

坑廃水水質改善技術開発事業

事業成果（詳細版）

平成27年12月7日

経済産業省商務流通保安グループ鉱山・火薬類監理官付

独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構

三菱マテリアル株式会社

鹿島建設株式会社

応用地質株式会社

目次

1. 事業の概要	1
2. 事業アウトカム	2
3. 事業アウトプット	3
3-1 事業全体のアウトプット	3
3-2 個別要素技術のアウトプット	8
3-2-1 要素技術①：充填材料開発	8
3-2-2 要素技術②：坑内空洞調査方法の確立	14
3-2-3 要素技術③：坑内状況詳細調査の技術開発	16
3-2-4 要素技術④：充填施工方法の確立	18
3-2-5 要素技術⑤：シミュレーション	21
3-3 特許出願状況等	26
4. 当省（国）が実施することの必要性	28
5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ	29
6. 研究開発の実施・マネジメント体制等	30
6-1 研究開発計画	30
6-2 研究開発実施者の実施体制・運営	32
6-3 資金配分	32
7. 費用対効果	34
8. 外部有識者の評価等（事前評価結果（要約））	35

1. 事業の概要

金属鉱業等の鉱山では、休山・閉山後も永続的に重金属を含んだ坑廃水が流出し続ける。我が国では、現在約80の休廃止鉱山において鉱石の採掘跡や捨石集積場等に浸透、流出する重金属等を含む坑廃水が処理されている。このような坑廃水の内、特に坑道から流出するものを「坑水」という。坑廃水の処理は、下流の公共水域における人の健康や農水産物等への被害を防止するうえで必要不可欠であるが、重金属等を含む坑廃水の流出を防止できない場合は半永久的に実施されなければならない、莫大な費用が費やされていることから、坑廃水の水量削減、水質改善及び処理費用の低減は猶予のない喫緊の課題となっている。

本事業は、鉱山の採掘跡や坑道等の坑内空洞を、坑廃水処理で発生する中和賸物を含む充填材料で埋め戻すことにより坑水の水量を減少させるとともに、地下に浸透した雨水と坑内の鉱石等との接触による水質汚染の機会を減らし、排出される坑水の水質を現状より良化させる、抜本的な坑廃水処理費用削減に資する技術について、現場実証も含めて実施するものである。坑内充填および本事業における技術開発の概念図を図1-1に示す。

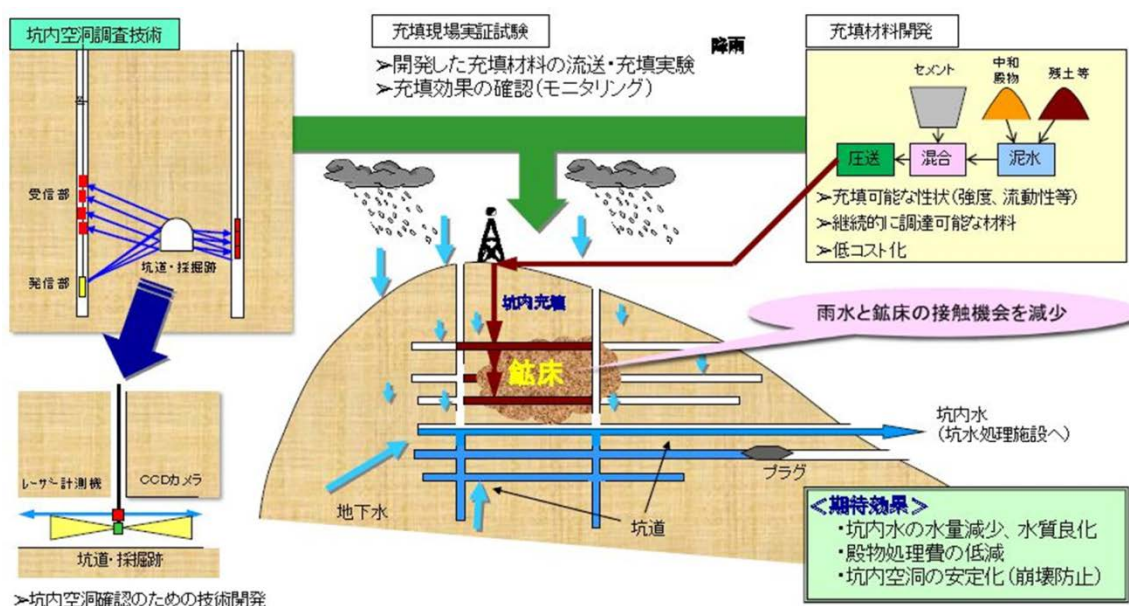


図 1-1 坑内充填および本事業における技術開発の概念図

鉱害防止対策は、環境保全にかかる重要な事業であり、坑廃水が未処理のまま放流されたときの環境汚染を伴う経済的損失は計り知れない。本プロジェクトは、坑廃水処理に要する費用削減を課題としており、坑廃水処理の円滑な実施に寄与するものである。したがって、本プロジェクトは、国民や社会のニーズに合致するもので、本事業の社会的、経済的意義は大きい。

2. 事業アウトカム

本事業のアウトカムは、国内に存在し坑廃水処理を必要としている複数の休廃止鉱山において、本事業で開発した技術を用いて充填施工がなされ、その効果により坑廃水処理費用の削減がなされることである。

本事業においては充填施工に関する要素技術の開発として、中和殿物等を利用した安価な充填材料の開発、地表下 30～50 m に存在する坑内空洞の探査手法の確立、充填施工のための坑内に関する詳細な状況把握の技術開発、充填施工に必要な坑内環境に適用する隔壁構築技術開発などは達成された。また、国内に存在する休廃止鉱山に対する本事業技術の適用可能性調査、さらには地質的特徴を組み込んだシミュレーションモデルの構築による充填施工時の効果予測等を行っている。

なお、充填施工にあたっては、必要な事前調査に基づく実証試験が必要であるが、これらの調査・試験には複数年を要することから、本事業における要素技術開発の成果を用いた鉱害防止対策の実施検討が計画されている他、要素技術開発の成果を学協会において講演・発表することで、広く普及することを図っている。

3. 事業アウトプット

3-1 事業全体のアウトプット

本事業の目標は、休廃止鉱山の疏水坑道レベル以上の採掘跡や坑道等の坑内空洞を、中和殿物等鉱業廃棄物を含む充填材料で埋め戻し、地下に浸透した雨水と鉱石等との接触を減らすことにより、坑内水量を減少、水質を良化させ、併せて坑内空洞の安定化、中和殿物等鉱業廃棄物の外部排出量の削減により、坑廃水処理事業コストの低減を図ることにある。このような坑内充填技術については、既存の研究より以下の表 3-1 の様な課題があるとされている。

表 3-1 充填施工における要素技術の開発課題

項目	既存技術開発における課題
充填材料の開発	- 充填材料のスペックについて、坑内充填に適した規程が存在せず、一般の土木・建築基準のものを適用すると、オーバースペックとなり材料費が過大になること - 中和殿物のみを利用した充填材料では広大な坑内空間を充填しきるためには容量不足となること
坑内空間の位置の把握	- 不明確な地表下 30～50 m に存在する坑内空間の位置を、地表からの調査により明確にできる手法が存在しないこと
坑内の詳細状況の把握	- 坑内に遮蔽物が存在する場合や坑道の形状が複雑である場合、充填対象となる空間を正確に把握できないこと - 充填施工に影響する坑木等の障害物や湛水状態を把握できないこと
坑内空間の充填施工	- ボーリング孔を通じて地表下 30～50 m の坑内を充填する際に必要な仕切り材について、求められる性能が十分に検討されていないこと - また、同様の条件下において効率的に仕切を構築できないこと
実用化・汎用化の推進	- 低コストで大量かつ継続的に現地で入手可能な増量材を、使用できるようにすること - 充填施工による水量削減・水質改善により、坑廃水処理コスト削減効果が示されること

これらの課題解決をもとに本事業では技術開発を行い、特に以下の課題につ

いて改善を図ることができた。

- ・坑内空間の位置の把握：

地表下 30～50 m 程度に存在する断面が 2 m×2 m 程度の大きさの空洞を、物理探査技術（弾性波・電磁波・電気探査等）を用いて把握する場合の、最も効率的な技術組み合わせを検討し、構築した坑道探査フローを試験サイトに適用して有効性を確認するとともに、坑内探査の効率面での改善を図ることができた。

- ・坑内空間内部の状況把握：

地表下 30～50 m 程度に存在する坑内の詳細な状態について、複雑な形状であってもサイズ把握等ができた。また、坑内観察などにより、地下水の状態や坑木などの障害物の有無についても確認が可能となった。

- ・充填材料の開発：

中和殿物等の鉱業廃棄物、建設残土等、現地で安価かつ継続的に入手可能な土質材料、セメント等から、安価で大量に作成可能な充填材料を開発し、その配合設計方法を確立した。

- ・充填施工：

坑内充填施工時に必要な隔壁（仕切）について、酸性水に長期間耐え、かつ坑木等の障害物や地下水状態によらず、さらにボーリング孔を通じての施工・形成が可能な手法を確立した。

- ・充填効果および安全性の事前評価手法の確立：

効果確認のためのモニタリングデータ（施工前状況）を取得するとともに、取得データを検証に用いることで地下水シミュレーション手法の高度化を図ることができた。

これらの技術開発成果を含め、本事業で実施された個別要素技術の目標と成果、および達成度を表 3-2～表 3-6にまとめる。また、本事業における技術開発のフレームワークを図 3-1に示す。

