

## 持続可能な資源利用には資源使用総量の1/8化が必要

—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—

平成19年7月6日

改訂：平成21年3月2日

独立行政法人物質・材料研究機構

### 概要

1. 独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：岸輝雄）、材料ラボの原田幸明ラボ長は、危惧されている将来の金属資源の利用に対して、これまでの金属の使用量と経済成長の関連の解析をもとに、持続可能な資源利用が可能になるための資源の使用量のレベルを推定した。その結果、持続可能な資源利用には、一人当たりの天然から採掘されている物質総量を、現在の日本のレベルの1/8にしていく必要があることが示された。
2. 推定計算には、製品中に使用される精製された金属の量に代わって、採掘の場で実際に掘削される天然資源の量を現す関与物質総量もしくはエコロジカル・リユクサックと呼ばれる資源量が使われた。現在の一人当たりの関与物質総量は年間一人当たり約18トンであるが、2050年には世界の各国がその1/8である年間一人当たり約2.3トンにしていく必要がある。
3. 関与物質総量の低減には、製品として使用されている金属の量を効率的に削減してだけでなく、エコロジカル・リユクサックの値の大きな金属から値の小さな金属への転換・代替が求められており、特に電子材料では重要である。
4. この結果は、7月9日からロンドンで行なわれる「第八回エコマテリアル国際会議」および、同12日のマテリアル・セキュリティに関する第二回日英ワークショップで発表され、また、10月30日から3日間の予定で石垣島で開催される「持続可能なエネルギーと資源の国際会議」（主催：物質・材料研究機構燃料電池センター、エコマテリアル・フォーラム）においても議論される。

## 研究の背景

BRICs 諸国など世界的な資源需要の増大や、イノベーションを支える高機能物質への期待など、資源需要はかつてない高まりを見せている。特に、レアメタルやレアアースなど多様な機能を発揮する金属元素は枯渇性資源と呼ばれ地球上の利用可能な資源は有限であり、その限界に向かって急速につき進んでいるのが現状であり、2月の記者発表でも示したように、資源リスクは著しく増大している。

そのような資源リスクの増大に対して、資源の探索などの取組みと共に、材料技術的にも、使用量を必要不可欠な部分に限定しつつ性能をアップさせる「減量」、希少性や枯渇性の高い金属元素からより普遍的に存在する元素への「代替」、さらにリサイクルによる「循環」などが取り込まれるようになってきている。しかし、それらの目標をどこまで設定すればよいのかということが曖昧であり、改善の対象や速度が資源リスクに効果的なものかの判断が難しかった。

目標設定の曖昧さの原因には、1) 元素は多種多様でありその違いを無視して「代替」等の目標を数的に表すことは難しい、一方で2) 元素は単独ではなく複数の組み合わせで材料や部材、製品として使用されるため社会全体の資源利用を考えるには異なる元素を足し合わせてデジタル化しなければ意味がない、という相矛盾する側面があった。

