

論文内容要旨 (和文)

平成 14 年度入学博士後期課程

地球共生圏科学専攻 環境保全科学講座

氏 名 小 関 武 宏



論文題目

インドネシア、マタロコ地熱地域における地熱流体流動の研究
— 鉱化作用からの検討 —

Bajawa 地域はインドネシア東部の Flores 島の中央部に位置する。この島には多数の火山が分布し、Bajawa 周辺では活発な地熱活動が認められる。主な地熱兆候地として Mataloko, Nage, Wolo Bobo などがあり、1997 年から 5 年計画で NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) によるインドネシア—日本二国間研究協力プロジェクト (遠隔離島小規模地熱の探査に関する研究協力) が始まり、本格的な調査が行われた。著者も日本側研究者の一員として参加し、試料の分析、データ解析、取りまとめなどを行った。これらの結果は、地質調査所報告 (2002, Vol. 53) の特集号ほかとしてまとめられている。調査地域の地質と変質の特徴は以下の通りである。

Mataloko 地域では酸性 SO_4 型の温泉を伴う変質帯が広く分布し、活発な地熱兆候地となっている。本地域で掘削された MT-1 (掘削深度 207m)、MT-2 (掘削深度 180m) とも坑底付近で優勢な蒸気に遭遇した。MT-2 では坑底付近で 192.3°C が確認されている。MT-1 と MT-2 の地質は安山岩質の火砕岩ないし溶岩で、浅部の火砕岩類と中深部の溶岩及び下部の火砕岩類からなる。

MT-1・MT-2 ともに浅部 (深度 20m 以浅)、中深部 (深度 50~100m 付近)、深部 (深度 130m 以深) に特徴的な変質が認められる。浅部では主として火砕岩 (凝灰角礫岩) が白色変質、珪化しており、カオリナイト帯、明バン石帯に分帯される。中深部の変質は緑色変質が著しく、粘土化により軟質化している。MT-1・MT-2 ともに比較的新鮮な安山岩溶岩が分布し、その直下に著しい粘土化が認められる。MT-1 では深度 50~100m、MT-2 では 55~85m 付近で、緑色粘土化が著しい。深部の変質は緑色変質とともに白色変質、珪化が認められる。この深度にはモンモリロナイト帯、C/M 帯、カオリナイト帯、ワイラケ沸石帯が分布している。

本研究は、この結果をふまえ、さらに同地域のうち最も活動的なマタロコ地熱地域において掘削された調査井 MT-1 と MT-2 のカッティングス試料について、硫化鉱物の観察、化学分析とイオウ同位体比分析を行った。その結果、主に以下のことが明らかとなった。

1. 不透明鉱物として、磁鉄鉱、赤鉄鉱、黄鉄鉱、白鉄鉱、閃亜鉛鉱が認められ、硫化鉱物のほとんど全てが黄鉄鉱であり、極少量の閃亜鉛鉱が黄鉄鉱中に包有されることがある。黄鉄鉱の一部は白鉄鉱に置換されている。
2. 磁鉄鉱は浅所の試料に多く、中～深部の試料では黄鉄鉱などに交代されていることが多い。
3. 黄鉄鉱の形態は、細い脈状、自形～半自形の単独粒、半自形～他形の粗粒結晶が脈状に配列したもの、輝石などの有色鉱物を交代したものなどが存在する。
4. 黄鉄鉱は As を最大 2.5 wt.%, Co を最大 0.8 wt.%, Mn を最大 0.9 wt.% 含んでいる。深部の黄鉄

鉱中のコアに As と Co の高い異常が認められ、浅部の黄鉄鉱は Mn に富んでいる。

5. 黄鉄鉱の $\delta^{34}\text{S}$ 値は以下の特徴を持っていることが分かった。(1)イオウ同位体比は浅部で-8 ‰程度、深部で-2 ‰まで徐々に変化する。(2)最深部でイオウ同位体比は約-10 ‰へと急激に変化する。

本研究の結果と既往調査の結果を考え合わせると、当地域の流体系は深度 160 - 180 m あたりに、2つに分けることができる。すなわち、深部の流体は、温度が $230^{\circ} - 250^{\circ}\text{C}$ で CO_2 と H_2S に富む酸化的な蒸気卓越貯留層に由来したものである。この流体によって、ワイラカイトや As, Co に富む黄鉄鉱が生じた。浅部の流体は、深部流体から分離した蒸気の凝縮によってできたもので、 200°C 以下で黄鉄鉱の再結晶や、モンモリロナイト、カオリナイト、明礬石などの変質鉱物を生じた。現在、深部流体は下部へ退き、熱水活動は少し衰えていると考えられる。本研究で得られたように、黄鉄鉱中の As や Co の濃度異常やイオウ同位体分析は、蒸気卓越型の地熱貯留層の上部を探索する際に非常に有効である。

論文内容要旨 (英文)

平成 14 年度入学博士後期課程

地球共生圏科学専攻 環境保全科学講座

氏 名 小 関 武 宏



論文題目

Study on the Geothermal Fluid System at the Mataloko Geothermal Field,
Indonesia - An Approach from Sulfide Mineralization -

Extensive geothermal activities occur in the Bajawa area, Flores Island, Indonesia. Chemical composition and sulfur isotopic ratio of sulfide were analyzed for cuttings from the exploration wells MT-1 and MT-2, which were drilled at the Mataloko geothermal field, one of the most active fields in the Bajawa area. Almost all of the sulfide minerals are pyrite with a little amount of sphalerite as small inclusions in pyrite. Pyrite contains As up to 2.5 wt.%, Co up to 0.8 wt.% and Mn up to 0.9 wt.%. High contents of As and Co are present in the core of pyrite crystals in the deeper samples, whereas Mn is enriched in the shallower samples.

