

「地熱発電導入拡大研究開発」

事業原簿 概略版 【公開版】

担当部	国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー部
-----	--

—目次—

内容

概 要.....	2
プロジェクト用語集.....	10
研究開発項目ごとの成果.....	17
(1)-1. 超臨界地熱資源量評価（湯沢南部地域）.....	18
(1)-2. 資源量評価（葛根田地域）.....	43
(1)-3. 超臨界地熱資源量評価（八幡平地域）.....	59
(1)-4. 超臨界地熱資源量評価（九重地域）.....	72
(1)-5. 光ファイバーDAS による超臨界地熱資源探査技術開発.....	85
(2)-1. 気象調査代替手法および新たな大気拡散予測手法の研究開発.....	133
(2)-2. IoT 硫化水素モニタリングシステムの開発.....	148
(3)-1. 蒸気生産データの AI 処理による坑内および貯留層での早期異常検知技術の開発.....	161
(3)-2. 坑内異常自動検出 AI 方式, 耐熱坑内可視カメラ（BHS）開発.....	169
(3)-3. 光ファイバマルチセンシング・AI による長期貯留層モニタリング技術の開発.....	189
(3)-4. AI を利用した在来型地熱貯留層の構造・状態推定.....	204
(3)-5. 地熱貯留層設計・管理のための耐高温・大深度地殻応力測定法の実用化.....	216
(3)-6. 発電設備利用率向上に向けたスケールモニタリングと AI 利活用に関する技術開発.....	227
(3)-7. 地熱発電持続可能性維持のための IoT-AI 技術開発.....	238

(添付資料)

- ・プロジェクト基本計画

概要

		最終更新日	2023年4月26日
プロジェクト名	地熱発電導入拡大研究開発 地熱・地中熱等導入拡大技術開発事業	プロジェクト番号	P21001
担当推進部/ PMまたは担当者 及びMETI担当課	<p>【新エネルギー部】</p> <p>PM：主任研究員／加藤 久遠（2021年4月～2022年3月） PM：主査／大竹 正巳（2022年4月～現在） SPM：主査／長谷川 真美（2021年4月～現在） PT：主査／和田 圭介（2021年4月～2021年12月） PT：主査／石川 一樹（2021年4月～現在） PT：主査／本田 洋仁（2021年7月～現在） PT：主査／長田 和義（2022年1月～現在）</p> <p>【経済産業省】</p> <p>資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギー課（2021年4月～現在） 産業技術環境局 エネルギー・環境イノベーション戦略室（2021年4月～2022年3月） 資源エネルギー庁 資源・燃料部 政策課（2022年4月～現在）</p>		
0. 事業の概要	<p>本事業では、国立・国定公園特別地域での地熱開発を含め、地熱発電の導入拡大を促進することを目的とし、2030年のエネルギーミックス実現に向けて、我が国の地熱発電設備容量最大1.55GWの達成を図るとともに、次世代のイノベーション技術として注目される超臨界地熱資源を対象とした地熱資源評価に係る研究開発を実施し、より一層の地熱発電の導入拡大を促進する。</p>		
1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋			
1.1 本事業の位置付け・意義	<p>(1) 政策・施策における位置づけ</p> <p>近年、温室効果ガスの排出量削減に対して多方面での対策が議論されている中、2015年12月にCOP21（パリ協定）において、2030年並びに2050年に向けた各国での削減目標が策定された。我が国では、2018年7月に第5次エネルギー基本計画が閣議決定され、再生可能エネルギーの主力電源化とそのための同電源に対する発電原価低減化が喫緊の課題として提言された。このような状況の中、再生可能エネルギーの一つである地熱は、ベースロード電源としての特徴を有し、大規模開発では競争力のある電源として位置づけられ、その導入拡大が期待されている。</p> <p>2012年7月には再生可能エネルギーの固定価格買取制度が施行され、地熱では、15MW未満では40円/kWh、15MW以上では26円/kWhという買取価格が設定され、地熱開発事業者にとって、一定の採算性が確保されるに至った。また、2021年6月には「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定され、2050年に向けて成長が期待される14の重点分野（エネルギー、輸送・製造、家庭・オフィス等）が選定されエネルギー分野の一つとして地熱発電の課題・取り組みが示された。加えて2021年10月には第6次エネルギー基本計画が閣議決定され、地熱発電の2030年度における導入見込量として最大で約148万kW（2021年度実績59.3万kW）、発電電力量68億kWh（2021年度実績28億kWh）が掲げられ、地熱発電のさらなる導入拡大が期待されている。</p> <p>(2) NEDOが実施する意義</p> <p>NEDOは1980年の設立時（新エネルギー総合開発機構）から、サンシャイン計画（1974～1992年）、ニューサンシャイン計画（1993～2000年）等の下、地熱資源探査、探査技術、坑井掘削技術、生産技術、発電システム技術などの調査・研究開発を推進し、地熱開発の導入・促進に貢献してきた。2012年度から地熱資源開発・調査業務はJOGMECへ移管されたが、地熱利用技術開発に係る業務は引き続きNEDOが実施している。また、2018年度からNEDOは超臨界地熱資源技術開発をスタートし、2050年頃の実用化に向けて超臨界地熱発電に必要な技術開発を牽引している。</p> <p>以上のことから、NEDOは地熱技術開発プロジェクトの運営・管理能力を十分に有している。また、効果的・効率的な事業執行の観点から、本事業はNEDOが推進すべき事業である。</p>		
1.2 アウトカム達成までの道筋	<p>(1) 2050年頃に普及を目指す超臨界地熱資源を活用した地熱発電所による推定資源量11GWと、これによるCO₂削減量は約4,500万トン-CO₂/年というアウトカムの達成に対して、以下のような道筋を計画している。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・2021～2023年度：主要な4地域における超臨界地熱資源量の評価。併せて、構造調査試錐井および調査井の掘削の検討や経済性の評価を実施。 ・2024～2025年度：2023年度までの検討結果を基にして構造調査試錐井を掘削。 		

	<ul style="list-style-type: none"> ・2026～2030 年度：2024～2025 年度に掘削した構造調査試験井で得られた地下データ（温度、地質等）を参考にして高精度な資源量評価を実施。そしてこれら地下データを参考にして調査井を掘削。更に同坑井で噴気試験を実施することにより、詳細な資源量を評価。 ・2030～2050 年度：発電所建設に向けて地上設備の検討と実証試験を実施。併せて、超臨界有望地域において国主導により資源調査を実施。この結果を参考にして民間により資源調査・開発を実施して、2050 年頃のアウトカムの達成を目指す。 <p>(2)2030 年頃に目指す最大で約 1.55GW の発電容量と、これによる CO₂削減量約 630 万トン-CO₂/年というアウトカムの達成に対して、以下のような道筋を計画している。</p> <p>(2)-1. 環境保全対策技術</p> <ul style="list-style-type: none"> ・2021～2025 年度：硫化水素測定器および気象モデリング手法の検討。 ・2026～2030 年度：2025 年度まで検討した結果を基に環境アセス手法の最適化を達成させ、手法のマニュアル化、および硫化水素測定器の商品化等により 2030 年頃のアウトカムの達成を目指す。 <p>(2)-2. 高度利用化技術</p> <ul style="list-style-type: none"> ・2021～2025 年度：貯留層管理および設備管理の最適化を実施。 ・2026～2030 年度：2025 年度までの成果により発電量増加、コスト削減、および利用率向上のアウトプット目標を達成する。その後、手法のマニュアル化、貯留層管理ツール・設備管理ツールの商品化等により 2030 年頃のアウトカムの達成を目指す。
<p>1.3 知的財産・標準化戦略</p>	<p>オープン/クローズ戦略の現状における考え方を以下にまとめる。</p> <p>(1) 公開・非競争域</p> <p>環境アセスメントを効率化する新たな硫化水素測定手法や、気象調査代替手法及び新たな大気拡散予測手法については、手法マニュアルの作成や環境アセスメントの手引への反映を目指し、広く成果を公開する。</p> <p>(2) 公開・競争域</p> <p>光ファイバの劣化評価装置および劣化評価方法や、地殻応力測定法のうちコア採取の装置および方法、および AI による有望領域推定技術について、特許として権利化を図っている。</p> <p>また、標準化については超臨界地熱発電技術について以下のように考えている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・日本企業は、超臨界地熱用（高温、高圧、強酸性に対する耐性を持つ）ケーシング材、セメント材の開発に世界に先駆けて取り組んでいる。一方、超臨界地熱発電の実用化に向けては、適地での試掘を実施することが重要なフェーズである。このため、調査井での試験などができるタイミングで、標準化に関する議論を実施（資機材の評価など）する予定である。
<p>2. 目標及び達成状況</p>	
<p>2.1 アウトカム目標及び達成見込み</p>	<p>(アウトカム目標)</p> <p>2030 年頃に、地熱発電所の平均利用率並びに発電原価を、現状よりそれぞれ 20%pt 向上並びに低減化し、最大で約 1.55GW の発電容量、および 11TWh の発電量の達成が見込まれる。これによる CO₂削減量は、約 630 万トン-CO₂/年である。さらに、2040～2050 年頃に、超臨界地熱資源を活用した地熱発電所(100M W 級を 5 カ所)の普及を目指す。推定資源量は、11GW と試算され、これによる CO₂削減量は、約 4,500 万トン-CO₂/年である。</p> <p>(達成度)</p> <p>各研究開発項目は 2023 年 3 月現在、概ね計画通りに進行しており、アウトカム目標の達成に向けて順調に推移している。</p>
<p>2.2 アウトプット目標及び達成状況</p>	<p>1. 事業全体</p> <p>研究開発項目 (1) 「超臨界地熱資源技術開発」</p> <p>(中間目標)</p> <p>資源量評価に必要な概念モデルを構築するとともに、数値モデルに必要な前提条件を提示する。</p> <p>(成果)</p> <p>各地域において概念モデルを構築した。それに基づき数値モデルを検討し、資源量評価を実施している。また、構想調査試験井の検討、超臨界調査井の仕様の検討を進めている。</p> <p>研究開発項目 (2) 「環境保全対策技術開発」</p> <p>(中間目標)</p> <p>最終目標達成の準備として、概念設計を完了し、実証試験の詳細計画を提示する。</p> <p>(成果)</p> <p>数値気象モデルを用いたシミュレーション手法開発のための定量評価や計算手法整備、観測データの取得を実施。また、硫化水素モニタリング開発のため、測定器の性能評価やフィールドテストを実施し、加えて実証試験の候補地を選定した。</p>

研究開発項目 (3) 「地熱発電高度利用化技術開発」

(中間目標)

最終目標達成の準備として、概念設計を完了し、実証試験の詳細計画を提示する。

(成果)

各研究開発項目において、ほぼ計画通りにデータベースの構築、データの収集、モニタリング手法の確立、ハード・ソフトの整備・開発、解析コードの開発、AI を用いたシステムの設計・開発、シミュレータの構築、センサ技術の開発、および測定器の開発・性能評価を実施。

2. 個別テーマ

研究開発項目 (1) 「超臨界地熱資源技術開発」

(1) -1. 超臨界地熱資源量評価 (湯沢南部地域)

(中間目標)

補完地表面調査などの結果を追加情報として、既存の地熱系概念モデルを改善するとともに、同概念モデルを再現しうる数値モデルを複数比較検討し、必要な前提条件を提示する。

(成果)

高松岳南部の標高-2000m 以深に深部低比抵抗域を精度良く推定した。微小地震観測はまだデータが少ないが震源空白域が深部低比抵抗域と重なる傾向を捉えている。これらの結果と既存調査データとを統合し、概念モデルを構築した。

この概念モデルに基づく自然状態シミュレーションにおいて、既存坑井データや地表面地熱兆候に対し精度高く再現された。生産量予測については現在検討中であり、100MW を安定維持するケースを検討中である。

(1) -2. 資源量評価 (葛根田地域)

(中間目標)

補完地表面調査などの結果を追加情報として、既存の地熱系概念モデルを改善するとともに、同概念モデルを再現しうる数値モデルを複数比較検討し、必要な前提条件を提示する。

(成果)

高密度 MT 法探査、地質学的情報の再コンパイル結果などを追加情報として、既存の地熱系概念モデルを改善し、資源量評価に必要な超臨界地熱システムの概念モデル初版を同定した。また、資源量評価シミュレーションに必要な物性値の決定法を確定した。

上述の概念モデル初版をもとに数値計算モデルを作成し、自然状態シミュレーションを実施し、坑井温度プロファイルと一定の整合性を有する温度分布を得た。また、上述の超臨界地熱貯留層初版を数値モデル化し、この貯留層から 100MW 以上の発電を実現可能であることを示した。

(1) -3. 超臨界地熱資源量評価 (八幡平地域)

(中間目標)

補完地表面調査などの結果を追加情報として、既存の地熱系概念モデルを改善するとともに、同概念モデルを再現しうる数値モデルを複数比較検討し、必要な前提条件を提示する。

(成果)

MT 法電磁探査によって抽出された推定熱源岩体 (深部低比抵抗帯) の分布形状から概念モデルを構築した。MT 法電磁探査に加えて微小地震観測・重力探査の結果も、超臨界領域の分布を示唆している。

この概念モデルをもとに数値モデルを作成した。そのひとつである溶融モデル (熱伝導モデル) で従来型地熱貯留層 (安比地域) を再現可能であることを確認した。これを基に新たな数値モデル「中間モデル」を作成し、未知の部分も含め幅広く検討可能とした。そして中間モデルによる資源量の試算を行った。

(1) -4. 超臨界地熱資源量評価 (九重地域)

(中間目標)

補完地表面調査などの結果を追加情報として、既存の地熱系概念モデルを改善するとともに、同概念モデルを再現しうる数値モデルを複数比較検討し、必要な前提条件を提示する。

(成果)

補完地表調査を行い、新しい知見を取り込んだ超臨界地熱システム概念モデルの初版を構築した。また、岩石物理モデルに基づく、貯留層相当領域の浸透率推定を評価する手法の検討を開始した。
上述の概念モデルに基づいた初期数値モデルを構築し、自然状態シミュレーションを実施している。

(1) -5. 光ファイバーDASによる超臨界地熱資源探査技術開発

(中間目標)

- ①国内外の地熱フィールドにおいて空間的に1 km程度の範囲で地熱貯留層を推定する汎用的手法を開発する。探査する上での注意点、条件などを抽出する。
- ②観測システムの最適化に貢献できるような理論的観測波動場推定手法を開発する。実際の解析において得られるDASデータから地下構造を推定するための理論DAS波形計算法、全波形インバージョン法、S波利用法をまとめる。
- ③光ファイバーの超臨界水環境下(目標400°C)での損傷度評価技術を確立するとともに、DAS用センシング構成要素モデルの耐久性評価手法を確立する。

(成果)

- ①森、澄川、滝上、木地山での実施により極めて本方法の有効性が確認できた。
- ②得られた結果が発電所の保有するデータおよび既存解釈と整合性を持っている。光ファイバーの入射地震波に対する応答を検出可能であることを確認した。
- ③ポリイミド被覆、金属被覆ファイバーについて、超臨界水/亜臨界水中での損傷度評価を実施しそのメカニズムを明らかにした。また、センサーデバイス内の雰囲気が重要であることを明らかにした。

研究開発項目(2)「環境保全対策技術開発」

(2) -1. 気象調査代替手法および新たな大気拡散予測手法の研究開発

(中間目標)

- ①2~4地点の地熱発電所における既存のアセスデータを対象として、気象モデルによる再現計算を実施し、モデルの再現精度を定量的に評価するとともに、精度向上に向けた課題抽出を行う。気象モデルとCFDモデルの結合モデルによるダウンスケーリング手法、および、データ解析に基づく地上風速予測手法について、ベースとなるモデルを完成させる。
- ②着氷予測モデルに地形影響を考慮できる機能を追加し、予測精度の評価を行う。また、24時間平均着氷成長率について従来モデルよりも高い予測精度を目指す。

(成果)

- ①4地点の地熱発電所における既存のアセスデータを対象として、山間部における気象モデル再現精度の定量評価を実施。地上風速の過大評価傾向が見られたが、モデル設定の最適化により改善の見込みが得られた。また、気象モデルとCFDモデルの融合モデルを整備し、機械学習による複雑地形上の地上風速予測手法を整備した。
- ②地熱発電所を対象とした着氷観測を実施し、着氷予測モデルの検証用データを取得した。

(2) -2. IoT 硫化水素モニタリングシステムの開発

(中間目標)

- ①以下の性能の実現を目標として、室内における小型連続測定器の実証機の性能評価試験を実施する。

【基本性能】

- ・検出限界：0.01 ppm 以下
- ・指示精度：±0.01 ppm 以内(試験ガス濃度：約0.11 ppm)、±10 %以内(試験ガス濃度：約1.00 ppm)

【使用環境を想定した温度、湿度による影響試験】

- ・測定値の変化：±0.01 ppm 以内
- ②低濃度領域測定器については、以下の性能を目標として試作機を製作する。

- ・検出限界：0.004 ppm
- ・バッテリー駆動：6時間以上

- ③地熱発電所などを実験フィールドとし、新しい硫化水素測定手法ガイドラインの案に基づく実証試験の詳細な計画をとりまとめる。

(成果)

- ①実証機プロトタイプ2台で現地試験等により性能確認を実施中。性能評価用の装置を組立て動作テストを実施し課題を抽出済み。
- ②装置化前段階で2022年11月にフィールドテストを実施し、目標をクリア。
- ③予備調査を実施し候補地の選定を完了(地熱発電所1箇所、温泉地1箇所)。

研究開発項目 (3) 「地熱発電高度利用化技術開発」

(3) -1. 蒸気生産データの AI 処理による坑内および貯留層での早期異常検知技術の開発
(中間目標)

- ①過去の生産記録、トラブル記録、貯留層データの収集、フォーマット変換を終了する。
- ②蒸気生産量異常検出、原因推定 AI の開発を終了する。
シミュレーションを通じて生産異常の 70%程度を事前・もしくは早期検知可能であり、事前・早期検知した異常の 70%以上について原因を提示できることを示す。
- ③奥会津地熱株式会社が運用している坑井データ監視・記録システムで運用可能にするためのコーディングおよび必要なハードウェアのコア部分の設計・開発を終了する。

(成果)

- ①過去の生産記録、トラブル記録、貯留層データの収集、フォーマット変換を終了した。
- ②蒸気生産量異常検出、原因推定 AI のコア部分の開発を終えた。シミュレーションにより生産異常の 80%以上について事前・早期検出が可能であることを示した。典型的異常について原因との関連を示すデータベースを構築した。
- ③AI システムの仕様を策定し、コア部分の開発を開始した。奥会津地熱株が運用中の坑井データ監視・記録システムで使用可能にするためのハード・ソフトの整備を終了した。

(3) -2. 坑内異常自動検出 AI 方式、耐熱坑内可視カメラ (BHS) 開発
(中間目標)

- ①200℃・2,000m 程度の環境下での坑内画像が取得可能で、VGA 以上の画像分解能（焦点での分解能 0.5mm 以下）を持つ BHS が開発されていること。
- ②浮遊物等のノイズを除去できる画像鮮明化処理が可能な 3 次元フィルタをはじめとするシステムのプロトタイプが完成し、浮遊物ノイズ等が除去されて、坑壁画像が視認できる状況に改善されていること。
- ③過去のデータの学習が完了した画像処理システムのプラットフォームが完成し、健全な状態にあるケーシングの継ぎ目が 100%検出でき、スケール付着状況が画面上で検出されるシステムであること。

(成果)

- ①200℃、2,000m 程度の環境下で 2.5 時間程度作業可能な測定器が開発できた。
- ②かすみ除去・2 次元及び 3 次元ノイズフィルターを組み合わせることで画像鮮明化を実現した。
- ③前方視について AI による学習の実施し、正常・スケール付着について正答率 77%のシステムを開発した。

(3) -3. 光ファイバマルチセンシング・AI による長期貯留層モニタリング技術の開発
(中間目標)

- ①調査した高温用光ファイバケーブルの性能を評価し、温度・圧力・振動・流量を計測できるマルチセンシングシステムの実現性を確認する。特に、圧力・流量に関しては、それぞれ 2 つの異なる手法による性能を評価し、2024 年度以降の開発の方針を策定する。
- ②光ファイバケーブルに損傷・断線・変形等を与えることのない降下・設置手法と確実な坑口シール方法を提案する。
- ③AI-IoT システムのプロトタイプを完成させる。技術者の習熟度によらず、一定条件で迅速かつ安定的なイベント検出または監視が長期にわたり可能な AI-IoT システムの概念を実証する。

(成果)

- ①高温用光ファイバケーブルを入手し、その特性と性能を評価した。また、室内およびフィールド実験においてマルチセンシングシステムの実現性を確認した。また、試作や室内実験を行い、それぞれの手法における性能を評価し、以後の開発方針を決定した。
- ②降下・設置技術を調査し、目的に合った手法を選定した。また、降下・設置条件に合った設置器具および坑口装置を選定した。
- ③坑井内 DAS による AE 観測データからのイベント検出作業の機械化による効率改善を確認した。また、遠隔監視システムのプロトタイプを試作した。

(3) -4. AI を利用した在来型地熱貯留層の構造・状態推定
(中間目標)

- ①坑井、地表地質、地理情報、物理探査データ等から AI の手法により温度分布および高透水性領域の分布を推定可能にする。特に、温度については、15%以下の誤差で推定する。

②地下 2～3km の 2 次元および 3 次元比抵抗構造について、従来手法よりも高い空間分解能を持つ解析方法を開発し、それに基づいた構造解析コードを作成する。

(成果)

①坑井、地表地質、地理情報、物理探査データ等から温度分布を推定する AI を開発し、人工データに対し 15%以下の誤差で推定した。また、画像認識により開発有望領域（高透水性領域）の分布を推定可能な手法を開発した。

②スパースモデリングによる 2 次元比抵抗逆解析コードの開発を完了し、最適化パラメータの検討を実施した。また、3 次元解析コードの一部となる順解析部分のコード開発を完了した。

(3) -5. 地熱貯留層設計・管理のための耐高温・大深度地殻応力測定法の実用化

(中間目標)

①250℃以上の耐熱性能があり、2.5 km 以上の深度で 2 個以上の応力記録コアを連続的に採取できる方法を具体化する。これに基づいて実証試験の詳細計画を提示する。

②方位の時間変化を内蔵メモリに記録でき、250℃以上の耐熱性能を有する方位測定器を開発する。また、測定器が耐えられる温度と保持時間の関係を明らかにする。

③現実に即した断裂型貯留層の構造モデルを決定する。

(成果)

①改良ロッド型ツールを製作して地表から掘削した実坑井および神岡鉱山の坑道に掘削した実坑井での動作試験に成功した。また、ワイヤーライン型ツールを製作して神岡鉱山の坑道に掘削した実坑井での動作試験に成功した。

②耐熱温度 204℃で 8 時間耐えられる市販の方位測定器を入手できた。この耐熱条件を踏まえ、ワイヤーライン取り付け方式で方位測定器を一時的に改良ロッド型ツールと連結してコア方位を測定する装置を製作した。そしてこの装置を神岡鉱山での掘削試験に適用して動作検証に成功した。

③国内の地熱発電所における地質構造と熱構造を文献調査した結果、断層、断裂帯と貫入岩体などが異なる 3 つの形態に分類されることがわかった。

(3) -6. 発電設備利用率向上に向けたスケールモニタリングと AI 利活用に関する技術開発

(中間目標)

①テストピースの材質選定から浸漬後のテストピースの保管、およびテストピースの各種分析を含めたモニタリング試験条件の決定し、標準化案の検討を完了する。

②熱水からのシリカスケール沈殿のケースを 200 条件以上（沈殿しないケースを 50 条件以上含む）、二相流および蒸気からのシリカスケールの沈殿のケース（フィールド試験）を 20 条件以上のデータセットを取得する。

③シリカスケール生成予測を実現する AI の概要設計を完了する。

④実証試験装置を製作し、実証試験を実施する。実証試験を実施し得られた結果と、モデル計算等との比較・評価を行う。

(成果)

①試験条件の標準化を検討し、ベースとなる試験法は確定しつつある。

②目標として挙げた条件数に対する進捗率の約 7 割を達成している。

③既存データによる AI の概念設計構築とともに試行的なスケール生成予測を繰り返し進めている。

④実証試験装置を製作し、実施可能な発電設備を検討中である。

(3) -7. 地熱発電持続可能性維持のための IoT-AI 技術開発

(中間目標)

①全体システム設計において、対象発電所の過去データに基づき全体最適化した場合に、持続的に利用率が向上することを示す。

②澄川地熱発電所ならびに滝上発電所の蒸気設備において、個別技術の試験を行う。

(成果)

①EnergyWIN、貯留層付き非定常坑内流動シミュレーションを用いた解析により、坑口圧を系統よりも僅かに低圧で併入することで、振動→除外現象を避けて安定的な生産の継続ができ、利用率が向上することを示した。また、現状の坑内状況に合わせ、タービン入口蒸気圧力を 0.287→0.273 MPaG と変化させることで、発電効率の低下を上回る蒸気量増が見込め、利用率の向上に繋がることを示した。上記 2 件の成果として、定検前後のデータ比較で利用率 8.34%の向上を確認できた。

②澄川地熱発電所ならびに滝上発電所に 2018 年度～2022 年度までの運転データ・実証フィールド等提供のご協力をいただき、個別の要素技術毎の検証を行うことができた。

3. マネジメント						
3.1 実施体制	経産省担当原課	資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギー課 資源エネルギー庁 資源・燃料部 政策課				
	プロジェクトリーダー	—				
	プロジェクトマネージャー	主査/大竹 正巳				
	委託先	日鉄鉱コンサルタント(株)、地熱エンジニアリング(株)、三菱マテリアルテクノ(株)、地熱技術開発(株)、西日本技術開発(株)、東北緑化環境保全(株)、(株)ガステック、奥会津地熱(株)、三井金属資源開発(株)、(株)物理計測コンサルタント、(株)地球科学総合研究所、応用地質(株)、九電産業(株)、九州電力(株)、三菱重工業(株)、日本オイルエンジニアリング(株)、(株)INPEX ドリリング、エスケイエンジニアリング(株)、地熱解析(株)、松永ジオサーベイ(株)、(株)レーザック、(国大)秋田大学、(国大)東北大学、(国大)九州大学、(国大)京都大学、(学)近畿大学、(国大)熊本大学、(公大)会津大学、(国大)室蘭工業大学、(国大)東京工業大学、(学)早稲田大学、兵庫公立大学法人兵庫県立大学、(国大)神戸大学、(国大)東海国立大学機構名古屋大学、(国研)産業技術総合研究所、(一財)エンジニアリング協会、(一財)ファインセラミックスセンター、(一財)電力中央研究所				
3.2 受益者負担の考え方 事業費推移 (会計・勘定別にNEDOが負担した実績額(評価実施年度については予算額)を記載) (単位:百万円)	主な実施事項	2021fy	2022fy	2023fy	/	
	研究開発項目 (1)「超臨界地熱資源技術開発」	モデルフィールドにおける資源量評価	→	→		→
		深部探査技術手法開発	→	→		→
	研究開発項目 (2)「環境保全対策技術開発」	硫化水素連続モニタリング装置開発	→	→		→
		気象モデリング手法開発	→	→		→
	研究開発項目 (3)「地熱発電高度利用化技術開発」	貯留層管理手法開発	→	→		→
		発電設備管理手法開発	→	→	→	
	会計・勘定	2021fy(実績)	2022fy(実績)	2023fy(予算額)	総額	
	一般会計	—	—	—	—	
	特別会計 (電源・需給の別)	1,059	1,515	1,154	3,728	
開発成果促進財源	—	—	—	—		
総NEDO負担額	1,059	1,515	1,154	3,728		
(委託)	1,059	1,515	1,154	3,728		
3.3 研究開発計画						
情勢変化への対応	<p>2021年10月に閣議決定された「第6次エネルギー基本計画」では地熱発電のさらなる導入拡大が期待されている。また、2022年11月にエジプトで開催されたCOP27では、パリ協定で定めた目標の重要性の再確認や国別目標の強化が決定された。</p> <p>このような状況を受け、「超臨界地熱資源技術開発」のうち4地域の資源量評価については、当初は2021年度から2024年度までの4年間での計画であったところを2023年度まで</p>					

		の3年間に前倒しで完了させる計画に見直しを行い、2050年のカーボンニュートラルに着実に貢献することを目指す。	
	中間評価結果への対応	—	
	評価に関する事項	事前評価	2020年度実施 担当部 新エネルギー部
		中間評価	—
		終了時評価	—
別添			
	投稿論文	「査読付き」12件、「その他」1件	
	特許	「出願済」1件、「登録」0件、「実施」0件（うち国際出願0件） 特記事項：特になし	
	その他の外部発表 （プレス発表等）	研究発表・講演：71件 受賞実績：2件	
	基本計画に関する事項	作成時期	2021年2月 作成
		変更履歴	2022年4月 改訂（プロジェクトマネージャー変更のため）

プロジェクト用語集

用語	説明
インマルサット衛星通信	インマルサット静止衛星を通じて、インマルサット設備と電話・テレックス・データ端末やインターネットを結ぶ通信サービスである。赤道上空 36,000km の位置に配置された 4 機の静止衛星で、極地を除く全世界をカバーしている。日本国内では、南側の空が開けていることで、衛星をとらえ通信ができる。
回帰学習型 AI	過去に取得した時系列データを用いて、現在および将来のデータを予測する手法。
隠れマルコフモデル	確率統計学的モデルを用いて観測された記号系列の背後に存在する状態の遷移系列を推測する手法
葛根田花崗岩	葛根田地域の地下 2km 以深に存在し、少なくとも 3km×2km の広がりを持つ花崗岩（加藤・佐藤、1995）。葛根田地域の天然熱水系の熱源として機能しており、その上部に超臨界地熱貯留層が形成されていると判断している。
カルマン渦式 FBG 流量計測法	カルマン渦周波数もしくは複数のセンサ間での渦の到達時間差を時間-周波数領域で検出して流量（流速）を推定する原理。
干渉物質	測定において実試料中に共存し、測定値を変化させる可能性がある目的成分以外の成分。
気象モデル	コンピューターを用いた数値解法により、計算領域における風速や気温等の気象場を予測・再現するもの
許容濃度の勧告（2018 年度）（日本産業衛生学会、平成 30 年）	労働者が 1 日 8 時間、週間 40 時間程度、肉体的に激しくない労働強度で有害物質に曝露される場合に、当該有害物質の平均曝露濃度がこの数値以下であれば、ほとんど全ての労働者に健康上の悪い影響が見られないと判断される濃度とされている。
クオリティ	2 相流流量の中で蒸気流量が占める比率。
蛍光検出器	蛍光励起用光源により、発色量を測定する機器をいう。
ケイ素・アルミニウムの NMR 分析	NMR (Nuclear Magnetic Resonance:核磁気共鳴) 分析は、対象原子核の特性に基づき、吸収する電磁波の周波数を吸収ピーク強度の関数として記録する方法で、対象原子周囲の配位・化学的な環境が異なれば、化学シフトを起こすことを利用して、対象原子を含む化合物の構造に関する情報を得られる手法である。
ケーシング	井戸の崩壊を防ぐために挿入する鉄管、地熱発電に利用できない低温流体の流入を防ぐ役割も果たしている。
検出感度	検出できる最小量（値）。検出下限、検出限界と同義語。また、ある検出器で検出できる元素あるいは化合物の最小量（detector sensitivity）として、検出器の性能を意味する場合がある。
公共の浴用に供する場合の温泉利用施設の設備構造等に関する基準（平成	温泉には種々の成分が含有されており、その利用方法あるいは温泉利用施設の管理等が適切でない場合において、人体に対して健康被害を与える場合がある。このため、総硫黄（硫化水素イオン、チオ硫酸イオン及び遊離硫化水素に対応するものをいう。以下同じ。）を 1 キログラム中 2 ミリグラム以上含有する温泉を、法第 15

18年環境省告示第59号)	条第1項の規定による許可を受けて公共の浴用又は飲用に供し、又は供しようとする者（以下「温泉利用許可者」という。）が遵守すべき基準を定め、硫化水素が衛生上有害となった場合における事故の防止や利用者の安全確保を図るものである。
校正	計器又は測定系の示す値、若しくは実量器又は標準物質の表す値と、標準によって実現される値との間の関係を確定する一連の作業。 (備考)校正には、計器を調整して誤差を修正することは含まない。
公定法	公定法とは分析化学・微生物培養の分野において成分の定性分析、定量分析、微生物の培養検出を行う際、国際機関、国家若しくはそれに準ずる公定試験機関、研究所において指定された方法をいう。 本研究開発では、「大気汚染物質測定法指針」（環境庁、昭和62年）に基づき環境大気中の硫化水素濃度を測定する方法とされているメチレンブルー吸光光度法を指す。
坑内検層	井戸の内部に測定器を降下させ、温度・圧力や地層の物性(比抵抗や密度等)などを調査することを指す。
酸素欠乏症等防止規則 (昭和47年労働省令第42号)	事業者は、酸素欠乏危険作業に労働者を従事させる場合は、当該作業を行う場所の空気中の酸素の濃度を十八パーセント以上（第二種酸素欠乏危険作業に係る場所にあつては、空気中の酸素の濃度を十八パーセント以上、かつ、硫化水素の濃度を百万分の十以下）に保つように換気しなければならないとされている。
自然状態シミュレーション	生産・還元が実施される前の地熱貯留層の安定した状態（自然流動状態）を再現するシミュレーションであり、調査井などから得られた貯留層の温度・圧力プロファイルなどをマッチング対象として、試行錯誤的に数値モデルを修正していくアプローチのこと。
植生モデル	CFDモデルにおいて、植生の空気力学的な抵抗を再現する際に、地表面のみに抵抗を与えるのではなく、樹高を考慮して植生が存在する空間に抵抗を与える方法。
深部構造調査試錐	超臨界地熱システム内部への調査井掘削に先立ち実施する、超臨界地熱システム上部（概ね350℃の領域）への掘削である。地下情報の取得、各種技術の試験等を通じて調査井掘削を迅速かつ安全に実現可能にする役割を担う。
スクラパー	気相吸収面と吸収液層が交わり、反応させる捕集のデバイスをいう。
スケール	地熱熱水等を輸送する配管内部に沈着した物質のこと。構成する化学成分により、シリカスケール、カルシウム系スケール、硫化物スケールなどに分類される。流体輸送管や還元井の閉塞を引き起こし、還元流量を減衰させる主要因の一つである。
スパースモデリング	少ない情報（スパースデータ）から全体像を復元しようとするモデリング手法。画像処理、信号処理、機械学習等で広く利用されている。
スパースモデル	入力された情報を必要な要素と不必要な要素に選別し、重要と判断された情報のみを抽出して「希薄」で「まばら」なデータから学習する手法
正解率	予測結果全体がどれくらい真の値と一致しているかを表す指標 $(TP+TN) / (TP+FP+FN+TN)$ で定義される
セルラーLPWA通信	セルラーLPWAとは、主に携帯電話で用いられている長距離通信を特徴としたLTEをベースに、データ転送速度と通信頻度を低く抑えることで低消費電力化を実現した

	LPWA 技術である。セルラーLPWA は通信事業者が既設している LTE 基地局の通信網を利用するため、専用の周波数で通信をおこなうことができ、電波干渉が起こりにくく、安定した接続環境が整えられる。
せん断型貯留層シミュレータ “SHIFT”	地殻応力と間隙流体圧の効果による既存フラクチャーの開口およびせん断変形とそれに伴う透水性変化と熱・流体流動をマクロなスケールでシミュレーションするために石油資源開発 (JAPEX) が開発した解析コード
ダウンスケーリング	力学的、あるいは、統計的な手法により、低空間解像度のデータから高空間解像度のデータを再現すること。
超臨界地熱システム	海洋プレートの沈み込みにより生成し、地下数 km (東北地方では 4~5km) まで上昇したマグマ上部に形成された地熱システム。シリカの沈殿により形成されたキャップ構造とその下部に存在する高温・高圧 (400~500°C、数 10MPa 程度) の地熱貯留層 (超臨界地熱貯留層) を指す。貯留層内に蓄えられた流体の組成にもよるが、流体は超臨界状態にあると推察されている。
超臨界地熱発電	超臨界地熱貯留層から高温・高圧の流体を取り出すことによる発電。タービンへ直接流体を導入する方式や水へ熱交換してタービンへ導入する方法等が検討されている。
鉄のメスバウアー分析	メスバウアー分析は、メスバウアー効果と呼ばれる放射性物質中の原子核から放射された特定の振動数のガンマ線がエネルギーを失うことなく同種の原子核を含んだ試料に共鳴吸収される現象を利用し、光のドップラー効果でエネルギーを変調したガンマ線を試料に照射することで得られる共鳴吸収スペクトルのパターン変化から元素の電子状態や磁気構造などを非破壊で分析する手法である。
同位体交換平衡地化学温度計	二酸化炭素とメタン、水素と水、のように同じ元素を共通にもつ成分同士の間で同位体交換反応が進むと、その平衡時の同位体分別は温度のみの関数となる。このことを利用して 2 つの成分の同位体比の差を測定結果から、地下深部の温度情報を得る手法。
特異スペクトル法	時系列データから何らかの「時系列の特徴」を表す成分を取り出した上で成分を比較し、どの程度差異があるかを異常度として提示する方法
二重ビットコアリングツール	口径が大きめのビット (外ビット) と口径が小さめのビット (内ビット) からなり、それぞれで独立に掘削ができるツール
二相流	地熱発電所にて、生産井より産出する気相と液相が混合した流体。
熱水	生産井より産出する二相流を汽水分離した液相 (気相は蒸気)。地質学的背景により化学組成が異なるが一般に高いケイ酸濃度をもつ。通常、還元井を通じて地熱貯留層に還元される。
波形インバージョン (FWI)	観測波形そのものを用いて、インバージョン (逆解析) を行い、モデルを決定していく方法
はじっこモデル	九重地域の地熱発電所・温泉・地熱徴候などが、低比抵抗体の縁辺部に分布する理由を説明するモデル。本 PJ の先行研究成果 (Aizawa et al., 2022) で提唱された。

パフモデル	正規分布的な拡散を仮定した拡散式に基づき、非定常な気流場を考慮して、拡散予測を行うモデル。
雰囲気	ある特定の気体やそれを主とした混合気体の状態、またはその気体の条件下にある状態を指す。
分解能	a) 測定器については、識別限界と同じ意味。 b) 指示計器については、識別可能な指示間の最小の差異。 (備考)デジタル指示計器では、最小の有効数字が1だけ変わるときの指示変化をいう。
ベイズモデル	統計モデルの一種であり、観測値に含まれる不確定性を考慮したモデル
ヘリカルファイバー	DAS用光ファイバーをらせん状にしたもので、通常の光ファイバーがその延びている方向の振動のみをとらえるのに対して、直交方向の振動もとらえられるとされている。
補間ベース手法の開発	○線形補間（線形内装）は、もっとも単純な補完手法、補間結果を得たい点の近傍点数から距離による重みづけで補間する（補完結果は一定に定まる）。 ○RBFネットワークは、RBF（放射基底関数）の重ね合わせで任意（1次元）、曲面（2次元）を再現、外挿も可能だが精度は劣る（補完結果は一意に定まる）。 ○Gaussian Process（GP）は、不確かさを加味した補完手法である。
マグマ性流体	マグマが冷却固化する過程で、水蒸気・二酸化炭素・二酸化イオウ・塩化水素・硫化水素・水素といった軽い元素から構成される成分がマグマから脱ガスし、地上に向かって上昇していくもの。火口から地表に出たものは火山ガスとして認識されることから、火山性流体とも称される。
メチレンブルー吸光度法	硫化物イオンが鉄イオン（三価）存在下でN,N-ジメチル-p-フェニレンジアミンと反応して生成するメチレンブルーの吸光度を測定し、硫化水素を定量する方法。
乱流振動流量計測法	光ファイバケーブル表面に凹部または凸部を設け、光ファイバケーブル周囲を流れる流体の乱流渦の振動をDASにより計測し、振動レベルを数値解析して流量（流速）を推定する原理。
硫化水素（H ₂ S）	天然には火山性ガスおよび火山地方の温泉ガスに含まれている。また卵黄などの硫黄を含むタンパク質の分解によっても発生し、腐卵臭と表現される。毒性が極めて強く、鉄や銅などの金属に対して腐食性を持っているため金属やコンクリート、電気回路などを腐食させる。悪臭防止法では敷地境界線上、気体排出口、排水水の3つの規制基準が地方自治体などにより設定され、例えば敷地境界線上の規制基準の範囲は硫化水素0.02～0.2ppmの間で定められている。
流体構造連成	流体の流れによって構造物が変形し、構造物が変形することによって流れが影響を受けるといった流体と構造物の相互作用が含まれる現象。
冷却塔	発電機のタービンを回したあとの蒸気を復水器で温水とし、さらに冷やして冷水をつくる装置。冷却塔で出る蒸気は温水を空気で冷やす際に発生する。この冷水は、復水器に戻し、冷却水として蒸気を冷やすために使われる。

ワイヤーライン取り付け方式	掘削が完了してコアを根元で切断する前の段階で、地表から掘管内をワイヤーラインで降ろした測定器を一時的に二重ビットコアリングツールと連結させて方位を測定する方式
BPT	(略語) Brittle-Plastic Transition : 脆性-塑性遷移境界
CFD ベース手法の開発	スーパーコンピュータを用いて、3次元の気象場を再現し、その中で拡散計算を行う CFD 詳細計算を行う（これによって、補完ベース手法高度化のための知見を得る）。
CFD モデル	数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics) モデル。コンピュータを用いた数値解法により、計算領域における気流分布を再現するもの。気象モデルと原理的にはほぼ同じであるが、一般に計算格子の解像度が細かく、微細な地形の影響なども考慮した気流場を再現することができる。
CNN	Convolutional Neural Network (CNN)は、通常のニューラルネットワークに「畳み込み層」を加えたもので、局所的に特徴量を抽出できる特徴がある。特に画像や動画認識に利用されている。
CSG	ケーシングパイプ。掘削孔に送入・設置し、孔壁が崩壊しないよう支持するための鋼管。
DAS	Distributed Acoustic Sensing または分布型音響センシング。光ファイバケーブルにて振動計測を可能とする技術。
DTS	Distributed Temperature Sensing または分布型温度センシング。光ファイバケーブルにて温度計測を可能とする技術。
EnergyWin	電中研が開発した各種発電システムの熱効率を解析するためのソフトウェア。
FBG	Fiber Bragg Grating または光ファイバコア内に短いセグメントで構築された屈折率変調 (回折格子)。
FFT	スペクトルを推定する際に用いられる高速フーリエ変換。AI 分野ではスペクトル形状を用いた信号・画像等の弁別に用いられている。
FIMT	Fiber in Metal Tube。金属管の中に光ファイバが内挿されたチューブ。
FP (ファブリー・ペロー) 干渉計	2つの反射面を平行に配置することで、取り出したい波長の光だけを投下させることができる干渉計。
Gaussian-AD	入力画像に対して異常度という数値を出力する画像処理用 AI の一種。
GFLOW	地熱技術開発が開発した地熱坑井内の流動状況をシミュレートするソフトウェア。
HSE マネジメント	Health、 Safety and Environment マネジメントの略。最高責任者が定める HSE 方針に基づき、事業活動における労働衛生・安全・環境に係る事故などの発生リスクを適切に管理するために、組織や役割・責務、活動計画、管理手順などを定め、継続的に実行・改善するための仕組みを体系化したもの。石油・天然ガス開発分野で広く導入され、実績を上げている。
IoT	Internet-of-things。インターネット接続し相互に情報交換する仕組み。
ISA S71-1985.04	国際自動制御学会 (ISA : The Instrumentation, Systems, and Automations Society) の規格である。そのうち硫化水素ガスの電子機器へ影響区分がある。

	<p>参考 2/硫化水素ガスの電子機器へ影響区分</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>クラス</th> <th>判定</th> <th>硫化水素濃度</th> <th>影響</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ClassGX</td> <td>過度</td> <td>0.1 ppm以上</td> <td>電子・電気機器の長期使用はできない環境</td> </tr> <tr> <td>ClassG3</td> <td>重度</td> <td>0.01 ppm以上</td> <td>腐食の発生確率が高い環境。このレベルは即座にさらに綿密な評価を行い、環境制御または特別に設計されたパッケージ装置を設置する必要がある</td> </tr> <tr> <td>ClassG2</td> <td>中度</td> <td>0.003 ppm以上</td> <td>腐食の影響が無視できなく、また装置の信頼性の決定要因になる可能性がある環境</td> </tr> <tr> <td>ClassG1</td> <td>軽度</td> <td>0.003 ppm未満</td> <td>腐食が装置の信頼性を決定付ける要因とはならない充分に管理された環境</td> </tr> </tbody> </table>	クラス	判定	硫化水素濃度	影響	ClassGX	過度	0.1 ppm以上	電子・電気機器の長期使用はできない環境	ClassG3	重度	0.01 ppm以上	腐食の発生確率が高い環境。このレベルは即座にさらに綿密な評価を行い、環境制御または特別に設計されたパッケージ装置を設置する必要がある	ClassG2	中度	0.003 ppm以上	腐食の影響が無視できなく、また装置の信頼性の決定要因になる可能性がある環境	ClassG1	軽度	0.003 ppm未満	腐食が装置の信頼性を決定付ける要因とはならない充分に管理された環境	
クラス	判定	硫化水素濃度	影響																			
ClassGX	過度	0.1 ppm以上	電子・電気機器の長期使用はできない環境																			
ClassG3	重度	0.01 ppm以上	腐食の発生確率が高い環境。このレベルは即座にさらに綿密な評価を行い、環境制御または特別に設計されたパッケージ装置を設置する必要がある																			
ClassG2	中度	0.003 ppm以上	腐食の影響が無視できなく、また装置の信頼性の決定要因になる可能性がある環境																			
ClassG1	軽度	0.003 ppm未満	腐食が装置の信頼性を決定付ける要因とはならない充分に管理された環境																			
JEITA IT-1004	<p>一般社団法人電子情報技術産業協会の規格で、「産業用情報処理・制御機器設置環境基準」という。そのうち硫化水素ガスの電子機器へ影響区分がある。</p> <p>参考 1/硫化水素ガスの電子機器へ影響区分</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>クラス</th> <th>項目</th> <th>硫化水素濃度</th> <th>影響</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ClassS3</td> <td>温度、湿度が高くガスが多い環境</td> <td>0.1 ppm以上</td> <td rowspan="3">電子機器の設置は適しない</td> </tr> <tr> <td>ClassS2</td> <td>温度、湿度が高くガスが若干ある環境</td> <td>0.01 ppm以上</td> </tr> <tr> <td>ClassS1</td> <td>湿度がやや高くガスが少ない環境</td> <td>0.003 ppm以上</td> </tr> <tr> <td>ClassB</td> <td>湿度が比較的低くガスが少ない一般的な環境</td> <td>同上</td> <td rowspan="2">湿度が低いときにガスの侵入があると、情報処理・制御機器の信頼性に影響をおよぼす腐食を起こしやすい</td> </tr> <tr> <td>ClassA</td> <td>温度、湿度が低くガスが検知されない良好な環境</td> <td>0.003 ppm未満</td> </tr> </tbody> </table>	クラス	項目	硫化水素濃度	影響	ClassS3	温度、湿度が高くガスが多い環境	0.1 ppm以上	電子機器の設置は適しない	ClassS2	温度、湿度が高くガスが若干ある環境	0.01 ppm以上	ClassS1	湿度がやや高くガスが少ない環境	0.003 ppm以上	ClassB	湿度が比較的低くガスが少ない一般的な環境	同上	湿度が低いときにガスの侵入があると、情報処理・制御機器の信頼性に影響をおよぼす腐食を起こしやすい	ClassA	温度、湿度が低くガスが検知されない良好な環境	0.003 ppm未満
クラス	項目	硫化水素濃度	影響																			
ClassS3	温度、湿度が高くガスが多い環境	0.1 ppm以上	電子機器の設置は適しない																			
ClassS2	温度、湿度が高くガスが若干ある環境	0.01 ppm以上																				
ClassS1	湿度がやや高くガスが少ない環境	0.003 ppm以上																				
ClassB	湿度が比較的低くガスが少ない一般的な環境	同上	湿度が低いときにガスの侵入があると、情報処理・制御機器の信頼性に影響をおよぼす腐食を起こしやすい																			
ClassA	温度、湿度が低くガスが検知されない良好な環境	0.003 ppm未満																				
LiDAR	Light Detection and Ranging。レーザー光を照射してその反射光をもとに対象物までの距離を計測する技術																					
MT 法電磁探査	電磁探査の一手法である地磁気地電流法 (Magneto-Telluric 法) のこと。自然界で発生する電磁場の変動に対する応答を地表で観測し、地下の比抵抗構造を調査する方法。																					
ppm	parts per million。百万分率は、100 万分のいくらかであるかという割合を示す parts-per 表記による単位。100 万分の 1 の意。1ppm = 0.0001%。10,000ppm=1%。容量比、重量比ともに濃度や含有率を表示するために用いるが、一般に気体の場合は容積比で表示する。たとえば、硫化水素(H2S) 1 ppm とは空気 1,000m3 中に H2S が 1L 含まれている状態をいう。																					
ppb	parts per billion。十億分率は、10 億分のいくらかであるかという割合を示す parts-per 表記による単位。10 億分の 1 を 1 ppb という。容量比、重量比ともに濃度や含有率を表示するために用いるが、一般に気体の場合は容積比で表示します。たとえば、硫化水素(H2S) 1 ppb とは空気 1,000m3 中に H2S が 1 cm3 含まれている状態をいう。																					
RESNET	ニューラルネットワークにおいて手前の層の入力を後ろの層に直接足し合わせることで、「勾配消失問題」を解決したモデル。Microsoft Research の Kaiming He 氏が 2015 年に考案した。																					
Starlink	SpaceX が提供する衛星インターネットアクセス。日本では 2022 年 10 月にサービス開始。																					
TOMONI	三菱重工業が発電所向けに提供している運転支援サービス。																					
TP	真の値が正事例のものに対して、正事例と予測したものの割合																					
TN	真の値が負事例のものに対して、負事例と予測したものの割合																					
FP	真の値が負事例のものに対して、正事例と予測したものの割合																					
FN	真の値が正事例のものに対して、負事例と予測したものの割合																					

UAV	無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle) 。ドローンとも呼ばれる。
VGA	640×480 ピクセルの画素数や表示モード
VPN	Virtual Private Network。ネットワークの中に、別のプライベートなネットワークを仮想的に作り出す技術。専用ネットワーク通信が疑似的に可能となり、機密性の高い通信が可能となる。
WD-1a 井	1995 年に岩手県葛根田地熱地域において新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) により掘削された坑井。深度 3729m で地層温度 500℃以上を記録 (当時、世界最高温) 。
XAFS 分析	XAFS (X-ray Absorption Fine Structure : X 線吸収微細構造) 分析は、物質に照射された X 線が一部吸収される現象を利用し、元素ごとに異なる特有の X 線エネルギーで X 線吸収量が増加することを利用し、X 線吸収スペクトルを吸収量が増大する近傍のエネルギーで詳細に計測して得られる振動構造から、測定対象元素の価数や化学種、配位構造などを得る手法である。

研究開発項目ごとの成果

個別テーマ (1) -1.

(1) 超臨界地熱資源技術開発

(1) -1. 超臨界地熱資源量評価 (湯沢南部地域)

委託先：日鉄鉱コンサルタント株式会社

1. 背景と目的

政府が掲げる 2030 年及び 2050 年目標達成に向けた取り組みの一環としてスタートされた「地熱発電導入拡大研究開発」において、超臨界地熱資源の資源量評価手法の開発を行う。NEDO による先行研究開発プロジェクトにおいて、超臨界地熱資源の推定賦存範囲とその資源量の試算結果が示された秋田県湯沢南部地域をモデルフィールドとして、超臨界水状態把握および資源量評価技術のさらなる高度化を図り、超臨界地熱資源の試掘に向けた実効性のある調査・評価技術の完成を目指す事を目的とする。

2. 研究開発の概要

「2020 年度湯沢南部地域の研究開発」では、超臨界地熱資源の分布、性状、規模等を把握することを目的として、超臨界地熱資源システムが形成される可能性が高い「湯沢南部地域」をモデルフィールドとして研究開発を行った。地下深部の構造を把握するための地表調査 (MT 法電磁探査) を実施するとともに、既存の地質・地震・重力・地化学データを統合して、本地域の超臨界地熱資源領域を含めた地熱構造モデルを提示し、20×20km の範囲の地表から標高 - 6,000m までの範囲において自然状態シミュレーションを行って、既存坑井の実測温度などを概ね再現した。一方、超臨界地熱資源量の詳細評価と試掘ターゲットを明確にするという狙いには、精度的にいくつかの課題が残った。

超臨界地熱資源の評価をより信頼できるものにするためには、数値モデルの改良が求められる。例えば、温度・圧力の改良や質量流束源の位置の修正が必要である。また、安定した目標出力 (100MW) のためには、最適な生産・還元井の配置や生産の仕方を検討するとともに、浸透率等の未知パラメータに対する感度解析や資源の利用方法 (例えば EGS) について検討を行う必要がある。

これらの課題に対し、追加データ (MT 法電磁探査) 及び微小地震観測データを取得して資源量評価に必要な地熱系概念モデルを改良するとともに、地下 5km 以浅に超臨界領域(あるいはそれに準じた高温領域)を特定し、超臨界地熱資源の資源量及び規模(100MW 規模)を定量的に評価し、調査井掘削に向けた実施可能な有望域を選定する。その後、深部構造調査試錐・調査井の仕様 (費用を含む)、HSE を策定し、経済性評価を行う。以下に研究開発項目を示す。

研究開発項目① 補間地表調査と概念モデル構築

これまで実施された地表調査に基づき、深部超臨界地熱資源の推定に有効となる補完的な現地調査（MT 法電磁探査及び微小地震観測）を実施し、地下情報をさらに取得する。併せて、文献或いは非公表データなどを引用し、既に作成された当該地域の地熱系概念モデルを改良する。地熱系概念モデルの構築においては、周辺の既開発エリアの情報を取り入れ、さらに深部に想定される超臨界地熱資源との関係を考察し記述する。

研究開発項目② 資源量評価

上記の研究開発項目①で構築された概念モデルに基づき、3次元モデルを作成し、概念モデルを再現する自然状態シミュレーションを実施する。現在の地熱系が十分再現された自然状態モデルを用いて、生産予測シミュレーションを実施し、当該地域の超臨界地熱資源量を推定する。開発シナリオに策定においては、還元或いは涵養などの最適な生産システムを検討し複数のケースを解析するするとともに、周辺の既開発エリアへの影響（干渉など）なども考察する。

研究開発項目③ 深部構造調査試錐の検討

超臨界地熱調査井（2026年度以降に計画）に対し、先行して実施が計画されている深部構造調査試錐の掘削仕様（ターゲット、ケーシングプログラム、掘削工法、掘削費用など）を検討する。研究開発項目①で示す地熱系概念モデルに従って、超臨界地熱資源が賦存する可能性がある領域周辺の、掘削深度 3,000～3,500m、最高温度 350℃程度の領域をターゲットとし、試錐座候補地、構造試錐井の仕様を検討する。掘削仕様の提案時期は 2022 年度末とする。

研究開発項目④ 超臨界地熱調査井仕様の検討

研究開発項目②の資源量評価に基づき、超臨界地熱資源に対する最適な調査井ターゲットを選定し、そこで実施するための調査井掘削仕様（費用含む）を策定するとともに、HSE（安全衛生・環境保全対策）を検討する。

研究開発項目⑤ 経済性評価

研究開発項目②における資源量評価結果に基づき、研究開発項目④における掘削に要する費用を参考にして、湯沢南部地域において超臨界地熱資源を開発する場合を想定した経済性評価を実施する。

各テーマにおける研究開発項目、開発目標及びその設定根拠を表 2-1 に示す。

表2-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	最終目標	根拠
I：補完地表調査と概念モデル構築	<ul style="list-style-type: none"> MT法電磁探査追加調査による深部低比抵抗域の抽出精度向上。 微小地震観測による震源空白域の把握とBPT推定。 	<ul style="list-style-type: none"> 深部低比抵抗域とBPT推定から超臨界地熱資源の熱源となるマグマだまり等を反映した高温域を推定する。
II：資源量評価	<ul style="list-style-type: none"> 既存地熱調査及び補完地表調査結果と十分整合する超臨界地熱系概念モデルの提示。 最適な浸透率等パラメーター設定と坑井モデルの検討、生産・還元井配置の検討。 	<ul style="list-style-type: none"> 超臨界地熱資源が存在する温度・圧力分布を提示する。 数値シミュレーションによる生産量予測において100MW以上の発電量を提示する。
III：深部構造調査試錐の検討	<ul style="list-style-type: none"> 超臨界地熱資源の概念モデルに基づく掘削ターゲット及び敷地の選定。 深度3,000～3,500m、温度350℃以内の領域をターゲットとした構造試錐の仕様・費用を提示。 	<ul style="list-style-type: none"> 超臨界地熱調査井掘削に先行して予定される、超臨界領域手前までの既存掘削技術で対応可能なターゲットに対する構造試錐計画を提示する。
IV：超臨界地熱調査井仕様の検討	<ul style="list-style-type: none"> 最適条件のシミュレーション結果による掘削ターゲット及び敷地の選定 深度5000m以浅の超臨界地熱資源推定域をターゲットとした調査井の仕様・費用・HSEを提示。 	<ul style="list-style-type: none"> 社会環境や試錐座確保も含めた超臨界地熱調査井掘削の実現性を評価する。
V：経済性評価	<ul style="list-style-type: none"> 最適条件における生産・還元井本数や発電量と超臨界地熱調査井費用をもとに発電コスト試算を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> 湯沢南部地域で100MW級の超臨界地熱資源を開発する場合を想定した経済性を評価する。

3. 事業スケジュール

本研究開発の期間は2021年6月15日より2024年2月28日であり、そのスケジュールの概要を図3-1に示す。

事業項目	2021年度				2022年度				2023年度				
	1 Q	2 Q	3 Q	4 Q	1 Q	2 Q	3 Q	4 Q	1 Q	2 Q	3 Q	4 Q	
I. 補完地表調査と 概念モデル構築		→											
II. 資源量評価			→										
III. 深部構造調査試 錐の検討				→									
IV. 超臨界地熱調査 井仕様の検討				→									
V. 経済性評価												→	

図 3-1 研究開発のスケジュール

4. 予算

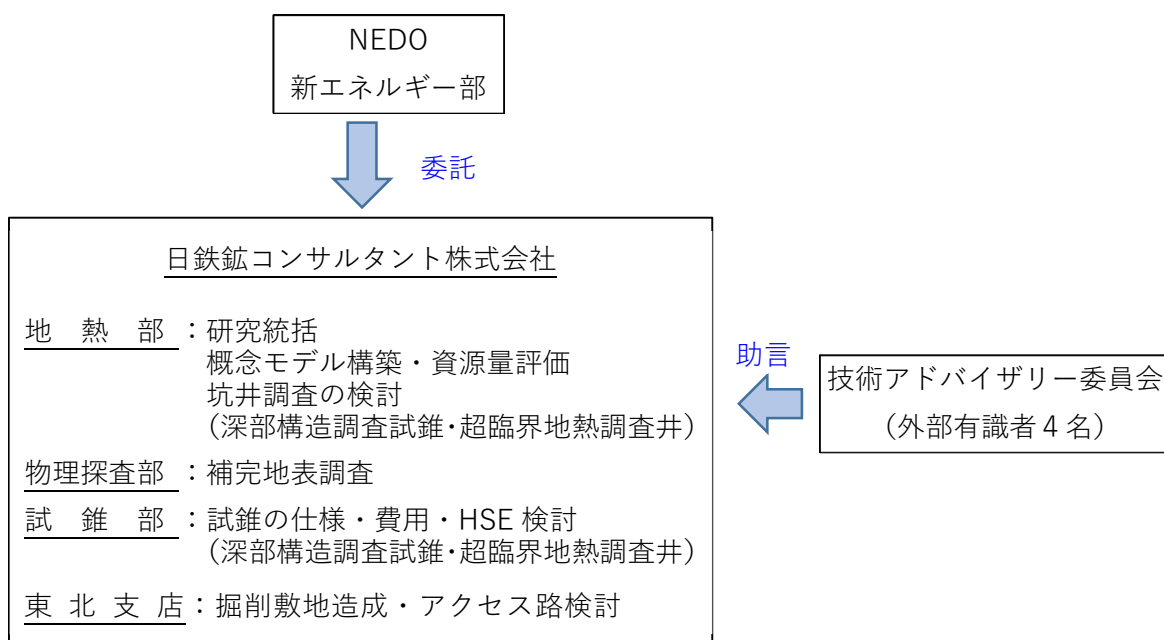
本研究開発の予算額を表 4-1 に示す。

表 4-1 研究開発の予算額

(単位：百万円)

	2021 年度	2022 年度	2023 年度	総額
研究開発費	57.4585	50.2249	51.4459	159.1293
合計	57.4585	50.2249	51.4459	159.1293

5. 研究開発の実施体制



6. 事業の管理運営

これまで有識者による推進委員会（技術アドバイザー委員会）を 2021 年 9 月，2022 年 1 月，7 月および 12 月に実施し，各実施項目について有益なコメントや方針についてのアドバイスを頂いた。2023 年度は，2023 年 5 月，12 月及び 2024 年 2 月の実施を予定している。表 6-1 に推進委員会及び有識者を示す。

表 6-1 推進委員会および有識者

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
内田 利宏	(前)産業技術総合研究所	比抵抗モデル解析 (MT法電磁探査) ・震源分布解析 (微小地震観測)
長縄 成実	秋田大学・教授	試錐仕様の検討
中西 繁隆	電源開発株式会社・部長補佐	モデル化・資源解析 (貯留層シミュレーション)
藤光 康宏	九州大学・教授	資源解析 (貯留層シミュレーション)

7. 研究開発成果について

本研究開発の成果は下表のとおりである。設定した中間目標に対して、項目Ⅰは概念モデル構築まで概ね達成し、微小地震探査については2023年10月まで継続してデータ取得を行う。項目Ⅱについては自然状態シミュレーションまで概ね達成し、生産量予測については現在検討中であるが2023年度末までに達成見込みである。項目Ⅲについては概ね達成し、項目Ⅳ～Ⅴについては2023年度末までに達成できる見込みである。

表 7-1(1) 中間目標に対する達成度 (見込み)

研究開発項目	最終目標 (2024年3月)	成果 (2023年3月まで)	達成度 (見込み)	達成の根拠 ／解決方針
Ⅰ. 補完地表調査と概念モデル構築	<ul style="list-style-type: none"> MT法電磁探査による深部低比抵抗域の抽出精度向上。 微小地震観測による震源空白域の把握とBPT推定。 	<ul style="list-style-type: none"> 高松岳南部の標高-2000m以深に深部低比抵抗域を精度良く推定した。 微小地震観測はデータが少ないが震源空白域が深部低比抵抗域と重なる傾向を捉えている。 上記及び既存調査データから概念モデルを構築した。 	○ 2024年3月 達成見込み	深部低比抵抗域の抽出と概念モデル構築は達成。微小地震観測を継続中。現時点で震源空白域を補足しつつありBPT推定と深部低比抵抗域の対比による熱源位置推定が可能となる見込み。

<p>Ⅱ：資源量評価</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 既存地熱調査及び補完地熱調査結果と精度良く整合する超臨界地熱系概念モデルの提示 • 最適な浸透率等パラメーター設定と坑井モデルの検討、生産・還元井配置の検討。 	<ul style="list-style-type: none"> • Iによる概念モデルに基づく自然状態シミュレーションにおいて既存坑井データや地表地熱兆候に対し精度高く再現された。 • 生産量予測については現在検討中。100MWを安定維持するケースを検討中。 	<p>○ 2024年3月 達成見込み</p>	<p>自然状態シミュレーションは達成。生産量予測については浸透率等のパラメーター設定の見直しと生産・還元井配置の検討により100MW安定維持ケースの提示に努める。</p>
----------------	--	--	--------------------------------	---

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

表 7-1(2) 中間目標に対する達成度（見込み）

研究開発項目	最終目標 (2024年3月)	成果 (2023年3月まで)	達成度 (見込み)	達成の根拠 ／解決方針
Ⅲ：深部構造 調査試錐 の検討	<ul style="list-style-type: none"> 超臨界地熱資源の概念モデルに基づく掘削ターゲット及び敷地の選定 深度 3,000 ～ 3,500m、温度 350℃以内の領域をターゲットとした構造試錐の仕様・費用を提示。 	<ul style="list-style-type: none"> 概念モデルに基づき標高・3000m付近にターゲットを設定し、ターゲットに到達可能な掘削敷地候補地を秋ノ宮地区に設定した。 秋ノ宮地区からターゲットに掘削した場合のケーシングプログラムその他、坑内環境予測に基づき実現可能な工法・費用を提示。 	○ 2024年3月 達成見込み	現地概査により試錐座候補地を選定し、試錐シミュレーションソフトにより坑内環境予測を行って、具体的な仕様・費用案を提示した。今後、測量等の現地詳細調査を実施予定。
Ⅳ：超臨界地 熱調査井 仕様の検討	<ul style="list-style-type: none"> 最適条件のシミュレーション結果による掘削ターゲット及び敷地の選定。 深度5000m以浅の超臨界地熱資源推定域をターゲットとした地熱調査井の仕様・費用・HSEを提示。 	<ul style="list-style-type: none"> 掘削敷地は社会環境条件も踏まえて深部構造調査試錐と同箇所を想定。 仕様設定に必要な掘削時坑内環境予測手法について深部構造調査試錐で概ね確立した。 	○ 2024年3月 達成見込み	Ⅱで検討中の最適条件のシミュレーション結果を踏まえて超臨界領域に対応した掘削時坑内環境予測を行う。その結果に基づく材料・工法選定とHSE検討予定。
Ⅴ：経済性評 価	<ul style="list-style-type: none"> 最適条件における生産・還元井本数や発電量と超臨界地熱調査井費用をもとに発電コスト試算を行う。 	現在、Ⅱ及びⅢについて検討中のため未着手	○ 2024年3月 達成見込み	Ⅱ及びⅢの検討結果を踏まえて2023年度に詳細検討をおこなう。

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

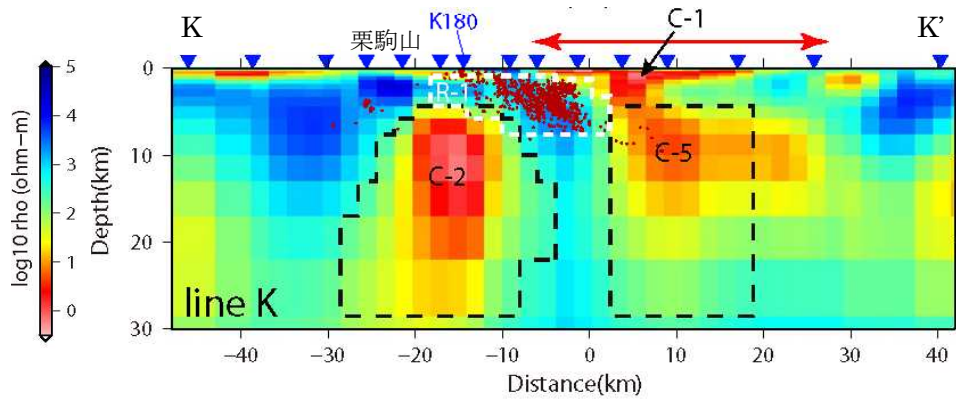
現時点での主要な研究成果を以下に示す。

(1) 既往調査データの整理

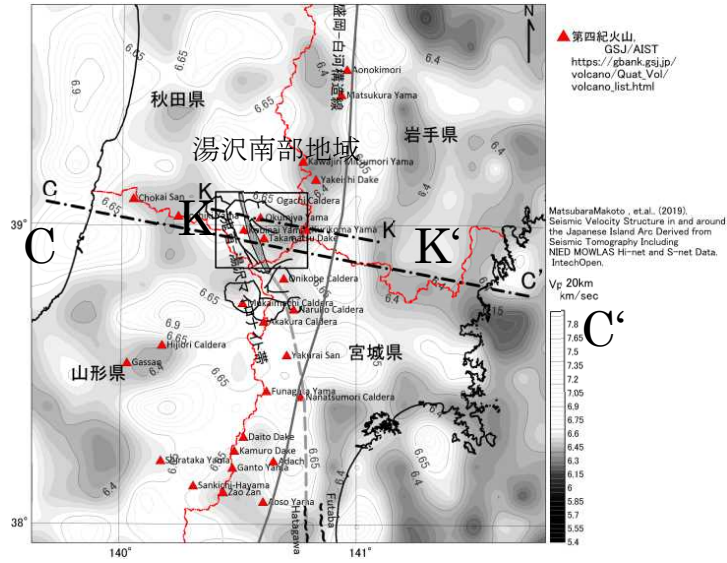
a) 湯沢南部地域への高温流体の供給

以下のとおり、超臨界地熱流体の起源としての高温流体供給が期待される。

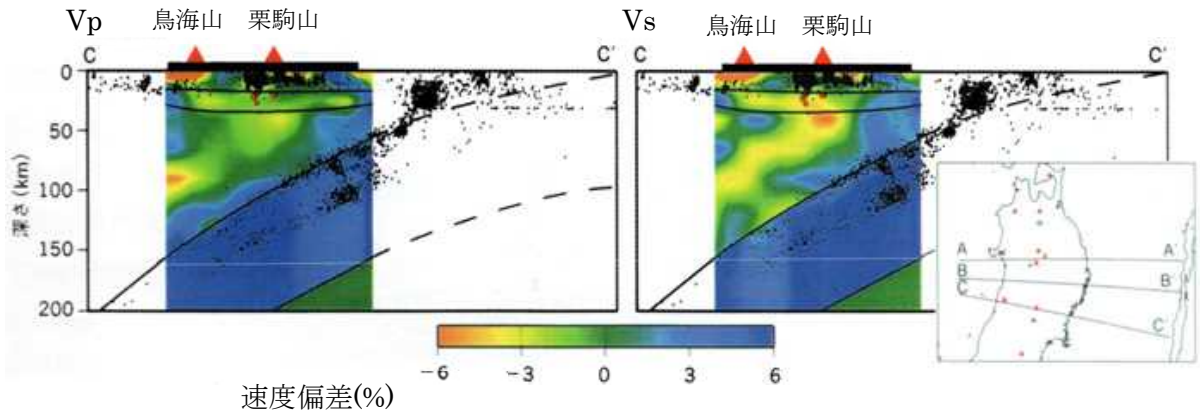
- 東北日本阿武隈帯と南部北上帯を境する構造の一部である鬼首-湯沢マイロナイト帯 (笹田, 1988) 上に位置。
- マイロナイト帯に沿って、鳴子火山、鬼首カルデラ、三途川カルデラ (歌田伊藤, 1986)、雄勝カルデラ (竹野, 1986) が連なる。
- 弾性波速度断面ではマントルウェッジの 100km 程度の深さから P 波低速度帯、S 波低速度帯が栗駒山深部に伸びる。
- 低速度帯は沈み込んだ海洋地殻の相転移に伴って供給された水の上昇経路を示す (長谷川, 2002)。
- MT 法比抵抗断面からは、相転移によって遊離した水が栗駒山火山深部に至り、その一部は 湯沢南部地域に供給されていると推定できる。(Ichihara et al., 2014)
- 栗駒山、湯沢南部地域深部標高-20km には P 波低速度帯が認められる (Matsubara et al., 2019)。



MT 法比抵抗断面 (Ichihara et al., 2014)



湯沢南部地域位置と弾性波速度(深度 20km)
(Matsubara et al., 2019)



Ichihara, et.al.(2014). A 3-D electrical resistivity model beneath the focal zone of 2008 Iwate-Miyagi nairiku earthquake(M7.2). Earth, Planets and Space 2014.

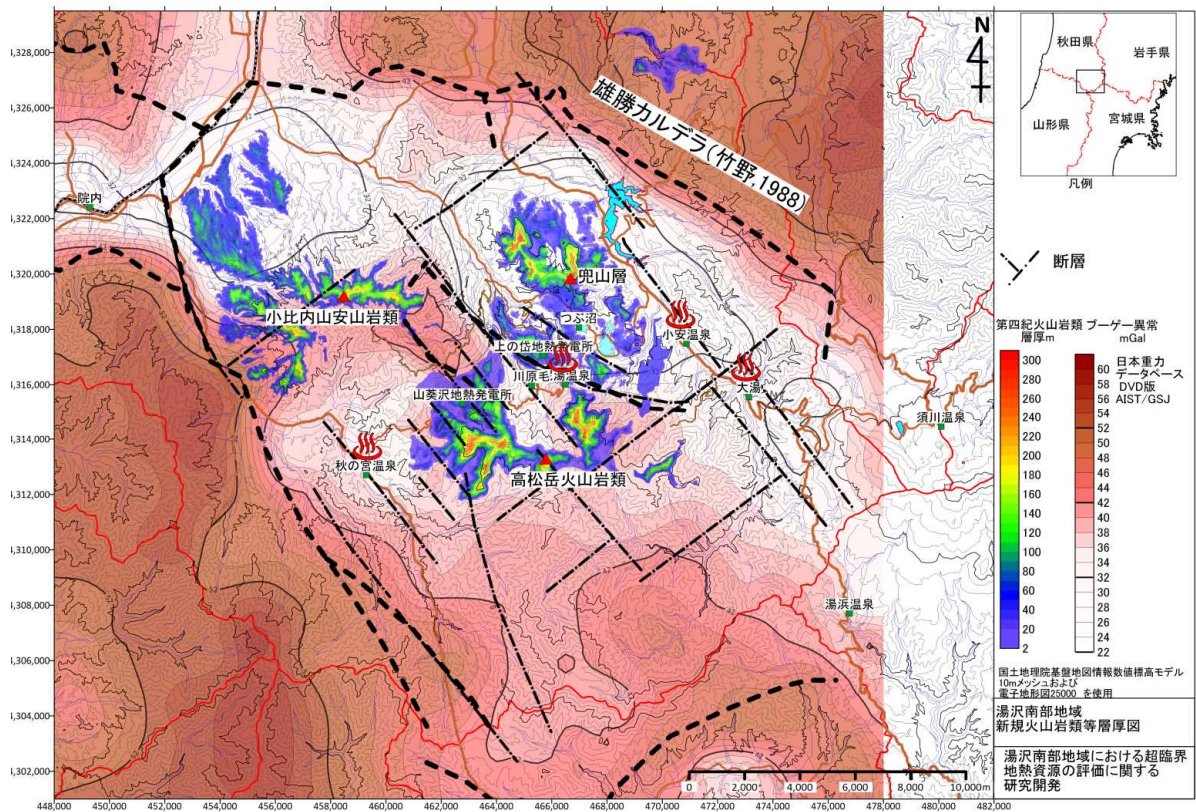
長谷川昭. (2002). 地震波で東北日本の下を見る. 科学.

