

レアアース危機は本当に去ったのか¹

高木 哲一²

Was the rare-earth crisis really over?

Tetsuichi Takagi

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

Abstract

The price of rare-earths (RE) soared extremely during 2009 to the mid 2011 due to the export restriction of China, but the price has been sharply delined toward 2013. During the soaring price, the Japanese industries using RE have made hard efforts to reduce their consumption and replace them by alternative materials. Some non-China light RE mines such as the Mt. Pass and Mt. Weld become ready to operate. However, few heavy RE mines other than the southern China are promised to operate yet. Therefore, the RE crisis has still continued regarding the supply of heavy RE.

Keywords: Rare-earths, China, Mine development, Resource saving, Alternative material

1. はじめに

20 世紀後半から長らく安定していた非鉄金属資源の価格が、新興工業国の台頭と共に 2004 年頃から顕著に上昇を始めた (Fig. 1)¹⁾。レアアースの価格は、中国が輸出枠を設定したことから 2009 年頃から急激に上昇し、2010 年 9 月 7 日の尖閣列島漁船衝突事件をきっかけとした中国のレアアース輸出規制により価格がさらに高騰、2011 年 8 月に史上最高値を記録した。この期間、日本の産業界は深刻なレアアース供給不足に見舞われ、レアアース危機の到来と言われた。しかし、その後レアアース価格は急速に下落し、軽レアアースはほぼ高騰前の価格水準に戻った。重レアアースは、高騰前に比べれば高止まりしているものの、最高値の 3 分の 1 程度まで値下がりし、需給の逼迫感は大幅に緩和された (Fig. 2)²⁾。このような状況から、産業界ではレアアース危機は去ったと言われるようになった。本稿では、レアアース資源の今後について、どのようなリスク要因が存在するのか検討してみたい。

なお、国内外の産業界の動きや資源開発状況などは、統

計的な情報として公になるまで時間がかかり、公開されない場合も多いので、本稿での記述は筆者が海外鉱山で直接取材したり関連業界や新聞等から個人的に入手した情報によるものが多いことをご了解いただきたい。

2. レアアース価格急落の原因

(1) 使用量削減・代替材料の普及

レアアースの高騰によって最初に困難に直面したのは酸化セリウムを研磨剤に多用するガラス産業である。この産業では、これまで 1 回の使用で廃棄してきた酸化セリウム系研磨剤を再利用し、複数回使用することにより使用量を削減した。また、研磨パッドを工夫することにより酸化ジルコニウム系研磨剤への代替が進んだ。次に、強力なネオジム系磁石を必要とする高性能モーターの関連産業 (自動車、家電など) もレアアース高騰により深刻な打撃を受けた。そこで、実用性能に問題がない範囲で、モーター用ネオジム系磁石のフェライト磁石 / サマリウム系磁石や非永久磁石への転換が進められた³⁾。また、レアアース磁石の耐熱性向上のために添加されるディスプロシウムが最も高騰したことから、磁石結晶粒子の微細化等の技術により、性能を落とさずにディスプロシウム使用量を大幅に減らす技術も開発された⁴⁾。これらの努力により、2012 年のレアアース輸入量は前年比でほぼ

1. 平成 25 年 10 月 24 日 本会第 131 回例会において発表

2. (独)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門

平成 25 年 7 月 24 日受理

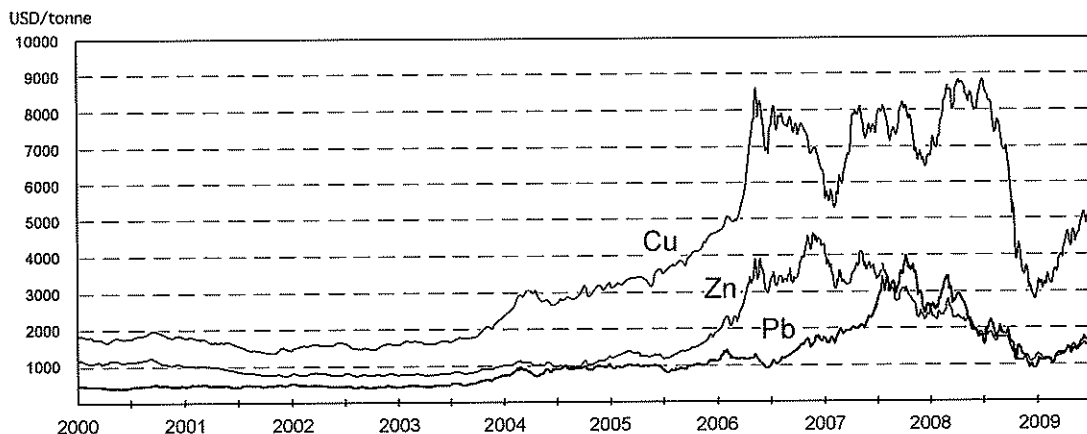


Fig. 1 Transition of import prices of base metals¹⁾.

半減し(Fig. 3)、価格下落の一因となった。国内企業のレアアース在庫調整などの影響もあり、輸入量が使用量をそのまま反映しているとは言えないが、これほどの劇的なレアアース使用量低減技術の普及は、政府の強力な資金的支援と日本の技術開発力が融合した見事な成功例と言えよう。

(2) 中国のレアアース在庫調整

中国では、2011年のレアアース価格高騰による輸出量の急減により、国内に大量のレアアース在庫を抱えるようになった。2012年後半には、中国レアアース生産の最大手である内モンゴル包鋼稀土が4ヶ月間操業を停止した⁵⁾。しかし、レアアースの在庫処分を急ぐ企業が多く、価格下落に歯止めがかからない状況で、2013年7月から再度操業を停止している。イオン吸着鉱の主産地である中国南部(江西省など)

でもレアアースは供給過剰な状況にある。この地域では、レアアース採掘に伴う環境問題も深刻なため、地方自治体が不正採掘の厳しい取り締まりを実施し、同時に生産能力の調整を行っている⁶⁾。レアアースの価格下落は、2013年6月頃から鈍化している。中国では、価格が採掘コストを既に下回っているとも言われており、現在が底値との観測も強い。

3. 中国外レアアース鉱山開発の動き

(1) 新規開発の停滞

1990年代前半までレアアースの主要生産国は米国(マウンテンパス鉱山、後述)であったが、その後、中国の圧倒的な価格攻勢により中国産レアアースが市場を席巻した。しかし、2009年来のレアアース高騰により、再び中国外のレアアース鉱山開発が採算ベースに乗る可能性が出てきたため、世界各地でレアアース鉱床の探査が行われるようになった。そのプロジェクト数は、2011年時点で100件は下回らなかったと予想される。Fig. 4に、世界の主要なレアアース探鉱・開発プロジェクトを示す。この時期、鉱床探査を専門とする中小の企業、いわゆる資源ジュニア企業によるレアアース探鉱ブームは、さながらバブル経済の様相を呈し、良好な探査結果のみで株価が上昇した。ところが、2011年後半からのレアアース価格急落により様相は一変し、レアアース探鉱プロジェクトの多くは資金不足により立ち往生または遅延を余儀なくされている。また、レアアース探鉱ブームを契機に、一部の第三世界(ベトナムやモンゴルなど)では資源権益確保や環境保護などを理由に先進国による自国の鉱山開発を規制する動きがあり、新規レアアース鉱山開発を遅滞させる原因の1つとなっている。

(2) マウンテンパス鉱山

中国外のレアアース供給元として期待される鉱山の筆頭が、米国マウンテンパス鉱山である。同鉱山はカリフォルニア

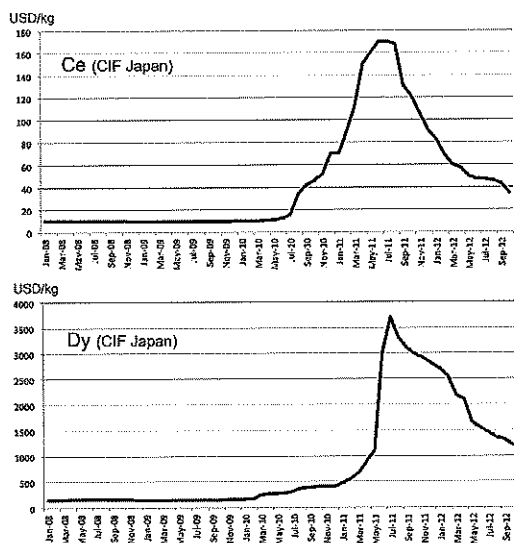


Fig. 2 Transition of prices of Ce and Dy metals (Costs, Insurance and Freight, Japan)⁷⁾.

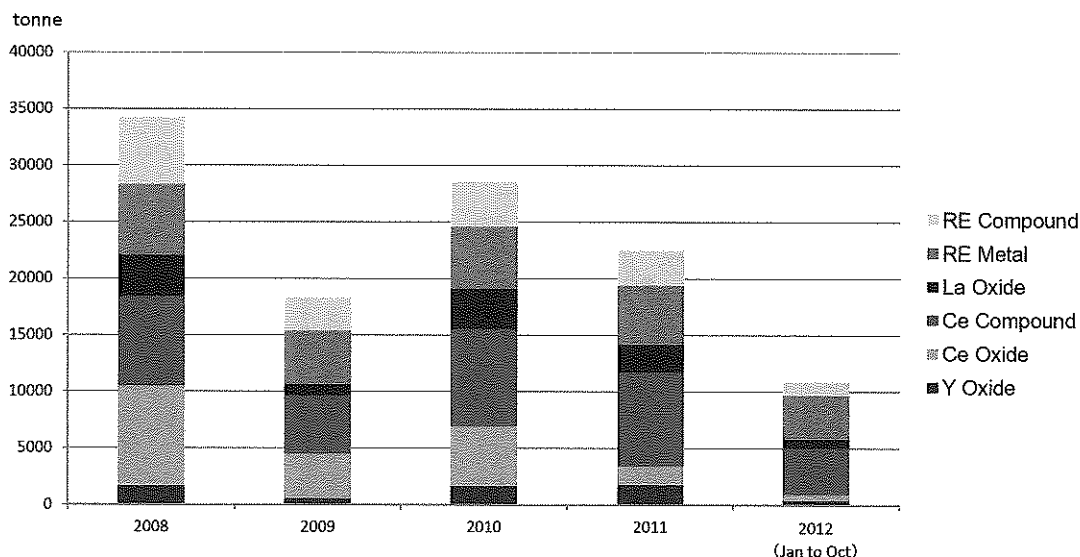


Fig. 3 Annual imports of a variety of rare-earths (RE) materials²⁾.

州東部にあり、2002年に一旦生産を中止したが、2009年に再開した。同鉱山を稼行するモリコープ社は世界最大のレアアース企業であり、2011年エストニアのシルメット社（レアアース加工）の経営権を取得、同年アリゾナ州のサントクアメリカ社（レアアース合金）を買収、2012年にカナダのネオマテリアル・テクノロジー社（レアアース加工製造）を買収するなど、レアアース価格高騰を背景に拡大路線を展開してきた。2011年の生産量は酸化物換算で3,516トンと公表されている。しかし、同鉱山産鉱石は軽レアアースの割合が非常に高いことから、2011年後半以降、レアアース需要減少・価格急落の影響を強く受けて業績が悪化している。同社は現在、プロジェクト・フェニックスと称するマウンテンパス鉱山の増産・設備近代化計画⁸⁾や、日本企業との磁石合金用レアアースの供給契約締結など積極的な計画を推進しており、業績の回復が注目されている。

(3) マウントウェルド鉱山

中国外のレアアース供給元として次に期待される鉱山が豪州ライナス社が稼行するマウントウェルド鉱山である。同鉱山は西オーストラリアにあるが、鉱石はマレーシアのクエンタンに建設された分離精製工場に運ばれ製品化される⁹⁾。同工場の操業にあたっては、環境問題への懸念から地元住民が反対運動を展開、マレーシア政府の許認可に時間がかかり、当初2011年中頃を予定していた操業開始が2012年12月まで遅延した¹⁰⁾。ライナス社と日本企業の間には長期供給契約（酸化物換算8,500トン／年）が締結されており、同鉱山の生産開始はレアアースに関する脱中国の切り札と考えられている。しかし、同鉱山も主体は軽レアアースであり、現在の市場は新たな供給元を受け入れるには厳しい状況にあ

る。したがって、本格的な操業はレアアースの需要回復を待ってからと予測されている。

(4) その他の鉱山

カザフスタンでは、国営カザトブロム社と日本企業の合弁によるレアアース分離精製工場が2012年11月から操業を開始した¹¹⁾。このレアアースは、ウラン鉱石の製錬残渣から回収するもので、重レアアースに富む特徴があり、年間1,500トンの生産を予定している。インドでは、政府系企業のインディアン・レアアースからの原料供給を受けて、日本企業がレアアース分離精製工場を建設・操業¹²⁾、2013年中には日本向け製品を出荷する予定である。このほか、ロシア西部のロボゼロ鉱山が小規模にレアアース鉱石を生産し、エストニアやカザフスタンの分離精製工場に出荷している。現在、上記以外にも、近い将来レアアース生産が確実な鉱山もしくは鉱山開発計画は知られていない。

4. レアアース資源開発の諸問題

(1) 中国のレアアース供給能力

中国のレアアース資源量は膨大なもので、これから中国産レアアースが再び潤沢に供給されれば、中国外レアアース鉱山の開発は困難あるいは当面不要という見方がある。しかし、中国のレアアース鉱床の地質には不明な点が多く、外国人研究者の立ち入りも許可されていないため、その供給能力はよくわかっていない。内モンゴル自治区のバイヤンオボ鉱山と四川省マオニュービン鉱山で産する軽レアアースは、鉱床の規模が大きいことから当面枯渇の心配はないと予想される。しかし、中国南部のイオン吸着鉱は、花崗岩風化殻

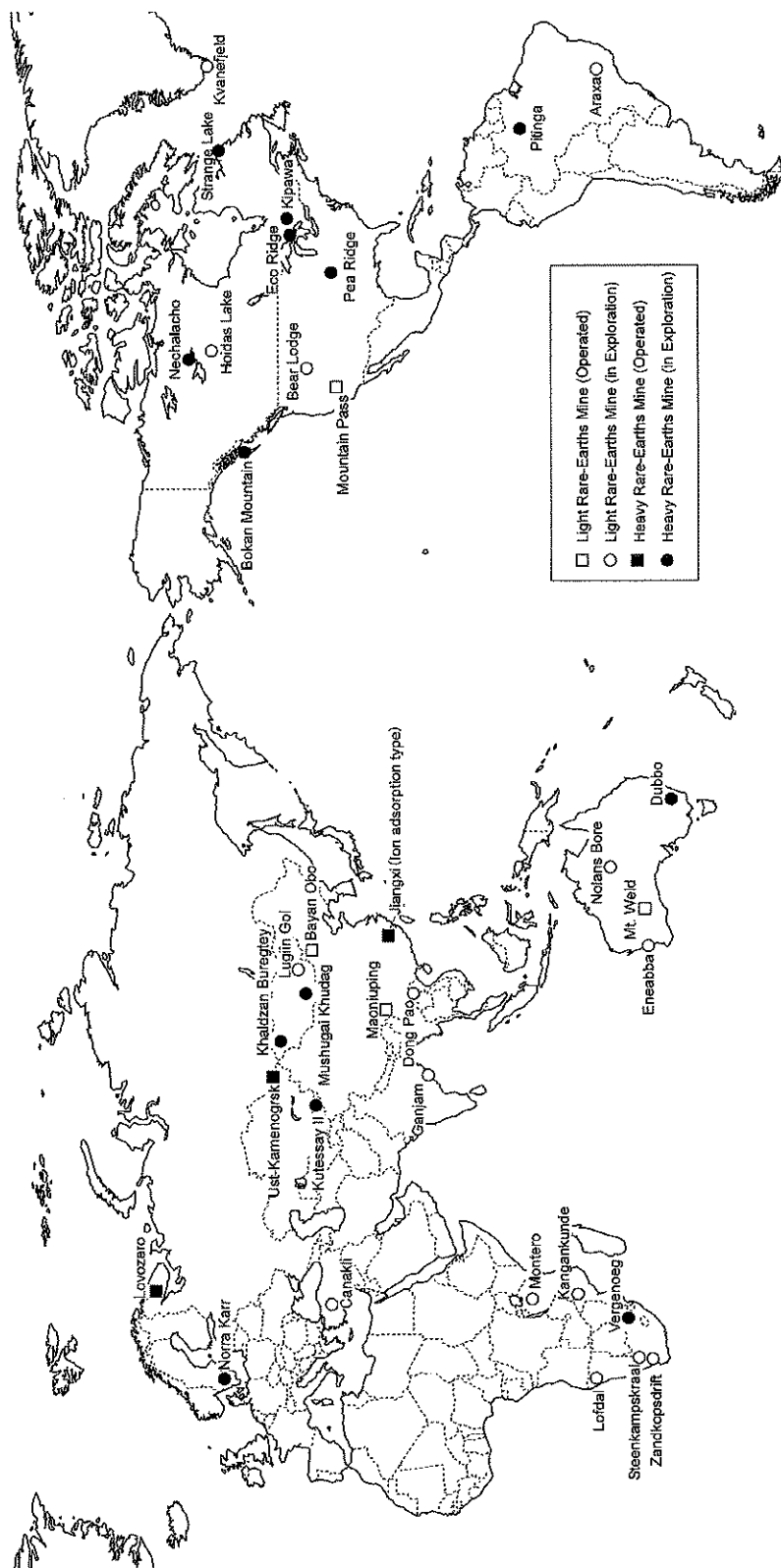


Fig. 4 Distribution of major rare-earths mining and exploration projects in the world, based on the literature⁷⁾ and this study.

からレアアースを抽出することから生産には広い面積が必要であり、可採鉱量には自ずと限界がある。これまでの採掘による環境問題も深刻であり、採掘範囲をむやみに広げることがないように、中国当局が厳しく規制・監視をしている⁹⁾。したがって、今後、中国南部のレアアース供給能力はあまり期待できない。一部では、近い将来、重レアアースに関して中国は内需を賄うこともできなくなり、輸入国になるという観測もある。

前章で述べた中国外のレアアース鉱山は、カザフスタンを除き全て軽レアアースが主体である。重レアアース(テルビウム、ディスプロシウムなど)は、依然として中国南部のイオン吸着鉱がほぼ独占的な供給元となっている。一方、ネオジム系磁石は最強の永久磁石として確かな需要があり、最新技術をもってしてもディスプロシウム添加量をゼロにすることはできない。今後、ハイブリッド自動車の世界的普及などで重レアアースの需要が本格的に回復した場合、重レアアースが再び供給不足に陥る可能性は否定できず、この問題が潜在的なリスク要因となっている。

(2) 重レアアース資源開発の方向性

現在のレアアース市況では、重レアアースと言えども大規模な開発投資はリスクが大きい。既存の軽レアアース鉱山から重レアアースを生産するには、大量に鉱石を採掘した上で、余剰の軽レアアースを廃棄するという非効率な生産を迫られる。そこでレアアース危機以降、鉱床は小規模だが重レアアース品位が高く、短期間で開発に至る鉱山が投資先として注目されている。カナダ・ケベック州キバワ鉱山がその例である¹³⁾。これは、たとえ鉱山の寿命が短くても、中国以外からの重レアアース供給という事実を作ることにより、市場に安心感を与える効果があること、鉱山設備をコンパクトにすることで投資リスクを最小限にできること、などが理由である。そのほか、カザフスタンと同様、他鉱種の副産物としての重レアアース生産も各地で試みられている(豪州ダガ鉱山、ブラジル・ピティンガ鉱山など)。特に選鉱残渣からのレアアース回収は、採掘コストが極めて安く、環境負荷が小さいことから有利な条件で開発できる。しかし、これら新規鉱山の操業開始は早くても2015年あるいはそれ以降であろう。

(3) 放射性物質の問題

レアアース生産において、ほぼ不可避免的に産出する物質がトリウムなどの放射性物質である。前述のライナス社のマレーシア工場での住民反対運動は、レアアース分離精製工程における放射性物質の扱いに不安があることが原因である。現在、この放射性物質を政府が責任を持って保管する意志を持つ鉱山国は、インド、南アフリカ、ブラジルの3カ国のみである。しかし、日本ではこの問題に対する明確なポリシーが定まっていないため、もしレアアース消費国の責任として鉱山国から放射性物質の引き取りを求められた場合、対応に苦慮することになる。なぜなら、日本は放射性廃棄物に対

する規制や国民感情が世界で最も厳しい国だからである。この問題も、今後のリスク要因の1つである。

5. レアアース危機は本当に去ったのか

前章までに述べたように、軽レアアースは中国外の主力鉱山が稼行を開始したこと、レアアース関連企業が上流から下流までサプライチェーンを作り、レアアースを安定出荷できる体制を構築しつつあることなどから、近い将来に供給不足が生じることは考えにくい。中国も自国のレアアース産業を維持しなければならないため、さらなる値下げにより世界市場の再寡占を目論むことは無理であろう。

一方、重レアアースは状況が全く異なる。中国外に本格的な稼行鉱山がなく、中国南部のイオン吸着鉱も増産が期待できないので、中期的に供給不足が生じる可能性がある。したがって、レアアース危機は完全には去っていないと言える。今後、重レアアースの安定供給確保に向けて、官民一体で対策を継続する必要がある。

謝辞

本特別講演をご紹介いただいた田中幹也博士、統計情報をまとめていただいた徐 維那博士に感謝申し上げます。

References

- 1) Sankosiryo, Rare metal Kakuho-senryaku, Ministry of Economy, Trade and Industry, 16p, (2009)
- 2) Kogyo Rare Metal, Arumu Shuppansha, 128, 157p, (2012)
- 3) Rare Metal News, Arumu Shuppansha, 2578, pp.1, (2013)
- 4) http://www.niche.tohoku.ac.jp/?page_id=1030
- 5) Industrial Minerals, Feb., pp.9, (2013).
- 6) Nicoletopoulos, V., Industrial Minerals, July, pp.34-39, (2012)
- 7) Industrial Minerals, Feb., pp.20-22, (2012).
- 8) <http://www.molycorp.jp/about-us/project-phoenix/>
- 9) <http://www.lynascorp.com/Pages/advanced-materials-plant-kuantan-malaysia.aspx>
- 10) Industrial Minerals, Jan., pp. 53, (2013)
- 11) <http://www.sumitomocorp.co.jp/news/detail/id=25526>
- 12) <http://www.toyota-tsusho.com/press/2010/12/20101208-3589.html>
- 13) <http://www.matamec.com/vns-site/index.php>

金属の資源循環と産業エコロジー研究： 鉄鋼材料と合金元素の循環利用への挑戦¹

中島 謙一^{2*}

Industrial Ecology for Metal Recycling:
Challenge in Cyclic Use of Elements in Alloy Steel

Kenichi NAKAJIMA

National Institute for Environmental Studies, Ibaraki 305-8506, Japan

Abstract

The global demand for metal resources has been sharply increasing by economic growth, and the issue of sustainable resource management has also been increasingly recognized. In order to optimize the material cycles and increase resource efficiency, material flow analysis (MFA) is a powerful tool to understand the resource consumption and material cycle in the national economy. However, MFA cannot provide technological information on the recoverability and/or removability of elements from secondary resources. This paper introduced the latest study to propose a combined application of MFA with thermodynamic analysis for sustainable resource use, and the detailed MFAs of metals, such as nickel, chromium and molybdenum, that were concerned with thermodynamic properties of elements.

