

平成20年1月25日(金)

日本学会議 総合工学委員会  
持続可能なグローバル資源利活用に係る検討分科会  
資源基礎調査小委員会

「鉱物資源の持続可能性と資源問題への展望」

## 鉱物処理技術の課題と展望

～資源の持続的供給に向けた  
ミネラルプロセッシングの方向性～

秋田大学工学資源学部 柴山 敦

## 選鉱(=鉱物処理・資源処理)の現状を知る

### *Mineral Processing Technology*

・実際の鉱山、選鉱場の現場はどうなっているのか

～“現状と課題”～

・期待される技術は

・将来の方向性は……



銅、鉛・亜鉛などベースメタルを中心に



選鉱技術の多くは「硫化鉱⇒ベースメタル」を  
対象に発展

(もちろん、酸化鉱、炭酸塩鉱物……も対象)

○近年の技術的な動向

粉砕機による細粒化技術の進展

浮選セルの大型化とカラム浮選機の普及・効率化

→ 但し、画期的な技術革新はなく(成熟域)、

コスト面では一部の鉱山で坑内粉砕と簡易的な選別処理を行い選鉱費の一部削減が行われている。

○処理困難な低品位鉱石や不純物の多い鉱石の増加

例えば、鉱物粒子の緻密な分布と低品位化

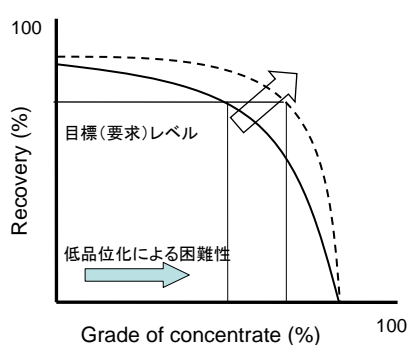
鉱石中の硫黄比の増加

ヒ素鉱物(やアンチモンなど)の増加

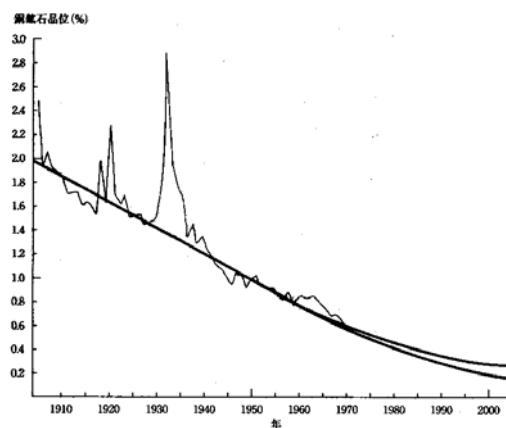
考慮した対策技術が不可欠である。

\* 海外からの問い合わせも多い(資源研修生など)。

選鉱として達成すべき品位と実収率



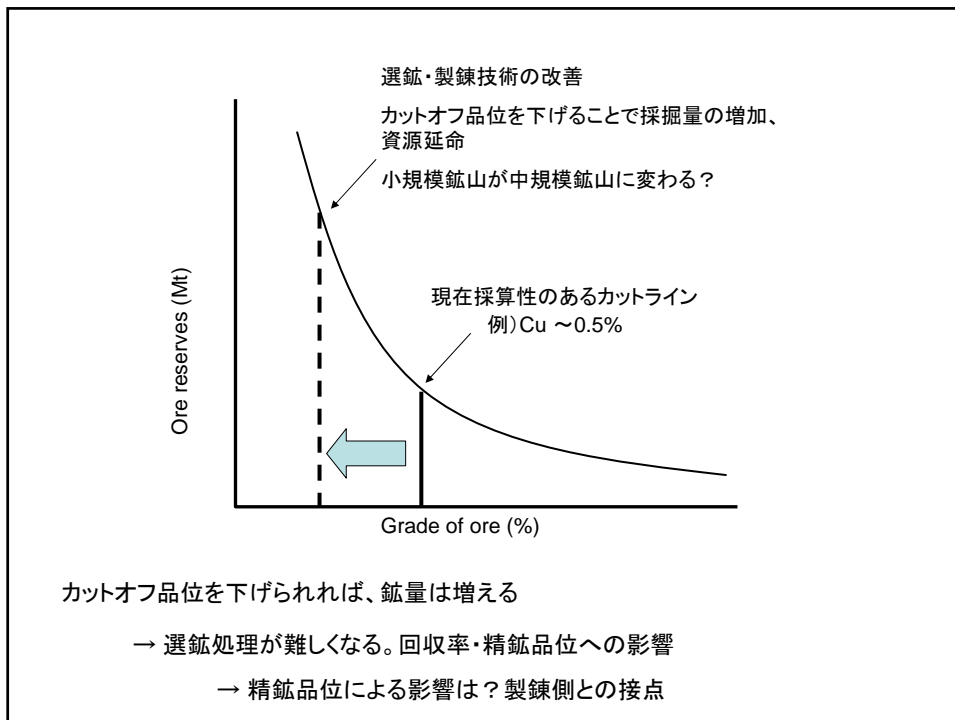
低品位化鉱床への対応  
あるいはカットオフ品位を下げられる技術開発



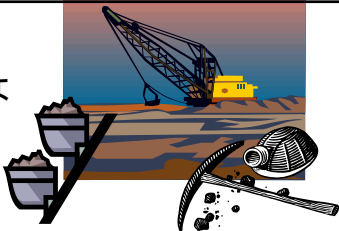
アメリカにおける銅鉱石の採掘品位の推移

鉱物資源論 志賀美英 著(九州大学出版 2003), p.247

\* 原著: 地学からの資源論、茂木睦 (地学雑誌 Vol.88(4)、1979), p.52-65



### 選鉱として必要なこれからの技術は



- ①粉砕～微粒技術～の進展と省エネルギー化
- ②浮選を主とする鉱物分離技術の改善
  - 浮選セルの大型化による効率アップ
  - 選択(凝集)浮選やエマルジョン、マイクロバブル浮選等
- ③恐らく間違いなくおとずれる
  - 「深部化・低品位化・複雑化」鉱石への対応
  - 中～小規模鉱山への対応

