

土壌汚染リスク管理における地圏環境研究の役割¹

駒井 武²・川辺 能成²
原 淳子²・竹内 美緒²

Role of Geo-environmental Research on Risk Management for Soil Contamination

Takeshi KOMAI, Yoshishige KAWABE, Junko HARA and Mio TAKEUCHI

Institute for Geo-resources and Environment, National Institute of Advanced
Industrial Science and Technology (AIST)

Abstract

Risk and exposure assessment for subsurface environment is very important for both aspects of health protection from hazardous chemicals and decision making of remedial goal for corrective actions. In this paper, methodologies of risk assessment developed for soil and groundwater contamination are described. Original exposure models have been introduced by conducting the case studies of exposure assessment for heavy metals, organic compounds, and dioxin compounds. The structure of exposure models and available data for model calculation are discussed to make more realistic exposure scenarios clear and to apply them to practical environmental problems.

We have developed a GIS-based Geo-environment Informatics System for risk management of soil contamination. This system contains a lot of geological and environmental data for soil, sediments, rocks and groundwater. The role of this kind geo-environmental research is also discussed in the aspects of risk management and medical geology.

Key words: Soil contamination, Risk management, Geo-environment informatics system, Heavy metal

1. はじめに

土壌汚染対策法の施行に伴い、重金属類や揮発性有機化合物を対象とした調査・評価手法およびリスク管理に関する検討が必要になっている。自然起源の重金属については、これまで鉱床探査や資源量評価に関する地質学、地球工学の研究調査を通じて、わが国の特定の地域を対象とした汚染評価図が作成されている。一方、土壌・地質汚染の主な原因である人為起源の発生源については、産業活動を中心とした汚染状況に関する地圏環境評価の検討が開始されている。いずれも広範な調査とデータ解析を必要とするため、最終的な目標に至るまでには長い期間と費用を要するが、成果物としての土壌環境評価マップや地圏環境リスク評価システムは、今後土壌汚染のリスク管理を実施していく上で重要なものである。

本報告では、鉛、水銀、ヒ素などの重金属類を中心に、自然界の濃度レベルと空間分布の特徴について述べる。また、土壌中重金属の分析結果に基づく人為的な発生源の特徴について整理する。筆者らは、土壌中含有量や溶出量の評価に基づいて、重金属類の暴露とリスクを解析し、土壌環境リスクマップの作成および地圏環境情報の整備を行っている。ここでは、土壌汚染のリスク管理への活用、更には地圏環境研究の役割について論じる。

2. 土壌・地質汚染の要因

(1) 自然的な原因

土壌・地質環境の汚染について議論する以前に、自然界において有害元素（主に重金属類）がどの程度の量と濃度で存在し、その分布はいかなるものであるかを把握することが重要である。しかし、これまで地圏環境汚染の自然的な原因に関する検討はほとんど行われていない。そのため、重金属類のバックグラウンドがどれくら

1. 平成 19 年 11 月 8 日 本会第 119 回例会において発表
2. 独立行政法人産業技術総合研究所
平成 19 年 7 月 24 日受理

いあるのか、地域によってどの程度の違いがあるかなど、科学的に解明すべき事項は多い。

このような検討において役に立つと考えられる基本データとして、地球化学図がある。地球化学図は、もともと有用な資源元素を胚胎する鉱床探査を目的として作成されたものであり、わが国でも本来の目的のために鉱床に深く関わる地域を中心に整備されてきた。イギリスやドイツでは、地球化学図を土壌汚染の評価のような問題に適用可能にするため、全国を対象とした研究調査が実施されているが、わが国では地圏環境評価に使用された例はほとんどない。この理由として、土壌汚染問題に対する関心がそれほどではなかったこと、全国的に調査するためには多大な費用と時間を要することがあげられる。しかし、最近では土壌汚染対策法の施行や土壌試料の簡易分析手法の普及なども相まって、地球化学図あるいは後述の土壌環境評価基本図を全国規模で作成しようというプロジェクトが現実味をおびてきた。

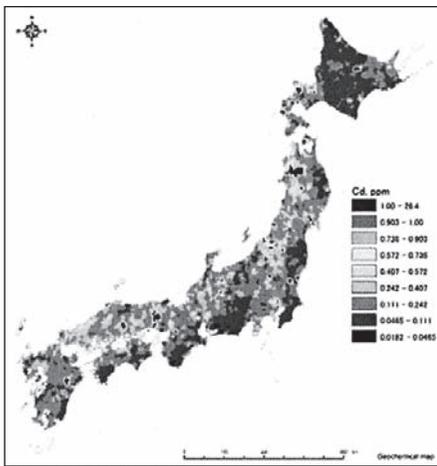


Fig.1 Spatial distribution of Cd content in river sediments after geo-chemical maps in Japan¹⁾

Fig.1は、代表的な重金属としてカドミウムの濃度分布に関する地球化学図の解析結果である¹⁾。調査メッシュは5km程度であるが、おおむね元素の濃度レベルと空間分布をみることができる。対象とした試料は、主に河床堆積物である。河床堆積物は、総体的にその地域の化学成分を代表できるとされており、また採取の容易さや再現性の点で優れている。一方、市街地や農用地は人為的な元素の負荷があるため、バックグラウンド値を示していない。

Fig.1によれば、カドミウムの濃度（底質試験法等に

より分析された全量）は全国的に2桁ないし3桁の違いがあり、北海道、東北および近畿、中国地方を中心に世界的にみても高濃度の地域がみられる。また、バックグラウンドレベルは地域による差異がきわめて大きく、その分布も限られた地点に高濃度地域が偏在しており、地質学的な構造や胚胎する鉱床や岩石の特徴、鉱山の開発などが反映しているものと考えられる。鉛やヒ素についても、おおむね同様な特徴と傾向を示している。このように、重金属の濃度レベルと分布は地域による特徴が顕著なので、それに対応した土壌・地下水汚染のリスク管理が必要である。

(2) 人為的な発生源

産業活動や人間の生活に起因する人為的な発生源は、地圏環境の汚染における主要な問題である。土壌汚染の問題を例にとれば、土壌中の重金属の含有量は、もともと土壌が含有している自然的なバックグラウンド値と、人為的な原因による負荷された含有量値の和ということになる。重金属類の発生源として、かつては鉱山の廃水や廃さい、精錬所や製鋼所からの排出量が大きく、主要な発生源となってきた。最近では、各種産業や焼却施設などの固定発生源から排出された排水、廃棄物および煤煙、自動車などの移動発源から排出されたガスと粒子状物質が主要な発生源となっている。一例として、わが国の市街地の表層土壌を対象に調査された鉛の含有量の分布をFig.2に示す²⁾。この環境調査は主に産業活動の密集した地域（潜在的な汚染地帯）を対象としたものであり、人為的な原因を直接的に反映した結果となっている。わが国における鉛のバックグラウンドレベルは10~20mg/kg程度であるが、この調査結果によれば汚染地

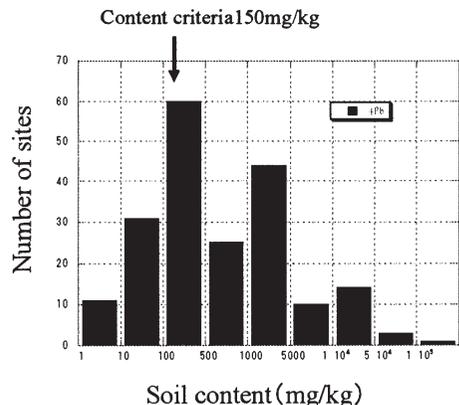


Fig.2 Total content of Pb in urban contaminated soil²⁾

では 500~1000mg/kg のような高濃度レベルを示す地域もある。また、バックグラウンドレベルの 10 倍以上の高濃度を示す地域が多数存在し、明らかに人為的な発生源に起因した汚染を意味している。特異的な汚染地帯として、幹線道路の周辺で高濃度の鉛が残留している地域がみられる。これは、かつて有機鉛化合物を含有したガソリンを使用した影響と考えられる。一部の地域では土壤環境基準 (150mg/kg) を超過している土壤もあることから、健康影響が懸念される。

人為的な発生源について全国的な調査を実施することは困難であるが、今後土壤汚染対策法に関わる地質調査や浄化対策の実施により、広範なデータを蓄積できる可能性はある。しかし、現状では使用できるデータが限られていることから、以下のような方法と手順で人為的な発生源を評価・推定することが考えられる。まず、工業統計や人口動態の基礎データを活用して、全国的な潜在的な発生源のデータベースを作成する。次に、PRT R (化学物質移動登録制度) により収集された排出のデータを用いて、発生量や発生箇所の推定を行う。これらの基本データに、重金属類の特徴や排出係数を加味して、全国的な発生源の分布図を作成することができる。このような推定データと実際の汚染データを組み合わせれば、より信頼性の高い発生源データベースを構築することが可能となる。

(3) 地域別の汚染評価図

より詳細な汚染評価を可能にするためには、5 万分の 1 の地質図に対応する精度をもつ汚染評価基本図の作成が必要である。産業技術総合研究所では、特定の地域を対象とした地質の特徴、ボーリング調査および土壤含有量と溶出量のデータ、バックグラウンドレベル、自然的原因と人為起源の識別方法などを取りまとめ、土壤・地質汚染基本図を作成している³⁾。Fig. 3 は、評価結果の一例として、当該調査地域においてボーリング調査などで採取した土壤中のヒ素の含有量と溶出量の相関を示したものである。含有量と溶出量の間に明確な相関はみられないが、地質の種類により一定の特徴があることがうかがえる。これらのデータは、地圏環境評価を実施する上での基盤として広く活用することができる。今後、全国の各地域に向けて、特に土壤汚染問題が深刻な都市部を中心に汚染評価基本図の整備を進めていく必要がある。これまでに、千葉県姉崎および仙台市の 2 図が公開されている。

(4) 自然的原因と人為起源の判別

重金属類 (元素) は水環境や土壤環境に普遍的に存在するが、何らかの自然的な原因で高濃度となり、場合によっては基準値を超過することがある。このような自然的原因と人為的な発生源を判別するためには、まず周辺環境におけるバックグラウンドの濃度レベルや分布を調べ、両者を比較・検討することが重要である。また、Fig. 1 に示したような地球化学図を利用することも有効である。元素の種類によっては、人為的な汚染の証拠をつかむために、化合物の化学形態や組成比などを明らかにすることも有効な手段である。

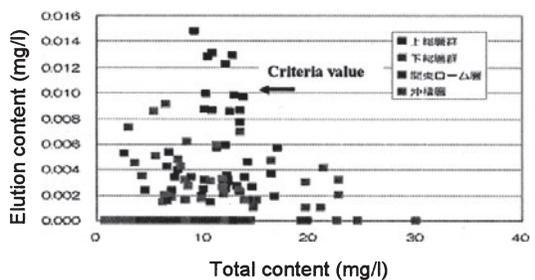


Fig.3 Relation between total content and leaching content in soils at Anesaki area³⁾

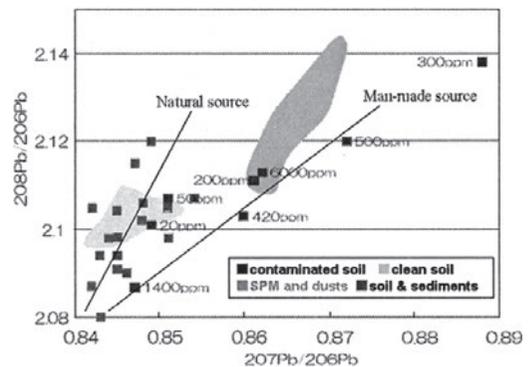


Fig.4 Analysis of ratio of Pb isotopes in soil and sediments⁴⁾

より詳細な環境化学的な調査としては、分別抽出法を用いた存在形態の化学分析が実施される。この分析では、イオン交換態、吸着態、炭酸塩、酸化物態、有機物態などの分画成分の割合が求められ、自然的原因であっても溶出しやすい状況や環境条件が明らかにされる。それらの性状によっては、自然的原因と人為的な発生源を判別

も可能である。Fig. 4は、鉛による汚染土壌を対象として、放射線同位体の組成比の相関をみたものである⁴⁾。この場合では、自然的原因と人為起源の間で比較的明確な差異がみられ、同位体比法により判別が可能であることを示している。

3. 土壌汚染のリスク評価

(1) 方法論

近年、産業活動に起因した土壌・地下水汚染の事例が増加している。また、自然的な原因の有害化学物質が土壌や地下水中に多量に存在し、バックグラウンドとしての濃度レベルが高い地域もみられる。これらの環境問題を客観的に評価するための手法として、Fig. 5 に示すような曝露をもとにしたリスク評価のアプローチが重要である⁵⁾。

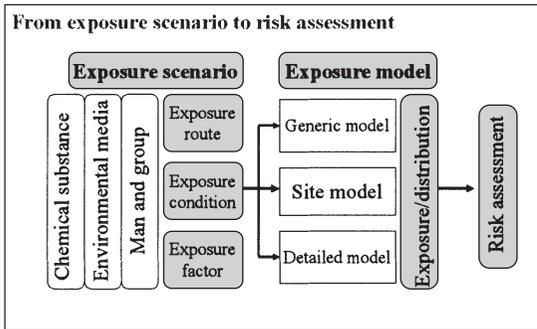
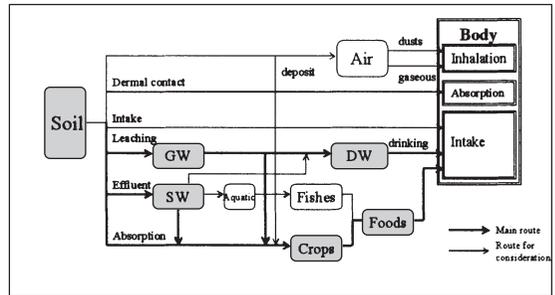


Fig.5 Methodology of exposure and risk assessment

各種の産業活動や鉱山の開発に伴い、水銀、鉛、ヒ素、カドミウムといった重金属による土壌・地下水汚染が古くから報告されている。これらの物質は、無機体や有機体の変化、化学反応による変換はみられるが、いずれも環境中での残留性が高い。特に、土壌中では土壌粒子や粘土鉱物との相互作用により長期間にわたり保持される傾向がある。さらに、イオン化した重金属が土壌中の間隙水や地下水中に移行すると、これを植物が取り込んで組織内に蓄積される場合もある。したがって、土壌中における重金属の環境動態としては、地下水や地表水への溶出と植物中への移行の両者を想定する必要がある。

Fig.6 は、土壌・地下水環境を起点とした重金属に関わる曝露経路を示したものである。主な曝露経路としては、土壌からの溶出・浸透により地下水中に移行し飲料水として経口摂取するもの、土壌圏の間隙水から農畜産物に移行し食品として経口摂取するものが想定される。

なお、土地利用と曝露の関係では、居住地（市街地）付近では地下水経路を、農用地では食品経路の経路を優先的に考慮し、曝露量を評価する。



(a) Exposure route of heavy metals

Fig.6 Exposure pathways of heavy metals in soil

(2) 曝露評価モデル

主に重金属類と揮発性有機化合物を対象として、筆者らはわが国の実情や土壌特性などを加味した曝露評価モデルを作成した⁶⁾。その概念と曝露経路、それぞれの媒体間の関連性などをFig. 7 および Fig. 8 に示す。

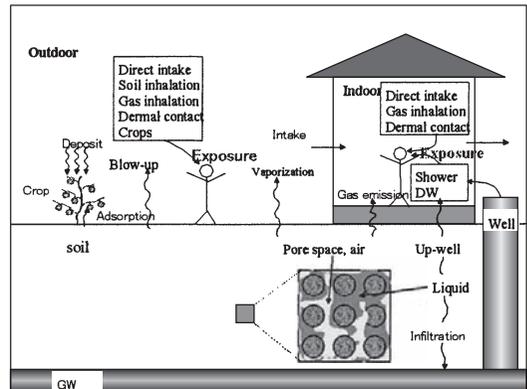


Fig.7 Exposure model for GERAS-1 assessment system

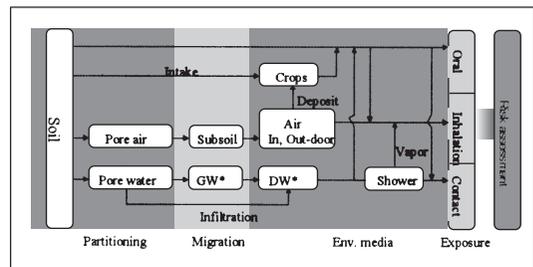


Fig.8 Exposure and risk assessment in GERAS-1

このモデルでは、一般的な環境条件および暴露条件において人が受ける暴露とリスクを定量的に評価することができる。わが国特有のパラメータとしては、有機物の含有が多い土壌特性、井戸水の利用率、摂取する食物の種類と量、体重や皮膚面積などの人の暴露ファクターを考慮に入れている。また、わが国特有の暴露条件や土壌・地下水の特性などもデータベースとして整備される。

また、サイト毎の特性を考慮に入れたサイトモデルの開発も行っている。Fig. 9 は、サイトモデルの考え方と暴露評価の方法を示したものである。このモデルでは、土壌や地下水の特性、サイト内およびサイト外における暴露とリスクを評価することができる。すなわち、土壌汚染のデータを与えると、人が受けるリスクを算定する同時に、許容できるリスクレベルから汚染土壌の浄化目標を算定することもできる。

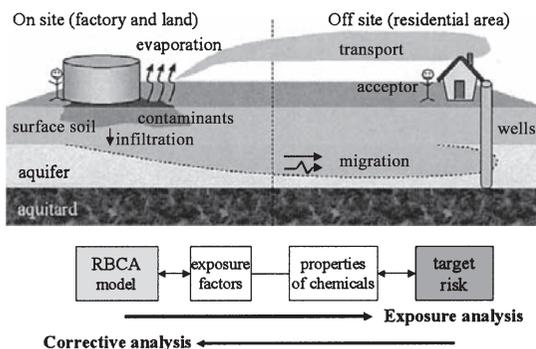


Fig.9 Site specific assessment model for GERAS-2

(3) 地圏環境リスク評価システムの開発

上記の暴露・リスク評価手法の確立に基づいて、産業技術総合研究所では地圏環境リスク評価システム GERAS (Geo-environmental risk assessment system) の開発⁷⁾を進めている。土壌汚染防止法の施行に伴い、事業所や工場における環境リスク管理が重要な課題となっている。このため、土壌汚染のリスク管理に関わる研究チームを結成し、総合的な取り組みを開始した。全国規模の土壌・地下水汚染の調査および曝露・リスク評価の方法論の確立により、土壌汚染現場ごとの健康リスクを定量化するわが国初の地圏環境評価システムを開発した。評価システムは専門家の審査・評価を受けて2006年に公開するにいった。その後、日本全国の500を超える事業所、浄化企業、コンサルタント、自治体、大学などに配布し、土壌汚染のリスク管理ツールとして

活用されている。このように、分野融合の重点的な研究推進により、土壌汚染対策の環境マネジメント等自主的取り組みに反映され、産業環境政策に貢献している。

(4) 土壌環境評価マップの作成

重金属類に関する汚染評価図に含まれるデータを開発した暴露評価モデルに適用して、特定の地域に居住あるいは労働している人が受ける暴露と、その結果としてのリスクを算定することができる。人が受ける暴露とリスクは、自然起源と人為起源の割合にかかわらず、溶出量と含有量、存在形態および化学形態などに依存している。しかし、汚染サイトのリスク管理を実施する上では自然と人為の識別を行うことは重要である。そのため、バックグラウンドレベルとの比較や地球化学を中心とした地質学的アプローチに加えて、化学形態の分別抽出法などに基づく環境化学的アプローチにより、重金属類の起源に関する科学的な検討を実施することが必要である。

土壌環境評価マップ作成の手順は以下のとおりである。まず自然起源の部分では地球化学図および地質調査の結果から汚染評価図を作成する。一方、人為起源の部分では、工業統計や人口動態などの既存の基本データを用いて発生源の推定を行い、これに実汚染データを加味して、全国レベルの汚染評価図を作成する。この土壌環境評価マップに含まれる予定の情報は、地域毎の1) 土壌中含有量、溶出量、2) 土壌や地下水の特性、3) 各物質の平均暴露量とその分布、4) 各条件で想定されるリスクレベルとその分布、5) リスク管理の方策とリスク低減効果などである。

今後、これらの基本図を合体させて5万分の1程度のメッシュサイズの汚染評価基本図として完成させ、さらに上述の方法論を適用して暴露とリスクの分布を推定するための一連の作業を行う計画である。その成果物である地域別あるいは全国版のリスクマップは、地圏環境評価の基盤データとして広く一般に活用される。

4. 地圏環境インフォマティクスの研究開発

地圏環境における様々な情報(ジオインフォマティクス)は、土壌汚染をはじめとして土木工事、大規模建設、都市計画などの広範囲の分野において重要である。また、広域の生態系の評価や大規模事業を対象として実施される環境アセスメントにも有用な基礎データベースである。産業技術総合研究所では、東北大学、同和エ

システムと連携して、地圏環境インフォマティクスシステムに必要な基礎データを取得している。最終的なターゲットは、全国をカバーする地圏環境情報のデータベース化およびGISシステム統合化である。

地圏環境インフォマティクスシステムに含まれる情報は、産業技術総合研究所で公開しているシームレス地質図（数値地質図）を基本として以下のような項目である。すなわち、（１）地球化学図、（２）地形図、（３）土壌図、（４）水文地質図、（５）水文環境図（流域解析）、（６）地下水汚染図、（７）植生図、その他の情報をGIS上で統合したものである。以下、土壌図をベースにして、表層土壌中の有害元素の分布を調べた結果について述べる。

