

3.8 金属系

3.8.1 近未来の金属系循環資源の消費と利用に関する要因構造

1) 金属系循環資源のライフサイクルにおける検討範囲

金属系資源のライフサイクルは、まず鉱床から鉱石が採鉱され、選鉱・製錬を経て地金となることから始まる。地金は加工され各製品に使用された後、回収、あるいは廃棄される。この一連のライフサイクルの中に、リサイクル、リユースという工程が既に内在しており、循環利用率を高めていることが金属系資源の特徴である。平成19年版 環境・循環型社会白書によれば、わが国で年間に排出される約6.05億トンの廃棄物のうち、金属系資源は約6%を占めている（なお、金属系循環資源とは、家電などの使用済み製品、建設現場から発生する解体屑、鉄鋼業、非鉄金属業から発生する金属屑などであり、鉄鋼業、非鉄金属業、鋳物業等から発生するスラグは非金属系循環資源に分類される）。金属系資源は性状的に安定しており、従来から回収・再生利用されていることから、現状での循環利用率は97%、最終処分率が3%とされている。多様な産業に大量に使われているベースメタルや、経済的価値の高い貴金属は循環利用が行われているのである。一方で、スラグ中の金属やハイテク産業を支えるレアメタルなど、低品位あるいは難処理の金属系資源については、金属としての循環利用はあまり進んでいない。また、近い将来に枯渇の危険のある金属、産出国が偏在している金属、副産物として生成される等、生産上の制約がある金属など、円滑な産業活動を行う上で必要な安定的供給を脅かす要素が存在している。このような金属系資源の循環システムを検討するため、本報では図3-8-1に示すように、そのライフサイクルを資源供給、製品需要、循環利用という3つの局面にわけ、論点の抽出を行った。

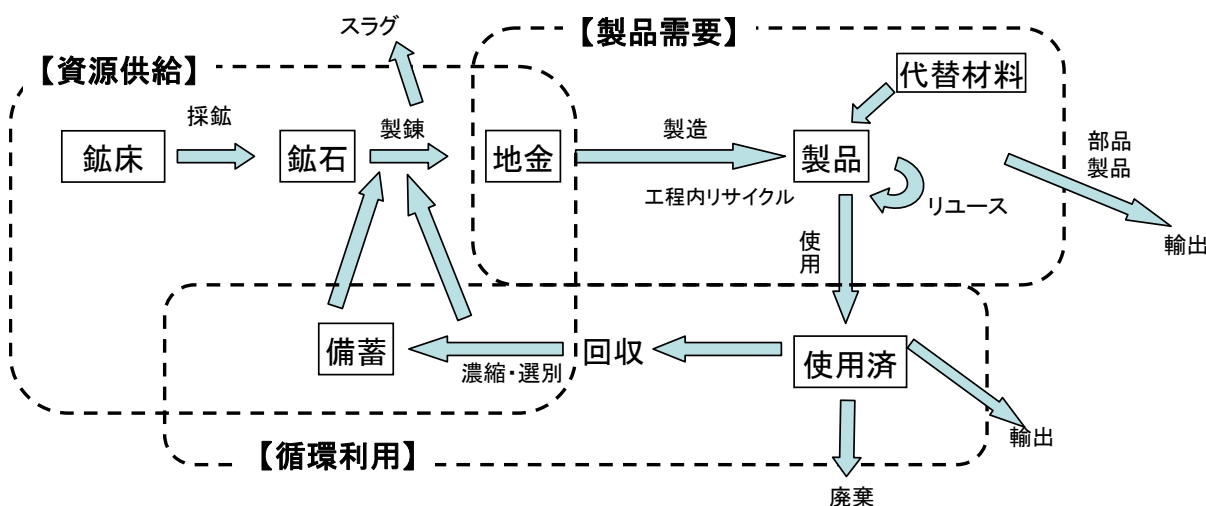


図 3-8-1 金属系循環資源のライフサイクルと検討範囲

2) 金属系循環資源の消費と利用に関する要因構造

金属系資源は他の資源と比べ、古くから循環利用が進んでいる。このため、発生や利用に影響する要因構造を考える際、「廃棄」を起点とするよりも、製品の「消費（利用）」という局面を起点と考えるほうが妥当であると考えられる。そこで、金属系資源に係わる要因構造について、供給から消費に至る詳細構造を図 3-8-2 に、消費後から再資源化に至る詳細構造を図 3-8-3 に示す。これらは金属系資源に係わるキーワードを網羅的に掲示したものであるが、これらのうち近未来の金属系資源循環システム作りに対し特に重要となる因子をまとめたのが図 3-8-4 であり、金属系資源循環システムを支える技術としては、価格や需要の動向の予測に基づいて評価や計画を行うソフト技術と、具体的に物質を管理し市場に流通させるためのハード技術とに分類できる。

まず、ソフト技術は、「資源セキュリティ対策」および「元素別金属資源戦略」に資する技術として整理できる。資源セキュリティの対策としては、国際的な動向を踏まえた適切な需要供給予測や、為替の変動や景気動向からみた需給予測が重要である。また、元素別金属資源戦略としては、各金属資源のマテリアルフローの把握や近年潜在的な国内資源として注目を浴びている「都市鉱山」の詳細評価等があげられる。経済的な合理性や環境への負荷といった問題を含めた適正なリサイクル対象の評価と、どの金属を回収し、どの程度の量を備蓄するのかということに対する適正評価も課題として上げられる。

他方、ハード技術としては「効率的な資源利用」および「潜在的資源の顕在化」として整理できる。前者は、材料や最終製品の製造業に係わる技術であり、製品の易リサイクル・省資源化設計、製造工程内での再利用・リサイクルの徹底や、中長期的には、需要の増大や資源不足が予想される金属の代替材料開発も重要となる。後者は資源や素材を供給する業界に係わる技術であり、廃棄物を初めとする種々の潜在的資源から、高度な濃縮・抽出技術の開発により市場性のある資源へこれらを顕在化してゆくことを示すものである。以上のように適切かつ効率的なシステム構築には、ソフト技術・ハード技術、双方の研究開発と両者の協調が重要と考えられる。

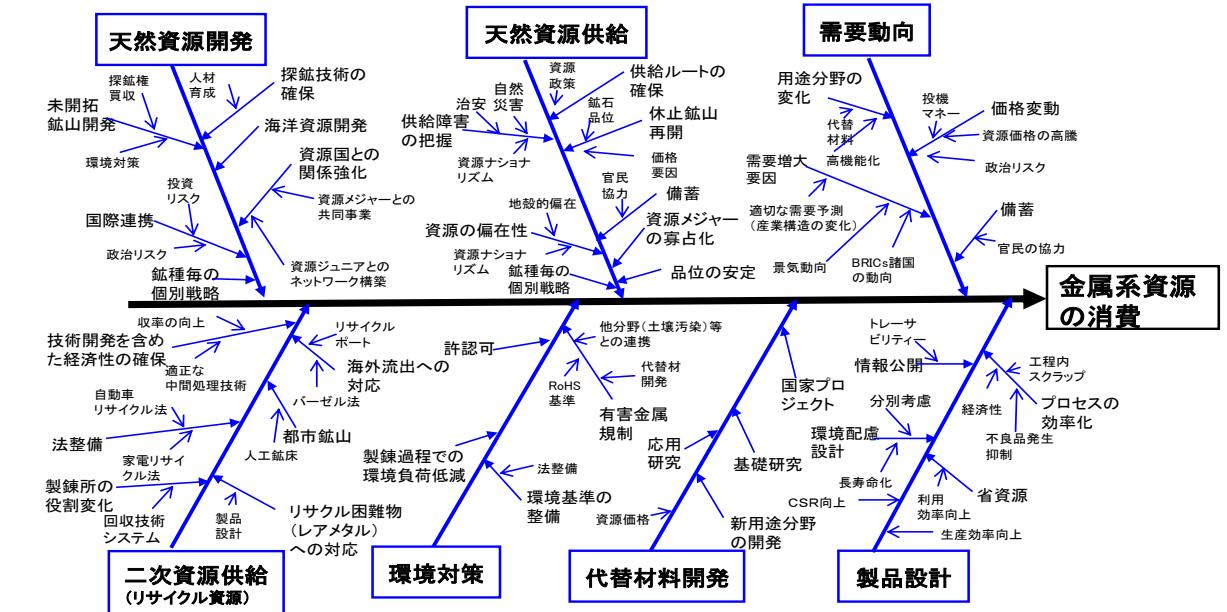


図 3-8-2 供給から消費にいたるまでの詳細構造

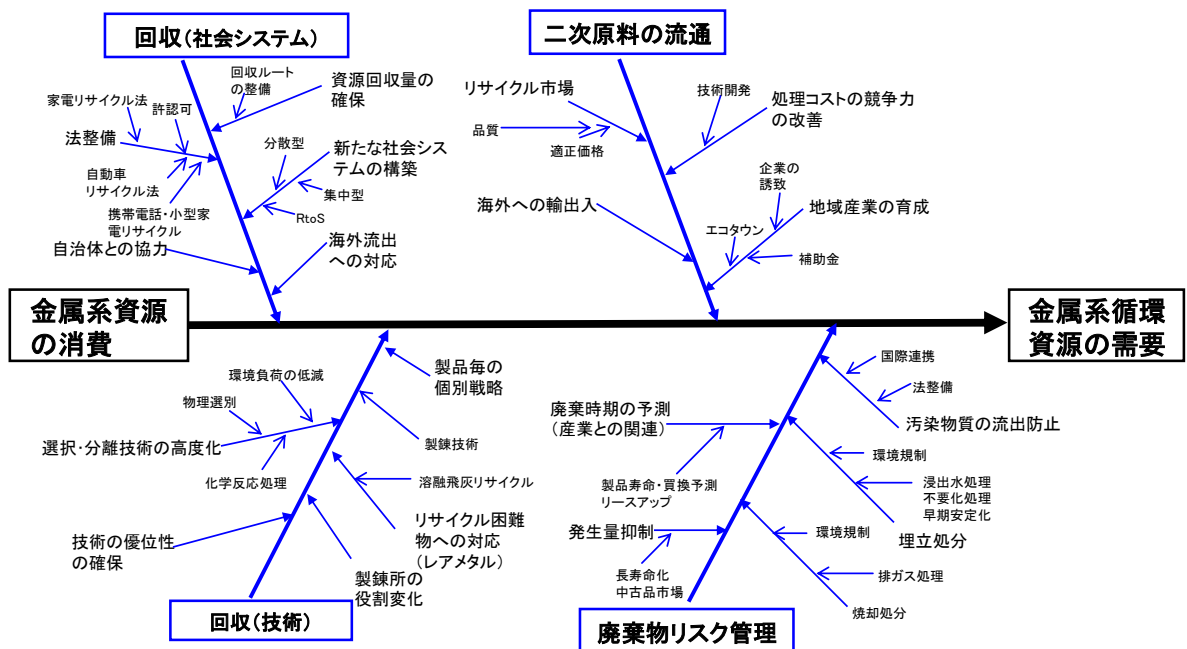


図 3-8-3 消費後から再資源化にいたる詳細構造

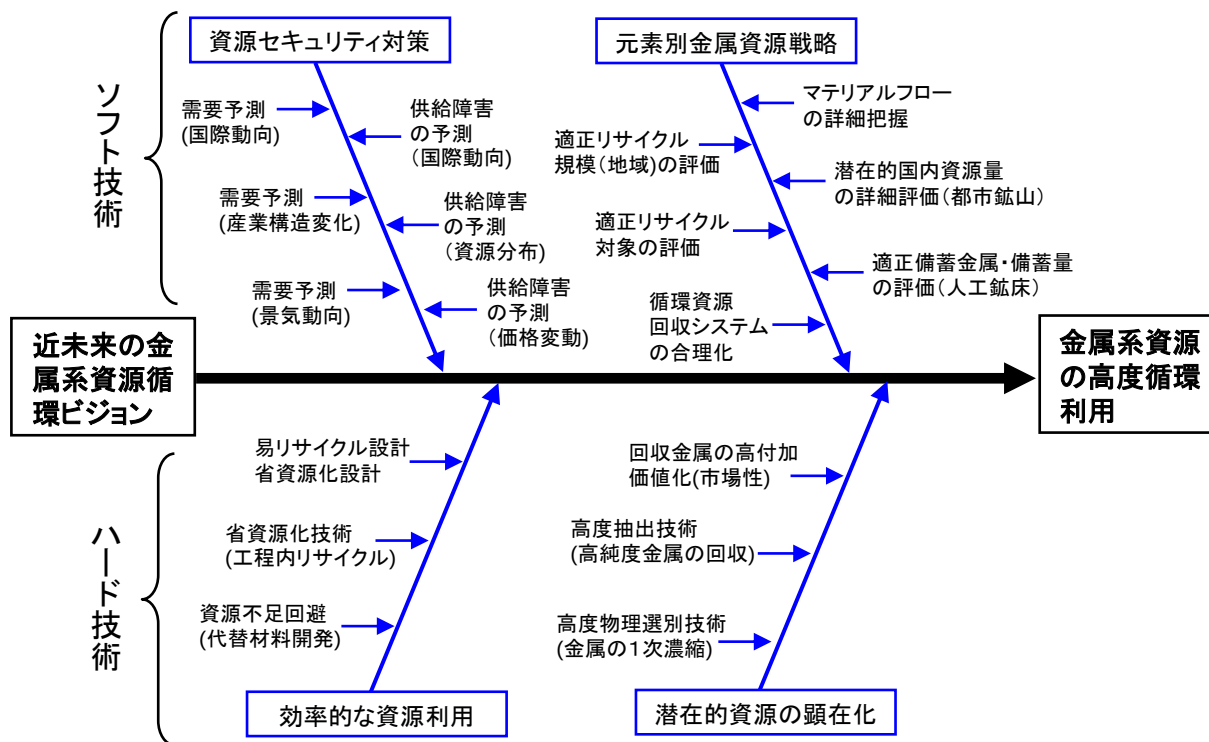


図 3-8-4 近未来の金属系循環資源システム作りにおける特性要因図（重要要因）

3.8.2 各要因に関する現状と課題

本項では、金属系資源に係わる種々の要因について図 3-7-1 に示した 3 つの範囲に基づいて、その現状と課題について検討を行った。

1) 資源供給

我が国においては、戦後の経済発展にともなって金属系資源の需要が著しく増大し、その影響で供給構造が大きく変化した。例えば銅について見ると、1960 年頃までは、国内鉱による地金生産量は、銅地金供給量（国内鉱出の地金生産＋海外産出の地金生産＋地金輸入）の 30%以上を占めていたが、以降は海外鉱石への依存が高まり、2000 年には銅生産 145.6 万 t のうち、国内鉱出が 900t（0.06%）、海外鉱出が 130.9 万 t（90%）であり、自給率（国内鉱出／国内鉱出＋海外鉱出＋輸入）で 0.05%となっている¹⁾。この例のように、金属系資源の安定的な供給源の 1 つであった国内の鉱山は、小規模鉱床が点在する採算性の低いものが多いうえ、公害規制の強化による鉱害防止対策費の増大等により、閉山にいたるものが少なくなかった。表 3-8-1 に、2007 年 4 月現在の我が国の鉱山の一覧を示した。1970 年当時に 246 鉱山あった我が国の金属鉱山は、2008 年 4 月現在では 11 鉱山と約 1／22 に減少した。2006 年 3 月には豊羽鉱山が生産を休止したことにより、現在、国内に

において商業規模で創業が行われている非鉄金属鉱山は、鹿児島県の菱刈鉱山のみである。

表 3-8-1 我が国の鉱山（2007 年 4 月 1 日現在）

鉱山名	所在地	鉱種名	鉱業権者名
神岡	岐阜	亜鉛・鉛・石灰石	神岡鉱業
菱刈	鹿児島	金、銀	住友金属鉱山
豊羽	北海道	鉛、亜鉛	豊羽鉱山
柏原	長野	鉄	吉田号
大江山	京都	ニッケル、コバルト、クロム、鉄	YAKIN大江山
鳥上羽内谷	島根	砂鉄	安中製作所
第一阿蘇	熊本	鉄	日本リモナイト
新木浦	大分	鉄	木浦エメリー
岩戸金山	鹿児島	金、銀	
春日	鹿児島	金、銀	春日鉱山
赤石	鹿児島	金、銀	三井串木野鉱山

メタルマイニング・データブック2008 より作成

金属系資源の需要量は年々増大しており、必然的に資源の海外依存度が増大した。このため、製錬所は鉱山に付随する形ではなく、臨海製錬所として存在するものが多い。現在、国内には 7 ヲ所の銅製錬所が存在し、電解製錬の能力は 2007 年時点で 167.5 万トン／年である。これは 1955 年の 13 万トン／年と比較すると、約 13 倍である。鉛の製錬所は 6 ヲ所にあり、製錬能力は 27.5 万トン／年、亜鉛については 6 ヲ所の製錬所があり、製錬能力は 70.3 万トン／年である（表 3-7-2～表 3-7-4）。現在、これらの製錬所では、精鉱からの亜鉛や銅の製錬だけでなく、リサイクル原料からの製錬や、貴金属、希少金属の回収も行っている。

表 3-8-2 我が国の銅製錬所

	企業名	製錬所名	所在地	製錬能力(トン／年)	
				溶解	電解
銅	日鉱製錬	日立工場	茨城県		217,000
	日鉱製錬	佐賀関	大分県	450,000	233,000
	三菱マテリアル	直島	香川県	306,000	225,000
	住友金属鉱山	東予	愛媛県	410,000	410,000
	小坂製錬	小坂	秋田県	96,000	72,000
	小名浜製錬	小名浜	福島県	311,000	258,000
	日比共同製錬	玉野	岡山県	260,000	260,000
	全国計			1,833,000	1,675,000

メタルマイニング・データブック2008 より作成

表 3-8-3 我が国の鉛製錬所

	企業名	製錬所名	所在地	製錬能力 (トン／年)
鉛	東邦亜鉛	契島	広島県	120,000
	三井金属鉱業	竹原	広島県	43,800
	小坂製錬	小坂	秋田県	25,200
	住友金属鉱山	播磨	兵庫県	30,000
	細倉金属鉱業	細倉	宮城県	22,200
	神岡鉱業	神岡	岐阜県	33,600
全国計				274,800

メタルマイニング・データブック2008 より作成

表 3-8-4 我が国の亜鉛製錬所

	企業名	製錬所名	製錬能力(トン／年)		
			所在地	電解	蒸留
亜鉛	神岡鉱業	神岡	岐阜県	72,000	117,600 90,000
	彦島製錬	彦島	山口県	84,000	
	東邦亜鉛	安中	群馬県	139,200	
	八戸製錬	八戸	青森県		
	住友金属鉱山	播磨	兵庫県		
	秋田製錬	飯島	秋田県	200,400	
全国計				495,600	207,600

メタルマイニング・データブック2008 より作成

金属系資源の海外への依存が高まったことに伴って、海外資源開発への参加が積極的に進められてきた。戦後の企業による海外資源開発への参加の歴史は、1953年のトレド鉱山（フィリピン）への開発融資に始まり、1960年代以降の海外資源開発への著しい進出が、その後の我が国の非鉄金属需要の増加に対して大きな役割を果たしたといえる。探鉱開発については、技術を有する鉱山会社が自ら探査権益を取得して探鉱開発を行うケースもあるが、企業の多くは鉱山会社及び商社が国による支援策を活用しつつ、海外資源メジャーが進める大規模プロジェクトに参入する形で実現してきた。海外鉱山に対して開発段階から積極的に参入を図ってきた結果、05年における自主開発比率は銅が39%、亜鉛は約13%、ニッケルは中間製品を含めて約25%にのぼる。

しかしながら、資源の賦存状況はアメリカやカナダ、オーストラリアを除けば発展途上国に偏在していることや、近年の傾向として鉱床が奥地化し深部化、低品位化していること、開発自体が大型化していることに伴って、様々な供給リスクが予想されている。兎島は、これまで実際に起こった資源供給障害に対する考察から、①供給国の偏在性（さらに資源国は政治・経済状態が不安定なことが多い）、②非鉄メジャーによる供給の寡占化、代替困難性（各鉱種の特性に基づいて利用されている）、③代替困難性（各鉱種の特性に基づいて利用されている）④希少性（ベースメタル、レアメタルともに地殻存在度が低い）、⑤投資環境上の問題（開発に長期を要するので、開発投資のファージビリティが低く、投資

家のアクセシビリティが低い)、そして⑥農産品、工業製品と違い「国家所有の原則」にあるという6つの点を供給障害の発生要因として指摘している²⁾。

一方、天然資源供給の新たな道筋として、海洋資源開発にも注目が注がれている。技術進歩により海底下での資源探査が可能になったこと、資源価格の高騰により海洋資源開発の採算性が向上していること、陸上の天然資源が地政学的な制約(一定地域への偏在)から、海洋地域が資源開発の新たなフロンティアとして注目されているようになったという世界的な情勢がある。特に金属系資源については、我が国の排他的経済水域内に産する海底熱水鉱床などが注目されており、金属資源自給の手段として期待されている。

2) 製品需要

金属系資源は、第二次世界大戦後の経済成長とともに需要が急激に増大した。その後、石油危機や1991年以降は長期の経済停滞に伴い需要が低下したが、2000年以降、IT・自動車業界を中心として、主要な産業分野において金属系資源の消費量は拡大傾向を示すものが多くなっている。貴金属、レアメタルを含めた希少金属については、液晶パネルに用いられるインジウム、自動車排ガス触媒や燃料電池の触媒として不可欠なプラチナなど、特定分野の需要が著しく増大したために、資源供給上のリスクが顕在化するものもあった。この背景には、同時期のBRICs諸国の経済成長によって金属系資源の消費量が世界的な拡大し、急激な需給構造の変化が起こったことがあげられる。今後の需要量については、銅・鉛・亜鉛などのベースメタルについては、高度経済成長の頃のような国内消費の増大は予想しにくい、希少金属については、用途分野に限られる上に、使用されている製品が製造産業の国際競争力の源となっているために、国際的な需要増大の影響を直接的に受けやすい。希少金属は自動車の排出ガス浄化や、家電の省電力化に必要な原材料でもあり、エネルギーの使用抑制に資するものである。また、太陽電池用の半導体や燃料電池の触媒としても用いられ、次世代エネルギーの用途分野にも期待もある。このように、今後も環境・エネルギー対策のためや、高機能材料など付加価値のより高い製品を求める傾向から、予期せぬ希少金属の需要を呼び起こし、資源の需給構造を急激に変化させる可能性がある。また、将来、爆発的な需要増大が見込まれるものや、供給に不安があるなど、戦略的な金属については代替材料の開発も課題である。しかし、金属は各々の元素特性に基づいて使用されるものであり、代替が容易ではないという制約がある。したがって、現在使用されている金属系資源については、省資源化設計、易リサイクル設計、工程内リサイクルの推進による耐用年数の拡大も重要である。

以上のように、金属系資源は総体として扱うことが難しく、金属種ごとに個別の事情を有していることが特徴である。そこで、本調査では、後述する総論との整合性を確認するために、いくつかの元素について着目し、現状においてなるべく精度の高いマテリアルフローの作成を行った。図3-8-5～図3-8-10は、それぞれレアメタルとしてインジウムとタングステン、貴金属として金と銀、ベースメタルとして銅と鉛について調査したマテリア

