

## バイオマイニング—効果的な鉱物分解を目指した微生物群の探索—

### Biomining—Microbial Consortia for Effective Mineral Dissolution—

沖部 奈緒子  
NAOKO OKIBE

九州大学大学院 工学研究院 地球資源システム工学部門  
〒819-0395 福岡市西区元岡744  
TEL & FAX: 092-802-3312  
E-mail: okibe@mine.kyushu-u.ac.jp

Department of Earth Resources Engineering Faculty of Engineering, Kyushu University,  
744 Motoooka Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, Japan

キーワード: バイオマイニング, 超好酸性菌, 金属資源, ヒ素  
Key words: Biomining, extreme acidophiles, metal resources, arsenic

(原稿受付 2011年9月16日/原稿受理 2011年10月3日)

#### 1. はじめに

マイニング(採鉱)は人類の歴史と共に存在する古い技術であるが、高温や毒性化学物質に依存する従来の金属抽出技術は、何世紀にもわたって環境・健康に多大の被害をもたらしてきた。日本は世界有数の金属資源消費国であるものの、その供給は完全に輸入に依存している。その上、近年の高品位鉱石の枯渇、および、それに伴う資源ナショナリズムによって、鉱石の世界的な需給バランスが懸念されている。このような背景から、従来の乾式製錬法では経済的に採算性がとれない低品位鉱石や難処理鉱石の開発を可能し、なおかつ環境負荷を低減するバイオマイニング技術の発展は今後益々重要になってくると思われる。バイオマイニングという用語は、微生物の利用により鉱物やコンцентレート(浮遊選鉱後の精鉱)からの有価金属抽出を促進するバイオリーチングやバイオオキシデーションといった生物学的湿式精錬技術に対して用いられる。現在世界の約20%の銅がバイオリーチングによって生産されているが<sup>1)</sup>、その割合は今後さらに拡大が予想される。これまでにバイオマイニングプロセスについては、様々な工学的最適化が検討されてきた。しかし、発酵・医薬品産業など他のバイオテクノロジー分野での微生物プロセスとは対照的に、バイオマイニングにおいて生物学的視点に基づいた技術向上に目が向けられるようになったのは意外にも比較的近年のことである。本稿では、バイオマイニングの紹介から、鉱物分解に関与する超好酸性微生物とその最適化についてまとめた。さらに、将来的に難処理鉱を開発していく上で重要になるとと思われる、enargite ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ )のバイオリーチングの試みについて、enargite分解に伴って溶出し、微生物に毒性を示すヒ素の不動化機構に触れ

ながら紹介する。

#### 2. バイオマイニングによる商業生産

バイオマイニングによる金属資源の商業生産は、現在、銅鉱石からの銅の溶出(bioleaching)や、鉱石やコンцентレートからの金の抽出促進(biooxidation)を主として、世界各地で行われている<sup>2)</sup>。商業的鉱物プロセスの方法としては、主にヒープバイオリーチング/バイオオキシデーション(heap bioleaching/biooxidation)(図1)やタンクバイオリーチング/バイオオキシデーション(tank bioleaching/biooxidation)(図2)などがある<sup>1)</sup>。ヒープバイオリーチング/バイオオキシデーションでは、粉碎した低品位銅鉱石を山のように堆積することから、ヒープ(heap)という言葉が用いられる。希硫酸をヒープの上からスプリンクラーで散布する。希硫酸が鉱石中を浸透すると、ヒープの中では微生物群集が構築され、鉱物酸化が促進される。下部に集まった酸性浸出液は、銅の回収後、再度ポンプでヒープ上部へ循環、散布する。主に輝銅鉱(chalcocite,  $\text{Cu}_2\text{S}$ )などの二次硫化銅鉱をターゲットとしたバイオリーチングが世界の各サイトにおいて商業生産に成功している<sup>2)</sup>。一次硫化銅鉱である黄銅鉱(chalcopyrite,  $\text{CuFeS}_2$ )は最も豊富かつ難処理性の銅鉱石であるが、現在は商業生産に向けた準備段階であり、今後のバイオリーチングのターゲットとして重要な鉱物である。また、難処理性の金含有鉱石からは金粒子をシアンで化学的溶出するが、その前処理としてヒープバイオリーチングを行っている例もある<sup>3)</sup>。一方、通気攪拌培養槽を用いるタンクバイオリーチング/バイオオキシデーションでは、温度、pH、通気などの各種パラメーターを制御でき、

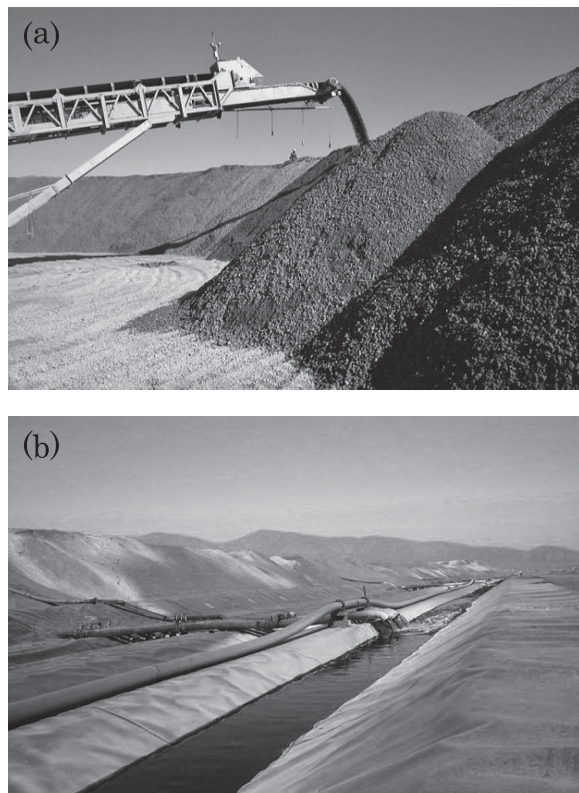


図 1. Heap bioleaching (source: BioMineWiki).

