

## H-9 物質フローモデルに基づく持続可能な生産・消費の達成度評価手法に関する研究

## (4) 隠れた物質フローの算定に関する研究

独立行政法人物質・材料研究機構

材料ラボ

原田幸明・井島 清・島田正典

東京大学大学院新領域創成科学研究科

月橋文孝

平成 16～18 年度合計予算額 31,900 千円

(うち、平成 18 年度予算額 10,450 千円)

## [要旨]

「隠れた物質フロー」は、資源の採掘などに伴って発生する大量の土壌や移動による排出物など、経済外の物質フローでありながら地球環境に影響を与え、以前からその重要性が指摘されつつも、データが不十分であるために多くの指標化に際する議論の際に導入が見送られ、検討課題とされていたものである。本研究では、この隠れた物質フローを算定し、他の環境指標やマテリアルフロー分析などの手法と協調して使用できるようにすることを目指した。その結果は以下の通りである。1) 鉱物資源に関する「隠れたフロー」は TMR(エコロジカルリュックサック)として数値化することができる。2) その基礎データの多くは鉱山の操業に係わる環境報告書等に整備されつつあり、他の希少な金属類も地殻存在度などから推計することができる。3) バイオマスに関しては土壌を含んだ取り扱いと、土壌を含まず非素材化部分を計上する方法があるが、そのいずれが妥当か今後の検討を要する。4) エコロジカル・フットプリントとはむしろ相補的な関係にあり、係数などを用いてその中に組み込むことは妥当ではない。5) 資源枯渇とも相関性はある程度はあるが一対一対応ではなく、TMR を基底として資源枯渇状況がある。6) TMR はむしろ、価格とよい相関関係を示しており、顕在した物質フローを表してはいないが、廃土の運搬などのコストとしてある程度価格に反映されている。7) 価格に反映されているとはいえ、そのコストはまだ内部コストに過ぎず、環境影響を配慮しての外部コストとしての評価の議論が必要である。8) TMR はそのための基礎的数値を与える環境ストレス因子のひとつにはなるが、これまでの段階では環境インパクトとの関連付けは明確にできておらず、これからさらなる議論が必要である。9) しかしインベントリー項目としては TMR は資源生産性の指標としてふさわしく、2050 年までの資源要求を TMR でファクター8 に抑えることが必要である。

[キーワード] 関与物質総量、隠れた物質フロー、希少金属、基盤金属、戦略物資

## 1. はじめに

物質フローの算定においては、物質のフローサイクルからはずれてしまうもの、少量であることから算定が難しいもの、処理不可能なものが統計データとして表れないものなど、種々の要因により物質フローの算定のサイクルからはずれて、数値として表れないものがある。このような隠れた物質フローはマテリアルフローの中に現実存在しており、物質フローの中でもっとも環境に近い部分に位置しながらも経済に組み込まれていないために定量的把握が十分に行われていない。このような「隠

「隠れた物質フロー」は資源の採掘などに伴って発生する大量の土壌や移動による排出物など、経済外の物質フローでありながら地球環境に影響を与え、以前からその重要性が指摘されつつも、データが不十分であるために多くの指標化に際する議論の際に導入が見送られ、検討課題とされていたものである。また、資源に乏しいわが国においては、この隠れた物質フローは中国やアジア、オーストラリア等の外国に置いてきた物質フローが大きく関与しており、今後の国際協調の中でのグローバルな環境負荷削減の努力とその分担の議論のためには基本的に把握しておくべきである。本研究では、この隠れた物質フローを算定し、他の環境指標やマテリアルフロー分析などの手法と協調して使用できるようにすることを目指している。

## 2. 研究目的

本研究においては、隠れたフローを科学的に把握し、環境影響、経済因子などと結合しうる人間活動の中の資源獲得に係る指標として確立するための科学的基礎を形成することを目指す。

そのために、1) 以前算定していた金属鉱石の関与物質総量を諸外国で用いられているエコロジカルリュックサックの値などと整合性を持ちながら見直し、かつ、使用しやすいように鉱石レベルから素材インゴットレベルに拡張する。また、2)エコロジカルフットプリントなどの他の持続可能性指標やコストなどの経済指標とも比較し隠れたフローの持続可能性指標としての位置づけを明らかにする。さらに3)わが国内のマテリアルフロー分析を行い、特に今後の戦略物質とみなされる資源が隠れたフローをどの程度誘発しているかを明らかにする。4)その中でも隠れたフローに大きな影響を与えると考えられる金や白金を多く使用する IT などの先進高度機器の素材構成を隠れたフローをもとに解析するなど、生活や生産スタイルの変更のための利用の可能性を明らかにする。最後に、5)隠れたフローの世界的な傾向を明らかにし、持続可能性を考慮した将来動向をあきらかにする。

以上を通じ、人間の生産活動の「from Cradle to Grave」の Cradle 端での持続可能指標としての隠れたフローの科学的意義と、その指標としての利用方法を明らかにする。

## 3. 研究方法

本研究は、上記の研究目的に沿って、1)関与物質総量 TMR の見直しと拡張、2)他の持続可能性指標との関連付け、3)国内の戦略物質マテリアルフローの分析、4)関与物質総量の応用によって構成される。

これらを進めていく上で、それらの共通基盤として、東大の月橋教授を主査として隠れた物質フローに関する検討委員会を組織し、関連分野の専門家の知識を結集できるようにした。隠れた物質フローに関する検討委員会のメンバーとそれぞれの専門分野を表1に、また委員会で行ったヒアリングのリストを表2に示す。

表1 専門委員

氏名	所属・役職	専門分野	氏名	所属・役職	専門分野
月橋 文孝	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授	マテリアル・ 機能設計	片桐 望	横浜国立大学 産学連携推進本部 共同研究推進センター	鉱物
田村 泰夫	日本鉱業協会 技術部・環境保安部	鉱業	岡部 進	(社)資源・素材学会 事務局長	資源
大藏 隆彦	秋田大学 ベンチャー・ビジネス・ラ ボラトリー 教授	非鉄製錬	佐藤 興平	(独)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 鉱物資源研究グループ	鉱物
北村 修	(独)石油天然ガス・金属鉱 物資源機構 金属資源調査企画グループ	金属資源	小林 幹男	(独)産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門 副研究部門長	環境管理
馬淵 守	京都大学大学院 教授	資源	岡部 徹	東京大学生産技術研究所 教授	循環資源・材料 プロセス工学
青江 多恵子	松下電器産業(株) 環境本部 主事	環境	原田 幸明	(独)物質材料研究機構 材料ラボ ラボ長	LCA、 エコマテリアル
森口 祐一	(独)国立環境研究所 循環型社会・廃棄物研究 センター センター長	循環型社会、 廃棄物	島田 正典	(独)物質材料研究機構 材料ラボ 特別研究員	非鉄金属
村上 進亮	(独)国立環境研究所 循環型社会・廃棄物研究 センター 研究員	資源経済学、 資源工学	井島 清	(独)物質材料研究機構 材料ラボ 研究員	エコマテリアル

表2 ヒアリング一覧

・希少金属の再資源化・集積化の緊急性と課題	三菱総研 中條 寛
・レアメタルのマテリアルフロー把握の問題点	専門委員
・ハイテク、ナノテクと戦略物質	専門委員
・金属資源のリサイクル-Ni、Co、Znを中心として	専門委員
・硫黄から見たエネルギーと金属の生産	専門委員

また、各年度の末に公開シンポジウムを開いて研究内容を開示し、環境関係者、資源関係者、素材関係者、素材、部品、製品に係る民間企業、学界など有識者に広く公開し、そのディスカッションを反映できるようにした。その際に、外国からの講演者も招待し国際的な意見交換も図った。このような関連知識との整合性を確保しつつ、各項目について以下のように研究を進めた。

(1) 関与物質総量 TMR の見直しと拡張 (担当：物質・材料研究機構)

関与物質総量(TMR: Total Material Requirement)は、エコロジカルフットプリントと同一概念であり、ある素材や製品を得るために利用した地球資源の総量である。この TMR の中で、製品や廃棄物処理として経済行為に明示的に含まれない物質の量が「隠れたフロー」に相当する。この TMR の値に関しては、以前から提唱者のドイツの Wuppertal 研究所が LCA などで注目されていた比較的大量消費の物質やエネルギーに関して値を与えていたが、本研究の分担者である物材機構で 2000 年において、ほとんどの金属元素に対して金属インゴットの鉱石分の TMR として Ore-TMR を与え IT 機器など製品単位では微量であるが持続可能性にはインパクトの大きいとみなされる諸元素に対しても TMR の計算が可能な状態を現出していた。しかし、Wuppertal の算定は個別サイトからのヒアリングの積み重ねに基づき、物材機構の算定は公開データからの統計処理や地殻存在度からの推定仮説を用いた計算が含まれており、一部に不整合が指摘されていた。そこで、本研究において、TMR およびエコロジカルリユクサック(以降、問題の無い限り TMR 等と称す)を使用して解析を行っている研究者からの意見を聴取し、問題となる食い違いのある数値を見直すとともに、先述の委員会において鉱山などの専門的知識から統計的処理および仮説を用いた推算データの妥当性を検討した。TMR 等を用いて意見を寄せた研究者は、米国エール大学の Graedel 教授のグループ、フィンランド自然保護協会の Lettenmeier 氏、科学技術振興機構社会技術研究「循環型社会」を遂行している東北大学長坂教授のグループ、および、国内で MIPS やファクターX を取り組んでいる企業の研究者である。そこで、相違の中で副産物とのアロケーション問題によるもの、算定根拠となった数値が過去のものであり現状と一致していないものなどを摘出し、専門家ヒアリング、文献調査、現地情報

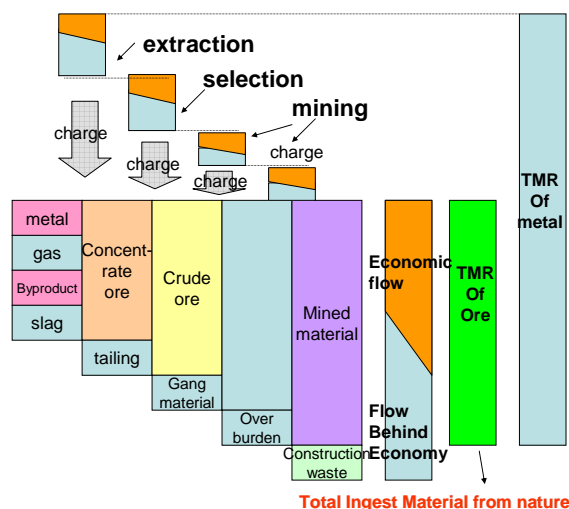


図1 金属の TMR と隠れた物質フロー

の聞き取りなどを行いつつ、Wuppertal との数値の調整を行った。

また、委員会などにおける専門家から指摘されたデータの存在や、環境問題に対する意識の高まりや情報開示義務の前進などで Ore-TMR 算定時には入手不可能だったデータの開示が進んでおり、それを生かして、それらのデータをもとに従来の統計的手法による算定値の妥当性の検証を行った。

さらに、従来の鉱石のみを対象とした Ore-TMR に対して、金属を得るための製錬プロセスでの資源・エネルギーの投入に係る TMR を算定し加算することで、素材としての TMR とし、マテリアルフローおよび製品などの解析に供しやすくした。その際、製錬プロセスでの資源・エネルギー投入の原単位が必要となるが、多くの元素に関してそれらの値は公表されていない。そこで物材機構で以前調査した「金属元素の製錬・精製段階における環境負荷算定に関する調査」<sup>1)</sup>からのデータを用い多くの金属に対して当てたが、稀な元素に関しては部分的にも参考となる操業データがないため、溶解・製錬反応の基礎となる溶解のエンタルピーと反応の生成自由エネルギーの両熱力学値を用い、実操業データの得られる金属に投入している過剰分と同等の過剰エネルギー投入を仮定してエネルギー投入値を与えた。また、エネルギー資源の TMR には、同じく物材機構で以前算定した「関与物質総量の算定-エネルギー資源および工業材料の LCA-」<sup>2)</sup>を用いた。

このようにしてデータの検討をすすめたが、近年 Wuppertal 研究所では、TMR を水と土壤に分けて表示するようになってきており、その是非自身は問題があるが、データの交換や妥当性の検証のために、Wuppertal 研究所とあわせて議論しうるよう、TMR を aqua-TMR(水)と soil-TMR(土壤)に分離して標記することも試みた。その際、製錬部分に関してはエネルギー源の種類などにより比較的分離可能であるが、鉱山においては水をほとんど必要としない露天掘りと大量の鉱内排水に悩まされる鉱内堀が並存しており個別操業例の積み上げでは一般化困難である。そこで、近年整備されてきた鉱山関係の環境報告書を集め、金属資源採掘の全体的な土壤処理量と水処理量の関係を読み取り、その分配比を用いて配分した。

これら金属素材の TMR に係るデータに加えて、石灰石、珪石などの他の無機素材の TMR の算定、さらには木材、穀物などバイオマス関係への拡張を行った。無機素材の TMR の算定においては、わが国の産業統計である「本邦工業の趨勢」<sup>3)</sup>に操業実績が公表されており、ここでは収率、品位、ズリ混入量などもデータとして与えられているため、その数値をもとに

$$\text{TMR} = 1/(1-\text{ズリ混入率})(\text{品位})(\text{収率})$$

として算定した。バイオマスについては、伐採した木から木材として製材するプロセスで発生する廃材、間伐材のように木材に至る以前に伐採されるバイオマス、肥料などとして投入される物質とともに、栽培のために必要とされる土壤も対象として算定した。従来の「隠れたフロー」の算定においては、土壤のエロージョン分のみを視野に入れていたが、本研究においては、基本的に、エロージョンと異なり耕作条件として容易にアクセスできるデータに基づく算定であること、また一次的に地球資源に係る物質としてまず算定しておき、その後の環境影響とのかかわりについては別途議論することが出来るようにする上でも、まず抑えておくべき数とであることから、耕作時に掘り返すべき土壤の量を算定して TMR に加えることとした。

## (2) 他の持続可能性指標との関連付け (担当：物質・材料研究機構)

他の指標として、エコロジカルフットプリント、フードマイレージなど類似のサステナビリティ指標があるため、まず、それらを調査し、それぞれを特徴付けた。特に、エコロジカルフットプリン

トは、英国などにおいても国のサステナビリティ指標として積極的に取り上げられており、その相互関係を把握しておくことは重要であるため、エコロジカルフットプリントが有効と思えるバイオマスから小麦粉と TMR が有効と思える金属から鉄を取り上げ、そのそれぞれをエコロジカルフットプリントおよび TMR の両方で標記してその違いを比較した。さらに、資源枯渇との関係、価格との関係、さらには地殻存在度などとの関連も調べた。特に、資源枯渇に関しては、資源枯渇指標自体が世界的に十分に議論されておらず、往々に資源埋蔵量を年間消費量で割っただけの耐用年数が暫定的に用いられているが、TMR と同等の製品や統計的な加算性を確保したのものとして、物材機構で提案している、資源枯渇加速度を用いた。<sup>4)</sup>

資源枯渇加速度とは、資源枯渇速度

$$\text{資源枯渇速度 [1/t]} = \frac{(\text{消費速度 [M/t]} - (\text{再生速度 [M/t]}))}{(\text{ストック量 [M]})}$$

を、それぞれの資源の消費量に対して級数展開した係数を、鉄の係数との比で表したもので、ある資源を単位量消費することが鉄を何単位量消費することに匹敵するかで表した数値であり、差分関係の近似式として、ある資源 i の消費が資源枯渇速度を加速するとして微分係数を取り、それを鉄を基準とした i 資源の資源枯渇加速度として

$$C_i = \frac{R_{Fe}}{R_i} \cdot \left(1 + \frac{n}{\lambda_i}\right) / \left(1 + \frac{n}{\lambda_{Fe}}\right)$$

の式の関係がえられている。なお、ここで、R はストック量、λ はいわゆる耐用年数、n は考慮範囲であり、『「鉱物資源使用」カテゴリーの特性化係数』では、n=100 年として R には埋蔵量が既知の資源に対しては埋蔵量、未知の場合は対照となる鉄も含めて地殻存在量を用いて算定されている。

さらに、TMR が直接的な経済フローの中では顕在的に現れないが、人間の生産活動として経済行為と係わっていることに注目し、価格との相関性についても価格に対する地殻存在度などの他のパラメータとの比較で検討を進め、「隠れたフロー」とみなされる TMR の果たす他の因子に対するの基本的な役割の可能性を検討した。

### (3) 国内の戦略物質マテリアルフローの分析(担当：東京大学)

TMR 等の隠れたフローを誘発する国内のマテリアルフローについて調査を行なった。対象とした金属は、物質使用量が大きく社会のインフラストラクチャー形成に不可欠な、鉄、銅、アルミニウム、古来から頻繁に使われ、合金やメッキ、蝋剤などとして先述の金属と付随して用いられる亜鉛、鉛、スズ、鉄の合金成分として高強度化や耐食性の向上に不可欠な、クロム、ニッケル、ニオブ、モリブデン、リサイクルや軽量化、長寿命化などのエコデザイン設計の構造材として期待されているチタン、マグネシウム、特殊な機能で電子材料などに不可欠なタングステン、コバルト、タンタル、リチウム、レアアース、レニウム、シリコン、ガリウム、砒素である。特に、戦略的レアメタル類のマテリアルフローの調査は東京大学月橋教授が分担して行なった。

マテリアルフローの作成において基本的情報には三種類ある。ひとつは、貿易を通じた国へのインプット、アウトプットとの情報である。この情報は正規の手続きを経た貿易によるものについては、通関統計により Web で月レベルの情報として価格情報も合わせて容易に収集することができる。鉱石、一次素材製品について通関統計より得られるものは、鉄、アルミニウム、銅、ニッケル、鉛、亜鉛、スズ、タングステン、マンガン、クロム、モリブデン、チタン、コバルト、ウラン、ニオブ、金、銀、白金の貴金属類。また、クロム、マンガン、ニッケル、ニオブ、バナジウム、タングステンについてはフェロアロイとしての通関データもそろっている。リチウムのように金属インゴットとしてではなく硝酸塩や炭酸塩のような化合物として輸出入されている金属も存在する。これは通関統計の中でも化学物質のグループに範疇分けされており、無機化学品及び貴金属、希土類金属、放射性元素又は同位元素の無機又は有機の化合物となる。リサイクルスクラップとして輸入側では、鉄、アルミ、銅、ニッケル、スズ、鉛、亜鉛が整えられているが、輸出側では、鉄の雑品の中に銅やアルミが含まれているなど通関統計だけでは物質ベースの移動量がつかめないケースもある。また、製品に伴う素材の輸出入も無視できない。特に、電池、蓄電池など製品は海外からの製品の一部としての輸入も多くその把握は困難である。輸出面では、製品中の素材の把握が難しいとともに、近年特にノックダウン方式 さらには、使用済み物品の輸出にともなうマテリアルフローが近年増加している。特に使用済み物品が製品そのものとしてではなく本来の製品機能が一部失われたパーツや素材として通関処理がされる場合も多く製品自体の量の把握も通関統計だけでは不十分でありかつ、そのようにして輸出される製品のなかの素材構成も把握が難しい。

マテリアルフローを作成する際のもうひとつの情報源は生産統計である。わが国では以前から統計が完備しており、鉄、アルミニウム、銅、亜鉛、鉛については「鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計年報」<sup>5)</sup>に基本統計が記載されている。また、クロム、ニッケル、マンガン、タングステンはフェロアロイとして、鉄鋼統計年報<sup>6)</sup>に記載されている。また、ニッケル、アンチモン、スズは資源統計年報の、その他非鉄金属製品<sup>7)</sup>に記載されている。しかしながら、近年は統計の簡素化が進み、また、素材業の空洞化が進む中で単一企業データとなるために統計として公開しない項目も進んでおり万能とはいえなくなっている。基本的には、これらの統計作成に関与した業界団体から直接情報を得ることが必要になってきている。このような情報源として「鉱山」<sup>8)</sup>、「レアメタルニュース」<sup>9)</sup>などがあるが、「工業レアメタル」<sup>10)</sup>がそれらを再集約しており有用である。

