

CODELCO 技術担当取締役 Pedro Morales Cerda 氏による 技術講演会の概要

金属資源技術グループ生産技術チーム サブリーダー **中村 英克**
nakamura-hidekatsu@jogmec.go.jp

平成 17 年 2 月 10 日、金属資源技術グループは、国際研究者交流事業の一環として、世界最大の銅プロデューサーであるチリ・CODELCO から技術開発担当取締役 Pedro Morales Cerda 氏を招聘し、当機構において技術講演会を開催した。

講演テーマは、「Bioleaching Copper Minerals & Concentrates State of the Art」であり、チリの経済状況や銅産業の現状、対中国ビジネス戦略、Radomiro Tomic 銅鉱山の操業状況、バイオリーチング技術開発状況等が紹介された。講演会には、非鉄金属会社、大学、研究機関等から約 50 名が参加した。

本講演の中では、今後の CODELCO が目指す銅資源開発戦略等を含めて、いくつか興味深い点が紹介されたことから、以下にその概要を報告する。

1. 本事業の目的と経緯

国際研究者交流事業（海外研究者招聘）は、鉱物資源探査・生産技術の中の特定技術分野に関する海外の技術動向を調査するため、その分野における海外研究者を日本へ招聘し、技術情報の収集と意見交換、さらには国際情報ネットワークの構築を目的に実施されている。

本事業は、平成 7 年度から開始され、これまで鉱床探査関連の専門家（地化学探査、リモートセンシング技術等）を中心に招聘してきたが、平成 15 年度からは、各方面のニーズ等を踏まえ、生産技術分野の専門家を招聘している。

2. 招聘者の選定

（１）招聘者の選定

近年、環境問題対策、低コスト鉱山開発の必要性から、硫化銅鉱に対するバクテリア等を活用した湿式製錬技術開発の研究が世界で進展している。本技術が商業ベースで実用化された場合、これまで乾式製錬では処理が難しいとされてきた低品位鉱や砒素等の不純物を含む複雑硫化銅鉱が開発対象となり、これまでの銅生産方法やマテリアル・フローが大きく変化する可能性がある。このため、世界の鉱業関係者は、今後の鉱山開発戦略を睨み、その技術開発動向を注視している。

今回、このような背景を踏まえ、バイオ・リーチング技術の実用化に向けた事業展開を世界の最前線で実施している Alliance Copper 社（CODELCO と BHP Billiton 社の JV 企業）の責

任者である Pedro Morales Cerda 氏を招聘し、それら最新技術開発動向、湿式製錬技術（SX-EW 法）全般に亘る情報提供を依頼した。

（２）招聘者の略歴

Pedro Morales Cerda 氏は、銅を中心とするベースメタルや貴金属の抽出冶金技術分野に 30 年以上携わり、これまで銅生産に関する特許を 10 件以上保有するなど製錬技術の専門家である。1994 年より CODELCO の技術開発担当取締役として活躍する傍ら、現在、CIMM（チリ鉱山冶金研究所）と CODELCO・チュキカマタ部門のプロジェクト・マネジャーを務め、CODELCO 鉱業・冶金技術開発研究所（IM2）とバイオテクノロジー関連 2 事業（Alliance Copper 社、バイオ・シグマ<CODELCO/日鉱金属（株）の JV>）を担当している。



講演者の Pedro Morales 氏（右下）と講演会の様子

3. 講演内容の概要

講演題名：「Bioleaching Copper Minerals & Concentrates State of the Art」

（１）チリの市場開拓による経済改革の成功

チリの経済は1990年～2004年にかけて平均約6%の成長を成し遂げた結果、インフレを克服し、国家予算の赤字も減少させた。貿易面では、メキシコ、カナダなどの国々と自由貿易を行っており、シンガポール、日本とは2国間で交渉中である。主な市場は、欧州向け28%、アジア向け27%等となっている。犯罪件数も非常に低く、物価に関しても極めて適切な対策が講じられ安定している。