Crushed ore is stacked in heaps of several meters high (a). The heap is sprinkled with sulfuric acid and the leachate drained from the heap (b) is collected in a pond and the solution is subsequently sent for metal recovery.

ヒープの場合よりもコストがかかることから、通常、鉱物コンセントレートに対して用いられる。ほとんどの場合、タンクバイオオキシデーションによって難処理性の金含有硫化鉱コンセントレートの前処理を行っているが、唯一、ウガンダにあるプラントでは、コバルト、ニッケル、銅、亜鉛の溶出をタンクバイオリーチングによって行っている<sup>4)</sup>。

### 3. バイオマイニングに働く超好酸性微生物

バイオマイニングにおける鉱物分解反応には、至適 pH<3 ほどの超好酸性微生物が関与している。*Thiobacillus ferrooxidans* (現在 *Acidithiobacillus ferrooxidans*) の発見<sup>5)6)</sup> により鉄酸化細菌が鉱物分解に関与していることが明らかとなって以来、生理学的・系統的に多種多様な細菌・古細菌(始原菌)が報告されてきている<sup>7)</sup>。これらの微生物は、生育至適温度の範囲によって大きく中温性(20–40°C; 主に真正細菌)、中度好熱性(40–60°C; 真正細菌および古細菌)、好熱性(60–80°C; 主に古細菌)に分けられる。タンク内の反応では均一の温度が保たれるが、温度制御のないヒープ内では、鉱物分解反応による発熱や、外気などの影響を受けるため、生育至適温度の異なる多種の微生物が、ヒープに形成されるそれぞれの微小環境で生育している。したがってヒープ内では空間的にも、ヒープの年齢によっても微生物の群集構造は不均一である。



図 2. Tank biooxidation of refractory gold (source: BioMineWiki). Process conditions (e.g. aeration, temperature, pH, reagent concentration, dissolved oxygen) can be controlled in order to achieve required leaching efficiency.

鉱物プロセッシング環境は基本的に強酸性(多くの場合 pH 1.5–2.0)かつ無機・好氣的である。このような条件で優勢に生育する微生物は、鉄や還元型硫黄化合物をエネルギー源とする独立栄養性菌である。硫化鉱を酸化分解する主要微生物は鉄酸化菌であるが、硫黄や還元型硫黄化合物の酸化から得られるエネルギーは鉄のそれよりもはるかに大きいため、鉱物プロセッシング環境において硫黄酸化菌の数が鉄酸化菌の数を上回ることがある<sup>8)</sup>。

タンクバイオリーチング/バイオオキシデーション運転では、タンク内で微生物にとって均一な生育環境が提供されるが、多連式連続培養装置で鉱物分解が進行するにしたがって、溶出した金属濃度やイオン強度が上昇して行き、微生物群集に重要な影響を与える。例えば、多金属硫化鉱コンセントレートの Mintek パイロットスケールタンクバイオリーチング装置(45°C 運転)より微生物群集の解析を行った結果、3種の真正細菌(*Leptospirillum ferriphilum*, *Acidithiobacillus caldus*, *Sulfobacillus* sp.) および1種の古細菌(*Ferroplasma acidiphilum*) が単離された。微生物群集の比率は各タンクにおいて変化し、鉱物分解が最も進んだ3つめのタンクでは *Ferroplasma acidiphilum* の割合が 99% 以上に達した(図 3)<sup>8)</sup>。この例にあるように、タンク内では、その環境で最も効率的に生育する微生物が選択的に優勢になる傾向にあり、限定された数種の微生物から成る群集構造となることが多い<sup>9)</sup>。実に、実験室レベルのバイオリアクター実験において、45°C で生育する中度好熱性の真正細菌(*L. ferriphilum*, *At. caldus*, *Sulfobacillus* sp., *Acidimicrobium ferrooxidans*, *Alicyclobacillus* sp. Y004) および古細菌(*F. acidiphilum*) を様々な組み合わせにて pyrite (FeS<sub>2</sub>) 分解実験を行ったところ、最大の pyrite 分解効率を得られた微生物の組み合わせは、前述の Mintek バイオリーチング装置で見られた微生物群集構造と酷似していた<sup>10)</sup>。鉱物プロセッシング環境で主に働く微生物は独立栄養性菌であると言えるが、高効率の鉱物分解を示す微生物群集には独立栄養菌に加えて従属栄養菌/混合栄養菌の存在が見られる。このような、一見重要でないと思われる微生物は、細胞溶解物や

