

環境にやさしい資源回収を可能にする

## メタルバイオテクノロジー

微生物の特殊な生態のメカニズムを明らかにし、産業に役立てようという取り組みが始まっている。なかでも「メタルバイオテクノロジー」は、これまで処理が難しかった金属汚染の浄化やレアメタルの回収等を行なう新しい研究分野で、近年積極的に研究が行われている。



バイオリアクター

セレン酸が溶け込んだ液は黄色であるが、この液に微生物「NT-I」\*を投入すると、液の色が赤く変色する。これは微生物が毒性のあるセレン酸を取り込み、無毒化した元素態セレンに変えたことを示している。

\*名称については本文を参照



## 特殊な環境に適応し、生息してきた微生物

スプーン1杯(約1g)の土の中には、数億もの微生物が存在しているという。地球上のありとあらゆる環境に微生物は生息し、私たちの暮らしと密接な関係を築いている。

そもそも46億年前に地球が誕生し、およそ40億年前に生命が誕生したと考えられているが、地球上に最初に誕生した生物も微生物だと言われている。この微生物は100℃以上の環境で生き、水素や硫化水素を使って生育していたと考えられている。その後、長い年月をかけて微生物は進化し、光合成を行う微生物が登場し、酸素を生み出し、二酸化炭素が吸収された。これによって地球の大気と気候が大きく変化した。美しい地球が作り上げられていった。およそ10億年前に多細胞生物が生まれるまでの30億年間、地球の主役はずっと微生物だったのである。

微生物の中には、とても他の生物が住めるとは思えないような過酷な環境、例えば非常に強い酸性やアルカリ性の環境、塩湖のような高濃度の塩水の中、熱水が噴出するような高温環境、北極や南極等の低温環境、深海のような高圧環境などでも適応し、生きている微生物がいる。このような微生物の特殊な生態のメカニズムを明らかにし、役立てていこうという取り組みが始まっている。

## 金属類を変化させる微生物の働き

微生物は有機物の分解や合成に関わるとはわれがちだが、実際には金属を含めた無機元素に対しても様々な作用を及ぼすことが知られている。

微生物が引き起こす反応は多岐にわたり、主な反応としては、「バイオリーチング」(Bioleaching, 固相中の金属類の液相への抽出作用)、「バイオミネラライゼーション」(Biomineralization, 金属類の鉱物化作用で液相等から固相・除去)、「バイオボラタライゼーション」(Biovolatilization, 金属類を気化する形に変換し、液相・固相から除去)、「バイオソープション」(Biosorption, 細胞表面や分泌物等への吸着により液相から除去)、「バイオデトキシフィケーション」(Biodetoxification, 有害金属類の無毒化、毒性低減化)等がある。

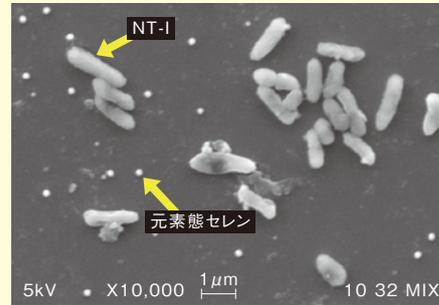
なかでも実用化が進むのがバイオリーチングで、主に銅鉱山の鉱石の製錬に用いられ、世界の銅生産の一部がこの方法で製錬されている。このバイオリーチングには鉄酸化微生物が利用されており、この微生物は鉄イオンを酸化する際に生じたエネルギーにより生育する。これを利用すると酸化反応速度が無菌状態に比べ飛躍的に向上し、銅の浸出が促進され銅の回収が効率的に進む。熱処理や薬剤を使用しないため操業費や設備費等のコストを低く抑えることができ、従来法では採

