

資源開発工学研究連絡委員会
エネルギー・資源工学研究連絡委員会地球・資源システム工学専門委員会
報告

「循環型社会システム構築のための鉱物・エネルギー資源分野の役割」

平成15年7月15日

日本学術会議
資源開発工学研究連絡委員会
エネルギー・資源工学研究連絡委員会地球・資源システム工学専門委員会

この報告は、第 18 期日本学術会議 資源開発工学研究連絡委員会、エネルギー・資源工学研究連絡委員会地球・資源システム工学専門委員会の審議結果を取りまとめて発表するものである。

資源開発工学研究連絡委員会

委員長	厨川道雄	日本学術会議第 5 部会員、独立行政法人産業技術総合研究所 顧問
幹事	芦田 譲	京都大学大学院工学研究科 教授
幹事	松永 烈	独立行政法人産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門 研究副部門長

エネルギー・資源工学研究連絡委員会地球・資源システム工学専門委員会

委員長	厨川道雄	日本学術会議第 5 部会員、独立行政法人産業技術総合研究所 顧問
	在原典男	早稲田大学理工学部 教授
	江崎哲郎	九州大学大学院工学研究院 教授
	榎本兵治	東北大学大学院環境科学研究科 教授
	恒川昌美	北海道大学大学院工学研究科 教授
	津 宏治	財団法人資源・環境観測解析センター 理事
	野田徹郎	独立行政法人産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門 研究部門長
	藤田豊久	東京大学人工物工学研究センター 教授
幹事	山口 勉	独立行政法人産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門 総括研究員
	山富二郎	東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻 教授
幹事	六川修一	東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻 教授

以下の方々は審議参加などで協力を得た。

中村 崇	東北大学多元物質科学研究所 教授
野口泰彦	経済産業省資源エネルギー庁鉱物資源課 課長
阿部一郎	住友金属鉱業株式会社資源事業部事業室 室長
小林幹男	独立行政法人産業技術総合研究所環境調和技術研究部門 総括研究員

要旨

1 報告書等の名称

循環型社会システム構築のための鉱物・エネルギー資源分野の役割

2 報告書等の内容

・ 作成の背景

「成長の限界」「IPCC 第3次報告」その他で、このままの成長が続けば、資源（鉱物資源、エネルギー資源、水、農産物など）が枯渇し、環境汚染が地球の有する浄化能力を超え、地球は「限界」を超える、という指摘がされている。

1999 年における有害物質の排出量は、「鉱物資源の生産」、「電力」、「化学工業」の順である（地球白書 2002-2003：ワールドウォッチ研究所）という指摘もあり、鉱物資源生産は、背負っている環境負荷「エコリックサック」が大きいことは無視できない。

資源の枯渇及び環境問題は、最近 50 年間、資源の消費量が急減に増し、幾何級数的な増加が続いていることに起因する。最近、特に発展途上国の消費量の伸びが大きく、その傾向は今後ますます強くなるものと考えられる。

「地球の限界」に資源関連分野から対処するには、枯渇する資源を節約し、地球に大なる負荷を与える廃棄物を削減することが重要である。そのため、従来の原料供給－製造－消費－廃棄という線型モデルではなく、可能な限り資源を有効に使用する循環型モデルの導入が重要である。

循環型モデルにおいて、忘れてはならないのは、地球から資源を採取し、最終的には地球に廃棄物を戻すこと、すなわち、地球が出发点であり、最終点であるということである。したがって、モデルを考える場合、出发点である資源の採取から素材化までの過程を無視してはいけない。

鉱山は、大きな「エコリックサック」を宿命的に背負っている。この「エコリックサック」をいかに小さくするかが、モデルにおいて重要な役割をなす。

・ 現状及び問題点

鉱物資源のほとんどを海外、特に発展途上国、に依存している我が国にとって、資源生産国に大きな「エコリックサック」を残している。我が国へ輸入された精鉱の「エコリックサック」は小さいからといって、この問題を無視するわけにはいかない。我が国で培われている資源生産技術を積極的に海外に移転し、海外における鉱山の「エコリックサック」をいかに小さくするかも我が国に与えられた大きな課題である。我が国の産業基盤を支える素材の供給を、地球からの生産から地球に廃棄物として戻すまで、総合的に考え

なければならない。

さらに、循環型モデルを推進する動力となるのが、エネルギーである。化石エネルギーもまた、枯渇資源である。したがって、物質の循環だけではなく、エネルギーの生産と消費を考慮し、モデルを設計しなければならない。また、エネルギー資源の枯渇や環境負荷の点から再生可能エネルギーの導入も重要である。

以上の観点から、どのような資源政策がとられ、今後資源産業界をどのような方向に導こうとしているのか、国内資源が少なくなり、ほとんどの資源を海外に依存している現状において、資源関連企業は、どのような展開を図ろうとしているのか、また、資源産業を技術的に支援する立場にある大学や研究機関は、どのような展望を持ち、どのような研究を行う機関として位置づけようとしているのかを述べた。

- ・ 改善策、提言等の内容

資源研究を 1) 天然資源の枯渇への対応、2) 地球温暖化問題の解決、3) 鉱山開発等による環境負荷の低減の 3 つをターゲットとする研究として位置づけ、それぞれの研究分野における研究展開を述べるとともに、次の二つの提言を行なった。

天然資源は地球の贈りものと考え、海外生産国における「エコリックサック」を可能な限り少なくするため、わが国の優れた環境保全技術に移転するための技術協力を積極的に進めるとともに、資源生産性を飛躍的に向上させ、環境負荷を低減するような技術開発を進めるべきである。

また、現在使用されている金属それぞれについて、新たな供給とリサイクルの 2 つのケースについて経済性、枯渇性、必要なエネルギー、環境負荷を考慮し、新たな供給を中心に考えるか、リサイクルを中心とするか、あるいは代替品の開発を行うかを検討し、位置づけを明確にすべきである。

目次

1. まえがき	1
2. 循環型社会システムの構築と資源の位置づけ	5
3. 資源を取り巻く状況	9
4. 資源分野の展望	12
4. 1 資源政策	12
4. 2 資源業界：金属鉱山の一例	15
4. 3 研究展開	19
4.3.1 衛星リモートセンシング	20
4.3.2 物理探査	21
4.3.3 資源開発	24
4.3.4 素材	26
4.3.5 リサイクル	29
4. 4 研究組織	31
4.4.1 北海道大学	31
4.4.2 東北大学	34
4.4.3 秋田大学	35
4.4.4 東京大学	37
4.4.5 早稲田大学	40
4.4.6 京都大学	42
4.4.7 九州大学	45
4.4.8 独立行政法人産業技術総合研究所	48
4. 5 資源系技術者教育	51
5. 循環型社会システムの構築のための資源分野からの提言	55
6. あとがき	56

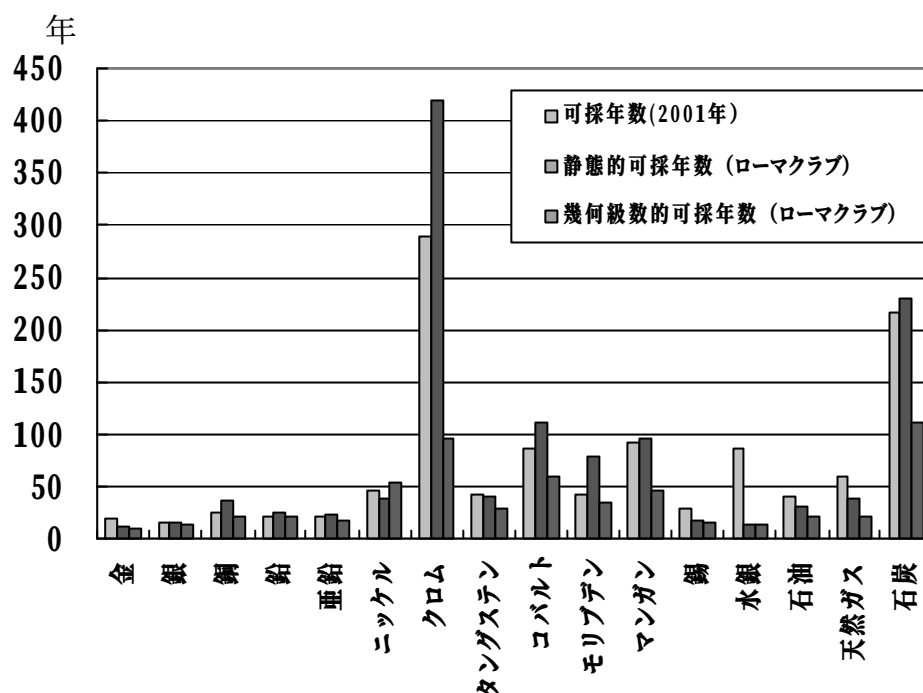
1. まえがき

1972 年にローマクラブは「成長の限界」で、世界の人口、工業化、汚染、食料生産および資源消費が、今のままの成長率を保つとすれば、来るべき 100 年以内に地球の成長は限界点に達するだろうと、指摘した。その 20 年後、この調査を依頼された研究グループが「限界を超えて」が発表した。そのなかで、「1991 年に再びデータやコンピュータ・モデル、そして自らの経験を考慮した結果、技術的改良や環境意識の高揚、環境政策の強化などが見られるにもかかわらず、多くの資源や汚染のフローが既に持続可能な限界を超えてしまっていることがわかった。」と述べている。

「成長の限界」が発表された 1970 年当時、金属やエネルギーなどの天然資源は、何年後に枯渇すると予測していたのだろうか。鉱物資源の埋蔵量を年間の消費量で割ると、資源が持ちこたえる年数、すなわち可採年数が求められる。年当たりの消費量は変わらないと仮定する場合（静態可採年数）と消費量は年とともに幾何級数的に増加すると仮定する場合（幾何級数的可採年数）で、可採年数は異なる。1970 年に予測されたこれらの可採年数を図 1-1 に示す。資源消費量の成長率は、資源によって異なり、錫の 1.1%からアルミニウムの 6.4%にわたっている。当然のことながら、幾何級数的可採年数に比べて静態可採年数の方が大きくなる。静態的可採年数が 30 年以下の資源は、金、銀、鉛、亜鉛、水銀、錫で、幾何級数的可採年数を考えると、銅、タングステン、石油、天然ガスが加わる。

「成長の限界」が発表されて 30 年余り経った現在、30 年以下の可採年数を有していた資源、すなわち枯渇が予測されていた金、銀、鉛、亜鉛、水銀、錫および銅、タングステン、石油、天然ガスは現在どのようになっているのであろうか。図 1-1 の 2001 年の実績から求められた可採年数が示すように、これらの金属はまだ枯渇していない。ここ 30 年間ですべての鉱物やエネルギー資源の生産および消費は、ローマクラブが予想した通りに、枯渇に向かって推移しているとはいえない。だからといって、新しい鉱床の発見や消費量の減少などにより、事態が大幅に改善されたわけでもない。相変わらず、天然資源の枯渇は、我々にとって大きな問題であることには間違いはない。

最近、地球の有限性を指摘する発表が数多く見受けられる。マイケル・カーレーは、著書「地球共有の倫理」のなかで次のように述べている。「これまで地球には、山一つ超えれば常により豊かな資源や切り倒せる木があり、掘り起こせる鉱物があり、町をつくる土地があり、きれいな空気や水があり、逃れていく田園がある、と考えられていた。しかし、現在、人類のあまりにも短い工業化の歴史の中で、我々を取り巻く環境が大幅に変化し、まさに臨終に立ち向かおうとしているといえる。また、地球はひとつの巨大な建設現場であり、燃料保管庫兼ゴミ貯蔵所である。さまざまな貴重なもの、自然から抜き取られていく。抜き取られたものは、莫大なエネルギーを注ぎ込まれて製品に加工され、製品は用済みとなると無価値を見なされて環境の中に投げ捨てられる。投げ捨てられたものは、自然のプロセスを傷つけ、損ない、破壊さえする。」



注) 2001 年のデータは、金属は米国地質調査所、石油、天然ガス、石炭は BP 社による
図 1-1 鉱物及びエネルギー資源の可採年数

地球は大気圏、水圏、地圏および生物圏の4つから構成されるシステムである。この4つの相互作用により、地表の環境が成立している。すなわちこの1つの変化が、他の変化をもたらす。このような地球のシステムは、エネルギーについては開放型である。極めて大量の太陽エネルギーが地表に放射され、一方では宇宙に放出され、バランスを保っている。このとき、大気中の温室効果ガスが増加すると、地表の温度が上昇する。この太陽エネルギーの放射と比べると、人間活動によるエネルギーは微小であり、地球内部からの熱の放出に比べても半分程度である。他方、物質(元素)としては閉鎖型であり、例えば、主たるエネルギー資源である炭素を例にとると、大気中は炭酸ガス、水中では炭酸イオン、生物中では炭水化物として地上を循環している。地圏の炭素は、これらと比べて多量に存在するが、地下に固定されている。しかし、化石燃料として掘り出し、燃焼させると地上の炭素を増加させることになる。これまでの化石燃料の消費は地上の炭素を数%増加させたといわれている。

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) は、1990 年に第1次評価報告書、1995 年から 96 年にかけて第2次評価報告書を発表し、2001 年には引き続き第3次評価報告書を発表した。IPCC は、第2次評価報告書の公表以降、現在及び過去の気候に関するデータが新たに追加

され、それらのデータ解析が進歩し、データそのものを厳密に品質評価し、異なる出所からのデータを比較することにより、気候変化に関する理解が大きく進歩し、さらに、将来の気候を予測するモデルの信頼性も大幅に向上したと述べている。そのうえで、近年得られたより強力な証拠によると、最近 50 年間に観測された温暖化のほとんどは、人間活動によるものであり、21 世紀を通して人間活動が大気組成を変化させ続け、人為起源の気候変化は、今後何世紀にもわたって続くことが見込まれる、と指摘している。

何の対策も講じずに現状のままの成長が続くと、世界は限界に達するということが、いろいろな人や機関によって指摘され始めた。この問題を解決し、世界が持続的発展をするためのいろいろな概念やモデルが数多く提案されている。例えば、レスター・ブラウンは「エコ・エコノミー」という概念を発表した。これは、

- ・ 炭素の排出量と吸収・固定とのバランスを回復させ、
- ・ 人口と地下水位を安定化し、
- ・ 森林と土壌と動植物種の多様性を保全する、

戦略である。このため、

- ・ エネルギーは石油、石炭、天然ガスから風力、太陽、地熱発電にシフトする、
- ・ 直線的モデルからリユース・リサイクルを取り入れた循環型モデルへ変換する、すなわち、金属の採掘は地球の表面に深い傷痕を残し、環境を破壊するので、新しいマテリアル経済、つまり工業がおおむねリサイクル産業に置き換えられるような経済を設計する必要がある、

と主張している。

1987 年にハンス・オプルホールは「環境容量」という概念を提示した。環境容量とは、地球全体あるいは地域で利用可能なエネルギー、再生不可能な資源、土地、水、森林その他資源の総量のことをいう。マイケル・カーレーは、次の条件を満たすように、世界がこの容量を利用すれば、世界の持続的成長が保たれると主張している。

- ・ 環境を損なわない
- ・ 将来の世代の権利を侵さない
- ・ 世界の全ての人々に、資源と生活の質の平等な権利が保障される

例えば、エネルギーの環境容量は、化石燃料を燃やしたときに排出される温室効果ガスのアウトプットに注目して評価される。二酸化炭素排出量でみると、年間排出量は現在 250 億トンであるが、100～120 億トンが持続可能なレベルである。1995 年における先進国一人当たりの排出量は 10.3 トン、発展途上国は 1.8 トンである。2010 年にはそれぞれ 5.3 トンと 3.1 トン、2050 年には 0.9 トンと 1.7 トンとしている。先進国にとっては非常に厳しい値で、2010 年をみても京都議定書で与えられた削減量-5.2%に比べ、-49%と大幅な削減を必要としている。

ドイツのヴッパタール研究所は、「地球が生き残るための条件」のなかで、自然を犠牲にして経済成長をすれば、西側の豊かさや将来世代の生活も損なわれ、南の国の世界経済へ

の仲間入りはさらに困難になることは確実であると述べている。人類が自然環境のなかでその本来の特質を傷つけることなく利用できる空間を「環境空間」と称した。「環境空間」は、エコシステムの需要能力、天然資源の復元力、原料の入手可能性からなる。この概念をもとに、エコロジー的環境空間利用基準（資源利用ガイドライン）を以下のように定めている。

- ・ 再生可能な資源を利用は、同じ期間で再生できる量を超えてはならない。
- ・ 環境に排出される物質は、環境が受け入れられる量を超えてはならない。
- ・ エネルギー・物質の全ライフサイクル採取量は、低リスクレベルまで削減しなければならない。

これをもとに「未来可能な社会のシナリオ」を描いており、「脱物質化」と「インダストリアル・エコロジー」を、先を見すえた遠大な概念的枠組として位置づけている。「脱物質化」の背景にある主要な考えは、今後数 10 年に人類が自然から取り出す物質・エネルギーフローを「ファクター10」（10 分の 1）に削減することである。

参考文献

- 1) D.H.メドウズ、D.L.メドウズ、J.ランダズ、W.W.ベアランズ3世、「成長の限界—ローマクラブ「人類の危機」レポート」ダイヤモンド社、1972 年
- 2) D.H.メドウズ、D.L.メドウズ、J.ランダズ、「限界を超えて 生きるための選択」ダイヤモンド社、1992 年
- 3) M.カーレー、F.スパーペンス、「地球共有の倫理」日科技連、1999 年
- 4) E. A. Keller 「Environmental Geology」Prentice Hall、1997 年
- 5) IPCC 第3次評価報告書、<http://www.ipcc.ch/>
- 6) レスター・ブラウン、「エコ・エコノミー」家の光協会、2002 年
- 7) ヴッパタール研究所編、「地球が生き残るための条件」家の光協会、2002 年
- 8) 「Mineral Commodity Summaries 2002」米国地質調査所、2002 年
- 9) 「Statistical review of world energy」BP 社、2002 年

2. 循環型社会システムの構築と資源の位置づけ

発展途上国を中心に工業化、人口増加が加速的に進みつつあるなかで、地球温暖化を始めとする地球環境の悪化は日増しに現実味を帯び、天然資源の枯渇も将来の世代を支えるために、具体的方策を考えるとときがきているといえる。先に述べたように、「成長の限界」が発表されてから多くの人や機関によって、我々人類の生活・社会活動により「地球」がいかに傷痕を受けているかを示し、「地球」を健全な形に保つためいろいろな提案がされている。これらの提案の多くは、方向性を示すものとしては正しいが、世界的な社会経済システムの変換を必要とするものである。そこで、現実問題として、今我々が具体的に何をすべきかを考えることを、問題解決の第1歩と位置づけることとする。

環境問題では、持続可能（sustainable）であることが要求される。持続可能とは、経済的に実行可能で、環境に害を及ぼさず、かつ、社会的に公正であるような開発行為をさす。天然資源の使用についても大気汚染や温暖化などの地球環境を損なわないエネルギー計画の再構築が不可欠であり、エネルギー資源の節約がその大きな柱の一つとなる。また、化石燃料を未来エネルギーへの過度的役割として位置づけることも考えねばならない。

R.ブラウン、M.カーレーらが主張しているように、直線モデル型経済から循環型モデル型経済への転換、すなわち生産物が「揺りかごから墓場までではなく、揺りかごから揺りかごへ」のライフスタイルのなかで、我々の「資源工学」が対象としている資源・エネルギーを機能させることが、現実的であると思われる。すなわち、循環型社会システムの構築という視点に立ち、そのなかで資源・エネルギーのあるべき姿を考えることである。

循環型社会システムにおけるマテリアルフローの概念図を図 2-1 に示す。地球にある鉱山や森林から原料が採取されて製品になり、やがて地球に廃棄物として戻されるフローのなかで、リサイクルなどによるマテリアルの循環を取り入れたものモデルである。

この図で、マテリアルは、地球の有する限りある資源から供給され、さまざまなパスを経て最終的には地球に廃棄物が戻されていることに注目すべきである。経済産業省によれば、21 世紀に向け我が国が持続的成長を遂げるために構築すべき経済システムとしての循環型社会システムの備える基本的要素として、

