

# 地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS)

## 研究課題別終了時評価報告書

### 1. 研究課題名

持続可能な資源開発実現のための空間環境解析と高度金属回収の融合システム研究  
(2014年5月～2020年3月)

### 2. 研究代表者

2. 1. 日本側研究代表者：石山 大三

(秋田大学 大学院国際資源学研究科 教授)

2. 2. 相手側研究代表者：Zoran Stevanovic

(セルビア共和国 ボール鉱山冶金研究所 (MMI-Bor<sup>1</sup>) 顧問)

### 3. 研究概要

本プロジェクトでは、三次元的な環境評価・解析と高度な金属回収技術を融合し、持続的な資源開発の実現のため広域環境評価修復システムの開発を目指している。具体的には、セルビア共和国における鉱山開発による環境汚染が懸念されるボール鉱山周辺地域を対象に、鉱業廃棄物の拡散など環境汚染を評価するため現地検証（①広域環境負荷評価研究）を行い、高度な金属回収技術を適用した鉱業廃棄物や廃水の無害化と資源化のための実証（②金属回収・無害化研究）を進め、環境修復のための全体システムを構築（③環境評価修復システム研究）することである。

### 4. 評価結果

総合評価：A

(所期の計画と同等の取組みが行われている。)

本プロジェクトでは、ボール鉱山の長年の操業による河川水を中心とした環境劣化を改善するために、その汚染の実態把握を環境評価手法の開発と共に行い、鉱山廃水や尾鉱等からの金属資源の回収技術の開発によるこれら廃棄物の無害化と資源化の両立と河川水質改善法の提案などを進めた。科学技術面では当初の計画通りの成果が達成され、研究開発基盤も整備された。

また、本邦及び現地研修に両国の若手研究者らが参画し、科学技術を通じた人的交流を促進しつつ人材育成を進めたほか、供与機材の活用度合いは高く、培った経験をもとに本課題に留まらず、ルーマニアとの合同調査など他の研究にも活用してきた。

---

<sup>1</sup> Mining and Metallurgy Institute Bor

さらに、中間評価における「環境評価修復システムの研究計画の明確化・具体化」、「プロジェクト終了後の体制構築」といった要望事項に対して、両国の研究代表者を中心に、関係機関の調整を進め、その結果、数次にわたりセルビアの鉱業エネルギー省（以下、鉱業省）や環境保全省の高官を日本に招聘し、これをベースに両省大臣らも参加する省庁間連絡会議を定期開催するに至り、研究から政策的アプローチに向けた社会実装にも尽力した。提言も既に先方政府に提出され、高官及び研究機関幹部ともに、プロジェクト終了後の研究活動の継続を表明している。具体的にはプロジェクトで特定された危険流域の水質等の環境モニタリング調査を少なくとも2年以上継続し、施設整備を進める予定であり、今後が期待される。尾鉱等の資源化技術の実用化にも期待したい。

なお、各研究題目の達成状況は次のとおりである。

（1）広域環境負荷評価研究（バックグラウンド解析、衛星画像解析、有害元素分布サンプリングによる重金属元素の高濃度分布域把握、廃さい現況調査等）：各調査及び研究は計画通りに進捗した。さらに当初計画になかった、鉱山廃水を含む河川下流域の地下水汚染に関する研究も廃水への住民の関心の高まりを踏まえた環境保全省からの要請を受けて実施した。また、構成鉱物別の廃さいの分布から、その累積量や廃水の流路等が推計され、環境負荷地域が特定された。

（2）金属回収・無害化研究（天然高分子吸着材の開発、金属回収・無害化プロセスの構築、坑廃水中や中和沈殿物の有用金属回収、小規模な実証プラント整備、経済性評価など）：選鉱尾鉱を加圧浸出後、溶媒抽出・電解採取することにより尾鉱中に存在する銅の約85%を資源化できる見込みを示した。鉱業省及び環境保全省の関心も高い中和沈殿プロセスの実証試験では廃水に含まれる銅および鉄の80%以上を回収し、銅含有量は当該地域の鉱石品位より高い結果となった。研究結果は国際シンポジウム等で発表され、著名国際ジャーナル<sup>2</sup>にも掲載された。政府への提言には、汚染が顕著で緊急対応が必要な河川位置を具体的に示し、河川水の分離、鉱山の操業方法の見直し、鉱業廃棄物の管理などの対策の必要性が記載された。

