

休廃止鉱山による環境汚染を防ぐために

～水文地質学・鉱床学の視点から～

坂 巻 幸 雄(鉱床部) 黒 田 和 男・永 井 茂(環境地質部)

1. はじめに

私たちはいつものように夜行列車で盛岡に着いた。接続して すぐ発車する花輪線の列車は はじめ岩手山の大きな姿を左の窓に映しながら走る。 竜ヶ森・荒屋新町の峠を越えると 米代川の源流だ。 約2時間八幡平へ向かう若い人たちがまず降り 十和田湖をめぐる乗客がそろそろ網棚を気にしはじめるころ 列車は陸中花輪駅に止まった。

山あいとはいえ米代川の谷間はもうかなりひらけていて 街のまわりには一面の水田が続く。 緑にずっとなじんできた目には 家並のむこうに立ちはだかっている赤い岩肌を見せた山が異様に映った。 わが国でも指折りの銅鉱山だった 尾去沢鉱山が つい先ごろ 1978年まで操業していた跡である。 このあたりから 日本でも有数の銅・鉛・亜鉛鉱の産出地 北鹿盆地(ホクロク・ベースン) がはじまる。 ただ 盛者必滅。 新しい鉱床が開発される一方で 経済性を失い 社会的使命を終えた古い鉱山は次々と閉じられてゆき その「遺跡」は盆地内にくまなくとってよいほど見られる。

尾去沢鉱山は その遺跡群のなかでも Aクラ

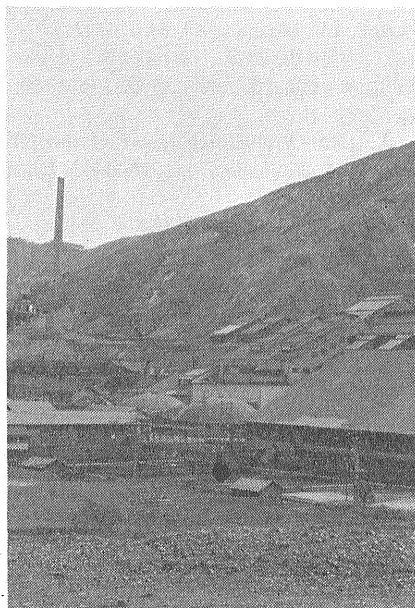
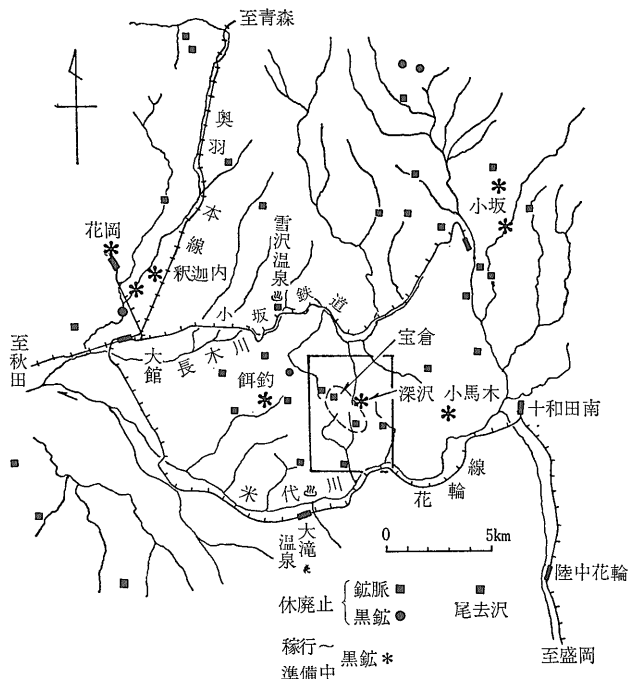


写真1 尾去沢鉱山
16世紀末からの操業の記録を持つこの大鉱山も 1978年 ついに坑内での採鉱を中止してしまっ

スで そして 一番新しいものの一つに入ってしまったのだ。

十和田南でスイッチ・バックした列車は 米代川をへだてて小馬木鉱山のズリ山を遠くに眺めながら 間近になった終着駅 大館へ向けて走る。 私たちの旅の目的地は その途中から山へはいったところにある「遺跡」のひとつ 宝倉鉱山なのだ。 大きな危険をおかさずに坑内調査のできる休廃坑など そうめったにあるものではないが 宝倉鉱山はそのめずらしい例の一つだった。 そのわけは 隣に新しく発見された有望な黒鉱鉱床・深沢鉱山の周辺精査が行われていたことと これも隣接する廃坑・旭坑の廃水処理がこの坑内を導水路として行われていたためである。 加えて 具合のいいことには 盛業時の鉱床調査の記録も 散逸せずにかかり残っている。

地質調査所が東北工業技術試験所・公害資源研究所と共同で 環境庁予算によって 昭和49～52年度にわたつ



第1図 秋田県北鹿盆地の鉱床群

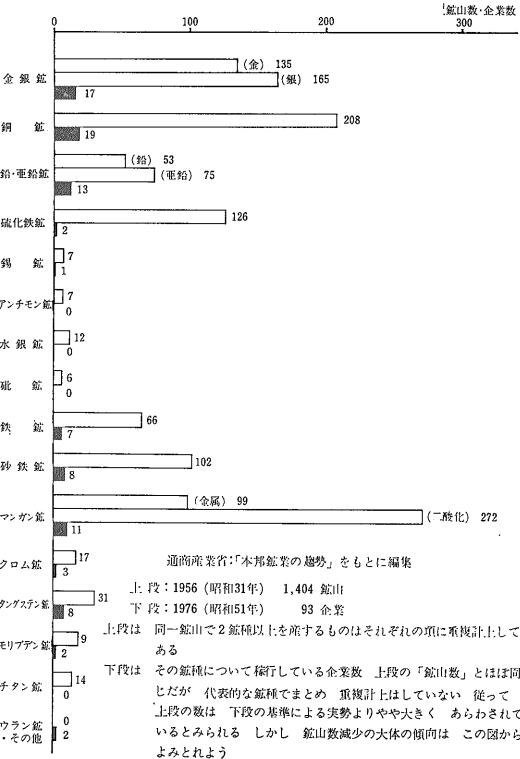
て実施することと定められたテーマ「休廃止鉱山における坑水の抑制と処理技術に関する研究」にあたって 宝倉鉱山のこのような状況は 野外研究のテスト・フィールドとして 願ってもないものであった。 さいわい 鉱業権者の卯根倉鉱業(株)と 監督官庁である仙台鉱山保安監督部の全面的な援助のもとに 作業は順調に進んだ。

2. 休山・そして環境問題

「もう やめますわ。 鉱石は買ったたかれるし 銀行は金を貸さんし。 きのうもいわれてきたんですよ。 お前さんが町工場やってるんだったら まだ貸してやる。 敷地だって 機械だって担保にとれる。 でも 鉱山がつぶれてからっぽの坑道もらったって何になる？ 戦争中なら防空壕に使えたかもしれないが——なんて」

ある小さな鉱山のおやじさんはこういってぼやいた。

1950年代から60年代にかけての 国内金属鉱山の閉山は とどまるどころを知らぬ勢いで進んだ。 もちろん最初に手を上げたのは採算性の悪い中小鉱山であったが 尾去沢鉱山(三菱系)に象徴されるように 大手でも安全圏に立っていたわけではなかった。 基準のとり方が年次で多少異なるので 単純比較はできないが 通商産業省の公表する統計によっても 1956年の国内金属鉱山総