Keywords: Material flow analysis, Thermodynamic analysis, Metal, Recycling, Industrial ecology

1. はじめに

金属資源は有限であり、資源の管理、供給、消費は各国の経済活動において大きな影響を持つ。先進諸国の経済発展に伴い拡大してきた鉱物資源および金属の需要は、近年の新興国の経済発展等に伴い更なる拡大が予測¹されると共に、先進諸国においても低炭素技術の導入等に伴った金属資源の需要の変化・拡大が予測²されている。他方、野生生物の種の絶滅が過去にない速度で進行し、その原因となっている生物の生息域の悪化、生態系の破壊に対する懸念が深刻なものとなっている。『生物多様性』の国際的な枠組みでは、1992年5月に「生物多様性条約」が採択され、2010年の生物多様性条約第10回締約国会議(COP10)を経て、2012年2月時点において192ヵ国および欧州連合が条約を締結している。

この資源利用と生物多様性は密接に関連しており、近年では、ニッケル鉱山・製錬所の開発と生物多様性に関する議論は記憶に新しい。なかでも世界有数のニッケル

産出国であるニューカレドニア、あるいは、新規鉱山の開発が進められているマダガスカルは、世界的にも類を見ない豊かな生態系を誇る地域であると共に、絶滅に類した種が多い地域(生物多様性ホットスポット)としても指摘³されている。このような背景のもと、経済活動に必須の金属資源を利用する上で、持続可能な資源利用や持続可能な資源管理が重要となっており、国連環境計画(United Nations Environment Programme, UNEP)の資源パネル(International Resource Panel)を中心に世界的に議論が進められている⁴。金属鉱物のほぼ全量を海外に依存している日本においても例外的な話ではなく、我々はサプライチェーンを通じた資源利用に伴い各国の経済活動や環境問題と密接な繋がりを持っている⁵。

しかしながら、資源採取・製造・消費・廃棄物処理に至るサプライチェーンは、国内および国際的に広がり、複雑な構造を有しており、サプライチェーンを通じた資源利用の俯瞰的な把握は非常に困難である。これに対して、物質フロー分析(Material Flow Analysis, MFA)は、経済活動に伴う物質のフロー・ストック量の定量情報を示すと共に、資源の利用と環境影響に関する国際的な議論⁴や物質循環の課題抽出に大きな影響を与えてきた^{6,7}。

1. 平成25年10月24日 本会第131回例会において発表

2. (独)国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター

* Nakajima.kenichi@nies.go.jp

平成25年7月20日受理

なかでも、Graedel ら⁷は、MFA により 60 種類の金属のリサイクル率を概算すると共に、リサイクル率の観点から見て金属の循環利用には未だ多くの課題が残されていることを指摘している。

一方で、MFA は、リサイクルにおける不純物の除去可能性や資源の回収可能性についての技術的な情報を与えてこなかった。また、上記を含めて MFA 研究の多くは、1 つの元素(あるいは物質)を対象として物質フローを記述しており、サプライチェーンを通じた多元素間の連関を含めた製品組成についての情報を与えてこなかった。これに対して、著者らは、多元素 MFA としての WIO-MFA (Waste Input-Output Material Flow Analysis)モデルを提案^{8,9}すると共に、熱力学解析の手法を用いることにより、二次資源からの元素の回収可能性・不純物の除去可能性を示してきた¹⁰⁻¹²。更に、近年では、これらの手法を複合的に活用する事により、使用済み自動車(ELV)の高度リサイクルに向けた提案¹³を行ってきた。本稿では、これら研究の概要を紹介する。なお、研究の詳細については、既報論文⁸⁻¹²を参照頂ければ幸いである。

2. 製鉄プロセスにおける金属の分解挙動解析¹¹

既存の製鉄システムでは、鉱石等の一定の品位・組成を有した原料を想定して、目的元素を経済的に効率よく抽出できるようにプロセスを組み合わせてシステムとして最適化している。また、その種類は、原料および目的とする金属の種類に応じて、非常に多岐に渡る。鉄鋼・非鉄金属製鉄のプロセスにはそれぞれ目的元素を効率よく回収するために技術的な特性があり、人工資源からの

資源の回収には化学的な限界が存在する。例えば、乾式製鉄による回収の可否は、主に、プロセスの雰囲気(酸素分圧、硫黄分圧等)、注目する元素の酸化還元平衡のポテンシャル、および、蒸気圧によって決まる。これらを利用した代表的な不純物の除去方法には、酸化除去と揮発除去がある。

図 1 は、鉄鋼製鉄(転炉・電気炉)を想定(1873K、1mol% 添加)した元素の配挙動の解析結果である。不純物の除去方法としては、上述の酸化除去および揮発除去を想定した。縦軸には金属相とスラグ相への元素の分配傾向を表す指標として、溶媒(鉄)とスラグへの元素の熱力学的な分配率($L^{s/m}$)を、横軸には金属相とガス相への分配傾向を表す指標として、各元素と溶媒の蒸気圧の比($L^{g/m}$)を取り上げた。

解析の結果、アルミニウム、マグネシウム、マンガンなどは酸化傾向が強くスラグ相への分配傾向が強い事が分かる。また、亜鉛めっき鋼板などに含まれる亜鉛はガス相への分配傾向が強い事が分かる。一方、鉄に対するトランプエレメントとして良く知られている銅や錫などの元素は金属相への分配傾向が強くこの図からも酸化除去・揮発除去による不純物除去が不可能である事が分かる。また、重要な合金元素であるニッケルおよびモリブデンも金属相への分配傾向が強く、鉄リサイクルに伴う希少な資源の散逸(Loss)の可能性を有している事が判る。

なお、本稿では、誌面の関係上、鉄鋼製鉄プロセスを想定した Fe-X 系の分配傾向のみを示した。詳細な解析方法および他の系(Al-X 系や Cu-X 系など)の分配傾向については既報論文¹⁰⁻¹²を参照して頂ければ幸いである。

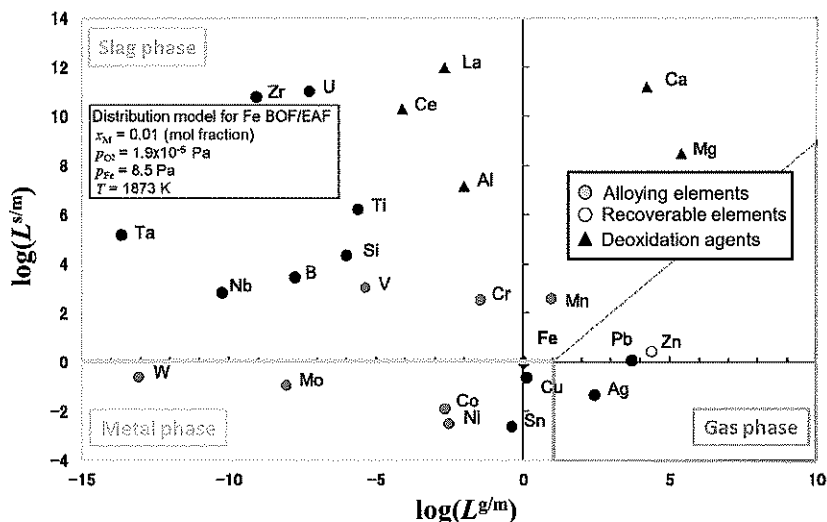


Fig. 1 Distribution chart of elements among gas, slag, and metal phases for the metal recovery under the simulated atmosphere of converter of steel making.¹¹

更に、Fig.2 は、同様の手法を用いて主要製錬・再溶解プロセスにおける元素の分配挙動の解析結果をもとに作成した『エレメントレーダーチャート』である。Fig.1 と同様に、各プロセスにおいて円周方向は金属相およびガス相への分配傾向を表し、半径方向は金属相およびスラグ相への分配傾向を表し中心方向に向かうほどスラグ相への強い分配傾向を示す事を表している。これらの図を用いる事により、合金元素や不純物元素等、各種の元素

が金属相、スラグ相、ガス相のいずれかに強く分配される傾向があるかを把握する事が可能である。全体的な傾向としては、Fig.2 から明らかなように、後工程に有効な不純物除去プロセス(電解製錬・湿式製錬等)を有する銅、鉛、鉛・亜鉛の製錬システムに対して、鉄鋼、アルミニウム、マグネシウムは不純物の除去が非常に困難な事が分かる。

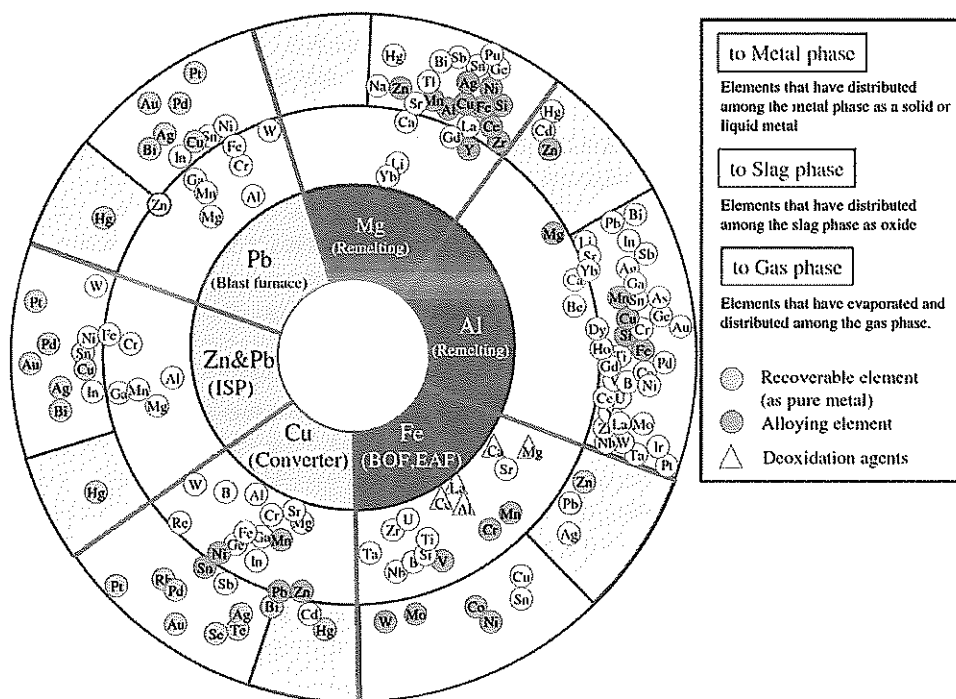


Fig. 2 Element radar chart for the recycling of Fe, Cu, Zn, Pb, Al and Mg into the metal phase¹²

3. ニッケル、クロム、モリブデンの物質フロー分析¹³

典型的な鉄鋼合金元素であるニッケル、クロム、モリブデンは、主にステンレスや耐熱鋼等の鉄鋼材料の原料として用いられている。一方で、ステンレスのリサイクルにおいては、ステンレススクラップの炭素鋼スクラップへの混入などにより、多くの資源散逸が起きていることが国内外のMFA研究により指摘されている^{14,15}。ここでは、WIO-MFAモデルを適用した多元素物質フローの解析により得られたニッケル、クロム、モリブデンの物質フローを示すと共に、これらの元素の高度リサイクルに向けた提言を紹介する。

Fig.3 は、WIO-MFAモデルにより得られたニッケル、クロム、モリブデンの品目別最終需要量の推計結果である。図には、各元素について、最終需要(国内需要および輸出)に対する上位10部門の結果(ニッケル：59%、クロ

ム：60%、モリブデン：50%)を抽出して示した。分析の結果、ニッケル、クロム、モリブデンの国内需要の割合は、それぞれ、38%、43%、49%であると得られた。この結果は、既報¹⁶において示している鉄についての分析結果と同様の傾向を示している。各元素について個別の内訳をみると、ニッケルの主な国内最終需要部門は、乗用車(9%)と非住宅非木造(9%)が高い割合を占めると得られた。同様に、クロムの主な国内最終需要部門は、乗用車(15%)と非住宅非木造(9%)であり、モリブデンの主な国内需要部門は、乗用車(20%)、トラック・バス(6%)および非住宅非木造(6%)が高い割合を占めると得られた。ニッケル、クロム、モリブデンのいずれの元素についても国内最終需要としては自動車用途が多く、リサイクルシステムの確立が重要であると考えられる。

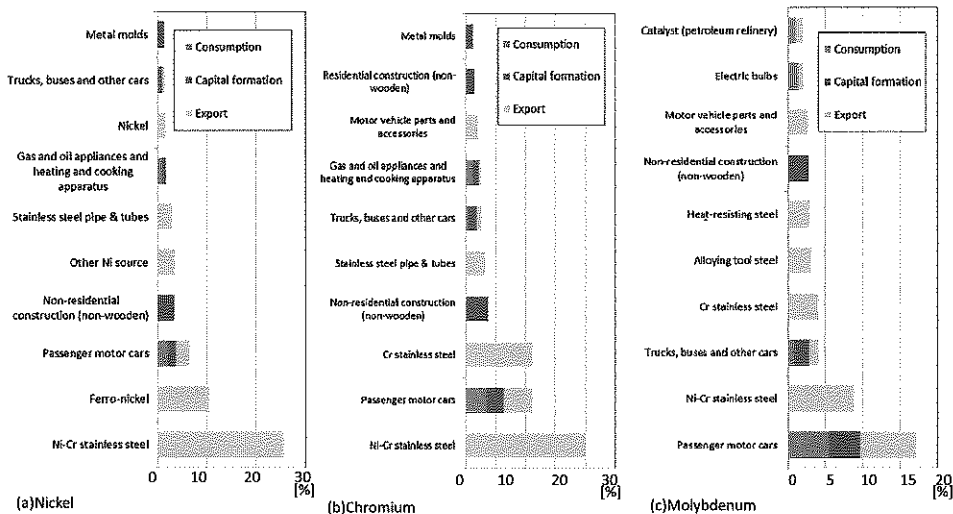


Fig. 3 Final destination of metallic elements by products and final demand categories in the Japanese economy calculated by use of WIO-MFA¹³

更に、Fig.4は、WIO-MFAモデルにより同定した自動車を中心としたニッケル、クロム、モリブデンの物質フローである。なお、物質フローデータの整備に際しては、鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計等の国家統計の他、各種の業界統計、有識者へのヒアリング等で得られた情報を参考にした。

推計の結果、乗用車には1台あたり、ニッケル、クロム、モリブデンが、1.8 kg-Ni、6.5 kg-Cr、0.3 kg-Mo含まれていると得られた。遡及分析の結果を個別にみると、ニッケルについては、自動車に含まれるニッケルの47%

が自動車部品・同付属品に含まれており、次いで内燃機関・同付属品が18%と続き、これらの部品は、ステンレスや耐熱鋼、構造用合金鋼により構成されていると得られた。クロムとモリブデンについても同様の解析を行った。解析結果より、ニッケル、クロム、モリブデンは、自動車部品・同付属品や内燃機関・同付属品にステンレスや耐熱鋼等として多く含有されていることが判った。鉄スクラップリサイクルに伴う合金元素の散逸を回避するためには、Alloy to Alloy リサイクルを視野に入れたこれらの濃化部位の分別回収が重要であると得られた。

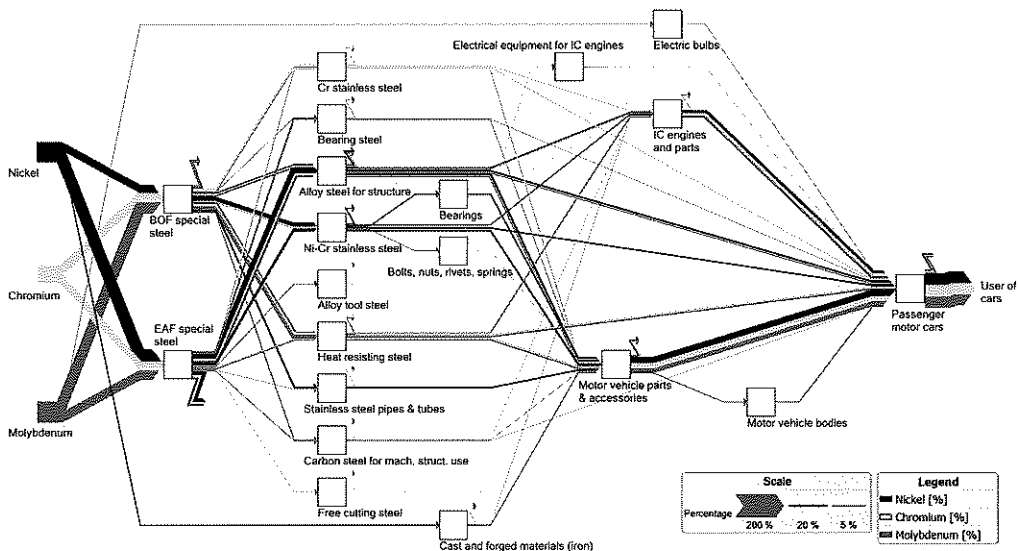


Fig.4 Material flow of nickel, chromium, and molybdenum associated with the production of car¹²

4. おわりに

本稿では、サプライチェーンを通じた資源利用の更なる高度化を目指して取り組んでいる研究の一端として、熱力学解析による元素の分配傾向・回収可能性の解析とMFAによるサプライチェーン解析の複合的な利用による鉄スクラップ中の合金元素に着目した Alloy to Alloy リサイクルの提案に関する研究を紹介した。

鉄スクラップのリサイクルは、合金元素の散逸の潜在的な可能性を有しているが、Alloy to Alloy リサイクルによる鉄スクラップの高度リサイクルの実施により、ニッケル、モリブデン、コバルト等の金属相への分配傾向の強い元素については、高い回収率で合金成分の添加用途のフェロアロイ等の削減が期待できる事、また、炭素鋼製造の条件下では、スラグ相への分配傾向が強いクロム、マンガン等に関しても特殊鋼製造の原料として投入することにより、合金成分の添加用途のフェロアロイや脱散剤等の削減が期待できる。

他方、金属資源のほぼ全量を諸外国に依存している日本においては、鉄スクラップの高度リサイクルによる二次資源の活用は、国内における最終処分量の削減や国内における貴重な資源の散逸を防止するだけではなく、資源戦略上の効果として、貴重な国内の二次資源の確保・利用を通じて経済活動に重要な金属資源の海外依存度の低減も期待できると考えている。また、加えて、昨今、世界的にも注目を集めている一次資源の利用に伴う資源産出国等での生物多様性の損失等の環境影響の拡大防止への寄与が期待できると考えている。

なお、現在、サプライチェーンを通じたニッケル資源の利用と環境影響(生物多様性への影響など)の把握、及び、劣質・未利用のニッケル含有資源の有効利用を含めたサプライチェーンを通じた資源利用の高度化に向けた研究に取り組んでいる。これらの成果については、別の機会に改めて紹介させて頂ければ幸いである。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金(22360387)の助成を受けた研究成果と共に、住友財団環境研究助成(2012年度)による「絶滅危惧種の保全に向けた持続可能な資源利用：ニッケルの国際サプライチェーン分析」および科学技術振興機構(JST)社会技術研究開発センター(RISTEX)の助成による「リソースロジスティクスの可視化に立脚したイノベーション戦略策定支援」研究開発プロジェクトによる研究進捗を紹介したものである。

研究実施に当たり、研究分担者を含めた関連各位に感謝の意を表する。読者各位からの忌憚のないご意見、ご批判を頂戴できれば幸いである。

参考文献

1. D.P. van Vuuren, B.J. Strengers, H.J.M. De Vries: Long-term perspectives on world metal use—a system-dynamics model, *Resource Policy*, **25**, pp.239-255 (1999).
2. R.Kleijn, E. van der Voet, G.J.Kramer, L. van Oers, C. van der Giesen: Metal requirements of low-carbon power generation, *Energy*, **36**, pp.5640-5648 (2011).
3. N. Myers, R.A. Mittermeier, C.G. Mittermeier, G.A. B. da Fonseca, J.Kent: Biodiversity hotspots for conservation priorities, *Nature*, **403**, 853-858 (2000).
4. United Nations Environment Programme (UNEP), Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles (2013) http://www.unep.org/resourcepanel/Portals/24102/PDFs/Environmental_Challenges_Metals-Full%20Report.pdf
5. K.Nakajima, K.Nansai, K.Matsubae, Y.Kondo, S.Kagawa, R.Inaba, S.Nakamura, T.Nagasaka: Identifying the Substance Flow of Metals Embedded in Japanese International Trade by Use of Waste Input-Output Material Flow Analysis (WIO-MFA) Model, *ISIJ Int.*, **51**, pp.1934-1939 (2011).
6. B.K. Reck, T.E. Graedel, Challenges in Metal Recycling, *Science*, **377**, pp.690-695 (2012).
7. T.E. Graedel, J. Allwood, J.P.Birat, M.Buchert, C. Hagelucken, B.K. Reck, S.F.Sibley, G.Sonnemann: What Do We Know About Metal Recycling Rates?, *J. Ind. Ecol.*, **15**, 355-366 (2011).
8. S. Nakamura, K. Nakajima: Waste Input-Output Material Flow Analysis of Metals in the Japanese Economy. *Mater. Trans.*, **46**, 2550-2553 (2005).
9. S. Nakamura, K. Nakajima, Y. Kondo, T. Nagasaka: The Waste Input-Output Approach to Materials Flow Analysis. *J. Ind. Ecol.*, **11**, 50-63 (2007).
10. K. Nakajima, O. Takeda, T. Miki, K. Matsubae, S. Nakamura, T. Nagasaka: Thermodynamic Analysis of Contamination by Alloying Elements in Aluminum Recycling. *Environ. Sci. Technol.*, **44**, 5594-5600 (2010).
11. K. Nakajima, O. Takeda, T. Miki, K. Matsubae, T. Nagasaka: Thermodynamic Analysis for the

- Controllability of Elements in the Recycling Process of Metals, *Environ. Sci. Technol.*, **45**, 4929-4936 (2011).
12. T.Hiraki, O.Takeda, K.Nakajima, K.Matsubae, S.Nakamura and T.Nagasaka: "Thermodynamic criteria for the removal of impurities from end-of-life magnesium alloys by evaporation and flux treatment", *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **12**, (2011), (<http://iopscience.iop.org/1468-6996/12/3/035003>)
 13. K. Nakajima, H. Ohno, Y. Kondo, K. Matsubae, O. Takeda, T. Miki, T. Nagasaka: Simultaneous Material Flow Analysis of Nickel, Chromium, and Molybdenum Used in Alloy Steel by Means of Input-Output Analysis, *Environ. Sci. Technol.*, **47**, 4653 -4660 (2013).
 14. I. Daigo, Y. Matsuno, Y. Adachi: Substance Flow Analysis of Chromium and Nickel in the Material flow of Stainless Steel in Japan, *Resour. Conserv. Recycl.*, **54**, 851-863 (2010).
 15. B.K. Reck, M. Chambon, S. Hashimoto, T.E. Graedel: Global Stainless Steel Cycle Exemplifies China's Rise to Metal Dominance, *Environ. Sci. Technol.*, **44**, 3940-3946 (2010).
 16. K. Nakajima, K. Nanasai, K. Matsubae, Y. Kondo, S. Kagawa, R. Inaba, S. Nakamura, T. Nagasaka: Identifying the substance flow of metals embedded in Japanese international trade by use of waste input-output material flow analysis (WIO-MFA) model, *ISIJ Int.*, **51**, 1934-1939 (2011).