鉱山/生産規模  
 大規模  
 中小規模

選鉱技術  
 採掘技術

現在の開発領域

低品位  
 高品位  
 鉱石品位

ベースメタルの巨大鉱山 メタル量で1,000万トン超  
 数百万～数十万トン メタル鉱量の鉱山開発は？  
 レアメタルの場合、単独鉱種であればメタル鉱量で  
 せいぜい数万トン程度

## 巨大銅鉱山の代表例

|   | Tonnes、粗銅<br>(billions) | Cu (%) | Au Grade<br>(g/t)    | Cu Eq.<br>Grade(%) |
|---|-------------------------|--------|----------------------|--------------------|
| Grasberg<br>(Freeport/RTZ/other)                      | 2.77                    | 1.09   | 0.97                 | 1.71               |
| Oyu Tolgoi<br>*0.6% Cu eq. cut-off<br>(Ivanhoe Mines) | 2.31                    | 1.16   | 0.35                 | 1.35               |
| Escondida<br>(BHP/RTZ/Mitsubishi)                     | 2.52                    | 1.14   | -                    | 1.14               |
| Collahuasi<br>(Faconbrigde/Anglo/Mitsui)              | 1.85                    | 0.91   | -                    | 0.91               |
| El Teniente<br>(Codelco)                              | 1.13                    | 1.02   | -                    | 1.02               |
| Chuquibambilla<br>(Codelco)                           | 2.35                    | 0.76   | -                    | 0.76               |
| Andina<br>(Codelco)                                   | 2.06                    | 0.86   | -                    | 0.86               |
| *Erdenet  | 1.30                    | 0.63   | Au-none<br>Mo 0.016% |                    |

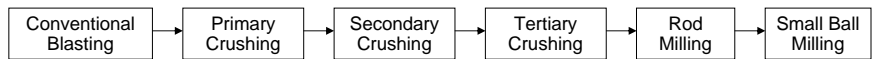
## 将来予想される「選銅」へのマイナス因子

- ・ 大規模銅山から中・小規模銅山への移行（銅量の問題）
- ・ 未開発地を対象とした探銅／銅山開発へのシフト
- 銅など低品位化・分離困難銅石への進行  
（カットオフ品位の低下、選銅成績の低下、尾銅の大量発生、  
選銅用水、坑廃水処理など）
- ・ 環境問題による銅山開発のスリム化（低負荷）、労働条件等
- ・ 省エネルギープロセスへの転換
- ・ その他、国際資源需給の変動、**資源技術者の減少**など

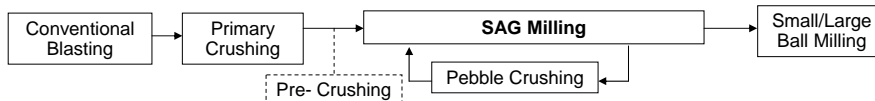
## 個別の要素技術で見る現状と課題

| 要素技(プロセス)         | 現状と課題   | 環境・効率等との関連  |
|-------------------|---|---|
| 粉碎                | 膨大なエネルギー消費<br>材料(摩耗等影響)の消費  | 電力消費とCO <sub>2</sub> 問題   |
| 浮選                | 浮選効率の改善<br>特に低品位鉱への低回収率   | 単位回収量当たりが発生する<br>不純物、廃滓の増加  |
| SX-EW<br>(銅の湿式工程) | ・一般的な硫化鉱の浮選で回収される90~95%と比較すると、銅の回収率が総じて低い:75~80%<br>・大量の硫酸使用<br>・EW時の膨大なエネルギー消費 | ・単位回収量当たりが発生する不純物、廃滓の増加<br>・土壌や水質、あるいは大気環境の問題<br>・電力消費とCO <sub>2</sub> 問題 |

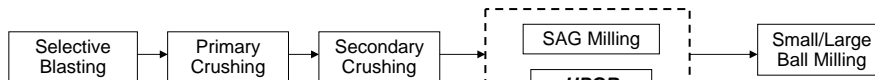
## 粉碎プロセスの変遷と今後の可能性



1970年代を中心とする伝統的な粉碎系統



1980年代に登場したSAGミルを導入した粉碎回路  
(若干の変更はあるが1990年代以降、主流となる)

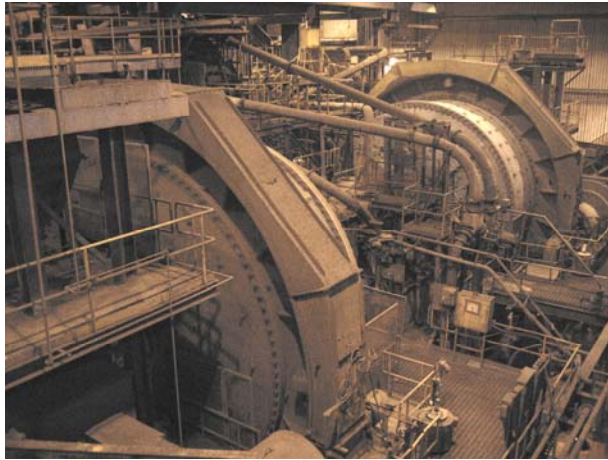


2010年以降、新しい粉碎系統の可能性と概念図

次世代の粉碎機になり得るか？

- HPGR: High Pressure Grinding Roll
- マイクロウェーブアシスト粉碎法(UK、南アより提案)
- プラズマ破碎法 ……………、電気破碎

