

日本の EEZ における海底鉱物資源の

探査と開発に向けた最新動向¹

中村謙太郎^{2*}

The latest trend of exploration and development of seafloor mineral resources in the Japanese EEZ

Kentaro NAKAMURA^{2*}

²Department of Systems Innovation, School of Engineering, The University of Tokyo

Abstract

Mineral resources are one of the most important materials that support the development of human society. Recently, in Japan, stable supply of rare metals to high-tech industries is critical for economic growth. During the last decade, the results of many researches conducted on deep seafloor within the Japanese Exclusive Economic Zone (EEZ) showed that there are abundant seafloor mineral resources containing base, precious, and rare metals. This paper presents recent progress of exploration and development of the four seafloor mineral resources (seafloor massive sulfide, Co-rich ferromanganese crust, manganese nodule, and REY-rich mud) in the Japanese EEZ.

Key Words: seafloor mineral resources, rare metals, exploration, mining, Japanese EEZ

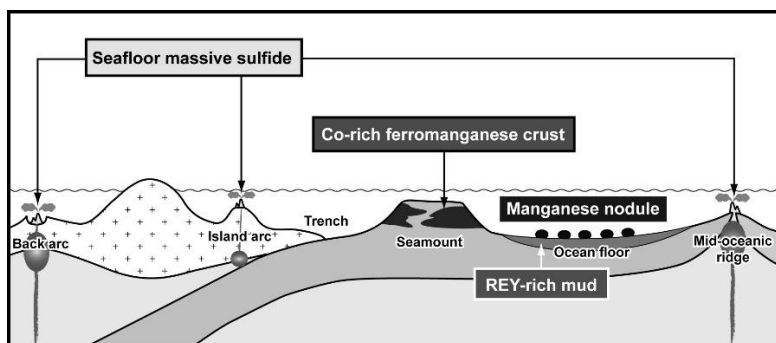


Fig. 1 Schematic illustration showing the occurrence of the seafloor mineral resources.

1. 海底鉱物資源とは

鉱物資源は、人類の文明社会を支えるための重要な役割を果たしている資源であり、特に金属資源が文明の発展に果たしてきた役割は大きい。最先端の産業において

は、レアメタルを含む殆ど全ての金属元素を利用するまでになっており、多様な金属資源を長期、安定的に供給することが求められている。一方で、陸上で高品位かつ大規模な鉱床を発見することは次第に難しくなっており、より低品位で、コストがかかり、環境へのインパクトが大きい資源を開発せざるを得なくなりつつあることが指摘されている¹⁾。また、陸上におけるレアメタル資源の偏在や、資源ナショナリズムの高まりも、安定供給を脅かすリスクとして認識されてきている。そんな中、

1. 平成 29 年 6 月 8 日 本会第 136 回学術講演会において発表

2. 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

* kentaron@sys.t.u-tokyo.ac.jp

平成 29 年 3 月 1 日受理

注目されているのが海底鉱物資源である。海底鉱物資源とは、その名の通り地球表面の約7割を占める海底に存在している鉱物資源である。現在、海底には「海底熱水鉱床」「マンガン団塊」「マンガンクラスト」「レアアース泥」という4つの鉱物資源が知られている（Fig. 1）。以下に、これらの海底鉱物資源について紹介する。

海底熱水鉱床は、海底火山の近傍の高温（300℃以上）の海底温泉において、様々な重金属元素が沈殿・集積して出来るタイプの資源であり、銅、鉛、亜鉛などの重金属のほか、金、銀などの貴金属、さらにはビスマス、カドミウム、ガリウム、ゲルマニウム、アンチモン、テルル、タリウム、インジウムなどのレアメタルの資源としても注目を集めている²⁾。海底火山の近傍では、海底下にしみこんだ海水がマグマによって熱せられ、周囲の岩石から有用金属元素を溶かし込むことで熱水となっている。海底の圧力は100気圧以上にもなるため、水は300℃以上になっても沸騰しない。そのため、大量の金属を溶かし込むことができる。このようにして出来た熱水が、上昇して海底から噴出する際に、熱水噴出孔の周囲で溶けていた有用金属元素を沈殿・集積するのである。

マンガン団塊は、直径数cm～数十cmのマンガンと鉄の水酸化物を主成分とした扁球状の塊であり、太平洋、大西洋、インド洋など世界の海洋の深海底に広く分布することが古くから知られている。その成因は、火山活動とは無関係に海水から非常にゆっくりと沈殿するマンガンを鉄の水酸化物が沈積して出来たものであると考えられている。マンガン、コバルト、ニッケル、銅などの金属元素に富んでおり、海底鉱物資源の中でも最も古くから注目されている資源である³⁾。

マンガンクラストは、マンガン団塊と同様にマンガンを鉄の水酸化物を主成分とした資源であるが、主に海山の斜面や頂上などの岩盤を厚さ数cm～数十cmで覆っている。マンガン団塊と比べると、特にコバルトが多く含まれるという特徴があり、しばしばコバルトリッチ・クラストとも呼ばれる⁴⁾。この資源は、1970年代末のシャバ紛争を契機とした世界的なコバルト需給の混乱の際に、大いに注目されるようになった資源である。

レアアース泥は、深海底に広く分布するレアアースを豊富に含んだ泥である。2011年にはじめてその存在が報告されており、最も新しく知られるようになった海底鉱物資源である⁵⁾。レアアース泥は、膨大な資源量が予想されることや最先端産業に必要不可欠な希土類元素を特に豊富に含むこと、泥からの希土類元素の抽出が容易であること、さらには陸上鉱床で問題となっているトリウムやウランなどの放射性元素をほとんど含まないことなどから、有望な海底鉱物資源として注目されるようになっている。その成因は、海底熱水から放出された鉄水

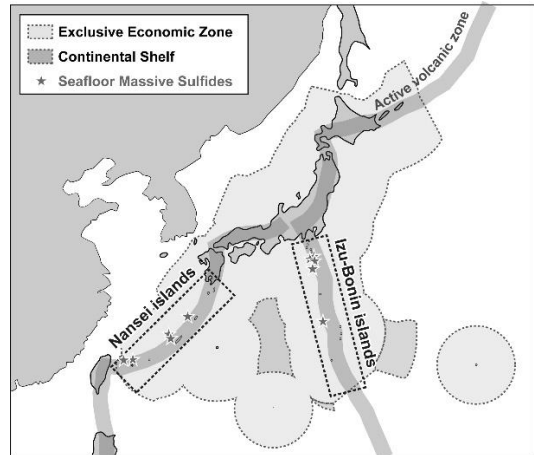


Fig. 2 Map showing the locations of seafloor massive sulfides along the Nansei islands and Izu-Bonin islands.

酸化物や生物の菌・骨片などが、海水のレアアースを吸着しながら堆積速度の遅い海底にゆっくりと沈積することでレアアースが濃集すると考えられている⁶⁾。この資源の発見は、尖閣諸島中国漁船衝突事件に端を発したレアアースショックの最中であったことから、世界中の注目を集めた。

2. 日本のEEZ内における海底鉱物資源探査の進展

日本は、一般的に国土が狭く天然資源の乏しい国であると認識されている。しかし、海に目を転じて見ると、排他的経済水域（EEZ）と大陸棚を含めた面積は世界第6位の海洋大国であり、しかもその海底は豊かな鉱物資源に恵まれていることが明らかとなりつつある。

日本は「沈み込み帯」と呼ばれる場に存在しており、プレート運動によって太平洋側から海洋プレートが日本列島の下へと沈み込んでいる。このような場では、火山活動と地震活動が活発に起こることが知られており、それゆえに日本は世界でも有数の火山と地震の多い国となっているのである。これらの火山活動や地震活動は、時として人間の生活を脅かす災害をもたらすが、その一方で日本の周辺の海底には多くの火山が生み出されており、それらに関連した海底熱水鉱床が多数存在しているのである。これまでに我が国周辺において見つかった海底熱水鉱床は、主として南西諸島と伊豆・小笠原諸島の周辺に集中している（Fig. 2）。これは、北海道・本州・四国・九州の4島は非常に大きいために火山が全て陸上に存在するのに対して、南西諸島と伊豆・小笠原諸島には大きな島が少なく、海底火山が多く存在するためである。現在までに、南西諸島の周辺海域においては、中部

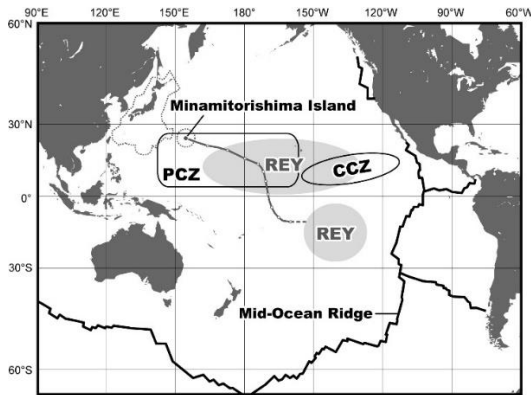


Fig. 3 Map showing the locations of Pacific Prime Crust Zone (PCZ), Clarion-Clipperton Zone (CCZ), and the areas of deposition of REY-rich mud (REY)^{5),8)}. Thick line represents reconstructed path of Minamitorishima Island since >100 Ma⁹⁾

の伊平屋北海丘、伊平屋小海嶺、伊是名海穴、および南部の鳩間海丘、伊良部海丘、第四与那国海丘群などで大規模な熱水鉱床が見つかった（Fig. 2）。一方、伊豆・小笠原諸島周辺海域でも、北部の明神海丘カルデラ、ベヨネーズ海丘カルデラ、南部の水曜海山などに海底熱水鉱床の存在が確認されている（Fig. 2）。これら2つの海域には、まだ見付かっていない鉱床も多数存在していると見られ、現在も調査が進められている。

マンガン団塊は、太平洋の中央部から東部にかけての「クラリオン・クリップトンゾーン（CCZ）」と呼ばれる公海域に大規模な分布が知られており（Fig. 3）、世界各国がこの海域に鉱区を持っている。日本も北海道に匹敵する面積の鉱区をCCZに獲得しており、将来の開発に備えている。一方、日本のEEZ内においては、これまでCCZのような広大なマンガン団塊分布域は知られておらず、マンガン団塊が国内で資源として注目されることはなかった。しかし、2016年に南鳥島沖EEZの水深5,500～5,800 mの深海盆に大規模なマンガン団塊分布域が存在していることが明らかとなり⁷⁾、国産資源としてのマンガン団塊にも注目が集まった。この南鳥島EEZのマンガン団塊分布域は、広さが約44,000 km²におよぶと推定されている。これは、日本がCCZに持つマンガン団塊探査鉱区（75,000 km²）の60%近い広さであり、新たな国内資源として期待される。

南鳥島EEZを含む伊豆・小笠原海溝の東側に広がる海域は「パシフィックプライムクラストゾーン（PPZ）」と呼ばれ、厚さ10cmを超えるマンガンクラストを伴った古い海山が多数存在している（Fig. 3）。これらの海山は、古いものは1億年以上前に南太平洋で生まれたものであり、それらは長い時間をかけてマンガンクラストを成

長させながら、プレート運動によって日本列島の近傍へと運ばれてきたのである。すなわち、海底熱水鉱床だけでなく、マンガンクラストもプレート運動の賜物であると言える。日本のEEZ内には、伊豆・小笠原海溝西側のフィリピン海プレート上にも、多数の海山が存在しており、これらの海山においてもマンガンクラストが確認されている。ただし、これらの海山の年代は数千万年から数百万年と、太平洋プレート上の海山に比べるとずっと若い。そのため、マンガンクラストの厚さも薄いことがわかっている。

レアアース泥は、2011年の発見当初日本のEEZ内には確認されていなかった。しかし、最初の発見から約一年後に、日本のEEZである南鳥島周辺海域にもレアアース泥が存在することが明らかとなっている。さらに近年の調査の進展によって、南鳥島EEZではこれまで太平洋で見つかっていたレアアース泥の実に3倍以上に達する、7,000 ppmを超える超高濃度のレアアース泥が、海底下2～4 m程度の比較的浅い深度に存在していることも確認されている。南鳥島は本州から約1,800 km離れた我が国の最東端の島であり、また日本で唯一太平洋プレート上に存在する島でもある。この島の周辺の高底もまた、今から1億年以上前に南太平洋で誕生し、太平洋プレートの運動に伴って現在の位置まで移動してきたことがわかっている。その間に、太平洋の真ん中で長い時間をかけてレアアース泥を堆積し、それが現在南鳥島に存在していると考えられるのである（Fig. 3）。

このように、日本はプレート運動の終着点である「沈み込み帯」に位置するがゆえに、火山や地震という災害にも苦しめられてきているが、一方でそのおかげで多くの海底鉱物資源に恵まれているのだとういことがわかる。

3. 海底鉱物資源の探掘に向けた技術開発

海底鉱物資源は、未だ商業的に開発されたことのない未来の資源である。高い圧力がかかり、電磁波も吸収されてしまう深海底では、人類の活動は大きく制限されてしまう。そのため、海底鉱物資源の開発には地上とは異なる困難が伴う。このような困難に立ち向かい、深海底の鉱物資源を採掘して引き上げるという挑戦を人類が最初に行ったのは1970年代のことである。その最初のターゲットは、マンガン団塊であった。

マンガン団塊の開発を目的とした調査・研究は、1960年代に入ると本格的に始められた。そして1970年代に入ると、アメリカ、カナダ、イギリス、西ドイツ、ベルギー、オランダ、イタリア、フランスなどの企業が参加する複数の国際コンソーシアムによって、採鉱・揚鉱システムの設計・製造と実海域での試験が集中的に行われ

た。これら一連の採鉱・揚鉱試験の結果、深海からマンガング塊を採鉱・揚鉱するための開発システムが形作られた (Fig. 4)。その後、1980 年代以降には日本、フランス、インド、韓国等の国々も、新たにマンガング塊の採鉱・揚鉱システムの開発および実証に向けた研究・開発に参入している。日本においては、独自の採鉱・揚鉱システムの開発を目指した取組みが 1981 年からスタートした。揚鉱システムについては、200m の縦型水槽を用いた陸上試験まで完了している。そして 1990 年代後半には、南鳥島沖水深 2,000m の海域において、採鉱・揚鉱システムの海域試験が行われている。