Sulfur isotopic ratios were analyzed for 17 samples. The $\delta^{34}\text{S}$ values of the pyrite show the following two characteristics: (1) the isotopic values gradually change from about -8 ‰ at the shallower level to about -2 ‰ at the deeper level, (2) the values abruptly change to about -10 ‰ at the deepest part. The $\delta^{34}\text{S}_{\text{py}}$ values concentrate around -5 ‰ which is not equilibrated with the $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ (-2.5 ‰) for the explosive gas of the well MT-1 at temperatures below 200°C. Combining these results with the previous results of geochemical and geophysical explorations, the fluid system can be divided into two zones at about 160 - 180 m: the deeper fluid which comes from the steam-dominated reservoir is oxidized and rich in CO_2 and H_2S of temperatures between 230°- 250°C. This fluid led to the precipitation of wairakite and As- and Co-rich pyrite. The fluid of the shallower zone is made from the condensation of the deeper steam separated from the CO_2 - and H_2S -rich fluids, and led to the

re-equilibration of pyrite, and new alteration minerals of montmorillonite, kaolinite and alunite at temperatures less than 200°C. The deeper fluid retreated to deeper depth and the hydrothermal activity dropped below its peak. The present results of As, Co and sulfur isotopic anomalies of pyrite below 160 m can be possibly applied to detect an uppermost of the vapor-dominated geothermal reservoirs.

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

平成 18年 8月 24日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 中島 和夫

副査 齋藤 和男

副査 長谷見 晶子

副査



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

1. 論文申請者

専攻名 地球共生圏科学専攻

氏 名 小 関 武 宏

2. 論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

..... インドネシア、マタロコ地熱地域における地熱流体流動の研究

..... ー鉱化作用からの検討ー

3. 学位論文公聴会

開催日 平成 18年 8月 11日

場 所 理学部先端科学棟大講義室(S401).....

4. 審査年月日

論文審査 平成 18年 8月 7日 ~ 平成 18年 8月 23日

最終試験 平成 18年 8月 23日 ~ 平成 18年 8月 23日

5. 学位論文の審査及び最終試験の結果 (「合格」・「不合格」で記入すること。)

(1) 学位論文審査 合 格

(2) 最 終 試 験 合 格

6. 学位論文の審査結果の要旨 (1,200字程度)

別紙のとおり

7. 最終試験の結果の要旨

別紙のとおり

別 紙

専攻名	地球共生圏科学専攻	氏 名	小 関 武 宏
学位論文の審査結果の要旨			
本論文では、地熱開発において重要な、適切な地熱構造モデルを作成する際に、従来ではほとんど検討されていなかった鉱化作用からの視点を加えることを目的としている。地熱構造を解明する上では流体流動の解明が特に重要であるが、現在は主として噴出流体の化学組成から検討されており、これに変質鉱物などの情報が加えられている。現在のところ鉱化作用について記載されている地熱系はほとんどない。地熱系は必ず鉱化作用を伴っており、熱水成鉱床は地熱活動の産物であることから、地熱活動と熱水鉱化作用は密接な関係にある。本研究では地熱活動により生じた鉱化作用の特徴と硫黄同位体分析という新たな視点から流体流動の解明にアプローチしている。 I 章では、地熱地域における流体流動研究の必要性などについて、一般的な背景をまとめるとともに、研究目的と研究方法を述べている。 II-1 章では、研究対象地域のインドネシア国フローレス島における電力事情と地熱開発の概要、さらに日本の技術協力の経緯、既往調査等の背景についてまとめられている。 II-2 章では、地質構造として、マタロコ地熱地域周辺の地質層序、坑井地質、重力構造、地質構造の調査結果がまとめられている。 II-3 章では、熱構造として、火山活動、熱水変質、温度分布、比抵抗構造、比熱構造についてまとめている。地下における深部貯留層とその上部のキャップロックが想定された。 II-4 章では、既往調査で判明した流体流動として、温泉・噴気、坑井からの噴出流体の地化学的特徴、流体流動についてまとめている。 III 章では、鉱化作用からみた流体流動の検討として、EPMA 分析と硫黄同位体分析の手法、分析結果として不透明鉱物の産状と化学組成、硫黄同位体分析結果についてまとめられている。 IV 章では、全体の考察として、鉱化作用の特徴、流体流動についての新たな見解、そして地熱系モデルを組み立てている。調査井下部にはかつて、現在の沸騰曲線を超えた高温の熱水が流入し、現在はやや温度が低下していることなどが分かった。この熱水系モデルを組み立てるには、鉱化作用の記載と硫黄同位体分析が大きな情報をもたらすことを示した。 また、本研究の鉱化作用の部分については地熱学会誌(28 巻 2 号, 2006)に英文で掲載され、博士課程入学後に公表した参考論文である地質調査所報告(英文)10 編、国際学会 1 件、国内学会 3 件を通して、研究成果を学界に公表し評価を得てきた。 以上のように、本論文は従来地熱開発ではほとんどやられていなかった、鉱化作用の解明と硫黄同位体分析が地熱調査に大きな貢献を果たすことを示したもので、学術的な価値は極めて高いと判断され、博士学位論文として十分な価値があると認められる。したがって、本論文を博士(理学)学位論文として合格と判定した。			
最終試験の結果の要旨			
学位論文の内容を要約した口頭発表を最終試験とし、研究方法や結果解析の妥当性、考察の論理性、研究成果の重要度・発展性に関して、発表および質疑応答を通して客観的に評価した。論文の内容を忠実に要約できたこと、および付加的な研究背景などの説明は評価に値するという見解に達したため、審査委員全員で最終試験を合格と判定した。			