展 望

特定研究「金属資源の完全利用」に期待されるテーマ

相 馬 胤 和*

1. ま え が き

3年前になるが、わが国にある金属関係の10学協会の連絡会の席上「金属工学が主体となるような特定研究の課題が無いものだろうか」という話題がでて以来、種々の会議を重ねた結果、標題のような特定研究を日本学術会議に提案することになり、1976年より始めて、本年度で3回目になる。そこでこれまでお世話をしてきた者として、その主旨を説明し、会員の皆さまのご理解、ご支援ならびにご批判を乞う次第である。

わが国の重工業は鉄鋼、自動車、造船などの進歩が著しく、特にこの10年間に驚異的な発展をとげた。現在米国などから利益をはき出せというような強い圧力が加わるようにすらなってきた。戦後ほとんどゼロから再出発したことを考えると感無量である。しかし考えてみると、アメリカなど資源を持っている国は省エネルギー、省資源により、できるだけ資源を使わないようにすれば、長く資源エネルギーを温存することができてよい。ただそれは金持の発想であり、日本のように資源はなく、土地が狭く、そのうえ人口の多い国にとっては生き延びるためには、加工業としてしゃにむに働き、それによって得た賃金で社会生活の中に資源を金属の形で蓄積しなくてはならない宿命を背負っている。これが資源国とちがうところである。

これを経済的にみるならば、日本は金属生産を中心とし、その金属を加工して機械(とくに自動車)、電気機器、造船などの形にして輸出をなして外貨を稼ぎ、原料代としての鉱石、石炭などの輸入代金を支払った残りの利益が日本の経済を支えている。したがって「自然」のみを求めているなら食糧の自給すらできない現状であり、世界の工場として生きる以外に道はない。このことは戦後10年くらいはただ生きることに精一ぱいだったので、素直に受け入れられてきたが、その結果が実り、日本も

このところかなり裕福になり(といっても流通面のみで、資産は無いのであるが)、のどもと過ぎて熱さを忘れた結果、「工業すなわち悪の根源」のような印象を受ける事態が多くなってきている。

そこで金属工学にたずさわるわれわれとしては何をすれば良いかということになるが、はるばる海を越えて輸入した大部分の鉱石、または、なけなしの国内の資源を如何にして効率良く、できるだけエネルギーを使用せずに金属に製錬するかということ。その際に排出する種々の物質すなわちスラグ、ダスト類を利用するか無害にして地球に戻してやるかということ。および一度使用された金属で廃棄されたもの、すなわちボンコツ自動車、古電気製品などから金属部分は再生して金属となし、その他の副産物質は無害化して地球に戻すという金属資源の循環利用体制を確立すること以外に道がない。

従来金属工学においては、金属の回収歩留りを上げること、未利用資源の利用、スクラップの再生利用などは重要なテーマとして取上げられてきたが、それらの研究はバラバラに行なわれている。そこでこれらの研究を総合的、有機的に関連づけ金属資源の循環による完全利用という1つの目的に沿って研究を行なうことは重要であり緊急を要することである。

アメリカにおいても1973年のオイルショック以来、主として新エネルギー源を探索する目的として、国家的規模において多くのプロジェクトが動いており、それらの中には資源に関するものも含まれている。しかし日本の現状に照してみると、日本にそのまま受け入れられるものは少なく、日本では別の発想から準備を始めねばならない。

この研究は金属の循環による資源の完全利用を目標としているが、大きく分けて3部門に分れている。それは

- (1) 現行技術の飛躍的な革新
- (2) 未利用資源の原料化
- (3) スクラップの循環利用・副産金属の利用

である。これらの各部門について期待されるテーマにつき述べてみたいと思う。

* 東京大学教授；工学部金属工学科
Expected Theme of "Complete Utilization of Metal Resources"; Tanekazu Soma (Faculty of Engineering, University of Tokyo, Tokyo)
1978年1月23日受理

2. 現行技術の飛躍的な革新

ここでは現在一応可採金属資源とみなされているが、劣質のため現実には経済的に利用できないでいる難採掘鉱、低品位鉱、複雑鉱などを対象にし、これら現行の採掘、製錬技術の飛躍的に革新的な方法を目指すものである。また当面は経済的に実行困難であっても、近い将来において資源に対する条件がより困難になったときに対応できることも含まれている。