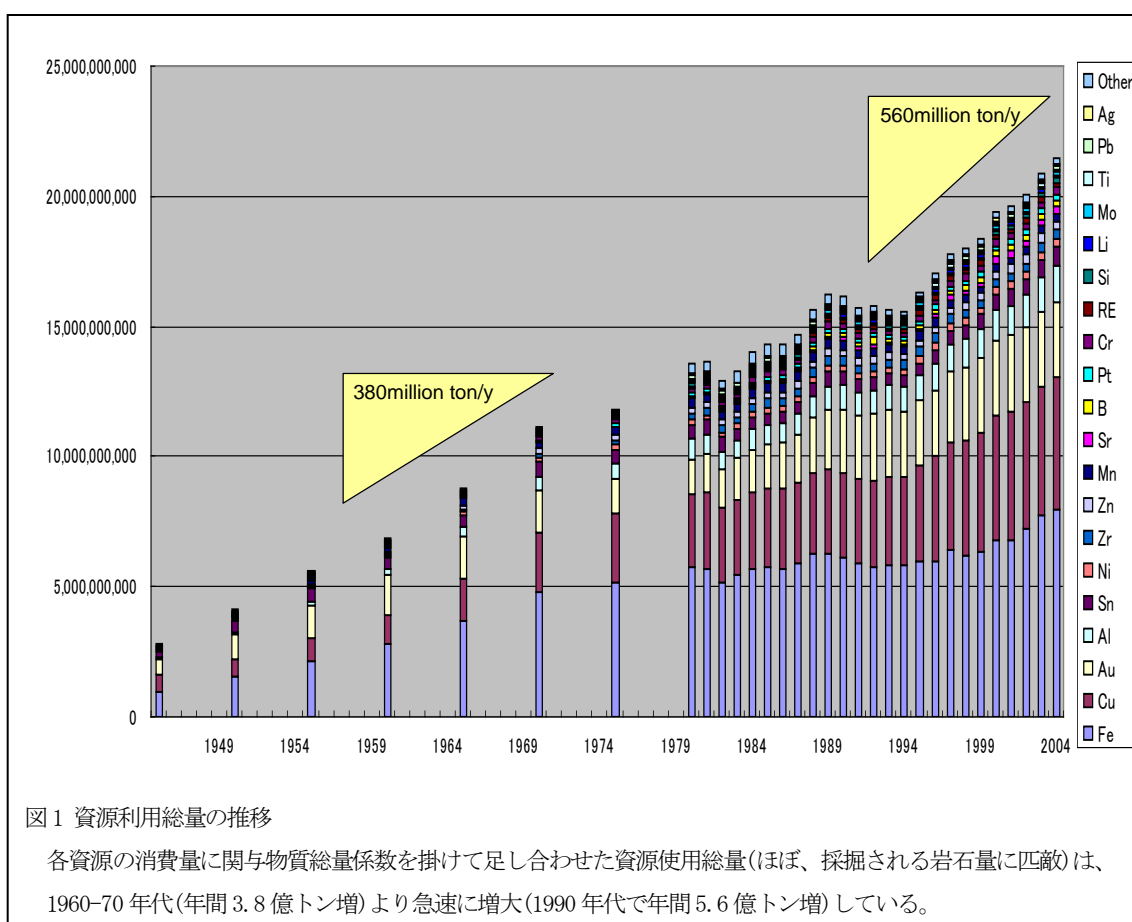
そこで、本研究では、多様な元素それぞれを資源の重みを付けて表せる指数として、関与物質総量(TMR: Total Material Requirement)もしくはエコロジカル・リユクサックと呼ばれる数値に着目し、包括的な金属元素利用全体の消費増大予測と、その枯渇への接近度を表せるようにすると共に、資源リスク低減のためにその数値をどの程度までに抑える必要があるのかを検討した。

## 成果の内容

### 1. 資源使用総量の把握

ある金属元素を1トン得るために、採掘の際に土石、岩石などを何トン採掘しなければならないかを表す量として、エコロジカル・リュックサック(関与物質総量係数)がある。この値を、第二次大戦後から現在に至るそれぞれの金属の年間消費量に掛けて、その年での和をとったものが年間資源使用総量で、それを棒グラフとして表した。なお、この年間資源使用総量は、その年に地球から掘り出された資源量にほぼ匹敵するとみなしてもよい。

現在の、年間資源使用総量は約220億トンであり、1990年からの年間増加量は5.6億トンと、かつて資源枯渇の危機が叫ばれた1960-70年代の増加速度を上回っている。



## 2. 資源枯渇への逼迫度

―― 2040 年台には資源の耐用年数が 10 年を切る ―――

個々の資源の資源枯渇への逼迫度は、埋蔵量を年間消費量で割った耐用年数(可採年数、資源余命などとも呼ばれる)で表されることが多い。この耐用年数の考え方に、それぞれの金属に対して関与物質総量の係数を掛けることで重み付けして、

$$\text{包括的金属資源耐用年数} = \frac{\Sigma \{(\text{資源の埋蔵量}) \times (\text{関与物質総量係数})\}}{\Sigma \{(\text{資源の年間消費量}) \times (\text{関与物質総量係数})\}}$$

とすることで、包括的な金属資源の耐用年数が得られる。なお記号の $\Sigma$ はそれぞれの資源に対しての総和を取ることを意味している。

こうして得られた結果が、図2のプロットであり、黒線で示すように、かつて1970年代には120年程度であった包括的な金属資源の耐用年数が、2000年には80年をきるレベルまで下がってきている。

