

海底熱水鉱床開発のための 海底選鉱に関する研究

海洋開発系

中島 康晴、山本 讓司、金田 成雄、高橋 一比古、正信 聡太郎

東京大学

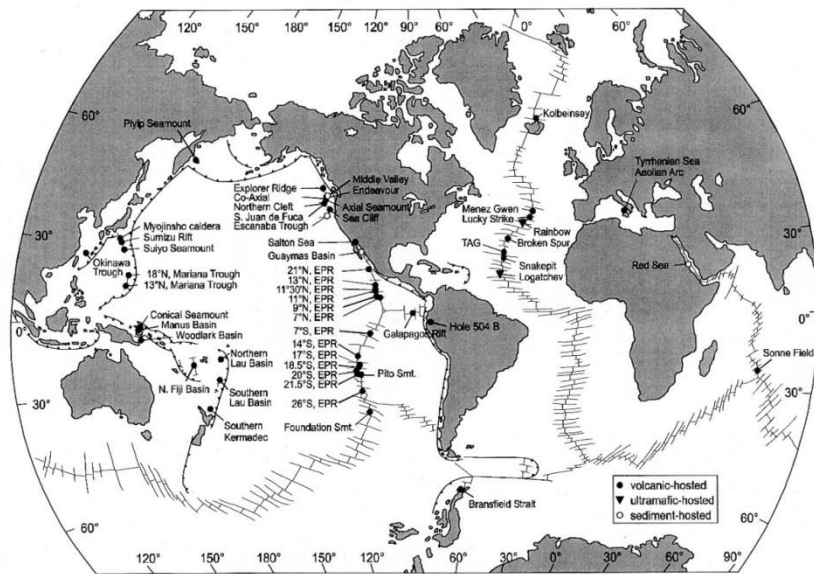
生産技術研究所 ソートンブレア

大学院工学系研究科 藤田 豊久



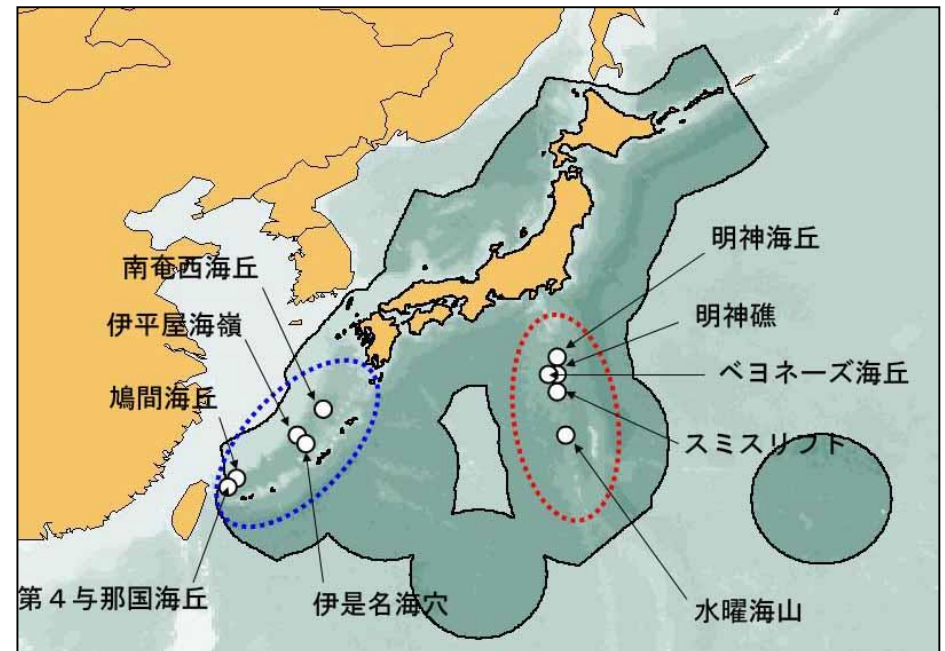
海底熱水鉱床とは

- 海底から噴出した熱水に含まれる硫化鉱物等が析出・沈殿して形成。
- 銅、亜鉛、鉛などのベースメタルを多く含む。
- 海洋底プレート境界に沿って分布。
- 日本周辺海域では、沖縄トラフ及び伊豆・小笠原海域で多数発見。



世界の海底熱水鉱床の分布

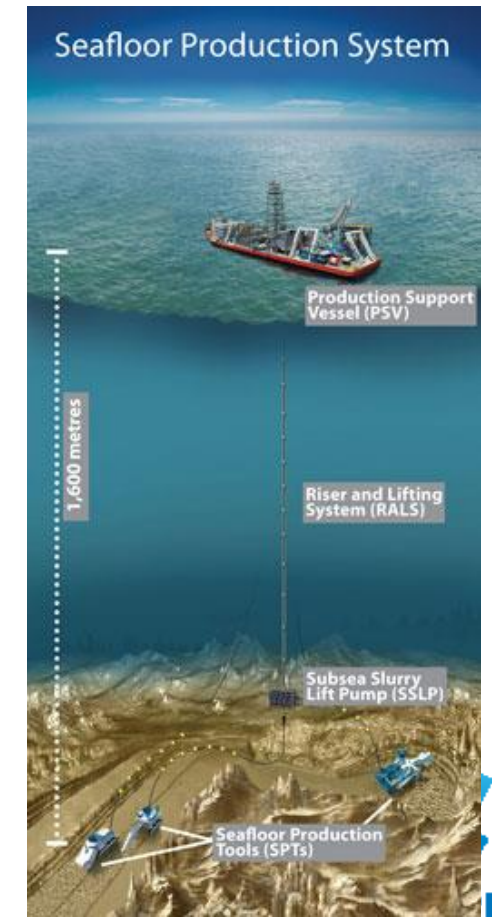
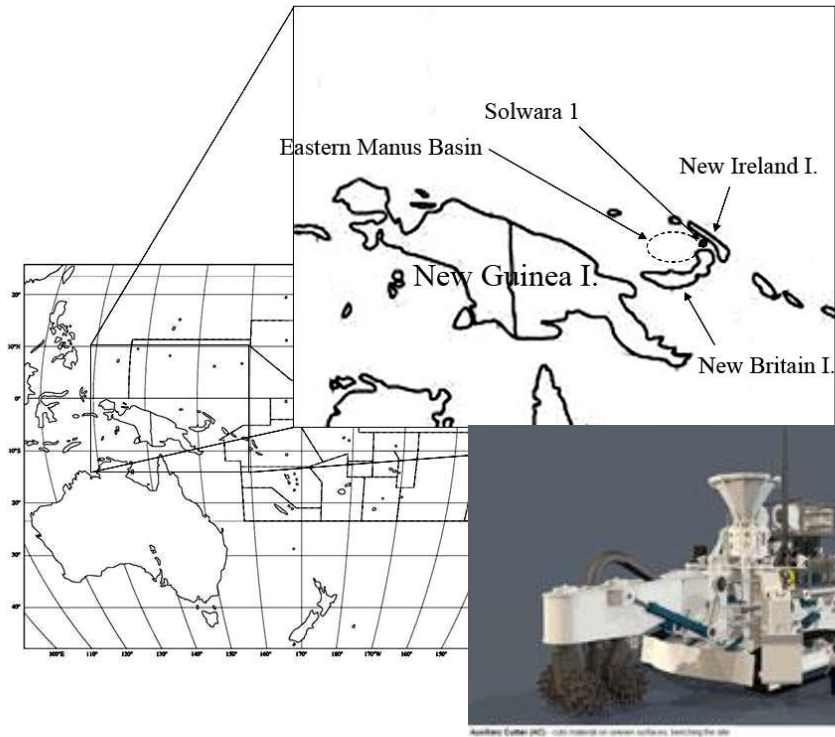
出典: ISA, Polymetallic Massive Sulphides and Cobalt-Rich Ferromanganese Crusts: Status and Prospects (2002)



