



UDC 622.34(73)

米国における鉱物資源開発の動向

岩 崎 巖*

Trends of Mineral Resources Research in the United States

Iwao IWASAKI

1. 緒 言

1973年 OPEC の輸出停止に始まった石油危機は、エネルギー高騰を通してわれわれの日常生活に大きな影響を及ぼしているが、最近 1980 年代には鉱物資源危機の兆候が現れ始めていると新聞雑誌に報じられている^{1)~4)}。

この危機はローマクラブの「成長の限界⁵⁾」に警告されているような資源の枯渇ということではなく、特定の鉱物資源の一時的不足が石油危機以上に深刻になる可能性があるというものである。その原因としては消費量の増加、資源開発の経済的制約、海外資源確保への諸外国との競走などがあげられるが、そのような事態に対処して行くためには資源に関するデータの収集とその分析が不可欠であるばかりでなく、資源開発技術の研究や技術者の養成を促進して国内資源の開発を助成し、また再生、代替材料の開発を含めて資源の自給と共にその節約と有効利用を図って行く必要がある⁶⁾。

これまで鉱物資源に比較的恵まれてきた米国でも最近海外依存度が高くなつてきており、国家の安全保障とともに貿易収支の均衡化対策として真剣に取上げられ始めている。そこでこの解説では最近話題になつているトピックスを紹介することにした。

2. 鉱物資源の埋蔵量

「成長の限界」が出版された当初には差し迫つた天然資源の枯渇の警鐘は各方面に衝撃を与え省資源への関心を高めたが、その後この分析には資源量 (Resource) が埋蔵量 (Reserve) と同義に使われていることが指摘されている。ここに埋蔵量とは現在の技術で経済的に採取可能な鉱量、資源量とは現在経済的に採取できない鉱量並に未発見の鉱量も含めての推定量で埋蔵量とははつきり区別せねばならないということである。それ故埋蔵量は技術の進歩と経済状態により変化するし、資源量は未発

見の鉱量をいかに推定するかによつて大幅に変化する。地球の大半は未調査であつて現在報告されている資源量はそれ程完全なものではなく信頼度も低いとされている。Table 1 にその一例を示す⁷⁾。

この表の中で消費が 2000 年まで指数関数的に増加すると仮定した累計量で埋蔵量を割つて得た可採年数を見ると銅、鉛、錫、亜鉛、モリブデン、タンタル、タングステンは 2000 年直後に、とりわけビスマス、水銀、銀、アスベストは 2000 年以前に枯渇することになる。また資源量は埋蔵量の 2~3 倍としかなつていないので危機論の深刻さが感じとられることになる。しかし鉱産物の可採年数が Table 1 のように 20~30 年となつているのは資源の枯渇ということではなく企業の経営的な理由によるものであつて企業は常時探査や鉱石処理技術の開発へ投資して可採年数を調整している。今後も表土や溶岩におおわれた地域の探査技術の進歩、低品位化する鉱石の処理技術の進歩によつて埋蔵量は漸次増加し資源は「成長の限界」に警告されている程早晩に枯渇するものとは考えられない。

Table 1 で注目すべき点は埋蔵量自体よりも埋蔵量の分布の偏在していることであり、東欧諸国、発展途上国、南アフリカの持分が大きいことであろう。殊に自動車、化学、電気、石油工業に重要な白金の埋蔵量は 98 パーセントが南アフリカとソ連で占められており、また冶金、化学工業に欠かせないクロームは 90 パーセント以上が南アフリカとローデシアに賦存し共に政治的政略的に供給が妨げられた場合の影響が懸念されている。

しかし常識的に考えても鉱物資源は枯渇性資源であつて当然限界があり、今後もその消費が指数関数的に増加して行くとすればやがては限界に達するのは想像に難くない事実であつて、ローマクラブの著者がこの点を指摘したことの価値は認めなければならないと思われる。ここに指す鉱物資源の限界について考察を進めるには地球上に存在する未調査未発見の資源をも含めての絶対量の

昭和 55 年 7 月 30 日受付 (Received July 30, 1980) (依頼解説)

* ミネソタ大学 工博 (Mineral Resources Research Center, University of Minnesota, 56 East River Road, Minneapolis MN 55455 U.S.A.)

Table 1. 21 Industrial raw material-resources, demand, geographical distribution and lifespan of reserves.

Raw material	Share of three countries 1974 percent	Share of five countries 1974 percent	Regional distribution of measured and indicated reserves-1974 country and percentage share	Resources 1975/76 metal content in million metric tons	Reserves 1975/76 metric	Ratio of reserves to 1975 demand in years	Ratio of cumulative demand 1974-2000	
Basic metals	Iron	59.4	76.0	USSR (31.1) Brazil (16.6) Canada (11.7) Australia (10.2) India (6.4)	195 000	90 500	177	4.5
	Copper	44.7	58.0	USA (18.4) Chile (18.4) USSR (7.9) Canada (6.8) Peru (6.5) Zambia (6.3) Zaire (5.6)	1 500	408.2	62	1.3
	Lead	58.0	71.9	USA (35.6) Canada (11.5) USSR (10.9) Australia (10.9) Mexico (3.0)	300	150	49	1.2
	Tin	50.8	69.0	China (23.6) Thailand (15.0) Malaysia (12.2) Bolivia (9.9) Indonesia (8.3) Brazil (6.0)	37.0	10.2	44	1.3
	Zinc	55.0	68.5	Canada (22.8) USA (20.1) Australia (12.1) USSR (8.1) Ireland (5.4)	245	135	41	1.1
Light metals	Aluminum	67.6	78.1	Australia (26.0) Guinea (26.0) Brazil (15.6) Jamaica (6.1) Greece (4.4) Cameroon (3.9) Surinam (3.4)	5 700	3 483	>200	4.0
	Titanium	93.0	98.2	Brazil (65.9) India (21.7) Australia (5.4) USA (3.5) Sierra Leone (1.7) Canada (1.6)	1 234	340.1	>300	4.4
Alloying metals	Chromium	96.5	98.2	S. Africa (73.9) Rhodesia (19.7) USSR (2.9) Finland (1.2) India (0.5) Madagascar (0.4) Philippines (0.4) Turkey (0.4) Brazil (0.3)	1 049	523.2	>200	5.7
	Cobalt	69.0	91.1	Zaire (27.7) New Caledonia (27.1) Zambia (14.2) Cuba (13.8) USSR (8.3)	4.3	2.4	78	2.1
	Columbium	89.7	96.4	Brazil (75.8) Canada (7.6) USSR (6.3) Zaire (3.8) Uganda (2.9) Nigeria (2.7)	14.6	10	>800	>10
	Manganese	90.5	97.7	S. Africa (45.0) USSR (37.5) Australia (8.0) Gabon (5.0) Brazil (2.2)	3 265	1 814	197	4.9
	Molybdenum	79.1	96.5	USA (49.5) USSR (15.2) Canada (14.4) Chile (13.6) China (3.8)	28.6	6	65	1.4
	Nickel	69.4	87.0	New Caledonia (43.7) Canada (16.1) USSR (9.6) Australia (9.2) Indonesia (8.4) Cuba (5.7)	129.7	55.3	77	2.1
Tantalum	72.7	84.8	Zaire (55.0) Nigeria (11.0) USSR (6.7) Thailand (6.7) Malaysia (5.4) Canada (4.8) Brazil (4.4)	0.26	0.07	49	1.1	