この生産統計には二つの大きな欠落がある。ひとつはカバー率の問題である。基本的に統計情報の源を協力業界に依存しているため、業界の組織状況にカバー率は大きく左右され、非加盟企業や統計調査の解釈が異なる企業がある分野や調査年にはカバー率が悪くなっている。また業界が組織されていない分野、特に IT などに関連する新規分野や自動車、電子などの製造業の中で素材精製・二次加工が行なわれ独立した業界を形成しえていない分野のカバーは困難な構造となっている。特に化合物として輸入され直接製品製造業に流れている物質についてこの問題は大きい。

また、生産統計のいまひとつの問題は、これらの生産が素材供給の立場から集約されていることである。例えば、アルミ圧延材からの飲料缶への流れは、あくまでアルミ飲料缶用途の素材としての流れであり、飲料缶そのものに供されるアルミニウムの量を示すものではない。つまり素材業にとっての「最終需要」は「製品製造業需要」であり消費財や資本財としての最終需要ではない。これがこれまでのマテリアルフロー調査で往々に曖昧にされていた部分であり、最終製品だけでなく産業廃棄物や加工スクラップとして発生するマテリアルフローが無視されてきたケースが多い。このような二次

加工素材から、部品製造、製品製造にいたる物質フロー解析には産業連関表<sup>11)</sup>が一見有効のように見える。しかしながら世界的にトップ水準のわが国の産業連関表においても、非鉄金属は、銅、アルミ、亜鉛・鉛以外はその他非鉄金属であり素材ごとに分解することは困難である。また産業連関表は価格ベースであるため銅のように電線から LSI の構成要素まで多様な機能と価格で製品中で用いられる素材に対しても分解能はきわめて低くなる。これらの問題を踏まえての正確なマテリアルフローの把握には、基本的に最終製品に含有される物質の量を把握し、そこに向かうフローを遡及したアプローチが必要である。しかし、本研究では、その前段階として、このような問題点を含むが故に現在のアクセス可能なデータのみで記述し、どこの不整合が起きるかを明らかにしておくにとどめた。

マテリアルフローのいまひとつの重要な情報はリサイクルに関する情報である。リサイクル情報の中で精度の高い情報は生産統計のなかで原料として計上されたスクラップである。しかしそれでもスクラップの発生由来の情報は不十分である。鉄、アルミニウム、銅、鉛、亜鉛については鉄連、JRCM、メタル経済研究所などでの調査例もあるが単年度のものが多く、それらのデータを下に、聞き取り調査で実態を把握しなければならない。

このような状況を踏まえつつ、本サブテーマにおいては、マテリアルフローそのものではなく、TMR 等に結びつくフローがどのような金属が多く関わっているかを明らかにしていくことが目的であるため、精緻なマテリアルフローの作成は別の機会に譲る。しかし、その目的を果たすためにも誤差要因となるこれらの因子の影響の状況を把握しておく必要がある。そこで、従来、それぞれの物質のフローの固有性を意識して個別の様式で記載されていたマテリアルフローを同一のフォーマットで記述することで、それぞれの物質のフローの特徴をつかみやすくするとともに、フローの欠落情報の存在をも明らかにできるようにした。次に、マテリアルフローの大きさを最終需要の量を基準にして正規化し線の太さで表すことで、上記の関係およびカバー状況をより視覚的に捉えやすくした。

また、このようにしたマテリアルフローに沿って、二種類の TMR 値をそれぞれの金属に対して算定した。ひとつは、最終需要製品中に含まれる当該金属分の TMR、および、鉱石等から実際供給されている金属分の TMR である。前者を需要 TMR、後者を供給 TMR と仮に呼ぶ。この両者は一見一致するように思えるが、需要 TMR を供給 TMR が上回る要素として、歩留まりの問題がある。製錬や加工のプロセスでロスがあると、そのロス分を見込んだ供給が求められ、供給 TMR が需要 TMR を上回る。逆に需要 TMR 以下の供給 TMR となる要因としてリサイクルがある。特に使用済み製品からのリサイクルは確実に一次天然資源からの供給 TMR を削減することができる。この両者の関係およびその結果としての供給 TMR の順位付けを各金属に対して行なった。

#### (4) 関与物質総量の応用 (担当：物質・材料研究機構)

TMR の応用として、a)マテリアルフローの TMR 表示、b) 製品単位での物質構成の TMR による表示、c) 国レベルの関与物質総量の表示、d)将来予測への適用を行なった。

a)マテリアルフローの TMR 表示は、本来別々の物質であるマテリアルのフローを、物質量でなく TMR で表示することで異種の物質も同一のフロー図の上に描くことができ、各物質のいずれが TMR を誘発しているか、さらに、それぞれのマテリアルフローのどの段階が TMR の誘発や抑制に関与しているかということを見て取ることができる。そのように複数のフローを重ねて比較するためには、3)で作成したマテリアルフローの統一フォーマットでもまだ複雑であるため、さらに統一フォーマットの簡素化を進めた。ここで TMR の誘発や抑制に関与しているものは、その物質の最終需要とともに

に製造工程の歩留まりの悪さとリサイクルであるから、その部分に注目した構造とした。すなわち、素材製造や製品加工の個々のプロセスの差異は無視し、「素材製造」、「素材加工」、「製品製造」、「使用」の四段階に分けた。「使用」は先述のように素材側から見た製造業の需要ではなく消費財や資本財としての最終需要を意味している。「製品製造」が従来のマテリアルフロー分析で往々に「需要」として記述されていた部分である。「素材製造」は基本的に製錬、「素材加工」は同じく溶解・加工に相当する部分である。「素材製造」と「素材加工」を分離した意味は、リサイクルを意識し、再溶解など製錬・精製工程を経ないでリサイクルできるフローは「素材加工」として処理し、大量に不純物を含んだり酸化などの化学反応が起こっているなどの理由で製錬プロセスを用いる必要のあるリサイクルのフローは「素材製造」として区別するためである。また、この区別は、「素材製造」「素材加工」それぞれから発生するリサイクル物など二次物質のフローにも対応しており、「素材製造」から発生する二次物質には酸化物、混合物の形態であり厳密な意味ではケミカルリサイクルに相当するものが存在するのに対し、「素材加工」からの二次物質は基本的に素材の断片でありマテリアルリサイクルが可能となる。また、「素材加工」と「製品製造」の境界も曖昧にされるケースが多く、特に近年は自動車製造業やLSIなどの電子部品製造では部材構成段階での素材の処理・加工が含まれており、関係する物質を扱う業界ごとに役割分担のあり方の相違が大きくなってきている。ここではこのような境界が曖昧な場合には、TMR抑制因子としてリサイクルを重視するという観点から、そこで発生したスクラップが「市中屑」として扱われる部分から「製品製造」とすることで、各素材に対しての一貫した記述を図った。

b) 製品単位での物質構成のTMRによる表示では、モーター、携帯電話、電子部品をケースにとり、製品構成素材量から、それぞれの素材量に素材の単位TMRを掛けて、製品を構成する資源のTMRを算定してみた。モーター、携帯電話に関しては関西大学の測定例<sup>12)</sup>を用い、電子部品については多様な物質が微量づつ使われているケースが想定されるため、全量を破碎・粉碎し蛍光X線で定性分析で分析対象を把握した後、王水で酸溶解をした後ICP分析を行なって、製品中の金属成分量を測定し、そのデータをもとにTMRを掛けて資源構成を得た。

c) 国レベルの関与物質総量では、アメリカ鉱山局のminerals commodity<sup>13)</sup>および、資源素材学会刊の「鉱物資源ハンドブック第二版<sup>14)</sup>」をもとに日本、世界および中国の金属資源消費データを得、それをもとにそれぞれの金属資源の単位TMRを掛けることで国の年間TMRを算定した。

#### d) 将来予測への適用

世界全体のTMRを経年的に求めた。基礎情報は先述と同じくアメリカ鉱山局のminerals commodityおよび、資源素材学会刊の「鉱物資源ハンドブック第二版」である。また、消費量のみならず埋蔵量に対しても、それぞれの資源埋蔵量の金属換算値に対してそれぞれのTMRを掛けてTMR重み付けの埋蔵量とし、加算して総TMR重み付け埋蔵量としての値を与えた。この総TMR重み付け埋蔵量は、世界の年間のTMRで算定した資源消費量とともに用いて、金属資源全体のTMRで重み付け平均した耐用年数を表すことができる。このようにしてTMRで重み付けした耐用年数の妥当性を見るために、アメリカ、日本、イギリス、フランス、ドイツと物質消費の伸びの激しいBRICs諸国を対象に、GDPと人工の成長予測から将来のTMRの予想を行なった。各国の一人当たりのGDPの成長予測はGoldmanSachs<sup>15)</sup>の予測により、人口予測は国連人口統計の予測をとった。TMRの予測については、わが国の一人当たり換算したTMRの伸びと一人当たりのGDPの関係をプロットして三段階の直線近似で表し、それに先述の一人当たりGDPおよび人口の予測を掛けてTMRの増加を予測した。さらに、

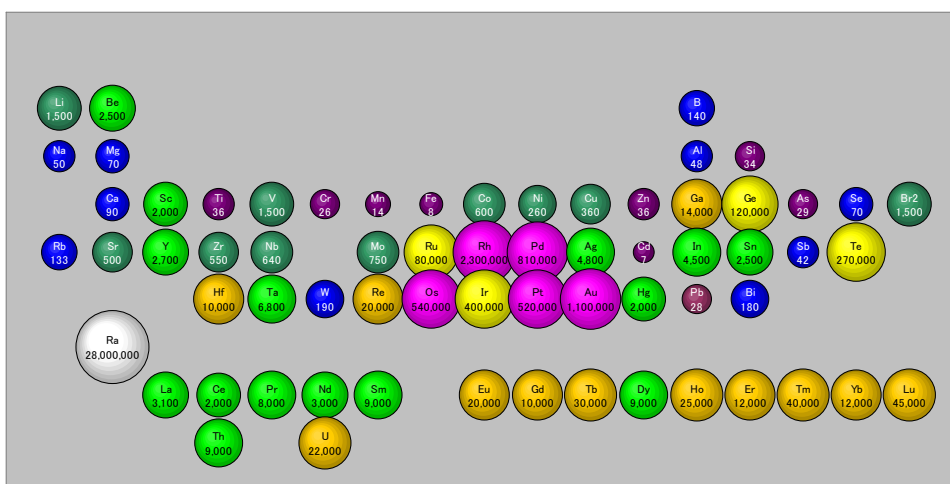


TMR の増加を低減させるための目標設定として、一人当たりの GDP が高くなった段階での資源消費を抑える、いわゆるファクターX の設定を行い X がどの程度まで進む必要があるかを検討した。そのために、一人当たり GDP と TMR の相関モデルでその三段階目の TMR レベルを現状、その 1/2、1/4、1/8、1/16 と設定し TMR 予測の推移を比較した。

#### 4. 結果・考察

##### (1) 関与物質総量 TMR の見直しと拡張

図 2 に見直し後の金属の TMR の最終結果を周期表上に配置したかたちで示す。従来算定されていた TMR は鉱石分の Ore-TMR であったが、ここでは製錬プロセスでのエネルギー投入も考慮して、金属単体をインゴットの状態で得た場合を想定して、それに至る鉱石、エネルギー資源等のトータルの TMR として表している。これにより、製錬などの技術知識がなくとも、製品中の素材構成などから近似的に TMR を計算することが容易になっている。



各元素のインゴットTMRを、周期表上に配置。円の大きさと色は、値の対数値にしたがって変化させ表記。

図 2 金属の TMR(最終結果)

この算定の以前の状態は図 3 にまとめてある。Wuppertal 研究所が金属からプラスチック、セラミクス、紙などと製品化された素材の基礎データに重点を置いているのに対して、物質・材料研究機構では資源消費の観点から TMR 値の大きい金属鉱物資源を中心に算定している。また、Wuppertal 研究所は固体、液体、気体の使用をそれぞれはじき出し加算して用いるのに対して、物質・材料研究機構では鉱物については土壌、石油などの流体資源については水使用として算定しており、いずれは算定方法論の調整が必要となる。また、Wuppertal 研究所は個別の事例調査を中心に算定されており個別の精度は高いがその代表性に問題があり、他方で物質・材料研究機構は統計データなどの既知の公開情報からの共通の手法による包括性の高い算定を意図しており相互比較や概要把握には有力だが、

1. 金属量と overburden の操業統計データがある場合 :金属量と採掘総量の両対数プロットの傾きから  
 2. 粗鉱品位の操業統計データがある場合 :Overburden=2 と近似して算定  
 3. 粗鉱品位の操業統計データも無い場合 \*粗鉱品位を地殻存在量の 2/3 乗に比例として近似かつ Overburden=2 と近似して算定  
 となっており、包括性には富むが個別分析には精度が劣っている。

図1 関与物質算定状況<sup>1)2)</sup>

3 Li ②	4 Be ③																		5 B ③	6 C ②	7 N ③	8 O ③	9 F ③	10 Ne ③
11 Na ②	12 Mg ②																		13 Al ②	14 Si ③	15 P ③	16 S ③	17 Cl ③	18 Ar ③
19 K ③	20 Ca ③	21 Sc ②	22 Ti ②	23 V ②	24 Cr ②	25 Mn ②	26 Fe ③	27 Co ②	28 Ni ②	29 Cu ②	30 Zn ②	31 Ga ③	32 Ge ③	33 As ③	34 Se ③	35 Br ③	36 Kr ③							
37 Rb ③	38 Sr ③	39 Y ③	40 Zr ②	41 Nb ②	42 Mo ②	43 Tc ③	44 Ru ③	45 Rh ③	46 Pd ③	47 Ag ②	48 Cd ②	49 In ②	50 Sn ②	51 Sb ②	52 Te ③	53 I ③	54 Xe ③							
55 Cs ③	56 Ba ③	*	72 Hf ③	73 Ta ②	74 W ②	75 Re ③	76 Os ③	77 Ir ③	78 Pt ③	79 Au ②	80 Hg ③	81 Tl ③	82 Pb ③	83 Bi ③	84 Po ③	85 At ③	86 Rn ③							
87 Fr ③	88 Ra ③	*	104 Rf ③	105 Db ③	106 Sg ③	107 Bh ③	108 Hs ③	109 Mt ③	110 Uup ③	111 Uuq ③	112 Uub ③	113 Uut ③	114 Uuq ③	115 Uuq ③	116 Uuq ③	117 Uuq ③	118 Uuq ③							
* ランタノイド			57 La ③	58 Ce ③	59 Pr ③	60 Nd ③	61 Sm ③	62 Sm ③	63 Eu ③	64 Gd ③	65 Tb ③	66 Dy ③	67 Ho ③	68 Er ③	69 Tm ③	70 Yb ③	71 Lu ③							
* アクチノイド			89 Ac ③	90 Th ③	91 Pa ③	92 U ③	93 Np ③	94 Pu ③	95 Am ③	96 Cm ③	97 Bk ③	98 Cf ③	99 Es ③	100 Fm ③	101 Md ③	102 No ③	103 Lr ③							

○: 本テーマにて推算  
 使用データ  
 △: ブッパータル研究所が公表しているデータ  
 ① 鉱山統計と実操業のエネルギー  
 ② 実鉱山鉱石品位と文献のエネルギー  
 ③ 地殻存在度からの品位予測と文献のエネルギー  
 ■: ブッパータル研究所および本テーマにて算出  
 □: マテリアルフロー整備

図3 本研究開始以前の TMR の算定状況

Yale 大 Gradel 教授のグループ等とのコミュニケーションで、調整を要した対象の金属元素は、銀、鉛、亜鉛、およびスズであった。このうち、銀、鉛、亜鉛は、Ore-TMR の算定において併産の効果が考慮されていないことに起因した。すなわち、LCA で言われるアロケーション問題であり、併産する金属に対して剥土や脈石、尾鉱をどのような比率で分配するかという問題である。ここで問題となった銀は金と、亜鉛と鉛はその相互間の分配が問題となる。図4は、得られる金属のインゴット価格による分配の式である。I がある鉱山を表し、j はそこから得られる金属である。Wi がその鉱山での剥土等を含む全採掘量であり、mi,j はその鉱山からの i 成分の収量、pj は j 成分の価格である。このようにして併産物とのアロケーション処理を行なって得られた、銀、鉛、亜鉛の TMR はそれぞれ 4800、28、36 となった。

W<sub>i,j</sub>: 按分された総採掘量(i鉱山のj成分)

$$W_{i,j} = \frac{w_i \times m_{i,j} \times p_j}{\sum_j (m_{i,j} \times p_j)}$$

w<sub>i</sub>: 鉱山の総採掘量  
 m<sub>i,j</sub>: 鉱山からのj成分の収量  
 p<sub>j</sub>: j成分のインゴット価格

図4 インゴット価格による分配の式

またスズについては、地質の専門家との意見交換や中国非鉄製錬専門家との聞き取り調査の結果、以前の物材機構で算定根拠とした数値にはスズ鉱石の品位が高い古い情報が含まれておりそれがスズの TMR 値を著しく下げていることが明らかとなった。現在はむしろそれらの廃鉱からの再回収や河川などへの流出分からの抽出が行なわれておりスズの TMR は大きくなっている。中国の最大の鉱山である箇旧では硫化物鉱はスズ品位 4.5%であったが、現在は電気石(スズ品位 0.3-0.8%)、砂鉱(スズ品位 0.2-0.3%)、柘榴石(スズ品位 0.2-1.3%)が 1-7m 掘って 3-15cm の層として得られている。またクアラルンプールではドレッジ船が 9-18m の深さまで浚渫し、1.1-1.5kg/m<sup>3</sup> の効率でスズを得ているがそのうち 9m まではスズを含まない粘土層となっており砂利・粘土比重 2 として 0.07%であり、さらにスズの存在していない上層を含めると二倍の掘削として、0.04%となり TMR は 2500 となる。これは箇旧において 1m の深さ掘って 10cm の厚みの品位 0.4% の鉱脈から採掘した場合とも同等であり、第一次近似としては適切な値であると判断できる。

また近年は、環境意識の高まりと社会的責任に対する情報開示の動きの中で、これまでアクセス困

難であったデータが比較的容易に手に入れられるようになってきた。さらに、インターネットの発達によりそれらの情報は特殊なコミュニケーションを持たなくとも入手できるケースも増しており、これまで「隠れたフロー」であったものが顕在化したフローに変わってきつつあるといえる。

図5はわが国の埋蔵鉱量調査により得られる値とそれから計算したTMRである。TMRは、

$$TMR=1/(\text{品位})(\text{採鉱実収量})(1-\text{ズリ混入率})$$

として得られる。菱刈鉱山に見られるように日本の金鉱山は規模は小さいものの世界にも優れた高品位の鉱山であり、TMRは世界平均よりかなり低い値になっているが、他の鉱山については以前物材機構で求めたTMRの世界平均と近い値になっている。

また図中括弧内に赤で示した数字は併産物を考慮し価格アロケーションを行なった数字である。亜鉛と鉛は基本的に同一の亜鉛・鉛鉱であるとして分配(アロケーション)を行なった。また銀は金との副産物として、2005年の金、銀の価格それぞれ1620円/gと27円/gでアロケーションすると、採掘量はほぼ金対銀で9:1となり国内鉱のTMRは3400と算定され、やはり世界平均のTMRとほぼ同等の値となった。

また、図6は、白金の生産の大きなシェアを持つ会社の環境報告書に記載された採掘に係わる物質のデータである。環境報告書の国際的に有力なガイドラインとなっているGRI(global Report Initiative)<sup>16)</sup>において、Environmental Potential Indicatorsの項目EN1にTotal Materails Useとして、Energy, Land Access, FootprintおよびMaterailsの項目があり、さらにEN5としてTotal Water Useの項目が挙げられている。このような状況は今後環境報告書を利用したTMR計算が容易になるものと期待される。その意味でもここに挙げた例が、以前物材機構で推算した値とどのくらい異なっているかをチェックしておく必要がある。

図7は同社の生産データであり、この鉱山から白金だけでなく、Pd,Rh,Auが併産している。これらを金価格を基準とすると白金,Pd,Rhの価格はそれぞれ1.82, 0.75, 2.12となりそれを用いてアロケーションした結果が図8であり、両者はオーダー的に一致しており、基本的な目安としては妥当なレベルを表していると判断できる。

#### 埋蔵鉱量調査

<http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/image/050622maizo.pdf>

	鉱数	品位	採鉱実収率%	ズリ混入率%	TMR	TMR世界平均
Au		22.8g/t	69.1	30.2	92,270	11,000,000
Ag		79.0g/t	56.0	34.4	34,000 (3,400)	4,800
Cu	4	0.21%	66.6	43.9	130	360
Pb	4	1.3%	53.0	34.8	220(42)	28
Zn	4	5.3%	53.0	34.8	55(45)	36
Mn	9	15.7	58.0	44.0	13	14
Cr	4	15.7	67.0	39.0	16	26
W	3	0.91	80.0	15.0	162	190

図5 わが国の埋蔵鉱量調査から計算したTMRとの比較

Anglo American Platinum Co.Ltd.'s production and used

Materials	2004	2003
Rock mined (1000ton)	84,953	78,294
Ore milled (1000ton)	37,925	33,546
Water used (1000m3)	32,804	31,224
coal (1000ton)	106.6	100.4
LPG (1000ton)	5.5	4.4
fuels (1000liter)	54,284	50,655

図6 白金鉱山会社の環境報告書公開データ

Anglo American Platinum Co.Ltd.'s production

Then Ore-TMR (TIM) is obtained.

