案件別事後評価（内部評価）評価結果票:技術協力プロジェクト（SATREPS[1]）

評価実施部署：インドネシア事務所（2026 年 6 月）

国名	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プロジェクト
インドネシア共和国	

Ⅰ 案件概要

事業の背景	インドネシアは、地熱発電の開発ポテンシャルが極めて高い国の一つであり、今後の電力需要の増大に対応するとともに、温室効果ガス（GHG）排出削減を図るうえで重要な役割を果たすことが期待されていた。インドネシア政府は、独立系発電事業者（IPP）による地熱開発を促進するため、さまざまな施策を講じてきたものの、その進展は当初の期待には届いていなかった。その要因の一つは、高い事業リスクであった。地熱発電は安定的に電力を供給でき、持続的な収益を確保できる一方で、試掘の失敗等のリスクが他の電源開発に比べて大きく、IPP がこうした事業リスクを負っていた。このため、探査ボーリング[2]の精度を高めることでリスクを低減することが不可欠であった。さらに、人材や技術力の不足も大きな課題であった。エネルギー鉱物資源省の下で地熱開発を担う人材を多く輩出してきたバンドン工科大学（ITB）は、地熱分野における教育研究機関として、今後ますます重要な役割を果たすことが期待されていた。		
事業の目的	本事業は、南バンドン ワヤン・ウィンドゥにおける地熱発電に最適な蒸気スポットを検出する技術の開発、リモートセンシングを利用した環境モニタリング技術の確立、地熱発電の最適化制御システムの確立、ならびに地熱科学技術に携わる ITB 研究者および学生の能力向上により、これらの技術の適用性の実証を図り、もって探査ボーリング掘削費の削減に寄与することを目指す。		
	1.想定された上位目標：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。 2.プロジェクト目標：プロジェクトで開発された技術の適用性が、モデルサイトにおいて実証される。		
実施内容	1. 事業サイト：南バンドン ワヤン・ウィンドゥ 2. 主な活動：①数学的手法を用いた蒸気スポットの存在可能性の評価、②高湿度の気象条件下における貯留層圧力変化に起因する地盤変位を D-InSAR 法[3]で検出すること③、種々の地質条件および地熱資源利用の下での貯留層の温度・圧力変化のシミュレーション、④地熱科学技術の基礎に関するカリキュラムの開発。 3. 投入実績 日本側 (1) 専門家派遣：5 人 (2) 研修員受入：60 人 (3) 機材供与：携帯型反射スペクトル測定装置、ラドン濃度測定システム、熱伝導度検出器型ガスクロマトグラフ、および X 線回折分析装置など 相手国側 (1) カウンターパート配置：13 人 (2) 施設・機材：事業実施に必要な執務室および施設設備 (3) 現地業務費：電気、水道、通信、および旅費		
事業期間	(事前評価時)2015 年 4 月～2020 年 3 月（60 カ月） (実績)2015 年 4 月 30 日～2020 年 4 月 24 日（60 カ月）	事業金額（日本側のみ）	（事前評価時）300 百万円、（実績）363 百万円
相手国実施機関	バンドン工科大学（ITB）		
日本側協力機関	京都大学		

Ⅱ 評価結果

1 妥当性/整合性

＜妥当性＞

【事前評価時のインドネシア政府の開発政策との整合性】

本事業は、事前評価時点におけるインドネシアの開発政策と整合性が高い。インドネシア政府は「国家エネルギー政策に関する大統領令（2006 年第 5 号）」において、2025 年までに新エネルギー・再生可能エネルギーの比率をエネルギー供給量全体の 17%（うち地熱エネルギー5%）とする数値目標を設定した。2010 年に策定された「ビジョン 25/25」では、この目標値は 25%（うち地熱エネルギーは約 8%）へと上方修正された。これを達成するために、同政府は 9,500MW の地熱発電設備容量の導入を目指す開発ロードマップを策定した。さらに、「国家エネルギー政策」（2014 年）では、地熱エネルギーの持続可能な利用の確保や関連産業の能力強化といった制度的支援策が示された。これらの施策を通じて、インドネシア政府は地熱エネルギー開発を段階的かつ計画的に推進していた。

