

NIMS-EMC 材料環境情報データ No.18
概説 資源端重量
(Total Material Requirement; TMR)



NIMS-EMC 材料環境情報データ No.18

概説 資源端重量

(Total Material Requirement; TMR)

2009年 3月

執筆者

片桐 望

中島謙一

原田幸明

(独) 物質・材料研究機構
元素戦略クラスター

執筆者

片桐 望 独立行政法人 物質・材料研究機構 材料ラボ 基盤研究グループ
中島謙一 独立行政法人 国立環境研究所 循環型社会・廃棄物研究センター
原田幸明 独立行政法人 物質・材料研究機構 元素戦略クラスター

環境の世紀とも呼ばれる 21 世紀になって、経済活動や生活のあらゆる局面で地球環境を考慮した変化が進んでくるようになってきています。そのような中で素材や材料は、あらゆる製品をかたちつくりしている存在であり、かつ、資源として地球環境圏から取り出され、廃棄物として地球環境圏に戻される、地球環境に密接に係わった存在でもあります。それゆえ素材の製造者だけでなく、製品の製造者、使用者、さらには処理に係わる人達すべてが、使用されている素材に対して、その素材に係わる環境負荷やリサイクルのしやすさ・状況等を的確に知り資源生産性の向上や持続可能な社会に向けた選択に生かして行くことが重要です。

しかし、そのために必要な材料の環境負荷や循環に対する情報はまだまだ整備されておりません。中には一部の側面だけを肥大化させた情報などが散見され判断に困る場合も出てきています。

このような状況に対し、エコマテリアル研究センターでは、信頼性における材料環境情報の整備が物質・材料研究の中核機関として欠くことのできない努めであると判断し、ここに、NIMS-EMC 材料環境データをシリーズとして発行する事にしました。なお、NIMS は物質・材料研究機構 (National Institute for Materials Science) の略、EMC はエコマテリアル研究センター (Eco Materials Center) の略です。データ集やデータベースとは若干趣は異なりますが、専門家による綿密な聞き込み調査などをもとに統計資料などでは得られない材料の製造や循環に係わるデータや、LCA 的な考察に不可欠の材料データなどを提供して行きたいと考えております。

2006 年

物質・材料研究機構

エコマテリアル研究センター長

原田幸明

2003 年以来、上記の趣旨で材料環境情報データを発行してきました。その後、エコマテリアル研究センターは発展改組されましたが、同様の趣旨で材料環境情報データの発行を継続することとしました。

2009 年 3 月

物質・材料研究機構

元素戦略クラスター長

原田幸明

目次

1 . はじめに.....	1
2 . 「資源端重量」着想の背景.....	2
3 . 資源端重量 (TMR) の定義.....	3
4 . TMR 係数とその導出.....	5
4 . 1 . 金属鉱石の TMR 係数.....	5
4 . 1 . 1 . 実操業データによる推定.....	5
4 . 1 . 2 . 関与物質総量 (鉱石分) の推定 (粗鉱品位による推定).....	7
4 . 1 . 3 . 関与物質総量 (鉱石分) の推定 (地殻存在度による推定).....	10
4 . 1 . 4 . 金属鉱石の TMR 係数の解釈と考察.....	10
4 . 1 . 5 . 本節 (金属鉱石の TMR 係数導出) の結言.....	14
4 . 2 . エネルギー資源の TMR 係数.....	14
4 . 2 . 1 . 石油資源および石油火力発電の TMR 係数.....	14
4 . 2 . 2 . 石炭資源および石炭火力発電の TMR 係数.....	15
4 . 2 . 3 . 天然ガス資源および天然ガス発電の TMR 係数.....	15
4 . 2 . 4 . 原子力発電の TMR 係数.....	16
4 . 3 . 非金属鉱物資源の TMR 係数.....	19
4 . 4 . バイオマス資源の TMR 係数.....	22
4 . 4 . 1 . 農作物の TMR 係数.....	22
4 . 4 . 2 . 木材の TMR 係数.....	23
4 . 5 . 金属 (インゴット) の TMR 係数の導出.....	24
4 . 6 . Wuppertal 研究所による TMR 係数との対比.....	26
5 . TMR による解析例.....	29
5 . 1 . 他の指標との相関.....	29
5 . 2 . TMR による解析.....	30
5 . 2 . 1 . 機器類の実重量と資源端重量の対応.....	30
5 . 2 . 2 . リサイクル関係の解析結果.....	31
5 . 2 . 3 . 総資源消費.....	33
5 . 2 . 4 . 一人あたりの GDP と一人あたりの TMR の関係.....	36
5 . 2 . 5 . GDP の検討.....	37
6 . 結言.....	38
文献一覧	

1. はじめに

1997年、Schmidt-Bleekら^{1、2)}は、「エコ・リユクサック」を提唱した。これは、人類が鉄や銅などの資源を使う際に、その背後に（資源生産国に）残された土砂・岩石などの量のことである。彼らは、これと経済への直接投入の合計である Total Material Requirement (TMR) を資源消費の指標として用いることを提案した。即ち、廃棄物の発生抑制、有害物質の排出抑制、リサイクル促進など、これまでのバックエンドでの政策よりフロントエンドでの抑制策の方が有効であり、TMR/GDP、DMI/GDP (DMI: Direct Material Input)などを指標として資源消費を減らす政策を進めるべきことを提案した。著者らはこれに着想を得て、資源端重量（あるいは、関与物質総量 (TMR)）に基づいて資源消費や資源生産性、環境効率などを検討するべきと考え、2001年にそれに必要となる金属鉱石の TMR 係数ならびにその計算の仕方を提案した³⁾。

資源端重量の考えはその後、原田を中心に多面的に検討・展開され^{4・6)}、2008年3月には環境省の「循環型社会形成推進基本計画」⁷⁾の補助指標として取り上げられるにいたった。

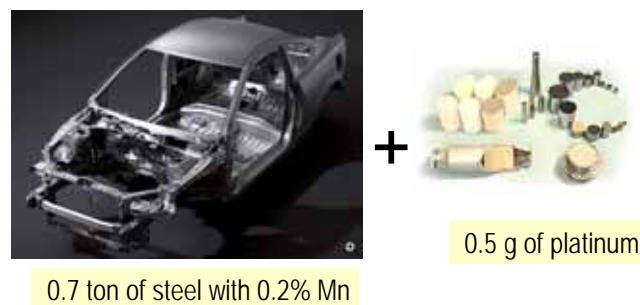
本概説の目的は、TMRの考えがより広く理解され・応用されることを期待して、TMR係数の導出方法を述べるとともに、著者らによるその応用事例の一端を紹介することである。この際、これまでの鉱石の TMR 係数導出の根拠数字を見直すなどによって、一部の鉱石の TMR 係数を修正した。読者諸氏は爾後、これらの TMR 係数を使われる場合は、本概説の係数を用いて諸検討を進めていただきたい。

なお、上記基本計画では、関与物質総量 (Total Material Requirement TMR) という語が使われているが、これは資源端重量と全く同義である。以下、ここでは資源端重量、関与物質総量、TMR を全く同義の言葉として用いる。

2. 「資源端重量」着想の背景

深刻化する地球環境問題の根底のひとつに、産業革命以来急激に増大した右肩上がりの物質使用の増大がある⁸⁾。これに対して「脱物質化(dematerialization)」や「サービス指向」等へのパラダイム転換が叫ばれている。しかし、これらの論点を検証し正しい解決の方向を見出すためには、科学的な根拠をもった定量化や指標化が必要である。

How do we add the impact of various materials in any products?



Is 700 + 0.0005 kg a material consumption of automobile?

製品等の管理に使用するには、「加算性」が必要

図1 TMRによる加算性の必要

これに対して、著者らは以下のように考えて「資源端重量」による新たな見方を提案し、検討してきた。すなわち、資源端重量とは、現代物質文明を支えてくれる材料やエネルギーを入手するために人類が地球から掘った鉱石・土砂・岩石の量のことである(注1)。これを用いれば、金属トン当たりの資源端重量(以下表現の簡潔さを重んじてTMR係数という)を用いることによって、0.7tの鉄と0.5gの白金と言った互いに比較することができない量を、資源端重量として統一的に扱えるようになる(図1)。これによって、資源消費や資源生産性、環境効率などを統一的に把握し検討する道が開ける可能性がある。

たとえば、後述のように鉄と白金のTMR係数はそれぞれ、 $8t\text{-TMR}/t\text{ Fe}$ 、 $520,000t\text{-TMR}/t\text{ Pt}$ なので、鉄0.7トンと白金0.5グラムは、それぞれ、5.6、0.26 t-TMRという同一の単位を有する量となって相互の比較や足し算などが可能になる。また、白金15.4gの消費は地球にとってはほぼ鉄1トンの消費に相当することもわかる。

(注1) 厳密には、これには、森林の伐採、水の使用、変更された水系、さらには土地の再生や景観の保護のために必要な物質の総量も含まれるが、著者らの一連の検討ではこれらは用いられた水を除いて無視されている。

3. 資源端重量 (TMR) の定義

TMR (Total Materials Requirement) は、直訳すれば「総物質要求量」であるが、著者らは、地球が人類に与えてくれた資源を地球から受け取るに当たって、いったん地球から受け取った量という側面を重視する場合は「資源端重量」と呼び、関与した物質の総量という側面を重視する場合は「関与物質総量」と呼ぶことにした。いずれで呼ぼうともこれは、(資源生産国に積み上げられた岩石・土砂は、鉱山に埋め戻せば目の前からは消えるので、環境負荷と言えるかどうかは議論のあるところであるが)、人類が資源採取にあたって一旦地球に与えた環境負荷と見ることもできる。

関与物質総量という言葉は、World resource institute の国際共同報告書「Resource Flows」の P8 に定義されている⁹⁾。それによれば式 (1) となる。

$$\begin{aligned} \text{(関与物質総量 TMR)} = & \text{(直接投入物質量)} + \\ & \text{(間接投入物質量)} + \text{(隠れた物質フロー量)} \quad (1) \end{aligned}$$

ここで直接投入物質量および間接投入物質量は、人間の経済的行為として、それぞれ直接、間接に投入された物質の量である。これらはまとめて経済フロー (commodity material flow) とも呼ばれ、様々な経済統計資料などで入手可能な量である。隠れた物質フロー量 (HMF: hidden materials flow) は直接、間接の経済行為に伴う物質以外にその行為に伴って起きる物質の移動や攪乱の量であり、採掘に伴う岩石や土石の移動、森林の伐採、水の使用、変更された水系、さらには土地の再生や景観の保護のために必要な物質の総量も含まれる。これらの総和である関与物質総量と資源端重量、TMR は全く同義であるが、ここでは上述の理由で資源端重量あるいは関与物質総量という言葉を用いる。表現の簡潔を重視したいときは、TMR あるいは TMR 係数という言葉を用いる。

図2に鉄鋼を例にとって資源端重量の概念を示す。同図左下の鉄鋼材料への直接投入物質は、太枠の直方体として描かれている銑鉄と燃料その他の関連素材である。これらの物質（特に銑鉄）を得るためには鉄鉱石やコークス等に代表される間接投入物質が必要であり、そのそれぞれもプロセスに必要な燃料や添加・調整成分などの間接投入を必要とし、鉄鉱石も品位を上げる選鉱プロセスの原材料として採掘したままの粗鉱石を必要とする。さらに、粗鉱石は地中に存在するため、鉱石の部分まで穴を掘り採掘する坑内掘り、もしくは、上層にある土石を取り除いて鉱石を取り出す露天掘りにより地中から取り出される。このとき生じるズリや剥土（overburden）および鉱物を結合している脈石（gangue mineral）、掘削により湧き出た坑内水などは、経済的な取引の対象とされないため経済統計などの中に明示的に現れないが、直接地球環境と係る物質そのものの量でもある。この部分が、先述した「隠れた物質フロー」である。隠れた物質フローは鉄鉱石だけではなく、石炭にも存在し、厳密には全ての投入の地球環境側との境界に必ず存在するものであるが、同図では石炭と鉄鉱石に係る部分のみ、破線の直方体で示してある。これら図中に示された全ての直方体の総和が関与物質総量（＝資源端重量）である（ただし、ダブルカウントは当然避けられている）。これらの中で破線の直方体で表された「隠れた物質フロー」分は、背後に背負っているものの意味から「エコ・リュックサック」とも呼ばれ、我が国においては「材料の背後霊」¹⁰⁾として例えられることもある。

なお、TMRの一連の検討において著者らは、基本的には土砂・岩石および水を対象としており、その算定根拠が不明確であることから空気については積算対象としていない。また、前記注に記したようなものも無視されているほか、水力発電のTMRについては未だ検討の余地はあるもののゼロとしている。

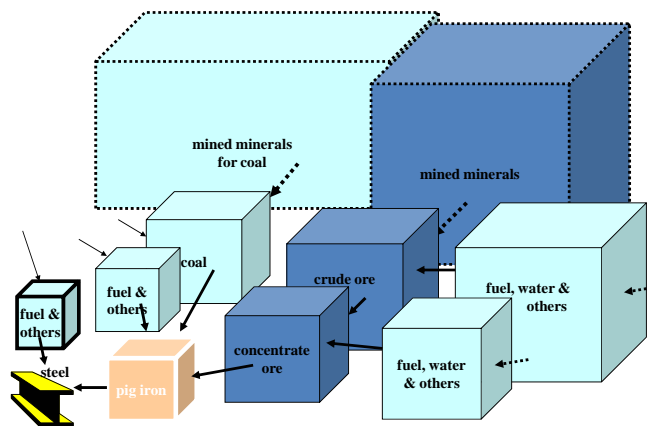


図2 Concept of "TMR: Total Materials Requirement"