日本周辺海域における主な海底熱水鉱床

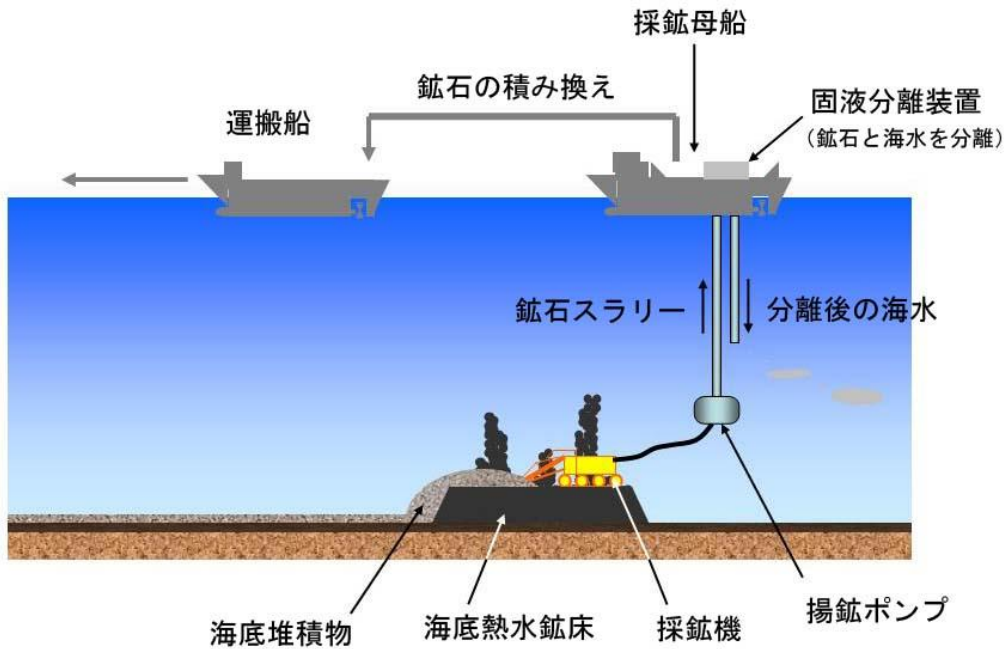
海底熱水鉱床の開発を巡る動き

- 海底熱水鉱床の開発を目指す動きが国内・国外で進行。
- Nautilus Minerals社によるパプアニューギニアでの海底熱水鉱床開発プロジェクトが2019年の商業生産開始を目指して進行中。
- 我が国でも海底熱水鉱床採鉱システムの研究開発が進捗。



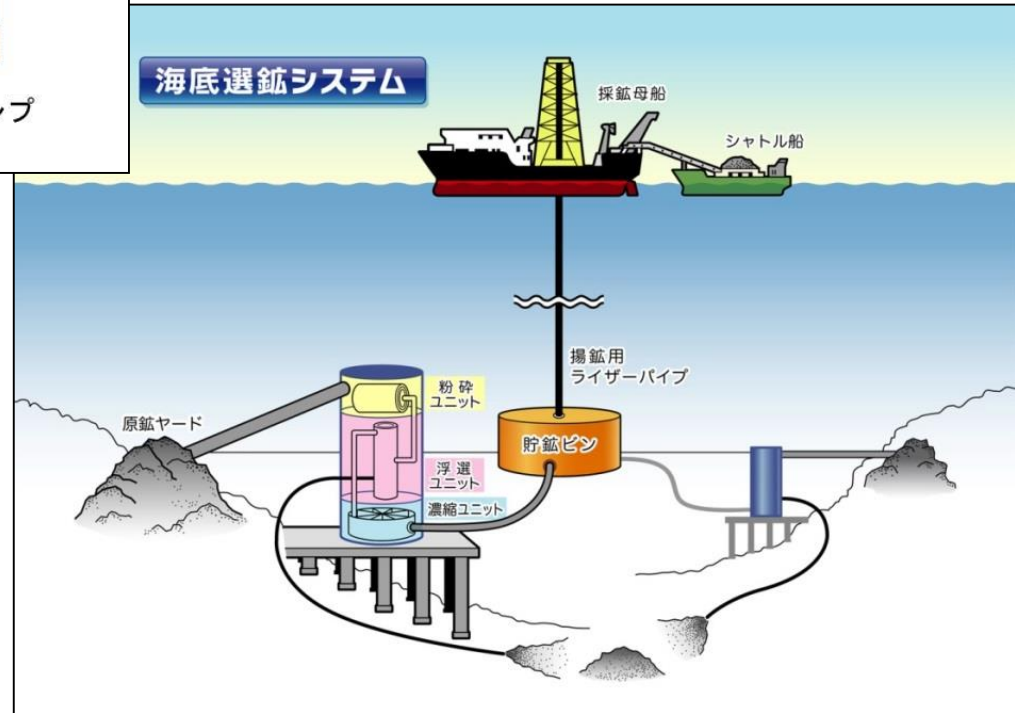
Nautilus Minerals 社のプロジェクトで使用される採鉱システムのイメージ

