

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

## 令和2（2020）年度実施報告書

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

研究の進捗状況を以下に図示する。

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 追加結果をもとに再評価			
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探査を代用				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錐結果の総合評価	ボーリング準備と実施				全データの回収完了 試料採取と分析 データ解析			
機材導入 ○ ラドン濃度測定器 ○ 無人航空探査機 (ドローン)	2機種とも調達済・R3年3月中旬までITBに貸与中							
渡航活動 (令和3年1月末での状況)	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) ボーリングコア分析・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・6日)			

\* 新型コロナ禍の影響で相手国に渡航できなかったため、現地計測はいずれもインドネシア側で実施した。

\* ボーリングの実施は一般競争入札の準備に時間を要し、未達である。

### (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、後述のように、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ている。

ボーリング調査は一般競争入札になるが、この入札実施のための内部調整、およびカウンターパート

【令和2年度実施報告書】【210531】

側との摺り合わせに予想外の時間を要し、年度内での実施に至らなかった。2021年度早期の入札実施と調査開始を目指し、必要となる情報の収集と仕様書の改善を行っている。また、調査によって得られる試料の分析・解析の準備は整っている。

## 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する。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 地熱地区を選定する。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」を用いている。

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 プロジェクト終了一年以内に上位目標達成の見込みが立ち、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、高額の前算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「CO<sub>2</sub>排出量の削減」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 CO<sub>2</sub> を排出する石炭火力発電換算（943 g-CO<sub>2</sub>/kWh；原子力・エネルギー図面集 2017）で、年間約 24.7 Mt-CO<sub>2</sub> 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、SGDs15「陸の豊かさを守ろう」にも貢献できる。

下記に令和 3 年 4 月時点において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今年度は全くできなかったが、オンライン会議を駆使したインド

ネシア側との密接な連携により、研究の遂行を実現することができた。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・人的支援を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継続させ、共同研究事業を展開させることが出来た。これらは時限期間で完遂するものではないので、最終年度となる2021年度およびそれ以降も継続できるようにITBとの持続的な協力関係と共同研究を発展させる。

#### ➤ 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5.55cmの数値標高モデルの作成に成功した。先行して実施したインドネシア地理空間情報局の公開データを用いた亀裂分布解析結果では、Patuha地区北部での亀裂密集帯が温泉の位置と対応することを確かめられた。ドローンの納入時期と雨季が重なってしまったため、Patuha地区全体でのフライトと地形測量の実施が遅れている。今後は早期に地区全体にわたるフライトを実施し、超高解像地形モデルを作成することで、亀裂分布形態を詳細に明らかにする。

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ている。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を確認した。項目1-1での亀裂分布解析結果に基づき、亀裂集中部や複数の断層の交点に計測井を追加で設置し、濃度データを増やすことでラドン濃度分布とその支配要因を明らかにする予定である。

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。熱水の起源を確かめるための一部ITBでは実施できない分析を京大側で実施するため、試料の国際輸送を手配中である。しかしながら、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)が、新型コロナウイルス禍により外来者による機器利用の受付を停止していたため、分析が遅れている。2021年度上半期での完了を目指し、分析を進める。

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で示したドローン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はまだ計算に取り入れておらず、計算格子も粗い。これらを考慮し、細かい計算格子を用いることで、発電に特に適した蒸気スポットの特定を図る。

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ラドン濃度(16点)、熱水・ガス化学組成(12点)、およびリニアメント密度の各データを用いて、予察的なポテンシャルマップを作成した。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。上記4項目での計測・分析

データとシミュレーション結果を順次追加することで、ポテンシャルマップの精度を向上させていく。

#### ➤ 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。今後は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 探査測点を複数追加し、データを取得する。

項目 2-2 では上記 15 地点のうち、8 地点の MT 探査データの解析を実施し、疑似 3 次元地下比抵抗構造モデルを作成した。これから地下約 500 m～1500 m に地熱変質帯とみなせる低比抵抗層が存在すること、噴火クレータ付近は地表付近まで低比抵抗が連続することが明らかとなった。さらに、地熱貯留層相当の低比抵抗層はクレータ直下には広がっておらず、クレータはむしろ低比抵抗層の北東端に位置することなども見出すことができた。今後はすべての MT 探査・TEM 探査データを用いて、3 次元地下構造の解析に取り組む。また、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も対比し、蒸気スポットの位置の特定を図る。

#### ➤ 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を 2 箇所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も作成した。これら 2 点により、ボーリング調査のための準備は整った。ボーリング調査は一般競争入札になるが、この入札実施のための内部調整、およびカウンターパート側との摺り合わせに予想外の時間を要し、年度内での実施に至らなかった。2021 年度早期の入札実施と調査開始を目指し、必要となる情報の収集と仕様書の改善を行っている。

