

「超臨界地熱発電技術研究開発」

事業原簿【公開】  
(2021 年)

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—

概要	概要-1
用語集	用語集-1
I. 事業の位置付け・必要性について	I-1
I.1 NEDOの関与の必要性・制度への適合性	I-1
I.1.1 NEDOが関与することの意義	I-1
I.1.2 実施の効果	I-2
I.2 事業の背景・目的・位置付け	I-2
I.2.1 事業の背景	I-2
I.2.2 事業の目的、位置づけ	I-3
II. 研究開発マネジメントについて	II-1
II.1 事業の目標	II-1
II.2 事業の計画内容	II-2
II.2.1 研究開発の内容	II-2
II.2.2 研究開発の実施体制	II-3
II.2.3 研究開発の運営管理	II-5
II.2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性	II-6
II.3 情勢変化への対応	II-6
II.4 評価に関する事項	II-6
III. 研究開発成果について	III-1
III.1 研究開発項目毎の成果	III-1
III.2 知的財産等の取得、成果の普及	III-8
III.3 個別テーマ毎の成果(まとめ)	III-9
IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて	IV-1
IV.1 事業全体の実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて	IV-1
IV.1.1 実用化・事業化の見通し	IV-1
IV.1.2 実用化・事業化に向けた具体的取り組み	IV-2
IV.1.3 波及効果	IV-2

(添付資料)

添付資料1 個別テーマについて(全10テーマ)

添付資料2 プロジェクト基本計画

# 概要

		最終更新日	2021年9月28日
プログラム名	エネルギーイノベーションプログラム		
プロジェクト名	超臨界地熱発電技術研究開発	プロジェクト番号	P18008
担当推進部/担当者	新エネルギー部/ 主任研究員 加藤 久遠 (2017年4月～現在) 主査 和田 圭介 (2019年10月～現在) 主査 長谷川 真美 (2021年4月～現在) 主査 石川 一樹 (2021年4月～現在) 主査 本田 洋仁 (2021年7月～現在)		
0. 事業の概要	(1) 概要：我が国で超臨界地熱資源存在可能性が高いと想定される複数地域での詳細な調査による資源量の評価や複数モデルの提示等のほか、調査井掘削に必要となる技術課題の整理を行うとともに、同調査井に必要とされる要素技術の研究開発等を実施する。(委託事業) (2) 事業期間：2018年度～2020年度(3年間)		
I. 事業の位置付け・必要性について	(1) 政策上の位置づけ 2011年の東日本大震災以降、再生可能エネルギーの導入拡大が望まれる中、我が国は世界第3位の地熱資源ポテンシャルを有すると推定されており、地熱発電に大きな期待が掛かっている。 2012年には、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という買取り価格が設定され、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。 2014年には、「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155万kW(2015年度実績 52万kW)、発電電力量113億kWh(2015年度実績 26億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。 一方、「独立行政法人の事務・事業の見直しの基本方針」(2012年、閣議決定)を受け、NEDOがこれまで実施してきた地熱開発関連事業のうち、地熱資源調査や地熱資源探査技術開発の業務は、石油天然ガス金属鉱物資源機構(JOGMEC)へ移管されることとなった。  (2) NEDOが関与する意義 NEDOは、1980年設立当初より、地熱事業に携わっており、地熱資源の調査として、「地熱開発促進調査」を実施した。これは、全国の地熱資源が賦存されると推定される地域を対象として、約70地域で実施された(1980～2010年)。こうした案件の多くは、この地熱開発促進調査の成果を利用しており、NEDO事業の成果が多くの実業者に利用され、その効果が出始めたといえる。 また、上記の地熱資源調査の他、技術開発事業においても、「地熱探査技術等検証調査」や「熱水利用発電プラント等開発」が実施された(1980～2003年)。これより、地熱探査技術、地熱井掘削技術、貯留層評価・貯留層管理技術、EGS技術、地上設備・発電システム技術等の研究開発により、地熱開発の導入・促進に貢献した。 2012年の独法見直しにより、NEDO業務の多くがJOGMECへ移管されて以降、NEDOは、技術開発事業のうち、地熱発電利用技術、環境保全対策技術、次世代地熱発電技術である超臨界地熱発電技術等を担当している。 こうした中、2015年より、「地熱発電の推進に関する研究会」(資源エネルギー庁)が開催され、エネルギー基本計画の2030年目標達成のための3つの柱(①新規開発地点の開拓、②事業環境の整備、③地域理解の促進)が提示された。このうち、「②事業環境の整備」の中に技術開発事業が含まれており、NEDOが果たすべき役割は大きく、その成果が期待されている。  (3) 実施の効果 2050年頃に、超臨界地熱資源を対象に最大で約11GWの発電容量、及び781億kWhの発電量の達成が見込まれる。これによるCO <sub>2</sub> 排出削減量は、約4,500万トン-CO <sub>2</sub> /年である。これまで未利用となっている大深度の超高温地熱資源を活用することで、大規模地熱発電所の立地が可能となり、効率的かつ経済的な発電所の運営を行うことで、開発リードタイム短縮、並びに、環境負荷低減(単位発電出力あたりの土地改変面積の縮小化)に貢献する。		
II. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	最終目標(2020度) 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では、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。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。 (1) 超臨界地熱資源の評価 地表調査(地質、地化学、物理探査等)を行うことで、地下5km以浅に比較的若い年代のマグ		

	<p>マが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を具体的に評価する（1地域あたり10万kW規模）。</p> <p>(2) 調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）等の開発 調査井に必要となる酸性環境かつ高温度に耐えるケーシング材並びにセメント材を開発する。</p> <p>(3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発 超臨界地熱資源システムのモデリング技術において、天然貯留層や人工貯留層造成の手法を開発する。</p> <p>(4) 調査井掘削に資する革新的技術開発 上記(1)～(3)以外で地熱発電導入拡大に資する革新的技術開発を行う。</p>				
事業の計画内容	主な実施事項	2018fy	2019fy	2020fy	
	(1) 超臨界地熱資源の評価	モデルフィールドでの詳細検討			
	(2) 調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）等の開発	坑井・発電システム等検討			
		ケーシング材・セメント材開発			
	(3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発	人工貯留層造成手法開発		モデリング手法開発	
(4) 調査井掘削に資する革新的技術開発	調査井掘削に資する革新的技術開発				
開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位：百万円)	会計・勘定	2018y	2019fy	2020fy	総額
	一般会計	-	-	-	
	特別会計(需給)	277	386	387	1,051
	開発成果促進財源	-	-	-	
	総予算額	277	386	387	1,051
	(委託)	277	386	387	1,051
	(共同研究) ：負担率2/3	-	-	-	-
開発体制	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 産業技術環境局研究開発課エネルギー・環境イノベーション戦略室			
	プロジェクトリーダー	—			
	委託先(*委託先が管理法人の場合は参加企業数及び参加企業名も記載)	<p>本事業は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」であり、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研究開発のため原則としてNEDO負担率1/1の委託で実施することとした。</p> <p><b>(1) 超臨界地熱資源の評価</b> [研究目標] 地下5km以浅のマグマの定置箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を評価</p> <p>(1.1) 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</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・国立研究開発法人産業技術総合研究所</li> <li>・国立大学法人北海道大学</li> <li>・国立大学法人東北大学</li> <li>・国立大学法人東京工業大学</li> <li>・国立大学法人九州大学</li> <li>・地方独立行政法人北海道立総合研究機構</li> <li>・地熱エンジニアリング株式会社</li> <li>・地熱技術開発株式会社</li> <li>・西日本技術開発株式会社</li> </ul> <p>(1.2) 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</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・三菱マテリアルテクノ株式会社</li> </ul> <p>(1.3) 湯沢南部地域における超臨界地熱資源の評価と発電可能量の推定に関する研究開発</p>			

		<p>・日鉄鉱コンサルタント株式会社</p> <p><b>(2)調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）等の開発</b>  <b>【研究目標】 調査井に必要な酸性環境・高温度に耐えうるケーシング材やセメント材の開発</b></p> <p>(2.1) 超臨界地熱発電に必要な坑井及び地上設備仕様の調査・検討</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・国立大学法人秋田大学</li> <li>・エヌケーケーシームレス鋼管株式会社</li> <li>・地熱エンジニアリング株式会社</li> <li>・富士電機株式会社</li> </ul> <p>(2.2) 材料試験に基づく候補材の評価</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・エヌケーケーシームレス鋼管株式会社</li> <li>・国立大学法人秋田大学</li> </ul> <p><b>(3)超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発</b>  <b>【研究目標】 超臨界地熱資源システムモデリング技術において、天然貯留層や人工貯留層造成のモデリング手法を開発</b></p> <p>(3.1) 水圧・減圧破碎による人工超臨界地熱貯留層造成に関する研究</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・国立研究開発法人産業技術総合研究所</li> <li>・国立大学法人東北大学</li> <li>・石油資源開発株式会社</li> <li>・帝石削井工業株式会社</li> <li>・株式会社リナジス</li> </ul> <p>(3.2) 超臨界地熱貯留層THMCシミュレータの技術開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・国立研究開発法人産業技術総合研究所</li> <li>・国立大学法人東北大学</li> <li>・大成建設株式会社</li> </ul> <p><b>(4)調査井掘削に資する革新的技術開発</b>  <b>【研究目標】 超臨界地熱資源から熱抽出可能な事、従来の地熱発電の発電コストと同等である事を提示</b></p> <p>(4.1) AIによる超臨界地熱資源評価・掘削技術</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・国立研究開発法人産業技術総合研究所</li> <li>・国立大学法人京都大学</li> <li>・国立大学法人室蘭工業大学</li> <li>・国立大学法人東北大学</li> <li>・国立大学法人九州大学</li> <li>・地熱エンジニアリング株式会社</li> <li>・地熱技術開発株式会社</li> <li>・国立大学法人秋田大学</li> <li>・帝石削井工業株式会社</li> <li>・株式会社物理計測コンサルタント</li> </ul> <p>(4.2) 二重解放コアを用いた地殻応力測定法の研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・国立大学法人東北大学</li> <li>・株式会社物理計測コンサルタント</li> <li>・応用地質株式会社</li> </ul> <p>(4.3) 革新的超臨界地熱場観測技術の研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・一般財団法人エンジニアリング協会</li> <li>・一般財団法人ファインセラミックスセンター</li> <li>・国立大学法人京都大学</li> </ul>
<p>情勢変化への対応</p>		<p>2016年4月に策定された「エネルギー・環境イノベーション戦略」において、温室効果ガス排出量を削減するポテンシャルが大きい、有望な革新的技術として地下の超高温・超高压の状態（超臨界状態）にある水を利用する地熱発電（以下、超臨界地熱発電）が挙げられた。こうした政府の政策を受け、2017年度には、「超臨界地熱発電の実現可能性調査」を実施した。この案件は、次世代に向けた取り組みのため、平成30年度以降は、地熱発電技術研究開発から独立させ、「超臨界地熱発電技術研究開発」というテーマで継続することとなった。</p> <p>本プロジェクトは、超臨界地熱発電技術研究開発事業として、2018年から2020年度3か年計画で進めることとした。</p> <p>その後、エネルギー・環境イノベーション戦略(内閣府)は、革新的環境イノベーション戦略(内閣府、2020)、そして、現在、グリーン成長戦略(内閣府、2021)に継承されている。そうした動向を受け、「超臨界地熱発電技術研究開発」事業を継承する事業の準備を実施し、2021年度新規事業「地熱発電導入拡大研究開発」を開始した。</p>
<p>中間評価結果へ</p>		<p>—</p>

<p>の対応</p> <p>評価に関する事項</p>	<p>事前評価</p> <p>中間評価</p> <p>事後評価</p>	<p>2017年度実施 担当部 新エネルギー部</p> <p>2017年度 NEDO POST3 実施</p> <p>—</p> <p>—</p>
<p>III. 研究開発成果について</p>		<p>超臨界地熱発電技術研究開発</p> <p>1) 最終目標(2020年度)</p> <p>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発電技術の研究開発を実施し、より一層の地熱発電の導入拡大を促進することを目的とする。具体的には、我が国で超臨界地熱資源存在可能性が高いと想定される複数地域での詳細な調査による資源量の評価や複数モデルの提示等のほか、調査井掘削に必要となる技術課題の整理を行う。併せて、同調査井に必要とされる要素技術の研究開発を実施する。なお、公募により研究開発実施者を選定後、目標の具体化等を行うこととする。</p> <p>(1) 超臨界地熱資源の評価 地表調査（地質、地化学、物理探査等）を行うことで、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を具体的に評価する（1地域あたり10万kW規模）。</p> <p>(2) 調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）等の開発 超臨界地熱資源システムのモデリング技術において、天然貯留層や人工貯留層造成の手法を開発する。</p> <p>(3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発 超臨界地熱資源システムのモデリング技術において、天然貯留層や人工貯留層造成の手法を開発する。</p> <p>(4) 調査井掘削に資する革新的技術開発 上記(1)～(3)以外で地熱発電導入拡大に資する革新的技術開発を行う。</p> <p>2) 全体の成果(2020年度末)</p> <p>(1) 超臨界地熱資源の評価 全国5地域（仙岩地域、後志地域、豊肥地域、八幡平地域、湯沢南部地域）において、MT法電磁探査および微小地震観測等を実施し、3次元比抵抗構造解析を実施し、3次元温度構造を推定した。また、地表調査結果及びシミュレーション結果を総合評価し、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を具体的に評価した。</p> <p>(2) 調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）等の開発 超臨界地熱環境に係わる材料評価データを収集し、調査井・生産井別に開発方針を策定した。また、アルミナセメントの試作・評価を実施した、さらに、現実的かつ最適な調査井仕様を策定し、3500m井で38億円、4000m井で44億円程度となることを示した。 調査井ケーシング候補材として、超臨界環境ではTN110SS、亜臨界環境では17Crを選定し、さらに、アルミナやジルコニアを用いたセラミックコーティングは高い耐食性を示すことを確認した。</p> <p>(3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発 水圧破碎・減圧破碎の室内実験結果に基づき、シミュレータへ組み込む破壊条件、およびモデル式を導出した。また、<math>10^{-15}m^2</math>以上の浸透率を有する亀裂システムの造成が可能である以上の浸透率を有する亀裂システムの造成が可能な事、さらに、超臨界環境での水圧破碎により坑井から500m適度の規模の人工貯留層の造成が可能であることを示した。 2次元、3次元対応の貯留層THMC連成シミュレータを開発し、本シミュレータを使用して評価した結果、石英の溶解析出による生産流量の長期的な変動、圧力減衰に伴う貯留層浸透率の低下、亜臨界領域での亀裂のすべり発生等が生じる可能性があるとの結果が得られた。</p> <p>(4) 調査井掘削に資する革新的技術開発 掘削ビット37丁を学習データとして、k-近傍法とニューラルネットワークによる損傷ビット予測に基づき、波形パターン分類を行い、新たな10丁について損傷予測を行った結果、90%の正答率（誤差10%）を得ることができた。 大口径（8-1/2in）の坑井を想定した二重コアビットを試作し、動作検証、および数値シミュレーションを実施した。その結果、開発した二重解放コアビットにより、深度4～5kmと想定される超臨界地熱貯留層の温度と応力環境でも本測定法によって誤差20%以内の精度で地殻応力を測定できることが明らかとなった。 地熱フィールドにおいて1.971kmまでの深度でDAS計測を行い、長時間観測を行うことによるS/Nの改善を評価した。その結果、DAS技術が極めて有効であることを確認した。</p> <p>3) 個別テーマの成果</p>

- (1) 超臨界地熱資源の評価
- (1.1) 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  
 3次元地下温度構造推定法を導出し、超臨界地熱貯留層の浸透率、間隙率を推定する手法を導出した。  
 仙岩地域・後志地域について各110地点以上でMT法により、3次元比抵抗構造解析を実施し、3次元温度構造を推定し、地表調査結果及びシミュレーション結果を総合評価し、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定した。豊肥地域については、94地点のMT法データを使用して3次元比抵抗構造解析を実施し、地表調査結果及びシミュレーション結果を総合評価し、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を具体的に評価した。  
 全3地域での地表調査結果及びシミュレーション結果を総合評価し、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を評価した（各地域100MWe以上）。
- (1.2) 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  
 MT法電磁探査により安比岳南方に熱源に関連するとみられる深部低比抵抗帯を検出した。微小地震観測により深部低比抵抗帯内は震源分布が少なく、超臨界領域に推定される延性的な環境を反映している可能性があることを確認した。  
 地熱構造モデルを模した数値モデルで、地熱流体の流動・加熱機構を再現し、生産予測シミュレーションを実施した結果、出力110MW程度の発電の可能性を提示した。
- (1.3) 湯沢南部地域における超臨界地熱資源の評価と発電可能量の推定に関する研究開発  
 MT法電磁探査により、超臨界地熱資源の熱源と考えられる深部低比抵抗構造を明らかにし、超臨界地熱資源領域を含めた地熱構造モデルを提示した。  
 推定された超臨界地熱資源に対して生産井を仮定した坑井特性曲線を求め、生産予測シミュレーションを実施した。
- (2) 調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）等の開発
- (2.1) 超臨界地熱発電に必要な坑井及び地上設備仕様の調査・検討  
 材料評価データを収集し、調査井・生産井別に開発方針を策定した。また、アルミナセメント試作し、アルミナセメントの知見・基礎データを取得した。  
 最適な調査井仕様を策定し、3500m井で38億円、4000m井で44億円程度となることを示した。また、生産される地熱流体中のシリカ濃度を55.2mg/kgと推定し、スクラバ出口での蒸気圧力と温度を試算した。さらに、湿式スクラバにより目標を実現できること、推定されるシリカ粒径に対しては乾式スクラバを適用できないことを確認した。  
 過熱蒸気直接利用・100MWe・新設のケースで、発電原価(40年)が10.2～13.2円/kWhが得られた。
- (2.2) 材料試験に基づく候補材の評価  
 超臨界環境ではTN110SS、亜臨界環境では17Crを調査井ケーシング候補材として選定した。  
 アルミナやジルコニアを用いたセラミックスコーティングは高い耐食性を示すことを確認し、以下の性能を達成した。  
 初期強度：11.3MPa@250° C×24h  
 長期安定性：11.9MPa@400° C×28日  
 耐酸性：GWCより良好  
 材料コスト：600円/kg程度（GWCは100円/kg程度）  
 シックニングタイム：200° C×6h以上
- (3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発
- (3.1) 水圧・減圧破碎による人工超臨界地熱貯留層造成に関する研究  
 水圧破碎・減圧破碎の室内実験結果をもとにシミュレータへ組み込む破壊条件、およびモデル式を導出した。  
 水圧破碎により、 $10^{-15}m^2$ 以上の浸透率を有する亀裂システムの造成が可能な事、および坑井から500m適度の規模の人工貯留層の造成が可能であることを示した。  
 坑内減圧破碎ツールを試作し、減圧効果を評価するとともに坑内流動シミュレーション等をもとに実坑内での破碎効果を検討した。また、減圧破碎作業の施工手順と作業によるリスクを取りまとめた。
- (3.2) 超臨界地熱貯留層THMCシミュレータの技術開発  
 超臨界地熱環境で生じうる基礎的なTHMC連成現象を考慮可能にするため、有限要素法に基づく2次元、3次元対応の貯留層THMC連成シミュレータを開発した。本シミュレーションを使用して予察的に評価した結果、石英の溶解析出による生産流量の長期的な変動、圧力減衰に伴う貯留層浸透率の低下、亜臨界領域での亀裂のすべり発生等が生じる可能性があるとの結果が得られた。
- (4) 調査井掘削に資する革新的技術開発

	<p>(4.1) AIによる超臨界地熱資源評価・掘削技術  水の超臨界状態相当の温度実測値が存在するフィールド（葛根田地域）において、当該実測値を除いたデータを使用してAIが推定した温度構造と当該実測値の残差は、ベイズ推定で13.9%、ニューラルネットワークで14～16%となった。また、掘削ビット37丁を学習データとしてk-近傍法とLSTMオートエンコーダニューラルネットワークによる損傷ビット予測に基づき、波形パターン分類を行い、新たな10丁について損傷予測を行った結果、90%の正答率（誤差10%）を得ることができた。</p> <p>(4.2) 二重解放コアを用いた地殻応力測定法の研究開発  大口径（8-1/2in）の坑井を想定した二重コアビットを試作し、地表試験で動作を検証した結果、超臨界地熱地層の掘削時に坑底温度を許容範囲に低下させるために必要な通水流量を確保できる見通しを得た。  実験結果および数値シミュレーションによって二重コアリングを再現して得た応力分布の結果から、深度4～5kmと想定される超臨界地熱貯留層の温度と応力環境でも本測定法によって誤差20%以内の精度で地殻応力を測定できることが明らかとなった。</p> <p>(4.3) 革新的超臨界地熱場観測技術の研究開発  メディボリス地熱フィールド内のIK-4坑井において1540mまでの深度で、5-10m間隔でDAS計測を行い、長時間観測を行うことによるS/Nの改善を評価した。DAS技術が極めて有効であることを確認した。</p> <table border="1" data-bbox="402 667 1479 824"> <tr> <td>投稿論文</td> <td>「査読付き」27件、「その他」1件</td> </tr> <tr> <td>特許</td> <td>「出願済」3件（うち国際出願0件）、「登録」0件 特記事項：特になし</td> </tr> <tr> <td>その他の外部発表（プレス発表等）</td> <td>「論文」28件、「研究発表・講演」113件、「新聞・雑誌等への掲載」2件、展示会への出展等1件</td> </tr> </table>	投稿論文	「査読付き」27件、「その他」1件	特許	「出願済」3件（うち国際出願0件）、「登録」0件 特記事項：特になし	その他の外部発表（プレス発表等）	「論文」28件、「研究発表・講演」113件、「新聞・雑誌等への掲載」2件、展示会への出展等1件
投稿論文	「査読付き」27件、「その他」1件						
特許	「出願済」3件（うち国際出願0件）、「登録」0件 特記事項：特になし						
その他の外部発表（プレス発表等）	「論文」28件、「研究発表・講演」113件、「新聞・雑誌等への掲載」2件、展示会への出展等1件						
IV. 実用化・事業化の見通しについて	<p>2016年「エネルギー・環境イノベーション戦略」（内閣府）は、その後、革新的環境イノベーション戦略（内閣府、2020）、そして、現在、グリーン成長戦略（内閣府、2021）に継承されている。そうした動向を受け、「超臨界地熱発電技術研究開発」事業を継承する事業の準備を実施し、2021年度新規事業「地熱発電導入拡大研究開発」を開始した。</p> <p>その一つの研究開発項目である「超臨界地熱資源技術開発」では、これまで実施してきた研究課題を継承し、我が国の超臨界地熱資源の賦存が期待される有望域での資源量評価スタディ（精査）を、岩手県、秋田県及び大分県の4地域を選定して実施する。これまでの概査により、1地域あたり100MW規模のポテンシャルが推定された。今後、補完調査を含めてデータを追加し、精度の高い評価を実施していく。</p> <p>併せて、大深度でも精度の高い断裂系探査が期待される光ファイバーによる地震波モニタリング技術開発を実施する。これまでの既存地熱発電所における実証試験により、地熱井により把握されている断裂系を捕捉するとともに、地熱井が掘削されていない深部にも断裂系を示唆する兆候が捉えられており、今後も、多くのフィールドで検証していく必要がある。世界的に地熱系での実施は初めての試みであり、海外へ向けてアピールしていく必要がある。</p>						
V. 基本計画に関する事項	<table border="1" data-bbox="402 1272 1479 1377"> <tr> <td>作成時期</td> <td>2018年4月 作成</td> </tr> <tr> <td>変更履歴</td> <td>2020年12月 研究開発項目の実施内容変更</td> </tr> </table>	作成時期	2018年4月 作成	変更履歴	2020年12月 研究開発項目の実施内容変更		
作成時期	2018年4月 作成						
変更履歴	2020年12月 研究開発項目の実施内容変更						

## 用語集

用語	説明
超臨界水	水の臨界点（純水の場合）は、温度 374℃、圧力 22MPa の状態であり、温度と圧力ともにそれを超えた領域を超臨界領域という。超臨界領域の状態の水を超臨界水という。なお、塩濃度やガス濃度が上昇すると、臨界点も変化する。
超臨界地熱発電	超臨界地熱資源から生産される地熱流体を利用した発電システム。貯留層温度が 400～500℃と高温であり、耐熱性のある資機材が求められるとともに、耐腐食性の地熱材料の開発が必要となる。なお、我が国では超臨界地熱資源が確認されていないので、その分布状況把握も重要な課題となる。
シリカスケール	地下での地熱水は、高温状態にあるためシリカ〔二酸化ケイ素 (SiO <sub>2</sub> ) の通称〕が多量に溶解している。この熱水が地上に生産されると、蒸気分離によるシリカ濃度増加と、温度低下による溶解度低下の要因により、熱水はシリカに過飽和となるため、シリカが析出し、配管や還元井に付着することがある。超臨界地熱環境のような高温・高圧下では過熱蒸気中にもシリカが溶存すると推定されており、その対策が求められている。
MT 法 3 次元インバージョン	インバージョンとは、逆解析のことで、解析結果が観測値と整合するようにモデルのフリーパラメータを調整し、地下での比抵抗分布の最適解を得る手法である。観測値との整合度、並びに、周辺データとの平滑度の 2 つをともに許容しうるところで最適解が求められる。測点配置により得られる比抵抗構造が変わるのが留意点として挙げられる。
シックニングタイム	セメンチング後、セメントスラリーが時間経過に伴い固化するが、固まる過程で力学的強度が発現するまでに要する経過時間をシックニングタイムという。早く固まり過ぎると、セメンチング後、ケーシング・地層のアニュラス部をセメントスラリーが流動する課程で流動しなくなり、フルホールセメンチングの妨げとなる。通常、添加剤の使用により、セメント硬化時間を調整する（遅硬剤、速硬剤など）。
水圧破碎、減圧破碎	掘削後、天然の亀裂に乏しく、透水性不十分の際に、人工的に亀裂を造成する作業が実施される。水圧破碎は、井戸への注水圧力を高くし、地層に圧力を掛けて、微細な亀裂を拡張する手法である。一方、減圧破碎は、超臨界領域では、圧力と温度は連動して変化するので、坑内圧力を急激に低下させることで、急冷効果を起こし、岩盤を破壊させ、亀裂を増大させるという技術である。室内実験では、亀裂が生じることが確認されたが、破壊の程度や、実際の井戸での減圧の仕方など未解決な課題も多い。
THMC シミュレータ	T (thermal : 熱)、H (hydro : 水)、M (mechanics : 力学)、C (chemical : 化学) を扱うシミュレータである。通常使用されるコードは、TH であり、一部（例えば、chemtough など）で岩石・水の相互作用（鉱物の沈殿・溶解）が可能なコード (THC) もあるが、力学を扱うコードは少ない。超臨界領域では、力学的には、脆性破壊～塑性変形の変化や、シリカ鉱物の沈殿溶解が盛んに行われ、透水性への影響も無視出来なくなるので、こうしたシミュレータが必要となる。
地殻応力測定	地下の岩盤中には、応力が掛かっており、その方位（最大主応力、最小主応力、中間主応力）が亀裂生成の方位・傾斜に大きく影響される。断裂系探査や水圧破碎、そしてその際の誘発地震の制御に、地殻応力の理解が必要であるが、深部における計測技術がないのが現状である。
光ファイバー-DAS	最近、光ファイバーの分解能が高いことを利用して、坑内に設置する地震計として適用されている。DAS とは、distributed acoustic sensing (分布型センサー) であり、地上から人工震源により起震し、地下での反射波を光ファイバー-DAS で観測する。反射面は、断裂系と想定されており、断裂系を直接捉える（新しい）探査手法である。

## I. 事業の位置付け・必要性について

### I.1 NEDO の関与の必要性・制度への適合性

#### I.1.1 NEDO が関与することの意義

##### ① 政策的重要性

2011年の東日本大震災以降、再生可能エネルギーの導入拡大が望まれる中、我が国は、世界第3位の地熱資源ポテンシャルを有すると推定されており、地熱発電に大きな期待が掛かっている。

2014年には、「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155万kW（2015年度実績52万kW）、発電電力量113億kWh（2015年度実績26億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。

一方、地熱開発の促進に対する課題の一つである国立・国定公園特別地域内での開発制限については、2012年に環境省から、同特別地域の第2種及び第3種では条件付きで開発を許可する通知が出され、その後、2015年にも、第1種特別地域へ傾斜掘りでの進入が条件付きで許可されるに至った。これは、地熱資源ポテンシャルがより多く賦存する国立・国定公園特別地域内での開発が可能となり、今後、地熱開発がより一層促進される環境が整ったことを意味する。

2017年に「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155万kW（2017年度実績51万kW）、発電電力量113億kWh（2017年度実績24億kWh）の導入拡大が掲げられている。

これに加え、2016年に策定された「エネルギー・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次世代地熱発電技術が位置づけられた。その具体例として超臨界地熱発電の技術開発が特定され、2050年頃の普及を目指すロードマップが策定されて、超臨界地熱発電技術が注目されることとなった。同戦略は、その後、革新的環境イノベーション戦略（内閣府、2020）、そして、現在、グリーン成長戦略（内閣府、2021）に継承されている。

##### ②NEDOの地熱事業の経緯

NEDOは、1980年設立当初より、地熱事業に携わっており、地熱資源の調査として、「地熱開発促進調査」を実施した。これは、全国の地熱資源が賦存されると推定される地域を対象として、約70地域で実施された（1980～2010年）。この調査で商業発電を開始した箇所は、八丈島地熱発電所（東京電力）のみと成果は十分とは言えなかったが、現在、上記の政府による支援策により、多くの新規開発案件が立ち上がっており、こうした案件の多くは、この地熱開発促進調査の成果を利用しており、ようやくNEDO事業の成果が多くの事業者にも利用され、その効果が出始めたといえる。

また、上記の地熱資源調査の他、技術開発事業においても、「地熱探査技術等検証調査」や「熱水利用発電プラント等開発」が実施された（1980～2003年）。これより、地熱探査技術、地熱井掘削技術、貯留層評価・貯留層管理技術、EGS技術、地上設備・発電システム技術等の研究開発により、地熱開発の導入・促進に貢献した。

##### ③JOGMECとの業務分掌とNEDOの取組み

「独立行政法人の事務・事業の見直しの基本方針」（2012年、閣議決定）を受け、NEDOがこれまで実施してきた地熱開発関連事業のうち、地熱資源調査や地熱資源探査技術開発の業務は、石油天然ガス金属鉱物資源機構（JOGMEC）へ移管されることとなった。これ以降、政府による地熱関連の事業の主体は、JOGMECで実施されるようになった。

NEDOは、技術開発の中で、地熱発電の利用に関する技術開発（環境保全対策技術を含む）を担当することとなり、2013年からNEDO新エネルギー部で「地熱発電技術研究開発」のプロジェクトがスタートした。また、次世代地熱発電技術である「超臨界地熱発電技術研究開発」も2018年から開始された。

NEDO は、研究開発の専門機関として多くのノウハウを有する。地下資源の専門機関であり現行事業支援を主として行う JOGMEC と連携することで、成果の相乗効果が発揮される。

## 1.1.2 実施の効果

2030年頃に、最大で約155万kWの発電容量、及び110億kWhの発電量の達成が見込まれる。これによるCO<sub>2</sub>排出削減量は、約620万トン-CO<sub>2</sub>/年である。また、これまでのバイナリー発電システム開発やIoT-AI技術等を適用した運転管理の高度利用化技術の成果等により、多くの温泉地等で中小規模地熱発電や熱利用が普及し、地域経済の活性化も見込まれる。これは、大規模地熱開発へも、地域との合意形成等に役立つ資料を提供し、その導入・拡大に資する。

併せて、2050年頃に、超臨界地熱資源を対象に最大で約11GWの発電容量、及び781億kWhの発電量の達成が見込まれる。これによるCO<sub>2</sub>排出削減量は、約4,500万トン-CO<sub>2</sub>/年である。これまで未利用となっている大深度の超高温地熱資源を活用することで、大規模地熱発電所の立地が可能となり、効率的かつ経済的な発電所の運営を行うことで、開発リードタイム短縮、並びに、環境負荷低減（単位発電出力あたりの土地改変面積の縮小化）に貢献する。

また、我が国は、地熱開発の経験が50年以上あり、世界でも地熱技術が高い国と評価されている。今後は、NEDOプロジェクトで開発した技術を、海外へ向けて提供（地熱用タービン発電機の納入、JICA事業を通しての地熱開発の支援、海外での開発投資等）していくことが国際アピールとして重要となる。

## 1.2 事業の背景・目的・位置付け

### 1.2.1 事業の背景

#### ①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も注目を集めている。

近年の地熱開発では、山葵沢・秋ノ宮地域（岩手県）では、2019年5月に1万kW以上の国内地熱発電として23年ぶりに運転を開始し、バイナリー発電では、滝上バイナリー発電所や山川バイナリー発電所等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）等で大型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11.4万kW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2017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、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の成果が上がっている。

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、前述の2050年頃の普及を目指すロードマップの初めのステップにあたる「超臨界地熱発電の実現可能性調査（2017年度）」が実施され、一定の成果が挙げられている。

#### ②世界の動向

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、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。

こうした中、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 3万 kW 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。

## 1.2.2 事業の目的、位置づけ

地熱開発促進の課題としては、大きく2つあり、一つは、技術的課題（資源の分布、質、量等）、もう一つは、その他の課題（採算性、ステークホルダー、環境、インフラ等）である。技術課題としては、地熱資源のリスクであり、資源開発の本質的な課題である。また、操業中に蒸気生産量が低下し、発電出力が落ちることである。そのほか、井戸や地上設備に関し、材料の腐食やスケール問題がある。

一方、その他の課題としては、まず採算性であるが、これは、再生可能エネルギー全般に言えることで、いかに発電コストを下げられるかという課題である。また、地熱特有の課題としては、温泉事業者との合意形成や、自然公園特別地域のような環境保全対策の要求レベルが高い地域で、いかに円滑に開発を行うかも重要な課題となる。なお、最近では、系統連系がひっ迫し、新規発電事業に対する送電枠が制限されている状況であり、こちらの課題も少なくない。

そうした課題に対応するため、経済産業省、JOGMECそしてNEDOで役割分担して、それぞれ事業を推進している。

経済産業省は、固定価格買取制度における買取価格の設定、地熱開発に対する理解促進事業、系統連系に対する課題対応等を担当している。

JOGMECは、前述のとおり、地熱開発事業の主体的な役割を担っており、地熱資源調査に係る助成金事業、リスクマネー低減に資する出資事業・債務保証事業、地熱資源調査事業、地熱探査技術開発事業、その他（地熱技術の情報提供・指導や国際連携等）である。

NEDOは、技術開発事業のうち、地熱発電利用技術、環境保全対策技術、次世代地熱発電技術（超臨界地熱発電技術）等を担当している。

こうした中、2015年より、「地熱発電の推進に関する研究会」（資源エネルギー庁）が開催され、エネルギー基本計画の2030年目標達成に向け、3つの柱（①新規開発地点の開拓、②事業環境の整備、③地域理解の促進）が提示された。このうち、「②事業環境の整備」の中に技術開発事業が含まれており、NEDOが果たすべき役割は大きく、その成果が期待されている。

本事業では、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発電技術の研究開発を実施し、より一層の地熱発電の導入拡大を促進することを目的とする。

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。

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。

## II. 研究開発マネジメントについて

### II.1 事業の目標

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。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。研究開発項目毎の目標と目標値の設定根拠を表 II-1 に示す。

#### (1) 超臨界地熱資源の評価

地表調査（地質、地化学、物理探査等）を行うことで、地下 5km 以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を具体的に評価する（1 地域あたり 10 万 kW 規模）。

#### (2) 調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）等の開発

調査井に必要となる酸性環境かつ高温度に耐えうるケーシング材並びにセメント材を開発する。

#### (3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発

超臨界地熱資源システムのモデリング技術において、天然貯留層や人工貯留層造成のモデリング手法を開発する。

#### (4) 調査井掘削に資する革新的技術開発

上記(1)～(3)以外で地熱発電導入拡大に資する革新的技術開発を行う。

表 II-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	研究開発目標	根拠
(1) 超臨界地熱資源の評価	地表調査（地質、地化学、物理探査等）を行うことで、地下 5km 以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を具体的に評価する。 (1 地域あたり 100kmW 規模)	超臨界地熱流体の存在形態が未解明であり、超臨界地熱資源量の詳細評価法は未導出である。
(2) 調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）等の開発	調査井に必要となる酸性環境かつ高温度に耐えうるケーシング材並びにセメント材を開発する。	坑井用に使用されているセメントは使用上限地層温度が 300℃ 程度であり、超臨界地熱環境での施工法が未確定である。さらに、ケーシング管は地層温度 180℃ 以下を想定しており、概ね 300℃ 以上で耐食性が大きく低下する。
(3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発	超臨界地熱資源システムのモデリング技術において、天然貯留層や人工貯留層造成のモデリング手法を開発する。	超臨界地熱環境での岩体の挙動の大部分や超臨界地熱流体の存在形態が未解明であり、超臨界地熱環境のモデリング評価手法は未だ導出されていない。また、既存の貯留層シミュレータは岩体特性の経時変化を表現不可能で、超臨界岩体内で発生する THMC 連成現象のシミュレーション技術が未開発である。

<p>(4) 調査井掘削に資する革新的技術開発</p>	<p>上記(1)～(3)以外で地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発を行う。超臨界地熱資源からの熱抽出が可能であることを示すとともに従来の地熱発電の発電コストと同等であることを示す。</p>	<p>掘削ターゲットを高精度で決定し、掘削コストを低減させることが必要である。また、岩石の破碎挙動および浸透率挙動は、地殻応力場に大きく依存すると想定されるが、地殻応力測定法が存在しない。さらに、石油・天然ガス探査分野や活用される光ファイバーを用いた地熱探査手法を超臨界資源の探索に利用できれば、地下探査精度の向上につながる。</p>
-----------------------------	--	---

## II.2 事業の計画内容

### II.2.1 研究開発の内容

本事業では、目標はテーマごとに設定されているが、その内容については、前述の「II.1 事業の目標」に示した、基本計画における研究開発項目(1)～(3)のいずれかに整理が可能であり、以下の通り研究目標毎に再整理を行った。

#### (1) 超臨界地熱資源の評価

【研究目標】 地下5km以浅のマグマの定置箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を評価

- (1.1) 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
- (1.2) 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
- (1.3) 湯沢南部地域における超臨界地熱資源の評価と発電可能量の推定に関する研究開発

#### (2) 調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）等の開発

【研究目標】 調査井に必要な酸性環境・高温度に耐えうるケーシング材やセメント材の開発

- (2.1) 超臨界地熱発電に必要な坑井及び地上設備仕様の調査・検討
- (2.2) 材料試験に基づく候補材の評価

#### (3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発

【研究目標】 超臨界地熱資源システムモデリング技術において、天然貯留層や人工貯留層造成のモデリング手法を開発

- (3.1) 水圧・減圧破碎による人工超臨界地熱貯留層造成に関する研究
- (3.2) 超臨界地熱貯留層THMCシミュレータの技術開発

#### (4) 調査井掘削に資する革新的技術開発

【研究目標】 超臨界地熱資源から熱抽出可能な事、従来の地熱発電の発電コストと同等であることを提示

- (4.1) AIによる超臨界地熱資源評価・掘削技術
- (4.2) 二重解放コアを用いた地殻応力測定法の研究開発
- (4.3) 革新的超臨界地熱場観測技術の研究開発

## II.2.2 研究開発の実施体制

本事業は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」であり、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必要がある、原則としてNEDO負担率1/1の委託で実施することとする。

各研究開発項目における実施テーマ名と実施機関および具体的な研究項目については、「V. 個別テーマ」にて、テーマ毎に実施体制図として纏める。

### (1) 超臨界地熱資源の評価

[研究目標] 地下5km以浅のマグマの定置箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を評価

(1.1) 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

[委託研究(NEDO負担率：1/1)]

- ・ 国立研究開発法人産業技術総合研究所
- ・ 国立大学法人北海道大学
- ・ 国立大学法人東北大学
- ・ 国立大学法人東京工業大学
- ・ 国立大学法人九州大学
- ・ 地方独立行政法人北海道立総合研究機構
- ・ 地熱エンジニアリング株式会社
- ・ 地熱技術開発株式会社
- ・ 西日本技術開発株式会社

(1.2) 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

[委託研究(NEDO負担率：1/1)]

- ・ 三菱マテリアルテクノ株式会社

(1.3) 湯沢南部地域における超臨界地熱資源の評価と発電可能量の推定に関する研究開発

[委託研究(NEDO負担率：1/1)]

- ・ 日鉄鉱コンサルタント株式会社

### (2) 超調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）等の開発

[研究目標] 調査井に必要な酸性環境・高温度に耐えうるケーシング材やセメント材の開発

(2.1) 超臨界地熱発電に必要な坑井及び地上設備仕様の調査・検討

[委託研究(NEDO負担率：1/1)]

- ・ 国立大学法人秋田大学
- ・ エヌケーケーシームレス鋼管株式会社
- ・ 地熱エンジニアリング株式会社
- ・ 富士電機株式会社

(2.2) 材料試験に基づく候補材の評価

[委託研究(NEDO負担率：1/1)]

- ・ エヌケーケーシームレス鋼管株式会社
- ・ 国立大学法人秋田大学

### (3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発

[研究目標] 超臨界地熱資源システムモデリング技術において、天然貯留層や人工貯留層造成のモデリング手法を開発

(3.1) 水圧・減圧破砕による人工超臨界地熱貯留層造成に関する研究

[委託研究(NEDO負担率：1/1)]

- ・ 国立研究開発法人産業技術総合研究所
- ・ 国立大学法人東北大学
- ・ 石油資源開発株式会社

- ・ 帝石削井工業株式会社
  - ・ 株式会社リナジス
- (3.2) 超臨界地熱貯留層 THMC シミュレータの技術開発  
[委託研究 (NEDO負担率 : 1/1)]
- ・ 国立研究開発法人産業技術総合研究所
  - ・ 国立大学法人東北大学
  - ・ 大成建設株式会社

(4) 調査井掘削に資する革新的技術開発

[研究目標] 超臨界地熱資源から熱抽出可能な事、従来の地熱発電の発電コストと同等であることを提示

(4.1) AI による超臨界地熱資源評価・掘削技術

[委託研究 (NEDO負担率 : 1/1)]

- ・ 国立研究開発法人産業技術総合研究所
- ・ 国立大学法人京都大学
- ・ 国立大学法人室蘭工業大学
- ・ 国立大学法人東北大学
- ・ 国立大学法人九州大学
- ・ 地熱エンジニアリング株式会社
- ・ 地熱技術開発株式会社
- ・ 国立大学法人秋田大学
- ・ 帝石削井工業株式会社
- ・ 株式会社物理計測コンサルタント