ルフローを示している。以下に各元素毎に若干の解説を加える。

【インジウム】

インジウムは亜鉛鉱などの副産物として生産される。国内では、かつて世界最大級の豊羽鉱山（2006 年 3 月閉山）で生産されていたが、現在は全量を輸入に頼っている。中国が生産、輸出ともに世界 1 位であり、生産量は世界全体の 4 割以上を占める。主要生産国は、韓国、カナダ、ベルギーなどである。日本のインジウムの総輸入量の 7 割を中国が占める。インジウムの用途は、化合物半導体、電池材料等としても使用されるが、その用途のほとんどはフラットパネルディスプレイ（FDP）の透明電極用途である。日本のインジウム需要は世界最大であり、2001 年以降は年率 10%～30%ほど拡大している。その 80%内外は透明電極用 ITO ターゲット材向けに急拡大した。インジウム回収については、生産上で装置や壁に付着したものの固形物を収集し、かつ酸などで洗浄して液状になったもの、エッチング廃液等をリサイクル原料として金属再生されている。不良パネルなど工程排出品もリサイクル原料となるが、使用済み液晶パネルからは金属回収はされていない。ITO 生産に関しては、フロー図にも示したように、製品化率は 0.96%であり、最終製品に含まれるインジウム量は極めて微量である。工程内リサイクルも 90%まで推し進められているのが特徴である。

【タングステン】

2006 年における世界のタングステン鉱石の埋蔵量の約 62%が中国に存在し、同年のタングステン鉱石の生産量における中国のシェアは 86%を占めている。日本もタングステンの原料供給の約 90%近く中国に依存している。中国は 1991 年にタングステンを国家保護鉱種に指定し、2001 年から高付加価値化政策として鉱石での輸出を禁止、三酸化タングステンや APT（パラタングステン酸アンモン）などの中間原料の形で輸出している³⁾。タングステンの国内製品別需要を見ると、超硬工具が 8 割を占めている。中国国内でのタングステン需要が増大している⁴⁾。タングステン原料は、フェロタングステン、三酸化タングステン、APT といった形で輸入され、このうち、フェロタングステンは特殊鋼用途に利用されている。タングステン粉はその半分程度が金属タングステン、タングステン合金、タングステン加工品として利用され、残り半分程度がタングステンカーバイド製造に向けられ、超硬工具の原料として利用される。超硬工具は、切削工具、耐磨工具、鉱山・土木工具に分類される。フローの大部分を占める超硬工具については貿易統計では直接的な把握が難しく、製品及び使用済み製品とともにその把握が難しい。超硬工具製造における工程屑及び使用済み超硬工具の回収や流通については、明確な資料が存在しない。

【金】

世界的な金の需要としては宝飾が圧倒的であり、退蔵分を除くと需要の約 3/4 を占めて

いる。2007 年の金の需要合計は約 4,000t であり、宝飾品以外の需要としては、金塊退蔵が約 260t、退蔵投資が約 360 t、工業用などその他の需要が約 640 t である⁵⁾。一方、日本における電子材料としての金の需要は 50% (約 126t) を超えている (内需合計 250 t)。このように、日本においては、金の大半が宝飾品としてではなく、工業製品として消費されているのが特徴である。特に、電子・通信用機器の接点に使用される金の需要が増大している。

なお、矢野経済研究所の推計によれば、2006 年度の金の回収量は 95.1 トンである。金回収の参入企業シェアは、松田産業が 26.3%とトップであり、第二位は田中貴金属工業で 21.0%、第三位のアサヒプリテックが 11.6%である。統計資料上に現れる市中回収よりも実際には多く回収されていると推察される。

【銀】

2004 年の銀の世界の需要合計は約 2 万 7000 トンである。用途としては電子材料などの工業用途 (約 1 万 1000 トン) が多く、費え宝飾品や銀器 (約 7700 トン)、写真産業 (約 5600 トン) となっている⁶⁾。日本の銀の需要は 2006 年度は内需は 2242 トンであり、1605 トンが輸出されている。なお、矢野経済研究所の推計によれば、2006 年度の銀の回収量は 1130 トンである。2006 年度の銀の回収における参入企業のシェアは、松田産業が 23.9%で第一位であり、日鉱金属、三菱マテリアル、アサヒプリテックが続いている。

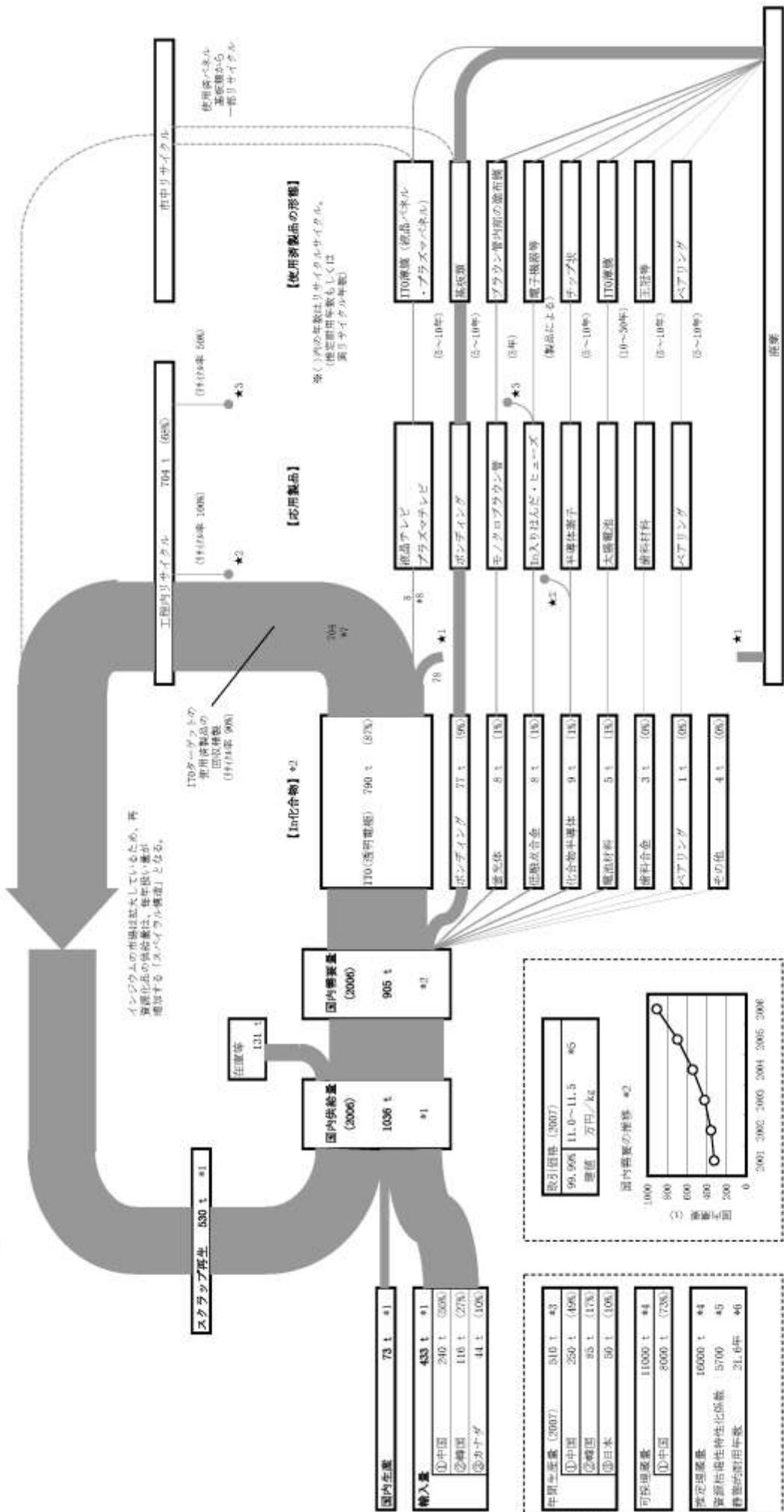
【銅】

銅地金(電気銅)の国内での生産量は 2006 年度で 1532 千 t である。電気銅の生産能力が内需を上回っているため、輸入は一部に留まっている (2006 年の輸入は 75 千 t)。主要原料の鉱石の輸入はチリをはじめとする海外に依存している。輸入鉱石は、銅鉱山において選鉱された銅品位 30%ほどの精鉱である。鉱石以外の原料としては、銅屑、銅合金屑などのスクラップ、製錬工程での副産物である。(二次地金製造は行われず、製錬所、あるいは電線や伸銅品の工場に戻り、再溶解されて原料として用いられる。銅合金については、再溶解された二次合金インゴットが製造されているが、量は少ない。

【鉛】

鉛の製造業者は、鉛精鉱から生産する一次業者と、再生業者がある。現在では蓄電池のリサイクルが義務付けられているために、廃蓄電池を原料に電気鉛を製造する割合が増加している。環境対策による鉛レス化が進展しているが、蓄電池の代替品は登場しておらず、鉛の用途の 80~90%を鉛蓄電池が占めている。鉛蓄電池は自動車バッテリーが中心であり、各メーカーによってリサイクルシステムが確立されており、回収率は 95%以上となっている。

インジウム (In)



- (※1) 出典：「鉱物資源マテリアルブルー2007」
- (※2) 「鉱物資源マテリアルブルー2007」より作成
- (※3) U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2008 より作成
- (※4) インゲンタムに關しては正確な資料が存在しないため、至低値石中の含有量から推定。
- (※5) 2007年6月 出所：工業レアメタル2007
- (※6) 2005年度の回復の計算には、これは、可採年数は5年とされている。
- (※7) 「東北地方北東北地方圏の資源・環境・産業調査報告書（東北地方北東北地方圏資源調査）」
- (※8) 三井金属鉱業株式会社「リサイクルケミカル事業」より出
- (※9) 三井金属鉱業株式会社「リサイクルケミカル事業」より出

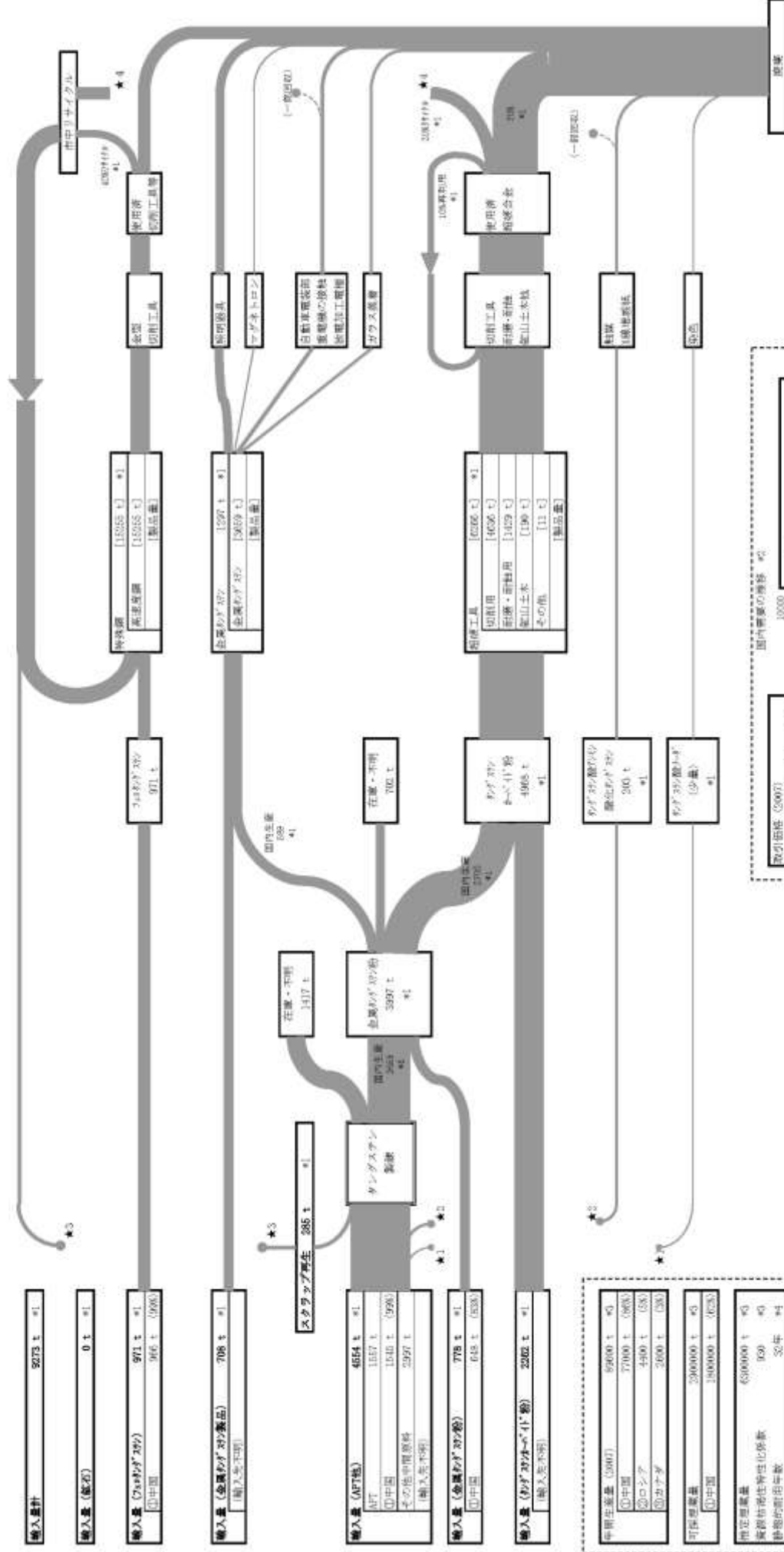
タンダステン (W)

【中間製品】

【最終製品】

【応用製品】

【使用時製品の形態】



*1) 鉱物資源マテリアルフロー2007

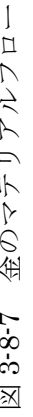
*2) JONREC: メタルマイニング・ジャーナル2006

*3) U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2008 より作成。

*4) 2006年の同様の計画によれば、可採年数48年とされている。

(「東北半島北部アサヒ」鉱山閉山 閉山リサイクル/用特産品 (東北経済産業局))

*5) 2007年6月 (出所: 工業レアメタル2007)



銀 (Ag)

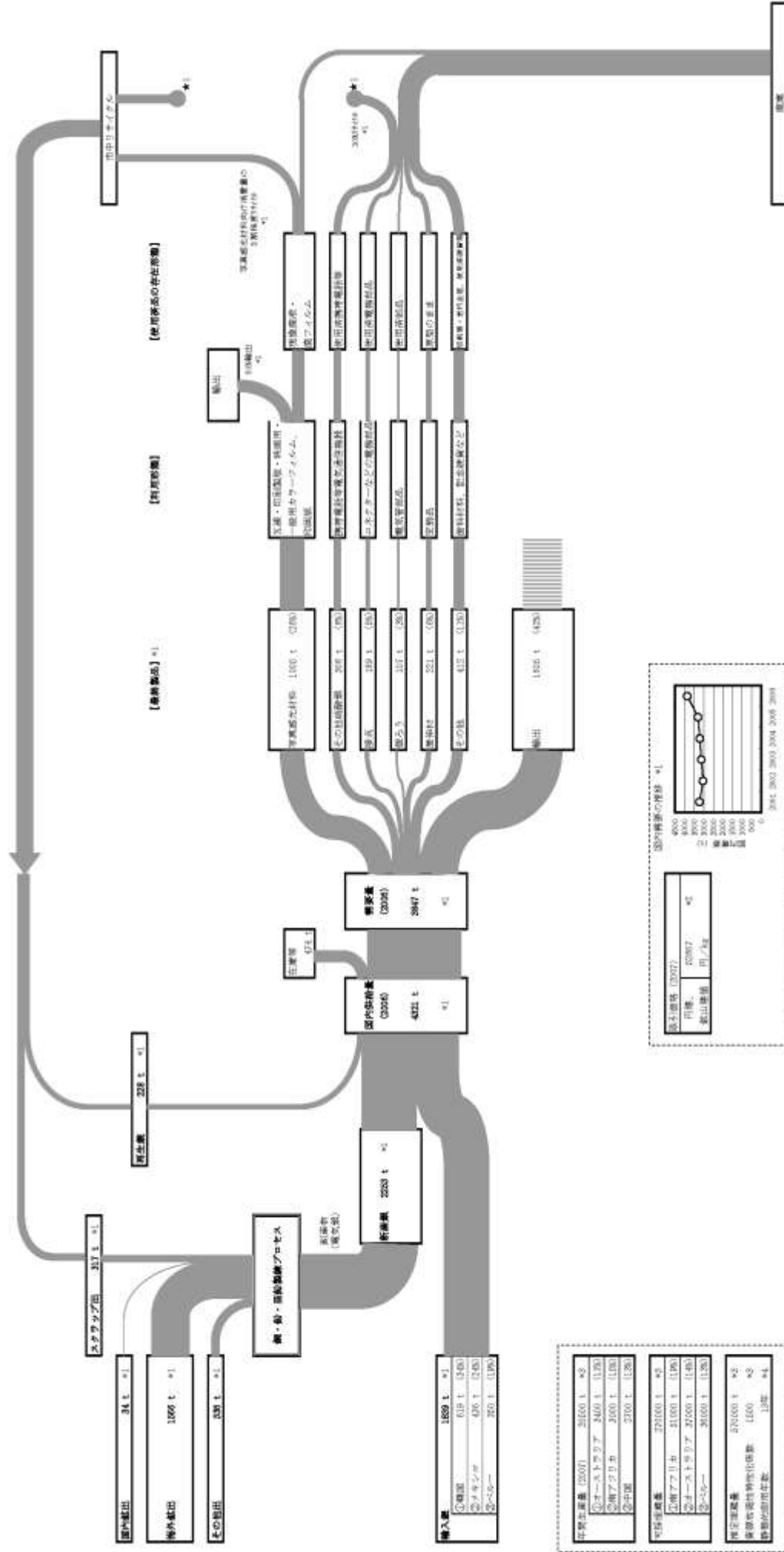
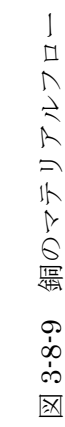


図 3-8-8 銀のマテリアルフロー

*1: 鉱物資源マテリアルフロー2007
 *2: 2007年6月 (出所: 工業レポート2007)
 *3: 2007年6月 (出所: 工業レポート2007)
 *4: 2007年6月 (出所: 工業レポート2007)



- *1) 経済産業省「サステナブルな未来2025」
- *2) 日本経済新聞「日本の経済力」(2005年4月～2006年4月、東京証券取引所)
- *3) 日本経済新聞「日本の経済力」(2006年4月～2007年4月、東京証券取引所)
- *4) 2005年の同様の計算によれば、対GDP比率は向上している。

3) 循環利用

1960年代以降の経済発展にともなう国内需要の増大を背景として、非鉄金属の製錬能力は著しく拡大され、1967年から1977年の10年間に銅製錬では約2.5倍、鉛製錬で約1.6倍、亜鉛製錬で約1.8倍となった。この間、銅を中心として臨海型の大型製錬所の建設が積極的に行われた。同時に、原料鉱石を海外から輸入し、国内で製錬して国内消費に当てるといった消費地製錬方式が確立し、世界有数の地金生産国となった。第一次石油危機後、国内鉱山が相次いで閉山し、大手鉱山会社が鉱山部門を分離別会社化してきたことで、鉱山業というよりは製錬業の様相が一層明確なものになった。近年では従来の製錬業に加え、金、白金、ニッケルなど金属地金を電子関連製品等向けに加工する電子材料事業が非鉄製錬業の根幹となっている。さらに、これまでに培われた製錬技術や施設を利用し、自動車の鉛バッテリーや家電のリサイクル事業が成り立っている。このような背景の元、従来から、明らかに金属割合の高い製品については、既に事業として成立している。例えばスチール缶については87.1%、アルミ缶については86.1%というリサイクル率が報告されている。平成18年度に行われた伸銅品のリサイクルの実態調査⁷⁾によれば、伸銅品等を中心とした銅系資源の国内のリサイクル率は72%に達している。また、経済価値の高い金、銀といった貴金属のリサイクルも事業化されており、2006年については、金の国内への原料供給のうち30%（50トン）が再生金であり、銀については原料供給の13%（545トン）が中古銀スクラップか再生銀である。このように、使用用途が広く大量に使われる鉄、アルミニウム、銅や経済価値の高い貴金属のように、従来から経済合理性を持っている金属はリサイクルが進められてきた。

一方で、1970年代から資源の有限性が指摘されるに至って、金属系資源についても、経済原理のみによらない資源の再利用・再資源化が議論されるようになった。例えば、南條は、工業製品の中に含まれる貴金属やレアメタル類の成分比が天然鉱石の品位より高い場合が多いこと、金属として組み込まれることが多いために製錬・精製に要するエネルギーが少なく済むことを特徴として指摘し、地上に蓄積された工業製品を「都市鉱山」と名づけた⁸⁾。また、西山は、多くの金属資源で既採掘量が現有埋蔵量を上回っていることを指摘している⁹⁾。地上の資源として注目されたこの「都市鉱山」の発想はそれ以来継続され、近年では、中村・白鳥らによる「人工鉱床構想」として発展させられ、企業や自治体を巻き込んだ取り組みが行われている¹⁰⁾。しかしながら、金属系資源の用途は様々で製品中の存在形態も多様であるため、使用済み製品の合理的、効率的回収を進めることには課題も多い。また、対象となる金属の高度選別・高度抽出技術の開発も不可欠とされている。さらに、現状では資源価値の低い低品位な金属や、小型家電中のレアメタルなど多品種に少量ずつ含有する金属を循環資源として柔軟に活用していくためには、これを一時的、あるいは長期的に備蓄（保管）しておくことも重要な課題となる。

他方、国内での金属系資源の循環利用の試みが進められているのに対して、資源が海外へ流出しているという問題もある。我が国は大量の資源を海外から輸入し、国内に集積し

ている一方で、使用済み品なども「リサイクル原料」として海外へ輸出しているのである。貿易統計によれば、2006年には、中国には銅（37万トン）、鉄（275万トン）、アルミ（8万トン）などのリサイクル原料が輸出されている。経済産業省の報告書¹¹⁾においても、銅系リサイクル資源の海外への流出の問題点が指摘されている。同報告書では、海外との連携を視野にいたした銅系資源の循環システム構築の必要性を指摘している（調査報告書によれば、国内で完結する銅系資源のリサイクル率は72%に対し、海外を含めたりサイクル率は92%に達している）。我が国の資源の保全、環境への影響等を含めた包括的な国債資源循環の枠組みが必要である。

3.8.3 金属系資源循環システムのビジョンと「資源循環インターフェース」

1) 金属系資源循環の近未来の技術システムビジョン

これまで述べてきたように、金属系の資源循環については、長年実施してきた歴史と、合理性を追求してきた技術開発の積み重ねによって築き上げられたものであるといえる。ここでは、これらの因果関係について図式的に整理すると共に、近未来の技術システムビジョンを構築する上での新たな技術開発の課題を明確にした。図3-8-11に近未来の技術システムビジョンの全体像を示す。

金属資源に関する資源生産性を高めるためには、天然資源投入量を削減しつつ、金属生産量を高めるとともに特に資源価値の高い金属を生産することが基本的な視点となる。天然資源投入量を削減するための王道は高品位の鉱石を確保することであるが、資源枯渇が叫ばれる状況下においては容易なことではない。各方面において海外探鉱や鉱山買収などが進められているものの、中長期的な視点からは我が国に輸入される鉱石は低品位化の傾向に向かうことは覚悟せざるを得ない。そのため、金属として流通あるいは廃棄されている資源をいかにして動脈系に循環させるか、さらにはその中でもより資源価値の高い金属に着目した資源循環をいかに進めるかが我が国の金属資源の資源生産性を高めるために重要な視点となる。