このまま単純に延長すると、図2の破線のようになり、2040年代には、包括的な金属資源の耐用年数は10年を切ってしまうことになる。

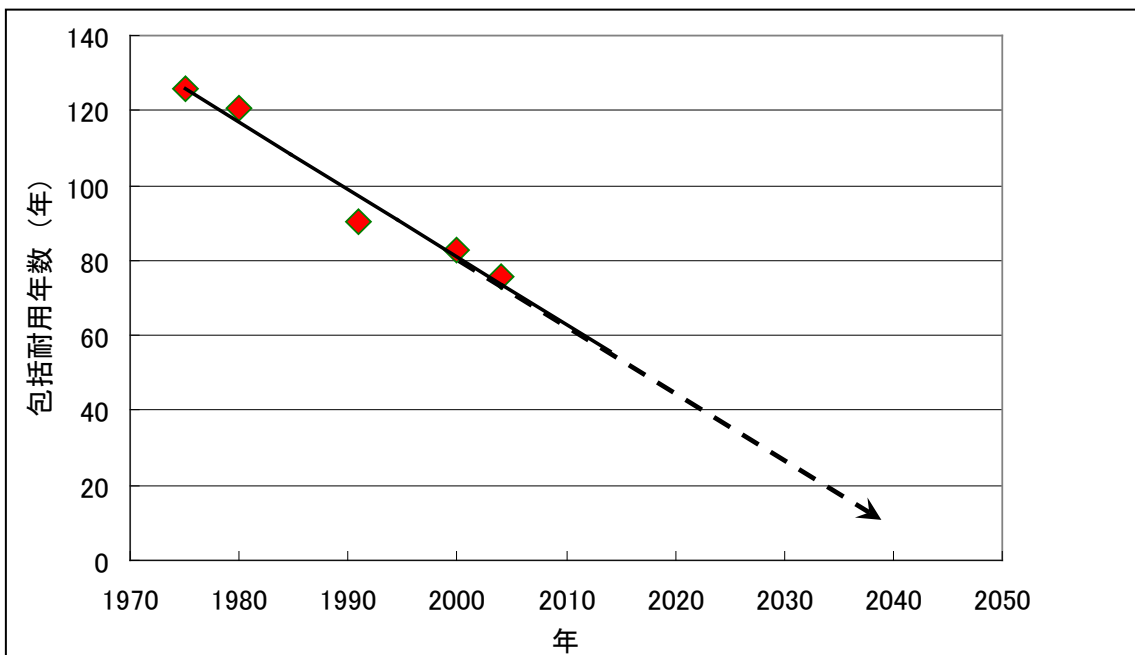


図2 金属資源全体を平均した包括的資源耐用年数の縮小

金属資源全体の平均ともいえる包括的資源耐用年数は、1970年代の120年から現在では80年を切るまでに短くなっており、このままの延長線では2040年代には耐用年数が10年を切ることもありうる。

### 3. 2050年までの予測

— 世界中が日本と同じレベルの省資源型への転換を行っても2050年には現有埋蔵量を超える資源要求——

実際の資源需要は、ある程度社会が成熟すれば、伸び率が鈍化してくる。それを考慮して、開発途上の国々が日本と同じ程度の省資源化を進めることが出来ると仮定して2050年までの関与物質総量の増大を見積もってみた。