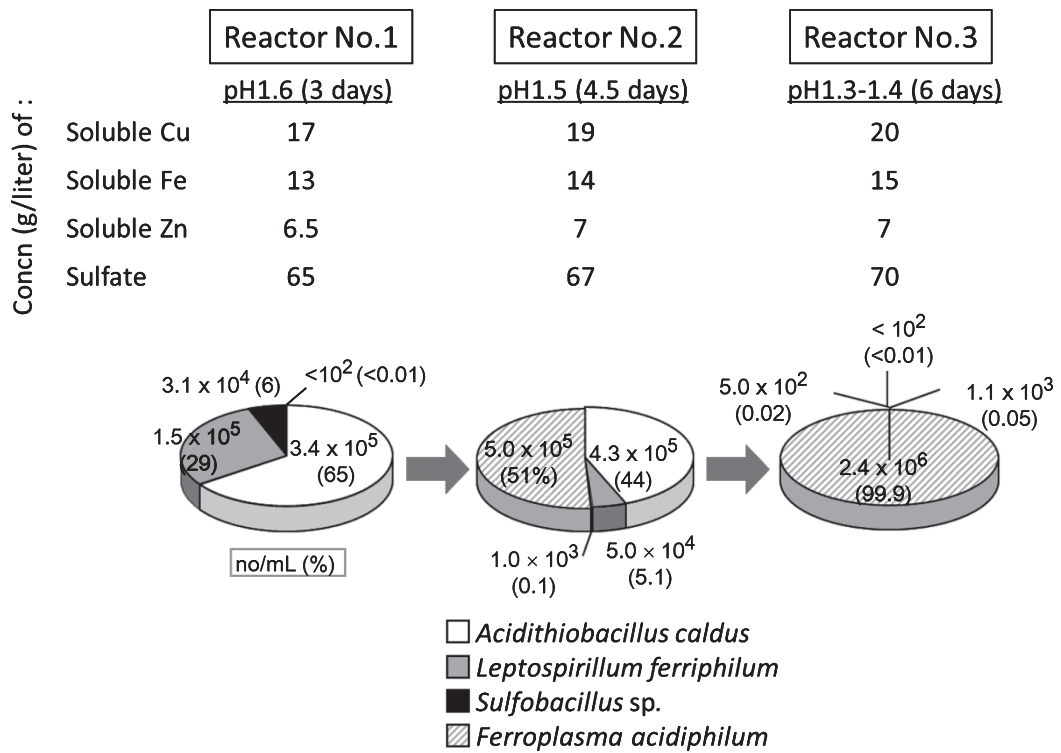


図 3. Conditions and microbial populations in the reactors of the pilot-scale biooxidation plant for polymetallic sulfide concentrate.

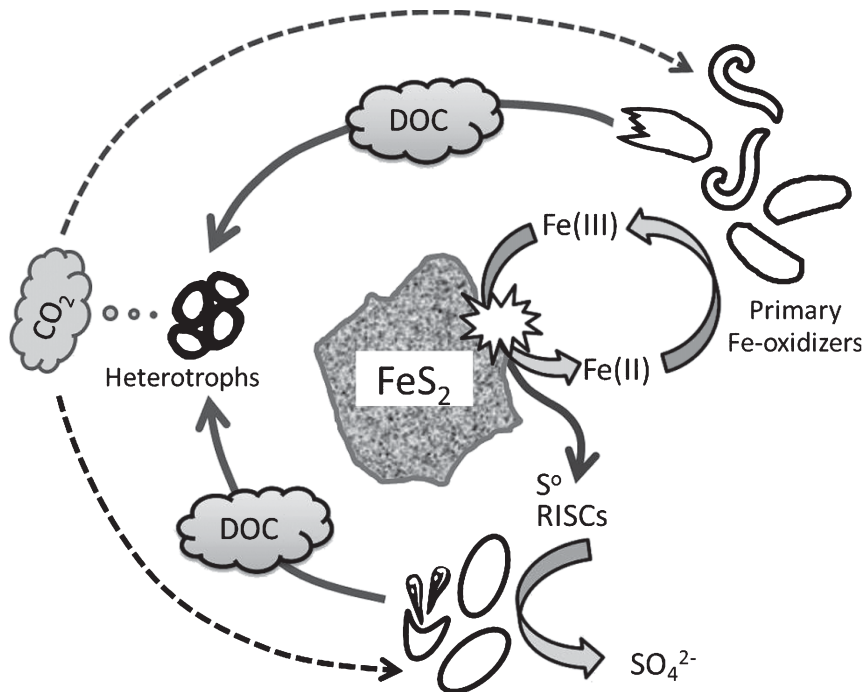


図 4. Possible interactions of biomining microorganisms in the oxidation of pyrite. Ferrous irons are oxidized by iron-oxidizers to produce ferric irons, which then chemically attack minerals (indirect mechanism). Elemental sulfur and RISCs produced as intermediates of pyrite oxidation are oxidized by sulfur-oxidizers to sulfuric acid, resulting in acidification of the media. The DOC (dissolved organic carbons) originating from autotrophs (often the dominant microbes in the population) may be utilized by mixotrophs/heterotrophs. In turn, the carbon dioxide released by mixotrophs /heterotrophs may aid autotrophic growth of iron-/sulfur-oxidizers. Some ion-oxidizing mixotrophs/heterotrophs may also contribute to the overall mineral dissolution rate.