具体的には、新たな資源開発等の取り組みを前提としつつも、資源生産性の向上と持続的金属系資源循環を考慮し、既に取り組まれているあるいは新たに取り組むべき、以下の7つの技術開発の推進が重要であると考える。

- ① 工程内リサイクル
- ② 長寿命化・易リサイクル設計
- ③ 回収システムの合理化
- ④ 高度選別・抽出
- ⑤ 国際資源循環システム
- ⑥ 資源備蓄
- ⑦ 非鉄スラグの有効利用

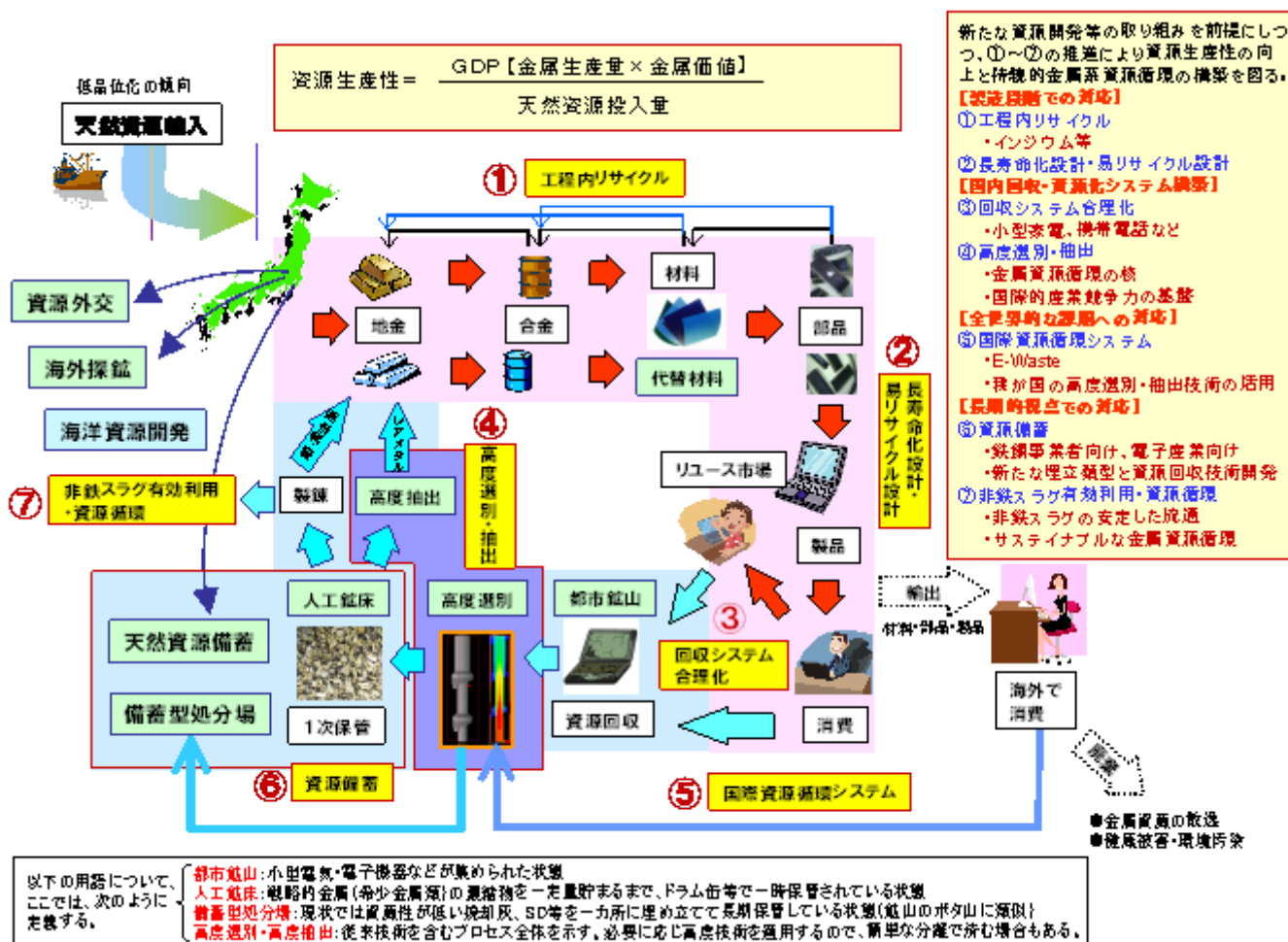


図 3-8-11 近未来の技術システムビジョン（金属系資源）

①工程内リサイクル

工程内リサイクルは、金属資源を用いた材料や部品等の製造段階での対応である。例えばインジウムの場合、ITO 生産に関する製品化率は 1%にも満たず、工程内リサイクルが積極的に進められているものの最終製品に含まれるインジウムの実に 10 倍程度が回収されていないのが現状である。そのため、製造段階における工程内リサイクルをより一層進めることが重要であり、これは製造段階におけるトータルでの歩留まりを抑えることにも繋がる。

②長寿命化・易リサイクル設計

金属資源に限ったことではないが、製品の設計段階から製品の長寿命化やリサイクルのしやすさに配慮を行うことは、今後の製品設計において必須の事項と考える。

特に、易リサイクル設計に関しては、分解や解体のしやすさに配慮するとともに、どのような金属資源がどこにどの程度使用されているかといった情報の表示も重要である。これは後述する回収システムや選別・抽出の方法等とも密接に関連することであり、金属資源回収のシステム全体を踏まえた上での検討が必要となる。また、製品に含まれる資源情報を表示することは、解体作業や廃棄時における有害性やリスクの判断にも有益と考えられる。

③回収システムの合理化

製品として市中に出回った金属資源を効率的に回収する仕組みが必要となる。

既に自動車や主要な家電製品については回収システムが整備されており、最近においては小型家電製品や携帯電話をターゲットとした新たな回収システムの構築の検討が各方面で進められているところであり、さらには溶融飛灰の山元還元についても一部の自治体において進められている。

いずれにせよ高品位で大量に確保可能な金属資源（銅線など）については既に回収システムが構築されていることから、今後検討すべき対象は、ある程度の濃度があったとしても小さな製品等から微量の金属を丁寧に集める回収システムとなる。流通に係わる関係者も多くなると考えられ、また、市民など製品利用者（排出者）の協力も不可欠である。そのため、個々の資源や製品に着目した回収システムを構築するだけでなく、いかに全体として合理的なシステムとしていくかが鍵となる。

④高度選別・抽出

回収した金属使用製品や小型電気・電子機器等（都市鉱山）から目的とする金属資源を選別・抽出することは、金属資源循環において核として位置づけるべきプロセスである。なお、ここでは「高度選別・抽出技術」は、従来技術を含む選別プロセス全体を示す。必要に応じて高度技術を適用するため、簡単な分離で済む場合もある。

我が国には高度な非鉄製錬施設がありベースメタルの資源循環においては従前から確立された技術がある。しかし、投入原料としての品質は確保すべきであり、新たな回収品目等に対しても製錬原料としての品質を確保した選別技術が必要となる。

さらに、非鉄製錬施設と言えども万能ではなく、回収できる金属資源も限られてしまう。特にレアメタルなど金属種類によっては、非鉄金属施設では回収ができなかったり効率が悪くなる場合もある。そのため、特に資源価値の高い金属を対象とした高度選別・抽出技術を確立することによって、金属資源の種類や回収製品等の特質に応じて、より資源生産性の高い金属の資源循環を目指すことが重要な視点となる。このような高度選別・抽出技術については、まだまだ技術開発の余地が残されている分野であり、技術開発の動向が非常に注目される場所である。

すなわち、非鉄製錬施設など既存の産業施設を活用しつつ、新たな選別・抽出技術の開

発によって多様な金属資源の循環システムを構築することが非常に重要であり、中長期的には我が国の国際産業競争力の基盤となると考える。

⑤国際資源循環システム

材料や製品等として海外に輸出された金属資源は、製品等が消費された後に海外で廃棄されることとなる。これは世界的に貴重な金属資源が散逸されることになるとともに、十分な知識のないまま回収作業を行ったり環境中に放出されることによって健康被害や環境汚染を引き起こすこともある。これは全世界的な課題とも言うべきものであり、そのため、E-Wasteの回収など国際資源循環システムの構築に向けた検討が現在、各方面で進められているところである。

その際、我が国は製品等の主要な製造・輸出国としてのリーダーシップを発揮することが求められるとともに、世界有数の非鉄製錬施設をはじめとした先進的な金属資源回収システムを有効に活用することが重要な視点となる。そのためにも、より先進的で効率的な高度選別・抽出技術が必要となる。

⑥資源備蓄

中長期的な資源戦略においては資源の備蓄も重要な戦略となる。

希少金属類など戦略的金属については、濃縮できたとしても微量であることから、経済規模がなかなか生じない場合がある。そのため、濃縮物が一定量貯まるまでドラム缶等で一時保管することが必要となる。すなわち「人工鉱床」と称される備蓄が必要となる。

一方で、焼却灰やシュレッターダストなど金属資源が含まれてはいるものの現状においては十分な抽出技術がなかったりあるいは経済合理性に乏しい資源については、一箇所に埋立を行い技術開発が進むまで長期間保管することが必要となる。この種の備蓄は「備蓄型処分場」として、そのあり方の検討が進められているところである。

なお、これらの新たな備蓄とは別に、主要な金属資源についての国家備蓄については、今後とも戦略的に進められるものと考えられる。

⑦非鉄スラグの有効利用

金属資源の資源循環においては、非鉄金属精錬が大きな要素を占めることとなり、特にベースメタルの循環には不可欠である。しかし、非鉄製錬を行うことによって副産物として大量に非鉄スラグが産出される。

現状においては、非鉄スラグをはじめとしてスラグ系産業副産物の大きな需要先はセメント利用となっている。しかし、今後の公共事業の縮小によってセメント需要も縮小することが考えられるとともに、建設廃棄物や鉄鋼スラグ等との競合もおこると考えられることから、有効利用先の確保は今後困難になってくることが予想される。

非鉄スラグの有効利用先が確保できなくなることは、我が国の非鉄製造業全体にとって

大きな打撃となることから、持続可能な金属資源の資源循環システムの構築には、非鉄スラグの安定した有効利用が不可欠となる。

金属資源は従来から循環利用が推進されているが、「資源供給」「製品需要」「循環利用」の各領域において、種々の問題を克服する必要がある。また、金属系資源はベースメタル、レアメタル、貴金属などの分類ごと、あるいは個々の金属元素ごとに流通や需要の様相が異なるため、個別の需要特性に応じた検討も必要となる。

2) 金属系資源循環の「資源循環インターフェース」

技術システムを構成する技術要素について、行為の担い手に基づいて3つのグループに整理したものを図3.8.12に示す。1つ目は、製造過程における省資源化あるいは副産物の有効利用・適正処理など、生産現場の中で対応すべき課題であり、ここには①と⑦が含まれる（ただし、⑦については、副産物からの金属資源回収ではなく、非鉄製造業全体としての事業安定化のためには副産物の安定的な循環経路を確保することが不可欠であるとの観点であり、本研究の目的からは、やや外れる）。2つ目は、製品を使用し使用済み品を排出する側の課題、つまり「生活現場での課題」である。ここには③と⑤が含まれ、技術的な問題もさることながら、法整備やルール作りといったソフトの充実が重要となる課題である。3つ目が「生産現場」と「生活現場」を結ぶインターフェース（「資源循環インターフェース」と呼ぶこととする）としての技術システムである。製品が製造業者の手を離れたのちに効果をもたらす②や、生活現場から生産現場に戻ってくる際に効果をもたらす④と⑥がこれに該当する。このインターフェースは、金属系資源の「生活現場」と「生産現場」の行き来（資源循環）を促進する潤滑材の役割を果たす。本研究では、特にこの資源循環インターフェースが、近未来の金属資源循環が効果的に行われるうえで促進が必要な技術要素であると考えている。

資源循環インターフェースにおいて、②の易リサイクル設計や⑥の資源備蓄は、必ずしも徹底した促進が望まれるわけではない。例えば、易リサイクル設計を徹底した場合、製品価格の増大、機能の低下、サイズ・重量の増大などが生じ、製品のコストパフォーマンスが低下することも予想される。従って、製品としての機能を極力損なわない、最低限度の易リサイクル性を取り込んだ設計をすることが要求される。また、即時の資源化が妥当でない対象について、保管・備蓄をすることは有意義と考えられるが、保管にはコストがかかり、不特定多数の資源を長期保管することは無駄であるので、これも必要最低限度に留めることが必要である。そこで、②や⑥をどこまで行うかの判断が重要となるが、その判断基準を左右する因子が、⑤の高度選別・抽出の技術水準と考えられる。図3.8.13に、資源循環インターフェースの役割分担に関するイメージを示す。国内から集められた使用済みの資源は、⑤選別・抽出システムに送られる。選別・抽出システムの高度化も検討が

進められているが、製品は種類が膨大で、年々、複雑化、多様化する傾向があり、すべての製品を機能的に選別・抽出することは事実上困難である。この中には、特定の部品が使われていることを明示する、あるいは特定の部品を着色するなど、設計段階の比較的簡単な工夫により、選別・抽出が格段に容易になるケースも少なくない。一方、選別時には直ちに資源化できるグレードに濃縮することが理想であるが、技術的な問題からどうしてもややグレードの低い中間産物が生まれてしまう。現時点では、有価として流通しなければ廃棄されるほかないが、枯渇性の高い金属や、将来的に供給困難が予想される金属などは、これを保管しておくという選択肢も生まれるだろう。このように、現時点あるいは近い将来において、技術的にどこまでが即時資源化可能であり、設計段階の工夫により資源化が容易となるポイントがどこにあり、技術的な制約からどのような産物を保管・備蓄すべきかを決めるのが⑤選別・抽出技術となる。その意味で、⑤が司令塔となり、資源循環インターフェースのどのように機能させるかが、今後重要となるであろう。

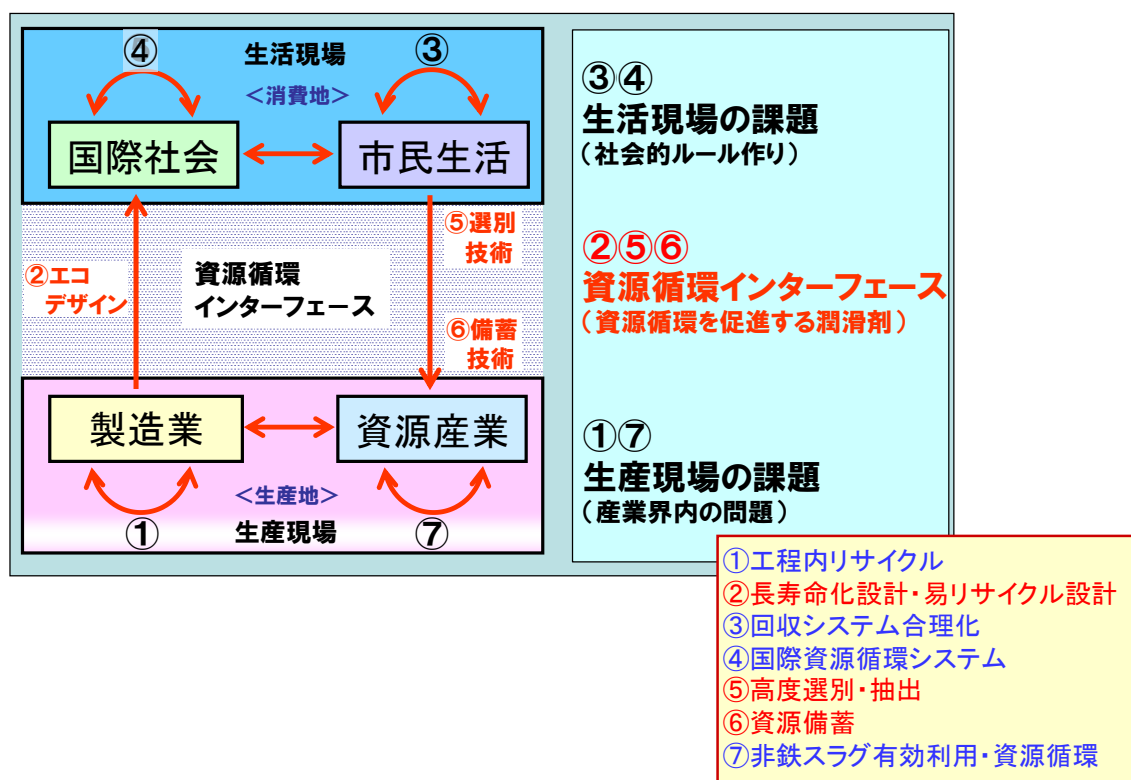


図 3.8.12 7つの技術システムにおける資源循環インターフェースの役割

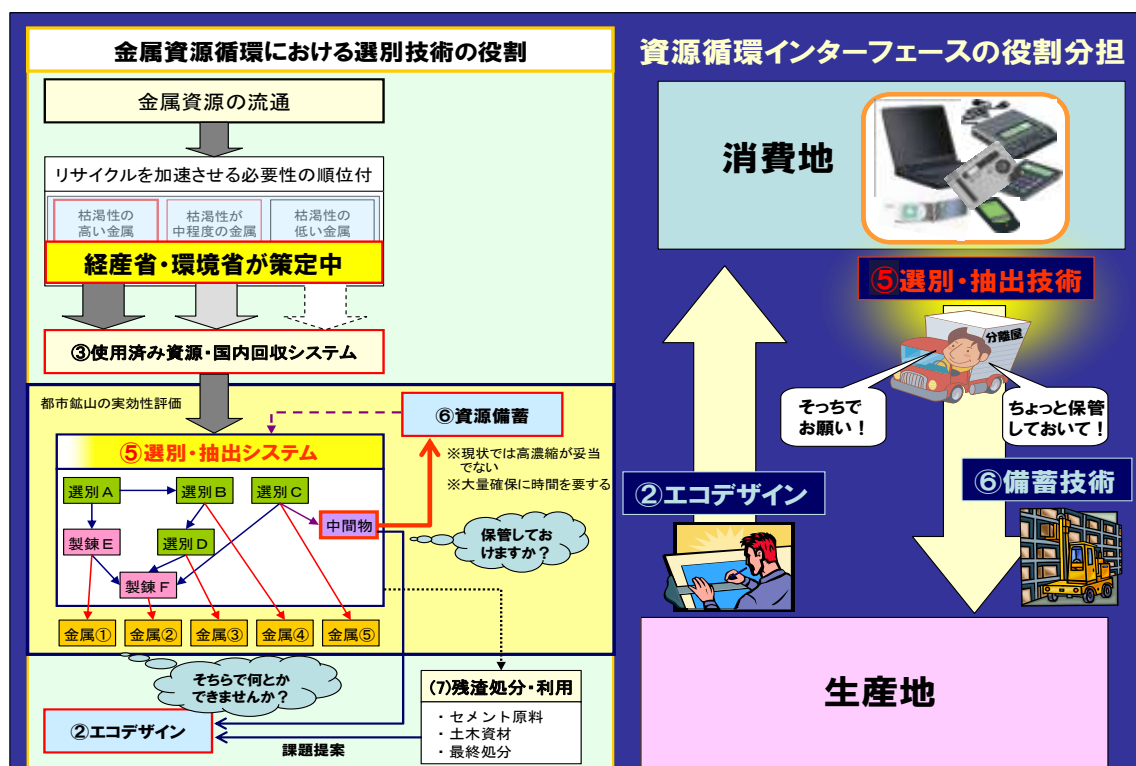


図 3.8.13 選別・抽出技術から見た資源循環インターフェースの役割

■ まとめ

金属資源のライフサイクルから、7つの技術要素（①工程内リサイクル、②長寿命化・易リサイクル設計、③回収システムの合理化、④高度選別・抽出、⑤国際資源循環システム、⑥資源備蓄、⑦非鉄スラグの有効利用・資源循環）からなる包括的な技術システムを想定した。これらの技術要素のうち、生産現場と生活現場の循環の流れを支える3つの技術要素（②④⑥）を、「資源循環インターフェース」と名付けた。

3.8.4 対象元素の選定と資源状況

本研究では、上記のような資源循環システムの現状とポテンシャルを、対象となる元素を絞り込んで検討を行った。各種の資料、資源状況を俯瞰した結果、ベースメタルでは、銅、鉛、亜鉛、錫、貴金属では金、銀、白金族金属（プラチナ、パラジウム）、レアメタルでは、リチウム、ゲルマニウム、レアアース、タンタル、タングステン、インジウムの13種を検討の対象とすることとした（レアアースについては来年度の報告とする）。以下、対象元素の資源状況と国内の資源循環（おもにリサイクルの現状）の概略について示す。

1) 銅

銅は、鉄、アルミニウムに次ぐ使用量の多いベースメタルである。

銅の世界の可採埋蔵量は 550 千 t、可採年数は 35.7 年である（図 3.8.14）。銅の可採年数はアルミニウムの 133.7 年や鉄の 75 年に比べて小さい数値であり、ベースメタルの中では枯渇性が高い金属と言われている。

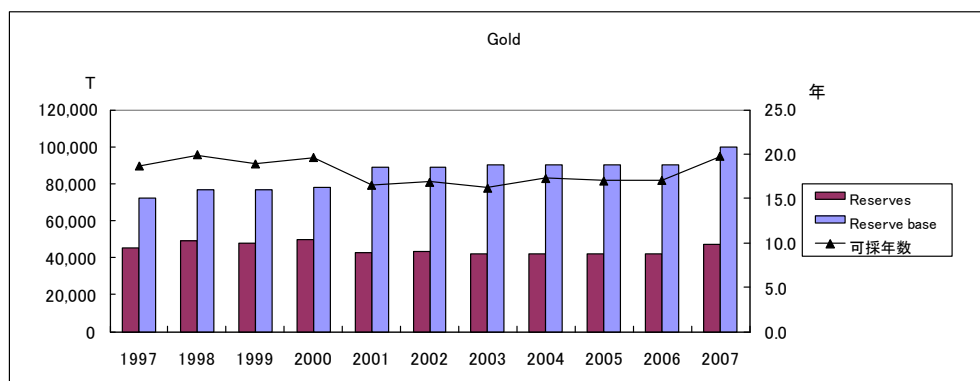


図 3.8.14 世界の銅の埋蔵量と可採年数

(Mineral Commodity Summaries 2009 より作成)

我が国の電気銅の供給は、その大部分が国内の銅製錬所で生産されている。国内生産の主原料である鉱石は、チリをはじめとする海外に頼っている。輸入される銅鉱石は、鉱山において選鉱された品位 30% ほどの精鉱である。原料としては、銅屑、銅合金屑などのスクラップや、製錬工程での副産物も輸入されている(図 3.8.15 および図 3.8.16)。

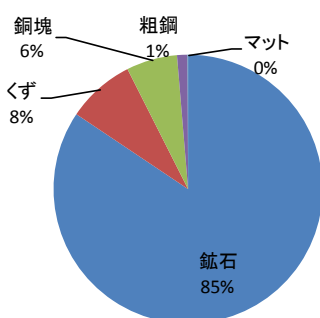


図 3.8.15 銅原料輸入の内訳 (2007 年)

総輸入量 1667 千 t

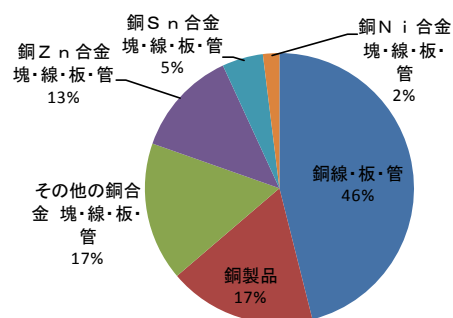


図 3.8.16 銅合金輸入の内訳 (2007 年)