海底熱水鉱床の開発に向けた動きとしては、近年カナダの Nautilus Minerals 社がパプアニューギニアの EEZ 内に存在する海底熱水鉱床の商業開発を目指して、探査と採鉱・揚鉱システムの構築を進めている。この Nautilus Minerals 社の計画している開発システムも、採鉱機とポンプリフトを用いたマンガング塊と類似のシステムを採用している。現在までに、3 種類の採鉱機を完成させ、陸上試験を行っていると報じられている。また、ポンプリフトを用いた揚鉱システムも完成品の陸上テスト段階にあるという。一方、これらの採鉱・揚鉱システムを運用するための母船は、2016 年現在まだ建造中であるという。日本でも、2008 年より独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) が中心となって、EEZ 内

の海底熱水鉱床開発を目指した探査、採鉱・揚鉱技術の開発が進められている。2015 年までに 2 種類の採鉱機の製作と試験が行われており、揚鉱のためのポンプリフトの陸上試験も実施されている。現在の計画では、今年 (2017 年) 沖縄本島北西沖の水深 1,600 m の海域において、実海域試験を実施する予定となっている。これに成功すると、上述の Nautilus Minerals 社を追い抜いて、世界初の海底熱水鉱床の実海域試験成功例となる可能性がある。

レアアース泥は、現在のところ採鉱・揚鉱システムの構想段階にあり、実地での試験の段階にはまだない。しかし、レアアース泥の開発システムには、前述のマンガング塊採鉱・揚鉱システムをほぼそのまま流用できると考えられている。そのため、まったくのゼロから挑戦しなくてはいけない課題はなく、既存の技術のみを用いて開発可能であると考えられる。マンガングクラストのみは、未だその開発システムの全貌が描ける段階には無い。これは、海山の斜面に張り付いている厚さ数 cm のクラストを剥がすための採鉱技術が確立されていないことによるものである。一方、揚鉱技術についてはマンガング塊や海底熱水鉱床の技術をそのまま用いることができると考えられる。

4. 今後の展望

海底鉱物資源については、現在まで商業生産は行われておらず、海底鉱物資源の本格的な開発には未だ至っていない。しかし、エネルギー資源である石油や天然ガスに目を転じると、すでに 1970 年代より海洋からの生産が本格的に始まっており、現在では全体の実に約 4 割が海洋から生産されている。そのため鉱物資源についても、将来的には石油や天然ガスなどのエネルギー資源に続き、海へと進出する可能性は高いと考えられる。

広大な EEZ を持つ日本は、海底鉱物資源のポテンシャルが高いと言える。また、日本の基盤産業を支える鉱物資源を自国で安定的に供給できるようになれば、単なる資源の調達以上の経済的なメリットも、もたらしてくれると考えられる。日本の EEZ における今後の海底鉱物資源開発の進展が期待される。

References

- 1) S. Petersen, A. Krätschell, N. Augustin, J. Jamieson, J. R. Hein, M. D. Hannington: Marine Policy 70 pp. 175–187 (2016)
- 2) SPC: Sea-Floor Massive Sulphides, a physical, biological, environmental, and technical review, Vol. 1A, Secretariat of the Pacific Community, 52p (2013)

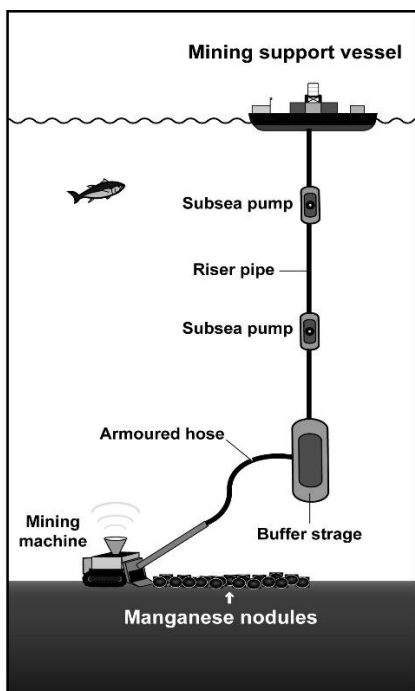


Fig. 4 Mining system for manganese nodules¹⁰⁾

- 3) SPC: Manganese Nodules, a physical, biological, environmental, and technical review, Vol. 1B, Secretariat of the Pacific Community, 52p (2013)
- 4) SPC: Cobalt-rich Ferromanganese Crusts, a physical, biological, environmental, and technical review, Vol. 1C, Secretariat of the Pacific Community, 52p (2013)
- 5) Y. Kato, K. Fujinaga, K. Nakamura, Y. Takaya, K. Kitamura, J. Ohta, R. Toda, T. Nakashima, and H. Iwamori: *Nature Geoscience*, **4**, pp. 535-539 (2011)
- 6) K. Nakamura, K. Fujinaga, K. Yasukawa, Y. Takaya, J. Ohta, S. Machida, S. Haraguchi, and Y. Kato: *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, **46**, pp. 79-127 (2015)
- 7) JAMSTEC press release:
http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20160826/ (2016)
- 8) J.R. Hein and A. Koschinsky: *Treatise on Geochemistry*, Elsevier (Oxford), pp. 273–291 (2014)
- 9) K. Nakamura, S. Machida, K. Okino, Y. Masaki, K. Iijima, K. Suzuki, and Y. Kato: *Geochemical Journal*, **50**, pp. 605-619 (2016).
- 10) K. Nakamura, K. Fujinaga, K. Yasukawa, Y. Takaya, J. Ohta, S. Machida, S. Haraguchi, and Y. Kato: *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, **46**, pp. 79-127 (2015)

特 別 電気化学的メタン生成を触媒する好熱性バイオカソードの
講 演 生物電気化学・数理的解析¹

小林 肇^{2*}, 中杉康仁², 姫野将徳², 孙 晓晗²,
長嶋彩乃², 宮本寛之², 佐藤光三²

Bio-electrochemical and mathematical analyses of a thermophilic biocathode catalyzing
electromethanogenesis

Hajime Kobayashi^{2*}, Yasuhito Nakasugi², Masanori Himeno², Xiaohan Sun²,
Ayano Nagashima², Hiroyuki Miyamoto², Kozo Sato²

² Department of Systems Innovation, School of Engineering, The University of Tokyo

Abstract

Electromethanogenesis is a bio-electrochemical system, in which a microbially-catalyzed cathode (biocathode) mediates CO₂ reduction into methane by using electrical energy. As the current-capture efficiency is as high as 96%, electromethanogenesis is an attractive option for energy conversion, as it results in storage of electrical energy in a stable form, methane. The major bottleneck of electromethanogenesis is its relatively low methane production rate, which restricts most of its commercial application. To better understand the reaction mechanism and improve the performance, a high-performance electromethanogenesis system was constructed by using thermophilic microorganisms. Our analyses revealed critical role of surface microbes at the biocathode.

Key Words: Electromethanogenesis, bio-electrochemical systems, energy conversion, CO₂ utilization, biocathode

1 緒 言

1.1 バイオ電気化学的システム

バイオ電気化学的システム (Bio-Electrochemical Systems: BESs) とは、個体電極上での電気化学的反応の触媒として微生物を用いる萌芽技術系の総称で、エネルギー生産・変換、ケミカル生産、排水処理、バイオセンサー、バイオレメディエーション等、幅広い分野での応用が期待されている¹⁾。その中で、私達は微生物をカソード反応の触媒として利用したバイオカソードによる「電気化学的メタン生成 (Electromethanogenesis: EM)」に着目している。カソード反応とは、アノードから回路を

経て流入した電子を消費する還元反応である。バイオカソードでは、触媒である微生物の代謝活性を利用し、還元反応の産物である有用化合物 (燃料、原料等) の生産を行う。バイオカソードの特徴は、微生物が電極を電子供与体として利用する、すなわち電極から電子を直接受容し、代謝に利用する点にある。この特性から、化学触媒を用いる従来技術と比べ、過電圧が低減され、電子の利用効率が低い事が示されており、エネルギー変換・物質生産での利用が期待されている。

1.2 電気化学的メタン生成

電気化学的メタン生成 (EM) とは、バイオカソード上で電子 (e⁻) とプロトン (H⁺) を CO₂ 還元へ供しメタンを生産する反応系である (CO₂ + 8H⁺ + 8e⁻ → CH₄ + 2H₂O) (Fig. 1)。この反応に必要な電極電位は理論上は -0.24 V (vs. SHE) と高く、投入する電力エネルギーは少なくない。また、バイオカソードにおける電子の利用効率 (カソードで消費された電子がメタンに組み込まれる割合)

1. 平成 29 年 6 月 8 日 本会第 136 回学術講演会において発表

2. 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻

* kobayashi@frcer.t.u-tokyo.ac.jp

平成 29 年 3 月 10 日受理

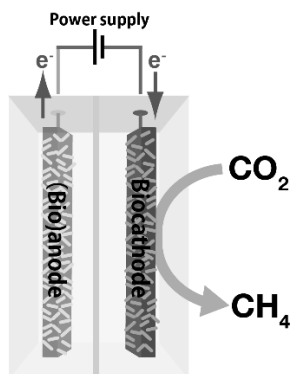


Fig. 1 Schematic representation of an electromethanogenesis reactor.

は 96% と極めて高い。電源として再生可能エネルギーを利用することで、供給と出力が不安定な再生可能エネルギーを化合物の形態で貯留（蓄電）することが可能となる。さらに、CO₂ を還元利用するため、産物であるメタンは炭素中立的である。

私達は、このバイオカソードによる EM 反応をエネルギー変換・CO₂ 利用技術として確立する研究を実施している。本発表では、バイオカソードの触媒機構の理解と性能向上を目的とした基礎研究の最近の進捗を報告する。

2 好熱性微生物を用いた EM 反応系の生物電気化学的解析

2.1 好熱性微生物を用いた高性能の EM 反応系の構築

既往研究で広く用いられている常温性微生物に比べ、好熱性微生物はより高い触媒活性と安定性を持つことが期待できる。そこで私達は、微生物源として好熱性微生物群を使用し、BESs の基礎研究を行っている^{2), 3), 4)}。

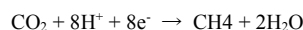
油田の地層水由来の微生物群を電気化学的培養リアクターで電圧を印可しながら培養し、EM の触媒活性を持つ微生物をカソードに集積した。形成された反応系では、メタン生成速度と発生する電流が電圧の大きさに依存して大きくなる傾向が見られた。また、印加電圧の大小によらず、電流-メタン変換効率率は 100% に近かった。さらに、同リアクターの電気化学的メタン生成速度は既往研究中で最高であった。以上のことから、好熱性微生物群を用いて高性能の EM 反応系の構築が可能である事が示唆された⁵⁾。

2.2 好熱性バイオカソードの生物電気化学的解析

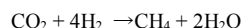
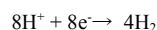
この EM 反応系のバイオカソードの電気化学的特性を Cyclic Voltammetry (CV) を用いて解析したところ、同バイオカソードによる電気化学的メタン生成反応は、それぞれ -0.3 V と -0.6 V (vs. Standard Hydrogen Electrode: SHE) 付

近に平衡電極電位を持つ 2 つの電気化学的反応により成されていることが示唆された⁵⁾。各反応の平衡電極電位から、これら 2 つの電気化学的反応は、それぞれ直接的または間接的 EM 反応（下記の反応経路 A, B）に対応している事が示唆された：

・反応経路 A（直接的 EM 反応、理論平衡電極電位：-0.287 V vs. SHE）：



・反応経路 B（間接的 EM 反応、理論平衡電極電位：-0.456 V vs. SHE）：



同バイオカソードが触媒する反応を理解するため、-0.3 ~ -0.8 V (vs. SHE) の異なる電位で電流とメタンの生産を測定した。-0.3 V vs. SHE ではメタン生成は検出されなかったが、それより低い電位では電位に依存したメタン生成速度の向上が見られた。特に -0.35 V、-0.4 V といったプロトン還元の理論的平衡電極電位（-0.456 V vs. SHE at pH 7 at 55°C）よりも高い電位でもメタン生成が見られたことは、バイオカソードでのメタン生成が水素分子による仲介を経っていない可能性を示唆した。また、反応が CO₂ の存在に依存していること、さらに微生物的なメタン生成を行うメタン生成古細菌の特異的阻害剤 2-bromoethanesulphonate (BES) によりメタン生産と電流生産が共に阻害されることから、バイオカソードでのメタン生成と電流生産が直接的に結びついていることが示され、直接的 EM 反応（反応経路 A）がバイオカソードで実際に起こっている事が強く示唆された。

3 好熱性バイオカソードの数理的解析

3.1 バイオカソードの微生物密度と内部抵抗の計測

EM 技術の実用化に向けた反応機構の更なる理解、反応効率の最大化、反応の制御法の確立を行っていく上で、EM 反応の数理モデルの構築が有用である。メタン生成量を予測可能な EM 反応の数理モデル構築を目的に、バイオカソードの数理的解析と実験検証を行った。

EM 反応系の数理モデルを構築するためには、メタン生成に関わる微生物数の定量と、バイオカソードの電気化学的特性の把握を行う必要がある。EM リアクターを 6 基構築（EM102, 103, 106, 302, 303, 304）、走査型電子顕微鏡を用いてバイオカソード表面の微生物数の定量を行った。大別して桿菌（Rod）と球菌（Coccus）の 2 種類の微生物が観察された（Fig. 2）。これら 2 種類の微生物密度とメタン生成速度の相関を調べたところ、桿菌にのみ相

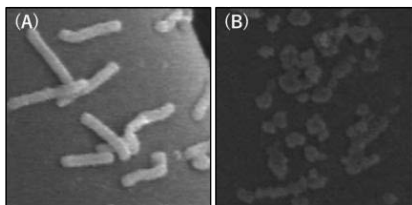


Fig. 2 SEM images of (A)Rod and (B)Coccus on the biocathode surface.

