

(続紙 1)

京都大学	博士（工学）	氏名	Mochamad Iqbal
論文題目	Integrated Analyses of Soil CO ₂ and Rn Gases and Groundwater Geochemistry for Detecting Hidden Geothermal System with a Case Study of Mt. Endut Field in Indonesia (潜在地熱システムの検出を目的とした土壌 CO ₂ と Rn ガスおよび地下水地球化学の統合解析とインドネシア・エンデュ山フィールドでのケーススタディ)		
(論文内容の要旨)			
Geothermal energy holds significant promise for sustainable power generation, yet many resources remain locked in Hidden Geothermal Systems (HGS) that lack surface manifestations. Exploration of these blind systems is risky and costly due to the absence of obvious indicators such as hot springs or fumaroles. Developing robust, integrated, and cost-effective exploration approaches is therefore essential to reduce uncertainty. This research develops and applies a multi-method geochemical framework to identify and characterize hidden systems by selecting the Mt. Endut area, west Java, Indonesia, as a case study. The approach integrates (1) a low-cost portable CO₂ flux device (PCFD), (2) soil-gas geochemistry (CO₂ flux, $\delta^{13}\text{C-CO}_2$, ^{222}Rn, ^{220}Rn), and (3) hydrogeochemistry of groundwater and surface waters combined with least-squares mixing models. Consequently, these methods provide complementary evidence to detect concealed geothermal fluids and improve confidence in exploration outcomes. This dissertation consists of the following seven chapters. Chapter 1—Introduction: The introduction sets out the research background, challenges in HGS exploration, and the specific objectives. Although Indonesia has vast geothermal potential, many resources remain underutilized due to exploration risks. The novelty of this dissertation lies in an integrated geochemical approach: developing affordable instrumentation, applying multi-tracer soil-gas and groundwater geochemistry, and cross-validating datasets to confirm hidden reservoirs. Mt. Endut, adjacent to the Cikawah geothermal field but with no surface manifestations, was chosen as the study area. Chapter 2—Regional Geology: This chapter outlines the geology and tectonic framework of Mt. Endut. The stratigraphy consists of Tertiary sedimentary units overlain by volcanic andesite. The NNE–SSW Endut normal fault is identified as a critical structure, which plays a central role in geothermal fluid circulation. Previous geophysical studies hinted at hidden geothermal potential, but without field confirmation. This geological background provides the structural context for subsequent geochemical investigations. Chapter 3—Development of the portable CO₂ Flux Device: The design and validation of the PCFD are presented. The instrument was tested against a Shimadzu Intelligent Flowmeter and a commercial West System device, yielding sufficient agreement ($R^2 = 1.00$ and 0.97, respectively). The PCFD can measure fluxes up to $100,000 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, covering the full range expected in geothermal areas. Its low cost and			

京都大学	博士（工学）	氏名	Mochamad Iqbal
portability make it a valuable tool for exploration, particularly in remote or resource-limited settings. Chapter 4—Soil Gas Analysis: Soil-gas surveys identified localized CO₂ flux anomalies along structural features. Stable carbon isotopes distinguished hydrothermal CO₂ from shallow biogenic sources. Radon isotopes provided depth-sensitive tracers: • ²²²Rn indicated gas transport along deeper fractures. • ²²⁰Rn reflected near-surface diffusion and short-lived seepage. In addition, these tracers showed that the Endut normal fault functions as a partial barrier that restricts fluid migration but permits localized leakage, producing detectable geochemical anomalies. Chapter 5—Hydrogeochemistry: Groundwater samples were analyzed for major ions, trace elements, and stable isotopes. Using a least-squares mixing model, geothermal fluid contributions of up to 16.8% were quantified in shallow aquifers. δ¹⁸O and δD signatures confirmed meteoric recharge at elevations between 617 and 828 m. Key geothermal tracers such as Cl, Li, B, Sb, Cs, and As supported the presence of deep fluid mixing, despite the absence of surface hot springs. Chapter 6—Integrated Conceptual Model: Results from soil-gas analysis and hydrogeochemistry were integrated into improving a conceptual model of the geothermal system: • The Cikawah system is sustained by a shallow andesite intrusion with active surface discharge. • The Endut HGS is supplied by a deeper heat source but remains concealed beneath a thick cap rock. • The Endut normal fault separates the two systems, acting both as a boundary and a leakage pathway. This integrated model provides a coherent understanding of the Mt. Endut geothermal area, confirming the existence of a hidden reservoir. Chapter 7—Conclusion and Future Work: This chapter summarizes the main results, contributions, and recommendations for future research. This PhD study makes three main contributions: 1. Innovation: development of a validated, affordable CO₂ flux device. 2. Discovery: confirmation of the Mt. Endut Hidden Geothermal System through multiple geochemical lines of evidence. 3. Framework: demonstration of an integrated exploration methodology for reducing risk in blind system detection. Future work should expand this framework to other volcanic regions, incorporate advanced geophysics, and apply long-term monitoring. Beyond its scientific value, the approach supports Indonesia's renewable energy strategy and global energy transition goals.			

