

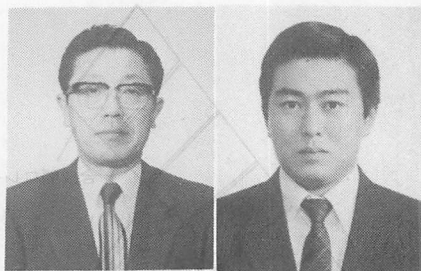
■ 解 説 ■

鉱業における微生物の利用

Use of Microorganisms in Mineral Industry

原 田 種 臣*・国 吉 信 行**

Taneomi Harada, Nobuyuki Kuniyoshi



1. ま え が き

鉱業すなわち地下資源を探索・採掘・選別・製錬する産業は、つい30年ほど前まで微生物とは全く無縁と考えられていた。しかし、一部鉱山の坑水から沈殿銅として回収される銅は、それが鉱体から溶出する過程で微生物と深いかわりをもつことが1957年に明らかとなつて以来、鉱業でも微生物への関心が急速に高まり、その働きを積極的に利用する技術が開発されるようになった。

現在、鉱業での微生物利用の研究は、採掘・選別・製錬・坑水処理の各分野で進められている。なかでも、低品位の銅鉱・ウラン鉱の採掘・選別に代わるバクテリアリーチングや、坑水処理費低減のための Fe^{2+} の微生物酸化は、すでに成功裏に工業化されている。また最近小坂製錬所でも、工程水中の Fe^{2+} の酸化に微生物法を導入し、注目すべき成果を収めた。

本稿の標題に関連する文献は膨大な数に達する。そのうち過去10年以内に出版され、解説的な内容をもつものを例示すれば次のようである。書籍では伊藤の「バクテリアリーチング」¹⁾が、この技術の基礎と応用を平易に記述している。総説・解説の類では、Brierleyの「Bacterial leaching」²⁾と「Microbiological mining」³⁾(今泉訳：微生物による採鉱)が内容豊富である。また須田の「バイオテクノロジーと鉱業」⁴⁾、鴻巣の「バクテリアリーチングと生物学との関連」⁵⁾、高森の「微生物を使った鉱物処理」⁶⁾、もそれぞれ興味深い。筆者らも「鉄酸化細菌による硫化鉱物の酸化現象」⁷⁾と題する総説を最近発表した。

本稿では、利用される微生物とその働き、バクテリアリーチング、工程水および坑水処理への微生物の利用の各項の順で、鉱業における微生物利用の現状と研

究の動向を概観することとした。

2. 利用される微生物とその働き

2.1 微生物の種類

鉱業で用いる微生物は学問上細菌 (bacteria) に分類されるもので、そのうちとくに重要なものは *Thiobacillus ferrooxidans* (以下 *T.f.* と略記する) と *Thiobacillus thiooxidans* (*T.t.* と略記する) である。そして両者のうち前者が一層多くの場合に用いられる。これらは化学合成独立栄養細菌、つまり還元型無機化合物の酸化によりエネルギーを獲得し、 CO_2 を主要炭素源とする菌種に属する。*T.f.* も *T.t.* も $0.5 \times 1.0 \sim 2.0 \mu m$ 程度の大きさの桿状菌である⁸⁾。参考のため、*T.f.* の走査型電子顕微鏡写真を図-1に示す。

その他の菌として *Thiobacillus concretivorus*, *Leptospirillum ferrooxidans*, *TH*, *Sulfolobus* 属菌などの有用性が指摘されている。

2.2 細菌の増殖に影響する主な因子

(1) 栄養分

細菌に必要な栄養分は、エネルギー源、炭素源、窒

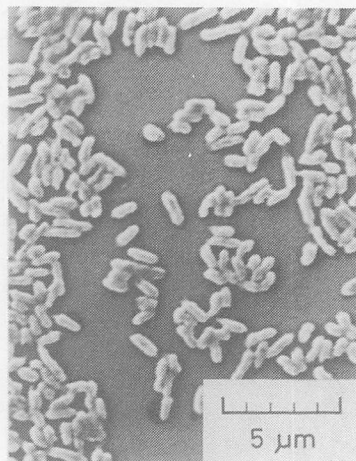


図-7 *Thiobacillus ferrooxidans* (*T.f.*) の走査型電子顕微鏡写真

* 早稲田大学理工学部資源工学科教授

〒160 東京都新宿区大久保3-4-1

** 旭硝子(株)資材・物流部原料資源グループ

素源、無機塩類、ビタミンなどである。

T.f. は 1) 第 1 鉄や、2) 硫黄とその化合物の酸化を、*T.t.* は 2) の酸化をエネルギー源とし、前述のように CO_2 を主要炭素源とする。窒素源はアンモニウム塩である。