そのために日本における一人当たりのGDPと一人当たりの年間関与物質総量の関係を調べ、

一人当たりのGDP約8,000ドル以下の成長期では

$$(\text{一人当たりの年間関与物質総量}) = 1,400 \times (\text{一人当たりのGDP})$$

一人当たりのGDP約8,000ドルから25,000ドルの遷移期では

$$(\text{一人当たりの年間関与物質総量}) = 450 \times (\text{一人当たりのGDP}) + 7,000,000$$

一人当たりのGDP約25,000ドル以上の安定期では

$$(\text{一人当たりの年間関与物質総量}) = 18,000,000$$

と、三本の直線で近似し、BRICs諸国がそれと同様の関係で経済発展していくと仮定して、年間関与物質総量を求め、それを累積したものが、図3の緑の折れ線である。

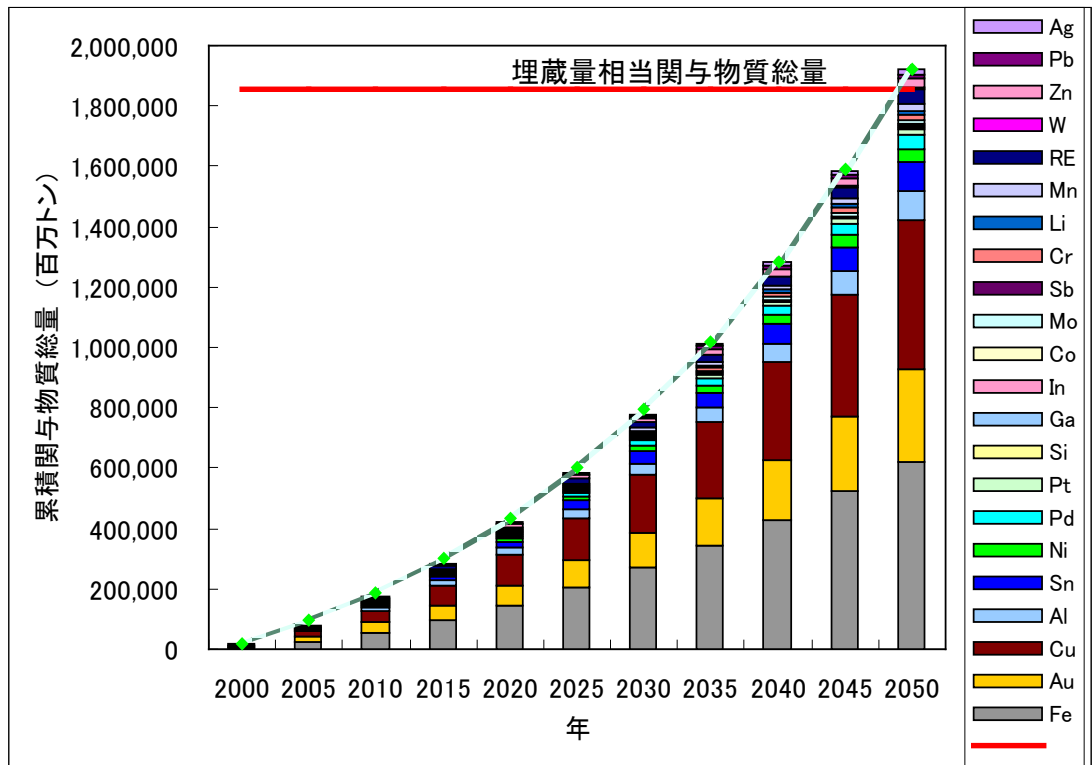


図3 累積関与物質総量

緑のラインがGDPとの関係より算定されたもの。棒グラフは金属毎の積み上げ、赤の線は現有埋蔵量に相当する関与物質総量の値であり、2050年にはそれを突破することが予想される。

なお、図3には各金属に対して同様の方法で年間消費量を予測したものに関与物質総量の係数を掛けて積み上げた棒グラフも示している。

この数値はこの50年間に地球から掘り出される物質の量に相当し、約2兆トンという量は、ほぼ富士山1個分に相当し、1フィートの深さでインド全体を掘り返した土の量にも匹敵する。また、図3の赤線は、各資源の現有埋蔵量に関与物質総量の係数をかけたものの総和であり、現有埋蔵量相当の関与物質総量を意味する。2050年には累積の関与物質総量がこの埋蔵量相当の関与物質総量を突破してしまうが、これは、多くの資源が現有埋蔵量ではもはや賄いきれなくなる事態が生じることを意味している。

#### 4. ファクター8の提案

このような資源リスクを低減するには、世界全体での資源利用の効率を上げる必要がある。そこで、安定期における一人当たりの年間関与物質量は現在18トンであるが、それをどの程度まで引き下げればよいかを検討した。

すなわち、発展、遷移、安定の三直線モデルでの安定のレベルを、半分、1/4、1/8、1/16と引き下げたシナリオで関与物質総量の増加を予想した。この場合、GDPを維持して関与物質総量が半分になると資源の生産性が二倍となることからファクター2と

呼ばれ、同様に、ファクター4、ファクター8 と呼ばれる。

図4がその結果であり、ファクター2では年間消費が停滞させられる程度、ファクター4でも年間消費は現在より高いレベルで累積の増加も鈍化しない。ファクター8で累積の鈍化が認められ年間消費も現在のレベルとなる。ファクター16も8とほとんど替わらない。これにより、安定期における資源利用の目安として、関与物質総量換算で現在の一人あたり18トンから2.25トンへと1/8に設定することが提言される。