出典: Nautilus Minerals 社ウェブサイト

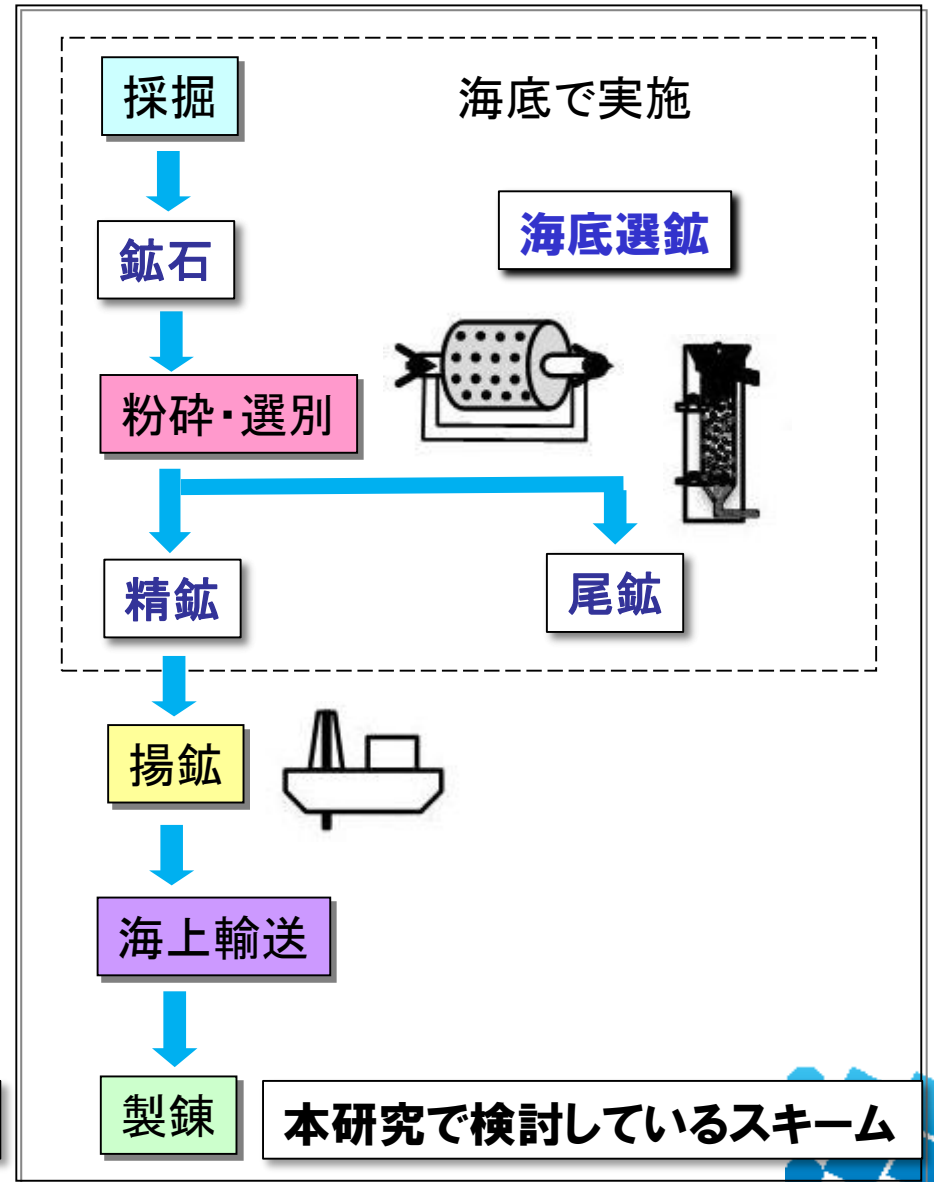
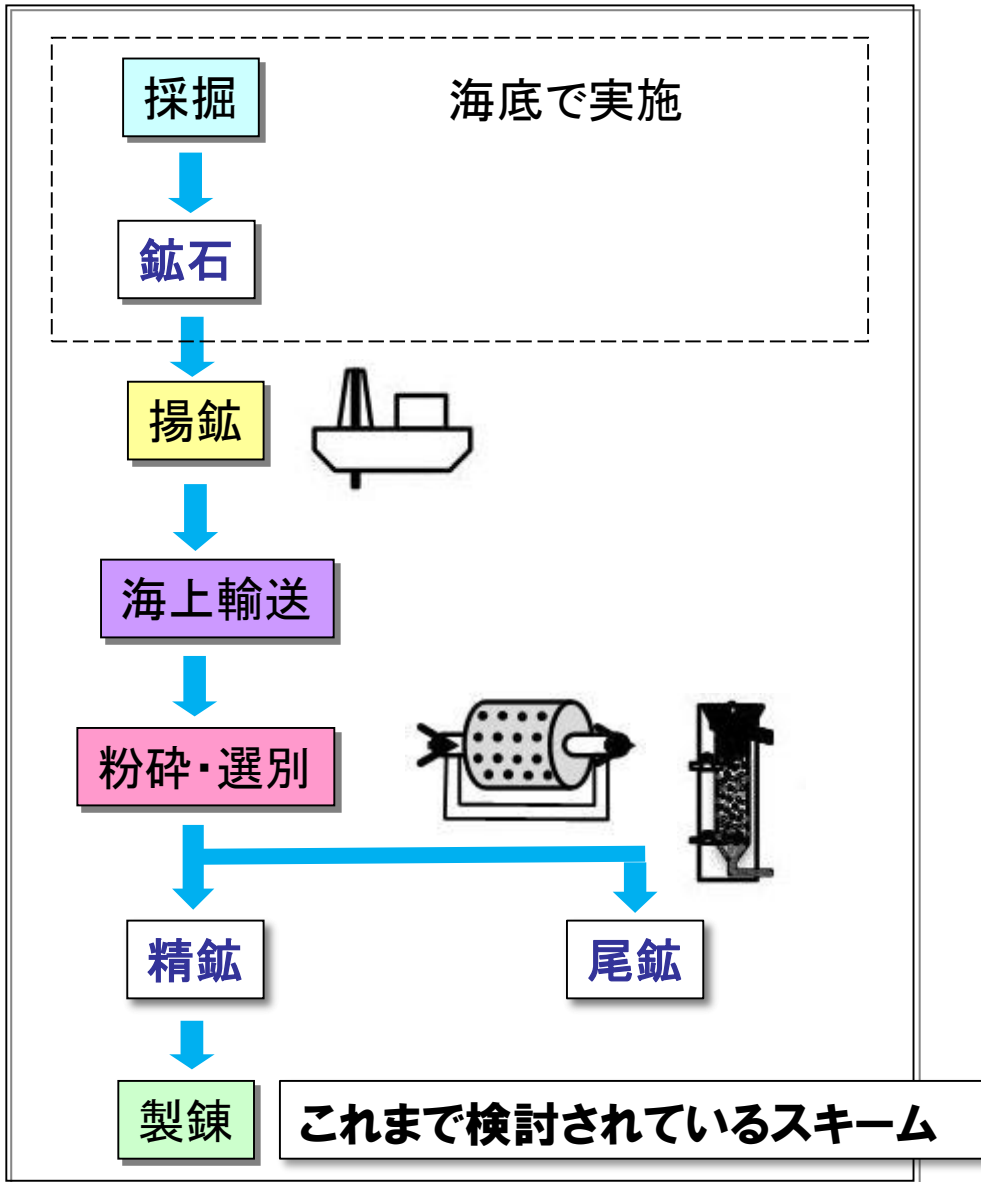


これまで検討されている採鉱システム

本研究で提案している海底選鉱システム



採掘から製錬までの流れ

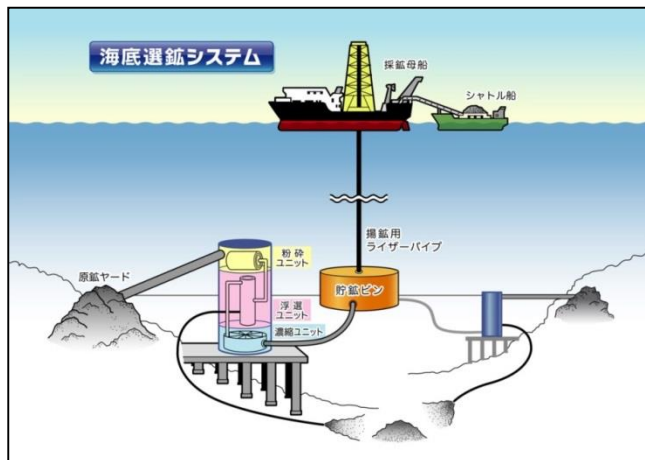


海底選鉱のコンセプト

- 海底で採取した鉱石の粉砕や有用鉱物の選別をその場で行う。
- 既存の選鉱技術を要素技術として適用。
- 粉砕・選別等の個別の操作を行うユニットを組み合わせることで海底選鉱システムを構成。
- 粉砕ユニット：百～数百 μm 程度のサイズにまで鉱石を粉砕。
- 選別ユニット：粉砕した鉱物粒子から有用鉱物を選別。

類似の研究事例

- “比重差を用いた海底一次選鉱手法の開発”（山本，大阪府立大学）
- 海底油・ガス田におけるSubsea Processing



海底選鉱システムのイメージ

コストダウンが期待される要素

- 揚鉱量の削減→揚鉱ポンプやライザーパイプのコスト低減
- 洋上での一時貯鉱量の削減→採鉱母船のコスト低減
- 海上輸送する鉱石量の削減→海上輸送のコスト低減

コストアップが懸念される要素

- 海底選鉱システムの初期コスト
- 海底選鉱システムのランニングコスト（所要電力、メンテナンス等）

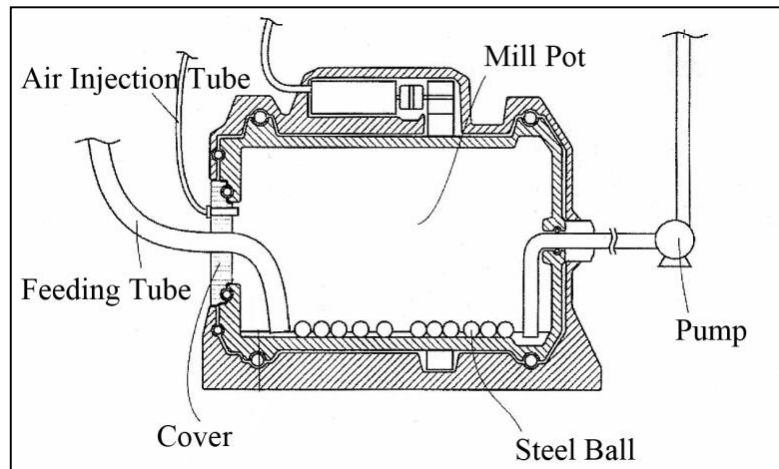


トータルでの採鉱コストの低減



粉砕ユニット:コンセプト

- 鉱石の粉砕技術には、鉱石のサイズに応じてジョークラッシャ、ジャイレトリークラッシャ、ボールミル等がある。
- 海底選鉱用粉砕ユニットの要素技術としてボールミルの適用可能性を検討。