- 1) 必要な資源・エネルギーについては、枯渇性資源・エネルギーの利用を可能な限り少なくするとともに、再生可能な資源・エネルギーの利用を可能な限り多くすることにより、経済活動に新たに投入される資源・エネルギーを可能な限り少なくすること（投入の最小化）
- 2) 経済活動に伴う廃棄物、二酸化炭素等の温室効果ガス、ダイオキシン等の有害化学物質、重金属、窒素酸化物、オゾン層破壊物質などの環境負荷物質などの生態系への排出をできるだけ少なくすること。（排出の最小化）

を挙げている。

循環型社会システムの構築に向けて講じるべき対策は、マテリアルフローにおける物質

のリサイクル（Recycle：再資源化）のみならず、リデュース（Reduce：省資源化、長寿命化などによる廃棄物の排出抑制）、リユース（Reuse：製品、部品の再利用）を含む総合的な取組の促進である。

マテリアル・フロー

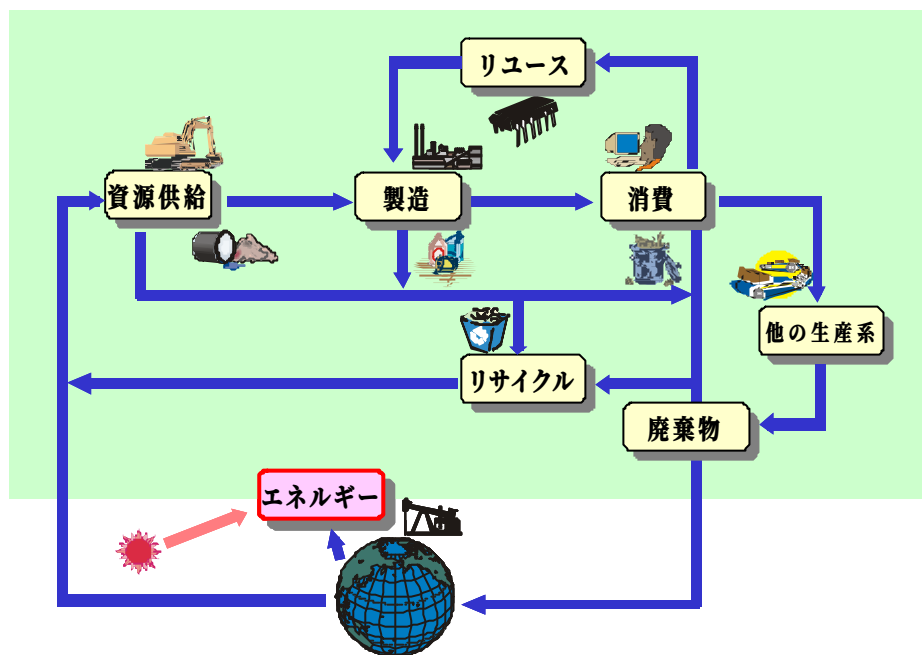


図 2-1 マテリアルフロー

マテリアルフローを考えるうえで、忘れてはならないことが2つある。まず第1に、マテリアルフローは、地球にある資源の供給に始まる。リデュース、リユース、リサイクルを積極的に促進することにより、限りある資源の採掘を削減することは、資源の枯渇や地球環境の観点から重要である。しかし、世界で年間約 300 億トンの鉱物資源が採取されているのが現状である。図 2-2 に環境省資料に基づく、我が国の物質収支を示す。我が国に供給される自然界からの資源採取量は 18.4 億tに達し、再生利用量の 2.3 億tに比較して、圧倒的に多いのが現実である。

そこで、鉱物資源の採掘は当面避けられないという視点に立ち、いかに効率的かつ環境への負荷が最小になるよう資源を採掘し、それを素材化するかの問題に取り組むことが、循環型社会システム全体を考えるうえで重要である。

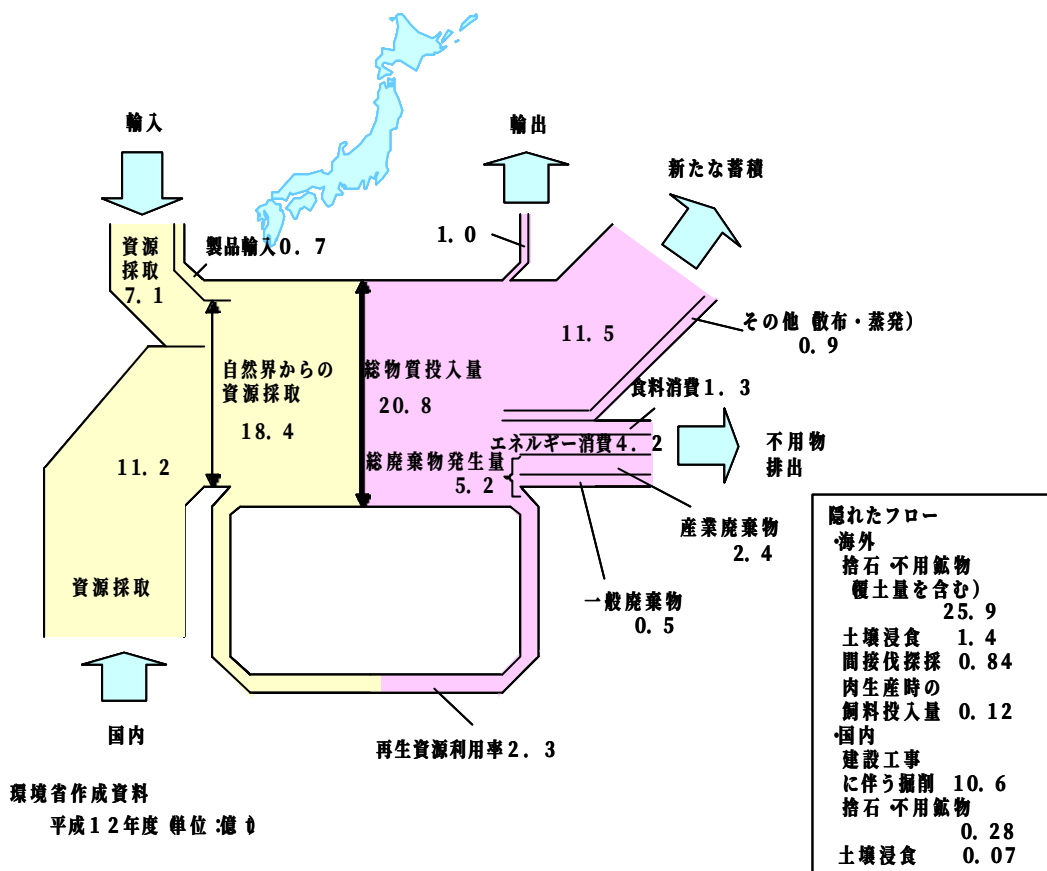


図 2-2 我が国の物質収支

第2に、マテリアルフローを考える場合、物質の流れのみに注意を払いがちである。物質を循環するためにはエネルギーが必要であることを認識すべきである。すなわち、「物質・エネルギー保存の法則」のみならず「エントロピーの増大則」も考えて、マテリアルフローを検討しなければならない。鉱石の採掘から素材化、製品の生産、流通、消費、使用済み製品のリユース、リサイクル、廃棄の過程、これら全ての過程でエネルギーが消費される。すなわち、低エントロピーのエネルギーを高エントロピーのエネルギーに変換して消費することにより、鉱石から素材の生産、さらにリサイクルのため使用済みの製品や部品の素材化の過程で、エントロピーの高い物質を低い物質に変換している。また、製品を使用しているときはもちろんのこと、製品の流通や廃棄の際の移動にもエネルギーを使用している。このために必要なエネルギー源の大部分は、再生不可能な資源（化石燃料）に依存している。エネルギーは最終的には熱として拡散するので、物質とは異なり、リユース、リサイクルすることはできない。したがって、再生不可能なエネルギー資源も金属資源と同様、効率的かつ環境への負荷が最小になるよう地球から採取し、かつそれを有効に使用することが重要である。また、再生可能なエネルギー資源である地熱、太陽、風力

などの導入促進を図ることも、循環型社会システムの構築にとって、大切な手段である。

構築された循環型社会システムが実際に社会で取り入れられ、実行されるためには、技術的な面に加え、社会設計、制度設計、経営戦略などでこのモデルをいかに実現するかである。そのためには環境会計を我が国ばかりではなく、いかに世界に浸透させるか、経済性を取り入れた LCA 手法を開発し、循環型社会システム全体の設計、評価のみならず、個々のマテリアルフローのなかに、いかに導入するかがポイントとなる。

参考文献

- 1) M.カーレー、F.スパーペンス、「地球共有の倫理」日科技連、1999 年
- 2) レスター・ブラウン、「エコ・エコノミー」家の光協会、2002 年
- 3) E. A. Keller 「Environmental Geology」Prentice Hall、1997 年
- 4) 産業構造審議会地球環境部会、廃棄物・リサイクル部会合同基本問題小委員会資料「循環型経済システムの構築に向けて」経済産業省、1999 年
- 5) エントロピー学会編、「循環型社会を問う 生命・技術・経済」藤原書店、2001 年

3. 資源を取り巻く状況

天然資源から原料を得るという行為は、単に資源が掘り尽くされて枯渇するという問題の他に、採掘、選鉱、輸送を通して、大量のエネルギーを消費し、自然の生態系を破壊し、大気・水質・土壌を汚染するという、大きな問題を抱えている。これは、鉱物を採掘し、素材を生産する鉱山が有する宿命である。天然資源を採掘し、素材化するためには、鉱物を取り出した後の廃石など不必要なものを移動し、保管しなければならない。シュミット・ブレイクは、これら経済的に利用できない物質や廃棄物を「エコロジカル・バックパック」、「エコリックサック」あるいは「リックサック」と表現した。例えば、鉱石の品位によって異なるが、金 1kg を得るために、350 t すなわち 35 万倍のエコリックサックを背負い、また鉄 1 t を得るためには 14 t のエコリックサックを背負っている。金属ばかりでなく、エネルギーもまたエコリックサックを背負っている。例えば、石炭の 1 t は、3 t のボタと水のエコリックサックを背負っている。石灰石などの鉱石は、採掘したもののほとんどが利用できるため、そのエコリックサックは、金属に比べてかなり小さいが、採掘にはやはり環境破壊を伴っている。

産業革命以後、今日に至るまでの資源収獲型文明を支えてきたのが、石油、石炭、金、銀、銅、鉄、アルミニウムなどの鉱物資源である。IT 時代になっても、その需要は、銅線が光ファイバーに変わっていくように、ものによって変化があったとしても、全体的には減らないどころか、発展途上国が先進国型経済発展を後追いしている現状では、むしろ増える一方である。

我が国は鉱物及びエネルギー資源のほとんどを海外に依存している。非鉄金属においては、神岡鉱山の生産停止によって、残す主要鉱山は、豊羽鉱山と菱刈鉱山の 2 つとなった。鉱石の自給率は、銅 0.04%、鉛 4.1%、亜鉛 10.2%、鉄・アルミニウム・ニッケル 0% となっている。このように、我が国は多くの鉱石の供給を海外に依存しているため、最大の鉱石輸入国となっている。かつて我が国の社会や産業を支えた石炭も、太平洋炭鉱の閉山によって、ほぼ 100% 海外に依存することとなった。しかし、鉱物資源の安定供給は、今後とも、我が国の経済社会を支えるために重要な課題である。これまで我が国の有する卓越した技術により、例えば IT や環境関連のような先端的あるいは国際的産業に対して、高付加価値ある製品を提供することは、今後ますます重要になると思われる。

鉱物資源の採掘という行為はもともと宿命的に自然破壊を伴うものであり、技術的にその度合いを減らすことはできても、なくすことはできない。例えば、銅 1 トンを生産するために、鉱床の探査に始まり、鉱石の採掘、選鉱、精錬を過程において、1,898 トンのエコリックサックを環境に残すことになる。ほとんどの鉱物資源を輸入に頼っている我が国においては、探査、採掘、選考を海外に依存し、精錬として国内に持ち込まれている。そのため、1,898 トンのうち 1,896 トンのエコリックサックが産出国に残され、我が国においては、製錬の過程で 2 トンのエコリックサックが生ずるのみである。すなわち、発展途上国

である資源生産国に 99.9%のエコリックサックを残し、我が国においては 0.1%のエコリックサックが残るだけで、銅を供給している。いくら素材を得るプロセスでの環境負荷が小さいからといって、資源生産国に大きな環境負荷を与えてそのまま放置することは許されるべきであろうか。天然資源を地球の贈り物と考え、資源の生産から素材化に至る全てのプロセスを考えて、素材の供給を行うことが必要である。特に、資源の生産国に対して、生産性を飛躍的に向上させて持続可能性を高めるとともに、資源生産国における環境負荷を低減するような方策を提供しなければならない。すなわち、鉱床の探査に始まり、鉱石の採掘、選鉱、精錬に至るそれぞれのプロセスについて、技術の向上を図り、これらのプロセスで発生するエコリックサックを小さくすることが、我々に与えられた使命である。

また、視点を変えて資源生産者から循環型社会システムを見れば、資源の需要を抑制し、環境対策のための費用が増大するという負の効果をもたらすと捉えられるがちである。その理由の一つとして、資源生産活動に伴う環境負荷の抑制のために必要なコストを負担するシステムができていない、すなわち環境負荷に伴うコストの内部化などの仕組みが未熟で、取り入れられていないことである。環境対策を含めた鉱山経営全体に対して、この問題を解決することが重要であることはいうまでもない。

我々の日常生活や経済活動が枯渇の恐れのある資源に依存する一方で、現在の廃棄物の発生量は、一般廃棄物で年間約 5 千万トン、産業廃棄物が約 4 億トンとなっており、一般廃棄物のリサイクル率は上昇しているが未だ 1 割程度であり、産業廃棄物についても約 4 割程度と、いずれも伸び悩んでいる。

循環型社会システムを構築し、限りある資源を有効に利用するには、金属資源のリサイクルは重要なテーマである。現在、金、銀、銅、鉛、鉄、アルミなどの主要金属や tantalum などの一部のレアメタルはリサイクルされている。金属鉱業事業団によれば、金の新たな供給が 256 t（国内生産 146 t、輸入 73 t、私的保有金放出 37 t）に対して、再生金は 15 t に過ぎないと指摘している。主要金属に加えて、戦略的資源であるレアメタルに対しても広範囲な資源のリサイクル技術の開発が急務である。ある種の金属のリサイクルは、省エネの観点から見ても、有効な方法であることも認識すべきである。例えば、アルミをリサイクル品から生産するときに要するエネルギーは、鉱石から生産するときに必要なエネルギーに比べて 25 分の 1 に過ぎない。

参考文献

- 1) E.ワイゼッカー、A.ロビンス、L.ロビンス、「ファクター 4」省エネルギーセンター、1998 年
- 2) 業構造審議会地球環境部会、廃棄物・リサイクル部会合同基本問題小委員会資料「循環型経済システムの構築に向けて」経済産業省、1999 年
- 3) 児島秀平、「資源安定供給論」経済産業省鉱物資源課、2002 年
- 4) 金属鉱業事業団資源情報センター、「鉱物資源マテリアルフロー」金属鉱業事業団、

2001 年

5) 谷口正次、「資源採掘から環境問題を考える」海象社、2001 年

4. 資源分野の展望

4. 1 資源政策

資源産業が生産する非鉄金属素材は現代の産業社会・国民生活に不可欠な基礎素材であり、資源産業の役割はこの素材を安定的に供給することにある。また、廃棄物から有用な物質を回収・再資源化する基本的な技術・ノウハウを他の産業以上に多く保有する資源産業は、循環型経済社会の構築に際しても大きな貢献を期待されている。

このような社会的背景にあって、我が国資源産業が今後とも国際競争力を維持しつつ、産業・社会において重要な役割を担い貢献し続けるために必要な取り組みについて、これまでの資源政策や資源産業の現状を踏まえ展望する。

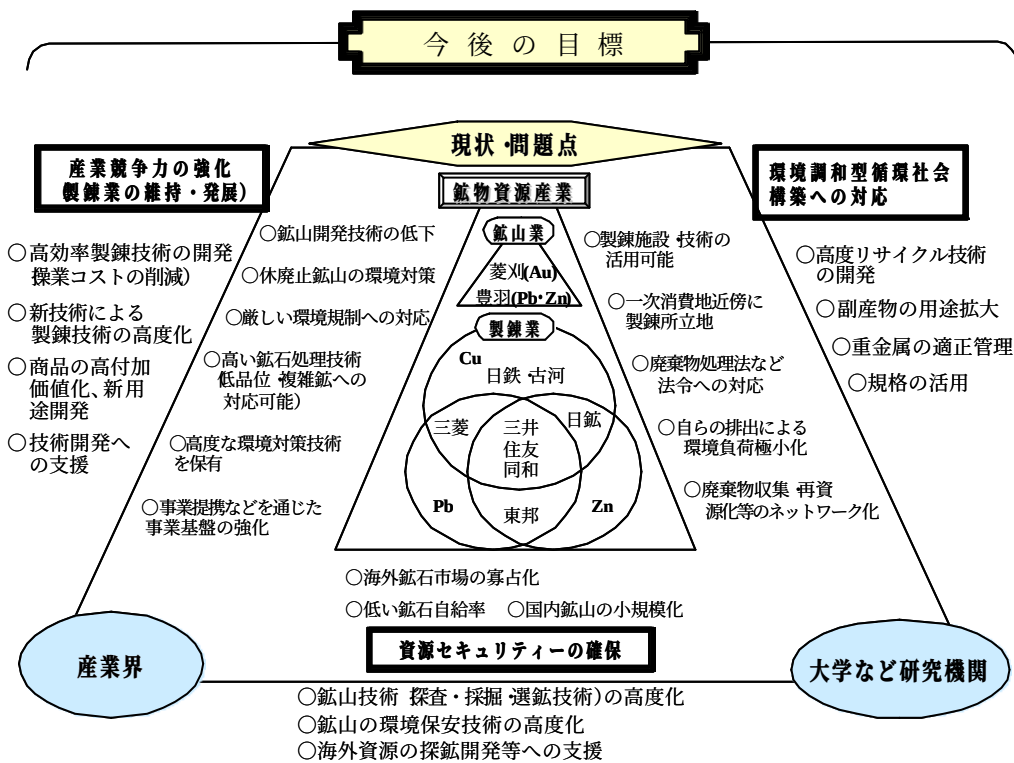


図 4-1-1 鉱業資源政策の展望

1) 資源産業の現状

資源産業の主要製品である銅、鉛、亜鉛などの非鉄金属素材は、電線・伸銅品、蓄電池、鋼材のメッキなどに使用され、最終的には自動車・電気製品などに組み込まれたり、建造物などの社会的インフラに供されており、産業活動や国民生活の維持・発展にとって不可欠な基礎素材となっている。資源産業の役割は、この素材を必要ととき、必要な品質で、必要な量を供給することである。

このような資源産業は、鉱石を探査・採掘する「鉱山業」と採掘した鉱石から地金を生

産する「製錬業」に大別される。このうち、鉱山業は鉱石を探し当てるための探鉱費と鉱山を開坑するためのインフラ投資に莫大な資金を要する産業であり、製錬業は典型的な資本集約設備産業・エネルギー多消費型産業である。

(1) 鉱山業

国内鉱山の多くは鉱量の枯渇、円高による地金価格の低迷などにより相次いで閉山し、現在稼行する従業員 100 人以上の鉱山は 2 鉱山のみとなっている。一方、経済発展に伴い地金需要が著しく増大したため、鉱石自給率は低下し、鉱石供給の太宗を海外鉱山へ依存している。このため、海外での資源開発に取り組み、大型開発プロジェクトの権益取得のみならず、自主探査も行っている。

また、環境保安問題への対応も必要な課題である。鉱山開発に当たっての環境アセスメントや稼行中の環境保安問題への対応は勿論のこと、操業終了後も坑廃水処理などの環境保安対策が求められる。

(2) 製錬業

高度経済成長期の急激な地金需要の増大、環境保全気運の高まり、第一次石油危機の影響による地金需要の減退など時々の社会経済状況に対応するため、海外技術の導入、設備の合理化、処理技術の高度化、製錬所の統廃合などを推進し、コスト競争力を確保するとともに、近年は循環型社会構築への気運の高まりを背景に、製錬設備・技術を活用した廃棄物処理やリサイクル事業を積極的に展開している。