(論文審査の結果の要旨)

再生可能エネルギーの一つである地熱資源を利用した発電には発電時の CO₂ 排出量が極めて少なく、天候に左右されず設備稼働率が太陽光や風力発電に比べて格段に高いとともに、出力が大規模という大きな利点がある。そのために世界的に地熱発電量が年々増加しているが、今後地熱発電を一層促進させるには、地下には貯留層が存在するものの地表に噴気帯や温泉などの地熱兆候を伴わないという従来とは異なった「潜在」地熱システムの探査と検出が不可欠になる。本研究は、土壌ガスの CO₂ フラックス・炭素同位体・ラドン同位体濃度、地下水化学成分、および地質温度計の統合解析によって潜在地熱システム検出の可能性を見出し、そのシステムの特徴と形成要因を明らかにした初めての地球化学的研究である。インドネシア・ジャワ島西部のエンデュ山フィールドをケーススタディの対象とした主な成果は次の 4 点に纏められる。

- 1) 従来の CO₂ フラックス測定器は高価で可搬性に劣るという問題があり、これを改善するために汎用的な部品を組み合わせた CO₂ フラックス測定器 (PCFD) を開発し、室内と野外での検証実験により PCFD の測定性能は高価な機器と同程度であることを確認した。PCFD によりエンデュ山フィールドのような急峻な地形でアクセスし難い状況でも、短期間で多くの地点における CO₂ フラックス測定が可能になった。
- 2) 炭素同位体 $\delta^{13}\text{C}$ のデータにより、PCFD で測定した 237 地点の CO₂ フラックスにおいて生物起源よりも熱水起源が卓越する場所を特定できた。また 68 地点で取得した半減期が長い ^{222}Rn と短い ^{220}Rn の濃度比 ($^{222}\text{Rn}/^{220}\text{Rn}$) および ^{222}Rn 濃度のデータの組み合わせから、ラドンガスのソース深度を浅部、深部に区分する手法を提案した。これらによりエンデュ正断層が潜在地熱システムの境界になっていると解釈できたとともに、熱水起源で高い CO₂ フラックスかつ浅い ^{222}Rn ソースの条件から地熱貯留層の分布範囲の推定も可能になった。
- 3) 水試料分析による主要イオン、微量元素 (Cl, Li, B, As, Rb, Sb, Sc), 水安定同位体 ($\delta^{18}\text{O}$ と δD) を組み合わせたマルチトレーサー最小 2 乗混合モデルにより、対象フィールドにおける地下水への深部地熱流体の混合率は 1.1~16.8% の範囲にあり、混合率はエンデュ正断層付近で大きくなることから、同断層に沿った流体の上昇が見出された。また、浅部地下水の水質は主に炭酸塩溶解、アルミノケイ酸塩風化などの局所的な水理地質プロセスに起因することが飽和インデックス解析から明らかになり、これからも地熱流体の混合率の低さが確かめられた。
- 4) 地化学データ解析結果と地磁気-地電流 (MT) 探査による比抵抗分布、重力異常マップの統合により、キャップロック層が厚く、その浸透性が特に低いことで地熱流体の上昇が抑えられて地下水による希釈と温度低下が増進され、その結果地表に地熱兆候が現れず、潜在地熱システムになっていると総合的に解釈できた。

氏 名	Mochamad Iqbal
-----	----------------

以上、本論文での開発手法の実用性と有効性は高く、潜在地熱システムの探査と検出に適用できることが示されたので、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7年8月18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。

また、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、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。