

京都大学	博士（工学）	氏名	NYORA DONALD KOBARE
論文題目	Clarifying Geothermal Systems and Assessing Resource Potential in a Half-Graben Setting of the East African Rift System by Incorporating Rock Permeability and Geothermal Fluid Evolution （岩石透水性と地熱流体進化を考慮した東アフリカリフトシステムの半地溝域における地熱システムの解明と資源ポテンシャル評価）		
（論文内容の要旨） Geothermal energy is increasingly recognized as a key low-carbon resource in the global energy transition because it can provide baseload electricity and direct-use heat with very low greenhouse gas emissions. In tectonically active settings, geothermal systems exploit elevated regional heat flow and structurally controlled permeability, which enables circulation of hot fluids through fractured volcanic sequences and crystalline basement aquifers. In Tanzania, national assessments have identified a Southwest Geothermal Province (SWGP) that includes the Kiejo-Mbaka, Rungwe, Ngozi, and Songwe prospects as priority areas for commissioning the country’s first geothermal power plants by approximately 2030. Despite this strategic designation, progress toward development has been constrained by incomplete geoscientific datasets and insufficiently resolved conceptual models. Earlier investigations focused primarily on regional-scale geophysics and reconnaissance hydrochemistry, but they did not provide integrated constraints on reservoir temperatures, fluid flow pathways, permeability architecture, or long-term fluid residence times and parameters that are fundamental for assessing resource potential and sustainability. This study establishes an integrated framework to characterize geothermal fluid circulation, recharge sources, heat supply, permeability structure, and residence times in the Songwe and Kiejo-Mbaka prospects within the Rungwe Volcanic Province (RVP), southwestern Tanzania. The RVP is situated at the triple junction between the Eastern and Western branches of the East African Rift System (EARS) and, together with adjacent rift basins, represents one of Tanzania’s most prospective geothermal regions. Although national resource estimates exceed 135 MWe for the SWGP, development remains limited by a lack of quantitative constraints on reservoir geometry, permeability distribution, and long-term sustainability. To address these limitations, this research integrates four complementary components: (1) hydrochemical and stable isotope analysis, (2) coupled geophysical and geochemical interpretation, (3) petrophysical and microtextural characterization of reservoir rocks, and (4) a multi-tracer approach to quantify fluid residence times. This multidisciplinary strategy provides a more robust and internally consistent basis for geothermal resource assessment and development planning in the region. This thesis is organized into seven chapters that build progressively from regional context and methods to detailed case studies and integrated research. ● Chapter 1 outlines the research background, problem statement, objectives, novelty, and structure			

京都大学	博士（工学）	氏名	NYORA DONALD KOBARE
of the research, and summarizes the Songwe and KiejoMbaka geothermal systems within the broader context of the EARS and Tanzania's energy transition. ● Chapter 2 presents the regional geology and tectonics of the RVP and adjacent rift basins, describing the structural framework, stratigraphic architecture, magmatic evolution, and fault systems that control heat flow and fluid pathways in the Songwe and Kiejo-Mbaka prospects. It provides the geological foundation for the more specialized analyses in subsequent chapters. ● Chapter 3 presents laboratory measurements of bulk density, porosity, and permeability on drill-core and outcrop samples, together with thin-section and SEM-EDS characterization, to quantify lithological, microstructural, and alteration controls on permeability and to link these to hydrochemical indicators of active upflow. ● Chapter 4 presents ^{81}Kr, ^{36}Cl, ^3H, and noble-gas tracers to determine piston-flow and dispersion-model residence times, estimate reservoir volumes, and interpret the spatial pattern of ages and radiogenic origin of noble-gas accumulation in relation to structural segmentation and permeability. ● Chapter 5 focuses on a half-graben geothermal system in the Songwe field, combining gravity data, structural analysis, hydrochemistry, and isotopes to delineate recharge areas, map deep high-density heat-source bodies, and refine the conceptual model of the half-graben geothermal system and its evolution. ● Chapter 6 presents the geothermal resources in the Songwe Half-Graben and KiejoMbaka prospects. Use hydrochemistry, stable isotopes, mineral equilibria, and geothermometry to identify main reservoir domains, and natural thermal power, and develop geothermal conceptual cross-sections of fluid circulation in each prospect. ● Chapter 7 synthesizes the crucial findings of the research chapters, highlights the major scientific and applied contributions of this research, and formulates recommendations for future research and geothermal development in the RVP and analogous rift-hosted geothermal systems. The integrated framework developed in this research is readily transferable to other rifted volcanic settings and provides a foundation for future research and geothermal development in the RVP.			

