

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

**平成 23 年度～平成 27 年度「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」
研究成果報告書概要**

1 学校法人名 芝浦工業大学 2 大学名 芝浦工業大学

3 研究組織名 芝浦工業大学 SIT 総合研究所レアメタルバイオリサーチセンター

4 プロジェクト所在地 さいたま市見沼区深作307芝浦工業大学先端工学研究機構棟内

5 研究プロジェクト名 微生物機能を用いたレアメタル回収技術開発研究

6 研究観点 研究拠点を形成する研究

7 研究代表者

研究代表者名	所属部局名	職名
山下光雄	工学部応用化学科	教授

8 プロジェクト参加研究者数 5 名

9 該当審査区分 理工・情報 生物・医歯 人文・社会

10 研究プロジェクトに参加する主な研究者

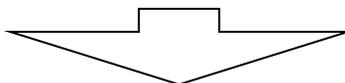
研究者名	所属・職名	プロジェクトでの研究課題	プロジェクトでの役割
山下光雄	工学部・教授	レアメタル代謝微生物スクリーニング、リアクター構築とメタル回収	プロジェクト全体のとりまとめ
今林慎一郎	工学部・教授	レアメタルバイオセンサーの開発	レアメタル感知センサー開発
新井剛	工学部・准教授	バイオレアメタル精錬開発	レアメタル精錬プロセス開発
(共同研究機関等) 池道彦	大阪大学大学院 工学研究科・教授	微生物による金属還元機構の解析	レアメタル回収に適応できる微生物の機能解析
大貫敏彦	日本原子力研究 開発機構・上級 研究主席	バイオレアメタルの分析	バイオ生成レアメタルを分析

<研究者の変更状況(研究代表者を含む)>

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

(変更の時期:平成 年 月 日)



新

変更前の所属・職名	変更(就任)後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

11 研究の概要(※ 項目全体を10枚以内で作成)

(1) 研究プロジェクトの目的・意義及び計画の概要

近年、IT 関連産業、自動車産業等の先端産業におけるレアメタルの消費が世界的に急伸しており、資源に乏しい我が国においては、技術力を基盤とした先端産業の国際競争力の高さが極めて重要となる。このような状況の中、資源ナショナリズム等によるレアメタル供給の不安定化は国の死活問題と言っても過言ではない。

本研究では、微生物の金属代謝機能を利用することで、現在では極めて困難とされている産業廃水・廃棄物などからのレアメタルの効率的除去と、市場価値のある資源としての鉱種の回収・リサイクルを同時に達成する実用的な一連の技術群を確立することを目的とする。微生物の金属代謝機能として水溶液中に溶けた金属を結晶にする生物固化 (Biom mineralization) や、水溶液中の金属を揮発化する生物気化 (Biovolatilization) を利用するといったものである。技術開発は、既に有効な微生物を取得しているセレン (Se) を先行モデルとして実施するが、同時に希少性、商業性の高いレアアースの回収に有効な新規微生物の取得にも取り組み、各種レアメタルをめぐる資源循環型社会システムの基盤を形成するとともに、レアメタル回収プロセスの潜在的市場拡大の知的基盤を構築する。

(2) 研究組織

本研究プロジェクトに参画する研究者総数は5名で、学内研究者は以下の3名である。氏名、所属職名、役割分担を順に記載する。

山下光雄：芝浦工業大学工学部応用化学科・教授、研究代表者として各研究者と密に連携をとり、プロジェクト全体のとりまとめを行う。

今林慎一郎：芝浦工業大学工学部応用化学科・教授、物理化学的手法によるレアメタルの回収・メタルバイオセンサーの開発を行う。

新井剛：芝浦工業大学工学部材料科学科・准教授、バイオレアメタル精錬開発を行う。

学内研究者間には不定期に研究打ち合わせを行い、レアメタルの定量定性分析は以下の研究施設で行い、連携をとっている。

学外研究者は以下の2名である。

池道彦：大阪大学大学院工学研究科・教授、金属代謝微生物の作用メカニズムの解析を行う。

大貫敏彦：日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター・上席研究主席、バイオレアメタルの分析を行う。

研究代表者と学外研究者は日本生物工学会メタルバイオテクノロジー研究部会員で大会毎に研究打ち合わせを行うと共に、電子メールで頻繁に情報交換を行っている。研究成果は代表者のホームページやメタルバイオテクノロジー研究部会に一部掲載している。毎年、数名の学部生や大学院生をアルバイト雇用し、一般生物化学実験や元素分析の補佐、簡単な報告書の作成を手伝っている。

(3) 研究施設・設備等

主として芝浦工業大学先端工学研究機構棟内レアメタルバイオリサーチセンター(実験室 100m²、居室 15m²)において、学生・研究員合わせて 6-8 名で研究している。レアメタルを代謝する微生物を分離するため、それらの反応を最適化するために、複数の振盪培養器と卓上型バイオリアクター(5L 容)を常時用いている。また実証研究を目指したスケールアップではバイオリアクター(100L 容)を用いている。微生物による反応サンプルの調整や遺伝子増幅のために、冷却小型遠心機や PCR 装置を常時用いている。微生物の形態観察とそれらが反応した元素を可視化分析するために、簡易型電子顕微鏡(SEM)とエネルギー分散 X 線分光装置(EDX)を常時用いている。微生物の動態を解析するために、微生物群集解析システムを使用している。微生物培養液の上清と沈殿物や固体サンプル中のレアメタル濃度を定性定量するために、誘導結合プラズマ質量分析装置(ICP-MS)、誘導結合プラズマ発光分光分析装置(ICP-AES)やイオンクロマトグラフィーを常時用いている。微生物によるレアメタルの相変化(気体)を定性定量するために、ガスクロマト質量分析装置(GC-MS)を用いている。微生物によるレアメタルを含む廃水等から有価金属を回収後の培養液中の有機物濃度、無機物濃度を測定するために、COD メータや多項目水質計を用いている。

(4) 研究成果の概要 ※下記、13及び14に対応する成果には下線及び*を付すこと。

本研究プロジェクトを推進するために大きく3つの研究テーマごとに分けた。

1. 廃水・廃棄物などからのレアメタル除去・回収バイオリアクターの開発

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

1. 1 セレン

セレン(Se)は非鉄金属製錬所で銅の副産物として生産され、2012年度世界総生産量の約33%に当たる650トンが日本で生産されており、その生産量は世界第一位である。セレンは工業的に重要な金属資源で、コピー機やガラス染色、CIGS型太陽電池の半導体原料などに利用されている。Seは必須元素であり、体内ではセレン含有アミノ酸に合成されるが、過剰に摂取すると急性毒性を起し頭痛や嘔吐などの症状が現れる。工場廃水に含まれているセレン酸化物イオンであるセレン酸や亜セレン酸は生物に対して高い毒性を有することから、日本では2009年に一律排出基準が設けられ、環境中に排出する際には0.1ppm(0.1mg/L)以下まで浄化することが義務付けられている。非鉄金属製錬所やガラス製造工場、太陽電池製造工場、火力発電所ではセレンを含む廃水の排出基準を満たすために、廃水中のセレンは物理化学処理(電気・化学還元や凝集沈殿・吸着剤法)により浄化されている。このような処理では大量の薬剤を投入することや大量の汚泥が発生するために高コストとなるため新しい技術が望まれている。

1. 2 セレンの除去・回収バイオリアクターの開発

現状のセレン排水処理技術の問題点を解決する新たな処理方法として、廃水中に存在するセレン酸化物イオンを微生物により還元し、固体セレンや気体セレンに変換し回収する方法を提案している。この様なコンセプトから分離・育種した微生物が、好氣的セレン酸塩還元細菌 *Pseudomonas stutzeri* NT-I 株である(*14,*72)。NT-I株はセレン酸を亜セレン酸へ還元し、亜セレン酸から固体の元素態セレンへ還元することができる。NT-I株の生成する元素態セレンは赤色を呈しているため、培養を続けると培養液が赤くなる。その後も培養を続けると赤色が薄くなる。元素態セレンを還元して気体セレンを生成する特異的なNT-I株の固化能と気化能を、セレン回収に応用することを考えた。

このNT-I株を用いて、廃水中からセレンを浄化・回収するためのプロセスを開発するために培養中の温度、pH、攪拌速度、通気量を制御できるラボスケールのバイオリアクターの設計・構築を試みた(*63,*74)。バイオリアクターを用いてNT-I株のセレン酸化物イオン(40ppm(0.5mM))の還元最適培養条件を求めた。その結果、還元最適培養条件を温度38℃、pH9.0、攪拌速度250rpm、通気量1L/minと決定した(*74)。この培養条件でのセレン気化速度を計算したところ14μmol/L・hであった(*10)。NT-I株の気化速度は既存の報告値よりも速かった。以上のことからこの培養条件をNT-I株のセレン気化回収方法とした。セレン酸濃度(0.5mM)の人工モデル(模擬)廃水を用いてセレン気化回収試験を行った。NT-I株によって培養開始から120時間目には初期セレン濃度の71.2%のDMDSeを硝酸で回収することができた。次に気化セレン化合物の同定と合成メカニズムの解析を行った(*57,*75)。気化セレンはセレン酸、亜セレン酸、元素態セレンからほぼ同等の率で生成された。ガスクロマトグラフィー質量分析から気化セレンは主としてジメチルジセレニド(DMDSe)と極少量のジメチルセレンからなる、メチル化セレンであることが分かった(*10)。

気化回収条件で培養を行うと元素態セレンは速やかにDMDSeに還元される。NT-I株は菌体増殖後には通気が無い状態でも、攪拌することによってセレン酸から元素態セレンまで還元できた。酸素が還元反応に重要な役割を果たしていることを明らかにした(*57)。以上の結果から、培養温度38℃、pH9.0、攪拌速度250rpm、通気量1L/minの条件で培養して菌体を増殖させ、培養開始から12時間目に通気を止めた時点でセレン酸を添加し、元素態セレンに変換する方法をセレン固化回収方法とした。模擬廃水を用いたセレン固化回収実験では、培養開始から22時間目に元素態セレン量が最大となった。初期セレン濃度の87.8%を元素態セレン(バイオセレン)として回収できた。

次に可溶性セレンを5.5mM含む実廃水セレン(セレン酸が約85%、亜セレン酸が約15%含有)からのセレン気化回収、固化回収実験を行った。セレン以外にもケイ素やカルシウム、カリウムが含まれていた。実廃水を培地で希釈して、模擬廃水のセレン濃度に合わせて回収試験を行った。

気化回収試験での各セレンの経時変化は、培養開始から120時間で初期セレン濃度の38.9%に

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

あたる DMDSe を硝酸にて回収できた。模擬廃水での回収率 71.2%と比べると、実廃水での回収率は約半分であり、培養液に未知セレンが 25.9%含まれていた。分析の結果、未知セレンは DMDSe であった。以上の結果から、実廃水時の気体回収率の低下の原因は DMDSe が可溶性セレンとして残存していることと考えられる。回収時に可溶性セレンに含まれる DMDSe が全て気体として硝酸で回収できたとすると、気化回収率は初期セレン濃度の 64.8%(気体回収率 38.9%+可溶性セレンに含まれる DMDSe 含量 25.9%)となる。これはモデル廃水を用いた時と同等の回収率である。

実廃水を用いた固化回収試験のセレンは培養開始から 24 時間で初期セレン濃度の 78.8%を元素態セレンとなり、この時点で回収することに成功した。モデル廃水と比較すると回収率が若干低下したものの、実廃水を用いても高い回収率が得られた。