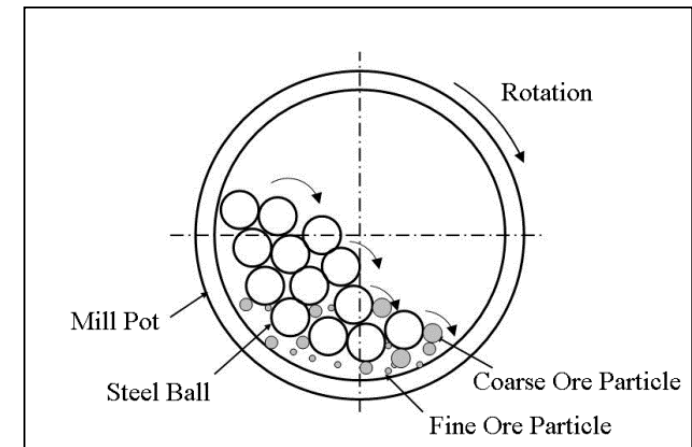
粉砕ユニットの概念図

耐圧容器(密閉容器)ではなく、外部開放型の容器(ミルポット)を使用。



陸上鉱山用ボールミルの例

出典: Outotec 社ウェブサイト



ボールミルの粉砕機構

陸上では湿式粉砕(試料に少量の水分を添加して粉砕する)が一般的。

粉碎ユニット：試験装置1

- ボールミルの適用可能性を検討するため、海底に相当する高圧水中条件での粉碎性能を大気圧条件での粉碎と比較。
- 高圧水中で使用可能なボールミル試験装置を製作し、模擬鉱石として珪砂を用いて粉碎試験を実施。

○大気圧条件での粉碎

- ・湿式粉碎
- ・水没粉碎(ミル容器内の空間を水で満たして粉碎)

○高圧水中条件での粉碎(10MPa)

- ・湿式粉碎(容器内に高圧空気を充填し、空気層を維持)
- ・水没粉碎



ミルポットへの珪砂と鋼球の充填

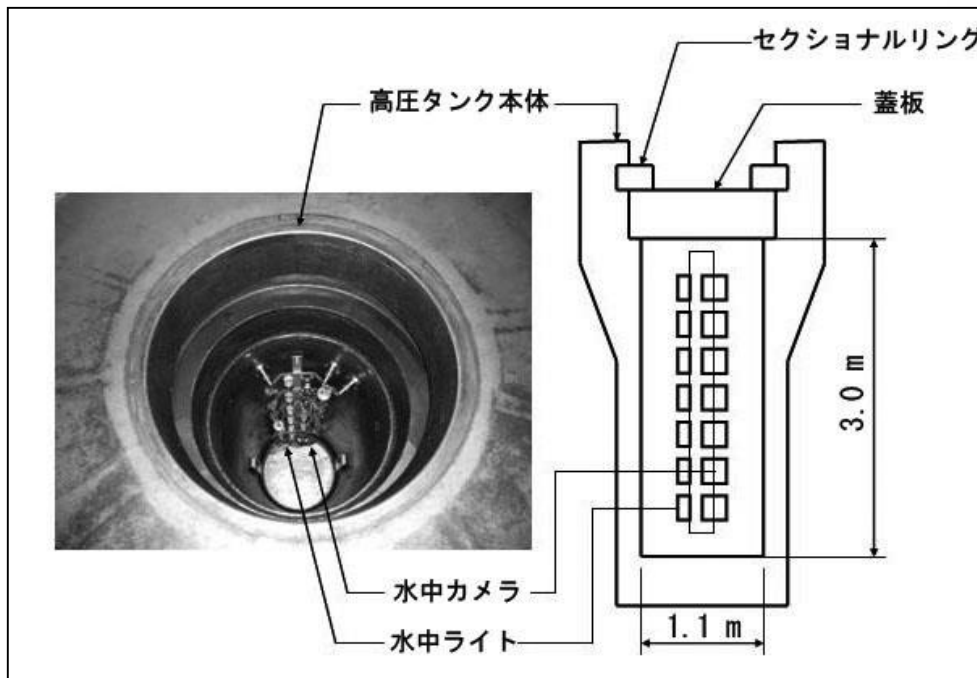


水中用ボールミル試験装置

ミルポット内外の水圧を等しくする均圧機構を採用

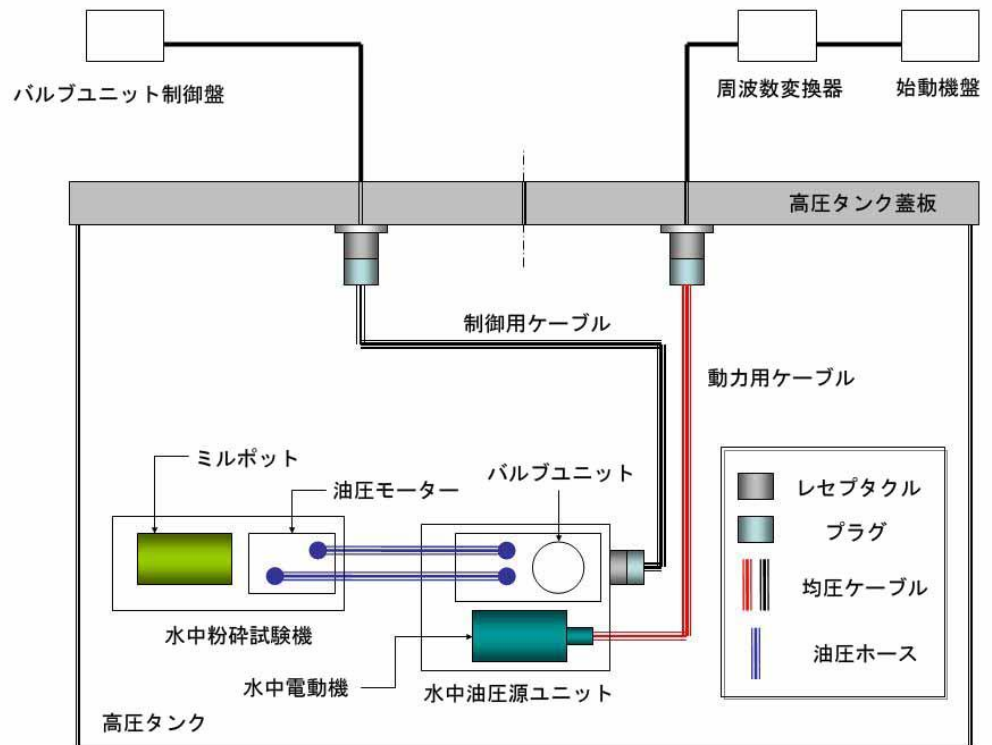
粉碎ユニット:試験装置2

- 水中用ボールミル試験装置を水中油圧源ユニットと接続して高圧タンク内に設置。
- タンク内を所定圧力(10MPa)まで加圧。
- タンク外から電力を供給して油圧源ユニットを稼働し、試験装置を運転。