しかしながら、海外鉱山開発の推進により自主開発比率（権益相当分）は高まったものの、依然として大部分を海外からの買鉱に依存するカスタムスメルターであり、収益源である受取製錬費は、鉱石の受給と共に国際金属市場で決定される地金価格と為替相場の影響に左右される。特に、近年は資源資本大手の買収などにより寡占化が進み、寡占化は海外での鉱石確保はより厳しいものにし、製錬業の国際競争力をより一層厳しいものとする。また、環境対策技術の水準は高いものの、厳しい環境規制への対応、過去の蓄積鉱害対策などのコストアップ要因を抱えている。

2) これまでの資源政策

我が国の資源政策は資源の安定供給を図ることを目的として、国内外の探鉱開発、鉱害対策、経営安定化対策、資源の探査技術開発、備蓄などの施策を加えながら今日に至っており、現在、基礎的な調査段階から生産段階、更に生産終了に至るまでの各段階に対応して支援を行う施策体系となっている。

現在の政策は資源探鉱・開発の促進が中心であり、予算などの多くの支援措置も探鉱関係が中心となっているが、対象は国内鉱山から海外鉱山へと軸足を移している。また、探鉱関連の技術開発も合理的な資源開発を行うことを目的としたものである。

なお、製錬や流通の段階（下流）については、これまで民間企業の主体的な経営判断に委ねられてきているが、近年は製錬施設や技術を活用し、鉱石の代替となる廃棄物から有価金属を回収する技術の開発に対しても支援している。

3) 今後の資源産業

非鉄金属地金は製造業及び国民生活の維持・発展に不可欠な基礎素材であり、海外から鉱石を安定確保し、製錬し、必要なときに必要な品質で必要な量の地金を供給するという資源産業の役割は今後も不変であろう。また、廃棄物などの再資源化技術と設備を保有する主要な産業であるので、循環型社会構築のための貢献も期待されている。このような資源産業が担うべき責務、社会的要請から、資源産業が目指すべき目標は以下のとおりと考えられる。

(1) 資源セキュリティの確保

主要非鉄金属地金の安定供給には海外からの鉱石の安定入手が不可欠であるが、鉱石市場は資源メジャーの寡占化が進展しているため、鉱山技術（鉱床の探査・採鉱・選鉱に係る技術）の競争力を強化して鉱山開発へ参加し、自主開発鉱石の比率を高めることが必要である。

資源開発協力基礎調査事業は、これまでJICA経由で金属鉱業事業団が行っていたが、15年度より経済産業省から当事業団への直接委託事業とすることとし、これまでの経済協力を主眼とした制度から我が国の鉱物資源の安定供給確保という目的を前面に打ち出したODA事業へと性格を変えた。これによって事業団は、途上国の民間企業等の相手方と共同で、調査終了後の権益の引継ぎや鉱石の引取り等を前提とした資源調査事業（いわば“海外版 広域調査”）を行うこととしている。

(2) 産業競争力の強化

非鉄金属地金を安定的に供給するには製錬業の競争力を強化する必要がある。製錬業の製品である地金は品質や製品開発力などに大きな差がないので、産業競争力はほぼコスト競争力に等しい。コスト競争力を持つには製錬操業コストを低減することが必要である。また、さらに付加価値を高めた電子材料等のハイテク材料分野に進出することも重要な課題である。

(3) 環境調和型循環社会構築への対応

循環型社会の構築に貢献するためには、まず、資源産業からの排出による環境負荷を極小化するとともに、製錬技術を活用して使用済み製品或いは廃棄物に含まれる稀薄な非鉄金属を効率的に回収・再資源化することが必要である。また、鉱山製錬技術を活かして土壌改良等の新たな環境ビジネスへの展開も期待される。

「資源セキュリティの確保」、「産業競争力の強化」、「環境調和型循環社会構築への対応」という目標を達成するためには政策支援が必要である。このため、資源政策も海外探鉱への支援に加え、海外で資源開発を行うために必要な技術、資源産業の維持・発展の基礎となる産業競争力強化及び環境負荷極小化のための技術開発に対しても、必要なものについては支援を検討していく必要があると考えている。この場合、産・学・官が情報交換して意思疎通を図るなど連携、一致協力が不可欠となることは言うまでもない。

また、資源セキュリティの確保は海外からの鉱石の安定供給のみによって達成される

ものではなく、鉱石から地金を生産する製錬業の存在が不可欠である。製錬業は廃棄物などからの有価金属の回収・再資源化にも重要な役割を果たしており、これは製錬原料の確保に繋がるので資源セキュリティの確保にも寄与する。したがって、資源セキュリティの確保は鉱山業における自給率の向上、製錬業の産業競争力の強化及び環境調和型循環社会への対応を同時に達成しなければならない。

4. 2 資源業界：金属鉱山の一例

日本には現在代表的な非鉄金属鉱業関連の企業として、住友金属鉱山(株)、東邦亜鉛(株)、同和鉱業(株)、日鉄鉱業(株)、日鉄金属(株)、古河機械金属(株)、三井金属鉱業(株)、三菱マテリアル(株)などが挙げられる。循環型社会システムは必ずしも金属鉱業にとって追い風となるものではなく、むしろ逆風となるものと言っても良い。しかし、資源を供給するこれらの企業は我々の社会にとってなくてはならないものである。第18期においてはこれらの金属鉱業関連企業の循環型社会システムにおける位置付け及び役割についての議論は殆ど行っておらず、今後の課題として残されている。しかしこの問題は資源分野にとって重要であることから、今期においては代表例として委員会で紹介のあった住友金属鉱山(株)を取り上げることにした。

非鉄金属資源産業（鉱山業）には一般の産業とは違ったリスク・特徴がある。

(1) 資源事業の特徴

- ・偏在性 一般の産業と違い、資源産業はその立地を自由に選択することが不可能であり、開発可能資源が賦存する位置でのみ鉱山立地が可能である。
- ・減耗性 採掘すればいずれ消滅・閉山する。植林のように再生は不可能。鉱山の長期安定操業には探鉱が不可欠である。
- ・開発リスク 開発へのリードタイムが長い(平均 20 年)、開発資金が膨大、近年の大型銅鉱山開発には US\$20 億を要する例もある。開発許可認可取得にも資金と時間を要する。
- ・環境保全 環境破壊産業の代表と見られることが多い。当然ながら環境対策を十分に講じなければ開発は不可能であり、これにも費用がかさむ。先住民や環境団体との協調も重要である。
- ・金属価格の高変動性 需給のバランス次第で価格が大きく変動する。変動の大きさによって、縮小・減産・閉山が日常的に行われる。

(2) 住友の鉱山事業

1590 年に京都で銅製錬業を開始、日本最大銅鉱山の一つである別子銅山を 1691 年に開発・稼行し、住友事業の基礎となる。その後国内各所で鉱山開発するも、1980 年にはすべて閉山し、一時期鉱山を持たない鉱山会社となった。1981 年に鹿児島県の菱刈金山を発見、1985 年に生産を開始して今日に至っている。

海外での鉱山開発は戦前から実施してきたが、国内鉱山の相次ぐ閉山により、鉱源を本格的に海外に求めた。1961 年カナダでベスレヘム銅山開発融資買鉱が成功し、さらに複数

プロジェクトへの参画により自社銅製錬所への精鉱安定供給に貢献した。

菱刈鉱山産出金先売で資金を捻出し、1986 年に米国アリゾナ州モレンシ銅山権益の一部を購入して経営に参画した。この投資も成功し、得られた利益でチリのカンデラリア銅山権益一部を購入した。さらにアラスカで金鉱床探鉱を実施した結果、ポゴ金鉱床を発見し、現在開発準備中である。また、現在フィリピンでニッケル鉱山・製錬所プロジェクトを推進中である。

鉱山操業や投資で得られた利益を、次の鉱山に投資というサイクルが近年まで継続した。しかし近年の金属価格の低迷により、世界的に鉱山業からの十分な利益確保が困難となり、新規鉱山投資は容易でないのが実情である。

(3) 国内鉱山業の動向

国内には非鉄 8 社がある。貿易自由化が銅(1963)・鉛/亜鉛(1964)に実施され、さらに円高により国内鉱山業は急速に競争力を失い閉山ラッシュが続いた。一方で国内製錬能力がアップし必要な精鉱を確保すべく、鉱山業の海外進出が必要となった。国内各社は鉱山業より製錬業の性格を強くし、世界各地から精鉱輸入に頼らざるを得なくなった。世界大手と比較すると国内鉱山会社の規模は小さく資金力も弱いことから、1970 年以降には大型プロジェクトに業界共同開発を指向し、各地で開発を実施してきた。

1980 年代にアジア・南米で相次いで銅製錬所が稼動開始し、増産の結果、銅価格の低迷と銅精鉱不足を惹き起した。一方で国内鉱山が競争力を失ったことから「海外自山鉱」確保で製錬業の生き残り、「鉱山業で利益」確保が求められている。この結果、国内非鉄産業の自山鉱率(銅)は 5.8% (1989) から 41.3% (2000) へと大きく変化した。以下に各社の海外鉱山投資と国内各社の提携を示す。

- ・住友金属鉱山：4 銅鉱山、3 ニッケル鉱山(製錬所含む)、1 銅製錬所、1 金鉱山開発準備中、蒸留亜鉛で三井と提携、硫酸で同和と提携
- ・日鉱金属：3 銅鉱山、1 亜鉛鉱山、銅製錬で韓国 LG カッパー・三井と提携、世界第 2 位の銅地金生産規模
- ・三菱マテリアル：6 銅鉱山、1 銅製錬所
- ・同和鉱業：1 銅鉱山、2 銅鉛亜鉛鉱山、硫酸で住友と提携
- ・古河機械金属：1 銅鉱山、1 銅製錬所
- ・日鉄鉱業：1 銅鉱山、1 銅製錬所
- ・三井金属鉱業：1 銅鉱山、1 亜鉛鉱山、銅製錬で日鉱金属、蒸留亜鉛で住友、電気亜鉛で東邦亜鉛と提携

(4) 非鉄メジャー

世界的資源総合メジャーとして Anglo American、Rio Tinto、BHP-Billiton がある。これらの会社はいずれもロンドンに本社を構え、石油以外の資源全般に亘る事業を世界規模で展開している。日本 8 社利益合計額以上の利益を上げ、近年はその莫大な資金量を駆使して会社買収合併を繰り返して企業規模を大きくしている。この結果、新規銅資源開発の

大部分を握り、銅精鉱マーケットのシェアを拡大している。

近年の中国・インド非鉄金属消費量増加は目覚しく、且つそれぞれの銅製錬所への精鉱輸入量の増大は、銅精鉱マーケットへの影響が大きく、国内各社の銅精鉱輸入条件の大幅悪化を招いている。これは鉱山業そのもので利益増大を意味することから、鉱山業で利益確保すべきとの考えに帰着する。

上記3社に続くチリ Codelco、ブラジル Rio Doce、米国 Newmont、Phelps Dodge、Barrick、カナダ TeckCominco、Inco、Noranda 等の非鉄貴金属大手各社も優良鉱山の囲い込みにしのぎを削りあい、国内各社の優良プロジェクト参入は容易ではない。

現在、大規模銅鉱床探鉱開発で注目される国は、モンゴル（ジュニア鉱山会社）・ブラジル・チリである。国内鉱山会社に参入機会が皆無でないが、巨大な資金が見込まれることから容易でない。ジュニア鉱山会社のプロジェクトは非鉄メジャーや大手鉱山会社に吸収されるのが一般的な見方である。

(5) 住友の資源戦略

目標は「自社製錬所への原料安定供給」と「鉱山経営での利益確保」である。製錬所増産起業（230→450ktpy）とニッケル増産（36→60ktpy）に対応する鉱源確保に努めていく。鉱源確保には積極的権益取得で鉱山経営に参画し、応分の利益確保を目指す。

この目標達成への戦略の一つとして人材の確保がある。国内主要鉱山は豊羽鉱山（Pb,Zn）と菱刈鉱山（Au）を残すのみとなった。鉱山技術は一朝一夕に獲得できるものでなく、経験の比重が極めて大きい。国内で鉱山技術の練磨・継承が困難となりつつあり、海外に活動の場を求めざるを得ない。海外鉱山プロジェクトを調査・評価できる人材の育成、さらには交渉力のある人材の育成が不可欠である。

住友の菱刈鉱山を長期・安定的に操業し、利益獲得と共に人材の育成と鉱山技術の練磨継承の場とし、併せて海外鉱山への技術者派遣・研修員派遣を実施していく。

もう一つの戦略は投資資金調達である。既存事業の利益確保と、進行中プロジェクトの早期戦力化からの利益確保、さらに有利な資金調達である。住友は早期から海外進出を進めてきた。現在は Inco（Ni）、Phelps Dodge（Cu）、Rio Tinto（Cu）、Newmont（Cu,Au）、TeckCominco（資本,Au）の各大手と提携している。

海外操業鉱山への技術者派遣と駐在員派遣で情報収集に努め、有望プロジェクト発掘・参画すべく、探鉱開発プロジェクトの調査と自らの探鉱活動を実施している。対象地域は基本的に全世界であるが、特に南米、アジア、豪州、中米、北米等である。対象鉱種は銅、ニッケル、金、PGM 等としている。

(6) 鉱山業の環境問題

人間の活動・企業の活動は多寡の違いはあるが、自然と天然資源への働きかけを基本としている。この意味から、人間の活動により自然環境を変化させることは避けて通れないことである。鉱山業は古くから金や銅の採取・製錬活動に伴って自然へ悪影響を与えてきた歴史がある。

日本には 2 万ヶ所以上と言われる鉱山探鉱・操業箇所がある。その大部分は極めて小規模で自然への悪影響は無いものであるが、そのまま排水すれば環境に重大な悪影響を及ぼす休廃止鉱山が多数存在する。最大の問題は重金属を含む酸性水発生である。閉山から何十年も経過した鉱山に対し、各鉱山会社（解散した場合は国）は多額の費用投じて鉱山排水処理と旧施設の保全作業を実施し環境保全に努めている。これは当然の義務としても、鉱山業には負担となっているのも事実である。日本の休廃止鉱山の管理技術や管理方法は世界的に見ても高レベルであり、開発途上国へのこれらの技術移転援助等を、JICA を通して実施している。

国内各社は、これらの経験を海外鉱山開発計画に活かしている。住友も菱刈鉱山開発には後世の負担とならないような開発方法を採用している。

海外鉱山開発でも環境への配慮が求められ、開発当初から閉山計画時の復旧対策を求められ、操業中の復旧対策費積立を求められるのが一般的である。環境対策規制としてはカナダの基準が世界的に一般的なものとされ、内容はかなり厳しいものがある。

開発に伴う自然環境への配慮は多岐に亘り、開発前の状況を時間をかけて調査・評価し、開発方法が自然環境に与えるインパクトを評価し、開発方法が妥当であるかどうかを判断し、さらに広く一般の意見を求めて（公聴会等）開発を許可もしくは否認するかを決定するのがルールとなっている。このために鉱山開発までのリードタイムが長くなり、費用負担も大きいものとなる。

住友は 1994 年にアラスカでポゴ金鉱床を発見し、その開発に向けて精力的に開発許認可取得に向けて必要な調査・評価作業を実施してきた。申請から許認可取得まで 7 年間は最低限必要なのが実情である。

世界の如何なる場所でも鉱山開発には環境への最大限の配慮が求められるのは当然のことであり、環境対策技術の向上も常に進めていくべき重要な事項である。

(7) 産業界からの期待

上述の通り、日本の鉱山業は海外進出が趨勢である。海外事業の遂行は海外人材を活用することでもある程度達成できるが、邦人人材も必要不可欠である。資源講座、冶金講座に優秀な人材が集まるような、より魅力ある講座となるように大学関係者に要望する。産業界と大学・学会との交流を密とするために、客員講師交換の場の設定や企業との共同研究推進なども、学生の非鉄産業への理解が深まろうし、産業界にとり有用な研究となろう。新技術開発として湿式製錬技術や休廃止鉱山関連技術が強く求められている。

鉱山業では、新入社員が独り立ちするまでには長時間の教育を要している。未だ経験が物を言う世界である。鉱山業会から学生へ期待する資質は、強い精神力、体力と忍耐力を有することである。入社後に「ヤッパリ合わない」と言って中途退社されると、企業にとって打撃は大きい。また、海外が活躍の舞台となるので語学力（英語・スペイン語）および日本語での発表や説明能力の向上に励むことが望まれる。

4. 3 研究展開

循環型社会システムの構築のために、資源分野からの研究課題は、1) 天然資源の枯渇問題、2) 地球温暖化問題および3) 鉱山開発や有害物質・廃棄物等による環境負荷問題に分類することが出来る。

1) 天然資源の枯渇問題

循環型社会システムの構築において、3R（リデュース、リユース、リサイクル）を積極的に促進することにより、限りある資源の採掘を削減することは、天然資源の枯渇に対して有効な手段である。しかし、新たな資源の供給も現在社会を営むために必須である。このため、資源を効率的に探査、開発、素材化することが、供給の面から見て重要である。

2) 地球温暖化問題

化石エネルギーから再生可能エネルギーへのシフト、温室効果ガスの排出の少ない化石エネルギーのシフト、化石エネルギーの効率的な開発と利用が地球温暖化問題の課題である。さらに、精錬工程におけるエネルギー効率向上などの省エネルギーの推進、リサイクルによるエネルギー原単位の低減があげられる。

3) 鉱山開発や有害物質・廃棄物等による環境負荷問題

鉱物資源の開発において宿命的に付随する問題である「エコリックサック」の極小化は重要な課題である。資源のほとんどを海外に依存している我が国としては、海外での鉱山開発に対してエコリックサックの低減や極小化に努めるべきである。この意味から、我が国は海外鉱山を範疇においた技術開発を行い、その成果を積極的に海外移転することが重要である。

以上の観点に立って、資源分野における研究分野を整理すると、図 4-3-1 のようになる。

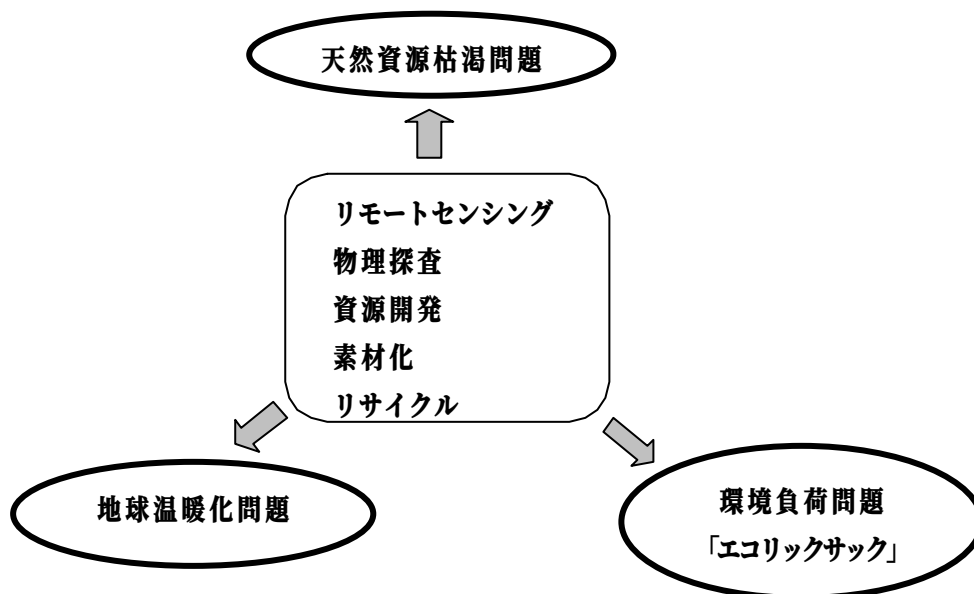


図 4-3-1 資源研究の位置づけ

以下、それぞれの研究課題についての展望を述べる。

4. 3. 1 衛星リモートセンシング

冷戦崩壊後、高度な軍事技術である偵察衛星関連技術の民生転用が始まるなどにより、衛星からの地球観測技術に目覚ましい進展がみられた。具体的には、光学センサーについては、数十メートルクラスであった空間分解能が1 m クラスへと高空間分解能化し、スペクトル分解能もマルチスペクトルからハイパースペクトルへと飛躍的な性能の向上が見られ、また合成開口レーダについても、フェーズドアレイ方式の導入によるオフナディア角の可変性、多偏波化等が実現されるようになった。