弾性波速度断面 (長谷川, 2002)

b) 湯沢南部地域に見られる雄勝カルデラと熱源

湯沢南部地域における熱源について以下のとおり整理した。

- 本地域の新規火山は小安岳、高松岳の第四紀火山(0.4~0.2Ma)。
- 高松岳火山岩類 (1.29km³)、兜山層 (1.14km³)から新規火山岩類噴出マグマだまり容積推定。
- 川原毛地獄では噴気活動、馬蹄形凹地は爆裂火口の可能性指摘。
- 雄勝カルデラ内には川原毛、泥湯、新湯、小安温泉、大湯、秋ノ宮温泉等の地熱兆候が分布。
- 「上の岱地熱発電所」平成6年(1994年)3月、「山葵沢地熱発電所」令和元年(2019年)5月、「カタツムリ山地熱発電所(仮)」2024年予定



雄勝カルデラと第四紀火山

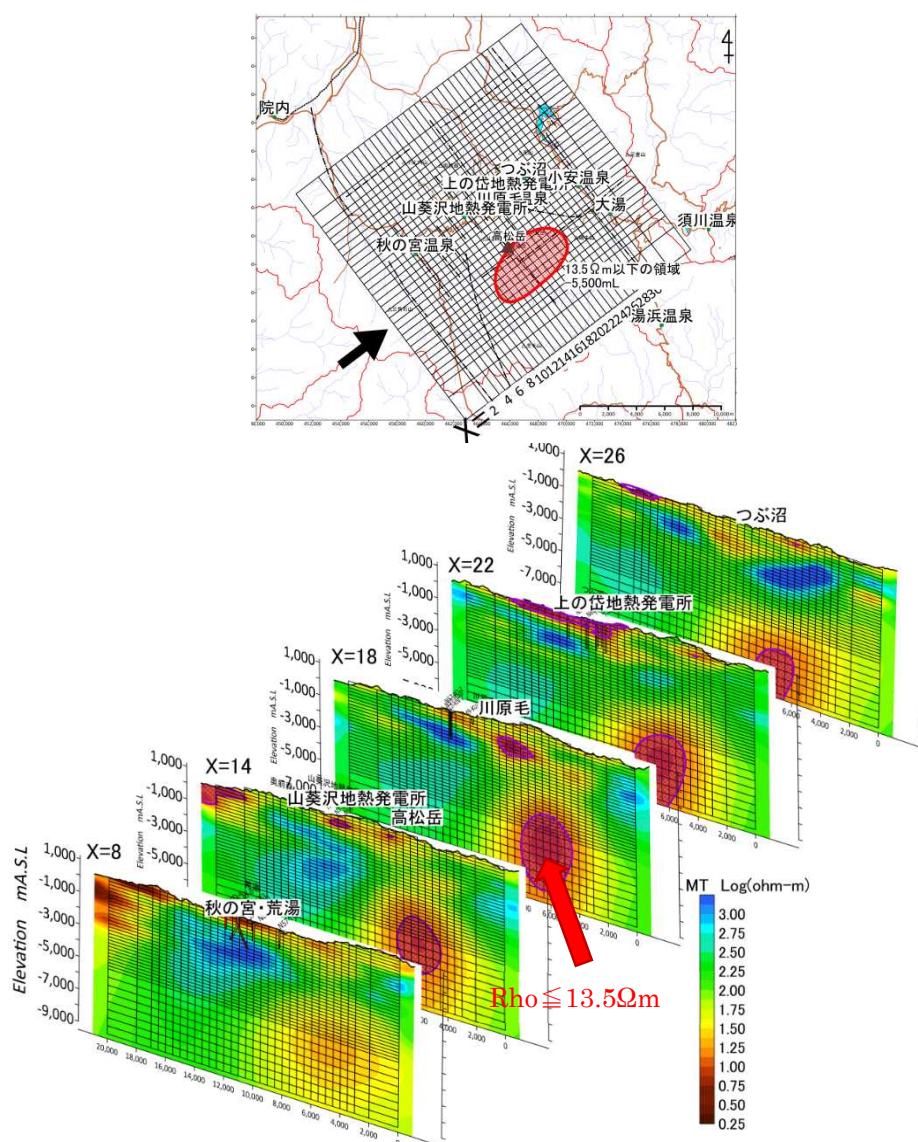
(湯沢南部地域における新規火山岩等層厚図と重力異常図)

(2) 湯沢南部地域における深部比抵抗構造と概念モデル

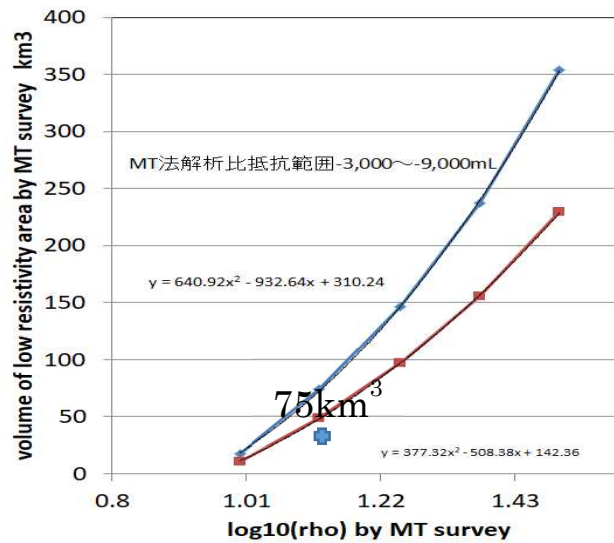
a) 湯沢南部地域の深部比抵抗構造

補完地表調査 (MT 法電磁探査及び 3 次元比抵抗構造解析) により、以下のとおり深部比抵抗構造を明らかにした。

- MT 法探査解析結果の高松岳南東深部の低比抵抗領域の容積から 75km^3 となる比抵抗として $1.1305\text{Log}(\Omega\text{m})=13.5\Omega\text{m}$ 以下について、新規火山岩類を噴出したマグマが貫入した位置および大きさと仮定した。



MT 法解析比抵抗断面図 X=8~X=26

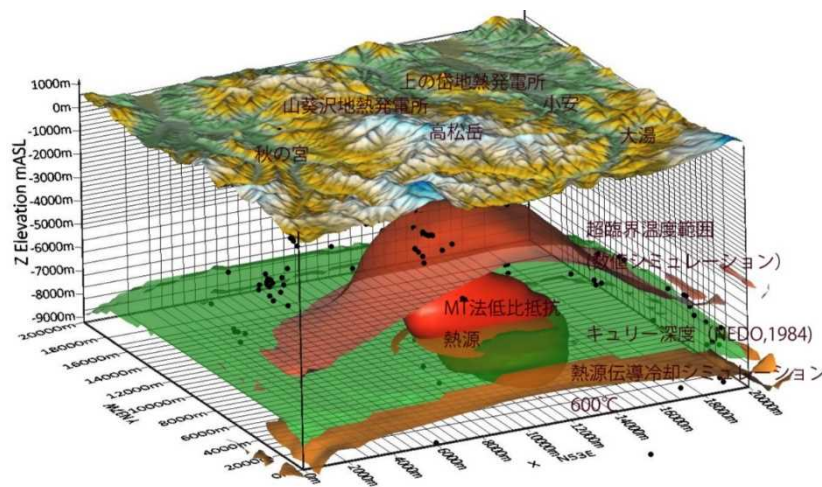


MT 法解析比抵抗領域の容積と比抵抗

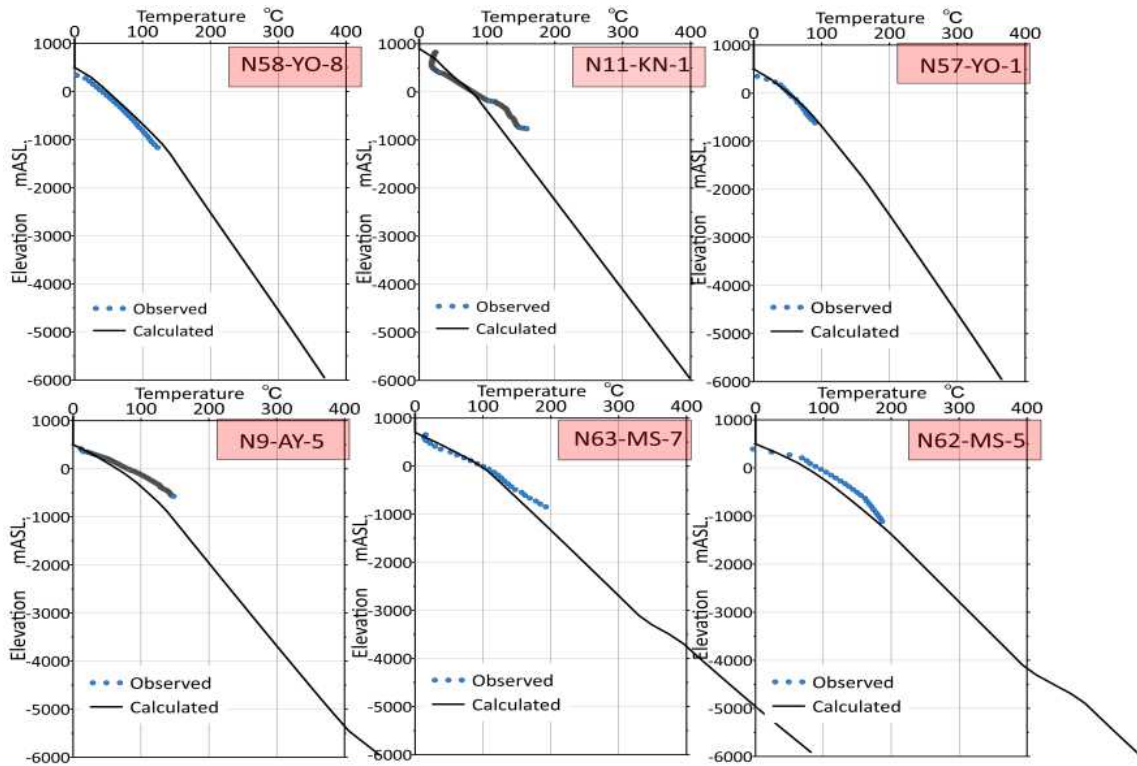
b) 湯沢南部地域に見られる雄勝カルデラと熱源

補完地表調査及び既存調査データを精度良く説明できる超臨界地熱系概念モデルを以下の通り構築した。

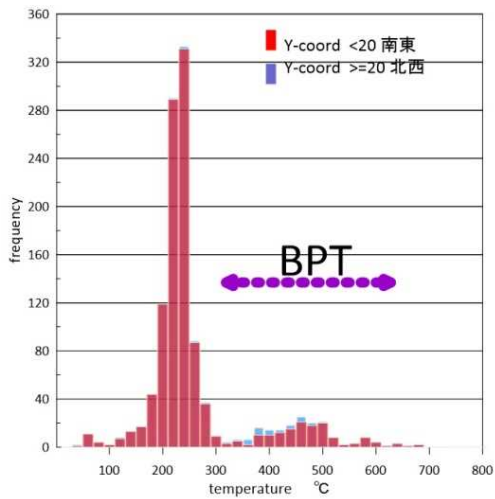
- MT 法低比抵抗域(<13.5Ωm)を 0.4~0.2Ma に活動したマグマだまりとして熱源伝導冷却シミュレーションを行うと、600℃範囲とキュリー一点深度(NEDO,1984)が調和的。
- シミュレーションによる温度分布のうち脆性-塑性遷移領域(BPT)温度範囲において微小地震震源の頻度が減少。
- MT 法解析比抵抗 2Ωm 以下では微小地震は発生していない。
- 熱伝導を仮定したモデルによる計算結果は伝導型坑井温度分布と一致



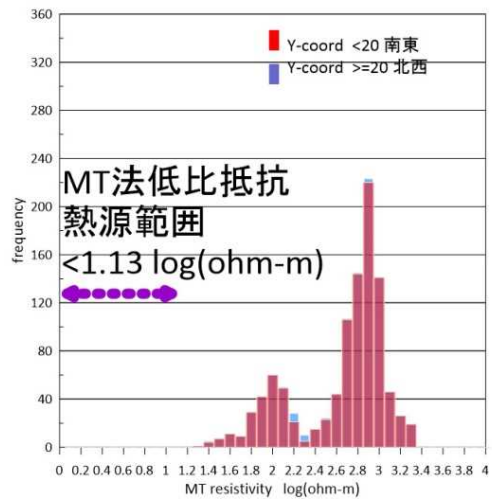
湯沢南部地域微小地震震源、キュリー一点深度とシミュレーションによる温度分布



既存伝導型坑井温度プロファイルと数値モデルによる温度



震源位置の地層温度頻度分布
(今回調査 2021-2022)



震源位置の MT 法比抵抗頻度分布
(今回調査 2021-2022)

(3) 湯沢南部地域における自然状態シミュレーション

a) グリッド及び境界条件

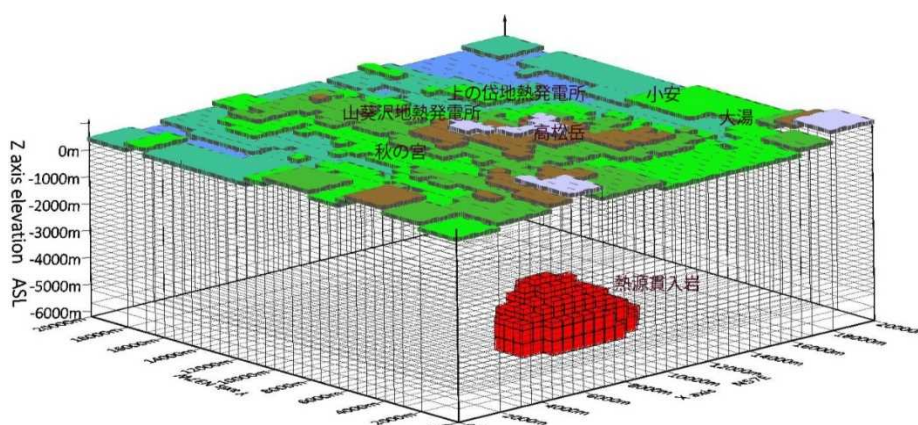
概念モデルに基づき、以下のとおりとした。

【数値モデル】

- 東西 20km×南北 20km×垂直 (地表~標高-6,000m)
- 東西 32 ブロック×南北 32 ブロック×深度 34 ブロック
- 東西 500m×南北 500m×厚さ 200m
- 34,801 ELEMENTS、100,667 CONNECTIONS
- 純水 (TOUGH2-SC_EOS1)を使用

【境界条件】

- 底部：熱源伝導冷却シミュレーションによる熱流量分布+質量流束源
- 地表：温度・圧力一定境界
- 南東部・北東部・南西部：閉境界
- 西北部：温度圧力一定境界



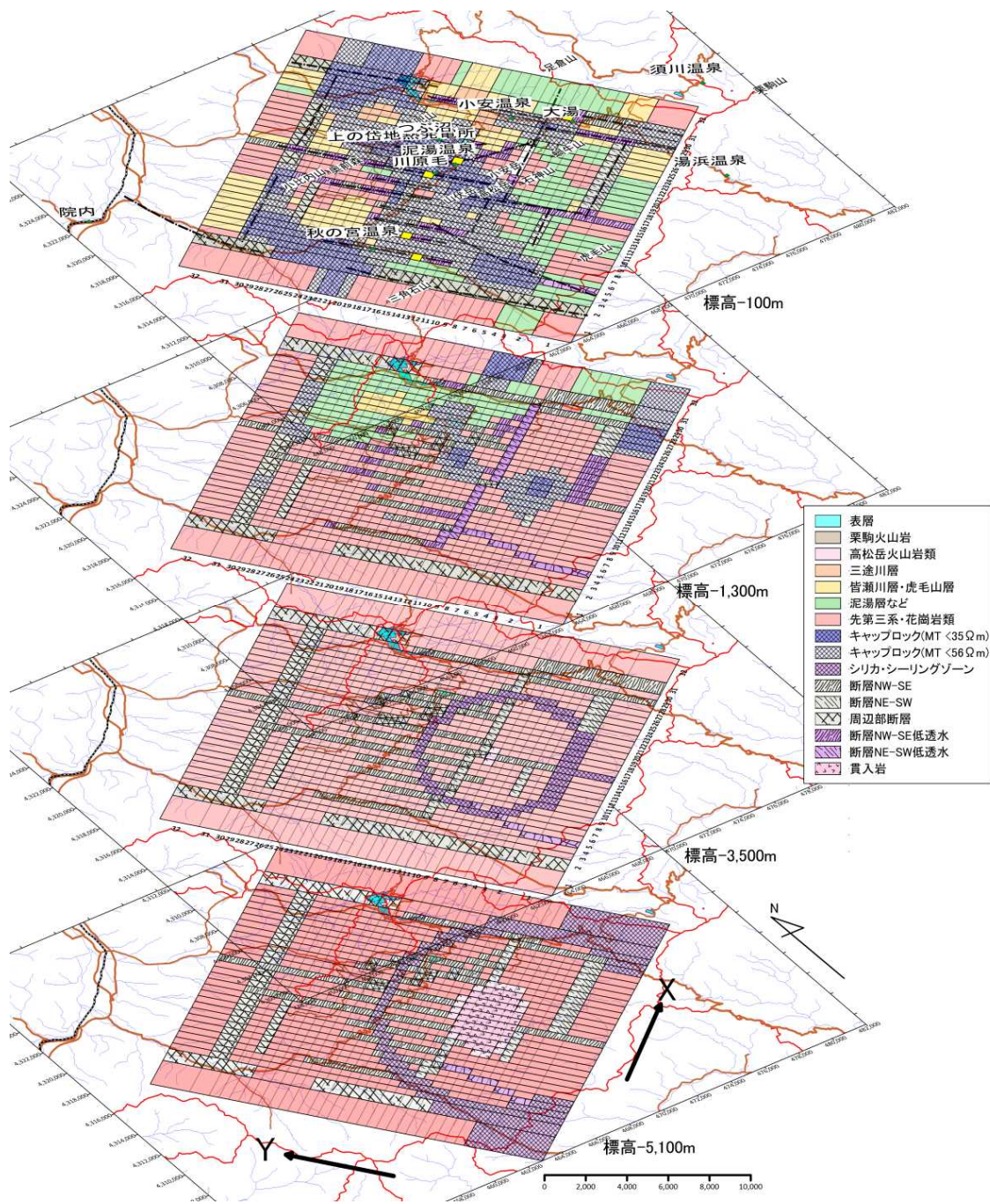
数値シミュレーションモデル

b) 湯沢南部地域における数値モデル

湯沢南部地域の地熱系を再現できる地質構造モデルを試行錯誤により選定した。

【数値モデル地質構造】

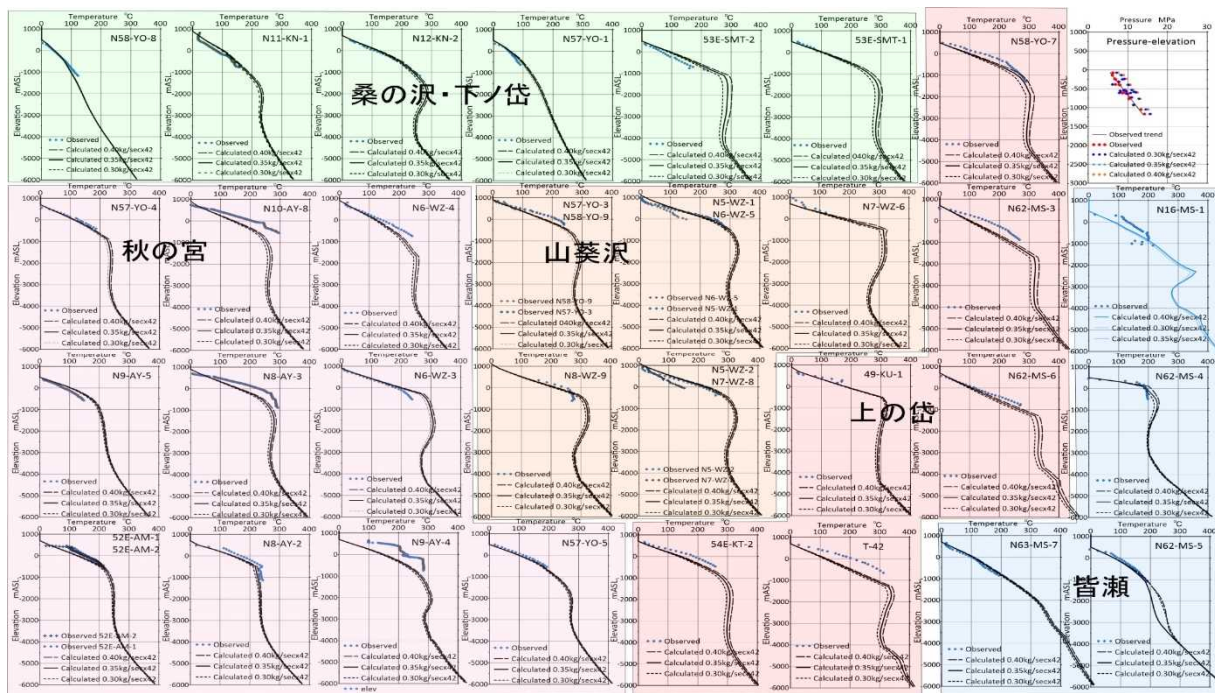
- 貫入岩：低比抵抗域 (<13.5Ωm)
- シリカシーリングゾーン：温度 400°C付近を難透水性
- キャップロック難透水：低比抵抗 (35Ωm)
- キャップロック中難透水：低比抵抗 (56Ωm)
- NW-SE 系断層
秋ノ宮断層、山葵沢断層、泥湯断層等
- NE-SW 断層
大鳥谷沢断層、湯ノ又温泉断層
- 深部質量流束源 0.35kg/sec×42 箇所



数値モデル 地質構造平面図

c) 既存坑井温度とのマッチング

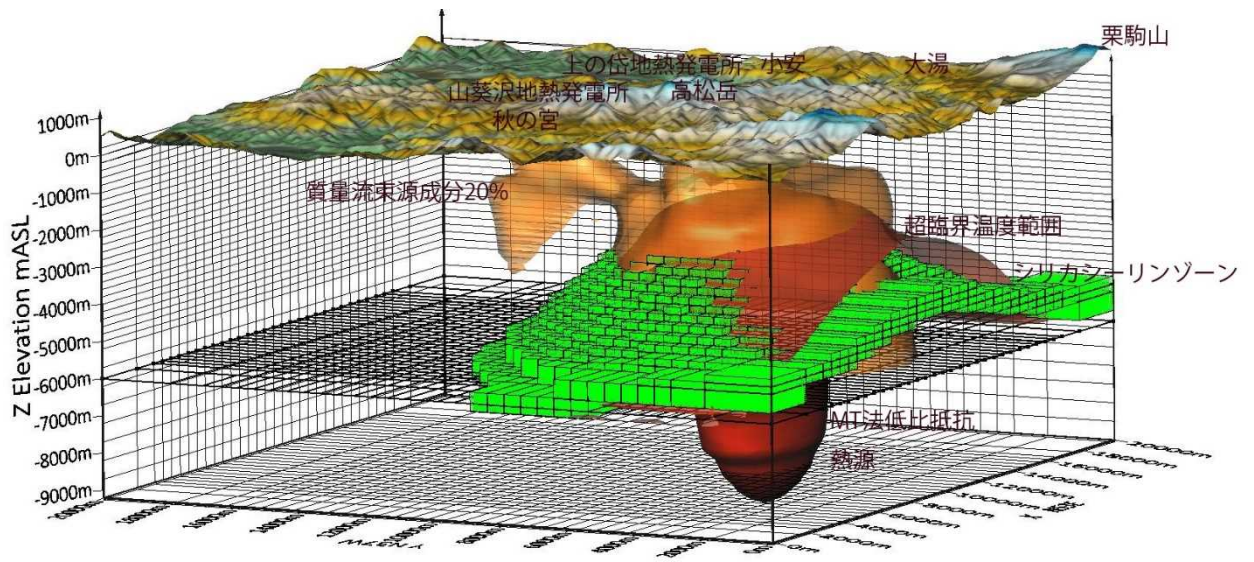
湯沢南部地域には過去の NEDO 促進調査等（皆瀬・湯沢雄勝・山葵沢・桑の沢・秋の宮・皆瀬・下の岱・上の岱）の調査井が 50 本以上存在する。既存井の温度分布とシミュレーション結果はほぼ一致し忠実に再現された。



湯沢南部地域の既存地熱井と自然状態シミュレーション結果のマッチング

d) 数値シミュレーションによる超臨界温度分布域の推定

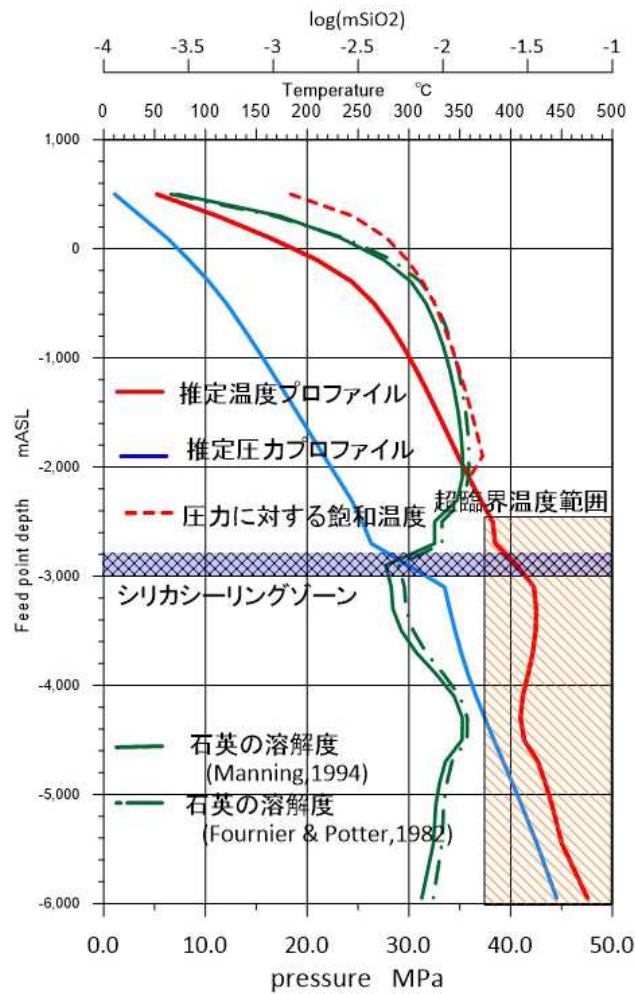
数値シミュレーションの結果、高松岳深部の標高-3,000m 以深に超臨界地熱温度範囲を推定した。超臨界温度の分布範囲は高松岳深部の MT 法低抵抗抵抗から推定した熱源を中心として、400°C 付近で形成されるシリカシーリングゾーン内に賦存する。シーリングゾーンの頂部付近では超臨界温度範囲はシーリングゾーン外にも広がる。底部に与えた質量流東源（ここではマグマ成分と仮定）からの流体は、シーリングゾーンからわずかに浸透し、川原毛付近に湧出する。



数値シミュレーション結果 超臨界流体分布範囲

e) 高松岳付近における地下温度圧力プロファイル

標高-3,000m 付近のシリカシーリングゾーン以深で、圧力・温度が上昇し、超臨界流体が賦存する。シリカの溶解度はシリカシーリングゾーンを境に深部で急激に低下し、この変化範囲でシリカの沈殿が生じる (Saishu et.at.2015)。



高松岳付近 シミュレーション結果温度・圧力垂直プロファイル

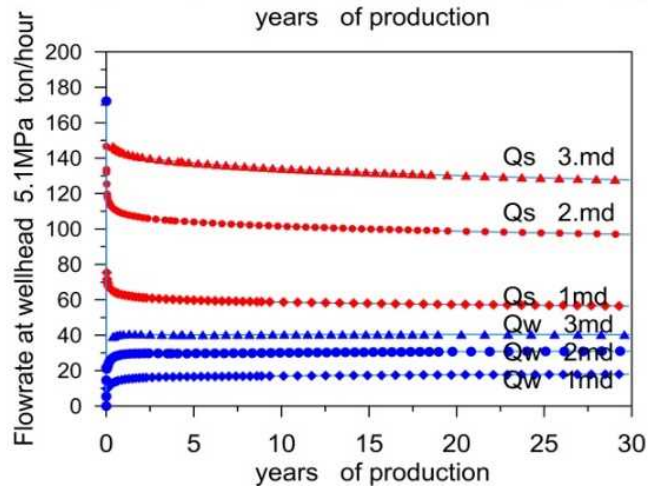
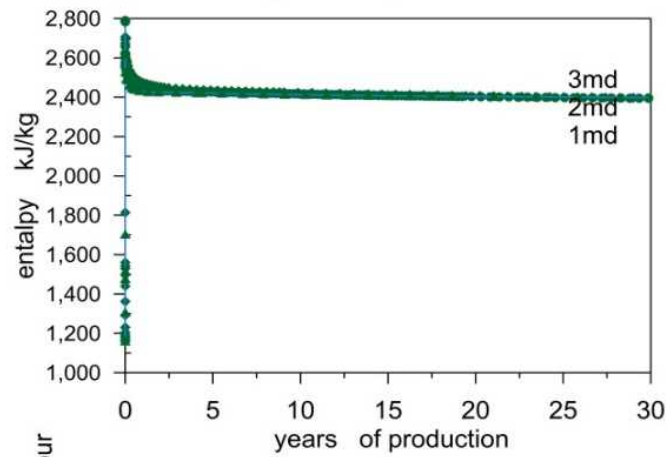
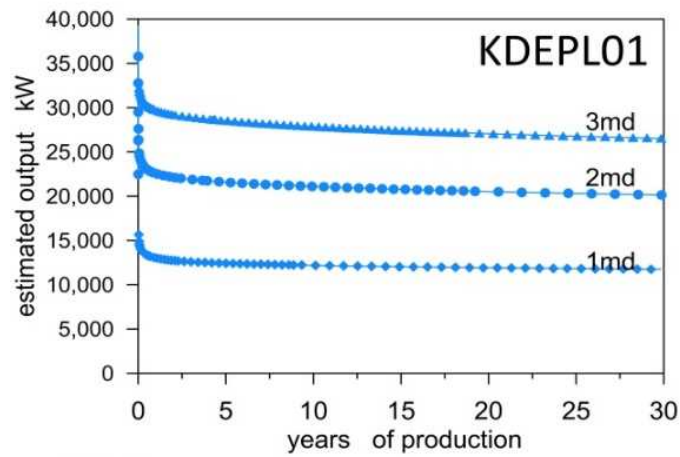
(4) 湯沢南部地域における生産予測シミュレーション

a) 超臨界地熱貯留層からの 30 年間生産量予測 (単独坑井ケース)

上述した自然状態モデルを用いて超臨界地熱貯留層から単独の坑井で 30 年間蒸気生産した場合の予測について検討した。以下に坑口圧力 5.1MPa とした場合の例を示す。

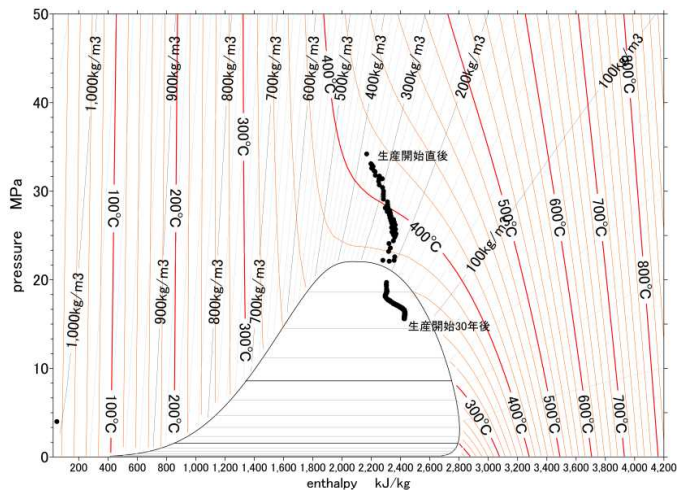
➤推定発電出力（浸透率 3md のケース）

30,640kW（3 か月後） ➔ 26,514kW（30 年後）

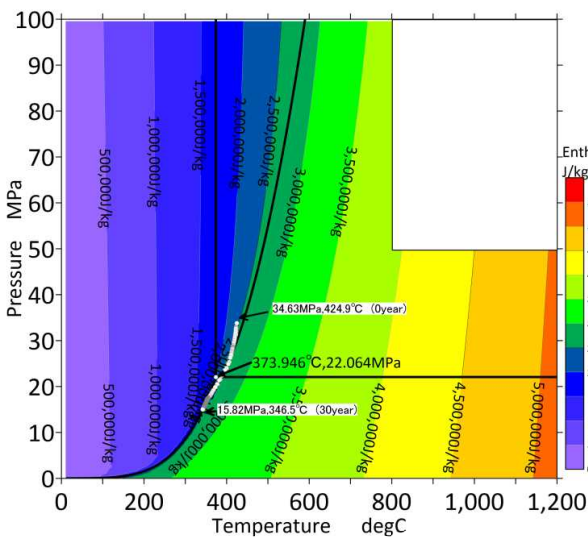


噴出量予測（30 年間） 浸透率 1md、2md、3md

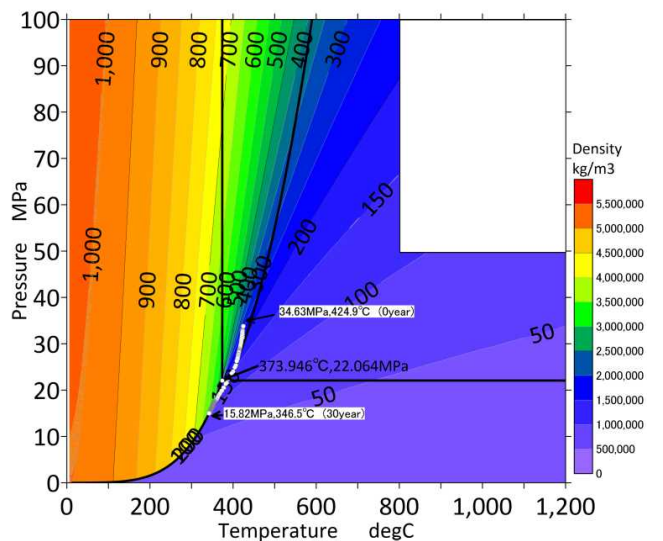
- 生産に伴い、坑底付近貯留層圧力・温度は初期状態から蒸気表の等エンタルピー線にほぼ沿って減衰。
- 圧力減衰に伴い温度も低下し、坑井近傍では超臨界から亜臨界に変化し、2 相状態となる。



p-h 線図



エンタルピー図



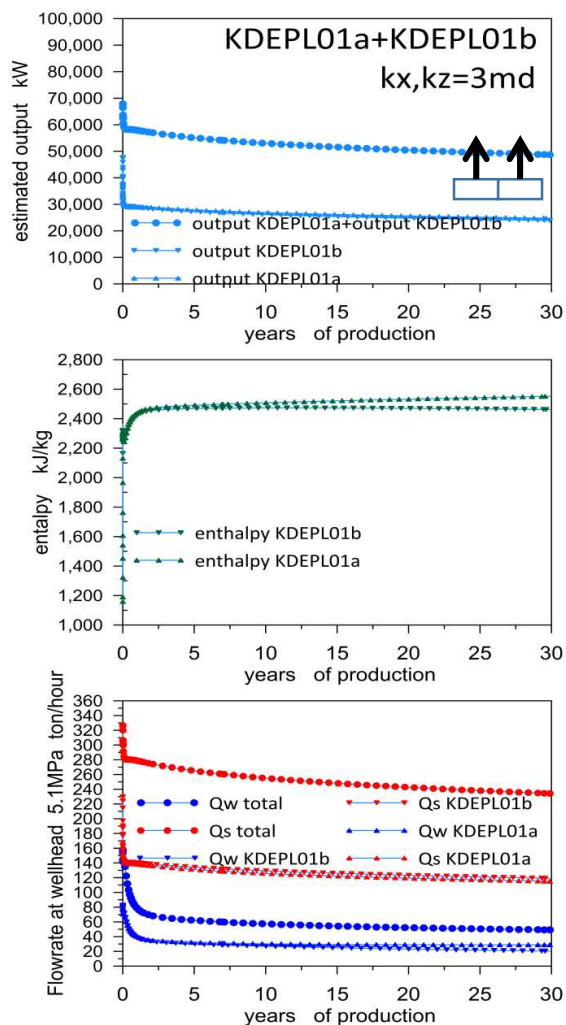
密度図

坑底付近貯留層流体挙動図

b) 超臨界地熱貯留層からの 30 年間生産量予測（複数坑井ケース）

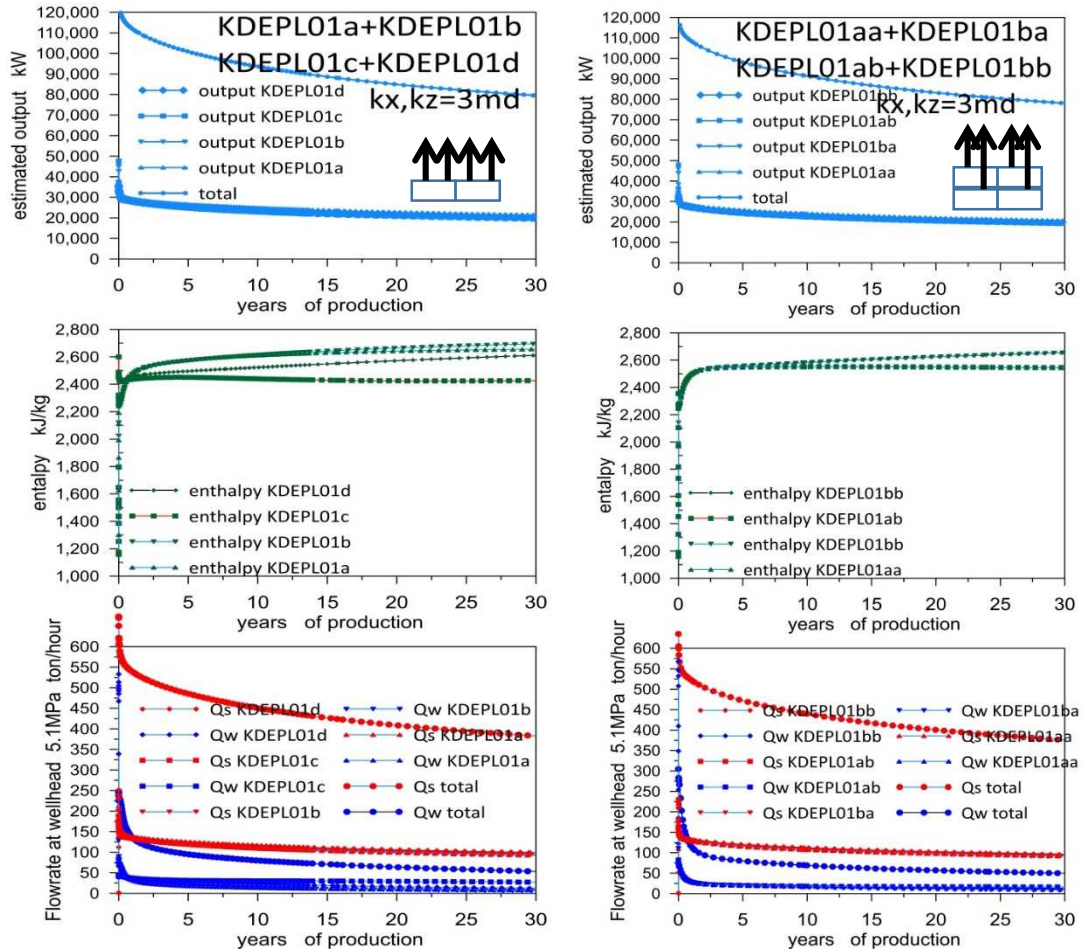
超臨界地熱貯留層から複数の坑井で 30 年間蒸気生産した場合の予測についても以下のとおり検討した。

生産井 2 本を 500m 離して掘削し、生産を行った場合は 3 か月後には推定発電出力は合計で 61.MW、30 年後には 49.MW となる。



生産井 2 本(左右 500m)

4本の生産井を左右500m、上下200m離して掘削し、生産を行った場合は3か月後には推定発電出力は合計で115.MW、30年後には78.MWとなる。



生産井 4 本(左右 500m)

生産井 4 本(左右 500m・上下 200m)

(5) まとめ・今後の課題

a) 現時点でのまとめ

- MT 法電磁探査、微小地震観測、豊富な既存データを用いて湯沢南部地域の数値シミュレーションを実施し、湯沢南部地域の深部（地下 5km 以浅）に超臨界地熱流体が賦存することを予測した。
- 超臨界地熱流体を生産した場合の流体挙動、貯留層挙動について検討し、100MW の発電が可能となる要件を整理した。
- 深部構造調査試錐の仕様について検討した。

b) 今後の技術課題

- 微小地震観測データの更なる蓄積・反映による超臨界地熱系概念モデルの精度向上。（微小地震観測は1年程度のデータ蓄積であるため）
- 数値モデルによる感度解析とモデル改良による、より信頼性のあるモデルの検討。
- MINC モデルを含めたモデルによる生産領域での超臨界地熱流体の挙動検討。
- 還元による効果と最適な涵養方法の検討。
- 深部構造調査試錐及び超臨界調査井の仕様・費用・HSE 検討と経済性評価。

8. 実用化・事業化へ向けての見通しと取組みについて

実用化・事業化に向けての見通しと今後の取組みを以下に示す。

- 2024 年度以降に NEDO が実施する構造調査試錐掘削、調査井掘削による超臨界地熱資源のコンセプト確認のための事業に可能であれば参画し、超臨界地熱資源開発に関する知見の蓄積を行う。
- 本事業で得た知見を基にして、新規開発地点における超臨界領域に至る地熱系概念モデルの構築及び掘削ターゲット抽出を目的とした調査（MT 法探査：約 20×20km, 100 測点程度など）及び貯留層シミュレーション等のコンサル業務をデベロッパーに対して提案する。
- 各種調査データに基づいた総合解析・ターゲットを検討の上で、新規開発地域における構造試錐井や生産井・還元井の開発ステージにおける掘削工事・坑井調査受注を目指す。

表 8-1 実用化・事業化の見通しと課題・取組み

項目	2026 年度	2027 年度	2028 年度	2029 年度	2030 年度～
I. 調査井掘削による超臨界地熱コンセプトの確認、関連技術開発	NEDO における調査井掘削（コンセプトの確認）と関連技術開発 →				
II. 超臨界地熱資源開発に係るコンサルティング(MT 法探査・解析含む)				コンサル業務受注 (MT・シミュレーション等)	→
III. 超臨界地熱資源開発に係る掘削工事					掘削工事受注 →

個別テーマ (1) -2.

(1) 超臨界地熱資源技術開発

(1) -2. 資源量評価 (葛根田地域)

委託先： (国研)産業技術総合研究所
(国)東北大学
(国)秋田大学
地熱エンジニアリング(株)

再委託先： (国)東京工業大学
(国)京都大学
地熱技術開発(株)
日本オイルエンジニアリング(株)
エスケイエンジニアリング(株)
(株)INPEX ドリリング

1. 背景と目的

受託者らが NEDO 等からの委託を受け実施してきた一連の研究開発により、海洋プレート沈み込みやプレートの形成に起源を有する高温・高圧の地熱システム（超臨界地熱システム）上部に、超臨界状態（400～500℃、数 10 MPa 以上）にある天然の地熱貯留層（超臨界地熱貯留層）が形成されている可能性が高いことが示されてきた。超臨界地熱貯留層を熱源として用いる超臨界地熱発電はエネルギー・環境政策の視点から他の発電方式に比して優位性があると判断されており、2020 年に策定された革新的環境イノベーション戦略において「I. エネルギー転換」における重要課題のひとつと位置付けられている。

受託者らは 2018 年度から 2020 年度にかけて NEDO からの委託を受け「超臨界地熱発電技術研究開発／東日本・九州地域における超臨界地熱資源有望地域の調査と抽熱可能量の推定」（以下、「先行研究開発」と記す）を実施し、国内有望 3 地域（後志地域、仙岩地域、豊肥地域）での地質学的調査、自然電磁波を用いた物理探査等を実施した。その結果、対象とする全地域で深度 5km 以浅に天然の超臨界地熱貯留層と推定される領域を見出すことに成功した。さらに、調査・探査により得られたデータから超臨界地熱システムの各種パラメータを推定する方法を導出し、周辺構造を含む超臨界地熱システムのモデル化を行うとともに、超臨界地熱対応 3D シミュレータを用いて各地域で 100MW の発電を 40 年以上継続可能な開発モデルが存在することを示してきた。また、その一方で、超臨界地熱システムのキャラクター化に不可欠な、熱構造、浸透率分布、圧力分布等の推定時における不確定性を低減する必要性が高いこと

も明らかとなってきた。受託者らは、近い将来に超臨界地熱システムへの調査井掘削を行い、超臨界地熱資源の存在実証ならびに資機材・開発技術の評価を実施することを想定し、一連の研究開発を実施しているが、限られた回数での試掘により着実な成果を上げ、超臨界地熱発電の実現可能性を実証するためには、有望地域における超臨界地熱システムモデルの精緻化、および資源量の詳細評価を行い、試掘地点や坑井の仕様、さらには発電に資する超臨界地熱資源存在実証および資機材評価に関連する一連の試験計画を立案することが必要となる。

これを受け、受託者らは先行研究開発において地下 3km 付近に超臨界地熱貯留層が存在する可能性が高いとされた仙岩地域の中心地点である岩手県葛根田地域を対象とし、以下を実現することを目的として本事業を実施している。

- ① 葛根田地域における超臨界地熱システムモデルの精緻化を行い、抽熱方式、発電可能性を具体的に提示する。
- ② 深部構造調査試錐井の仕様、工程概要、ならびに本坑井を使用した調査・試験プラン等を提示する。
- ③ 調査井の仕様、工程概要、ならびに本坑井を使用した調査・試験プラン等を提示する。
- ④ 葛根田地域での超臨界地熱発電の経済性を評価する。
- ⑤ 葛根田地域での調査井掘削、試験の優位性を提示するとともに、調査井掘削・試験等へ向けた課題、体制等を整理する。

2. 研究開発の概要

本事業では、先行研究開発において葛根田地域において超臨界地熱貯留層の存在可能性が高いとされた地点（以下「有望地点」と記す）を対象として以下の研究開発を実施する。

研究開発項目① 補完地表調査と概念モデル構築：高密度 MT 法探査、反射法地震探査、微小地震モニタリング等を実施し、有望地点付近の地下データを取得するとともに超臨界地熱システムに関連した基礎データを収集する。また、統計数理的手法を導入し、超臨界地熱システムモデル推定時の不確定性を低減する。これらにより概念モデルを同定する。

研究開発項目② 資源量評価：研究開発項目①で構築された概念モデルに基づき、3次元モデルを作成し、概念モデルを再現する自然状態シミュレーションを実施する。現在の地熱系が十分再現された自然状態モデルを用いて、生産予測シミュレーションを実施し、当該地域の超臨界地熱資源量を推定する。開発シナリオの策定においては、還元或いは涵養などの最適な生産システムを検討し複数のケースを解析するとともに、周辺の既開発エリアへの影響（干渉など）なども考察する。

研究開発項目③ 深部構造調査試錐の検討：①で得られた情報ならびに葛根田地域の地形等を勘案し、超臨界地熱システム直上まで掘削する構造試錐井の仕様、同坑井

を使用した試験内容、コスト等を提示する。

研究開発項目④ 超臨界地熱調査井仕様の検討：調査井で実施する一連の試験ならびに超臨界地熱資源存在実証シナリオ等を策定し、これに加え、①で得られた情報ならびに葛根田地域の地形等を勘案し、超臨界地熱システム内部へ掘削する調査井の仕様、工程、コスト等を提示する。

研究開発項目⑤ 経済性評価：葛根田地点で 100MW 程度の超臨界地熱発電を実施する際の発電コスト等を算出する。

研究開発項目⑥ 総合評価：研究開発項目①～⑤の成果を取りまとめ、調査井掘削地点としての葛根田地域の特徴を整理するとともに、調査井掘削・試験、商用発電へ向けたロードマップを策定する

各テーマにおける研究開発項目、開発目標及びその設定根拠を表 2-1 に示す。

表2-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	中間目標	最終目標	根拠
①補完地表調査と概念モデル構築	<ul style="list-style-type: none"> 補完地表調査などの結果を追加情報として、既存の地熱系概念モデルを改善する。資源量評価に必要な超臨界地熱システムの概念モデルを構築する。 資源量評価シミュレーションに必要な物性値の決定法を確定する。 	<ul style="list-style-type: none"> 葛根田地域の地下 5km 以浅に超臨界領域（あるいはそれに準じた高温領域）を特定する。 熱構造、浸透率空間分布等、生産シミュレーションに必要なパラメータを決定する。 	<ul style="list-style-type: none"> 商用超臨界地熱発電が実現可能であることを示すために不可欠であるため。

②資源量評価	<ul style="list-style-type: none"> 葛根田地域の地熱系概念モデルを再現しうる数値モデルを複数比較検討し、必要な前提条件を提示する。 	<ul style="list-style-type: none"> 葛根田地域の在来型地熱系及び超臨界地熱システム全体を対象に自然状態シミュレーションを実施し、当地域の地熱系全体を表現できることを示し、モデルの妥当性・信頼性を提示する。 葛根田地域の超臨界地熱システムの詳細モデル化および生産シミュレーション等を通じて超臨界地熱資源の質、量および規模を定量的に評価する（100 MW規模） 	<ul style="list-style-type: none"> 同定した地熱系概念モデルにより、在来型地熱系および超臨界地熱システムの両者を矛盾なく説明できることが不可欠であるため。
③深部構造調査試錐の検討	<ul style="list-style-type: none"> 深部構造調査試錐井の仕様、工程概要、ならびに本坑井を使用した調査・試験プランを提示する。また、掘削・試験費用を算出する。 	<ul style="list-style-type: none"> 中間目標と同じ。 	<ul style="list-style-type: none"> 何らかの予算措置があった際に、速かつ安全に掘削を実現し、所定の成果を得るため。 本研究開発終了直後から試掘フェーズへの円滑な移行に必要なため。
④超臨界地熱調査井仕様の検討	<ul style="list-style-type: none"> 調査井を用いた試験計画を策定する。 	<ul style="list-style-type: none"> 調査井の坑口および掘削ターゲットの位置を決定する。 調査井を用いた一連の調査・試験計画を提示する。 HSEマネジメントプランを提示する。 	<ul style="list-style-type: none"> 商用発電に資する規模の超臨界地熱資源の存在実証に不可欠な試掘フェーズへの移行を本研究開発終了直後から円滑に移行し、その後の実用化・実証フェーズへの展開に必要なため。
⑤経済性評価	<ul style="list-style-type: none"> 2024年度に実施予定のため目標設定なし。 	<ul style="list-style-type: none"> 葛根田地域において在来型地熱発電と同等以下のコストで超臨界地熱発電を実現可能であることを示す。 	<ul style="list-style-type: none"> 超臨界地熱発電が経済的優位性を有することが必須であるため。
⑥総合評価	<ul style="list-style-type: none"> 2024年度に実施予定のため目標設定なし。 	<ul style="list-style-type: none"> 葛根田地域での調査井掘削、試験の優位性を提示する。 調査井掘削、試験およびその後の実用化へ向けた研究開発課題、体制案を提示する。 	<ul style="list-style-type: none"> 本研究開発終了直後から試掘フェーズへの移行を円滑にし、その後の実用化・実証フェーズへの移行に必要なため。

3. 事業スケジュール

本研究開発の期間は 2021 年 6 月 15 日から 2024 年 3 月 20 日であり、そのスケジュールの概要を図 3-1 に示す。

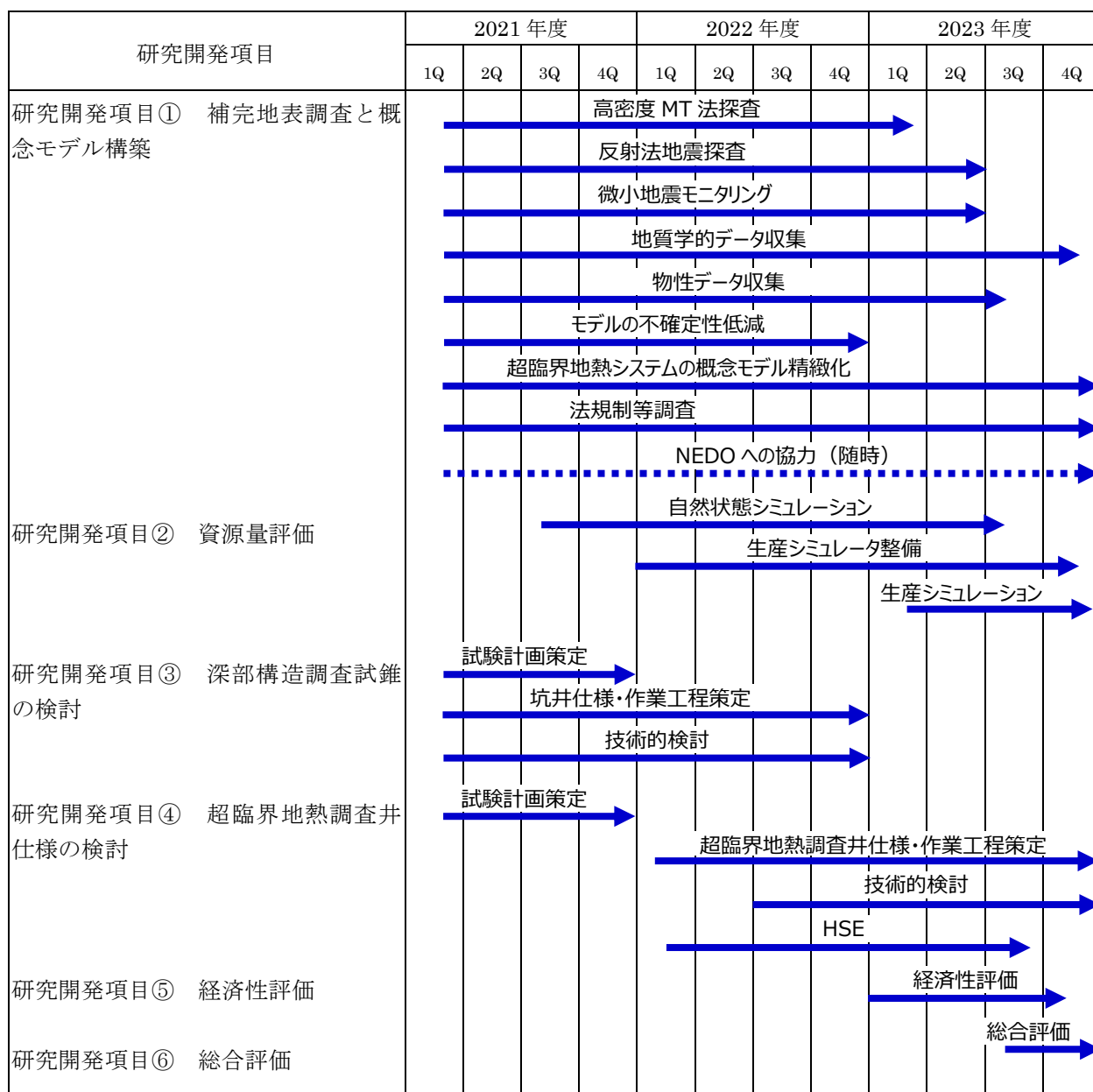


図 3-1 研究開発のスケジュール

4. 予算

本研究開発の予算額を表 4-1 に示す。

表 4-1 研究開発の予算額

(単位：百万円)

	2021 年度	2022 年度	2023 年度	総額
国立研究開発法人産業技術総合研究所	77.3	86.0	19.0	182.3
国立大学法人東北大学	3.2	15.4	11.6	30.2
国立大学法人秋田大学	3.4	25.7	24.9	54.0
地熱エンジニアリング株式会社	16.0	53.6	48.3	117.9
合計	99.9	180.7	103.8	384.4

5. 研究開発の実施体制

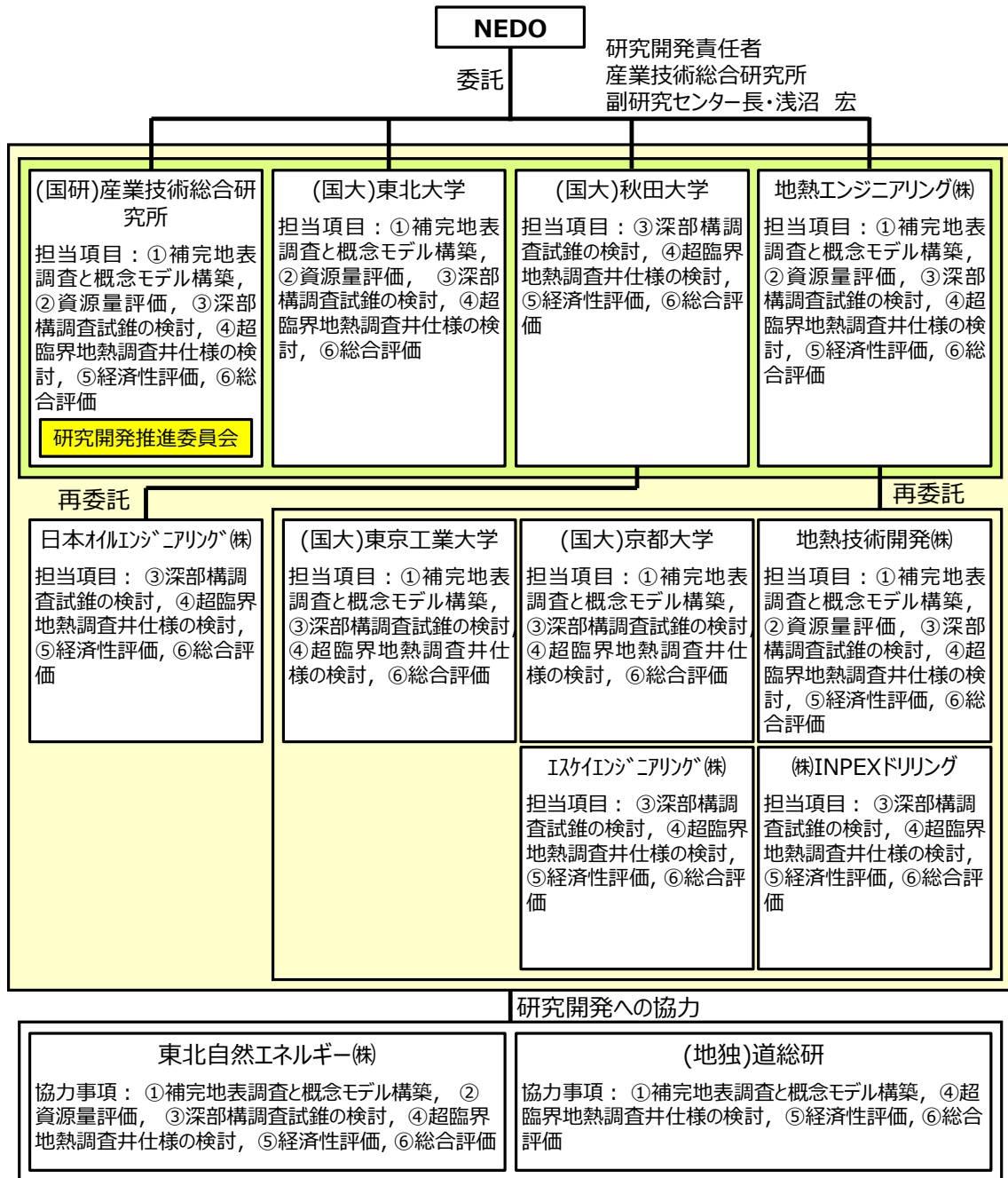


図 5-1 研究開発の実施体制

6. 事業の管理運営

全体打合せ：2023.3.31 までに9回開催（Teams で開催）

（開催日：）2021.7.26, 2021.11.24, 2022.1.28, 2022.3.31, 2022.5.9, 2022.7.20, 2022.10.12, 2023.2.10, 2023.3.30

研究開発推進委員会

2021.9.7 第1回研究開発推進委員会（Teams で開催）

2022.2.22 第2回研究開発推進委員会（Teams で開催）

2022.8.2 第3回研究開発推進委員会（Teams で開催）

2022.12.5 第4回研究開発推進委員会（Teams で開催）

これらに加え、項目別打合せを月に2～4回程度開催。また、NEDO 担当者との打合せを2ヵ月に1回程度の頻度で実施。

表 6-1 研究開発推進委員会委員

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
安達正敏	地熱資源コンサルタント・研究開発推進委員会委員長	研究開発推進委員会での指導・助言
加藤 修	東北自然エネルギー株式会社・研究開発推進委員会委員	研究開発推進委員会での指導・助言
藤光康宏	九州大学・研究開発推進委員会委員	研究開発推進委員会での指導・助言
林 為人	京都大学・研究開発推進委員会委員	研究開発推進委員会での指導・助言
田村 慎	北海道立総合研究機構・研究開発推進委員会委員	研究開発推進委員会での指導・助言
北村龍太	石油天然ガス・金属鉱物資源機構・研究開発推進委員会委員	研究開発推進委員会での指導・助言

表 6-2 有識者

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
岡 大輔	北海道立総合研究機構・研究主任	MT法探査、超臨界地熱システムモデル化に関する助言
辻 健	九州大学・教授	MT法探査、反射法地震探査、超臨界地熱システムモデル化に関する助言
西島 潤	九州大学・教授	MT法探査、反射法地震探査、超臨界地熱システムモデル化に関する助言
相澤公記	九州大学・准教授	MT法探査、反射法地震探査、超臨界地熱システムモデル化に関する助言
北村圭吾	九州大学・助教	MT法探査、反射法地震探査、超臨界地熱システムモデル化に関する助言
石橋純一郎	神戸大学・教授	MT法探査、基礎データ、超臨界地熱システムモデル化に関する助言

齋藤博樹	西日本技術開発株式会社・部長代理	MT法探査、超臨界地熱システムモデル化に関する助言
稲垣陽大	西日本技術開発株式会社・資源開発グループ・主任	MT法探査、超臨界地熱システムモデル化に関する助言
藤井勇樹	西日本技術開発株式会社・地域地熱利用グループ・担当	MT法探査、超臨界地熱システムモデル化に関する助言
池田 哲	西日本技術開発株式会社・グループリーダー	地熱井掘削技術に関する助言
中田節也	国立研究開発法人防災科学技術研究所・火山研究推進センター・センター長	超臨界地熱システムモデル化に関する助言
山田茂登	富士電機株式会社・発電プラント事業本部 発電事業部 火力・地熱プラント総合技術部 担当部長	噴気試験・資材評価に関する助言
近藤早紀	富士電機株式会社・火力・地熱プラント総合技術部プラント技術課	噴気試験・資材評価に関する助言
伊藤哲也	株式会社テルナイト・技術部 技術開発課長	掘削泥水に関する助言
佐藤 敬	株式会社テルナイト・取締役	掘削泥水に関する助言
俣野健児	AGCセラミックス株式会社・開発センター 材料開発グループリーダー	セメントに関する助言
吉田友紀	AGCセラミックス株式会社・開発センター 材料開発グループ	セメントに関する助言
高橋俊一	エヌケーケーシームレス鋼管株式会社・QHSE部・ミルプロダクト&メタラジー室・室長	ケーシング管、地上配管に関する助言
佐倉弘持	サクラジェイテック・代表	ケーシング管、地上配管に関する助言
山本晃司	石油天然ガス・金属鉱物資源機構・メタンハイドレート研究開発グループ・MH-21リーダー	坑井安定性に関する助言
内田利弘	GG-Tech・代表	MT法探査に関する助言
茂木 透	名古屋大学・特任教授	MT法探査、超臨界地熱システムモデル化に関する助言

7. 研究開発成果について

本研究開発の成果は表 7-1 のとおりである。設定した中間目標に対して項目①、②は達成できる見込みであり、項目③および④は目標を大きく上回って達成済み、もしくは達成できる見込みである。

表 7-1 中間目標に対する達成度（見込み）

研究開発項目	中間目標 (2024年3月)	成果 (2023年3月末見込)	達成度 (見込)	達成の根拠 ／解決方針
① 補完地表調査と概念モデル構築	<ul style="list-style-type: none"> 補完地表調査などの結果を追加情報として、既存の地熱系概念モデルを改善する。資源量評価に必要な超臨界地熱システムの概念モデルを構築する。 資源量評価シミュレーションに必要な物性値の決定法を確定する。 	<ul style="list-style-type: none"> 高密度 MT 法探査、地質学的情報の再コンパイル結果などを追加情報として、既存の地熱系概念モデルを改善し、資源量評価に必要な超臨界地熱システムの概念モデル初版を同定した。 資源量評価シミュレーションに必要な物性値の決定法を確定した。 	○ (2024年3月末迄に達成見込)	<ul style="list-style-type: none"> 超臨界地熱貯留層のパラメータ推定法を科学的に妥当な論理に基づき導出し、概念モデルに反映させた。今後、超臨界地熱システムのさらに高度な貯留層パラメータ推定を行い、概念モデルに反映させる。 超臨界地熱システムを含む広域地熱系モデル初版を同定した。今後、探査データや地質データ、不確定性低減技術適用結果等を追加することによりモデルをより詳細化・高信頼性化する。 超臨界地熱システムに関して、互いに独立な手法により得られた情報が相互矛盾しないことを確認したため、同定したモデルの妥当性は高いと考えており、このため、当初目標は達成されるものと判断している。

<p>②資源量評価</p>	<ul style="list-style-type: none"> 葛根田地域の地熱系概念モデルを再現しうる数値モデルを複数比較検討し、必要な前提条件を提示する。 	<ul style="list-style-type: none"> 「①補完地表調査と概念モデル構築」で同定した概念モデル初版をもとに数値計算モデルを作成し、自然状態シミュレーションを実施し、坑井温度プロファイルと一定の整合性を有する温度分布を得た。 「①補完地表調査と概念モデル構築」で同定された超臨界地熱貯留層初版を数値モデル化し、この貯留層から100MW以上の発電を実現可能であることを示した。 	<p>○ (2024年3月末迄に達成見込)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 超臨界貯留層の大きさ、流体組成、圧力分布が異なる複数の数値モデルを用いて地熱系概念モデルの再現性を評価し、最も妥当なモデルを決定するとともに、感度解析によりモデルの不確定性の影響を評価する。 葛根田地域で超臨界地熱貯留層を用いた100MW以上の発電が実現可能な開発方式を提示することに加え、浅部在来系地熱システムへ有意な影響が出ないことを示す。 今後の資機材価格、人件費等の推移を考慮する必要があるものの(⑤での検討)、現在の成果から、葛根田地域で100MW以上の超臨界地熱発電が実現可能な資源が存在することを示すことができると想定しており、当初目標を達成可能と判断している。
<p>③深部構造調査試錐の検討</p>	<ul style="list-style-type: none"> 深部構造調査試錐井の仕様、工程概要、ならびに本坑井を使用した調査・試験プランを提示する。また、掘削・試験 	<ul style="list-style-type: none"> 関連する科学者・技術者からの提案・ヒヤリングにより深部構造調査試錐井を利用した一連の調査・試験計画を立案した。 	<p>◎ (2023年3月末迄に達成済)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 現実的に掘削が可能な基地、坑跡等を検討し、試錐井の構造、工法等を決定した。 予算規模に応じて、適切な掘削・

	<p>費用を算出する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> 葛根田地域の超臨界地熱システムモデルおよびその他の諸条件を勘案し、坑井仕様、工程、コストを算出した。 葛根田地域を対象として法令、社会的条件等を詳細に調査した。 同地域で蒸気生産を行っている企業との調整を行い、試錐に対する前向きな回答を得た。 		<p>調査・試験を実施可能にする複数の試錐プランを導出した。</p> <ul style="list-style-type: none"> 安全に掘削・試験を実施するための HSE マネジメントプランのコア部分を構築した。 上記成果により、本事業終了直後から試錐へ迅速かつ円滑に移行できる状況となったため、◎と評価する。
<p>④超臨界地熱調査井仕様の検討</p>	<ul style="list-style-type: none"> 調査井を用いた試験計画を策定する。 	<ul style="list-style-type: none"> 関連する科学者・技術者からの提案・ヒヤリングにより調査井を用いた一連の試験計画を具体的に立案した。 調査井を利用した「超臨界地熱資源存在立証シナリオ」を策定した。 葛根田地域の超臨界地熱システムモデルおよびその他の諸条件を勘案し、坑井仕様、工程の初版を策定した。 葛根田地域での掘削・試験に関連した法令、社会的条件等を詳細に調査した。 同地域で蒸気生産を行っている企業との調整を行い、調査井掘削に対する前向きな回答を得た。 坑内シミュレーションによる掘削時の坑内状況の事前評価を開始した。 調査井における水圧破碎シミュレーションを実施し、坑口、坑内圧力分布、人工貯留層進展等を予測した。 調査井の坑内温度分布等を推定し、使用 	<p>◎ (2024年3月末迄に達成見込)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 葛根田地域の超臨界地熱システムモデル、浅部熱水系、地理的条件等を勘案し、安全に超臨界地熱貯留層へ到達可能な調査井仕様・掘削工程等を策定する。 掘削時における坑内状況をシミュレートし、適切な資機材を選択する。 これらにより、本事業終了直後から調査井掘削へ迅速かつ円滑に移行できる状況となる見込みであり、◎と評価する。

		可能な資機材および工法の評価・選定を行った。		
⑤経済性評価	・2024年度に実施予定のため目標設定なし。			
⑥総合評価	・2024年度に実施予定のため目標設定なし。			

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

葛根田地域の地熱系概念モデル初版を同定した(図7-1)。当地域の主要な熱源は葛根田花崗岩であり、その岩体縁辺部に天水を主な起源とする在来型地熱系が発達している。葛根田花崗岩の上部にマグマ水がシリカシーリング層にトラップされて超臨界貯留層が形成。シーリング層の存在により在来型地熱系と超臨界地熱系の間で顕著な水の移動は発生していない可能性が高い。

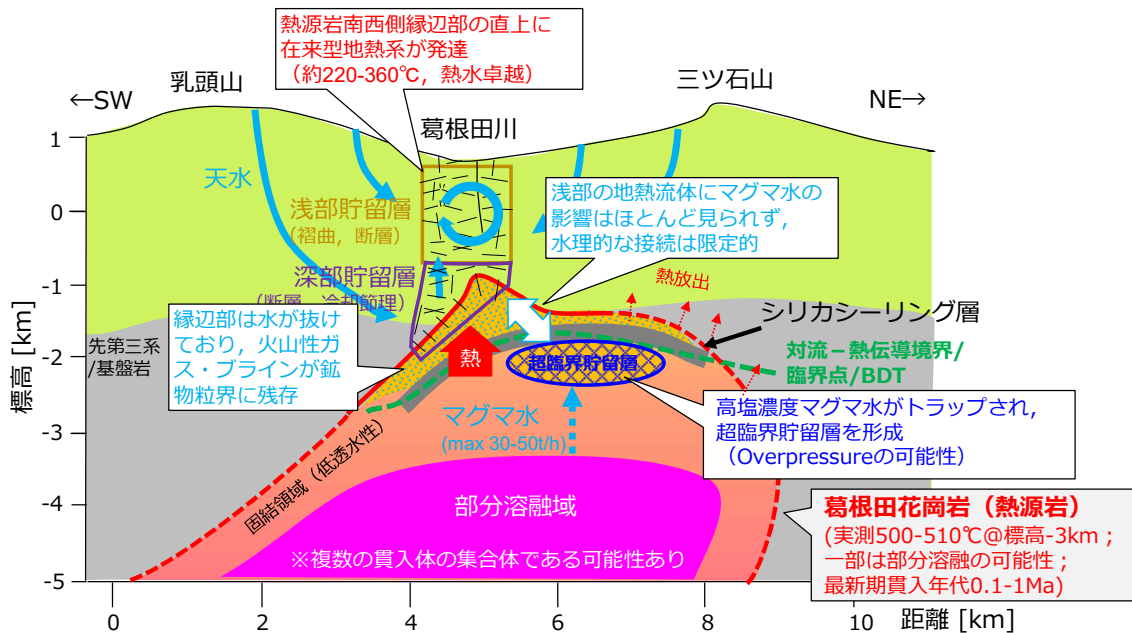


図7-1 葛根田地域の地熱系概念モデル(初版)

8. 実用化・事業化へ向けての見通しと取組みについて

実用化・事業化に向けての見通しと今後の取り組みは、以下のとおりである。

- 実用化：参画者は、一連の超臨界地熱発電技術開発において最も重要なステップである「構造試錐井および調査井の掘削」を本研究開発終了直後に国プロとして開始することを想定している。本フェーズでは、(a)葛根田地域での100MW程度の商用発電を40年以上実現可能なことの実証（資源存在実証）、(b)探査・モデル化技術等の妥当性評価、(c)資機材・開発技術の試験・評価等を行う。これらを通じて超臨界地熱発電が実用化可能であるか否の判断、および実用化へ向けた方向性を提示する。
- 事業化：発電事業者が主体となった、2040年頃のパイロットプラント建設（100MW程度）、2050以降の多数地点での事業化（国内総容量数GW以上）の実現を目指す。国研、大学等の研究者はポテンシャル評価、資源開発技術開発、データ分析等により事業化を支援する。

表 8-1 実用化・事業化の見通しと課題・取り組み

フェーズ	試掘詳細検討フェーズ										実用化フェーズ		事業化フェーズ
	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2032~2040頃	2040頃~2060頃	
研究開発項目（主な実施者）											実用化結 果 向 の 検 討 方 向 性 の 検 討		
葛根田地域での超臨界地熱資源量評価	本事業										*パイロットプラン（100MW程度）建設 *商用発電へ向けた研究開発 *全国規模のポテンシャル評価	*国内複数地点での商用発電（1基100~200MW程度。総容量数GW以上）	
全国超臨界地熱ポテンシャルマップ（産総研、大学等）				国内有望地点の資源量詳細評価									
試掘と各種試験（参画会社、先行研究開発参画各社）				準備・地元説明									
				掘削工事									
				各種試験・噴気試験									
			解析・評価										
			環境モニタリング										
基礎研究（産総研、大学等）	基礎研究												

添付資料

●特許論文等リスト

【とりまとめ】

	2021年度	2022年度	合計
特許	0	0	0
論文	2	3	5
学会発表（口頭・ポスター）	0	6	6
プレスリリース	0	0	0
新聞・TV等掲載	0	0	0
受賞	0	0	0
その他	0	0	0

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Hoshino, A., Naganawa, S., Sato, T., Ito, T. and Yoshida, Y.	Akita University, Telnite, AGC Ceramics	Numerical Study on Downhole Temperature Distribution during Cementing Operation for Supercritical Geothermal Wells	Geothermal Resources Council Transactions. 45, 2056–2067	有	2021/10
2	Sakuma, S. Naganawa, S. Sato, T. Ito, T. Yoshida, Y.	Akita University, Telnite, AGC Ceramics	Evaluation of New High-Temperature Well Cement for Supercritical Geothermal Drilling	Geothermal Resources Council Transactions. 45, 268–283	有	2021/10
3	Asanuma, H	AIST	Status of Japanese supercritical geothermal project in 2022	Geothermal Resources Council Transactions. 46, 5p	有	2022/10
4	Shimomura, R. and Naganawa, S.	Akita University	Evaluation of Applicability of Reverse Circulation Primary Cementing Method in Supercritical Geothermal Wells	Geothermal Resources Council Transactions. 46, 1719–1727	有	2022/10
5	Ajima, K. and Naganawa, S.	Akita University	Evaluating Wellbore Cooling Effect with Insulated Drill Pipes in Supercritical Geothermal Well Drilling	Geothermal Resources Council Transactions. 46, 805–818	有	2022/10

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
----	-----	----	------	-----	------

1	安島航平、長縄成実	秋田大学	超臨界地熱井掘削における断熱ドリルパイプの坑内冷却効果の評価	石油技術協会春季講演会	2022/6
2	下村 領、長縄成実	秋田大学	超臨界地熱井掘削における逆循環セメンチング手法適用の検討	石油技術協会春季講演会	2022/6
3	石橋琢也、渡邊教弘、北村真奈美、高橋美紀	産総研	超臨界地熱システムモデル同定に必要な高温・高圧条件下での岩石物性データに関するレビュー	日本地熱学会学術講演会	2022/11
4	安島航平、長縄成実	秋田大学	超臨界地熱井掘削における断熱ドリルパイプの坑内冷却効果の評価	日本地熱学会学術講演会	2022/11
5	下村 領、長縄成実	秋田大学	超高温環境下におけるケーシングの熱応力挙動解析	日本地熱学会学術講演会	2022/11
6	Asanuma, H., Watanabe, N., Yamaya, Y., Okamoto, K., Suzuki, Y., Tamura, M., Oka, D., Suzuki, K., Naganawa, S., Tsuchiya, N., Ogawa, Y., Mogi, T., Ishitsuka, K., Fujimitsu, Y., Kitamura, K., Kajiwara, T., Akatsuka, T., Osato, K. and Saito, H.	AIST, HRO, Hokkaido University, Akita University, Tohoku University, Tokyo Institute of Technology, Kyoto University, Kyushu University, Geo-E, GERD, WJEC	Current status of Japanese supercritical geothermal project	Grand Renewable Energy 2022 International Conference	2022/12

個別テーマ (1) -3.