出典(一部改良): J.M. Menacho; Proc. of "First Meeting on Minor Element Contaminants in Copper Metallurgy", p.169-189, 2007,



アラスカ Red Dog鉱山(鉛・亜鉛)のSAGミル粉碎回路

○Φ10m以上のものが多くの鉱山で使用

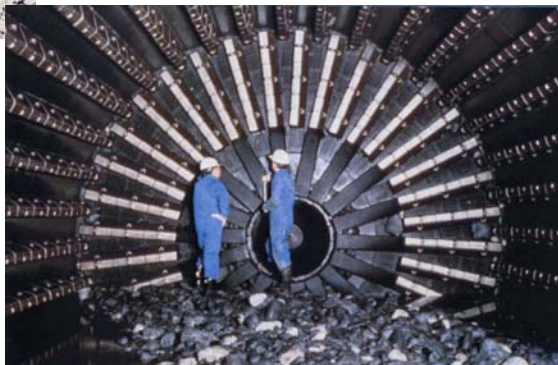
○コンタミが少なく、微粉碎が可能でボールミルとの組み合わせで粉碎効率を高めている



SAGミル



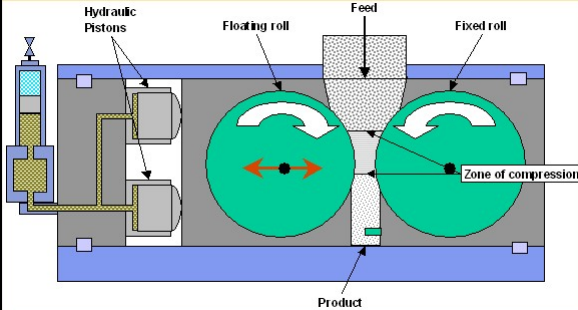
Mesto minerals  
社資料より





次世代の粉砕機になり得るか？

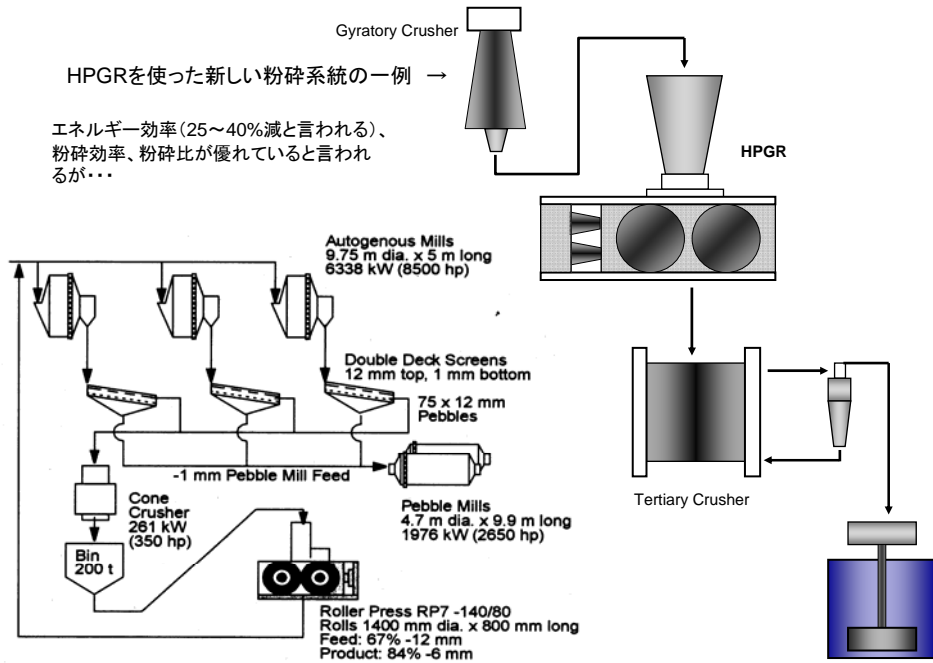
### HPGR: High Pressure Grinding Roll



Prof. Dr. Schönert(ドイツ)も新型粉砕機として言及  
セメント、鉄鉱石粉砕に1980年頃から導入  
<http://www.polysius.com> より

HPGRを使った新しい粉砕系統の一例 →

エネルギー効率(25~40%減と言われる)、  
粉砕効率、粉砕比が優れていると言われ  
るが...

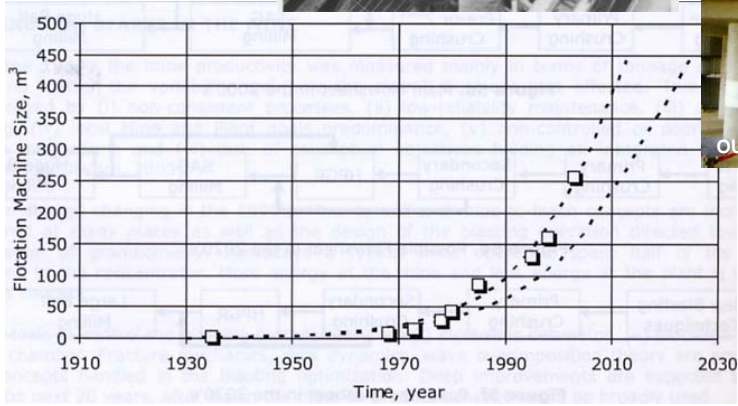
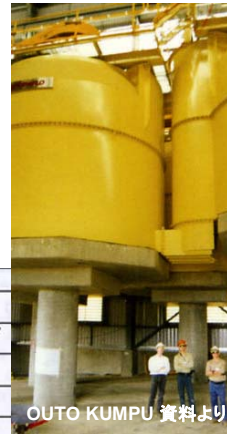


Technical Report by S. K. Kawatra et al., Michigan Tech. Univ. 2002.