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

【令和 2 年度実施報告書】【210531】

項目 1-1 において、2020 年 12 月に ITB へのドローンの輸出・納品が完了し、2021 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。インドネシアでは 12 月から 4 月までが雨季になるため、Patuha 地区全体にわたっての長時間のフライトをまだ実施できていないが、乾季を待ってフライトとデータ取得を行う。

また、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、これから亀裂分布を先行して推定した（図 2）。DEMNAS の空間分解能は約 7 m であるが、これを他データとの比較・統合がしやすいように 10 m メッシュに変換した後に、リニアメント解析を実施した。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ところ、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。さらに、リニアメント密度マップを他のデータと統合し、実施項目 1-4 の蒸気スポットポテンシャル評価マップを作成した。次のステップとして、ドローン撮影によって作成する超高解像度地形モデルを用いてリニアメントを抽出し、亀裂分布をさらに詳細に推定し、蒸気スポットの高精度検出に繋げる。

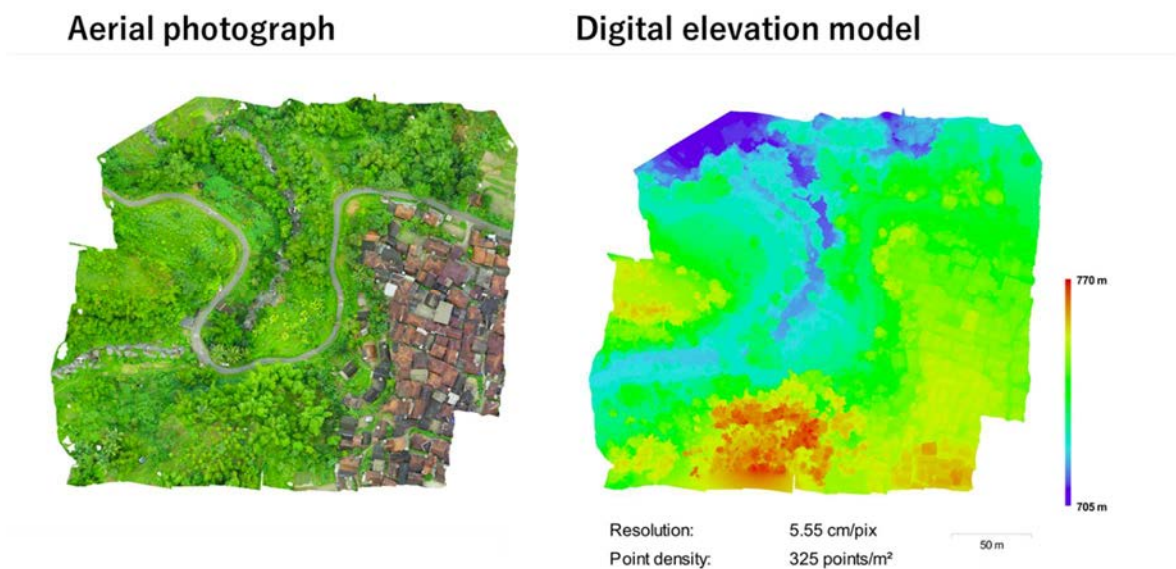


図 1 バンドン市近郊(Cibatuhideung)におけるドローン写真(左)と作成された数値地形モデル(右)。数値地形モデルの解像度は画素当たり 5.55 cm である。