(1) 超臨界地熱資源技術開発

(1) -3. 超臨界地熱資源量評価 (八幡平地域)

委託先：三菱マテリアルテクノ株式会社

再委託先：地熱解析株式会社

1. 背景と目的

超臨界地熱資源の分布、性状、規模等を把握することを目的として、超臨界地熱資源システムが形成される可能性が高い地域における超臨界水状態把握と資源量評価の詳細検討を行う。

弊社は、2019～2020年度「超臨界地熱発電技術研究開発/超臨界地熱資源の評価と調査井仕様の詳細設計/八幡平地域における超臨界地熱資源の評価に関する研究開発」(以下「前回PJ」)に従事し、八幡平地域をモデルフィールドとして、超臨界地熱資源の推定賦存範囲とその資源量の試算結果を提示した。この前回PJの成果を踏まえ、本研究開発では超臨界水状態把握および資源量評価技術のさらなる高度化を図り、超臨界地熱資源の試掘に向けた実効性のある調査・評価技術の完成を目指す。

2. 研究開発の概要

対象地域 (モデルフィールド) : 「八幡平地域」 (岩手県八幡平市)

研究開発項目 :

① 補完地表調査と概念モデルの構築

(目的) 超臨界地熱資源の分布範囲の特定

(手法) MT法電磁探査, 微小地震観測, 重力探査

② 資源量評価

(目的) 超臨界地熱資源量の評価

(手法) 数値モデルシミュレーションによる生産予測

③ 深部構造調査試錐の検討, ④ 超臨界地熱調査井仕様の検討

(目的) 本地域での実施を想定した掘削仕様・費用の提示

(手法) 文献・情報収集, 国内企業・専門家の協力を基に検討

⑤ 経済性評価

(目的) 開発を想定した経済性評価

(手法) 文献・情報収集, 資源量評価・掘削費用の検討結果を基にした想定

各研究開発項目における、開発目標及びその設定根拠を表 2-1 に示す。

表2-1 研究開発目標と根拠

※本研究開発は2023年度が最終年度

研究開発項目	最終目標	根拠
①補完地表調査と概念モデル構築	MT法電磁探査、微小地震観測の最終結果を反映し、地下5km以浅における超臨界領域の規模を特定する。	資源量評価には、超臨界地熱資源の賦存範囲の特定が必要。
②資源量評価	最終的な「超臨界貯留層モデル」、「溶解モデル」での推定資源量と、それぞれにおける最適生産システムを提示する。	<ul style="list-style-type: none"> ・未知である超臨界領域の適切なモデル化が必要。 ・シミュレーションによる資源量評価手法は、従来型地熱資源の評価に用いられる手法。
③深部構造調査試錐の検討	地熱系概念モデルを基に選定される掘削ターゲットを対象として、現時点で考える掘削仕様を提示する。	超臨界地熱資源の試掘に向けた調査井の具体的な仕様検討・費用試算が必要。
④超臨界地熱調査井仕様の検討	地熱系概念モデルを基に選定される掘削ターゲットを対象として、現時点で考える掘削仕様を提示する。	超臨界地熱資源の試掘に向けた調査井の具体的な仕様検討・費用試算が必要。
⑤経済性評価	最適生産システムの実現に必要な費用を総括し、最終的な推定資源量との比較による経済性評価結果を提示する。	超臨界地熱発電所の実現に向けた費用規模・経済性の把握が必要。

3. 事業スケジュール

本研究開発の期間は2021年6月15日より2024年2月28日であり、そのスケジュールの概要を図3-1に示す。

事業項目	2021年度				2022年度				2023年度			
	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
①補完地表調査と概念モデル構築												
MT法電磁探査		3次元解析精度検証			許可申請				現地調査・データ処理	解析		
微小地震観測	許可申請	微小地震観測	震源計算					震源計算				
重力探査					許可申請	現地調査・データ処理						
地熱構造概念モデル			モデル修正		モデル修正・構造試錐ターゲット検討				モデル修正	調査井ターゲット検討		
②資源量評価												
超臨界貯留層モデル	精度検証・ケーススタディ		モデル修正		最適生産システム検討		モデル修正				モデル修正・最終評価	
溶融モデル	自然状態シミュレーション		モデル修正		生産予測・最適生産システム検討		モデル修正		最適生産システム検討		モデル修正・最終評価	
③深部構造調査試錐の検討		情報収集・概略仕様検討			情報収集・詳細仕様検討						仕様修正	
④超臨界地熱調査井仕様の検討					情報収集・詳細仕様検討						仕様修正	
⑤経済性評価					情報収集・手法検討							最終評価

図3-1 研究開発のスケジュール

4. 予算

本研究開発の予算額を表 4-1 に示す。

表 4-1 研究開発の予算額

(単位：百万円)

	2021 年度	2022 年度	2023 年度	総額
研究開発費	31.4	46.9	30.9	109.2
合計	31.4	46.9	30.9	109.2

5. 研究開発の実施体制

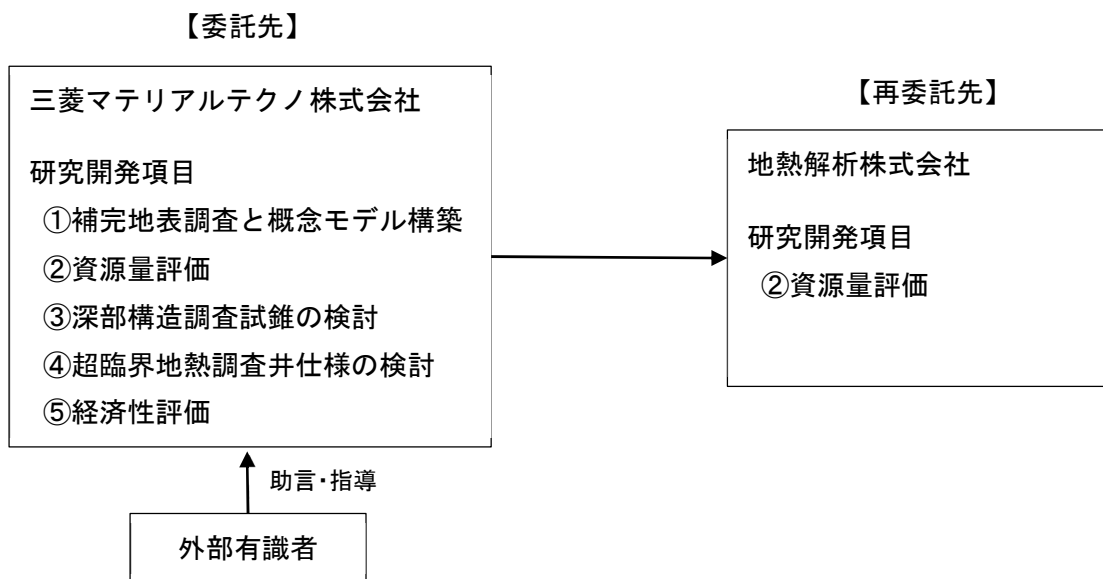


図 5-1 研究開発の実施体制

6. 事業の管理運営

本研究開発への指導・助言を行うアドバイザーとして、表 6-1 に示す 4 名を外部有識者として委嘱した。

表 6-1 外部有識者

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容	打合せ等の実施状況
内田 利弘	個人（元産業技術総合研究所）	物理探査（電磁探査）	2022. 3. 7, 2023. 3. 23
笠原 順三	静岡大学 客員教授	物理探査（微小地震）	2022. 3. 8, 2023. 3. 16
藤光 康宏	九州大学 教授	資源量評価	2022. 3. 16, 2023. 3. 29
村岡 洋文	弘前大学 特別顧問	全般	2022. 3. 4, 2023. 3. 14

7. 研究開発成果について

本研究開発の成果は下表のとおりである。設定した中間目標（本研究開発は2023年度が最終年度であるため最終目標と同じ）に対して、項目①～⑤は達成できる見込みである。

表 7-1 中間目標（最終目標）に対する達成度（見込み）（1）

研究開発項目	最終目標 (2024年3月)	成果 (2023年3月まで)	達成度 (見込み)	達成の根拠 ／解決方針
①補完地表調査と概念モデル構築	MT法電磁探査、微小地震観測の最終結果を反映し、地下5km以浅における超臨界領域の規模を特定する。	<ul style="list-style-type: none"> MT法電磁探査によって抽出された推定熱源岩体（深部低比抵抗帯）の分布形状から概念モデルを構築。 微小地震観測・重力探査の結果も超臨界領域の分布を示唆（図7-1, 7-2）。 	○ (2024年3月)	<ul style="list-style-type: none"> 調査結果を基に作成した数値モデルで、従来型地熱貯留層（安比地域）をシミュレーションにより再現でき、調査手法としての妥当性が確認された。 調査結果が揃い次第、地熱概念モデルの最終版を作成する。
②資源量評価	最終的な「超臨界貯留層モデル」、「溶融モデル」での推定資源量と、それぞれにおける最適生産システムを提示する。	<ul style="list-style-type: none"> 溶融モデル（熱伝導モデル）で安比地域を再現可能であることを確認。 新たに「中間モデル」を作成、未知の部分も含め幅広く検討可能とした（図7-3～7-6）。 中間モデルによる資源量の試算を行った。（図7-7） 	○ (2024年3月)	<ul style="list-style-type: none"> 各モデルで安比地域を再現できており、想定した熱源とその周辺の地熱構造には妥当性がある。 熱源岩体内部構造等、未知の部分についても感度解析的なアプローチの目途がついた。
③深部構造調査試錐の検討	地熱系概念モデルを基に選定される掘削ターゲットを対象として、現時点で考えうる掘削仕様を提示する。	掘削長3,200mの掘削仕様案を作成し、費用の積算を行った。（図7-8）	○ (2024年3月)	<ul style="list-style-type: none"> 深部構造調査試錐の掘削は現有技術で対応可能と判断され、積算も現在の単価等から検討可能。 最終版概念モデルを基に掘削仕様を調整予定。
④超臨界地熱調査井仕様の検討		掘削長3,800mの掘削仕様案を作成し、温度・圧力環境の想定や課題の整理を行った。（図7-9）	○ (2024年3月)	<ul style="list-style-type: none"> 温度・圧力環境の想定には、資源量評価におけるシミュレーション結果を使用。 現有技術での対応可否/解決案の検討。

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

表 7-2 中間目標（最終目標）に対する達成度（見込み）（2）

研究開発項目	最終目標 (2024年3月)	成果 (2023年3月まで)	達成度 (見込み)	達成の根拠 ／解決方針
⑤経済性評価	最適生産システムの実現に必要な費用を総括し、最終的な推定資源量との比較による経済性評価結果を提示する。	既往研究等を基に、超臨界地熱発電所の構想や技術状況、費用検討の方法を調査。	○ (2024年3月)	<ul style="list-style-type: none"> ①～④の目途がついており、それを基に総括を行える予定。 主に中間モデルによる資源量評価を通じて、100MW級を実現可能な生産システムを絞り込む。

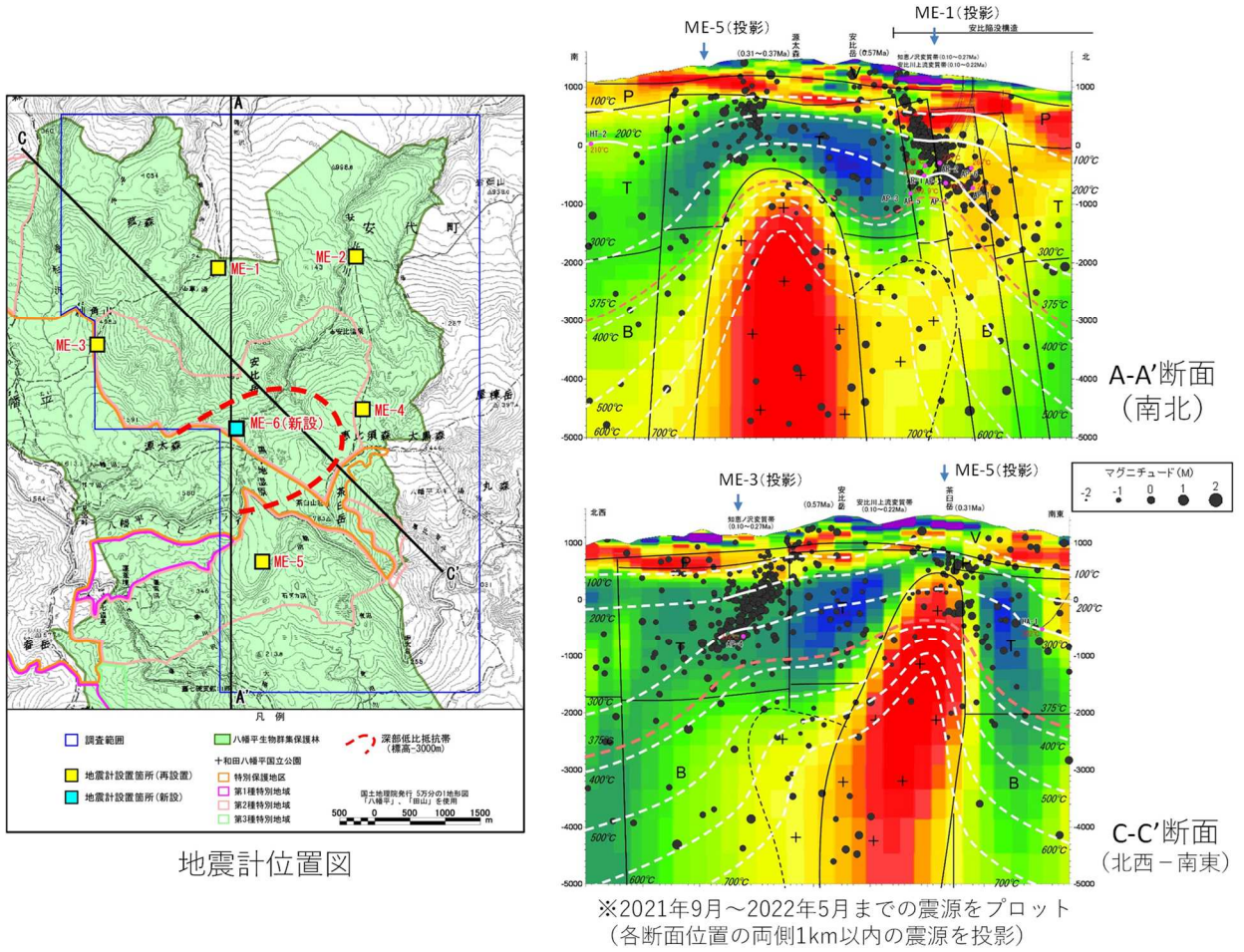
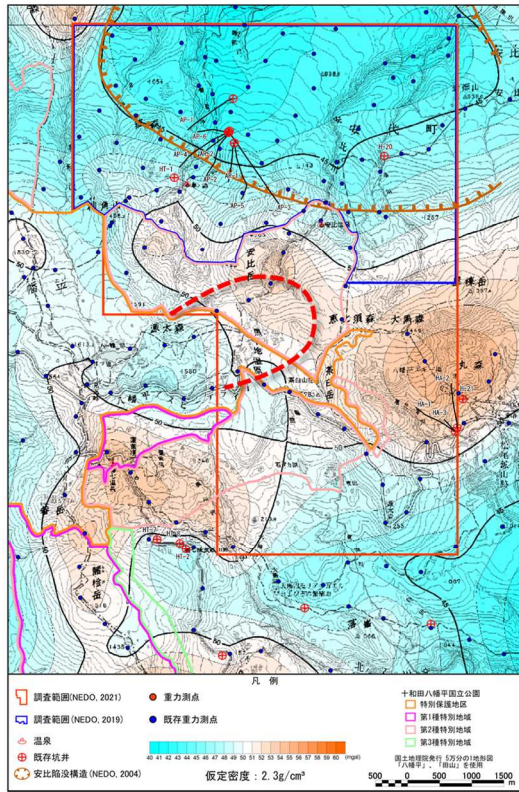
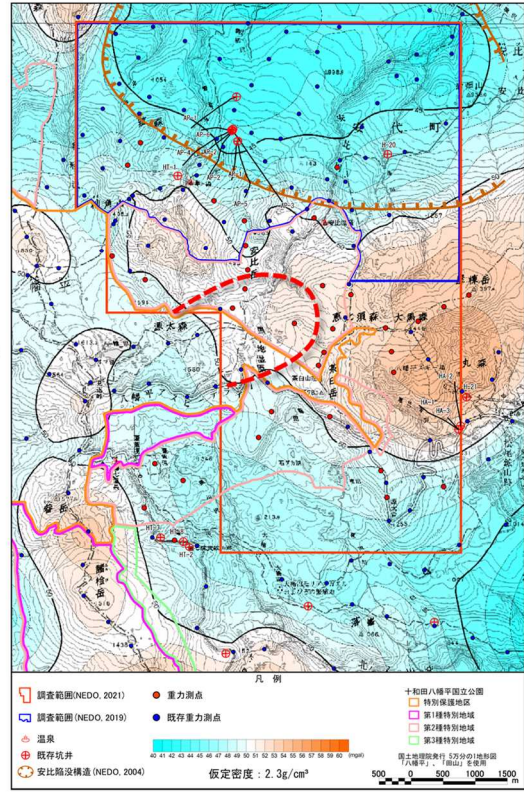


図 7-1 深部低比抵抗帯と微小地震震源分布

深部低比抵抗帯 (投影, 標高-3,000m)



ブーゲー異常図 (既存データ使用)



今回測定データ追加後

図 7-2 重力探査結果 (ブーゲー異常図)

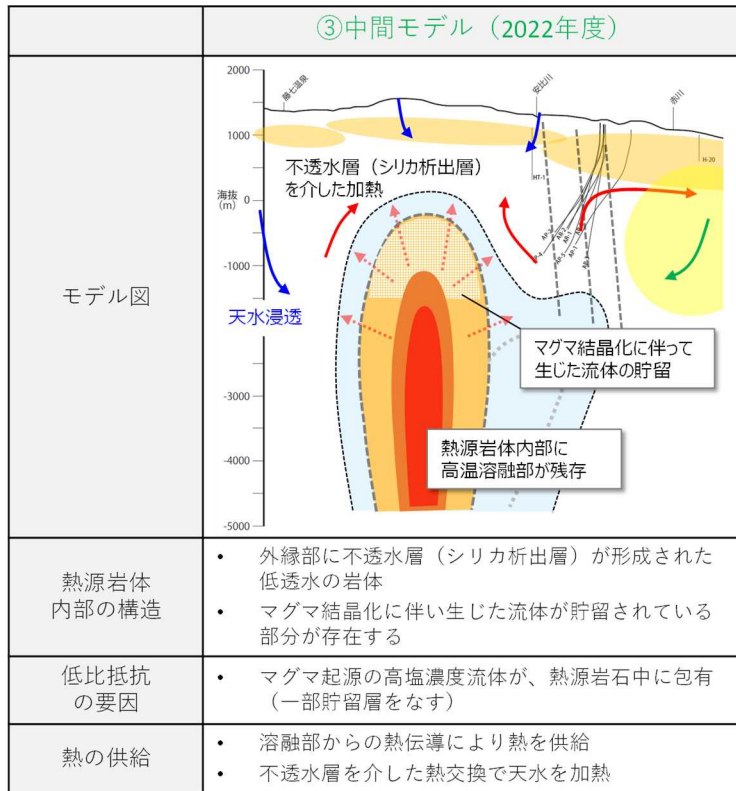


図 7-3 概念モデル (中間モデル)

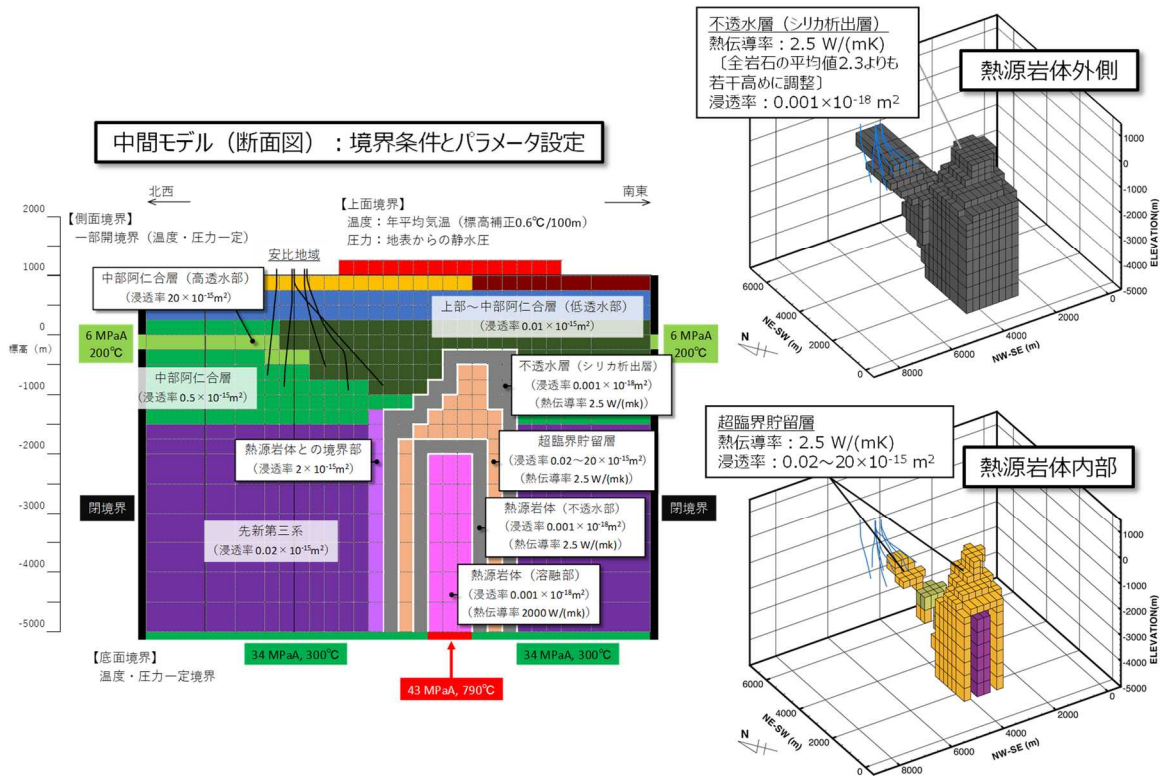


図 7-4 中間モデルと浸透率等の設定

【自然状態シミュレーション結果例】

(C-C'断面, 超臨界貯留層浸透率 $2 \times 10^{-15} \text{m}^2$, 計算時間13.4万年)

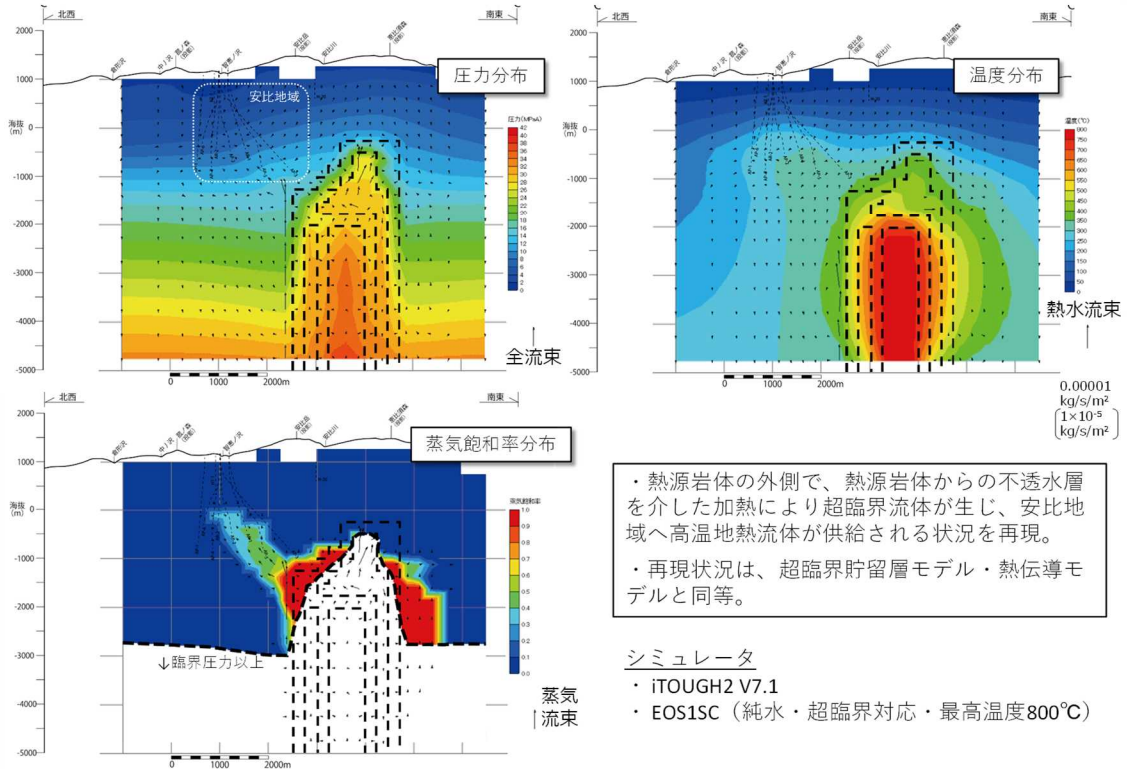
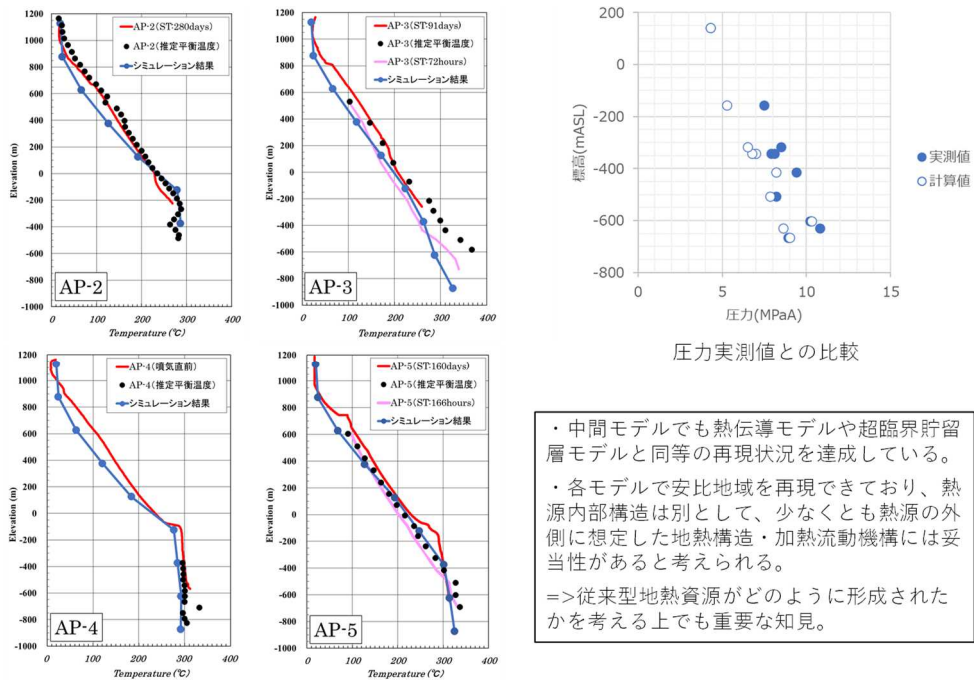


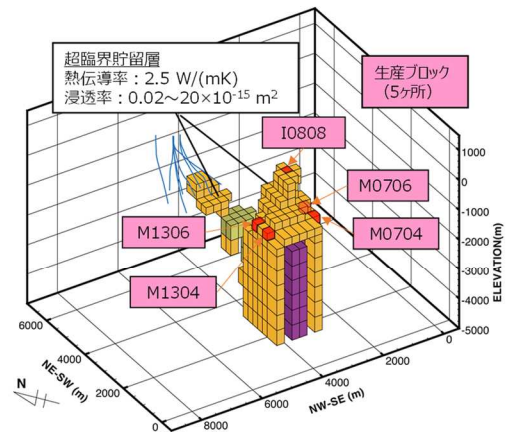
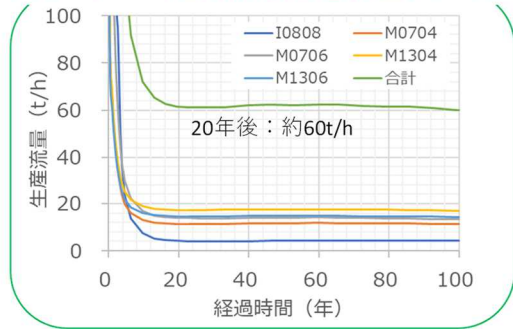
図 7-5 自然状態シミュレーション結果例 (中間モデル)



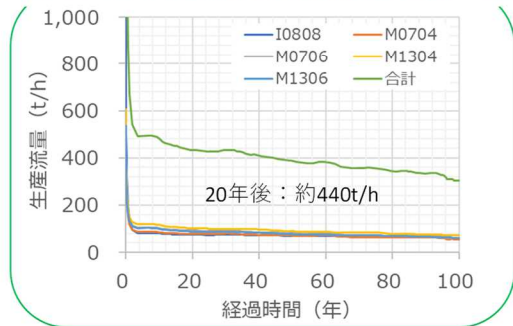
実測温度プロファイルとの比較

図 7-6 自然状態シミュレーション結果と実測値の比較例

中間モデル：超臨界貯留層浸透率 $2 \times 10^{-15} \text{ m}^2$



中間モデル：超臨界貯留層浸透率 $20 \times 10^{-15} \text{ m}^2$

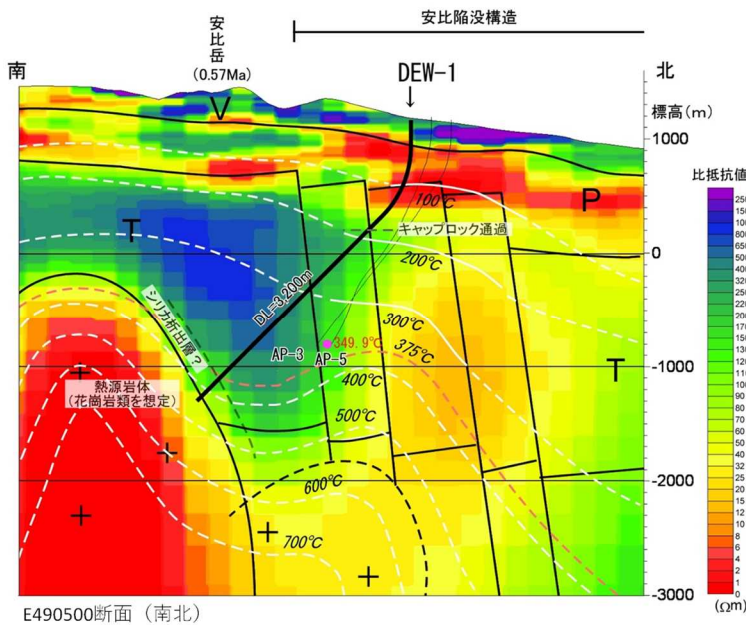


・中間モデルの超臨界貯留層のうち5か所を生産ブロックとした場合の生産予測シミュレーション結果例。

・今回の試算条件では、600 t/h（前回PJで試算した発電出力100 MW相当の蒸気量）に届かない結果となったが、今後浸透率以外のパラメータも含めて検討を行い、資源量の取りうる範囲を明らかにする。

・熱源岩体の外側、熱源岩体との境界部からの生産も検討。

図 7-7 資源量試算結果例（中間モデル）



【深部構造調査試錐DEW-1（仮称）】

掘削深度：3,200m
最大傾斜：45°
偏距：1,875m

【掘削の狙い】

- ・熱源岩体（花崗岩類を想定）への逢着と臨界点以上の温度の確認（想定坑底温度400°C強）
- ・不透水層（シラカ析出層）、境界部の高透水部など、数値モデルで想定した地質構造要素の有無を確認

【備考】

- ・掘削用地の制約（地形・国立公園・保護林）から、比較的大きな偏距を要する。

図 7-8 深部構造調査試錐：ターゲットと概略仕様

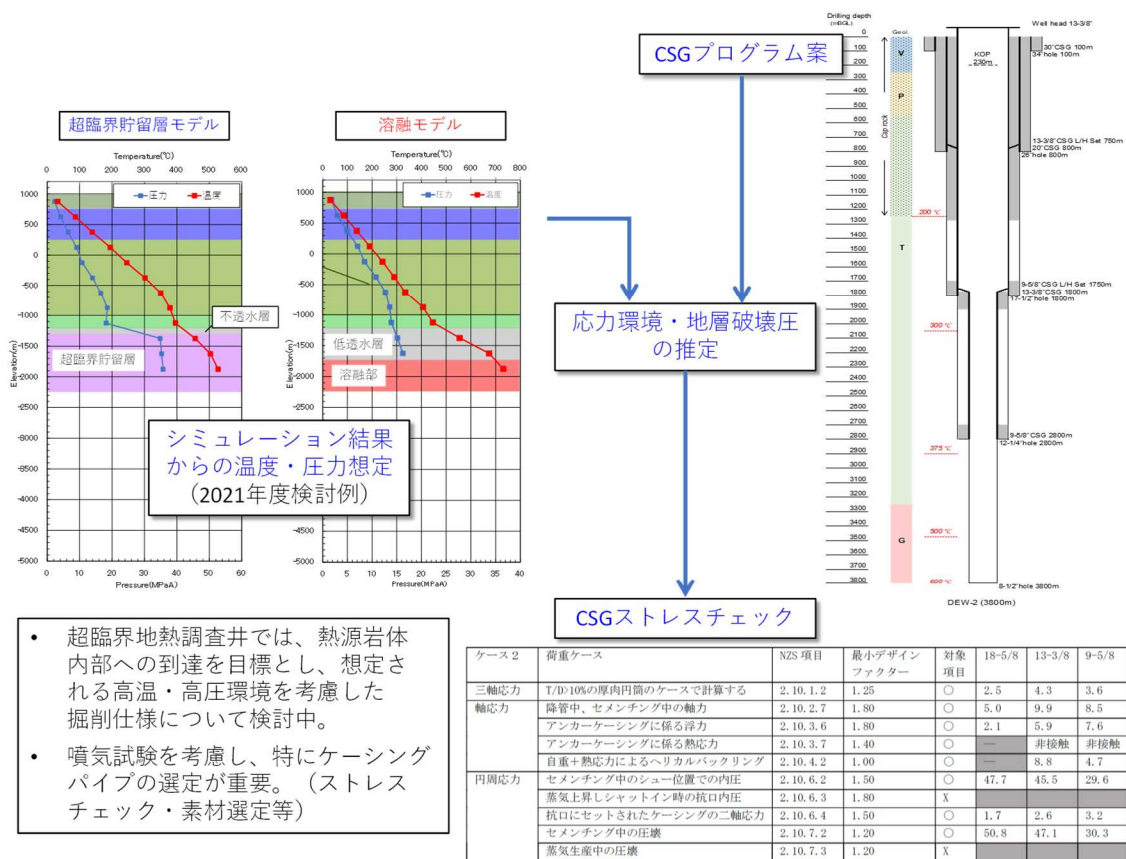


図 7-9 超臨界地熱調査井仕様の検討

8. 実用化・事業化へ向けての見通しと取組みについて

実用化・事業化に向けての見通しと今後の取組みを表 8-1 に示す。そのコンセプトは次の通り。

- 将来的には、超臨界地熱資源開発の普及・拡大期における探査・評価サービスの事業化を目標としている。
- 超臨界地熱発電自体の実用化には、今後の試掘結果が重要であるが、現時点では未知の部分が多い。資源量評価技術についても、関連する研究開発等への参画を通じた検証と精度向上に取り組む。
- 超臨界地熱資源とは従来型地熱資源の熱源にあたる存在であり、既に従来型地熱資源の調査において、本研究開発での知見を取り入れ、より深部までを対象とした物理探査等の調査を提案・実施している。

表 8-1 実用化・事業化の見通しと課題・取組み

項目	2026 年度	2027 年度	2028 年度	2029 年度	2030 年度～
試掘段階における研究開発事業への参画を通じた検証と精度向上への取組み	深部構造調査試錐で得られた知見の取り入れ				
	調査井掘削・関連技術開発で得られた知見の取り入れ				
超臨界地熱資源開発案件への探査・評価サービス提供					普及
従来型地熱資源開発案件への活用（熱源としての超臨界領域の調査）	超臨界領域を含む深部まで対象とした調査（既に実施中）				
	超臨界試掘結果からの改善				

添付資料

●特許論文等リスト

【とりまとめ】

	2021 年度	2022 年度	合計
特許	0	0	0
論文	0	1	1
学会発表（口頭・ポスター）	1	0	1
プレスリリース	0	0	0
新聞・TV 等掲載	0	0	0
受賞	0	0	0
その他	0	0	0

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ 番号	査読	発表年月
1	岩崎隆一	三菱マテリアル テクノ(株)	岩手県八幡平地域における超臨界地熱 資源の資源量評価に関する研究開発	地熱技術, 47, 3&4, p69-79	無	2022/11

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	岩崎隆一	三菱マテリアル テクノ(株)	八幡平地域における超臨界地熱資源の 評価に関する研究開発	2021 年度第 2 回地熱 研究会	2022/02/03

個別テーマ (1) -4.

(1) 超臨界地熱資源技術開発

(1) -4. 超臨界地熱資源量評価 (九重地域)

委託先：(国大)九州大学、西日本技術開発
(株)、地熱技術開発(株)

再委託先：(国研)産業技術総合研究所、(国大)
東京工業大学、(国大)京都大学、(国大)
神戸大学、(国大)東京大学 (国大) 秋
田大学、地熱エンジニアリング(株)、
日本オイルエンジニアリング(株)、エ
スケイエンジニアリング(株)、
(株)INPEX ドリリング

1. 背景と目的

海洋プレートの沈み込みやプレートの形成に起源を有する高温・高圧の地熱システムを熱源として用いる超臨界地熱発電はエネルギー・環境政策の視点から優位性があると判断されており、2020年に策定された革新的環境イノベーション戦略において「I. エネルギー転換」における重要課題のひとつと位置付けられている。

北部九州豊肥地域は2018年度から2020年度にかけて実施された、NEDO委託事業「超臨界地熱発電技術研究開発／東日本・九州地域における超臨界地熱資源有望地域の調査と抽熱可能量の推定」(以下、「先行研究開発」と記す)において、北海道の後志地域、東北の仙岩地域と同じく超臨界地熱資源開発の有望地域との評価を受けた。この先行研究において、受託者らは八丁原発電所から九重火山群にかけての地域(九重地域)の深度4km以浅に天然の超臨界地熱貯留層と推定される領域を見出すことに成功した。これを受け、受託者らは九重地域を対象とし、以下を実現することを目的として本事業を実施している。

- ① 九重地域の超臨界地熱システムの精緻モデル化を行い、抽熱方式、発電可能量を具体的に提示する。
- ② 深部構造調査試験井の仕様、工程概要、ならびに本坑井を使用した調査・試験プラン等を提示する。
- ③ 調査井の仕様、工程概要、ならびに本坑井を使用した調査・試験プラン等を提示する。
- ④ 九重地域での超臨界地熱発電の経済性を評価する。
- ⑤ 九重地域での調査井掘削、試験の優位性を提示するとともに、調査井掘削・試験等へ向けた課題、体制等を整理する。

これらを達成することにより、九重地域をモデルフィールドとして超臨界水状態把握および資源量評価技術のさらなる高度化を実現するとともに、超臨界地熱資源の試掘に向け

た実効性のある調査・評価技術を完成させる。

2. 研究開発の概要

本事業では、先行研究開発において超臨界地熱貯留層の存在可能性が高いとされた九重地域（以下「有望地点」と記す）を対象として以下の研究開発を実施する。

研究開発項目① 補完地表調査と概念モデル構築：高密度 MT 法探査、反射法地震探査、微小地震モニタリング等を実施し、有望地点付近の地下データを取得するとともに超臨界地熱システムに関連した基礎データを収集する。また、統計数理的手法を導入し、超臨界地熱システムモデル推定時の不確定性を低減する。これらにより概念モデルを同定する。

研究開発項目② 資源量評価：研究開発項目①で構築された概念モデルに基づき、3次元モデルを作成し、概念モデルを再現する自然状態シミュレーションを実施する。現在の地熱系が十分再現された自然状態モデルを用いて、生産予測シミュレーションを実施し、当該地域の超臨界地熱資源量を推定する。開発シナリオの策定においては、還元或いは涵養などの最適な生産システムを検討し複数のケースを解析するとともに、周辺の既開発エリアへの影響（干渉など）なども考察する。

研究開発項目③ 深部構造調査試錐の検討：①で得られた情報ならびに九重地域の地形等を勘案し、超臨界地熱システム直上まで掘削する構造試錐井の仕様、同坑井を使用した試験内容、コスト等を提示する。

研究開発項目④ 超臨界地熱調査井仕様の検討：調査井で実施する一連の試験ならびに超臨界地熱資源存在実証シナリオ等を策定し、これに加え、①で得られた情報ならびに九重地域の地形等を勘案し、超臨界地熱システム内部へ掘削する調査井の仕様、工程、コスト等を提示する。

研究開発項目⑤ 経済性評価：九重地点で 100MW 程度の超臨界地熱発電を実施する際の発電コスト等を算出する。

各テーマにおける研究開発項目、開発目標及びその設定根拠を表 2-1 に示す。

表2-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	中間目標	最終目標	根拠
I：補完地表調査と概念モデル構築	補完地表調査などの結果を追加情報として、既存の地熱系概念モデルを改善する。資源量評価に必要な超臨界地熱システムの概念モデルを構築する。 ・資源量評価シミュレーションに必要な物性値の決定法を確定する。	九重地域の地下5km以浅に超臨界領域（あるいはそれに準じた高温領域）を特定する。 熱構造、浸透率空間分布等、生産シミュレーションに必要なパラメータを決定する。	仕様書に記載された開発目標であるため。 商用超臨界地熱発電が実現可能であることを示すために不可欠であるため。
II：資源量評価	九重地域の地熱系概念モデルを再現しうる数値モデルを複数比較検討し、必要な前提条件を提示する。	九重地域の超臨界地熱システムの詳細モデル化および生産シミュレーション等を通じて超臨界地熱資源の質、量および規模を定量的に評価する（100 MW規模）	仕様書に記載された開発目標であるため。
III：深部構造調査試錐の検討	深部構造調査試錐井の仕様、工程概要、ならびに本坑井を使用した調査・試験プランを提示する。また、掘削・	中間目標と同じ。	何らかの予算措置があった際に、迅速かつ安全に掘削を実現し、所定の成果を得るため。本研究開発終了直後から試掘フェーズへの円滑な移行に必要なため。

	試験費用を算出する。		
IV：超臨界地熱調査井仕様策定	調査井を用いた試験計画を策定する。	調査井の坑口および掘削ターゲットの位置を決定する。 調査井を用いた一連の計測・試験計画を提示する。 HSE マネジメントプランを提示する。	商用発電に資する規模の超臨界地熱資源の存在実証に不可欠であるため。 調査井の仕様策定や HSE マネジメントプラン提示等に必要のため。 本研究開発終了直後から試掘フェーズへの移行を円滑にし、その後の実用化・実証フェーズへの展開に必要なため。
V：経済性評価	2024年度に実施予定のため目標設定なし。	九重地域において在来型地熱発電と同等以下のコストで超臨界地熱発電を実現可能であることを示す。	超臨界地熱発電が経済的優位性を有することが必須であるため。
VI：総合評価	2024年度に実施予定のため目標設定なし	九重地域での調査井掘削、試験の優位性を提示する。 調査井掘削、試験およびその後の実用化へ向けた研究開発課題、体制案を提示する。	本研究開発終了直後から試掘フェーズへの移行を円滑にし、その後の実用化・実証フェーズへの移行に必要なため。

3. 事業スケジュール

本研究開発の期間は2021年6月15日から2024年3月20日であり、そのスケジュールの概要を図3-1に示す。

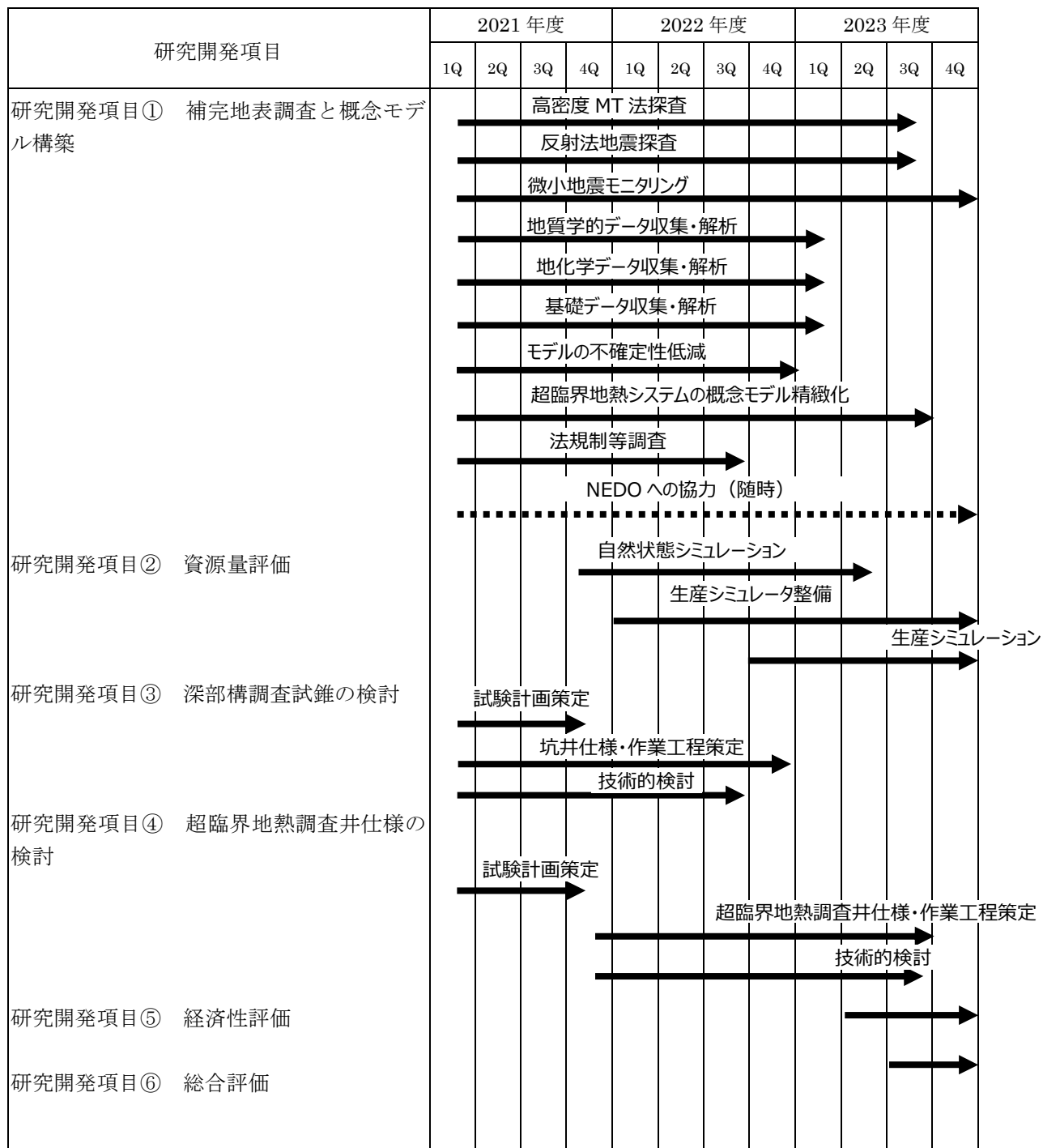


図 3-1 研究開発のスケジュール

4. 予算

本研究開発の予算額を表 4-1 に示す。

表 4-1 研究開発の予算額

(単位：百万円)

	2021 年度	2022 年度	2023 年度	総額
研究開発費 ((国大)九州大学)	22.7	34.7	28.5	85.9
研究開発費 (西日本技術開発(株))	68.0	112.3	51.7	232.0
研究開発費 (地熱技術開発(株))	5.8	38.9	30.4	75.1
研究開発費合計	96.5	185.9	110.6	393

5. 研究開発の実施体制

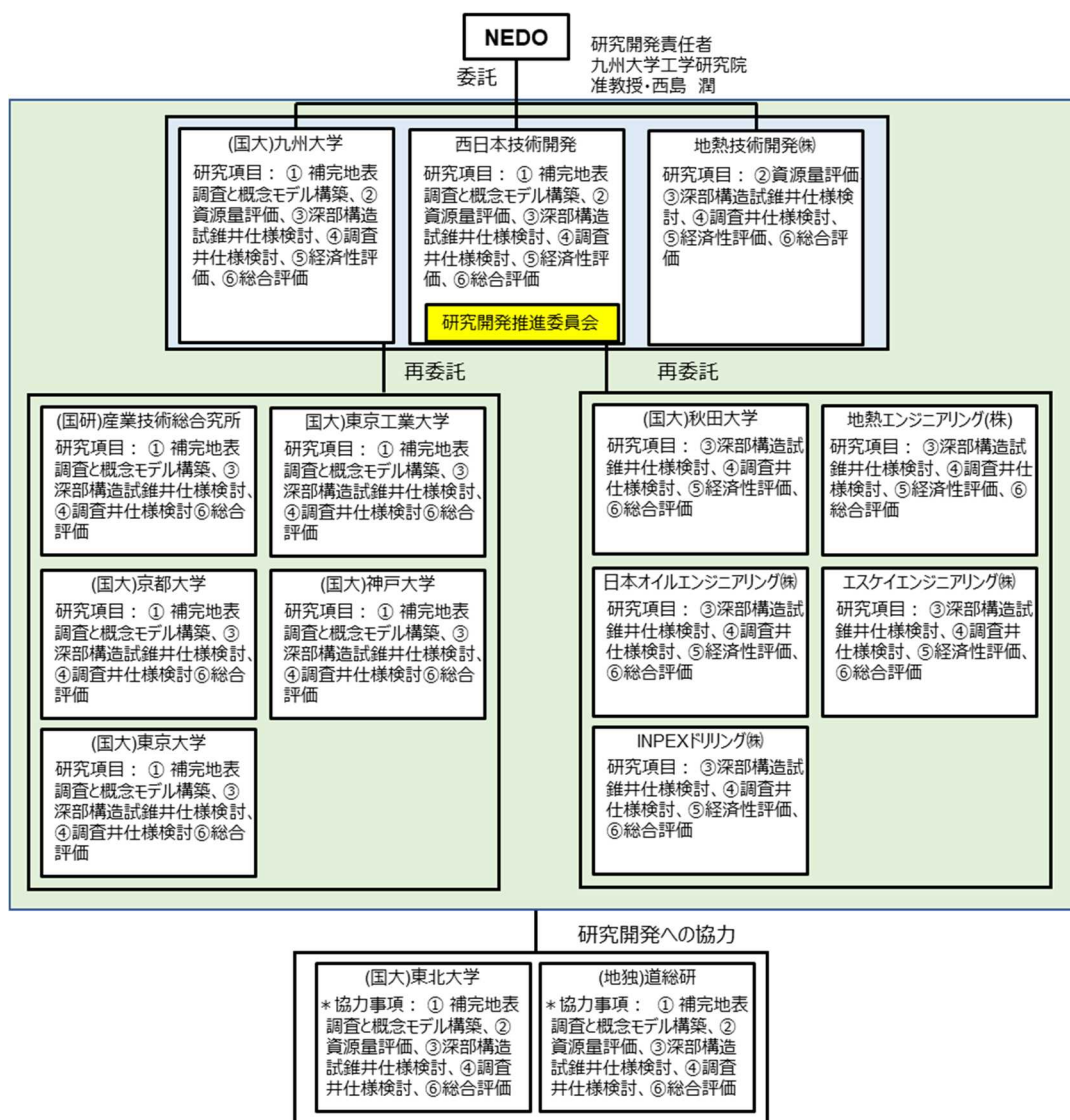


図 5-1 研究開発の実施体制

6. 事業の管理運営

これまで、4回の研究開発推進委員会、6回の全体会議および各項目・研究テーマ毎に定期・不定期のミーティングを実施している。

表 6-1 推進委員会および有識者

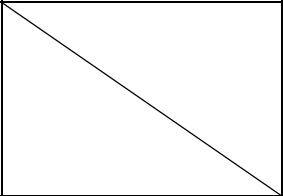
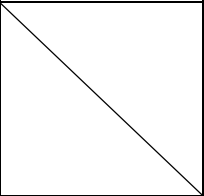
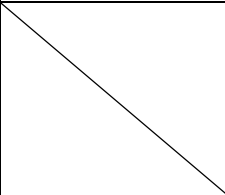
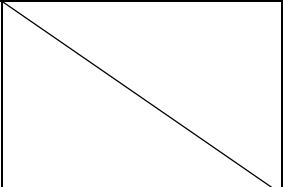
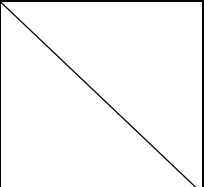
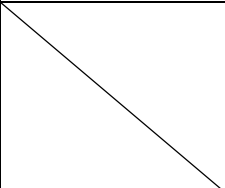
氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
田口 幸洋	福岡大学・研究特任教授	技術推進委員会 委員長
安達 正敏	地熱資源コンサルタント・日本地熱協会顧問	技術推進委員会 委員
土屋 範芳	東北大学・教授	技術推進委員会 委員
手塚 和彦	石油資源開発(株)技術本部・技術本部長（執行役員）	技術推進委員会 委員
田村 慎	北海道立総合研究機構・主査	有識者・超臨界地熱システムに関する助言・指導
岡 大輔	北海道立総合研究機構・主査	有識者・九重地域の地下構造に関する助言・指導
茂木 透	名古屋大学・特任教授	有識者・超臨界地熱システムに関する助言・指導
太田 優介	名古屋大学・特任助教	有識者・超臨界地熱システムに関する助言・指導
石須 慶一	兵庫県立大学・助教	有識者・超臨界地熱システムに関する助言・指導
宮城 磯治	産業技術総合研究所・主任研究員	有識者・超臨界地熱システムに関する助言・指導

7. 研究開発成果について

本研究開発の成果は下表のとおりである。設定した中間目標に対して、項目Ⅲは達成できる見込み、項目Ⅳは一部未達の見込みである。

表 7-1 中間目標に対する達成度（見込み）

研究開発項目	中間目標 (2024年3月)	成果 (2023年3月まで)	達成度 (見込み)	達成の根拠 ／解決方針
I：補完地表調査と概念モデル構築	<ul style="list-style-type: none"> 補完地表調査などの結果を追加情報として、既存の地熱系概念モデルを改善する。資源量評価に必要な超臨界地熱システムの概念モデルを構築する。 資源量評価シミュレーションに必要な物性値の決定法を確定する。 	<ul style="list-style-type: none"> 補完地表調査を行い、新しい知見を取り込んだ超臨界地熱システム概念モデルの初版を構築した 岩石物理モデルに基づく、貯留層相当領域の浸透率推定を評価する手法の検討を開始した。 	○ 2024年3月に達成見込み	<ul style="list-style-type: none"> 地表調査、文献調査の結果を追加し、検討を加えることで概念モデルの改良を行う。 文献調査及び岩石実験によって浸透率と岩石物性のデータを収集し、これを基に、岩石物理モデルを構築する。
II：資源量評価	<ul style="list-style-type: none"> 九重地域の地熱系概念モデルを再現しうる数値モデルを複数比較検討し、必要な前提条件を提示する。 	<ul style="list-style-type: none"> 項目①より提供された概念モデルに基づいた初期数値モデルを構築し、自然状態シミュレーションを実施している（外注）。 	○ 2024年3月に達成見込み	<ul style="list-style-type: none"> 外注している自然状態シミュレーション結果を受領し（2023年3月）、数値モデルを確認する。

<p>Ⅲ：深部構造調査試験錐の検討</p>	<ul style="list-style-type: none"> 深部構造調査試験錐井の仕様、工程概要、ならびに本坑井を使用した調査・試験プランを提示する。 また、掘削・試験費用を算出する。 	<ul style="list-style-type: none"> 深部構造調査試験錐の掘削ターゲット位置、地上掘削位置、ケーシングプログラム、傾斜掘削計画、工程概略を提示した。 本坑井を使用した調査・試験プランを提示した。 掘削・試験費用を算出した。 	<p>○</p>	<ul style="list-style-type: none"> 2023年3月までにケーシングプログラム等の坑井仕様ならびに調査・試験プランを策定し、それぞれの概算費用を算出した。
<p>Ⅳ：超臨界地熱調査井仕様策定</p>	<ul style="list-style-type: none"> 調査井を用いた試験計画を策定する。 	<ul style="list-style-type: none"> 調査試験項目をリストアップし、調査井を用いた調査試験計画を立案した。 	<p>○ 2024年3月に達成見込み</p>	<ul style="list-style-type: none"> 試験計画を策定する／現在検討中である資源存在実証シナリオを考慮して試験計画を検討する。
<p>Ⅴ：経済性評価</p>	<ul style="list-style-type: none"> 2024年度に実施予定のため目標設定なし。 			
<p>Ⅵ：総合評価</p>	<ul style="list-style-type: none"> 2024年度に実施予定のため目標設定なし。 			

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

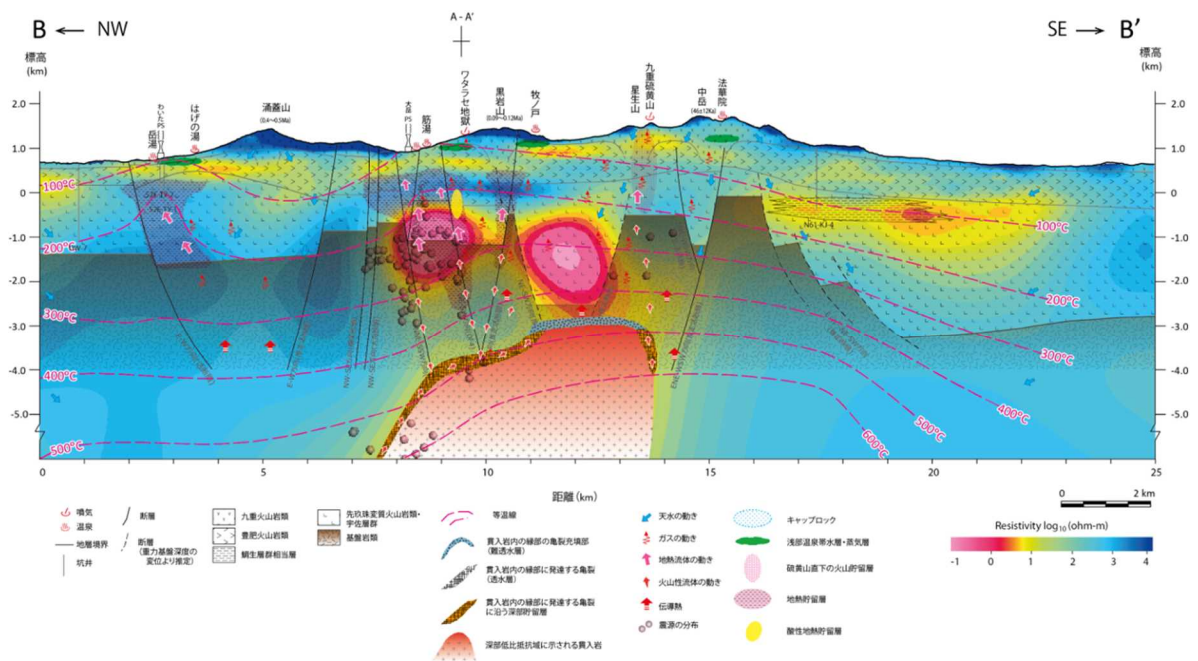



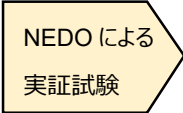
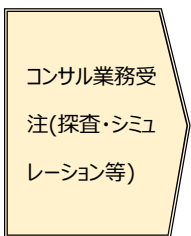
図1 九重地域の超臨界地熱系概念モデル (相澤他、2022 ; Rezkia et al., 2022)。

8. 実用化・事業化へ向けての見通しと取組みについて

超臨界地熱研究開発は、エネルギー・環境イノベーション戦略技術ロードマップ、グリーン成長戦略および第6次エネルギー基本計画に従って実施されると推定される。

2024年度以降にNEDO超臨界地熱関連事業として実施される予定の構造調査試錐掘削、調査井掘削等の事業に参画し、超臨界状態の地熱エネルギー利用に関する知見の蓄積を行う。

本事業で得た知見は、近隣浅部に存在する地熱貯留層に対するコンサルティング業務にも活用が可能であり、探査やシミュレーション等、適宜知見を活かし事業を行っていく。

項目	2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	2030年度～
調査井掘削による超臨界地熱コンセプトの確認、関連技術開発					
九重地域近隣の浅部貯留層に対するコンサルティング業務					

添付資料

●特許論文等リスト

【とりまとめ】

	2021年度	2022年度	合計
特許	0	0	0
論文	0	1	1
学会発表（口頭・ポスター）	0	3	3
プレスリリース	0	0	0
新聞・TV等掲載	0	0	0
受賞	0	0	0
その他	0	0	0

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	堤 彩紀& 石橋 純 一郎	西技・ 神戸大	地化学探査 —地熱資源の利用に向けた地球化学の応用—	地学雑誌, 131(6), 597-606	有	2022年12月

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Ishibashi, Ijiri, Kitamura & Nishijima,	Kobe U. and Kyushu U.	Gas geochemistry of geothermal fluids from the Hatchobaru geothermal field in Kyushu, Japan	The IAVCEI Scientific assembly 2023 (Rotorua, New Zeland,)	2023年2月
2	Rezkia, Tsuji, Ikeda, Kitamura, Matsumoto, Yamaura, Inagaki	U .of Tokyo, Kyushu U. and WJEC	Microseismic Monitoring for Supercritical Geothermal Fluid in Kuju Volcanoes	AGU Fall meeting 2022 (Chicago, USA)	2022年12 月

3	相澤・井ノ又・北村 圭 吾・澤山・大久保・安仁屋・ 松島・稲垣・齋藤・西島 潤	九大・京 大・気象 庁・西枝	Low-resistivity zone between Kuju Iwo- yama volcano and Otake-Hatchobaru	地球電磁気・地 球惑星圏学会 2022 年秋学会 (相模原)	2022 年 12 月
---	--	----------------------	---	---	----------------

個別テーマ (1) -5.

(1) 超臨界地熱資源技術開発

(1) -5. 光ファイバーDAS による超臨界地熱資源探査技術開発

委託先：一般財団法人エンジニアリング協会
一般財団法人ファインセラミックスセンター
国立大学法人京都大学

1. 背景と目的

地熱資源の効率的な開発は、地質調査、地化学調査、物理探査等の地熱探査により、地熱ポテンシャルをいかに正確に把握できるかが第一歩となる。地熱探査で有望と判断された場合に初めて調査井の掘削によりさらなる調査を実施するが、超臨界水の存在するであろう深さは 3km より深いと考えられるために、その掘削に莫大な費用が必要となる。したがって開発初期段階の地熱探査技術の精度向上は非常に重要な課題である。

しかしながら、現状の地質構造を知ろうとする物理探査においても深部で地熱流体が実際に存在しているかどうかについては確実性があまり高いとは言えない。また、地質構造中に地熱流体が存在しているかどうかについては電気探査や電磁探査 (MT 法等) が活用されるがいまだ成功率の高いピンポイントで地熱資源位置を特定するには今一步である。

一方、地熱貯留層を形成する地質構造の把握には主として地表からの地震探査も行われているが、地下構造の不均質性と地震波の減衰が妨げになりその精度等において地下地熱構造のイメージングに限界がある。特に超臨界地熱の開発は通常の掘削より深く、脆性帯～延性帯にかけ存在しそうな超臨界水状況が事前に把握できていないと、地熱掘削の成功率はさらに低くなる危険性があると言わざるを得ない。

これを解決するためには、深深部の地下構造、すなわち超臨界地熱場の理解を深めるために、従来考えられている調査手法に加えて、2018 年～2020 年に開発試験を進めてきた地震学的手法 (坑井内の分布型振動センサー (分布型音響センサー: DAS(Distributed Acoustic Sensor)) と人工地震または自然地震を用いた地熱貯留層探査技術) を軸とした革新的超臨界地熱場観測技術の完成度を高め、どのような地熱場にも応用できるように技術の普遍化を図り、超臨界水を含めて地熱開発を確実性の高いものにすることを目指す。図 1-1 に本研究の立ち位置を示す。

解決すべき技術課題は以下のとおりである。

- ・地熱フィールドが異なった場所への最適な調査法を確立する。
- ・調査法の予測をするための手法と解析の精度を高めるために理論波形の利用と全波形インバージョンの総合化を進める。
- ・超臨界条件下でも使用に耐え、また水素の侵入を防ぐような光ファイバーの被覆方法を開

発する。

・MT 法など他の調査法によって提案されてくる超臨界貯留層可能域が地震学的手法とどの程度の整合性をもっているかを検証する。

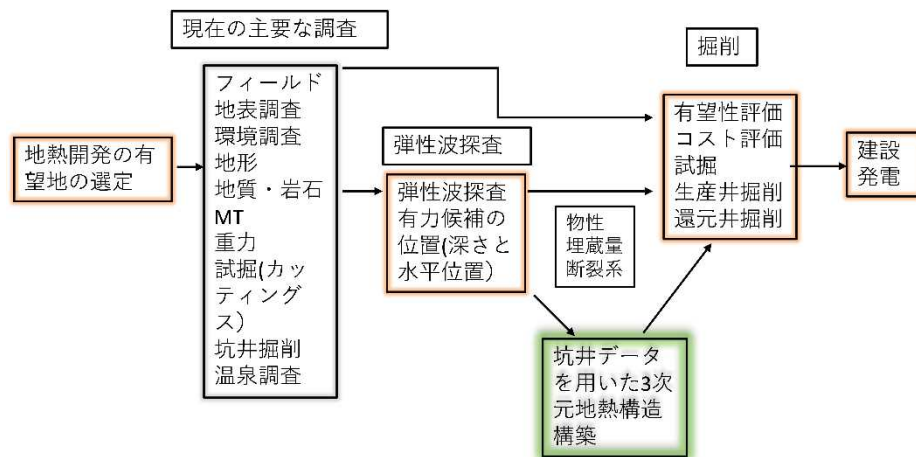


図 1-1 地熱開発における地震学的弾性波探査手法の占める役割。

2. 研究開発の概要

(1) 本事業で提案する観測手法

ここで提案する手法は、人工震源と坑井内の分布型地震計 (DAS) および地上地震計と全波形インバージョン手法、理論 DAS 波形計算法を組み合わせる地震波反射域とそれが示唆する地下地熱貯留層の探査をするものである。同時に観測された地震波形を説明できる物性モデル(縦波速度 V_p 、横波速度 V_s 、その比 V_p/V_s 、減衰係数(Q^{-1}) と密度異常を推定する。 $V_p/V_s \sim 2$ のゾーンは高い流体の包含域であることを示唆し、地熱貯留層の可能性が高い。特に、高温が想定される場合超臨界水の貯留域である可能性が高い。図 2-1 は本手法を用いた観測システム概念を示す。

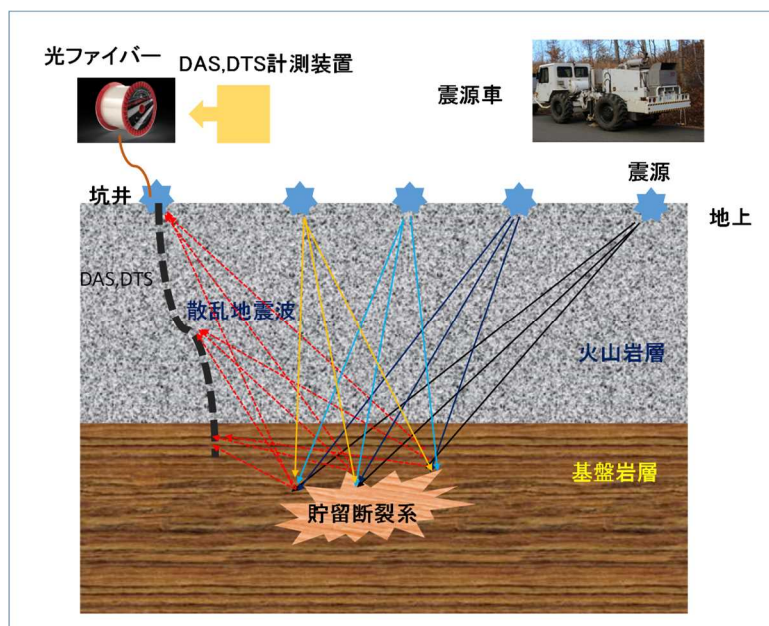


図2-1：超臨界地熱開発のための地熱坑内のDASと人工震源を用いた地震観測の概念

物性の推定には地震波反射強度と地震横波速度 (V_s) や密度の推定が重要である。横波の観測結果に加え、DAS 受振システムとしてヘリカルファイバーを用い坑井に斜め方向から入射する横波を主とした地震波の検出法を探る。

【坑内受信方法】

地震波の検知に坑内に挿入した光ファイバーによる DAS システムを用いる。DAS は光ファイバー中に入射したレーザー光が地震波により後方散乱する性質を利用し、高感度でかつ高密度の分布型地震計アレーとすることができる(図 2-2 参照)。

Hartog et al. (2013) の方法

Hartog et al (2013) The Optics of Distributed Vibration Sensing, *Second EAGE Workshop on Permanent Reservoir Monitoring 2013 – Current and Future Trends*, Stavanger, Norway, 2-5 July 2013, Th-01-04

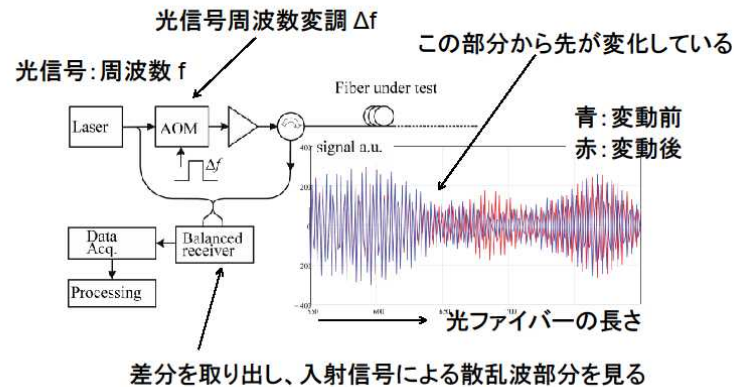


図 2-2 DAS(分布型音響センサ)システム の概念

【起振方法】

中型あるいは大型の人工地震波震源を用いる。同一地点での 8 時間(480 回に相当)の加振操作ならば過去の実績で運用可能であることがわかった。また、地面に加える震源の特性の補正を行いそれによる依存度を下げる。観測波形の重ね合わせ(スタッキング)による信号/雑音比の改善を 10 倍程度行う。

【解析方法】

断裂帯では地震波が散乱されたり減衰したりして十分な信号/雑音比をもつ探査が難しいが、長時間の重ね合わせと波形の時間差分とその逆時間伝搬法を用いることにより地下探査の精度を 10 倍以上改善することが可能になる。理論波形との比較、波形インバージョンも実施しデータを最適に説明できるモデルを構築する。

(2) 研究開発項目

本研究では、2020 年度までに行った試験的な研究段階から技術の完成度を高めどのような地熱フィールドにも適用可能な技術開発を行う。また、2023 年～2024 年度には超臨界水の掘削候補地として他の探査手段を利用して提案される地熱フィールドにおいて高精度な実証比較試験を行い候補地の有効性を地震学的側面から明らかにする。

① 既存地熱井を利用した高精度実証試験

地熱発電事業者、温泉事業者、地熱資源掘削事業者などの協力を得て、坑内光ファイバーDASにより計測可能な掘削坑を探し、高精度実証試験を行う。具体的には、地

熱発電所の用地内などを借用し高精度な実証試験を実施する。

② 解析・イメージング技術の開発

DAS 理論波形の計算、全波形インバージョンの手法、横波の利用による解析手法を確立する。

③ DAS 用光ファイバーの信頼性向上技術開発

DAS 用センシングシステムの構成要素（耐環境性被覆ファイバー、金属チューブ、補強ワイヤー等）の最適構成を検討し、超臨界水環境下において適用可能な DAS 用センシングシステム構造およびその有効性を示す。

④ 超臨界水候補地での高精度比較実証試験

他の探査手法を主として選定された超臨界水開発候補地に対し、その候補地での高精度の比較実証試験を行う。

なお、得られた成果について積極的に学会等での論文発表を行う。

(3) 項目別事業内容

① 既存地熱井を利用した高精度実証試験（担当：一般財団法人エンジニアリング協会）

地熱発電事業者、温泉事業者、地熱資源掘削事業者などの協力を得て、坑内光ファイバーDAS により計測可能な掘削坑を探し、高精度実証試験を行う。試験にあたっては既存の地熱データの豊富な試験地を選定し、観測データと既存地熱データを総合し精度の高い地熱モデルを検討する。

以下の進め方をする。

ア) 坑内光ファイバーDAS 計測の最適観測方法を事前評価する。

光ファイバー設置ができるような有効な坑井を見つけ、坑井内の DAS システムと震源位置を仮定し地下のイメージングができるかどうかの数値シミュレーションを行い最適な観測システムを決定する。DAS には測定器内部のノイズが極めて低い計測装置を用いる。

イ) 震源は中型または大型震源を用いる。同一地点の加振を 8 時間程度とし震源特性の除去後に 480 回に相当する受振波形の重ね合わせを行う。この重ね合わせで信号/雑音比(S/N 比)を 20dB(10 倍)改善できる。

ウ) DAS 測定において平均化区間(ゲージ長)を長くとることにより S/N の改善をはかる。しかし、長いゲージ長は空間分解能の劣化を伴うので最適なゲージ長を選択する。

エ) 取得データと既存地熱データを総合化し精度の高い地熱モデルを構築する。

2021 年度

北海道電力が所有する北海道茅部郡森町濁川にある森地熱発電所の F1 坑井を用い実証試験を行う。坑井の深度は 2,400m であり、周囲に多数の生産井戸、還元井が存在する。これらによる既存地熱データも豊富であり、観測データと既存地熱データを総合し精度の高い地熱モデルを

検討する。濁川は噴火口形状が明瞭でこの場所の地熱構造は特異であり、そこでの調査は意義深い。

さらに、秋田県澄川発電所周辺においても実証試験を行う。ここは浅部への貫入岩体、低比抵抗体、花崗岩基盤岩の既存貯留層の存在など調査の意義が高い。

2022 年度

出光興産が蒸気生産をおこなっている滝上発電所（大分県九重町）と東北自然エネルギー社が開発をおこなっている木地山地熱発電所建設予定地（秋田県湯沢市）にて実証試験を行う。

2023 年度

九州電力が地熱発電を行っている八丁原発電所周辺で実証試験を行う。

2021 年～2022 年度に行った調査結果をまとめ汎用的な調査法の暫定版マニュアルを作成する。

2024 年度（参考）

本項は実施しない。

② 解析・イメージング技術の開発（担当：一般財団法人エンジニアリング協会、国立大学法人京都大学）

DAS 理論波形の計算、全波形インバージョンの手法、横波の利用による解析手法を確立する。

調査法の予測をするための手法と解析の精度を高めるために理論波形の利用と全波形インバージョンの総合化を進める。解析精度を高めるために、数値モデルとの検証も併せて実施する。DAS で利用可能な理論歪波形を求める手法を開発する。DAS 理論波形はデータの平均化区間であるゲージ長の違いによる精度の変化も考慮に入れる。

横波の利用も必要であり、解析の面から検討する。またらせん状に巻いたヘリカルファイバーの利用を想定し横波の検出法と評価試験を行う。

2021 年度

森発電所、澄川発電所の調査に対する事前評価と取得データに対する理論波形を求める。

波形インバージョンも実施する。

DAS への応答を仮定し、縦波、横波に対する理論波形を求める。

2022 年度

調査に伴う事前評価、取得データに対する理論波形、波形インバージョンを実施する。

DAS への応答を仮定し、縦波、横波に対する理論波形を求める。ヘリカルファイバーの有効性を調べる。

2023 年度

超臨界地熱資源候補地での調査に伴う事前評価、取得データに対する理論波形の計算と波形インバージョンを実施する。物性を推定する。横波有効性を評価する。ヘリカルファイバーの有効性を調べる。解析手法の暫定版マニュアルを作成する。

2024 年度(参考)

超臨界地熱資源候補地での調査に伴う事前評価、取得データに対する理論波形の計算と波形インバージョンを実施する。物性を推定する。横波の有効性を評価する。解析手法をマニュアル化する。

③ DAS 用光ファイバーの信頼性向上技術開発 (担当：一般財団法人ファインセラミックセンター、一般社団法人エンジニアリング協会)

・超臨界条件下に光ファイバーを浸漬した状態で、光源波長 1000~1600nm に対する光透過損失をその場観察手法 (In-situ 評価) できる装置を開発する。そして、この装置を用いて光ファイバーの時間依存型損傷度を定量評価する技術を開発する。

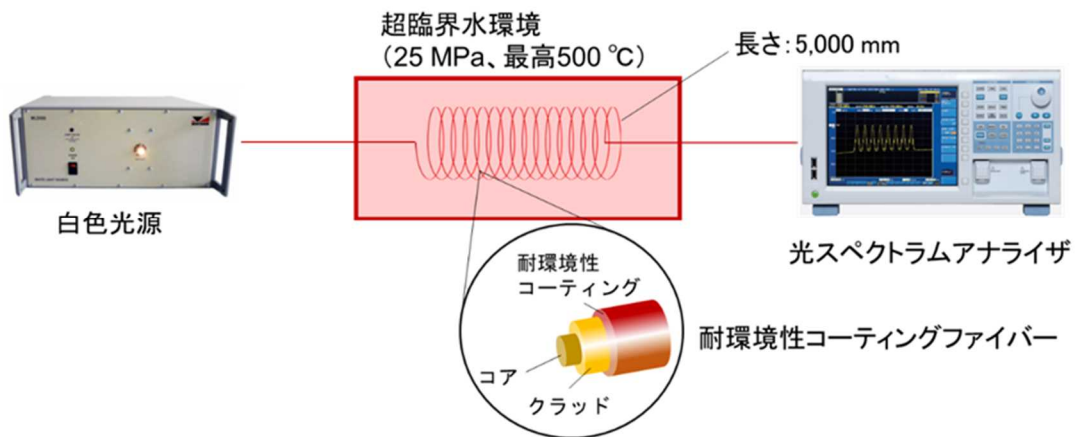


図 2-3 その場観察による光ファイバーの損傷の計測

- ・DAS 用センシングシステムとして想定される使用温度に比べ高い温度で評価することで、損傷度の加速劣化の程度の評価技術を確立する。また、その技術を基にファイバーの使用限界を予測する。
- ・DAS 用センシングシステムの構成要素(耐環境性被覆ファイバー、金属チューブ、補強ワイヤー等)の最適構成を検討し、超臨界水環境下において適用可能な DAS 用センシングシステム構造およびその有効性を示す。

2021 年度

超臨界条件下に光ファイバーを浸漬した状態で、光源波長 1000~1600nm に対する光透

過損失をその場観察 (In-situ 評価) できる評価装置を開発し、損傷度モニタリング技術を確立する。さらに、DAS 用センシングシステムの構成要素の最適構成について検討する。

2022 年度

超臨界水環境下評価装置を用いて光ファイバーの損傷度評価法を検討する。また、DAS 用センシングシステムの構成要素を用いて耐久性の評価法を検討する。

2023 年度

超臨界水環境下評価装置を用いて想定される使用温度に比べ高い温度で評価することで、損傷度の加速評価法を確立する。また、DAS 用センシング構成要素モデル等を用いた耐久性評価手法を確立する。

2024 年度(参考)

光ファイバーの使用限界を予測する。また、DAS 用光ファイバーシステムの耐久性を評価し、超臨界水環境下において適用可能であることを実証する。

④超臨界水候補地での高精度比較実証試験 (担当：一般財団法人エンジニアリング協会)

他の手法を主として選定された超臨界地熱資源候補地 (八幡平 (安比)、葛根田、湯沢南部、八丁原) に対し、その候補地での高精度の比較実証試験を行う。これにより地震学的手法による超臨界水の存在の可否に関する情報をまとめる。低比抵抗構造が特異な例えば安比や澄川など地震学的にどう特徴づけられるかは重要な意味を持っている。

超臨界水の存在が分かった場合、推定域の場所と物性を推定する。2024 年度に実施をする。

最終的には超臨界地熱資源候補地において超臨界地熱貯留層の位置をできる限り定量的に求め、必要に応じ地震学的な見地から複数の候補についてより確実性の高い候補地を挙げる。

2024 年度 (参考)

超臨界地熱資源候補地での調査に伴う事前評価、取得データに対する理論波形の計算と波形インバージョンを実施する。物性を推定する。

地熱発電導入拡大研究開発/超臨界地熱資源技術開発 (資源量評価) における超臨界地熱資源候補地に関する情報等を基に、同調査グループとも情報交換しながら超臨界水候補地での高精度比較実証試験を実施可能な場所を 2 か所検討する。