無機元素としては P, S, Mg, K が必要であり、普通これらの塩類を添加した培地を使用する。*T.f.* に対する 9 K 培地は代表的なもので、 $(NH_4)_2SO_4$ 3.0g, KCl 0.10g, K_2HPO_4 0.50g, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.50 g, $Ca(NO_3)_2$ 0.01g, 蒸溜水 700ml, 10N H_2SO_4 1.0 ml, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 14.74% (W/V) 溶液 300ml の成分をもつ。なおバクテリアリーチングのような操業では、無機元素は母岩中から供給されるので原則として不要である。

(2) pH

細菌の生息に適した pH は通常中性付近から弱アルカリ性までであるが、*T.f.* や *T.t.* は好酸性である。両者に最適の pH は 2.0 ~ 3.5 とされる^{11) 9)}。

(3) 温度

最適温度は、その細菌が生息可能な温度の上限より数度低い¹⁰⁾。*T.f.* に最適の温度は 30 ~ 35°C^{11) 11) 12)}、*T.t.* のそれは 28 ~ 30°C¹⁾ である。*Sulfolobus* 属のある種の菌は極度に好熱・好酸性で、80°C 以上の高温下で Fe や S を酸化する機能をもつ。

(4) 鉱物に対する菌体の馴養

Kingma と Silver¹³⁾ は、*T.f.* により黄銅鉱および、方鉛鉱を酸化させる場合、黄銅鉱で前培養した菌は黄銅鉱に対し、方鉛鉱で前培養した菌は方鉛鉱に対して活性を示すと述べている。

Roy と Mishra¹⁴⁾ は、黄鉄鉱を *T.f.* で酸化させる場合、 Fe^{2+} で前培養した菌では誘導期が認められるが、黄鉄鉱で前培養した菌ではそれが消滅することを示した。

筆者ら¹⁵⁾ も、*T.f.* の前培養条件により黄鉄鉱の酸化浸出速度が大幅に変わることを認めた。すなわち、

A 法：9 K 培地で 1 週間培養

B 法：9 K 培地による 3 日間の培養を 5 回以上繰り返す。

C 法：B 法で得られた培養液を、-270 mesh の黄鉄鉱 1 W / V % を加え Fe 量を調節した 9K 培地にて 1 週間培養後、さらに黄鉄鉱 2 W / V % 加えて 1 週間培養

の 3 条件を比較すると、A、B ともに浸出開始まで約 1 週間の誘導期を要したが、C はほとんど誘導期なしで浸出が始まったので、浸出量は最大となった。

以上のことから、対象とする鉱物への菌体の馴養は、

重要な因子と判断できる。

(5) 阻害物質^{16) 17)}

T.f. に対する阻害作用が最も強い重金属イオンは Hg^+ 、 Hg^{2+} および Ag^+ で、 Sn^{2+} がそれに次ぐ。陰イオンでは砒酸、亜砒酸、硫酸イオン以外が有害で、とくにフッ素、シアン、モリブデン酸、アジドなどはその作用が強い。また、硝酸イオンや塩素イオンも阻害作用を与える。

2.3 細菌による鉱物の酸化機構

T.f. の作用で酸化される鉱物を示すと表 1 のようになる。

酸化の機構は次の二つに大別されるが、多くの場合両者は併存すると解釈されている。

(1) 間接酸化機構

硫化鉱物の酸化は純化学的な反応であり、細菌はその反応のサイクルで酸化剤が生成する際に触媒作用をするというのがこの機構の骨子である。

黄鉄鉱を例にとれば、反応は次式のように進む。

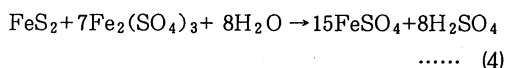
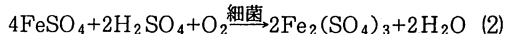
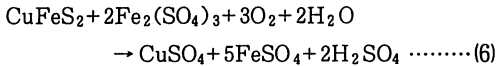
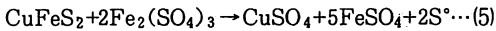


表 1 *T.f.* により酸化される鉱物 (Duncan ら¹⁸⁾ による)

鉱物名	化学組成	
硫磺鉄鉱	Arsenopyrite	$Fe_2As_2S_2$
斑銅鋼	Bornite	Cu_5FeS_4
黄鉄ニッケル鉱	Bravoite	$(Ni, Fe)S_2$
輝銅鉱	Chalcocite	Cu_2S
黄銅鉱	Chalcopyrite	$CuFeS_2$
輝コバルト鉱	Cobaltite	$CoAsS$
銅藍	Covellite	CuS
硫磺銅鉱	Enargite	$Cu_3(As, Sb)S_4$
白鉄鉱	Marcasite	FeS_2
鉄閃亜鉛鉱	Marmatite	$(Zn, Fe)S$
針ニッケル鉱	Millerite	NiS
輝水鉛鉱	Molybdenite	MoS_2
雄黄	Orpiment	As_2S_3
黄鉄鉱	Pyrite	FeS_2
磁硫鉄鉱	Pyrrhotite	Fe_7S_8
閃亜鉛鉱	Sphalerite	ZnS
黄錫鉱	Stannite	Cu_2FeSnS_4
四面銅鋼	Tetrahedrite	$Cu_8Sb_2S_7$
紫ニッケル鉱	Violarite	$(Ni, Fe)_3S_4$