以上実廃水の試験をまとめると、セレン固化回収最適化条件と気化回収最適化条件で培養し各々78.8%と38.9%の回収率が得られた(*7,*13,*41,*42,*43,*67,*71,*78,*79)。

1. 3 レアメタルバイオセンサーの開発

セレン代謝微生物菌体または酵素を用いて簡易なバイオセンサーの開発を行った。セレン酸還元菌 *Pseudomonas stutzeri* NT-1 懸濁液をグラッシーカーボン(GC)電極上に滴下、乾燥したあと、ポリカーボネート膜(孔径 0.4 μm)で被覆して、電極と膜間に閉じ込め、 MV^{2+} をメディエーターとするセレンオキシアニオンセンサーを作製した。その結果、この電極の-0.75 V における還元電流値は 0.1 ~1.0 mmol dm^{-3} で亜セレン酸濃度に比例して増加し、亜セレン酸センサーとして使用できる可能性が分かった。ただし、現時点の感度は排水中に含まれる亜セレン酸の濃度領域は測定できるが、排出の許容限度 0.1 mg dm^{-3} (1.3 $\mu\text{mol dm}^{-3}$)をカバーできなかった。100 倍程度の高感度化が必要である。次に、セレン酸を用いた-0.75 V における還元電流値は 0.1~1.0 mmol dm^{-3} でセレン酸濃度に比例して増加するが、電流値は亜セレン酸添加の 1/5 程度であり、感度がよくなかった。ストリッピング法(セレンオキシアニオン中の Se と電極表面の金属からなる合金を形成させることで、溶液中の Se を電極表面に濃縮させた後、合金を還元的に脱離させるときの電流値から溶液中の亜セレン酸を決定すること)や、電極自体を多孔化して実表面積を増やすことによって高感度化できると思われる。

2. レアメタル精錬プロセスの開発

2. 1 簡易精錬プロセスの検討

セレン酸濃度 0.5mM の模擬廃水を用いてセレン気化回収試験を行った。高純度セレンの気化回収を目指してガスフィルターユニットとして気液分離槽と回収槽(硝酸トラップ)を構築した。セレン酸還元細菌 NT-I 株によって培養開始から 120 時間目には初期セレン濃度の 71.2%の DMDSe を硝酸で回収できた。硝酸による捕集効率を考慮するとセレンを 87.9%捕集することに成功した(*10,*20)。この硝酸中のセレン濃度を測定したところ7.2mMであり、模擬廃水中の初期セレン濃度よりも14倍濃縮して回収できた。検出した夾雑物は硫黄のみであり、高純度セレンの回収に成功した。

固化セレンを回収するために模擬廃水からの NT-I 株培養液を遠心分離し、沈殿物を得た。蒸留水とエタノール洗浄を行って元素態セレンを含む汚泥を簡易に濃縮できた(*10,*19)。汚泥(バイオセレン)を粗精製した後、誘導結合プラズマ発光分光分析(ICP-AES)で元素の定量分析を行ったところ、粗精製物にはセレンが 2% (wt/wt)、マグネシウムが 4%、カルシウムが 2%含まれていた。エネルギー分散型 X 線分析(EDX)の分析結果、粗精製物全体にセレンが検出・濃縮されており、粗精製物は平均 2%のセレンを含んでいた。模擬廃水の初期セレン濃度は 0.004%であるので、粗精製物は約 500 倍に濃縮され、資源化の可能性を示した。次に**バイオセレンを蒸留水とエタノール洗浄を繰り返して、脱水を行った。**その結果セレンを 11-14%(wt/wt)含有したバイオセレンの精錬に成功した(*7)。

2. 2 酸化焙焼による精錬プロセスの開発

バイオセレンは元素態セレンと微生物由来の有機成分と培地由来の無機塩からなる。バイオセ

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

ンを酸化焙焼に供すると、有機成分とともに Se は酸化揮発し、低温部にて焙焼ガスから二酸化セレン(SeO_2)を析出分離できると考えられる。酸化揮発傾向や焙焼生成物の水溶解性や還元性の相違から、無機成分の低減も期待できる。一方で、有機成分と Se は競合酸化し、Se の酸化が不十分な場合には不溶な元素態セレンが析出することが予想される。そこで、熱力学計算によってバイオセレンの焙焼条件を検討し、試行した。その結果、バイオセレンを 700°C で酸化焙焼したところ、酸素量が大きい場合には Se は十分に酸化され、固体の SeO_2 が得られた。本実験では、酸素 $50\text{ml}/\text{min}$ の流量で焙焼した際に、Se の総収量のうちの SeO_2 としての収率が最大 97% となった。析出した SeO_2 は金属成分の総和に対する Se 分率が約 99% であり、酸化焙焼による精製効果が認められた。より高純度のセレンを得るために還元剤を用いて精製したところ 99% 以上の金属セレンを得た。模擬廃水中から微生物代謝を利用し、バイオセレンから金属セレンを高純度にまで精錬することに成功した(*3)。

2. 3 セレン含有実廃棄物からのセレン浄化

セメント製造工程で発生する塩素バイパスダストは自然由来のセレンが含有し浄化対象となっており、高塩濃度のために大量の水で希釈した後に物理化学処理を行って浄化されている。そこで塩素バイパスダストからのセレンの新しい浄化回収を試みた。まず特定の溶出助剤を用いて水溶液中にセレンを溶出させ(*67,*71)、溶出液の4倍希釈溶液を NT-I 株を用いて初期濃度の 90% のセレンを固化回収することに成功した(*2,*40)。

2. 4 セレンオキサニオンの電解還元反応と元素態セレン回収

セレンオキサニオンの直接的な電極還元は、亜セレン酸については強酸性条件でのみで起こり、セレン酸については起こらないと報告されている。検討の結果、メチルビオロゲン(MV^{2+})をメディエーターとして用いると、中性 pH 領域においてセレンオキサニオンの還元が可能になることを電気化学手法によって見出した(*8)。

2. 4. 1 セレンオキサニオン電気還元の検討

メチルビオロゲン(MV^{2+})添加によるセレンオキサニオンの還元が促進される反応機構について解析した。その結果、① MV^{2+} が電極から亜セレン酸に電子を運搬するメディエーターとして働いており、還元電流は $[\text{MV}^{2+}] = 5 \text{ mmol dm}^{-3}$ までは濃度とともに増加し、それ以上では飽和した(*64,*65,*68)。② MV^{2+} 以外にも、ビオロゲン、キノン、フェナジン各化合物のなかにメディエーターとして機能する物質があり、式量電位が負であるメディエーターほど還元電流が大きい傾向があった(*48,*64,*65)。③ 電極表面にアルキル鎖を介して固定化した MV^{2+} もメディエーターとして機能することがわかった。固定化により排液毎に MV^{2+} を添加する必要がなくなるため、実用に適する。④ リン酸緩衝液(PBS)、クエン酸緩衝液、イミダゾール/HCl 緩衝液、Tris/HCl 緩衝液、MES 緩衝液、PIPES 緩衝液は亜セレン酸還元に必要な H^+ の供給源であると同時に、電解質の pH を亜セレン酸が活性型 HSeO_3^- をとる領域に保持する働きをしている。従って、共役酸 HA である必要があり、緩衝液の pKa が亜セレン酸の酸塩基平衡($\text{SeO}_3^{2-} + \text{H}^+ \rightleftharpoons \text{HSeO}_3^-$)の pKa より大きいことが必要である(*48,*65,*59)。⑤ COOH 基をもつイオン交換ビーズを緩衝液の代わりに使用できる。 H^+ 供給により COOH 基は COO^- に変化するが、イオンビーズは COOH 基を再生後、利用可能である。⑥ MV^{2+} 添加によりセレン酸も還元可能になるが、反応促進は亜セレン酸還元よりも小さかった(*64,*65)。酸化還元電位と亜セレン酸還元に対するメディエーター能には相関がある。ビオロゲン化合物の疎水性の R 基を変換することによってより優れたメディエーター能を発揮する化合物を探した。その結果プロピオン酸を R 基にもつプロピオン酸ビオロゲンは COOH 基の影響を大きく受けることが分かった(*36,*37)。

2. 4. 2 元素態セレン回収方法の検討

セレンオキサニオンのメディエーター型電解還元反応による元素態セレン回収の可能性を検討するために、電解試験を行った。 $[\text{MV}^{2+}] = 1 \text{ mmol dm}^{-3}$, $[\text{HSeO}_3^-] = 10, 1.0, \text{ or } 0.1 \text{ mmol dm}^{-3}$ また $[\text{SeO}_4^{2-}] = 10 \text{ mmol dm}^{-3}$ を含む 1 mol dm^{-3} PBS (pH6) を電解液とし、77mL を自家製セルに

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

入れ, Ar で除酸素した. 作用極:カーボンフェルト電極(MV 還元ピーク電流からは見積もった表面積 76.29 cm^2), 対極:白金黒線, 参照極:Ag|AgCl(飽和 KCl)を入れ, 定電位 $-0.8 \text{ V vs. Ag|AgCl}$ で電解した. 原子吸光測定と ICP 発光測定によってオキサニオン濃度を定量し, 電解に使用した電流量と除去率から電流効率を決定した. その結果, ①亜セレン酸 $[\text{HSeO}_3^-] = 10, 1.0 \text{ mmol dm}^{-3}$ の時, 除去率は 99%以上, 回収率は 95%以上であり, 除去した亜セレン酸が Se として回収されることがわかった. MV による亜セレン酸還元は電極近傍の電解液中で起こるため, 生成した Se は電極表面に析出せず, 電解液に懸濁した状態で得られ, ろ別が容易である. MV²⁺を添加しない場合でも亜セレン酸の電解は可能であったが, 2 倍以上の電解時間を要し, かつ生成した Se のほとんどが回収に適さない電極上に析出した状態で得られた (*38,*47). ②セレン酸 $[\text{SeO}_4^{2-}] = 10 \text{ mmol dm}^{-3}$ における除去率および回収率はそれぞれ 13%, 10%と, 亜セレン酸と比べて低かった. MV²⁺による SeO_4^{2-} の還元効率が低いために電流が流れにくいことを示唆する. MV²⁺を添加しない場合は, セレン酸はまったく還元されなかった. 電気化学的にセレン酸が還元される例はほとんど報告がなく, 今後電流効率の向上は課題である. ③排水中の SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , CO_3^{2-} を妨害物質として調べた. SO_4^{2-} , NO_3^- , CO_3^{2-} については, 亜セレン酸共存および非共存下とも, 10 mmol dm^{-3} までの濃度では MV²⁺のレドックスを妨害しなかった. 亜セレン酸電解還元の電解効率は NO_2^- を加えることで 93 % から 3 %減少するに留まり, ほとんど妨害の影響がなかった.

2. 5 イオン液体を用いたレアメタル精錬開発

微生物等を利用したバイオ分離技術は特定の金属イオンに対して選択性を示す菌体を用いて, バイオメタルとして目的の金属を分離・回収する技術である. しかし, バイオメタルは菌体由来の有機物が多く, 菌体内の金属イオンを精錬する必要があるが, 一般的な製錬技術を適用することは難しい. 分離を菌体で行うため, 夾雑物質の可能性も否定できず, 純度の低下が懸念される. これまで, バイオメタルから酸性水溶液への抽出の可能性及び新規の無機-有機複合型イオン交換体へのレアメタルの吸脱着特性の基礎性能を明らかにした(*16). さらに高効率・高純度の精錬を目指して, イオン液体を用いたレアメタルの精錬技術開発を検討した. イオン液体には金属イオンの抽出能の他に高導電性, 難燃性などの特長を有するので, 新たな製錬技術が開発できる可能性があると思われる. 以上のことから, イオン液体を用いたレアメタル製錬プロセスについて基礎研究を行った(*9,*49).