Alloying metals	Tungsten	74.6	87.1	China (53.6) USSR (8.9) USA (6.1)	Canada (12.1) N. Korea (6.4)	5.2	1.8	46	1.2
	Vanadium	94.8	97.3	USSR (74.7) Australia (1.4) USA (1.1)	S. Africa (18.7) Chile (1.4)	56.2	9.7	>300	7.5
Accessory metals	Bismuth	58.4	69.7	Japan (25.6) USA (13.3) Peru (5.1)	Australia (19.5) Mexico (6.2)	0.13	0.06	22	0.5
	Mercury	60.8	80.0	Spain (40.6) Yugoslavia (10.1) China (10.0) Italy (8.1)	USSR (10.1) USA (9.1)	17 510	4 930	21	0.7
Precious metals	Silver	65.0	86.7	USSR (26.7) Mexico (13.3) Canada (11.7) Australia (3.3)	USA (25.0) Peru (10.0)	0.70	0.19	16	0.4
	Platinum	99.8	100.2	S. Africa (71.3) USSR (26.7) USA (0.2)	Canada (1.8) Colombia (0.2)	0.026	0.009	110	3.1
	Asbestos	76.9	83.5	Canada (45.2) S. Africa (6.9) Australia (3.6)	USSR (24.8) USA (3.0)	249.4	145.1	35	0.9

Source : W. Michalski, World Mining (September 1978)

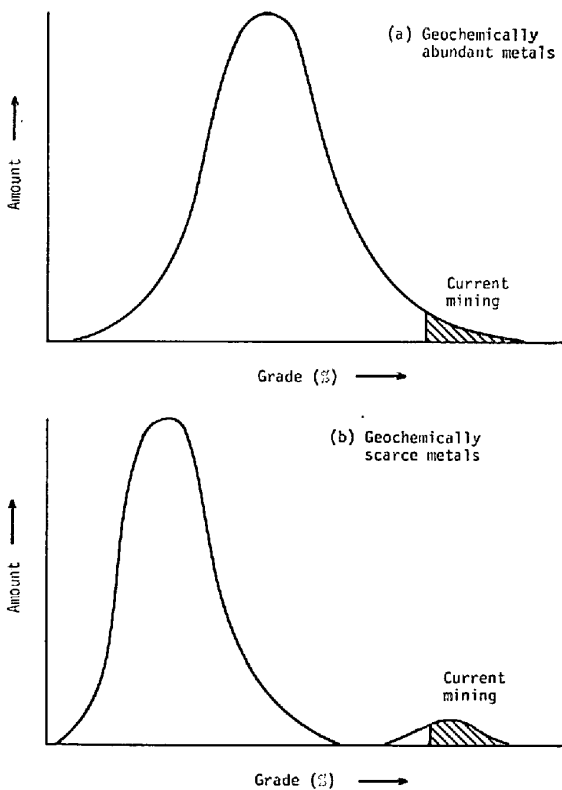


Fig. 1. Distribution of metals in the earth's crust.
Source : B.J. Skinner, American Scientist (May-June 1976)

推定方法が必要になってくることになる。最近引用されている方法に SKINNER⁸⁾ が提唱している考え方がある。それは地殻中に存在する元素の分布は Fig. 1 に示すようなピークが一つまたは二つある曲線で表すことができ

るというものである。Fig. 1(a)は鉄、チタン、アルミニウムのように地殻中に多量に存在する金属の分布を示しており、現在までに稼業された鉱床は最も高品位の側から始まって採掘された鉱量の総計がピークの右側に示されている。このような場合にはいわゆる品位を下げると鉱量は幾何学的にふえるという通念がピークの品位まであてはまることになる。

地殻中に比較的稀少な金属、例えば鉛、銅、錫のように地殻中に0.1パーセント以下のものについては Fig. 1(b)のようにピークが二つある曲線で表され、大きなピークは岩石中に置換原子として存在する元素、小さい方のピークはいわゆる鉱床として硫化鉱物、酸化鉱物などの形で鉱石として存在する元素である。金、銀その他二三の金属については既に小さいピークを超えた品位以下のところまで稼業が進んでおり、やがてはこの二つのピーク間に存在する谷間の品位に到達することになる。そこでここに述べた地殻中に豊富な金属と稀少な金属について鉱石処理に必要なエネルギー量を鉱石品位の関数として表すとすれば、前者の場合採取する金属の単位重量当たりに必要なエネルギーは品位が下がるに従って漸次増加する。しかし後者の場合にはこの谷間の品位に到達すれば珪酸塩中に置換された金属を採取せねばならないことになり、所要エネルギーは段階的に増加することになって当然代替材料の開発という方向をとることになる。

このような考え方は最近ウラン資源についてもなされておられ各種の鉱床の推定鉱量が Fig. 2 に示されている⁹⁾。今までウランの埋蔵量は限られているとして原子力発電の将来を懸念するむきもあつたが、この図にみられるように現在稼行されている鉱床は左側の最も高品位

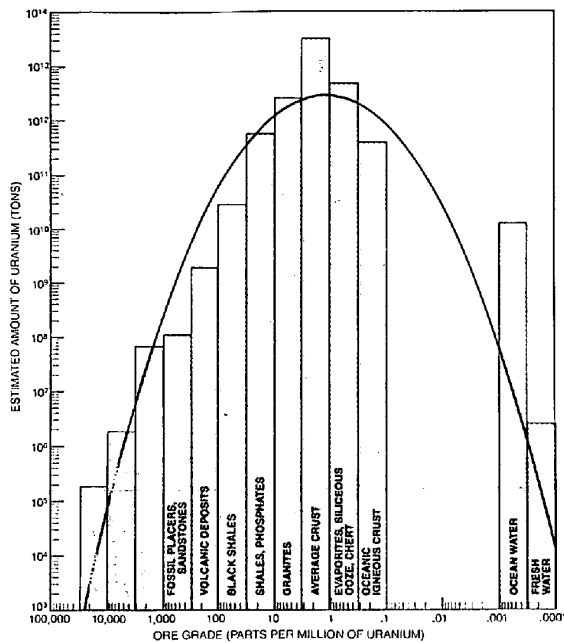


Fig. 2. Distribution of uranium in the earth's crust.

Source: K.S. Deffeyes and I.D. MacGregor, Scientific American (January 1980)

の三本に相当しており、将来ウランの価格が上昇すれば低品位鉱の採掘が可能となつて、供給可能なウランの量は大幅に増加することが示されている。最近カナダで局地的とはいえ U_3O_8 含有量 28 パーセントの鉱床が発見されており、極端に高品位な一例として興味あるニュースである¹⁰⁾。

3. 鉱産物の需給

米国における鉱産物の年間消費量は現在 40 億 t を越えており、これまで資源に恵まれてきた米国も経済の成長に伴つてその需要が増加し、輸入量も年々増加してきている。1979 年度の鉱産物輸入量は 40 億ドル、鉄鋼、アルミニウムなどの一次産品輸入量は 200 億ドルにも達し¹¹⁾両者を併せると現在脚光を浴びている石油輸入額 550 億ドルの半分に近い額となつている。Fig. 3 に掲げた米国の品目別の海外依存度をみると 50 パーセント以上を依存しているものが 20 品目、90 パーセント以上を依存しているものは 9 品目にも及んでいる¹²⁾。主要輸入先のリストをみると政情不安定ないしは共産圏諸国へ依存しなければならない鉱産物が多品目にわたっており、殊に国内資源に欠けているクロム、コバルト、マンガン、白金がもつとも重要な物資とされている。現にソ連のクロム、マンガン、白金などの輸出量が最近減少し始めているとのことである¹³⁾。