(2)式に示すように、細菌はそれをもつ酵素の触媒作用により Fe^{2+} を Fe^{3+} に酸化する。細菌なしの場合この反応は緩慢で、*T.f.*の存在はpH 2.2, 31°Cの条件下で反応を50万倍に加速するといわれる¹⁹⁾。こうして生じた Fe^{3+} が(3)(4)式のように黄鉄鉱を酸化し、再び硫酸鉄(II)が生成する。

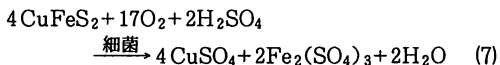
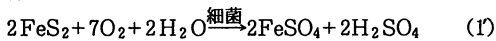
黄銅鉱の場合も同様 Fe^{3+} が酸化剤となり、(5)(6)式のように反応が進む。



なお(3)(5)式で生成した硫黄は、*T.t.*が存在する場合急速に酸化されて硫酸を生ずる。すなわち*T.f.*と*T.t.*の共生は、黄鉄鉱や黄銅鉱の酸化分解を相乗的に促進させる。

(2) 直接酸化機構

菌体が硫化鉱物表面に付着し、直接的に酸化するという機構である。したがって(1)式や(7)式に対しても触媒作用を与える。



菌体と鉱物表面との間で微小な電池が形成され、鉱物成分の鉄や硫黄から、電子が細胞膜内の蛋白質を経て酵素に伝達されるためと解釈されている^{3) 20)}。

*T.f.*は*T.t.*ほど強力ではないが、無機硫黄化合物の酸化活性をもつため、菌による S^{2-} の酸化に基づくNiS, CoS, Sb_2S_3 , CuSなどの酸化現象も知られている^{20) 21) 22)}。鉄を含まぬ硫化鉱物の酸化浸出や、浸出後の鉱粒面への菌体の付着を示す電子顕微鏡写真などから、直接機構の存在が確信されている。

3. バクテリアリーチング

3.1 リーチングの形式¹⁾

(1) ダンプリーチング (dump leaching)

選鉱場で処理するに値しない低品位の塊を坑外に堆積し、浸出を行う方法をいう。浸出後の貴液の集水率を高めるため、堆積地の地層は不透水性であることが望まれる。低品位塊は底部より階段状に積み上げ、その上部は平らにならず、上部から浸出液を散布し、浸出が進み貴液の品位が低下すると、その上に新たな堆積層を設け浸出を行ってゆく。アメリカなどで大規模にダンプリーチングを実施している鉱山の中には、階段全体の高さが300mにも達するところがある。

(2) ヒープリーチング (heap leaching)

ダンプリーチングで対象とするものよりも価値の高い鉱石を、より計画的に堆積浸出する方法である。この方法では、鉱山周辺の比較的平らな場所を選び、粘土やアスファルトなどを用いて堆積鉱からの荷重に耐えうる不透水層を構築する。また貴液の集水管も埋設する。

(3) インプレースリーチング (in-place leaching)

原位置浸出または鉱床内浸出と訳せよう。低品位の残存鉱床や、未採掘の鉱床から採掘作業を伴わずに金属を回収する方法である。浸出液の流動性や浸出液と鉱石の接触面積を高めるため、必要に応じて鉱体内を破碎する。またその危険性がある場合には遮断壁を設けるなどして、浸出液が浸出対象区域外に逸水することを防止する。

3.2 銅およびウランの回収³⁾

(1) 銅の回収

バクテリアリーチングにより回収される銅量は、全世界の産銅量の約20%に達している。ダンプ、ヒープ、インプレースのどの方式でも、酸性水を通させると鉱石中のあちこちに生息する*Thiobacillus*属菌が増殖を開始する。そして2.3で述べた機構にしたがい銅の酸化浸出速度を大幅に増大させる。生成した硫酸銅は浸出液により岩石から洗い落され、貴液捕収池に集められる。沈殿銅工場では、 Fe^{2+} と銅を置換させるセメンテーション反応により、貴液中の Cu^{2+} を沈殿分離する。鉱山によっては、沈殿銅方式の代わりに溶媒抽出法を採用しているところもある。

わが国では、小坂鉱山と土畑鉱山がインプレースリーチングを実施してきたが、前者は現在その操業を停止している。

(2) ウランの回収

ウラン鉱の場合には、主にインプレースリーチングが採用されている。ウラン浸出においては、細菌がウラン鉱物に作用するのではなく、黄鉄鉱や Fe^{2+} から、 Fe^{3+} を生成する働きをする。この Fe^{3+} が U^{4+} の鉱物に作用して、希硫酸に可溶の U^{6+} に変換するのである。