2. 5. 1 イオン液体の合成と金属イオンの抽出率

イオン液体は一般に, カチオンとなる物質にアルキル基を導入するアルキル化反応と, 目的物質を得るためのアニオン交換反応の 2 つの反応で構成される. 本研究では 1-ブチル-3-メチルイミダゾリウムヘキサフルオロホスファート($[\text{C}_4\text{mim}][\text{PF}_6]$)を合成することにした. この $[\text{C}_4\text{mim}][\text{PF}_6]$ に対する各金属イオンの抽出特性を調査するためバッチ式抽出試験を行った. その結果, Al(III), Fe(III)は高い抽出分率を示した(*61,*69). 特に, イオン交換樹脂等では殆ど吸着されない Al(III)が塩酸濃度によらず抽出されることは特筆すべき特徴である. Al(III)は塩酸濃度の増加に伴う抽出量の増大傾向が確認され, 1 M 以上では 90 %を超える抽出分率が示された. Cu(II)は何れの塩酸濃度においても非抽出であった. Zn(II)は塩酸濃度の増加に伴い抽出分率が増加したが, 最大 25 %であった. 鉄族元素は塩酸濃度の増加に伴う抽出分率の増大が見られた. Co(II), Ni(II)とも 20 %前後の抽出分率であり, 抽出に適していない. 白金族元素の抽出傾向に関しては, Ru(III)は塩酸濃度によらずほぼ非抽出, Pd(II)と Pt(IV)については塩酸濃度の増加に伴い抽出分率は低下し, 負の相関を示した. 0.1 M 塩酸において Pd(II)と Pt(IV)の抽出分率は各々 80%と 90 %であり良好な抽出性が得られた. 希土類元素も塩酸濃度と抽出分率の間に正の相関が確認されたが, 6 M 以上の塩酸では試験後に沈殿物の生成が確認された. この沈殿の影響により, 抽出分率が 100 %近い値になったと推察される. 他の元素に関しては, V(III), Ga(III), Zr(IV), In(III)は塩酸濃度と抽出分率に正の相関が得られた. Mo(VI), Re(VII)は本実験の塩酸濃度では何れにおいても抽出された. Se(IV)はほぼ非抽出である

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

ことが示され、Bi(III)については最も抽出される 1 M 塩酸においても 20 % であり低抽出性であった。

2. 5. 2 イオン液体に抽出された金属イオンの抽出速度

これまでに得られた抽出試験結果より、良好な抽出反応を示す Al(III), V(III), Fe(III), Ga(III), Zr(IV), Mo(VI), Pd(II), In(III), Re(VII), Pt(IV)の抽出速度試験を行った。その結果、V(III)と In(III)を除く 8 元素に関しては 10 分以内に抽出反応は平衡に達することが確認でき、良好な抽出速度であることが示された。これは抽出剤として用いる場合において有利な特徴であり、実プロセスにも適した性能であると考えられる。V(III)と In(III)は抽出に最適な塩酸濃度が 6 M であるため、[C₄mim][PF₆]の溶解反応などにより平衡到達時間の推定は困難であった。V(III)や In(III)をアニオン種とするイオン液体は、疎水性が弱いことが予想される。

2. 5. 3 イオン液体に抽出された金属イオンの電気化学挙動

イオン液体の特長として、高導電性であることが挙げられる。この特長を活かし、金属イオンが抽出されたイオン液体を電解還元し、電析により直接金属として回収するプロセスの構築を目指している。本試験では、[C₄mim][PF₆]に抽出された金属イオンの電気化学挙動についてサイクリックボルタメトリー (CV) により検討した(*56,*60)。その結果、[C₄mim][PF₆]は幅広い 2~-2V の電位窓を持つことにより、イオン液体中における金属の価数変化や電析が期待できるものと考えた。また、全体を通してフラットな電流-電位曲線であり、不純物などの影響も僅かであることが示され、イオン液体中での金属の価数変化が良好に観測される可能性が示唆された。先述の試験結果から良好な結果が得られ、電析による直接回収の可能性がある Pd(II)の CV を行った。Pd(II)は 0.1 M 塩酸において抽出した [C₄mim][PF₆]を CV に用いた。その結果 Pd(II)抽出後の CV は非可逆を示し、幾つかのピークが確認され、Pd(II)の還元波と考えられるピークが-0.5 V 付近に観察された。また酸化波が 0 V 近傍に観察された。非可逆性を示していることから、CV 測定中に析出物が生成されている可能性が示された。繰り返し試験の結果、CV に用いた [C₄mim][PF₆]から黒色の析出物を確認した。これはパラジウムブラックの可能性が考えられ、電析試験により Pd(II)が回収される可能性が示唆された。

2. 5. 4 イオン液体に抽出された Pd(II)の電析挙動

電気化学試験より、[C₄mim][PF₆]に抽出された Pd(II)は、電解還元反応により直接回収できる可能性が示唆された。本試験では、[C₄mim][PF₆]に抽出された Pd(II)の電析挙動について検討した。電析試験中の外観写真から、[C₄mim][PF₆]中に黒色の電析物の生成が確認された。この黒色析出物の同定を行うため、蛍光 X 線と SEM-EDX による分析を行った。両分析装置とも溶液を測定することは困難であるため、メンブレンを用いてろ過、回収して分析に用いた。SEM 像より、電析物は微小な球状物質の集合体であることが示され、電析物は Pd 単体である可能性が示された(*50)。続いて電解還元法による [C_nmim][PF₆]に抽出された金属イオンの電析回収について詳細に検討した。[C_nmim][PF₆]に抽出された Pd(II)は、電解還元により数 μm 径のワイヤー状を呈した電析物として回収できた。また、[C_nmim][PF₆]のアルキル側鎖長や希釈剤が Pd の電析物の形状に影響を及ぼすことが確認された。さらに、[C_nmim][PF₆]よりも電気化学特性に優れる 1-アルキル-3-メチルイミダゾリウムビス(トリフルオロメタンスルホニル)イミド ([C_nmim][Tf₂N]と略記)の金属イオンの抽出特性並びに電気化学特性について検討した。[C_nmim][Tf₂N]は [C_nmim][PF₆]と比較して金属イオンの抽出性能が低いこと、広い電位窓を有し電気化学的に優れることを明らかにした(*28,*31,*33,*35)。

3. 多様なレアメタル回収・資源化に適用できる新規金属代謝微生物の取得と遺伝子の特定

3. 1 セレン酸代謝遺伝子の特定

好氣的セレン酸塩還元細菌 *Pseudomonas stutzeri* NT-I 株はセレン酸を亜セレン酸と元素態セレンを介して、メチル化セレン(ジメチルセレニド)に還元することができる(*10)。しかし各還元に関する遺伝子や酵素の知見は明らかでない。そこで基礎的知見を得るために NT-I 株のゲノム DNA を解析

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

後(*62)、金属還元酵素遺伝子やメチル基転移酵素遺伝子との相同性を調べ、NT-I 株内に数個の候補遺伝子を見出した(*57)。その結果、セレン酸を亜セレン酸に還元するセレン酸還元遺伝子と元素態セレンをジメチルセレニドに合成する遺伝子を特定し、組換え大腸菌において発現に成功した。

3. 2 セレン以外の新規な金属代謝微生物の分離

3. 2. 1 テルル酸代謝微生物の取得

セレン以外のレアメタルを回収・資源化するため新規な金属代謝微生物の分離を試みた。

テルルはセレンと同周期にある半金属である。主要用途は、鉄の機械加工性を向上させるための冶金用添加剤、加硫剤およびゴム生成の促進剤、合成繊維生産用の触媒である。機能的用途としては近年、Cd-Te 系太陽電池への使用が増加している。テルルも幅広い用途で使用されるが、セレンと同様に生体に対する高い毒性を有しており、環境省によって水質汚濁防止法の要調査項目に指定されている。高毒性や近年の使用量の増加から、その処理と再資源化方法の確立が急務である。

テルル酸化物陰イオン(テルル酸, 亜テルル酸)は毒性が高く、亜テルル酸は 3.9 μM の低濃度でほとんどの微生物に対して毒性を示す。一般的に金属の固体や揮発化物はその酸化物陰イオンよりも毒性が小さいため、その固体化・揮発化反応は解毒メカニズムの一種であると考えられている。そこでテルルの浄化・回収プロセスを構築するため、金属精錬工場から採取した排水溝底泥水から亜テルル酸耐性微生物を分離し、固体化・揮発化能力を有しているかを調べた。その結果、1mM の亜テルル酸に対して耐性を示す集積培養系から、亜テルル酸耐性を有する細菌 TI-1 株, TI-2 株, TI-3 株を分離した。TI-1 株, TI-2 株, TI-3 株は 30mM の亜テルル酸存在下で増殖可能なことから、これまで報告されている微生物の中で最も高い亜テルル酸耐性を有しているだけでなく、テルル酸, 亜テルル酸に対して強い還元能を示した(*70)。同定した結果、これら 3 株を *Stenotrophomonas maltophilia* Ti-1, *Ochrobactrum anthropi* Ti-2, *Ochrobactrum anthropi* Ti-3 と命名した(*58)。次にこれら 3 株の還元特徴を解析した。Ti-2,3 はテルル酸還元能に差はなかったが、Ti-1 株はこの 2 株に比べて低温、低 pH、高塩濃度での還元能が優れていた(*11,*58)。合成された元素態テルルは細胞外に分泌され、遠心分離や限外濾過等で簡単に回収できた(*70)。浄化・回収の対象となる廃水・廃棄物は多元素で高塩濃度であることが多いので、塩耐性を持つ新たなテルル酸・亜テルル酸還元微生物を海洋環境試料から分離することを試みた結果、初発濃度の 50%以上を溶液から除去できる微生物を 18 株分離した(*44,*45)。それらの細菌は多様な分類系統で 9 属に分類できた。その内 6 属はこれまでテルル酸化物の還元が報告されていない新しい菌株であった(*26)。

3. 2. 2 レアアースエレメント(REE)代謝微生物の取得

REE とは、周期表第三族の原子番号 21 番のスカンジウム(Sc)及び 39 番のイットリウム(Y)と、57 番から 71 番のランタノイドと総称される 15 元素のグループのことをいう。REE は特殊な電子軌道の原子構造をしており、蛍光材料や永久磁石、超伝導材料として日本の産業にとって必須金属である。特に、ジスプロシウム(Dy)は耐熱性ネオジム(Nd)磁石と呼ばれる高温に耐える強力磁石の原料としてその需要が増加している。この Nd 磁石はモーターとして次世代型自動車や携帯電話、パソコンに利用されており、その製造工程から排出される研磨屑は、物理化学的処理によるリサイクルが試みられているが、この方法では完全に回収することが出来ず、その廃棄物中の残存 REE の回収が望まれている。そこで、固形廃棄物から選択的に REE 抽出を行う微生物の取得と REE 含有溶液から特異的に REE を分離・濃縮する新規代謝微生物の分離を行い、バイオプロセス構築に向けて検討した。