(1) 金属鉱床の総合的な探査方法

石油でもいわれているように、探鉱には莫大な資金が必要であり、その結果鉱床が発見されれば良いが、発見されないとまるまる損になるという経済的危険度の高い調査である。金属鉱床の探査もその例にもれない。そこで現在個別的にはそれぞれかなり進歩しているボーリングによるコアの調査や検層技術なども加味した地質調査、弾性波、電気抵抗などを利用する物理探査および地下水中の微量化学成分の分析なども含む地球化学探査などの情報を数値化し、それをコンピューターを使って情報工学的処理を行ない、総合的な探査の方法を開発しようというものである。

(2) 低品位鉱床中の金属の完全採取

わが国の金属鉱山はそのほとんどが坑内に人が入って採掘をする坑内掘りに頼っており、人件費の高騰と、鉱石品位の低下などにより、廃山、休山に追込まれたところが多い。これらの休廃止鉱山または坑内掘に働かない低品位鉱床中の有価金属を地表より水を流し込むことにより金属成分を浸出し、地表にあふれ出した溶液中より金属を回収する方法をソリューションマイニング法と呼んでいる。この方法はうまく行くとわが国の休廃止鉱山はもとより、海外で坑内掘に適さない低品位大鉱床の開発にも役立つものである。

研究としては低品位鉱山または休廃止鉱山のモデルを設定し、総合的な立場からケービング法、ソリューションマイニング法の適用を考える。そのための基礎研究として上下地盤の透水性、岩石を強制的に破碎する方法としての爆破応力の測定、浸出液の選定、随伴金属の溶解速度、バクテリアの利用などの研究が必要である。

(3) 新製錬法の開発

新製錬法の開発は従来からも広く研究が行なわれているが、ここで取り扱うのは原理的に新しい分離法を目指すものである。

(1) わが国でも最近多く発見されている複雑難処理鉱

の各金属成分のより高い分離法を目指し、選鉱と製錬の組み合わせや磁性流体による分離および塩化揮発法の利用など、現行の方法よりも省エネルギーでかつ高い分離性のものを目標としている。

(2) 鉄やアルミニウムの原料は大部分外国に依存しているため、資源的な制約を受けている。だが利用できる資源の範囲を一段と拡大する目的で、より劣質な原料の利用を研究することにより、より広い原燃料への適合性を求めようとしている。塩化アルミニウムを経由するアルミニウムの製錬法や微粉鉄鉱石を利用するプラズマ製錬法などを研究する。

(4) 加工法における工程の単純化による省資源、省エネルギー加工法

金属の加工は現在造塊と圧延・鍛造の2行程で行なわれている。すなわち溶湯は造塊または連続铸造でインゴットやスラブとなり、それを再加熱して圧延・铸造される。その間熱的にも多くの損失があり、また酸化による表面スケールの生成等資源の損失も大きい。そこでこの2つの工程を1つの工程に単純化し、中間でのエネルギー、資源の損失を無くそうとするものである。すなわち溶湯からの直接圧延、直接鍛造など工程の単純化による消費エネルギー、消費資源を著しく少なくすることを目標としている。

このためには凝固直前の金属融体の基礎物性の研究、加工時における応力分布、それに使用条件が過酷になる工具材料や潤滑油の研究が必要である。したがってこれらの基礎研究を中心とし、直接圧延の際の問題点の研究をしようというものである。

3. 未利用資源の原料化

ここで取り扱うのは極低品位鉱など現在では金属資源とは認められていないか、または価値が非常に低いとしてかえりみられない鉱石、および産業廃棄物として大量に産出され捨てられている物質である。それらに含まれている有価金属を取り出し、残った廃棄物を安全に地球に戻せるようにすることであり、本研究の中心となるものである。

(1) 低品位鉱の処理

岩石が長年月にわたって地質学的な処理を受け、金属成分の富化されたものをわれわれは鉱石として利用している。したがって天然の富化の度合の低い低品位鉱は賦存量が富鉱に対して一般的に多大である。これらの低品位鉱が経済的に製錬が可能になれば、埋蔵量は著しく増

大し、産出地域も多くなり、したがって原料の入手は著しく容易になる。

低品位鉱より有価金属を回収する技術の基礎として

- (1) 鉱石組織、鉱物物性、結晶構造等の鉱物学的研究
- (2) 界面物理化学、浮選剤化学、および浮選、磁力選別、静電選別、比重選別等の選鉱学に関する研究
- (3) 熱力学、反応速度論および乾式、湿式冶金学における研究

などの基礎研究を中心とし、それらを活用して低品位酸化鉱、ラテライト鉱などの処理方法の研究を行なう。

(2) 海洋金属資源および海水からの金属の採取

海洋底には大量のマンガン団塊があり、銅、ニッケル、コバルトなどの金属が含まれていて、将来における重要な金属資源として注目されている。また海水中にも微量ではあるが多くの金属が溶解している。これら海洋資源中の金属を有効に利用するための研究である。