東日本における代表的な地域（宮城県全域、北海道南西部地域）を選定し、自然起源と人為起源の混在した市街地において重金属類の分布調査を実施し、土壌・地質基本マップの作成を行った。この調査では、表層土壌調査および岩石露頭調査に基づく地質情報の取得および解析作業、土壌中の金属類の含有量および溶出量などの分析作業および化学形態調査を行った。その結果、表層土壌中には母岩組成に依存する重金属が含有されているものの、母材の供給時堆積環境およびその後上流から溶出した重金属の負荷による現象がその分布様式に著しく反映されており、表層土壌の重金属分布は河川流域（分水界）と良い相関を示した。また、同じ流域内においては土壌生成環境を反映する土壌種によって重金属存在形態に特徴があることが見いだされた。このように重金属の分布様式および母材（岩石）中重金属含有量を把握することにより、自然由来の重金属バックグラウンド値が明白となり、人為由来の重金属汚染を断定することが可能となった。その一例として、Fig. 10に宮城県における表層土壌中重金属の水溶出値分布（例：ヒ素）⁸⁾ および県内に分布する鉱床位置を示す。山脈には5つの火山地域（栗駒、鬼首、鳴子、船形、蔵王）が分布し、これらの火山活動に伴う鉱床、温泉、変質帯を上流の水源とする河川が支流を伴って仙台平野へと流れ下っている。主要なものとして迫川、江合川、鳴瀬川、七北田川、名取・広瀬川、白石川があるが、いずれも下流は市街地へと達している。鳴瀬川、名取・広瀬川、白石川では局所的にヒ素溶出値の高い部分が検出された。いずれも含有量値として環境基準値を超えるものは少ないが、河川集水域にあたる支流の合流地点に高濃度部が検出されている。

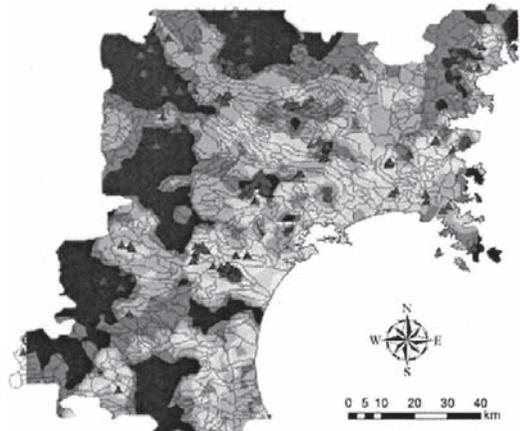


Fig.10 Distribution of leaching content of As in soils at Miyagi area, Geo-informatics system

5. 土壌汚染のリスク管理

（１）リスク評価手法の活用

土壌汚染による環境影響を評価する各側面において、リスクの分析、評価および処理の各プロセスが重要である。Fig. 11は、土壌・地下水汚染におけるリスク評価とリスク管理の考え方と方法をまとめたものである。適切なリスク管理を進めるためには、リスク評価による定量的かつ客観的な評価と意思決定が必要となる。また、個別の汚染事例に対してサイトアセスメントを実施する場合は、本研究で開発したさまざまなタイプの暴露評価モデルを適用することが期待される。

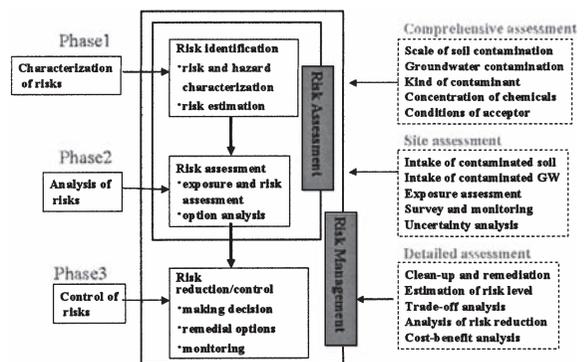


Fig.11 Risk assessment and risk management for soil and groundwater contamination

暴露・リスク評価の手法は、いずれも科学的な知識、知見や調査・観測データを集約し、一般的またはサイト

毎の環境条件において化学物質の曝露やリスクを評価することを目標としている。そのため、仮想環境、実環境を問わず、リスク管理を行う際の技術指針や数値目標を定める上で有効な手段となり得る。特に、地下水や土壌のように目に触れない環境における現象を理解し、時間的、空間的な拡がりや将来的なリスクの予測を行うためには解析モデルに頼るほかに手段はない。また、浄化対策や長期的なモニタリングには多額の費用を要するので、事前に評価モデルを用いて十分な検討を行うことは経済的にも意義が大きい。

現行法では土地用途や汚染サイトの特性にかかわらず一律の環境基準や指定基準が適用されているが、本論で述べたような地球化学、環境地質学的な知見、土壤環境基本図および地圏環境リスク評価システム GERAS を適用することにより、さらに合理的な土壤汚染対策の実施が期待される。

(2) 今後の展望と課題

土壤汚染対策として、まずは法制度や社会システムを整備していくことが重要であり、土壤汚染対策法は評価基準や対策の考え方をとりまとめた法規制の枠組みとしては画期的なものであった。これを基本として、より良い制度・システムにしていく必要があるが、リスク管理を基本として今後重点的に対処していくべき技術的な課題をいくつかあげてみたい。

a) リスクの側面

一元的な管理基準にとどまらず、人に対する健康影響の程度を定量的に表すことができるリスク（健康リスクあるいは環境リスク）の考え方が重要である。これにより、さまざまな環境施策の意思決定や経済評価も可能となるので、合理的なリスク管理が実施できる。特に、工場や事業所などの自主的な取り組みにおいて有効な方法と言える。

b) 本質的な問題（現場主義）

土壤や地下水といった媒体の特殊性をふまえ、何が本質的な問題であるのか、その結果どの程度のリスクがあるのか、さらにリスクの低減や回避の方法はあるのかなど、現場の視点でみきわめることが重要である。このため、現場の詳細な調査をもとに、暴露経路の遮断やリスク低減措置の選択など、十分な事前検討が必要である。

c) 何のための浄化か

そもそも、土壤汚染の浄化は何のために実施するのか。

第一義的には人への健康リスクを低減し、回避するためである。したがって、リスクの現状レベルと浄化によるリスクの軽減を定量的に把握することが重要である。

d) 専門家の育成

わが国では、欧米と比べて土壤汚染に関わるリスク評価の専門家（リスクアセッサー）が絶対的に不足している。学識者のもとより、行政担当者、事業者、コンサルタント、浄化企業のような、さまざまな分野の専門家を育成することが重要である。土壤汚染では、それぞれの専門性に加えて、社会的、技術的な両側面をもったジェネラリストの育成も不可欠と考えられる。

e) 地圏環境情報の整備

本論で述べたように、土壤や地下水などの地圏環境に関わる様々な情報の整備が不可欠である。欧州を中心に広域の情報整備が進められているが、わが国では研究開発が遅れている。今後、全国的な展開により公共で利用可能な知的基盤として整備していくことが急務である。自然環境中の有害元素による健康リスクを対象とする医療地質分野の研究も期待されることである。

f) 方法論の標準化

現状の汚染調査・評価では、同様な汚染状況でも個々のケースで異なった結果や対応になることがある。これに対処するため、科学的な地質調査、汚染評価を進めるとともに、方法論の標準化という視点が重要と思われる。わが国でも世界標準的な指針やマネジメントシステムの構築、各種の認定制度や登録制度の確立が必要である。

g) リスクコミュニケーション

情報の公開はもとより、利害関係者間のコミュニケーションが重要である。大規模な土壤浄化を行う場合には、市民、行政、事業者、浄化企業などの全ての利害関係者による参加型事業（事前協議、監視、評価）とすることで、よりスムーズな浄化活動が期待される。このため、安心の観点から社会心理学的な検討も求められる。

h) 合理的対策

費用対効果の高い浄化対策として、低コストあるいは低環境負荷の浄化技術の開発が求められる。また、汚染物質、汚染の程度、浄化目標などに応じた適切な浄化技術の選択も重要である。特に、汚染状況が軽微な場合では、微生物や鉱物作用といった自然減衰による浄化策もオプションのひとつとなり得る。鉱物油等については、MNA（科学的自然減衰）の適用可能性も十分な検討が必要である。

6. まとめ

土壌汚染対策法の施行に伴い、重金属類や揮発性有機化合物を対象とした調査・評価手法の規格化、事業所などにおけるリスク管理のあり方に関する検討が必要である。ここでは、鉛、水銀などの重金属類を中心に、自然界の濃度レベルとその空間分布の特徴について述べた。また、わが国の各地域を対象とした土壌・地質汚染評価基本図の作成の事例について紹介した。さらに、土壌中含有量や溶出量の評価に基づいて、有害化学物質の暴露とリスクに関わる解析を行い、一般的な環境条件における地圏環境評価システム GERAS の開発および土壌環境評価図の作成について述べた。GERAS は、すでに多数の事業所や自治体で使用され、環境施策に貢献している。このような研究成果は、土壌汚染のリスク管理を合理的に実施していく上での基本的な方法論およびデータベース、土木・建設工事における有害元素含有地盤からのリスク回避、さらには産業立地に必要な基盤データなどに広く活用される。

References

- 1) N. Imai, S. Terashima: Chishitsu News, 558, pp.9-17, (2001)
- 2) Geo-environmental Protection Center: Report of referential total content of heavy metals in soils, pp.33-24, (2000)
- 3) Geological Survey of Japan, AIST: Geochemistry of rocks, sediments and soils of Anesaki area (1:50,000), (2003)
- 4) K. Marumo, T. Ehashi, R. Ujiie: Resource Geology, 53(2), pp.125-146, (2003)
- 5) T. Komai, Y. Kawabe: Journal of Groundwater Hydrology, 45(1), pp.73-80, (2002)
- 6) Y. Kawabe, T. Komai: Journal of MMIJ, 119, 427-433, (2003)
- 7) Institute for Geo-resources and environment, AIST, Japan, Development of GERAS-1,2 (CD version) for soil risk management, (2006)
- 8) J. Hara and T. Komai: Development of Geo-informatics system, Water Rock Interaction, (2007)

Nickel Recycling System and its Lifecycle Environmental Assessment

Masayuki SAGISAKA², Toshio ONOYE², Kyoichi TASHIRO² and Osamu KITAMURA³

² Research Centre for Life Cycle Assessment, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

³ Metals Mining Technology Group, Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC)

Abstract

The authors conducted lifecycle greenhouse gas (GHG) emission analysis for Ni recovery from plating liquor and secondary batteries. Those recycling shows GHG emission reduction compared with non-recycling case. Recycling is expected to reduce natural resources usage and environmental impacts including land usage. For decisions support for companies or governments to apply recycling technologies or policies, lifecycle evaluation of them is indispensable. However, lack of to necessary data and immature methodologies for the assessment were found by this study. It is required to establish the implementing environment of the method.

Key words: LCA, Nickel, Recycling, Battery, Plating Liquid, Carbon Dioxide

1. 緒言

リサイクルを浸透させ、循環型社会を構築することはわが国にとって不可欠な命題であり、各方面でリサイクル技術の開発、適用、行政による支援が図られている。しかし、多くの関係者が指摘するように、リサイクル量、率の単なる増加でなく、真にそのリサイクルが資源消費の削減、あるいは土地利用を含む環境負荷軽減に寄与するか科学的評価に基づき、経済性を含めてその有効性を判断して取り組む必要がある。

非鉄金属は、多様な形態で供給、消費されており、年ごとにその形態は変化している。有効なリサイクルを考慮する場合、対象金属に関係する全体のフローとその変化、代替品となる素材の開発や、その適用範囲を考慮しつつ、リサイクルプロセスに対する評価を行なう必要がある。

今回、筆者らは中国に始まる素材需要の拡大と新規用途の開発により、急騰を見せるニッケルに注目し、現状でのリサイクルの環境負荷側面からの有効性を検討した。その結果と、評価の問題点を報告する。

2. 調査研究の方法

2.1 実施手法

リサイクルシステム全体をとらえて評価する手法として、ライフサイクルアセスメント (LCA) が認知され著者らの組織でもその手法を適用して非鉄金属のみならず、鉄、プラスチックなどの素材から、使用済み家電や自動車のリサイクルや、リサイクルタウンへと適用を図ってきている。この手法は、ある製品やサービスの原料・素材製造から製品の利用、廃棄まで全ステージ(ライフサイクル)の投入排出を調査し、評価するものである。

2.2 調査対象システム

家電・自動車・建設廃棄物等のリサイクルに関する法制度が整い、使用済み製品類の集積するシステムが確立したことに加え、ニッケル市況の高騰から素材回収ニーズが高まり、その技術的革新も進んでいることから、複

1. 平成 19 年 11 月 8 日本会第 119 回例会において発表
2. 独立行政法人 産業技術総合研究所
ライフサイクルアセスメント研究センター
3. 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構
金属資源技術グループ
平成 19 年 7 月 30 日受理

雑なりサイクル経路やカスケード利用が動的に展開されている。それらのシステムに対してできる限り透明性を保ちつつ簡素化して評価する必要がある。ここでは、現状で想定されているめっき廃液と二次電池中のニッケル回収システムを対象として、評価を行う。

2.3 環境カテゴリ

評価対象とする環境カテゴリは、わが国の国際約束の重要性から、主にエネルギー消費に起因する二酸化炭素排出を中心とした地球温暖化ガス（GHG）とする。

3. インベントリ調査

3.1 めっき廃液からのニッケル回収

ニッケルめっき廃液処理には、ニッケルめっき廃液を他のめっき廃液と合わせて処理する混合処理とニッケルめっき廃液だけを処理する単一処理とがある。

ニッケルめっき廃液の混合処理のインベントリの例をTable1に示す。この場合、スラッジには、銅、ニッケル、クロム以外に金、銀、パラジウムなどの有価金属が含まれる。

Table1 Inventory data for treatment of mixed plating liquor

	unit	mixed treatment
input		
plating liquor	kg	1.000
flocculant	kg	0.000015
magnesium hydroxide*	kg	0.00053
sodium hypochlorite	kg	0.00043
sodium hydroxide*	kg	0.0017
sodium bisulphite*	kg	0.00036
sodium hydrosulphide*	kg	0.00031
sodium sulphide*	kg	0.00020
sulphuric acid*	kg	0.00115
electricity	kWh	0.00183
gasoline	l	0.0000027
city gas	m ³	0.000001
output		
Ni sludge (moisture content)	kg	0.0041
(Ni content)	%	(60)
(Ni content)	kg	(0.00013)

* all chemicals are translated as 100% purity

これに対し、ニッケルめっき廃液の単一処理として、硫化法と中和沈殿法のインベントリをTable2に示す。硫化法のほうが分離性がよく、含水率は低い。

ニッケル含有スラッジは、リサイクル業者および非鉄製錬会社においてニッケル回収が行なわれるが、インベントリを得ることができなかった。そこで、それぞれのスラッジの性状を考慮して回収プロセスを想定し、類似プロセスおよび設備仕様などからニッケル回収のインベントリを推算した。

すなわち、硫化法によるニッケルめっきスラッジは湿式法により硫酸ニッケルに、中和沈殿法によるニッケルめっきスラッジは同様に湿式法（MCLE法想定）により、

混合めっきスラッジは銅および貴金属を含有するため銅製錬工程に戻すこととした。ニッケルの回収は湿式法となるが、その回収率は不明のため、便宜上100%とした。なお、混合スラッジの場合には、併産される銅および貴金属に対して、質量配分および価格配分により算出した。回収ニッケル1 kg-NiあたりのインベントリをTable 3に示す。

Table2 Inventory data for treatment of Ni-plating liquor

	unit	Sulphuration	neutralization & precipitation
input			
Ni plating liquor	kg	1.000	1.000
sodium hydroxide *	kg	0.00041	0.00055
sodium hydrosulphide *	kg	0.0057	-
sulphuric acid*	kg	-	0.0000064
electricity	kWh	0.00075	0.00094
output			
Ni sludge (moisture content)	kg	0.0375	0.00142
(Ni content)	%	(60)	(75)
(Ni content)	kg	(0.006)	(0.00023)

* all chemicals are translated as 100% purity

Table3 Inventory data for Ni recovery from plating sludge

	unit	Ni plating sludge		mixed plating sludge	
		Sulphuration ~ wet process	neutralization ~ wet process	mixed process ~ copper refinery	
				wt. allocation	price allocation
input					
Ni sludge (Ni content)	kg	6.25	6.31	-	-
mixed sludge (Ni content)	kg	(1.00)	(1.00)	-	-
chlorine	kg	-	1.16	12.0	12.0
silica	kg	-	-	(1.00)	(1.00)
oxygen	kg	-	-	0.29	0.38
electricity	kWh	5.03	2.18	0.34	0.44
steam coal	kg	-	-	0.11	0.15
heavy oil -C	l	-	-	0.0023	0.0030
LPG	kg	-	-	5.1	5.1
output					
nickel sulphate (Ni content)	kg	2.64	-	2.64	2.64
electrolytic Ni (Ni content)	kg	(1.00)	-	(1.00)	(1.00)
	kg	-	1.00	-	-
	kg	-	(1.00)	-	-

3.2 使用済み電池からのニッケル回収

3.2.1 使用済み小型二次電池

使用済み電池からのニッケル回収について、Fig. 1のフローによりインベントリを算出する。

使用済みニカド電池の場合は真空焼成時にカドミウムは蒸着物として回収されるため、真空焼成にかかわる環境負荷の配分が必要となるが、

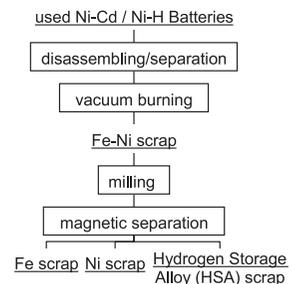


Fig.1 Metals recovery from used batteries (portable)

ここでは質量配分とした。真空焼成により得られる鉄-ニッケルスクラップはニカド電池の場合は鉄の比率が多く、ニッケル水素電池の場合はニッケルの比率が多い。これらは溶解炉において、ニッケルスクラップあるいは鉄スクラップを用いて成分調整し、鉄-ニッケル合金としてステンレス鋼原料としている。

ニッケル1 kg-NiあたりのインベントリをTable4に示す。

Table4 Inventory data for Ni recovery from used batteries (portable)

	unit	used Ni-Cd battery	used Ni-H battery	remarks
input				
used Ni-Cd batteries (Ni content)	kg	2.47	-	Ni-Cd : Ni 18%,
used Ni-H batteries (Ni content)	kg	(1.00)	-	Fe 33%, Cd 15%
Ni scrap	kg	0.56	2.57 (1.00)	Ni-H : Ni 39%, Fe 19%
Fe scrap	kg		0.33	
electricity	kWh	1.97	2.27	
output				
Fe-Ni alloy (Ni content)	kg	1.82 (1.00)	1.82 (1.00)	

3.2.2 使用済み大型ニッケル水素電池

電気自動車とはじめとした大型のニッケル水素電池は単電池をシステムとして組み上げたものである。Fig. 2に示すフローに従って、分解解体した正極板および負極板からニッケルを回収する方法についてインベントリを推算した。

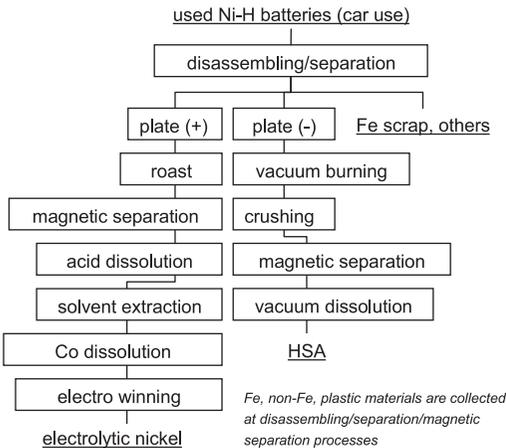


Fig.2 Metals recovery from used Ni-H batteries (car use)

電池システムの単電池への分解解体は主として電動工具を用いた手解体と搬送によると考えられ、家電高高度リサイクルの分解解体工程のインベントリおよび聞き取り調査を基に算出した。ただし、解体する製品が異なるため、解体工数に相当する時間当たりのインベントリ

として次のように算出した。

分解解体のインベントリ：

$$3.87 \text{ kWh/h} = 0.0645 \text{ kWh/min}$$

正極板からのニッケル回収は、

か焼・粉碎・磁選～酸溶解～溶媒抽出～電解採取のように湿式法によるものとし、電気ニッケルとして回収する。負極板は、解体選別によりペーストメタルからミッシュメタルを含む水素吸蔵合金を分離し、これを再溶解してインゴットとする。実際には、ペーストメタルはPTFE系樹脂で固められており、この分離が課題となるが、このプロセスの特徴は化学的に活性なミッシュメタルを含む水素吸蔵合金を回収できる点にある。推算したインベントリをTable5に示す。

