

地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム (SATREPS)

研究課題別終了時評価報告書

1. 研究課題名

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(2015年04月～2020年04月)

2. 研究代表者

2. 1. 日本側研究代表者：小池 克明（京都大学 大学院工学研究科 教授）

2. 2. 相手側研究代表者：スダルト ノトシスウォヨ

（バンドン工科大学 鉱山石油工学部 教授）

3. 研究概要

本プロジェクトでは、地熱資源を利用した発電量の大幅な増加と環境と調和した長期間の持続的地熱発電の2点を実現することを目的として、リモートセンシング・地球化学・鉱物学での最先端手法を統合して発電に最適な蒸気スポットを高精度で検出できる技術、リモートセンシングを利用した地熱発電所周辺の広域環境モニタリング技術、長期にわたる地熱エネルギーの持続的利用・産出を可能にするための最適化システム設計技術、の3つを開発した。併せて、バンドン工科大学（ITB）と協同して地熱開発を担える人材を育成した。

地熱発電所の予定地における探査ボーリング掘削費を減少させる上位目標への貢献のため、プロジェクト目標として本技術の適用性をモデル・サイトにおいて実証することを目指し、以下の4つの研究題目を実施した：

- （1）蒸気スポットと地熱発電適地の高精度検出技術開発。
- （2）環境調和型地熱利用のためのモニタリング技術開発。
- （3）地熱エネルギー利用・産出の最適化システム設計。
- （4）インドネシアにおける地熱開発を担える人材の育成。

プロジェクトには京都大学のほか、九州大学、産業技術総合研究所、海洋研究開発機構、リモートセンシング技術センター、三菱マテリアル、三菱マテリアルテクノ、（一財）山の手博物館の研究者が参画し、インドネシア側ではITBに、鉱物・石炭・地熱資源センター（CMCGR）、地熱発電会社のStar Energy社とGeo Dipa Energy社が協力機関として参加した。

4. 評価結果

総合評価：S（所期の計画を超えた取組みが行われた。）

研究開発成果、持続的研究基盤の確立、人材育成、相手国での社会実装への期待、いずれ

においても所期の計画を超えた取り組みが行われ、高いレベルで達成された。相手国のコミットメントとオーナーシップが高く、また、供与機材の活用と今後の維持管理が期待できる点など、プロジェクト運営の面でもベストプラクティスの一つとして、高く評価できる。

波及効果が期待できるすぐれた学術的成果が多く得られ、さらに、当初計画を超えた成果も得られた。地熱発電会社の自発的取り組みが、プロジェクト開始時に想定した以上に広がり、成果の活用が期待される。インドネシアにおける学術的レベルを向上させ、持続可能な人材育成・研究体制が構築されたのみならず、第三国の大学・研究機関との連携も進められ、今後、他国・他地域での地熱エネルギー導入が促進され、低炭素社会の実現という地球規模課題の解決に大きく寄与することが期待できる。

4-1. 地球規模課題解決への貢献

【課題の重要性とプロジェクトの成果が課題解決に与える科学的・技術的インパクト】

地熱エネルギーは、低炭素再生可能エネルギーのなかで、太陽光や風力と違い安定した出力が得られる半面、ボーリングの確度が低く導入のボトルネックになってきた。

本課題は、リモートセンシング・数理地質学・地球化学などの最先端手法を統合化し地熱エネルギー資源の探査精度の向上を図るものであり、研究の結果、地形の分析や深さ 5m 程度の表層ボーリングと地殻ガス（特にラドン）測定のような比較的低コストの手法を併用することが、地熱貯留層の探査に有効であることを実証できた。

これらの成果は、地熱発電所の開発コスト低減により地熱エネルギーの利用促進に大きく寄与するものであり、低炭素社会の実現に向けた地球規模課題へのアプローチとして、そのインパクトは極めて高いと評価できる。

【国際社会における認知、活用の見通し】

研究成果は原著論文 35 報、学会発表 97 件（うち国際学会 39 件）あり、著名な国際学術誌にも掲載されるなど、学会レベルで国際的に高く評価されている。今後、インドネシア、日本などで開発された技術の社会実装が進み、国際的に一層認知・活用される可能性が高い。

【他国、他地域への波及】

得られた成果は、地熱発電の開発コストを大幅に低減できる汎用性が高い技術であり、エジプトやジンバブエへの共同研究の展開も図られている。今後、フィリピンなどのアジア諸国、アフリカ・中南米諸国など、地熱資源を有する多くの地域に展開可能であり、波及効果は相当に高いと評価できる。

