豊羽鉱山におけるペースト充填導入試験と ペースト充填が持つ省エネ効果・コスト削減効果について*

山 富 二 郎¹ 霜 鳥 洋²
境 收³ 佐 々 木 久 郎⁴

Underground Tests for Paste Backfilling at the Toyoha Mine and Energy-Cost Saving Effects of Paste Fill

by Jiro YAMATOMI^a, Hiroshi SHIMOTORI^b,
Osamu SAKAI^c and Kyuro SASAKI^d

- a. School of Engineering, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan
(Corresponding author: E-mail tjiro@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp)
- b. Japan Oil, Gas and Metals National Corporation, 1310 Omiya-cho, Saiwai-ku, Kawasaki City,
Kanagawa 212-8554, Japan
- c. NIKKO Exploration & Development Co., Ltd., 2-7-10 Toranomon, Minato-ku, Tokyo
105-0001, Japan
- d. Faculty of Engineering and Resource Science, Akita University, 1-1 Tegata gakuen-machi,
Akita City, Akita 010-8502, Japan

The paper describes the first attempt of introducing paste backfill in Japan at the Toyoha mine. In 1997, the Metal Mining Agency of Japan (MMAJ), which was reorganized in February of 2004 and currently works as the Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC), launched a five year long research program to innovate mining technologies and systems required to save and efficiently use energy in mines. As a part of the program, studies on paste backfill technology and its implementation in Japan were involved.

The Toyoha mine was selected as the site for testing paste backfill, since the mine is being operated under an extremely high rock temperature environment. In order to improve the underground climate, the mine decided to introduce paste backfilling and effectively reduce heat flows from mined-out stopes.

The first flow test was performed on surface in 1998 and the second flow test was carried out underground in 2001 after having installed the paste fill plant and underground pipelines. The underground test was, however, abruptly discontinued by a mechanical failure, which happened to the PPSM thickener whose bolts holding the drive head at the top of the thickener were broken.

After the unpredicted interruption of the paste backfilling test, we have carried out a series of ventilation analyses to evaluate the energy saving effects with paste backfilling under a high rock temperature condition. And we have clarified that remarkable energy saving can be expected by reducing heat flows from mined-out stopes and energy consumption required for underground refrigeration. In addition, it is found that significant cost saving can be also anticipated by curtailing volume of the tailings impoundment and its construction cost.

KEYWORDS: Paste Backfill, Underground Mining, High Temperature Rock, Ventilation, Energy Saving, Cost Saving

1. は じ め に

豊羽鉱山で実施されたわが国で初めての試みであるペースト充填の坑内充填試験と、ペースト充填から期待できる省エネ・コスト削減効果の試算結果について報告する。本稿は、通商産業省／経済産業省より委託を受けて当時の金属鉱業事業団が行った、鉱山におけるエネルギー使用合理化を目的とした鉱山システムに関

する調査事業の一部について、その成果報告を行うものである¹⁾。

金属鉱業事業団（現在の独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構）は、平成9年度から13年度の5年間（1997～2001年度）、鉱山におけるエネルギー使用合理化を目的とした鉱山設計システム（トータルシステム）を開発するため、委員会を組織し、調査研究・システム開発を行った。その中で、特に、革新的採鉱システム創成の可能性を持つペースト充填（Paste Backfilling）が注目され、ペースト充填の国内金属鉱山への導入をはかることになった。そのため、1997～99年にかけて、ペースト充填を取り入れた海外の坑内掘非鉄金属鉱山の調査を行った²⁾。その過程で、豊羽鉱山（北海道札幌市）にペースト充填を適用できれば、高温岩体中で操業を行っていることから、坑内掘採鉱システムの飛躍的な改善とエネルギー使用合理化、特に、坑内通気・冷却に要するエネルギーとコストの節減と、廃滓堆積場の減容化による経済効果が

*2004年11月23日受付 2005年2月10日受理

1. 普通会員 工博 東京大学教授 工学系研究科 地球システム工学専攻
2. 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 金属資源探査推進グループ チームリーダー

3. 普通会員 日鉱探開（株） 開発事業部開発部 主席技師長

4. 普通会員 工博 秋田大学教授 工学資源学部 地球資源学科

【著者連絡先】FAX: 03-5841-7029(東大・山富)

Email: tjiro@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

キーワード: ペースト充填, 坑内採掘, 高温岩盤, 通気, 省エネ, コスト削減

期待できるという結論に至った。

国内で最初となるペースト充填を豊羽鉱山で試みることに
なり、ペースト充填の技術開発をエンジニアリング振興協会に委託
した。まず 1997 年度には、ペーストに関する基礎的な室内試験
と流送試験を予備的に実施し、1998 年度には、ペースト製造技
術（選鉱廃滓の脱水技術）と製造・流送設備の概略設計を行った。
そして、1999～2000 年度には、豊羽鉱山の選鉱場を利用して廃
滓脱水装置（PPSM シックナ）、ミキシングプラント、流送設備
を建設した。さらに、坑内への流送パイプの通路（充填坑井）を
掘さくし、配管と坑内充填実験場所の整備を行い、坑内流送試験
を行った。2001 年度には、本格的な採掘跡空洞への充填試験を
行い、通気解析を行って省エネ・コスト削減効果について検討し
た。しかし、坑内充填試験を行っていた 2001 年 11 月 7 日に、
PPSM シックナのドライブユニットを固定していたアンカーボルト
が突然、破断したため、試験の続行を断念せざるを得なくなっ
た。

2. ペースト充填

鉱山にとって、選鉱廃滓の処理は重要な課題である。坑外に堆
積場・ダムを建設する場合、単にその用地を確保することが難し
いだけでなく、水処理やリクラメーションのコスト負担も大きい。
選鉱廃滓の坑内処分として、坑内掘鉱山では充填がしばしば行わ
れるが、ペースト充填は採掘切羽の安定化だけでなく、廃滓堆積
場の減容化にも無視できない効果が期待されている。

2・1 ペースト充填の特長

ドイツの Grund 鉱山（鉛・亜鉛・銀の鉱山で 1992 年に閉山した）
は、1985 年に、廃滓ダムが満杯となり、廃滓全量を坑内に充填
せざるを得なくなった。これが契機となって、廃滓全量を充填材
として使用するペースト充填を始めた³⁾。廃滓全量を充填材とし
て使用するペースト充填は“Total Tailings Fill”とも呼ばれ
ている。比較的大きな設備投資、高度な技術を要するものの、ペ
ーストはその物理的特性が従来の充填物に比べて多くの点で優れ
ている⁴⁾。

充填に使用する材料によって坑内充填法を Table 1 に示す 3 種
に分類することができる。すなわち、

- ・ズリ充填/ロックフィル：開坑作業で発生したズリあるいは坑
外の露天採石場で採取した岩石を使用する。ズリ・岩石を破碎

し、セメントを混合したものは“Cemented Rockfill”と呼ばれ、
充填物の中で最も高い強度が期待できる。

- ・スラリー充填（従来の湿式充填）：選鉱廃滓の内、微粒分を除
いたもの“Classified Tailings”を使用し、坑内にスラリー状態
で流送する。
- ・ペースト充填：練り歯磨きのようなペースト状で、スラリー状
の Classified Tailings に比べて、固体粒子が多くて水分が少ない。
通常、固体濃度は 75－85% である（重量比）。微粒分も
含めた廃滓全量を使用できるが、必要と条件に応じて、砂やロッ
クフィルを併用することもある。

いずれの充填でも、強度を高める必要があるときには、セメン
ト・フライアッシュ・高炉スラグなどのバインダを添加する。3
種の充填法の長所と短所を、Table 1 に記入した。

選鉱廃滓を水とともに坑内に流送する場合、水（液相）の中に
廃滓・セメント・骨材などの固体粒子（固相）が混じり合った状
態にある。このような混合物は、条件によって液体または固体、
あるいはその中間的性質を持ち得る⁵⁾。

ペースト充填の Paste と呼ばれる状態も、液体－固体の中間状
態で分散系と呼ばれる状態にある。固体粒子は懸濁した状態
（Suspension）にあつて、長時間放置しても、沈降による固液分離
が起こらない。ペースト状態に水が加わると、懸濁状態を保つこ
とができず固液分離を生じ、もはや分散系ではなくなる。従来の
湿式充填である廃滓スラリーはこのような固液分離した状態であ
った。固体粒子の沈降分離を防ぐために限界速度以上の流速を与
えて疑似懸濁状態を作るか、微粒分が少なくして懸濁状態を作り
得ない場合には、沈降－浮遊の跳躍現象を繰り返しながらパイプ
ライン流送されていた。