ネオジム磁石のリサイクルについて¹

新井 義明^{2*}・佐藤 靖之³

Recycling of Neodymium Magnet

Yoshiaki Arai², Yasuyuki Sato³

²Mitsubishi Materials Co., Ltd. Eco-Business Div.

³Panasonic Eco Technology Kanto Co., Ltd.

Abstract

In general, neodymium magnets contained in defectives in a manufacturing process have been recycled, whereas neodymium magnets contained in almost all used home appliances have not been recycled. We developed recycling technology to collect neodymium magnets efficiently from used air conditioner compressors and established the recycle process. Based on the findings, demonstration test equipment was developed and made. Demonstration test that is being conducted using the demonstration test equipment in Panasonic Eco Technology Kanto Co., Ltd. is reported in this paper.

Keywords: neodymium magnet, rare earth magnet, rare earth, recycle, home appliance recycle

1. 緒 言

希土類金属（レアアース）を含有する高性能な希土類永久磁石であるネオジム磁石（ネオジム-鉄-ボロン磁石：Nd-Fe-B 磁石）は従来の永久磁石と比べて性能が大幅に向上したため多くの工業製品に使用されている。ネオジム磁石にレアアースであるジスプロシウム（Dy）を添加して、耐熱磁石特性を向上させることが可能になったため、さらに用途が拡大している。ネオジム磁石はOA機器のハードディスク、ハイブリッド自動車や電気自動車のモータ、家電製品のモータに使用されており、これらの製品の高性能化や省エネルギー化、小型化、軽量化に貢献している。¹⁾

しかしながら、今後も需要が大幅に拡大すると予想されるネオジム磁石の原料となるレアアースの確保が懸念されている。レアアースは資源偏在性が高く、供給に関

しては、資源保有国である中国に依存しているのが現状である。²⁾このような背景からネオジム磁石に使用されているネオジムやジスプロシウムなどのレアアースのリサイクルによる再生資源化の必要性が高まってきている。³⁾また、レアアースの消費大国である我が国では、資源セキュリティの観点からもリサイクルによる資源循環システムの構築が必要となっている。

家電製品では、2000 年以降の比較的新しい型式のエアコンや冷蔵庫のコンプレッサ、洗濯機のモータにネオジム磁石の使用が開始されている。家電製品の使用年数がおおむね 10 年程度であることを考えると、既存の家電リサイクルルートからネオジム磁石を回収するシステムの構築を検討する良いタイミングであると考えられる。また、ネオジム磁石のリサイクルは、製造工程で発生した切削屑や工程不良品等を対象としていることが多く、使用済みの製品からのリサイクルは、ほとんど実施されていないのが現状である。⁴⁾

本稿では使用済み家電製品であるエアコンからのネオジム磁石のリサイクルについて、技術開発したリサイクル実証試験設備および、これらの設備を用いてパナソニックエコテクノロジー関東株式会社にて実施している実証試験に関して報告する。

1.平成 25 年 10 月 24 日 本会第 131 回例会において発表

2.三菱マテリアル株式会社 環境リサイクル事業部

3.パナソニックエコテクノロジー関東株式会社

*e-mail: yoshiaki@nmmc.co.jp

平成 25 年 7 月 23 日受理

2. エアコンに使用されているネオジム磁石

2. 1 エアコンにおけるネオジム磁石の使用状況

既存の家電リサイクルルートで回収可能である使用済み家電製品のエアコンをネオジム磁石使用量とリサイクルの実現可能性の高さから技術開発の対象とした。エアコンの室外機に搭載されているコンプレッサの圧縮機用モータのロータ部にネオジム磁石が使用されている。

(Fig. 1) 従来はフェライト磁石が使用されていたが、製品の高性能化や省エネルギー化、小型軽量化のためにネオジム磁石の使用が進んでいる。

2. 2 コンプレッサの現状のリサイクルフロー

エアコンから回収されたコンプレッサはリサイクルされ鉄や銅などの非鉄金属が回収、あるいは添加材として再利用されている。しかしながら、ネオジム磁石は磁石としてリサイクルされておらず、鉄系の再生原料の一部になっているのが現状である。我々は、現在国内で行われているコンプレッサの分解プロセスに追加する形でネオジム磁石のリサイクル技術開発を実施した。

3. エアコンに使用されているネオジム磁石の特性

3. 1 ネオジム磁石の組成

ネオジム磁石の特性を把握するために ICP 発光分光分析方法を用いて定量分析を実施し組成の確認を行った。平均的な組成は、鉄(Fe):68%、ボロン(B):1%、レアアース(RE):31%であり、レアアースの内訳は、ネオジム(Nd)+プラセオジム(Pr):26%、ジスプロシウム(Dy):5%であった。耐熱性の向上はテルビウム(Tb)の添加によって非常に高い効果が得られるが、テルビウムは資源的に希少でかつ高価であるため、ジスプロシウムの添加が主流であることが、組成結果より確認できた。(Table 1)

3. 2 ネオジム磁石のキュリー温度

磁気消滅温度であるキュリー温度を測定した結果、エアコンに使用されているネオジム磁石のキュリー温度は330℃~370℃であることが確認された。これらの結果より、エアコンから回収したネオジム磁石を熱脱磁するための熱脱磁条件としては、400℃で加熱できれば良いことがわかった。(Fig. 2)

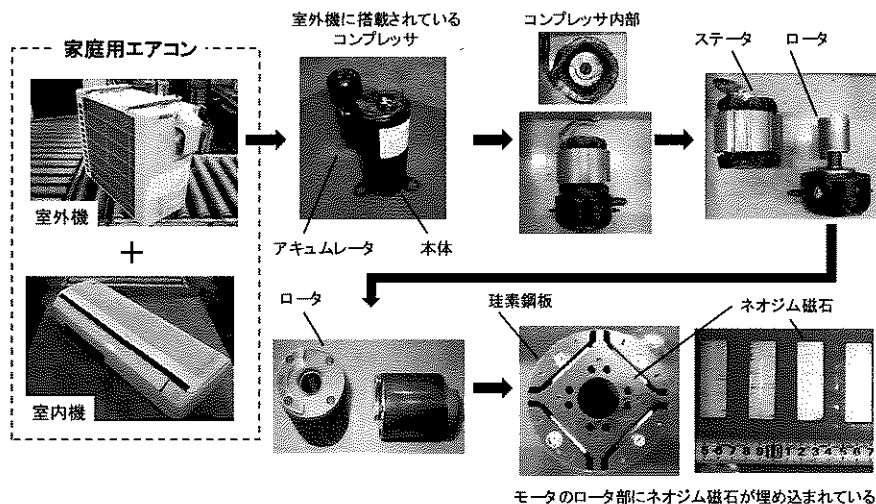


Fig. 1 The situation mounted with the air-conditioner of the neodymium magnet.

Table 1 Composition of the neodymium magnet for air-conditioners.

	定量分析(%)							
	Fe	B	Co	Cu	Nd	Pr	Dy	Tb
平均値	66	1	2	0	23	3	5	0
最大値	67.1	1.14	4.83	0.22	27.0	6.07	7.56	1.65
最小値	62.6	0.90	0.54	0.00	18.1	0.10	2.85	0.00

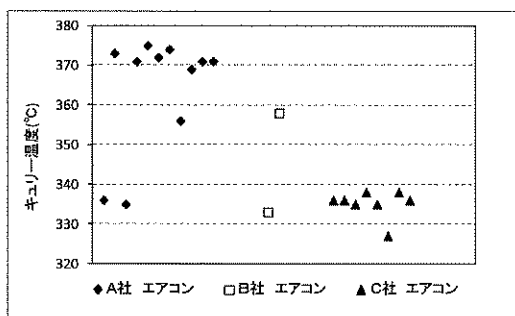


Fig. 2 Curie temperature of the neodymium magnet for air-conditioners.

4. エアコンからのネオジム磁石の回収

4. 1 エアコンからのネオジム磁石の回収

エアコンのコンプレッサの分解試験を実施し、ネオジム磁石の取り付け方法・形状・使用重量を確認するとともにネオジム磁石を取り出すために必要な工程を確認し、その方法を検討した。⁶⁾

分解時に想定される磁力による分解困難性を回避するために磁石の磁力を消失させることが必要と考え、我々は脱磁方法として熱脱磁方法を選択した。

エアコンの現状の分解プロセスによるリサイクルではコンプレッサの鉄のシェル（ケース）をカット後、ステータを取り外し、ステータから銅と鉄を回収し、残ったシェルにロータが結合している状態となる。

この工程に追加する形でロータを分離して分解し、ネオジム磁石を取り出す工程を検討した。ロータを分離し、ロータごと大気炉にて400℃～500℃で熱脱磁することにより、ロータ表面の磁束密度は0.25 T (2500 G)から1 mT (10 G)以下となり、磁力を消失できることを確認した。磁力による分解困難性を取り除いた後、ロータをドリル等の装置を使って分解し、ネオジム磁石の取り出しが可能となることを確認した。エアコンのコンプレッサ1台から約90 g/台のネオジム磁石を回収できることがわかった。使用済みのエアコンのコンプレッサからネオジム磁石を回収できることを確認し、回収をより効率的に実施するためのリサイクルプロセスフローを構築した。

(Fig. 3) ⁶⁾

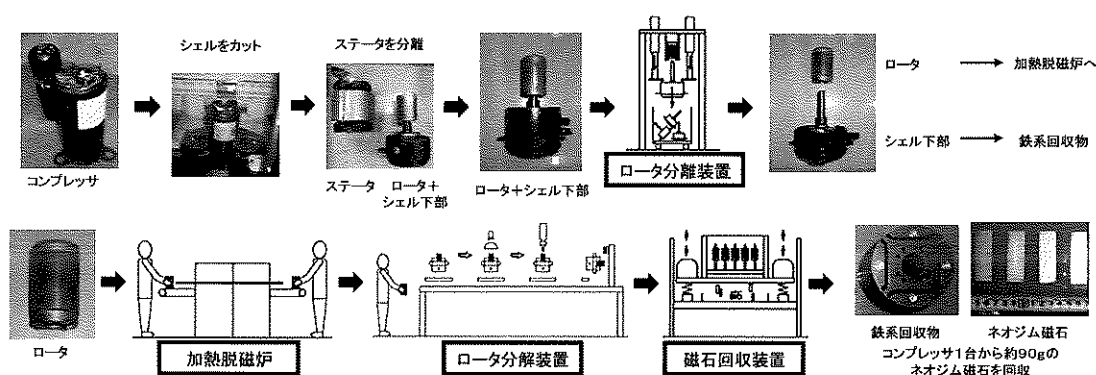


Fig. 3 The neodymium magnet recovery process flow for airconditioners.

4. 2 ネオジム磁石リサイクル実証設備

使用済みのエアコンのコンプレッサからネオジム磁石を回収するプロセスにおいて、リサイクルプロセスを構成する上で開発が必要な装置は、①ロータ分離装置、②加熱脱磁炉、③ロータ分解装置、④磁石回収装置である。我々は自動化・省力化・効率化を検討し、これらの装置の技術開発を実施し、実証試験設備を製作した。技術開発した各装置の概要および特徴を以下に示す。

(Fig. 4)

- ① ロータ分離装置は、油圧を用いてロータを引く抜く方法とした。
- ② 熱脱磁炉は、キュリー温度以上に加熱し、連続的に加熱脱磁処理ができる方法とした。
- ③ ロータ分解装置は、ロータに取り付けられている押え板やバランスを固定している複数のピンを切削する方法とし、ピンの位置を検出する方法として画像処理を利用した。
- ④ 磁石回収装置は、振動による磁石回収方法とした。

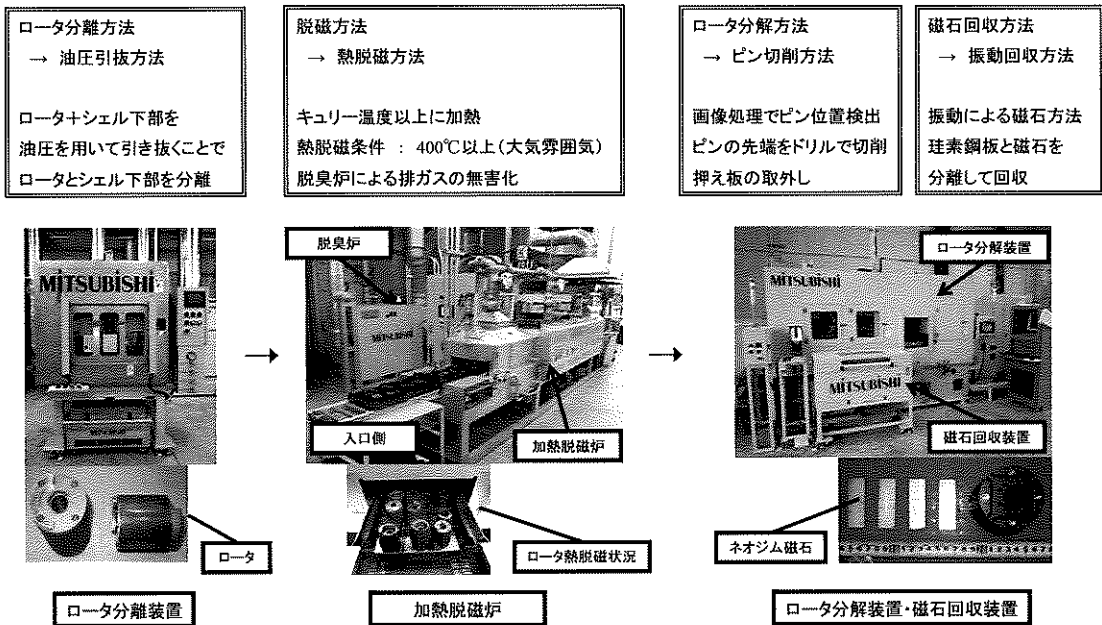


Fig. 4 The demonstration test equipment for neodymium magnet recovery

5. リサイクルシステムの実現に向けた検討

5. 1 エアコンにおけるネオジム磁石の使用比率

リサイクルを効率的に実施するためには、ネオジム磁石使用製品の判別が重要となる。使用製品の判別とその使用比率を把握することを目的とし、家電リサイクル工場において、ネオジム磁石を使用したエアコンを型式別に調査した結果、冷媒種類 R410A を使用している比較的新しい省エネルギー型のエアコンにネオジム磁石を使用しているものが多いことが確認された。

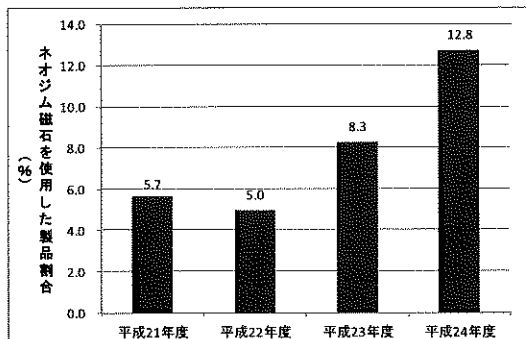


Fig. 5 The ratio of neodymium magnet to others in recycled air-conditioners.

現在、家電リサイクル工場で再商品化処理されている使用済みのエアコンの約 13%にネオジム磁石が使用されていることが確認された。(Fig. 5)

今後は、ネオジム磁石を使用した製品の普及が進んでいることから使用比率が増加するものと予想される。

ネオジム磁石を効率的に回収しリサイクルするためには製品・部品への表示が必要になると考えられる。

5. 2 リサイクルシステム実証

技術的な課題、経済的な課題を解決するために、技術開発結果で得られた知見を基にして実証試験設備を製作し、パナソニックエコテクノロジー関東株式会社に設置した。現在、実証試験設備を活用し、リサイクル事業者、磁石合金メーカー、磁石メーカーと連携し、リサイクル品を原料としたネオジム磁石リサイクルシステム実証を行い実用化を検討している。リサイクルシステム実証試験では、家電リサイクル工場でネオジム磁石を使用したエアコンからコンプレッサを選別して回収し、実証試験設備を用いてコンプレッサからネオジム磁石を回収する。回収したネオジム磁石を使用して磁石合金メーカーでレアアースの抽出から磁石合金の試作までを行い、試作した磁石合金を使用して、磁石メーカーでネオジム磁石の試作を実施し、試作した磁石の磁石特性評価を実施している。

(Fig. 6)

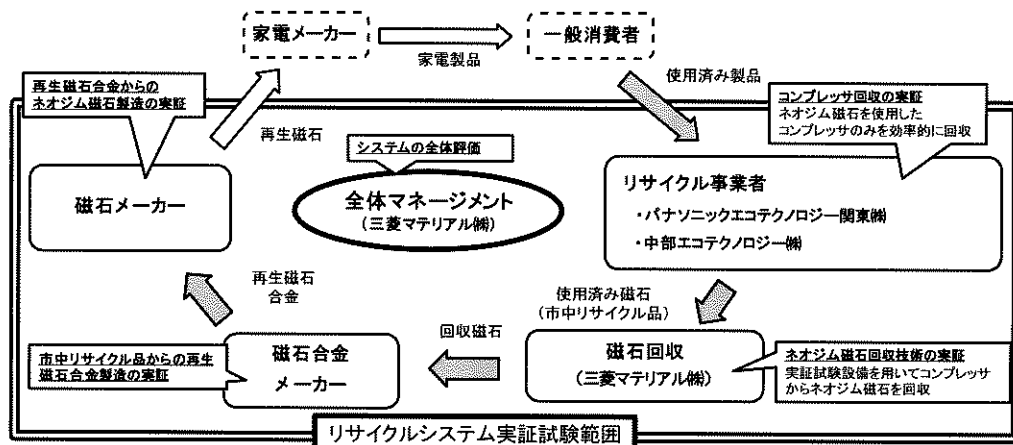


Fig. 6 The flow chart of the demonstration test for neodymium magnet recycling system.

6. 結 言

使用済み家電製品のエアコンからネオジム磁石を回収するための社会システムは、家電リサイクル法が施行されていることから、製品回収に関して基本的には問題はないといえる。リサイクルを推進するためには、ネオジム磁石使用製品の判別や磁石を取り出し易くするための製品設計が重要であり、将来的には、製品・部品への表示等が望まれる。

使用済み家電製品のエアコンのコンプレッサからネオジム磁石を回収できることを確認し、回収をより効率的に実施するためのリサイクルプロセスを構築し、実証設備を開発した。現在は、パナソニックエコテクノロジー関東株式会社に設置した実証試験設備を活用し、リサイクル事業者、磁石合金メーカー、磁石メーカーと連携し、リサイクル品を原料としたネオジム磁石リサイクルシステム実証を行い、実用化の検討を進めている。

今後もネオジム磁石は用途や使用量が拡大することが予想されており原料であるネオジムやジスプロシウムなどのレアアースのリサイクル技術は都市鉱山を活用したリサイクル技術として、さらに技術開発が必要不可欠である。また、資源セキュリティの観点からもリサイクル原料が新たなレアアースの供給資源として利用できる資源循環型社会システムを構築することが必要であり、リサイクル技術を活用し、貢献していきたいと考えている。

謝 辞

本技術開発およびシステム実証は、平成 21 年度 経済産業省 新資源循環推進事業費補助金「高性能磁石モータ等からのレアアースリサイクル技術開発」、平成 22

年度 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 省資源型・環境調和型資源循環プロジェクト 国内における資源循環技術開発 低炭素産業を支える製品のリサイクルシステム「省エネ型家電製品のリサイクル高度化」、平成 22 年度 NEDO 希少金属代替・削減技術実用化開発助成事業「使用済み家電製品からのネオジム磁石のリサイクル技術実用化開発」、平成 23 年度 経済産業省 希少金属使用量削減・代替技術開発設備整備費等補助金「市中リサイクル品を原料としたネオジム磁石製造システム実証」の助成を受けて実施したものである。この場をお借りして感謝の意を表します。

References

- 1) Nishigaki, H. Yamamoto: Magnetics Japan, Vol.3, No.11, pp.525-537 (2008)
- 2) H.Minami: *Kinzokushigen report*, JOGMEC, pp.127-133 (2007)
- 3) T.Okabe: *Kinzoku*, Materials Science & Technology, Vol.77, No.6, pp.10-16 (2007)
- 4) T.Okabe: Molten Salt Committee of the Electrochemical Society of Japan, Vol.52, No.2, pp.71-82 (2009)
- 5) Y.Arai: Japan Society of Material Cycles and Waste Management, Vol.22, No.1, pp.41-49 (2011)
- 6) M.Sagawa, M.Hamano: *Kidoruijisyaku*, Nikkan Kogyo Shinbunsha (Tokyo), pp.236-247 (2012)

資源リサイクリングにおけるソーティング技術¹

古屋仲 茂樹^{2*}

Sensor Based Sorting Technology in Resource Recycling

Shigeki KOYANAKA

Research Institute for Environmental Management Technology,
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Abstract

Sensor based sorting is one of the physical separation technology, which detects physical properties of a moving object without contact, identifies its material instantaneously by analyzing the detected information, and separates it mechanically according to the identification result. This separation technology can handle relatively large particles of nonferrous metal, alloy, plastic, glass, paper, wood etc. Recently, social interest in this technology has been growing because various sensors and data analysis devices have been upgraded. In this article, recent trends of the sensor based sorting in resource recycling are summarized based on the sensor types of NIR, Optical, XRT, XRF, LIBS etc.