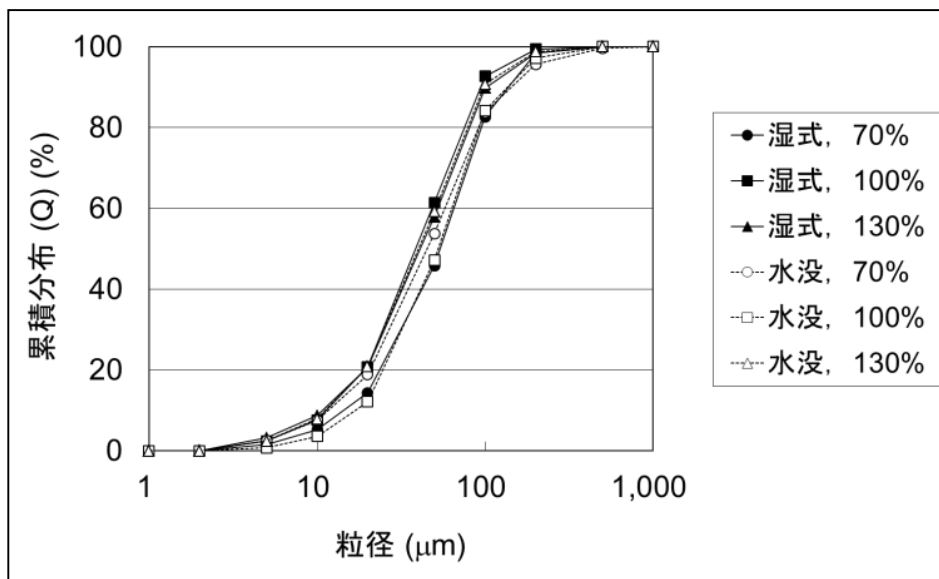
高圧タンクの概要

内径:1.1m、内部深さ:3.0m、最高使用圧力60MPa

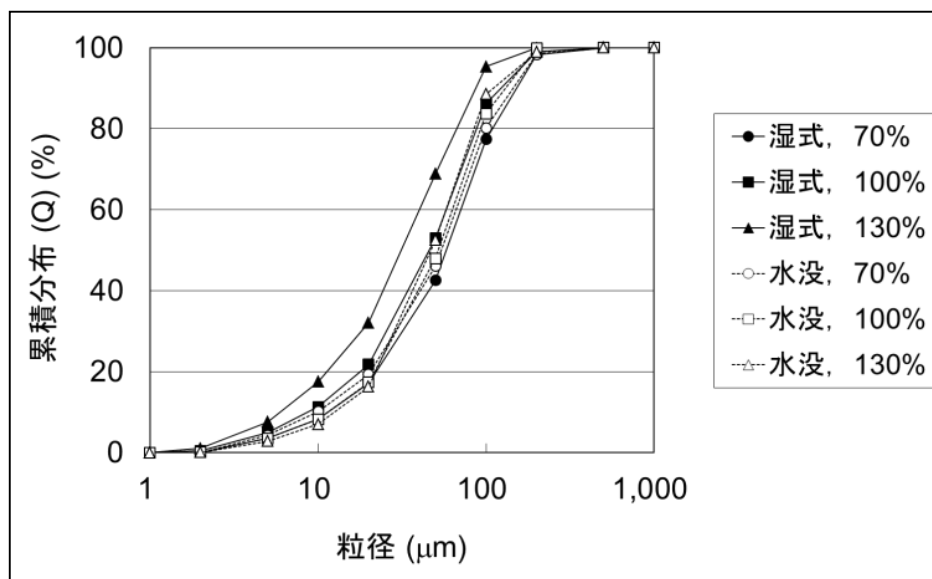


高圧タンク内設置機器への電力供給

大気圧条件での粉砕試験の結果



高圧水中条件(10MPa)での粉砕試験の結果



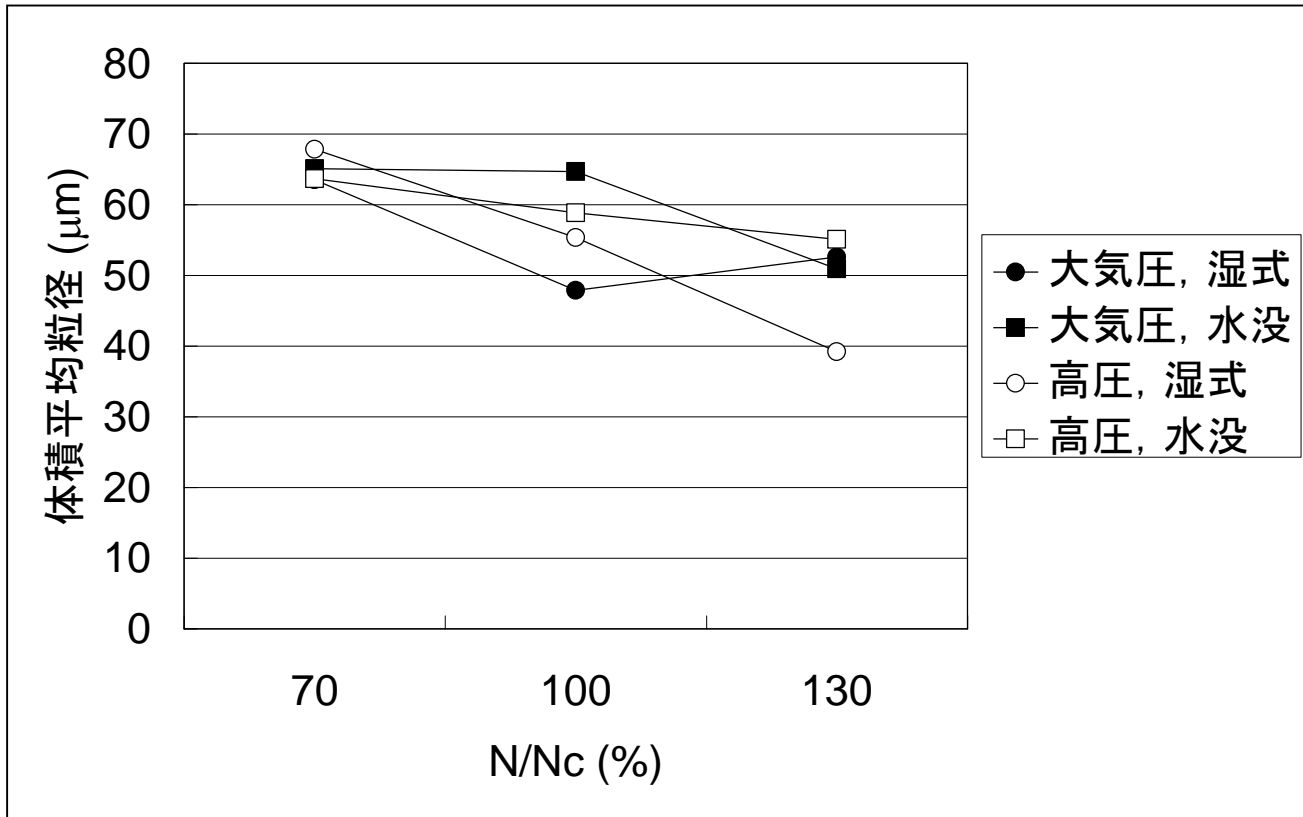
運転特性上のパラメータ:ミルポットの回転数(N)
 (臨界回転数*を100%として70~130%の範囲で回転数を調整)