固液分散系がペースト状態/懸濁状態を形成するためには、微
粒子が欠かせないことが経験的に知られており、20 μ m 以下の微
粒子が 15 % 前後含まれている必要があるとする意見がある⁶⁾。
Suspension を形成し得る水分は 10%－25% と言われているが⁷⁾、
固体粒子の粒度分布、固体粒子の特性（鉱物特性・形・比重）によ
って変わる。例えば、微粒分が多いと微粒子ほど比表面積が広いの
で多くの水を吸着し易くなり、見かけ上同じペースト状態（コン
システンシ）であっても、微粒子の少ないものよりも水分が多く、
固体濃度が低い。このようにペーストを流送するときの固体濃度
は幅が広く、70%－80% あるいは 85% とするものもあるが、

Table 1 坑内充填法の分類とその長所・短所の比較

	ズリ充填/ロックフィル (Waste Fill/Rockfill)	スラリー充填 (Slurry Fill)	ペースト充填 (Paste Fill)
長所	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 開坑ズリの坑内処分ができる。 ◆ 製造と運搬が容易である（特別な設備を必要としない）。 ◆ セメントを混入したロックフィルの強度は高い。 ◆ 排水の必要がない。 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ プラントの建設、操業に比較的問題が少ない。管理も容易である。 ◆ 充填材である廃滓を調達しやすく、廃滓ダムの減容化に貢献できる。 ◆ 充填材の品質・濃度を管理しやすい。 ◆ 細粒分を除くことにより脱水性が改善される。 ◆ 多くの場合、流送にポンプを必要としない。 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 同じ強度のスラリー充填に比べ、バインダの必要量が少なくてすむ。 ◆ 廃滓の全量を使用できるので、大幅な廃滓ダムの減容化が期待できる。 ◆ 充填物からの脱水量が少ないので、バルクヘッド（脱水面）が不要か簡単なものである。
短所	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 坑外の採石場でロックフィル原料を採取する場合には、破碎と運搬コストがかかる。 ◆ 開坑ズリを使用する場合には必要とするときに不足する可能性がある。 ◆ 充填物中の空隙を埋める細粒・セメントがないと強度が期待できない。 ◆ 材料の粗粒分と細粒分の分離が発生しやすい。 ◆ 廃滓を使わないので、廃滓ダムの減容化が期待できない。 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 流送に使用した水を回収して地上に汲み上げる必要がある。 ◆ バインダを混入しても不均一に分布して強度が発揮できない場合がある。 ◆ 排水に含まれる微粒分の清掃作業に時間とコストがかかる。 ◆ 脱水面の設置、充填物の固化に時間を要する。 ◆ バインダが流出する可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 水平流送距離が長くなるとポンプが必要。パイプラインの力学的な補強も必要。 ◆ ペースト製造時に廃滓の微粒分を失うことなく、脱水可能な設備とコストが必要となる。 ◆ 高い技術レベルと正確な品質管理が要求される。 ◆ 液状化が問題となる場合がある。 ◆ 技術そのものが新しく、実施例が少ない。

40% - 95%とするものもある。逆に言えば、水も含めたわずかな組成の変化により、ペーストの性状が大きく変化する可能性がある。選鉱場で発生する廃滓に含まれる鉱物は日々刻々変化するものであるから、ペースト製造には高い技術レベルと品質管理が要求される。

2・2 PPSM シックナ

ペースト充填では、水分の多い廃滓スラリーを使うことができない。したがって、低濃度スラリー状の廃滓を脱水する必要がある。そのための設備を要する。また、ペースト中に微粒子が含まれていることにより、ペーストの性状が安定して固液分離が起き難くなること、流送パイプ内で微粒子が管壁面との潤滑剤の働きをすることなどから、ペースト充填では微粒子の存在が必須である。そのため、低濃度のスラリー状である廃滓から、微粒子を失うことなく、廃滓の濃縮・脱水を行う必要がある、フィルタを使った脱水あるいは特殊なシックナを使った高濃度化が必要となる。

Fig.1 は、ペースト製造のための特殊なシックナで、PPSM (Paste Production Storage Mechanism) シックナと呼ばれ、INCO Ltd. と GL&V Process Equipment Group Inc. が共同開発した。PPSM シックナを使ったペースト充填プラントがカナダ・オンタリオ州の Macassa 鉱山 (Kinross Gold Corporation) に最初に建設された⁸⁾。

PPSM シックナの内部には垂直なスパイラルシャフト (回転方向とは逆方向にスパイラルが付いたシャフト) と、回転レーキが取り付けられている。廃滓はフィードウェル内に凝集剤とともに給鉱される。スパイラルシャフトの回転により、高濃度スラリーを下方から上方および半径方向内側へ動かす循環パターンを形づくる。底部に一旦沈降した固形粒子を掻き上げ、一部を静かに上昇させ、上昇-沈降の繰り返しにより、高濃度スラリー層の密度を徐々に高める。タンク底部に濃集したペーストは排出ポッドから排出され、清澄液はタンク上縁の樋 (O/F ラウンダ) より取り除かれ、オーバーフローした清澄液は希釈水として循環使用する。

ペーストの製造にフィルタを使った脱水方式をとる事例が多い。豊羽鉱山において、フィルタ方式と PPSM 方式のどちらを採用するかを判断するために、基礎試験と小型の PPSM シックナを使った小規模実証試験を 1998 年度に行った。小規模 PPSM シックナによって、ペーストが製造できることを確認し、エネルギー使用合理化を最大の目標としていることを考慮して、適用例は多いものの、エネルギー多消費型のフィルタ方式を採用せず、ペースト製造を PPSM 方式によることを決定した⁹⁾。

Fig.1 PPSM シックナ

3. 豊羽鉱山におけるペースト充填試験

3・1 ペースト製造設備

ペーストの挙動に、選鉱廃滓の物理的・物理化学的特性が大きな影響を持っている。Fig.2 に豊羽鉱山の選鉱場で採取された廃滓の粒度分布曲線を示した。同図には、PPSM シックナを初めて導入した Macassa 鉱山の廃滓の粒度分布曲線も示している。Macassa 鉱山の廃滓よりも豊羽鉱山の廃滓の方がやや粗い粒度分布特性を持っているが、鉱石の組成が複雑であるため、20 μm 以下の微粒子が 50% 余りを占めている。その他、廃滓の分析結果から次のことがわかった。

- ・乾燥した廃滓の真比重は 3.58 であった。
- ・廃滓の主な化学組成は、 Fe_2O_3 (37.59%)、 SiO_2 (32.81%)、 Al_2O_3 (6.65%)、 MgO (0.85%)、 MnO (0.84%)、 K_2O (0.58%)、 TiO_2 (0.36%)、 CaO (0.24%)、 Na_2O (0.12%)、 P_2O_5 (0.04%)、 Cr_2O_3 (0.01%)、LOI (19.4%) であった。
- ・この他、金属元素として、Cu (1,683 ppm)、Pb (1,755 ppm)、Zn (6,420 ppm)、Sn (517 ppm) 他が含まれていた。

坑内への本格的なペーストの流送・充填試験に先立って、地表と坑内にパイプラインを設置して、流送試験が実施され、豊羽鉱山の選鉱廃滓を使ったペーストの流動特性が明らかにされた¹⁰⁾。

Fig.3 は、豊羽鉱山に建設されたペースト製造プラントと坑内充填システムのフローチャートを表している。

Fig.2 豊羽鉱山と Macassa 鉱山の廃滓の粒度分布曲線

Fig.3 豊羽鉱山のペースト製造と坑内充填のフローチャート

給鉱条件を給鉱量：25 Dt/h，給鉱時間：24 時間，拔出条件を拔出量：60 Dt/h，拔出時間：10 時間として，PPSM シックナの仕様を見積もり，最終的に直径を 7.95 mφ，高さを 11.8 m とした（ここで，Dt は乾燥状態の質量すなわち乾量をトンで表わしたものである）。その結果，タンク及びレーキの重量は 114 t となり，内容物重量 856 t（比重 2.36）を加えた PPSM シックナの総重量は 970 t となった。

PPSM シックナの底部から抜き出した濃縮廃滓をセメントと混合し，水分を調整した後，ペーストに仕上げる。そのため，ミキサー本体の他に，水タンク，セメントサイロ，ベルトスケール，計量設備等を設け，34.4 m³/h のミキシング能力を持たせた（1 時間に 20 バッチ，1 バッチ当りのサイクル時間（投入・練混・拔出）を 3 分間，1 バッチ当りの混合量 1.72 m³ とした）。