細胞分泌物などの有機物質を資化するなど、炭素循環を介して、有機物質に対して感受性の高い独立栄養菌との相互作用をしていることが考えられる (図4)。

#### 4. 対象鉱物と微生物群集の最適化

ある鉱物プロセッシングに対して最適化された微生物群集構造は、その他の鉱物種に対しても同様の効率を示すことができるのだろうか? 筆者は、EUで行われたバイオマイニング研究に関する大規模国際プロジェクト、BioMinE (図5) に英国ウェールズ大学として参加する好機に恵まれた。そこで、新たなターゲット鉱物に対して最適な微生物群集を選定しようとする場合に、試験鉱物に対して、十分な多様性をもつ多種の微生物を混合して植菌し、リーチング実験後に安定かつ優勢に残ってくる微生物種を特定するというアプローチ ('top down' approach) を試みた (図6)<sup>11)</sup>。バイオマイニング対象となる様々なコンセントレートに対して構築される微生物群集構造の特定を T-RFLP (Terminal Restriction Fragment Length Polymorphism) および固体培地での培養を組み合わせてのことにより行った。試験に用いたコンセントレートは、pyrite (3種), chalcopyrite (3種), Cu-Ni (2種), および各1種の enargite, sphalerite, galena である。各鉱物種に対して、生理学的・系統学的に異なる中温菌または中等度好熱菌から構成される混合培養液 (表1)

を植菌し、それぞれ 30°C または 45°C にてバイオリーチング実験を行った。多くの場合 30 日間で 80% 以上の目的金属が溶出した。30°C では *At. ferrooxidans* が優勢種となって現れることが多いが、45°C では鉄酸化菌と硫黄酸化菌が揃った群集構造をとることが多く、なおかつ独立栄養性菌と混合栄養性菌/従属栄養性菌の共存が頻繁に見られる。ただし、chalcopyrite については *Sulfobacillus thermosulfidooxidans* が単一の優勢菌として確認された。つまり、鉱物種によって定着した微生物群集構造に差が見られ、効率的なリーチングに適した微生物群は、鉱物学的差異に依存することが示された (表2)<sup>11)-13)</sup>。ただし、唯一、ヒ素含有硫化鉱である enargite については、いずれの温度においても、これらの微生物による鉱物分解は認められなかった。

#### 5. ヒ素含有鉱物の開発

近年、銅鉱山の開発においては、より深部の鉱体から銅鉱石を採掘するようになり、それにとまってヒ素含有量が高くなっている。ヒ素は銅鉱石が含有する最も一般的な不純物であり、enargite ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ) や tennantite ( $\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$ ) などのヒ素含有硫化鉱が主要な鉱物として存在している。これらのヒ素含有硫化鉱は chalcopyrite, chalcocite, covellite など他の硫化銅鉱との物理選別が困難であることから、バイオリーチングは代替技術として期待される手段と言える。一方で、ヒ素が多くバイオマイニング微生物に対して強い毒性を示すことが、バイオリーチング技術の応用を難しくしている。前項に記すように、中温菌および中度好熱菌を用いた 'top down' approach による試験では、enargite をリーチングすることはできなかった。ヒ素含有硫化鉱のバイオリーチングによる開発を実現化するためには、それを可能とする微生物の模索が必要である。

効率的な enargite のリーチングを、好熱性鉄・硫黄酸化古細菌 *Acidianus brierleyi* (元々 *Sulfolobus brierleyi* と命名<sup>14)</sup>) を利用することで可能とした、九州大学の研究成果を紹介する。70°C で行った enargite リーチング実験において、*A. brierleyi* は 27 日間で 90% 以上の銅を浸出していた<sup>15)</sup>。*A. brierleyi* はヒ素の毒性をどのように回避しているのだろうか。まず、*A. brierleyi* は、ヒ素濃度を徐々に上げながら継代培養を繰り返すことにより、ヒ素耐性を獲得することができる<sup>16)</sup>。とはいえ、何等かのヒ素不動態機構がない限り、enargite のリーチングは進まない。微生物にとって毒性の高い、enargite 中の As(III) は、リーチング溶液中で As(V) に酸化され、二次鉱物として potassium jarosite や corodite を生成することで不動態化されていた。これら以外にも、リーチング実験の終盤に cupric arsenate ( $\text{Cu}_3(\text{AsO}_4)_2$ ) の生成も示唆された。リーチング実験後の固体残渣についての TEM-EDX 像をみると (図7)、視野の中央部に左から右へ斜めに走る溝が見られる。元素マッピングから、この溝に境に、左側では  $\text{Cu}_3(\text{AsO}_4)_2$  と scorodite、右側では potassium jarosite の形成が示唆される。この溝自体には重金属元素の分布はみられず、古細菌由来の EPS (Extracellular Polymeric Substances; 細胞外ポリマー) を含む有機物から構成されているのかもしれない。*A.*



図5. BioMinE (Biotechnology for Metal Bearing Materials in Europe) プロジェクト。2004年から2008年までの4年間、EUをはじめとする14か国から産官学連携の37パートナーで行ったバイオマイニング研究に関する巨大プロジェクト。EUにおけるバイオマイニング技術への関心の高さが伺える。