（3）環境評価修復システム研究（環境修復予測及び財務分析を含む研究成果統合システムの構築、情報のマニュアル化、開発技術普及など）：水質予測シミュレーションを実施し、広域環境評価、衛星画像解析、廃さい・廃水処理にかかるマニュアル類をとりまとめ、関連官庁高官への成果発表を実施。省庁間連絡会議や、環境関連シンポジウム、環境教育ワークショップ等を開催した。

---

<sup>2</sup> “Development of copper recovery process from flotation tailings by a combined method of high – pressure leaching solvent extraction”, Journal of Hazardous materials, 2018

#### 4-1. 地球規模課題解決への貢献

鉱山廃棄物の掘削や処理による環境汚染は世界各地で大きな問題となっている一方で、その高いコストや技術的限界から解決が進まない状況にある。廃棄物に含まれる金属を回収することで、環境修復に要する費用を創出しえる、資源開発に係る広域的な環境評価と新たな環境対策の研究は意義が大きいと評価される。

広域的な環境を修復できる費用対効果ある技術が求められており、金属回収技術や無害化技術の開発は科学技術的なインパクトが大きく、放置された鉱山の廃さいの無害化の可能性が示されるなど本プロジェクトの功績は大きい。特に金属回収率は高く、これら成果は国際誌等に多数発表されるなど、高度な研究がなされた。今後の成果活用に伴い認知度が高まることが期待されるが、廃さい等の再資源化のためには、さらに実用化レベルを目指した共同研究が求められる。なお、衛星データを利用した汚染地域の空間分布の評価は、技術的に他国に適用できる可能性を有しており、今後の展開を期待したい。

#### 4-2. 相手国ニーズの充足

セルビアでは長期にわたる鉱山開発の結果、周辺地域に大きな環境負荷が掛かってきた。それにも拘わらず、これまで環境修復技術は未着な状況にあった。本プロジェクトでは環境と開発を担う省庁間連絡会議を通じて相手国の政策ニーズに対応した課題研究が進められるなど、相手国に与えるインパクトは大きい。特に、セルビアなど西バルカン諸国の2025年のEU加盟を目指した新戦略が2018年に欧州委員会により公表されたことにより、EU基準に適合した環境規制が求められるようになり、本課題へのニーズが高まった背景がある。

一方、対象地域の鉱山が2018年末より中国企業が資本参加し、1日当たりの操業時間を延長するなど、公害の心配から地域住民の環境意識が高まっている。しかしながら、具体的な環境修復活動や規制の実施には未だ至っておらず、鉱山排水の環境基準の厳格化など法的規制がどこまで可能かは今後の課題である。また、既存の蓄積された廃棄物と、今後の操業延長による廃棄物処理の責任の所在を整理する必要がある。加えて、金属回収及び無害化は現状の実験室レベルからプラントレベルに規模を拡大すべく、パイロット試験へのスケールアップが必要であり、本格処理プラントの導入には、さらなる検討が必要とされている。

人材・組織・研究基盤については、セルビア人研究者が秋田大学博士課程を2022年に修了予定である他、両国の院生・学生の合同フィールドワーク実習の継続が計画されている。また、MMI-Borは環境影響評価、衛星画像解析、無害化研究の3チームを設立し、人材も配置された。供与機材は研究所が負担してラボの一部を改修し、担当の研究者が非常に良好な状態で管理し、ドイツとの共同プロジェクトやルーマニアとの共同研究などにも利用されている。