3・2 坑内充填試験

坑内充填試験の試験場として選んだ羽前ヒと採掘跡を Fig.4 に示す。羽前ヒは 1990 年代の初めに採掘を終了しており，長さ約 270 m，空洞高さ 48 m，平均採掘幅約 3 m で，23,000 m³ の空洞が残っていた。-150 ～ -100 mL にある羽前ヒの採掘跡をペースト充填することにしたが，-150 mL の水平流送距離が長いことなどを理由に，高低差を利用した自然流送だけでは不十分と判断して，ペーストをポンプで坑内に圧送することにした。そのため，最大吐出量 60 m³/h，最大吐出圧 10.4 MPa の油圧ダブルピストン式ポンプを充填プラントに設置した。

ペースト製造プラントと -150 mL の坑道を傾斜約 70 度，長さ約 240 m の充填坑井（高低差 210 m 強）で結び，780 m 水平に流送し，最後に 50 m 立ち上がって，-100 mL から羽前ヒの採掘跡に投入することとした。坑内の流送パイプにはすべて 8B パイプを使用した。

2000 年 9 月に PPSM シックナとペースト製造設備が整い，実際にペーストを製造して，含水比・セメント添加量によるペーストの流動特性（コンシステンシ）と強度の変化を調査した。まず，坑外で 4B パイプを使った流送試験を行って，流送中のペースト性状の変化をモニタし，パイプ閉塞を予防する条件と閉塞した場合の解除法について検討を行った¹⁰⁾。

さらに，羽前ヒにペーストを流送する前に，-150 mL の坑道を使った坑内流送試験を行い，流送パイプの圧力を計測し，坑内にペーストが流送されることを確認した。しかし，圧送ポンプがダブルピストン式のため，7 ～ 8 MPa 以上の油圧で運転した時に，ピストン切替時の油圧の脈動により，特に坑外に配管されたパイ

プ（曲がり管）が激しく振動した。そのため，坑内充填試験を中断し，パイプ振動防止対策として，ピストン切替時の各ピストンのエンドスローとアップスローを確実にするため油圧を調整し，また油圧上昇を 7 MPa 以下とした。これにより流送時の配管内の急激な圧力上昇（いわゆるウォーターハンマー現象）による配管の振動・騒音の発生を抑制した。

2001 年 9 月に坑内充填試験を再開したが，羽前ヒ -100 mL からペーストを投入し，Fig.4 の縦断面図で黒く塗りつぶした部分（「充填箇所」と表示）の充填を行った。-150 mL には，ドローポイントがあるため，バルクヘッド（脱水面）を設け，圧力計を配して計測を行ったが，ドローポイントからの脱水はほとんどなく，圧力も発生しなかった。ペーストからの脱水は少なく，バルクヘッドも簡単なものですむことが確認できた。

しかし，約 3,800 m³ のペーストを流送した 2001 年 11 月 7 日に，通算運転時間 9,408 時間で PPSM ドライブユニットのアンカーボルトが破損するというトラブルが発生し，最終年度でもあったので，修理しても坑内充填を再開することができなくなった¹¹⁾。

充填後のペーストの性状と堆積状態を調査するため，2 本のボーリングを充填部分に行った。

- ・投入口の直下，充填時のペースト落下地点では固結が進んでいるが，周辺部では未固結であった。
- ・投入口を設けた竜頭の直下に，一部未充填空洞が残っていたが，それ以外では堆積状態の連続性を確認した。
- ・含水比は流送時の 0.35 ～ 0.50 に対して 0.27 ～ 0.51，湿潤密度は流送時の 1.87 ～ 2.11 に対して 1.85 ～ 2.29 であった。含水比は堆積下部ほど低い傾向にあった。
- ・透水係数は $1.6 \sim 7.6 \times 10^{-8}$ m/s で，間隙率は 49 ～ 68% であった。
- ・一軸圧縮強度は 0.1 ～ 2.6 MPa の範囲にあって，バラツキを持っていた。粘性土地盤の非常に堅い状態の一軸圧縮強度 0.4 MPa に比べ，固結の進んだペースト落下地点の充填物は満足する地耐力を有するものの，周辺部は不十分であった。

などが明らかになった。

3・3 豊羽鉱山におけるペースト充填の課題

豊羽鉱山の試験で製造したペーストは必ずしも十分な強度を持たず，その品質のバラツキに無視できないものがあつた。その大きな要因の一つは，Fig.2 の廃滓の粒度分布曲線に示されている。すなわち，豊羽鉱山の廃滓は微粒分が多く，20μm 以下が 50% を占めている。同じ図には，PPSM シックナによるペースト充填を最初に試みた Macassa 鉱山の廃滓粒度分布特性も含まれている。豊羽鉱山の廃滓よりもさらに細かな粒度が多い Macassa 鉱山では，廃滓のみから作ったペーストの強度が不足しているとして，粒子の粗いサンド分を混ぜて強度増加を行った。

豊羽鉱山で，今後もし，ペースト充填を行うとしたら，サンド分を追加して粒度分布調整を行えば，ペーストの強度増加と安定な品質が期待できるものと考ええる。しかし，残念ながらこれを現場実験で確認する可能性が失われてしまった。

ペーストの安定な製造に必要な管理・操業上のノウハウの習得，流送・閉塞条件の把握などの成果をあげた一方で，ペーストの性状を改良して強度（地耐力）を高めるためには何をすべきか，ペーストの堆積状況・性状のバラツキを解消するためには何が必要かなど，課題を残しながら坑内充填試験は終了した。

4. ペースト充填の省エネ効果とコスト削減効果

PPSM シックナの破損という予期しなかったトラブルにより，豊羽鉱山におけるペースト充填試験は，その有効性を確認するま

Fig.4 羽前ヒの坑内図とペースト充填のための流送パイプとバルクヘッドの配置

では至らなかったが、ペースト充填の省エネ・コスト削減効果を評価するために通気解析とエネルギー消費・コスト分析を行った。

4・1 熱環境解析結果

Fig.5に示す通気網モデルを使って、岩盤温度の高い豊羽鉱山の採掘切羽の熱環境を解析した。想定した採掘空洞は、仮想的なものであり、幅が平均3.5 m、長さ300 m×高さ50 mの大きさを持ち採掘実収率を84%として、44,100 m³の空洞容積を有する。岩盤の初期温度は、LL（下部レベル）において130℃、SL（サブレベル）において125℃、UL（上部レベル）において120℃とした。また、入気の乾球温度を20℃、相対湿度を80%に固定し、岩盤（玄武岩）の熱伝導率を3.4 W/(m・K)、比熱を837 J/(kg・K)、密度を2,950 kg/m³とした。

坂井と齋藤¹²⁾がFig.5の通気網モデルを使った通気解析結果を、すでに資源・素材学会誌に報告しているので、本研究では、坂井と齋藤の解析結果を使って、ペースト充填が持つ省エネ効果とコスト削減効果を試算することにした。坂井と齋藤は、ULの中央に仮想ファンを一基設けた場合、ULの片側に一基設けた場合、ULの両側に一基ずつ設けた場合の3ケースを解析したが、ここでは、中央に仮想ファンを一基設けた場合の計算結果を使用する。

Fig.5の通気網モデルについて、採掘跡を無充填のまま放置しておくものの他に、採掘跡をペースト充填、スラリー充填、ズリ充填した場合を解析し、排気の風量・乾球温度・相対湿度を比較

Fig.5 豊羽鉱山の坑内熱環境解析に使用した通気網モデル

した。Table 2に坂井と齋藤の解析結果を整理したものを示す。同表の風量、乾球温度、相対湿度、比エンタルピーは排気を持つ値であるが、乾球温度と相対湿度から比容積と比エンタルピーの値を求め直し、排気と入気を持つエンタルピーの差を計算し、これを採掘空洞からの気流（漏風）に与えられた単位時間当りの放熱量とした。Table 2で比エンタルピーの単位がkJ/kgDAとなっているが、kgDAは乾燥空気1 kgを意味している。