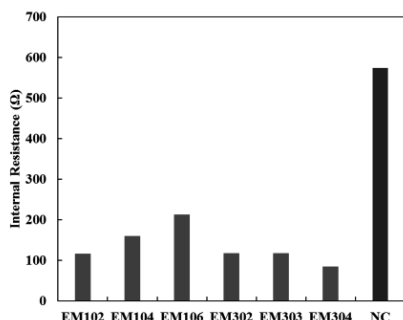


Fig. 3 Internal resistances of EM reactors (EM102, 103, 106, 302, 303, 304) and a non-inoculated control (NC).

関がみられ、この桿菌がメタン生成反応の触媒能を持つと推測された。そこで、以下の数理解析では、桿菌のみがEM反応に関与すると仮定している。

3.2 バイオカソードの微生物密度と内部抵抗の相関

電気化学インピーダンス分光解析により、これらバイオカソードの内部抵抗を測定した。バイオカソードの内部抵抗は、無菌カソードと比べて平均で75%低下した (Fig. 3)。これにより、微生物がカソードでの電子の授受を触媒していることがさらに確認された。

他のBESに関する研究では、内部抵抗 R_{int} は式(1)により計算される⁶⁾。

$$R_{int} = R_{min} + (R_{max} - R_{min})e^{-K_R x} \quad (1)$$

ここで、 R_{min} 、 R_{max} は内部抵抗の最小値と最大値、 K_R は曲線の傾きを決定するパラメータ、 x は微生物(桿菌)密度である。上述のバイオカソードにおいても微生物密度の増加が内部抵抗の低下をもたらすことが確認されたため、この式を用いてパラメータ推定を行った。 R_{min} は実験値の84.2 Ωを用いた。その結果 $R_{max} = 313$ Ω、 $K_R = 1.56 \times 10^{-4}$ と推定された。このパラメータを用いた計算結果と実験値の比較をFig. 4に示す。推定された $R_{max} = 313$ Ωは対照実験の内部抵抗である573 Ωより小さくなっており、微生物が触媒能を持つという仮定から妥当な結果である。この結果は微生物の密度がある値に達した時点で電子授受の触媒能の向上が見られなく

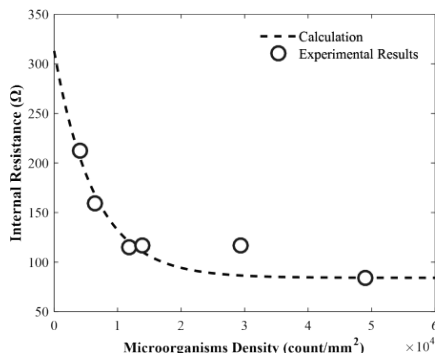


Fig. 4 Comparison between calculated and experimental results of internal resistance

なることを示唆しており、今回の実験で確認された傾向と矛盾しない。パラメータ推定の精度については、更なる実験により向上させることが望ましい。

3.3 バイオカソード内部抵抗と電流生産の相関

EM反応において、発生する電流とメタン生成速度は強い相関を持つことが今回の実験からも確認され、電流値の予測が反応系の性能向上に重要である事が示された。そこで、バイオカソードの電気化学的特性を示す内部抵抗と電流値との相関を調べた。リアクターに流れる電流値 I_{EM} (mA)は理論分解電圧 E_0 (V)、濃度過電圧 η_{conc} (V)、活性化過電圧 η_{act} (V)を用いて以下の式(2)により表すことができる。

$$I_{EM} = \frac{|E_{applied}| - |E_0| - |\eta_{conc}| - \eta_{act}}{R_{int}} \quad (2)$$

過電圧の変化による影響を無視できると仮定すると、電流値は内部抵抗に反比例することが予測されるため、今回は以下の式(3)を用いる。

$$I_{EM} = \frac{K_I}{R_{int}} \quad (3)$$

K_I を回帰分析により求めると $K_I = 66.1$ mV と推定され、決定係数 R^2 は0.776となった。そこで、横軸に内部抵抗の逆数、縦軸に電流値をプロットした結果をFig. 5に示す。リアクターによっては計算値との乖離がみられ、微生物数の時系列的变化を考えたうえで過電圧を計算することにより、精度を上げる必要があることが示唆された。

3.4 直接的EM反応と間接的EM反応の寄与

数理モデル構築の主目的の1つはメタン生成速度の予測であり、メタン生成速度を計算する式の検討が不可欠である。まず直接的EM反応(前述の反応経路A)について、カソード電位を-0.35 V vs SHEとした実験データを用いて検討した。この電位では水素分子の生成が起これにくいので直接的EM反応のみが起きると仮定でき、

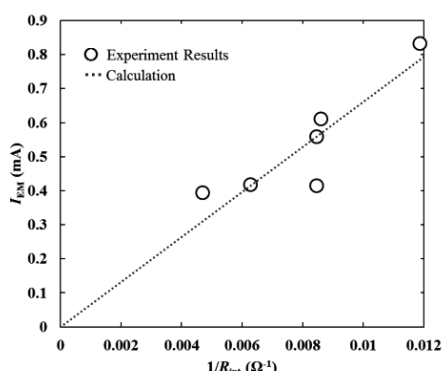


Fig. 5 The relationship between internal resistance and current

以下の式(4)によりメタン生成速度 v_m (mol/hour)が計算できると考えられる。

$$v_m = f_d \frac{I_{EM}}{mF} \quad (4)$$

m は反応で消費される電子数, F はファラデー定数, f_d は流れた電流のうち直接的 EM 反応に使われたものの割合を表す. パラメータ推定の結果 $f_d = 1.0$ と推定された. Fig. 6 に計算結果と実験値の比較を示す. この結果から, カソード電位が高い場合, 電気化学的メタン生成は直接的経路を主とし, 式(4)によって計算できることが確認された.

一方, カソード電位が低い場合, 式(4)による計算ではメタン生成量を正しく表現できない. これは電流が水素分子の生成などの反応にも用いられること, メタン生成が間接的 EM 反応 (上述の反応経路 B) からも起こることが原因として考えられる. そこで第 2 項として間接的経路による電気化学的メタン生成を考慮する. これは水素分子を還元力源として用いる反応であり, 通常の水素資化性メタン生成と同様であることが想定されている.

$$v_m = f_d \frac{I_{EM}}{mF} + Y_{H_2/CH_4} Y_m x A_{sur} \quad (5)$$

Y_{H_2/CH_4} は水素-メタン収率であり 0.25, A_{sur} はカソードの面積 ($8.0 \times 10^3 \text{ mm}^2$), Y_m は微生物 1 体当たりの水素消費能 ($\text{mmol-H}_2 \text{ hour}^{-1} \text{ count}^{-1}$) である. 3 つのリアクター EM102, 104, 106 を用いてパラメータ推定を行ったところ $Y_m = 5.4 \times 10^{-12}$, $f_d = 0.66$ と推定された (Fig. 7). さらに推定されたパラメータを用いて, 式(5)から EM302, 303, 304 についてメタン生成速度を計算し実験値と比較した (Fig. 8). 高い精度でメタン生成速度を推定できていることが分かる (Fig. 8). 異なる電流-メタン変換効率を示すリアクターに対して同じパラメータを用いてメタン生成速度が再現されており, 微生物数と電流値を数値シミュレーションによって正しく求められれば, メタ

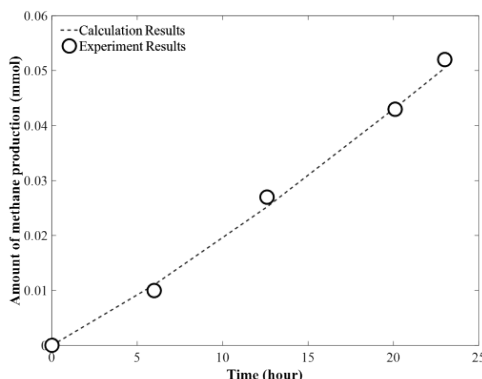


Fig. 6 CH₄ production rate via direct pathway

ン生成速度を予測できることを示唆している.

3.5 バイオカソードの微生物密度に基づくメタン生成速度の予測

以上の式(1), (3), (5)を組み合わせると微生物密度からメタン生成速度を予測することができる. その結果を Fig. 9 に示すが, 実験値との乖離が見られた. 原因は式(3)では電流値を正しく予測できていないことにある. 予測精度を向上させるためには, 微生物数に関して更なる解析を行い, メディエーターの割合等から過電圧を計算する必要がある. また, 式(5)では微生物数を一定 (定常状態) としているが, カソード上での微生物の増殖速度等を考慮する必要がある.

4 バイオカソード上の微生物群の分子遺伝学的解析

4.1 バイオカソード微生物群の構成種の解析

バイオカソードにおける EM 反応の微生物的機構の理解を目的に, バイオカソードの微生物叢の解析を行った. 16S rRNA 遺伝子を指標とした分子系統解析の結果, 20 種類以上の細菌と数種の高細菌が検出された. 細菌種の構成は各バイオカソードで比較的異なっていたが, 高細菌種は各サンプルでほぼ同様の構成を示し, メタン生成高細菌 *Methanothermobacter thermautotrophicus* の近縁種の優占化が見られた.

4.2 バイオカソード微生物群のメタゲノム解析

バイオカソード上の微生物種の EM 反応における役割を理解するため, バイオカソードのメタゲノム情報を解析した. 長時間 (約 3 ヶ月間) の定電位 (-0.5 V vs. SHE) 培養後, EM 触媒能が確認されたバイオカソードから DNA を抽出, 約 100 ギガ塩基対 (Gbp) の塩基配列をショットガン解析した. その中から 60 Gbp のショットガン

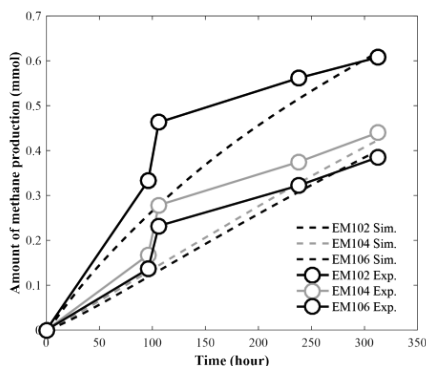


Fig. 7 The result of parameter estimation related to CH₄ production via indirect

配列に対し、MetaPhlAn による系統解析を行った。また、同ショットガン配列を、MEGAHIT メタゲノムアセンブラーを用いてアセンブルしたコンティグ配列に対し、AMPHORA による系統解析を行った。さらに、Velvet ゲノムアセンブラーを用いた優占種ゲノムのアセンブリー解析を行った。

解析の結果、新規の細菌種とメタン生成古細菌 *M. thermautotrophicus* 近縁種に由来するゲノム情報が全メタゲノム情報のそれぞれ 60% と 30% を占めていた。最も優占していた細菌種は *Actinobacteria* 門 *Coriobacteriales* 目に属する新規の細菌で、既知の既培養株と 16S rRNA 遺伝子の相同性が 90% 程度しかない。そこで、この細菌種のゲノム情報を再構築し、その代謝能とバイオカソードにおける機能の解明を試みている。さらに、全メタゲノム配列から同細菌種由来の配列を取り除いた上でアセンブリー解析を行う事で、*M. thermautotrophicus* に近縁のメタン菌種の全ゲノム情報の再構築を試みた。上記の新規細菌種の EM 反応への寄与は不明だが、*M. thermautotrophicus* 近縁種は CO₂ のメタンへの還元反応に必要な触媒性のメタン菌である可能性が示唆される。特に、*M. thermautotrophicus* は桿菌であり、項目 3 でバイオ

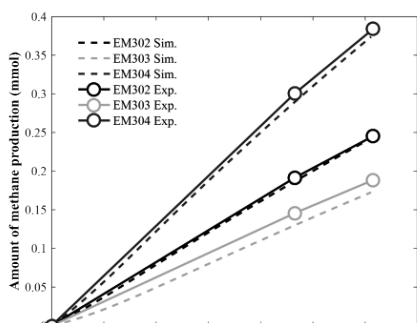


Fig. 8 Validation of CH₄ production via indirect pathway using estimated parameters

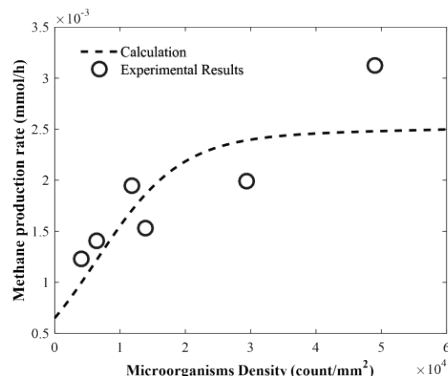


Fig. 9 Prediction of CH₄ production rate from microbial density

カソードの性能に重要であることが示されている「桿菌」と非常に似た形態を持っている。バイオカソード上で濃縮されている同メタン菌種のゲノムを他のメタン菌種のゲノムと比較解析することで、同メタン菌種の代謝能と EM 反応への寄与を検証する予定である。

5 結論

エネルギー変換・CO₂ 有効利用に寄与する技術革新を目的に、CO₂ を炭素中立的なメタンに変換する EM 反応系の研究を行い、以下の結論を得た。

地下由来の好熱性微生物群を用いて高性能の EM 反応系を構築した。同反応系は、メタン生産速度が既往研究中で最も高く、電子の利用効率 100% に近いという有望な性状を示している。この反応系で形成されたバイオカソードは、電位に依存し 2 種類の電気化学的反応を触媒する事が示された。バイオカソードでは、比較的高い電位 (-0.32 ~ -0.6 V vs. SHE) では「直接的 EM 反応 (CO₂ + 8H⁺ + 8e⁻ → CH₄ + 2H₂O)」が、-0.6 V (vs. SHE) より低い電位では「間接的 EM 反応 (2H⁺ + 2e⁻ → H₂ および CO₂ + 4H₂ → CH₄ + 2H₂O)」が起こっている事が示唆された。