MT データ、重力データから推定された超臨界貯留域と地震学的に推定される貯留層の位置関係、物性関係を検討する。最適な超臨界貯留域について数値を入れた提案をする。

調査法のマニュアルを作成する。

各テーマにおける研究開発項目、開発目標及びその設定根拠を表 2-1 に示す。

表2-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	中間目標	最終目標	根拠
I：既存地熱井を利用した高精度実証試験	<ul style="list-style-type: none"> 2023年度で終了 	<ul style="list-style-type: none"> 1km程度の範囲で地熱貯留層を求める手法の開発 	<p>前フェーズ（2018年から2020年度）では2km程度の範囲で有望地熱貯留層域を確認できたので、1kmの範囲を確認できると考えた。</p>
II：解析・イメージング技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> DASデータから地下構造を推定する理論的手法の確立（推定誤差：深さ方向：300m、水平方向：1km） 	<ul style="list-style-type: none"> DASデータから地下構造を推定する理論的手法の確立（推定誤差：深さ方向200m、水平方向500m） 	<ul style="list-style-type: none"> 2018年～2020年度に得られた結果を検討し推定精度を予測した。 ヘリカルケーブルを用いることによりDASセンサが三成分の地震波ベクトル場の情報を取得可能であることを検証した。
III：DAS用光ファイバーの信頼性向上技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 光ファイバーの超臨界水環境下（目標400℃）での損傷度評価技術を確立するとともに、DAS用センシング構成要素モデル等を用いた耐久性評価手法を確立する。 	<ul style="list-style-type: none"> 超臨界水環境下（目標400℃）において適用可能なDAS用光ファイバーシステム構造の有効性を示す。 	<ul style="list-style-type: none"> 2022年度までに得られた現行の光ファイバーとDASシステムの損傷分析・解析より、損傷しやすい部位を構成要素モデルに選定するとともに、加速評価のための温度を決定した。
IV：超臨界水候補地での高精度比較実証試験	<ul style="list-style-type: none"> なし 	<ul style="list-style-type: none"> 1.5km程度の範囲で深さ4km程度の地震波反射面の存在の有無を明らかにする。 	<ul style="list-style-type: none"> 既存地熱井を利用した高精度実証試験から得られる結果をさらに深部適用する。

3. 事業スケジュール

本研究開発の期間は2021年6月15日より2024年3月20日であり、そのスケジュールの概要を図3-1に示す。

事業項目	2021年度				2022年度				2023年度				2024年度(参考)			
	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期
①既存地熱井を利用した高精度実証試験																
・観測解析シミュレーション	←	→			←	→										
・データ取得	←	→			←	→			←	→						
・解析	←															
②解析・イメージング技術の開発																
・RTM法評価	←															
・FWI開発評価	←															
・実データ適用			←													
・横波有効性評価									←							
③DAS用光ファイバーの信頼性向上技術開発																
・光ファイバー損傷度評価技術の確立	←															
・光ファイバーの使用限界予測									←							
・DAS用センシングシステムの開発	←															
④超臨界水候補地での高精度比較実証試験																
・実試験フィールド評価																
・実フィールド実証試験									←							

図3-1 研究開発のスケジュール

4. 予算

本研究開発の予算額を表 4-1 に示す。

表 4-1 研究開発の予算額 (単位：百万円)

	2021 年度	2022 年度	2023 年度	総額
研究開発費(ENAA)	81.0	80.3	53.7	215.0
研究開発費(JFCC)	35.7	18.0	17.0	70.7
研究開発費(京都大学)	4.8	4.0	4.0	12.8
合計	121.5	102.3	74.7	298.5

5. 研究開発の実施体制

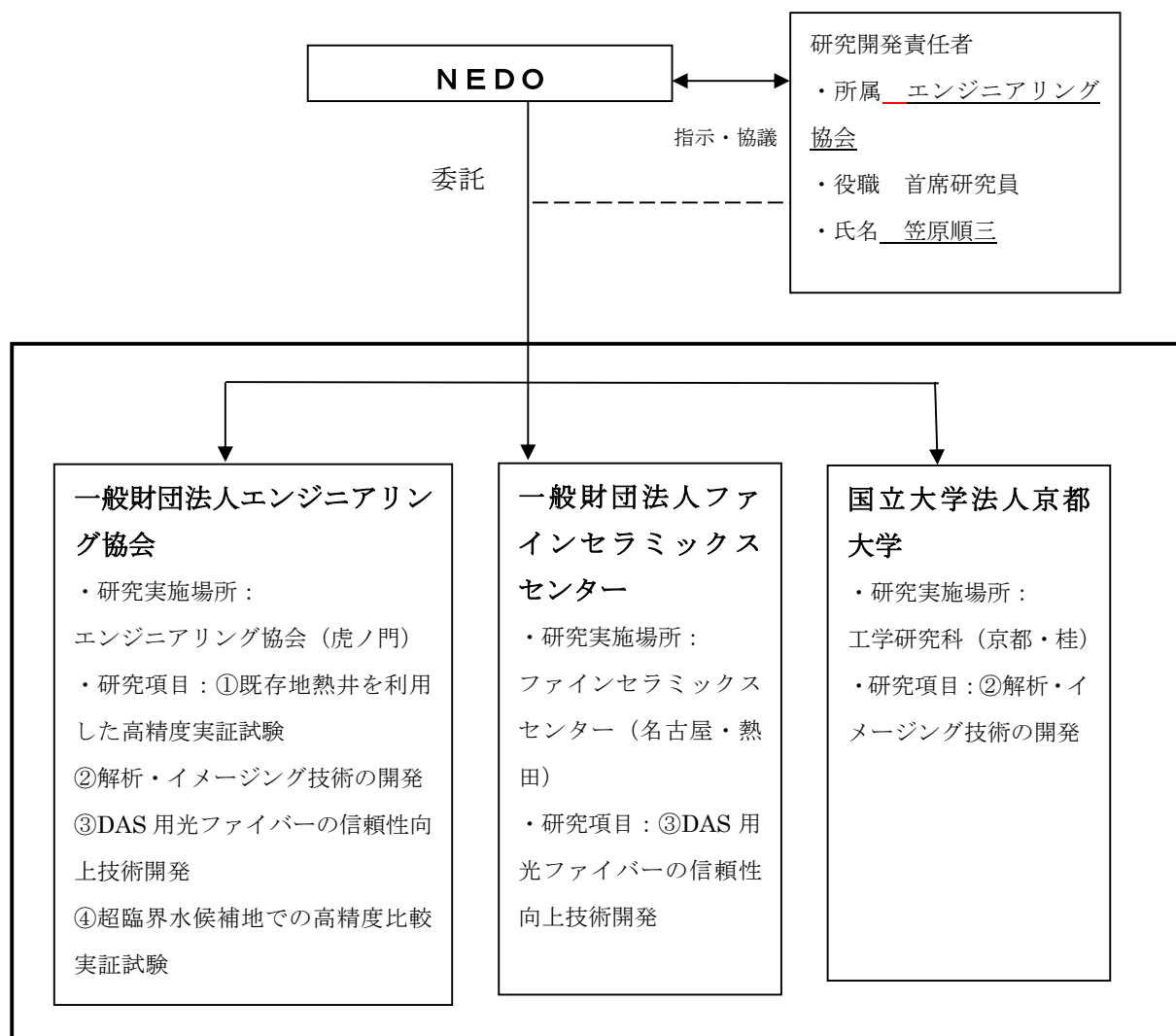


図 5-1 研究開発の実施体制

6. 事業の管理運営

2021年度、2022年度とも年度当初と最後（2021年7月、2022年1月、2022年4月、2023年1月）に有識者5名の方による有識者委員会を開催し、進捗状況を説明したうえでご意見を伺った。主な指導・助言について表6-1に示す。

表 6-1 有識者委員会

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
藤井直之	名古屋大学名誉教授	意欲的な成果が得られそうで期待している。(S H、SV波を出せる) アクロス的な震源が簡便におけるなら、さらに精度の高い解析ができるのではないかと。
村岡洋文	弘前大学特別顧問	DASは現状では掘削中にその下を探索できる唯一の方法ではないかと考える。地質屋としては縦型割れ目を以下に検出できるかが残された課題ではないかと思う。
相馬宣和	(国研) 産業技術総合研究所	VSPツールは有効な探索方法であるが、日本ではコスト面などからなかなかできないと思っていたが、(このDAS探索が) 大変有望であることが分かった。木地山では山側に震源が置けないということであったが、従来の反射法地震探索の送受信点を並べるのに比べれば有利であると考え。高傾斜断裂についてもDASで計測した方が送受信レイアウト的に感度は高いのではないかと想像する。ぜひ実用化し、一般化してほしい。
田籠功一	西日本技術開発(株) 顧問	「高温、高圧の水環境下における光ファイバーのスペクトル特性のその場観察」について、(このような実験データはほかにはないので) 様々な実験条件で行っていただき、どのくらいの経済性があるかを出していただくと、様々な分野で役立つと思う。
花野峰行	日本重化化学工業(株)技術顧問	蛇紋岩の分布についてもこのような方法で計測できないか。今後に期待する。

7. 研究開発成果について

本研究開発の成果は下表のとおりである。設定した中間目標に対して達成度を示した。

表 7-1 中間目標に対する達成度（見込み）

研究開発項目	中間目標 (2024年3月)	成果 (2023年3月まで)	達成度 (見込み)	達成の根拠 ／解決方針
I. 既存地熱井を利用した高精度実証試験	・ 1km程度の範囲で地熱貯留層を求める手法の開発	・ 森、澄川、滝上、木地山での実施により極めて本方法の有効性が確認できた。2023年予定の八丁原も追加の確認ができる。	◎ 100%を超える成果がえられた	前フェーズ（2018年から2020年度）および本フェーズに浅部実証試験で得られた結果をもとにDASデータを用いてインバージョン解析、イメージングした結果、貯留層の深さは目標の1kmを上回る精度で求まることが分かった。浅部実証試験井周辺の既存地盤データの整合性を比較した結果整合性を確認できつつある。
II: 解析・イメージング技術の開発	・ DASデータから地下構造を推定する理論的手法の確立（推定誤差：深さ方向：300m、水平方向：1km）	・ 得られた結果が発電所の保有するデータおよび既存解釈と整合性を持っている。光ファイバの入射地震波に対する応答を検出可能であることを確認した	○ 十分達成した	既知のデータとの整合性があることの確認ができた。
III: DAS用光ファイバの信頼性向上技術開発	・ 光ファイバの超臨界水環境下（目標400℃）での損傷度評価技術を確立するとともに、DAS用センシング構成要素モデル等を用いた耐久性評価手法を確立する。	・ ポリイミド被覆、金属被覆ファイバについて、超臨界水/亜臨界水中での損傷度評価を実施しそのメカニズムを明らかにした ・ センサーデバイス内の雰囲気が重要であることを明らかにした。	○ 2024年3月には達成見込みである	2022年度までの成果に加え、2023年度実施内容を基に評価手法を確立する見込みである。
IV: 超臨界水候補地での高精度比較実証試験	なし			

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

結果の概要

① 既存地熱井を利用した高精度実証試験

(1) 森において得られた成果

北海道電力森地熱発電所のある濁川地区において発電所所有の F1 地熱生産井内に 2,000 m 深度まで光ファイバーを設置し DTS による温度測定と DAS による地震波探査を行った。森地熱発電所の地熱坑井はカルデラとその周囲からの地熱により発電を行っている。震源として IVI 社製中型震源を用い、8 か所で加振を行った。加振地点は濁川のカルデラ内に位置する。同時に地表 3 成分地震計による記録も取得した。F1 坑井内の温度は最大 204°C であった。DAS によって記録した地震波形から反射波と直達波を分離したところ、幾つかの明瞭な断裂系の存在と反射波が見られた (図 7.2)。また 1060m 深度付近に顕著な P 波初動の食い違いが認められた。これはこの深さに断裂系があることを示唆している可能性がある。

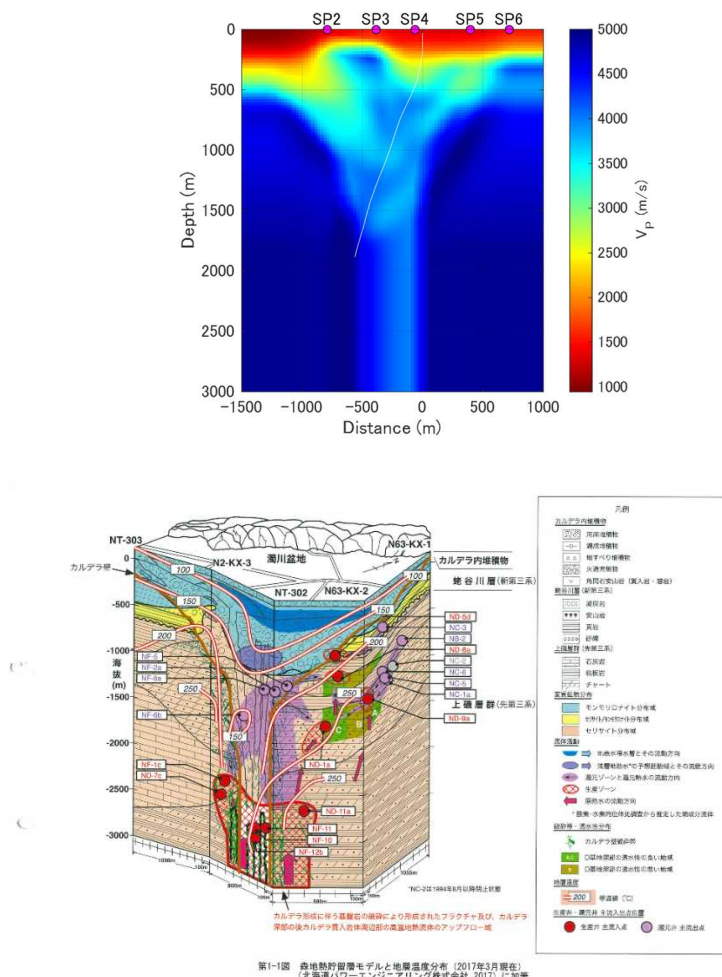


図 7.1 (上図) 森地域濁川盆地の東西断面の V_p 深さ分布 (白線は F1 地熱井)
(下図) 既存の地熱・地質モデル (Hanano et al., 2005)

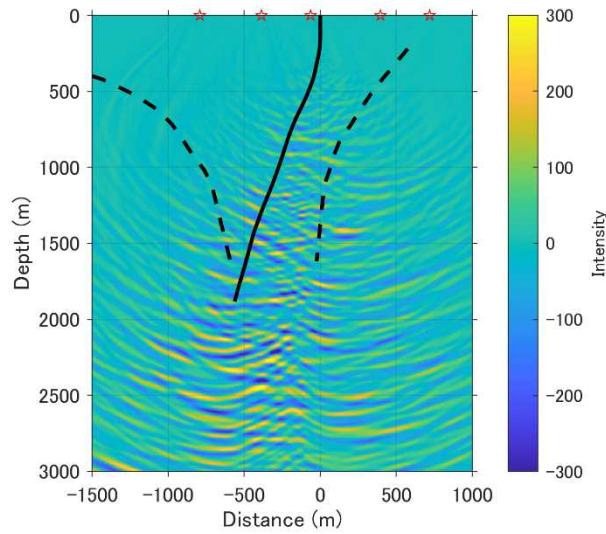


図 7.2 森地域濁川盆地の反射強度の深さ分布（黒線は F1 地熱井）

(2) 澄川において得られた成果

秋田県八幡平の澄川地熱発電所周辺において光ファイバーを用いた DTS, DAS 地熱探査を実施した。SE-4 地熱坑井内に深さ 1,200 m まで光ファイバーを設置し、坑井内の温度分布と地震波記録を得た。9 か所の震源を用い DAS と地表地震計の記録から V_p 構造を求めた。DAS 地震波記録を用い、深部からの反射波を取り出した。反射波のマイグレーションを実施した結果、生産域、還元域に相当する水平的位置かつ深さに反射強度の大きな場所がありこれらは断裂系に浸透した流体の存在を意味している可能性がある(図 7.3, 図 7.4)。

なお、物理探査学会発表で本成果に際し、最優秀発表賞を受賞したことを記す。

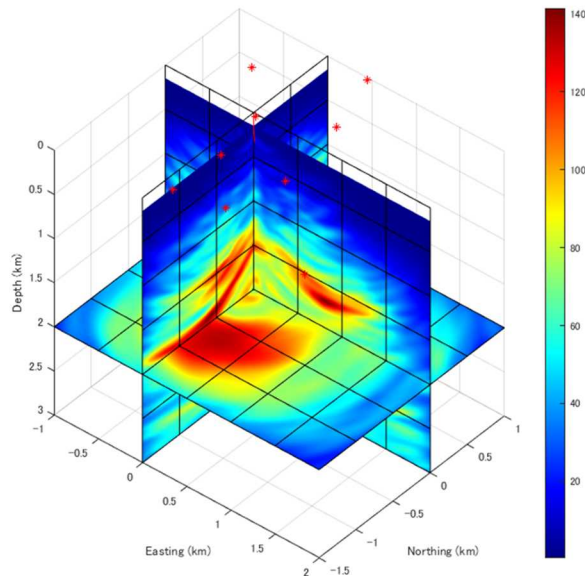


図 7.3 澄川の地震波反射強度の 3D 結果

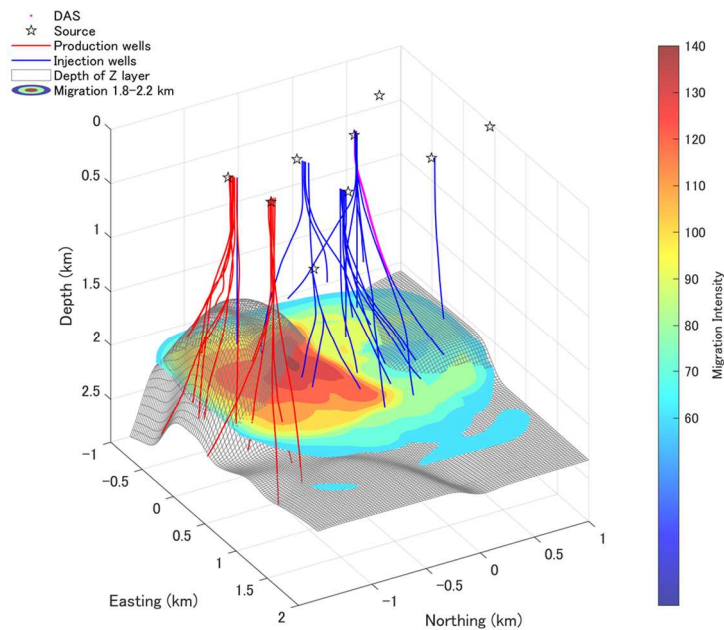


図 7.4 生産井（赤）と還元井（青線）と 1.8-2.2km 地震波の反射強度（カラー）と花崗閃緑岩の貫入（網掛け）

(3) 滝上において得られた成果

2022 年 5 月に大分県九重町の滝上蒸気生産井（TP-2）を用いて地震探査を行った。TP-2 坑井内の深さ 2000 m にまで光ファイバーを挿入した。滝上発電所周辺で 12 か所において起振機により地震波を発生させた。これによる DAS データと地上地震計波形記録を用い地震波速度構造を求めた。その結果、生産 1 号基地の付近を通るほぼ南北走向の垂直断層により東西で速度構造が異なる地下構造と解釈できることが分かった（図 7.5）。DAS の波形記録には坑口から深さ 1 km 付近に大きな波形変化を示す境界が見られる。反射波を抽出しマイグレーション処理を行った。深さ約 1 km の反射波の強度は非常に強く、また深さ 2-3 km にも比較的強い反射面が分布することがわかった（図 7.6）。1 km の反射が生じた部分は地層境界と一致していると考えられたが、それだけでは強度の説明が難しいため、そこには大量の流体が存在する可能性がある。重力の時間変化（西島ほか, 2000）もこれを見ているのかもしれない。

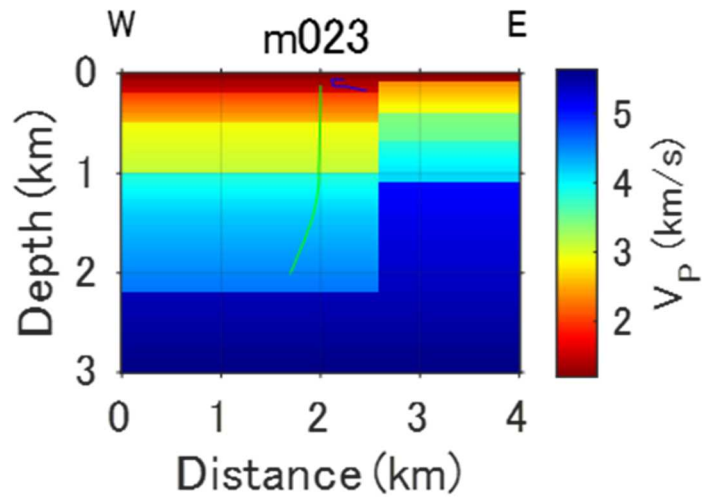


図 7.5 滝上の東西断面の V_p 速度構造と南北走行の垂直断層

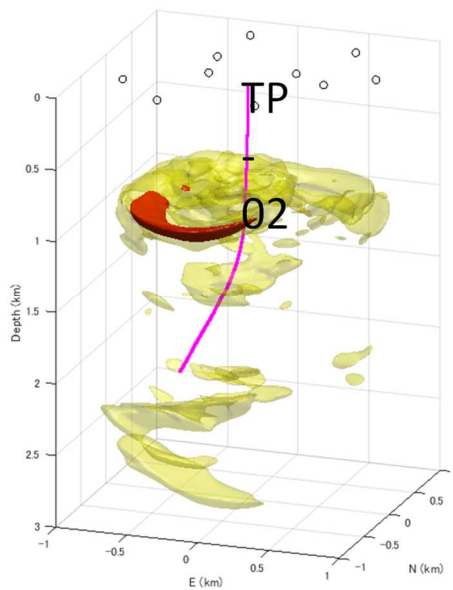


図 7.6 地震波反射強度の 3D 表示。赤～黄色になるにつれ反射強度が弱くなる。

(4) 木地山において得られた成果

秋田県木地山地熱フィールドにおいて KJ-5 坑内に設置した光ファイバーを用い DTS により温度プロファイと DAS による 12 か所の起震に対する地震波形記録を得た。また一か所で水平加振も行った。

KJ-5 の坑底付近の温度は 288°C であった。1,000 m 付近で温度勾配の変化が見られた。その深さは坑口での DAS 記録中 V_p 速度勾配の変化する皆瀬川層と泥湯層の境界にも相当する。測線 A-A' に沿った V_p の深さ分布を求めた。この結果、北側は南側に比べより遅い

V_p層が厚い（図 7.7）。深さ 1 km までの V_p の構造は地質構造(参考資料の Fig.7.4- 1 は概念的であるが、より詳細な地質構造は東北自然エネルギー社が保有)と調和的であると考えられる。また東北自然エネルギー（株）社の保有する坑井内の地質構造ともほぼ調和的である。水平加振により求めた S 波と P 波による V_p/V_s を求めたところ 1.75 であった。この値は通常の岩石の持 V_p/V_s と同じであることから、深さ 1,200 m までの深さでは SH の水平振動方位の断裂は著しくないと考えられる。

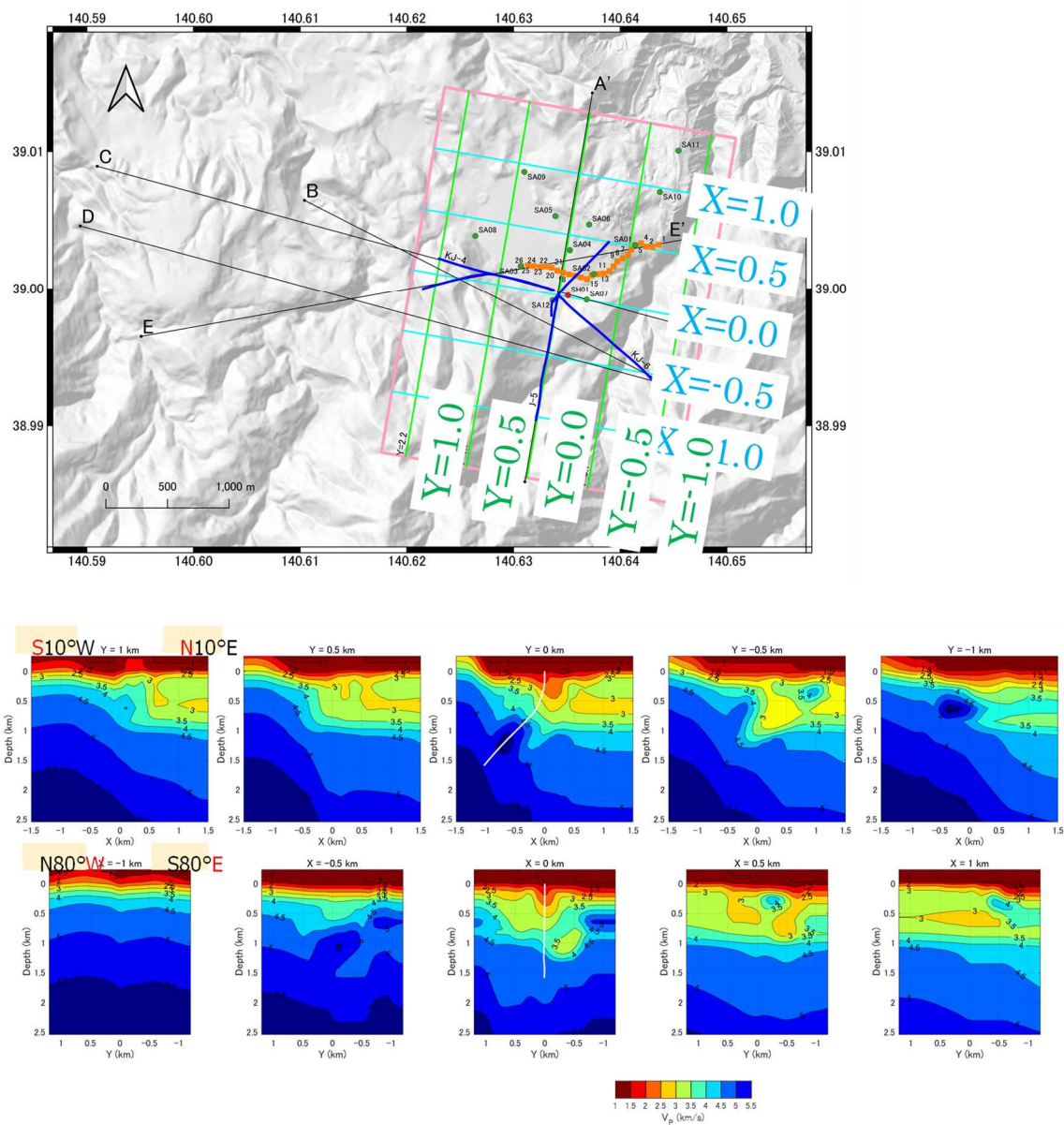


図 7.7（上図）V_p プロファイルの位置図。（下図）木地山 3D V_p 構造：上段は南北断面、下段は東西断面（白い線は KJ-5 地熱坑井）

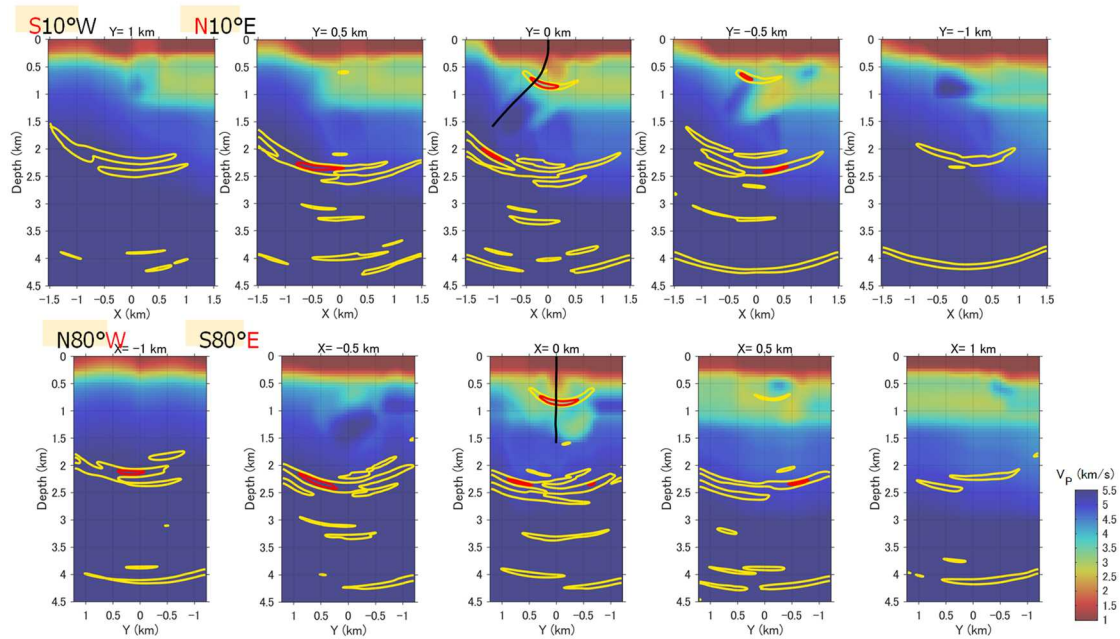


図 7.8 深さ 4.5km までの、木地山の 3DV_p 分布と地震波の反射強度。上段：南北断面、下段：東西断面。赤（強い）～黄色の反射強度。黒い線は KJ-5 地熱坑井。深さ 4 km にも地震波反射面があり、超臨界水貯留層かもしれない。

② 解析・イメージング技術の開発

(1) 木地山で得られた SH 波の解析

木地山において S 波の起震を行い DAS による S 波の観測を行った。その結果、 $V_p/V_s=1.75$ を得た。これから深さ 1.2 km までは水平方向の断裂は著しくないといえる。

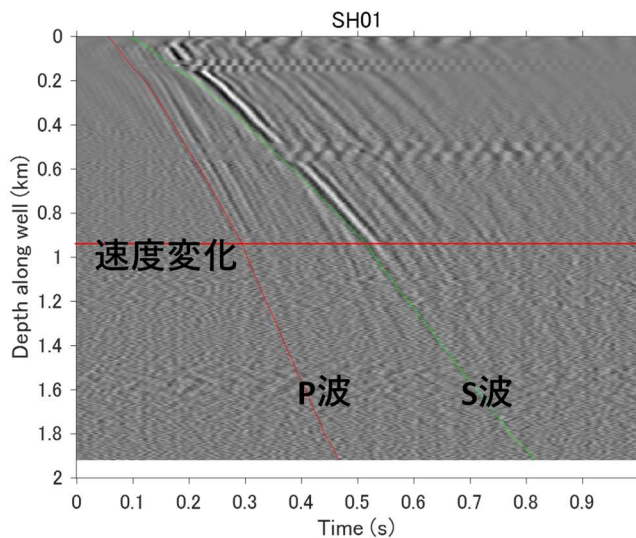


図 7.9 DAS による横波の観測と V_p/V_s

(2) ヘリカルファイバーの理論的考察

ファイバーの軸方向成分を計測する DAS のセンサの特性を利用し、三成分に軸方向を有する地震計を製作し、その応答を調査した。その結果をもとに、今後三成分での波動場記録が取得可能かを調査した。三成分に対する応答が、取得したデータに含まれていることを検証した。さらに、取得したデータについて、光ファイバ軸方向の疎密波的な応答だけでなく、方位を固定する方向に直交する振幅の大きな弦の横振動が含まれていることが明らかとなり、最終的に、横振動の発生を抑制可能な、いわゆるヘリカルケーブルを用いることが必要であるとの結論に至った。ヘリカルケーブルを用いた際、ファイバでどのような歪を記録するかについて、理論的な計算を行った。その結果、ケーブルセンサに入射する地震波の入射角、ケーブルおよび周辺媒質の P 波速度、S 波速度の推定が重要であることが判明した。入射角により、ケーブル状のファイバに時間差を持つ歪みが発生するため、この位相差を取り込む処理の必要性が結論づけられた。

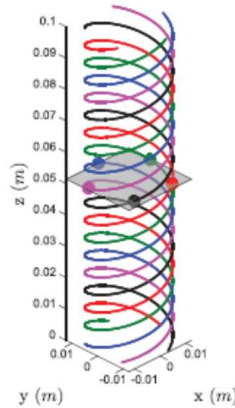


図 7.10 ヘリカルファイバーの概念

- 位相部分を省略したケーブルの外側における波動ポテンシャル

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \frac{i\alpha V}{\omega} \left[A_0 H_0^{(1)}(k_L r) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n (A_n \cos n\theta + A'_n \sin n\theta) H_n^{(1)}(k_L r) \right] \\ \xi &= \frac{\beta^2 V}{\omega^2} \left[B_0 H_0^{(1)}(k_S r) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n (B_n \cos n\theta + B'_n \sin n\theta) H_n^{(1)}(k_S r) \right] \\ \psi &= \frac{i\beta V}{\omega} \left[-C'_0 H_0^{(1)}(k_S r) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n (C_n \sin n\theta - C'_n \cos n\theta) H_n^{(1)}(k_S r) \right] \end{aligned} \right\}$$
- ケーブル内の波動ポテンシャル(φ_c, ξ_c, ψ_c)も同様な形の関数となる。
 係数 A_n, B_n, C_n を D_n, E_n, F_n で置換する。
 ダッシュ付の係数はSH波、ダッシュの付かない係数はP波およびSV波。

図 7.11 ヘリカルファイバーの理論的考察

③ DAS 用光ファイバーの信頼性向上技術開発に関する成果

超臨界水および亜臨界水条件下に光ファイバーを浸漬した状態で、光源波長 1000~1600

nm に対する光透過損失を連続的にその場評価可能な装置を開発した。また、本装置を用いて、耐環境性に優れる高分子（ポリイミド）や金属（Cu 等）を被覆した種々の光ファイバーに対して超臨界水および亜臨界水条件下における損傷挙動を評価・解析し、被覆種毎に異なる光ファイバーの損傷機構を明らかにした。例えば、C/ポリイミド被覆ファイバーの場合、図 7.12 示されるように、300℃において短時間で溶解するとともに、OH による光吸収が増大することを明らかにした。

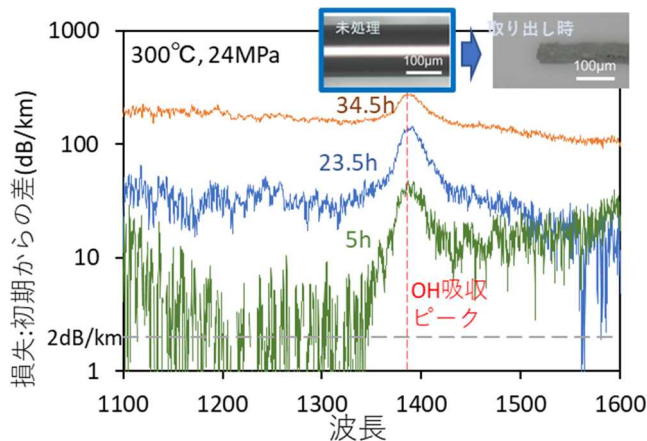


図 7.12 C/ポリイミド被覆ファイバーの光透過損失の経時変化

参考資料

7. 1 2021 年森における結果

7.1.1. 緒言

2021 年度から始まった新規 NEDO プロジェクトの最初の調査として北海道電力(株)が保有する森地熱発電所の F1 坑井を借用し光ファイバーを用いた。DAS 測定と DTS 計測を実施した。この DAS の計測には OptaSense 社の ODH-4 DAS インテロゲータを用いた。パルスレートは 20 kHz、16 m のゲージ長を用い、1 ms サンプリングによる DAS の記録を得た。DAS データは深さ 2,038 m まで、DTS による温度データは 2,140 m まで取得した。

震源として IVI 社中型震源を用いた。同一地点においてほぼ 8 時間の加振をした。加振点は 8 か所である。DAS の記録と地表地震計の記録を用い、震源特性とスパイク的ノイズの影響を除去したのち 480 回のスタッキングを実施し S/N の改善を試みた。



Fig 7.1.1 Location map of Nigorikawa (Mori) (after Hanano *et al.*, 2005).

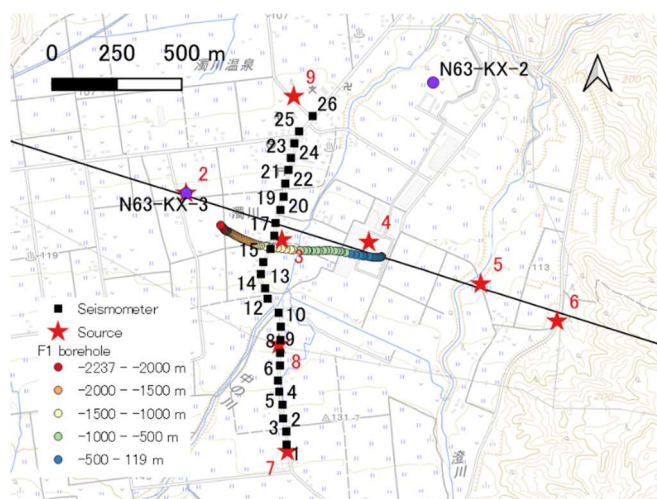


Fig. 7.1.2 Location map of the F1 geothermal well, seismic sources (stars) and surface seismometers (square boxes) in the Nigorikawa (Mori) Geothermal Field. The black line is the line for the velocity inversion. The red stars are source positions. The purple star is the N63-KX-3 well head. The DAS along the F1 borehole positions are shown by small circles. The solid squares are surface geophones.

7.1.2. 森地熱発電所所周辺の状況

森地熱発電所は北海道森町の濁川地区にある。新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) (1989, 1991, 1994)の調査を経て地質・地熱構造が調べられた。坑井内の地質などの解析から濁川がカルデラ構造を持っていることがわかってきた (黒墨、土井、2003、花野ほか、2005) (Fig. 7.1.3)。

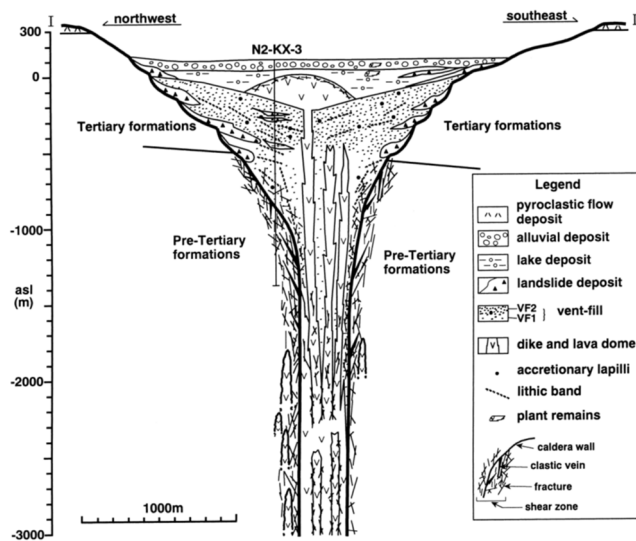


Fig. 7.1.3 Geological model of Nigorigawa area (after Hanano *et al.*, 2005). N2-KX3 borehole is shown in this figure.

NEDO 調査の際掘削された N2-KX-3 坑井 (Fig. 7.1.3) は地表付近にあるカルデラ堆積物を通り、深さ 900 m 付近でカルデラの外側の上礫層群(pre-tertiary)に達している。

7.1.3. DTS による温度

F1 坑井内に設置した光ファイバーを用いて DTS モードにより坑井内の温度測定を行った (Fig. 7.1.4 右)。左側にはケーシングプランを示した (Fig. 7.1.4 左)。1,100 m での温度は 204°C であった。



Fig. 7.1.4 (Right) Temperature measurements of F1 geothermal borehole measured by DTS mode. (Left) Casing plan of F1 borehole.

7.1.4. DAS データの解析

取得したデータを 480 回 (8 時間) のスタックをして S/N の向上を図った。Fig. 7.1. 5 は震源位置 SP2 に対する DAS 記録である。黄色の反射波も確認できるが、深さ 1,060 m 付近に初動の食い違いが見られる。このような特徴はほぼ全部の震源記録に対する DAS 記録上に見られる。

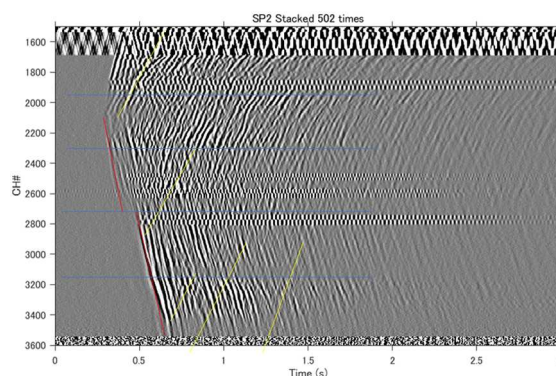


Fig.7.1. 5 DAS records of SP2 at the western side of F1 wellhead. First arrivals (red lines) show a travel time gap at 1,060 m depth. Several reflected phases are identified (yellow lines).

DAS 記録断面から反射波を取り出すために F-K フィルター処理を実施した (Fig. 7.1.6)。大沼地熱フィールドでの DAS 記録ほどは明瞭ではないが、坑井付近の断裂系に伴う反射波と 2,000 m より深部と思われる反射波を確認できる。

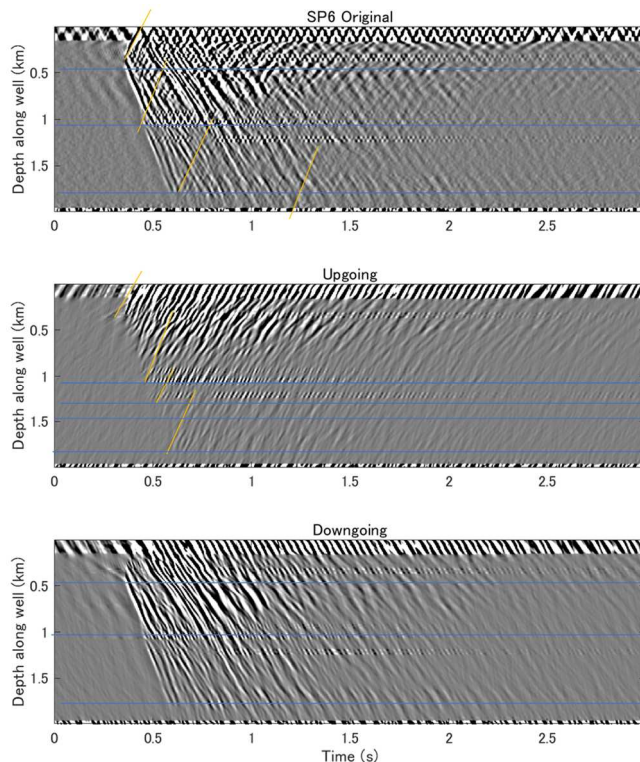


Fig. 7.1.6 DAS section after applying F-K filter. The top is an original record. The Middle is upgoing phases and the bottom is down-going phases.

7.1.5. 速度解析と理論 DAS 波形

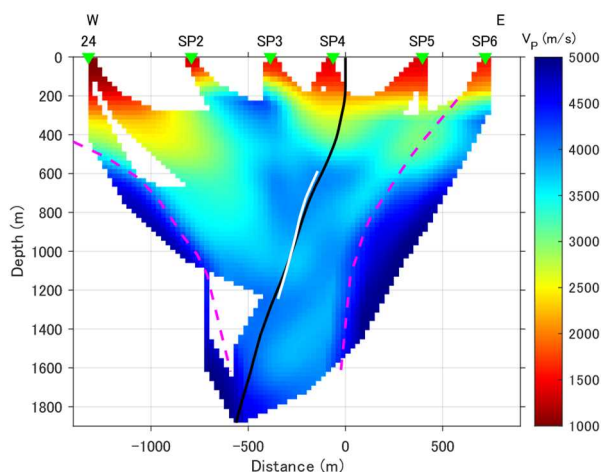


Fig. 7.1.7 Results of 2D V_p tomographic inversion for EW profile. 0 is the position of the wellhead. The F1 borehole is shown as the black line. The V_p values at deeper than 2 km are assumed. The white line shows F6. The green inverted triangles are source positions. “24” is the previous offset VSP position (unpublished data). The

caldera wall model (Kurosumi and Doi, 2003) is shown by pink dotted lines.

東西方向の V_p 分布、南北方向の V_p 分布を得るために 8 か所の DAS データ及び地表地震計の記録を用いて走時インバージョンを実施した。東西断面の V_p 分布を Fig. 7.1.7 に示した。深さ 400 m 付近までは遅いカルデラ堆積物がある。カルデラ内部の V_p は $<4\text{km/s}$ であるがその外側にある第三紀層はカルデラ内部より V_p が大きく 4.5km/s 程度である。

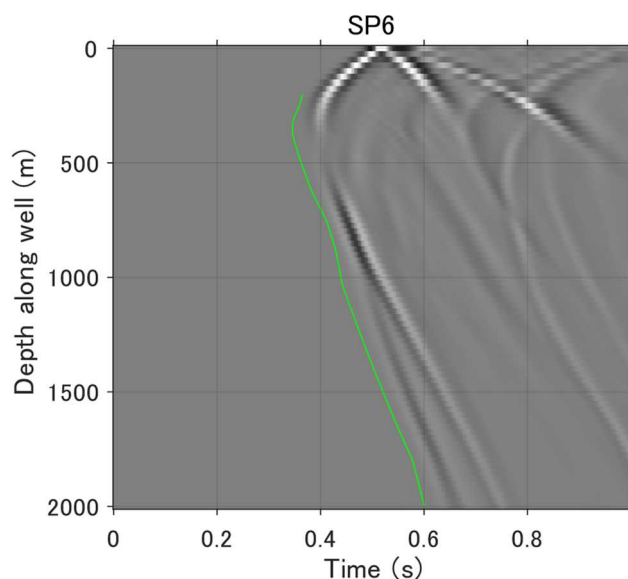


Fig. 7.1.8 Synthetic DAS records for the SP6 source. The travel time change at 1,060 m is faintly seen. The green line is P first arrival readings used for the travel time inversion.

このトモグラフィ速度の結果を用い理論 DAS 波形を計算した(Fig. 7.1.8)。読み取り走時はほぼ説明できるが DAS 記録に見られる波形の振幅とは差がある。その差は 1060m 付近に破碎帯を置くことにより説明できるかもしれない。

7.1.6. 議論

求めた理論波形では観測 DAS 波形に見られるような深さ 1,060 m での初動走時の食い違いを表すことができなかつた。1,060 m の場所は F1 の掘削時に見られた全量逸水の場所 (北電私信) に近いかもしれない。全量逸水したことはこの深さに逸水を生じるような断裂帯があることを示唆しているのかもしれない。

7.1.7. 要約

北海道電力森地熱発電所のある濁川地区において発電所所有の F1 地熱生産井内に 2,000 m 深度まで光ファイバーを設置し DTS による温度測定と DAS による地震波探

査を行った。森地熱発電所の地熱坑井はカルデラとその周囲からの地熱により発電を行っている。震源としてIVI社製中型震源を用い、8か所で加振を行った。加振地点は濁川のカルデラ内に位置する。同時に地表3成分地震計による記録も取得した。F1坑井内の温度は最大204°Cであった。DASによって記録した地震波形から反射波と直達波を分離したところ、幾つかの明瞭な断裂系の存在と反射波が見られた。また1,060m深度付近に顕著なP波初動の食い違いが認められた。これはこの深さに断裂系があることを示唆している可能性がある。

7.2. 澄川における結果

7.2.1 緒言

2021年10月、三菱マテリアル社が蒸気生産をしている秋田県澄川地熱発電所周辺での実証試験を行った。

7.2.2 秋田県八幡平澄川地熱フィールドの地質

2021年10月、秋田県大沼地熱フィールドの西に位置する澄川地熱発電所の地熱坑井を利用しDTS、DASによる地熱探査を実施した。

本調査においてはFig. 7.2.1の中央付近のSE-4還元井を用いた。本報告でその概要を報告する。

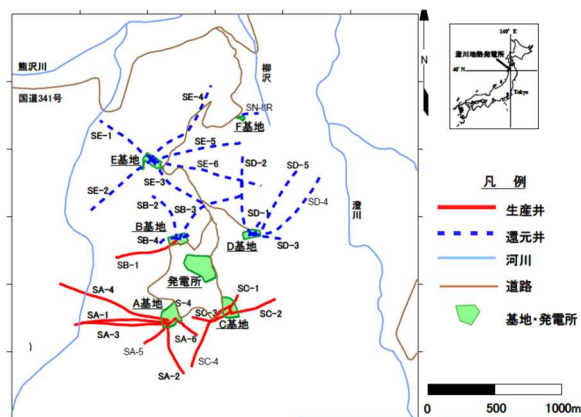


Fig. 7.2.1 Location map of production and injection wells at the Sumikawa Geothermal Power Plant (Ariki, 2011).

Fig. 7.2.2にこの付近の地質断面（坂井ほか，1993）を示した。表層付近には火山性堆積物がありその下部に湖沼堆積層がある。その下部に変質安山岩があり最も下部に新第三紀の花崗閃緑岩が貫入している。

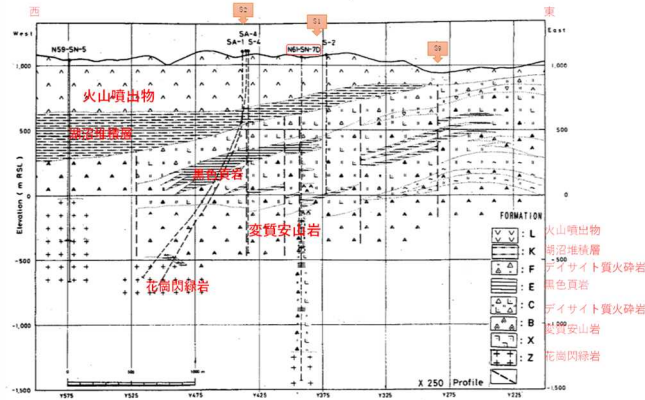


Fig. 7.2.2 Geological E-W cross-section of the Sumikawa geothermal field (from Sakai et al., 1993).

7.2.3 観測と一次処理

澄川地熱発電所敷地内の SE-4 還元井に光ファイバーを設置して観測を行った。発電所の敷地内とその周辺の 9 か所において中型震源を用いた加振を実施した。坑井位置と震源位置、地表地震計位置を Fig. 7.2.3 に示した。



Fig. 7.2.3 Location map of the Sumikawa study. Stars are seismic source locations. The SE-4 is a geothermal well. Triangles are surface geophones.

SE-4 坑井中に光ファイバーを 1,200 m の深さまで挿入し、1,200 m 深度までの温度記録と、1,100 m 深度までの DAS の振動波形記録を得た。DAS データは OpetaSense 社の ODH-4 インテロゲータによって取得した。レーザー光のピンレートは 20 kHz, それを間引き 1 ms サンプリングにした。ゲージ長は 16 m を用い、1 m 間隔のデータを取得した。地表には 26 台の 3 成分地震計を設置した。震源は 10–75Hz までを 30 秒間スイープした。一か所で 480 回の加振を行い、この 480 回分の DAS 記録および地表地震計記録を、各々ノイズ除去をしながらスタックし、震源波形との相関処理を行った。

7.2.4. データ解析と得られた結果

DTS モードにより深さ 1,200 m までの温度プロファイルを得た(Fig. 7.2.4). 温度は深さ 1,200 m で 168°C であった.

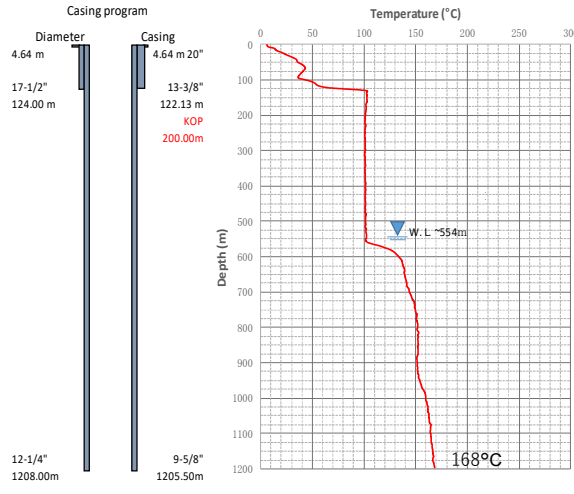


Fig. 7.2.4 (Left) Casing program of SE04. (Right) The temperature profile of the SE-4 well using the DTS mode.

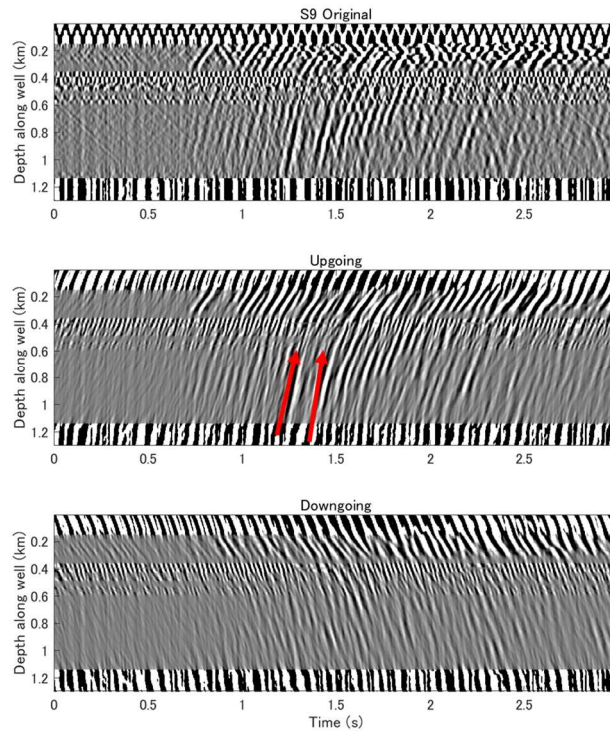


Fig. 7.2.5 (Top) Original DAS record section, (middle) upgoing phases separated from (a) and (bottom) down-going phases.

The vertical axis is depth in km, and the horizontal axis is travel time in seconds.

スタックおよび相関処理後の DAS の地震波形記録および地表地震計の記録を用い解析を行った。坑井内の DAS の地震波初動と地表地震計初動走時を用い P 波速度の 3 次元モデルを求めた。またこのモデルを用いた理論波形を計算して観測記録と比較した。

Fig. 7.2.5 は S9 での加振記録に対する DAS 元記録とそれに F-K フィルター処理をして上方に向かう波群，下方に向かう波群を分離した結果である。生産井に位置する深さ 1,500 m 付近に花崗閃緑岩に対応する反射波がみられる。

9 か所の DAS 記録中の反射波と速度構造を用いて 3D マイグレーションを行った (Fig. 7.2.6)。南側の深さ 2,000 m 周辺と北側の深さ 1,500 m 周辺に反射強度の強い部分が集まる傾向がみられた。

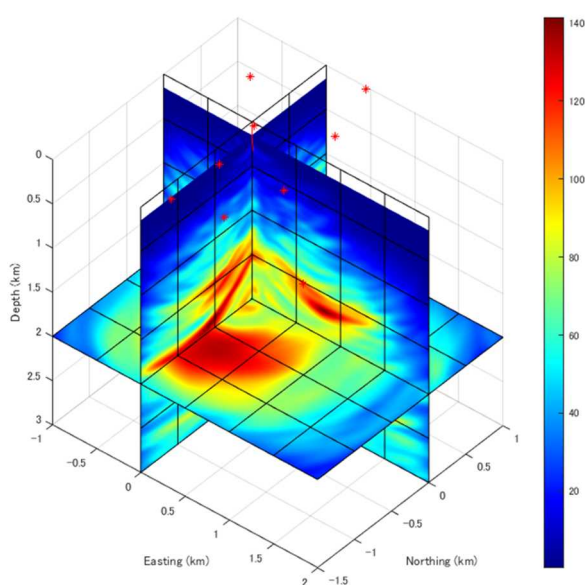


Fig. 7.2.6 Results of migration image using DAS reflection phases.

7.2.6 結論

秋田県八幡平の澄川地熱発電所周辺において光ファイバーを用いた DTS, DAS 地熱探査を実施した。SE-4 地熱坑井内に深さ 1,200 m まで光ファイバーを設置し、坑井内の温度分布と地震波記録を得た。9 か所の震源を用い DAS と地表地震計の記録から V_p 構造を求めた。DAS 地震波記録を用い、深部からの反射波を取り出した。反射波のマイグレーションを実施した結果、生産域、還元域に相当する水平的位置かつ深さに反射強度の大きな場所がありこれらは断裂系に浸透した流体の存在を意味している可能性がある。

謝辞

本調査は NEDO 「超臨界地熱発電技術研究開発／調査井掘削に資する革新的技術開発／革新的超臨界地熱場観測技術の研究開発」 (JPNP18008) として実施した。研究の

推進にあたり NEDO 加藤様はじめ皆様には多大な支援と助言をいただいたことに感謝を申し上げる。三菱マテリアル(株)には地熱フィールドの提供と坑井データを参考にさせていただいたことに感謝を表す。また有益なコメントをいただいた三菱マテリアル(株)の山岸様に感謝を申し上げる。また、調査にあたり、(株)WELMA 社、(株)地球科学総合研究所、阪神コンサルタント(株)、大和探査(株)にお世話になった。ここに感謝の意を申し上げる。

7.3. 滝上における結果

7.3.1 緒言

2022年5月に大分県九重町の滝上発電所周辺で実証試験を実施した DAS 及び DTS 測定に関するものである。

7.3.2 滝上地熱発電所の地熱情報

滝上地熱フィールドの地質、地熱構造、坑井地質、坑井内電気伝導度分布、重力異常は精査されている(星住他, 1988, 竹中他, 1995, 本松, 1999, NEDO, 1999)。およそ南北の走行を持つ断層(野稻断層あるいはそれと平行な南北走行の断層)があるとされている。ほぼそれと整合的な重力分布がある(星住ほか, 1988)。断層は滝上発電所と TP-2 坑井 (Fig. 7.3.1) の東側にあると考えられる (Fig. 7.3.1)。坑井データなどからその上下変位は 1,000 m に及ぶと考えられている(竹中ほか, 1995, Fig. 7.3.2)。断層の東側では阿地原層の厚さは薄く、滝上層がより浅い部分にあると考えられる。坑井から得られた地質データとも整合的である(出光興産社内資料)。



Fig. 7.3.1 NS fault suggested by gravity data (modified from Takenaka *et al.*, 1995). The yellow circle shows the TP-2 wellhead and the geothermal powerplant location. The geological section A-A and B-B is shown in Fig. 7.3.2.

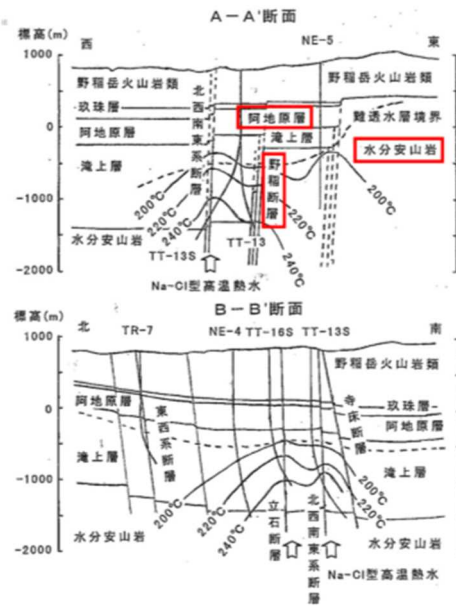


Fig. 7.3.2 E-W and N-S geological sections (in-house document of Idemitsu Kosan).

7.3.3 フィールド調査の概要

2022年5月に出光大分地熱(株)の蒸気生産井TP-2坑井を使用しDASをもちいた地震探査を実施した。Fig. 7.3.3はTP-2坑井と12か所の震源、並びに地表地震計の位置を示している。



Fig. 7.3.3 Location map of TP-2 geothermal well (red line), seismic sources (red stars) and surface geophones (yellow dots).

TP-2坑井内の2,000 m深度まで光ファイバーを挿入した。この光ファイバーと12か所の震源による加振を用いDTSによる温度とDASによる地震波記録を得た。DAS測定時のゲージ長は16 m, サンプルングは1 kHzであった。

7.3.4. 温度プロファイルの結果

坑井内に挿入した同じ光ファイバーを用いDTSモードにより温度の測定を行った

(Fig. 7.3.4). 深さ 1,000–1,400 m まで温度は緩やかに上昇する. 1,000 m より浅い部分の温度は低く, この領域は表層水の循環を示唆している. 1,000–1,400 m の地層はモンモリロナイト粘土鉱物によりシール層の役目を果たしている. 深さ 1,400 m ではモンモリロナイトは脱水し温度は 2,000 m 付近までほぼ同じである. 坑底付近の 2,000 m では 223°C であった.

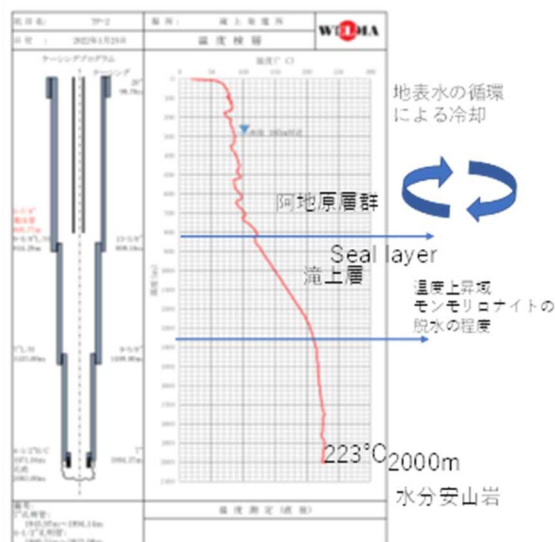
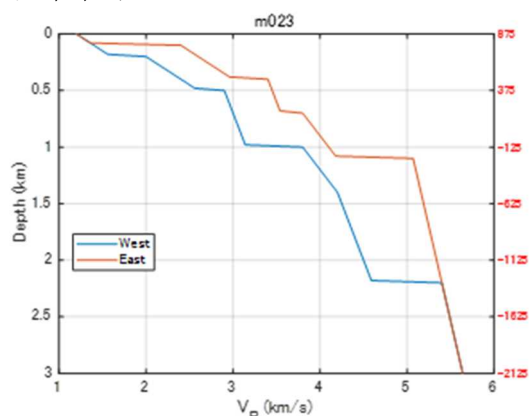


Fig. 7.3.4 Temperature profile obtained by DTS measurement.

7.3.5 速度構造.

坑井地質を参考にしながら速度構造モデルを作成し, それを用い理論波形を計算した. 南北走向の断層を境に東西の構造が異なる水平地層構造を用い DAS 観測データを説明できそうな速度構造モデルを得た (Fig. 7.3.5). 推定した断層の位置を Fig. 7.3.6 に示す. TP-2 の坑口の 600 m 東寄りに相当し, 生産 1 号基地付近を通る. 多くの滝上の地熱生産井は同断層の西側に位置する.



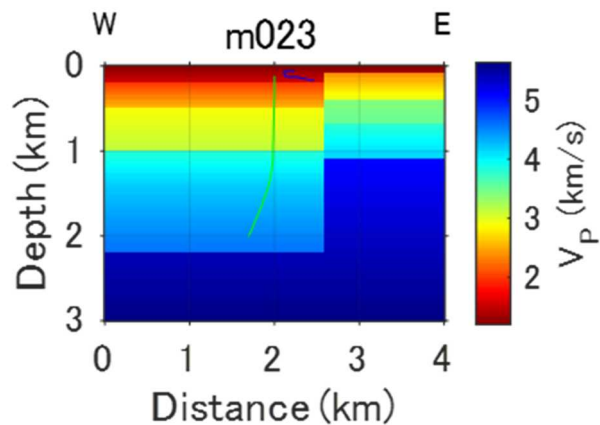


Fig. 7.3.5 V_p depth model (m023) matched the DAS data. The TP-2 well head locates at 2 km distance.

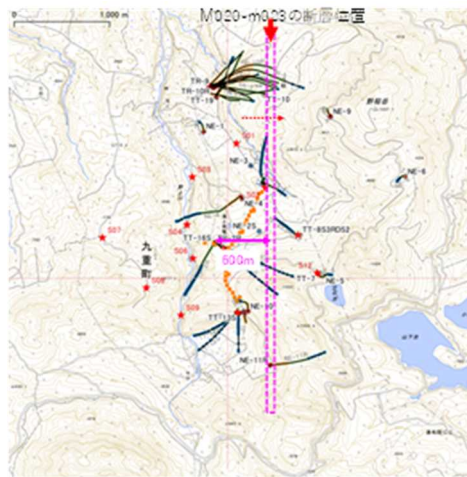


Fig. 7.3.6 Inferred location of the N-S fault 600 m from the TP-2 well head towards E. Red stars are seismic source locations. Lines show profiles of wells in the Takigami geothermal field.

7.3.6 F-K フィルタリングとマイグレーション結果

DAS 波形では初動 P 波のほかに深さ 1 km 付近で上方に向かう反射 P 波と下方に向かう S 波と考えられる地震波が明瞭に確認できた。また深部からの反射 P 波も多数認められる。深部の反射波をより明瞭にするために DAS の地震波形を F-K フィルタ処理し反射波を分離した。この反射波に対し本研究で求めた V_p 速度構造を用いマイグレーション処理を実施した。その結果、滝上フィールドの反射面の分布を求めることができた。その結果、測定域全体で深さ 1 km に強い反射面が存在し、特に TP-2 坑口の南西に最も強い反射波が分布することがわかった。また、深さ 2–3 km にも比較的強い反射面が分布する。

7.3.7 S-P 変換波

測定中にいくつかの自然地震も観測できた。そのうち滝上発電所の南西方向を震源とする地震波の記録では S 波が P 波に変換する sP と考えられる波群がみられた (Fig. 7.3.7)。S 波と sP 波の交差する深さから S-P 変換の生じた深さは 1 km と 2.5 km と考えられる。

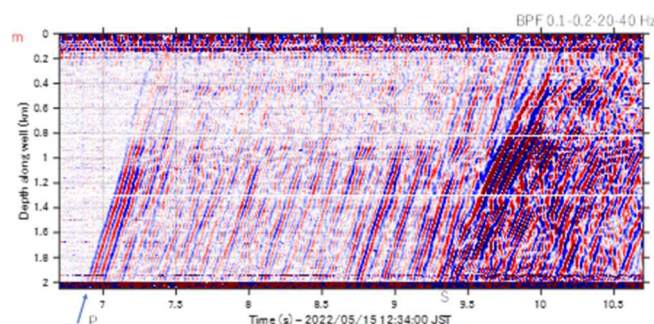


Fig. 7.3.7 A DAS record shows the sP phase concerning the M1.7 earthquake at Aso area 19 km away from the field.

7.3.8 議論とまとめ

2022年5月に大分県九重町の出光大分地熱(株)所有の滝上蒸気生産井(TP-2)を用いて地震探査を行った。TP-2坑井内の深さ2000mにまで光ファイバーを挿入した。滝上発電所周辺で12か所において起振機により地震波を発生させた。これによるDASデータと地上地震計波形記録を用い地震波速度構造を求めた。その結果、生産1号基地の付近を通るほぼ南北走向の垂直断層により東西で速度構造が異なる地下構造と解釈できることが分かった。DASの波形記録には坑口から深さ1km付近に大きな波形変化を示す境界が見られる。反射波を抽出しマイグレーション処理を行った。深さ約1kmの反射波の強度は非常に強く、また深さ2–3kmにも比較的強い反射面が分布することがわかった。1kmの反射が生じた部分は地層境界と一致していると考えられたが、それだけでは強度の説明が難しいため、そこには大量の流体が存在する可能性がある。重力の時間変化(西島ほか, 2000)もこれをみているのかもしれない。

謝辞

本研究はNEDO「地熱発電導入拡大研究開発・超臨界地熱資源技術開発・光ファイバーDASによる超臨界地熱資源探査技術開発」(JPNP21001)として実施した。謝意を表す。また、本調査にTP-2地熱坑井の使用と滝上地熱フィールドでの調査にご協力いただいた出光興産(株)、出光大分地熱(株)及びグループ各社に感謝を表す。調査にご協力をいただいた(株)WELMA、応用地質(株)、(株)阪神コンサルタンツに感謝する。

7.4. 木地山における結果

7.4.1 はじめに

秋田県湯沢市とその周辺では以前から地熱開発が行われており、上の岱地熱発電所、山葵沢地熱発電所が操業を開始している。少し離れているが、鬼首地熱発電所もある。また、木地山地区の地熱開発とともに蝸牛山地域の地熱開発も進んでいる。今回は、2022年8月～9月東北自然エネルギー(株)が開発を進めている秋田県木地山地区において地熱坑井内に挿入した光ファイバーシステムを用いた地熱地域の物理探査を実施した。

7.4.2 木地山での調査

今回調査した木地山地区の西側約 2.5 km には上の岱発電所がある。上の岱の地質構造は中・岡田(1992)、二子石(1999)にまとめられている。木地山は上の岱の地質構造の延長と思われるが、周辺の地質と比抵抗などの結果は佐藤他(2011)、岡部他(2012)にまとめられている。それらによれば、地表から深さ 500 m 程度までには砂岩・シルト・凝灰岩が分布し、その下にデイサイト質溶結凝灰岩があり、深さ 1000 m より深部には安山岩質火山礫凝灰岩が分布するとしている(Fig. 7.4.1)。

本調査では東北自然エネルギー(株)が所有する KJ-5 地熱坑井を用い、光ファイバーを坑底に近い深さ 2000m まで挿入した。坑井の北側では 12 か所の震源による起震を行った。また地表には地震計 26 台を設置した(Fig. 7.4.2)。

KJ-5 坑井に挿入された光ファイバーを用い温度と地震波振動を DTS および DAS を用いて計測した。EnviroVibe 中型震源を用い、30 秒間に 10–75 Hz の周波数スイープを行い、このスイープを 480 回以上繰り返したのち、得られた地震波形記録を重み付きでスタックした。MiniVib によって KJ-5 の伸長方向に振動する水平加振も行い SH 波を発生させた。

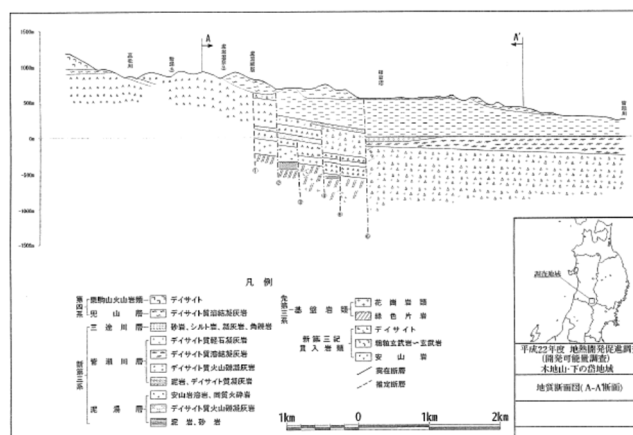


Fig. 7.4.1 Geological structure in Kijiyama area in the E-W section (Sato *et al.*, 2011).

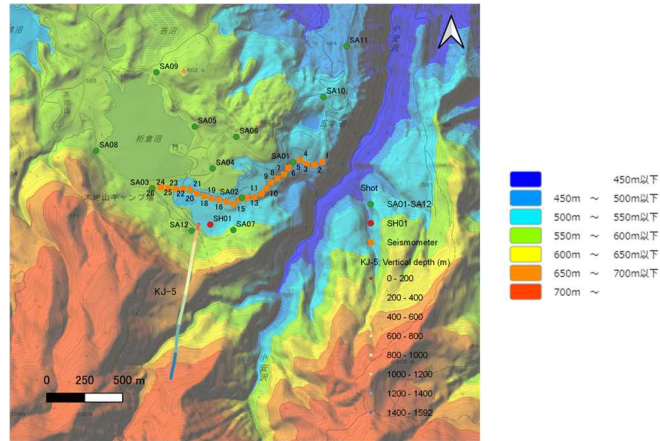


Fig. 7.4.2 Location map of the KJ-5 well (color bar), vertical seismic sources (green circles), horizontal seismic source (red circle), and surface seismometers (solid orange squares).

7.4.3 得られた結果

DTSにより KJ-5 坑内の温度プロファイルを求めた(Fig. 7.4.3). 坑底 2,000 m では 288°C と高温であった.

坑口の北側に位置する 12 か所で震源に対する KJ-5 坑内の光ファイバーによる DAS 記録と地表地震計による地震波形記録を得た. 坑口付近での起震(SP-2)の DAS 記録と地質との対比, DAS から得られた P 波平均速度, P 波区間速度を Fig. 7.4.4 に示した. この記録から深さ 1,000 m 付近に V_p 走時の折れ曲がりがあり, これは地層境界と考えられる. 皆瀬川層と泥湯層の境界とであろう.

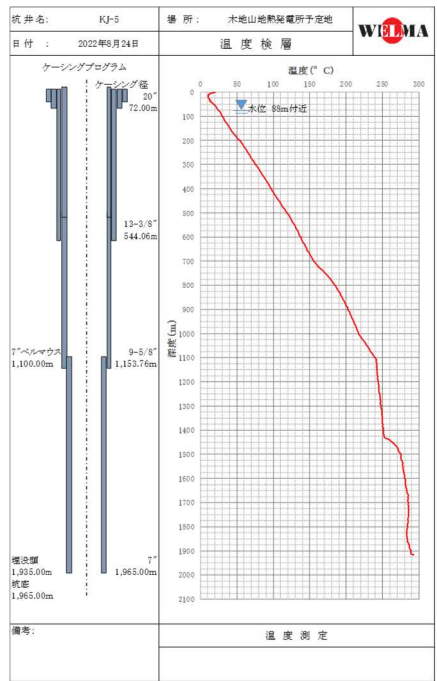


Fig. 7.4.3 Casing plan (left) and temperature profile (right) in the KJ-5 well.

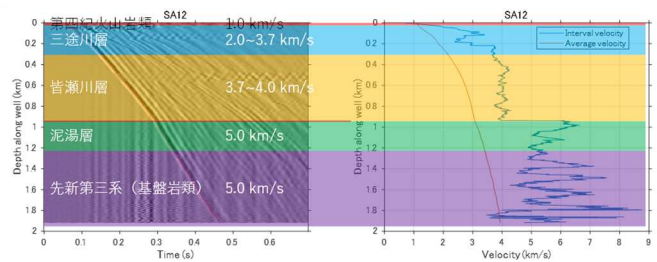


Fig. 7.4.4 (Left) DAS records of the SA12 at the wellhead (right) with geological formations. The vertical and horizontal axes are depth in km and elapsed time in seconds, respectively. The red line is P first arrivals. (Right) average P velocity (red line) and interval P velocity (blue line).

今回は水平加振機によって DAS による S 波を記録した。この振動による S 波は SH である。Fig. 7.4.5 はそれを示す。1,200 m まで S 波の到達がわかる。Vp と Vs の比 Vp/Vs は約 1.75 と求まった。

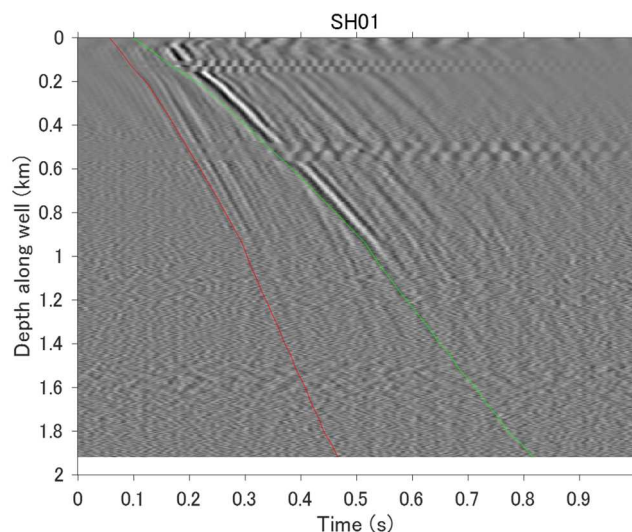


Fig. 7.4.5. DAS records were obtained by the MiniVib in horizontal vibration mode. The red and green lines are P and S first arrivals, respectively. The vertical and horizontal axes are depth in km and the elapsed time in seconds, respectively.

測線に沿った KJ-5 の DAS 記録中の P 波初動，および地上地震計の P 波初動記録を用い A-A'測線(Fig 7.4.6)に沿った V_p の深さ分布を P 波初動走時トモグラフィにより求めた。また 3D 地震反射波のイメージング結果を Fig. 7.4.7 に示した。深さ 4 km 付近の反射面は超臨界水かもしれない。

地表から深さ 1.3 km 付近までは V_p は 3.5 km/s~4.0 km/s である。VP~3.5 km/s 層は北側で厚い。

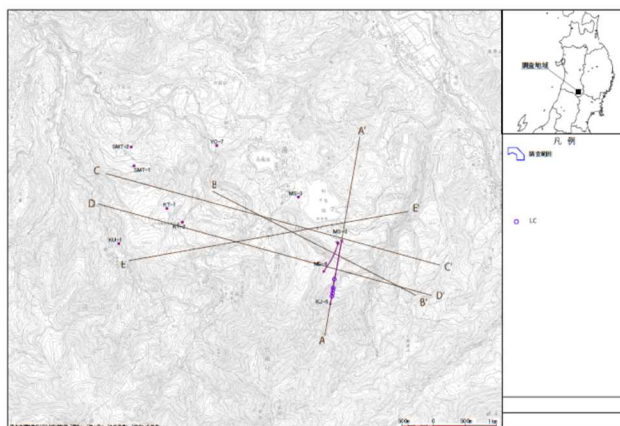


Fig. 7.4.6. The A-A' line for the V profile. The location of KJ-5 and KJ-6 wells are also shown. Other lines (B-B', C-C', D-D', and E-E') are the location of geological sections owned by the internal database of (TOUSEC) Tohoku Renewable Energy Co.