今後の経済成長の見通しでは国内企業は公害規制による現存施設への除害設備投資に追われ、また大幅に変動する市価とインフレによる建設費や金利の高騰に対する警戒から鉱山開発や製錬所の建設などの大型プロジェク

トへの投資を控えており、そのため需要の増加に生産能力がついて行けないことになつてこれからも輸入依存度が増える傾向にある。その上諸外国の経済も米国以上のペースで成長しており資源確保への競走がますます烈しくなることが予想される。OPEC の石油値上げ攻勢の成功、「成長の限界」などの著書を通して天然資源枯渇の懸念、資源ナショナリズムの高揚などに刺激されて一時ボーキサイト、銅、鉄鉱石、水銀、錫、タングステンなどの生産国のカルテル化の動きがみられ¹⁴⁾、現に国際ボーキサイト生産国機構 (International Bauxite Association) は 1974 年に輸出税をかけてボーキサイトの価格引き上げをねらつた例があり、また昨年には石油の対米輸出の条件としてローデシアのボイコットへ結びつけようとする動きがあつて、鉱産物が政策的な武器として使われる傾向がみえ始めている。

この点ソ連は鉱物資源政策として自給を強調しているという文献が一部の反響を呼んでいる¹²⁾。Fig. 4 に米国鉱山局の推測による 1975 年度のソ連の輸入依存度を示す。この図をみるとソ連は 6 品目 (ボーキサイト、重晶石、アンチモン、ホタル石、錫、タングステン) を除けば他の鉱産物は自給しており、この 6 品目についても輸入依存度はいずれも 50 パーセント以下に押えており経済性は第二義的として自給を重視しているといわれる。例えばアルミニウムの製造にボーキサイト以外の原料を大規模に使用しているのは世界でもソ連だけで、霞石閃長岩 (Nepheline Syenite)、リン鉱石処理後の霞石 (Nepheline) 精鉱、明ばん石 (Alunite) などがアルミナ製造に使われており国内資源で自給を目指している意欲の程がうかがわれるとしている*。

非常時における戦略物資としての鉱産物は別として輸入依存度が増加すれば、石油の場合のような鉱産物の輸出停止の懸念はないとしてもその供給が攪乱され価格が異常に高騰する危険性は十分考えられることで、資源政策の確立を要望する声が高まっている。そのためには備蓄 (Stockpile)、節約と有効利用、国内資源開発技術の確立が必要となるわけで 1979 年の戦略物資備蓄改定法 (Strategic and Critical Materials Stock Piling Revision Act) の主旨となつている¹⁵⁾。この法案に基づく備蓄は国防用に限定され 79 品目の鉱産物や金属を含む 93 品目の戦略物資を 3 年間以上にわたる非常事態に対処できるように規定されており総額 185 億ドルを越えるとのことである¹⁶⁾。備蓄されている鉱産物の一例を Table 2 に示した。前述の米国で最も稀少の鉱物資源であるクロム、コバルト、マンガン、白金について消費量と対応してみると現在相当量の備蓄があるけれども更に多量に備蓄するよう計画していることがうかがえる。

* 最近ソ連は鉱物資源の自給政策から漸次海外依存へ移行しているという報道記事が、しばしば見られるようになって、米国との資源確保への競争が懸念され始めている。ソ連のアフリカ大陸への関心、アフガニスタンへの侵攻は鉱物資源の確保にあるといわれる。(49) - (50)

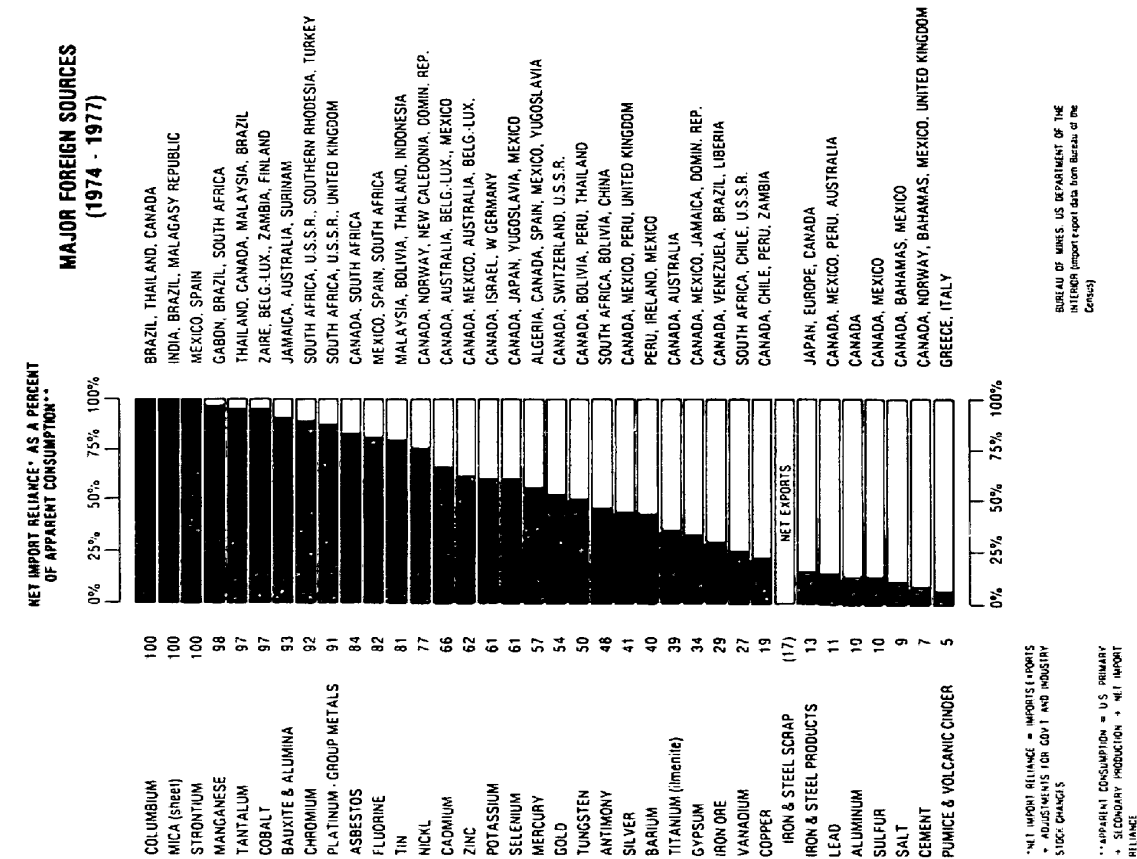


Fig. 3. U.S. net import reliance of selected minerals and metals as a percent of consumption in 1978.