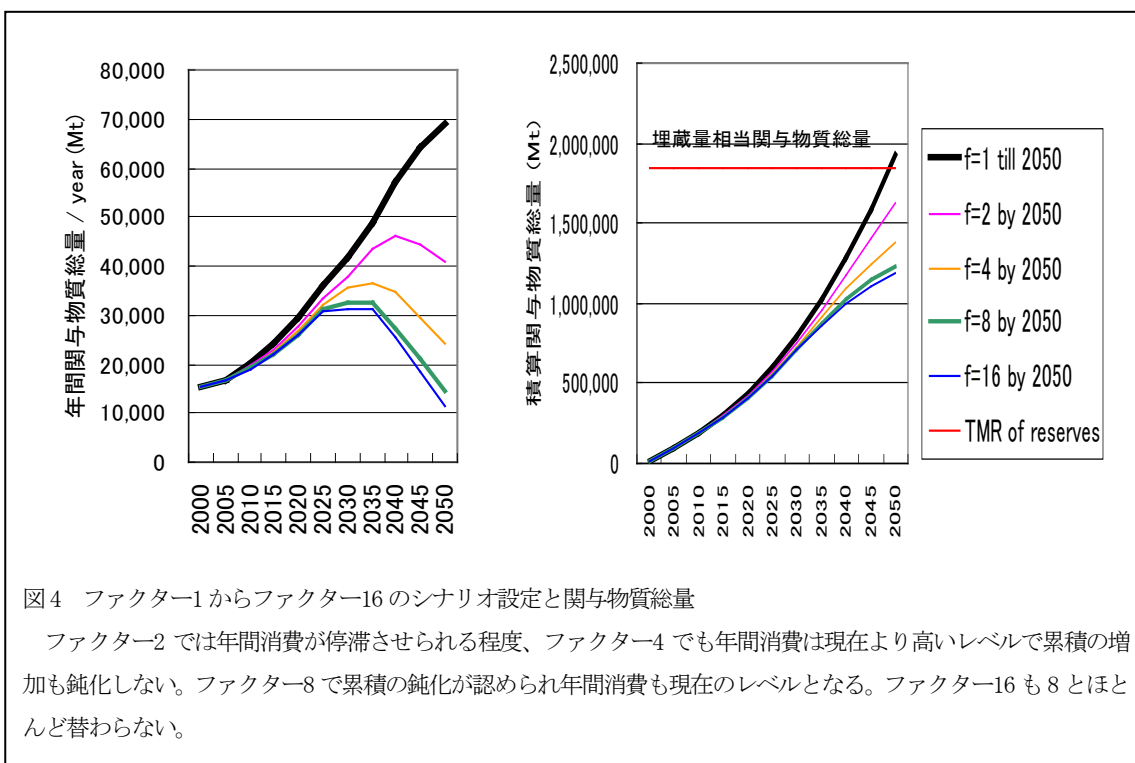


図4 ファクター1からファクター16のシナリオ設定と関与物質総量

ファクター2では年間消費が停滞させられる程度、ファクター4でも年間消費は現在より高いレベルで累積の増加も鈍化しない。ファクター8で累積の鈍化が認められ年間消費も現在のレベルとなる。ファクター16も8とほとんど替わらない。

## 社会的影響と今後の展開

現在の資源利用を一人当たり18トンから2.25トンへと1/8に低減させていくためには、物質の利用のあり方自体を大きく変えていく必要がある。

そのためには、

- 1) 使わずにすむものは使わない: reduce
- 2) 丁寧にかつ徹底して使う: long-life と reuse
- 3) 何度も使う: recycle
- 4) あるものを使う: replace

の「4つの努力」があらゆるところですすめられていく必要がある。

技術イノベーションにおいても、使わずにすむものは使わないでかつ効率を上げる「減量化技術」、特殊な金属元素ではなく普遍的に存在する元素で高機能化をすすめて、すでにあるものを使う「代替技術」などが、リサイクルや長寿命化とともに開発されていく必要がある。

そのような技術的可能性や「4つの努力」に対する資源利用の原則などを議論する

場のひとつとして、まずは、10月30日からの3日間「持続可能なエネルギーと資源の国際会議」(主催:物質・材料研究機構燃料電池センター、エコマテリアル・フォーラム)が石垣島で開催され、その中で International Workshop on Sustainable Materials Design (IWSMD)としてラウンドテーブルがもたれる予定である。

**問い合わせ先:**

〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1  
独立行政法人物質・材料研究機構  
広報室 TEL:029-859-2026