4・2 自然対流熱伝達モデルを使った放熱量の計算

本研究では、付録に解説をつけた平行平板間の自然対流熱伝達

Fig.6a 自然対流熱伝達モデルにより計算した出口気流温度と漏風量の関係

Fig.6b 自然対流熱伝達モデルにより計算した放熱量と漏風量の関係

Table 2 熱環境解析結果

充填方式	状態	経過日数	風量 (m ³ /min)	乾球温度 (°C)	相対湿度 (%)	比エンタルピー (kJ/kgDA)	放熱量 (MW)	冷却対象熱量 (MW)	1,348日間の 累積熱量 (GJ)		坑内冷却に必要な電力 (MWh)
									放熱量	冷却対象	
ペースト	初期	0	2,476	57.8	39.3	179	5.204	1.762			
	充填完了	351	1,091	44.5	51.0	123	1.389	0	215,894	6,772	616
	最終	1,348	1,084	43.0	52.5	118	1.298	0	(40.8%)		(9.4%)
スラリー	初期	0	2,389	58.1	39.8	183	5.162	1.854			
	充填開始	180	1,700	59.1	47.4	218	4.527	2.251	289,142	39,430	3,585
	充填完了	1,348	1,083	42.9	52.3	117	1.277	0	(54.6%)		(54.9%)
ズリ	初期	0	2,281	59.0	39.4	188	5.088	1.947			
	充填完了	720	1,899	50.1	47.9	150	3.211	0.456	403,638	34,193	3,108
	最終	1,348	1,888	49.0	48.7	145	3.050	0.293	(76.3%)		(47.6%)
無充填	初期	0	2,281	59.0	39.4	188	5.088	1.947	529,132	71,776	6,525
	最終	1,348	2,215	53.0	43.5	158	3.999	0.826	(100.0%)		(100.0%)

モデル¹³⁾を使って、坂井と齋藤の解析結果を検証した。自然対流熱伝達モデルによる計算結果を Fig.6a と 6b に示す。Fig.6a は出口気流温度と漏風量の関係を、Fig.6b は漏風の相対湿度を 40% としたときの放熱量と漏風量の関係を示している。

坂井と齋藤は、無充填時に採掘跡から流れ出る漏風量が約 1,600 m³/min、相対湿度が 40% 前後と報告している。Fig.6a によれば、漏風量が 1,600 m³/min のとき、出口気流温度は 0.5 年後に 62.7℃、1.0 年後に 60.1℃、2.0 年後に 57.8℃、4.0 年後に 56.2℃へと低下する。坂井と齋藤の解析結果では、漏風の出口乾球温度が初期の 63.7℃から 1,348 日 (3.74 年) 後には 59.7℃に低下しており、ほぼ、自然対流熱伝達モデルによる計算結果と一致する。

次に、出口気流が持つ相対湿度を 40% として、入排気のエンタルピー差 = 放熱量を計算すると、Fig.6b にあるように、漏風量が 1,600 m³/min のとき、放熱量は 0.5 年後の 4.07 MW から、1.0 年後に 3.62 MW、2.0 年後に 3.23 MW、4.0 年後に 2.98 MW へと減少する。一方、坂井と齋藤によると、放熱量が初期の 4.53MW から 1,348 日 (3.74 年) 後には 3.58MW に減少しており、これも自然対流熱伝達モデルを使った計算結果にほぼ一致している。

以上よりかなりの程度で、坂井と齋藤の解析結果が持つ信頼性を確認できたと考えた。また、自然対流熱伝達モデルを使うことにより、採掘空洞から排出される気流の乾球温度、放熱量を簡便に計算できることもわかった。採掘空洞を持つ坑内の熱環境改善に自然対流熱伝達モデルの活用が期待できる。

4・3 累積放熱量

ペースト充填は充填物からの脱水量が少なく早期に固まるので、充填物流出防止のために LL に建設するバルクヘッドは木製の仕切程度のものでよい。しかし、スラリー充填の場合には強固なコンクリート製のバルクヘッドを LL のドローポイントに構築する必要がある。そのため、坂井と齋藤は、バルクヘッド建設に 180 日間を要するものとし、スラリー充填のためのバルクヘッドの通気抵抗はペースト及びズリ充填時の 10 倍と設定している。

Table 3 に流送時と充填・脱完了後の充填物の含水比・カサ比重の値を示した。坑内充填のパイプラインの流送能力を 200 m³/d、廃滓の真比重を 3.58 として、1 日当りの固体粒子の輸送量 (乾量) と 1 日当りの充填体積、1 日当りの脱水量を求めることができる。その結果、44,100 m³ の空洞体積を持つ採掘跡の充填に要する日数は、ペースト充填では 351 日、スラリー充填では 1,168 日であることがわかった。ズリ充填については、使用している LHD の運転実績と採鉱・開坑ズリの発生状況を基に所要日数を試算し、720 日で採掘跡のズリ充填が完了するものとした。

Table 3 充填量・脱水量と廃滓堆積場への流送量

		含水比	カサ比重	流送量	乾量	充填/ 堆積量	脱水量
		—	—	m ³ /d	Dt/d	m ³ /d	m ³ /d
ペースト充填	流送時	0.39	2.08	200	299		
	脱水後	0.14	2.72		299	126	74
スラリー充填	流送時	1.94	1.32	200	90		
	脱水後	0.14	2.72		90	38	162
廃滓ダムへの流送時		2.33	1.28	2,067	791		
廃滓ダムへの堆積後	堤内	0.72	1.72		435	435	702
	堤体	0.30	2.24		356	206	724

廃滓の真比重： 3.58

スラリー充填は上記の充填日数に加え、バルクヘッドの建設に 180 日を要するので、充填が完了するのは 1,348 日後ということになる。初日、LL におけるバルクヘッド設置日、充填完了日と最終日 (1,348 日目) の状態に対応した複数の通気解析モデルを使用した。1,348 日間の採掘跡からの累積放熱量を計算し、Table2 に示した。

採掘跡を無充填で放置した場合に、累積放熱量が最も大きく、ついで大きいのがズリ充填を行った場合で、ズリ充填により累積放熱量が約 1/4 削減できる。スラリー充填、ペースト充填を行った場合の累積放熱量はそれぞれ、無充填時の約 55%、約 40% であり、ペースト充填の放熱量抑制効果が最も大きいことがわかる。ペースト充填とスラリー充填の最終日における放熱量に大きな差が見られないが、累積放熱抑制効果に 10% を越える違いが現われた。その理由として、スラリー充填では強固なバルクヘッドを建設するために 180 日を要したこと、そしてこの 180 日の間に、採掘跡の漏風量が初期の約 2,000 m³/min から約 700 m³/min まで絞られたため採掘跡を流れる漏風が受け取る熱量が増加したことがあげられる。自然対流熱伝達モデルによる計算結果 (Fig.6) に示されるように、漏風量が抑制されると出口気流温度が高くなるだけでなく伝熱量も増加する。LL に強固なバルクヘッドを設置したことによって採掘跡への漏風量が制限され、採掘跡からの漏風温度が上昇し、伝熱量が大きくなったと考えることができる。

4・4 坑内冷却に必要な電力

豊羽鉱山の坑内では冷却のために冷凍機が一部使用されている。これらの運転実績を基に坑内冷却に必要な電力量を試算した。

排気の比エンタルピーがある限界を越えたとき冷凍機を運転して坑内冷却を行うものとした。冷凍機の運転開始条件となる比エンタルピーを 136 kJ/kgDA と設定したが、これは乾球温度 37℃、相対湿度 95% の湿り空気が持つ比エンタルピーである。また、坑内作業を行っているときのみ冷凍機を運転するものとした。豊羽鉱山の平均的な坑内作業スケジュールから、1 ヶ月 (30 日) のうち 20 日間坑内作業が行われ、1 日 24 時間のうち 16 時間だけ坑内作業が行われるものとした。

Table 2 の熱環境解析結果から、排気の比エンタルピーが 136 kJ/kgDA をオーバーする超過分に、排気質量、日数をかけ、さらに冷凍機の実稼働率 (2/3 × 2/3 = 4/9) をかけて、1,348 日間の冷却対象累積熱量を求めた。そして、冷凍機の冷凍容量を 11,000 kJ/kWh に設定することにより、坑内冷却に必要な電力を求めた。

Table 2 に示されるように、坑内冷却に必要な電力は無充填の場合が最も大きい。無充填時に必要な電力に対して、ペースト充填は 9.4%、スラリー充填は 54.9%、ズリ充填は 47.6% となる。ペースト充填の導入によって、坑内冷却に必要な電力が大幅に減少することがわかる。一方で、スラリー充填時に必要な坑内冷却電力はズリ充填時よりもやや大きくなる。坑内冷却用電力消費について、スラリー充填とズリ充填の順位が入れ替わった理由は、4・3 で指摘したように、スラリー充填の場合、強固なバルクヘッドを設けたため、漏風量が制限され、ズリ充填完了時よりも、熱環境が悪化し、冷却対象熱量が多くなったためである。