わが国では、人形峠鉱山でバクテリアリーチングの試験を行い、その有効性が示された。

3.3 他の金属の回収の可能性^{1) 3)}

現在のところ、バクテリアリーチングは銅とウランの回収に利用されているにすぎないが、表1に示したように、この方法は硫化鉱物を構成する多種の金属に

対し応用の可能性をもっている。

たとえば米国には、低品位のニッケルを含む70億トン以上の巨大な硫化物鉱床がある。現在の採掘・選別・製錬技術では効率が低く、環境に対しても有害な影響が予想されるため、この鉱床は開発されていない。バクテリアリーチング技術の進歩によって、このニッケルだけでなく、同じ鉱床に含まれるコバルトのいくぶんかが回収されるようになることが期待できる。

そのほかビスマス、マンガン、金などの回収の可能性が報告されている。

3.4 石炭の脱硫

石炭中の硫黄分は、有機質硫黄と、硫化鉄鉱物（黄鉄鉱・白鉄鉱）および硫酸塩鉱物（石膏など）の形で含まれる無機質硫黄の二つに大別される。無機質硫黄のうち硫酸塩鉱物が占める割合は、一般にごくわずかである。細菌による脱硫の主対象は硫化鉄鉱物、とりわけ産出頻度の高い黄鉄鉱である。

Silvermanら²³⁾は、石炭化度の異なる数種の石炭の *Ferrobacillus ferrooxidans* (*T.f.*と同一種) による脱硫を試みた。石炭の粒度が微細であれば脱硫は効果的で、黄鉄鉱の80%が除去された。石炭化度による脱硫性の順位は、瀝青炭>亜瀝青炭>亜炭となったが、その原因は、石炭化度の低いものほど酸を中和する作用が強いためと解釈された。

DetzとBarvinchak²⁴⁾は、*T.f.* および好熱性の *Sulfolobus* 属菌により石炭の脱硫が有効になされることを認め、その操業コストを試算し、従来法に比べこの方法がより安価であることを示した。

Hoffmannら²⁵⁾は *T.f.* および *T.t.* を用いた実験で、石炭中の黄鉄鉱の浸出速度は、黄鉄鉱の露出表面積に比例することを認めた。また黄鉄鉱質硫黄分の比較的高い試料を用い、パルプ濃度20%以下、粒径74 μm以下、浸出日数8~12日で、90~98%の脱硫を達成した。

KargiとRobinson²⁶⁾も好熱性の *Sulfolobus acidocaldarius* を用いて石炭中の黄鉄鉱質硫黄(含有率2.1%)の除去を試み、その90%以上の除去に成功したと述べている。

国内では三池炭の脱硫に関する原田らの報告^{27) 28)}がある。-625mesh (-20 μm) に粉砕した試料を *T.f.* により5週間浸出して、無機質硫黄の67%が除去された。この程度の浸出率にとどまった理由は、この石炭試料中の硫化鉄(黄鉄鉱・白鉄鉱)の多くが1 μm前後の微粒子として存在するので、石炭に包まれたまま浸出液に接触しない硫化鉄粒子があるためと判断して

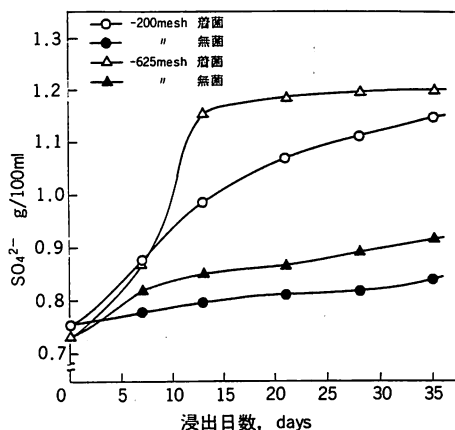


図-2 *T.f.* による三池炭中の黄鉄鉱および白鉄鉱の浸出²⁸⁾

いる(図-2参照)。

最近では有機質硫黄も細菌により分解する可能性がでてきているので、脱硫に関する研究の今後の発展が期待される。

3.5 他の処理技術との組合せ

(1) 湿式製錬との組合せ

TormaとSubramanian²⁹⁾は、硫化鉛精鉱中の銅、カドミウム、亜鉛の分離法として次の方法を考案した。すなわち、鉛精鉱を *T.f.* で処理して鉄、銅、カドミウム、亜鉛を浸出液中に溶解し、鉛を $PbSO_4$ の形で残渣として分離後、浸出液から有価金属を個別に回収する。Cartaら³⁰⁾も、複雑硫化鉱の処理法として同様の方法を提示している。

(2) 青化製錬との組合せ

LawrenceとBruynesteyn³¹⁾は、青化製錬の前に *T.f.* で鉱石中の黄鉄鉱を酸化させると、金、銀の実収率が大幅に向上することを報告している。すなわち *T.f.* を用いない場合の3試料の金実収率は24%、60~78%、80~86%であったが、*T.f.* 使用により黄鉄鋼の80~88%を分解したのちでは、それぞれが81%、90%、98%以上となった。