マンガン団塊に関しては、マンガン団塊の生成環境、内部構造、構成鉱物相、含有金属組織、海底における分布などの基礎研究を行なうとともに、マンガン団塊の採取、金属抽出に必要な選鉱法、製錬法に関する基礎研究を行なう。

海水中の微量金属の回収については、大量の海水を処理する必要から、吸着剤の開発、接触システム、金属の濃縮方法など方式および装置の開発研究を行なう。

(3) 高炉滓、転炉滓の再生利用

わが国の粗鋼生産量が年間1億トンに達したのにともない、約3000万トンの高炉滓と約1000万トンの転炉滓が発生している。高炉滓は現在バラスや埋め立てに使われているが、硫黄の問題やさらに高度な利用法としてのセメント、建設材としての利用の問題があり、転炉滓は現在埋め立てに使われているが、その中に含まれる鉄分と石灰分の有効な循環利用が大きな問題となりつつある。これらの基本的解決策として、環境問題も考慮しつつ、つぎの基礎研究を取上げている。

- (1) 凝固組織と冷却条件の関係
- (2) 凝固に伴う発泡性とガスの溶解度との関係
- (3) セメント、耐火物への利用
- (4) 高炉滓の硫黄の挙動と脱硫
- (5) 転炉滓の風化膨張の鉱物学的研究
- (6) 転炉滓中の燐の挙動と脱燐による高炉への循環利用

(4) 非鉄金属滓の再生利用

非鉄金属鉱石中には主要な非鉄金属以外に多種の金属成分を含有していることが多い。非鉄製錬においてはこ

れらの各種金属を総合利用することを目標として研究が行なわれている。しかしこのように多種の金属の回収を完全に行なうことは非常に困難を伴うが徐々に改善されている。

現在における最大の問題は多量に発生する製錬滓の有効利用である。これらの対象としては銅製錬スラグ、ニッケル製錬スラグ、亜鉛湿式製錬残査、アルミニウム製錬の際の赤泥などを挙げることができる。その基礎としては不純物の熱力学的データの集積、硫黄、銅、砒素などの不純物の除去による鉄原料として利用の研究などがある。

つぎに最近重油脱硫により回収される多量の硫黄のため、硫酸の需給に変調が起り、硫酸が過剰となり、そのため排煙脱硫による硫酸製造設備を持つ銅製錬所などは、硫酸タンク満杯のための生産制限を強いられている状況にあり、従来の製錬法に変わり、単体硫黄を副産する製錬法の確立が重要な問題となっている。

また他の分野の廃棄物の有効利用として製鉄所ダストからの亜鉛の回収、プラスチック廃棄物中の塩素分の塩化製錬への利用などを挙げることができる。

(5) ダスト、廃水中の有価金属の回収

金属製錬工程で生ずるダスト等の粉状の排出物や廃液、廃水処理にともなって生成するスラジ類、石油の脱硫に使用された特殊金属を含む触媒廃棄物などに含まれる金属分を有効に回収しようというものである。対象が粉状またはそれに水分を含んだスラジ状であるため、処理がなかなか困難である。これらの処理方法の基礎的研究を行なう。

赤泥から酸化鉄とソーダを分離したり、廃触媒からモリブデンやコバルトなどを回収し、基体は耐火材料原料とするなどの研究であり、システム技術として確立することを目標とする。

4. スクラップの循環利用と副産金属の利用法

一度使用された後に棄てられたスクラップは、天然産出の鉱石とは異なった物質相互の混り方をしている。技術が進めば進むほどますます複雑に入り組んだ使い方となってくる。これらを分離して、再び有用な金属として回収する技術は金属資源の完全利用のための大きな柱である。循環がうまく行き、社会の中に金属がある程度蓄積すれば、1次資源の量は少なくともすむ。

また金属回収技術が進むと金属によっては、従来必要とされてきた量以上の金属が生産されることもある。たとえばマンガン団塊がニッケル、コバルトに注目して多量に採掘された場合、その主成分たるマンガンは過剰に

供給されることになる。そこでそれらの金属の利用法の開拓を今から行なって総合利用ができるようにする必要がある。

(1) スクラップの破碎と機械的分離

複雑に結合された数種の金属を含むスクラップや非金属材料を含む金属スクラップは破碎分離する必要があるが、金属には延性があるので思うようにはいかない。そこで低温のまま輸入される液化天然ガス(LNG)を蒸発させてガスとして使用する際の潜熱を利用して、金属を含むスクラップを 90 K 程度に冷却し、鉄やゴムなどのぜい性を利用して破碎を行ない、それを磁力分離、静電分離、比重分離、磁性流体による分離などにより、鉄などの磁性金属、銅アルミニウムなどの非磁性金属とゴムなどの非金属に分離するための基礎研究を行なう。

