

京都大学	博士（工学）	氏名	Yudi Rahayudin
論文題目	Clarification of geochemical properties and flow system of geothermal fluids around the Bandung basin for geothermal-resource assessment（地熱資源評価のためのバンドン盆地周辺における地熱流体の地球化学特性と流動システムの解明）		
Geothermal fluids have various chemical compositions and are greatly influenced by geological conditions, water origin and mixing of magmatic and metamorphic gases. Hydrological condition is also an essential influence factor, because this significantly controls the degree of mixing or boiling, which can change the fluid composition. Whether heat is flowed by convection in the geothermal system or stored in the reservoir is determined by large-scale hydrological factors such as heat input and permeability. Geological conditions, in particular the basement structure, are important to control the composition and movement of geothermal fluids. To clarify characteristics of the geothermal system around the Bandung basin and the influence of the subduction process and basement lithology on the geothermal conditions, I conducted major-minor and trace element analyses, specified the fluid type and interpreted water-rock interaction processes. Stable isotope oxygen-18 and deuterium analysis was applied to reveal the elevation range of the recharge area and the mixing process of the meteoric water with magmatic or sedimentary fluids. Other stable isotope data of strontium and carbon were used to analyze the sources of geothermal gases and fluids and also, characterize the mixing processes depending on the lithology types in the study area. This dissertation is composed of the following eight chapters. Chapter 1 is an introduction to summarize the content of my research with an overview of preceding, related researches, social background, unsolved problems and motivation for understanding the objectives of my research. Chapter 2 summarizes the general geological, structural and geodynamic settings of Indonesia, Java island and Bandung basin and describes that all the settings are strongly influenced by the plate movement activities of the Indian-Australian plate in the south, the Eurasian plate in the north and the Pacific plate in the east. Also, this chapter explains the sampling locations and methods and the analytical methods for the samples. Chapter 3 explains in detail the geothermal conditions of the Tampomas field in a medium enthalpy geothermal system and clarifies the effects of sedimentary basement rocks on the geochemical composition of geothermal fluids. Among the rocks, marine sediments were specified to control significantly the geochemical composition in this field. Chapter 4 focuses and reveals the geothermal conditions of the Tangkuban Parahu geothermal field that consists of two main groups of Quaternary volcanic rocks over the Tertiary			

京都大学	博士（工学）	氏名	Yudi Rahayudin
sedimentary rocks. This geothermal field was characterized by the sulfate and sulfate-chloride types with low to medium chloride content and low pH, which may originate from the volcanic gas activities. The H₂S oxidation in the vadose zones can generate high sulfate content. In addition, the dissolution process of rocks was interpreted by the water composition with high Fe and Al contents located in the upflow zones of the geothermal system. The geothermal fields in Chapters 3 and 4 are located in the northern Bandung basin, whereas the two geothermal fields in the following Chapters 5 and 6 are in the southern basin. Chapter 5 targets the Patuha geothermal field in a vapor dominated system, derives indications about the fluid flow patterns based on the geochemical, geophysical and drilling data and interprets the plate subduction process through the gas composition data. The Wayang Windu field, the target of Chapter 6, has a unique feature as a transition geothermal system. By a fracture system analysis, this field was revealed to be an active tectonic zone in which major structural faults are dominated by NE-SW direction. The meteoric water was interpreted as the main origin of reservoir fluids and manifestations based on the $\delta^{18}\text{O}$ and δD data. Chapter 7 integrates all the data obtained to characterize the Bandung basin geothermal system, points out the important findings from this research, calculates the total geothermal potentials in the selected four geothermal fields and constructs a conceptual model of the geothermal system. Common to the four fields in the northern and southern Bandung basin, the meteoric water is as a main source of reservoir fluids. The isotope oxygen shifting indicated the change of the meteoric water by mixing with the magmatic fluids and connate water supplied from marine sedimentary layers. The reservoir fluids from the meteoric water infiltrated through the permeable zones such as faults and fractures. In the northern Bandung basin, the infiltration amount of meteoric water is limited by the formation of impermeable layers of marine sedimentary rocks, whereas in the southern basin, the meteoric water can infiltrate deeply and interact strongly with basement rocks and reservoir fluids. Chapter 8 summarizes the essential results of each chapter as a grand conclusion of this research and organizes the important points of the results. Important future works are also discussed in this chapter to develop geochemical studies furthermore for accurate and effective geothermal exploration.			