4・5 廃滓処理のマテリアルフロー

ペースト充填が持つエネルギー削減効果、コスト削減効果を明らかにするためには、前節の坑内冷却に加え、坑内充填と排水、堆積場への廃滓輸送に必要な電力とコスト、充填プラントと堆積場の建設経費などを求めなければならない。そのためには、まず、廃滓処理のマテリアルフローを整理する必要がある。そのために、Fig.7 を準備した。

充填が行われる採掘空洞の体積を V_0 として、そこから生み出

Fig.7 廃滓処理のマテリアルフロー

された鉱石 W_0 が選鉱場で精鉱: $(1-\omega)W_0$ と廃滓: ωW_0 に分離され、廃滓 V_t が坑内の採掘跡に還元される。選鉱廃滓の全量を坑内充填に使用するペースト充填であっても全量を坑内に還元することはできない。したがって、一般に $V_t \leq V_0$ である。

鉱床から掘り出される前の鉱石のカサ比重を ρ_0 、廃滓の坑内還元率を π 、廃滓の真比重を ρ_t 、脱水完了後の充填物の含水比を γ_t とすれば、 V_t は次式によって与えられる。

$$V_t = (1/\rho_0 + \gamma_t) \cdot \pi \omega \rho_0 V_0 \quad (1)$$

$V_t = V_0$ とおくことにより、坑内還元率の最大値 $\pi_{\max}$ を得ることができる。豊羽鉱山の平均的な操業条件から、 $\rho_0 = 3.5$ 、 $\omega = 0.78$ 、 $\rho_s = 3.58$ 、 $\gamma_t = 0.14$ とすると、 $\pi_{\max} = 0.874$ である。理想的な坑内還元が行われたとしても発生した廃滓の 87.4% しか坑内充填に使用できないことがわかる (100% の坑内充填を行っても、残りの 12.6% は廃滓ダムに堆積処分しなければならない)。

鉱石のカサ比重を 3.5 としているので、採掘空洞 44,100 m³ からは、154,350 t ($= W_0 = \rho_0 V_0$) の鉱石が掘り出され、乾量で 120,393 t ($= \omega W_0$) の廃滓が発生する。採掘跡を 100%、ペーストあるいはスラリー充填した場合でも、 $\pi_{\max} = 0.874$ までしか坑内充填に利用できないので、乾量で 105,168 t ($= \pi_{\max} \omega W_0$) の廃滓が坑内充填に使用され、残った 15,225 t ($= (1-\pi_{\max}) \omega W_0$) の廃滓は廃滓堆積場に送って処分することになる。これらから、鉱石 1 t を採掘することにより乾量で 0.78 t の廃滓が発生し、鉱石 1 t を採掘することによって生まれた空洞を充填するために、乾量で 0.68 t の廃滓を必要とすることがわかる。

豊羽鉱山における廃滓堆積場への廃滓の輸送実績 (固体濃度 30% で、2,067 m³/d) を Table 3 に記入した。廃滓ダムへの堆積処分には 2 系統があって、堤内のダムに投下されるものと堤体に積み上げられ堤体の一部に供せられるものがある。堤内堆積処分と堤体処分の比率を実績に基づき 55:45 とした。次に堆積処分後に圧密沈下が進んで、堤内処分されたものは含水比が 0.72 (固体濃度 58%) に減少するものとする、堤内への堆積量は 434.8 m³/d となる。豊羽鉱山が持つ廃滓ダムの堤内堆積容量は $9,329 \times 10^3$ m³ であるので、安全率を 1.25 とすると、廃滓ダムの寿命 (耐用年数) は 47.7 年と推定できる。

4・6 ペースト充填の省エネ効果

廃滓処理のマテリアルフローが明らかとなったので、廃滓ダムへの流送、充填材の製造と坑内充填・排水に必要な電力を求める

Table 4 廃滓処理・坑内充填・坑内冷却に關係したエネルギー消費原単位

エネルギー消費原単位		廃滓乾量トン当り kWh/廃滓Dt	空洞体積当り kWh/m ³	鉱石トン当り kWh/鉱石Dt
廃滓堆積場に処分		6.19		4.83
製造+流送	ペースト充填	8.07		5.50
	スラリー充填	11.33		7.72
ズリ運搬			6.46	1.85
坑内冷却	ペースト充填		13.96	3.99
	スラリー充填		81.28	23.22
	ズリ充填		70.49	20.14
	無充填		148.0	42.27

ことができる。

実績から廃滓堆積場への流送に要する電力を 4,898 kWh/d とした。充填材の製造と坑内流送に要する電力は、使用する機器類の電力消費から推定し、ペースト充填は 2,340 kWh/d、スラリー充填は 858 kWh/d と見積もった。ペースト充填とスラリー充填ではこれらに加えて、充填後に充填材から流れ出る水をポンプアップする電力が必要となる。Table 3 には坑内に充填された充填物からの脱水量も示した。1 m³ の水をくみ上げるのに要する電力量を 1 kWh として、排水に必要な電力量を算定した。

両者を合計すると、廃滓ダムへの堆積処分が 4,898 kWh/d、ペースト充填が 2,415 kWh/d、スラリー充填が 1,020 kWh/d となる。ペースト充填の電力消費はスラリー充填の約 2.4 倍となっている。流送量当りの電力消費が最も少ないのが廃滓堆積場への処分であり、ペースト充填はその約 5.1 倍、スラリー充填はその約 2.2 倍となっている。

Table 3 から 1 日当りの流送量に含まれている廃滓乾量がわかるので、廃滓乾量トン当りの使用電力が計算できる。さらに、鉱石 1 t から生まれる廃滓が乾量で 0.78 t であること、鉱石 1 t を採掘した跡を充填するのに必要な廃滓が乾量で 0.68 t であることを考慮することにより、Table 4 にあるように、鉱石 1 t の採掘によって必要となる電力量を求めることができる。

廃滓乾量トン当りの電力使用量で比較すると、ここでも廃滓堆積場への処分が最も少なく 6.19 kWh/廃滓 Dt、続いてペースト充填で 8.07 kWh/廃滓 Dt、スラリー充填が最も多く 11.33 kWh/廃滓 Dt である。ペースト充填の廃滓乾量トン当り電力使用量は廃滓堆積場への処分の約 1.3 倍であり、スラリー充填の廃滓乾量トン当り電力使用量は約 1.8 倍となっている。廃滓乾量トン当りのエネルギー消費原単位で比較すると、ペースト充填とスラリー充填の大小が逆転する。これは、流送時のペースト充填とスラリー充填の固体濃度が約 2.1 倍異なり、ペースト充填に含まれる廃滓の乾量がスラリー充填の約 3.3 倍であるためである。

次に、ズリ充填のエネルギー消費を試算する。豊羽鉱山では、以前から LHD を使って、探鉱・開坑ズリによる採掘跡の充填を行っていた。豊羽鉱山における LHD の運転実績を調査したところ、豊羽鉱山では 3.0 m³ のバケット容量を持つ LHD がズリ充填に使用されていて、ズリ運搬の平均距離は 200 m、サイクルタイムは 300 sec、平均の燃料消費は 20 リットル/h であった。バケットの実積込率を 0.9 とすると、1 時間当りバULK体積で 32.4 m³ のズリを投入することができる。空洞内と運搬中のバケット内での岩石 (ズリ) が占める体積の比率が同じであると仮定して、44,100 m³ の空洞を充填するのに要する時間数を計算すると、1,361

時間が得られる。これは、24ヶ月間の坑内作業時間数、4,800時間よりも短いので可能な時間数と見なした。—— 充填に要する時間が熱環境解析で設定した24ヶ月よりかなり短いものとなるので、熱環境解析におけるズリ充填完了日をもっと早く設定することもできる。しかし、充填に必要な探鉱・開坑ズリが必要ときに供給されるとは限らない。実績を尊重して、熱環境解析ではズリ充填が完了するのは24ヶ月(720日)後とした。

平均的な燃料消費が20リットル/hであるから、1,361時間で27,222リットルとなるので、軽油1リットルの発熱量を9,000kcalとすると、軽油消費量は284,935kWhに相当する。その結果、空洞1m³をズリ充填するのに必要なエネルギー消費量は6.46kWh/m³となることがわかった。

坑内冷却に必要なエネルギーは熱環境解析によってすでに求められていて、Table 2に与えられている。これらを空洞体積あるいは空洞から掘り出される鉱石の採掘量で割ることにより、Table 4にある空洞体積当たりと鉱石トン当りのエネルギー消費原単位が求まる。