Keywords: Resource Recycling, Physical separation, Sensor based sorting, Sorter, Identification

1. はじめに

ソーティング(Sensor based sorting)とは、搬送コンベア上などを移動する物体に対して、各種センサーで検知した物性情報をコンピュータで瞬時に解析して物質を識別し、その結果に基づいて圧縮空気の噴射やパドルを動作させ、別々の回収ボックスに搬送する選別技術である。対象となるのは、数 mm~300mm 程度の比較的大きな固体粒子であり、鉱石、非鉄金属・合金、プラスチック、ガラス、木材、食品など、使用するセンサーの特性に応じて様々な物体に適用される。ソーティングは、磁力選別機、風力選別機、渦電流選別機などでは正確な分離が困難な混合物を対象として、これらの選別装置の後段で行われることが多い。近年の各種センサーや解析装置の機能向上に伴い、適用範囲が拡大しつつある。本稿では主要なソーティング技術について、その原理や用途などについて解説する。

2. ソーティング技術の概要

ソーティングは「供給」、「検知」、「識別」、「分離」の4段階で構成される。選別対象物を「供給」する方法としては、ベルトコンベアまたは自由落下によるものがある。ベルトコンベアの移動速度は、センサーの応答特性に応じて決められるが、最も高速な機種では 3m/s 以上に達する。対象物がセンサーの検知方向に対して重なり合うと、個々の物体について正確な情報が得られず選別精度が低下するので、供給の際には対象物になるべく密集しないような方法が取られる。通常はベルト幅 1~2m 程度のベルトコンベアを使用し、センサーを並列に配置して時間あたりの処理量を向上させている。

物質情報の「検知」には、非接触かつ高速測定に都合の良い電磁波や磁場が利用される。電磁波を検知するソーティング技術では、γ線からマイクロ波までの電磁波が用いられている。検知情報としては、大きさ、形状、重量、色、赤外線吸収スペクトル、磁場または電場変化量、X線透過率、蛍光X線スペクトル、ラマンスペクトル、表面温度、即発γ線、パルス波振幅などがあり、対象物の物性に応じて最適な検知情報とその測定のための

1. 平成 25 年 10 月 24 日 本会第 131 回例会において発表

2. 産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門

*s-koyanaka@aist.go.jp

平成 25 年 7 月 22 日受理

センサーが選択される。ソーティング装置（ソータ）における測定時間は、実験室内での通常の機器測定とは比較にならない程短く、1検体当たり短いもので1ミリ秒、最も長いものでも1秒以内である。

検知情報を使って未知の物体を「識別」する方法としては、標準試料を用いた測定によって事前に設定した閾値と測定データとを比較するのが一般的である。測定データが可視光スペクトルなどで明確なピークが見られる場合には、ピークの位置、高さ、面積などに基づいて定義した閾値を用いることが多い。赤外線スペクトルなどでピークが不明確な場合には、実験室内での分析と同様に、特徴を強調するために一次微分あるいは二次微分スペクトルに変換する前処理を施した後、多変量解析（パターン認識）やニューラルネットワークといった測定データ全体の類似性に基づいて識別する方法がよく用いられる。これらのデータ解析法については成書^{1,3)}を参照していただきたい。

最後に識別結果に基づいて「分離」が行われる。ベルトコンベヤの末端などの対象物が最終的に到達する場所に圧縮空気噴射ノズルや電磁式パドルなどを配置して、物質の種類ごとに異なる回収容器に搬送して分離する。しかし実際には、わずかではあるが検知と識別が正確でも分離に失敗することがある。圧縮空気の噴射では、対象物の形状によって移動距離にばらつきが見られたり、近くにある目的外の粒子を巻き込むことがある。一方、電磁式パドルでは、長期間繰り返し使用する際の耐久性に問題があるといわれている。将来的にはロボット技術を応用したより精緻な分離機構の開発が期待されるところである。

3. ソーティング技術の最近の動向

以下に、検知方式の違いに基づいてソーティング技術を分類して最近の研究開発の動向について述べる。

3.1 近赤外線ソータ (NIR)

近赤外線 (Near-infrared light, 波長 1100nm~2500nm) を物体に照射すると物体を構成する分子構造に依存して特定の波長の光が吸収される。近赤外線ソータは、近赤外線の吸収スペクトルの違いを利用して物質を識別して分離する装置である。未知試料のスペクトルパターンと事前に取得している標準試料のスペクトルパターンとを比較・照合することにより識別している。最近の近赤外線ソータでは、直線状の近赤外光線を物体に照射、スリットを通過した反射光を採光し光学素子によって分光、二次元に配置したセンサーによって高解像度な空間情報とスペクトル情報を同時検出することで、コンベア上を移

動する物体のスペクトルを二次元イメージとして取得する分光イメージング技術が利用されている。STEINERT 社の最新の近赤外線ソータ(Unisort)⁴⁾では、ベルト幅方向に 320pixel のセンサーを有する分光イメージングカメラを採用することで空間分解能 6mm×6mm を達成しており、従来機では困難であった微小な粒子の選別を可能としている (Fig. 1)。

近赤外線ソータは廃プラスチックの選別において特に重要な装置である。汎用プラスチックであるポリエチレン、ポリプロピレン、ポリスチレン、ポリエチレンテレフタレート、ポリ塩化ビニル、ABS などの選別を目的とする場合が多いが、これらに加えてポリカーボネートなどのエンジニアプラスチックを識別可能な機種も開発されている。しかし、黒色のプラスチックについては含有するカーボン粒子が近赤外全域の光を吸収するために近赤外線ソータでは選別ができない。この様な場合に対処するため、波長の長い中赤外線域 (波長 2500nm~4000nm) の光吸収スペクトルの違いを利用する機種も開発されている。この他の主な用途としては、古紙のリサイクルにおける各種用紙の選別や廃木材に含まれるプラスチックなどの不純物除去が挙げられる。

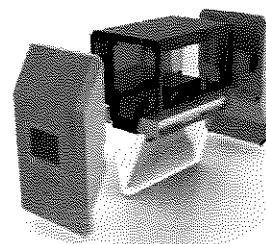


Fig. 1 Detection unit of the Unisort.⁴⁾

3.2 光学ソータ (Optical)

光学ソータは、物体からの可視光線 (Visible light, 波長 400nm~700nm) の反射光あるいは透過光を、CCD や CMOS などのイメージセンサーで検知して物体の明度、彩度、色相、サイズ、幾何学的形状などの違いを識別して分離する装置である。分光器を介してスペクトルパターンの違いを識別する機種もある。なお、紫外線~可視光~赤外線の波長域の電磁波を検知するソータを包括して光学ソータもしくは光ソータと呼ぶ場合もある。他のソータと比較して機能は限定的であるが、安価かつ高解像度という優れた点がある。色彩の違いを検知するものはカラーソータと呼ばれる。カラーソータは比較的古くから用いられている物理選別技術であり、ガラス瓶やカレットの選別 (無色、茶、緑、青)、廃自動車や廃家電を破碎処理したリサイクル原料に含まれる銅系金属 (銅、

真鍮などの色物金属)とその他金属(鉛、亜鉛などの灰色金属)の選別などに用いられる。可視光のみでは正確な選別が難しい場合には、紫外線ソータや近赤外線ソータなどの他の装置と組み合わせて用いられる。レーザー光などの特殊な光源を用いて反射、透過、散乱特性の違いによって選別するソータも開発されている。

3.3 電磁誘導ソータ

物体が磁界を通過する際には電磁誘導により渦電流が発生し、流れる電流値は物体の導電性に依存する特性がある。電磁誘導ソータは、ベルトコンベア内に埋め込んである磁界センサーによってこの渦電流(誘導起電力)を検知し、その特性の違いに基づいて物質を識別して分離する装置である。したがって、交番磁界が渦電流による磁界に及ぼす力学的作用によって物体の運動方向を変化させて分離する渦電流選別機とは原理的に異なる。

電磁誘導ソータは、導電性の違いに基づいた選別装置であるので、主に金属と非金属の分離に利用され、シュレッダーダストからの非鉄金属の回収や、樹脂などに混入する金属異物の除去手段としてよく用いられる。また、廃自動車や廃家電などの破碎・選別処理で発生する非鉄金属混合物(ミックスメタル)に含まれるステンレス(導電性小)を銅やアルミニウム(導電性大)から分離する際に利用される。また、印加する交流磁界の周波数を最適制御すれば、銅とアルミニウムの選別にも利用できる。

3.4 透過X線ソータ(XRT)

X線(波長 $0.001\text{nm}\sim 80\text{nm}$)を物体に照射した際の透過率(X-ray transmittance)は、物質の密度によって異なるので、X線透過率の違いを検知すれば、物体の素材や内部構造などを分析できる。透過X線ソータは、物体の密度、すなわちバルク物性の違いを識別して分離する装置なので、物体表面の汚れや塗装の影響をほとんど受けない。また、鉄製ボルトが付随したアルミニウム片のような単体分離していない物体の検出が可能であることや、高速処理が可能といった優れた点がある。しかし、不定形の形状を持つ物体に対しては、X線照射方向の厚さの違いによる透過率の差が生じるため、事前に厚さを測定したり揃えたりするなどの対策が必要になる場合がある。

Fig. 2 に MOGENSEN 社の透過X線選別ソータ(MSort AR)⁹⁾の写真を示す。このソータはデュアルX線検知センサーを備えており、異なるエネルギーを持つ2波長のX線の透過率を検知することで、従来よりも高い識別精度を得ることを可能としている。20mm~150mmの大きさのミックスメタル(銅、真鍮、ステンレス、アルミニウム、マグネシウム)に対して、重金属グループ(銅、真鍮、ステンレス)と軽金属グループ(アルミニウム、マ

グネシウム)に良好に分離可能であること、軽金属グループに含まれるアルミニウムとマグネシウムの分離が可能であることが報告されている⁹⁾。透過X線ソータは、ミックスメタルの選別の他にも各種非金属製品に混入する金属異物の除去、リサイクル原料としての混合プラスチックに含まれるPVCや臭素系プラスチックの除去、鉛ガラスや耐熱ガラスなどの選別にも利用される。

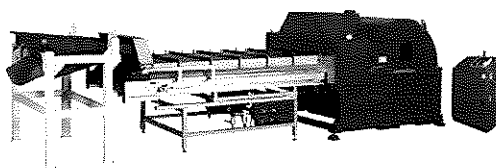


Fig. 2 Photo of the MSort AR.⁹⁾

3.5 蛍光X線ソータ(XRF)

X線を物体に照射した際に発生する蛍光X線(X-ray fluorescence)を分光して物体表面近傍に存在する元素の定性・定量を行うのが蛍光X線分析である。これまでは実験室内で用いられる分析装置であったが、近年これを選別に応用した蛍光X線ソータが開発された。透過X線ソータと比べて、使用するX線源の出力が小さくて済むので装置動力は少ないが、蛍光X線スペクトルの測定に時間を要するために処理速度はやや遅く、通常は1m/s程度のベルトスピードで用いられる。

Fig. 3 に Olympus-NDT 社の蛍光X線ソータ(JX-STREAM)⁷⁾の写真を示す。蛍光X線ソータは、元素分析に基づいて識別するので、ミックスメタルの選別が可能である。さらに、微量に含まれる添加元素の含有量を測定することで銅合金やアルミニウム合金の相互選別が可能となる。大和田らは透過X線ソータと蛍光X線ソータを組み合わせたアルミサッシスクラップの高度選別プロセスを提案している⁸⁾。Fig. 4 にそのフローを示す。試料は建材アルミサッシ破砕物であり、6063 アルミニウム合金を90.0wt%、不純物(その他のアルミニウム合金、亜鉛、ステンレス、プラスチック、ゴムなどの11種類)を10.0wt%含むものである。これをスクリーン、電磁誘導ソータ、透過X線ソータの順に供給し、最後に透過X線ソータもしくは蛍光X線ソータによって処理する。いずれの場合でも最終的な回収物に含まれる6063 アルミニウム合金の品位は99%以上、回収率は93%以上となる。こうした物理選別によって6063 アルミニウム合金を高純度化することで、二次合金の製造時に成分調整のための溶解工程が不要になるので、リサイクルに要するエネルギーを大幅に低減できる。この他にも、蛍光X線ソータは着色ガラスの選別や防腐処理木材の選別などに利

用されている。

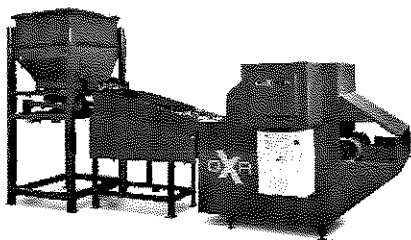


Fig. 3 Photo of the JX-STREAM.⁷⁾

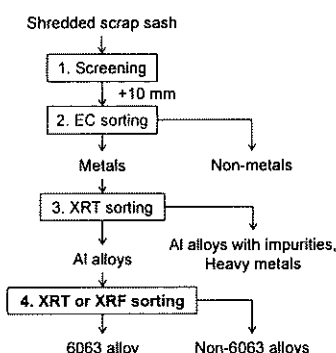


Fig. 4 New separation process for concentrating 6063 aluminum alloy from scrap sash.⁸⁾

3.6 レーザー誘起プラズマ分光分析法 (LIBS)

レーザー誘起プラズマ分光分析 (Laser induced breakdown spectroscopy) は、高出力パルスレーザーを集光照射して (ピーク出力 $100\text{GW}/\text{cm}^2$ 程度)、物体表面の微細な集光スポット近傍に瞬間的にプラズマを発生させ、その発光スペクトルを検知することで、元素の定性・定量を行う分析法である。本分析法は、蛍光 X 線分析と比較して検出元素範囲が広く精度も高い。また、瞬時に測定が完了するので高速処理が可能である。しかし、測定領域 (集光スポット) が極めて小さいために、物体表面に汚れや塗膜などがあると、その影響を受けやすいという問題がある。

レーザー誘起プラズマ分光分析法をソーティングに応用する研究開発が Fraunhofer ILT と Titech 社によって行われている^{9,10)}。Fig. 5 はその試作機の写真である。本試作機では、ベルトコンベア上を 3m/s の速度で移動する物体の位置を正確に検知し、同一の測定スポットに対して複数回レーザー光を集光照射する機構を有している。これによって 1 回目の照射で物体表面の汚れを除去した後、再度同一の測定スポットに照射して発光スペクトルを取

得することで、物体表面の汚れの影響の回避可能としている。表面を酸化処理または Cu-Zn 合金でコーティングした 8 種類の展伸用アルミニウム合金を 99.8%以上の精度で識別可能であることを実験で確認している。近い将来、このような LIBS ソータがミックスメタルや各種合金スクラップの選別などの目的で利用されるものと考えられる。

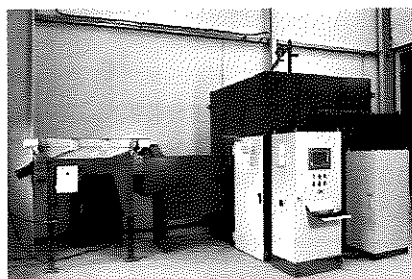


Fig. 5 Photo of the automated LIBS sorting system developed by Fraunhofer ILT and Titech GmbH.⁹⁾

3.7 レーザー3D解析法

レーザー3D解析 (Laser 3D analysis) は、ベルトコンベア上を移動する物体の表面を直線状のレーザー光でスキャンし、レーザー光線の高さ方向への動きを CCD カメラで検知して 3 次元的な表面形状をデジタルデータとして計測する方法であり、光切断法とも呼ばれる。計測したデジタルデータから物体のサイズや形状に関する変数を算出することで、これらの違いに基づいた選別が可能となる。レーザー3Dを用いたソータは、安価、高解像度、高速処理といった光学ソータと同様の利点を有しており、機構が簡便であることから他のセンサーと組み合わせて用いられることも多い。

筆者らは Fig. 6 の写真に示すようなレーザー3Dとベルトコンベヤ式重量メータを組み合わせたソーティングシステムを開発し、廃車由来の展伸アルミニウム合金 (Alw)、鋳造アルミニウム合金 (Alc)、マグネシウム合金 (Mg) の破碎スクラップの選別が 90%以上の精度で可能なこと、ならびに本システムで選別回収した各スクラップから二次合金を製造する際には、バージン原料による希釈倍率が低下することを報告している¹¹⁻¹⁴⁾。Fig. 7 は、廃車破碎選別施設でサンプリングした破碎スクラップについて、レーザー3Dで計測した体積値と重量メータで計測した重量値から算出した見掛け密度 (X_1) の頻度分布を示している。3 種の破碎スクラップが異なる分布を示すことがわかる。本システムでは、こうした見掛け密度値に加え、投影面積値や最大高さなどの 3D 形状に関係する 13 通りの変数をニューラルネットワークに入力することによって物質を

識別する。あらかじめ設定するデータベースを変更することで、他の物体の選別にも応用できる。現在はアルミサッシスクラップやアルミ缶スクラップに混入する異物除去や使用済み家電製品の選別などについて検討している。

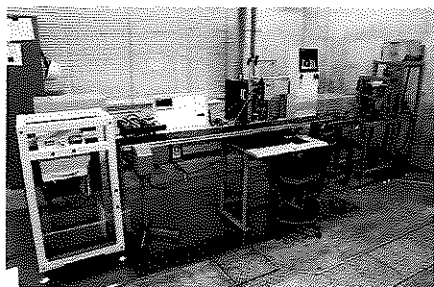


Fig. 6 Photo of the sorting system combining laser 3D and weight meter developed by AIST.

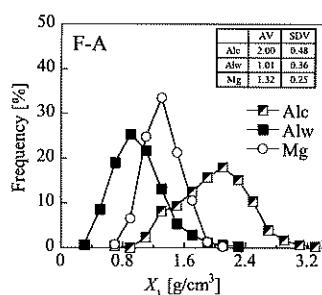


Fig. 7 Distributions of the apparent density of lightweight metal scraps. ¹²⁾

3.8 ラマン分析による方法

ラマン分析法は、物体にレーザー光を集光照射した際に発生するラマン散乱光（照射光と異なる振動数を有する光）スペクトルを検知する分析法である。入射光との振動数の差（ラマンシフト）が物質の構造に特有の値をとることから、物質を構成する分子の構造や状態を知ることができる。ラマン分析法を用いたソーティングについては、黒色プラスチックの選別やプラスチックに含まれている難燃剤の識別などへ応用する研究が試みられている¹⁵⁻¹⁷⁾。一般にラマン散乱光の強度は非常に弱いので、ラマンスペクトルを検知する際、短時間の測定ではSN比が不十分となる場合が多く、それによって高速処理が難しくなる場合がある。また、LIBSと同様の理由で汚れの影響を受けやすいので、対象物の表面はクリーンであることが必要である。

これまで実用化されたラマンソータは見られなかった

が、最近、土田らによってラマンソータの実用機が開発された¹⁸⁾。光源として高出力半導体レーザー（波長 600～900nm の範囲で出力 100mW 以上）を用いており、25 台のラマン散乱識別装置を並列に動作させることで、ベルトスピード 1.6m/s で移動する 5～30mm の小さな破砕プラスチック片を 600kg/h で選別する能力がある。また、独自の識別計算方法を採用することで処理を高速化している^{19,20)}。家電リサイクルプラントにおいて発生するシュレッダーダストに対して、多段の湿式比重選別などで純度を高めたポリプロピレン及びポリスチレン濃縮物の最終精製工程にこのラマンソータを用いると、両成分の純度を共に 98%以上とすることが可能である。

3.9 温度差を検知する方法

対象物をマイクロ波で急速加熱し、昇温、降温過程を赤外線カメラで検知して、温度変化特性の違いから物質を識別するソーティング法が、Berlin 大学において廃プラスチックの選別技術として研究されている²¹⁾。マイクロ波照射下でのプラスチックの温度上昇は、プラスチックの極性、サイズ、マイクロ波出力及び周波数、加熱時間に依存する。温度上昇が顕著なプラスチック（ポリアセタール、ポリウレタン）、温度上昇が中程度のプラスチック（アクリル、ポリカーボネート、ポリ塩化ビニル、6 ナイロン）、温度上昇が殆ど見られないプラスチック（テフロン、ポリエチレン、ポリプロピレン）に分類することができ、10mm～20mm 程度の大きさのこれらのプラスチック片を選別可能であると報告している。本技術については明確な温度差を検知するために相当の時間を必要としており、現状はベルトスピード 0.6m/s 程度で用いられている。処理の高速化が今後の課題であろう。

3.10 中性子線の利用

物体に中性子線を照射して内部の原子核を放射化し（Neutron activation）、同時に発生する即発 γ 線（Prompt gamma-ray）が原子核に固有のエネルギーを持つことを利用した元素分析法（PGNAA 法）を利用すれば、非破壊で物体の内部に存在する元素の定性・定量分析が可能となる。これは前述のいずれの分析法でも不可能であるので、実現できればそのメリットは非常に大きい。この元素分析法自体は古くから知られていたが、最近になり低コストかつ比較的 안전한中性子線源が開発された²²⁾こと、ならびに γ 線検出器が高機能化したことによって、ソーティングへの応用が検討され始めている。FORCE Technology 社は、PGNAA 法によって NiCd 電池、NiMH 電池、Li-Ion 電池、Zn-Carbon 電池の非破壊選別が実際に可能であることを報告している²³⁾。本ソーティング技術を実用化するには、安全性の確保が課題となる可能性が

高いが、その機能については魅力的であり、今後の開発動向には注目すべきである。

3.11 テラヘルツ波の利用

テラヘルツ波とは、波長 $3\mu\text{m}\sim 3\text{mm}$ 、周波数 $0.1\sim 10\text{THz}$ の電磁波のことである。この波長域は光波と電波の中間に位置しており、これまで発生・検知が困難であったため、応用については未開拓の領域であった。近年のレーザー技術の進歩によってテラヘルツ波パルスを比較的容易に発生させることが可能になり、応用への関心が高まりつつある。テラヘルツ波は、電波のように紙、プラスチック、繊維などを透過し、光波のようにレンズやミラーで空間を取り回すことができる。金属に対しては全く透過せず、水分には吸収されやすい。X線の100万分の1のエネルギーしか持たないので人体にも安全である。Aachen工科大学において、こうした特徴を有するテラヘルツ波をソーティングに応用する研究が始まっている²⁴⁾。プラスチック試験片を透過するテラヘルツ波パルスの振幅波形を測定することで、ポリスチレンとポリプロピレンの識別が可能なることを報告している。

4. おわりに

本稿は国際会議 (Sensor Based Sorting 2012) の発表論文の内容を中心に、資源リサイクルにおけるソーティング技術の最近の動向をまとめたものである。本会議を主催しているドイツはソーティング研究の本場であり、TiTech社、Steineert社などの世界的な装置メーカーが産業界を形成し、Aachen工科大学やFraunhofer研究所などと共同で先進的な研究開発を行っている。ソーティングは、資源リサイクルの将来像を描く上で必須の技術といえるが、本会議はその最新動向に関する情報を収集する絶好の機会である。今回は2014年3月に開催²⁵⁾されるようなので、本技術に関心のある方は参加されることをお勧めする。

References

- 1) Y. Ozaki, A. Uda, T. Akai: *Kagaku no tameni Tahenryou Kaisaki*, Kodansya (Tokyo), pp.42-79 (2002)
- 2) Nihon Bunko Gakkai: *Sekigai Raman Bunkouhou*, Kodansya (Tokyo), pp.144-179 (2009)
- 3) K. Kyuma, T. Nakayama: *Neuro Computer Kogaku*, Kogyo Chosakai (Tokyo), pp.33-75 (1992)
- 4) E. Beker: Proc. Sensor Based Sorting 2012, paper No. 19 (2012)
- 5) <http://www.mogensen.de/>
- 6) M.B. Mesina, TPR. De dong, WL. Dalmijn: International Journal of Mineral Processing, **82**, pp.222-232 (2007)
- 7) <http://www.ponyindustry.co.jp/>
- 8) S. Owada, K. Tsuchiya, A. Takasugi, Y. Kato, T. Funakoshi, H. Tanno: Proc. Sensor Based Sorting 2012, paper No. 11 (2012)
- 9) P. Werheit, R. Noll, J. Makowe, C.F. Begemann, V. Sturm, M. Gesing: Proc. Sensor Based Sorting 2012, paper No. 32 (2012)
- 10) P. Werheit, C.F. Begemann, M. Gesing, R. Noll: Journal of Analytical Atomic Spectroscopy, **26**, pp.2166-2174 (2011)
- 11) S. Koyanaka, K. Kobayashi: Resources, Conservation and Recycling, **54**, pp.571-578 (2010)
- 12) S. Koyanaka, K. Kobayashi: Resources, Conservation and Recycling, **55**, pp.515-523 (2011)
- 13) S. Koyanaka: Proc. Sensor Based Sorting 2012, paper No. 23 (2012)
- 14) S. Koyanaka, K. Kobayashi, Y. Yamamoto, M. Kimura, K. Rokuchō: Resources, Conservation and Recycling, **75**, pp.63-69 (2013)
- 15) Sony International: Toku Kai 2000-356595
- 16) S. Koyanaka, H. Yamaji, T. Moro, S. Endoh: Journal of the Society of Powder Technology, Japan, **39**, pp.190-195 (2002)
- 17) Y. Yamaji, K. Okaya, G. Dodbiba, L.P. Wang, T. Fujita: Resources Processing, **60**, pp.65-71 (2013)
- 18) Y. Tsuchida, H. Kawazumi, K. Arikata and A. Tsuchida: Resources Processing, **57** (2010), 146-149.
- 19) H. Kawazumi: Toku Kai 2008-209128.
- 20) H. Kawazumi, Y. Tsuchida: Toku Kai 2009-92458.
- 21) M. Labbert, T.A. Baloun, J.I. Schoenherr and H.Z. Kuyumcu: Proc. Sensor Based Sorting 2012, paper No. 29 (2012)
- 22) J. Sved: Proc. Sensor Based Sorting 2012, paper No. 13 (2012)
- 23) J. Sletsgaard and N.H. Pedersen: Proc. Sensor Based Sorting 2012, paper No. 7 (2012)
- 24) A. Maul, M. Gastra, F. Mavroudis and M. Nagel: Proc. Sensor Based Sorting 2012, paper No. 15 (2012)
- 25) http://www.sbs.rwth-aachen.de/cms/front_content.php#

日立市における資源開発の展開

～日立鉱山から小型家電回収事業まで～¹⁾

福地 伸^{2*)}

Development of Resources in Hitachi City: from the Hitachi Mines to the Small Household Appliances Collection and Recycling Business

Shin Fukuchi

Deputy Mayor, City of Hitachi

Abstract

In "Hitachi Village" named as village standing in the sun because it is like a beautiful rise of the morning sun, Fusanosuke Kuhara has established Hitachi Mine Inc., which was the dawn of the industrial city Hitachi. Namihei Odaira who had joined Hitachi Mine Inc. as an electrical engineer founded Hitachi, Ltd., which led to the rise of the city of Hitachi today by the development of the two companies. Many medium and small-sized businesses as well as JX Nippon Mining & Metals Co., the successor to Hitachi Mine Inc., and many affiliates of Hitachi, Ltd. gather in current Hitachi City. Many citizens of more than 190,000 are living as of associated with these companies more or less. Hitachi City, up to here, has realized the coexistence and co-prosperity with the area by the advanced action to environmental problems such as construction of the world's biggest chimney to overcome damage caused by smoke and 10-million planting.