【国内外の類似研究と比較したレベル】

代表的な地熱貯留層シミュレーションである TOUGH2 を活用しながら独自の拡張を行い、

374°C、228 気圧以上の超臨界状態の計算を可能にした改良型を開発するなど、個々の技術において国際的にトップレベルにある。また、多くの技術を統合化し、地表および地表浅部の地質・物性・化学情報から地下深部の地熱貯留層の構造・流動状態を把握するシステムとしてまとめた点が、高く評価できる。

4-2. 相手国ニーズの充足

【課題の重要性とプロジェクトの成果が相手国ニーズの充足に与えるインパクト】

インドネシアは 2019 年現在世界第 2 位の地熱発電大国であるが、潜在的発電容量 (29000 MW) の約 7% の利用にとどまっている。政府は地熱発電設備容量を 2025 年までに電源比率として 23% まで高める計画である。このようにインドネシアにとって地熱資源の開発は喫緊の課題であり、本プロジェクトの成果が、学術、技術開発、産業開発の面で与えるインパクトは極めて大きい。

【課題解決、社会実装の見通し】

プロジェクト開始時から相手国の地熱発電会社である Star Energy 社と共に取り組んでおり、さらにプロジェクト期間中に同業の Geo Dipa Energy 社も参画するなど、社会実装への取り組みが積極的に行われた。その結果、両社の技術者が、本研究成果や研究手法を各社の地熱開発に活かしていると述べているなど、すでに社会実装の緒についている。また、JST 持続可能開発目標達成支援事業 (aXis) 事業に応募して採択され、引き続きインドネシアでの活動を継続している。これらの点から社会実装の可能性は極めて高いと評価できる。

【継続的発展の見通し（人材育成、組織、機材の整備等）】

国際学術誌論文数、国際学会発表数がプロジェクト中に急増したことからわかるように ITB の研究能力が向上し、研究者・学生などの研究人材が育成され、日本との密接な研究体制が構築された。地熱発電会社 2 社の技術者が参加した研究成果が国際学会で発表されたり国際学術誌に掲載されたりするなど、産業界の人材育成にも貢献した。

また、本プロジェクトで導入された機材、特に物理特性・化学特性の分析機器は、極めて有効に活用されており、整備・維持管理が十分可能な見通しである。これらの結果から、今後も研究開発が継続的に発展する見通しは極めて高い。

【成果を基とした研究・利用活動が持続的に発展していく見込み（政策等への反映、成果物の利用など）】

地熱発電の拡大は社会的ニーズが大きく、インドネシア政府の方針にも合致している。また、開発された技術と最適化システム設計などの成果物は、すでに論文などで報告されている。また、他に複数の国際共同研究を実施している。これらの結果から、今後研究・利用活

動が持続的に発展していく見込みは相当に高い。

今後、各研究成果を統合化・体系化したテキスト・指針などを作成し、相手国で持続的に発展・展開されるために活用されることを期待する。

4-3. 付随的成果

【日本政府、社会、産業への貢献】

地熱エネルギーの一層の活用は、これからの日本のエネルギー戦略において必須事項であり、開発成果の具体的な活用が期待される。関連するプロジェクトも含めて、三菱マテリアルや西日本技術開発などの日本企業との連携が進んでおり、日本の産業界への貢献が期待できる。そのために有効な、特許の取得にも留意してほしい。

【科学技術の発展】

前述の様に、超臨界状態まで取り扱える拡張性の高い地熱貯留層シミュレーションソフトウェア開発など先進的な取り組みが行われ、多数の研究成果が著名な国際誌に掲載されるなど、科学技術の発展への貢献は極めて高いと評価できる。

また、地熱システムと植生異常の関係を見出したこと、3次元の地表変動を推定することが可能になったことなど、地熱発電以外への展開（波及効果）もすでに図られており、今後の発展も期待できる。

【世界で活躍できる日本人人材の育成（若手、グローバル化対応）】

多くの日本人若手研究者が参加し、原著論文、学会発表、受賞など特筆に値する業績をあげた。国際的に活躍できるマネージャークラスの人材育成という点では標準的であったが、学生が学位（博士）取得とともに国際共同研究を通じてグローバル化に対応できる研究者に育った点が評価できる。

【知財の獲得や、国際標準化への取り組み、生物資源へのアクセスや、データ入手手法】

超臨界状態の計算をも可能とした拡張性・新規性の高いソフトウェアが開発され、公開して普及させる方向で検討されている点は国際標準への取り組みとして評価できる。研究成果として得られた要素技術について、特許など知財権の取得と活用についても検討することが望ましい。

【その他の具体的成果物（提言書、論文、プログラム、試作品、マニュアル、データなど）】

前述の原著論文 35 報、学会発表 97 件に加えて、超臨界状態まで取り扱えるよう改良・開発したシミュレーションソフトウェアなど豊富な成果物は極めて高く評価できる。今後、探査技術として体系化した解説書、マニュアルの作成を期待したい。

