

持続可能開発目標達成支援事業（aXis）

Aタイプ研究分野「環境・エネルギー分野」

研究課題名「地熱生産井掘削地点特定用の蒸気スポット検出技術の

高精度化とボーリングによる実証」

相手国名：インドネシア共和国

終了報告書

研究期間

2020年4月1日から2022年3月31日まで

研究代表者：小池 克明

京都大学大学院工学研究科 教授

I. 国際共同研究の内容 (公開)

1. 当初の研究計画に対する進捗状況

(1) 研究の主なスケジュール

研究題目・活動	R2年度				R3年度			
	4～6月	7～9月	10～12月	1～3月	4～6月	7～9月	10～12月	1～3月
1. 蒸気スポット検出技術の高精度化・精緻化 1-1 亀裂分布の精緻化 1-2 Rn濃度分布解明 1-3 熱水・ガス分析 1-4 熱水流動系の推定 1-5 評価マップの作成	バンドン工科大学との合意に従い、インドネシア側で調査開始				解析追加 測定追加 試料と分析の追加 解析追加			
2. 高密度・高周波地磁気-地電流 (AMT) 探査による比抵抗分布解明 2-1 AMT探査の実施 2-2 比抵抗分布の3次元モデリング	2. 高密度・地磁気-地電流探査と電磁探査による比抵抗分布解明 MT探査を代行				MT探査データの品質向上とTEM探査実施 MTとTEM探査データを組み合わせた3次元比抵抗分布モデリング			
3. 探査ボーリングの実施と総合評価による開発技術の社会実装化 3-1 ボーリング実施と検層データ取得 3-2 鉱物・化学組成分析 3-3 温度圧力データ解析と蒸気スポットの位置の特定 3-4 社会実装に向けての試験結果の総合評価	10月中旬準備と2月末までの実施				10月中旬よりボーリング 全データの回収完了(3月上旬まで) 試料採取と分析(11月下旬～3月中旬まで) データ解析(11月下旬～3月上旬まで) 総合評価(1月中旬～3月下旬まで)			
機材導入 ○ ラドン濃度測定器 ○ 無人航空探査機 (ドローン)	本邦調達 2機種とも調達済・R3年9月中旬までITBに貸与中				R3年9月末までに京大に返却			
渡航活動 (令和3年9月上旬での状況)	打ち合わせ・調査開始 (6人・7日) 野外測定・分析 (4人・14日) AMT探査 (2人・14日) ボーリング開始 (4人・7日)				打ち合わせ・調査 (4人・7日) ボーリング調査分析・温度・圧力データ解析 (3人・14日) 研究打ち合わせ (3人・5日) 成果ワークショップ (3人・5日)			

- 黒の矢印はプロジェクト開始時の当初の予定，赤の矢印は令和3年度年次研究計画書提出（2021年1月末）時点での変更，青の矢印は2021年11月17日の再改訂を表す。
- 渡航活動の取り消し線は，新型コロナウイルス感染状況のために実施できなかったことを表す。オミクロン株による2022年1月中旬からの急速な感染拡大により，本報告書作成の時点で，令和3年度第四四半期での研究打ち合わせ渡航，およびインドネシアからの招聘により成果ワークショップも実施不可能な状況である。

(2) プロジェクト開始時の構想からの変更点(該当する場合)

プロジェクト全体に関する大幅な計画の見直しは行っていない。研究題目2については，初年度において，当初予定した高周波数帯域地磁気地電流 (AMT) 探査の実施は断念せざるを得ない状況となったが，代替手段として地磁気地電流 (MT) 探査と時間領域電磁 (TEM) 探査との組み合わせにより，当初予定を十分にカバーする成果が得られた。

ボーリング調査は一般競争入札実施に向けたカウンターパート側との調整と用地使用許可申請に予想外の時間を要し，仕様書は作成できたものに，予定の初年度には入札と調査実施に至らなかった。コ

ロナウイルス感染の深刻な状況がインドネシアで続いたため、令和3年度になっても入札に至るまで相当の時間が掛かり、2021年11月19日に工事請負業者が決まった。仕様書に記載の期日までの調査完了に向けて進行中である。

2. プロジェクト成果の達成状況とインパクト (公開)

(1) プロジェクト全体

研究代表者らはバンドン工科大学（以下、ITB と略する）と地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS) で研究課題「インドネシアにおける地熱発電の大幅促進を目指した蒸気スポット検出と持続的資源利用の技術開発」（課題番号 H26-01, 以下「SATREPS プロジェクト」と略する）を実施した。本 aXis プロジェクト全体のねらいとして、SATREPS プロジェクトにより開発された蒸気スポット検出技術による生産井掘削適地特定の高精度化・精緻化を図り、これを地熱資源探査の有効な手法として社会実装させることを目標とした。具体的には、蒸気スポット存在評価の精度と空間分解能を向上させるとともに、500 m 深度規模のボーリングを実施し、蒸気スポット存在評価の精度を検証する。そのための研究対象フィールドとして、バンドン盆地の南南西側に位置する Patuha 地熱地区を選定した。なお、SATREPS と aXis に共通して、プロジェクトの副題に BAGUS 「Beneficial and Advanced Geothermal Use System」を用いた。

SATREPS プロジェクトでの上位目標は「開発された技術の適用によって、地熱発電所の予定地における探査ボーリング掘削費が減少する」であり、これは蒸気スポットを高精度で特定できるか、に依る。本研究の実施により、SATREPS プロジェクト終了に続けて上位目標達成の見込みが立て、社会実装が図れることは投資効果と社会貢献の高い研究プロジェクトと位置付けられ、日本、インドネシアの双方にとって正に win-win の成果となる。本研究の成果が本格的に社会実装されれば、地熱発電開発の初期コストを少なくとも半減させる、すなわち生産井掘削の成功確率を少なくとも倍増させられると期待できる。

地熱資源は我が国において自給可能な資源であり、地熱発電は再生可能エネルギーで唯一ベースロード電源となり得る。本研究により地熱発電が大幅に促進されれば、「第 5 期科学技術基本計画」における政策目的「経済・社会的な課題への対応」の主要指標「自給率(エネルギー、食料自給率等)」を向上させることが可能となる。また、本研究で開発する蒸気スポット高精度検出技術は、高額の前倒しを必要としないため、発展途上国を含む世界中の地熱資源国に導入が可能である。さらに、主要指標「2050 年カーボンニュートラルの実現」という地球規模課題への対応と持続的発展可能社会の構築にも大きく貢献できる。

本研究の成果は地熱発電が占める発電割合を大きく増進させることに繋がるので、SDGs7「エネルギーをみんなに そしてクリーンに」と 13「気候変動に具体的な対策を」の実現に大きく貢献できる。仮に、地熱資源利用率の低い地熱資源国（特に米国、日本、インドネシア）における地熱発電量を現在（2016 年時点で設備稼働率を 54%と仮定したとき、それぞれ 17.01, 2.58, 6.63 GWh/y；資源エネルギー庁）の 2 倍にまで増産できれば、最も多く CO₂ を排出する石炭火力発電換算（943 g-CO₂/kWh；原子力・エネルギー図面集 2017）で、年間約 24.7 Mt-CO₂ の排出量削減が可能となる。また、本研究技術の社会実装化により、開発途上国におけるクリーンエネルギー開発の計画策定を強力に支援することも可能になる（SDGs13）。さらに、石炭採掘は大規模な地表削剥を必要とするが、これを大幅に減少させることで、SDGs15「陸の豊かさを守ろう」にも貢献できる。

下記に本プロジェクトで得られた主な成果を述べるが、(2) から (4) でも個々の研究項目に対する成果を補足する。新型コロナウイルス禍の影響でインドネシアへの渡航、現地フィールドでの調査・計測、インドネシアからの招聘が全期間を通じて全くできていないが、オンライン会議を駆使したインドネシ

【終了報告書】【210531】

ア側との密接な連携により、研究は進展・発展できている。すべての研究項目に京都大学（以下「京大」と略する）の若手研究者と大学院生が関与し、ITB 側と連携してきたので、研究の進展に伴って日本人若手人材の育成とグローバル化が展開できたと考える。新型コロナウイルス感染拡大の影響で、現地における直接的な調査・人的支援は実施できていないが、オンライン会議を活用して密な研究コミュニケーションを取り続け、共同研究を展開させることができた。これらは時限期間で完遂するものではなく、本プロジェクト終了後も継続が不可欠である。それを可能にするように、ITB との持続的な協力関係と共同研究体制を発展・構築させることに成功した。

➤ 蒸気スポット検出技術の高精度化・精緻化

項目 1-1 について、2020 年 12 月に ITB へのドローン輸送が完了し、2021 年 1 月にバンドン市内において実施したテストフライトの結果、1 画素当たりの解像度 5.55 cm の数値標高モデルの作成に成功した。しかしながら、研究対象の Patuha 地区で撮影するのに森林局によるフライト許可取得が難航し、最終的にボーリング掘削候補 2 地点周辺のみ 2021 年 9 月に撮影が可能になった。候補地点周辺の地形は詳細にわかったものの、Patuha 地区全体での亀裂分布を明らかにするために、インドネシア地理空間情報局による公開データ DEMNAS、および Geo Dipa Energi 社による LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) を用いた航空測量データを活用することにした。得られたリニアメント分布図からは、Patuha 地区北部での亀裂密集帯が温泉の位置に対応することが確かめられた。

項目 1-2 では 2020 年 7 月より計測井の掘削を実施し、9 月までに 17 箇所への設置が完了した。各計測井において約一か月間隔での定期的な Rn (ラドン) 濃度モニタリング測定を継続し、2020 年 12 月までに各点で 5~10 回程度のデータを取得した。測定結果から、温泉が分布する Patuha 地区北部で相対的に高濃度を示す傾向にあることが確認できた。

京大による現地調査は実施できなかったが、ITB チームにより、項目 1-3 で予定していた Patuha 地区における試料採取と計画した化学分析は完了している。ボーリング調査を通じて得られる試料は同様に ITB において分析を実施するが、熱水起源を確認するための一部追加分析については ITB では実施できないため、試料の国際輸送を順次実施する。京大側で分析を実施する学外共同研究機関（総合地球環境学研究所）における機器の利用が毎年度 2 月に終了するため、追加分析の一部は本プロジェクト終了後も継続して実施する予定である。加えて、SATREPS プロジェクトで取得した Patuha 地区での温泉水の地球化学データを再検討し、温泉水の起源や循環状態を推定した。

項目 1-4 に関しては断層分布を考慮しての温度・圧力分布のシミュレーションが可能になり、蒸気スポットの位置特定とリンクできるようになった。特に高温で蒸気が卓越する貯留層部を特定でき、熱水の流れも推定できた。シミュレーションによる温度・圧力の計算値は温度・圧力検層データとほぼ等しいので、シミュレーション結果の妥当性を確認できた。この成果は国際誌論文に取り纏め中である。項目 1-1・1-2・1-3 で示した超高解像度地形モデルに基づく亀裂分布、ラドン濃度分布から推定される透水性亀裂、および熱水・ガス化学分析による流体上昇域も計算では考慮し、細かい計算格子を用いることで、計算精度を向上させた。

上記 4 項目を統合する項目 1-5 では、2020 年 11 月時点で取得された 16 地点でのラドン濃度、12 地点での熱水・ガス化学組成、およびリニアメント密度の各データを用いたポテンシャルマップを令和 2 年度に予察的に作成した。これから、温泉が集中している Patuha 地区北部中央で比較的高い評価値を示す

ことが明らかとなり、この領域北部に蒸気スポットが存在する可能性が高いことが示された。令和3年度では、このポテンシャルマップに用いたリニアメント密度マップを、より高分解能な LiDAR 地形モデルから求めたマップに更新し、蒸気スポット存在度評価の精度を高めた。

➤ 高密度・地磁気－地電流探査と電磁探査による比抵抗分布解明

新型コロナウイルスの感染拡大に伴う渡航制限により、項目 2-1 で実施予定であった AMT 探査の実施が不可能となったため、代替手段として ITB チームにより Patuha 地区で MT 探査を実施し、15 地点において良好なデータを取得できた。また、概ね地表からの深度 100 m 以浅の浅部をターゲットとした TEM 探査も実施し、15 地点でデータが得られ、比抵抗分布の特徴を明らかにできた。さらに、地下浅部での比抵抗分布をさらに詳細なものとするために、Patuha 地区での TEM 探査を複数地点で追加実施し、データの取得・解析を行った。

項目 2-2 では上記 15 地点すべての MT 探査データの解析を実施し、3 次元的な地下比抵抗構造モデルを作成した。これから地下約 1000 m の深度に地熱変質層とみなせる低比抵抗層が存在すること、その下の一部地域では比抵抗の増大が認められており、地熱貯留層の存在が示唆されることが明らかとなった。さらに、地熱変質層・地熱貯留層は解析領域全体に渡って広がっているわけではなく、北部と南部の 2 つに別れて分布している可能性が高いことも明らかとなった。これらの特徴を、1-1 による亀裂分布や 1-2・1-3 による地球化学分析結果と組み合わせ、蒸気スポットの位置の特定を図ることが可能となった。

➤ 探査ボーリングの実施と総合評価による開発技術の社会実装化

調査の前準備として項目 3-1 では 1-1～1-5 の研究結果と 2 による比抵抗構造モデルより、蒸気スポットの存在可能性を地図化でき、ボーリング実施地点の候補 2 箇所を絞り込むことができた。また、国際コーディネーターを中心としたカウンターパート側との入念な打ち合わせの結果に基づき、ボーリング調査の仕様書を作成し、一般競争入札を経てボーリング掘削業者への委託が完了した。現地における掘削許可の取得、大雨に起因した道路崩落等による重機搬入路の修復、ボーリング台座設置の用地整備等にさらなる時間を要したが、2022 年 1 月末にようやく掘削調査が開始されるところである。

項目 3-1 の遅延に伴い項目 3-2・3-3・3-4 は未着手であるが、項目 3-2 で実施する各種分析の準備は完全に整っている。項目 3-1 の進捗に応じて試料の採取が開始されるので、順次 ITB チームにより分析を実施する。得られたデータは速やかに京大チームと共有し、共同でのデータ解析、得られた特徴の妥当性の検証を行う。また、項目 3-3 では前もって深層学習型ニューラルネットワークを応用して、温度検層データの外挿に適し、予測精度の高い手法を開発できた。これを応用することで、本項目の目標である「深度 2000 m までの温度と圧力推定誤差を 10%以内に抑えながら、蒸気スポットの存在の有無、およびその位置を±100 m の精度で特定する」を実現する。

以下に各研究題目の成果について詳述する。研究グループは一つであるので、以下の(2)～(4)の各要点は当グループに関する記載のみである。

(2) 研究題目 1 : 「蒸気スポット検出技術の高精度化・精緻化」

①研究題目 1 の当初の計画（全体計画）に対する当該年度の成果の達成状況とインパクト

項目 1-1 において、令和 2 年 12 月に ITB へのドローンの輸出・納品が完了し、令和 3 年 1 月に Irwan Iskandar 助教の研究室学生らにより、バンドン市近郊でテストフライトと撮影が実施された。図 1 に示すように撮影された画像から画素当たり解像度 5.55 cm という超高解像度の数値標高モデルの作成に成功している。令和 3 年度は対象地域全域の撮影を予定していたが、現地森林局からのフライト許可取得が遅れ、2021 年 9 月にボーリング掘削候補 2 地点周辺の撮影のみ実施することができた。このため、当初計画したドローン測量による Patuha 地区全体の超高解像度 DEM (Digital Elevation Model : 数値地形モデル) データの取得はできなかったが、その代替として共同研究機関である Geo Dipa Energi 社が航空機による LiDAR 測定を実施し、ドローン測量に相当する解像度約 1 m の DEM が得られた (図 2)。

令和 2 年度にはインドネシア地理空間情報局が公開している数値地形モデル「DEMNAS」を利用した亀裂分布解析を先行して実施しており (図 3)、令和 3 年度は LiDAR データを用いて同様の解析を実施した。DEMNAS-DEM よりも、LiDAR-DEM には Kawah Putih 火口の形状や谷地形などが明瞭に現れているのがわかり (図 2)、地形が詳細になったのでリニアメント抽出精度も向上した。次に、他データとの比較・統合がしやすいように LiDAR-DEM を 10m メッシュに変換した後に、リニアメント解析を行い、得られたリニアメント分布から 100 m メッシュでのリニアメント密度マップを作成した。その結果、密度が大きい部分は領域北部での温泉の密集部と重なることなどを確認できた (図 4)。さらに、リニアメント密度マップを他のデータと統合することで、実施項目 1-5 の蒸気スポットポテンシャル評価マップを作成できた。

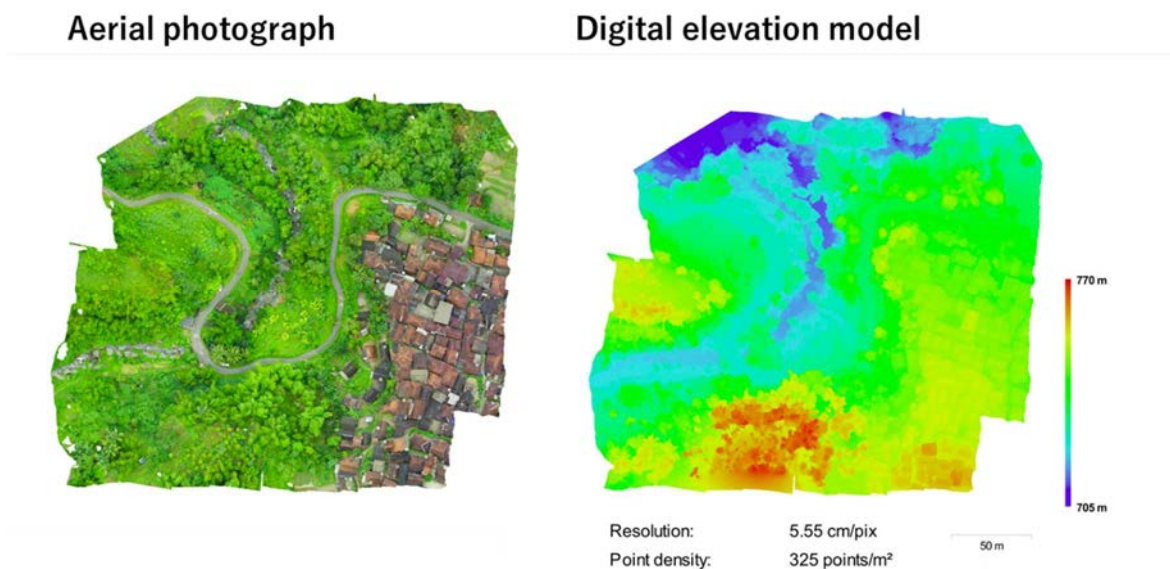


図 1 バンドン市近郊(Cibatuhideung)におけるドローン写真(左)と作成された数値地形モデル(右)。数値地形モデルの解像度は画素当たり 5.55 cm である。

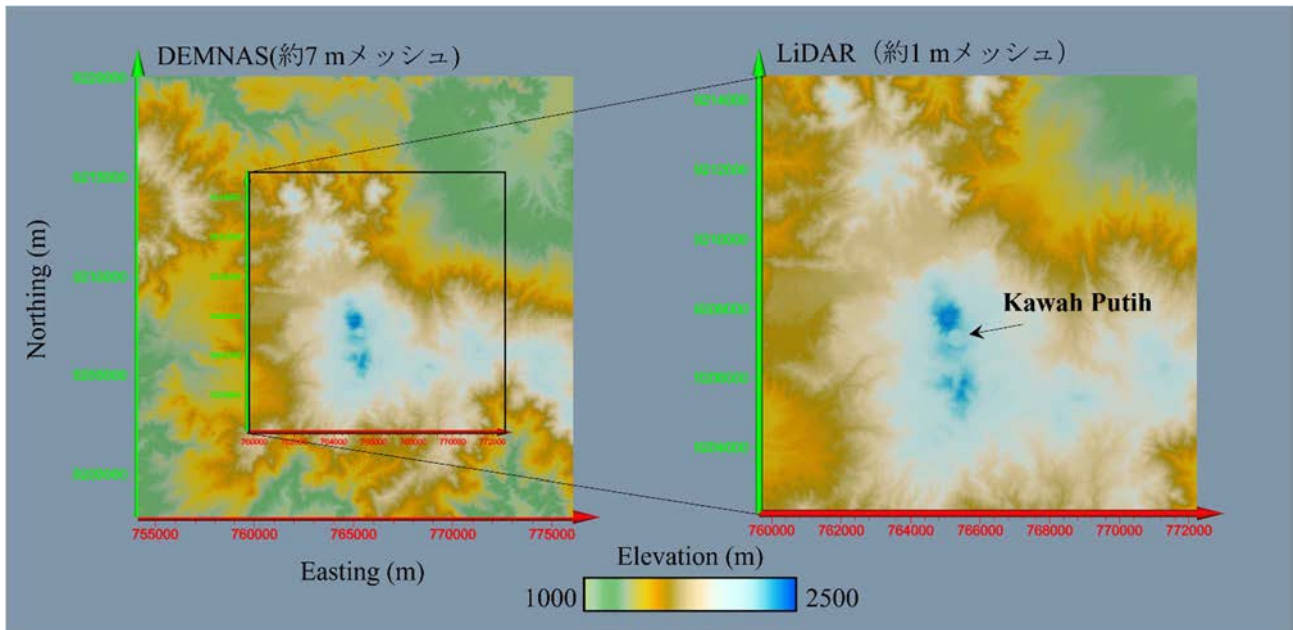


図2 Patuha 地域の DEMNAS 地形モデル (左上) と LiDAR 地形モデル (右上) の比較。現地地形の一例として、プランテーションに利用されている谷地形 (左下) および火口湖であり、クレータ地形である Kawah Putih (左下) を示す。