Table5 Inventory data for metals recovery from used Ni-H batteries (car use)

	unit	disassembling	recovery plate(+)	recovery plate(-)	total
input					
used Ni-H battery	kg	1,000			1,000
sulphuric acid (100%)	kg		0.058		0.058
hydrochloric acid (100%)	kg		0.041		0.041
organic solvent	kg		0.058		0.058
electricity	kWh	0.0017	0.338	1.13	1.47
heavy oil -C (disassembling time)	l	(0.0004)	0.0051		0.0051
output					
electrolytic Ni	kg		0.132		0.132
H absorption alloy	kg			0.203	0.203
Electrolytic Co	kg		0.012		0.012
Ni scrap	kg	0.015			0.015
Fe scrap	kg	0.072	0.042	0.040	0.154
Cu scrap	kg	0.0072			0.0072
Al scrap	kg	0.034			0.034
plastics scrap	kg	0.105			0.105
chlorine	kg		0.039		0.039

4. リサイクル効果

一般に、リサイクル効果は、Fig.3のように、リサイクルした場合（リサイクルシステム）とリサイクルしない場合（従来システム）との差で評価できる。この場合、ニッケルについては、機能を同等にするために従来システムではニッケル再生品に相当するニッケル製品を新たに製造するプロセスを加える必要がある。もちろん、従来システムでニッケル以外の製品がある場合には、リサイクルシステムにも同等製品の製造プロセスを加える必要がある。

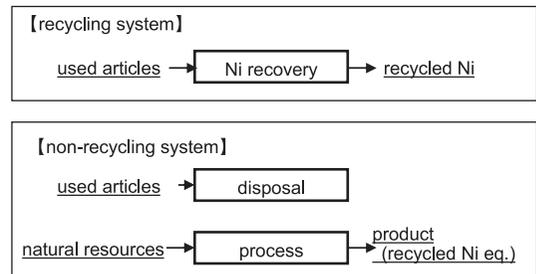


Fig.3 Concept of recycling effect

いっぽう、使用済み製品のリサイクルは行なわれているが、ニッケルの回収は行なわれていないような場合には、従来システムについては新規原材料によるニッケル再生品相当品のみとし、その違いをもってリサイクル効果とした。

本調査において対象としたニッケル回収プロセスについて、リサイクル効果の評価シナリオをTable6に示す。使用したデータは、各プロセスについては前項で求めたインベントリを、また計算に必要なバックグラウンドデータについては、原則としてLCAソフトウェアAIST-LCA Ver. 4¹⁾に付属のデータベースを使用した。

Table6 Scenarios to evaluate recycling effect of Ni recovery

recycling system	non-recycling system	note
plating sludge		
• mixed sludge - Cu refinery - crystallisation - Ni sulphate	• Ni sludge - treatment - landfill • Ni matte - hydrometallurgy - Ni sulphate	mixed sludge
• Ni sludge - hydrometallurgy - electrolysis - electrolytic Ni	• Ni sludge - treatment - landfill • Ni ore/matte - hydrometallurgy - electrolysis - electrolytic Ni	neutralisation
• Ni sludge - hydrometallurgy - Ni sulphate	• Ni sludge - treatment - landfill • Ni matte - hydrometallurgy - Ni sulphate	sulphuration
catalysts		
• used catalyst - roasting - hydrometallurgy - electrolysis - electrolytic Ni	• Ni ore/matte - hydrometallurgy - electrolysis - electrolytic Ni	
used batteries		
• used battery (portable) - vacuum burning - crushing & magnetic separation - scraps (Ni, Fe, etc.) • Fe-Ni alloy production	• used battery (portable) - vacuum burning - dissolution - Fe-Ni alloy (• HSA production)	Ni-Cd batteries, Ni-H batteries (portable)
• used battery (car) - disassembling - plate(+) (crushing & hydrometallurgy) - electrolytic Ni / - plate(-) (vacuum burning - crushing & separation) - HSA	• electrolytic Ni production • HSA production	Ni-H battery system (car, etc.) no-existing recycling system

4.1 めっきスラッジからのニッケル回収

混合めっきスラッジ、ニッケルめっきスラッジ（中和法）、およびニッケルめっきスラッジ（硫化法）のシステム境界をFig. 4~6に示し、これらめっきスラッジからのニッケル回収のリサイクル効果をまとめてFig. 7に示す。混合めっきスラッジについては、銅、貴金属への配分を質量配分としたものと価格配分にしたものを示した。図中において、リサイクル効果のマイナスは二酸化炭素排出量削減を意味する。

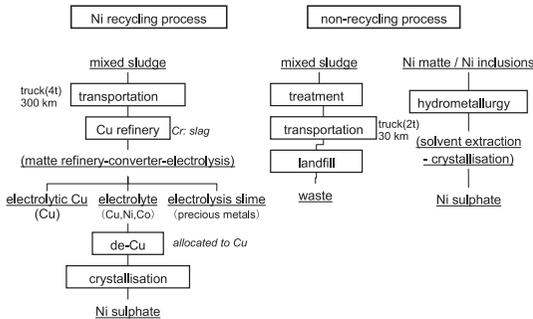


Fig.4 Ni Recovery from mixed plating sludge

インベントリの算出に種々の仮定や推定はあるが、電

気ニッケルとして回収した場合にリサイクル効果が大きいことが予想される。なお、スラッジからのニッケル回収は非鉄製錬やリサイクル工場にて行なわれるため、スラッジの輸送を考慮したが、その影響は極めて小さい。

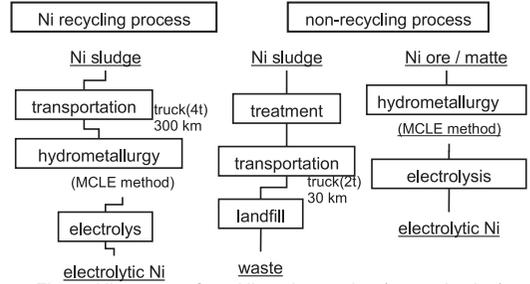


Fig.5 Ni recovery from Ni-plating sludge (neutralisation)

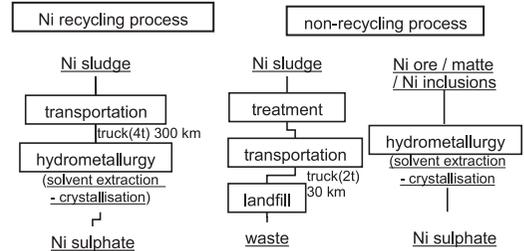


Fig.6 Ni recovery from Ni-plating sludge (sulphuration)

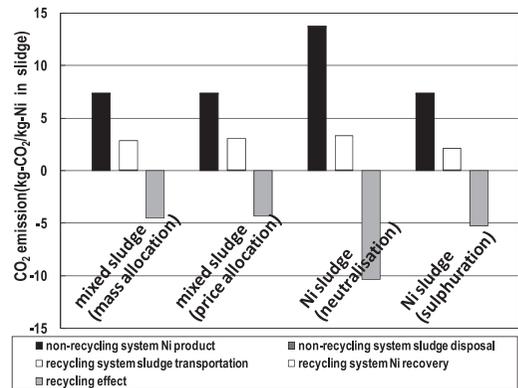


Fig.7 Recycling effect of Ni recovery from Ni-plating sludge

4.2 使用済み電池からのニッケル回収

4.2.1 使用済み小型二次電池

使用済みニカド電池および小型ニッケル水素電池については、現状、焼成後に溶解し、鉄-ニッケル合金としてステンレス鋼の原料としている。これに対して、ニッケルとして回収をするプロセスを想定し検討する。

システム境界をFig. 8に示す。図において真空焼成までは同じであり、ニカド電池の場合はここでカドミウムの回収が行なわれる。ニカド電池とニッケル水素の割合

は1:4とする。

鉄・ニッケル混合スクラップには水素吸蔵合金からのミッシュメタルも含まれるが、従来プロセスではこれも含めて溶解し、鉄-ニッケル合金とするが、ミッシュメタルは非常に活性なため溶解時に大部分は酸化してスラグとなる。一方、想定プロセスではこれらが混合状態であることを利用し、破碎・磁選などにより分離できるところにある。なお、システムを同等にするために想定プロセスには鉄-ニッケル合金溶解の工程を加えたが、ここで使用するニッケルスクラップの不足分については、便宜上ニッケル地金(15\$/kg)に対するニッケルスクラップ(11\$/kg)の価格比で評価した。

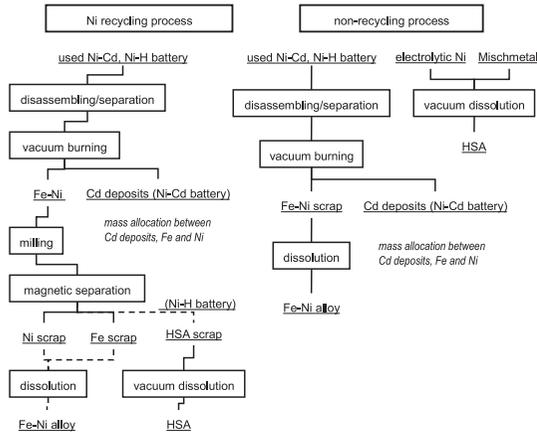


Fig.8 Metals Recovery from used batteries (potable)

リサイクル効果はTable7に示すようにリサイクル効果は認められないが、これは鉄-ニッケル合金の評価にニッケル地金(価格比)として評価したためである。前段の工程は同じであるため、スクラップを溶解して鉄ニッケル合金としてステンレス鋼原料にするか、ニッケルと鉄スクラップに分けるかという違いであり、用途とも関係するので直接比較することはできない。

Table7 Recycling effect of metals recovery from used batteries (portable)

	Ni recycling system (A)				non-recycling system (B)				recycling effect (A-B)	
	vacuum burning	crushing/magnetic separation/HSM dissolution	mixed scrap dissolution	subtotal (price allocation)	vacuum burning	mixed scrap dissolution	HSA production	subtotal		
inputs amount	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg		
Ni content	1.00	1.00	0.53	1.00	1.00	1.00	0.47	1.00		
products amount	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg		
Ni content	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.47	1.00		
coal	kg	1.1E-01	1.5E-01	4.7E-01	1.1E-01	1.0E-01	3.4E+00	3.6E+00	-3.18	
oil	kg	2.4E-02	3.4E-02	3.5E-02	2.4E-02	2.3E-02	1.0E+00	1.1E+00	-1.00	
natural gas	kg	6.7E-02	9.6E-02	9.7E-02	2.6E-01	6.7E-02	6.5E-02	9.5E-01	1.7E+00	-0.82
Ni ore	kg	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	9.5E-01	9.5E-01	-0.85	
CO ₂	kg	5.4E-01	7.7E-01	1.6E+01	1.7E+01	5.4E-01	5.2E-01	1.3E+01	1.4E+01	3.09
NOx	kg	2.7E-04	3.9E-04	5.9E-02	5.9E-02	2.7E-04	2.7E-04	4.3E-02	4.3E-02	0.02
SOx	kg	9.4E-05	1.3E-04	1.1E+00	9.4E-05	9.2E-05	4.9E-01	4.9E-01	0.59	
remarks		Cd (coproduct)	Fe scrap (coproduct)	additional input of Fe-Ni	Cd (coproduct)	non-quality governing				

一方、将来的には小型二次電池ではニッケル水素電池が主流になると考えられるので、同じプロセスでニッケル

ル水素電池についてリサイクル効果を算出した結果をTable 8に示す。わずかにリサイクル効果が認められるが、大きな効果は得られないと考えてよい。

Table8 Recycling effect of Ni-recovery from used Ni-H batteries (portable)

	Ni recycling system (A)				non-recycling system (B)				recycling effect (A-B)	
	vacuum burning	crushing/magnetic separation/HSM dissolution	mixed scrap dissolution	subtotal (price allocation)	vacuum burning	mixed scrap dissolution	HSA production	subtotal		
inputs amount	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg		
Ni content	1.00	1.00	0.55	1.00	1.00	1.00	0.45	1.00		
products amount	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg		
Ni content	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.45	1.00		
coal	kg	9.6E-02	1.1E-01	4.3E-02	2.5E-01	9.6E-02	7.6E-02	2.7E+00	2.8E+00	-2.58
oil	kg	2.1E-02	2.5E-02	9.7E-03	5.6E-02	2.1E-02	1.7E-02	8.2E-01	8.6E-01	-0.80
natural gas	kg	6.0E-02	7.0E-02	2.7E-02	1.6E-01	6.0E-02	4.7E-02	7.5E-01	8.5E-01	-0.70
Ni ore	kg	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	6.7E-01	6.7E-01	-0.67	
CO ₂	kg	4.8E-01	5.6E-01	8.9E+00	1.0E+01	4.8E-01	3.8E-01	1.0E+01	1.1E+01	-1.21
NOx	kg	2.5E-04	2.9E-04	3.3E-02	3.4E-02	2.5E-04	1.9E-04	3.4E-02	3.4E-02	0.00
SOx	kg	8.4E-05	9.8E-05	6.2E-01	6.2E-01	8.4E-05	6.7E-05	3.8E-01	3.8E-01	0.23
remarks		Fe scrap (coproduct)	Fe scrap (coproduct)	additional input of Fe-Ni	non-quality governing					

4.2.2 使用済み大型ニッケル水素電池

使用済み大型ニッケル水素電池は多数の単電池、組電池で構成されるシステムである。現在、この種の電池はいまだリサイクルの段階にないため、従来プロセスを設定できない。そこで、ここでは、Fig.9に示すように、リサイクルプロセスで回収される電気ニッケルと水素吸蔵合金に相当するものを従来プロセスで製造するとした。したがって、従来プロセスでは使用済み大型ニッケル水素電池の処分は考慮していない。

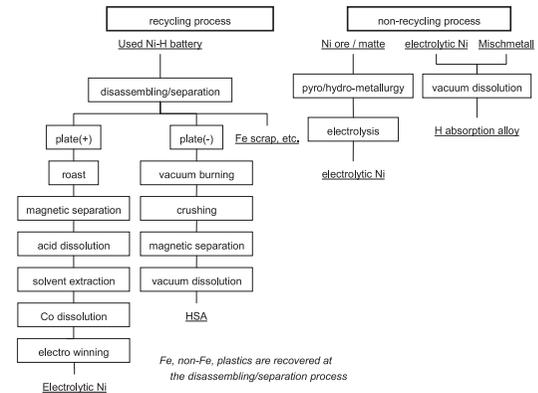


Fig.9 Metals Recovery from used Ni-H batteries (large)

Table9 Recycling effect of metals recovery from used Ni-H batteries (car use)

	Ni recycling system (A)				non-recycling system (B)				recycling effect (A-B)	
	disassemble-separation	recovery from plate(+)	recovery from plate(-)	subtotal	HSA production	elec. Ni production	HSA production	elec. Co production		
inputs amount	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg		
Ni content	1.00	0.42	0.49	0.35	1.00	0.5E-01	0.35	1.00		
products amount	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg		
Ni content	1.00	0.42	0.49	0.35	1.00	0.5E-01	0.35	1.00		
coal	kg	4.5E-04	9.0E-02	3.0E-01	1.1E-01	5.0E-01	3.9E-01	2.4E+00	2.5E+00	-2.32
oil	kg	1.0E-04	2.4E-02	6.8E-02	2.4E-02	7.2E-01	4.8E-01	7.7E-01	3.2E+00	-1.14
natural gas	kg	2.8E-04	5.6E-02	1.9E-01	6.8E-02	3.1E-01	3.8E-01	6.3E-01	3.2E+00	-1.0E+00
Ni ore	kg	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	4.7E-01	0.0E+00	4.7E-01	-0.47
CO ₂	kg	2.3E-03	4.5E-01	1.5E+00	5.4E-01	2.5E+00	3.1E+00	1.1E+01	1.2E+01	-1.15
NOx	kg	1.2E-06	2.3E-04	7.8E-04	2.8E-04	1.3E-03	1.2E-02	3.8E-02	4.4E-04	4.8E-02
SOx	kg	4.0E-07	8.0E-03	2.7E-02	9.5E-03	4.4E-02	2.3E-01	3.8E-04	3.8E-04	5.7E-01
remarks					Fe scrap (coproduct)					

リサイクル効果をTable9に示す。ニッケルおよび水素吸蔵合金へのリサイクル効果が大きい。なお、分解過程で発生する鉄、銅、アルミ、プラスチックなどのスクラップについては評価していない。

5. 考察・結論

5.1 ニッケルリサイクルによる二酸化炭素削減

ニッケルリサイクルについて、めっき廃液、廃触媒の80%、廃電池の全量がリサイクルされるとした前提のもとに、リサイクルによる二酸化炭素排出削減効果を試算した結果をTable10に示す。

わが国全体の二酸化炭素排出量、13.6億トン（2005年度）に比べれば、年間約10千トンと多くはないが、少なからず削減の方向あることが示唆されている。内訳としては、めっき廃液からのリサイクルに伴う削減が2/3、ニッケル水素電池からのリサイクルが1/3となっている。

Table10 CO₂ emission reduction by Ni recycling

	recycling amount (t-Ni/y)		GHG emission reduction per kg-Ni (kg-CO ₂)	expected emission reduction (t-CO ₂ /y)
	present	future		
plating	140	1,120	6.6	6,511
catalysts	40	336	0.9	270
magnet materials / non-Fe alloys	3,000	3,000		0
batteries (portable)	880	3,880	1.2	3,621
batteries (car)		4	11.5	46
stainless steel	35,200	35,200		0
			total	10,449

5.2 LCA手法

リサイクル評価にLCAを適用し、実際に削減される環境影響を定量的に求め、意思決定に資することが求められているが、今回の調査分析で下の課題が明らかになった。

(1) インベントリデータの不足

今回、二酸化炭素排出だけを評価対象にしたが、リサイクルの目的はその他環境項目を含む全体の影響削減、新規資源使用量の低減である。ライフサイクルでのそれら各項目への評価をもとにリサイクルの有効性を評価することが求められている。しかし、それらへの環境影響を網羅した十分なバックグラウンドのインベントリデータは少なく、実施を困難にしている。

また、リサイクル処理に必要なさまざまな薬品、化学製品類のバックグラウンドのデータが整備されておらず、データ種類の面で不足が目立つ。LCA実施者の努力も不可欠であるが、それらに対する公的なデータの整備が一層推進され、評価が可能になることが望まれる。

(2) インベントリデータの不確実性

様々な方向からフォアグラウンド/バックグラウンドともにインベントリデータを積上げてみたが、実際に生

産を行なっている企業からの協力を得られたところは限られており、その他は既存の文献、報告書、推定で行なわざるを得なかった。同じプロセスに対して得られたインベントリを比較すると、重要な投入・排出で数倍の違いがあるものも見られた。意思決定に資する結果として信頼度を上げるためには、実データを精度よく集積することが不可欠である。

(3) 手法の確定

今回、環境負荷の配分に重量と価格に基づく配分結果を示した箇所がある。非鉄金属製造のように複雑なプロセスから多くの併産物を産出する場合、配分は不可避である。配分については議論が多く定まった方法が無く、利害関係者で合意される方法を採用すべきである。

また、リサイクル効果を定量化するため、リサイクルシステムと従来システムを特定し、境界を同じにする必要があるが、それらシステムが想定上のものであるため、特定が困難な場面があり、その妥当性を検証する必要がある。

(4) 動的なシステムへの対応

非鉄金属のリサイクルは、市況が著しく変動する中、技術開発と適用が進んでいる。LCAは、その動的な要素を取り入れた的確な評価に必要な情報を生み出すツールとなっていない。今回の非鉄金属リサイクルの例をはじめ、巨額の投資と長い期間の研究開発に対し、求められるようなツールへと発展が期待される。

6. 結言

ニッケルのリサイクルにLCAを適用し、ライフサイクルでの二酸化炭素排出削減効果を試算した。その結果、わが国全体の排出量から見ればわずかではあるが、排出が削減される可能性が推定された。同手法を意思決定に使うにあたり、いくつかの主要な課題が明らかになり、とりまとめを行った。

ライフサイクル思考での評価、取り組みは持続可能な社会構築に不可欠の要素と認識されており、手法の確立を一層推進する所存である。

謝辞

この研究は、平成18年度エネルギー合理化技術開発（精錬/リサイクルハイブリッドシステムの開発）の一環である「湿式製錬法の適用可能性等に関する技術調査」の一部として取り組んだものである。調査研究ならびに発表の機会を頂き、関係各位に心より御礼申し上げます。

Reference

- 1) Research Centre for Life Cycle Assessment: *AIST homepage*, <http://unit.aist.go.jp/lca-center/ci/activity/software/nire/nire-ver4/outline.html> (2007)

バイオエタノール導入の可能性¹

横山伸也²・佐賀清崇²

Prospects and Challenges of Bioethanol Shinya Yokoyama and Kiyotaka Saga

Department of Biological and Environmental Engineering
Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo

Abstract

If biomass can be efficiently converted to liquid fuels such as ethanol, it can contribute to the energy security and global environment. One of the options for starting materials for bioethanol production will be rice. It has a long history for cultivation because it can avoid injury by continuous cropping and soil erosion. In this report, energy balance of ethanol production from rice and rice straw and husk is evaluated from the energy input and output analysis. Furthermore prospects and conditions for bioethanol production from not only agricultural biomass but also forest one is considered.

