

**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

熱発光地熱探査法による地熱探査と地熱貯留層の統合評価システム  
(2018年8月～2024年8月)

## 2. 研究代表者

2. 1. 日本側研究代表者：土屋 範芳（東北大学 大学院環境科学研究科 名誉教授／客員教授 八戸工業高等専門学校 校長）
2. 2. 相手側研究代表者：Prof. Edgar Armando Peña Figueroa  
(エルサルバドル大学 工学・建築学部長)

## 3. 研究概要

本プロジェクトは、豊富な地熱資源を有し、国策として地熱発電を推進しているエルサルバドルで、研究代表者らが開発した「熱発光地熱探査法」を応用し、QGIS<sup>1</sup>をベースとした地熱貯留層の統合評価システムを開発する。これにより、現地の地熱開発の有望地域の絞り込みと、地熱貯留層の性能や抽熱量が正確に設計できる技術を開発することをプロジェクト目標とする。さらに、開発された技術によってエルサルバドルの地熱エネルギー利用が促進されることを上位目標としている。

プロジェクトは下記の4つの研究題目で構成されている。

- (1) 熱発光地熱探査法の展開・推進
- (2) 地熱探査データ解析技術の開発
- (3) 貯留層シミュレーションの整備
- (4) 地熱開発に携わるエルサルバドル大学（以下、UES）関係スタッフおよび国営地熱会社ラヘオ（以下、LaGeo）技術者の能力の強化

## 4. 評価結果

総合評価：A+

(所期の計画をやや上回る取り組みが行われ、大きな成果が得られた。)

QGIS を用いた探査データの統合化と、データ化解析で地熱貯留層を評価するプログラムの開発により、所期の目標値を超える探査エリアの絞り込みが可能となるなど、すべての研究題目の目標を達成した。石英の熱発光探査技術はプロジェクト開始時にほぼ確立していたが、石英がないことが判明した相手国で、新たに長石・方解石を対象とした熱発光探査技

---

<sup>1</sup> Quantum Geographic Information System: 無料のオープンソースの地理情報システム。

術を開発したことは大きな学術的成果と言えよう。さらに火山岩地熱貯留層においてキレート剤による岩石の浸透率を増加させ、熱水を通りやすくする方法を見出した。また、エルサルバドルの地熱帯の成り立ちに関わる科学的知見を得るなどの付随的成果も得られた。

コロナ禍の世界的拡大による大きな影響を受けたが、研究代表者のリーダーシップにより人材育成の面でも大きな成果を上げたと高く評価できる。国際ジャーナル等での研究成果の発信に加え、LaGeo では成果の活用がすでに始まっている。一方で、今後は熱発光探査技術だけでなく、さまざまな探査技術を組み合わせてシミュレーション技術を高度化していく必要があると考えられる。プロジェクト終了後も継続的な研究教育活動と研究の展開が期待される。

#### 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】

相手国、我が国ともに、地熱エネルギーの資源ポテンシャルが大きく、本プロジェクトの目指す資源探査技術と地熱貯留層の統合評価システムの高度化は、地熱発電の経済性を高めるとともに普及に大きく貢献し、地球温暖化の緩和に資するものである。

##### 【国際社会における認知、活用の見通し】

本プロジェクトで開発された技術は、学術論文や国際会議等で積極的な成果発信が行われており、今後の国際社会全体への認知度の向上や日本の存在感の拡大が期待できる。技術を完成させ、一つ一つ着実に社会実装を進めていけば、地熱探査の分野で大きな貢献をしようと考えられる。

実際に、相手国で地熱発電を計画・運用している LaGeo が、成果を活用するに至っている。

##### 【他国、他地域への波及】

エルサルバドルは地熱発電技術および関連の人材育成においてラテンアメリカのハブとなるポテンシャルがある。そのため、関わっている事業者と連携して、すでに構築されている技術の向上と発展に向けた人材育成を通じた取り組みが期待される。

地熱探査は一つの技術だけでなく、物理探査、地化学探査、リモートセンシングなど多くの技術を集結させていく必要があるが、ここで開発された熱発光探査技術は有効な技術の一つとして、他国や他地域でも広く適用可能だと考えられる。井戸掘削候補地選定のコスト低下も見込める技術であり、候補地選定ソフトを安価公開することから、他地域への普及も大いに期待できる。ただし、熱発光法は本プロジェクトの研究者らの独自技術であることから、特許が逆に普及を阻む可能性もあり、適切なビジネスモデルの設定が今後必要になる。