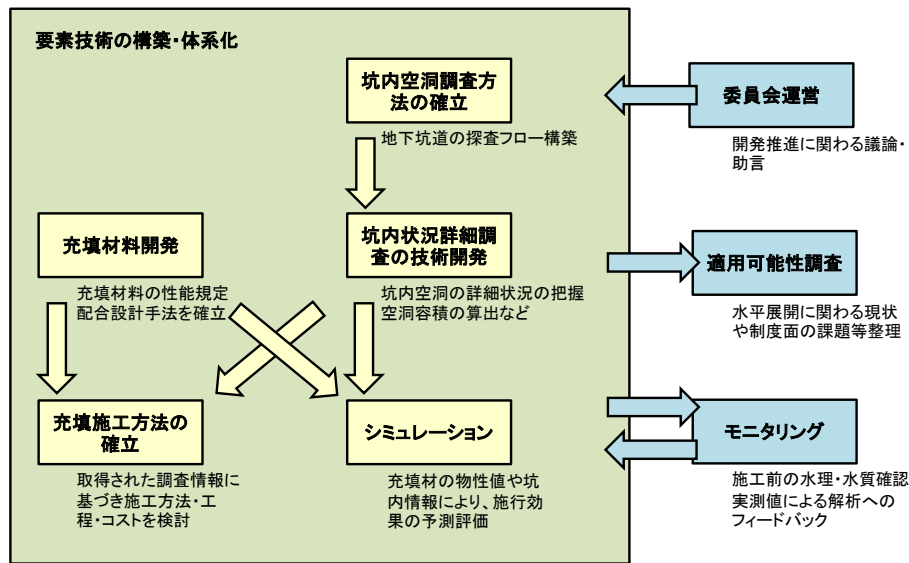


図 3-1 本事業のフレームワーク

表 3-2 要素技術①の目標・成果・達成度

要素技術①：充填材料開発		
目標・指標	成果	達成度
坑内水の流出抑制および空洞の安定化のために必要な充填材料の性能等を決定する。	空洞安定化を目的とした中和殿物等を使用した充填材料に必要な性能として、強度や溶出性のスペックを以下のとおり定めた。 強度：一軸圧縮強さ 50 kN/m ² 流動性：90 分後 JH フロー 250～300 mm 分離抵抗性：ブリーディング率 3 %未満 溶出性：土壤環境基準を満足 遮水性：1.0×10 ⁻⁵ cm/s 未満	達成
上記性能規定を満たす、充填材料の配合設計を確立する。	充填材料の性能と、中和殿物等の材料配合割合の関係を調査し、材料によらない配合設計方法を確立した。	達成
既存技術による充填材料と比べ材料費が1/3程度（約2,480 円/m ³ ）となる充填材料を開発する。	既存の充填材料と比べ、材料費が1～2 割程度（約1,000 円/m ³ ）となる充填材料を開発した。	達成

表 3-3 要素技術②の目標・成果・達成度

要素技術②：坑内空洞調査方法の確立（坑道位置調査）		
目標・指標	成果	達成度
地表下 30～50m、断面が 2m×2m 以上の坑内空洞の位置が把握できる調査方法を確立する。	現地情報を活用しつつ、以下の手順で物理探査を進めることで、深さ 30～50m、大きさ 2m×2m 以上の空洞位置が探査可能となった。 ① ボーリング施工 ② ボアホールレーダ ③ シングルホール・イメージング ④ 比抵抗構造がシンプルであると予想された場合は比抵抗プロファイラ ⑤ ボーリング孔から互いに反対方向に 5～10m 離れた位置に 2・3 本目のボーリング ⑥ 弾性波トモグラフィ （必要に応じ比抵抗トモグラフィ）	達成

表 3-4 要素技術③の目標・成果・達成度

要素技術③：坑内状況詳細調査の技術開発		
目標・指標	成果	達成度
モデルサイト（地表下 30～50 m）の坑内について、形状や湛水状況といった詳細な状況を把握する技術を確立する。	地表下 30～50 m の採掘跡及び坑道において調査を実施し、ボアホールカメラおよび 3D レーザースキャナ等を用いる調査方法を確立し、坑内の詳細な情報（壁面状態、坑木、湛水など）を得た。	達成
上記技術による詳細な調査結果を基に、空洞体積を算出する。	3D レーザースキャナの測定結果より、空洞（坑道）を 3D モデル化し、より正確に形状を把握すると共に、空洞体積が約 1,200 m ³ であることを算出した。	達成

表 3-5 要素技術④の目標・成果・達成度

要素技術④：充填施工方法の確立		
目標・指標	成果	達成度
酸性水が湛水している坑内環境に適用可能な隔壁構築の技術開発を行う。	坑木が存在し、酸性坑水による湛水環境である坑内環境においても適用可能な隔壁の構築技術を開発した。	達成

表 3-6 要素技術⑤の目標・成果・達成度

要素技術⑤：シミュレーション		
目標・指標	成果	達成度
地質的特性を組み込んだシミュレーションモデルを構築し、7 km×6 km の領域における地下水シミュレーションを実施し、充填施工の効果予測を行う。	空洞充填箇所周辺の広域におけるシミュレーションモデルを作成し、ここに地形特徴量（地表形状、地質特性を数値化したもの）を組み込んだモデルを構築した。また同モデルによるシミュレーションにより、以下の結果を得た。 ① 坑内水量の計算値は、モデル鉱山全体の流量値に近似し、エリアごとの水量値のバランスについても概ね整合する結果を得た。 ② c-1 サイトの坑道充填を反映した解析では、c-1 サイト下流部の-5L 坑道における坑内水量の削減率 42% ($0.91\text{m}^3/\text{分} \rightarrow 0.53\text{ m}^3/\text{分}$) の予測値を得た。	達成

3-2 個別要素技術のアウトプット

3-2-1 要素技術①：充填材料開発

(1) 充填材料に対する性能要求

充填材料の設計にあたっては、充填施工を行う上で重要な材料の流動性や材料分離抵抗性、施工後に固化した後、止水するための遮水性や充填した空間を安定させるための強度、さらには充填材料が2次汚染源とならないための非溶出性等について、性能規定を検討する必要がある。

充填材料の性能について、既存の研究によると、セメント材を多量に用いることで強度及び遮水性を確保することができるものの、その使用量が大きく製造コストに影響することが判明している。そのため、本項目では製造コストに対して支配的要因となる強度及び透水係数について、坑内空洞の充填に適した目標値を設定することを目的とし、数値解析による検討を行った。

充填した坑内空間（空洞）の安定化に影響する充填材料の強度に関する検討は、充填材料の自立・流出防止の観点から、空洞充填度の力学的安定性について数値解析による評価を行った。

数値解析における坑内空間の解析モデルを図3-2に示す。解析モデルはシュリンケージ採掘法を想定し、地表から深度30 mに高さ2 m×幅2 mの水平坑道および、その上方に高さ20 m×幅2 m×長手方向10 mの採掘跡を3Dモデル化した。

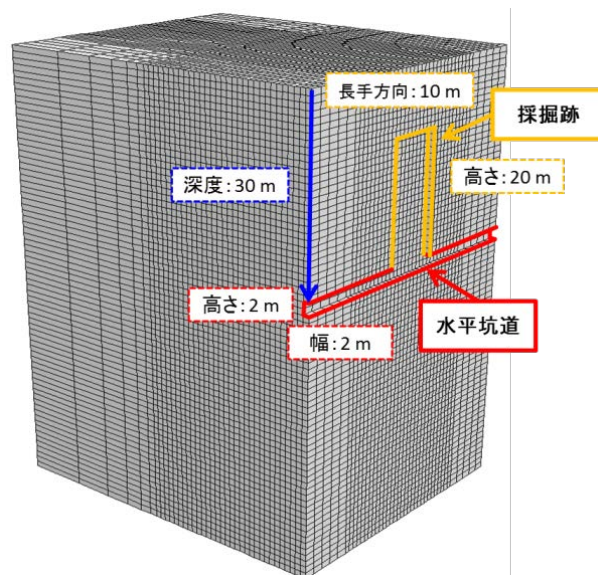


図 3-2 3次元力学安定解析 解析モデル（鳥瞰図）

解析においては地山を表層の風化帯と深部の新鮮岩盤の2層構造とし、既往の実績データ等を参考に变形特性および強度特性を設定条件とし、解析は、作

用荷重が自重のみの場合（常時）と自重と地震力の場合（地震発生時）の 2 条件について実施した。これらの条件下で、解析結果から充填材料中における塑性領域の発生有無を確認した。

力学安定解析の結果、図 3-3 に示す通り、充填材料の強度が一軸圧縮強さ 20 kPa (20 kN/m²) の条件において塑性領域は部分的な発生にとどまり、充填材料が流出する可能性が小さいと評価された。また、充填材料が 50 kN/m² 以上の条件では、塑性領域は発生しなかった。このことから、充填材料の強度に関する目標値は、一軸圧縮強さで 20 kN/m² を基本として、端部の隔壁（仕切材）の状態などから流出が懸念されるような場合においてのみ、部分的に 50 kN/m² とすれば、充填後における坑内空間（空洞）の安定性は確保できると判断した。

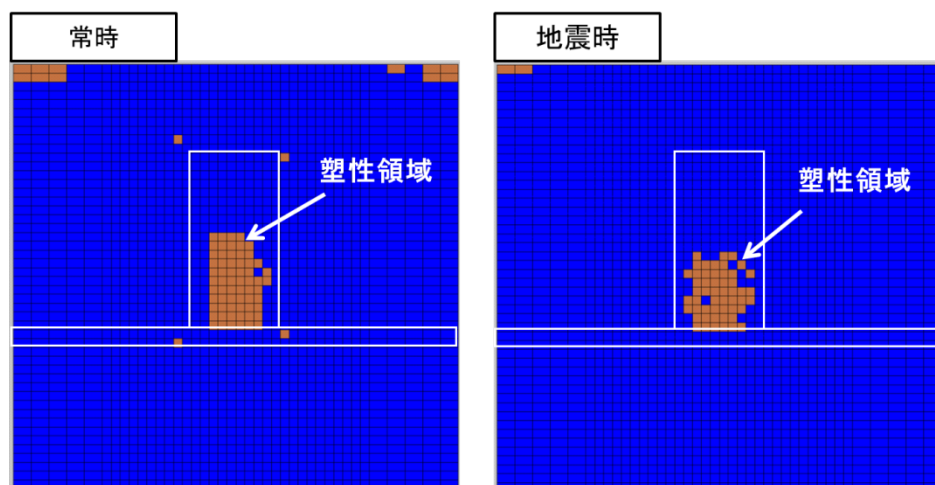


図 3-3 塑性領域の分布（充填材料の強度 20 kN/m²、図中茶色：塑性領域）

次に、空洞充填による水量削減効果に関係する充填材料の性能である透水係数について評価を実施した。

実際に充填施工を行った場合の坑内における水量削減効果は、図 3-4 に示すような局所的な止水効果によるものであり、充填範囲や規模も要因となるため、有限要素法（Finite Element Method、FEM）浸透流解析による評価を行った。

解析モデルは図 3-5 のように、シュリンケージ採掘法を想定した坑道横断面の 2 次元モデルとした。モデルでは、深さ方向に 2 m × 2 m の矩形坑道（横坑）を 3 段配置し、最上部の横坑及び採掘跡で形成される高さ 22 m × 幅 2 m を充填した条件とした。