この結果、チリは、持続的経済成長、インフレ抑制、貧困からの脱却を達成し、ラテンアメリカ諸国では最も安定した国になった。

（２）銅の需給動向

世界の銅生産量は、過去20年で毎年2.6%の伸びを示してきた。この伸びに最も貢献したのはチリであり、2002年には世界シェアの約34%を占めるまでに拡大した（図1）。南米は世界の銅資源の主要供給国として存在し、特に、西欧、アジア、豪州への供給が増加している。主要な消費国としては、アメリカが世界の16%を占めているが、中国がアメリカと肩を並べるまでに拡大し、その銅需要は増え続けている。今後の世界の銅産業の成長は、中国市場が鍵を握っている（図2）。ちなみに日本の消費量は8%、韓国の消費量は6%である。銅価格は長期的には低下する傾向にあるが、短期的には需要の増加に応じて変化するかもしれない。

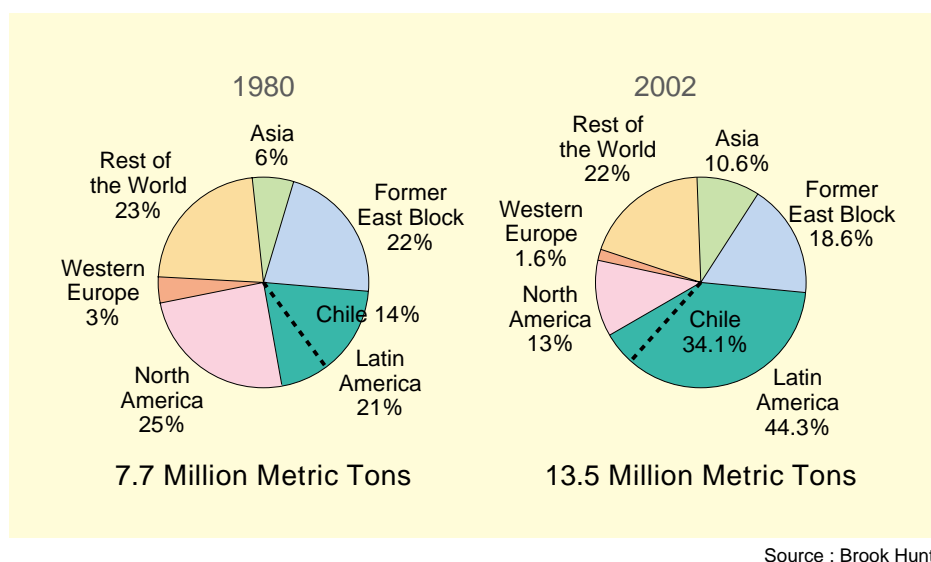


図1 Geographic Relocation of World Mine Production

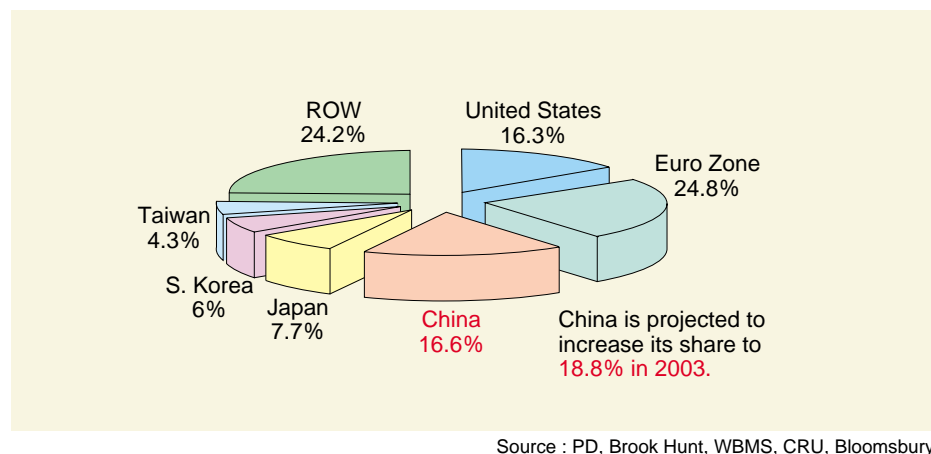


図2 Geographic distribution of Copper Consumption 2002

(3) CODELCO の対中国ビジネス戦略

中国は、銅需要の急増に伴い需給バランスに大きなギャップが発生している（表1）。

表1 China Growing Copper Imports

Concentrate Balance	1997	2003	2007	2010
CONCENT RATE	494	592	635	560
BLISTER OUTPUT	814	1,415	1,969	2,166
BALANCE	- 320	- 823	- 1,334	- 1,606

Blister Balance

BLISTER	814	1,415	1,969	2,166
REFINED OUTPUT	1,178	1,789	2,544	2,797
BALANCE	- 364	- 374	- 575	- 632

Refined Copper Balance

PRODUCTION	1,178	1,789	2,544	2,797