バイオリーチングは低品位鉱石から微生物を用いて銅などの有用非鉄金属を抽出する技術である。現在ではバイオリーチングの応用研究が進み、ウランやコバルト、金などの抽出にも利用されている。本研究では REE リーチング微生物を分離することを主とし、その REE リーチング能を評価して REE 回収に向けた有用性を検討した。実験の結果、酸性湖の環境試料から REE 抽出微生物群を 3 菌群得た。このうち S20 菌群は、培養 1 日目で REE 含有廃棄物から Dy を約 70%、Nd を約 55%、Pr

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

を約 65% 抽出し、リサイクルに不要な Fe はほとんど抽出しなかった(*54)。

有用金属の濃縮・回収手段として、金属代謝微生物によるバイオミネラルゼーションは広く研究されている。これまで金属イオン還元菌 *Shewanella algae* を利用した Pd, Pt, Au 等の貴金属回収があげられる。そこで、REE の中でも高価なジスプロシウム(Dy)に重点をおき、Dy 含有溶液から特異的に Dy を固化・濃縮する新規代謝微生物を分離して、その固化・濃縮能を評価して REE 回収に向けた有用性を検討した。その結果、廃鉱山の環境試料から Dy 代謝能をもつ微生物 T9 株を単離した(*4)。SEMとEDXによる解析から、菌体上にDyとリン(P)を固化濃縮していることが分かった。さらに、生育培地にリン酸を添加することで、Dyの蓄積率が90%に向上した。以上の結果から、取得したDy代謝微生物T9株は高効率にDyを濃縮する可能性があると思われる(*54)。Dyを蓄積したT9株を焙焼することにより酸化ジスプロシウムを得ることができ、一連のリサイクル系を構築できた。

3. 2. 3 バイオ鉱物合成微生物の取得

福島県原子力発電所の事故で問題となっている放射性核種は全てレアメタルに属する元素であり、それらの核種(コバルト(Co), ストロンチウム(Sr), セシウム(Ce))を浄化・回収対象とした新規なバイオ修復材料を開発し、社会貢献していくことを目指している。高塩濃度条件では地下水で有効であるスメクタイト(粘土鉱物)などの吸着効率が非常に低下するため、CoやSrは従来の吸着材料を用いることは困難である。そこで高塩濃度下で微生物が合成するバイオ鉱物にCoやSrを取り込ませて固化し浄化・回収することを目的とした。海水試料からカルサイト(炭酸カルシウム)を生成する菌種を探索したところ TK2d 株を単離した。この微生物は1mMのSrを5日間で約99.3%培養液から除去する能力があった(*24)。

<優れた成果があがった点>

好氣的セレン酸還元細菌 *Pseudomonas stutzeri* NT-I 株を用いた、ラボスケールのバイオリアクターの設計・構築に成功した(*63,*74)。40ppm (0.5mM)濃度のセレン酸、亜セレン酸を含む模擬廃水から、固体セレン又は気体セレンを、約90%という高効率で回収に成功した(*7,*10,*19)。実廃水から固体セレンまたは気体セレンを各78.8%、38.9%の収量で回収することに成功した。気体セレンを質量分析により定性分析をした結果、気体セレンは主としてDMDS_eであることを発見した(*10)。回収した沈殿物から、エタノール洗浄という簡易な処理を検討し、セレンの結晶化物を濃縮・精錬し(*7,*10,*19)、その後酸化焙焼することによって96.7%の収量で金属セレンを精錬することに成功した。微生物によるバイオセレンから金属セレンを高純度で精錬した初めての例である。レアアース元素においては、模擬廃水中のDyを蓄積・固化するT9株を獲得し、Dy蓄積後の菌体を焙焼することにより酸化ジスプロシウムを得ることができる一連の回収系を構築できた。

レアメタルの電気化学的手法により精錬においては、セレンオキサニオンの直接的な電極還元は、亜セレン酸については強酸性条件でのみで起こり、セレン酸については起こらない。検討の結果、メチルビオロゲン(MV²⁺)をメディエーターとして用いると、中性pH領域においてセレンオキサニオンの還元が可能になることを電気化学手法によって見出した(*8)。

貴金属の電気化学的手法により精錬においては、本試験結果より[C₄mim][PF₆]に抽出されたPd(II)は、電解還元によりPd単体として回収可能であることが示された(*50)。

セレン以外ではテルル、REE、Srを代謝する新規な微生物の分離に成功した(*11,*54)。

本年度特に優れた成果は、模擬廃水から微生物作用によって得られたバイオセレンを高純度(99%以上)にまで精錬する一連のプロセスの構築ができたことである。セレン代謝に関する遺伝子が特定でき基礎的知見が得られた。REEを蓄積する微生物を用いて模擬廃水から初発濃度の90%の収量でDyを回収資源化できるプロセスの構築ができた。放射性核種のSrを5日間で初発濃度の99%以上バイオ鉱物に取込む微生物を獲得できた。

<課題となった点>

先行研究で行ったセレン含有模擬廃水を用いて *Pseudomonas stutzeri* NT-I 株を培養した場合、固体セレンも気体セレンも、約90%という高効率でセレンの回収に成功したが、実廃水からの回

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

収効率は模擬廃水よりもよくなかった。実廃水はセレン酸と亜セレン酸が混在しているので、各還元反応速度が異なり、単純に通気を止めるだけでは元素態セレンの還元を完全に抑制することができない。セレン酸化物の混合比によって反応条件を変更する必要がある。特にセレン酸化回収では模擬廃水と比べると回収率は低かった。その原因は実廃水に固体セレン、酸化セレンの合成を阻害する物質が存在すること、培養液中の未知セレンが酸化しなかったことなどが考えられ、合成メカニズムの解明、阻害因子の除去により、セレン酸化回収率が高くなる可能性がある。

セレン酸還元細菌 NT-I 株を用いてレアメタルバイオセンサーを構築しているが、排水基準値を直接測定できなかつたが、ストリッピング法や電極の実表面積を増やすことにより高感度化できるかもしれない。電気化学手法によるセレンの精錬を検討したが、セレン酸においては、特定のメディエーターを添加しても除去率および回収率が亜セレン酸と比べて低かつた。電流効率の向上が課題である。

イオン液体を用いてレアアースの回収を試行し、特定の Pd(II)の等の回収には成功したが、より多くの有用元素を回収できるイオン液体を用いた系を開発する必要がある。

テルル酸、REE、放射性核種を代謝する特異な微生物を取得できたが、廃水・廃棄物から有用元素を浄化・回収できる可能性をもつ微生物の獲得と実用化に向けての検討が必要である。

<自己評価の実施結果及び対応状況>

研究代表者により、本学の組織的研究活動を統括する研究戦略会議(学長・副学長・学部長・研究科長等から構成)において年度毎に研究活動報告を行っている。研究戦略会議においては、研究成果の評価、以後の研究活動展開についての確認が行われ、次年度の予算配分が決定される。最終年度にあたっては「当初の計画通り進んでおり、最終年度において研究目標が達成できる見込みである。」との評価を受けている。

レアメタルを定性定量する大型分析機器を保有しているので、微生物を可視化する装置と反応容器を設置するために研究費を用いた。これらにより微生物の分離からプロセスの構築までのフローが完成し、大きな成果が得られた。さらにプロジェクトを細目化して専門家を配置することにより一連の基盤研究の成果を得た。

<外部(第三者)評価の実施結果及び対応状況>

SIT 総合研究所の研究センター(レアメタルバイオリサーチセンター)として、毎年外部の有識者(大学、企業等)からなる評価委員会を実施し、多角的な視点から忌憚のない評価やアドバイスを受けている。本研究における外部評価者のコメントは、メタルバイオを産業界に広めること、実用化するためにはエネルギーの低減化と処理時間の短縮すること、手法の妥当性を評価する客観的なデータを取ること、実用化に向けたプラントを稼働させ事業化を進めることである。これらのコメントには以下のように対応する。レアメタル回収に果たす微生物の役割やリサイクル回収技術を、編集した「地球を救うメタルバイオテクノロジー」を用いたり、生命化学研究室やメタルバイオテクノロジー研究部会のホームページにアップし周知する。実用化に向けて企業との共同研究を進めると共に、新たな研究助成費を獲得して大きな装置を構築し、客観的なデータを取得していく。エネルギーの低減化と処理時間の短縮を含めたコストダウンをラボスケールやベンチスケールの装置を用いて検討していく。

<研究期間終了後の展望>

将来日本の産業が生き残る道は、技術力を基盤にした省エネやリサイクル技術を含む技術開発力に集約されると思われる。特にレアメタルから発展する環境・エネルギービジネスがキーテクノロジーとなる。太陽発電、燃料電池、電気自動車等はレアメタルから発想できる事業である。持続的にレアメタルを供給するために、備蓄する事、新規な探鉱を開発する事や代替材料を開発する事は必須

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

であるが、かなりの時間がかかると言われている。本技術開発は、既に多量に存在する使用済製品や廃水・廃棄物からの有価金属の回収であり、免税制度から民間活力を利用すれば、3R(reduce, reuse, recycle)技術が確立できると思われる。レアメタルは有用資源として注目されているが、新たな環境汚染が懸念されている。本研究は廃棄物からのレアメタル処理技術も兼ねており、資源循環と環境保全の一石二鳥の技術として、循環型社会の構築に大いに寄与するものである。

セレンを含有した廃水・廃棄物からセレンを回収・資源化できるプロセスフローを開発した。微生物を活用した他のレアメタル浄化・回収を達成する一連の基盤技術が構築できたと思われる。学術的(微生物や遺伝子の特定)にも経済的にも(特許を含む)、さらなる知的基盤も構築できると思われる。これら一連の成果により、ブラジルの大手資源開発企業 Vale 社と我々が日本では初めて共同研究して、微生物を用いた鉱物の新処理方法の開発を目指すことになった。実用化するためには共同研究先を増やし実証レベルのプラントを設置すると共に、国内外に循環型社会システムの必要性を認知、流布させることにより、市場拡大を目指してレアメタルの資源循環型社会システムの基盤を形成することである。また新たに、福島県原子力発電所の事故で問題となっている放射性核種を浄化・回収対象とした新規なバイオ修復材料を開発し、社会貢献していくことを目指している。

<研究成果の副次的効果>

得られた研究成果は特許出願し、セレン関連会社と共同出願を行った。

@<発明者>山下光雄, <発明名称>タンパク質、核酸、組み換えベクター、形質転換体、及びジメチルジセレニドの製造方法, <出願人>芝浦工業大学, <出願日>平成27年12月14日, <出願番号>特願2015-243298号

@<発明者>山下光雄, <発明名称>放射性核種を固化する能力を有する好塩菌, <出願人>芝浦工業大学, <出願日>平成27年7月2日, <出願番号>特願2015-133419号

@<発明者>山下光雄, <発明名称>希土類元素の回収方法, <出願人>芝浦工業大学, <出願日>平成27年4月24日, <出願番号>特願2015-089492号

@<発明者>山下光雄, 三浦彰, <発明名称>新規セレン還元微生物及び該当微生物を使用したセレン処理方法, <出願人>JX 日鉱日石金属株式会社(*79), <出願番号>特願 2014-131926, <出願日>平成 26 年 12 月 24 日

@<発明者>山下光雄, <発明名称>希土類元素を固化する能力を有する微生物及び希土類元素の固化する方法, <出願人>芝浦工業大学, <出願日>平成25年7月17日, <出願番号>特願2013-148344

@<発明者>山下光雄, <発明名称>希土類元素を溶出させる能力を有する微生物及び希土類元素の溶出方法, <出願人>芝浦工業大学, <出願日>平成25年7月17日, <出願番号>特願2013-148343

@<発明者>山下光雄, 三浦彰, <発明名称>セレンの処理方法, <出願人>JX 日鉱日石金属株式会社(*79), <出願番号>特願 2013-131926, <出願日>平成 25 年 6 月 24 日.