これらの先進テクノロジーに基づく衛星リモートセンシングは、資源探査・開発、開発に伴う環境モニタリング等分野にも大きな影響を及ぼしつつある。

以下に、資源分野毎にその利用の現状を述べる。

1) 非鉄金属資源分野

新規の探鉱開発は海外で行われており、この際如何に効率よく探査情報を収集、解析を行うかがポイントとなっている。衛星リモートセンシングは効率よく探査に役立つ情報を提供する手段としてその利用価値は高くなっている。即ち、衛星リモートセンシングは広域についての詳細な地質情報を迅速に提供してくれる。特に、資源の賦存に密接に関連する地表に露出する変質鉱物の詳細かつ迅速な把握が短波長赤外域の多バンド観測により可能となった。また、周辺環境の保全に配慮した資源開発を進めなければならないが、宇宙から定期的に観測できる衛星リモートセンシングはこのような環境モニタリング手段として最適である。

2) 石油等エネルギー資源分野

現在の探鉱・開発は、地理的、政治的にアクセスの困難な地域へと移行しつつあり、これらの制約をのがれて効率的に探鉱・開発を提供してくれるのが宇宙からの衛星リモートセンシングである。非鉄金属資源と異なり、資源は深部に胚胎し、直接的な探鉱情報は得られないが、資源情報の乏しい地域においては、スペクトル情報、立体視データ解析から得られる地質構造情報は有望地の抽出や、新たな鉱区の取得に威力を発揮している。さらに、石油の探鉱は陸上ばかりでなく、海域でも広くおこなわれている。時に海底下に賦存する貯留層から微量の油が染み出して海面に油膜をつくることもあり、衛星搭載合成開口レーダによって油膜の検知から有望域の絞込むことが行われている。

また、遠隔地で開発された油田から油ガスを消費地までパイプラインを敷設して運ぶことがあるが、衛星データによる地表情報解析が最適な輸送ルートの計画立案に役立っている。

さらに、今日老朽油田の一部では漏出油汚染による周辺環境の悪化が大きな問題となっており、環境回復に向けて諸事業を進めるに当たり、環境把握の手段としての衛星リモートセンシングに寄せる期待は大きい。

3) 自然エネルギー、特に風力エネルギー分野

今日、風力発電は地球環境問題の視点から世界的に注目を集め、積極的にそのエネルギー開発が進められている。風力発電を進めるに先立って広域的な風力発電ポテンシャル調

査が行われるが、途上国等においては、基となる気象や地表・地形情報が未整備の場合が多く、このような場合に衛星リモートセンシングデータが重要な役割を果たしている。

このように先端技術を駆使した衛星リモートセンシング技術の資源、エネルギーさらには環境分野への実利用化はまさに21世紀に入って本格化してきた。この流れをさらに推し進めてゆくためには、国として以下の基盤的な技術開発や、プロジェクトの推進が求められている。

1) 衛星データのデータ フュージョンによる解析技術開発

現在、日、米、欧等諸国は、種々のタイプの地球観測衛星を打ち上げ、運用しているが、それぞれデータフォーマットやセンサーの性能・仕様が異なっている。利用できるすべての衛星データを使ってデータ フュージョンにより資源情報や環境情報を抽出したいユーザにとって、衛星データ相互の規格をソフト的に統一されることが課題となっている。このようなデータ フュージョンのための研究開発、さらにはこれらの衛星データに容易にアクセス可能とするバーチャル アーカイブ システムの早急な研究開発が望まれる。

2) 衛星データの継続的、タイムリーな提供システムの確立

資源開発に伴う環境影響評価等の環境モニタリングに衛星リモートセンシングが真に利用されてゆくためには、観測衛星をシリーズ化し、10年、20年と長期、継続的に同一仕様の衛星データをユーザに提供されることがきわめて重要である。米国では、Landsat 衛星シリーズを1970年代より、フランスは SPOT 衛星シリーズを1980年代よりそれぞれ長期継続的に運用してきている。

一方、我が国は、気象衛星を除き地球観測衛星は技術開発目的で開発してきたため、観測衛星のシリーズ化が行われていなかった。資源開発に伴う環境モニタリング、さらには現在大きな課題となっている京都議定書対応の森林による炭酸ガス吸収量モニタリング等に対しては、長期・継続的な衛星観測データの存在が不可欠である。日、米、欧、3極の一つである我が国は社会情報インフラとして地球観測衛星のシリーズ化を是非実現してほしい。

4. 3. 2 物理探査

1) 物理探査の新たな位置づけ

現代のような複雑な社会にあっては、先進技術に携わるものであればあるほど、自分が置かれている場を理解し、かつ自分の技術の特質を的確に把握してそれを適用する必要がある。いわゆる"Think globally, act locally"が求められる。この場合の場とは、わが国が現在置かれている状況や歴史的視点における当該技術の役割である。まず、物理探査の諸問題を考えるにあたり、原点となるわが国の基本的なあり方について考えておこう。やや私見ではあるが、国づくりの基本理念は、以下の3項目に集約されると考えている。

a)安心・安全の国づくり

b)個人の能力が生かされる国づくり

c) 誠実で信用のある国づくり

ここで、たとえばエネルギー資源の開発は、現代文明を支える根幹であり、わが国の安心・安全の国づくりにとって極めて重要である。エネルギー資源をどの地域に依存するのか、将来のエネルギーを何に求めるのか、国内資源をどのように考えるのか、技術立国としてのエネルギー関連技術をどう捉えるのか、など、現代社会ではエネルギー全体を 1 つの安全保障の問題、すなわちエネルギーセキュリティという観点でとらえることが求められている。また、金属資源の開発でも、その大部分を海外に依存している現状から広義の資源安全保障の観点で、金属資源の問題を考えなければならない。

一方、物理探査の新しい応用分野になってきた防災や環境分野でも、諸要因から生ずるリスクをいかに減少させるべきかというリスクマネジメントの視点から技術のあり方が問われている。このように物理探査は、従来のエネルギー資源や金属資源を“探す”ための技術体系から、広義の安全保障すなわちセキュリティマネジメントにおける的確な情報提供技術の体系へと基本的位置づけが変化しつつあると言える。

2) 応用分野の多様化と役割の質的变化

物理探査の主要な応用分野である石油・天然ガス開発をエネルギー安全保障の視点で捉えれば、収益性の高い油ガス田の開発、探鉱開発を国際展開するための技術力の確保、わが国周辺の確度の高いエネルギー資源のポテンシャル評価、メタンハイドレートなどの未来エネルギー開発の可能性評価など、多様な側面で物理探査の活用が考えられる。一方、石油文明との関係で探査技術を考えることも必要である。よく知られたハバート曲線によれば、石油生産のピークは 2,005 年から 2,010 年頃に来るといわれており、探査活動そのものも新規の油ガス田の発見よりも既存の油ガス田を持続させるための技術としての位置づけが重要になってくる。また、コストの考え方自体も現在の安いエネルギー資源を使って将来のややコストの高いエネルギー資源を先買いするというような考え方もあり得よう。この場合、技術の性格は、既存油ガス田の再開発型または外挿型である。これに対し、前述のメタンハイドレートの例は、量的には非常に有望な未来型エネルギー資源と考えられるが、その探査開発にあたっては従来型の手法では不十分で、探査の指針や質を根本から構築することが求められる。さらには地球環境への影響モニタリングも物理探査の必須の役割になるものと思われる。

土木・環境・防災の分野では、都市域での土壤汚染が深刻な問題になりつつある。しかしながら物理探査による汚染区域の特定やその変遷のモニタリング技術は、研究途上にあり、物理的手段による汚染物質の間接検出手法、流体あるいは気体によるダイナミクスへの適用など技術的課題は多い。近年の土木工事でも、それまでの生態系を保持あるいは復元した施工が求められるようになり、表層土壤の厳密な事前モニタリングや土質の特定などが要求されるようになり、より詳細な探査能力が必要になってきた。また近年は京都議定書に関連した表層下のカーボンストック、たとえば、土壤中の有機物や根の特定までも

が求められるようになってきており、従来の物理探査に比べ、得るべき情報の質的变化が著しい。

今後、社会的に重要となる問題に、高レベル放射性廃棄物の地層処分問題がある。物理探査技術は、処分場の選定過程において活用されている。さらに、法律上は、人間界に永久に影響を及ぼさない場所に廃棄物を捨てることとされているが、この考え方では社会の理解が得にくくなっている。このため、処分地のモニタリングも求められるようになってきた。この場合、何をモニターし、それがどのような状態になったときに問題があるかを決めること自体が容易ではない。

3) 今後の展開と課題

物理探査の適用範囲が多様化するのに伴い、探査の概念そのものを一度整理してみることも必要ではないかと考えられる。すなわち、従来型の資源・エネルギー探査は、ターゲットが明確で、それをひたすら追求する型の技術体系である。しかし、環境保全や地層処分モニタリングのように”問題は生じていない”、”健全である”ということを保証するための論理構築や技術立証には、まだまだ曖昧な部分が多い。たとえば、予防医学における診断技術とその結果の解釈技術に相当するものが、新しい分野の物理探査では、まだ未成熟な状態にあると言える。この点は、物理探査の分野のみでは解決できない課題であり、当該応用分野との連携による技術開発、技術論理の構築が要請される。

次に、物理探査の主要な応用分野である石油・天然ガス開発における技術の展開予測を見てみよう。概念的に最も重要な指摘は油ガス田の基本的考え方にある。すなわち、これからの油・ガス貯留層は、一種のエネルギー資源の近代生産工場と位置づけられるというものである。このためには、洗練されたセンサーシステムが貯留層に設置され、自在制御可能な戦略的貯留層管理が行われるとの近未来像が示されている。このため、探査の目的は基本的に貯留層内流体挙動把握になり、空間座標に時間軸をいれた四次元探査がその根幹をなすと考えられる。この考え方は、金属資源の開発、防災・環境、地層処分でも進展するものと考えられ、厳しい環境下で利用可能なセンサの開発やそれを有効に機能させるシステムがきわめて重要である。

今後の物理探査は、個別要素技術の発展もさることながら、多岐にわたる応用分野の要請を的確に理解し、それを物理探査技術で有機的に実現するためのシステム技術が重要である。このためには、継続的な人材育成と正しい技術マネジメントが必要である。近年、わが国でも広がりつつある、MOT(Management of Technology)教育を大学教育ならびに社会人教育として、資源探査に従事する人たちにも展開することが望まれる。

4. 3. 3 資源開発

1) 地殻資源を巡る現状と将来の課題

鉄やアルミニウムなどの鉱物資源は、従来より産業社会・国民生活を支える基礎素材として重要な役割を担っているが、最近では情報化社会の進展とともに、電子材料や高機能素材の原料として非鉄金属資源やレアメタルなどの重要度も大幅に増加している。しかし、近年の円高、海外における大規模開発による資源の低コスト化が相まって、鉱量の枯渇、資源産業の国際競争の激化が進む状況下で、国内鉱山の数は一途を辿り、現在従業員 100 名以上の鉱山は豊羽、菱刈の 2 つが残るだけとなっており、原料である鉱石の海外依存度が大幅に増加している。例えば、最も自給率の高い亜鉛でも 90%、銅にいたっては石油の 99.7% よりも高い 99.9% に達している。今後、アジアやアフリカ諸国を中心に人口の増加が続くだけでなく、中後進国における生活レベル向上がより顕著になるにつれ、鉱物・エネルギー資源の大量採取、消費の傾向がさらに強くなると考えられる。一方で、地球温暖化問題のような地球規模での環境破壊だけでなく都市地域での土壤汚染問題などが問題化しており、エネルギーや鉱物資源の浪費に対する制約が大きくなるとともに、持続可能な発展を可能とする環境対応への取り組みが求められるようになってきた。

このような状況下、エネルギー・鉱物資源の安定供給は産業活動や国民生活を維持発展するため不可欠のものとなっており、今後の産業政策の指針となる産業技術戦略においても「資源の有効利用と廃棄物の減量化を行いつつ資源の循環を図る経済社会システムの実現」が、社会ニーズに対応するための重点項目の一つと位置づけられており、製品または部品の再利用促進、廃棄物・副産物の原材料やエネルギーとしての再利用、廃棄物の発生抑制と適正処理とともに天然資源利用が研究開発課題としてあげられている。

2) 資源産業技術戦略と資源開発技術

2000 年 2 月に資源産業技術戦略がまとめられ、「資源セキュリティの確保に向けて海外で資源開発を行うために必要な技術、資源産業の維持・発展の基礎となる産業競争力強化と、環境調和型循環社会の構築への対応として環境負荷極小化のための技術」の重要性が指摘され、探査、鉱山生産、環境保安の各技術における高度化の必要性が指摘されている。

今回対象としている資源開発技術は、資源産業技術戦略で指摘された探査、鉱山生産、環境保安技術の 3 つをカバーする広い分野に対応するが、探査技術については前節に、環境保安技術に関しては次節の素材において記述されているので、ここでは鉱山生産技術との関連性を中心に話を進めることにする。

資源産業技術戦略では、鉱山生産技術の高度化のための個別技術として、①情報化採掘技術、②高効率細脈採掘技術、③高温鉱体開発技術、④ソリューション・マイニング技術、⑤坑内充填技術・鉱滓処理技術があげられている。しかし、これら 5 つの技術は主に国内の鉱物資源開発を想定し、比較的短期的な課題が中心となっており、石油、石炭、天然ガスなどのエネルギー資源や海外における大規模な鉱山開発を想定したものとはなっていない。また、資源開発における探査、鉱山生産、環境保安の各技術の役割を考えると、それ

らは相互に関連し合っており、個々の技術における効果だけでなく、総合的なメリット・デメリットを判断する視点が必要である。また、学術的にも地球科学、地質工学、探査工学、岩盤工学、資源処理学、素材工学、安全工学、環境工学など理学や工学の分野だけでなく、資源経済学などを含む広い学問領域を対象としている点に特徴がある。しかし、鉱物資源の発見から、採取、処理、素材化までを含む総合的な技術体系も、対象となる国内での開発が限られる状況においては、その存在性は限定されたものとならざるを得ない。従って、従来型の資源開発に関しては国際的な展開を図るとともに、これまで以上に関連する分野への技術的な展開や、関連分野との協調を目指す必要があろう。

近年の環境問題意識の高まりによって、国内だけでなく海外における従来型のエネルギーや鉱物資源の開発に要求されているのは、環境への影響を最低限に押さえて、いかに低コストで資源を生産するかという点である。その意味でいえば、個々の開発地域の特殊性を考慮しつつ、いかに共通の技術や機器、さらには労働力を用いて生産を行うかが開発のベースとなる。その前提としては、資源の賦存状態を開発の早い段階で的確に把握するための探査技術以外に、採掘関連の技術としては上述の情報化採掘技術やそのベースとなるボーリング掘削の効率化やコスト削減のための技術が最も重要と考えられる。

3) 今後の対象となる新しい資源と技術分野

これまでも技術開発が進められてきたにもかかわらず、コストの点で実際に開発まで進んでいない技術が幾つかある。しかし、地球環境問題への対応や高品位資源の枯渇等の理由によって、将来開発対象となりうる資源が幾つか考えられる。想定されるものを表4-3-1に示した。

マンガンノジュール、コバルトクラスト、海底熱水鉱床などの海底鉱物資源や、海水に容存している種々の有用元素は、比較的古くから注目されて技術開発が進められてきたが、金属価格の低迷によりコスト的な問題に直面している。しかし、国際海洋法条約への対応を考えると、我が国の排他的経済水域を中心に地道な調査、技術開発が必要であろう。

エネルギー資源の開発に関しては、地球環境問題への対応から欧州諸国を中心に再生可能エネルギーの開発が活発に進められている。CO₂ 発生量の少ないクリーンなエネルギーである地熱資源の開発は、従来の探査、掘削、資源評価等の適応が比較的容易と考えられるものの、国内の豊富な賦存量の割には開発が進んでいない。国立公園による規制だけでなく石油や石炭火力による電力に比べてコスト高という点がネックとされているが、人工的な貯留層造成・管理技術の開発により熱利用を含めた地域分散型エネルギー開発や、ヒートポンプとの組み合わせによる都市地域における浅層の地殻熱機能利用などの新たな方向性が提案されており、その展開が期待される。また、近年、石炭や石油に比べて CO₂ 発生量の少ない天然ガス資源の需要が増加しているが、我が国周辺の海域に豊富に賦存しているとされるメタンハイドレートの技術開発が、平成 13 年度より資源エネルギー庁によって開始された。この技術開発では、高精度弾性波探査を主とした資源量評価、生産シミュレーション手法の開発を中心とする生産手法開発、メタンハイドレート開発に伴うメタ

ンガス漏洩の検知や地層変形評価などの環境影響評価の3つの分野の技術開発が進められている。

これらの資源以外にも、21世紀前半には資源の枯渇に向かう石油の新しい資源として、オイルシェールやオイルサンドの開発、その賦存量は比較的多いもののCO₂発生量が多いことから開発に制約が多い石炭資源に関しては、地下ガス化やコールベットメタンの開発など、既に20世紀から概念や現場実験は進められているものの、コスト面の制約から本格的な開発段階に進んでいない技術開発も多い。今後、実際に、開発段階に進むにつれて、技術的に多くの困難が予想される。今後着実な研究・技術開発が必要であろう。その場合、既に上述したように、対象地域の状況の正確な把握（探査）、資源あるいた対象箇所への効率的なアクセス（掘削）、生産や稼働中の状況把握（評価・管理）、生産・稼働後の環境影響への対応を考えると、これらの技術開発には共通する技術も多い。広い分野の協力体制作りも重要であろう。

表 4-3-1 将来、開発の対象となりうる資源

対象資源		将来対象となる資源や対象技術
エネルギー資源	石油	オイルシェール、オイルサンド
	天然ガス	メタンハイドレート
	石炭	CBM、地下ガス化
	地熱	人工抽熱技術
鉱物資源		深海底鉱物、海水溶存成分
関連する分野		核廃棄物やCO ₂ の地層処分、地下水資源、地圏環境保全

4. 3. 4 素材

資源循環型社会を推進していくには、素材・設計・製造の段階において、循環利用あるいは循環のし易さを配慮することが必要となる。このような素材は、エコマテリアル (Environment Conscious Materials) とも称される¹⁾。

このような循環利用あるいは循環のし易さを意識した素材の指標としては、有害な元素が使用されていないこと、より少ない資源投入量で、また、より少ないエネルギー使用量で製造され、なおかつ、より高い機能を有すること、すなわち、高い資源生産性を示すこと、さらに、排出物最少のプロセスで製造されていること、より単純な組成であること、寿命が長いこと、単純な再生・リサイクルプロセスで循環利用できること、環境浄化・保全に役立つ機能を有すること、等があげられる。

世界的にみても、このような素材の研究開発はまだ端緒についたばかりであるが、下記のようにいくつかの分野で先進的な研究開発例が認められる。

人類は鉛を永年利用してきており、現在も多くの分野で利用している。しかしながら、人体内での鉛の蓄積は有害であることが知られている。自動車に使われる鉛蓄電池は回収ルート、再生ルートともに明確であり、クローズドな使われ方をしているが、ハンダや塗膜等のような使われ方の場合、他の素材との融合体や複合体として存在し、また、使用の際のアセンブリーの形態からみても、回収・再生が困難である。また、顔料や塗料、あるいは、合金として利用されている鉛についても、同様に回収・再生は困難である。したがって、このような鉛については、使用中に、あるいは、回収・再生プロセスの過程で拡散してしまう危険性があり、できるだけ早く代替化が必要であるとされる。ハンダについては、ビスマス系ハンダやスズ・銀系ハンダ等の鉛フリーハンダが研究され、プリント基板等に使用されだしている。また、鉛は自動車用燃料タンクや自動車用塗料にも使われており、これらの使用量の低減あるいは代替化のための研究開発が推進され、一部、実用化されつつある。さらに、加工性を良くするために鋼に鉛を添加し快削鋼を製造しているが、このような素材についても鉛使用量低減、代替化が行われつつある。また、クロメート処理鋼板等にはクロメートによる表面処理が施されていることから、六価クロムが環境へ溶出する可能性があり、これについても、クロムフリーの処理鋼板の研究開発が行われている。さらに、ニカド(Ni-Cd)電池は、ニッケル・水素電池やリチウムイオン電池への代替が進みつつある。水銀フリー化も全世界的な課題であり、電池の水銀フリー化に加えて、蛍光灯における水銀使用量低減、水銀フリー化の研究開発が盛んに推進されつつある。このように、有害物質代替の課題は、人類の将来にとって、あるいは、環境保全の立場から極めて必須の課題である。さらに、EUでのRoHS(Restriction of Hazardous Substances)等による有害物質使用禁止規定等で、鉛、水銀、カドミウム、六価クロム、ポリ臭素化ビフェニル、ポリ臭素化ジフェニルエーテルに対して使用禁止や使用制限が製品に対して義務づけられていることから、これらの有害物質代替化及び使用量低減の取り組みは、短期的には輸出戦略上との関連でも重要な課題である。