第2図 衰退していった金属鉱山

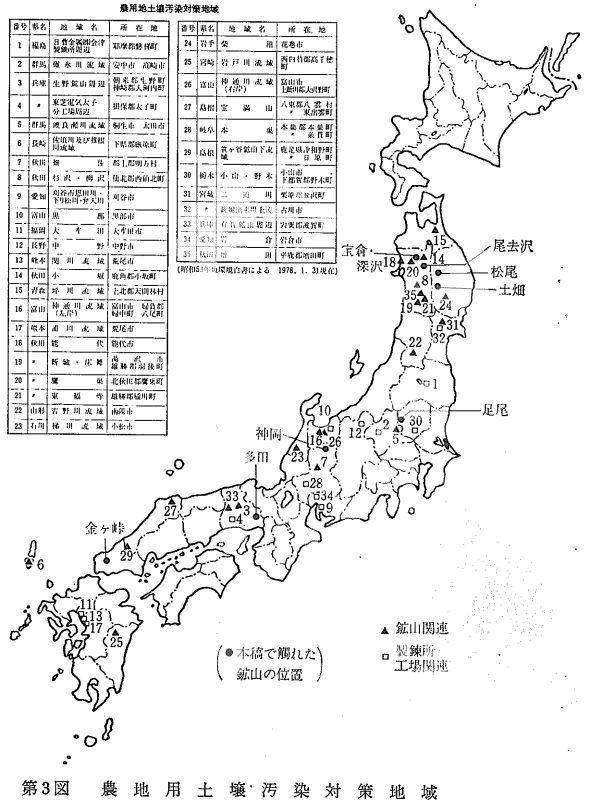
第1表 坑 廃 水 排 出 基 準
(主要なもののみ) pHを除き 単位 ppm

Cd	Cu	Pb	Zn	Hg	Fe ¹⁾	Mn ¹⁾	Cr ⁶⁾
0.1	3	1	5	0.005	10	10	0.5
As	F	CN	SS	BOD			pH
0.5	15	1	200(150) ²⁾	160(120) ²⁾			5.8~8.6

注 1) 溶解性のものにつき 2) ()内は日間平均値

数 1,404 は 20年後の1976年には 93事業所に減り 現在では 規模・鉱石品位からみて操業の近代化が可能な 鉱山に限って いわば少数精鋭主義で集中的な生産が行われるようになってきた(第2図)。

一方 鉱山排水による周辺住民とのトラブルは 所によっては 江戸時代からはじまっていたが 明治期以後は特に多く記録されるようになった。 しかし 当時の認識では 被害の形は農作物の減収や川魚の絶滅などとしてとらえられていて 足尾鉱毒事件のように 抗争もその面からおこっている。 これに対して 急速な国内鉱業の衰退とからみあって 1960年代の鉱害問題は質的に異なる形をもって登場してきた。 岐阜県神岡鉱山の



第3図 農地用土壌汚染対策地域

排水と関連して 富山県神通川下流域に発生したイタイイタイ病問題は その頂点に位置するもので 人体の健康に直接被害があらわれたことと それがカドミウムなど微量重金属の蓄積効果による慢性中毒症状であることが示されたことが大きな特徴であった。

この種の社会問題にはつきものの いろいろな曲折はあったが 行政的には総理府令や地方自治体などで 公共水面への排水に際しての水質基準が定められ 対応して 金属鉱山等保安規則のなかでも坑廃水排水基準が設けられた(第1表)。汚染地に住む人々の生活と健康を将来にわたって保障するためには 農地の土を入れかえさらに用水を通じての再汚染がおこらぬようにすること また生活用水を通じて重金属が身体の中にとりこまれないようにすることが必要であるから このような発生源での規制措置は一連の「系」のなかでは特に大切なことである。操業中の鉱山は 経営的にはかなりの負担となる場合があるにせよ とにかく操業の大前提としてこの基準を守ることを法的に義務づけられている。

しかし それ以前に休山し すでに鉱業権も 措置を義務づけられた人もなくなっている鉱山の場合はどうなのか。

蓄積性のある水銀などの例は別にしても 騒音 臭気 NOx などといったたぐいの工場公害は 事業が左前になって工場が止まってしまうば その段階で悪影響も大体なくなる。周辺との折合いが悪くなれば引越しも不可能ではない。しかし 鉱山は ふつう休んでからあ

とも汚染水の排出は止まらないし もちろん引越しはできない。したがって 「義務者不存在」の場合には 住民 地方公共団体 鉱山保安監督部 金属鉱業事業団などの関係者が それぞれの守備範囲で真剣に対策にとりくみ 少なからぬ公費もそのために支出されている。

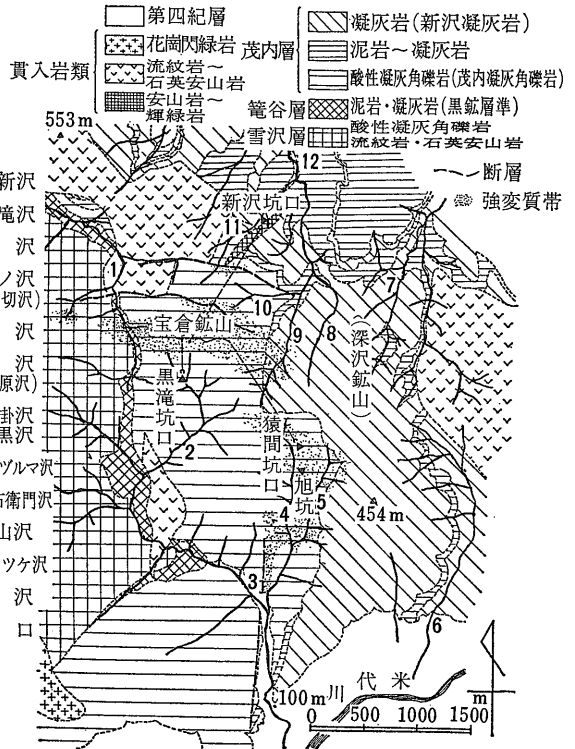
それらの労力や経費をより有効に活かせるように 地質学と工学の両面から適切な助言ができれば——というのが 私たちに与えられた中心課題でもあったし それを受けた私たちの願いでもあった。

3. 山にしみこむ水

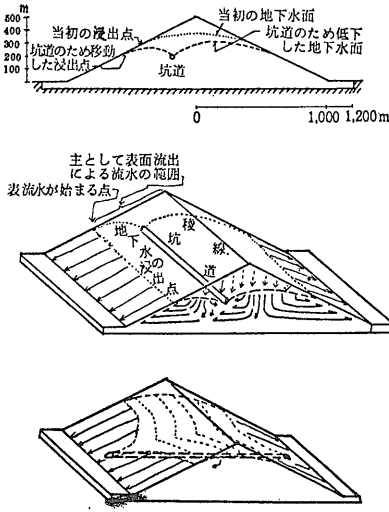
初夏の宝倉鉱山はみずみずしい緑の中にあつた。空茶筒を叩いているようなツツドリの声が好きりに聞こえる。ただ それにまじってチェンソーのエンジンの音もひっきりなしにこだまし たまには 巨大な秋田杉が倒れる地響きも伝わってきた。国有林なので 皆伐方式がとられ 山はみるみる裸になる。先様のご都合だから文句の云える筋合いではないとしても 坑内をひとりわり見て 地表調査に出てきた私たちにとっては「泣き」であった。打ち落された小枝が沢底をクッションのように埋め 岩も流れもおおいかくしてしまうからである。