同 EM 反応系の数理モデル構築に不可欠な微生物の菌体数と電気化学的特性に関する解析を行い、メタン生産速度の予測を試みた。電気化学的メタン生成能を持つリアクターについて、バイオカソード上の微生物の定量を行い、メタン生成能との相関を調べたところ、桿菌がメタン生成に寄与していることが示唆された。また、桿菌の密度の増加が内部抵抗の低下、すなわち電子の授受の触媒能の向上をもたらすことがわかった。桿菌の密度と電流値を用いることで、異なる条件のリアクターについてメタン生成速度の予測に成功したが、電流値を実験条件から予測するためには微生物数の時間的変化を調べ、

過電圧による影響を考慮する必要がある。

パイオカソードの微生物的機構の理解を目的に、パイオカソードのメタゲノム情報を解析した。メタゲノム情報の約 9 割が *Actinobacteria* 門 *Coriobacteriales* 目の新規細菌種とメタン生成古細菌 *M. thermautotrophicus* 近縁種に由来するゲノム情報に占められていた。アセンブリー解析により、それら優占種 2 種のゲノム情報の再構築に成功しており、現在は代謝経路の再構築と比較ゲノム解析を行っている。特に、*M. thermautotrophicus* 近縁種は、パイオカソード上で観察された桿菌に対応する触媒性メタン菌であると考えられ、パイオカソードによる EM 反応の触媒機構の分子機構に関する知見が得られる事が期待される。

謝 辞

本研究で多大なるご協力を頂いている国際石油開発帝石株式会社の佐野正治様、前田治男様、米林英治様、宮川喜洋様、五十嵐雅之様に心よりお礼申し上げます。

References

- 1) 小林 肇, 佐藤光三 (2014) “CO₂から資源を生み出す微生物電解合成システム.” 水素エネルギー協会 (HESS)会誌, 39: 24-32.
- 2) Q. Fu, H. Kobayashi, Y. Kuramochi, J. Xu, T. Wakayama, H. Maeda and K. Sato (2013) “Bioelectrochemical analyses of a thermophilic biocathode catalyzing sustainable hydrogen production.” Int J Hydrogen Energ, 38:15638-45.
- 3) Q. Fu, N. Fukushima, H. Maeda, K. Sato and H. Kobayashi (2015) “Bioelectrochemical analysis of a hyperthermophilic microbial fuel cell generating electricity at temperatures above 80 °C .” Biosci Biotechnol Biochem, 79:1200-6.
- 4) Q. Fu, H. Kobayashi, H. Kawaguchi, T. Wakayama, H. Maeda and K. Sato (2013) “A thermophilic Gram-negative nitrate-reducing bacterium, *Calditerrivibrio nitroreducens*, exhibiting electricity generation capability.” Environ Sci Technol, 47:12583-90.
- 5) Q. Fu, Y. Kuramochi, N. Fukushima, H. Maeda, K. Sato and H. Kobayashi (2015) “Bioelectrochemical Analyses of the Development of a Thermophilic Biocathode Catalyzing Electromethanogenesis.” Environ Sci Technol, 49:1225-32.
- 6) R.P. Pinto, B. Srinivasan, A. Escapa and B. Tartakovsky (2011) “Multi-population model of a microbial electrolysis cell.” Environ Sci Technol, 45:5039-46.

特 別
講 演

JX 金属グループにおけるリサイクル処理プロセス¹

永井燈文^{2*}

Metals recycling process in JX Nippon Mining group

Hifumi NAGAI^{2*}

²JX Nippon Mining and Metals Corporation

Abstract

JX 金属グループは、鉱山や製錬所の操業で長年培ってきた技術と実績をベースに、リサイクル原料から銅・貴金属などの有価金属を経済的に回収している。電気部品やスラッジ等のリサイクル原料から銅製錬プロセスを活用して銅および金、銀、鉛、白金、パラジウム等の各種金属を回収している。銅製錬プロセスを活用した金属リサイクル処理について、銅製錬(乾式製錬処理、銅電解精製)および銅電解殿物からのレアメタルおよび貴金属の精製法の概要を紹介する。また、リサイクル原料の受入に不可欠な分析評価法について述べる。

Key words : Copper Smelting, Refining, Recycling, Precious Metals, Recycled materials analysis

1. 緒 言

工場などから発生する金属スクラップ、スラッジ類および「都市鉱山」と呼ばれる新たな資源として注目を集めている使用済みの電気部品、電子機器等、これらのリサイクル原料はベースメタルである銅をはじめ、金、銀、白金、パラジウム等の貴金属および各種レアメタル等の金属資源を含む。鉱物資源が乏しい日本にとっては、こうしたリサイクル原料からの非鉄金属のリサイクルは、「資源循環型社会」の構築という観点からも重要である。

JX 金属グループでは非鉄金属の製錬事業で培ってきた技術力を活用して、リサイクル原料から銅、貴金属などの有価金属を回収している^{1)~3)}。ここでは銅製錬(乾式製錬処理、銅電解精製)および銅電解殿物からの貴金属精製の概要を紹介し、銅製錬プロセスを活用した貴金属などのリサイクル処理について報告する。

2. 有価金属のリサイクルネットワーク

JX 金属グループは、JX 金属株式会社 (JX 金属)、パンパシフィック・銅株式会社 (PPC) および関連会社から成り、銅を中心に上流の「資源開発」、中流の「金属製錬」および「金属加工」、「リサイクル」までの一貫

した事業展開をしている。銅製錬は JX 金属と三井金属鉱業との合弁会社である PPC を中心に行っており、その製錬能力は国内 1 位である。佐賀製錬所は、年間約 45 万トンの粗銅生産能力を有し、年間約 10 万トンのリサイクル原料を処理しており、アジアにおける最大級の銅・貴金属リサイクル拠点となっている。JX 金属グループは、世界最大級の銅製錬所である PPC 佐賀製錬所と関係会社、日立事業所 HMC 製造部 (Hitachi Metal recycling Complex, HMC) とが連携してリサイクル原料を処理することにより銅、貴金属、レアメタルを効率的に回収している。

Fig. 1 に PPC および関係会社 5 社を活用したリサイクル原料の処理体制を示す。拠点が日本各地を網羅しており、

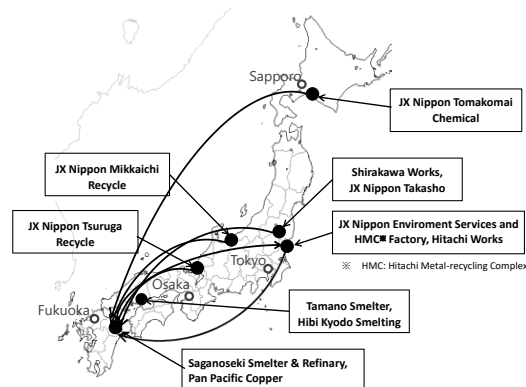


Fig. 1 Operation bases and material flow of JX-Metals' recycling and environmental services business.

1. 平成 29 年 6 月 8 日 本会第 136 回学術講演会において発表

2. JX 金属株式会社

* nagai.hifumi@jxgr.com

平成 29 年 3 月 10 日受理

特に、東京～大阪～福岡にかけて存在する工業地帯に近い
ため、集荷に有利である。国内各地から集荷したリサイ
クル原料は、原料に応じた前処理（焼却・破碎・溶融
など）を行った後、佐賀関製錬所へ集められて処理され
有価金属を回収する。さらに銅製錬工程で発生する製錬
副産物を HMC で処理してレアメタルおよび貴金属等の
有価金属を製品化する。

3. JX 金属グループのリサイクル原料処理プロセス

3.1. 銅製錬プロセス

Fig. 2 に銅製錬プロセスを活用した回収フローを示す。
電気部品などのようなリサイクル原料は樹脂などの可燃
物を多く含み、樹脂に塩素や臭素などのハロゲンを含む
ことがある。これらをそのままの状態では銅製錬工程に
て処理すると、可燃物の急激な燃焼による操業の不安定
化、塩化水素などによる設備の腐食、また微細炭化水
素粒子による製品硫酸の着色などの問題が生じる。こ
のため前処理で可燃物を焼却することによって塩化水
素などを除き、焼却金銀滓とする。

次に銅製錬工程では焼却金銀滓などのリサイクル原料
を自溶炉、転炉で溶解する。銅製錬の原料である銅精
鉱は銅鉱石を選鉱して製錬ができるように銅品位を 27 %
程度に高めたものである。銅の形態は銅、鉄と硫黄の
硫化物であり、鉄と硫黄を酸化して銅と分離する。こ
のとき大量の反応熱が発生し、その熱を利用してリサ
イクル原料を溶解する。また、貴金属は銅に吸収され
る性質があり、銅をキャリアメタルとすることで貴金
属を効率よく回収できる。

貴金属を吸収した銅はアノードに鑄造して銅電解精製

することで銅と貴金属が分離され、電気銅と貴金属を濃
縮した銅電解殿物となる。銅電解殿物は貴金属以外に銅
精鉱から持ち込まれたセレン、テルルを含み、貴金属精
製工程で分離・精製処理して貴金属などを回収する。

また鉛、錫などの揮発し易い元素は、転炉で揮発しダ
ストに濃縮する。このダストは、さらに湿式処理して鉛、
錫などの製錬原料とする。また銅電解液を浄液すると
アンチモン、ビスマスが回収される。JX 金属では、こ
れらの製錬副産物を HMC で処理して回収する。

3.2. 貴金属精製プロセス

銅製錬では貴金属にセレン、テルルが随伴するため、

- ① 貴金属とセレン、テルルの分離
- ② 貴金属元素の相互分離

が課題となる。従来はセレン、テルルの分離に乾式処
理が広く用いられたが、排ガス処理の負担が大きかった。
JX 金属グループは湿式処理による貴金属とセレン、テ
ルルとの分離、および溶媒抽出による貴金属元素の相
互分離を採り入れた操業を 1996 年から開始した¹⁾。

Fig. 3 に銅電解殿物からの貴金属精製フローを示す。
脱銅工程では浄液処理後の銅電解液を用いて銅電解殿
物から銅を酸化浸出する。脱銅残渣は塩酸と過酸化水
素を用いて塩化浸出され、金、白金、パラジウム、セ
レンおよびテルルを溶解する。銀は塩化銀に変換され
て未溶解物となり濾過分離する。塩化銀を含む未溶解
物は、鉄粉で銀メタルへ還元して粗還元銀となり HMC
へ送られる。HMC では酸化炉で溶融・精製して銀ア
ノードを鑄造し、電解精製を行って製品銀とする。

塩化浸出で溶解した金を Dibutyl carbitol (DBC) を用い

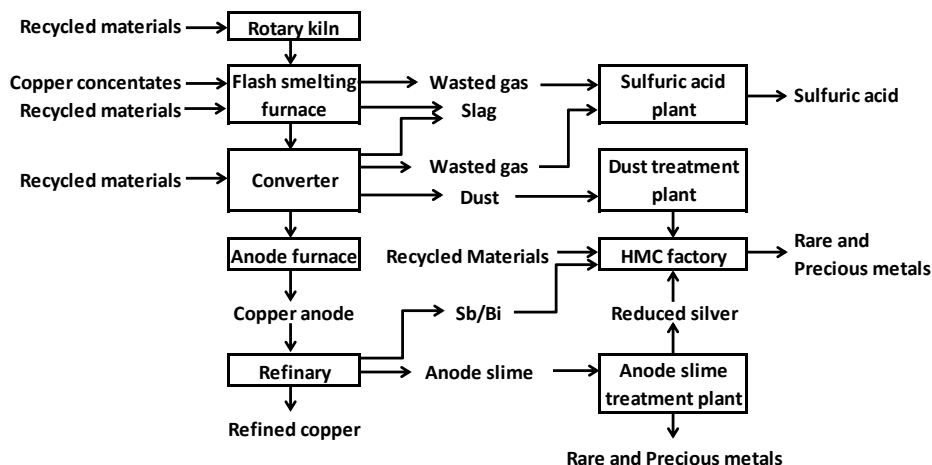


Fig. 2 Typical smelting and refining process in the JX-Metals' group.³⁾

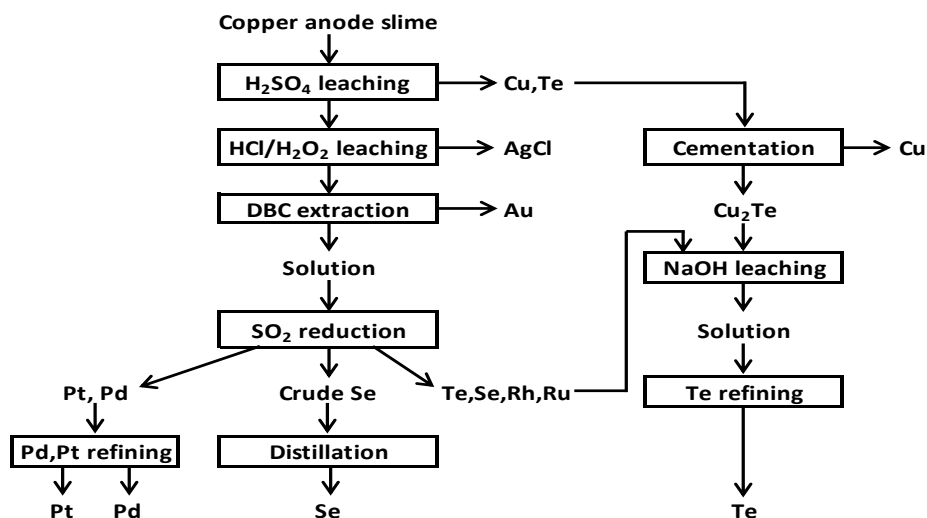


Fig. 3 Typical flow chart for precious metals refining from copper anode slime. ¹⁾