これまでは、高性能、高機能の獲得を目指して、複雑な組成の素材を開発することが多かったが、循環利用を考えると、今後は、できるだけ簡単な組成で高性能を有する素材を製造することが望まれる。スーパーメタルあるいは超鉄鋼といわれる金属を目指しての研究開発が行われている。これらの目的の一つは、同じ量の鉄原料を用いて、鉄単一組成あるいはできる限り合金・添加元素を少なくし、結晶粒等の内部微細構造を制御し、目指すメゾスコピック構造や非晶質構造をつくりだして、強度、靱性、耐食性を飛躍的に改善しようとするものである。これが可能となれば、例えば、強度2倍、寿命2倍という鉄鋼ができることとなる。また、成分は鉄のみあるいは合金成分は非常に少ないことから、循環利用も容易である。鉄はクラーク数も大きく、資源量も多く、また、金属として抽出しやすいことから、資源活用という視点からも優位性が認められる。

また、今後は製造工程を省エネルギー化していくことも重要な課題である。わが国においては、製鉄業・鉄鋼業・非鉄業等、素材製造業の分野においては、石油ショック等を経て

これまでに非常に大きな改善がなされてきたが、さらに、今後は循環型社会構築を目指し、製造業全般において、さらに改善のための技術開発をしていく必要がある。製造プロセスにバイオプロセスを利用したり、水溶液等を利用したソフトな系でのセラミックス製造等の研究開発も行われている。

資源循環が進む中で、原料の変化がおりつつある。鉄の場合、鉄スクラップからの粗鋼生産量は約 35%程度で、この原料転換の傾向は年々高まっているとのことである²⁾。このことは、電炉操業の相対的比重の高まりを示している。現在、銅については、種々の含銅使用済み品を山元還元と称して既存の銅製錬所において精鉱とともに処理を行っている。このように銅製錬所は資源循環に対しても重要な役割を果たしているが、今後、循環利用がさらに進むことによって、原料中の金属銅量が増え、金属銅の原料としての比重が上昇することが予想される。このことにより、硫化物である銅精鉱を原料とする製造炉である自溶炉に代わる新しいタイプ処理・再生装置が必要になると予想される。セメント製造業における焼却灰や下水汚泥の受け入れや、製鉄業における使用済みプラスチックの還元材としての受け入れなど、原料の転換が大きな規模で進みつつある分野もすでに存在する。ある製造分野での排出物が、他の製造分野での有効な原料となり得る場合がある。このような異種製造分野のリンク、融合が今後素材製造分野において必要となる。循環資源からの素材の再生利用には、大きく2つに分けられる。1つは、ある製品からの再生物を他の製品の原料として供するもので、カスケードな再生利用である。今1つは、機能・性能を落とすことなく、もとの製品に再生するシステムであり、product-to-product と称される。これらの2つを合理的に活用して、全体として再生素材としての利用率を高めていくことが重要である。

しかしながら、使用済み製品を原料として、バージンの原料から製造したものと遜色のない素材・製品をつくっても、社会に受け入れられず、経済的に循環されない場合も現状では多々見受けられる。これらの解決法として、再生技術を技術面でもコスト面でも改善をめざすことは当然であるが、再生素材の標準化・規格化をも進める必要がある。標準化・規格化は、再生素材の価値を適正に客観的に評価するものとして、循環社会の推進に重要なインフラの一つに数えられると思われる。また、現状でも、素材の国際循環、とりわけ、わが国においては、アジア域での循環との関わりが量的にも質的にも重要となりつつあり、この傾向は、ますます増大すると予想される。このような状況の中で、わが国がリーダーシップをとって再生素材の標準化等、国際循環のための規格をつくることは極めて重要と考えられる。

循環型社会を目指した素材を考えると、今ひとつ重要なのは、再生資源から製造した循環素材と天然資源から製造した素材とを並行して有効利用に利用していくシステムの構築を目指すことである。個々の金属の特性および存在状況は多様であり、それぞれの特徴を活かした循環利用システムを目指すべきであり、循環に必要なエネルギー、コストを考慮して、合理的なバランスを有する利用システムでなければならない。そのためにも、資

源生産性や循環性、環境適合性等を適正にトータルシステムとして評価する評価手法の開発もインフラ整備の一つとして重要である。

参考文献

- 1) 未踏科学技術協会エコマテリアル研究会監修「エコマテリアル学」、日科技連、2002 年
- 2) 岡部徹「グリーン・マテリアル・テクノロジー、第 12 章金属のリサイクル」、講談社サイエンティフィック、2002 年

4. 3. 5 リサイクル

循環型社会の形成にリサイクルが重要であることは言を待たない。ただ、リサイクルの意味が使用される人により多少異なるために種々の議論が起こる。日本学術会議第 17 期リサイクル工学専門委員会⁽¹⁾では、リサイクル工学を下記のように定義している。

“「リサイクル工学」とは、物やサービスの生産、流通、消費の過程で生じる発生物¹⁾を、経済、エネルギー消費、環境負荷の上から²⁾合理的に循環利用する工学³⁾である。”
注記)

- 1) 生産、流通、消費の過程で発生し、その時点では有価物と判断されないものすべてを対象とする。
- 2) 持続可能な生産から消費の流れを目指して、評価の枠組みには、生産段階から最終的な処分までが含まれる。再生利用のための要素技術だけでなく、リサイクルの流れを取り扱うシステム技術も含まれる。
- 3) 再生利用のための要素技術だけでなく、リサイクルの流れを取り扱うシステム技術も含まれる。例示的には①不要な発生物の減量やリサイクルに繋がる生産、②繰り返し利用、原材料資源や有用物への再生利用、他の生産・流通・消費へのカスケード利用に繋がる生産・流通・分離技術、③エネルギーなどの有用資源の回収を含む処理処分など。

この定義では、単に従来のリサイクル要素技術のみならず、システムも含め、エネルギーの問題にも言及しており、当然といえる。ただ、この定義では対象物を“発生物”とし、“有価でないもの”としたところにかなり廃棄物処理に近いイメージを与える可能性があり、新たな定義が必要と思われ、18 期のリサイクル専門委員会では、さらに検討を行っている。近年の循環型社会推進基本法ならびにそれに伴う個別リサイクル法は、どちらかと言うと廃棄物処理の問題、有害廃棄物の不拡散と処分場の逼迫を避けるために制定された感があり、リサイクルと廃棄物処理が混同されがちである。事実、リサイクルと廃棄物処理は実質上同一のプロセスで行われることもあり、それが可能ならば、そうできた方が望ましい。図 4-3-2 に示すように廃棄物処理にはそのためのエネルギーが必要であり、同時にリサイクルすることで新しい素材製造のためのエネルギーを省くことは大いに意味がある。ただし、無理にリサイクルを行い、却ってエネルギー消費が増えるならばリサイクルの意味はない。リサイクルの大前提として“リサイクルによって資源生産性の増大が認められる場合にのみリサイクルの意義がある”が確認されなくてはならない。鉱物資源系、

つまり金属のリサイクルは従来経済ベースで行われてきたものが多いために断らなくても前述の大前提を満足してきた。ただ、近年問題となっているプラスチック素材のリサイクルは単純な LCA 評価でもややもすると却って環境負荷を大きくすることがある。十分な注意が必要である。ただ、この環境負荷の定義が非常に難しく、議論があるためにともかくリサイクルを行うことがいいことだとの認識が広まりすぎ、そのアンチテーゼを武田が示した⁽²⁾。当然、武田の指摘を待つまでも無く、環境負荷を増大させるリサイクルは意味が無く、促進すべきでない。繰り返すが、リサイクルの本質はエネルギー資源との兼ね合いである。全体として資源生産性を高めることができればリサイクルの促進を図る必要がある。

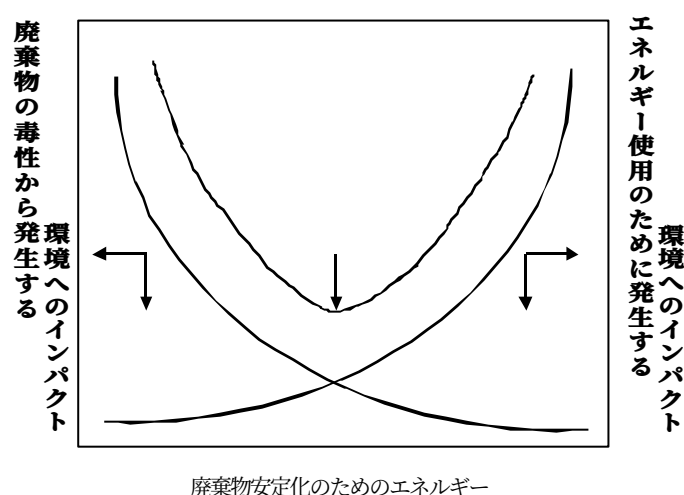


図 4-3-2 有害廃棄物拡散の環境インパクトとエネルギー消費による環境インパクトの Trade off の関係

以上の問題のほかに人件費の高い我が国では注意しなくてはならない点がある。資源生産性的にはよいが、経済合理性がなくリサイクルが行われないことである。一部の素材特にプラスチックや国際価格が低下した鉛などがその例となる。鉛は資源的にも非常に枯渇性が高く、かつ自動車用バッテリーには欠かすことができないものであるが、London Metal Exchange(LME)の価格が低下、かつ円高により国内鉛建値の低下が鉛のリサイクルを困難にしつつある。問題の本質は廃プラスチックや廃鉛バッテリーの収集・運搬にコストがかかりすぎるためである。しかしながらいずれも廃棄物処分場で埋め立て処分するのは大きな問題が残る製品である。このようなことを克服するには、しっかりとしたシステム特に安定した収集・運搬システムを作ることが大きな課題である。その一つとして容器包装リサイクル法で指定された一般家庭から排出される廃プラスチックがある。これは通常の経

済行為では行えない収集・運搬部分を法律によって自治体負担としている。つまりは税金である。最終的に処分場の問題を考えると税金の投入でも社会コストが安くなるとの認識から出たものである。鉛バッテリーは現在電池工業会の自主活動としてリサイクルが行われているが、このままでは現在のシステムを保つことは困難となると予想され、新たなシステムの開発が待たれる。リサイクルの促進はシステムと技術がバランスよく進歩する必要がある。

リサイクル技術について言えば最近急激に進んでいる。特に資源開発で使用されてきた技術がリサイクル技術として蘇っている。たとえばプラスチックの選別では比重選鉱、浮遊選鉱、静電選別などが盛んに用いられており、さらには非鉄金属のリサイクルが可能ということで従来の製錬設備を用いて廃棄物を処理することも珍しいことではなくなった。具体的にはシュレッターダストや焼却飛灰が副原料の一部として製錬炉で処理されている。その意味でも本地球・資源専門委員会はリサイクルに大きな貢献ができるし、またしなくてはならない。そのためにはますますリサイクル工学専門委員会と連絡を密にとり連携を深める必要があると思われる。

参考文献

- (1) 第17期リサイクル工学専門委員会報告書、日本学術会議、2000年
- (2) 武田邦彦：Boundary, 15,[6],1999年,3

4. 4 研究組織

現在、資源系の講座を有する大学は北海道大学、室蘭工業大学、北見工業大学、東北大学、岩手大学、秋田大学、東京大学、早稲田大学、京都大学、山口大学、九州大学、熊本大学、及び崇城大学などがある。

これらの大学のうち第18期においては、北海道大学、東北大学、秋田大学、早稲田大学、京都大学、九州大学その他、独立行政法人産業技術総合研究所を取り上げ、これらの大学や研究機関の動向と将来展望について議論を行ったので、ここに紹介する。

4. 4. 1 北海道大学

北海道大学では、平成9年度からの大学院重点化に伴い組織の基盤が大学院に置かれることになり、従来の工学部資源開発工学科を構成していた6講座(現在、この旧講座は分野と称し、教授1、助教授1、助手1からなる)は図4-4-1に示すように、大学院工学研究科社会基盤工学専攻と環境資源工学専攻に所属することになった。新組織では、3～4の分野で研究組織としての大講座を構成し、この大講座が大学院教育において専修として教育にあたる。したがって、資源開発に関連する学部教育は、これらの6分野に所属する教官を中心に工学部で資源開発工学科として行なわれている。工学部社会工学系(定員210名)に入

学した学生は、1年後に志望と成績に基づき、4学科の一つに進学する。資源開発工学科(定員30名)に進んだ学生は、3年の秋に6分野の一つに属し、卒業研究の指導を受ける。大学院には、資源に関連する専修が4つ存在する。一つは資源系の3分野からなる地殻資源工学専修(講座)であり、残りの三つは土木工学系分野とで構成する地盤工学専修(講座)、および環境工学系分野とで構成する環境保全システム工学専修(講座)、廃棄物資源工学専修(講座)である。大学院修士課程では学生は主専修から22単位と副専修から8単位以上を、博士課程ではさらにもう一つの副専修を選択する。

このように北大では、学生は学部で工学基礎と資源工学に関する専門基礎を学んだ後、大学院でどの専修に進んでも、資源との関わりが深い境界領域の勉強をある程度することになる。教育システムにおけるこの変革を受けて、資源関連の各分野は研究面でも積極的に研究対象を土木工学、環境工学との境界領域に広げてきている。資源工学での研究をベースにして、地球環境問題、防災問題、廃棄物処分問題などに取り組むと、地球科学的な視点を通したものの見方ができ、また地球資源の開発・生産・利用・廃棄のシステム全体から循環型社会のあるべき姿を模索することができるので、社会工学系の中で資源系分野はユニークで重要な存在として注目されるようになってきている。

現在、北大では次の大学院改組に向けての検討が進行しており、大学院を研究組織としての研究院と教育組織としての学院に分け、また学部には大学科をおく予定である(図4-4-2参照)。資源開発工学科はこの改組案の中では環境社会工学科に含まれ、この学科内に設けられる地球資源循環システムコースとして継承・発展する。また、資源系の各分野は、研究院、学院の中で、資源をベースに今まで以上に積極的に境界領域に挑んでいく予定であり、21世紀に相応しい新しい資源工学の創成と体系化に取り組む。

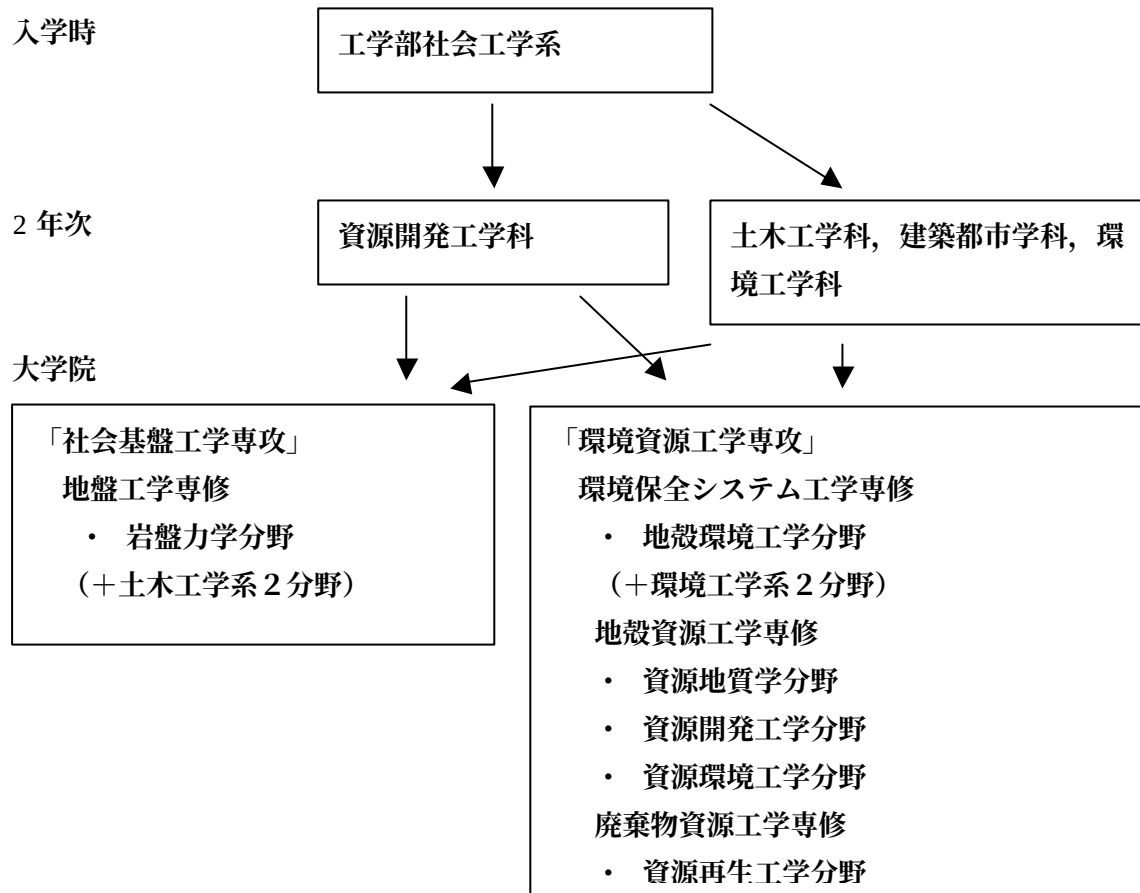
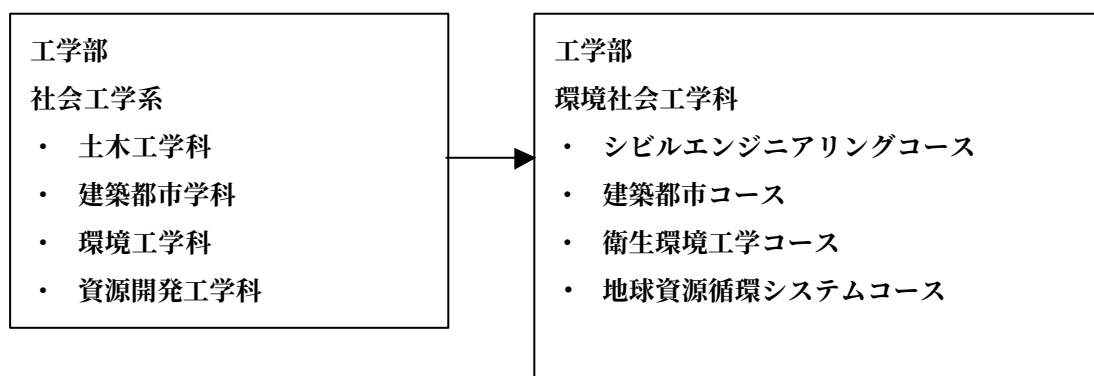


図 4-4-1 北大における資源系教育研究の概要



大学院

岩石力学分野→岩盤システム工学分野（環境地球工学専攻）

地殻環境工学分野→地圏環境工学分野(同上)

資源地質学分野→環境地質学分野(サステイナブル工学専攻)

資源開発工学分野→資源システム工学分野(同上)

資源環境工学分野→資源環境工学分野(同上)

資源再生工学分野→資源再生工学分野(同上)

図 4-4-2 現在検討中の改組案

4. 4. 2 東北大学

東北大学大学院工学研究科地球工学専攻は、基幹講座（8 研究室）のみならず全ての協力講座（7 研究室）も、平成 15 年 4 月に、新設の環境科学研究科環境科学専攻に転属し、工学研究科地球工学専攻は廃止となった。ただし、これは、東北大学において資源関連の教育・研究を停止するということではない。むしろ資源関連の教育・研究はより充実する方向の改革である。

資源開発に伴う環境負荷の低減については、従来より露天採掘による景観破壊防止や廃水処理などについて取り組まれているが、昨今の環境問題はさらに深く資源問題と一体になっているといえるほど密接な関係がある。まず、エネルギー資源についていえば、石油・石炭等の炭化水素資源の開発・利用は地球環境の保全・地球温暖化問題と不可分の関係にある。世界的に見て、少なくとも 21 世紀の前半における一次エネルギーはその 2/3 以上を炭化水素資源に頼らざるを得ず、必要資源量の確保と、大気中の二酸化炭素濃度の上昇を抑制しながらこれらのエネルギー資源を利用する工夫の、両者が必要である。これは資源問題であると同時に環境問題である。