(4.2) 二重解放コアを用いた地殻応力測定法の研究開発

[委託研究 (NEDO負担率 : 1/1)]

- ・ 国立大学法人東北大学
- ・ 株式会社物理計測コンサルタント
- ・ 応用地質株式会社

(4.3) 革新的超臨界地熱場観測技術の研究開発

[委託研究 (NEDO負担率 : 1/1)]

- ・ 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

### II.2.3 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて設置される技術検討委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させる。

開発項目の着実な実施と確実な達成に向け、適時、技術委員会(含、実証現地開催)を開催し、NEDOおよび実施者で実施内容や目標設定を修正、検討する会議を設けている。

なお、個別テーマ毎の運営管理については、「V. 個別テーマについて」に記述する。

#### (知的財産権等の取り扱い)

開発成果に対する取り扱いとして、委託事業の成果に関わる知的財産権等については原則として、すべて実施機関に帰属させることとする(「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)。

実施機関においては、我が国の産業競争力の強化に資するべく、開発した技術や成果の特徴を踏まえた知的財産マネジメントを実施する。

知的財産マネジメントとして、例えば、技術成果の公開や権利化を通して、地熱発電技術を普及させるためのマネジメントや、開発技術や研究成果をオープンソースとして公開し技術の普及や浸透を目指すマネジメントなど、各実施機関のマネジメント戦略に基づく取り扱いを行う。

## II.2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

実用化・事業化に向けたマネジメントとしては、2016年エネルギー・環境イノベーション戦略で策定された超臨界地熱発電技術開発ロードマップに従い、フェーズⅠ「実現可能性調査」を終了し、フェーズⅡ「試掘の詳細検討」を現行では実施しているところ、着実にフェーズⅡを終了し、フェーズⅢ「調査井掘削」のステージへ移行することである。また、同調査井掘削では、JOGMECと連携していく選択肢もあり、可能性のある手段を検討していくよう準備している。また、超臨界地熱資源開発のみに限らず、在来型地熱開発へも使用可能な技術については、適宜、現状の地熱探査、貯留層評価や貯留層管理に適用していくことが重要で、次期地熱事業の実施内容の策定に役立てている。

## II.3 情勢変化への対応

2016年4月に策定された「エネルギー・環境イノベーション戦略」(内閣府)において、温室効果ガス排出量を削減するポテンシャルが大きい、有望な革新的技術として地下の超高温・超高压の状態(超臨界状態)にある水を利用する地熱発電(以下、超臨界地熱発電)が挙げられた。こうした政府の政策を受け、2017年度には、「超臨界地熱発電の実現可能性調査」が実施された。この案件は、次世代に向けた取り組みのため、2018年度以降は、地熱発電技術研究開発から独立させ、「超臨界地熱発電技術研究開発」というテーマで継続することとなった。

本プロジェクトは、超臨界地熱発電技術研究開発事業として、2018年度から2020年度3か年計画で進めることとした。

その後、エネルギー・環境イノベーション戦略(内閣府)は、革新的環境イノベーション戦略(内閣府、2020)、そして、現在、グリーン成長戦略(内閣府、2021)に継承されている。そうした動向を受け、「超臨界地熱発電技術研究開発」事業を継承する事業の準備を実施し、2021年度新規事業「地熱発電導入拡大研究開発」を開始した。

## II.4 評価に関する事項

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、外部有識者による研究開発の事後評価を2021年度に実施する。

### III. 研究開発成果について

#### III.1 研究開発項目毎の成果

##### (1) 超臨界地熱資源の評価

研究開発項目①超臨界地熱資源の評価の最終目標に対する成果と達成度を表Ⅲ.1.1-1に示す。

表Ⅲ.1.1-1 最終目標の達成度

最終目標	成果	達成度	次フェーズの課題
地表調査により、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を具体的に評価する。(1地域あたり10万kW規模)	・(1.1) 調査地域(仙岩、後志、豊肥)でのMT法3次元バージョン最適化法により3次元地下温度構造導出し、シミュレーション結果から、超臨界地熱資源量の規模を評価した(各地域10万kW以上)。	○	(1.1) 最有望地点においてより詳細な調査・モデル化を行うとともにパイロット孔、調査井の仕様策定。
	・(1.2) 八幡平地域でのMT法電磁探査結果・微小地震探査結果および地熱構造モデルを模した数値モデルを構築し、生産予測シミュレーションの結果、出力11万kW発電の可能性を提示した。	○	(1.2) MT法3次元解析による詳細な感度解析、および長期の微小地震観測による延性領域の特定・震源位置精度の向上
	・(1.3) 湯沢南部地域でのMT法電磁探査結果および地熱構造モデルを構築精微化し、生産予測シミュレーションの結果、出力10万kW発電の可能性を提示した。	○	(1.3) 超臨界地熱資源の概念モデルを精緻化、および最適な生産・還元井の配置や生産の仕方を検討

◎大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

##### (2) 調査井の資材(ケーシング材及びセメント材)等の開発

研究開発項目②調査井の資材(ケーシング材及びセメント材)等の開発の最終目標に対する成果と達成度を表Ⅲ.1.1-2に示す。

表Ⅲ.1.1-2 最終目標の達成度

最終目標	成果	達成度	次フェーズの課題
超臨界地熱環境下で適用可能で経済性のあるケーシング材・セメント材の材料開発方針を提案する。	・目標とした材料評価データの収集ができ、調査井・生産井別に開発方針を提案すべく評価ができた。	○	・ケーシングおよびセメント候補材についての、より詳細で広範な条件下での材料試験データの取得
	・アルミナセメントの知見・基礎データを得て、開発方針を提案すべく評価ができた	○	・掘削・地熱流体生産中の熱衝撃(繰り返し熱応力)がケーシング・セメントに及ぼす影響の評価と、それを考慮した坑井設計法の確立
掘削費が40億円規模となる調査井の仕様を策定し提案する。	・現実的かつ最適な調査井仕様を策定し、3500m井で38億円、4000m井で44億円程度となることを示した。	○	・具体的な調査井掘削地点に基づく坑井・掘削の詳細計画の策定、資源量および発電コストの正確な見積もり

<p>蒸気清浄化に必要な蒸気中のシリカ濃度の基準値を明確化し、これに伴う熱量の範囲の提示及び試掘ステージにおける開発目標を策定する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>生産される地熱流体中のシリカ濃度を55.2 mg/kgと推定しスクラバ出口での蒸気圧力と温度を試算した</li> <li>スクラバ出口での蒸気中シリカ濃度の目標を0.1 mg/kgと定め、湿式スクラバにより目標を実現できること、推定されるシリカ粒径に対しては、乾式スクラバは適用できないことを確認した。</li> </ul>	<p>○ ○</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>発電システムの湿式スクラバの設計および実証</li> </ul>
<p>超臨界地熱資源の開発に最適な坑井並びに発電システムを提案し、従来開発と同等の発電コスト(9~12円/kWh)となる事を確認する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>過熱蒸気直接利用・100MWe・新設のケースでは、発電原価(40年)が10.2~13.2円/kWhが得られた。</li> </ul>	<p>○</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>具体的な調査井掘削地点に基づく坑井・掘削の詳細計画の策定、資源量および発電コストの正確な見積もり</li> </ul>
<p>酸性熱水腐食試験および材料腐食予測式に基づき、腐食速度3.0 mm/年以下となる調査井ケーシング候補材およびコーティング技術を選定する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>超臨界環境ではTN110SS、亜臨界環境では17Crを調査井ケーシング候補材として選定した。</li> <li>アルミナやジルコニアを用いたセラミックコーティングは高い耐食性を示すことを確認した。</li> </ul>	<p>○ ○</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ケーシングおよびセメント候補材についての、より詳細で広範な条件下での材料試験データの取得</li> </ul>
<p>以下の性能を備える坑井用アルミセメントシステムの改良完了する。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>初期強度：3.5 MPa以上@250°C×24時間</li> <li>長期安定性：10 MPa以上@450°C×72時間以上</li> <li>耐酸性：3.5 MPa以上@pH = 2の硫酸および塩酸環境</li> <li>材料コスト：既存地熱井セメントGWCの10倍以内</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>以下の性能を達成 初期強度：11.3MPa@250° C×24h 長期安定性：11.9MPa@400° C×28日 耐酸性：GWCより良好 材料コスト：600円/kg程度 (GWCは100円/kg程度) シッキングタイム：200° C×6h以上</li> </ul>	<p>○</p>	<p>掘削・地熱流体生産中の熱衝撃(繰り返し熱応力)がケーシング・セメントに及ぼす影響の評価と、それを考慮した坑井設計法の確立</p>

◎大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

### (3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発

研究開発項目③超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発の最終目標に対する成果と達成度を表Ⅲ. 1. 1-3に示す。

表Ⅲ. 1. 1-3 最終目標の達成度

最終目標	成果	達成度	次フェーズの課題
<ul style="list-style-type: none"> <li>・水圧破碎現象のメカニズム、およびその寸法効果、高応力下での挙動を明らかにし、フィールドスケールのモデル式・パラメータを導出する。</li> <li>・減圧破碎現象のメカニズム、その特異性の有無、およびその寸法効果を明らかにし、フィールドスケールのモデル式・パラメータを導出する。</li> <li>・水圧破碎及び減圧破碎、またはいずれか一方において、生産可能な浸透率（10-15m<sup>2</sup> オーダー）以上の破碎が可能なことを、室内実験かつ数値シミュレーションにより立証する。</li> <li>・超臨界地熱環境下で水圧破碎及び減圧破碎、またはいずれか一方による、坑井周辺の数 100m 規模の人工貯留層造成手法のシナリオを提案する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水圧破碎室内実験結果をもとにシミュレータへ組み込む破壊条件を導出した。</li> <li>・減圧破碎室内実験結果をもとにシミュレータへ組み込むモデル式を導出した。</li> <li>・水圧破碎により 10-15m<sup>2</sup> 以上の浸透率を有する亀裂システムの造成が可能であることを示した。</li> <li>・超臨界環境での水圧破碎により坑井から 500m 適度の規模の人工貯留層の造成が可能であることを示した。</li> </ul>	<p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・超臨界地熱システム内での水圧破碎・生産を想定し、より高度な室内実験、THMC 対応シミュレーション技術の構築、亀裂システムの進展をモニタリング可能な技術・機器の開発が重要である。</li> <li>・THMC シミュレータを用いた地震リスク詳細な事前評価を行う。</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>・減圧破碎ツールの装置内圧力が設計通り数秒以内に大気圧まで減圧することを確認し、作動状況の評価、機器動作シミュレーション等から減圧破碎シミュレーションへの入力データを提示する。</li> <li>・減圧破碎作業の施工手順と作業によるリスクを取りまとめる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・坑内減圧破碎ツールを試作し、減圧効果の評価するとともに坑内流動シミュレーション等をもとに実坑内での破碎効果を検討した。</li> <li>・減圧破碎作業の施工手順と作業によるリスクを取りまとめた</li> </ul>	<p>○</p> <p>○</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・耐熱条件を大きく超えた環境での試験となるため、金属・耐熱樹脂等を使用したパッカーの水圧破碎ツール開発が重要である。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・地熱事例 10 件・油ガス田事例 10 件以上のプロジェクトを調査し、超臨界地熱開発に関わる重要項目を取りまとめる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地熱事例 10 件・油ガス田事例 10 件以上のプロジェクトを調査し、超臨界地熱開発に関わる重要項目を取りまとめた。</li> </ul>	<p>○</p>	<p>—</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・超臨界地熱環境で基礎的な THMC 連成現象の 3 次元シミュレーションを可能にする。</li> <li>・開発したシミュレータを用いて、岩石力学挙動やシリカ溶解析出が貯留層の水理特性や抽熱性能に与える影響を定量的に評価する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・超臨界地熱環境で、有限要素法に基づく 2 次元、3 次元対応の貯留層 THMC 連成シミュレータを開発した。</li> <li>・開発シミュレータを用いた予察的な評価により、石英の溶解析出による生産流量の長期的な変動、圧力減衰に伴う貯留層浸透率の低下、亜臨界領域での亀裂のすべり発生等が生じる可能性があるとの結果が得られた。</li> </ul>	<p>○</p> <p>○</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・THMC シミュレーションを用いて、臨界地熱貯留層内における石英溶解析出挙動の精査、および亜臨界領域における岩石破壊挙動の影響評価を行う。</li> <li>・THMC シミュレーションの妥当性評価</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・超臨界地熱環境下における流体性状変化、水-岩石平衡反応を計算可能な地化学計算ツールを試作する。</li> <li>・室内実験、文献調査等にもとづき、5 件のベンチマーク問題を策定し、試作ツールを用いて計算する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・超臨界低密度領域における地化学挙動を計算するために、地化学計算ソフト SOLVEQ /CHIM のデータセットを拡張し、実装した。</li> <li>・室内の溶解平衡実験、析出実験の結果、および文献をもとにした現実的な深部地熱モデル流体を用いて、7 件のベンチマークテストを実施し、計算手法の評価を行った。</li> </ul>	<p>○</p> <p>○</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・貯留層シミュレーションにおける地化学反応モデルの高度化、岩石破壊挙動の考慮し、THMC シミュレーションの妥当性評価する。</li> <li>・超臨界/高塩濃度流体を対象にした地化学計算法の検討する。</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>・文献調査等にもとづき、6件以上のテストケースを策定する。</li> <li>・2つ以上の既存シミュレータを用いてテストケースの試解析を実施し、①で開発するシミュレータと比較するためのデータセットを作成する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・全200件超の文献データベースを作成し、これに基づき3レベル11ケースのテストケースを策定した。</li> <li>・レベル2の2ケースについて、既存の3つのシミュレータ（TOUGH3、iTOUGH、TOUGHREACT）による試解析を実施し、ベンチマーク問題のデータセットを作成した。</li> </ul>	<p>○</p> <p>○</p>	—
--	--	-------------------	---

◎大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

#### (4) 調査井掘削に資する革新的技術開発

研究開発項目④調査井掘削に資する革新的技術開発の最終目標に対する成果と達成度を表Ⅲ.1.1-4に示す。

表Ⅲ.1.1-4 最終目標の達成度

最終目標	成果	達成度	次フェーズの課題
<ul style="list-style-type: none"> <li>・水の超臨界状態相当の温度実測値が存在するフィールドにおいて、当該実測値を除いたデータを使用してAIが推定した温度構造と当該実測値の残差が20%以内であること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・水の超臨界状態相当の温度実測値が存在するフィールド（葛根田地域）において、当該実測値を除いたデータを使用してAIが推定した温度構造と当該実測値の残差は、ベイズ推定で13.9%、ニューラルネットワークで14～16%となった。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・学習方法の改善、物理モデルの精緻化により推定の高精度化を進める。パイロット孔掘削における実測データでの実証により、本掘削地点の選定前の事業化を目指す。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・過去に得られたマッドロギングデータ等を入力し、ビットの摩耗度の予測を行い、現実の計測数値と誤差20%以内の精度で予測を行うことが可能なこと。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・掘削ビット37丁（損傷2丁）を学習データとしてk-近傍法とLSTM(Long Short-Term Memory) オートエンコーダニューラルネットワークによる損傷ビット予測に基づき、Shapletsを用いた波形パターン分類を行い、新たな10丁（損傷7丁）の損傷予測を行った結果、90%の正答率（誤差10%）を得ることができた。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・個々の役割分担を確定して、社会実装により、在来地熱開発での掘削現場での適用を行い、データの蓄積ならびにシステムの改良を加えて、本掘削地点の掘削時での運用を目指す。</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・二重コアビット（実験ツール）の結果を踏まえ、超臨界地熱開発の掘削坑井として想定される8-1/2inの口径で二重コアビット（実用ツール）を製作し、超臨界地熱環境の岩体中で使用可能な方法を提案する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大口径（8-1/2in）の坑井を想定した二重コアビット（実用ツール）を試作し、地表試験で動作を検証した。また、大型の泥水ポンプによる通水試験の結果から、超臨界地熱地層の掘削時に坑底温度を許容範囲に低下させるために必要な通水流量を確保できる見通しを得た。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・試掘井を掘削し、そこで取得したデータ、実験結果等により超臨界地熱発電の実現可能性を判断する。また、の試掘井での適用に間に合うように実用ツールを製作し、坑井を使用したコミッションングを行う。</li> </ul>

<p>・二重解放コア変形法により、誤差 20%以内の精度で地殻応力を測定できる応力レベルと岩体温度の範囲などの測定条件を提示する。さらに、深度 4~5km と想定される超臨界地熱貯留層に作用する地殻応力を直接あるいは間接的に測定する方法を明らかにする。</p>	<p>・実験結果および数値シミュレーションによって二重コアリングを再現して得た応力分布の結果から、深度 4~5km と想定される超臨界地熱貯留層の温度と応力環境でも本測定法によって誤差 20%以内の精度で地殻応力を測定できることが明らかとなった。</p>	<p>◎</p>	<p>二重解放コア変形法は、代表的な従来法である水圧破碎法と比較して、深度、温度両面で高い適用能力がある。また、計測サービスを現状より約 6 割減で提供できる見通しである。これらの強みを活かして幅広い分野でサービスを展開する。</p>
<p>・地熱坑井内の比較的浅部に DAS (分布型地震計) を設置し、周辺で起きる地震あるいは人工震源の振動を坑井に沿って 5-10m 間隔で計測し、坑井内における DAS の S/N を定量的に評価するとともに逆伝播を行う。これらにより、DAS 技術の有効性を確認し、課題を把握する。</p>	<p>・メディポリス地熱フィールド内の IK-4 坑井において 1540m までの深度で DAS 計測をおこなった。5-10m 間隔で計測を行い、長時間観測を行うことによる S/N の改善を評価した。DAS 技術が極めて有効であることを確認した。</p>	<p>○</p>	<p>—</p>
<p>・全波形インバージョンでは地下 100-500m ブロック内の位置と形、物性の状態について観測結果とインバージョンを用い推定する。</p>	<p>・全波形インバージョンを実施しモデルの再現性を評価した。その結果、位置、形状、Vp の再現性は良かったが、Vs, 密度の再現性は Vp 程では無かった。これは観測網の形状にも依存した。</p>	<p>◎</p>	<p>—</p>
<p>・開発した光ファイバーが超臨界水環境下における要求性能を満たす耐水素性と耐食性を有することを実証し、経済性を評価する。</p>	<p>・耐腐食性、水素遮蔽性に優れた素材を用いて熱応力を考慮した積層構造を設計するとともに、その設計指針に従い作製した構造が超臨界環境下において維持することを実証した。また、既存光ファイバーのコストをもとに開発光ファイバーの経済性評価を行った。さらに、既存光ファイバーの耐食性を評価した結果、Au を被覆した光ファイバーは超臨界環境下 (400℃) において光透過損失が認められなかったことから、既存製品においても適用可能性が示唆された。</p>	<p>◎</p>	<p>耐環境性光ファイバーを実用化する場合、数 km におよぶ連続被覆処理が必要になる。これを実現するには、設備メーカー・ファイバーメーカーを含めた要素技術開発が必要と考える。</p>
<p>・使用可能な地熱坑井深度と坑井内の状態、使用可能な光</p>	<p>・1.971km 深度まで坑井内に DAS を設置した。超臨界水域としては浅すぎたが、メディポリス地熱フィールド</p>	<p>◎</p>	<p>今後地質と地熱構造の異なった日本各地の地熱フィールドにおいて</p>

<p>ファイバーなどを勘案しながら、地熱坑井内に DAS を設置し超臨界水貯留域が存在する深さに可能な限り接近する。そこで、深さ 5km まででかつ坑井周辺 3 km 四方の物性変化、貯留層の存在の有無等を明らかにできる手法を開発する。</p>	<p>では深さ 3.6km に超臨界層の可能性を示唆するゾーンの存在を見つけた。大沼地熱フィールドでは深さ 2.8-3.0 km に地震波反射ゾーンを見つけた。これは超臨界水域としては少し浅い。坑井周辺 3km、深さ 5km の貯留層検出の可能性はほぼ達成できた。物性の評価も行った。短時間では変化は見られなかった。</p>	<p>実証試験をして本方法の有効性、有効な調査法、有効な解析法を確立する。</p>
--	--	---

◎大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

### Ⅲ.2 知的財産等の取得、成果の普及

成果の普及については、NEDOは、技術情報流出に配慮しつつ、実用化・事業化を推進するため、情報発信を行うように指導している。事業全体の特許、論文、外部発表等の件数を表Ⅲ-3に示す。

NEDO自身も、学会・シンポジウムでの講演、専門誌への寄稿等を行っている。

表Ⅲ.1.2-1 事業全体の特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読付 き	その 他	学会発 表・講演	新聞・雑誌等 への掲載	その他
2018FY	1件	0件	0件	4件	0件	17件	0件	0件
2019FY	2件	0件	0件	12件	1件	49件	2件	1件
2020FY	0件	0件	0件	11件	0件	47件	0件	0件
合計	3件	0件	0件	27件	1件	113件	2件	1件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

2021年4月19日現在。

NEDO 成果報告会発表および、NEDO 自身の件数は含まない。

### Ⅲ.3 個別テーマ毎の成果(まとめ)

#### (1) 超臨界地熱資源の評価

[研究目標] 地表調査を行うことで、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量を具体的に評価する(1地域あたり100MW規模)。

表Ⅲ.1.3-1 個別テーマの目標と成果(最終目標に対する成果)

※達成度[◎:目標を大幅に上回って達成、○:達成。△:一部達成、×:未達]

(1.1) 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				
開発項目	最終目標[2020度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①資源量・発電ポテンシャル評価法の検討	・抽熱シミュレーション及び資源量評価の結果の妥当性を検証するとともに、海外事例により、現地調査地点の資源量評価を行う。	・3次元地下温度構造推定法を導出し、超臨界地熱貯留層の浸透率、間隙率を推定する手法を導出した。 ・抽熱シミュレーション及び資源量評価の結果が妥当であることを示した。 ・海外の超高温地熱開発プロジェクトの資源量評価手法を用いて、本プロジェクトにおける現地調査地点の資源量評価を行った。	○	・第三者的視点でシミュレーション結果を評価することにより、より妥当性の高い結果が得られる。
②東日本における超臨界地熱システム調査	・仙岩地域・後志地域について、地表調査結果及びシミュレーション結果を総合評価し、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量を具体的に評価する。	・仙岩地域・後志地域について、各110地点以上でMT法により、3次元比抵抗構造解析を実施し、3次元温度構造を推定した。 ・両地域について地表調査結果及びシミュレーション結果を総合評価し、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を具体的に評価した。	○	・超臨界地熱資源量を具体的に評価する。
③九州における超臨界地熱システム調査	・豊肥地域について、地表調査結果及びシミュレーション結果を総合評価し、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を具体的に評価する。	・豊肥地域について94地点のMT法データを使用して3次元比抵抗構造解析を実施し、坑井プロファイルに基づいて、3次元温度構造を推定した。 ・同地域について地表調査結果及びシミュレーション結果を総合評価し、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を具体的に評価した。	○	・超臨界地熱資源量を具体的に評価する。
④資源量評価	・調査対象地域の抽熱量を推定するとともに、海外の高温地熱地域での抽熱量を推定する。	・複数の抽熱・発電方式想定し、調査対象地域(3地点)の抽熱量を推定した。 ・海外の地熱開発プロジェクトで公開されている地下データを基に、同地熱地域での抽熱量を推定した。	○	・超臨界地熱資源量を具体的に評価する。
⑤まとめ	・全3地域の特徴をまとめるとともに、調査井掘削候補地点としてのランキングを行う。 ・今回の調査を通じ不確定性を十分低減できなかった項目について、今後の研究開発方針を提示する。	・全3地域での地表調査結果及びシミュレーション結果を総合評価し、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を評価した(各地域100MWe以上)。 ・全3地域の特徴を取り纏め、社会的条件等を調査し、調査井掘削候補地点としてのランキングを行った。 ・今回の調査を通じ不確定性を十分低減できなかった項目について、今後の研究開発方針を提示した。	○	・調査井掘削試掘に向けて不可欠
(1.2) 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				
開発項目	最終目標[2020度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①地表調査	・MT法電磁探査、微小地震探査により、地熱構造モデルの精緻化に寄与する情報を取得する。	・MT法電磁探査:安比岳南方に熱源に関連するとみられる深部低比抵抗帯を検出した。 ・微小地震観測:深部低比抵抗帯内は震源分布が少なく、超臨界領域に推定される延性的な環境を反映している可能性があることを確認した。	○	・MT法電磁探査の補足調査により、その構造を把握する。
②地熱構造モデルの構築	・超臨界領域を含む地熱構造モデルを構築し、その精緻化を図る。	・深部低比抵抗帯と地熱構造の関係を考察し、超臨界領域を含む地熱構造モデルを提示した。 ・推定温度分布を基に、容積法により超臨界地熱資源量を試算した(170MW)。	○	・地表調査・貯留層シミュレーションの結果をフィードバックした再検討を行うことで、最終的な地熱構造モデルを提示する。
③資源量評価	・既往研究における安比地域の自然状態を再現可能な数値モデルを作成し、生産予測シミュレーション	・地熱構造モデルを模した数値モデル上で、想定される地熱流体の流動・加熱機構を再現した。 ・生産予測シミュレーションの結果、出力100MWを超える発電の可能性を提示した(検討したケースで110MW)。	○	・数値モデルの妥当性は、NEDO(2004)と同等の自然状態の再現

	ンによる資源量評価を行う。			ができるかをもって判断する。
④社会環境情報の収集・整理	・八幡平地域に関する社会環境情報を収集・整理する。	・本地域の社会環境情報、環境規制区域等の情報を収集・整理し、資源量評価、今後の研究対象地域としての検討に反映した。	○	・開発可能な資源量および研究開発対象地域としての評価を行うため、社会環境に関する情報を収集し、環境規制区域について整理する。
⑥総合評価	・①～④の結果をまとめ、総合評価として提示する。	・②③の結果を基に、最終的な地熱構造モデル・資源量評価結果を整理した。 ・本地域は、超臨界領域が比較的浅部まで分布する可能性が高く、ターゲットが明瞭であることから、「試掘」に向けた研究対象地域として適地の一つに挙げることができると評価した。	○	・掘削で到達可能な範囲として地下5kmを設定。 ・超臨界地熱発電に期待される発電規模感として100MWを設定

**(1.3) 湯沢南部地域における超臨界地熱資源の評価と発電可能量の推定に関する研究開発**

開発項目	最終目標[2020度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①地表調査	・MT法電磁探査により地下深部の情報を取得し、地熱構造モデルの精緻化を実施して、詳細な3次元比抵抗モデルを構築する。	・MT法電磁探査により、超臨界地熱資源の熱源と考えられる深部低比抵抗構造を明らかにした。	○	・マグマの上昇域に関連する地下深部の比抵抗構造の解析とその地質的解釈が最も重要な役割を担う
②地熱構造モデルの構築	・地震・重力・地化学データ等の既存データを用いた解析結果も組み入れ、超臨界地熱資源を含めた地熱構造モデルを構築する。	・超臨界地熱資源領域を含めた地熱構造モデルを提示した。	○	・確度の高い資源量評価を行うためには、超臨界領域を含む地熱構造モデルの構築が必要である。
③資源量評価	・3次元ブロックモデルにより、超臨界地熱資源が賦存する可能性のある地下深部までの自然状態シミュレーションを実施する。 ・推定された超臨界地熱資源に対して生産井を仮定し、坑井特性曲線を求め、生産予測シミュレーションを実施する。	・3次元ブロックモデルにより、超臨界地熱資源が賦存する可能性のある地下深部までの自然状態シミュレーションを実施した。 ・推定された超臨界地熱資源に対して生産井を仮定した坑井特性曲線を求め、生産予測シミュレーションを実施した。	○	・確度の高い資源量評価を行うためには、超臨界領域を含む地熱構造モデルの構築が必要である。
④社会環境情報の収集・整理	・社会環境や環境規制の情報を収集する。	・本地域の社会環境・環境規制区域等の情報を収集し、今後の研究や開発可能性の検討に反映させた。	○	・将来的に100MW規模の超臨界地熱発電が可能であることを示すことを目標とする。
⑥総合評価	・対象地域における超臨界地熱資源の資源量を評価する。 ・地熱構造モデル・資源量評価結果の妥当性の検討と問題点を把握する。	・地熱構造モデル・資源量評価結果の妥当性と問題点を整理した。	○	・将来的に100MW規模の超臨界地熱発電が可能であることを示すことを目標とする。

(2) 調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）等の開発

[研究目標] 調査井に必要な酸性環境かつ高温度に耐えうるケーシング材並びにセメント材を開発する。

表Ⅲ. 1. 3-2 個別テーマの目標と成果(最終目標に対する成果)

※達成度[◎：目標を大幅に上回って達成、○：達成、△：一部達成、×：未達]

(2.1) 調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）等の開発／超臨界地熱発電に必要な坑井及び地上設備仕様の調査・検討				
開発項目	最終目標[2020度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①ケーシング材料開発方針提案	・超臨界地熱環境下で、適用可能で経済性のあるケーシング材の材料開発方針を提案する。	・目標とした材料評価データの収集ができ、調査井・生産井別に開発方針を提案すべく評価ができた。	○	「超臨界地熱発電技術研究開発」 2018年度実施方針に従い典型的な超臨界地熱資源環境を想定
②セメント材料開発方針提案	・超臨界地熱環境下で適用可能で経済性のあるセメント材の材料開発方針を提案する。	・アルミナセメントの試作・評価は実施計に沿って実施でき、アルミナセメントの知見・基礎データを得て、開発方針を提案すべく評価ができた。	○	
③最適な坑井仕上げ仕様検討	・掘削費が40億円規模となる調査井の仕様を策定し提案する。	・現実的かつ最適な調査井仕様を策定し、3500m井で38億円、4000m井で44億円程度となることを示した。	○	
④発電システム検討	・蒸気清浄化により、必要とされる蒸気中のシリカ濃度の基準値を明確化し、これに伴う熱量の範囲の提示及び試掘ステージにおける開発目標を策定する。	・生産される地熱流体中のシリカ濃度を55.2mg/kgと推定し、スクラバ出口での蒸気圧力と温度を試算した。 ・湿式スクラバにより目標を実現できること、推定されるシリカ粒径に対して乾式スクラバは適用できないことを確認した。	○	
⑤発電コスト試算	・想定される超臨界地熱資源の開発に最適な坑井並びに発電システムを提案し、従来開発と同等の発電コスト（9～12円/kWh）となることを確認する。	・過熱蒸気直接利用・100MWe・新設のケースで、発電原価(40年)が10.2～13.2円/kWhが得られた。	○	
(2.2) 調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）等の開発／材料試験に基づく候補材の評価				
開発項目	最終目標[2020度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①ケーシング候補材の評価	・酸性熱水腐食試験および400°Cまで拡張した材料腐食予測式に基づいて、腐食速度3.0mm/年以下となる調査井ケーシング候補材及びコーティング技術を選定する。	・超臨界環境ではTN110SS、亜臨界環境では17Crを調査井ケーシング候補材として選定した。 ・アルミナやジルコニアを用いたセラミックコーティングは高い耐食性を示すことを確認した。	○	・20年以上の使用を想定した生産井では0.3mm/年以下、2年間程度の使用を想定した調査井では3.0mm/年以下に設定。
②セメント候補材の評価	・以下の性能を満足する様に坑井用アルミナセメントシステムを改良する。 ・初期強度:3.5MPa以上@250°C×24h ・長期安定性:10MPa以上@450°C×72h ・耐酸性:3.5MPa以上@pH=2の硫酸・塩酸環境 ・材料コスト:既存地熱井セメントGWCの10倍以内	・以下の性能を達成した。 初期強度:11.3MPa@250°C×24h 長期安定性:11.9MPa@400°C×28日 耐酸性:GWCより良好 材料コスト:600円/kg程度(GWCは100円/kg程度) シッキングタイム:200°C×6h以上	○	・20年以上の使用を想定した生産井では0.3mm/年以下、2年間程度の使用を想定した調査井では3.0mm/年以下に設定した

(3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発

[研究目標] 超臨界地熱資源システムのモデリング技術において、天然貯留層や人工貯留層造成の手法を開発する。

表Ⅲ. 1. 3-5 個別テーマの目標と成果(最終目標に対する成果)

※達成度[◎：目標を大幅に上回って達成、○：達成。△：一部達成、×：未達]

(3.1) 水圧・減圧破碎による人工超臨界地熱貯留層造成に関する研究				
開発項目	最終目標[2019 度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①水圧破碎・減圧破碎メカニズム詳細検討及び人工貯留層造成・維持シミュレーション査	<ul style="list-style-type: none"> <li>水圧破碎現象のメカニズム/寸法効果/高応力下の挙動を明確にし、フィールドスケールのモデル式/パラメータを導出する。</li> <li>減圧破碎現象のメカニズム/特異性の有無/寸法効果を明確にし、フィールドスケールのモデル式/パラメータを導出する。</li> <li>生産可能な浸透率(10-15m<sup>2</sup>オーダー)以上の破碎が可能なことを、室内実験かつ数値シミュレーションにより立証する。</li> <li>超臨界地熱環境下で、坑井周辺の数100m規模の人工貯留層造成手法のシナリオを提案する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水圧破碎室内実験結果をもとにシミュレータへ組み込む破壊条件を導出した。</li> <li>減圧破碎室内実験結果をもとにシミュレータへ組み込むモデル式を導出した。</li> <li>水圧破碎により10<sup>-15</sup>m<sup>2</sup>以上の浸透率を有する亀裂システムの造成が可能であることを示した。</li> <li>超臨界環境での水圧破碎により坑井から500m適度の規模の人工貯留層の造成が可能であることを示した。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>水圧・減圧破碎による貯留層スケールでの破碎効果について適切な評価を行うためには、両破碎現象のメカニズム詳細検討とモデル化が必要である。</li> </ul>
②減圧破碎ツール試作・評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>減圧破碎ツールの装置内圧力が大気圧まで減圧することを確認し、作動状況の評価、減圧破碎シミュレーションへの入力データを提示する。</li> <li>減圧破碎作業の施工手順と作業によるリスクを取りまとめる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑内減圧破碎ツールを試作し、減圧効果を評価するとともに坑内流動シミュレーション等をもとに実坑内での破碎効果を検討した。</li> <li>減圧破碎作業の施工手順と作業によるリスクを取りまとめた。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>減圧破碎ツールの試作を行い、減圧破碎手法を工学的に実現するための課題、リスクを把握する必要がある。</li> </ul>
③破碎事例調査	<ul style="list-style-type: none"> <li>地熱事例10件・油ガス田事例10件以上のプロジェクトを調査し、超臨界地熱開発に関わる重要項目を取りまとめる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>地熱事例10件・油ガス田事例10件以上のプロジェクトを調査し、超臨界地熱開発に関わる重要項目を取りまとめた。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>超臨界地熱システムへの破碎技術適用事例はなく、地熱発電等の事例調査をもとに起こり得る問題点の把握を行う必要がある。</li> </ul>
(3.2) 超臨界地熱貯留層 THMCシミュレータの技術開発				
開発項目	最終目標[2020 度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①超臨界地熱貯留層 THMC シミュレータのコア機能開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>開発したシミュレータを用いて、超臨界地熱環境での超臨界水流動、熱輸送、岩石力学変形、シリカ反応輸送等の基礎的なTHMC連成現象の3次元シミュレーションを可能にする。</li> <li>開発したシミュレーションを用いて、岩石力学挙動やシリカ溶解析出が貯留層の水理特性や抽熱性能に与える影響を定量的に評価する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>超臨界地熱環境で生じる基礎的なTHMC連成現象を考慮可能にするため、有限要素法に基づく2次元、3次元対応の貯留層THMC連成シミュレータを開発した。</li> <li>開発したシミュレータを使用して評価した結果、石英の溶解析出による生産流量の長期的な変動、圧力減衰に伴う貯留層浸透率の低下、超臨界領域での亀裂のすべり発生等が生じる可能性があるとの結果が得られた。</li> </ul>	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>生産活動中の応力場の変化や地化学的非平衡状態の発生が貯留層の抽熱特性に与える影響を検討する必要がある</li> </ul>

② 超臨界水環境での地化学計算法の設計	<ul style="list-style-type: none"> <li>初期条件400℃, 20MPa以上の環境下における流体性状変化, 水-岩石平衡反応を計算可能な地化学計算ツールを試作する。</li> <li>室内実験, 文献調査等に基づき, 5件のベンチマーク問題を策定し, 試作ツールを用いて計算する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>超臨界低密度領域における地化学挙動を計算するために, 地化学計算ソフトSOLVEQ /CHIMのデータセットを拡張し, 実装した。</li> <li>室内の溶解平衡実験と析出実験の結果を元に, また文献をもとにした現実的な深部地熱モデル流体を用いて, 7件のベンチマークテストを実施し, 計算手法の評価を行った。</li> </ul>	○ <ul style="list-style-type: none"> <li>超臨界地熱発電を長期的に継続する上で不可欠な要素技術であるが, 現存の計算ツールでは対応しておらず, データセットを含め, 方法論の確立が必要であると判断。</li> </ul>
③ 超臨界地熱シミュレータ標準ベンチマーク問題の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>文献調査等に基づき, 6件以上のテストケースを策定する。</li> <li>2つ以上の既存シミュレータを用いてテストケースの試解析を実施し, ①で開発するシミュレータと比較するためのデータセットを作成する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>全200件超の文献データベースを作成し, これに基づき3レベル11ケースのテストケースを策定した</li> <li>上記の内, レベル2の2ケースについて, 既存の3つのシミュレータ (TOUGH3, iTOUGH, TOUGHREACT) による試解析を実施し, ベンチマーク問題のデータセットを作成した。</li> </ul>	○ <ul style="list-style-type: none"> <li>超臨界地熱発電を長期的に継続する上で不可欠な要素技術であるが, 現存の計算ツールでは対応しておらず, データセットを含め, 方法論の確立が必要であると判断。</li> </ul>

(4) 調査井掘削に資する革新的技術開発

[研究目標] 超臨界地熱資源からの熱抽出が可能であることを示すととも従来からの地熱発電の発電コストと同等であることを示す。

表Ⅲ. 1. 4 個別テーマの目標と成果(最終目標に対する成果)

※達成度[◎：目標を大幅に上回って達成、○：達成。△：一部達成、×：未達]

(4.1) AIによる超臨界地熱資源評価・掘削技術				
開発項目	最終目標[2020年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①AIによる超臨界地熱資源評価技術	・水の超臨界状態相当の温度実測値が存在するフィールドにおいて、当該実測値を除いたデータを使用して、AIが推定した温度構造と当該実測値の残差が20%以内になる事を示す。	・水の超臨界状態相当の温度実測値が存在するフィールド(葛根田地域)において、当該実測値を除いたデータを使用して、AIが推定した温度構造と当該実測値の残差は、ベイズ推定で13.9%、ニューラルネットワークで14~16%となった。	○	・既存機械学習的手法による推定誤差を改善し、定量的かつ自動的な地下温度構造の推定を実現するため
②AIによる超臨界地熱資源掘削技術	・過去に得られたマッドロギングデータ等を入力して、ビットの摩耗度の予測を行い、現実の計測数値と誤差20%以内の精度で予測を行うことが可能な事を示す。	・掘削ビット37丁を学習データとしてk-近傍法とLSTMオートエンコーダニューラルネットワークによる損傷ビット予測に基づき、波形パターン分類を行い、新たな10丁について損傷予測を行った結果、90%の正答率(誤差10%)を得ることができた。	○	・現場の経験則から20%程度の予測誤差であれば実用に耐えられるため。
(4.2) 二重解放コアを用いた地殻応力測定法の研究開発				
開発項目	最終目標[2020年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①二重コアビットの開発	・超臨界地熱開発の掘削坑井として想定される8-1/2inの口径で二重コアビットを製作し、超臨界地熱環境の岩体中で使用可能な方法を提案する。	・大口径(8-1/2in)の坑井を想定した二重コアビット(実用ツール)を試作し、地表試験で動作を検証した。また、大型の泥水ポンプによる通水試験の結果から、超臨界地熱地層の掘削時に坑底温度を許容範囲に低下させるために必要な通水流量を確保できる見通しを得た。	◎	・二重解放コア変形法の可否を左右する課題が二重コアリングという新たな方式による掘削を行うための二重コアビットで、採取したコアから求めた地殻応力の妥当性を示すことが必要となる。
②測定結果に及ぼす各種因子の影響評価	・二重解放コア変形法によって誤差20%以内の精度で地殻応力を測定できる条件を提示する。また、二重コアビットの仕様に基づき、超臨界地熱環境に作用する地殻応力を測定する方法を明らかにする。	・実験結果および数値シミュレーションによって二重コアリングを再現して得た応力分布の結果から、深度4~5kmと想定される超臨界地熱貯留層の温度と応力環境でも本測定法によって誤差20%以内の精度で地殻応力を測定できることを明らかにした。	◎	・地殻応力は、超臨界地熱開発の方向性を左右する基本データとなる為、測定法の限界を予め把握し、得られた結果の信頼性の程度を示すことが必要である。
(4.3) 革新的超臨界地熱場観測技術の研究開発				
開発項目	最終目標[2020年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①浅部簡易実証試験	・地熱坑井内の比較的浅部に分布型地震計(DAS)を設置し、周辺で起きる地震あるいは人工震源の振動を坑井に沿って計測する。また、坑井内におけるDASのS/Nを定量的に評価し、逆伝播を行い、DAS技術の有効性を確認し、課題を把握する。	・メディポリス地熱フィールド内のIK-4坑井において1540mまでの深度でDAS計測をおこなった。5-10m間隔で計測を行い、長時間観測を行うことによるS/Nの改善を評価した。DAS技術が極めて有効であることを確認した。	◎	・浅部実証試験で得られたDASデータをもってインバージョン解析、イメージングした結果と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て、本技術の可能性を評価する。
②解析・イメージング技術の開発	・全波形インバージョンでは地下100-500mブロック内の位置と形、物性の状態について観測結果とインバージョンを用い推定する。	・全波形インバージョンを実施しモデルの再現性を評価した。その結果、位置、形状、Vpの再現性は良かったが、Vs、密度の再現性はVp程では無かった。これは観測網の形状にも依存する。	◎	・振動の伝播速度、周波数、受信間隔等からの分解能により、精度が制約される。