て溶媒抽出で回収し、還元して製品金とする。DBC の一部は水相に溶解するので、蒸留で回収する。

セレン還元工程では蒸留後液に銅製錬工程で発生する亜硫酸ガス (SO_2) を吹き込み還元するが、吹き込み時間で反応を調節して、還元を 3 段階に分けている。1 段目で白金、パラジウムを、2 段目でセレンを、3 段目でテルルを還元して回収する。1 段目の還元液は塩化浸出して、溶解した白金を Tributyl phosphate (TBP) で、パラジウムを Dihexyl sulfide (DHS) を用いた溶媒抽出でそれぞれ回収する。白金、パラジウムは逆抽出液に塩化アンモニウムを添加してアンモニウム塩で析出させて、加熱分解することで製品とする。

3.3. HMC 処理プロセス

銅製錬副産物および鉛系で貴金属品位が比較的高いリサイクル原料は HMC で処理する。Fig. 4 に HMC におけ

るリサイクル原料処理プロセスを示す。

銅製錬のダスト処理で発生する鉛スラッジは主に硫酸塩であるが、炭酸化処理で炭酸塩に変換する。これに鉛系リサイクル原料を混合して電気炉にて還元溶融して鉛メタル中へ有価金属を吸収する。鉛メタルをハリス炉でソーダ処理して錫をスカムとして回収する。鉛メタルは電解精製して製品鉛とする。錫スカムは浸出・浄液して、電解採取で製品錫とする。

貴金属を含む鉛電解殿物は、銅電解精製の電解液から回収したアンチモン、ビスマスと共に還元炉で処理した後、熔融金属から銅等の不純物を除去して各種金属を回収する。アンチモンは酸化して三酸化アンチモンで製品化する。ビスマスは電解精製で製品ビスマスとする。貴金属はビスマス電解殿物に濃縮するので、HMC の貴金属精製工程で精製して製品化する。

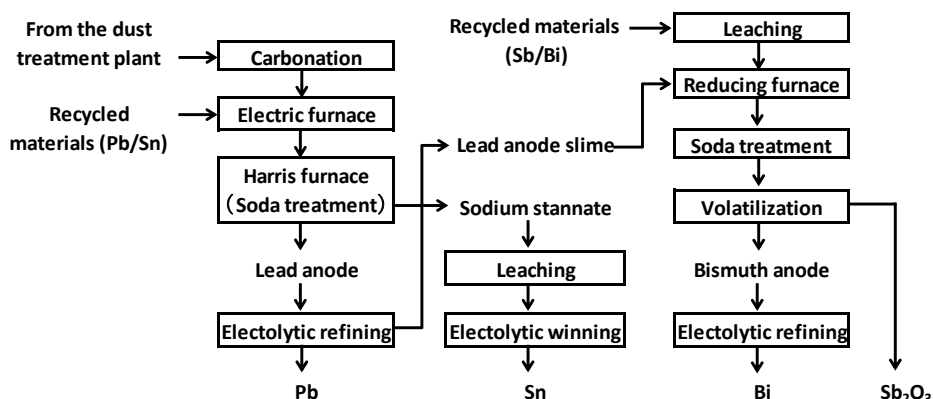
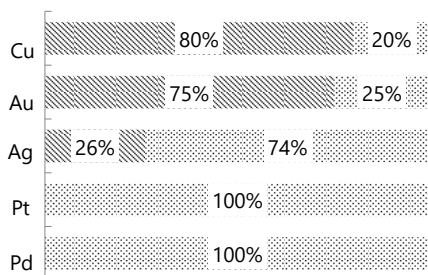


Fig. 4 Typical refining process for rare metals in the HMC factory, Hitachi works.

4. リサイクル原料の受入

JX 金属グループのリサイクル原料処理量は、故銅を除いて年間で約 10 万トンである。Fig. 5 に JX 金属グループの生産量に対する鉱石とリサイクル原料の比率を示す。貴金属は銅よりもリサイクル原料の割合が大きくなっている。特に、白金とパラジウムはほぼ全量がリサイクル原料由来となっている。



▨ Mined ore ▤ Recycled materials

Fig. 5 Percentage output from mined ore and recycled materials.³⁾

リサイクル処理は処理技術とともに、リサイクル原料の受入に不可欠な分析評価技術が重要である。受入分析評価過程を顧客に開示することで分析評価技術に対する信頼を確保している。JX 金属では、HMC 内にリサイクル原料分析センターを設置して、受入、サンプリング、評価、処理の一貫体制を実現した。Fig. 6 にリサイクル原

料分析センターの外観を示すが、顧客の視察受入を前提とした設備となっている。

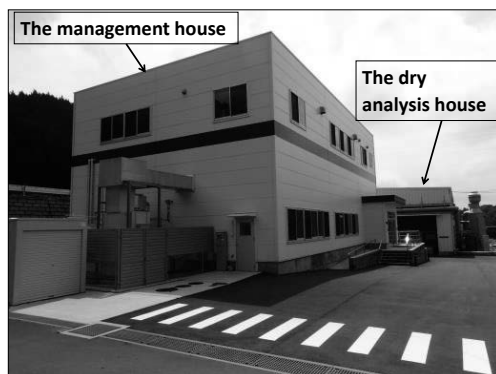


Fig. 6 Recycled materials analysis center in the HMC factory, Hitachi works.

Fig. 7 にリサイクル原料分析センターにおけるリサイクル原料の分析業務フローを示す。リサイクル原料は不均一であることが多く、縮分法でサンプリングすることで、全体を代表する試料を採取する。試料はマット中に融解して、粉碎する。微粉碎した試料を用いて、貴金属を乾式分析法で定量する。鉛ボタン中へ貴金属を融解した後、灰吹き法で貴金属を濃縮したビードにする。ビードを酸溶解して、ICP 発光分析装置(ICP-AES)で測定する。また、銅の分析は、微粉碎した試料を酸溶解後、滴定法で定量する。

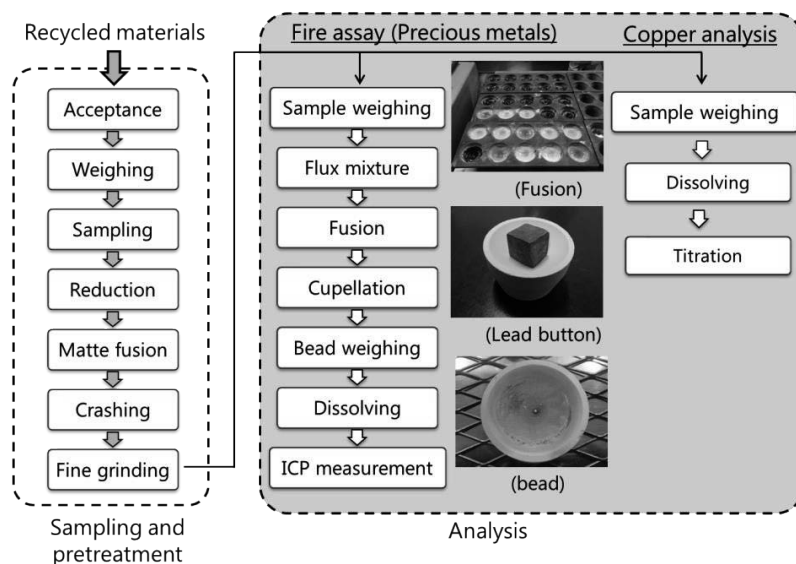


Fig. 7 Flow sheet of the procedure for the acceptance of analytical values for recycled materials.

5. 結 言

JX 金属グループでは銅製錬プロセスのスケールメリット、反応熱を活用することで効率的なリサイクル処理を行っている。これまでに培ってきた技術を活かし、リサイクルを促進することにより、「資源循環型社会」を構

築して、さらに地球規模の環境保全に貢献するように取り組んでいる。

References

- 1) 虎岩明德, 安部吉史: 資源と素材, **116**, 484 - 492 (2000).
- 2) 木村隆: Journal of MMIJ, **123**, 626 - 629 (2007).
- 3) 宮林良次: 金属, **83**, 916 - 920 (2013).

特 別
講 演

長期予測に基づく日本の資源戦略のあり方¹

岡屋克則^{2*}

A Japanese strategy of resources based on long term forecast

Katsunori OKAYA^{2*}

²School of Engineering, The University of Tokyo.

Abstract

資源少国である日本は 100 年規模の長期戦略を持つべきであり、長期の資源の需給状況を予測すると、極めて悲観的な状況になると見込まれる。資源取得のためには、資源の未開発地域への支援協力を進めて、資源確保に務めなければならない。また、海洋資源開発に力を入れ、コスト的に見合う時期が来るまでに採掘技術を開発するべきである。方で、資源の備蓄のために、廃棄物の埋設備蓄を提案する。現在の廃棄物処理は少量であることが原因でコスト高になっており、将来まとめて処理をおこなう方が有利になるものも多い。また、資源処理技術は他国に先駆けたものを持つ必要があるために、研究開発のために国家予算を多く投入すべきである。さらに、エネルギーは不可欠であり、エネルギー供給のために新技術も開発しなければならない。

Key Words : 資源戦略、資源備蓄、海洋資源開発、ODA、技術開発

1. 諸 言

かねてより言われているように、日本は少資源国である。エネルギー、鉱物資源、食糧など大部分の資源を輸入に依存せざるを得ないことは現在も、そして遠い将来においても変わらない宿命である。一方で、世界的に資源の消費量は着実に増加を続けており、やがて資源枯渇の危機に至ることも避けることはできない。しかし悲観的ではない可能性もある。例えば、かつてローマクラブの報告によって指摘された石油枯渇の予測は新たな採掘技術の開発により、極めて大きな延命を果たすことができた。

このような前提を踏まえて、日本が 50 年後、100 年後に向けてどのような資源戦略を講じるべきであるのか、新たな提案を含めて考えたい。

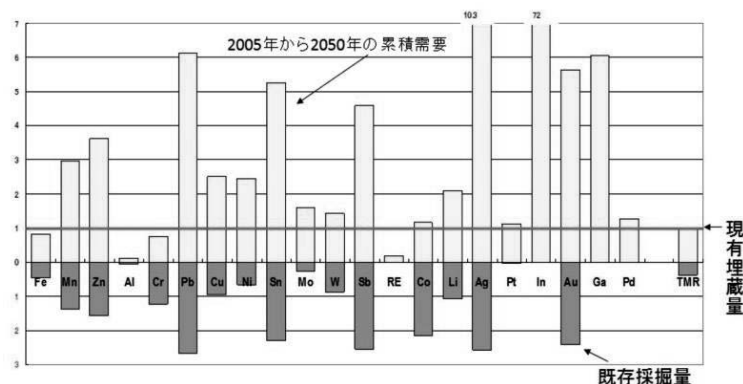


図 1 現有埋蔵量に対する 2050 年までの累計需要量
(出典：物質・材料研究機構「レアメタル・レアアース特集」)

2. 超長期展望の必要性

後述するように資源の枯渇は決して遠くない将来に訪れる。一方で資源の偏在や寡占などのリスクもあり、さらには中国をはじめ多くの国々の資源需要が急増する問題もある。このような事態に対処するには 100 年規模の将来予測をもってしても十分ではない。

2.1 資源の需給予測

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 (NIMS) によれば、2050 年までにニッケル (Ni)、マンガン (Mn)、リチウム (Li)、インジウム (In)、ガリウム (Ga) に

1. 平成 29 年 6 月 8 日 本会第 136 回学術講演会
において発表

2. 東京大学大学院 工学系研究科

* okaya@sky.hi-ho.ne.jp

平成 29 年 3 月 22 日受理

については現有埋蔵量の倍以上を消費するものと見込まれる。さらに、銅 (Cu)、鉛 (Pb)、亜鉛 (Zn)、金 (Au)、銀 (Ag)、スズ (Sn) も埋蔵量を上回り、比較的豊富とみなされている鉄 (Fe)、モリブデン (Mo)、タングステン (W)、コバルト (Co)、白金 (Pt)、パラジウム (Pd) についても現有埋蔵量をほぼ使い切るものと見込まれている。

経産省のホームページに掲載されている資源需給予測は 2030 年までであって、中期的な対応策が検討されているにすぎない。このような中期的な将来予測では、やがて到来する資源枯渇に対処するのは困難である。

2.2 国際社会的な不確定要素

日本にとってレアアース資源に関しては 3 つの大きな不確定要素がある。

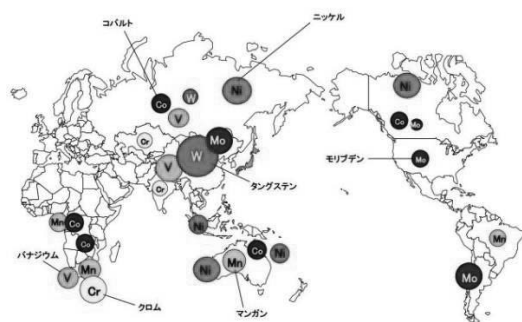


図2 資源の偏在

(出典：資源エネルギー庁「最近における鉱物資源需給の動向と鉱物資源政策の状況について」)

資源の偏在： レアアースは世界的に偏在しており、特定の国からの供給が途絶えた場合に代替資源国が得にくい。

生産者の寡占化： 中国を含め資源生産メジャー企業は市場支配を強化しており、資源価格の高騰が懸念される。

中国などの消費拡大： 中国などの原料輸入が急増しており、我が国の資源確保と競合する。

今後、インドやアフリカ諸国がますます資源を必要とする時が来るはずで、その傾向はこれまでの資源需給予測を外す可能性がある。また、食料、エネルギー、鉱物資源などが不足してくればナショナリズムが台頭し、日本のような少資源国はますます立場が苦しくなるであろうことも容易に想像される。

3 資源戦略のための 5 つの提案

現在経産省のホームページにあるように 2030 年までの長期予測というのでは、本当の将来に向けての資源戦

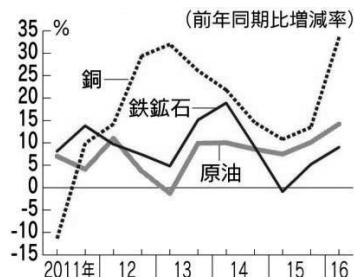


図3 中国の資源輸入量の急増
(出典：中国税関総署「貿易統計」)