Source : S.D. Strauss, Mining Congress J. (November 1979)

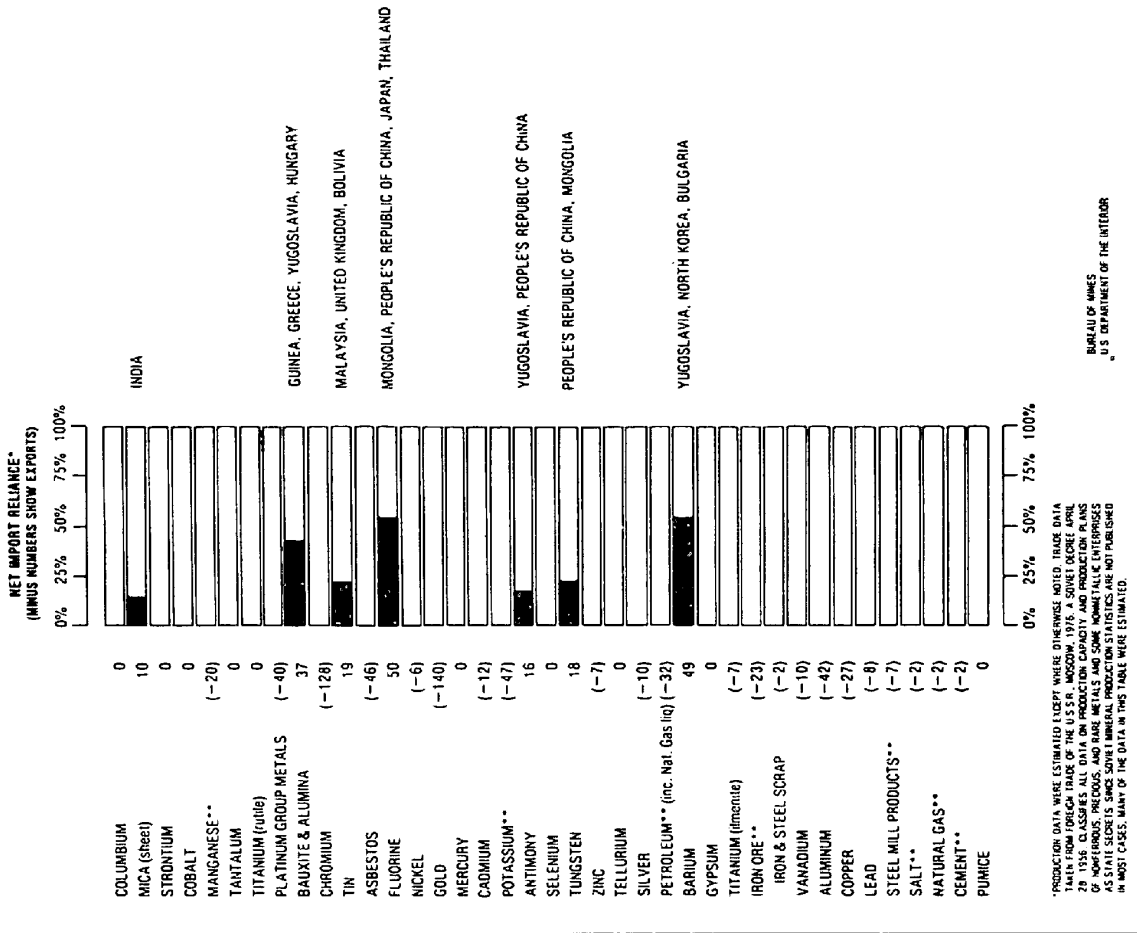


Fig. 4. U.S.S.R. net import reliance of selected minerals and metals as a percent of consumption in 1975.

Table 2. Examples of U.S. production, import, consumption and government inventories of minerals in 1979.

Material	Units	Domestic production	Import	Consumption*	Stockpile**	
					Inventory	Goal
Chromium	t					
Chromite:		—	1 043 000	1 043 000		
Metallurgical-grade					1 775 000	2 313 000
Chemical-grade					220 000	666 000
Refractory-grade					355 000	582 000
Chromium ferroalloys			181 000	508 000	689 000	389 000
Chromium metal					3 600	9 000
Cobalt	t	none	8 618	9 208	18 508	38 744
Copper	t	1 430 000	300 000	2 260 000	20 000	1 178 000
Iron ore	t	85 300 000	35 600 000	117 900 000	—	—
Manganese						
Manganese ore:	t	none	454 000	1 179 000		
Battery: Natural ore					188 000	12 000
Synthetic dioxide					2 700	17 000
Chemical ore					200 000	224 000
Metallurgical ore					2 154 000	1 862 000
Ferromanganese:			680 000	907 000		
High carbon					544 000	398 000
Medium carbon					26 000	90 000
Silicomanganese					22 000	73 000
Electrolytic metal					13 000	14 000
Nickel	t	13 000	177 000	246 000	—	185 000
Platinum group metals	kg	311	105 750	87 400		
Platinum					14 090	40 870
Palladium					39 035	76 200
Iridium					529	3 040
Tin	t	—	57 400	67 700	203 698	33 021
Tungsten	kg W					
Ore and concentrates		2 700	4 990	11 570	27 220	4 002
Metal powder					711	1 492
Ferro					381	8 060
Carbide powder					871	5 826
Zinc	t	260 000	610 000	900 000	338 000	1 191 000

* Includes secondary, ** Stockpile status 11-30-79, Source: Mineral Commodity Summaries 1980, U.S. Bureau of Mines

この表で興味のある点は錫とタングステンの備蓄量でマンガンやクロムと共に備蓄がなかつたなら現在事態は相当違っていたであろうといわれている¹⁵⁾。

しかしこれらの備蓄は現在国防上という狭い目的に限られているけれども供給が妨げられて経済活動に支障を来すような事態が起きた場合も含めるべきであるという考え方もでてきている¹⁷⁾。産出国での内乱や政変、天災やストライキなどによつて突然しかも相当長期にわたつて供給が途絶したり、また最近しばしばみられてきている供給制限を通して価格引上げをねらう動きに対しても供給や価格の安定化に必要なこととされている。近年の市価や利率の上昇で一般企業に対して平常の在庫量以上の備蓄を奨励することは難しいけれども、スウェーデン

の例にみられるような平常以上の備蓄に対して減税の利点を与えてはということも言われている¹⁵⁾。

一方再生 (Recycling) も省資源省エネルギーである上に廃物処理量を軽減するので将来は相当量原料として利用されると予想されている。今後低品位化していく鉱石の処理にエネルギー所要量は増加して行き 2000 年以後には鉱産物の需要に対応して行けるだけのエネルギー所要量の手当が懸念され始めている¹⁸⁾。そこで鉱産物の使用量の軽減を通しての省エネルギーと同時にエネルギー効率の高い技術の開発や再生原料の利用の重要性が強調されるわけである。銅鉱石の処理について一例をとつてみると逐年の品位低下とその処理に要するエネルギー増加の関係は Fig. 5 に示すとおりであるが¹⁹⁾、2000 年頃には銅鉱石の

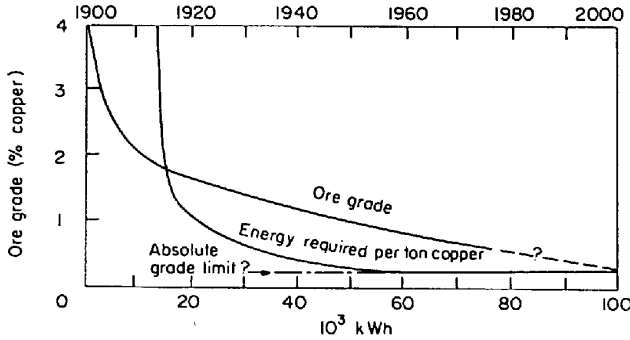


Fig. 5. Energy required to produce copper from ore of various grades.