##### 【国内外の類似研究と比較したレベル】

我が国発の熱発光法が長石や方解石にも適用できるよう改良されたことは、本プロジェクトの研究者らが開発した独自技術であり、石英がほとんど存在しないエルサルバドルの地熱帯の調査に活用された。キレート剤による岩石の浸透率向上も独創性の極めて高い技術であり、どちらの技術も地熱発電のコスト低下に対して、ある程度のインパクトが期待できる。また、地熱開発の有望地域を評価するスコアリングプラグインプログラムの開発等、多くの新規性の高い成果が得られている。

## 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】

エルサルバドルは地熱発電開発を国の重要施策としている。また、地熱発電の比率が高く、資源量が豊富なエルサルバドルにとって、地熱発電のコスト低減、持続可能性の向上は大変重要なテーマであり、本プロジェクトは相手国ニーズに沿うものである。

相手国の政府、大学、研究組織の問題もあり、プロジェクトの成果が直ちに相手国ニーズの充足に大きなインパクトを与えることは難しいが、人材育成、教育および研究体制は確実に一歩前進させたと言えよう。これらの継続性が重要と思われる。

### 【課題解決、社会実装の見通し】

本プロジェクトで開発された技術により地熱発電候補地域の絞り込みが可能となり、また、プロジェクトに参画した LaGeo を通じてプロジェクト成果が現場で活用されつつある。相手国側の努力によるが、東北大学と UES との部局間学術交流協定の締結、LaGeo との共同研究契約の締結など、社会実装への見通しは明るい。

### 【継続的発展の見通し（人材育成、組織、機材の整備等）】

きめ細かい研修の実施や留学生の受け入れ等、人材育成の強化を図ったことにより、相手国の研究力は格段に向上した。また、UES と LaGeo が共に本プロジェクトに参加し、大学と企業との連携が進んだことは高く評価できる。東北大でも 3 つの研究室がプロジェクトを引き継いでおり、継続的発展に寄与していくことが期待できる。

UES の大学運営陣の変化などの懸案事項も残るが、現時点でプロジェクトが対処可能な最善を尽くしており、相手国側の地熱発電に関する科学研究を前進させたのは確かである。機材もすでに相手国側で十分活用されている。

### 【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）】

UES と LaGeo がプロジェクトに参画し、両者の連携が進んだことから、研究・利用活動の持続的発展が期待できる。また、地熱研究センターの設立や修士課程の常設について働きかけを継続している点も評価できる。ただし、エルサルバドル政府等からの外部資金を獲得す

るなど、今後の研究活動継続のための資金獲得が重要であり、エルサルバドル側の課題であるが、プロジェクト終了後も日本側も支援していくことが望ましいと考えられる。

### 4-3. 付随的成果

#### 【日本政府、社会、産業への貢献】

本プロジェクトにおいて開発した技術は、日本に対しても適用可能である。加えて、世界共通の基盤技術と認められる可能性もある。日本企業による成果の事業化が検討されており、日本の産業への貢献も期待できる。

#### 【科学技術の発展】

日本とエルサルバドルとの岩石組成の違いなどから、地質学上の発見があるなど、基礎的なサイエンスとしても成果があった。熱発光法の実用化や浸透率向上の技術的発見・発明についても、インパクトが大きい成果と言える。地熱探査法や有望地域を評価するプログラム、岩石の浸透率を増加させる方法等の技術成果に加え、エルサルバドルの地熱帯の成り立ちに関わる科学的知見が得られている。

#### 【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）】

相手国人材育成には大きな成果を出しているが、日本人人材育成は標準的だと考えられる。プロジェクトの推進に関して、会話や人間関係も重視する研究代表者の姿勢などは若手に良い影響をもたらすと考えられ、研究課題に対するフレキシブルな対応なども若手研究者が享受することが望まれる。エルサルバドルの研究者を日本に招いて開催される地熱スクールは、日本人も参加してディスカッションするなど両国の教育の機会を増やすことにも繋がったと考えられる。

#### 【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】

熱発光法は本プロジェクト発足前に特許を取得しており、新たに開発された地熱開発の有望地域を評価するスコアリングプラグインプログラムについては、2024年1月に著作権の登録を完了した。熱発光法の知財化や国際標準化と共に、広く活用してもらうためのアプリの無償開放など高い意識を持って推進されている。また、地熱エンジニアリングとの共同特許があることは強みとなりうる。