Key words: Ethanol, Bioethanol, Biomass, Rice, Energy

1. 序論

わが国は石炭、石油、天然ガスなどの化石資源のほぼ全量を海外に依存している。エネルギーの自給率はわずか19%であり、81%を輸入に依存している。石油依存率は52%と高く、先進国の中では際だってエネルギー供給構造が脆弱といえる。唯一の国内資源ともいえるバイオマスを利活用することは、エネルギー自給率を上げる意味でも、化石燃料の依存度を低下させる意味でも重要である。今なすべきことは、化石資源依存度を下げ、かつエネルギー自給率をあげるために、長期的な視点から確固たる政策を打ち出すことにある。すなわち、少なくとも30年程度のスパンで、いかにして再生可能エネルギーの導入・普及を進めるのか、少子高齢化に伴う社会構造の変化、産業構造の変換、石油の需給見通し、環境制約の強化、ポスト京都議定書の世界的動向、森林政策の抜本的な見直しなどを考慮してエネルギー政策を決定することが求められる。

前述したようにわが国のエネルギー構造は極めて脆弱ではあるものの、技術的には他国の追随を許さない蓄積がある。多くの課題があるが、世界に先駆けて再生可能エネルギーを中心とした社会を構築すべきであると考える。わが国におけるバイオマス賦存量は、「バイオマス・ニッポン総合戦略」によれば、未利用バイオマスや廃棄物系バイオマスに加え資源作物も含めれば原油

換算で約3500万キロリットル（2005年国内石油消費量《1億9200万キロリットル》の18.2%）と推定されている。林業や農業を活性化することで、このような状況を突破する方策が求められている。

わが国は地政学的にアジア圏に属していることから、否応なしに人口大国である中国やインドの経済発展やエネルギー需要の急激な増加の影響を強く受けざるを得ない。アジア諸国は、最近のめざましい経済発展により急激にエネルギー消費量が拡大している。2003年には、アジア地域だけで石油換算で27億トン以上に達している。これに対して、生産量は恒常的に消費量を下回っており、輸入に依存しなければならない状況である。一次エネルギーの内訳では、石炭と天然ガスは消費量と生産量がほぼ等しいが、石油に関しては消費量の65%以上を輸入に依存しているのが現状である¹⁾。

発電は石炭で賄えるが、自動車の燃料は当然石油に依存せざるを得ない。中国の急激な石油需要の伸びはモータリゼーションによるところも大きく、この傾向はますます強まると予想される。液体の輸送用燃料をバイオマスから生産し供給することは、わが国の石油消費量を抑制することはもとより、アジア地域の石油圧力を緩和することにもなる。バイオマスから安価にエタノールを生産する技術を確認することは、わが国のリーダーシップの確立にも貢献できる。我々は、国内でのバイオマスによるエネルギーの地域自給を実現する一方で、アジア地域におけるエネルギー需給バランスを考慮して国際的な展開を図る戦略も必要である。

1. 平成19年11月8日 本会第119回例会において発表
2. 東京大学大学院農学生命科学研究科
平成19年7月31日受理
Vol. 54, No. 4 (2007)

2. 農産系バイオマスからの バイオエタノール生産

2.1 休耕田の有効利用

農産系バイオマスに関しては、わが国の休耕田の利用が考えられる。一人当たりの米消費量低下、人口減少、反収増加などの理由から、38万haに上る不耕作地は今後さらに増加する恐れがある。中長期的な視点から、環境負荷を最小にして農業従事者の所得を確保し、さらには農業部門での規制緩和を図ることによって、休耕田をエネルギー用イネの生産の場として活用することは、一つのオプションとして検討に値する。

エネルギー用イネからエタノールを生産する場合、まずエネルギー収支が健全でなければならない。ブラジルにおけるサトウキビを原料としたエタノール生産のエネルギー収支は大きくプラスとなっている。これは副産物であるバガスをコジェネレーション施設の燃料とし、エタノール生産プラントに必要な電力及び熱エネルギーを供給しているためである。

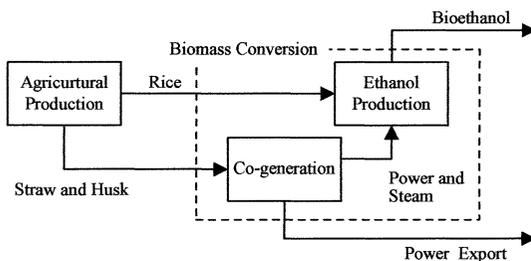
一方、非可食部であるコーンストーバーやバガスをコジェネレーション利用するのではなく、それらに含まれるセルロースやヘミセルロースの糖化によるエタノール生産が注目されている。10年程前に米国のベンチャー企業が木材や稲ワラなどのバイオマスを硫酸で糖化し、C6糖を酵母でC5糖をK011という微生物で発酵させエタノールを生産するプロセスを開発した。現在、セルロースの糖化に酵素を使う方法、熱水処理をする方法、メカノケミカルな方法、酵素との併用など様々な方式が提案されている。経済性や環境性の点でもまだまだ問題が残っているが、将来性ある技術であり、食料との競合を避けられるという観点からも期待されている。

休耕田でエネルギー用イネを栽培しバイオエタノールを生産する際、リグノセルロース資源である稲わら・籾殻はコジェネレーション利用したほうがよいであろうか。もしくは糖化エタノール発酵したほうがよいの

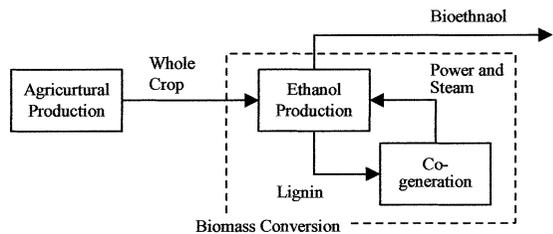
であろうか。Fig.1にエネルギー収支を検討した2種類のバイオエタノール生産システムのプロセスフローを示す。1つは、稲わら・籾殻をガス化発電させ、玄米からエタノールを生産するために必要な電力及び蒸気を賄い、余剰電力を系統に供給するエタノール・電力併産シナリオ(以下、シナリオ(1)と略記)である。もう1つは、稲わら・籾殻を加水分解によって糖化させ、その糖化工程で副生されるリグニンをガス化発電させてエタノール変換に必要なエネルギーを補うバイオエタノール優先シナリオ(以下、シナリオ(2)と略記)である。

Fig.2にシナリオ(1)と(2)のエネルギー収支を比較した結果を示す。エネルギー収支とはエタノール生産量と余剰電力を合計した産出エネルギーから農業生産及びバイオマス変換プロセスでの投入エネルギーを差し引いた値である。シナリオ(1)と(2)のエネルギー収支はともにプラスとなり、エネルギー生産性の観点からの多収米を適用した稲作からのバイオエタノール生産システムの可能性は十分にある。シナリオ(1)のエネルギー収支は12.9GJ/10aとなり、シナリオ(2)の1.2GJ/10aよりも大きな値となった。シナリオ(2)では10aあたり約700Lのエタノールが生産されシナリオ(1)の約2倍となるが、エタノール生産に必要な電力及び蒸気のエネルギーも多くなるため現状の技術ではシナリオ(2)のエネルギー収支は悪い。不足する蒸気エネルギーを他産業の排熱で賄える、あるいはエタノール生産技術の省エネルギー化が進むことでシナリオ(2)のエネルギー収支は向上する。現在ゼオライト膜によるエタノール濃縮脱水プロセスや希硫酸糖化などの技術が研究開発されており、今後エタノール生産プロセスでの投入エネルギーは大幅に削減される可能性がある。まずは現在活用されていない休耕田でシナリオ(1)を導入し、リグノセルロース資源からの技術開発が成熟した段階でシナリオ(2)へシフトすることが妥当と思われる。

休耕田でエネルギー用イネを栽培し、これをバイオエ



Scenario(1): ethanol and power co-production



Scenario(2): only ethanol production

Fig.1 Process flow of bioethanol production system from rice cropping

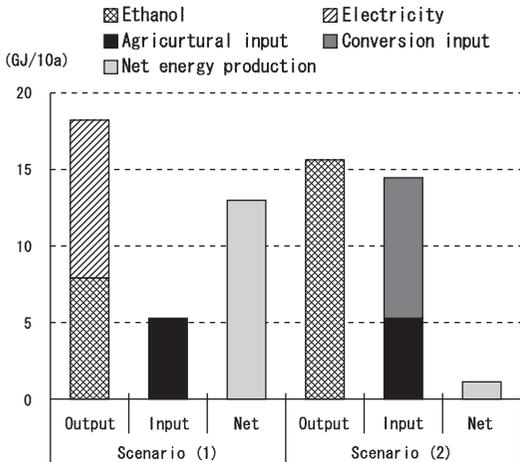


Fig. 2 Energy balance of ethanol production system

タノールに変換することは、現状ではアイデアとしてはあり得るが、コスト面から容易ではない。しかしながら、エネルギー生産機能に加えて水資源の涵養、気候緩和機能、生物多様性の保全、景観の保全などの水田の多面的機能を考慮すれば決して無理ではないと思われる。いずれにせよ、従来水田として機能してきた水田を放棄するよりは、エネルギー生産の活動の場として利活用するほうが有効である。

エネルギー用米生産に向けて急な政策転換をすると様々な不都合が起こる可能性が高いので、10年程度をかけて種々の法律整備などの作業が必要であろう。経済性を向上させるために、大規模経営、機械化、無人化、直播きなどにより合理化を図ることが鍵となる。また、食料として口に入れるものをエネルギーとして使うことに対する拒否反応に対しては、エネルギー政策のキャンペーンなどで払拭させることが国民の合意形成の醸成のために必要である。

2.2 水田裏作の可能性

過去50年、関東地域における耕地面積は緩やかな減少であるのに対し、耕地利用率は大幅な低下傾向にある。例えば、栃木県において1956年164%であった耕地利用率は現在98%まで減少している。これからも担い手の不足などの理由から耕地利用率はさらに低下する恐れがある。この動向は群馬、茨城、千葉にも見られる。

そのような状況のもと、新しい取り組みもなされており、耕畜連携を目的としたコントラクターの増加がそれにあたる。コントラクターとは稲わら収集・飼料生産などの農作業受託を業務とする営農集団である。農地を取得して農業参入することに対して、農家がある種の抵抗感や不安感を持つことは多い。今後コントラクターは地

域農業の核となり、飼料生産だけでなくエネルギー作物生産をも担う組織として期待される。

水田裏作で作付けされる作物にはイタリアンライグラス、エンバク、オオムギ、ライムギなどが挙げられる。そのなかでもイタリアンライグラスは東北から九州までの広い地域で栽培されている水田冬作物である。極早生品種から極晩生品種まで多くの品種があり、現在約50品種が市販されている。この作物は乾物収量が多く飼料作物としてだけではなく、資源作物としても有望である。また、イタリアンライグラスは耐湿性にも優れていることから排水条件に関わらず生産でき、水田裏作に適した作物である。さらにイタリアンライグラスは複数回の刈り取りが可能である。このことはコントラクターの季節的な繁閑を回避させ、またエタノール生産プラントの設備利用率の向上、原料の安定供給を可能にする。

このように、休耕田だけでなく圃場整備された条件の良い水田の利用率を向上させ、バイオエタノールを生産する可能性も検討すべきであろう。

2.3 東南アジアにおける

エネルギー用イネ生産の可能性

イネはアジアモンスーン気候帯において、これまで伝統的に栽培されており、連作障害や土壌浸食を回避できる作物である。長期的には、このような持続的に栽培できる稲作を基盤としたバイオマス利用システムの構築が望まれる。

わが国では前述したように一人当たりの米消費量の減少、少子化に伴う人口減少、反収の増加により減反せざるを得ない状況が続き、余剰耕作地が増加してゆくことはほぼ確実であるが、将来はアジア地域でも同様の傾向が予想される。タイやマレーシアでも出生率の減少傾向が見られ、一人当たりの消費量が減少しつつある。

東大の川島博之助教授によれば、アジア地域で2050年には減反で余剰となる耕作地の面積は約1600万haと推定されている²⁾。余剰耕作地をエネルギー用のイネ生産に回しても、森林伐採などをする必要がないので、環境面でも問題は少ないといえる。優秀な多収米の開発に加えて、東南アジアでは二期作や三期作も可能であり、飛躍的な増産も期待できる。

3. 森林系バイオマスからの

バイオエタノール生産

国内の有望なバイオマス資源として、農産系だけでなく森林系バイオマスが挙げられる。森林系バイオマスからバイオエタノールを生産するためには上述のリグノセルロース原料からの糖化エタノール発酵技術がエネ

ルギー・コスト的に実用化されなければならない。また、原料である間伐材や林地残材などを利用するためには、健全な林産業が成立していることが必要である。すなわち、再生可能資源であるバイオマスが持続的に調達されるためには、その基本となる林業が持続可能でなければならない。

わが国の林業は、昭和 40 年代に入ってから衰退の一途であり、住宅用の木材や紙パルプ原料を輸入に頼っている。国土の三分の二が森林でありながら、素材、製材品、パルプ、合板など木材の約 80%を輸入に依存しているという異常な現象が続いている³⁾。ここで 30 年あるいは 50 年という長期的な視野から、わが国の林業を再構築し競争力のある産業に再生することが、まづもって大事である。

このためには、以下に挙げることを抜本的に改善する必要がある。わが国では林家の所有規模が小さいこと、これらの小規模所有林をまとめて伐採し大規模需要に結びつけるメカニズムが不在であることその他に、流通経路が複雑であることなどの理由により、立木価格が異常に高くなっている。経済同友会環境委員会ワーキンググループの調査によれば、立方メートル 3600 円の立木価格が工務店に届くまでに約 6 万 4000 円となっている⁴⁾。

したがって、小規模経営の所有林を有機的に結びつけるメカニズムや、流通経路を簡素化にして中間経費を省く仕組みを作ることが急務である。流通経路の簡素化などは事業者自らが関与すべきものであり、関係者の一層の努力を期待する次第である。

スウェーデンやオーストリアでは林業が大きな産業として育っており、バイオマスが一次エネルギーの中で大きな比重を占めるに至っているが、これもそれぞれの国の長年の試行錯誤の結果である。わが国でも長期的な視野に立って対策を講じれば、林業の再生は決して不可能ではないと思われる。

林業が健全なビジネスとして展開すれば、間伐材や林地残材などが安定して排出され、これらのエネルギーなどへの有効利用により、さらに経営基盤が強化される。

日本の家屋には耐久性からいっても国産材が外国産に比べて優れており、国産材利用の促進が望まれる。最近、森林整備や保全を目的としたいわゆる森林税が鹿児島県、高知県、山口県、岡山県、島根県、鳥取県などで導入されている。また一方で、国内大手の住宅メーカーもスギやヒノキなどの国産材利用に目をむけているようであり、このような傾向を歓迎したい。

4. おわりに

海外では、欧米などですでにバイオ燃料の導入が進んでいるが、技術的にはわが国も決して引けをとるものではない。例えば、1990 年から 2000 年の 10 年間の、世界のバイオエタノールを含むバイオエネルギー関連特許出願数を調べると、わが国は半数以上を占めており、米国の 13%、EU の 30%を凌駕している。この数値はバイオエタノールに特化しておらずバイオマスエネルギー一般であり、かつ特許出願数だけではあるが、この分野ではわが国は欧米と遜色がなく競争力をもつ分野の一つといえる。

わが国は無資源国であり、再生可能資源を効率よくかつ循環的に利用することが基本である。バイオマスは循環型社会の構築に向け、キーマテリアルの一つであろう。林業の再生、地域産業の活性化、雇用の促進、地域環境の保全、アジア諸国との連携強化、地球規模での環境改善に貢献することは明らかであり、世界に先駆けてバイオマス利用を推進すべきである。

References

- 1) *BP toukei 2004*
- 2) Hiroyuki Kawashima: *Syokuryouseisan Tono Kyozon Wo Kangaeta Biomass Seisan Kanouryo*, Kagaku Gizyutu Forum,(2006)
- 3) Forestry Agency: *Mokuzai Zyukyu 2004*
- 4) *Keizaidouyuukai Kankyoinkai Working Group Material*, (2002)

廃棄物熔融技術を中核とする資源循環システムの設計と評価¹

大迫政浩² 肴倉宏史² 鄭 昌煥²

Design and assessment for material cycle systems centering the waste melting process

Masahiro OSAKO, Hirofumi SAKANAKURA and Chang-Hwan JUNG

Research Center for Material Cycles and Waste Management, National Institute for Environmental Studies (NIES)

Abstract

This paper introduces state-of-the-art Japanese waste melting technology that has not yet been successfully implemented in Europe. Melting technology in Japan has been developed to resolve dioxin problems and shortage of landfills. There were 165 facilities using the melting process in 2006 in Japan. A new material-cycling system using melting technologies is now being developed for creating a sound material-cycle society. This system recovers valuable metal resources such as Zn, Pb and Cu from the molten fly ash (MFA) and is almost a zero-discharge system. A life-cycle assessment was performed to compare the case of disposal as the base scenario and some cases of melting including using the new system. It was shown that the new material-cycling system using the melting technology reduces landfill space, lowers the risk caused by toxic metals in landfills, and decreases the consumption of natural mineral resources while it somewhat increases GHG emission.

Key words: Wastes, Melting technology, molten fly ash, metal resource recovery, LCA

1. はじめに

廃棄物の熔融技術は、1990年代のダイオキシン類問題や最終処分場ひっ迫の問題の解決のために登場したものであり、欧州等ではほとんどみられないユニークな技術システムとして今日まで展開してきた。これは、廃棄物を直接、あるいは焼却後の残渣（灰）を千数百度の高温下で熔融処理するもので、廃棄物は大幅に減容化され、固化された熔融スラグとして有効利用されるため、最終処分（埋立処分）されるものはほとんどないゼロエミッション型の技術である。焼却残渣等に含まれるダイオキシン類は高温下で分解され、再合成もほとんど認められない。このような意味で、「持続可能な廃棄物処理技術」として注目されてきた。

一方で、従来の単純な焼却処理に比較して多くのエネルギーを消費し、コストも高い点などが指摘され、真の意味で「持続可能」な技術なのか、しばしば疑問が呈されている。これには、かつての適正処理を重視した時代背景から社会の様相は変化し、2000年に制定された循環型社会形成推進基本法に基づく循環型社会への転換や、近年の脱温暖化に向けた低炭素社会の実現が至上の命題

になり、廃棄物処理への社会要請が大きく変化してきたことが強く影響している。また、熔融処理過程から発生する熔融飛灰（ばいじん）が埋立処分され、完全なゼロエミッションではないこと、熔融処理の特性上、揮発した有害な金属が熔融飛灰に高濃度に含まれ、そのため「特別管理廃棄物」として法律上は有害廃棄物に指定されていることも、熔融技術に対する批判的文脈で指摘されているところである。

以上のような背景から、廃棄物の熔融技術の客観的な再評価をこの時点で行っておくことは有用であろう。最近では、資源セキュリティの観点から熔融飛灰中に濃縮され高濃度に含有されている有用金属資源の回収を意図して、その山元還元システムも普及しつつあり、熔融技術を中核とした資源循環システムとしての新たな付加価値も見出されつつある。本研究では、このような新たな技術システムづくりの展開も考慮しながら、廃棄物熔融技術システムに対する評価を様々な視点から試みる。

2. 廃棄物熔融技術の概要

廃棄物熔融技術は先に述べたとおり、エネルギーを用いて千数百度の高温下で廃棄物を熔融し、熔融固化物としてのスラグと、揮発した金属等が凝結して濃縮されている熔融飛灰（ばいじん）を産出するプロセスである。

1.平成19年11月18日 本会第119会例会において発表
2.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

炉の型式によっては、溶融帯中の高密度部分を溶融メタルとして取り出すタイプもある。

廃棄物溶融技術は対象物の観点から大きく「灰溶融」と「ガス化溶融」に分類される。前者は廃棄物の焼却後に発生する焼却残渣（焼却灰 bottom ash と焼却飛灰 fly ash）を溶融処理する。エネルギー源に直接燃料を用いるか、あるいは電力を用いるかで「燃料式溶融」と「電気式溶融」がある。また、それぞれについても、燃料の種類や炉型式、電力から熱への変換方式等によって細かく分類されている（詳細は割愛）。一方後者は、廃棄物を直接的に溶融するタイプであり、無酸素あるいは低酸素状態で熱分解（部分燃焼含む）し、その過程で生じた熱分解ガスやチャーを熱源として無機物を溶融する。コークスを熱源の一部としてもちいるシャフト型、熱分解工程をロータリーキリン炉で行うキルン型、同じく熱分解工程を流動床炉で行う流動床型の三タイプが主なものである。

Fig. 1 に最近の稼働施設の推移¹⁾を示す。施設数は年々増加し、2006年度で一般廃棄物を対象とした溶融施設の数 は 165 施設となっており、施設数ベースでは全国の焼却施設数の 1 割を超えている。可燃系ごみの処理容量ベースでは、最終的に溶融処理される量は 2～3 割程度を占めていると推定される。溶融方式別に推移をみると、以前は灰溶融が多かったが近年ではガス化溶融の施設が増加し、半々程度の割合である。

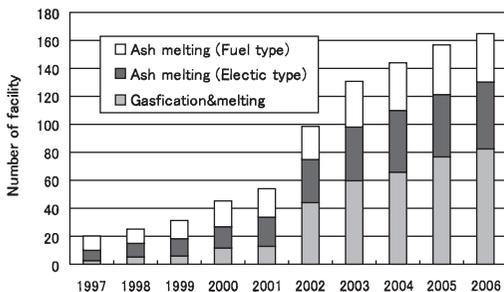


Fig.1 Trend in number of melting facility operated

3. 溶融スラグの利用

溶融スラグには冷却方法により水砕スラグ、空冷スラグ、徐冷スラグの 3 つのタイプがある。水砕スラグは高温の溶融物を冷却水中に入れて一挙に冷却・破砕させて造られ、砂状の微粒子である。空冷スラグは空気中で比較的急速に冷却された大きな塊の固化物であり、利用の際は適当な粒径に破砕して用いる。徐冷スラグは温度を制御しながら徐々に冷却し固化させる。冷却速度の違いで前二者は非結晶質のガラス状になり、徐冷スラグは結