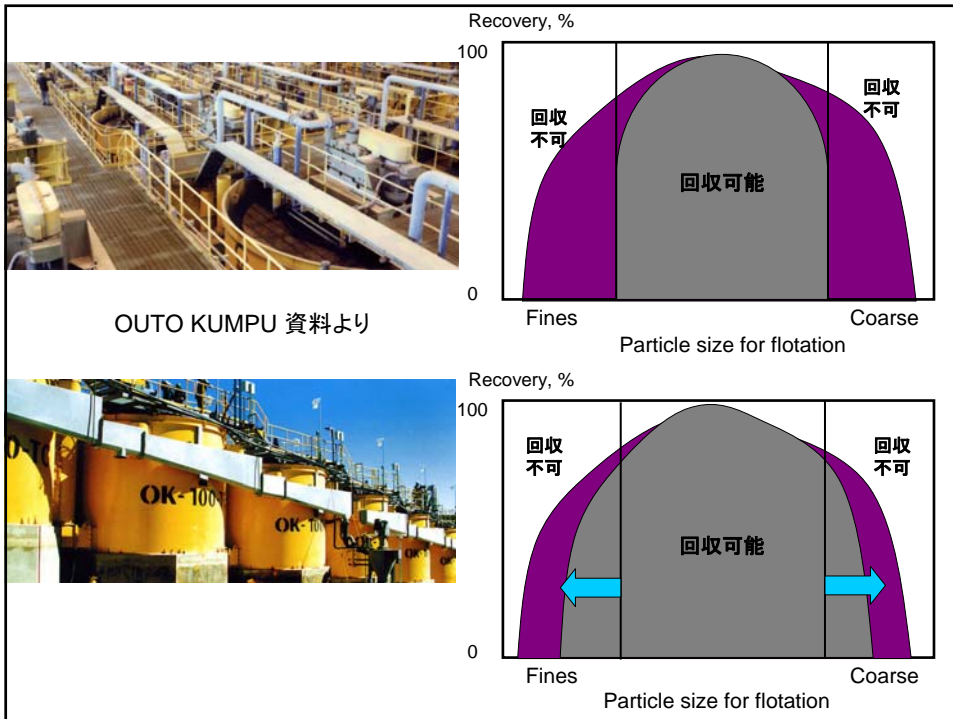
# 浮選セルの大型化

## Tank Cell Flotation

右) Wills', Mineral Processing Technology (7th Edition), B.A. Wills, T.J. Napier-Munn, ELSEVIER, 2006 (p.310)より引用-160m<sup>3</sup> Tank Cell-

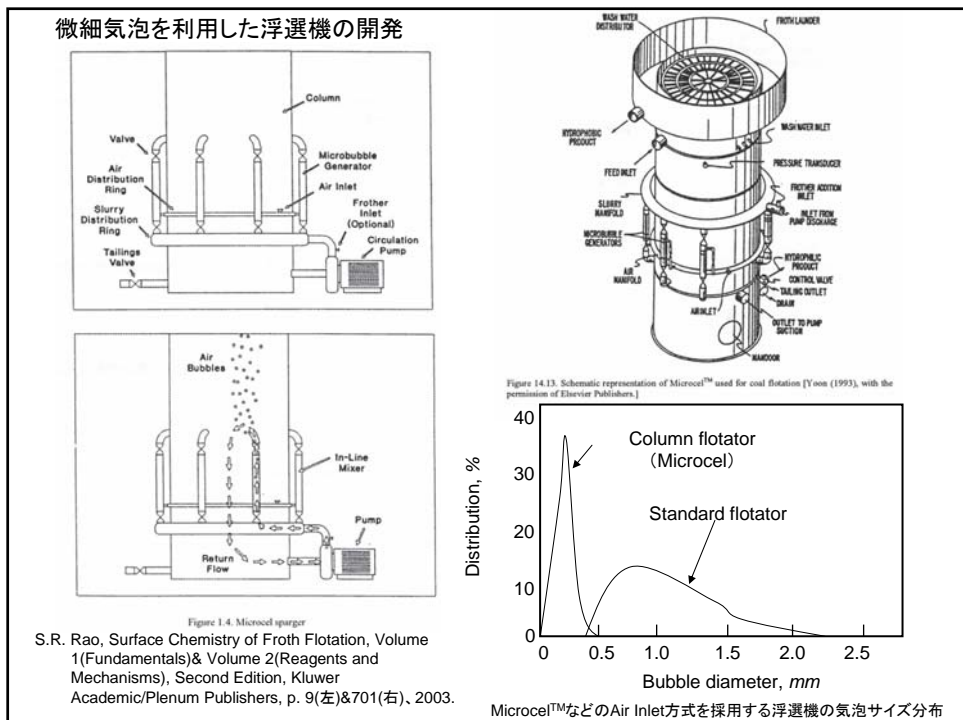
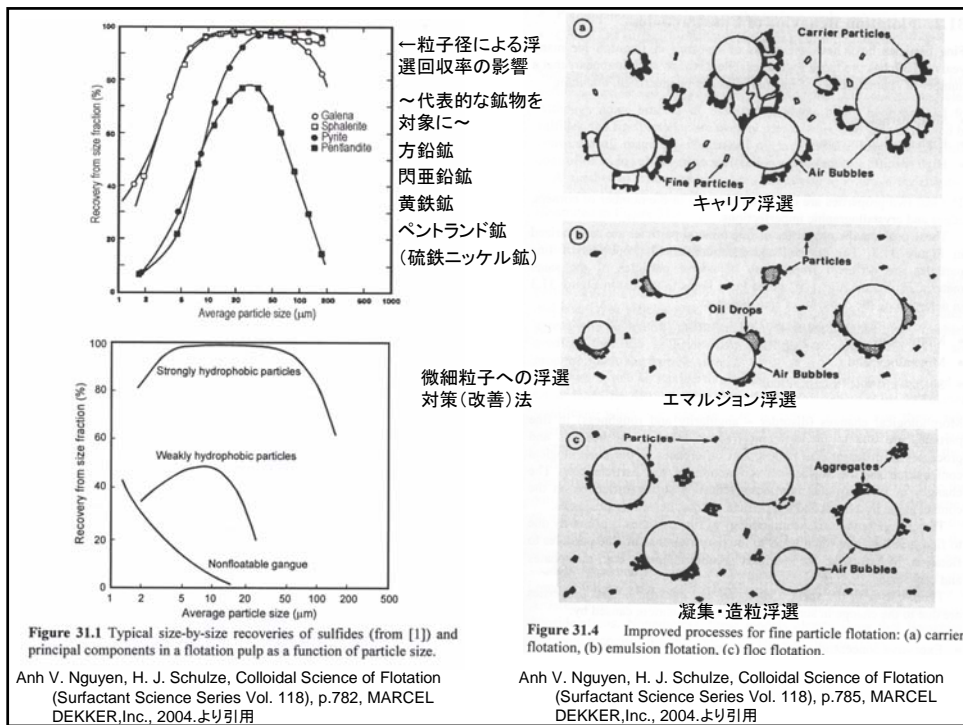