CONSUMPTION	1,297	3,087	4,346	5,069
BALANCE	- 119	- 1,297	- 1,802	- 2,271

Source: CRU Copper Quarterly Industry and Market Outlook, January, 2004; Brook Hunt Copper Metal Service, 1st Quarter 2004; Codelco.

今後、新しい銅資源の探鉱・開発には、相当の時間が必要である。CODELCOは、大きな銅資源のポテンシャルを有している上、新規プロジェクトや融資拡大などの共同開発の方法*さえ決まれば資源開発を早急に進めることができる。チリは、この10年間に中国への銅供給量が7倍になるなど、中国と長期的に良好な関係を続けたいと考えている（図3）。このため、2002年8月、CODELCOはアジア管轄事務所を上海に開設した。

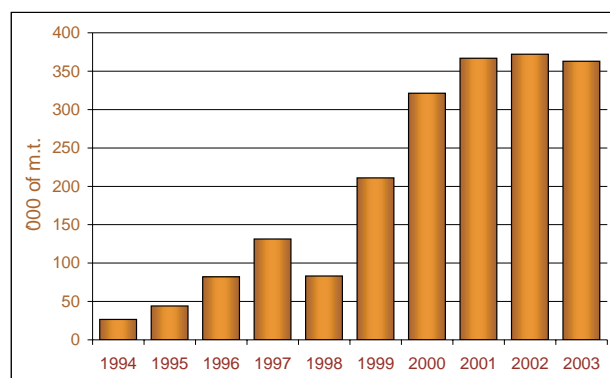


図3 Codelco: Total Copper Exports to China

(4) 銅湿式製錬技術

中国の銅需要の伸びに合わせるため、価格を抑制しながらどのように銅の生産量を上げるかが問題である。銅は主に硫化鉱物と酸化鉱物からなり、現在、ヒーブリーチングによる生産が主体であるが高品位銅精鉱を生産するためには攪

拌リーチング（Agitated Leaching）等も考えなければならない。どのような製錬方法を採用したとしても製錬前の粉碎等の費用は銅価格に上乗せしなければならない、低品位銅鉱石から高品質の銅精鉱を生産しようとすればその費用も大きくなる。さらに精鉱品位を上げるためには様々な処理エネルギーも大きくなり、製錬コストも増える。

世界の湿式製錬（SX-EW法：溶媒抽出・電解採取法）による銅生産量は、約270万t（内、チリ57%、CODELCO16～21%）とされ、近年、SX-EW法による電気銅の生産は急激に伸びている。特に南米の伸びが顕著で、1987年の生産量が僅かな量であったのに対して、2002年には174万3千tと急激な伸びを示し、アメリカの生産量66万3千tを抜いて世界一となった（図4）。

