紀以降の火山活動に乏しい地域に、またこれらの中に当たる10km前後の地域は中新世の火山活動域であるグリーンタフ地域に対応し、キュリー点深度の相対的变化と広域的熱構造は一致するという結論を得た。一方、地熱井の温度検層データから求めた温度勾配とキュリー点深度分布とは東北日本弧、西南日本弧等で整合的であった。一方、硫黄島火山の中心部の温度を325-390℃以上と推定した成果もある。

### ③レーダ映像法

飛行中の航空機から11-31°の低照射角で斜め下方にマイクロ波を射出し、地表面からの反射波を機体下方に取り付けたアンテナで受信すると、地表面に対して斜め方

向からの画像が得られ、低照射角の陰影効果により地形起伏が強調され、断裂を反映したリニアメントを明瞭に判読することが出来る。これが合成開口レーダ映像法である。画像上のリニアメントに地質学的な解釈を加えることによって、断裂を通路あるいはリザーブとしている地熱資源の検出に有効であると考えられ、わが国では1981年6-8月に全国地熱資源総合調査が行われた。その結果の一部として、豊肥地域の画像から、比較的長い距離に渡って追跡できるリニアメント群の位置と重力異常パターンとが良く一致すること、及びリニアメントの卓越方向と一致した断裂系が現地調査によって確認できたこと等が報告されている。また原子力発電に使用後分離される高レベル放射性廃棄物の扱いは重要である。

## 2. 4 地球環境

現在、世界的に見て人口は毎年増加しており、人間活動はそれに伴い拡大している。又国により生活レベルの進歩は異なるがいずれの国も豊かな生活を求めている。したがって、金属資源や非金属資源の需要は年毎に増加し、エネルギー消費も増加している。一方、このような人間活動の増大、資源やエネルギーの消費の増大は、地球規模における酸性雨問題、CO<sub>2</sub>増加による地球温暖化、オゾン層破壊といった環境問題を引き起こしている。この度『地球環境と人間活動を総合して一つのシステムとして捉え、物質循環、エネルギー収支のあるべき姿を安定的に評価できる手法を開発する事』を目的とした地球システム工学はこれからの時代に重要視される学問領域である。すなわち、従来の工学は機能や効率の追求の時代であったが、これからは地球人類の人間性や自然との調和を考慮した技術開発の時代に向けられるべきものとなりつつある。

### (1) 地球環境問題における対策の立案

地球環境問題として取り上げられている問題は多い。例えば森林の保全、砂漠化防止、野生生物の保護、オゾン層破壊防止、大気汚染防止、海洋汚染防止、高レベル放射性廃棄物の生体圏からの隔離など種々挙げられる。

資源工学（資源開発工学）としては、社会に対してエネルギー源であるエネルギー資源、さらに工業材料となる材料資源を提供している。特に、石油、石炭、天然ガス、オイルシェールなどに代表される化石燃料は、エネルギー発生時にCO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>を発生し、大気汚染やオゾン層破壊の原因となり、またSO<sub>x</sub>は酸性雨を発生し森林の保全に悪影響を与えている。このような背景から、エネルギー資源に関する対策としては次のような事が考えられる。

- 1) 各種エネルギー資源の存在量や利用の耐用年数などを考慮しながら地球工学的に、環境に調和したエネルギー資源の使い分けをする指針の必要性
- 2) 物質循環の調査を基にし、自然のCO<sub>2</sub>が許容量以下になるように化石燃料の使用を制限するための指針
- 3) 民生関係の利用者、産業部門の利用者などのエネルギーの効率良い利用
- 4) 省エネルギーに対する努力
- 5) CO<sub>2</sub>の固定法の研究推進

- 6) 燃焼源での脱硫, 脱硝技術の開発推進
- 7) 高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する研究開発の推進
- 8) 新エネルギーの開発

## (2) エネルギー収支における状況の把握・最適化の研究

産業の進展および生活レベルの向上と共に, 各国のエネルギー消費は増大する。最近, わが国ではかなり積極的な省エネルギー政策の推進により, エネルギー消費の増加は slow-downしている。しかし, 全体のエネルギー源に占める化石燃料の割合は85% (1989年度)と高く, これを如何に減少させるかは, 地球環境問題と密接に関係しており重要な問題である。

この問題解決に当たっては, 化石燃料の消費により発生するエネルギー量の他に, 副生するCO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>等の物質循環を地球システム規模の観点から定量的に把握し, 気圏, 水圏, 地圏の生態系を通して自然に循環する許容量を知る必要がある。

また, この物質循環の調査を基にし, 地球人類を構成する各国は自国のエネルギー消費を予測し, かつ国の事情に応じ, 化石燃料の合理的な使用, 最適量を推定する必要がある。これらの事は一国だけの問題でなく, IEAのような国際機関を通じ世界各国に協力を呼かけ実現するように機能する事が必要である。

## (3) 社会環境における資源エネルギーの有効利用対策

人類の持続的発展を考える場合, 現代の人類のみが資源エネルギーを消費し尽くす事はできない。社会的に, 又環境的にも対応した資源エネルギーの有効利用が考えられなければならない。前述の各種エネルギー資源も, 又各種の材料資源も存在量や耐用年数には限りがある。その為には如何に合理的に利用するのか検討されるべきである。エネルギー資源に関しては, 太陽エネルギー, 風力エネルギー, 地熱エネルギー, 水力エネルギー, 海洋エネルギーなどの再生可能エネルギー技術の開発が望まれる, また, さらに核融合などの新エネルギーの実現化が待たれる。また, 利用者側としては, 積極的な省エネルギー器機の利用, 未利用エネルギーの活用に努力する必要がある。

一方, 金属や非金属資源に関しては, 各種元素や化合物の物性を把握し新しい材料開発の研究を行うと共に, 資源リサイクルを強力に推進する事が望まれる。

## (4) 資源リサイクルにおける地球規模的な対策

(3) 項で述べた如く, 資源の有効利用として資源リサイクルは資源確保の面で極めて重要な役割を果たす。この資源リサイクルを円滑に行うためには, まず社会を形成する個人のリサイクルに対する認識を高める必要がある, さらに地方自治体, 企業, 各種団体の協力による収集システムの確立が望まれる。一方では, 選別回収技術の開発, 複雑な組成の廃棄物に対する分離技術の進歩も必要である。また工業製品もリサイクルを考えた製品を生産するような姿勢が望まれる。

次に地球システム工学の観点から資源リサイクルの推進を考える場合には, 数カ国の先