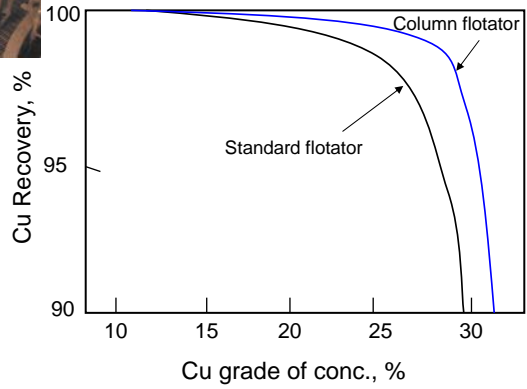
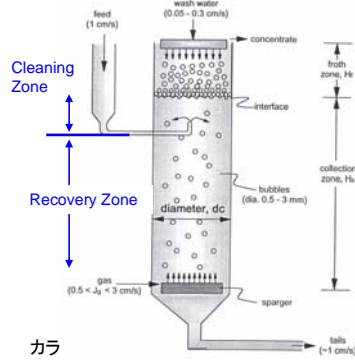
出典: J.M. Menacho; Proc. of "First Meeting on Minor Element Contaminants in Copper Metallurgy", p.178, 2007,



OUTO KUMPU 資料より

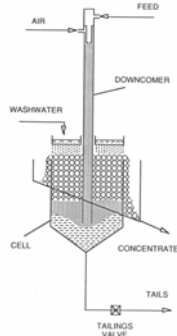






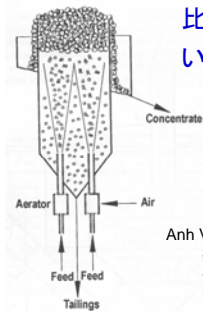
Wills', Mineral Processing Technology (7th Edition), B.A. Wills, T.J. Napier-Munn, ELSEVIER, 2006 (p.310&312)より引用

K.A. Matis, Flotation Science and Engineering, p.292&334, MARCEL DEKKER, Inc., 1995.より引用



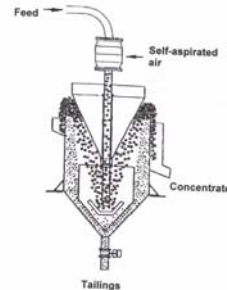
Jameson Cell (Single-downcomer)

比較的、新しく開発されている浮選機の一例



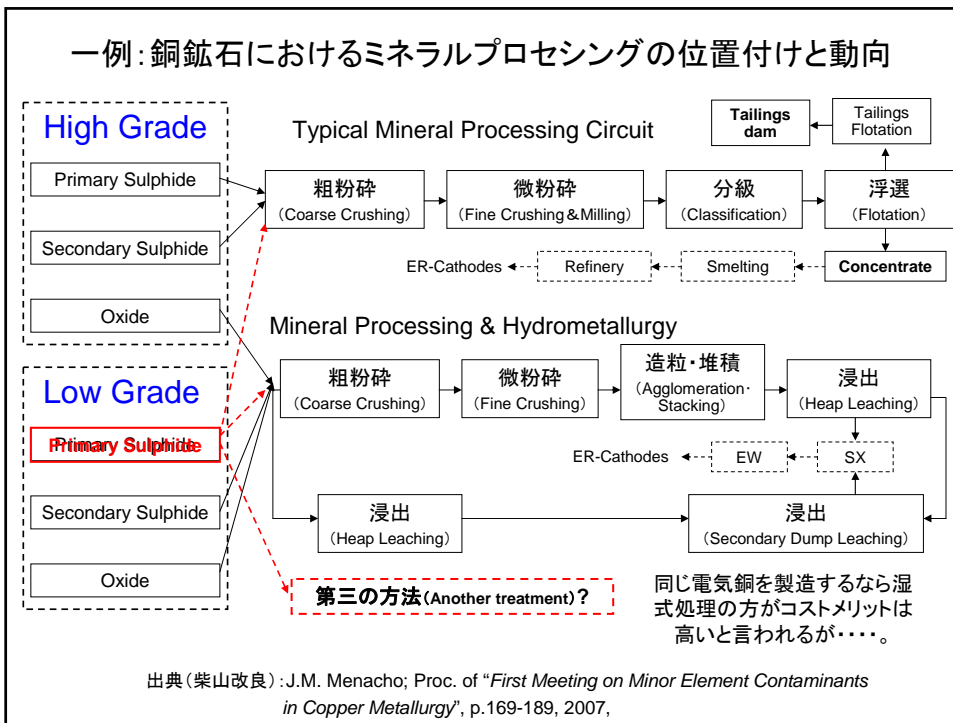
Bahr cell

Anh V. Nguyen, H. J. Schulze, Colloidal Science of Flotation (Surfactant Science Series Vol. 118), p.836&837, MARCEL DEKKER, Inc., 2004.より引用