Refined products	2004	2003
Platinum (ton)	69.55	65.43
Palladium (ton)	37.16	33.76
Rhodium (ton)	7.18	6.59
Gold (ton)	3.12	3.29

Materials	Pt	Pd	Rh	Au
Rock	893,700	368,100	1,041,200	490,100
Water	345,700	142,100	402,100	189,300
Fuels derived*	16	6.8	19	9
Total (approx)	1,200,000	500,000	1,500,000	680,000

\* TMR of coal, LPG and petroleum are included.

図 7 同社の金属鉱石生産データ

図 8 鉱山会社の環境報告書公開データから算定した白金類の TMR

ここまでは、鉱石分だけを考慮した ore-TMR であったが、実際のサステナビリティ指標としてマテリアルフロー解析や製品の資源指標として用いるには、鉱石ではなく製錬の際のエネルギー資源や他の資源の投入も含めた形で値を算定しておくほうが応用がしやすい。この算定も基本的には関連する各プロセスでの投入データを得てそれぞれの TMR を算定するのが基本である。しかしレアメタルの中にはプロセスデータが公開されていない

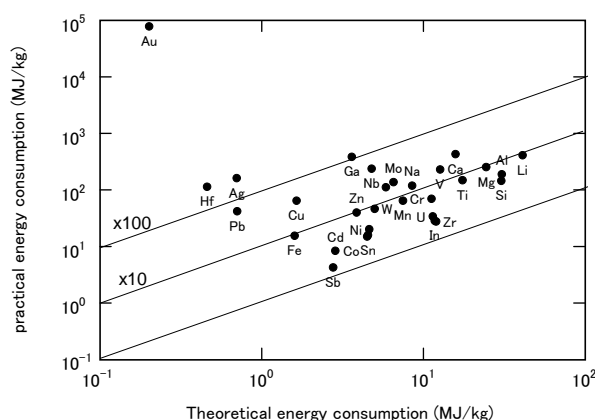


図 9 金属製錬の理論エネルギー消費と実操業投入エネルギー

ものも多く、それらが特に ore-TMR が大きく微量の使用でも数値的には大きな影響を与えることが多い。そこで、製錬反応の基本となる溶解のエンタルピーと生成自由エネルギーを理論エネルギーとして、いくつかの既知の金属精錬の実操業エネルギー投入をプロットしたのが図 9 である。金の場合には金属単体が安定なため理論エネルギーが極めて低く、また金より多量に存在している不純物元素の除去のためにエネルギー投入が行なわれるために実操業/理論比が極めて大きな値となっているが、その他はほぼ 100 倍以下に収まっており、実操業のエネルギー資源投入が不明なレアメタル類においては、金属精錬の理論エネルギーの 10 倍のエネルギー投入を想定し、その供給のためのエネルギー資源としては日本の平均の一次エネルギー構成を用いた。もちろんこの仮定は非常に粗い仮定であるが、製錬に要するエネルギー資源の投入データの不明なレアメタル類は鉱石の TMR が大きいいため難製錬性の希土類金属に至ってもエネルギー資源の寄与割合は 3 桁も小さくあまり数値的な影響は与えない。もちろん、図 9 でプロットした金属類については、アルミニウムやマグネシウム、鉄のように比較的 Ore-TMR が小さく、エネルギー資源の影響が大きい、それらは先述の仮定を用いず、物材機構でかつて調査したプロセスデータ(金属元素の製錬・精製段階における環境負荷算定に関する調査<sup>1)</sup>)に基づ

いて積算を行なっている。これらの結果は合わせて図 2 の TMR の値として反映されている。

TMR の対象は金属だけでなく鉱物資源全般に適用することができる。この場合も、埋蔵量調査のデータが有効であった。図 10 はわが国における非金属鉱物鉱山の埋蔵量調査によって公表されている珪石類、石灰石、ドロマイト、カオリン、および粘土類の品位、採鉱実収率、およびズリ混入率であり、そこから表の右側の TMR を得ることができた。非金属鉱物は金属のような鉱物中の含有成分よりも鉱物そのものが資源として利用されるため TMR は比較的小さいものとみなされるが、ドロマイトやカオリンでは 10 を超える数値となっており、あながち無視できない存在であるということが明らかとなった。

	鉱数	品位	採鉱実収率%	ズリ混入量%	TMR
白珪石	30	90.9%	58.8	11.1	2.1
天然珪砂	40	75.8%	73.3	91.3	2.0
蛇目珪砂	13	50.9%	91.6	0.0	2.1
ろう石	26	100	39.7	22.1	3.2
石灰石	277	53.7%	58.2	11.8	3.6
ドロマイト	17	17.2%	60.2	6.5	10.3
カオリン	6	100	70.9	6.2	10.3
頁岩粘土	3	100	46.9	26.7	2.9
木節粘土	35	100	95.6	0.0	1.05
蛙目粘土	33	100	88.2	0.0	1.13

図 10 非金属鉱物の TMR

同様に、日常的に使用される素材として木材などのバイオマス由来の素材も無視することはできない。また、プラスチックの原料やガソリンの代替としてもバイオマス資源が注目されており、これらバイオマス資源に対してもそれらが天然資源である限り TMR を適用することもいづれ求められてくる可能性が強いといえる。そこで、ここでは、暫定的に TMR の値を与える試みを行い、どのような要素をカウントすることが妥当かの議論に資することとした。

木材においては、木材として用いられる製材部分以外に、伐採された木と製材の関係があり、さらに、材木として利用された樹木と間伐で材木化できなかった樹木の関係がある。伐採された樹木の利用率は、50% 葉、枝、樹冠、樹皮 5% おがくず 6% チップ利用 15%といわれており、1 本の 25%が木材量となる。間伐量と素材生産量の関係は、図 11 に示すように地区によりばらつきはあるものの、間伐量はほぼ素材量と等しいとみなすことができる。これらより木材の TMR は

地区	A	B	C	D	全体	1m3当り
素材生産量 (m3)	1,328	60,029	8,357	6,269	76,064	1
間伐実施量 (m3)	5,825	48,200	16,624	4,204	74,871	0.98
エリア森林面積 (ha)	27,502	149,109	94,503	50,949	332,064	4.36

図 11 木材の間伐量と素材量

$$TMR = 1 / 0.25 / 0.5 = 8$$

と概算することができる。

さらには、天然資源の使用という意味では、樹木は土壌の上に成り立っており、樹木を生長させるために必要とされる土壌も関与した物質であり、その分も考慮しておく必要がある。ここではその値を樹木が根を張り養分を吸収するエリアを考慮することで最大限に見積もることとした。森林の樹木量 210m<sup>3</sup>/ha から重量換算で 126t/ha すなわち 1.26t/a、1a あたりの土壌が影響を受ける深さを 0.75m と

して土壌の比重 1.6 を掛けると、12t/a の土壌が関与していることとなる。故に最大限見積もった TMR は

$$\text{TMR} = 12 / 1.26 * 8 = 76$$

となる。

同様に、穀物類の最大 TMR も算定してみた。稲を例にとると NEDO のもみ殻賦存量・利用可能量の推計方法から籾殻原単位は 0.25、また、バイオマスタウン情報([http://www.biomass-hq.jp/biomasstown/bt\\_nousakuhi.html](http://www.biomass-hq.jp/biomasstown/bt_nousakuhi.html))によると、稲わら発生量 1.360 、もみ殻・くず米発生量 0.323 となっており、地上収量分だけの TMR で 2.68 となる。稲の収量は約 5t/ha すなわち 0.5kg/m<sup>2</sup> であり水耕中に除去される雑草量は 20g/m<sup>2</sup> であるから雑草量は 0.04、また農林水産技術会議農業の持続的な発展に資する生産方式の定着・普及評価シートより堆肥など有機物 947kg/10a, 無機肥料 10.3kg/10a よりこれら合わせて、1.92 となり、計 TMR=5.6 が土壌を除いた最低限の TMR となる。作土深さは県等の土壌肥料指針等から 9cm-14cm であり、ここで中間をとって 12cm を仮定し、土の比重を 1.6 とすると 1m<sup>2</sup>あたり 192t/m<sup>2</sup> の土壌が関与することになる、すなわち、

$$\text{TMR} = 192 / 0.5 + 5.6 = 390$$

が稲の最大 TMR となった。このように、関与する土壌の量も考慮するとバイオマスの TMR は鉄やアルミを凌ぎ銅並みの値になってしまう。しかし、この土壌分は何年も繰り返し耕作するなど再生利用が可能であり、その場合は、客土など劣化した土壌を補う分をカウントすればよいことになる。また、その延長線として無限年の永続的土地使用としたものが土壌を除いた最低限の TMR に相当するとみなせる。これらの取り扱いは今後検討を要するが、使いすて的な土地利用を排し持続可能な土地利用の方向を検討していくには、この土壌を含んだ TMR の手法は活用できる可能性がある。

ここまで、TMR の数値的見直し、非金属鉱物のみならずバイオマスへの適用と拡張について明らかにしたが、TMR をより国際的に活用していくために、先に検討した数値的側面や基本的コンセプトのみならず表現方法においても他の諸外国のものとの整合性を図る必要がある。特に、Wuppertal のエコロジカルリユクサックは TMR を土壌(soil)と水(aqua)に分けて表示しており、本研究においてもそれと同等の表現になるように分割を試みた。とはいえ、エネルギー資源については石油由来、石炭、原子力由来などと振り分け可能であるが、ore-TMR の特に水についてはサイトスペシフィックな様相も強いいため、複数の鉱山の情報から全体としての傾向を導き出し、従来のデータに当てはめることで soil 分と aqua 分の振り分けを行なった。

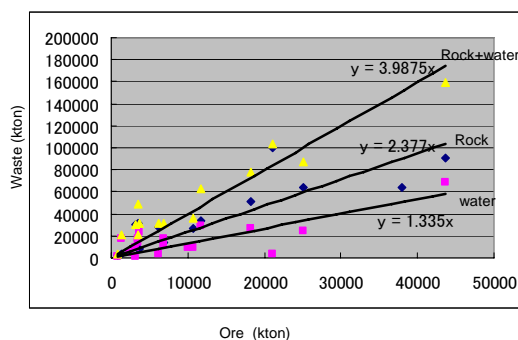


図 12 鉱山の採掘における廃土と廃水の関係

さらに図 12 をもとに廃土対廃水をみるとその比は 2.4 対 1.3 の関係となっている。この比率をもちい Ore-TMR を配分し、製錬分のエネルギー資源のそれぞれの由来分と合わせて振り分けた。その結果を図 13 に示した。

	TMR	soil	water		TMR	soil	water
3 Li	1,500	978	526	52 Te	270,000	181,611	89,079
4 Be	2,500	1,631	875	57 La	3,100	2,080	1,028
5 B	140	54	86	58 Ce	2,000	1,350	670
11 Na	50	25	25	59 Pr	8,000	5,381	2,639
12 Mg	70	28	42	60 Nd	3,000	2,018	990
13 Al	48	18	30	62 Sm	9,000	6,054	2,969
14 Si	34	12	22	63 Eu	20,000	13,453	6,599
20 Ca	90	28	62	64 Gd	10,000	6,726	3,299
21 Sc	2,000	1,330	675	65 Tb	30,000	20,179	9,898
22 Ti	36	13	23	66 Dy	9,000	6,054	2,969
23 V	1,500	992	512	67 Ho	25,000	16,816	8,248
24 Cr	26	12	14	68 Er	12,000	8,072	3,959
25 Mn	14	5	9	69 Tm	40,000	26,905	13,197
26 Fe	8	6	2	70 Yb	12,000	8,072	3,959
27 Co	600	402	199	71 Lu	45,000	30,269	14,847
28 Ni	260	173	87	72 Hf	10,000	6,733	3,315
29 Cu	360	237	123	73 Ta	6,800	4,575	2,257
30 Zn	36	21	15	74 W	190	125	66
31 Ga	14,000	9,388	4,647	75 Re	20,000	13,454	6,601
32 Ge	120,000	80,716	39,591	76 Os	540,000	364,398	178,736
33 As	29	20	10	77 Ir	400,000	268,925	131,908
34 Se	70	45	25	78 Pt	520,000	353,014	173,151
35 Br2	1,500	1,009	495	79 Au	1,100,000	743,449	373,344
37 Rb	133	88	45	80 Hg	2,000	1,345	660
38 Sr	500	331	170	82 Pb	28	16	12
39 Y	2,700	1,808	898	83 Bi	180	118	59
40 Zr	550	368	183	88 Ra	28,000,000	2.E+08	92,378,521
41 Nb	640	413	229	90 Th	9,000	6,058	2,975
42 Mo	750	494	258	92 U	22,000	14,803	7,261
44 Ru	80,000	53,808	26,396	coal	12	12	
45 Rh	2,300,000	1,547,059	758,824	oil	7		7.4
46 Pd	810,000	544,833	267,239	碎石	1.4	1.4	0
47 Ag	4,800	3,217	1,596	骨材	1.4	1.4	0
48 Cd	7	4	3	plastic	10		10
49 In	4,500	3,025	1,487	木材		8.0	
50 Sn	2,500	1,680	826	cement		3.2	
51 Sb	42	28	14	穀物		330	

図 13 soil と aqua に振り分けた TMR

## (2) 他の持続可能性指標との関連付け

TMR やエコロジカルリユクサック等の隠れた物質フローと関連する分析、評価手法、および指標としては、ヴァーチャル・ウォーター、エコスペース、エコロジカル・フットプリント、フード・マイル、ウッド・マイルが提唱されている。これらを、提唱者、定義、目的、基本算定方法、INPUT、OUTPUT、算定式、主たる使用対象として整理したものが、表 3 から表 6 である。バーチャル・ウォーター、フードマイルは、水、食物という天然資源消費の指標としているが、これらは一見局所性のあると思われるこれらの資源消費指標がグローバルな意味を持つことに重点がある。エコスペース、エコロジカル・フットプリントは、環境収容力や土地あたりの生産能力などを基準に、人類活動の許容量との関係で自然資源の消費を捉えようとする指標であり、TMR などが枯渇性資源の消費に有効なことに対して、再生可能資源消費のキャパシティを論じる上で有効なパラメータとなっている。

表3 Virtual Water (ヴァーチャル・ウォーター)

提唱者	ロンドン大学 アンソニー・アラン教授 (J.Anthony Allan)
定義	飲料水や料理に使う水など、目に見えない形で直接的に消費している一方、水資源は、私たちの生活に関わる様々なものを生産する過程においても利用されており、生産物を使うということは、私たちは間接的にも水を消費している。ヴァーチャル・ウォーターはこのように間接的に消費される水のこと。
目的	「水資源の地域的な偏りは食料の輸出入を媒体とする地域間の移動により緩和することが可能である」として、国内外の消費のための国家の水に関するレトリックが、いかに治水政策に影響しているかを表すため。
算定方法	輸入品の農産物・畜産物・工業製品等の使用推量を日本の単収で割る
INPUT	各項目における間接使用水 (cm3)
OUTPUT	ヴァーチャル・ウォーターの消費量 (cm3)
算定式	農産物の場合: (一日の灌漑水量 × 耕作面積 × 栽培日数) / (収量 × 可食部) 畜産物の場合: (親から受け継いだ間接投入水 + 間接投入水 (飼料の直接投入水 + 直接投入水) / 個体重量 × 取れる肉量)
対象	政策

表4 Environmental Space / Ecospace (環境スペース/エコスペース)

提唱者	環境保護団体「地球の友オランダ」(Friends of the Earth Netherlands) ブイテンカンブとワムス (M.Buitemkamp and T.Wams)
定義	将来の世代の資源利用の権利を侵さない範囲でどの程度のエネルギー、水、その他資源の利用や消費活動、そして環境汚染が許されるのか、一人ひとりの許容限度を計算し、具体的な数量を示したもの。
目的	復元できないような環境破壊や未来の世代に必要な資源を奪うことなしに、我々が環境資源を持続可能に利用できる割合を示し、資源の公平な分配を促すため。
算定方法	環境収容力(キャリング・キャパシティ)を算出した後に、最大許容使用量を算出する。
INPUT	エネルギー:一人当たり合計一次エネルギー使用量(GJ) 非燃料鉱物:一人当たり物質投入量(トン) 木材:一人当たり木材消費量(m3) 農産物:一人当たり物質投入量(トン) 建設地:一人当たり建設地(m2) 水:一人当たり合計抽出量 海洋資源:一人当たり海洋資源消費量(トン)
OUTPUT	各単位による
算定式	INPUT情報を元に一人当たりの各項目の消費量を求める。
対象	政策

表5 Ecological Footprint (エコジカル・フットプリント)

提唱者	ブリティッシュコロンビア大学 ウィリアム・リース教授 (William E. Rees)
定義	人間の活動による「生物学的な足跡」を意味し、一人の人間、あるいは1つの都市、1つの地域が、自らの活動を行うために直接的・間接的に消費している土地面積として指標化される。「経済の環境面積要求量」。
目的	エネルギーや食料、物質調達のために依存している土地、あるいは住居や産業活動のための直接的に消費している土地を一人当たり換算することで、反貿易や自給率という理想のもと、生産の公平な分配を促進しようというため。
算定方法	一国のエコジカル・フットプリントについて、消費資源の量を、平均的な生物学的生産力をもつ土地の面積に換算して算出する。
INPUT	1ヘクタールあたりの年間生産量 (kg/ha)、製品の平均年間消費量 (kg/capital)
OUTPUT	エコジカル・フットプリント (hectre/acre)
算定式	<各主要消費財の生産に必要な一人当たり土地面積 > $aa_i = ci / pi$ i=各主要消費財, aa=各主要消費財iの生産に必要な一人当たり土地面積, ci=iの平均年間消費量 (kg/capital), p=1ヘクタールあたりの年間生産量 (kg/ha) <一人当たりの合計エコジカル・フットプリント (ef) > $ef = \sum_{i=1}^n aa_i$ <集団全体のEF> $EF_p = N(ef)$
対象	政策・貿易、一般

表6 Food Mileage (フード・マイルージ)

提唱者	イギリスのNGOであるSUSTAINの議長(現ロンドン市立大学教授) ティム・ラング (Tim Lang)
定義	食料の生産地から食卓までの距離に着目し、食卓がどのくらいの食料輸送にたよっているのかを表したもの。
目的	食糧貿易が拡大することによって貧困に苦しむ人々をより苦しめ、少数の強力な無責任な企業により力を与えているという懸念がある。このことから、食糧貿易について考える機会を与えるため。
算定方法	輸入相手国別の食料輸入量に当該国から我が国までの輸送距離を乗じ、その国別の数値を累積することにより求められる。単位はt・km。(国内での輸送距離は含まない)
INPUT	食料輸入量(トン)、輸送距離(km)
OUTPUT	フード・マイルージ(km)
算定式	フード・マイルージ = $\sum (Q_{j,k} \times D_j)$ Q <sub>j,k</sub> =輸入相手国(輸出国)jからの食料kの輸入量 D <sub>j</sub> =輸入相手国(輸出国)から当該国(輸入国)までの輸送距離(首都から首都の距離)
対象	政策・貿易