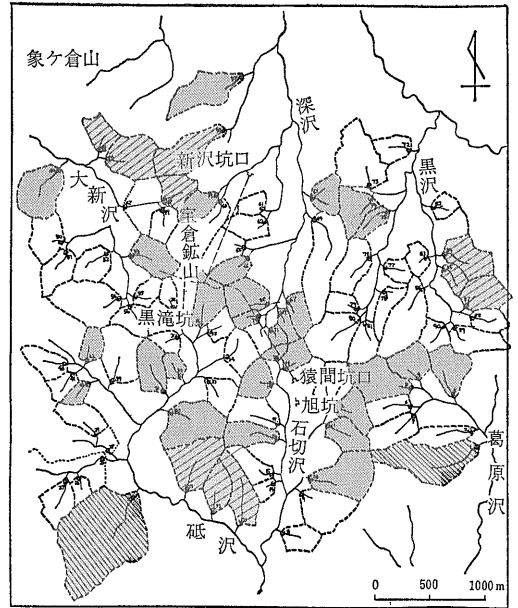
写真2 地表での採水
比抵抗値 水温 pH などはその場で早く測定せねばならない。重金属イオン濃度だけでなく 一般成



第4図 秋田県宝倉鉱山周辺地質図
[藤井・坂巻・上村(1977)による]



第5図
坑道と地下水面
宝倉鉱山の事例を念頭に
おいてコンピュータシ
ミュレーション用の山体
モデルをこしらえた
当初の地下水面は 坑道
開さく条件を入れるこ
とにより低下し 表流水
の始点も下がってくる
これにより 坑道内には
湧水が発生し 地表では
それに見合って 一定の
枯渇圏が形成されてくる
地下水面の形は 岩盤の
透水係数 空洞の大きさ
坑道と稜線のなす角度
坑道の深さなどで複雑に
変化する ここでは坑道
が稜線に平行な場合と
直交する場合を例として
示した

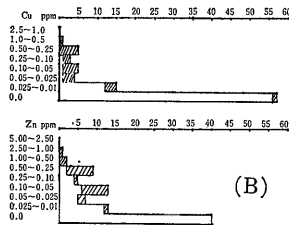
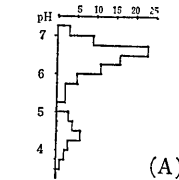
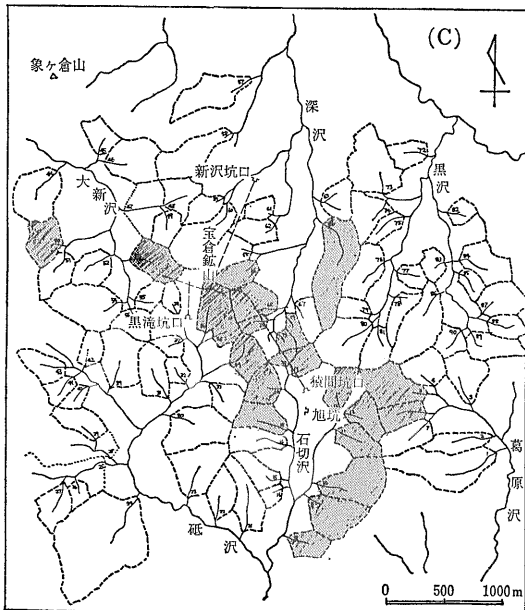


第6図 単位小流域区分図
アミ目の部分は $0.7\text{m}^3/\text{min}/\text{km}^2$ 以下の低流量区 (/////) は
流紋岩～石英安山岩岩体が分布することによる (|||||) は 伏流
による低流量区であるため 考察の際には区別した
(秋田県宝倉鉱山周辺)

私たちの日課は 水文地質調査の正攻法のようなものであった。 沢をさかのぼりながら 露岩を観察してこれまでの地質図を修正し 要所要所で採水してゆく。 気温 水温 流量 水比抵抗値 pH RpH などの現地測定を手早く済ませ ポリ瓶2本に採水する。 うち1本は酸を加えて 微量の重金属が器壁に吸着されるのを防ぐのだ。 沢がだんだん細くなってきて ついには水がなくなる。 その地点の標高を正確に押さえ 地形図上にプロットしておく。 もちろん 流量や水質は季

節や 直前に降った雨の影響を受けて変わるから 重点個所には定点をおいて くりかえしデータをとり 補正する必要があった。

この作業を進めるに当たっては 次のような考え方に



第7図 低pHを示す小流域各小流域ごとに 表流水について測定した pHの度数分布は (A) のように2つの山になる 低pH側のものは 鉱床変質帯 ズリ中の浸透水 廃坑からの浸出水などを含むことが多い 水中に溶けている銅 亜鉛の度数分布 (B) でも 低pH側の山に属するもの (斜線部) のほうが 含有量が高い 平面的な分布 (C) (影をつけたのは $\text{pH} \leq 5.0$ の部分) も低流量区との分布と似ている (秋田県宝倉鉱山周辺)

立っていた。山に降った雨は一部はそのまま沢に流れくだる。これを表面流出と呼ぶ。また一部は直接大気中に蒸発する。残りは地中にしみこみ山体のなかに地下水を形成する。それぞれの割合は条件によって大きく変わるがわが国の場合地下にしみこんで地下水を維持する水量は平均的に1日当たり1mm程度とみつもられている。この水は地下水面と地表面とが切り合う線から湧きだし表流水となって斜面を流れくだる。

宝倉鉱山周辺の岩石は中新世の海底火山活動で形成された緑色凝灰岩(グリンタフ)のメンバーでくわしくみれば透水性もまちまちであり鉱床付近では水の流れはむしろその中の局所的な割れ目に支配されているらしい。細かく見だしたらキリがないが一つの山体くらいの規模でとらえた場合細かい局所的な条件は思い切って捨て全体を透水性に関しては均質とみなしてモデル化するのが一つの便法である。以上の仮定に立つと同じ山に坑道を開ければ当然のことながらその坑道内には水が湧き出しその結果最初の地下水面は順次低下して条件に見合った点で静止する過程をコンピューター・シミュレーションで追うことができる。金属鉱業事業団のご好意でこの目的で開発された2次元有限要素法による解析プログラムに宝倉鉱山の地形・地質条件をモデル化して入力してみた。その結果をみやすく表わしたのが第5図で何も地下空間がない場合にくらべて地下水の浸出点は明瞭に下がる。

話を再びフィールドにもどそう。まず図上の作業で私たちは調査地域を1区画には湧水点が原則として1個だけであるような「小流域」に分割しそれぞれの面積を測定した。次に各「小流域」から流出する沢水の流量を流域面積で割ると比流量が求まる。さきほどの地下浸透水によって地下水面が定常状態に保たれているという考え方に立てば浸透水と流出水の水量はバランスするはずでその際の比流量は $1000 \text{ m}^3/\text{日}/\text{km}^2$ つまり $0.7 \text{ m}^3/\text{min}/\text{km}^2$ 程度と想定される。もちろん現実はこのモデルほど単純ではありえない。しかし地域全体の傾向からみて小さな比流量を持つ小流域は坑内への水の通り路としては「灰色」である。甚だしいときには上流側での流水が鉱体付近ですいこまれて下流側が涸沢となる場合もある。もっとも河床の状態に注意してただの伏流の場合や人為的な影響岩質の差異による影響を除かなくてはならないが。水質的には鉱体や周辺変質帯を含んでいる小流域だと溶存成分の絶対量や成分相互間の量比水比抵抗値が顕著に変わるのが普通である。ズリ山など鉱山の操業に関連した人為的な要素が加わった場合も同じである。この現象がむしろ水汚染のプロセスにとっては本質的なものなので次にのべる坑内湧水のところであらためてふれてみよう。