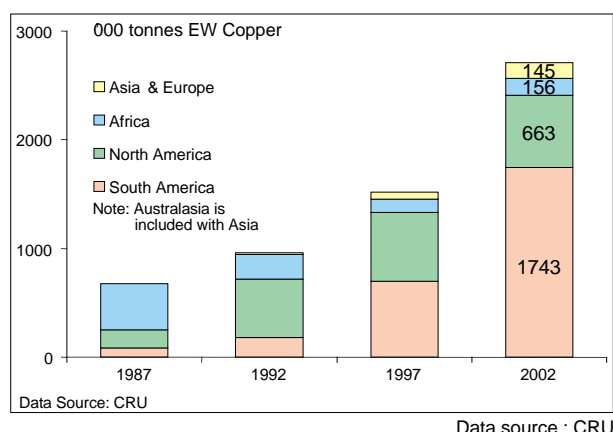


図4 Electrowon Copper Production Breakdown by Region

リーチングには、ダンブリーチング、ヒーブリーチング、バットリーチング、加圧リーチング、攪拌リーチング、バイオリーチング等がある。ダンブリーチングは鉱石を20～50m積上げ、ヒーブリーチングも粉碎した鉱石を高さ6～8mに積上げる。バットリーチングの場合は、さらに浸出液管理のため独立した2,300m程の長大なコンクリート製の設備が必要である。いずれにしても広大な面積、設備およびエネルギーが必要である。銅の増産に付随する課題の解決は様々な困難が付きまとう。

リーチングを実施する前には、粉碎工程が必須で、ダンブリーチングの場合、粒径はかなり大きくても良いが、ヒーブリーチングの場合では10mm、バットリーチングの場合は8mm程度、攪拌リーチングの場合1mm程度に粉碎する必要がある。リーチング工程をはじめとして、SX（溶媒抽出）工程、EW（電解採取）工程の

* CODELCOは、中国・五礦有色金属（ミンメタルズ）との間で、20億ドル規模の投資と銅供給に関する契約で合意した旨報じられている（5月30日付けロイター）。

特徴は、表2、表3、表4のとおり要約することができる。

表2 Leaching Operations Characteristics

Leach operations:

- Labour Productivity: 0.6 ~ 7.6 man-hour/t Cu
- Electricity Consumption:
 - Pretreatment: 236 kWh/t Cu
 - Leaching: 463 kWh/t Cu
- Copper Grade:
 - Dump Leaching: 0.25 ~ 0.40%
 - Heap Leaching: 0.40 ~ 1.35%
 - Vat Leaching: 0.35 ~ 1.75%
- PLS Tenor:
 - Dump Leaching: 1.0 ~ 2.5 gpL
 - Heap Leaching: 2.0 ~ 11.0 gpL
 - Vat Leaching: 1.0 ~ 12.0 gpL
- Acid Consumption:
 - Dump Leaching: 0.5 ~ 7.5 t/t Cu
 - Heap Leaching: 1.2 ~ 8.0 t/t Cu
 - Vat Leaching: 0.3 ~ 5.5 t/t Cu

表3 SX Operations Characteristics

SX operations:

- Labour Productivity: 0.3 ~ 4.3 man-hour/t Cu
- Electricity Consumption: 231 kWh/t Cu
- Raffinate Tenor :
 - Dump Leaching: 0.1 ~ 0.4 gpL
 - Heap Leaching: 0.1 ~ 1.2 gpL
 - Vat Leaching: 0.1 ~ 0.5 gpL
- Extractant in Organic Phase: 3.0 ~ 30.0 %
- Organic Loss: 10 ~ 127 g/t Cu

表4 EW Operations Characteristics

EW operations:

- Labour Productivity [man-hour/t Cu]:
 - Conventional Process: 2.0 ~ 5.0
 - Kidd Process: 0.5 ~ 1.4
 - Isa Process: 0.7 ~ 2.4
- Technology Capacity [Ktpy Cu]:
 - Conventional Process: 18.0 ~ 80.0
 - Kidd Process: 32.0 ~ 335.0
 - Isa Process: 12.0 ~ 380.0
- Current Density [A/m²]:
 - Conventional Process: Up to 325
 - Kidd Process: Up to 340
 - Isa Process: Up to 345
- Electricity Consumption:
 - Average 2,135 kWh/t Cu

なお、過去15年間ににおけるSX-EW法による電気銅の生産は400%の伸びを示すなど順調に推移してきたが、現状のリーチング-SX-EW法には、未だ以下の課題が残されている。

リーチング工程

- ・遠隔操業の導入
- ・不純物と酸化亜鉛処理の向上
- ・2次製錬による銅回収率の向上
- ・低品位鉱のダンブリーチング技術の改良

SX（溶媒抽出）工程

- ・低銅濃度、低pH、不純物含有量の高い貴液の管理
- ・銅回収率の向上（95% ~ 96%）
- ・安全確保（防火対策）

EW（電解採取）工程

- ・完全自動化システムの開発
- ・LME品位Aの達成
- ・鉛の代替としてのアノードの改良
- ・カソードの機械的測定技術の開発

（5）Radomiro Tomic銅鉱山

本鉱山は1952年にボーリング調査で発見され、本格操業は1996年から始まった。

現在操業している鉱床の主な鉱石は、アタカマイト、クリソコラを主とする低品位鉱（銅品位0.59%）であり、これら鉱石は地表から深部へ続く母岩の割目に胚胎している。資源量はおよそ8億tである（図5）。



Reserva de óxidos : 802 M. tons
 Principales minerales oxidados :
 Ley media : 0.59% Cu Total
 Atacamita ($\text{CuCl}_2 \cdot 3\text{Cu}(\text{OH})_2$)
 Crisocola ($\text{CuO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
 Arcillas con cobre, Wad

図5 Mine Resources

鉱石の1次粉碎では1.5インチ程に碎かれるが、これは酸化鉱に対してはかなり大きいサイズであるため、その後2次粉碎へと進み、必要に応じて3次粉碎を行う。途中、Belt Acid Curingを経てヒープリーチングパッドに推積する。リーチングは1次、2次と行われるが、この貴液は給排水システムにより完全回収される(図6)。さらに貴液はVFS SX Dutokumpuシステム(図7)へと進み、攪拌工程により銅の抽出効率が促進される。最終的には、EWタンク・ハウス(図8)で電気銅が年30万t生産される。



図6 Primary Heap Leaching



図7 VFS SX Outokumpu Technology

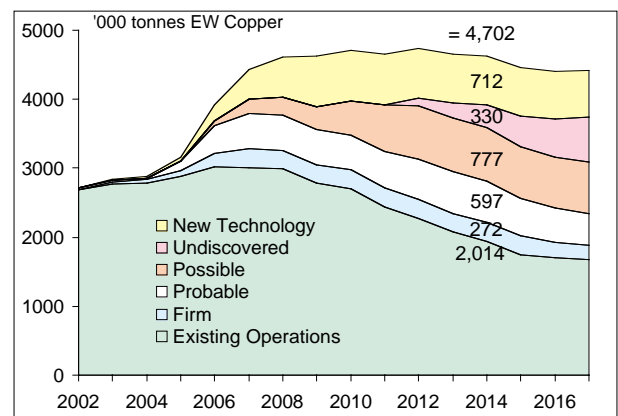


El edificio mide 493 mts de largo por 60 mts de ancho. La Capacidad de Diseño de la planta alcanza las 300,000 t/a. Comprende tres circuitos hidráulicos y tres circuitos eléctricos, cada uno con dos T/R en paralelo. 984 celdas distribuidas en seis bancos, 128 de las cuales son de limpieza.