ここでエコロジカルフットプリントとの関係/相違をみるために、具体的に二つの物質をとってエコロジカルフットプリントと TMR の比較を行なった。対象としたものは小麦粉と鉄である。鉄の TMR は鉱石で 5.1、コークスの投入なども含めて鉄の段階で 8.2 という値が得られている。すなわち、鉄鉱石関係の土壌分が 5.1、コークスも含むエネルギー等投入分が 3.1 である。小麦粉については、日本 L C A 学会食品研究会による小麦の LC-CO<sub>2</sub> 算出のための調査をもとに生産地アメリカ合衆国の排出源単位を使用し算定した。すなわち、小麦粉の作付面積はトン当たり 4452m<sup>2</sup>/t、ha あたりの投入は種子、窒素化学肥料、りん肥料、カリウム肥料、消石灰、農薬それぞれが 94.17、68.37、24.66、8.97、44.83、0.49kg/ha、また軽油、電力、ガソリン、L P ガス、天然ガスのエネルギー投入がそれぞれ 48.95L/ha、37.07kWh/ha、9.35L/ha、2.81L/ha、0.01 m<sup>3</sup>/ha であり、生産国国外輸送の船舶(重油、トラック(ガソリン)、貨物(電力)それぞれ 8000、100、2000km も考慮に入れた。また、土壌については、作土深さを 0.6m とし、比重 1.2 を仮定することで、小麦粉生産 t あたり 3206t の土壌に係わっており、100 年間の耕作期間を仮定して 32.1t/t とした。投入物の場合は本来それらの TMR も個別に計算し加算すべきであるが土壌に対して量が少ないことから粗い近似として投入重量をそのまま用いた。また、輸送関係はエネルギー源に換算し、エネルギー投入とともに、以前物材機構で算定したエネルギー資源あたりの TMR 値に換算した。こうして計算された小麦粉の TMR は、土壌分 32.1、エネルギー等投入分 0.107 となった。

次に、これら小麦粉および鉄のエコロジカルフットプリントを求める。鉄については、土地使用データ等が必要であり、オーストラリアの B 社の環境報告書よりそれらの情報を得た。すなわち、年間



97Mt/y の鉄鉱石の生産に対して採掘面積は 8100ha/y インフラ等に使用した面積は 1860ha であり、さらに 780ha/y の荒地が生じている。エネルギー投入は買電および蒸気発生に用いるナフサをあわせて 10.6PJ である。まず、生産能力阻害地の面積は、トン/year あたりとして、0.092ha/t/y となる。また 10PJ に相当する CO<sub>2</sub> 吸収地はエコロジカルフットプリントの換算式を用いて、2.038ha/t/y となった。さらに、鉄の製錬に投入するコークス、他のエネルギーがあり、ほぼ鉄 1t あたり 1t の CO<sub>2</sub> が発生することが知られているので、それにエコロジカルフットプリントの用いている森林の吸収係数 1.92ha/kg および森林の等価係数 1.17 を用いるとさらに 2.25ha/t/y が加算され CO<sub>2</sub> 吸収地は 4.29ha/t/y となり、計 4.38ha/t/y となる。また、小麦粉のエコロジカルフットプリントは、耕作地が 0.445ha/t/y となり、CO<sub>2</sub> 吸収地が、種子、窒素化学肥料、りん肥料、カリウム肥料、消石灰、農薬、軽油、電力、ガソリンそれぞれ単位使用量から CO<sub>2</sub> 原単位を掛けて吸収係数で処理するとそれぞれ、0.002、0.0141、0.0027、0.00076、0.004、0.0018、0.0115、0.0019、0.002ha/t/y となり、吸収地計 0.042ha/t/y 農耕地とあわせて 0.487ha/t/y となる。

この関係を表したものが図 14 である。注目すべき点が二つある。ひとつは、一目瞭然のように、TMR とエコロジカルフットプリントの小麦粉と鉄の重みが全く逆転していることである。これは、それぞれの指標が異なった観点でのサステナビリティの側面に係わっていることを意味し、単純な換算などで一元化することは好ましくないことを示している。いまひとつは、そのどちらもが、そのコンセプトを生み出す際に本来注目していた物質対象よりも拡張的に適用した物質対象のほうが大きな値となっていることである。特にエコロジカルフットプリントの場合、鉄のエネルギー投入に係わる CO<sub>2</sub> から計算された「吸収地」が大きな部分を占めており、エコロジカルフットプリントの基礎概念との係わりでもあいまい性のある部分が支配的な数値

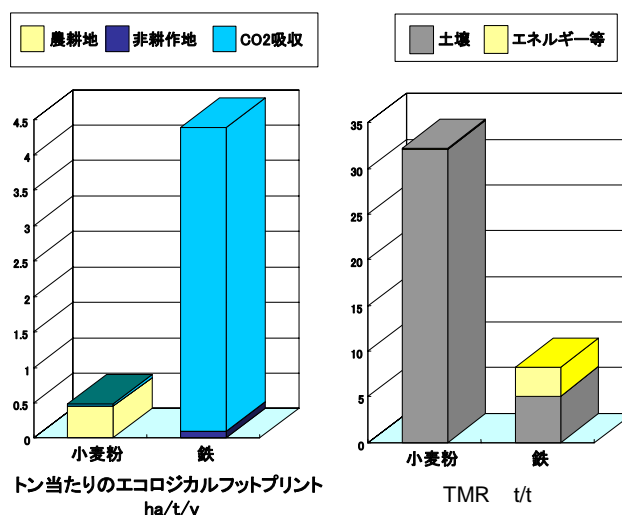


図 14 鉄と小麦粉のエコロジカルフットプリントと TMR

となって現れているのは大きな問題である。TMR においても、小麦粉の生産における作土部分の土壌が支配的な数値となっており、このようなバイオマス生産に適用するには耕作年限の仮定や、再利用土壌と客土部分との相違などより理論的に整理すべき問題が残されているといえる。いずれにしても、このいずれかの指標でサステナビリティが統一的に表現できるということではなく、それぞれの視点での指標として併置的に用いていくべきであることが指摘される。

TMR と同様に資源を対象とした指標との関連性についての検討結果を示す。資源の場合、1) プロセス負荷の問題: 資源の取得のためにどのくらい CO<sub>2</sub> や環境汚染物を発生させているか、2) 量の問題: 資源の取得のためにどのくらい天然資源に手をつけているか、3) 時間の問題: 資源の枯渇にいかに関わっているか、の 3 つの視点があり、TMR はその中でも 2) の量の問題に係わる指標であるといえる。

1)については、LCA で検討されており、各種のレアメタル類に対しても物材機構で「金属元素の製錬・精製段階における環境負荷算定に関する調査<sup>1)</sup>」として多くの金属をカバーできている。特に、CO<sub>2</sub>に関しては、エネルギー原料投入ベースで処理すれば、エネルギー原料と TMR の換算係数、おなじく CO<sub>2</sub> 発生源単位と、それぞれに応じて異なる換算係数を用いるだけであり、基本的にイクイバレントな取り扱いとなる。また、TMR の多くの部分を占める覆土、脈石などの土石についても、構内輸送に要する燃料投入などとして鉱山サイトのエネルギー投入に含まれ、CO<sub>2</sub> への換算は原則的に可能である。これに対して他の環境汚染物質は鉱山の状況により大きく異なっているため、一般化した扱いは困難である。そのためには、世界中の鉱山の環境汚染物質排出データを取得するなどの試みが必要であり、残念ながら今回の研究の枠内では取り組み得ない規模の課題であり、他の機会に譲ることとした。

3)の時間の問題、すなわち資源の「枯渇」との関係では、研究方法の部分で述べたように、「資源枯渇加速度」をとりあげ、それとの比較を行なった。図 15-a は、各金属元素資源の資源枯渇加速度である。なお参考までに周期表上に TMR を示した図を図 15-b

資源枯渇加速度

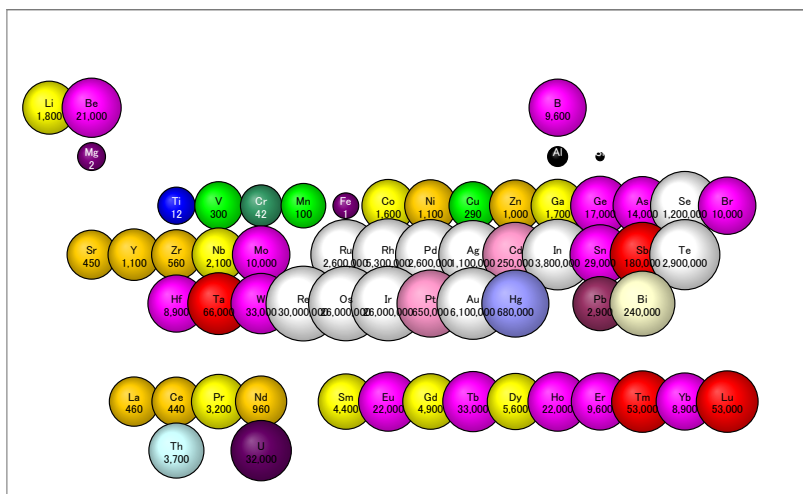
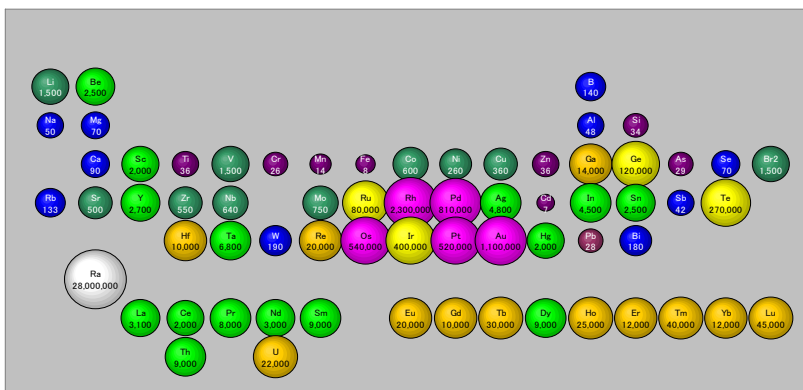


図 15-a 金属の資源枯渇加速係数



各元素のインゴットTMRを、周期表上に配置。円の大きさとしは、値の対数値にしたがって変化させ表記。

図 15-b 金属の TMR(最終結果)

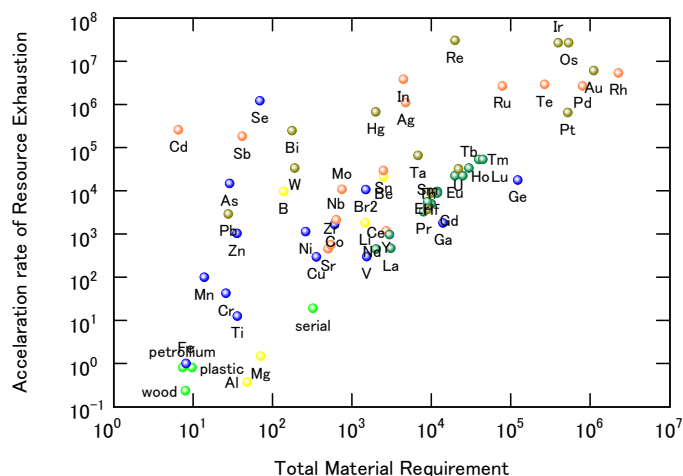


図 16 TMR と資源枯渇加速係数の関係

必要であり、残念ながら今回の研究の枠内では取り組み得ない規模の課題であり、他の機会に譲ることとした。

(図2再掲)に示す。この両者とも約1から100,000,000までの大きな範囲の値であるため、両対数でプロットしてその関係と比較してみたものが図16であり、横軸にTMR、縦軸に資源枯渇加速度をそれぞれの元素に対してプロットしてある。なお、図には金属元素資源だけでなく、プラスチック、木材、穀物もプロットした。図は対角線に対する上三角状になっており、多くの金属およびプラスチックや木材、穀物はその対角線底辺に近く位置しているが、Cd,Sb,Seをはじめとした金属元素資源がより高い位置に存在し、資源枯渇の面でより厳しい状態にあることを示している。このことから、TMRは資源枯渇に対して基底的关系を有しており、TMRの大きい金属元素資源は資源枯渇係数も大きくなっているが、資源枯渇はさらに数桁も厳しい金属元素資源が多くあり、資源枯渇加速度はそれらも反映した資源枯渇の指標としてTMRとは独立して試用する必要がある。

資源の要素は環境に係わるとともに人間活動の指標でもある。この資源指標が人間活動の中でどのくらい反映されているかも検討しておく必要がある。その点で価格との関連を見ておくことが重要であり、地殻存在度などの他の物理因子と比較して価格への反映状態を見ておく。先の資源枯渇加速度が、ある意味では資源の貴重さを表すことから価格に反映されている可能性が高い。そこで価格と資源枯渇加速度を比較したものが図17であり、横軸に資源枯渇加速度、縦軸にKgあたりの価格(2000年時点)を各金属ごとに両対数にプロットした。図中の下のラインは資源枯渇係数と価格との傾き1、すなわち比例関係を意味するラインであり、上のラインは傾き2、つまり資源枯渇加速度の二乗に価格が比例する関係を意味するラインである。ほとんどの金属がこの二つのラインの内側にあるが、強い相関関係を持っているとはいえない。

他方で、本研究で対象としたTMRは価格とよい相関関係を与えた。図18は横軸にTMRをとり、縦軸に価格を正規化した値をとっている。正規化した値という意味は、金属元素の価格は投機的な側面もあり変動が激しいため、それぞれの金属元素に対して最高値(図中の□点)と最安値(図中の◆点)をプロットしたが、為替等の時間的な

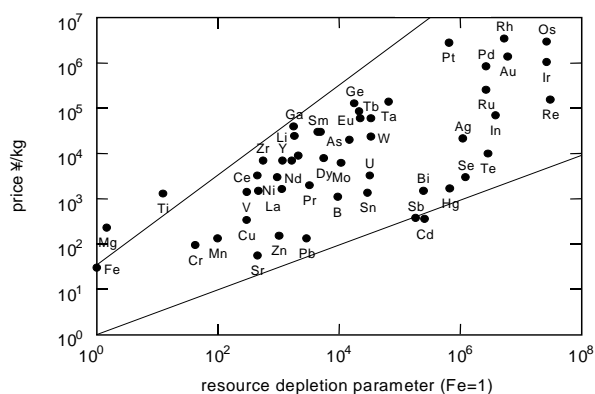


図17 資源枯渇加速係数と価格の関係

TMR of metal has good relationship to price, comparing other items.

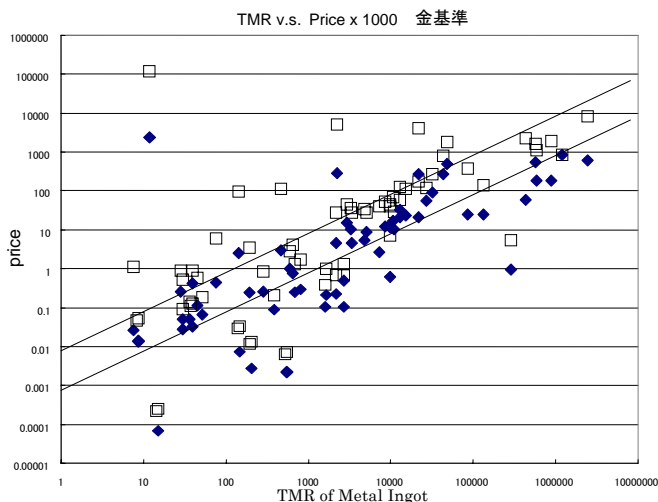


図18 金属のTMRと金対比の金属価格 (□は最高、◆は最低)

変動が激しいため、それぞれの金属元素に対して最高値(図中の□点)と最安値(図中の◆点)をプロットしたが、為替等の時間的な

変動もあるため、その年々の金の価格との比をとり、かつ 1982 年の金価格の 1/1000 を基準として表したからである。

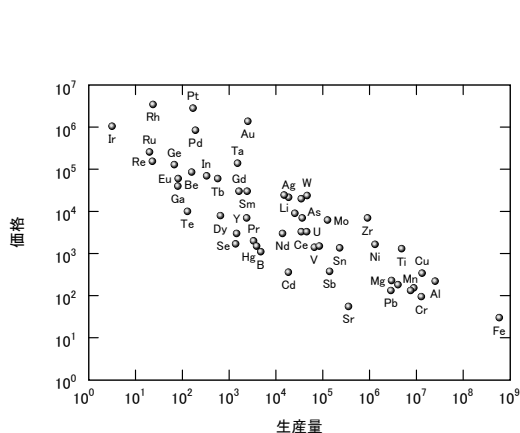


図 19 生産量と価格の関係

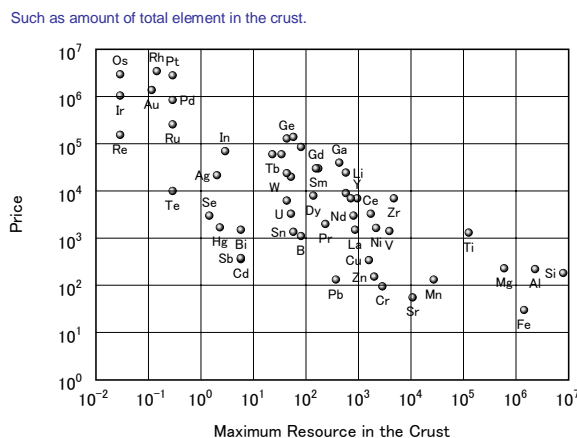


図 20 地殻存在度と価格の関係

両対数でのプロットは、相関性の低いものでも一見相関関係があるかのように見えるケースがある。このような場合、他の両対数の関係と比較してみると、得られた関係の妥当性がわかる。図 19 は需要と供給の関係からある程度価格との関係が認められるとも考えられる生産量と価格をプロットしたもの、図 20 は、逆に人間活動とは関係なく地殻存在度に対してプロットしたものである。いずれの場合も分散を数値的に比較する必要もないほど TMR と価格の関係に劣る相関しか得られておらず、単純な指標間の相関関係としては、TMR は価格と良い相関関係を有しているといえる。もちろん価格には投機などの変動要因もあり一意的に決まるものではないが、TMR はその基底となる因子になっているとみなせるであろう。

マテリアルフローを追う上で、素材や鉱物資源等の顕在的な経済行為として現れるフロー以外に、実際には地球環境から人間経済圏に取り上げられながらも、直接的な経済価値がないために廃土などのかたちで採掘という人為的な改変行為の後に地球環境に戻されているフローを「隠れたフロー」として追いかけて、TMR、別名エコロジカルリユクサック、として数値化してきた。それにもとづき、この TMR が地球環境や人間活動の諸因子といかに係わっているかをいくつかの異なる視点で見えてきた。これまでの検討結果をまとめると、

- 1) 鉱物資源に関する「隠れたフロー」は TMR(エコロジカルリユクサック)として数値化することができる。
- 2) その基礎データの多くは鉱山の操業に係わる環境報告書等に整備されつつあり、他の希少な金属類も地殻存在度などから推計することができる。
- 3) バイオマスに関しては土壌を含んだ取り扱いと、土壌を含まず非素材化部分を計上する方法があるが、そのいずれが妥当か今後の検討を要する
- 4) エコロジカルフットプリントとはむしろ相補的な関係にあり、係数などを用いてその中に組み込むことは妥当ではない。
- 5) 資源枯渇とも相関性はある程度はあるが一对一对応ではなく、TMR を基底として資源枯渇状況がある。

- 6) TMR はむしろ、価格とよい相関関係を示しており、顕在した物質フローを表してはいないが、廃土の運搬などのコストとしてある程度価格に反映されている。
- 7) 価格に反映されているとはいえ、そのコストはまだ内部コストに過ぎず、環境影響を配慮しての外部コストとしての評価の議論が必要である。
- 8) 以上の諸点を考慮すると、マテリアルフローの中の隠れたフローすなわち TMR の位置は、図 21 の左側の部分  $F_i$  として表される。このうち  $F_b$  はこれまで経済価値がなかったため