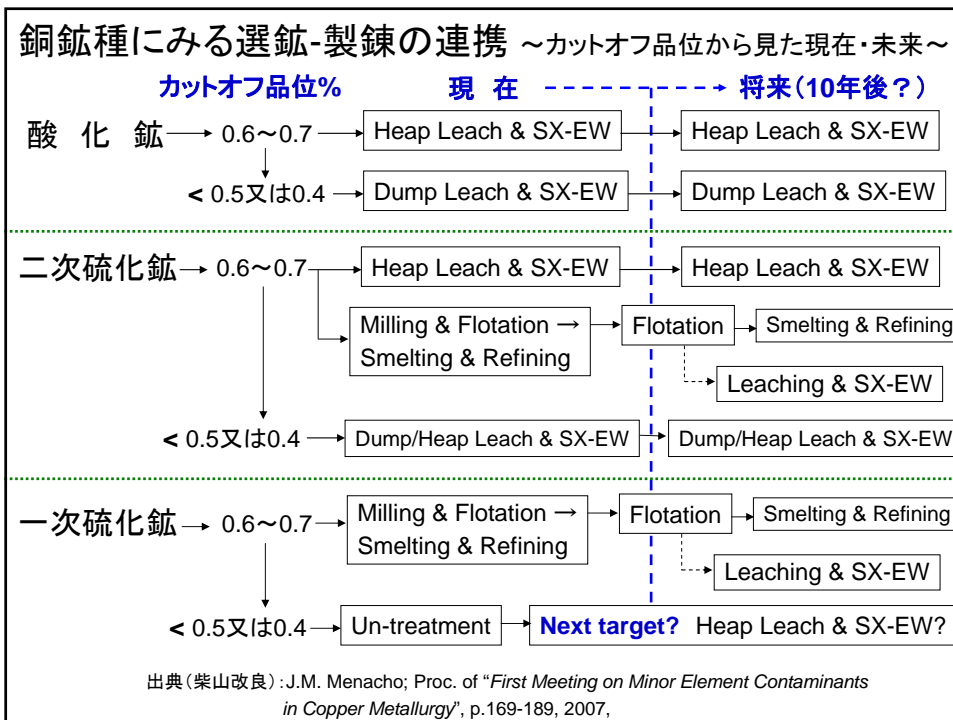


Imhoflot™ vertical cell

一例：銅鉱石におけるミネラルプロセッシングの位置付けと動向



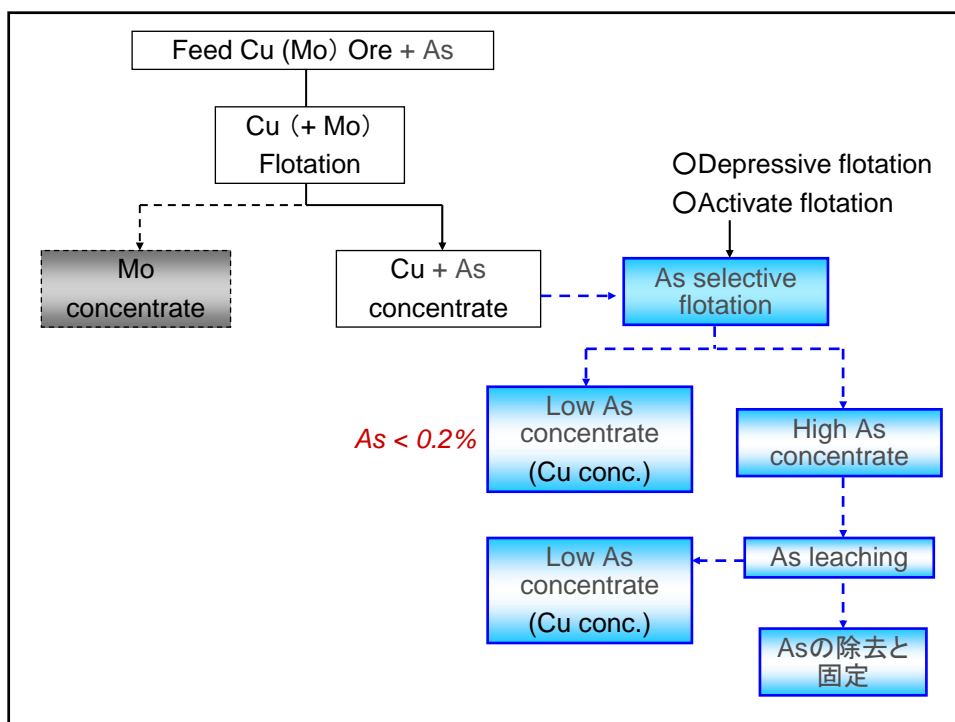
銅鉱種にみる選鉱-製錬の連携 ~カットオフ品位から見た現在・未来~



## チリ・CODELCOの選鉱分野の課題

(対象物から見た具体的テーマの抽出、2007.11月ヒアリング JOGMEC共同調査)