【技術および人的ネットワークの構築（相手国を含む）】

従前からの ITB との技術・人材ネットワークを一層強化し緊密・強固にしたことに加え、現地地熱発電会社 2 社との関係も構築した。さらに、他の SATREPS 地熱プロジェクトとの連携、別の JICA プロジェクトを通じたインドネシア地熱産業との連携など、日・インドネシアを中心とした国際的な技術及び人的ネットワークが構築されつつ有る点を高く評価できる。

4-4. プロジェクトの運営

【プロジェクト推進体制の構築（他のプロジェクト、機関などとの連携も含む）】

研究対象地域を当初の Wayang Windu 地区から Patuha 地区を加えて 2 カ所に広げ、それぞれの地区に基盤を持つ地熱発電会社 Star Energy 社と Geo Dipa Energy 社をプロジェクトに参画させ、共同調査や日本での研究者育成プログラムへ参加させるなど良好な関係を構築したことは、技術開発・社会実装の両面で有意義であり高く評価できる。また、追加的に電磁的地中探査技術を投入した点、SATREPS 企画提案により追加予算を獲得しアフリカ大陸の 2 地域まで研究を展開した点、他の SATREPS 地熱プロジェクトとの交流など、幅広く積極的な取り組みがなされた。プロジェクト推進体制の構築として非常に優れていたと評価できる。

【プロジェクト管理および状況変化への対処（研究チームの体制・遂行状況や研究代表者のリーダーシップ）】

多岐にわたる研究課題がスムーズに運営され、両国が密接に連携して研究を推進する体制が構築されるなど、非常によくマネジメントされたプロジェクトであった。その結果、様々な技術を統合してインパクトのある成果が得られた。これは、15 年以上に及ぶ ITB と京大の連携を基盤としつつも、研究代表者の優れたリーダーシップが十分に発揮されたものと、高く評価できる。

【成果の活用に向けた活動】

次項に述べる情報発信によって、広く成果の活用が可能になっている。相手国の企業を参画させ、実地ボーリングの計画など成果の社会実装に向けた具体的な活動が進められている。また、開発された技術の他分野への展開も図られつつある。結果として成果の活用に向けた活動は相当に優れていると評価できる。

【情報発信（論文、講演、シンポジウム、セミナー、マスメディアなど）】

開始当時からインドネシア語で「素晴らしい」を意味する BAGUS (Beneficial and Advanced

Geothermal Use System) をプロジェクト名にするなど、相手国での認知度を高める努力が行われた。プロジェクト期間中、多くの学会発表、論文発表だけでなくワークショップ・セミナーを活発に開催したこと、プロジェクトの進捗を広報するニュースレターを継続的に発行したこと、成果が京都大学の研究室と ITB の学科のウェブサイトで一般公開されていることなど、積極的な発信がなされた点を高く評価できる。プロジェクト終了時に ITB からマスメディアへの情報発信が有り、複数メディアに掲載されたが、成果の活用に向けてさらに努力を期待したい。

【人材、機材、予算の活用（効率、効果）】

導入した機器は非常に有効に利活用されて、効率は高い。さらに、導入した機材を活用して ITB で物理・化学機器分析の事実上の COE を形成した点は、効率的で維持管理の持続性の高い運用として高く評価できる。予算と機材活用の面で非常に優れていると評価できる。

5. 今後の研究に向けての要改善点および要望事項

- 1) 探査システムとしての推定精度（確度）の確認は未だ十分ではない懸念がある。今後、その確認とさらなる向上を期待したい。
- 2) 要素技術の成果を可能な限り特許等の知財権の獲得につなげてほしい。さらに、探査システムとしての知財権獲得も期待したい。前述の通り、探査技術として体系化した解説書、マニュアル類の充実にも期待する。
- 3) 計画中の実地ボーリングでの検証を成功させて、新規の地熱開発に繋がることを期待する。企業が実際に活用することでの、開発技術の効果の立証が待たれる。
- 4) 他国、他地域、我が国での展開も積極的に進めていただきたい。特に SATREPS の他の地熱プロジェクトと連携を進めることで、本プロジェクト成果の展開および他プロジェクトでの一層の成果創出が望まれる。
- 5) 地熱発電以外への技術の展開にも大いに期待したい。たとえば、植生の活性度評価技術の応用として、地球温暖化の進展による森林成長度の評価など幅広い活用について検討いただきたい。

以上

研究課題名	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: 先進的地熱資源利用システム
研究代表者名 (所属機関)	小池 克明 (京都大学大学院工学研究科)
研究期間	H26採択(平成26年4月1日～令和2年3月31日)
相手国名/主要相手国研究機関	インドネシア共和国/バンドン工科大学, CMGR(鉱物・石炭・地熱資源センター)