③耐環境性光ファイバーの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>開発した光ファイバーが超臨界水環境下における要求性能を満たす耐水素性と耐食性を有することを実証し、経済性を評価する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>耐腐食性、水素遮蔽性に優れた素材を用いて熱応力を考慮した積層構造を設計し、その設計指針に従い作製した構造が超臨界環境下において維持することを実証した。また、既存光ファイバーのコストをもとに開発光ファイバーの経済性評価を行った。また、既存光ファイバーの耐食性を評価した結果、Auを被覆した光ファイバーは超臨界環境下において光透過損失が認められなかったことから、既存製品においても適用可能性が示唆された。</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>超臨界環境（温度、圧力）、設置雰囲気能耐えること。</li> </ul>
④深部実証試験	<ul style="list-style-type: none"> <li>使用可能な地熱坑井深度と坑井内の状態、使用可能な光ファイバー等を勘案しながら、地熱坑井内にDASを設置し超臨界水貯留域が存在する深さに可能な限り接近する。そこで、深さ5kmまででかつ坑井周辺3km四方の物性変化、貯留層の存在の有無等を明らかにできる手法を開発する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1,971km深度まで坑井内にDASを設置した。超臨界水域としては浅すぎたが、メディポリス地熱フィールドでは深さ3.6kmに超臨界層の可能性を示唆するゾーンの存在を見つけた。大沼地熱フィールドでは深さ2.8-3.0kmに地震波反射ゾーンを見つけた。これは超臨界水域としては少し浅い。坑井周辺3km、深さ5kmの貯留層検出の可能性はほぼ達成できた。物性の評価も行った。短時間では変化は見られなかった。</li> </ul>	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>実証試験におけるセンサー部の設置深度を深くすることにより、より深い地盤のイメージング精度が向上する。</li> </ul>

## IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

### IV.1 事業全体の実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

本事業における「事業化・実用化」とは、超臨界地熱発電技術のロードマップ（内閣府）にある調査井掘削（フェーズⅢ）が開始されることであり、さらに、当該研究開発に関わる成果（試作器、製品やサービスなど）が調査井掘削・噴気試験に利用されることで、同ロードマップ・フェーズⅢの活動へ貢献することをいう。

#### IV.1.1 実用化・事業化の見通し

##### ①超臨界地熱資源の評価

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では、10万kW以上の発電が可能であることが示された。今後、最有望地点においてより詳細な調査・モデル化を行うとともにパイロット孔、調査井の仕様を策定し、その後、早い段階でパイロットプラントを設置し、実用上の課題を解決を通じて、2040年頃までの商用発電実現を目指す。

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では、10万kW以上の発電が可能であることが示された。今後、詳細なMT法3次元解析や長期的な微小地震観測等により、深部低比抵抗内に超臨界流体の流動がなく、低透水性の高温岩体からなる場合の検討を実施する。

湯沢南部地域における超臨界では、超臨界地熱資源の存在を推定することができた。今後、当地域の超臨界地熱資源の概念モデルを精緻化し、併せて、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、浸透率等の未知なるパラメータに対する感度解析、EGSやバイナリーサイクル発電について検討を行う。

##### ②調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）等の開発

超臨界地熱発電に必要な坑井及び地上設備仕様の調査・検討では、事業化が可能であるとの見通しを持つことができた。2025年度以降に調査井の掘削を想定し、継続的なケーシングおよびセメントの候補材の選定、および超臨界地熱傾斜井に対応した坑井設計・掘削計画策定法の検討等を実施する。

材料試験に基づく候補材の評価では、調査井掘削、および事業化が可能であるとの見通しを持っている。2025年度以降に調査井の掘削を想定し、発アルミナセメントの長期養生試験の再現性や浸透率等のデータ収集、および調査井掘削に向けて、泥水等その他材料の耐高温・酸性性能の評価等を実施する。

##### ③超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発

水圧・減圧破砕による人工超臨界地熱貯留層造成に関する研究では、水圧破砕により人工貯留層が造成可能であることが示された。2020年代半ばに試掘井を掘削し、そこで取得したデータ、実験結果等により超臨界地熱発電の実現可能性を判断する予定である。その後、パイロットプラントを設置し、実用上の課題解決を通じて、2040年頃までの商用発電実現を目指す。

超臨界地熱貯留層THMCシミュレータの技術開発では、THMC現象の基礎的なシミュレーション技術手法及び検証のための標準ベンチマーク問題を開発した。今後、破砕・維持・制御が一体となった超臨界地熱シミュレータを実現開発し、安定かつ持続的な商用発電を実現するため、超臨界・高塩濃度流体を対象にした地化学計算法の検討、シミュレーション技術手法の妥当性評価等を実施する。

##### ④調査井掘削に資する革新的技術開発

AIによる超臨界地熱資源評価・掘削技術では、実測値の20%以内の誤差で水の超臨界相当の温度、および掘削ビットの損傷度を推定可能であるが示された。今後、学習方法の改善、物理モデルの精緻化により推定の高精度化を進める。有望地点におけるパイロット孔掘削における実測データでの実証により、本掘削地点の選定前の事業化を目指す。

二重解放コアを用いた地殻応力測定法の研究開発では、二重解放コア変形法を深度4～5kmと想

定される超臨界地熱貯留層での応力計測に適用できることが示された。今後、2020年代半ばに試掘井を掘削し、そこで取得したデータ、実験結果等により超臨界地熱発電の実現可能性を判断する予定である。そのため、試掘井での適用に間に合うように実用ツールを製作し、坑井を使用したコミッショニングを実施する。

革新的超臨界地熱場観測技術の研究開発では、坑井内に設置したDASを用いた地震波探査が地熱地帯であっても地下構造に有効であることがメディポリス地熱フィールドと大沼地熱フィールドで有効であることを実証できた。

今後、地質と地熱構造の異なった日本各地の地熱フィールドにおいて実証試験をして本方法の有効性、有効な調査法、有効な解析法を確立する予定である。

#### IV.1.2 実用化・事業化に向けた具体的取り組み

2016年「エネルギー・環境イノベーション戦略」(内閣府)は、その後、革新的環境イノベーション戦略(内閣府、2020)、そして、現在、グリーン成長戦略(内閣府、2021)に継承されている。そうした動向を受け、「超臨界地熱発電技術研究開発」事業を継承する事業の準備を実施し、2021年度新規事業「地熱発電導入拡大研究開発」を開始した。

その一つの研究開発項目である「超臨界地熱資源技術開発」では、これまで実施してきた研究課題を継承し、我が国の超臨界地熱資源の賦存が期待される有望域での資源量評価スタディ(精査)を、岩手県、秋田県及び大分県の4地域を選定して実施する。これまでの概査により、1地域あたり100MW規模のポテンシャルが推定された。今後補完調査を含めてデータを追加し、精度の高い評価を実施していく。

併せて、大深度でも精度の高い断裂系探査が期待される光ファイバーによる地震波モニタリング技術開発を実施する。これまでの既存地熱発電所における実証試験により、地熱井により把握されている断裂系を捕捉するとともに、地熱井が掘削されていない深部にも断裂系を示唆する兆候が捉えられており、今後も、多くのフィールドで検証していく必要がある。世界的に地熱系での実施は初めての試みであり、海外へ向けてアピールしていく必要がある。

#### IV.1.3 波及効果

- 深部へのMT法探査(熱源の定量的評価)、並びに、DASによる地震波モニタリング技術(断裂系の把握、貯留層管理など)は、在来型地熱貯留層への探査や評価にも大いに役立つ技術となる。同技術の現場適用が期待される(⇒2030年目標へ貢献)。
- 地殻応力計測やAIによる資源評価技術については、在来型地熱資源開発の分野に波及効果があり、2021年度以降、地熱の関連テーマ「地熱発電導入拡大研究開発/地熱発電所高度利用化技術開発」へ継承していくテーマとなる。
- 超臨界地熱資源は、火山深部に由来するため、国立公園内に多く賦存すると考えられる。今般、環境省においても国立公園内での地熱開発の加速化を公表しており、当該資源利用の導入拡大へ資する技術を提供するものとなる。
- 2021年度以降、JOGMECでは、CO<sub>2</sub>を用いたEGSの技術開発を進めていく予定であり、当該技術開発は高温地熱エリアを対象としている。従って、本テーマで抽出した超臨界地熱資源ポテンシャルマップは当JOGMEC事業へ役立つ資料を提供する。
- 国際共同研究開発事業(NEDO国際部)において、アイスランドとの共同研究が提案・採択された。超臨界地熱技術が進んだチームと連携することは、我が国においてメリットは多い(⇒残念ながら、相手国の都合により、契約までに至らなかった)。

## 添付資料 1

個別テーマについて（全 10 テーマ）

## 個別テーマ (1.1)

### (1) 超臨界地熱資源の評価と調査井仕様の詳細設計

#### (1.1) 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

委託先：国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人北海道大学、  
国立大学法人東北大学、国立大学法人東京工業大学、  
国立大学法人九州大学、地方独立行政法人北海道立総合研究機構、  
地熱エンジニアリング株式会社、西日本技術開発株式会社、  
地熱技術開発株式会社

## II. 研究開発マネジメントについて (事業の計画内容)

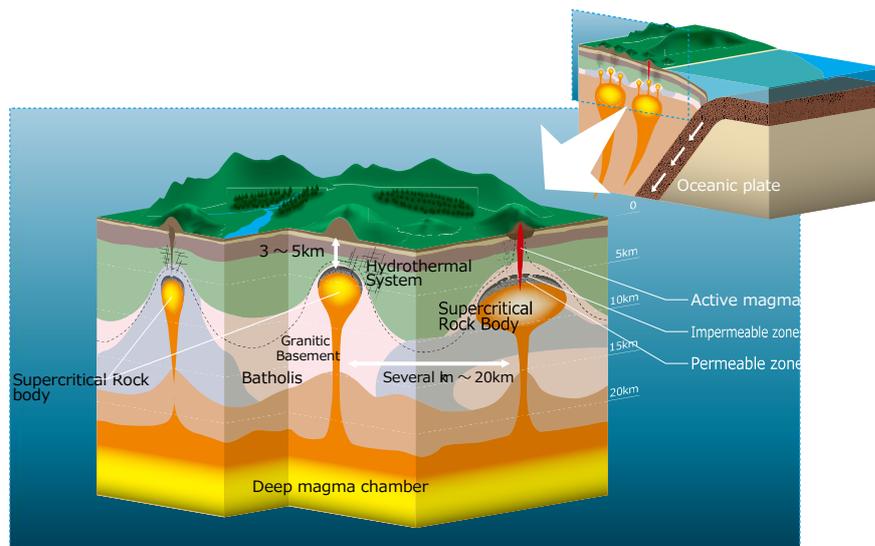
### (1.1.1) 背景と目的

2016年4月に内閣府により策定された「エネルギー・環境イノベーション戦略」において、温室効果ガス排出量を削減するポテンシャルが大きい、有望な革新技術として地下の超高温・超高压の状態（超臨界状態）にある流体を利用する地熱発電（以下、「超臨界地熱発電」という）が挙げられた。

これを受けて、当該研究開発への参画者の多くは、2017年度にNEDOからの委託を受け、「超臨界地熱発電の実現可能性調査」を実施し、超臨界水の状態把握、当該貯留層からの熱抽出の検討、人工貯留層造成の検討、高温環境で使用可能な機材・資材の検討、経済性評価等に関する調査をそれぞれ実施し、多くのブレークスルーが必要であるものの、経済性を有する超臨界地熱発電が実現可能であることを示した。

当該調査結果を受け、本プロジェクトでは、超臨界地熱資源システム（図1）が形成されている可能性が高い国内3地域における超臨界水の状態把握と資源量評価を目的として研究開発を実施した。本研究開発終了時の目標は以下の通りである。

- ・調査対象である全3地域での地表調査結果及びシミュレーション結果を総合評価し、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を具体的に評価する。
- ・本プロジェクトで得られた国内の超臨界地熱資源量と海外の高温地熱開発プロジェクトを実施している地域の資源量の相互比較を行う。



図Ⅱ(1.1)-1 我が国における超臨界地熱システムの概念図

#### (1.1.2) 研究開発の概要

北海道1地点(後志地域(ニセコ地点)), 東北地方1地点(仙岩地域(葛根田地点)), 九州1地点(豊肥地域(九重地点))を対象とし, 各地点について共通の手法により物理探査データ(MT, 重力, 微小地震)および地質学的・地球化学的データの取得, 統合解析, モデル化を行う。その後, 超臨界地熱システム対応3Dシミュレーションコードを用いて, 抽出可能熱量, 抽熱システム等を検討し, 最終的に超臨界地熱開発有望度・社会的条件等を勘案し, 各地点のランキングを行った。各研究開発項目の内容は以下の通り。

##### 研究開発項目①「資源量・発電ポテンシャル評価法の検討」

- \* 研究開発項目②及び③で実施する現地調査における調査方法・資源量評価方法を検討し, 具体的内容を決定する。さらに, 抽熱シミュレーションで使用する抽熱モデルを決定するとともに, 抽熱シミュレーション及び資源量評価の結果の妥当性検証を継続する。
- \* 海外の超高温地熱開発プロジェクトにおける資源量評価手法の調査を行う。海外の超高温地熱開発プロジェクトにおける資源量評価手法を用いて本プロジェクトにおける現地調査地点の資源量評価を行う。

##### 研究開発項目②「東日本における超臨界地熱システム調査」

- \* 後志地域(ニセコ地点), 仙岩地域(葛根田地点)における各種規制・社会的条件, 地理・地形条件, 浅所熱水, 深部熱水, マグマインプット, マントルダイアピル等に関する情報について文献調査等を行い, その結果をGISへ入力する。
- \* 後志地域(ニセコ地点), 仙岩地域(葛根田地点)においてMT法による広域探査を実施し, 既存データと併せて得られた比抵抗分布結果をGISへ入力する。

- \*仙岩地域（葛根田地点）において自然地震を用いた高精度震源分布解析、三次元速度インバージョン処理、および三次元反射法イメージング処理を実施する。
- \*後志地域（ニセコ地点），および仙岩地域（葛根田地点）について，研究開発項目①で策定された評価方法に基づき，各地点の超臨界地熱システムの特徴を明らかにするとともに，超臨界地熱システムのモデルを決定する。

#### 研究開発項目③「九州における超臨界地熱システム調査」

- \*豊肥地域（九重地点）における各種規制・社会的条件，地理・地形条件，浅所熱水，深部熱水，マグマインプット，マントルダイアピル等に関する情報について文献調査等を行い，その結果をGISへ入力する。
- \*豊肥地域（九重地点）においてMT法による広域探査を実施し，既存データと併せて得られた比抵抗分布結果をGISへ入力する。
- \*豊肥地域（九重地点）において自然地震を用いた高精度震源分布解析および三次元速度インバージョン処理を実施する。
- \*豊肥地域（九重地点）について，研究開発項目①で策定された評価方法に基づき，各地点の超臨界地熱システムの特徴を明らかにするとともに，超臨界地熱システムのモデルを決定する。

#### 研究開発項目④「資源量評価」

- \*使用する抽熱シミュレーションソフトの諸元を精査し，必要に応じ改良・変更等を行う。抽熱シミュレータの妥当性を発電所が設置されている地点でのデータを用いて検証開始する。
- \*研究開発項目②，③で決定した地下モデル及び研究開発項目①で策定した抽熱モデルを用いて，後志地域（ニセコ地点），仙岩地域（葛根田地点），豊肥地域（九重地点）の抽熱量を推定する。
- \*海外の高温地熱開発プロジェクトで取得され公開されている地下データを基に，海外高温地熱地域での抽熱量を推定する。

#### 研究開発項目⑤「まとめ」

- \*抽熱シミュレーション結果，地質学的・社会的条件等を勘案し，3か所の調査対象地点の特徴をまとめるとともに，調査井掘削候補地点としてのランキングを行う。今回の調査を通じ不確定性を十分低減できなかった項目について，今後の研究開発方針を検討する。

表Ⅱ(1.1)-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	目標	設定根拠
① 「資源量・発電ポテンシャル評価法の検討」	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 抽熱シミュレーション及び資源量評価の結果の妥当性を検証する。</li> <li>* 海外の超高温地熱開発プロジェクトにおける資源量評価手法を用いて本プロジェクトにおける現地調査地点の資源量評価を行う。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* ①で設置する「資源量評価コアチーム」が第三者的視点でシミュレーション結果を評価することにより、より妥当性の高い結果が得られると判断しているため。</li> <li>* 今後、海外高温地熱開発PJとの連携が想定されるが、そのための基礎データが重要であるため。</li> </ul>
② 「東日本における超臨界地熱システム調査」	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 仙岩地域(葛根田地点)および後志地域(ニセコ地点)について地表調査結果及びシミュレーション結果を総合評価し、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を具体的に評価する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* NEDOが提示した仕様書記載事項</li> </ul>
③ 「九州における超臨界地熱システム調査」	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 豊肥地域(九重地点)について地表調査結果及びシミュレーション結果を総合評価し、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を具体的に評価する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* NEDOが提示した仕様書記載事項</li> </ul>
④ 「資源量評価」	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 調査対象地域(3地点)の抽熱量を推定する。</li> <li>* 海外の高温地熱開発プロジェクトで取得され公開されている地下データを基に、海外高温地熱地域での抽熱量を推定する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* NEDOが提示した仕様書記載の達成目標実現のために不可欠であるため。</li> <li>* 今後、海外高温地熱開発PJとの連携が想定されるが、そのための基礎データが重要であるため。</li> </ul>

- ⑤ 「まとめ」 \*調査対象である全 3 地域での地表調査結果及びシミュレーション結果を総合評価し、地下 5km 以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を具体的に評価する（1 地域あたり 10 万 kW 規模）。
- \*NEDO が提示した仕様書記載事項であるため。
- \*達成目標記載事項が調査井掘削試掘に向けて不可欠であるため。
- \*調査対象である全 3 か所の調査対象地点の特徴をまとめるとともに、調査井掘削候補地点としてのランキングを行う。
- \*今回の調査を通じ不確定性を十分低減できなかった項目について、今後の研究開発方針を提示する。

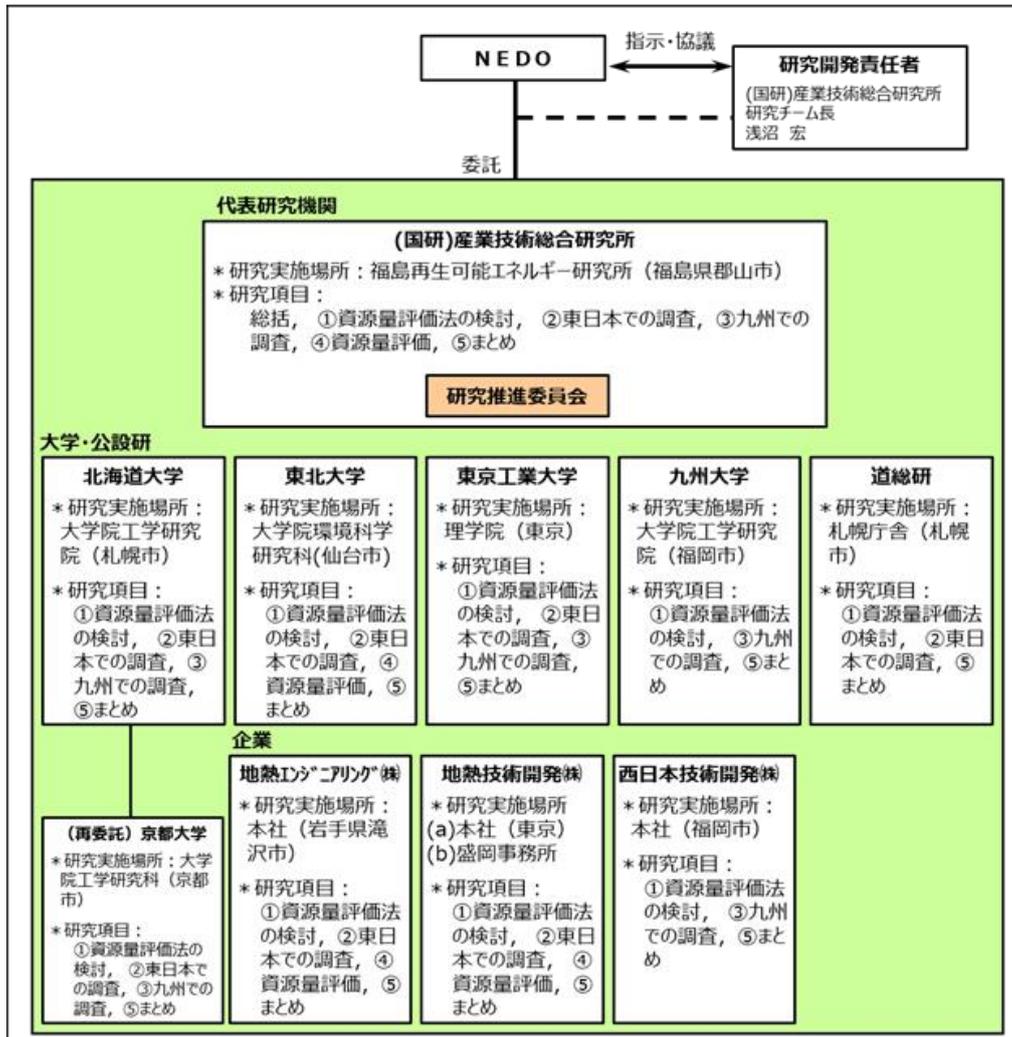
(1.1.3) 事業スケジュール

本事業の研究期間は、2018 年 8 月 3 日より 2021 年 2 月 28 日であり、主な事業スケジュールの概要を図 II (1.1)-2 に示す。

事業項目	2018 年度				2019 年度				2020 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 資源量・発電ポテンシャル評価法の検討												
② 東日本における超臨界地熱システム調査												
③ 九州における超臨界地熱システム調査												
④ 資源量評価												
⑤ まとめ												

図 II (1.1)-2 研究開発のスケジュール

(1.1.4) 研究開発の実施体制



(1.1.5) 事業の管理運営

表 II 1. 1-2 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 研究開発推進委員会 (2021.2 時点)

氏名	役割・所属
安達正敏	委員長・I N P E X
中田節也	委員・防災科学研究所
田口幸洋	委員・福岡大学

### Ⅲ. 研究開発成果について

本事業の主な成果は以下の通り。

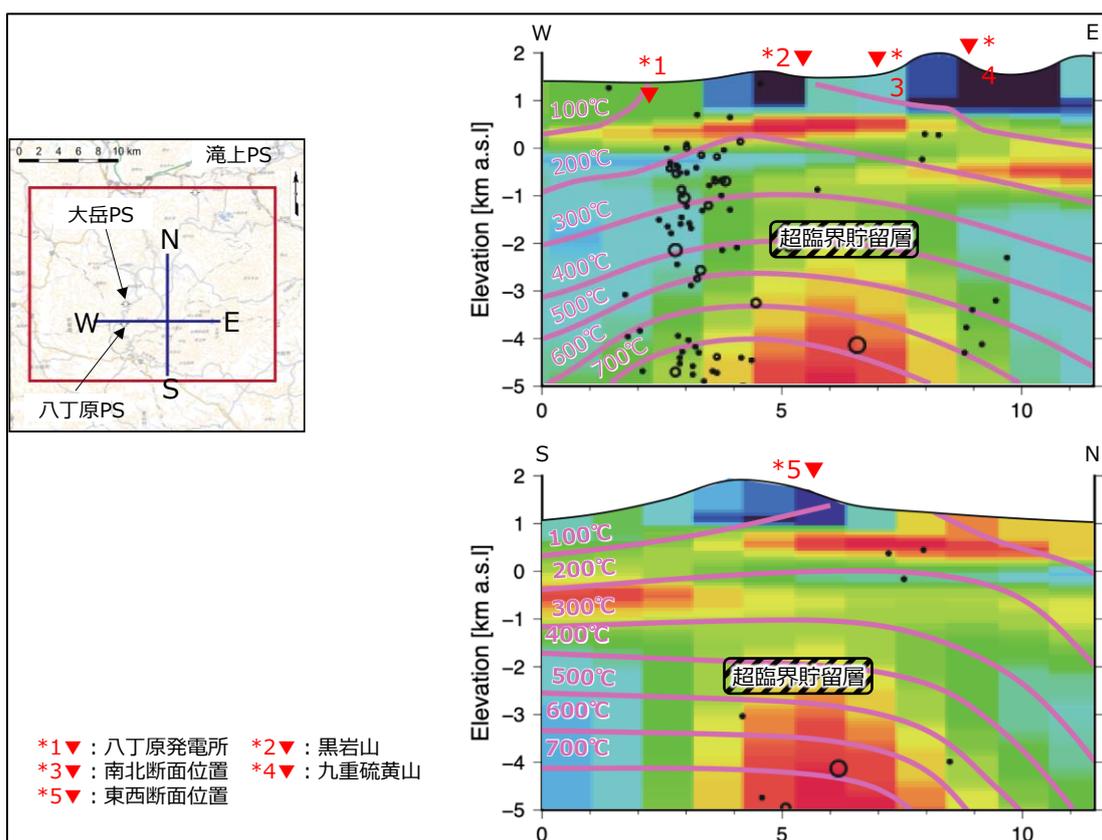
- ①調査対象である全3地域での地表調査結果及びシミュレーション結果を総合評価し、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を具体的に評価した（各地域において100MWeの出力で40年発電可能）。
- ②本プロジェクトで得られた国内の超臨界地熱資源量と海外の高温地熱開発プロジェクトを実施している地域の資源量の相互比較を行った。

[最終目標に対する成果と達成度]

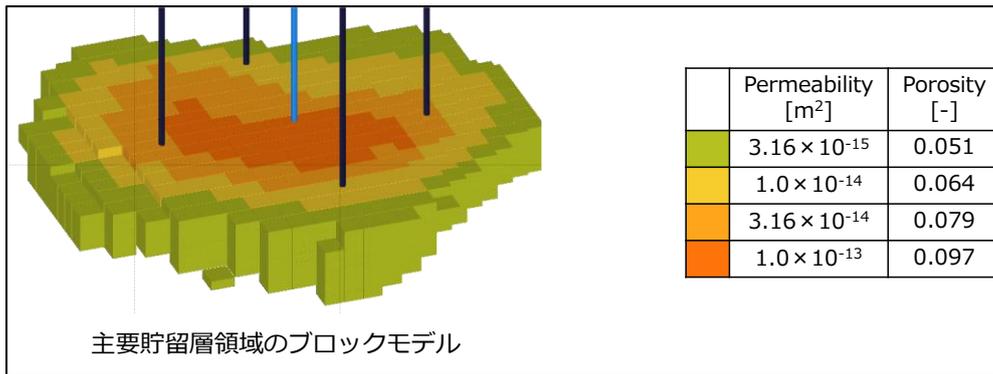
表Ⅲ(1.1)-1 最終目標に対する成果と達成度

研究開発項目	成果	達成度
①「資源量・発電ポテンシャル評価法の検討」	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 複数地点の資源量を比較可能にするため、客観性の高いMT法3次元インバージョン最適化法、坑井温度プロファイル等にもとづく3次元地下温度構造推定法を導出した。</li> <li>* Archie則、RPGZ式を用いて比抵抗値から超臨界地熱貯留層の浸透率、間隙率を推定する手法を導出した。</li> <li>* 抽熱シミュレーション及び資源量評価の結果が妥当であることを示した。</li> <li>* 海外の超高温地熱開発プロジェクトにおけるheat in place法(USGS)等の資源量評価手法を用いて本プロジェクトにおける現地調査地点の資源量評価を行った。</li> </ul>	100%
②「東日本における超臨界地熱システム調査」	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 仙岩地域(葛根田地点)および後志地域(ニセコ地点)について、それぞれ110地点、116地点のMT法データを使用して3次元比抵抗構造解析を実施した。また、坑井プロファイルに基づいて3次元温度構造を推定した。</li> <li>* 両地域について地表調査結果及びシミュレーション結果を総合評価し、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を具体的に評価した。</li> </ul>	100%
③「九州における超臨界地熱システム調査」	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 豊肥地域(九重地点)について94地点のMT法データを使用して3次元比抵抗構造解析を実施した。また、坑井プロファイルに基づいて3次元温度構造を推定した。</li> <li>* 同地域について地表調査結果及びシミュレーション結果を総合評価し、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を具体的に評価した。</li> </ul>	100%

④「資源量評価」	<ul style="list-style-type: none"> <li>*複数の抽熱・発電方式想定し、調査対象地域（3地点）の抽熱量を推定した。</li> <li>*米国ガイザースでの地熱開発プロジェクトで取得され公開されている地下データを基に、同地熱地域での抽熱量を推定した。</li> </ul>	100%
⑤「まとめ」	<ul style="list-style-type: none"> <li>*調査対象である全3地域での地表調査結果及びシミュレーション結果を総合評価し、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を評価した（各地域100MWe以上）。</li> <li>*調査対象である全3か所の調査対象地点の特徴をまとめるとともに、調査井掘削候補地点としてのランキングを行った。</li> <li>*今回の調査を通じ不確定性を十分低減できなかった項目について、今後の研究開発方針を提示した。</li> </ul>	100%



図III (1.1)-1：豊肥地域において八丁原地熱発電所から九重硫黄山にかけての領域の海拔-2000m 程度の位置に超臨界地熱貯留層として有望な構造が存在していることを確認した。同様の結果が他の2地域についても得られた。



図Ⅲ(1.1)-2：各地域において、物理探査データ、坑井データ等から超臨界貯留層内の温度分布、浸透率分布等を推定し、抽熱シミュレーションを行ったところ 100MW の発電を 30 年以上実現可能であることが明らかとなった（図は豊肥地域の例）。

#### IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

本事業を通じて、調査対象 3 地域において、超臨界地熱システムが存在する地点および、その深度が示されるとともに、100MW 以上の発電が可能であることが示された。今後、最有望地点においてより詳細な調査・モデル化を行うとともにパイロット孔、調査井の仕様を策定し、超臨界地熱資源の存在実証に結び付ける。その後の早い段階でパイロットプラントを設置し、実用上の課題抽出、およびその解決等を通じて、2040 年頃までの商用発電実現を目指したい。

## 個別テーマ (1.2)

### (1) 超臨界地熱資源の評価と調査井仕様の詳細設計

#### (1.2) 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

委託先：三菱マテリアルテクノ株式会社

## II. 研究開発マネジメントについて (事業の計画内容)

### (1.2.1) 背景と目的

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位となる地熱資源を有する我が国では、ベース電源として活用可能な地熱発電が大きな注目を集めている。

2016年4月に内閣府が策定した「エネルギー・環境イノベーション戦略」において、温室効果ガス排出量を削減するポテンシャルが大きい有望な革新技术として、地下の超高温・超高压の状態（超臨界状態）にある水を利用する地熱発電（超臨界地熱発電）が挙げられたことを受け、2017年度にNEDOにより「超臨界地熱発電の実現可能性調査」が実施され、超臨界水の状態把握、当該貯留層からの熱抽出の検討、人工貯留層造成の検討、高温環境で使用可能な機材・資材の検討、経済性評価等に関する調査が行われた。

当該調査結果を受け、2018年度に開始された研究開発プロジェクト「超臨界地熱発電技術研究開発」では、同調査で指摘された課題についての継続的な調査、および先行しているアイスランドの事例をさらに調査するとともに、我が国で超臨界地熱資源存在の可能性が高いと想定される複数地域で資源量の評価や複数モデルの提示等のほか、調査井に必要な技術課題の整理と、具体的な調査井に必要な仕様（安全・環境対応等を含む）の検討が実施されている。

本研究開発は、地下温度300℃以上が確認されている地域において、地表調査により超臨界領域の地熱資源のモデルの精緻化を図り、精度の高い資源量評価手法の開発を目的とする。

### (1.2.2) 研究開発の概要

本研究開発では、岩手県八幡平市に位置する八幡平地域をモデルフィールドとする。

八幡平地域は、地熱開発促進調査「安比地域」の坑井調査により300℃を超える高温が確認されている地域である。本地域において実施された2018年度の「超臨界地熱資源先導調査」では、超臨界領域と推定される深度において、熱源に関連すると考えられる低比抵抗帯が捕捉され、超臨界領域の地熱構造モデルが推定されている。本研究開発では、本地域において地表調査としてMT法電磁探査と微小地震観測を補足的に実施し、

「超臨界地熱資源先導調査」により構築された超臨界領域の地熱構造モデルの精緻化を図り、数値シミュレーションにより超臨界地熱資源の資源量評価を行う。また、当該地域の社会環境情報を収集し、環境規制区域等について整理する。これらの研究開発項目と開発目標およびその根拠を表Ⅱ（1.2）-1に示す。最終目標は次のように設定された。

**【最終目標】**

地表調査（地質、地化学、物理探査等）を行うことで、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量を具体的に評価する（1地域あたり100MW規模）。

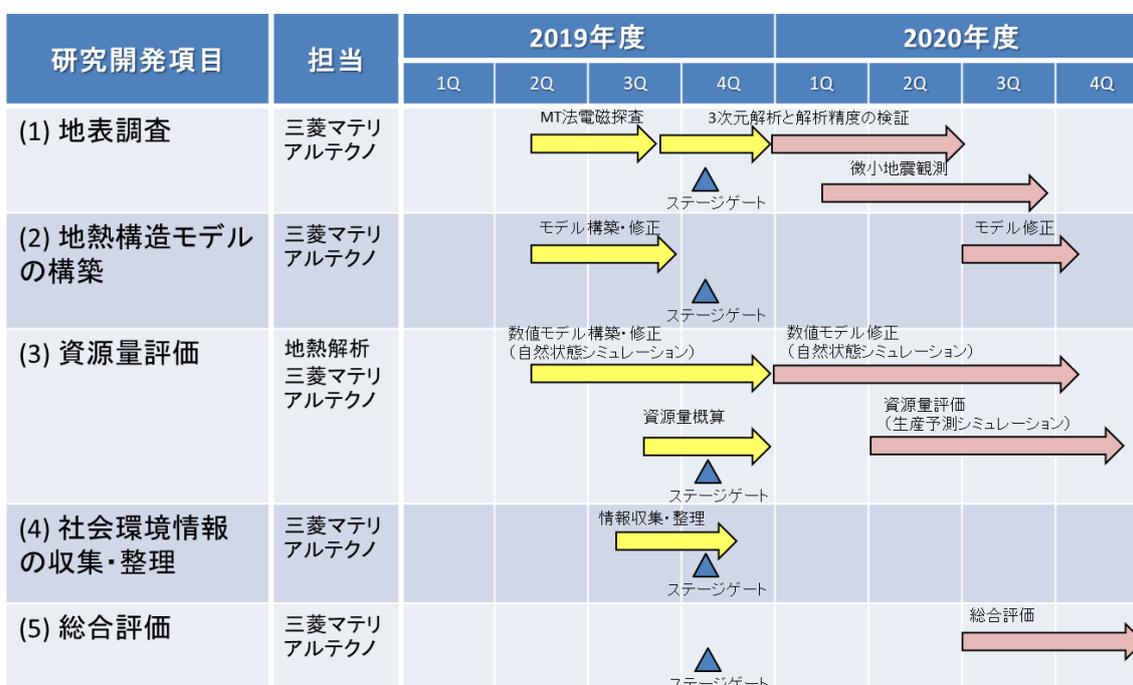
表Ⅱ（1.2）-1 研究開発目標と根拠

開発項目	開発目標	設定根拠
① 地表調査	MT法電磁探査、微小地震探査により、地熱構造モデルの精緻化に寄与する情報を取得する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 地熱地帯で検出される深部低比抵抗は、熱源に関連すると解釈されることから、MT法電磁探査の補足調査により、その構造を把握する。</li> <li>▶ 微小地震観測により、脆性-延性境界を推定することで、低比抵抗の要因の推定を試みる。</li> </ul>
②地熱構造モデルの構築	超臨界領域を含む地熱構造モデルを構築し、その精緻化を図る。	▶ 地熱貯留層シミュレーションに使用する数値モデルのベースとなる。地表調査・貯留層シミュレーションの結果をフィードバックした再検討を行うことで、最終的な地熱構造モデルを提示する。
③資源量評価	既往研究における安比地域の自然状態を再現可能な数値モデルを作成し、生産予測シミュレーションによる資源量評価を行う。	▶ 貯留層シミュレーションにより資源量評価を行う。先行研究であるNEDO(2004)をベースとして、その数値モデルを南方及び深部に拡大する。数値モデルの妥当性は、NEDO(2004)と同等の自然状態の再現ができるかをもって判断する。
④社会環境情報の収集・整理	八幡平地域に関する社会環境情報を収集・整理する。	▶ 開発可能な資源量および研究開発対象地域としての評価を行うため、社会環境に関する情報を収集し、環境規制区域について整理する。
⑤総合評価	①～④の結果をまとめ、総合評価として提示する。	▶ モデルフィールドを通じた一連の調査・評価によって、超臨界地熱資源の資源量評価が可能であることを提示する。
最終目標	地表調査（地質、地化学、物	▶ 掘削で到達可能な範囲として地下5kmを

	理探査等)を行うことで、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量を具体的に評価する(1地域あたり100MW規模)。	設定。 ▶ 超臨界地熱発電に期待される発電規模感として100MWを設定。
--	--	---

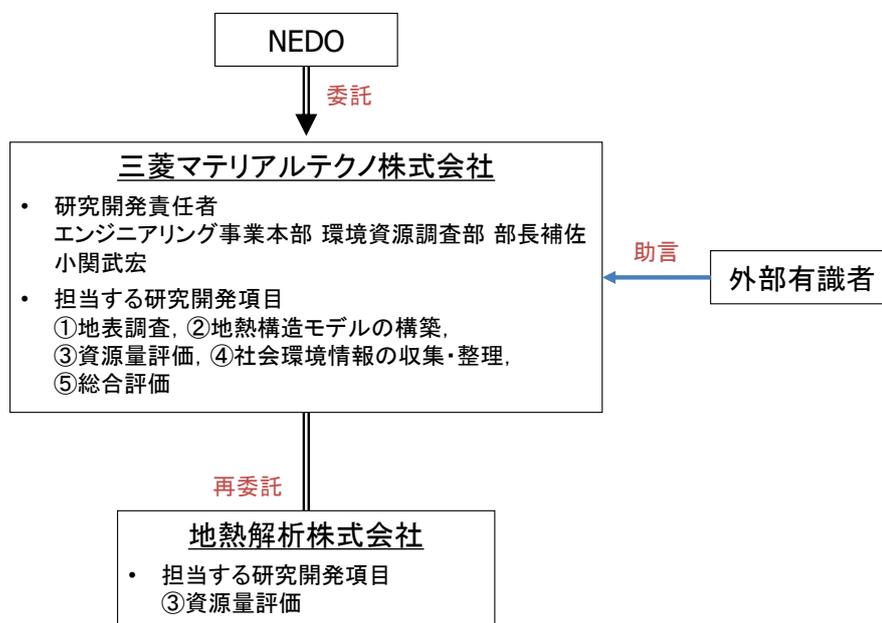
(1.2.3) 研究開発スケジュール

本事業の研究期間は、2019年6月5日より2021年2月28日である。実績スケジュールを図Ⅱ(1.2)-2に示す。



図Ⅱ(1.2)-2 研究開発スケジュール

(1.2.4) 研究開発の実施体制



図Ⅱ(1.2)-3 研究開発の実施体制

(1.2.5) 研究開発の管理運営

表Ⅱ1.2-2 に示す有識者より指導・助言等を頂いた。

表Ⅱ1.2-2 本研究開発における外部有識者一覧

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
村岡 洋文	弘前大学 特別顧問	全般
内田 利弘	産業技術総合研究所	物理探査
藤光 康宏	九州大学 教授	資源量評価

### Ⅲ. 研究開発成果について

本研究開発では、「八幡平地域」（岩手県八幡平市）をモデルフィールドとして、地表調査を行うことで、地下 5km 以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量を具体的に評価することを最終目標として研究開発を行った。各研究開発項目に対する成果は下記のとおり。

#### ① 地表調査

MT 法電磁探査では、本地域の地下、標高-10km までを対象に測定を行い、データの 3 次元解析の結果、安比岳南方に熱源に関連するとみられる深部低比抵抗帯を検出した（図Ⅲ(1.2)-1）。微小地震観測では、深部低比抵抗帯内は震源分布が少なく、超臨界領域に推定される延性的な環境を反映している可能性が確認された。

#### ② 地熱構造モデルの構築

深部低比抵抗帯と地熱構造の関係を考察し、超臨界領域を含む地熱構造モデルを提示した。深部の温度分布の推定は、既存検層データの外挿推定により行い、この推定温度分布を基に容積法により超臨界地熱資源量を試算した（170MW）。

#### ③ 資源量評価

地熱構造モデルを模した数値モデル上で、想定される地熱流体の流動・加熱機構が再現された。なお、本研究開発では、超臨界領域に超臨界流体の流動が存在し、超臨界領域の上面に石英充填不透水層と呼ばれる不透水構造が分布するという説を採用している。生産予測シミュレーションの結果、出力 100MW を超える発電の可能性を提示した（検討したケースで 110MW）。（図Ⅲ(1.2)-2）