総輸入量 102 千 t

銅屑、銅合金屑は、種別や品位、形態によって製錬所、あるいは電線や伸銅品の工場に戻り、再溶解されて原料として用いられている。銅合金については、鋳物原料として再溶解された二次合金インゴットが製造されているが量は少ない。

銅の用途は電線と伸銅品が主である。我が国において電気銅のほぼ 6 割は電線用で、残りが伸銅品に使用される。需要全体からみると、46%が電線用途、27%が伸銅品、26%が

輸出となっている（図 3.8.17）。近年の我が国の内需合計、輸出量は横ばいという状況である（図 3.8.18）。

輸出されている銅には、市場や加工工程からの排出銅屑の一部が含まれている。輸入される銅屑もあり、それらは製錬所に回って地金の原料として利用されたり、伸銅品や電線の工場で直接再溶解されている。

廃電線は、非鉄問屋によって回収されている。被膜剤の除去や粉粒状にチップ化（ナゲット処理）を行って、電線・伸銅メーカーに戻されている。鉄道、電力、通信、公共事業などの分野で排出される廃電線とケーブルは、ほぼ 100%回収されている（機械用は自動車用の電線は、解体工程の中で回収されるものや、シュレッダー工程で細かく裁断された後、選別回収されている。船舶用についても、廃電線は廃船処理時にほぼすべて回収される。建築物に使用されている廃線については、建物の撤去工事の際に分別回収される。

伸銅品は、電子・電気部品に多種多様な形で使用されており、分別回収が課題となっている。2001 年に施行された家電リサイクル法により、家電メーカーなどが、同法の対象である家電 4 品目（テレビ、エアコン、洗濯機、冷蔵庫）の回収を行い、銅をはじめとする有価金属の回収を行っている。

銅を含む金属製品は、生産・出荷の状況が多岐にわたっており、排出の実態についても不明な点が多い。

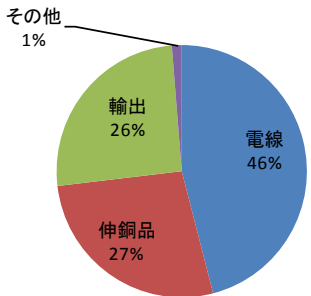


図 3.8.17 銅需要の内訳（2007 年）
総需要 1670 千 t
日本電線工業会、日本伸銅協会資料より作成

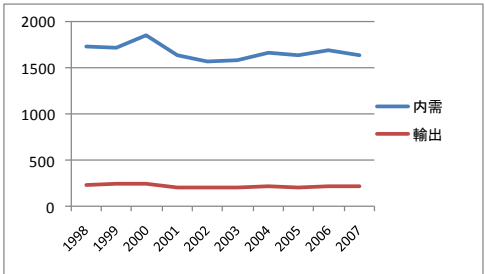


図 3.8.18 銅の内需と輸出量の変化（千 t）
日本電線工業会、日本伸銅協会資料、貿易統計より作成

表 3.8.5 電線、伸銅品の出荷状況（2007 年 千 t）

電線			伸銅品		
建設	379	44%	電気電子	295	29%
電気機械	206	24%	機械	216	22%
自動車	91	11%	金属製品	123	12%
電力	74	9%	その他	105	10%
その他	61	7%	輸送機械	74	7%
通信	18	2%	建設業	14	1%
内需計	830		内需計	815	
輸出	29	3%	輸出	188	19%
出荷合計	859		出荷合計	1003	

2) 鉛

鉛の埋蔵量は 79 千 t、可採年数は 21 年である（図 3.8.19）。鉛用途は、80～90%程度が蓄電池向けである。その他では、酸化鉛の形態で、ブラウン管等管球ガラス製品に鉛が使用されている（図 3.8.20）。

鉛の製造業者は、主に鉛精鉱から製錬する一次製錬業者と再生（二次製錬）業者がある。蓄電池のリサイクルが義務付けられているため、廃蓄電池を原料に電気鉛を製造する割合が増加している。他の原料としては米国、豪州、ペルー、チリなどから輸入される鉱石が利用されている。近年輸出が増加傾向にある（図 3.8.21）。

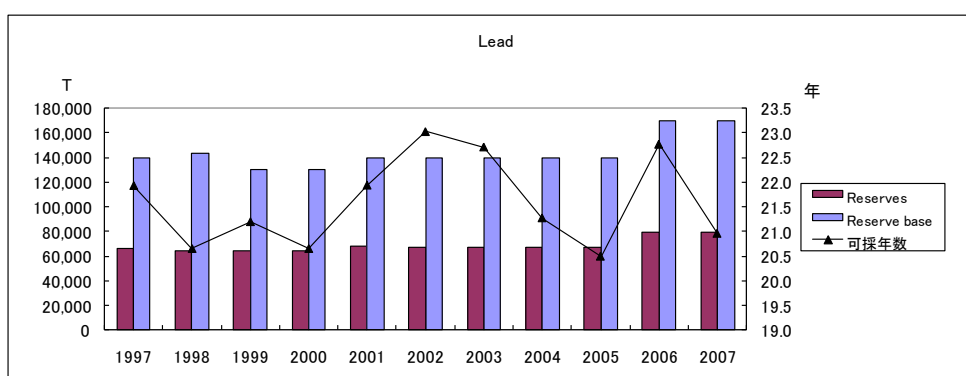


図 3.8.19 世界の鉛の埋蔵量と可採年数

(Mineral Commodity Summaries 2009 より作成)

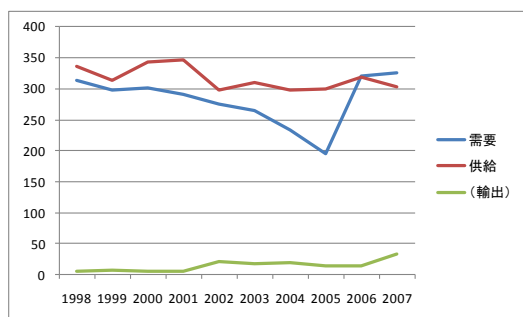


図 3.8.20 鉛の国内需要の内訳

(2007 年) 総需要量 293 t

鉱業協会統計より作成

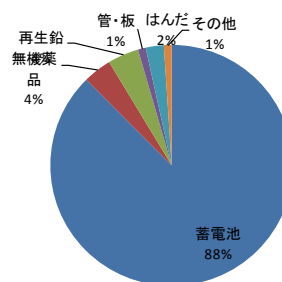


図 3.8.21 鉛の需給と輸出量の変化 (t)

貿易統計、鉱業協会統計より作成

リサイクルについては、自動車用バッテリーに使用されている鉛電池について、回収システムが確立している。輸入蓄電池の回収についても、日本のメーカーが費用を負担している状況にある。管球ガラスが使用されているブラウン管テレビやCRTは、家電リサイクル法の施行によりほぼ回収されている。はんだは現在リサイクルされていないが、家電

リサイクル法の枠組みの中で回収される家電の基板から、鉛はんだを回収する動きがある。実際には、環境への影響の懸念から、鉛フリーのはんだに代替されつつあり、はんだ用途の鉛の使用量は減少する見込みである。その他、一般廃棄物の焼却灰や二次飛灰に含まれるものや、製鋼用電気炉ダストから、亜鉛とともに回収されているが、排出・回収量ともわずかである。

3) 亜鉛

亜鉛は、鉄、アルミニウム、銅に次いで量産されている金属である。亜鉛の埋蔵量は180,000 千 t、可採年数は16.5 年である（図 3.8.22）。

亜鉛の用途は鋼板などめっき向けが 65%、真鍮・青銅等の伸銅品用が 14%、ダイカスト用が 8%、酸化亜鉛等の無機薬品が 8%、乾電池向けの亜鉛板が 1%弱である。亜鉛めっき鋼板は自動車、家電、建材に使用されている。その他のめっきは構造物等に向けられるものである（図 3.8.23）。

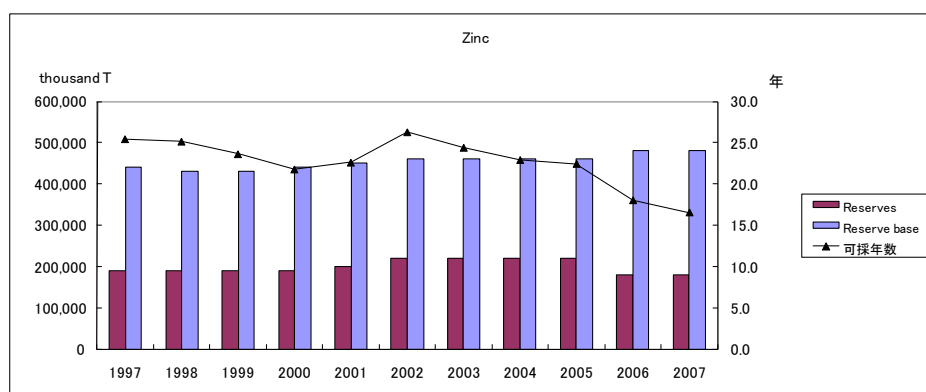


図 3.8.22 世界の亜鉛の埋蔵量と可採年数

(Mineral Commodity Summaries 2009 より作成)

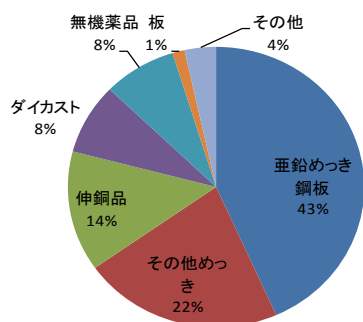


図 3.8.23 亜鉛の国内需要内訳（2007 年）

内需合計 525 千 t

日本鉱業協会統計より作成

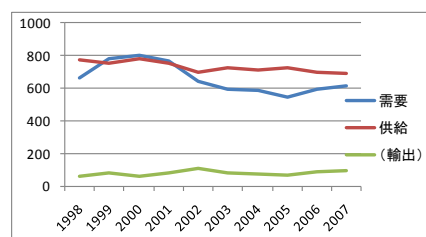


図 3.8.24 亜鉛の国内需給と輸出の変化

(貿易統計、鉱業協会統計より作成)

亜鉛の生産業者としては、亜鉛精鉱から生産する製錬（一次）業者と、再生（二次）業者がある。二次製錬業者はめっき工場から発生するドロス、滓類や亜鉛屑等から再生地金を生産している。

亜鉛生産の原料としては、豪州、ペルー、ボリビア、米国等から鉱石を輸入している。

亜鉛鉛の国内需給と輸出量を図 3.8.24 に示した。銅と同様に、近年では需要と供給はほぼ横ばいに推移している。輸出対象となっているのは、亜鉛鋼板などの亜鉛含有製品や亜鉛塊、亜鉛合金塊等である。自動車（亜鉛めっき鋼板）などの亜鉛含有製品は、輸出が輸入を上回っている。

市場や加工工程からの排出される亜鉛屑等の量は、経済産業省の「鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計年報」によると年間に 50 千 t 程度である。これらは製錬所や再生工場に供給されている。鉱物資源マテリアルフロー（JOGMEC）によれば、めっき工程から発生するドロス・滓類から 30%程度リサイクルされている。また、製鋼用電気炉ダスト中に含まれる亜鉛の 60%が製錬所で回収されている。伸銅品中の亜鉛は、銅回収の工程中で再利用されている。ダイカストは自動車の一部がシュレッダー経由で 15%程度がリサイクルされていると推測されている。

4) 錫

錫の埋蔵量は 5,600 千 t、可採年数は 17.5 年であるが（図 3.8.25）、パラジウム、ジルコニウムなどのレアメタルよりも地殻存在量が少ない金属である。

以前は、わが国でも錫石からの製錬を行っていたが、現在ではリサイクル原料からの製錬が主となっている。廃金属、錫滓、ドロス、煙灰などが原料として、年間 650～750 t 程度の製錬が行われている（図 3.8.26）。インドネシア、マレーシア、中国、タイなどから、金属錫（塊・屑）や錫の棒・線材、錫合金などから輸入し、製品原料としている。

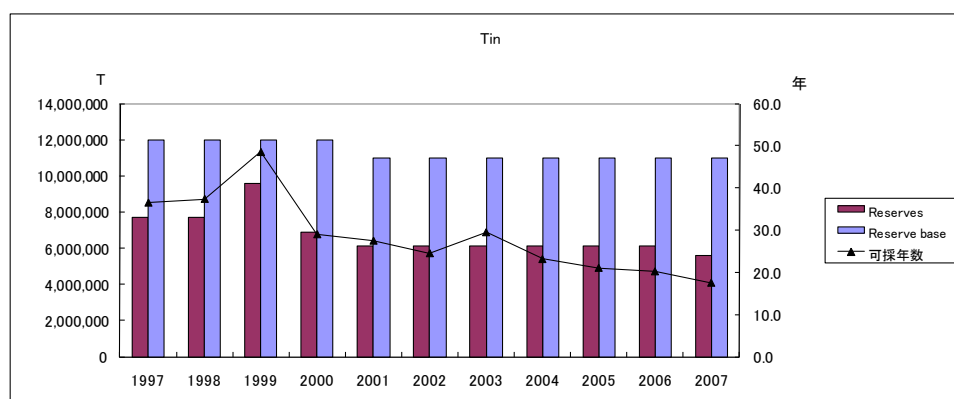


図 3.8.25 世界の錫の埋蔵量と可採年数

(Mineral Commodity Summaries 2009 より作成)

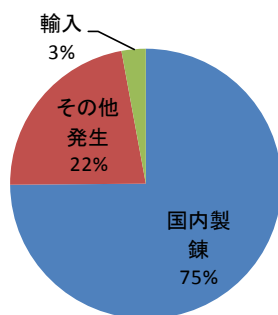


図 3.8.26 錫の国内供給内訳 (2007 年)

供給計 1,174 t

日本鉱業協会統計より作成

錫は、ブリキ、電子・電気製品中のはんだ、展伸材などとして多くの工業分野で多用されてきた。最近では、応用製品として、液晶パネルやプラズマパネルの I T O 透明電極の需要が増加している。

ブリキは鉄板として回収されているが、錫が取り出されることはない。鉛フリー化が進んでいるためにはんだ需要が増加している。電子・電気基板を収集・処理する業者が一部を回収して製錬所に戻している。電子部品や伸銅品についても銅合金として回収されている。

5) 金

金の埋蔵量は 47,000 t、可採年数は 19.7 年である (図 3.8.27)。現在、国内で稼働している金鉱山は、鹿児島県の菱刈鉱山 (住友金属) 一か所である。菱刈鉱山の金含有率は平均 45~50% 程度と非常に高いことが特徴であり、年間 7~9 t の金が採掘されている。これは、国内供給の 3% 程度に相当する。おもな原料としては、海外で銅・鉛・亜鉛鉱山から産出された鉱石を輸入し、貴金属スクラップなどの二次原料とあわせて、原料とされている。金は、銅・鉛・亜鉛製錬の過程で、副産物として生産されている。これは、新産金と呼ばれ、スクラップのみから生産される再生金とは区別されている。

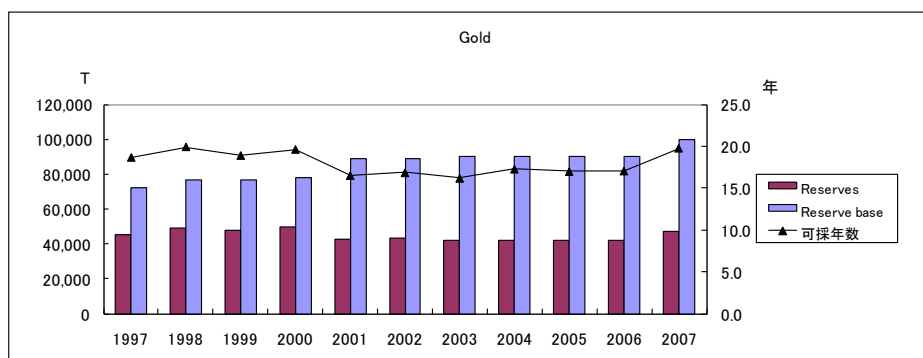


図 3.8.27 世界の金の埋蔵量と可採年数

国内供給の内訳を図 3.8.28 に示した。金の供給の特徴は、私的保有の放出 (売却) が行われていることであり、これが 25% を占めている。

再生金の原料としては、パソコンや携帯電話等のプリント基板、I C、セラミックパッケージ、めっき廃液、廃棄された宝飾品等があり、二次加工業者によって、回収・精製されている。

金の用途としては、電気通信機・機械部品用が約半分を占め、次いで宝飾・美術工芸等が約 10%である。工業分野で幅広く利用されているのが、日本の金需要の特徴である（図 3.8.29）。

金スクラップは、金や金合金等を製造する工程で発生する歩留まり材、製品の製造工程で発生する不良品、さらに使用済みの最終製品に組み込まれた状態の 3 種類である。歩留まり材、不良品についてはリサイクルのルートが確立しており、ほぼ全量がリサイクルされている。

パソコンや携帯電話に組み込まれた金が、使用済み品から再生されている。使用済みのパソコンは、製造業者やリース会社に戻され、産業廃棄物処理業者の手を経て、回収・製錬業者においてその他の貴金属とともに金が回収される。携帯電話は通信事業者が自主的に使用済み製品の回収を行っている。

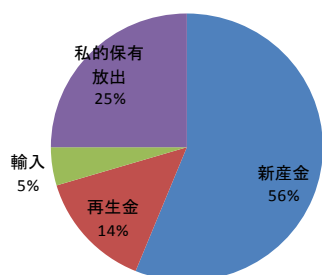


図 3.8.28 金の国内供給内訳 (2007 年)

供給合計 260 t

貴金属流通統計より作成

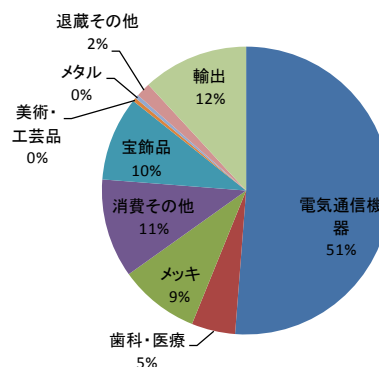


図 3.8.29 金の需要内訳 (2007 年)

需要計 244 t

貴金属流通統計より作成

6) 銀

銀の埋蔵量は 270,000 t、可採年数は 13 年である（図 3.8.30）。現在、国内の一部の鉱山で銀を含有する鉱石が生産されているが、国内供給に占める割合はわずかである。国内での銀の生産は、金と同じように、銅・鉛・亜鉛の製錬過程の副産物として生産されている（新産銀）。二次原料のみから生産される銀は再生銀と呼ばれ、新産銀とは区別される。2006 年の新産銀の生産は 2,263 t、再生銀の生産は 392 t、輸入銀が 1,545 t である（図 3.8.31）。銀の国内需要は 2,263 t であり、需要のおよそ半分を写真感光材料用が占めている（図 3.8.32）。

銀の回収については、一部ルートが確立している。感光材用途では、現像液中に流出した銀を日本感材銀工業組合が回収している。病院などで長期間保管されている X 線フィルムも専門の回収業者によって回収されている。したがって、写真用途の銀は退蔵・廃棄さ

れる分以外は回収できるシステムとなっている。その他の用途の場合、貴金属・非鉄金属を含んだ各種の使用済み品の回収の過程で回収されている。

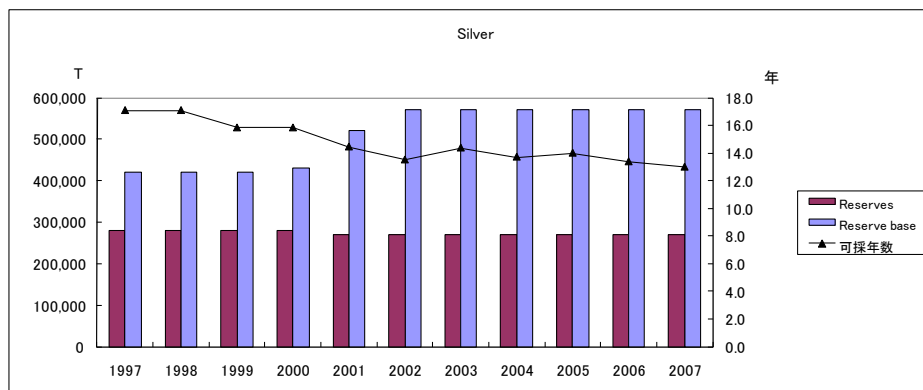


図 3.8.30 世界の銀の埋蔵量と可採年数
(Mineral Commodity Summaries 2009 より作成)

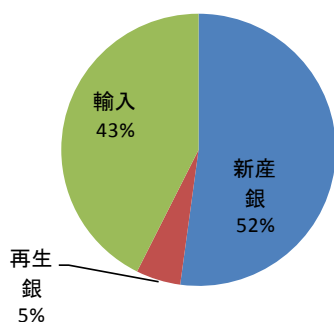


図 3.8.31 銀の供給内訳 (2006 年)
供給計 4,321 t
貴金属流通統計より作成

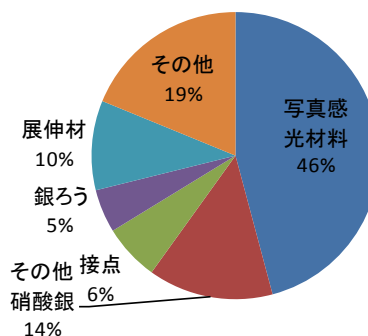


図 3.8.32 銀の需要内訳 (2006 年)
需要計 3,847 t
貴金属流通統計より作成

7) タングステン

タングステンの埋蔵量は 3,000 t、可採年数は 55 年である (図 3.8.33)。タングステンの原料としては、APT (パラタングステン酸アンモン) や酸化物等の中間化合物の状態で輸入されており、鉱石の形では現在は輸入されていない (図 3.8.34)。輸入量の 83%を、中国からの輸入に依存している。世界のタングステン生産量の 75%が中国で生産されており、埋蔵量においても、60%が中国に集中している。中国国内においても国内消費が拡大しているため、輸出抑制策が採用されており、日本にとっての供給懸念となっている。

国内では鉱石の消費はなく、リサイクル以外では国内でのタングステンの抽出・製錬は全く行われていない。需要の用途は、特殊鋼、超硬工具、二次電池、電気・電子機器、自動車部品などである。超硬工具用途の需要が最も多く、全体の 56% (2007 年では 6,113 t) を占めている。

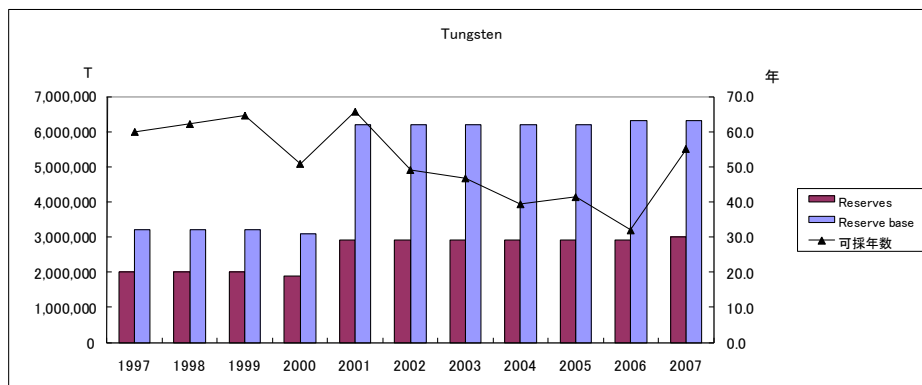


図 3.8.33 世界のタングステンの埋蔵量と可採年数
(Mineral Commodity Summaries 2009 より作成)