@<発明者>山下光雄, <発明名称>セレンの回収方法, <出願人>芝浦工業大学, <国際特許出願番号>PCT/JP2012/052922, <出願日>平成24年2月9日, <出願番号>特願2011-191309, 出願日:平成23年9月2日).

@<発明者>山下光雄, 池道彦, 惣田訓, 鈴木務, 花田昌子, <発明名称>セメント製造工程における金属の回収方法, <出願人>芝浦工業大学, 大阪大学, 太平洋セメント(株)(*78), <出願番号>特願2012-26189, <出願日>平成24年2月9日.

@<発明者>山下光雄, 池道彦, <発明名称>セレン酸還元活性を示すタンパク質, <出願人>芝浦工業大学, <国際特許出願番号>PCT/JP2011/071442, <出願日>平成23年9月21日, <出願番号>特願2011-65289, 出願日:平成23年3月24日.

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

@<発明者>山下光雄, <発明名称>セレンの回収方法, <出願人>芝浦工業大学, <出願番号>特願2011-191309, <出願日>平成23年9月2日.

@<発明者>山下光雄, 惣田訓, 池道彦, 花田昌子, 鈴木務, <発明名称>セメント製造工程における金属の回収方法, <出願人>芝浦工業大学, 大阪大学, 太平洋セメント(株)(*78), <出願番号>特願2011-172045, <出願日>平成23年8月5日.

12 キーワード(当該研究内容をよく表していると思われるものを8項目以内で記載してください。)

- | | | |
|--------------------|-----------------------|------------------|
| (1) <u>金属代謝微生物</u> | (2) <u>レアメタル</u> | (3) <u>セレン</u> |
| (4) <u>テルル</u> | (5) <u>レアアース元素</u> | (6) <u>放射性核種</u> |
| (7) <u>バイオリクター</u> | (8) <u>バイオメタルセンサー</u> | |

13 研究発表の状況(研究論文等公表状況。印刷中も含む。)

上記、11(4)に記載した研究成果に対応するものには*を付すこと。

<雑誌論文>

論文名、著者名、掲載誌名、査読の有無、巻、最初と最後の頁、発表年(西暦)について記入してください(左記の各項目が網羅されていれば、項目の順序を入れ替えても可)。また、現在から発表年次順に遡り、通し番号を付してください。

1. Bioleaching of gallium from gallium arsenide by *Cellulosimicrobium funkei* and its application to semiconductor/electronic wastes. Sirikan Maneesuwannarat, Alisa S. Vangnai, Mitsuo Yamashita, and Paitip Thiravetyan, *Process Safety and Environment Protection*, 査読有. 99, 80-87, (2016).
- *2. Selenium recovery from kiln powder of cement manufacturing by chemical leaching and bioreduction. Satoshi. Soda, Ai Hasegawa, Masashi Kuroda, Akiko Hanada, Mitsuo Yamashita, and Michihiko Ike. *Water Science and Technology*, 査読有. 72(8), 1294-1300, (2015). 査読有
- *3. 酸化焙焼によるバイオセレンからのセレン分離の検討, 大塚治、築場豊、吉川健、山下光雄、*日本金属学会誌*, 査読有. 79 (6), 330-337, (2015).
- *4. A new isolate, *Penidiella* sp. T9, accumulates the rare earth element dysprosium. Takumi Horiike, and Mitsuo Yamashita, *Appl. Environ. Microbiol.*, 査読有. 81(9), 3062-3068, (2015).
5. Draft Genome Sequence of *Bacillus selenatarsenatis* SF-1^T, a promising agent for bioremediation of environments contaminated with selenium and arsenic. Masashi Kuroda, Hiroyuki Ayano, Kazunari Sei, Mitsuo Yamashita, and Michihiko Ike, *Genome Announc.*, 査読有. 3(1), 1-2, (2015).
- *6. 高効率分離を目指したトリフェニルホスフィン抽出剤による都市鉱山からの白金族元素の分離プロセスの提案, 松本佑美、鈴木亮利、千葉雄大、新井剛, *Journal of MMIJ*, 査読有. 131(8-9), 481-486 (2015).
- *7. セレン還元細菌 NT-I 株を用いた廃水からのセレン回収, 山下光雄、大塚治, *水環境学会誌*, 査読無、37(2)、1-5 (2014).
- *8. Fumiya Koshikumo, Wakana Murata, Akiyuki Ooya, and Shin-ichiro Imabayashi, "Acceleration of Electroreduction Reaction of Water-Soluble Selenium Compounds in the Presence of Methyl Viologen", *Electrochemistry*, 査読有. 81(5), 350-52 (2013).
- *9. イオン液体を用いた都市鉱山からの有用金属の分離・回収技術の開発, 新井剛、剣持

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

達也、十時一晃、化学工業、査読無、Vol.64, 148-156, 2013.

*10. Selenium volatilization under aerobic conditions and recovery from aqueous phase by *Pseudomonas stutzeri* NT-I. Tsubasa Kagami, Takanobu Narita, Masashi Kuroda, Emi Notaguchi, Mitsuo Yamashita, Kazunari Sei, Satoshi Soda, and Michihiko Ike. Water Research. 査読有. 47, 1361-1368, 2012.

*11. Isolation and characterization of bacteria capable of reducing tellurium oxyanions to insoluble elemental tellurium for tellurium recovery from wastewater. Tsubasa Kagami, Akira Fudemoto, Noriyuki Fujimoto, Emi Notaguchi, Masaya Kanzaki, Masashi Kuroda, Satoshi Soda, Mitsuo Yamashita, and Michihiko Ike. Waste and Biomass Valorization. 査読有. 3(4), 409-418, 2012.

*12. メタルバイオ技術による排水からのレアメタル回収の可能性, 池道彦、山下光雄、黒田真史, 環境バイオテクノロジー学会誌、査読無、vol.12、3-8、(2012).

*13. Laboratory-scale bioreactors for soluble selenium removal from selenium refinery wastewater using anaerobic sludge. Satoshi Soda, Masami Kashiwa, Tsubasa Kagami, Masashi Kuroda, Mitsuo Yamashita, and Michihiko Ike. Desalination. 査読有. 279, 433-438 (2011).

*14. Characterization of *Pseudomonas stutzeri* NT-I capable of removing soluble selenium from the aqueous phase under aerobic conditions. Masashi Kuroda, Emi Notaguchi, Akiko Sato, Masaya Yoshioka, Ai Hasegawa, Tsubasa Kagami, Takanobu Narita, Mitsuo Yamashita, Kazunari Sei, Satoshi Soda, and Michihiko Ike. J. Biosci. Bioeng., 査読有. 112(3), 259-264 (2011).

15. Molecular cloning and characterization of the *srdBCA* operon encoding the respiratory selenate reductase complex from the selenate-reducing bacterium, *Bacillus selenatarsenatis* SF-1. Masashi Kuroda, Mitsuo Yamashita, Kanako Imao, Noriyuki Fujimoto, Hisayo Ono, Kouta Nagano, Emiko Miwa, Kazunari Sei, and Michihiko Ike. J. Bacteriol., 査読有. 193(9), 2141-2148 (2011).

*16. イオン交換法による使用済液晶パネル中からのインジウム分離・回収の基礎研究, 井上亮、山田竜生、河村卓哉、新井剛、永山勝久, 日本イオン交換学会誌、査読有.Vo1.22, No.3, p.87-95, (2011).

<図書>

図書名、著者名、出版社名、総ページ数、発行年(西暦)について記入してください(左記の項目が網羅されていれば、項目の順序を入れ替えても可)。また、現在から発表年次順に遡り、通し番号を付してください。

17. 「セレン等の揮発化回収」, 山下光雄、大塚治, バイオベース元素戦略 —都市鉱山・海底鉱山に眠る貴金属・レアメタル回収技術— 小西康裕編集, 2017年7月10日 (株)シーエムシー出版

*18. 「第2章 メタルバイオテクノロジー」, 山下光雄、清和成編集, “地球を救うメタルバイオテクノロジー -微生物と金属資源のはなし-” 成山堂書店. 2014年.

*19. 「レアメタルのバイオ濃縮回収技術の可能性」. 成田尚宣、山下光雄. 応用微細藻類学. 小柳津広志、倉橋みどり編集. 成山堂書店. 分担. 190. 2012.

*20. 「バイオボータリゼーションによるセレンの回収」. 成田尚宣、山下光雄. リサイクル・廃棄物事典. 産業調査会事典出版センター. 分担. 600. 2012.

21. Phytoremediation for soils contaminated by heavy metals using the symbiosis between *Astragalus sinicus* with rhizobacteria. Mitsuo Yamashita. Handbook of Metal Biotechnology — Applications for Environmental Conservation and Sustainability. Pan Stanford Publishing. 231. 2012.

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

22.「レンゲと根粒菌の共生による重金属ファイトレメディエーション」.山下光雄.植物機能のポテンシャルを活かした環境保全・浄化技術 ～地球を救う超環境適合・自然調和型システム～.CMC 出版. 261. 2011.

<学会発表>

学会名、発表者名、発表標題名、開催地、発表年月(西暦)について記入してください(左記の項目が網羅されていれば、項目の順序を入れ替えても可)。また、現在から発表年次順に遡り、通し番号を付してください。

*23. 山下光雄, 微生物培養による廃水や廃棄物からのレアメタル回収技術(2015 年度第 67 回日本生物工学会大会、鹿児島、10 月 26-28 日)

*24. T. Ohnuki, N. Kozai, F. Sakamoto, T. Saito, Q. Yu, M. Yamashita, T. Horiike, S. Utsunomiya. Coprecipitation of radioactive strontium in sea water during formation of biogenic calcite. 15th International Conference on the Chemistry and Migration Behaviour of Actinides and Fission Products in the Geosphere. September 13-18, 2015, Santa Fe Community Convention Center, Santa Fe, NM, USA

*25. Selenium recovery from simulated wastewater using Selenium reducing bacteria *Pseudomonas stutzeri* NT-I. Osamu Otsuka, Masashi Kuroda, Satoshi Soda, Michihiko Ike, and Mitsuo Yamashita. Hydroprocess 2015 (7th International Seminar on Process Hydrometallurgy. July 22-24, 2015, Antofagasta, Chile)

*26. 海洋環境から分離した好気性テルル酸還元微生物の多様性、堀池巧、大塚治、寺原猛、今田千秋、山下光雄(マリンバイオテクノロジー学会 2015 年度大会(平成 27 年度)、東京海洋大学、5 月 30 日-31 日)

*27. セレン酸還元菌 *Pseudomonas stutzeri* NT-I 株を用いた模擬廃水からのセレン再資源化。大塚治、築場豊、吉川健、山下光雄(廃棄物資源循環学会 2014 年度春の研究発表会(平成 27 年度)、川崎、5 月 28 日)

*28. 北義弘、大胡貴仁、新井剛“[C_nmim][PF₆]₂による複合反応系を用いた都市鉱山からの希少金属回収技術開発”、2015 年日本イオン交換学会・日本溶媒抽出学会連合年会、(2015)

29. 松本佑美、矢田祐士、山中拓実、新井 剛“イオン液体を溶媒とした白金族元素回収の新規・分離回収技術開発”、2015 年日本イオン交換学会・日本溶媒抽出学会連合年会、(2015)