(2) スクラップの化学的分離

大きなスクラップは上記の機械的分離でも分離できるが、めっきされた金属、電子製品のように金属蒸着などにより密接に結合されているスクラップが急速に増加している。そこでこれらの分離には化学的方法による溶解抽出の方が分離が容易である。

溶解抽出の溶媒としては水溶液、有機溶剤、熔融塩、熔融金属などが考えられる。各種金属の任意の溶液に対する溶解度曲線はかなり分っているが、それら既知のデータの集積と未知のデータの測定により、システムとしての分離方法および装置の研究を含んでいる。

(3) スクラップを原料とする加工法

スクラップを製造工程に戻して再び製錬し直すよりも、もし使用できれば、そのまま加工して使用することは省エネルギーの観点からも有効である。

ここでは機械工作クズ、すなわち切削、研削、打抜きなどで発生する比較的小さなクズを粉碎し、保護雰囲気中で焼結や铸造により成品とすること。または鋼くずを溶解して鉄を溶製し铸件として使用することを目標としている。

また不純アルミニウム屑を溶解铸造することにより、不純物を含んだ強力なアルミニウム合金材料を作る研究も行なう。

(4) 副産金属の利用および代替合金の研究

ここでは金属の完全利用に関する以上の研究の結果、副産される金属で現在数量的な用途の少ない金属の利用開発を目指すものと、現在資源的に将来入手困難を予想される金属の代替合金の開発を目標としている。

(i) TiC 基合金の開発研究

現用の WC-Co 系超硬合金に代って使用できる高強

度で靱性も高い TiC 基合金の開発を目的としている。わが国では W 資源が全くなき、Ti 資源は極めて豊富である。しかし TiC 基合金は現状では強度が低く使用に耐えぬからである。

(ii) 高 Mn 合金の開発研究

海底資源であるマンガン団塊の利用が実現すると、Mn 過剰になるのでその需要開発が必要となる。そこで Mn-Cu 防震合金、高 Mn の Zn-Mn 合金などの基礎研究を行なう。

(iii) 金属間化合物の研究

金属間化合物には超電導、超耐熱性、変形記憶特性などの性質を示すものである。副産金属を利用してそれら化合物を合成し、確性試験を行なうことは、新しい金属材料の開発につながり極めて有意義である。

5. あとがき

以上で研究の概略を各項目について述べたが、この外にこれらの各研究の横の連絡をとり総括を行ない、また各研究の「金属資源の完全利用」研究全体に対するアセスメントを行なっていく予定である。

この研究に関し昨年 2 月第 1 回のシンポジウムを行なった。その講演内容は次のようである。

- (1) 金属リサイクルと鋳滓の処理
日本鉄鋼協会専務理事 田畑新太郎
- (2) 非鉄金属資源と需給
日本興業銀行 仲田 旭
- (3) 金属資源の完全利用と基礎研究
名古屋工業大学学長 佐野幸吉
- (4) 金属資源の完全利用の新技術
東京大学教授 今泉常正
- (5) 金属資源の完全利用の社会的要請と研究の重要性
早稲田大学教授 原田種臣

以上の講演は主として本研究の必要性を高所から説いたものであった。

本年 2 月 3 日に第 2 回のシンポジウムが予定され、今回は実際に本研究のテーマを研究し、または研究を始めようとしておられる先生方をお願いしてあり、活発な討論があることを願ってある。その内容は、

- (1) 資源循環のエネルギー論
東京大学助教授 増子 昇
- (2) TiC 基サーメットの強化改良に関する研究
東京大学教授 鈴木 寿、同助教授 林 宏爾
- (3) ソリューションマイニングに関する問題
京都大学教授 伊藤一郎
- (4) 低品位アルミニウム 鋳石からの AlCl_3 の製造について
東北大学教授 谷内研太郎、同助教授 南條道夫
- (5) 固形廃棄物の選別技術について
東北大学教授 下飯坂潤三
- (6) 転炉滓の脱磷について
東京大学助教授 佐野信雄、東北大学助教授 水渡英昭

(7) 非鉄スラグの性質と利用について

東北大学教授 矢沢 彬

以上である。

この研究は昨年日本学術会議の金属研究連絡委員会と資源開発工学研究連絡会との共同(1976年には鉱物研究連絡委員会も)で提案されたが、本年も再度提案を予定している。