(3) 選択造粒との組合せ

Capesら³²⁾は、石炭中の黄鉄鉱を除去するため選択造粒法を適用し、その前処理に *T.f.* を使用した。選択造粒のみでは50%以上の黄鉄鉱の除去は困難であったが、*T.f.* 使用によりその80%が除去できたと述べている。

(4) 浮遊選鉱との組合せ

筆者らは、硫化鉱物の優先浮選工程における細菌の利用を目的として、*T.f.* による黄鉄鉱の浮遊性の抑制法

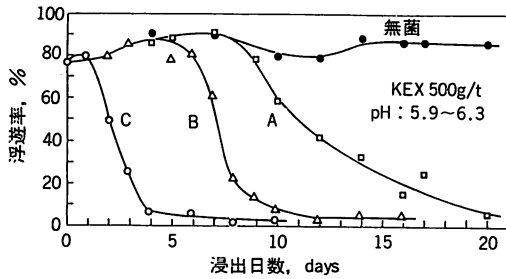


図-3 T.f.の前培養条件の差異が浸出日数と黄鉄鉱の浮遊率の関係におよぼす影響

を検討した¹⁹⁾。図-3に示すように、無菌条件では黄鉄鉱の浮遊率は20日の間高い値を示す。しかし、2.2の(4)で述べたA, B, C条件で前培養したT.f.を用いた場合は、浸出日数の経過に伴い浮遊率の急速な低下が認められる。とくに黄鉄鉱で馴養した菌を使用のCの条件で、浮遊抑制に要する浸出日数が大幅に短縮していることは興味深い。またこの抑制現象は、黄鉄鉱表面での親水性硫酸塩皮膜の形成に基づくと考えられる。浮選の最終工程で黄鉄鉱の精鉱を回収することを思えば、浸出時における黄鉄鉱の浸出量は少ないほどよい。C条件において、浮遊率が10%にまで抑制されたときの黄鉄鉱浸出率は約6%であった。このとき浸出液中の菌体濃度は、1 ml当たり約7億体であった。

4. 工程水および坑水処理への微生物の利用

4.1 製錬工程水処理への利用³³⁾

小坂製錬所では、煙灰処理に細菌酸化法を適用し注目すべき成果をえているが、関連工程の操業概要は次のようである。

(1) 浸出工程

常温浸出と高温強酸浸出の2段階処理で、銅製錬煙灰からCu, Zn, Fe, As等を浸出する。

(2) 第一脱銅工程

液中の銅イオンは、硫化水素で硫化銅として沈澱させる。砒素の共沈を避けるため、この工程は若干の銅イオンを残す。

(3) 中和工程

液中の遊離硫酸は炭酸カルシウムを用いて石膏として固定し、遠心分離機で固液分離する。

(4) 脱砒工程

液中の砒素を、後工程で産出する水酸化鉄Ⅲ殿物とこれを浸出した硫酸第二鉄溶液を用い砒酸鉄として沈澱し戸別する。

(5) 第二脱銅工程

残留銅イオンを、硫化水素で硫化銅として沈澱させる。

(6) 鉄酸化工程

液中の Fe^{2+} は、T.f.を用いて酸性・常温の条件下で Fe^{3+} とする。液に栄養剤を添加し、細菌の着床している殿物とともに酸化槽に入れる。酸化槽には空気を吹き込み、処理した液はシックナに送る。シックナのオーバフローは次工程に送り、アンダフローの細菌着床殿物は酸化槽に送り返す。

(7) 脱鉄工程

鉄酸化工程で生成した Fe^{3+} は、炭酸カルシウムで中和することにより完全に沈澱する。生成した水酸化鉄殿物は戸過し、一部は脱砒工程に送り返す。

細菌酸化法を導入することにより、1)常温で酸化処理ができるようになった、2)酸化処理後の鉄殿物の生成はpH 4程度で進行し、炭酸カルシウムの無駄がない上、このpHでは亜鉛の共沈が起こらない、3)脱砒工程では、細菌酸化法でえられた鉄殿物で砒素を沈澱させるので、殿物の砒素品位が高くなり結果として殿物量が半減する、などのことが達成された。

4.2 坑水処理への利用

(1) 柵原鉱山の例^{34) 35)}

金属鉱山には大量の黄鉄鉱が存在することが多い。その場合、黄鉄鉱の酸化溶解が主因となり坑水は酸性になり、溶存成分として鉄、硫酸イオンその他を含有する。したがって河川へ放流する前に坑水に対する中和処理が必要となる。その中和剤として従来、消石灰や生石灰を用いる習わしであった。

わが国最大の黄鉄鉱鉱山である岡山県柵原鉱山では、従来法よりはるかに低コストでしかも固液分離効率の高い、T.f.を用いた坑水処理技術を開発し、昭和49年4月から操業に移っている。この方法の長所は、1)細菌で Fe^{2+} を Fe^{3+} に変換後に鉄殿物を生成させるため、pH 2.5~4程度の低pH領域で殿物生成が可能、2)中和剤として廉価の炭酸カルシウムの使用が可能、3)生成殿物の沈降と固液分離が容易等である。

