

バイオハイドロメタラジーによる鉱物処理と金属汚染水処理

沖部奈緒子

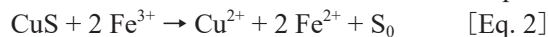
2019年の10月には、1977年より続くInternational Biohydrometallurgy Symposium (IBS) が初めて日本で開催される。この「バイオハイドロメタラジー」とは、「Bio」微生物学的反応に基づき、「Hydro」水性環境で起こる、「Metallurgy」金属生産および金属含有物/水の処理を扱う学問」であり、「微生物学的湿式製錬学」と和訳できる。「金属と微生物」または「鉱業と微生物」は意外な関係に思われがちだが、実は多様かつ深い結びつきがある。炭素や窒素のような元素が地球上で生物界と無機物質界の間を循環しているのは周知であるが、各種金属元素も同様に地球微生物学的に循環する。このような有用な「金属/鉱物と微生物間の相互作用」は、鉱業分野におけるバイオ技術として応用することができる。

上述の「相互作用」には、biosorption (吸着と吸収)、biomineralization (鉱物化)、biotransformation (変換)、bioleaching (溶出) などが含まれるが、応用面では大きく二つの方向に分けられる。一つ目は「鉱物処理」として鉱物中の有価金属を溶出するもので「固→液」方向、二つ目はその逆反応とも言えるが、「汚染水処理」として溶存重金属を不動化する「液→固」方向である。なお、前者においては、今後は天然鉱物のみならず都市鉱山資源(電気電子機器廃棄物や廃触媒)も対象と考えられ、また、後者においては、汚染金属の除去だけでなく、経済的価値を有する金属(有価金属)の回収としての意義も含まれる。

さて、昨今では特にレアメタルや貴金属がよく話題に上るなか、本稿では敢えて古典的に銅に焦点を当てることにした。というのも、人類にとって最重要金属種であり、ベースメタルと呼ばれる銅ですら、高品位鉱床の枯渇により2050年にはその供給が困難になることが予測されているからである¹⁾。

バイオハイドロメタラジー分野における鉱物処理の実用化例としては、bioleachingによる二次硫化銅鉱(例:銅藍CuS、輝銅鉱CuS₂)からの銅生産が代表的であり、従来法では経済性がなかった低品位鉱石に対して商業化をもたらした経緯がある。Bioleachingの原理は微生物学的には比較的シンプルで、鉄酸化菌が系内のFe²⁺をエネルギー源としてFe³⁺へ酸化[Eq. 1]、二次硫化銅鉱表面は化学的酸化剤であるFe³⁺に攻撃され酸化溶解する[Eq. 2]。還元されたFe²⁺は再び鉄酸化菌によりFe³⁺へと再生する[Eq. 1]。同時に硫黄酸化菌による還元型

硫黄化合物(中間体)の酸化反応が重要であり、硫酸生成により系内は酸性(pH 1.5–2.0)に保たれる[Eq. 3]。



系内は通常、好酸性の極限微生物群集(バクテリア・アーキア)により成り立つ。

しかし、二次硫化銅鉱の埋蔵量にも限りがあり、将来的な銅資源としては、難溶性ではあるが埋蔵量の多い一次硫化銅鉱(黄銅鉱CuFeS₂、硫砷銅鉱Cu₃AsS₄など)に対象がシフトしている。そのためには、微生物学的視点に加え、鉱物学的、電気化学的視点に基づく複雑な反応最適化が重要になってくる。たとえば、代表的な一次硫化銅鉱物である黄銅鉱(CuFeS₂)には、その溶解が最大化する独自の酸化還元電位(Eh)帯が存在するため、bioleaching反応を低Eh帯に保持する必要がある。これは、鉄酸化菌によるFe²⁺酸化反応によって上昇するEhを逆にある程度抑制しなければならないというジレンマを示す。また、実際の処理プロセスでは、異なる鉱物種が複雑に混在し、互いの溶解挙動に影響を与え合っている。このような複雑かつ特殊な反応を如何に最適化していくのか?研究者にとっては非常に重要かつ面白いチャレンジであるといえる。

一次硫化銅鉱の利用におけるもう一つの大きな課題が、ヒ素(As)問題である。硫砷銅鉱(Cu₃AsS₄)などに由来する高毒性のヒ素は不純物として増加傾向にあり、製錬所にてさまざまな支障をもたらしている²⁾。Bioleachingにおいては、溶出した亜ヒ酸(As(III))はAs(V)に酸化されたうえで、系内の鉄源との化合物生成により一定量は不動化されるが、残りは溶存したままである。このAs(III)含有製錬廃液のバイオ処理法として、ヒ素酸化アーキアを利用したbiomineralization[scorodite (FeAsO₄·2H₂O) 鉱物化]も検討されている。

将来の銅の安定供給を叶えるべく、このような「鉱物処理」および「汚染水処理」のためのバイオハイドロメタラジー研究の更なる発展を期待したい。

1) 国立研究開発法人 物質・材料研究機構: www.nims.go.jp/research/elements/rare-metal/probrem/dryness.html (2018/12/27).

2) 独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構: www.jogmec.go.jp/metal/metal_10_000007.html (2018/12/27).