*臨界回転数[rpm]: N_c

ミルポット内径[m]: D_m

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D_m}}$$



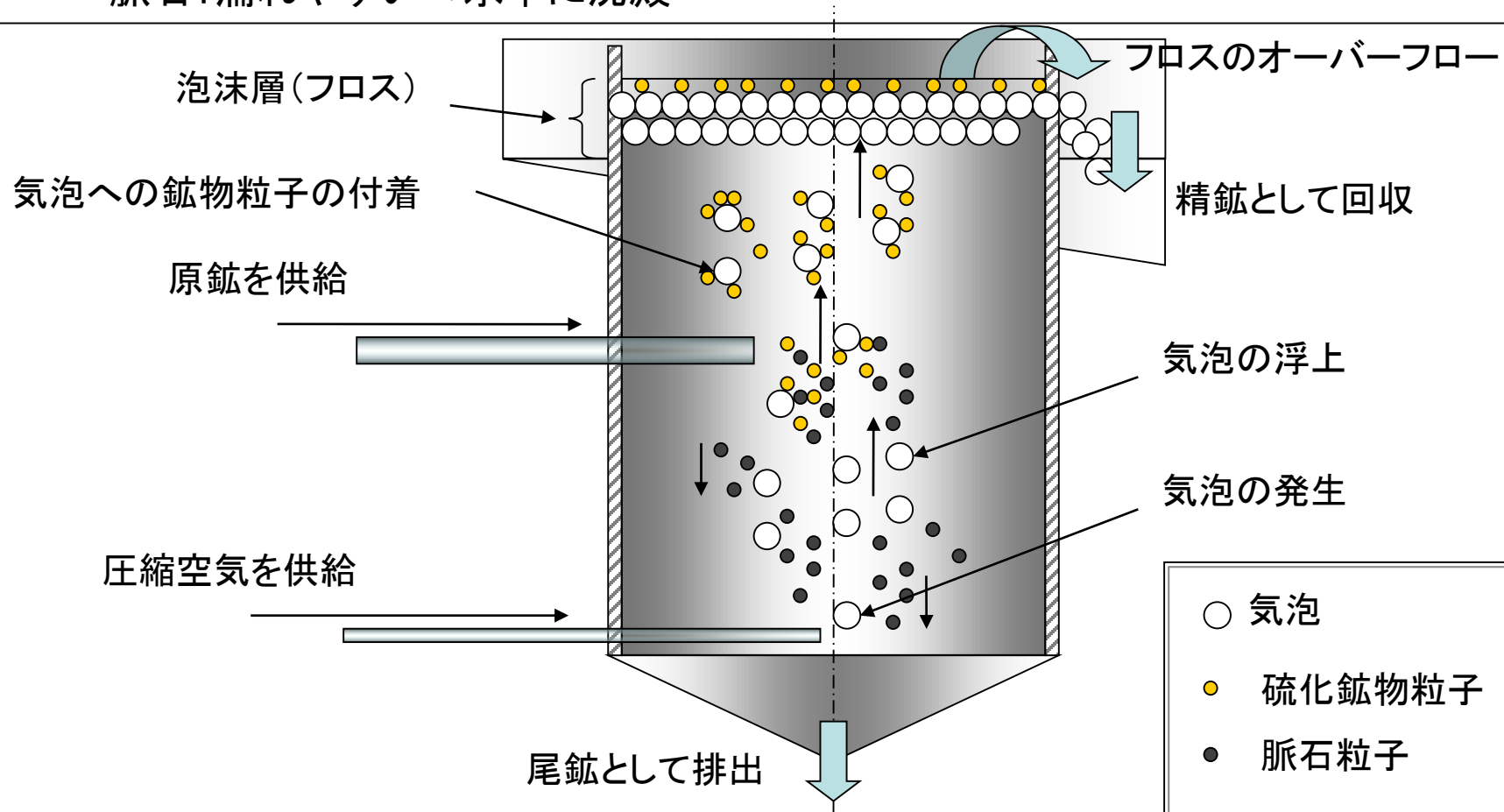


高压水中条件での水没粉碎において、大気圧での湿式粉碎と概ね同等の粉碎性能が得られた。



選別ユニット:コンセプト

- 鉱石の選別(選鉱)技術には、ジグ選別、磁力選別、浮遊選鉱(浮選)などがある。
- 要素技術として、陸上鉱山で一般に使用される浮選の適用を検討。
- 粒子表面の濡れ性の違いを利用。
 - 硫化鉱物:濡れにくい→気泡に付着
 - 脈石:濡れやすい→水中に沈殿



選別ユニット：試験方法

- 浮選の適用可能性を検討するため、海底に相当する高圧水中条件での選別性能を大気圧条件での選別と比較。
- 高圧水中で使用可能な浮選試験装置を製作し、模擬鉱石として黒鉱*を用いて選別試験を実施。

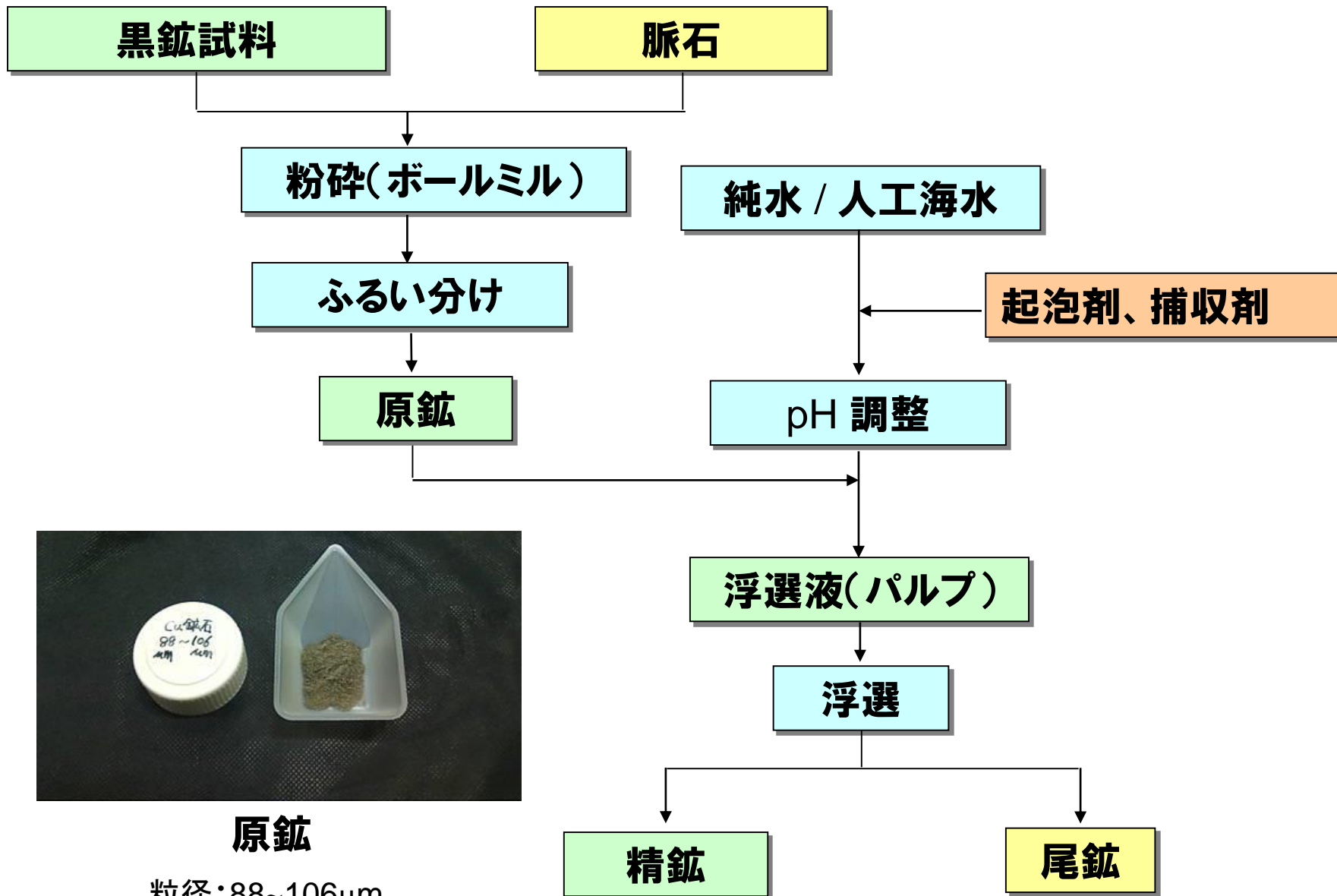
*: 東北地方などで産出する銅や鉛に富む鉱石。日本国内では多数の黒鉱鉱床が開発されていた。

○大気圧条件での試験

- ・気泡及びフロスの発生、並びにフロスのオーバーフローの確認
- ・得られた精鉱、尾鉱を元素分析し、選別性能を確認
- ・浮選液(パルプ)のpH等の条件の最適化

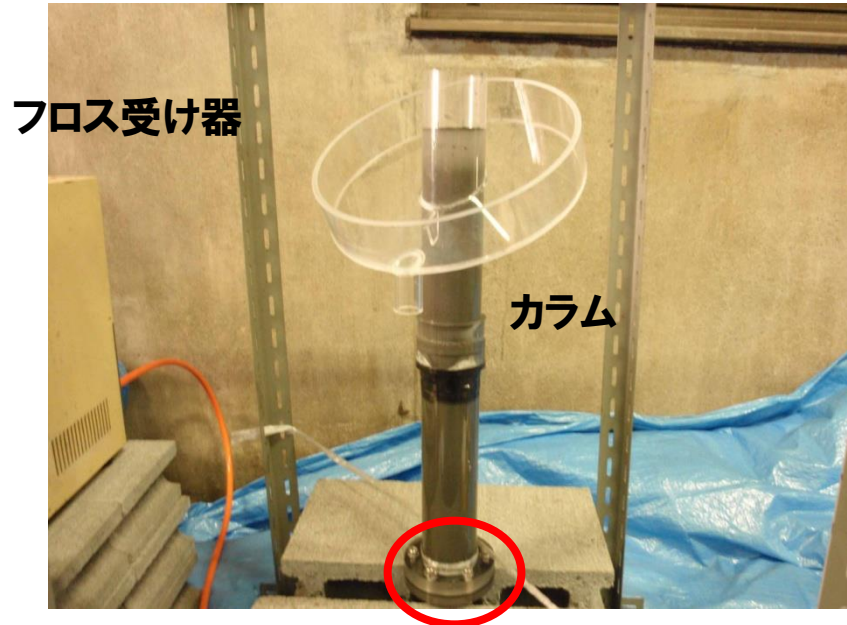
○高圧水中条件での試験(1~10MPa)