Source : M.H. Govett and G.J.S. Govett, Resources Policy (June 1978)

Table 3. Unit energy for production of primary and secondary metals. (10⁶ kcal per ton of metal)

	Primary, from ore	Secondary	Energy saved through recycling
Magnesium	90.2	3.0	87.2
Aluminum	61.5	3.0	58.5
Nickel	36.3	3.8	32.5
Copper	28.2	4.5	23.7
Zinc	16.4	4.5	11.9
Steel	8.1	3.3	4.8
Lead	6.8	3.0	3.8

Source : H.H. Kellogg, Eng Mining J (April 1977)

品位は現在の 0.65 パーセントから 0.3 パーセント前後に下がると予想されている。この場合原鉱品位 0.3% Cu の鉱石を処理するには精鉱 t 当たりのエネルギー所要量は二倍となり、その上廃棄せねばならない尾鉱の量も二倍となつてエネルギー所要量ばかりでなく環境への影響も大きくなつてくることになり再生の重要性が認識できる。

Table 3 に鉱石を選鉱製錬した場合とスクラップを再生して溶解した場合のエネルギー所要量が対比されているが²⁰⁾、例えばアルミニウムについては産品 t 当たりの所要エネルギーは鉱石から始めた場合には再生スクラップの溶解の 20 倍、鉄鋼については一次産品はスクラップ溶解の 2.5 倍のエネルギーを要することになつている。現在廃棄されている金属類を Table 3 中の 7 品目だけについてみても再生すれば年間 3×10^{14} kcal のエネルギー (石油換算 2×10^9 バレル相当) を節約できることになり石油の輸入量の 10 パーセントに近い量に相当することになる。もつともこの対比には回収や選別に要するエネルギー、更には再生原料の純度の品質に及ぼす影響などが含まれておらず、再生利用を奨励していくためには二次産品価格の助成措置が必要であるという提案もみられる²¹⁾。

4. 鉱業技術者の養成

過去 25 年間鉱産物の需要は人口の増加より急速に増加しており、今後ますます高騰して行くエネルギー費や起業費、環境保全に留意しつつ漸次低品位化して行く鉱床を開発して鉱産物の需要に応じて行かねばならないわけだが、そのためにはこれらの難関を克服して供給を安定化して行く鉱業技術の開発とそれにたずさわる技術者の養成が重要な問題となつてくる。しかし 1950 年代の末頃から学生の人気は宇宙開発関係に集まり 鉱業教育は下落の一途をたどつて 1968 年には全米の鉱物工学科 (Mineral Engineering) 卒業生が 100 名足らずにまで減少した。そのため経営上学生数に対する教員数の比を重視する米国の大学では軒並みに 鉱物工学科を廃止、1950 年代には 34 の大学に存在した 鉱物工学科は 1970 年代始めには 15 にまで減少することになる。その当時工学系卒業生の中で 鉱業関係者の給与は一番低かつたことである。

ところが 1970 年代に入つて石油危機とともに石炭への関心がたかまり 鉱業技術者の不足が目立ち始め、学生数も漸次増加し、今では 500 名を越え最近卒業生の初任給も最高に近いといわれている。1956 年以後の 鉱物工学科と金属工学科の学士 (BS)、修士 (MS)、博士 (Ph D) 課程卒業生数を示すと Fig. 6 のような経過をたどつている。1960 年中頃に従来の金属工学科から材料工学科 (Material Science) が独立する大学がふえ、現在では両学科の卒業生数は別々に報告されているが、その大学によつては金属工学と材料工学が同一学科に属

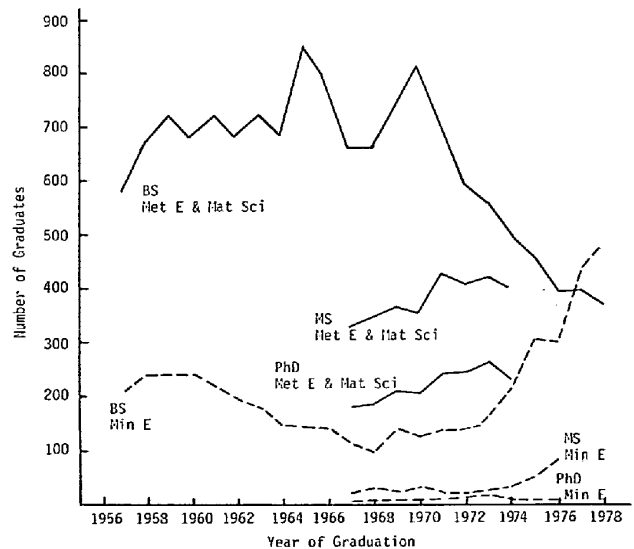


Fig. 6. Baccalaureate and graduate degrees awarded in mining engineering, metallurgical engineering and materials science and engineering.

Source : Mineral Resources Committee of the National Association of State Universities and Land Grant Colleges (February 1977)

しているところもあるので 1950 年代より継続しての推移を示すためにその和を図示してある。また選鉱製錬関係は一般には金属工学科に属しているが、ミネソタ大学のように鉱物工学に入っている場合もある。1970 年以後の金属系卒業生数の減少は鉱山系卒業生の増加と対照的で、現在インフレ抑制対策に基づく金属価格統制で金属工業関係者の給与が比較的低いことによると考えられている²²⁾。

参考までに工学系学卒者の平均初任給の逐年変化を Fig. 7 に掲げてある。ちなみに 1978~79 年の鉱物工学科卒業生の初任給を Fig. 7 に挿入すると平均より大分上廻っている。また就職後の処遇は鉱業技術者不足の影響で社内での昇進も早く給与も工学系卒業生の平均より大幅に上廻っており、一例として 1968 年の卒業生について調査した結果が報告されている²³⁾。Fig. 8 に 1978 年における工学系卒業の技術者の平均給与を図示したが、上記の鉱物工学科卒業生の例が卒業後 10 年のところに記入されている。

一方このように学卒者の初任給が高くなり、大学の助教の給与と同じまたはそれ以上に相当するようになって最近大学院へ進学する学生数が激減しており、外国人留学生や教員の増加が目立ってきている。もう一つの米国鉱業界の特色は現役技術者の 70 パーセント近くが 1950 年以前の卒業生で、10 年さきには漸次退役することになり、この人達に代わる技術者を育てかつこれからますます活発になる石炭資源の開発に必要な技術者を供給して行かねばならないことである²⁴⁾。最近鉱物資源開発の必要性とそれに伴う鉱業技術者の養成の必要性が認識されるようになって、1977 年には鉱物資源研究所法 (Mineral Resources Research Institute Act) が成立した。これによって 7 年間にわたって総額 2 億ドルにのぼる予算で鉱物工学科の存在する各州立大学へ補助金

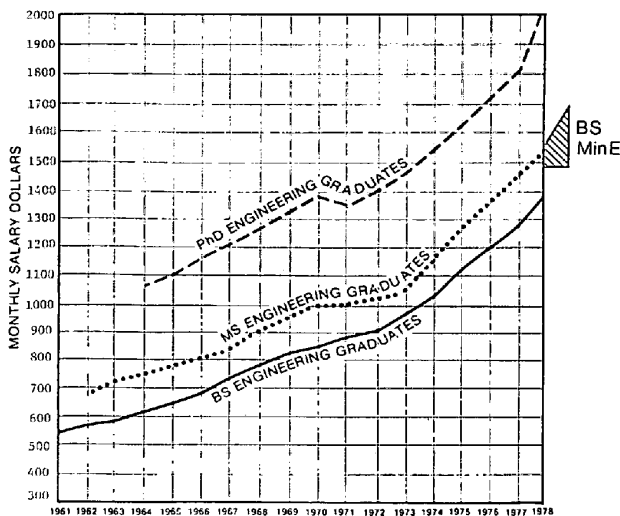


Fig. 7. Average monthly starting salaries of new engineering graduates.
Source: Iron and Steel Maker (November 1979)