また、炭化水素資源の利用量を抑制するためには、地熱の開発・利用は重要なテーマである。特に、世界的に見て我が国は地熱資源に恵まれており、高温岩体（HDR）発電や地熱の高度利用に関する研究開発は世界を先導する立場にあると認識している。東北大学の資源における重要な 1 分野である。

他方、鉱物等無機資源の開発については大学が担当する教育・研究分野は狭くなってきている。学生の就職でみると、数年に 1 人石灰石採掘や碎石の分野で求人がある程度である。これとは対照に、むしろ、廃棄物のリサイクルの分野が重要になってきている。リサイクル処理に関する教育・研究は環境科学専攻においても重要な位置を占めており、循環型社会を支える新たな資源循環・再生技術を創生する教育・研究として位置付けされ、この分野は以前よりも補強されている。

また、東北大学の資源分野は、素材に関する研究部門を有することを従来より特徴としている。近年のこの分野は、天然素材の機能発現技術の開発を指向し、太陽光エネルギーを水素に変換する半導体光触媒、高効率水素吸蔵を目指した炭素素材の開発など、エネルギー・環境問題解決への応用へと発展している。また、焼却灰を水熱ホットプレスで固化し、人工岩石として素材を提供するリサイクル関連の研究も指向されている。

これまでの資源分野で対象とする有機物は石油や石炭等の炭化水素に限定されていた。また、それらを採掘し、供給するまでが守備範囲とされていた。しかし、それらの利用により温暖化問題が生じているとなると、無関係とタカを括っているわけにはいかない。需要と供給は一体であるからである。さらに、太古の昔に生命を全うした生物すなわち廃棄物が地下に埋没し、地球の機能によってエネルギー資源に転換されたと考えれば、有機廃棄物から石油や石炭が人工的に作れることになり、重質油や亜炭等の低品位資源は地球の機能による高品位資源化過程の途中にあるもので、地球機能の人為的模擬プロセスによっ

ても高品位資源に転換できることになる。すなわち、有機廃棄物のエネルギー資源化も資源分野のテーマとなる。

地球上における炭素質物質の調和的循環によって温暖化問題の解決を図るという立場からは、廃棄物の循環経路として二酸化炭素経路のみならず、資源化経路も存在し、地球自身が有する資源化経路の活性化あるいは人為的模擬経路の構築によって二酸化炭素経路の負荷低減を図ることが望ましい。またそうすることによって、炭素循環システムにエネルギー資源も取り込まれることになる。無機廃棄物のリサイクルのみならず有機廃棄物のリサイクルも資源分野のテーマと考える。東北大学では、このリサイクルを、地球が有する機能、すなわち、高温高压の水が関与する反応である水熱反応を利用して行う工学に関する教育・研究を実施している。

4. 4. 3 秋田大学

1) 秋田大学の基本理念

秋田県は、環日本海地域の一角を占める東北に位置し、白神山地をはじめとする豊かな自然環境や資源に恵まれ、風土に根ざした伝統的かつ洗練された独自の文化的環境を持つ。秋田大学はこのような環境の中で、地域と共に歩み発展してきた。秋田大学には、国際的に独自性が評価されている資源学と工学とを融合した工学資源学部があり、大学院が設置されている。

2) 秋田大学の基本的目標

教育の基本的目標に関して秋田大学は、学習者中心の大学教育を行い、社会の変化に柔軟に適応できる高度の専門性と倫理性を備えた人材を養成し、地域の文化的・経済的発展を支える人材を養成するとともに、国際人として通用する、コミュニケーション能力、異文化理解力を持った人材を養成することを目標としている。

研究の基本的目標に関して秋田大学は、知の継承、発展、創造に努め、基礎から応用までの幅広い自立的な研究活動を行い、広範で学際的な「環境」と「共生」という課題について、独創的な研究活動を行い、持続可能な 21 世紀型文明の基盤を築くことを目標とする。

地域貢献に関する基本的目標に関して秋田大学は、地域と共に発展し地域と共に歩む「地域と共生」を目指し、秋田県の産業文化医療等の向上はもとより、東北地方、更には環日本海地域の発展にも貢献したい。

国際貢献に関する基本的目標に関して秋田大学は、国際的な教育・研究拠点の形成を目指し、国際交流を積極的に推進して、地球規模の課題の解決に貢献することを目標とする。

大学運営に関する基本的目標に関して秋田大学は、学長のリーダーシップの下、柔軟で有機的な運営体制を構築し、学生・教職員の個性と能力を十分に活かし、社会に貢献できる大学運営を行いたい。

3) 基本的目標達成のための措置

秋田大学は、不断に点検・評価を行い、その結果を更なる充実・発展に結びつけるとと

もに、社会に対する説明の責務を全うしたい。

4) 工学資源学部の中期目標・中期計画

工学資源学部の教育研究の質の向上に関する目標について、教育に関する目標と研究に関する目標に分けて述べると以下ようになる。

教育の成果に関する目標としては、学士課程では工学資源学部の理念に基づいた学部教育の成果を評価するシステムの構築を行い、大学院課程では独創性が高く国際的に評価される高度技術者養成のために適切な大学院教育の成果を評価するシステムの構築を行う。一方、教育内容等に関する目標として学士課程では問題解決型から課題探求型学習能力涵養のために、アドミッション・ポリシーの周知を図ると共に教育内容、教育方法の改善を行う。また、大学院課程では国際的に評価される高度技術者に必要な研究能力涵養のために、先導的な課題を取り上げるなど、高度で多様な教育課程を構築する。さらに、教育の実施体制等に関する目標では、学士、大学院課程共に質の高い教育が提供できるように、教員自身の教育能力、教育意欲の向上を図ると共に教育研究設備の充実を目指す。学生への支援に関する目標については学生が自らの潜在能力を引き出し快適に学修・研究できるように、教育環境、生活環境の整備を目指す。

研究水準及び研究の成果等に関する目標としては、独創性が高く国際的に評価される研究の水準を維持しかつ成果を評価するシステムを構築する。研究実施体制等の整備に関する目標では、独創性が高く国際的に評価される研究の水準を維持するために、「ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー」と連携し、必要な体制等の整備を行う。

5) その他の目標

社会との連携、国際交流に関する目標としては、工学資源学部の理念の下に、地域社会との連携や生涯教育に関しては「秋田大学地域共同研究センター」、「秋田大学教育推進センター（仮称）」また、国際交流は「秋田大学国際交流推進機構（仮称）」を核にして、学部におけるそれぞれの活動を推進する。

6) 資源系学科の変遷

秋田大学（専門学校を含む）における主な資源系学科と大学院の変遷を表 4-4-1 に示す。旧来の鉱山学を主体とした学科から地質、冶金、材料、化学を取り入れ、秋田大学の資源系は学問の融合を図ってきた。現在では、学部から大学院の博士後期課程まで秋田大学の資源系では幅広い教育と研究が行われ、目標を考慮した改革が進められている。

表 4-4-1 秋田大学の主な資源系学科と大学院の変遷

1910 年	秋田鉱山専門学校設置（採鉱学科、冶金学科）
1942 年	採油科設置
1943 年	採鉱科設置
1949 年	秋田大学鉱山学部設置（鉱山学科、冶金燃料学科、鉱山電気学科）
1960 年	採鉱学科、鉱山地質学科設置（鉱山学科の分離増設）
1965 年	大学院鉱山学研究科（修士課程）設置
1990 年	資源・素材工学科設置（資源系学科の融合として採鉱学科、鉱山地質学科、冶金学科の一部、資源化学工学科の一部で構成） 物質工学科（冶金学科の一部、金属材料学科、資源化学工学科の一部、燃料化学科で構成）
1994 年	大学院鉱山学研究科博士課程設置 （資源系の博士課程は地球工学専攻、修士課程は資源・素材工学専攻）
1998 年	工学資源学部設置（鉱山学部の改組） 資源・素材工学科の一部（選鉱学講座を除く旧採鉱学科＋旧鉱山地質学科で構成） →地球資源学科 資源・素材工学科の一部＋物質工学科の一部（選鉱学講座、鉄冶金学講座、非鉄冶金学講座＋旧資源化学工学科＋旧燃料化学科で構成）→環境物質工学科
2002 年	工学資源学研究科設置（鉱山学研究科の改組） （資源系の博士前期課程：地球資源学専攻、環境物質工学専攻、博士後期課程：資源学専攻）

4. 4. 4 東京大学

1) 東京大学における資源系工学教育の変遷

東京大学における資源系工学教育は、大学院の地球システム工学専攻を中心に行われている。そのルーツは明治 10 年（1877 年）、125 年前にさかのぼり、東京大学理学部採冶科と工部大学校鉱山科の誕生から始まる。帝国大学の発足に際して採冶科に一本化され、その後、採冶科が採鉱学科（Mining）と冶金学科（Metallurgy）に別れ、鉱山学科と名前を変えたりもした。太平洋戦争勃発後に石油工学科が設立され、戦争が終わって、大学の制度が新しくなった昭和 26 年に、石油工学科は鉱山学科に吸収され、「新制鉱山学科」が誕生した。高度経済成長時代の海外資源開発ブームがあった昭和 39 年（1964 年）に、資源開発工学科に改組され、地球環境問題に対する関心が高まった平成 6 年（1994 年）に地球システム工学科に改称となった。そして、平成 12 年 4 月のシステム創成学科発足により、学部教育はシステム創成学科の環境・エネルギーシステムコースと知能社会システムコース

に引き継がれた。

2) 東京大学における資源系工学教育の将来

東京大学における資源系工学教育の将来を予測することは難しい。ここでは、2000 年 4 月に誕生したシステム創成学科の学部教育、中でも、地球システム工学専攻の教員が参加している環境・エネルギーシステムコースと知能社会システムコースについて紹介する。また、システム創成学科の実質第一期生が大学院に進学した 2003 年 4 月からの地球システム工学専攻の大学院教育について述べることにする。

システム創成学科 (Department of Systems Innovation) の誕生は、東京大学工学部の歴史の中で画期的な出来事であった。図 4-4-3 に示したように、システム創成学科は、精密機械工学科・船舶海洋工学科・システム量子工学科 (1993 年までは原子力工学科)・地球システム工学科 (1994 年までは資源開発工学科) が融合して生まれた。伝統・文化の異なる 4 つの学科が一つになった動機は、“「知」の再構築と総合化を目指して”と表現されている。

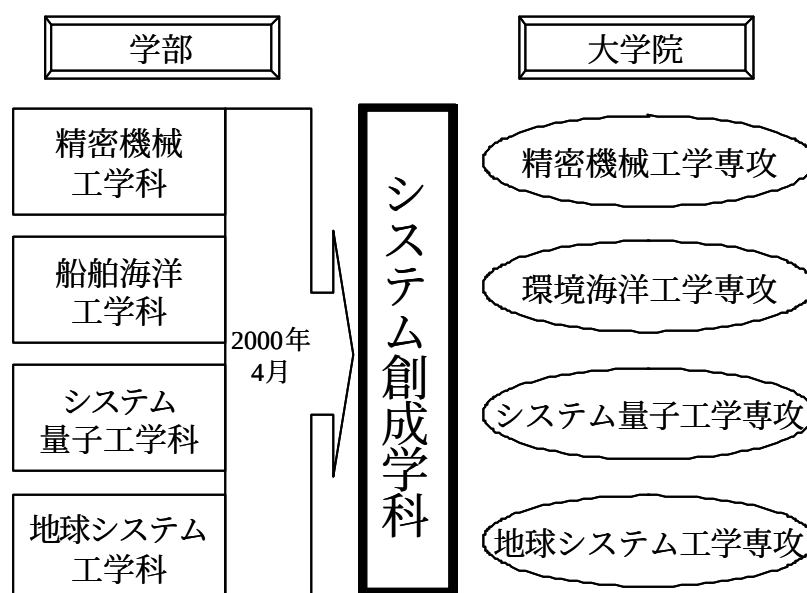


図 4-4-3 東京大学工学部システム創成学科の誕生

20 世紀末を迎え、環境問題、食糧・エネルギー危機、国際関係の緊張などが顕在化して、これらを解決するためには、電気や機械、物理や化学といった従来型の工学や理学などにおける特定分野の知識だけでは不十分で、領域を越えた幅広い「知」を創造して、これを総合的に捕らえる事が必要である。そのためにより総合的な科学技術教育システムによって、21 世紀を支え発展させる優秀な人材を育てるという認識を共有する 4 つの学科がシステム創成学科に生まれ変わった。システム創成学科は、工学システム、生体システム、社会システム、地球システムなどのさまざまなシステムを対象とし、これらを分析・解析・評価・設計・創造し、新たな価値の創出 (Innovation) を目指す。そのために、システム

創成学科は、環境・エネルギーシステムコース、シミュレーションコース、生体・情報システムコース、知能社会システムコースの 4 つのコースを設け、各コース固有の理念と専門知識を習得すると同時に、システム創成的な知識・技法、ノウハウを実地で学習し、両者の調和の取れた人材養成を行う。(東京大学工学部システム創成学科 HP より)

システム創成学科は以上のような理念の基に誕生したが、その学部教育に体现されている。2003 年 3 月に実質第一期生を誕生させたばかりであり、その多くが大学院に進学することもあり社会に巣立った卒業生の数は限られており、その教育成果を評価できる段階にはない。

次に、2003 年 4 月からの地球システム工学専攻の大学院教育について述べる。システム創成学科の実質第一期生が 2003 年 3 月に卒業するため、システム創成学科に参加している 4 つの専攻において、大学院入試と大学院カリキュラムの検討が行われた。その結果、大学院入試の内、いわゆる推薦入学(東京大学大学院工学系研究科では別途選考と呼んでいる)については、4 専攻で共同歩調をとることになり、システム創成学科から順位を付けて推薦された志願者を、専攻が設けた基準にしたがって可否の判断を行うことになった。推薦に対して一般入試(筆記試験をおこなうもの)についても協議が行われたが、精密機械工学専攻をのぞく 3 専攻は共通の入試問題を使うことになった。工学系研究科の共通科目である外国語(英語)に加えて、数学を中心とした専門科目を 3 専攻は共通して使用し、口頭試問をそれぞれで行い可否の判定を行うことになった。しかし、それでも、システム創成学科の環境・エネルギーシステムコースと知能社会システムコースには 3 専攻の教員が参加しているため、システム創成学科からの受験生は専攻所属の異なる複数の教員を指導教官として選ぶことを望んでいるはずであるが、一つの専攻にしか出願できない。学生の要望に答えるためには、今後も大学院入試改革が必要である。

地球システム工学専攻所属教員は、システム創成学科の環境・エネルギーシステムコースと知能社会システムコースに参加しており、その卒業生を大学院の修士学生として受け入れるにあたり、大学院修士課程のカリキュラムを 3 コース制とし、その一部は、システム創成学科に参加している環境海洋工学専攻と相互協力を行い、連携を強化することになった。すなわち、地球システム工学専攻は、エネルギー・社会経済コース、地球環境コース、テクノロジー・マネジメントコースの 3 つのコースを設け、後二者は環境海洋工学専攻との共有コースである。

地球環境コースとテクノロジー・マネジメントコースは、それぞれ、システム創成学科の環境・エネルギーシステムコースと知能社会システムコースを意識したものであり、学部教育の中で提起された様々な課題に対して、知識と能力の習得をさらに深めるために用意されたコースである。これに対して、エネルギー・社会経済コースは地球システム工学専攻独自の大学院コースであり、従来の資源開発に関する技術的・工学的テーマだけでなく、評価・解析に社会・経済的な視点を取り入れたカリキュラムを用意している。

東京大学大学院工学系研究科の修士課程では 30 単位の取得を修了条件として課している

が、そのうち 10 単位は修士論文研究に関連し、残り 20 単位は講義・演習により取得することになっている。東京大学大学院工学系研究科では、修士論文研究だけが必修であり、講義・演習の単位は、他専攻・他研究科と学部講義・演習を受講してもとれることになっている。したがって、前記 3 つのコースカリキュラムでまかなう必要はない。

大学院修士課程の教育は、前記 3 つのコースカリキュラムだけでなく、指導教官の下における修士論文研究を無視することはできない。従来型あるいは未来志向型の修士論文研究がそれぞれの指導教官の下で行われており、そこに東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻における資源系工学教育の将来を見ることができると言えよう。

4. 4. 5 早稲田大学

早稲田大学における地球・資源システム工学分野の教育・研究は、近代産業の成立に不可欠な原料資源、エネルギー資源等の自然界における存在状況の把握、その開発および有効利用、資源開発に関連する作業の安全および環境保全等、広範囲の学問と技術に関する研究を目的としている。

今後の展望については、21 世紀の重点科学技術分野が「バイオテクノロジー」、「IT」、「環境」、および「ナノテクノロジー」であるという認識のもとに、理工学部および大学院理工学研究科再編の一環として検討されている。すなわち、再編フレームワークの一つとして、環境問題、エネルギー問題、都市問題、社会システム等、自然環境と社会環境にかかわる複数の学科による教育・研究体系の展望を開くものである。

1) 経過と実績

早稲田大学の地球・資源システム工学関連分野は 1960 年代以降の技術と経済の発展成長期には、特にエネルギー資源および原料の安定供給を課題として、地下資源の探査開発ならびに有効活用にかかわる教育研究を担ってきた。また、資源と原料の開発・利用に伴う環境問題も重要な関連分野とされており、1980 年代以降、地球科学、特に地質学を基盤科学とする観点から、地球の動的変動と物質循環、資源開発、環境保全等、地球的視野に立った教育研究への取り組みがなされてきた。そこでは、地球・環境そして資源という極めてグローバルな諸問題に対して、従来の地質学、岩石・鉱物学、地球物理学、岩盤工学、石油工学、資源循環工学、環境工学等を基盤としつつ、理学と工学の真に学際的な教育研究のアプローチがとられて来た。

早稲田大学における地球・資源システム工学関連の学科としては、理工学部では環境資源工学科および社会環境工学科、教育学部で理学科地球科学専修があり、大学院理工学研究科では地球・環境資源理工学専門分野および建設工学専門分野がある。地球・環境資源理工学専門分野は現在、地質学、資源科学、地殻情報工学、開発環境工学、資源循環工学、環境安全工学の 6 部門から形成されている。

地質学部門は構造地質学、古生物学、岩石学および構造岩石学の 4 分野から構成され、地球・資源システム工学の基礎となる地球科学のうち地質学系の分野を担っている。

資源科学部門は岩石・鉱物のキャラクタリゼーションおよび処理にかんする知識と技術を基礎として、資源探査、鉱物処理、新素材開発、環境問題等への応用を目指している。

地殻情報工学は近くの構造や性状の解明を目的として、物理探査の理論と技術を習得し、地下資源の発見・確認、自然災害の軽減、地下空間利用のための地質調査、地盤・岩盤災害の予測、地下汚染調査等の諸問題に対応する。

開発環境工学は石油、地熱および鉱物資源の安全且つ効率的開発に必要な地層・岩盤構造の静的安定性と動的挙動、並びに岩石内における流体挙動に関する教育研究を担う。

資源循環工学は天然資源並びに廃棄物の処理利用およびリサイクリングにわたる資源循環システムの最適化を目標として、各種資源に関わる成分分離およびハンドリング技術の高効率化について研究する。

環境安全工学は大気環境並びに作業環境における有害因子の計測・評価・対策を対象とする分野と、廃水処理における主として界面化学的分離技術の開発を目指す分野から成る。

近年特に、海洋資源、地熱利用、地下空間利用、新素材開発、資源リサイクリング、地球環境等の新しい問題が提起されており、本専門分野においても、急速に変わりつつある社会からの要請に対応し得る学識を備えた人材の育成を行っている。

2) 早稲田大学における地球・資源システム工学の位置付け

地球・資源システム工学の位置付けは、地球科学を基礎とし、環境資源理工学および社会環境工学（土木工学）を応用分野とする広範な総合環境学フレームワークにおける主要な分野の一つと考えられている。総合環境学の概念は、全ての物質は地球大気圏、水圏、地殻、マントルから成る地球システム内で循環するという観点から、地球システムの形成・変動過程を究明するとともに、有用な物質の開発と循環系への還流により地圏環境の保全を可能にし、人類の持続的発展を図るというものである。従って、地球・資源システム工学は、広大な時間と空間にまたがる地球システム循環系における自然と工学的アプローチにかかわる物理的、化学的メカニズムの解明の一端を担うもので、環境工学とも密接に関連するものと考えられる。