付随的成果	
日本政府、社会、産業への貢献	<ul style="list-style-type: none"> 企業の新規ボーリングサイト決めに本研究成果の活用 インドネシア地熱発電設備容量第2位への向上に貢献 バンドン工科大学側の先端研究拠点(COE)形成に貢献 地熱を含む地球資源分野(鉱物・水・エネルギー)での研究進展による国際貢献
科学技術の発展	<ul style="list-style-type: none"> 地熱発電適地検出精度の向上 インドネシアにおける地熱資源利用促進(低炭素社会と環境調和型資源開発への貢献) アフリカの地熱地帯への技術展開, および深部高温岩体地域の地熱資源探査への応用
知財の獲得、国際標準化の推進、生物資源へのアクセス等	下記の4技術に関する知財の獲得(論文発表等による) <ul style="list-style-type: none"> リモートセンシング・教理地質学・地球化学・鉱物学での先端手法を統合した、特に生産井設置適地の検出技術 地殻カスデータ分析技術と地下物性計測技術 衛星リモートセンシングを用いた地熱発電所周辺での植生活性度と地形変動に関する広域環境モニタリング技術 貯留層シミュレーションの新規ソフトウェア技術
世界で活躍できる若手人材の育成	<ul style="list-style-type: none"> 国際的に活躍可能な日本、インドネシア、およびアフリカの若手研究者の育成に貢献(国際共同研究の立案・実施、現地調査の主導、著名な国際ジャーナルへの論文掲載、国際会議での発表)
技術及び人的ネットワークの構築	<ul style="list-style-type: none"> バンドン工科大学, Star Energy社, Geo Dipa Energi社, およびCMGR(鉱物・石炭・地熱資源センター)と地熱研究に関わる技術・人的ネットワークの構築
成果物(提言書、論文、プログラム、マニュアル、データなど)	<ul style="list-style-type: none"> 研究成果の国際的地熱シンポジウム・会議等での発表 地熱研究に関する代表的国際誌への論文掲載 流体バスとなる透水性亀裂の抽出プログラム 貯留層の温度と圧力変化予測プログラム 地化学的測定・分析法, 機器使用法のマニュアル作成

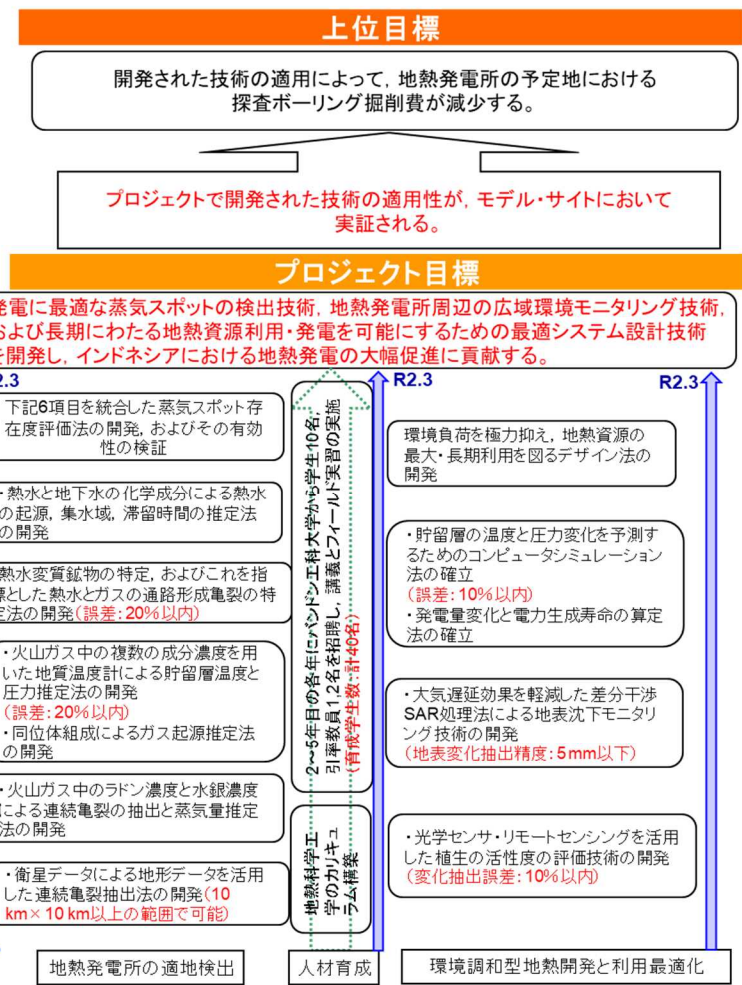


図1 成果目標シートと達成状況 (2020年7月時点)