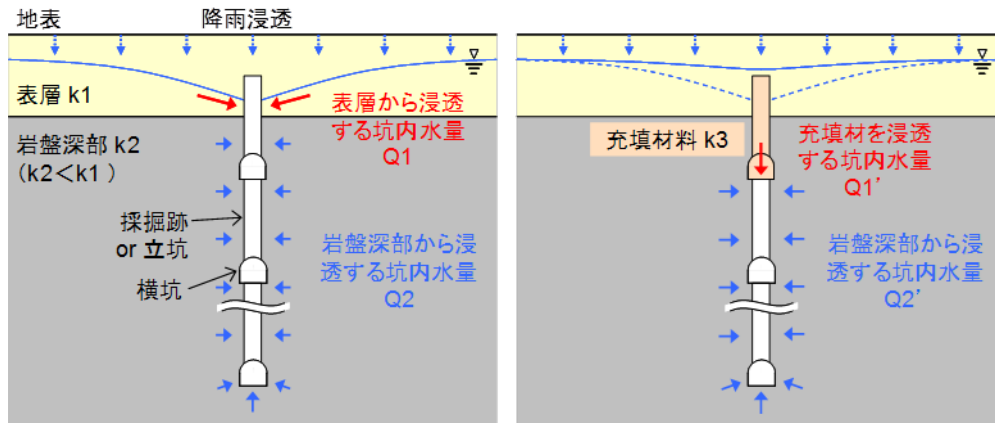


図 3-4 空洞充填による局所的な止水の考え方

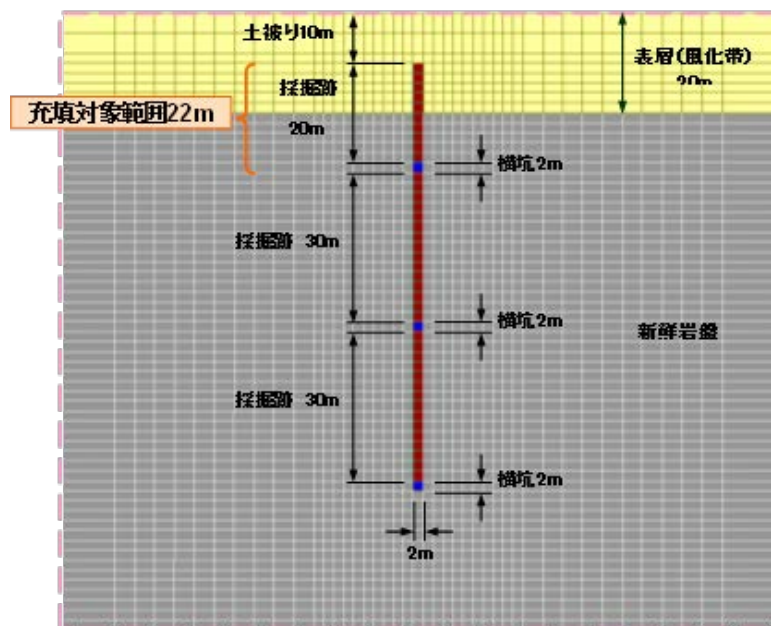


図 3-5 2次元浸透流解析 解析モデル

解析の結果、図 3-6 に示す通り、充填材料の透水係数が 1.0×10^{-5} cm/sec の条件では表層から浸透する坑内水量を、充填前と比較して 10% 程度に止水できると評価された。そのため、充填材料の透水性に関する目標値は、透水係数で 1.0×10^{-5} cm/sec (周辺岩盤と同程度) とすれば、充填箇所の局所的な止水効果が十分に期待できると判断された。

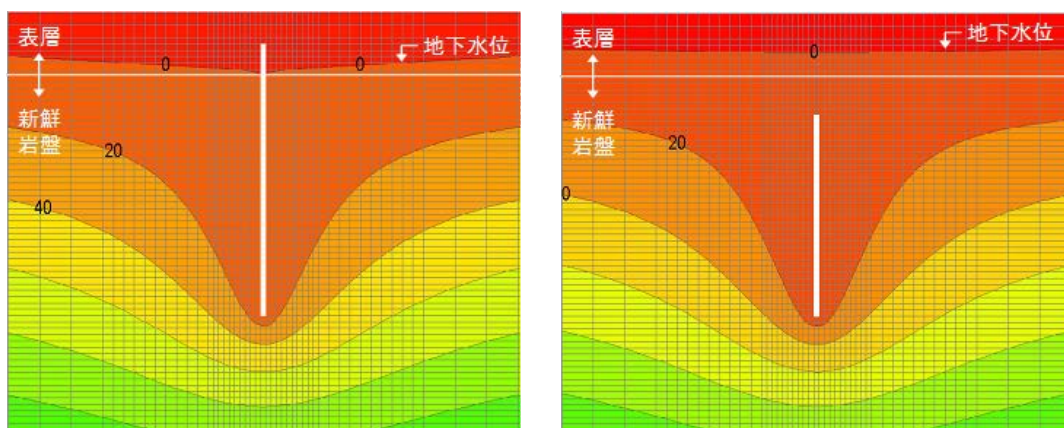


図 3-6 2次元浸透流解析 圧力水頭コンター（左：充填前、右：充填後）

（２）充填材料の設計

休廃止鉱山における空洞充填は、その充填対象となる空間が広大なため、事業実施にあたっては充填材料のコストが事業費を左右することとなる。充填材料にセメントを多く用いることで強度の確保が可能となるが、材料費が大きくなることが既存の研究よりわかっている。そのため、本事業では、充填材料のコスト削減を目的とし、継続的に調達可能であり、かつ比較的安価な建設残土などの増量材としての適用可能性について検討した。

建設残土などの増量材としての適用可能性試験については、粘性土と砂質土を混合した模擬建設残土を用いた試験、およびズリ、試薬を添加した模擬汚染土、非鉄スラグを用いた試験を実施した。これらを用いた充填材料を作成し、流動性や有害物質の溶出性、コストなどについて検討を行った結果、建設残土や非鉄スラグは増量材として適用可能であり、汚染土は重金属の種類および汚染濃度の程度により適用可能であることを確認した。

また、建設残土などが増量材として利用可能であることが判明したため、これらの増量材を利用し、前項で定めた性能規定を満たす充填材料のコスト試算を行った結果、既存の充填材料と比べ、材料費が約１～２割程度の $1,000 \text{ 円/m}^3$ と、目標値を大きくクリアするコストの充填材料が開発できることが判明した。

また、実際の事業における充填材料は、現地で調達可能な中和燐物などの鉱業廃棄物と建設残土などが利用され、現場ごとに用いる材料の含有物質や物性が異なることが想定される。したがって、充填材料の性能規定（流動性、材料分離抵抗性、硬化後の強度、遮水性、重金属など有害物質の非溶出性）を満足する配合も、現場ごとに異なる可能性が高いと考えられる。そのため、上記の本項目では様々な鉱山で事業が実施できるよう、材料の物性によらず性能規定を満足する充填材料の設計方法の確立を目的として試験を行った。

試験においては、様々な材料、配合条件で作成した充填材料の物性値の相関性を調査した。その結果、図 3-7 に示すとおり、単位水量、流動性、液性限

界時の含水量、粗粒子容積との間に高い相関を持つ重回帰式（式 1）が得られることが確認された。

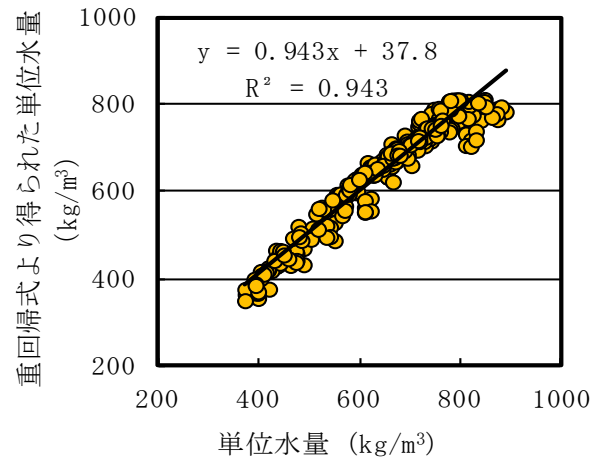


図 3－7 重回帰式

$$W = 0.295 \times JH(90) + 0.0953w_L - 0.643 \times bs + 692 \quad (\text{式 1})$$

(R^2 (決定係数) = 0.943)

ここで、JH(90)は流動性を示す 90 分後の JH フロー (mm)、 w_L は液性限界時の含水量 (kg/m^3)、 bs ：粗粒子容積 (m^3/m^3)、 W ：単位水量 (kg/m^3)を表す。

式 1 と、強度とセメント水比の関係式、容積の関係式から各材料の単位量を算出することが可能となった。そして、求めた各材料の単位量を、充填材料の安定性を表す材料分離抵抗性や、止水効果に影響する遮水性に関する関係式と照合することで、充填材料に求められる性能を満足する充填材料の配合が決定される。図 3－8 は、この材料配合設計プロセスを示すものであり、これにより充填材料の配合設計方法が確立された。