太線の箱：鋼への直接投入、
 細線の箱：鋼への間接投入、
 破線の箱：隠れたフロー

4 . TMR 係数とその導出

4 . 1 . 金属鉱石の TMR 係数

著者らが金属材料の資源端重量あるいは関与物質総量を求めていくにあたって、まずは、最も影響が大きいと思われる鉱石採掘に係る「隠れた物質フロー」を客観性を持って得ることに焦点を絞った。その際、ズリ、剥土などの土石類に加えて坑内水などが付随物質としてあるが、水関係のデータは聞き取りに伴う信頼性や調査のカバー範囲が著しく不均等になるため、第 1 ステップとしては採掘に伴う土石に関する量のみ限定した。(ただし、関与する水の量はこの後検討の対象に加えた。)また、結果は製錬・精製・一次加工の工程で投入される燃料や物質、さらにはエネルギー源として間接投入される物質も含むデータとして提示されることが扱いやすい数値とはなるが、製錬等におけるエネルギー関係の間接投入のデータが当時は整備されていなかったため、これらの部分の影響の少ない鉱石までのデータを整備しておくことが将来エネルギー関連の関与物質総量のデータが整備された際に数値的な混乱を招かないと判断し、土石類のみ限定した。即ち、それぞれの金属に対して 1 単位 (1 t) 分の金属を得るための精鉱の取得に関与する粗鉱、ズリ、剥土、脈石等の採掘土石の総量を ore-TMR (鉱石分の関与物質総量) として算定した。

4 . 1 . 1 . 実操業データによる推定

まずは鉄、銅、亜鉛、鉛を対象として実操業データによる推定を試みた。これらは世界的に取扱量も多く商取引等を通じた鉱山情報も比較的流通しており、また国内での採鉱冶金の歴史も長いと聞き取り調査において比較的鉱山関係の技術的裏づけのある情報を得やすい金属であることが理由である。さらに石炭も鉄鋼の生産に必須であり、かつ、同様の状況にあるため調査の対象に含めた。算定に必要な数値については、複数の鉱山を訪問し鉱山関係者に聞き取りを行うと共に、関連事業者の保有している鉱山情報も参考にして、精鉱生産量、精鉱品位、選鉱尾石比、剥土比の調査を行った。こうして情報を収集した鉱山数は、石炭 33、鉄 40、銅 101、亜鉛 93、鉛 96 であった。剥土比 (鉱種によっては剥岩比とも呼ぶ) は粗鉱に対する剥土 (主として露天掘り) とズリ (主として坑内掘り) の和の比である。また選鉱尾石は精鉱への選鉱過程で分離される金属成分の少ない脈石類の量である。厳密には選鉱尾石にも金属成分が含まれ、再度金属回収の対象とされるケースもあるが、量的に微量であるためまずは無視した。これらの数値に基づき、全採掘量および金属分を、

$$(\text{全採掘量}) = \{(\text{剥土比})+1\} \times \{(\text{選鉱尾石比})+1\} \times (\text{精鉱生産量}) \quad (2)$$

および

$$(\text{金属分}) = 0.01 \times (\text{精鉱生産量}) \times (\text{精鉱品位}\%) \quad (3)$$

として求めた。ここで、選鉱尾石比とは、尾鉱/精鉱のことである。図3から図7にこの調査に基づく金属分と全採掘量の関係、石炭、鉄、銅、亜鉛、鉛それぞれの鉱山に対してプロットした。なお、このプロットの世界生産に対するカバー率は、鉄約80%、銅および鉛約66%、亜鉛約55%、石炭約25%である。石炭のカバー率が低いのは世界生産の1/3を占める中国の鉱山事情が的確に入手できなかったことに起因している。これをもとに、石炭およびそれぞれの金属1tに対する鉱石分の関与物質総量を

$$(\text{ore-TMR:t 当たり鉱石分関与物質総量}) = (\text{全採掘量}) / (\text{金属分}) \quad (4)$$

として得た。なお本算定に当たっては、露天掘りと坑内掘りの併用鉱山もあるが、鉱山ごとの厳密な区別が難しいため簡略性と代表性を重視したバックグラウンド・データとして両者を区別せず式(4)を適用した。LCA等でこれら採掘法の厳密な差異を論じる場合にはフォアグラウンド・データとして個別の鉱山事情に合わせてそのつど算定した数値に置き換えるべきである。計算の結果、石炭では12.4 t-TMR/t-Coal、鉄:5.1 t-TMR/t-Fe、銅:304 t-TMR/t-Cu、亜鉛:34 t-TMR/t-Zn、鉛:95 t-TMR/t-Pbとなった。これらの値を図3から図7に ore-TMR 係数を y 切片とし傾きを 1 とした直線として記した。

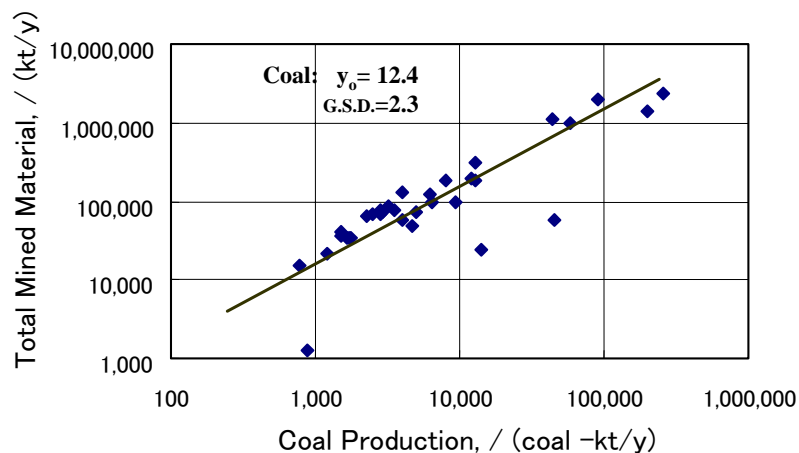


図3 全採掘量と石炭生産量の関係

全採掘量：粗鉱量 + 剥土量 + 脈石 + その他
 両者は y 切片 12.4 とする傾き 1 の直線に乗っており、
 これより石炭の TMR 係数を 12.4t/t-coal とした。

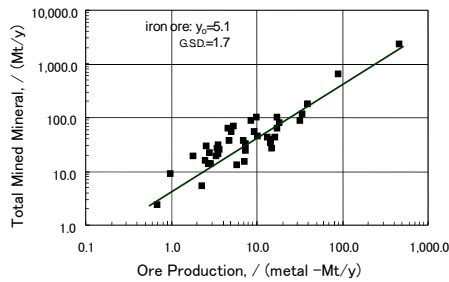


図4 鉄鉱石生産量と総採掘量の関係

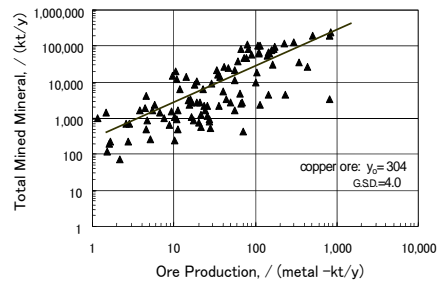


図5 銅鉱石生産量と総採掘量の関係

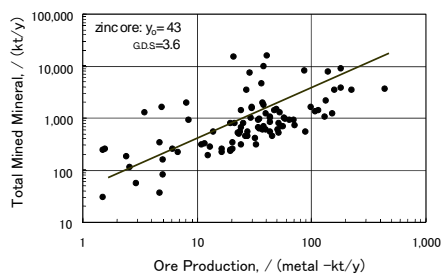


図6 亜鉛鉱石生産量と総採掘量の関係

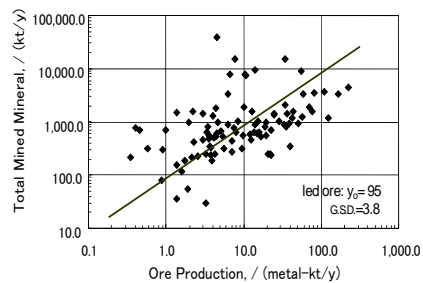


図7 鉛鉱石生産量と総採掘量の関係

4.1.2. 関与物質総量(鉱石分)の推定(粗鉱品位による推定)

上記の実操業データに基づく算定方法は一見信頼性の高いものに見えながら、図3から図7の対数-対数プロットでさえ幾何標準偏差が1.7(鉄)から4.0(銅)と、データの分布が認められるような広がりをもった数値集合を形成しており、代表値としての ore-TMR 値も単一指標としてはその代表性に乏しいものとなることは否めない。それ故に、これらの数値は予備的な LCA 等の近似的手法に基づく粗い分析に用いるべきである。また、より精緻な代表値とするためには、この代表値としての ore-TMR 係数を分散を表現するパラメータと共に用いるべきである。しかし、そのためには分布関数の形態、LCA 的手法になじみやすい分散表現など検討を要する部分が多い。これらの分散記述の精緻化は今後の検討課題とし、逆に粗い分析のための近似的代表値として関与物質総量を使用する視点から、各種金属の鉱石分の関与物質総量をより容易に得られる情報から推定する手法について検討した。

単純化のために、式(2)の剥岩比を含む項 Rock/ore-ratio として

$$(\text{Rock/ore-ratio})_i = (\text{採掘全量})_i / (\text{粗鉱量})_i = \{(\text{剥土比})+1\}_i \quad (5)$$

と定義し、この値が金属 i に対して一定であると仮定する。この仮定は rock/ore ratio が主として鉱床の存在様式に依存し、鉱床の存在様式は金属の種類によることからして無理のない近似的仮定である。同様に粗鉱品位も鉱物中の金属成分の存在様式に依存し、その様式は金属によることから、i 金属の粗鉱品位も同様に金属により大略一定であると仮定できる。ここで精鉱は粗鉱から尾石を取り除いた量であるから、

$$\text{(精鉱品位\%)} = \text{(粗鉱品位\%)} \times \{(\text{選鉱尾石比})+1\} \quad (6)$$

の関係があり、式(4) において式(2) 式(3) に式(5) 式(6) の関係を代入したものをを用いることにより金属 i の単位あたりの関与物質総量（鉱石分）は、

$$\begin{aligned} \text{(ore-TMR 係数)} &= \{(\text{Rock/ore-ratio}) \times \text{(精鉱品位\%)} \times \text{(精鉱生産量)}\} \\ &\quad / \{(\text{粗鉱品位\%})/0.01 \times \text{(精鉱生産量)} \times \text{(精鉱品位\%)}\} \\ &= (\text{Rock/ore-ratio}) / (\text{粗鉱品位\%}) \end{aligned} \quad (7)$$

となり、鉱山の立地条件などの経済性に大きく依存して任意に調整される精鉱品位およびそのためのプロセスパラメータである選鉱尾石比が消去された簡単な式になる。

Rock/ore-ratio に関しては、米国鉱山省の Metal Yearbook^{1 1)} 中の Mining and Quarrying Trends^{1 2)} の中に、アメリカ国内での鉄、金、銅、亜鉛、その他金属の粗鉱量と採掘全量のデータが公表されている。また、先述の調査データのそれぞれの金属の総計としてこれらの値を得ることができる。この出典の異なるデータを共にプロットしたのが図 8 である。同図に見られるように、出典および金属の種類に係らず採掘全量は粗鉱量のほぼ 2 倍という関係が近似的に得られ、

$$\text{(rock/ore-ratio)} = 2.0 \quad (8)$$

即ち、

$$\text{(ore-TMR 係数)} = 2.0 / \{0.01 \times \text{(粗鉱品位\%)}\} \quad (9)$$

の関係が得られる。

これにより、詳細な鉱山の操業データなしに、粗鉱品位のデータのみから目的金属の ore-TMR 係数を近似的に推定することができる。詳細は後述する表 1 の一部に式(9) を用いて計算した ore-TMR 係数の値と、その際に用いた粗鉱品位を示してある。なお粗鉱品位は基本として「鉱物資源の現状」^{1 3)} から採ったが、最新の情報があるものは、金属鉱業事業団