#### 【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）】

共著論文を含む多くの論文が学術誌、国際学会等で発表された。また、エルサルバドルの地質に関するデータの集積が進んだ点についても、今後の研究活動を加速させる成果であると考えられる。さらに、QGISを利用したソフトウェアを開発するなど、成果が上がっている。

#### 【技術および人的ネットワークの構築（相手国を含む）】

UES も LaGeo も日本側の東北大学をはじめとする関係機関との交流の継続を強く望んでおり、それぞれが東北大学との連携協定を締結した。本プロジェクトの分野について、相手国と日本の人的ネットワークは極めて高いレベルで構築されており、非常に良好である。

#### 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）】

UES と LaGeo が本プロジェクトに参画したことにより、両者の連携が進んだ。留学生の受け入れや、部局間協定の締結、意思決定の要職者も交えた相手国側でのワークショップや日本でのスクールの開催など推進体制は優れている。

##### 【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）】

研究代表者が率先して人材育成と研究指導に当たったことから、両国の信頼関係が構築され研究チームの連携が進んだ。また、コロナ禍の逆風もあったがその困難を克服した点や、UES の研究についての姿勢や考え方などの文化の違いも乗り越えた点など、もともとの文化の異なる両国の橋渡しをして、会話を重視し、プロジェクトをまとめた研究代表者のリーダーシップや人柄が果たした貢献は非常に大きい。その結果、研究代表者は LaGeo から VICTOR DE SOLA 賞<sup>2</sup>を授与されている。

##### 【成果の活用に向けた活動】

LaGeo の意思決定の要職にある人も含めたワークショップ開催など、相手国の参加企業が高い関心を持つように仕向けている。これは、成果の活用に向けて有効な活動であると言える。また、次世代を担う人材も育ってきており、産学連携した研究活動の継続が見込まれる。

##### 【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）】

我が国で行った地熱スクールの研究報告会には、毎回駐日エルサルバドル大使、UES の幹部、LaGeo の社長を招き、交流を図った。また、多くの論文発表、会議発表がなされており、十分な学術的成果を上げるとともに、活発な情報発信がなされた点も評価できる。

##### 【人材、機材、予算の活用（効率、効果）】

機材と予算の活用は妥当であり、また、相手国研究者が主体的に機材を活用できるようトレーニングしており、今後の活用・効率的な運用も期待できる。

---

<sup>2</sup> VICTOR DE SOLA 賞：エルサルバドルにおける地熱探査の先駆者の一人にちなんで名付けられた賞。毎年、エルサルバドルの地熱開発に多大な支援を行った個人または機関において、特に地熱の技術的および科学的能力の拡大に貢献した人物に授与される。

## 5. 今後の研究に向けての要改善点および要望事項

- 1) 本プロジェクトを通して、相手国の研究力は格段に向上し、研究の継続、社会実装に向けた人材育成と体制づくりは進んだと考えられるが、研究および研究成果の社会実装、人材育成等に関しては引き続き支援が必要と思われる。今後は、持続的に発展していけるように、継続的な予算や資金を獲得し、連携協定に基づくさらなる取り組みを検討してほしい。日本にとっても地熱開発の発展につながるポテンシャルは大いにあると考えられるため、引き続き頑張っていたきたい。
- 2) 素晴らしいプロジェクト推進である。一方で、本プロジェクトは地熱探査技術の枠の中で設定されている。地熱発電によるカーボンニュートラル貢献では、探査技術だけでなく、発電技術・運用技術の向上など様々な可能性がある。また、キレート剤での浸透率向上は優れた技術シーズだが、社会実装の道筋はまだ弱い。  
資源探査以外の発電システム側の改良などのアプローチも束ねて（或いは連携して）、地熱発電の普及促進につながる全体像を構築していけば、地熱発電のコスト低減や二酸化炭素削減効果がより明確になり更に可能性が拡がると考えられる。このためにも地熱分野において、もう少し幅広いネットワークができれば更に良い。
- 3) 他の SATREPS の地熱研究プロジェクトと連携し、エルサルバドルだけでなく、より広く展開し、大きな波及効果を引き出すことを検討してほしい。