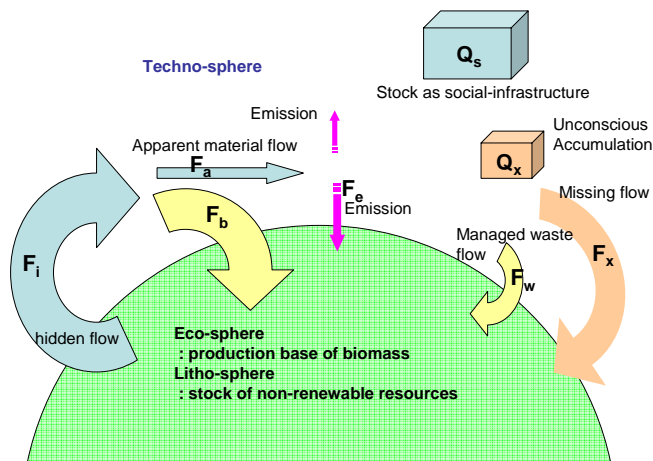


図 21 隠れた物質フローの位置づけ

- 顕在的に現れず、資源物資として算出される  $F_a$  のみがマテリアルフローの対象となっていたが、地球への影響を考慮するならば  $F_i$  としての地球から人間経済圏へのインプットを把握する必要がある。
- 9) TMR はそのための基礎的数値を与える環境ストレス因子のひとつにはなるが、これまでの段階では環境インパクトとの関連付けは明確にできておらず、これからさらなる議論が必要である。

(3) 国内の戦略物質マテリアルフローの分析

リチウム、ベリリウム、マグネシウム、アルミニウム、チタン、バナジウム、クロム、マンガン、鉄、コバルト、ニッケル、銅、亜鉛、ガリウム、ゲルマニウム、セレン、ストロンチウム、ジルコニウム、ニオブ、モリブデン、パラジウム、銀、インジウム、スズ、アンチモン、テルル、セシウム、レアメタル、ハフニウム、タンタル、タングステン、レニウム、プラチナ、金、水銀、鉛、ビスマスに対してマテリアルフローを求めた。基本的方法は研究方法の部分でのべたので、ここでは結果だけを列挙する。なお、このうち、戦略物質のフローについては、東大の月橋教授のグループが研究分担として調査を行なった。

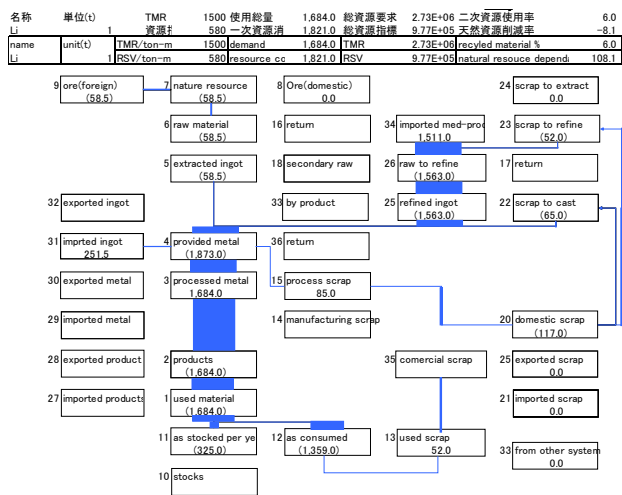


図 22-1 Li

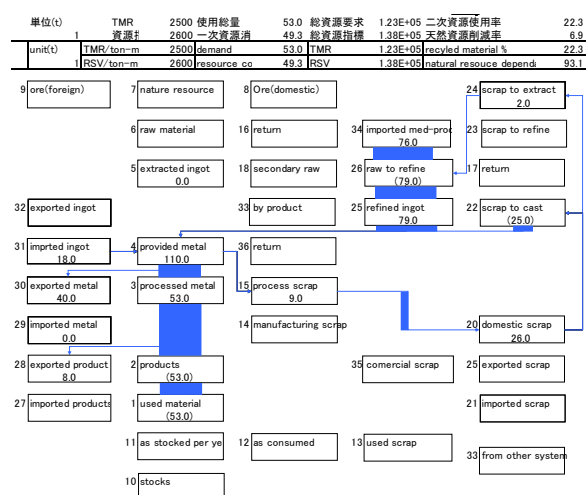


図 22-2 Be

名称	单位(t)	TMR	70 使用總量	51,328.0	總資源要求	2.87E+06	二次資源使用率	32.8
Mg	1	資源計	3.6 一次資源消	41,025.7	總資源指標	1.95E+09	天然資源削減率	20.1
name	unit(t)	TMR/ton-m	70 demand	51,328.0	TMR	2.87E+06	recycled material %	32.8
Mg	1	RSV/ton-m	3.6 resource cc	41,025.7	RSV	1.85E+09	natural resource depend	79.9

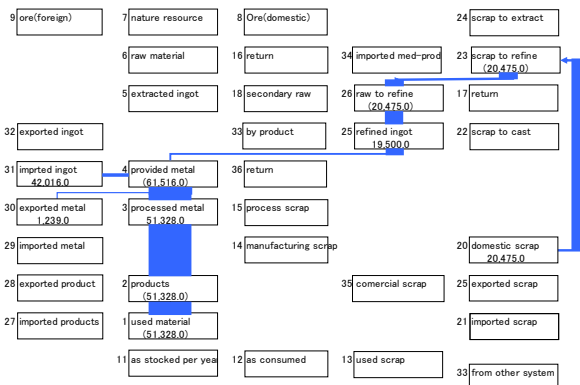


图 22-3 Mg

名称	单位(t)	TMR	48 使用總量	3,640.7	總資源要求	1.17E+08	二次資源使用率	55.2
Al	1000	資源計	1.5 一次資源消	2,427.9	總資源指標	5.46E+06	天然資源削減率	33.3
name	unit(t)	TMR/ton-m	48 demand	3,640.7	TMR	1.17E+08	recycled material %	55.2
Al	1000	RSV/ton-m	1.9 resource cc	2,427.9	RSV	5.46E+06	natural resource depend	66.7

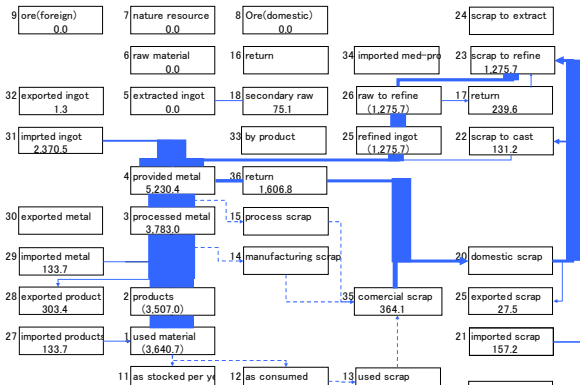


图 22-4 Al

名称	单位(t)	TMR	36 使用總量	143.9	總資源要求	4.96E+06	二次資源使用率	24.7
V	1000	資源計	7.4 一次資源消	137.9	總資源指標	1.06E+06	天然資源削減率	4.2
name	unit(t)	TMR/ton-m	36 demand	143.9	TMR	4.96E+06	recycled material %	24.7
V	1000	RSV/ton-m	7.4 resource cc	137.9	RSV	1.06E+06	natural resource depend	95.8

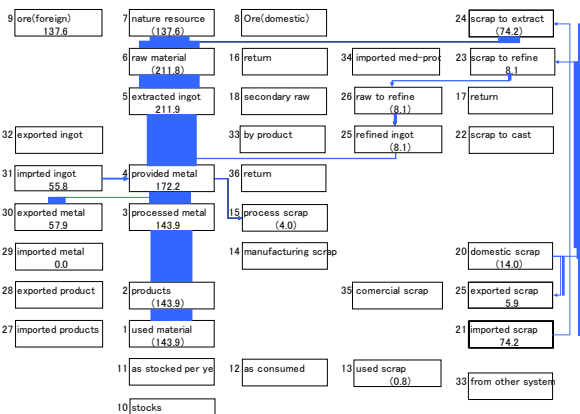


图 22-5 Ti

名称	单位(t)	TMR	1500 使用總量	4,725.0	總資源要求	6.90E+06	二次資源使用率	19.3
V	1	資源計	240 一次資源消	4,602.0	總資源指標	1.13E+08	天然資源削減率	2.6
name	unit(t)	TMR/ton-m	1500 demand	4,725.0	TMR	6.90E+06	recycled material %	19.3
V	1	RSV/ton-m	240 resource cc	4,602.0	RSV	1.13E+08	natural resource depend	97.4

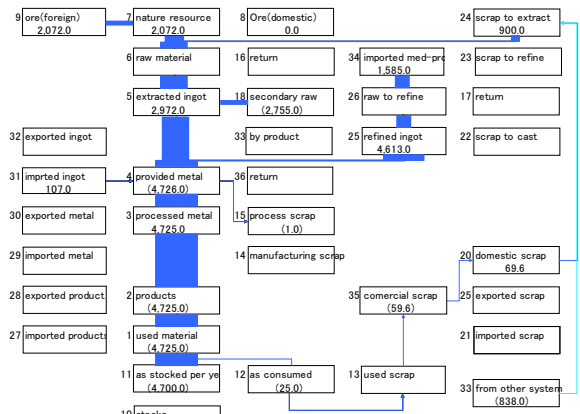


图 22-6 V

名称	单位(t)	TMR	28 使用總量	547.2	總資源要求	1.02E+07	二次資源使用率	35.6
Cr	1000	資源計	12 一次資源消	365.0	總資源指標	6.57E+06	天然資源削減率	33.3
name	unit(t)	TMR/ton-m	28 demand	547.2	TMR	1.02E+07	recycled material %	35.6
Cr	1000	RSV/ton-m	12 resource cc	365.0	RSV	6.57E+06	natural resource depend	66.7

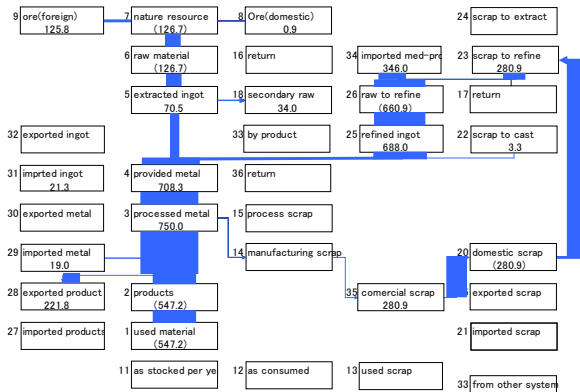


图 22-7 Cr

名称	单位(t)	TMR	14 使用總量	846.8	總資源要求	1.04E+07	二次資源使用率	13.8
Mn	1000	資源計	13 一次資源消	744.6	總資源指標	1.10E+07	天然資源削減率	12.1
name	unit(t)	TMR/ton-m	14 demand	846.8	TMR	1.04E+07	recycled material %	13.8
Mn	1000	RSV/ton-m	13 resource cc	744.6	RSV	1.10E+07	natural resource depend	87.9