柵原鉱山で本法を適用しているのは、最も汚染度の高い上部鉱床とその周辺の湧水(A水とよばれpH約2.5)に対してである。処理の段階は、1)細菌による酸化(pH 2.4)、2)1次中和(pH 2.5)、3)鉄、アルミ置換(pH 3.5)、4)中和(pH 6.5)、5)石膏の沈降、6)分級、7)アルミ殿物の沈降、8)亜鉛の中和と沈澱(pH 8.3)、9)砂戸過等からなる。2)の段階で、石膏を析出しない程度に炭酸カルシウムを加え、塩基性硫酸鉄を析出させ

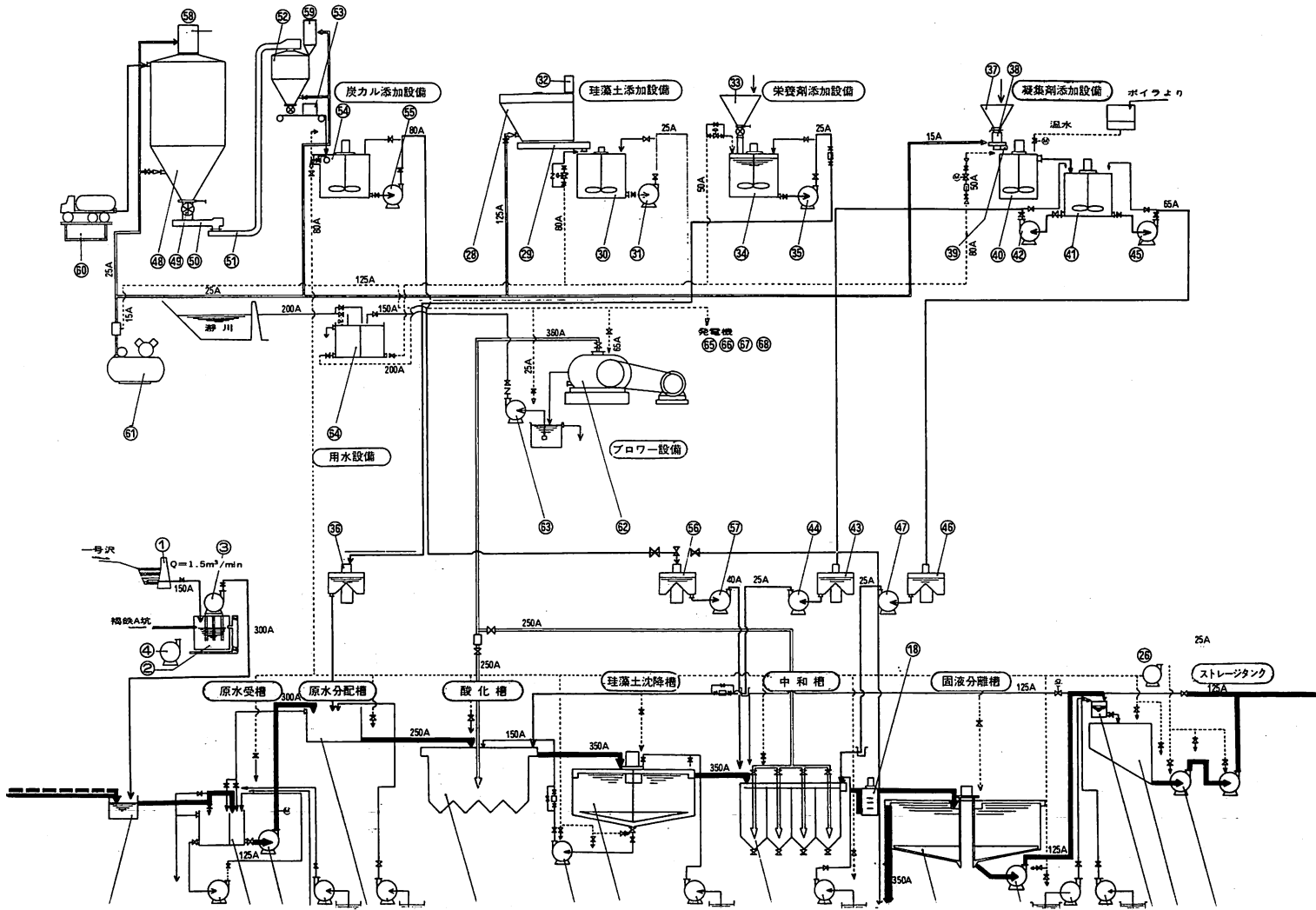


図-4 旧松尾鉱山新中和処理施設操業系統図 (岩手県および金属鉱業事業団³⁷⁾による)

沈降分離する。4)では、鉄、アルミ置換後の坑水に炭酸カルシウムを加えて空気攪拌を行い、Al, Cu, Zn (一部)の沈殿と石膏の析出を図る。9)では、垂流沈殿槽のオーバフローを砂河過し、吉井川へ放流する。塩基性硫酸鉄から製造される水酸化鉄と硫酸第二鉄、5)の工程で回収される石膏などは いずれも資源として有効に利用されている。