**研究内容に関すること:**

独立行政法人物質・材料研究機構  
材料ラボ  
原田 幸明 (はらだ こうめい)  
TEL:029-859-2602 Fax:029-859-2601 E-mail:halada@mcn.ne.jp

**第八回エコマテリアル国際会議および「持続可能なエネルギーと資源の国際会議: International Symposium on Sustainable Energy & Materials」関連:**

〒105-0001 東京都港区虎ノ門 2-5-5 櫻ビル 9F  
未踏科学技術協会・エコマテリアルフォーラム事務局  
TEL:03-3503-4681 FAX:03-3597-0535 E-mail:ecomat@sntt.or.jp

エコマテリアル国際会議 Web site <http://www.brunel.ac.uk/sed/icem8>  
ISSEM2007 Web site <http://www.sntt.or.jp/issem2007/>



## 用語解説

### 1) 関与物質総量(TMR: Total Material Requirement):

ある素材や製品を得るために係った全ての地球資源の量。ドイツのブッパータル研究所で1990年代にエコロジカル・リュックサックとして提案され、MIPS(material Input Per Service:サービス当りの物質集約度)などとして資源生産性を表す数値として用いられている。

この量はエネルギー投入物や水使用なども含むが、金属資源の場合は採掘の際に掘り出される土石の量が大部分を占め、銅では最終的に製品に組み込まれる金属の約300倍、金や白金族では百万倍にも及ぶ。

これらの物質量は現地で廃棄物となり商取引の対象とならないためその量の把握はあまりなされていなかったが、近年環境レポートなどで情報の開示が進みある程度わかるようになった。これらはほとんどの金属に対して推定値も含めた算定が行われている。

参考 原田幸明、井島清、片桐望、大蔵俊彦：日本金属学会誌、Vol. 65, No. 7(2001)564-570

### 2) 耐用年数:

可採年数と呼ばれることもあり、往々に資源枯渇の緊迫度を表すために用いられてきた指標。埋蔵量を年間消費量で割っただけの数値で、埋蔵量や消費量の変化に応じて変わるにもかかわらず、式の次元が「年」で表されるため耐用年数になると資源が無くなるかのように誤解されることもある。

### 3) GDP:

国内総生産(こくないそうせいさん、GDP: Gross Domestic Product)一定期間内に国内で産み出された付加価値の総額。

### 4) ファクター:

ドイツのワイッセッカーやシュミットブリークなどによる環境効率改善目標を倍数で表す表現。同一量のサービスを半分の資源で実現するとファクター2となる。シュミットブリークは、「二倍の豊かさを半分の物質で」としてファクター4を提唱した。

### 5) 資源生産性:

資源当りの機能やサービスの大きさ。

### 6) 減量化技術:

省資源のひとつの取組みであるが、その物質を用いることにより得られる機能は向上させながら使用する物質は減らしていくという資源生産性向上の観点が入っている。技術開発が進めばナノテクノロジーなどを活かして、原子や電子が作用する極微細な部分だけを活用することで、数桁オーダーでの資源生産性の向上も可能である。

7) 代替技術:

ある特殊な役割を果たしている元素を別の元素に置き換えること。類似した元素で置き換える部分代替と、全く異なった機能で置き換える全面代替がある。透明電極のインジウムを亜鉛に置き換える、熱電変換素子のビスマスやテルルを鉄やシリコンに置き換えるなど、関与物質総量の係数の大きい元素からその係数の少ない元素への全面代替は、地球から採掘する総資源量を大きく削減できファクター8 化に貢献できる。

8) エコマテリアル国際会議:

第一回は1993年日本で開催され、その後隔年で開催されている、環境を考慮した材料技術に関する国際会議。今回はイギリス、ロンドンで開催される。

9) 第二回資源セキュリティーに関する日英ワークショップ: 2nd UK-JAPAN Workshop on Materials Security

昨年12月東京の英国大使館で開催された「資源生産性に関する日英ワークショップ(UK-JAPAN WORKSHOP ON RESOURCE PRODUCTIVITY, EFFICIENCY AND MANAGEMENT)」の継続会議。資源・エネルギーのリスク増大の中で解決の方向を探る。英国のキーパーソンはマーチン・チャーター氏、日本は横浜国立大学の梅沢修教授。

## Acknowledgement

今回の研究成果の多くの部分は、環境省の地球環境研究総合推進費(H-9「物質フローモデル」)の支援により実施されたものであることを付記しておきます。