【事前評価時のインドネシアにおける開発ニーズとの整合性】

本事業は、事前評価時点におけるインドネシアの開発ニーズと整合性が高い。地熱発電は、電力需要の増加や温室効果ガス削減の観点から重要視されていた。しかし、試掘失敗のリスクを IPP が負担していたことにより開発は停滞していた。加えて、熟練技術者や専門家の不足も大きな障害となっていた。

[1] SATREPS とは、「地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム」（Science and Technology Research Partnership for Sustainable Development）を指す。

[2] 探査ボーリングとは、資源探査のための掘削作業を指す。

[3] D-InSAR 法（差分干渉合成開口レーダー法）は、地表の変動（地すべり、地震、火山活動、地盤沈下など）を高精度で検出・測定するためのリモートセンシング技術である。

【事業計画/アプローチの適切性】
本事業の計画/アプローチは、適切である。事業計画/アプローチに起因する課題は確認されなかった。
【評価判断】
以上より、本事業の妥当性は③[4]と判断される。

＜整合性＞
【事前評価時における日本の援助方針との整合性】
本事業は、事前評価時点の日本の対インドネシア共和国 国別援助方針（2014年）と整合している。同計画では、援助重点分野として『不均衡の是正と安全な社会造りへの支援』および『アジア地域及び国際社会の課題への対応能力向上のための支援』の2点が掲げられていた。これらに沿って、日本政府は、電力・資源の確保、主要な地方中核都市における都市基盤整備、さらにエネルギー効率の向上、省エネルギー、及び再生可能エネルギー開発の促進に取り組んでいた。
【JICA他事業・支援との連携/調整】
事前評価時および事業実施中において、本事業とJICAの他の事業との連携/調整は、明確に計画されていなかった。
【他機関との連携/国際的枠組みとの協調】
事前評価時および事業実施中において、本事業と他組織との連携/協調は、明確に計画されていなかった。
【評価判断】
以上より、本事業の整合性は②と判断される。