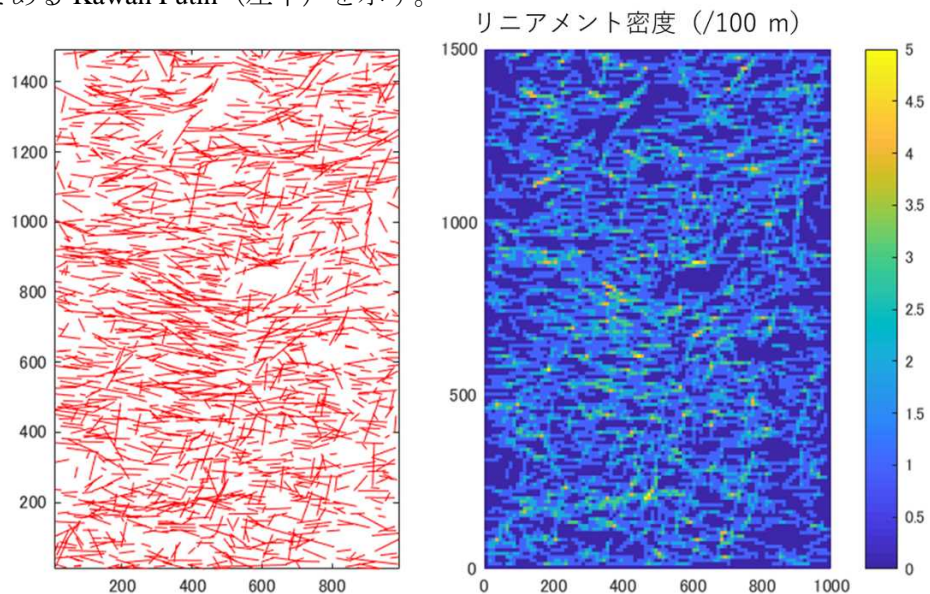


図3 10 m メッシュの DEMNAS 地形モデルを用いた Patuha 地区のリニアメント分布図 (左) と 100 m メッシュでのリニアメント分布密度マップ。

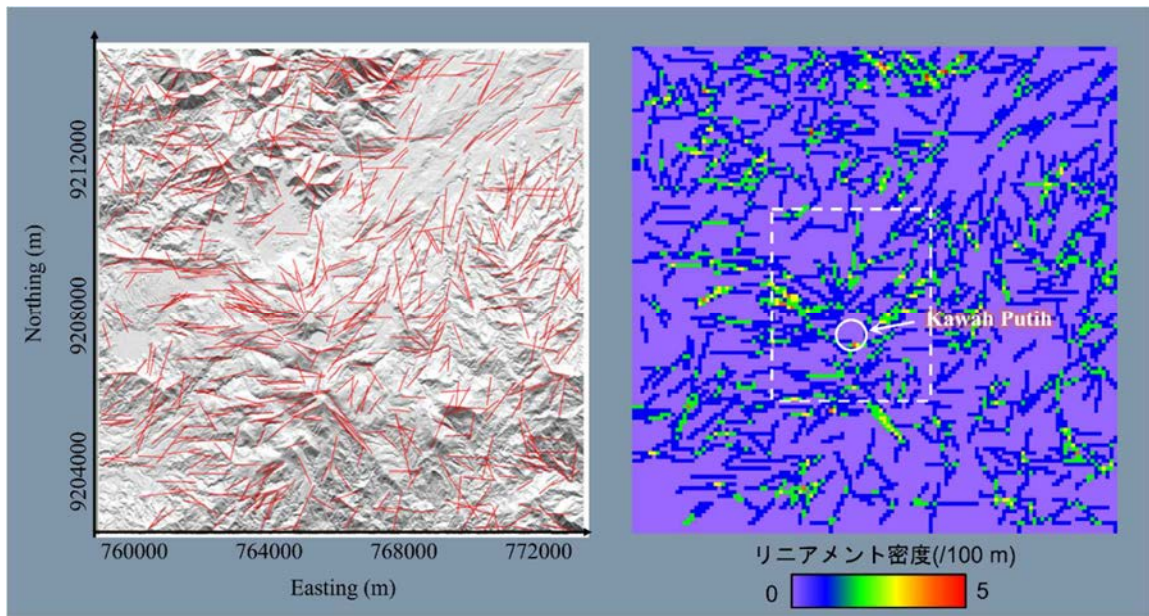


図 4 10 m メッシュ変換の LiDAR 地形モデルを用いた Patuha 地区のリニアメント分布図（左）と 100 m メッシュでのリニアメント分布密度マップ。

項目 1-2 について、2020 年 7 月から 9 月にかけて表層ボーリングを掘削し、計 17 箇所（既存 4 点・新規 13 点）に深度約 2 m の計測井を設置した。その後、本プロジェクトの前身となる SATREPS プロジェクトで導入した ITB 所有のラドン計と水銀計を用いて各計測井でのガス中のラドン濃度、水銀濃度のモニタリング測定を行った。2020 年 12 月からは、本プロジェクトで導入したラドン計も併用している。

図 5（左）に示すように、Patuha 北部の測点において比較的ラドン濃度が高い測点が集中していることがわかる。これは、検証用ボーリング掘削地点の選定に有効な情報となる。また、特に高濃度を示す TTN-03 は、図 5（右）に示すようにラドン濃度の時間変化が高濃度で安定するパターンを示しており、この測定での蒸気の上昇量が多く、地下深部から継続的に供給されている可能性が高いことが SATREPS プロジェクトの成果からわかっている。ただし、全体的なラドン濃度は SATREPS プロジェクトでテスト・フィールドとした Wayang Windu 地熱地区と比較して低い傾向にある。水銀濃度測定では、一部の計測井でラドンとともに高い濃度を示す場合もあったが、Wayang Windu 地区における計測結果と同様に、全体としてはラドンと水銀濃度の相関性は小さい。

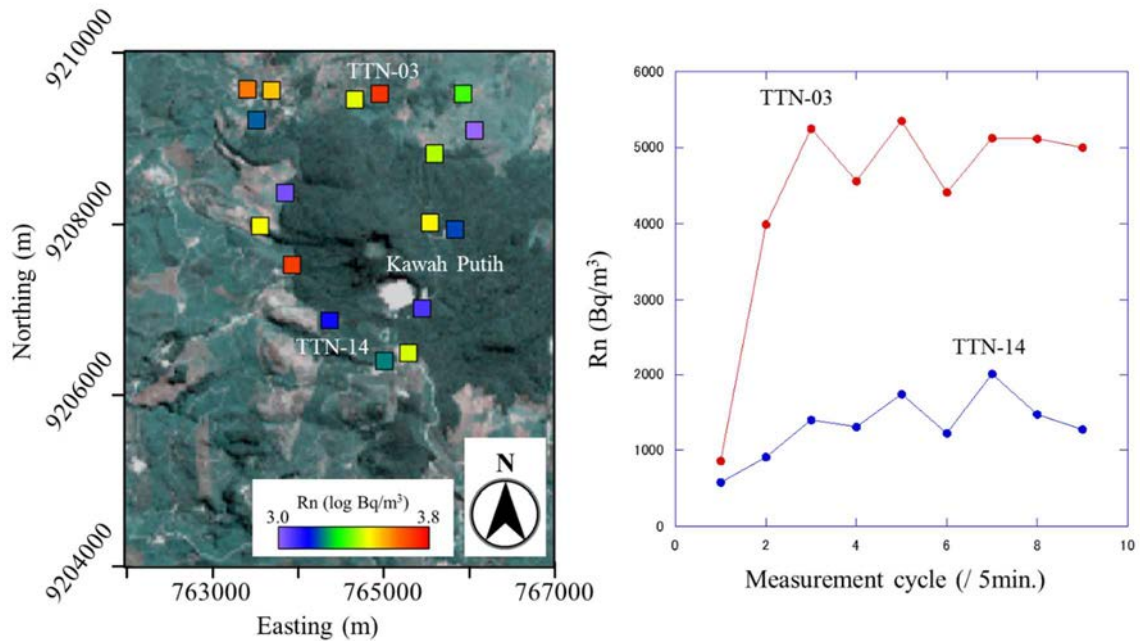


図5 Patuha 地区におけるラドン濃度測定結果。(左) 17 箇所の計測井でのラドン濃度分布 (2020 年 9 月) と (右) 代表的な 2 測点でのラドン濃度の時間変化パターン。右の写真は表層ボーリングによるラドン濃度測定用の計測孔の例を表す。



項目 1-3 では、SATREPS プロジェクトで取得した Patuha 地区における試料の分析を進めた。これまでに得られている分析結果に基づき、地熱流体の上昇、側方流動などの流動状態や地質構造の関係を解釈した。これに加えて Patuha 地熱地区の 16 箇所から熱水試料を採取し、地化学分析を実施した。インドネシアへの渡航が制限されたため、この採取と分析は ITB チームのみで行った。

結果の一例として、主要陽イオン・微量元素濃度の分析結果を対象に主成分分析を行った結果を表 1 に示す。全 41 変数に対して、第 1 主成分と第 2 主成分の累積寄与率は 83 % を示した。第 1 主成分は希土類元素やホウ素、アルミニウムなどで負荷量の絶対値が大きく、第 2 主成分は主要陽イオンや Rb で負荷量の絶対値が大きいという特徴をもつ。両主成分を X 軸、Y 軸として各試料をプロットすると、2 測点 (Kawah Cibuni と Kawah Putih) は第 1 主成分が負となる特異的なパターンを示し、その他の試料は Patuha 地区において北側で採取されたもの (第 2 主成分は正) と南側で採取されたもの (第 2 主成分は負) とに分けられた (図 6)。

試料間の距離をユークリッド距離として求め、相互の位置関係を階層的クラスター分析 (ウォード法) により図示した (図 7)。全試料は大きく南側 (C1) と北側 (C2) との 2 つのクラスターに分類できる。Kawah Cibuni と Kawah Putih は C1 の中で亜群 (C1') を形成しているが、特に主要陽イオン濃度など第 2 主成分構成因子において、他の C1 構成試料と近い距離を示す。C2 は比較的高い主要陽イオン濃度と 0 % に近いイオンバランス値とで特徴付けられる。一方、C1 のイオンバランス値は 0 % からかけ離れており、特に C1' においては極端に高い陰イオン (SO_4^{2-} や Cl^-) 濃度により特徴付

表 1 各試料の主要陽イオン・微量元素濃度の主成分分析結果。全 41 変数に対する各主成分の固有値、寄与率と累積寄与率から、第 1・第 2 主成分のみで全情報量の 83 %が説明付けられる。なお、分析にあたり、検出下限以下の成分濃度は便宜上ゼロとして扱っている。

	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分
固有値	27	7.2	3.4	1.3
寄与率 (%)	65	18	8.3	3.1
累積寄与率 (%)	65	83	91	94

けられる。C1 は Patuha 地区での蒸気卓越型貯留層の直上に位置すると考えられるため、地下深部における流体が貯留層の熱により高温の蒸気となって地表付近まで達していると解釈できる。高温蒸気として供給されるために δD と $\delta^{18}O$ 値はいずれも蒸発効果の影響を受け、ガス体として供給される H_2S や HCl のみが高濃度で地表付近にまで到達する。その一方で、蒸気には含まれない主要陽イオン濃度は低い値を示す。上述した C1 のイオンバランス値異常は、Al 濃度や Fe 濃度によって補完される。これら金属元素の溶解度は溶媒の pH 値が中性付近で極小となるため、C1 は酸性の蒸気そのもの、あるいは同蒸気によって地表付近で加熱された表層水または地下水によって構成されていると考えられる。

一方、貯留層温度の低下する北側に分布する C2 では、地下深部で熱せられた天水起源の地下水が熱水として地表付近まで上昇するため、主要陽イオンに比較的富んだ地下起源の化学組成を示すことになる。C1 と比較して Al や Fe が枯渇した C2 では、すべての試料が中性蒸気によって加熱されたと考えられる。先行研究により、C1 と C2 の近傍に多くの断層が存在することが報告されている。この断層がバリアーとなって Patuha 地区の南北における地下水流動を阻害し、2 つのクラスターを形成する要因になっていると考えられる。

加えて、温泉水に含まれるハロゲンの起源が天水、海水、マグマ水であると仮定して、これらの混合割合を推定した。北部の温泉水では天水の混合割合が高いのに対し、Kawah Putih のクレータで採取された水試料では相対的に海水およびマグマ水の混合割合が高いことが示唆された。このうち、塩素放射性同位体を用いて推定された海水の滞留時間から、海水は深部の海成堆積層から供給されているものと考えられた。現状の地化学分析結果のみでは温泉水の起源を完全に推定することは困難であることから、ハロゲンの追加分析を実施して温泉水の起源と地下水循環状態の復元を今後行う予定である。

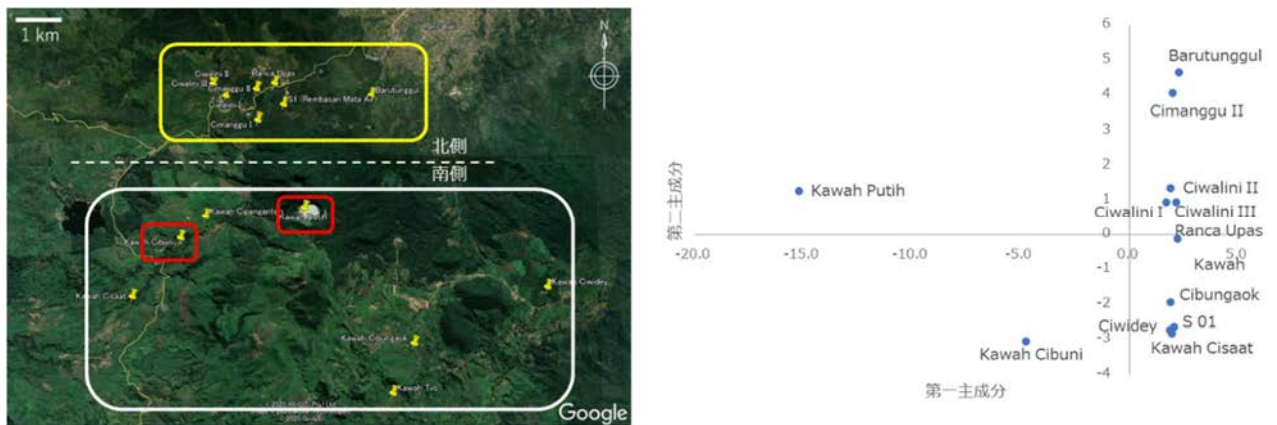


図 6 各試料における第 1・第 2 主成分得点 (右)。Kawah Cibuni と Kawah Putih の 2 測点 (左図赤色箇所) のみが負の第 1 主成分得点 (それぞれ-4.7, -15) を示し, その他の測点 (第 1 主成分得点は 1.7~2.3) は, 第 2 主成分得点が正の値を示す北側 (左図黄色箇所) と負の値を示す南側 (左図白色箇所) とに区分される。

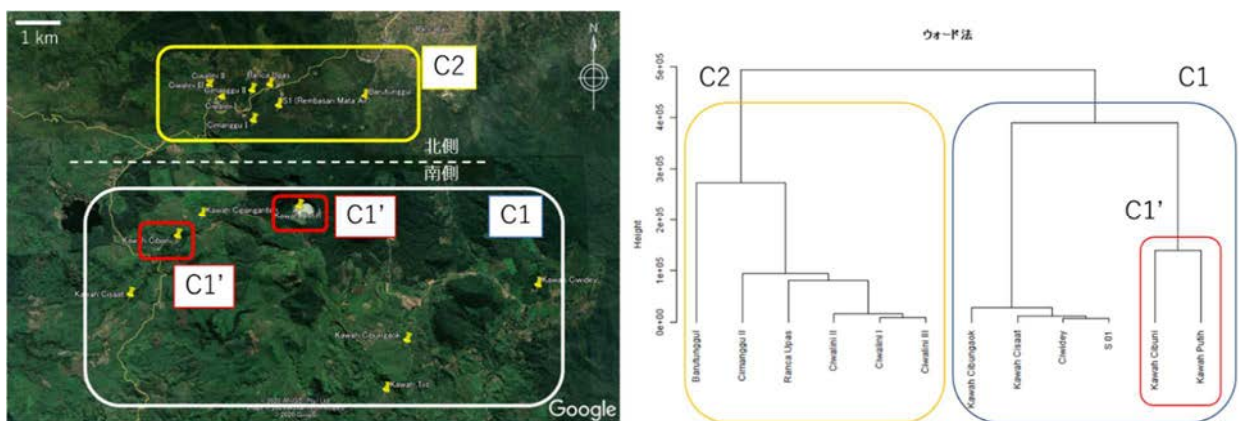


図 7 各試料のクラスター解析結果を表す樹状系統図 (右)。図の縦軸は各試料間のユークリッド距離を示し, より高い位置の分岐ほど試料群間の距離が遠く, 関係性が小さいことを意味する。各試料は大きく分けて C1 (Cluster 1) と C2 (Cluster 2) に所属し, C1 には亜群として C1' が含まれる。C1 は南側, C2 は北側の試料から構成されていることがわかる (左)。

項目 1-4 において, 熱水流動シミュレーションでは熱水の上昇経路となる断層, および貯留層の上部を覆い, 流体の高温化に寄与する不透水層であるキャップロックの分布が重要な要素になる。Patuha 地区での地質柱状図データと地表調査結果から, 断層分布形態, およびキャップロックの位置と広がり方を推定し, これらの分布を正確に考慮できるようにボロノイ状のセルで対象領域を分割した。自然状態に対する温度と圧力のシミュレーション結果を図 8 に表す。これから貯留層内で特に高温で蒸気卓越部が形成されていることがわかり, 熱水の広域的な流動形態も把握できる。シミュレーションによる温度・圧力は温度・圧力検層データとほぼ等しいので, シミュレーション結果の妥当性を確認できた。このように, 断層とキャップロックの分布形態を詳細に考慮しての温度・圧力分布のシミュレーションが可能になり, 蒸気スポットの位置特定とリンクできるようになった。

さらに, 主に CO₂ を主成分とする非凝縮性ガス (Non-condensable Gas : NCG) の濃度分布を計算した。NCG は塩化物イオンを含む熱水と天水との深部混合によって生じるので, 熱水の起源となる天

【終了報告書】【210531】

水が多く涵養され、それと上昇する熱水とが混合することで NCG 濃度が高くなると考えられる。よって、NCG 濃度が高く、温度が高い地点ほど熱水上昇と涵養とのバランスが取れているので、生産井の設置に適しており、長期間にわたっての発電が可能になる。計算結果を示す図 9 より NCG の高濃度部は断層の西部と東部に位置しており、特に Kawah Putih クレータの西側の高濃度部は図 8 からわかるように Patuha 地区で最も高温域に相当する。この地熱資源ポテンシャルの高い領域に、後述するようにボーリング調査地点 TCH-A を設けている。これらの成果は国際誌論文として纏めており、早期投稿を目指している。