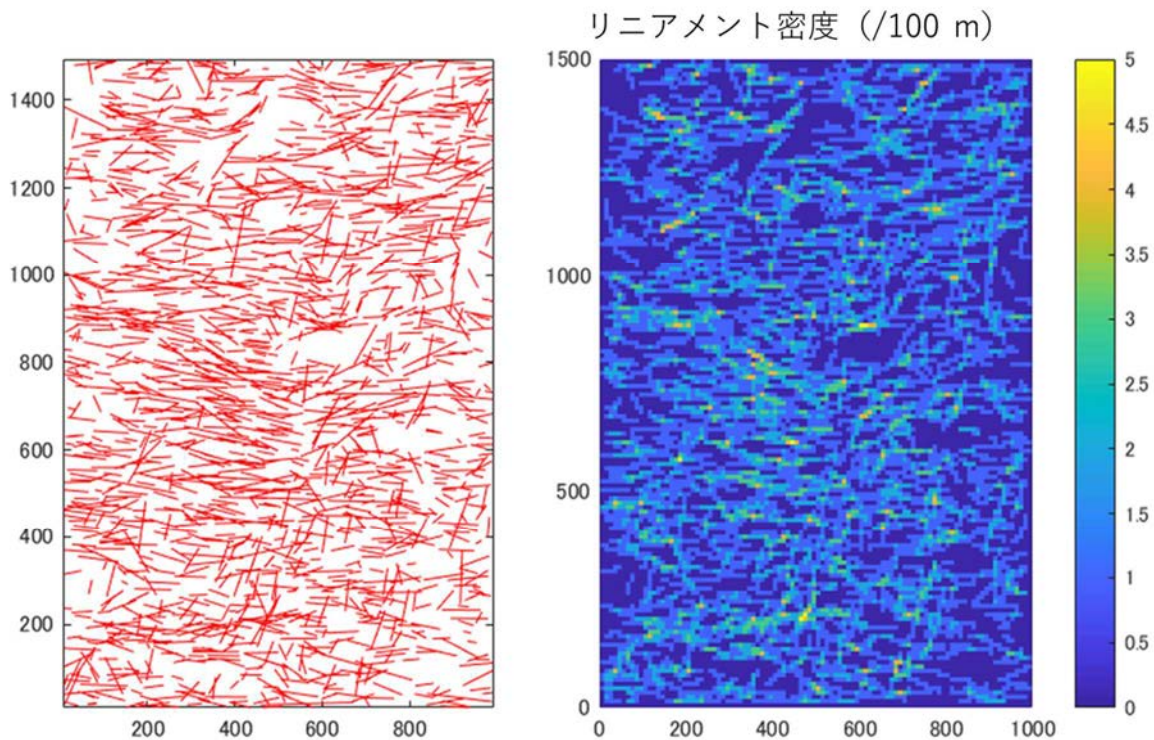


図2 10 m メッシュの数値地形モデルを用いた Patuha 地区のリニアメント分布図（左）と 100 m メッシュでのリニアメント分布密度マップ。領域中央付近に加えて、北部でも温泉の分布に対応するリニアメント密集部を確認できる。

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い、ガス組成分析も実施中である。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 3（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 3（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。



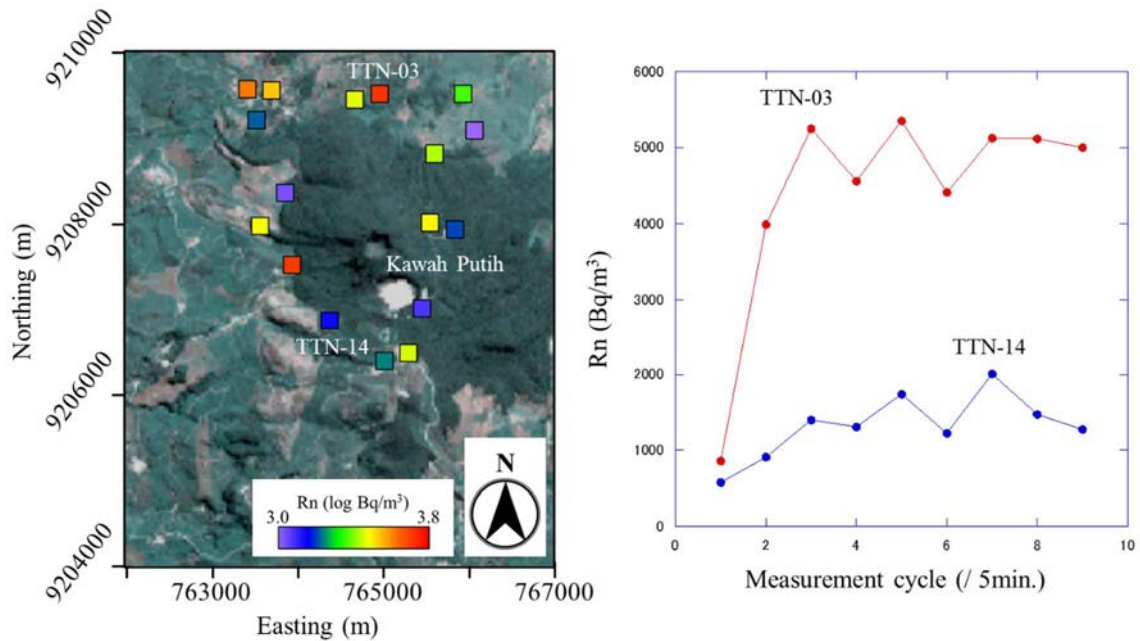


図3 Patuha 地区におけるラドン濃度測定結果。(左) 17 箇所の計測井でのラドン濃度分布 (2020 年 9 月) と (右) 代表的な 2 測点でのラドン濃度の時間変化パターン。

項目 1-3 では、SATREPS プロジェクトで 2019 年度までに取得した 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。

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

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、上述の 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 4)。

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5)。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<sub>4</sub><sup>2-</sup>やCl<sup>-</sup>)濃度により特徴付けられる。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、地下深部まで到達した天水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δ<sup>18</sup>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<sub>2</sub>SやCl<sub>2</sub>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。