【妥当性・整合性の評価判断】
以上、本事業の妥当性及び整合性は③と判断される。

2 有効性・インパクト

【プロジェクト目標の事業完了時における達成状況】
事業完了時までに、プロジェクト目標は計画どおりに達成された。モデルサイトであるワヤン・ウィンドゥおよびパトゥハにおいて、蒸気スポット存在の高評価分布域内に、生産井[5]の71%が位置していることが明らかとなり、計画の50%を上回った。複数のデータソース[6]を統合して作成した評価マップにより、探査精度の向上が実現した。（指標1）。インパクト・ファクター付き国際学術誌に8本の論文が掲載された。直近の論文では、合成開口レーダー（SAR）画像から抽出したリニアメント密度[7]を用い、インドネシア西ジャワ州の地熱地域における流体経路の特定に焦点を当てていた（指標2）。
【事業効果の事後評価時における継続状況】
事後評価時点で、本SATREPS事業の効果は継続し、さらに発展している。特に、次の3つの研究成果は、学術界と産業界の双方のパートナーが参画する新たな共同研究事業や取り組みによって一層進展している。蒸気スポット検出技術に関しては、PT Geo Dipa Energi社[8]、京都大学、ITBが新規研究事業「地熱生産井掘削地点特定のための蒸気スポット検出技術のボーリング調査による精度向上と実証」を立ち上げた。同事業は、リモートセンシング、地球化学分析、鉱物学的評価、数値シミュレーションを組み合わせて活用し、地熱生産井に適した掘削地点を高精度で特定できる技術の開発を目的としている。環境モニタリングのためのリモートセンシング技術に関しては、インドネシア最大の地熱関連民間企業であり、クリーンエネルギー分野のパイオニアであるPT Star Energyが「第3フェーズ開発プロジェクト」の一環として、リモートセンシングデータからのリニアメント解析を用いて地表付近の透水帯を検出し、ワヤン・ウィンドゥ地域における探査用スリムホールの最適位置を特定することを目的としたプロジェクトを開始した。さらに、地熱発電の最適化制御システムに関しては、インドネシアの民間企業である、PT Geo Dipa Energi社とITBが共同で「Geo Dipa パトゥハ インターンシップ・プログラム」を実施している。同プログラムは、PT Geo Dipa Energi社の技術者の能力強化を図り、パトゥハ地熱発電所における運転制御システムを最適化するための知識と技術の向上を目的としている。
なお、本SATREPS事業により供与された施設・機材は、現在も継続的に活用されている。代表的なものとして、リモートセンシング用の携帯型分光計システムおよびラドン測定システムが挙げられる。
【想定された上位目標の事後評価時における達成状況】
事後評価時点までに、上位目標はおおむね計画どおりに達成された。本SATREPS事業で開発された技術は、ワヤン・ウィンドゥおよびパトゥハの2か所の地熱開発サイトで適用されている。適用されているサイト数は現時点では限定的であるものの、将来的な拡大の可能性は高い。ITBによれば、当該技術を導入したPT Star Energy社およびPT Geo Dipa Energi社は複数の地熱事業サイトを運営しており、他地点への展開が見込まれている。特に、グリーンフィールド[9]と呼ばれる新規開発地域では、土地取得や関連手続きが完了次第、導入が期待されている。以上より、開発技術は既に具体的成果を示しており、今後の地熱開発において広範に活用される可能性が高いと考えられる（指標1）。本SATREPS事業で開発された技術により、前述の2サイトにおいて蒸気ゾーンを検出できる確率は70%と報告された。これらの成果は掘削リスクの低減を示している。2023年時点では新たな採用事例は確認されていないものの、今後の拡大可能性は依然として高い。一方で、他の開発サイトにおいては蒸気ゾーンの検出確率が70%を下回る事例があることも認識されている。これは主として地質条件の違いによるものであり、すべての断層帯が蒸気流動に対して高い透水性を示すわけではない。しかしながら、本SATREPS事業で開発された概念モデルおよび透水性評価手法は、土壌ガス調査や地球化学モデリングといった補完的手法と組み合わせることで、検出確率を向上させることが可能である（指標2）。
【事後評価時に確認されたその他のインパクト】
本SATREPS事業は、当初の範囲を超えて他の学術分野にも波及効果を及ぼした。本SATREPS事業に参加したITBの多くの研究

[4] ④：「非常に高い」、③：「高い」、②：「やや低い」、①：「低い」
[5] 地下資源を実際に採取（生産）するための井戸で、商業的に採掘できると判断された地点に掘削される。
[6] これらには、地球化学的指標（ボロン／塩化物イオン比 [B/Cl]、アルミニウム、硫酸イオン、炭酸水素イオン、水素および酸素の同位体比など）、生産井戸外で採取されたサンプルに基づくもの、リニアメント密度、そしてラドン濃度から算出されたガス上昇速度が含まれる。
[7] 地形や地質構造に見られる線状構造（リニアメント）が、ある範囲内にどれくらい存在しているかを示す指標である。
[8] PT Geo Dipa Energi 社は、地熱発電を専門とするインドネシアの国営企業である。2002 年に設立され、南ジャカルタに本社を置き、従業員数は約 200～500 名と推定されている。
[9] グリーンフィールドとは、これまで地熱発電のために探査や開発が行われていないサイトを指す。このようなサイトでは、開発に着手する前に、初期の地質・地球物理探査、土地取得、環境影響評価、規制当局による承認といった手続きが通常必要とされる。

者は、開発された技術を他の学術分野に積極的に応用している。さらに、インドネシア地質庁傘下の鉱物・石炭・地熱資源センター（CMCGR）においては、本SATREPS事業の研究成果が技術ガイドラインの改訂に反映され、地熱探査手法の改善および強化に繋がっている。