*brierleyi* を用いた enargite リーチングにおけるヒ素の不動態化機構のモデルを示した (図 8)。*A. brierleyi* の鉄酸化能により, Fe(II)は Fe(III)に酸化される。Fe(III)は化学的に enargite を酸化分解するが, その結果, Cu(II)と H<sub>3</sub>As(III)O<sub>3</sub>が溶出する。enargite が電子媒体と

なることにより, H<sub>3</sub>As(III)O<sub>3</sub>は Fe(III)に電子を与え, H<sub>2</sub>As(V)O<sub>4</sub><sup>-</sup>へ酸化される。EPS 層内で局所的にイオンが過飽和となった場所で, scorodite や potassium jarosite に加えて cupric arsenate や元素硫黄が生成すると考えられる<sup>15)</sup>。

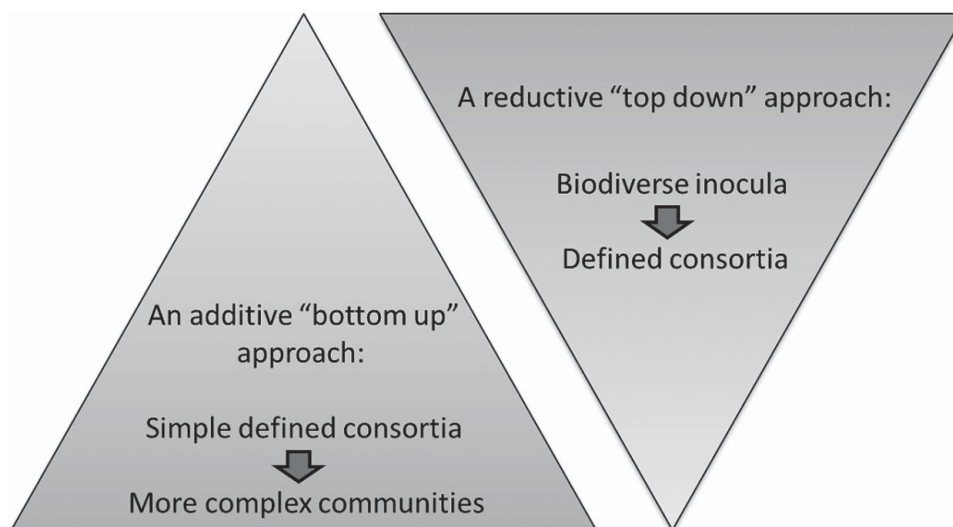


図 6. Different experimental approaches for evaluating microbial consortia for mineral bioleaching/biooxidation<sup>9)11)13)</sup> (redrawn).

表 1. Mesophilic and moderate thermophilic microorganisms used in a 'top down' approach to evaluate mineral leaching of a variety of concentrates<sup>9)11)13)</sup>.

Mesophilic Microorganism	Strain	Physiological Traits
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Type (ATCC 23270)	Autotrophic Fe <sup>2+</sup> /S-oxidizer, Fe <sup>3+</sup> -reducer
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> -like	NO37	Autotrophic Fe <sup>2+</sup> /S-oxidizer, Fe <sup>3+</sup> -reducer
<i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	CF12	Autotrophic Fe <sup>2+</sup> -oxidizer
β-Proteobacterium isolate	PSTR	(Autotrophic Fe <sup>2+</sup> -oxidizer)
<i>Ferrimicrobium acidiphilum</i>	Type (T23)	Heterotrophic Fe <sup>2+</sup> -oxidizer, Fe <sup>3+</sup> -reducer
Gram-positive iron-oxidizer	SLC66	Heterotrophic Fe <sup>2+</sup> -oxidizer
' <i>Sulfobacillus montserratensis</i> '	L15	Mixotrophic Fe <sup>2+</sup> /S-oxidizer, Fe <sup>3+</sup> -reducer
<i>Thiomonas intermedia</i>	WJ68	Mixotrophic Fe <sup>2+</sup> /S-oxidizer
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	Type (ATCC 19377)	Autotrophic S-oxidizer
<i>Acidiphilium</i> sp.	SJH	Heterotrophic Fe <sup>3+</sup> -reducer
' <i>Acidocella aromatica</i> '	PFBC	Heterotrophic Fe <sup>3+</sup> -reducer
Moderate Thermophilic Microorganism	Strain	Physiological Traits
<i>Leptospirillum ferriphilum</i>	MT6/BRGM1	Autotrophic Fe <sup>2+</sup> -oxidizer
<i>Acidimicrobium ferrooxidans</i>	TH3	Mixotrophic Fe <sup>2+</sup> -oxidizer, Fe <sup>3+</sup> -reducer
<i>Ferroplasma acidiphilum</i>	MT17	Heterotrophic Fe <sup>2+</sup> -oxidizer, Fe <sup>3+</sup> -reducer
<i>Actinobacterium</i> isolate	Y005	Heterotrophic Fe <sup>2+</sup> -oxidizer, Fe <sup>3+</sup> -reducer
<i>Sulfobacillus thermosulfidooxidans</i>	Type (DSM 9293)	Mixotrophic Fe <sup>2+</sup> /S-oxidizer, Fe <sup>3+</sup> -reducer
<i>Sulfobacillus acidophilus</i>	YTF1	Mixotrophic Fe <sup>2+</sup> /S-oxidizer, Fe <sup>3+</sup> -reducer
<i>Sulfobacillus</i> isolate	BRGM2	(Mixotrophic) Fe <sup>2+</sup> /S-oxidizer
<i>Firmicute</i> isolate	G1	(Mixotrophic Fe <sup>2+</sup> -oxidizer)
<i>Acidithiobacillus caldus</i>	Type (KU)	(Mixotrophic) S-oxidizer
<i>Acidocaldus organivorans</i>	Type (Y008)	Heterotrophic S-oxidizer, Fe <sup>3+</sup> -reducer
<i>Alicyclobacillus</i> isolate	Y004	Heterotrophic Fe <sup>3+</sup> -reducer