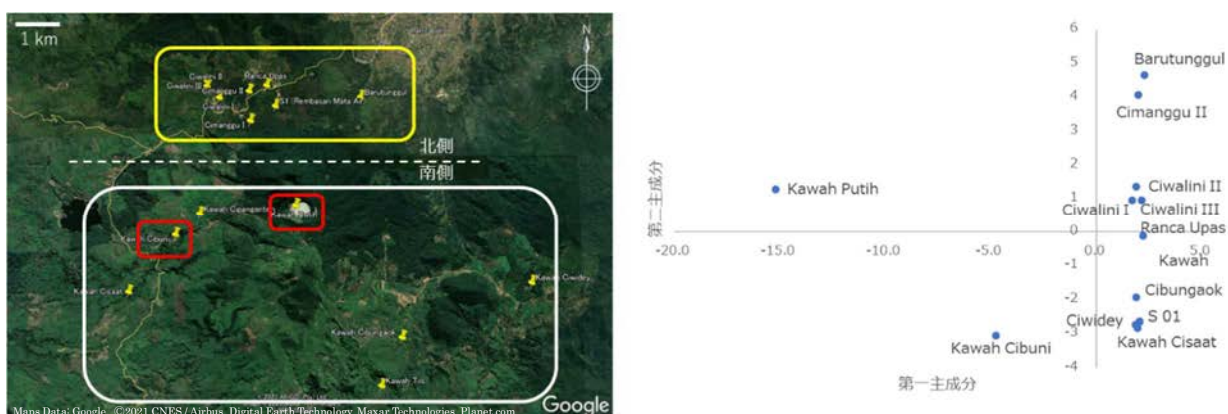


図4 各試料における第1・第2主成分得点(右)。Kawah CibuniとKawah Putihの2測点(左図赤色箇所)のみが負の第1主成分得点(それぞれ-4.7, -15)を示し、その他の測点(第1主成分得点は1.7~2.3)は、第2主成分得点が正の値を示す北側(左図黄色箇所)と負の値を示す南側(左図白色箇所)とに区分される。

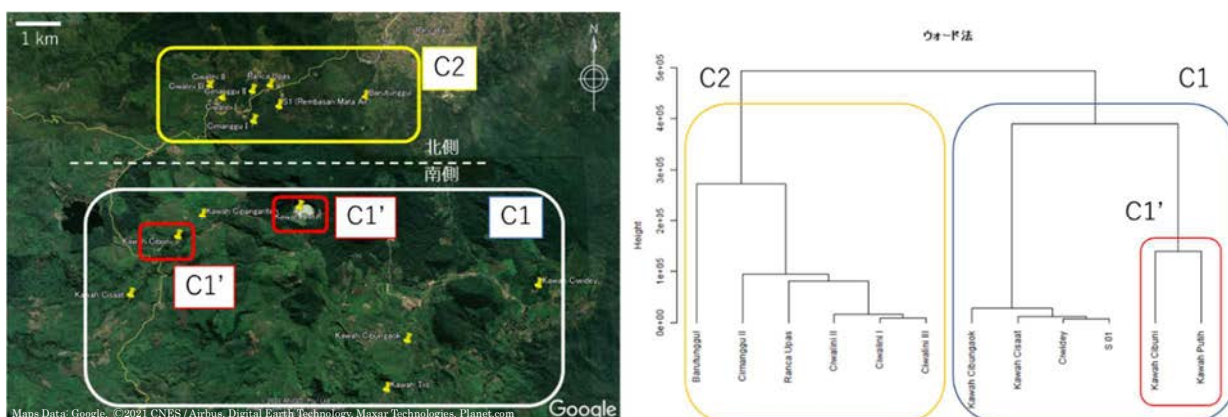


図5 各試料のクラスター解析結果を表す樹状系統図(右)。図の縦軸は各試料間のユークリッド距離を示し、より高い位置の分岐ほど試料群間の距離が遠く、関係性が小さいことを意味する。各試料は大きく分けてC1(Cluster 1)とC2(Cluster 2)に所属し、C1には亜群としてC1'が含まれる。C1は南側、C2は北側の試料から構成されていることがわかる(左)。

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されるため、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。SATREPS プロジェクトでの先行研究により、C1 と C2 の間に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。C1 では C1'のみが地下深部起源流体（蒸気）による影響を示唆しているのに対し、C2 ではすべての試料が地下深部起源流体の影響を示唆しており、地下深部から地表付近にまで達するパスが多く存在する可能性が示された。これを検証するため、ストロンチウム同位体分析など、流体の起源を特定する追加分析を 2021 年度に実施する予定である。

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 6 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。この成果は国際誌論文として纏めているところである。