なお、本事業による自然環境への負の影響は見られなかった。

【評価判断】

以上より、本事業の有効性・インパクトは③と判断される。

プロジェクト目標及び上位目標の達成度

目標	指標	実績	情報源
プロジェクト目標 プロジェクトで開発された技術の適用性が、モデル・サイトにおいて実証される。	（指標１） モデルサイトにおいて，項目 1-8 から抽出された蒸気スポット存在の高評価値分布に生産井の 50%が存在する。	達成状況（継続状況）：計画を超えて達成（継続） （事業完了時） - 蒸気スポット存在の高評価分布域内に、生産井の 71%が位置していることが明らかとなり、計画の 50%を上回った。 - この探査精度の向上は、複数のデータソースを統合して作成された評価マップに基づいて導かれたものである。 （事後評価時） - 3 つの研究成果(蒸気スポット検出技術、環境モニタリングのためのリモートセンシング技術、および地熱発電の最適化制御システム)は、学術界と産業界の双方のパートナーが参画する新たな共同研究プロジェクトや取組みによって一層進展している。	- 終了時評価報告書 - ITB からの質問票回答
	（指標２） 同技術に関する研究成果が、インパクト・ファクターを有する国際学術誌に受理される。	達成状況（継続状況）：計画どおり達成（継続） （事業完了時） - インパクト・ファクター付き国際学術誌に 8 本の論文が掲載された。直近の論文では、合成開口レーダー（SAR）画像から抽出したリニアメント密度を用い、インドネシア西ジャワ州の地熱地域における流体経路の特定に焦点を当てていた。 （事後評価時） - 具体的な数値は不明だが、国際学術誌の掲載に向け、研究が続けられている。	- 終了時評価報告書 - ITB からの質問票回答
想定された上位目標 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。	（指標１） 本技術を採用する地熱サイト（計画中のサイトも含む）の数が増加する。	達成状況：おおむね計画どおり達成 （事後評価時） - 本 SATREPS 事業で開発された技術は、ワヤン・ウィンドゥおよびパトゥハの 2 か所の地熱開発サイトで採用されている。 - 採用サイト数は現時点では限定的であるものの、将来的な拡大の可能性は高い。 - 当該技術を導入した PT Star Energy 社および Geo Dipa Energi 社は複数の地熱事業サイトを運営しており、他地点への展開が見込まれている。特に、グリーンフィールドと呼ばれる新規開発地域では、土地取得や関連手続きが完了次第、導入が期待されている。	- ITB からの質問票回答
	（指標２） 開発技術は 70%の確率での貯留層の位置を特定できる。	達成状況：おおむね計画どおり達成 （事後評価時） - 上記 2 サイトにおいて蒸気ゾーンを検出できる確率は 70%と報告された。これらの成果は掘削リスクの低減に寄与している。 - 2023 年時点では新たな採用事例は確認されていないものの、今後の拡大可能性は依然として高い。 - 他の開発サイトにおいては蒸気ゾーンの検出確率が 70%を下回る場合があることも認識されている。これは主として地質条件の多様性によるものであり、すべての断層帯が蒸気流動に対して高い透水性を示すわけではないためである。しかしながら、本 SATREPS 事業で開発された概念モデルおよび透水性評価手法は、土壌ガス調査や地球化学モデリングといった補完的手法と組み合わせることで、検出確率を向上させることが可能である。	- ITB からの質問票回答

3　効率性

事業費は、機材の購入および輸送に想定以上の費用を要したことなど複数の要因のため、やや計画を上回ったが（計画比：121%）、事業期間は計画どおりであった（計画比：100%）。

	事業金額（日本側の支出のみ、円）	事業期間（月）
計画（事前評価時）	300 百万	60 ヵ月
実績	363 百万	60 ヵ月
割合（%）	121%	100%

アウトプットは計画どおり産出された。

以上より、効率性は③と判断される。

4　持続性

【政策面】

本SATREPS事業を通じて導入されたシステムおよび技術は、継続的な利用と発展に向けて、政策や省令によって支えられている。「国家電力計画」（2019年～2038年）にて、インドネシア政府は再生可能エネルギー比率を2025年までに23%、2038年までに25%へ引き上げる目標を掲げている。この枠組みの下で、地熱発電は同国の豊富な資源に支えられた安定したベースロード電源として重視されている。さらに、水力や太陽光と並ぶ再生可能エネルギー拡大の主要な柱の一つとして位置付けられ、インドネシアの長期的なエネルギー転換において中心的な役割を果たすことが期待されている。加えて、「環境林業大臣規則第5号」（2021年）においては、地中流体モニタリングの基準が定められ、これにより地熱分野やその他関連分野において本SATREPS事業の技術を正式に適用することが可能となった。