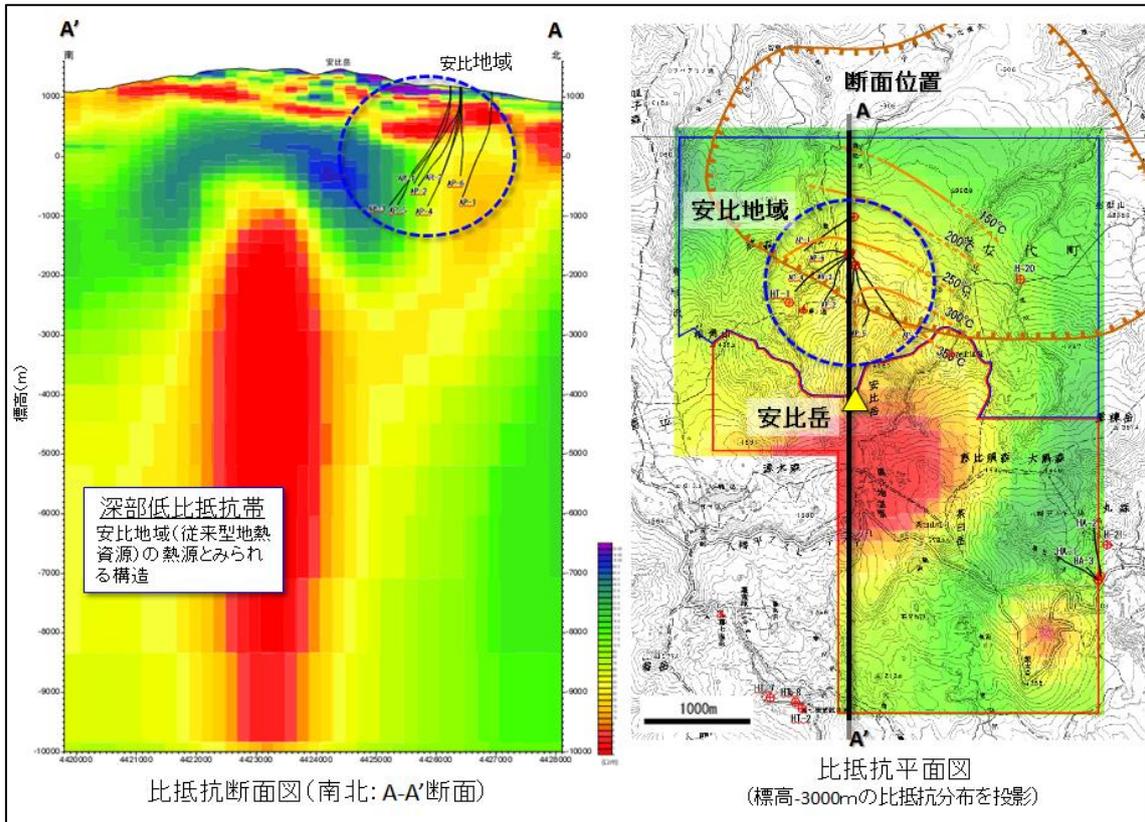
#### ④ 社会環境情報の収集・整理

本地域の社会環境情報、環境規制区域等の情報を収集・整理し、資源量評価、今後の研究対象地域としての検討に反映した。

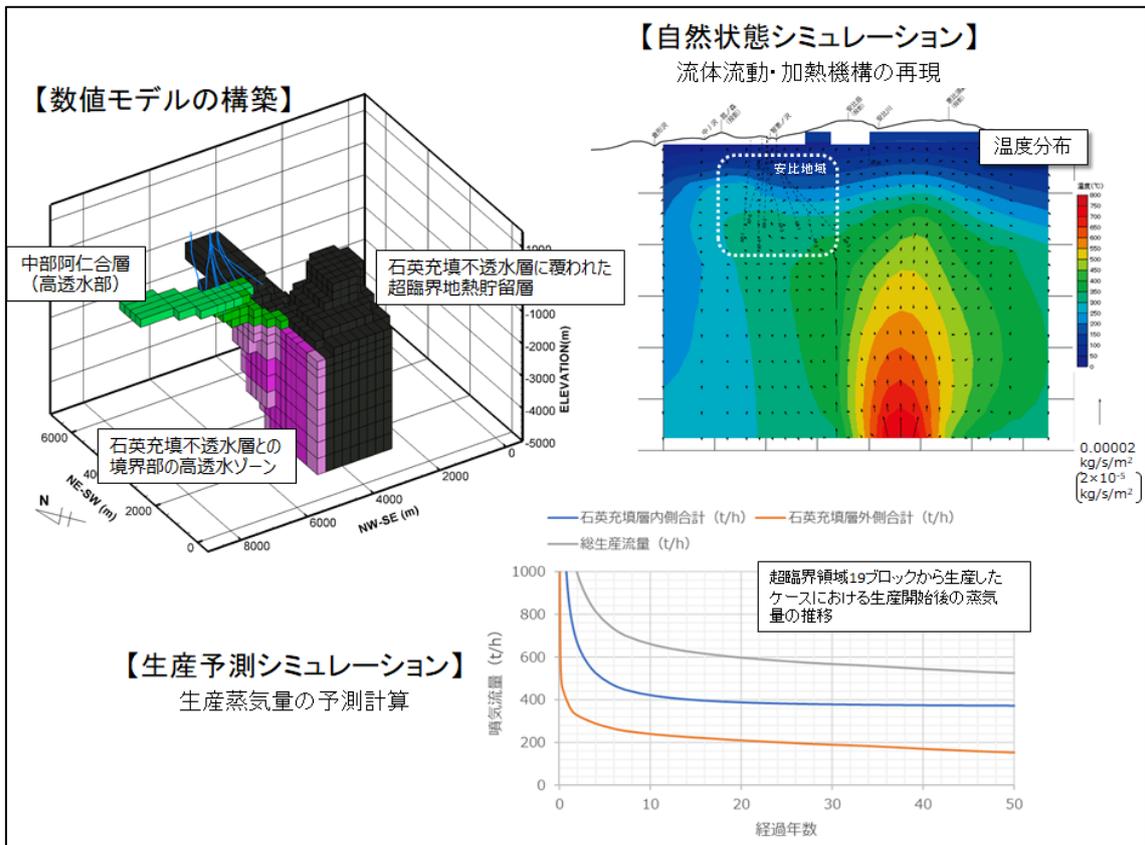
#### ⑤ 総合評価

②③の結果を基に、最終的な地熱構造モデル（図Ⅲ(1.2)-3）・資源量評価結果を整理した（表Ⅲ(1.2)-1）。本地域は、超臨界領域が比較的浅部まで分布する可能性が高く、ターゲットが明瞭であることから、「試掘」に向けた研究対象地域として適地の一つに挙げることができる。

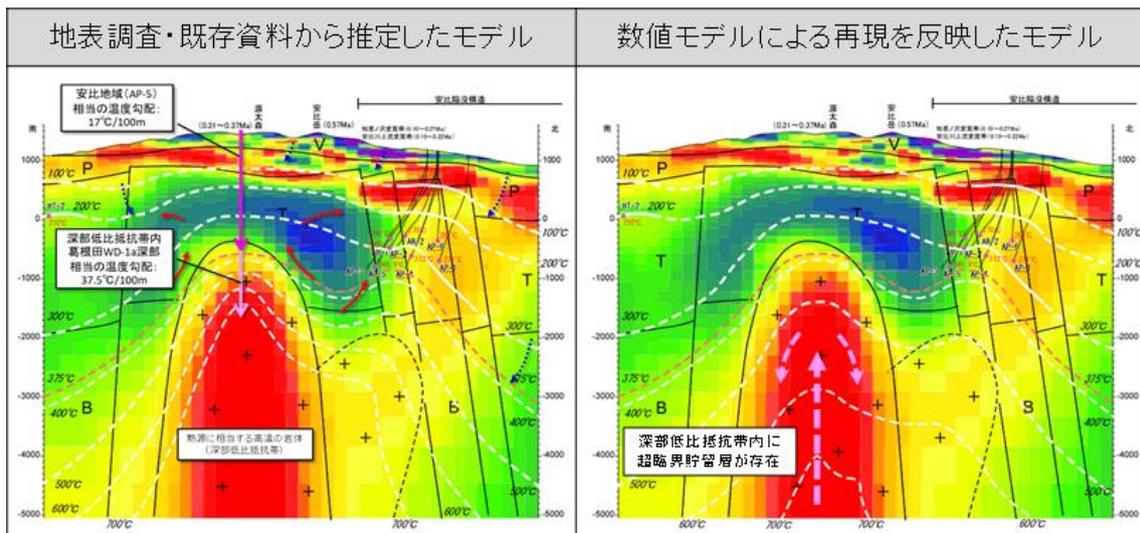
これらの成果を通じて、最終目標である本地域の資源量評価を達成したと考える（表Ⅲ(1.2)-2）。研究発表・講演、特許等の状況は表Ⅲ(1.2)-3 のとおりである。



図Ⅲ(1.2)-1 MT法電磁探査によって検出された深部低比抵抗帯と地熱構造モデル



図Ⅲ(1.2)-2 本研究開発にて実施した資源量評価の概要図



図Ⅲ(1.2)-3 八幡平地域における超臨界領域を含む地熱構造モデル

表Ⅲ(1.2)-1 資源量評価結果

手法名	超臨界地熱資源量	備考
モンテカルロ 容積法	170 MW (40~300MW)	<ul style="list-style-type: none"> <li>標高-3000mまでの推定温度375℃以上の領域（国立公園特別保護地域の地下を除く）を対象とした場合</li> </ul>
数値モデルによる 生産予測	110 MW (生産開始10年後)	<ul style="list-style-type: none"> <li>深部低比抵抗帯内に超臨界貯留層が存在する場合</li> <li>現実的な生産ゾーン（掘削を考慮し超臨界貯留層の縁辺部から生産、海拔-1500m以浅）を想定</li> <li>より高温の深部（標高-2,500~-3,000m）の全ブロックから生産したケースでは139MW</li> </ul>

表Ⅲ(1.2)-2 最終目標に対する成果と達成度

事業項目	開発目標	成果	達成度
①地表調査	MT法電磁探査、微小地震探査により、地熱構造モデルの精緻化に寄与する情報を取得する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ MT法電磁探査:安比岳南方に熱源に関連するとみられる深部低比抵抗帯を検出した。</li> <li>➤ 微小地震観測:深部低比抵抗帯内は震源分布が少なく、超臨界領域に推定される延性的な環境を反映している可能性が確認された。</li> </ul>	○
②地熱構造モデルの構築	超臨界領域を含む地熱構造モデルを構築し、その精緻化を図る。	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 深部低比抵抗帯と地熱構造の関係を考察し、超臨界領域を含む地熱構造モデルを提示した。推定温度分布を基に、容積法により超臨界地熱資源量を試算した(170MW)。</li> </ul>	○
③資源量評価	既往研究における安比地域の自然状態を再現可能な数値モデルを作成し、生産予測シミュレーションによる資源量評価を行う。	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 地熱構造モデルを模した数値モデル上で、想定される地熱流体の流動・加熱機構が再現された。</li> <li>➤ 生産予測シミュレーションの結果、出力100MWを超える発電の可能性を提示した(検討したケースで110MW)。</li> </ul>	○
④社会環境情報の収集・整理	開発可能な資源量および研究開発対象地域としての評価を行うための資料とする。	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 本地域の社会環境情報、環境規制区域等の情報を収集・整理し、資源量評価、今後の研究対象地域としての検討に反映した。</li> </ul>	○

⑤総合評価	①～④の結果をまとめ、総合評価として提示する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ ②③の結果を基に、最終的な地熱構造モデル・資源量評価結果を整理した。</li> <li>➤ 本地域は、超臨界領域が比較的浅部まで分布する可能性が高く、ターゲットが明瞭であることから、「試掘」に向けた研究対象地域として適地の一つに挙げることができる。</li> </ul>	○
最終目標	地表調査を行うことで、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量を具体的に評価する（1地域あたり100MW規模）。	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 各項目を通じて達成。</li> </ul>	○

表Ⅲ(1.2)-3 研究発表・講演、特許等の状況

【累計】

項目	2019FY	2020FY	合計
特許	0	0	0
論文	0	0	0
学会発表（口頭・ポスター）	0	1	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

【2020年度の実績】（学会発表1件）

No.	発表者	所属	タイトル	会議名	発表日
1	岩崎隆一	三菱マテリアルテクノ	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	日本地熱学会令和2年学術講演会 オーガナイズドセッション	20.11.11

## IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

### (1) 実用化の見通し

本研究開発における超臨界地熱資源量評価についての一連の評価手法は、既存調査データ（坑井調査による温度情報等）がある程度取得されている地域であれば適用可能であり、超臨界地熱資源の概査段階における資源量評価に寄与することができる。

### (2) 実用化に向けた課題

- 具体的な掘削ターゲットの検討など、精査段階への適用に向けた調査手法の高精度化が必要である。検討項目として現時点では次のものが挙げられる。
  - MT法3次元解析：詳細な感度解析（深部低比抵抗の上面深度等）
  - 微小地震観測：長期観測による延性領域の特定，震源位置精度の向上
  - 資源量評価：深部低比抵抗内に超臨界流体の流動がなく、低透水性の高温岩体からなる場合の検討。
- 現時点では、国内外ともに超臨界領域に到達した事例が少なく、資源量評価において仮定・推定した項目の検証が進んでいない状況であるため、今後得られた知見を取り入れ、評価手法を修正していく必要がある。

### (3) 実用化に向けた取組み

- 研究開発の継続
- 最新事例・情報の収集
- 従来型地熱資源の資源量評価への応用  
（熱源領域までを考慮した調査・評価）

## 個別テーマ (1.3)

### (1) 超臨界地熱資源の評価と調査井仕様の詳細設計

#### (1.3) 湯沢南部地域における超臨界地熱資源の評価と発電可能量の推定に関する研究開発

委託先：日鉄鉱コンサルタント株式会社

## II. 研究開発マネジメントについて (事業の計画内容)

### (1.3.1) 背景と目的

2016年4月に策定された「エネルギー・環境イノベーション戦略」において、温室効果ガス排出量を削減するポテンシャルが大きい有望な革新技术として、地下の超高温・超高压の状態（超臨界状態）にある水を利用する地熱発電（以下、超臨界地熱発電という）が挙げられた。これを受けてNEDOは、2017年度に「超臨界地熱発電の実現可能性調査」を実施し、超臨界水の状態把握、当該貯留層からの熱抽出の検討、人工貯留層造成の検討、高温環境で使用可能な機材・資材の検討、経済性評価等に関する調査をそれぞれ実施し、さらに2018年度からは、我が国で超臨界地熱資源存在の可能性が高いと想定される複数地域で資源量の評価や複数モデルの提示等のほか、調査井に必要な技術課題の整理と、具体的な調査井に必要な仕様（安全・環境対応等を含む）の検討等を実施している。

本研究開発は「超臨界地熱発電技術研究開発」の一環として、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に、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を行うことにあり、本事業では、比較的浅部に超臨界地熱資源が賦存する可能性が高い「湯沢南部地域」をモデルフィールドとして詳細検討を実施した。対象とした地域は、地熱開発促進調査や企業による地熱開発事業によって1,000～2,000mクラスの比較的浅い坑井調査で300℃を超える実測温度が確認されており、また前年度に実施された「超臨界地熱資源先導調査―山葵沢地域」によって、基盤中に熱源に関連すると考えられる低比抵抗構造が捕捉されている。

### (1.3.2) 研究開発の概要

秋田県「山葵沢地域」先導調査(2019)において海拔5km以浅で374℃以上の超臨界温度領域が推定された山葵沢地熱発電所～川原毛地獄～上の岱地熱発電所を含む地区に、隣接する促進調査等で熱源の存在が推定されている山伏岳～高松岳を合わせた「湯沢南部地域」を研究開発の対象地域とした。

「湯沢南部地域」において、先導調査を補完するMT法電磁探査を実施し、統合したデータにより3次元比抵抗モデルを改良するとともに、取得可能な既存の物理探査

データ・地質地化学データを統合して、超臨界地熱資源域までを含めた地熱構造モデルの構築を行った。次に、地熱構造モデルを基にして、超臨界地熱システム対応シミュレータを用いて3次元貯留層シミュレーションを実施し、超臨界資源賦存域を推定した。推定された超臨界資源域に対して生産井を仮定し、坑内流動シミュレータを用いて生産予測シミュレーションを行い、資源量及び坑井の噴出能力等を評価した。

今後の調査可能性の評価のため、地下情報だけでなく環境規制を含む社会環境情報についても収集・整理を行った。

- ① 地表調査（MT法電磁探査によるデータ取得及び解析）
- ② 超臨界地熱構造モデルの構築
- ③ 資源量評価（超臨界資源賦存域推定及び資源量の評価）
- ④ 社会環境情報の収集・整理
- ⑤ 総合評価

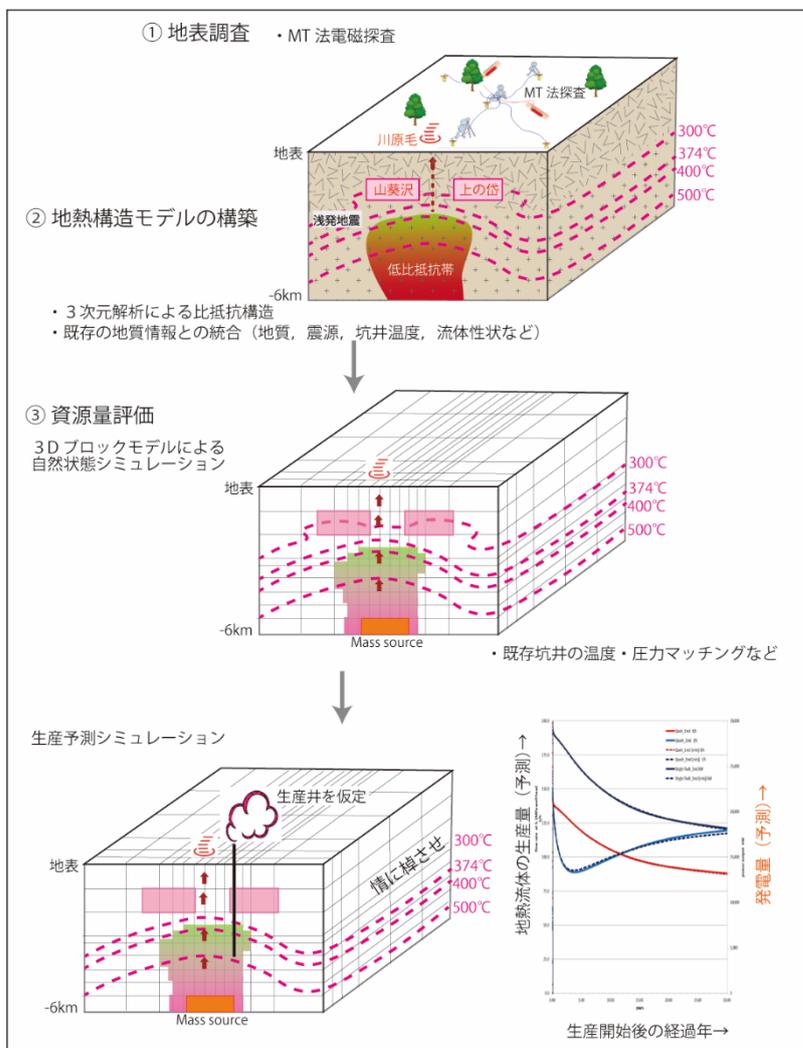


図 II (1.3)-1 研究開発の概要

表Ⅱ(1.3)-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	開発目標	目標レベル設定の根拠
①地表調査	<ul style="list-style-type: none"> <li>・MT法電磁探査により地下深部の情報を取得し、地熱構造モデルの精緻化を実施。</li> <li>・詳細な3次元比抵抗モデルを構築。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・超臨界地熱資源の評価には、マグマの上昇域に関連する地下深部の比抵抗構造の解析とその地質的解釈が最も重要な役割を担う。</li> </ul>
②地熱構造モデルの構築	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地質情報・地震・重力・地化学データ等の既存データを用いた解析結果も組み入れ、超臨界地熱資源を含めた地熱構造モデルを構築。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・確度の高い資源量評価を行うためには、超臨界領域を含む地熱構造モデルの構築が必要である。</li> </ul>
③資源量評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地熱構造モデルを反映させた3次元ブロックモデルにより、超臨界地熱資源が賦存する可能性のある地表下6kmまでの自然状態シミュレーションを実施。</li> <li>・推定された超臨界地熱資源に対して生産井を仮定し、坑井特性曲線を求め、生産予測シミュレーションを実施。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・数値モデルにより、想定される超臨界地熱資源量とその発電能力を評価する。</li> </ul>
④社会環境情報の収集・整理	<ul style="list-style-type: none"> <li>・社会環境や環境規制の情報を収集。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象地域の今後の調査研究や開発可能性について検討を行う。</li> </ul>
⑤総合評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・対象地域における超臨界地熱資源の資源量の評価。</li> <li>・地熱構造モデル及び資源量評価結果の妥当性の検討と問題点の把握。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・将来的に100MW規模の超臨界地熱発電が可能であることを示すことを目標とする。</li> </ul>

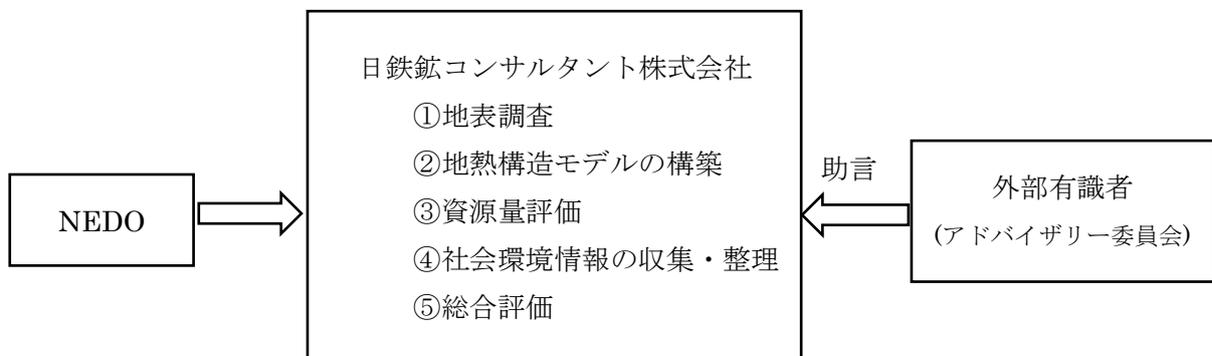
(1.3.3) 事業スケジュール

本事業の研究期間は、令和2年6月12日より令和3年2月28日であり、主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ(1.3)-2に示す。

事業項目	2020年度									
	6月	7月	8月	9月	10月	1.3月	12月	1月	2月	
① 現地調査（データ処理／解析含む）	■									
② 地熱構造モデルの構築						■				
③ 資源量評価	■									
④ 社会環境情報の収集・整理								■		
⑤ 総合評価								■		

図Ⅱ(1.3)-2 研究開発のスケジュール

(1.3.4) 研究開発の実施体制



図Ⅱ(1.3)-3 研究開発の実施体制

(1.3.5) 事業の管理運営

表Ⅱ(1.3)-4 湯沢南部地域 技術アドバイザリー委員会

氏名 (敬称略)	所属・役職	指導・助言等の内容
石戸 経士	産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門	資源量評価シミュレーション
内田 利弘	産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門	比抵抗モデル解析
中西 繁隆	電源開発株式会社 火力建設部 地熱室	地熱構造モデル及び資源量評価

### Ⅲ. 研究開発成果について

本研究開発では「超臨界地熱発電技術研究開発」の一環として、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に、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」について詳細検討を実施した。

- ① 地表調査では、MT法電磁探査を実施して既存測点データと統合して、比抵抗3次元解析を実施した。その結果、湯沢南部地域の地熱資源の熱源と考えられる基盤岩中の深部低比抵抗構造が明らかになった。
- ② 地熱構造モデルの構築では、MT法による比抵抗構造に加えて、既存の地質情報・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た。
- ③ 資源量評価においては、地熱構造モデルに基づいて、20km×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山葵沢地区の坑井実測温度などを再現した結果、本研究地域に超臨界地熱資源が分布することが推定された。推定された超臨界地熱資源域に、環境規制等を考慮に入れて生産井を掘削すると仮定した場合の生産予測を試みた。
- ④ 社会環境情報の収集・整理を行い、今後の研究や開発可能性の検討に反映させた。
- ⑤ 総合評価としては、自然状態シミュレーションによって山葵沢地区の坑井の実測温度を概略的に再現することができたことから、本研究で提示した地熱構造モデルはおおむね妥当であったと判断される。数値モデル改良の必要性を含め、今後の超臨界における貯留層シミュレーションにおける課題が明らかになった。

表Ⅲ(1.3)-1 特許、論文、外部発表等

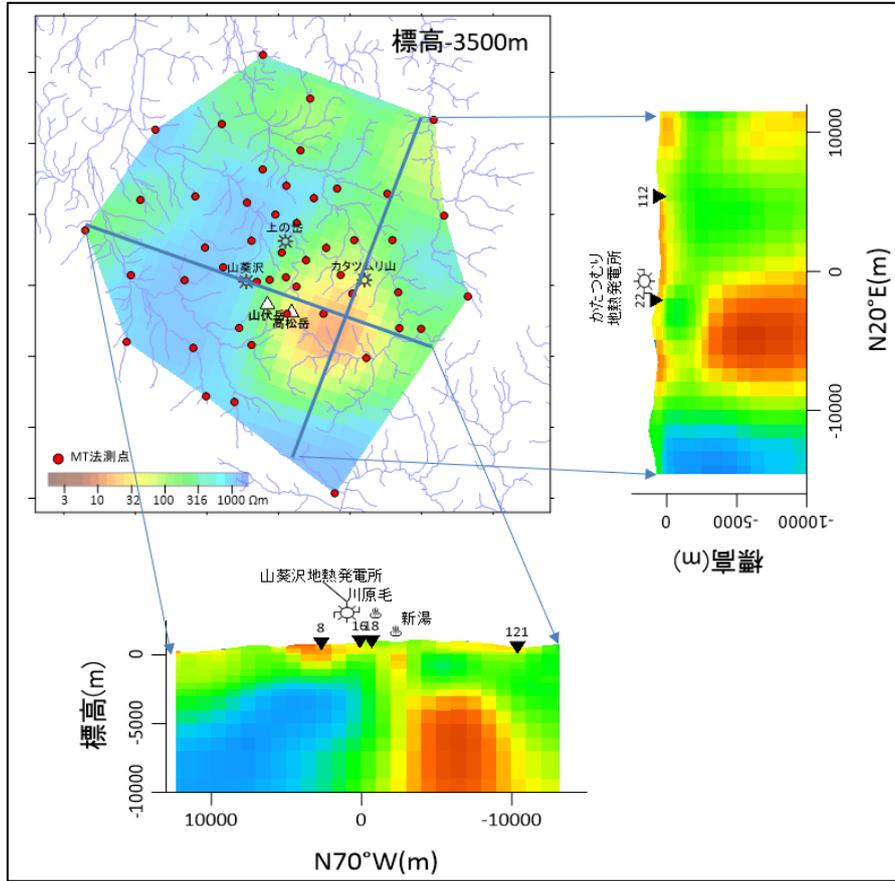
区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発 表・講演	新聞・雑誌 等への掲載	その他
2020 FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

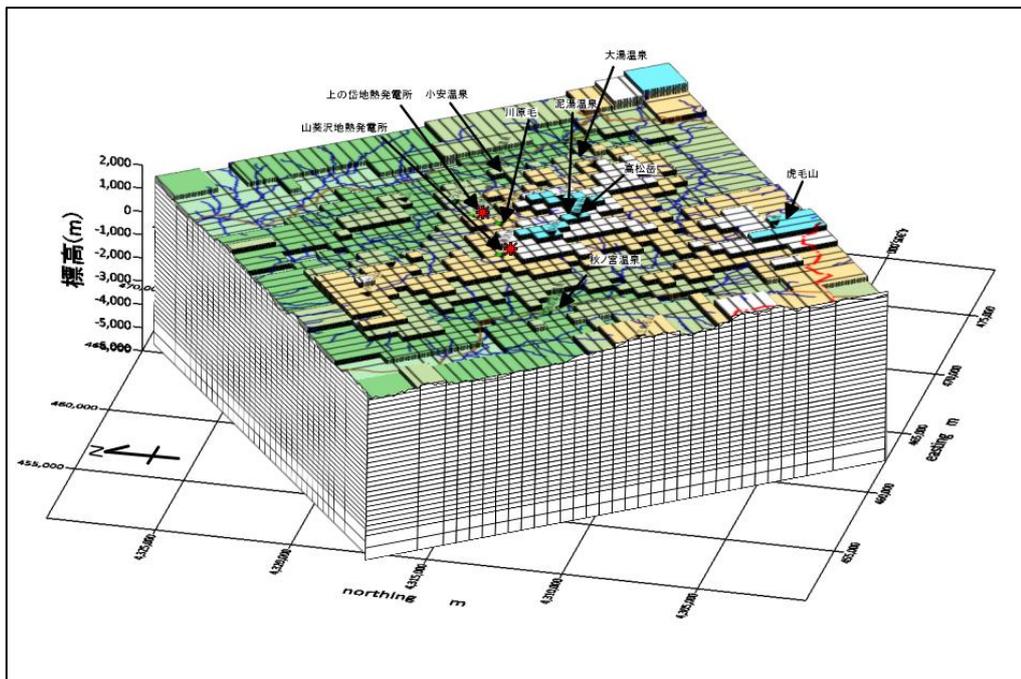
開発項目	開発目標	成果	達成
①地表調査	MT 法電磁探査により地下深部の情報を取得し、地熱構造モデルの精緻化を実施。	超臨界地熱資源の熱源と考えられる深部低比抵抗構造を比抵抗3次元解析により明らかにした。さらに精度を上げるためには、測点を追加する必要がある。	○
②地熱構造モデルの構築	既存の地震・重力・地化学データ等の既存データを用いた解析結果を組み入れ、超臨界地熱資源を含めた地熱構造モデルを構築。	超臨界地熱資源領域を含めた地熱構造モデルを提示した。	○
③資源量評価	超臨界地熱資源が賦存する可能性のある地表下6kmまでの3次元ブロックによる自然状態シミュレーションを実施。 推定された超臨界地熱資源に対して生産井を仮定して坑井特性曲線を求め、生産予測シミュレーションを実施。	坑井実測温度などを概ね再現し、超臨界地熱資源が分布することが推定された。 超臨界地熱資源域に生産井を掘削すると仮定した場合の生産予測を試みた。	○ ○
④社会環境情報の収集・整理	社会環境や環境規制の情報を収集。	社会環境及び環境規制区域等の情報を収集し、今後の調査研究や開発可能性の検討に反映させた。	○
⑤総合評価	地熱構造モデル及び資源量評価結果の妥当性と問題点の把握。 100MW規模の超臨界地熱発電が可能であることを示すこと。	地熱構造モデル及び資源量評価結果の妥当性が評価できた。超臨界域の貯留層シミュレーションにおける課題が明らかになった。	○

[最終目標に対する成果と達成度]

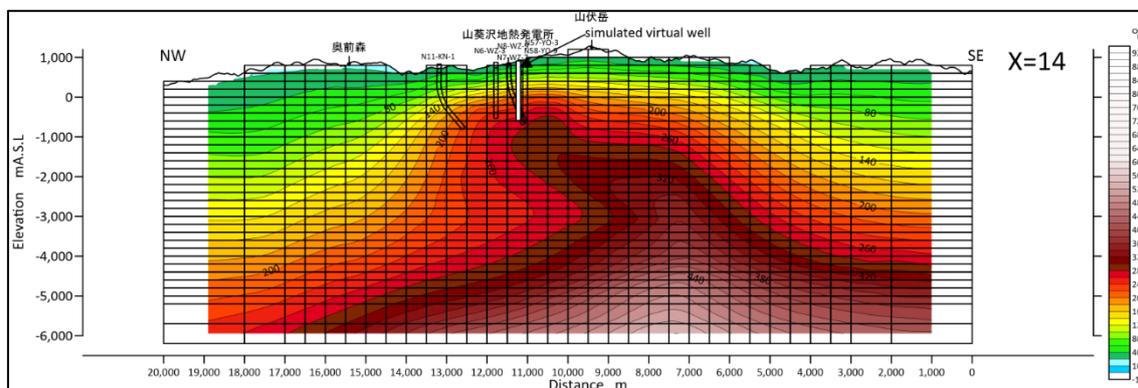
表Ⅲ(1.3)-2 最終目標に対する成果と達成度



図Ⅲ(1.3)-1 「湯沢南部地域」の比抵抗構造



図Ⅲ(1.3)-2 自然状態シミュレーションの数値モデル



(山葵沢地熱発電所を通る断面)

図Ⅲ(1.3)-3 自然状態シミュレーションによる推定温度構造

#### IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

地表調査から資源量評価までの自然状態シミュレーションの結果、山葵沢地区の坑井の実測温度を概略再現し、超臨界地熱資源の存在を推定することができた。従って、本地域は、超臨界地熱資源を対象とした調査井の試掘に向けた研究調査対象のひとつとして有望と判断できる。

事業化に向けた取組として、超臨界地熱資源に関する詳細な地下構造を把握することが、調査井掘削及び試験の計画立案及び確実性の高い資源量評価に寄与する。今後、当地域の超臨界地熱資源の概念モデルを精緻化し、より信頼できるものにし、超臨界試掘ターゲットを明確にするためには以下の作業が求められる。

- ・ 地形的制約（急峻な地形）から測点を設けられなかった範囲に深部低比抵抗帯の分布が推定されており、超臨界地熱資源に関係する深部低比抵抗帯の位置をより確かなものにするため、測点を追加して再解析を行う。
- ・ 自然状態シミュレーションにおいて、数値モデルの改良を行って、より信頼できる超臨界地熱資源の概念モデルを構築する。
- ・ 安定した目標出力（100MW）のために、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、EGS やバイナリーサイクル発電について検討を行う。
- ・ 改良したシミュレーション結果に基づき、社会的制約の少ない試錐基地からのパイロット井のターゲットを選定するとともに、超臨界試掘井を掘削するために必要な試験項目を検討する。

## 個別テーマ (2.1)

### (2) 調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）等の開発

#### (2.1) 超臨界地熱発電に必要な坑井及び地上設備仕様の調査・検討

委託先：国立大学法人秋田大学、エヌケーケーシームレス鋼管株式会社、  
地熱エンジニアリング株式会社、富士電機株式会社

## II. 研究開発マネジメントについて（事業の計画内容）

### (2.1.1) 背景と目的

2016年4月に策定された「エネルギー・環境イノベーション戦略」において、温室効果ガス排出量を削減するポテンシャルが大きい有望な革新技術として地下の超高温・超高压の状態（超臨界状態）にある水を利用する地熱発電（超臨界地熱発電）が挙げられた。これを受けて国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）では、2017年度に「超臨界地熱発電の実現可能性調査」を実施し、超臨界水の状態把握、当該貯留層からの熱抽出の検討、人工貯留層造成の検討、高温環境で使用可能な機材・資材の検討、経済性評価等に関する調査をそれぞれ実施した。

当該調査結果を受けて、「超臨界地熱発電技術研究開発」の2018年度実施方針には、調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）等の開発として、(1) 酸性環境かつ高温（400～500℃）に耐えうるケーシング材ならびにセメント材の開発方針の検討、(2) 機器・材料の開発として坑井および発電システムについての検討と経済性の調査、とくに坑井に関しては生産井仕様と調査井仕様それぞれの検討、発電システムについては技術課題となる蒸気清浄化対策や腐食対策について最適なシステムの検討、を実施することが示された。

本研究開発は、超臨界地熱発電用坑井に要求されるケーシング材およびセメント材の開発方針、ならびに超臨界地熱開発に最適な坑井仕様および発電システムを提案するとともに、以上の提案に基づく調査井掘削費および超臨界地熱発電コストの試算を行い、超臨界地熱発電研究開発の実現可能性を示すことを目的とする。

### (2.1.2) 研究開発の概要

上記目的を達成するために、以下の5つの研究開発項目を設定した。

#### 研究開発項目①「ケーシング材料開発方針の提案」

超臨界地熱井の掘削中および生産中に想定される内外圧や熱応力によるケーシングの変形・破壊挙動の予測からケーシング材料に要求される仕様を整理し、ケーシ

ング管に適用可能な構造用・非構造用材料を探索する。ケーシング管体用材料としての適合性能やコストの検討以外に、ケーシング材の内面コーティングによる耐腐食性能向上技術等についても検討する。以上の検討結果に基づき、ケーシング材開発方針を検討する。(エヌケーケーシームレス鋼管株式会社)

#### 研究開発項目②「セメント材料開発方針の提案」

超臨界地熱掘削海外事例を精査し、セメンチング作業中およびセメント硬化後の地下温度・圧力環境の再検討を行う。また、アルミナセメントおよび他の高温用セメント材の特性を再評価し、アルミナセメントの優位性を評価する。以上の検討結果に基づき、セメント材開発方針を検討する。(国立大学法人秋田大学)

#### 研究開発項目③「最適な坑井仕上げ仕様の検討」

超臨界地熱掘削海外事例を精査し、高温地熱流体の化学特性を評価する。また、坑内対流シミュレーションにより材料への影響について評価し、調査井及び生産井の仕様を検討する。以上の実施内容を踏まえて、調査井及び生産井のコスト試算を行う。(地熱エンジニアリング株式会社)

#### 研究開発項目④「発電システムの検討」

発電システムにおいて、蒸気清浄化装置や腐食対策等を検討し、過熱蒸気直接利用（フラッシュ）方式と過熱蒸気熱交換（水バイナリー）方式を再評価する。(富士電機株式会社)

#### 研究開発項目⑤「発電コスト試算」

研究開発項目③及び④で再検討された発電システムのコスト試算を実施し、超臨界地熱発電のスケールメリットと必要設備増設の関係、既開発地域周辺での開発の優位性などを考慮した採算性の検討を行う。(地熱エンジニアリング株式会社)

本研究開発の最終目標を表Ⅱ(2.1)-1のように設定した。

表Ⅱ(2.1)-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	開発目標	設定根拠
(1) ケーシング材料開発方針提案	超臨界地熱環境下（500℃、pH=3 前後）で適用可能で経済性のあるケーシング材の材料開発方針を提案	「超臨界地熱発電技術研究開発」2018 年度実施方針に従い典型的な超臨界地熱資源環境を想定
(2) セメント材料開発方針提案	超臨界地熱環境下（500℃、pH=3 前後）で適用可能で経済性のあるセメント材の材料開発方針を提案	
(3) 最適な坑井仕上げ仕様検討	掘削費が 40 億円規模となる調査井の仕様を策定し提案	

(4) 発電システム検討	蒸気清浄化により、必要とされる蒸気中のシリカ濃度の基準値を明確化し、これに伴う熱量の範囲の提示及び試掘ステージにおける開発目標を策定	
(5) 発電コスト試算	想定される超臨界地熱資源の開発に最適な坑井並びに発電システムを提案し、従来開発と同等の発電コスト（9～12円/kWh）となることを確認	「コスト等検証委員会」の試算による従来地熱発電コストを目標

### (2.1.3) 事業スケジュール

本事業の研究期間は、2018年8月3日より2020年2月28日であり、主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ(2.1)-1に示す。

事業項目	2018年度				2019年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
① ケーシング材料開発方針の提案		→						
② セメント材料開発方針の提案		→						
③ 最適な坑井仕上げ仕様の検討		→						
④ 発電システムの検討		→						
⑤ 発電コスト試算					→			
まとめ							→	

図Ⅱ(2.1)-1 研究開発のスケジュール

### (2.1.4) 研究開発の実施体制

研究開発の実施体制は図Ⅱ(2.1)-2のとおりである。

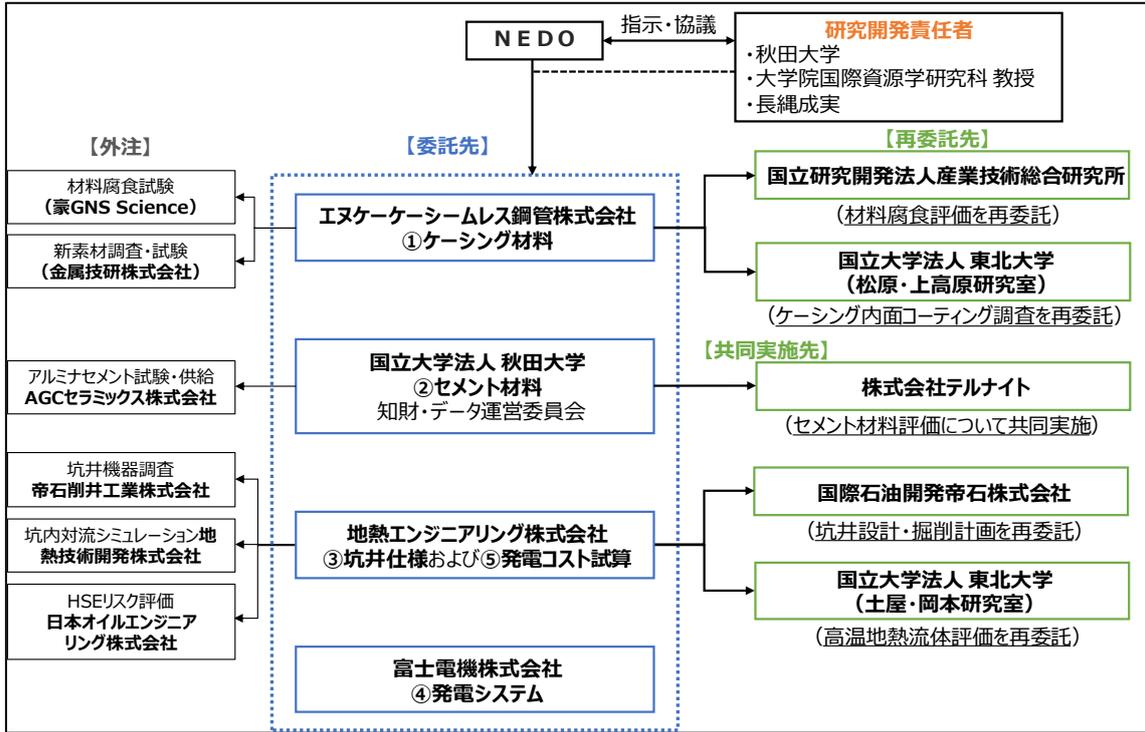


図 II (2.1)-2 研究開発の実施体制

(2.1.5) 事業の管理運営

表 II 1. 2-2に示す有識者より指導・助言等を頂いた。

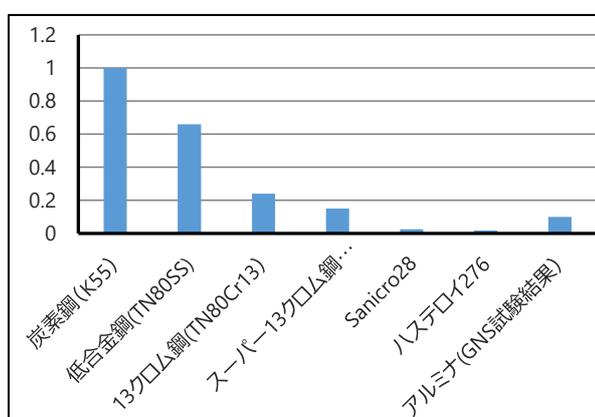
表 II (2.1)-2 外部からの有識者

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
澤田 郁郎	海洋開発研究機構地球深部探査センター運用部 部長	坑井計画に関する助言等
遠藤 聡	ハリバートン・オーバーシーズ・リミテッド	セメンティングに関する助言等
門傳 孝	シュルンベルジェ (株)	坑井計画に関する助言等
池田 正市	日本メタンハイドレート調査 (株)	坑井計画に関する助言等
Toshifumi Sugama	Brookhaven National Lab (アメリカ)	セメント材料に関する助言等
Tatiana Pyatina	Brookhaven National Lab (アメリカ)	セメント材料に関する助言等
小林 照明	(株) ベッツ	坑井計画に関する助言等
武村 貢	エスケイエンジニアリング (株) 代表取締役社長	坑井計画に関する助言等
中森 義仁	長	坑口装置・バルブに関する助言等
佐倉 弘持	株式会社ティクス IK	等
	エスケイ Seamless Steel Pipe (株) 研究開発部 技術顧問	ケーシング材料に関する助言等