以上

## 成果目標シート

研究課題名	熱発光地熱探査法による地熱探査と地熱貯留層の統合評価システム
研究代表者名 (所属機関)	土屋範芳 (東北大学 大学院環境科学研究科 教授)
研究期間	H29採択 (平成29年6月1日～令和6年3月31日)
相手国名/主要 相手国研究機関	エルサルバドル/エルサルバドル大学、 LaGeo (国営地熱公社)
関連するSDGs	目標7「すべての人々に手ごろで信頼でき、持続可能かつ近代的なエネルギーへのアクセスを確保する」

### 付随的成果

日本政府、社会、 産業への貢献	<ul style="list-style-type: none"> <li>地球規模の気候変動枠組みへの活用</li> <li>日本企業による成果の事業化</li> </ul>
科学技術の発展	<ul style="list-style-type: none"> <li>地熱資源の精密評価</li> <li>ラテンアメリカの地熱資源の評価技術</li> <li>地熱熱流量と地球温暖化</li> </ul>
知財の獲得、国際 標準化の推進、生 物資源へのアクセ ス等	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱発光法の国際特許</li> <li>新地熱探査法の国際標準化</li> <li>LaGeoのラテンアメリカ進出に伴う熱発光探査法の推進</li> </ul>
世界で活躍できる 日本人人材の育成	<ul style="list-style-type: none"> <li>日本人相手研究者・技術者の国際展開 (エルサルバドルを中心としてラテンアメリカ全体へ)</li> </ul>
技術及び人的ネッ トワークの構築	<ul style="list-style-type: none"> <li>ラテンアメリカの地熱技術者ネットワーク</li> <li>ラテンアメリカの大学との連携</li> <li>人材養成の中核組織</li> </ul>
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"> <li>熱発光地熱探査システムの導入</li> <li>地熱貯留層評価シミュレーション・システムの導入</li> <li>新地熱探査法のトレーニング・マニュアルの導入</li> </ul>

### 上位目標

エルサルバドルの地熱エネルギー利用が促進される。

- 本プロジェクトで開発される技術を活用し、2箇所以上の地熱候補地が検証される。

相手国での地熱開発への関心が高まり、新たな地熱開発計画が策定される。

### プロジェクト目標

- 有望地域を確定するための効果的な方法論が開発され、地熱貯留層の性能や抽熱量が正確に設計される。

- TL探査と統合システムによって抽出された二次エリアは、LaGeoコンセッションエリアと探査フェーズエリアの合計の75%未満となっている。
- QGISデータベースの3次元可視化により、地熱貯留層の構造が明らかにされる。

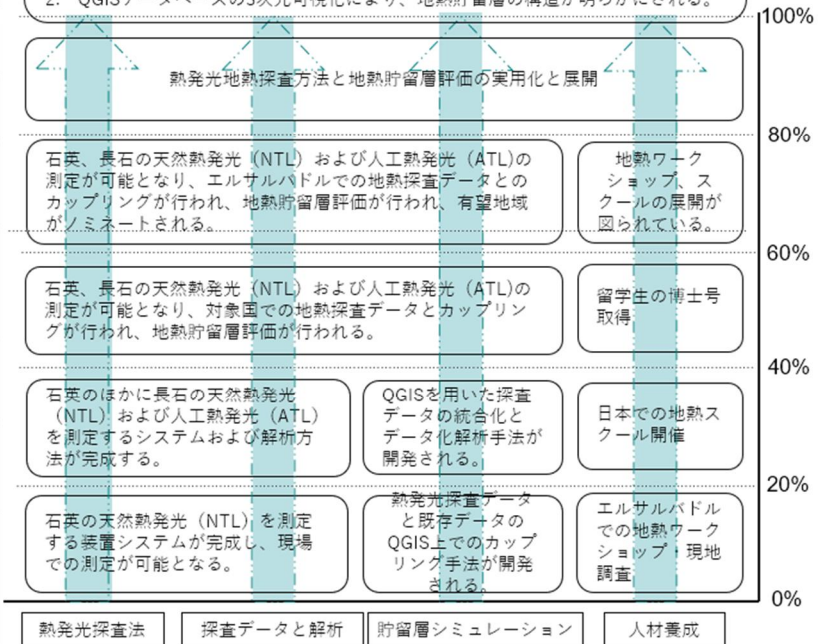


図1 成果目標シートと達成状況 (2024年1月時点)