特殊鋼の製鋼の際に発生するスクラップや、超硬工具製造時の切削屑、研磨屑などの工程屑は原料として使用されている。使用済の特殊鋼はスクラップとして回収され、溶解原料として再利用される。

超硬工具は、使用済み品を特殊鋼製造時の添加剤として利用する方法と、タングステンを回収後に中間原料や特殊鋼の原料とする方法の 2 つが採られている。超硬工具用途の約 30% がリサイクルされていると言われており、超硬工具や特殊鋼添加剤に利用されるほか、輸出も行われている。

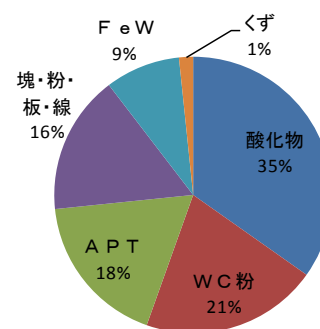


図 3.8.34 タングステン原料の輸入内訳 (2007 年)
輸入計 8,316 t
工業レアメタルより作成

8) タンタル

タンタルの埋蔵量は 130,000 t、可採年数は 159.5 年である (図 3.8.35)。主要鉱石としてタンタライトがあるが、近年では錫製錬により併産される錫鉱さいと、そこから得られる人工精鉱が、原料の大半を占めている。

我が国では 1998 年以降、輸入鉱石からの精製は行われていない。原料供給としては全量が輸入によって賄われている。貿易統計によると、フッ化物、塊・粉、製品 (ターゲット材の元板、コンデンサーワイヤー等の最終製品の部品)、屑といった形で輸入されており、2007 年の総輸入量は 695 t となっている (図 3.8.36)。輸入の相手国は、米国、タイ、ドイツなどである。国内で生産された粉末タンタルやスクラップ、加工品等が、同年には 501 t 輸出されている。

タンタルの主要な用途は、高温炉用ヒーター、タンタルコンデンサ、セラミック材料、光学レンズ材料、超硬工具などである。近年では、携帯電話、自動車電装品用タンタルコンデンサ用途の需要が増加しているのが特徴である。生産量の半数以上が電子工業分野で

用いられている。

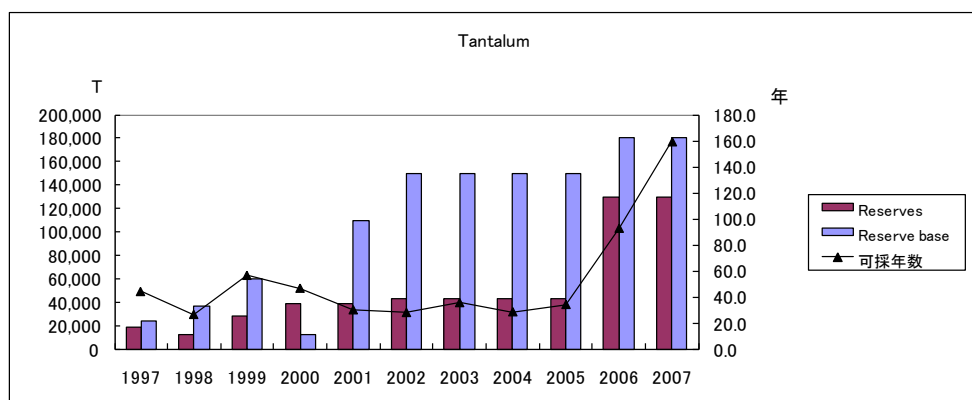


図 3.8.35 世界のタンタルの埋蔵量と可採年数
(Mineral Commodity Summaries 2009 より作成)

フッ化物をアルカリ還元して製造される純タンタル粉末の需要は、2007 年では 237 t であり、このうちコンデンサ用途が 183 t 程度である。タンタルコンデンサは CPU、携帯電話などに使用されており、需要は増加しているが、コンデンサ自体が小型化し、1 個あたりのタンタル使用量が減少しているために、コンデンサの需要の伸びが、タンタル粉末の需要の伸びとは直結していない推察される。

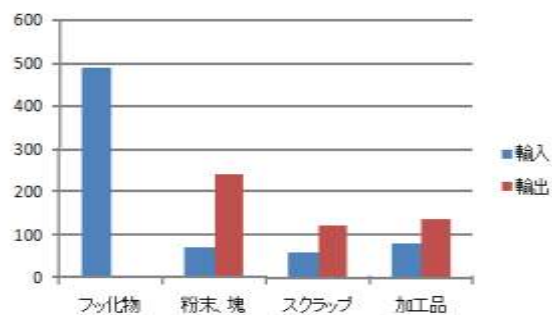


図 3.7.36 タンタルの輸出入の状況 (2007 年 t)
輸入合計 695 t、輸出合計 378 t
財務省貿易統計より作成

タンタルの塊や展伸材は、電子工業用

真空熱処理炉部品、コンデンサリード線、一般工業用化学装置など、電子工業用として使用されている。この分野での 2007 年の国内需要は 134 t である。酸化物は主に光学レンズ添加剤及びタンタル酸リチウムの原料として使用されている。タンタル酸リチウムは電子機器用の各種のフィルタに利用され、テレビ・ビデオ・携帯電話等に使用されている。

リサイクルについてみると、製品製造の過程で発生する工程屑・不良品等は、各工程で管理されており、コンデンサメーカーで発生する工程スクラップは、ほぼ 100%リサイクルされている。最終製品については、プリント基板にはんだ付けされているため、再利用するためにはコンデンサを基板から外す必要がある。一部は海外の専門解体事業者によって取り外され、リサイクル事業者によって市場に出されている。

9) ゲルマニウム

ゲルマニウムはおもに、鉛、亜鉛等の鉱石の精錬の過程で、副産物として回収されてい

る。天然鉱石からの生産は行われておらず、利用できる統計情報もほとんどないため、世界的な生産量、可採年数等は不明である。世界のゲルマニウム供給は純分で 100 t 程度と言われ、このうち亜鉛・銅生産量が大きな中国が 8 割を占めている。これまでは、二酸化ゲルマニウムとして供給されることが多かったが、赤外線スコープ市場の拡大をうけ、金属での供給割合が拡大してきている。主な供給元である中国において輸出規制が行われているため、より低品位のゲルマニウムも亜鉛から分離され、市場に供給される傾向にある。

我が国でも、鉱石の輸入は行われておらず、低品位ゲルマニウム、二酸化ゲルマニウム、ゲルマニウム屑が原料として輸入されている。

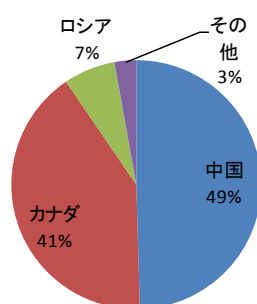


図 3.8.37 二酸化ゲルマニウムの輸入相手国内訳 (2007 年)
輸入合計 48,139 t

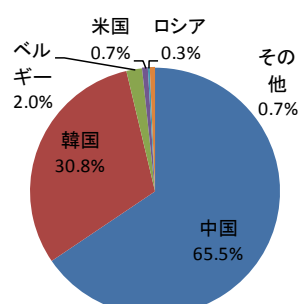


図 3.8.38 金属ゲルマニウムの輸入相手国内訳 (2007 年)
輸入合計 32,538 t

工業レアメタル 2008 より作成

2007 年の国内需要は 65 t 程度と推測されている。原料輸入は中国への依存が高い (図 3.8.37 および図 3.8.38)。ゲルマニウムの主要用途は、PET 樹脂用触媒である。その他、光ファイバーケーブル、蛍光体などに使用されている (図 3.8.39)。輸入単価は年々値上がりしており、07 年には 87,775 円/kg と、03 年に比べて 54% 高となっている。ゲルマニウム価格の高騰をうけ、需要用途のうちの触媒分野では、アンチモンへの代替が進められている。

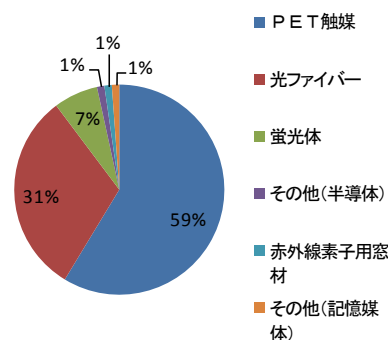


図 3.7.39 ゲルマニウムの需要用途内訳 (2007 年)

工業レアメタル 2008 より作成

10) 白金族 (PGM)

白金族金属は、粒状か砂状の自然白金として砂礫と混ざって産出する。これを、現地で水選別し、白金精鉱として製錬所に送り、パラジウム、ロジウム、イリジウム、ルテニウム、オスミウム等の各元素に分離・精製して出荷されている。

白金族金属全体での埋蔵量は 71 千 t、プラチナ、パラジウムの生産量をもとに算出さ

れる可採年数は 164.4 年である（図 3.8.40）。

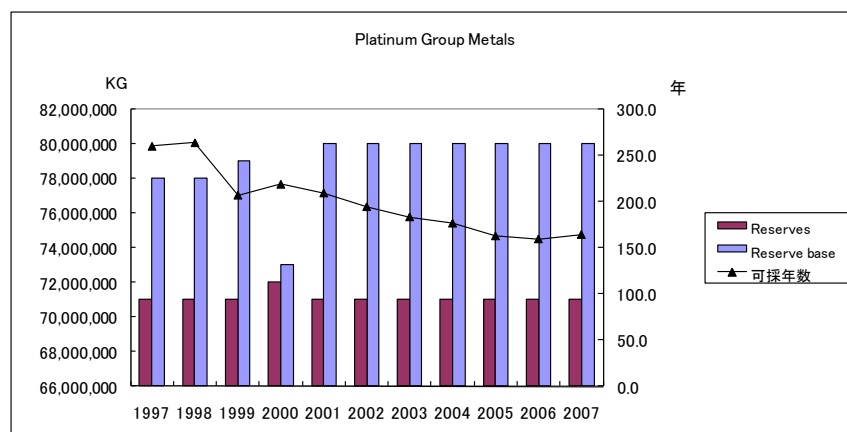


図 3.8.40 世界の白金族金属の埋蔵量と可採年数

(Mineral Commodity Summaries 2009 より作成)

白金族の産地は偏在しており、ロシア、南アフリカ、アメリカ合衆国、カナダで全体の 100% 近くを占める。

プラチナの主要用途は自動車触媒と宝飾品である（図 3.8.41）。自動車・電子工業での需要が増加している。パラジウムの需要は、プラチナと同様、自動車触媒、歯科用材料、電気・電子工業部品、宝飾品などである（図 3.8.42）。

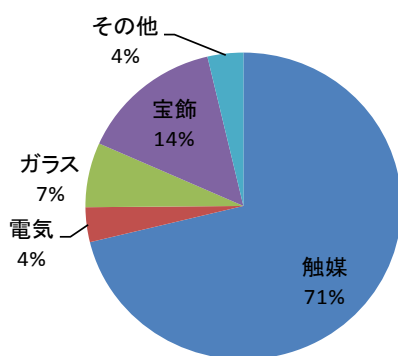


図 3.8.41 プラチナの国内需要内訳（2007 年）
需要合計 36.3 t

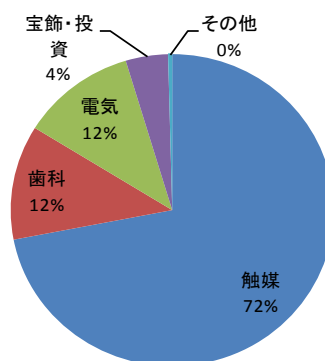


図 3.8.42 パラジウムの国内需要内訳（2007 年）
需要合計 72.8 t

財務省貿易統計、化学工業統計、触媒資源化協会資料より作成

「平成 19 年度触媒資源化実績報告書」（触媒資源化協会）によれば、触媒からの白金族回収が 14.7 t、触媒以外からの回収が 19.7 t、合計 34.4 t である。

白金族金属は非常に高価であるため、使用済み品の回収・再資源化のルートが古くから確立している。自動車用触媒のリサイクルについては、廃車の際に取り出され、リサイクル業者に持ち込まれている。石油精製、硝酸製造、シリコン製造に使用されている触媒に

については、専門メーカーがリサイクルを行っており、90%以上がリサイクルされている。電気・電子工業製品については、パソコン、サーバー、携帯電話等の基板については、他の有価金属と共に回収されている（破碎、焼却、乾留して銅製錬所に送られ、製銅炉に供給されたのち、貴金属回収工程を経てプラチナなど有価金属が回収される）。自動車の基板については、取り外しが面倒であるために回収が実施されていない。坩堝、熱電対に使用されるプラチナについては、大部分が回収され、メーカーにてリサイクルされている。宝飾品については大部分が個人に退蔵されている。歯科用材料については、使用済み品や細工過程で生じる屑は、歯科材料販売店によって回収され、リサイクルされている。

11) リチウム

リチウムの埋蔵量は4,100 t、可採年数は158.9年である（図 3.8.43）。炭酸リチウムの主要供給国はチリ、アルゼンチン、アメリカ、そして中国である。日本には原料となる資源がないために、全量を輸入に頼っており、炭酸リチウム、水酸化リチウム、塩化リチウム、金属リチウム状態で輸入されている。

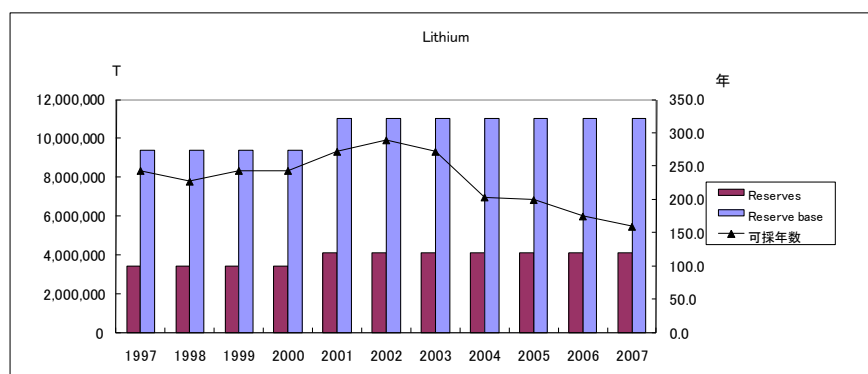


図 3.8.43 世界のリチウムの埋蔵量と可採年数

(Mineral Commodity Summaries 2009 より作成)

もっとも消費の多い炭酸リチウムの主要用途は、リチウムイオン 2 次電池の対極材と耐熱ガラス向け重要である。その他、鉄鋼の連铸用フラックス、弾性表面波フィルタなどに使用されている。臭化リチウムの用途は、大型空調用吸収式冷凍機の冷媒吸収材である。水酸化リチウムの用途は、自動車のグリース及びリチウム電池（1 次、2 次）向け原料である。金属リチウムの用途は、1 次電池の負極材としての箔と合成ゴム触媒用のブチルリチウム向け原料である。リチウム全体での需要用途の内訳を図 3.8.44 に示した。リチウムイオン 2 次電池の需要が最も多く、全体の 38%を占めている。リチウムイオン 2 次電池は小型家電の需要拡大に応じて、消費が増大しており、リチウム全体の内需を押し上げている（図 3.8.45）。

リサイクルについては、全体ではほとんど行われていない。1 次電池の負極に使用され

る箔については、製造過程で発生する工程くずが全量再利用されている。合成ゴム製造用重合触媒として使用されるブチルリチウム等の使用済み品は、塩化リチウムとして抽出され溶接用フラックス等に再利用されている。リチウムイオン電池については、コバルト酸リチウムが使用されているために、コバルトの回収が行われているが、リチウムの回収は行われていない。

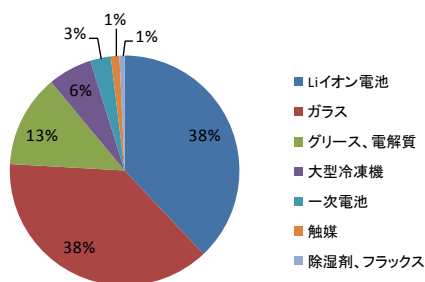


図 3.8.44 リチウムの需要用途内訳 (2007)
需要計 3,468 t
財務省貿易統計、工業レアメタルより作成

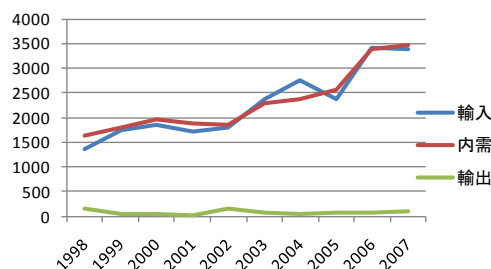


図 3.8.45 リチウムの輸出入と内需の変化 (t)
財務省貿易統計より作成

12) インジウム

インジウム単独の鉱床は存在せず、主に亜鉛鉱に随伴して産出する。亜鉛の埋蔵量から推測されるインジウムの埋蔵量は 11,000 t、可採年数は 19 年である (図 3.8.46)。日本では、国内で年間 70t 程度生産されており、他には、地金、塊、屑等の形で韓国・中国などから輸入されている。

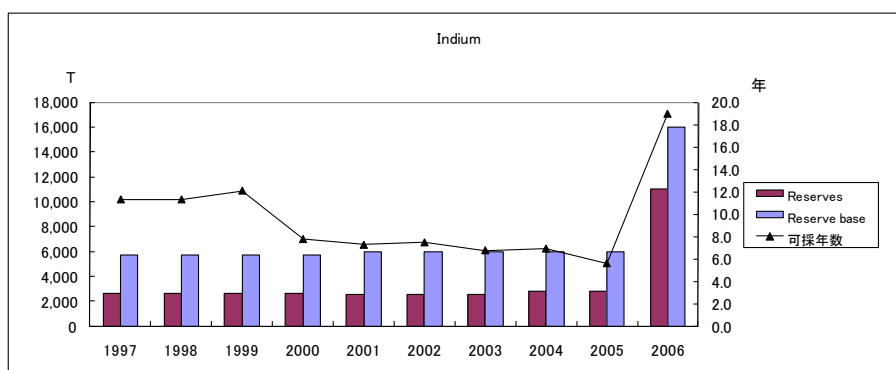


図 3.8.46 世界のインジウムの埋蔵量と可採年数
(Mineral Commodity Summaries 2009 より作成)

日本のインジウム地金の需要は、世界最大である。国内需要の 8 割以上を占める透明電極用 ITO ターゲット材の需要が、液晶ディスプレイなどの大型化と市場拡大に伴って拡大しており、インジウムの生産量を急激に増加させた。他には、化合物半導体、蛍光体、低

融点合金などの需要がある（図 3.8.47）。

使用済みスパッタリング材は、非鉄製錬会社やリサイクル会社で精錬され、ターゲット生産メーカーに戻される。これがスクラップ再生原料となっており、国内供給の 85%（2007 年では 680 t）を占めている。最終製品に含まれるインジウムは少ないため（たとえば 15 インチ液晶パネルで含有量は 0.1 g 程度である）、最終製品からのインジウム回収は行われていない。また、液晶パネルの単位面積あたりのインジウムの使用量は、技術開発の結果減少傾向にある。

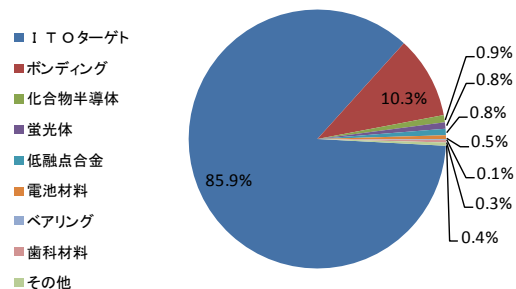


図 3.8.47 インジウムの需要用途内訳（2007 年）
需要計 963 t

■まとめ

金属資源の中から、ベースメタルでは、銅、鉛、亜鉛、錫、貴金属では金、銀、白金族金属（プラチナ、パラジウム）、レアメタルでは、リチウム、ゲルマニウム、タンタル、タングステン、インジウムの 12 種について、資源状況と国内での循環利用について調査を行った。循環利用（使用済み品の回収後の再資源化）については、銅、鉛、亜鉛、錫、金、銀、プラチナ、パラジウム、タングステンについて行われている。

3.8.5 国内における資源循環量の把握

対象元素について、国内における資源循環量を把握するため、資源の流れをⅠ原料、Ⅱ中間製品、Ⅲ最終製品、Ⅳ使用済み品の 4 つのステージにわけ、2007 年時点での資源循環量の把握を行った。「原料」は地金生産の原料を指し、中間材とは加工物、製品部品をさす。最終製品と使用済み品は市中に出る前か後かで区別されるので、製品形状としては同じ形である。各ステージを構成する要素は、図 3.8.48 に示す。

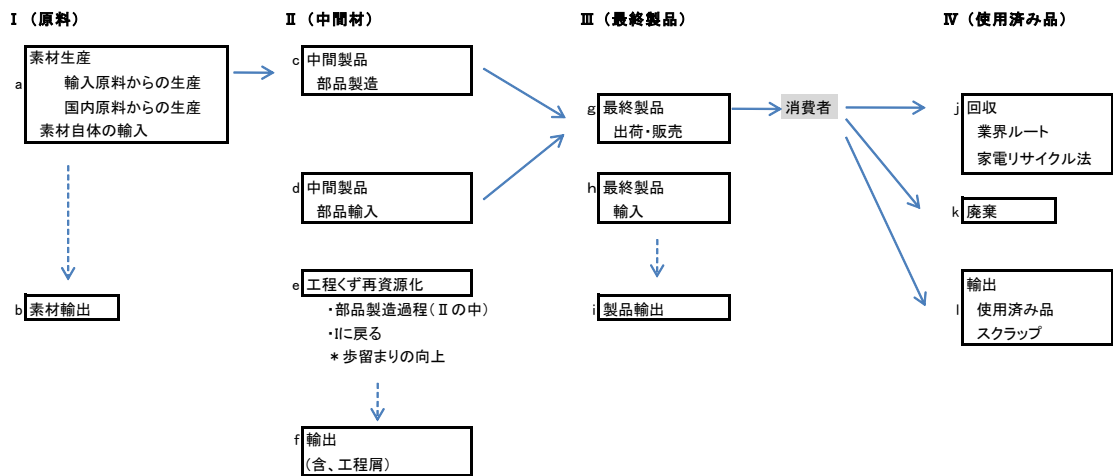


図 3.8.48 資源投入量と流通量

それぞれの元素について、それ以前の国内蓄積量等を勘案せず、2007 年の静態的なフローを想定し、国内市場規模とそれに対する循環利用率を示した。特記がない限り、純分量に対応している。

銅の資源投入量は 915 千 t である。中間材として銅線、合金等が輸出入されており、最終製品に組み込まれる前の状態では、928 千 t の銅が国内に滞留している。さらに、最終製品の輸出が輸入を上回っており、製品の状態で 73 千 t の銅が国外へ流出していることになる。国外流出分を除いた 855 千 t が銅の国内循環資源規模であり、これに対し、110 千 t の銅が回収され、原料として利用されている。資源規模に対する回収量の割合を循環利用率と仮定すると、銅の循環利用率は 12.9% である。

鉛の資源投入量は 219.4 千 t である。最終製品の輸出が輸入を上回っており、鉛の国内循環資源規模は 151.8 千 t である。市中回収は 79 千 t 行われており、鉛の循環利用率は 52% である。