エネルギー消費の項目を鉱石トン当りの原単位で比較すると、ズリ充填が最も少なく、ペースト充填の約1/3.0、スラリー充填の約1/4.2である。ついで、エネルギー消費原単位が少ないのは、ペースト充填の坑内冷却用エネルギー消費、廃滓ダムへの堆積処分に関係したエネルギー消費である。逆に、エネルギー消費原単位が大きいものは、坑内冷却に関係したもので、無充填の場合の坑内冷却用エネルギー消費、ついで、スラリー充填、ズリ充填である。

採掘空洞を無充填のまま放置した場合、100%ズリあるいはペースト・スラリー充填した場合に必要なエネルギー消費原単位は、Table 4を整理することにより求めることができる。これをTable 5に示す。

坑内充填と廃滓ダムへの堆積処分をあわせたエネルギー消費原単位は、ペースト充填では6.11kWh/鉱石Dt、スラリー充填では8.33kWh/鉱石Dtであり、それぞれ全体の60.5%と26.4%を占めている。スラリー充填の坑内冷却用エネルギー消費の占める割合は高く、両者の差が大きくなった原因と言える。同様に、無充填の場合もズリ充填の場合も、エネルギー消費の大部分を坑内冷却用エネルギー消費が占めている。

無充填時のエネルギー消費原単位を100%とすると、ズリ充填、

スラリー充填、ペースト充填のエネルギー消費原単位は、それぞれ、56.9%、67.0%、21.4%となつて、ペースト充填のエネルギー消費が最も少なく、無充填時に対して78.6%のエネルギー消費削減効果を持っている。豊羽鉱山のように、坑内冷却を必要とする場合には、ペースト充填のエネルギー消費削減効果は非常に大きいと言える。

豊羽鉱山は高温岩盤という特殊条件を持っているが、坑内冷却を必要とせず、坑内冷却用を除外したエネルギー消費を比較すると、無充填、ズリ充填、スラリー充填、ペースト充填のエネルギー消費原単位はそれぞれ、4.83kWh/鉱石Dt、6.68kWh/鉱石Dt、8.33kWh/鉱石Dt、6.11kWh/鉱石Dtとなつて、無充填が最もエネルギー消費が少なく、ついでペースト充填が少なく、ズリ充填はペースト充填にやや劣るが、スラリー充填は大幅に劣る。

坑内冷却を除外したとき、無充填が最もエネルギー消費の点で優れており、次点となったペースト充填でも、無充填に比べエネルギー消費が26.5%多くなる。しかし、無充填では(ズリ充填でも)、廃滓全量を廃滓ダムに堆積処分することになるので、廃滓ダムの規模が大きくなる。無充填(ズリ充填)の場合、鉱石1tから乾量が0.78t(=ω)の廃滓が発生する。一方、採掘跡を100%ペーストで充填した場合には、乾量が0.098t(=(1-π_{max})ω)の廃滓が堆積場に送られるだけである。これは、無充填の場合の12.6%である。廃滓ダムの建設コストも考慮して、無充填とペースト充填の優劣を比較する必要がある。これを4.7において行う。

4・7 ペースト充填のコスト削減効果

豊羽鉱山では坑内充填のほとんどを探鉱・開坑ズリで行ってきた。ペースト充填の利点は認めながらも、坑外に充填製造プラントを新規に建設し、坑内への流送ラインを整備するため、大規模な設備投資が求められる。さらに、ペースト充填そのものが世界的に見ても、まだ実績・実施例が少なく操業コストの見積もりや、安定操業に不確定な要素が多く残っており、導入にはリスクを覚悟しなければならない。そのため、ペースト充填に必要な設備投資と操業コストを見積もり、他の充填方式と比較し、その優位性を確認するとともに、それが予想されるリスクを補いうるものであるかどうかを判断することにした。

まず、廃滓ダムの建設コストの見積もりを行った。豊羽鉱山はおしどり沢廃滓堆積場を持っており、1969年より同堆積場への廃滓流送を開始したが、1996年に当初計画の堆積容量に達するものと予想された。そのため、建設後20年を経過した1989年から廃滓ダムの容量を3,386×10³m³増加させて9,329×10³m³とする、おしどり沢堆積場の拡張工事を行い、2001年に主要な工事をほぼ完了した¹⁴⁾。このときの工事費を使って、堤体建設、用地取得、アプローチ道路とダム基礎工事、流送・受入設備他の建設費を算定した。4.5で明らかにしたように、安全率を1.25としたとき、572ヶ月、すなわち、47.7年で堆積容量に達するので、その間に堤内堆積処分された廃滓乾量を使って、廃滓乾量トン当りの廃滓ダム堆積処分のコストを得ることができる。1,098円/廃滓Dtであった。

次に、ペースト充填とスラリー充填に必要な充填物製造プラントと坑内流送設備の設備費を、ペースト充填では366×10⁶円、スラリー充填では34×10⁶円と見積もり、またいずれの充填法でも設備の耐用年数を30年とした。耐用年数の間に作られる充填物に含まれている廃滓の乾量から、廃滓乾量トン当りのペースト充填とスラリー充填の設備費を求めることができる。設備費は、ペースト充填が113.1円/廃滓Dt、スラリー充填が34.5円/廃滓Dtとなった。設備費総額では、ペースト充填がスラリー充填の11倍弱となったが、廃滓乾量トン当りでは約3.3倍に縮まってい

Table 5 エネルギー消費削減効果の比較

	エネルギー消費原単位(kWh/鉱石Dt)				比 %	削減効果 %
	坑内充填	ダム処分	坑内冷却	計		
無充填	0.00	4.83	42.27	47.10	100.0%	0.0%
ズリ充填	1.85	4.83	20.14	26.82	56.9%	43.1%
スラリー充填	7.72	0.61	23.22	31.55	67.0%	33.0%
ペースト充填	5.50	0.61	3.99	10.10	21.4%	78.6%

坑内冷却を必要 としない場合	エネルギー消費原単位(kWh/鉱石Dt)				比 %	削減効果 %
	坑内充填	ダム処分	坑内冷却	計		
無充填	0.00	4.83	/	4.83	100.0%	0.0%
ズリ充填	1.85	4.83		6.68	138.2%	-38.2%
スラリー充填	7.72	0.61		8.33	172.4%	-72.4%
ペースト充填	5.50	0.61		6.11	126.5%	-26.5%

る。これは、流送時のペースト充填の固体濃度がスラリー充填の約2倍という高濃度となっているためである。

廃滓ダムへの堆積処分および充填物製造・流送に必要な年間の人件費、年間の物品・工事費の見積もりを行った。その結果、これらの年間廃滓処理費を年間廃滓乾量で除して、廃滓乾量トン当りの処理費を求めた。その結果、廃滓ダムへの堆積処分が258円/廃滓Dt、ペースト充填の製造・流送が1,116円/廃滓Dt、スラリー充填の製造・流送が1,737円/廃滓Dtとなった。流送などに必要な処理費に電力費を加えたものを廃滓処理費とする。Table4の廃滓乾量トン当りのエネルギー消費原単位に電力単価10円/kWhを掛けることにより、廃滓乾量トン当りの電力費が求まる。結局、廃滓処理費は、廃滓ダムへの堆積処分について320円/廃滓Dt、ペースト充填の製造・流送について1,196円/廃滓Dt、スラリー充填の製造・流送について1,850円/廃滓Dtとなった。これらをTable6に記入した。廃滓乾量トン当りの処理費は、廃滓ダムへの堆積処分が最も安く、ペースト充填の約1/3.7、スラリー充填の約1/5.8となっている。

坑内冷却に必要な電力コストの原単位は、Table4のエネルギー消費原単位に電力単価10円/kWhを乗ずることによって得られる。これらもTable6に記入した。

ズリ充填にかかるコストを、人件費・燃料費・保全費などの実績値を基に算定し、空洞1m³をズリ充填するのに必要なコストを270円/m³とした。Table6を使って、坑内充填のコストを、鉱石トン当りのコスト原単位で比較すると、ズリ充填が最も安く、ペースト充填の1/10以下、スラリー充填の約1/16と圧倒的に安い。しかし、ズリ充填には直接の充填コスト以外に、廃滓をダムに堆積処分するためのコスト（初期投資と処理費）が必要となることを忘れてはならない。

採掘空洞を無充填のまま放置した場合、100%ズリあるいはペースト・スラリー充填した場合に必要なコスト原単位は、Table6を整理することにより求めることができる。これをTable7に示す。