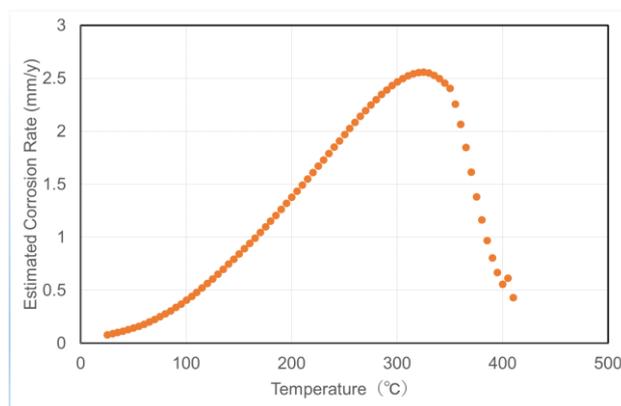
### Ⅲ. 研究開発成果について

#### 研究開発項目①「ケーシング材料開発方針の提案」

ケーシング材料の調査井への適用性については、調査井のように短期間試験の場合、高温での応力腐食割れや孔食より全面腐食で律速される炭素鋼の TN 110SS あるいは13Cr 鋼が強度面からも候補材として適当と判断できた（図Ⅲ(2.1)-1）。腐食速度式の高精度化においては、火山ガスの  $H_2S$ 、 $CO_2$  ガス分圧の異なる地熱環境下では pH および腐食速度に違いが生じ、必ずしも超臨界状態でない特定の条件で腐食が厳しくなることを明らかにした（図Ⅲ(2.1)-2）。



図Ⅲ(2.1)-1 主要材料の腐食速度相対値（炭素鋼を1とする）



図Ⅲ(2.1)-2 30 MPaでの低合金鋼の腐食速度（縦軸）の温度（横軸）依存性の例

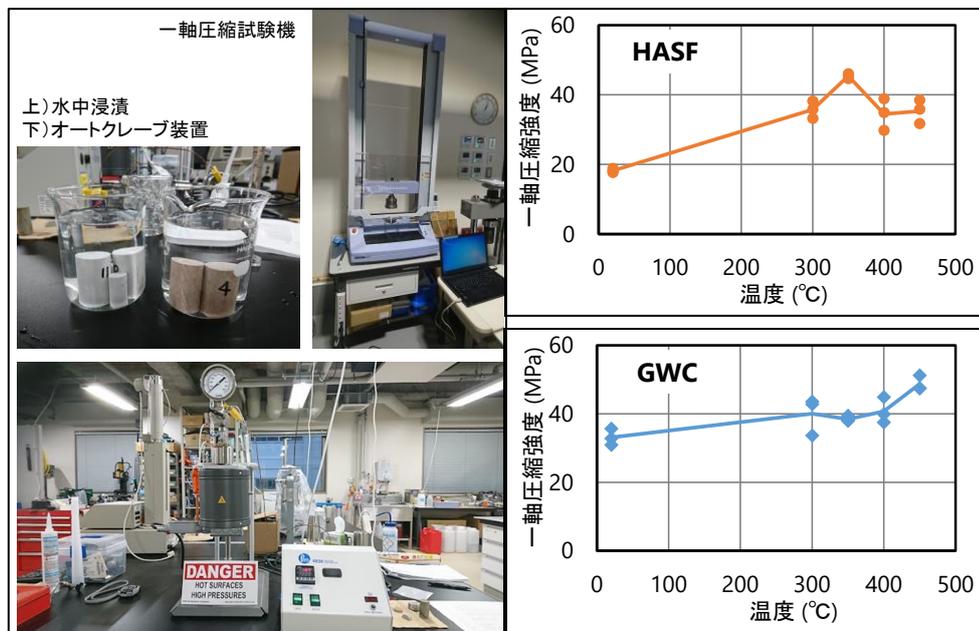
セラミックス内面コーティング技術については、7種類のコーティング材に対して炭素鋼との密着性試験と超臨界水環境下での腐食試験を行った結果（図Ⅲ(2.1)-3）、アルミナ+Ni-Cr ボンドコートおよびジルコニア+Ni-Cr ボンドコートが良好な耐食性を示すことを確認した。

試料	アルミナ+ Ni-Crボンド コート	ジルコニア+ Ni-Crボンド コート	クロミア-シリ カ-アルミナ コート	クロミア-シリ カ-アルミナ +Ni-Crボ ンドコート	DLC	窒化チタン	炭化チタン	炭素鋼
浸漬前								
浸漬後								
外観の 変化	変化なし	変化なし	緑色に 変色	緑色に 変色	剥離した	白い剥げ が生じた	白い剥げ が生じた	黒色に 変色
重量変化	+1.0mg	+0.6mg	-9.1mg	-10.5mg	-7.8mg	-0.2mg	-0.4mg	+0.5mg

図Ⅲ (2. 1)-3 超臨界水浸漬実験前後の外観と重量の変化

研究開発項目②「セメント材料開発方針の提案」

新規開発の坑井用アルミナセメント試作品に対して、スラリーのシックニングタイム（流動性を失うまでの時間）および硬化セメントの耐熱性や耐酸性といった長期安定性について評価した結果（図Ⅲ (2. 1)-4 および表Ⅲ (2. 1)-1）、シックニングタイムが100℃以上の温度でも調整可能であること、超臨界環境下での一軸圧縮強度の低下を起さない安定性が維持できること、および従来のポルトランド系セメントの10倍以内の価格（セメント材料費のみ）となることが確認できた。



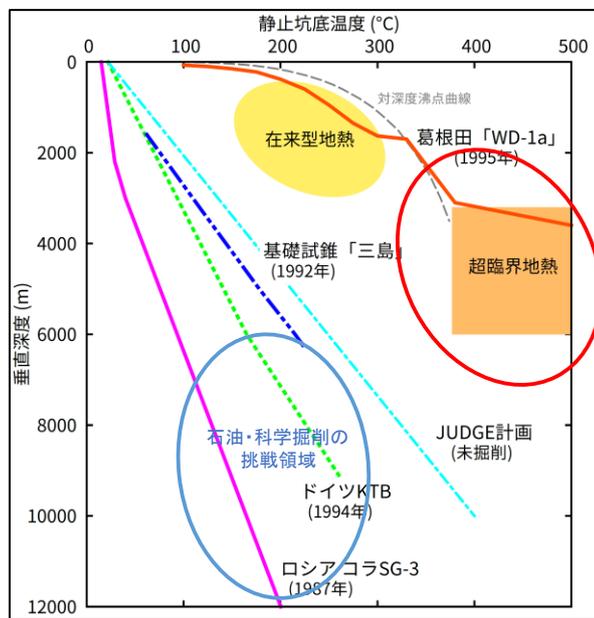
図Ⅲ (2. 1)-4 試作セメントHASFおよび既存地熱井セメントGWCの高温養生試験

表Ⅲ(2.1)-1 試作セメントHASFおよび既存地熱井セメントGWCの耐酸性試験

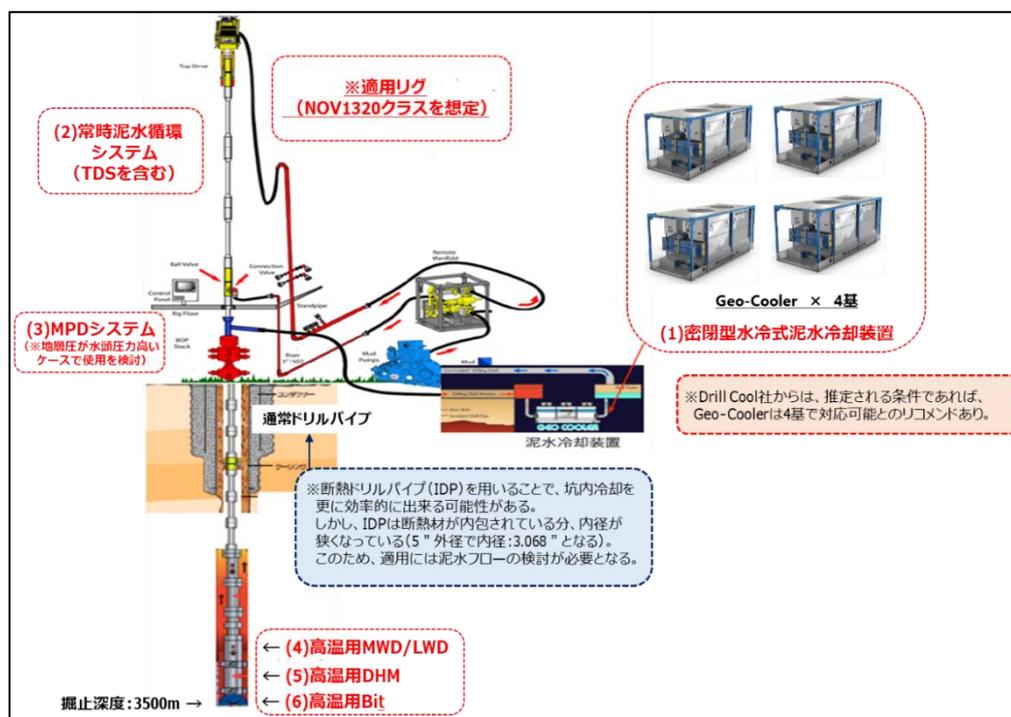
酸の種類	塩酸				硫酸			
	0.5		3		0.5		3	
pH	0.5		3		0.5		3	
サンプル	GWC	HASF	GWC	HASF	GWC	HASF	GWC	HASF
1日後	微亀裂有	外観は変化なし	微亀裂有	外観は変化なし	表面付着層あり	外観は変化なし	外観は変化なし	外観は変化なし
5日後	微亀裂有	外観は変化なし	微亀裂有	外観は変化なし	剥離・崩壊	表面剥離	外観は変化なし	外観は変化なし

研究開発項目③「最適な坑井仕上げ仕様の検討」

超臨界地熱資源開発候補地点の一つである仙岩（葛根田）地域の推定温度・圧力条件をもとに想定した坑内温度・圧力挙動（図Ⅲ(2.1)-5）に対して、超臨界地熱環境に対応可能な坑井仕様を検討し、掘削および仕上げに必要な既存機材を抽出した（図Ⅲ(2.1)-6）。調査井については、既存の技術および資機材、あるいはそれらをベースとした比較的軽微な改良を施した技術を用いて坑井の掘削が可能であることを示した。



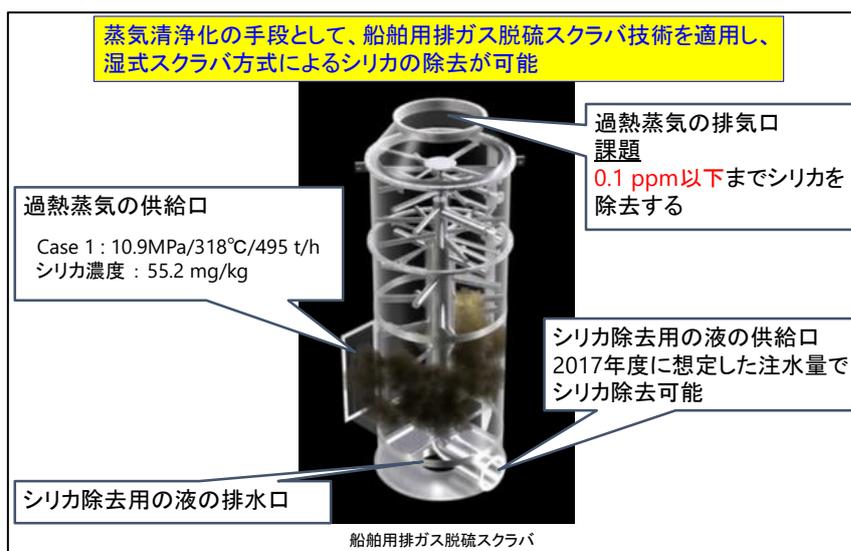
図Ⅲ(2.1)-5 仙岩（葛根田）地域の推定温度・圧力条件



図Ⅲ (2. 1)-6 超臨界地熱掘削に必要な機器構成検討例

#### 研究開発項目④「発電システムの検討」

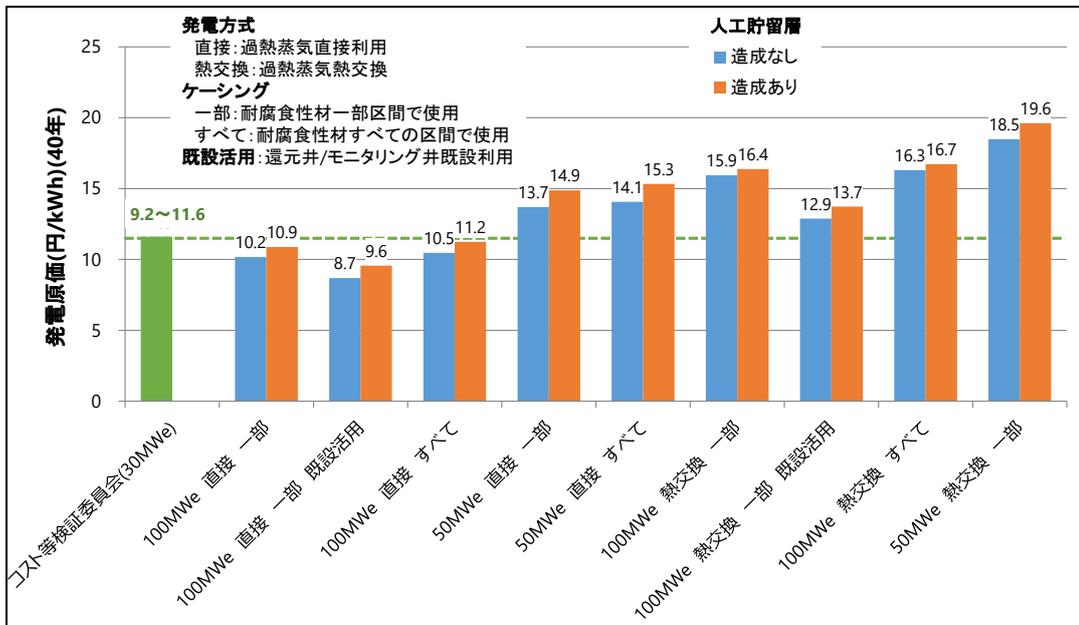
超臨界地熱資源開発想定地点から生産される地熱流体中のシリカ濃度を 55.2 mg/kg と推定し、スクラバ出口での蒸気圧力と温度を試算した。これをもとに、スクラバ出口での蒸気中シリカ濃度の目標を 0.1 mg/kg と定め、図Ⅲ (2. 1)-7 のような湿式スクラバにより目標を実現できることを確認した。また、推定されるシリカ粒径に対しては乾式スクラバは適用できないことを確認した。



図Ⅲ (2. 1)-7 湿式スクラバの検討

研究開発項目⑤「発電コスト試算」

掘削深度 3500 m および 4000 m の調査井試掘コスト（各種調査、水圧破碎費用を除く）は、それぞれ約 38 億円と 44 億円と試算された。発電原価の試算では、過熱蒸気直接利用・100 MWe・新設のケースで、発電原価（40 年）が 10.2～13.2 円/kWh と試算され、図Ⅲ(2.1)-8 に示すとおり、コスト等検証委員会による試算（9.2～11.6 円/kWh）と同程度となることが分かった。また、既設を活用すると新設と比べて 1～2 円/kWh 程度安価となること、50 MWe のケースは 100 MWe のケースと比べて 3～5 円/kWh 程度高価となり、発電出力が大きいほどスケールメリットがあること、および貯留層深度が深い 5000 m のケースは浅い 3500 m のケースと比較して 1.5～2 円/kWh 程度高価となることが分かった。



図Ⅲ(2.1)-8 坑井深度3500 m の場合の発電コスト比較

本研究開発を通して行われた特許出願、論文その他の外部発表件数は、表Ⅲ(2.1)-2に示すとおりである。

表Ⅲ(2.1)-2 特許、論文、外部発表等

区分	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT 出願	査読付き	その他	学会発表・講演	新聞・雑誌等への掲載	その他
2018	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	2 件	0 件	0 件
2019	0 件	0 件	0 件	3 件	1 件	8 件	1 件	0 件

[最終目標に対する成果と達成度]

最終目標に対する成果と達成度を表Ⅲ(2.1)-3にまとめる。

表Ⅲ(2.1)-3 最終目標に対する成果と達成度

研究開発項目	開発目標	成果	達成度
(1) ケーシング材料開発方針提案	超臨界地熱環境下（500℃、pH=3 前後）で適用可能で経済性のあるケーシング材の材料開発方針を提案	目標とした材料評価データの収集ができ、調査井・生産井別に開発方針を提案すべく評価ができた	○
(2) セメント材料開発方針提案	超臨界地熱環境下（500℃、pH=3 前後）で適用可能で経済性のあるセメント材の材料開発方針を提案	アルミナセメントの試作・評価は実施計に沿って実施でき、アルミナセメントの知見・基礎データを得て、開発方針を提案すべく評価ができた	○
(3) 最適な坑井仕上げ仕様検討	掘削費が 40 億円規模となる調査井の仕様を策定し提案	現実的かつ最適な調査井仕様を策定し、3500 m 井で 38 億円、4000 m 井で 44 億円程度となることを示した	○
(4) 発電システム検討	蒸気清浄化により、必要とされる蒸気中のシリカ濃度の基準値を明確化し、これに伴う熱量の範囲の提示及び試掘ステージにおける開発目標を策定	<ul style="list-style-type: none"> <li>生産される地熱流体中のシリカ濃度を 55.2 mg/kg と推定しスクラバ出口での蒸気圧力と温度を試算した</li> <li>スクラバ出口での蒸気中シリカ濃度の目標を 0.1 mg/kg と定め、湿式スクラバにより目標を実現できること、推定されるシリカ粒径に対しては、乾式スクラバは適用できないことを確認した</li> </ul>	○
(5) 発電コスト試算	想定される超臨界地熱資源の開発に最適な坑井並びに発電システムを提案し、従来開発と同等の発電コスト(9～12 円/kWh) となることを確認	過熱蒸気直接利用・100MWe・新設のケースでは、発電原価(40 年)が 10.2～13.2 円/kWh が得られた	○

#### IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

本研究開発の事業化目標は「超臨界地熱調査井掘削」の成功であり、調査井掘削に向けて図Ⅲ(2.1)-8 のようなスケジュールによる事業化が可能であるとの見通しを持っている。2025 年度以降に超臨界地熱資源の存在および貯留層性状を確認するための地熱流体生産試験（噴出試験）を行う調査井の掘削を想定している。

本研究開発を終えての今後の課題としては、以下のようなものが挙げられる。

- ケーシングおよびセメント候補材についての、より詳細で広範な条件下での材料試験データの取得
- 掘削・地熱流体生産中の熱衝撃（繰り返し熱応力）がケーシング・セメントに及ぼす影響の評価と、それを考慮した坑井設計法の確立

- 掘削中の坑内冷却手法の最適化設計法の確立
- 超臨界地熱貯留層をターゲットとした傾斜井掘削技術の検討
- 発電システムの湿式スクラバの設計および実証
- 具体的な調査井掘削地点に基づく坑井・掘削の詳細計画の策定、資源量および発電コストの正確な見積もり

次年度以降は、以下の研究開発に取り組むことが必要と考える。

- ケーシングおよびセメントについては材料試験に基づく候補材の選定
- 超臨界地熱傾斜井に対応した坑井設計・掘削計画策定法の検討
- 調査井での噴気試験のための地上装置の詳細設計
- 掘削地点が決定され次第、調査井の詳細設計と掘削コストの見積もり

年度	2020	2021	2022	2023	2024	2025～
試掘詳細検討ステージ	地表調査・物理探査		☆ 試掘ターゲット決定(2022年度末)			
				坑井設計・掘削計画		
					資機材調達・各種手続き	
				HSEMS 整備、リスクアセスメント		
ケーシング材・セメント材、掘削技術開発	材料・機器、掘削手法等開発					【調査井掘削】
				パイロット坑を用いたフィールド試験		
発電システム開発	蒸気清浄化等技術開発					

図Ⅲ(2.1)-9 事業化スケジュールの想定

## 個別テーマ (2.2)

### (2) 調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）等の開発

#### (2.2) 材料試験に基づく候補材の評価

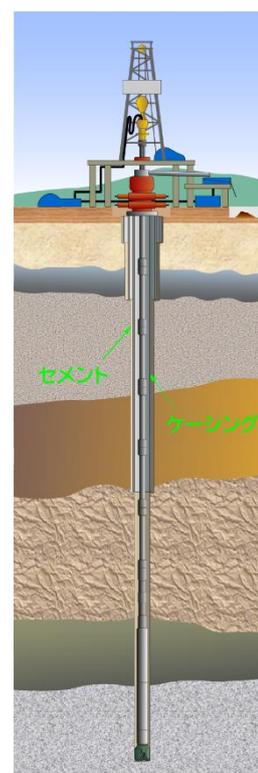
委託先：国立大学法人秋田大学、エヌケーケーシームレス鋼管株式会社

## II. 研究開発マネジメントについて（事業の計画内容）

### (2.2.1) 背景と目的

2016年4月に策定された「エネルギー・環境イノベーション戦略」において、温室効果ガス排出量を削減するポテンシャルが大きい有望な革新技术として地下の超高温・超高压の状態（超臨界状態）にある水を利用する地熱発電が挙げられた。これを受けて、2017年度に、「超臨界地熱発電の実現可能性調査」を実施し超臨界地熱発電を実現する上での課題を抽出、さらに2018～2019年度には調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）についての研究開発を行い、超臨界地熱環境の調査井に適用可能で経済性のあるケーシング材・セメント材の材料開発方針を示した。

「超臨界地熱発電技術研究開発」の2020年度実施方針には、酸性環境かつ高温に耐えうるケーシング材ならびにセメント材を開発することが示された。この実施方針を踏まえ、本研究開発は、材料試験によって超臨界地熱発電用調査井に適用可能なケーシングおよびセメント候補材を提案することを目的とする。



### (2.2.2) 研究開発の概要

上記目的を達成するために、以下の2つの研究開発項目を設定した。

#### 研究開発項目①「ケーシング候補材の評価」（エヌケーケーシームレス鋼管）

超臨界地熱調査井を模擬した高温酸性環境下で腐食試験を実施し、全面腐食速度に対する候補材の性能を確認するとともに、腐食速度予測式および材料選定チャートの精度を高める。以上の検討結果に基づき、ケーシング管に適用可能な鋼管材料や内面セラミックコーティング技術を提案する。

研究開発項目②「セメント候補材の評価」（秋田大学）

過年度の研究結果等を元に、超臨界地熱調査井の坑井用セメントに要求される条件等の技術的課題を明確化し、これを解決するためのアルミナセメントの改良や遅硬剤について検討する。超臨界水および酸性環境での材料試験および検討結果に基づき、超臨界地熱調査井のセメンチング作業時の坑内環境で使用可能なセメント材料を提案する。

本研究開発の最終目標を表Ⅱ(2.2)-1のように設定した。

表Ⅱ(2.2)-1 研究開発目標と根拠

事業項目	開発目標	目標レベル設定の根拠
① ケーシング候補材の評価	酸性熱水腐食試験および400℃まで拡張した材料腐食予測式に基づいて、腐食速度3.0 mm/年以下となる調査井ケーシング候補材およびコーティング技術の選定を終える	Sanadaら(1995)の材料選定指針を参考に、ケーシング材候補の全面腐食速度の目標値を、20年以上の使用を想定した生産井では0.3 mm/年以下、2年間程度の使用を想定した調査井では3.0 mm/年以下に設定した
② セメント候補材の評価	以下の性能を満足するような坑井用アルミナセメントシステムの改良を終える <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 初期強度：3.5 MPa以上@250℃×24時間</li> <li>・ 長期安定性：10 MPa以上@450℃×72時間以上</li> <li>・ 耐酸性：3.5 MPa以上@pH = 2の硫酸および塩酸環境</li> <li>・ 材料コスト：既存地熱井セメントGWCの10倍以内</li> </ul>	ハリバートン社製品ThermaLockセメントや米Brookhaven国立研究所で開発中の高温井用アルミナセメントTSRC (Thermal Shock Resistant Cement) の性能を参考にした

(2.2.3) 事業スケジュール

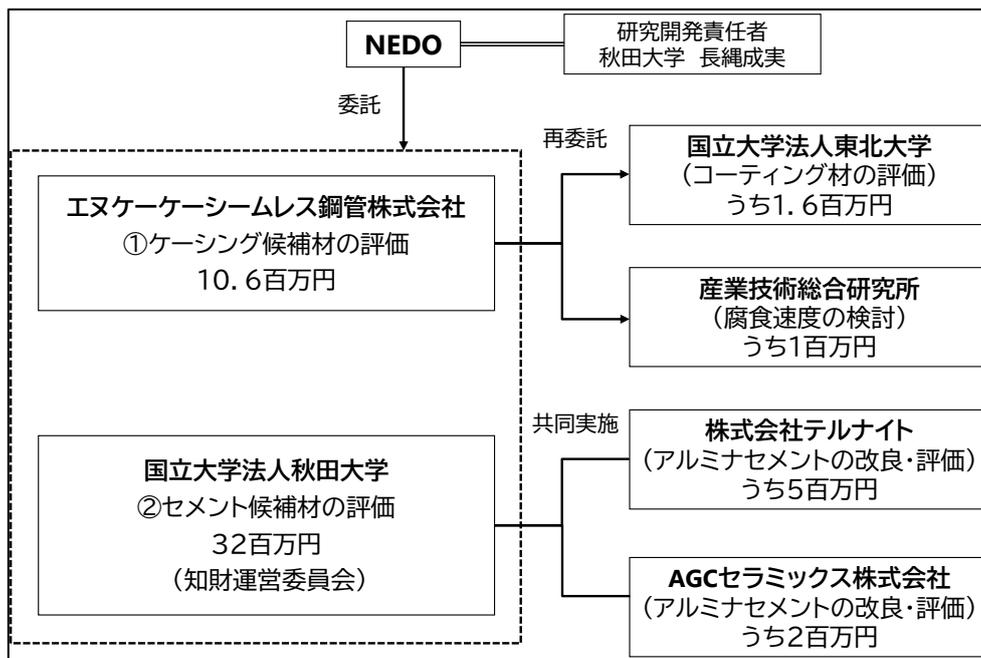
本事業の研究期間は、2020年6月12日より2021年2月28日であり、主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ(2.2)-1に示す。

事業項目	2020年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q
研究開発項目①「ケーシング材候補の評価」				
(1) 酸性熱水腐食試験と総合評価		→		
(2) セラミックスコーティング評価・検討		→		
(3) 腐食速度予測式の確立		→		
研究開発項目②「セメント候補材の評価」				
(1) セメントシステムの改良		→		
(2) セメント基本性能の評価		→		
(3) セメント硬化体の長期養生試験			→	
(4) セメント硬化体の耐酸性試験			→	

図Ⅱ(2.2)-1 研究開発のスケジュール

(2.2.4) 研究開発の実施体制

研究開発の実施体制は図Ⅱ(2.2)-2のとおりである。



図Ⅱ(2.2)-2 研究開発の実施体制

(2.2.5) 事業の管理運営

表Ⅱ(2.2)-2に示す有識者より指導・助言等を頂いた。

表Ⅱ(2.2)-2 外部からの有識者

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
佐倉 弘持	エヌケーケーシームレス鋼管株式会社・技術顧問	鋼管材料技術に関する助言
岡本 敦	東北大学環境科学研究科・教授	超臨界熱力学データに関する助言

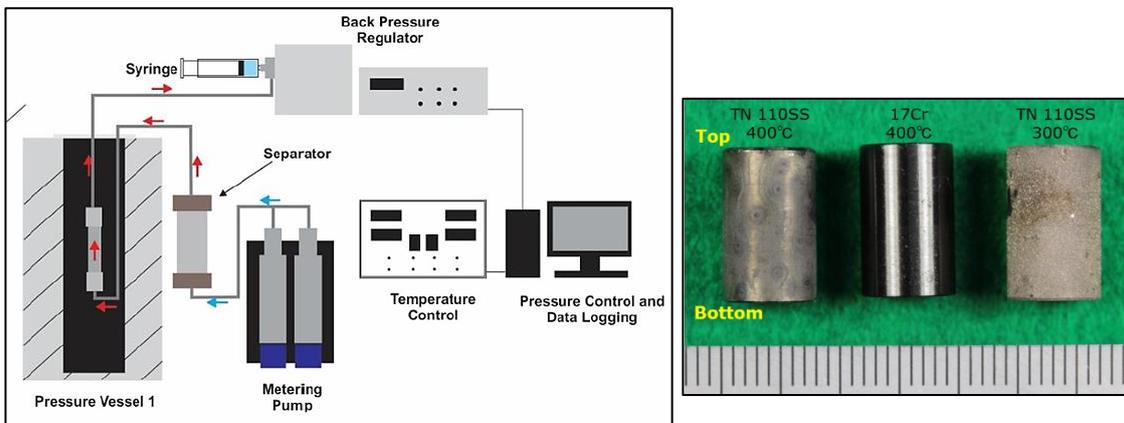
Ⅲ. 研究開発成果について

研究開発項目①「ケーシング候補材の評価」

想定される超臨界地熱貯留層深度の環境は極めて高温かつ酸性（400℃、pH = 3 前後）であり、高温強度および全面腐食、局部腐食への耐性が大きな問題となる。調査井のケーシングでは、低合金鋼を用いることにより局部腐食を回避することがある程度可能であるので、全面腐食を中心に検討し、以下の成果を得た。

(1) 候補材の酸性熱水腐食試験と総合評価

調査井ケーシングに対して最適候補材と考える低合金鋼 TN 110SS、生産井のケーシング候補材にもなり得る 17Cr 鋼およびジルコニア被覆炭素鋼の 3 種類の材料について超臨界地熱環境を模擬した酸性熱水下でのフロー式腐食試験を実施した（図Ⅲ(2.2)-1）。XRD 定性分析および SEM-EDX 分析により腐食速度を求めた結果と外観の観察結果から、17Cr 鋼の耐食性は極めて高く、TN 110SS は 400℃よりも 300℃の環境で腐食が進むことが分かった。



図Ⅲ(2.2)-1 フロー式腐食試験装置と試験後の試験片外観

## (2) 鋼管内部セラミックスコーティング技術の評価・検討

ジルコニア被覆炭素鋼の耐食性は非常に高いことが確認できたが、溶射によるコーティング技術に課題が残った。そこで、長尺管内面へのアルミナコーティング技術について検討を行った。超臨界水浸漬試験では、炭素鋼基材に直接ゾルーゲル法によるアルミナの厚膜コーティングをすると超臨界水中でコーティングが剥離してしまった。これに対して、アルミナイズおよび低温熱拡散処理した炭素鋼は、超臨界水中でも強く、表面が多孔質であるためゾルーゲルコーティングとは相性がよく、接着強度を上げられることが分かった（図Ⅲ(2.2)-2）。



図Ⅲ(2.2)-2 炭素鋼（左下）及びアルミナイズド・低温熱拡散処理した炭素鋼（右下）にアルミナコーティングした試験片の超臨界水浸漬試験後の試験片

## (3) 材料腐食予測式の確立と総合評価

熱水単相での材料腐食速度を、温度、pH および材料構成元素の耐腐食性をあらかず合金成分のCr当量の3つの要素から予測する式を用いた解析と上述の材料試験結果を総合して評価した結果、調査井の全面腐食目標値を満足するなかで最も低コストとなる金属材料は、超臨界環境(400℃)においてはTN 110SS、亜臨界環境(300℃)においては17Crという結論が得られた。また、アルミナイズドおよび低温熱拡散処理した炭素鋼へのアルミナコーティングは、長尺管内面へのコーティング施工の可能性もあり、今後の発展が期待できる。

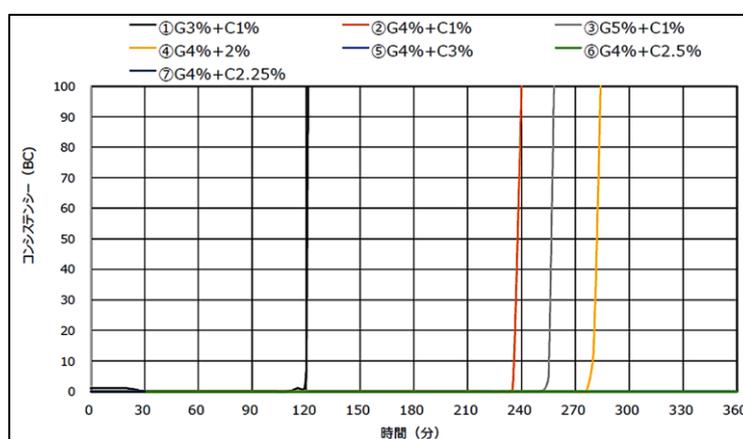
## 研究開発項目②「セメント候補材の評価」

調査井のセメンチングでは、既存の地熱井セメント(GWC)を主に使用し、開発中のアルミナセメントを部分的に試験使用することを想定し、以下の研究開発を実施

した。

#### (1) セメントシステムの改良と基本性能の評価

前年度試作した坑井用アルミナセメント HASF の評価ではハンドリング性が課題であった。ハンドリング性とは水に材料をスムーズに投入できるかどうかを指し、現場での作業効率すなわちコストに多大な影響を及ぼす。混合するシリカ粉末の粒度を粗くして試作した HASFL では、ハンドリング性は改善されたが、遅硬剤を加えると発泡して体積が増加する課題が残った。そこで今年度は、発泡課題の解決を狙った改良 HASFL を主軸に評価した。発泡対策を行った上で、常圧下で HASFL とほぼ同等の流動性、硬化特性を有する改良 HASFL を試作した。図Ⅲ(2.2)-3 に示すように、適切な遅硬剤の添加によりシックニングタイムを調整できることおよび初期強度の発現が十分であることなど要求性能を満たしていることを確認できた。



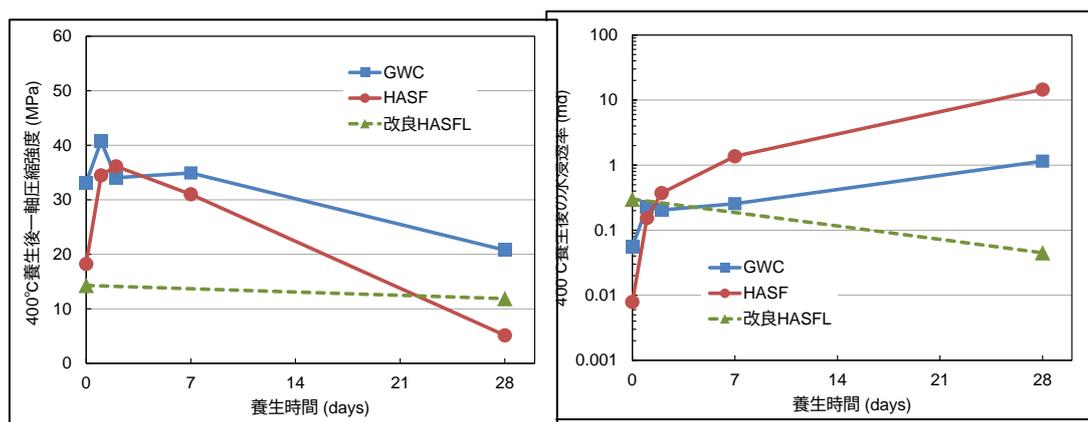
図Ⅲ(2.2)-3 遅硬剤の組み合わせによる改良HASFLのシックニングタイムの調整

#### (2) セメント硬化体の超臨界水熱環境下長期養生試験

小径にコア抜きした硬化セメント試料に対して、高温高压反応容器による温度400℃での超臨界・亜臨界水熱環境下での最長28日間の長期養生試験を実施した(図Ⅲ(2.2)-4)。一軸圧縮強度および水浸透率の養生前後の変化は図Ⅴ(2.2)-7に示すようであった。改良HASFLの28時間養生後の一軸圧縮強度はGWCよりも劣るが前年度試作したHASFよりも大きく、10MPa以上を維持した。水浸透率は、GWCとHASFはともに28日後に大きく上昇しているが、改良HASFは0.1md以下と十分な不浸透性を示し、超臨界水環境下において長期間の安定性を維持できることが確認できた。GWCに比べると一軸圧縮強度が小さい点は、今後のさらなる改良が必要であろう。



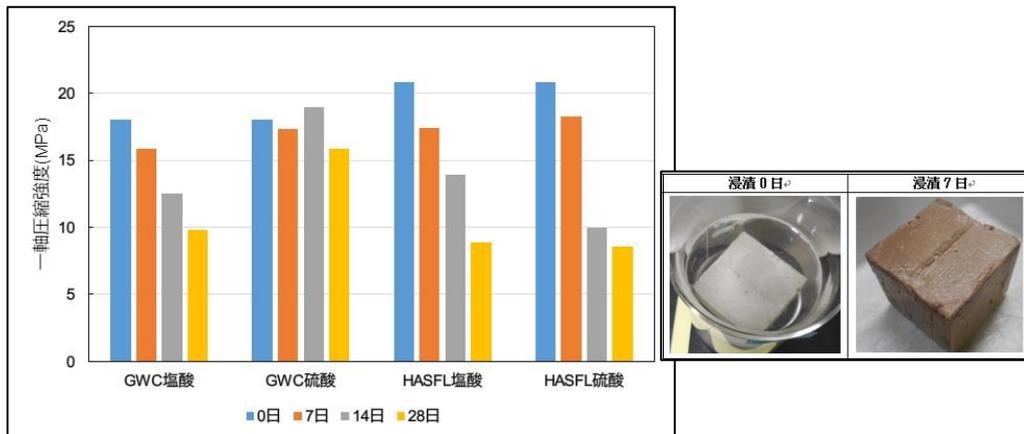
図Ⅲ(2.2)-4 超臨界セメント養生試験装置(左)、セメント試験片(右上)および試作アルミナセメントの28日養生試験後の外観(右下)



図Ⅲ(2.2)-5 28日間養生試験結果(左:一軸圧縮強度、右:水浸透率)

### (3) セメント硬化体の常温耐酸性試験

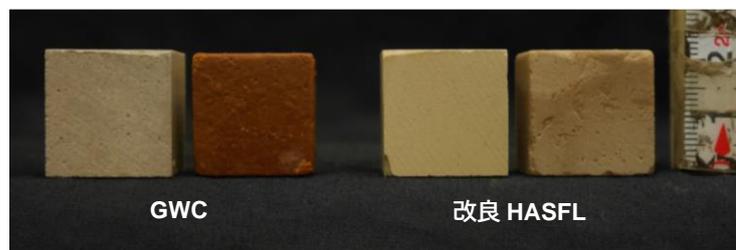
塩酸および硫酸の溶液を pH = 5 に調整し、セメント硬化体をそれぞれの溶液に浸漬して28日経過までの浸漬試験を常温下にて行った。図Ⅲ(2.2)-6に示す結果より、セメント試料は経時と共に酸の影響を受け、表面強度および一軸圧縮強度が低下することが確認できた。改良 HASFL は、塩酸耐性は GWC と同程度であったが、硫酸耐性は GWC よりも劣る結果となった。



図Ⅲ(2.2)-6 常温塩酸・硫酸浸漬実験の結果（左：一軸圧縮強度の変化、右：GWCを塩酸に浸漬した様子）

#### (4) セメント硬化体の高温耐酸性試験

フラスコに GWC と改良 HASFL の硬化体を同時に入れ、pH = 2 に調整した硫酸、塩酸にそれぞれ浸漬し、それをウォーターバスで 85℃ にキープして常圧 85℃ における耐酸性を評価した。GWC は、硫酸浸漬 21 日目から表面が剥離し始め、塩酸浸漬では 37 日には剥離が大きく進んだ。図Ⅲ(2.2)-7 に示すように、表層に生じた変質相が剥離する様子が観察された GWC は、硫酸、塩酸ともにサイズは大きく減少したが、強度はむしろ増加した。改良 HASFL は、硫酸、塩酸ともに寸法はほとんど変化せず、強度はやや低下したが、要求条件を満たす範囲内であった。



図Ⅲ(2.2)-7 水中保管サンプル（左）と硫酸浸漬後のサンプル（右）

本研究開発を通して行われた特許出願、論文その他の外部発表件数は、表Ⅲ(2.2)-1 に示すとおりである。

表Ⅲ(2.2)-1 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT 出願	査読付き	その他	学会発表・講演	新聞・雑誌等への掲載	その他
2020	0 件	0 件	0 件	3 件	0 件	10 件	0 件	0 件

[最終目標に対する成果と達成度]

最終目標に対する成果と達成度を表Ⅲ(2.2)-2にまとめる。

表Ⅲ(2.2)-2 最終目標に対する成果と達成度

研究開発項目	開発目標	成果	達成度
① ケーシング候補材の評価	酸性熱水腐食試験および 400℃まで拡張した材料腐食予測式に基づいて、腐食速度 3.0 mm/年以下となる調査井ケーシング候補材およびコーティング技術の選定を終える	<ul style="list-style-type: none"> <li>超臨界環境では TN110SS、亜臨界環境では 17Cr を調査井ケーシング候補材として選定</li> <li>アルミナやジルコニアを用いたセラミックスコーティングは高い耐食性を示すことを確認</li> </ul>	○
② セメント候補材の評価	以下の性能を満足するような坑井用アルミナセメントシステムの改良を終える <ul style="list-style-type: none"> <li>初期強度：3.5 MPa以上@250℃×24時間</li> <li>長期安定性：10 MPa以上@450℃×72時間以上</li> <li>耐酸性：3.5 MPa以上@pH = 2の硫酸および塩酸環境</li> <li>材料コスト：既存地熱井セメント GWCの10倍以内</li> </ul>	以下の性能を達成 <ul style="list-style-type: none"> <li>初期強度：11.3MPa@250° C×24h</li> <li>長期安定性：11.9MPa@400° C×28日</li> <li>耐酸性：GWC より良好</li> <li>材料コスト：600 円/kg 程度（GWC は 100 円/kg 程度）</li> <li>シッキングタイム：200° C×6h 以上</li> </ul>	○

#### IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

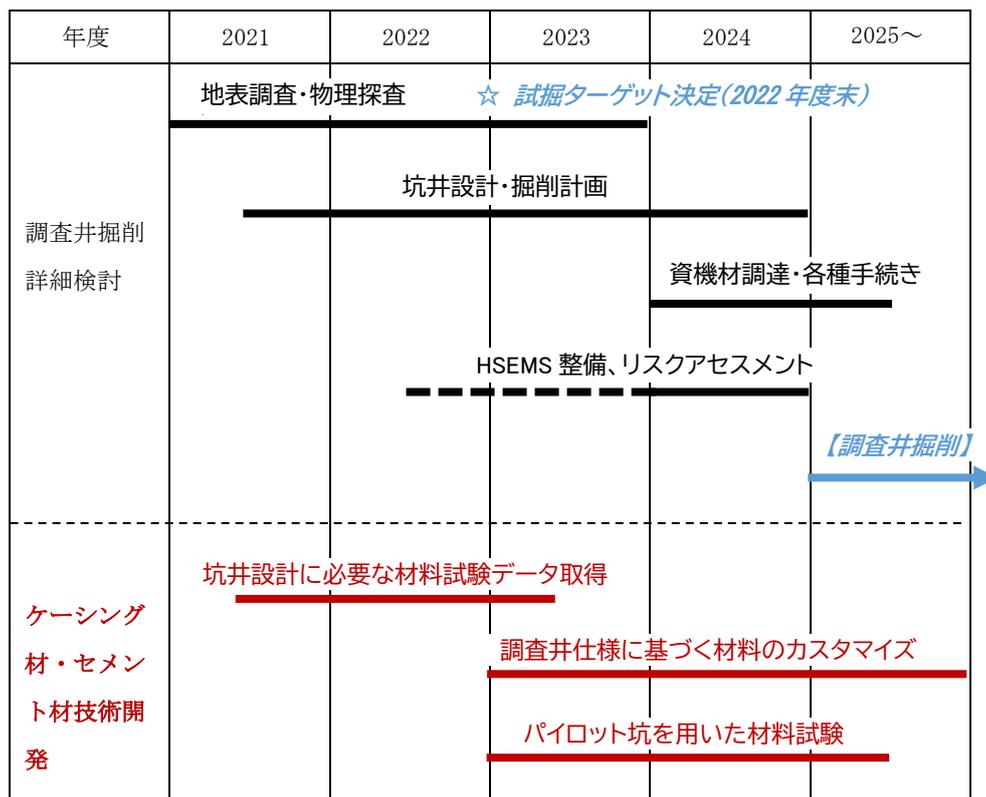
本研究開発の事業化目標は「超臨界地熱調査井掘削」の成功であり、調査井掘削に向けて図Ⅱ(2.2)-10のようなスケジュールによる事業化が可能であるとの見通しを持っている。2025年度以降に超臨界地熱資源の存在および貯留層性状を確認するための地熱流体生産試験（噴出試験）を行う調査井の掘削を想定している。