亜鉛の資源投入量は 573 千 t である。最終製品の状態での輸出入の差分は 1.4 千 t であり、国内循環資源規模は 574.4 千 t である。これに対して、2 千 t の回収が行われており、亜鉛の循環利用率は 3% である。

錫の資源投入量は 29,867 t である。中間材、最終製品等の輸出入の実情は不明であるため、資源投入量を国内循環資源規模と仮定すると、これに対し 879 t の回収が行われている。錫の循環利用率は 3% である。

金の資源投入量は 219 t である。中間材、最終製品等の輸出入の実情は不明であるため、資源投入量を国内循環資源規模と仮定すると、これに対し 37 t の回収が行われている。金の循環利用率は 16.9% である。

銀の資源投入量は 2,716 t である。中間材、最終製品等の輸出入の実情は不明であるため、資源投入量を国内循環資源規模と仮定すると、これに対し 317 t の回収が行われてい

る。銀の循環利用率は 11.7%である。

タングステンの資源投入量は 6702 t である。最終製品の輸出が輸入を上回っており、1905.6 t のタングステンが製品の状態で国外へ流出している。タングステンの国内循環資源規模は 4796.4 t であり、これに対し 1179 t の使用済み品が回収され原料に利用されている。タングステンの循環利用率は、24.6%である。

タンタルの資源投入量は 695 t である。中間材、最終製品等の輸出入の実情は不明であるため、資源投入量を国内循環資源規模と仮定すると、これに対し 317 t の回収が行われている。ターゲット材製造工程で発生する残材、工程くずは 95%以上が原料として利用されているが、具体的な量は不明である。

ゲルマニウムの資源投入量は金属換算量で 65274kg である。中間材、最終製品等の輸出入の実情は不明である。ゲルマニウムの流通は不明な点が多いが、使用済み品からの回収は行われていない。

プラチナの資源投入量は 60.9 t である。最終製品の状態で、12.3 t 程度のプラチナが国外へ流出しているため、プラチナの国内循環資源規模は 48.6 t である。これに対して 19.9 t のプラチナが市中から回収されている。プラチナの循環利用率は 40.9%である。

パラジウムの資源投入量は 81.8 t である。最終製品の状態で、0.7 t 程度のパラジウムが国外へ流出しているため、パラジウムの国内循環資源規模は 81.16 t である。これに対して 18.7 t のパラジウムが市中から回収されている。パラジウムの循環利用率は 23%である。

リチウムの資源投入量は 3294 t である。最終製品では、輸出が輸入を上回っており、971.9 t のリチウムが国外へ流出しているため、リチウムの国内循環資源規模は、2322 t である。使用済みの回収は行われていない。

インジウムの資源投入量は 797 t である。最終製品の輸出が輸入を上回っており輸出分を差分すると、国内循環資源規模は 799.4 t である。使用済み品の回収は行われていないが、中間材の ITO ターゲットの工程くず 680 t が原料として使用されている。インジウムの循環利用率は 85%である。

■まとめ

それぞれの対象元素について、2007 年の統計データから市場規模を算定し、循環利用率を示した。使用済み品からの回収の循環利用率が最も高いのは、鉛（52%）であり、次いでプラチナ（40.9%）である。インジウムについては、工程内リサイクルからの再資源化による循環利用は 85%と高い。

3.8.6 回収システム(金属資源循環ポテンシャル)の検討

金属系資源循環の近未来の技術システムビジョンを構成する 7 つの技術要素のうち、ここでは③回収システムの合理化について検討を行う。なお、合理的な回収方法の検討につ

いては、小型家電からのレアメタル回収など環境省・経済産業省にて検討が別途進められていることから、ここでは廃製品の金属資源ポテンシャルに着目して検討を行う。

1) 既存研究における電気電子機器の廃棄物量推計値

既存研究によると電気電子機器の廃棄量は年間約170～250万tと推計される(表3.8.6)。このうち、リサイクルルートが確立している家電リサイクル法対象四品目は約70～100万tであり、リサイクルルートが確立していない上記以外の電気電子機器は約70～180万tとなっている。また、レアメタルリサイクルの対象として環境省・経済産業省が検討を行っている小型電気電子機器は、全体の2～3%となっている。

表 3.8.6 既存研究における電気電子機器の廃棄量推計値

	既存研究1	既存研究2	既存研究3
著者	白鳥・中村	小口・亀野ら	相澤・平井ら
対象廃棄物	廃電気・電子機器 (WEEEカテゴリ)	耐久消費財 (94品目)	小型電気電子機器 (8品目)
推計方法	出荷量＝廃棄量して推計	平均年数をもとにワイブル関数を用いて推計	出荷量と単位重量から推計
家電リサイクル法対象四品目	671,410	999,000	
調理器具	216,637	121,342	
掃除器具、洗面・浴室機器	114,288	97,800	
居間用機器、屋外設置機器	95,876	13,000	
液晶ディスプレイ、プラズマテレビ、AVセット	211,830	81,090	
	ビデオテープレコーダー	22,420	700
	DVDビデオ	1,354	10,000
	ビデオカメラ	1,237	9,000
	(小計)	(25,011)	(約20,000)
	その他の品目	56,080	
パーソナル機器(携帯電話・デジカメ・ポータブル音楽プレイヤー等)	120,559	7,518	
	デジタルカメラ	336	9,000
	フラッシュメモリープレーヤー		10,000
	HDDオーディオプレーヤー		200
	ゲーム機器		10,000
	携帯電話	4,950	7,000
	(小計)	(5,286)	(約40,000)
	その他の品目	2,232	
IT機器	155,879	179,235	
カー用品	19,095		
電動工具	11,788		
照明器具	570,160		
医療・産業機器	104,147		
他の機器(自動販売機、スロット等)	187,680		
その他(ガス・石油機器)		194,232	
計	2,479,349	1,693,216	約60,000

既存研究1：白鳥寿一，中村崇：人工鉱床構想 2－廃電気・電子機器の金属含有ポテンシャルの推移と経済的意味－，資源と素材，第4,5巻，第123号，pp.171-178（2007）

既存研究2：M. Oguchi, T. Kameya, S. Yagi, K. Urano：Product Flow Analysis of Various Consumer Durables in Japan, Resources, Conservation and Recycling, Vol.52, No.3, pp.463-480（2008）

既存研究3：相澤寛史，平井康宏，酒井伸一：日本における小型電気電子機器のリサイクル，廃棄物資源循環学会論文誌，Vol.20, No.6, pp.371-382（2009）

一方、廃電気電子機器に含まれる金属資源量の推計値を表 3.8.7 に示す。金属の種類にもよるが、廃電気電子機器に含まれる金属資源量は我が国の金属資源の国内需要量の約 1 割前後であり、我が国にとっては十分に意義のある量と言える。また、金属の種類別に見ると、銅などのベースメタルは家電四品目に多く含まれているが、小型電気電子機器に含まれる量は少なくなっている。また、金やパラジウムなどの貴金属類は小型電気電子機器に比較的多く含まれている。既存研究においても相澤ら^{※3)}は「小型電気電子機器は、廃棄物量は少ないが資源密度が高く、リサイクル対象として高いポテンシャルを秘めている」としている。

表 3.8.7 廃電気電子機器に含まれる金属資源量の推計値

著者	既存研究 1 白鳥・中村	既存研究 3 相澤・平井ら	資源循環規模 (国内需要量)
対象廃棄物	廃電気・電子機器 (WEEE)	小型電気電子機器 (8 品目)	(参考) 家電 4 品目
推計資源量 (t)			
Fe		10,000	310,000
Al		800	32,000
Cu	119,900	3,000	61,000
Pb	10,300	200	855,000
Zn	26,200		151,800
Sn	5,300	300	574,400
Au	41	4	29,867
Ag	710	20	219
Pt	1.5		2,716
Pd	3.6	3	49
Ni	5,400		81
Co	2,300		
Ga	23		
In	18		
Ge	4.0		
Ba	4,600		
Ta	123		
Sr	4,200		
Se	3.0		
Te	0.0		
Bi	108	20	
Li	276		
RE	1,281		
Sb	920		

【ベースメタル】
・家電四品目に半分
・小型電気電子機器
には少ない

【貴金属類】
・小型電気電子機器
に比較的多い。

「小型電気電子機器
は、廃棄重量は少
ないが資源密度が
高く、リサイクル対
象として高いポテン
シャルを秘めてい
る」(相澤ら)

廃電気電子機器に含まれる金属
資源量は、国内需要量の1割前後
↓
我が国にとっては
十分に意義のある量

2) 金属資源の経済的意味合い

金属資源の海外からの調達費用（金額）は、金属資源の輸入量及び輸入価格等を用いて算出すると、表 3.8.8 に示すように年間約 3 兆円と推計される。このうちベースメタル（銅、鉛、亜鉛、錫）が約 1.7 兆円、貴金属（金、銀、PGM）が約 1.2 兆円であり、レアメタル（タングステン、タンタル、ゲルマニウム、リチウム、インジウム）は 1,000 億円弱となっている。

これらの金属資源に密接に関わる産業は、製造業のうち「非鉄金属製造業」「電気機械器具製造業」「電子部品・デバイス製造業」「輸送用機械器具製造業」であり、これら 4 業種

の製造品出荷額等は合わせて約 100 兆円（2007 年）となっている。すなわち、金属資源が生み出す効果を広義に解釈すれば、これら製造業は 3 兆円の金属資源（うちレアメタルは 1000 億円弱）の特性を最大限に活用して 100 兆円の価値を生み出していると言える。

なお、参考までに 2007 年の国内総生産額は 515 兆円（名目 GDP）であり、このうち製造業の総生産額は 328 兆円である。100 兆円は我が国の GDP の約 1/5 に相当する。

表 3.8.8 金属資源の海外からの調達費用の推計（2007 年）

鉱種	資源調達費用（試算値）	計
銅	14,000 億円	【ベースメタル】 約 1.7 兆円
鉛	490 億円	
亜鉛	1,600 億円	
錫	600 億円	
金	4,200 億円	【貴金属】 約 1.2 兆円
銀	2,200 億円	
白金族	5,700 億円	
タングステン	370 億円	【レアメタル】 約 1000 億円弱
タンタル	110 億円	
ゲルマニウム	70 億円	
リチウム	110 億円	
インジウム	260 億円	
計	30,000 億円	

※金属資源の輸入量及び輸入価格等を用いて算出

資料：「鉱物資源マテリアルフロー2008」「工業レアメタル 2007」「メタルマイニング・データブック 2006」

また、表 3.8.7 に示した廃電気電子機器に含まれる金属資源量を金額に換算すると、表 3.8.9 のとおりとなる。廃電気電子製品に含まれる金属資源価値は約 3,700 億円程度であり、特にこのうち貴金属類（金、銀）とベースメタルとしての銅の資源価値が高く、これら 3 鉱種を合わせると約 2,700 億円程度となる。資源循環規模（国内需要量）と比較すると、廃電気電子製品に含まれる金属資源（ベースメタル、貴金属類）はその 20% 近くの価値を占めている。廃電気電子製品を全般的に対象とするような資源循環システムの構築は金属資源の資源セキュリティの面からも十分に意義があると考えられる。例えば、産業用・事業用の廃電気電子製品のリサイクルルートを確立し、そこに一般家庭用の廃電気電子製品の回収ルートを乗せていくなどの方法が考えられる。

小型電気電子機器だけを見ると、貴金属類（金、銀、パラジウム）の価値が合わせて約 200 億円程度と高くなっている。少量の廃棄物から効率的に貴金属類を回収するのであれば小型電気電子機器はリサイクルの対象として考えられる。また、ベースメタルである銅は使用量が少ないことから約 20 億円程度となる。さらに、資源循環規模（国内需要量）と比較すると、小型電気電子機器に含まれる金属類の価値は数%程度と非常に小さくなっており、小型電気電子機器に特化した回収システムの構築は、資源セキュリティ面からは、その効果は限定的と考えられる。

表 3.8.9 廃電気電子機器に含まれる金属資源の経済的価値

		既存研究 1	既存研究 3		資源循環規模 (国内需要量)	金属 価格 出典
著者		白鳥・中村	相澤・平井ら			
対象廃棄物		廃電気・電子機器 (WEEE)	小型電気電子機器 (8品目)	(参考) 家電4品目		
金属 価格 (十億円)	Fe		0.2	5.0		***
	Al		0.2	6.4		**
	Cu	77.9	2.0	39.7	555.8	**
	Pb	1.9	0.0		27.3	**
	Zn	5.0			109.1	**
	Sn	8.5	0.5		47.8	**
	Au	151.7	14.8		810.3	**
	Ag	39.1	1.1		149.4	**
	Pt	7.1			230.3	*
	Pd	5.4	4.5		121.5	*
	Ni	12.4				*
	Co	10.6				*
	Ga	1.6				*
	In	0.1			5.4	*
	Ge	0.6				*
	Ba	0.0				*
	Ta	19.7			111.2	*
	Sr	23.5				*
	Se	0.0				*
	Te					*
	Bi	0.2	0.0			*
	Li	0.8			6.7	*
	RE	0.0				*
	Sb	0.9				*
	計		366.8	23.2	51.0	2,174.8

* 工業レアメタル No.126 (2010 年 6 月価格)

** U.S. Geological Survey (2010 年価格速報値)

*** U.S. Geological Survey (2009 年価格)

**** IMF 一次産品価格データ (2010 年価格平均値)

為替相場 2009 年；総務省統計局：第六十回日本統計年鑑 (95 円/\$)

2010 年；財務省貿易統計 (税関長公示レートの年平均) (88.1 円/\$)

■ まとめ

- ・ 廃電気電子製品に含まれる金属資源価値は約 3,700 億円程度であり、特にこのうち貴金属類と銅の資源価値が高い。
- ・ 廃電気電子製品に含まれる金属資源の価値は資源循環規模 (国内需要量) の 20% 近くを有しており、廃電気電子製品を全般的に対象とするような資源循環システムの構築は金属資源の資源セキュリティの面からも十分に意義があると考えられる。
- ・ 少量の廃棄物から効率的に貴金属類を回収するのであれば小型電気電子機器はリサイクルの対象として考えられる。ただし、その量は数%程度であり、小型電気電子機器に特化した回収システムの構築は、資源セキュリティ面からは、その効果は限定的と考えられる。

3) 各工程における各種金属の資源循環ポテンシャル

電気電子機器に使用されているベースメタル、レアメタル等は我が国の産業政策上、非常に重要な物質である。今後とも資源価格の上昇は予想され、金属資源のほとんどを輸入に依存していることから、資源リスクも大きい。ただし、将来的には、①高機能化が進み、付加価値の高い金属の使用量が増加、②技術進歩による省資源化が進み、付加価値の高い金属の使用量が減少という、相反するベクトルがあり、廃電気電子機器等に含まれる金属資源量がどのように推移するかは予測が難しい。

各種資料、資源状況を俯瞰した結果、小型電気電子機器を含めて廃電気電子機器の回収を進めることは、銅、金、銀、タンタルなどについては一定程度は有効と考えられた。特に、廃電気電子製品を全般的に対象とするような資源循環システムの構築は金属資源の資源セキュリティの面からも十分に意義があると考えられた。小型電気電子機器のみを対象としたリサイクルは、少量の廃棄物から効率的に貴金属類を回収するのであれば有効であるが、資源セキュリティ面からはその効果は限定的と考えられた。電気電子機器以外の用途に対しても相当量の金属資源が使用されており、金属資源ごとに資源循環効率を高めるための対象分野を見定めていく必要がある。

本研究のこれまでの検討では、13 元素の資源循環ポテンシャル（各要素技術で扱うことができる最大資源量）について、詳細なマテリアルフローに基づく算出を試みた。しかし、マテリアルフローの精度を上げることにより、かえって、元素間のフローの比較が困難となった。そこで、各元素の資源循環ポテンシャルを比較するためだけに、図 3.8.49 に示すようにマテリアルフローの単純化を行った。以下に各要素技術で扱う資源循環ポテンシャルの考え方を述べる。ここで基準としたのが日本の各金属の生産能力である。主として海外から鉱石を輸入して製錬所で金属を生産することを想定しているが、元素によっては、中間品からの再生が主体となるものもある。いずれにせよ、資源をしかるべき生産拠点に持ち込めば、自国で生産することができる量を示している。また、以下の各工程における資源ポテンシャルは、各金属における自国の生産能力を 1 とした相対量で表した。次に求めたのが工程内リサイクル対象量である。これは、我が国で生産された金属のうち自国向けの分(多くの金属は大部分が自国向け)と中間材としての輸入量の和として示した。最終製品が製造される過程において、製造業間で流通する金属量を意味する。3 つ目が、国内市場に流通する製品中の金属量である。各元素について、日本で製造した最終製品の国内出荷量と製品輸入量の和として示した。「長寿命設計・易リサイクル設計」の対象となる量は、究極には製品の国内流通量と同じである。また、現実的ではないが、「回収システムの合理化」の対象となる量も究極に言えば国内流通量と同じあり、100%回収ができれば、「高度選別・抽出」の対象となる量も、国内流通量ということになる。

一方、国内流通量のうち、既に再生資源としてリサイクルされるものの割合を、現行のリサイクル率として示した。また、我が国の金属生産規模に対する再生資源量を資源自給率として示した。現時点で、既に有効に再資源化されているものは、今回、備蓄対象から

外したため、「国内に流通する製品の金属量－資源自給率」が現在の備蓄ポテンシャルということになる。なお、現時点で算出が難しい「国際資源循環システム」「非鉄スラグの有効利用・資源循環」は、この場では集計から外した。



図 3.8.49 各工程における各種金属の資源循環ポテンシャル

集計の結果が図 3.8.49 下の表である。当初、13 元素についての評価を行う予定であったが、元素間の比較が可能な統計データが得られない、あるいは流通量に比べ年変動が大きい等の理由から、錫、ゲルマニウム、プラチナ、パラジウムは評価を省略し、9 元素を対象とした。①工程内リサイクルのポテンシャル(A)が 1 以上の元素は、日本で金属を生産しこれを輸出する量よりも、材料として輸入する量の方が多い金属である。②③④の欄の(B)の数値が 1 以下の金属は、金属生産量に比べ国内に出荷された製品中の金属の量の方が少ない金属である。多くが製品として輸出されているか、工程内で扱われる金属の極一部しか製品に含まれていない場合である。⑥資源備蓄ポテンシャル(C)が 1 以上の元素は、自国の金属生産量に比べ輸入製品として国内を流通する量が多く、一部がリサイクルされても、現状では多くが退蔵するか散逸あるいは廃棄されており、備蓄ポテンシャルが非常に大きくなっている例である。

次に、A, B, C の数値を使って、都市鉱山開発と工程内リサイクルの量的インパクト比 (A/B) や、現状でのリサイクル（都市鉱山開発）の進捗状況 (C/B) の指標化を提案し、定量的に示した。各元素の工程別資源循環ポテンシャルを評価した結果を表 3.8.10 に示す。

左の欄は、A/B、つまり工程内リサイクル対象量を最終製品としての国内流通量で除した数値が高い順に示してある。中間産物や最終製品の輸出入を考えなければ、中間産物の一部が最終製品となるので、1 よりやや大きくなるのが普通である。特にインジウムが特徴的であるが、この数値が大きい元素は、使用済み製品中からの回収よりも、工程内リサイクルの方が、量的なインパクトが大きいことを示している。一方、右欄は、C/B、つまり、最終製品としての国内流通量のうち、2008 年現在では再利用されていない割合を示している。上位 3 元素は、使用済み製品からのリサイクルが現在は事実上ゼロであることを示している。このうちインジウムについては、製品中の含有量が著しく低い(A/B=7.64)ことから、今後とも製品中からの回収の優先順位が高くはならないであろう。また、タンタル、リチウムについては、A/B が 1.5 以上と工程内リサイクルの効果が高い元素であるが、製品中にも相応の量が含まれており、技術的困難度からリサイクルが進んでいないケースである。本研究においては、まずは、④高度選別・抽出の技術開発により C/B の引き下げの努力を行い、さらに残った分について、どの程度⑥資源備蓄できるかの算出が課題となる。

表 3.8.10 各工程別資源循環ポテンシャルの特徴

都市鉱山開発より工程内リサイクルの量的インパクトが高い元素		現状でリサイクル(都市鉱山開発)が進んでいない元素	
	A/B		C/B
インジウム	7.64	タンタル	1.00
タンタル	1.86	リチウム	1.00
タングステン	1.59	インジウム	1.00
リチウム	1.51	亜鉛	0.93
金	1.38	銅	0.89
亜鉛	1.21	銀	0.87
鉛	1.02	タングステン	0.71
銅	0.99	鉛	0.56
銀	0.94	金	0.49

4) 廃製品に含まれる金属資源ポテンシャルのまとめ

- 廃電気電子機器に使用されているベースメタル、レアメタル等は我が国の産業政策上、非常に重要な物質である。
- 特に、今後とも資源価格の上昇は予想され、金属資源のほとんどを輸入に依存していることから、資源リスクも大きい。
- なお、将来的には、
 - ①高機能化が進み、付加価値の高い金属の使用量が増加
 - ②技術進歩による省資源化が進み、付加価値の高い金属の使用量が減少

という、相反するベクトルがあり、廃電気電子機器等に含まれる金属資源量がどのように推移するかは予測が難しい。

- 小型電気電子機器を含めて廃電気電子機器の回収を進めることは、銅、金、銀、タンタルなどについては一定程度は有効と考えられる。
- 特に、廃電気電子製品を全般的に対象とするような資源循環システムの構築は金属資源の資源セキュリティの面からも十分に意義があると考えられる。
- 小型電気電子機器のみを対象としたリサイクルは、少量の廃棄物から効率的に貴金属類を回収するのであれば有効であるが、資源セキュリティ面からはその効果は限定的と考えられる。
- しかし、電気電子機器以外の用途に対しても相当量の金属資源が使用されており、金属資源ごとに資源循環効率を高めるための対象分野を見定めていく必要がある。
- 全製品を通じて、工程内リサイクルの効果が極めて高い元素としてインジウムが挙げられ、タンタル、タングステン、リチウムなども比較的效果が高い。
- 一方、タンタル、リチウムなどは、廃製品からの回収(所謂、都市鉱山開発)がほとんど進んでいないため、国内蓄積量が多いと推測され、高度選別・抽出の技術開発によるリサイクルの促進が期待される。

3.8.7 都市鉱山開発技術(中間処理技術)の検討

廃電気電子機器等を都市鉱山として利用するには、安定的に一定量を確保してゆくことが不可欠であり、まずは、市中から廃製品を回収する社会システムの構築が必要である。これについては、環境省あるいは経済産業省主導の下、秋田県、茨城県、東京都、名古屋市、京都市、福岡県、水俣市の 7 モデル地域が制定されて、社会実験が進められている。まだ、安定した量の確保をするには至っていないが、問題点や課題などが抽出できており、今後の展開に期待が持たれるところである。

一方、廃電気電子機器等を大量に収集できれば、そこに含有する金属を漏れなく資源化できるわけではない。循環資源として利用するには、市場流通性のある原料にして、生産現場に安定供給することが必要である。これを実現するための技術が、廃棄物を解体・粉碎、粒径分離、成分分離する中間処理技術である(図 3.8.50 参照)。中間処理工程では、廃製品を市場に流通可能な粉体原料とするまでの工程を担い、これが、低コスト、低環境負荷に達成できて初めて、原料は有価物として様々なリサイクル工程に流通し、循環資源としての利用が実現する。一部の小型電気電子機器等に限れば、これらには多くの貴金属が含有するため、高度な中間処理工程を施さなくても非鉄製錬所で効率良く貴金属や一部のレアメタルを回収することができる。しかし、現状では、非鉄製錬で回収できるレアメタルは限定的であり、各種レアメタルを効率的に回収するためには、中間処理工程でこれらを事前に分離しておくことが必要となる(図 3.8.51 参照)。先の 7 モデル地域における社会実験においても、中間処理によりレアメタルの選別が試みられた。しかし、従来型の中間