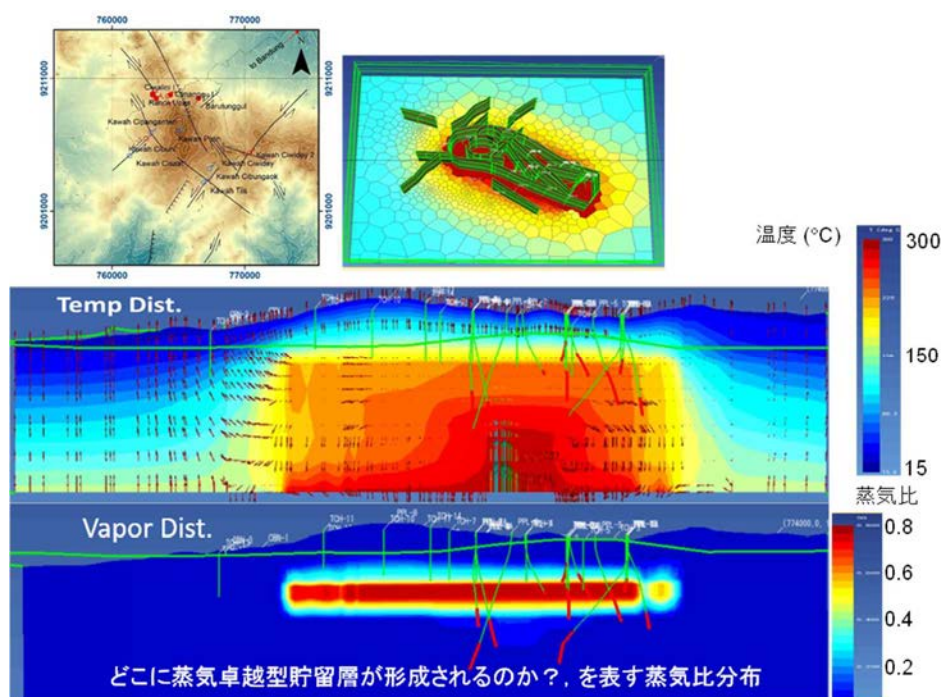


図 6 自然状態に対する熱水流動のシミュレーション結果。上図の緑色の帯は推定した断層を表す。下図の蒸気比により、蒸気比が特に大きな部分に蒸気スポットが形成されていると考えられる。

項目 1-5 について、2020 年 11 月時点で取得されていたラドン濃度測定データ（16 箇所）、地球化

学分析データ（12箇所）、リニアメント抽出結果を統合し、予察的に蒸気スポットの存在ポテンシャル評価マップの作成を行った。ラドン測定・地球化学分析のデータ取得箇所は図7（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・SO<sub>4</sub>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5 km×東西4 kmで、解像度は100 mである。図7（右）に示すとおり、評価値は解析領域北部中央付近で高く、南部および東部で低くなっている。高ポテンシャル領域はリゾート施設としての開発も進んでいる温泉地帯に位置しており、ボーリング調査の候補地の選定に有用な情報が得られた。