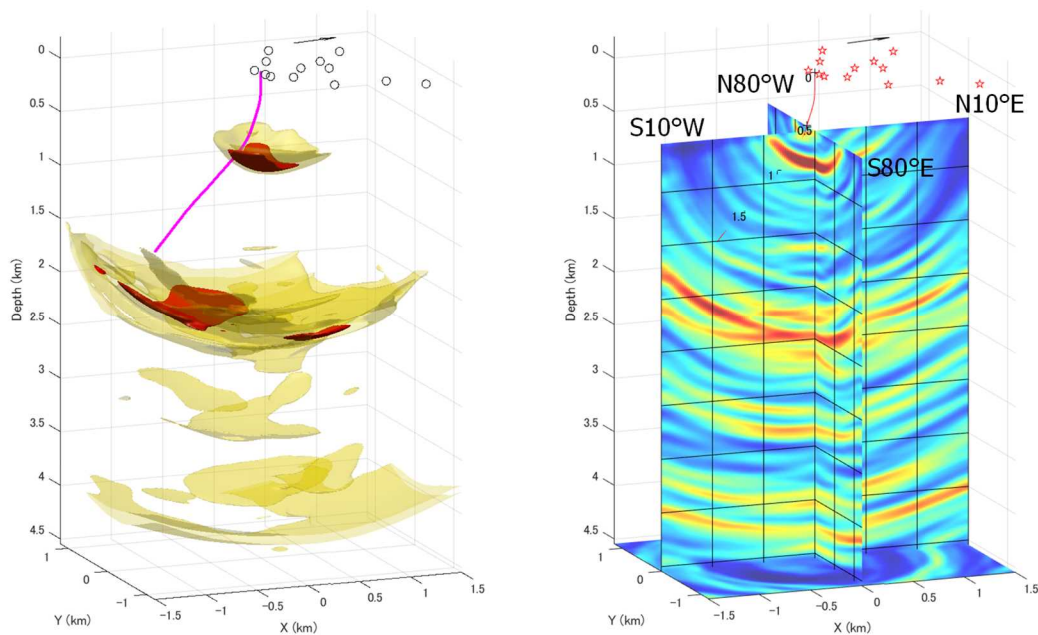


Fig. 7.4.7. (left) 3D seismic reflection image. (right) Seismic reflection image in two cross sections: N10°E-S10°E and N80°W-S80°E.

7.4.4 議論と結論

秋田県木地山地熱フィールドにおいて KJ-5 坑内に設置した光ファイバーを用い DTS による温度プロファイルと DAS による 12 か所の起震に対する地震波形記録を得た。また一か所で水平加振も行った。

KJ-5 の坑底付近の温度は 288°C であった。1,000 m 付近で温度勾配の変化が見られた。その深さは坑口での起震に対する DAS 記録中で V_p 速度勾配の変化する皆瀬川層と泥湯層の境界にも相当する。

KJ-5 の坑跡を含む断面 A-A' に沿った V_p の深さ分布を求めた。この結果、北側は南側にくらべより遅い V_p (3 km/s 程度) を持つ層が厚い。深さ 1 km までの V_p の構造は地質構造 (Fig. 7.4.1) と調和的であると考えられる。また東北自然エネルギー(株)の保有する抗井内の地質構造ともほぼ調和的である。

水平加振により求めた S 波と P 波による V_p/V_s を求めたところ 1.75 であった。この値は通常の岩石の持 V_p/V_s と同じであることから、深さ 1,200 m までの深さでは SH の水平振動方位の断裂は著しくないと考えられる。

謝辞

本研究は NEDO「地熱発電導入拡大研究開発・超臨界地熱資源技術開発・光ファイバー DAS による超臨界地熱資源探査技術開発」(JPNP21001)として実施した。謝意を表す。また、本調査に KJ-5 地熱坑井の使用および木地山地熱フィールドでの調査にご協力いただいた東北自然エネルギー(株)に感謝を表す。調査にご協力をいただいた(株)WELMA, (株)阪神コンサルタンツに感謝する。

7.5 DAS 用光ファイバーの信頼性向上技術開発に関する成果

Fig. 7.5.1 に示される超臨界水腐食炉を用いて、種々の環境下における被覆光ファイバーの光透過スペクトルを連続的に計測し、その劣化挙動を評価した。

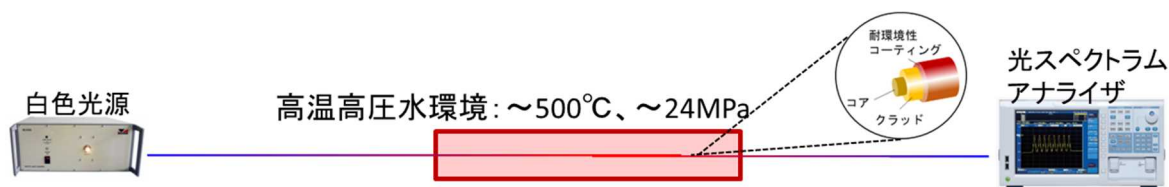


Fig. 7.5.1 開発した超臨界水腐食炉

Fig. 7.5.2 に C/ポリイミド被覆ファイバーを 300°C、24MPa の亜臨界水中で処理した時の光透過損失の変化を示す。また、C/ポリイミド被覆ファイバーの初期外観と取り出し後の外観の光学顕微鏡写真を合わせて示す。これらの結果からその劣化メカニズムとして、(i)ポリイミド被覆の溶解、(ii)光ファイバーの溶解とファイバー内部への水素侵入、の順に劣化が進行することが示された。

また、C/Cu 被覆ファイバーを 500°C、24MPa の超臨界水中で処理し、光透過損失の増大と、Cu 表面における酸化被膜の形成を観察した (Fig. 7.5.3)。C/Cu 被覆ファイバーの場合には、(i)Cu 層の酸化に伴う多孔質酸化層の形成と、(ii)Cu 層を介したファイバー内部への水素侵入、(iii)Cu 層貫通き裂の形成と水侵入、(iv)ファイバーの溶解とファイバー内部へのさらなる水素侵入、の順に劣化が進行することが示された。

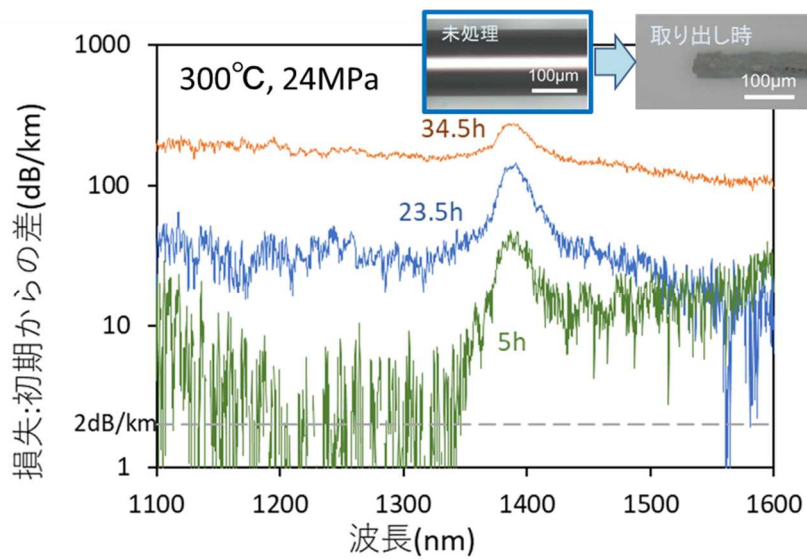


Fig. 7.5.2 C/ポリイミド被覆ファイバーの光透過損失の経時変化

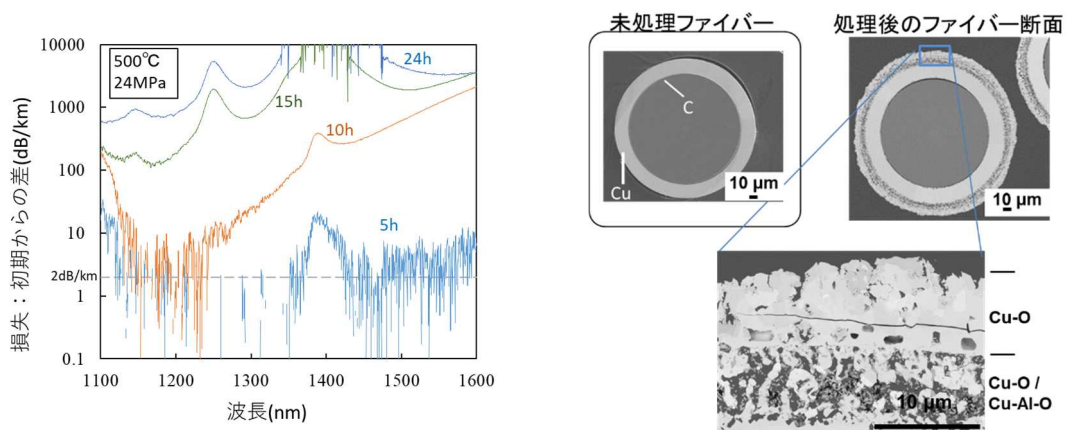


Fig. 7.5.3 C/Cu 被覆ファイバーの光透過損失の経時変化と表面酸化層形成

8. 実用化・事業化へ向けての見通しと取組みについて

図 8-1 に示すとおり、実用化・事業化に向けての見通しと今後の取組みは以下である。

- 将来的には、超臨界地熱資源の探査サービスの事業化を目標としている。
- 本手法により、従来型の地熱資源については目標より高い精度で求められる可能性が示された。このため、本事業終了後には従来型の地熱資源の探査サービスを事業化することを目指す。
- DAS 用光ファイバーの損傷度評価手法についても、本事業終了後にサービス提供することを目指す。

項目	2025年度	2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	2030年度～
従来型の地熱資源開発への活用	サービス提供（事業化）					
DAS用光ファイバーの損傷度評価	サービス提供（事業化）					
超臨界地熱資源の探査技術の開発	NEDOにおいて掘削する構造調査試錐井および調査井での実証試験					NEDOにおける実証試験

図 8-1 実用化・事業化の見通しと課題・取り組み

(1) 事業化を行う製品・サービス

▲従来型の地熱資源開発への応用は本事業終了後に事業化する計画である。

本技術の優位性として

- ・地熱資源開発における掘削成功率を格段に向上させて開発効率を(飛躍的に)上昇できる。
- ・掘削率の飛躍的向上により開発費の大幅なコストダウンができる。
- ・再生化エネルギーにおける地熱資源の比率を向上に大きな貢献がきたいできる。

また以下の応用をすることが可能である。

- 1) 超臨界水生成域という高温高圧環境下において、熱水運動に起因する地震波微動、マイクロクラック形成に伴うアコースティックエミッション等を検出できるような地震波計測やモニタリング・システムの構築
- 2) 深層ボーリング時の状態のリアルタイムモニタリング技術
- 3) 人工破碎域の生成と拡大のリアルタイムモニタリング技術
- 4) データ処理及び超臨界水貯留層、超臨界水貯留層のイメージング手法
- 5) 人工涵養のモニタリング技術
- 6) 還元水の還元状況モニタリング技術
- 7) 亜臨界、超臨界下の劣化対策と水素侵入対策を施した DAS 用センシングシステム

▲DAS 用光ファイバー及びシステムの損傷評価も本事業終了後に依頼試験として事業化する計画である。

- ・最高 500℃・24MPa の高温・高圧水下において、光ファイバー素線の光伝送損失をその場測定することにより、光ファイバーシステム内に水が侵入した際の光ファイバーの損傷度を予測する。これにより、システムのシビアアクシデントに対する光ファイバーの耐久性データを取得する。
- ・最高 500℃・24MPa の高温・高圧水下において、光ファイバーセンサーシステムの水

素遮蔽性を評価し（システム内への水侵入無し）、メーカーやユーザーにおけるシステム構造の設計と使用条件下でのシステムの耐久性予測に資する。

▲超臨界地熱資源の探査技術の開発への応用は

NEDO において掘削する構造調査試錐井および調査井での実証試験を通じて本技術の検証と精度向上に取り組み、将来的な事業化を目指す。

- ・ 調査井の掘削時の掘削ドリル振動を震源として用いることにより破砕帯の成長程度を評価する。
- ・ 調査井内部に入れた光ファイバーにより、超臨界水の広がり、物性を評価する。
- ・ 光ファイバーにより超臨界下の温度も直接測定可能とする。

(2) 販売先

地熱開発事業者、掘削事業者、探査事業者、自治体等

(3) 事業化の形態と制約等

- ・ 弾性波探査手法及び貯留層のイメージング手法については本事業で開発されるソフトに組み込まれる。地熱資源開発事業者に比較的制約なく本開発技術を提供可能である。
- ・ DAS 計測装置は数社が提供可能である。

添付資料

●特許論文等リスト

【とりまとめ】

	2021 年度	2022 年度	合計
特許	0	1	1
論文	0	3	3
学会発表（口頭・ポスター）	12	12	24
プレスリリース	0	0	0
新聞・TV 等掲載	0	0	0
受賞	0	1	1
その他	0	0	0

特許

番号	出願者	出願番号	国内外 国 PCT	出願日	状態	名 称	発明者
1	(一財)ファインセラミックスセンター	特願 2022-170000	国内	2022/10/24	公開	光ファイバーの劣化評価装置および劣化評価方法	松田哲志他

(Patent Cooperation Treaty: 特許協力条約)

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Kasahara, J.	ENAA	A field experiment of a temperature-tolerant distributed acoustic sensor in deep geothermal reservoir prospecting	The Leading Edge, May 2022, Volume 41, No. 5.P306-312	有	2022/5
2	笠原順三	ENAA	秋田県大沼地熱発電所地熱井内の DAS を用いた地熱探査	日本地熱学会誌, 第 44 巻第 2 号, p.73-84	有	2022/5
3	Takekawa, J.	京都大学	A new DAS sensor prototype for multicomponent seismic data	The Leading Edge, May 2022, Volume 41, No. 5.P338-346	有	2022/5

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	笠原順三	ENAA	八幡平大沼地熱フィールドにおける DAS-地震波観測の結果の解釈	日本地球惑星連合 2021 年大会	2021/5
2	Kasahara, J.	ENAA	DAS-Seismic and temperature data acquisition using DAS and DTS measurements at the Ohnuma, geothermal field, Tohoku, Japan	日本地球惑星連合 2021 年大会	2021/5
3	Kasahara, J.	ENAA	Simulation of Seismic Imaging of Supercritical Geothermal Reservoir Using the Full-Waveform Inversion Method,	World Geothermal Congress2020-2021	2021/5
4	Kasahara, J.	ENAA	Seismic feasibility study to Identify and characterize supercritical Geothermal Reservoirs, using DTS, DAS, and surface seismic array	World Geothermal Congress2020-2021	2021/5
5	笠原順三	ENAA	秋田県大沼地熱発電所地熱坑井内の DAS を用いた地震波探査	物理探査学会 2021 年春季大会	2021/6
6	Kasahara, J.	ENAA	Exploring New Geothermal Reservoirs in the Ohnuma Well in Honshu, Japan Using Enhanced DAS Seismic Methods	European Association of Geoscientists & Engineers Annual 2021	2021/6
7	Kasahara, J.	ENAA	Presence of an intense reflector at 2.8 km depth revealed by the enhanced borehole DAS seismic study in the Ohnuma Geothermal field in Honshu, Japan	IMAGE 2021 (The International Meeting for Applied Geoscience & Energy)	2021/10
8	Kasahara, J.	ENAA	Seismic exploration for	Sixth International	2021/10

			geothermal resources	Conference on Engineering Geophysics	
9	笠原順三	ENAA	大沼地熱発電所地熱坑井内の DAS を用いた地震波探査	日本地熱学会 2021 年学術講演会 (仙台大会)	2021/10
10	笠原順三	ENAA	北海道森町濁川地区における DAS 地震波探査	物理探査学会 第 145 回学術講演会	2021/11
11	松田哲志	JFCC	耐環境性光ファイバーの開発	日本地熱学会 2021 年学術講演会	2021/10
12	笠原順三	ENAA	北海道森町濁川地区における DAS 地震波探査	物理探査学会秋季大会	2021/11
13	笠原順三	ENAA	北海道森地熱発電所周辺での光ファイバー-DAS による地熱フィールドの地震探査,	日本地球惑星科学連合 2022 年大会	2022/5
14	笠原順三	ENAA	秋田県八幡平澄川地熱フィールドにおける地熱探査	物理探査学会 第 146 回学術講演会 (最優秀発表賞を受賞)	2022/5
15	笠原順三	ENAA	秋田県大沼・澄川での地熱坑井 16 内の光ファイバーによる分布型温度(DTS)、振動計測(DAS)用いた地熱構造探査	日本地震学会 2022 年度秋季大会	2022/10
16	笠原順三	ENAA	滝上地熱フィールドの地熱坑井を用いた DAS 地熱探査	物理探査学会第 147 回学術講演会	2022/11
17	松田哲志	JFCC	光ファイバーの光透過損失その場観察装置の開発	日本地熱学会 2022 年学術講演会	2022/11
18	笠原順三	ENAA	滝上地熱フィールドにおける地熱坑井を用いた DAS 地熱探査	日本地熱学会 2022 年学術講演会	2022/11
19	笠原順三	ENAA	北海道濁川地熱フィールド森発電所の地熱坑井での DAS を用いた地熱探査	日本地熱学会 2022 年学術講演会	2022/11
20	笠原順三	ENAA	秋田県澄川地熱フィールドにおける地熱坑井を用いた DAS 地熱探査	日本地熱学 2022 年学術講演会	2022/11

21	梶原竜哉	地熱エンジニアリング(株)	森地熱地域における DAS 調査の結果と地質構造、解釈との比較検討	日本地熱学 2022 年学術講演会	2022/11
22	Kasahara, J.	ENAA	Geophysical exploration of subsurface structure in six geothermal fields using distributed acoustic and temperature sensing methods	GRE2022	2022/12
23	Kasahara, J.	ENAA	Seismic Study at the Mori Geothermal Power Plant, Japan using DAS and DTS in a geothermal well	Stanford Geothermal Workshop	2023/2
24	Kasahara, J.	ENAA	Application of DTS and DAS for the geothermal explorations	SPE Fiber Optic Sensing	2023/2

(b)その他（同様の形式で表を作成する）

番号	受賞者	受賞		受賞日
1	笠原順三	物理探査学会 第 146 回学術講演会 最優秀発表賞	物理探査学会	2022. 8

個別テーマ (2) -1.

(2) 環境保全対策技術開発

(2) -1. 気象調査代替手法および新たな大気拡散予測手法の研究開発

委託先：一般財団法人電力中央研究所、学校法人近畿大学

1. 背景と目的

地熱発電所の環境影響評価では、硫化水素の大気拡散予測等に必要となる地上気象・高層気象の現地調査を、「発電所に係る環境影響評価の手引」に基づき実施する。しかしながら、これらの調査には多大な費用と期間を要しており、地熱発電所の開発促進を図る上で、一つの大きなハードルとなっている。本事業では、この気象調査を、気象モデルを用いた数値シミュレーション手法で代替することを主な目的とする。本技術が確立されることにより、調査費用の大幅な削減（1/2～1/3）が可能になるとともに、調査期間の短縮化によって、地熱発電開発の課題であるリードタイムの長さの解決につながることを期待される。

2. 研究開発の概要

近年、気象モデルの高解像度化により、空間スケールが数百メートルから 1 キロメートル程度の詳細な気象場も数値シミュレーションによって予測・再現できるようになってきている。本研究では、現地調査を気象モデルにより代替するため、気象モデルの再現性を確認するとともに、地熱発電所が多く立地する山間部に適した風速予測手法を開発する。また、気象調査代替手法の妥当性を確認するため、現行の気象調査と代替手法の両手法に基づいて大気拡散予測を実施し、両者の相違が十分に小さいことを確認する。

加えて、気象モデルから得られる 3 次元的な気象場の時空間情報や、大気拡散予測に重要となる風の乱れの情報を生かした新たな大気拡散予測手法を開発する。これにより、現行手法では困難な硫化水素の長時間平均濃度の予測（例えば 24 時間程度）や、地形影響を考慮した着氷予測を可能とするなど、アセス手法の高度化を図る。また、開発手法の妥当性を示すため、現地観測等との比較を行う。

(1) 研究開発項目と実施内容

以下に、各研究開発項目の実施内容を示す。

研究開発項目① 気象調査代替手法の研究開発

①-1 気象モデルの妥当性確認と最適化(担当:電力中央研究所)

気象モデルによる気象場の再現計算を実施し、既存のアセスデータ(これまでに実施された地熱発電所の環境影響評価で得られた現地調査結果)や新たに実施する現地観測との比較から、気象モデルによる計算結果の妥当性確認を行う。

①-2 力学的ダウンスケーリング手法の開発(担当:電力中央研究所、近畿大学)

現状の気象モデルの格子サイズは細かくても数百メートル程度であり、地熱発電所の立地地点に多く見られる複雑地形に起因する局所的な気流分布は、モデルの特性上格子サイズを小さくしても詳細に再現することはできない。そこで、気象モデルと、局所的な気流分布を再現可能な数値流体力学(CFD)モデルを結合したダウンスケーリング手法を開発し、気流場の高解像度化を行う。

①-3 データ解析による複雑地形上の地上風速予測手法の開発

(担当:近畿大学、電力中央研究所)

気象モデルと CFD モデルを結合した融合モデルによるダウンスケーリング手法は、計算コストが膨大になる恐れがある。そこで、機械学習を含むデータ解析手法により、CFD モデルによるダウンスケーリング手法よりも低コストで複雑地形上の地上風速を再現できる手法についても並行して開発を進める。

①-4 拡散予測への適用性確認(担当:電力中央研究所)

現在、地熱発電所の環境影響評価で実施されている硫化水素の拡散予測および白煙予測に対して、気象モデルを用いた気象調査代替手法の適用性を評価し、実用化につなげる。

研究開発項目② 新たな大気拡散予測手法の研究開発

②-1 3次元気象場に基づく拡散予測手法の開発(担当:電力中央研究所)

気象モデルを用いた気象調査代替手法により出力される3次元気象場を利用した、新たな大気拡散予測手法を開発する。本手法は、複雑地形上の気流分布を考慮するとともに、計算コストの最適化により、硫化水素濃度の24時間平均値が予測できる手法とする。

②-2 着氷予測手法の高度化(担当:電力中央研究所)

2019 年度～2021 年度に実施された NEDO 事業(冷却塔排気に係る環境影響の調査・予測・評価の手法に関する研究開発)により開発された着氷予測モデルをベースとして、発電所周辺の地形による影響を考慮できる予測モデルを開発し、予測手法の高度化を図る。

(2) 開発目標と設定根拠

各テーマにおける研究開発項目、開発目標及びその設定根拠を表 2-1 に示す。

表2-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	中間目標	最終目標	根拠
I : 気象調査代替手法の研究開発	<ul style="list-style-type: none"> 2～4地点の地熱発電所における既存のアセスデータを対象として、気象モデルによる再現計算を実施し、モデルの再現精度を定量的に評価するとともに、精度向上に向けた課題抽出を行う。 気象モデルとCFDモデルの結合モデルによるダウンスケーリング手法、および、データ解析に基づく地上風速予測手法について、ベースとなるモデルを完成させる。 	<ul style="list-style-type: none"> 気象モデルおよびダウンスケーリング手法による気象調査代替手法を完成させ、代替手法に基づく硫化水素濃度の予測結果が、従来の現地気象調査に基づく予測結果と同等（おむね0.5～2倍）の範囲に収まることを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 複数地点を対象とすることで、汎用性の高い手法開発につなげる。また、開発した気象調査代替手法が実用的な性能を満たすことを定量的に示し、環境影響評価への早期実用化を図る。これにより、環境影響評価の期間短縮・コスト削減につながる。
II : 新たな大気拡散予測手法の研究開発	<ul style="list-style-type: none"> 着氷予測モデルに地形影響を考慮できる機能を追加し、予測精度の評価を行う。また、24時間平均着氷成長率について従来モデルよりも高い予測精度を目指す。 	<ul style="list-style-type: none"> 気象モデルの3次元気象場に基づく新たな大気拡散予測手法を開発する。また、硫化水素濃度の実測値により、開発した予測手法の性能評価を行い、大気拡散モデルに求められる性能基準を満たすことを示す。 	<ul style="list-style-type: none"> 気象場の変化を考慮した大気拡散予測手法を開発することで、WHOの健康基準との比較が可能な、「24時間平均の硫化水素濃度」を予測することが可能となる。これにより、環境影響評価において基準が不明確であった硫化水素濃度に対して、適切な評価が可能となる。

3. 事業スケジュール

本研究開発の期間は2021年6月15日より2024年3月20日であり、そのスケジュールの概要を図3-1に示す。

事業項目	2021年度				2022年度				2023年度				2024年度 (予定)				2025年度 (予定)			
	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
①-1 気象モデルの妥当性 確認と最適化(担当:電力 中央研究所)	■																			
①-2 力学的ダウンスケーリ ング手法の開発(担当:電 力中央研究所、近畿大 学)	■																			
①-3 データ解析による複 雑地形上の地上風速予測 手法の開発(担当:近畿大 学、電力中央研究所)	■																			
①-4 拡散予測への適用性 確認(担当:電力中央研 究所)																				
②-1 3次元気象場に基づ く拡散予測手法の開発(担 当:電力中央研究所)	■																			
②-2 着氷予測手法の高度 化(担当:電力中央研 究所)	■																			

図3-1 研究開発のスケジュール

4. 予算

本研究開発の予算額を表 4-1 に示す。

表 4-1 研究開発の予算額

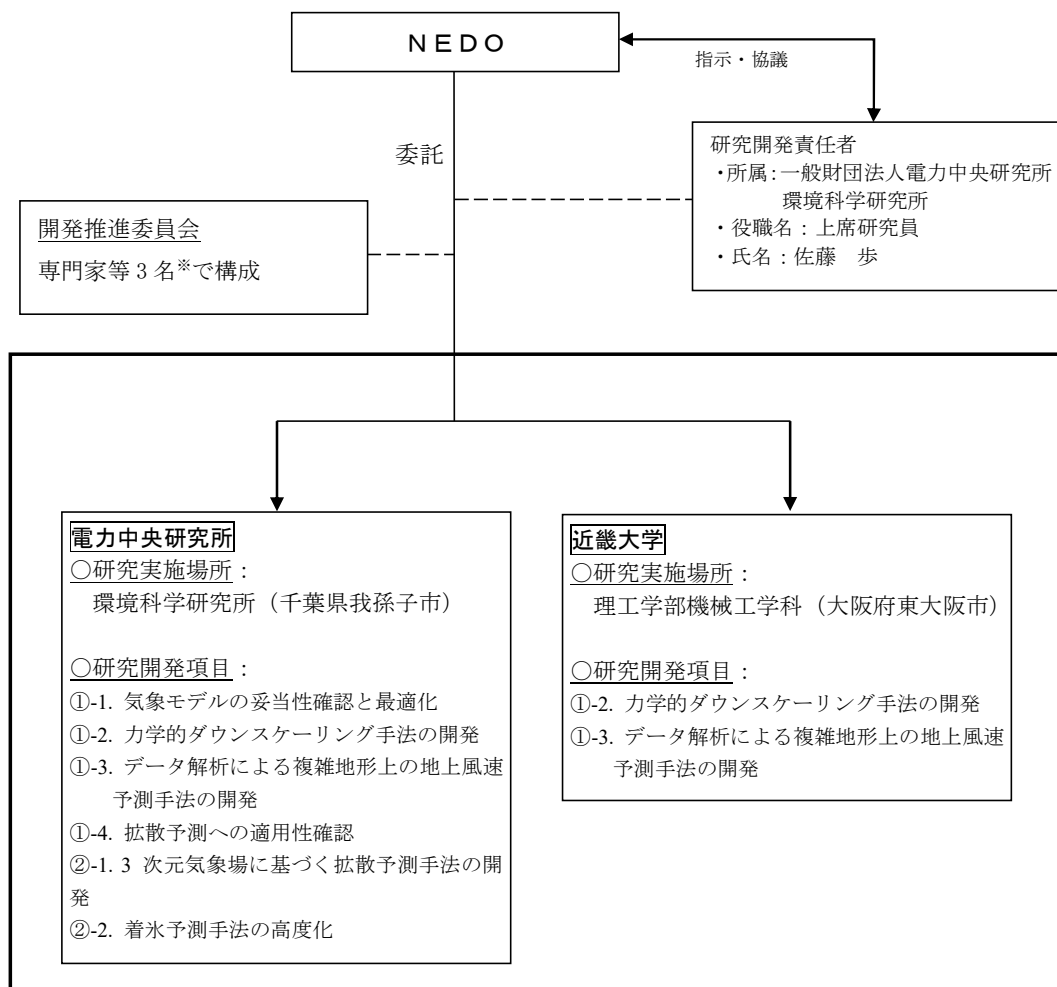
(単位：百万円)

	2021 年度	2022 年度	2023 年度	総額
研究開発費 (電力中央研究所)	79.1	84.8	85.4	249.3
研究開発費 (近畿大学)	1.8	1.3	3.8	6.8
合計	80.9	86.1	89.1	256.1

注：1. 標記の金額は税込みである。

2. 丸め誤差のため、総額や合計が合わない場合がある。

5. 研究開発の実施体制



※開発推進委員会

研究開発の着実な推進に向け、以下の専門家等による委員会を開催し、指導・助言を得る。

委員 (予定)	所属	専門分野等
市川 陽一	龍谷大学名誉教授、経済産業省環境審査顧問会全体会会長・火力部会部会長・地熱部会部会長	大気拡散、環境影響評価
中山 浩成	日本原子力研究開発機構 環境動態研究グループ 研究副主幹	大気拡散、数値流体力学
小野寺 亨	東北電力株式会社 発電・販売カンパニー 火力部地熱統括センター 所長	地熱発電事業者

図 5-1 研究開発の実施体制

6. 事業の管理運営

本研究開発の開発推進委員会の委員を表 6-1 に示し、委員会開催実績を表 6-2 に示す。

表 6-1 開発推進委員会

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
市川 陽一	龍谷大学名誉教授 経済産業省環境審査顧問会 地熱部会長	大気拡散予測技術、環境アセスメントに関する 指導・助言
中山 浩成	日本原子力研究開発機構 環境動態研究グループ 研 究副主幹	大気拡散予測技術、数値流体力学、気象モデル に関する指導・助言
小野寺 亨	東北電力株式会社 発電・販 売カンパニー 火力部地熱統括センター 所長	地熱発電事業者としての指導・助言

表 6-2 開発推進委員会の開催実績

年度	回数	開催年月日	主な議題
2021	第1回	2021年9月22日	研究開発概要と2021年度計画について
2022	第2回	2022年5月 9日	前年度成果と2022年度計画について

7. 研究開発成果について

本研究開発の成果は下表のとおりである。設定した中間目標に対して、いずれの項目も達成できる見込みである。

表 7-1 中間目標に対する達成度（見込み）

研究開発項目	中間目標 (2024年3月)	成果 (2023年3月まで)	達成度 (見込み)	達成の根拠 ／解決方針
① 気象調査代替手法の研究開発	<ul style="list-style-type: none"> 2～4地点の地熱発電所における既存のアセスデータを対象として、気象モデルによる再現計算を実施し、モデルの再現精度を定量的に評価するとともに、精度向上に向けた課題抽出を行う。 気象モデルとCFDモデルの融合モデルによるダウンスケーリング手法、および、データ解析に基づく地上風速予測手法について、ベースとなるモデルを完成させる。 	<ul style="list-style-type: none"> 4地点の地熱発電所における既存のアセスデータを対象として、山間部における気象モデル再現精度の定量評価を実施。地上風速の過大評価傾向が見られたが、モデル設定の最適化により改善の見込みが得られた。 気象モデルとCFDモデルの融合モデルを整備した。また、機械学習による複雑地形上の地上風速予測手法を整備した。 	○ 2024年3月に達成見込	遅滞なく精度検証・モデル開発を進めており、計画通り達成の見込み
② 新たな大気拡散予測手法の研究開発	<ul style="list-style-type: none"> 着氷予測モデルに地形影響を考慮できる機能を追加し、予測精度の評価を行う。また、24時間平均着氷成長率について従来モデルよりも高い予測精度を目指す。 	<ul style="list-style-type: none"> 地熱発電所を対象とした着氷観測を実施し、着氷予測モデルの検証用データを取得した。 	○ 2024年3月に達成見込	観測データが予定通りに取得できたことから計画通り達成の見込み

◎ 大きく上回って達成、○ 達成、△ 一部未達、× 未達

以下に、実施項目別の研究成果を以下に示す。

①-1 気象モデルの妥当性確認と最適化

既存の4地点の地熱発電所環境影響評価を対象として、現地気象調査の再現計算を実施し、高解像度気象モデルによる再現精度を定量化した（図7-1）。その結果、地点によっては気象モデルの格子解像度を細かくすることで再現精度が向上することを確認した。また、気象モデルは山間部の地上風速を過大評価する傾向がみられたが、気象モデルの設定を最適化することで、地上風速の過大評価傾向が改善することを確認した（図7-2）。

これらの成果により、気象調査代替手法の実用化の見通しを得た。なお、これらの成果は、山間部の風力発電に対する風況予測にも活用可能である。

また、UAV（無人航空機）による、高周波数の風速測定精度を検証し、実用化の見通しを得た（図7-3）。この成果を用いた風速測定により、今後、気象モデルによる風速変動成分の

妥当性確認を実施する。

格子解像度	A地点	B地点	C地点	D地点
4.5 km (領域1)	0.75	0.50	0.47	0.68
1.5 km (領域2)	0.74	0.57	0.64	0.66
0.3 km (領域3)	0.75	0.58	0.65	0.63

図 7-1 地上風速の相関係数（観測値と気象モデル）

地点によっては、計算格子の高解像度化により、風速の再現精度が向上することを確認した

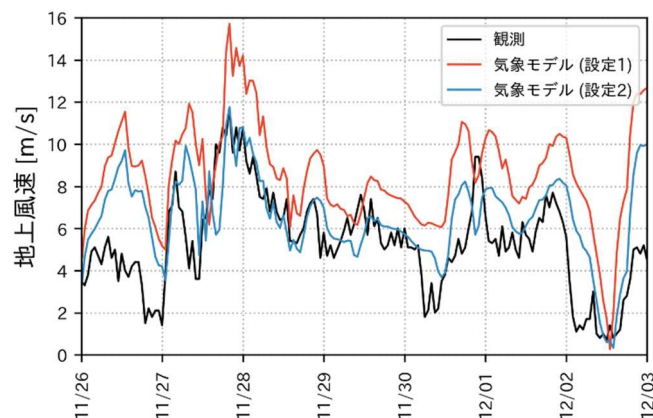


図 7-2 気象モデルによる地上風速の予測

気象モデルの設定を最適化することで（設定1→設定2）、地上風速の過大評価傾向が改善されることを確認した

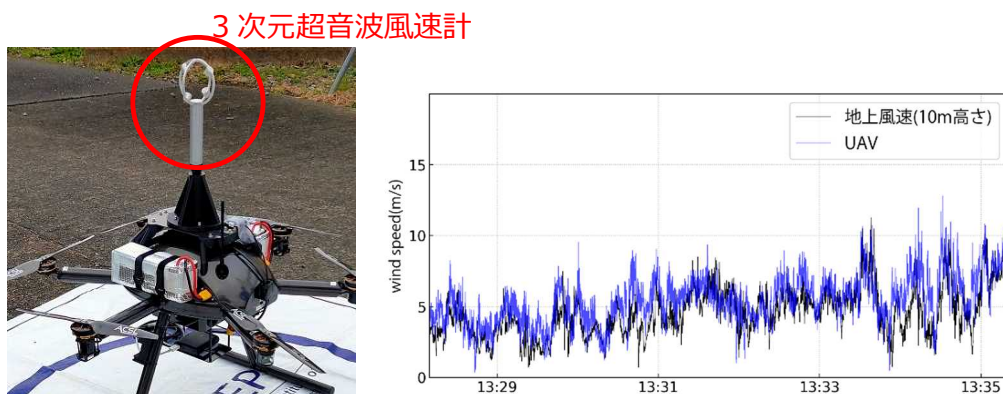
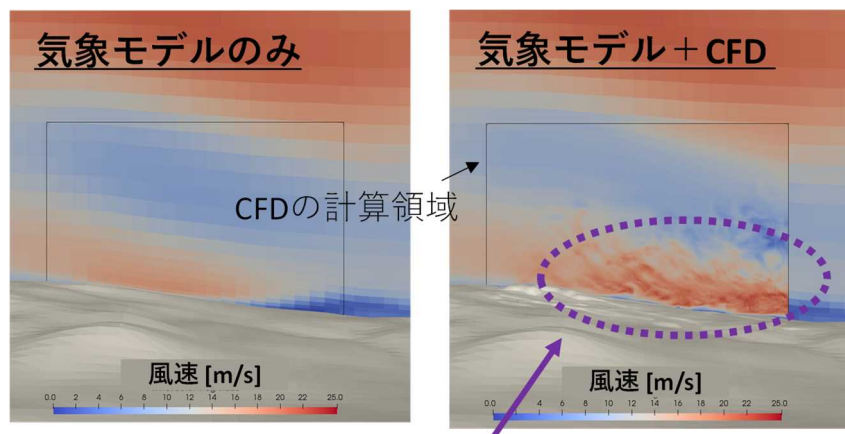


図 7-3 UAVによる高周波風速変動の測定

左：小型3次元超音波風速計を搭載したUAV、右：固定設置した超音波風速計との比較

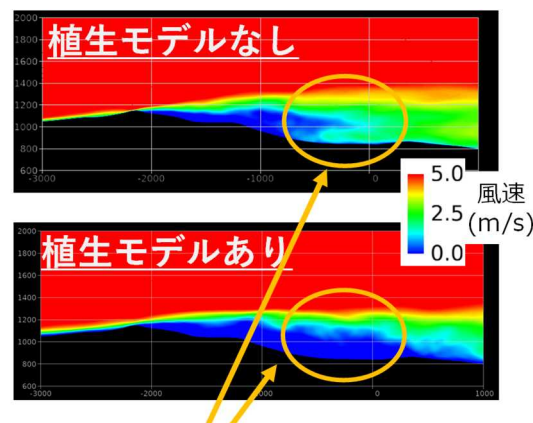
①-2 力学的ダウンスケーリング手法の開発

気象モデルの計算結果を、CFDモデルの駆動力として与えることのできる計算環境を構築した(図7-4)。本手法の適用により、山間部の気流場を高精度に予測することが可能となる。また、植生高さの分布に関するデータベースから、CFDモデルにおいて植生の抵抗を空間的に与える機能(植生モデル)を実装し、山間部における気流場への影響を確認した(図7-5)。



気象モデルのみに比べて、地形等により生じる
微細な乱流構造が再現できることを確認

図7-4 気象モデルとCFDモデルの融合モデルによる気流場の予測



植生モデルの実装により、尾根地形風
下の剥離域が大きく変化することを確認

図7-5 植生モデルの有無による山間部の気流分布の違い

①-3 データ解析による複雑地形上の地上風速予測手法の開発

異なる格子解像度を用いたCFDモデルにより、仮想の気象モデルデータ(格子解像度

160m) と正解データ (格子解像度 20m) を作成し、低解像度データから高解像度データを機械学習により予測する手法を開発した (図 7-6)。機械学習モデルにより予測された風速は、高解像度 CFD モデルの風速とよく一致することを確認した。

この成果により、比較的格子解像度の粗い気象モデルの出力データから、山間部の局所的な風速を予測することが可能となる。また、機械学習による予測手法は、CFD モデルによる予測手法に比べて計算コストが圧倒的に小さいことから、地熱発電所環境影響評価に限らず、風力発電における風況予測など、山間部のあらゆる風速予測に適用可能な成果である。

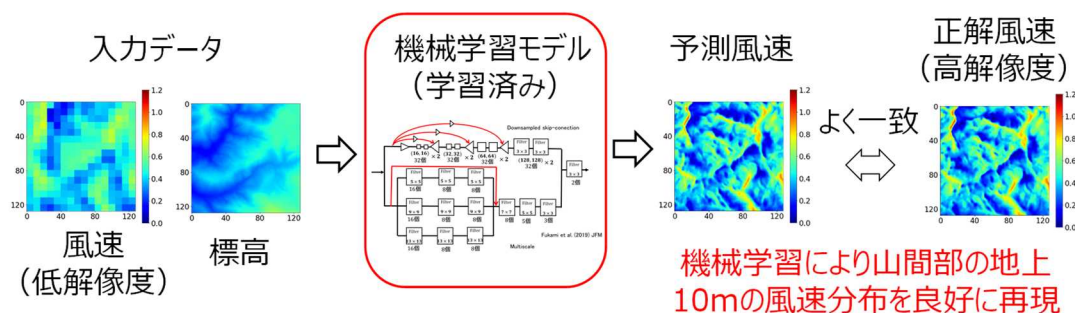


図 7-6 機械学習モデルによる地形を考慮した局所風速の予測

②-1 3次元気流場に基づく拡散予測手法の開発

諸外国における地熱発電所の硫化水素拡散予測手法の調査結果等に基づき、3次元気流場に基づく拡散予測手法のベースモデルを選定した。また、3次元の非定常気流場に基づく拡散予測が可能な CALPUFF モデル※について、実行環境を整備し、試計算を実施した (図 7-7)。拡散予測モデルの検証用データ取得のため、地熱発電所における拡散実験の候補地を選定し、予備調査を実施した。

※CALPUFF：非定常な気流変化を考慮した汚染物質の拡散予測が可能なパフモデルの1つ

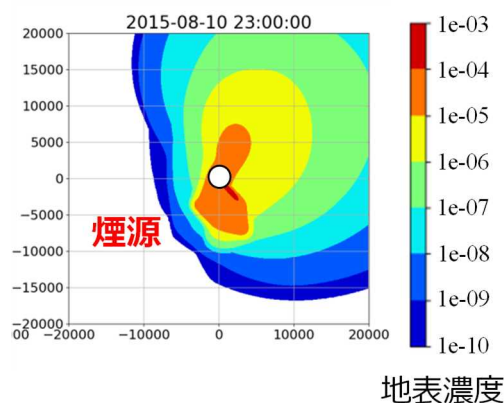


図 7-7 CALPUFF モデルによる非定常気流場を考慮した計算結果の例

②-2 着氷予測手法の高度化

地熱発電所において、着氷観測を実施し、着氷予測モデル高度化のための検証用データを取得した。また、画像解析による着氷厚さの計測に加えて、地熱発電所では計測例のない凍結検知センサを用いた計測により、高精度で時間分解能の高いデータを取得した(図 7-8)。これらの測定データに基づき、今後、着氷予測モデルの妥当性確認、および、改良を実施する。

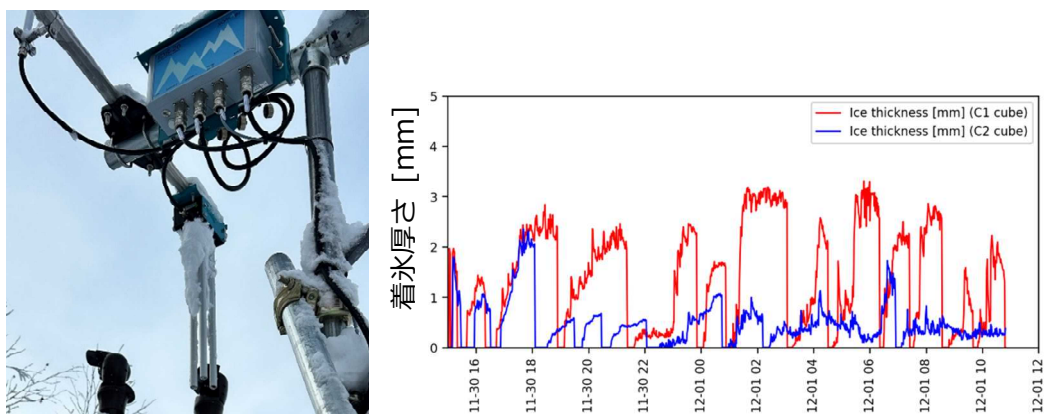


図 7-8 凍結検知センサ (左) と着氷厚さ測定結果の例 (右)

8. 実用化・事業化へ向けての見通しと取組みについて

本研究開発の成果においては、以下の3項目についての実用化・事業化を予定している。

(1) 環境影響評価における現地気象調査の代替手法

地熱発電所の環境影響評価において実施される現地の気象調査を、シミュレーション・統計手法により代替する。これにより、気象調査に要するコスト・期間を1/2以下にすることが可能となる。

なお、本手法は山間部の風力発電に対する風況予測にも活用可能と考えられることから、風力分野での実用化も視野に入れた取組みを行う。

(2) 3次元気流場に基づく拡散予測手法

気象モデルの出力を利用して、3次元的な気流の変化を考慮した大気拡散予測手法を開発する。これにより、従来は困難であった、気流場の時間的・空間的变化を考慮した長時間の拡散予測が可能となり、WHOの硫化水素に関する健康基準（24時間平均で0.15 mg/m³）との比較・評価が可能となる。

(3) 地形影響を考慮した着氷予測手法

電力中央研究所が開発した、冷却塔から排出される蒸気による着氷予測モデルは、地形影響を簡易的に考慮しており、山間部での予測精度には改善の余地がある。改良された着氷予測手法が実用化されれば、環境影響評価等において、適切な着氷予測が可能となる。




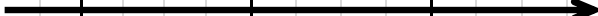


以上の項目に対して、実用化・事業化に向けての見通しと今後の取組みを、表8-1に示す。

実用化に際しては、経済産業省の「発電所に係る環境影響評価の手引」（以下、アセス手引）において、これらの手法が掲載されることが望ましい。このため、上記代替手法・予測手法の妥当性確認結果については、積極的に学術論文等にて公知化を行い、科学的根拠を明確にする。また、関係各所である、経済産業省電力安全課、環境省環境影響評価課、経済産業省環境審査顧問会等にも適宜情報提供を行い、アセス手引への早期反映を促す取組みを実施する。

また、事業化においては、上記3項目の代替手法・予測手法を、受託解析サービスとして、地熱発電所の環境影響評価を実施する発電事業者や環境調査会社に提供する。販売ルートとしては、一般財団法人電力中央研究所が直接受託、あるいは、協力会社である株式会社電力計算センターが受託し、一般財団法人電力中央研究所が技術指導を行うことを想定している。なお、ダウンスケーリング手法や統計的手法による地上風速予測モデルを活用する場合には近畿大学も技術指導に協力する。この販売ルートは、地熱発電所の環境影響評価に

における現行の硫化水素拡散予測モデル、および、白煙予測モデル、また、火力発電所の環境影響評価における地形影響予測モデル（排ガス拡散）や白煙予測モデル等で数多くの実績があり、確立されたものである。

表 8-1 実用化・事業化の見通しと課題・取り組み

項目	2026 年度	2027 年度	2028 年度	2029 年度	2030 年度～
環境影響評価における現地気象調査の代替手法	学術論文による公知化 アセス手引き※への反映 			アセスへの適用	
3次元気流場に基づく拡散予測手法	学術論文による公知化 アセス手引き※への反映 			アセスへの適用	
地形影響を考慮した着氷予測手法	学術論文による公知化 			アセスへの適用	

※経済産業省「発電所に係る環境影響評価の手引」

添付資料

●特許論文等リスト

【とりまとめ】

	2021 年度	2022 年度	合計
特許	0	0	0
論文	0	0	0
学会発表（口頭・ポスター）	0	5	5
プレスリリース	0	0	0
新聞・TV 等掲載	0	0	0
受賞	0	0	0
その他	0	0	0

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	道岡 武信	近畿大学	機械学習を用いた複雑地形上の風速予測の試み	大気環境学会近畿支部気象拡散部会	2022/05/17
2	道岡 武信	近畿大学	機械学習による複雑地形上の地上風予測	第 27 回計算工学講演会	2022/06/01
3	小林 謙仁	電力中央研究所	複雑地形上の気象モデル再現精度に関する検討	第 63 回大気環境学会年会	2022/09/14
4	瀧本 浩史	電力中央研究所	地熱発電所を対象とした着氷予測モデルの開発 -山間部における拡散パラメータの最適化に向けた検討-	第 63 回大気環境学会年会	2022/09/15
5	道岡 武信	近畿大学	Estimation of near-surface wind speed over complex terrain with machine learning	75 th Annual Meeting of the American Physical Society, Division of Fluid Dynamics	2022/11/22
6	瀧本 浩史	電力中央研究所	気象モデル WRF を用いた複雑地形上の風速再現精度に関する検討	日本風工学会 2023 年度年次研究発表会	2023/05/24 (予定)

個別テーマ (2) -2.

(2) 環境保全対策技術開発

(2) -2. IoT 硫化水素モニタリングシステムの開発

委託先：東北緑化環境保全(株)
(株)ガステック
(国)熊本大学
(一財)電力中央研究所

1. 背景と目的

地熱発電所を建設する際、出力1万kW以上の場合は環境影響評価法に基づく環境アセスメントを実施する必要がある。また、それ未満の7,500kW以上の規模では、個別に判断が行われる。さらに、都道府県条例等では、5,000kWや2,000kW以上の場合にも実施を求められる場合がある。

環境影響評価法に基づく環境アセスメントにおける硫化水素測定は、「発電所に係る環境影響評価の手引」(以下「環境アセス手引き」という。)に記載された「メチレンブルー吸光度法」(以下「環境アセス公定法」という。)により、四季に24時間の硫化水素測定が実施されている。

しかし、この手法には相当の人件費等を要する一方で、一度の測定で得られるデータは1日程度分の1時間平均値のみと限定的である。また、経済産業省環境審査顧問会では、硫化水素の測定時間が現在の24時間では四季を代表するとは言えないのではないかとの意見が挙げられている。

さらに、国立・国定公園等の植物への硫化水素の影響を把握する長期的な連続測定や、金属腐食や臭気が問題となる低濃度領域の硫化水素の自動測定に適した測定器は無いのが現状である。

そこで2019年度～2021年のNEDO地熱発電技術研究開発「冷却塔排気に係る環境影響の調査・予測・評価の手法に関する研究開発」(以下、「前プロジェクト」)では、定電位電解式センサを用いた小型連続測定器を試作し開発に着手した。

本プロジェクトでは、小型連続測定器を実用化し、IoTシステム、見える化手法の構築等により、硫化水素に係る環境影響を把握・公表するプロセスを省力化するシステムを開発する。

2. 研究開発の概要

前プロジェクトにおいて実用化の目途が得られた小型連続測定器を活用するとともに、独自の湿式ケミカルデバイス技術を用いて低濃度領域へ測定範囲を拡張する機構を開発し、新たに構築する IoT システムと見える化手法により、硫化水素に係る環境影響を把握し公表するプロセスを省力化する「IoT 硫化水素モニタリングシステム」を開発する。

また、環境アセスメントを効率化しながら現状よりも多くの日数を測定する新たな硫化水素測定手法を提案し、環境アセス手引きへの採用を目指す。さらに、運転中の地熱発電所のモニタリングや、国立・国定公園内の植物への影響把握の省力化にも貢献するなど様々な分野にも普及を図り、市場の拡大により価格を抑え、環境アセスメントの調査解析に係る時間とコストを 50%削減することを目標とする。

(1) 実施内容、研究開発項目

① 全体設計 （担当：【東北緑化環境保全株式会社】）

前プロジェクトの実績を踏まえ、調査解析に係る時間とコストの 50%削減を実現するための提案を行うとともに、様々なニーズに応じたシステムの構成、性能、機能等の仕様を決定する。また、本事業を含む環境保全対策関連の技術開発について広報動画を作成する。

② 実証試験 （担当：【東北緑化環境保全株式会社】）

実際のフィールドで、環境アセス公定法による測定との比較を行い、有効性を検証するための実証試験の計画を立案・運営し、本システムを環境アセスメントに適用する際の課題の解決を図る。地熱発電所に限らず、様々な用途やシーンでの本システムの有用性を検証するものとする。

③ 測定ガイド作成 （担当：【東北緑化環境保全株式会社】）

前プロジェクトで作成した「新しい硫化水素測定手法のあり方（素案）」を、研究開発項目②の実証試験を通して有効性を確認し、より具体的に改良したガイドラインとしてとりまとめる。

④ 小型連続測定器の実用化 （担当：【株式会社ガステック】）

前プロジェクトにおける課題を踏まえ、使い勝手に関する仕様や屋外での長時間のモニタリングを考慮した硫化水素の小型連続測定器を開発する。

⑤ IoT システムの構築 （担当：【株式会社ガステック】）

小型連続測定器に実装するデータ通信機能とクラウド上での統合を反映した、測定値の遠隔モニタリングのためのデータ通信機能を構築する。

⑥ 小型連続測定器の性能評価試験（担当：【国立大学法人熊本大学】）

実証機を用いて性能評価試験を実施する。実施に際しては、環境アセスメントでの使用を想定した性能や信頼性を詳細に評価する。

⑦ 低濃度領域への測定範囲拡張（担当：【国立大学法人熊本大学】）

研究開発項目④の小型連続測定器では測定が難しい環境アセス公定法の下限值（0.004 ppm）や臭気検知閾値相当の低濃度（0.004 ppm 未満）の領域について、低コストで自動測定できる測定器を試作し、実験室における性能評価と現地実証試験を行なう。

⑧ システム最適化の検討（担当：【一般財団法人電力中央研究所】）

開発する硫化水素測定装置の汎用性を高めて販売コストを低減させるため、環境アセスメント以外の様々な分野における硫化水素測定の条件やニーズを調査し、モニタリングシステムの最適な仕様を具体化する。

⑨ 見える化手法の開発（担当：【一般財団法人電力中央研究所】）

モニタリングシステムから遠隔で得られる硫化水素濃度・風向・風速と地形等を考慮した拡散モデリングにより、面的な濃度分布を推定し、それを視覚的にわかりやすく表示する手法を開発する。

(2) 目標及び達成方法

2023年度末の中間目標および2025年度末の最終目標を表2-1に示す。

達成方法としては、2023年度には、小型連続測定器の性能評価試験を実施することにより、環境アセスメントに必要な性能が確保できることを確認する。また、低濃度領域測定器は試作を終え動作テストを行い、環境アセス公定法の測定濃度範囲のうち小型連続測定器ではカバーできない低濃度域の測定を自動化する目途を得る。

一方、2024年度と2025年度に予定している実証試験については、これまで予備調査により選定した候補地を対象に、具体的な計画を作成する。

2025年度には、性能評価を終えた実証機を用いて環境アセス公定法との比較検証や見える化の実証試験を行い、地熱発電所の環境アセスメントにおける硫化水素測定にかかる時間とコストを50%削減できる測定手法や、様々な分野における硫化水素測定を効率化する手法をガイドラインにとりまとめる。

表 2-1(1) 研究開発中間目標と設定理由（中間目標）

行動目標	技術的な中間目標	達成方法
I. 室内における小型連続測定器の実証機の性能評価試験の実施	<ul style="list-style-type: none"> ○基本性能として以下の評価が得られること。 <ul style="list-style-type: none"> ・検出限界：0.01 ppm 以下 ・指示精度 ±0.01 ppm 以内(試験ガス濃度:約 0.11 ppm ^{注1}) ±10 %以内(試験ガス濃度:約 1.00 ppm ^{注1}) ○使用環境を想定した温度、湿度による影響の試験において以下の評価が得られること。 <ul style="list-style-type: none"> ・測定値の変化：±0.01 ppm 以内 	<p>必要な性能を目標に現地試験や性能評価試験など様々な試験により、課題を抽出し、解決を目指す。</p>
II. 低濃度領域測定器の試作機の動作テスト	<ul style="list-style-type: none"> ○環境アセス公定法と同等の測定範囲の下限（0.004 ppm）を持つ試作機を完成させ、野外においてバッテリー駆動で正常に6時間の測定が可能なこと。 	<p>課題を明確化し、各要素開発や、様々な試験により課題を抽出し、解決を目指す。</p>
III. フィールドにおける実証試験の実施計画の策定	<ul style="list-style-type: none"> ○地熱発電所等を実験フィールドとし、新しい硫化水素測定手法ガイドラインの案に基づく実証試験の詳細な計画をとりまとめること。 	<p>実際に使用する屋外環境におけるシステムの有効性を確認し、課題の解決を目指す。</p>

注：1. 前プロジェクトで提案されている「地熱発電所の冷却塔から排出される硫化水素の予測手法の基本的な考え方に関するガイドライン(案)」での評価基準濃度（住居等がある場合<0.11 ppm、住居等が無い場合<1.00 ppm）
2. 「屋外作業環境ガイドラインに基づく管理濃度」（1 ppm）や「WHO 欧州空気質ガイドライン」（0.11 ppm）

表 2-1(2) 研究開発最終目標と設定理由（最終(2025年度末)）

行動目標	技術的な最終目標	達成方法
I. 実証機を用いた現地実証試験の実施	<ul style="list-style-type: none"> ○小型連続測定器が、地熱発電所周辺の野外において3日間以上連続で正常に動作し、現行の環境アセス公定法の測定結果と一定の相関が得られること。 ○モニタリングシステムが、10地点以上の硫化水素の測定結果（基本的には測定範囲の下限は0.01 ppm程度、うち数地点は0.004 ppm未満に対応）による0.004未満～5 ppmの範囲の面的な濃度分布を、1時間よりも短い単位で速やかに地形図上に表示し、見える化できること。 	<ul style="list-style-type: none"> ・左記の技術的な最終目標を満足したIoT硫化水素モニタリングシステムを開発すること。 ・新しい硫化水素測定手法ガイドラインの作成のため、測定濃度範囲の提案や関係省庁や顧問会等へ事前説明等の手引き改定のための働きかけ、公知化等を行う。 ・様々な分野への活用による販売先の拡大等を行う。
II. 新しい硫化水素測定手法ガイドラインの作成	<ul style="list-style-type: none"> ○地熱発電所の環境アセスメントにおける硫化水素測定結果のデータの質と量を向上しつつ、調査解析に係る時間とコストを50%削減できる測定手法をとりまとめること。 	

注：現行の環境アセスメントで測定されている濃度範囲（0.004 ppm～5 ppm程度）に対し、2025年度末においては小型連続測定器で測定が可能となる測定範囲（下限値0.01 ppm～上限値5.00 ppm）を商品化の目的を得る対象とする。また、低濃度領域への測定範囲拡張の試作機による現地実証試験により、0.01 ppm未満については数年後に実用化できる目的を得ることを目標とする。

3. 事業スケジュール

本研究開発の期間は2021年6月15日より2024年3月20日であり、そのスケジュールの概要を図3-1に示す。

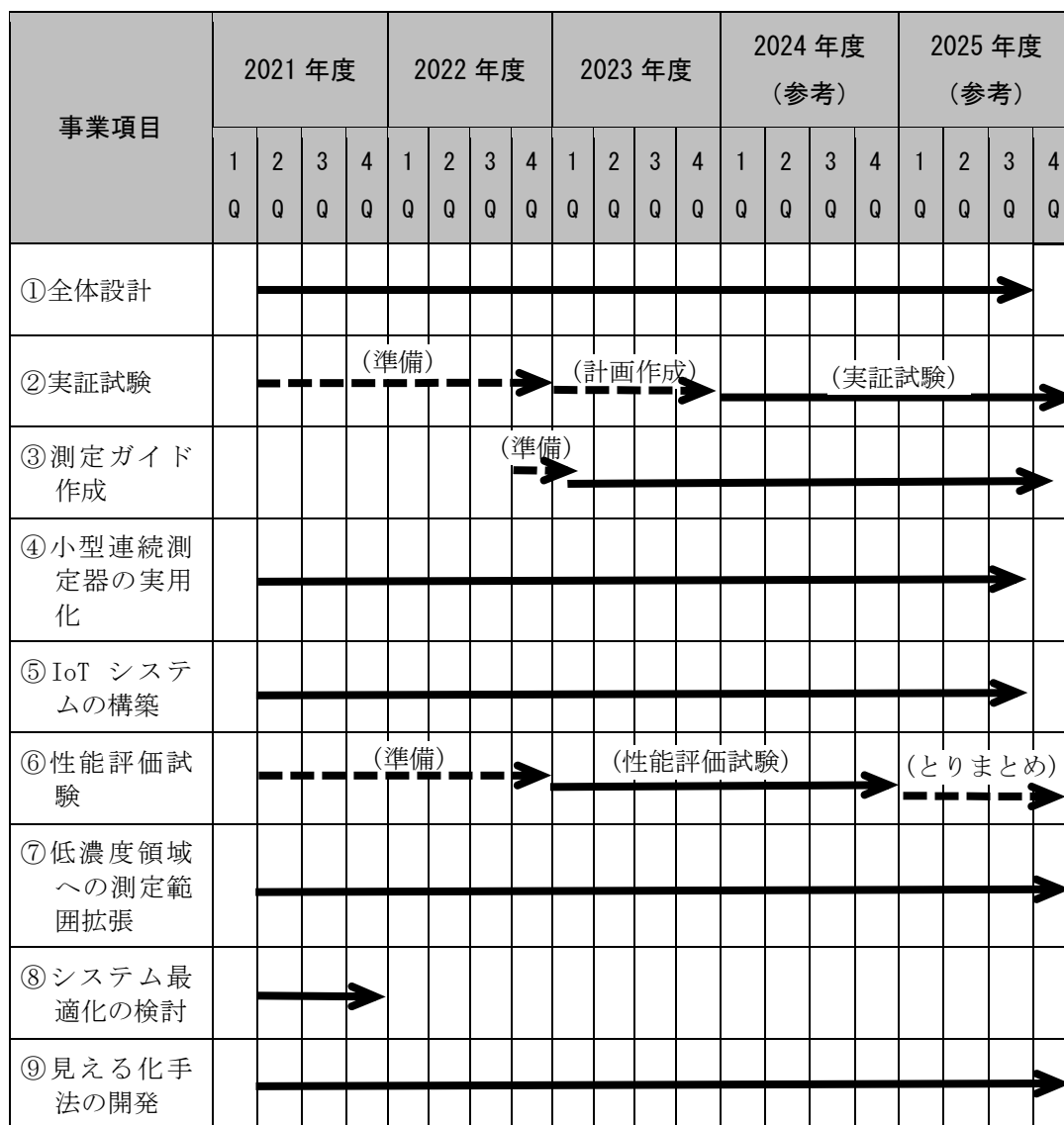


図3-1 事業スケジュール (概要)

4. 研究開発の実施体制

本研究開発の実施体制を図 4-1 に示す。

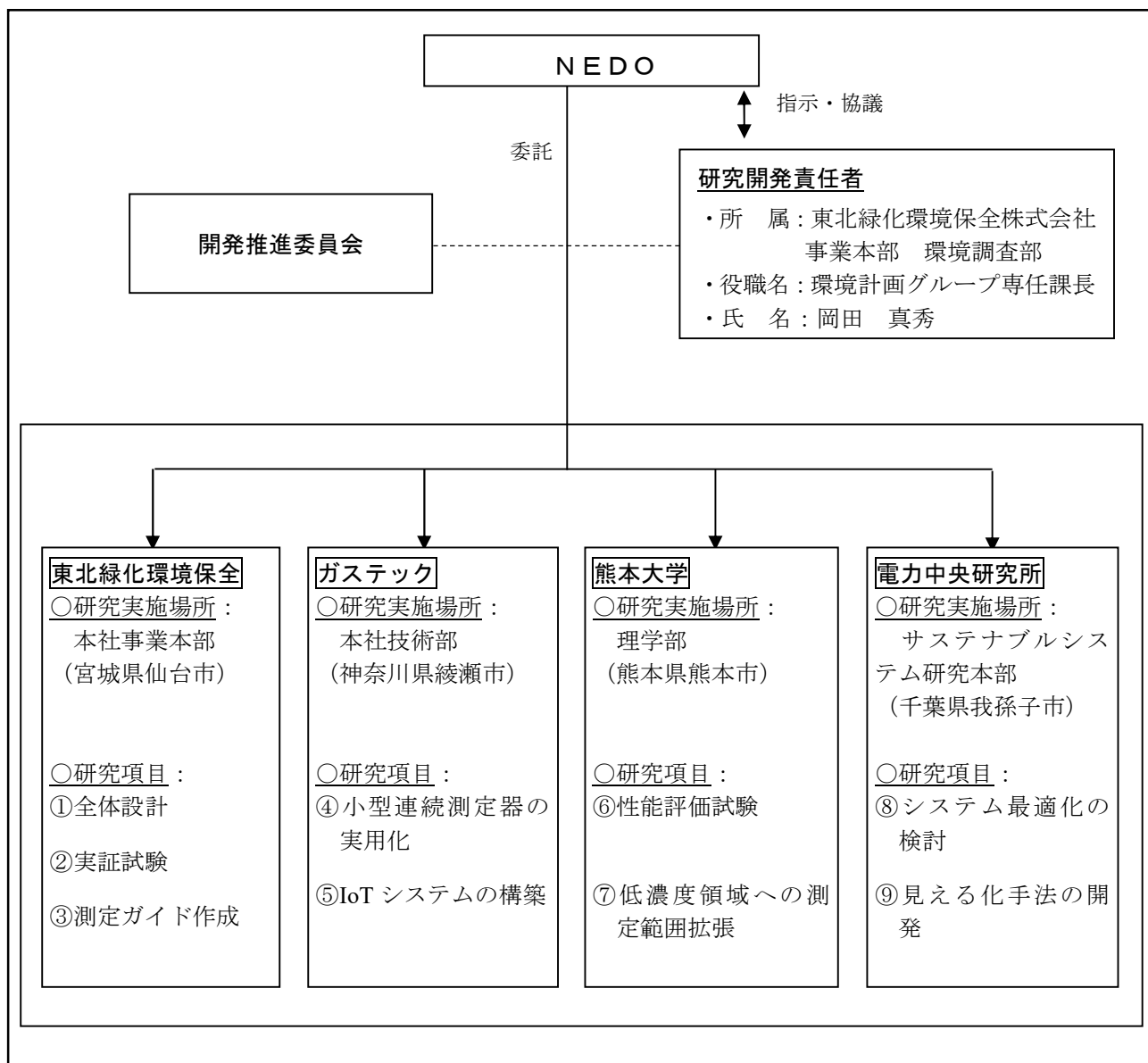


図 4-1 研究開発の実施体制

5. 事業の管理運営

本研究開発の推進委員会について、登録委員は表 5-1 に示し、実施履歴は表 5-2 に示すとおりである。

表 5-1 推進委員

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
浅沼 宏	(国研)産業技術総合研究所産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所 地熱チーム長	NEDO硫化水素モニタリングシステム開発推進委員会 委員長
樋口 慶郎	株式会社小川商会 取締役事業本部長	NEDO硫化水素モニタリングシステム開発推進委員会 委員
安倍 修	東北自然エネルギー株式会社 地熱事業部 部長	NEDO硫化水素モニタリングシステム開発推進委員会 委員

表5-2 推進委員会の実施履歴

年度	回数	開催年月日	主な議題
2021	第1回	2021年8月26日	研究開発計画について
	第2回	2022年3月 2日	当年度成果と次年度計画について
2022	第3回	2023年3月 9日	当年度成果と次年度計画について

6. 研究開発成果について

(1) 研究開発成果

2022年度までに、小型連続測定器の実証機および低濃度領域測定器の試作機を製作し動作テストを行った。また、性能評価試験の試験装置を組み上げテストを行い、試験計画を作成した。

一方、IoTシステムはテスト通信に成功し、WEBアプリケーションの製作に着手したほか、見える化手法は最適なシミュレーション手法の選定方針を決定した。

さらに、実証試験は予備調査を実施し候補地を決定した。硫化水素の影響有無の判断基準選定に向けた検討を行った。

2023年度に、小型連続測定器は実証機の性能評価試験を行い、低濃度領域測定器は反応系等、これまでの要素開発を踏まえ装置化を実施する。

一方、IoTシステムはWEBアプリケーションの開発を進め衛星通信や気象データを含めた現地試験を行うとともに、見える化手法はシミュレーション手法の開発を進め実装方針を決定する。さらに、実証試験の詳細計画の策定をすすめ、測定ガイドの作成に着手する。

これにより、表 6-1 に示す成果が得られ、中間目標は達成できる見込みである。

表 6-1 中間目標に対する達成度（見込み）

項目	技術的な中間目標 (2024年3月)	達成度 (見込み)
小型連続測定器の実用化	<ul style="list-style-type: none"> ○基本性能として以下の評価が得られること。 ・検出限界：0.01 ppm 以下 ・指示精度 ±0.01 ppm 以内(試験ガス濃度:約 0.11 ppm ^{注1)} ±10 %以内(試験ガス濃度:約 1.00 ppm ^{注1)} ○使用環境を想定した温度、湿度による影響の試験において以下の評価が得られること ・測定値の変化：±0.01 ppm 以内 	○
低濃度領域への測定範囲拡張	○環境アセス公定法と同等の測定範囲の下限(0.004 ppm)を持つ試作機を完成させ、野外においてバッテリー駆動で正常に6時間の測定が可能なこと	○
実証試験	○地熱発電所等を実験フィールドとし、新しい硫化水素測定手法ガイドラインの案に基づく実証試験の詳細な計画をとりまとめること	○

注：1. 前プロジェクトで提案されている「地熱発電所の冷却塔から排出される硫化水素の予測手法の基本的な考え方に関するガイドライン(案)」での評価 基準濃度（住居等がある場合<0.11 ppm、住居等が無い場合<1.00 ppm）

2. 「屋外作業環境ガイドラインに基づく管理濃度」(1 ppm) や「WHO 欧州空気質ガイドライン」(0.11 ppm)

3. 項目「達成度(見込み)」の◎は大きく上回って達成、○は達成、△は一部未達、×は未達を示す。

(2) 開発のメリット／環境アセスメント硫化水素測定効率化

本研究開発のメリットは、図 6-1 に示すとおりであり、開発する IoT 硫化水素モニタリングシステムでは、室内での試料の作成や分析、調査機材の運搬の手間、大型バッテリーを不要とし、現行より少ない人員で調査できる等がある。

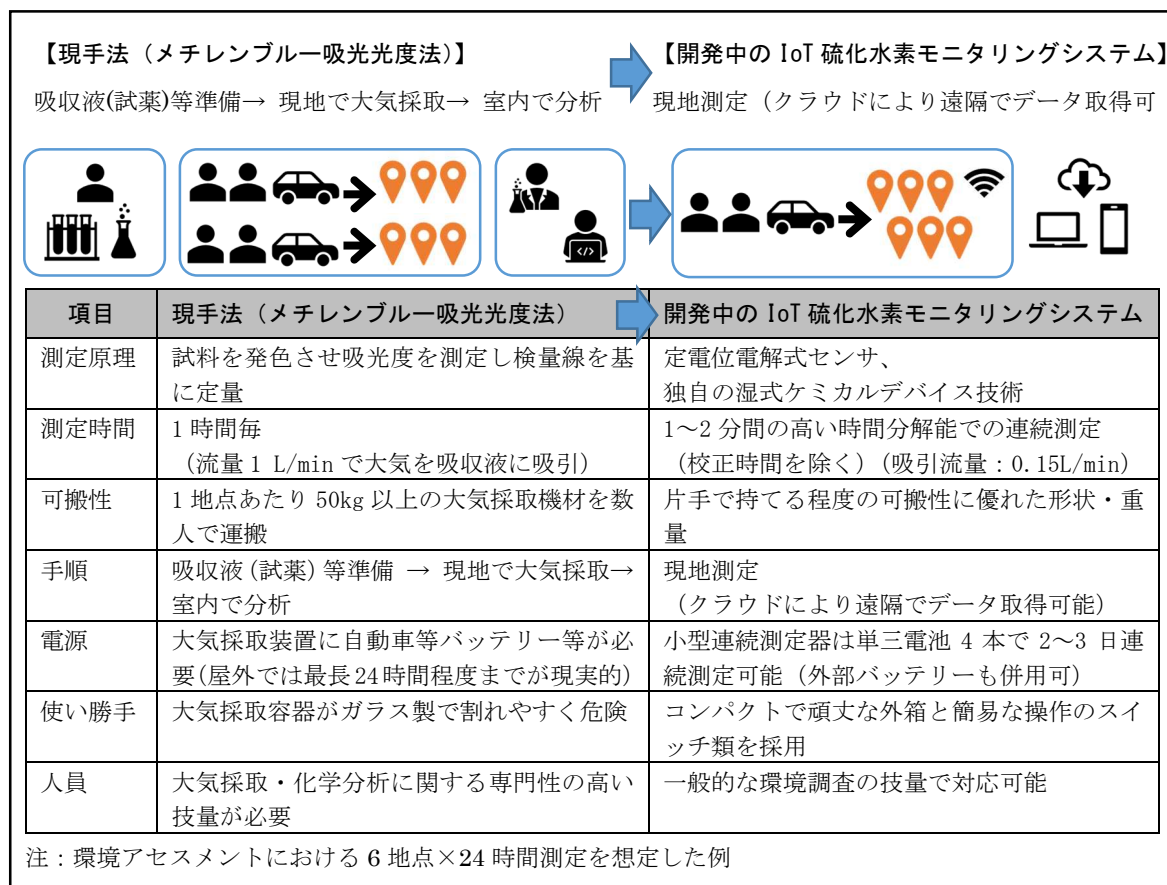


図 6-1 開発のメリット

(3) 環境アセスメントの効率化に伴う波及効果

波及効果は、表 6-2 に示すとおりである。

開発する IoT 硫化水素モニタリングシステムは、小型連続測定器、低濃度領域測定器、IoT システム、見える化手法と、測定手法ガイドラインから成り立っている。

これらのメリットを生かすことで、植物影響、金属腐食、臭気、火山、坑井掘削・噴気試験、地域との合意形成などを対象とした低い濃度の硫化水素を連続的に測定できる小型の可搬型測定器として、地熱発電所の環境モニタリング（コスト削減含む）だけではなく、様々な分野での活用が期待できる。

さらに、販売先が広がることで 1 台当たりの販売価格の低減にもつながることが期待される。

表 6-2 波及効果一覧

項目	メリット	波及効果
○IoT 硫化水素モニタリングシステム	AC 電源を必要とせず数日間の調査や長期間の調査が容易となる。 測定手法ガイドラインとセットとなることで、調査コストが大幅に低減できる。	以下の様々な分野の硫化水素測定を効率化する等の効果を包含する。
・小型連続測定器	<ul style="list-style-type: none"> ・現地で濃度がわかる。 ・時間分解能が、1 時間平均値から 1~2 分程度になり、変化が把握できる。 ・持ち運びが容易になる。 ・調査員の人員が削減できる。 	植物への影響調査、坑井掘削・噴気試験等、火山の噴火予知研究
・低濃度領域測定器	環境アセスメント従来通りの低濃度からさらに低い濃度まで測定できる。	植物への影響調査、金属腐食対策、臭気対策
・IoT システム	離れた場所でリアルタイムに濃度等がわかり、数日間の調査や長期間の調査が容易となる。	火山の噴火予知研究等の長期間モニタリング
・見える化手法	硫化水素濃度を面で、リアルタイムに把握することができる。	面的な実態をわかりやすく表示し、様々な合意形成や安心安全に貢献できる。
○測定手法ガイドライン	環境アセスメントの測定方法が追加され、調査コストが低減する。また容易に測定でき地熱発電所等の管理が容易になる。	中小地熱発電所やバイナリー発電所の濃度把握が容易になる。

7. 実用化・事業化へ向けての見通しと取組みについて

本研究開発では、0.01～5 ppm の濃度範囲を対象とした小型連続測定器の実用化を図り、2026 年度に商品化することを目指す。その小型連続測定器を用いて、地熱発電所の環境アセスメントの硫化水素測定を省力化する「IoT 硫化水素モニタリングシステム」を構築し、測定サービスを提供する。

ただし、現行の環境アセス公定法（下限 0.004 ppm）を代替するには濃度範囲を拡張する必要がある。0.01 ppm 未満の低濃度領域への測定範囲拡張機構は 2025 年度内に実用化の目途が得られる見込みであるものの、環境アセス公定法を完全に自動化できるシステムの販売は 2028 年度以降を想定している。

一方、低濃度領域への測定範囲拡張では、範囲の下限を需要に応じて最適化することとしている。0.004 ppm 未満の濃度にも対応した低濃度領域測定器及びモニタリングシステムを様々な分野に展開することにより製品価格を抑え、環境アセスメントのコスト削減に寄与することを目指す計画である。

また、環境アセスメントへの実装化へ取組状況と課題は、表 7-1 に示すとおりであり、測定手法ガイドライン化、公知化、測定濃度範囲の提案等に課題はあるものの、今後、実証機による検証、関係省庁や顧問会等へ事前説明等の環境アセス手引き改定のための働きかけ、学会等での発表、影響有無の判断基準妥当性に関する検討などの取り組みを着実に進めることにより、概ね計画通りに実用化・事業化を達成できる見通しである。

なお、専門家や NEDO ご担当の協力を仰ぎながら、今後も環境アセス手引きへの採用を目指して取り組みを継続する。

表 7-1 環境アセスメントへの実装化の取組状況と課題

項目	2022 年度までの主な成果
現手法との並行測定による検証	発電所計画地点周辺：1 件実施
手引き改訂に向けた働きかけ	関係省庁への事前説明 環境審査顧問会への事前説明
公知化	学会等での発表 ✓ 9/2 環境アセスメント学会 他
測定濃度 範囲の提案	「影響有無の判断基準妥当性に関する検討」 ✓ 中間とりまとめを実施

添付資料

●特許論文等リスト

【特許、論文、および学会発表等の件数】

項目	2021 年度	2022 年度	合計
特許	0	0	0
論文	0	0	0
学会発表（口頭・ポスター）	2	6	8
プレスリリース	0	0	0
新聞・TV 等掲載	0	0	0
受賞	0	1	1
その他	0	0	0

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月日
1	高橋 知広	(株)ガステック	定電位電解式センサを用いた地熱発電所の環境アセスメント向け硫化水素濃度測定器の開発	第 62 回大気環境学会年会	2021/09/16
2	岡田 真秀	東北緑化環境保全(株)	地熱利用と地域との共生を促進する新しい硫化水素測定手法のあり方の検討	日本地熱学会令和 3 年学術講習会	2021/10/27
3	岡田 真秀	東北緑化環境保全(株)	地熱発電所の環境アセスメントにおける硫化水素測定の効率化の取り組み	環境アセスメント学会第 21 回年次大会	2022/09/02
4	土屋 郷	東北緑化環境保全(株)	地熱発電所の環境アセスメントを効率化する IoT 硫化水素モニタリングシステムの開発	第 63 回大気環境学会年会	2022/09/14
5	松山 京右	(国)熊本大学	Quinolinol 金属錯体の蛍光特性を活用した硫化水素の新規検出法の開発	日本分析化学会第 71 年会	2022/09/14
6	岡田 真秀	東北緑化環境保全(株)	IoT 硫化水素モニタリングシステムの開発	日本地熱学会令和 4 年学術講習会	2022/10/08
7	戸田 敬	(国)熊本大学	地熱発電環境アセスを目指した低濃度硫化水素モニタリングシステムの開発	第 58 回フロンジェクション分析講演会	2022/11/25
8	青木 一樹	東北緑化環境保全(株)	Development of an IoT Hydrogen Sulfide Monitoring System for Environmental Impact Assessment of Geothermal Power Plants	グランド再生可能エネルギー 2022 国際会議	2022/12/13

(b) 受賞

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	受賞内容
1	青木 一 樹	東北緑化 環境保全 (株)	Development of an IoT Hydrogen Sulfide Monitoring System for Environmental Impact Assessment of Geothermal Power Plants	グランド再生可能エネルギー 2022 国際会議	POSTER PRESENTATION AWARD (ポスター賞)

以上

個別テーマ (3) -1.