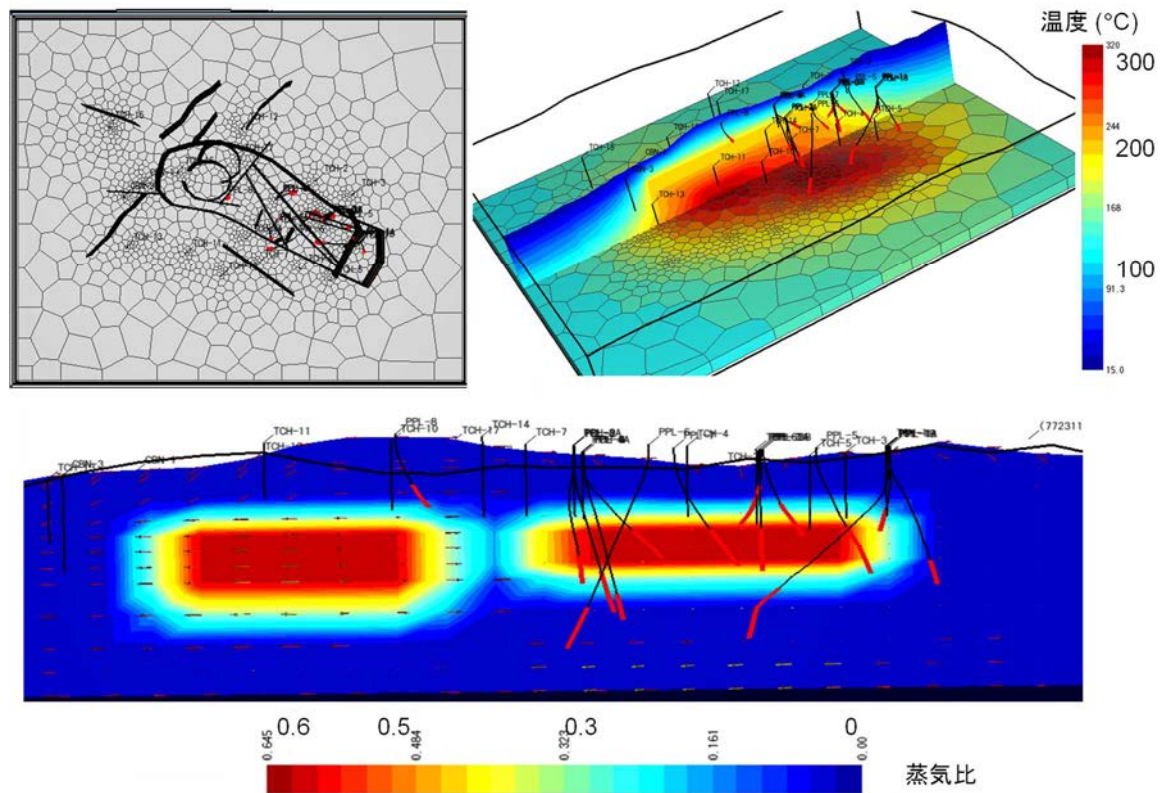


図 8 自然状態に対する熱水流動のシミュレーション結果。左上図の黒色の帯は推定した断層を表す。下図の蒸気比により、蒸気比が特に大きな部分に蒸気スポットが形成されていると考えられる。

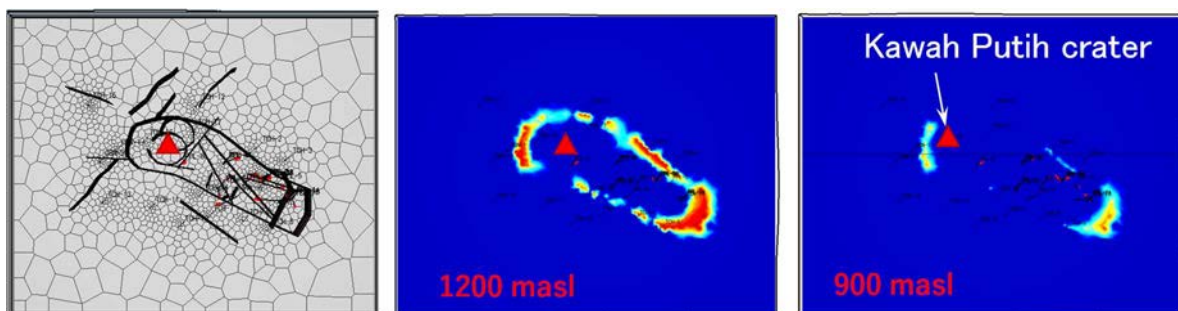


図 9 非凝縮性ガス濃度分布の計算結果。青色から赤色にかけて濃度は増加する。masl は海面からの標高を表す。▲はクレータである Kawah Putih の位置を表す。

さらに、Sentinel-1 合成画像データの差分干渉処理を行い、2014 年 11 月から 2017 年 2 月までの 2

年3ヶ月にわたる地表変位を求めた。変位を上下方向（すなわち地表の上昇と沈降）と水平東西方向に分解し、変位が大きく変化する箇所を前述のリニアメント抽出法を応用してマッピングした。このような箇所は、主に断層で区切られた地質ブロックの境界に位置し、隣り合うブロック間の変位が不連続になることから地質の破碎度が大きく、透水性が高いと解釈できる。よって、天水の下降域、あるいは熱水の上昇域を形成する。天水の下降域であれば地下の温度は低下するので生産井の設置には適さない。前述のようにラドン濃度は熱水の上昇の活発さと関連するので、ラドン濃度が高いことが生産井設置の条件となる。そこで、上下方向・水平東西方向の変位の空間変化とラドン濃度を組み合わせ、透水性の評価マップを作成した。組合せには、ベイズ統計に基づく証拠加重法（Weight of Evidence : WoE）を用いた。その結果を示す図10において、寒色系が低透水性、暖色系が高透水性を表す。これからNCGの高濃度部であったKawah Putihクレータの西側（図9）において、高透水性が推定されている。よって、全く独立した解析からも同様の結論が導けることがわかり、地熱資源ポテンシャルが高く、生産井設置に適した場所が絞り込めるようになる。なお、図9と図10は当初予想していなかった結果である。

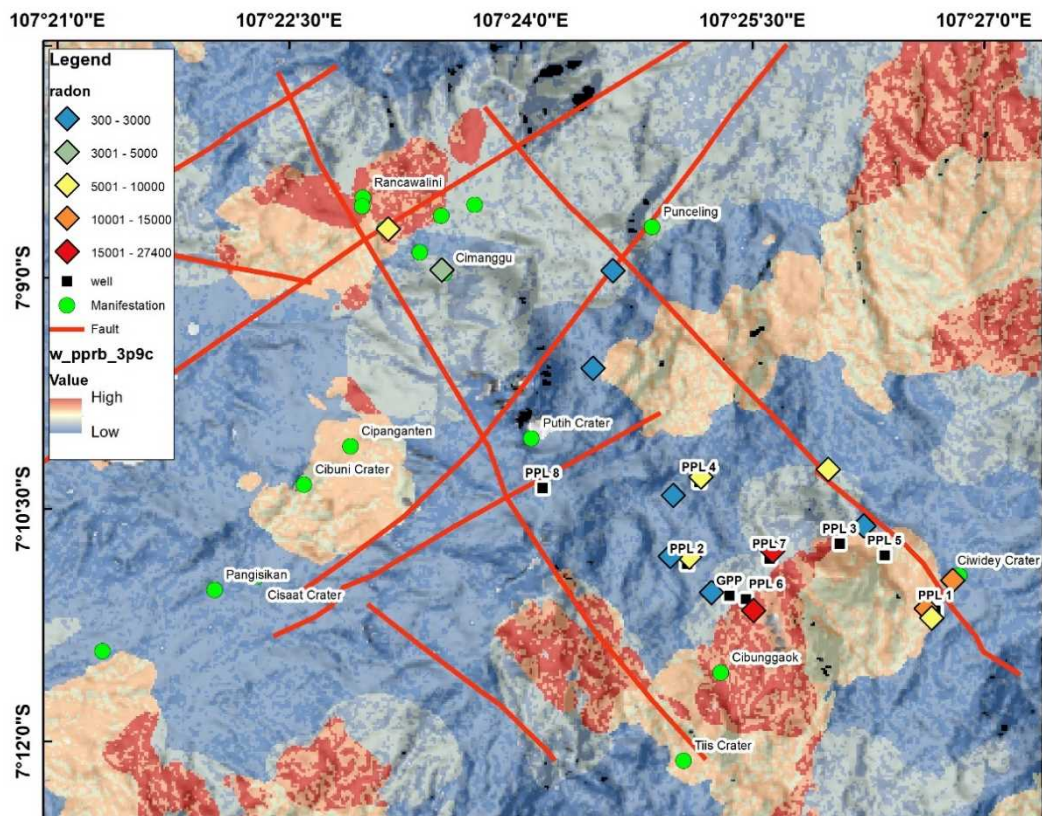


図10 Sentinel-1 合成画像データの差分干渉処理による上下方向・水平東西方向の変位の空間変化、およびラドン濃度の WoE を用いた組み合わせによる透水性評価マップ。寒色系が低透水性、暖色系が高透水性を表す。

項目1-5については、令和2年度に実施した16箇所でのラドン濃度測定データ、12箇所での地球化学分析データ、DEMNASによるリニアメント抽出結果を統合し、蒸気スポットの存在ポテンシャル評価マップの作成を予察的に行った（図11）。ラドン測定・地球化学分析のデータ取得箇所は図5

(左)に示すとおりである。評価値は Wayang Windu 地区での解析結果を参考に、ラドン濃度、Al・B・Cl・SO₄各化学成分濃度、リニアメント密度を用いた。解析範囲は、南北5km×東西4kmで、解像度は100mである。この推定結果から、北部の高ポテンシャル領域、南部の低ポテンシャル領域に区分できることがわかった。

令和3年度では、リニアメント密度を新しく取得されたLiDARデータによる結果に変更し、ラドン濃度測点1点を追加して、ポテンシャルマップを更新した(図12)。新規ポテンシャルマップでは、北部が高ポテンシャル、南部が低ポテンシャルという特徴は令和2年度のものと同じであるが、特に高い値を示す領域は北部中央付近に集中している。また、領域西部中央付近に、令和2年度版には見られなかった高ポテンシャル領域を確認できる。

この評価マップに基づき、現地の土地利用状況やアクセスの利便性に依る現地でのボーリングの実行可能性を考慮して2箇所のボーリング地点TCH-AとTCH-Bを選んだ。これらの地点の現地状況を図13に示す。TCHは温度検層を実施するボーリング Temperature Core Holeの意味である。Patuhaは山岳域であり、道路も整備されていない場所が多く、大雨で崩壊して通行止めになっている箇所が存在する。ボーリング実施の際には重機やボーリングコア等をトラックで頻りに運ぶので、幅広く、堅硬な道路が安全確保のため不可欠である。ボーリングでは泥水を孔に循環させて掘進するが、そのためにボーリング地点の周囲に水が確保できることが条件になる。また、Patuhaは主に森林で覆われ、その中に紅茶やコーヒーのプランテーションが広がる。森林域では森林局、プランテーションでは経営者の許可が不可欠である。保護林に近い場所に対しては半年掛ける環境影響評価も森林局から求められる。これらの3条件：ボーリング地点へのアクセス、水の確保、用地使用許可のしやすさを考慮した結果がKawah Putihクレータの西側のTCH-Aと領域北部のTCH-Bである。

TCH-Aは周辺のラドン濃度データの不足から中程度の評価値ではあるが、この3条件を満たすとともに、高い評価ゾーンに隣接すること、および上記のNCG高濃度と浅部高透水性を考慮して選定した。TCH-A周辺において、ラドン濃度の追加測定を2022年1月下旬～2月上旬に行った。そのデータを追加することでポテンシャルマップを更新する。TCH-Bは領域内で最も高い評価値ゾーンに位置する。図13からわかるように、TCH-Aはプランテーション、TCH-Bは森林に位置し、それぞれの標高は2165m、1810mである。いずれも700m程度の距離に水源があるので、ボーリング実施可能な位置である。

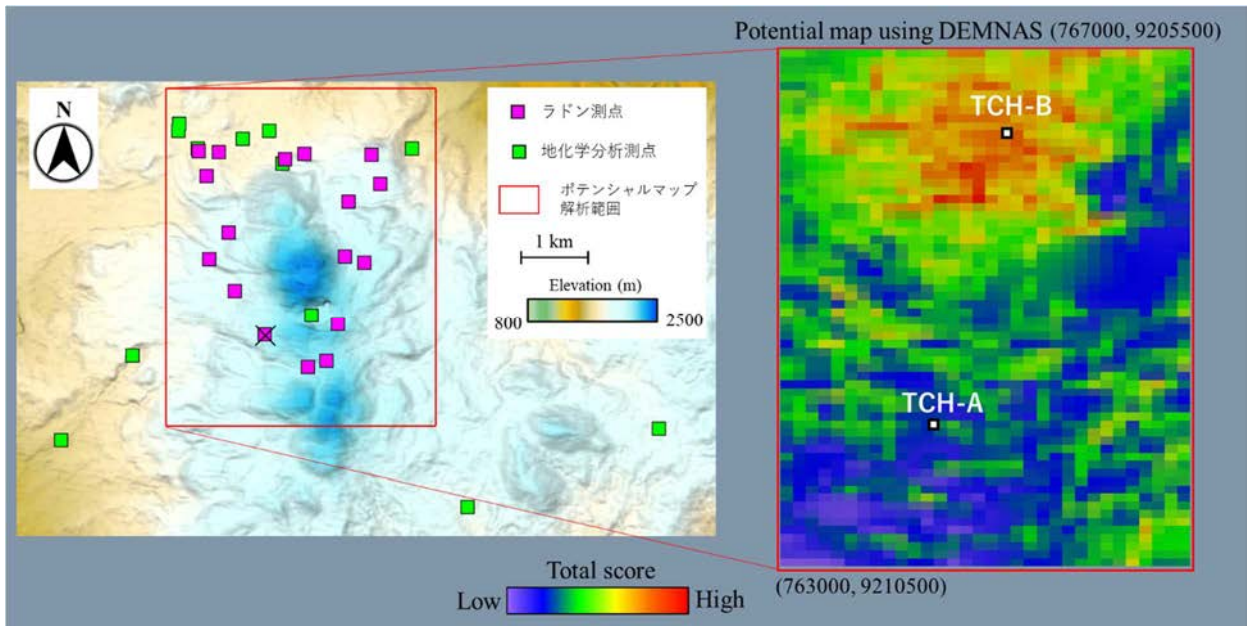


図 11 令和 2 年度の蒸気スポットの存在ポテンシャル評価に用いた各計測データの分布と解析範囲 (左), ポテンシャルマップ (右) は DEMNAS モデルによるリニアメント解析結果を使用している。解像度は 100 m×100 m である。

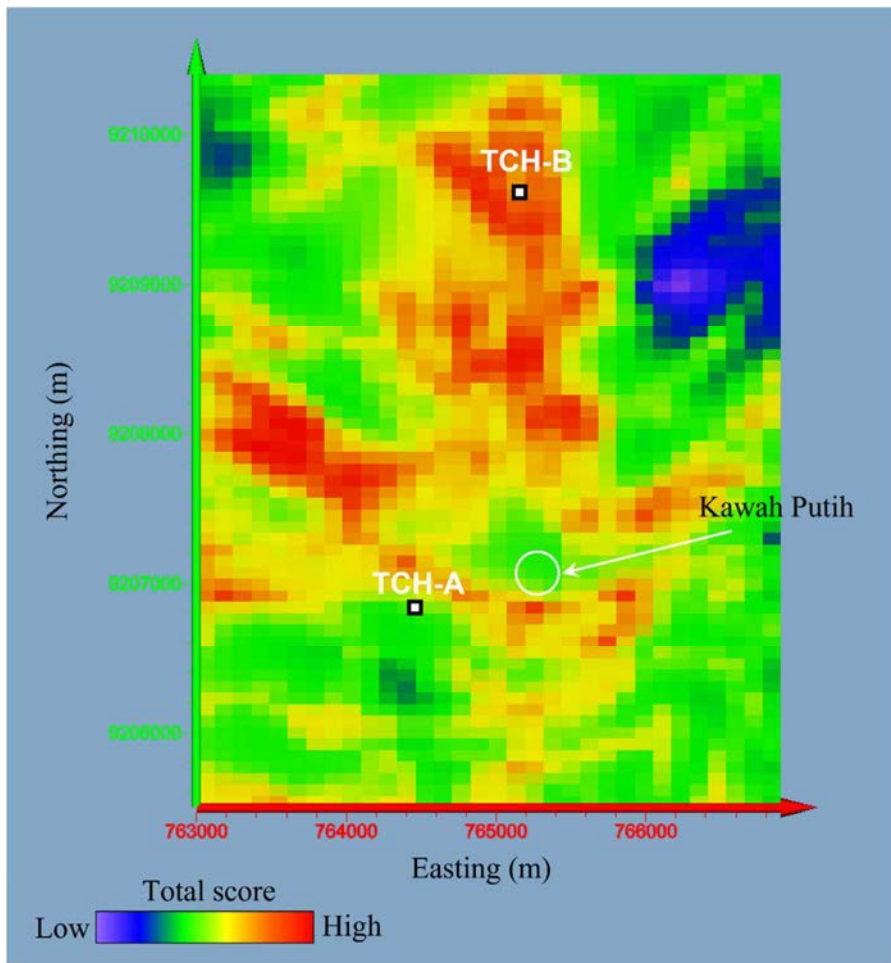


図 12 LiDAR データと 17 点のラドン濃度測定結果を用いたポテンシャルマップ。その他の地球化学データや解像度・解析範囲は令和 2 年度と同一である。

②研究題目 1 の当初計画では想定されていなかった新たな展開

項目 1-1 では上記成果に加え、京大チームで Patuha 地区北西部の Hyperion 衛星画像を用いた解析を実施した。Hyperion 衛星画像は現在利用できる唯一のハイパースペクトル画像である。熱水や蒸気による土壌の酸性化に起因して植生のストレスが高い箇所、およびカオリナイトに注目しての熱水変質鉱物が顕著に生成されている箇所は、地熱兆候地や断層の分布と調和的である。TCH-A と TCH-B とともにカオリナイト分布域に位置する。よって、Patuha 地区においても亀裂分布の推定や熱水変質鉱物の形成が蒸気スポットの検出に有効であることを確認できた (図 14)。項目 1-3 からは、Patuha 地域における熱水の化学的性質を地理的に区分できることが示唆された。当該地域での浅部の地下水流動を含む熱水流動系を解明できれば、地熱発電のみならず、地域における水資源管理の上でも貢献が期待できる。

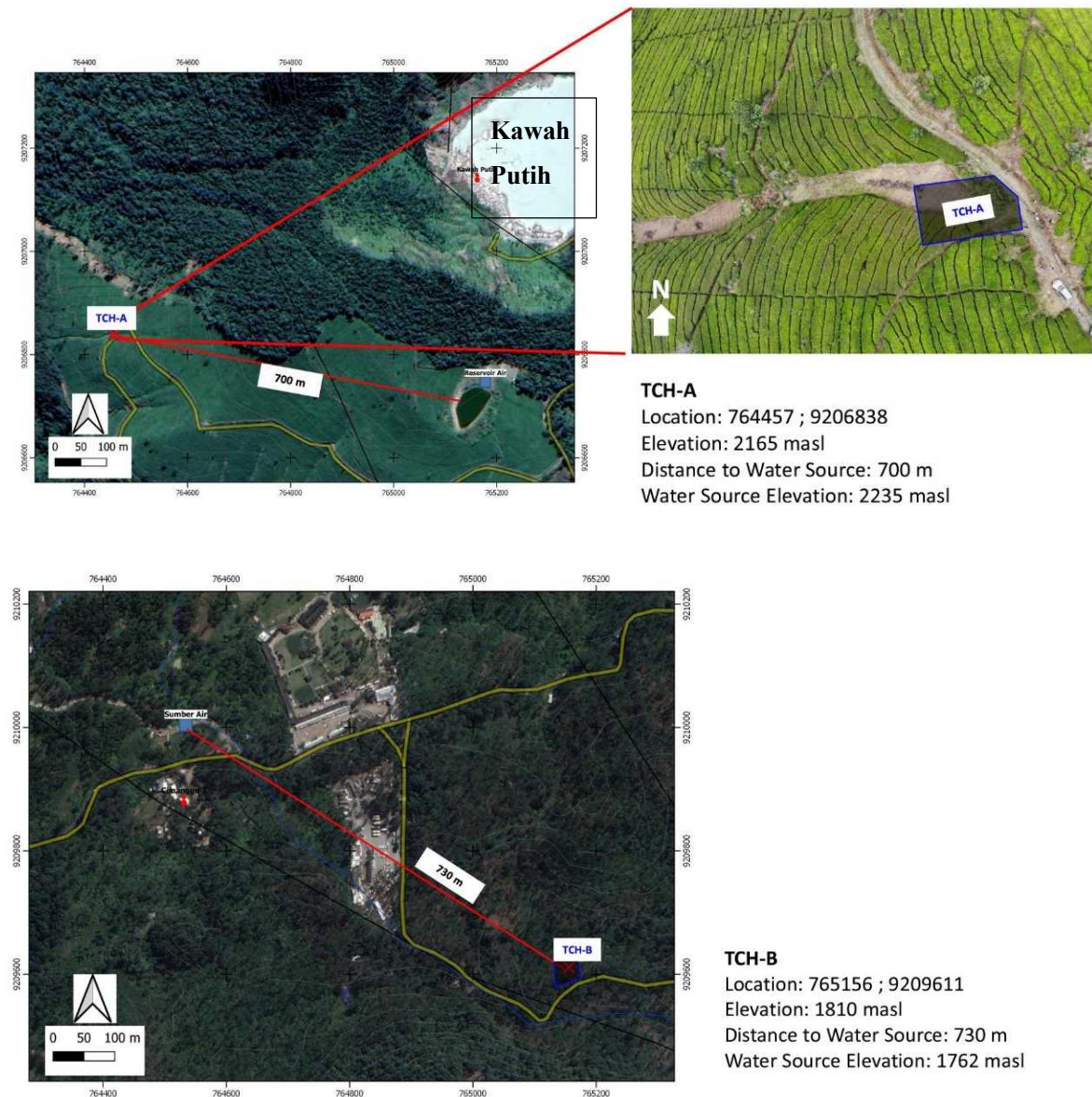


図 13 衛星画像による調査候補地 TCH-A (上) と TCH-B (下) の現地状況。ドローンによる空中写真 (右上) から明らかなように TCH-A はプランテーション内にあり、TCH-B は林の中にある。画像中の数値は水源までに距離を表す。