この節の最初で採水点のえらびかたに触れて「要所要所で」といった。いいかえれば私たちの採水点はいつも地域全体の水系網を意識しその水文地質

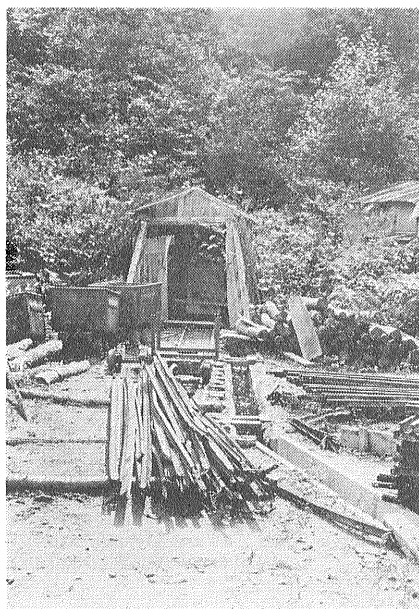


写真3
坑内から出てくる水——宝倉鉱山新沢通洞坑口
全山をまわってきた水はここに集中する。流量はこれでほぼ毎分1トン。休廃止鉱山にとってその処理はかなりの負担だ

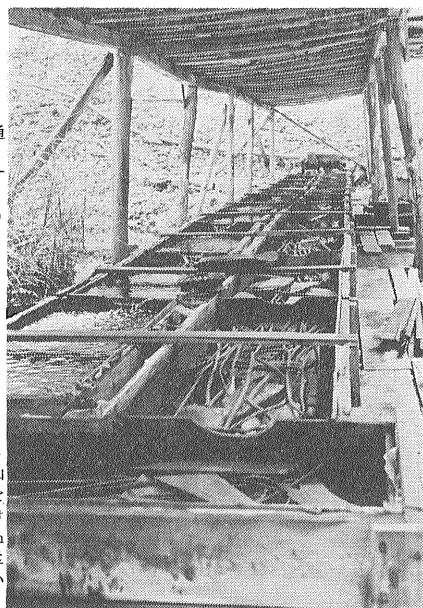
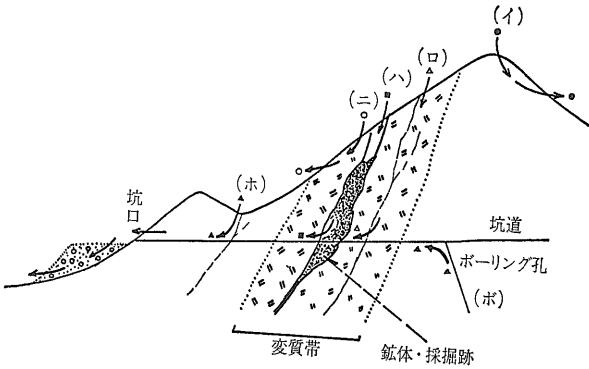


写真4
沈澱銅の採取——宝倉鉱山
銅イオンを多量に含む水の中に屑鉄片を入れるとイオン化傾向の差で鉄が溶け銅が析出する。新しい solution mining につながる原理だが経済的に引き合うレベルに達するのは容易でない



第8図 坑水となって出てくる地下水の経路
坑内に湧出する水のなかでも 鉱体・変質帯とは無関係な湧水(ホ)(ポ)は水質が良い場合が多い。しかしそれが水質の悪い水(ロ)(ハ)と混ざって 処理を要する水量を増大させてしまう例をよく目にする。条件によっては両者を分離することも 効果的な対策としてもっと検討されてよい。記号は第9図に同じ。

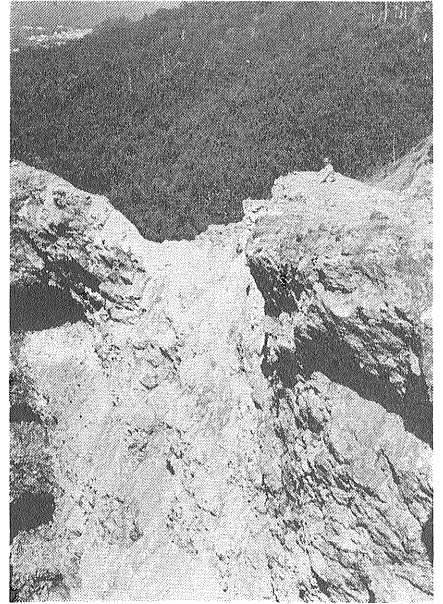


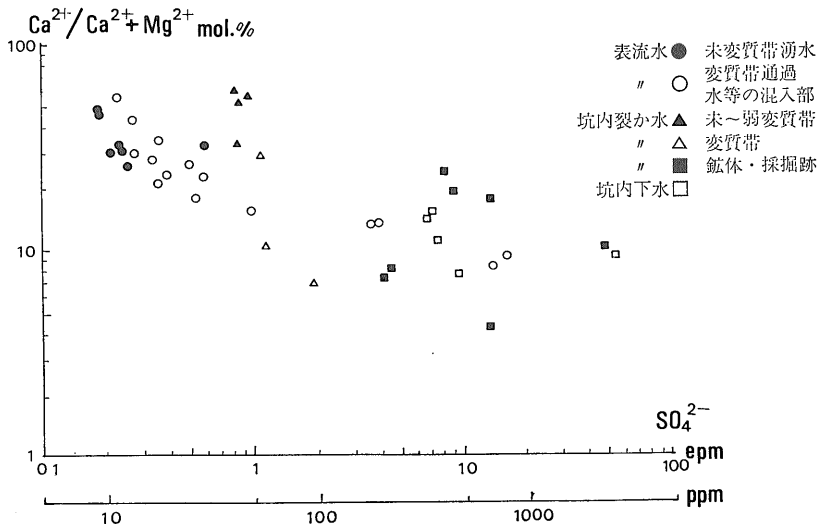
写真5 地表に貫通した採掘跡——岩手県土畑鉱山
本仁玉沢鉱床
鉱体は酸化し 青緑色の銅の二次鉱物ができている。当然浸透水の水質も悪いがここではそれをインプレース・リーチング用の撒水にもちい。さらに銅イオン濃度を高めてから沈澱銅として回収している。「守り」より「攻め」の対策ともいえる。

的な特徴をよくあらわすように選定している。そのためによく用いられる ランダム・サンプリングや等間隔〜グリッド・サンプリングなどの手法は 統計的な取扱いは容易でも 数値化できない地学情報をとりこぼすおそれがある。それは 私たちの目的にはそぐわないことなので この場合はあえてそのような意味での「標準化」はしないでいた。

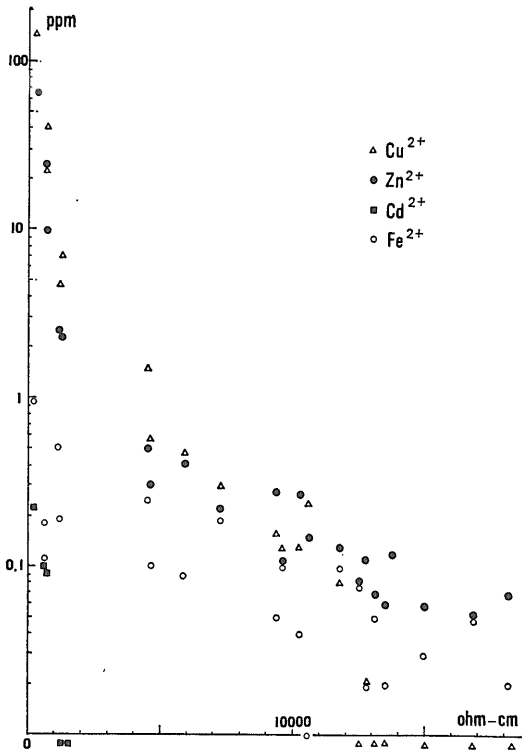
4. 坑内に湧く水

宝倉鉱山の坑内水は 最後には1本の坑道・新沢通洞坑にしぼられ 海拔204mの坑口から地表にでてくる。毎分約0.8〜1トン pH3.2前後という硫酸酸性水だが

側溝を勢よく流れ出てくる水は 意外に澄んでいる。しかし もちろんこのまま川には流せない。鉱山は1972年2月に閉山したが 坑水処理場だけはまだ仕事をやるわけには行かない。この坑水の中に まず鉄片を入れて沈澱銅をとり 次いで 沈澱池で石灰乳を投入