(3) 地熱発電高度利用化技術開発

(3) -1. 蒸気生産データの AI 処理による坑内および貯留層での早期異常検知技術の開発

委託先：国立研究開発法人産業技術総合研究所
公立大学法人会津大学
奥会津地熱株式会社

1. 背景と目的

地熱発電の経済性・持続性確保のためには、発電設備への一定量の蒸気の安定供給が不可欠であるが、国内の多くの地熱発電所では、「蒸気生産量が不安定な坑井」が操業上の課題となっている。生産量の変化や脈動の発生、あるいは汽水比の変化などが突発的に生じた場合、それらの発生原因が不明であるが故に現場で適切な対応を取り難い事例も多数生じている。また、異常への早期の対応により異常拡大の防止が図れるが、このためには生産量に目視では検出困難な微小な変化が表れた時点でそれを検出するとともに原因を推定することに加え、将来予測を可能にする技術が必要である。

本事業の受託者である産総研、会津大学の研究者は温泉データやエネルギー供給関連データ等に対して、AI ベースの信号処理や状態空間モデルを適用し、データの高度な分析を行ってきた実績を有するが、予備的検討として奥会津地熱地域での蒸気生産データについて、生産データの統計数理モデル化や確率過程化が可能であることを見出してきた。本研究開発は、これらの予備的成果をベースに生産異常の早期検知と原因および対策を提示可能な AI システムを開発するとともに、それをを用いて貯留層内で発生する現象の理解を深化させる。これにより、柳津西山地熱発電所における発電量の 10%増大と奥会津地熱(株)における坑井・貯留層維持管理費用の 20%以上削減を目指す。さらには、開発した AI システムを蒸気生産事業者・地熱発電事業者が標準的ツールとして広く利用可能にすることを目的とする。

なお、本事業の成果物が国内の地熱発電所の 50%に導入され、各発電所の出力が 10%増大すれば、約 130GWh/年の発電量増大（約 34 億円程度の売電収入に相当）が見込める。

2. 研究開発の概要

本事業では、奥会津地熱(株)蒸気生産設備および奥会津地熱地域で得られた坑井データ、微小地震データ等を実サンプルデータとして用い、これらに本事業で開発する AI

ベースの信号処理や状態空間モデルを適用し、生産データの統計数理モデル化や確率過程化を実現する。さらに、これらモデルから得られたパラメータにより、異常発生の事前・早期検知や、他の貯留層データとの関連性の定量評価を実現可能にする。これらの成果を地熱開発分野で広く利用可能にすることを旨とし、開発したAIシステムを汎用化させ、国内蒸気生産事業者・地熱発電事業者が標準的ツールとして広く利用可能にする。

本事業での研究開発を大きく以下の3項目に分類し、これらを順次実施することにより、効率的かつ着実な目標達成を目指す。

- I. AI および統計数理学の概念を用いた異常検知・将来予測・原因特定技術の開発
- II. 実際の蒸気生産設備へのソフトウェア組み込み。さらに実証試験を通じた実運用時の課題抽出と解決
- III. 蒸気生産事業者・地熱発電事業者への普及を目的とした技術のマニュアル化とソフトウェアの汎用化

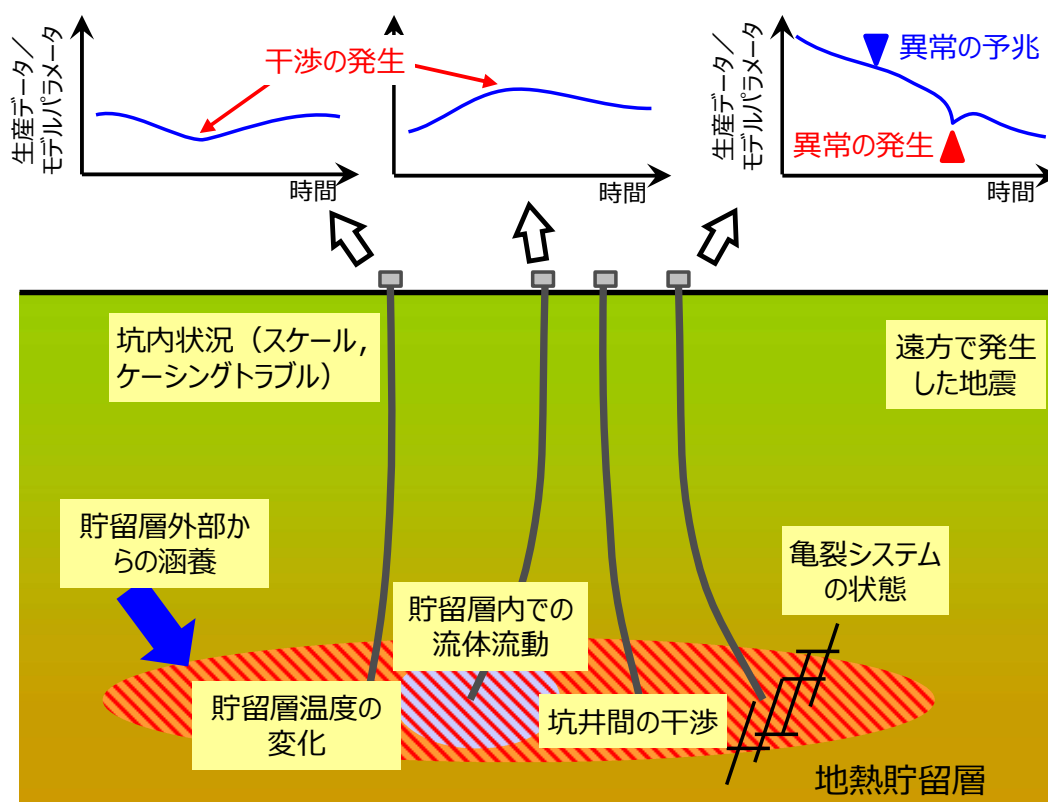


図 2-1 蒸気生産量は坑内や貯留層の状況等により変化する。生産データやそこから抽出したパラメータには異常の予兆・発生等に関する何らかの情報が含まれていると考えるのが妥当であり、それらを最新のAI技術・統計数理的手法により抽出

可能にするとともに、安定した生産のために現場で広く使用可能にするのが本研究開発の趣旨である。

各テーマにおける研究開発項目、開発目標及びその設定根拠を表 2-1 に示す。

表2-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	中間目標	最終目標	根拠
I. AI による異常検出法の開発 (a)基礎データ収集	<ul style="list-style-type: none"> 過去の生産記録，トラブル記録，貯留層データの収集，フォーマット変換を終了する。 	中間目標と同じ（本項目はFY2022末で終了）	<ul style="list-style-type: none"> I-(b)で実施するAIの開発，およびIIで実施する実証試験の開始に不可欠であるため。
(b)AIの開発	<ul style="list-style-type: none"> 蒸気生産量異常検出，原因推定AIの開発を終了する。 シミュレーションを通じて，生産異常の70%程度を事前・もしくは早期検知可能であり，事前・早期検知した異常の70%以上について原因を提示できることを示す。 	中間目標と同じ（本項目はFY2023末で終了）	<ul style="list-style-type: none"> IIで実施する実証試験の開始に不可欠であるため。 これまでの蒸気生産の経験から，目標値が達成されれば，蒸気生産管理業務上，非常に有益であると判断しているため。
II. 実証試験	<ul style="list-style-type: none"> 奥会津地熱㈱が運用中の坑井データ監視・記録システムで使用可能にするためのコーディング及び必要なハードウェアのコア部分の設計・開発を終了する。 	<ul style="list-style-type: none"> 奥会津地熱地域において生産異常の60%程度を事前，もしくは早期検知可能であり，事前・早期検知した異常の65%以上について原因を提示できることを示す。 本AIシステムにより，10%の蒸気生産量増大，および坑井管理にかかる業務もしくは維持管理コストの20%以上を削減できることを示す。 	<ul style="list-style-type: none"> これまでの蒸気生産の経験から，目標値が達成されれば，蒸気生産管理業務上，非常に有益であると判断しているため。
III. 汎用化	目標設定無（FY2025に実施予定）	<ul style="list-style-type: none"> マニュアル化，コードの整備，PRコンテンツの作成を終了する。 	<ul style="list-style-type: none"> 本研究開発終了直後から複数の蒸気生産設備での運用を可能にするためにこの目標達成が必要であるため。

3. 事業スケジュール

本研究開発の期間は2021年6月15日より2024年3月20日であり、そのスケジュールの概要を図3-1に示す。

事業項目	2021年度				2022年度				2023年度				2024年度 (予定)				2025年度 (予定)			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
I. AIによる異常検出法の開発																				
(a)基礎データの収集	→								→								→			
(b)AIの開発	→								→								→			
II. 実証試験									→											
III. 汎用化																	→			

図 3-1 研究開発のスケジュール

4. 予算

本研究開発の予算額を表 4-1 に示す。

表 4-1 研究開発の予算額

(単位：百万円)

	2021 年度	2022 年度	2023 年度	総額
研究開発費（産総研）	20.0	43.0	31.0	94.0
研究開発費（会津大）	10.4	21.5	21.0	53.0
研究開発費（奥会津地熱）	23.2	27.0	27.8	77.9
合計	53.6	91.5	79.8	224.9

5. 研究開発の実施体制

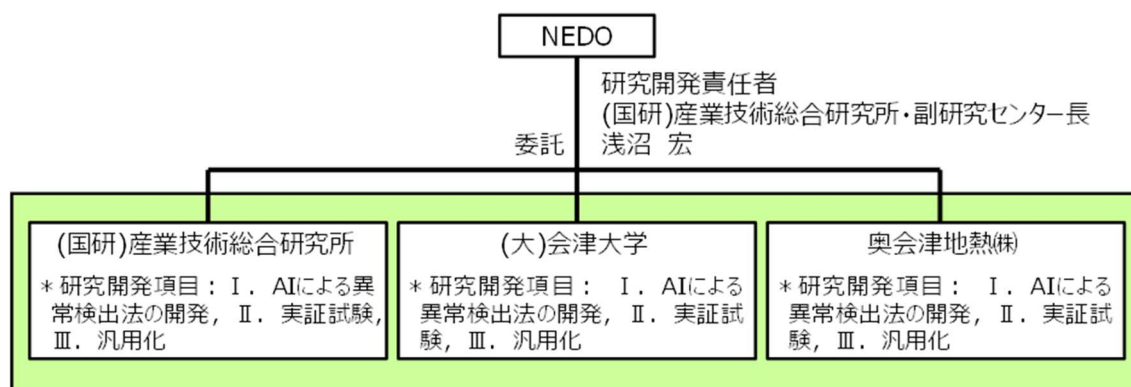


図 5-1 研究開発の実施体制

6. 事業の管理運営

全体打合せ：2023.3.31 までに 11 回開催

(開催日：2021.7.7, 2021.7.27, 2021.9.29, 2021.11.2, 2022.1.17, 2022.2.28, 2022.3.25, 2022.5.13, 2022.9.1, 2022.11.1, 2023.3.1)

これらに加え、項目別打合せを週に 1 回程度開催

表 6-1 有識者

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
井櫻 剛	三井金属鉱業(株) 生産技術部・部長補佐	蒸気生産・監視システムの設備設計と設置に関する指導・助言
田中泰正	三井金属鉱業(株) 生産技術部・部長補佐	操業データ、分析データの統計解析、並びにAI活用に関する指導・助言
平井克幸	三井金属鉱業(株) 生産技術部・担当部長	基礎データ作成のための操業データのサンプリング・データ変換と、IT技術の活用に関する助言
久米裕之	三井金属鉱業(株) 資源事業部・事業推進部主査兼 品質保証室主査	柳津西山地域における地質学的見地からの貯留層挙動に関する指導・助言

7. 研究開発成果について

本研究開発の成果は下表のとおりである。設定した中間目標に対して項目Ⅰ(a)は目標を大きく上回って達成できる見込みであり、項目Ⅱ～Ⅳは達成できる見込みである。

表 7-1 中間目標に対する達成度（見込み）

研究開発項目	中間目標 (2024年3月)	成果 (2023年3月まで)	達成度 (見込み)	達成の根拠 ／解決方針
Ⅰ. AI による 異常検出法の 開発 (a) 基礎デー タ収集	<ul style="list-style-type: none"> 過去の生産記録, トラブル記録, 貯留層データの収集, フォーマット変換を終了する。 	<ul style="list-style-type: none"> 過去の生産記録, トラブル記録, 貯留層データの収集, フォーマット変換を終了した。 	◎ 2023年4月に 達成（必要が 生じた場合、 FY2023以降 も実施）	<ul style="list-style-type: none"> JOGMECプロジェクト等で取得したデータが利用可能となり、当初想定以上の量、品質の基礎データを収集できた。
(b)AIの開発	<ul style="list-style-type: none"> 蒸気生産量異常検出, 原因推定 AI の開発を終了する。 シミュレーションを通じて, 生産異常の70%程度を事前・もしくは早期検知可能であり, 事前・早期検知した異常の70%以上について原因を提示できることを示す。 	<ul style="list-style-type: none"> 蒸気生産量異常検出, 原因推定 AI のコア部分の開発を終えた。 シミュレーションにより生産異常の80%以上について事前・早期検出が可能であることを示した。 典型的異常について原因との関連を示すデータベースを構築した。 	○ 2024年4月に 達成見込	<ul style="list-style-type: none"> 研究開発は大きな問題なく順調に進んでおり、当初予定通り、もしくは予定を上回る成果を達成できる見込。
Ⅱ. 実証試験	<ul style="list-style-type: none"> 奥会津地熱株が運用中の坑井データ監視・記録システムで使用可能にするためのコーディング及び必要なハードウェアのコア部分の設計・開発を終了する。 	<ul style="list-style-type: none"> AI システムの仕様を策定し、コア部分の開発を開始した。 奥会津地熱株が運用中の坑井データ監視・記録システムで使用可能にするためのハード・ソフトの整備を終了した。 	○ 2024年4月に 達成見込	<ul style="list-style-type: none"> 研究開発は大きな問題なく順調に進んでおり、当初予定通り、もしくは予定を上回る成果を達成できる見込。
Ⅲ. 汎用化	<ul style="list-style-type: none"> 目標設定無 (FY2025に 実施予定) 			

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

8. 実用化・事業化へ向けての見通しと取組みについて

実用化・事業化に向けての見通しと今後の取り組みは、以下のとおりである。

実用化・事業化の対象：蒸気生産早期異常検出・原因判別 AI システム

実用化・事業化への取組

- ・ 奥会津地熱(株)：本事業終了直後から同社蒸気生産設備に組み込んだシステムを稼働させ、蒸気生産量増大及び利用率向上に結び付ける。
- ・ 産総研，奥会津地熱(株)：日本地熱協会等を通じて PR を行い，導入希望する企業へ AI システムのコア部分を無償提供し，利用拡大を図る。
- ・ 産総研，会津大：システムのブラッシュアップによる機能性の向上，解析技術・ノウハウが十分でない事業者への支援等により導入促進へ寄与する。

表 8-1 実用化・事業化の見通しと課題・取組み

実施項目	FY2026～2030	FY2031～FY2040
奥会津地熱(株)での導入	システム運用・ブラッシュアップ	
蒸気生産事業者での導入	システム導入・ブラッシュアップ	
奥会津地熱(株)，産総研，会津大によるPR	協会・学会等でのPR活動	
産総研・会津大による導入支援	蒸気生産事業者・発電事業者等への技術指導	導入各社で実施
	定期的バージョンアップ	導入各社で実施

個別テーマ (3) -2.

(3) 地熱発電高度利用化技術開発

(3) -2. 坑内異常自動検出 AI 方式, 耐熱坑内可視カメラ (BHS) 開発

委託先：地熱エンジニアリング株式会社、三井金属資源開発株式会社

再委託先：国立研究開発法人産業技術総合研究所、松永ジオサーベイ株式会社

1. 背景と目的

地熱井の長寿命化・安定運用のためには、坑内のスケール付着やケーシング破損（圧潰・腐食等）の対策が重要であり、その検討において、坑内状況の適切な把握を行なう必要がある（図 1-1 参照）。そのため、本事業において、トラブルを抱えている地熱井坑内状況を視覚的に把握できるシステムとして、1) 200℃程度の耐熱性能を持つボアホール光学カメラ検層器（耐熱坑内可視カメラ（以下、ボアホールスキュナーと呼び、BHS と略記する）と検層器で確認したスケールを採取する装置、2) 画像鮮明化機能および 3) 画像から坑内異常を自動検出する AI 機能からなるシステムの開発を行う。

本研究開発の成果により、地熱井の坑内で生じている異常箇所を視覚的に把握して、トラブル要因の一つであるスケール試料を採取し、最適な対策修繕計画の立案に資する情報提供を行えるようにすることで、地熱井の長寿命化・安定運用に寄与することができる。

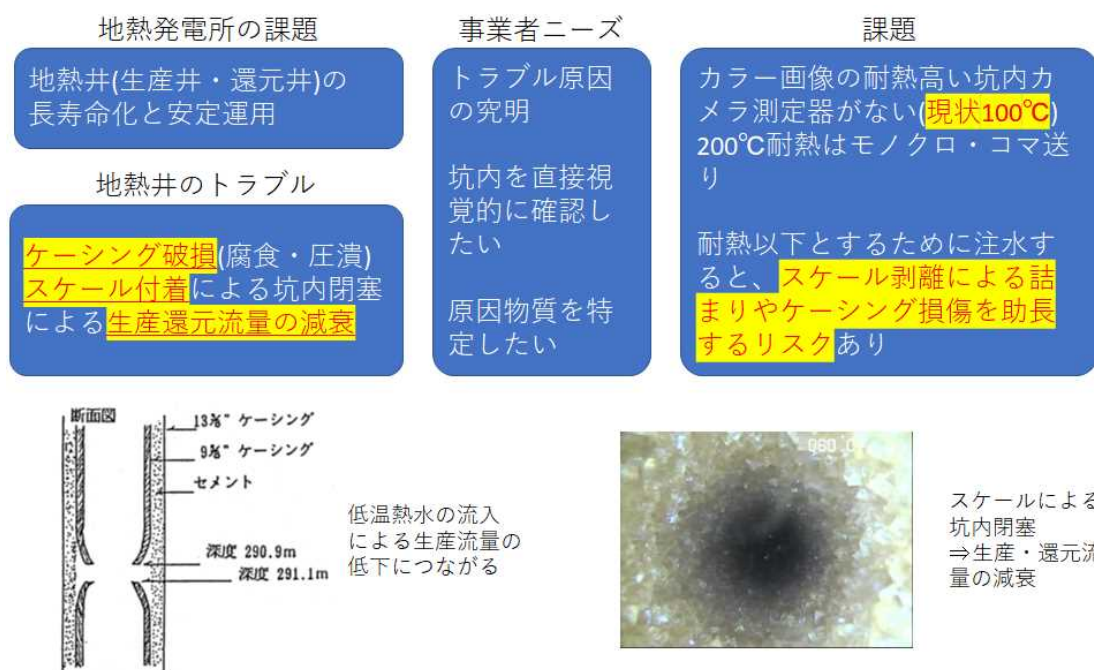


図 1-1 地熱発電所の課題・事業者ニーズ・技術課題

2. 研究開発の概要

坑内にスケールが付着したりケーシング破損（圧潰・腐食等）している地熱井の坑内状況の適切な把握を行なうための技術として、下記の三つの開発要素からなる研究開発を行う。

① 200℃程度の耐熱性能を持つボアホール光学カメラ検層器の開発及びスケール採取装置の開発

深度 2,000m 程度までの耐圧性能を持ち、4～6 時間程度の作業時間が確保できる耐熱性能を持つ光学カメラ検層器を開発する。また、BHS で確認したスケール試料を採取する装置を開発する。

② 画像鮮明化技術手法の開発

スケール等の浮遊物があり、坑内水が混濁した状態においても、複数のフィルタリング・補正等による鮮明化処理技術を活用することで、視認性の向上を図り、リアルタイムで鮮明化した画像を確認できるシステム（ソフトウェアおよびハードウェア）を開発する。

③ AI 技術を用いた画像から坑内異常を自動検出するシステムの開発

AI 学習(健全な状態のケーシングや不具合・坑内異常のある坑内状況事例)を活用して、坑内異常を自動で検出できるシステムを開発する。開発したシステムを活用することで、作業者が坑内異常を目視確認している状況を改善し、異常検出に関わる作業時間の短縮・効率化を図る。

また、東北地方の複数の地熱井を用いた現地実証試験を通じて、それぞれの開発要素についての検証を行うとともに、それらを統合したシステムを開発する。本研究開発に関わる現状・課題・アプローチ・成果品のイメージを図 2-1 に、開発したシステムの活用方法と地熱発電所の安定運用およびコスト削減への貢献イメージを図 2-2 に示す。

本技術開発の最終的なシステム構成図を図 2-3 に示す。各テーマにおける研究開発項目、開発目標及びその設定根拠を表 2-1 に示す。

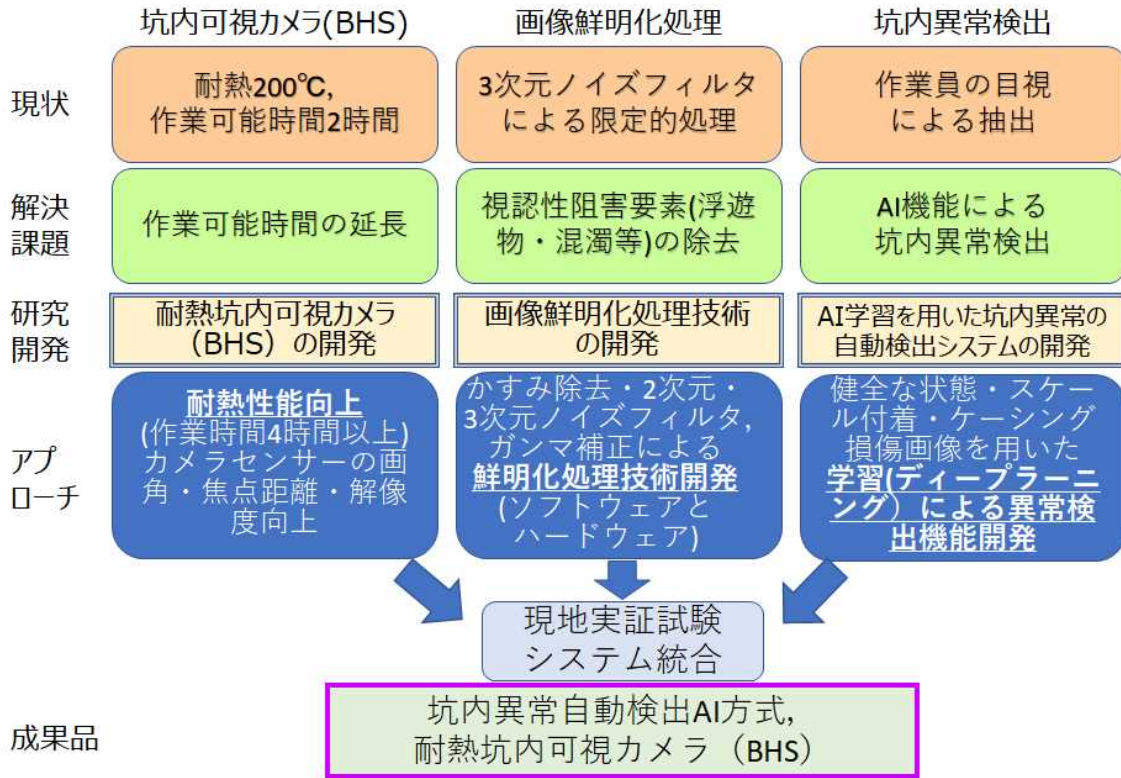


図 2-1 耐熱坑内可視カメラ (BHS) 課題および取組・成果品イメージ

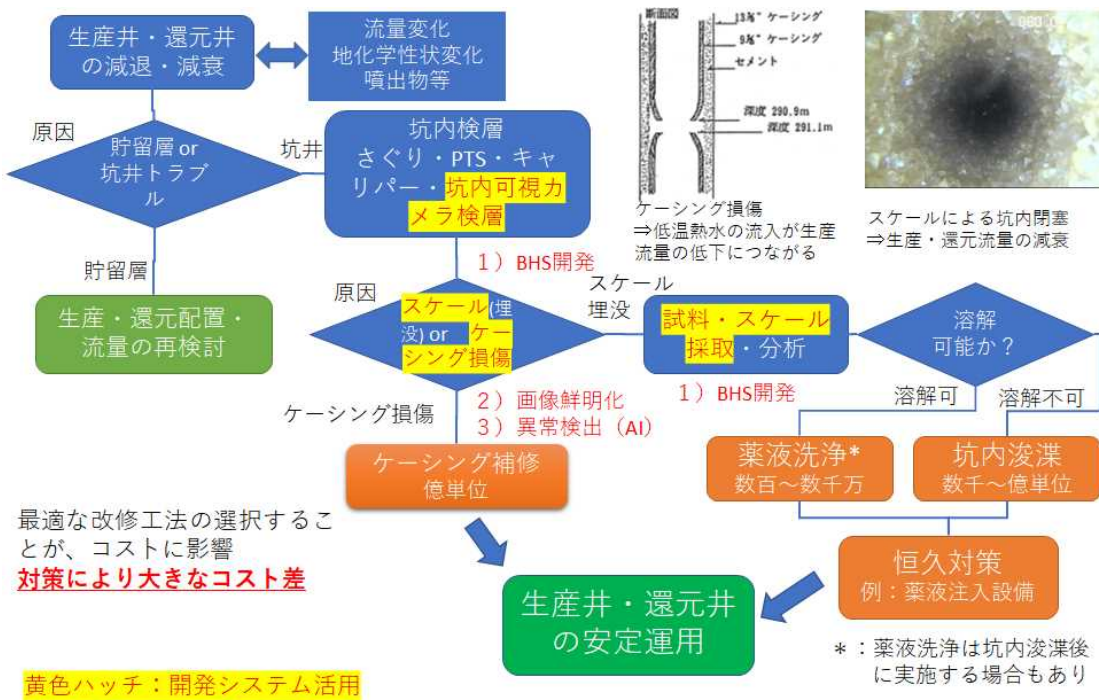


図 2-2 開発したシステムの活用方法と地熱発電所の安定運用およびコスト削減への貢献イメージ

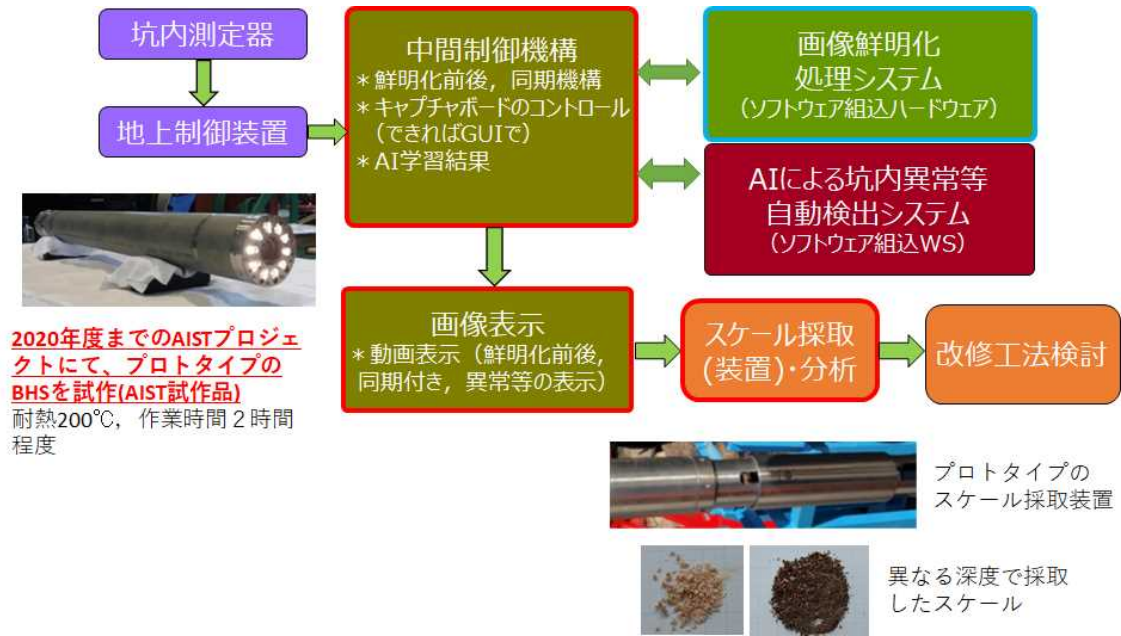


図 2-3 耐熱坑内可視カメラ (BHS) システム構成図

表2-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	中間目標(FY2022末)	最終目標(FY2023末)	根拠
①耐熱坑内可視カメラ(BHS)の開発	200℃・2,000m程度の環境下での坑内画像が取得可能で、VGA以上の画像分解能(焦点での分解能0.5mm以下)を持つBHSが開発されていること。	200℃, 2,000m程度の環境下で4時間以上作業ができるBHSが開発されていること。 また、BHSで確認したスケールを採取する装置が開発されていること。	実用的に坑内作業が確実に実施できる状況と考えるため
②画像鮮明化処理技術の開発	浮遊物等のノイズを低減・除去できる画像鮮明化処理が可能な3次元ノイズフィルタをはじめとするシステムのプロトタイプが完成し、坑壁画像が視認できる状況に改善されていること。	画像処理システムのハードウェアへの組み込みが完了し、現場において、鮮明化した画像を視認できる状況になっていること。さらに、画像鮮明化処理システムとAIによる異常検出システムを統合すること。	現場作業中にほぼリアルタイム処理にて、坑壁画像を把握することで、坑内異常を検出できる状況にするため
③AI学習を用いた坑内異常の自動検出システムの開発	過去のデータの学習が完了した画像処理システムのプラットフォームが完成し、健全な状態にあるケーシングの継ぎ目が100%検出でき、スケール付着状況が画面上で検出されるシステムが実現していること。	生画像および鮮明化処理後の画像からスケール付着・ケーシング損傷部を自動検出できるシステムが完成し、解析時のデータ処理時間が従前(マニュアル)の1/3程度となること。	坑内異常を自動検出できて、解析時の作業時間を低減することで作業の効率化、異常箇所の見逃しリスク低減を図ることができるため

3. 事業スケジュール

本研究開発の期間は2021年6月15日より2024年3月31日であり、そのスケジュールの概要を図3-1に示す。

研究開発項目	担当	2021年度	2022年度	2023年度
①高耐熱ポアホールスキャナの開発	○Geo-E, MINDECO, AIST	高耐熱ポアホールスキャナの開発		スケール採取装置開発
②画像鮮明化処理技術の開発	Geo-E, ○MINDECO, AIST	画像鮮明化処理技術の開発		ハードウェアの開発
③AI学習を用いた坑内異常の自動検出システムの開発	Geo-E, MINDECO, ○AIST	AI学習を用いた坑内異常の自動検出システムの開発		
		坑内画像データの学習	坑内異常検出システムの開発	
④現地実証試験	○Geo-E, MINDECO AIST,MGS	現地実証試験		
⑤システム統合	○Geo-E, MINDECO, AIST,MGS	システム統合		

図3-1 研究開発のスケジュール

4. 予算

本研究開発の予算額を表4-1に示す。

表4-1 研究開発の予算額

(単位：百万円)

	2021年度	2022年度	2023年度	総額
研究開発費	81	88	65	234
(上段：地熱エンジニアリング、 下段：三井金属資源開発)	15	12	32	59
合計	96	100	97	293

5. 研究開発の実施体制

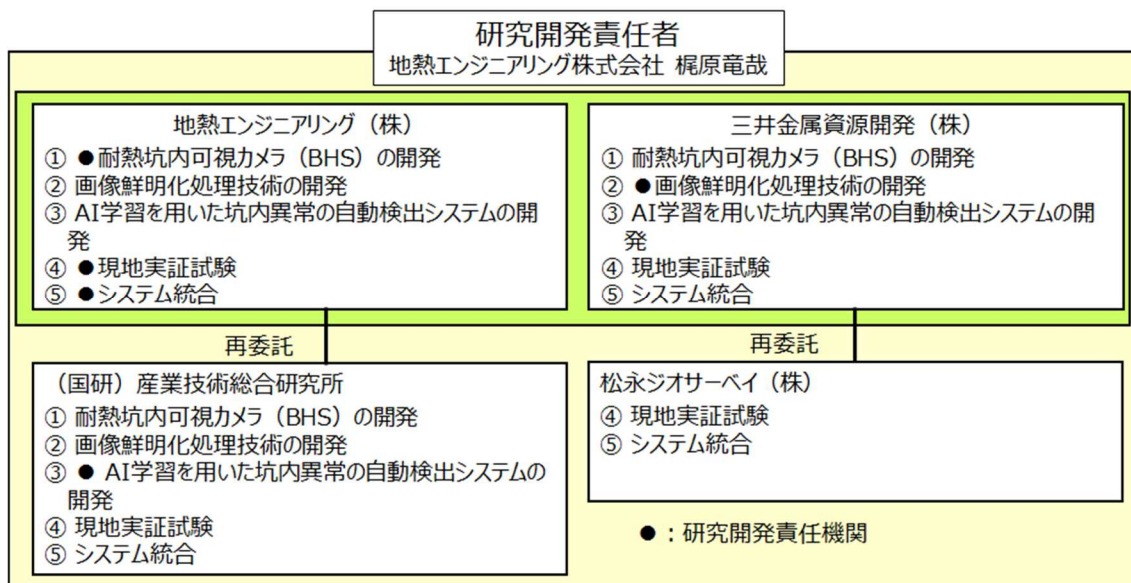


図 5-1 研究開発の実施体制

6. 事業の管理運営

現在までの事業運営に関わる打合せ状況を年度毎に下表に示す。

2021 年度	2022 年度
2021/7/7 キックオフミーティング	2022/4/11 定例進捗打合せ
2021/9/10 定例進捗打合せ	2022/7/6,7 現地実証試験・進捗打合せ
2021/10/14 定例進捗打合せ	2022/8/2 定例進捗打合せ
2021/11/29 定例進捗打合せ	(測定器改良点抽出)
2022/1/18 定例進捗打合せ	2022/9/29 定例進捗打合せ
2022/3/1 定例進捗打合せ	2022/11/2 定例進捗打合せ
2022/3/8 技術委員会打合せ(NEDO)	2022/12/2 定例進捗打合せ
2022/3/17 技術委員会(NEDO)	2023/1/6 定例進捗打合せ
	2023/1/10 技術委員会打合せ(NEDO)
	2022/1/19 技術委員会(NEDO)
	2023/1/20 定例進捗打合せ
	2023/2/9 定例進捗打合せ

表 6-1 有識者

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
国松 直	RED総合研究所・代表	BHSシステムに関する総合的な助言
青木 孝文	東北大学大学院情報科学研究科・教授・理事・副学長	AIによる坑内異常等の検出機能開発に関する助言
伊藤 康一	東北大学大学院情報科学研究科・准教授	AIによる坑内異常等の検出機能開発に関する助言
島村 徹也	埼玉大学工学部情報工学科・教授	画像鮮明化処理・定量評価に関わる助言
加藤 修	東北自然エネルギー株式会社 雫石事業所・所長	カメラ検層器・坑内異常検出に関する助言
阿部 泰行	奥会津地熱株式会社・代表取締役社長	カメラ検層器・坑内異常検出に関する助言

7. 研究開発成果について

本研究開発の成果は表 7-1 のとおりである。設定した中間目標に対して、項目②は目標を大きく上回って達成できる見込みであり、項目①、③は達成できる見込みである。

表 7-1 中間目標に対する達成度（見込み）

研究開発項目	最終目標 (2024年3月)	成果 (2023年3月まで)	達成度 (見込み)	達成の根拠 ／解決方針
①耐熱坑内可視カメラ（BHS）の開発	200℃、2,000m 程度の環境下で4時間以上作業可能な測定器開発。スケール採取装置が開発されていること。	200℃、2,000m 程度の環境下で2.5時間程度作業可能な測定器が開発できた。	○ (2023年12月)	内部温度シミュレーションから前面からの流入熱量を軽減することで目標達成が見通せることが示されたため/前面の断面積削減(熱流入量削減)・保冷機構容量増大・断熱材の追加等による断熱性能向上(センサー前面・ヘッド側)と実証
②画像鮮明化処理技術の開発	画像処理システムのハードウェア化完了、現場で鮮明化した画像を視認できる状況になっていること。	かすみ除去・2次元及び3次元ノイズフィルターを組み合わせることで画像鮮明化を実現	◎ (2023年12月)	複数のノイズフィルターを組み合わせることで画像中のノイズを大幅に軽減できているため/ソフトウェア・ハードウェアの製作と検証
③AI学習を用いた坑内異常の自動検出システムの開発	画像からスケール付着・ケーシング損傷部の自動検出システムが完成し、解析時間が従前の1/3程度となること	前方視についてAIによる学習の実施し、正常・スケール付着について正答率77%のシステムを開発	○ (2023年12月)	正答率向上とケーシング損傷の判別(学習データ数が少ない)が課題/類似画像を取り除いた学習によるAI機能の向上と損傷事例の追加、再学習機能開発を付加することで、随時機能向上できるシステムとする

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

7. 1 耐熱坑内可視カメラ (BHS) の開発

7. 1-1 試作測定器の実証試験結果

2021 年度に製作した試作測定器を図 7.1-1 に、測定現場で取得する測定画面例を図 7.1-2 に示す。測定器は耐熱 200℃、耐圧：20MPa、測定器外径(101.6mm)、長さ 1,320mm、重量 41.6kg である。



図 7.1-1 試作測定器 組立完成全体図

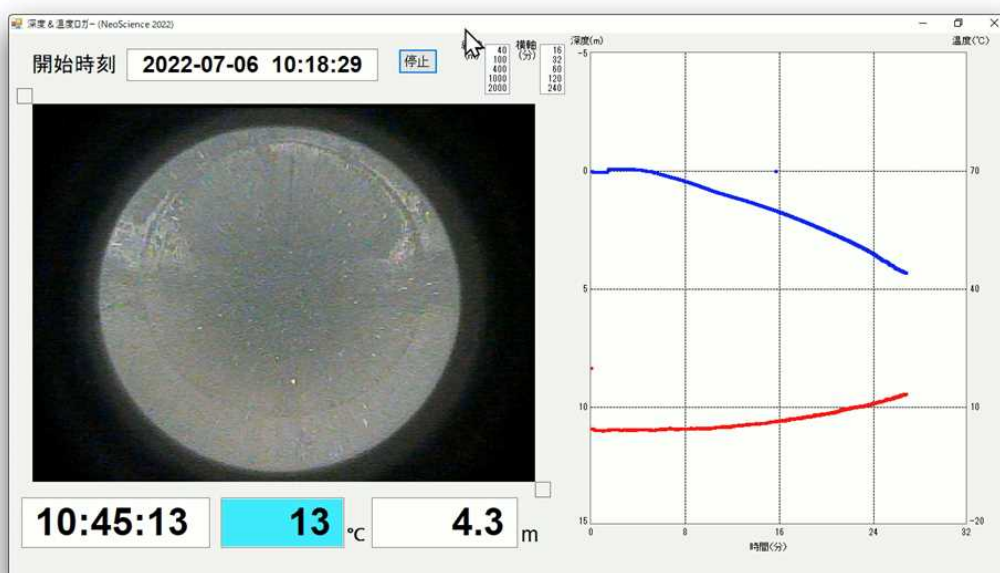


図 7.1-2 試作測定器 測定時のパソコン画面の画像(例)

実証試験時の測定器[試作品1号機と呼ぶ]の内部温度の変化を図7.1-3に示す。なお、同図には、研究開発プロジェクトの前に産総研主導によるプロジェクトで試作した測定器[AIST試作品と呼ぶ]の結果も合わせて示した。測定器は坑内温度200℃環境下において、正常に画像を表示することができることを確認できた。

カメラセンサーの動作確認温度は100℃までであり、カメラセンサー部の温度が100℃に達する時間を作業可能時間として評価した。その結果、試作品1号機は2.5時間程度となり、目標とした4時間には達しなかった。一方で、AIST試作品の作業可能時間は3時間10分程度と試作品1号機よりも長いと評価された(図7.1-3参照)。

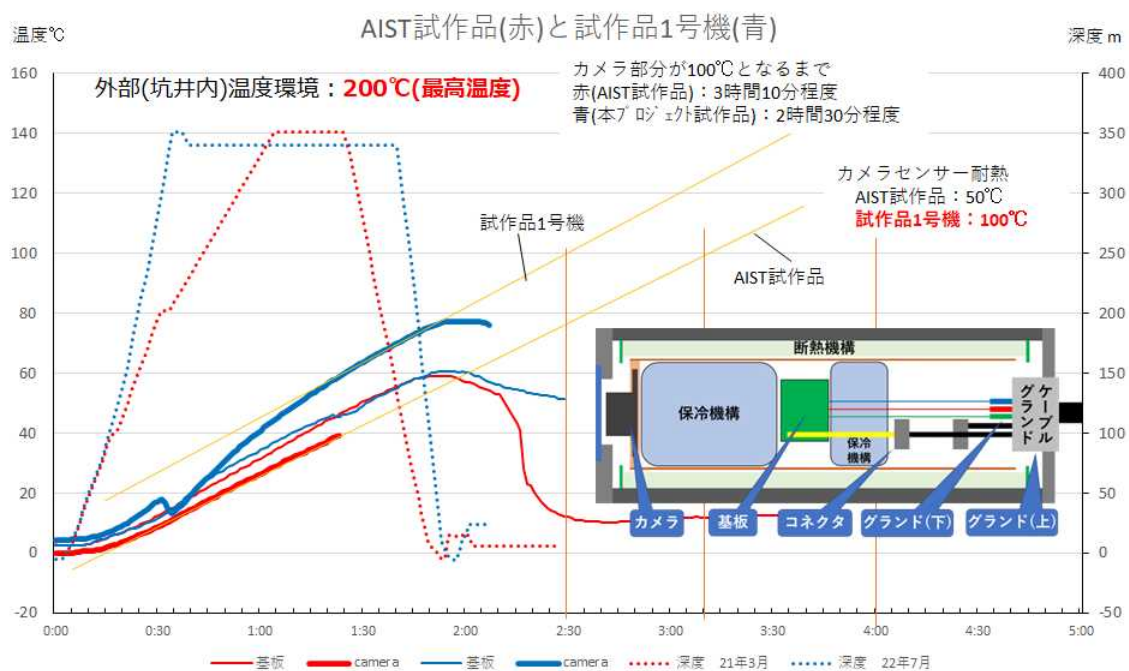


図 7.1-3 実証試験時の測定器内部温度の変化

両測定器間の作業可能時間の違いについて、両測定器の仕様の違いに基づいて、検討した結果を図7.1-4にまとめて示す。

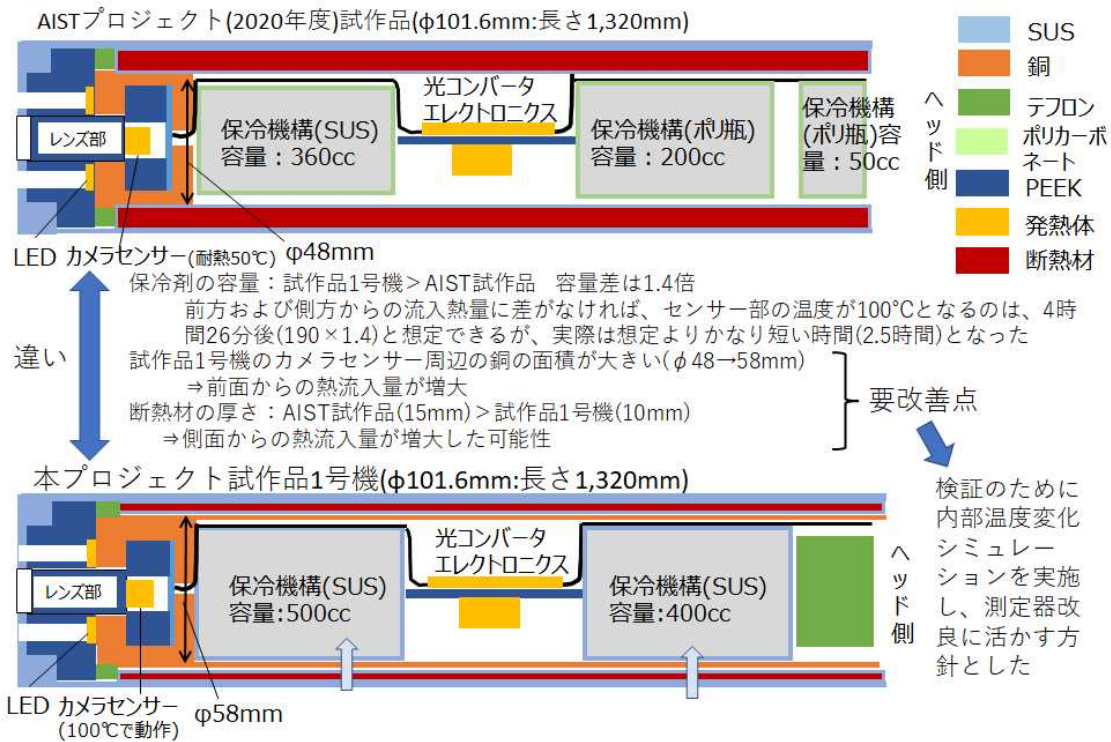


図 7.1-4 試作品 1 号機と AIST 試作品の構造の違いと作業可能時間の違いの考察

7. 1-2 内部温度シミュレーション結果

試作品 1 号機の実証試験時の内部温度変化について、シミュレーションを実施した。シミュレーションモデルは図 7.1-5 に示すような 2 次元軸対称モデルとして、測定器の外部温度変化にしたがって内部温度（カメラセンサー部）がどのように変化するかシミュレーションを行った。その内部温度とのマッチング結果を図 7.1-6 に、カメラセンサー周囲の熱流束分布を図 7.1-7 に示す。

図 7.1-7 から、測定器内部に流入する熱流束はカメラセンサー前方から大きいことが明確となった。また、カメラセンサー周囲の材料を熱伝導率の低い PTFE（テフロン）に換えるだけで熱流入量を半分程度までに低減できることがわかった。加えて、保冷機構の容量を増大することも有効と考えられた。



図 7.1-5 内部温度シミュレーション 2 次元軸対称モデル

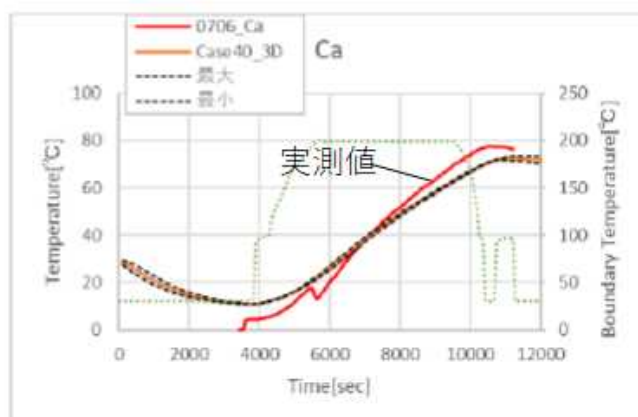


図 7.1-6 内部温度シミュレーション カメラセンサー部のマッチング状況

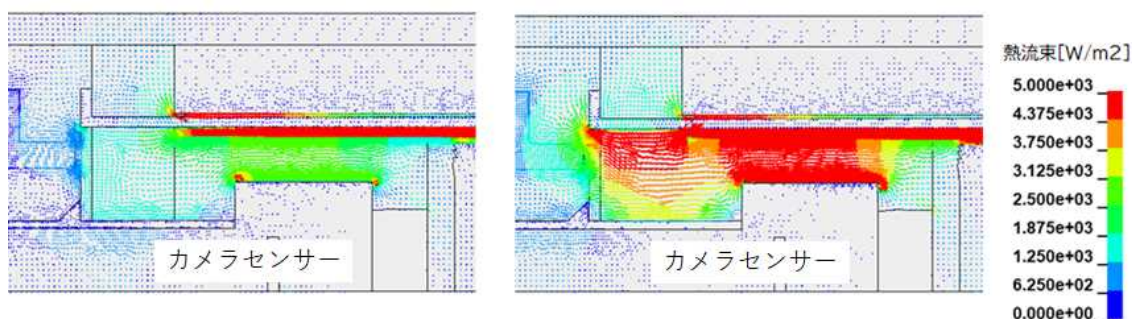


図 7.1-7 内部温度シミュレーション カメラセンサー周辺の熱流束分布(外部温度 200°C)
左：カメラセンサー周囲が PTFE、右：カメラセンサー周囲が銅(試作品 1 号機)

7. 1-3 試作品 2 号機に向けた改良方針

試作品 2 号機に向けた改良方針は下記の通りである(図 7.1-8 参照)。

- ◆ 前面の断面積は AIST 試作品と同程度以下とする。ただし、側面からの熱流入量も増大している可能性があるため、断熱材の厚さは AIST 試作品と同じにする(10mm⇒15mm)。
- ◆ カメラセンサーとエレクトロニクス間の保冷機構の容量をさらに増大させるために、測定器の長さを長くする。
- ◆ カメラセンサーはデジタルセンサーとする
- ◆ 保冷機構のカメラセンサー側には、熱を早く伝えるために、フィン構造についても検討する。
- ◆ 保冷機構は冷凍庫の大きさを考慮した長さとし、さらに、現場での作業性を考慮して、複数連結できるようにする。
- ◆ カメラセンサー周囲を銅からテフロンに変更し、前面からの熱流入量を下げるとともに、カメラセンサー部の熱を直接保冷機構に伝えられるように、センサーカバーは SUS とする。

- ◆ LED の数を減らして内部発熱量を減らす方向で検討する(実証試験において、光量をフルにする必要がなかったため)。

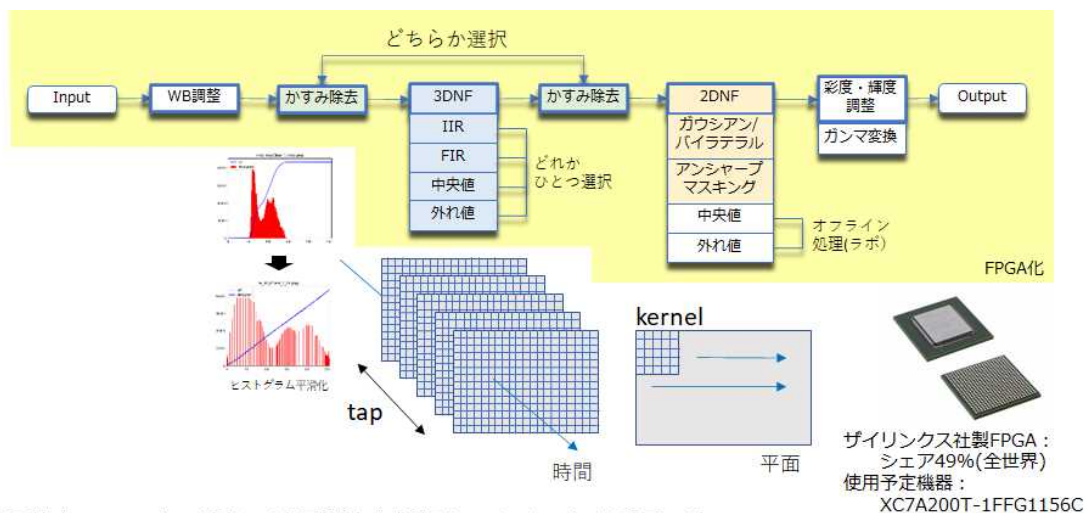


図 7.1-8 試作品 2 号機に向けた改良方針

7. 2 画像鮮明化処理技術の開発

7. 2-1 画像鮮明化処理システム 全体構成

画像鮮明化処理に使用する主要フィルターは、かすみ除去・3次元ノイズフィルター・2次元ノイズフィルターであり、その順序の事例を図 7.2-1 に示す。



効果的なフィルタの選択・適用順序を把握しておくことが重要：適用実験・評価（主観+定量評価）が必要
BRISQUE：画質を定量的に評価する手法のひとつで、評価用のリファレンス画像を必要としない手法。

図 7.2-1 画像鮮明化処理システム 全体構成

7. 2-2 画像鮮明化処理システム ソフトウェア構成

画像鮮明化処理システムの構成と GUI(Graphical User Interface)を図 7.2-2 と図 7.2-3 に示す。現場でのオンライン処理ではメモリ上限があるため、機能・パラメータ制限が生じるが、オフライン用には基本的に全機能を搭載する。

処理システムの機能比較表

		オンライ(FPGA)	オフライン	
3DNF	IIR7	IIRβ IIRα	○	
	IIR4	IIRβ IIRα	○	
	FIR20	β	○	
	FIR10	β	○	
中央値	Tap Tap	3~9	○	
外れ値	輝度差 上限	0~255	○	
IIR/FIR 領域設定	全体 3領域 中央重点		○	
ガすみ除去	強度	0~63 3DNF前後でON/OFF	60固定 ○	
2DNF	ガウシアン	カーネル σ	1,3,5,9 0<	5 ○
	バイラテラル	カーネル σ α β αスベース	1,3,5,9 0< 0< 0<	×
	中央値	カーネル	3,5,9	3固定 ○
	外れ値	カーネル 輝度差 上限	3,5 0~255 0~255	○
	エッジ強調	カーネル σ	1,3,5,9 0<	5 ○
ホワイトバランス	オート マニュアル	Gain:0.1~10, Offset:-100~100	○	
ノイズ除去	オン/オフ	水平垂直ともにko~k6設定可	○	
ガンマ補正	オン/オフ	係数:0.0~12.0	○	
色補正	RGB HSV	0.0~3.0 H:-180~180, SV:0.0~3.0	○	



図 7.2-2 画像鮮明化処理システムの構成



図 7.2-3 画像鮮明化処理システム オンライン用ソフトウェアの GUI

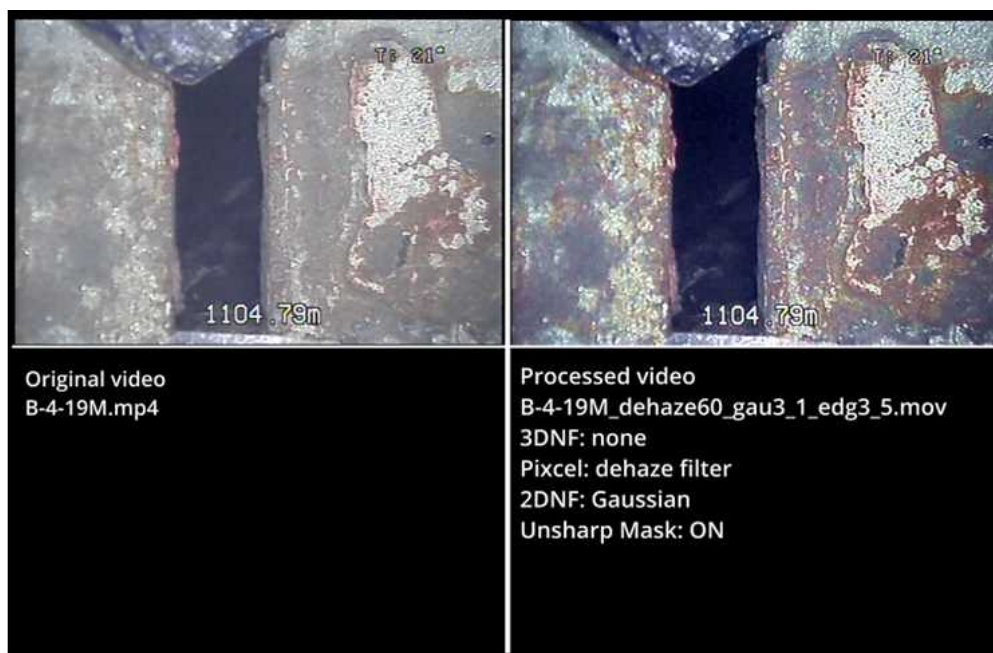
7. 2-3 画像鮮明化処理による効果

画像鮮明化処理を実施した画像について、鮮明化処理前と処理後の画像を前方視と側方視について、それぞれ図 7.2-4,5 に示す。



かすみ除去・3次元ノイズフィルター(中央値)を適用

図 7.2-4 画像鮮明化処理システムの効果 比較図 (前方視)

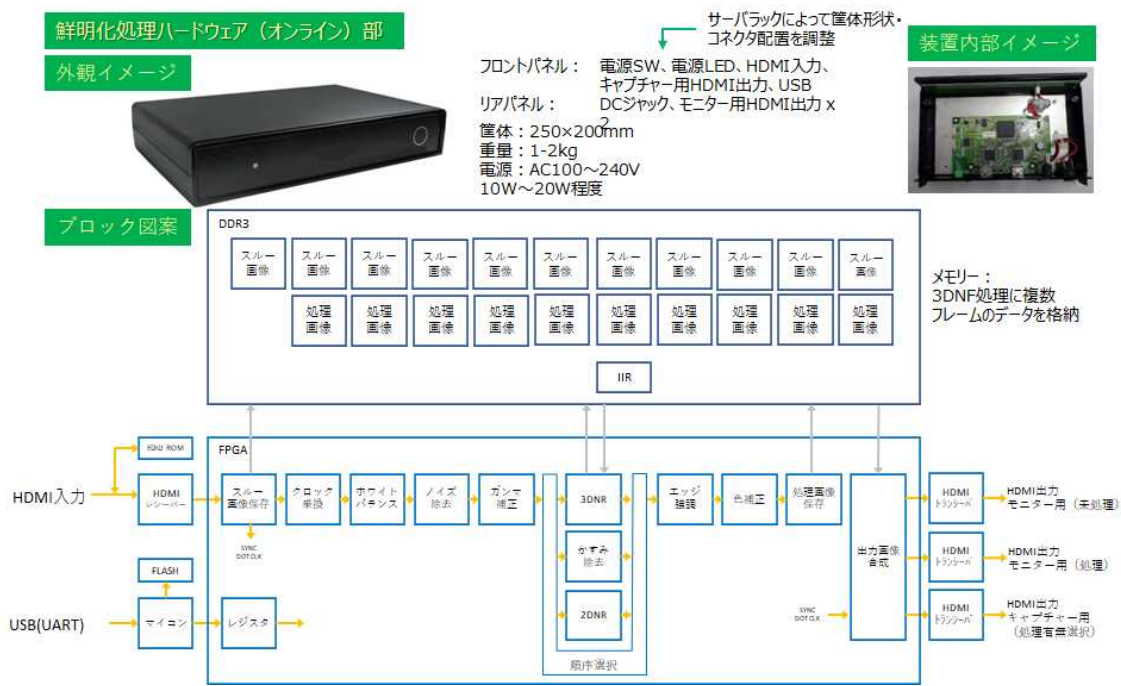


かすみ除去・2次元ノイズフィルタ(ガウシアン)・エッジ強調フィルタを適用

図 7.2-5 画像鮮明化処理システムの効果 比較図 (側方視)

7. 2-4 画像鮮明化処理システム ハードウェアの構成

ハードウェアの構成を図 7.2-6 に示す。



7. 3 AI 学習を用いた坑内異常の自動検出システムの開発

7. 3-1 前方視用 AI の開発・性能評価

2021 年度には前方視画像に対して「正常」「スケール付着」の判別を行う AI の検討を行った(ResNet)。最新の結果では、Accuracy は 97%程度であった。

検査対象の動画において、画像から欠陥が判断できない「視界不良」画像が含まれることが分かった。2022 年度には前方視 AI の改善として、入力画像を「正常」「スケール付着」に分類することに加えて、「視界不良」かどうかを分類する手法の検討を行った(図 7.3-1 参照)。

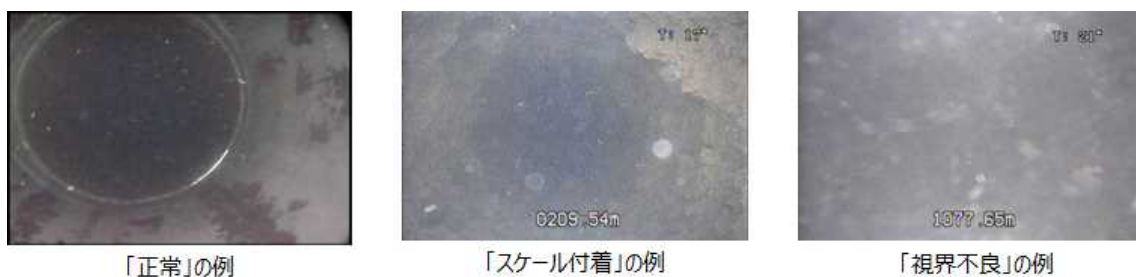


図 7.3-1 タイプ毎の入力画像例

画像を「視界不良」かどうかに分類する手法として、FFT(Fast Fourier Transform)と Gaussian-AD の 2 つの手法を検討した。

- 「視界不良」画像に不鮮明（ボケ）画像が含まれていることが分かっているので、FFT を用いて鮮明度をスコア化し、一定の閾値より小さいスコアの画像を「視界不良」として分類する。
- 異常検知手法の Gaussian-AD を用いることで（異常度のスコア化）、「正常」「スケール付着」のどちらとも似ていない画像を「視界不良」として分類する。

ResNet+FFT+Gaussian-AD で「正常」「スケール付着」「視界不良」を判定させた場合、Accuracy ((TP+TN)/N) は 77%程度まで低下した。

「視界不良」かどうかの判定において、TP (True Positive) が 25%程度であったため、精度が低下した。「視界不良」の判定がうまくいかなかった原因として、学習／評価データの中に別のラベルと類似した画像が含まれてしまっていることが考えられる（「正常」の学習／評価データの中に「視界不良」と類似した画像が含まれているなど）。これにより、「視界不良」とそれ以外の Gaussian-AD のスコア分布が重なったと考えられる。学習データからこれらの類似画像を取り除いて学習することで、Gaussian-AD によって分離しやすくなり判定精度が向上することが期待できる。

7. 3-2 側方視用 AI の開発・性能評価

側方視におけるケーシング損傷事例を図 7.3-2 に示す。側方視については「正常」「ケーシング損傷」に分類して RESNET を使用した AI を検討した。



図 7.3-2 タイプ毎の入力画像例

現段階で「ケーシング損傷」を分類するためにはデータが不足しており(表 7.3-1 参照)、うまく学習することができていない。ケーシング損傷の事例毎に、2~5 シーン/500 万程度のデータが最低限必要と判断された。この点については、技術委員会において委員からの助言（正常を学習させて、それ以外を異常と判別する）も含めて検討を進めることとしている。

表 7.3-1 各坑井の撮影動画における「正常」「ケーシング損傷」の秒数

坑井名	正常	ケーシング 損傷	ケーシング 損傷種類
A-1	0	194	小さい穴
A-2	0	21	小さい穴
B-1	14559	790	破断
B-3	538	0	-
B-4	16234	0	-
C-1	5646	0	-
C-2	6851	0	-
C-3	1528	1136	一部欠落
C-4	4661	0	-
C-5	19341	0	-
C-6	2515	1679	損傷
C-7	21874	0	-
C-8	8409	0	-
C-9	27393	0	-
D-1	6830	1289	一部欠落
D-2	2243	0	-
D-3	3917	0	-
合計[s]	142539	5109	-
坑井数[種]	15	6	-

8. 実用化・事業化へ向けての見通しと取組みについて

8. 1 実用化・事業化を行う製品・サービス

200℃耐熱のボアホールスキャナー（BHS：光学カメラ：前方視・全方位・側方視）測定システム（画像鮮明化処理システムやAIによる坑内異常自動検出システムを含む統合システム）を用いた坑内物理検層サービスを実施する。

8. 2 実用化・事業化を行う製品・サービス

実用化・事業化への取組みを表 8-1 に示す。

表 8-1 実用化・事業化の見通しと課題・取組み

年度	FY2024	FY2025	FY2026	FY2027	FY2028
1. BHS利用チーム体制構築	 産総研とのサポート契約含む				
2. 全方位・側方視・システム開発	 NEDO等のプロジェクト活用による技術開発				
3. 成果品による検層サービスの実施	 現状システムによる試用  試用期間につき、サービス価格による実施も想定		 地熱発電事業者各社への営業活動とサービスの実施  収益発生 初年度から数百万/年程度を想定 将来的には1千万円以上/年を目標		
4. システム改良検討				 使用中の不具合などに基づいた改良点の検討	 改良点適用
5. 複数実施体制の構築				 2年間の受注動向に基づいて検討：投資規模 50百万円程度	

個別テーマ (3) -3.

(3) 地熱発電高度利用化技術開発

(3) -3. 光ファイバマルチセンシング・AIによる長期貯留層モニタリング技術の開発

委託先：株式会社物理計測コンサルタント
国立大学法人東北大学流体科学研究所
株式会社地球科学総合研究所
再委託先：国立研究開発法人産業技術総合研究
株式会社レーザック
地熱エンジニアリング株式会社

1. 背景と目的

2018年7月に「第5次エネルギー基本計画」が閣議決定され、同計画において地熱発電は、発電コストも低く、安定的に発電を行うことが可能なベースロード電源を担うエネルギー源と位置付けられている。エネルギーミックスの議論においては、地熱発電の2030年度における導入見込量として最大で約1.55GW（2017年度実績510MW）、発電電力量1.13TWh（2017年度実績2.4TWh）の導入拡大が掲げられている。しかし、地熱発電設備容量は、固定価格買取制度開始以降の増加が約80MWに留まっており、2030年導入目標の半分にも至っていない。この現状を打破するためには、生産量増大、コスト削減、利用率向上を実現する高度利用化技術の開発が必要である。

地熱発電所を適切に運用するためのひとつの手段として、坑内および貯留層全体の特性変化を連続的にモニタリングすることが挙げられる。現時点でも貯留層モニタリングは行われているが、その手法は坑井の特定深度において温度・圧力をポイントモニタリングすることがほとんどであり、貯留層全体の時間・空間的变化を詳細に把握することはできておらず、その計測内容としても十分とは言えない。その背景には、地熱貯留層のような高温高圧の過酷な環境下で高精度なセンサや複雑な電子部品を長期安定的に使用することが困難な点がある。その課題を解決するために、センサ部に電子部品を使用しない耐熱性の優れた光ファイバを用いる温度・振動・圧力・流量を計測可能なマルチセンシングシステム開発し、地熱貯留層モニタリングデータの質と量を向上させることで、貯留層管理の最適化を図り、生産量増大・コスト削減・利用率向上につなげることを目的とする。

2. 研究開発の概要

本研究開発は、以下の3つの項目に区分して実施する。最終年度には、各研究開発項目を総合的に評価し、地熱貯留層の持続的管理とエネルギー抽出の最適化に資するモニタリングの観点から運用方法を提案する。図1に光ファイバマルチセンシング・AIによる長期貯留層モニタリング技術概念図を示す。

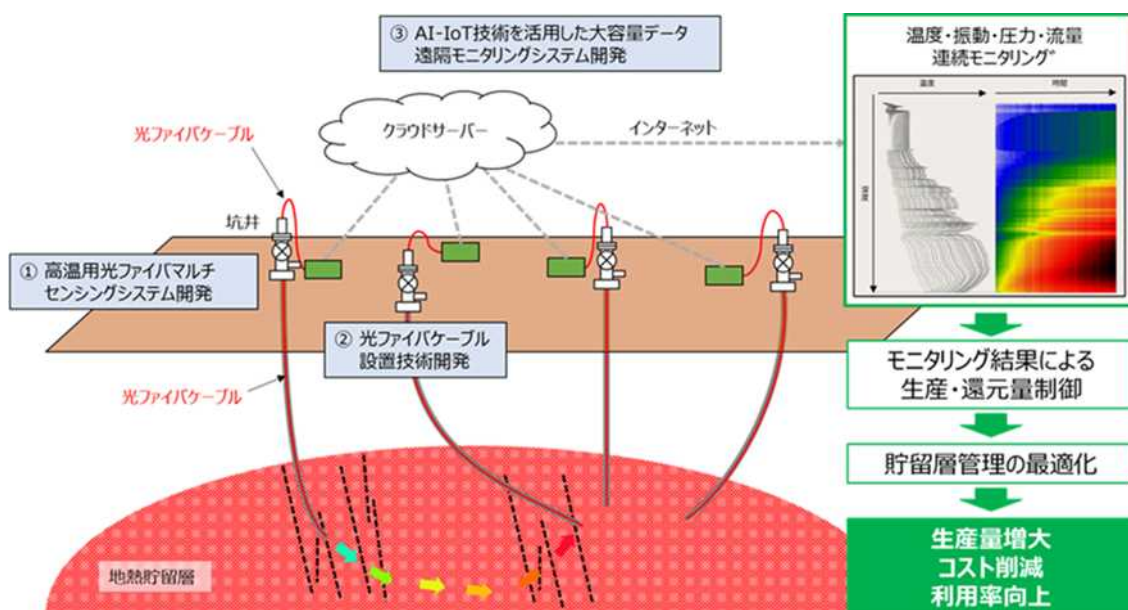


図 2-1 光ファイバマルチセンシング・AI による長期貯留層モニタリング技術概念図

- ① 「高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発」(担当：株式会社物理計測コンサルタント(以下、GSC)、国立大学法人東北大学(以下、東北大)、以下、再委託先：国立研究開発法人産業技術総合研究所(以下、AIST)、株式会社レーザック(以下、LZ)、地熱エンジニアリング株式会社(以下、Geo-E))

高温高圧環境下でも長期間運用可能な光ファイバマルチセンシングシステムを開発する。開発したシステムは、室内試験等によりその性能を評価・整理し、改良を加え、地熱井での実証試験で動作確認をする。

- ② 「光ファイバケーブル設置技術開発」(担当：GSC)

地熱井の圧力・温度状態等を勘察し、安全かつ効率的に光ファイバケーブルを坑内に降下できる手法と確実な坑口シール方法を検討し、降下手法に応じた器具や長期間安定的に運用できる坑口装置を開発する。開発する器具や坑口装置は、模擬坑井等でその性能を評価し、改良等を加え、地熱井における光ファイバマルチセンシング技術の実証試験で使用する。

③ 「AI-IoT 技術を活用した大容量データ遠隔モニタリングシステム開発」（担当：地球科学総合研究所（以下、JGI））

光ファイバマルチセンシングシステムによって得られる温度や振動、圧力等の大容量データから地熱貯留層を管理する上で有益な情報（非定常な温度・圧力変化、振動の発生、坑内流動の変化等）を迅速かつ的確に抽出することが可能な AI-IoT 技術を活用した遠隔モニタリングシステムを開発する。開発したシステムを地熱井における光ファイバマルチセンシング技術の実証試験で導入・実証し、必要に応じて改良を加える。

光ファイバによる長期および短期のモニタリング手法について、表 2-1 に整理する。

光ファイバを利用した長期モニタリングの目的としては、貯留層全体の温度や圧力を連続モニタリングすることや坑井近傍で発生する AE モニタリングが挙げられる。光ファイバケーブルの設置箇所は、ケーシング降下時にその外側に設置する場合や坑内に設置される場合が想定される。貯留層の温度、圧力、振動、ひずみを長期連続的に計測することで、長期的な貯留層変動（温度、圧力、ひずみの変化）や坑井近傍での AE 活動度の変化等を確認することが可能となる。これらの結果を活用することによって地熱発電所の操業の最適化が図れるとともに、適切な坑井管理によって安定的な発電量が確保でき、発電効率の向上が期待できる。

光ファイバを利用した短期モニタリングの目的としては、従来のプロダクション検層や生産・圧入試験時の温度、圧力、流量計測、温度回復試験が挙げられる。光ファイバケーブルの設置箇所は、坑内が想定される。坑内の温度、圧力、振動、流量を短期連続または短期繰り返し計測することで、坑井の生産・還元能力を評価することが可能となる。以上により得られた結果は、今後の当該地点での開発計画の最適化に利用できる。

表 2-1 光ファイバによる長期および短期のモニタリング手法

項目	長期モニタリング	短期モニタリング
目的	貯留層モニタリング、AEモニタリング	プロダクション検層、生産試験、圧入試験、温度回復試験
設置箇所	ケーシング背後に設置（セメンチング有/無） 坑内(CSG・TBG内)に設置	坑内(CSG・TBG内/裸孔内)に設置
計測項目	温度、圧力、振動、ひずみ	温度、圧力、振動、流量
計測方法	長期連続	短期連続／短期繰り返し
得られる結果	長期的な貯留層変動(温度、圧力、ひずみの変化)、AE活動度の変化等	生産・還元能力の評価
期待される貢献	操業の最適化／適切な坑井管理による安定的な発電量の確保および発電効率の向上	開発計画の最適化

各テーマにおける研究開発項目、開発目標及びその設定根拠を表 2-2 に示す。

表2-2 研究開発目標と根拠

研究開発項目	中間目標	最終目標	根拠
①高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発	<ul style="list-style-type: none"> • 高温用光ファイバケーブルの性能評価 • 温度・圧力・振動・流量を計測できるマルチセンシングシステムの実現性の確認 • 2手法の圧力・流量計測性能評価・以後の開発方針策定 	<ul style="list-style-type: none"> • 光ファイバマルチセンシングシステムの確立 • 坑内機器の耐久性 (300m、400℃、2年間以上)の検証 	<ul style="list-style-type: none"> • 地熱発電高度利用化の実現には、地熱貯留層の高温高圧環境下で適正に動作し、持続的に使用できる高耐久性のモニタリングシステムが必要なため
②光ファイバケーブル設置技術開発	<ul style="list-style-type: none"> • 確実・安全な光ファイバケーブルの降下・設置手法の提案 • 確実な坑口シール方法の提案 	<ul style="list-style-type: none"> • 実証試験にて確実な光ファイバケーブルを降下・設置手法の確認 • 坑口装置の耐久性 (20MPa/260℃/10日間、20MPa/125℃/1年以上)の検証 	<ul style="list-style-type: none"> • 光ファイバセンシングシステムを長期間安定的に運用するためには、センサでもある光ファイバケーブルの確実な降下・設置が必要であるため。また、坑口圧力をシールするための坑口装置は、地熱井における噴気試験および圧入試験に耐えうる仕様である必要があるため
③AI-IoT技術を活用した大容量データ遠隔モニタリングシステム開発」	<ul style="list-style-type: none"> • AI機能の試作 • 遠隔モニタリングシステムの試作 • 機能の評価 	<ul style="list-style-type: none"> • 遠隔地から常時確認可能なモニタリングシステムの構築 	<ul style="list-style-type: none"> • 迅速かつ安定的なイベント検出・監視が長期間可能となる • 情報抽出に掛かる人的コストを90%削減できる

3. 事業スケジュール

本研究開発の期間は2021年6月15日より2024年3月20日であり、そのスケジュールの概要を図3-1に示す。

事業項目	2021年度				2022年度				2023年度				2024年度 (参考)				2025年度 (参考)			
	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期
①高温用 光ファイ バマルチ センシ ングシス テム開 発	光ファイバケーブル調査・選定				短尺ケーブル製作				長尺ケーブル製作				実証試験							
	圧力計測手法検討 室内試験等(2手法)				圧力および流量計測 システム試作、評価				課題抽出・改良											
	流量計測手法検討 室内試験等(2手法)																			
	次世代型光ファイバ センシング研究調査																			
②光ファ イバケー ブル設置 技術開 発	光ファイバ ケーブル 降下・設置 手法調査				設置器具製作 坑口装置製作				設置器具製作 坑口装置製作				実証試験							
	坑口装置 調査・検討				模擬坑井試験 評価				坑井実証試験 評価				課題抽出・改良							
③AI-IoT 技術を活 用した大 容量デー タ遠隔モ ニタリン グシス テム開 発	手法調査																			
	AI機能 基本設計								改良 試験				実証試験							
	システム 概念設計				試作 性能評価				性能確認				課題抽出・改良							

図3-1 研究開発のスケジュール

4. 予算

本研究開発の予算額を表 4-1 に示す。

表 4-1 研究開発の予算額

(単位：百万円)

事業者名	2021 年度	2022 年度	2023 年度	総額
株式会社物理計測コンサルタント	77.8	85.8	81.6	245.2
国立学校法人東北大学	6.4	7.9	6.6	20.9
株式会社地球科学総合研究所	5.8	15.8	11.8	33.4
合計	90.0	109.5	100.0	299.5