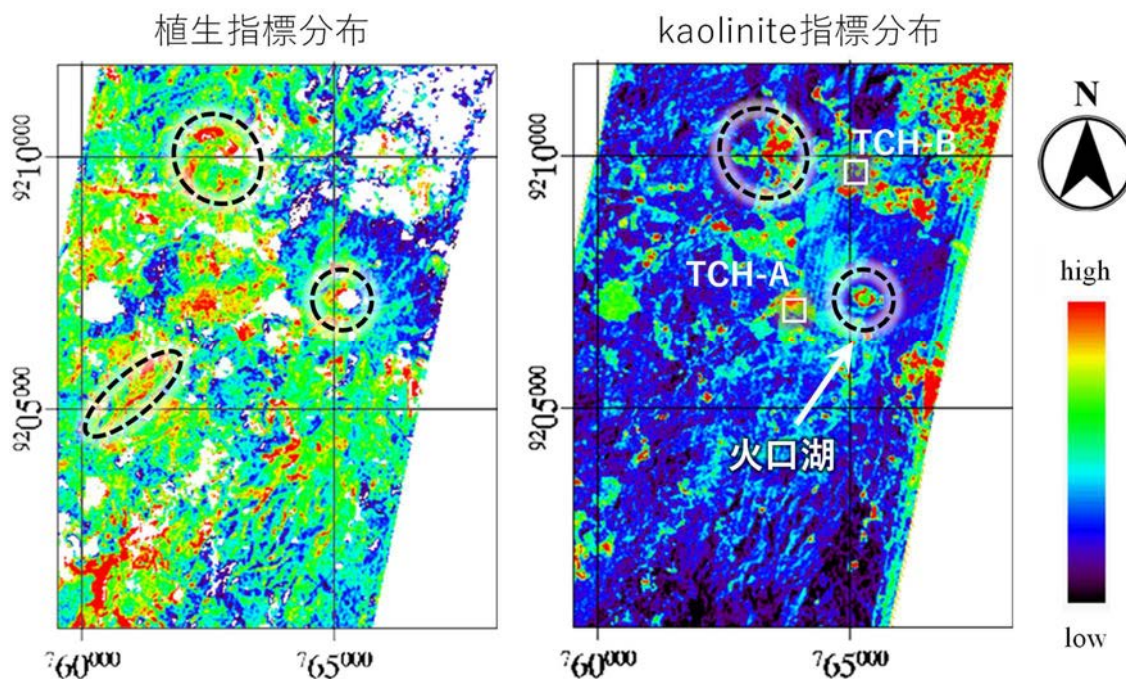


図 14 ハイパースペクトル画像 (Hyperion) の線形分離法に基づく植生指標分布 (左) と kaolinite 指標分布図 (右)。暖色系ほど、左図では地熱の影響などにより植生のストレスが高いこと、右図では代表的な熱水変質鉱物であるカオリナイトの分布が顕著であることを意味する。黒の破線は温泉や噴気帯などの既知の地熱兆候点と各指標の対応する箇所を表す。左図での白色部分は非植生域、火山湖は Kawah Putih である。TCH-A と TCH-B とともにカオリナイト分布域に位置する。

③研究題目 1 の研究のねらい (参考)

現地調査に基づく亀裂分布・地化学・数値計算の結果を組み合わせることにより、蒸気スポットの存在ポテンシャル評価を精緻化する。

④研究題目 1 の研究実施方法 (参考)

1-1 【亀裂分布の精緻化】無人航空機 (ドローン) を用いて 0.5 m メッシュ間隔という超高空間分解能の地形モデル (DEM) を作成し、これからリニアメントを抽出することで地下での亀裂の 3 次元分布形態 (方向, 長さ, 面積, 交差状態など) を推定する。これとリモートセンシング技術による熱水変質帯の抽出技術と組み合わせ、流体パスの可能性の高い亀裂を特定する。

1-2 【Rn 濃度分布解明】特定された亀裂分布域において、地表から 3 m 程度の表層ボーリングを 20 箇所程度掘削し、ガス中のラドン濃度計測とガス組成分析を実施する。

1-3 【熱水・ガス分析】噴気帯, 温泉等から熱水・ガス試料を採取し, 安定同位体比, 主要イオン濃度, 微量元素濃度の分析により, 貯留層の温度と流体の起源を推定する。

1-4 【熱水流動系の推定】数値シミュレーションにより, Patuha 地区全域での熱水流動系を推定するとともに, 貯留層内で高温の蒸気卓越部を特定する。

1-5 【評価マップの作成】1-1~1-4 の結果を地球統計学の応用によって点から面のデータに変換し, これらを統合することで, 100 m 程度の空間分解能で蒸気スポット存在ポテンシャルの空間分布を明らかにする。

(3) 研究題目 2 : 「高密度・地磁気ー地電流探査と電磁探査による比抵抗分布解明」

① 研究題目 2 の当初の計画（全体計画）に対する当該年度の成果の達成状況とインパクト

項目 2-1 においても新型コロナウイルス感染拡大の影響で、当初予定した 2020 年 9～10 月での京大・ITB チームでの共同測定が実施できず、AMT 機器のインドネシア持ち込みもできなかった。その対策として、Geo Dipa Energi 社が MT 探査を実施し、これによるデータ解析と比抵抗の 3 次元分布の解明を京大・ITB チームで実施した。MT 探査は AMT 探査よりも深度 100 m 以浅の空間分解能は低いですが、より深部までの比抵抗構造を推定できるというメリットがある。MT 探査は多くの地点で実施されたが、データの一部を確認したところ、良質な電磁場データが得られていることが確かめられた。

取得された MT 探査データのうち、地表の熱水噴出地域（噴火口）周辺を含む 15 地点で得られたものについて、データ解析を実施した結果、周波数約 400 Hz～0.001 Hz の広帯域において、大地のインピーダンス、および見掛比抵抗・位相などの MT 応答関数を算出することができた。さらに、これらの 15 地点では、概ね地表から 100 m 以浅を対象とした TEM 探査も ITB チームにより実施している（図 15）。これらについても解析を行い、上記の MT 応答関数との対比が可能になった。



図 15 MT と TEM 探査データの取得地点（丸印：1～15）。

項目 2-2 について当初は、蒸気スポット存在の高評価域を対象とし、50 地点ほどで AMT 探査を実施する予定であった。しかしながら、2-1 に示したように AMT 機器の現地への持ち込み、および京大・ITB チームでの共同観測は実施できなかった。このため、Geo Dipa Energi 社が実施した MT 探査データに対して、3 次元地下構造解析を行うこととした。

次に、15 地点の MT 探査データを用いて、各地点・各測定周波数での大地のインピーダンス（回転不変量 Z_{ssq} ）を求めた。この Z_{ssq} から計算される見掛比抵抗・位相を利用して、各観測点の直下

の比抵抗構造を解析した。ここでは各地点では地下は1次元構造（水平成層構造）であると仮定し、Niblett-Bostick 変換を用いて見掛比抵抗・位相を比抵抗・深さの関数に変換した。このようなステップで得られた各地点の1次元構造を滑らかに繋ぎ合わせることで、擬似的な3次元地下比抵抗構造を作成した。その結果、地下約数百 m～1000 m の深度には地熱変質層とみられる低比抵抗層（3 Ω m 以下）が広がっている様子が明らかとなった。さらに深部では、解析領域の一部で低比抵抗層が見られなくなり、10 Ω m 程度の比抵抗を示す領域（解析領域の北東端や南側）が現れるようになった。これは熱水変質層の下に広がる地熱貯留層を示している可能性が高い。

そこで、地下比抵抗構造を立体的に把握するために、MT 探査データから逆解析して3次元地下比抵抗分布モデルを求めた。逆解析コードとしては、WS3DMTINV を用いた。簡略化のため、ここでは地形をモデル上には表現はせず、平坦な地形を導入した。また MT 探査データの特徴や、調査地域の地形の特徴から判断して、N50°W 方向を X 軸、N40°E 方向を Y 軸として、座標系を設定した。地下は厚さ 0.02～20 km、幅 0.2～50 km のブロックで表現し、各ブロックの比抵抗を MT 探査データ（インピーダンステンソル 4 成分）から求めた。全 15 測定点のデータ（320 Hz～0.01 Hz の内の 5 周波数に限定）を使用した。3次元逆解析は2段階で行った。まず 100 Ω m 一様の地下構造を初期モデルとして逆解析を行った。ここで得られた逆解析結果を初期モデルとして、再び逆解析を行った。その結果、最終的な3次元モデルからの予測観測値と実際の観測値の差（RMS 残差：予測値と観測値の差を観測誤差で割ったものの自乗和の平方根）は 4.4 程度に低下した。

得られた地下構造を図 16 に示す。1次元解析結果と同様に、深さ数百 m～3000 m の深度には 3 Ω m 程度の比抵抗を示す地域が見られる。これらは熱水変質帯に相当すると考えられる。また、変質帯の下位には 10 Ω m 以上の比抵抗を示す地域が認められる。特に断面図（図 17 の A-B 断面図のうち、A 側の地下）では、熱水変質帯に相当する低比抵抗層が、100 Ω m 程度の部分（深さ 1000～2000 m）に覆いかぶさるように分布している様子が顕著に認められる。これらの 10 Ω m～100 Ω m の部分は、地熱貯留層に相当するものと考えられる。

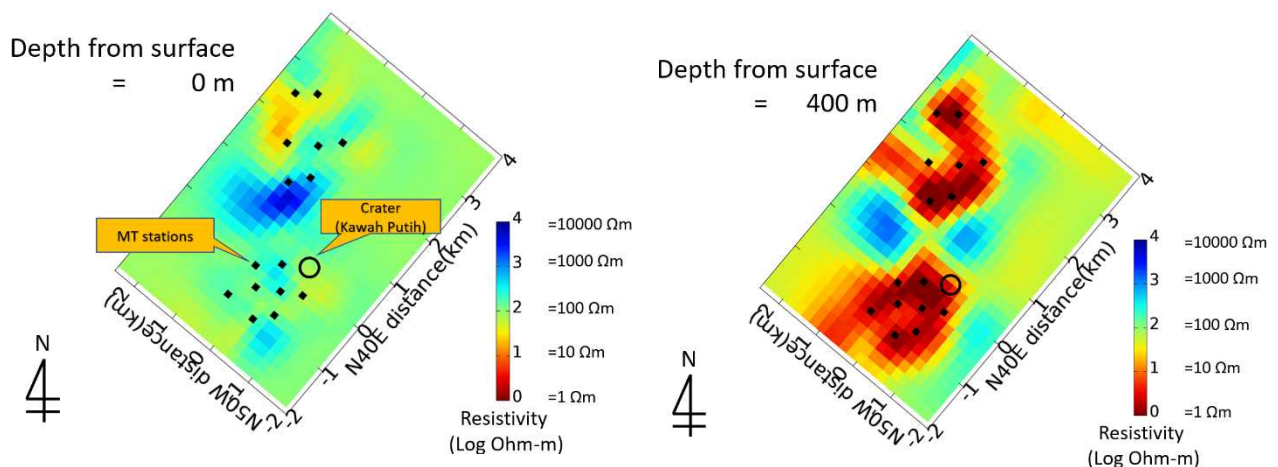
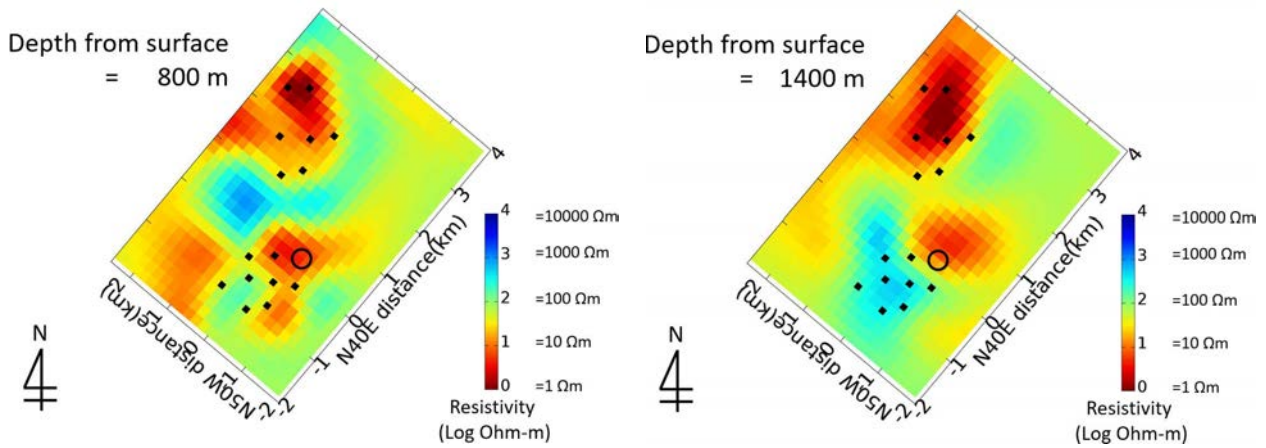


図 16 MT 探査の測点分布（左上）および地表からの各深度での地下比抵抗分布（3次元逆解析による結果）。黒点は MT 探査の観測点位置を、黒丸はクレータ（Kawah Putih）を示している。



(図 16 続き)

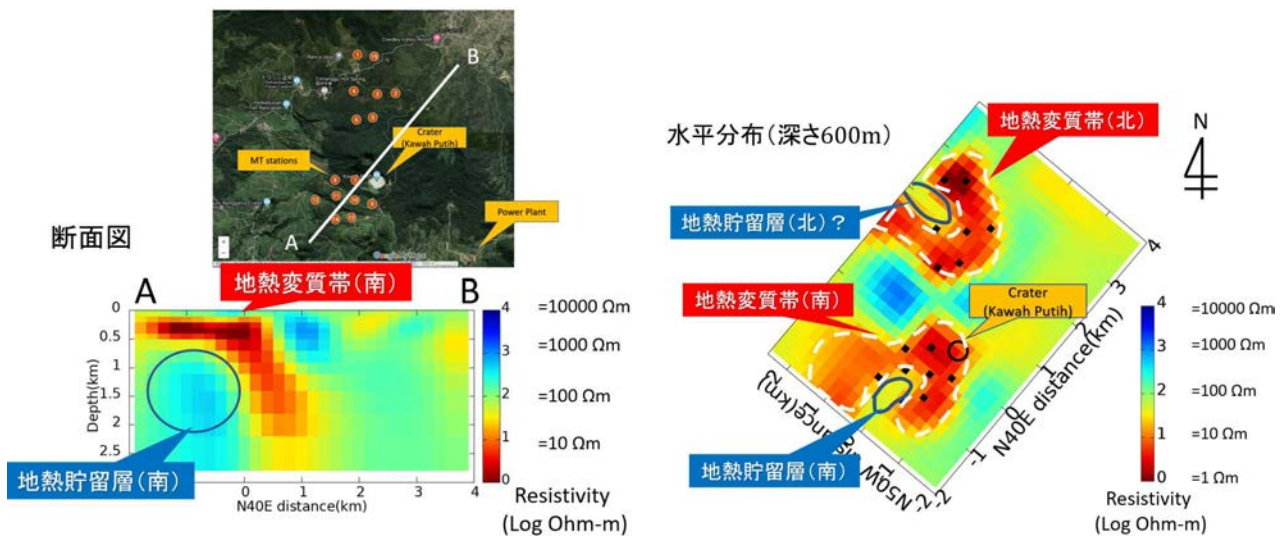


図 17 比抵抗分布に基づく 3 次元構造解析結果の解釈。断面図および水平分布図。

黒い点は MT 探査の観測点，黒丸はクレータ（Kawah Putih）の位置を示す。

以上の解釈について、3 次元的な地下比抵抗イメージとともに図 17 にまとめた。熱水変質層に相当するとみられる低比抵抗領域（前述の 1 の低比抵抗域）は噴火クレータである Kawah Putih 付近に位置しているが、クレータを中心として広がっている様子は認められない。噴火クレータはむしろ低比抵抗層の北東端に位置することから、深部の地熱貯留層は噴火クレータ直下ではなく、南西側に位置していることが示唆される。この特徴も TCH-A 選定の根拠である。

さらに地表浅部の地下構造を推定するために、浅部の比抵抗測定に適した時間領域電磁探査法（TEM 法）を適用し、MT 観測地点に加えて複数箇所で TEM 探査を実施した。その結果、掘削予定地点周辺の地表から 80 m 深度までの比抵抗分布を明らかにできた。測定点の分布と測定結果の一例を図 18 に示す。掘削地点 TCH-A 付近には、地下 20 m 付近には共通して、1 Ω m 以下という極めて低比抵抗に低い層が広がっているのが特徴的である。その低比抵抗層の上面が地表付近まで連続して

いる箇所も部分的に存在する。TCH-A もそのような特異な箇所に対応しており、熱水の上昇による変質帯が顕著に形成されていると考えられる。これも上記の NCG 濃度分布の数値シミュレーション結果に基づく解釈と整合する。

一方、掘削地点 TCH-B 付近では、TCH-A 周辺に現れたような地下浅部での低比抵抗層は認められない。しかし、地表下 60m 付近に 1 Ωm 以下の低比抵抗層の上面が現れている箇所も点在しており、このような箇所の近傍に TCH-B は位置している。よって、TCH-B も熱水の上昇域に位置する可能性が高く、地下に変質帯の発達が予想される。

以上のように、MT 探査から見出された広域的比抵抗分布から地熱貯留層の位置と広がりや推定でき、さらに TEM 探査によって地下浅部の比抵抗分布を詳細に明らかにすることで、貯留層からの熱水上昇箇所を特定することが可能になった。その結果、TCH-A と TCH-B のいずれも高温の熱水による変質帯が地下浅部に形成されており、その深部に高温・高蒸気量の地熱流体をもたらす貯留層が存在する可能性があり、掘削候補地として適していることが確かめられた。