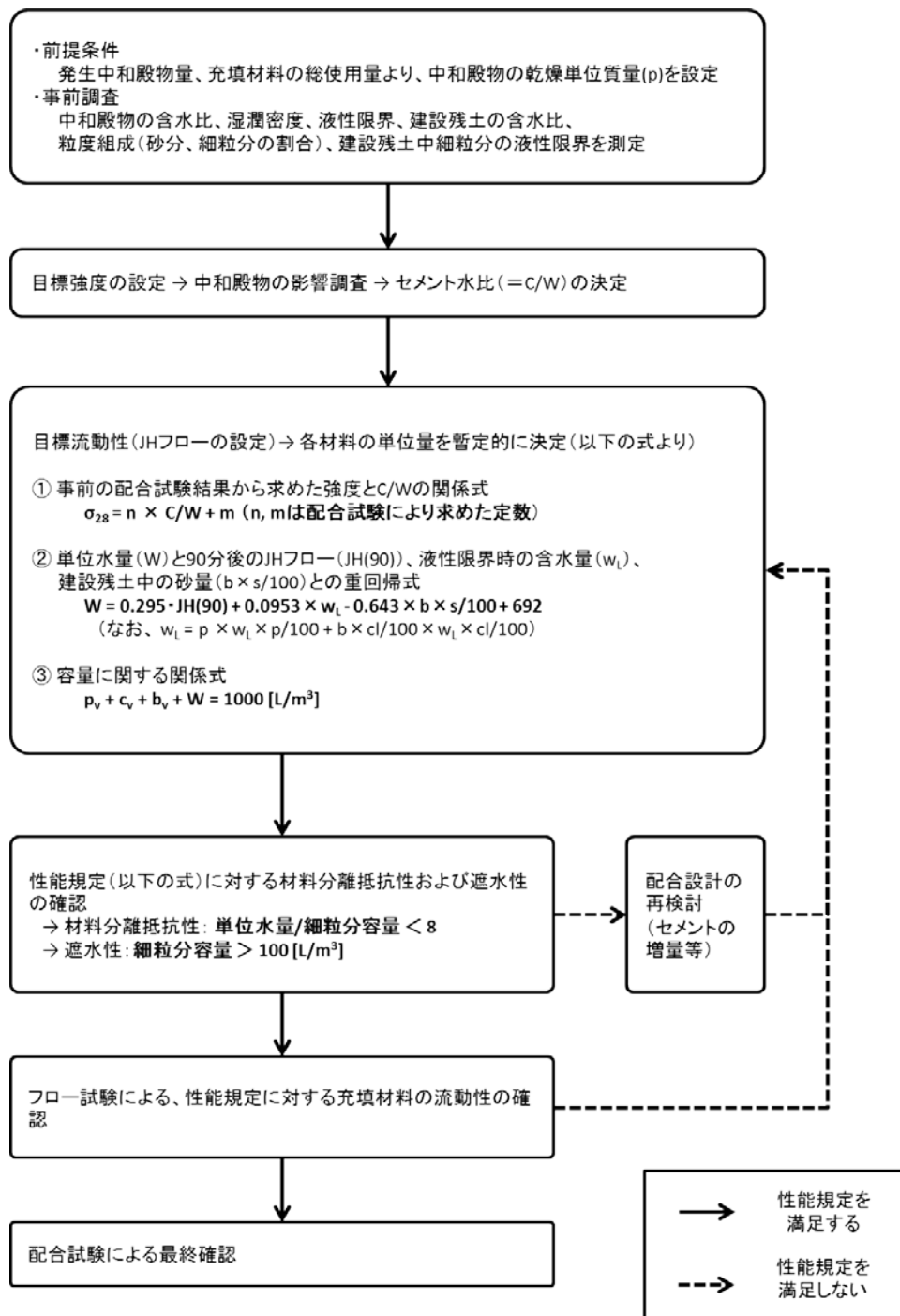


図 3-8 充填材料設計のプロセス

3-2-2 要素技術②：坑内空洞調査方法の確立

本技術の検討では、地表下 30～50 m 程度に、その存在はわかっているが、位置が不明瞭な断面大きさが 2 m×2 m 以上の坑道を探すために、1 本、あるいは 2 本のボーリング孔を使った効率的な空洞探査のための物理探査手法の組み合わせを検討した。

検討対象となった物理探査手法は、ボアホールレーダ、シングルホール・イメージング、比抵抗プロファイラ、比抵抗トモグラフィ、弾性波トモグラフィの 5 つであり、これらの手法に対して、ボーリング孔を用いた現地試験、およびシミュレーション結果から、坑道検知の可能性、検知可能な有効距離、位置・大きさの正確性、コストの評価を行った。その評価結果は図 3-9、および以下のとおりである。

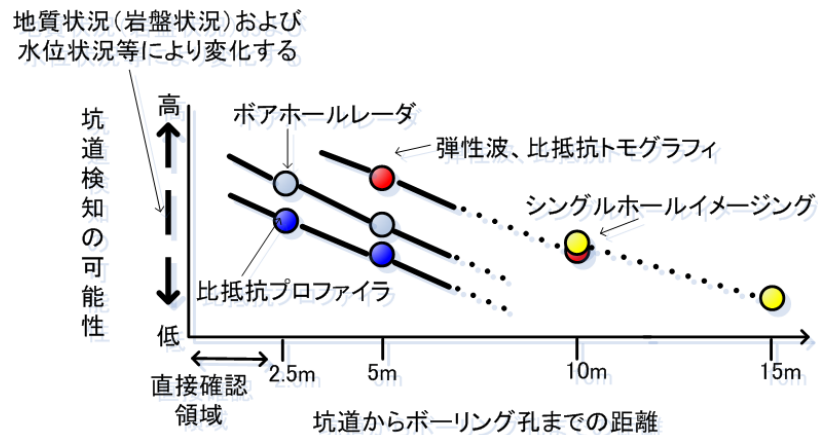


図 3-9 各探査手法の検知可能性と有効距離の相関性

- ・ ボーリング孔から概ね 5 m 以内に存在する坑道であれば、ボアホールレーダ（電磁波）で検知できる可能性が高い。
- ・ 比抵抗プロファイラは、地質構造が均質であればボーリング孔から 5.0m 程度の坑道検知に利用できる可能性がある。
- ・ シングルホール・イメージング（弾性波）は 5m 程度までの検知能力を確認したが、地下水位の影響を強く受ける。
- ・ 比抵抗トモグラフィは、地質構造が単純な構造（特に鉱化帯などの極端な比抵抗異常がないこと）であれば、10m 以上の孔間で坑道の位置特定に利用可能である。さらに、坑道内が充填されている場合には、坑道は周辺岩盤と比較して低比抵抗帯として表現され、坑道内が空洞（高比抵抗）の場合よりも検出能力は大きい。
- ・ 弾性波トモグラフィは、地質構造の影響は比抵抗探査よりも少ないと言える。そのため、やや複雑な地質構造である場合においても 10m 以上の孔間で坑道

の位置を特定できる可能性は比抵抗トモグラフィよりも高い。しかしながら、坑道内が充填されているか否かを弾性波速度値で判定することは難しい。

- ・ 一般に物理探査における利便性および経済性は、高い順に、ボアホールレーダ > 比抵抗プロファイラ >> シングルホール・イメージング = 比抵抗トモグラフィ > 弾性波トモグラフィである（測定時間、準備・測定・撤収に要する経費および解析経費を考慮した場合であり、ボーリングの経費などは考慮しない）。

これらの結果から、10 m 以内の精度で坑道図面が存在する休廃止鉱山において、地表下 30～50 mにあるはずの断面大きさ 2 m×2 mの坑道位置を、ボーリング孔を使った物理探査で把握するための手法の組み合わせとして、以下のプロセスが最適な手法であると判断された。

- ①：1 本目のボーリング実施
- ②：ボアホールレーダを用いた探査
- ③：シングルホール・イメージング
- ④：（ボーリング孔周辺の比抵抗構造がシンプルであると予想される場合）
比抵抗プロファイラ
- ⑤：1 本目のボーリング孔から、坑道があると予測される方向に 5～10 m 離れた位置における 2～3 本目のボーリング施工実施
- ⑥：弾性波トモグラフィによる探査
（必要に応じ比抵抗トモグラフィによる探査）

3-2-3 要素技術③：坑内状況詳細調査の技術開発

本項目では、実証試験現場となるモデル鉱山における、実際の充填対象となる坑道内部の詳細状況の調査方法の確立、および確立した手法による充填対象となる空洞体積の算出を実施した。

実際の充填施工時には、要素技術②により坑道の詳細な位置を把握した後に詳細な調査が行われるため、地下 30～50 m に存在する坑道を捕捉したボーリング孔を利用した調査方法として、3Dスキャナ（図 3-10）およびボアホールカメラを利用した2種類の方法について坑内観測を実施した。



図 3-10 3Dスキャナ

その結果、図 3-11に示す通り、3Dスキャナにより坑道の詳細な形状や掘進方向、分岐、行き止まりなどを確認することが出来た。これにより、現在の旧坑道の正確な位置が把握できるため、3Dスキャナの結果を利用することで、充填施工や調査に必要なボーリング施工位置を正確に定めることが可能となる。

また、3Dスキャナの点群データから3Dモデルを作成することで、任意の空洞部の体積の算出が可能となり、モデル鉱山における充填対象となる全体の空間体積が約 1,200 m³と算出された。

さらに、ボアホールカメラを利用することで、坑内状況のより詳細な情報として、湛水状況や壁面状態、障害物（坑木など）の情報を得ることができ、要素技術①の充填材料設計や、後述の要素技術④における隔壁形成などに必要な情報を得ることができるため、人が立ち入ることの出来ない地下 30～50 m の旧坑道の情報を得るのに適した手法であると判断された。

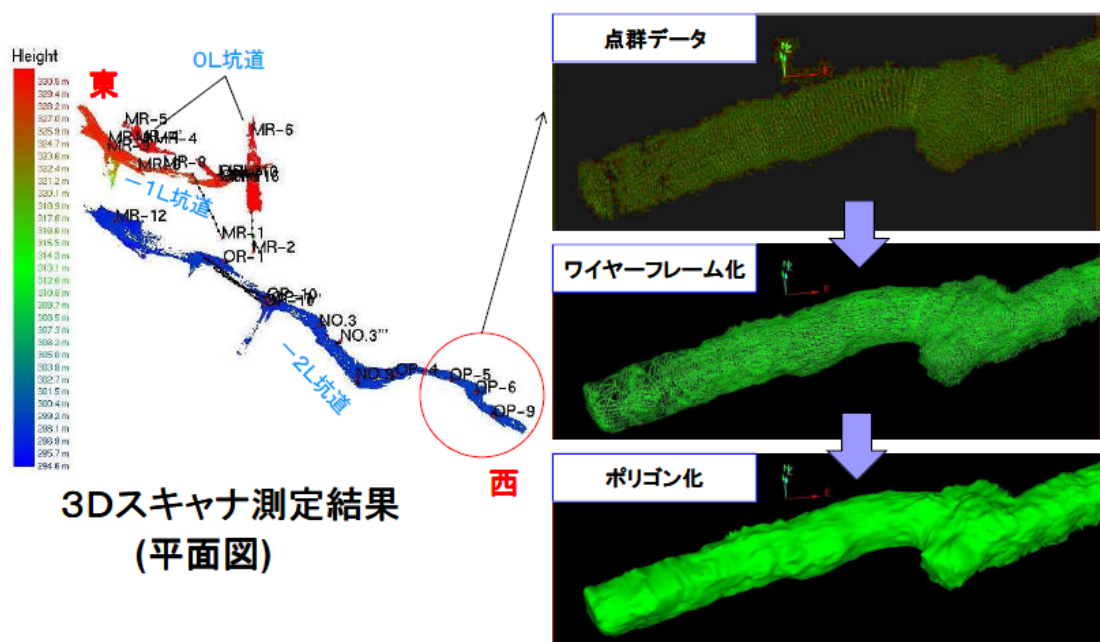


図 3-11 3Dスキャナ測定結果のデータ処理

3-2-4 要素技術④：充填施工方法の確立

ボーリング孔を通じた地表下 30～50 m に存在する坑道を充填する技術（概念図：図 3-12）について、既存の研究により以下の 2 つの課題が明らかとなっている。