High citizen awareness for environment is shown in the action to current recycling. Our city was appointed as a model area of "the rare metal recovery from used household appliance products and their appropriate processing" which Ibaraki suggested, by Ministry of the Environment and Ministry of Economy, Trade and Industry, and cooperated with examination about construction of effective recovery systems. After model business of 3 years, we aim at the circulation in the complete level including the middle processing in the welfare recycling factory by handicapped persons, as original business.

Keywords: Hitachi mine, Hitachi, Ltd., rare metal recycling project, small household appliance recycling, employment of handicapped persons

1 日立鉱山と日立製作所¹⁾

明治政府は鉱山の開発を重要課題として、優良鉱山の官営化と民間による開発の自由化を進めた。銅の輸出の解禁や海外市場での銅価格の高騰により銅市場が拡大し、政府による鉱業政策の進展、近代技術の導入とあいまって、民間

による鉱山開発が進み、江戸時代に荒廃、衰微していた鉱山が開発の対象となっていた。日立でも例外ではなかった。日立村の赤沢鉱山は多くの経営者が開発に挑んだが、鉱毒対策や資金不足などから長期的な経営を断念する中、明治38年(1905)赤沢鉱山を買い取った久原房之助は、日立鉱山と改称して開業した。小坂鉱山を銀山から銅山へと転換し再生した久原は、小坂鉱山から来た技術者や鉱員とともに、発電所の建設や削岩機の導入など機械化を進め、新製錬所の建設など開業から6年で日立鉱山の骨格をつくりあげていった。こうして、明治39年から44年の間に、従業員数・採掘粗鉱量・銅生産量は、約400人から1,300人、約1万トンから

1. 平成25年10月24日 本会第131回例会において発表

2. 日立市役所

*shin.fukuchi@city.hitachi.lg.jp

平成25年8月9日受理



Fig.1 Photo of Daioin refinery plant of Hitachi Mine and the world's biggest chimney.
(日立鉱業所大雄院製錬所と大煙突)²⁾

17万トン、約260トンから5,670トンへと飛躍的に増大をみせた。この日立鉱山において一挙に前年の3倍の銅生産が行われた明治40年、煙害が大きな問題になり、新製錬所が稼働した明治41年には農作物や山林の被害の拡大と激しさが増した。補償金での対応が限界となった日立鉱山は、久原の決断で高煙突の建設に踏み切り、大正3年(1914)3月に工事に着手し翌年3月に当時世界一の、高さ155.7メートルの大煙突を完成させた。この煙突の完成により煙害の減少と生産の拡大を達成するとともに、日立鉱山では被害山林へ耐煙樹種である大島桜をはじめ約1,000万本の植林を積極的に行い、他の鉱山とは異なった深い緑や桜の名所地としての現在の景観をつくりだしている。

日立製作所の創業者小平浪平は、小坂鉱山で久原のもとで働いたことがあり、日立鉱山開業とともに、発電所建設の責任者として招かれ、日本有数の発電所を完成させた。小平は鉱山の機械修理から自主技術による開発路線を進め、鉱山業と並ぶ事業の一つとして独立し、日立製作所が誕生した。日立製作所第1号の製品である5馬力誘導電動機の製作に成功し、変圧器や電動機、発電機、電気機関車の製造など日立鉱山向けの製品から国内向け製品の製作へ拡大していった。

久原鉱業は第一次世界大戦の始まった大正3年までに70に及ぶ新鉱区を取得、さらに、大正4年から7年までの間に31の鉱山を買収、海外で行った資源調査は2,840件に達し、北樺太、台湾などに大きな足跡を残している。金属資源にとどまらず石油、石炭資源についても、大正5年には秋田・新潟で油井掘削を始め、昭和10年には雄物川油田の大噴油など成果をあげている。日立製錬所の拡充と同時に佐賀関(大分)製錬所の新設などにより、大正6年の久原鉱業のシェアは全国生産量のうち金35%、銀40%、銅34%を占めた。

久原房之助は日立で成功を収め、第一次世界大戦で大き

く飛躍したが、久原は60歳で実業界を去り政治家に転身、昭和3年久原鉱業は日本産業と改称し、持ち株会社として、日本鉱業、日立製作所、日産自動車などを傘下におく日産コンツェルンを構築し、企業の出資額総額で日本一の財閥となった。

日立鉱山も日立製作所も戦争の拡大とともに、生産規模を拡大し、国際収支決済のために必要とされた金を生産するために、銅山として知られた日立鉱山でも、金の生産は重要な位置を占めていた。日本鉱業の産金量は昭和9年から著しく増加し、12年には1万4,344キログラムと、全国の産金量の30パーセントを占め、第1位となっていた。このうち、日立鉱山の産金量は4,213キログラムで、日本鉱業全産金量の29パーセントに達していた。販売高では金は銅を上回っていたが、日本鉱業の銅生産量も昭和16年には3万3,892トンに達し、業界第1位を占め、このうち、日立鉱山の銅生産量は1万1,855トンで日本鉱業全生産量の35パーセントを占めていた。製錬部門では自山鉱60パーセントに対し、受入・買入鉱が40パーセントであった。日立鉱山では、金や銅の生産のほか、軍事資材として爆薬の原料である硫酸の生産をはじめ、白金、パラジウム、硫酸銅、ニッケル、セレンウムのほか、船底塗料となる亜硫酸も生産された。

戦後、日立製作所は終戦時国内外に擁していた81社のうち53の系列会社と19工場の処分を余儀なくされたが、朝鮮戦争により再び好況に転じ、日立市内に主要な工場として4工場1研究所が設置され、鉱工業都市として新たな発展をした。日立製作所主要4工場の従業員が製造業従業員の約70パーセントを占めており、日立市の工業、地域経済は日立製作所の動向に大きく左右されている。

一方、戦後の日立鉱山も朝鮮戦争に伴う特需により出鉱計画を拡大し、関連施設・設備の拡充が行われた。昭和24年における日立鉱山の採掘粗銅量・銅生産量・従業員数は、それぞれ21万2,134トン・1万5,672トン・5,289人で、それが34年には54万2,272トン・6万6,321トン・4,174人となり、生産の伸びに比べ従業員数が減少し、この間の合理化を物語っている。しかし、昭和31年の国内銅価格は戦後最高のトンあたり41万円を記録したものの、以後景気の後退に伴い下落し、33年には26万円にまで下がった。この時の国際的な銅価格の相場はトンあたり23万円と日本の産銅業の生産力の低さを示している。また、貿易の自由化に対応するため昭和37年以降、大幅な人員の削減を進めながら生産水準を維持し、生産コストの低減化を図っていった。採鉱部門での合理化と並行して、製錬部門でも施設・設備の改善を進め、自山鉱による採掘粗銅量が減少する一方で他山鉱による生産も行われ、銅生産量は昭和38年には10万トンを超えるまでになった。

しかし、日本鉱業は昭和51年(1976)、銅の溶錬を佐賀関製錬所に集中したため、明治41年(1908)から続けられた日

立での銅の溶錬に終止符が打たれた。昭和53年には、産業廃棄物から有価金属を回収し、残りを無害化して再資源化するリサイクリング溶解炉が操業した。採掘部門でも昭和48年日本鉱業から切り離され、日立鉱山株式会社として再出発したが、以後年間15万トン前後する出鉱にとどまり、昭和56年(1981)9月に閉山した。

現在はJX日鉱日石金属グループとして、非鉄金属資源の資源開発・製錬から素材の製造・販売、環境リサイクルまで一貫した事業展開をしているが、日立事業所ではリサイクル原料専用の製錬・精製設備として、銅、鉛の乾式製錬技術と最先端の湿式精製技術をコンパクトに組み合わせた独自のゼロエミッション型複合製錬・精製プロセスによる次世代型製錬所HMC(Hitachi Metal-recycling Complex)を完成させ、「都市鉱山」と呼ばれる、リサイクル原料中に含まれる微量なレアメタルなど多様な金属を効率的、経済的に回収する「大都市隣接型・資源循環型製錬所」として機能している。

2 日立市における小型家電リサイクルの取り組み³⁾

(1) 日立市の特性と事業実施までの経緯

日立市は、平成14年度に実施した新ごみ収集システム(有料化)により、新たな収集項目として粗大ごみ(小)という区分を設けた。これは、鉄やプラスチック類などの材質が混合しているもので容量が45リットルの指定袋に入れて集積所に出すものである。したがって、必然的に小型家電が不要になった場合、この指定袋に入れて排出される仕組みである。

また、市民自ら清掃センターへ持ち込む自己搬入(以下「自己搬入」という。)の比率が高く毎年ごみ総収集量の約30パーセント(許可業者搬入含む)を超えている。

これは、年始の3日間(その他臨時休場あり)を除き市民が直接清掃センターに搬入できるという利便性が起因していると考えられる。そのため必然的に廃小型家電の持ち込みも多くなっている。

このようなことから、本市は一定の廃小型家電の回収が見込めるとのことで、茨城県が平成19年度に立ち上げた産官学連携の「再資源化・地球温暖化防止対策タスクチーム」の一員として指名を受け、廃小型家電からのレアメタル抽出の技術開発等に参画することとした。

その後、茨城県が「いばらきイノベーション戦略」に基づく産官学プロジェクトとして環境省・経済産業省に提案していた「レアメタルリサイクルプロジェクト」が平成20年12月に採択され、「使用済家電品からのレアメタルの回収及び適正処理」(平成21年度からは使用済小型家電の回収モデル事業(以下「モデル事業」という。))に関するモデル地域に茨城県が指定されたことに伴い、廃小型家電等の効率的な回収システム構築を検討するフィールドとして平成20年12月から平成24年2月までの約3年間廃小型家電の回収などに協力してきた。

回収方法は、自己搬入及び粗大ごみ(小)の袋から対象品を抜き取るピックアップ回収と行政施設等に回収拠点を設けるボックス回収で実施した。なお、イベントなどで集めるイベント回収を実施したが今回(Table 1)の回収量には含めていない。モデル事業が平成23年度で終了したことから平成24年度から本市独自の事業として、回収品目を増やすとともに、障害者雇用を推進するなど、新たな制度に対応するため廃小型家電等資源化実証実験事業(以下「独自事業」という。)を実施している。

Table 1 Pick-up and box recoveries. (ピックアップ、ボックス回収品目量)

品目	平成20年度		平成21年度		平成22年度		平成23年度		合 計	
	個数(個)	重量(kg)	個数(個)	重量(kg)	個数(個)	重量(kg)	個数(個)	重量(kg)	個数(個)	重量(kg)
デジタルカメラ	81	15.00	629	185.80	723	141.10	769	156.25	2,202	498.15
ビデオカメラ	7	5.10	70	47.10	95	53.60	95	74.64	267	180.44
電子手帳	98	14.30	558	128.20	735	110.76	581	82.60	1,972	335.86
ゲーム機器	147	110.50	2,140	2,265.20	2,471	2,572.70	3,683	3,528.44	8,441	8,476.84
ACアダプタ	225	41.50	12,446	2,539.50	18,209	3,640.50	20,100	4,527.61	50,980	10,749.11
卓上計算機	188	18.50	2,110	225.20	2,887	304.48	2,633	274.13	7,818	822.31
カーナビ	15	21.10	202	117.60	118	113.80	258	192.22	593	444.72
ワープロ	64	269.30	687	2,751.70	553	2,341.00	617	2,602.50	1,921	7,964.50
携帯電話	2,191	232.30	4,591	574.80	5,149	556.91	6,316	687.55	18,247	2,051.56
携帯音楽プレーヤー	154	24.20	865	162.60	1,074	207.35	1,003	198.51	3,096	592.66
合 計	3,170	751.80	24,298	8,997.70	32,014	10,042.20	36,055	12,324.45	95,537	32,116.15

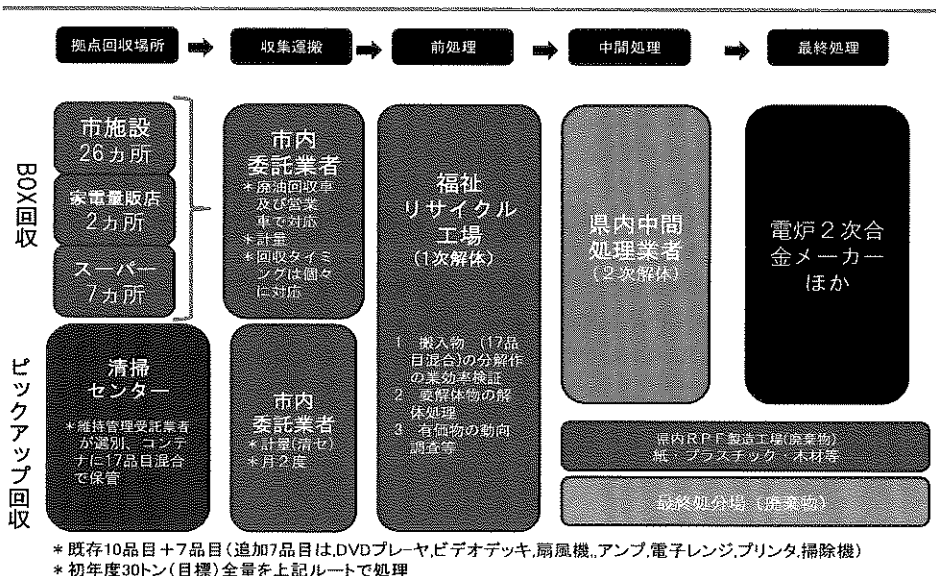


Fig. 2 Flowsheet of the original project of Hitachi City for recycling consumer electronics.
 (日立市廃小型家電等資源化実証実験事業の流れ)

(2) 独自事業の流れ

事業の流れは(Fig. 2)のとおりである。独自事業は、モデル事業で構築したピックアップ回収とボックス回収をそのまま継続することとした。ボックスの設置場所もモデル事業時と変わりなく市の施設及び家電量販店、スーパーに設置した。回収品目は、既存10品目(Table 1の品目)に比較的解体しやすく、ベースメタルが多く含まれ事業の継続性が見込める①DVDプレーヤー、②ビデオデッキ、③扇風機、④アンプ、⑤電子レンジ、⑥プリンタ、⑦掃除機の7品目を追加(以下「17品目」という。))した。

追加品目については、ボックスに収納できないことから、ピックアップ回収のみとした。

また、自己搬入及び粗大ごみ(小)で排出される廃小型家電は、清掃センターで選定しピックアップを行う。

17品目は、市が委託した民間事業者(以下「委託業者」という。)が清掃センター及び各拠点から収集し、自社の福祉リサイクル工場まで運搬する。福祉リサイクル工場に集められた17品目は、品目別に手分解などにより一次解体される。一次解体された部品は、廃棄物を除いて分離・濃縮などの二次解体を行う県内中間処理業者に送られる。二次解体後は、市内電炉二次メーカーや国内非鉄製錬所に送られ金属資源として再生される。完全国内循環を目指した。

(3) 具体的な処理の流れ(Fig. 3)

① 拠点回収場所

回収ボックスの設置箇所は、市役所本庁及び各支所、交流センター等、家電量販店、スーパーの35箇所である。

粗大ごみ(小)及び自己搬入された廃小型家電は、清掃セ

ンターの維持管理業務を受託している業者が17品目をピックアップし、専用のコンテナで保管している。平成24年度は、ボックス及びピックアップで回収した17品目約30トンを独自事業の中で処理する予定である。7月末時点で約10トンを出している。

② 収集運搬

17品目は委託業者が、清掃センターと拠点回収場所から収集し、自社所有の福祉リサイクル工場に運搬している。

なお、ボックス回収の収集運搬については、別事業のバイオディーゼル燃料精製業務の中で利用する廃食用油とあわせて委託業者が収集運搬していることから高効率に行うことができている。

③ 前処理(一次分解)

17品目は、委託業者が運営する福祉リサイクル工場で前処理される。福祉リサイクル工場では、障害者を正規社員として採用し主に廃パーソナルコンピュータの手分解作業を行っている。17品目の分解は、正規社員3名に加え、今回の独自事業のために新たに雇用した研修生3名で行っている。

当初、指定した時間内に解体量を確保できるか不安があったが、現在では健康者と変わらない時間で作業ができています。

④ 中間処理(二次分解)

福祉リサイクル工場で手分解された部品(Table 2)は、無償物(廃棄物)を除いて県内中間処理業者に運ばれる。そこで、分離・濃縮(破碎・選別処理)されベースメタル(鉄・アルミ等)、銅・貴金属等(濃縮物)の再生原料に分けられ、それぞれの用途より、市内電炉二次メーカーや国内非鉄製錬所に

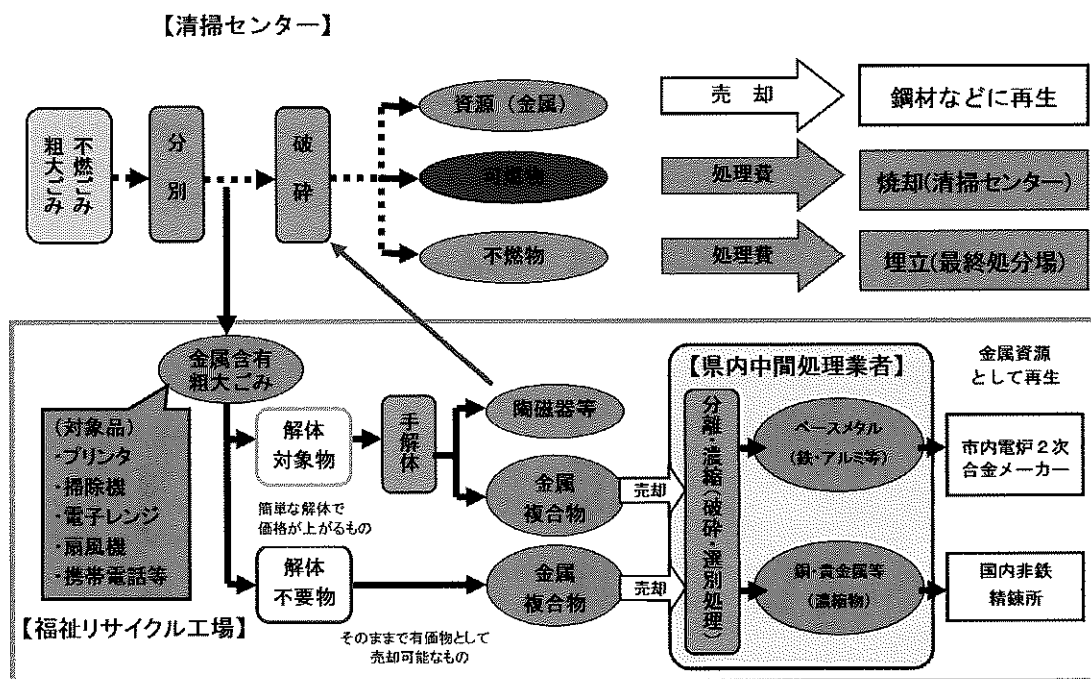


Fig. 3 Concrete flowsheet for processing consumer electronics waste in Hitachi City.
(日立市における廃小型家電の具体的な処理の流れ)

Table 2 List of parts for consumer electronics disassembled in the welfare recycling factory.
(福祉リサイクル工場で手分解された部品)

区分	対象品 部品	電子レンジ	掃除機	プリンタ	ビデオデッキ	DVDプレーヤ	扇風機	アンプ	ゲーム機器	ワープロ
①	モーター	○	○				○			○
	トランス	○			○			○		
	マグネトロン	○								
②	基板	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	DVD読取機					○				
③	コード類	○	○	○	○	○	○	○	○	○
④	ハードディスク				○	○				
⑤	金属樹脂複合材			○	○	○			○	○
⑥	鉄	○	○	○	○	○	○	○	○	○
⑦	プラスチック	○	○	○	○	○	○	○	○	○

売却されている。(以上 Fig. 4 も参照)

(4)事業のPR

本市が地球環境保全対策として毎年夏のはじめに実施しているエコフェスひたちの中に独自事業のブースを設け子どもたちに掃除機を分解させるなど、事業推進のPRを行った。

(5)期待される効果

本市において廃小型家電や家具類は、粗大ごみ処理施設

設(40 t/日(5 時間))で破碎処理をしている。処理にかかるコストは、毎年1億円程度必要としている。この独自事業が軌道に乗ることで、粗大ごみ処理施設の稼働時間が少なくなるため大幅なコスト削減につながる可能性があり、施設の次期選定に大きな影響を与えると考える。施設で破碎処理された後は、風力選別、磁力選別され可燃物、不燃物、資源物の3種類に分別される。しかし、現在の施設の選別能力では非鉄



Fig. 4 Photos of the situation of recycling consumer electronics.
(日立市における廃小型家電リサイクルの様子)

金属等は、可燃物に紛れ込んでしまうため、焼却施設でのキレート剤(重金属固定剤)が必要となり、大きな負担となっている。廃小型家電を別ルートに乗せることで、大きなコスト削減につながる可能性がある。また、解体作業には障害者を雇用する企業を選定することで、障害者雇用の促進も図ることができる。あわせて、新たに国が進めている使用済み小型家電のリサイクル制度(以下「リサイクル制度」という。)に優位に対応できる可能性がある。

(6)今後の展開

本市は、国が進めているリサイクル制度の参加について、二つの方法を考えている。手を加えず直接認定事業者へ渡す方法と障害者施設などで一次解体してから認定事業者へ渡す方法である。どちらを軸にするかは、今後の実験の結果を基に検討していく。できるだけ市の歳出を抑えるため、指定される品目ごとにどこまで解体すれば有償で引き取ってもらえるのか、解体せずに有償で引き取る品目はどれなのかを判断する必要がある。また、障害者雇用の観点からも作業に携わる者の作業量、解体の正確さについて判断する必要がある。平成25年度は、対象品目を25品目程度に増やし、引き続き独自事業を継続するとともに、資源化する廃小型家電の品目を決定したい。

(7)国が進めているリサイクル制度への要望

リサイクル制度を成功に導けるかは、ボックス回収に係わるコスト抑制が重要であると考え。市民の利便性のためには、身近な場所に多数の排出拠点があることが望ましいが、拠点回収の場所から定期的に収集運搬するコストが占める割合が大きいため、コストを抑制するには、排出拠点を指定引取場所として市内数箇所選定することが効果的と考える。そこで、全国大多数の市町村が設置している障害者訓練施設やシルバー人材センターなどを指定引取場所(排出拠点)に指定する項目を制度の中に設けることを要望したい。集めたものは、そこで解体などして認定事業者へ解体物等を送るという仕組みである。障害者、高齢者雇用につながることで、何より回収のコストが抑制できる。また、持込み者へは何かのインセンティブを与えることにより、回収量は大幅に増えると思われる。

References

- 1) Shinshu Hitachishishi Gekan, Hitachishi
- 2) Hitachikouzanishi, Nihonkougyoukabushikikaisha Hitachikougyouso
- 3) Kazue Suzuki: Life and Environment, Vol.57, No.11, 2012, pp.29-34

メタンハイドレート開発に係る地層特性評価技術の開発¹

天満 則夫^{2*}

Development of evaluation method for sediment deformation

Norio TENMA

Methane Hydrate Research Center, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Abstract

Methane Hydrate (MH) is considered to be one of the new-generation energy resources. The depressurization method has been proposed as a method of extracting methane gas from the MH sediment in marine sediments. During depressurization operation the sediment deformation may occur due to MH dissociation and increases of effective stress. Thus, “Development of evaluation technologies for sedimentary characteristics” is studied in the Research Group for Production Method and Modeling, MH21 Research Consortium. Geo-mechanical simulation code ‘Coupled thermo-hydro-mechanical analysis with dissociation and formation of methane hydrate in deformation of multiphase porous media (COTHMA)’ are developed to predict the sediment deformation during the methane gas production from MH. Also, laboratory experiment for well integrity (push-out test) have been carried out to understand the frictional strength between well and the sediments in AIST, Tsukuba. Outline of these research activities are described in this paper.