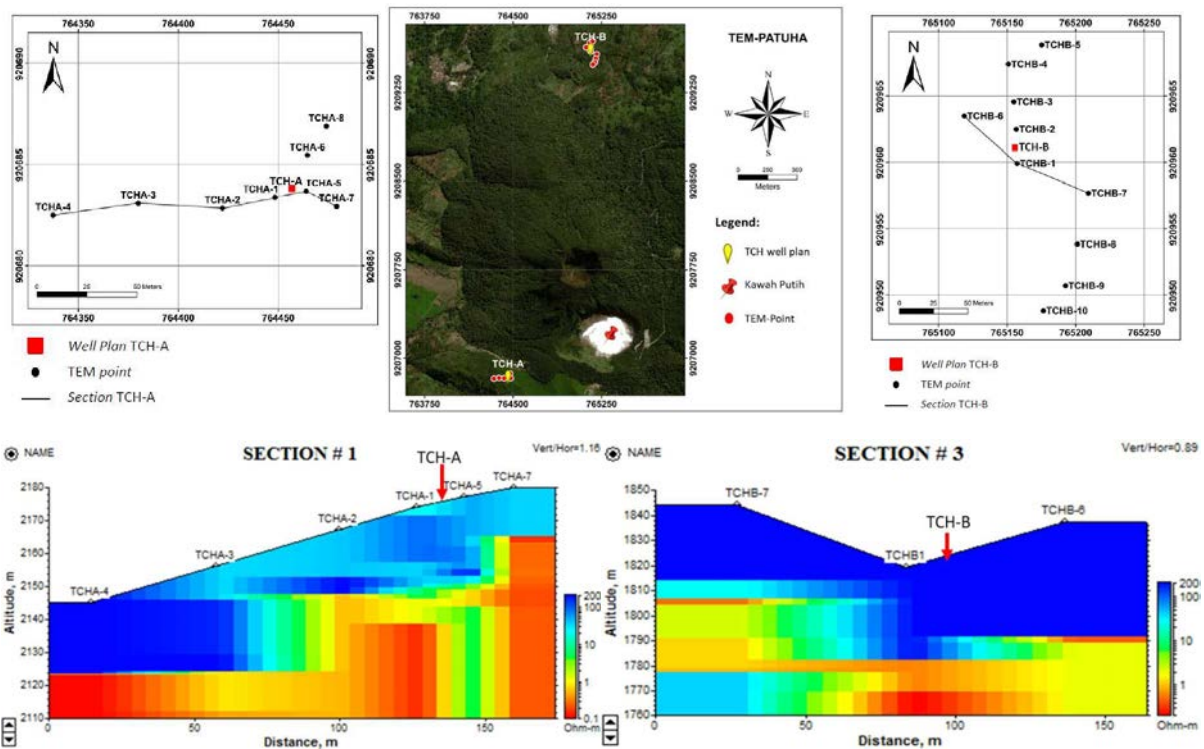


図 18 TEM 探査による地表下浅部の比抵抗構造。(上) 観測点配置および断面の位置、(左下) 掘削点 TCH-A 付近の地下比抵抗断面図、(右下) 掘削点 TCH-B 付近の地下比抵抗断面図。

②研究題目 2 の当初計画では想定されていなかった新たな展開

項目 2-1 においては、当初予定していた AMT 探査が実施できなかった代替手段として MT 探査を実施したが、良質な比抵抗データが得られた。弱点となる浅部領域においては TEM 探査を組み合わせることで、地表付近から地下 2 km までの地下構造を可視化することに成功した。

項目 2-2 で得られた結果より、噴火クレータ Kawah Putih 近傍における地下の比抵抗構造を明らかにできた。さらに解析を続けたところ、地熱貯留層相当の低比抵抗層は噴火クレータ直下には確認されるものの、このクレータを中心に広がっているわけではないことも明らかにできた。噴

火クレータはむしろ低比抵抗層の北東端に位置することから、深部の地熱貯留層は噴火クレータ直下にはなく、南西側に位置していることが示唆される。これらの結果は Patuha 地区の地熱貯留層分布に関して新しい知見であり、今後の同地区における地熱資源探査と開発計画に大きなインパクトを与えることが予想される。

③研究題目 2 の研究のねらい（参考）

現地において実施する MT 探査の結果に基づいた、地表付近から地下深部へ至る 3 次元比抵抗分布マッピングにより、探査ボーリング地点の絞り込みを行う。

④研究題目 2 の研究実施方法（参考）

2-1【MT 探査データの品質向上】初年度までに Geo Dipa Energi 社によって取得された約 20 地点での MT 探査データからノイズ成分を除去し、データの品質を向上させる。次に、1-5 により抽出された蒸気スポット存在の高評価域を対象とし、高周波電磁探査の一種である TEM 探査を 20 地点程度で実施する。

2-2【比抵抗分布の 3 次元モデリング】地下浅部の比抵抗分布の空間分解能が高い TEM データと空間分解能が低い MT データとを組み合わせた逆解析法を開発する。これにより、両探査法の利点が結果に反映されるようになり、AMT 探査データの逆解析と同等の空間分解能 100 m で対象深度範囲 500 m までの比抵抗分布を明らかにする。これと 1-5 の評価分布と重ね合わせ、探査ボーリング地点を 2 つに絞り込む。

(4) 研究題目 3:「探査ボーリングの実施と総合評価による開発技術の社会実装化」

①研究題目 3 の当初の計画（全体計画）に対する当該年度の成果の達成状況とインパクト

項目 3-1 については本プロジェクト開始時からの ITB チームとの定期的な打ち合わせで、本プロジェクトの予算内で実施できるボーリングの長さ、地点数、得られるデータ、および実施開始から完了までの期間が、概ね 2 ヶ月であることを ITB と確認した。ボーリング実施に向けて、ITB、Geo Dipa Energi 社との打ち合わせを、オンライン会議で定期的実施することで、実施仕様書も作成できた。カウンターパートよりコスト、期間、アクセス等の制限から一点のみと当初、ボーリング地点数が提案されていたが、打ち合わせの過程で、ボーリング地点を研究計画通りに 2 つに増やせることがわかり、本プロジェクトによる成果をより適切に検証できるようになった。

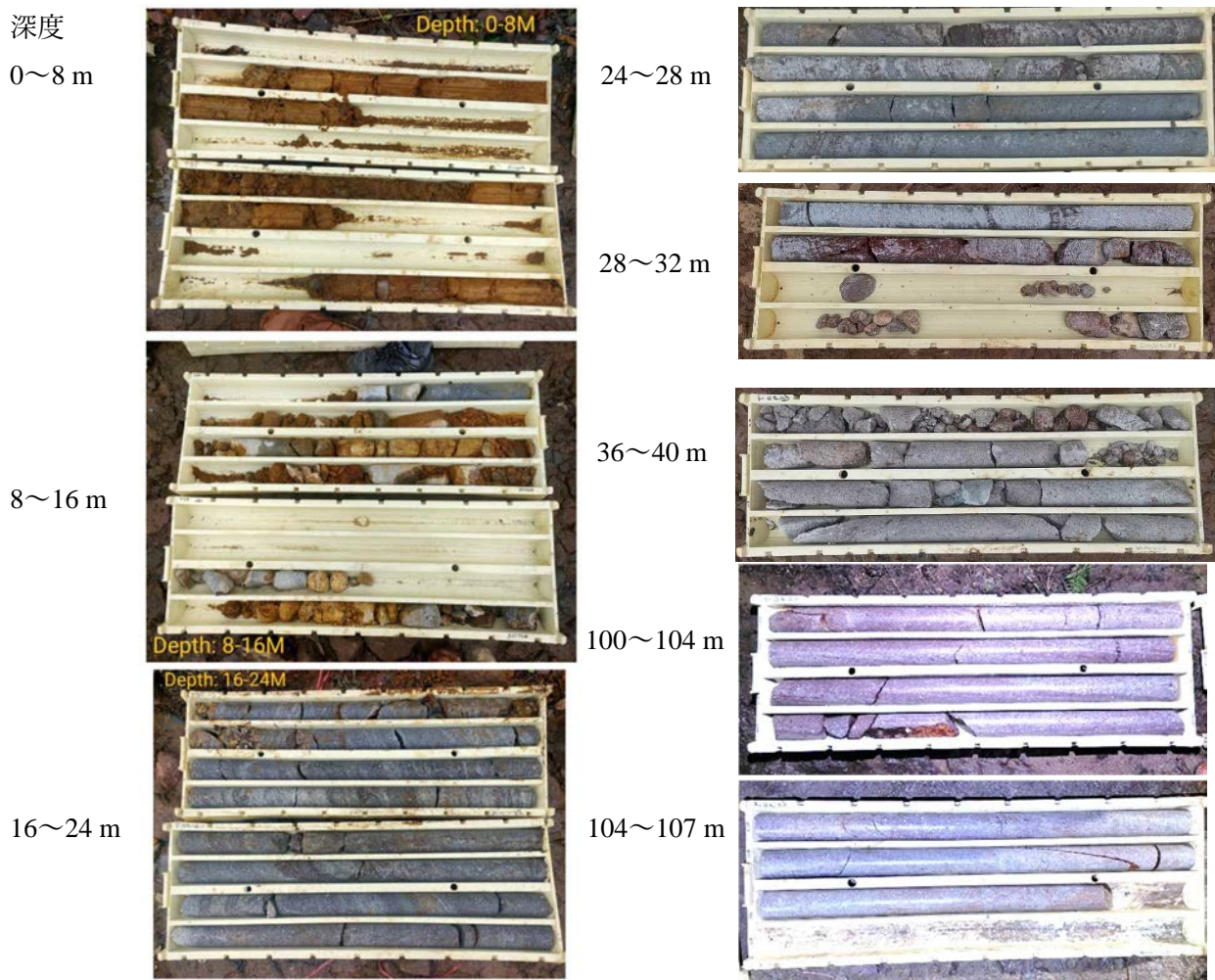
ボーリング地点である Kawah Putih クレータ西側の TCH-A で 2022 年 2 月 18 日に掘削が開始し、3 月 9 日朝の時点で深度 135.9 m まで進行した。TCH-A でのボーリング用地掘削と台座建設の様子、および得られたボーリングコアの一部を下記の写真に示す。深度 16 m から亀裂が少なく、硬質の安山岩が現れたが、深度 28 m からコア未回収あるいは強破碎岩石の区間が 20 m 以上連続した。これは、TEM 探査による特に低い比抵抗の特徴に調和的であり、強熱水変質の影響と考えられる。現時点まで安山岩が続く。

一方、TCH-B に対しては当初、2021 年 9 月には実施許可が取れる見込であったところ、森林局との折衝が極めて難航し、ようやく 2022 年 2 月初めから用地整備の後、2022 年 3 月 7 日 23:45 に掘削が開始され、3 月 9 日朝の時点で 14.5 m の掘削深度である。TCH-B での掘削現場の様子と最初のボーリングコアも下記の写真に示す。カウンターパート側の最大限の尽力にも関わらず、2 地

点ともに厳しいスケジュールになってしまったが、一日 8 時間・3 交代制の 24 時間体制で掘削を進行させており、期限までにデータの取得と分析が完了できるようにカウンターパート側と協力・協同しながら取り組んでいるところである。



【TCH-A でのボーリング用地掘削 (左), 台座建設 (中), 夜間の掘削工事 (右) の写真】



【TCH-A における各深度でのボーリングコアの写真。深度 28～40 m 区間岩石の強破碎を表す。】



【TCH-B サイトと掘削の風景 (左) と最初のボーリングコアの写真 (深度 0～4 m)】

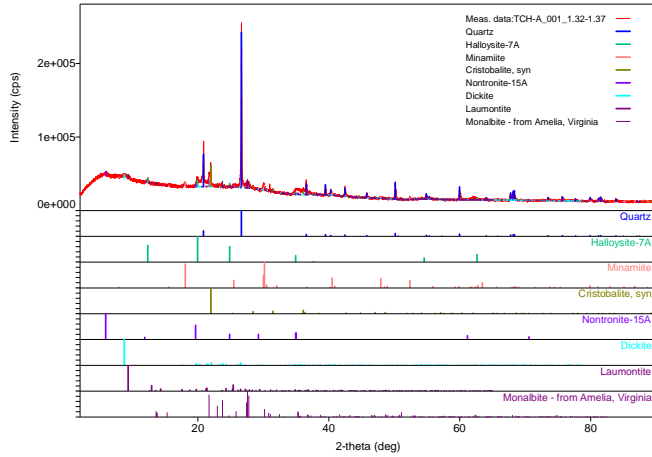
【終了報告書】【210531】



【標高 2243 m の山岳地に位置する TCH-A サイトの風景（左），TCH-A での掘削とコア回収の様子（中），林の中に位置する TCH-B サイトの風景（右）】

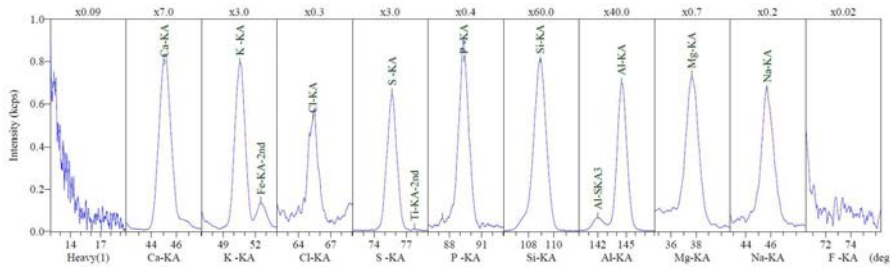
項目 3-2, 3-3, 3-4 は継続進行中である。項目 3-2 では SATREPS プロジェクトでの導入機器を活用し、ボーリングコアの鉱物・化学組成を分析するのに必要な消耗品を揃え、準備を整えた。項目 1-2 による Patuha 地区での表層ボーリングから得られた表土層の鉱物・化学組成を分析し、分析精度に問題がないことを確認した。また、これにより表土層に含まれる鉱物を明らかにでき、熱水変質鉱物の熱水の上昇域を概ね特定できた。その一例として地表に近い TCH-A ボーリングコアの一部を用いて、XRD により鉱物組成を分析した結果を図 19 に示す。同定された主な鉱物は石英、クリストバライト、濁沸石、ディッカイト、輝石であり、そのうち濁沸石をディッカイトは代表的な熱水変質鉱物である。特にディッカイトの存在は高温熱水と岩石との反応を表すので、表層付近までの熱水の上昇が推測できる。また、コアの XRF による化学組成分析結果を図 20 に示す。石英の化学成分である SiO_2 が最も多く含まれるのは火山域での土壌や岩石の通常の傾向である。特筆できるのは明礬石、白雲母、カオリナイト、白雲母に含まれるアルミニウム Al が 2 番目に多い元素であることであり、熱水由来の硫黄 S も検出されている。これらも熱水の上昇を示す特徴である。

さらに熱水の上昇を確認するために、コアから得られる鉱物が生成された温度を流体包有物分析から計測する。流体包有物とは、石英の結晶などが成長する際に周囲の流体を取り込むことで生じる。流体包有物は気相と液相の 2 相からなるが、鉱物を加熱し、液相のみになる均質化温度を求める。分析の準備として、Patuha 地区のように岩石と熱水との反応で生じた鉱物の薄片を作成し、石英内の流体包有物を見出し、顕微鏡加熱装置を用いて均質化温度を計測した。流体包有物の顕微鏡写真を図 21（左）に示す。信頼性の高いデータを得るために、複数の流体包有物を分析した結果、図 21（右）に示すように均質化温度は $190\sim 205\text{ }^\circ\text{C}$ の狭い範囲に収まり、平均で約 $200\text{ }^\circ\text{C}$ と得られた。これは代表的な熱水変質鉱物の生成温度に対応する。TCH-A と TCH-B でのボーリングコアも同様に分析し、熱水の上昇域であること、および熱水変質鉱物の高い生成温度から蒸気スポットが存在することを確認するとともに、生成温度の垂直方向の分布からボーリング下底よりも深部の温度分布を推測し、これも蒸気スポットの存在位置の特定に応用する。



鉱物名	化学式
Quartz	Si O ₂
Halloysite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Cristobalite	SiO ₂
Dickite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
Laumontite	Ca (Al ₂ Si ₄ O ₁₂) 4(H ₂ O)
Monalbite	Na Al Si ₃ O ₈

図 19 TCH-A の表層ポーリングから得られた XRD による表土層の鉱物組成分析結果。右図が X 線回折チャート，左の表は同定された鉱物名と化学式を表す。



No.	Component	Result	Unit
1	Na	0.681	mass%
2	Mg	0.722	mass%
3	Al	25.4	mass%
4	Si	47.9	mass%
5	P	0.273	mass%
6	S	2.53	mass%
7	Cl	1.37	mass%
8	K	2.82	mass%
9	Ca	2.33	mass%
10	Ti	1.09	mass%
11	Mn	0.192	mass%
12	Fe	14.6	mass%
13	Sr	0.0635	mass%
14	Zr	0.0375	mass%

図 20 TCH-A の表層ポーリングコアから得られた XRF による表土層の化学組成分析結果。左図が X 線回折チャート，右の表は分析された元素の濃度（質量%）を表す。

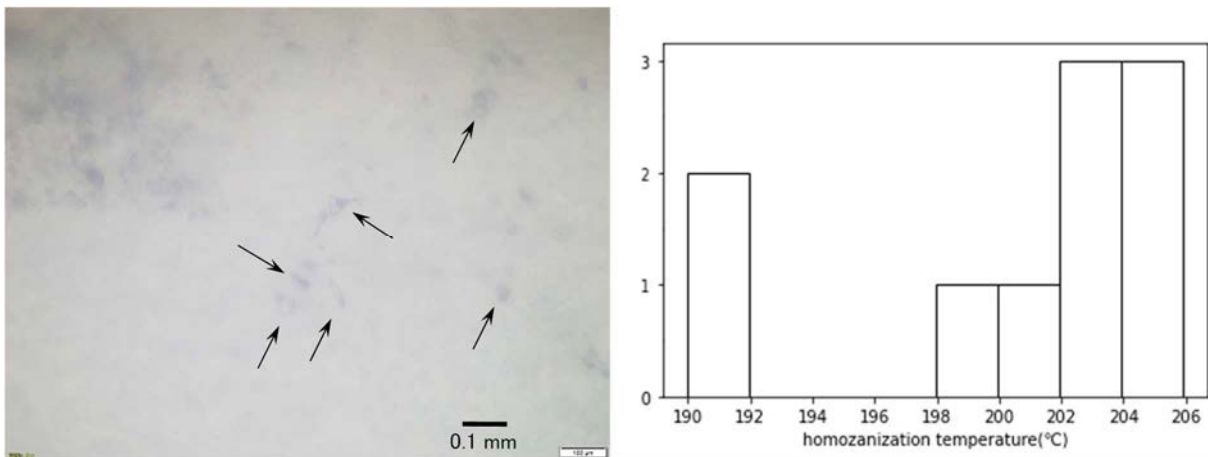


図 21 矢印で示す石英中の流体包有物の顕微鏡写真。Patuha 地区と同様の環境にある熱水鉱床での鉱石を分析に用いた。

項目 3-3 実施の準備として、深層学習型ニューラルネットワーク (Deep-learning Neural Network: DNN) を応用して、温度検層データの外挿に適し、予測精度の高い手法を開発できた。この DNN では入力層、3つの中間層、出力層の5層構造とし、中間層のユニット数をいずれも128とするのが最適であることを明らかにした。教師データには対数変換した温度検層データを標準化して用いた。温度データの外挿精度の評価として、検層データの浅い部分(90%)と深い部分(10%)をそれぞれ訓練用、検証用データに分割する方法を用いた。DNNへの入力情報として、各データの位置情報に加え、地温勾配、キュリー点深度、最近傍点の温度データなどを用いると推定誤差を10%以内に抑えられ、目標値に達成できることがわかった。結果の一例として、本プロジェクトによるボーリング深度500mに合わせて、大凡この程度のデータ範囲をもつ温度検層データを日本の坑井温度プロファイルデータベースから選び、その外挿結果を図22に示す。伝導型、対流型のいずれでも標高-5000mという、データ範囲の10倍近く深度範囲まで外挿でき、各タイプの特徴を正確に再現できていることがわかる。特に対流型では孔口からの深度約2kmに相当する標高-1000mで温度の屈曲点が現れ、これ以深が貯留層であると特定できる。本プロジェクトで対象としている Patuha 地区での貯留層も、おおよそこの深度に位置すると考えられる。よって DNN をベースとした手法は、ボーリング下底よりも数百m以上深部に存在する蒸気スポットの位置の特定に貢献できる。