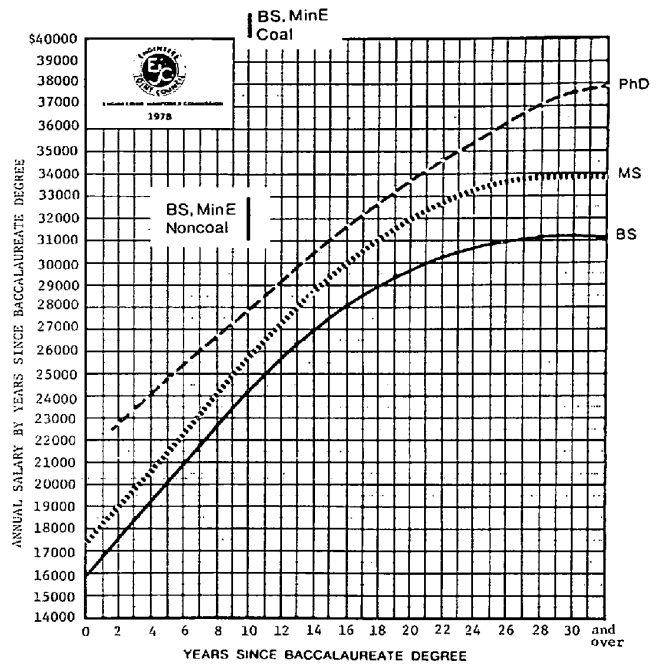


Fig. 8. Median salaries by degree level, 1978.
Sources: Iron and Steel Maker (November 1979)
D. Simon, Mining Eng (December 1979)

を支出し、鉱山製錬分野での教育と研究を助成することになった。現在各大学での研究活動が活発化し数年後の成果が期待されている。この法案成立に先立つて国立科学財団 (National Science Foundation, 通常 NSF と略称) 後援によって採鉱と鉱石処理関係での研究を要する問題点を検討する会議が 1975 年に行われ Research Opportunities in Mining²⁴⁾ と Research Needs in Mineral Processing²⁵⁾ の二つの報告書が出された。

5. 鉱業技術開発の現況

将来の鉱物資源を確保して行くためにはまず国内の鉱床を探索し開発して行かねばならないわけで探索技術採鉱技術についても言及すべきであるけれども、ここでは鉱石処理技術、殊に鉄鋼業に関連したトピックスに絞って基幹資源の確保、省エネルギー技術、環境保全に分けて紹介する。

5-1 基幹資源の確保

以前われわれの研究所 (Mines Experiment Station, 現在 Mineral Resources Research Center と改称) で開発された磁性タコナイトの選鉱とペレタイジング技術はメサビ鉱区における直接鉱の枯渇と入れ代わりに 1955 年 Reserve Mining 社で企業化され、資源量であった磁性タコナイトを埋蔵量に変更し、同地区の産業の再建に寄与したことは技術開発の意義を実証した例として著名である。その後この技術は漸次普及して現在ミネソタ州より年間 5600 万 t のペレットを出荷しており、またこのペレタイジング技術は米国のみならず世界に拡がって年間生産能力の総計は 2 億 6 千万 t を越えると報

告されている²⁶⁾。なおメサビ鉱区の磁性タコナイトの埋蔵量は470億tであるが²⁷⁾、その他に1兆t以上と予想される非磁性タコナイトが存在し長期的な資源としてその開発への基礎研究が進められている²⁸⁾。

今後ますます低品位化し、その選鉱に微粉碎を必要とする鉱石が多くなつて行くことが予想され、微粒子の処理技術の開発が重視され始めている。ちなみに1978年にはNSF後援によりBeneficiation of Mineral Finesと題する会議が開かれて研究方針の討議が行われた²⁹⁾。また1980年春のAIME年次大会ではFine Particle Processingの国際シンポジウムがあつて、91にのぼる論文が提出されている³⁰⁾。微粒子処理の新技術として注目に値する方法に選択凝集と湿式高磁力選鉱がある。選択凝集はミネソタ州Tilden鉱山の赤鉄鉱の選鉱に開発された技術で、原鉱品位36%Feの鉱石の単体分離には500メッシュ以下85パーセントという超微粉碎を必要とし浮選に先立つて従来法によつて脱スライムすると大部分の鉄分が損失してしまふ。同鉱山では磨鉱後デンプンを用いて鉄分を選択凝集し、シックナーで珪酸分スライムを除去した後その沈鉱を浮選処理して品位65%Feの精鉱を得ている。1974年より年間1000万tの鉱石から400万tのペレットを生産していたが、1979年には処理能力を倍増して現在ペレット年間800万tを出荷している³¹⁾。この方法は世界各地の非磁性微粉鉄鉱石の処理に試験されており、また鉄鉱石以外の種々の鉱石、例えば硫化鉄、リン鉱石、マンガン鉱石、石炭などについても研究されている。

湿式高磁力選鉱は1960年代初期より殊に鉄鉱石に対して開発され、われわれの研究所においてもメサビ地区の酸化鉄鉱石について中間工業化試験が行われ好成績をおさめたことが報告されている³²⁾。1970年にはブラジルで企業化され年間3000万tの赤鉄鉱の処理に使用されている³³⁾。この方法は鉄鉱石に限らず、例えば石炭の脱硫、浮選尾鉱より副産物の回収、冷延潤滑油中の鉄分除去³⁴⁾などにも試験されている。

上記のように鉄鉱石に関しては米国は国内資源が豊富であるが、需要の大半を輸入に頼っている鉱産物については国内資源の開発の必要性が強調され始めている。殊に石油代替燃料の開発にはクロム、コバルト、ニオブ、モリブデン、ニッケル、白金、タンタル、チタンなどの需要が、また自動車の小型化には低合金高張力鋼用原料の需要が高まってくるのが予想される¹⁵⁾。クロム、マンガン、コバルト、白金の4品目については国内資源に乏しいため備蓄政策と国内低品位鉱床、例えばマンガンについてみるとミネソタ州を始め二三の州に賦存する低品位鉄マンガン鉱床開発の必要性が話題にのぼり、また海底マンガンノジュールも注目されている。

一方固体廃棄物処理によつて金属成分を再生すれば米国における全消費量の7パーセントの鉄、8パーセント

のアルミニウム、19パーセントの錫を供給できる可能性のあることが報告され、その他紙の再生やエネルギーとしての有効利用の可能性についても十分認識されているにもかかわらず企業化は余り進んでいない。これは廃棄物処理技術が他分野からの借用技術の寄せ集めで効果的に使いこなされていないことに起因するとして今年の始めNSF後援によるResource Recovery Research Needsの会議が開かれ基礎研究の必要性について討議された。その結果金属、ガラスの回収については産物中の微小不純分の分析法、破碎ならびに流体特性、表面化学、浸出並に溶融特性などについて検討し、分級分離技術の基礎知識を収集するよう勧告している³⁵⁾。現在廃棄物の処理には焼却炉で焼却し、その残査を破碎後磁選に供して鉄分を除去し、非磁性分は重力選鉱法により非鉄金属とガラスに別けている。非鉄金属や非金属の分離には磁性流体を用いる重液選鉱、高磁力選鉱、静電選鉱、浮選、湿式冶金技術などの適応性が検討されている³⁶⁾³⁷⁾。また最近では焼却の代わりに空気を通さずに加熱分解する乾留法が注目されている。乾留法では固体、液体、ガス燃料の他に金属成分も酸化されずに回収できる利点がある。今後ますます再生が重要視されるのは想像に難くないが、そのためにはもう一步進めて今後の製品はその成分の回収を容易にできるようなデザインの考案を奨励すべきであろう³⁸⁾。