- ・地表下 30 m 以上の条件では、仕切材料を自由落下させると、坑道内で拡散し所定の流動勾配が得られず、坑道天端までの閉塞（仕切の構築）には、計画量よりも大量の材料が必要となる。
- ・掘上り等、立坑または斜坑部における隔壁形成方法が確立されておらず、現状では下段坑道から嵩上げる以外に手段が無い。

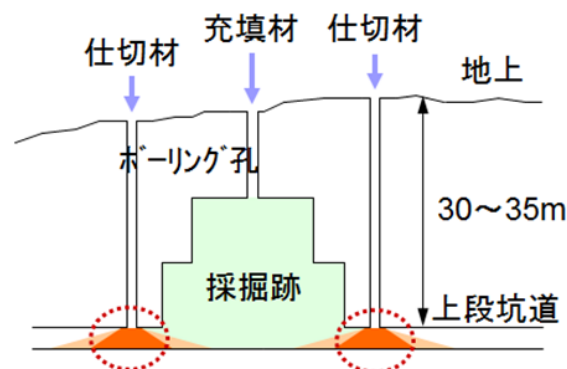


図 3-12 隔壁の概念図

これらはいずれも施工時間及びコストの肥大化に繋がるため、より合理的な隔壁形成方法を開発する必要がある。そこで、本事業においてはウレタン材料を利用した隔壁形成について、基礎試験および模擬坑道を用いた試験を実施し、地表下 30～50 m に存在する断面の大きさが 2 m×2 m の坑道の仕切としての適性を検討した。

試験では、図 3-13、図 3-14 に示すような 1/2 スケールの模擬坑道を用意し、試験を実施した。要素技術③の結果により、充填対象となる坑道には坑木が存在し、また一部地下水により湛水状態であることが判明したため、坑木を模した障害物として塩ビ管を設置し、模擬坑道下部が水に浸漬している条件で試験を行った。



図 3-13 模擬試験施設全体像

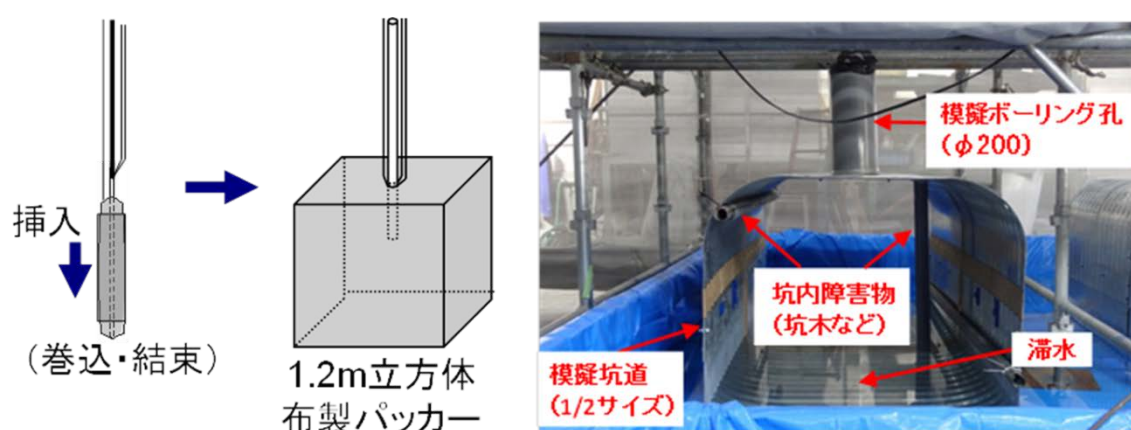


図 3-14 パッカー概念図と模擬坑道

ボーリング孔を通して仕切材を挿入する点については、ウレタン隔壁の容器となるパッカーを布製にし、これを巻込・結束させた状態でボーリング孔から挿入することで坑道内部への挿入が可能となった。また、坑道内の湛水環境への対策としては、パッカーを上部と下部の2構成とし、上部（水面以上、気相）、下部（水面以下、液相）の順に施工することで、図 3-15のように、確実に隔壁を構築できることが確認できた。

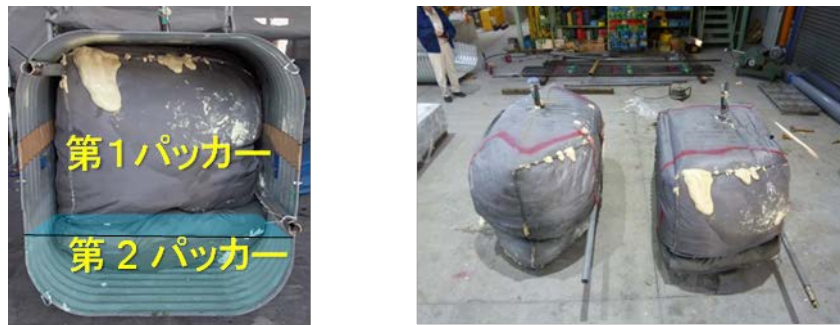


図 3-15 上下2段パッカーの拡張状況（左）とウレタン隔壁出来形（右）

また、坑道内に存在する地下水は、坑廃水と同様に強酸性であることから、隔壁の耐酸性を含めた長期耐久性について試験を実施した。試験は発泡ウレタンおよびパッカー生地について、実証試験予定地の現地坑廃水（pH 3.1）を用いた浸漬試験を実施した。

浸漬試験の結果から、図 3-16 のとおり、試験期間中である 3 か月間は pH3 程度の酸性水に浸漬した条件における、発泡ウレタンの一軸圧縮強度などの劣化は確認されなかった。

これらの結果から、ウレタン隔壁は実証試験サイトに特有な坑道滞水条件にも対応できることが分かり、本方式は、施工数量がわずかのパッカー容積で済むため、施工時間及びコスト面で有利な工法と判断された。

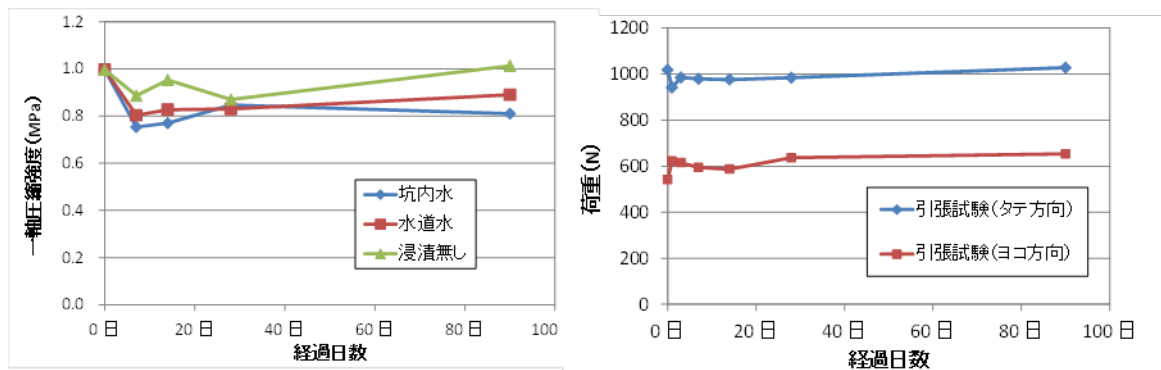


図 3-16 浸漬試験結果（ウレタンの一軸圧縮強度（左）と布パッカーの引張強度（右））

3-2-5 要素技術⑤：シミュレーション

本事業で技術開発を実施した坑内空洞充填について、充填施工がなされた際の効果の予測・評価は、今後の成果活用にあたり重要である。そのため本事業では、充填施工による効果予測のため、周辺環境の地質データや地形データを組み込んだシミュレーションモデルの構築を行い、構築されたモデルの妥当性検証、水量低減効果の予測を実施した。

(1) 地下水シミュレーションによる水量低減予測

シミュレーションモデルの構築にあたり、本事業で行う予測は地下水の流動解析にあたることから、①地下水の移動、②地表水の浸透の2点が主要要素になる。ここでは②の地表水の浸透に着目し、解析範囲における地表面の形状・傾斜から地形涵養量を求め、この地形涵養量と地質特性をシミュレーションモデルの初期条件として組み込むことで、坑道充填想定箇所を含む広範囲における地下水シミュレーションモデルを構築した。このシミュレーション条件は以下のとおりである。

- ・ 解析範囲：モデル鉱山の坑道や採掘領域を含有する東西 7 km×南北 6 km×地表下 300 m までの範囲（図 3-17、図 3-18）。
- ・ 透水係数：解析範囲の地質の種類、採掘状況等によって、既存研究値・実測値・充填材料の物性値を適用。
- ・ 境界条件：地下水の流出／流入が無視できるものとして側面・底面は不透水境界とし、地表面は観測降雨量から涵養量を決定。