### 4-3. 付随的成果

両国参画研究者は 2006 年の JICA 鉱業振興マスタープラン調査にはじまり、長期間にわたる研究協力による信頼に基づくネットワークを構築してきた。共著を含む相当な論文が発表され、機材やモニタリングのマニュアル整備が推進されるなど、質量ともに評価される。金属回収、無害化技術は今後様々な場面での活用が期待され、銅や鉄の回収率が大変高く、その実用化が待たれる。さらに、両国の院生・学生の合同フィールドワーク実習等により、日本人学生の育成にも貢献してきた。特に、若手研究者は本プロジェクトの推進を通じて研究遂行能力、シンポジウムの企画・運営や相手国との調整能力を培い、グローバル化に対応できる国際交流能力が向上された。

### 4-4. プロジェクトの運営

研究開始当初は両国間でプロジェクトの運営方針への意識にずれも見られたが、両国研究代表者等の努力により体制が強化された。また、両国の研究者、技術者の研修が推進され、セルビアから研究者だけでなく、鉱業省や環境保全省の高官（副大臣、次官、部長）を数次にわたり、社会実装のために招聘し、旧松尾鉱山の中和処理施設などを視察し、金属鉱業等鉱害対策特別措置法など環境対策費についての意見交換を行うなど行政レベルの環境意識の向上に大きく貢献した。

さらに、相手国研究者 1 名が秋田大学博士課程を修了し、もう 1 名が在籍中である。将来の国際共同研究の核となる人材が養成されている。また、研究者だけでなく、ボール市民や NPO、あるいは高校生などに対してもセミナーやワークショップを行い、地域住民の関心を高め、地域社会の環境意識を高めてきた。

加えて、国際誌及び国内誌への論文投稿は共著を含めて 30 件以上と多く、マニュアル類も作成された。学会発表はさらに積極的に取り組まれ、相手国側研究チームとの連名を含め 100 件以上の発表実績を有するなど評価できる。知的財産権出願はなされていないが、相手国側が公的研究機関であり、関係省庁と政策よりの社会実装を志向してきたことによる。知財の獲得や国際標準化への貢献は今後に期待したい。また、本技術を適用したパイロットプラントの設計や整備への日本企業参画なども期待したい。

なお、41 機材の供与を受けた MMI-Bor は自己予算で 6 研究室をリフォームし、停電用装置も導入した他、人件費に限らず旅費、研究費など多くの資金を独自に負担するなど、オーナーシップが高い。試薬購入を含め適切に運営維持管理されてきた点は高く評価される。

## 5. 今後の研究に向けての要改善点および要望事項

今後の研究に向けての要望事項は以下のとおりである。

- (1) 2018 年末に MMI-BOR と関係が密接なボール鉱業公社 (RTB Bor) に中国企業が資本参加し、当初、心配されたものの、MMI-BOR はその影響を受けず研究活動を推進してきた。一方、ボール市では鉱山等の 1 日の操業時間が延長され、住民の間に大気

や水への影響の危惧が広がった。そんな状況下、プロジェクトでは、抽出された危険地域への対応策として「段階的な改善・対策案」「継続的モニタリングの重要性」「企業・自治体・研究機関等による協働アプローチ」「調整機能・計画を伴う組織的アプローチ」「人材育成」などの施策を提言した。関連省庁は鉱業関連の環境問題解決のための優先順位を付した基本計画を策定すること、及びその推進チームを形成することが求められている。また、鉱山会社はEU環境基準のもと法を遵守して操業するよう指導力を発揮することが必要である。特に外国資本の鉱山運営に対しては、行政の適切な対応が必要不可欠であり、地域住民だけでなく、近隣国も含め国際的世論を醸成する研究を進めて頂きたい。