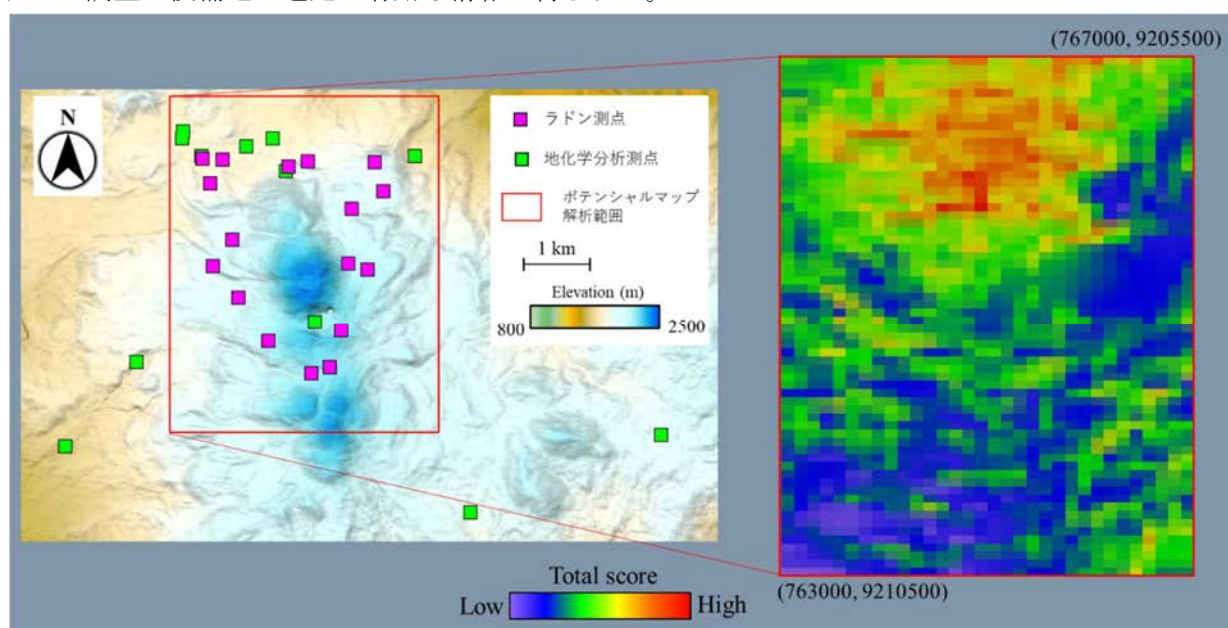


図7 蒸気スポットの存在ポテンシャル評価に用いた各計測データの分布と解析範囲(左)、評価値の空間分布(右)。ポテンシャルマップの解像度は100 m×100 mである。

## 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。得られた熱水変質鉱物分布は地熱兆候地や断層の分布と調和的であり、Patuha地区においても亀裂分布の推定が蒸気スポットの検出に有効であることを確認できた。項目1-3からは予察的ながら、Patuha地域における熱水の化学的性質を地理的に区分することが示唆された。当該地域における地下水流動を解明することができれば、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。

## 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－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 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、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 8）。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。

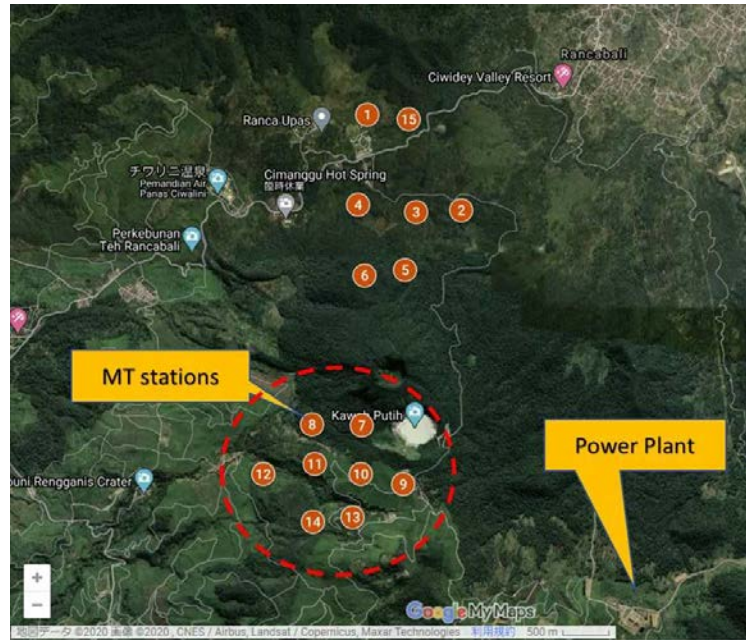


図 8 MT と TEM 探査データの取得地点(丸印:1~15)。点線で示した範囲については 3 次元解析を実施(後述)。

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。

2020 年度は 8 地点で得られた MT 探査データに着目した(図 9)。まず、TEM 探査データを用いて MT 探査データの補正を行った。MT 探査データは TEM 探査データよりも探査深度が深い(前者は数十 m~数十 km, 後者は数 m~数十 m) ことがメリットであるが、地表近傍(深さ数十 m 以浅)の小規模な比抵抗異常体の影響(Static Shift)を強く受けることが知られている。TEM 探査はこのような Static Shift を受けないため、TEM 探査データに基づいて、MT 探査データの Static Shift 補正を実施した。

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(水平性層構造)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。その結果を図 10 に示すが、地下約 500 m~1500 m の深度に地熱変質帯とみられる低比抵抗層が存在すること、噴火クレータ付近は地表付近まで低比抵抗が連続することが明らかとなった。