Table7に示されるように、鉱石トン当りのコスト原単位は、無充填が1,529円/鉱石Dt、ズリ充填が1,385円/鉱石Dt、スラリー充填が1,656円/鉱石Dt、ペースト充填が1,072円/鉱石Dtとなっており、スラリー充填が最もコスト原単位が高く、ペースト充填が最も安い。無充填時のコスト原単位を100%とすると、ズリ充填、スラリー充填、ペースト充填のコスト原単位は、それぞれ、90.6%、108.3%、70.1%となっており、ペースト充填のコスト原単位が最も安い。無充填時に対して29.9%のコスト削減効果を持っている。

これに対して、スラリー充填は無充填よりもコストが逆に増加しているが、その要因は廃滓処理費が大きいことである。すなわち、ペースト充填に比べて、坑内流送時の固体濃度が低いために、同じ体積を充填するのに必要な流送量が多く、充填後の脱水量・排水量も多い。しかも、坑内冷却に必要なエネルギー消費が大きいのでコスト負担も大きい。唯一、充填プラント・流送設備に関わる初期投資額がペースト充填よりも少ないだけである。スラリー充填の全コストはペースト充填の約1.5倍となっている。また、スラリー充填では、廃滓の微粒分を坑内充填に使用できないことから、ここで考えているよりも廃滓ダムへの堆積処分量が増えるので、廃滓乾量トン当りの廃滓ダム建設コストが増え、ペースト充填と比較したときの経済性はさらに悪化する。

Table7より、無充填・ズリ充填では、初期投資が大きな比率を占めていることがわかる。無充填では初期投資が全コストの56.0%、ズリ充填では61.9%となっており、その原因は廃滓ダム建設コストが巨額であるためである。一方、スラリー充填・ペースト充填では、坑内充填に関係したコストが全コストの約3/4を占めている。

ペースト充填の設備費は全体の17.3%を占めており、スラリー充填の約1.4倍である。しかし、坑内充填を行わない無充填・ズリ充填の設備費の約1/4.6と少ない。発生する廃滓の87.4%が坑内充填に使用されるため、廃滓ダムの大幅な減容化が可能となり、廃滓ダムの建設コスト負担が大幅に軽減されるためである。豊羽鉱山の場合、すでに大規模な廃滓ダムを有しているので、Table7に示したほどのコスト削減効果は持っていない。Table7は、豊羽鉱山と類似した鉱山を新規に開く場合のコスト削減効果と理解する必要がある。

エネルギー消費では、坑内冷却に要するエネルギー消費が大きい。

Table6 廃滓処理・坑内充填・坑内冷却に関係したコスト原単位

コスト原単位			廃滓乾量 トン当り 円/廃滓Dt	空洞体積 当り 円/m ³	鉱石 トン当り 円/鉱石Dt
初期投資	廃滓ダム建設、受入設備		1,098		856.7
	製造＋流送 設備	ペースト充填	113.1		77.1
		スラリー充填	34.5		23.5
廃滓処理	廃滓ダムに堆積処分		319.7		249.4
	製造＋流送	ペースト充填	1,196		815.2
		スラリー充填	1,850		1,261
ズリ充填				270.0	77.1
坑内冷却	ペースト充填			139.6	39.9
	スラリー充填			812.8	232.2
	ズリ充填			704.9	201.4
	無充填			1,480	422.7

Table7 コスト削減効果の比較

	コスト(円/鉱石Dt)					比 %	削減効果 %
	初期投資	坑内充填	ダム処分	坑内冷却	計		
無充填	856.7	0.0	249.4	422.7	1,529	100.0%	0.0%
ズリ充填	856.7	77.1	249.4	201.4	1,385	90.6%	9.4%
スラリー充填	131.8	1,261	31.5	232.2	1,656	108.3%	-8.3%
ペースト充填	185.4	815.2	31.5	39.9	1,072	70.1%	29.9%
坑内冷却を必要 としない場合	コスト(円/鉱石Dt)					比 %	削減効果 %
	初期投資	坑内充填	ダム処分	坑内冷却	計		
無充填	856.7	0.0	249.4		1,106	100.0%	0.0%
ズリ充填	856.7	77.1	249.4		1,183	107.0%	-7.0%
スラリー充填	131.8	1,261	31.5		1,424	128.7%	-28.7%
ペースト充填	185.4	815.2	31.5		1,032	93.3%	6.7%

な比率を占めていたが、コスト面では、坑内冷却のコストが占める比率は少ない。坑内冷却コストが最も多い、無充填の場合でも、全コストに占める比率は27.7%である。したがって、坑内冷却を除外したコストと比較した場合でも、ペースト充填がやや優位となっている。無充填のコスト原単位を100%としたとき、ズリ充填とスラリー充填のコスト原単位は無充填よりも高くなって、ズリ充填が107.0%、スラリー充填が128.7%となる。一方、ペースト充填のコスト原単位は無充填の場合の93.3%で、値は小さいもののコスト削減効果が見られる。

ペースト充填は充填物流出防止のための強固なバルクヘッドを必要としないことから、今回の解析でも、ペースト充填の充填・固結に要する時間を、ズリ充填の約1/2、スラリー充填の約1/4とした。ペースト充填では採掘・充填のサイクルが短縮されるので、年間の出鉱量を大幅に増加させることも可能である。また、同じ出鉱量でも切羽の数を減らし集中することができるので、人員・重機の運用面でより効率的な改善が期待できる。坑内冷却を必要としない場合、ペースト充填が持つコスト削減効果は少なくとも、6.7%であったが、ペースト充填の導入による坑内採鉱システムの改善が上乗せのコスト削減を生む可能性を持っている。

5. ま と め

旧金属鉱業事業団が手がけた豊羽鉱山におけるペースト充填導入試験について報告した。

従来のスラリー充填と比較しながら、ペースト充填の特性を明らかにし、ペースト製造法の一つであるPPSMシクナを紹介した。エネルギー使用合理化に力点を置いたことから、今回のプロジェクトで、豊羽鉱山をペースト充填適用の鉱山として選び、PPSMシクナによるペースト製造方式を採用した理由を説明した。

そして、豊羽鉱山におけるペースト充填試験の実施状況と結果を示した。残念ながら、豊羽鉱山のペースト充填試験はPPSMシクナの破損により、その続行を断念したが、ペーストの製造・坑内流送システムの操業・管理に必要な知見を得ることができ、同時に残された課題も明らかになった。

続いて、ペースト充填が持つ省エネ効果と経済効果を明らかにするために熱環境解析結果を活用した。廃滓の処理と充填に関するマテリアルフローを考慮しながら、熱環境解析結果を基に、ペースト充填・スラリー充填・ズリ充填と充填を行わない場合のエネルギー消費とコストを試算し、ペースト充填に期待できる省エネ効果と経済効果を定量的に評価した。

ペースト充填はここで明らかにしたプラス効果以外に、既存の採鉱法を全く新たなものにしている可能性を持っている。ペーストは従来の充填に比べて早期に固化し、しかも強度が高いと期待できるので、ズリ混入の大幅な改善、切羽の大型化、採掘準備作業の簡素化、採掘サイクルの短縮が可能となる。カナダやオーストラリアの大型坑内掘鉱山でその一部が実現されている。

ペースト充填は廃滓の全量を充填に使用できるので、廃滓堆積場の減容・延命効果が大きい。ここでは、廃滓堆積場の建設コスト削減による直接的な効果を明らかにしたが、廃滓堆積場の立地・取得条件を緩和し、環境負荷を低減するという間接的な効果は鉱山開発と鉱山操業の環境リスクを軽減するものといえよう。非鉄金属鉱山の廃滓堆積場の姿も大きく変わることになる。

本研究を進めるに当たり、旧金属鉱業事業団に設けられた「エネルギー使用合理化鉱山システム等開発トータルシステム開発委員会」メンバーの方々、なかんずく北海道大学の金子勝比古氏、産総研の小林幹男氏と皿田滋氏から貴重な助言と支援を数多くいた

だいた。ここに深く感謝の意を表す。

付録. 自然対流熱伝達モデル

4・2において、坂井と齋藤¹²⁾が行った熱環境解析結果を検討するために、自然対流熱伝達モデルを使用した。ここでは、自然対流熱伝達モデルの概要を示す。

岩盤などの固体表面とそれに接して流れる流体間の熱移動現象は対流熱伝達と呼ばれている。一般に、流体に熱が伝わって温度上昇し、密度変化による対流が誘起されると熱移動量が熱伝導に比較して格段に増加する。この熱移動の形態を自然対流熱伝達(Natural Convection Heat Transfer)と呼んでいる。