本プロジェクトでは同じ地熱地区で2本のボーリング温度検層データを得る。このように同一地区で複数の温度検層データが得られた場合、上記の1本のボーリングに沿った外挿のみでなく、ボーリング地点間の内挿も行い、内挿・外挿の組合せによって蒸気スポットの3次元分布を明らかにできるか、についても検討した。この内挿には、データ間の空間的相関性を考慮する地球統計学も DNN を取り入れた。本プロジェクトと同様にデータの深度範囲が短いという状況を対象とするため、日本の坑井温度プロファイルデータベースを主に用いて、日本全域での地温分布推定にチャレンジした。総データ数は116,121個、坑井地点数は1,404点である。坑井地点の分布に基づいて解析範囲を約 $6.2 \times 10^5 \text{ km}^2$ と広くし、対象深度は超臨界状態も一部存在すると考えられる標高-5000mまでと設定した。対象領域の大きさに比べてデータ密度が格段に小さく、深度範囲も短いというスパースなデータ分布状態である。本手法による解析の結果、-5000mまで到達している坑井はわずか4地点であるにもかかわらず、日本全域での地温分布を適切に推定できていることがわかった。また、蒸気スポットのような特定の温度分布を特定するために、3次元地温分布から水の臨界点に到達する標高分布を求めた。その等値面で図23に表すが、活火山付近では浅い深度で臨界点に到達することが明らかである。深度は浅間山や富士山付近で最も浅く、花崗岩体での超臨界状態が報告されている葛根田地熱地域でも臨界点到達が推定できている。この臨界点到達標高分布はマグマの規模と貫入深度に依存するはずであり、地下深部構造の解釈、および本プロジェクトの次のターゲットとなる超臨界発電の適地選定に利用できると考えられる。

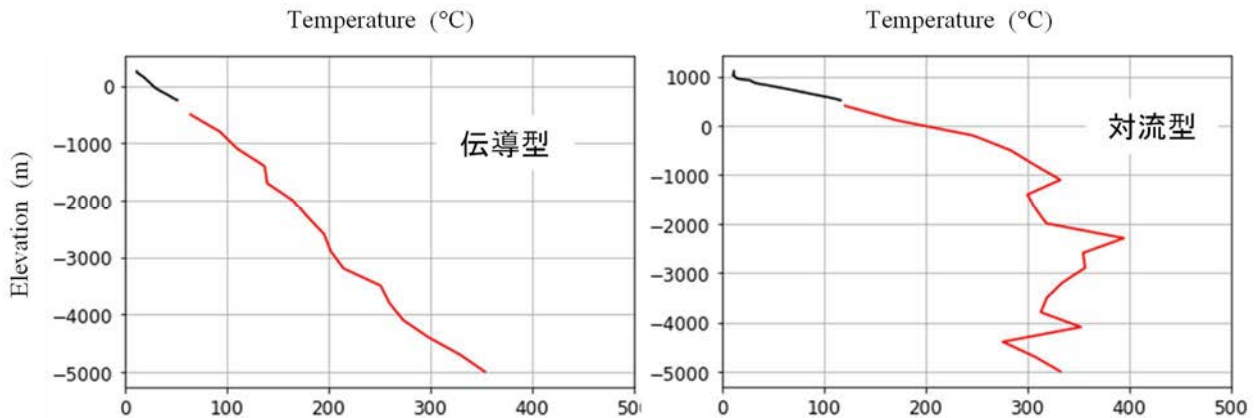


図 22 DNN ベースの手法による伝導型（左）と対流型（右）温度検層データの外挿結果。黒線がデータ部で、赤線が外挿による-5000 m までの推定温度を表す。

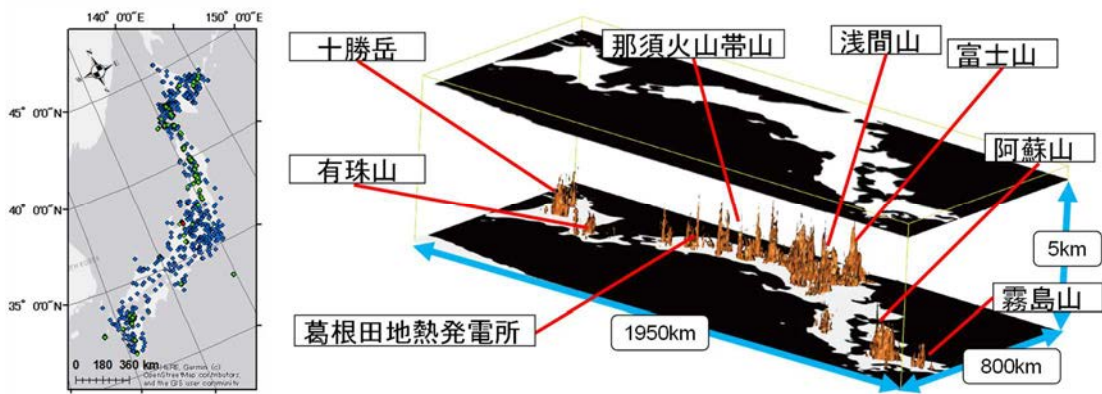


図 23 日本全域を対象とした地温分布モデリングに用いた温度検層データの位置（左）と水の臨界点に到達する標高分布を表す等値面（右）。深部で臨界点到達が知られている葛根田発電所と活火山の位置も右図に示す。

項目 3-4 においてはカウンターパート側と共同で SATREPS プロジェクトの蒸気スポットの検出技術の改善を上記のように図り、この技術を生産井設置場所の特定用に標準化するように検討を進めている。これまでの定期的な本プロジェクト打ち合わせ会により、この標準化を社会実装の柱にする、と方向付けられた。

②研究題目 3 の当初計画では想定されていなかった新たな展開

カウンターパート側の積極的なプロジェクト参画と貢献により、SATREPS プロジェクト成果であり本プロジェクトのメインとする「蒸気スポット検出技術」を、地熱開発技術において標準化するという展開を目指している。標準技術として確立し、世界第 2 位の地熱資源国であるインドネシア国において社会実装が加速されれば、本プロジェクト成果の世界的な水平展開と日本のプレゼンス向上が期待できる。

③研究題目 3 の研究のねらい（参考）

探査ボーリングの実施と、そこから得られた温度・圧力データやコア試料等の鉱物・化学組成分析に基づく総合評価により、「蒸気スポット検出技術」の有用性を明らかにするとともに、この技術の社会実装化を目指す。

④研究題目 3 の研究実施方法（参考）

- 3-1【ボーリング実施と検層データ取得】2 地点で 500 m 深度の探査ボーリングを実施し，コアの回収と各深度での温度・圧力計測を実施する。
- 3-2【鉱物・化学組成分析】ボーリングコアを用いて鉱物・化学組成を分析し，対象地点で地熱流体上昇が生じていることを検証する。
- 3-3【温度圧力データ解析と蒸気スポットの位置の特定】温度・圧力データと 1-4 による数値シミュレーション，さらに深層学習を利用したニューラルネットワークにより，深度 2000 m までの温度と圧力推定誤差を 10% 以内に抑えながら，蒸気スポットの存在の有無，およびその位置を±100 m の精度で特定する。これにより 1-5 で得られた蒸気スポット存在評価を検証する。
- 3-4【社会実装に向けての試錐結果の総合評価】3-2 と 3-3 の結果の統合により，研究チーム全員で蒸気スポット高精度検出技術を最終的に評価し，社会実装化の道筋を策定する。

II. 今後のプロジェクトの進め方、および成果達成の見通し（公開）

本報告書の作成時点において、研究題目3以外の項目は概ね予定に沿って研究が進展し、研究項目[1-1][1-4]で当初の予想を上回る成果が得られている。上述の通り、衛星画像に基づく地形データ、およびLiDAR画像によって作成した超高解像度地形データの解析に基づく大規模亀裂系の抽出、亀裂分布と地熱兆候地や断層分布との位置的対応、現地におけるラドンガスと水銀濃度の野外定点観測、および熱水試料採取と化学分析に基づいた熱水パスの分布推定、熱水流動シミュレーションを用いた地熱システムと貯留層中の蒸気卓越部分の推定、これらの結果を組み合わせた蒸気スポット存在ポテンシャルマップの作成、現地におけるMT探査・TEM探査による地表から地下深部に至る比抵抗の3次元モデリングと熱水パスの推定、という各研究項目に、カウンターパートであるITB・Geo Dipa Energy社・CMCGRと協同で取り組み、着実に成果を積み重ねることができた。SATREPSプロジェクトの成果と併せて2本の論文を地熱分野を代表する国際誌に掲載でき、国際会議での15件の発表と2本の査読付きプロシーディングの掲載も行い、さらに現在、複数本の論文を作成中である。

新型コロナウイルス感染拡大により、国際コーディネーターを除いた京大チームの渡航は実現できなかったものの、その本プロジェクトへの影響は可能な限り低く抑えられたと考えている。これは、SATREPSプロジェクトで築いた京大チームとITBチームとの協力・信頼関係、およびほぼ毎月開催しているオンライン会議によるものである。上述したように、研究題目1・2でのデータ解析、試料採取と分析、データ統合が概ね所定通り進行したことは、カウンターパートの積極的なプロジェクトへの協力と尽力に依るところが大きい。京大側研究者が全く渡航できなかったにもかかわらず、ITBチームは率先して野外調査、試料サンプリング、試料分析を実施し、良質のデータを蓄積し続けた。Geo Dipa Energi社は研究題目2で予定したAMT探査に代えてMT探査、およびITBと共同でTEM探査を実施し、項目2-1・2-2の実施に大きく貢献した。

一方で、研究題目3については項目3-1のボーリング調査に係る一般競争入札の実施において、入札実施のための内部調整、カウンターパート側との合意形成、掘削地点の用地交渉・許可申請・認可に予想外の時間を要し、調査開始は令和3年度1月まで遅延した。本報告書作成時点ではTCH-Aでの掘削が開始されたところであり、コアを利用したデータの取得はこれからであるが、上述した通り項目3-2・3-3の準備は完了している。3-4についても地熱資源探査で「蒸気スポット検出技術」を標準化し、社会実装を目指すという方向付けに合意が得られている。ボーリング調査が進行次第、項目3-4に着手し、本プロジェクトによる開発手法の全体的な評価と社会実装への道筋立てを行う。

プロジェクト開始前にはインドネシアに渡航できない状況がこれほど長引くとは全く予想できず、研究題目2の計画をAMT探査からMT・TEM探査に変更せざるを得なかったが、それでも当初の予定に相当する成果が得られた。全体の研究計画について、ボーリング調査実施時期の大幅な遅延を除き、特に軌道修正を要する点はなかった。ボーリング調査の完了は年度末の3月と極めてタイトなスケジュールになり、また地下を対象とした調査なので掘削困難な堅固な岩盤に当たるなどのリスクもあって、予断は許さないが、本プロジェクトの目標達成にカウンターパートと全力で取り組む。「蒸気スポット検出技術」が標準化され社会実装への道筋が確立されれば、世界第二位の地熱資源大国であるインドネシアにはもとより、世界の地熱発電促進に大きく貢献できるものと考えられる。

Ⅲ. 社会実装に向けた課題とそれを克服するための工夫、教訓など（公開）

(1) プロジェクト全体

研究成果を社会実装へつなげるためには、①社会への情報発信に基づく認知度の向上、②ステークホルダーに対する研究成果の開示と協働の実施、③社会適用事例の拡大、④研究成果を標準手法（公定法、示方書としての策定など）として登録する、などのステップが考えられる。①については SATREPS プロジェクトに引き続き、本プロジェクトの内容・研究活動・成果を、研究代表者研究室と ITB の鉱山・石油工学部の URL に開設したサイトを用いて一般に公開している。活動状況がよくわかる写真を多く掲載するとともに、掲載論文や国内・国際会議発表のリスト、研究速報、受賞報告を随時更新している。

- 京大側 <http://www.geoenv.kumst.kyoto-u.ac.jp/bagus1.html>
- ITB 側 <https://www.ftm.itb.ac.id/science-and-technology-research-partnership-for-sustainable-development-satreps-project-2/>

同様に SATREPS プロジェクトより引き続き、本プロジェクトを広く紹介するためにニュースレターを紙媒体・電子媒体（web 公開）双方で定期的に発行している。第 1 号は 2020 年 11 月 13 日に発行し、上記の URL に掲載している。図 24 はその最初のページである。ボーリング掘削とコア分析が本格化し、岩相・鉱物組成・化学組成のデータがある程度蓄積でき始めた 2022 年 3 月中旬に第 2 号、および掘削と孔内温度検層が完了した 3 月末に第 3 号を発行する予定である。京大・ITB チームの双方で、第 2 号用の記事を執筆中である。②についてはインドネシア国営企業である Geo Dipa Energi 社、および資源エネルギー関係の国立研究機関である CMCGR との協働を実現できた。地熱資源開発はリードタイムが長いので、③の社会適用事例を拡大するには時間を要するが、本プロジェクトのメインとなる成果である「蒸気スポット検出技術」を標準化し、④の社会実装を目指している。

「本プロジェクトの妥当性・有効性・効率性・インパクト・持続性を高めるために実際に行った工夫」としては、SATREPS プロジェクトでのメインのテスト・フィールドとした Wayang Windu 地区とは地熱システムが異なる Patuha 地区を対象として研究を進めていることであり、Wayang Windu 地区での結果と併せて「蒸気スポット検出技術」の精度向上、有効性評価を図れることである。Patuha 地区での成果の一つとして、蒸気スポット存在の可能性の高い場所が温泉の位置と整合したことから、技術の有効性が確かめられたと考える。複数の手法による結果を有効に統合することで、地熱開発適地である「蒸気スポット」を特定できる本手法の確立は、これまで実施されたあらゆる事前調査データを有効に再活用し、地熱資源開発有望地を絞り込むことができるため、国内外における地熱資源利用促進に及ぼすインパクトは大きいと考えられる。

持続性を高めるための一環として、科学研究費の国際共同研究加速基金：国際共同研究強化(B)に aXis プロジェクトの発展版である『地熱発電の大幅利用促進を可能にする貯留層臨界スポット検出を目指した先端的共同研究』が、令和 3 年度 10 月に採択されたことは大きい。これは発電量と発

【終了報告書】【210531】

電可能期間を大幅に増加させるため、貯留層で蒸気スポットよりも深部に位置し、臨界スポットと称した高エネルギー部を特定することを目的におく。臨界スポットとは、水の臨界点（374℃で228気圧）近くの高エンタルピー、かつ流体の通路となる透水性亀裂が発達する、という特殊な条件を満たす場所であると想定している。臨界スポットは地下3 km程度に存在すると考えられ、臨界スポットの存在に起因した地下深部での現象やそれからの微弱な信号を地表近くで捉えることは、既存の探査法では難しい。この先端的課題に令和7年度末まで4年間半掛けてITBと取り組み、ジャワ島中部の地熱地帯を新たな研究対象フィールドに加えることで、aXisプロジェクトの成果をさらに発展させ、社会実装に繋げることを目指す。新規プロジェクトでは、既に地熱発電が稼働中の地区を対象として臨界スポットを検出し、地熱貯留層深部で大きなエネルギーをもつ箇所へのボーリング到達を高い確率で成功させ、現在の技術による発電量を倍以上に増加させることを目指す。これは新規の地熱発電所建設に伴う森林や土地開発などによる環境負荷を最小限に抑えられるので、より地球環境と調和した低炭素化社会の構築にも貢献し得る。

さらに、7名のインドネシア留学生が博士学生、あるいは2022年4月の博士課程入学を目指した本学研究生として、SATREPSとaXisプロジェクトに関連した研究に取り組んでいることも持続性向上に大きく貢献し得る。7名ともカウンターパートであるバンドン工科大学の修士課程修了生である。2名は研究項目[1-3]熱水・ガス分析の関連研究で博士号を取得し、現在インドネシアの国立研究機関の研究者として同様の地熱研究を進めている。地球化学的観点からPatuhaの熱水流動システムのモデルを構築し、熱水の上昇域の特定に貢献し、国際誌*Applied Geochemistry*に論文掲載できた。現在の博士課程学生3名のうち1名（D3）は2022年3月に博士号取得の予定で進めており、合成画像データの差分干渉処理による地形変化の観点からPatuhaで透水性が高いゾーンを抽出した。この成果の一部が図8であり、研究内容は項目[1-4]熱水流動系の推定に関連する。学位取得後はカリマンタン島にある大学の教員として、地熱研究を継続・発展させる。1名（D3）は項目[1-4]の熱水流動シミュレーションの研究に取り組んでおり、図9・10が成果の一部である。博士号取得後はバンドン工科大学の研究者に復帰する。D1の1名はPatuhaを対象として項目[1-3]、および項目[3-2]ボーリングコアを用いた鉱物・化学分析と流体包有物分析に取り組んでいる。研究生2名の研究テーマは[1-4]熱水流動シミュレーション、および[3-3]温度圧力データの解析と蒸気スポットの位置の特定に関連する。入学試験に合格すれば博士課程で研究を発展させられる。取得後はバンドン工科大学とスマトラ工科大学の教員に戻り、さらにレベルの高い地熱研究に取り組む。このように学位取得後はいずれもインドネシアの研究機関や大学にてaXisプロジェクトに関連した地熱研究に既に取り組んでいる、あるいは取り組む予定であり、上記の科学研究費・国際共同研究強化プロジェクトをコアとして京大チームとの共同研究も継続するので、本プロジェクトが終了後も持続的に発展・展開していくことは確実である。

SATREPSとaXisプロジェクトを通し、京大チームと打ち合わせしながらも、現地調査の実施、試料の採取、機器分析から解析に至るまでITBチームが主導的に行っており、研究の持続性を大幅に向上させることができている。「プロジェクトの自立発展性向上のために、今後相手国（研究機関・研究者）が取り組む必要のある事項」に関しては、ITBチームが自主的・積極的に本プロジェクトの実施・推進に取り組んでおり、プロジェクトの自立発展性向上は既に達成できていると考え

【終了報告書】【210531】

る。分析機器類の維持管理には、消耗品費・人件費を含め多額の年間予算の獲得が必須となるが、ITBはその点も受託分析等により克服しており、インドネシア国内におけるトップレベルでの地熱を含む、地球資源学研究拠点を形成しつつある。実際、ITB内で本チームの組織はCOE（先端研究拠点）に位置付けられている。



No. 1 | 13th November 2020

aXis BAGUS Project News

BAGUS Project is now aXis BAGUS Project

aXis BAGUS - Accuracy Improvement and Demonstration by Boring Survey of Steam-Spot Detection Technology for Locating Drilling Sites of Geothermal Production Wells -

Greetings from the Leaders

I am very pleased that we can extend and develop furthermore the SATREPS BAGUS project as a new JST aXis (Accelerating Social Implementation for SDGs achievement) project and with a new title, aXis BAGUS project. One of the most blessed point of the new project is that we can confirm the effectiveness and accuracy of the methods for Steam-Spot detection developed by the SATREPS project through an actual drilling survey.

For large decrease of carbon dioxide emission, promotion of the utilization of geothermal power is needed. The new project aims to develop technologies for locating accurately a suitable portion, a Steam Spot for drilling a production well for geothermal power generation from the ground surface using a combination of remote sensing, geochemistry, mineralogy, and numerical simulation. The Patuha geothermal field, West Java, Indonesia is selected as a study area, and the research will be advanced in collaboration with the ITB team including ITB, Geo Dipa Energi, CMCGR* and other collaborators. Research contents include 3D fracture modeling using high-precision topographic data, radon concentration measurement at many shallow drilling points, estimations of reservoir temperature and fluid origin by water and gas geochemistry, simulation for fluid flow and specification of liquid or vapor rich zones, and potential-map production of Steam-Spot existence by integrating these results using geostatistical methods.

Exploration drilling sites are narrowed down to two based on subsurface resistivity distribution by electromagnetic survey at high potential zones. The existence of Steam Spot potential is verified through temperature, pressure, and mineralogical data obtained by the drillings down to about 500 m depth (tentative). Social implementation of the research result will contribute to a large increase of geothermal power generation by reducing resource-exploration cost.

The aXis BAGUS project was officially started in April 2020 and the COVID-19 pandemic has already been prevalent. Because of this, the Kyoto University team has still been unable to visit ITB and Patuha and we cannot predict when the field visits and the joint survey can become possible. Although the situation is not favorable to us at all, we hope that we can advance the SATREPS BAGUS project and obtain excellent research achievements. In addition, I appreciate deeply the great effort and sincere collaboration of the ITB team for proceeding with the project under this situation.