(論文審査の結果の要旨)

再生可能エネルギーを利用し、火力発電に比べて CO_2 ガスの排出量が圧倒的に少ない地熱発電には大きな出力、高い安定性、高い変換効率というメリットがあり、火山国での一層の促進が求められている。インドネシアの地熱資源ポテンシャルは世界二位であり、ジャワ島西部のバンドン盆地周辺はインドネシアの中でも特にポテンシャルが高いとされ、8つの地熱フィールドがあり、そのうち5つでは既に発電所が稼働している。盆地周辺では地熱貯留層のタイプが蒸気卓越型、熱水卓越型、その混合型とフィールドごとに異なるという特徴があるが、その形成要因に関してはまだ明らかになっていない。地熱資源開発と持続的利用のためには熱水の涵養から流出までの流動形態、涵養水の加熱機構、貯留層温度、蒸気卓越部の位置などの解明が不可欠になる。そこで、本研究ではこの解明を目指し、バンドン盆地北部に位置する Tampomas と Tangkuban Parahu、南部の Patuha と Wayang Windu の4つのフィールドを選び、温泉や生産井から熱水とガス、露頭から岩石の試料を数多く採取し、主要・微量成分濃度、および水素、酸素、ストロンチウム (Sr)、炭素の同位体比を分析した。この地球化学的手法によって広域の地熱システムの特徴を明らかにできた、という初めての地熱流体学研究である。成果の概要は以下にまとめられる。

- 1) 盆地北部の熱水は南部に比べて重炭酸型の傾向にあるが、いずれにも共通して陽イオンのうち Mg の濃度比が相対的に高い未成熟な熱水であり、地表からの地下水の混合が顕著に生じている。
- 2) いずれの地熱フィールドにも共通して、主要な2系統の断層帯の存在(例えば Wayang Windu では NW-SE と NE-SW 方向の断層系)が地表地熱兆候の形成に強く関与している。盆地北側と南側両方の地熱地域で天水線よりも重い酸素同位体比を示す熱水が認められ、その原因としてマグマ水の混合や海成堆積岩との相互作用が考えられた。特に Tampomas では遺留水の影響も考えられる。
- 3) 盆地南部の Patuha のガスには N_2/Ar 比が高いという特徴がみられ、プレートの沈み込みに伴う海洋底堆積物中の有機物の分解に起因していると考えられる。また、 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ 比が地点によって異なり、低い地点では貯留層からの蒸気上昇速度が速く、 H_2S ガスと母岩との反応が小さいことを示唆する。
- 4) 炭素同位体比の分析結果から、バンドン盆地周辺の地熱流体に含まれる CO_2 は火山ガスと海成炭酸塩起源であることが示された。Sr 同位体比は北部では堆積岩と、南部ではカルク-アルカリ火山岩との相互作用に起因すると考えられる。これらの結果から地熱流体の起源や流動域を推定可能である。
- 5) 地質温度計により推定できた貯留層温度とエネルギー密度に基づくと、盆地北部、南部の対象フィールドでの地熱ポテンシャルはそれぞれ 300 MWe, 633MWe と見積もられ、南部は北部の2倍の発電可能量であることを明らかにできた。

以上、熱水・ガス・岩石の地球化学分析データの統合により、マグマ深度と貯留層の岩相が地熱システムの相違の要因になっていることを明らかにできた。その成果は地熱

氏 名	Yudi Rahayudin
-----	----------------

資源量の評価にも応用でき、地熱発電促進にも貢献し得るので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和２年４月１７日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第１４条第２項に該当するものと判断し、公表に際しては、全文公表日までの間（未定）、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。