5. 研究開発の実施体制

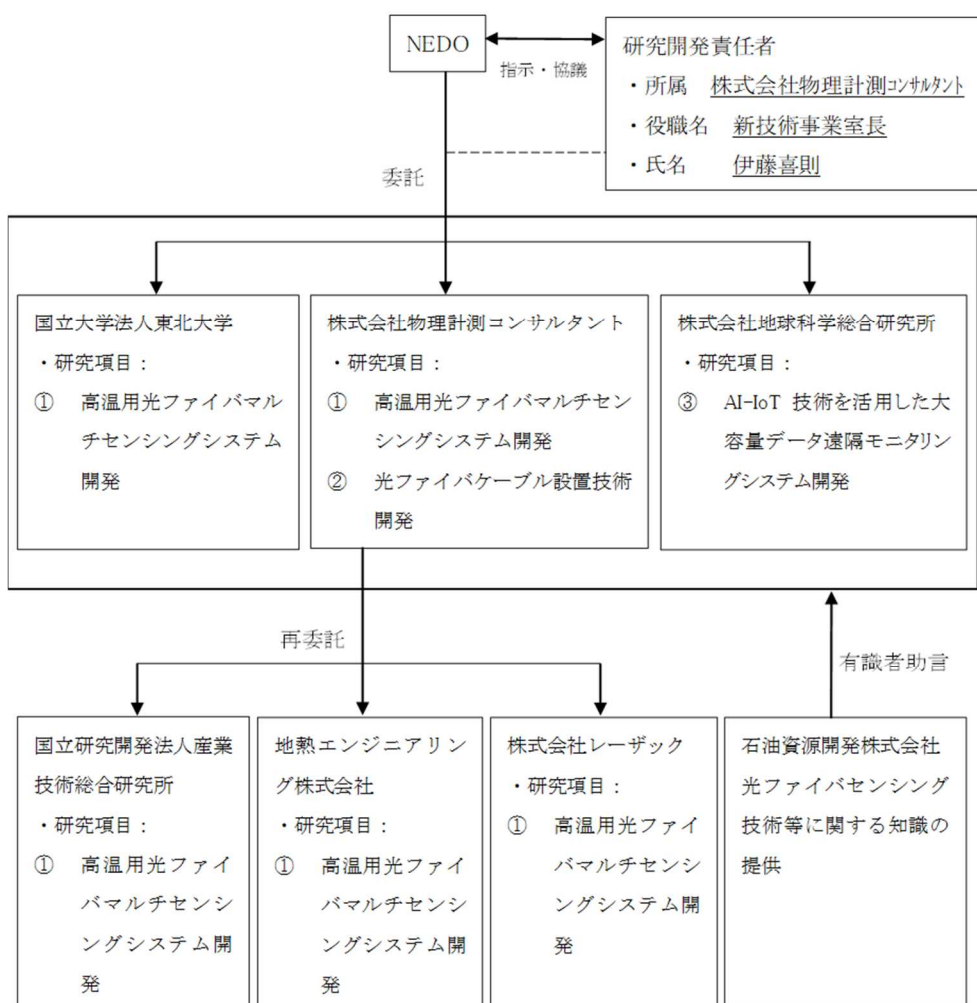


図 5-1 研究開発の実施体制

6. 事業の管理運営

本研究開発の運営のために、関係者による定期打合せをおよそ4半期ごとに実施している。その打合せは、各研究開発の進捗状況や課題等を報告し、中間および最終目標を達成すべく意見交換を行っている、表 6-1 に本研究開発に対して指導・助言等をいただく有識者を記す。

表 6-1 有識者

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
手塚和彦	石油資源株式会社 常務執行役員技術本部長	光ファイバセンシング全般にかかる技術的指導・助言

7. 研究開発成果について

本研究開発の成果は下表のとおりである。設定した中間目標に対して、研究開発項目①および②、③は達成できる見込みである。

表 7-1 中間目標に対する達成度（見込み）

研究開発項目	中間目標 (2024年3月)	成果 (2023年3月まで)	達成度 (見込み)	達成の根拠 ／解決方針
①高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発	<ul style="list-style-type: none"> 高温用光ファイバケーブルの性能評価 温度・圧力・振動・流量を計測できるマルチセンシングシステムの実現性の確認 2手法の圧力・流量計測性能評価・以後の開発方針策定 	<ul style="list-style-type: none"> 高温用光ファイバケーブルを入手し、その特性と性能を評価 室内およびフィールド実験においてマルチセンシングシステムの実現性を確認 試作や室内実験を行い、それぞれの手法における性能を評価し、以後の開発方針を決定 	○ 2024年3月までに達成見込み	<ul style="list-style-type: none"> 高温用光ファイバケーブルの入手が可能であり、特性・性能試験が実施できる環境にある 室内およびフィールド実験でシステム構築の実現性の成果が見込まれる
②光ファイバケーブル設置技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 確実・安全な光ファイバケーブルの降下・設置手法の提案 確実な坑口シール方法の提案 	<ul style="list-style-type: none"> 降下・設置技術を調査し、目的に合った手法を選定 降下・設置条件に合った設置器具および坑口装置を選定 	○ 2024年3月までに達成見込み	<ul style="list-style-type: none"> 既存製品および技術を応用・改良することで成果が見込まれる

<p>③AI-IoT技術を活用した大容量データ遠隔モニタリングシステム開発」</p>	<p>• AI-IoTシステムのプロトタイプ完成と概念実証</p>	<p>• 坑井内DASによるAE観測データからのイベント検出作業の機械化による効率改善を確認 • 遠隔監視システムのプロトタイプを試作</p>	<p>○ 2024年3月までに達成見込み</p>	<p>• AI実装による自動化で、更なる効率化が達成できる • 現在の数倍の転送速度向上により、年間100TBのデータの恒久保存が実現される見込み</p>
--	-----------------------------------	---	------------------------------	---

① 高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発

図 7-1-1 は、調査した高温用光ファイバケーブルについてまとめたものである。金属管に金でコーティングされた高温用光ファイバケーブルが内挿され、耐熱 400℃、耐圧 30MPa となっており、短尺（100m 長）の試作品を入手し、その性能評価を実施中である。



図 7-1-1 高温用光ファイバケーブル

図 7-1-2 は、FP（ファブリー・ペロー）干渉型圧力センサについてまとめたものである。本センサの概念設計と仕様について検討し、試作品を製作した。その試作品の性能評価試験を行い、当初目標よりも大幅に高い精度であることが確認された。センサヘッドのシール機構は、Oリング機構としたが、一部課題を確認したため、今後金属ロウ付け機構を試し、性能を評価する予定である。

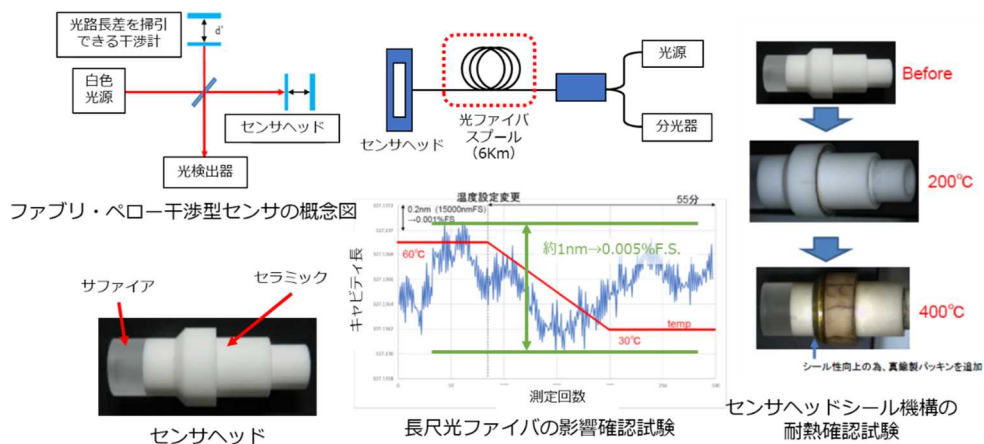


図 7-1-2 FP（ファブリー・ペロー）干渉型圧力センサ

図 7-1-3 は、FBG（Fiber Bragg Grating）圧力センサについてまとめたものである。従来の FBG センサは、高温環境下に長時間晒されると FBG 自体が消滅してしまうため、フェムト秒レーザーを用いた新たな FBG 製法を導入したセンサの適用について検討した。その製法で製造された FBG センサを入手し、温度 600°C でのヒートサイクル試験を行い、従来の FBG センサと遜色ない性能であることを確認した。また、センサを収納するモジュールを試作し、その課題を洗い出し、改良することを予定している。

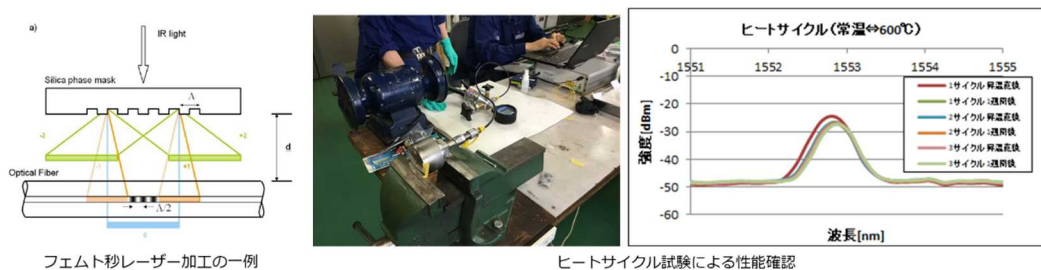


図 7-1-3 FBG 圧力センサ

図 7-1-4 は、乱流振動法による流量計測についてまとめたものである。乱流振動法による流量計測は、光ファイバケーブルの表面を凹凸等の形状を設けることで、その周囲に乱流渦を発生させ、その振動を DAS により検知して数値解析することで坑内流速を定量予測するものである。

様々な流量下での室内実験を行って一連のスペクトル解析を実施し、流量に対して特徴を持つ振動が誘起されていないかを信号処理の観点から調べた。表面に形状加工を施していない Fiber in Metal Tube (FIMT) を用いた結果では、低流速時 (0~75m/min) には特定の周波数にピークが見られ、流速と共に振動レベル全体が上昇する傾向がみられた。しかし、流速が 100m/min 以上になると周波数特性がフラットに

なり、周波数特性・レベルに大きな変化が見られないという結果となった。一方、表面に形状加工を施した FIMT を用いた結果では、低流速時（0～50m/min）に現れる特定の周波数ピークについては違いが見られるものの、流速と共に振動レベル全体が上昇する傾向と、流速が 100m/min を以上になると周波数特性がフラットとなる傾向については同様であった。

現状では、FIMT の表面形状の違いによる振動特性の顕著な違いは確認できていないものの、流速に応じて特徴的なスペクトルのピークが立つことが示唆されている。今後は、これらのピークが FIMT の形状によって有意に生じたものかを精査する必要がある。さらに、高流速になるとスペクトルがフラットになることについては、DAS 計測装置のダイナミックレンジを超えている可能性があり、実験方法や計測条件を検討し、改めて実験を実施する予定である。また、データ処理・解析手法に関しても、流速に対応する振動特性の違いを効果的に検出する方法を考案する予定である。効果的なフィルターの設計、適切なスペクトラム解析や相互相関解析の適用に加え、スパースモデリング等の検討も行うことを検討している。

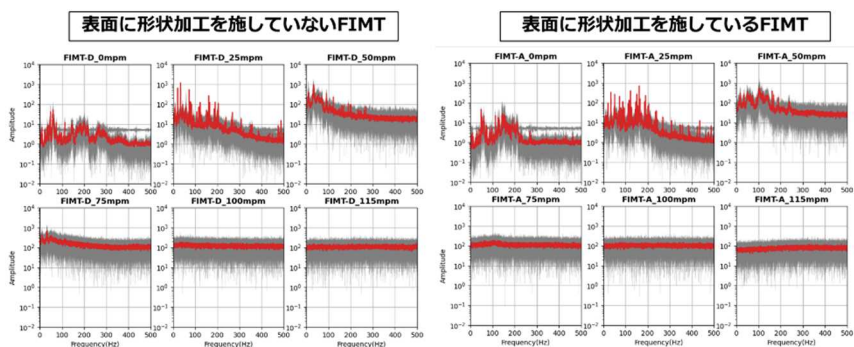
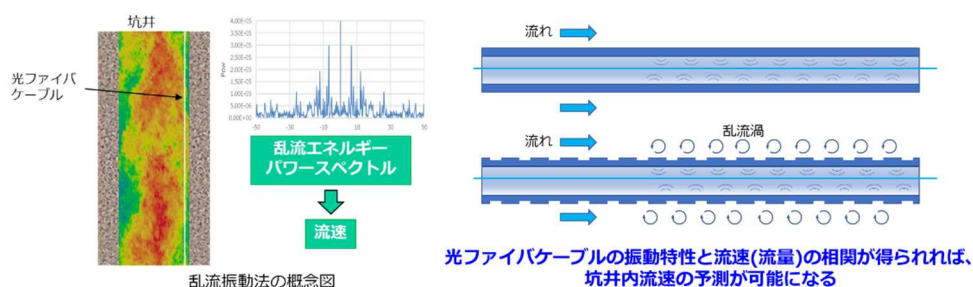


図 7-1-4 乱流振動法による流量計測

図 7-1-5 は、乱流振動法による流量計測に関する数値シミュレーションについてまとめたものである。乱流振動法は、数値シミュレーションにより流速と乱流振動の相関性があることが判明した。さらに、効果的に乱流を発生させるための光ファイバケーブル表面の形状とその定量的な特性を流体・構造体連成解析や乱流スペクトル解

析を用いて検討を行った。今後、高精度 LES（ラージ・エディ・シミュレーション）流体構造連成数値シミュレーションを実施し、目標を達成すべく、その性能を評価する予定である。

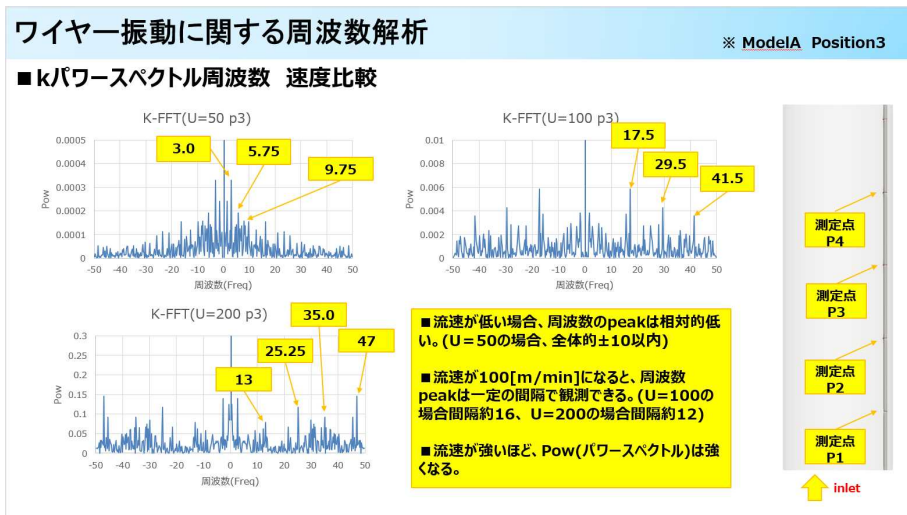


図 7-1-5 乱流振動法による流量計測に関する数値シミュレーション

図 7-1-6 は、カルマン渦式法による流量計測についてまとめたものである。その手法について検討し、カルマン渦周波数もしくは複数のセンサ間での到達時間差を時間-周波数領域で検出する手法が有望であると判断した。室内実験システムを製作し、第 1 回目の試験を実施した。その結果、想定してたよりもセンサ感度が低かったため、機器を改良して今後再実験を行う予定である。

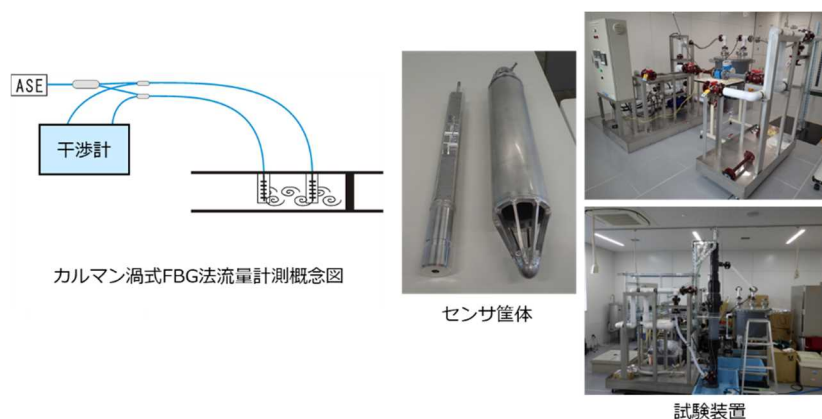


図 7-1-6 カルマン渦式 FBG 法による流量計測

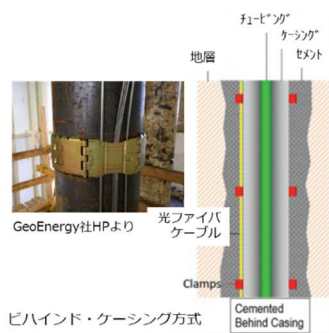
② 光ファイバケーブル設置技術開発

図 7-2-1 は、光ファイバケーブルの降下手法について、図 7-2-2 は光ファイバケーブル設置器具および坑口装置についてまとめたものである。光ファイバケーブルの降下手法としては、主に 4 手法が挙げられる。また、設置器具や坑口装置は、石油・天

然ガス井で既に使用されているものが多く、既存製品の性能試験を行い、地熱井適用に向けた課題を抽出して、それらを改良することで目標を達できる見込みである。

【光ファイバケーブル降下手法の調査】

- ・ ビハインド・ケーシング方式
 - ✓ ケーシングの外側に光ファイバケーブルをクランプして坑内に降下してそのままセメンチングを行い、固定する方法
- ・ アロング・チュービング方式
 - ✓ チュービングの外側に光ファイバケーブルをクランプして坑内に降下して設置する方法
- ・ ワイヤーライン方式
 - ✓ 光ファイバケーブル(金属管タイプ、アーマードタイプ)を降下して設置する方法
- ・ インサイドCT方式
 - ✓ 光ファイバケーブルを挿入済みのコイルドチュービング(CT)をチュービング内に降管して設置する方法



ワイヤーライン方式 (ウインチ)

ワイヤーライン方式が最も簡便な手法

図 7-2-1 光ファイバケーブルの降下手法

【坑口装置・光ファイバ固定器具の調査および選定】

- ・ 地熱井向け坑口装置(BOP)のケーブルシール部材料の検討
 - ✓ シール部(ラム)は耐熱・耐圧によって材料が異なる
 - ✓ ケーブル仕様に合わせたラムを選定する必要がある
- ・ 光ファイバ固定器具の検討
 - ✓ クランプの特性や特徴を確認
 - ✓ 効率的なクランピング手法を調査



図 7-2-2 光ファイバケーブル設置器具および坑口装置

③ AI-IoT 技術を活用した大容量データ遠隔モニタリングシステム開発

図 7-3-1 は、坑井オペレーション時の DAS 連続観測の記録である。坑井オペレーション時に坑井近傍で発生したと思われる微小地震を観測したが、目視で 7 か月かかるイベント検出作業が、機械化により 2 週間に短縮された。加えて、地上からの地震観測では、期間中、7 イベントのみの検出結果であったのに対し、本システムでは 200

個超を検出した。

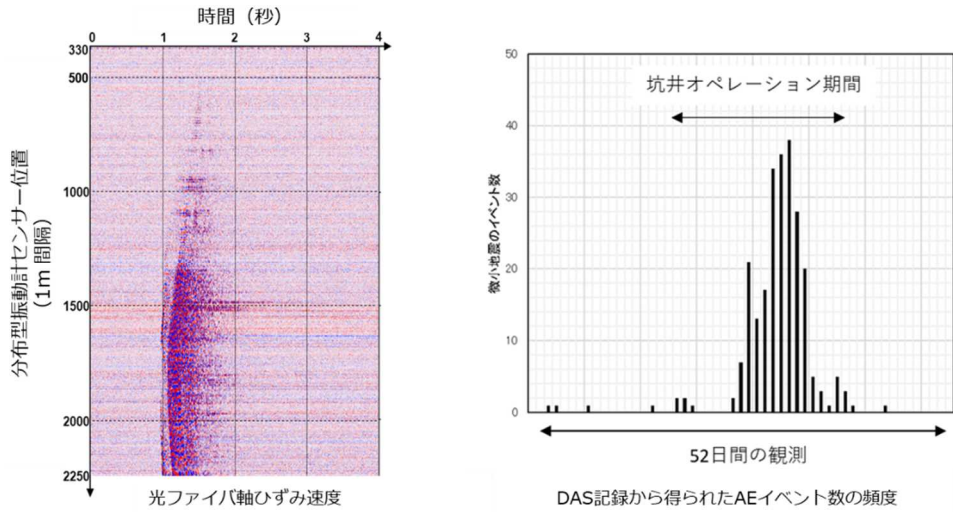


図 7-3-1 坑井内の DAS (分布型振動計) による AE 観測

図 7-3-2 にシステムの概念図を示す。オンサイトへのサーバーへの機能の集約と StarLink による VPN 接続の採用により、人口過疎地域でのインターネット回線の確保に係る問題を解決するとともに、機密性確保と運用コストの低減を両立させた。

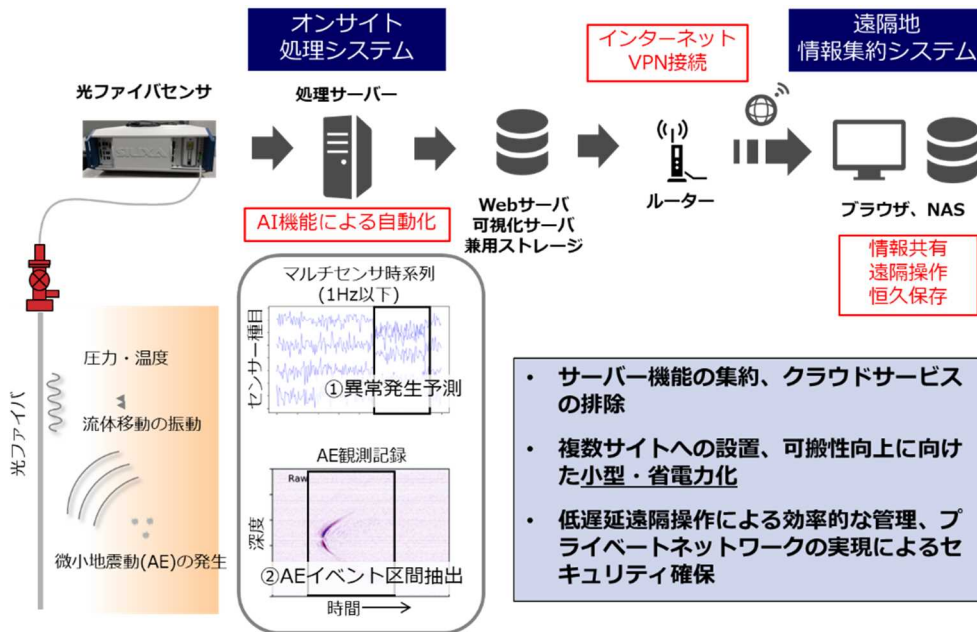


図 7-3-2 システム概念図

8. 実用化・事業化へ向けての見通しと取組みについて

実用化・事業化に向けての見通しと今後の取組みは、下表のとおりである。

表 8-1 実用化・事業化の見通しと課題・取組み

項目	2026 年度	2027 年度	2028 年度	2029 年度	2030 年度～
短期実用化 計測 (実用化)	→				
システム改 良・製作 (実用 化)		→			
地熱貯留層 モニタリング サービス (事業化)		→			
圧力センサ 販売 (事業化)		→			
他分野への 展開 (事業化)	→				

GSC は、顧客の坑井を利用した短期実用化試験を実施し、改良点を抽出した後、サービスのためのシステムを製作する。それと同時に光ファイバマルチセンシングによる貯留層モニタリングの有効性を地熱開発事業者に理解してもらうよう営業活動を行う。GSC は、地熱井における物理検層作業で数多くの経験と実績があるため、そのネットワークを活用しながらマーケット拡大に努めるとともに、公的資金による助成制度の導入にも働きかける。また、並行して CCS 事業や石油・ガスなどの分野での光ファイバマルチセンシングの適用について情報収集と営業活動を行う。

LZ および Geo-E は、光ファイバセンシングに関する機器の製作とその性能試験の実績を有しているため、独自のネットワークを活用して貯留層・坑井モニタリングサービスのマーケット拡大に努める。特に、既存システムでは測定不能な高温域での調査・サービスに力を入れる予定である。また、本プロジェクトで開発した高温用圧力センサの販売にも取り組む。

JGI は、既存モニタリングシステムへの適用可能性を広く発信し、他分野への大容量データ遠隔モニタリングシステムマーケットの拡大するほか、AI-IoT システムを既存

探査システムへ適用することにより地熱貯留層探査技術の高度化と低コスト化を推進する。

東北大および AIST は、理論的検討と実験的検討を継続することで光ファイバによるマルチセンシングが有効であることを学会や業界団体に対して広くアピールする。また、光ファイバセンシングの経験が少ない企業等に対して講習会や解析支援等を行うことにより、市場の拡大に寄与する。

個別テーマ (3) -4.

(3) 地熱発電高度利用化技術開発

(3) -4. AI を利用した在来型地熱貯留層の構造・状態推定

委託先：(国研) 産業技術総合研究所、(国) 室蘭工業大学、(公) 兵庫県立大学、(国) 京都大学、地熱エンジニアリング(株)
再委託先：(国) 東北大学、(国) 名古屋大学、(国) 九州大学

1. 背景と目的

地熱開発においては、地下の高温かつ高透水性ゾーンの位置を特定し、掘削目標を如何に絞り込むかが開発リスク低減のために重要である。特に坑井数の少ない開発初期段階では、出来るだけ高精度で高透水性ゾーンの推定を行い、掘削成功率を向上させることが重要な課題である。現在、一般的には、地質学的な情報を収集する地表調査や、地球物理学的手法による比抵抗探査等により、高透水性ゾーンの位置や生産能力を推定する方法が取られている。しかしながら地表調査や比抵抗探査では、貯留層の評価に必要な情報・物理量（温度、透水性分布）を直接的に得ることはできない。そのため、何らかの仮定や経験式等をもとに地表調査や比抵抗探査の結果を解釈して、貯留層評価をせざるを得ないため、推定値には相当の誤差が含まれているのが現状である。一方、すでに生産が行われているフィールドにおいては、生産量の増大や持続性の維持に代表される貯留層管理が重要な課題になるが、このためには貯留層内での流体の挙動やその経時変化を明らかにする必要がある。

このような問題を解決するためには、地熱貯留層に関して得られる間接的かつ多様な情報を総合的に解釈し、貯留層評価に必要な温度、透水性の情報を高精度に推定することが必要である。本事業では、限られた数の坑井、地質学的情報、物理探査等の地表で得られる多項目データを人工知能（AI）的手法によって総合的に解釈し、地下の温度分布および高透水性領域の分布を高精度で推定可能な技術を確立にすることを目的とする。また、それらの時間変化を検出する手法の可能性についても検討する。

2. 研究開発の概要

本事業では、未利用地熱貯留層に対する掘削成功率向上を目指し、国内の地熱フィールドで得られている既存の坑井データ、地表調査・物理探査等による地球科学的データ

セットおよび在来型地熱貯留層を模した人工データセットを用いて、AI的手法により貯留層評価に必要な温度、透水性の情報を高精度に推定可能な技術を開発する。また、貯留層管理の高度化に資するため、貯留層状態の時間変化を検出する手法の可能性について検討する。これらの目標を着実に達成するため、以下の2つの研究項目を実施する。

研究開発項目① 「AIによる坑井、地表、物理探査データの統合解釈技術の開発」

開発初期段階のような限られた数の坑井、地質学的情報、物理探査等の地表で得られる多項目データから、AI的手法によって地下の温度分布および高透水性領域の分布を推定する技術を開発する。また、貯留層管理のための応用を前提として、AI的手法により、温度および含水率（または浸透率）の時間変化を検出する手法を検討する。併せて、これらの開発、評価に使用するための各種データを収集、整理する。

研究開発項目② 「物理探査データ逆解析における空間分解能の向上」

研究開発項目①の推定において重要な比抵抗構造の空間分解能を向上させるため、スパースモデリング等を導入した新たな2次元、3次元逆解析手法を開発する。併せて、開発、評価に使用するための各種データを収集、整理する。

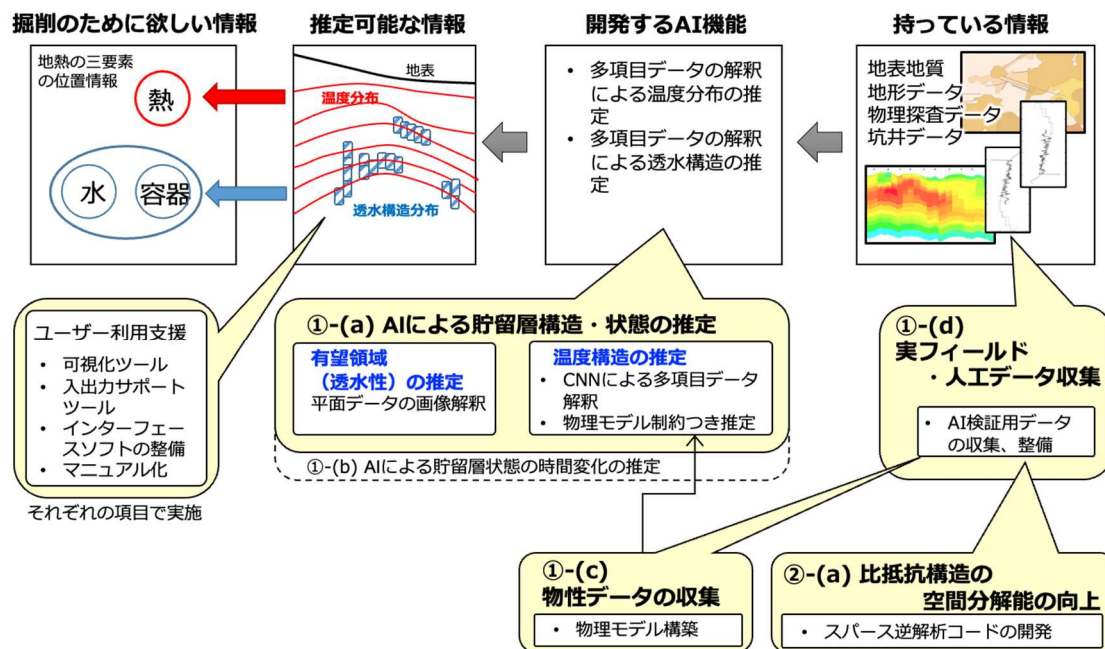


図 2-1 本研究開発における地熱貯留層構造・状態推定のアプローチ概要

研究開発項目、開発目標及びその設定根拠を表 2-1 に示す。

表2-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	中間目標	最終目標	根拠
①AIによる坑井、地表、物理探査データの統合解釈技術の開発	* 坑井、地表地質、物理探査データ等を使用して温度分布および高透水性領域の分布を推定するAI的手法の全体設計を行い、それに基づいて基本機能の開発を完了する。	* 坑井、地表地質、地理情報、物理探査データ等から AI 的手法により温度分布および高透水性領域の分布を推定可能にする。特に、温度については、15%以下の誤差で推定する。 * 人工データ等を使用して、温度等の時間変化の抽出方法を検討し、その結果を整理する。 * 上記機能の開発のために必要なデータの種類、量、取得方法等を検討し、既存文献・データベース、実験、シミュレーション等により収集し、整理を完了する。	* 先行研究による温度推定の誤差を 5%上回る精度改善を行うとともに、高透水性領域の分布を推定することで、在来型貯留層の掘削成功率を向上させるため。 * 時間変化抽出法を提示し、貯留層管理への応用技術開発に展開するため。 * AI 機能開発に必要なデータを使用可能とするため。
②物理探査データ逆解析における空間分解能の向上	* スパースモデリング等を導入した新たな 2次元、3次元比抵抗構造逆解析手法について、基本機能の開発を完了する。	* 地下2～3kmの 2次元および 3次元比抵抗構造について、従来手法よりも高い空間分解能を持つ解析方法を開発し、それに基づいた構造解析コードを作成する。	* 地熱貯留層までの深さを対象に、従来の逆解析の空間分解能を上回る解析ツールを実用化するため。

3. 事業スケジュール

本研究開発の期間は2021年6月15日から2024年3月31日までであり、そのスケジュールの概要を図3-1に示す。

事業項目	2021年度				2022年度				2023年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
①AIによる坑井、地表、物理探査データの統合解釈技術の開発												
(a) AIによる貯留層構造・状態の推定												
(b) AIによる貯留層状態の時間変化の推定												
(c) 物性データの収集												
(d) 実フィールド・人工データ収集												
②物理探査データ逆解析における空間分解能の向上												

図3-1 研究開発のスケジュール

4. 予算

本研究開発の予算額を表 4-1 に示す。

表 4-1 研究開発の予算額

(単位：百万円)

	2021 年度	2022 年度	2023 年度	総額
産業技術総合研究所	4.0	5.1	4.0	13.1
室蘭工業大学	7.0	5.3	5.0	17.3
兵庫県立大学*	11.0	6.5	6.0	23.4
京都大学	7.0	8.5	10.0	25.5
地熱エンジニアリング	15.4	23.4	19.6	58.4
合計	44.3	48.8	44.6	137.7

*2021 年度は東京工業大学。2022 年 4 月 1 日付けで兵庫県立大学が本事業にかかる権利義務を承継した。

5. 研究開発の実施体制

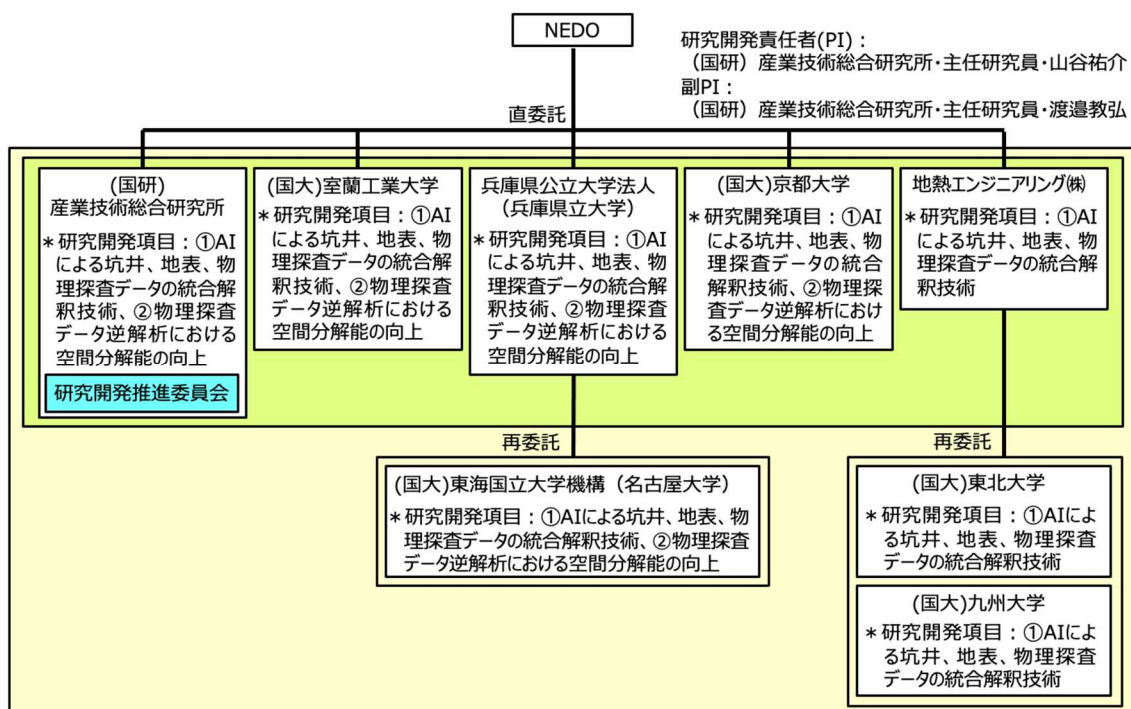


図 5-1 研究開発の実施体制

6. 事業の管理運営

定例打ち合わせ	2021年9月3日
	2021年11月8日
	2021年12月16日 項目①
	2021年12月27日 項目②
	2022年2月10日 項目①
	2022年4月14日
	2022年5月26日
	2022年8月25日
	2022年9月29日
	2022年10月31日
	2022年12月1日
	2023年1月25日
	2023年3月20日
研究開発推進委員会	2021年10月12日 第1回
研究開発推進委員会	2022年3月1日 第2回
研究開発推進委員会	2023年2月13日 第3回

表 6-1 推進委員会および有識者

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
石戸経士	(元) 国立研究開発法人産業技術総合研究所・招聘研究員	研究開発推進委員
内田利弘	(元) 国立研究開発法人産業技術総合研究所・グループ長	研究開発推進委員
桑谷 立	国立研究開発法人海洋研究開発機構・主任研究員	研究開発推進委員
手塚和彦	石油資源開発株式会社・常務執行役員 技術本部長	研究開発推進委員
小川康雄	東京工業大学・教授	電磁探査解析コードに関する助言
Bjarkason, Elvar Karl	秋田大学・助教	人工データセットの整備に関する助言

7. 研究開発成果について

本研究開発の成果は下表のとおりである。設定した最終目標に対して、項目①、②ともに達成できる見込みである。

表 7-1 中間目標に対する達成度（見込み）

研究開発項目	最終目標 (2024年3月末)	成果 (2023年3月まで)	達成度 (見込)	達成の根拠 ／解決方針
①AIによる坑井、地表、物理探査データの統合解釈技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> * 坑井、地表地質、地理情報、物理探査データ等からAI的手法により温度分布および高透水性領域の分布を推定可能にする。特に、温度については、15%以下の誤差で推定する。 * 人工データ等を使用して、温度等の時間変化の抽出方法を検討し、その結果を整理する。 * 上記機能の開発のために必要なデータの種類、量、取得方法等を検討し、既存文献・データベース、実験、シミュレーション等により収集し、整理を完了する。 	<ul style="list-style-type: none"> * 坑井、地表地質、地理情報、物理探査データ等から温度分布を推定するAIを開発し、人工データに対し15%以下の誤差で推定した。また、画像認識により開発有望領域（高透水性領域）の分布を推定可能な手法を開発した。 * 開発に必要なデータの種類、量、取得方法等を検討した。既存文献・データベース等から実データを収集し、AIへ適用するための加工を行なった。また、実験、シミュレーション等によりデータを収集し、人工データセットの初版を作成した。 	○ (2024年3月末迄に達成見込)	<ul style="list-style-type: none"> * 温度分布および高透水性領域の分布を推定可能なAIの基本機能は完成済みで、温度は特定の条件で15%以下の誤差を達成している。今後両者ともに推定精度の向上のための改良を実施する。 * 人工データセットおよび整備したCNNアプリで温度時間変化の検討を行う。 * 補足的なデータ収集、加工と人工データセットのアップデートを実施する。
②物理探査データ逆解析における空間分解能の向上	<ul style="list-style-type: none"> * 地下2～3kmの2次元および3次元比抵抗構造について、従来手法よりも高い空間分解能を持つ解析方法を開発し、それに基づいた構造解析コードを作成する。 	<ul style="list-style-type: none"> * スパースモデリングを導入した2次元比抵抗逆解析コードの開発を完了し、最適化パラメータの検討を実施した。また、3次元解析コードの一部となる順解析部分のコード開発を完了した。 	○ (2024年3月末迄に達成見込)	<ul style="list-style-type: none"> * 開発済みの3次元順解析コードを使用して逆解析コードを完成させる。人工データセットを用いて、パラメータチューニングと性能の評価を行う。

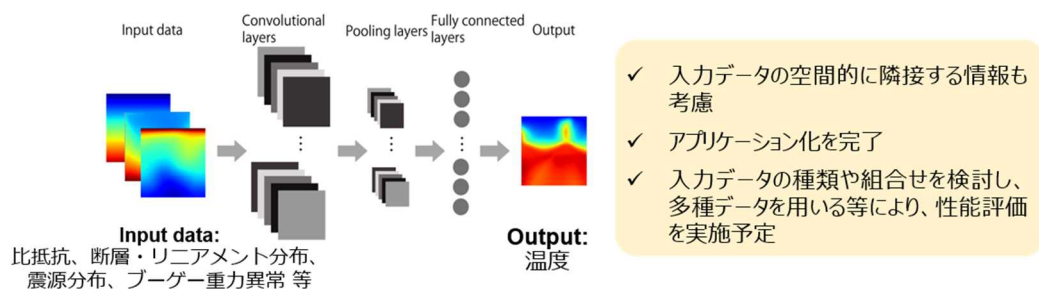
◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

①AIによる坑井、地表、物理探査データの統合解釈技術の開発

(1) 温度推定AIの開発

本研究開発では、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）と物理的な制約を考慮したニューラルネットワークの2種類のアプローチにより温度構造を推定するAIを開発している。

A.多項目の観測データを考慮した畳み込みニューラルネットワーク（CNN）



B.物理的な制約を考慮したニューラルネットワーク

- ✓ 観測データに加えて温度の物理現象としての制約を考慮
- ✓ 実際の地熱開発地域を想定した条件下での手法の評価を実施予定

図 7-1 温度推定 AI の概念

a. 畳み込みニューラルネットワーク（CNN）によるアプローチ

CNNの導入により、データの空間分布を考慮可能とした。また、開発したプログラムのアプリ化を行い、GUIで推定から表示までを可能にした。

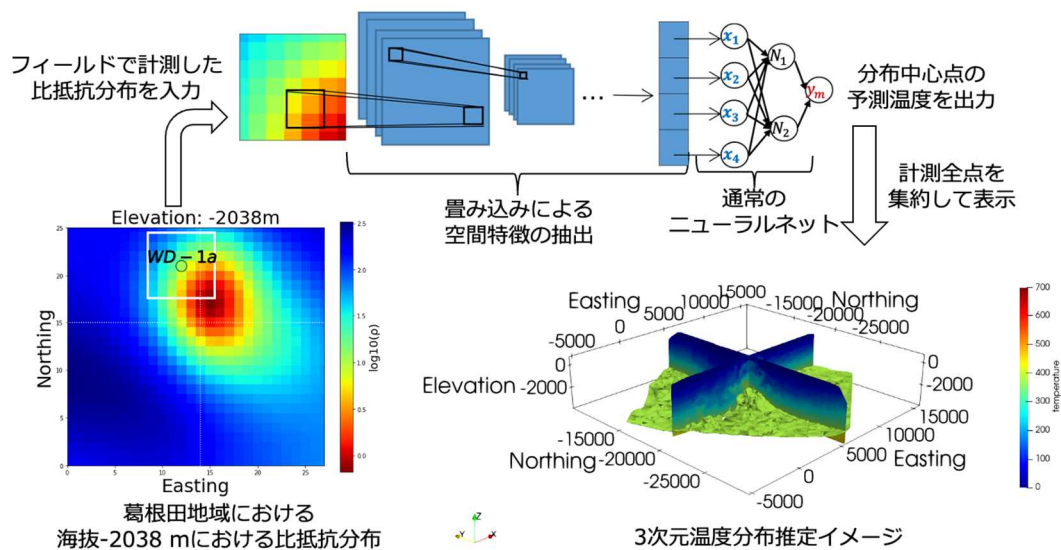


図 7-2 畳み込みニューラルネットワーク（CNN）による温度推定AIの実装

b. 物理的な制約を考慮したニューラルネットワークによるアプローチ

物理的な制約を導入したニューラルネットワークにより、少ない坑井データから温度等の3次元分布が予測可能なAIを開発した。

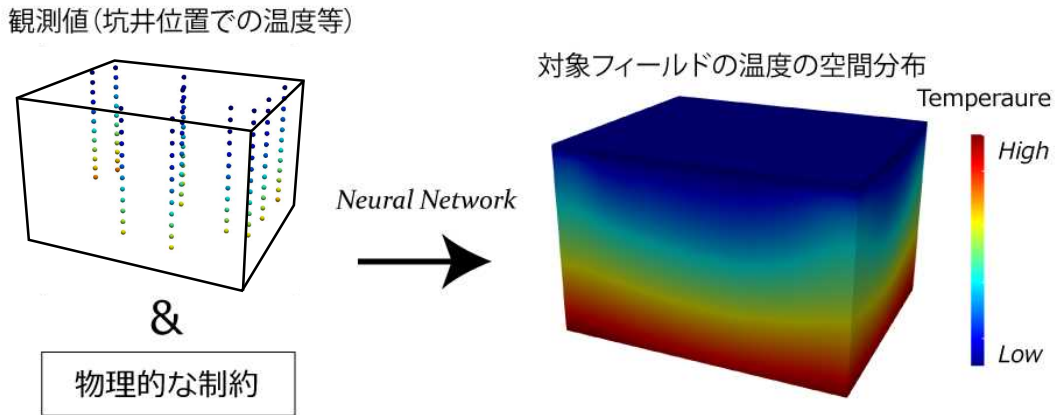


図 7-3 物理的な制約を考慮したニューラルネットワークによる温度推定 AI の概念

(2) 有望領域 (透水性) 推定 AI の開発

各種平面図データと経験的に読み取れる有望領域の画像解釈により、有望領域の分布を推定する AI を開発した。

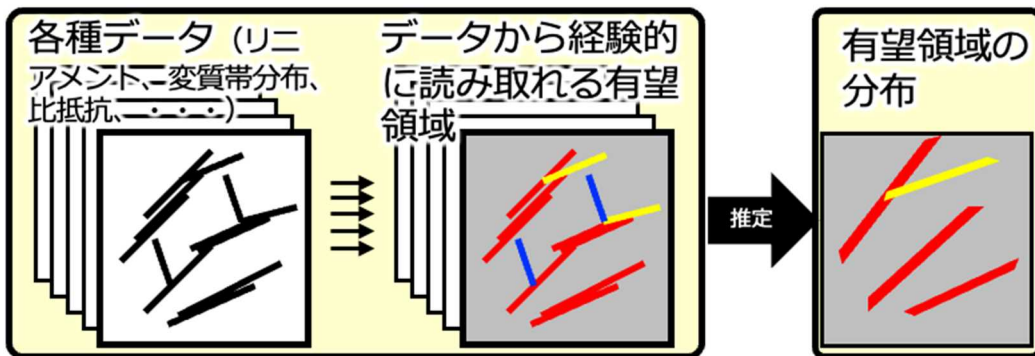


図 7-4 有望領域 (透水性) 推定 AI の概念

②物理探査データ逆解析における空間分解能の向上

(1) スパースモデリングを導入した MT 法 2 次元比抵抗逆解析コードの開発

MT 法比抵抗探査データ解析手法として、L1 正則化によるスパースインバージョンを開発し、解析コードを作成した。このコードを使用して正則化および条件設定を工夫した結果、シャープな境界を持ち、真のモデルに近い構造を推定することが可能となった。

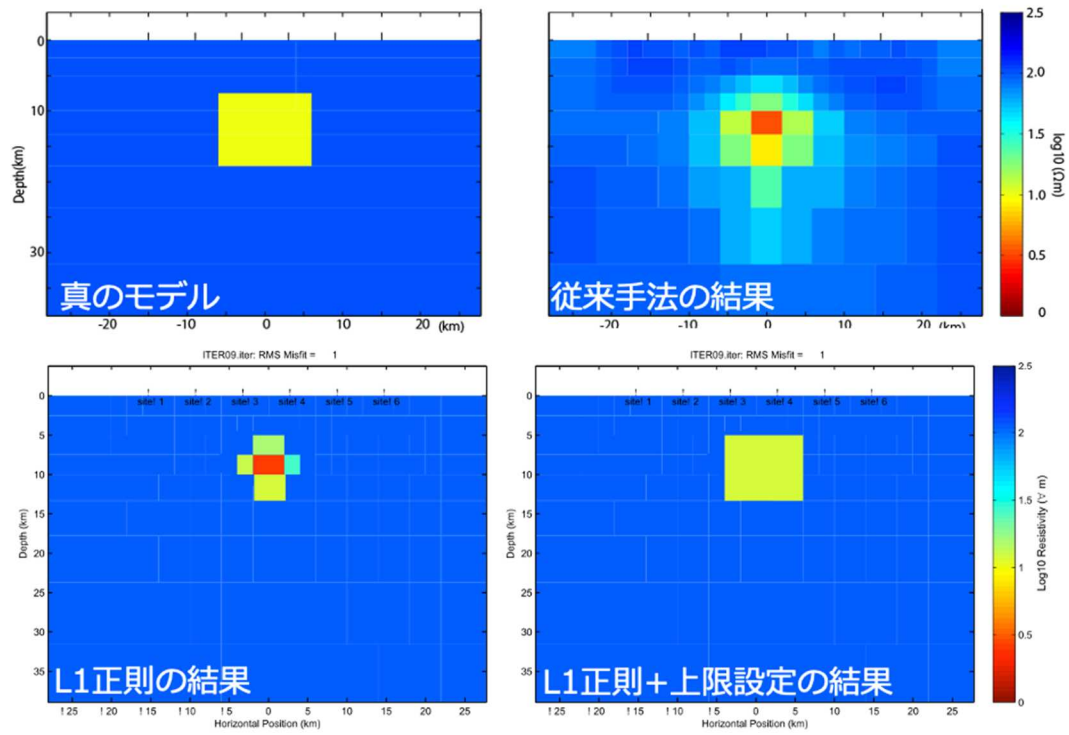


図 7-5 MT 法比抵抗探査データの 2 次元スパースインバージョンの推定例

8. 実用化・事業化へ向けての見通しと取組みについて

高温・高透水領域推定技術は、順次既開発地での貯留層評価サービスとして展開するとともにデータ蓄積、汎用化を進め、新規フィールドでの開発事業者向けのサービスを開始する。

地熱開発・地下探査コンサル事業者を対象に、製品・サービス化および普及の支援を行う。また、開発事業者、貯留層管理事業者を対象に、担当者への技術指導、解析結果の評価支援等を行う。

表 8-1 実用化・事業化の見通しと課題・取組み

実施内容と実施者	FY2024	FY2025	FY2026	FY2027	FY2028
設計・製品化 (国研、大学、企業)	ソフトウェア・パッケージ統合		ソフトウェア改良、アップデート		
	初期課題	統合初版 リリース	課題	汎用版 リリース	
サービス化 (企業)	既存フィールドでのサービス実施		新規フィールドでのサービス実施		
サービス化支援 (国研、大学)	地熱・地下探査コンサル企業との連携によるサービス化支援				
地熱分野での応用技術開発、他分野への展開 (国研・大学)	各応用先への拡張 各要素技術の開発			ソフトウェア・パッケージ化および検証	各分野におけるサービス化支援
技術支援 (国研、大学)	地熱開発事業者等への技術指導				
PR活動 (国研、大学)	学協会を通じたPR活動				

添付資料

●特許論文等リスト

【とりまとめ】

	2021 年度	2022 年度	合計
特許	0	0	0
論文	0	0	0
学会発表（口頭・ポスター）	0	4	4
プレスリリース	0	0	0
新聞・TV 等掲載	0	0	0
受賞	0	0	0
その他	0	0	0

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	宇津木 ほか	京都大	L1 ノルム正則に基づいた磁気インバージョンに対するベイズ的情報量基準の MCMC を用いた有効性の評価	地球電磁気・地球惑星圏学会 2022 年講演会	2022/11/4
2	山谷ほ か	産総研 ほか	AI を利用した在来型地熱貯留層の構造・状態推定技術の開発	日本地熱学会令和 4 年学術講演会	2022/11/8
3	石塚	京都大	物理則を考慮した深層学習による自然状態での温度・浸透率のモデリング手法の開発	日本地熱学会令和 4 年学術講演会	2022/11/8
4	山谷ほ か	産総研 ほか	Development of the ai-based technology for estimating the structure and condition of conventional geothermal reservoirs	グランド再生可能エネルギー2022 国際会議	2022/12/14

個別テーマ (3) -5.

(3) 地熱発電高度利用化技術開発

(3) -5. 地熱貯留層設計・管理のための耐高温・大深度地殻応力測定法の実用化

委託先：国立大学法人東北大学 流体科学研究所
株式会社物理計測コンサルタント
応用地質株式会社

1. 背景と目的

2018年7月に「第5次エネルギー基本計画」が閣議決定され、同計画において地熱発電は、発電コストも低く、安定的に発電を行うことが可能なベースロード電源を担うエネルギー源と位置付けられている。エネルギーミックスの議論においては、地熱発電の2030年度における導入見込量として最大で約1.55GW（2017年度実績510MW）、発電電力量11.3TWh（2017年度実績2.4TWh）の導入拡大が掲げられている。しかし、地熱発電設備容量は、固定価格買取制度開始以降の増加が約80MWに留まっており、2030年導入目標の半分にも至っていない。この現状を打破するためには、生産量増大、コスト削減、利用率向上を実現する高度利用化技術の開発が必要である。一方、地下深部からの地熱流体の上昇が、既存の断層に沿って起こっており、その断層の中でも面に作用する応力が臨界状態にあるものが主要な役割を担っていることが、地熱を対象にした数多くの研究で最近明らかになっている。このため、地殻応力に基づいて地熱開発を行うことが、生産井の成功率を高め、貯留層の持続性を向上させるなど、調査から運用に至る様々な段階の大きなコスト削減につながると期待されている（例えば、米国エネルギー省, GeoVision, 2017）。そこで、超臨界地熱を対象としたNEDO研究開発プロジェクト（フェーズI、2018～2020年度）では、大深度かつ高温な岩体の地殻応力測定を実現するための新しい方法（二重解放コア変形法）の原理の検証を行い、それを具体化する技術（二重ビットコアリング）の開発に成功した。これを踏まえて本プロジェクトでは、現実に即したシビアな掘削環境とコストを考慮し、同方法を信頼性・堅牢性のあるものに完成させるための研究開発を行う。

2. 研究開発の概要

本プロジェクトが対象とする二重解放コア変形に基づく地殻応力測定法では、二重ビットコアリングによる掘削で採取した特殊なコア（応力記録コア）の断面形状から地殻応力状態を読み取る。掘削自体は1時間程度に過ぎないのに比べ、掘削の揚げ降ろ

しに要する時間は大幅に長い。したがって、その時間とそれに要する労力が無駄にならないよう、1度の揚降管でコアが確実に得られなければならない。さらに、近い深度でコア掘削・測定を繰り返して結果を検証することが求められる。そこで1度の揚降管で複数の応力記録コアを連続的に採取できるようにするための新たな技術開発（コアのマルチ化）が必要となる。また、地殻応力の大きさは向きによって変化するので応力記憶コアを定方位化し、応力と方位の関係を測定できるようにするための新たな技術開発（コアの定方位化）が必要である。これらの課題を解決するため、以下の研究開発を実施する。

① マルチ二重ビットコアリングツールの開発（担当：物理計測コンサルタント、応用地質、東北大学）

下記の2つの方式による二重ビットコアリングツールを開発してコア掘削試験を行い、性能評価と課題を抽出し、それを踏まえた改良を行ってコアのマルチ化を実現する。なお、二重ビットコアリングツールは、口径が大きめのビット（外ビット）と口径が小さめのビット（内ビット）からなり、それぞれで独立に掘削ができるツールである。

A. ワイヤーライン型

先の NEDO プロジェクトで開発した二重ビットコアリングツールの構造を改め、外ビットを下端に付けた外管を掘管と直結し、内ビットとコアチューブを取り付けた内管を掘管と分離させる。そして、その内管は通常のワイヤーラインコアリングの要領で掘管の内部を通して降下させて、ラッチ機構で掘管に固定する。

B. 改良ロッド型

外ビットを下端に付けた外管を掘管と直結し、内ビットとコアチューブを取り付けた内管を掘管と分離させる。内管は J-slot 機構によって掘管と任意に連結／離脱できる構造とする。また、内管を下に伸ばし、連結状態で外ビットより内ビットが下側に突き出した配置にする。

② コア方位測定方法の開発（担当：物理計測コンサルタント、東北大学）

コアが格納されるコアチューブの方位がわかれば、それからコアの方位が決まる。そこで、耐熱性があるメモリ記録型の方位測定器を開発する。さらに、その測定器を下記いずれかの方式で二重ビットコアリングツールと組み合わせてコアチューブの方位を測定する方法を開発する。

A. ツール内蔵方式

二重ビットコアリングツールの中に方位測定器を組み込んでコアチューブの方位を測定する。このため、方位測定に影響する範囲にある部品を非磁性材料で製作することが必要となる。

B. ワイヤーライン取り付け方式

掘削が完了してコアを根元で切断する前の段階で、地表から掘管内を自由落下あるいはワイヤーラインで降ろした測定器を一時的に二重ビットコアリングツールと連結させて方位を測定する。

③ 地熱開発における地殻応力の有効性評価（担当：東北大学）

地殻応力が調査・生産井の掘削等にもたらす効果を、数値シミュレーションによって定量化する。また、断裂系の地熱貯留層を模擬する数値モデルを作成し、地熱流体の分布、効率的な生産井の配置、生産量の変化などに対する地殻応力の影響を明らかにする。

各テーマにおける研究開発項目、開発目標及びその設定根拠を表 2-1 に示す。

表2-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	中間目標	最終目標	根拠
①マルチ二重ビットコアリングツールの開発	250℃以上の耐熱性能があり、2.5 km以上の深度で2個以上の応力記録コアを連続的に採取できる方法を具体化する。また、これに基づいて実証試験の詳細計画を提示する。	2.5 km以上の深度で2個以上の応力記録コアを定方位で連続的に採取でき、250℃以上の耐熱性能を有する二重ビットコアリングツールを完成させる。また、数値シミュレーション結果に基づき、地殻応力を考慮することで調査・生産井の掘削および貯留層維持・管理に要するコストを10～20%削減できることを明らかにする。	地熱開発での地殻応力測定を一般化し、地殻応力に基づく開発を可能にすることで、生産量増大、コスト削減、利用率向上等を実現し、地熱発電の導入拡大を促進するため。
②コア方位測定方法の開発	方位の時間変化を内蔵メモリに記録でき、250℃以上の耐熱性能を有する方位測定器を開発する。また、測定器が耐えられる温度と保持時間の関係を明らかにする。		
③地熱開発における地殻応力の有効性評価	現実に即した断裂型貯留層の構造モデルを決定する。		

3. 事業スケジュール

本研究開発の期間は2021年8月3日より2024年3月20日であり、そのスケジュールの概要を図3-1に示す。

事業項目	2021年度				2022年度				2023年度				2024年度(参考)			
	第1 四 半 期	第2 四 半 期	第3 四 半 期	第4 四 半 期	第1 四 半 期	第2 四 半 期	第3 四 半 期	第4 四 半 期	第1 四 半 期	第2 四 半 期	第3 四 半 期	第4 四 半 期	第1 四 半 期	第2 四 半 期	第3 四 半 期	第4 四 半 期
① マルチ二重 ビットコアリング ツールの開発 ・新型コアビット ・ワイヤーライン 型 ・改良ロッド型																
			開発・検証													
							試作・地表試験					方位計組み込み・実坑井試験・改良				
			試作・地表試験				実坑井試験・改良				方位計組み込み・実坑井試験・改良					
② コア方位測 定法の開発 ・方位測定装置 ・内蔵方式 ・ワイヤーライン 取り付け方式																
		試作・地表試験														
							開発									
						開発										
③ 地熱開発に おける地殻応 力の有効性評 価																
						調査・モデル作成						シミュレーション・評価				
④ まとめ																

図 3-1 研究開発のスケジュール

4. 予算

本研究開発の予算額を表 4-1 に示す。

表 4-1 研究開発の予算額

(単位：百万円)

	2021 年度	2022 年度	2023 年度	総額
東北大学	3.95	5.25	10.35	19.55
物理計測コンサルタント	14.036	76.714	44.77	135.52
応用地質	2.347	58.8016	45.5092	106.6578
合計	20.3334	140.7656	100.6292	261.7282

5. 研究開発の実施体制

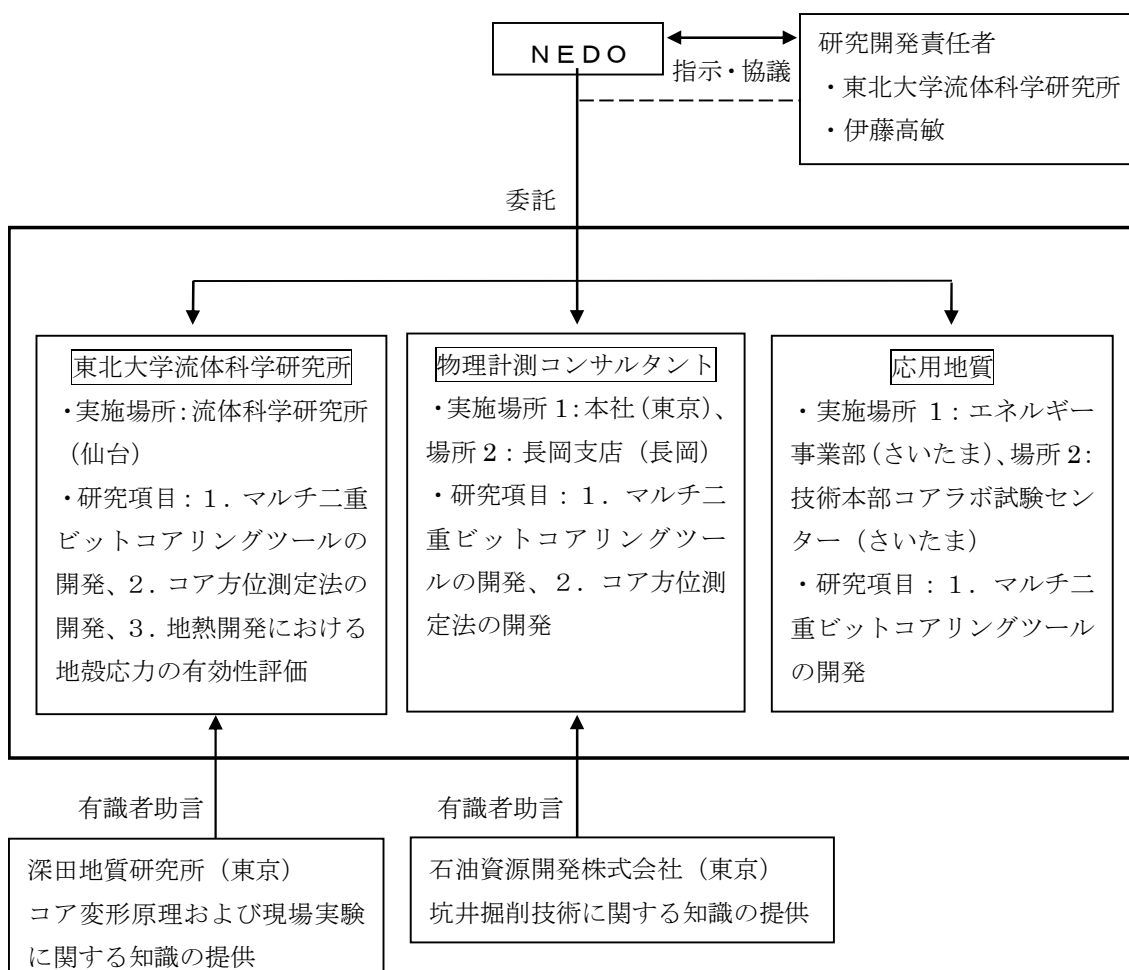


図 5-1 研究開発の実施体制

6. 事業の管理運営

- 開発ツールの検証試験は、特に支障ない限り全ての事業者が参加して実施している。例えば2022年度には2022年7月11日～16日、9月26日～10月8日、12月12日～17日および2023年2月27日～3月11日それぞれの期間に計4回の検証試験を実施した。
- 検証試験に合わせて事前および事後の検討会を全ての事業者が参加してオンライン会議で実施し、実施内容の立案と確認、結果と認識の共有を行っている。
- 必要に応じて検証試験および検討会に有識者(表6-1)に参加して頂いている。

表 6-1 有識者

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
船戸 明雄	深田地質研・副理事長	コア変形原理に関する知識の提供
横山 幸也	深田地質研・上席研究員	現場実験に関する知識の提供
手塚 和彦	石油資源開発・技術本部長	坑井掘削技術に関する知識の提供

7. 研究開発成果について

本研究開発の成果は下表のとおりである。①～③のいずれの項目についても設定した中間目標を既に達成した。

表 7-1 中間目標に対する達成度（見込み）

研究開発項目	中間目標 (2023年3月)	成果 (2023年3月まで)	達成度 (見込み)	達成の根拠 ／解決方針
① マルチ二重ビットコアリングツールの開発	250℃以上の耐熱性能があり、2.5 km以上の深度で2個以上の応力記録コアを連続的に採取できる方法を具体化する。また、これに基づいて実証試験の詳細計画を提示する。	<ul style="list-style-type: none"> 改良ロッド型ツールを製作して地表から掘削した実坑井および神岡鉱山の坑道に掘削した実坑井での動作試験に成功した。 ワイヤーライン型ツールを製作して神岡鉱山の坑道に掘削した実坑井での動作試験に成功した。 	○ (2023年3月に達成)	<ul style="list-style-type: none"> 改良ロッド型に加えて次年度に予定していたワイヤーライン型の製作および実坑井での動作試験まで完了したこと。 2方式のいずれも250℃以上の耐熱性能があり、それを大型にすれば2.5 km以上の深度でも使用できる見込みであること。
② コア方位測定方法の開発	方位の時間変化を内蔵メモリに記録でき、250℃以上の耐熱性能を有する方位測定器を開発する。また、測定器が耐えられる温度と保持時間の関係を明らかにする。	<ul style="list-style-type: none"> 耐熱温度204℃で8時間耐えられる市販の方位測定器を入手できた。 この耐熱条件を踏まえ、ワイヤーライン取り付け方式で方位測定器を一時的に改良ロッド型ツールと連結してコア方位を測定する装置を製作した。 この装置を神岡鉱山での掘削試験に適用して動作検証に成功した。 	○ (2023年3月に達成)	<ul style="list-style-type: none"> 高温の坑底でも二重ビットコアリングツールで採取されたコアの方位を測定できる装置を具体化できたこと。 同装置の耐熱温度が目標値の250℃よりやや小さいが、このギャップは、方位測定装置を降ろす前に泥水循環で坑底を冷却することで回避できる見込みであること。
③ 地熱開発における地殻応力の有効性評価	現実に即した断裂型貯留層の構造モデルを決定する。	国内の地熱発電所における地質構造と熱構造を文献調査した結果、断層、断裂帯と貫入岩体などが異なる3つの形態に分類されることがわかった。	○ (2023年2月に達成)	国内の地熱発電所における地質構造と熱構造の代表的な形態が、適用予定のせん断型貯留層シミュレータ“SHIFT”で模擬できる見込みであること。

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

8. 実用化・事業化へ向けての見通しと取組みについて

実用化・事業化に向けての見通しと今後の取組みは、下記の箇条書きと表のとおりである。

- 研究開発段階（2021~2024年度）では、マルチ DBC ツールの開発とコア方位測定方法の開発を進め、製品化を目指す。
- 研究開発終了後は、完成させたツールを用いて様々な条件での実証を行い、それらを使用した地殻応力計測サービス業務を事業化し、計測サービスを開始する。
- 2025年度以降は、地熱調査井（ヒートホール）や地質調査井などの小口径孔井（HQ孔）における地殻応力計測が定常業務となるよう、マルチ DBC ツールの利便性・必要性をアピールしながら営業活動に重点を置く。その後、大深度地熱調査・開発井での使用へと適用範囲を拡大する。
- 地殻応力測定サービスの対象となる孔井は、地熱調査・開発坑井のほか、石油・天然ガス坑井、CCS 調査井、高レベル廃棄物地層処分（HLW）の調査井、断層調査井などである。サービス提供先は、地熱デベロッパー、石油・天然ガス開発企業、CCS 調査・実施事業者、HLW 事業者、地質コンサルタント、大学、公的研究機関などが見込まれる。海外案件へのサービスもありうる。
- 計測サービスの拡大に合わせて、二重コアリングツール、直径計測装置のラインナップを製作する。
- 地熱調査では、将来的には超臨界井でのサービス提供も視野に入れながら、対応ツール製作や計測も試みる。

表 8-1 実用化・事業化の見通しと課題・取り組み

項目	2025 年度	2026 年度	2027 年度	2028 年度	2029 年度～
HQ 孔での実証 大深度井での実証	地熱 HH 井, HLW 調査井など →				
	CCS、地熱調査井など →				
超臨界用ツール製作 超臨界井での計測		製作 (25,000 万円調達) →		超臨界井での計測 →	
二重コアリングツール ラインナップ製作 直径計測装置 ラインナップ製作			設計・製作 (500 万円投資) →	設計・製作 (500 万円投資) →	
			設計・製作 (500 万円投資) →		
計測サービスの展開	営業活動 (利便性・必要性のアピール、周知) →				
	サービス開始 (1 件/年)	サービス継続 (2 件/年)	サービス拡大 (5 件/年) 売上額 3,500 万円	サービス拡大 (10 件/年) 売上額 7,000 万円	サービス拡大 (15 件/年) 売上額 10,000 万円

添付資料

●特許論文等リスト

【とりまとめ】

	2021 年度	2022 年度	合計
特許	0	0	0
論文	1	0	1
学会発表（口頭・ポスター）	5	2	7
プレスリリース	0	0	0
新聞・TV 等掲載	0	0	0
受賞	0	0	0
その他	0	0	0

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	伊藤高敏 ほか	東 北 大 学	Experimental and numerical study on a two-stage coring method for stress measurement: application to deep and high-temperature geothermal wells	Geothermics, 100(2022), 102333	有	2022/1

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	手塚和彦	石油資源開発株式会社	地下資源開発における地殻応力計測の役割・課題	地球科学者ユニオン談話会	2021/7
2	手塚和彦	石油資源開発株式会社	Dual-bits Coring Tool - New rock stress measurement technology applicable to high temperature and deep depth	SPWLA Special Edition Webinar	2021/12
3	手塚和彦ほか	石油資源	大深度地熱井における地殻応力	日本地熱学会令和3	2021/10

		開発株式会社	測定を目的とした大口径 8 - 1 / 2 "用二重ビットコアリングツールの開発	年学術講演会	
4	伊藤高敏ほか	東北大学	地熱井への適用を考慮した二重解放コア変形原理による地殻応力測定法の室内実験による検討	日本地熱学会令和 3 年学術講演会	2021/10
5	伊藤高敏	東北大学	Core deformation: A new stress indicator applicable in a wide range of depth and temperature	ISRM Video Lecture: Crustal stress assessment and its application in engineering and earthquake research	2022/1
6	多田駿人ほか	東北大学	ボーリング採取試料の応力解放に伴う弾性変形を利用した岩体応力測定原理の数値シミュレーション	日本機械学会 M&M 2022 材料力学カンファレンス (弘前)	2022/9
7	伊藤高敏ほか	東北大学	新しい地殻応力測定法と地熱開発への応用	日本地熱学会令和 4 年学術講演会	2022/11

以 上

個別テーマ (3) -6.