第9図 硫酸イオンの増加と対応するマグネシウムイオンの増加
変質帯などを通ってきた水は SO4²⁻イオンを含んで酸性を呈するようになり同時に 2価陽イオンのなかでMg²⁺の占める量比が増す。坑内条件が悪くて入坑できない時には これらの関係から逆に地質構造を推測する。ただし グリントフ地域であることが前提。横軸 ppm はミリグラム当量値を意味する (秋田県宝倉鉱山)



第10図 水比抵抗値と主要重金属イオンとの関係
 グリタフ地域では 水比抵抗値— SO_4^{2-} —イオン濃度—pH の間により相関があることから 間接的に 水比抵抗値が重金属汚染の指標として使えることが多い 水比抵抗値の現場測定は簡便なので 化学分析以前に 試料を採取すべきかどうかの判断がすぐできるのが長所である (秋田県宝倉鉱山)

して pH を上げると 溶けていた鉄は 赤茶けた水酸化鉄ゲルとなって沈澱し ほかの重金属もここでほとんどが沈澱物のなかにとりこまれる。この上澄液は はじめて川に流してもよくなるが 溜まる一方の沈澱物は 毎日のように トラックに吸上げて 花岡鉱山の終末処理場まで捨てに行かねばならない。北国のことで 11月の末には根雪がくる。長い冬の間 一帯が雪につつまれても この作業を休むわけには行かない。

多少の季節的変動はあるにせよ 終掘後数年経って山体のなかの地下水面はだいたい安定し 人為的な変動の要素は 南側の 旭坑の坑口から洩れる水を集めてこの坑内にポンプアップし 本来の湧水といっしょに処理系統に入れていることだけとみてよい。凝灰岩は透水係数 $3 \sim 5 \times 10^6$ 程度と 比較的水を透しやすいので この前の節でのべたように 地表から浸みこんだ水は 割合に早く坑内に現われてくると予想できる。地下水の「年令」を推定するのは 1959年以降 水爆実験によって大気中に急増した三重水素(トリチウム ^3H)を指標とする方法がよく用いられるが 念のためおこなったその測定でも 水爆実験以前の「古い水」の存在は認められなかった。

鉱山で仕事をする地質家の大切な仕事といえば 坑内の地質と それぞれの場所での鉱石の品位・特徴をくわしくした品位図 (assay map) を作る事がまずあげられよう。私たちが 坑水の処理対策を作るにあたって 第一に作らねばならないのが 坑内の湧水点と その排出経路の要所要所で 水量と水質を記載した いわば水についての assay map である。現在生き残っている大きな鉱山では 徐々にこのような資料もとのえられてきてはいるが 休廃坑の場合は やはり自分たちで入坑して作る以外に方法はない。

第8図をみてみよう。このような 鉱床地帯の山に雨が降ったとする。(イ) (ロ)は 坑道にまで到達しないで 表面流出あるいは基底流出としてすぐ沢に入ってしまう水である。(ハ)は 変質帯内を通るので 水質がわるくなる可能性がある。

坑内に現われるのは (イ) (ハ) (ホ)の水である。一般に 水質的に一番問題が少ないのは (ハ) (ホ)である。これは 未変質帯～微変質帯からの湧水であるが 坑内にはこの種の湧水が意外に多い。岩盤の割れ目から湧き出すもののほかに 鉱体や変質帯に当たらなかった探鉱坑道・ボーリング孔からの湧水などは この種のものである。(イ)になると 鉱化変質帯の特徴がはっきり水質に反映する。宝倉鉱山の場合だと SO_4^{2-} イオンが増え そのことの別の側面として pH が下がり 水比

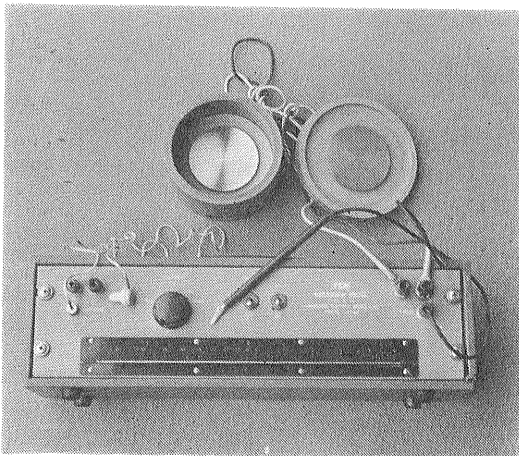
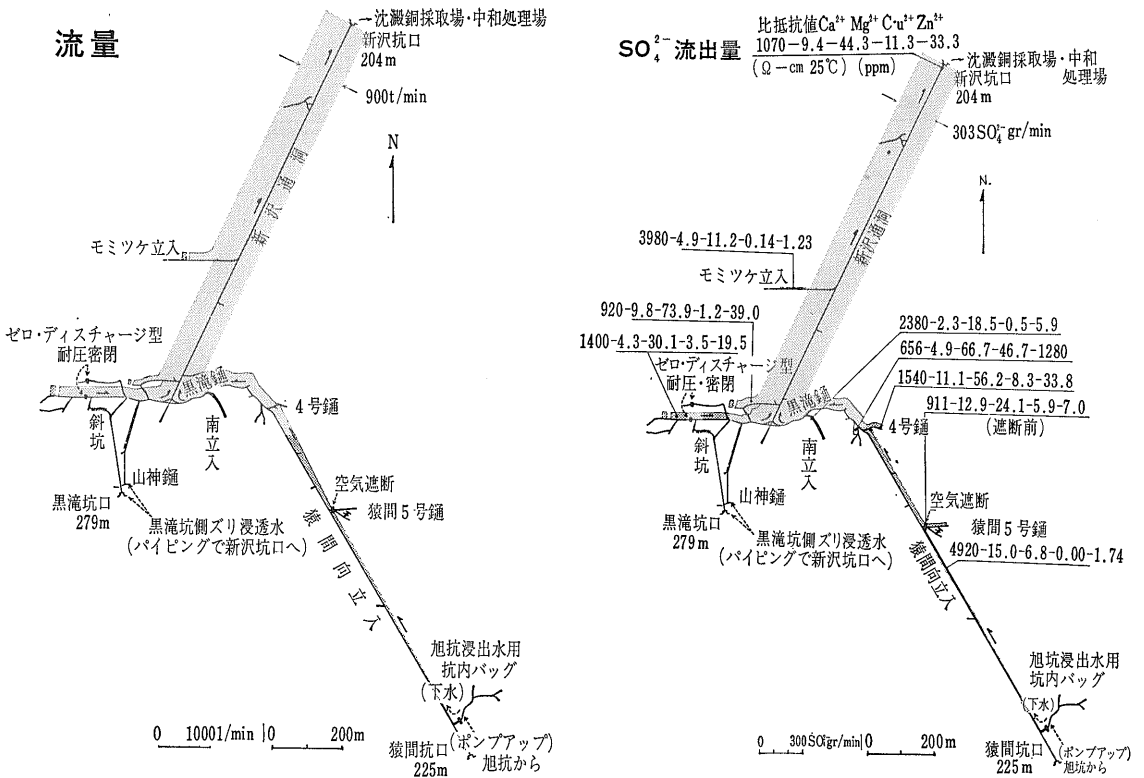


写真6 コーラウシュブリッジと測水用電極
 水比抵抗値測定は現場での水質判定に欠かせないが これはそのための有力な武器。頑丈で故障知らずの点がフィールド向きである