図8 Electro winning Tank house

(6) 銅湿式製錬の動向

今後、湿式製錬による電気銅生産量は、従来の方式が継続されるものの、その生産量は漸減し、現在の300万tから200万tくらいになると考えられる(図9)。



Data source : CRU

図9 EW Copper Production Forecast Based on Existing Technologies

リーチング技術は、現在の化学リーチングやバイオリーチングが酸化鉱や二次硫化鉱のリーチングにおいては今後も有効と考えられる。一方、銅精鉱を対象とした新しいリーチング方法としては、Biological Assisted Leaching、Pressure Leaching 等がある。Biological Assisted Leachingは、商業生産準備段階のBioCOP法が年2万t、デモプラント段階のBacTech法が年132tの銅を生産量している。その他、Pressure Leachingにおいては、未だデモプラント段階ではあるが、Intec法、HydroCopper法ともに年330tの銅を生産している。

なお、これら新しいリーチング方法の利点及び現状の技術課題は、以下のとおり要約できる。

(利点)

- ・年間生産量5万t位までの比較的小規模な処理や遠隔地での操業において経済性を有すること
- ・様々な粗鉱品位の処理が可能であること
- ・不純物の処理が容易であること
- ・硫黄飛散の制御が可能で環境問題への対処が容易であること
- ・低品位の一次硫化鉱の処理に優れていること 等

(技術課題)

- ・未だプロトタイプの域を出ていないこと
- ・SX-EW法の経済性
- ・残査等の処理法
- ・硫黄の過剰生産
- ・貴金属の回収 等

さらに、新しいリーチング-SX-EW法の操業上の課題は、以下のとおり要約できる。

リーチング工程

- ・大量発生する硫酸の処理
- ・銅の回収率を96.5%以上とすること

SX(溶媒抽出)工程

- ・貴液濃度、低pH、高懸濁物質の調整
- ・乾式製錬以上の銅回収率

EW(電解採取)工程

- ・完全自動化されたEW生産設備の開発
- ・LMEのAグレードカソードを生産するため
の高電流密度操業(例えば450A/m²)

(7) バクテリアを活用した湿式製錬技術の方向性

現在、バクテリアを活用した湿式製錬技術(bio-heap leaching)は、不純物の含有量にかかわらず品位が比較的低い鉱石に対して適用されている。一方、品位が高い場合は、不純物含有量の低い鉱石に対しては乾式製錬および湿式製錬、不純物含有量の高い鉱石には湿式製錬法が適用されている(図10)。

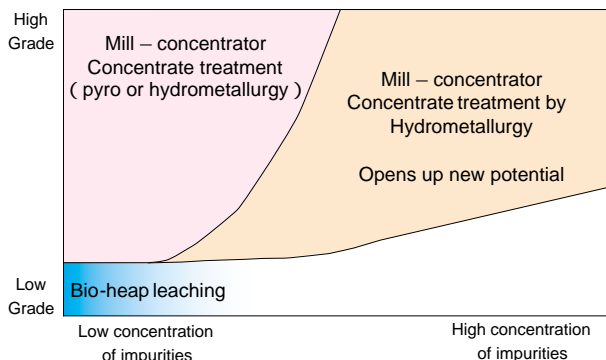


図10 Bio - Copper Technology Applications

将来的には、品位の高低にかかわらず、酸化銅鉱に対してはヒープリーチングが、低品位硫化鉱に対しては一次硫化鉱、二次硫化鉱にかかわらずBioSigmaが開発中のバイオ・ヒープリーチングが、ある程度以上の鉱石品位に対してはBioCOP法が適用されていくと予想される(図11)。