晶鉱物が形成され天然石様の結晶質スラグになる。現状では、冷却設備の簡易化・省スペース化の観点から水砕スラグが生産される場合が多い。

Fig. 2 に 2005 年度の溶融スラグ生産量と有効利用状況¹⁾を示す。有効利用の割合は 6 割を超える程度で、100% の利用を確保するにはほど遠い状況である。なお有効利用先は土木材料としての利用がほとんどであるが、1 割程度は最終処分場の覆土利用など施設内利用であり、その意味では一般の土木材料と同様の価値を認められて利用されている分は半分を超える程度にとどまっている。

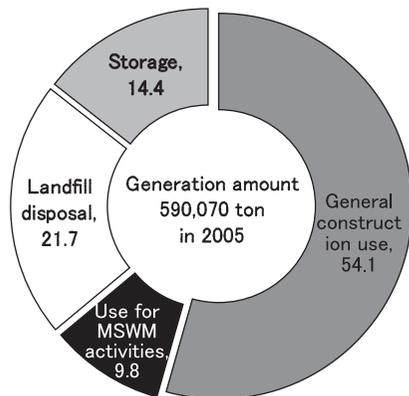


Fig.2 Current status in utilization/disposal of molten slag

溶融スラグの有効利用が十分に進んでいない主な原因は、ごみ由来の再生材料の安全性に対する懸念である。そこで有効利用促進に向けて、2006 年 7 月にコンクリート用及び道路用材料としての溶融スラグの品質を規定する日本工業規格 JIS A 5031 及び 5032 が策定された。近年の環境 JIS 化の流れを受けて、再生材料に対して日本で初めて安全性の観点からの品質規定が組み込まれ、安全品質規定採用の動きは、非鉄スラグや鉄鋼スラグの JIS へ波及しつつある。今後、JIS 化を受けて徐々に有効利用が促進されることが期待されるが、利用者側の信頼を得るには未だ高いハードルが存在している。特に、土壌汚染対策法が 2003 年に制定された後に、スラグ系材料を土木資材として利用する場合に含有量に関する指定基準をメルクマークとする傾向がみられる。溶融スラグで問題となるのは鉛の含有量であり、指定基準（150mg/kg）を超過するスラグは全体の 1～2 割程度と推察されている。これまで有効利用の実績を積み重ね信頼性を獲得してきた他の産業系スラグでも、銅スラグの鉛やヒ素、鉄鋼スラグのフッ素などが同様の問題をかかえているが、再生材料全体の問題として、有効利用の際の環境安全性評価の合理的な方法論自体の検討が急務であると言える。

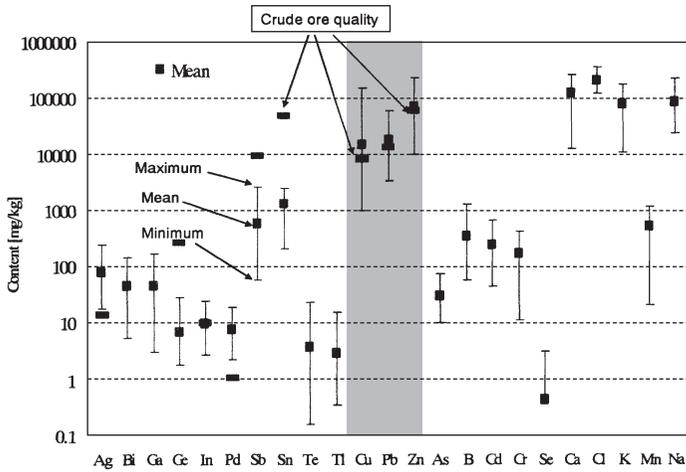


Fig.3 Contents of various metals in molten fly ash

4. 溶融技術を中核とした新しい資源循環システム

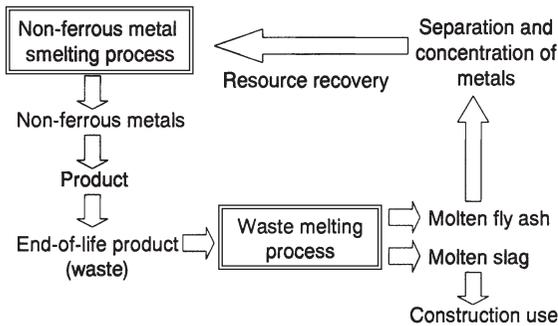


Fig.4 New concept of material cycling system centering on waste melting process

4.1 溶融飛灰の山元還元

廃棄物溶融プロセスから発生する溶融飛灰は、これまではキレート処理あるいはキレート処理にセメント固化を併用して無害化処理し、その後埋立処分される場合がほとんどであった。しかし、埋立処分後の長期的な安定性を疑問視する研究報告²⁾が多く出され、環境影響への懸念から埋立処分に代わる対処方法が求められた。また、溶融飛灰は有害金属を高濃度に含んでいるが、逆に言えば有用金属の資源的価値も高いことが注目された。Fig. 3には、筆者等が行った調査³⁾により明らかとなった溶融飛灰中の各種金属資源含有濃度の分布を示した。資源性の観点からは、ベースメタルである亜鉛や鉛がターゲットとなり、

それぞれ約10%、約3%程度含有されている。また、様々なレアメタル類も比較的高い濃度で含まれている。これらは粗鉱石に含まれているレベル⁴⁾と同等であり、比較的単純な洗浄処理による脱塩等の前処理によって、濃集度を3~4倍程度に高めることも可能である⁵⁾。

このような背景から、非鉄製錬プロセスへの溶融飛灰山元還元への新たな試みが始まった。システムフローの概念図をFig. 4に示す。当初は埋立処分に代わって、安全な非鉄製錬プロセスを用いた無害化処理の側面も強かったが、世界的な需要増による金属資源の価格急騰もあ

って、資源セキュリティの文脈からもこの新たなシステムの意義が評価されようとしている。金属資源のクローズドループの流れを太くするために、溶融プロセスは廃棄物中の金属資源の分離濃縮機能の役割を果たしていることになる。さらに分離濃縮機能を高度化することは、溶融スラグ中の有害金属含有量を低減させ、安全性を高めることに繋がる点も特記すべきであろう。Fig. 5には、実際の溶融施設における調査結果³⁾を基に整理した各種金属元素の溶融飛灰への移行率を示す。ZnやPbの移行率は高く、溶融プロセスが各種金属の分離濃縮機能を果たしていることがわかる。筆者らが熱力学平衡計算によりシミュレートした結果⁶⁾では、炉内の温度だけでなく、酸化還元雰囲気や塩素の共存が金属元素の揮発分離に大きく影響していることが明確になった。事実、溶融スラグ中の有害金属含有量を低減する目的もあり、酸素ポテンシャルを下げ還元度を高め、滞留時間を長くし十分な揮発を促すなどの処理条件の改善が進められ、最近の

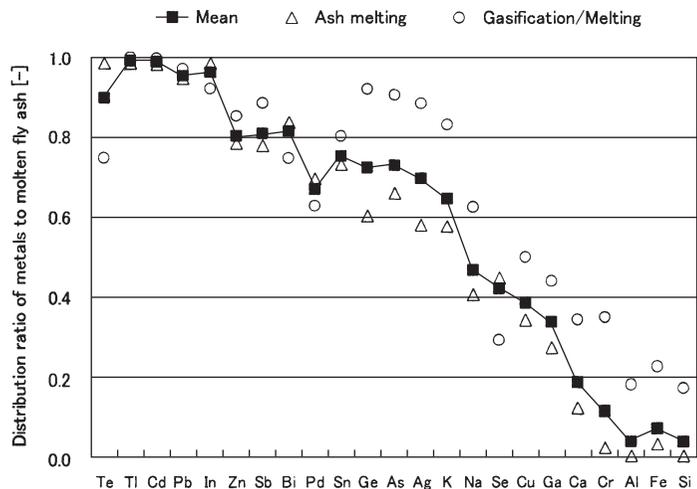


Fig.5 Distribution ratio of various metals to molten fly ash (n=17)

溶融炉の性能は格段に向上している。

一方、溶融飛灰中の有用金属の含有レベルが将来的にどのように変化するかについても注視すべきである。現在の含有レベルを前提に、システムを構成するインフラを一旦整備した場合に、もし含有レベルが将来減少してしまえばインフラは無駄になってしまいかねない。含有レベルの減少要因としては、由来する製品（廃棄物）について、使用される対象金属の低減や他の金属への代替、事前選別等による回収などが考えられる。そこで筆者らはごみ中の各有用金属の由来について調査中であり、将来の含有レベルの変化可能性について検討しているところである。

4.2 システム評価

(1)目的 溶融飛灰の山元還元を組み込んだ溶融技術の中核とする新たな資源循環システムについて、従来型の焼却+埋立処分や溶融飛灰の山元還元の有無などを比較対照シナリオとしたライフサイクルアセスメント(LCA)による分析を行う。

(2)機能及び機能単位 LCAを実施する上での評価対象システムの機能として、都市ごみ(可燃系ごみ)の適正な処理、対象システム内の各プロセスでの発電あるいは代替する通常の電力系統から供給される電力、溶融スラグあるいは代替する天然系資材の土木資材生産、溶融飛灰の山元還元による回収金属資源あるいはそれが代替する天然鉱石からの金属資源生産、を取り上げる。また、シナリオ間の比較を行う際の機能単位は、可燃系ごみ1トンの処理とし、そのごみ組成及び熱量は、松藤による廃棄物処理対象のLCAソフトウェア(H-IWM)⁷⁾に基づき設定した。

(3)比較シナリオ 以下の5つのシナリオを比較分析した。

シナリオ1(S1): 焼却/埋立のベースシナリオ、単純なストーカー炉による焼却と焼却残渣埋立

シナリオ2(S2): 焼却/灰溶融、溶融スラグの土木資材利用による天然系資材生産の回避、溶融飛灰埋立処分

シナリオ3(S3): 焼却/灰溶融、溶融スラグの土木資材利用による天然系資材生産の回避、溶融飛灰山元還元による天然鉱石からの金属資源生産回避(Zn,Pb,Cu)

シナリオ4(S4): ガス化溶融、溶融スラグの土木資材利用による天然系資材生産の回避、溶融飛灰埋立処分

シナリオ5(S5): ガス化溶融、溶融スラグの土木資材利用による天然系資材生産の回避、溶融飛灰山元還元による天然鉱石からの金属資源生産回避(Zn,Pb,Cu)

なお、上記のシナリオにおいて発電プロセスが設置されている場合には、相当分の発電所における電力生産を回避するものとした。

(4)データ収集及び適用モデル ごみ処理としての焼却、埋立、溶融プロセスに関するインベントリー分析には松藤によるH-IWMのモデル⁷⁾を適用した。また、山元還元に関わる各種プロセスや天然系土木資材生産、天然鉱石からの金属資源生産など、H-IWMに存在しないデータについては実施設備保有企業へのヒアリング調査や関連の既存文献^{8),9)}から収集した。

(5)結果と考察 まず、各シナリオにおける最終処分量(埋立処分量)の結果をFig.6に示す。従来の焼却/埋立(シナリオ1)に対して溶融技術を用いたシステム(シナリオ2~5)は格段に最終処分量を削減可能である。溶融飛灰の山元還元の有無で比較すると、灰溶融の両ケース(シナリオ2と3)では大きな違いはないが、溶融飛灰発生量の多いガス化溶融の両ケース(シナリオ4と5)では、溶融飛灰の山元還元による最終処分量の削減効果は無視できない。

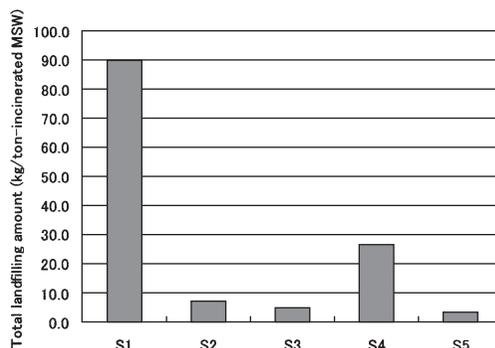


Fig.6 Results of LCA related to total landfilling amount in each scenario

つぎに二酸化炭素の排出量についての結果をFig.7に示す。ベースシナリオ1に比較して、溶融技術を導入したシナリオ2~5では1~2割程度排出量が増加している。内訳をみると、ごみの燃焼・分解に由来する非エネルギー起源の二酸化炭素搬出量(バイオマス由来は計上せず)が、各シナリオ共に同等に大きく寄与している。先の説明の1~2割のシナリオ間の違いには、システム内で利用する燃料や電力に由来して間接的に誘発される二酸化炭素排出量(エネルギー起源)、システム内での発電による発電所での二酸化炭素排出回避の影響が反映している。なお、溶融飛灰の山元還元のために新たに付加しなければならないプロセスの寄与は、微々たるものがある。

以上のように、溶融技術を活用したシステムと従来型の焼却/埋立システムでは、最終処分量と二酸化炭素排出量の間トレードオフの関係が存在しており、総合的な評価の際に考慮する必要がある。日本の最終処分量ひっ

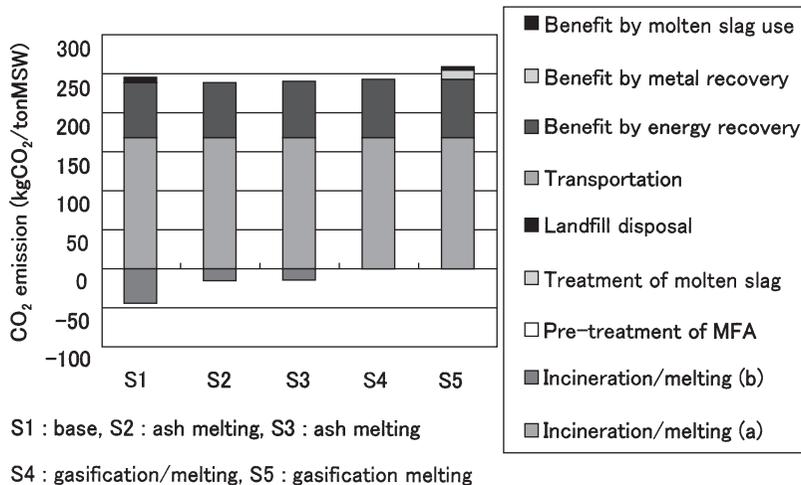


Fig.7 Results of LCA related to GHG emissions in each scenario. In the incineration/melting process, (a) and (b) represent CO₂ directly originating from MSW and that indirectly from energy use, respectively

迫問題への対応と、地球温暖化問題における廃棄物部門での対応において、どちらの費用対効果が大きいかなどを冷静に判断すべきであろう。さらに、定量化については今後の課題であるが、先に触れたキレート処理した溶融飛灰の埋立後の環境影響についても適切に評価し、山元還元による埋立回避の効果についても考慮すべき重要な要素である。

5. まとめ

廃棄物溶融技術は、1990年代に最終処分量ひっ迫とダイオキシン類の問題解決のためにその普及が図られてきたが、近年では資源セキュリティの観点も含めて資源循環システムとしての意義が見出されつつある。本研究では、このような時代変遷と共に、まず廃棄物溶融技術の概要、溶融スラグの利用状況や課題等を説明した。つぎに、溶融飛灰中に濃集されている有用な金属資源の山元還元システムを組み込んだ、溶融技術を中核とする資源循環システム形成の新たな展開を紹介し、LCAを適用してシステム評価を試みた。その結果、新たなシステムが最終処分量削減には寄与するが、若干の二酸化炭素排出量の増加が生じ、異なる影響要素間でのトレードオフの関係が存在することがわかった。定量化できない溶融飛灰の埋立後の環境影響などを含めて、総合的に評価していく必要があることを指摘した。

なお、本研究は環境省廃棄物処理等科学研究補助金「近未来の循環型社会における技術システムビジョンと転換戦略に関する研究（代表：大迫政浩）」(K1942)の成果を一部活用している。2年間の研究の中途の段階での成果であり、最終的な結論に至っていない点についてはご了承ください。

References

- 1)Ecoslag Riyou Fukyu Center: Saisei Shigen no Riyou kakudai ni Kansuru Tyousa Houkokusyo (2007)
- 2)H.Sakanakura : ES&T, **41**, pp.1717-1722(2007)
- 3) C.Jung, M.Osako : 18th Haikibutsu Gakkai kenkyu Happyoukai Kouen Ronbunshu(2007.11)
- 4)K.Harada, etc.: Nihon Kinzoku Gakkai Shi, **65**, pp.564-570(2001)
- 5)C.Jung, M.Osako: J.Hazardous Material (in submission)
- 6)C.Jung, M.Osako: Chemosphere(in press)
- 7)T.Matsuto: Toshi Gomi Shyori System no Bunseki keikaku Hyouka, Gihoudou (2005).
- 8)S.Hashimoto, etc.: Doboku Gakkai Ronbunshu, **65/7-16**, pp.75-80(2000)
- 9)Nihon Kougyou Kyoukai Data
- 10)Nihon Sangyou Kikai Kougyoukai Data

資源リスクとエコマテリアル¹

原田幸明²

Ecomaterials to Relieve Material Risk

Kohmei HALADA

National Institute for Materials Science

Abstract

As a momentous shift of the political actions for the global climate change is beginning, the role of materials getting more important as tools of eco-innovations. On the other hand, the eco-innovation will bring additional demand of material use, adding to the expansion of global economic to acquire the welfare of non-OECD countries. The simulation of materials consumption until 2005 is shown. Accumulative consumptions of Au, Ag, Cu, Zn, Pb, Ni will run over the amount of reserves and reserve base. Factor 8 or more is required to avoid the Material Risk. Four Re's, Reduce, Replace, Recycle and Restrict are important to achieve it.

Key words : Material risk, Resource depletion, Factor 8 , Stimulation of elements research project

1. エコマテリアル

エコマテリアルは 1990 年代の初頭に日本から世界に発信された持続可能社会に向けた材料の発展の方向である。これは、それまでの材料開発がより強くより厳しい環境に耐えるなど人間の生産圏を広げていくいわばフロンティア性にもつばら焦点を置いていたのに対して、それらの性能を伸ばしながらも、環境との調和性を配慮し、人間にも優しい材料となるように総合的な発展の方向を目指そうというものであった(図 1)。

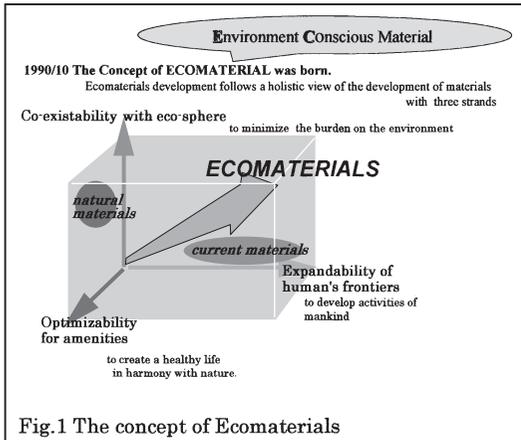


Fig.1 The concept of Ecomaterials

このエコマテリアルの提唱以前にも、環境問題に貢献する材料群は存在していた。それらには、浄化触媒など素材の特殊物性を生かした「機能対応型」と耐熱材料のようにエネルギーシステムの高効率化などに貢献する「システム要素型」があり、これらも機能そのものが環境問題に応えるという意味で広義のエコマテリアルである。

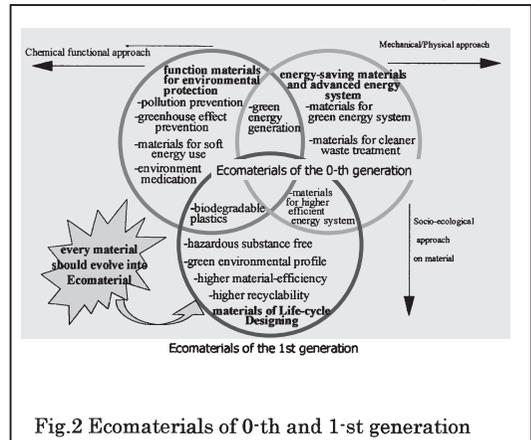


Fig.2 Ecomaterials of 0-th and 1-st generation

エコマテリアルの考え方は、そのような特殊な環境機能材だけではなく、今日常で使用しているすべての材料を対象とするのである。それは資源採取から廃棄までの素材のライフサイクル全般を通じての環境負荷の低減を目指すもので、「ライフサイクル・デザイン型」と呼ばれる。このエコマテリアルの考え方により、自動車や住まいさらには家電製品や飲料缶といった日常多くの人が接し使用しているすべての素材が、環境との調和性を持つように換わっていかねばならないことが示された(図 2)。

このエコマテリアルの特徴は、「Environment Conscious」(環境配慮)ということである。その配慮をどのようにして進めていくか、ここで、ライフサイクル思考とそれに基づく LCA が重要になってくる。ライフサイクル思考は、製品や設備などがその目的使用される局面だけでなく、その製品のための資源の採取から廃棄にいたるすべてのライフステージでの環境負荷を意識しそれを最小化しようとするものである。エコマテリアルはそのステージのどの段階で環境配慮がなされているかで、

- ①低環境負荷の資源で造られた材料
- ②低環境負荷のプロセスで製造やリサイクルできる材料

1. 平成 19 年 11 月 8 日本会第 119 回例会において発表
 2. 所属先 独立行政法人 物質・材料研究機構
 平成 19 年 8 月 21 日受理