1. エナージェイト(Enargite,  $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ )などヒ素鉱物と銅鉱石の分離  
例えば、黄銅鉱と砒化銅鉱との分離など
2. 黄鉄鉱の選択的な浮選除去  
スラグ量を減らす、 $\text{SO}_2$ ガスの発生分を減らすために、  
黄鉄鉱を浮選の段階で選択的に除去したい。
3. 除去した砒素の固定と煙灰対策
4. バイオリーチングへの選択性と浸出率(黄銅鉱)アップ  
+選鉱処理との組み合わせ



## 選鉱分野に求められるアカデミックな課題と技術とは

～ミネラルプロセッシングの効率と学術的発展の追求として～

- 微粒子と粗粒子分離の効率化
- ミネラル粒子の選択的相互分離
- (液相からの)微粒子の相互分離
- 2液混合系の制御-分離

バルクで見た性質と  
単一粒子がもつ性質  
の使い分け

表面化学と流体力学を利用した粒子の選択活性や抑制、凝集・分散の制御

→ 新しい分離機構、反応場の操作

○In-situリーチングは経済的側面では興味深い(選択発破など)、環境対策への付加技術が必要。

ただし、深部化・低品位化への移行状況や「黄銅鉱」への浸出にブレークスルーできれば期待できる。

### 1. 選鉱プロセスの最適化(不純物の多い鉱石を含め)

### 2. 精鉱生産におけるコスト抑制

↓  
選鉱成績の悪化、選択的な不純物除去  
ができなければ「製錬」への負荷が増大

### 3. 省エネルギー化

粉碎工程の省電力化(ミルの方式変更。マイクロウエーブ、電気・プラズマ利用など)

### 4. 水の問題(特に乾燥地にとっては重要な問題)

海水の淡水化(膜利用など)?どの程度塩分を抜くか?→選鉱プロセスへの影響  
腐食性、pHとEhのコントロール、場合によっては塩素(NaCl)やアルカリの影響

### 5. 浮選尾鉱からの再回収

低回収率プロセス時代などTailing Damを含む浮選尾鉱が対象

金、白金あるいは銅の浮選尾鉱からは一部回収プロセスが実用化されている

cf. マグネタイト回収なども

### 6. 選鉱廃水(廃滓)・坑廃水やTailing Damなどの環境問題

5や6は海外でも注目され、一部実用処理がされているが、コスト&環境の問題、時間軸の考え方などの課題がある。

## その他、代表的鉱石・鉱種の選鉱例は

ウラン鉱 粉碎 → 浸出 → 洗浄 → 溶媒抽出 →

(比重選鉱、古くは浮選も採用)



Yellowcake / 結晶化

コバルト鉱

硫コバルト・ニッケル鉱 → 以前は浮選も採用されたが現在は湿式製錬で処理可能

カローライト( $\text{CuCo}_2\text{S}_4$ )・輝コバルト鉱( $\text{CoAsS}$ )など → ザンセート系浮選による精鉱回収

タングステン鉱

Scheelite:  $\text{CaWO}_4$  → 比重選鉱、オレイン酸等による浮選で精鉱回収

Wolframite:  $(\text{Fe,Mn})\text{WO}_4$  → 比重選鉱、磁選、静電選鉱(希に浮選)で精鉱回収

金鉱

粉碎 → 比重選鉱(濃縮) → シアン浸出+CIP法 → Bullionへ

白金族は粉碎後、浮選により精鉱回収(硫化鉱-ザンセート)



モリブデン鉱

銅とのバルク浮選で分離、  
選択浮選で精鉱濃縮



## 参考までに「レアアース」の選鉱は

### モナザイト／バストネサイト(北方鉱)／ゼノタイム鉱石

→ 他鉱石との混合物であることが多く、一般的に比重選鉱や浮遊選鉱、磁力選鉱、静電選鉱など選鉱学的な分離法が採用される。

精鉱を回収後、酸(硫酸)浸出やアルカリ浸出によってレアアースを分離し、浸出液に対し溶媒抽出を行う。場合によっては100段を越す溶媒抽出(ミキサーセトラ)が行われ、元素種ごとに濃縮／分離される。

抽出剤にはD2EHPAなどのリン酸エステル、同じくリン酸系のTBP、カルボン酸種、アンモニウム塩などが用いられる。

### イオン吸着型鉱石

→ イオン吸着型という鉱石の成因が影響し、鉱石からの浸出とイオン交換によって比較的容易に希土類元素を回収可能。

選鉱学的手法も考えられるが、多くは浸出操作となる。イオン交換には陽イオン交換が行われ、アンモニウム溶液などを使う。

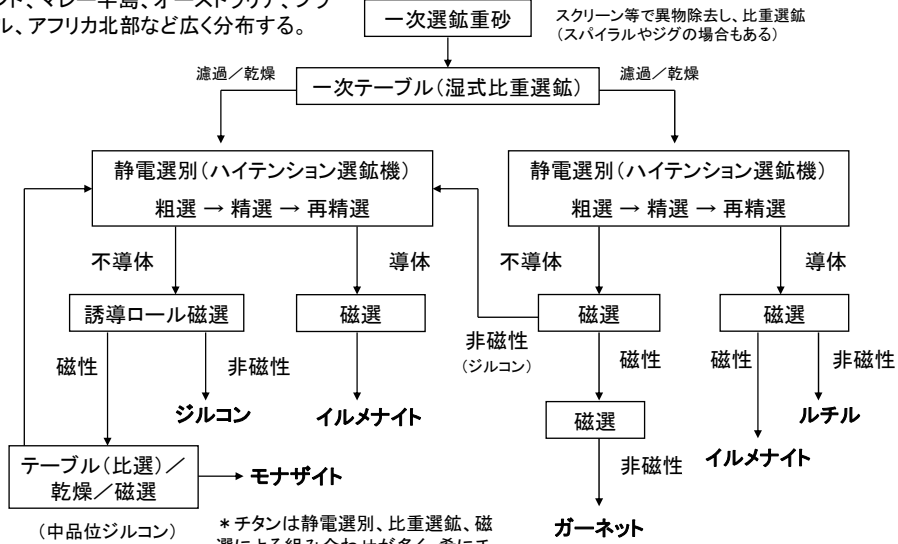
溶離液は炭酸塩もしくは有機酸による沈殿回収がなされ、塩化物や炭酸塩あるいは酸化物として回収することになる。