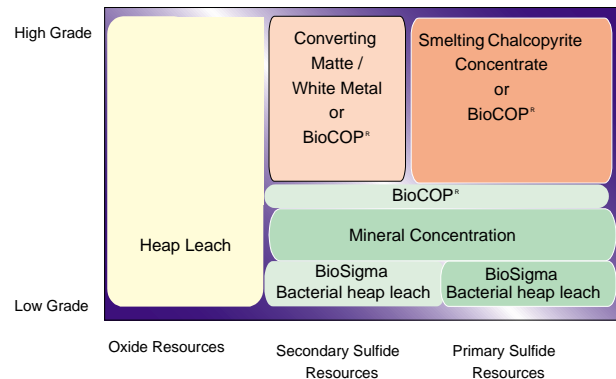


図11 Technology Predominance Region

ちなみに、CODELCOのバイオリーチングに対する取り組みは以下のとおりである。

- ・1995年：複雑銅精鉱に対するバイオリーチング・プロセスの開発を決定
- ・1997年：金精鉱から硫砒鉄鉱をリーチングする方法において、先進的研究をしている南アフリカの鉱山会社Gencorと技術提携
- ・2000年：CODELCOとBHP Billiton社は、銅精鉱のバイオリーチングを行うため、BioCOPプロセス技術の商業化を目指しAlliance Copper Limited (ACL)を設立
- ・2002年：主に低品位黄銅鉱を対象としたバイオリーチング技術を開発するため、チリ政府援助の下、日鉱金属(株)とBioSigmaを設立

(8) Alliance Copper Limited

Alliance Copper Limited (ACL)は、CODELCOとBHP Billiton社により設立された。BHP Billiton社はBioCOP技術を、CODELCOはSX-EW法の技術ノウハウを互いに提供している。

バイオリーチングに用いるバクテリアは自然界の中で硫黄泉や鉱山の酸性排水等に数種類確認される(図12)。

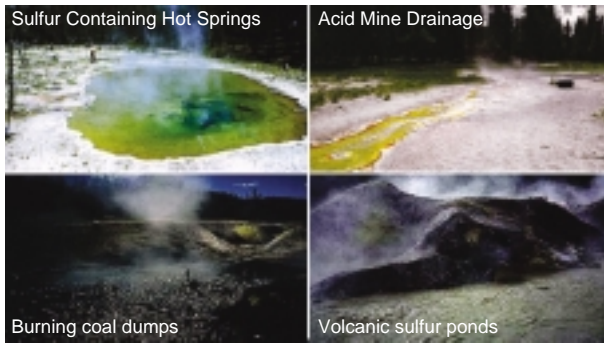


図12 MICROORGANISMS ORIGIN

ACLはこれらバクテリアを独自技術で分離、抽出することが可能であり、中でも *Acidithiobacillus ferrooxidans* は、2価の鉄を3価の鉄にする働きを有することから、バイオリーチングへの活用を試みている。

ACLでは、このバクテリアを用いて輝銅鉱と銅藍から銅のリーチング試験を実施した。この結果、輝銅鉱は高温溶液中で2日間かけて80%以上が浸出し、最終的には98%近くに達した。銅藍は低温溶液中で40%浸出するために数日間を要した。いずれの場合にも溶液中に酸素を挿入して鉄の酸化を促進させた。これらの試験結果等から、バイオリーチングに求められる検討項目は以下のとおり要約することができる。

- ・ 鉱石の粒径：95%が90 μm 以下であること、また、80%が38 μm 以下であること
- ・ 酸素濃度：1.5ppm、2.5ppm
- ・ 適正な温度管理：68～80
- ・ 適正なpH管理：1.2～1.5
- ・ その他：安定的な流量管理とパルプ濃度、適正な窒素、二酸化炭素の供給

基本的にACLの技術は、銅精鉱を低温溶液と高温溶液を用いた2段のバイオリーチング・プロセスを経て、SX-EW法を行うものである。また、残査からは砒素を固定し、同時に金・銀を回収する。現在、専ら砒素含有量の少ない輝銅鉱、銅藍、黄銅鉱等をリーチング対象としている。