オンライン鉱業情報のニュースフラッシュ(2000年)の記事から鉱量および粗鉱品位をピックアップし、粗鉱品位を鉱量の重み付けで平均して用いている。

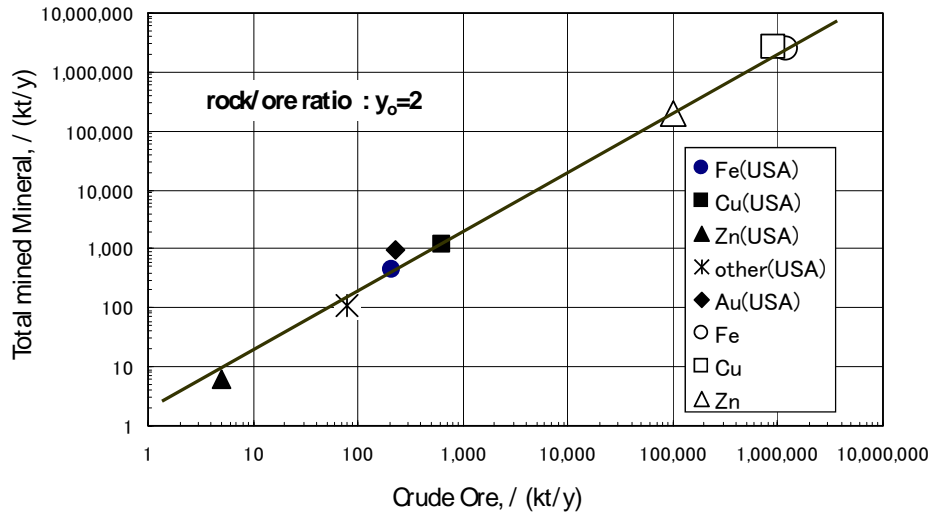


図8 Rock/ore-ratioの推定

各種鉱石の粗鉱採掘量と全採掘量をプロットすると、切片を2とする傾き1の直線が得られる。これにより、Rock/ore-ratioとして2を得た。

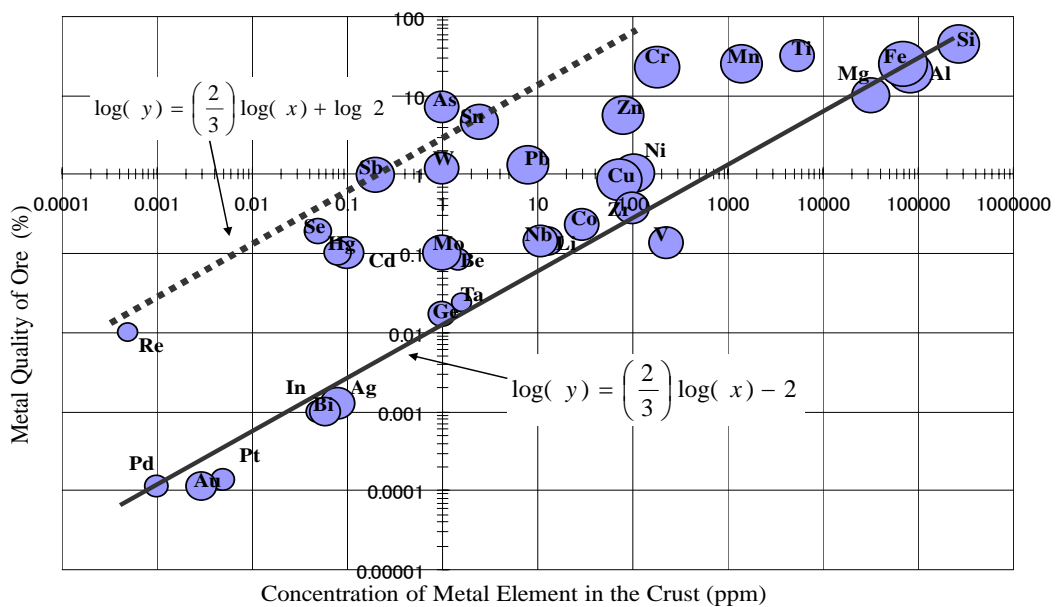


図9 地殻中濃度と鉱石の品位の関係

図中の円の大きさは2000年における世界の生産量の対数に対応している。ほとんどの金属が、傾き2/3、切片2と0.01の直線の分布している。

4.1.3. 関与物質総量（鉱石分）の推定（地殻存在度による推定）

粗鉱品位を用いる方法により、これまで鉱山の実操業データの取得が困難であった各種の金属に対して ore-TMR 係数を予測することが可能となったが、いまだ用途開発の途上にある金属や品位情報が商取引に影響を与えるため情報の入手が困難な金属が残されている。これらは使用量は少ないものの微量でも多量の関与物質を誘発させる恐れがあり、その中には特に、触媒やドーパ剤などの微量な用途を含む新素材の開発の際に環境影響をチェックすべき材料も含まれる。そのために、一般的に入手可能な数値から ore-TMR 係数を推算する手法を検討した。

前項の式(9)において、既にパラメータとして残されているのは粗鉱品位のみである。この粗鉱品位を地殻存在度¹⁰⁾に対してプロットしたものが図9である。粗鉱品位の代表値の誤差範囲とみられる微妙な例外を除いて、殆どの金属がそれぞれ切片を2及び0.01とする傾き2/3の直線の間領域に存在し、かつ、親石元素と分類される金属群や比較的生産量の少ない金属群は、殆ど切片0.01の直線の近傍に位置している。この直線を仮に基底粗鉱品位と呼ぶならば、

$$(\text{基底粗鉱品位}\%) = 0.01 \times (\text{地殻存在度 ppm})^{2/3} \quad (10)$$

の2/3乗の関係が存在している。また、上限の直線も同様に2/3乗の関係を認めることができる。この関係が得られる理由については今後鉱床の由来なども考慮した様々な視点からの検討を要するであろうが、直感的に3次元的な厚みを持った地殻に対して我々の利用可能な地表近くの領域は2次元的な広がりしか持たず、そのことが何らかのかたちで反映しているのではないかと考えている。しかし、本件ではそこまで立ち入らずあくまで経験的な関係としてとらえて、経験則による推算式として粗鉱品位のデータの得にくいレアメタルに対して式(9)に代入することにより、以下の式(11)を得る。すなわち、

$$(\text{ore-TMR 係数}[t/t]) = 20000.0 \times (\text{地殻存在度 ppm})^{-2/3} \quad (11)$$

となる。

4.1.4. 金属鉱石の TMR 係数の解釈と考察

以上で、金属鉱石の TMR 係数は求められた。その結果を粗鉱品位、地殻存在度とともにまとめて表1に示す。表中の ore-TMR 係数について、調査に基づいて求めたものは太字、式(9)の粗鉱品位によるものは標準体、式(11)の地殻存在度からの推算値はイタリックで表記する事により区別してある。なお、表1は、文献³⁾の表1と全く同じ表であるが、その後地殻存在を理科年表の値に統一するなど数値の見直しを行ったなどの理由で、いくつかの

ore-TMR 係数は文献³⁾中の数値と異なっている。今後は、著者らの値を使われる時は、この表 1 を正として使っていただきたい。

また、この ore-TMR 係数にそれぞれの金属の 2000 年の年間生産量¹¹⁾を乗じたものを年間関与物質総量(鉱石分)として求め、表 1 はその値の順に金属を並べてある。表の順序は全使用量としての地球規模での環境インパクトの大きさの順位付をある程度反映しているものとみなすことができる。その点で、これまで製品等の使用で環境側面があまり注目されていなかった金が、使用量のはるかに多い鉄を凌いで最上位にあることや他の貴金属類が押しなべて上位に位置付けられていることは製品やデバイスでの物質の利用の際に新たな注意を喚起するものである。しかも、これらの金属の ore-TMR 係数は地殻存在度からではなく粗鉱品位に基づいた計算から得られた推算値であり、ウランやビスマスなどと比較して相対的に信頼度の高い結果である。ビスマスやウランも高い順位にあるが、これらは地殻存在度からの推算値であり、原子力燃料や鉛代替の有力候補であるこれらの金属の ore-TMR 係数の値は、今後の議論のためにより現実の操業に基づくデータの取得が必要である。ここでの順位の高さはそのデータ取得・公開の緊要性を意味していると受け取ることができる。また、表では銅が鉄より上位にあるが、鉄の場合には鉱石の他にコークスが多量の ore-TMR を誘発させており、この表では鉱石分に限定しているためトータルの TMR では鉄と銅は逆転するものと予想される。

低いほうではチタンが低位置にあることが注目される。これは豊富な資源に対して材料の用途が限られていることによる。ore-TMR 係数の観点からはこのような素材の用途開発が重要であると指摘できる。しかし、鉄のコークス分と同様に電力の使用により誘発される関与物質はここでは含まれておらず、最終的にはエネルギー誘発分も総合化した関与物質総量として取り扱えるようにすることが必要である。これは、中位に位置している Si を原料とする高純度の半導体等の原材料素材についても同様である。今後、エネルギー使用による誘発分の関与物質総量の推定が、本研究と同様に行われることが、これらの素材に対する環境への影響の評価にとって残された課題である。

また、本研究の過程で経験則として明らかになった地殻存在度と粗鉱品位の 2/3 乗則は、鉱石品位の変化を切片 \log_2 の直線から切片 0.01 の直線上への移動ととらえることにより資源の枯渇性を議論する目的で使用するなど、単に関与物質総量を予測するためだけでなく多様な可能性を持つことが期待される。鉱物学、鉱床学、組織定量学など様々な見地からの議論を望むものである。

表 1 鈳石の TMR 係数との各金属の世界総 Ore-TMR 値

	鈳石の TMR 係数 ^{a)}	世界総 Ore-TMR 値 (Mt/y)	世界生産量 (t/y) ^{b)}	粗鈳品位 (%) ^{c)}	地殻存在 度 (ppm) ^{d)}		鈳石の TMR 係数 ^{a)}	世界総 Ore-TMR 値 (Mt/y)	世界生産量 (t/y) ^{b)}	粗鈳品位 (%) ^{c)}	地殻存在 度 (ppm) ^{d)}
Au	1,800,000.0	4,400.0	2,445.0	0.00011 ^{h)}	0.003	Br	39,000.0	20.0	520.0		0.37
Cu	300.0	3,900.0	12,900,000.0	0.84 ^{h)}	75	B	4,300.0	18.4	4,270.0		10
Fe	5.1	2,900.0	571,000,000.0	25 ^{h)}	70700	Li	1,400.0	18.0	13,000.0	0.14	13
Ag	160,000.0	2,900.0	17,900.0	0.0013 ^{h)}	0.08	Tb	30,000.0	17.0	574 ^{e)}		0.6
U	21,000.0	1,000.0	45807 ^{e)}		0.91	Gd	10,000.0	16.0	1640 ^{e)}		3.3
Bi	150,000.0	570.0	3,780.0		0.06	Ru	800,000.0	16.0	19.99 ^{f)}	0.00025 ^{h)}	0.001
Sn	2,500.0	500.0	200,000.0	0.07	2.5	Si	4.5	15.0	3,400,000.0	44	267700
Zn	43.0	340.0	8,000,000.0	5.5 ^{h)}	80	Zr	540.0	7.7	14,250.0	0.37	100
Pd	1,800,000.0	320.0	177.0	0.00011 ^{h)}	0.001	Ir	2,400,000.0	7.6	3.18 ^{e)}	0.000084 ^{h)}	0.0001
Pb	95.0	280.0	2,980,000.0	1.33 ^{h)}	8	Y	2,700.0	6.5	2,400.0		20
Pt	1,400,000.0	250.0	178.0	0.00014 ^{h)}	0.005	Ta	12,000.0	6.2	513.0	0.017 ^{h)}	1
Ni	200.0	250.0	1,230,000.0	1.02 ^{h)}	105	Dy	9,000.0	5.9	656 ^{e)}		3.7
Al	10	240	23900000		84100	Mg	20.0	5.7	284,000.0	10	32000
Mo	2,000.0	220.0	112,000.0	0.1 ^{h)}	1	W	170.0	5.4	31,500.0	1.2 ^{h)}	1
Sr	500	150	304000		260	Lu	45,000.0	5.2	114.8 ^{e)}		0.3
Cr	8.9	120.0	13,700,000.0	23 ^{h)}	185	Hg	2,000.0	3.6	1,800.0	0.1	0.08
Ce	2000	70	35014 ^{e)}		33	Er	12,000.0	3.0	246 ^{e)}		2.2
V	1,500.0	63.0	42,000.0	0.14	230	Tm	40,000.0	2.7	65.6 ^{e)}		0.32
Rh	2,600,000.0	62.0	23.96 ^{f)}	0.000078 ^{h)}	0.001	Ho	25,000.0	2.5	98.4 ^{e)}		0.78

Mn	8.0	60.0	7,450,000.0	25 ^{h)}	1400	Eu	20,000.0	1.6	82 ^{e)}		1.1
La	3,100.0	59.0	18860 ^{e)}		16	Se	1,000.0	1.4	1,400.0	0.2 ^{h)}	0.05
In	200,000.0	44.0	220.0	0.001	0.05	Hf	10,000.0	1.2	123.5		3
Nd	3,100.0	43.0	13940 ^{e)}		16	As	29.0	1.2	40,000.0	6.9	1.8
Cd	2,000.0	39.0	19,300.0	0.1	0.1	Re	20,000.0	0.9	43.0	0.01	0.0005
Te	270,000.0	34.0	125.0		0.02	Be	2,400.0	0.9	356.0	0.08	1.5
Nb	1,400.0	33.0	23,600.0	0.14	11	Ga	3,000.0	0.7	210.0		18
Co	870.0	28.0	32,300.0	0.23 ^{h)}	29	Ge	8,300.0	0.5	58.0	0.024	1.6
Pr	8,000.0	27.0	3362 ^{e)}		3.9	Th	9,000.0	0.4	45.0		3.5
Sb	200.0	24.2	121,000.0	0.99 ^{h)}	0.2	Ti	6.3	0.3	51,000.0	31	5400
Yb	12,000.0	23.6	1958 ^{e)}		2.2	Os	2,000,000.0	0.1	0.06 ^{e)}	0.0001 ^{h)}	0.001
Sm	9,000.0	22.1	2460 ^{e)}		3.5						

a) 太字は、実操業データによるもの、イタリックは地殻存在度から推定したもの、それ以外は粗鉱品位からの推定

b) 文献11)より

c) 文献13)より

d) 文献14)より

e) ウェブ上の "Global Nuclear Market, trend information" より。 <http://criepi.denken.or.jp/CRIEPI/nic/seisaku/sgold1999/keikou/trend45.htm>

f) 2000年における白金族の生産量を米国の消費に比例配分

g) 2000年におけるREの生産量を米国の消費に比例配分

h) 文献22)の値を平均

k) 本研究における鉄鉱石の値を平均

4.1.5. 本節（金属鉱石の TMR 係数導出）の結言

4.1. 項では、物質・材料の地球環境との係りを表すパラメータである資源端重量あるいは関与物質総量(TMR: Total Materials Requirement) を算定するための基礎データとして、各種金属の鉱石の金属量あたりの関与物質総量 (ore-TMR 係数) を算定した。調査によって算定された ore-TMR 係数は石炭、鉄、銅、亜鉛、鉛であり、詳細調査が困難な場合の粗鉱品位からの推定として、

$$(\text{ore-TMR 係数}) = 200 / \{(\text{粗鉱品位}\%)\} \quad (9)$$

さらに粗鉱品位も入手不能の場合の推定として、

$$(\text{ore-TMR 係数}[\text{t/t}]) = 20000 \times (\text{地殻存在度 ppm})^{-2/3} \quad (11)$$