- ③使用時の生産性を上げて製品の環境効率(性能/環境負荷)を高める材料
 - ④周囲の環境を改善しながら使うことのできる材料
 - ⑤環境に影響のありそうな物質を使わない、もしくは回収できるようにした材料
 - ⑥リサイクル性の高い材料
- に分類される(図3)。

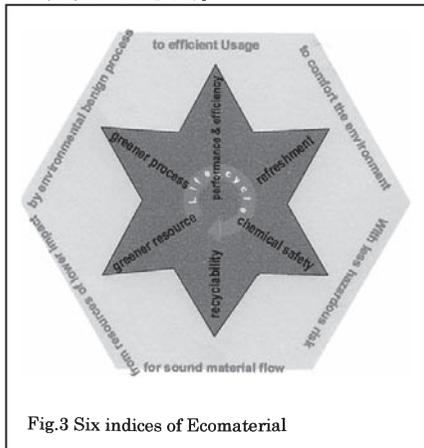


Fig.3 Six indices of Ecomaterial

2. 新たなる資源需要

上記のようにエコマテリアルは、地球環境問題の広まりの中で発展し、材料技術においてもライフサイクルのさまざまな側面での環境「配慮」ということが定着しつつある。しかし、他方で、地球環境問題はその深刻さを増しており、単に環境に「配慮」するだけでなく、具体的に環境問題の「解決」につながるものが要求される段階となってきた。地球温暖化問題についても、2050年を目標にCO₂の半減が目指されるようになり、そのためのエコイノベーションが叫ばれている。

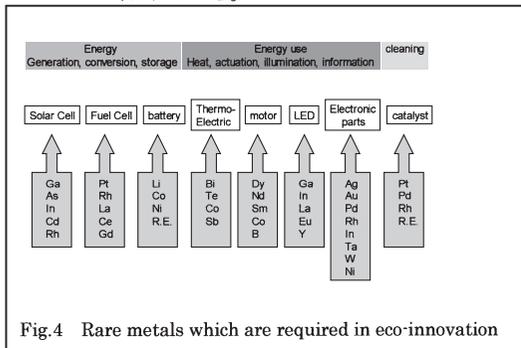


Fig.4 Rare metals which are required in eco-innovation

このような場合、注意しなければならないことは、ひとつのリスクに注目するあまり他の分野のリスクを大きくするリスクの転嫁である。エコイノベーションにおいて、エネルギーの発生、転換、貯蔵の分野における、太陽電池や燃料電池、バッテリー、そのエネルギーを使用する段階における、熱機関、動力、照明、情報などの分野において、CO₂抑制のための大きな技術転換が期待されているが、その鍵をなすのは、電子や光などの量子を自在に変換・移動・貯蔵させる物質群である。物質・材料が

このようなエコイノベーションにとって重要な役割を果たすことは、エンジニアリング的には非常に夢とやりがいのあることではあるが、同時に、そこにかかわる新たなリスク、資源リスクの拡大を注意しておく必要がある。図4はこれらの開発のために使用される代表的な金属元素を示したものである。白金族元素や貴金属、レアアース等をはじめとして、希少な資源の元素がこれからのイノベーションで多用されようとしている。

いまひとつの資源需要の高まりは、BRICs 諸国などをはじめとする世界的な経済の拡大と社会的インフラストラクチャー整備のための物質利用の拡大である。

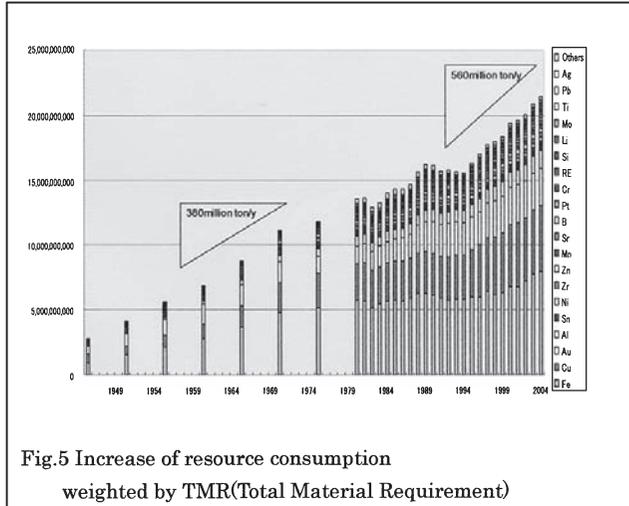


Fig.5 Increase of resource consumption weighted by TMR(Total Material Requirement)

図5は第二次大戦後の資源消費量の推移を示すグラフである。素材としての使用量で表すと鉄と金のように資源の違いが出て来るため、ここでは資源指標のひとつである TMR(関与物質総量)係数を素材消費量に対する重み

Table1 Resource indices of elements

	Energy Generation, conversion, storage			Energy use Heat, actuation, illumination, information			cleaning		
	TMR coefficient	Resource Exhaustion Acceleration coefficient	Resource Scarcity Index	TMR coefficient	Resource Exhaustion Acceleration coefficient	Resource Scarcity Index	TMR coefficient	Resource Exhaustion Acceleration coefficient	Resource Scarcity Index
3 Li	1,500	1,800	800	52 Te	270,000	2,900,000	300,000		
4 Be	2,500	21,000	2,500	53 I2	45,000		8,000		
5 B	140	9,600	400.0	55 Cs	11		1.3		
9 F2	210		26	56 Ba	510		60		
10 Ne				57 La	3,100	470	400		
11 Na	49		6	58 Ce	2,000	450	300		
12 Mg	71	1.5	3.8	59 Pr	8,000	3,300	2,000		
13 Al	48	0.4	1.5	60 Nd	3,000	1,000	800		
14 Si	34	0.1	2.1	62 Sm	9,000	4,500	2,000		
15 P2	220		27	63 Eu	20,000	22,000	8,000		
16 S	520		60	64 Gd	10,000	5,000	2,000		
17 Cl2	52		6	65 Tb	30,000	34,000	10,000		
19 K	54		68 Dy	9,000	5,600	2,000			
20 Ca	90		11	68 Ho	25,000	22,000	8,000		
21 Sc	2,000		200	68 Er	12,000	9,800	4,000		
22 Ti	36	13	71	69 Tm	40,000	54,000	20,000		
23 V	1,500	300	200	70 Yb	12,000	9,000	4,000		
24 Cr	26	43	12	71 Lu	45,000	54,000	20,000		
25 Mn	14	100	13	72 Hf	10,000	9,000	3,000		
26 Fe	8	1	1	73 Ta	8,800	68,000	8,000		
27 Co	600	1,700	300	74 W	190	34,000	1,000		
28 Ni	280	1,100	200	75 Re	20,000	30,000,000	30,000		
29 Cu	380	300	120	76 Os	340,000	27,000,000	1,000,000		
30 Zn	36	1,000	70	77 Ir	400,000	27,000,000	1,000,000		
31 Ga	14,000	1,800	2,000	78 Pt	520,000	680,000	200,000		
32 Ge	120,000	18,000	20,000	79 Au	1,100,000	6,200,000	1,000,000		
33 As	29	2,000	200	80 Hg	2,000	680,000	10,000		
34 Se	70	1,200,000	3,000.0	81 Tl	430		50		
35 Br2	1,500	11,000	1,000	82 Pb	28	3,000	100		
37 Rb	130		16	83 Bi	180	250,000	2,000		
38 Sr	500	450	200	88 Ra	280,000,000	40,000	40,000		
39 Y	2,700	1,200	600	90 Th	9,000	3,700	2,000		
40 Zr	550	560	200	92 U	22,000	32,000	10,000		
41 Nb	640	2,100	400						
42 Mo	750	11,000	1,000	coal	12	0.04	1.5		
44 Ru	80,000	2,700,000	181,213	oil	7	0.8	0.9		
45 Rh	2,300,000	5,400,000	1,000,000	stones	1		0.2		
46 Pd	800,000	2,700,000	500,000	mercury	1		0.2		
47 Ag	4,900	1,100,000	29,000	plastic	10	0.8	1.0		
48 Cd	7	280,000	400	wood	78	0.2	1.4		
49 In	4,500	3,900,000	50,000	cement	3		0.4		
50 Sn	2,500	30,000	3,000	oerment	320	19	39		
51 Sb	42	180,000	1,000						

として用いている。この TMR 係数は、対象の素材を 1ton 製造するために何 ton の天然資源を採掘したかを表す数値であるので、資源採掘端での物質使用量を表していると理解しても良い。なお、参考のために、資源枯渇の視点からの資源指標も Table1 に記しておいた。

「成長の限界」が指摘されたオイルショック以前の 1960 から 70 年代の資源消費の増加が有名であるが、その当時の年間の増加率は年 3.8 億トンであるのに対して、現在の増加率は年 5.6 億トンとそれを大きく凌いでいることに注目すべきであり、われわれは「成長の限界」を超えてさらに「限界」に向かって突き進んでいるといえる。

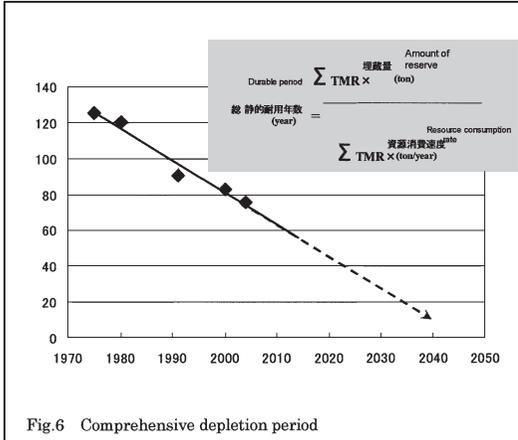


Fig.6 Comprehensive depletion period

さらに、図 6 は、同じく TMR で重み付けした各資源の埋蔵量を TMR 重み付け年間消費量で割ったものの推移であり、重み付けされた資源の総括静的耐用年数に相当する。1970 年代には 120 年を超えていたこの数値が現在では 80 年を切っており、そのまま外挿するならば 2040 年代には 10 年を切る関係になっている。

3. 将来の資源リスク

このような議論の場合、単純な外挿では不十分であることは言うまでもない。現に「成長の限界」が指摘された後の OECD 諸国では、資源消費量の増加は鈍り一種の安定成長期に移行している。このような状態をデカップ

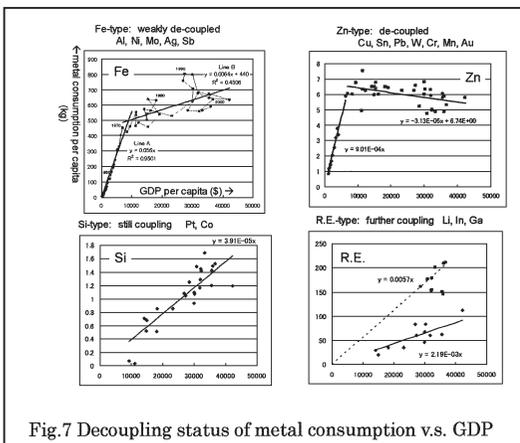


Fig.7 Decoupling status of metal consumption v.s. GDP

リングと呼ぶ。このデカップリングの状態を各種の金属に対して、一人当たりの GDP を横軸に、一人当たりの金属消費を縦軸にとりて表したものが図 7 であり、亜鉛、銅、錫、鉛などは一人当たり GDP が増大すると消費が減る強いデカップリングを示し、鉄やアルミニウムは増大が緩やかになる弱いデカップリングになっている。白金、コバルトなどは日本でもデカップリングに至っておらず、さらにレアアースは、成長段階のレベルをさらにアップさせようとしている。

この一人当たりの GDP と金属消費の関係の二段階直線近似に BRICs 諸国などの GDP と人口の予測を当てはめて金属消費を予測した。その典型的なものが図 8 である。左側が各国の年間の金属消費予測であり、右側はその積算量となっている。なお、右の棒グラフの下部の濃い部分はこれまでの消費量の累積であり、薄い横線は現有埋蔵量、その上部にある濃い線は経済限界を無視した埋蔵量である埋蔵量ベースを表している。

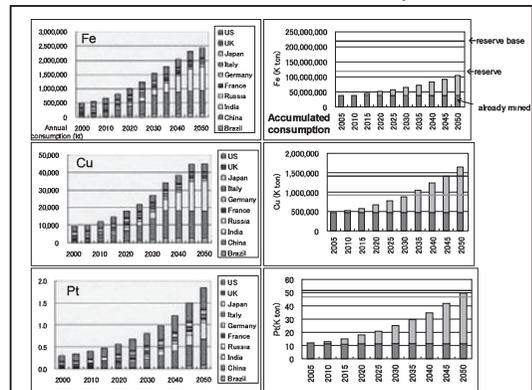


Fig.8 Example of the prediction of material consumption

図 8 でわかるように、比較的資源は豊富と見られた鉄や白金でさえほぼ現有埋蔵量を使い切る量の資源消費が予想されており、銅に至っては現有埋蔵量を凌ぎ、埋蔵量ベースでさえ超過する資源消費が予想されている。

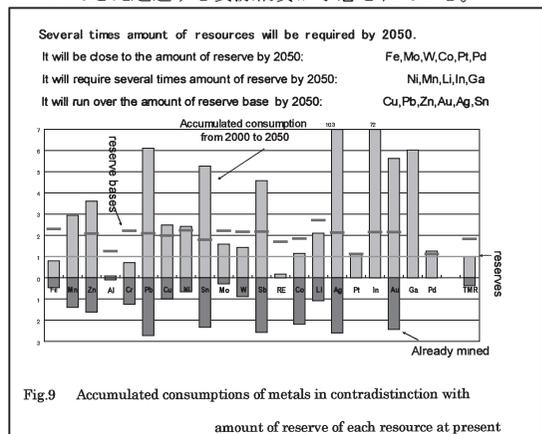


Fig.9 Accumulated consumptions of metals in contradistinction with amount of reserve of each resource at present

各金属に対してのこれらの傾向を一覧で示したものが図 9 であり棒グラフの下向きの部分がこれまでの消費量の累積であるのに対して、上側が 2000 年から 2050 年にかけての累積消費量を示しており、これらはそれぞれの

金属の現有埋蔵量を 1 として比較しやすく表してある。また短い横バーは埋蔵量に対する埋蔵量ベースの量を示している。多くの金属が現有埋蔵量を超過する消費量が見込まれており、探索やリサイクルとともに使用量の大幅な削減が求められていることがわかる。この傾向は、金、銀、銅、鉛、亜鉛など当用漢字で書ける日常的な金属で著しくその社会的影響は大きい。

4. Factor 8

環境経済学者のハーマン・デイリーはサステナビリティの条件として以下の 3 項目をあげている。

- 1)再生可能な資源の利用は再生可能の速度を超えない
- 2)枯渇性資源の利用は代替できる再生可能資源の再生速度を超えない
- 3)環境への排出は環境の浄化能力を超えない

この 1)、3)については容易に合意できるが 2)はレアメタルのように再生可能資源では代替できない機能を有する場合には対応できなくなってしまう。しかし、持続可能性を考えるとそれに対する解を見つけ出す必要がある。

まず全体としてどのくらいの資源利用の削減を考えねばならないかを見てみる。図 7 にプロットしたものは日本の一人当たりの TMR を一人当たりの GDP に対してプロットしたものである。この場合は様々な金属の影響が複合しているため、二段階ではなく三段階になっており、成長期、遷移期を経て、一人当たり約 18 トンの TMR とほぼ一定で GDP は増加している安定期に入っているものと見られる。この 18 トン/人のレベルを factor1 として、半分の 9 トン/人を factor2、四分の一を factor4 というように表し、日本などは右下がりの線のように 2050 年までにそのレベルにまで資源利用を削減し、成長段階の国は横線のようにその消費レベルに達した段階で安定期に移行するとして全体的な資源消費を予測した。

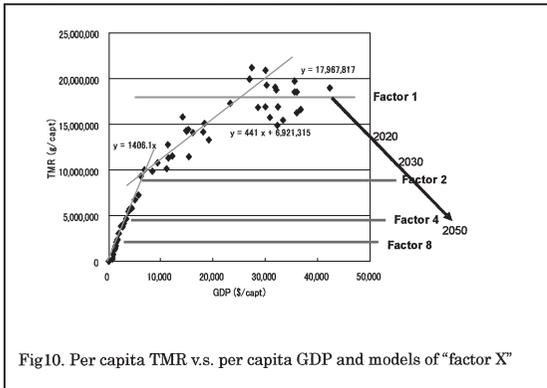


Fig10. Per capita TMR v.s. per capita GDP and models of "factor X"

その結果が図 11 であり、図 8 の右側に当たる累積量をすべての金属に対する TMR 係数の重み付け総和で表したのになっている。Factor1 では、2050 年に現有埋蔵量に相当するラインを突破してしまい、factor2 や factor4 でも、2050 年までの突破は防げるものの、増加傾向は収まらず、問題の先延ばしになるに過ぎない。Factor8 でようやくその増加は安定傾向となり、持続可能性が見えてくる。これを年間の TMR を見たものが図 12 である。は Factor2 でも年間 TMR は減少傾向に転じることはできるが、現在よりはるか高水準にとどまっており、Factor8

になってはじめて現状のレベルにまで引き戻すことができる。

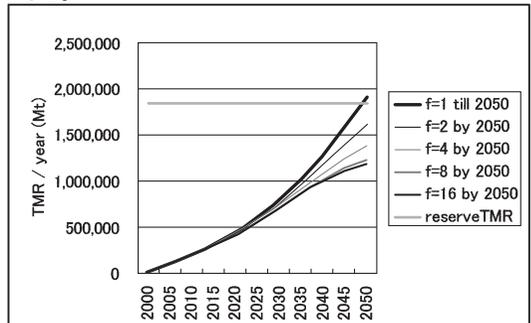


Fig.11 Forecasting results of accumulated TMR in various factor

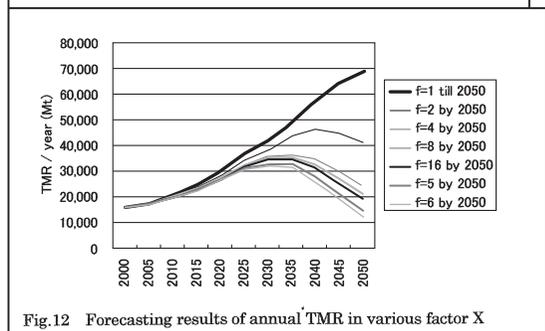


Fig.12 Forecasting results of annual TMR in various factor X

さらに、図 13 はその結果をもとに TMR 加重平均の耐用年数を示したものである。プロットの点は全世界の消費を対象として予測は BRICs 諸国と G6 諸国に限定しているため若干の不連続はあるが factor1 ではほぼ現在の傾向の外挿に近い結果が得られている。Factor4 で耐用年数の低下は緩やかになるが、2050 年の段階で 20 年と厳しい状況から脱することは難しい。この図には示していないが Factor8 になって 2050 年の段階で現状と同程度の資源消費に抑えることが可能となり、図に示すように耐用年数も盛り返すことができる。しかし、それでも 40 年程度でしかなく探索やリサイクルが重要になることは同じである。

5. 元素戦略と資源リスク軽減

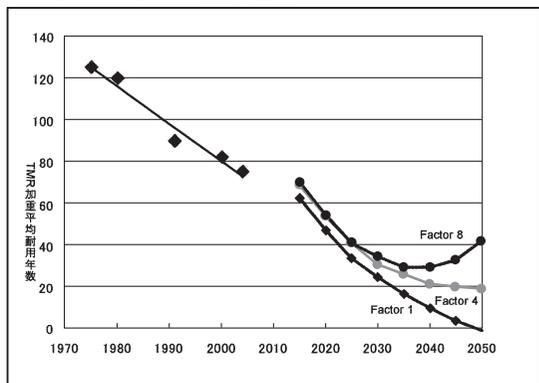


Fig.13 TMR weighted depletion period for each factor model

資源リスクを軽減する取り組みとして元素戦略研究ブ

プロジェクトが国のレベルで進められている。これは、「減量」「代替」「循環」「規制」をかかげ、長期的な視点から、資源利用と素材のあり方をかえていこうとする試みである。このようなアプローチが全体として Factor8 を実現していく取り組みとなっていくと期待される。

その観点から、もう一度資源利用のあり方を整理してみると、以下のような、「4つの努力」と呼べるような方向性が考えられる。

4つの努力

Factor8を達成するには

しかも、枯渇性資源も天然循環の範囲に抑えるには

- 使わずにすむものは使わない
Reduce
- 丁寧につかう
Long-life ← Reuse
- 何度もつかう
Recycle
- あるものを使う
Replace

技術面からの貢献

- 一減量化技術
ナノテクノロジーの出事
- 一長寿命化技術
信頼性技術
- 一リサイクル技術
軽体性技術
- 一代替技術
普遍的資源からのものづくり

この中で、Reduce、Reuse、Recycle はこれまでも言われてきた側面を資源の観点からより強めることになる。例えば Reduce はまさに米国で言われた「国会図書館を角砂糖一個に」を実現するナノテクノロジーの勝負の場である。ここで更に新たに付け加えたものが「あるものを使う」という視点である。これは本来地球資源の準備している物質のバランスと人類の利用の形態のバランスが一致していないところに資源リスクの根源があるという見方をするとでてくるもので、枯渇性資源を枯渇させない基本的な道であるといえる。錬金術が化学に進化したとき我々は原子という認識を持ち電子の軌道や状態から機能を利用することを学んだ。しかし現時点では電子構造は原子核に強く依存して物質が設計されておりそれが特定の元素ひいては資源の利用につながっている。現在利用されている多くの機能は電子状態や原子の相互配置から得られることを考えると、その条件を与えるのに特定の元素に依存する必要はない。より普遍的に存在する元素群から原子配列や電子構造の制御で機能を引き出すことで、限られた資源に依存せざるをえない拘束から脱却することが出来る。このような物性科学の秘められた可能性の探索で“自然のありようを知る”追求が持続可能性への道を開くであろう。