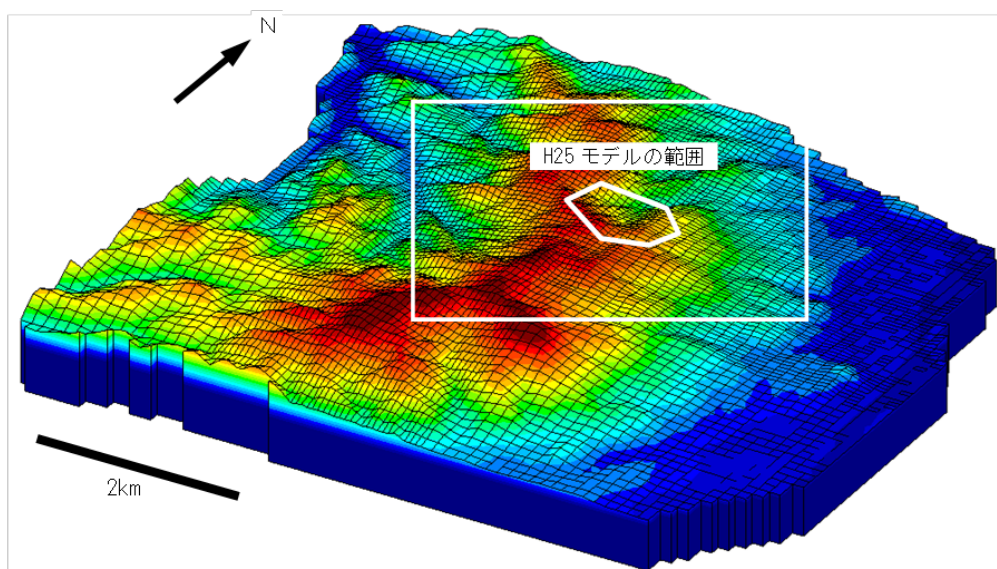


図 3-17 シミュレーションモデルの鳥瞰図

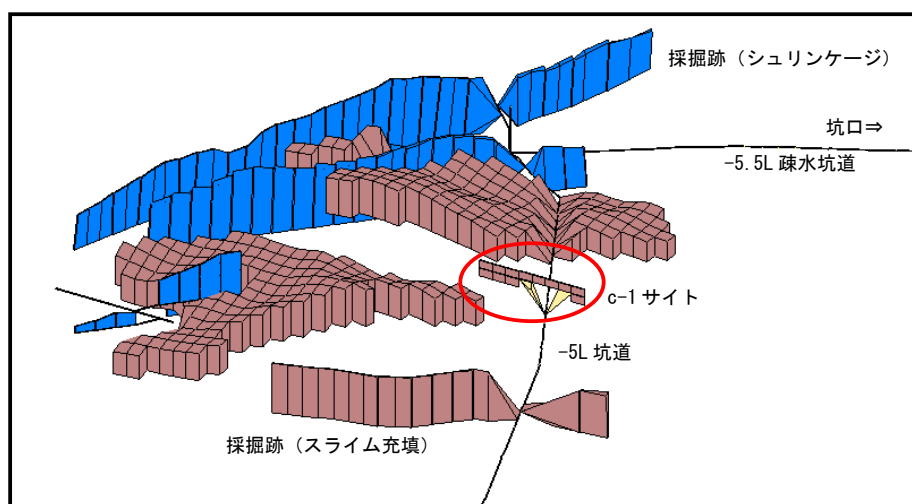


図 3-18 シミュレーションモデル 採掘跡周辺の鳥瞰図

これらの条件で構築したシミュレーションモデルについて、妥当性を検証するため、坑内水流量のモニタリングを実施し、シミュレーションから得られる坑内水流量と比較した。その結果は図 3-19 に示す通り、一部実測値と計算値に差が見られるものの、鉱山全体の坑内水流量はほぼ一致しており、他サイトもおおむね良好な相関が得られた。また、地下水位の実測値と計測値を比較した結果、誤差は±1%程度と、非常に良好な相関を得ることが出来た。このことから、本シミュレーションモデルは妥当であると判断できる。

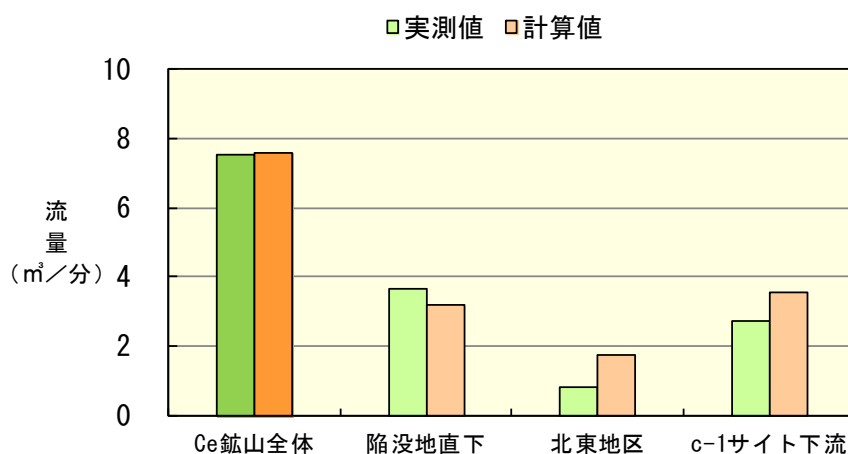


図 3-19 地下水シミュレーション結果（計算値）と実測値の比較

また、本シミュレーションモデルを使用し、c-1 サイトを要素技術①で開発した充填材料を用いて c-1 サイト (0L、-1L、および-2L 坑道) を充填した場合の解析を実施した結果、c-1 サイト下流部の-5L 坑道における坑内水流量が、現状の $0.91 \text{ m}^3/\text{分}$ に対し、施工後は坑内水量 $0.53 \text{ m}^3/\text{分}$ と、充填施工による水

量削減効果として、水量低減率約 42%という予測値を得た。

（２）安全性に関する検討

本事業は坑内水量の削減および水質改善を目的とするが、その一方で坑道等の地下空間充填に伴う地下水流動の変化が予測される。本事業で目指しているアウトカムは国内の複数の休廃止鉱山への研究成果の適用・展開であり、要素技術のひとつとして、充填による地下水理環境等の変化が安全面に与える影響の評価方法を検討する必要がある。そのため、他事業分野における安全評価の事例を調査・整理し、地下空間充填を対象とした安全評価の適用方法（フレームワーク）を検討の上、リスクとなり得る事象について、仮想鉱山におけるシミュレーション等を実施し、モデル計算を行った。

ここでは仮想鉱山における坑道充填に伴う地下水位の上昇と疏水坑道以外の坑口からの坑内水の流出をベースシナリオとして選定し、試行的なモデル計算を行った。解析ケースの設定及び解析結果を以下に示す。

① 解析ケース設定（図 3-20）：

モデル計算を行うために、シュリンケージ採掘法による採掘跡が残存し、0L 坑道が疏水坑道であるような仮想鉱山モデルを設定し、浅部の採掘跡や坑道の一部を充填した場合の効果を地下水シミュレーションにより算定した。また比較参考として、0L 坑道の坑口にプラグ打設をしたケースについても解析を行った。

② 解析結果（図 3-21）：

充填箇所地表部から地下への浸透水量が減少し、それに伴う 0L 坑道坑口からの坑内水流出量半減が予想された（170L/分⇒80L/分）。一方、参考ケースでは、0L 坑道の坑口付近での遮水プラグ打設によって地下水位が上昇し、上位の 1L 坑道坑口から坑内水が流出する解析結果となった。

仮想鉱山における解析では、充填施工を行うことで 0L 坑道坑口からの流出量減少が予測されるとともに、他の坑口から坑廃水が流出する等のリスクは見いだされなかった。一方、0L 坑道坑口をプラグ打設したケースでは、上位の 1L 坑道坑口からの坑内水流出が予測された。この結果は充填箇所の選定が安全面で大きな差異をもたらす可能性を示唆するとともに、安全評価への地下水シミュレーションの適用性を示すものと考えられる。