本研究開発を終えての今後の課題としては、以下のようなものが挙げられる。

- ・ ケーシングの部位ごとに、TN110SS や 17Cr、あるいはそれ以上の高級材をどのように使い分けるかなどを考慮した臨界地熱井対応したケーシングプログラムの設計法の確立
- ・ 候補となるセラミックスコーティングを長尺ケーシング内部に施すことは溶射などの既存の汎用技術では不可能
- ・ 超臨界地熱井に対応したセメンチング計画策定法が未確立
- ・ 硬化セメントの耐熱衝撃（耐繰返し熱応力）に関する知見が不足

次年度以降は、以下の研究開発に取り組むことが必要と考える。

- ・ 熱応力による鋼管材料の強度低下や膨張率等のデータ収集および検討
- ・ 開発アルミナセメントの長期養生試験の再現性や浸透率等、より多くのデータの取得
- ・ ケーシング材およびセメント材の調査井掘削前フィールド試験計画の立案
- ・ 調査井掘削に向けて、泥水等その他材料の耐高温・酸性性能の評価



図IV (2.2)-1 事業化スケジュールの想定

## 個別テーマ (3.1)

### (3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発

#### (3.1) 水圧・減圧破砕による人工超臨界地熱貯留層造成に関する研究

委託先：国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人東北大学、  
国立大学法人東京大学、国立大学法人秋田大学、石油資源開発株式会  
社、帝石削井工業株式会社、株式会社リナジス、大成建設株式会社、  
日本オイルエンジニアリング株式会社、地熱エンジニアリング株式会  
社、地熱技術開発株式会社、株式会社物理計測コンサルタント

## II. 研究開発マネジメントについて（事業の計画内容）

### (3.1.1) 背景と目的

2016年4月に内閣府により策定された「エネルギー・環境イノベーション戦略」において、温室効果ガス排出量を削減するポテンシャルが大きい、有望な革新技術として地下の超高温・超高压の状態（超臨界状態）にある流体を利用する地熱発電（以下、「超臨界地熱発電」という）が挙げられた。

これを受けて、当該研究開発への参画者の多くは、2017年度にNEDOからの委託を受け、「地熱発電技術研究開発／地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発／天然・人工地熱システムを利用した超臨界地熱発電の発電量、経済性および安全性に関する詳細検討」研究開発（以下、「先行研究」という）を実施し、超臨界水の状態把握、当該貯留層からの熱抽出の検討、人工貯留層造成の検討、高温環境で使用可能な機材・資材の検討、経済性評価等に関する調査をそれぞれ実施し、多くのブレークスルーが必要であるものの、経済性を有する超臨界地熱発電が実現可能であることを示した。

本研究開発の受託者の一部は先行研究において、水圧破砕、減圧破砕により、400℃以上の高温環境での水圧・減圧破砕により、低透水性岩石の浸透率を $10^{-15}$  m<sup>2</sup>程度まで改善可能であることを室内実験により示した。しかしながら、両破砕現象のメカニズムおよび実際の貯留層における挙動については未解明な点が多く、継続的な検討が必要であるとされてきた。また、減圧破砕については、先行研究において減圧破砕ツールを設計したが、減圧破砕工法の実用化可能性は未検証であった。一方、地熱開発、および石油・天然ガス開発分野における近年の破砕の適用事例について網羅的に把握するとともにリスクとその低減・回避策、および技術的な課題などの超臨界地熱開発に関わる重要項目を取りまとめる必要があるとされてきた。以上の背景を踏まえ、本事業では以下の点を達成することを目標に研究開発を実施した。

- ・水圧破砕及び減圧破砕、またはいずれか一方において、生産可能な浸透率 ( $10^{-15}$  m<sup>2</sup> オーダー) での人工亀裂生成が可能であることを、室内実験かつ数値シミュレーションにより立証する。
- ・超臨界地熱環境下で水圧破砕及び減圧破砕、またはいずれか一方により、坑井周辺の数 100m 規模の人工貯留層造成手法のシナリオを提案する。

### (3.1.2) 研究開発の概要

本事業では、上記の目的を達成するため、①水圧・減圧破砕メカニズム詳細検討及び人工貯留層造成・維持シミュレーション、②減圧破砕ツールズ試作・評価、③破砕事例調査を実施した。各研究開発項目の内容は以下の通り。

研究開発項目①「水圧・減圧破砕メカニズム詳細検討及び人工貯留層造成・維持シミュレーション」

- \* 水圧破砕については、既存の実験システムに AE 計測機能を導入し、400°C~500°C、真三軸応力下において、複数の温度と応力状態の組み合わせ条件下での水圧破砕実験と AE 同時観測を実施する。さらに個別要素法等による数値実験を通して室内実験結果再現モデルの構築や、寸法の影響等、室内実験では検討が困難な事項についての検討を行う。
- \* 減圧破砕については、破砕実験試料の P 波/S 波測定を実施するとともに、有限要素法等による粒子スケールシミュレーションを行い、減圧破砕の発生に必要な熱応力等の条件を解明する。
- \* 貯留層造成シミュレーションに必要となる花崗岩体を想定した高温高压下の花崗岩物性データを整備する。文献調査による高温岩体の各種物性値の整備だけでなく、水圧破砕、減圧破砕後の花崗岩試料を用いて高温高压下 (100 MPa、300~600 °C) の岩石物性試験を実施し、弾性的性質 (ヤング率)、強度、浸透率等のラボスケールにおけるバルク物性値を得る。さらに亀裂の量・分布に関する情報とラボスケールにおけるバルク物性値とを関連させた形で経験式を提示する。
- \* 室内実験、粒子スケールシミュレーション等の結果を総括し、フィールドスケールでの現象予測に必要なモデル式、パラメータの導出を行う。必要に応じて、室内実験、粒子スケールシミュレーションを実施し、モデルを改良する。
- \* 既存の人工超臨界地熱貯留層造成シミュレーションコードを拡張し、局所熱力学非平衡条件、岩石力学モデルを考慮可能にする。
- \* 上記の検討で得られるモデル式、パラメータ等をシミュレータに組み込み、フィールドスケールでの水圧破砕・減圧破砕シミュレーションを可能にする。シミュレーションを用いて、人工超臨界地熱貯留層造成・維持シナリオを策定する。

#### 研究開発項目②「減圧破砕ツール試作・評価」

- \* 2017 年度に実施した概念設計をもとに減圧破砕ツールを試作し、工場内作動試験を行う。
- \* 試作した減圧破砕ツールの地上での作動試験を行う。作動試験によって、当該機器の動作ならびに装置内圧力が数秒以内に大気圧まで減圧することを確認する。
- \* 必要に応じて減圧破砕ツールの改良を行う。
- \* 工場内作動試験結果等から、研究開発項目①で開発する貯留層造成シミュレータへの入力データを想定する。
- \* 地上試験結果等から、研究開発項目①で開発する貯留層造成シミュレータへの入力データを導出する。
- \* 研究開発項目①で開発する貯留層造成シミュレータから、試作した減圧破砕ツールを超臨界地熱貯留層に用いた場合の破砕効果を導出する。
- \* 減圧破砕ツールの性能と貯留層シミュレータから得た情報をもとに、減圧破砕作業の施工手順と、作業によるリスクを検討・評価する。

#### 研究開発項目③「破砕事例調査」

- \* 国内外の地熱開発における加圧注水や水圧破砕事例および微小地震観測事例を調査する。
- \* 国内外の油ガス田開発における加圧注水や水圧破砕事例および微小地震観測事例を調査する。
- \* 事例調査を継続するとともに、調査結果を精査し、破砕技術を適用する場合のリスクとその低減・回避策、および技術的な課題などの超臨界地熱開発に関わる重要項目を取りまとめる。

#### 研究開発項目⑤「まとめ」

- \* 本事業を総括・評価し、目標達成のためのアプローチを随時検討する。研究開発成果を取りまとめる。

表Ⅱ(3.1)-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	目標	設定根拠
① 「水圧破碎・減圧破碎メカニズム詳細検討及び人工貯留層造成・維持シミュレーション」	<p>*水圧破碎現象のメカニズム、およびその寸法効果、高応力下(100MPa程度)での挙動を明らかにし、フィールドスケールのモデル式・パラメータを導出する。</p> <p>*減圧破碎現象のメカニズム、その特異性の有無、およびその寸法効果を明らかにし、フィールドスケールのモデル式・パラメータを導出する。</p> <p>*水圧破碎及び減圧破碎、またはいずれか一方において、生産可能な浸透率(10<sup>-15</sup>m<sup>2</sup>オーダー)以上の破碎が可能なことを、室内実験かつ数値シミュレーションにより立証する。</p> <p>*超臨界地熱環境下で水圧破碎及び減圧破碎、またはいずれか一方による、坑井周辺の数100m規模の人工貯留層造成手法のシナリオを提案する。</p>	<p>*水圧・減圧破碎による貯留層スケールでの破碎効果について妥当な評価を行うためには、両破碎現象のメカニズム詳細検討とモデル化が必要であるため。</p> <p>*公募要領においてステージゲート時目標として設定されているため。</p>
② 「減圧破碎ツール試作・評価」	<p>*減圧破碎ツールの装置内圧力が設計通り数秒以内に大気圧まで減圧することを確認し、作動状況の評価、機器動作シミュレーション等から減圧破碎シミュレーションへの入力データを提示する。</p> <p>*減圧破碎作業の施工手順と作業によるリスクを取りまとめる。</p>	<p>*減圧破碎ツールの試作を行い、減圧破碎手法を工学的に実現するための課題、リスクを把握する必要があるため。</p>
③ 「破碎事例調査」	<p>*地熱事例10件・油ガス田事例10件以上のプロジェクトを調査し、超臨界地熱開発に関わる重要項目を取りまとめる。</p>	<p>*超臨界地熱システムへの破碎技術適用事例はなく、地熱発電や油田開発での事例調査をもとに超臨界地熱で起こり得る問題点の把握とその解決策の検討を行う必要があるため。</p>

(3.1.3) 事業スケジュール

本事業の研究期間は、2018年8月3日より2020年2月28日であり、主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ(3.1)-2に示す。

事業項目	2018年度				2019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
①水圧・減圧破碎メカニズム詳細検討及び人工貯留層造成・維持シミュレーション				破碎メカニズム検討・モデル化				
				貯留層造成・維持シミュレーション				
			(シミュレーションの中間検証)					
				減圧ツール試作・地上試験				
②減圧破碎ツール試作・評価					破碎効果評価			
						作業工程等検討		
③破碎事例調査				事例調査				
④まとめ							まとめ	

図Ⅱ(3.1)-1 研究開発のスケジュール

(3.1.4) 研究開発の実施体制

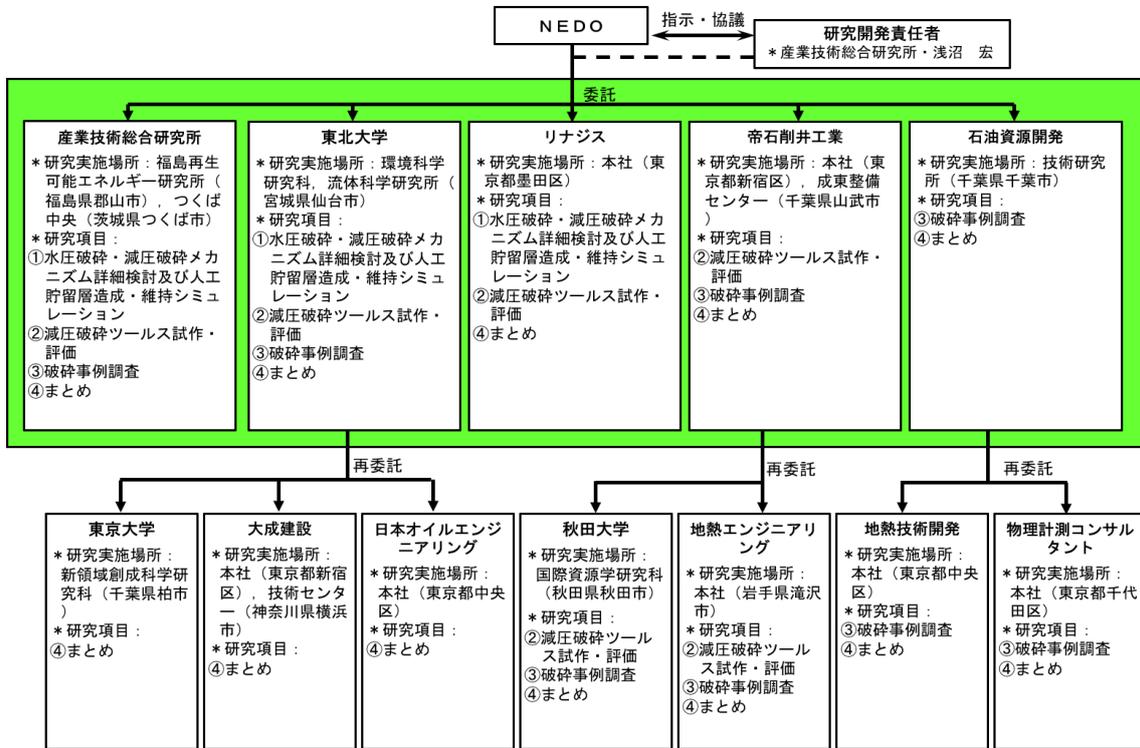


図 II (3.1)-2 研究開発の実施体制

(3.1.5) 事業の管理運営

表 II (3.1)-2 に示す有識者より指導・助言等を頂いた。

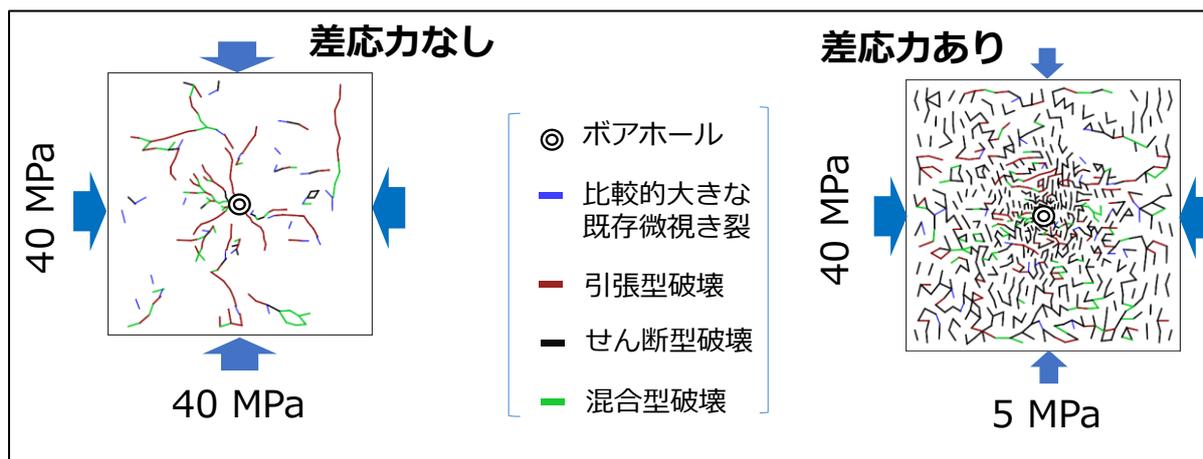
表 II (3.1)-2 外部からの有識者

氏名	所属・役職	協力内容
陳 友晴	京都大学大学院エネルギー科学研究科・助教	岩石薄片観察に関する技術協力
直井 誠	京都大学大学院工学研究科・助教	AE 計測に関する技術協力
Justin Rubinstein	U. S. Geological Survey・Research Geophysicist and Deputy Chief	破砕事例に関する知見の提供

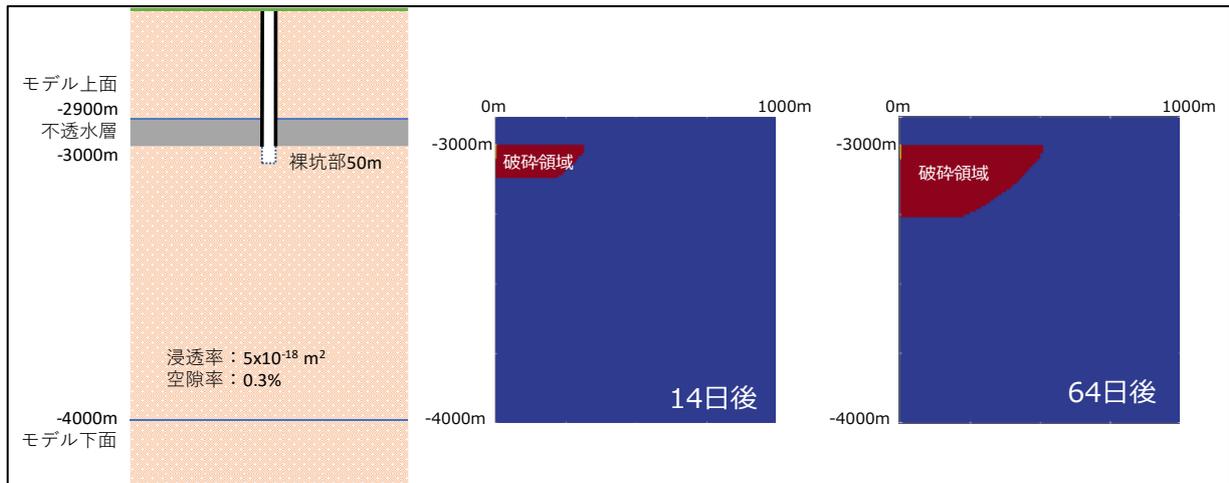
### Ⅲ. 研究開発成果について

本事業の主な成果は以下の通り。

- ①高温高压環境下における花崗岩の水圧破碎実験および粒子スケール水圧破碎シミュレーションを通じて、水圧破碎により熱抽出に有利な複雑な亀裂パターンが形成され、 $10^{-12}\text{m}^2$ 程度の浸透率が発生しうることが示された。また、破碎発生条件はGriffithの破壊基準に概ね一致することが示された。
- ②水圧破碎により、坑井から500m付近まで人工貯留層を進展可能であることが示された。
- ③花崗岩の減圧破碎実験および粒子スケールシミュレーションを通じて、破碎メカニズムは主に水の急減圧にともなう急冷（熱衝撃）による岩石-他鉱物粒界の破壊であることが示された。また、減圧破碎後の孔隙率は、徐冷によるものよりも平均的に数10%程度大きく、減圧開始温度と温度低下量で決まる熱ひずみと正の相関性があり、最大で約3%であることが示された。
- ④減圧破碎ツールプロトタイプを設計・試作し、地上試験を実施した結果、当初想定通りの動作をすることを確認した。また、減圧破碎作業は、遮断区間を限定して作業を行うことが有効であることがわかった。
- ⑤地熱開発分野の事例（17フィールド42件）、油ガス田開発分野での事例（10地域104件）の情報を収集し整理した。また、国内事業者（7事業者、11発電所）へのアンケートおよび個別ヒアリングを行った。これらの調査で得られた情報に基づき、超臨界地熱開発において破碎技術を適用する場合のリスクとその低減・回避策、および技術的な課題などの重要項目を取りまとめた。



図Ⅲ(3.1)-1：シミュレーションにより、水の粘度が小さく、水が既存微視き裂を有する岩石へ浸透可能な場合、差応力の有無に関わらず様々な場所で破壊が発生し、等方的で複雑なき裂パターンが生じることを確認した。これは実験により得られた結果と整合的であった。



図Ⅲ (3.1)-2：超臨界地熱システム内での水圧破碎シミュレーションにより、商用発電に資する規模の人工貯留層を造成可能であることを示した。

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ (3.1)-1 最終目標に対する成果と達成度

研究開発項目	成果	達成度
①「水圧破碎・減圧破碎メカニズム詳細検討及び人工貯留層造成・維持シミュレーション」	<ul style="list-style-type: none"> <li>*水圧破碎室内実験結果をもとにシミュレータへ組み込む破壊条件を導出した。</li> <li>*減圧破碎室内実験結果をもとにシミュレータへ組み込むモデル式を導出した。</li> <li>*水圧破碎により <math>10^{-15}\text{m}^2</math> 以上の浸透率を有する亀裂システムの造成が可能であることを示した。</li> <li>*超臨界環境での水圧破碎により坑井から 500m 適度の規模の人工貯留層の造成が可能であることを示した。</li> </ul>	100%
②「減圧破碎ツールズ試作・評価」	<ul style="list-style-type: none"> <li>*坑内減圧破碎ツールズを試作し、減圧効果を評価するとともに坑内流動シミュレーション等をもとに実坑内での破碎効果を検討した。</li> <li>*減圧破碎作業の施工手順と作業によるリスクを取りまとめた。</li> </ul>	100%
③「破碎事例調査」	<ul style="list-style-type: none"> <li>*地熱事例 10 件・油ガス田事例 10 件以上のプロジェクトを調査し、超臨界地熱開発に関わる重要項目を取りまとめた。</li> </ul>	100%

#### IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

本事業を通じて、①超臨界地熱環境下での水圧破碎により、坑井周辺の数百メートル規模の人工貯留層が造成可能であること、②水圧破碎による人工貯留層造成では、地殻応力が大きな影響を持つこと、③加圧する裸坑部の一部に弱面を形成することにより、人工貯留層の造成位置や形状をコントロールできる可能性があること等が示された。

超臨界地熱発電研究開発に従事する研究者・技術者は、2020年代半ばに試掘井を掘削し、そこで取得したデータ、実験結果等により超臨界地熱発電の実現可能性を判断したいと考えている。更に、その後の早い段階でパイロットプラントを設置し、実用上の課題抽出、およびその解決等を通じて、2040年頃までの商用発電実現を目指したい。

## 個別テーマ (3.2)

### (3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発

#### (3.2) 超臨界地熱貯留層 THMC シミュレータの技術開発

委託先：国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人東北大学、大成建設株式会社

## II. 研究開発マネジメントについて (事業の計画内容)

### (3.2.1) 背景と目的

2016年4月に内閣府により策定された「エネルギー・環境イノベーション戦略」において、温室効果ガス排出量を削減するポテンシャルが大きい、有望な革新技術として地下の超高温・超高压の状態（超臨界状態）にある流体を利用する地熱発電（以下、「超臨界地熱発電」という）が挙げられた。

これを受けて、当該研究開発への参画者の多くは、2017年度にNEDOからの委託を受け、「超臨界地熱発電の実現可能性調査」を実施し、超臨界水の状態把握、当該貯留層からの熱抽出の検討、人工貯留層造成の検討、高温環境で使用可能な機材・資材の検討、経済性評価等に関する調査をそれぞれ実施し、多くのブレークスルーが必要であるものの、経済性を有する超臨界地熱発電が実現可能であることを示した。

当該調査結果を受け、本プロジェクトでは、天然超臨界地熱貯留層及び人工超臨界地熱貯留層で起こりうる THMC（熱・水・力学・化学）連成現象（図 II (3.2)-1、V (3.2)-2）を考慮可能なシミュレータ技術の開発を目指すとともに、当該技術における今後の研究開発の方向性を示すこととした。

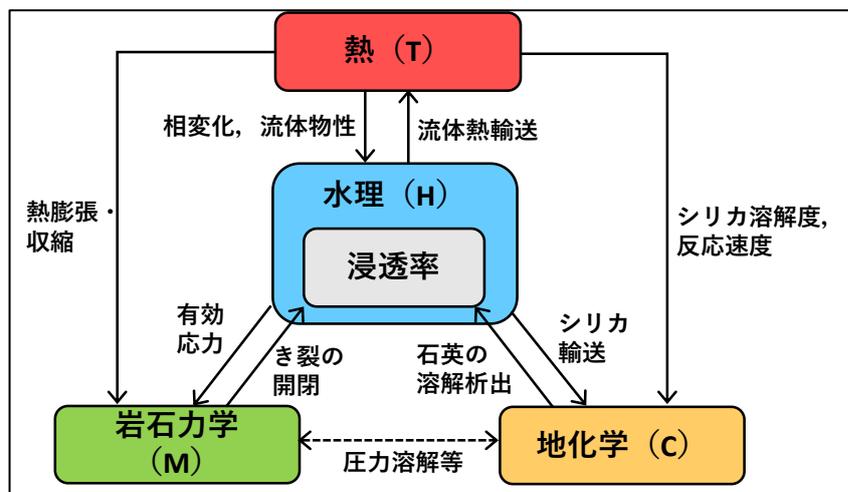


図 II (3.2)-1 超臨界地熱貯留層内で生じる THMC 現象とその連成作用の例

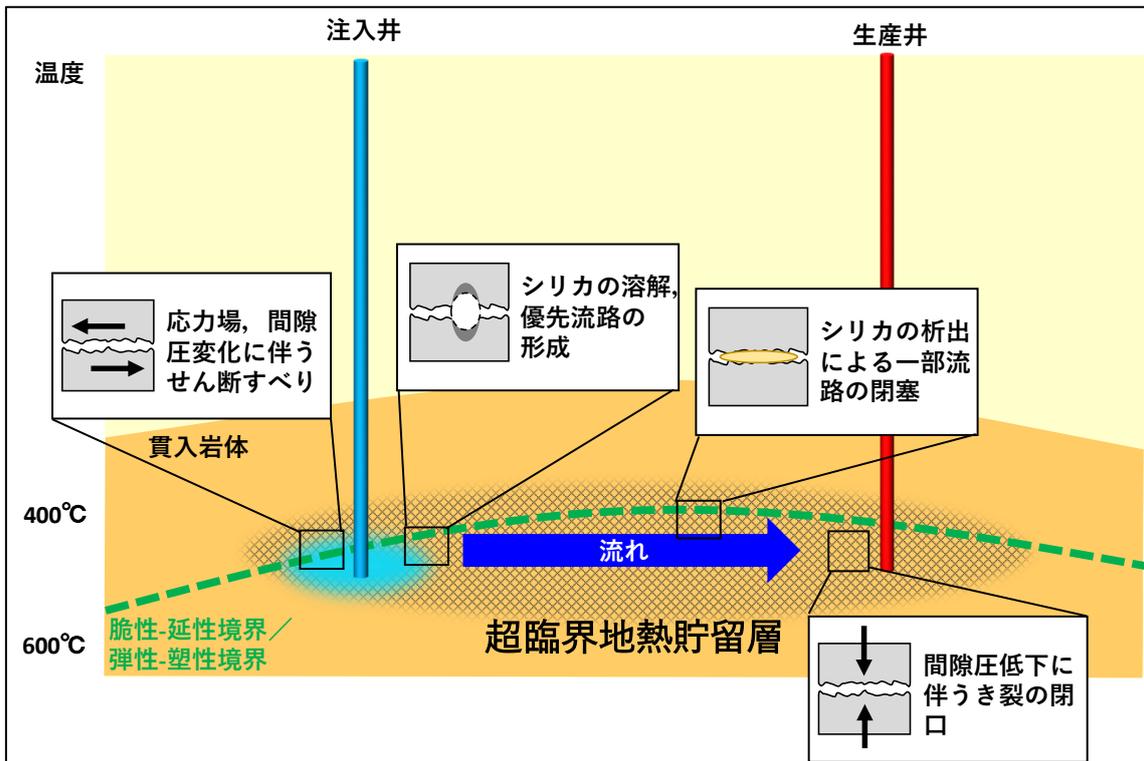


図 II (3.2)-2 超臨界地熱貯留層内で生じる応力変化や鉱物溶解析出反応による浸透率への影響例

### (3.2.2) 研究開発の概要

本事業では、超臨界地熱貯留層で起こりうる THMC (熱・水・力学・化学) 連成現象を考慮可能なシミュレータのコア技術として、①「超臨界地熱貯留層 THMC シミュレータのコア機能開発」、②「超臨界水環境での地化学計算法の設計」、および③「超臨界地熱シミュレータ標準ベンチマーク問題の開発」を実施した。各研究開発項目の内容は以下の通り。

#### 研究開発項目①「超臨界地熱貯留層 THMC シミュレータのコア機能開発」

- \* 超臨界地熱貯留層内で生じる熱輸送、流体流動、岩石弾性変形、石英-水反応等の基礎的な THMC 連成現象を考慮可能なシミュレータを開発する。
- \* シミュレーションに必要となる高温高圧環境での花崗岩物性データの拡充を行う。
- \* 開発したシミュレータを用いて、抽熱時の超臨界地熱貯留層内 THMC 挙動をシミュレーションし、岩石力学挙動やシリカの溶解析出が貯留層の水理特性や抽熱性能に与える影響を検討する。

#### 研究開発項目②「超臨界水環境での地化学計算法の設計」

- \* 受託者らのこれまでの成果をベースに、超臨界地熱環境での多成分系の地化学反応計算法を設計する。
- \* 計算ツールの試作・評価を通じて、提案手法の性能、課題等を検討する。

研究開発項目③「超臨界地熱シミュレータ標準ベンチマーク問題の開発」

- \* 超臨界地熱貯留層シミュレータの信頼性を評価するための標準ベンチマーク問題を開発する。
- \* 試掘ステージでの実践的利用を踏まえた課題抽出を行う。

研究開発項目④

- \* 貯留層 THMC シミュレータ、地化学計算ツールの性能、および課題を取りまとめる。さらに、当該技術における今後の方向性を策定する

表 II (3.2)-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	目標	設定理由
①超臨界地熱貯留層 THMC シミュレータのコア機能開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>*開発したシミュレータを用いて、超臨界地熱環境での超臨界水流動、熱輸送、岩石力学変形、シリカ反応輸送等の基礎的な THMC 連成現象の 3 次元シミュレーションを可能にする</li> <li>*開発したシミュレータを用いて、岩石力学挙動やシリカ溶解析出が貯留層の水理特性や抽熱性能に与える影響を定量的に評価する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 公募要領において開発目標として設定されているため</li> <li>* 生産活動中の応力場の変化や地化学的非平衡状態の発生が貯留層の抽熱特性に与える影響を検討する必要があると判断したため</li> </ul>
②超臨界水環境での地化学計算法の設計	<ul style="list-style-type: none"> <li>*初期条件 400°C、20MPa 以上の環境下における流体性状変化、水-岩石平衡反応を計算可能な地化学計算ツールを試作する</li> <li>*室内実験、文献調査等にもとづき、5 件のベンチマーク問題を策定し、試作ツールを用いて計算する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*超臨界地熱流体の化学的性状に関する地化学計算は、超臨界地熱発電を長期的に継続する上で不可欠な要素技術であるが、現存の計算ツールでは対応しておらず、データセットを含め、方法論の確立が必要であると判断したため</li> </ul>
③超臨界地熱シミュレータ標準ベンチマーク問題の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>*文献調査等にもとづき、6 件以上のテストケースを策定する</li> <li>*2 つ以上の既存シミュレータを用いてテストケースの試解析を実施し、①で開発するシミュレータと比較するためのデータセットを作成する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*超臨界地熱シミュレータを有効なツールとして利用するためには、シミュレータの信頼性を評価するテストケース及びデータセットの作成が必要であると判断したため</li> </ul>

(3.2.3) 事業スケジュール

本事業の研究期間は、2020 年 6 月 12 日より 2021 年 2 月 28 日であり、主な事業スケジュールの概要を図 II (3.2)-3 に示す。

事業項目	2020年度			
	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
①超臨界地熱貯留層 THMC シミュレータのコア機能開発				
①-1. 超臨界地熱貯留層 THMC 連成現象の数理モデルの導出	→			
①-2. 高温高压下の花崗岩物性データの収集	→			→
①-3. 超臨界地熱貯留層 THMC 連成シミュレータの開発	→			→
①-4. 抽熱時の THMC 連成現象の影響に関する予察的評価			→	→
②超臨界水環境での地化学計算法の設計				
②-1. 超臨界水環境での地化学計算法の検討	→			→
②-2. 地化学モデリングベンチマークの収集		→		
②-3. 手法の評価			→	→
③「超臨界地熱シミュレータ標準ベンチマーク問題の開発」				
③-1. 超臨界地熱シミュレータに係る科学的知見のアップデート	→			
③-2. 標準ベンチマーク問題及びデータセットの作成		→		
③-3. 適用範囲の整理と課題抽出			→	→
④まとめ				→

図Ⅱ(3.2)-3 研究開発のスケジュール

(3.2.4) 研究開発の実施体制

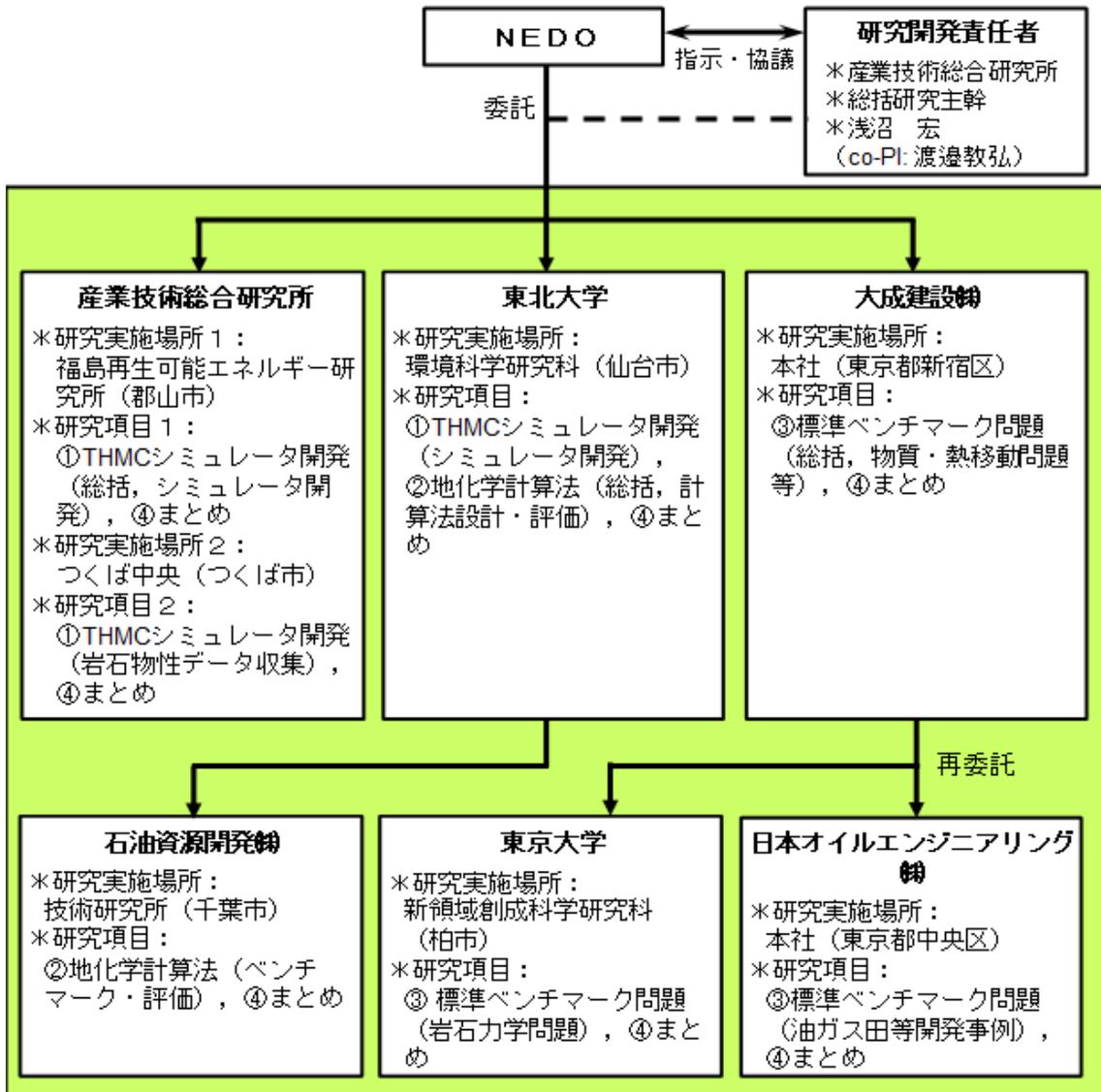


図 II (3.2)-4 研究開発の実施体制

(3.2.5) 事業の管理運営

表 II (3.2)-2 に示す有識者より指導・助言等を頂いた。

表 II (3.2)-2 研究開発目標と根拠

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
藤光 康宏	九州大学大学院工学研究院・教授	超臨界地熱貯留層シミュレーションに関する助言等
大里 和己	地熱技術開発株式会社・事業開発統括部・取締役・事業統括	超臨界地熱貯留層シミュレーションに関する助言等

	部長	
渡辺 公雄	株式会社リナジス・代表取締役	超臨界地熱貯留層シミュレーションに関する助言等
戸高 法文	日鉄鉱コンサルタント株式会社・地熱部・部長	地化学計算に関する助言等
Mark H Reed	Professor Emeritus, Department of Earth Sciences, University of Oregon	地化学計算に関する助言等

### Ⅲ. 研究開発成果について

本事業での主な成果は以下の通り。

- ① 超臨界地熱環境で生じうる基礎的な THMC 連成現象を考慮可能な貯留層シミュレータを開発し、石英の溶解析出や応力変化が生産時の貯留層浸透率や生産流量に与える影響について予察的な評価を実施した。予察的な評価により、石英の溶解析出による生産流量の長期的な変動、圧力減衰に伴う貯留層浸透率の低下、亜臨界領域での亀裂のすべり発生等の生じる可能性が示唆された。
- ② 熱力学データセットを水の密度を用いて超臨界低密度領域に拡張する手法を地化学計算ソフト SOLVEQ/CHIM に実装し、ベンチマークを通じて、提案手法の有効性を示した。特に、過熱蒸気の pH について高温状態では pH が高く、冷却すると酸性になるとの予測が得られた。
- ③ 文献調査に基づき、超臨界地熱シミュレータの標準ベンチマーク問題として、3 レベル 11 ケースのテストケースを策定した。レベル 2 の 2 ケースについて、既存の 3 つのシミュレータ (TOUGH3、iTOUGH、TOUGHREACT) による試解析を実施し、ベンチマーク問題のデータセットを作成した。

表Ⅲ (3.2)-1 特許、論文、外部発表等

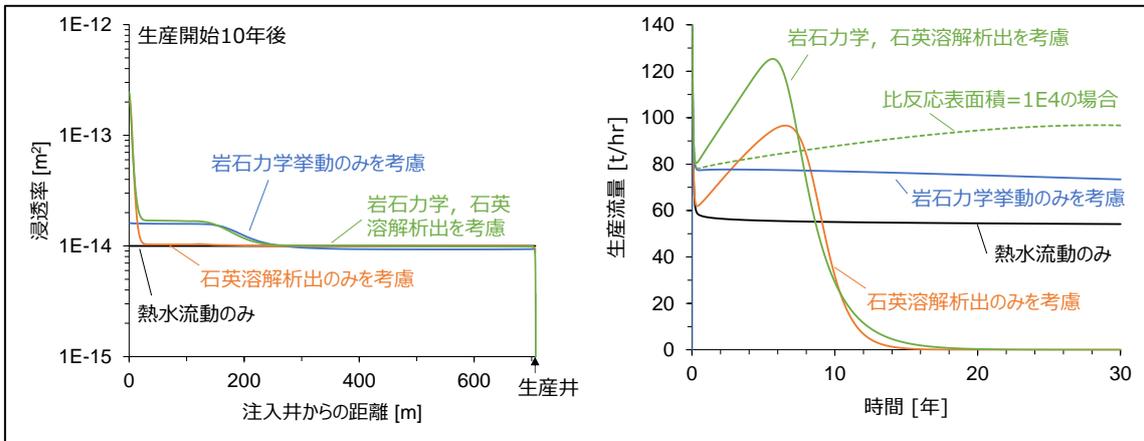
区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発 表・講演	新聞・雑誌 等への掲載	その他
2020FY	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件	0 件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

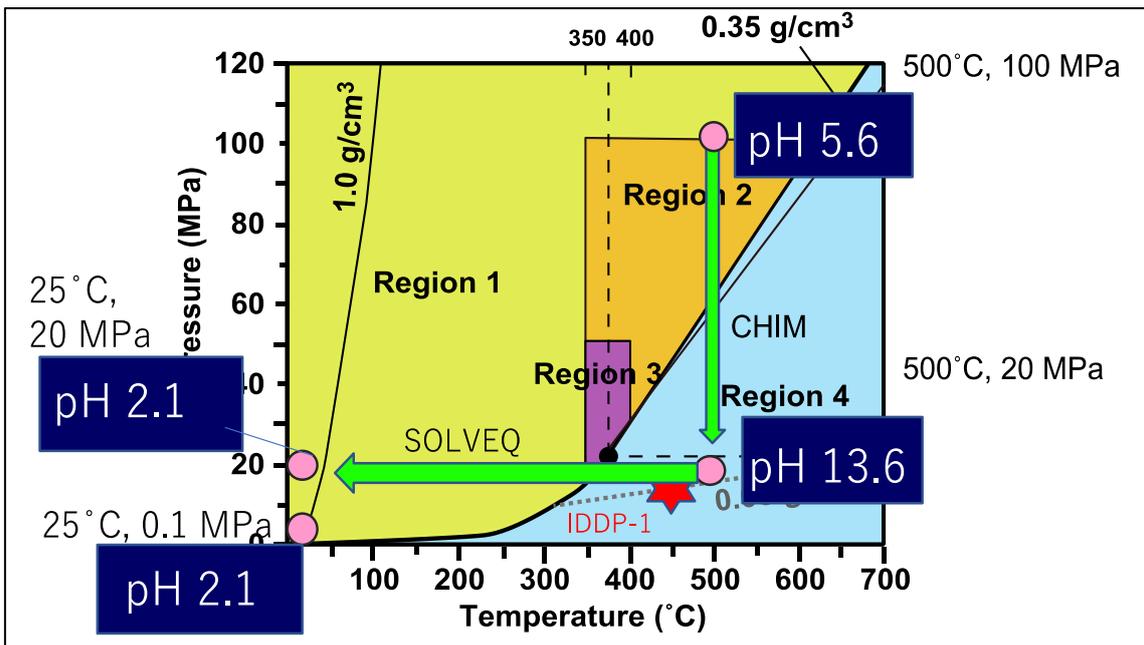
[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ(3.2)-2 最終目標に対する成果と達成度