略とはなりえない。50 年後、100 年後を考えるべきであり、せめて 2100 年頃にはどうなっていなければならないのかを提案しなければならない。無論、今から 83 年後の未来には、今は SF でしかないような技術も開発されるかもしれない。例えば、軌道エレベータが完成して有害廃棄物の投棄に困らなくなるかもしれないし、マグマから直接エネルギーや金属資源を得られるようになっていくかもしれない。しかし、SF 的な楽観論に基づくよりも、現在の延長線上に未来があるものとして妥当な戦略を講じるほうが懸命であろう。

ここに 5 つの方向性を示す。その中には 2,3 のオリジナルな考え方も含まれており、日本の長期資源戦略には有効であろうと思う。

3.1 未開発資源保有国との共同事業推進

国内資源がほぼ枯渇状態にある日本としては、開発途上国に限らず、未開発資源を保有する国々と日本企業が資源開発をおこなうことによって将来の資源取得を目指すことが考えられる。現在、共同開発や採掘権を取得している国内企業には、国際石油開発帝石 (豪州イクシス LNG プロジェクト)、石油資源開発 (サハリン、イラク・ガラク油田、カナダ・シェールガス)、日鉄鉱業 (チリ・アタカマ銅鉱山、コロンビア、豪州)、日本海洋掘削 (イ

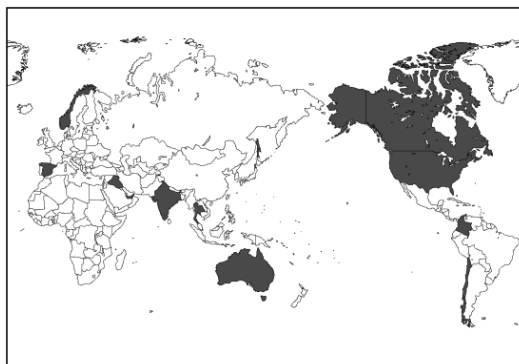


図4 日本企業が共同開発または採掘権をもつ国

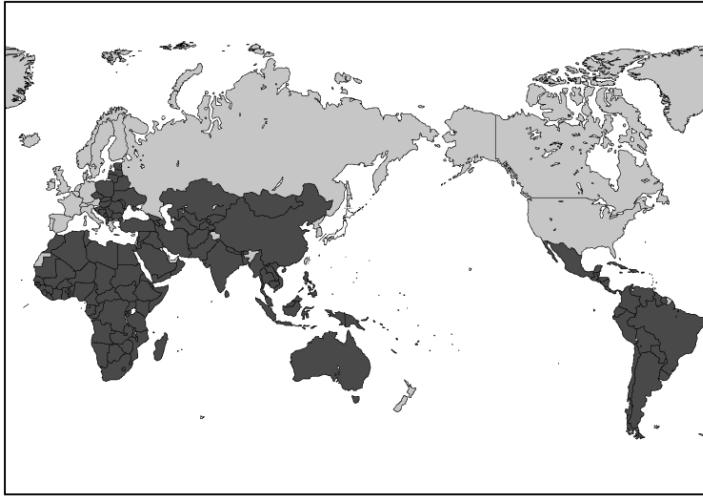


図5 日本のODA対象国

ンド、スペイン、UAE、シンガポール）、三井石油開発（タイ、ノルウェー、米国）などがある（一部、海外に売却済みも含む）。しかし全般的に見ると件数が少なく、将来有望と見られるアフリカ地域については手付かずの状態である。

一方、現在日本のおこなっているODA（政府開発援助）は先進国、紛争地域を除いてほぼ全世界にいきわたっている。

ただし、日本のODAは様々な問題があり、東南アジア主体（中国に約6兆円ほか）、贈与比率が低い（円借款型）、ハード支援比率が高い（道路、橋、鉄道、発電所などが中心）、タイド支援形式（紐付き支援）などの批判を受けている。そのため近年では農業、医療、教育などについてのODAに方向転換が図られている。2011年の東日本大震災に際しては127の国々・組織から物資支援・義援金が寄せられたのは、ODAなどを通じて日本が世界中の国々につながっていることを示すものだろう。今後ともさらにODAに力を注ぎ世界中の国々の発展に寄与することが望まれる。

同時に民間企業においても、長期視野に立って各国の資源開発を援助して共栄を図るべきである。

3.2 海洋資源開発

陸上資源の枯渇が予測されているのであるから、地球の表面の7割を占める海洋に目を向けるのは当然のことである。筆者はかねてより様々な海洋資源開発（海水ウラン回収、マンガンノ

ジュール、コバルトリッチクラスト）に関わってきたが、陸上資源とのコスト競争など様々な要因によって棚上げ状態に至っている。また近年では（メタンハイドレート、海底熱水鉱床、海底レアアース泥資源）なども注目しているが、それぞれに超えなければならないハードルは多い。筆者らは海底に選鉱プラントを置き、不要な物質を極力陸上に持ち帰らないことを提案しているが、これについても人間が近寄りやすい深海底でのプロジェクトとなり、自律型や遠隔操作式のロボットの開発が必須である。当然、採鉱作業も遠隔操作でおこなうしかなく、採鉱・選鉱プラントの設置・運用・保守それぞれについてもロボットが活躍するはずである。

図らずも、福島第一原発のメルトダウンした炉心でデブリを取り出すためのロボットを日本の各企業が開発を進めている。人間が近寄りやすい環境である点で一致しているこの技術がやがて深海底での作業ロボットに活かされることになるかもしれない。

3.3 代替材料・技術の開発

レアアースの最大産出国である中国が2010年に輸出規制をおこなったためにレアアースの代替技術開発が始まった。ジスプロシウム、インジウム、ガリウム・ヒ素、タングステン、テルビウム、白金触媒などについて代替材料技術が開発される一方で、廃材からの回収技術も向上し、高騰したレアアース価格は落ち着きを取り戻した。

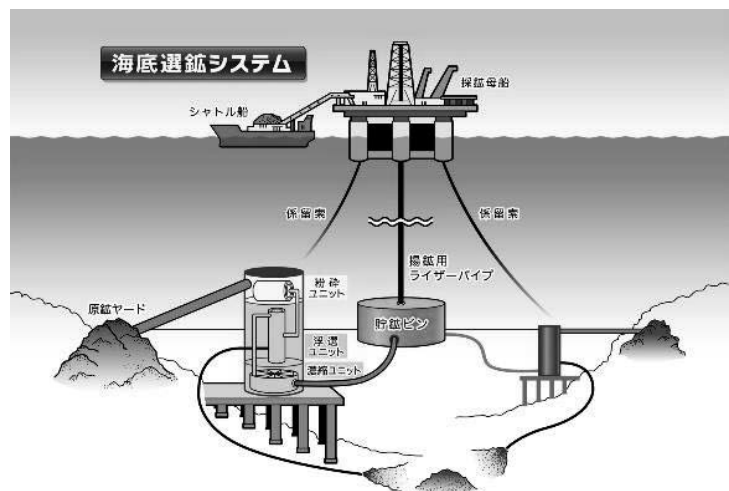


図6 海底選鉱システムの構想

その後、世界貿易機関(WTO)で中国の輸出規制はWTO協定違反だと判断され、中国はレアアースの輸出関税を撤廃したが、「中国はレアアース産業における発言権を拡大する」と宣言をしており、中国からのレアアース資源の長期安定供給は見込めない。だからこそ、中国以外からのレアアース調達を志向すべきであるし、代替技術や回収技術をより進めていく必要がある。

3.4 リサイクル技術の開発と新たな資源備蓄

近年リサイクリング技術は格段に飛躍をしているが、それでもバージン原料との価格競争を避けることはできない。そのため消費者負担や補助金などに頼ってリサイクリングが実現している。

一方、資源備蓄に関しては石油備蓄のほかにレアメタル備蓄が行われている。ただし、これは国内消費量の60日分程度の地金備蓄であって、コストも高く、短期的な供給障害にしか耐えられない。

そこでこれらを鑑みて、廃棄物による備蓄を提案する。鉄やアルミのように容易にリサイクル可能なものは別にして、リサイクルにコストが掛かりバージン原料よりもコスト高となるものは地中埋設により将来への備蓄とするのがよい。これはリサイクリングによるCO₂排出の削減にもつながる。そもそもリサイクリングの弱点は処理費用が高い点であり、その主たる要因は処理量が少ないことによってスケールメリットが得られないからである。鉱山からの鉱石は品位が低くても何百トン/日の規模であるのに対して、電子基板の処理はせいぜい何百キロ/日である。何十年も廃棄物の備蓄をおこない、資源価格が上がった時点で大量処理に踏み切ればコスト問題は容易に解消することができる。幸いにして日本には廃坑となった地下空間がたくさんあるので、これらを活用して廃棄物備蓄をおこなえばよい。

直ちに原料として利用できるものあるいは容易に原料に転換できるものであれば備蓄することは妥当ではない。原料に還元するためにコストがかかるものや、現在の技術では容易に原料化できないものこそが廃棄物備蓄の対

象として適している。例えば、国内で大量に発生した鉱山のズリは将来的には有望な資源に変わるかもしれない。過去の分離技術は未来の分離技術よりも劣っているはずであるから、残留する有価成分を取り出せば貴重な資源となり得る。

ただし重要なことは、将来に向けて分離回収技術を向上させておく必要があるので、リサイクリングのモチベーションが失われるほど徹底的に備蓄のみに偏向するのは得策ではないかもしれない。

3.5 教育・研究機関の充実

戦後の日本が目覚ましい発展を遂げたのには国際的な要因も無視できないが、本質的に勤勉で丁寧に仕事をまっとうする気質と常に新しいものを求め続ける向上心が日本人の中にあったからだと思う。少資源国であり、技術立国として進まなければならない日本にとっては、常に世界に先駆けた技術とアイデアを創出し続ける必要がある。そのためには前項までに登場した新技術の開発ばかりでなく、その基盤となる教育を充実させる必要がある。予算削減を名目に研究機関や教育機関の縮小をおこない、研究や教育のための予算を縮減する現在の政府方針は全くの誤りであり、日本の将来を危うくするものにほかならない。勤勉さを特質とする日本人の資質を活かし、教育面でも文化的にも優れたレベルを維持してこそ、その先に優れた技術やアイデアが生まれるものである。先に述べたODAのような海外支援に加えて国内の教育研究に国家予算の多くを当てることを求める。

4. 結 論

将来の資源枯渇に備えて、日本がどのような資源戦略を持つかが重要である。未開発資源保有国との連携を高める一方で、廃棄物備蓄などのあらたな手法を講じる必要がある。また、技術立国たる日本が代替技術や海洋資源開発などの新たな突破口を持つべく、研究・教育に十分な投資を行う必要がある。

成友興業株式会社 城南島第二工場
高度洗浄処理施設の処理技術について¹月澤麻衣^{2*} 坂井慶太² 亀山敏治² 山本中一²Mai TSUKISAWA^{2*} Keita SAKAI² Toshiji KAMEYAMA² Nakakazu YAMAMOTO²

Abstract

成友興業株式会社城南島第二工場は東京都スーパーエコタウン事業の第3次公募で採択された施設である。かつて日本で広がった資源回収における選鉱技術を基礎とした従来の処理方法を革新的な高度洗浄処理設備に進化させている。最新技術ではシルトデハイダーを導入し、対象物の物理的・化学的特性を把握した適切な処理方法、マイクロバブルとCO₂を組み合わせた脱塩技術等最新の知見を高度に融合させた処理システムとなっている。発生が予想される直下型大地震・豪雨等の災害に伴うがれき類の処理、塩素を含む土砂混じりの廃棄物処理に対しても対応可能な施設であり、有事の際には、迅速な災害復旧と都市機能の回復に貢献することができると考えている。第二工場稼働に伴い、指定調査機関事業ならびに計量証明事業という2つの新事業が加わった。これにより開発工事における現地調査から建設系産業廃棄物や汚染土壌の処理を行えるワンストップ体制を整えた。

Key words : 汚泥、汚染土壌、洗浄、浄化、自然由来

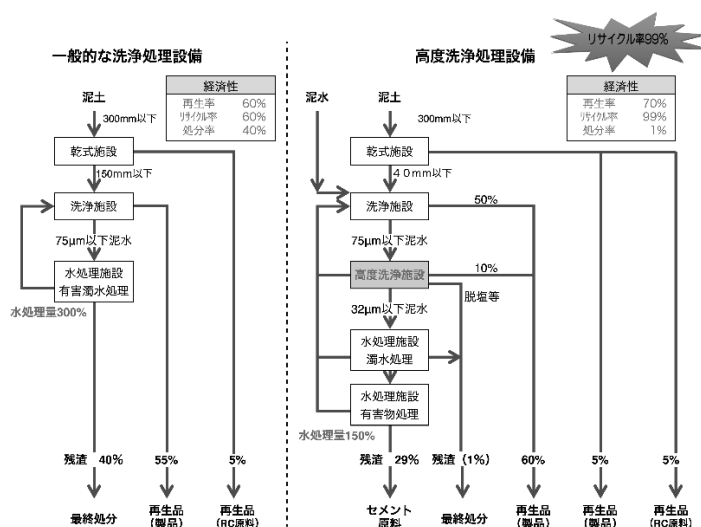


Fig. 1 一般的な洗浄処理設備と高度洗浄処理設備の比較

1. 諸 言

当社はこれまで、建設現場から発生するがれき類、建設泥土（建設汚泥）、汚染土壌などを再生砕石、再生骨材、

1. 平成 29 年 6 月 8 日 本会第 136 回学術講演会において発表

2*. 成友興業株式会社 城南島第二事業所

平成 29 年 3 月 10 日受理

改良土、セメント原料等、建設資材にリサイクルし、建設現場へ戻す循環型社会への寄与を目指すための仕組み「e Synergy System（イーシナジーシステム）」を構築し、環境事業ならびに建設事業を相互連携させ推進している。