(論文審査の結果の要旨)

地熱エネルギーを利用した発電には CO_2 排出量が極めて少なく、大規模出力が可能でベースロード電源になり得るという利点があり、世界的に地熱資源の探査と開発が急増している。特に東アフリカリフトシステムは世界で最大の地溝帯にあり、伸張力による地殻の薄化、活発な火山と断層活動で地熱資源を豊富に有することが知られており、ケニアでは地熱発電が稼働している。しかし、その南部にあるタンザニアでの地熱システムの研究は進んでおらず、地熱資源の精緻な評価もなされていない。本研究は岩石物理・水質化学・地質構造の統合解析によって、タンザニア特有の地熱システムの特徴、熱水流動系、資源有望域の絞り込みと熱エネルギー量の空間分布推定を試みた初めての地球化学的研究である。タンザニア西部の半地溝域にある2つの有望地区 (Songwe と Kiejo-Mbaka) をケーススタディの対象とした主な研究成果は次の4点に纏められる。

- 1) 地熱システムを構成する主要岩石の透水性を見積もるために、ボーリングコアと露頭採取試料を用いて岩石物性を測定した結果、空隙率は $0.3 \sim 75.5\%$ 、浸透率は $10^{-19} \sim 10^{-14} \text{ m}^2$ の広い範囲にあり、いずれも凝灰角礫岩と縞状トラバーチンで高く、玄武岩とペグマタイトで低かった。浸透率は粒子充填度などの初生構造と粘土鉱物充填などの二次構造に支配されており、水質化学データとの組合せによって浸透率が高いゾーンは主に断層で形成され、 CO_2 に富んだ流体の上昇経路になっていることを明らかにできた。
- 2) 放射性同位体である ^{81}Kr と ^{36}Cl を用いた年代測定により地熱流体の滞留時間を求めたところ $0.23 \sim 1.39 \text{ Ma}$ の範囲にあり、Songwe 地区は Kiejo-Mbaka 地区よりも系統的に滞留時間が長いことがわかった。この傾向は ^{36}Cl 年代により Songwe 地区の貯留層体積が大きく、涵養に時間を要するという推定結果と調和した。
- 3) 水の水素酸素同位体と d-excess のデータから地熱流体の涵養域の標高は $1,400 \sim 2,400 \text{ m}$ の範囲にあり、重力データの逆解析による地下密度構造から高密度の貫入岩が熱源となり、半地溝での低密度域は熱水の流出経路に対応すると解釈できた。
- 4) 涵養地熱流体は深度約 2 km まで浸透し、それから断層に沿って上昇するが、その過程での水-岩石反応におけるマグマ水の寄与は限定的であること、Songwe 地区と Kiejo-Mbaka 地区には4つの貯留層が存在し、各地区での貯留層温度と自然熱エネルギーは $90 \sim 135^\circ\text{C} \cdot 4 \text{ MW}$ 、 $100 \sim 145^\circ\text{C} \cdot 5 \text{ MW}$ で総計は 35 MW であることが水質化学データの解析から推定できた。

以上、本論文での統合手法による地熱システム解明法の実用性と有効性は高く、地質構造が特異なリフトシステムでの地熱資源の探査と評価に貢献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8年2月19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

氏 名	NYORA DONALD KOBARE
-----	---------------------

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。