(2) 旧松尾鉱山の例^{36) 37)}

この鉱山は岩手県八幡平の中腹に位置し、東洋一を誇る硫黄および硫化鉄鉱山であった。昭和40年代に入り、海外から大量に輸入されるようになった低価格硫黄に押されて経営は危機を迎え、46年閉山のやむなきに至った。

白鉄鉱が酸化しやすいことは広く知られているが、それと一緒に多量に産出する硫黄鉄床の黄鉄鉱は、その成因上、きわめて酸化しやすい特性をもつ。そこで閉山後もpH 1.6という強酸性の坑水が大量に流出し、これが北上川を赤茶けた状態にしてしまい、大きな社会問題となった。閉山後会社は解散となり、国や県もそれを放置できず、巨費を投じて坑水の中和処理に取り組み、ようやく川はよみがえった。それに次ぎ処理技術改善の決め手として登場したのが、細菌酸化-炭酸カルシウム中和法である。これは前述の柵原方式を基礎とするものである。

環境庁、通産省、建設省、農林水産省、自治省からなる関係5省庁会議は、新方式に基づく中和処理施設の建設を決定し、昭和52年8月に着工、56年11月末に完成、57年4月から本格運転に入っている。建設には、貯泥ダムを含め93億円が費やされており、この種の施設としては他に例を見ない大規模なものである。

操業系統を図-4に示す。施設の処理能力は $20\text{m}^3/\text{min}$ (増水時 $25\text{m}^3/\text{min}$)であり、原水のpH 1.6, 全Fe 795 mg/l, Al 189 mg/l, As 5.77 mg/l, 処理水のpH 4.0, 全Fe 13 mg/l, Al 130 mg/l, As 0.02 mg/l という諸元になっている。ストレージタンクの殿物は、パイプ流送により貯泥ダムに堆積される。固液分離槽の上澄水が川へ放流される。

本法の特長は、*T.f.*を増殖後、酸化槽と珪藻土沈降槽の間で高濃度の*T.f.*を循環させることにより、比較的少量の炭酸カルシウムで効率的中和処理を行う点にあり、また生成される中和殿物の容積も少ない。

現在金属鉱業事業団を中心にして、中和殿物の資源化に関する試験研究が進められている。

5. む す び

以上、鉱業における微生物利用の現状と研究の動向を概観する目的で、鉱業で利用される微生物(細菌)の種類、細菌の増殖に影響する主な因子、細菌による鉱物の酸化機構、バクテリアリーチングの形式、バクテリアリーチングによる銅およびウランの回収、バクテリアリーチングによる他の金属の回収の可能性、バクテリアリーチングによる石炭の脱硫、バクテリアリーチングと他の処理技術との組合せ、製錬工程水処理への細菌の利用、坑水処理への細菌の利用などについて触れた。

バクテリアリーチングでは多大の反応時間を要するので、実用化されている鉱種はまだ銅鉱とウラン鉱の低品位鉱に限られている。しかし微生物を利用する方法の最大の魅力は、低コストで無公害なことにある。

利用技術の進歩と社会のニーズとが両々相まって、本文で紹介した研究段階のいくつかのものが、近い将来実用化の域に入ることであろう。

本稿をまとめるに際しては、多くの文献の知識をお借りした。とくに文献1)~6)からは貴重な御教示を頂いた。ここに記して深く謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 伊藤一郎; バクテリアリーチング (1976), 講談社サイエンスフィック
- 2) Brierley, C.L.; CRC Critical Reviews in Microbiology, Vol. 6, No. 11 (1978), 207~262
- 3) Brierley, C.L.; Scientific Am., Vol. 247, No. 2 (1982), 42~51
今泉常正訳; サイエンス, 10号 (1982), 66~80
- 4) 須田 了; ファインケミカル, 1号 (1983), 43~51
- 5) 鴻巣 彬; 全国地下資源関係学協会合同秋季大会分科研究会資料, I-3 (1983)
- 6) 高森隆勝; 日本金属学会会報, 24巻, 4号 (1985), 257~261
- 7) 国吉信行, 原田種臣; 日本鉱業会誌, 101巻, 1173号 (1985), 689~698
- 8) Buchanan, R. E. and Gibbons, N. E. (ed.); Bergey's Manual of Determinative Bacteriology 8th ed. (1974), Williams & Wilkins
- 9) Mac Donald, D. G. and Clark, R. H.; Can. J. Chem. Eng., (1970), 669~676
- 10) 山根恒夫; 生物反応工学 (1980), 産業図書
- 11) Malouf, E. E. and Prater, J. D.; J. Metals, Vol. 13, No. 3 (1961), 353~356
- 12) Bryner, L. C., Walker, R. B. and Palmer, R.; Trans. AIME, Vol. 238, No. 3 (1967), 56~62
- 13) Kingma Jr, J. G. and Silver, M.; Appl. Envir. Micro-