30. 大胡貴仁、北義弘、新井剛“LCST 型イオン液体を用いた金属イオンの抽出挙動の基礎研究”、2015 年日本イオン交換学会・日本溶媒抽出学会連合年会、(2015)

*31. 矢田祐士、松本佑美、新井剛“[C_nmim][Tf₂N]-Tributyl phosphate 混合抽出相からのギ酸アンモニウムによる希土類元素の逆抽出”、2015 年日本イオン交換学会・日本溶媒抽出学会連合年会、(2015)

32. 北義弘、大胡貴仁、新井剛“イオン液体を用いた複合反応系による都市鉱山からの有用金属の直接回収技術開発”、平成 27 年度資源・素材関係学協会合同秋季大会、(2015)

*33. 松本佑美、矢田祐士、室井悟、新井剛“[C_nmim][Tf₂N]を溶媒とした都市鉱山からの白金族元素新規分離・回収技術開発”、平成 27 年度資源・素材関係学協会合同秋季大会、(2015)

34. 大胡貴仁、北義弘、新井剛“イミダゾリウム系イオン液体の抽出挙動に及ぼすアニオン構造変化の影響”、平成 27 年度資源・素材関係学協会合同秋季大会、(2015)

*35. 矢田祐士、松本佑美、新井剛“Tributyl Phosphate の希釈溶媒に[C_nmim][Tf₂N]を用いた場合の塩酸水溶液中における希土類元素の抽出・逆抽出挙動”、平成 27 年度資源・素材関係学協会合同秋季大会、(2015)

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

- *36. 村上大昌、今林慎一郎、「亜セレン酸の電極還元促進に対するビオロゲンメディエーター構造の影響」、第 61 回ポーラログラフおよび電気分析化学討論会、2015/11/24、イーグレひめじ。
- *37. 今林慎一郎、村上大昌、越雲文也、「メディエーター型亜セレン酸還元反応に対するメディエーター構造の影響」、2015 年電気化学秋季大会、2015/9/11、埼玉工業大学。
- *38. 赤塚秀太、越雲文也、今林慎一郎、「メディエーター型水溶性セレン還元反応に基づくセレン回収法の可能性」、電気化学会第 82 回大会、2015/3/17、横浜国立大学。
39. Bioleaching of gallium from semiconductor/electronic wastes: Screening and characterization of gallium arsenide-extracting bacteria. Sirikan Maneesuwannarat, Alisa S. Vangnai, Mitsuo Yamashita and Paitip Thiravetyan. ENRIC2014: Global Climate Change and Sustainability pathway 6-7/November, 2014, Bangkok, Thailand.
- *40. Selenium recovery from kiln powder as by-product of cement manufacturing by using chemical leaching and bacterial reduction. S. Soda, A. Hasegawa, M. Kuroda, A. Hanada, M. Yamashita, M. Ike. (The International water association (IWA) World Water Congress & Exhibition, September 21-26, 2014, Lisbon, Portugal)
- *41. Recovery of Selenium in Wastewater through Biovolatilization by Using *Pseudomonas stutzeri* NT-I. M. Ike, T. Narita, M. Kuroda, S. Soda, M. Yamashita, (The International water association (IWA) World Water Congress & Exhibition, September 21-26, 2014, Lisbon, Portugal)
- *42. 循環型社会を目指した実廃水・実廃棄物からのレアメタル回収技術。大塚治、山下光雄(エコデザインプロダクツ&サービスシンポジウム、東京大学本郷キャンパス、2014)
- *43. 微生物を用いた廃水からのセレン酸化回収技術の検討。大塚治、黒田真史、池道彦、山下光雄(廃棄物資源循環学会 2014 年度春の研究発表会(平成 26 年度)、川崎)
- *44. 海洋環境からの好気性テルル酸還元微生物の単離とテルル酸還元能の解析。堀池巧、大塚治、田中康寛、寺原猛、今田千秋、山下光雄(マリンバイオテクノロジー学会 2014 年度大会(平成 26 年度)、三重大学)
- *45. テルルを代謝する新規海洋性微生物の獲得とその機能解析。堀池巧、大塚治、田中康寛、寺原猛、今田千秋、山下光雄(日本農芸化学会 2014 年度(平成 26 年度)、東京、3月 27-30 日)
- *46. *Pseudomonas stutzeri* NT-I のジメチルジセレニド合成能の特徴。大塚治、成田尚宣、黒田真史、池道彦、山下光雄(日本農芸化学会 2014 年度大会(平成 26 年度)、東京、3月 27-30 日)
- *47. 赤塚秀太、今林慎一郎、「メディエーター型亜セレン酸還元反応はセレン回収方法として有用か? - 反応機構解析結果に基づく電解還元条件の検討 -」、第 60 回ポーラログラフおよび電気分析化学討論会、2014/11/16、京都工繊大
- *48. 越雲文也、今林慎一郎、「電子メディエーターを介する亜セレン酸の電極還元反応機構の解析」、電気化学会第 81 回大会、2014/3/29、関西大学千里山キャンパス
- *49. 北義弘、新井剛、十時一晃、「廃棄物の減容化を目指した都市鉱山からのイオン液体による有用資源の直接回収技術の創生」、平成 26 年度資源・素材関係学協会合同秋季大会、2014。
- *50. 北義弘、十時一晃、新井剛、「 $[C_n\text{mim}][PF_6]$ を用いた複合反応系による塩酸水溶液中からの Pd の直接回収に関する基礎研究」、エコデザイン学会/NPO エコデザイン推進機構「エコデザイン・プロダクツ&サービスシンポジウム」、2014。
- *51. ジャーファーマンターを用いた *Pseudomonas stutzeri* NT-I によるセレンオキソアニオ

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

ン還元特性の検討。樋口靖典、成田尚宣、黒田真史、惣田訓、山下光雄、池道彦(2013 年度(第 50 回)日本水処理生物学会、神戸市、11 月 13-15 日)

52. Analyses of selenate reduction mechanism in *Pseudomonas stutzeri* NT-I, the promising biocatalyst for selenium-removal and recovery from contaminated water. Masashi Kuroda, Emiko Miwa, Kazunari Sei, Satoshi Soda, Mitsuo Yamashita, and Michihiko Ike. (Metals and Related Substances in Drinking Water 5th international Conference, November 6-9, 2013, Shanghai, China)

53. *Pseudomonas stutzeri* NT-I capable of reducing selenate/selenite into elemental selenium and methyl selenides; a versatile microbial agent for biotreatment/bioremediation of selenium contamination. M. Kuroda, T. Kagami, T. Narita, S. Soda, M. Yamashita, and M. Ike. (VJSE: Vietnamese-Japanese Students' Scientific Exchange Meeting, September 23, 2013, Osaka, Japan)

*54. Development of recycling technology of rare-earth elements (REE) from wastes using microorganism's metabolism). Mitsuo Yamashita, Takumi Horiike. (Japan Sustainable Mining, Investment & Technology business forum 2013, 東京、5 月 16-17 日)

*55. 越雲文也、今林慎一郎、「メチルビオロゲンを介した亜セレン酸の電極還元反応に対する緩衝液の影響」、電気化学会第 80 回大会(東北大学)、2013/3/29、東北大学川内キャンパス

*56. 十時一晃、北義弘、新井剛、「 $[C_n\text{mim}][PF_6]$ によるレアメタルの抽出及び電気化学挙動に関する研究」、日本溶媒抽出学会「第 32 回 溶媒抽出討論会」、2013.

*57. *Pseudomonas stutzeri* NT-IIによるセレン酸還元機構の解析。黒田真史、三輪美恵子、清和成、惣田訓、山下光雄、池道彦(日本農芸化学会2013年度(平成25年度)、仙台、3月25-28日)

*58.テルル酸還元細菌 *Ochrobactrum anthropi* Ti-3株のテルル酸還元能の解析。大塚治、長谷川智美、坂本康太、生田裕馬、池道彦、山下光雄(日本農芸化学会2013年度(平成25年度)、仙台、3月25-28日)

*59. 越雲文也、今林慎一郎、「回転電極測定法を用いた水溶性セレン化合物の電極還元反応の解析」、第 58 回ポーラログラフおよび電気分析化学討論会(高尾)、2012/11/27、八王子市高尾の森わくわくビレッジ

*60. 十時一晃、劔持達也、木暮勇、佐々木琴江、新井剛、「イオン液体に含まれる金属イオンの電氣的回収に関する研究」、平成 24 年度資源・素材関係学協会合同秋季大会、2012.

*61. 木暮勇、十時一晃、劔持達也、新井剛、「低融点イオン液体のアルキル鎖変化による塩酸溶液中の金属イオンの抽出挙動に関する研究」、平成 24 年度資源・素材関係学協会合同秋季大会、2012.

62. 二種のセレン酸還元細菌のセレン酸還元関連遺伝子の解析。黒田真史、三輪恵美子、清和成、惣田訓、山下光雄、池道彦(2012年度(第49回)日本水処理生物学会、北里大学白金高輪キャンパス、11月24-25日)

*63. *Pseudomonas stutzeri* NT-Iを用いたセレン揮発化除去・回収プロセスの試行。黒田真史、成田尚宣、三輪美恵子、鏡つばさ、惣田訓、山下光雄、池道彦(2012年度日本生物工学会大会、神戸国際会議場、10月23-26日)

*64. F. Koshikumo, W. Murata, A. Ooya and S. Imabayashi, "Electrochemical reduction of selenite and selenate accelerated by methyl viologen", PRiME2012, 2012/10/9, Honolulu, Hawaii.

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

*45. 越雲文也、今林慎一郎、「メチルビオロゲン共存下における水溶性セレン化合物の電極還元反応の解析」、電気化学会第 79 回大会、2012/3/30、アクトシティ(浜松)。

*46. セレン酸還元細菌 *Pseudomonas stutzeri* NT-I を用いたセレン酸および亜セレン酸還元最適化。成田尚宣、鏡つばさ、黒田真史、惣田訓、池道彦、山下光雄(2012年度日本農芸化学会大会、京都女子大学、3月22-25日)

*67. Recycling of selenium from K-powder in selenate reducing bacterium, *Pseudomonas stutzeri* NT-I. Shun Ochiai, Takanobu Narita, Kazunari Sei, Satoshi Soda, Michihiko Ike, and Mitsuo Yamashita (SEATUC 6th congress, March, 6-7, 2012)

*68. 越雲文也、今林慎一郎、「水溶性セレン化合物の電極還元反応におけるメチルビオロゲンの役割」、第 57 回ポーラログラフおよび電気分析化学討論会、2011/12/1、沖縄県男女共同参画センター(那覇)。

*69. 剣持達也、木暮勇、新井剛、永山勝久“イオン液体を用いた塩酸水溶液中からの有用金属の分離・回収プロセスの研究”資源・素材 2011(堺)、2011。

*70. Isolation and characterization of bacteria capable of reducing tellurium oxyanions to insoluble elemental tellurium. Tsubasa Kagami, Akira Fudemoto, Noriyuki Fujimoto, Emi Notaguchi, Masaya Kanzaki, Masashi Kuroda, Satoshi Soda, Mitsuo Yamashita, and Michihiko Ike. (Ecomate, 2011 年 11 月 28-30 日)

*71. セメント工場から発生する K パウダーからのセレン回収方法の基礎検討。長谷川愛、黒田真史、花田晶子、惣田訓、山下光雄、池道彦(廃棄物資源循環学会第 22 回研究発表会、東洋大学、11 月 3-5 日)