第11図 宝倉 鉱山の坑内水系
閉塞着工前の1973.12.4~5 測定 旭坑からのポンプアップを止めた状態の下なので 坑口流量はやや減少している 坑口での pH は 3.2
黒滝鍾は この鉱山の主力鉱脈で 山頂近くまで採掘が終っているのだから ここからの水量 SO₄²⁻ 流出量はともにも多い 両図を比較すると
水量は多くても SO₄²⁻ 流出量や 重金属濃度の小さい水源 (モミツケ立入など) と 逆に水量は小さいが負荷源として無視できない水源 (4号
鍾 猿間5号鍾) があることがわかる 各水源ごとの特徴をつかむことは 対策を考えるうえできわめて大切なステップだ

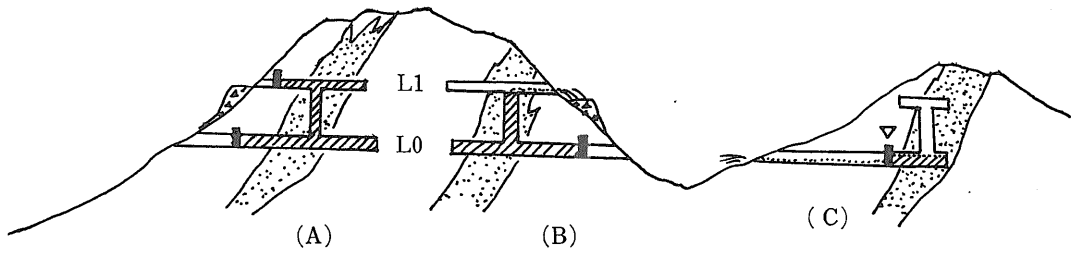
抵抗値も下がる。 重金属イオンは増える。 Ca²⁺ Mg²⁺ など 一般の地下水中にある陽イオンも増え 特に Mg²⁺ が特徴的に増える。 この現象は 変質帯粘土中を水が通ってくる時の イオン交換によるものと推定され そのために 2価陽イオン 中に Ca²⁺ イオンの占める比率 Ca²⁺/Ca²⁺+Mg²⁺ は 水が変質帯を通ることによってはっきり下がる。 わずか数メートルの坑壁を浸透してきた水でも 影響があらわれることもある。 いに至っては 採掘跡の残鉱やズリの中を浸透してくることによって 水質は極端に悪くなる。

これらの水が すべて入りまじって 坑口に現われたものが 規制の対象となる坑水というわけである。 ただ 現実の問題として 作業環境が一般に悪く 時としてはある程度の危険も伴う廃坑内での研究であるだけに 採水点のその場で およその水質の目安をつかみたい。 その目的のためには 私たちは コーラウシュブリッジによる水比抵抗値の現場測定を重視した。 装置が原理的に簡単で 機械的にも丈夫 数値の再現性もよいので

悪条件下の測定でも気が楽であるし SO₄²⁻ 濃度 (非ダリントフ地域では HCO₃⁻ 濃度 ある種の鉱泉ではCl⁻濃度) や重金属濃度とも一定の関連をもっているからである。

坑内水路では 水量は坑口に向けて増えてゆくのが普通だが その測定は容易ではない。 測定堰が作れば理想的だが 場所的にも時間的にも 休廃坑内ではその余裕がないことがほとんどである。 水量測定の誤差は各成分の排出量算出に直接影響するので なるべく精度を上げたいのだが 普通の坑内下水の断面ではスクリー式の流速計はまず使えず 誤差の大きい「浮子流し」によることが多くなる。 下水中への直接湧出 下水からの漏水 伏流等については 注意深い観察が必要である。 個々の末端湧水点では ビニール袋に湧水の全量を受けることもできる。

これらを含めた状況を 第11図にまとめてみた。 こまで状況が明らかにできたのは 廃坑とはいえ坑内環境が比較的良かったからで 幸運であった。 大多数の休廃止鉱山では この部分が black box のなかにはい



第12図 坑道閉そくの方法
 (A) ゼロディスチャージ型：関連坑道を完全に閉そくする プラグは耐圧プラグ (B) オーバーフロー型：坑水の流出は上の坑道に移るだけで止まらないがL1～L0間で発生する水量と負荷の分だけ状況が改善される 排水をズリ山に浸透させないような注意が必要 (C) 空気遮断型：水封じ管つきのプラグを設け 水は流しだが空気の流通を遮断し 鉱石の酸化を防いで水質を改善する めくら坑道であることが必要 (点の部分は鉱体と変質帯)

ってしまっている。私たちは尿の検査結果だけで診断し 治療に当たらねばならない医師の立場におかれるわけで そのような場合のためにも 一つ一つの鉱山についての「症例研究」の蓄積が貴重になってくる。

5. 水を止める

私たちが水の挙動を追っている間に 東北工業技術試験所と公害資源研究所のスタッフは 具体的な水止めの方法の検討にはいていた。

ちょっと考えれば 坑口にただ「栓」をしてしまえば坑水の排出は止まりそうに思える。このような形の閉塞方式を ゼロ・ディスチャージ型の坑道閉塞と呼んでいる。結果としては 山体内の地下水面を なるべ

く採掘以前の状態に戻すことにつながる。

しかし 現実にはそれほど甘くない。まず直面するのが 栓(プラグ)にかかる水圧の問題である。水が出ている坑道のレベルから最上部の坑道まで 5坑準 150mの高度差があったとすると このプラグにかかる静水圧は 約15気圧をみこまねばならない。プラグ自体にそれだけの強度を持たせることはできても 周辺の岩盤が弱ければ 圧力を持った水は 隙間を押し抜げてにじみ出してきてしまうだろう。その実例が 宝倉鉱山のなかでも東の端にある旭坑で かつて 坑口で坑道閉塞を試みたところが プラグのまわりからの漏水が止め切れず その分は 前に記したようにポンアップして本坑の処理系統につなげなくてはならなくなった。現在の進んだ技術では あらかじめ プラグを打設する場所を切り抜け 周辺の岩盤にボーリングを打ち セメントミルク等の岩盤凝固剤を注入する カーテングラウト工法などを用いることによって成功率は高まってはいるが施工経費は一番高つく。

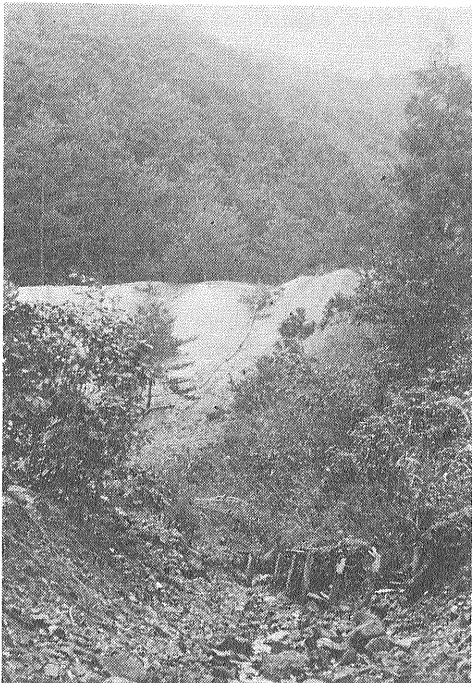
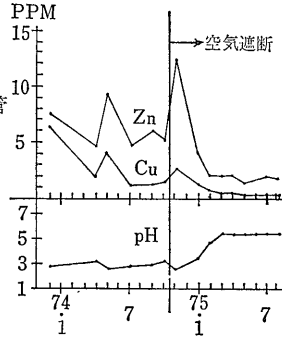
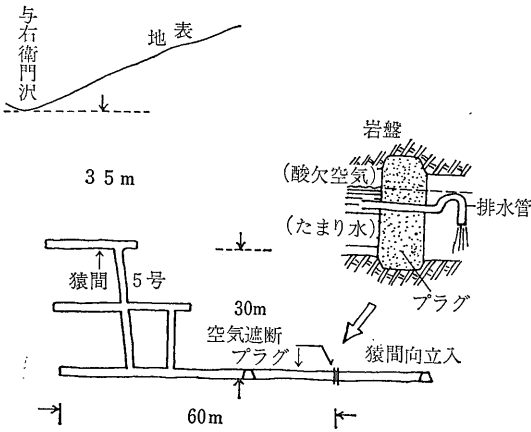