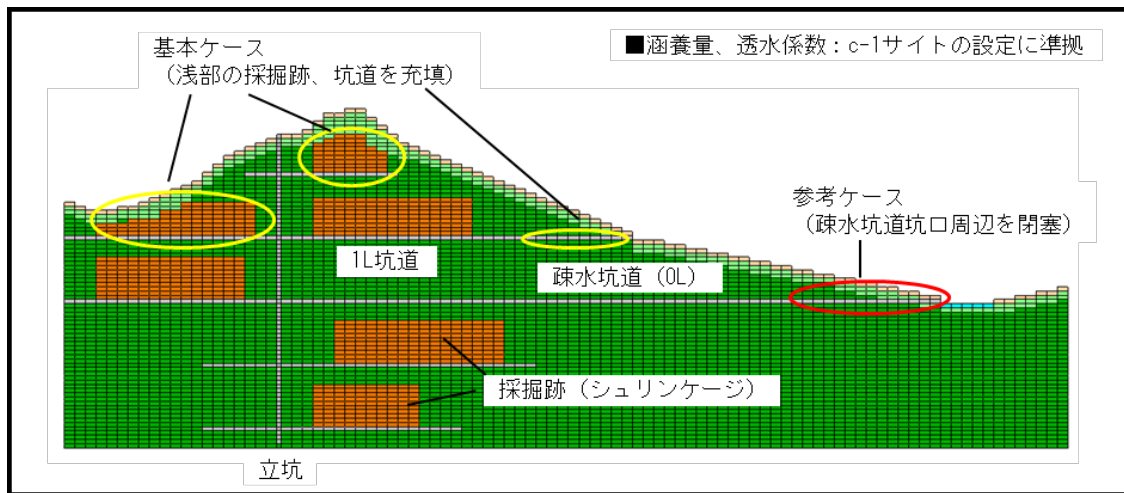


図 3-20 ベースシナリオの数値モデル

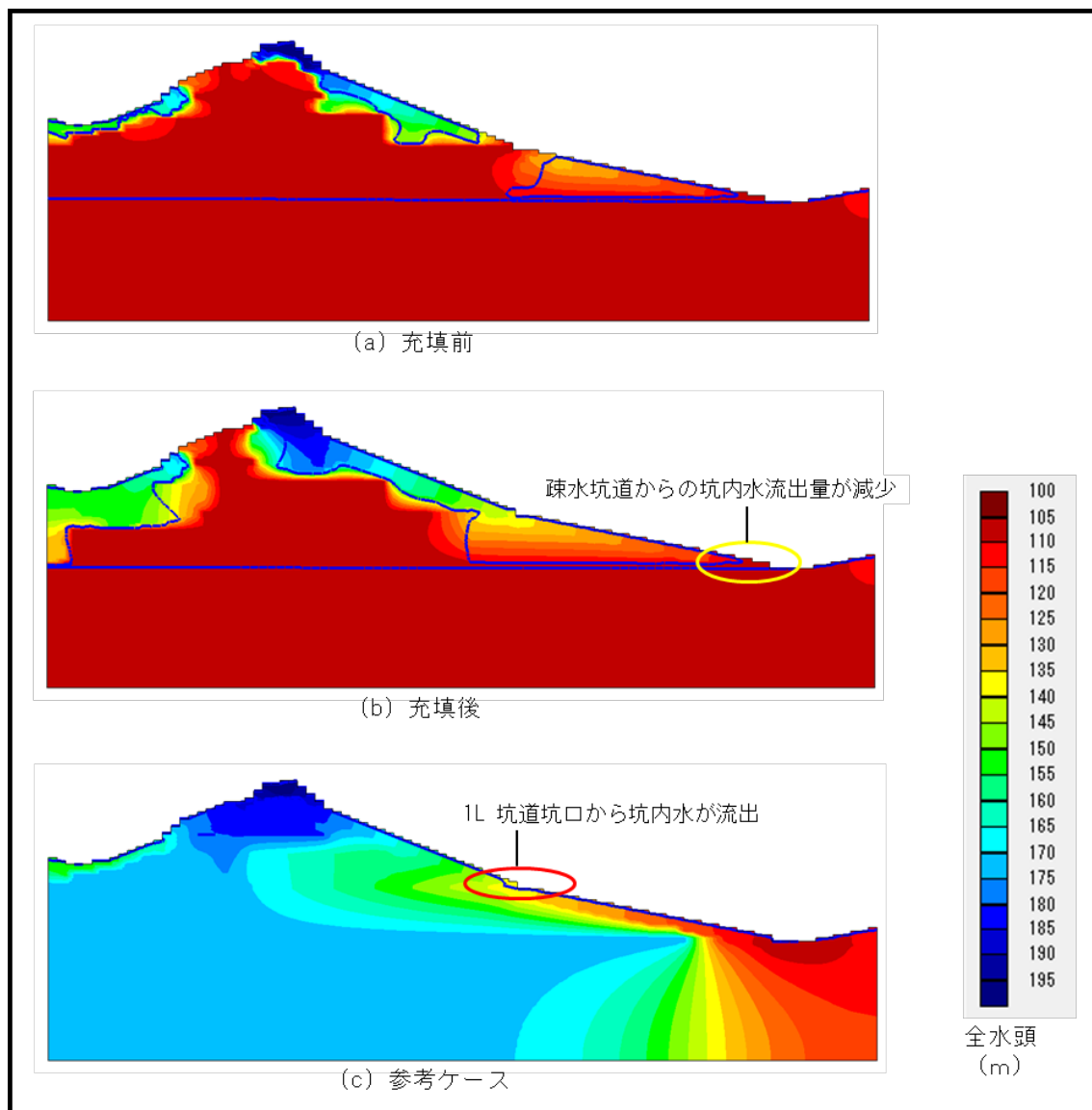


図 3-21 各ケースの解析結果（全水頭分布）

3-3 特許出願状況等

表 3-7 特許・論文等件数

要素技術	論文数 (発表数)	論文の被 引用度数	特許等件 数（出願 を含む）	特許権の 実施件数	ライセン ス供与数	取得ライ センス料	国際標準 への寄与
充填材料開発	(2)		2				
坑内空洞調査 方法の確立	(4)						
坑内状況詳細調 査の技術開発	(2)						
充填試験設計	(1)		1				
シミュレーショ ン	(3)						
その他	(4)						
計	(16)		3				

表 3-8 論文・投稿・発表・特許リスト

	題目・メディア等	時期
論文	—	—
投稿	—	—
発表 (16 件)	土木学会 第 69 回年次学術講演会 S 波孔間弾性波トモグラフィに よる空洞調査への適用性検証試験	H26. 9
	平成 26 年度 資源・素材関係学協会合同秋季大会「資源・素材 2014」 (熊本) 数値シミュレーションを用いた坑内水量削減対策工の効果予測	H26. 9
	平成 26 年度 資源・素材関係学協会合同秋季大会「資源・素材 2014」 (熊本) 坑内水量削減対策工に用いる充填材料設計の検討	H26. 9
	全地連「技術フォーラム 2014」秋田 パーカッションボーリング と孔内挿入式 3D レーザースキャナー (CALS) を用いた効率的な行 動内部調査例	H26. 9

	平成 26 年度 応用地質学会研究発表会 S 波を用いた孔間弾性波 トモグラフィによる地下空洞探査試験	H26. 10
	第 24 回環境地質学シンポジウム 休廃止鉱山への坑内充填による 鉱害防止技術開発の社会的意義と課題	H26. 11
	土木学会 第 43 回岩盤力学に関するシンポジウム 地盤深部の地 下空洞を対象とした物理探査手法の適用性検証試験	H27. 1
	平成 27 年度 資源・素材関係学協会合同秋季大会「資源・素材 2015」 (松山) 坑内空間充填に係る安全性評価の検討	H27. 9
	平成 27 年度 資源・素材関係学協会合同秋季大会「資源・素材 2015」 (松山) 先進型坑廃水処理技術開発事業の成果と今後の展開につ いて	H27. 9
	平成 27 年度 資源・素材関係学協会合同秋季大会「資源・素材 2015」 (松山) 鉛直孔からのアプローチにおける充填施工の技術開発と 設計・コストの検討	H27. 9
	平成 27 年度 資源・素材関係学協会合同秋季大会「資源・素材 2015」 (松山) 3 次元可視化技術の休廃止鉱山管理等への適用につ いて	H27. 9
	平成 27 年度 資源・素材関係学協会合同秋季大会「資源・素材 2015」 (松山) 坑内水起源・水質形成機構の検討と坑内空間充填の効果 予測	H27. 9
	平成 27 年度 資源・素材関係学協会合同秋季大会「資源・素材 2015」 (松山) 坑内水量削減対策工に用いる充填材料設計の検討(その 2)	H27. 9
	平成 27 年度 資源・素材関係学協会合同秋季大会「資源・素材 2015」 (松山) 廃掃法等から見た休廃止鉱山における坑内充填の検討	H27. 9
	平成 27 年度 資源・素材関係学協会合同秋季大会「資源・素材 2015」 (松山) 我が国の鉱害防止施策の現状と坑内空間充填への期待	H27. 9
	平成 27 年度 資源・素材関係学協会合同秋季大会「資源・素材 2015」 (松山) 物理探査およびパーカッションボーリングを活用した坑 道調査技術	H27. 9
特許 (3 件)	出願 No. 2013-069267 バルクヘッドの形成方法及び形成装置(鹿島 建設(株)、(株)ケー・エフ・シー)	H25. 3
	出願 No. 2015-152303 重量流動化処理土(三菱マテリアル(株))	H27. 7
	出願 No. 2013-202801 充填材料の製造方法(三菱マテリアル(株))	H25. 9

4. 当省（国）が実施することの必要性

坑廃水処理事業は非収益性の事業であるため、事業主体にとって現行の処理方式や処理設備の改良・改善といった狭い範囲での努力は可能であっても、自らがリスクを負って新技術を開発導入し抜本的な省エネルギー・省コスト化を図るというのはほぼ困難な状況にあるのが現実である。

また、本研究の要素技術である坑内空洞の調査技術は、従来、地質や断層の調査に用いられている物理探査技術を応用する。鉱山における坑内空洞探査が可能となることで、今まで地表から調査して位置を特定できなかった深部の古いトンネル、導水管、道路下の空洞など社会的に危険と考えられる箇所の探査技術における要素技術としての波及効果が期待される。

本事業の施策分野である鉱害防止技術については、資源保有国に対し、鉱害防止セミナーの開催、専門家の派遣又は研修生の受け入れなどにより、情報提供・技術支援の活動を通じた関係構築・深化のために貢献できる等、世界において強みを有している技術の1つである。

また、国は金属鉱業等鉱害対策特別措置法に基づく基本方針に則って事業の確実な実施を図るため、地方公共団体等に財政的な支援（休廃止鉱山鉱害防止等工事費補助金）を実施しているものであり、その削減につながるよう国が積極的に取り組むべき課題である。

したがって、国が自ら委託事業として実施し技術の確実性とその効果について実証し、導入普及に向けた端緒を付けることが緊要である。

5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ

本事業で目指す事業アウトカムは、モデル鉱山以外の国内休廃止鉱山への本技術の適用である。そのアウトカムに至るまでのロードマップを図 5-1 に示す。

本事業においては、坑内充填を行うにあたり必要な、充填材料の開発や充填対象となる空洞の探査・充填対象となる坑道内部の詳細な調査等の要素技術の開発を実施し、シミュレーションによる充填施工の効果予測を行った。

事業終了後は、アウトカム達成に向け、学協会での講演・発表等による成果普及を通じ、国内休廃止鉱山への本技術の適用を図ることとしている。

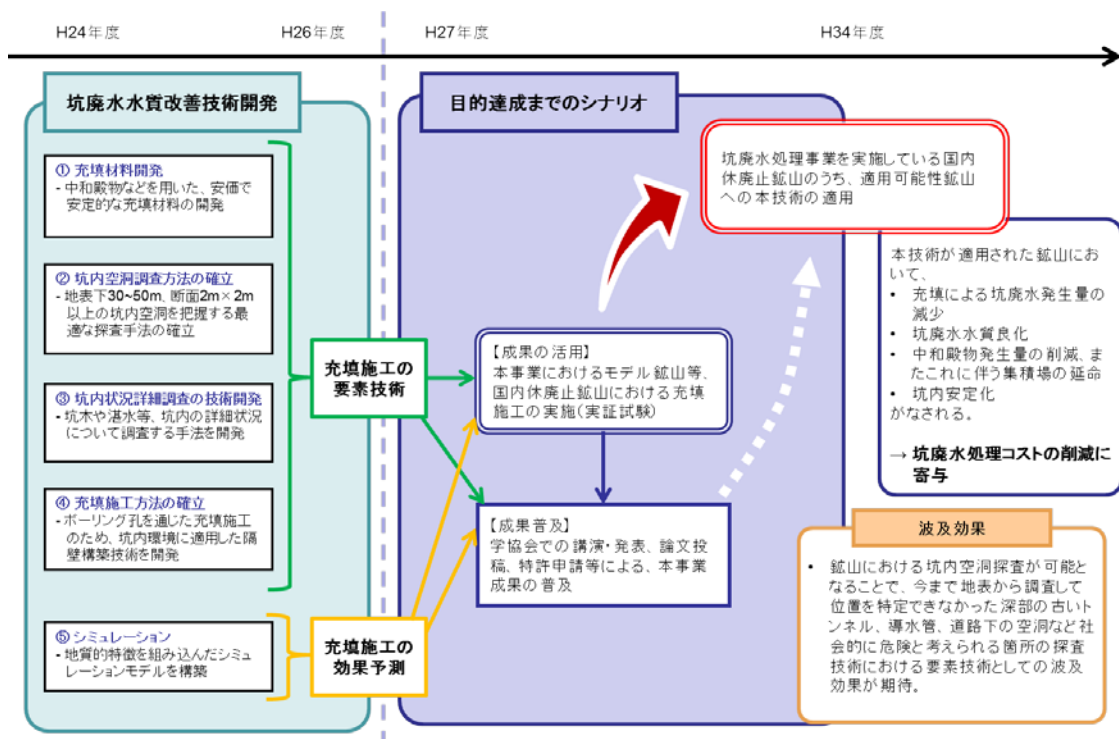


図 5-1 事業アウトカムに至るまでのロードマップ

平成 27 年度には資源素材学会総会において、本技術開発に係る企画セッションを開催、9 本の発表を行い（表 3-8）、成果の普及を行った。

6. 研究開発の実施・マネジメント体制等

6-1 研究開発計画

本事業で技術開発を行う坑内充填については、既存の研究により表 6-1 に示すような課題があるとされている。

休廃止鉱山では坑内空間の大部分へ人が立入れず、坑内状況が把握できていないため、最初に坑内調査のためのボーリングを掘削する必要がある。しかし、資料不足などにより、地表と坑内空間の位置関係が不明確な場合が多いため、地表から坑内空間の位置を把握する技術が必要となる。そこで、本事業では、ボーリング孔を用いた物理探査により、坑内空間の位置を地表から明確にする工法を確立する。また、同工法において坑内空間内部状態（湛水、土砂閉塞）の違いによるパターン化を行い探査精度の向上を図ることとする。