●レアメタル「セレン」の浄化回収



河口や湾内、深海等や、工場周辺や鉱山等の水や泥から環境試料を採取し、地道な作業によって目的の微生物を探す。

図1 新規微生物の探索



NT-I\*はセレン酸・亜セレン酸を自らの細胞内に取り込み、無毒化した元素態セレンを粒のような固化物として細胞外に放出する。

図2 NT-I\*株の電子顕微鏡写真

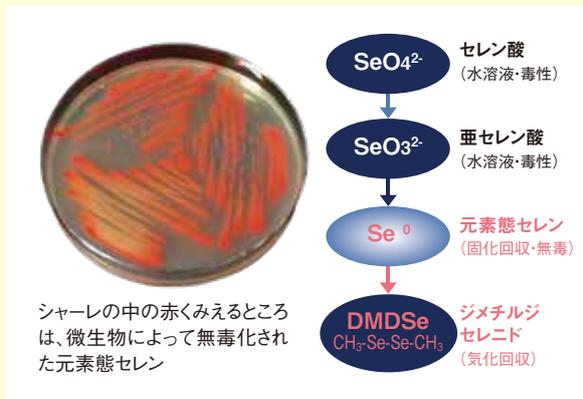


図3 微生物NT-I\*を投入した反応

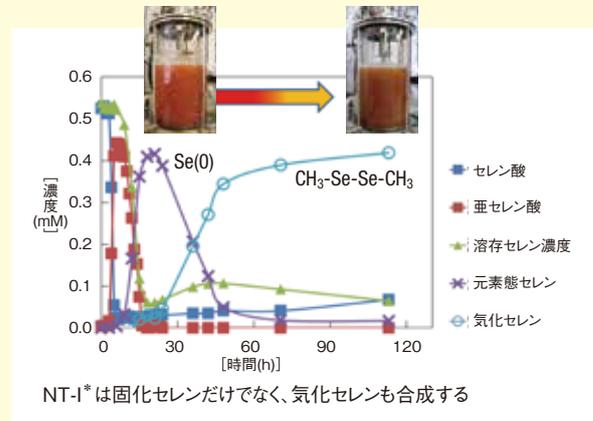


図4 固化セレン、気化セレンの合成

\*名称については本文を参照

算がとれない低品位鉱石の製錬に利用されている。

微生物は適正なエネルギー源と栄養素さえ与えておけば自己増殖できるので、使用に伴って劣化する化学触媒に比べ、経済性に優れる。高い省エネルギー性だけでなく、反応によって生じる副産物は自然の物質循環に組み込まれ、環境適合性に優れている。特にターゲットとする金属類との親和性が高い酵素が関与している場合には、低濃度域においても比較的高い反応効率が保たれ、排水のような混合物中でも特定の金属類の製錬等を行うことができる。

このような金属に対する微生物の様々な働きを幅広い分野で活用する技術は、「メタルバイオテクノロジー」と名付けられている。これは芝浦工業大学工学部応用化学科生命化学研究室の山下光雄教授らによる造語で、2007年度に公益社団法人日本生物工学会にメタルバイオテクノロジー研究部会が設置された。10年以上が経過した現在では、委員会以外でもこの用語が使われるようになってきており、優れた研究成果も報告されるようになってきた。

微生物によるレアメタルの回収・資源化

メタルバイオテクノロジーでは微生物を用いた金属回収・資源化が積極的に研究されているが、なかでも期待されているのがレアメタルの回収・資源化である。レアメタルは地殻中の存在量が比較的少量であったり、採掘と精錬が高コストであったり、流通量が少なく、入手にくい。レアメタルはハイテク産業に不可欠な材料として需要が高まっており、さらには鉄鋼材料をはじめ金属材料の機能性向上を図る添加元素として欠かせない役割を果たしている。

このレアメタルの回収・資源化にあたって、まずターゲットとしたのがセレン (Se) である。セレンは通常、合金の添加物として用いられ、半導体原料として利用されている。セレンの多くは黄銅鉱などの硫化鉱中に存在し、銅、亜鉛の精錬工程の副産物として回収される。実は日本は世界でも有数のセレン生産国であり、銅製錬会社やスクラップ精製会社がセレンを生産し、生産量の約8割が世界各国に輸出されている。セレンは生体