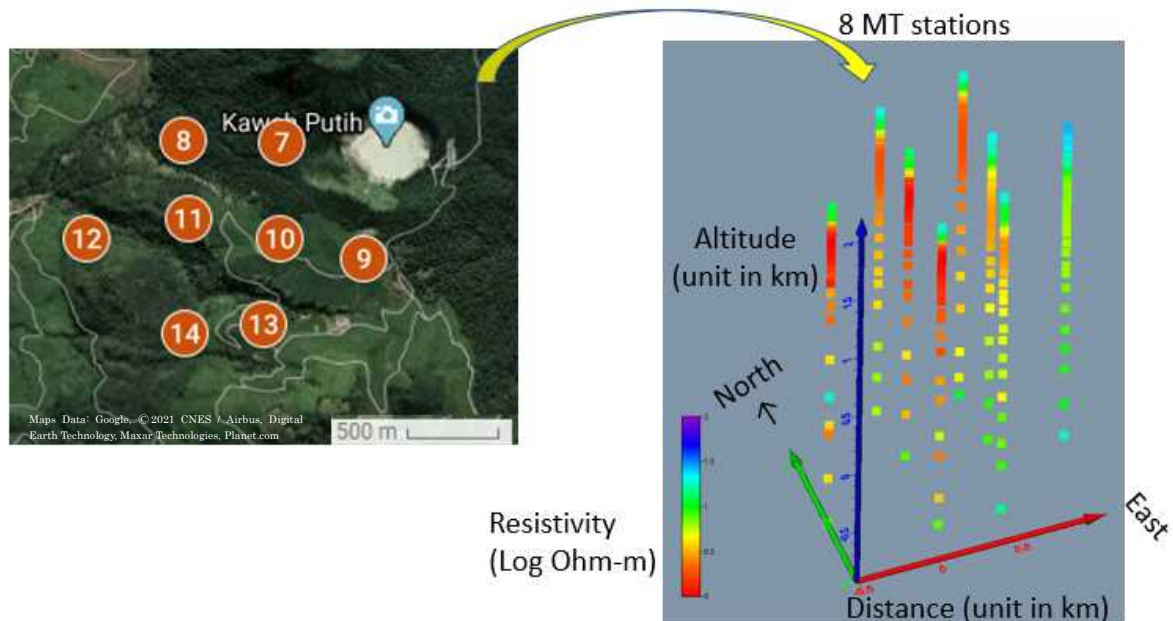


図9 (左) 8地点のMT探査の測点, および(右) これらデータを用いて推定した各測点直下の1次元比抵抗構造

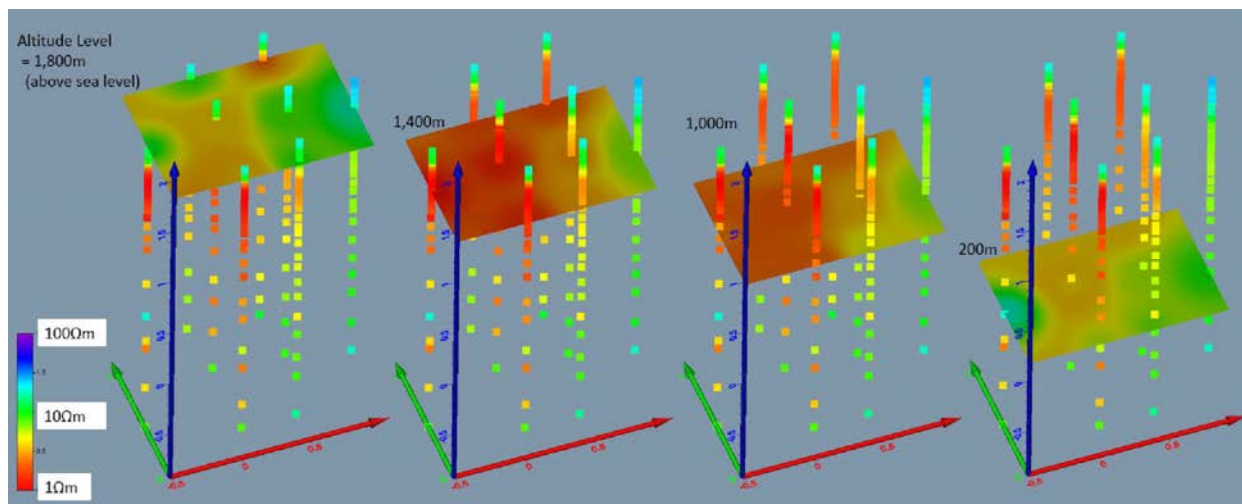


図10 1次元構造解析結果に基づく疑似3次元比抵抗構造

## 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2km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ではなく、

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。さらに観測点を増やした解析を行うとともに、より高度な3次元比抵抗構造逆解析法(インバージョン)を適用し、2021年度に精度を向上させる。

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100mで対象深度範囲500m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に行うことで、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。

項目3-2、3-3、3-4は3-1におけるボーリング調査が実施されていないことから未着手である。しかしながら、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。

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。

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を改善しているが，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）

初年度が終了した時点において、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、成果が得られつつある。上述した通り、ドローン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ている。SATREPSプロジェクトの成果と併せて2本の論文を国際誌に掲載でき、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る本プロジェクトへの影響は、現時点において最小に止められている。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が概ね所定通り進捗していることは、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。プロジェクト開始より京大側研究者が全く渡航できない状況が続いているにもかかわらず、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ている。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の実施に欠かせない貢献を果たした。