- (2) 研究代表者らは、予算規模は限られるも、学生交流を継続し、若手研究者の渡航予算を確保すべく準備している。プロジェクトの提言に対し、MMI-Bor がどのように責任を持って推進するか、所管省庁はどう責任を持ってサポートしていくか、フォローが必要である。両国の国際共同研究をさらに推進させ、親日国のセルビア国との科学技術外交がさらに発展することを期待したい。
- (3) 相手国の研究代表者はプロジェクトで構想したプラント設計を日系企業と共同で実現することを目指している。共同研究の継続を表明する両国の研究代表者らは研究資金支援への応募も含め、本課題をフォローして頂きたい。特に、MMI-Bor には今後も対象地域に広がる廃さいや剥土堆積等の河川への影響を継続的にモニタリングすることが求められており、それらの結果はプロジェクトでなされた提言の実現への政策的裏付けとなりうる。また、環境インパクト低減技術はその実現性を高め、知的財産化も期待したい。さらに日本企業の参画とともに、開発された技術を他の東欧諸国やアフリカ諸国に展開されることにも期待したい。
- (4) 今後、具体的な環境修復及び汚染拡大防止のため、衛星計測技術や金属回収、無害化技術をどのように融合的に実装するのか、検討が望まれる。特にプラント設計に向けて、コスト評価や責任分担体制を明確にし、その実現を進めてほしい。両国の研究者及び関係者がセルビア政府等と関係性を今後も構築し続けられることを期待したい。
- (5) 2020年4月の国会議員選挙による政権や高官の交代可能性の動向も注視するなど、JICA 現地事務所の引き続きの支援を願いたい。特に、セルビアの環境管理に特化したプログラムがあることから、研修派遣等も含め、関係の継続が必要であり、両国共同研究のフォローが期待される。

以上

図1 成果目標シートと達成状況（2020年3月時点）

研究課題名	持続可能な資源開発実現のための空間環境解析と高度金属回収の融合システム研究
研究代表者名 (所属機関)	石山大三 (秋田大学教授, 国際資源学部)
研究期間	H26採択(平成27年1月1日～令和2年3月31日)
相手国名／主要相手国研究機関	セルビア共和国/セルビア共和国鉱業エネルギー省, 農業環境省, ボール鉱山冶金研究所, ペオグラード大学ボール校

### 付随的成果

日本政府、社会、産業への貢献	<ul style="list-style-type: none"> <li>資源開発企業の技術優位性の向上</li> <li>日本企業による環境修復技術の事業化</li> </ul>
科学技術の発展	<ul style="list-style-type: none"> <li>環境評価技術の高度化</li> <li>金属回収技術高度化と廃棄物の新たな資源化</li> <li>次世代衛星センサーの実用化</li> </ul>
知財の獲得、国際標準化の推進、生物資源へのアクセス等	<ul style="list-style-type: none"> <li>次世代衛星データと地表データを統合した資源開発環境評価</li> <li>鉱山廃水中のレアメタルリサイクル技術</li> <li>極低品位鉱床の開発技術</li> </ul>
世界で活躍できる日本人材の育成	<ul style="list-style-type: none"> <li>国際的に活躍可能な日本側の若手研究者の育成(国際会議への指導力、レビュー付雑誌への論文掲載など)</li> </ul>
技術及び人的ネットワークの構築	<ul style="list-style-type: none"> <li>セルビアを核とした東欧地域の資源学関係人材とのネットワーク構築</li> <li>世界の鉱山地域への技術適用および人的ネットワークの拡大</li> </ul>
成果物(提言書、論文、プログラム、マニュアル、データなど)	<ul style="list-style-type: none"> <li>環境評価修復システムマニュアル</li> <li>ハイパーセンサー利用技術マニュアル</li> <li>衛星と地表データの統合解析プログラム</li> <li>廃水、廃さい等からの金属回収、資源化技術論文等</li> </ul>

### 上位目標

セルビアのボール地域及び環境問題を有する他の鉱業地域において環境評価修復システムの社会実装が開始されること。

MMI-Bor及びTF-Borが実用化に向けて研究を継続するとともにセルビア政府が社会実装に向けた取り組みを開始する。

### プロジェクト目標

広域環境評価と鉱業廃棄物からの金属排出量削減(1/4~1/10以上)と資源化(80%以上)を実現する環境評価修復システムの開発。