が用いられることを示した。

これらの数値は、極めて粗い近似的代表値であるが、製品の概念設計の段階で材料の環境へのインパクトを考慮し材料の機能と合わせた適材適所化を進めていく目安にはなるであろう。このような数値的環境情報の交換がエコマテリアル選択と環境適合設計がコンカレントで進んでいく基盤を形成することを望むと共に、材料関係者がこの試算を踏み台に、エネルギーも含めた関与物質総量や資源生産性などより信頼性のある評価関数の提示や算定を推し進め機能向上面もとりこんだ積極的な材料情報の提示へと進んでいく契機へと役立てば幸いである。

4.2. エネルギー資源の TMR 係数

以上で、金属鉱石の TMR 係数が求められた。以下に引き続いてエネルギー資源、非金属鉱物資源、バイオマス資源の TMR 係数について、中島ら¹⁵⁾の報告を中心に概説する。最後に金属インゴットの TMR 係数について簡単に述べる。

4.2.1. 石油資源および石油火力発電の TMR 係数

石油資源にかかわる関与物質総量は、油井の最盛期においては原油が自噴するケースが多いため、過剰な関連物質はほとんどないとみなされてきた。しかし、油井のライフサイクルを考えると、地中圧が減少し生産性が低下してきた際に、水圧をかけて原油を押し出す「水攻め」、さらに爆発などの圧力をかけて押し出す「火攻め」などの方法がとられており、この段階になると 100%の原油ではなく、水と原油の混じった混合液体が採掘される。この水と原油成分の比は水油比 (WOR) と呼ばれ、原油 1 に対する水の量であらわされる。この水油比は、油井の経年に従って増加していき、油井の寿命が尽きる段階では 100 近くになるケー

スも報告されている。ここで、油井の寿命を T として t の時点での生産量を $y(t)$ 、WOR を $w(t)$ として表すと、全資源量である TMR は、以下の式により表される。

$$TMR_{oil} = \frac{\int_0^T y(t) \cdot (w(t) + 1) dt}{\int_0^T y(t) dt}$$

この生産量と油水比の関係は Purvis ら (Analysis of production-performance graphs, R.A.Purvis, The J. of Canadian Petroleum, July-August 1985) などにより考察されているが、Baker (Richard Baker: "Reservoir Management for Water Floods II" J Canadian Petroleum Technology, Vol.37 (1998) No.1, 12-17) が、実操業のデータをもとに累積生産量と油水比の関係を表している。グラフを読み取り積分して平均することにより、TMR 係数が 7.4 kg/L として得られる。なお、この WOR 曲線が一旦上昇した後一時減少しているのは、「水攻め」などによる生産性の向上によるものである。このようにして得られた石油の採掘の TMR 係数=7.4kg/L と燃焼のエネルギー原単位 38.7MJ/L(資源エネルギー庁長官官房企画調査課:総合エネルギー統計(平成12年度版))より、石油燃焼の TMR 係数=0.19kg/MJ が得られる。

さらに内山らのデータによると、石油火力発電の場合、6,169GWh の発電に 1,448.8ML の石油が必要であり、そこから石油火力発電の TMR 係数=7.40 × 1.4488/6.169 = 1.74kg/kWh すなわち、0.48kg/MJ が得られる。

4.2.2. 石炭資源および石炭火力発電の TMR 係数

石炭の燃焼によるエネルギーは石炭 1 kg あたり 32.2MJ である。つまり、1MJ の燃焼エネルギーを発生するのに 0.03kg の石炭が必要になる。石炭については、すでに第一ステップにおいて実石炭鉱山データから 12.4t/t の値を得ており、そこから石炭燃焼 1MJ 当たりの TMR 係数は 0.39kg/MJ となる。さらに内山らのデータによると、石炭火力発電の場合、6084GWh の発電に 2.336Mt 石炭が必要であり、そこから石炭火力発電の TMR 係数=12.4 × 2.336/6.084=4.76kg/kWh すなわち、1.32kg/MJ が得られる。

4.2.3. 天然ガス資源および天然ガス発電の TMR 係数

天然ガス火力の場合も天然ガスの採掘にともなう TMR 係数を求める必要がある。天然ガスの場合は得る物質が気相であるため TMR 係数の推定は難しいが、日本および日本が取引している天然ガス田では石油と同時に得られていることから、天然ガスに随伴する石油量の平均値を得て、そこに石油の TMR 係数をかけて天然ガスの TMR 係数を近似的に推算する手法をとった。天然ガス田の天然ガス/石油比は、日本石油開発事業団の HP¹⁷⁾ から、次のよ

うなデータを得て生産量で加重平均をとった。

JAPEX.U.S.石油 20.7kL/d: 天然ガス 700Km³/d、

JAPEXGalf 4.77kL/d: 868 Km³/d、

Gebang(スマトラ) 51kL/d: 364Km³/d、

SangaSanga 6.3ML/d: 33.6Mm³/d、

勇払 241.8KL/d: 256.1Km³/d、

申川 77.8KL/d: 5.7 Km³/d、

由利 49.4kL/d: 27.4 Km³/d、

岩船沖 661.7KL/d: 306.2 Km³/d、

東新潟 240.7KL/d: 658.5 Km³/d、

吉井 101.0KL/d: 578.4 Km³/d、

片貝 83.9KL/d: 813.9Km³/d

であり、平均すると 4.88 m³/L すなわち 0.2L/m³の原油と共存していることになる。原油の比重を 0.85 とし、さらに原油の TMR 係数である 7.4 をかけることにより、 $0.2 \times 0.85 \times 7.4 = 1.26$ として 1.26kg/m³ の TMR 係数が得られる。この天然ガスをメタンとして $9,700\text{Kcal/m}^3 = 40.6\text{MJ/m}^3$ の燃焼熱で計算すると、天然ガスの 1MJ 当たりの TMR 係数 = 0.031kg/MJ となる。

さらに内山らのデータによると、天然ガス発電の場合、6,169GWh の電力発生に 1.1145Mt の天然ガスが必要とされているので、これもメタン換算により $1.1145 \times 22.4/16 = 1.56\text{Gm}^3$ の体積の天然ガスから $63,300\text{TJ} = 1,963 \text{ Gt-TMR}$ が必要ということになり、0.088kg/MJ が天然ガス発電の TMR 係数として得られる。

4 . 2 . 4 . 原子力発電の TMR 係数

原子力発電の場合、内山らのデータによると、5,868Gwh の発電に 127 t の U が UF₆ の形で消費される。U の鉱石の TMR 係数は 21,000 であるから、 $127\text{t}/5,868\text{G} \times 21,000 = 0.455\text{kg/kWh}$ となり、0.13kg/MJ が原子力発電の TMR 係数になる。

なお、U の鉱石の TMR 係数としての 21,000 の値は、実鉱山データや鉱床データが乏しいことから地殻データから推算したものであったが、2001 年 3 月 23 日にすべての施設が操業終了した人形峠の情報によると、露天掘採掘場でウラン鉱石採掘量 55,650 t に対して約 55,000 m³ のウラン鉱さい、製錬廃さいを投棄し、ダムには 34,000m³ の鉱さいが投棄、また敷地内のウラン残土は 251,000m³ が投棄であった。これより、鉱石あたり鉱さいと残土を比重を 1 とみなしても $(251+34+55+55.65)\text{kt}/(55.65)\text{kt} = 7.11$ の比率となり、内山「発電プラントのエネルギー収支分析」より、1 GW 軽水炉 (6,347 GWh/y) に UO₂ が 25.4t/y 使用され、その際の U 鉱石 57,800 t/y のデータから、 $\text{鉱石品位} = 25.4 \times (285/317) / 57,800 = 0.04\%$ となり、 $7.11/0.04\% = 35,500$ と、比較的条件の悪い日本の鉱山においても同じオーダーの値となっている。地殻データからの推算も一次

近似としては妥当なものといえる。

図10、図11、表2、3に、それぞれ、以上によるエネルギー資源の TMR 係数および電力の TMR 係数の算出結果を示した。ここで TMR(s)は土砂や尾鉱などの固形分を、TMR(aq)は水分を示す。OECD の電力については、電源構成(石油火力発電 50%、石炭火力発電 19%、天然ガス 13%、原子力 16%)より算出した。

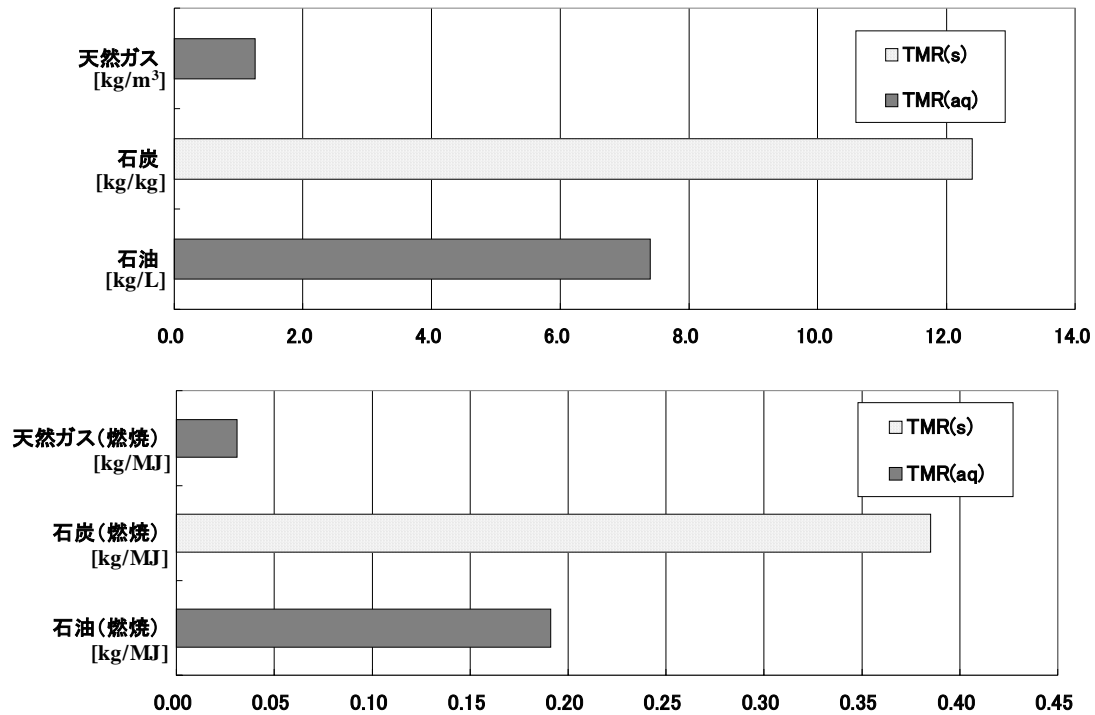


図10 エネルギー資源の TMR

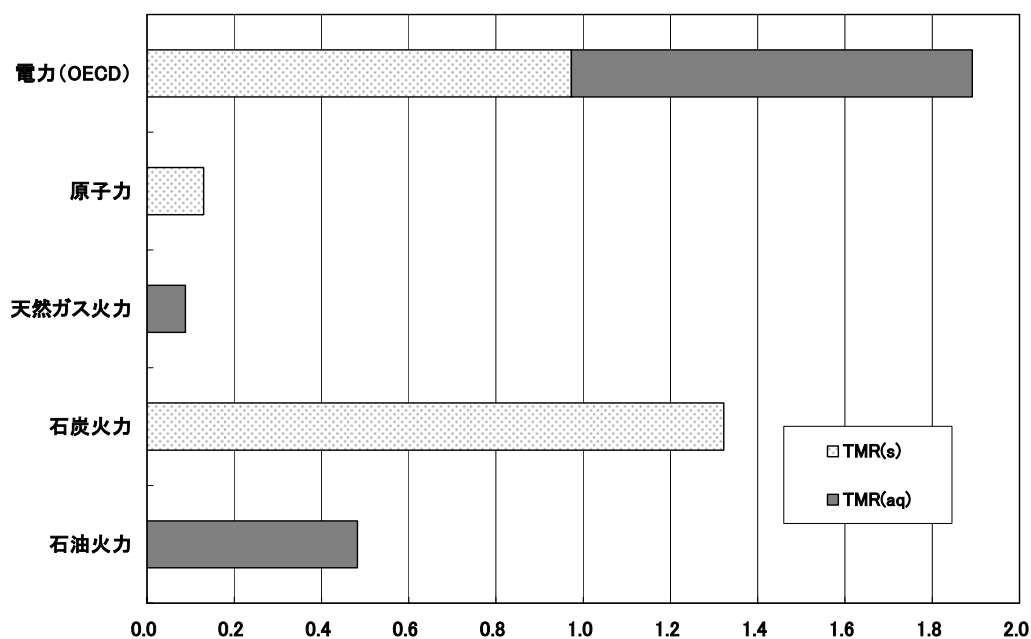


図 1.1 電力の TMR(t/MJ)

表 2 エネルギー資源の TMR

	units	TMR(s)	TMR(aq)	TMR(total)
石油	kg/L	-	7.40	7.40
石炭	kg/kg	12.40	-	12.40
天然ガス	kg/m ³	-	1.26	1.26
石油(燃焼)	kg/MJ	-	0.19	0.19
石炭(燃焼)	kg/MJ	0.39	-	0.39
天然ガス(燃焼)	kg/MJ	-	0.03	0.03