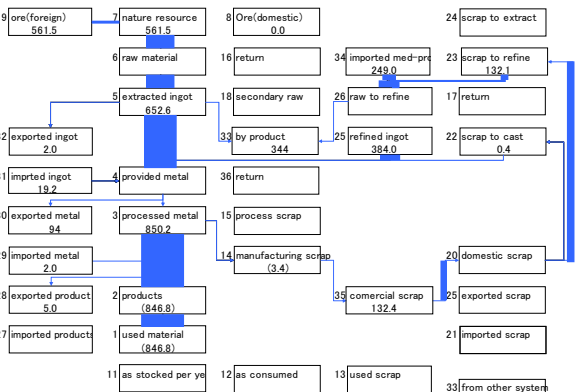


图 22-8 Mn

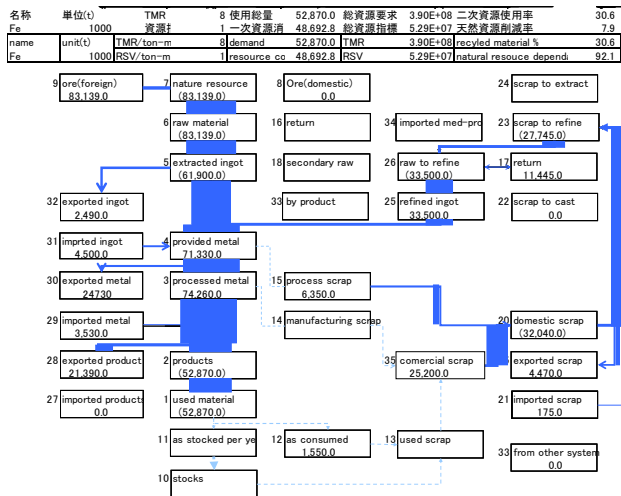


図 22-9 Fe

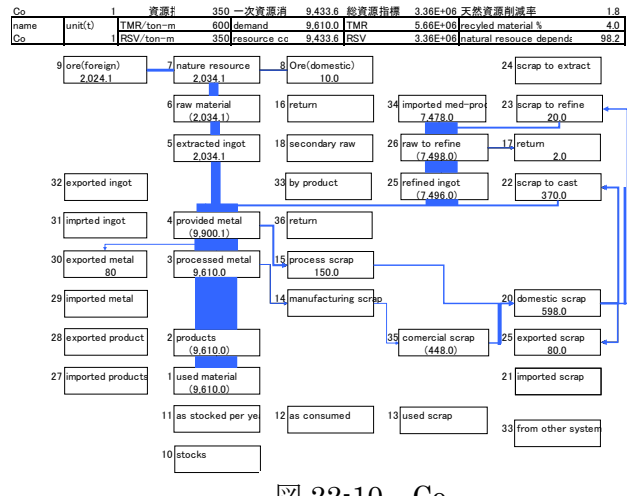


図 22-10 Co

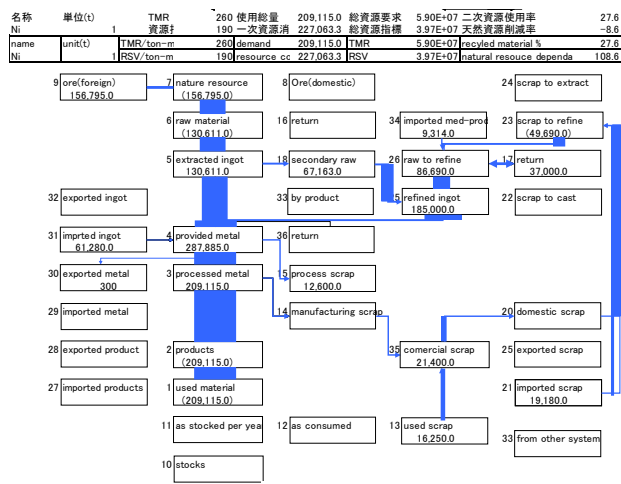


図 22-11 Ni

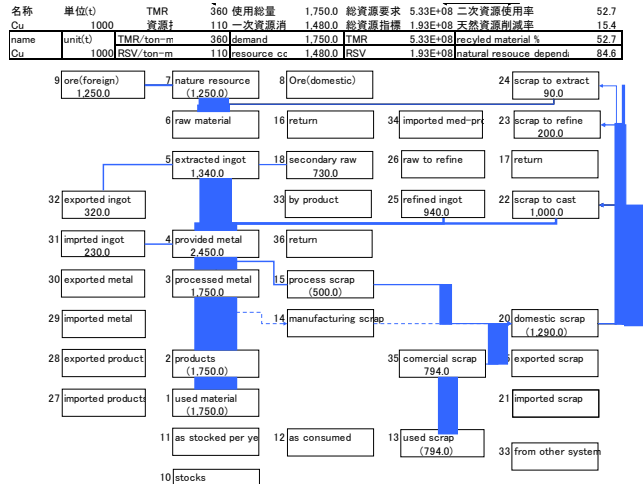


図 22-12 Cu

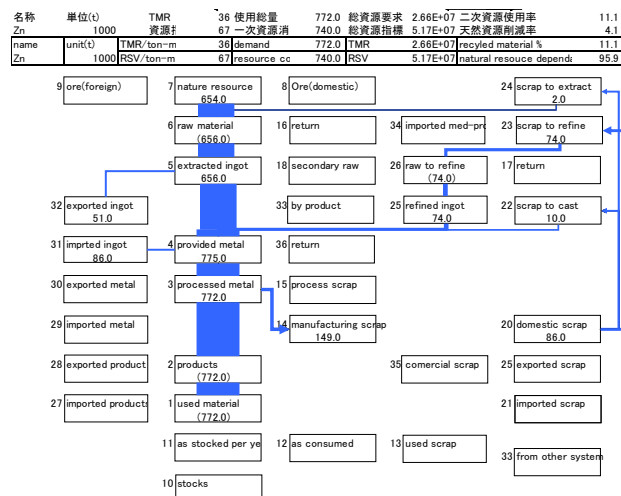


図 22-13 Zn

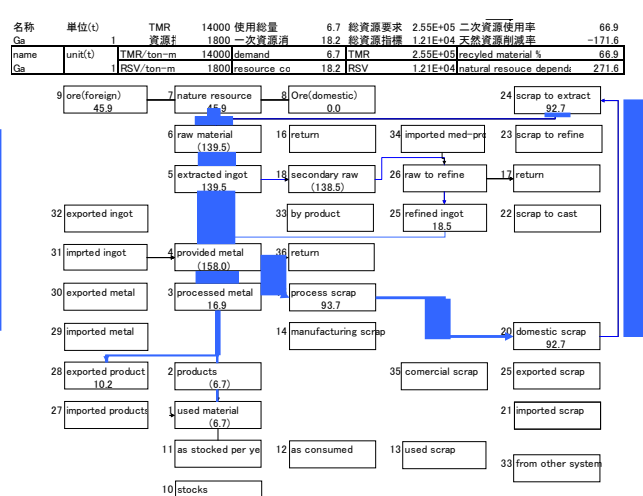


図 22-14 Ga

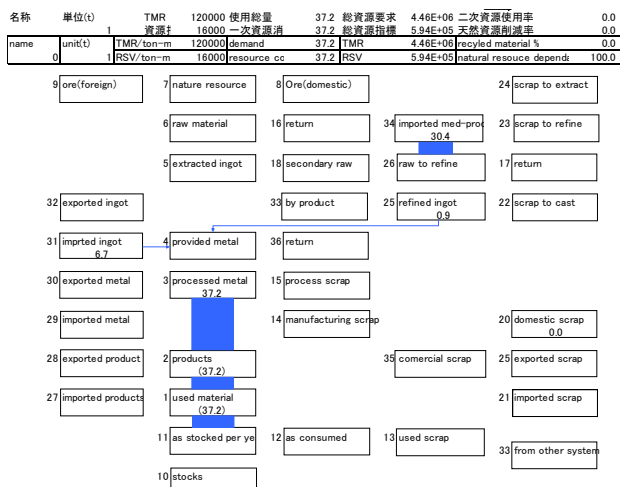


図 22-15 Ge

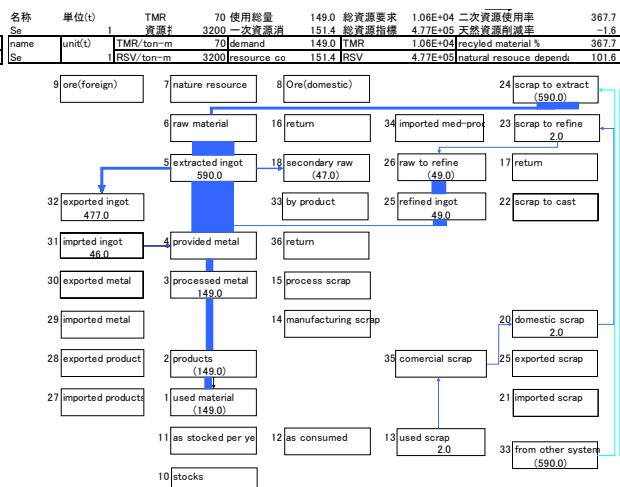


図 22-16 Se

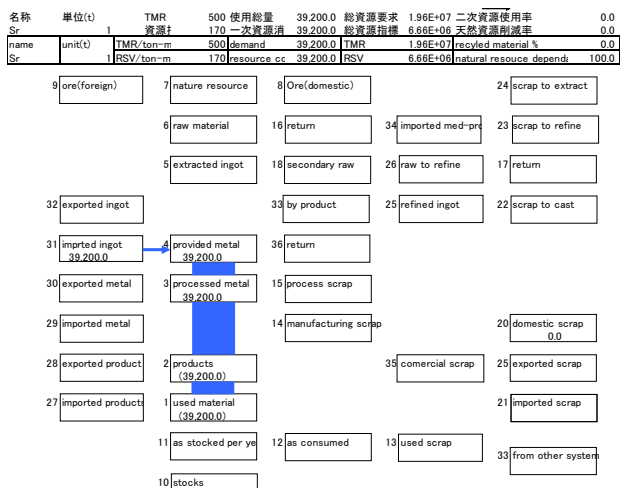


図 22-17 Sr

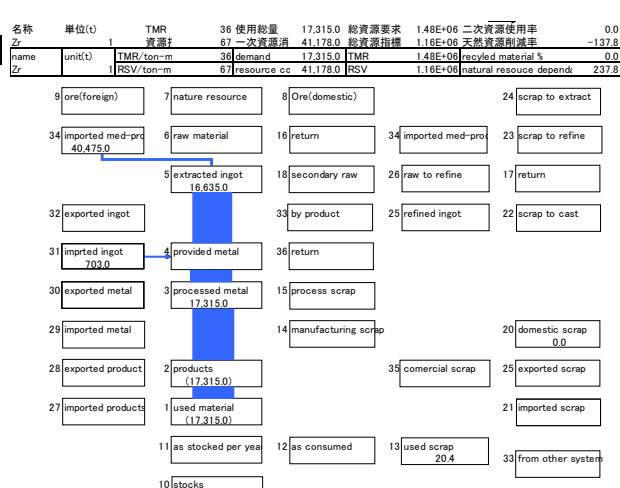


図 22-18 Zr

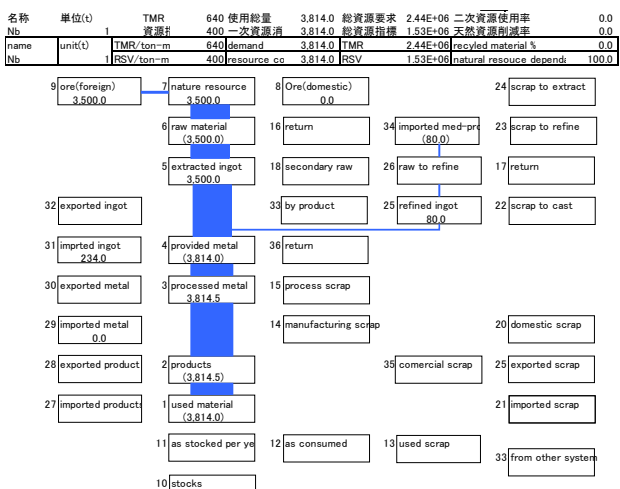


図 22-19 Nb

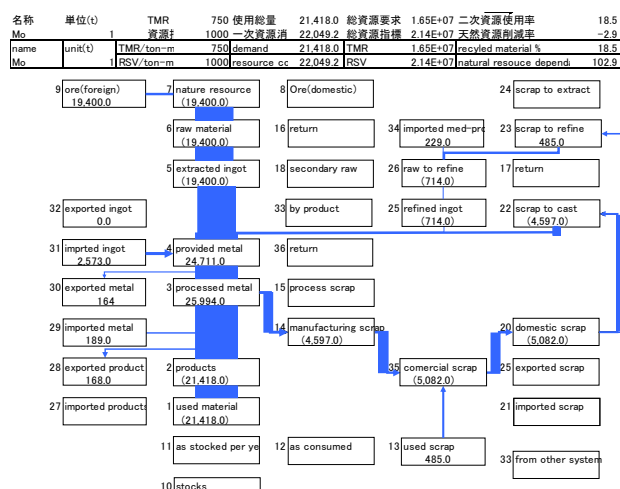


図 22-20 Mo



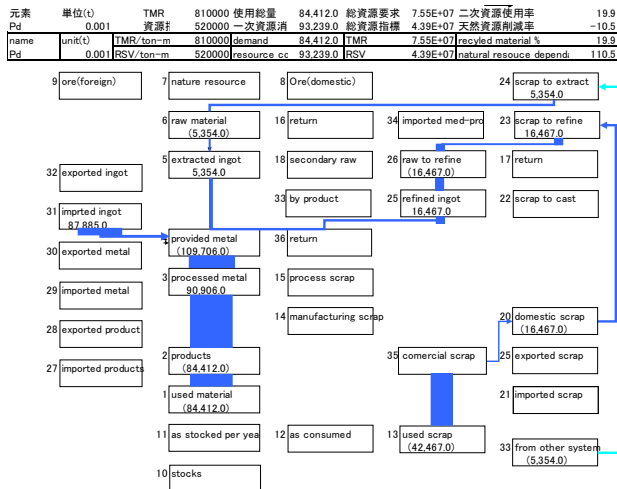


図 22-21 Pd

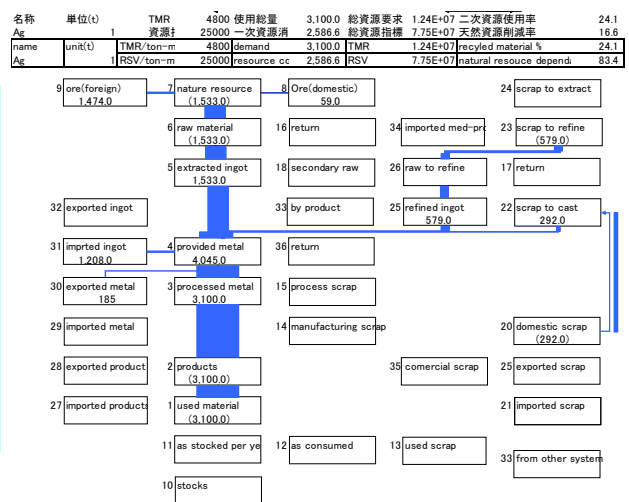


図 22-23 In

図 22-22 Ag

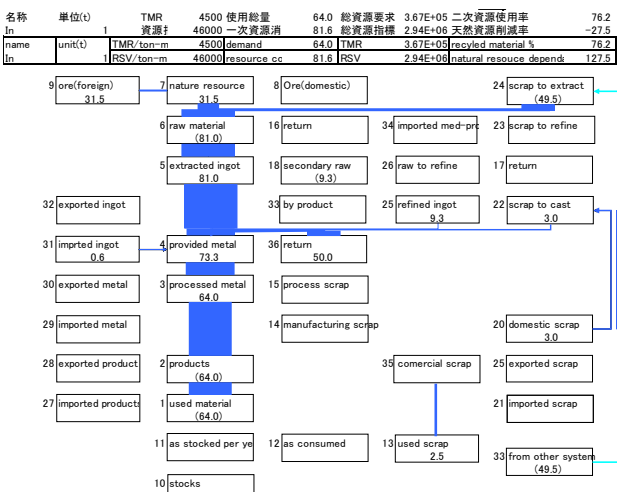


図 22-24 Sn

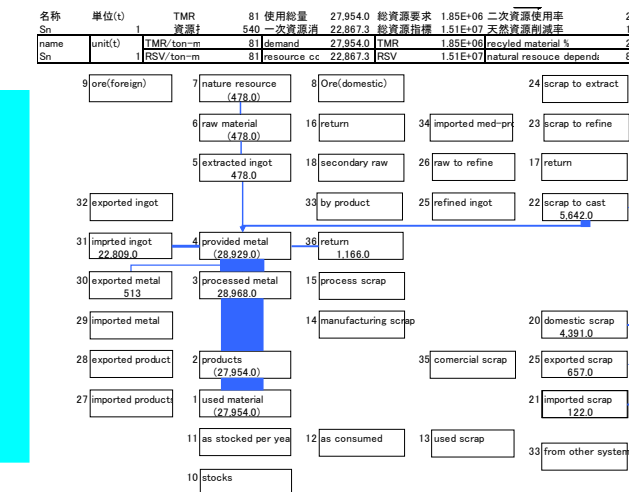


図 22-25 Sb

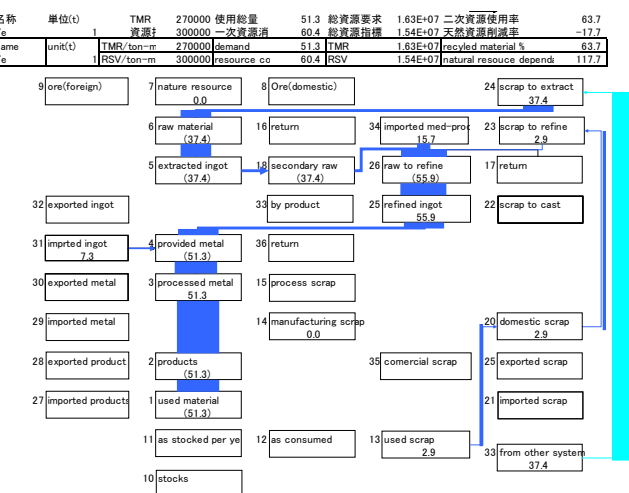


図 22-26 Te

名称	単位(t)	TMR	10000	使用総量	5.0	総資源要求	5.00E+04	二次資源使用率	0.0
Cs	資源#	資源#	一次資源消費	総資源消費	5.0	総資源消費	1.67E+05	天然資源削減率	-34.7
name	unit(t)	TMR/ton-m	10000	demand	5.0	TMR	5.00E+04	recycled material %	0.0
Rs	unit(t)	RSV/ton-m	33300	resource cc	5.0	RSV	1.67E+05	natural resource depend	100.0

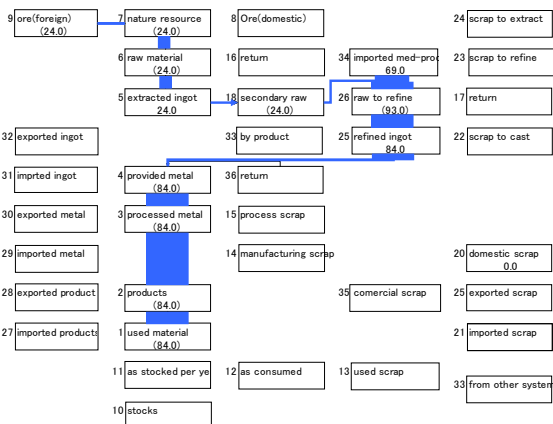


図 22-27 Cs

名称	単位(t)	TMR	3100	使用総量	17,323.0	総資源要求	6.56E+04	二次資源使用率	0.0
R.E.	資源#	資源#	一次資源消費	総資源消費	21,149.0	総資源消費	7.28E+03	天然資源削減率	-22.1
name	unit(t)	TMR/ton-m	3100	demand	17,323.0	TMR	6.56E+04	recycled material %	0.0
RE	unit(t)	RSV/ton-m	420	resource cc	21,149.0	RSV	7.28E+03	natural resource depend	122.1

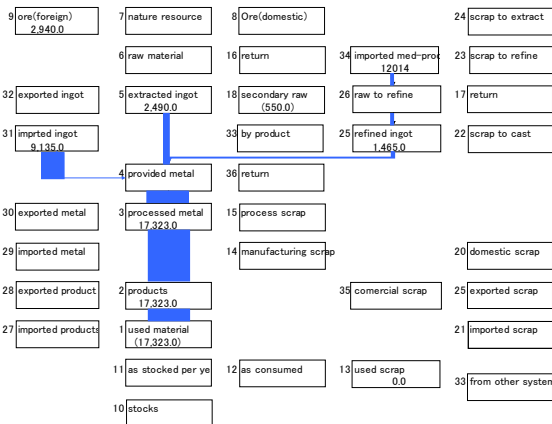


図 22-28 R.E.

名称	単位(t)	TMR	10000	使用総量	5.0	総資源要求	5.00E+04	二次資源使用率	0.0
Hf	資源#	資源#	一次資源消費	総資源消費	5.0	総資源消費	1.67E+05	天然資源削減率	0.0
name	unit(t)	TMR/ton-m	10000	demand	5.0	TMR	5.00E+04	recycled material %	0.0
Hf	unit(t)	RSV/ton-m	33300	resource cc	5.0	RSV	1.67E+05	natural resource depend	100.0

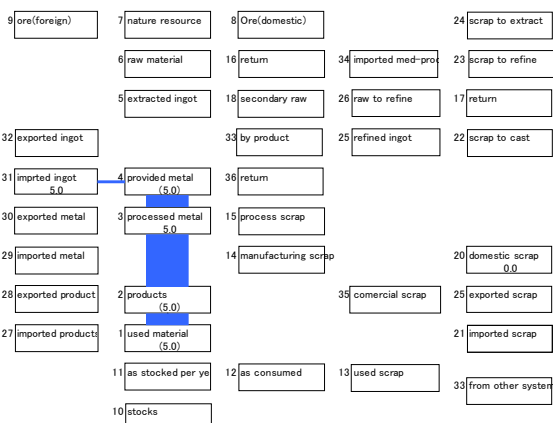


図 22-29 Hf

名称	単位(t)	TMR	6800	使用総量	503.0	総資源要求	8.89E+06	二次資源使用率	9.7
Ta	資源#	資源#	一次資源消費	総資源消費	1,308.0	総資源消費	3.72E+06	天然資源削減率	-160.0
name	unit(t)	TMR/ton-m	6800	demand	503.0	TMR	8.89E+06	recycled material %	9.7
Ta	unit(t)	RSV/ton-m	7400	resource cc	1,308.0	RSV	3.72E+06	natural resource depend	260.0

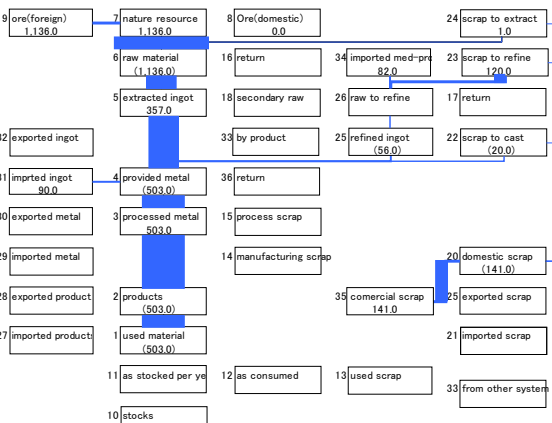


図 22-30 Ta

名称	単位(t)	TMR	190	使用総量	5,049.0	総資源要求	1.29E+06	二次資源使用率	5.0
W	資源#	資源#	一次資源消費	総資源消費	6,802.0	総資源消費	4.04E+06	天然資源削減率	-34.7
name	unit(t)	TMR/ton-m	190	demand	5,049.0	TMR	1.29E+06	recycled material %	5.0
W	unit(t)	RSV/ton-m	800	resource cc	6,802.0	RSV	4.04E+06	natural resource depend	134.7

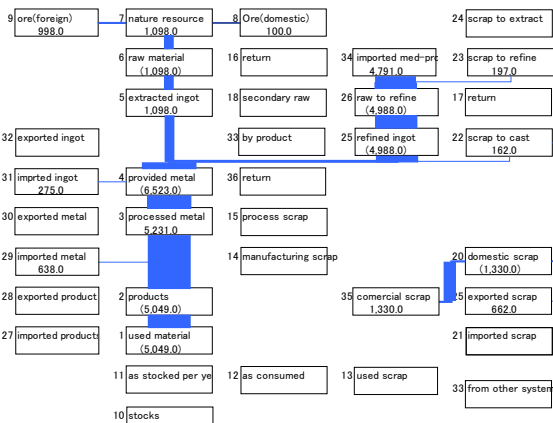


図 22-31 W

名称	単位(t)	TMR	20000	使用総量	1.2	総資源要求	3.50E+04	二次資源使用率	14.6
Re	資源#	資源#	一次資源消費	総資源消費	1.8	総資源消費	3.24E+05	天然資源削減率	-45.8
name	unit(t)	TMR/ton-m	20000	demand	1.2	TMR	3.50E+04	recycled material %	14.6
Re	unit(t)	RSV/ton-m	270000	resource cc	1.8	RSV	3.24E+05	natural resource depend	145.8