【制度・体制面】

ITBは、本SATREPS事業で確立した研究成果をさらに普及するため、制度・体制面を維持している。蒸気スポット検出技術といった手法等を継続的に活用する体制について、本SATREPS事業の下でITBと共同研究を行ったPT Star Energy社およびPT Geo Dipa Energi社が、本SATREPS事業で確立された技術を日常業務の中に組み込み運用している。さらに、ITBが、本事業で提供されたものを含め、主要な研究施設や機材の長期的な運営・維持体制を確保している。なお、政府当局と研究者の間における政策やプログラム実施に関する正式な協力メカニズムについては、現時点では十分に確立されていない。以上のとおり、制度・体制面については、小さな課題があるものの、総じて良好に維持されている。

【技術面】

本SATREPS事業は、極めて高いレベルの技術的持続性を実現しており、その水準は着実に向上している。ITBは、本SATREPS事業の研究成果を学術プログラムに統合し、科学分野のフォーラムへの積極的な参加を通じて、高度な技術的能力を発展させてきた。さらに、研究者は本SATREPS事業の手法を新たな研究イニシアティブや大学院レベルの研究に応用することで、その能力を維持するのみならず一層強化している。これらの取り組みにより、今後も技術力のさらなる向上が期待される。加えて、政府当局も研究者との積極的な協力や事業の報告書・出版物の活用を通じて、科学的リテラシーを高めている。なお、機材の運用・維持管理に関する技能と知識は、定期的な研修および国家認証を通じて一層強化されている。結論として、技術面における問題はなく、この側面は今後も維持されると考えられる。

【財務面】

ITBは、資金源の多様化と積極的な資金動員を通じて、高いレベルの財政的持続性を示している。産業界や特定プロジェクトから継続的に外部資金を確保しており、これに大学や学部からの競争的助成金が加わることで、財政基盤が一層強化されている。特筆すべきは、研究施設・機材の運営・維持管理が、産業界へのサービス提供によって得られる収益に支えられ、財政的に自立していることである。さらに、政府当局からも年間の研究資金スキームを通じた支援がなされている。これらの要素が相互に補完し合い、研究活動の長期的な継続と研究成果の効果的な活用を可能にする、強固で多面的な資金構造が形成されている。したがって、財源は十分に確保されている。

【環境・社会面】

環境・社会面の問題は確認されず、対応策を講じる必要はなかった。

【評価判断】

以上より、制度・体制面に軽微な問題があるが、本事業によって発現した効果の持続性は③と判断される。

5　総合評価

本事業は、技術の開発およびモデルサイトにおけるそれらの適用可能性の検証というプロジェクト目標、ならびに計画された地熱サイトにて適用技術を用いた探査ボーリングの費用削減という上位目標を計画どおり達成した。

以上より、総合的に判断すると、本事業の評価は非常に高い。

III 提言・教訓

実施機関への提言：

- 本 SATREPS 事業により開発された蒸気スポット検出技術、リモートセンシング・モニタリング、運転制御システムなどの技術は、インドネシアの地熱サイトにおいて実用的な成果を示し、その一部は MEMR や地質庁が発出した技術ガイドラインに反映された。しかしながら、政策レベルでの制度化には十分に至っておらず、持続的に普及・展開するための枠組みも未整備である。今後、より広範な導入を進めるために、ITB は関係政府機関に対して研究成果を体系的に共有する枠組みを構築することが望まれる。

JICA への教訓：

- 民間企業との共同研究は事業の中盤から開始され、成果の普及と展開に向けた基盤が整えられた。これは、詳細計画策定時に民間企業へ研究連携を打診し、継続的に情報提供を行ってきた結果である。今後、JICA が SATREPS 事業の初期段階から民間企業を体系的に関与させる仕組みを取り入れることで、開発された技術の普及が一層進み、社会実装の可能性も高まると期待される。



生産井および研究チーム



X 線解析装置