表 3 電力の TMR

	units	TMR(s)	TMR(aq)	TMR(total)
石油火力	kg/MJ	-	0.48	0.48
石炭火力	kg/MJ	1.32	-	1.32
天然ガス火力	kg/MJ	-	0.09	0.09
原子力	kg/MJ	0.13	-	0.13
電力(OECD)	kg/kwh	0.97	0.92	1.89

4.3. 非金属鉱物資源の TMR 係数

石灰石、ドロマイト、耐火粘土などの非金属鉱物資源の TMR 係数について、資源エネルギー庁が公開している埋蔵鉱量統計調査¹⁸⁾を参考にして概算した。表4、5に非金属鉱物の埋蔵鉱量等に関するデータを示した。ここで、埋蔵鉱量とは地殻中に存在する鉱床の質量を、可採粗鉱量とは現存する鉱床の採鉱によって出鉱すべき粗鉱の質量(すなわち、埋蔵鉱量のうち採鉱し得る量に混入するズリの量を加えた出鉱予定量)を意味する。また、採鉱実収率は、次式により得られる。

$$\text{採鉱実収率} = (\text{可採粗鉱量} \times (1 - \text{ズリ混入率}) / \text{埋蔵粗鉱量}) \times 100 \%$$

これらのデータを用いて、非金属鉱物の TMR 係数を算定した。白けい砂を例に、以下に非金属鉱物の TMR 係数の算定方法を示す。白けい砂の採鉱実収率は、58.6%であることから、白けい砂鉱石の TMR 係数 $=1/0.586=1.71\text{t/t}$ が得られる。さらに、採鉱される鉱石の品位が90.9%であることから、白けい砂鉱石の成分あたりの TMR 係数 $=1/0.586/0.909=1.88\text{t/t}$ が得られる。他の非金属鉱物の TMR 係数についても同様の手法により算出した。表6に非金属鉱物の TMR 係数の算出結果を示した。なお、この算出では、鉱床からの採掘に至るまでの土砂などの量が考慮されていない。したがって、より正確には、それらの量を考慮した TMR 係数の算出が必要である。

表4 非金属鉱物(けい石、ろう石、石灰石、ドロマイト)の埋蔵鉱量

1.けい石

(1)白けい石(16年4月1日現在)調査鉱山数 30

	埋蔵鉱量		可採粗鉱量		採鉱 実収率 (%)	ズリ 混入率 (%)
	鉱量 (千t)	品位 (%)	鉱量 (千t)	品位 (%)		
確定	241,888	88.4	194,819	88.7		
推定	125,738	91.0	90,874	90.6		
予想	332,816	93.9	176,336	93.4		
計	700,442	91.5	462,029	90.9	58.6	11.1

(2)天然けい砂(16年4月1日現在)調査鉱山数 40

	埋蔵鉱量		可採粗鉱量		採鉱 実収率 (%)	ズリ 混入率 (%)
	鉱量 (千t)	品位 (%)	鉱量 (千t)	品位 (%)		
確定	42,162	80.1	33,846	77.6		
推定	23,836	77.6	18,210	75.4		
予想	25,732	72.7	21,567	73.5		
計	91,730	77.4	73,623	75.8	73.3	8.7

(3)蛙目けい砂(16年4月1日現在)調査鉱山数 13

	埋蔵鉱量		可採粗鉱量		採鉱 実収率 (%)	ズリ 混入率 (%)
	鉱量 (千t)	品位 (%)	鉱量 (千t)	品位 (%)		
確定	6,445	47.7	5,303	47.9		
推定	3,292	47.8	2,857	48.0		
予想	11,177	53.1	11,004	53.2		
計	20,914	50.6	19,164	50.9	91.6	0

2.ろう石(16年4月1日現在)調査鉱山数 26

	埋蔵鉱量 (千t)	可採粗鉱量 (千t)	採鉱 実収率 (%)	ズリ 混入率 (%)
確定	30,954	21,484		
推定	36,787	19,709		
予想	49,510	18,525		
計	117,251	59,718	39.7	22.1

3.石灰石(16年4月1日現在)調査鉱山数 277

	埋蔵鉱量		可採粗鉱量		採鉱 実収率 (%)	ズリ 混入率 (%)
	鉱量 (千t)	品位 (%)	鉱量 (千t)	品位 (%)		
確定	11,178,284	54.2	9,182,301	53.8		
推定	10,190,585	54.0	8,179,035	53.8		
予想	39,463,981	54.3	23,010,743	53.6		
計	60,832,850	54.3	40,372,079	53.7	58.5	11.8

4.ドロマイト(16年4月1日現在)調査鉱山数 17

	埋蔵鉱量		可採粗鉱量		採鉱 実収率 (%)	ズリ 混入率 (%)
	鉱量 (千t)	品位 (%)	鉱量 (千t)	品位 (%)		
確定	441,708	17.9	338,568	17.8		
推定	294,133	17.8	217,212	17.7		
予想	683,064	16.7	357,176	16.4		
計	1,418,905	17.3	912,956	17.2	60.2	6.5

表5 非金属鉱物（耐火物）の埋蔵鉱量

5.耐火粘土

(1)カオリン(16年4月1日現在)調査鉱山数 6

	埋蔵鉱量 (千 t)	可採粗鉱量 (千 t)	採鉱実収率 (%)	ズリ混入率 (%)
確定	2,787	2,193		
推定	1,731	1,413		
予想	2,214	1,478		
計	6,732	5,085	70.9	6.2

(2)頁岩粘土(9年4月1日現在)調査鉱山数 3

	埋蔵鉱量 (千 t)	可採粗鉱量 (千 t)	採鉱実収率 (%)	ズリ混入率 (%)
確定	746.5	435.5		
推定	1,604.0	997.0		
予想	3,185.0	2,107.0		
計	5,535.5	3,539.5	46.9	26.7

(3)木節粘土(16年4月1日現在)調査鉱山数 35

	埋蔵鉱量 (千 t)	可採粗鉱量 (千 t)	採鉱実収率 (%)	ズリ混入率 (%)
確定	3,253	3,084		
推定	1,889	1,772		
予想	8,501	8,193		
計	13,643	13,049	95.6	0

(4)蛙目粘土(16年4月1日現在)調査鉱山数 33

	埋蔵鉱量 (千 t)	可採粗鉱量 (千 t)	採鉱実収率 (%)	ズリ混入率 (%)
確定	8,625	6,886		
推定	4,666	4,038		
予想	13,422	12,649		
計	26,713	23,573	88.2	0

表6 非金属鉱物の TMR

		Ore-TMR(t)	
		per ore(t)	per component(t)
けい石	白けい石	1.71	1.88
	天然けい砂	1.36	1.80
	蛙目けい砂	1.09	2.14
ろう石		2.52	-
石灰石		1.71	3.18
ドロマイト		1.66	9.66
耐火粘土	カオリン	1.41	1.99
	頁岩粘土	2.13	4.55
	木節粘土	1.05	1.09
	蛙目粘土	1.13	1.29

4.4. バイオマス資源の TMR 係数

4.4.1. 農作物の TMR 係数

農作物は食用としてだけでなく、紙などをはじめバイオプラスチック、バイオフューエル等各種の工業材料および工業燃料の原料としても利用される。ここでは、バイオマス資源である農作物の TMR 係数を、農林水産統計月報¹⁹⁾を参考に算出した。表7に農林水産統計を集計した各種の農作物の作付面積および収穫量を示した。これらの上記のデータおよび土壌の TMR を用いて農作物の TMR 係数を算定した。土壌の TMR 係数については、以下の仮定により算出した。野菜耕作用の土壌の仮比重 1.2、耕深 5cm より 60t/a、稲作用の土壌の仮比重 1.6、耕深 12cm より 192t/10a が得られる。稲を例に、以下に、農作物の TMR 係数の算出方法を示す。稲の作付面積 10a あたりの生産量は 513kg より、稲の TMR 係数 = $(10/0.513) \times (192/10) = 374.2t/t$ が得られる。他の農作物の TMR 係数についても同様の手法により算出した。表8に農作物の TMR 係数の算出結果を示した。

表7 農作物の作付面積および収穫量 (2004年)

	Planted area	Yield per 10a	Production
	ha	kg	t
稲	1,701,000	513	8,730,000
小麦	212,600	405	860,300
二条大麦	37,200	355	131,900
六条大麦	17,600	291	51,200
裸麦	5,060	306	15,500
大豆	136,800	119	163,200
小豆	42,600	212	90,500
いんげん	11,800	231	27,300
らっかせい	9,110	234	21,300
馬鈴薯	-	4,504	-
かんしょ	40,300	2,500	1,009,000
かんしょ(でんぷん原料)	5,510	3,110	171,500
牧草	788,300	3,897	30,723,000
青刈りとうもろこし	87,400	5,330	4,659,000

表8 農作物の TMR

	TMR (t/t)		TMR (t/t)
稲	374.1	いんげん	259.7
小麦	148.3	らっかせい	256.4
二条大麦	169.2	馬鈴薯	13.3
六条大麦	206.3	かんしょ	24.0
裸麦	195.9	かんしょ(でんぷん原料)	19.3
大豆	504.2	牧草	15.4
小豆	283.0	青刈りとうもろこし	11.3

4.4.2. 木材の TMR 係数

木材の TMR 係数については、京都市市民活動総合センター内薪く炭く KYOTO の HP²⁰⁾ を参考にして算定した。表9に HP から入手したスギ、ヒノキ素材の生産量および間伐実施量を示した。同表より、木材の間伐材比が約 50%であることが解る。また、HP によると 1 本の木のうちで木材としての利用比率が 25%であることから、木材の TMR 係数 = $1/0.5/0.25 = 8t/t$ が得られる。

表9 スギ、ヒノキ素材生産量・間伐実施量（平成 12 年度）

区分		京都南部	京都中部	中丹	丹後	京都府計
エリア森林面積 (ha)		27,502	149,109	94,503	60,949	332,063
資源量	素材生産量 (m ³)	1,328	60,092	8,357	6,269	76,046
	間伐実施材積 (m ³)	5,825	48,200	16,642	4,204	74,871
	合計 (m ³)	7,153	108,292	24,999	10,473	150,917

地域区分は「京都府森林林業振興構想」の区分を準拠

4.5. 金属（インゴット）の TMR 係数の導出

以上で、Ore-TMR やエネルギーの TMR 係数が得られたので金属（インゴット）の TMR 係数を求めることができる。金属インゴットの TMR 係数は、下記の原則を用いて計算した。

- (1) 副産物のアロケーションは、金属地金価格でアロケーションした。
- (2) 抽出エネルギーについては、抽出エネルギーが得られる場合は、世界の一次平均エネルギーの TMR を加算。抽出エネルギーが得られない場合は、所要金属の還元の標準自由エネルギー変化（ G_0 ）とその溶融エンタルピー（ H_{m0} ）の和の 10 倍と仮定して計算した。図 1 2 は、横軸に上記の G_0 と H_{m0} の和、縦軸に実際に精錬に要するエネルギーの関係を示す。同図に見られるように、多くの金属では横軸の 10 倍の線上に集まっている。この仮定で得られた金属インゴットの TMR 係数を表 1 0、図 1 3 に示す。これらによれば、Pt は 520,000 となっている。一方、Anglo American Platinum Co の実操業データ（図 1 4）からは 1,200,000 となっており、プラマイ 2 倍程度で一致しているとみられる。