6. 第二世代のエコマテリアル

第一世代のエコマテリアルは、材料にライフサイクル思考を持ち込み、「環境配慮」を材料パフォーマンスの一要素として組み込んだ。これからの第二世代のエコマテリアルは、ここまで見てきたように資源リスクへの転嫁を回避しながら、環境問題に具体的な解決を与えていく材料群となる。

資源リスクへの転嫁を防止しそのリスクを軽減するという点では、材料科学、物性科学の基礎からのアプロー

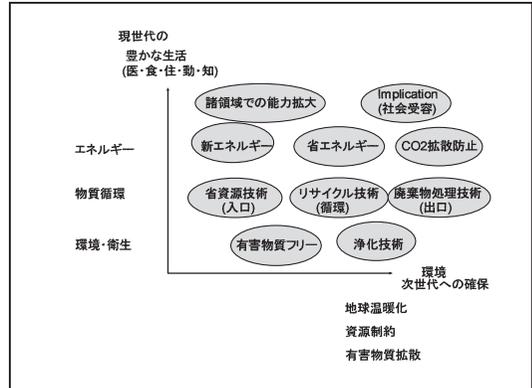


Fig.14 Subjects of 2nd Generation Ecomaterial

チが重要であることは述べたが、問題解決という意味での材料の役割を再度確認しておく必要がある。

図 14 は、持続可能性という観点から、「環境」的視点と、「豊かさ」の視点をマッピングしてみたものである。ここで「環境」的視点は、持続可能性で言う「将来世代への豊かさの確保」として横軸にとりあげ、同じく持続可能性でいう「現世代の豊かさの獲得」の縦軸との中でそれぞれを位置づけてみた。もちろん縦軸は、輸送、情報、医療などさまざまな需要に応じた分だけ存在することになるが、ここでは、社会的に共通な社会サービスとしてみると、エネルギー利用、物質循環、さらに環境・衛生がある。次世代への視点では、“地球温暖化”、“資源制約”、“有害物質拡散”が三大要素である。エネルギー問題は、現在の主力である化石燃料の利用を通じて CO₂ の発生抑制の問題、およびエネルギー資源の制約の問題と深くかかっている。また、物質循環は、環境のサイドから発せられること多い表現であるが、逆に、資源を通じた経済の拡大能力と大きくかかわった現世代の豊かさに通じる課題でもある。環境・衛生の問題においても、現時点での問題解決と将来への予防の二つの側面があることを忘れてはならない。

このように、それぞれの技術が個別の問題に対してどのような位置で応えようとしているのかを把握しておくことが重要であり、その目的を資源制約の中で factor8 として達成していくことが、これからの第二世代のエコマテリアルの課題である。

7. まとめ

地球環境問題は、いまや国際的な安全保障の問題となりつつあり、その解決の手段としてイノベーションが大きく期待されている。しかし、それは同時に資源制約のリスクへの転嫁の危険性もあり、そのベースは BRICs 諸国などの経済拡大の中で強まってきている。このような中で、資源制約のリスクを factor8 へと軽減させつつ、エコイノベーションに貢献する具体的な解決の道を実現していくのがこれからの第二世代のエコマテリアルである。

コロイドフォトニック結晶の創成¹

— 次世代のための材料フロンティア開拓 —

加納 剛²

Colloidal photonic crystals -A new material for next generation-

Tsuyoshi KANO

Japan Aerospace Exploration Agency

Abstract

Rare earth materials have been put into advanced industrial application first by the red phosphor for color TV in 1960's. The wide innovation caused by the materials has shown the importance of the pioneering materials demonstrating the merit of practical application. Colloidal photonic crystals could be such pioneering materials, if the demonstration is successful. They need intimate collaboration of wide research areas not organized so far. The space experiment project now in progress is described as an example of such collaboration, where a "Mogamigawa" model is proposed to convert existing individual technologies into combined fast flow of open innovation.

Key words: Colloidal crystal, Photonic crystal, Nano particle, Space experiment, Microgravity,

1. 希土類工業材料の登場

希土類元素の基礎的知見は古くから集積されていたが、工業材料として登場したのは、1960年代である。当時カラーテレビジョン製品が離陸過程にあり、受像管に使用される赤、緑、青三原色蛍光体が探索された。初期には、刺激電子線エネルギーを光に変換する効率の高い硫化物蛍光体が使用された。赤色蛍光体は、輝度と色純度が背反関係にあり、両者の調和を取るには、硫化物蛍光体のように幅広い発光スペクトルよりも、幅の狭いスペクトルを持つ蛍光体が求められた。希土類3価イオンは発光準位の4f軌道が外殻電子に遮蔽されていて、輝線スペクトルを示すが、当時希土類元素の精製技術が未発達で、高純度でないとも明るく発光しない蛍光体の研究は進んでいなかった。1963年に、 $YVO_4:Eu$ が、米国GTE社から、次いで $Y_2O_3S:Eu$ が米国RCA社から、カラー受像管用赤色蛍光体として優れていることが発表されると、工業的精製技術(イオン交換、溶媒抽出)が急激に開発され、高純度で比較的低価格の希土類酸化物材料が工業的に供給されるようになった。

これが契機になって、希土類材料が、磁性材料、光学材料、超伝導材料などに広く応用されるようになった。このような新材料登場のドラマに立ち会えたのは筆者の幸運であった¹⁾。

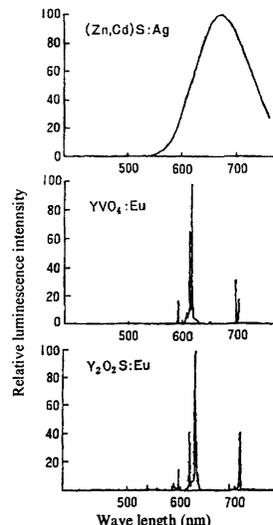


Fig.1 Spectra of red phosphors²⁾

1.平成 19 年 11 月 8 日 本会第 119 回例会において発表

2.独立行政法人 宇宙航空研究開発機構

平成 19 年 7 月 30 日受理

2. コロイドフォトリック結晶プロジェクト³⁾

(3DPC プロジェクト、JAXA)

宇宙開発事業団（現宇宙航空研究開発機構、JAXA）では、国際宇宙ステーションにおける宇宙環境利用研究を推進してきたが、その産業利用を強化するために、先導的応用化研究制度を発足させ、その高機能材料分野を立ち上げるために、「微粒子パターン形成研究会」を呼びかけた（1998）。その下地には、200 nm の粒ぞろいのシリカ粒子が、沈降して結晶格子を形成する無機材質研究所の先駆的研究があった⁴⁾。

この研究会が素地となって、コロイド結晶の光学応用研究の提案が生まれ、研究会、調査研究、フィージビリティスタディ、宇宙実験準備、宇宙実験を行ってきた。この9年間の経過は、固定された研究グループが固定された目標、期限を掲げて、基礎から応用へ進む従来のリニアモデルではなく、入口も出口もオープンにして、宇宙実験を核として、自由度の高いイノベーション⁵⁾を産学官連携で進める試みであった。また従来の公募研究が、流動的に編成される外部評価委員によって、応募した研究を採択不採択でふるい、採択された研究の実行は研究代表者に委ねられるのに対し、応用化研究では、評価者が招聘職員として固定され、研究の推進にも責任を持ち、欠陥技術のメンバー強化、目標の適正化など、研究の実態に応じた段階を踏んだ運用がなされた。

電子が半導体のような原子単位の周期構造において、特有のエネルギーバンド構造をとることが、今日の半導体デバイスの動作原理になっている。これとまったく同様に光は波長と同程度の屈折率の周期構造を持つ媒体において特有のエネルギーバンド構造を形成し、光デバイスを動作でき、このような媒体をフォトリック結晶と呼ぶ。



Fig.2 Periodic structure and wave

半導体：0.1 nm の周期構造

真空管を代替（20世紀）

フォトリック結晶：100 nm の周期構造

回折格子などを代替（21世紀）

フォトリック結晶の理論的研究は近年急速に進み⁶⁾それを応用した多層構造薄膜が半導体製造技術を利用して試作されている。一方粒ぞろいの微粒子を規則配列させたコロイド結晶は、構造形成の面からの研究は進展している⁷⁾が、材料の作製が容易でないために光学応用はあまり進んでいない。コロイド結晶は高価な設備なし

に、大きな3次元構造を形成できる可能性がある。

コロイド結晶の構造研究は盛んであるが、粒子間の相互作用をなくした剛体球モデルで堆積させる方法が主である。この方法では粒子直径のばらつきが積算されて大きな結晶を形成するのは困難である。粒子を帯電させて静電反発力を付与したコロイド分散液は、ある条件では結晶化でき、大きな結晶を形成できる可能性があるが、われわれのグループ以外にはこのような試みを精力的に行っている例は世界的に見当たらない。大きな結晶は、高強度の光応用には必要であり、また多数のチップを量産する中間体としても有用である。今日の半導体技術は、直径30 cmの巨大シリコン単結晶から大量生産されるウエハーを基板として成立している。

コロイド結晶はコロイド粒子の直径が10%以内のバラツキに収まるが必要で、現在その条件を満たす入手可能な材料は、シリカ、ポリスチレン、PMMAしかない。その構造は面心立方と体心立方が主であるが、最近十一の2種の荷電粒子で合成された構造⁸⁾も合成されており、多彩な材料群の潜在が予感される。

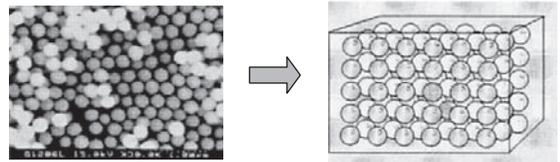


Fig.3 Colloidal crystals

光学応用には高屈折率粒子が望ましく、資源環境技術総合研究所の微粒子希土類蛍光体の研究⁹⁾¹⁰⁾を参考にして、酸化ガドリニウムをコアとし、表面をシリカで被覆した粒ぞろい粒子を開発した（富士化学㈱）。新技術開発は基本になる材料開発から手がけることが、重要と強く認識しての施策である。

コロイド分散液からコロイド結晶を生成するためには、粒子を帯電させる、分散液のイオン濃度を低くする、粒子濃度を高めることなどが必要である。また生成したコロイド結晶を固定するために、溶液をゲル化することも必要になる。ゲル化したコロイド結晶は、弾性変形により可逆的に格子定数を変化させることができるのも、応用上の利点である¹¹⁾。

シリカは等電点（pH 2）以上のpHで負に帯電する。酸性の分散液に一方から塩基を拡散することにより、結晶化する面を移動させて大きな結晶を形成できる¹²⁾。最近、塩基の解離定数の温度変化を利用して、温度拡散による一方コロイド結晶成長にも成功している¹³⁾。

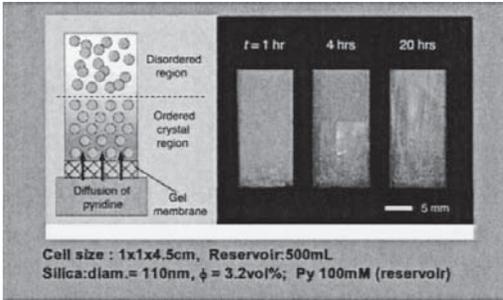


Fig.4 One-directional colloidal crystal growth

このようにして形成したコロイド結晶は、地上実験では重力により上下に粒子濃度の勾配があるために、均質になりにくい。生成した結晶の構造色が下部では緑、上部では赤と、格子定数が変化していることが観察される。微小重力環境では均質になることが期待できるので、下記の搭載装置を試作して宇宙実験を行った。

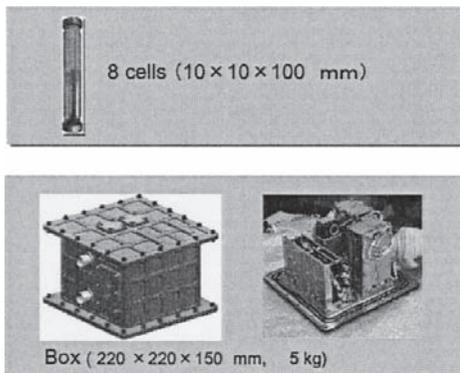


Fig.5 Apparatus for colloidal crystal preparation in space

ロシアプログレス補給船で打ち上げ(2005年12月)、国際宇宙ステーションロシアモジュールに3ヶ月滞在後、ロシア宇宙船ソユーズで回収した。結果は解析中であるが、目標とした均質化は実証されている。現在第2回目の宇宙実験として2007年12月打ち上げを予定して、12本のセル試料を準備中である。

このような自己組織化プロセスは、試料を収納した箱を宇宙空間に滞在させるだけで進行し、大きな装置や宇宙飛行士による複雑な操作を必要としないので、宇宙実験には好適である。

夢は大きいが前例のない実験なので、試行錯誤の連続である。とくに苦労するのが、わずかなイオンの溶出が粒子の静電反発力を低下させて結晶生成を妨害し、また生成した結晶を破壊することである。このための粒子の精製、ゲル材料の加水分解防止、セル材質の選定洗浄など、衆知を集めて取り組んでいる。

大きな結晶をつくるのは至難であり、結晶生成とゲル
Vol. 54, No. 4 (2007)

化プロセスを宇宙実験スケジュールに適合させる苦労もある。地上で沈降する粒子の実験結果から沈降しない宇宙実験条件を定めるのは本来試行錯誤以外にはできない。高価な宇宙実験でも、リスクを恐れず挑戦することを激励し、失敗は成功の母であることを広く理解することが望まれる。

研究グループは、富山大学、名古屋市立大学、名古屋工業大学、富士化学(株)、浜松ホトニクス(株)、物質・材料研究機構、宇宙航空研究開発機構、(株)AESと、地理的にも専門分野でも、多岐にわたっているが、メールによるホットデータの共有、意見交換が毎日頻繁に行われて、毎月の会合で調整しながら、プロジェクトが進行するさまは、

五月雨を集めて早し 最上川 (芭蕉)

の名句を髣髴とさせるシナジীর現実化である。シナジীর重要性は広く叫ばれているが、宇宙実験機会のように、自己都合では動かさないスケジュールが設定されることが、シナジীর推進に極めて有効である。

今後の技術課題として強調したいのは、ナノ粒子の分級技術開発である。粒子直径の差異は沈降速度の差異と相関があるので、フィードバックプロセスをうまく設定すれば、大量に効率よく分級できる可能性がある。

(安部公房の「砂の女」には、「なぎさ」の砂の粒度は世界中どこも等しいというくだりがある。「なぎさ」を装置化できないか?) もしこの技術が完成すれば、多種類のナノ粒子分級が可能になり、さまざまな応用が開かれよう。それは、さきに述べた希土類材料誕生のドラマを再現することでもあり、ひとつの実用化例がその起爆剤になる。

中国の要人が、「水を飲むときには井戸を掘った人々の労苦を忘れてはならない」としばしばいう。心打たれる表現である。いま我々は、次世代のために井戸を掘る労苦を惜しんではならない。



Fig.6 International space station (to be completed in 2010)

非 21 世紀日本発の材料技術として発信したいと念願している。カラーテレビ用赤色蛍光体が一群の豊富な希土類材料を引き出したように、われわれのコロイドフォトニック結晶が、一群のナノ粒子結晶開発の起爆剤になるのは夢だろうか。希土類元素は精製が難しく高価格だといふかっの思い込みは、一つの実用化例で一掃された。粒ぞろいのナノ粒子の合成は難しいという現状は、単なる思い込みではないのか？江戸時代の木版画（浮世絵）職人が、鎖国時代に特殊性を徹底追求することによって、芸術の普遍性に到達した日本文化の伝統を復活させたいものである。

追記：「ことづくり」

宇宙材料フォーラムでは、最近「宇宙ことづくり」を提言した²⁰⁾。定着している「ものづくり」に、社会的広がりを入れ込もうという意図である。

工学流に言えば、「もの」は具体的製品であり、「こと」は製品の持つ機能とその発現を意味する。「ことづくり」には、個々の製品を超えた社会・人間の全体性を取り込まねばならず、普遍性が必要である。「ものづくり」と「ことづくり」を車の両輪とした科学技術立国政策が必要である²¹⁾。

「こと」を「もの」と「こころ」の相互作用により生ずると南方熊楠は考えた。「今の学者はただ個々のこの物、この心について論及するばかりなり。小生は心と物が交わりて生ずる事によりて究め、心界と物界とはいかにして相異に、いかにして相同じところあるかを知りたきなり。」「今日の科学、因果はわかるが、縁が分からぬ。縁は諸因果の錯雑して生ずるものなれば、諸因果総体の一層上の因果を求むるのがわれわれの任なり。」²²⁾

宇宙は時空の尺度を拡大するので、このように一見とらえどころのない「こと」を意識するには格好の場である。本稿がその場づくりの参考になれば幸いである。

謝 辞

コロイドフォトニック結晶宇宙実験プロジェクトは次の方々のさまざまな貢献により、進行しつつあることを付記し、深く感謝します。

伊藤研策（富山大学）、山中淳平、豊玉彰子、恩田佐智子（名古屋市立大学）、瀧口義浩、内山昌一（浜松トニクス㈱）、内田文生、山田浩司、尾崎宙志（富士化学㈱）、澤田勉（物質・材料研究機構）、岡本茂、若松雅樹（名古屋工業大学）、大木芳正、池田俊民、荒金恭一、伊藤明、小林智之、田中哲夫（JAXA）、渡辺勇基、

依田英里香（㈱AES）、大場洋一（インターフェイス技術研究所）、吉富進（日本宇宙フォーラム）、澤岡昭（大同工業大学）、伊勢典夫（京都大学）

References

- 1) T.Kano, H.Yanagida (Eds) , *Rare Earth s - sono bussei to ouyou*,Gihoudoushupan (1980)
- 2) T.Kano, *Kagaku to Kougyou*, **33**, pp56-59 (1980)
- 3) T.Kano, THERMEC'2006, July4-8, 2006 Vancouver, Canada(2006)
- 4) Mukizaishitsukenkyuujou Kenkyuuhokoku , **14**(1977)
- 5) H.Chesbrough, *Open Business Models*, Havard Business School Press. (2006)
- 6) K. Inoue and K.Ohtaka(Eds.), :*Photonoc Cryastals* , Springer, Berlin(2004).
- 7) N. Ise , I.Sogami, *Koubunshibutsurigaku*, Asakura Shotenn (2004)
- 8) M.E.Leunissen et al. *Nature*, **437/8** September (2005)
- 9) Y.Nishisu, M. Kobayashi, SHIGEN-TO-SOZAI, **110**, 191(1995)
- 10) Y.Nishisu, M. Kobayashi, SHIGEN-TO-SOZAI, **115**, 983(1999)
- 11) Y.Iwayama, J.Yamanaka, Y.Takiguchi, M.Takasaka, K.Ito, T.Shinohara, T. Sawada, M. Yonese, *Langmuir*, **19**, no.4, pp977-980(2003)
- 12) J.Yamanaka,M.Murai, Y.Iwayama, M.Yonese, K.Itoh, T.Sawada, *J.Am.Chem.Soc.*, **126**, pp.7156-57(2004)
- 13) A.Toyotama,J.Yamanaka, M.Yonese, T.Sawada, F.Uchida, *J.Amer.Chem. Soc.*, **129**, pp3044-3045(2007)
- 14) T.Kano:Kanagawa Kagakugijutsuakademi, KAST REPORT **13**, pp12-16(1991)
- 15) Phylip and Phylis Morison, Y.and K.Murakami yaku, *Powers of ten* , Nikkei Science sha(1983)
- 16) T.Yourou:Yuinouron , Seidosha(1989)
- 17) W. Heisenberg, K.Yamasaki yaku *Bubun to Zentai*, Misuzu Shobou (1974)
- 18) A..Koestler, M.Tanaka and Y.Yoshioka yaku, *Horon Kakumei*, Kousakusha (1983)
- 19) S. Kato, *Nihon Bunka niokeru Jikan to Kuukan* Iwanami shoten (2007)
- 20) Uchuukotozukuri Forum, Tokyo koenkai (2007.3)
- 21) H. Kimura, *Bungeishunnju*, **1**, pp89-91(2004)
- 22) K.Tsurumi, *Minakata Kumakusu*, Koudansha Gakujutsubunnko, pp 85—88(1981)

地球温暖化あれこれ¹

餌 取 章 男²

Around the Global Warming

Akio ETORI

Public Relations Department, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Abstract

At present, we have various problems about earth environment such as climate change, decrease of forests, lack of water to drink, air pollution, environmental hormones, and lost of ozone layer. Among them, the global warming is thought to be most critical. But the argument on the global warming is scattered from utmost pessimistic to optimistic. Through two typical opinions of pessimistic and optimistic, I would like to consider the real direction of the global warming and how we should cope with it.