- ・気泡及びフロスの発生、並びにフロスのオーバーフローの確認
- ・得られた精鉱、尾鉱を元素分析し、選別性能を確認



原鉱

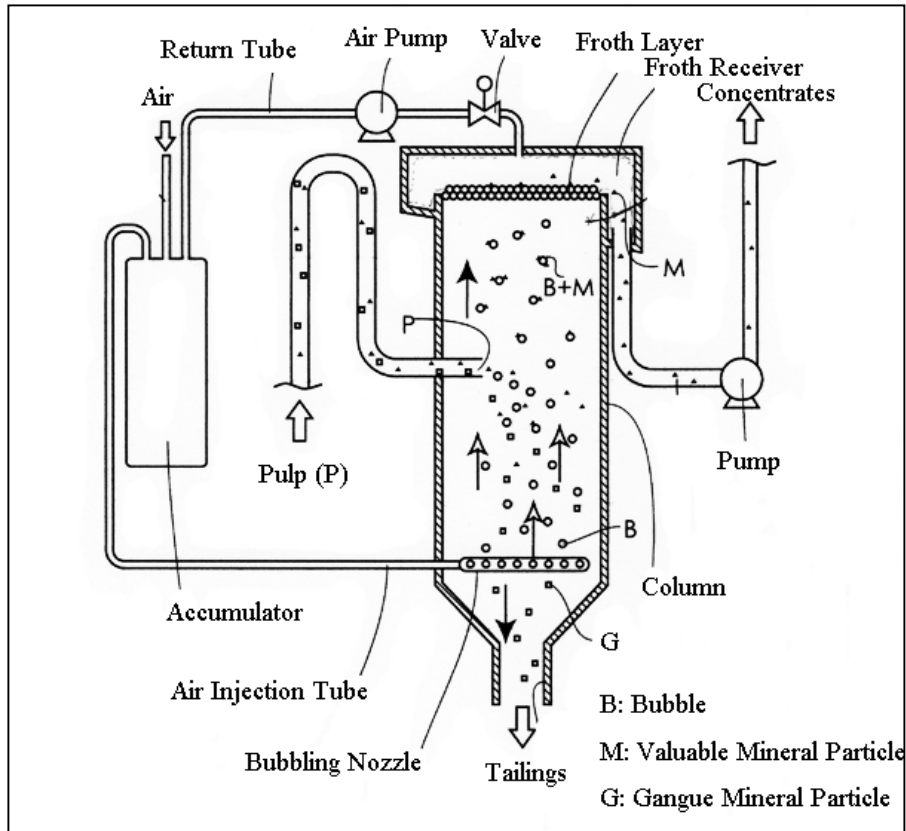
粒径:88~106 μ m



大気圧用浮選試験装置



フロスがオーバーフローする様子



選別ユニットの概念図



選別試験@1MPa

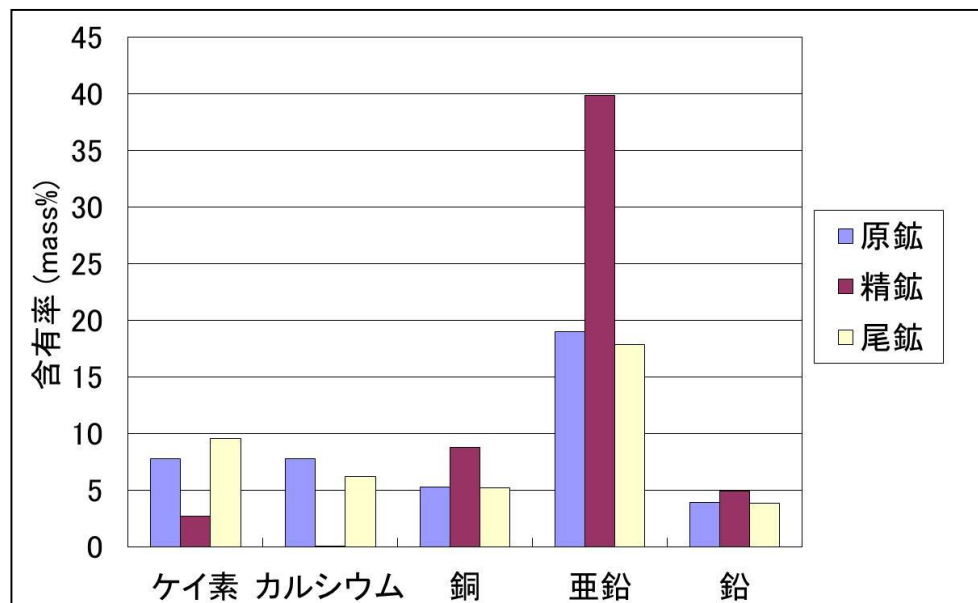
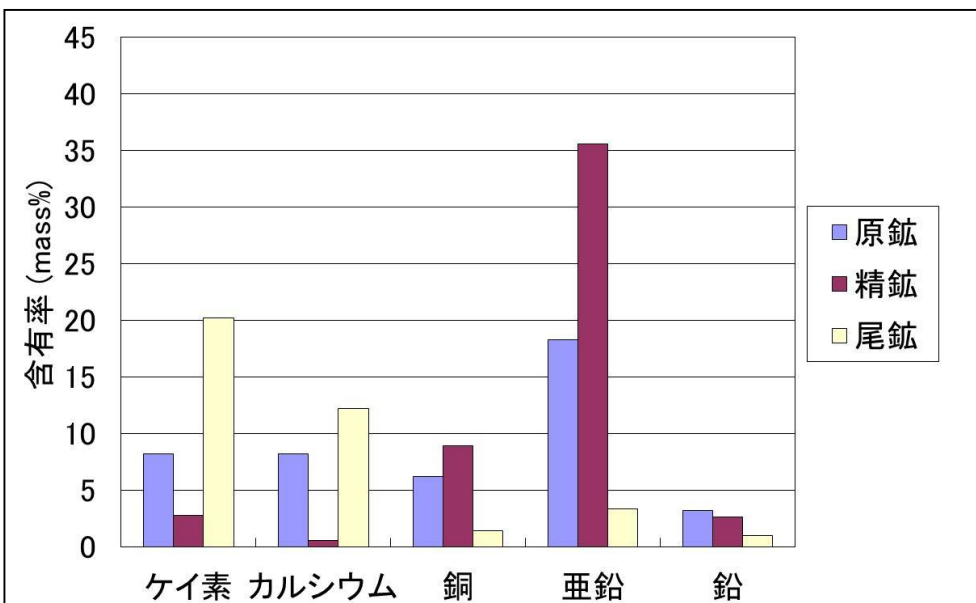
カラムに原鉱と浮選液を充填し、下端から高圧空気を圧入して気泡を発生→精鉱を分離

微細気泡の発生及びフロスのオーバーフローによる精鉱の分離に成功
(1MPaの圧力条件にて分析可能な量を回収)