5.2 省エネルギー技術

鉱石の低品位化すなわち鉱石量の増加に伴う所要エネルギー原単位の増加と近年高騰一途のエネルギー費に選鉱機械の大型化自動化によるコスト低減に進歩がみられている。鉄鉱石の団鉱、還元関係の技術開発には国内に豊富にある石炭の利用に関するものが多くなつてきている。数年前までペレット焼成にはカナダから供給されている天然ガスが主に使われてきたが、天然ガスは冬期暖房へ優先となつて供給の保証がなくなつたこと、カナダは石油や天然ガスを1982年より自国向けに切り換える方針であること、石油や天然ガスの価格が急騰してきたことに起因している。1977年に操業を開始したInland Steel社のMinorca工場ではグレート炉の脇に燃焼室を設置して微粉炭の直接燃焼を行つている³¹⁾。その後Pickands-Mather社のHibbing Taconite工場でも同じデザインの燃焼室を設置したグレート炉を導入将来微粉炭への切り換えに備えているが現在は重油操業を行つている。グレートキルン炉についても微粉炭燃焼の試験が行われているといわれる。一方石炭のガス化は脱硫可能の利点があり、ペレット焼成向けとする研究も行われ、殊に直接燃焼方式への切り換えの困難なシャフト炉への適用が提案されている³⁹⁾⁴⁰⁾。またペレット焼成炉には廃熱再循環による省エネルギー方式が普及し始め、Hibbing Taconite工場の場合には月間熱消費量t当たり58500kcalの記録を出した旨報じられている⁴¹⁾。

最近直接還元、電気製鋼の組み合わせ操業によるミニルへの関心が高まっておりシリカ分3パーセント以下の超精鉱 (Super-concentrate) 生産の研究が行われているが、このような高品位まで品位を向上するには鉱石の選択と選鉱方法の周到な検討が必要となってくる。一方これまでメサビ地区は東部の石炭産地を中心にした製鉄所へ鉄鉱石を供給してきたが、近年西部の石炭開発が活発化し、今まで鉄鉱石の積出港であつた Duluth 港は石炭の積出港にもなつてきている。このような事情とタコナイト精鉱はシリカ分以外の不純分が少ないことを組み合わせ Duluth に製鉄所をという考え方も成立することになり現在プラズマ利用の直接製鋼法の開発研究が進められている⁴²⁾。

最近よく耳にする言葉に Co-generation (熱併給発電) または Energy Park (エネルギー基地) という考え方があるが、これはエネルギー転換設備と生産設備を組み合わせ総的にエネルギー消費の節減をはかるということで、製鉄所においても例えば高炉ガスを発電に使うなど古くからよく知られているものである。その一例として Westinghouse 研究所の提案している石炭ガス化、直接還元、電気製鋼、発電の組み合わせにより 150 t 電気炉三基を稼動し年間生産能力 100 万 t の設備構成が SZEKELY により紹介されている⁴²⁾。この報告にはプラズマ炉とその排熱利用発電との組み合わせ、MHD (電磁流体) 発電と直接還元の組み合わせなどによる製鉄方法にも言及しているが、前述のプラズマ直接製鋼法の開発研究にも Co-generation の考え方が提案されている。

製鉄過程におけるエネルギー消費量の低減に新技術の開発が要望されている折、KELLOGG は Table 4 に示すような興味深い解析を報告し、電熱や電解は燃料を直接利用するプロセスより効率が低いことを強調している²⁰⁾。この表には還元に要する金属 t 当たりの自由エネルギー量をプロセスに要するエネルギー量で割つて得たエネルギー効率が示されている。この中で電力を使用していない鋼、錫、フェロマンガ (溶鉱炉) はプロセスに要するエネルギー量も低く効率も高い。電力を使用している場合、また特に複雑な処理工程を要する場合にはエネルギー量が高く効率は低くなつている。銅、ニッケルの場合に効率が低いのは精鉱品位が低いため例外となつているが、このような考え方は省エネルギープロセスの開発の一つの指針を与えていると思われる。現に Alcoa 社ではアルミニウムの生産に直接還元方式を開発中といわれる⁴⁴⁾。

5.3 環境保全

Reserve Mining 社の Silver Bay 工場ではこれまでスーペリオル湖へ廃棄してきたタコナイト磁選尾鉱をこの六月から内陸の尾鉱沈澱池へパイプ輸送して廃棄するようになった⁴⁵⁾。この工場は 1955 年建設当時には直接鉄枯渇により衰微に直面したメサビ地区の新技術による救済と謳歌されたものだがその後スーペリオル湖畔に廃

Table 4. Process energy for metals production from concentrate.

	10 ⁶ kcal per t		
	Process energy	Free energy	Efficiency
Titanium sponge (Na reduction)	90.5	4.03	4.4
Magnesium ingot (Sea water process)	85.4	5.06	5.9
Aluminum ingot	49.6	6.35	12.8
Ferrochrome, low carbon	31.5	2.22	7.0
Sodium metal	22.9	1.76	7.7
Nickel cathode	22.4	0.78	3.5
Ferrochrome, High carbon	13.9	2.22	15.9
Ferromanganese (Arc Furnace)	12.1	1.84	15.2
Copper, Refined	12.1	0.45	3.7
Zinc (electrolytic)	12.1	1.06	8.7
Ferromanganese (Blast Furnace)	10.8	1.84	17.0
Steel slabs	5.5	1.44	26.0
Tin ingot	4.8	0.96	19.8
Lead ingot	4.5	0.20	4.4

Source : H.H. Kellogg, Eng Mining J (April 1977)

棄する一日当たり 67 000 t に及ぶ尾鉱は当初に予想されたように湖底に沈積せず湖水を汚濁するとして 1968 年に公害問題として告訴され、その後 10 年間にわたつて史上最高の訴訟事件となつた。その間尾鉱中にアスベスト状の微粒子が存在し発ガン物質の危険性があるとの見解が生じ公害問題は公衆衛生問題へと移行した。その結果 1977 年に裁判所はスーペリオル湖への尾鉱廃棄を禁止し、内陸約 8 キロの地点へ尾鉱沈澱池を建設してパイプ輸送で廃棄するか、今年 4 月 15 日以後の操業禁止の二者択一の判決を下した。そのため Reserve Mining 社は総額 3 億 7 千万ドルを投じて尾鉱沈澱池の建設と選鉱工場の改造を行い、操業再開のはこびとなつたが、このことは今後大規模な新技術の企業化はもちろん、莫大な資本投下を必要とする鉱業開発には周到な事前調査と深慮が必要なが示唆されている⁴⁶⁾。現在ミネソタ州内でも低品位銅ニッケル鉱や泥炭の開発、ウラン鉱の探査が行われているが、それぞれ相当規模の環境への影響の総合調査 (Environmental Impact Study) がなされている。

6. 結 言

鉱物資源は早晚枯渇することはないけれども低品位化とエネルギー費の上昇に伴つてコスト上昇は不可避であり、また世界的に消費が増加しているにもかかわらず生産設備の拡充がおこなわれているため近い将来に鉱産物が

短期的に欠乏する可能性がでてきている。このような事態に対処して供給量の確保、価格の安定化をはかつて行くには備蓄が必要であり、また国内資源の処理技術確立して外国依存度を軽減し、国家の安全保障と貿易収支均衡化に備えて行かねばならない。

一方長期的には資源は有限であることを認識し現在廃棄されている尾鉱、鉱滓からの副産物資源の回収、再生の潤滑化、代替材料の開発などを通して資源の節約と有効利用の道を開拓する必要がある。大学としてはこれらの要望に対応できるよう訓練された技術者の養成と共に技術革新の基礎研究や開発研究を推進すべきであり、鉱物資源研究所法はその後継となつている。