写真7 宝倉鉱山旭坑風景
 旭坑の坑口は昔の技術で閉塞したため プラグ周囲の岩盤からの漏水がある これらはまとめてポンアップし処理場へ送られる ズリ山を這うのはそのためのパイプ

古い鉱山になればなるほど 記録洩れの坑道・坑口はふえる。ゼロ・ディスチャージをめざすことになれば 水位の上昇に伴って それらすべてを耐圧密閉しなくてはならないが 現実には非常な困難が伴う。そうであれば 上位の坑道を無理に閉めないで 坑水はそこから流れ出すことをあらかじめ計算に入れておいたらどうだろう。このようなやり方が オーバーフロー型坑道閉塞と呼ばれる。排出される坑水は まだ処理を要する場合が多いであろうが 水位を上げたことによって 鉱体・変質帯中を流動する水の量と 経路延長が減ってくれば 水質は相対的によくなり 規制物質の量は減る。プラグの耐圧強度も 他の条件が同じであれば ゼロ・ディスチャージ型の時ほど大きく取らなくてよい。この2つの点でのメリットが 永続的な水処理のデメリットを上廻る場合か あるいは 技術的な制約からゼロ型では施工不可能な場合 次善の策として オーバーフロー型が採用される。



第13図
空気遮断法による水質の改善
地表と空気の流通のない「めくら坑道」
では 水封じ管その他によって 空気を
遮断すれば 鉱石の酸化が進まなくなり
結果として水質の改善が期待できる
この図は宝倉鉱山猿間5号鑛の例
遮断直後の水質の悪化は 水位上昇による
一時的な溶脱の進行によるもの (東
北工業技術試験所・公害資源研究所の資
料による)

この2つの方式は 坑内空間に水を溜めるので 事後の注意が必要なことはないまでもない。しかし 水位を上げなくても 鉱石の酸化を防ぐことができれば 硫酸生成も 重金属の溶出もおこらなくなるはずである。

カナダ楯状地には世界最大の予想鉱量を持つ 礫岩型ウラン鉱床がある。その構成鉱物は明らかに水の流れによって円磨された閃ウラン鉱と黄鉄鉱であることがかねてから問題になっていた。2つとも 水中に長くおいておいたら 円磨される前に酸化・分解してしまうことがはっきりしている鉱物だからである。この疑問は 最近の地球化学の進歩によって解決した。この鉱床が堆積した当時 いまから約25億年前の地球大気にはまだ酸素がほとんど含まれていなかったのだ。

同じような低酸素の条件を坑内を作ってやれば この場合目的は達する。空気の流通を止めるためには いわゆる「めくら坑道」のように 局所的な空間が仕切られ 岩盤の割れ目などが少ない場所でないといけない。坑道は閉塞するが この場合 耐圧度は低くてよいので 施工は容易である。ただ 水は通すが 空気は中に入れない 水封じ構造を持った排出管を埋めこんでおく必要がある。この方式は空気遮断法(エア・シール)と呼ばれる。

排出管を通じて 水は相変わらず出てくる。量も減りはしない。最初のうちは水質も変わらないどころか 逆に多少悪くなることすらある。水位がやや上昇して残った酸素で酸化が進んだ鉱石が水に浸かるからである。しかし 酸素を使い切ってしまうと 水質は一転して良くなって来る。あとは 水封じが破れないように保守をしてゆけばよい。

の耐圧密閉が 猿間5号鑛でエア・シールがそれぞれ施工された。前者では 水量にくらべて湧水水圧が予想外に低く 上位の坑道まで水が上がり切らないうちに バランスがとれて水位上昇がとまった。後者では 予想通り遮断後4か月で 重金属の溶出はとまり 定常状態に達した。工学面からのアプローチはこのようにして一応の成功をみたことになる。

しかし この成功は同時に 必ずしも理想的な条件をそなえてはいない多くの現場について どのようにキメ細かく対応してゆくかを 特に私たち地質家にあらためて問いかけるものであった。すでにみてきたように 坑内湧水といってもさまざまな水質のものが入りまじっている。それをまとめて処理できる場合はよいが 一般的には さらに細かく 個々の湧水点についての処理方針を決めてゆかねばならない。その場合の基本姿勢は 1) 有害物質は発生源の近傍にとどめ 希釈・拡散させず 2) 可能な限り短時間に処理する ことに尽きてくる。

具体的には 個々の湧水点について 閉山前に 極力水どめを行って 鉱山全体としての排出水量を引き下げることと その上で なお湧いてくる水については 鉱体・変質帯を通過してくる汚染度の高い水と それ以外の汚染を受けていない水を 坑内ですぐに分離し 混ざり合わないようにすることが 基本的な処置方針として重要である。たとえ排出される規制物質の総量が同じでも 高濃度・小水量のケースのほうが その逆よりもはるかに処理場の負担は軽くなって来る。将来の見通しとしては 鉱床の開発段階から 鉱体内に無用の水をひきこまないような採掘計画や坑道レイアウトが採用されるようになってくるに違いないし その際には 鉱床と

第2表 鉱床タイプ別にみた坑水制御の問題点

鉱山例	鉱種	鉱床の形～種別	おもな有害物質	対策	問題点
宝倉・土畑	Cu Pb Zu	鉱脈(東北日本 グリントフ地域)	酸性水・重金属	閉塞・中和・ (沈殿銅回収)	岩盤透水性大 変質帯粘土化 水質 Mg-SO ₄ 型
多田・金ヶ峠	Cu Pb Zn (Au Ag As)	鉱脈(西南日本内帯 古生層 または 流紋岩地域)	重金属・As	閉塞・中和・ 凝集沈降	岩盤裂かきが地下水の流路を支配 水質 Ca-HCO ₃ 型 pH 5~7
深沢・小坂	Cu Pb Zn	塊状(黒鉱 東北日本グリントフ 地域)	重金属・ (酸性水)	中和・ 鉱体酸化防止	終掘後の鉱体酸化防止がカギ
神岡	Cu Pb Zn	塊状(接触交代鉱床 飛驒帯)	重金属	凝集沈降・ 鉱体酸化防止	重金属の大半は懸濁粒子中に 水質 Ca-HCO ₃ 型 pH 8 前後のアルカリ性
松尾	S	塊状～鉱染状(第四紀火山岩中)	酸性水・As	閉塞・中和	岩盤透水性大 変質帯粘土化 水質 Ca・Mg-SO ₄ 型 pH < 3 の強 酸性 水量大

周辺の母岩を含めた構造規制とその系内での地下水の挙動を統一的にとらえる能力がただちに地質家の側に求められることとなろう。

宝倉鉱山のすぐそばにある黒鉱々床・深沢鉱山の坑内では主要坑道の壁面がモルタル・ライニングでおおっており見学者のためにところどころに小窓を開けてうしろ側の鉱石がのぞけるようになっている。その光景をみてすぐ連想したのは青函トンネルの海底部の導坑であった。出水に対していささかも気を許せないここでは導坑の先端部以外はすべてモルタルで捲きたてられていた。深沢鉱山のライニングはもっと多くの目的を持つものであろうが結果的には湧水の制御と鉱石の酸化防止にもプラスに利いているようである。バッテリーロコがあえぎあえぎ走る宝倉とダンプカーが大断面の斜坑を力一杯登ってくる深沢との違いはそのまま新・旧両鉱山の坑水処理の難易を象徴しているものようであった。