本技術は既に基礎研究段階、パイロットプラント段階を経ており、これまでプロトタイプのプラントで年2万tの銅を生産した（図13）。ここまで10年を要したが、今後は2008年を目途に年10～20万t規模の実用プラント稼働を目指している（図14）。



図13 Commercial Prototype Plant 20 000 Copper tpy

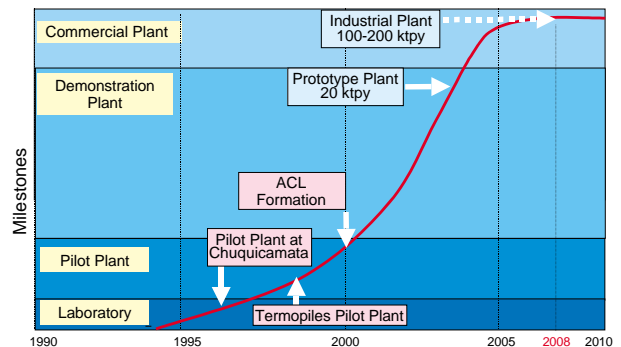


図14 Future Challenges

（9）BioSigma

BioSigmaはCODELCOと日鉱金属により設立された。CODELCOはSX-EW法の技術ノウハウ、日鉱金属は世界クラスの科学研究技術を互いに提供している。本事業の目的は、低品位硫化銅鉱に対するバイオリーチング技術の実用化と開発である。

微生物は500の遺伝子を持つといわれるが、それらの遺伝子は生体中で連鎖を形成しており、それぞれ固有の位置にある。BioSigmaは、バイオリーチングに応用できる微生物を抽出し、これらの遺伝子の中から酸化作用に関与する遺伝子とその位置を明らかにする努力をしている。

（10）最後に

CODELCOの有する銅資源のうち、0.26%程度の低品位鉱は約500億tに達する（表5）。この低品位鉱の経済的製錬法が確立できれば、CODELCOの銅増産は新しい段階に入る。将来、銅産業は、それまでのバイオリーチング技術経験を踏まえたIn-Site Bioleachingによる銅生産に発展すると期待される（図15）。

表5 Codelco Resources and Reserves 2004

	Toneladas Mill. t.m.	Ley del Mineral (%)	Cobre Fino Mill. t.m
Codelco Norte	5,584	0.69	38
Salvador	300	0.71	2
Andina	5,098	0.79	40
Teniente	4,424	0.9	40
Gaby	399	0.48	2
Total	15,805	0.78	122
Low Grade Resources	50,000	0.26	130

In Situ Bioleaching
 Copper Minerals Bioleaching
 Copper Concentrates Bioleaching
 Standard Copper Processes

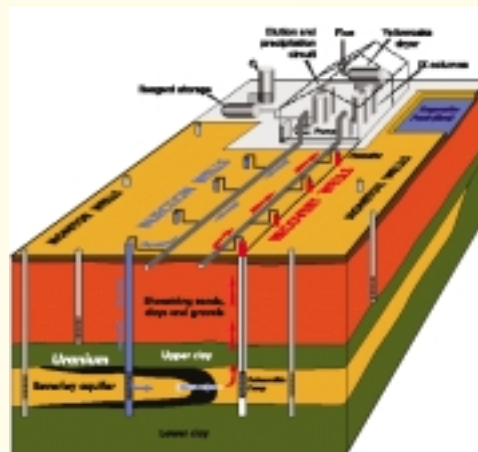


図15 Vision Future Copper Industry

今後、新しいバクテリアの発見、解析、工業化への応用には日本の研究者に期待するところが大きい。

なお、講演会で使われた全体の資料につきましては、金属資源技術グループ生産技術チームが保管しておりますので、ご利用の向きはお問い合わせ下さい。

お問い合わせ先：金属資源技術グループ生産技術チーム
 Tel：044-520-8689 Fax：044-520-8730

(2005.6.23)