鉱物資源の開発、特に一次製品の生産設備には莫大な資本投下を要し、国際競争力の強化には新技術の開発と同時に設備の更新が不可欠であつて償却期間の改正が望まれている。ちなみに米国における設備投資の償却期間は 15 年であるのに対して、カナダでは 2 年となつており、1980 年の 1 月 1 日現在カナダ製の鋼材は日本製のものより 5~7 パーセント、米国製のものより 20~30 パーセント安になつているのは償却期間の短いことが大きな要因であると考えられる⁴⁷⁾。ここに特記すべきは今こそ学界、業界、官界が協力して新技術の開発、資源の確保、国際競争力の強化に踏み出すべきだと呼びかけている記事がしばしば見え始めていることであろう。

文 献

- 1) "Now the squeeze on metals," *Business Week*, July 2, (1979)
- 2) "Strategic metals, critical choices," *Time*, Jan. 21, (1980)
- 3) "Nonferrous metals: high costs, tight supplies ahead," *Chemical Engineering*, Apr. 7, (1980)
- 4) E. D. VERINK JR.: "Non-fuel materials—the next national crisis?", *J. Metals*, June (1980), p. 22
- 5) D. H. MEADOWS, D. L. MEADOWS, J. RANDERS, and W. W. BEHRENS III: *The limits to growth*, Potomac Associates, Washington, D. C., (1972)
- 6) *Science and technology, a five-year outlook*, National Academy of Sciences, (1979)
- 7) W. MICHALSKI: "Future mineral supplies... politics, not lack of ore, may create scarcity," *World Mining*, Sept. (1978), p. 106
- 8) B. J. SKINNER: "A second iron age ahead?", *American Scientist*, May-June (1976), p. 258
- 9) K. S. DEFFEYES and I. D. MACGREGOR, "World uranium resources," *Scientific American*, Jan. (1980), p. 66
- 10) "Hot lip + persistence = major uranium discovery for Canadian Oxy-Inco," *Engineering and Mining Journal*, May (1980), p. 29
- 11) "Mineral commodity summaries 1980," U. S. Bureau of Mines
- 12) S. D. STRAUSS: "Mineral self-sufficiency—the contrast between the Soviet Union and the United States," *Mining Congress Journal*, Nov. (1979), p. 49
- 13) H. E. MEYER: "Russia's sudden reach for raw materials," *Fortune*, July 28, (1980), p. 43
- 14) C. J. JOHNSON: "Cartels in minerals and metal supply," *Mining Congress Journal*, Jan. (1976), p. 30
- 15) J. D. MORGAN JR.: "The non-fuel mineral position of the USA," *Resources Policy*, Mar. 18, (1980), p. 33
- 16) "FEMA unveils new US strategic mineral stockpile goals," *Engineering and Mining Journal*, June (1980), p. 47
- 17) R. N. COOPER: "Natural resources and national security," *Resources Policy*, June (1975), p. 192
- 18) "Study sees shortfall in energy to produce metals," *Engineering and Mining Journal*, Oct. (1979), p. 43
- 19) M. H. GOVETT and G. J. S. GOVETT: "Geological supply and economic demand," *Resources Policy*, June (1978), p. 106
- 20) H. H. KELLOGG: "Sizing up the energy requirements for producing primary materials," *Engineering and Mining Journal*, Apr. (1977), p. 61
- 21) M. J. MITCHDOLL and P. D. WEISSE: "We need a national materials policy," *Harvard Business Review*, Sept.-Oct. (1976), p. 143
- 22) "Engineering manpower," *Iron and Steel Maker*, Nov. (1979), p. 35
- 23) D. SIMON: "What happened to the class of 1968?", *Mining Engineering*, Dec. (1979), p. 1693
- 24) "Research opportunities in mining," Workshop held in Minneapolis, Minnesota, Sept. 25-26, (1975), Final Report by C. FAIRHURST
- 25) "Research needs in mineral processing," Workshop held in Arden House, New York, Aug. 1-3, (1975), P. SOMASUNDARAN and D. W. FUERSTENAU, eds.
- 26) G. K. JONES: "Iron ore pelletisation," *Industrial Minerals*, Mar. 1979, p. 61
- 27) *Minnesota Mining Directory 1980*, W. D. TRETHERWEY, ed., Mineral Resources Research Center, University of Minnesota
- 28) C. RAMPACEK: "The impact of R & D on

- the utilization of low-grade resources," Chemical Engineering Progress, Feb. (1977), p. 57
- 29) "Beneficiation of mineral fines," Workshop held in Sterling Forest, New York, Aug. 27-29, (1978), P. SOMASUNDARAN and N. ARBITER, eds.
- 30) Fine particles processing, P. SOMASUNDARAN, ed., (1980) [AIME, New York]
- 31) R. W. HOPPE and R. A. THOMAS: "Taconite progress report," Engineering and Mining Journal, Sept. (1979), p. 64
- 32) J. E. LAWVER and D. M. HOPSTOCK: "Wet magnetic separation of weakly magnetic materials," Minerals Science and Engineering, July (1974), p. 154
- 33) A. VILLELA: "Technical developments at CVRD operations to increase product flexibility," Proceedings of 39th Annual Mining Symposium, University of Minnesota, (1978)
- 34) C. J. CLARKSON K. C. RUSSELL, and T. B. KING: "Removal of iron fines from cold-rolling lubricants by high-gradient magnetic separation," Ironmaking and Steelmaking, (1979) 5, p. 251
- 35) "Resources recovery research needs," Workshop held in Washington, D. C., Mar. (1980), Report by J. G. ABERT and R. BOLCZAK
- 36) P. M. SULLIVAN, and M. H. STANCZYK: "Economics of recycling metals and minerals from urban refuse," Technical Progress Report 33, (1971)
- 37) S. E. KHALAFALLA: "Magnetic separation of the second kind: magnetogravimetric, magnetohydrostatic and magnetohydrodynamic separations," Proceedings of 39th Annual Mining Symposium, University of Minnesota, (1978)
- 38) J. J. MOORE: "Recycling of non-ferrous metals," International Metals Reviews, (1978) 5, p. 241
- 39) J. H. FATUM: "Alternate fuels and energy program," Proceedings of 38th Annual Mining Symposium, University of Minnesota, (1977)
- 40) K. C. VYAS R. A. ASHWORTH and D. G. BONAMER: "Coal gassification-viable fuel source for iron ore pelletizing," Proceedings of 39th Annual Mining Symposium, University of Minnesota, (1978)
- 41) G. N. CARLSON and R. A. BAUER: "Hibbing Taconite story-pelletizing," Skillings' Mining Review, Mar. 22, (1980)
- 42) K. J. REID: "Direct steelmaking based on solid plasma interactions," Proceedings of 41st Annual Mining Symposium, University of Minnesota, (1980)
- 43) J. SZEKELY: "The role of innovative steelmaking technologies," Iron and Steelmaker, Dec. (1979), p. 25
- 44) "DR aluminum: the next step beyond Alcoa's chloride smelting," Engineering and Mining Journal, Jan. (1980), p. 11
- 45) "Reserve to resume operations using on-land disposal sites," Minneapolis Tribune, June 25, (1980)
- 46) "The long, difficult Reserve Mining case," Minneapolis Tribune, Mar. 19, (1980)
- 47) "Canadian Steel's lessons for Pittsburgh," Business Week, Apr. 14, (1980), p. 74
- 48) "Moscow's ominous shift toward buying minerals," Business Week, Sept. 29, (1980), p. 58
- 49) "An underlying impetus for Soviet invasion," Business Week, Sept. 29, (1980), p. 62
- 50) T. VELOCCI: "Minerals: the resource gap", Nation's Business, Oct. (1980), p. 33