なお、このイーシナジーシステムの中核でもある城南島第一工場は、東京都スーパーエコタウン事業施設として、既に実績を積み重ねている。東京オリンピック・パ

ラリンピック開催に伴い、取り組むべきは道路等インフラ整備であり、東京湾岸エリアを中心として整備・開発が更に加速するものと予測されている。浚渫土砂の埋立地や過去に海水面下であった地層等で、有害物質の使用履歴がないにもかかわらず、砒素やふっ素などの重金属等の溶出量が調査範囲全域で土壤汚染対策法の指定基準をわずかに超過して検出されることがある。¹

2. 施設の特徴

本施設は東京都スーパーエコタウン事業の第3次公募で採択された施設である。かつて日本で広がった資源回収における選鉱技術を基礎とした従来の処理方法を革新的な高度洗浄処理設備に進化させている。最新技術ではシルトデハイダーを導入し、対象物の物理的・化学的特性を把握した適切な処理方法、マイクロバブルとCO₂を組み合わせた脱塩技術等最新の知見を高度に融合させた処理システムとなっている。土壌、泥土等における既存洗浄技術の機械的分級点は75μm(0.075mm)であったが、シルトデハイダーにより機械的分級点を32μm(0.032mm)にすることが可能となった。(Fig.1)

Fig.1に示すように、これまでの一般的な洗浄処理設備に加えて、さらに細かい分級が可能となる精度の高い設備や、脱塩処理設備を導入することで、建設泥土(建設汚泥)の再生処理が可能となる。

Fig.2に湿式篩機で分級試験を行った際の粒度割合を示す。従来の洗浄技術では75μm以下の粒度は27.9%の脱水ケーキが発生するが本施設では、75μm以下からさらに1/3が製品として回収可能となる。

これらの設備により、製品化率10%向上することができ、埋立処分場の延命化にも寄与することができると考えられる。

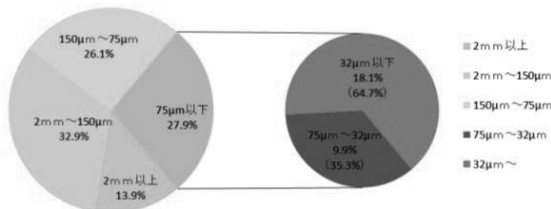


Fig. 2 粒度分布

3. 洗浄技術

当該処理施設において、土壌に含有している水溶性の

塩素は、洗浄処理を行うことによって、洗浄水に溶解し、洗浄後の砂には塩素が残らない。

洗浄前、洗浄後の塩素の含有率について、Fig.3に示す。

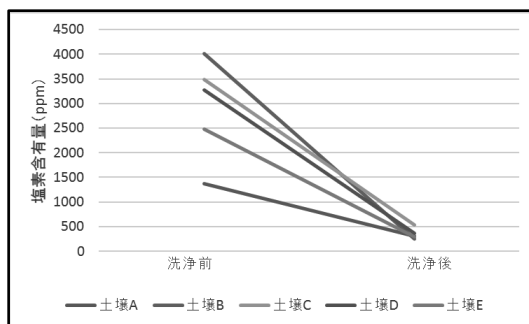


Fig. 3 土壌における水洗浄の効果

4. 新技術

4-1. シルトデハイダー (Fig.4)

シルトデハイダーは従来技術に新たに開発したシルトクリーナーを付加させ、土壌等の洗浄分級精度を飛躍的に向上させたシステムである。基準超過した特定有害物質が含まれた土砂を洗浄した後に当該物質が再付着することを防ぐ。従来は、洗浄工程から脱水工程のみだったが、シルトデハイダーにシルトクリーナーによる強力なすすぎ工程を追加し、より良い砂(製品)の製造が可能になっている。



Fig. 4 シルトデハイダー及びシルトクリーナー

4-2. 炭酸マイクロバブル

従来の水洗浄では不可能であった、焼却灰等の無機鉱物中に塩素が固定化されている対象物において、炭酸マイクロバブルを利用した脱塩が可能であることを確認した。

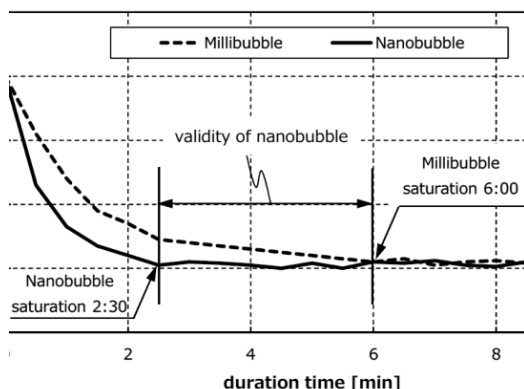


Fig. 5 マイクロバブルおよびナノバブルにおける継続時間

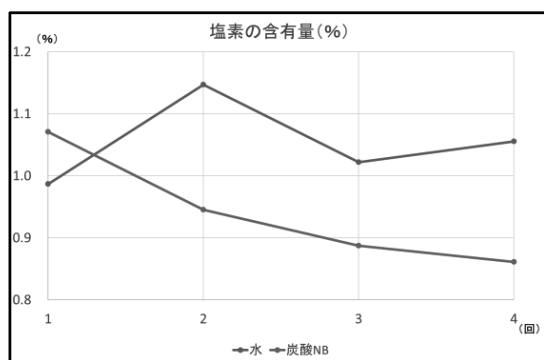


Fig. 6 洗浄回数別の炭酸マイクロバブルによる脱塩率の比較

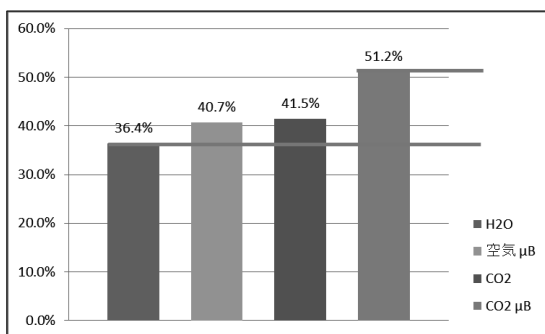


Fig. 7 水洗浄と炭酸マイクロバブル洗浄の脱塩率の比較

マイクロバブルは、長時間、液中に存在するため、 CO_2 の濃度を高濃度に維持でき² (Fig. 5)、脱塩原理であるフリーデル氏塩等の塩素を固定化している無機鉱物の化学反応による分解を高効率に行えんと考えられる。炭酸マイクロバブルによって無機鉱物の結晶構造を破壊し、塩素を溶脱させる。(Fig. 6, Fig. 7)

酸洗浄では大幅なコスト増や廃液による環境破壊の問題があるが、炭酸マイクロバブルでは、それらの問題は生じないといえる。

5. 今後の展望

今年4月には改正廃棄物処理法の施行で建設汚泥の海洋投入が全面禁止となる。五輪やインフラ関連等の大型工事が本格着工し建物の基礎工事や土木工事から発生する建設汚泥や汚染土壌の大量排出が見込まれている。第二工場を含めた弊社の事業が、そのような状況を捉えてどれだけ貢献できるか、できることを最大限行う必要がある。

あわせて第二工場の稼働に伴い、指定調査機関事業並びに計量証明事業という2つの新事業が加わった。これにより開発工事における現地調査から分析までのコンサルティング、建設工事における掘削から運搬、建設系産業廃棄物や汚染土壌の処理、さらには土壌の埋戻し、再生砕石の搬入・仕上げ、建物外構・舗装工事等の業務を行えるワンストップ体制を整えた。首都圏において、製品のストックヤードの確保が近々の課題となっている。製品の分析を外部に委託した場合、時間を要し、受入量の調整等を検討しなければならないが、自社内で処理から分析までのワンストップ体制を構築することにより場内の製品の滞留を解消し、安定的に廃棄物を受け入れることができる。

また城南島の東京スーパーエコタウン内の各社との共同取り組みである、環境省；平成27年度及び平成28年度地域循環拠点（エコタウン等）高度化モデル事業や東京都；平成28年度「持続可能な資源利用」に向けたモデル事業に積極的に取り組んでおり、より広域的な事業展開を行うための付加価値を検討している。

第二工場は、大きな資源循環の流れを考える上での重要な拠点地域であり、東京スーパーエコタウンに立地する他企業と連携した取り組みを目指していく。発生が予想される直下型大地震・豪雨等の災害に伴うがれき類の処理、塩素を含む土砂混じりの廃棄物処理に対しても対応可能な施設であり、有事の際には、迅速な災害復旧と都市機能の回復に貢献できると考えている。

謝辞

本施設の処理技術開発にあたり、東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻藤田豊久教授、ドドビバ・ジョルジ准教授、また東京大学大学院工学系研究科付属水環境制御研究センター栗栖太准教授、建築学専攻北垣

亮馬講師より、共同研究協力及び炭酸マイクロバブル等の貴重なご助言を頂きました。今後ともご指導ご鞭撻の程何卒よろしくお願い致します。

設計・建設を担当し、無事故でかつ当初の工期通りに竣工していただいた大豊建設株式会社の職員の方々、設備機器のコンサルティングと施工管理の環テックス株式会社をはじめ、建設に際し多大なるご尽力をいただきまして関係各位、地域の皆様のご理解とご協力に対し、心から感謝申し上げます。

References

1. 北岡幸 (2009) 自然由来の重金属等に係る調査及び対策について, 23
2. Kim (2013) 微視的機構に基づくセメント系廃材と二酸化炭素の再資源化・有効利用による資源循環システム, 東京大学博士論文, 2013

特 別
講 演

日本における PET ボトルリサイクルの課題と展望¹

古澤栄一^{2*}

Situation of PET Bottle recycle and it's difficulties

Eiichi FURUSAWA^{2*}

²Kyoei Industry Co.,Ltd.

はじめに

1997年に容器包装リサイクル法（以下「容リ法」と略記する）が本格施行されてから、PET ボトルを資源ゴミとして分別排出するといった行為も市民の間に広く定着した。この間、再生原料の品質向上や用途開発が進み、近年では Bottle to Bottle として利用（水平リサイクル）されるようになった。

一方、再生 PET 樹脂の利用を進めたのは海外諸国も同様であり、2004 年頃から海外諸国が日本の使用済み PET ボトルやその破砕品を買い集める動きが顕著になった。現時点では回収されている PET ボトルの半分以上が海外に流出しており、国内市場の健全な発展に影を落としている。

現在国内で飲料ボトル用に使用されている PET 樹脂は 60 万トン程度であるが、それらがリサイクルされ石油由来樹脂に置き換えることが出来れば、リサイクルした分、新たな資源の消費を削減できる。また弊社が外部機関に依頼して調査した結果、PET ボトルをリサイクルして石油由来樹脂に置き換えれば CO₂ の排出量も大幅に削減できることも判明している。市民が飲料を飲むことで毎日街から湧いて出てくる使用済み PET ボトルを我々は「都市油田」と位置づけているが、PET ボトルリサイクルには上記のような資源環境制約への対応力が内在していることを考えると、この「都市油田」は出来る限り日本国内で有効活用されることが望ましい。

弊社の紹介及び Bottle to Bottle を実現した技術と共に、リサイクルの現状を報告し、今後の PET ボトルリサイクルのあるべき姿を考えるきっかけにして頂ければと思う。

Key words : Polyethylene terephthalate, Mechanical Recycling, heat degradation

1. 会社の概要

1.1 設立の歩み

協栄産業の設立は 1985 年。大型 PET ボトルの利用が徐々に広がった頃である。国内の経済は「大量生産・大量消費・大量廃棄」の時代であった。

設立のきっかけは著者が起業前に携わっていたプラスチックの油化事業について師事を受け交流のあった工業技術院（現：国立研究開発法人産業技術総合研究所）の研究者より原油の残りが 40 年分であると聞いたことだ。大量廃棄の現状を改めるためにも、プラスチックリサイクルを自らの使命と考え、29 歳の時、全財産である 350 万円を資本金として起業した。

創業当初、工場から出る廃プラスチックの有効利用をメーカーに提案して回ったが、PP・PE 等汎用樹脂はリサイクルの歴史が長く、既存の再生事業者が排出元との信頼関係を構築しており、仕事に結びつけることが出来なかった。

そんな折、まだリサイクルされていない、当時伸長著しいポリエステル素材のビデオテープフィルムに着目した。汎用樹脂と異なる性質を持つため、国内にリサイクルを手掛ける事業者が見当たらなかったからだ。

また当時、ビデオテープのフィルム端材の排出元企業は製造ノウハウや知的財産の流出を恐れ、リサイクルにあまり積極的でなかった。そこで、フィルム端材の引取、破砕、再資源化といった工程ごとに、いつ、どこで誰が作業を行ったかをその工程毎に記録する複写式の伝票を考案し（現在の廃棄物マニフェストと同様の複写式伝票）、運用の仕組みを整えた。更にいつでも排出元企業による処理工程への抜き打ち検査も受入れた。これによりトレーサビリティを担保出来るようにした。また技術的には、樹脂の特性を

1. 平成 29 年 6 月 8 日 本会第 136 回学術講演会において発表

2. 協栄産業株式会社

* kyoei@kyoei-rg.co.jp

平成 29 年 3 月 13 日受理

研究、試行錯誤を繰り返しながら販売先を開拓し、何とかリサイクル事業を軌道に乗せることが出来た。

しかしながら、プラザ合意以降の円高により日本のメーカーが生産拠点を次々と海外移転していく。ビデオテープメーカーも例に漏れず、当社は顧客を失い存続が危ぶまれる状況となった。

この状況に危機感を覚え、新たな容器としてスタートしたばかりの PET ボトルの成型メーカーから、ボトルの成型不良が大量に廃棄されていることを聞き、メーカーに資源としてリサイクル出来るものだとその必要性を訴え、成型不良ボトルのリサイクルに協力してもらえることが出来た。ビデオテープで培ったトレーサビリティ管理は PET ボトルメーカーからも高い評価を受けた。