処理技術ではその達成は困難であることが明らかとなり、不特定多数の廃製品からレアメタルを精度良く選別・回収するための技術開発が急務であることが強く認識された。

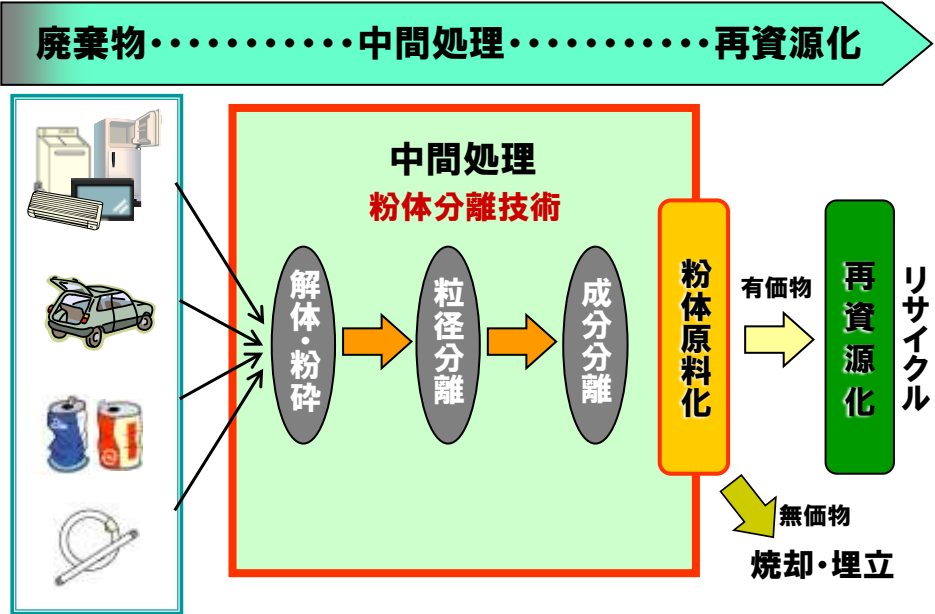


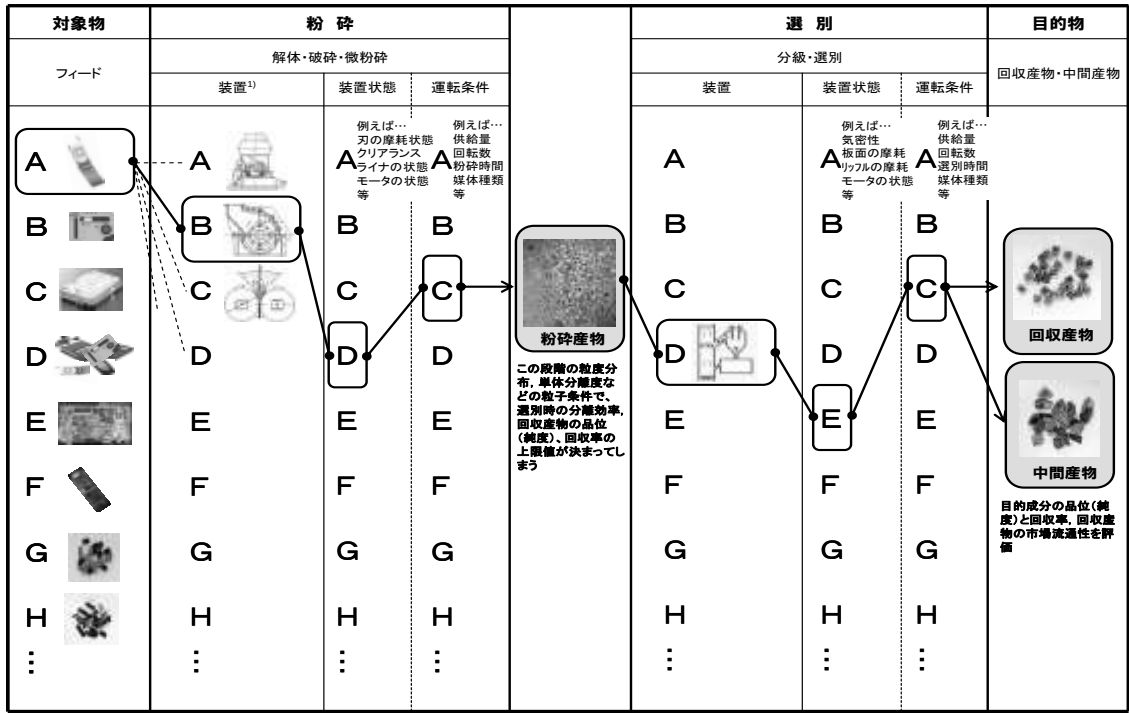
図 3.8.50 廃製品を粉体原料化するための中間処理工程



図 3.8.51 レアメタルを回収するための粒子分離(中間処理)工程の役割

従来の中間処理工程では、廃製品を人手で解体したり、簡単な粉砕後、鉄、アルミ、ガ

ラス、プラスチック等を主対象としたマクロな選別が主体であった。しかしながら、製品中でレアメタルは、粉末状、めっき状、合金の一部など、ミクロな成分として微量ずつ使用されており、その回収には、高度な選別装置と綿密な選別プロセスの設計が必要となる。それは、扱う廃製品、粉砕機・選別機の種類や処理条件により、数億通りもの選別パターンから廃製品毎に有効な数パターンを決める作業となり(図 3.8.52 参照)、データベースの構築や、装置の AI 制御など、中間処理技術の高度化には多くの課題が残されている。



1) 先端粉砕技術と応用 (NGT) より図面を引用

図 3.8.52 小型電気電子機器のリサイクルの中間処理プロセスで想定される選択肢の一例

■まとめ

- 都市鉱山の開発には、安定的に量を確保するため、まずは、廃製品を回収する社会システムの確立が必要である。
- 廃製品を安定的に確保できても、そこに含有する金属を直ちに資源化できるわけではない。循環資源として利用するには、市場流通性のある粉体原料にするための中間処理技術の確立が必要である。
- マクロな選別が主体であった従来の中間処理工程では、廃製品中のレアメタルを回収することは困難であり、高度な選別装置と綿密な選別プロセスの設計が必要となる。今後、データベースの構築や、装置の AI 制御など、中間処理技術の高度化には多くの課題が残されている。

3.8.8 都市鉱山開発技術(備蓄技術)の検討

金属系資源循環の近未来の技術システムビジョンを構成する7つの技術要素のうち、ここでは⑥資源備蓄について検討を行う。

1) 資源備蓄の考え方

化石燃料と同様に、資源を持たない我が国にとって、供給が不安定になる事態に備えた金属資源の備蓄は重要な戦略となっている。そのため、レアメタルの国家備蓄が行われており、今後とも戦略的に進められると考えられる。

この国家備蓄と並行して、現状の再資源化費用や市場性からは金属資源の抽出は困難であるものの、将来的に金属価値の上昇や技術の進歩によって有用となりうる循環資源を対象とした資源備蓄を行うことが、都市鉱山や人工鉱床構想としてこれまで白鳥・中村ら^{※4)}によって提唱されている。

特に、金属については資源枯渇の問題とともに、金属価格が経済や市場動向に大きく左右されるという問題がある。図 3.8.53 に銅および金の価格の推移を示すが、銅の価格は2004年頃から世界的に高騰し、金融バブルの崩壊によって大きく下落するものの、再び上昇に転じている。金の価格は金融バブル崩壊に与える影響も小さく、上昇傾向にある。インジウムなど他の金属種についても総じて価格上昇の傾向が見られる。将来の金属価格の動向予測は非常に難しいものではあるが、長期的には需要の拡大等によって上昇するものと考えられる。

そのため、現状においてはコストが合わない循環資源等についても、将来の金属価格の上昇や技術開発の達成が図られるまで備蓄を行うことによって、採算性が大きく向上する場合も可能性としては考えられる。

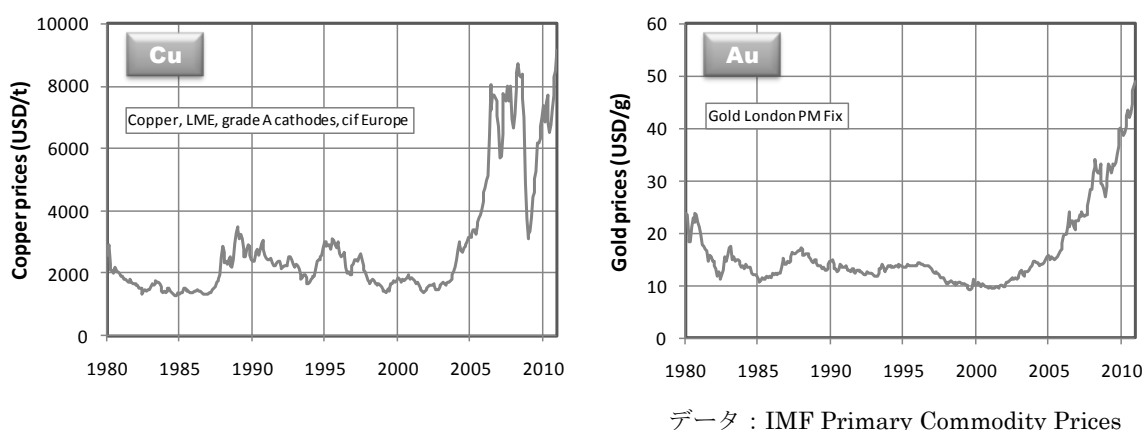


図 3.8.53 金属資源価格の推移（銅、金）

金属資源循環を考える際、現状においては有価物とはみなされない中～低濃度の中間物については、備蓄（一時保管）を行い、将来的に技術開発や資源需給の段階に応じて金属

資源の抽出を行う方法が考えられる。具体的には図 3.7.54 に示すとおり、希少金属など戦略的金属を含む循環資源であって経済規模の観点から現状においては有価物とならないものについて、それらの濃縮物が一定量たまるまでドラム缶等で一時保管することが考えられる。また、現状において十分な抽出技術がない循環資源については、一箇所に埋立を行い、ある程度の長期間の保管の後に、技術開発が進んだ段階で資源化を行う方法が考えられる。

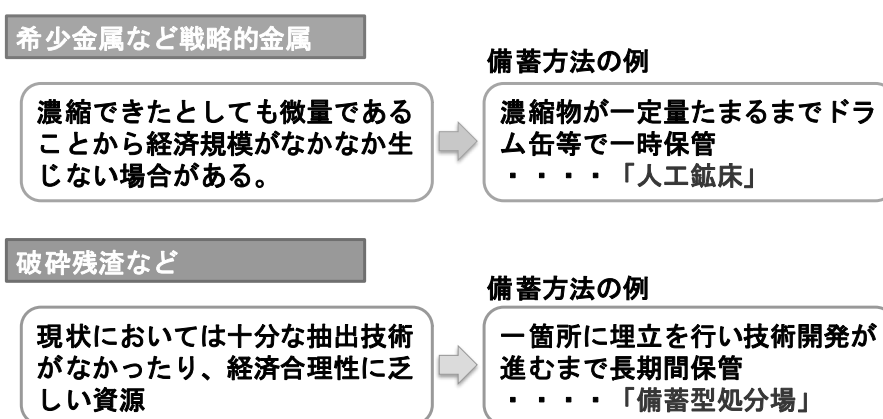


図 3.8.54 資源備蓄の考え方

（参考）レアメタルの国家備蓄について

我が国においてはレアメタルの安定供給に関するリスクを軽減するために、民間における備蓄の拡充努力と併せて国家備蓄の実施を図ることが必要との観点から、1983 年度から国家備蓄制度が開始されている。^{※5)}

また、このほか、プラチナ、レアアース、ニオブ、タンタル、ストロンチウムが「すぐに備蓄が必要ではないが、注視し検討を要する鉱種」とされている。

○レアメタル国家備蓄制度の全体スキーム

備蓄形態：国家備蓄及び民間備蓄

対象鉱種：ニッケル、クロム、タングステン、モリブデン、コバルト、マンガン、バナジウム、インジウム、ガリウム（インジウム、ガリウムは 2009 年より追加）

備蓄目標：国内消費量の 60 日分（国家備蓄：42 日分、民間備蓄：18 日分）

保管：国家備蓄は、民間施設を借り上げ保管

○高萩国家備蓄倉庫の概要

倉庫所在地：茨城県高萩市（手綱工業団地内）

面積：約 37,000m²

概要 : 倉庫棟 (3 棟)、屋根付きヤード (41 ブロック)
トラックスケールにより検量して搬出が可能

※ (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構：我が国におけるレアメタル備蓄事業の歴史（備蓄制度の背景と歴史），金属資源レポート 2005.3, pp.53-62 (2005)

2) 備蓄の対象

高度選別を経た産物は、濃度の低いものから高いものまで様々な形態となっている。そのうち高濃度でまとまった量のあるものは有価物としてすぐに市場に流通する。(例えば、貴金属類や鉄、アルミなどのベースメタル)。一方で、低濃度で量の少ないものは最終処分される。

そのため、備蓄の対象となるのは、電子部品など対象金属濃度が高くて（高品位で）その量が少量のもの、もしくは破碎残渣など対象金属濃度が低くて（低品位で）その量が多量のものと考えられる。

高度選別を経た産物について、対象金属に品位及び存在量に基づきリサイクル特性を分類すると図 3.8.55 の通りとなり、高品位・少量物と低品位・多量物が備蓄の対象となると考えられる。

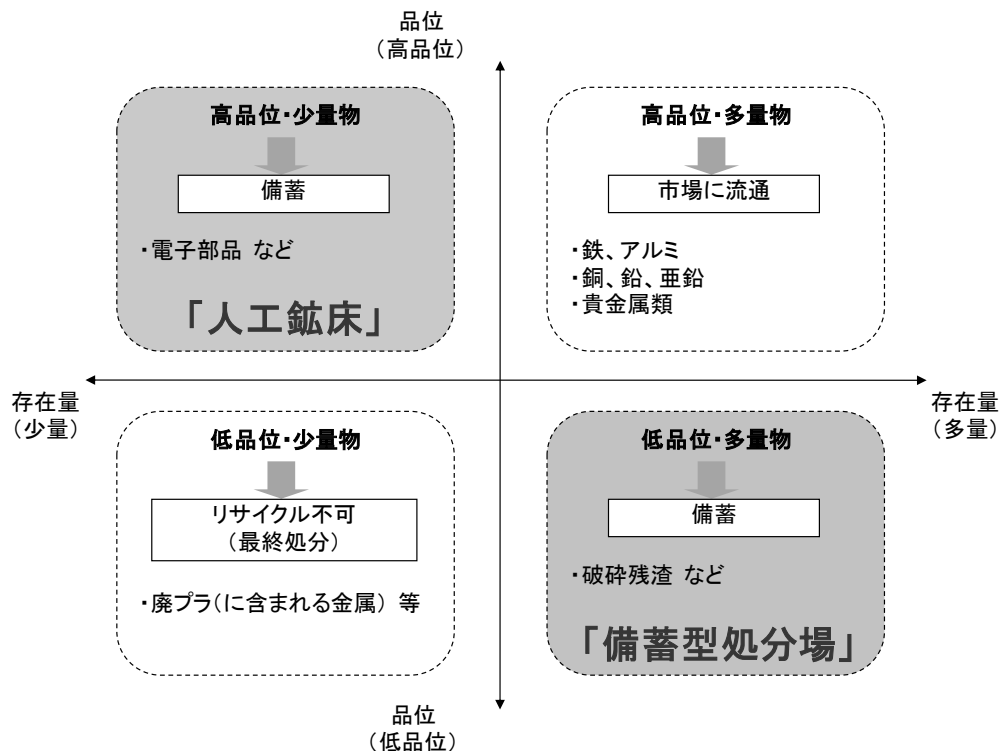


図 3.8.55 備蓄の対象の考え方

3) 備蓄方法

備蓄の方法としては、倉庫を活用する方法と最終処分場跡地を活用する方法、備蓄型処分場として最終処分場そのものを活用する方法が考えられる。それぞれの特徴の比較を表 3.8.11 に示す。

①倉庫

倉庫を活用する場合は、高品位少量物を対象とした比較的短期間の保管を想定し、規模による経済性の向上を期待したり、あるいは短期的な資源価格の変動の調整を行うことが考えられる。この場合、備蓄資源の管理等が行いやすいものの、倉庫賃料や保管容器などコストがやや高くなるものと考えられる。

②最終処分場跡地（上部利用）

上述したとおり、倉庫での備蓄の場合、コストがやや高くなると考えられる。そこで、比較的短期間であってもなるべくコストを抑えた備蓄方法として、最終処分場跡地の上部利用を提案する。最終処分場の跡地は全国に立地しているものの、立地場所が山間であったり、跡地の安定化が進まないなどの理由から、その跡地利用は進んでいないのが現状である。そこで、こうした使われていない跡地を備蓄用地として活用することが考えられる。利用用途のない跡地であるため、保有自治体等の理解が得られれば安価あるいは場合によっては無償によっての使用も可能である。また、保管容器を土のう等とすることによってもコスト低減を図ることができる。また、最終処分場が必ずしも廃止されている必要はなく、埋立終了後で廃止前の処分場の上部利用も可能となる。

③備蓄型処分場

備蓄型処分場は、長期的視点の元で将来に資源価値が生じる可能性があるものを、最終処分場に埋め立てておくことである。この場合、備蓄専用の処分場とする考え方と、通常管理型処分場（もしくは一般廃棄物最終処分場）の一部を用いて区分埋立とする方法がある。

将来の金属価格上昇や技術開発等を期待した資源備蓄のリスクは、「備蓄したものの将来にわたって資源価値は生じず廃棄物として処分せざるを得なくなる」ことである。このリスクを回避できるのが、備蓄型処分場のメリットである。資源価値が生じるのであれば掘り返して金属抽出をするが、資源価値が生じなかった場合はそのままにしておけば良い。ただし、資源価値が生じる可能性がある間は、当該処分場の跡地利用に制約が生じる可能性はある。また、埋立処分場内部はその埋立状況によっては還元雰囲気になったり、腐食が生じる場合があり、金属資源の性状が変化する可能性があることに注意を要する。

表 3.8.11 備蓄方法の比較

	備蓄方法 1	備蓄方法 2	備蓄方法 3
備蓄場所	倉庫	処分場跡地（上部利用）	備蓄型処分場(区分埋立)
対象物の種類	高品位少量物 (電子部品など)	高品位少量物、低品位多量物のいずれも可能	低品位多量物 (破碎残渣など)
荷姿	ドラム缶	耐候性大型土のう	バラ
備蓄の目的	<短中期間の保管> ①集約による資源価値の向上 ②資源価格の変動の吸収 ③技術開発の猶予	同左	<長期間の保管> ・技術開発の猶予
備蓄期間	目的①②： 3～10 年程度 目的③： 10～20 年程度	同左	半永久 (現実的には 15～30 年程度)
メリット	・施錠等が可能なため、厳重に保管可能。 ・短期間の賃借が可能	・全国各地にある。 ・安価（もしくは無償）で使用できる可能性あり	・再利用されない場合はそのまま埋立処分可能(追加費用が生じない)
デメリット	・費用がやや高い	・長期の保管にあたっては容器の破損を多少容認する必要がある（保証期間は 3 年程度） ・セキュリティ面で懸念	・処分場の跡地利用が遅れる。 ・埋立環境下において金属の性状が変わる可能性あり（腐食、溶出）
備考	・新たな固定資産（土地、建屋）を保有することは現実的ではないため、賃借を想定。	・廃止前処分場の跡地の先行利用も可能	

4) 備蓄費用

備蓄方法 1（倉庫に保管）、備蓄方法 2（処分場跡地に保管（上部利用））、備蓄方法 3（備蓄型処分場（区分埋立））の 3 つの方法を対象として、備蓄費用を試行的に試算した。

備蓄費用の試算結果は表 3.8.12 のとおりである。倉庫での備蓄は、保管量や保管期間によって差があるものの倉庫使用量が高くなるため、6 万円～23 万円／ m^3 と高くなった。処分場跡地（上部利用）の場合は、空間使用量が無償と設定したこともあり約 7 千円/ m^3 と最も安価となった。また、備蓄型処分場の場合は、管理型処分と同等の 2 万～3.5 万円／ m^3 となった。

あくまでも試行的な試算結果であるが、備蓄の目的や期間、備蓄量に応じて、適切な備蓄方法を選択する必要があることが示唆された。

なお、備蓄費用の試算条件については、以下の①～⑥に示す。

①保管量の設定

倉庫に保管する場合は、倉庫の規模として小規模な倉庫（面積 100 m^2 ）と比較的大きな倉庫（3000 m^2 ）の 2 種類を想定した。これは後に示す図 3.8.56 に示した規模の範囲を考

慮して設定したものである。倉庫に保管する場合はドラム缶による保管とし、パレット1枚に4本のドラム缶を積載し、これを3段重ねにして保管するとした。このときに、保管量を優先して倉庫の1フロアに最大限詰めこむ場合と、種類ごとにこまめに出し入れをするなど区画を決めてロット管理をする場合（すなわち、フォークリフトの通路を確保する場合）との2種類を想定し、100m²の倉庫ではドラム缶400～600本（80～120m³）、3000m²の倉庫ではドラム缶13000～20000本（2600～4000m³）と想定した。ドラム缶の格納のイメージを表3.8.13、表3.8.14に示す。

また、処分場跡地及び備蓄型処分場に保管する場合は、保管量は処分場の大きさに依存するものの、ここでは仮に10000m³と設定した。保管量がこれより大きくなる場合でも、全体の費用は比例して大きくなるため、備蓄単価として見るのであれば一定と考えられる。

表 3.8.12 備蓄費用の試算結果

	備蓄方法 1				備蓄方法 2		備蓄方法 3	
対象物の種類	高品位少量物				高品位少量物、低品位多量物		低品位多量物	
備蓄場所	倉庫（100m ² ）		倉庫（3000m ² ）		処分場跡地（上部利用）		備蓄型処分場	
荷姿	ドラム缶		ドラム缶		耐候性大型土のう		バラ	
保管量	400本 80m ³	600本 120m ³	13000本 2600m ³	20000本 4000m ³	10000袋 10000m ³		10000m ³	
空間使用量	80～240万円／年		1700～5800万円／年				200～350百万円	
	※倉庫賃料（実勢価格）				※無償と仮定		※埋立費用（2～3.5万円/m ³ ）	
保管期間	5年	5年	15年	15年	最大15年程度		半永久	
	※比較的短期間		※中長期間		※中長期間（容器の耐久性による）		※長期間	
容器	120万円	180万円	3900万円	6000万円	6700万円			
	※中古ドラム缶＋木製パレット				※耐候性大型土のう			
のべ作業日数	2.5日	3.8日	81日	125日	104日			
	※3分/パレット1枚				※5分／フレコン1袋			
労務費	7.5万円	11万円	244万円	375万円	448万円			
	※特殊作業員×1名、普通作業員×1名				※特殊作業員×1名、普通作業員×2名			
機械賃料	1.3万円	1.9万円	41万円	63万円	125万円			
	※フォークリフト				※クレーン装置付トラック			
合計	5.3～14百万円		297～934百万円		73百万円		200～350百万円	
保管単価	66～116千円／m ³		114～234千円／m ³		7.3千円／m ³		20～35千円／m ³	
（比重1.5と仮定）	44～77千円／t		76～156千円／t		4.8千円／t		13～23千円／t	
備考	運搬費用は含まない。 再利用時の費用は含まない。 再利用されない場合は、別途処分費用が必要。 倉庫賃料は場所によって大きく異なる。 仮に空間使用量が0円／年とすると、保管単価は11千円／t				運搬費用は含まない。 再利用時の費用は含まない。 再利用されない場合は、別途処分費用が必要。		運搬費用は含まない。 再利用時の費用は含まない。 再利用されない場合でも、追加的な費用は生じない。	