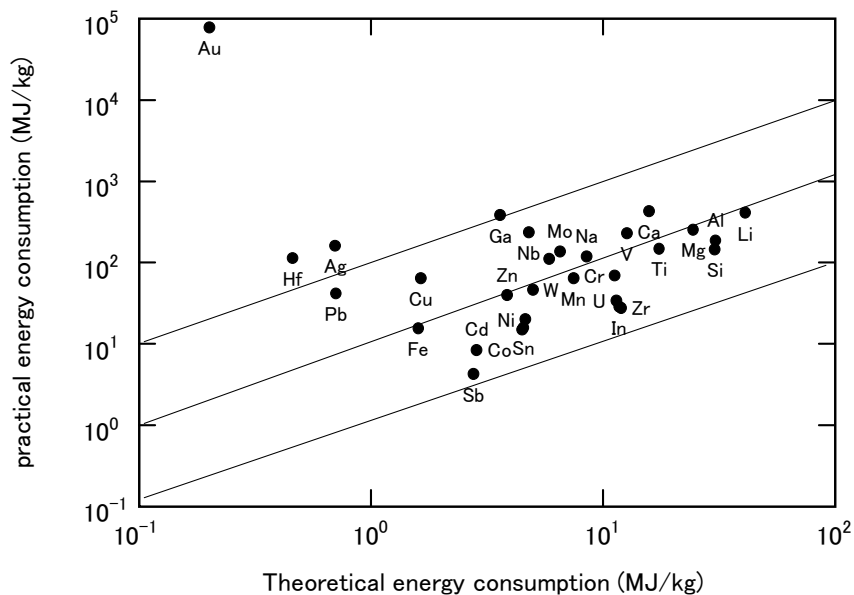


図 1 2 理論エネルギー必要量と実使用量の関係

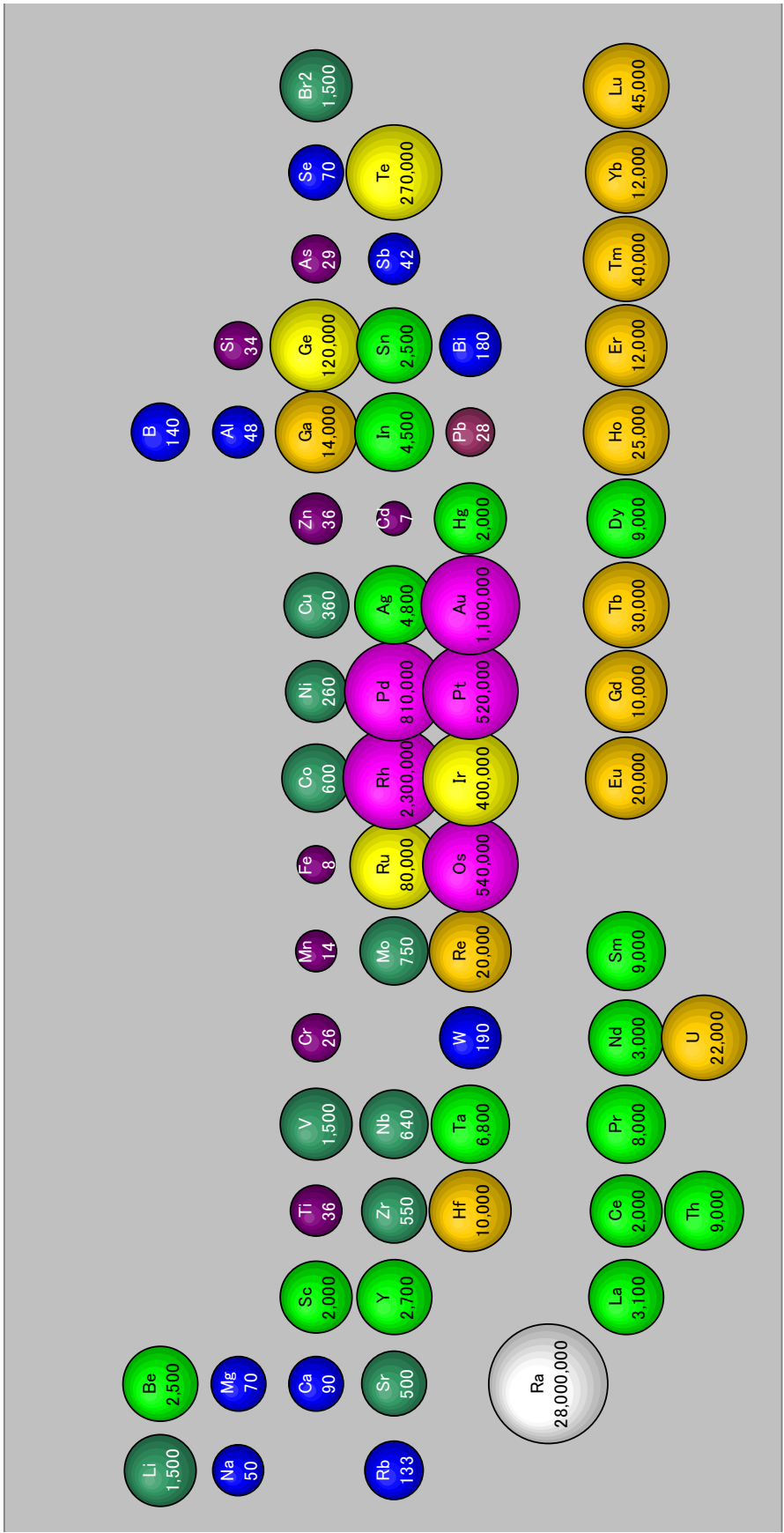


図13 周期表上に示した金属のTMR (t/t)

表 1 0 各元素の TMR 係数(t/t)

元素	TMR 係数	元素	TMR 係数	元素	TMR 係数	元素	TMR 係数
L	1,500	Co	600	Cd	7	Tm	40,000
Be	2,500	Ni	260	In	4,500	Yb	12,000
B	140	Cu	360	Sn	2,500	Lu	45,000
F2	210	Zn	36	Sb	42	Hf	10,000
Na	50	Ga	14,000	Te	270,000	Ta	6,800
Mg	70	Ge	120,000	I2	45,000	W	190
Al	48	As	29	Cs	11	Re	20,000
Si	34	Se	70	Ba	510	Os	540,000
P2	220	Br2	1,500	La	3,100	Ir	400,000
S	520	Rb	130	Ce	2,000	Pt	520,000
Cl2	52	Sr	500	Pr	8,000	Au	1,100,000
K	54	Y	2,700	Nd	3,000	Hg	2,000
Ca	90	Zr	550	Sm	9,000	Tl	450
Sc	2,000	Nb	640	Eu	20,000	Pb	28
Ti	36	Mo	750	Gd	10,000	Bi	180
V	1,500	Ru	80,000	Tb	20,000	Ra	280,000,000
Cr	26	Rh	2,300,000	Dy	9,000	Th	9,000
Mn	14	Pd	810,000	Ho	25,000	U	22,000
Fe	8	Ag	4,800	Er	12,000		

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

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

図 1 4 白金族の操業データ

4 . 6 . Wuppertal 研究所による TMR 係数との対比

表 1 1 に、Wuppertal 研究所より公表されている TMR 係数の値^{2 1)}を示す。同表では、Material intensity という表示になっているが、これはここでいう TMR 係数と理解して差し支えない。同表の abiotic material(非生物材料)によれば、金属は 15 種しか記載されていないが、アルミは 37kg/kg に対して著者らの TMR は 48kg/kg、鉛は 16kg/kg に対して 28kg/kg、Au は 540,000kg/kg に対して 1,100,000kg/kg、鉄は 8kg/kg ぐらいに対して 8kg/kg とおおむねプラマイ 2 倍の誤差で対応している。

表 1 1 Wuppertal 研究所より公表されている TMR の値

Material intensity of materials, fuels, transport services		Version 2; 28.10.2003				
material	specification	Material intensity [t/t] / Materialintensitaet [t/t.]				
		abiotic material	biotic material	water	air	moved soil
Metals / Metalle						
aluminum Aluminium	primary primaer	37		1047.7	10.87	Europe
	secondary sekundaer	0.85		30.7	0.948	Europe
	wrought alloy Knetlegierung	35.28		996.8	10.374	Europe
	cast alloy Gusslegierung	8.11		234.1	2.932	Europe
	average Durchschnitt	18.98		539.2	5.909	Europe
lead Blei	estimated abgeschaetzt	15.6				World
ferrochromium Ferrochrom	low carbon, 60% Cr niedriggekohlt 60% Cr	21.58		504.9	5.075	World
	high carbon, 75% Cr hochgekohlt, 75% Cr	13.54		221.4	2.3	World
ferro manganese Ferro-mangan	high carbon, 75% Mn hochgekohlt, 75% Mn	16.69		193.8	2.231	World
ferro molybdenum Ferro-molybdan	estimated abgeschaetzt	748		1286	9.5	World
ferro nickel Ferro-nickel	25% Ni	60.33		615.9	9.726	World
gold Gold	estimated abgeschaetzt	540,000.00				World
copper Kupfer	50% primary, 50% secondary 50% primaer; 50% sekundaer	179.07		236.39	1.16	World
	secondary sekundaer	2.38		85.5	1.319	World
	primary primaer	348.47		367.2	1.603	World
nickel Nickel		141.29		233.3	40.825	Germany
platinum Platin		320,300.00		193000	13800	World
silver Silber	estimated abgeschaetzt	7,500.00				World
steel Stahl	plate, hot dipped galvanised, basic oxygen steel Oxygenstahl; Blech, feuerverzinkt	9.32		81.9	0.772	World
	Rebar, Wire Rod, Engineering Steel; electric arc furnace route Traeger, Draht, Masch.baustahl; Elektrolichtbogenflen Route	1.47		58.8	0.519	World
	Rebar, Wire Rod, Engineering Steel; blast furnace route Traeger, Draht, Masch.baustahl; Hochoten Route	8.14		63.7	0.444	World
	Plate, blast furnace Route Grobblech, Hochofenroute	8.05		55.7	0.436	World
	Hot Rolled, blast furnace Route Warmband, Hochotenroute	7.63		56	0.414	World
	plate, electrogalvanised, blast furnace Oxygenstahl Blech, feuerverzinkt	9.42		75.4	0.65	World
	Cold Rolled, blast furnace Route Kaltfeinblech, Hochofenroute	8.51		74.8	0.492	World
stainless steel Edelstahl (rostfrei)	18%Cr; 9%Ni	14.43		205.1	2.825	Europe
	17%Cr; 12%Ni	17.94		240.3	3.382	Europe
tin Zinn	Import-Mix Germany Import-Mix Deutschland	8,486.00		10958	149	Germany
zinc Zink	electrolytic elektrolytisch	22.18		343.7	2.282	Germany
	high-grade zinc, (secondary) IS Feinzink (sekundaer) IS-Ofen	19.36		86.5	42.29	Germany
	mix Mix	21.76		305.1	8.283	Germany

5 . TMR による解析例

5 . 1 . 他の指標との相関

4 . 5 . 項で得られた TMR 係数と生産量、価格の対応を見てみた。その結果を図 1 5、1 6 に示す。図 1 5 では、TMR 係数が 8kg/kg と小さく生産量が 10 億トンに達する鉄が右下にあり、左上には白金族が集まっている。全体として TMR 係数と生産量には明確な負の相関が認められる。図 1 6 では、逆に価格と TMR 係数のあいだに正の相関が認められ、地球を掘った量が多いほど価格が高いという傾向が認められる。

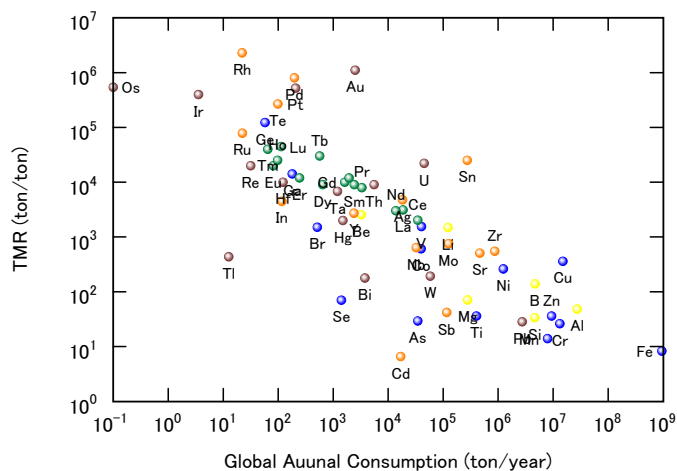


図 1 5 TMR 係数と世界の生産量の関係

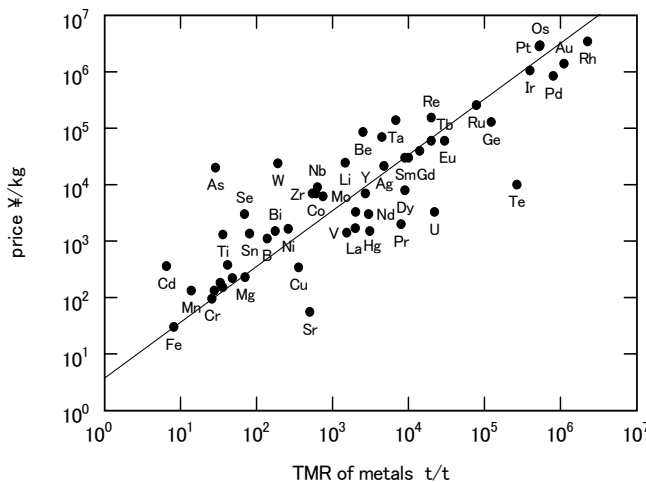


図 1 6 金属の TMR 係数と価格の関係

5.2. TMRによる解析

5.2.1. 機器類の実重量と資源端重量の対応

図17は、乗用車、CPU、携帯、LCDパネルについて、消費端重量（各機器の実重量）と資源端重量の対応を示す。自動車は従来型素材（アルミ、鉄、銅、ステンレス）を多用しているため実重量の15倍程度の資源端重量となっているが、CPU、携帯、LCDパネルなどは300から1,000倍の資源端重量を示しており、いかに地球に負荷をかけたかがよくわかる。この中で金の寄与が目につく。

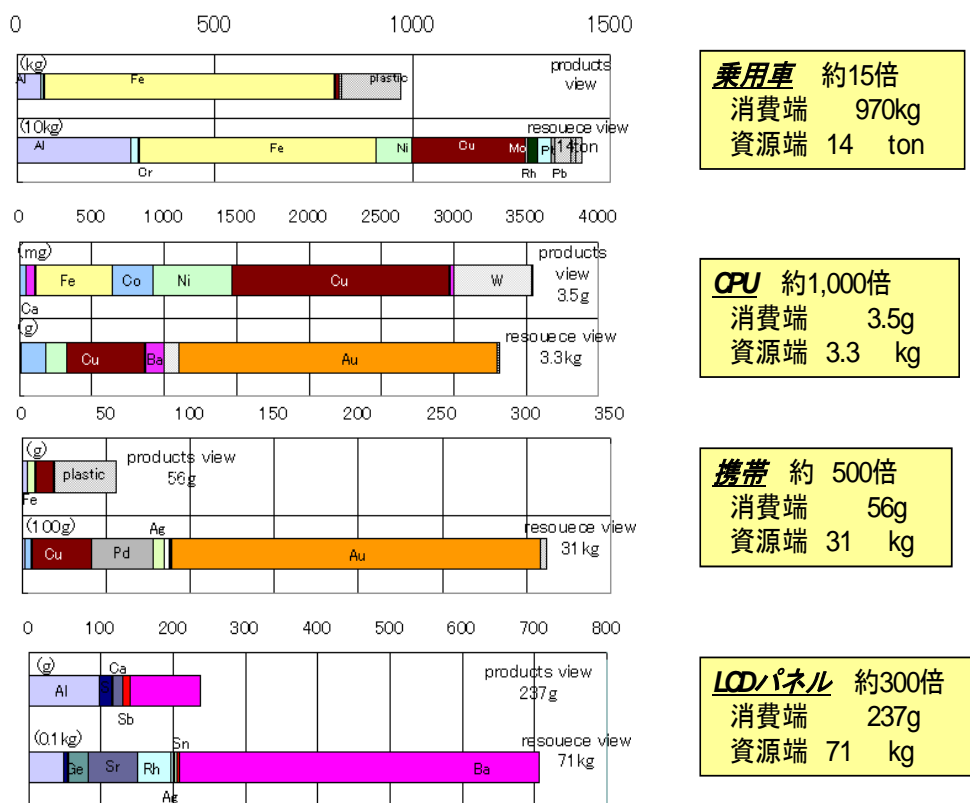


図17 各種製品の消費端重量と資源端重量

5.2.2. リサイクル関係の解析結果

図18は、使用済み自動車のリサイクルの内容を、実重量と資源端重量で見たものである。自動車のリサイクルは実重量で見れば鉄のリサイクルであるが、資源端重量で見ればアルミや銅のリサイクルであることが見てくる。