豊羽鉱山では、採鉱法としてSublevel Longhole Stoppingが採用されていて、採掘空洞はほぼ垂直であり、鉱脈に沿った方向に長くのびた形状を持っている。熱環境解析に使用したモデル(Fig.5)は平均採掘幅が3.5 mで、長さが300 m、高さが50 mであった。Fig.A1に示したような、幅が $2b$ (m)で高さが h (m)である空間を気流が流量 Q (m³/s)で移動し、気流温度が入口気流温度の Θ_{in} から出口気流温度の Θ_{out} まで暖められるものとする。空間を挟む2枚の固体壁面から与えられる、単位面積、単位温度差当りの伝達熱量、すなわち、熱伝達率(Coefficient of Heat Transfer): α (W/(m²・K))は、Handbook of Heat Transfer¹³⁾によれば、

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{2b} = 0.618 \cdot (Ra)^{0.25} \cdot \frac{\lambda}{2b} \quad \text{..... (A1)}$$

によって与えられる。ここで、 Ra はレイリー数(Rayleigh Number), Nu はヌセルト数(Nusselt Number)数であり、Fig.A1の形状を持った空洞の場合には、

$$Ra = \frac{g\beta \cdot (\Theta_w - \Theta_\infty)(2b)^3}{\nu \cdot \kappa} \cdot \frac{2b}{h} \quad \text{..... (A2)}$$

$$Nu = 0.618 \cdot (Ra)^{0.25}$$

である。これらの式に含まれている記号は、次のことを意味している。

λ : 気流の熱伝導率 = 27.8×10^{-3} W/(m・K)

ν : 気流の動粘性係数 = 18.3×10^{-6} m²/s

κ : 気流の温度伝導率 = 25.4×10^{-6} m²/s

β : 気流の熱膨張率 = 3.096×10^{-3} 1/K

g : 重力加速度 = 9.8 m/s²

Θ_w : 壁面温度 = 403 K (初期値)

Θ_∞ : 離れた場所の気流温度 = 293 K

上記の気流物性値は50℃における値であり、これらを使用する

Fig.A1 自然対流熱伝達モデル

と、レーリー数、ヌセルト数、熱伝達率は

$$Ra: \text{レーリー数} = 2.154 \times 10^{10}$$

$$Nu: \text{ヌセルト数} = 237$$

$$\alpha: \text{熱伝達率} = 1.88 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

となる。

空間を流れる気流が壁面（岩盤）から受け入れる伝達熱量を考慮して、熱収支をバランスさせることにより、 $z = h$ における気流の温度、すなわち出口気流温度： Θ_{out} を得ることができる。すなわち、

$$\Theta_{out} = \Theta_w - (\Theta_w - \Theta_{in}) \cdot \exp \left(-\frac{\alpha \cdot 2w}{\rho C_p \cdot Q/60} \cdot h \right) \quad \text{..... (A3)}$$

あるいは、熱伝達率をビオット数 (Biot Number) で置き換えると、出口気流温度は次式からも求めることができる。

$$\Theta_{out} = \Theta_w - (\Theta_w - \Theta_{in}) \cdot \exp \left(-\frac{Bi \cdot \lambda_w \cdot 2w}{\rho C_p \cdot Q/60} \cdot \frac{h}{b} \right) \quad \text{..... (A4)}$$

ここで、

$$Bi: \text{ビオット数} = \frac{\alpha \cdot b}{\lambda_w}$$

$$\lambda_w: \text{岩盤の熱伝導率} = 3.37 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

$$\rho: \text{気流の密度} = 1.079 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$C_p: \text{気流の定圧比熱} = 1,013 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

である。ここでも気流の物性値として 50°C のものを与えたが、

$$Bi: \text{ビオット数} = 0.976$$

となる。

壁面温度より冷たい気流が流れることによって、壁面が徐々に冷却される。このことを考慮すると、Eq.A4 は

$$\Theta_{out} = \Theta_{w0} - (\Theta_{w0} - \Theta_{in}) \cdot \exp \left(-\frac{Bi \eta_t}{\eta_t + Bi} \cdot \frac{\lambda_w \cdot 2w}{\rho C_p \cdot Q/60} \cdot \frac{h}{b} \right) \quad \text{..... (A5)}$$

と書き換えることができる。ここで、 Θ_{w0} は壁面の初期岩盤温度であり、 η_t は経時係数 (Elapsed Time Factor) と呼ばれるものである¹⁵⁾。経過時間を t (s) として、

$$Fo = \frac{\kappa t}{b^2} \quad \text{..... (A6)}$$

で定義されるフーリエ数 (Fourier Number) を使って

$$\left\{ \begin{array}{ll} 1.5 < Fo \leq 10 & \eta_t = \frac{1}{0.979813 + 0.373860 \cdot \ln Fo} \\ 10 < Fo \leq 100 & \eta_t = \frac{1}{0.839337 + 0.444718 \cdot \ln Fo} \\ 100 < Fo \leq 1000 & \eta_t = \frac{1}{0.683043 + 0.479054 \cdot \ln Fo} \\ 1000 < Fo & \eta_t = 2\Lambda \cdot (1 - \Lambda - \Lambda^2 - \Lambda^3) / 0.57722 \\ & \Lambda = 0.57722 / (\ln(4Fo) - 1.15444) \end{array} \right. \quad \text{..... (A7)}$$

より η_t を計算し、Eq.A5 に使用する。このようにして計算した出口気流温度を熱環境解析結果と比較した (本文中の Fig.6a)。

Eq.A8 より計算できる出口気流と入口気流が持つエントロピーの差： ΔH (MW) は、壁面からの放熱量に等しいと考えた。

$$\Delta H = \left[\frac{H_{out}}{1 + \varphi_{out}} - \frac{H_{in}}{1 + \varphi_{in}} \right] \cdot \frac{\rho \cdot Q}{60} \cdot \frac{1}{1000} \quad \text{..... (A8)}$$

ここで、

$$H_{out}: \text{出口気流の比エンタルピー (kJ/kgDA)}$$

$$H_{in}: \text{入口気流の比エンタルピー (kJ/kgDA)}$$

$$\varphi_{out}: \text{出口気流の絶対湿度 (kg/kgDA)}$$

$$\varphi_{in}: \text{入口気流の絶対湿度 (kg/kgDA)}$$

である。

気流の相対湿度を 40% として、気流の比エンタルピーと絶対湿度を求め、Eq.A8 より計算した放熱量を熱環境解析結果と比較した (本文中の Fig.6b)。

References

- 1) The Metal Mining Agency of Japan: Enerugi- Siyou Gourika Kouzan Sisutemu-tou Kaihatsu Houkokusho, Heisei 13 nendo.
- 2) J. Yamatomi: Proc. MMIJ Fall Meeting (2001), Vol. AB, pp.292-297.
- 3) W. Helms: Proc. of MINEFILL 93 (SAIMM, Johannesburg, 1993), pp. 323-331.
- 4) F. Hassani and J. Archibald: *Mine Backfill* 1998 on CD-ROM (CIM, Montreal, 1998), pp. 5-7.
- 5) J. Yamatomi, G. Mogi and K. Yasunaga: Proc. MMIJ Fall Meeting (1997), Vol. D, pp.59-65.
- 6) W. Lidkea and D. Landriault: Proc. of MINEFILL 93 (SAIMM, Johannesburg, 1993), pp. 337-347.
- 7) F.W. Brackebusch: Mining Engineering, **46** (1994), 1175-1178.
- 8) J. Naylor: Proc. of Canadian Mineral Processors Conference (CIM, Ottawa, 1997), pp. 408-420.
- 9) O. Sakai and J. Saito: Proc. MMIJ Fall Meeting (2001), Vol. AB, pp.283-287.
- 10) K. Asakura et al: Sigen-to-Sozai (Journal of MMIJ), **120** (2004), 217-221.
- 11) O. Sakai: Proc. ENAA-GEC2002 (ENAA, Tokyo, 2002), pp.1-9.
- 12) T. Sakai and K. Saito et al: Sigen-to-Sozai (Journal of MMIJ), **119** (2003), pp. 469-476.
- 13) W.M. Rohsenow, J.P. Hartnett and Y.I. Cho: *Handbook of Heat Transfer* (Third Ed.) (McGraw-Hill, New York, 1998), pp. 4.33-34.
- 14) S. Yamada and T. Katsuki: Proc. 49th Zenkoku Kozan-Seirensheo Genba Tantoshu Kaigi (Tokyo, 2001), pp. 45-68.
- 15) X. Zhang, K. Sasaki, H. Miyakoshi and Y. Mizuta: Sigen-to-Sozai (Journal of MMIJ), **110** (1994), 653-660.