研究開発項目	開発目標	成果	達成度
①超臨界地熱貯留層 THMC シミュレータのコア機能開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 開発したシミュレータを用いて、超臨界地熱環境での超臨界水流動、熱輸送、岩石力学変形、シリカ反応輸送等の基礎的な THMC 連成現象の3次元シミュレーションを可能にする</li> <li>* 開発したシミュレータを用いて、岩石力学挙動やシリカ溶解析出が貯留層の水理特性や抽熱性能に与える影響を定量的に評価する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 超臨界地熱環境で生じうる基礎的な THMC 連成現象を考慮可能にするため、有限要素法に基づく2次元、3次元対応の貯留層 THMC 連成シミュレータを開発した。</li> <li>* 開発シミュレータを用いた予察的な評価により、石英の溶解析出による生産流量の長期的な変動、圧力減衰に伴う貯留層浸透率の低下、亜臨界領域での亀裂のすべり発生等が生じる可能性があるとの結果が得られた。</li> </ul>	100%
②超臨界水環境での地化学計算法の設計	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 初期条件 400℃、20MPa 以上の環境下における流体性状変化、水-岩石平衡反応を計算可能な地化学計算ツールを試作する</li> <li>* 室内実験、文献調査等にもとづき、5件のベンチマーク問題を策定し、試作ツールを用いて計算する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 超臨界低密度領域における地化学挙動を計算するために、地化学計算ソフト SOLVEQ /CHIM のデータセットを拡張し、実装した。</li> <li>* 室内の溶解平衡実験と析出実験の結果を元に、また文献をもとにした現実的な深部地熱モデル流体を用いて、7件のベンチマークテストを実施し、計算手法の評価を行った。</li> </ul>	100%
③超臨界地熱シミュレータ標準ベンチマーク問題の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 文献調査等にもとづき、6件以上のテストケースを策定する</li> <li>* 2つ以上の既存シミュレータを用いてテストケースの試解析を実施し、①で開発するシミュレータと比較するためのデータセットを作成する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 全 200 件超の文献データベースを作成し、これに基づき3レベル11ケースのテストケースを策定した。</li> <li>* レベル2の2ケースについて、既存の3つのシミュレータ(TOUGH3、iTOUGH、TOUGHREACT)による試解析を実施し、ベンチマーク問題のデータセットを作成した。</li> </ul>	100%



図Ⅲ(3.2)-1 本事業で開発した THMC シミュレータにより得られた計算結果例：開発シミュレータにより、超臨界地熱貯留層内で生じる基礎的な岩石力学挙動、石英溶解析出反応、及びそれらが浸透率、生産流量に及ぼす影響を評価可能になった。石英溶解析出反応が生産流量の変動に顕著な影響を与える可能性がある等の結果が得られた。



図Ⅲ(3.2)-2 本事業で開発した地化学計算法を用いて推定した深部地熱流体の減圧→冷却パスにおける pH の変化：水の密度を用いた logK の拡張法によって、超臨界低密度領域での地化学計算が可能になった。開発手法によって、**過熱蒸気は高温状態では pH が高く、冷却すると酸性になるとの予測**が得られた。

#### IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

本事業を通じて、超臨界地熱貯留層内で生じる THMC 現象の基礎的なシミュレーション技術手法及び検証のための標準ベンチマーク問題を開発した。本事業の主な課題は以下の通りである。

- \* 超臨界地熱貯留層内における石英溶解析出挙動の精査
- \* 亜臨界領域における岩石破壊挙動の影響評価
- \* 高塩濃度流体の考慮
- \* THMC シミュレーションの妥当性評価
- \* ソルバの安定性

今後、図 II (3.2)-7 の研究開発計画に示すように、早い段階で破碎・維持・制御が一体となった超臨界地熱シミュレータを実現開発し、安定かつ持続的な商用発電の実現に結び付けたい。そのためには主に以下のような取組みを行う必要がある。

- \* 貯留層シミュレーションにおける地化学反応モデルの高度化，岩石破壊挙動の考慮
- \* 超臨界・高塩濃度流体を対象にした地化学計算法の検討
- \* パイロット坑や調査井での原位置試験等によるシミュレーション技術手法の妥当性評価
- \* 安定・高速に解を導出するためのソルバ技術開発

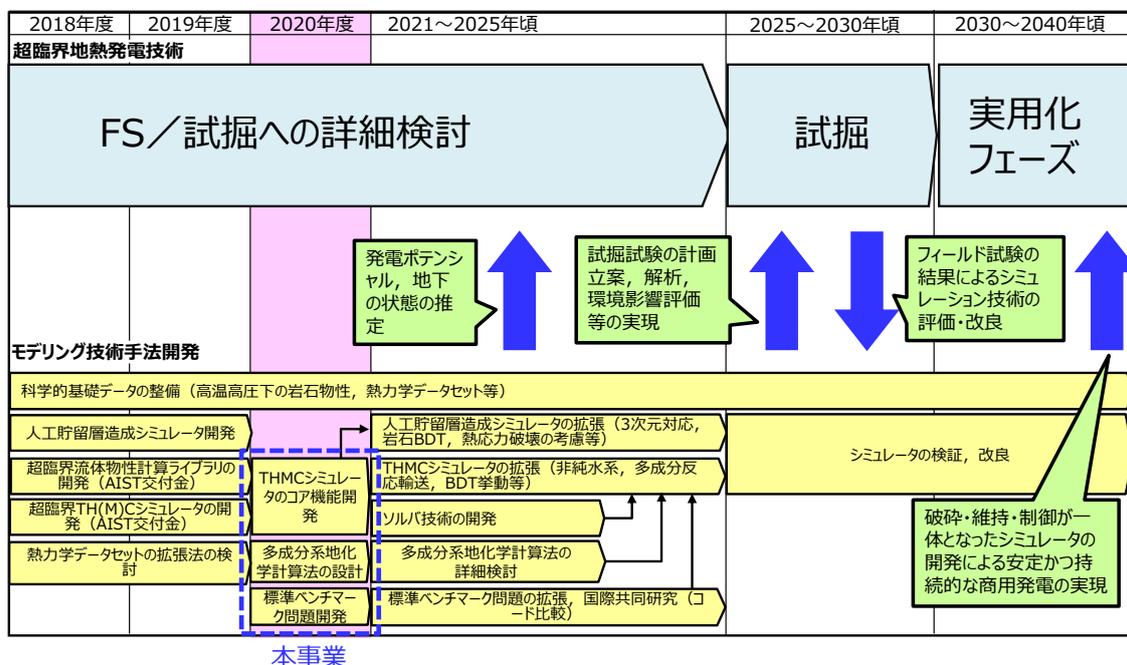


図 III (3.2)-3 超臨界地熱システムシミュレーション技術手法の研究開発計画

## 個別テーマ (4.1)

### (4) 超臨界地熱資源への調査井掘削に資する革新的技術開発

#### (4.1) AI による超臨界地熱資源評価・掘削技術

委託先：国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人室蘭工業大学、国立大学法人東北大学、国立大学法人京都大学、国立大学法人九州大学、地熱エンジニアリング株式会社、地熱技術開発株式会社、国立大学法人秋田大学、帝石削井工業株式会社、株式会社物理計測コンサルタント

## II. 研究開発マネジメントについて (事業の計画内容)

### (4.1.1) 背景と目的

2016年4月に策定された「エネルギー・環境イノベーション戦略」において、温室効果ガス排出量を削減するポテンシャルが大きい、有望な革新技術として地下の超高温・超高压の状態（超臨界状態）にある水を利用する地熱発電（以下、超臨界地熱発電という）が挙げられた。

これを受けて、2017年度に、「超臨界地熱発電の実現可能性調査」を実施し、超臨界水の状態把握、当該貯留層からの熱抽出の検討、人工貯留層造成の検討、高温環境で使用可能な機材・資材の検討、経済性評価等に関する調査をそれぞれ実施した。

当該調査結果を受け、本プロジェクトでは、超臨界地熱資源を対象とした調査井掘削に必要な革新的技術開発を目的として研究開発を実施する。

### (4.1.2) 研究開発の概要

AI による超臨界地熱資源評価技術として、坑井データと地表で得られるデータから、超臨界地熱資源の特定に重要な深部の温度構造を、人工知能技術を使って自動的かつ定量的に推定する技術の開発を行った。また、AI による超臨界地熱資源掘削技術として、既存のマッドロギングとオープンソース AI ソフトウェアをベースとすることで、低い運用コストで実現するビット摩耗度の予測とそれに伴うリスクの評価を行う、掘削アシスト型 AI システムの開発を行った。各研究開発項目の内容は以下の通り。

#### ・研究開発項目①「AIによる超臨界地熱資源評価技術」

坑井データと地表調査データから超臨界地熱資源の特定に重要な深部の温度構造を人工知能技術により自動的かつ定量的に推定する。

- ①-1 AI導入FS, 既存手法の検討  
文献調査により既存手法をレビュー, 手法と特徴を整理する。
- ①-2 教師データの収集  
地質, 地化学, 物探, 坑井等の実データ, 岩石物性文献データを整理する。
- ①-3 AI機能開発  
各種データから深部の熱構造を予測するAI機能の開発を行う。
- ①-4 機能評価とまとめ  
複数モデルフィールドの実データを適用し, 推定した結果を可視化する。併せて, AI機能による推定能力を定量的に評価する。

・研究開発項目②「AIによる超臨界地熱資源掘削技術」

既存のマッドロギングとオープンソフトウェアをベースとすることで低い運用コストで実現するビット摩耗度の予測とそれに伴うリスク評価を行う掘削アシスト型AIシステムを開発する。

- ②-1 全体システム設計  
現象の体系化, センサ技術, 機械学習技術の各要素研究開発の取り纏めと一連のシステム開発を実施する。
- ②-2 掘削現象の体系化  
過去の掘削記録の相互の関連性を調査し, 掘削ビットの摩耗に関わる評価データを抽出し, 現象の体系化を行う。併せて, 機械学習の教師データを整備し, 検証試験を実施する。
- ②-3 センサ技術  
マッドロギング技術の中で必要な測定仕様の検討を行う。併せて, IoT技術として必要なマッドロギングシステムの基本仕様を整理する。
- ②-4 機械学習技術  
得られた教師データに基づき, 掘削ビット摩耗率を予測するAIシステムを構築する。

表Ⅱ(4.1)-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	目標	設定根拠
① AIによる超臨界地熱資源評価技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>水の超臨界状態相当の温度実測値が存在するフィールドにおいて、当該実測値を除いたデータを使用してAIが推定した温度構造と当該実測値の残差が20%以内であること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>既存機械学習的手法による推定誤差を改善し、定量的かつ自動的な地下温度構造の推定を実現するため</li> </ul>
② AIによる超臨界地熱資源掘削技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>過去に得られたマッドロギングデータ等を入力して、ビットの摩耗度の予測を行い、現実の計測数値と誤差20%以内の精度で予測を行うことが可能なこと。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>現場の経験則から20%程度の予測誤差であれば実用に耐えられるため。</li> </ul>

(4.1.3) 事業スケジュール

本事業の研究期間は、2018年8月3日より2021年2月28日であり、主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ(4.1)-1に示す。

項目	2018年度	2019年度	2020年度
① AIによる超臨界地熱資源評価技術			
①-1.AI導入FS, 既存手法のレビュー	→	→	
①-2.教師データの収集	→	→	→
①-3.AI機能開発		→	→
①-4.AI機能の評価, まとめ			→
②AIによる超臨界地熱資源掘削技術			
②-1. 全体システム設計	→	→	→
②-2 現象の体系化			
(1)掘削挙動モデルの調査・整理	→		
(2)掘削挙動モデルとAIアルゴリズムの適合性の検討およびシステム設計		→	
(3)実データを用いたAIシステムの検証と結果の評価。			→
(4). 全体開発設計との調整	→	→	
(5). 現象の体系化	→	→	→
(6). センサー技術との調整	→	→	→
(7). 機械学習技術との調整			→
②-3 センサ技術			
(1). 現況マッドロギングとセンサ技術調査	→		
(2). マッドロギングデータから評価データの抽出方法の検討	→		
(3). AI技術調査(文献や海外)	→	→	
(4) マッドロギングデータから評価データを抽出し, 抽出データを評価		→	
(5) システム開発調査		→	→
(6) マッドロギングデータからの抽出方法の再検討, 抽出データの再検討評価			→
(7).全体評価			→
②-4. 機械学習技術			
(1) システム設計	→		
(2) システム開発・模擬試験		→	
(3) システム改良・実証試験			→

図II(4.1)-1 研究開発のスケジュール

(4.1.4) 研究開発の実施体制

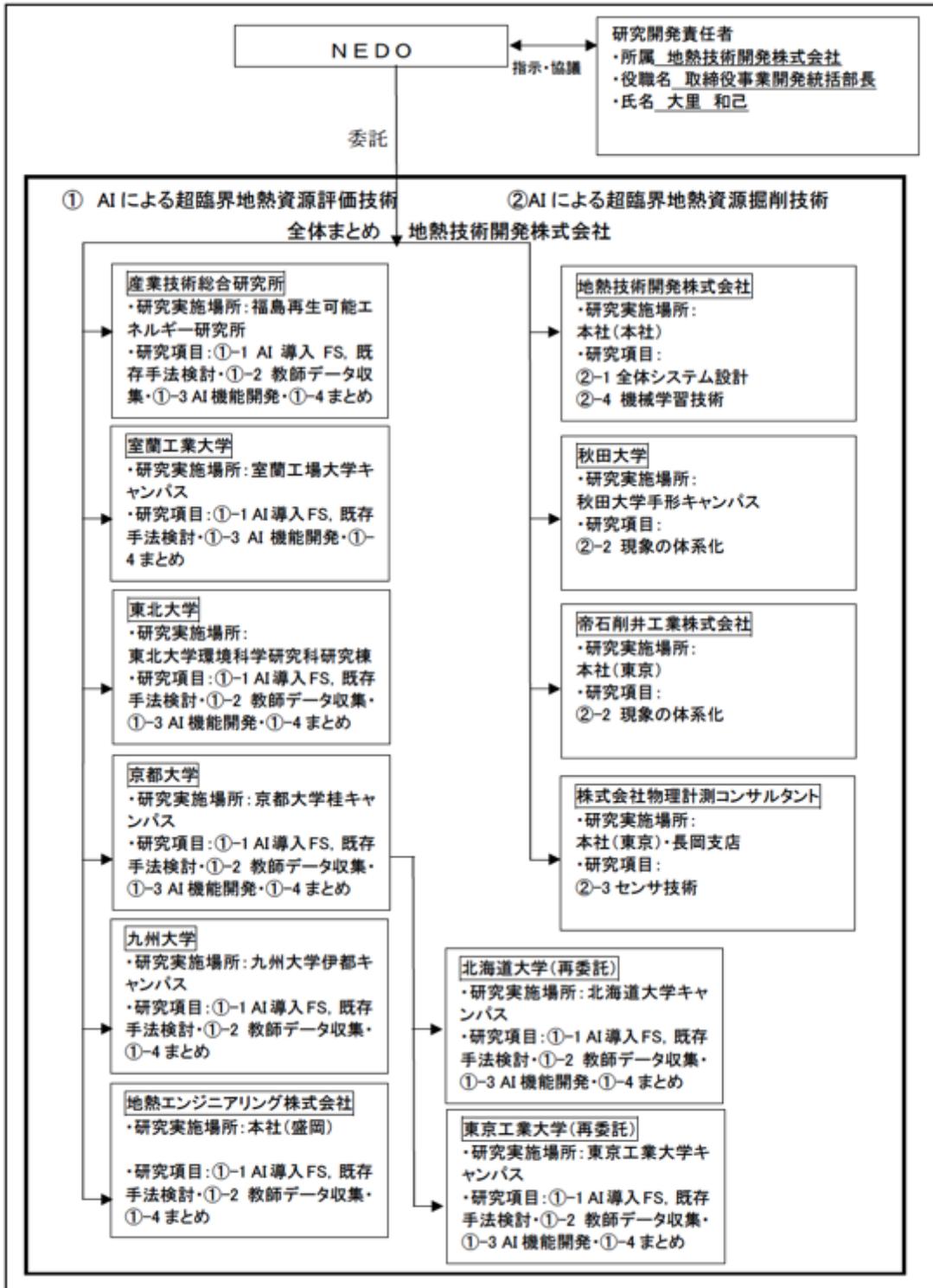


図 II (4.1)-2 研究開発の実施体制

(4.1.5) 事業の管理運営

表Ⅱ(4.1)-2に示す有識者より指導・助言等を頂いた。

表Ⅱ(4.1)-2 外部からの有識者

氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
桑谷 立	国立研究開発法人海洋研究開発機構・研究員	人工知能機能開発に関する助言
大森 敏明	神戸大学大学院工学研究科・准教授	人工知能機能開発に関する助言
日野 英逸	統計数理研究所・准教授	人工知能機能開発に関する助言

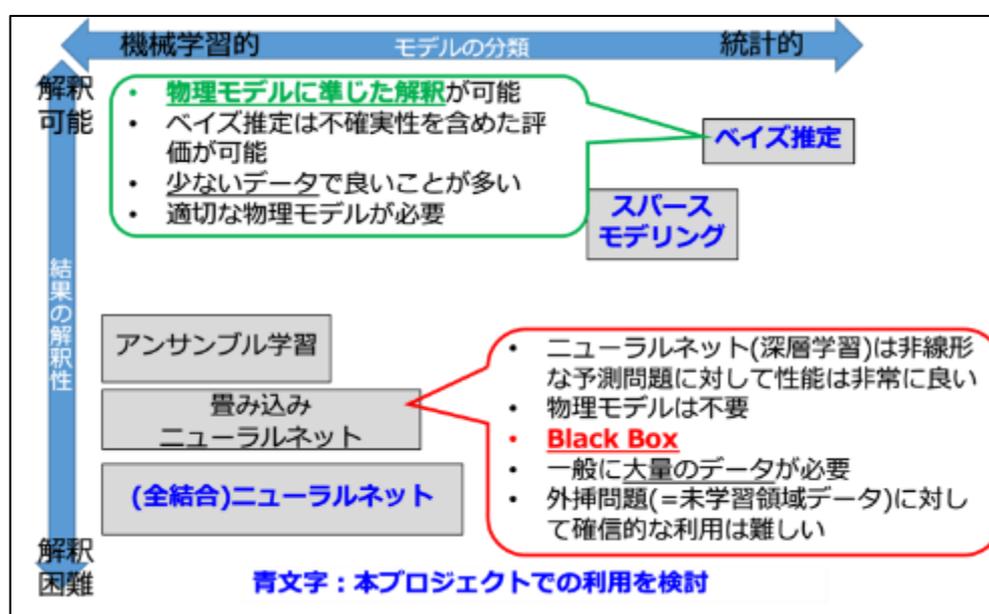
### III. 研究開発成果について

本事業の主な成果は以下の通り。

#### 研究開発項目①「AIによる超臨界地熱資源評価技術」

##### ①-1. AI導入FS, 既存手法の検討

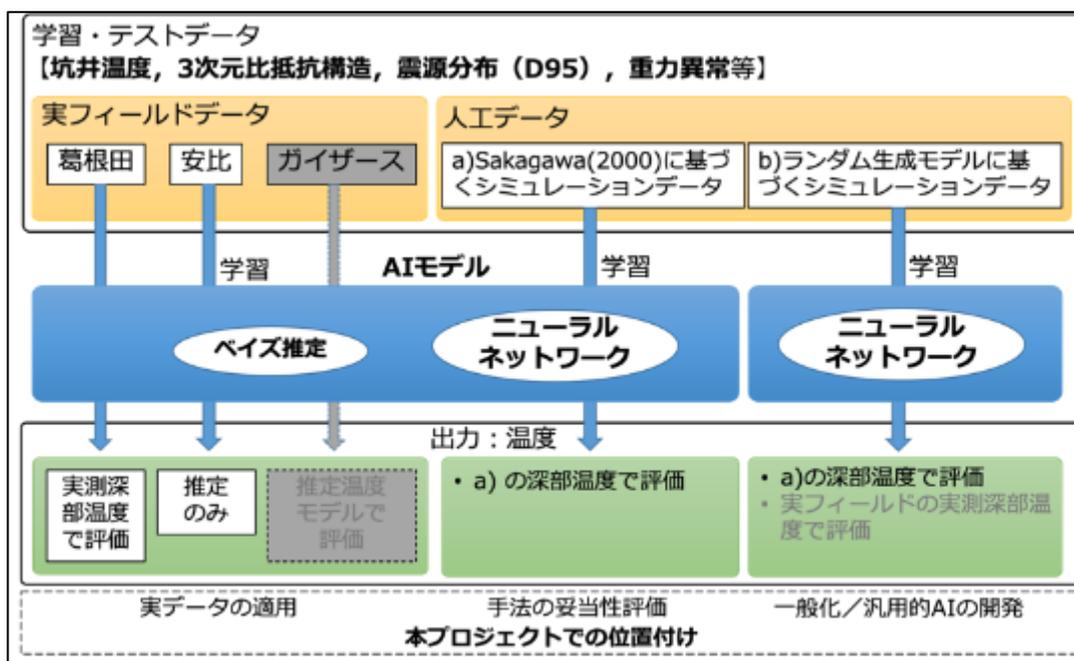
資源探査, 地球科学分野におけるAI技術の適用例を文献調査からレビューし, 手法と特徴を整理した。この検討結果から, 深部熱構造を推定するための最適なAI的手法の候補としてニューラルネットワーク, スパースモデリング, ベイズ推定を選定した。これらの手法で深部熱構造の推定を実現するために①-2で収集するデータの仕様, ①-3で開発するAI機能仕様(データ項目, 分解能等)の策定を実施した。



図III(4.1)-1: 本プロジェクトで検討したAI手法(回帰, 教師あり学習)

##### ①-2. 教師データの収集

①-1で策定したデータ仕様に基づき, 地質, 物理探査, 坑井, 地化学等の実データを既存のデータベース, 文献調査等から収集し, デジタルデータとして整理した。また, データ仕様に基づき, 比抵抗, 弾性波速度等の基礎岩石物性データの文献調査を行った。熱水流動シミュレーションを利用し, 手法評価のための人工データセットを作成した。



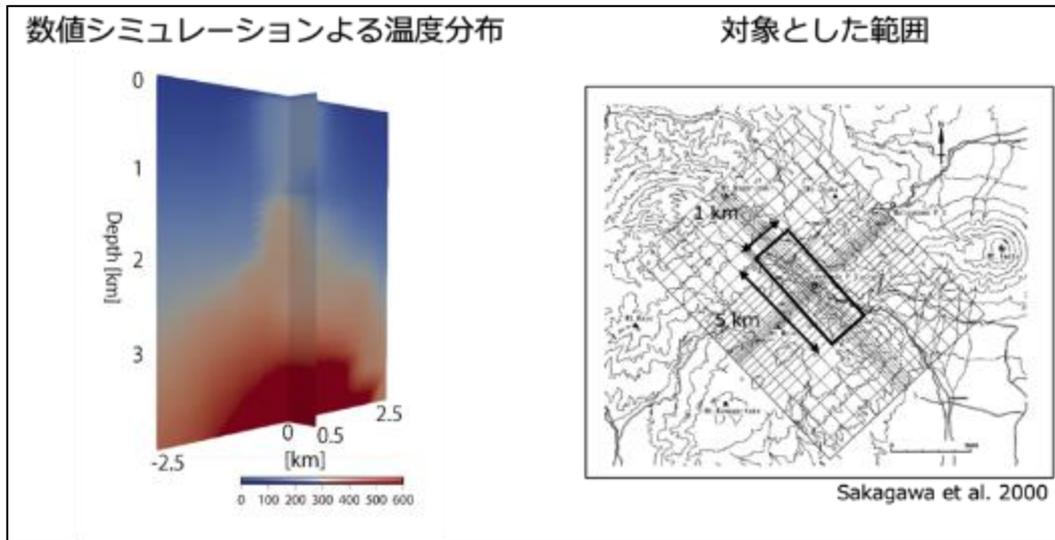
図Ⅲ(4.1)-2：収集したデータと用途

①-3. AI 機能開発

①-1で策定したAI機能仕様に基づき、地表、浅部のデータから深部構造を推定するAI手法を開発した。①-2で収集したデータを使用し、ニューラルネットワークにより特徴量や空間的分布等を抽出、学習する手法、観測値と岩石物性値を結びつける理論式もしくは経験式に基づく岩石物理モデルを用いて、ベイズ推定により関係する物性値を導き出す手法を開発した。

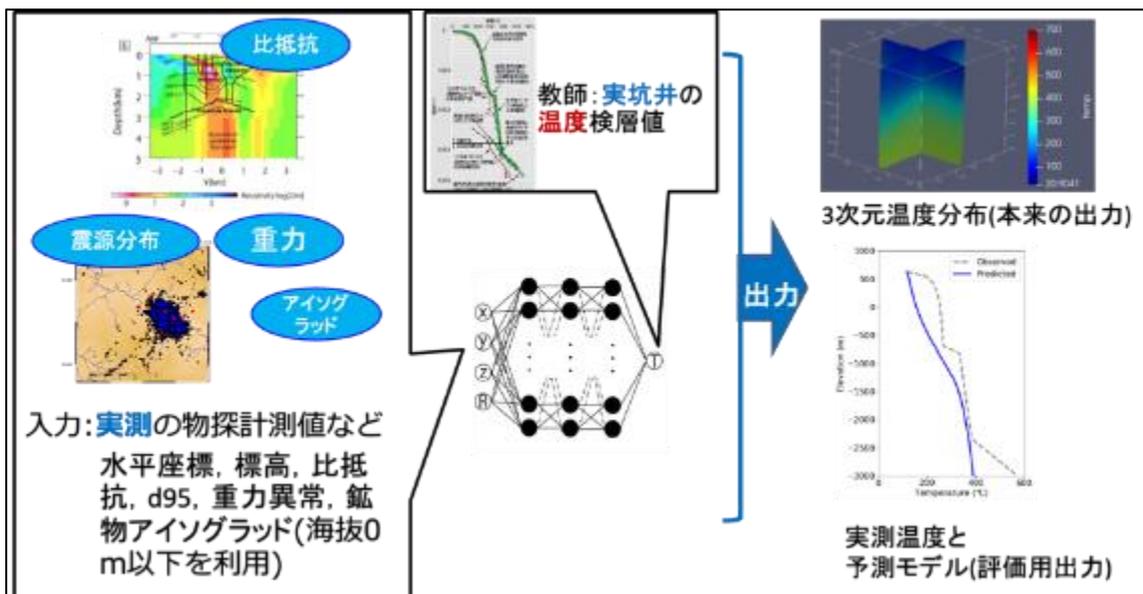
①-4. AI 機能の評価, まとめ

①-3. で開発したAIに貯留層シミュレーションモデルに基づくデータセットを用いて、予測温度の評価を行った。広域で坑井数の多い条件下ではいずれも20%以下の誤差となった。一方、局所的で坑井数が少ない条件下では、既存坑井の深さが推定誤差に大きく影響することが明らかになった。



図Ⅲ(4.1)-3：開発したニューラルネットワークおよびベイズ推定の妥当性検証に使用した葛根田地熱地域のシミュレーション (Sakagawa et al. 2000) による温度構造 (左) と対象範囲 (右)。

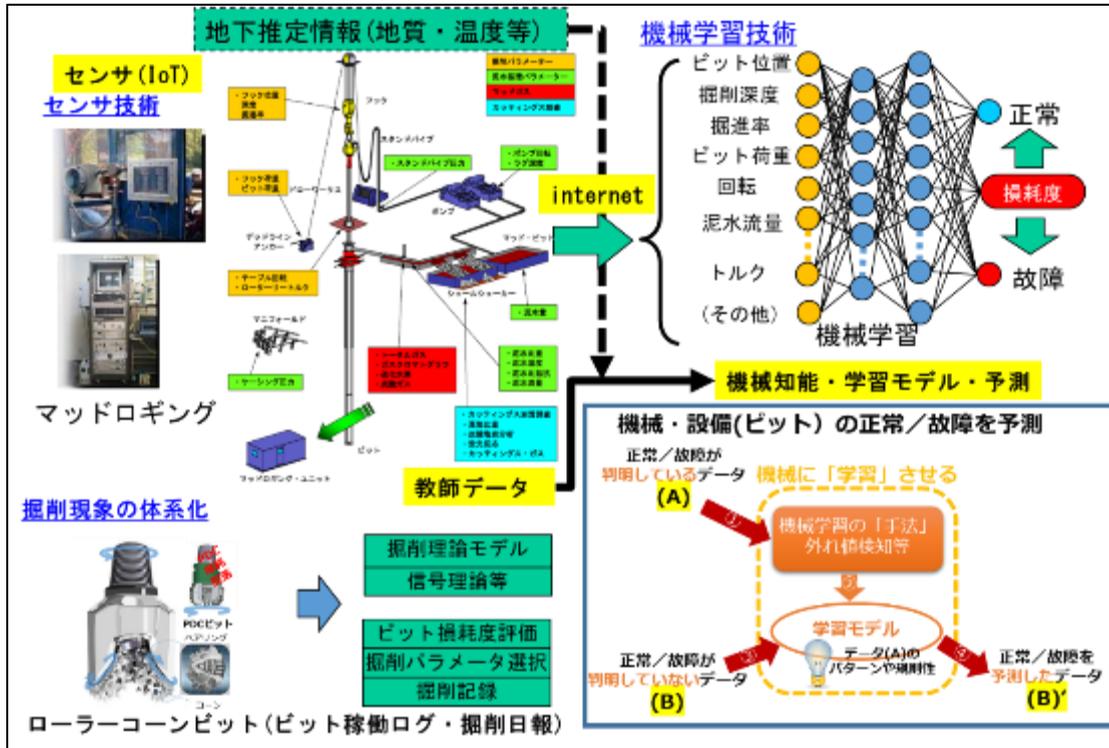
また、複数モデルフィールド (葛根田地域、安比地域) の実データを適用して、深部構造の推定を行い、温度構造を可視化した。水の超臨界状態相当の温度実測値が存在するフィールド (葛根田地域) において、当該実測値を除いたデータを使用して AI が推定した温度構造と当該実測値の誤差はベイズ推定で 13.9%、ニューラルネットワークで 14~16% となった。また、①-1~4. を総括し、設定した目標の達成度評価、課題の抽出、将来的な改善内容の検討を行った。



図Ⅲ(4.1)-4：実フィールドデータへの適用概念 (ニューラルネットの例)

研究開発項目②「AIによる超臨界地熱資源掘削技術」

全体システムの概念図を図Ⅲ(4.1)-5に示した。



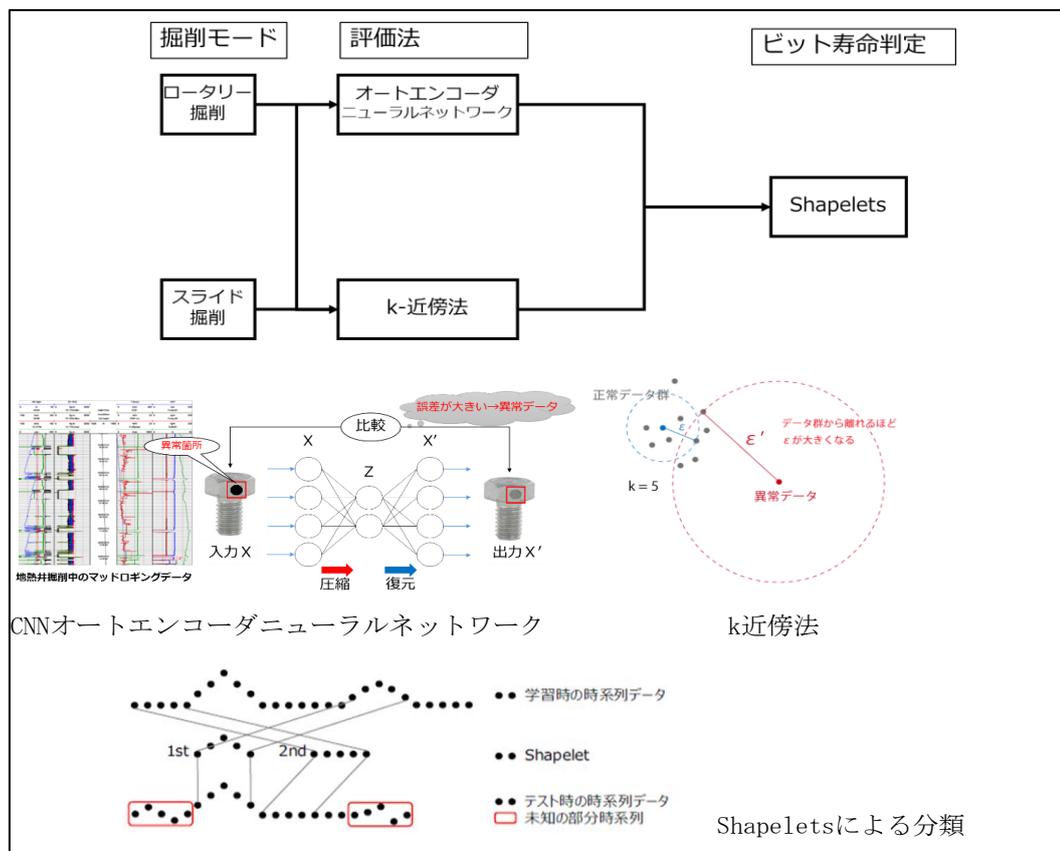
図Ⅲ(4.1)-5：超臨界地熱資源掘削技術全体システム

超臨界地熱井などの掘進長 4,000m を超える大深度坑井におけるビット交換のための揚降管作業時間（掘削停止期間）の増大は掘削コストを増大する。超臨界地熱井では、高温・硬質岩での掘削が予想され、ビット損傷によるコーン落下などの事故の可能性が増すため、より安全な使用時間で交換を行うため、掘削コストは更に増大することから、ビットの寿命を予測することはコスト削減に寄与する。ビットの損傷のメカニズムは、在来の地熱井と超臨界地熱井で変わらないため、在来地熱井のデータを教師データとすることで超臨界地熱井掘削時に役立つ支援技術を開発する。ビットは消耗品であるため、新品からビット損傷直前までの寿命を予測することができる。長く使うほど、経済性が改善されるが、ビット損傷によるコーン落下のリスクが増加する。ローラーコーンビットは、ベアリングの損傷によるガタツキや掘進率の減少などが予想される。コーンが脱落しない限り、多少のベアリング損傷であれば、掘削継続は可能である。従って、ローラーコーンビットの場合は、ビットの機軸度ではなく、ベアリング（回転機械）の寿命に着目する方が現実的である。したがって、使用開始時点では新品＝正常であることから、使用開始時点を中心としてその時点からのズレを検知して損傷を予測する「外れ値検知」アルゴリズムが適用できる。ちなみに、回転部分が存在しない PDC ビットについては、地熱での適用事例が少ないため、次期課題とした。

地熱井掘削工事における掘削ビット損傷事例を収集して、2019年度までに34丁（損傷2丁）、2020年度に10丁（損傷7丁）の掘削情報（マッドロギング、掘削日報等）を得た。これらの情報に基づき、ビット損傷に関連性のありそうな情報について関連性の分析を行い、ロータリー方式の場合は回転トルク、スライド方式の場合はポンプ圧力がビットの損傷に関する強い相関性が見られたため、これらの情報を機械学習の方に反映させた。

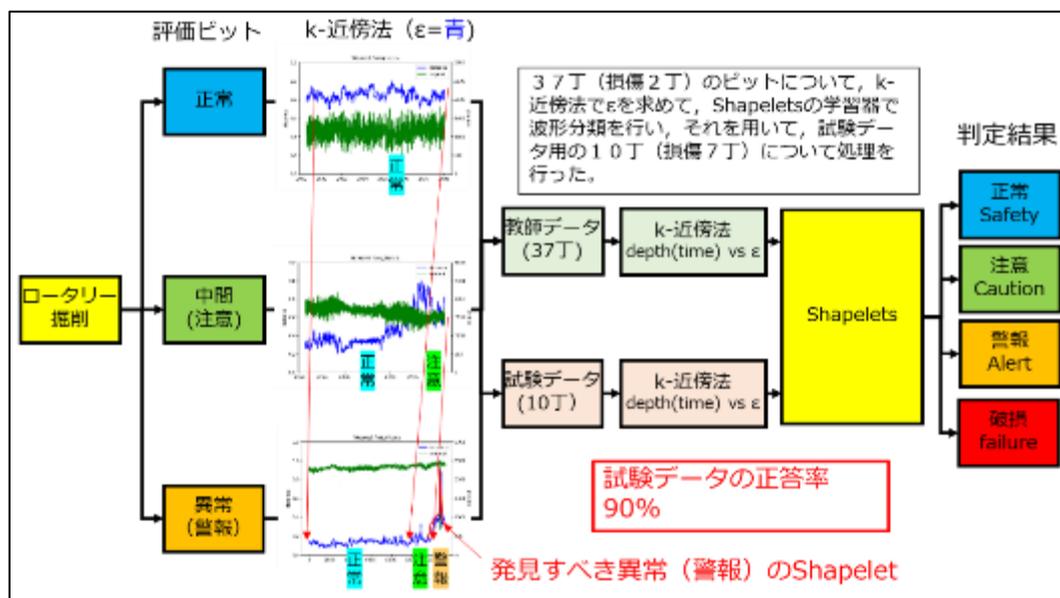
マッドロギングデータにおける回転トルクの計測方法が掘削機械によって異なるため、統一を図った。また、マッドロギングには、掘削中以外のデータも含まれているため、自動的にデータがどの方式による掘削中であるか、あるいは、掘削以外の何の作業を行っているかを判定して、各データ値に紐づけできる機能を付加した。更に、マッドロギングシステムをクラウドサービス（今回はAWS）上の機械学習システム側に送信して、機械学習側の判定結果を受信してマッドロギング側で表示できる機能を付加した。

CNN オートエンコーダニューラルネットワークによるビット寿命判定法と k-近傍法を用いたビット寿命判定法の結果から、分類器を学習することで分類に有効な波形パターンである時系列 shapelet を発見する shapelets のアルゴリズムを用いて、正常、故障の判定を行う方法を開発した（図Ⅲ(4.1)-6）。



図Ⅲ(4.1)-6 ビット寿命判定のために用いた機械学習法の組み合わせ

37丁（故障2丁）の事例について、回転トルクならびにポンプ圧力のデータを用いたk-近傍法による処理結果（掘削深度対 $\epsilon$ ）をShapeletsの信号分類器により学習した波形に基づき、10丁（故障7丁）のデータを用いて検証を行った結果、90%の正答率（警報8丁，正常・注意2丁）の結果を得た。



図Ⅲ(4.1)-7：Shapeletsによるビット寿命判定

表Ⅲ(4.1)-1 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発 表・講演	新聞・雑誌 等への掲載	その他
2018FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
2019FY	0件	0件	0件	0件	0件	4件	0件	0件
2020FY	0件	0件	0件	0件	0件	10件	0件	0件

(※Patent Cooperation Treaty：特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ(4.1)-2 最終目標に対する成果と達成度

事業項目	開発目標	成果	達成度
① AIによる超臨界地熱資源評価技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>水の超臨界状態相当の温度実測値が存在するフィールドにおいて、当該実測値を除いたデータを使用してAIが推定した温度構造と当該実測値の残差が20%以内であること。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>水の超臨界状態相当の温度実測値が存在するフィールド（葛根田地域）において、当該実測値を除いたデータを使用してAIが推定した温度構造と当該実測値の残差は、ベイズ推定で13.9%、ニューラルネットワークで14～16%となった。</li> </ul>	○
② AIによる超臨界地熱資源掘削技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>過去に得られたマッドロギングデータ等を入力して、ビットの摩耗度の予測を行い、現実の計測数値と誤差20%以内の精度で予測を行うことが可能なこと。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>掘削ビット37丁（損傷2丁）を学習データとしてk-近傍法とLSTM(Long Short-Term Memory)オートエンコーダニューラルネットワークによる損傷ビット予測に基づき、Shapletsを用いた波形パターン分類を行い、新たな10丁（損傷7丁）の損傷予測を行った結果、90%の正答率（誤差10%）を得ることができた。</li> </ul>	○

#### IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

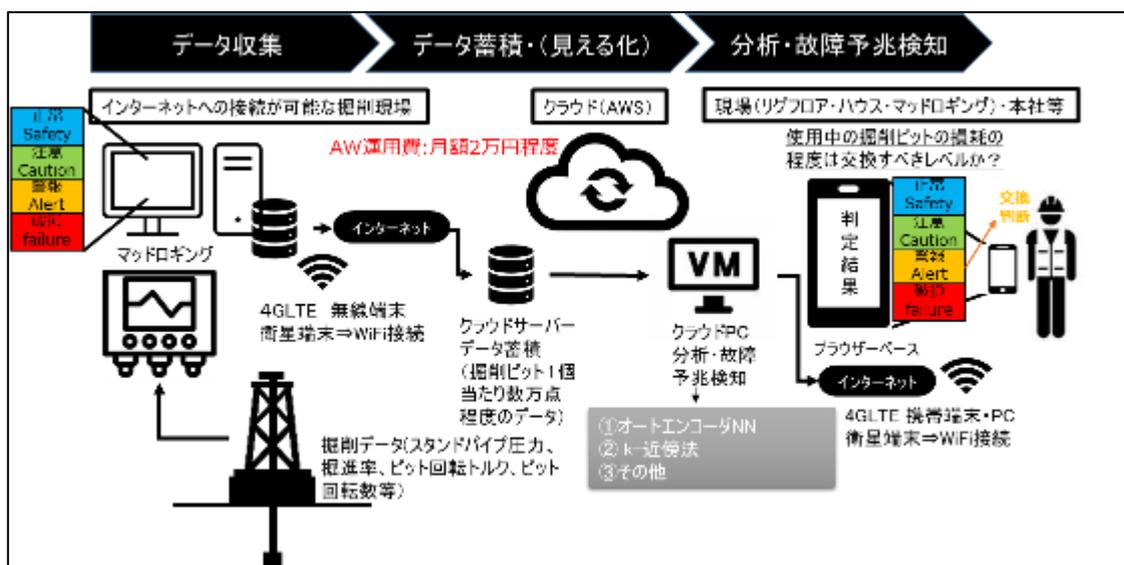
##### 研究開発項目①「AIによる超臨界地熱資源評価技術」

本事業を通して、AIは当該実測値の20%以内の誤差で水の超臨界相当の温度を推定可能であることが示された。今後、学習方法の改善、物理モデルの精緻化により推定の高精度化を進める。有望地点におけるパイロット孔掘削における実測データでの実証により、本掘削地点の選定前の事業化を目指す。