Key words: Global warming, IPCC, CO₂, Alternative energy, Green business

1. はじめに

今年はじめ、核戦争の危機を警告する世界終末時計の針が2分すすみ、人類滅亡のときをあらわす深夜0時までの残り時間が5分になった（北朝鮮とイランの核開発問題）。と同時に、核時計でありつづけた終末時計に、はじめて地球温暖化というもう一つの脅威が加わった。「その破壊力は短期的には核爆弾におよばないが、今後30～40年の間には人類の生存環境にとりかえしのつかない被害をおよぼす可能性がある」（BAS 指摘, BAS=ブレイン・オブ・ジ・アトミック・サイエンティスト, 米科学誌, 核時計の管理者）。折しも、世界では異常気象が猛威をふるっている。温暖化の危機を訴え、世界を行脚するアル・ゴア元米副大統領のドキュメンタリー映画「不都合な真実」と同名書籍とともにベストセラーとなった。一つ一つの異常気象を地球温暖化と結びつける科学的根拠はほとんどない。しかし、多くの科学者は地球温暖化が予想以上のスピードで加速していると危機感を強めている。最新の科学的調査によれば、破局をあらわす深夜0時は地球の平均気温が産業革命（1750年）以前に比べて2度（現在と比べて1.3度）上昇した時点と設定できる。核の終末時計にならえば、温暖化時計の警

戒時間帯は23時45分以降の15分間となる。45分は危機のはじまりであり、18～19世紀の産業革命か、あるいはCO₂の排出量が急増しはじめた1960年以降か、温暖化問題が認識されはじめた80年代末とも考えられる。人類はいま、大幅なCO₂排出量の削減—EUの調査によれば、2050年までに90年の水準の半分にする必要がある—により針を戻せるか、後手にまわって深夜へ突きすすむかの分岐点にある。破局までに残された時間はあと7分だ。EUレポートによれば「いったん2度を超えれば、食料生産や水資源、生態系への影響は深刻さを増し、元に戻せなくなる。破壊的な事態を生じかねない。」

- 南米の熱帯雨林は立ち枯れる。
- ロシア北部のツンドラが干上がる。
- 1度上昇の場合と比べ、アフリカのマラリア感染者は4000～6000万人増加。
- デング熱や食糧不足による栄養失調増。
- 熱波が2年ごとの頻度で。
- 海面上昇、洪水、干ばつで家を失う人2億。

IPCCによると、今世紀末までに3度上昇の可能性もとても高い。過去10年の間に世界の動植物は年間600メートルのペースで南北両極に移動している。花が咲いたり産卵する時季も、10年ごとに数日のペースで早まっている。温暖化に対する適応だ。

このように、地球温暖化はまちがいでなく私たちのまわ

1. 平成19年11月8日 本会第119回例会において発表
2. 独立行政法人 産業技術総合研究所 広報部
平成19年8月10日受理

りにおしよせているが、それが人類にいかなる影響を与えるかという議論になると、その振幅が極めて大きく、強烈な悲観論から、のどかな楽観論まで、さまざまな考え方が存在する。ここでは、その二つの典型的な例を紹介しよう。

2. 悲観論者の代表 ジェイムズ・ラブロック

『ガイア伝説』で有名なジェイムズ・ラブロックは、2005年に刊行された"The Revenge of Gaia"で地球の危機を訴え、その根拠をくわしく述べている。ラブロックは1919年7月26日英国生まれ、現在88才だ。英国国立医学研究所、米国ハーバード大学医学部、英国オックスフォード大学医学部などで研究員および教授を歴任した。1957年、電子捕獲検出器の開発に成功。この装置によって、フロンや、その他地球環境に影響を及ぼす微量成分に関する分析が急速に進展した。1960年、NASAの火星生物探査計画に招聘され、その過程で地球大気の特異性を認識し、「生物圏が地球気候と大気組成を、生物が生きていくうえで最適な状態に調整・維持している」という『ガイア伝説』を提唱するに至る。この説はその後更に発展し、現在では、地球そのものが一つの大きな生命体だと考えている。ラブロックは現在、英国の片田舎クームミルに在住、12万㎡の広大な敷地に研究室もおく独立自営の科学者である。

ラブロックがガイアをはじめて世に問うたのは1971年8月、大気科学に関するゴードン会議においてである。「大気を通してみるガイア」という15分のディナースピーチは、保守的な科学者からの反対を受けた。特に、地球科学、生物学分野からの反対は強烈であった。そのため、学術論文としての発表はほとんど不可能であった。1975年、ニューサイエンティスト誌に「ガイアの探求」というラブロックの説に共鳴する投稿があり、次第にラブロックに注目があつまるようになった。その結果、1979年、オックスフォード大学出版局から「地球生命圏—ガイアの科学」が刊行され、世界的な大反響を呼ぶことになる。ただし、その反響は一般大衆、哲学者、宗教家からが圧倒的で、科学者からはその3分の1程度だった。当時はニューエイジ運動が盛んなときで、ガイア仮説はそうした運動家の心をくすぐったらしい。アニミズム、フェミニズム、ネオ・ペイガニズム（新異教主義）などの信仰対象として、大いにもてはやされたのである。それが科学者たちには、余計に違和感をもたせたのかも知れない。

ところで、ガイアの名付け親はノーベル文学賞作家のウィリアム・ゴールディングだといっているだろう。1960年代末ラブロックとの散歩中に彼の考えを聞いた

ゴールディングがガイアと名づけたらとアドバイスしたという。1988年3月、科学界のわだかまりに決着をつけるため、アメリカ地球物理学連合主催の「ガイア理論についてのチャップマン会議」がサンディエゴで開催された。会議には、地質学、気象学、海洋学、地球化学、地球物理学、生物学、宇宙物理学、数学、情報学などの分野から150人の科学者があつまり、5日間にわたって議論が行なわれた。まず、仮説の提案者によるキーノートスピーチがはじまった。ジェイムズ・ラブロックの「地球生理学—ガイアの科学」とリン・マルグリスの「生物とガイア」である。しかし会場の科学者は極めて冷淡だった。3匹のサルのように“見ようとせず、聴こうとせず、語ろうとさえしない”。そして、若い理論生態学者が否定論を唱えたと、会場の空気はこの否定論が支配的になってしまった。こうして、会議自体はガイアに否定的だったにもかかわらず、ガイアの主張するホリスティックなアプローチの意義は支持された。特に、生物相と無生物が形作る環境との間に、継ぎ目のない連続性が存在するという主張は、大多数の科学者が認めざるを得なかった。かつて論文掲載を拒否しているネイチャーも、「この会議でガイアは破壊的勝利を収めた」というレポートをのせた。1994、1996、1999年の3回にわたってオックスフォードでガイア学会が開かれ、『ガイア仮説』は科学としての市民権を獲得した。2001年、国際地球研究計画に関わるアムステルダム会議は、次のような共同宣言を出した。

“地球システムは物理・化学・生物・人間という構成要素から成る単独の自己調節システムとして機能している。構成要素間の相互作用とフィードバックは複雑多様なスケールで時間的空間的に変動する“

ラブロックの3つの顔

① 発明家

ECD（電子捕獲検出器）の開発。1兆分の1の有害物質を捉えることができる。南極から北の果てまで地球をあまねく巡り、世界がいかに有害物質で汚染されているかを示した。ベンチャー実業家のもとで徒弟生活を経験したこともあり、職人魂を持った創意溢れる技術者である。

② 地球生理学者

「地球生理学」を創設。生物学、地質学、気象学などの諸分野をシームレスに結合した。還元主義万能の科学界にホリスティックな視点を復活させた。

③ 地球の臨床医

工学・科学をおさめ、さらに医学をマスターする。

地球の臨床医としてガイアの健康維持につとめる。
“ガイアの復讐”は地球の壮大な診断書である。

心情的な技術批判、産業批判を戒め、リスクとベネフィットの厳正な秤を通して、ハイテクや巨大技術の効用を評価し直し、積極的に活用しようと提案する。自然を無条件に賛美し、文明の利器をいわれもなく貶め排除しようとする反文明運動には警戒の目を光らせ、2000年も前にパラケルススが説いた「毒も薬も量次第」の原則を忘れ、環境浄化の名のもと、果てしもなく有害物質を仕立て上げる現代の魔女狩りには、危機感を募らせる。

文明社会にとって、もはや「持続的な発展」のスローガンに酔いしれる余裕は残されていない。太陽はすでに老境に入り、地球の自己調整能力にも衰えが目立ち始めた。人類の過激な文明活動による悪影響がその衰えに輪をかけている。それならば肉体の持続的撤退を価値創造へと転換する人類の知恵を、ガイアの領域にまで拡大して、新しい文明・文化の価値基準、行動規範を構築することはできないものだろうか。

”人間は部族主義の肉食動物 (E.O.ウィルソン)。したがって重大な危機に気付くのが遅い。”

「原子力は確実に安全で信頼できるエネルギー源として使える。命にかかわるほどの耐えがたい猛暑や、世界のあらゆる沿岸都市を脅かす海面上昇に比べれば、原子力のもたらす脅威など取るに足らないものだ。再生可能エネルギーは聞こえはよいが、今のところ効率が悪く高くつく。将来性はあるものの、非現実的なエネルギーを試している時間が今はない。文明は切迫した危機状態にあり、今こそ原子力を利用するときだ。省エネはいつでもできる限りのことはやらねばならないが、これはダイエットと同じで、言うは易く行うは難しという気がしてならない。核分裂エネルギーを病氣療養中の地球が長期間使用するための万能薬と考えているわけではないし、これさえあればすべての問題が解決すると考えているわけでもない。私は原子力を今使用すべき唯一の特効薬として考えている。」

ラブロックは1979年以来原子力エネルギーの利用を主張しており、最初積極的に参画し、指導理念の確立にも貢献した緑の党とも、この点から袂を分つことになった。尚、パトリック・ムーアを原子力支持に変えたのもラブロックである。「クリーンで永続的な核融合エネルギーと再生可能エネルギーが有効利用できるようになるまで、核分裂エネルギーは文明の光を燃え続けさせるために、安定した確実な電力源を維持する役割を果たしてくれるのだ。われわれは恐怖を克服し、原子力が地球

に最小限の変化しかもたらさない折紙つきのエネルギーだという事実を受け入れなければならない。その安全性については、他の主要なエネルギー源のなかで最高だということが実績によって証明されている。もし化学工業や生化学工業によってCO₂とH₂OとN₂から食糧を合成することができるなら、それを実行して地球を休ませてやろう。化学物質や放射線によってガンになるなどと心を悩ますのはやめよう。われわれの3分の1はガンで死ぬ。主原因は空気中に大量に存在する発ガン物質、すなわちO₂を吸い込むせいだ。そんなことより、地球温暖化という現実の危険を回避するほうに専心しなければ…。」

3. 楽観論者の代表 リチャード・リンゼン

気象学者でMIT教授のリチャード・リンゼンは、地球の気候が変動するのは当たり前、過熱ぎみの危機論こそスクールダウンが必要だと主張する。過去1世紀半の間に地球の温暖化が進み、温室効果ガスの排出がある程度それに関係していることはほぼまちがいない。そこで、最近は多くの人びとが、地球は危機に直面しているので、緊急の対策が必要だと主張している。しかし、この主張には科学的根拠が欠けている。温暖化が破局的事態に直結することを示す有力な証拠はない。現時点ではっきりいえるのは、気候は変動するという点だけだ。地球の年間平均気温は、常に10分の数度上下している。平均気温が一定期間変わらないほうが珍しい。現在の温暖化危機論は、二つの誤った前提にもとづいている。私たちは「完璧な世界」に住んでいるという思い込み。もう一つは、2040年の温暖化予測の方が来週の天気予報より信頼できるという誤解だ。

気候変動に関する警告の大部分は、「何が正常か」を無視した議論だ。たとえば、異常気象が「規則的」に増加している証拠はないと、米ハリケーン研究所、世界気象機関、IPCCの研究者はいう。気象理論上は温暖化によって熱帯を除く世界は気候変動が小さくなる。これは望ましいことではないか。ほかにも多くの点で温暖化の悪影響は誇張されている。たとえば海面上昇だ。短期の変動を無視すれば、ここ数世紀間の海面上昇率は比較的安定している(年間2~3ミリ未満)。20世紀前半のほうが後半より上昇率が大きかったという証拠さえある。総じて温暖化が海面上昇に及ぼす影響は、地殻変動などその他の要因より小さい。地球の危機を強調する研究の多くは、本質的に信頼できない気候モデルを長期予測の前提に使っている。大気中のCO₂が増えれば増えるほど、CO₂の温度への影響が減ることは、ほとんど考慮されていない。たとえ、排出ガスだけが原因で近年の気温上昇

が起きているとしても（これも疑わしい前提だが）、将来の気温上昇は排出ガスの増加ほど急激ではないだろう。

温暖化危機論は一つの謎から目をそらしている。なぜ現在の気温がそれほど高くないかだ。さまざまな気候モデルは、大気中のCO₂が2倍になると、世界の平均気温は1.5~4.5度上昇すると予測している。ここで重要なのは「放射強制力」つまり、エネルギーの放射が温暖化に及ぼす影響力だ。放射強制力の値はすでにCO₂が2倍になった場合の約4分の3に達している。だが平均気温は、産業革命以来およそ0.6度しか上昇しておらず、変化も一律ではない。温暖化は主に1919~40年と76~98年に進み、それ以外の期間は逆に寒冷化している。研究者はこうした矛盾を説明できていない。多くの研究者は76年以前の時期の気温変化について、火山活動や太陽の影響に関するわずかなデータにもとづく推測であり、シミュレーションの頻度に限界があると主張する。一方、76~98年の約0.4度の温暖化については、こうした自然要因による放射強制力では説明できないという。ほかに説明のしようがないから、原因は温室効果ガスだというわけだ。これでは証拠の代わりにはならないし、シミュレーションは主張の根拠にならない。さらに気候モデルは、エルニーニョや季節内振動といった短期の気候変動を軽視しすぎている。そうした現象からは、気候システムは外的要因がなくても大きく変動し、それが何年も、何世紀も続く可能性がうかがえる。

CO₂の増加が破局を招くといいはることに、意味があるのだろうか。むしろ温暖化ペースはおだやかで、全体としてはメリットのほうが大きいとは考えられないのか。20世紀後半から温暖化しているインドは、農業生産が大幅に増えている。マラリアなどの伝染病は、気温よりも貧困や保健政策（DDTの使用中止など）の影響が大きい。一般的には、温暖化より寒冷化のほうが危険で不快な現象だ。最後に、これまでの排出ガス削減対策はすでにマイナスの結果を生み出している。たとえば、エタノールの使用を奨励した結果、メキシコではトウモロコシの価格高騰が激しい抗議行動を招き、東南アジアでは森林や生態系の破壊につながっている。排出ガス規制は物価上昇に加え、排出権取引がらみの腐敗にもつながるおそれがある。（01年末に破綻した米エンロンは、排出権取引をにらんで京都議定書支持のロビー活動に力を入れていた）。環境保護派が主張する「解決策」は、彼らがいいう「問題」以上に破局の原因になる可能性が大きい。

温暖化対策の必要性を正当化するだけの証拠は、まだみつかっていない

—ロジャー・レベ

4. 気候変動とともに生きる

気候変動は北の豊かな国々に有利で、貧しい南に不利だ。いまから数十年したら、グリーンランドは名前どおりの緑の地に、シベリアのツンドラ地帯は草原に変わるかも知れない。一方、赤道付近の農業は猛暑と干ばつで壊滅状態になるだろう。ブラジルの研究では、アマゾンの熱帯雨林が2100年には野原になっている可能性もある。サハラ砂漠の面積はさらに広がるだろう。地球の気温上昇はさげられない。しかしそれが恩恵をもたらす場合もある。被害が大きいのは暑さよりも寒さのほうだ。スタンフォード大学フーパー研究所のトマス・ゲール・ムーアによると2.5度上昇すれば、全米で年間4万人の命が救われるという。北極圏でも、厚い氷におおわれた資源を採掘できるようになるだろう。コロンビア大学の研究では、異常気象で打撃を受ける最上位国はシエラレオネとバングラデシュ（干ばつや疫病発生のため）。最下位国はノルウェーとフィンランドだ（農業や観光業が活性化するので、かえってプラスになる）。

Table 1 Ranking of adaptability for climate change (Adaptability is proportionate to country economic conditions.)

Top 10 countries	Worst 10 countries
1. Norway	1. Sierra Leone
2. Finland	2. Bangladesh
3. Sweden	3. Somalia
4. Switzerland	4. Mozambique
5. Canada	5. Ethiopia
6. Japan	6. Rwanda
7. Austria	7. Benin
8. France	8. Yemen
9. U.S.A	9. Angola
10. Denmark	10. Kenya

Another rankings : China 52nd, India 74th, Holland 14th, Israel 25th, Costa Rica 37th (commitment for environmental problems), Saudi Arabia 49th (no-reflection of economic conditions, small investment for the environmental adaptation) (\$12,000/person), Kyrgyz 47th(\$1,700/person)

IPCCの要請により、米コロンビア大学国際地球科学情報ネットワークセンター(CIESIN)は、海岸線の長さや熱帯性低気圧の影響の度合いなどを考慮に入れ、気候変動への適応力を判定する手法を考案、世界100か国を対象とするランキングを作成。CO₂排出量の多い国々が温暖化の影響を受けにくいという皮肉な事実。先進国は、温暖化の影響を受けにくい立場に身をおきながら、気候変動の影響に対してより脆弱

な国に代替エネルギー開発といった温暖化対策への投資を求めている。

5. 温暖化に強いビジネス

21世紀末まで温暖化が続けば、世界のGDPの合計が最大20%減少する（英、スターン報告）、という見通しだが、すでに政府や企業は温暖化に適応しはじめている。

- ・ SUVへの依存度が大きい自動車会社
- ・ 石油会社
- ・ ウール主力の衣料品会社

…負け組

- ・ 海水淡水化
- ・ 干ばつ対策の技術
- ・ ハイブリッド車が得意な自動車会社
- ・ 異常気象に強い建材をつくる企業

…勝ち組

農業では、かつて寒冷地だったシベリアやカナダの北部、アラスカで本格的な農業生産が可能になりはじめている。

- ・ エアバス380→ドリームライナー（エネルギー効率）
- ・ 水処理産業
- ・ ワクチン産業
- ・ 風力発電、太陽光発電、燃料電池

賢い企業やビジネスマンは、警鐘が鳴るとすぐに反応して行動する。

グリーンな企業トップ10

投資リサーチ会社イノベストの調査チームが個々の企業につき、ビジネス戦略に環境問題への配慮をどれだけ組み込んでいるか、業績面で同業他社をどの程度上まわっているかを評価。環境問題や社会問題、コーポレートガバナンスのリスク管理がとくに優れた企業だ。

① カナダ・ロイヤル銀行

融資先の環境問題へのとりくみをチェック。風力発電、バイオマス燃料、バイオガスなどのプロジェクトへの融資、助言。

② ラファルジュ

フランスの建設資材メーカー。主力製品はセメントと石膏。風力発電やバイオマス燃料を利用。温室効果ガスの排出削減に貢献。

③ グルーボ・フェロビアル

スペインの建設会社。温室効果ガスを6.5%削減し、廃棄土砂を半分に減らしている。05年に廃棄物27万トンのリサイクル。

④ ウェストパック銀行

オーストラリア。エネルギー効率の悪いビルを売却

し、再生可能なエネルギーに切りかえることにより温室効果ガスを10%近く削減。

⑤ イェル・グループ

イギリスの電話帳会社。多くのリサイクル関連のとりくみで環境分野の賞を受賞。

⑥ デンソー

日本最大手の自動車部品メーカー。廃棄時に問題となる鉛や水銀、六価クロムといった有害物質を使わない製品づくりをめざす。

⑦ 凸版印刷

日本の大手印刷会社。印刷業界は有害な化学物質を大量に使うが、そうした物質の使用削減に努力。

⑧ ヒューレット・パカード

アメリカのIT企業大手。古いパソコンやプリンターといったハイテク廃棄物のリサイクルを主導。工場からの廃棄物を1年間で5%削減することに成功。

⑨ アディダス

ドイツのスポーツ用品大手。微生物によって分解されないプラスチックを自社製品に使うことを中止。同じく難分解性の揮発性有機化合物の使用低減に努力。

⑩ ベスタス・ウィンド・システムズ

オランダの風力タービン・メーカー。製造プロセスが環境に及ぼす影響を工程ごとに追跡調査。

未来のパカンス

ヨーロッパ観光の中心が地中海地方から移動する。

北欧、イギリス、バルト3国。

バルス（エストニア）

パラंगा（リトアニア）

ヒマラヤに高級スキー場

アルプスは方向変換（複合娯楽施設）

アフリカ、カリブ海、インド

～海岸線を失いかけている（ツバル水没）

サンゴ礁の減少

他に…

☆ 農業の転換

☆ 北極の氷

☆ 水戦争

☆ エコな街…。世界のいくつかの街が、これに該当する。

6. おわりに

こうみても、やはり個々ないしはグループの温暖化に対する意識が高く、それに対応しようという積極的な努力が、最大の効果を生むようだ。但し、地球温暖化問題は南北の経済格差問題にほぼ比例することに留意

する必要がある。

私たち人類は、暑いアフリカで生まれながら、寒冷の地をもとめつづけて移動する放浪の民なのであろうか。

References

- Newton, 8, (2007)
- Newsweek, 2.7, (2007)
- Newsweek, 5.23, (2007)
- A. Gore: An Inconvenient Truth, Random House Kodansha (Tokyo)
- J. Lovelock: The Revenge of Gaia
- Nikkei Science, 12, (2006)