元素分析データの比較

大気圧条件での選別試験の結果

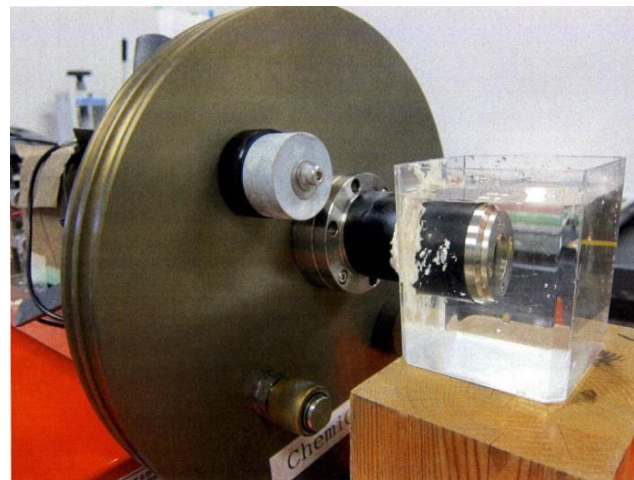
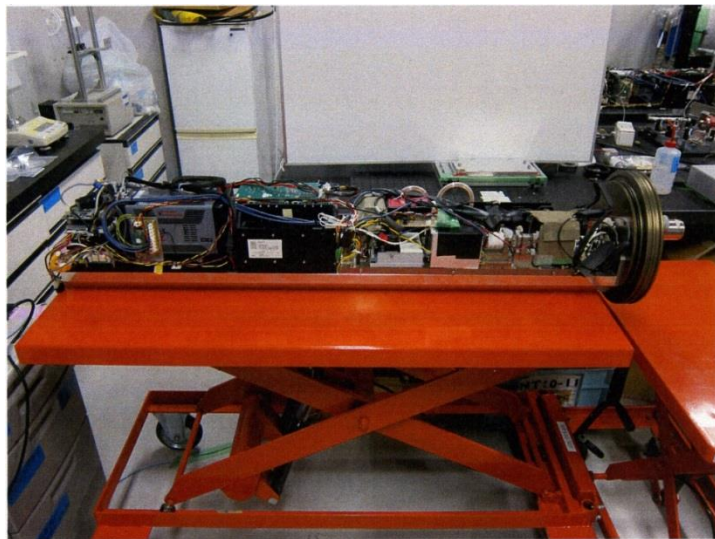
高圧水中条件(1MPa)での選別試験の結果



元素分析: 蛍光X線法(XRF)により実施

- 精鉱中の有用金属(銅、亜鉛、鉛)の含有率は原鉱よりも高い。
- 純水ベース、人工海水ベースのパルプ間での差異はほとんど無い。

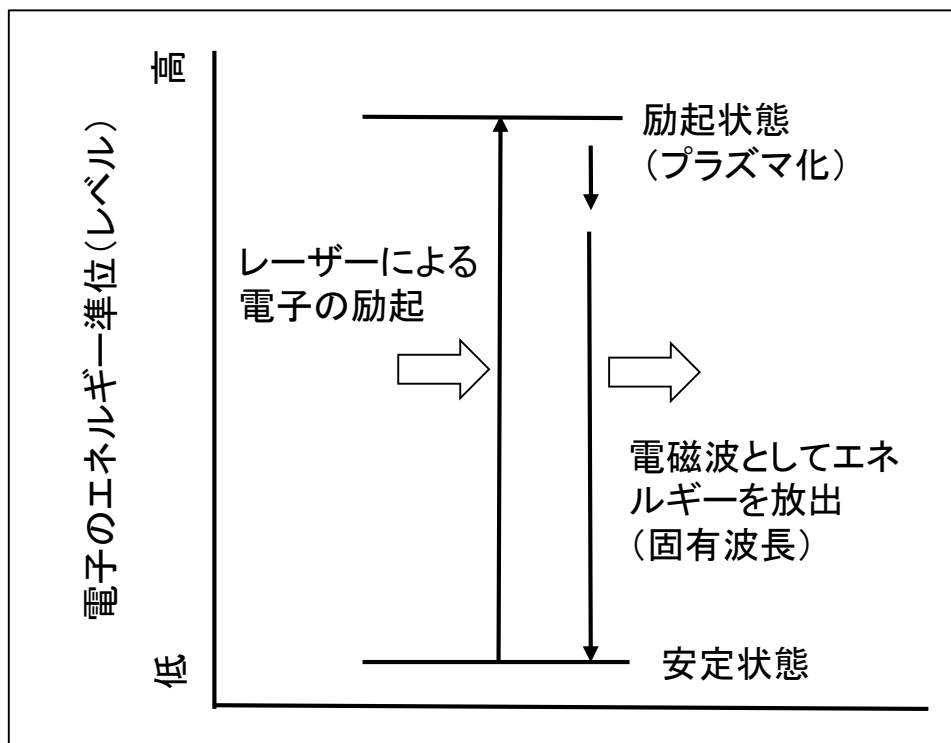
- 海底選鉱において各ユニットの運転性能を最適化するには、ユニット内を流動する粉碎された鉱石の流量や品位などのデータをリアルタイムで計測し、ユニットの運転を制御する必要がある。
- 高圧水中条件で使用可能な品位計測法の候補として、海底の鉱石等の元素分析について実績のあるレーザー誘起ブレイクダウン分光法(LIBS)に着目し、海底選鉱システムへの適用を検討中。



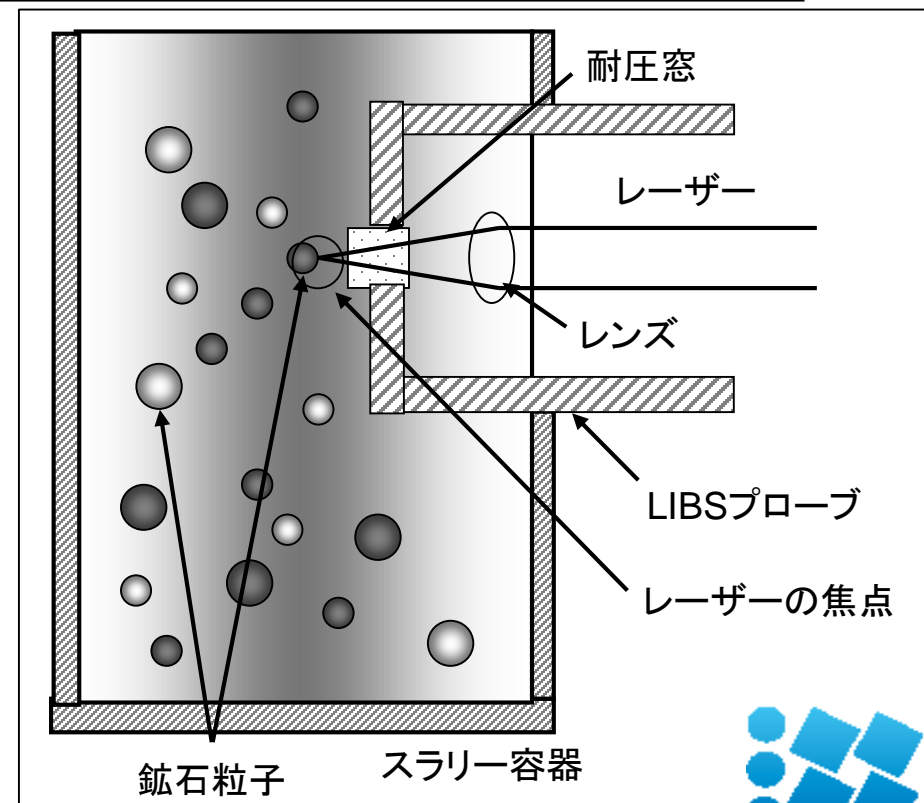
レーザー分光装置 (LIBS) @ 東京大学生産技術研究所ソートン研究室

レーザー誘起ブレイクダウン分光法の概要と品位計測への適用

- 試料に強力なパルスレーザーを照射すると、試料表面が局所的にプラズマ化し、電子が励起される。
- レーザー照射後プラズマ状態は終了し、励起された電子が安定な(エネルギー準位の低い)状態に戻る。
- 電子がエネルギー準位の低い状態に戻る過程で、エネルギーを電磁波として放出する(原子の種類に固有の波長を有する)。



LIBSの原理



スラリー中の鉍石粒子のLIBS計測の概念図

- 海底熱水鉱床の開発を推進するため、採掘した鉱石の粉碎・選別を海底で実施する「海底選鉱」を提案し、ラボ実験による検討を実施した。
- 深海底に相当する高圧水中条件において「ボールミル粉碎」及び「カラム浮選」の模型試験を実施し、海底選鉱の要素技術としての適用可能性を示唆する結果を得た。
- 海底選鉱システムを構成するユニットの運転性能を最適化するためには、スラリーとして流動する鉱石の流量や品位等のリアルタイム計測が必要。
- スラリー中の鉱石粒子の品位計測法として、「レーザー誘起ブレイクダウン分光法(LIBS)」の適用を検討中。

謝辞

- 本研究は科学研究費補助金(課題番号22360373及び課題番号16H04609)を受けて実施されました。
- 本研究にご協力をいただいた関係各位に御礼申し上げます。