その一方で、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、およびカウンターパート側との摺り合わせに予想外の時間を要し、年度内での実施に至らなかった。必要となる情報の収集と仕様書の改善を行っており、2021年度早期に入札実施に至るように進めている。上述した通り項目3-2・3-3を実施する準備は整っており、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た。ボーリング調査が実施できれば項目3-4にも着手でき、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が可能になる。

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つつある。よって、目標達成に向けて着実に研究は進展しているといえる。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い。ボーリング調査の実施期間は概ね2ヶ月程度であることを確認しているため、2021年内でのボーリング調査完了、および本プロジェクトの目標達成は可能であると見込まれる。「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。既に第 1 号を 2020 年 11 月 13 日に発行し、上記の URL に掲載済みである。下記はその最初のページである。（図 11）②についてはインドネシア国公営企業である Geo Dipa Energi 社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ため、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 地区での初年度の成果として、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。

また、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ている。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

【令和 2 年度実施報告書】【210531】

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。



No. 1 | 13<sup>th</sup> 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 11 2020 年 11 月 13 日発行 BAGUS Project News No.1

【令和 2 年度実施報告書】【210531】

「進捗の遅れた事例」に対しては、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生じた。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のおかげで京大から ITB にスムーズに輸送できたが、初めて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。

(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-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点であるが、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いる。また、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しており、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 (下記) に関してもボーリング調査が昨年度実施できなかった原因は新型コロナウイルス禍あるが、ボーリング仕様書の策定、得られる試料の分析の準備を整えるなど、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ている。上記のように、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って、実証試験や社会実装に向けた取り組みにおける教訓が得られ、提言等を行えると考えている。

#### 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。下記はその記事の一部である。(図 12)

# 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 12 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、バンドン工科大学のプレスリリースに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。これらにより、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。(図 13)



図 13 2020年7月20日 バンดอน工科大学プレスリリースニュースサイト(赤い枠内に aXis BUGS Project について言及あり)

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 (± 20 students) at ITB, Master thesis (± 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 ± 40 Junior researcher (master students) of ITB, ± 5 research assistants of ITB, ± 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/>

V. 成果発表等【研究開始～現在の全期間】（公開）

様式 02 に記載済み。

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, and 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", Geothermics		国際誌	in press	地熱分野におけ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3.682) 2021年3月16日受理

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

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。)

論文数 0 件  
 うち国内誌 0 件  
 うち国際誌 0 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 <sup>1</sup> ・久保 大樹 <sup>1</sup> ・ナフタリ ハウ ヘデ アリー <sup>2</sup> ・サエプロフ アセブ <sup>2</sup> ・小池 克明 <sup>1</sup> (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 <sup>1</sup> , Yuji Yamada <sup>1</sup> , Mohamad Nur Heriawan <sup>2</sup> , Irwan Iskandar <sup>2</sup> , Katsuaki Koike <sup>1</sup> (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 <sup>1</sup> ・柏谷 公希 <sup>1</sup> ・Yudi Rahayudin <sup>2</sup> ・多田 洋平 <sup>1</sup> ・小池克明 <sup>1</sup> (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 <sup>1</sup> ・柏谷公希 <sup>1</sup> ・多田洋平 <sup>1</sup> ・Riostantieka M. Shoedarto <sup>1</sup> ・小池克明 <sup>1</sup> ・Mohamad Nur Heriawan <sup>2</sup> ・Irwan Iskandar <sup>2</sup> ・Sudarto Notosiswoyo <sup>2</sup> (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, 11月11日	ポスター発表
2020	国内学会	Panggea Ghiyats Sabrian <sup>1</sup> ・Katsuaki Koike <sup>1</sup> ・Asep Saepuloh <sup>2</sup> (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, 11月11日	ポスター発表
2020	国内学会	池本 龍平 <sup>1</sup> ・久保 大樹 <sup>1</sup> ・ヘリアワン ヌル モハメド <sup>2</sup> ・小池 克明 <sup>1</sup> (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 <sup>1</sup> ・権守 宏明 <sup>1</sup> ・ヘリアワン モハメド <sup>2</sup> ・イスカンダル イルワン <sup>2</sup> ・小池 克明 <sup>1</sup> (1:京都大学, 2:バンドン工科大学), "複合的なリモ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

招待講演 0 件  
口頭発表 4 件  
ポスター発表 3 件

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	家木優成・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	家木優成・久保大樹・小池克明(京都大学), "スパースデータの挿入・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 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, 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, 11月11日	ポスター発表

招待講演 0 件  
口頭発表 5 件  
ポスター発表 2 件

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

0 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・到達点などの共有化
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、ポ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、ポ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

3 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

0 件