- biol., Vol. 39 (1980), 635~641
- 14) Roy, P. and Mishra, A. K.; Indian J. Experimental Biology, Vol. 19(1981), 728~732
- 15) 原田種臣, 国吉信行; 日本鉱業会誌, 101巻, 1173号(1985), 719~724
- 16) 今井和民; 全国地下資源関係学協会合同秋季大会分科研究会資料, E-5(1974)
- 17) Tuovinen, O. H. and Kelly, D. P.; Zeitschrift für Allg. Mikrobiologie, Vol. 12, No. 4 (1972), 311~346
- 18) Duncan, D. W., Walden, C. C. and Trussell, P. C.; Trans. Can. Inst. Mining and Met., Vol. 69 (1966), 329~333
- 19) Lacey, D. T. and Lawson, F.; Biotech. Bioeng., Vol. 12 (1970) 29~50.
- 20) 今井和民; 科学と工業, 57巻, 10号(1983), 368~373
- 21) Silver, M.; Can. J. Microbiol., Vol. 16(1970), 845~849
- 22) Silver, M. and Torma, A. E.; Can. J. Microbiol., Vol. 20 (1974), 141~147
- 23) Silverman, M. P., Rogoff, M. H. and Wender, I.; Fuel, Vol. 42 (1963), 113~124
- 24) Detz, C. M. and Barvinchak, G.; Mining Congress J., No. 7(1979), 75~86
- 25) Hoffmann, M. R., Faust, B. C., Panda, F. A., Koo, H. H. and Tsuchiya, H. M.; Appl. Envir. Microbiol., Vol. 42 (1981), 259~271
- 26) Kargi, F. and Robinson, J. M.; Biotech. Bioeng., Vol. 27(1985), 41~49
- 27) 原田種臣, 原田種久, 福田勉文; 日本鉱業会春季大会講演要旨集 (1981), 379~380
- 28) 原田種臣, 原田種久; 日本鉱業会春季大会講演要旨集 (1983), 205~206
- 29) Torma, A. E. and Subramanian, K. N.; International J. Mineral Processing, Vol. 1 (1974), 125~134
- 30) Carta, M., Ghiani, M. and Rossi, G.; International Congress of Complex Sulphide Ores(1980), I. M. M.
- 31) Lawrence, R. M. and Brynesteyn, A.; CIM Bulletin, No. 9 (1983), 107~110
- 32) Capes, C. E., McIlhinney, A. E., Sirianni, A. F. and Puddington, I. E.; CIM Bulletin, No. 11 (1973), 88~91
- 33) 箕浦潤; 日本鉱業会誌, 101巻, 1169号(1985), 397~402
- 34) 小原芳夫, 福田勉文; 日本鉱業会誌, 92巻, 1058号(1976), 306~310
- 35) Yabuuchi, E. and Imanaga, Y.; Joint MMIJ-AIME Meeting (1976), 943~956
- 36) 紺野康郎, 池田肇, 酒田剛; 日本鉱業会誌, 100巻, 1160号(1984), 1031~1038
- 37) 岩手県, 金属鉱業事業団; 旧松尾鉱山鉱害防止事業概況 (1984)

話の泉

超微粒子化技術(その1)

ファインセラミックスは微粒子素材を圧縮成型、焼結したもので、従来のセラミックスに対して文字通りその成分の純度、粒子の大きさ、焼結条件などがファイン化されたものといえよう。その結果従来のセラミックスとは格段に異なった性能を示している。

微粒子としてはその大きさが従来のものに比較してさらに小さく、ミクロン(μ)或はそれ以下のサブミクロン(0.1μ)に対しては超微粒子、さらに最近では光の波長の単位となっているナノメートル($\text{nm} = 10^{-9} \text{m}$)で表わされる超超微粒子までに到っており、その結果として高密度、超硬度、超耐熱性、超反応性などが話題となっている。

微粒子化法としては固体を機械的に粉碎する方法、溶液から沈澱、コロイドの形で生成する方法もあるが、これらはどれもサブミクロンオーダーが

技術の限界だろう。一方ガス状分子の酸化、還元反応を利用して超微粒子が得られるが、中でも電気溶接の場合に発生するヒュームと呼ばれる煙は、その物質から発生した微粒子(時には酸化物)であることは以前から知られていたが、最近超微粒子技術の見地から注目されてきた。

レーザー技術の発達によって CO_2 レーザーによる加工時には電気溶接に比較して集光部のエネルギー密度が大きく1万倍以上にも達するといわれており、そのため対象物が瞬時に溶融、蒸発、或いは昇華し、高密度の蒸気流として発生することからその捕集も効率よく容易である。

雰囲気は O_2 , N_2 によって対象とされる金属材料も Fe , Ni , Co , Zr , Al , Si などはそれぞれに応じて生成物も酸化物、窒化物の微粒子が得られるが、その雰囲気の高圧力の低下によって粒子径は微少化する。(F)

(注) その2は53ページに掲載しています。