Key words: Methane Hydrate (MH), MH21 Research Consortium, COTHMA, Geo-mechanical

1. はじめに

メタンハイドレート(以下、MH)は大水深の浅層(海底面より200~300m)のような高圧・低温の条件下で固体として存在しており、圧力を下げたり(減圧)、温度を上げたりすると、メタンガスと水に分解することから新たな天然ガス資源として期待されている。このMH資源開発のために2001年度に「メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム(MH21)」が組織され、研究開発が進められている¹⁾。2009年4月からフェーズ2が開始され、2013年3月には世界で最初の第1回海洋産出試験が実施された。試験では、6日間の生産期間で約120,000m³のガス生産量があり、MH資源開発において、大きな成果が得られた。

産業技術総合研究所は、石油天然ガス・金属鉱物資源開発機構(JOGMEC)とともにMH21コンソーシアムの中核機関として本研究開発を進めている。

今回、「つくばから発信する資源・エネルギー技術」ということでMH資源開発に関する当センターの取り組み、特につくば西サイトの研究活動について紹介する機会を得たので、最近のプロジェクトの状況や著者の研究チームが進めているMH層の力学挙動に関する研究進捗について簡単に報告させていただく。

2. メタンハイドレート(MH)について

MHはメタン分子が高圧・低温下の条件で、水分子の籠の中に取り込まれた個体の結晶である。この高圧・低温下の条件になる環境として陸域では永久凍土地帯、海域では大陸縁辺部の数百メートル以上の海底下の堆積層などがあり、これまでの調査・研究によって日本の近海にも多く存在することがわかってきた。Fig1 に、日本周辺海域におけるMHの存在を示す指標となる

1. 平成 25 年 10 月 24 日 本会第 131 回例会において発表

2. 独産業技術総合研究所 メタンハイドレート研究センター

* tenma-n@aist.go.jp

平成 25 年 7 月 20 日受理

BSR(Bottom Simulating Reflector,海底疑似反射面)の分布を示す。なお、東部南海トラフ海域では1999年～2000年にかけて掘削調査が実施され、世界で初めて砂質層の砂粒子と砂粒子の間にMHが含まれていることが確認された。この東部南海トラフのMHが全て分解した場合に得られるメタン量は³⁾、2011年に日本に輸入しているLNGの約11年分に相当すると推定されている。

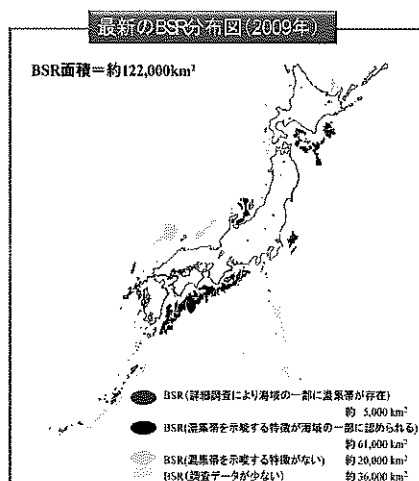


Fig.1 Distribution of Methane Hydrate (BSR) in Japan³⁾

3.メタンハイドレート資源開発研究コンソーシアム(MH21)の取り組み

フェーズ1では、東部南海トラフ海域のMH層のメタンガス原始資源量の算定や、減圧法による陸上産出試験の成功等、多くの成果を挙げた。そして、2009年4月より、「我が国周辺海域での海洋産出試験の実施等の研究開発を通して、メタンハイドレート層のメタンガスがエネルギー資源となり得る可能性をより高い信頼性で評価するとともに、メタンハイドレート層の商業的開発のための技術の整備に必要となる技術課題の抽出を行う」ことを目的にフェーズ2が開始された。フェーズ2では、東大の増田昌敏准教授をプロジェクトリーダーとして、フィールド開発グループ、生産手法開発グループ、資源量評価グループ、環境チームの研究グループ・チームがMH21内につくられ研究開発を進めている。2013年3月には、東部南海トラフの第二渥美海丘エリアにおいて、世界で最初の第1回海洋産出試験が実施された。この試験は、①減圧法によりハイドレートからガスを生産できることの実証と生産性の確認、②減圧法が海底下の比較的浅い深度に適用するた

めの技術の確立等を目的に実施され、減圧法によって6日間で約120,000m³のガスが生産された。また、貯留層評価等のための貴重な様々なデータが取得された。

今後は、現場試験で得られたデータを基に、MH層内の様々な現象に関して各研究グループ・チームが連携をとりながら詳細な検討をしていく予定である。

さて、この試験で適用された減圧法は、地層中の原位置において水をくみ上げ圧力を下げることでメタンハイドレートをメタンガスと水に分解させて、メタンガスを採取する方法です。この様な生産手法に関して、(独)産業技術総合研究所が生産手法開発グループの管理主体として研究開発を進めている。この生産手法開発では、大量・安定生産を実現する「生産手法高度化技術」や実用化シミュレータ開発のための「生産性・生産挙動評価技術」、さらにMH層からのメタンガス生産に伴う地層変形・圧密挙動について長期的な安全性を保证するための「地層特性評価技術」の研究が行われている。

4.地層特性評価技術について

生産手法開発グループが進めている「地層特性評価技術」では、①地層変形シミュレータの開発、②坑井の健全性評価および③広域の地層変形評価の課題を設定して研究開発を行っている。

具体的には、①地層変形シミュレータの開発では、後述するCOTHMAの開発等を進めている。また、シミュレータでMH層の変形や圧密挙動を取り扱うことが可能になるように、MH層の様々な力学パラメータの取得も行っている。

②坑井の健全性評価では、減圧法適用時に坑井壁面に大きな応力差が生じることから、この生産条件が坑井壁に与える応力を解析し、生産期間中における坑井の安定性について評価を行うことになっている。

さらに、③広域の地層変形評価では、断層などの不連続性や地層の不均質性が海底面沈下や地層変形などに与える影響を解析する手法を調査・検討することや、シミュレータによる感度解析の実施を行っている。また、開発初期から廃坑後に至るまでの期間における地層の変形と強度の変遷について解析し、開発前との比較によって開発の長期的な影響を評価することになっている。

このうち、著者の研究チーム(生産モデル開発チーム)は、①地層変形シミュレータの開発として、コア試験などを通して力学パラメータの取得を行いながら、地層変形シミュレータの高度化を図るとともに、メタンハイドレート開発に特有な大水深未固結堆積層の力学特性の総合的な評価を行っている。また、②減圧法適用に伴う坑井及び坑井周辺の応力分布などを評価し坑井の安定性などの評価を行っている。

以下では、地層特性評価技術の開発として取り組んでいる開発中の地層変形シミュレータの概要と坑井の健全性評価の一環として実施している接触面特性に関する研究に関して概要を報告する。

4.1. 地層変形シミュレータの開発

地層変形シミュレータでは、MH 層の変形や圧密挙動を精度よく解析する必要があることから、Fig.2 に示すような三軸圧縮試験装置等を用いて MH 層に係る強度等の力学特性を取得している^{9,10)}。

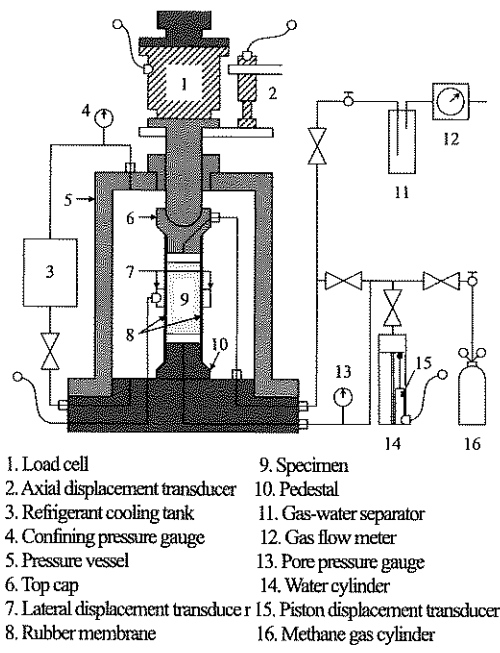


Fig. 2 Schematic illustration of triaxial compression testing apparatus

室内実験結果の一例として、人工的に作製した MH 含有砂供試体の応力(荷重/断面積)一ひずみ(試料の縮み量/試料の初期高さ)の関係を Fig.3 に示す。図中のメタンハイドレート飽和率とは、試料の間隙内に占める体積比率のことで、0%は MH がなく、100%だと間隙内がすべて MH で満たされていることを示す。試料のメタンハイドレート飽和率が大きいほど、強度(応力のピーク値)や剛性(載荷初期の曲線の傾き)が大きくなっていることがわかる。これは、生産時に MH が分解することで、貯留層の強度や剛性が低下することを示唆している。さらに、深度(拘束

圧)、砂の粒径など様々な要因が力学パラメータに与える影響を評価していき、これらの実験結果を基にモデル構築やシミュレータ用のパラメータ評価を進めている。

また、筆者らが開発を進めている地層変形シミュレータは、応力、浸透流、熱伝導、メタンハイドレート分解・生成などを連成した 2 次元および 3 次元の解析が可能な有限要素法による解析コードであり、COTHMA(Coupled thermo-hydro-mechanical analysis with dissociation and formation of methane hydrate in deformation of multiphase porous media)と略称している。開発・改良中の COTHMA は以下の機能を有している。

- ①気液固 3 相を連成解析。
- ②減圧、加熱およびこれらを併用した生産手法に対応。
- ③MH の分解・再生成を考慮。
- ④氷の生成・融解を考慮。

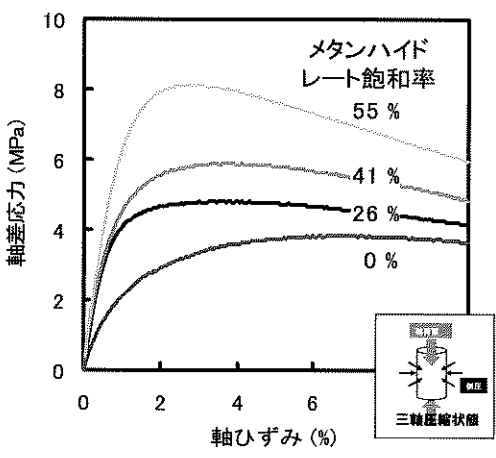


Fig. 3 Stress-strain curve for artificial specimen in triaxial compression test. (MH saturation is 0% - 55 %)

これまでは室内実験結果の再現を行い、シミュレータの検証を進めてきた^{10,11)}。さらに、本シミュレータを用いて、現場試験に関する感度解析なども行っている^{12,13)}。そこで、感度解析に用いた数値モデルを Fig.4、計算結果の一例を Fig.5 に示す。モデルは坑井を中心軸とした二次元円筒座標系の軸対称モデルを用い、坑井の右半分の領域を要素分割している。また、モデルは MH 層とその上下に泥層を設定し、モデル左上部には坑井を設定してい

る。坑井とMH層に達している坑井部分で減圧を行うこととして、減圧度、坑井仕上げ区間長、減圧速度、坑井仕上げ方法などを変化させた場合の地層変形挙動を検討した。

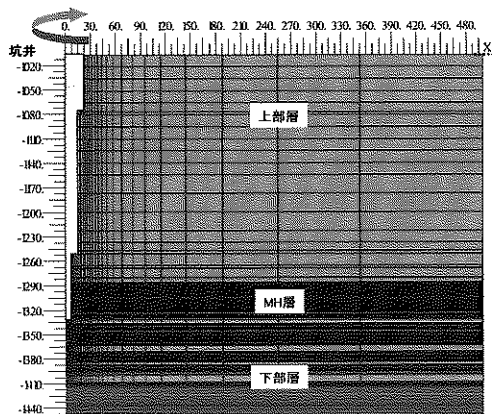


Fig. 4 Geological modeling for COTHMA

計算結果の例(Fig.5)として、3MPaまで減圧させる日数(減圧速度)を1日、5日、10日及び15日として、それから30日後の坑井の2段目ケーシングにおける沈下量の結果を示す。なお、減圧させる日数を1日としたケースを基本ケースとして、沈下量を正規化してプロットしている。図より3MPaまでの減圧速度が遅くなるほど、沈下量が少なくなることが分かる。これは、減圧に伴うMH分解や圧密変形により地層内で応力の再配分が起こるのですが、減圧速度が遅いほど、応力の変化が緩やかになることから変形も緩やかになったと推察される。

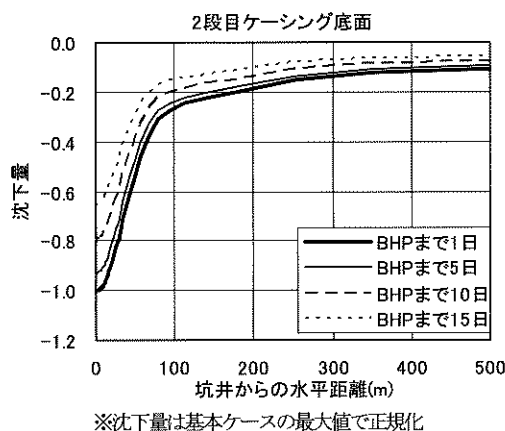


Fig. 5 Normalized vertical displacement of each calculation case

現在は海洋産出試験地の情報を基にした三次元モデルを構築し、海洋産出試験結果の検証を通してMH生産時の地層変形挙動などに関する解析・評価を進めている。

4.2 坑井の健全性評価

坑井の健全性評価として、開発中の地層変形シミュレータを基に解析・評価も進めている。この解析・評価では現場における坑井および坑井周辺の地層の応力分布を詳細に検討することを目的としており、坑井モデルを現場の条件に合わせて取り扱う必要がある。特に、坑井はケーシング、セメント及び地層の複合材料の組合せとなっていることから、各材料同士の接触面強度を把握することは坑井周辺の応力分布を評価する上で重要なパラメータである。しかし、MH層のような大水深・大深度の条件下における坑井の接触面に関する研究報告はあまり多くない。このパラメータを取得することで現場に則した坑井モデルの取り扱いがより精度良く図れることから、Fig.6のような貫入試験装置を導入して図の右上に示す写真のような試料を作成してケーシング、セメントおよび地層の各材料間の接触面強度の取得を行っている。これまでに、ケーシングー地層間、ケーシングセメント間、セメントー地層間の接触面強度に関する実験を行い、例えばケーシングーセメント間の摩擦強度に関して、有効拘束圧などをパラメータとした実験式の導出を行っている¹⁴⁾¹⁵⁾。

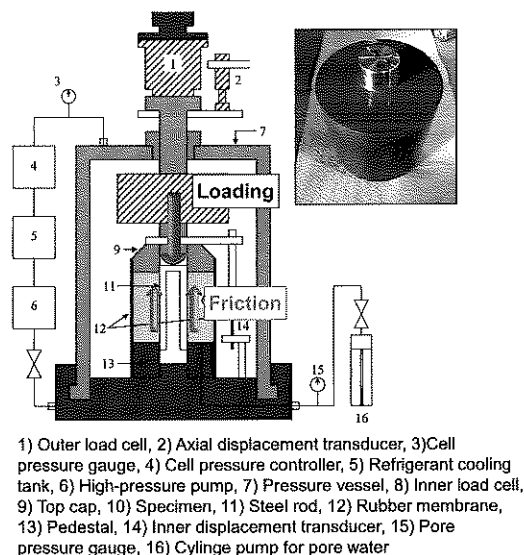


Fig. 6 Schematic illustration of experimental apparatus for high pressure push-out test.

(Photo is a simulated specimen for casing-cement interface)

また、接触面における力学挙動をより詳細に取り扱うために個別要素法(Distinct Element Method; DEM)を用いた検討も行っている。Fig.7に示すように、DEMは多数の粒子の運動を追跡していく手法なので、実験では計測困難なミクロな力学量を定量的に評価できる。接触面における「粗さ」が強度にも関係することがわかっているため、坑井表面スケールの凹凸や砂粒子の凹凸など様々なスケールの粗さをDEMで系統的に整理することを試みている。DEMによって様々な力学的条件下での接触面の特性を系統的に把握できれば、その情報と貫入試験から得られた知見によって、境界部での力学挙動の解明や摩擦特性のモデリングにつながるかと考え研究を進めている¹⁶⁾。

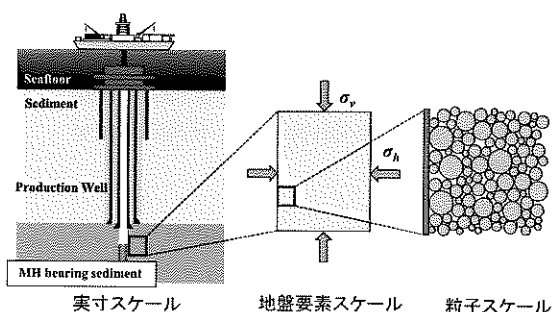


Fig.7 Idea of evaluation of mechanical behavior using by DEM

6. おわりに

「地層特性評価技術」として当チームが主に進めている①地層変形シミュレータの開発及び②坑井の健全性評価に関する進捗について簡単に報告を行った。本研究は室内実験でのデータ取得や検証が中心で現場規模での検討はまだ不十分である。今後は、第1回海洋産出試験の検証など通して、地層変形シミュレータの改良や坑井の健全性評価などを行い、本技術の開発をさらに進めて行く予定である。

謝辞

本研究は、経済産業省「メタンハイドレート開発促進事業・生産手法に関する研究開発」の一環として実施した。関係各位に対し、謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) MH21研究コンソーシアム、<http://www.mh21japan.gr.jp/>
- 2) T. Fujii, et. al.; Proceedings of 2008 Offshore Technology Conference, OTC19310, 2008
- 3) http://www.mh21japan.gr.jp/pdf/toubunankai_MH-2007.pdf
- 4) A. Masui, Haneda, H, Ogata, Y, and Aoki, K: Proc 15th Int Offshore and Polar Eng Conf, Seoul, Korea, ISOPE, pp 364-369., 2005
- 5) A. Masui, Miyazaki, K, Haneda, H, Ogata, Y, and Aoki, K: Proc 6th Int Conf on Gas Hydrates, Vancouver, Canada, CD-ROM, 2008
- 6) K. Miyazaki, Masui, A, Haneda, H, Ogata, Y, Aoki, K, and Yamaguchi, T: Proc 6th Int Conf on Gas Hydrates, Vancouver, Canada, CD-ROM, 2008.
- 7) K. Miyazaki, Masui, A, Tenma, N, Ogata, Y, Aoki, K, Yamaguchi, T, and Sakamoto, Y: Int J Offshore and Polar Eng, ISOPE, Vol 20, pp 61-67., 2010
- 8) K. Miyazaki, Masui, A, Sakamoto, Y, Tenma, N, and Yamaguchi, T: Proc Offshore Technology Conf, Houston, USA, OTC 20721., 2010
- 9) K. Miyazaki, K. Aoki, N. Tenma, Y. Sakamoto, T. Yamaguchi: Proc. of 7th International Conference on Gas Hydrates, ICGH-2011, 2011
- 10) Y. Sakamoto, M. Kakumoto, K. Miyazaki, N. Tenma, T. Komai, K. Aoki, T. Yamaguchi: *Journal of MMLI*, Vol.126, No.12, 631-639, 2010
- 11) K. Miyazaki, Y. Sakamoto, M. Kakumoto, N. Tenma, K. Aoki and T. Yamaguchi: *Journal of MMLI*, Vol. 127, No. 9, 565-576, 2011
- 12) N. Tenma, K. Miyazaki, J. Yoneda, M. Kakumoto, K. Aoki, J. Mori, A. Takiguchi and F. Huolang: *Proceedings of CSMH-3*, 55-56, 2011
- 13) N. Tenma, J. Yoneda, K. Aoki, J. Mori, A. Takiguchi and M. Ishibashi: *Proceedings of CSMH-4*, 68-69, 2012.
- 14) M. Kakumoto, J. Yoneda, K. Miyazaki, N. Tenma, K. Aoki and R. Itoi: *Journal of MMLI*, Vol. 129, No. 4, 116-123, 2013
- 15) J. Yoneda, M. Kakumoto, K. Miyazaki, J. Katagiri, N. Tenma and K. Aoki: *Journal of MMLI*, Vol. 129, No. 6, 278-283, 2013
- 16) J. Katagiri, J. Yoneda and N. Tenma: *Proceedings of CSMH-4*, 207-208, 2012.