表 2. Microbial consortia of mesophiles and moderately thermophiles developed on a variety of mineral concentrates after 30 days leaching experiment<sup>9)11)13)</sup>.

Concentrate	Temp.	Dominant microorganisms	Minor microorganisms
Pyritic Au (1)	30°C	<i>At. ferrooxidans</i> <sup>T</sup> <i>L. ferrooxidans</i> CF12	<i>Fm. acidiphilum</i> T23 <i>Sulfobacillus</i> L15
	45°C	<i>L. ferriphilum</i> BRGM1 <i>Am. ferrooxidans</i> TH3 <i>At. caldus</i> KU	<i>Sulfobacillus</i> BRGM2 <i>Sb. thermosulfidooxidans</i>
Pyritic Au (2)	30°C	<i>At. ferrooxidans</i> <sup>T</sup>	<i>Firmicute</i> SLC66 <i>Acidiphilium</i> SJH
	45°C	<i>At. caldus</i> KU <i>Am. ferrooxidans</i> TH3	<i>Sb. acidophilus</i> YTF1 <i>Ferroplasma</i> MT17
Pyritic Co	30°C	<i>At. ferrooxidans</i> <sup>T</sup> <i>L. ferrooxidans</i> CF12	<i>Sulfobacillus</i> L15 <i>Acidiphilium</i> SJH
	45°C	<i>At. caldus</i> KU <i>Am. ferrooxidans</i> TH3	<i>Alicyclobacillus</i> Y004
Chalcopyrite (26 g/t Ag)	30°C	<i>At. ferrooxidans</i> <sup>T</sup> <i>L. ferrooxidans</i> CF12	<i>Sulfobacillus</i> L15 <i>Acidiphilium</i> SJH
	45°C	<i>Sb. thermosulfidooxidans</i> <sup>T</sup>	( <i>Sulfobacillus</i> BRGM2)
Chalcopyrite (800 g/t Ag)	30°C	<i>At. ferrooxidans</i> <sup>T</sup>	<i>Sulfobacillus</i> L15
	45°C	<i>Sb. thermosulfidooxidans</i> <sup>T</sup>	<i>Alicyclobacillus</i> Y004 <i>At. caldus</i> KU
Chalcopyrite (1500 g/t Ag)	30°C	<i>At. ferrooxidans</i> <sup>T</sup>	SLC66
	45°C	<i>Sb. thermosulfidooxidans</i> <sup>T</sup>	—
Cu-Ni (1)	30°C	<i>At. ferrooxidans</i> <sup>T</sup>	<i>Acidiphilium</i> SJH
	45°C	<i>At. caldus</i> KU <i>Am. ferrooxidans</i> TH3	<i>Sb. thermosulfidooxidans</i> <sup>T</sup>
Cu-Ni (2)	30°C	<i>At. ferrooxidans</i> <sup>T</sup> <i>L. ferrooxidans</i> CF12	<i>Fm. acidiphilum</i> T23 <i>Firmicute</i> SLC66 <i>Acidiphilium</i> SJH <i>Sulfobacillus</i> L15
	45°C	<i>At. caldus</i> KU <i>Am. ferrooxidans</i> TH3 <i>L. ferriphilum</i> BRGM1	<i>Sulfobacillus</i> BRGM2 <i>Sb. acidophilus</i> YTF1
Enargite	30°C	—	—
	45°C	—	<i>Sulfobacillus</i> sp.
Sphalerite	30°C	<i>At. ferrooxidans</i> <sup>T</sup> <i>L. ferrooxidans</i> CF12	<i>Firmicute</i> SLC66 <i>Acidiphilium</i> SJH
	45°C	<i>At. caldus</i> KU <i>Am. ferrooxidans</i> TH3	<i>Sulfobacillus</i> BRGM2
Galena	30°C	<i>At. ferrooxidans</i> <sup>T</sup> <i>L. ferrooxidans</i> CF12	<i>Acidiphilium</i> SJH
	45°C	<i>L. ferriphilum</i> BRGM1 <i>Am. ferrooxidans</i> TH3 <i>Sb. thermosulfidooxidans</i> <sup>T</sup> <i>Sulfobacillus</i> BRGM2 <i>At. caldus</i> KU	<i>Firmicute</i> G1

この enargite リーチングの例にみられるように、結果的に特殊な条件下（微生物にとって毒性の高いイオン存在下、高温、超低 pH など）で鉱物プロセッシングを試みるという場合は、利用できる微生物種には限りがある。つまり、‘top down’ approach と相反する、理論的に一つずつ微生物を選択・試験していく ‘bottom up’ approach（図 6）を提案する一つの例と言える。