おわりにあたり金属研連委員長の東北大学 小林卓郎教授はもとより、金属関係10学協会特定研究課題選定委員会で本研究の幹事をしていただいている東北大学の

高橋愛和、谷内研太郎両教授、早稲田大学の草川隆次、原田種臣両教授、東京大学の後藤佐吉、鈴木 寿、武内寿久禰、山口梅太郎の諸教授、増子 昇、吉沢昭宣両助教授にはこの3年間多大のご努力をいただき感謝いたします。またこの研究に参加下さいました約100名の先生方には度々のアンケートにご回答をいただき、またシンポジウムにご参加いただき、ここに誌面をお借りして、謝意を表する次第です。

この研究が金属学会をはじめ多くの学会のご支援を得て採択されますように祈りつつ筆をおきます。

(1978年1月18日)

「ノート」から

特 殊 元 素 の 使 用 例

元 素 名	主 要 用 途 (単 体 及 び 化 合 物)
硼 素	ガラス、繊維状ガラス、陶磁器の釉薬、医薬品、化学(農)薬品、絶縁材料、超耐熱材料、特殊固体潤滑剤、整流器、原子炉制御材、遮蔽剤、半導体、非鉄金属脱酸剤、鉄鋼添加剤
バ リ ウ ム	各用増量(充填)・配合剤、染料定着剤、煙火剤、陶磁器の釉薬、X線造影(防壁)剤、X線管球窓、熱処理剤、光学ガラス(ブラウン管)
ベリリウム	各用バネ材、防爆用安全工具、電子工業機構材、プラスチック金型、高温用坩堝、原子炉用構造材、減速材、反射体、核燃料被覆材、宇宙航空材
希 土 類 (La Ce 他)	発火合金、発光剤、研磨剤、黄色顔料、脱酸剤、鋳鉄添加剤、光学レンズ添加剤、熱中性子吸収材(Sm, En, Gd)
イットリウム	カラーテレビ赤色蛍光体、マイクロ波素子、耐熱合金
コ バ ル ト	特殊鋼(磁石、高速度鋼、工具鋼、その他)添加剤、触媒、シーリングメタル
セ シ ウ ム	光電管
カ リ ウ ム	半導体、集積回路、発光素子
ゲルマニウム	半導体、集積回路、整流素子
インジウム	半導体、低融点合金、金属表面被覆用
リ チ ウ ム	高級ガラス、セラミックガラス、アルミ製錬用融剤、潤滑剤、炭酸ガス吸収剤、除湿剤、吸収式冷凍機吸収剤、各種触媒
モリブデン	鉄鋼(高速度鋼、耐熱鋼、その他)、真空管材、抵抗体、着色剤、潤滑剤、触媒
セ レ ン	整流素子、ガラスの着色剤、ゴム添加剤、光電池、鉄鋼添加剤
ストロンチウム	発火着色剤、各種吸着剤(甜菜糖吸脱剤、脱鉛剤、脱鉄剤)、釉薬、真空管陰極材、コンデンサー材、光学ガラス
ニ オ ブ	核燃料被覆管、原子炉構造材、セラミックコンデンサー、超電導合金、耐熱合金、超硬工具、鉄鋼(高張力鋼、耐熱鋼、その他)
タ ン タ ル	高炉制御材、コンデンサー、電子管、集積回路、耐熱耐食材、光学ガラス
テ ル ル	ゴム強化剤、合金、鋳鉄(表面硬化)、ガソリン(アンチノック剤)、色調剤、熱電冷却素子、鉄鋼(テルル鋼)
ト リ ウ ム	ガスマントル、真空管、高温耐火物、高融点サーマット、光学ガラス、合金、核燃料
チ タ ン	着色剤、色調剤、充填剤、耐食(合金)材、構造材、耐熱合金材、鉄鋼脱酸剤
タ リ ウ ム	殺鼠剤、殺虫剤、合金、単結晶プリズム、特殊光学ガラス
ウ ラ ン	陶磁器の釉薬、核燃料
バナジウム	鉄鋼(高張力鋼、その他)、触媒、着色剤、高速炉用燃料覆材
タングステン	真空管材、電子工業機構、耐熱合金、超硬合金、鉄鋼(工業鋼、その他)、触媒、顔料、化学(医)薬品
ジルコニウム	耐火煉瓦、鋳物砂、磁器、特殊ガラス、燃料被覆材、原子炉構造材、閃光電球、耐食材
ハフニウム	原子炉制御材、耐熱材