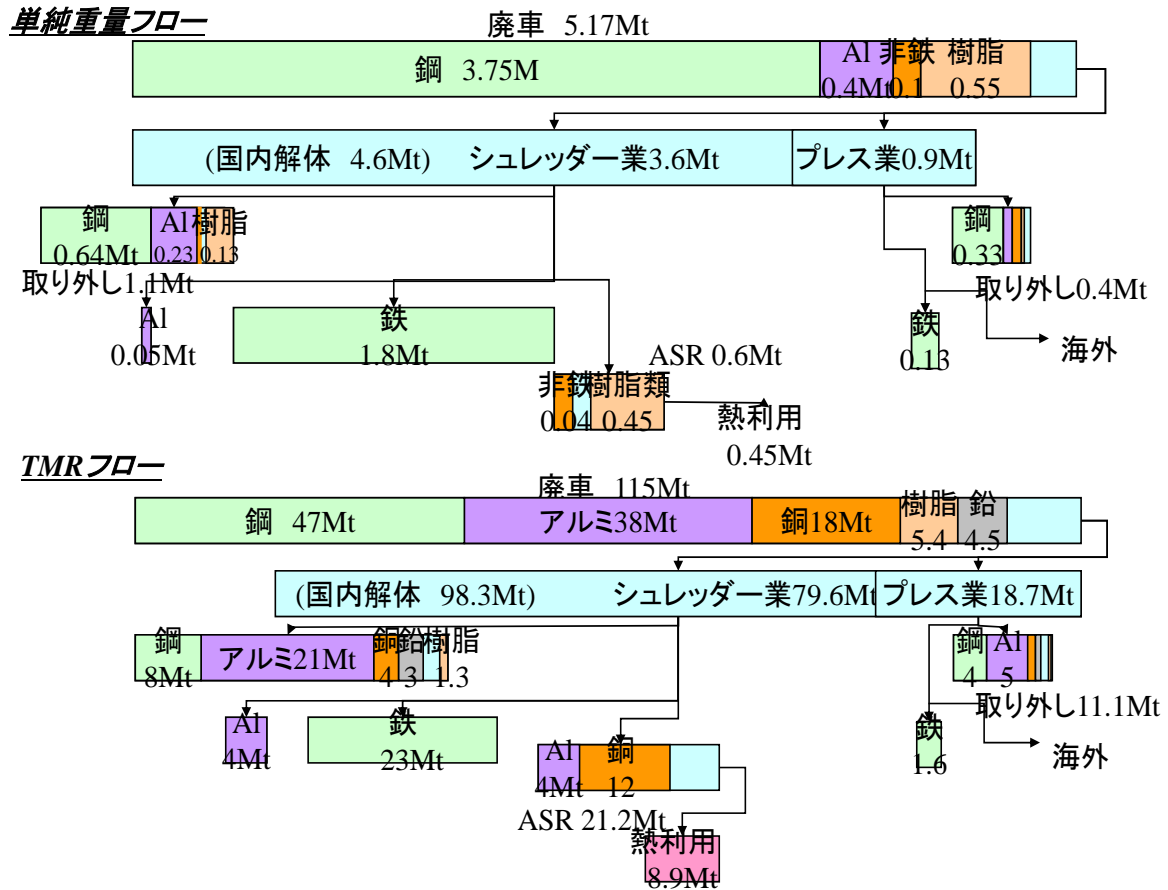
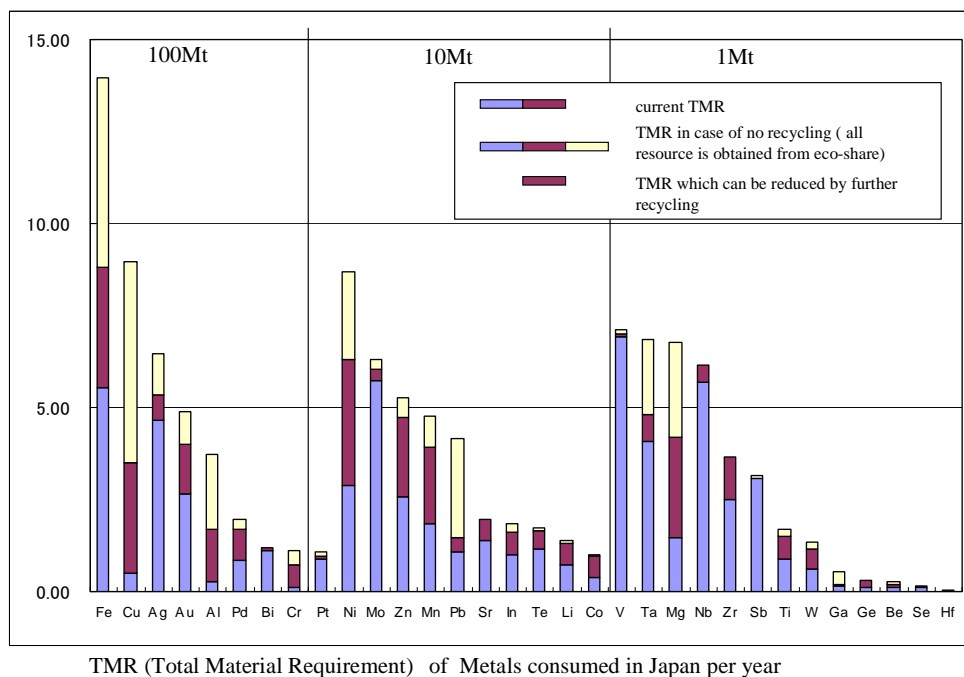


図18 自動車のリサイクルと実重量フローと TMR フロー

図19は、鉄、銅、銀、金などにおける現状の TMR と、それがリサイクルによって現状よりどれだけ少なくてすまされているか、ならびに、さらにリサイクルを促進すればさらにどこまで減らせるかを見たものである。各金属とも大きな TMR 値を示しているが、リサイクルによって大幅に資源端重量を減らせることが見て取れる。



TMR (Total Material Requirement) of Metals consumed in Japan per year

図19 日本における金属ごとの年間 TMR

5.2.3. 総資源消費

それぞれの金属の生産量にTMR係数を掛け合わせて合計をとると、人類が金属元素を得るためにどのくらい地球を掘っているか（=総資源端重量）を知ることができる。図20は、それぞれの金属の世界の年間生産量の総資源端重量（総TMR）の推移を示している。2004年段階の年間の総TMRは約220億トンに達している。その内訳は、鉄がTMR係数は小さいものの生産量が圧倒的に多いため40%近くの比率となっている。次いで銅が約20%となっている。注目すべきことは、使用量ははるかに少ない金がTMRとしてはAlよりも大きな値となっていることである。特に金は電子産業などでよく用いられており、地球の持続可能性に配慮を必要とする物質である。同図の凡例に記された元素は、2004年の年間TMRの上位20元素であり、白金、レアアース、銀などが金と同様に比較的少量の使用にもかかわらずランクインしている。

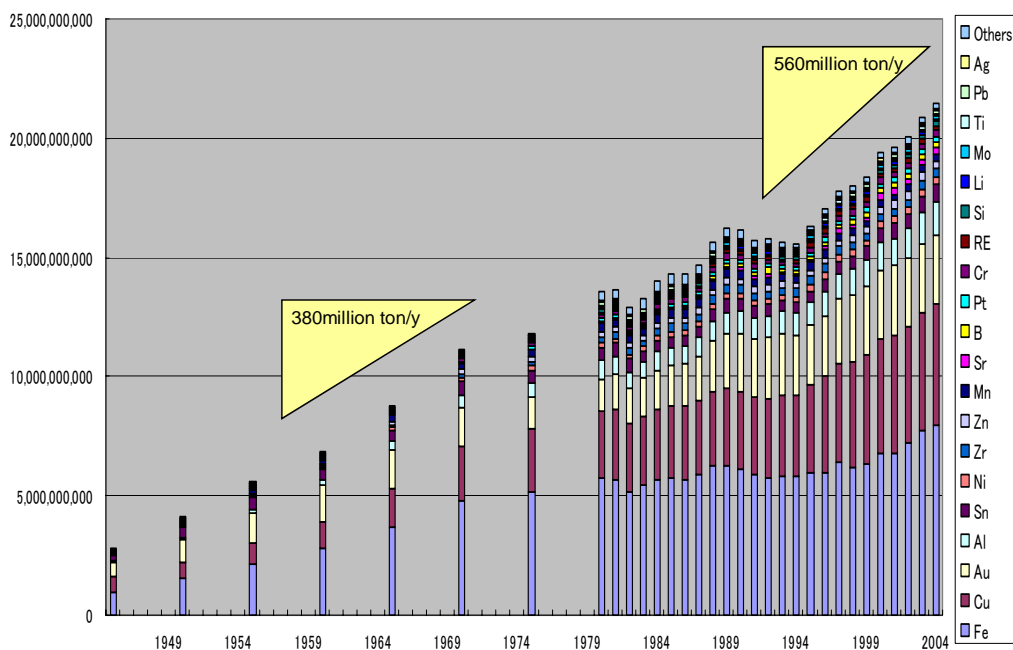


図20 世界の年間 TMR の推移 (t)

同図から総TMRの推移を見て取ると、全体として右肩上がりの傾向であるが、特に、1990年代の後半からの増加傾向は5.6億トン/年であり、成長の限界が唱えられた1960~70年代の3.8億トン/年より大幅に大きくなっている。

世界総TMRが今後どのように増大していくかを見てみた。その結果を図2-1に示す。同図の2005年より右は、各金属の消費量と一人あたりのGDPとの関係を3段階直線モデル用いて2050年に向けて外挿したものである。同図によれば、2050年ごろには世界の年間総TMRは、2兆トンを超えると見られる。

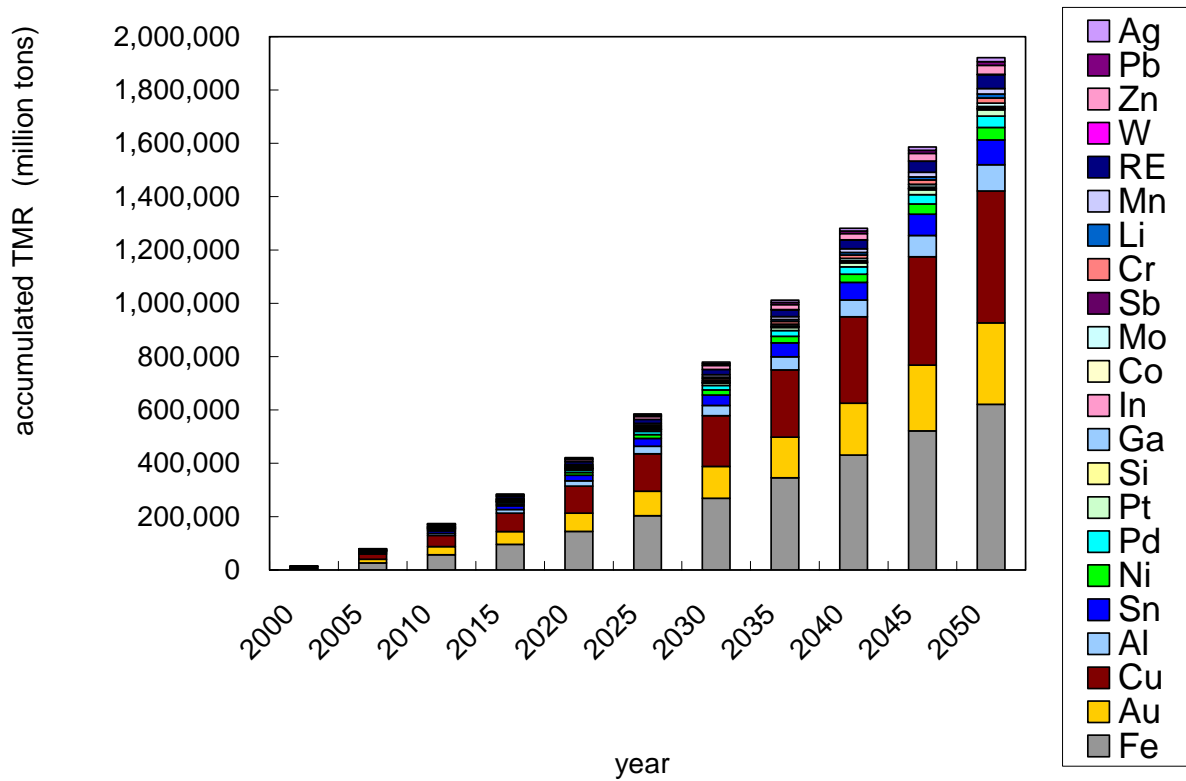


図2-1 世界総TMRの将来予想

TMR係数で重み付けられた各年の埋蔵量（埋蔵量相当TMR）を当該年のTMR係数で重み付けられた金属生産量で割れば、当該年における金属元素総体としての資源耐用年数を得る。すなわち；

$$\text{金属総耐用年数} = \frac{\sum \{ (i\text{金属のTMR係数}) \times (i\text{金属資源の当該年で確定埋蔵量}) \}}{\sum \{ (i\text{金属のTMR係数}) \times (i\text{金属の年間生産量}) \}}$$

