

氏名（本籍）	Dragana Adamović（セルビア）
専攻分野の名称	博士（理学）
学位記番号	国博甲第 11 号
学位授与の日付	令和 3 年 9 月 24 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	国際資源学研究科・資源学専攻
学位論文題目（英文）	セルビア国東部ボール・マイデンペック鉱山地域の地下水と河川水の地球化学的・安定同位体的研究：地下水への環境負荷の意味 (Geochemical and stable isotope studies of groundwater and river water in the Bor and Majdanpek porphyry copper mining areas in Eastern Serbia: Implications for the environmental impact on groundwater)
論文審査委員	(主査) 教授 石山 大三 (副査) 教授 柴山 敦 (副査) 教授 渡辺 寧 (副査) 教授 林 武司 (副査) 准教授 小川 泰正

## 論文内容の要旨

世界の多くの鉱山地帯では、水質汚染が大きな問題となっている。約 120 年前から採掘活動が行われてきたセルビア東部にも同様な問題がある。現在、セルビア東部には 4 つの開発中の銅鉱山があり、3 つはボール鉱山地域、1 つはマイデンペック鉱山地域にある。特に、ボール鉱山から下流の水質汚染が顕著で、深刻な環境問題となっている。本研究の目的は、調査地域の河川水と地下水の地球化学的特性を明らかにするとともに、地下水への環境影響を推定する手法を確立し、ボール鉱山地域とマイデンペック鉱山地域の地下水への環境影響を推定することである。

ボール鉱山地域のボール川、クリベリ川、ベラ川の河川水は、pH が 2~4 の酸性を示し、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、Fe, As, Cu, Mn は高い濃度であった。マイデンペック鉱山下流の小ペック川とペック川上流部の河川水は、弱アルカリ性の pH を示し、ボール鉱山地域の 3 つの河川よりは低濃度ではあるものの、高い  $\text{SO}_4^{2-}$ 、Fe, As, Cu, Mn 濃度で特徴づけられる。ボール鉱山地域のベラ川の河川水は、Fe 6900 t/年, As 42 t/年, Cu 910 t/年, Mn 187 t/年などの大量の重金属やヒ素を下流に運搬している。一方、マイデンペック鉱山の小ペック川の河川水は、鉄 160 t/年, As 0.1 t/年, 銅 6 t/年, Mn 272 t/年の重金属とヒ素を下流に運搬している。このことは、ボール鉱山地域の環境負荷は、マイデンペック鉱山地域の環境負荷よりもかなり大きいことを示している。しかし、環境負荷の大きいボール鉱山地域のベラ川の  $\text{SO}_4^{2-}$ 、Fe, As, Cu, Mn の濃度は、ベラ川の河川水と高濃度の重炭酸成分を含むティモック川の河川水が混合した後に大幅に減少する。この事実は、ボ

ール鉱山とマイデンペック鉱山を含む研究地域の河川水が、鉱山廃水を含む汚染河川水に対して十分な中和能力を持っていることを示唆している。

研究地域の地下水は、pH 値が 6.4~8.8 で、 $\text{HCO}_3^-$ 濃度が高いのが特徴で、Ca-Mg- $\text{HCO}_3^-$ 型の地下水である。研究地域の地下水は、全体としては微量元素の含有量は低く、セルビア飲料水基準の最大許容濃度以下の良好な水質である。微量元素の中でも高濃度を示す元素は、Ba と Sr であり、石灰岩地域で高い濃度を示す。標高が高い山地の地下水と平地の地下水には地下水の水素・酸素同位体比の値に違いが認められる。山地の地下水は、相対的に軽い水素・酸素同位体比を持ち、平地の地下水は、相対的に重い水素・酸素同位体比を持つ。この違いは、水蒸気を輸送する気団が山地を越えるときにレーリープロセスに従い、同位体分別を起こしながら地下水のもととなる降水を降らせたことによると考えられる。

鉱業活動が研究地域の地下水汚染を引き起こしているかどうかを判断するために、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ ほか 26 成分について、地球化学図の作成とバックグラウンドグループから異常値を持つグループを識別するための閾値の推定を行った。

$\text{Ca}^{2+}$ と  $\text{SO}_4^{2-}$ の地球化学図から、ボール鉱山地域の下流域に  $\text{Ca}^{2+}$ と  $\text{SO}_4^{2-}$ の高い濃度の地下水が認められた。この下流域の一部の地下水においては、 $\text{Ca}^{2+}$ と  $\text{SO}_4^{2-}$ の濃度は基準値を下回るものもあるが、 $\text{Ca}^{2+}$ と  $\text{SO}_4^{2-}$ の閾値に基づくと、これらの地下水の  $\text{Ca}^{2+}$ と  $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度も、閾値を超えており、鉱業活動による汚染と考えられる。

ベラ川に沿って堆積した廃さい中の間隙水とボール鉱山地域外側の非汚染地下水の混合計算に基づくと、汚染河川水と非汚染地下水との直接的混合ではなく、ベラ川の河岸に沿って存在する廃さいなどの汚染された堆積物中の  $\text{Ca}^{2+}$ と  $\text{SO}_4^{2-}$ を含む間隙水と非汚染地下水の混合が、ベラ川の周辺の地下水の汚染を引き起こしていると考えられる。マイデンペック鉱山地域の地下水には、高い  $\text{Ca}^{2+}$ と  $\text{SO}_4^{2-}$ の濃度は認められず、現時点では同地域の地下水汚染はないと考えられる。本研究によって得られた  $\text{Ca}^{2+}$ と  $\text{SO}_4^{2-}$ を指標とする評価は、主に中性の pH を有する地下水に適している。このことに加え、本研究で用いた地球化学図、閾値解析、地球化学反応を考慮した混合解析による評価手法は、鉱山地帯の環境評価に広く適用可能である。

## 論文審査結果の要旨

最終試験は、令和 3 年 6 月 23 日（水）の審査委員会（10 時 40 分~12 時 00 分）および 7 月 7 日（水）の博士論文公聴会（13 時 00 分~14 時 00 分）において開催し、石山大三審査委員会主査、柴山 敦審査委員、渡辺 寧審査委員、小川 泰正審査委員、林 武司審査委員の出席のもと、論文内容と関連事項に関して詳細な質疑応答を行うとともに、口頭による学力の確認を行った。

- 1) カルシウムと硫酸を使うモニタリングのねらいについて、
- 2) 河川水と間隙水の平均値の求め方について、
- 3) 汚染のもととなる河川沿い廃さい中の間隙水が石膏に不飽和であるか否かについて、
- 4) 間隙水が地下に浸透するプロセスでの重金属の沈殿メカニズムについて、
- 5) 汚染地下水に含まれる硫酸の起源について、
- 6) 鉱業施設からの排水や廃さいなど、汚染となる元素の発生源の特定について、

7) 今後検討すべき課題について

などの各質問に対して、申請者からの確な回答がなされた。また、予備審査委員会で指摘されていた事項も適切に改善されていた。これらのことから、学位審査委員会は本審査委員会および公聴会出席教員全員の賛同のもとに、ドラガナ アダモビッチ氏が最終試験に合格し、博士（理学）として十分資格があるものと判定した。