当然、分離後の溶媒抽出も重要な手法。



## 重砂鉱床系の選鉱フロー例

\* (重)砂鉱床タイプの鉱石は、アメリカ、インド、マレー半島、オーストラリア、ブラジル、アフリカ北部など広く分布する。



\* チタンは静電選別、比重選鉱、磁選による組み合わせが多く、希にチタン鉄鉱に浮選が採用される

大町・山本; 浮選(資源処理技術)、Vol.31(No.4)、1984、p.267を加工

## 中小規模鉱山、将来の開発の可能性はあるのか？

メタル量を逆手に取った(メジャーの“穴”を狙う?)

コンパクトプロセッシング/モビリティ・コンセントレーターの開発?

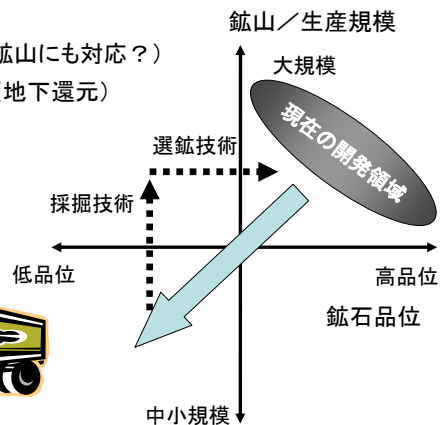
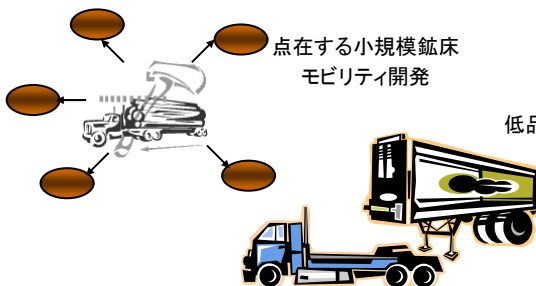
○選鉱一式のモビリティはもちろん、湿式製錬を組み合わせた坑内処理型コンパクトプロセス技術(可搬型)の開発

→ 集約的かつ局所的開発

(比較的規模の小さいレアメタル鉱種鉱山にも対応?)

坑内選鉱、ズリ・尾鉱の直接坑内充填(地下還元)

運搬物の低減



**Mobility Concentrator**は実現できるのか……？

## Powerhouse Module

teckcominco

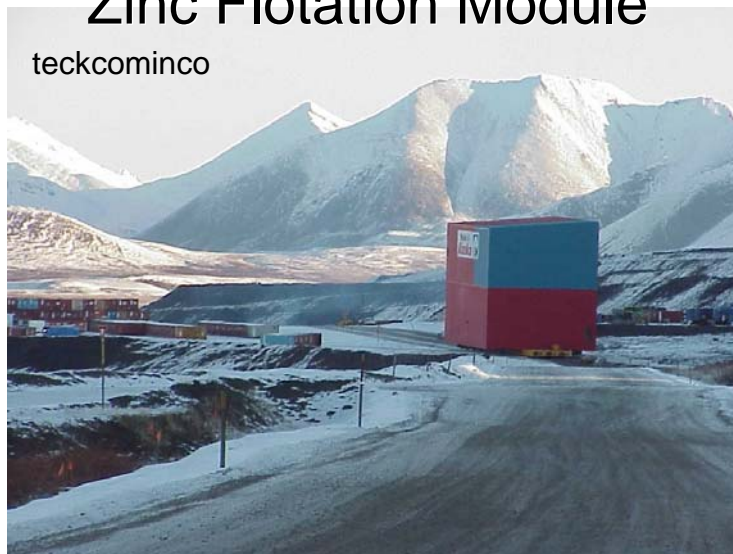
世界最大の亜鉛鉱山「RED DOG(アラスカ)」の資料より



**Mobility Concentrator**は実現できるのか……？

## Zinc Flotation Module

teckcominco



世界最大の亜鉛鉱山「RED DOG(アラスカ)」の資料より

## Zinc Flotation Circuit



世界最大の亜鉛鉱山「RED DOG(アラスカ)」の資料より

### 破碎(粉碎)・選別、分離・濃縮



選鉱＝ミネラルプロセッシングのアプリケーションとして

リサイクル、特に前処理濃縮に重点を置いた活用

(他にも土壌洗浄法、坑廃水処理など)

○二次原料を「新しい精鉱レベルに！」を目標に利用・  
技術展開(開発)

○ここでも選鉱・製錬の上手な連携が必要

将来的には海底資源の選鉱にも期待

## まとめ

近い将来、間違いなく課題となる

○「深部化・低品位化・複雑化」鉱石への対応

○中～小規模鉱山への対応



1. 処理困難な低品位鉱石の増加(カットオフ品位の低下)
2. 不純物の多い鉱石
3. 選鉱用水の問題(環境、乾燥地域での問題)
4. 尾鉱(廃滓)の管理と再回収、環境問題
5. 省エネルギープロセスへの転換

選鉱技術の高度化、  
リーチングを含めた技術  
の飛躍が必要

選鉱の分かる日本人技術者は……？