3) 早稲田大学における地球・資源システム工学の展望

理工学部および理工学研究科における既存の関連分野を融合的に再編成することを視野に入れながら、地球・資源システム工学を含む総合環境学の教育・研究拠点の構築が目標とされている。関連分野はそれぞれ教育・研究の実績があり、独自のリソースを有しているが、それらを更に機能的に融合することで新しい展望と飛躍的な発展が期待できる。新しい教育・研究拠点では、総合環境学の枠組みにおいて、以下のような主要な課題について、新しい教育・研究の展開を図ることが考えられる。

(1) 炭素循環に関する課題

炭素循環のメカニズム、石油根源岩の形成および貯留岩への炭化水素の移動・集積過程、ガス・ハイドレード層の形成メカニズムと動態、地球環境の変動、炭酸ガスの地中固定メカニズム等、炭素の循環は地球システムならびに資源工学における基礎的かつ応用的課題

である。

(2) 鉱物資源の新機能開発に関する課題

粘土鉱物は地球表層の物質循環、特に重金属、砒素、硫黄などの分布や移動制御を担うもので、生命誕生、生物環境、地下水汚染の浄化等、環境制御機能を有するが、その性状と動態の解明は今なお課題である。また、新しい技術の適用によって、粘土鉱物を機能性と環境調和性に富む素材・原料に変成する可能性を有している。

(3) 環境保全および防災に関する課題

土壌および地下水中における汚染物質の挙動の解明と検出技術の確立、廃棄物の新しい処理・再生システムの構築、地圏環境の物理化学的要素と生物科学的要素を統合する新しい防災理工学体系の追求、自然災害に対する環境の安定性の評価と防災システムの構築等々の課題への挑戦が考えられる。

4) 人材育成に関する目標

早稲田大学における地球・資源システム工学関連分野では、地球科学の基礎的知識と総合環境学の視野を持ち、地球・資源システム工学にかかわる専門知識を持つ有能な人材を育成することが課題とされている。

- (1) 地球環境の物理的、化学的、および生物的要素の相互関係と相互作用のメカニズムとインパクトを理解し、それらを的確に評価できる人材を育成する。
- (2) 資源探鉱開発、資源・物質循環、環境保全にかかわる広い専門知識と地球的視野を持ち、国際的な場において、国際社会との連携を図りつつ、十分に能力を発揮できる人材を育成する。
- (3) 地球・資源システム工学の専門家としての自覚を持ち、社会に対する倫理的責任を担うことのできる人材を育成する。
- (4) 鉱物資源から環境制御機能等の新機能を有する素材・原料を開発するために必要な研究を指導できる人材を育成する。
- (5) 地圏環境の物理化学的要素と生物科学的要素、ならびに環境の安定性を評価することができ、防災システムの構築に取り組むことができる人材を育成する。

4. 4. 6 京都大学

京都大学の改組については大別すると、大学自体の独法化に係る改組に伴うもの、研究科レベルのものと専攻に関するものの3つに分けられる。

平成16年度の大学の独立行政法人化により、画一的な大学から、世界の大学に伍しての競争的状况の下での独自色、経営的手腕に依る教育・研究が問われるように変化してきている。

1) 大学自体の改組

京都大学としての改組では、工学研究科の吉田キャンパスから桂キャンパスへの移転がある。平成15年度の、化学系、電気系に始まり、建築系と順次移転し、平成17年度には

我々が所属する地球系（土木、資源、環境工学）が移転する予定である。

移転する桂キャンパスで特徴的なのは、専門分野および産官学を横断的に連携した、時限の高等研究院とオープンラボである。これらは京都大学が中心となり、産官学の総力を結集して、特定のテーマに絞り、資金を集中的に投入して成果をあげようとするものである。

2) 研究科レベルの改組

工学研究科のスリム化と社会の要請に応じた新規の講座・分野の設置を目的として、平成 8 年にエネルギー科学研究科が、平成 10 年に情報学研究科が分離独立した。さらに、平成 14 年度には、環境工学、土木工学等の一部が地球環境学堂（研究科に対応）が設置された。

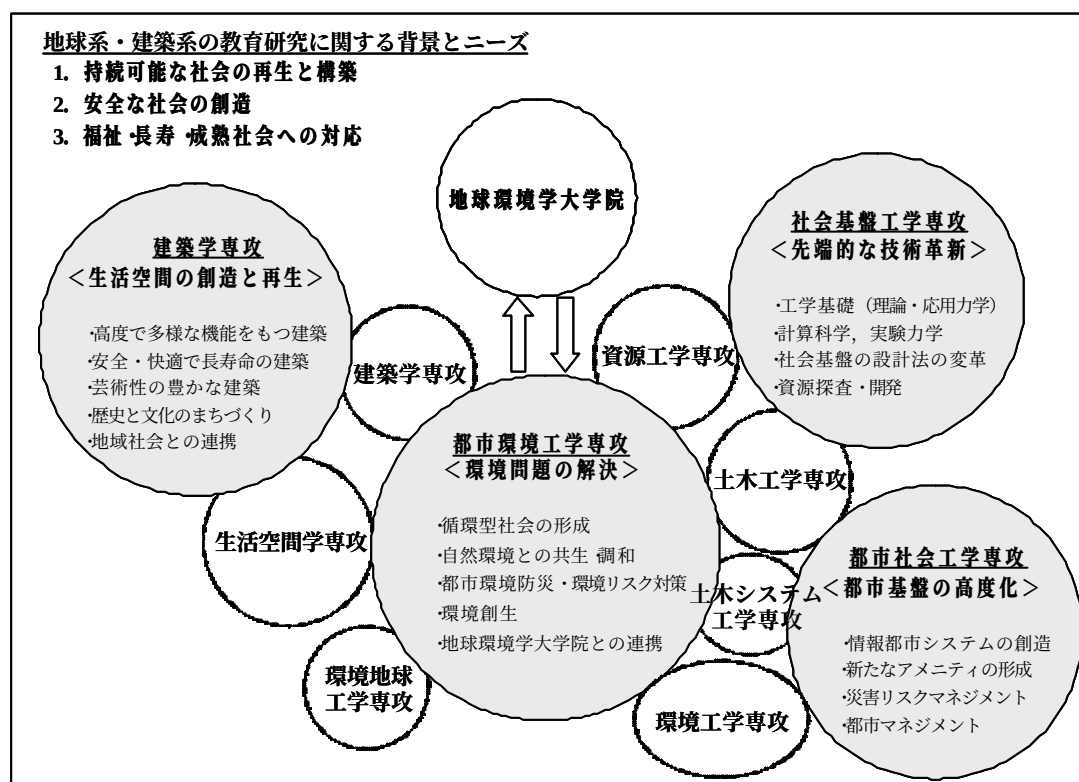


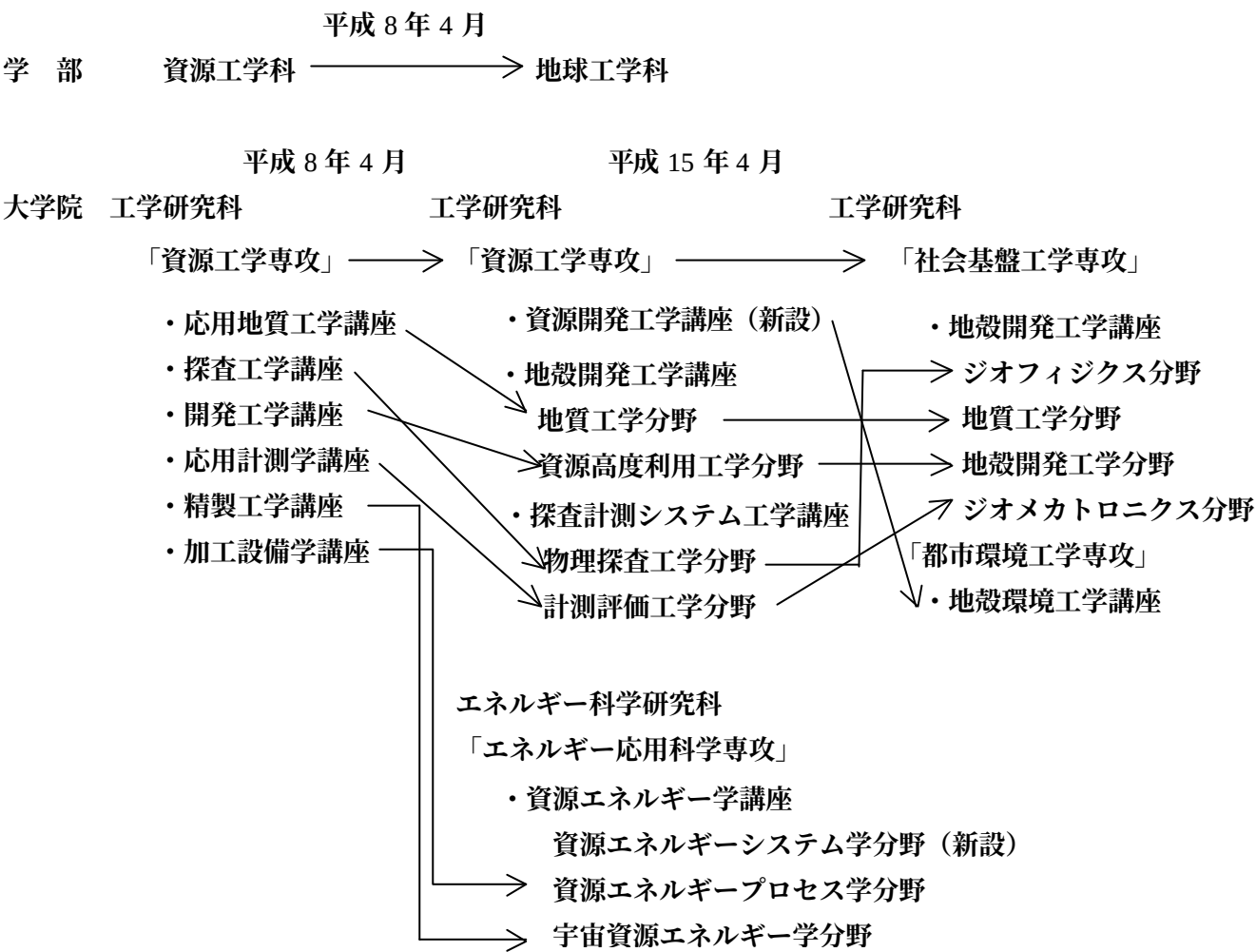
図 4-4-4 地球系・建築系 7 専攻から 4 専攻への再編

3) 専攻レベルの改組

資源工学関連の学科は平成 15 年 4 月 1 日でもって大きく変革された。すなわち、図 4-4-4 に示すように資源工学専攻、土木系専攻（土木工学専攻、土木システム工学専攻）、環境工学専攻、環境地球工学専攻、および建築系専攻（建築学専攻、生活空間学専攻）の一部が改組され、社会基盤工学専攻、都市社会工学専攻および都市環境工学専攻となった。この時点で、土木工学、資源工学という名称が京都大学の専攻レベルから消失したことになる。ただし、学部教育主体である地球工学科の 3、4 回生は、土木コース、資源コース、環境

コースに所属することになり、わずかにそこに名残をとどめることになった。京都大学の資源開発関連講座の学部および大学院の平成 8 年に行われた大学院重点化以降の変遷を表 4-3-2 に示す。

表 4-4-2 平成 8 年以降の資源開発関係講座の変遷



4. 4. 7 九州大学

九州大学においては「国際的・先端的教育研究拠点の形成」と「自律的に変革し活動を維持し続ける社会に開かれた大学の構築」の 2 つを基本的なコンセプトとして、その実現のために「組織の再編・整備」「教育・研究の改革」および「管理・運営の強化」が進められている。ここでは地球・資源開発工学分野に関連したその概要を報告する。

1) 大学院重点化

大学を取り巻く社会環境の変化を見据え、また教育と研究の調和という視点から、今後の環境変化に対応できる教育研究の組織運用体制として、平成 12 年度より「学府・研究院制度」が導入された。これは教育研究組織を全学的に見直し、大学院の教育研究組織である「研究科」を、教育組織としての「学府」と、研究組織としての「研究院」に分離することによって、教育上の目的を重視した組織編成と、研究上の目的を重視した組織編成にそれぞれ柔軟に対応できる組織である。

「学府・研究院制度」において「研究院」は、教官の所属組織であるとともに、当該教育分野に関連する分野の研究を行う組織である。また、その編成は、新しい発展動向も含めて、従来から確立・発展してきた系統性と学際性を考慮しつつ、また大学院教育、学部教育に配慮して行われた。

資源開発分野では、「学府」と「研究院」は 1 対 1 の対応となっている。この改組にあたり、工学部附属地熱開発センターは廃止され、地球資源システム工学部門へ統合された。また、同センター所属の九重分室が、新たに「九重地熱・火山研究推測ステーション」という名称で発足した。一方、学部については、建設都市工学科（旧土木）、資源工学科、船舶海洋工学科（旧造船）は、地球環境工学科に統合され、資源工学科は資源工学コースと改称された。

今後の展開としては、アジアを中心とする地域への国際展開を図っている。アセアン工学系高等教育ネットワークにおいて資源・地質工学部門のわが国の幹事大学となり、東南アジア諸国の大学の教育・研究の展開を図っている。また、アジアの特定大学（たとえばバンドン工科大学）との協定を通じ、アジアにおける教育・研究の展開を図っている。さらに、30 年以上にわたって継続された国際協力事業団の国際研修コース（地熱研修コースおよび石炭資源研修コース）は 400 名近くの研修生を送り出し修了したが、2003 年度より、同じく国際協力事業団の再生可能エネルギーコースを開設するなど、多様な国際展開を図っている。

2) 国際環境システム工学特別コース

平成 14 年 10 月より、工学府に国際環境システム工学特別コース（博士課程定員 20 名）が発足した。九大大学院工学研究院では、それまでの資源関連の教育研究の実績を踏まえてかつ、地域の特徴を生かし、国際協力事業団などの協力を得て、昭和 45 年国際地熱エネルギー研修コースを、同 61 年には、国際石炭資源開発利用コースを併せて開設した。このコースは資源関係の教官を主体に運営され、途上国の上級技術者養成に貢献するとともに、

国際交流の発展に大いに寄与した。その後、国際協力事業団の研修コースの見直しなどにより廃止されたが、コースの再開、維持発展の要望は強く、過去のコースの修了者数は 400 名を越えて、各国で活躍しているという実績もあり、本特別コースの設置に至った。

国際環境システム工学特別コース (International Special Course on Environmental Systems Engineering) は大学院工学府内に開設されている。本特別コースは、地球温暖化、酸性雨、土壤汚染、地下水汚染、砂漠化、廃棄物、海岸汚染などの問題に対して、地球を有限のシステムとしてとらえ、エネルギー資源の開発と地球環境保全の両側面から工学的に問題解決ができる有為の人材を地球規模で育成するのが目的で、アジアを中心とした世界各地の環境・エネルギー問題のたんなる理論・方法の展開にとどまらず、実践的応用面に重点を置き、要請された人材が直ちに自国で活躍できるように配慮するという特色を持っている。

コースは博士後期課程の 3 年間で、定員は国費留学生 10 名、私費留学生 10 名、カリキュラムは基本的には現行のものに従い、当初は建設都市、地球資源、エネルギー量子の各専攻を中心に構成することとし、使用言語は英語で、このコース独自の共通講義 (2 単位 6 科目)、先端専門 (2 単位 20 科目) が用意されている。平成 10 年度は 10 ヶ国から国費留学生 9 名、私費留学生 11 名が入学した。本コースでは、講義、各研究室での博士論文研究のほか、フィールドワークを重視した地球的規模の教育を実施するため、内外の企画研修、研究機関、現場見学なども実習科目として履修させている。また、内外の著名な研究者を招致し、特別講演を実施することで、より充実した講義としている。更に、留学生の研究教育を通じて、本学府の将来にわたる国際的な研究交流、および環境・エネルギー問題に関わる学問的拠点 (COE) の形成に資せんと期待している。

3) 新キャンパスへの統合移転

九州大学は 1911 年も創立以来、現箱崎キャンパスを中心として発展してきたが、キャンパスの分散、狭隘および航空機騒音等の問題があり、また、世界的レベルの研究・教育拠点の形成のために、福岡市西区元岡・桑原地区に 275ha の用地 (有効敷地 141.6ha) を確保し、移転することを決定した。以来、造成、ゾーニングが進められてきた。新キャンパス基本計画では (1) COE にふさわしい研究教育施設の整備、(2) 環境と共生する未来型のキャンパスの創造、(3) 地域に開かれた魅力的なキャンパス生活の創造、(4) 新しい学術研究都市の核となるキャンパス創りと地域連携の推進、(5) キャンパス間の連携に配慮した新キャンパスの創造 が掲げられており、学内外の専門家の協力を得て、21 世紀にふさわしい新技術を導入した未来型のキャンパづくりが行われている。地球環境系の教官は造成基本設計、環境評価及びマスタープラン作成に、それぞれの専門分野から積極的に参画している。

現在、第 1 期造成工事が完了し、平成 15 年 1 月建築工事が開始された。移転は 3 ステージに亘って進められるが、この全体の移転修了までを、概ね 10 年程度と想定している。工学系移転は第一陣となっており、その開始は平成 17 年度、地球環境系は平成 18 年度を予定している。これまで、環境影響評価、キャンパス内に多数存在する遺跡群の取扱い、古

墳の保存、インフラ整備、地下水塩水化など多くの問題に直面し、その解決に取り組んできたが、独立行政法人化が進められる中で、なお、建物建設の PFI 化、交通問題、関係機関や地元との調整など問題が山積している。しかしながら大学各位の鋭意努力によって総合移転全体は順調に進んでおり、地球環境系においては平成 19 年頃からは、新しいキャンパスにおいて研究・教育活動が開始される見通しである。

4) 中期目標・中期計画について

平成 16 年 4 月の独立行政法人化にともない、大学全体および工学研究院としての中期目標・中期計画の策定、文科省の許可が求められており、現在、その策定作業が進められている。内容詳細については未だ決定されるに至っていないが、骨子は以下の通りである。

工学研究院・工学府は、両組織相互の柔軟な連携を図り、教育・研究の更なる変革と活力の向上を目指す。工学研究院・工学府は重点化された基幹大学の研究・教育組織として世界的規模の中核的拠点を目指し、九州大学学術憲章に則り、研究においては工学に関する基礎的学術を深化、体系化する独創的研究、萌芽的分野を育成する創造的研究を推進し、学術的新学術分野の開拓、他部局、他機関との共同研究、産学との連携研究、国際共同研究を通して、自然と調和し、人類社会の持続的発展に貢献することを達成する。また教育面においては課題探求・課題解決能力の育成、先端的な創造性能力の開発を柱とした教育により、人類社会の持続的発展に貢献することを達成目標としている。

これに対応する中期計画などは、具体的な項目と達成の具体的数値を明示する方向で、現在策定進行中である。

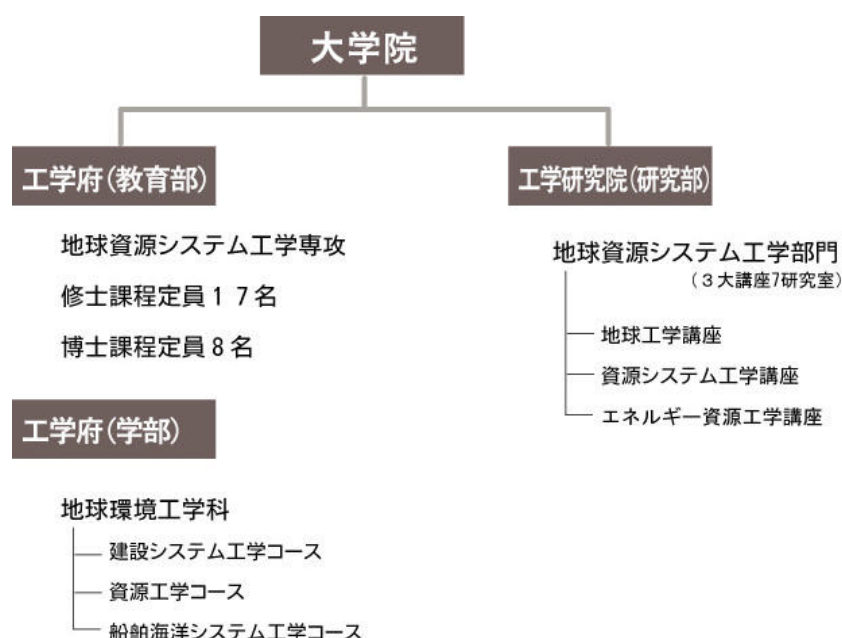


図 4-4-5 九大における教育研究組織

4. 4. 8 独立行政法人産業技術総合研究所

我が国の行政改革の方針に従い、経済産業省（旧通商産業省）工業技術院の15の研究所は、独立行政法人産業技術総合研究所として、平成13年4月1日に統合・発足した。「産総研」は、我が国経済社会の明日に向けて常に新たな可能性を開き提案していくため、先端的研究、長期的政策推進のための研究、科学基盤研究、の推進を目指している。これらの研究は旧研究所を解体・再統合したおよそ60の研究ユニット群で実施される。各ユニットは組織として独立しており、テーマに対し自由に連携可能なフラット性を特徴としている。