Katsuaki Koike (Leader of aXis BAGUS project, Professor of Graduate School of Engineering, Kyoto University)

Sudarto Notosiswojo (Project Director of Indonesia team, Professor of Faculty of Mining and Petroleum Engineering, ITB)

*CMCGR: Center for Mineral, Coal and Geothermal Resources, Ministry of Energy and Mineral Resources



図 24 2020 年 11 月 13 日発行 BABUS Project News No.1

【終了報告書】【210531】

「進捗の遅れた事例」として、新型コロナウイルスの感染拡大に伴う、アメリカでの機器製造工場の生産・出荷停止により、京大への機器納品とインドネシアへの輸送に大幅な遅延が令和2年度に生じたことがあげられる。SATREPS プロジェクトを通じて蓄積された、国際的な機材調達と機器輸送ノウハウを活かして京大から ITB にスムーズに輸送できたが、初めてであれば相当の混乱が予想された事例であった。特に日本からの輸送（輸出）にあたっては、相手国内での輸送までをカバーできる業者の選定が最重要となる。

加えてボーリング調査の契約締結と掘削開始が、予定よりも大幅に遅れたことが想定範囲外であった。令和3年度当初は5月半ばに準備を開始し、10月末までに完了する予定であった。しかし、令和3年度当初からインドネシアでのコロナウイルス感染者数が増加し、2021年7月15日に一日当たりの新規感染者数が約56,000のピークとなった。この感染状況により社会全体としての活動制限が10月上旬まで続き、特に8月まではボーリング調査のような新規の活動が大きく制限されていた。この間、インドネシア側の共同研究者とオンラインにて研究打ち合わせ会合を継続したものの、実際にボーリング調査実施にまで至れる状態ではなかった。長期にわたるロックダウンに近い状況の継続により、大幅にボーリング調査の入札、契約、開始が遅延した。ボーリング調査開始に至ったのは、インドネシアでの感染者数の低下によって社会活動制限が緩和されたためであり、状況改善を待つしか手がなかった。このような状況下でもオンライン会議を活用してカウンターパートと密な打ち合わせ、意思疎通、連携を継続して図ったので、プロジェクトを進められ、活動制限が緩和されたときに研究を展開できた。

(2) 研究題目1：「蒸気スポット検出技術の高精度化・精緻化」

(3) 研究題目2：「高密度・高周波地磁気ー地電流（AMT）探査による比抵抗分布解明」

研究題目1と2に関しては新型コロナウイルス禍により京大チームがインドネシアに渡航できず、現地にてITBと調査計測できていないことが問題ではあるが、ITBチームが取得したデータを共有し、互いにデータ解析を進めることで研究を進行させて来た。また、計20回近く of 定期的なオンラインミーティングにより、メールでの情報交換よりも効率的に、かつ深く解析結果について議論できており、これが研究の進展に大いに役立っている。

(4) 研究題目3：「探査ボーリングの実施と総合評価による開発技術の社会実装化」

研究題目3に関してもボーリング調査が昨年度中、および今年度の1月中旬まで実施できなかった原因は新型コロナウイルス禍にあるが、ボーリング仕様書の策定、得られる試料の分析の準備を進めるなど、ボーリング調査の早期実現、分析の効率化と分析精度の向上に向けての取り組みは行った。上記のように本プロジェクトでは、蒸気スポットの検出技術を生産井設置場所の特定用に標準化することを社会実装の柱にする、と方向付けた。ボーリング調査実施とデータ解析により、実証試験や社会実装に向けた教訓が得られ、これを基づく提言等をプロジェクト終了時には示せると考えている。また、限られた期間でのプロジェクトにおいて海外でボーリング調査を実施することは、現地の状況を勘案した仕様書作成、用地使用許可申請と取得、それに掛かる期間、掘削地点までのアクセス道路の建設、施設の建設等を含め、国内実施とは異なった困難要素が想定以上に多いことがわかった。様々なネットワークを通してボーリング調査を可能にするための現地での課題、申請プロセス、必要日数、スケジュール等をカウンターパートと密に確認することが不可欠である。

【終了報告書】【210531】

IV. 日本のプレゼンスの向上 (公開)

2020年7月22日 Web版の SIEDOO (インドネシア教育ニュース) に「地熱資源プロジェクトによる京都大との連携強化」というタイトルで、SATREPS プロジェクトと aXis プロジェクトによる本研究グループの活動が記事にされ、バンドン工科大学の国際連携と共同研究実施の Good Practice として紹介された。図 25 はその記事の一部である。

siedoo

Mengupas Pendidikan dari Pelosok Negeri

S

Daerah

Nasional

Internasional

Teknologi

Inovasi

Tokoh

Opini

Kegiatan

Adv



INTERNASIONAL

TEKNOLOGI

ITB dan Kyoto University Perkuat Kolaborasi Pengembangan Teknologi Eksplorasi

📅 22 Juli 2020 👤 Narwan Sastra Kelana

図 25 2020年7月22日掲載 Web版 SIEDOO 報道記事

これと同様の記事が2020年7月20日、「ITB and Kyoto University Strengthen Collaboration on Geothermal Exploration Technology Development」と題し、バンドン工科大学プレスリリースのニュースサイトにも掲載された (<https://www.itb.ac.id/news/read/57547/home/itb-and-kyoto-university-strengthen-collaboration-on-geothermal-exploration-technology-development>)。下記はリリース記事の最初の部分である。また、ITB 主催の地球科学・地球資源工学国際会議 International Conference on Geoscience and Earth Resources Engineering (ICGERE) に、「SATREPS and aXis BAGUS (Beneficial and Advanced Geothermal Use System) projects for large enhancement of geothermal power generation」の内容でインドネシア側代表スダルト教授と研究代表者が2020年12月、2021年12月にそれぞれ講演した。いずれもキーノートスピーチである。これらによ

【終了報告書】【210531】



During 24 April 2015 to 24 April 2020, ITB and Kyoto University have collaborated in a research project named "Beneficial and Advanced Geothermal Use System" (BAGUS) which was under the scheme of Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development (SATREPS). The research project was funded by Japan International Cooperation Agency (JICA) for ITB and by the Japan Science and Technology Agency (JST) for Kyoto University. The project was co-partnered by three parties, i.e. Center for Mineral, Coal, and Geothermal Resources (CMCGR) - Geological Agency, Star Energy Geothermal (Wayang Windu) Ltd., and PT Geo Dipa Energi (Persero).

This project was motivated by some global issues such as the manifestation of phenomena suggesting "Global Warming", the need for enhanced use of renewable energy resources, the cost problem in geothermal resource exploration & development, and the vulnerability of geothermal resource. There are three aims of the project, known as 3S, i.e. (i) Detection of steam spots (Steam-Spot Exploration), (ii) Minimization of environmental load (Sustainable Development), and (iii) Maximization of resource and plant uses (Survivability).

By this project, JICA has installed some modern laboratory equipment and software with total budget JPY 282.5 million or equivalent to about IDR 36 billion. All equipment and software were installed in Laboratory of Hydrogeology and Hydrogeochemistry FTTM ITB. The list of equipment are: Automated multipurpose XRD, WD-XRF, Ion Chromatography, Gas Chromatography, Field Spectrometer, Ultra-Micro Balance, Scanning Electron Microscope – EDS, Ultra-Pure Water Purifier System, ICP – MS, Water Stable Isotope, GC-EA Isotope Ratio Mass Spectrometry, Radon and Mercury measurement equipment, ENVI software for remote sensing analysis (installed in Study Program of Geology FITB), and TOUGH software for reservoir modelling (installed in Study Program of Geothermal FTTM). Apart from the BAGUS Project, the equipment is also provided for community services within ITB and other universities and institution e.g. Ministry of Energy and Mineral Resources, Indonesian Institute of Sciences, Indonesian National Narcotics Agency, National Agency of Drug and Food Control, Forensic Laboratory Center - Indonesian National Police, PT Biofarma (Persero), PT Len Industri (Persero), Ministry of Public Works and Public Housing of Republic of Indonesia, etc. The current laboratory's activity can be seen in: <https://lab.fttm.itb.ac.id/hidro/>.

Beside those laboratory facilities, these five years project has also produced some extensive outcomes as follows:

- Publication in International proceedings and journals (> 20 papers).
- Final project for Bachelor program (\pm 20 students) at ITB, Master thesis (\pm 15 students) at ITB, and PhD dissertation (4 students) at Kyoto University.
- Short-term training program in geothermal science and technology at Kyoto University which was held for four batches and participated by \pm 40 junior researcher (master students) of ITB, \pm 5 research assistants of ITB, \pm 6 scientist/engineer/staff of CMCGR (Geological Agency) and geothermal companies.
- Development on the new geothermal sites at Wayang Windu and Patuha geothermal fields, Bandung Regency, West Java.



This year (April 2020 to March 2021) Kyoto University extends the new research collaboration under the scheme of Accelerating Social Implementation for SDGs (Sustainable Development Goals) Achievement or called as aXis Project which is funded by JST. This new project is the implementation of BAGUS Project at Patuha geothermal field with total budget about USD 800 thousand. The title of project is "Accuracy Improvement and Demonstration by Boring Survey of Steam-Spot Detection Technology for Locating Drilling Sites of Geothermal Production Wells". In this project, additional radon and mercury monitoring points and some geophysical surveys such as Audio-Magnetotelluric (AMT) and Transient Electromagnetic (TEM) methods are planned. Moreover, shallow core drilling for thermal gradient measurement and geochemical analysis of core and fluids samples is planned for one well with total depth about 600 m within PT Geo Dipa Energi (Persero)'s working area.

The general activities of BAGUS project can be checked at: <http://bagus-satreps.fttm.itb.ac.id/>

り、インドネシアに SATREPS と aXis プロジェクトを広報でき、日本のプレゼンスの向上に繋がった。

また、World Geothermal Congress（世界地熱会議）は地熱分野では最も規模が大きく、権威のある国際会議であり、5年に一度開催される。その2020年大会（WGC2020）にて下記の8件の発表を行った。著者とタイトルをそれぞれ示す。2020年4月26日～5月2日にかけてアイスランドのレイキャビクで開催される予定であったが、COVID-19の影響により2021年4・5・6・10月に延期になり、会期を分割したオンラインでの開催になった。総発表件数は3000を超え、参加者もそれと同程度であった。これらの発表は主にSATREPSの成果ではあるが、aXisによる最新の成果も一部含めており、関連する研究項目を[]内に示す。いずれの発表でもSATREPSとaXisによる成果であることを提示した。査読を経て、修正の後、8件のプロシーディングはすべて受理され、インターネット上に公開された。WGCで、一つの研究グループが同じプロジェクトの成果を8件も発表したのは稀なことであり、聴衆の関心を引き、質問も多く受けたので、これも本研究グループ、さらには日本のプレゼンスを高めるのに貢献できたと思う。

- [全体] Katsuaki Koike, Taiki Kubo, Koki Kashiwaya, Yohei Tada, Tada-nori Goto, Shigeki Sakurai, Sudarto Notosiswoyo, Mohamad Nur Heriawan, Irwan Iskandar, Asep Saepuloh, Arie Naftali Hawu Hede, Nenny Miryani Saptadji, Sutopo: *Technology development of 'Steam Spot' detection for suitable location of production wells by integrating geoscientific methods.*
- [1-1, 2-2] Mohamad Nur Heriawan, Awwab Hafizh, Suryantini, Taiki Kubo, Katsuaki Koike, Chevy Iskandar: *Spatial correlation model between resistivity data and subsurface permeable zones to optimize the existence of a geothermal reservoir.*
- [1-1, 1-2, 1-5] Taiki Kubo, Ahmad Ali Syafi'i, Mustiatin Mustiatin, Hiroaki Gonnokami, Mohamad Nur Heriawan, Irwan Iskandar, Katsuaki Koike, Sudarto Notosiswoyo: *Effectiveness of radon concentration features in soil gas for specifying hydrothermal ascent paths in the Wayang Windu geothermal field, Indonesia.*
- [1-2] Koki Kashiwaya, Bunji Yatomi, Yudi Rahayudin, Riostantieka Mayandari Shoedarto, Yohei Tada, Takanori Kagoshima, Yuji Sano, Katsuaki Koike: *Gas origin and fluid circulation regimes estimated based on gas geochemistry in geothermal areas around the Bandung Basin, Indonesia.*
- [1-3] Riostantieka Mayandari Shoedarto, Yohei Tada, Koki Kashiwaya, Katsuaki Koike, Dwiyoarani Malik, Irwan Iskandar: *Application of rare-earth elements in spring waters to indicate surficial water-rock interaction process in the Wayang Windu geothermal field, Indonesia.*
- [1-3] Yudi Rahayudin, Koki Kashiwaya, Yohei Tada, Katsuaki Koike, Irwan Iskandar, Andi Susmanto: *Characterizing geothermal system of the Tampomas volcano, West Java, Indonesia by water chemistry and stable isotope analyses.*
- [1-4] Panggea Ghiyats Sabrian, Asep Saepuloh, Katsuaki Koike: *Characterization of topographic changes in geothermal fields around Bandung Basin, Indonesia using SBAS-InSAR technique.*
- [1-4] Nurita Putri Hardiani, Asep Saepuloh, Nenny Saptadji, Katsuaki Koike: *Clarification of generation mechanism of distinct pressure and temperature regimes in geothermal systems around the Bandung Basin, Indonesia by numerical simulation.*

【終了報告書】【210531】

また、2022年2月11日にベトナム国家大学科学学校で開催される国際シンポジウム Hanoi Geoengineering 2022 に下記の2件の発表とプロシーディングが受理された。第8回目の Hanoi Geoengineering であり、オーストラリア、アメリカ、日本を含む複数の国から毎回200名以上の参加者がある。①は研究項目[3-3]の成果を含み、基調講演に選ばれている。②は項目[1-1]の成果を含む。世界的なオミクロン株の感染拡大状況からオンラインでの発表にはなるが、これらの発表によっても、特に ASEAN 諸国の参加者に aXis の成果をアピールできる。

- ① **[Keynote Speech]** Katsuaki Koike, Vitor Ribeiro de Sá, Yusei Ieki, Taiki Kubo: *Improvement of spatial modeling accuracy for multiple geologic data by advanced geostatistical and deep learning methods.*
- ② Taiki Kubo, Hiroaki Gonnokami, Katsuaki Koike, Mohamad Nur Heriawan, Irwan Iskandar: *Development and application of remote sensing-based analysis for detecting geothermal anomalies in thick vegetation areas.*

V. 成果発表等【研究開始～現在の全期間】（公開）

VI. 投入実績【研究開始～現在の全期間】（非公開）

VII. その他（非公開）

以上

V. 成果発表等

(1) 論文発表等【研究開始～現在の全期間】(公開)

①原著論文(相手国側研究チームとの共著)

年度	著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ～おわりのページ	DOIコード	国内誌/ 国際誌の別	発表済 /in press /acceptedの別	特記事項(分野トップレベル雑誌への掲載など、 特筆すべき論文の場合、ここに明記ください。)
2020	Riostantieka Mayandari Shoedarto, Yohei Tada, Koki Kashiwaya, Katsuaki Koike, Irwan Iskandar, Dwiyoarani Malik, Boyke Bratakusuma, "Investigation of meteoric water and parent fluid mixing in a two-phase geothermal reservoir system using strontium isotope analysis: a case study from Southern Bandung, West Java, Indonesia", <i>Geothermics</i> , 2021, vol. 94.	10.1016/j.geothermics.2021.102096	国際誌	発表済	地熱分野の科学・工学に関する最も代表的な国際誌への掲載(最新のインパクトファクター4.284)
2021	Pangaea Ghiyats Sabrian, Asep Saepuloh, Koki Kashiwaya, Katsuaki Koike, "Combined SBAS-InSAR and geostatistics to detect topographic change and fluid paths in geothermal areas", <i>Journal of Volcanology and Geothermal Research</i> , 2021, vol. 416, 107272, 17 p.	10.1016/j.volgores.2021.107272	国際誌	発表済	Geothermicsとともに、地熱分野の科学に関する代表的な国際誌への掲載(最新のインパクトファクター2.789)
2021	Taiki Kubo, Mohamad Nur Heriawan, Irwan Iskandar, Katsuaki Koike, "Development and application of remote sensing-based analysis for detecting geothermal anomalies in thick vegetation areas", <i>Proceedings of International Symposium Hanoi Geoengineering 2022</i> , pp. 20-25.		国際誌	発表済	

論文数 3 件
 うち国内誌 0 件
 うち国際誌 3 件
 公開すべきでない論文 0 件

②原著論文(上記①以外)

年度	著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ～おわりのページ	DOIコード	国内誌/ 国際誌の別	発表済 /in press /acceptedの別	特記事項(分野トップレベル雑誌への掲載など、 特筆すべき論文の場合、ここに明記ください。)
2021	Katsuaki Koike, Vitor Ribeiro de Sá, Yusei Ieki, Taiki Kubo, "Improvement of spatial modeling accuracy for multiple geologic data by advanced geostatistical and deep learning methods", <i>Proceedings of International Symposium Hanoi Geoengineering 2022</i> , pp. 109-116.		国際誌	発表済	

論文数 1 件
 うち国内誌 0 件
 うち国際誌 1 件
 公開すべきでない論文 0 件

③その他の著作物(相手国側研究チームとの共著)(総説、書籍など)

年度	著者名,タイトル,掲載誌名,巻数,号数,頁,年		出版物の種類	発表済 /in press /acceptedの別	特記事項

著作物数 0 件
公開すべきでない著作物 0 件

④その他の著作物(上記③以外)(総説、書籍など)

年度	著者名,論文名,掲載誌名,出版年,巻数,号数,はじめ-おわりのページ		出版物の種類	発表済 /in press /acceptedの別	特記事項

著作物数 0 件
公開すべきでない著作物 0 件

⑤研修コースや開発されたマニュアル等

年度	研修コース概要(コース目的、対象、参加資格等)、研修実施数と修了者数	開発したテキスト・マニュアル類	特記事項

V. 成果発表等

(2) 学会発表【研究開始～現在の全期間】(公開)

①学会発表(相手国側研究チームと連名)(国際会議発表及び主要な国内学会発表)