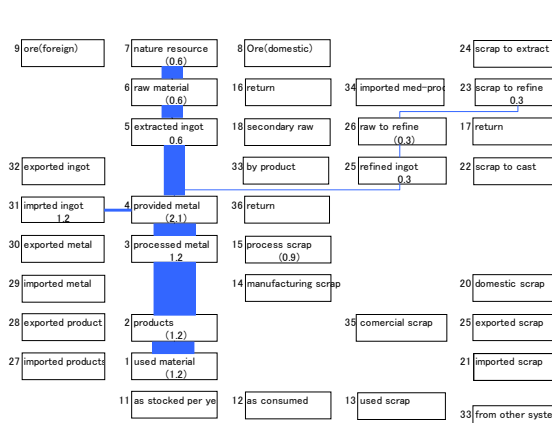


図 22-32 Re

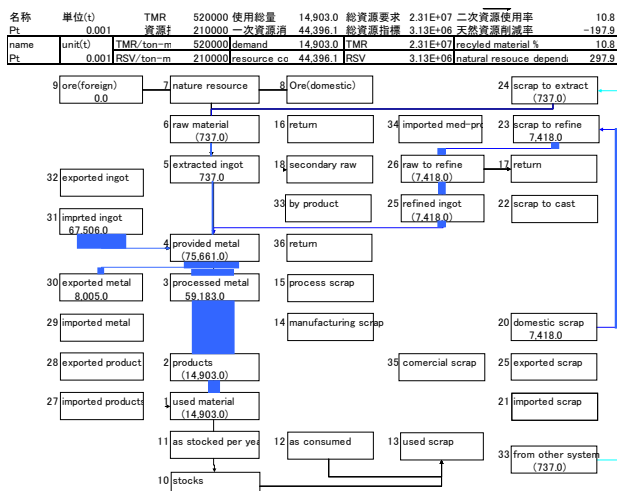


図 22-33 Pt

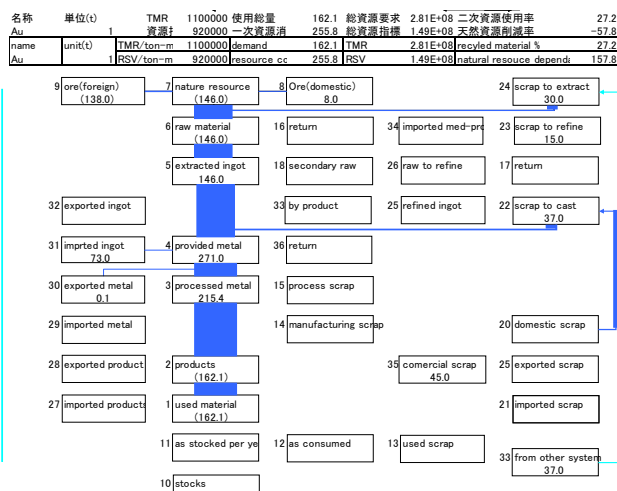


図 22-34 Au

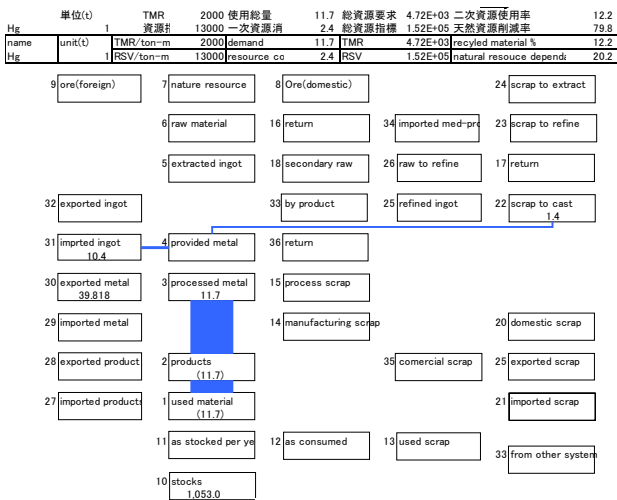


図 22-35 Hg

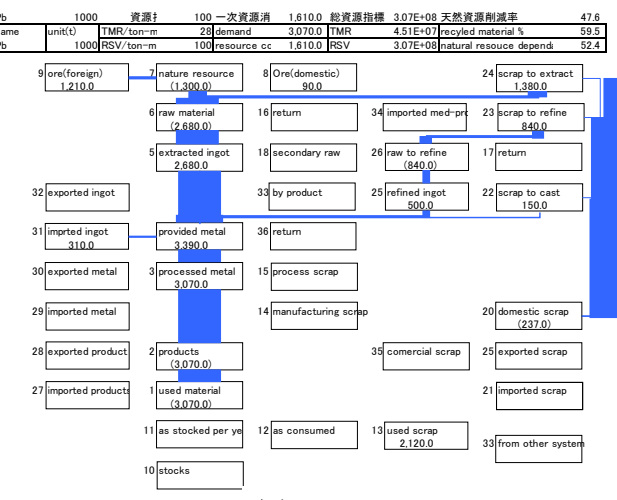


図 22-36 Pb

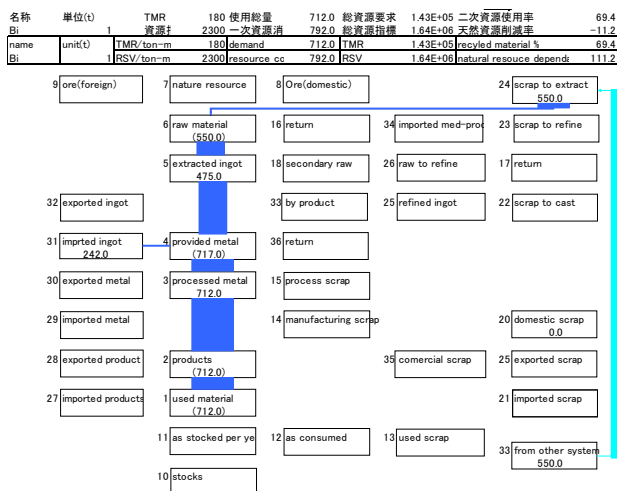


図 22-37 Bi

図 22 マテリアルフロー

以上のフローに基づき、2002年の最終需要レベルでのTMRと、リサイクル、歩留まりを反映した実要求としてのTMRをわが国のそれぞれの金属の年間使用に対してもとめ、実要求レベルのTMRの大きい巡に並べたものが、図23である。図の白抜きコラムが最終需要段階でのTMR、斜線が実要求のTMRである。最終需要段階のTMRとは、最終製品の中の金属を得るのに必要であった資源量としてのTMRであり、これが実要求の資源量としてのTMRより小さくなるケースがあるのは、すでに地球圏から人間経済圏に取り入れられて「隠れたフロー」を発生しなくなった資源、すなわちリサイクル資源を利用しているからである。このようにTMRを用いることによりリサイクルの効果も的確に表すことができるようになる。

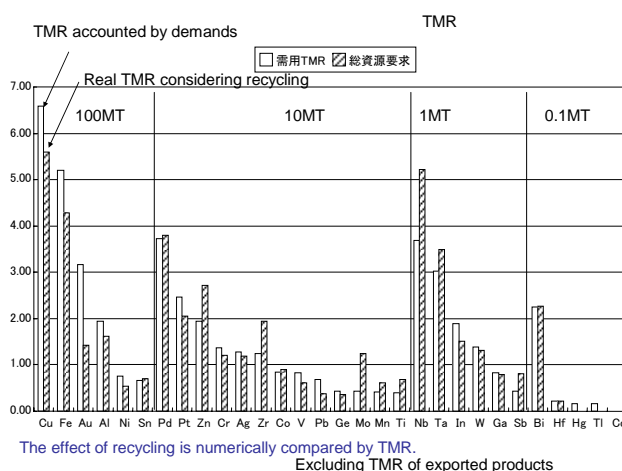


図 23 わが国の金属の TMR

(4) 関与物質総量の応用

a) マテリアルフローの TMR 表示

簡素化したマテリアルフローの典型的例を図24の1-4に示す。それぞれ、鉛、ガリウム、アルミニウム、プラスチックのマテリアルフローを同一のフォーマット上に記し、さらに、最終使用量に対するフロー量の比を線の太さで表したものである。理想的な循環型のフローは、鉱石等の天然からの系内への流入を最小限に抑え、使用量に匹敵するほぼ同じ太さの線が形成される。ここで取り上げた4つの例は、現在のマテリアルフローの代表的な生涯ループ型、中途ループ型、スパイラル型、ワンウェイ型の類型となっている。

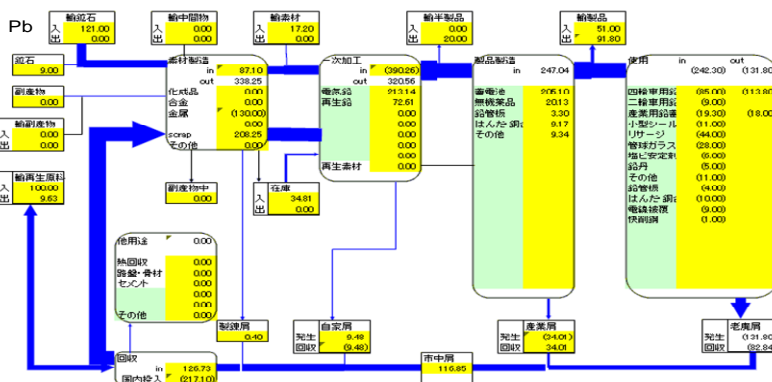


図 24-1 鉛のマテリアルフロー

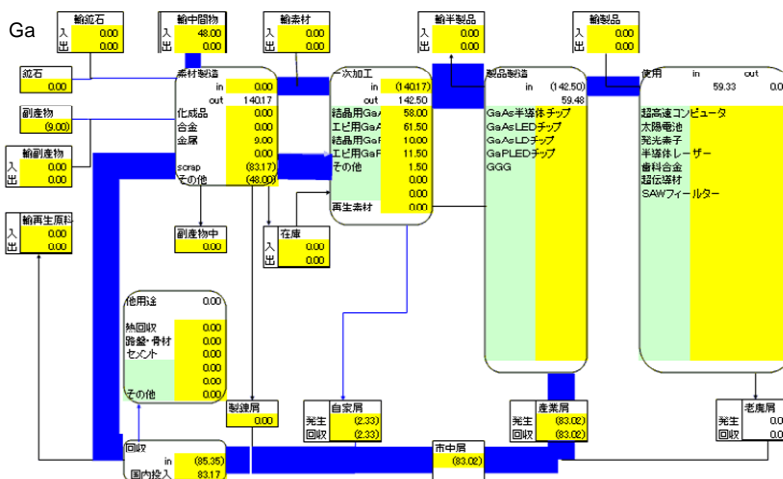


図 24-2 Ga のマテリアルフロー

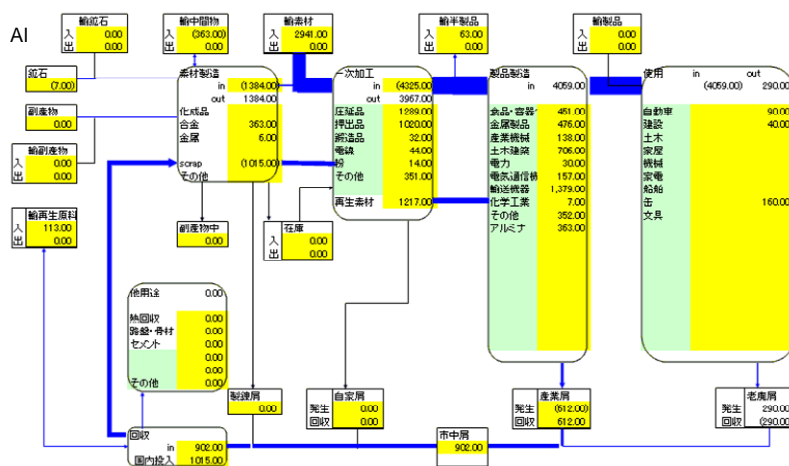


図 24-3 アルミニウムのマテリアルフロー

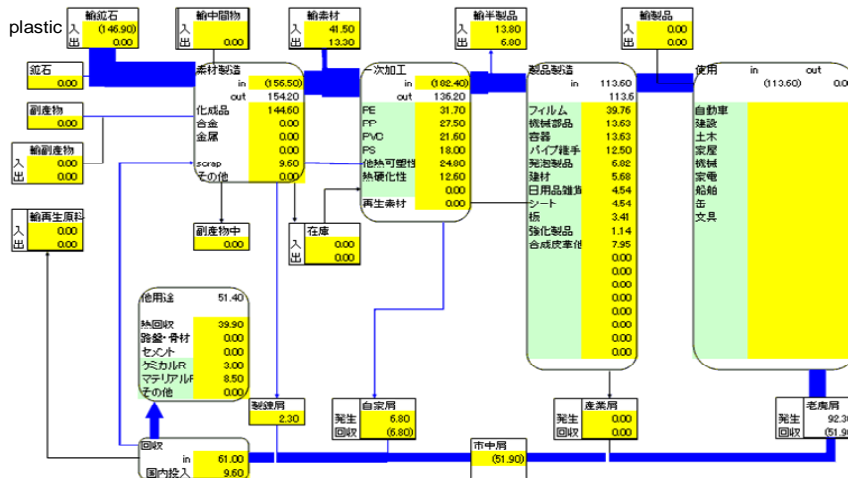


図 24-4 プラスチックのマテリアルフロー

このような傾向は同一の図上に重ねがきすることでより比較しやすくなる。しかしながら物質により使用量が大きく異なるためそのような試みはあまり行なわれていなかった。例えば Au の使用量は土石の使用量に比べてはるかに少ないために土石のデータに埋もれて全く現れてこない。ここで TMR を用いることにより、資源的重みの多い素材は量が少なくとも把握できるようになる。図 25 では大量に使用される土石、日常的に使用されるプラスチック、産業基盤となる鉄、微量でも重要用途を持つ金を TMR を用いてあわせて記述した。

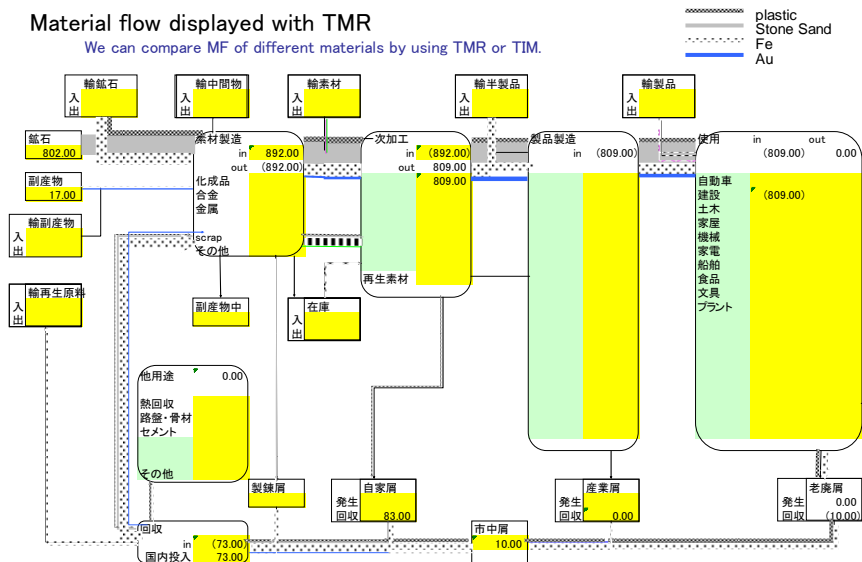


図25 TMRを用いて重ね書きしたプラスチック、土石、鉄、金のフロー

このようにしてみると、土石がワンウェイのフローとなっている反面、鉄が生涯ループを形成していることがわかる。また、通常のマテリアルフローの重ねがきでは検出できないプラスチックや金のフローも図中に表れ、リサイクルなどの資源の観点からの相対的重みを見て取ることもできるようになった。

b) 製品単位での物質構成の TMR による表示

国レベルでのフローは基本的には個々の製品需要の集積である。その観点からして個々の製品に対して TMR による記述を進めておくと物質使用のどの要素が大きいかを知ることができる。これは、Wuppertal のグループの MIPS(Material Intensity per Service)と一致するが、TMR を多様な各物質にわたって算定してあることによって、全体の Material Intensity の量だけでなく、その構成要素をチェックして完全に結びつけることができる。

図 26、27 の上部はそれぞれコピー機に使用されるモーターと携帯電話の最終素材重量構成であり、下部はそれをもとに各成分の TMR を掛けて得られた TMR 構成である。最終素材重量ではいずれも鉄やプラスチックの占める割合が大きいが、TMR 構成になるとその様相は一変する。すなわち、比較的単純な構成であるモーターにおいては、銅の占める割合が大きくなるとともに、量的には微量であったニッケルの存在も注目される。携帯電話に至っては、量的にはほとんど無視される金、パラジウム、銀が大きな比率を占めるようになり。最終素材重量とは全く異なった資源利用像となる。

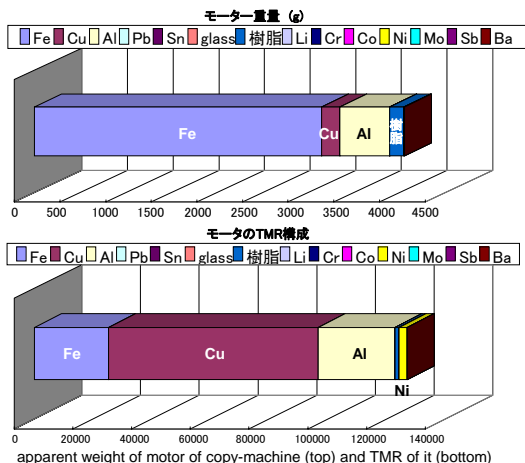


図 26 コピー機モーターの素材重量構成と TMR 構成

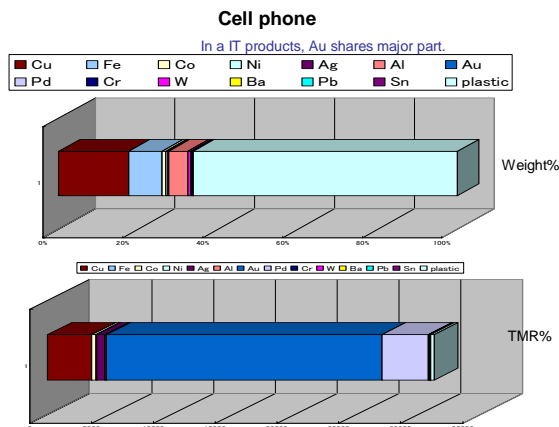


図 27 携帯電話の素材重量構成  
TMR 構成

さらに、顕著に現れたのが IT の部品として不可欠な LSI である。IC チップおよび世代の異なる CPU とネットワーク回路用ボードを完全に破砕し化学分析にかけてその成分比を知り、その値にそれぞれの TMR を掛けて TMR 構成を得た。図 28 の下部は金属重量で見た構成要素であり、上部が TMR となっている。半導体の主成分である Si はほとんどが酸、王水などでは不溶物質となるためそれを除いたものが分析されている。金属重量としてはタングステン、ニッケルなどが目立つが、TMR で資源の重みを考慮すると、金の占める割合ははるかに大きい。また Ir, Pd, Rh などの白金族元素も高精度の電気接点部分などに用いられており、それらを無視できないことがよくわかる。

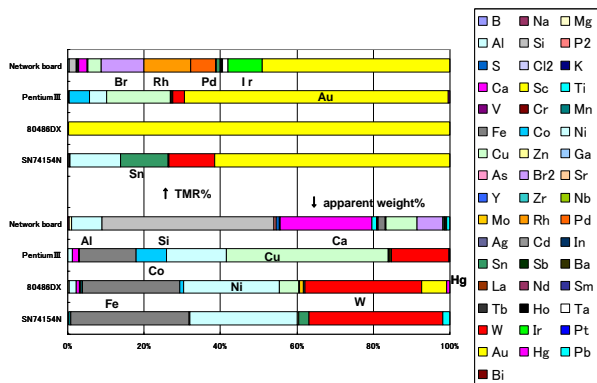


図 28 LSI と CPU の化学分析値と TMR

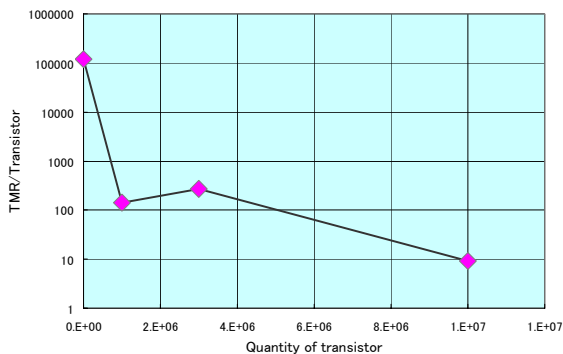


図 29 トランジスタあたりの TMR

LSI と CPU に含まれるトランジスタの個数に対してトランジスタ 1 個あたりの TMR を図 29 にプロットしてみた。このように 1 トランジスタあたりの TMR は減少してはいるが、CPU あたりのトランジスタ数は指数関数的に増加しており、新しい CPU の開発において全体として TMR は増加の傾向となり、単位機能あたりの物質の減量化と回路の集積化の競争関係になっているといえる。

c) 国レベルの関与物質総量

先のような製品レベル資源集約としての表現とともに TMR の応用で重要になるのは、国の資源生産性の表示である。国の資源生産性において、(GDP)/(天然資源量) が用いられているが、往々にして天然資源ではなく輸入素材量が用いられているケースが多い。天然資源をどの段階から定義するか曖昧な要素があったが、地球資源から一時的に使用する量として TMR を用いることにより明確に定義することができる。

図 30 はわが国の 2003 年の年間のマテリアル需要を TMR であらわしたものである。最終素材重量ではグラフの下側の部分のように、ほぼ 2G トンであり鉄の値が支配的になってしまう。それに対して、TMR でみると鉄とともに銅、金の占める割合が大きくなり、TMR 全体としても 22Gton の量になる。より詳しく見ると、鉄が 7.9Gt(最終金属量 986Mt)、銅 5.5Gt(最終金属量 15Mt)、金 2.8Gt(最終金属量 2.5kt)、アルミニウム 1.3Gt(最終金属量 28Mt)、ウラン 1Gt(最終金属量 46kt)、スズ 695Mt(最終金属量 280kt)、ホウ素 664Mt(最終酸化物量 4.8Mt)、ジルコニウム 482Mt(最終酸化物量 884kt)、クロム 351Mt、亜鉛 342Mt、ニッケル 330Mt、ストロンチウム 238Mt、リチウム 184Mt、パラジウム 163Mt、シリコン 158Mt、マンガン 113Mt、白金 111Mt とつく。

国ごとに TMR を集計し比較することもできる。図 31 は同じく 2003 年のデータから中国と日本の TMR を比較したものである。中国のデータにはいくつか不明部分もあり、この図においても金が含まれていない。しかしながら金を含まなくとも中国の TMR は既に日本を凌いでおり、しかもこの二カ国を合わせると世界の 3 割に近い TMR となっている。日本での TMR の構成は、鉄が 881Mt、銅 433Mt、金 248Mt、アルミニウム 184Mt、とここまでは世界と同じ傾向であるが、さらにスズ 72Mt、ニッケル 51t、パラジウム 50Mt、マンガン 41Mt、白金 27Mt、クロム 25Mt、シリコン 24Mt、亜鉛 22Mt、リチウム 22Mt、といわゆるハイテク素材といわれる金属が続いている。