微細藻類を用いた炭化水素生産の現状と課題¹

鈴木 石根^{2*}

Current Status and Problems of Hydrocarbon Production by Microalgae

Iwane SUZUKI

Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

Abstract

In general, microalgae are capable to produce more amounts of oils than land plants. They do not directly interfere production of land crops. Thus, microalgae are thought to be suitable source of biomass materials to produce renewable energy. However, there are several issues to be solved before practical usage. To solve the issues we are going to develop new techniques to couple growth of the algae with treatment of wastewater.

Key words: *Aurantiochytrium*, Biofuel, *Botryococcus*, Squalene, Waste water treatment

1. 緒 言

今日、石油は自動車や航空機などの移動や輸送手段のための燃料や、発電所での燃料、あるいは様々な工業製品の原料として、現代社会の維持に不可欠な天然資源である。近年、産油国における生産量の減少・不安定な政情、発展途上国等における需要の増加等により、石油価格は上昇を続けている。また、採掘可能な石油資源は徐々に少なくなっていくと予測されており、数十年後には枯渇すると予想されている。また、石油や石炭などの化石燃料の消費による大気中の二酸化炭素濃度の増加にともなう、地球温暖化・異常気象・海洋の酸性化などの地球環境の悪化が実感されている。したがって、石油を代替できるエネルギー資源の安定的な確保や、地球規模での環境の改善や維持のため、カーボン・ニュートラルな持続可能エネルギー資源の確保は急務である。

現在、石油代替エネルギー資源として、水力・風力・太陽光・太陽熱・地熱・波力・潮力・原子力など様々なエネルギー源が考えられているが、そのほとんどが電力を生み出すもので、長距離・大規模の移動輸送手段のためのエネ

ルギー密度の高い燃料や、様々な工業製品の原料に用いることはできず、現在の石油に直接取って代わることが困難なエネルギー資源といえる。このような次世代のエネルギー資源の中で唯一、光合成生物が産生する有機物に由来するバイオマスエネルギーだけが、石油の直接の代替物質となりうるポテンシャルを秘めている。現在、最も多量に産出される中東の石油は、今から約2億年前に海洋に生息した藻類が産生したバイオマスが、海底に堆積し、長い時間を経て改質されて石油になったと考えられていること、石炭は石炭紀に繁茂した木生シダに由来することを踏まえても、光合成生物を活用した石油代替物質の生産は理にかなったものといえる。

サトウキビやトウモロコシのショ糖やデンプンを活用し、酵母やバクテリアのエタノール発酵の過程を経て、生産されるバイオエタノールを精製し燃料に混合して、利用する試みは一部の国で実用段階にある。しかしながら、作物を原料にバイオマスエネルギーを生産する試みは、食糧生産と競合するため将来の食糧危機問題を考えると、全地球規模で同様の仕組みを構築することは現実的とはいえない。また、エタノールは内燃機関内の金属を腐食させたり、配管などの樹脂製品を傷めるおそれもあり、専用の装置の開発が必要になる。陸上植物の非食部を活用したセルロース起源の糖からのエタノール生産の方がより現実的であるが、セルロースを直接微生物に利用させることが容易ではなく、現時点では研究の域をでていない。

1.平成25年10月24日本会第131回例会において発表

2.筑波大学生命環境系

* iwanes6803@biol.tsukuba.ac.jp

平成25年8月14日受理

Table 1. Comparison of some sources of biodiesel

Crop	Oil yield (L/ha)	Land area needed (M ha)*	Percent of existing US cropping area*
Corn	172	1540	846
Soybean	446	594	326
Canola	1190	223	122
Jatropha	1892	140	77
Coconut	2689	99	54
Oil palm	5950	45	24
Microalgae ^b	136,900	2	1.1
Microalgae ^c	58,700	4.5	2.5

*For meeting 50% of all transport fuel needs of the United States.

^b70% oil (by wt) in biomass.

^c30% oil (by wt) in biomass.

Y. Chisti 2007

一方、微細藻類は海洋・湖沼・河川水などの水中に生育する、主に単細胞性の藻類で、光合成により大気中の二酸化炭素 (CO₂) から有機物 (バイオマス) を生産・蓄積する。特に窒素欠乏の条件では細胞の乾燥重量の数%以上のトリグリセリドあるいは炭化水素を蓄積する種が知られている。また、微細藻類は陸上植物とことなり、耕作不適地であっても藻類培養用の施設・装置を設置すれば培養が可能である。その上、単位面積あたりのオイル生産量は陸上植物の生産量に比べて、ずっと高い値を示す種もあり (Table 1)、微細藻類のオイル生産のポテンシャルを活用した石油代替物質として利用可能なバイオマス生産を目指した研究が、近年国内外で盛んに行われている。

2. 微細藻類を用いる問題点

Table 1 に示すように微細藻類のオイル生産のポテンシャルは、他の陸上植物のそれと比較して、極めて大きい。ひとつひとつの細胞は小さいが分裂の速度が速く、細胞に蓄積するオイル含量が高い特徴を有するからである。しかしながら、陸上の植物は光合成を行う器官と油脂を蓄積する器官を分けて、バイオマス生産の効率をある程度自らが調節できるが、藻類細胞は光合成を行うのも油脂を蓄積するのも同一の細胞であるため、生産の効率を最大限に発揮するには、人為的な制御が必要になる。また、培養に耕作地を必要としないが、大量の培養液が必要となるため、淡水性の微細藻類を用いる場合は、水の確保が大きな課題となる。また、海産性の微細藻類の場合は、海水を利用できるが、培養にともなう水分蒸発による塩分濃度の上昇に耐性な株を用いるか、蒸発した水分を補う炭水の確保が必要となる。また、開放型の培養池で行う場合は、光の供給の効率を高めるため水深を浅くする必要があり、大規模な培養を行うには広い土地が必要となる。また、広く浅い構造の培養池は培養液の蒸発の対策がより必要で、上記の水の確保にも直接関わってくる。一方で、透明なチューブやパ

イプ、パネル型の閉鎖型の培養施設についても様々検討されている。これらは一般に開放型の培養池より、培養にコストがかかるが、異種生物の混入を防ぐことができる利点がある。初期藻類濃度を高くするなどの工夫により、異種生物の混入を緩和できるならば、開放型の培養池の方が全般的にコストを抑制できる。

大容量の培養液が必要になることは、水の供給だけでなく、窒素 (N)、リン酸 (P)、その他の無機塩などの培地成分も多量に必要なことを意味する。特に窒素とリン酸は、藻類の生産性を一義的に決める不可欠な元素 (必須元素) で、その供給は重要である。藻類細胞は一般に陸上植物に比べて、より小さい炭素/窒素比を持っているため、特に窒素の供給は生産性を規定する極めて重要なファクターである。窒素は、アミノ酸、ヌクレオチドを構成するのに不可欠な元素で、細胞を構成するタンパク質・核酸・脂質に含まれる。光合成の過程での光の捕集と二酸化炭素の固定を効率よく行うには、高いタンパク質含量が必要である。一般に、生物はアンモニア態または硝酸態の窒素を利用できるが、空気中の窒素ガスを利用するのは一部の微生物に限られている。工業的には、水素ガスと窒素ガスを触媒の存在下で、高温高压条件にすることでアンモニアを生産している。この反応には非常に多くのエネルギーを必要としている。また、リン酸はリン鉱石から精製され、国内ではリン鉱石の産出がないため、全て国外からの輸入に依存している実態がある。近年、発展途上国での肥料の消費の増加に伴い、窒素肥料・リン酸肥料の価格が高騰しているため、藻類の培養用の培地のコストも上昇すると見込まれる。生産に用いた培養液に不足する成分を追加して、再利用するような仕組みを構築する必要がある。

ところで、油脂植物や微細藻類が蓄積するオイルは、一般的にトリグリセリドと呼ばれる、グリセリンに3つの脂肪酸が結合した物質である。トリグリセリドを鹸化して得られる脂肪酸をメチルエステルとして、ディーゼル燃料に用いる、いわゆるバイオディーゼルとして利用が可能である。しかしながら、光合成生物のトリグリセリドに含まれる脂肪酸は、一般にそのアシル基に複数の二重結合を含んだ多価不飽和脂肪酸であり、それらは空気中の酸素により容易に酸化され劣化を受けやすく、長期間の貯蔵には不向きである。また、炭素鎖長が長い (一般的に炭素数 16 から 18) ため低温条件で粘性が上昇したり固化したりするため、その利用は限定される。分子内の二重結合が多ければ、融点は低下するが、易酸化性は高まるジレンマがある。また、脂肪酸メチルエステルは分子内に酸素原子を含むため、高温のエンジン内で燃焼させると、窒素酸化物 (NO_x) を生じやすくなることも問題である。このような現状により、近年炭化水素を蓄積する微細藻類を利用したバイオマス生産に対する期待が高まっている。これら藻類のオイルは、

細胞内に炭素の貯蔵物質として蓄積する。そのため、オイルの抽出には、培養液からの細胞の回収と細胞の破壊が必要である。細胞の外側にオイルを分泌する種を用いるか、細胞外へのオイル分泌機能を付与したような藻類細胞の構築が望まれている。

3. 独立栄養性炭化水素生産藻類

ボトリオコッカス (*Botryococcus braunii*) は、炭化水素生産の藻類で、トリグリセリドはほとんど蓄積しない特徴を持つ。複数の単細胞性の細胞が集まってコロニーを形成し生育する緑藻の一種であり (Fig. 1)、コロニーの細胞と細胞の間に多量の炭化水素を蓄積する²⁾。細胞の外側に炭化水素を蓄積する点で、たいへんユニークな藻類である。現在は、培養中の細胞から効率よく炭化水素性オイルだけを絞り、細胞を培養に戻す技術が得られていないが、将来的にそういった技術が開発されれば、生産コストはさらに向上できる溶きたいされている。

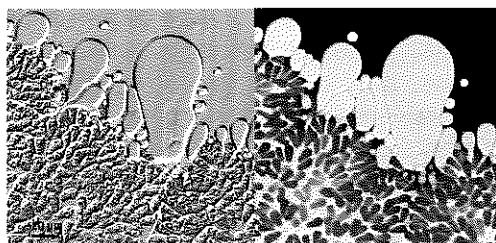


Fig. 1. Hydrocarbon-producing alga, *Botryococcus braunii*. Left panel, a picture of light microscopy, right panel, a picture of fluorescent microscopy after staining with Nile Red. Hydrocarbons were stained white color in the picture.

ボトリオコッカスは、生産する炭化水素の構造により 4 種の族 (Race A, B, L, S) に分類され、Race A は分子内に 2 つまたは 3 つの二重結合を持つ炭素数 C_{25} - C_{31} 程度の直鎖の炭化水素 (アルカジエンあるいはアルカトリエン) を蓄積する。Race B は、 C_nH_{2n-10} ($n=30\sim37$) で表されるトリテルペン構造を持つ炭化水素を持つグループ、Race L は $C_{40}H_{78}$ のテトラテルペンであるリコパジエンを蓄積するグループである (Fig. 2)。近年、上記 3 族に加えて、炭素数 18~20 のエポキシ n -アルカンと飽和 n -アルカンを合成する Race S が明らかにされた。

ある種のボトリオコッカスは乾燥重量の 30-70% の炭化水素をコロニーに蓄積するので、微細藻類を用いたバイオマス生産には大きな利点を有している。

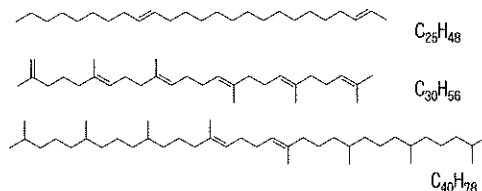


Fig. 2. Hydrocarbons produced by various Races of *B. braunii*.

4. 従属栄養性炭化水素生産藻類

オーランチオキトリウム (*Aurantiochytrium*) は、ラビリンチュラ属に属する生物で、葉緑体を持たず光合成を行わないので、厳密な意味では藻類とはいえない。しかし、褐藻などの不等毛植物と同様の形態を持つ遊走子を生活環の中に持ち、近年の分子系統解析により不等毛植物の属するストラメノパイルに分類されている。

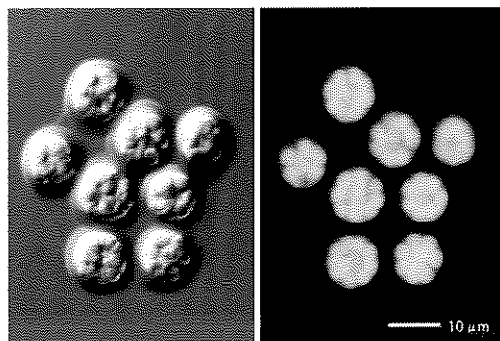


Fig. 3. Cells of *Aurantiochytrium*. Left panel, a picture of light microscopy, right panel, a picture of fluorescent microscopy after staining with Nile Red. Squalene accumulated in these cells were stained white color in the picture.

最近、筑波大学の渡邊信教授らのグループは、細胞内に多量のスクワレンを蓄積するオーランチオキトリウム株を分離・同定した³⁾。スクワレンはボトリオコクセンと同じく、トリテルペノイドに分類される安定な炭化水素である。このオーランチオキトリウム株は、乾燥重量の 30-50% ものスクワレンを短時間の培養で蓄積する。生育は極めて早く数日の内に培養液から 2-3 g/L のスクワレンを回収することが可能である。ただし、独立栄養性の藻類に比べて生育に炭素源を必要とする点は難点であり、生育を助けるには多量の炭素源を必要とする。我々人類が食糧とする穀物のデンプンからグルコースなどの糖を回収し、オーランチオキトリウムの培養に与えるのであれば、全く非効率である。

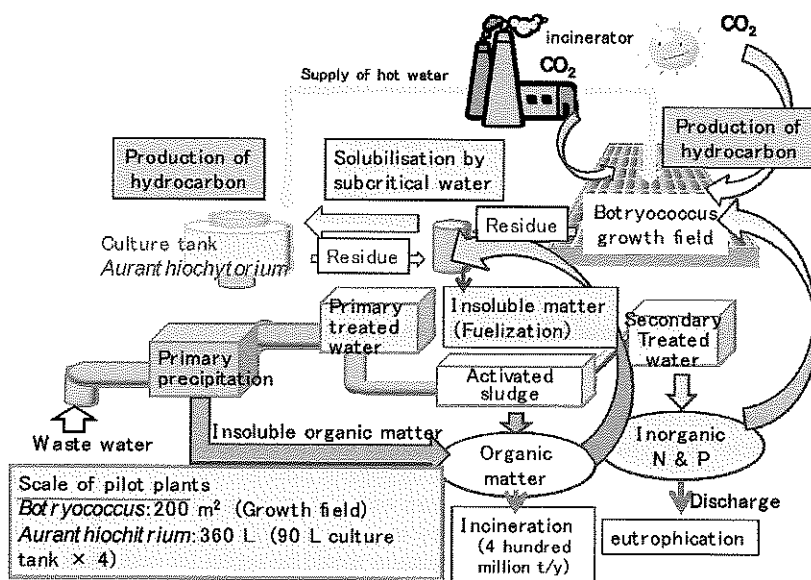


Fig. 4. Scheme of utilization of wastewater. Insoluble organic matter and activated sludge in the wastewater treatment plant are solubilized and apply cultures of heterotrophic organism that accumulates hydrocarbons. Inorganic nitrogen and phosphate in the treated water are supply to the cultures of autotrophic organism producing hydrocarbons.

5. 排水を利用した微細藻類の培養

現在、我々は上記課題の解決を目指して、有機物を豊富に含んだ産業廃液や、下水処理場の固形有機物や活性汚泥などの産業廃棄物に含まれる有機物を活用して、炭化水素生産性の微細藻類を生産する系の開発を目指して、研究を行っている (Fig. 4)。これまでの研究により、培養液の一部を産業排水に置き換えた培地で、スクワレンの生産ができることが示されている。今後は培養系の最適化や、培養の規模を大きくしていく過程が必要である。また、排水の有機物の低コストな可より、培養液の一部を産業排水に置き換えた培地で、スクワレンの生産ができることが示されている。今後溶化技術の開発、細胞からの効率的な炭化水素の回収、バイオマスの改質による利用価値の向上など、化学工学的アプローチによる貢献にも期待が持たれる。

また、オーランチオキトリウムを活用した排水処理により有機物を除去した後の処理水は、窒素・リン酸・金属イオンなどの無機化合物を含む溶液となる。これらの化合物は光合成を行う独立栄養性の微細藻類の生育に不可欠な栄養塩である。そこで、この処理水を用いてボトリオコッカスのような独立栄養性の藻類の培養に添加し、その培養の

過程でそれらの無機成分を回収できれば、さらに効率的な炭化水素生産系を構築できると考えられる。

我々は、東北大学と仙台市それに筑波大学の三者で、微細藻類による排水を活用したオイル生産システム構築を目指した共同研究を立ち上げている。仙台市の南蒲生浄化センターに、ボトリオコッカス等の独立栄養性の藻類と、オーランチオキトリウムなどの従属栄養性藻類の培養施設を構築し、浄化センターの排水・活性汚泥等を活用した最適な培養システム、産物の回収利用システム、菌体残渣の再利用化などの道筋をつけ、将来的に排水処理のコストを低減すること、排水を活用したエネルギー生産システムの構築のために必要な基礎的知見の創出と確立を目指して研究を開始している。

References

- 1) Y. Chisti: *Biotechnol. Adv.* **25**, pp. 294-306 (2007)
- 2) M. Kawachi, T. Tanoi, M. Demuraa, K. Kaya, M. M. Watanabe: *Algal Res.* **1**, 2, pp. 114-119 (2011)
- 3) A. Nakazawa, H. Matsuura, R. Kose, S. Kato, D. Honda, I. Inouye, K. Kaya, M. M. Watanabe: *Bioresour. Technol.* **109**, pp. 287-291 (2012)

比重選別と選別性の評価¹大木 達也^{2*}

Gravity concentration and the evaluation of separation properties

Tatsuya OKI

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

Abstract

Gravity concentration that separates particles by the difference of their densities is one of the most basic physical separation techniques. Lots of gravity concentrators such as air tables, pneumatic separators, and jigs have been used in recycling plants, but the separation causations have not been understood systematically by the operators. The basic theory of gravity concentration and evaluation methods of separation properties are introduced in this report. This information is expected to assist the selection of separators and the optimum separation conditions. I would be happy if this information would be useful for understanding the separation results and if it would help to construct the optimum operation for people who have always used gravity concentrators as a black box.

Key words: Gravity concentration, Settling velocity, Particle size, Separation efficiency

1. 緒 言

空気中あるいは水中の粒子運動差を利用して粒子を種類別に選別する操作は、最も基本的な物理選別として古くから行われ、今日まで発展してきている。空気中や水中の粒子は、粒子の密度(この技術分野では、古くから水との相対密度である比重が多用されるが本質的には密度)、粒径、形状といった物性の違いによって異なる運動を示す。したがって、これらのいずれか1つの物性を基準に選別しようとする場合、他の2者の物性は同一であることが望ましい。製造工程における分級操作のように、密度や形状がほぼ同じ粒子を粒径の違いで分ける場合、理想に近い粒子条件となり、比較的良好に選別を行うことが可能である。しかしながら、リサイクルの中間処理のように、不特定多数の素材が混合した状態から特定素材を比重差で選別する場合は、上記3物性がいずれも異なる状況での選別となる。したがって、多種多様な選別装置の中から、粒子物性に応じた最適な装置を選択することが重要であり、また、選別工程を多段化するなど、一層複雑な選別プロセスの設計が必要となる。他方、プロセス最適化の検討では、種々の装置や条件による選別成績を正しく理解することが重要で

あるが、パラメータの扱いや選別結果の解釈について、一般には必ずしも浸透していない部分もある。本報では、物理選別の最も基本的な操作である比重選別を習得しようとする方々や、既に装置は使用しているが、技術の系統的な理解に及んでいない方々を対象に、比重選別とその選別性の評価について、基本的な考え方を紹介するものである。なお、本報で紹介する比重選別は、2種の粒子比重の中間比重を有する媒体中で選別する重選とは、一般に区別される。重選も海外の大規模プラントでは多用されるが、重液材の回収などプロセスが複雑となり我が国ではあまり利用されることがない。誌面の関係もあり、本報では比重選別のみを紹介する。

2. 比重選別の分類と特徴

比重選別は乾式法と湿式法に大別される。乾式比重選別は大量処理が可能で、選別後の産物の回収も容易である。一方、湿式比重選別は、乾式法に比べて選別精度の向上が期待できるが、水循環の動力や回収産物の脱水、乾燥など、エネルギーやコストの面でやや不利となる。さらに、浮選など表面性質を利用した湿式選別法では、界面活性剤等が利用されることが多く、上記に加えて廃水処理の負荷が大きくなる。導入の容易さだけを考えれば、乾式比重選別が有利であるが、各選別技術には、それぞれ適用粒径があるため、対象粒径に応じた選択が余儀なくされる。各選別技術の適用下限粒径について概念的にまとめたも

1.平成25年10月24日 本会第131回例会において発表

2.産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門

*t-oki@aist.go.jp

平成25年7月23日受理

のを Fig.1 に示す。図中の下限粒径は便宜的に筆者の主観で記載したものである。その厳密な線引きは難しいが、ある程度信頼性をもって適用できる下限粒径としては、例えば、乾式選別で 1mm、バルク性質利用の湿式選別で 50 μm という数字があげられる。粗粒段階で単体分離(粒子が単成分で構成される状態)がなされれば、乾式選別が適用でき、経済的かつ精度の良い選別が達成できる。しかし、細粒化が余儀なくされ、特に 50 μm 以下の粒子となると、従来は浮選に代表される表面性質利用の湿式選別法しか選択肢がなかった。しかし、近年、強い遠心場を利用した比重選別機の開発が盛んに行われており、10 μm 程度の粒子まで比重選別できる可能性が出てきている。

一方、Fig. 2 は F. F. Apland² による各種選別技術の適応粒径の図を元に、比重選別に関する記述を抜粋し再構成したものである。この適用範囲は、各技術のおよその利用領域を示したものであり、同程度の選別精度を保証するものではない。また、黒いバーは限定的な適用を意味する。比重選別は、粗粒 $\sim$ 10 μm 程度の粒子まで幅広い粒度に対して適用可能であり、近年も多くの技術が開発されている。この図には、乾式選別機はエアテーブルしか示されていないが、分級用途に多く利用されるサイクロン、ジグザグ選別機や慣性選別機、筆者らが近年開発したストレートカラム気流選別機^{3,4,5} などもある。特にリサイクル用途には、このような乾式比重選別が多く利用されるが、装置の種類と