1) 「産総研」における資源研究

産業技術総合研究所法によると、「産総研」は、鉱工業の科学技術に関する研究及び開発等の業務を総合的に行うことにより、産業技術の向上及びその結果の普及を図り、もって経済及び産業の発展並びに鉱物資源及びエネルギーの安定的かつ効率的な供給の確保に資することを目的にしている。

「産総研」では、6つの大くくりの研究分野を設け、それぞれに連絡会を設けて参加ユニット間の連絡を図っている。環境・エネルギーは分野の一つであり、資源もその中に含まれている。環境・エネルギー分野では、研究ユニット並びに外部機関との連絡・連携を強化し、研究開発を推進するために研究推進戦略を検討している。そこには、分野に関する取り組みの展望も述べられている。「産総研」の位置付けに基づく当該分野の中期目標は、環境と調和した経済社会システムの構築とエネルギー・資源の安定供給確保である。

ここでは、平成15年2月18日に策定された最新の「環境・エネルギー分野の推進戦略」（以下「戦略」）から、資源に関する部分を抜き出し、さらに「戦略」に触れていない点を補強して述べることにより、「産総研」における資源に関する研究の展望とする。

「戦略」では、グローバルで歴史的な社会・経済的転換点という状況と、それに伴う研究開発の新しい在り方を踏まえ、産総研の環境・エネルギー分野として、持続・共生が可能な循環型社会の構築を両分野で共通の社会的目標と定めた。

さらに、この社会的目標を果たすため、主に産業に係わる科学技術の進展を担う国の研究機関としての社会的要請に基づき、以下の三つの研究開発目標を定めた。

目標1. 安心・安全な環境の確保（内容省略）

目標2. 資源の循環型システム構築

- ・ グローバルな視点から見た資源の効率的利用と安定供給
- ・ 資源、環境制約のもとでの効率的で競争力の強い産業技術の育成

目標3. 環境と調和した新しいエネルギー需給構造の創造

- ・ 2050年までにCO₂濃度を550ppmに安定化させるシナリオに従い、我が国のCO₂排出量を現在の30%以下に削減
- ・ そのための再生可能エネルギー導入率の飛躍的向上（1次エネルギーの30%以上）
- ・ 我が国におけるエネルギーの安定的確保

- ・ 経済的で利便性の高いエネルギー技術の創出

2) 特に地下資源について

地下資源に関しては、探査、評価、開発、利用のいわゆる上流部分への取り組みが重要である。「産総研」において、この部分を担当するユニットは地圏資源環境研究部門と海洋資源環境研究部門である。ところが、「戦略」にはこの部分の記述が十分でない。これは、当初、両部門が環境・エネルギー分野ではなく地質調査分野と見なされていたことにより、「戦略」への記述が十分なされなかったものである。両部門では別途、地下資源の上流部分について長期展開を示す資源・エネルギーロードマップを作成したので、これを図 4-4-6 に示す。

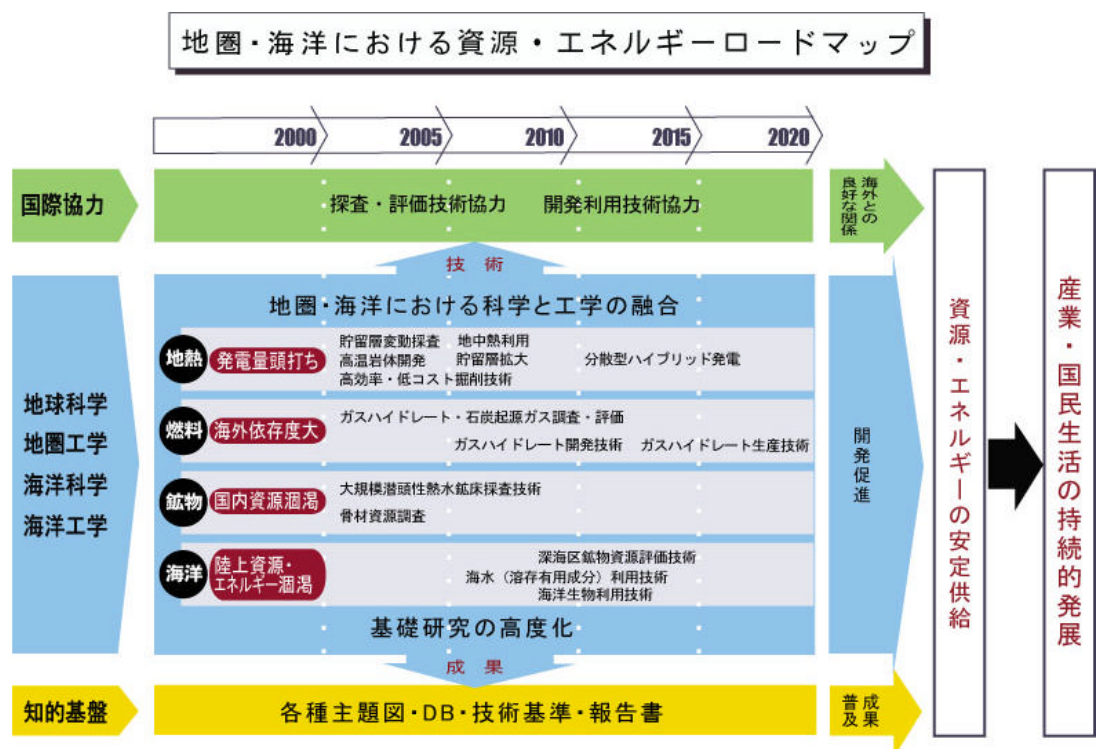


図 4-4-6 地圏・海洋における資源・エネルギーロードマップ

我が国の産業、経済、国民生活の発展、維持は、資源・エネルギーの安定供給の上に成立している。これに対し、我が国は資源貧国であり、すべての炭坑が閉山、金属鉱山が激減する中、資源自給は不可能であり、ほとんどを輸入に依存している。経済原理からは、退化を払えばモノ（資源）は買えるので、資源研究は不要との議論がある。しかし、この議論は、「国際的な資源流通経済が安定していれば心配はないが、長期的に安定している保障はない。」ことへの配慮に欠けている。つまり、資源ショックの可能性は常に潜在しているのである。

図 4-4-6 に示す地圏及び海洋の様々な資源に関する研究や技術開発への取り組みの基本コンセプトは、この資源問題への対応にある。その決め手としてとり得る方策は次の三つであり、図 4-4-6 に示すように、これらを絶やすことなく長期にわたって展開していくことが、我が国の資源・エネルギーの安定供給、ひいては産業・国民生活の持続的発展につながると考える。

- ・我が国の国土及び経済水域における未開発資源の開発
- ・資源産出国に対する技術協力
- ・資源・エネルギーに関する知的基盤の提供

4. 5 資源系技術者教育

資源分野の発展のためには、国内はもちろん、国際的にも活躍する資源系の技術者を育成することが重要である。具体的な方策として、技術者教育 J A B E E へ積極的に取り組むことが今後ますます重要になると思われる。ここでは、資源開発工学研連やエネルギー・資源工学研連地球・資源システム工学専門委員会合同委員会に関連する学協会が J A B E E に関してどのように取り組みを行っているかについて紹介する。

平成 13 年 10 月 22 日に開催された第 3 回資源開発工学研連とエネルギー・資源工学研連地球・資源システム工学専門委員会合同委員会では、「資源系技術者教育と技術者養成の課題」と題するプレゼンテーションがあった。このプレゼンテーションをもとに討議した結果、本合同委員会ではなるべく多くの関連教育機関が JABEE の認定を受けることを推進するという方針を決定した。この方針のもとに、資源開発工学研連に所属する 6 学協会（資源・素材学会、資源処理学会、物理探査学会、日本リモートセンシング学会、日本地熱学会、石油技術協会）に対して、「技術者教育プログラム認定制度への理解と、地球・資源分野における技術者養成と技術者の生涯教育の積極的支援」を要請する依頼を行った。また、資源系学協会の JABEE 及びそれと密接に関連する技術者資格問題への取り組みの現状や今後の対応を把握し、学協会間の意見交換を積極的に図ることを目的とした、アンケートを関係学協会に送付した。その結果、資源・素材学会、資源処理学会、物理探査学会、日本リモートセンシング学会、日本地熱学会より回答を得ることができた。アンケートの設問や回答内容の詳細については、平成 14 年 5 月 27 日に学術会議で開催したシンポジウム「地球・資源および関連分野における技術者養成と大学教育」で述べた。このアンケートは前半が JABEE に設問であり、後半は技術者資格に関する設問である。前半の JABEE に関する回答内容をまとめると次のようになる。

回答のあった 5 学協会のうち、JABEE の会員学会となっているのは資源・素材学会のみであった。資源・素材学会は、JABEE 設立準備段階より積極的に関わっており、現在は常設の委員会を設けて対応を行っている。対応組織・調査研究委員会の設置を検討中としている学協会は二つ、特になしとしている学協会の数は二つであった。ただし、特になしとしている学協会であっても、CPD に関する委員会が必要に応じて検討するとしている。

「4 年制の大学の教育について議論がなされているか」の設問に対しては、1 学協会において分野別要件の策定の段階で踏み込んだ議論がなされている。他の学協会においては、これまでに機会がなかった、教育関連の会員が少数、主旨が理解されていない等の理由により、議論はなされていない。

「4 年制大学の技術系教育プログラム・教育システムの第三者機関による認定が必要であるか」との設問に対しては、必要と考える学協会が三つあった。その理由はいずれも「国際的な水準とするためには、第三者の認定が必要」ということである。なお、回答のなかった残りの 2 学協会は、他の設問である「JABEE による技術系教育プログラム・教育システ

ムの認定基準知っているか」に対して、「聞いたことはあるが詳しくは知らない」と回答した2学協会と一致している。

「JABEEによる技術系教育プログラム・教育システムの認定は、大学の持つ伝統や個性を尊重せず、大学の自主的な教育改革を規制するか」の設問に対しては、そうは考えないとする学協会が三つあり、その他の学協会は不明としている。そうは考えないとする三つの学協会の意見をまとめると、「JABEEによる認定は大学の特徴を活かした教育プログラム・教育システムを前提としており、大学の自主的な改革を規制するものではなく、むしろ自主的な教育改革を進め易くなる」ということになる。

「JABEEの認定では、社会で活躍できる卒業生を送り出しているか、そのために必要な教育システムが機能しているか等が評価項目となっている。これに対する意見」を求める設問に対しては、この評価項目を妥当とする学協会が3つあった。ただし、それ以外の1学協会からは、重要な評価項目ではあるが、卒業生が活躍できるかどうかは、本人の努力や社会環境等も影響するとの意見があった。

次に、JABEEの認定基準として挙げられた(a)～(h)の8つの能力と素養に関して、意見を求めた結果、これで良いとする回答(2学協会)があった一方、特に「(a)地球的視点から多面的に物事を考える能力とその素養」は抽象的で分かりにくい(3学協会)という意見があった。また、「(b)技術の社会および自然に及ぼす影響・効果に関する理解力と技術者としての社会および組織に対する責任を自覚する能力(技術者倫理)」に関しては、冗長、分かりにくいとする意見があった。「(c)数学、自然科学、情報技術に関する知識とそれらを活用できる能力」及び「(d)該当する分野の専門技術に関する知識とそれらを問題解決に活用できる能力」に関しては特段の意見はなかった。また、「(e)種々の科学・技術・情報を利用して社会の要求を解決するためのデザイン能力」は抽象的で理解しがたいとする意見があった。また、「(f)日本語による論理的な記述力、口頭発表力、討議などのコミュニケーション能力および国際的に通用するコミュニケーション基礎能力」、「(g)自主的、継続的に学習できる能力」及び「(h)与えられた制約の下で計画的に仕事を進め、まとめる能力」については、達成したか否かの判断が困難という意見、さらには項目全体に対して、どのレベルまでの到達を望むかについてのミニマム・ガイドラインが必要とする意見があった。以上の八項目に付け加えて、「技術のコストパフォーマンス」あるいは「技術適用の政治・経済的制約」、技術マネジメントスキルに関するもの」が必要であるという意見があった。

「地球・資源およびその関連分野の分野別要件を知っているか」の設問に対しては3学協会から知っている、2学協会から知らないとの回答があった。この分野別要件に関して意見を求めた結果、1学協会から「どの項目がどの程度満たされれば認定基準を満たすかが記されていないので、きわめて不十分な内容であり、きちんと認定基準を示すべきである」との回答があった。

また、「この分野別要件は三主要領域から構成されており、それらの主要領域が適正であるかどうか」の設問には、回答のあった5学協会のうち3学協会が適正と答えており、他

の2学協会からは、「地圏」は「地球科学」とした方が良いとする同様の主旨の意見があった。

さらに、「三主要領域のそれぞれが小分野から構成されており、それぞれに与えられたキーワード」に関する意見を求める設問では、2学協会が適正であると答えているが、他の2学協会は、重複するものがあるとしている。また、「キーワードの中で何をどの程度みれば認定基準を満たすのか明示すべき」という意見があった。

一方、アンケート後半の技術者資格に関するとりまとめた結果は以下の通りである。

「各学協会の会員に占める大学・研究所の会員数と民間企業等の会員数の比の概数」を尋ねる設問では、どちらかといえば前者が多いもの（6割程度）が3学協会、どちらかといえば後者が多いもの（6割程度）が1学協会、後者が多いもの（7割超）が1学協会である。

「学協会内に技術者資格問題に関して、対応組織・調査研究委員会があるか」の設問に対しては、2学協会が現在あるとの回答であった。このうち、1学協会では、平成14年度より新設、もう一つの学協会では、ネットを通じて積極的な活動を行っている。ないと答えた残りの3学協会では、今後、対応組織を立ち上げるかどうかについては未定である。

「学協会内の技術士の概数」を問う設問では、具体的な数について2学協会から回答があった。それぞれ、250名、100名程度で、比較的多くの学協会員が技術士の資格を持っていることが分かった。また、分野としては応用理学が多いようである。

「国際的な相互承認の必要性」に関しては、3学協会が、必要と答えている。他方、2学協会では特に議論されていないとの回答であった。

「APEC 技術者資格の相互承認の9分野のうち、どの分野に関心があり、早期の相互承認を希望するか」の設問に対しては、Environmental が4学協会以最も関心が深く、Geotechnical が3学協会（但し1学協会は留保付）、Industrial と Mining がそれぞれ2学協会であった。

「学協会の会員技術者が仕事をされる場合、技術者資格を必要とする具体例や対策など」を問う設問に対しては、現地での契約の際に必要なであるとの回答があった。しかしながら、自由意見の欄で、必要があれば有資格者を現地で調達したとの記述もあり、これが実状に近いと考えられる。

それぞれの学協会が「技術者倫理について、何らかの規定を明文化し公開されているか」との設問に関して、このような規定を公開している学協会はなく、今後も特に予定はないようである。但し、1学協会からは技術士法などに準じるとの回答があった。

各学協会が「継続教育について協力を求められた場合、具体的方策の検討を始めているか否か、またプランがある場合には、その具体的内容」を問う設問に対しては、具体的な組織作りを検討している学協会が一つあり、3学協会では検討していないとの回答を得た。また、既に継続教育関連システム（ネット）を立ち上げている学協会も一つあった。

「継続教育以外に、会員技術者にどのようなサービスを行っているかの具体例」を問う

設問に対しては、特に行っていないとの回答が大勢を占めた。また具体的な回答のあった1学協会では年2回の例会やシンポジウムで、特別講演、技術紹介、特定テーマについて情報提供をしているとのことであった。

以上の JABEE に関する回答をもとに資源関連の学協会の現状を総括すれば、JABEE 設立当初から関係の深かった資源・素材学会は別として、その他の学協会は JABEE の重要性や必要性は認識しているものの、それがなかなか具体的な活動に反映されていないと言えよう。とはいえ、JABEE の認定を受けようとする大学の動きは加速化しており、平成 12 年度には九州大学工学部・地球環境工学科資源工学コース、平成 13 年度には秋田大学の工学資源学部・地球資源学科の応用地球科学と地球システム工学コース、島根大学の総合理工学部・地球資源環境学科、平成 14 年度には北海道大学工学部・資源開発工学科、東京都立大学理学部・地理学科、大阪市立大学理学部・地球学科地球システム課程の合計で7プログラムが試行審査を受けており、平成 15 年度には本格審査を行う可能性もある。このような情勢を踏まえ、資源関連の学協会も引き続き、関連教育機関が JABEE の認定を受けるように努力する必要がある。

5. 循環型社会システム構築に対する「資源」分野からの提言

循環型社会システムの構築のために、これまで法律の整備を始め、いくつかの促進策がとられてきた。これをさらに促進するために、資源供給の観点から次の2つの提言を行いたい。

1) 海外資源生産国における「エコリックサック極小化」のために、我が国の優れた環境保全技術を移転するための技術協力の推進

地球環境の保全、天然資源の枯渇、社会の持続的発展のために、循環型社会システムの構築は必須である。循環型社会システムのマテリアルフローは、地球にある資源の供給に始まることを十分認識し、これをフローの第1歩として位置づけることが必要である。天然資源は地球の贈り物と考え、海外資源生産国における「エコリックサック極小化」のために、我が国の優れた環境保全技術を移転するための技術協力を推進すべきである。そのためには、生産性を飛躍的に向上させる技術や資源生産国における環境負荷を低減するような技術開発を行い、海外技術移転を積極的に図るべきである。さらに、ハードのみならず、環境アセスメント手法などのソフトに関しても、海外への技術移転を行うべきである。

2) 個々の鉱物資源の明確な位置づけとその対策

金属のリサイクルは、循環型社会システムを支える重要な技術の一つであり、今後さらに積極的に推進すべき課題である。そのため、現在使用されている金属について、資源賦存量及び可採年数、採掘（新たな供給）とリサイクルに関して経済性の比較、金属の廃棄に伴う環境負荷、リサイクルに必要なエネルギー消費量などを総合的に考えて、1) リサイクルすべき金属、2) 代替品を開発すべき金属、3) 鉱山からの供給を中心に考えるべき金属に分類するなど、その位置づけを明確にすべきである。そのためには、鉱物資源のマテリアルフローの充実化、金属廃棄物に関する統計の整備の他、経済性が考慮可能なライフサイクルアセスメント手法の開発を行うことも重要である。

6. あとがき

天然資源の枯渇と地球環境問題の顕在化により、循環型経済社会システムの構築が問題解決のための一つの手段として注目されている。循環型経済社会システムの構築に当たり、これまでどちらかといえば3R（リデュース、リユース、リサイクル）を中心としたマテリアルの循環に注意が払われ、このシステムに対する資源の供給は殆ど議論されていない。本報告書では、天然資源の供給がこのシステムの構築の第一歩であるという観点に立ち、そのための資源分野の役割を明確にすることを試みた。本報告書が関係各方面において何らかの参考になれば幸いである。

なお、本報告書をまとめるに当たり、経済産業省中小企業庁経営支援部長川口幸男氏、独立行政法人産業技術総合研究所理事吉海正憲氏から貴重なコメントを頂いた。ここに感謝の意を表します。また、本報告書の出版に当たり、独立行政法人産業技術総合研究所の協力を頂いたことを申し添えます。