*72. メタルバイオ技術による排水からのレアメタル回収の可能性。池道彦、山下光雄(2011 年日本生物工学会、東京農工大学、東京、9 月 26-28 日)

*50. セレン酸還元細菌 *Pseudomonas stutzeri* NT-I 株を用いた K パウダーからのセレンの回収。落合俊、成田尚宣、清和成、惣田訓、池道彦、山下光雄(2011 年日本生物工学会、東京農工大学、東京、9 月 26-28 日)

*74. Optimization of seleno-oxyanions reduction and recovery of elemental and gaseous selenium with selenate reducing bacterium, *Pseudomonas stutzeri* NT-I. T. Narita, M. Kashiwa, S. Yamazaki, T. Horiike, Y. Tokunaga, S. Kuboyama, H. Shirai, S. Ogiyama, S. Soda, M. Ike, and M. Yamashita. (International Union of Microbiological societies 2011 Congress, Sapporo, 2011 年 9 月 6-10 日)

*75. *Pseudomonas stutzeri* NT-I capable of reducing selenate/selenite into elemental selenium and volatilizing them as methylated selenium. E. Miwa, M. Kuroda, E. Notaguchi, A. Sato, M. Yoshioka, A. Hasegawa, T. Kagami, K. Sei, S. Soda, M. Yamashita, and M. Ike. (International Union of Microbiological societies 2011 Congress, Sapporo, 2011 年 9 月 6-10 日)

76. Molecular cloning and characterization of the *srdBCA* operon encoding the respiratory selenate reductase complex from the selenate-reducing bacterium, *Bacillus selenatarsenatis* SF-1. Masahi Kuroda, Mitsuo Yamashita, Emiko Miwa, Kazunari Sei, and Michihiko Ike. (Asian Congress on Biotechnology ACB-2011, Outstanding awards for young scientists, 2011 年 5 月 11-15 日, Shanghai, China)

<研究成果の公開状況>(上記以外)

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

シンポジウム・学会等の実施状況、インターネットでの公開状況等

※ホームページで公開している場合には、URL を記載してください。

<既に実施しているもの>

芝浦工業大学工学部応用化学山下研究室(生命化学研究室)のホームページ(<http://www.ch.shibaura-it.ac.jp/yamashitalab/index.html>)に一部情報を公開している。

公益社団法人 日本生物工学会 メタルバイオテクノロジー研究部会の代表をしており、(http://www.sbj.or.jp/division/division_metalbio.html)に一部情報を公開している。

<これから実施する予定のもの>

* Removal of radioactive strontium from sea water by biogenic calcium carbonates. T. Ohnuki, N. Kozai, F. Sakamoto, T. Saito, Q. Yu, M. Yamashita, T. horiike, S. Utsunomiya. The 26th Goldschmidt Conference on June 26th to July 1st, Yokohama, Japan.

* Optimization of Dimethyl diselenide synthesis by *Pseudomonas stutzeri* NT-I. Osamu Otsuka, Masashi Kuroda, Michihiko Ike, and Mitsuo Yamashita. 13th International Conference on the Chemistry of Selenium and Tellurium. May 23-17, 2016. Nagaragawa Convention Center at Gifu, Japan.

14 その他の研究成果等

「13 研究発表の状況」で記述した論文、学会発表等以外の研究成果、企業との連携実績があれば具体的に記入してください。また、上記、11(4)に記載した研究成果に対応するものには下線及び*を付してください。

※ 論文や学会発表等になじまない研究である場合は、本欄を充実させること

*77. ブラジル Vale 社と「Investigation of ore processing using microorganisms」という題目で日本との初めて共同研究締結

*78. 太平洋セメント(株)と「セメント製造工程におけるセレンおよび他の有害物質浄化技術の開発」という題目で共同研究.

*79. JX 日鉱日石金属(株)と JX 日鉱日石金属由来の廃水サンプルを用いて低コストで高効率なレアメタルを回収するためのプロセスの開発を目指して、「レアメタル回収実証プラント構築を目指した開発研究」という研究題目で共同研究.

80. 三菱レーヨン(株)と「分離膜を用いたセレン処理・回収技術の研究」という研究題目で共同研究.

81. テレビ朝日 スーパーJ チャンネル 平成25年5月1日(水)「ゴミに隠れた『宝』を発掘 レアメタル鑑定」という番組で本研究内容の微生物によるレアメタル回収が取材、放映された。

82. 朝日新聞 平成25年7月31日(水)夕刊 「レアメタル 微生物で回収」とタイトルの記事が掲載された。

83. 電気新聞 平成25年10月15日(火)「全国理系学び舎紀行」に研究室と研究内容が紹介された。

84. 化学工業日報 平成26年1月6日(月)「グリーンイノベーション」に研究内容(微生物でレアメタル回収)が掲載された。

85. 化学工業日報平成27年11月17日(火)「微生物でレアアース回収」が掲載された。

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

15 「選定時」及び「中間評価時」に付された留意事項とそれへの対応

<「選定時」に付された留意事項>

留意事項が付されていない場合は「該当なし」と記載してください。

基盤形成の観点からの研究成果に留意されたい。

<「選定時」に付された留意事項への対応>

付された留意事項に対し、どのような対応策を講じ、また、それにより、どのような成果があがったか等について、詳細に記載してください。

将来につながる基礎的な実験結果を取得することを心がけ、学術論文や著書や学会発表での成果をあげることを重視した。さらに基礎的な研究を実用化に結びつけるため、企業と共同研究を行ない、特許申請も行った(研究成果の副次的効果参考)。

<「中間評価時」に付された留意事項>

留意事項が付されていない場合は「該当なし」と記載してください。

学術論文・学会・特許出願などの成果が認められる。しかしながら、研究代表者と学外研究者1名の成果のみで、プロジェクトとしての連携が必ずしもうまくいっているとは思えない。

今後、連携を深め、基盤形成のための研究成果の蓄積を期待する。

<「中間評価時」に付された留意事項への対応>

付された留意事項に対し、どのような対応策を講じ、また、それにより、どのような成果があがったか等について、詳細に記載してください。

中間報告では提出枚数に制限があり、全てを網羅して記述できなかった。そこで本報告では研究発表の状況欄に加筆した。当初の目標であるレアメタル代謝微生物の分離、リアクターの構築、精錬技術の開発及び一連のフローからの派生研究までを示すことができる研究成果をあげた。

学内研究者の業績欄に研究代表者の名前が記載されていないのは、貢献度を低く設定したので削除した。実際上は、本実験研究で行った元素分析の一部を分担し、担当学生の分析技術指導を行っている。

学外研究者のうち1名は東北地域で生じた災害のために研究ができなくなり、レアメタル分析に関しての示唆をいただくことでプロジェクトの役割を担って頂くことにした。その後、実験研究する事が可能になったので、多様なレアメタル回収に適用できる微生物の取得と分析研究に関しての役割を担って頂いた。

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

16 施設・装置・設備・研究費の支出状況(実績概要)

(千円)

年度・区分	支出額	内 訳						備 考
		法 人 負 担	私 学 助 成	共同研 究機関 負担	受託 研究等	寄付金	その他(科学研究費補助金)	
平成二十三年 度	施設	0						受託) (株)三徳
	装置	0						受託) 太平洋セメント(株)
	設備	0						寄付) ハウスウェルネスフーズ(株)
	研究費	23,896	3,168	2,850		7,216	9,362	1,300
平成二十四 年度	施設	0						受託) (株)三徳
	装置	0						寄付) ハウスウェルネスフーズ(株)
	設備	0						寄付) JX日鉱日石金属(株)
	研究費	17,389	4,055	3,492		755	5,098	3,989
平成二十五 年度	施設	0						受託) 美交化学
	装置	0						寄付) ハウスウェルネスフーズ(株)
	設備	0						寄付) JX日鉱日石金属(株)
	研究費	15,693	2,216	2,000		5,700	2,360	3,417
平成二十六 年度	施設	0						受託) 美交化学
	装置	0						受託) JX金属(株)
	設備	0						寄付) ハウスウェルネスフーズ(株)
	研究費	18,162	2,213	2,000		7,436	920	5,593
平成二十七 年度	施設	0						受託) 美交化学
	装置	0						受託) JX金属(株)
	設備	0						寄付) ハウスウェルネスフーズ(株)
	研究費	14,512	2,199	2,000		5,237	1,077	3,999
総 額	施設	0	0	0	0	0	0	0
	装置	0	0	0	0	0	0	0
	設備	0	0	0	0	0	0	0
	研究費	89,652	13,851	12,342	0	26,344	18,817	18,298
総 計	89,652	13,851	12,342	0	26,344	18,817	18,298	

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

17 施設・装置・設備の整備状況（私学助成を受けたものはすべて記載してください。）
《施設》（私学助成を受けていないものも含め、使用している施設をすべて記載してください。）（千円）

施設の種類	整備年度	研究施設面積	研究室等数	使用者数	事業経費	補助金額	補助主体
先端工学研究機構棟	既存施設	100 m ²	1室	5名			

※ 私学助成による補助事業として行った新增築により、整備前と比較して増加した面積

_____ m²

《装置・設備》（私学助成を受けていないものは、主なもののみを記載してください。）（千円）

装置・設備の名称	整備年度	型番	台数	稼働時間数	事業経費	補助金額	補助主体
(研究設備) 卓上顕微鏡	平成22年度	TM3000	1	常時使用	5,250	5,250	経済産業省
発光分光分析装置	平成22年度	iCAP6300	1	常時使用	6,510	6,510	経済産業省

18 研究費の支出状況

研究テーマ 1. 廃棄物などからのレアメタル除去・回収バイオリクターの開発

(千円)

年度	平成 23 年度		
小科目	支出額	積算内訳	
		主な用途	金額
教育研究経費支出			
消耗品費	1,806	実験用消耗品	1,238
		実験用薬品	136
		その他	430
旅費交通費	34	研究旅費	34
保守清掃・修繕費	222	保守費	6
		修繕費	216
計	2,060		2,060
アルバイト関係支出			
人件費支出 (兼務職員)			時給 950円, 年間時間数 200時間 実人数 1人
教育研究経費支出	190	分析器具の酸洗浄等実験補助	190
計	190		190
設備関係支出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教育研究用機器備品	2,693	実験用機器	1,239
		実験用機器	1,454
図書			
計	2,693		2,693
研究スタッフ関係支出			
リサーチ・アシスタント			
ポスト・ドクター			
研究支援推進経費			
計	0		

(様式2)

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

(千円)

年 度	平成 24 年度		
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳	
		主 な 使 途	金 額
教 育 研 究 経 費 支 出			
消 耗 品 費	1,693	実験用消耗品	1,429
		実験用薬品	91
		その他	173
用 品 費	131	実験用品	131
保守清掃・修繕費	446	修繕費	446
計	2,270		2,270
ア ル バ イ ト 関 係 支 出			
人件費支出 (兼務職員)			時給 950円, 年間時間数 38時間 実人数 1人
教育研究経費支出	36	実験データの回収・報告	36
計	36		36
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教育研究用機器備品 図 書	415	実験用機器	415
計	415		415
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出			
リサーチ・アシスタント ポスト・ドクター 研究支援推進経費			
計	0		

(千円)