坑内空間内部の状況を調査する技術は、坑内に遮蔽物が存在する場合や坑道が複雑な形状である場合、既存の手法では正確な計測ができない等の問題点があることから、様々な坑内空間内部の状況を把握する工法の確立を行う。

既存の研究では、一般の土木・建築基準より充填材料の性能を規定すると、オーバースペックとなることや、充填材料の配合として強度や材料費が適切な充填材料を開発できていない状態である。そこで、本事業では坑内充填に適した充填材料のスペックとして、その目的に沿った項目（強度、透水係数、流動性、材料分離抵抗性、非溶出性）を検討し、性能規定を定める。本技術の充填の対象となる地表付近の坑内空間は、大規模な鉱山では数十万 m^3 以上に達するのに対し、前事業で主材料とした中和殿物の発生量は数十～数百 m^3 /年、多いところでも数千 m^3 /年という鉱山がほとんどであり、広大な坑内空間を充填するのに中和殿物のみでは容量が大きく不足する。そこで、低コストで大量かつ継続的に現地で入手可能な増量材（土壌、ズリ（岩石）等）が必要となることから、それらを混合し、前記性能を満たす新材料の配合設計を確立する。

坑内空間の充填施工については、既存の研究によりボーリング孔を通じて地表下 30～50 m の坑道を効率的に仕切る手法が確立されていない。そこで、本事業では、仕切りの構築技術について材料面、施工面からの検討を行い、坑内環境（坑木などの障害物が存在、酸性水による湛水環境）に適用可能な隔壁構築技術を開発する。

また、本技術が多くの鉱山で活用されるためには、それらの鉱山で本技術が処理コストの削減に寄与することを示すことが必要である。そのため、地質的特徴を組み込んだシミュレーションモデルを構築し、充填施工による水量削減効果の予測を行う。

これらの全体の研究開発計画を表 6-2 に示す。

表 6-1 充填施工における要素技術の開発課題（再掲）

項目	既存技術開発における課題
充填材料の開発	- 充填材料のスペックについて、坑内充填に適した規程が存在せず、一般の土木・建築基準のものを適用すると、オーバースペックとなり材料費が過大になること - 中和殿物のみを利用した充填材では広大な坑内空間を充填しきるためには容量不足となること
坑内空間の位置の把握	- 不明確な地表下 30～50 m に存在する坑内空間の位置を、地表からの調査により明確にできる手法が存在しないこと
坑内の詳細状況の把握	- 坑内に遮蔽物が存在する場合や坑道の形状が複雑である場合、充填対象となる空間を正確に把握できないこと - 充填施工に影響する坑木等の障害物や湛水状態を把握できないこと
坑内空間の充填施工	- ボーリング孔を通じて地表下 30～50 m の坑内を充填する際に必要な仕切り材について、求められる性能が十分に検討されていないこと - また、同様の条件下において効率的に仕切を構築できないこと
実用化・汎用化の推進	- 低コストで大量かつ継続的に現地で入手可能な増量材を、使用できるようにすること - 充填施工による水量削減・水質改善により、坑廃水処理コスト削減効果が示されること

表 6-2 全体の研究開発計画

実施項目 \ 年度	平成24年度	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度
充填材料開発	■	■	■		
坑内空洞調査方法の確立	■	■			
坑内状況詳細調査の技術開発	■	■	■		
充填施工方法の確立		■	■		
実証試験					
シミュレーション		■	■		
適用可能性調査・委員会	■	■	■		

成果の普及・現場適用

実績
 当初計画

6-2 研究開発実施者の実施体制・運営

本事業は、公募による選定審査手続きを経て、独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（JOGMEC：幹事法人）、三菱マテリアル株式会社、鹿島建設株式会社、応用地質株式会社の4社で構成されるコンソーシアムが経済産業省からの委託を受けて実施した（図6-1）。

また、研究開発の実施に当たっては、研究開発を統括するためのプロジェクトリーダー（研究開発責任者：図6-1）を設置するとともに、本事業の円滑な実施のため、JOGMEC内に学識経験者、専門技術者からなる先進型坑廃水処理技術委員会を設置し、4社への助言が行われる体制とした。委託費は、経済産業省から直接各社に流れる形をとった。

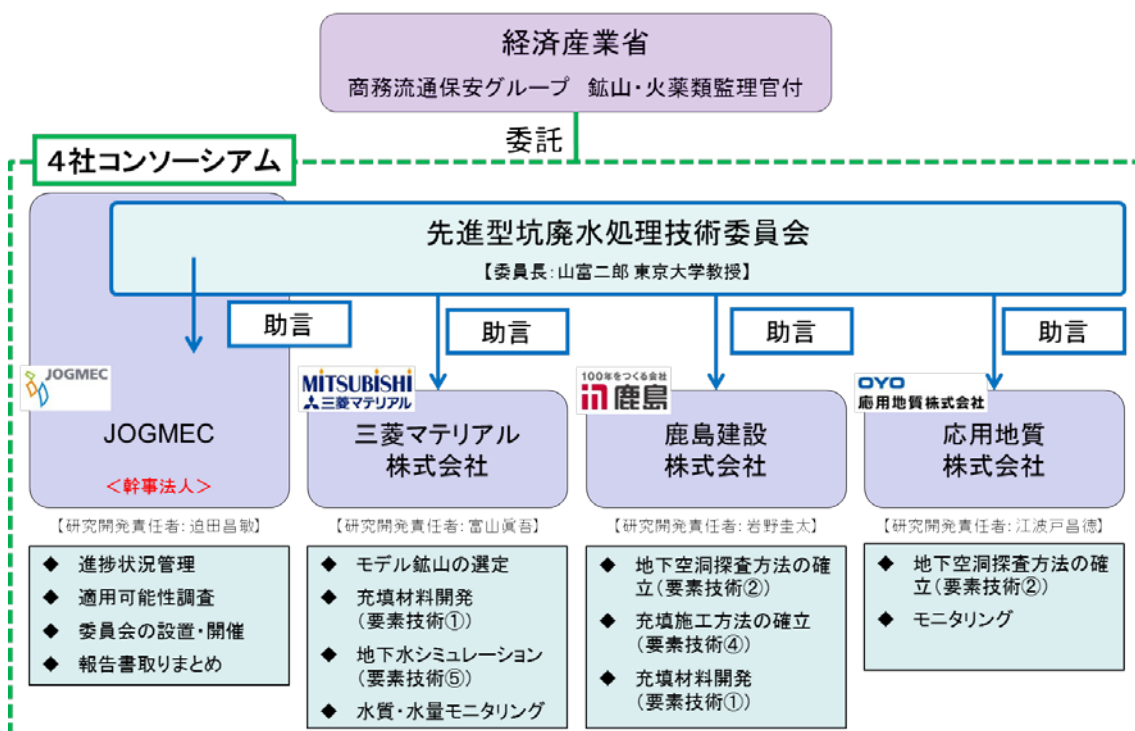


図 6-1 研究開発実施体制

6-3 資金配分

本研究開発事業は、3年間で2億9百万円の委託費予算で実施した。資金年度配分を表6-3に示す。

表 6－3 資金年度配分（単位：百万円）

実施項目	年度 H24FY	H25FY	H26FY	H27FY	H28FY	合計
充填材料開発	25	15	5	—	—	45
坑内空洞調査方法の確立	22	34	0	—	—	56
坑内空洞詳細調査の技術 開発	17	17	40	—	—	74
充填施工方法の確立	0	6	11	—	—	17
実証試験	0	0	0	—	—	0
モニタリング、 シミュレーション	0	4	5	—	—	9
適用可能性調査・委員会	3	3	2	—	—	8
合計	67	79	63	—	—	209

7. 費用対効果

本事業に係る費用対効果は、モデル鉱山において、本事業で開発した充填材を坑内空洞に充填する実証試験を実施し、モニタリングで取得した水量・水質データ等を元に試算する計画であった。しかしながら、要素技術段階の成果で水量削減効果の目途がついたため、事業者の現場適用を図ることとした。

このため、実証試験に基づく費用対効果の試算は実施していないが、モデル鉱山での坑内空洞充填を想定した地下水シミュレーションにより、c-1 サイトを充填することで-5L 坑道から流出する坑内水量は $0.91 \text{ m}^3/\text{分}$ から $0.53 \text{ m}^3/\text{分}$ に低減するという効果を得た。

なお、坑廃水の湧出、およびその処理事業は持続性があることから、本事業で開発した坑内空洞充填技術が導入され、水量削減・水質改善がなされた場合の費用対効果は大きいと考えられる。

8. 外部有識者の評価等（事前評価結果（要約））

従来、休廃止鉱山の廃水処理では多額の経費を投入して対処してきたが、国および自治体の財政の状況を考えると、坑廃水処理の継続の可否を議論するまさに重要な時期と考えられ、発生源を抑制してコスト削減をはかることは重要。また、本研究開発ではモデル鉱山を対象とした技術開発を実施するが、同様の形態の鉱山にも適用可能で、水量低減や水質改善の効果が見込まれることから、研究成果の普及が期待できる。河川流域の水質問題は飲料水や農業、生態系に影響がある可能性があるため、その水質改善は安全・安心の観点から喫緊の課題であるが、坑廃水処理事業は非収益性の事業であるため、本事業を民間で対処することは困難であり、実施事業の確実性の確保や安全性の担保の点でも、国が実施主体となるべき重要な事業である。

なお、削減効果のコスト試算や成果目標の数値については、シミュレーションの条件に多少の不確実性がみられ、削減効果については、どのような鉱山に適用可能なのか、どのような試算をすればこの金額の削減になるかの根拠が不明確。また、具体的に、充填材料配合試験はどのような事項を想定しているのか、坑内空洞調査に関して、ボーリング孔から物理探査を行うとのことであるが、3次元的にどのようにして空洞の把握を行うのか、具体的な方法案を追記すべき。本技術が普及に至るためには、開発した要素技術を組み合わせて総合的なシステムとして完成させる必要があるが、現時点ではその技術体系が明示されていないが、中間段階での詳細設計に期待する。