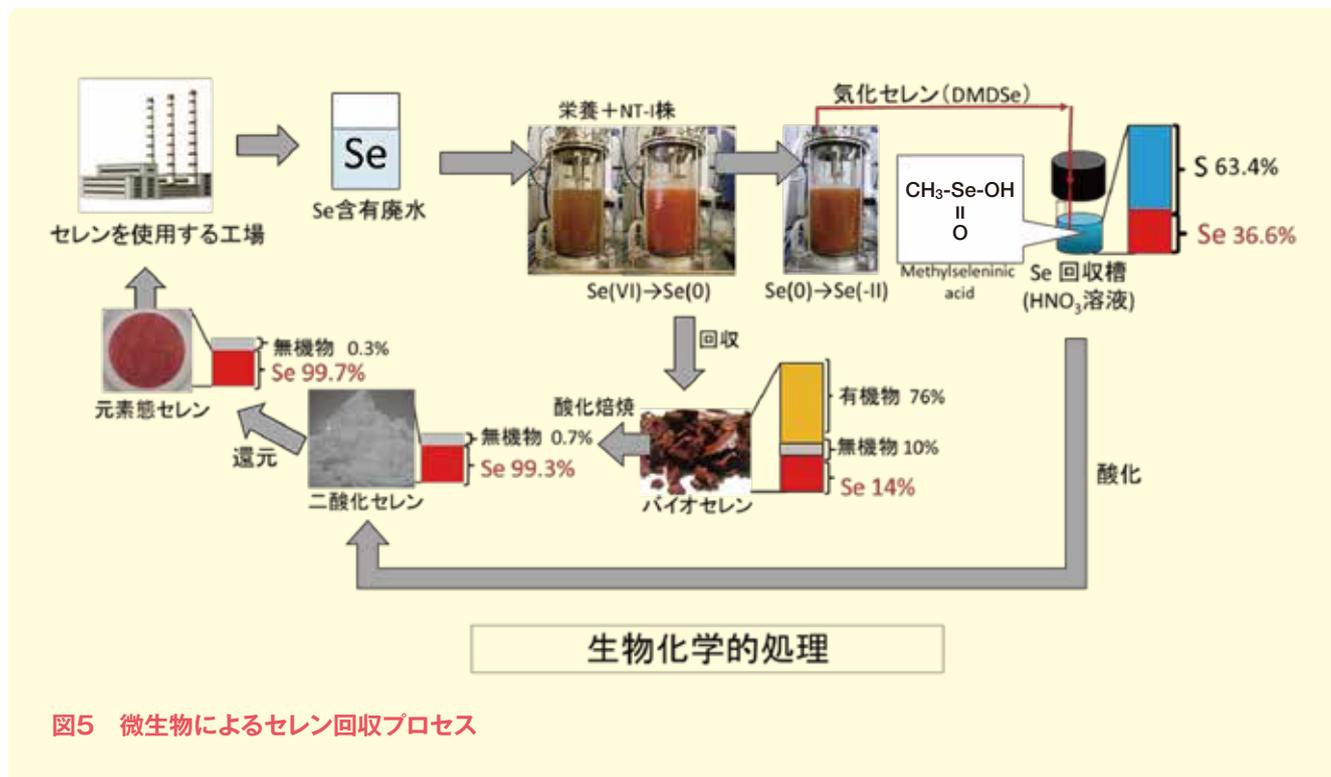


図5 微生物によるセレン回収プロセス

にとって必須の微量元素であるが毒性も有し、厳しい排水基準が定められている規制物質である。そのため凝集剤を用いてセレンを沈殿させ、産業廃棄物として処分されており、高いコストをかけて処理せざるを得ないのが現状である。

セレンは、周期表では硫黄の真下に位置する非金属で、時として半金属に属し、化学的性質は硫黄に類似している。還元しやすい硫黄に似ている元素であるため、セレンを還元(代謝)する微生物が存在するのではないかという仮説が立てられた。セレン酸還元細菌による水相からの除去・回収が可能になれば、経済性に優れた除去プロセスが実現できる。

研究はまず、セレン酸還元細菌の探索から行われた。河口や湾内、深海等や、工場周辺や鉱山等の水や泥から環境試料を採取し、スクリーニングを行い、菌種同定、機能解析が行われた。数年間に及ぶ地道な探索の結果(図1)、ついにセレン生産工場の周辺で、浄化処理された水が流れ出ている場所から、目的の微生物が発見された(図2)。この微生物は、セレンが多く存在する環境に適応し、セレン還元機能を得た微生物と考えられる。2011年、新しい微生物の発見に伴い、好気性セレン酸還元細菌*Pseudomonas stutzeri* NT-I(エヌティー・アイ)と名付けられた。「NT」は発見した学生のイニシャルから、「I」はコロニー写真から大きい微生物を選別して1番(I)と命名したことによる。この微生物が珍しいのは、毒性のあるセレン酸・亜セレン酸を取り込み、無毒化した元素態セレンという固化物を放出するだけでなく、さらに時間が経過すると、揮発性ジメ

チルジセレンドという気化物にまで変換しており、セレンを無毒な固化物と気化物に変えるという非常に稀な働きをする(図3、4)。この働きを活かして、セレンの回収プロセスが考えられた(図5)。このプロセスでは、廃水からセレンを回収し、市販品以上の純度の高いセレンへと資源化し、再び工場に原料として戻すことができる。また放出された気化セレンも捕集し、精錬することで資源化できる。希少なレアメタルを廃棄することなく無毒化して回収し、環境にやさしいプロセスで循環していくことが可能となる。

### 期待されるレアアースの回収・資源化

微生物を用いたセレンの回収技術は、他の元素にも応用することができる。なかでも特に最近、研究が進んでいるのがジスプロシウム(Dy)の回収である。Dyは高温に耐える強力な磁石材料として需要が増すレアアース(希土類元素)である。レアアースは製品中における使用量がわずかであるため、十分な回収・リサイクルがなされず、廃棄されているのが現状である。Dyは産出量の95%を中国が占めており、輸出制限の影響で供給量や価格が不安定になっているため、リサイクル技術の確立が望まれている。

研究ではまず、新規微生物の探索を目指して約40か所から環境試料を取得した。これにネオジム(Nd)約2%、Dy約0.6%、プラセオジウム(Pr)約0.5%、鉄(Fe)約50%を含有す