こうしてボトルメーカーの製造ラインから出る未使用ボトルのリサイクルを継続しながら、生産設備の強化と技術の向上を進めた。同時に再生樹脂の用途として、ポリエステル繊維や鶏卵パックなどの用途開発をユーザーと協働で推し進めていった。

1.2 Bottle to Bottle を目指した経緯

未使用ボトルのリサイクルを皮切りに PET ボトルリサイクルを事業化したのが、Bottle to Bottle を志向したのは 1994 年頃であり、容リ法施行の約 3 年前だった。PET ボトルは単一素材で生産され添加剤等を含まない為、技術開発を進めることで実現できると考えたからだ。

当時 PET ボトル飲料の流通量は爆発的に拡大していた。一方回収リサイクル制度は徐々に整備されつつあるものの、すぐに国内の処理能力が追いつかなくなり、溢れかえってゴミ問題に発展することが懸念された。当時の技術では、再生樹脂は石油由来原料である新材の増量材として主に使用され、いずれ販売数量の限界が来て利用先が足らなくなる。また当時主要な再生樹脂の販路である繊維・鶏卵パック等は「カスケードリサイクル」であり、最後にはリサイクルが継続出来なくなるという危機感から、将来に渡って安定して循環を継続させる為には Bottle to Bottle 技術が不可欠と考え、技術開発に着手した。

1.3 メカニカルリサイクル手法の確立

従来、再生 PET 樹脂は、「回収工程で付着・収着した汚れ」、「粘度低下」を主因として Bottle to Bottle は技術的に困難であった。

当社は従来の破碎・洗浄・溶融を基本的な考え方としたマテリアルリサイクル手法を一段飛躍させ、樹脂の化学反応を利用したメカニカルリサイクル手法による再生 PET 樹脂製造技術を確立し「樹脂に付着した汚れから生じる汚染の完全除去」及び、「低下した粘度の回復」を実現した。同技術により製造される再生 PET 樹脂＝「MR-PET®」

は、石油由来樹脂と同等の品質を有することから、2011 年 5 月、同手法を活用した日本初となる MR-PET®50% を使用した Bottle to Bottle が実現した。発売後 1 年間を消費者クレーム 0 という結果に自信を深めた飲料メーカーは翌 2012 年 4 月、MR-PET®使用率 100% 即ち「水平リサイクル」、新たな石油資源を全く使用しない PET ボトルを誕生させた。

1.4 技術概要

当社が開発した再縮合重合反応方式を採用したメカニカルリサイクル手法は、再生フレーク製造工程とペレット製造工程の 2 段階からなる。(Fig. 1) まず、使用済み PET ボトルを粉碎し、風力選別、比重分離等で固形異物を除去した後、樹脂の表面に吸着した汚れなどを特殊な洗浄（アルカリ洗浄）により除去する。その再生フレークを高温減圧下で PET 樹脂の再縮合重合反応を起こして樹脂の物性を回復させるのと同時に、樹脂内部に収着した不純物などを完全に除去する技術である。

1.5 安全性の担保と制度の確立

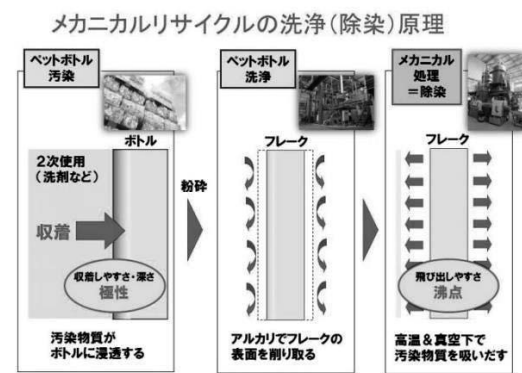


Fig. 1 Principle of Mechanical Recycling

人が飲む飲料容器への使用を可能にする為には、除去技術が有効に働くことを検証しなければならない。特に安全性を確保するための樹脂内部に入り込んだ不純物を除去する技術は、その検証が確実に慎重になされなければならない。

当社が、飲料メーカー数社に対しアプローチを行った結果、サントリーが当社の技術に興味を示し、協働で安全性実証の為の試験、代理汚染試験（Surrogate contaminants cleaning test）を実施した。

物理化学的性質を代表する種々の毒物劇物を含む化学物質で意図的に汚染させ、その除去効果を実証する試験である。過酷汚染状況の試料（使用済み PET ボトル）を

人為的に作成し、プラント実機を使用しての除去テストを実施した。

結果としてFDAの基準を遥かに上回り日本で最も厳しいとされるサントリーの食品安全基準に照らしても、汚染物質を完全に除去できること、そして再現性があることが確認された。

尚、当時日本では廃棄物からリサイクルされた原料を直接口に触れる容器に使用した前例が無かった為、サントリーと共に厚生労働省に働きかけ、試験の考え方や実施内容について協議と確認を取りながら実証を進めた。その時我々が、汚染物質が食品に混入しない保証として示した試験の方法が、後に厚生労働省によって策定された「食品用器具及び容器包装における再生プラスチック材料の使用に関する指針（ガイドライン）」に盛り込まれている。

1.6 食品包材や高機能繊維等 他用途への展開

当社が開発した「MR-PET®」は、飲料ボトル用途のみならず食品直接接包装材である食品用トレイやレトルト食品パッケージなど、従来は石油由来のPET樹脂でしか製造できなかった用途への多様な展開が可能であり、多くの企業で採用されている。

2. PET ボトルリサイクルの現状と課題

順調にも見えるPETボトルリサイクルであるが、一方でいくつかの課題が顕在化してきている。

2.1 容リ法の概要

容器包装リサイクル法（以下、容リ法）は平成7年に制定され、平成9年にPETボトルを含む品目において一部施行され、平成12年に完全施行された。家庭から出るごみの約6割（容積比）を占める容器包装廃棄物のリサイクル制度を作ることでごみを減らし、資源を有効に利用するためにつくられた法律である。容リ法では、消費者・自治体・事業者それぞれに役割を求めている。リサイクルの義務を負う事業者は「特定事業者」と呼ばれ、容器を製造・販売する企業が該当する。特定事業者は、公益財団法人日本容器包装リサイクル協会（以下、「容リ協会」）に再商品化費用を支払い、協会はその委託金でリサイクルの義務を代行する。自治体は、家庭から排出される容器包装を法律に定められた「分別基準」に従い保管する。保管されたものは、再商品化事業者（リサイクル事業者）が自治体から引き取り、委託金を受け取って再生処理を行う。

2.2 容リ協会の引取量の停滞と入札単価の高騰

分別収集実績量（市町村が収集している全体量）は運用開始当初の約2.1万トンから、2009年に約28万トンにな

りその後は一定を維持している。この仕組みに則って処理される量は19万トン程度で、それ以外の約9万トンは市町村が独自に判断した事業者に手渡されており、貿易統計やその他統計資料から推計すると、その多くは海外に輸出されていると思われる。2016年の中国向けPETくずの輸出量は36万トンを超える。一方で容リルートは制度的に再商品化事業者に対し、市町村から排出される収集量を完全に処理できる能力を求めており、その結果現在国内の使用済みPETボトル処理の設備能力は45万トンを超える。つまり市町村の回収量と再商品化事業者の処理能力が全くバランスしておらず、この大きなミスマッチから、近年入札単価の異常な高騰が続いている。

入札単価の高騰は再生品価格の高騰を招き、石油由来のバージン原料に対する価格競争力も低下する為、再商品化事業者の採算性は著しく悪化し、その状態は現在でも続いている。

2.3 廃棄物としての側面

廃棄物処理の観点・再生可能資源有効活用の観点から以下のような問題点が懸念される。

2.3.1 ゴミ処理の安定性・持続性の確保

使用済みPETボトルは排出された段階では廃棄物である。相手国が廃棄物資源の受入れを拒否したからと言って発生をゼロにすることは不可能である。PETボトルリサイクルの海外依存度をこれ以上高めることは避けるべきである。なぜなら、廃棄物処理をこれ以上海外で行えば国内のリサイクルインフラは消滅する危険性もあり、そうなった場合に再びリサイクルインフラを構築し直すのは非常に難しく、相手国から受入れを拒否された使用済みPETボトルが街に溢れるといった廃棄物問題になりかねない。廃棄物処理は最終的に自国の責任において行うべきことに十分留意する必要がある。

2.3.2 廃棄物の適正処理

海外諸国は安い労働コストを最大限に活かすために、洗浄しないまま出荷して、手間が掛かる作業は自国に輸入してから行うのが一般的であり、適正処理がなされていないケースが多い。汚染されたままの使用済みボトルやフレークが出荷されているとすれば、それらは後々輸出相手国とのゴミ問題となって表面化することにつながりかねない。

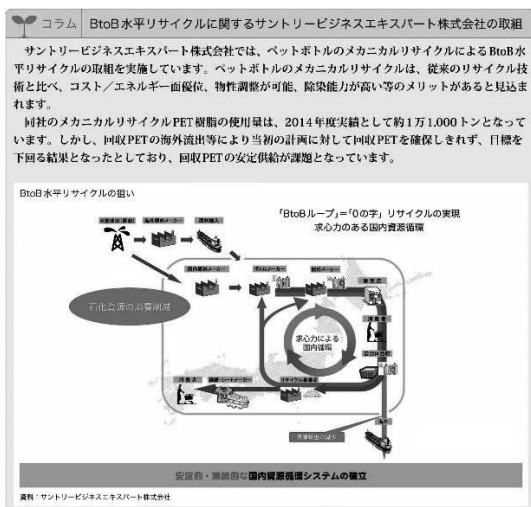


Fig. 2 An extract from ANNUAL REPORT ON THE ENVIRONMENT IN JAPAN 2015

3. 国内循環の重要性

Fig. 2は2009年に私が描いた国内のペットボトルリサイクルの鳥瞰図であるが、従来のカスケードリサイクルは循環せず一度きりで終わってしまい真の循環とは言い難い。求心力が無い為、使用済みペットボトルは海外へ流出し易い。Fig. 2の下部分のタンカーは海外流出を表している。使用済みペットボトルを生産者である飲料ボトルメーカーで再び使って貰えれば、資源の完全国内循環が持続可能となる。(Fig. 2)

更に、従来は石油由来の樹脂によってのみ製造されていた商品群への再生材の安定的な供給を可能とすることは、PET樹脂を使用している飲料など食品、繊維、自動車、シート・フィルム産業などの国際競争力をコスト面で高めることに繋がる。ユーザーとの連携による共同研究・共同開発を促進し新規需要が創出されることは、国内での資源循環を推進するとともに、リサイクル技術の更なる向上に繋がる効果が期待できる。

3.1 環境効果

我々は、原油からPET樹脂ができる過程と、回収PETボトルから再生PET樹脂が出来る過程との比較を行った。市町村の使用済みPETボトル集積所を中東の油田と位置づけ、そこから再生PET樹脂が出来るまでに排出されるCO₂の量の算定を外部コンサルティング会社に依頼し定量的に把握した。その結果、PET樹脂1Kgを原油から製造した場合には約1.577KgのCO₂が排出されるのに対し、使用済みPETボトルから製造した場合は0.583Kgと約63%の削減効果があることが判明した。量的に言

えば「1Kgの置き換えて1Kgの排出量削減効果」があることが実証された。極論すると国内の飲料ボトルの生産量60万t全てをリサイクル原料で代替することが可能であり、その時のCO₂削減効果は約60万トンということになる。この削減効果は石油由来樹脂を代替することで初めて顕在化する効果であり、国内循環の重要性が再認識できる。

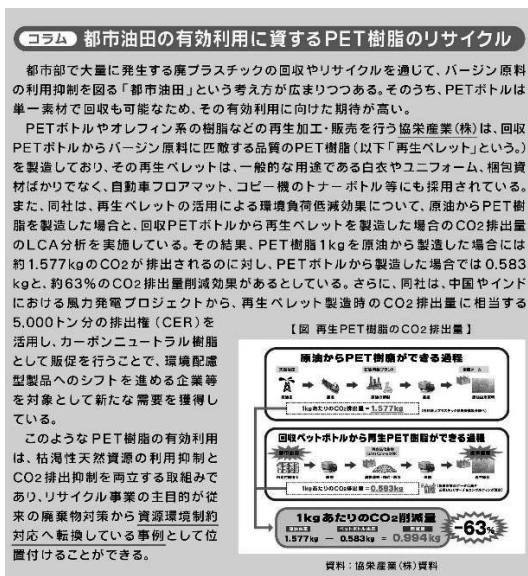


Fig. 3 An extract from WHITE PAPER ON MANUFACTURING INDUSTRIES (MONODZUKURI) 2010

3.2 価値と雇用の拡大

使用済みPETボトルが国内循環すれば、PETボトルが再商品化事業者の手によってフレック化される段階、そのフレックが高度化リサイクル等によってペレット化される段階、利用事業者の手で製品化される、その各段階で付加価値が増大し雇用の創造がなされる。

4. PETボトルリサイクルの課題と展望

日本のリサイクルシステムは世界に誇れる素晴らしいシステムである。それは国民一人一人がリサイクルという循環に参加し協力しているからであり、これだけ高品質な使用済みPETボトルを集められるシステムは他国にも例がない。

東京オリンピック・パラリンピック競技大会組織委員会では、東京2020大会を持続可能な大会とするため、「持続可能性に配慮した運営計画」を策定し、活動を推進している。

また、最近では欧州を中心に「Circular Economy」といった考え方が急速に定着しつつあり、世界的な環境問題への取組みが始まっている。

消費者と我々事業者がより強い一体感を持って国内循環を推進するためには「ボトルを回収ボックスに入れた後、その先で何に生まれ変わるのか」関心を持って頂くことが必要だと考える。リサイクルを支える消費者の意

識の高まりが、世界に誇れるリサイクル技術を更に発展させ「天然資源を使わないものづくり」を実現すると確信している。

References

- 1) Ministry of Finance Japan Home Page
- 2) The Council for PET bottle Recycling Home Page