年 度	平成 25 年度		
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳	
		主 な 使 途	金 額
教 育 研 究 経 費 支 出			
消 耗 品 費	312	実験用消耗品	249
		実験用薬品	63
通信運搬費	1	運搬費	1
報酬・委託料	4	委託料	4
計	317		317
ア ル バ イ ト 関 係 支 出			
人件費支出 (兼務職員)			
教育研究経費支出			
計	0		0
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教育研究用機器備品 図 書			
計	0		0
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出			
リサーチ・アシスタント ポスト・ドクター 研究支援推進経費			
計	0		

(様式2)

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

(千円)

年 度	平成 26 年度			
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳		
		主 な 使 途	金 額	主 な 内 容
教 育 研 究 経 費 支 出				
消 耗 品 費	286	実験用消耗品	194	ガラス器具 スターラー等
		実験用薬品	92	試薬
通信運搬費 報酬・委託料				
計	286		286	
ア ル バ イ ト 関 係 支 出				
人件費支出 (兼務職員)				
教育研究経費支出				
計	0		0	
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)				
教育研究用機器備品 図 書				
計	0		0	
研 究 ス タ ッ プ 関 係 支 出				
リサーチ・アシスタント ポスト・ドクター 研究支援推進経費				
計	0			

(千円)

年 度	平成 27 年度			
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳		
		主 な 使 途	金 額	主 な 内 容
教 育 研 究 経 費 支 出				
消 耗 品 費	261	実験用消耗品	168	ガラス・プラスチック器具
		実験用消耗品	65	電極
		その他	28	試薬 グローブ等
計	261		261	
ア ル バ イ ト 関 係 支 出				
人件費支出 (兼務職員)				
教育研究経費支出				
計	0		0	
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)				
教育研究用機器備品 図 書				
計	0		0	
研 究 ス タ ッ プ 関 係 支 出				
リサーチ・アシスタント ポスト・ドクター 研究支援推進経費				
計	0			

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

研究テーマ 2. レアメタル含有バイオマスからの精練プロセスの開発

(千円)

年 度	平成 23 年度		
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳	
		主 な 使 途	金 額
教 育 研 究 経 費 支 出			
消 耗 品 費	155	実験用消耗品	97
		実験用薬品	58
用 品 費	50	実験用品	50
報 酬・委 託 料	63	委託料	63
計	268		268
ア ル バ イ ト 関 係 支 出			
人 件 費 支 出 (兼 務 職 員)			
教 育 研 究 経 費 支 出			
計	0		0
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教 育 研 究 用 機 器 備 品 図 書		実験用機器	
計	0		0
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出			
リサーチ・アシスタント ポスト・ドクター			
研究支援推進経費			
計	0		

(千円)

年 度	平成 24 年度		
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳	
		主 な 使 途	金 額
教 育 研 究 経 費 支 出			
消 耗 品 費	347	実験用消耗品	243
		実験用薬品	104
計	347		347
ア ル バ イ ト 関 係 支 出			
人 件 費 支 出 (兼 務 職 員)			
教 育 研 究 経 費 支 出			
計	0		0
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教 育 研 究 用 機 器 備 品 図 書			
計	0		0
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出			
リサーチ・アシスタント ポスト・ドクター			
研究支援推進経費			
計	0		

(様式2)

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

(千円)

年 度	平成 25 年度			
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳		
		主 な 使 途	金 額	主 な 内 容
教 育 研 究 経 費 支 出				
消 耗 品 費	141	実験用消耗品	141	ガラス器具等
計	141		141	
ア ル バ イ ト 関 係 支 出				
人件費支出 (兼務職員)				
教育研究経費支出 計	0		0	
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)				
教育研究用機器備品	1,276	研究用機器	383	MF10ベーシック連続式ミル
		研究用機器	893	回転式大気炉一式
図 書				
計	1,276		1,276	
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出				
リサーチ・アシスタント ポスト・ドクター 研究支援推進経費 計	0			

(千円)

年 度	平成 26 年度			
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳		
		主 な 使 途	金 額	主 な 内 容
教 育 研 究 経 費 支 出				
消 耗 品 費	60	実験用薬品	60	試薬
報酬・委託料	292	委託料	292	X線吸収微細構造解析
計	352		352	
ア ル バ イ ト 関 係 支 出				
人件費支出 (兼務職員)				
教育研究経費支出 計	0		0	
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)				
教育研究用機器備品		実験用機器		
図 書				
計	0		0	
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出				
リサーチ・アシスタント ポスト・ドクター 研究支援推進経費 計	0			

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

(千円)

年 度	平成 27 年度		
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳	
		主 な 使 途	金 額
教 育 研 究 経 費 支 出			
印刷製本費	119	印刷製本費	119
			論文別刷料
計	119		119
ア ル バ イ ト 関 係 支 出			
人件費支出 (兼務職員)			
教育研究経費支出			
計	0		0
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教育研究用機器備品			
図 書			
計	0		0
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出			
リサーチ・アシスタント			
ポスト・ドクター			
研究支援推進経費			
計	0		

研究テーマ 3. 多様なレアメタル回収・資源化に適用できる新規金属代謝微生物の取得

(千円)

年 度	平成 23 年度		
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳	
		主 な 使 途	金 額
教 育 研 究 経 費 支 出			
消耗品費	514	実験用消耗品	307
		実験用薬品	207
通信運搬費	19	運搬費	19
旅費交通費	66	研究旅費	66
報酬・委託料	17	委託料	17
計	616		616
ア ル バ イ ト 関 係 支 出			
人件費支出 (兼務職員)			
教育研究経費支出			
計	0		0
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教育研究用機器備品			
図 書			
計	0		0
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出			
リサーチ・アシスタント			
ポスト・ドクター			
研究支援推進経費			
計	0		

(様式2)

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

(千円)

年 度	平成 24 年度		
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳	
		主 な 使 途	金 額
教 育 研 究 経 費 支 出			
消 耗 品 費	698	実験用消耗品	120
		実験用薬品	578
報酬・委託料	94	委託料	94
計	792		792
ア ル バ イ ト 関 係 支 出			
人件費支出 (兼務職員)			
教育研究経費支出			
計	0		0
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教育研究用機器備品	2,467	実験用機器	997
		実験用機器	1,470
図 書			
計	2,467		2,467
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出			
リサーチ・アシスタント			
ポスト・ドクター			
研究支援推進経費			
計	0		

(千円)

年 度	平成 25 年度		
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳	
		主 な 使 途	金 額
教 育 研 究 経 費 支 出			
消 耗 品 費	379	実験用薬品	208
		実験用薬品	171
報酬・委託料	581	委託料	581
計	960		960
ア ル バ イ ト 関 係 支 出			
人件費支出 (兼務職員)	125	実験・分析補助	125
教育研究経費支出			
計	125		0
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教育研究用機器備品			
図 書			
計	0		0
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出			
リサーチ・アシスタント			
ポスト・ドクター			
研究支援推進経費			
計	0		

(様式2)

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

(千円)

年 度	平成 26 年度		
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳	
		主 な 使 途	金 額
教 育 研 究 経 費 支 出			
消 耗 品 費	140	実験用薬品 その他	108 32
報酬・委託料	367	委託料	367
計	507		507
ア ル バ イ ト 関 係 支 出			
人件費支出 (兼務職員)			時給 950円, 年間時間数 9時間 実人数 1人
教育研究経費支出	8	実験・分析補助	8
計	8		8
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教育研究用機器備品 図 書			
計	0		0
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出			
リサーチ・アシスタント ポスト・ドクター 研究支援推進経費			
計	0		

(千円)

年 度	平成 27 年度		
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳	
		主 な 使 途	金 額
教 育 研 究 経 費 支 出			
消 耗 品 費	94	実験用薬品 その他	47 47
通信運搬費 報酬・委託料	7 202	運搬費 委託料	7 155
印刷製本費	281	印刷製本費	281
計	584		584
ア ル バ イ ト 関 係 支 出			
人件費支出 (兼務職員)			
教育研究経費支出			
計	0		0
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教育研究用機器備品 図 書			
計	0		0
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出			
リサーチ・アシスタント ポスト・ドクター 研究支援推進経費			
計	0		

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

各研究テーマ共通経費

年 度	平成 23 年度		
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳	
		主 な 使 途	金 額
教 育 研 究 経 費 支 出			
旅費交通費	111	研究旅費	111
研修費	58	研修費	58
印刷製本費	22	印刷費	22
計	191		191
ア ル バ イ ト 関 係 支 出			
人件費支出 (兼務職員)			
教育研究経費支出			
計	0		0
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教育研究用機器備品			
図 書			
計	0		0
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出			
リサーチ・アシスタント			
ポスト・ドクター			
研究支援推進経費			
計	0		

(千円)

年 度	平成 24 年度		
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳	
		主 な 使 途	金 額
教 育 研 究 経 費 支 出			
旅費交通費	16	研究旅費	16
保守清掃・修繕費	92	保守清掃費	92
	215	修繕費	215
印刷製本費	54	印刷費	54
計	377		377
ア ル バ イ ト 関 係 支 出			
人件費支出 (兼務職員)			
教育研究経費支出			
計	0		0
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教育研究用機器備品	843	実験用機器	843
図 書			
計	843		843
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出			
リサーチ・アシスタント			
ポスト・ドクター			
研究支援推進経費			
計	0		

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

(千円)

年 度	平成 25 年度		
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳	
		主 な 使 途	金 額
教 育 研 究 経 費 支 出			
消 耗 品 費	1,097	実験用消耗品	586
		実験用薬品	163
		その他	348
印 刷 製 本 費	13	印刷製本費	13
旅 費 交 通 費	62	研究旅費	62
報 酬 ・ 委 託 料	225	委託費	225
計	1,397		1,397
ア ル バ イ ト 関 係 支 出			
人件費支出 (兼務職員)			
教育研究経費支出			
計	0		0
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教育研究用機器備品			
図 書			
計	0		0
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出			
リサーチ・アシスタント			
ポスト・ドクター			
研究支援推進経費			
計	0		

(千円)

年 度	平成 26 年度		
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳	
		主 な 使 途	金 額
教 育 研 究 経 費 支 出			
消 耗 品 費	501	実験用消耗品	428
		その他	73
通 信 運 搬 費	3	運搬費	3
旅 費 交 通 費	37	研究旅費	37
報 酬 ・ 委 託 料	47	委託費	47
修 繕 費	1,517	修繕費	1,517
計	2,105		2,105
ア ル バ イ ト 関 係 支 出			
人件費支出 (兼務職員)			
教育研究経費支出			
計	0		0
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)			
教育研究用機器備品	955	実験用機器	772
			183
図 書			
計	955		955
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出			
リサーチ・アシスタント			
ポスト・ドクター			
研究支援推進経費			
計	0		

(様式2)

法人番号	131024
プロジェクト番号	S1191004

(千円)

年 度	平成 27 年度			
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳		
		主 な 使 途	金 額	主 な 内 容
教 育 研 究 経 費 支 出				
消 耗 品 費	526	実験用消耗品 その他	327 199	分析機器交換部品 ガラス器具等 分析機器用ガス(液化アルゴン等) 試薬
旅費交通費	2	研究旅費	2	研究打合せ
修繕費	607	修繕費	607	実験機器修理
計	1,135		1,135	
ア ル バ イ ト 関 係 支 出				
人件費支出 (兼務職員)				
教育研究経費支出				
計	0		0	
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)				
教育研究用機器備品	2,100	実験用機器	2,100	SynergyHTX蛍光・発光測定機器
図 書				
計	2,100		2,100	
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出				
リサーチ・アシスタント ポスト・ドクター				
研究支援推進経費				
計	0			