●レアアース「ジスプロシウム(Dy)」の回収

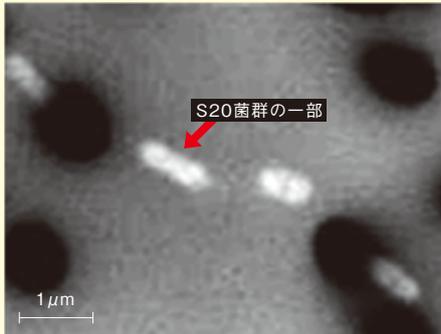


図6 S20菌群の一部(電子顕微鏡写真)

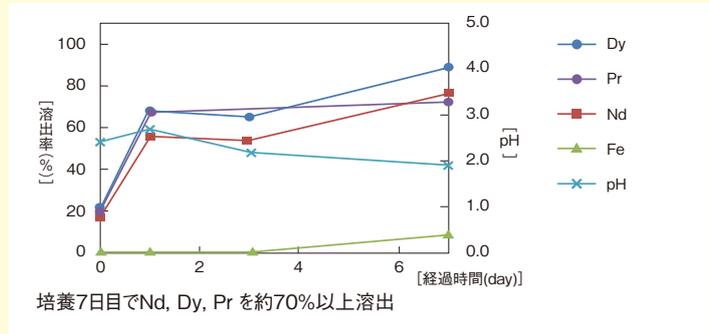


図7 S20菌群による抽出試験

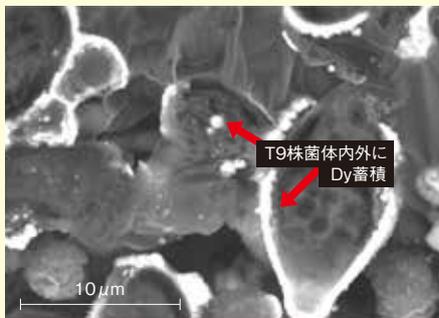


図8 Dy蓄積後の菌体断面(電子顕微鏡像)

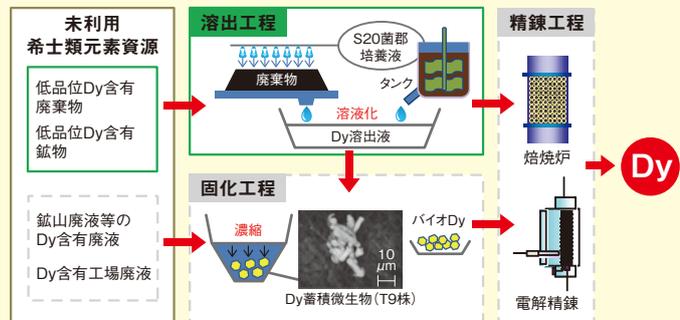


図9 微生物によるDy回収プロセス

る廃棄物を投入したところ、温水源地から採取した「S20菌群」と名付けた微生物が培養7日後に、Nd、Dy、Prだけ70%も溶出するという、特異な現象を起こすことがわかった(図6、7)。

さらにこの溶液からDyのみを抽出するため、Dyを代謝する微生物を探索した。なかでも閉山した鉱山周辺から採取した環境試料から得た「T9株」と名付けた微生物がDyを多く吸着することがわかった。T9株の菌体断面の電子顕微鏡写真(図8)では表面にびっしりとDyが蓄積し、さらに内部にも取り込んでいることがわかる。ターゲットに有効な微生物を発見することができたため、これらを用いて、廃棄物廃水からDyを回収するプロセスが考案された(図9)。自動車や家電のモータ等の廃棄物は幾つかのレアアースを含んでいるため、粉碎した後、S20菌群に漬けてバイオリッチングを行い、レアアースを溶出する。その後、その溶液にT9株を投入しDyの回収を行う。また鉱山廃液や工場廃液等のDyを多く含む場合はそのままT9株による工程のみ行う。その後、焙焼炉で焼成すればDyを資源化す

ることができる。

日本では都市で発生する大量の廃棄物のうち、携帯電話やパソコンなどの家電製品に含まれている金属資源が豊富に存在し、これは都市鉱山と呼ばれている。今後はこの都市鉱山から金属資源を回収していくことが重要となっていくだろう。微生物を用いた金属回収は環境へ負荷をかけることなく金属を回収・資源化することができるが、そのためには目的の金属に有効な微生物の取得が鍵となる。これまではマンガン、クロムの還元、バナジウムの還元、パラジウムや白金の還元、レアメタルの吸着・濃縮、焼却灰からの金属類溶出等、このような金属代謝能を有する微生物の取得が報告されている。微生物が持つ特殊な能力が明らかとなり、これを活かすリサイクル技術が確立されれば、限りある資源を無駄なく回収できる。循環型社会の構築に有効な手段の一つとして、今後メタルバイオテクノロジーが発展していくことが期待される。