②空間使用量の設定

倉庫での保管は短期間の保管をイメージしており、あくまでも一時的な保管と考えられることから、倉庫は賃借と想定した。倉庫賃料は、その立地場所、面積、設備（冷凍、冷蔵、常温など）によって、おおよそ図3.8.56とおりととなる。

処分場跡地に保管する場合は、土地使用料等を一概に決定することは難しいものの、有効な活用用途が当面はない処分場跡地を使用することを前提とし、最終処分場所有者（市町村等）の理解が得られることを仮定して、空間使用量は無償と想定した。

表 3.8.13 ドラム缶の格納イメージ（倉庫面積が 100m² の場合）

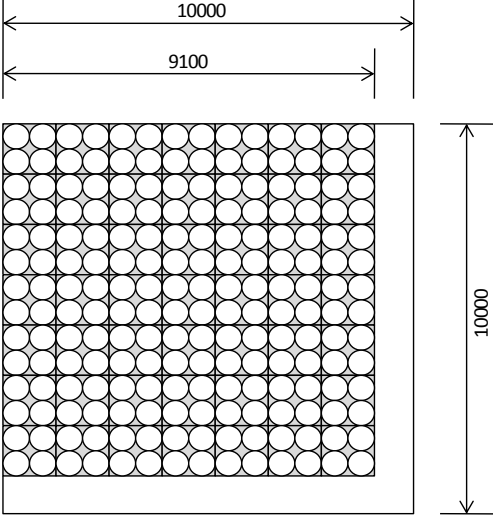
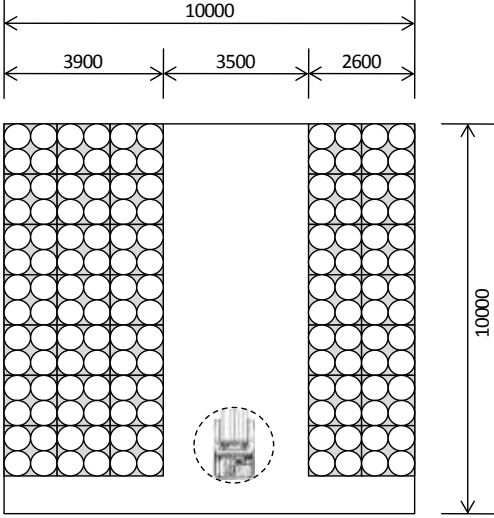
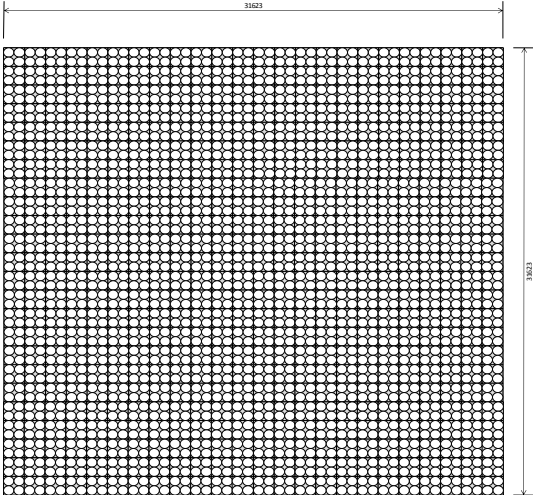
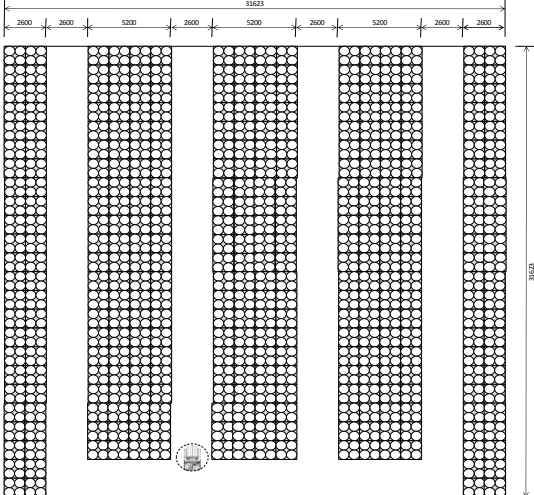
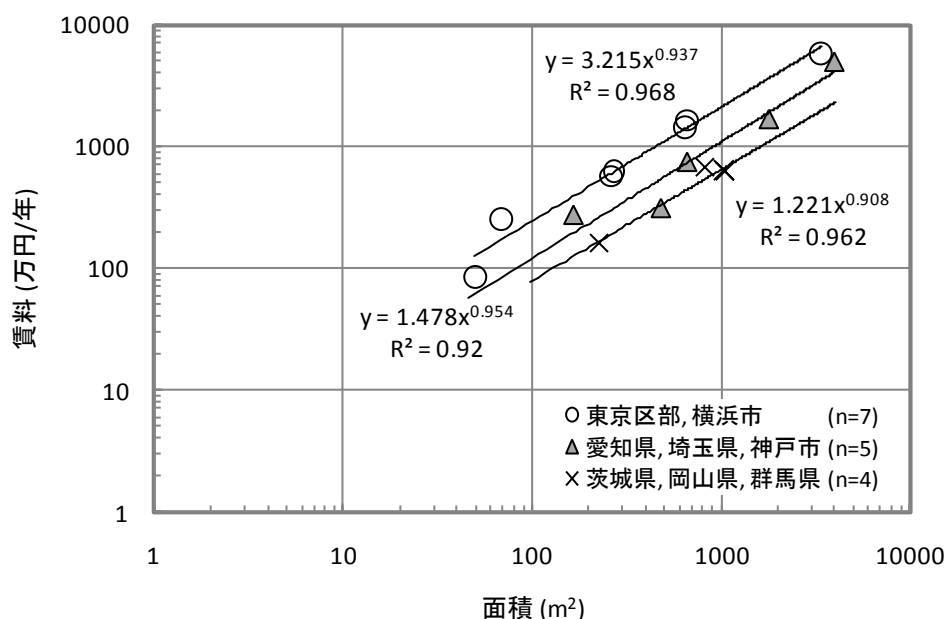
保管量を優先する場合	区画を決めてロット管理を優先する場合
パレット（1300×1300、4 本積）49 枚×3 段重 ＝ドラム缶 計 588 本	パレット（1300×1300、4 本積）35 枚×3 段重 ＝ドラム缶 計 420 本
	

表 3.8.14 ドラム缶の格納イメージ（倉庫面積が 3000m²（1000m³×3 階建）の場合）

保管量を優先する場合	区画を決めてロット管理を優先する場合
パレット（1300×1300、4 本積）576 枚×3 段重×3 階＝ドラム缶 計 20736 本	パレット（1300×1300、4 本積）360 枚×3 段重×3 階＝ドラム缶 計 12960 本
	



Web 上の実勢価格（2011 年 1 月）を元に整理、倉庫の種類は「常温」

図 3.8.56 倉庫の面積と賃料の関係

備蓄型処分場に保管する場合の空間使用量は、通常の埋立処分費用と同等と考えた。備蓄型処分場に保管するメリットは、備蓄物が仮に有効利用されなかったとしてもそのまま埋立処分することができることである。そのため、場合によっては埋立物が安定化するまで長期間の維持管理が必要となり、通常の埋立処分と同等の費用が見ておく必要があると考え、実勢価格を元に 2～3.5 万円／m³と設定した。

③保管期間

倉庫に保管する場合は、倉庫の規模として小規模な倉庫（面積 100m²）に保管するのは保管量当たりの倉庫賃料が高くなることから 5 年程度の短期間で保管を想定し、比較的大きな倉庫（3000m²）への保管は中朝期間である 15 年と想定した。

処分場跡地に保管する場合は、屋外での保管となるため、長期間の保管によって容器等の腐食や破損を生じるおそれがある。仮に破損によって保管内容物がこぼれたとしても、直ちに環境に影響を及ぼすことは考えにくい、倉庫での保管期間(15 年間)も考慮して、ここでは処分場跡地での保管期間は最大 15 年程度と設定した。

備蓄型処分場の場合は、資源価値が生じた段階で掘り起こせば良いと考えられることから、保管期間は半永久と設定した。

④保管容器

倉庫で保管を行う際の保管容器は、ハンドリングが比較的容易であること、そして保管対象物が比較的高品位である（濃度が高い⇨有害性や反応性が高い場合がある）ことを勘案し、ドラム缶と想定した。また、ドラム缶の保管や移動にはパレットに積載して行うと想定した。ドラム缶及びパレットの試算条件は表 3.8.15、表 3.8.16 のとおりである。ここでは、スチール（中古）のドラム缶と木製パレットを用いると想定し、パレット合わせて 3000 円／缶と設定した。

処分場跡地で保管を行うには土のうを用いると想定した。なお、一般的な土のう袋（フレコンバッグ）では耐候性が劣るため、長期間の保管には不向きである。また、耐候性大型土のう袋でも耐候性は 2 年程度とされている。しかし、大きくは破損しないと想定されること、破損したとしても実質上の問題はないと考えられることから、ここでは耐候性大型土のう袋を用いると設定した（表 3.7.17 参照）。

備蓄型処分場に保管する場合は、バラ（そのまま）で埋め立てることとした。

表 3.8.15 ドラム缶の試算条件の設定

種類	スチール	ステンレス	プラスチック	スチール （中古）
大きさ	200L（φ 60×90cm）			
価格	8,000～ 18,000 円／本	40,000～ 60,000 円／本	9,000～ 12,000 円／本	2,000～ 3,000 円／本

表 3.8.16 パレットの試算条件の設定

種類	ドラム缶専用のパレット	木製パレット
大きさ	1300×1300 程度（4 本積）	1200×1100 程度（4 本積める）
価格	20000～30000 円／枚	1000～2000 円／枚
備考	滑り止め加工等	保管が主目的なら十分

表 3.8.17 土のう（フレキシブルコンテナバッグ）の試算条件の設定

種類	フレコンバッグ（PE）	耐候性大型土のう
大きさ	1m ³ （φ 110×108cm）	
価格	1,300 円／枚	6,700 円／枚
備考	耐候性は 2 か月程度（JIS Z 1651）	耐候性は 2 年程度（JIS Z 1651）

建設物価／2010.5 月号

⑤労務費

作業にかかる労務費は次のとおりと設定した。なお、備蓄型処分場における労務費は埋

立費用に含まれると考えた。

表 3.8.18 労務費の試算条件の設定

種類	特殊作業員	普通作業員
内容	重機運転	人力による作業
価格	13,100～17,500 円／人日	10,800～14,500 円／人日

建設物価／2010.5 月号

⑥建設機械賃料

作業にかかる建設機械賃料は次のとおりと設定した。なお、備蓄型処分場における建設機械賃料は埋立費用に含まれると考えた。

表 3.8.19 建設機械賃料の試算条件の設定

種類	フォークリフト	クレーン装置付 トラック	移動式クレーン
仕様	エンジン駆動 最大積載 2.0t	4t 車 2.9t 吊り	ホイールクレーン 4.9t 吊り オペレータ付き
価格	4,600～ 5,200 円／日	10,100～ 12,800 円／日	35,000～ 38,000 円／日

建設物価／2010.5 月号

■まとめ

長期的に見ると金属資源の枯渇と価格の上昇は避けられない。将来的な技術開発を前提とした循環資源の備蓄は、一義的に資源確保の面からは有効である。

備蓄方法として、倉庫を活用する方法、最終処分場跡地を活用する方法、備蓄型処分場として最終処分場そのものを活用する方法を提案し、それぞれの目的や特徴を整理するとともに、備蓄費用を試算した。その結果、備蓄の目的や期間、備蓄量に応じて、適切な備蓄方法を選択する必要があることが示唆された。

3.8.9 有害物質管理面から見た金属資源リサイクル

1) 使用済製品からの有害物質の移動経路

小型家電等に使用されている有用金属は、有害物質という側面も持つ。例えば、鉛、カドミウム、クロム、水銀などがその代表例であり、未知の部分も多いがレアメタルも大なり小なり有害性ある金属と言える。

これらの金属資源を含む製品の使用が終わり廃棄物として排出されると、破碎等を経た

後にほとんどが埋立処分され、長期間にわたって最終処分場にとどまるとともに、これら金属類は少しずつ溶出してくることになる。溶出してきた金属（有害物質）は最終処分場の浸出水処理施設で排水基準を満たすように除去されるが、排水基準以下の濃度の物質や基準項目以外の物質など一部は除去されずに公共用水域に放流される。このように非常に長期間をかけて、金属（有害物質）は最終的には環境中に広く薄く拡散されることとなる。

また、直接焼却もしくは不燃・粗大ごみの破碎残渣として焼却処理される使用済製品の中にも有害物質は含まれる。鉛を例にすると、既存研究によると、推計によって差はあるものの、焼却処理される鉛の量は、全国で数百～数千 t-Pb 程度とされている（図 3-8-57）。焼却処理された鉛等の有害物質は、焼却施設の排ガス処理施設にて飛灰として除去され、キレート薬剤等によって不溶化処理をされた後に最終処分場に埋立処分されるか、焼却残渣（主灰）としてそのまま埋立処分されるか、あるいは、排ガス処理施設で除去されずに大気中に放出される。直接埋立処分されるよりも、飛灰処理物や主灰として埋立処分される方が有害物質濃度は濃縮され、かつ不安定な状態であることから、環境中には放出されやすいと考えられる。

そのため、これら金属資源を含む循環資源を分別回収したり、金属資源の選別・抽出を行うことは、廃棄物処理施設を経由して環境中に放出される有害物質による健康リスク・環境リスクを低減できる可能性がある。これは市民にとっても有益であると考えられる。

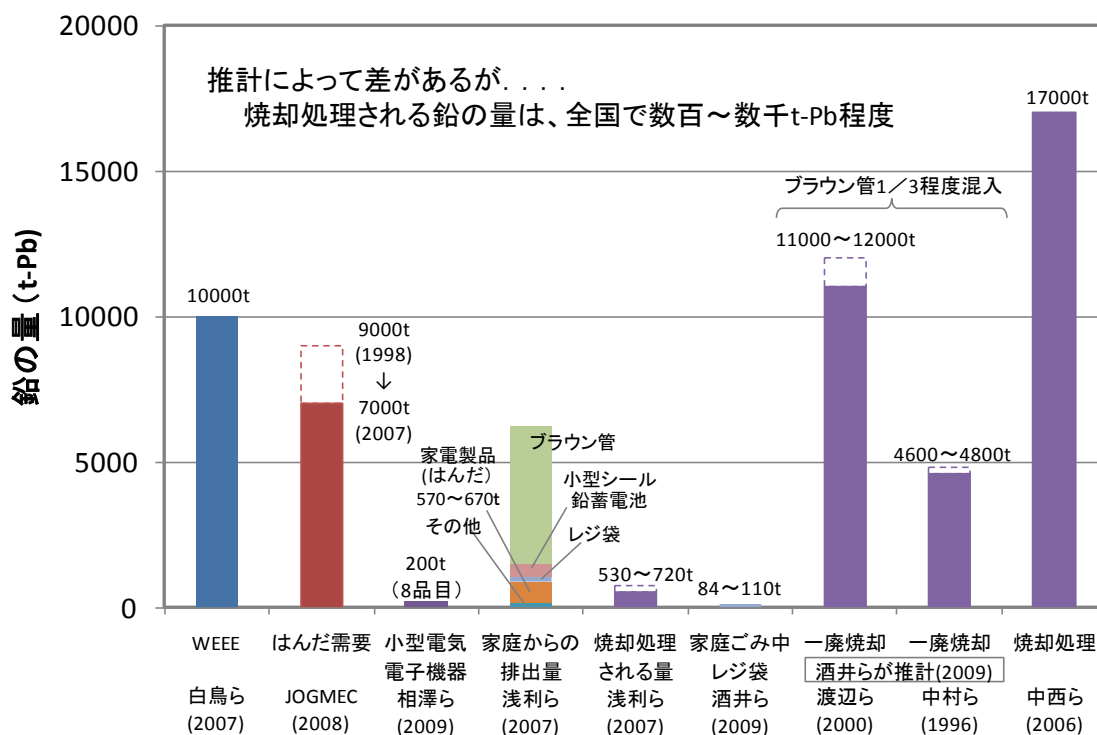


図 3.8.57 使用済製品に伴って排出される鉛の量の推計値

2) 金属資源リサイクルによる鉛の焼却回避の効果について

上述のとおり、金属資源を含む使用済製品等の循環資源を分別回収したり、金属資源の選別・抽出を行うことは、廃棄物処理施設を経由して環境中に放出される有害物質による健康リスク・環境リスクを低減できる可能性があることが示された。

ここでは処理の方法として焼却処理を、そして有害性を有する金属資源として鉛に着目し、使用済製品等の循環資源をリサイクルすることによって焼却処理が回避された場合の自治体にとっての効果を試行的に算出する。

①金属資源リサイクルによる鉛の焼却回避について

家庭からの使用済製品の排出に伴って焼却処理される鉛の量は、前述のとおり全国で年間数百～数千 t-Pb 程度であることから、人口百万人規模の都市の場合では数 t～数十 t-Pb 程度が焼却処理されていると考えられる（人口比率から全国の 1 %程度として案分）。

なお、前述の図 3.8.57 より、焼却処理される鉛の少なくとも 50～75%程度は家電製品由来と考えられる。金属資源リサイクルを目的とした廃電気電子機器の分別回収・選別等を行うことによって、副次的に焼却処理される鉛の量を数 t～数十 t-Pb の規模で大幅に削減することが可能と考えられる。

②自治体における有害物質管理

使用済製品等の焼却処理等における有害物質については、自治体としても非常に高い意識のもとで管理している。

ある 100 万人規模の A 自治体を例にとると、家庭ごみとして排出された製品中の金属資源のうち相当量は、直接もしくは破碎後に焼却処理されている。しかしながら、焼却施設において適正な排ガス処理等が実施されているため、環境中への有害物質の拡散は防止されている。

A 自治体においては、焼却残渣中に含まれる金属量（測定値を元にした概算試算値）は、Zn が数百 t / 年、Pb、Cu、Cr が数十 t / 年、Cd が数 t / 年、Hg が数百 kg / 年と推計されている。すなわち、適正な排ガス処理が行われた結果、有害物質は焼却残渣の中に捕集されたと見ることができる。

しかしながら、有害物質対策の観点からは環境上の問題はないものの、ごみ処理施設の運営面からは、有害物質の処理・管理に相応の費用が生じているという問題がある。具体的には A 自治体における年間のキレート薬剤購入費は約数千万円となっている。

これは特定の自治体に限ったことではなく、程度に差はあるにせよ、多くの自治体においても「相当量の有害物質がごみ処理施設に投入され、それらを環境中に拡散させないために相応の費用が生じている」という状況にあると考えられる。

③金属系資源のリサイクルによる環境管理費用削減の試算

上述の状況をふまえ、使用済電気電子製品等の分別回収・選別等の金属リサイクルを行うことによって、

- ・鉛の焼却処理量が半分になる
- ・それに伴い、飛灰処理に用いるキレート薬剤量が半分になる

と仮定すると、非常にラフな試算ではあるが、自治体における有害物質管理費用が全国で数十億円程度削減されると試算される。

<試算条件>

- ・飛灰発生量を焼却処理量の2～3%
 - ・全国の焼却施設の半数でキレート薬剤を使用
 - ・キレート薬剤添加量3%
 - ・キレート薬剤単価：150～450円/kg
- ⇒削減費用：7～45億円/年

なお、これはあくまでも理論上の試算であり、焼却施設の運転管理者の立場からは、薬剤処理量を直ちに減らすことは難しい。実際には、金属リサイクルの推進によって焼却灰中の鉛などの有害物質量が安定的に減少することを確認した上で、一定の移行期間を経て徐々に薬剤使用量を減少することとなると考えられる。

そのような制約はあるものの、金属資源循環による廃棄物処理施設への有害物質の投入削減は環境安全の観点からも進むべき方向と考えられる。

■まとめ

使用済製品に含まれる有害物質の管理に着目し、金属資源リサイクルを行うことによる有害物質管理面からの有効性を検討した。

有害物質の中でも鉛に着目し、使用済製品に伴って排出される鉛の量を整理した。そして使用済製品等の循環資源をリサイクルすることによって焼却処理が回避された場合の効果を試行的に算出したところ、全国で数十億円程度のコスト削減効果が得られることがわかった。

金属資源リサイクルを行うことは、資源セキュリティ面から有効だけでなく、自治体における環境管理費用の削減面からも有効であることが示唆された。

参考文献

- 1) 白鳥寿一, 中村崇: 人工鉱床構想 2-廃電気・電子機器の金属含有ポテンシャルの推移と経済的意味-, 資源と素材, 第 4,5 巻, 第 123 号, pp.171-178 (2007)
- 2) M. Oguchi, T. Kameya, S. Yagi, K. Urano : Product Flow Analysis of Various Consumer Durables in Japan, Resources, Conservation and Recycling, Vol.52, No.3, pp.463-480 (2008)
- 3) 相澤寛史, 平井康宏, 酒井伸一: 日本における小型電気電子機器のリサイクル, 廃棄物資源循環学会論文誌, Vol.20, No.6, pp.371-382 (2009)
- 4) 白鳥寿一, 中村崇: 人工鉱床構想-Reserve to Stock の考え方とその運用に関する提案-, 資源と素材, Vol.122, pp.325-329 (2006)
- 5) (独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構: 我が国におけるレアメタル備蓄事業の歴史(備蓄制度の背景と歴史), 金属資源レポート 2005.3, pp.53-62 (2005)
- 6) 白鳥寿一, 中村崇: 人工鉱床構想 2-廃電気・電子機器の金属含有ポテンシャルの推移と経済的意味-, 資源と素材, 第 4,5 巻, 第 123 号, pp.171-178 (2007)
- 7) JOGMEC: 鉱物資源マテリアルフロー2008
- 8) 浅利美鈴, 佐藤直己, 酒井伸一, 山田一男, 瀬川道信: 使用済レジ袋に含まれる鉛とその物質フロー, 廃棄物学会研究発表会講演論文集, Vol.18, pp.111-113 (2007)
- 9) 酒井伸一, 浅利 美鈴, 佐藤 直己, 宮島 章: レジ袋に含まれる鉛とその物質フローについて, 環境化学, 19(4), pp.497-507 (2009)
- 10) 渡辺信久, 井上三郎, 福永勲: 都市ごみ焼却処理場での鉛のマスバランス, 生活衛生, Vol.44, No.4, pp.171-174 (2000)
- 11) Nakamura K, Kinoshita S, Takatsuki H : The Origin and Behavior of Lead, Cadmium and Antimony in MSW Incinerator, Waste Management, Vol.16, No.5/6, pp.509-517 (1996)
- 12) 中西準子, 小林憲弘, 内藤航: 詳細リスク評価書シリーズ9 鉛, 丸善 (2006)