6. よりよい対策のために

宝倉鉱山のようなグリントフ(緑色凝灰岩)中の鉱脈型鉱床はわが国の休廃止鉱山のなかでも特に数が多いほうである。これまで見てきたことが宝倉鉱山だけの特殊な例ではないことを証明するために私たちはその後にもいくつかの地質条件の似かよった鉱山について踏査を続けた。結果はSO₄²⁻の増加 重金属の増加 Mg²⁺の溶脱などの一連の傾向はどこでもよく似通っておりそれが岩盤内に浸透してから再び坑内に湧き出すまでの経路の地質環境を反映していることも同様であった。

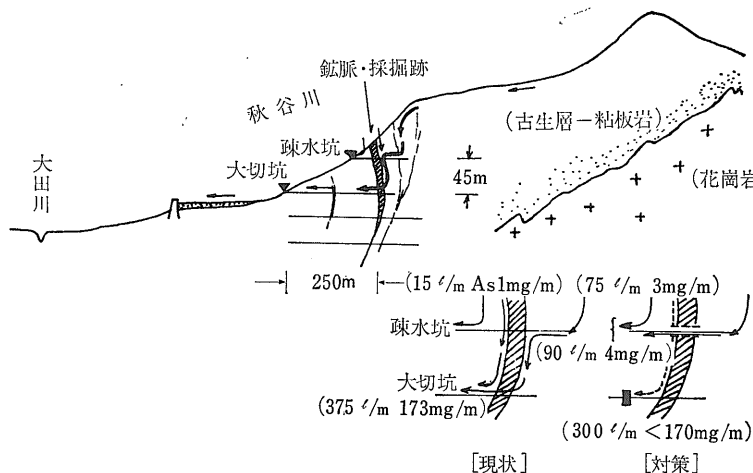
しかしもちろん非グリントフ地域にも多くの休廃止鉱山は存在しそれぞれの坑水の水質も地質環境を反映してさまざまに変わる。そのうち兵庫県多田・山口県金ヶ峠の2鉱山は対照地域としてやや詳しい調査をおこなった。別の機会に踏査や資料の収集が実施で

きたものも含めて 鉱床タイプ別の坑水のおもな特徴を第2表にまとめた。非グリントフ地域では坑水のpHは中性側に寄り 接触交代鉱床などでは弱アルカリ

性を示している。このような場所では重金属の大半はイオン状ではなく懸濁粒子状となるので処理も微細な粒子を沈降・除去する方式が重点となる。同じ例では一般溶存陽イオンではCa²⁺が特徴的であってMg²⁺はもはや指標とはならない。しかし溶存イオン総量の指標である水比抵抗値は引続き浸透経路の地質環境を反映して変化する。

従ってこのような鉱山の場合も汚染水・非汚染水の判定はさほど困難ではない。山口県金ヶ峠鉱山の場合特徴的な汚染物質は硫酸鉄鉱の分解によって生じるヒ素であるが坑口排水の約20%は鉱脈の背後からかん養されている非汚染水であることが調査の結果判った。この非汚染水も採掘跡を流れ下るうちに次第にヒ素を含むようになってしまう。最近金属鉱業事業団が地元自治体と共同で施工している排水対策工事では賢明にもこの非汚染水が鉱体に流れこむ前にパイプで導水し別系統として処理できるようにしている。操業中のところでもたとえば岐阜県神岡鉱山のように汚染水と非汚染水を坑内で別々の水系統にふりわけける施策を進めているところもあって今後のとりくみが注目される。

休廃止鉱山をめぐる水の問題をトータル・システムとしてみた場合あと残っている重要な課題はズリ(廃石)山の浸透水であろう。坑道内を流下する水の水質を悪くする元凶のひとつは坑道内に残されたズリや残骸であった。地表でもそれは同じことである。ズリ山の表面からの雨水の浸透 側方からの沢水の浸透 下底からの湧水の浸透は注意して防がねばならない。重金属を含む土石や砂粒などの流出防止には覆土と植栽が各地で実施されているがこの工法が浸透水の水質改善



第14図

山口県金ヶ峰鉱山の坑水制御
 金ヶ峰鉱山は多量の硫砒鉄鉱 (FeAsS) を産し
 その分解により坑水が汚染されている。しかし
 坑内水の水源には明らかに汚染されていない
 部分があり、それを別系統として排出すること
 が金属鉱業事業団の対策工事にくみこまれた
 濃度を上げて、処理水量を減らす方向での
 適切な措置といえる。地質条件を考慮して
 きめこまかく対策がとられた好例

にどれくらい寄与するかは、これからさらに確かめてゆかねばならない研究課題であろう。

もう一つの研究課題は、これらの汚染水をネガティブなものとしてとらえずに積極的に資源化しようとする場合の技術開発である。坑内水を人為的に制御して高濃度の Cu イオンを含む坑水から沈澱銅を回収する「インプレース・リーチング」はすでに秋田県小坂鉱山・岩手県土畑鉱山などで試験操業されているし、ズリ山に散水して有用金属を溶出させる「ヒープ・リーチング」とあわせ solution mining と名付けられてその将来が注目される。そのどちらもが坑廃水制御の技術と密接に結びついていることは、あらためていうまでもない。すべての点でまだことは始まったばかりなのである。

7. あとがき

この記事は本特集の他の項目と同じく、1979年2月の所内研究発表会「環境科学における地質学の果たす役割」での講演内容をもとにしたものである。ただ、研究の経過をご存じない大多数の読者のために、背景部分や実際の作業の部分を多く書き加え、視点も秋田県宝倉鉱山にしばった。この特集の他の項目の多くが「自然の営力」とのかかわりあい、言葉を換えれば「天災」との対応が中心課題なのに対し、このテーマでは「人間の営力」が自然条件以上に大きく現象を左右していること、その特質により、自然・人為の両面を常に見すえていかなければ、真の問題の解決には迫りえないことを、特に強調したかったからである。

(水文地質) 藤井敬三 (地域地質) 細野義純 (水文地質・自治省消防研、当所兼務) であった。本文中に記した各研究・行政機関、鉱山関係者のかたがたからは、研究遂行上多くの協力や示唆をいただいた。特に、公害資源研究所・石原透第三部長には、東北工業技術試験所ご在任中から、ここでとりあげた坑道閉塞に関する研究を主宰されていたので、そのグループの方々を含めてフィードバックをともにし、貴重な助言をいただくことが多かった。仙台鉱山保安監督部の担当監督官各位からも、これまでの坑廃水対策に関する現場での指導事例などを含め、短期間の現地研究ではカバーできない部分について、ご教示いただくことがしばしばであった。これらの方々にあつくお礼申しあげる。

おもな参考文献について

- 公害対策技術同友会刊「公害と対策」昭和51年10月号には、特集記事として「休廃止鉱山対策とその実例」がとりあげられ、7編の関連論文が掲載されている。また、日本鉱業会関東支部が昭和54年1月16日におこなった「休廃止鉱山の坑水対策に関する研究会」の講演集には、6編の要旨が掲載され、現在同会において入手可能である。
- 本稿の基礎となった特別研究の報文は昭和49～52年度の「国立機関環境保全研究成果集」(環境庁編)中に記載、公表されている。
- 宝倉鉱山周辺の地域地質については多くの論文があるが、ここでは、藤井敬三・坂巻幸雄・上村不二雄(1977): 秋田県北鹿地域中央部宝倉鉱山周辺の地質および構造、地質調査所月報 vol. 28 p. 753～762 によることとした。

この研究班の構成メンバーは、表記の坂巻(鉱床)、黒田(水文地質)、永井(化学)のほか、望月常一(化学)、菅野敏夫