(3) 地熱発電高度利用化技術開発

- (3) -6. 発電設備利用率向上に向けたスケールモニタリングと AI 利活用に関する技術開発
委託先：九電産業株式会社、国立大学法人九州大学、九州電力株式会社

1. 背景と目的

世界の多くの地熱発電所は運転開始以来スケール問題を抱えている。特に、地上設備や還元井周辺地層においてはシリカスケール生成が地熱発電設備の利用効率低下の原因となっている。本プロジェクトでは、定量的スケールモニタリング法の確立、および様々な条件における AI への入力データセット（スケール化学組成、流体化学組成、物理パラメータ、発電所運転条件等）の取得を行うことにより、元素毎の付着速度のモニタリングを基にスケール生成予測の結果を求める一連作業を可能とするアルゴリズムを作成する。確立した AI によるスケール生成予測技術をベースとして、スケール生成を短期間で評価することで、スケールに起因する種々の問題に対し、適時・適切な対策を施すことにより、地熱発電におけるシステム利用率を向上させることを目的とする。

2. 研究開発の概要

2018～2021 年度 NEDO 研究開発プロジェクト「地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発/酸性熱水対策技術開発」において、中性～弱アルカリ性熱水からだけでなく、酸性熱水からもシリカスケールが生成し、腐食問題と合わせて地熱発電所設備の利用低下の原因となるという結果を得ている。その結果からシリカスケール生成をモニタリング（監視・制御）するシステム開発が必須であり、膨大な地化学データからシリカスケール生成につながる条件を見出すことができればスケール抑制法を迅速に適用可能かつ、発電設備の利用率の向上およびコスト削減につながると考えている。

そこで、様々な熱水条件下でのテストピース浸漬実験において、テストピース表面に短時間で付着した目に見えないごく微量の薄膜スケールの化学組成を高感度定量分析により明らかとし、反応速度論解析を行うことでスケールを構成する各元素の付着速度を導出し、スケール生成能を有する熱水の物理化学情報と最終産物であるスケールに関する化学組成・化学状態・沈殿量等をデータセットに集約し、それらを AI に学習させることで、熱水情報と短期間のスケールモニタリングを経ることによって、最終産物であるシリカスケールの生成予測システムを構築することを目指す。

各テーマにおける研究開発項目、開発目標及びその設定根拠を表 2-1 に示す。

表2-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	中間目標	最終目標	根拠
I：定量的スケールモニタリング法の確立	テストピースの材質選定から浸漬後のテストピースの保管、およびテストピースの各種分析を含めたモニタリング試験条件を決定し、標準化案の検討を完了する。	標準化した定量的スケールモニタリング法により、補完的な実験も含めて500条件程度のAI入力データセットを取得する。	現時点においては、地熱流体からのスケール生成をモニタリングする標準的な方法は存在せず、精度よく将来のスケール生成を予測するためには、モニタリング法の確立・標準化が必須であり、AIによる学習・予測を達成するためには、標準法で取得された多くのデータセットが必要であるため。
II：定量的スケールモニタリング法によるデータセットの収集	決定した条件をベースとして熱水からのシリカスケール沈殿のケースを200条件以上（沈殿しないケースを50条件以上含む）、二相流および上記からのシリカスケール沈殿のケース（フィールド試験）を20条件以上のデータセットを収集する。		
III：スケール生成予測を実現するAI利活用に関する研究開発	シリカスケール生成予測を実現するAIの概念設計を完了し、試験によって得られた情報等によりスケール生成予測を試行する。	スケール生成予測の結果を求める一連作業を可能とするアルゴリズムを作成し、模擬試験装置等を利用した実証実験により、システム利用率を10%～20%向上できることを明らかにする。	スケールを予測するAIは存在せず、精度の高い予測を行うには、データセットの収集と並行して、AIに関するワークフローの概念を固める必要があるため。
IV：フィールドでの実証実験	実証試験装置を製作し、実証試験を実施する。実証試験によって得られた結果と、モデル計算等との比較・評価を行う。		システム利用率を向上させる条件を明らかにするためには、実証試験装置によって得られる結果とAIによって得られる予測の比較・評価が必要であるため。

3. 事業スケジュール

本研究開発の期間は2021年10月1日より2024年3月20日であり、そのスケジュールの概要を図3-1に示す。

事業項目	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度 (参考)	2025年度 (参考)
① 定量的スケールモニタリング法の確立	← スケールモニタリング法の確立 →			← スケールモニタリング法の改良 補完的データの収集(ラボ試験含む) →	
② スケールモニタリング法によるデータセットの収集	← データセット収集(主に現場試験) →				
③ スケール生成予測を実現するAI利活用に関する研究	← AI概念設計 →		← AIデータ入力・アルゴリズム作成 →		
④ フィールドでの実証実験	← 試験装置の設計・製作 →			← 実証試験 →	← 評価 →
⑤ 技術検討委員会の設置、開催	←		← 適宜開催 →		←

図3-1 研究開発のスケジュール

4. 予算

本研究開発の予算額を表 4-1 に示す。

表 4-1 研究開発の予算額

(単位：百万円)

研究開発費	2021 年度	2022 年度	2023 年度	総額
九電産業株式会社	35	47	39	121
九州電力株式会社	4	7	7	18
国立大学法人九州大学	4	69	21	94
合計	43	123	67	233

5. 研究開発の実施体制

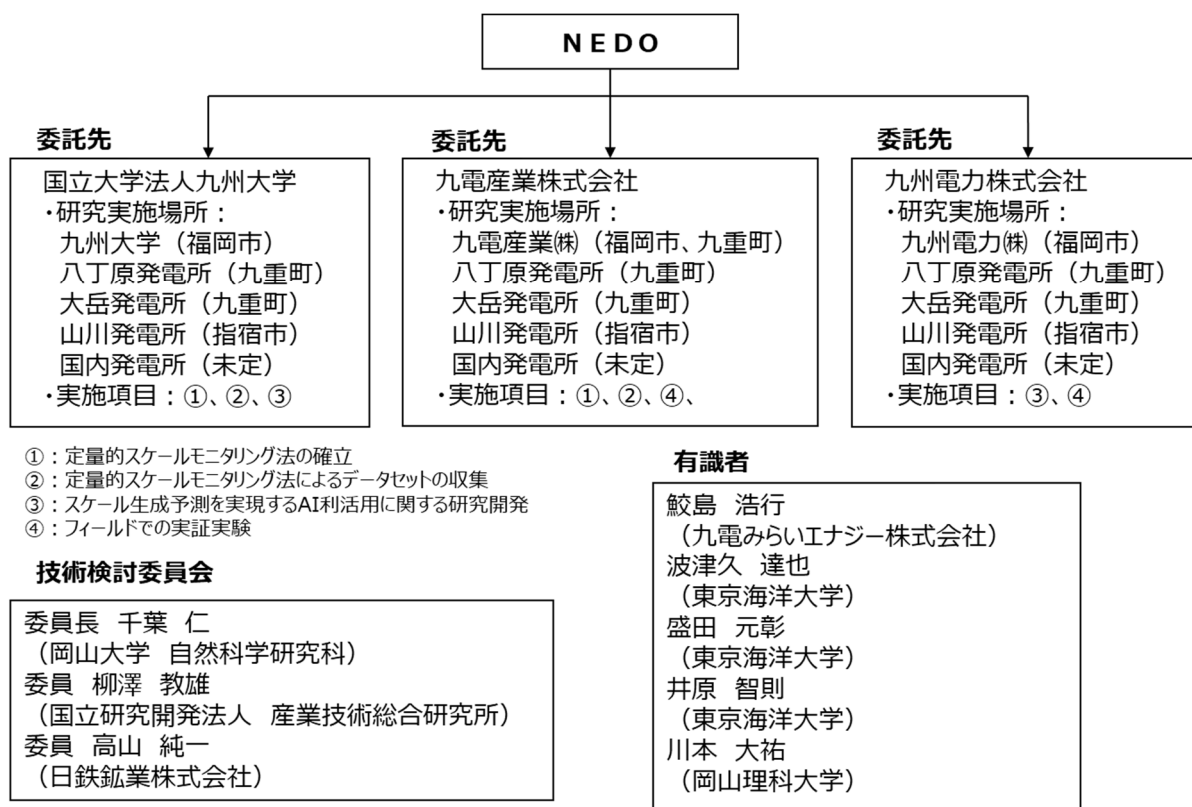


図 5-1 研究開発の実施体制

6. 事業の管理運営

本プロジェクトにおいては、2022年3月に技術検討委員会を実施した。概要は以下の通り。なお、本プロジェクトの技術検討委員および有識者の一覧をそれぞれ表6-1, 6-2に示す。

<第1回技術検討委員会>

日時 2022年3月25日 13:00~17:00

場所 福岡市商工会議所 401会議室

参加者

(委員・有識者)

千葉 仁 (委員長)、柳澤 教雄 (副委員長)、高山 純一 (委員)、鮫島課長※

(受託者)

九州電力(株) 上野グループ長、一ノ宮副長。新留所長※、小田巻副長※、白垣グループ長※、河内副長※、九州大学：米津准教授、寺師※、九電産業(株)：横山技術顧問、渡邊グループ長、宮部、藤木、井上、森、渡邊所長※、梶井※ (※はオンラインによる参加)

内容

初年度であったためプロジェクトの全体概要の説明および、委員会実施時点で得られている成果について報告し、今後の進め方に関する議論を行った。

表 6-1 技術検討委員

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
千葉 仁	国立大学法人 岡山大学 名誉教授	スケール生成メカニズム、化学平衡、シミュレーション
柳澤 教雄	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター 総括主幹	スケール生成メカニズム・腐食、シミュレーション
高山 純一	日鉄鉱業株式会社 資源開発部 地熱開発課 課長	地熱発電設備全般、実機への適用

表 6-2 有識者

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
鮫島 浩行	九電みらいエネルギー株式会社 エンジニアリング第2本部 地熱事業部 山川バイナリー発電所 課長	地熱発電設備全般、実機への適用
波津久 達也	国立研究開発法人 東京海洋大学 学術研究院 海洋電子機械工学部門 教授	熱電対を利用したスケールモニタリング

盛田 元彰	国立研究開発法人 東京海洋大学 学術研究院 海洋電子機械工学部門 准教授	熱電対を利用したスケールモニタリング スケール生成メカニズム
井原 智則	国立研究開発法人 東京海洋大学 学術研究院 海洋電子機械工学部門 助教	熱電対を利用したスケールモニタリング
川本 大祐	岡山理科大学 理学部 化学科 講師	スケールおよび熱水の分析

7. 研究開発成果について

本研究開発における、これまでの実施内容は表 7-1 の通りである。

表 7-1 研究開発項目ごとの実施内容

項目	実施内容
① 定量的スケールモニタリング法の確立 ② 定量的スケールモニタリングによるデータセットの収集	<ul style="list-style-type: none"> ● 八丁原発等において熱水を対象とした短期スケール付着試験を実施 ● 八丁原発等における長期スケール付着試験（最長約3か月）を実施二相流、蒸気を対象としたスケール付着試験を実施（各1フィールド） ● 還元系統を対象とした、熱電対を利用したスケールモニタリング（東京海洋大学の）を開始
③ スケール生成予測を実現するAI利活用に関する研究開発	<ul style="list-style-type: none"> ● 熱水化学組成からスケール生成量を予測するAIを試行、発電所運転データの組み込みも検討
④ フィールドでの実証試験	<ul style="list-style-type: none"> ● 実証試験機を製作

なお、①の「定量的スケールモニタリング法の確立」および「②定量的スケールモニタリングによるデータセットの収集」のため、九州電力㈱八丁原発所をはじめとした5フィールドにて計6回、延べ38日の現地試験を実施した。

上記のとおり、定量的スケールモニタリング法の確立および、AI によるスケール生成予測を目指した研究開発を進めており、現時点で得られている成果は以下の通りである。

<定量的スケールモニタリング法の確立について>

- 走査型電子顕微鏡および LA-ICP-MS を用いた定量的スケールモニタリング法によって、数時間程度の短期のスケールモニタリングからスケールを構成する各元素の定量が可能であり、元素ごとの成長過程が得られることがわかった。また、その過程で LA-ICP-MS による膨大なデータを適切に処理する手法を開発した。
- スケールモニタリング用の金属板の材質としては、Cu、Ti、SUS を用いたが、沈殿挙動を把握する上では少なくとも 2 つの材質を組み合わせることが重要であることが明らかとなった。
- 熱水の性状試験（化学組成分析、シリカ重合試験、イオン交換樹脂およびシリカゲルへの溶存ケイ酸・アルミニウム種の同定、ポリマーサイズ試験）を経た後に、定量的スケールモニタリング法を実施することで、熱水中の溶存各元素がどのように固体表面へと沈殿していくかの挙動が明らかとなった。このことはある程度、熱水のグルーピングが可能であることを示唆し、最終的な AI による精度予測の向上につながる。
- （数か月程度の）長期テストピース浸漬試験や、地熱発電所で得られる実際のシリカスケールの活用も有効であることを見出した。これらの試験で得られる沈殿物やシリカスケールは、化学組成以外にも化学状態分析（ケイ素・アルミニウムの NMR・鉄のメスバウアー・XAFS など）が可能であり、これらを加味することで、スケール物質の生成過程がいくつかのステージに分けられることが見えるなど、スケール生成予測に繋がる情報が得られる。
- これまでのテストピース法が月単位の長期で重量を測定するものが主であったことを踏まえて、定量的スケールモニタリングでも各元素の重量に換算することが過去データを活用することにもつながる。そこで各元素濃度を各元素の物質質量に変換する作業をすることが、最終的な AI による精度予測の向上に寄与する可能性が見いだせた。

<スケール生成を予測する AI の利活用について>

- AI によるスケール予測では、初期段階として各熱水の化学組成を説明変数とし、その熱水から生成されたスケール量を目的変数としたところ、ケイ酸の化学状態に関するデータを加味したり、データを熱水性状によってグループ化したりすることで、予測精度の向上が見込めることが見いだせた。また、温度や流量等の物理特性等を説明変数として取り込む余地があることも明らかとなった。
- 熱水のグルーピングのためにも、多様な性質を持つ熱水を対象とした定量的スケールモニタリング法のデータ収集、データベースの構築が、カギとなることが改めてわかった。

以上を踏まえ、本研究開発の中間目標に対する達成度は表 7-2 のとおりであり、設定した中間目標に対して、項目 I～IVは達成できる見込みである。また、上述した成果の一部について、2022年度に4件の学会発表を行った（発表の詳細は添付資料参照）。

表 7-2 中間目標に対する達成度（見込み）

研究開発項目	中間目標 (2024年3月)	成果 (2023年3月まで)	達成度 (見込み)	達成の根拠 ／解決方針
I：定量的スケールモニタリング法の確立	テストピースの材質選定から浸漬後のテストピースの保管、およびテストピースの各種分析を含めたモニタリング試験条件を決定し、標準化案の検討を完了する。	様々な熱水条件において、テストピース浸漬試験を実施し、スケールモニタリング条件について標準化しつつある。	○ 2023年12月に達成見込み	2023年度の現地試験において、テストピースの材質選定や分析の妥当性の検討を計画しているため。
II：定量的スケールモニタリング法によるデータセットの収集	決定した条件をベースとして熱水からのシリカスケール沈殿のケースを200条件以上（沈殿しないケースを50条件以上含む）、二相流および上記からのシリカスケール沈殿のケース（フィールド試験）を20条件以上のデータセットを収集する。	中間目標として挙げた試験条件数に対し、約7割を達成済。	○ 2023年12月に達成見込み	八丁原発等での現地試験を計画しており、中間目標に対して相当数のデータセットの取得を見込んでいるため。
III：スケール生成予測を実現するAI活用に関する研究開発	シリカスケール生成予測を実現するAIの概念設計を完了する。	既存データセットによるAIの概念設計構築とともに試行的なスケール生成予測を実施。	○ 2023年12月に達成見込み	現在、取得したデータの整理およびAIの概念設計を進めており、ワークフローが確定しつつあるため。
IV：フィールドでの実証実験	実証試験装置を製作し、実証試験を実施する。実証試験を実施	実証試験装置を製作し、実施可能な発電設備を検討中。	○	2022年度に実証試験装置を製作し2023年度において試

	し得られた結果と、モデル計算等との比較・評価を行う。		2024年3月に達成見込み	験・評価を実施する計画のため。
--	----------------------------	--	---------------	-----------------

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

8. 実用化・事業化へ向けての見通しと取組みについて

本プロジェクト終了後、まずは短期間でスケール生成予測を行うスケールモニタリング法及び簡易的なスケールインヒビター試験装置での実証試験で、コンサルティング・評価事業を行いデータの蓄積を図る。ターゲットとしては、初めに当社に知見の深い九州内から展開し、九州域外の国内全域へ事業拡大を行う。その間、設備等の改良、データセットを拡大しAI構築を図り、2030年にはAIによるスケール生成予測及びそれに見合ったスケール抑制方法、インヒビター注入方法等を事業化する。

添付資料

●特許論文等リスト

	2021 年度	2022 年度	合計
学会発表（口頭・ポスター）	0	4	4

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	宮部 俊輔	九電産業(株)	発電設備利用率向上に向けたスケールモニタリングと AI 利活用に関する技術開発：プロジェクト概要紹介	日本地熱学会 令和 4 年学術講演会 (東京大会)	2022 年 11 月
2	森 康一郎	九電産業(株)	テストピース浸漬法による地熱熱水からのシリカスケール生成モニタリング：八丁原発電所 H-32 と H-36 号井熱水を用いたケーススタディ		
3	米津 幸太郎	九州大学	鉄、マグネシウム、アルミニウムが関わるシリカスケール生成		
4	有里 海斗	九州大学	テストピース浸漬法から考察する鉄、マグネシウム、アルミニウムが関わるシリカスケール生成		

個別テーマ (3) -7.

(3) 地熱発電高度利用化技術開発

(3) -7. 地熱発電持続可能性維持のための I o T - A I 技術開発

委託先：地熱技術開発（株）

三菱重工業（株）、（一財）電力中央研究所、
（国）九州大学、（学）早稲田大学

再委託先：（国）京都大学

1. 背景と目的

地熱発電所における利用率低下の主な原因は、地下（坑井設備・地熱貯留層）の影響である場合が多く、プラント全体で利用率を大幅に向上させるためには、地上設備と地下を含む複雑な循環系全体を統合して管理する全体システムの構築が不可欠である。システム構築にあたっては、保安上のリスクを回避しながら、低コストで地上設備のデータだけではなく、地下データの変化観測も含めて多岐にわたる情報収集を可能とするクラウドを活用した IoT システムを実現するための基盤技術を開発する。また、この IoT システムに AI や数値シミュレータを活用することによって、地熱発電所の利用率維持・向上を実現することを目的とする。

2. 研究開発の概要

地熱発電の稼働率低下の原因は貯留層の状態に大きく依存するため、対象となる地熱発電所（貯留層）に即した操業管理システムを構成する必要がある。本事業では、今後実案件（適用先）としてどこか対象の地熱発電所が決まった場合に、当該発電所に見合ったシミュレーション技術等を、特定のインターフェースのもと有機的に結合できるような操業管理システムの枠組みを確立することを目指している。上記枠組みのもと、本事業で選定したモデルフィールドに対して、その特徴に合わせたシミュレーション及び管理技術を開発、それらをインテグレートして稼働率向上の検証を行うものである。

各テーマにおける研究開発項目、開発目標及びその設定根拠を表 2-1 に示す。

表2-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	中間目標	最終目標	根拠
①全体システム設計	<ul style="list-style-type: none"> 対象発電所の過去データに基づき全体最適化した場合に、持続的に利用率が向上することを示す。 	<ul style="list-style-type: none"> 対象発電所に適用した場合に、2019年度データと比較して15%程度の利用率向上が可能であることを示す。 	<ul style="list-style-type: none"> 先行研究において、問題の発生している発電所で問題を解決すれば相対値で約15%の利用率改善が可能は見通しを得ていた。
②IoTセンサ技術の研究開発	<ul style="list-style-type: none"> エッジデバイスによる坑井データの計測・データ収集が可能であることを示す。 非在来型センサデータを加えることによる、生産井の停止現象の予兆を捉える効果を整理する。 エッジデバイス対応型の二相流量計、配管厚計測計について、開発可能な目処を付ける。 開発するシステムの産業サイバーセキュリティ対策要件を確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 坑口に設置した変動予兆検知センサによって連続監視を行い、大きな変動前の微小な変化から予兆検知が可能であることを実証する。 開発したセンサを設置して、エッジデバイスでの計測とクラウド環境下でのデータ収録が可能であることを実証する。 汽水比 1 以下で使用可能かつ、精度10%以内のエッジデバイス対応型二相流量計を開発する。 地熱蒸気配管（二相流配管含む）で発生するエロージョンの長期計測を目的に、管厚の変化を精度10%以内で検出可能なエッジデバイス対応型配管厚計測計を開発する。 	<ul style="list-style-type: none"> 二相流量計の室内試験およびIoT加速度・ドローンのフィールド試験を実施し性能評価した。

③蒸気生産部門の O&M 最適化 の研究開発	【③-1】 ・既存のAI機械学習モデルの認識精度を5%向上させる。 ・準オンライン環境にて、オフライン環境と同程度のAIモデルの認識精度を達成する。	【③-1】 センサーフュージョン技術を活用した在来型・非在来型センサーデータの統合手法と各機能について、実データを基に検証する。	地熱発電の必要とされる経験的な値から論拠を得ていた。
	【③-2】 ・坑内流動の安定条件を定式化する。 ・坑井・貯留層の連結シミュレータの動作検証が完了し、実用性を備えていることを示す。	【③-2】 ・生産井の不安定な坑内流動の発生メカニズムについて貯留層の流体流動を含む包括的な解釈を示す。 ・開発したシミュレータで評価および予測精度の向上が認められること。 ・開発したシミュレータのユーザー向けマニュアルの整備。	地熱発電の必要とされる経験的な値から論拠を得ていた。
	【③-3】 ・生産井・還元井の干渉問題（複数の流体流入点からの流体性状の予想）をAIにより解く。 ・最適化アルゴリズムの確立と単純なモデル事例での検証が完了すること。	【③-3】 最適化アルゴリズムにより、人間の手で実施する場合と比較して1/3以下の時間で適正解に到達できること。	地熱発電の必要とされる経験的な値から論拠を得ていた。
	【③-4】 GPUによる汎用計算を用いてシミュレーション計算アルゴリズムの最適化を行い、現在の計算速度を2倍以上高速化する。	【③-4】 腐食・スケール成長シミュレーションで実測値より10%程度早く成長を予測できること。	地熱発電の必要とされる経験的な値から論拠を得ていた。

④地熱発電プラント全体のO&M最適化の研究開発	【④-1】 発電設備向けおよび蒸気設備向けの管理アプリを開発する。	【④-1】 澄川地熱発電所において地上設備（発電設備・蒸気設備）と地下設備（坑井設備・地熱貯留層）を統合した発電プラント全体の操業管理ツールを開発し、試運用と総合評価を行う。	地熱発電システム全体の利用率向上のためには、地上設備（発電設備、蒸気生産設備）の情報を集約して地下の適切な管理を行うことが必要。
	【④-2】 ・EnergyWinを用いて、蒸気生産設備の定常シミュレーションモデルを組み込んだプラントシミュレータを構築する。 ・EnergyWinとTOMONIとの連携のため、クラウド環境を整備して、対象とする地熱発電所専用に地熱発電プラント性能評価ツールをマイクロサービス化するREST API等を開発する。	【④-2】 開発したツールおよび最適化手法を用いて、地熱発電所の定検前後におけるプラント性能変化を解析・評価するとともに、本開発ツールおよび最適化手法の有用性を評価する。	地熱発電の必要とされる経験的な値から論拠を得ていた。
⑤技術実証	澄川地熱発電所ならびに滝上発電所の蒸気設備において、個別技術の試験を行う。	<ul style="list-style-type: none"> ・本事業で開発した技術を地上設備（発電設備・蒸気設備）と地下設備（坑井設備・地熱貯留層）を統合した発電プラント全体のシステムとしてまとめ、澄川地熱発電所において、その有用性について実証試験を行う。 ・澄川地熱発電所において2019年度比較で利用率が向上することを実証する。 （実証にあたっては、事業者が実行した部分の改善率と各種事情で実行できなかった部分の理論的な改善率を合算して15%以上の利用率改善の見通しを示す） 	所有者である東北電力・三菱マテリアル（八幡平グリーンエネギー）から協力を取り付けていた。

3. 事業スケジュール

本研究開発の期間は2021年6月15日より2024年3月20日であり、そのスケジュールの概要を図3-1に示す。

事業項目	FY2021				FY2022				FY2023				FY2024 (参考)				FY2025 (参考)			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
①全体システム設計	試験概要・計画立案				要素技術検証試験調整				要素技術検証試験調整				実証試験計画立案・調整 要素技術検証試験調整				実証試験調整 試験結果評価・とりまとめ			
②IoT センサ技術の研究開発	IoTセンサ設計・試作・試験 (官厚計測・二層流計測)				IoTセンサ設計・試作・試験 (官厚計測)				IoTセンサ改良・試験 (エッジデバイス対応)				実証試験適用準備				実証試験への適用・評価			
③蒸気生産部門のO&M 最適化の研究開発																				
③-1在来型・非在来型センサ データを統合した予知保全 システムの設計	システム設計・制作				システム制作・試験				システム改良・試験				プラント状態監視機械学習モデルの構築・改良							
③-2独自非定常坑井シミュ レータを活用した安定条件 の正式化と他シミュレーション モデルとの連携	坑井シミュレータ高速化・安定条件定式化				坑井・貯留層シミュレータ改良・検証・評価				坑井・貯留層連結シミュレータ開発・検証・評価				坑井・貯留層連結シミュレータ検証・改良 (現地実証試験と連携)				マニュアル作成・利用環境整備・評価			
③-3 AI 技術を用いた坑井 一貯留層モデルの最適化	前処理手法の開発 単純化モデル試作・評価				機械学習アルゴリズム開発 教師データ収集・評価				機械学習モデル構築 モデル拡張・教師データ分析・評価				モデル構築の改良 教師データの結合・試験				検証・実装化・評価			
③-4腐食・スケール成長 シミュレータの開発	シミュレーション技術高度化 管厚データ入力				シミュレーション技術高度化 管厚データ入力				腐食・スケール成長速度 シミュレータ構築				個別試験データ検証・改良				検証・実装化・評価			
④地熱発電プラント全体の O&M 最適化の研究開発																				
④-1操業管理システムの開発	接続法検討				基本設計 発電設備向け製作				各種シミュレータとの 接続方法検討				操作管理システム への反映				実証地点での試験・評価			
④-2地熱発電プラント性能 評価ツールのクラウド サービス化	熱効率解析モデル作成 性能変化の解析・評価 定検策定課題の整理				プラントシミュレータの構築 マイクローソフト・SPA-1データへの構築				パラメータ抽出、時間分解能向上 REST API等開発				運用条件最適化手法の構築 マイクローソフトの開発・評価				現地実証試験・評価			
⑤技術実証	状況調査 要素技術適用試験				要素技術適用試験				要素技術適用試験				実証試験準備 要素技術適用試験				実証試験・評価			

図 3-1 研究開発のスケジュール

4. 予算

本研究開発の予算額を表 4-1 に示す。

表 4-1 研究開発の予算額

(単位：百万円)

	2021 年度	2022 年度	2023 年度	総額
地熱技術開発	38	42	43	123
三菱重工業	9	12	13	34
電力中央研究所	12	16	17	45
早稲田大学	28	25	18	70
九州大学	9	8	9	25
合計	95	103	99	298

5. 研究開発の実施体制

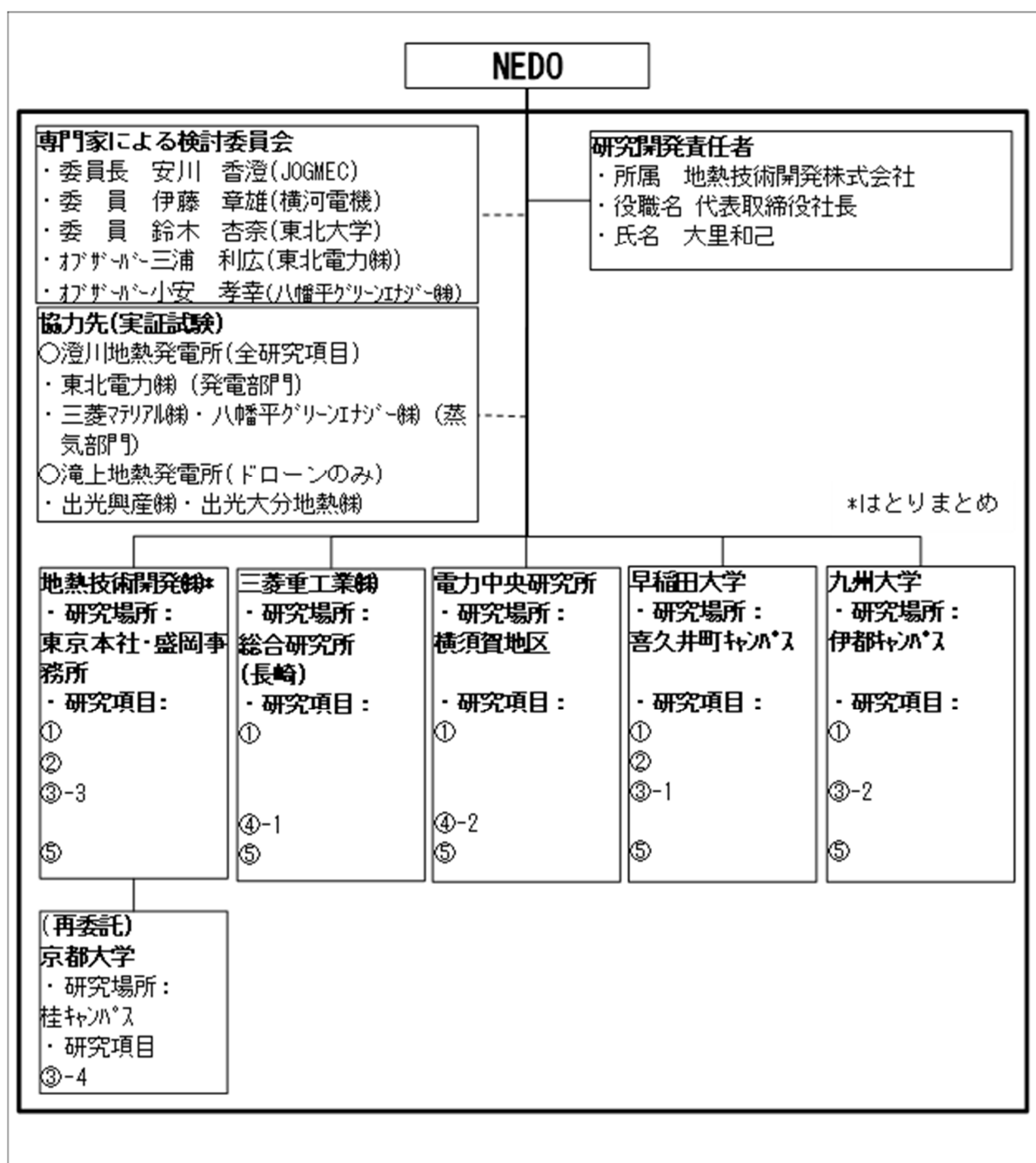


図 5-1 研究開発の実施体制

6. 事業の管理運営

本研究開発では、2021年11月29日、2022年3月3日、2022年10月14日、2023年1月19日に事業者間連絡会を計4回実施した。また、2021年12月2日、2022年11月2日に下表有識者を招いた推進委員会を計2回実施した。

表 6-1 推進委員会および有識者

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
安川 香澄	独立行政法人 エネルギー・金属 鉱物試験機構・委員長	プロジェクトの助言
伊藤 章雄	横河電機株式会社・委員	プロジェクトの助言
鈴木 杏奈	国立大学法人 東北大学・委員	プロジェクトの助言
三浦 利広	東北電力株式会社・オブザーバー	プロジェクトの助言
小安 孝幸 (2021年度)	八幡平グリーンエナジー株式会 社・オブザーバー	プロジェクトの助言

7. 研究開発成果について

本研究開発の成果は下表のとおりである。設定した中間目標に対して、全項目とも達成の見込みである。

表 7-1 中間目標に対する達成度（見込み）

研究開発項目	中間目標 (2024年3月)	成果 (2023年3月まで)	達成度 (見込み)	達成の根拠 ／解決方針
① 全体システム設計	対象発電所の過去データに基づき全体最適化した場合に、持続的に利用率が向上することを示す。	<ul style="list-style-type: none"> データ駆動型アプローチ、および物理シミュレーションより、坑井不安定現象を予測・回避することにより安定的な生産の継続ができ、利用率が向上（6%相当）することを示した。 EnergyWinを用いた主蒸気圧力最適化シミュレーション結果を実データと比較した。実際の主蒸気圧力変化幅が小さかったため観測された効果は限定的（2%相当）であったが、想定通りの最適化効果が得られることを確認した。 	○ 2024年3月までに達成の見込み	今後実データの蓄積及び解析を進めることにより、主蒸気圧力最適化効果の精度向上を図る。また、全体システムの設計における各要素技術の連携を図れるようにインターフェースを統合するとともに、左記以外の各要素技術も積み上げることにより、更なる利用率の向上を示す。
② IoTセンサ技術の研究開発	<ul style="list-style-type: none"> エッジデバイスによる坑井データの計測・データ収集が可能であることを示す。 非在来型センサデータを加えることによる、生産井の停止現象の予兆を捉える効果を整理する。 	<ul style="list-style-type: none"> 腐食モニタについて、エッジデバイスとして計測可能であることを試験により実証した。 加速度の計測により、坑井内の状態変化の予兆を掴め、適切な操作の実施により生産井の脱落を防止できる予兆の推定に用いることが可能なことを明らかにした。 	○ 2024年3月までに達成の見込み	加速度データを1分あるいは10分間隔で通年収集でき、在来型データと加速度データを併用した機械学習モデルにより予兆推定精度が向上することを確認した。
	エッジデバイス対応型の二相流量計、配管厚計測計について、開発可能な目処を付ける。	実フィールドでの検証試験により、気水比が低い場合、高い場合それぞれの計測における課題について整理した。	○ 2024年3月までに原因と対策を行い、達成の見込み	気水比が低い領域、気水比が高い領域それぞれの対策を行い、2023年度に改めて検証試験を実施し、開発要件を整理する予定。

	開発するシステムの産業サイバーセキュリティ対策要件を確認する。	システムにおけるセキュリティに関して現状の発電事業者の状況についてアンケート調査によって整理した。その結果、電力制御システムセキュリティガイドラインの制約から、専用線を使用している事業者が大勢を占め、一般的なインターネットを利用する事業者は僅かであることを確認した。	○ 2024年3月までに達成の見込み	調査結果より、電力制御システムセキュリティガイドライン(JESC Z0004(2019))、電力制御システムセキュリティに関する社内規定等への準拠が必要であり、本システムもこれらに合致する形で運用することが望ましい。今後、各規程の詳細について整理し、システムの考え方に反映する。
③ 蒸気生産部門のO&M最適化の研究開発	【③-1】 ・既存のAI機械学習モデルの認識精度を5%向上させる。 ・準オンライン環境にて、オフライン環境と同程度のAIモデルの認識精度を達成する。	生産井の系統除外現象を予測できた。 坑井の集合セパレータの手前で、エネルギーの変化傾向を予測することができた。	○ 2024年3月までに達成の見込み	AIモデルに最新のネットワーク構造を適用し、今後取得する実フィールドの生産井計測データを用いてモデルを再学習することで、順次、予測精度を改善していく見込み。
	【③-2】 ・坑内流動の安定条件を定式化する。 ・坑井・貯留層の連結シミュレータの動作検証が完了し、実用性を備えていることを示す。	坑内流動の安定条件を定式化した。 坑井・貯留層の連結シミュレータのベースとなる坑井シミュレータと貯留層シミュレータの動作検証完了。	○ 2024年3月までに達成の見込み	数値実験を説明できる経験式を導出。複数の独立したコード間の整合性を確認。今後、検証フィールドのデータを用いて実用性を示す。
	【③-3】 ・生産井と還元井の流体流入点の変化を、坑口データを用いて予測する。 ・最適化アルゴリズムの確立と単純なモデル事例での検証が完了すること。	2次元モデルを造り、それを教師データとして予想した結果、線形性の高い正解率を得ることが出来た。	○ 2024年3月までに達成の見込み	モデルでの高い正解率を得ることができた。検証フィールドで検証する。
	【③-4】 ・物理的に配管の腐食現象やスケール付着現象を解く ・GPUによる汎用計算を用いてシミュレーション計算アル	層流から乱流領域を扱え、単相から二相に問題の解法を拡張して、問題を現実に近いモデルに置き換えた。	○ 2024年3月までに達成の見込み	より汎用な発電所の問題を取り扱えるようにした。層流を仮定し検証に用いた実験データを、新しいモデルで再度検証し、計算の有効

	ゴリズムの最適化を行い、現在の計算速度を2倍以上高速化する。			性を確認した。今後並列計算化を行い高速化を達成する。
④地熱発電プラント全体のO&M最適化の研究開発	【④-1】 ・発電設備向けおよび蒸気設備向けの管理アプリを開発する。	発電設備向け管理アプリの完成、および試運用開始した。	○ 2024年3月までに達成の見込み	2022年9月までに仕様書完成、システム製作中であり、2023年度に実証フィールドでの検証を実施予定。
	【④-2】 ・EnergyWinを用いて、蒸気生産設備の定常シミュレーションモデルを組み込んだプラントシミュレータを構築する。 ・EnergyWinを用いて、蒸気生産設備の定常シミュレーションモデルを組み込んだプラントシミュレータを構築する。	EnergyWinを用いて、プラントシミュレータを構築、またTOMONIとの連携システムを整備中（2023年度に完成予定）。同システムの要素技術を活用して、実証試験地で2022年度に実施された定期検査（定検）の期間前後で発電所の性能変化を分析できた。	○ 2024年3月までに達成の見込み	要素技術の作動を確認し、定検前後の性能分析に用いることができた。 2024年3月までには、地熱発電プラントの性能評価を可能とする連携システムが完成する見込み。
⑤技術実証	・澄川地熱発電所ならびに滝上発電所の蒸気設備において、個別技術の試験を行う。	澄川地熱発電所ならびに滝上発電所に2018年度～2022年度までの運転データ・実証フィールド等提供のご協力をいただき、個別の要素技術毎の検証を行うことができた。	○ 2024年3月までに達成の見込み	個別の要素技術毎の検証を行い有用な結果を得ることができた。2023年度も最新のデータ提供を受けての検証を実施予定。

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部未達、×未達

【研究開発の概要説明】

研究開発の課題

- 一般的な地熱発電所では蒸気生産設備と発電設備の管理事業者が異なり、運転データもそれぞれ別管理されていることがある。
- 地熱発電所の利用率向上のためには貯留層の適切な管理が不可欠だが直接観測することが困難。
- このためこれら地上データの一元管理、および非在来型センサからのデータを有効活用することにより地下状態を適切に予測管理する技術が重要。

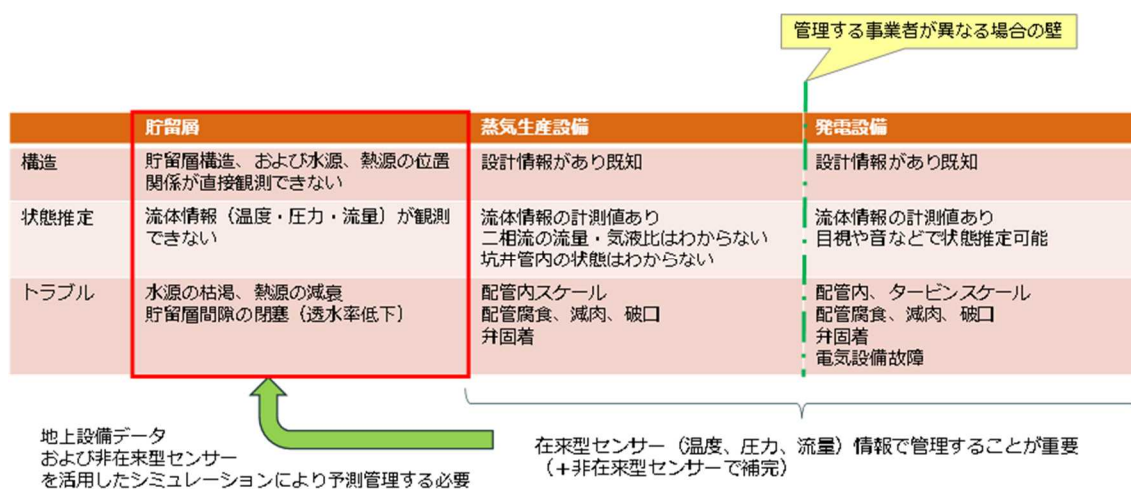


図 7-1 地熱発電所における運転データを管理・活用するうえでの課題

利用率改善の目論見

- 発電設備のトラブルおよび性能劣化は大きくないが、特定の坑井の不安定現象による併入除外、および地熱フィールド全体の特性変化により運転点が計画から外れていることによるプラント効率の低下が問題となっていることがわかった。
- データ駆動型アプローチ、および物理シミュレーションより坑井不安定の予測・回避すること、また、貯留層を含む地熱発電所全体のシミュレーション技術を確立し、資源利用の最適化すること、これらにより利用率を 15%改善する目論見を得た。

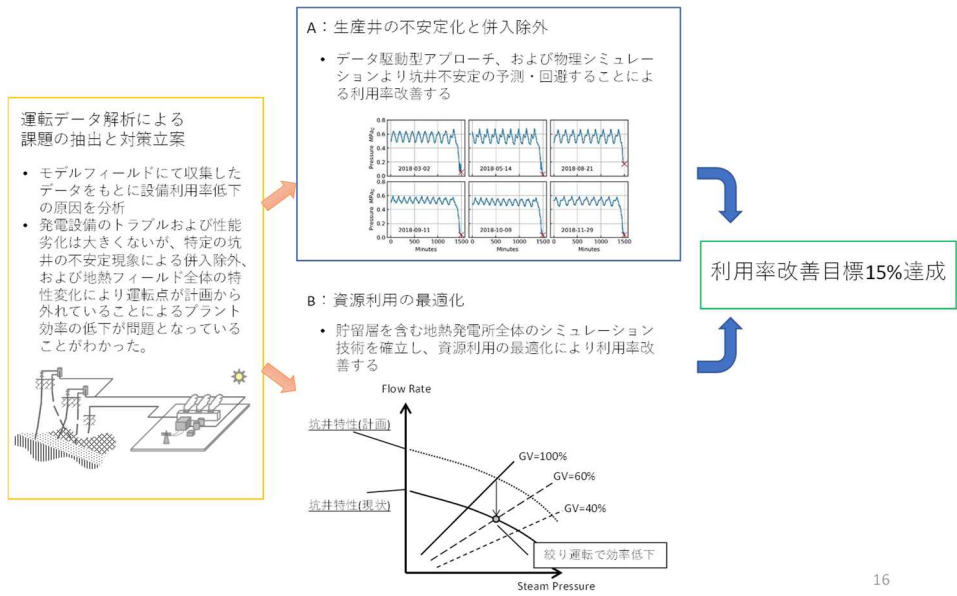


図 7-2 利用率改善効果の目標根拠

研究成果について

● 全体システム設計

地熱発電所での運転データを一元管理し、その運転データに基づいて管理・最適化を行うためのシステムの基本構成を確立した。

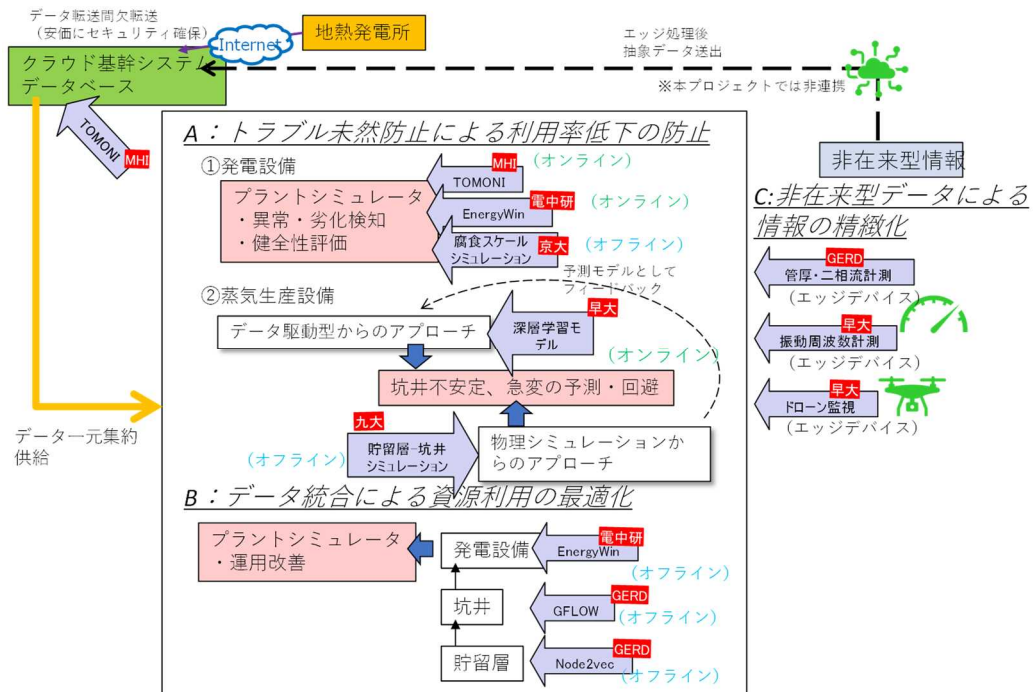


図 7-3 全体システムの基本構成

- エッジデバイスによる坑井データ計測および機械学習モデルによる予兆推定
坑井内における不安定流動や噴気停止現象を予測・回避するため、在来型データに加えて非在来型データの双方を用いて入・出力データの相関関係より識別・予測する枠組みを構築した。また、時系列・周波数解析等のデータ分析ならびに深層学習モデルによる急落予測手法および時系列予測手法の構築を完了した。

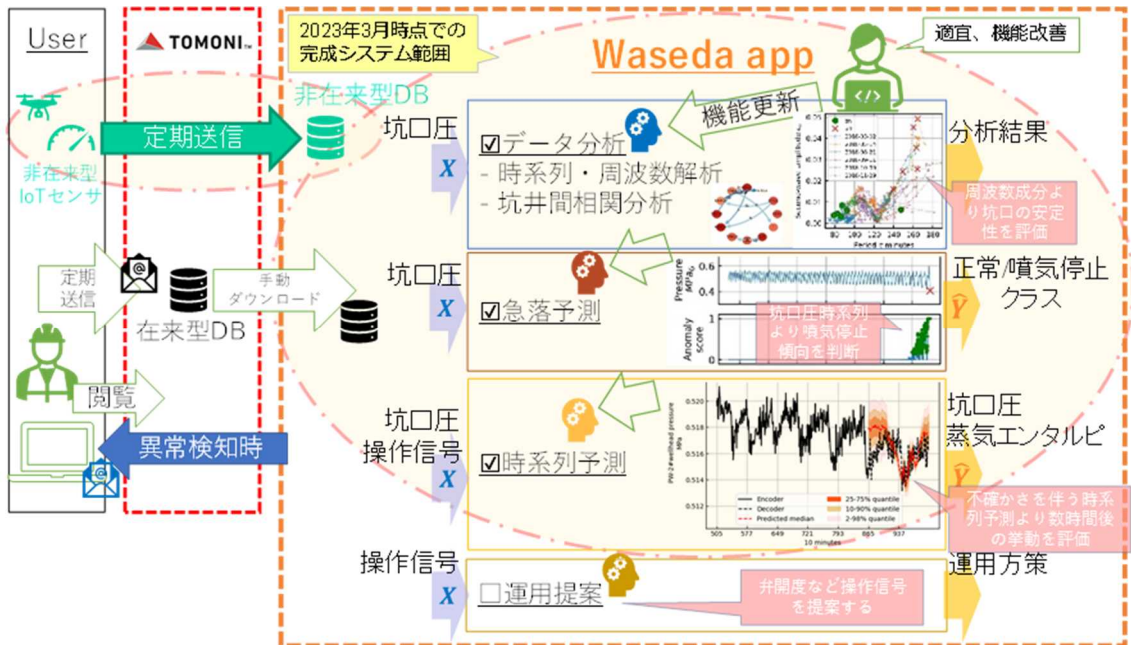


図 7-4 蒸気生産設備の予兆検知システムの構成図

- ドローンによる目視点検の自動化
複数のサブシステムを組合わせて 高精度な三次元モデルを生成する計測システムを構築した。サブシステム単体では不足する点群情報を組合わせて使用することで補い、設備の位置変化、腐食の状況、配管の位置ずれなどの目視点検を自動化できる。

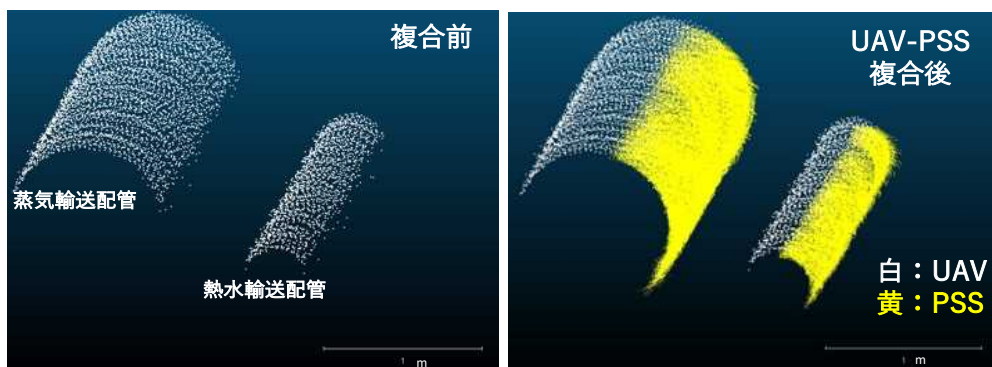


図 7-5 システムにより生成した三次元モデル (左図：複合前、右図：複合後)

- 坑井・貯留層の連結シミュレータの開発

1000回を超える数値実験により、坑井が貫く2つの貯留層の圧力と比エンタルピに基づく坑内流動の安定条件の定式化に成功した(図7-6)。加えて、坑井・貯留層の連結シミュレータのベースとなる坑井シミュレータと貯留層シミュレータの動作検証を完了した。2023年度末までに坑井・貯留層の連結シミュレータの開発と検証を完了する(図7-7)。

同シミュレータでは、厳密な坑内流動の非定常シミュレーションと経験式を状況に応じて使い分けることで計算量を大幅に削減し、実用的な計算時間でシミュレーションを実現する

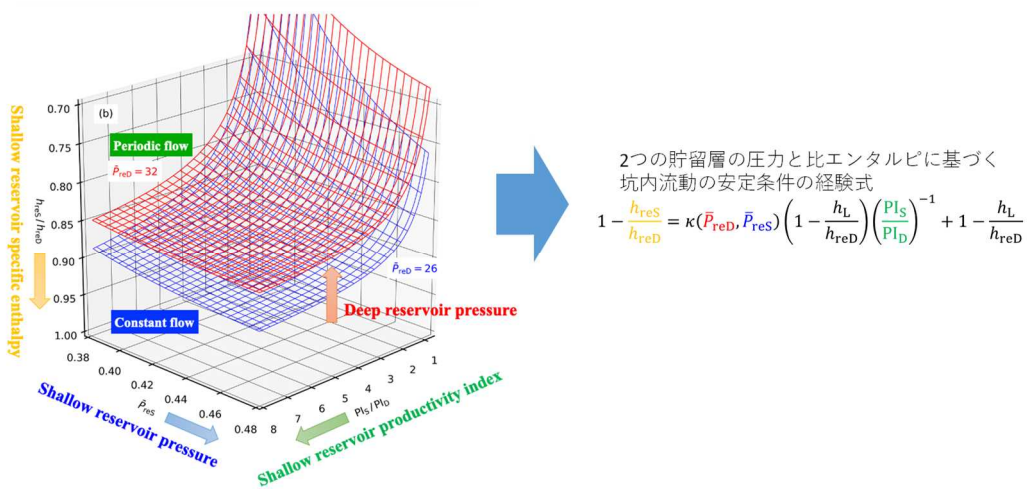


図7-6 2つの貯留層の圧力とエンタルピの関係と坑内流動の安定条件の経験式

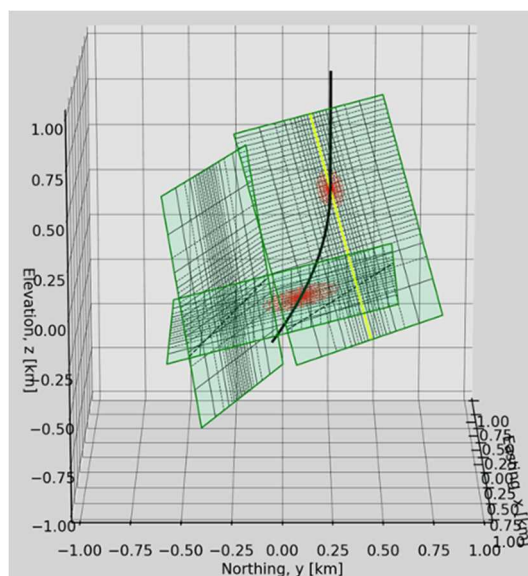


図7-7 坑井・貯留層連結シミュレータのプロトタイプ

- 地熱発電プラント全体の O&M 最適化に向けた操業管理システムの開発
 地熱発電プラントで実運用されている TOMONI（三菱重工業）を基幹システムとして、各操業管理ツール要素との連携動作を 4 パターンに体系化した。それぞれのツールの特性、および開発状況に応じて適切な接続法が選択可能であり、このうち、発電所～TOMONI～Web 閲覧ま 4 のシステムについては、2023 年 4 月までに完成した。また、EnergyWin（電力中央研究所）を利用する地熱発電プラント性能評価ツールは TOMONI との内部連携を整備中。

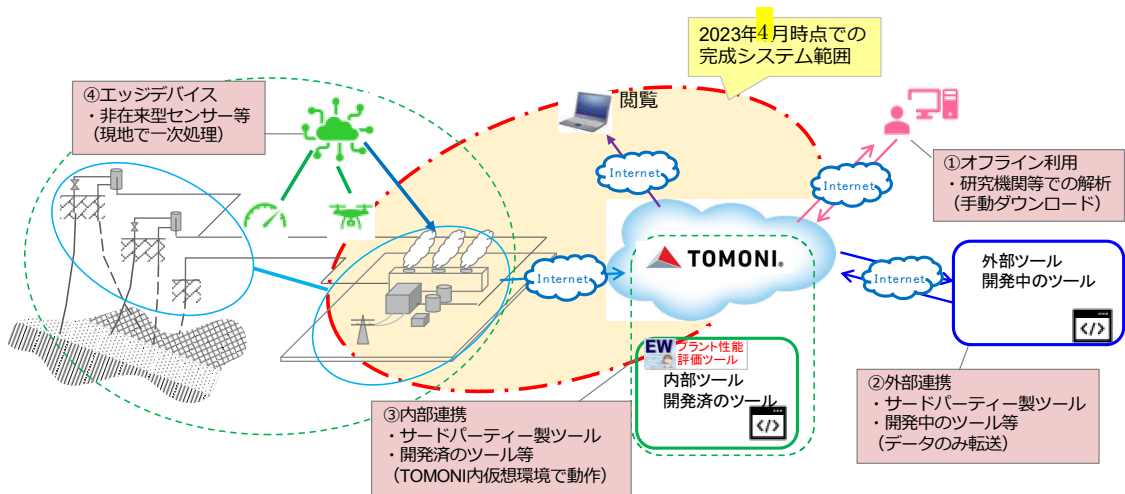


図 7-8 基幹システムと各ツールとの連携動作パターン

- 地熱発電プラント性能評価ツールのクラウドサービス化

地熱発電プラントへの適用実績がある EnergyWin（電力中央研究所）を基幹ツールとして、各シミュレーションツールの連携動作を可能とする。研究開発項目③-3の坑井・貯留層モデルおよび GFLOW（地熱技術開発）、TOMONI（三菱重工業）に収集された運転データを用いて、プラントの運用特性を把握し、事業者に運用改善を提案する。このうち、井戸特性～発電所までのプラントシミュレーションについては、2023年3月までに完成した。

本機能を利用することで、蒸気井口底から発電設備までを包括したプラントシミュレーションが可能となり、例えば、定期点検においてどの部位を修繕すべきかを提案したり、各サイトの蒸気生産能力に応じた最適な減圧運転条件を提案したりすることが可能となる。

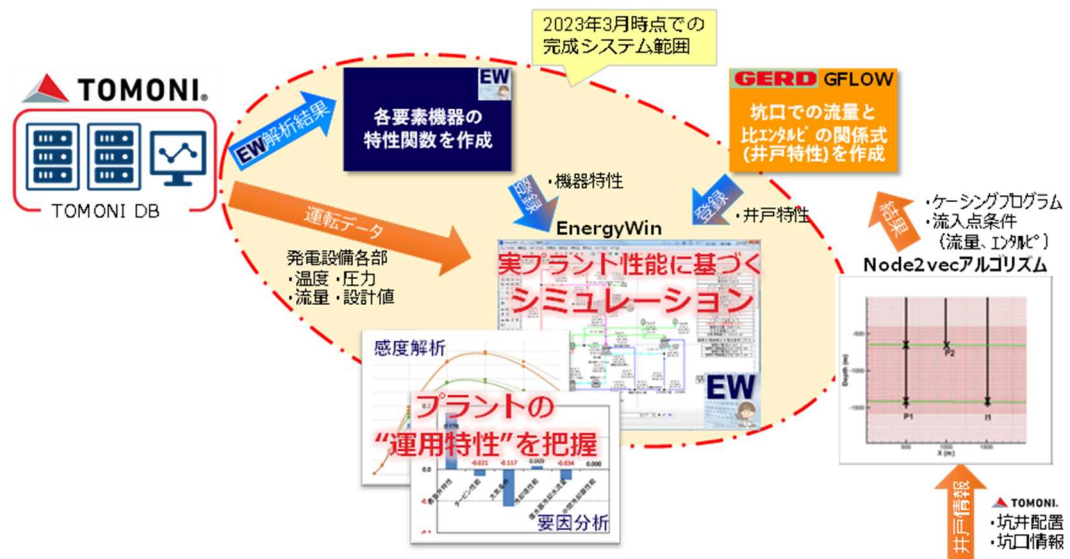


図 7-9 井戸特性～発電所までのプラントシミュレータの連携動作イメージ

8. 実用化・事業化へ向けての見通しと取組みについて

実用化・事業化に向けての見通しと今後の取組みは、下表のとおりである。

表 8-1 実用化・事業化の見通しと課題・取組み

項目	2026年度	2027年度	2028年度	2029年度	2030年度～
TOMONIソリューション	既存の発電設備向けソリューションの拡販活動				
顧客ヒアリングによる対象案件発掘	プラント性能診断活動を通して地下に関する困りごとヒアリング				
製作（カスタマイズ）		困りごと相談があり次第 現象の解析、対策の検討 システム設計	最適管理システムの提案 (本プロジェクトで開発した技術をカスタマイズ) 受注が決まれば製作開始 システム製作	システム運用開始	以後、定期的なフォローアップによる継続受注

添付資料

●特許論文等リスト

【とりまとめ】

	2021 年度	2022 年度	合計
特許	0	0	0
論文	1	1	2
学会発表（口頭・ポスター）	3	6	9
プレスリリース	0	0	0
新聞・TV 等掲載	0	0	0
受賞	0	0	0
その他	0	0	0

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	M. Matsumoto, H. Okada, R. Itoi, Y. Fujimitsu	Kyushu University	Numerical Simulation of Periodic Wellbore Flow Due to the Inflow of Low-Enthalpy Fluid	Proceedings, 48th Stanford Geothermal Workshop	有	2023.2
2	A.Imagawa, A.Yoshida, Y.Amano	Waseda University	Deep Neural Network Based Process Data Simulation Model for Production Well of a Geothermal Power Plant	Proceedings of ECOS2021	有	2021.6

【外部発表】

(a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	M. Matsumoto,	Kyushu University	Numerical Simulation of Periodic Wellbore Flow Due	48th Stanford Geothermal	2023.2.8

	H. Okada, R. Itoi, Y. Fujimitsu		to the Inflow of Low- Enthalpy Fluid	Workshop	
2	大里和己	地熱技術 開発	地熱発電持続可能性維持のため のIoT-AI技術開発(地熱発電 所全体の利用率向上)の概要	日本地熱学会 令和4年学術講 演会(東京大会)	2022.11.9
3	松本光央・岡 田陽喜・糸井 龍一・藤光康 宏	九大	周期的坑内流動現象の発生条 件の数値的検討(その4)	日本地熱学会 令和4年学術講 演会(東京大会)	2022.11.9
4	松崎穂高・吉 田彬・天野嘉 春	早大	Temporal Fusion Transformerアーキテクチャを用い た蒸気エネルギー流および生産井 坑口圧力時系列予測モデルに対 する坑口IoT加速度・速度データ の追加効果の検証	日本地熱学会 令和4年学術講 演会(東京大会)	2022.11.9
5	宋源・品田直 樹・荒木悠 吾・天野嘉春	早大	地熱発電所配管の異常検出に向 けたUAVによる3次元計測精度 向上手法の提案	日本機械学会口 ボティクス・メカトロ ニクス講演会 2022	2022.6.1
6	秋山仁・荒木 悠吾・品田直 樹・天野嘉春	早大	UAVからの放射温度計測におけ る太陽光外乱への耐性の向上方 策	日本機械学会口 ボティクス・メカトロ ニクス講演会 2022	2022.6.1
7	今川敦博・吉 田彬、天野 嘉春	早大	時系列データにおける因果構造検 出手法の地熱発電所実プロセス への適用評価	第38回エネルギ ーシステム・経済・ 環境コンファレンス	2022.1.26
8	松本光央・岡 田陽喜・糸井 龍一・藤光康 宏	九大	周期的坑内流動現象の発生条 件の数値的検討(その3)	日本地熱学会 令和3年学術講 演会(仙台大 会)	2021.10.27
9	A.Imagawa, A.Yoshida, Y.Amano	Waseda University	Deep Neural Network Based Process Data Simulation Model for Production Well of a Geothermal Power Plant	The 34th International Conference On Efficiency, Cost, Optimization,	2021.6.27

				Simulation and Environmental Impact of Energy Systems	
--	--	--	--	--	--

添付資料

プロジェクト基本計画

「地熱発電導入拡大研究開発」基本計画

新エネルギー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

① 政策的な重要性

2018年7月に「第5次エネルギー基本計画」が閣議決定され、同計画において地熱発電は、発電コストも低く、安定的に発電を行うことが可能なベースロード電源を担うエネルギー源と位置付けられている。エネルギーミックスの議論においては、地熱発電の2030年度における導入見込量として最大で約1.55GW（2017年度実績510MW）、発電電力量1.13TWh（2017年度実績2.4TWh）の導入拡大が掲げられている。一方、同基本計画では、2050年に向けた取組みについても言及されており、再生可能エネルギーなど、あらゆる選択肢を追求する「エネルギー転換・脱炭素化を目指した全方位での野心的な複線シナリオ」を採用することが掲げられている。

さらに、2050年を見据えた方針として2020年1月に策定された「革新的環境イノベーション戦略（内閣府）」においては、温室効果ガス排出量を削減するポテンシャル・インパクトが大きい有望な革新的技術として、エネルギー供給を含む5分野からなる16の技術課題と39テーマが選定され、その中に一つのテーマとして超臨界地熱発電の技術開発が特定され、その課題解決に向けた取り組みが期待されている。

② 我が国の状況

2011年の東日本大震災以降、再生可能エネルギー導入拡大が望まれる中、世界第3位となる地熱資源ポテンシャルを有する我が国において、地熱発電に大きな期待がかかっている。また、地熱は、太陽光や風力と異なり、安定した出力が得られるため、ベースロード電源として位置づけられるとともに、大規模開発は競争電源となるとの評価も得ている。

近年の地熱開発では、山葵沢・秋ノ宮地域（秋田県）において、2019年5月に10MW以上の大規模地熱発電として23年ぶりに運転（出力46MW）を開始するとともに、バイナリー発電では、既存発電所の未利用熱水を利用した滝上バイナリー発電所や山川バイナリー発電所が運転を開始している。さらに、安比地域（岩手県）や小安地域（秋田県）等で大規模の新規地熱開発が進捗している。

しかしながら、日本地熱協会（第47回調達価格等算定委員会資料）によると、多くの大規模案件は未だ調査・開発途上にあり、これらの公表出力は合計114MWと報告されており、2030年度の導入目標を達成するためには、更なる案件が必要である。従って、従来型地熱発電の更なる導入促進に向けその支援策として、新規発電所の立地促進に資する技術開発を実施することが重要である。また、既存の地熱発電所

の発電量低下も大きな課題となっており、既存発電所の発電能力の回復・維持・向上に資する技術開発にも取り組むことが必要である。

こうした状況の中、エネルギーミックスにおける導入目標達成に向け、NEDOでは、2013年度から2020年度にかけて「新規地熱発電所の立地促進」及び「既存地熱発電所の発電能力の回復・維持・向上」に資する技術開発に取り組み、主要なテーマ「環境保全対策技術」、「酸性熱水対策技術」、「IoT-AI 適用技術」等を実施し、成果を挙げてきた（例えば、環境アセスメント手続きの迅速化に係る硫化水素拡散予測数値モデルの開発に成功するなど）

一方、NEDOにおける超臨界地熱発電に係る研究開発においても、エネルギー・環境新技術先導プログラムである「島弧日本のテラワットエネルギー創成先導研究（2014～2015年度）、並びに、「超臨界地熱開発実現のための革新的掘削・仕上げ技術の創出（2015～2017年度）と合わせて、2050年頃の普及を目指すロードマップ（エネルギー・環境イノベーション戦略）の第Ⅰ及び第Ⅱフェーズにあたる「超臨界地熱発電の実現可能性調査、並びに試掘に向けた詳細検討」（2017～2020年度）」が実施され、超臨界地熱資源量の評価、超高温下で使用可能な資機材（特に、ケーシングやセメント）の検討、発電コストの試算等で有意義な知見が得られている。

③ 世界の取組状況

再生可能エネルギーの拡大が推進されている中、米国や欧州においても国家レベルで技術開発や導入拡大に向けた取組が実施されている。地熱発電についても、地熱資源国である米国、イタリア、ニュージーランドの先進国の他、フィリピン、インドネシア、メキシコ、アイスランド、トルコ、ケニア等の開発途上国での開発も目覚ましい勢いで進んでいる。2020年現在では、世界の地熱総発電容量は、16.0GWであり、近年、年間約270MWずつ増大している。

こうした中、米国では、DOEプログラムの一環として、米国版2050年地熱開発ビジョンが2019年に取りまとめられ、現在の発電設備容量3.8GWを2050年には、シナリオ別に6GW（基本シナリオ）、13GW（規制緩和シナリオ）並びに60GW（技術開発シナリオ）へ引き上げる構想が提示されている。

地熱技術開発の分野においては、これまで同様にEGS（Enhanced Geothermal System）を中心として、掘削、AI適用技術、地域共生プログラム、CO₂対策とのコラボレーション等のプロジェクトが進行している。EGS技術では、米国では高温岩体事業（例えばFORGE）が開発地域周辺の高温資源を対象に実証試験を含めて進められている。また、高温岩体フィールドでの水圧破碎作業で特に課題となる誘発地震発生に対してもその抑制技術の取り組みも着手されている（例えば、DESTRESS）。ここでは、数値シミュレーションを適用し、誘発地震数減少やマグニチュードの低減が実証された。

統合的なEGSとしては、アイスランドにおいて、より深部の超臨界地熱資源領域

への還元・涵養を通して、浅部の既開発領域からの蒸気生産量を増大するプロジェクト（DEEPEGS）があり、これは、3つのEGSタイプ（高温岩体、涵養、透水性改善）の組み合わせの手法という点で大変注目される。

さらに、従来の開発深度よりも深部の高温領域をターゲットとすることで、生産量を増大しようとする試みがいくつかの国で着手されつつある。この発端には、我が国で、1990年代後半に、岩手県葛根田地域で実施された「NEDO地熱探査技術等検証調査/深部地熱資源調査」があり、同調査において深度4,000m級の調査井が計画・実施されたのを受け、2000年代以降いくつかの国で開始された。

特に成果を挙げているのは、アイスランドの大深度高温域への掘削プロジェクト（IDDP：Iceland Deep Drilling Project）である。ここでは、2008～2012年にかけて、IDDP-1号井（Krafla地域）を掘削し、噴出試験にも成功し、坑口状態で、温度450℃、圧力14MPa、出力30MW相当の過熱蒸気の噴出が確認された。その後、2016～2017年にかけて、IDDP-2号井（Reykjanes地域）を掘削し（深度4,650m）、坑底温度427℃及び圧力34MPaにより、地熱流体が超臨界状態で存在しているであろうとの知見を得た。2020年以降に噴出試験を計画している他、次の掘削計画（IDDP-3）もある。

現在は、国際エネルギー機関（IEA）においても、地熱プログラムの一つのテーマ（Deep Roots of Volcanic Geothermal Systems）として取り上げられ、アイスランド以外でも、イタリア、米国、メキシコ及びニュージーランドといった地熱開発先進国で同様のプロジェクトが始まっている。

一方、次世代型のプロジェクトとして、CO₂適用技術では、地熱蒸気中のCO₂ガス回収や地熱エネルギーを利用した大気中のCO₂回収（DAC）の技術開発プログラム（GECO）や、地熱フィールドにおいて、熱効率が高いCO₂を媒体とした発電システム（クローズドやオープンシステム）の構築（米国）等が検討されており、それぞれ期待される。

④ 本事業のねらい

2019年度に地熱技術戦略策定のために、国内外の地熱開発・地熱技術開発動向を調査し、技術開発シナリオ策定の検討がなされた。ここで、地熱発電の導入拡大として2030年及び2050年目標達成のために必要な技術開発ロードマップが議論された。その知見を下記に示す。

- 現状の課題を考慮し、地熱発電の導入拡大を図る上で重要となる技術開発目標としては、資源量増大、発電原価低減化、そして、環境・地域共生の3つに集約される。さらに、長期的には、次世代へ向けた取り組み（CO₂対策、水素製造等）や我が国で培った技術の海外展開も課題となる。
- 資源量増大は、固定価格買取制度開始以降増加した地熱発電設備容量は約80MWに留まり2030年導入目標の半分にも至っていないという喫緊の課題

がある。これに対して、地熱資源量が多く賦存する国立・国定公園特別地域の開発のより早期実現（約 5GW）や、より深部に存在すると想定される超臨界地熱資源開発（約 11GW）が重要課題と位置づけられる。

- 発電原価低減化は、第 5 次エネルギー基本計画に提示されている「再エネの主力電源化」とこれを実現するための「発電原価低減化」に同調するものであり、具体的には、生産量増大、コスト削減、並びに利用率向上が鍵となる。特に、利用率向上は発電原価に大きく影響を与えるため、その引き上げは最重要課題と位置づけられるとともに、利用率低下の原因は地下に起因することが過半数を占めると判明している。発電原価低減により、対象事業の採算性が向上し、開発可能資源は約 3 割増大すると試算された。
- 環境・地域共生に関し、地熱調査やその開発にあたり、ステークホルダーとの合意形成を獲得することに時間を要する（或いは、撤退を余儀なくされる）ケースが多く、重要課題の一つとなっている。地域共生に資するツール（ハードやソフト等）の開発の他、すでに、科学・技術以外の専門性（経済学や法律等）を含めた議論が進められつつある中、こうしたアプローチを積極的に取り入れる必要がある。合わせて、環境保全対策として、これまで実施してきた環境アセスメントに資する手法開発についてもさらに取り組んでいく必要がある。

以上の検討結果を受け、本事業では、国立・国定公園特別地域での地熱開発を含め、地熱発電の導入拡大を促進することを目的とし、2030 年のエネルギーミックス実現に向けて、我が国の地熱発電設備容量最大 1.55GW の達成を図るとともに、前述のとおり、次世代のイノベーション技術として注目される超臨界地熱資源を対象とした地熱資源評価に係る研究開発を実施し、より一層の地熱発電の導入拡大を促進する。

次世代型では、在来型よりも深部に存在するといわれている超臨界状態（またはそれに準ずる状態）の水を利用することで、地熱発電容量のさらなる増大を目指すとともに、在来型地熱資源開発促進のための技術開発としても、探査、掘削や貯留層評価等において波及効果も期待される。

併せて、超臨界地熱発電では、生産井 1 本あたりの生産能力が従来の数倍以上と高い。これゆえ、従来と比べ単位 kW あたりの敷地改変面積を低減することが可能となるため、環境への負荷が低いというメリットもある。地熱開発は自然度の高い地域（自然公園特別地域含む）で行われることが多く、当該技術は環境面での価値も高く期待できる。

（2）研究開発の目標

①アウトプット目標

上述の検討を踏まえ、NEDO 事業では、JOGMEC による資源開発分野に関する技術開発事業と連携することで効率的な技術開発の推進が期待され、具体

的な研究開発項目とそれぞれのアウトプット目標として下記を選定した。

a) 超臨界地熱資源技術開発

我が国における超臨界地熱資源量評価として、1地域あたり100MW以上（合計で500MW以上）を提示し、調査井掘削に向けた実施可能な有望域を4か所選定する。

b) 環境保全対策技術開発

環境アセスメントの手法開発として、調査・予測・評価において、新たな手法を提案し、環境アセスメントの仕様書（発電所に係る環境影響評価の手引）の改定を支援する。併せて、調査解析に係る時間とコストの削減化に向けた提案を行う。

c) 地熱発電高度利用化技術開発

これまで適用されていないIoTやAI技術等を利活用することにより、生産量増大、コスト削減、利用率向上等を目指す（それぞれ10～20%）。

②アウトカム目標

2030年頃に、地熱発電所の平均利用率並びに発電原価を、現状よりそれぞれ20%pt向上並びに低減化し、最大で約1.55GWの発電容量、および11TWhの発電量の達成が見込まれる。これによるCO₂削減量は、約630万トン-CO₂/年である。

さらに、2040～2050年頃に、超臨界地熱資源を活用した地熱発電所(100MW級を5カ所)の普及を目指す。推定資源量は、11GWと試算され、これによるCO₂削減量は、約4,500万トン-CO₂/年である。

③アウトカム目標達成に向けた取組

JOGMECによる地熱調査助成金事業、地熱探査出資事業及び技術開発プログラムと連携させることにより、地熱開発事業者の参入を促進させるような情報提供を行い、社会実装をより早期に実現できるよう取り組む。また、環境省や温泉事業者団体等との情報交換も積極的に進めていく。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、別紙1の研究開発計画及び別紙2の研究開発スケジュールに基づき研究開発を実施する。実施形態（委託、助成等）については、下記のとおりとする。

①超臨界地熱資源技術開発

[委託]

実用化には長時間を要し、産学官で取組むリスクが高い技術の開発に該当し、委託として実施する。

地表調査（地質、地化学、物理探査等）及び地熱構造調査試錐を行うことで、地下 5km 以浅に超臨界水領域の（或いはそれに準じる）地熱資源の賦存を推定し、その資源量を評価するとともに、次フェーズで計画される調査井掘削および噴気試験のそれぞれの仕様を提案する。併せて、深部地熱資源探査手法を実施し、地熱資源開発のリスク低減化を図る。

② 環境保全対策技術開発

[委託]

安全性基準の開発に該当し、委託として実施する。

環境保全対策技術開発として、環境アセスメントに資する手法開発を実施する。これより、国立・国定公園内での地熱開発において、開発リードタイムを短縮し、早期に新規地熱開発を実施することで地熱発電量を引き上げる。

③ 地熱発電高度利用化技術開発

[委託、または助成（NEDO負担率：1/2～2/3）]

産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施するものであり、委託事業として実施するとともに、企業単独で実用化に近いフェーズの開発内容については助成事業として扱う。

生産量増大、コスト削減、並びに利用率向上に資する技術開発として、地熱発電設備や地熱貯留層のそれぞれの管理を効率化・最適化する手法開発を実施する。これより、発電原価低減化を図ることで、開発可能発電量並びに既存発電設備の発電量をそれぞれ引き上げる。

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

プロジェクトマネージャー（以下「PM」という）に、NEDO新エネルギー部大竹 正巳主査を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理や、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。

本研究開発は、NEDOが、単独ないし複数の原則本邦の企業、大学等の研究機関（原則、本邦の企業等で日本国内に研究開発拠点を有していること。なお、国外の企業等（大学、研究機関を含む）の特別の研究開発能力、研究施設等の活用または国際標準獲得の観点から国外企業等との連携が必要な部分を、国外企業等との連携により実施することができる。）から公募によって研究開発実施者を選定後、委託または助成して実施する。

(2) 研究開発の運営管理

NEDOは、研究開発全体の管理・執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適時に把握し、必要な措置を講じるものとする。運営管理にあたっては、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

①研究開発の進捗把握・管理

PMは、経済産業省及び研究開発実施者と緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握する。また、外部有識者で構成する技術検討会を組織し、定期的に技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努める。

②技術分野における動向の把握・分析

PMは、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、技術の普及方策を分析、検討する。なお、調査等を効率的に実施する観点から委託事業として実施する。

③研究開発テーマの評価

研究開発を効率的に推進するため、「(別紙1)研究開発計画 研究開発項目① 2. 研究開発の具体的内容 (i)」について、ステージゲート方式を適用する。ステージゲート審査を実施するにあたり、PMは、外部有識者による審査を活用し、2025年度以降の研究開発テーマの継続是非を2025年3月までに決定する。

(3) その他

特になし。

3. 研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、2021年度から2025年度までの5年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDOは技術評価実施規定に基づき、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、プロジェクト評価を実施する。評価の時期は、中間評価を2023年度、並びに、事後評価を2026年度とし、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

5. その他の重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

①成果の普及

本研究開発で得られた研究成果については、NEDO、委託先とも普及に努めるものとする。

②標準化施策等との連携

得られた研究開発成果については、知的基盤整備事業との連携を図ることとし、

データベースへのデータ提供を積極的におこなう。

③知的財産権の帰属

委託研究開発及び共同研究の成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

④知財マネジメントに係る運用

「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」に従ってプロジェクトを実施する（委託研究のみを対象とする。ただし調査事業を除く）。

⑤データマネジメントに係る運用

本プロジェクトは「NEDOプロジェクトにおけるデータマネジメント基本方針（委託者指定データを指定しない場合）」を適用する。

(2)「プロジェクト基本計画」の見直し

PMは、当該研究開発の進捗状況及びその評価結果、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、研究開発費の確保状況等、プロジェクト内外の情勢変化を総合的に勘案し、必要に応じて目標達成に向けた改善策を検討し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、プロジェクト基本計画を見直す等の対応を行う。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1号イ及び第3号に基づき実施する。

6. 基本計画の改訂履歴

(1) 2021年2月、制定。

(2) 2022年4月25日、改訂。プロジェクトマネージャー変更のため。

(別紙1) 研究開発計画

研究開発項目①「超臨界地熱資源技術開発」

1. 研究開発の必要性

地熱発電導入拡大の課題の一つに、地熱資源量増大が挙げられる。近年、これまで開発してきた深度よりも深いレベルから熱量が高い地熱蒸気を採取し、発電電力を向上させるという技術開発が複数の国々で開始されており、成果が出ている。我が国においても、NEDO超臨界地熱発電技術研究開発（2018～2020年度）としてプロジェクトを実施し、超臨界地熱資源が賦存する地域やその資源量ポテンシャルが概略把握された。今後、同資源賦存可能性の高い地域での調査井掘削・噴気試験による具体的な資源量評価が必要となるが、その前段におけるモデルフィールドを想定した地域での資源量評価（精査）が実施されることが喫緊の課題となる。併せて、同開発リスクを低減するための要素技術開発（探査手法）も必要となる。

2. 研究開発の具体的内容

- (i) 地表調査（地質、地化学、物理探査等）及び地熱構造調査試錐を行うことで、地下5km以浅に超臨界水領域（或いはそれに準じる）地熱資源の賦存を推定し、その資源量を評価するとともに、想定される地下環境で掘削可能な資材・機材を選定し、安全面・環境面にも対応した目標達成可能な調査井及び噴気試験仕様を提案する。併せて、経済性について再評価を実施する。
- (ii) 地熱資源探査手法として期待される地震波モニタリング手法、並びにより高温環境に耐えうる測定機器を開発する。

3. 達成目標

(1) 中間目標

資源量評価に必要な概念モデルを構築するとともに、数値モデルに必要な前提条件を提示する。

(2) 最終目標

我が国における超臨界地熱資源量評価として、1地域あたり100MW以上（合計で500MW以上）を提示し、調査井掘削に向けた実施可能な有望域を4か所選定する。

研究開発項目②「環境保全対策技術開発」

1. 研究開発の必要性

我が国における地熱資源量は、国立・国定公園特別地域にその半分以上が賦存すると推定されており、昨今、地熱開発を促進するために、同特別地域第1～3種に該当する区域での開発が条件付き（優良事例への対応等）で許可された。これにより、全国的に当該区域での地熱調査が開始されているが、ステークホルダーとの合意形成に時間を要し、開発スケジュール遅延の発生という課題がある。その一つの解決策として、環境保全対策技術の向上・強化が指摘されており、過去NEDO事業においても（例えば、地熱発電技術研究開発（2013～2020年度）、環境アセスメントに資する手法開発に着手し、一定の成果が挙げられている。今般、環境アセスメントにおいて、常に問題視されている大気質（特に硫化水素拡散について）をテーマに、環境問題の課題解決（安全基準策定等）へ向けた手法開発に取り組む。

2. 研究開発の具体的内容

環境アセスメントに資する手法開発として、国立・国定公園特別地域内での地熱開発が円滑に進むよう、環境アセスメントにおける各種（例えば、大気質等）の調査・予測・評価において、それぞれの手法開発、具体的にはデータの質・量を大幅に向上させ、予測・評価の精度を引き上げることに資する硫化水素連続モニタリング装置開発、並びに、気象観測を代替し、調査期間を大幅に短縮させるための気象モデル手法開発を実施し、環境保全対策技術の向上を図る。

3. 達成目標

(1) 中間目標

最終目標達成の準備として、概念設計を完了し、実証試験の詳細計画を提示する。

(2) 最終目標

環境アセスメントの手法開発として、調査・予測・評価において、新たな手法を提案し、環境アセスメントの仕様書（発電所に係る環境影響評価の手引）の改定を支援する。併せて、調査解析に係る時間とコストの削減化に向けた提案を行う。

研究開発項目③「地熱発電高度利用化技術開発」

1. 研究開発の必要性

発電原価低減化は、再エネの共通課題として位置づけられる。発電原価は、総括原価を総発電量で除した値であり、地熱の場合、発電原価は資源開発の特性を強く受けるため、地熱資源の質・量に依存するという避けられない特徴がある。しかしながら、総発電量を上げるとともに総括原価を削減することは技術的に可能であり、その技術課題として昨今、様々な事業分野・領域で活用され始めているIoT-AIを適用することで、発電量増大、コスト削減、あるいは利用率向上を図ることが期待されている。

既に、「地熱発電技術研究開発（2018～2020年度）並びに超臨界地熱発電技術研究開発（2018～2020年度）」の各プロジェクトにおいて同技術開発について事前検討が実施された。設備利用率の向上には、地下に原因があることが多く、その課題解決のテーマを追加する必要があり、発電所～蒸気設備～坑井～地熱貯留層を連成させた故障予兆や操業最適化を図り、利用率向上を実現することを目的とする。

2. 研究開発の具体的内容

生産量増大、コスト削減、並びに利用率向上に資する技術開発として、地熱発電設備や地熱貯留層のそれぞれの管理を効率化・最適化する手法開発を実施する。

涵養水の移動経路や貯留層の温度・圧力の影響、並びに、振動（地震）を、リアルタイムで時空間的にモニタリングする技術を開発する。要素技術としては、高温用光ファイバーのマルチセンサー化と長寿命化の開発、モニタリング結果を活用した涵養水の流路、流動状態の評価技術（シミュレーション技術）の開発、貯留層特性を把握する計測技術の開発等を行う。

さらに、発電・蒸気設備の監視技術としては、国産ドローンによる自動航行監視、振動や異音を検知するマルチセンサー技術を開発する。

3. 達成目標

(1) 中間目標

最終目標達成の準備として、概念設計を完了し、実証試験の詳細計画を提示する。

(2) 最終目標

これまで適用されていないIoTやAI技術等を利活用することにより、生産量増大、コスト削減、利用率向上等を目指す（それぞれ10～20%）。

(別紙2) 研究開発スケジュール

研究開発項目	FY21	FY22	FY23	FY24	FY25
超臨界地熱資源 開発	モデルフィールドにおける資源量評価				
	深部探査技術手法開発				
環境保全対策技 術	硫化水素連続モニタリング装置開発				
	気象モデリング手法開発				
高度利用化技術	貯留層管理手法開発				
	発電設備管理手法開発				