## 6. おわりに

高品位鉱石の枯渇とともに、我々に必要な金属資源の開発は、経済的に採算の取り難い低品位鉱石や難処理鉱

石への依存が大きくなっている。バイオマイニングでも商業的生産に成功している銅をはじめ、金、ニッケル、コバルト、亜鉛などの有価金属は、微生物学的な最適化を考えることによって、それぞれ異なる鉱物種からの回収を効率化することができる。世界の最大規模の銅鉱床のほとんどは低品位の斑岩銅鉱床であり、世界の銅生産の 50–60% を供給している<sup>17)</sup>。斑岩銅鉱床には難処理性の一次硫化銅鉱やヒ素含有硫化鉱も含まれ、これらの効果的な鉱物分解を可能とする微生物の探索 / 最適化、およびそのメカニズムを明らかにしていくことが出来れば、将来的に難処理性鉱物を金属資源として開発することが可能になる。

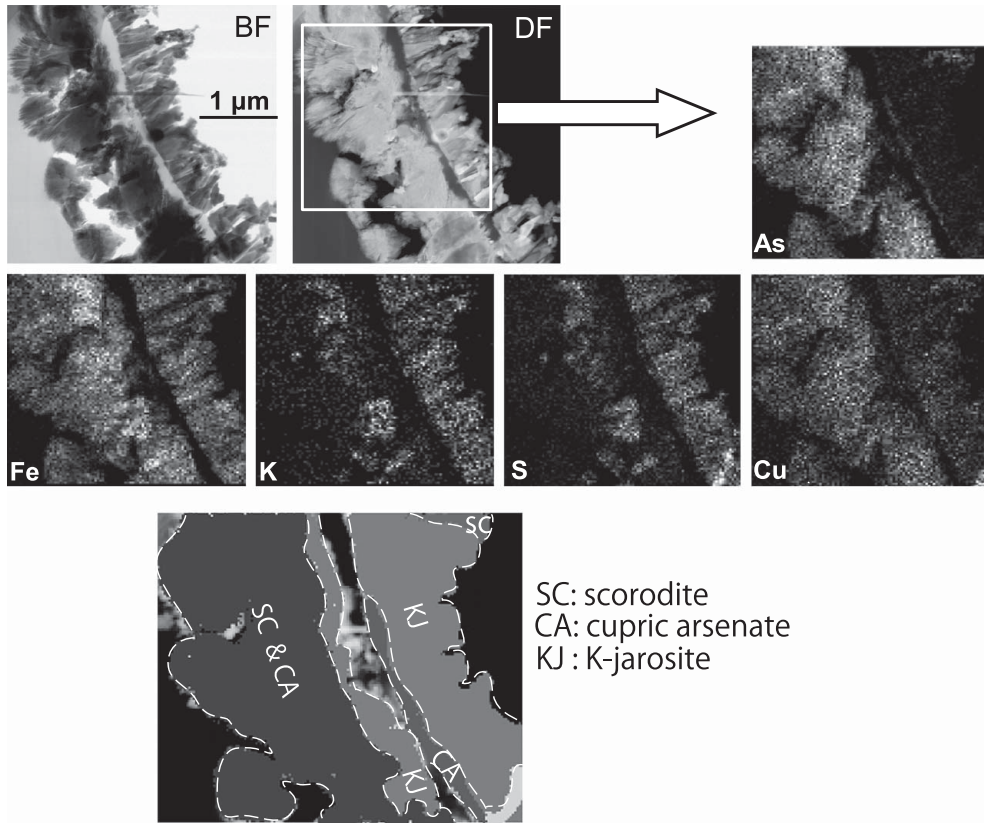


図 7. Bright field (BF) and dark field (DF) TEM images and elemental mapping of the solid residue after 27-days enargite leaching with *A. brierleyi* at 70°C<sup>15)</sup> (redrawn).