年度	国内/ 国際の別	発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、年月日等	招待講演 /口頭発表 /ポスター発表の別
2020	国内学会	権守 宏明 ¹ ・久保 大樹 ¹ ・ナフタリ ハウ ヘデ アリー ² ・サエプロフ アセブ ² ・小池 克明 ¹ (1: 京都大学, 2: バンドン工科大学), "ハイパースペクトル衛星画像の線形分離法による高植生域地熱地域での熱水変質帯分布の抽出", JpGU-AGU Joint Meeting 2020, オンライン, 2020年7月12-15日	ポスター発表
2020	国内学会	Tada-nori Goto ¹ , Yuji Yamada ¹ , Mohamad Nur Heriawan ² , Irwan Iskandar ² , Katsuaki Koike ¹ (1: 京都大学, 2: バンドン工科大学), "Detection of fluid passes by audio-frequency magnetotelluric survey in the Wayang-Windu Geothermal area", Indonesia, 第148回地球電磁気・地球惑星圏学会講演会(2020年秋季学会), オンライン, 2020年11月3日.	口頭発表
2020	国内学会	犬飼 郁也 ¹ ・柏谷 公希 ¹ ・Yudi Rahayudin ² ・多田 洋平 ¹ ・小池克明 ¹ (1: 京都大学, 2: インドネシア鉱物資源省), "インドネシアTampomas地熱地域における複数の放射性同位体を用いた地熱流体の起源と滞留時間の推定", 日本地下水学会2020年秋季講演会, オンライン, 2020年11月4-5日.	口頭発表
2020	国内学会	久保大樹 ¹ ・柏谷公希 ¹ ・多田洋平 ¹ ・Riostantieka M. Shoedarto ¹ ・小池克明 ¹ ・Mohamad Nur Heriawan ² ・Irwan Iskandar ² ・Sudarto Notosiswoyo ² (1: 京都大学, 2: バンドン工科大学), "地熱地帯における各種探査データの統合による蒸気スポットの存在度評価", 日本地熱学会 令和2年学術講演会, 講演要旨のみ, 2020年11月11日.	ポスター発表
2020	国内学会	Panggea Ghiyats Sabrian ¹ ・Katsuaki Koike ¹ ・Asep Saepuloh ² (1: 京都大学, 2: バンドン工科大学), "Characterization of surface deformation pattern induced by production and reinjection through PS-InSAR method in the Patuha Geothermal Field, West Java, Indonesia", 日本地熱学会 令和2年学術講演会, 講演要旨のみ, 2020年11月11日.	ポスター発表
2020	国内学会	池本 龍平 ¹ ・久保 大樹 ¹ ・ヘリアワン ヌル モハメド ² ・小池 克明 ¹ (1: 京都大学, 2: バンドン工科大学), "地熱地帯を対象としたGEOFRACIによる3次元亀裂分布モデリングと熱水の主要上昇経路の推定", 資源・素材学会 2021年度 春季大会, オンライン, 2021年3月8-10日.	口頭発表
2020	国内学会	久保 大樹 ¹ ・権守 宏明 ¹ ・ヘリアワン モハメド ² ・イスカンダル イルワン ² ・小池 克明 ¹ (1: 京都大学, 2: バンドン工科大学), "複合的なりもートセンシング解析手法を用いた高植生被覆域での地熱兆候点検出", 資源・素材学会 2021年度 春季大会, オンライン, 2021年3月8-10日.	口頭発表
2021	国際学会	Panggea Ghiyats Sabrian ¹ , Asep Saepuloh ² , Katsuaki Koike ¹ , "Characterization of topographic changes in geothermal fields around Bandung Basin, Indonesia using SBAS-InSAR technique", World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik, Iceland, オンライン, 2021年4月14日.	ポスター発表
2021	国際学会	Katsuaki Koike ¹ , Taiki Kubo ¹ , Koki Kashiwaya ¹ , Yohei Tada ¹ , Tada-nori Goto ² , Shigeki Sakurai ³ , Sudarto Notosiswoyo ⁴ , Mohamad Nur Heriawan ⁴ , Irwan Iskandar ⁴ , Asep Saepuloh ⁴ , Arie Naftali Hawu Hede ⁴ , Nenny Miryani Saptadji ⁴ , Sutopo ⁴ (1: 京都大学, 2: 兵庫県立大学, 3: 開志専門職大学, 4: バンドン工科大学), "Technology development of 'Steam Spot' detection for suitable location of production wells by integrating geoscientific methods", World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik, Iceland, オンライン, 2021年5月12日.	口頭発表
2021	国際学会	Mohamad Nur Heriawan ¹ , Awwab Hafizh ¹ , Suryantini ¹ , Taiki Kubo ² , Katsuaki Koike ² , Chevy Iskandar ¹ (1: バンドン工科大学, 2: 京都大学), "Spatial correlation model between resistivity data and subsurface permeable zones to optimize the existence of a geothermal reservoir", World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik, Iceland, オンライン, 2021年5月12日.	ポスター発表
2021	国際学会	Taiki Kubo ¹ , Ahmad Ali Syafi'i ² , Mustiatin Mustiatin ² , Hiroaki Gonnokami ¹ , Mohamad Nur Heriawan ² , Irwan Iskandar ² , Katsuaki Koike ¹ , Sudarto Notosiswoyo ² (1: 京都大学, 2: バンドン工科大学), "Effectiveness of radon concentration Features in soil gas for specifying hydrothermal ascent paths in the Wayang Windu geothermal field, Indonesia", World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik, Iceland, オンライン, 2021年5月12日.	口頭発表
2021	国際学会	Riostantieka Mayandari Shoedarto ¹ , Yohei Tada ¹ , Koki Kashiwaya ¹ , Katsuaki Koike ¹ , Dwiogarani Malik ² , Irwan Iskandar ³ (1: 京都大学, 2: Star Energy Ltd., 3: バンドン工科大学), "Application of rare-earth elements in spring waters to indicate surficial water-rock interaction process in the Wayang Windu geothermal field, Indonesia", World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik, Iceland, オンライン, 2021年5月12日.	口頭発表
2021	国際学会	Yudi Rahayudin ¹ , Koki Kashiwaya ² , Yohei Tada ² , Katsuaki Koike ² , Irwan Iskandar ³ , Andi Susmanto ³ (1: インドネシア・エネルギー・鉱物資源省, 2: 京都大学, 3: バンドン工科大学), "Characterizing geothermal system of the Tampomas volcano, West Java, Indonesia by water chemistry and stable isotope analyses", World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik, Iceland, オンライン, 2021年5月12日.	ポスター発表
2021	国際学会	Koki Kashiwaya ¹ , Bunji Yatomi ¹ , Yudi Rahayudin ² , Riostantieka Mayandari Shoedarto ¹ , Yohei Tada ¹ , Takanori Kagoshima ³ , Yuji Sano ³ , and Katsuaki Koike ¹ (1: 京都大学, 2: インドネシア・エネルギー・鉱物資源省, 3: 東京大学), "Gas origin and fluid circulation regimes estimated based on gas geochemistry in geothermal areas around the Bandung Basin, Indonesia", World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik, Iceland, オンライン, 2021年10月27日.	口頭発表
2021	国際学会	Nurita Putri Hardiani ¹ , Katsuaki Koike ¹ , Nenny Saptadji ² , Asep Saepuloh ² (1: 京都大学, 2: バンドン工科大学), "Clarification of generation mechanism of distinct pressure and temperature regimes in geothermal systems around the Bandung Basin, Indonesia by numerical simulation", World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik, Iceland, オンライン, 2021年10月27日.	口頭発表
2021	国際学会	久保 大樹 ¹ ・権守 宏明 ¹ ・ヘリアワン モハメド ² ・イスカンダル イルワン ² ・小池 克明 ¹ (1: 京都大学, 2: バンドン工科大学), "ハイパースペクトル衛星画像に基づく植生ストレス指数分布を用いた高植生被覆地域からの地熱流体パスの検出", JpGU-AGU Joint Meeting 2021, オンライン, 2021年5月30日-6	口頭発表

2021	国際学会	後藤 忠徳 ¹ , 大場 将平 ¹ , Heriawan Mohamad Nur ² , Iskandar Irwan ² , 久保 大樹 ³ , 柏谷 公希 ³ , 小池 克明 ³ (1: 兵庫県立大学, 2: バンドン工科大学, 3: 京都大学), "Near-surface geothermal fluids conduit imaged by audio-frequency magnetotelluric survey in a hydrothermal area, Indonesia", JpGU-AGU Joint Meeting 2021, オンライン, 2021年5月30日-6月6日.	口頭発表
2021	国内学会	久保 大樹 ¹ , 権守 宏明 ¹ , ヘリアワン モハメドヌル ² , イスカンダル イルワン ² , 小池 克明 ¹ (1: 京都大学, 2: バンドン工科大学), "ハイパースペクトル衛星画像解析とラドン測定による高植生被覆地域での地熱流体上昇地点の絞り込み", GEOINFORUM-2021, オンライン, 2021年6月17日-18日.	口頭発表
2021	国内学会	池本 龍平 ¹ , 久保 大樹 ¹ , ヘリアワン モハメドヌル ² , 小池 克明 ¹ (1: 京都大学, 2: バンドン工科大学), "熱水の上昇経路特定を目指した地熱地帯での地球統計学的3次元亀裂分布モデリング", GEOINFORUM-2021, オンライン, 2021年6月17日-18日.	口頭発表
2021	国内学会	後藤 忠徳 ¹ , 大場 将平 ¹ , 山田 勇次 ² , Mohamad Nur Heriawan ³ , Irwan Iskandar ³ , 久保 大樹 ² , 柏谷 公希 ² , 小池 克明 ² (1: 兵庫県立大学, 2: 京都大学, 3: バンドン工科大学), "土壌ガス分析と電磁探査に基づく地熱地域の断裂帯の検出: インドネシアでの例", 資源・素材学会 2021年度秋季大会, オンライン.	口頭発表
2021	国内学会	小池 克明 ¹ , 柏谷 公希 ¹ , 久保 大樹 ¹ , 多田 洋平 ¹ , スダルトリオスタンティカ ¹ , 後藤 忠徳 ² , ノトシス ウォオ スダルト ³ , ヘリアワン モハメド ³ , イスカンダール イルワン ³ , ラハユディン ユディ ⁴ (1: 京都大学, 2: 兵庫県立大学, 3: バンドン工科大学, 4: インドネシア・エネルギー・鉱物資源省), "地熱生産井掘削地点特定を目指した蒸気スポット検出技術の高精度化の試み", 日本地熱学会 令和3年学術講演会.	口頭発表
2021	国内学会	柏谷 公希 ¹ , 犬飼 郁也 ¹ , Rahayudin Yudi ² , Shoedarto Riostantieka Mayandari ¹ , 多田 洋平 ¹ , 小池 克明 ¹ (1: 京都大学, 2: インドネシア・エネルギー・鉱物資源省), "インドネシア, バンドン盆地周辺の地熱地域で湧出する温泉水の放射性塩素同位体による滞留時間推定", 日本地下水学会2021年秋季講演会, ハイブリッド開催, 12月2-4日.	口頭発表
2021	国際学会	Katsuaki Koike ¹ , Taiki Kubo ¹ , Koki Kashiwaya ¹ , Yohei Tada ¹ , Tada-nori Goto ² , Shigeki Sakurai ³ , Sudarto Notosiswoyo ⁴ , Mohamad Nur Heriawan ⁴ , Irwan Iskandar ⁴ , Asep Saepuloh ⁴ , Arie Naftali Hawu Hede ⁴ , Nenny Miryani Saptadji ⁴ , Sutopo ⁴ (1: 京都大学, 2: 兵庫県立大学, 3: 開志専門職大学, 4: バンドン工科大学), "SATREPS and aXis BAGUS (Beneficial and Advanced Geothermal Use System) projects for large enhancement of geothermal power generation", The International Conference on Geoscience and Earth Resources Engineering (ICGERE 2021), オンライン, 2021年12月8日.	招待講演
2021	国内学会	Kusumasari B.A. ¹ , Kashiwaya K. ¹ , Tada Y. ¹ , Koike K. ¹ , Rahayudin Yudi ² (1: 京都大学, 2: インドネシア・エネルギー・鉱物資源省), "Subsurface Temperature Estimation by Multicomponent Geothermometry with a Case Study of Patuha Geothermal Field, West Java, Indonesia", 資源・素材学会関西支部第18回若手研究者・学生のための研究発表会, 2021年12月10日.	口頭発表
2021	国際学会	Taiki Kubo ¹ , Mohamad Nur Heriawan ² , Irwan Iskandar ² , Katsuaki Koike ¹ (1: 京都大学, 2: バンドン工科大学), "Development and application of remote sensing-based analysis for detecting geothermal anomalies in thick vegetation areas", International Symposium Hanoi Geoengineering 2022, オンライン.	口頭発表
2021	国内学会	Heru Berian Pratama ¹ , Ali Ashat ² , Jonathan Sharon Widiatmo ² , Sutopo ² , Katsuaki Koike ¹ (1: 京都大学, 2: バンドン工科大学), "Sustainability assessment of geothermal power generation under various conversion technologies using numerical reservoir modelling", 資源・素材学会 2022年度 春季大会, オンライン, 2022年3月7-9日.	口頭発表

招待講演	1
口頭発表	19
ポスター発表	6

②学会発表(上記①以外)(国際会議発表及び主要な国内学会発表)

年度	国内/ 国際の別	発表者(所属)、タイトル、学会名、場所、年月日等	招待講演 /口頭発表 /ポスター発表の別
2020	国内学会	Tada-nori Goto, Yuji Yamada (京都大学), "Effective combination of MT and GDS survey for three-dimensional imaging of geothermal reservoir", JpGU-AGU Joint Meeting 2020, オンライン, 2020年7月12日-7月15日.	口頭発表
2020	国内学会	冢木優成・小池克明(京都大学), "ニューラルクリギングと温度検層データを用いた日本全域での三次元地温分布のモデリング", JpGU-AGU Joint Meeting 2020, オンライン, 2020年7月12日-7月15日.	口頭発表
2020	国内学会	冢木優成・久保大樹・小池克明(京都大学), "スパースデータの内挿・外挿に適したニューラルネットワークと広域地温分布モデリングへの応用", GEOINFORUM-2020, オンライン, 2020年10月23日	口頭発表
2020	国内学会	Riostantieka Mayandari Shoedarto, 多田洋平, 柏谷公希, 小池克明(京都大学), "Identification of meteoric water incursion to a high-temperature geothermal reservoir by rare earth elements and isotope oxygen-18 analyses", GEOINFORUM-2020, オンライン, 2020年10月23日.	口頭発表
2020	国内学会	Riostantieka Mayandari Shoedarto, 多田洋平, 柏谷公希, 小池克明(京都大学), "Impacts of regional faults on groundwater flow regimes elucidated from the alkali earth metals, transition metals, and 87Sr/86Sr analysis in the Southern Bandung Geothermal Field, Indonesia", 日本地下水学会2020年秋季講演会, オンライン, 2020年11月4-5日.	口頭発表
2020	国内学会	Nurita Putri Hardiani, Katsuaki Koike (京都大学), "Simulation and clarification of steady state condition by considering a high concentration effect of non-condensable gas in a geothermal reservoir: A case study of Patuha geothermal eld, West Java, Indonesia", 日本地熱学会 令和2年学術講演会, 講演要旨のみ, 2020年11月11日.	ポスター発表
2020	国内学会	Riostantieka M. Shoedarto, Yohei Tada, Koki Kashiwaya, Katsuaki Koike (京都大学), "Estimation of infiltration process of meteoric water into geothermal reservoir through an analysis of strontium isotopic exchange between water and rock", 日本地熱学会 令和2年学術講演会, 講演要旨のみ, 2020年11月11日.	ポスター発表
2020	国際学会	Sudarto Notosiswoyo, Heriawan Mohamad Nur (バンドン工科大学), "BAGUS (Beneficial and Advanced Geothermal Use System)-SATREPS (Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development)- project summary", 2nd International Conference on Geoscience and Earth Resources Engineering (ICGERE) 2020, オンライン, 2020年12月16日.	招待講演
2021	国際学会	Nagi Yamashita, Tada-nori Goto(兵庫県立大学), "Relationship between detailed three-dimensional resistivity structure and fault distributions in a geothermal area: a case study in Japan", The 14th SEGJ International Symposium, オンライン, 2021年10月21日.	口頭発表
2021	国内学会	Riostantieka M. Shoedarto, Yohei Tada, Koki Kashiwaya, Katsuaki Koike (京都大学), "REE analysis as an effective method to shallow hydrogeology in a geothermal system (地熱システムでの浅層水理地質に有効なREE解析)", 日本地熱学会 令和3年学術講演会, 2021年10月27-29日.	ポスター発表
2021	国内学会	Nurita Putri Hardiani, Katsuaki Koike (京都大学), "Clarifying non-condensable gas distribution in a geothermal field by numerical modeling", 資源・素材学会関西支部第18回若手研究者・学生のための研究発表会, 2021年12月10日.	口頭発表
2021	国内学会	冢木優成・小池克明・久保大樹(京都大学), "種々の地殻情報と機械学習を用いた日本全域での地温と臨界点の3次元分布推定", 資源・素材学会関西支部第18回若手研究者・学生のための研究発表会, 2021年12月10日.	口頭発表
2021	国内学会	Fikriansyah Ersyad, Mohamad Nur Heriawan, Irwan Iskandar (バンドン工科大学), "Spatial Distribution of Radon Gas Concentration by Considering the Lineament Densities Extracted from Digital Elevation Model (DEM) at Patuha Geothermal Field, West Java, Indonesia", ITB Graduate School Conference (i-GSC 2021), 2021年12月22日.	口頭発表
2021	国際学会	Katsuaki Koike, Vitor Ribeiro de Sá, Yusei Ieki, and Taiki Kubo (京都大学), "Improvement of spatial modeling accuracy for multiple geologic data by advanced geostatistical and deep learning methods", Hanoi Geoengineering 2022, オンライン, 2022年2月11-12日.	招待講演

招待講演	2
口頭発表	9
ポスター発表	3

V. 成果発表等

(3) 特許出願【研究開始～現在の全期間】(公開)

①国内出願

	出願番号	出願日	発明の名称	出願人	知的財産権の種類、出願国等	相手国側研究メンバーの共同発明者への参加の有無	登録番号 (未登録は空欄)	登録日 (未登録は空欄)	出願特許の状況	関連する論文のDOI	発明者	発明者所属機関	関連する外国出願※
No.1													
No.2													
No.3													

国内特許出願数 0 件

公開すべきでない特許出願数 0 件

②外国出願

	出願番号	出願日	発明の名称	出願人	知的財産権の種類、出願国等	相手国側研究メンバーの共同発明者への参加の有無	登録番号 (未登録は空欄)	登録日 (未登録は空欄)	出願特許の状況	関連する論文のDOI	発明者	発明者所属機関	関連する国内出願※
No.1													
No.2													
No.3													

外国特許出願数 0 件

公開すべきでない特許出願数 0 件

V. 成果発表等

(4) 受賞等【研究開始～現在の全期間】(公開)

①受賞

年度	受賞日 (例:2020/4/1)	賞の名称	業績名等 (「〇〇の開発」など)	受賞者	主催団体	プロジェクトとの関係 (選択)	特記事項
2021	2021/12/10	資源・素材学会関西支部 第18回若手研究者・学生 のための研究発表会・優 秀発表賞	「種々の地殻情報と機械学習 を用いた日本全域での地温 と臨界点の3次元分布推定」 の発表に対して	家木 優 成(京都 大学工学 研究科博 士前期課 程2年)	(一社)資源・ 素材学会関 西支部	3.一部当課題研究の成果 が含まれる	

1 件

②マスコミ(新聞・TV等)報道

年度	掲載日 (例:2020/4/1)	掲載媒体名	タイトル/見出し等	掲載面	プロジェクトとの関係 (選択)	特記事項
2020	2020/7/22	SIEDOO(インドネシア教 育ニュース)	地熱資源プロジェクトによる 京都大との連携強化	Web 版	3.一部当課題研究の成果 が含まれる	SATREPSの成果が 主であるが、継続し て共同研究が実施さ れていることにも触 れられている。

1 件

V. 成果発表等

(5) ワークショップ・セミナー・シンポジウム・アウトリーチ等／実証試験等【研究開始～現在の全期間】(公開)

① ワークショップ・セミナー・シンポジウム・アウトリーチ等

年度	開催日 (例:2020/4/1)	名称	場所 (開催国)	参加人数 (相手国からの招聘者数)	公開/ 非公開の別	概要
2020	2020/6/2	キックオフミーティング	オンライン	16(10)	非公開	研究コアメンバーの顔合わせ、研究目標・内容・スケジュール・到達点などの共有
2020	2020/7/28	全体会議	オンライン	10(5)	非公開	研究計画の確認、研究進捗状況報告、ボーリング調査実現に向けての課題とスケジュールに関する意見交換など
2020	2020/11/20	全体会議	オンライン	16(10)	非公開	研究の進捗状況報告、ボーリング調査実現に向けての意見交換、今年度末までの研究内容と達成目標など
2020	2021/1/22	全体会議	オンライン	16(10)	非公開	研究の進捗状況報告、ボーリング調査実現に向けての意見交換、次年度の研究計画とスケジュールなど
2020	2021/3/30	全体会議	オンライン	10(5)	非公開	研究の進捗状況報告、ボーリング地点の候補地と調査実現に向けての意見交換、解決すべき課題など
2021	2021/4/28	全体会議	オンライン	15(6)	非公開	ボーリング地点の候補地と調査実現に向けて、研究スケジュール、解決すべき課題などについての意見交換
2021	2021/7/2	全体会議	オンライン	11(4)	非公開	研究の進捗状況とボーリング調査準備状況の報告、今後の研究計画とスケジュール、解決すべき課題などに関する
2021	2021/9/3	全体会議	オンライン	8(4)	非公開	ボーリング調査の準備状況の報告、ボーリング調査のスケジュールとコアを用いた分析とデータ解析に関する意見交換、研究進捗状況報告など
2021	2021/11/1	全体会議	オンライン	15(8)	非公開	ボーリング調査の準備状況の報告、スケジュールとコアを用いた分析とデータ解析に関する意見交換、研究進捗状況・論文作成状況報告、など
2021	2021/12/21	全体会議	オンライン	15(8)	非公開	ボーリング調査状況の報告、問題点の共有と解決法、今後のスケジュールと研究成果の取り纏め方などに関する意見交換
2021	2022/1/17	全体会議	オンライン	16(8)	非公開	ボーリング調査状況の報告、問題点の共有と解決法、今後のスケジュールとコアを用いた分析とデータ解析、研究成果の纏め方に関する再度の意見交換
2021	2022/2/22	全体会議	オンライン	12(6)	非公開	ボーリング調査の進捗状況の確認、プロジェクト終了時までの進展の見込み、問題点の共有と解決法、今後のスケジュールなどに関する意見交換
2021	2022/3/9	全体会議	オンライン	10(4)	非公開	ボーリング調査とコア分析の進捗状況の確認、プロジェクト終了時までの進展の見込み、修了後の共同研究の進め方などに関する意見交換

13 件

② 実証試験等

年度	実施期間(実施日)	実証項目	実施場所	概要
2021	2022年2・3月	探査ボーリングの実施による蒸気スポットの存在の実証と位置の推定	インドネシア Patuha地熱地区	データの総合解析により、蒸気スポットの存在可能性が高いと評価した地点においてボーリング調査を実施し、コアの鉱物・化学組成分析、温度測定によって貯留層が存在すること、熱水の上昇域であること、および貯留層が高圧であることを確認する。

1 件