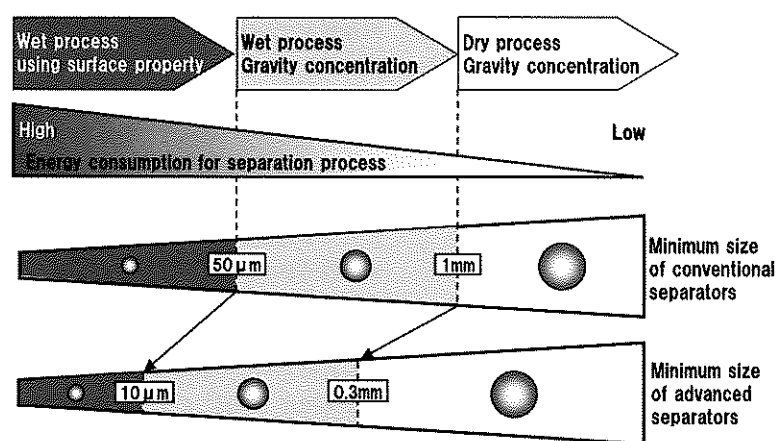


Fig.1 Category of separators and these minimum separation sizes

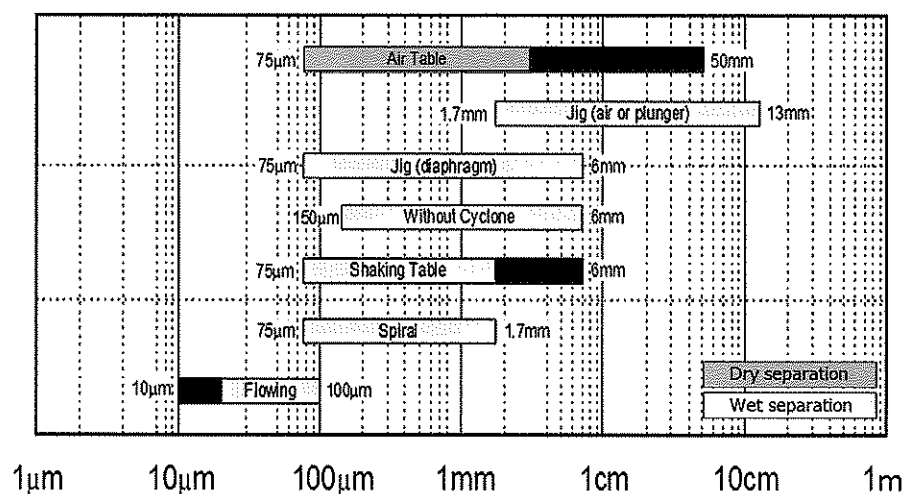


Fig.2 Separation size ranges of gravity concentrators

しては湿式比重選別機の方が多い。

湿式比重選別において、適用粒度と選別精度を特徴付けるのは、水中で粒子を搬送する駆動力の様式と、粒子運動をもたらす重力あるいは遠心力の加速度である。Fig. 3 は駆動力の様式と選別時に作用する加速度を示したものである¹。ここでは、比較的小型の実験機を基準に比較している。既存のほぼ全ての湿式比重選別機は、3つの駆動力のいずれかに分類できる。1つは、水流による選別で、粒子の沈降速度と水の流速の大小関係で選別する方法である。2つ目は薄流選別で、傾斜面を流れる水膜の抵抗と傾斜面—粒子間の摩擦の大小関係によって選別する方法である。3つ目は上下運動する水の脈動により、粒子の着底時間の差で選別する方法である。粒子に及ぼす加速度としては、重力沈降を利用した装置あるいは旋回流による遠心力を利用した技術が、従来から用いられてきている。また、1980 年以降、浮選の適用粒度である数 10 μm オーダーの粒子を選別するため、機械的な回転により高い遠心力を発生させる装置の開発も進んでいる。個別の選別装置については誌面の関係で省略するが、文献 6 で解説しているので参照されたい。

3. 選別性の推定と評価

ほとんどの比重選別は、運動する流体中で選別が行われる。近年、混相流シミュレーションの発達により、ある程度の精度でその計算もできるようになっているが、膨大な

計算処理を行っても、複雑な粒子物性を全て反映させることは困難である。そこで、便宜上、静止流体中の粒子沈降運動を目安にした選別性の推定が古くから行われている。

流体中の粒子の沈降速度は、粒子の密度だけでなくサイズや形状にも影響を受ける。また、空気や水のような粘性媒体ではこの運動に対する抵抗が存在し、抵抗は速度に伴って増大する。重力と流体抵抗が釣り合ったとき、粒子は終末速度に到達して以後は等速で沈降する。粒子体積に比べ流体の体積が十分に大きく、粒子同士の影響が無視できる状態を自由沈降と呼ぶ。目安として Taggart⁷ は、良く分散した鉱石スラリーでは、固体粒子の重量濃度が 15% 以下のとき自由沈降が支配的となるとしている。簡単のために球形粒子を想定すると、粒径や密度の異なる粒子の非定常運動を含む速度は、次の BBO 式で知られる運動方程式で求められる^{8,9}。

$$\frac{\pi}{6} d^3 \rho_p \frac{dv}{dt} = \frac{\pi}{6} d^3 g (\rho_p - \rho_f) + C_d \frac{\pi}{8} d^2 \rho_f |u - v| (u - v) + \frac{\pi}{6} d^3 \rho_f \frac{du}{dt} + \chi \frac{\pi}{6} d^3 \rho_f \left(\frac{du}{dt} - \frac{dv}{dt} \right) + B(t) \quad (1)$$

ここで d は粒子径、 ρ_p 、 ρ_f は粒子および流体の密度、 v 、 u は粒子および流体の速度、 t は時間、 g は重力加速度、 C_d は抵抗係数、 χ は付加質量係数、 $B(t)$ は Basset 項である。左辺は粒子質量と加速度の積で、粒子に作用する力 (Newton) を示す。右辺第 1 項は粒子に掛かる重力と浮力。第 2 項は粒子運動に対する流体の抵抗力である。第 3 項は流体が加速運動している際に粒子に掛かる力 (圧力勾配

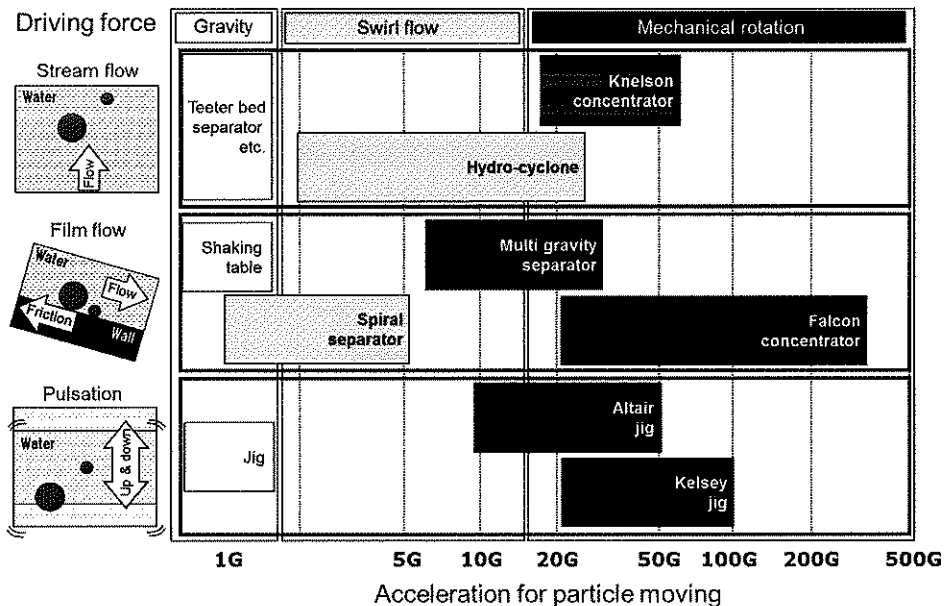


Fig.3 Driving force and acceleration of wet gravity concentrators

力)で、静止流体中あるいは等速運動する流体中では無視できる。第4項は粒子の運動に伴って随伴する流体の質量を考慮した付加質量項であり、粒子、流体の双方が加速運動していない場合はこれも無視できる。第5項は Basset 項と呼ばれ、加速運動する粒子に対し、第4項までの定常的運動方程式で表せない粘性効果の履歴を補正したものであるが、終末速度で沈降する粒子ではこれも無視できる。また、回転揚力なども配慮が必要な場合があるが、通常、沈降速度の計算では無視される。以上のことから、静止流体中で等速運動する流体中の粒子運動方程式は下式のように簡略化できる。

$$\frac{\pi}{6} d^3 \rho_p \frac{dv}{dt} = \frac{\pi}{6} d^3 g (\rho_p - \rho_f) + C_d \frac{\pi}{8} d^2 \rho_f |u - v| (u - v) \quad (2)$$

また、抵抗係数 C_d は、下式で示される Reynolds 数 Re のみの関数となる。

$$Re = \frac{\rho_f d_p |v - u|}{\mu} \quad (3)$$

ここで μ は流体粘度。球形粒子の場合、 Re と C_d の関係は Fig. 4 で示される標準抵抗曲線によって求められ、例えば Haider ら¹⁰が提案した下式は、近年、多くの研究者に利用されている。

$$C_d = \frac{24}{Re} \left(1 + 0.1806 Re^{0.6459} \right) + \frac{0.4251}{1 + \frac{6880.95}{Re}} \quad (4)$$

一方、古典的には Re を 3 つの領域に分け、標準抵抗曲線

を直線近似した下式が使用され、各領域の境界でやや精度に劣るものの、概算用としては今日でも実用的に使用される。

$$C_d = \frac{24}{Re} \quad Re < 2 \quad (\text{Stokes域}) \quad (5)$$

$$C_d = \frac{24}{Re^{0.5}} \quad 2 < Re < 500 \quad (\text{Allen域}) \quad (6)$$

$$C_d = 0.44 \quad Re > 500 \quad (\text{Newton域}) \quad (7)$$

終末沈降速度となるのは、粒子の加速度 $dv/dt=0$ となる状態であるので、例えば(2)式の C_d に Stokes 域の(5)式を適用すると、以下の式が導かれる。

$$v = \frac{(\rho_p - \rho_f) d_p^2 g}{18\mu} \quad Re < 2 \quad (\text{Stokes域}) \quad (8)$$

ここで、粒径、密度が異なる 2 つの粒子 $p1$, $p2$ が同じ速度で沈降していたとすると、下式が得られる。

$$\frac{d_{p1}}{d_{p2}} = \left(\frac{\rho_{p2} - \rho_f}{\rho_{p1} - \rho_f} \right)^{0.5} \quad (9)$$

これは、Stokes 域における等速粒径比(等速沈降比)として知られ、同じ速度で沈降する 2 種の粒子の粒径比を表している。同様に Newton 域における等速粒径比は下式のようになる。

$$\frac{d_{p1}}{d_{p2}} = \frac{\rho_{p2} - \rho_f}{\rho_{p1} - \rho_f} \quad (10)$$

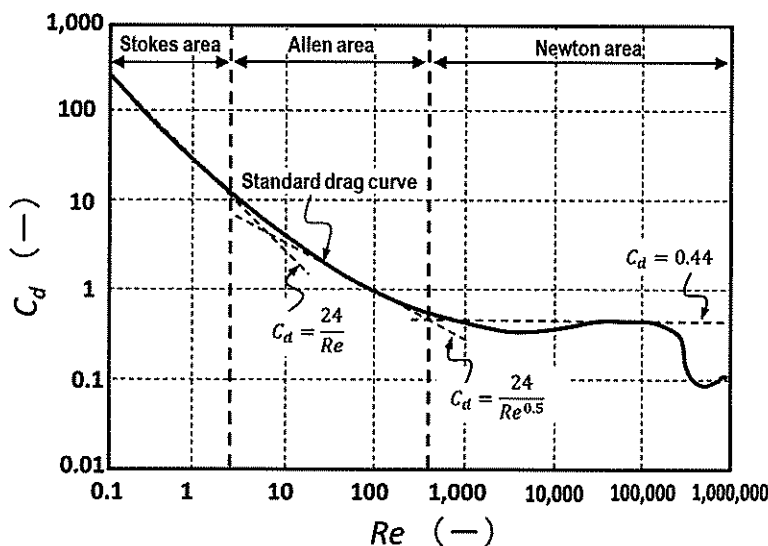


Fig.4 Standard drag curve

球形粒子を想定すると、沈降速度は粒径と密度の関数となる。つまり、密度の異なる2種類の粒子が混合した粒子群を比重選別する場合、等速粒径比が大きくなるほど、沈降速度は粒径差よりも密度差の影響が支配的になり、精度良く比重選別ができる状態であることを示す。また、(9)式、(10)式から、Stokes域に比べNewton域の方が常に等速粒径比は大きくなる。つまり、粒径や粒子速度が大きく、 Re が大きくなるほど、相対的に比重選別が有利な状況で実施できる。一方、粒子濃度が增大すると、次第に粒子の沈降速度は低下し始める。これは、媒体に粒子が分散したスラリが、密度の高い重液のように振る舞うためである。このような状況における粒子の沈降を干渉沈降と呼ぶ⁷。スラリの密度を ρ_s とすると、例えばNewton域における等速粒径比は下式のように書き換えられる。

$$\frac{d_{p1}}{d_{p2}} = \frac{\rho_{p2} - \rho_s}{\rho_{p1} - \rho_s} \quad (11)$$

ここで、 $\rho_s > \rho_f$ であるので、等速粒径比は自由沈降のときに比べ常に大きくなり、相対的に比重選別が有利な状況で実施できる。このように、選別する粒子やスラリの状態がわかれば、比重選別が有効に実施できそうかの目安を得ることができる。

しかし、現実には、静止流体中で選別することは希であり、壁面摩擦などの他の作用力も加味される。何より、粒子が単体分離しているかによって、選別結果は大きく左右される。したがって、最終的には実際の選別結果を評価することで、選別の最適化が行われるのが普通である。Fig. 5は、最も基本的な選別の考え方を示したモデルである。まず、選別前のフィードとして、重量 m_{Af} の成分Aと、

重量 m_{Bf} の成分Bからなる混合物を考える。多成分が混合した場合でも、回収したい物と除去したい物など、必ず2つの成分グループに選別する状況を想定するのが一般的である。選別の後、A成分の濃縮物である産物Xと、B成分の濃縮物である産物Yに分かれたと仮定する。産物X中のA、B成分の重量はそれぞれ m_{AX} 、 m_{BX} 、産物Y中のA、B成分の重量はそれぞれ m_{AY} 、 m_{BY} である。以下、A成分を回収対象としてA成分基準で考える。なお、以下の式では概念として比で表しているが、数値を100倍して百分率(%)で表すのが普通である。まず、回収された産物Aの「歩留まり」 Y は、フィードに対する産物Xの重量割合であり下式によって得られる。

$$Y = \frac{m_{AX} + m_{BX}}{m_{Af} + m_{Bf}} \quad (12)$$

また、A成分の「回収率」 R は、フィード中のA成分の重量に対する、産物Xで回収されたA成分の重量割合で、下式で求められる。

$$R = \frac{m_{AX}}{m_{Af}} \quad (13)$$

リサイクルの現場などで、歩留まりと回収率を混同して使用されているケースも見受けられるので注意されたい。次に、産物X中のA成分の割合である「品位(純度)」 G は下式で表される。

$$G = \frac{m_{AX}}{m_{AX} + m_{BX}} \quad (14)$$

以上は、極めて基本的かつ重要な指標であるが、単独で用

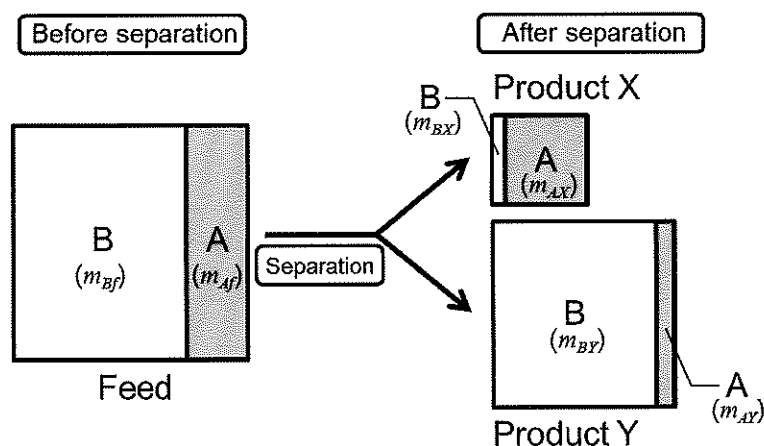


Fig.5 Basic separation model for results estimation

いても選別の精度を知ることができない。選別前後の品位が全く同じである状況を「分割」と呼ぶが、選別によって産物 X: 産物 Y=9:1 で分割された状況でも、回収率 90%と表現できる。また、品位 95%に濃縮と表現される状況の中には、回収率が1%であり、有価物が99%ロスするという状況も起こりえる。したがって、選別精度を表現するには、これらを複合的に評価した指標を用いる必要がある。

「分離効率」は、上述の指標と異なり、多数ある選別精度指標の総称である。どの点を重視して選別精度を表現するかによって、古くから様々な指標が考案されているが、我が国では下式で定義される「Newton's'分離効率(ニュートン効率)」 η_N と呼ばれる指標が良く用いられる。

$$\eta_N = \frac{m_{AX}}{m_{Af}} - \frac{m_{BX}}{m_{Bf}} \quad (15)$$

同じ結果を得るための計算プロセス(式)が複数あるが、産物 X において、A 成分の回収率から B 成分の回収率を引いた上式が覚えやすい。この式からは理解できないが、この分離効率を持つ本質的な意味は、成分 A と成分 B に完全分離された割合(残りは単に分割された)を示すものである。前述の回収率や品位と異なり、この数値が高ければ、客観的な選別精度が高いことは間違いない。しかし、フィード中の A 成分の割合が極めて低くて選別の難易度が高い場合には、非常に高い Newton's'分離効率となっても、品位が未だ不十分であることがある。これは、B 成分の大部分は産物 Y として除去され、産物 X の B 成分回収率が(率として)十分低いにもかかわらず、B 成分の回収量が(重量として)A 成分の回収量を遙かに上回ってしまうときに起こる。また、その後、選別条件の改善で、残る B 成分を徹底的に除去できたとしても、新たに除去された B 成分の割合は(率としては)僅かであるため、Newton's'分離効率にはほとんど反映されない。このようなケースにおいて、選別精度の改善を表現するには、例えば、フィードの A 成分品位と産物 X の A 成分品位の比である「富鉱比」などによって、上手く表せることもあるが、これも回収率の概念が欠如しており万能ではない。

以上のように実際の選別結果に対する評価指標は、いずれも万能ではないものの、状況によって使い分けることにより、装置や条件の最適化には大変有効なツールとなる。また、何より、各指標の意味を理解し、数値を正しく解釈することが重要である。

4. 結 言

本報では、比重選別と選別性の評価について、体系的な整理と基礎的な概念について紹介した。ここで紹介した内容は物理選別の初歩に過ぎないが、これまで現場において、物理選別装置をブラックボックス化して使用してきた方々にとって、最適な装置の選択や、選別結果の良否について、理解を深めるきっかけとなれば幸いである。

References

1. T.Oki: Funtai Gijyutsu, **1**, 5, pp.39-48 (2009)
2. F.F.Aplan: Principles of Mineral Processing, SME, Colorado, pp.185-219 (2003)
3. T.Oki, Y.Naito, T.Kamiya, K.Kawakita, T.Shiratori, Proceedings of IMPC 2010, pp.3839-3844 (2010)
4. T.Oki: Proceedings of COM2011, pp.69-77 (2011)
5. T.Oki: Environmental Management, **49**, 3, pp.62~65 (2013)
6. T.Oki: Funtai gijyutu to Eco recycle, NGT, pp.80-87 (2010)
7. B.A.Wills, T.J.Napier-Munn: Wills Mineral Processing Technology (Seventh edition), Butterworth-Heinemann (2006)
8. P.R.Schoneborn: International Journal of Multiphase Flow, **2**, 307-317 (1975)
9. T.Oki, M.Kobayashi, S.Owada and D.Matsuura: International Journal of Mineral Processing, **82**, pp.69-79 (2007)
10. A.Haider and O.Levenspiel: Powder Technology, **58**, pp.63-70 (1989)

会 務 報 告

(平成 25 年 7 月～9 月)

平成 25 年第 1 回常任理事会

日 時：平成 25 年 7 月 29 日（月）15：00～17：30

場 所：中西印刷株式会社 会議室（京都市上京区下立
売通小川東入）

出席者：（敬称略 役職順）

大和田秀二（会長）、川井隆夫（副会長）、中澤
廣（副会長）、田中幹也（産業技術総合研究所）、
寺岡真司（栗本鐵工所）、川上智（DOWA エコ
システム）、日下英史（京都大学）、小林幹男（石
油天然ガス・金属鉱物資源機構）、丹野秀昭（日
本エリーズマグネチックス）、廣吉直樹（北海道
大学）、小高竹男（住友金属鉱山）、中西隆太郎
（事務局）

議事録は掲載しない。

シンポジウム 「リサイクル設計と分離精製技術」 第 27 回リサイクルのための 固体分離技術 報告

実行委員長 中澤 廣

今回のシンポジウムでは、本会が昨年発刊した「粉体
精製と湿式処理—基礎と応用—」でとり上げた固体分離
技術の廃棄物のリサイクルプロセスへの活用を目的とし
て、固体分離技術の基礎から応用そして技術課題等につ
いての講演を行った。

まず、固体分離の前処理としての粉砕と分級の必要性、
その操作に求められる要件、装置について説明があった。
つづいて、固体分離技術である比重分離、浮遊選別、電
氣的選別、磁気分離、ソーター選別・形状選別に関して、
その分離原理、装置、応用例、今後の技術課題について
発表があった。最後に、それぞれの単位分離操作が実操
業プロセスでどのように活用されているか、廃自動車の
リサイクルプラントを例として紹介があった。

開催日時：平成 25 年 9 月 12 日 9:30～18:50

（ライトパーティーを含む）

開催場所：新橋住友ビル大会議室

協賛：（一社）廃棄物資源循環学会、（一社）資源・素材学会

講演内容

講演 1 粉砕と分級

産業技術総合研究所環境管理技術研究部門

大木 達也

講演 2 比重分離

岩手大学大学院工学研究科 中澤 廣

講演 3 浮遊選別

京都大学大学院エネルギー科学研究科

日下 英史

講演 4 電氣的選別（渦電流選別・静電選別）

早稲田大学創造理工学部研究科 大和田秀二

講演 5 磁気分離

東京大学大学院工学系研究科 藤田 豊久

講演 6 ソーター選別・形状選別

産業技術総合研究所環境管理技術研究部門

古屋仲茂樹

講演 7 使用済み自動車のリサイクルに使用されてい
る分離選別技術

東北公益文科大学公益学部 古山 隆

本シンポジウムの参加者は 109 名であり、内 49 名が当
学会員、27 名が協賛学会員、33 名が非会員であった。ま
た、参加者からは 39 枚のアンケート回答をいただいた。
総合採点は「よい」が 22 票、「まあまあ」が 14 票、「あ
てはずれ」が 0 票、記載なしが 3 票あり、参加者の要望
をほぼ満足させられる結果となった。回答を頂いた方々
は製造業が 24 名、リサイクル業が 8 名、サービス業、研
究機関が各 2 名、鉱業、商社、教育機関がそれぞれ 1 名
であった。

また、「粉体精製と湿式処理—基礎と応用—」を 8 部販
売した。

最後に、会場の受付や照明等の進行や運営にご協力い
ただいた東京大学藤田研究室の方々に厚く御礼申し上げ
ます。