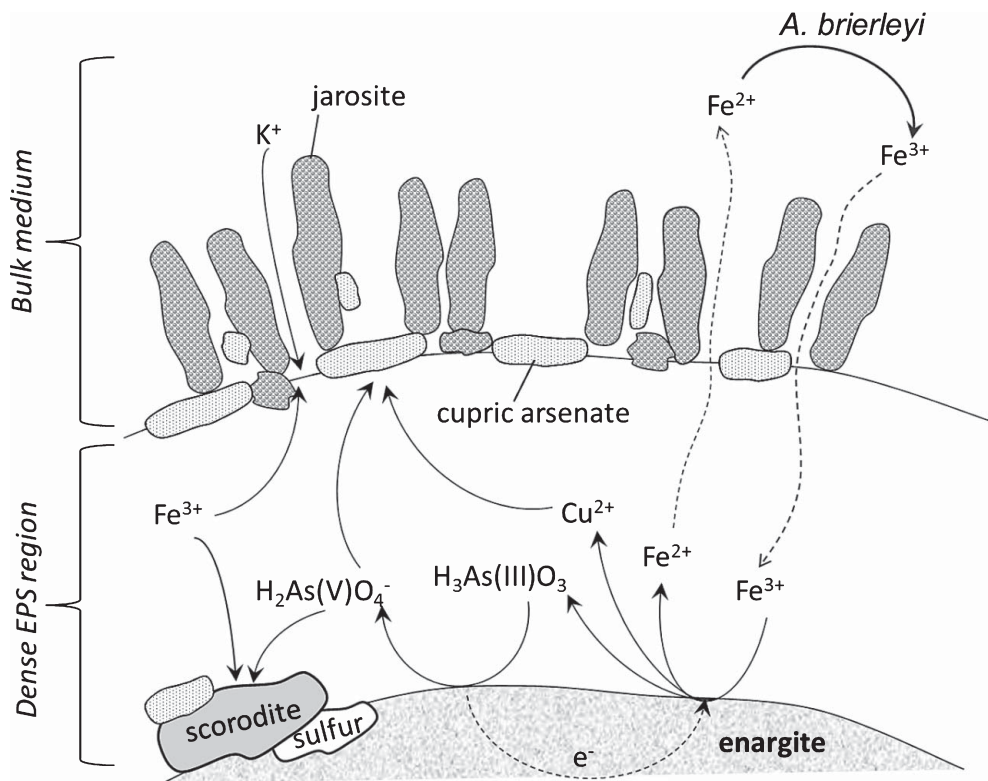


図 8. Schematic model of enargite leaching with *A. brierleyi*<sup>15)</sup> (redrawn).

Sequential formation of secondary compounds on the enargite surface is shown. Enargite is chemically oxidized by  $\text{Fe}^{3+}$ , and the resultant  $\text{Fe}^{2+}$  is reoxidized by *A. brierleyi*. The mineral surface oxidation releases  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  into the solution phase, while the S-entropy is oxidized to elemental sulfur that accumulates on the mineral surface. The enargite surface may act as a catalyst to oxidize  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  to  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$ . Arsenate and  $\text{Fe}^{3+}$  can form scorodite, while in the absence of  $\text{Fe}^{3+}$ , cupric arsenate may precipitate instead. In the bulk medium,  $\text{Fe}^{3+}$  precipitates as jarosite. The EPS layer may function to sequester cations, resulting in formation of complexes with metal cations.

## 文 献

- 1) Brierley, C. L. 2008. How will biomining be applied in future? T. Nonferr. Metal. Soc. 18:1302–1310.
- 2) Watling, H. R. 2006. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides – A review. Hydrometallurgy. 84: 81–108.
- 3) Logan, T. C., T. Seal, and J. A. Brierley. 2007. Whole-ore heap biooxidation of sulfidic gold-bearing ores. Biomining, Rawlings, D. E. and D. B. Johnson, eds. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 113–138.
- 4) <http://www.kccl.co.ug/>
- 5) Colmer, A. R. and M. E. Hinkle. 1947. The role of microorganisms in acid mine drainage: A preliminary report. Science. 106:253–256.
- 6) Colmer, A. R., K. L. Temple, and M. E. Hinkle. 1950. An iron-oxidizing bacterium from the acid drainage of some bituminous coal mines. J. Bacteriol. 59:317–328.
- 7) Rawlings, D. E. Characteristics and adaptability of iron- and sulfur-oxidizing microorganisms used for the recovery of metals from minerals and their concentrates. 2005. Microb. Cell. Fact. 4:13
- 8) Okibe, N., M. Gericke, K. B. Hallberg, and D. B. Johnson. 2003. Enumeration and characterization of acidophilic microorganisms isolated from a pilot plant stirred-tank bioleaching operation. Appl. Environ. Microbiol. 69:1936–1943.
- 9) Rawlings, D. E. and D. B. Johnson. 2007. The microbiology of biomining: Development and optimization of mineral-oxidizing microbial consortia. Microbiology. 153:315–324.
- 10) Okibe, N. and D. B. Johnson, 2004. Biooxidation of pyrite by defined mixed cultures of moderately thermophilic acidophiles in ph-controlled bioreactors: Significance of microbial interactions. Biotechnol. Bioeng. 87:574–583.
- 11) Okibe, N., Y. Liu, K. B. Hallberg, and D. B. Johnson. 2008. Development of microbial consortia for bioleaching: Investigation of a “Top Down” approach, using different mineral concentrates and ores. BioMinE Deliverable DII.4: Microbial consortia and mineral processing. 196–253.
- 12) Johnson, D. B., Y. J. Liu, N. Okibe, K. Coupland, and K. B. Hallberg. 2007. Concentrate mineralogy dictates the composition of bioleaching microbial consortia. Adv. Mat Res. 20–21:403–404.
- 13) Morin, D., T. Pinches, J. Huisman, C. Frias, A. Norberg, and E. Forsberg. 2008. Progress after three years of biomine-research and technological development project for a global assessment of biohydrometallurgical processes applied to european non-ferrous metal resources. Hydrometallurgy. 94:58–68.
- 14) Brierley, C. L. and J. A. Brierley. 1973. A chemoautotrophic and thermophilic microorganism isolated from an acid hot spring. Can. J. Microbiol. 19:183–188.
- 15) Takatsugi, K., K. Sasaki, and T. Hirajima. 2011. Mechanism of the enhancement of bioleaching of copper from enargite by thermophilic iron-oxidizing archaea with the concomitant precipitation of arsenic. Hydrometallurgy. 109: 90–96.
- 16) Okibe *et al.*, unpublished data.
- 17) Sinclair, W. D. 2007. Porphyry deposits. Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods. Goodfellow, W. D. ed. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication No. 5, 223–243.