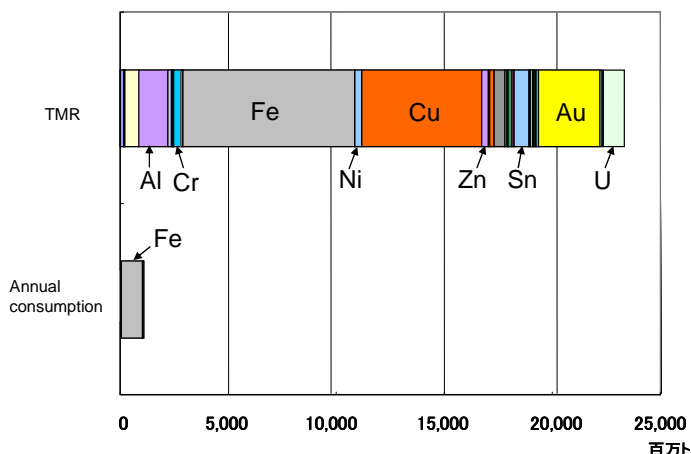


図 30 わが国の金属分の TMR と実フロー

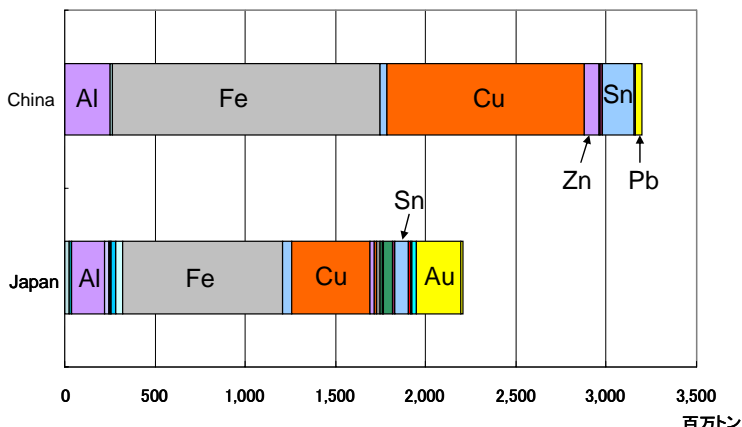


図 31 わが国と中国の TMR

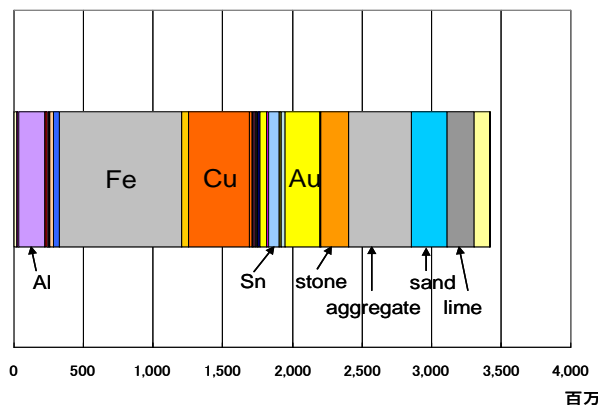


図 32 土石を含んだわが国の TMR



すなわち、TMR の構成をみることによって、最終素材量では埋もれてしまう高機能素材に係わる物質の消費動向を把握し、それらが資源に対してどの程度圧迫しているかをより具体的に把握できるようになる。

ここまでは、主として金属を対象に TMR の傾向を見てきたが、本来 TMR は金属に限ることなくすくなくとも鉱物資源には適用されるべきである。土石、砂利の使用となると国際的な統計はまだ不備であるため国内の物質消費に限り土石、砂利などを含めた TMR が図 32 である。土石類は単位あたりの TMR が小さいため、素材量としては 8 割を占めるものの TMR としては金属の 2/3 程度にしかならない。このことは逆に言うと、国内の資源が主体である土石類よりも海外の資源を主体としている金属類の資源への関与が重要であり、わが国はその資源への関与量のほとんどを海外に置いた形で経済活動を進めてきているといえる。

d) 将来予測への適用

先に 2003 年の世界の年間 TMR を約 22Gt と示したが、1997 年の年間 TMR は、16Gt でしかなかった。世界の資源消費は急速に上昇している。図 33 は 1975 年からの世界の TMR の推移を示したものであり、着実に増加しており 1990 年以降は加速の傾向になっている。図 33 には埋蔵量に相当する TMR もプロットしてある。これはそれぞれの金属の埋蔵量にその金属の TMR を重みとして掛けたものの総和である。埋蔵量も資源の需要が多くなり枯渇に近づけば探索が進み増加する傾向があるが、TMR で重み付けした埋蔵量はほぼ横ばいとなっている。

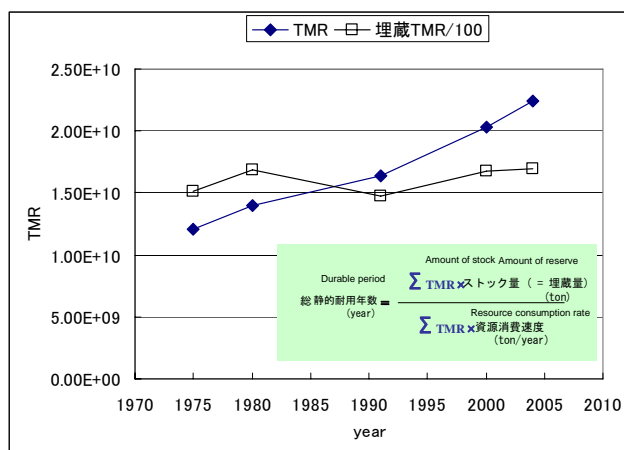


図 33 世界の TMR の推移と埋蔵量相当 TMR

ここで、一般によく用いられる資源の耐用年数の考え方

埋蔵量

$$\text{耐用年数} = \frac{\text{埋蔵量}}{\text{年間消費量}}$$

年間消費量

を拡張して、総耐用年数として

$$\Sigma(\text{TMR}_i \cdot \text{埋蔵量 } i)$$

$$\text{総耐用年数} = \frac{\Sigma(\text{TMR}_i \cdot \text{埋蔵量 } i)}{\Sigma(i \text{ 資源の年間 TMR})}$$

$\Sigma(i \text{ 資源の年間 TMR})$

を表した。その総耐用年数の推移をグラフで表したものが図 34 である。1970 年代には 120 年であった総耐用年数は 1990 年には 100 年を切り、さらに 21 世紀になると 80 年をも下回るようになってきている。個々の金属で見ると、70 年台に耐用年数が約 30 年として問題になった鉛や亜鉛、銅などは新規の鉱山の探索などでほぼ同程度の耐用年数で凌いできているが、全体としては着実に資源の枯渇の方向に向かって進んでいることがこの図から読み取れる。さらに、この総耐用年数の推移をそのまま外挿すると 2040 年には総耐用年数が 10 年を切ってしまうという事態さえ予測される。

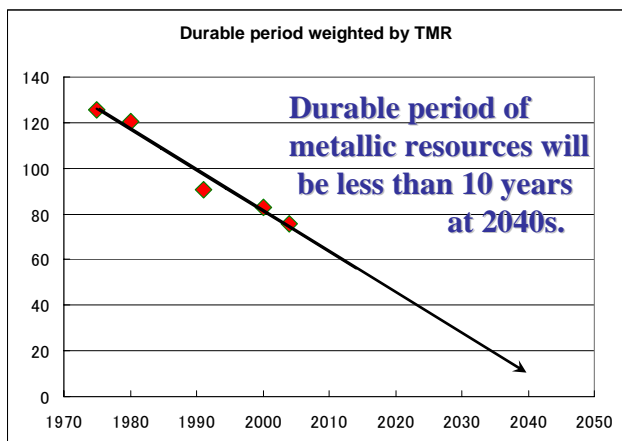


図 34 金属の総耐用年数の推移

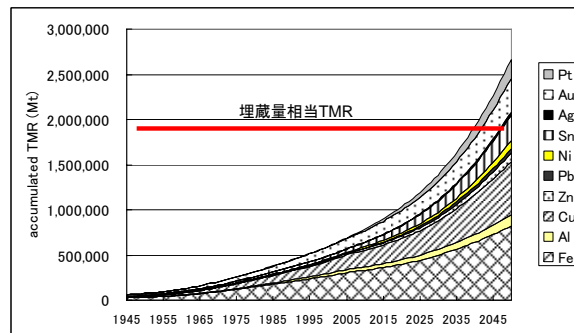


図 35 2050年までの金属資源消費の累積 TMR

その状況をより詳しく検討するために、一人当たりの GDP との金属消費の関係をモデル化したもの(参考 2050 年の金属使用量予測<sup>17)</sup>)から、それぞれの金属の TMR を掛けて 2050 年に至る累積 TMR を予測した。その結果が図 35 であり、やはり、2050 年以前の段階で現有埋蔵量に相当する分を超える消費量が予測される結果になっている。

このような状況に対して、資源生産性を著しく向上させる代替、減量、循環などでの対応が求められ、ファクターX と言われる資源生産性指数の改善を急速に進めなければならない。その際問題は目標となる X の程度である。それを考慮する目安として、一人当たりの GDP に対する一人当たりの TMR の関係をどこまで下げるべきかを見てみた。図 36 はわが国の一人当たり GDP と TMR の歴史的関係であり、GDP の小さい順から 3 本の直線で近似できる。このうち最終段階の直線  $y=18,000,000$  をそのまま用いたものがファクター1、 $y=9,000,000$  と半減させたものをファクター2 と、ファクターにあわせて、設定し GDP と人口の成長予測に当てはめた。

その結果が図 37 である。F(ファクター)=1 の

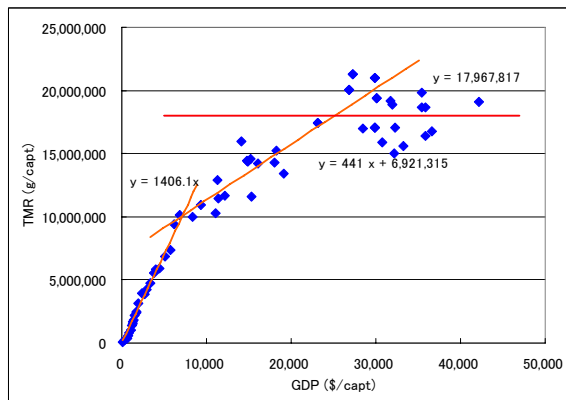


図 36 わが国の一人当たり GDP と TMR の歴史的関係

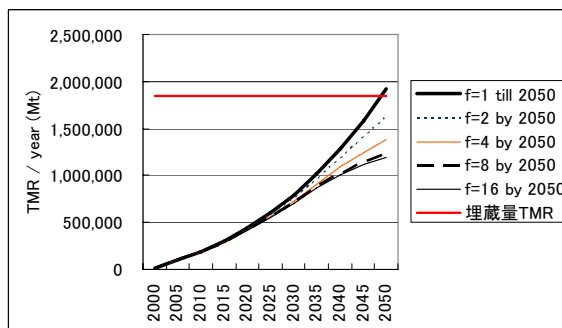


図 37 ファクターの相違と累積 TMR

場合が現状の延長線上であり、図 35 の各金属の積み上げ予測とは異なった TMR 計算でありながら傾向はほぼ一致している。F=2,F=4 では TMR の増加は減速するものの以前増加傾向であり、問題を先延ばしにするだけである。F=8 となつてはじめて増加は鈍化し、F=16 とほとんど変わらない。このことからして、少なくともファクター8の資源生産性の大幅向上を行なう必要があると結論付けられる。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

1) マテリアルフロー分析において、「隠れたフロー」といわれていた部分が、地球環境圏から人間圏に取り入れられた物質の量であり、それを TMR により定量的に表すことができることを明確にし、その数値も示された。

2) この TMR をほとんどの金属資源、主要な非金属鉱物について算定するとともに、バイオマスへの適用の考え方が示された。

3) TMR は、エコロジカルフットプリントや資源枯渇とは異なる独自の環境ストレス因子であることが確かめられ、今後資源指標として、マテリアルフロー解析のみならず LCA 的アプローチやエコデザイン設計指標として有効であることが示された。

4) そのための、製品レベル、国レベルでの TMR 構成、および将来予測などの手法を具体的適用を通じて提示することができた。

5) また、マテリアルフローを統一的フォーマットで記す事により、リサイクルの形態の相違など個々のフローの相対的特長をあきらかにするとともに、マテリアルフローの欠落なども顕著に示すことができ、マテリアルフロー解析のために収集すべきデータの関係を明確化できた。

### (2) 地球環境政策への貢献

1) 資源生産性のための基礎指標としての「天然資源の利用」に関する定量的指標を提供できた。

2) 資源の観点からのリサイクル指標としての応用も可能である。

3) エコロジカルフットプリントなどとは併用して用いるべきであり、単純な環境指標一般としての統合化は好ましくないことを示した。

4) TMR を環境ストレス因子として組み込むことで、従来の LCA 等で希薄であった資源インパクトを表現し、持続可能な製品やシステムの設計に資源概念を持ち込むことができる。

5) 資源生産性の向上目標をすくなくともファクター8とすべきことを示した。

## 6. 引用文献

- 1) 金属元素の製錬・精製段階における環境負荷算定に関する調査：物質・材料研究機構、エコマテリアル研究センター、NIMS-EMC 材料環境情報データ No.1：2005.3
- 2) 中島謙一、原田幸明、井島清、長坂徹也：関与物質総量の算定-エネルギー資源および工業材料の LCA-：Journal of Life-cycle Assessment, Japan, Vol. 2, No. 2, pp 152-158, 2006.04
- 3) 経済産業省経済産業政策局調査統計部編：本邦工業の趨勢：経済産業調査会
- 4) 原田幸明、井島清：「鉱物資源使用」カテゴリーの特性化係数：物質・材料研究機構、エコマテリアル研究センター、NIMS-EMC 材料環境情報データ No.8：2005.3
- 5) 経済産業省経済産業政策局調査統計部編：鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計年報：経済産業統計協会

- 6) 通商産業大臣官房調査統計部：鉄鋼統計年報：
- 7) 通商産業大臣官房調査統計部：資源統計年報：(社)通産統計協会
- 8) 鉱山：(財)金属鉱山会・金属鉱業会
- 9) レアメタルニュース：アルム出版社
- 10) 工業レアメタル：アルム出版社
- 11) 産業連関表：(財)全国統計協会連合会
- 12) 関西大学工学部：電子機器用材料のリサイクル・リユース因子：平成16年3月
- 13) アメリカ鉱山局：<http://minerals.usgs.gov/>
- 14) 鉱物資源ハンドブック第二版：資源素材学会
- 15) Dominic Wilson & Roopa Purushothaman: "Dreaming With BRICs: The Path to 2050": Goldman Sachs Global Economic Paper No.99 (2003)  
<http://www2.goldmansachs.com/insight/research/reports/99.pdf>
- 16) GRI(global Report Initiative)：<http://www.globalreporting.org>
- 17) 原田幸明：2050年の金属使用量予測：日本金属学会誌（投稿中）

#### 7. 国際共同研究等の状況

- 1) 主催した「資源の経済外物質フローシンポジウム」において、中国中南大学教授 張傳福氏に「中国非鉄金属の現状及び二十一世紀持続発展化の対策」について講演を依頼、中国の現状について討論をおこなった。
- 2) 主催した「物質フローシンポジウム」において、Michael Lettenmeier 氏 (Finnish Association for Nature Conservation) に講演を依頼。

#### 8. 研究成果の発表状況

##### (1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Katsutoshi YAMADA, Kohmei HALADA, Kiyoshi IJIMA : MATERIALS TRANSACTIONS, vol. 46, No. 12 (2005)  
"Web-site Survey of Recent Ecomaterials Developments in Japan"
- 2) 中島謙一、原田幸明、井島清、長坂徹也: Journal of Life-cycle Assessment, Japan: Vol. 2, Number 2, 152-158, 2006. 4:  
「関与物質総量の算定 -エネルギー資源および工業材料のLCA-」

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 原田幸明: エネルギー・資源: Vol.27, Number 4, 268-272, 2006.4:  
「マテリアルリースと社会システムの構築」
- 2) 原田幸明: 農業: Number 1482, 6-29, 2006.06  
「金属資源の現状と見通し」
- 3) 原田幸明: 工業材料: Vol.54, Number 11, 69-74, 2006.11:  
「エコマテリアルの今後の課題と展望」

## (2) 口頭発表 (学会)

- 1) 原田幸明：日本鉄鋼協会・日本金属学会共同シンポジウム (2005)  
「関与物質総量(TMR)による資源生産性評価」
- 2) 原田幸明：「物質フロー分析・産業連関分析・環境会計」連続ワークショップ；02/08-02/10, 2005  
「金属資源の背後の隠れたフロー」
- 3) 原田幸明：日本金属学会日本鉄鋼協会 2005 春季大会共同シンポジウム；03/29-03/31, 2005  
「関与物質総量(TMR)による資源生産性評価」
- 4) Katsutoshi YAMADA, Kohmei HALADA, Kiyoshi IJIMA : The 7th International Conference on ECOMATERIALS (ICEM7)；07/03-07/08, 2005  
“Japanese Ecomaterials in recent several years through Web-sites survey”
- 5) Masanori Simada, Kiyoshi Ijima, Yasushi Sawatani, Kenichi Nakajima, Tetsuya Nagasaka, Takafumi Tsukihashi, Yuich Moriguchi and Kohmei Halada : The 7th International Conference on ECOMATERIALS (ICEM7)；07/03-07/08, 2005  
“New Trend of Material Flow in the era of globalization”
- 6) 井島清, 島田正典, 澤谷 精, 原田幸明：日本 L C A 学会研究発表会；12/01-12/02, 2005  
「MFA とその表示ソフト」
- 7) 井島清, 町田知聡, 伊藤真二, 原田幸明：日本鉄鋼協会 第 151 回春季講演大会；03/21-03/23, 2006  
「使用済み製品リサイクル中の微量成分」
- 8) 原田幸明、山田裕久、森利之：International Symposium of Nanotechnology in Environmental Protection and Pollution  
”Japanese progress of the research on the application/implication of nanotechnologies to the environment”
- 9) 原田幸明：Thermec 2006 :  
“Recent Progress of Ecomaterials”
- 10) 原田幸明：Symposium on Advanced Material Flow Analysis for the Sustainable Society (2006) :  
“Material Flow Analysis with TMR”
- 11) 原田幸明：4th COE21 International Symposium on Human-Friendly Materials (2006)  
“Recent Progress and Pressing Issues on Ecomaterial”
- 12) 原田幸明：Workshop on Material Flows and Environmental Impacts associated with Massive Consumption of Natural Resources and Products (2006) :  
“Hidden material flows by extraction of natural resources.”
- 13) 井島清、山口仁志、原田幸明：The 7th International Conference of EcoBalance (2006) :  
“Evolution of Material Risk (Valuation) of the Electronic”
- 14) 原田幸明、井島清、山口仁志、長谷川信一、井出邦和：The 7th International Conference of EcoBalance (2006)  
“Development of material specific techniques of electricity and electronic parts for LCA”

15) 原田幸明 : The 7th International Conference of EcoBalance (2006)

“Resource Index of a Product considering the Load of Mining and the Acceleration of Exhaustion”

16) 原田幸明 : UK-J workshop on Resource Productivity(2007)

“Japanese Academic Strategy on the Utilization and Development of Material to Improve Resource Productivity”

(3) 出願特許

なし

(4) シンポジウム、セミナーの開催

1)資源の経済外物質フローシンポジウム主催 (平成 17 年 3 月 16 日、都市センターホテル、聴衆 70 名)

2)資源の経済外物質フローシンポジウム主催 (平成 18 年 3 月 13 日、都市センターホテル、参加者 100 名)

3)物質フローシンポジウム主催 (平成 19 年 2 月 20 日、航空会館 B101 会議室、参加者 60 名)

(5) マスコミ等への公表・報道等

1) 物質・材料研究機構プレスリリース (平成 19 年 7 月 6 日) : 持続可能な資源利用には資源使用総量の 1/8 化が必要ー資源消費の将来予測から持続可能な資源利用のあり方を量的に示すー

<http://www.nims.go.jp/jpn/news/press/press190.html>

(6) その他

なし