図2 2は、この金属総耐用年数の年毎の推移をプロットしたものである。一般に個々の金属資源の耐用年数は埋蔵量の増大などにより変動するが、TMR係数で重み付けた全体的傾向は着実に耐用年数を減少させており、1970年代には120年を上回っていたものが、2004年の時点では80年を切るに至っている。これをそのまま外挿すると、2040年には耐用年数が10年を切るといった事態も予測される。

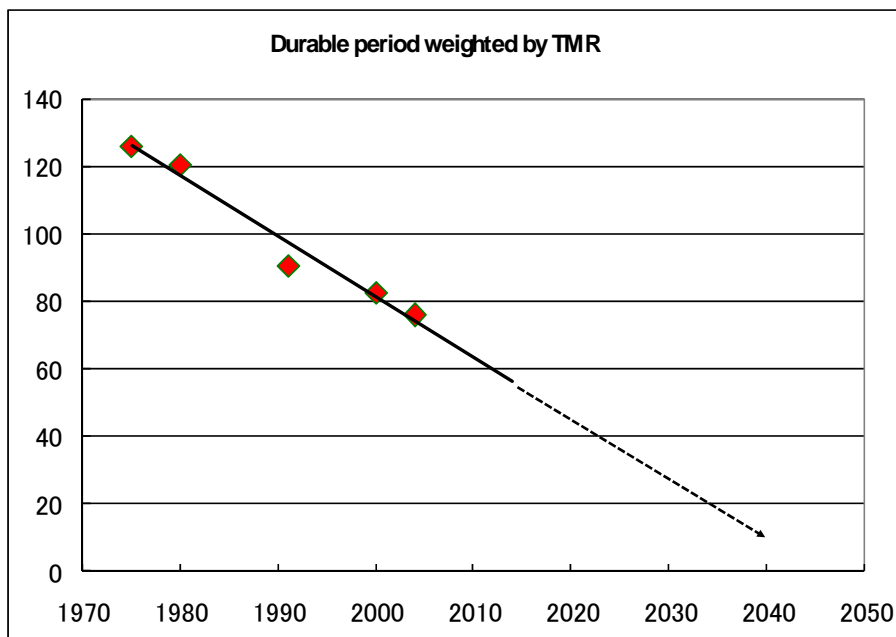


図2 2 TMR の耐用年数の将来予想（年）

5.2.4. 一人あたりの GDP と一人あたりの TMR の関係

我が国における一人あたりのGDPと一人あたりのTMRの関係を図23に示す。図中の点は、戦後の日本のある年を示す。一人あたりのGDPの増大に伴って、一人あたりのTMRは横軸の値が8,000ドルあたりまでは大きな傾きで増大する。これは、この段階の経済成長は、資源多消費型で成長することを示していると思われる。8,000ドルを過ぎるあたりから縦軸の増加の速度は鈍化し、25,000ドルを超すあたりから横這うように見える。これは、経済のサービス化により、少ない資源で高いGDPが得られることを示している。同図には、資源効率を2倍、4倍、8倍にした時に縦軸がどのレベルに止まるかを示している。2050年に向けて資源効率を大幅に上げることによってTMR消費を下げ、資源の寿命を延命する必要がある。

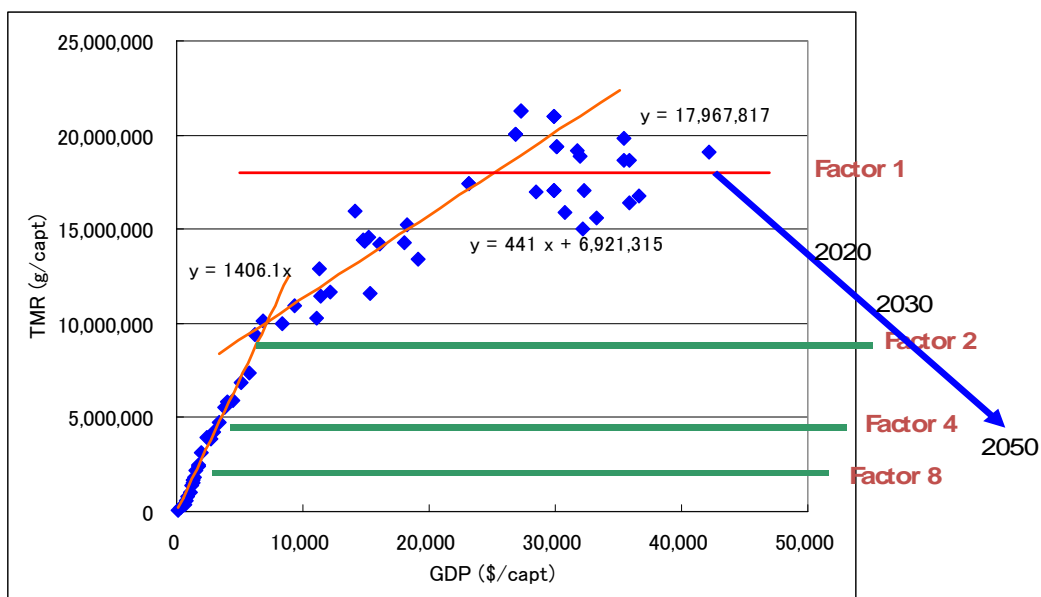


図23 戦後の日本における GDP と TMR の関係

5.2.5. GDPの検討

図24は、各国の資源の生産性（\$/TMR トン）を示す図である。これは、それぞれの国で消費された素材・原料・製品を構成する金属や樹脂材料にそれぞれの TMR 係数を掛けて総和を取ることによって計算した消費素材の総 TMR で、各国の GDP（ドル）を割り算することによって得た。同図は GDP1,000 億ドル以上の国について示してある。図中の曲線は GDP（右スケール）である。資源生産性は、経済のサービス化がより進んでいる欧米系の諸国が高く日本はそれを追う形となっている。中国は、すでに世界の工場と言われているが、GDP、資源生産性ともまだ、日本の半分以下となっている。

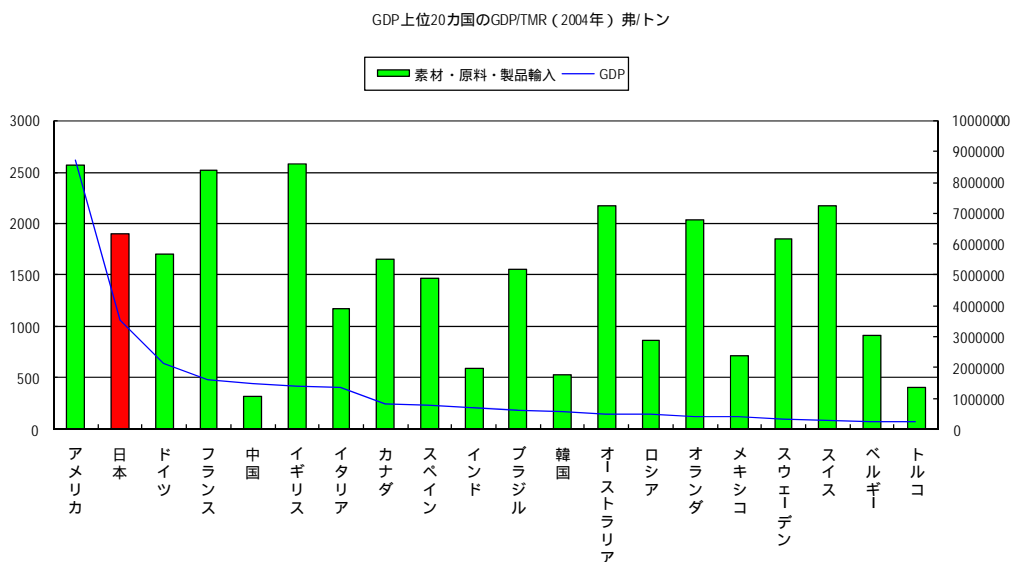


図24 国ごとの資源生産性

6．結言

以上、著者らがこれまでに提案し、検討してきた資源端重量（関与物質総量、TMR）について、現段階における概要を概説した。その中で TMR 係数の導出方法についてはかなり詳細に説明したので、これによって TMR 係数の意味や精度、さらには問題点や限界もご理解いただけたものと考え。これをきっかけに、多くの研究者によってさらに事例検討も含めた検討が行われ、この見方の有用性や限界が示されることとなれば、著者らの喜びとするところである。

文献一覧

- 1) F.シュミット・ブリーク(佐々木健訳):“ファクター10エコ効率革命”,シュプリンガー・フェアラーク,東京(1997)
- 2) World Resources Institute: “RESOURCE FLOWS THE MATERIAL BASIS OF INDUSTRIAL ECONOMIES (April 1997)
- 3) 原田幸明,井島 清,片桐 望,大蔵隆彦:J. Japan Inst. Metals 65 (7) (2001), pp564-570
- 4) 原田,井島:マグネシウムの資源生産性,まてりあ巻数: 43,号: 4, ページ: 264-269, 2004.4
- 5) 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, 2, 2, p.152-158, 2006
- 6) 中島謙一,山本圭介,中野加都子,黒田光太郎,原田幸明,長坂徹也:関与物質総量(TMR)に基づく使用済み携帯電話リサイクルフロー解析, Journal of Life-cycle Assessment, Japan, 2, 4, p.341-346, 2006
- 7) “循環型社会形成推進基本計画”、環境省(オンライン)、
http://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku/keikaku_2.pdf ,
http://www.env.go.jp/recycle/circul/keikaku/gaiyo_2.pdf ,(参照 2008-09-18)
- 8) 水谷広編集,エコマテリアル研究会:“地球の限界”,日科技連、東京(1999)
- 9) 文献2) p.8
- 10) 武田邦彦:“『リサイクル』してはいけない”,青春出版社,東京,(2000)
- 11) U.S. Geological survey Minerals Information: Minerals year book, (2001),
published on the web:<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/myb/>.
- 12) J.K.Moore: Mining and Quarrying Trends in the web of U.S. Geological survey Minerals Information (2001)
- 13) 西山 孝:“鉱物資源の現状”,アルム出版社,東京,(1992)
- 14) 国立天文台編:理科年表 2000,丸善(2000)
- 15) 中島謙一,井島 清,原田幸明:関与物質総量(TMR)の算定 資源および工業材料のTMR, NIMS-EMC 材料環境情報データ No.10 (2006.3)
- 16) K.Halada and K.Ijima: “Resource Productivity of Magnesium”, Materia Japan, 43 (4), pp.264-269, (2004)
- 17) 日本石油開発事業団(オンライン),
http://www.japex.co.jp/infomation/jigyo/t_index4.html
- 18) 資源エネルギー庁:埋蔵鉱量統計調査(オンライン),
<http://www.enecho.meti.go.jp/info/statistics/image/050622maizo.pdf> (参照 2006年1月15日)
- 19) 農林水産省統計部: “農林水産統計月報”, (2005)

- 20) 農林水産部：“標準山村集落における木質バイオマス資源を活用した山村振興”，薪く炭く KYOTO (オンライン)，
<http://sinktank.kdn.jp/rep/chapter2.pdf> (参照 2005年5月20日)
- 21) “Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy”，Wuppertal Institute, (オンライン), 入手先
http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wibeitrag/MIT_v2.pdf , (参照：2009・1・21)
- 22) 金属鉱業事業団：“ニュースフラッシュ” 2000-01～2000-49, (2000), published on the web: <http://www.mmaj.go.jp/>

NIMS-EMC 材料環境情報データ

No.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	(2003年3月)
No.2	鉛マテリアルフロー作成のための基礎調査	(2004年3月)
No.3	我国における自動車用白金族金属触媒のリサイクル動向	(2004年3月)
No.4	鉄スクラップの消費動向とその拡大技術シナリオのLCA的検討	(2004年3月)
No.5	我が国のアルミニウムマテリアルフロー調査	(2004年3月)
No.6	バイオマスの利活用に関する調査	(2005年3月)
No.7	中国の非鉄金属リサイクル動向と日本の廃家電を中心とするリサイクル6法のその後の状況	(2005年3月)
No.8	「鉱物資源使用」カテゴリーの特性化係数	(2005年3月)
No.9	中国の鉄鋼需給の現状と展望	(予定)
No.10	関与物質総量(TMR)の算定 資源および工業材料のTMR	(2006年3月)
No.11	金属元素のマテリアルフローを統一した形式で整理する試み	(予定)
No.12	社会蓄積量の把握に関する専門家意見調査	(2006年3月)
No.13	Ni, Co, V, REEの現状に対する考察	(2006年3月)
No.14	ナノテクノロジーの倫理・社会影響に関する調査研究	(2006年3月)
No.15	中国のリサイクル・資源利用調査報告	(2007年3月)
No.16	マテリアルリース社会システムのグランドデザインの検討	(2007年3月)
No.17	社会インフラとしての鋼構造物のハイパーネーション・ストックとしての評価	(2007年3月)
No.18	概説 資源端重量(Total Material Requirement ; TMR)	(2009年3月)

独立行政法人物質・材料研究機構
元素戦略クラスター

〒 305-0047

茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL 029-859-2668

FAX 029-859-2601

e-mail emc@wotome.nims.go.jp

home page <http://www.nims.go.jp/>