##### 研究開発項目②「AIによる超臨界地熱資源掘削技術」

本事業を通して、AIは当該実測値の20%以内の誤差で掘削ビットの損傷度を推定可能であることが示された。また、実装のためのクラウドサービス・単独運用でのシステム運用について検討を行った(図IV(4.1)-1にクラウドサービスベースでの運用形態を例示した)。

今後は、委託先4者において、個々の役割分担を確定して、社会実装によって、在来地熱開発での掘削現場での適用を行い、データの蓄積ならびにシステムの改良を加えて、本掘削地点の掘削時での運用を目指す。



図IV(4.1)-1 AIによる超臨界地熱資源掘削技術の実装化例(クラウドサービスによる運用例)

## 個別テーマ (4.2)

### (4) 超臨界地熱資源への調査井掘削に資する革新的技術開発

#### (4.2) 二重解放コアを用いた地殻応力測定法の研究開発

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

## II. 研究開発マネジメントについて (事業の計画内容)

### (4.2.1) 背景と目的

2016年4月に策定された「エネルギー・環境イノベーション戦略」において、温室効果ガス排出量を削減するポテンシャルが大きい、有望な革新技術として地下の超高温・超高压の状態（超臨界状態）にある水を利用する地熱発電（以下、超臨界地熱発電という）が挙げられた。これを受けて、2017年度に、「超臨界地熱発電の実現可能性調査」を実施し、超臨界水の状態把握、当該貯留層からの熱抽出の検討、人工貯留層造成の検討、高温環境で使用可能な機材・資材の検討、経済性評価等に関する調査をそれぞれ実施した。当該調査結果を受け、本プロジェクトでは、超臨界地熱資源への調査井掘削に資する革新的技術として二重解放コアを用いた地殻応力測定法の研究開発を実施する。

### (4.2.2) 研究開発の概要

地熱発電に必要な熱水／蒸気は、破壊によって形成されたき裂や断層などの割れ目を主要な流路として移動する。したがって、その流れを評価・予測するためには、割れ目の幅や分布を支配する地殻応力の把握が重要となる。しかし、超臨界地熱の対象となる、大深度かつ高温な岩体の地殻応力を測定できる方法はない（図Ⅱ(4.2)-1）。この課題を解決するために本事業では、下記の2つの研究項目を実施して二重解放コアを用いた地殻応力測定法（略称、二重解放コア変形法）を実坑井に適用するための坑内ツールを開発すると共に、その妥当性を室内および実坑井を用いた試験で検証する。

#### ① 二重コアビットの開発（担当：物理計測コンサルタント、応用地質、東北大学）

対象とする二重解放コア変形法では、新たな掘削方式となる二重コアリングによって地殻応力の情報（水平面内の最大および最小成分の大きさと方向）を変形量として掘削コアに記録し、それを地表に回収したコアから読み取る測定原理である（図Ⅱ(4.2)-2）。揚降管に長時間を要する大深度の測定となることを考慮し、かつコアにダメージを

与えることなく一度の掘削で対象コアを掘削・回収する工程を行うことを目的として、二重コアビットと名付けた独自の掘削ツールを開発する。

② 測定結果に及ぼす各種因子の影響評価（担当：東北大学）

二重解放コア変形法の元となるコア変形法の原理自体は、地下3～4km深度の測定に適用できることが、2017年度に実施した調査における南アフリカ大深度金鉱山への適用事例で検証済みである。しかし、応力評価のデータとなるコアの断面形状が、掘削泥水と岩体の温度差、坑底からコアを回収する過程の温度低下および二重コアリングで作成した溝の応力集中などの要因で乱される可能性がある。このため、それらの影響を室内実験および数値シミュレーションで定量的に評価する。その結果を踏まえて最適な二重コアビットのビット先端形状および2つのビットの位置関係などを明らかにし、また、二重解放コア変形法によって正しく地殻応力を測定できる応力レベルと岩体温度の範囲などの測定条件を提示する。

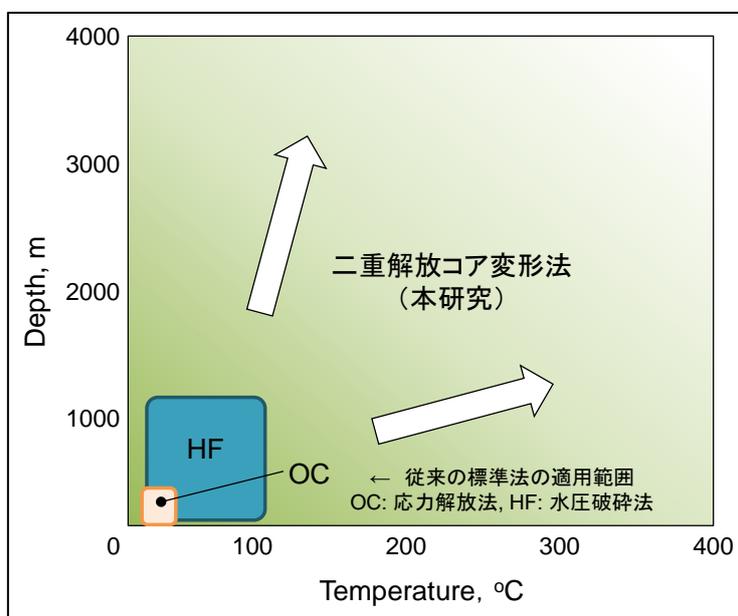


図 II (4.2)-1 本研究で見込まれる適用範囲の大幅な拡大

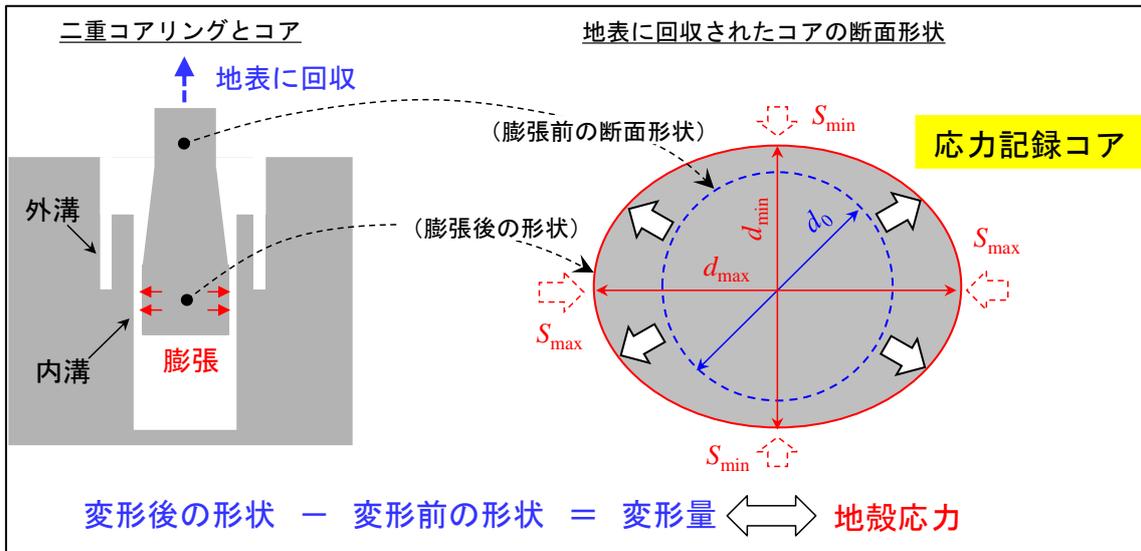


図 II (4.2)-2 二重解放コアを用いた地殻応力測定法の基本概念

表 II (4.2)-1 研究開発目標と根拠

事業項目	開発目標	目標レベル設定の根拠
①二重コアビットの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 二重解放コア変形法の要領でコアリングを行うための二重コアビット（実験ツール）を製作し、他の標準的手法で測定した地殻応力値と同等性能を有することを確認する。（中間）</li> <li>➤ 二重コアビット（実験ツール）の結果を踏まえ、超臨界地熱開発の掘削坑井として想定される8-1/2inの口径で二重コアビット（実用ツール）を製作し、超臨界地熱環境（深度4～5km、温度400℃～500℃）の岩体中で使用可能な方法を提案する。（最終）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 二重解放コア変形法の可否を左右する課題が二重コアリングという新たな方式による掘削を行うための二重コアビットが実現できるか否かにあり、また、実現できたことの証明には、その二重コアビットで実際に採取したコアから求めた地殻応力の妥当性を示すことが必要となるため。</li> <li>➤ 本事業は超臨界地熱開発に資することが目的であり、そのためには、開発対象となる超臨界地熱環境にある岩体に適用できる技術であることが必要のため。</li> </ul>
②測定結果に及ぼす各種因子の影響評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 応力レベルおよび岩体温度などの因子が地殻応力評価に及ぼす影響を明らかにする。（中間）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 二重解放コア変形法の原理を、超臨界地熱開発が対象とする地層の条件に近い、高温で大きな模擬地殻応力条件で実験を行い、その影響を確認する必要</li> </ul>

	<p>➤ 二重解放コア変形法によって誤差20%以内の精度で地殻応力を測定できる応力レベルと岩体温度の範囲などの測定条件を提示する。この結果と①で製作した二重コアビットの仕様に基づき、深度4～5kmと想定される超臨界地熱貯留層に作用する地殻応力を直接あるいは間接的に測定する方法を明らかにする。（最終）</p>	<p>があるため。</p> <p>➤ 地殻応力は、超臨界地熱開発の方向性を左右する基本データとなる。このため、測定法の限界を予め把握し、得られた結果の信頼性の程度を示すことが必要であり、また、信頼性の高い結果を使って、測定限界を超える条件にある岩体の地殻応力を推定する方法の検討が可能となるため。</p>
--	--	--

(4.2.3) 事業スケジュール

本事業の研究期間は、2018年8月3日より2021年2月28日であり、主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ(4.2)-3に示す。

事業項目	2018年度				2019年度				2020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 二重コアビットの開発												
・小口径ビット（実験ツール）の開発と検証	→											
・大口径ビット（実用ツール）の開発	→											
・標準法との比較検証				→								
②測定結果に及ぼす各種因子の影響評価												
・室内実験装置の製作	→											
・室内実験による岩体温度および応力レベルの影響評価				→								
・数値シミュレーションによる応力解析と実験結果の検証	→											
② まとめ												→

図Ⅱ(4.2)-3 研究開発のスケジュール

(4.2.4) 研究開発の実施体制

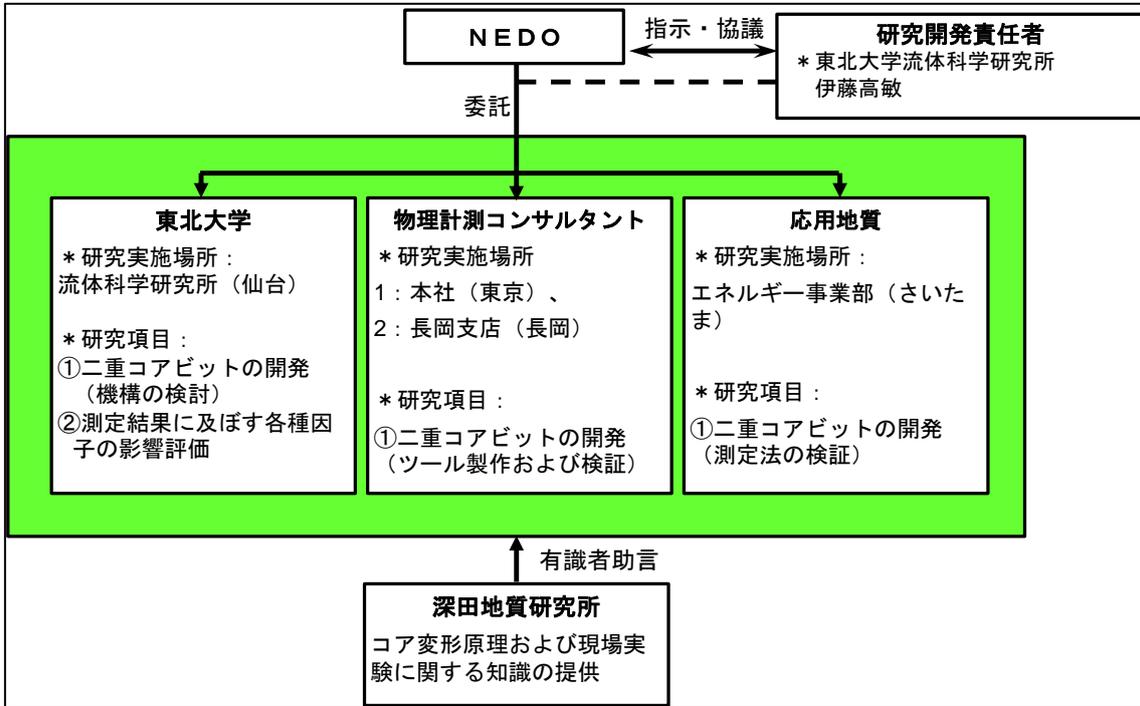


図 II (4.2)-4 研究開発の実施体制

(4.2.5) 研究開発の管理運営

表 II (4.2)-2 に示す有識者より指導・助言等を頂いた。

表 II (4.2)-2 有識者からの指導・助言等

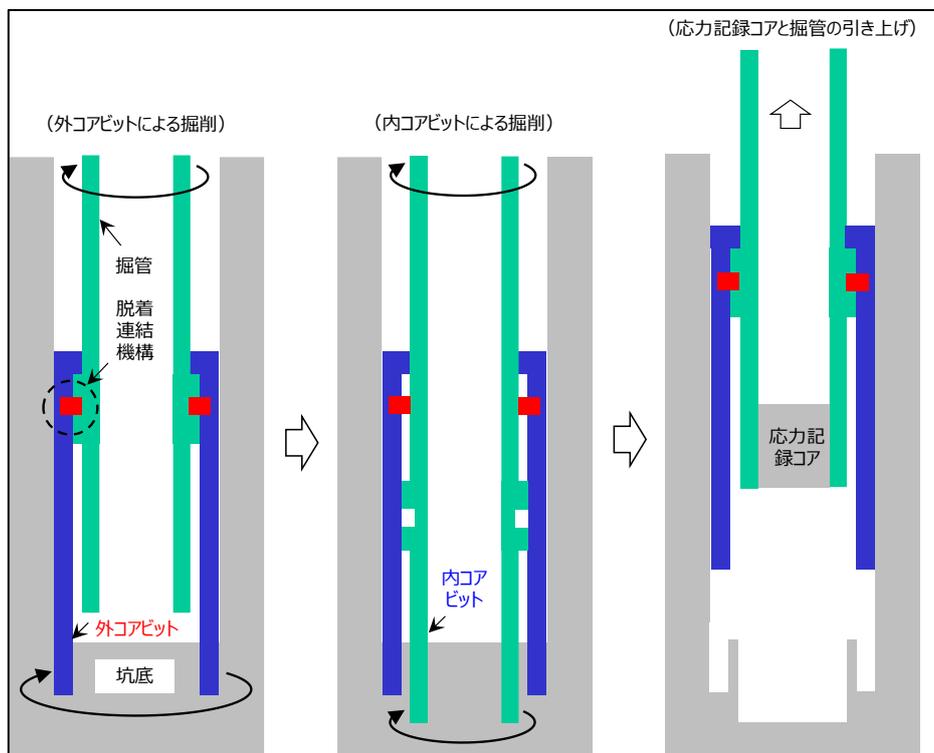
氏名	所属・役職	指導・助言等の内容
船戸 明雄	公益財団法人深田地質研究所 主席研究員	コア変形に関する知識の提供および検証方法に関する助言
横山 幸也	同上 上席研究員	現場実験に関する知識の提供および検証方法に関する助言

### Ⅲ. 研究開発成果について

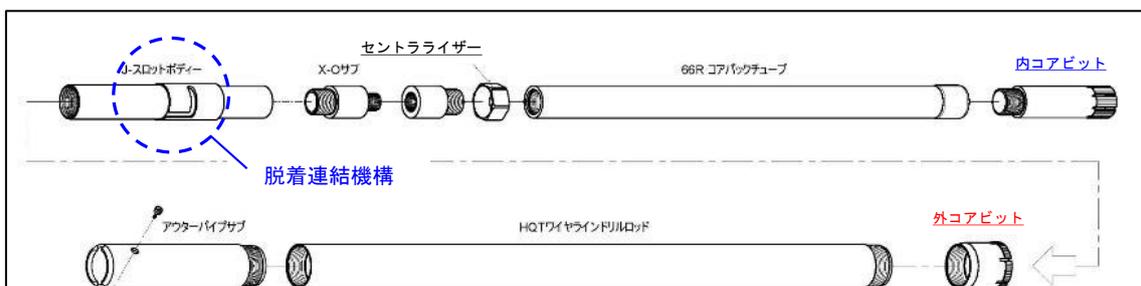
本事業では、その重要性が従来から認識されながら未知量であるために開発に反映できなかった地殻応力を、原理的には大深度かつ高温の条件でも定量的に測定できる二重解放コア変形法を提案し、それを超臨界地熱層に適用するためのツール開発と方法の検証を行った。

- ① 二重解放コア変形法では、同心で径が大小異なる2つのコアビットを用いて掘削を行うことで地殻応力をコアの断面形状として記録する。この要領を二重コアリングと呼ぶ。そのためのビット交換を掘管の揚げ降ろしを要せずを実施するための掘削方法を新たに考案した(図Ⅲ(4.2)-1)。この方法では、2つのコアビットと、その切り替え機構からなる掘削ツール、すなわち二重コアビットを用いる。この方法を実証するために、まず小口径(HQ サイズ)の坑井を用いて二重コアリングを行うための二重コアビット(以下、小口径実験ツール)を実際に製作した(図Ⅲ(4.2)-2)。
- ② 神岡鉱山において、地殻応力を受ける周囲の岩盤に坑道から掘削した坑井に小口径実験ツールを適用して二重コアリングを実施した。これによってツールの動作検証を行い、その結果に応じてツールを改良した。まず坑道側壁から水平に掘削した坑井で掘削試験を行った。また、標準的な手法として広く普及している応力解放法および水圧破砕法それぞれを隣接する坑井に適用して地殻応力を求め、その結果が二重コアリングで採取されたコアから求めた地殻応力と一致することを確認した(図Ⅲ(4.2)-3)。次に坑道底面から鉛直に掘削した坑井で掘削試験を2回実施した。これらの結果を踏まえて、J-slot型ビット切り替え機構、ツール外筒の揺動を押さえるスタビライザー、内側の小径ビットの揺動を押さえるセントラライザーなどの構造、ならびに大小コアビットのサイズおよび刃先形状などを決定した。
- ③ 小口径実験ツールの試験結果を踏まえ、超臨界地熱開発で掘削される大口径(8-1/2in)の坑井を想定した、二重コアビットの実機サイズモデル(以下、実機モデルツール)を製作した(図Ⅲ(4.2)-4)。これを用いて模擬地殻応力を負荷した岩石ブロックの掘削試験ならびに坑底にセメントブロックを設けた深度20mの模擬坑井での掘削試験をそれぞれ実施して、実機モデルツールが正常に動作することを確認した。また、大型の泥水ポンプによるツール内の通水試験を行って流量特性を評価した。この結果から、超臨界地熱地層の掘削時に坑底温度を許容範囲に低下させるために必要な通水流量を確保できる見通しを得た。
- ④ 二重解放コア変形法で地殻応力を求める原理の妥当性を検討するために、三軸の模擬地殻応力を負荷した試験片からコアを掘削採取する実験を行い、そのコア形状から模擬地殻応力を正しく評価できることを確認した(図Ⅲ(4.2)-5)。岩体が高温な場合の適用性を確認するために、加熱した試験片を用いて同様のコア掘削実験を行っ

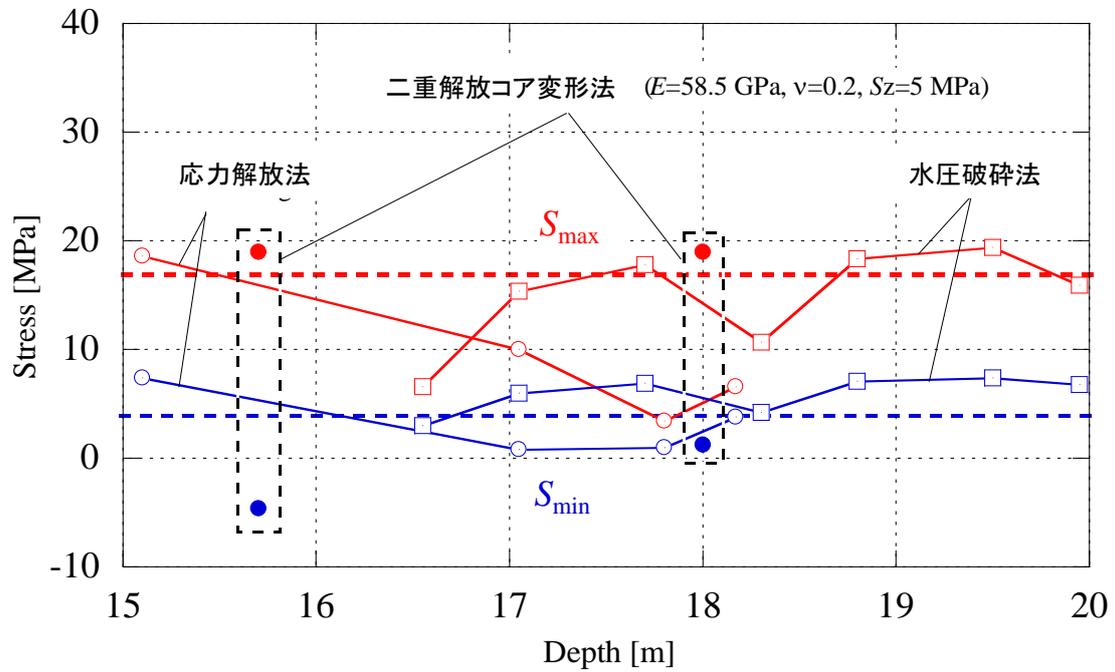
た。この結果、異常なくコアを採取でき、その形状から模擬地殻応力を正しく評価できることを確認した。また、高温の坑底から地表に回収する過程でコアに生じる温度変化が測定法に影響しないことを理論的に明らかにした。さらに、コア掘削を行う岩体を局所的に無応力にするために考案した特殊な掘削方法である二重コアリングを数値シミュレーションで再現し、掘削する二重の円周溝の最適な形状を求めた。また、二重コアリングの過程においてコアとして採取される部分の岩体に、破壊を起こすような異常な応力が発生しないことを確認した。以上の結果から、深度4~5kmと想定される超臨界地熱貯留層の温度と応力環境でも本測定法によって誤差20%以内の精度で地殻応力を測定できることが明らかとなった。



図Ⅲ(4.2)-1 二重コアリングを行うためのビット交換を掘管の揚げ降ろしを要せずに実施するために考案した新たなコア掘削方法



図Ⅲ(4.2)-2 実証試験に成功した小口径(HQサイズ)坑井用の二重コアビットとその構造

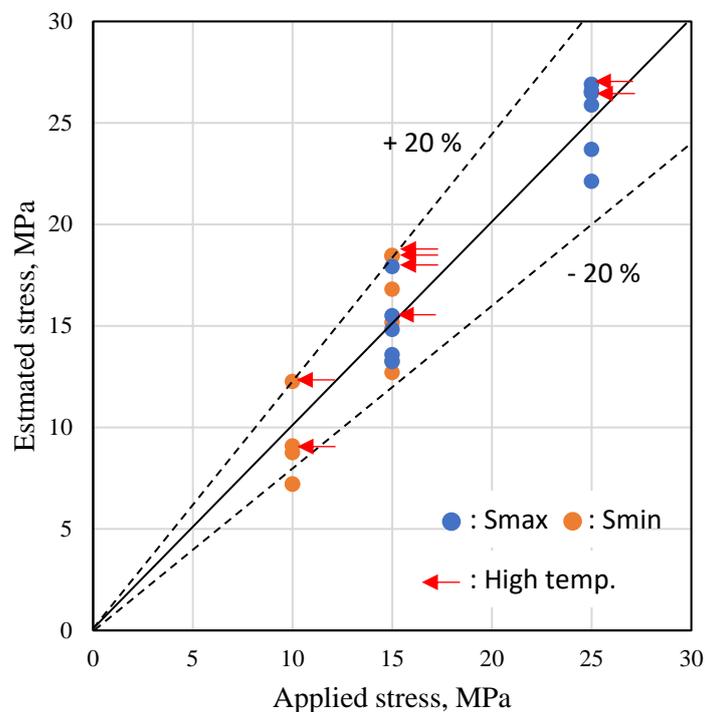


図Ⅲ(4.2)-3 神岡鉱山において実施した本手法と従来の標準法（水圧破砕および応力解放法）との比較検証結果



図Ⅲ(4.2)-4 超臨界地熱開発で掘削される大口徑（8-1/2in）の坑井を想定した二重

コアビットの実機サイズモデルの（左）組み立て状況および（右）コアの採取状況



図Ⅲ(4.2)-5 室温および高温の試験片に载荷した模擬地殻応力の最大および最小値、それらの大きさをコア形状から評価した各応力の比較結果

表Ⅲ(4.2)-1 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発 表・講演	新聞・雑誌 等への掲載	その他
2018FY	1件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
2019FY	1件	0件	0件	0件	0件	6件	1件	0件
2020FY	0件	0件	0件	0件	0件	6件	0件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ(4.2)-2 最終目標に対する成果と達成度

事業項目	開発目標	成果	達成度
①二重コアビットの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 二重解放コア変形法の要領でコアリングを行うための二重コアビット（実験ツール）を製作し、他の標準的手法で測定した地殻応力値と同等性能を有することを確認する。（中間）</li> <li>➤ 二重コアビット（実験ツール）の結果を踏まえ、超臨界地熱開発の掘削坑井として想定される8-1/2inの口径で二重コアビット（実用ツール）を製作し、超臨界地熱環境（深度4～5km、温度400℃～500℃）の岩体中で使用可能な方法を提案する。（最終）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 小口径（HQサイズ）の坑井を想定した二重コアビット（実験ツール）を製作し、これを用いた二重コアリングで採取されたコアから求めた地殻応力が、応力解放法および水圧破碎法それぞれで求めた結果に一致することを確認した。</li> <li>➤ 大口径（8-1/2in）の坑井を想定した二重コアビット（実用ツール）を試作し、地表試験で動作を検証した。また、大型の泥水ポンプによる通水試験の結果から、超臨界地熱地層の掘削時に坑底温度を許容範囲に低下させるために必要な通水流量を確保できる見通しを得た。</li> </ul>	◎
②測定結果に及ぼす各種因子の影響評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 応力レベルおよび岩体温度などの因子が地殻応力評価に及ぼす影響を明らかにする。（中間）</li> <li>➤ 二重解放コア変形法によって誤差20%以内の精度で地殻応力を測定できる応力レベルと岩体温度の範囲などの測定条件を提示する。この結果と①で製作した二重コアビットの仕様に基づき、深度4～5kmと想定される超臨界地熱貯留層に作用する地殻応力を直接あるいは間接的に測定する方法を明らかにする。（最終）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 深度1km相当の模擬地殻応力および掘削水と岩体の温度差が250° の条件で実験を行ってコア形状から模擬地殻応力を正しく再現できることを確認した。</li> <li>➤ 実験結果および数値シミュレーションによって二重コアリングを再現して得た応力分布の結果から、深度4～5kmと想定される超臨界地熱貯留層の温度と応力環境でも本測定法によって誤差20%以内の精度で地殻応力を測定できることが明らかとなった。</li> </ul>	◎

## IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

### (1) 超臨界地熱調査井での地殻応力評価への適用

本事業を通じて、二重解放コア変形法を深度 4~5km と想定される超臨界地熱貯留層での応力計測に適用できることが示された。超臨界地熱発電研究開発に従事する研究者・技術者は、2020 年代半ばに試掘井を掘削し、そこで取得したデータ、実験結果等により超臨界地熱発電の実現可能性を判断したいと考えている。その試掘井での適用に間に合うように実用ツールを製作し、坑井を使用したコミッションングを行う必要がある。そのための費用は以下の通り見積もられる。

- ・ 実用ツールの製作費 約 1,500 万円
- ・ 坑井での掘削試験 約 1,000 万円
- ・ 合計 約 2,500 万円

また、採取したコアの方位を特定するための方位計測機能を付加する場合は、更に 3500 万円程度の追加費用が必要である。これらの作業を民間企業の自社予算で実行することは困難で、NEDO 主導の超臨界地熱開発プロジェクト、あるいはその他の技術開発プロジェクトによってなされることが望まれる。

### (2) 従来型地熱調査井あるいはその他の分野での活用

本事業を通じて開発した小口径用ツール（HQ 孔用）は若干の課題を残すものの、必要な改良を施すことでサービス業務への展開が可能である。HQ 孔を対象としたツールのため、超臨界地熱坑井での適用はできないが、従来型地熱の調査井や断層調査、岩盤調査などその他の地質調査井での使用が想定される。本事業の受託会社である（株）物理計測コンサルタントと応用地質（株）は、地殻応力計測が必要とされる多様な分野において、二重解放コア変形法のサービスを展開する計画である。

二重解放コア変形法は、代表的な従来法である水圧破砕法と比較して、深度、温度両面で高い適用能力があると同時に、コストの面においても優位性がある。水圧破砕法と二重コア解放法とのおおよそのサービス費用の比較を下表に示す。一深度当たりの計測サービスを約 6 割の費用で提供できる見通しである。これらの強みを活かして幅広い分野でサービスを展開することで、地殻応力計測を今まで以上に身近なものとし、サービス機会の拡大に努めていきたい。

表IV(4.2)-1 地殻応力計測の概算費用比較（一深度当たり）

項目	水圧破碎法	二重解放コア変形法
坑井内作業※1	約 800 万円	約 500 万円
解析作業※2	約 200 万円	約 200 万円
合計	約 1,000 万円	約 700 万円

※1 水圧破碎法では 2～3 回の水圧破碎作業、二重コア解放法では 2～3 個のコア採取を含む。  
 深度約 500m を想定。※2 二重解放法コア変形法では岩石物性試験費用を含む。

以 上

## 個別テーマ (4.3)

### (4) 超臨界地熱資源への調査井掘削に資する革新的技術開発

#### (4.3) 革新的超臨界地熱場観測技術の研究開発

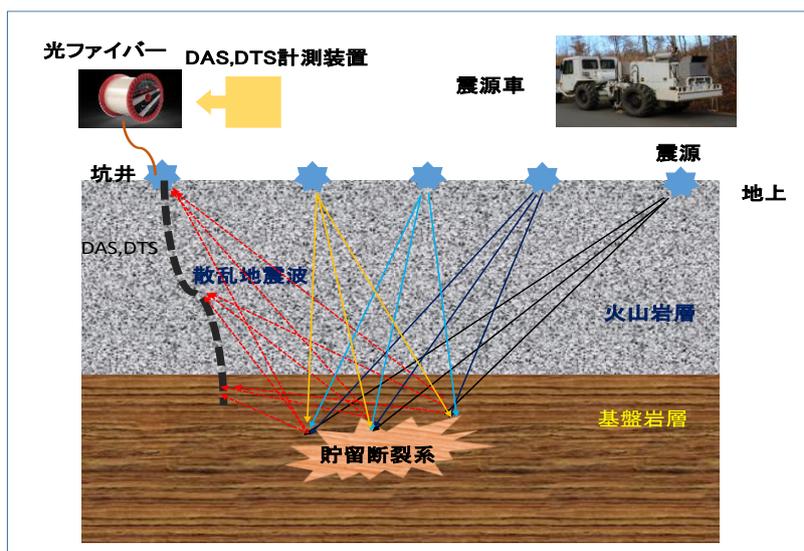
委託先：一般財団法人エンジニアリング協会、  
一般財団法人ファイナセラムセンター、  
国立大学法人京都大学

## II. 研究開発マネジメントについて (事業の計画内容)

### (4.3.1) 事業の背景と目的

超臨界地熱場を解明するために、まったく新しい坑井内地震探査法を世界に先駆けて開発することを目的として研究開発をおこなった。この探査法の概念を図Ⅱ(4.3)-1に示す。

この手法においては坑井内に設置した光ファイバーをセンサーとして用いる DAS (Distributed Acoustic Sensor、分布型音響センサー) 技術を応用する。また光ファイバーは超臨界水の臨界点 374°C、22MPa でも動作し、低 PH でも耐酸性の強い光ファイバー技術を開発することを目標とする。また、これらの観測機器で得られた地震波などの解析にあたってのシミュレーション技術、イメージング技術を開発する。本研究開発成果は今後の調査井掘削時の状況の把握と超臨界地熱場の構造を推定するモニタリング技術として活用出来るものとする。提案する探査技術の概念を図Ⅱ(4.3)-1に示す。



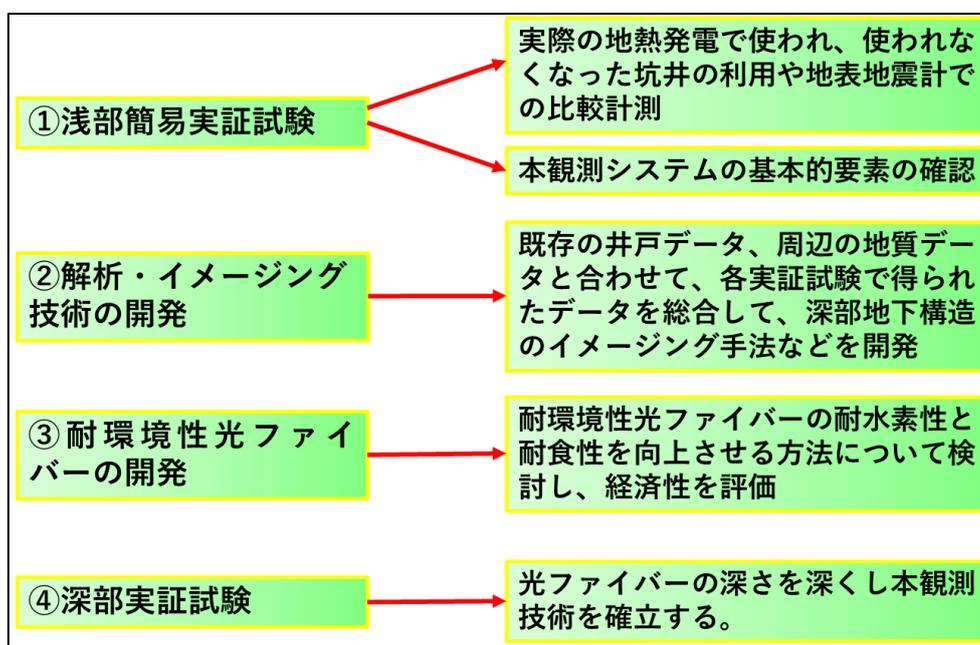
図Ⅱ(4.3)-1 超臨界地熱開発のための地震観測システムの概念  
地熱坑井内に設置した光ファイバーを用いた分布型音響センサー (DAS) を用い、震源から出した地震波を検出することにより

地下の地熱貯留をイメージする。

本探査技術は震源、坑内稠密地震波計測アレーを想定した地震観測システムであり、浅部の破砕帯域での地震波の減衰を避けるには、震源、受振システムがともに超臨界地熱源に近い必要がある。

その主要構成要素は地表人工震源、光ファイバー-DAS 型坑内稠密地震波計測アレー（光ファイバー-DAS）、イメージングのための地震波全波形インバージョン解析手法であり、震源から送出される地震波は貯留層で散乱され光ファイバー-DAS 受振器アレーで観測される。観測されるのは歪あるいは歪速度である。

図Ⅱ(4.3)-2 に研究開発の項目とその実施内容を示す。



図Ⅱ(4.3)-2 研究開発項目

(4.3.2) 研究開発の概要

研究課題毎の目標と根拠を表Ⅱ(4.3)-1に示す。

表Ⅱ(4.3)-1 研究開発目標と根拠

研究課題	目標	設定根拠
① 浅部簡易実証試験	<p>地熱坑井内の比較的浅部にDAS(分布型地震計)を設置し、周辺で起きる地震あるいは人工震源の振動を坑井に沿って5-10m間隔で計測する。そして、坑井内におけるDASのS/Nを定量的に評価するとともに逆伝播を行う。</p> <p>これらにより、DAS技術の有効性を確認し、課題を把握する。</p>	<p>浅部実証試験で得られたDASデータをもってインバージョン解析、イメージングした結果と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て、本技術の可能性を評価する。</p>
① 解析・イメージング技術の開発	<p>全波形インバージョンでは地下100-500mブロック内の位置と形、物性の状態について観測結果とインバージョンを用い推定する。</p>	<p>振動の伝播速度、周波数、受信間隔等からの分解能により、精度が制約される。</p>
② 耐環境性ファイバーの開発	<p>開発した光ファイバーが超臨界水環境下(374℃以上、22MPa以上)における要求性能を満たす耐水素性と耐食性を有することを実証し、経済性を評価する。</p>	<p>超臨界環境(温度、圧力)、設置雰囲気に耐えること。</p>
③ 深部実証試験	<p>使用可能な地熱坑井深度と坑井内の状態、使用可能な光ファイバーなどを勘案しながら、地熱坑井内にDASを設置し超臨界水貯留域が存在する深さに可能な限り接近する。そこで、深さ5kmまででかつ坑井周辺3km四方の物性変化、貯留層の存在の有無等を明らかにできる手法を開発する。</p>	<p>実証試験におけるセンサー部の設置深度を深くすることにより、より深い地盤のイメージング精度が向上する。</p>

(4.3.3) 事業スケジュール

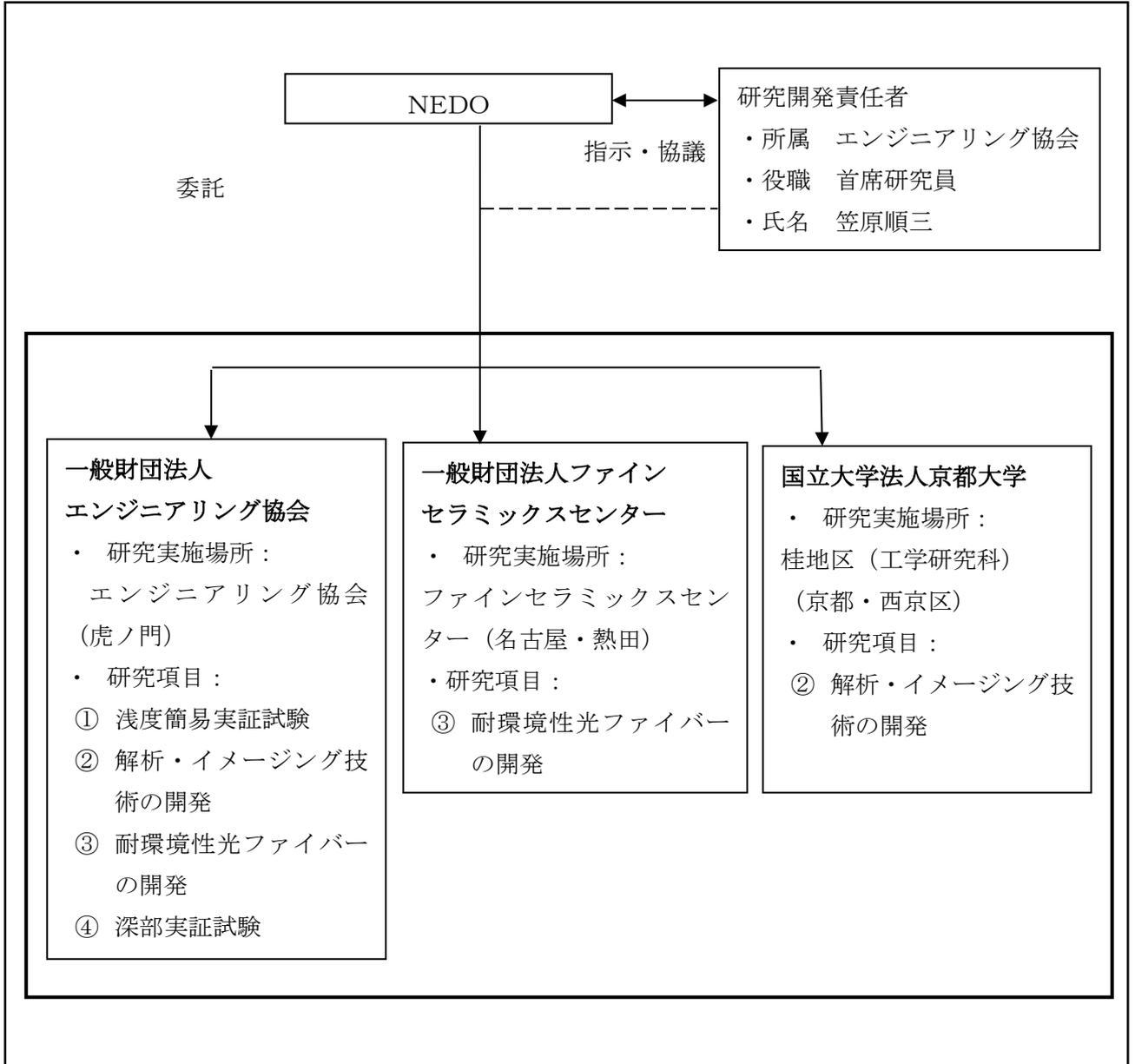
本事業の研究期間は、2018年8月3日から2021年3月20日までであり、主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ(4.3)-3に示す。

研究開発項目	2018年度	2019年度	2020年度
①浅部簡易実証試験	試験井調査 坑内DAS	能動的観測 有効性の確認 課題抽出	
②解析・イメージング技術の開発	試験井	モデル化 DAS比較検討 タイムラプス	技術の開発
③耐環境性光ファイバーの開発	ベンチマーク素材試験 耐環境構造設計 劣化損傷	評価試験	
④深部実証試験	適地調査	協力・データ入手 坑内DAS計測準備	能動的測定・解析

図Ⅱ(4.3)-3 研究開発のスケジュール

(4.3.4) 研究開発の実施体制

本研究の実施体制を図Ⅱ(4.3)-4に示す。



図Ⅱ(4.3)-4 研究開発の実施体制

(4.3.5) 事業の管理運営

表Ⅱ(4.3)-2に示す有識者より指導・助言等を頂いた。

表Ⅱ(4.3)-2 革新的超臨界地熱場観測技術の研究開発

有識者会議

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	・研究開発項目全体の事業内容の評価
村岡 洋文	元秋田大学教授	・地熱構造の評価

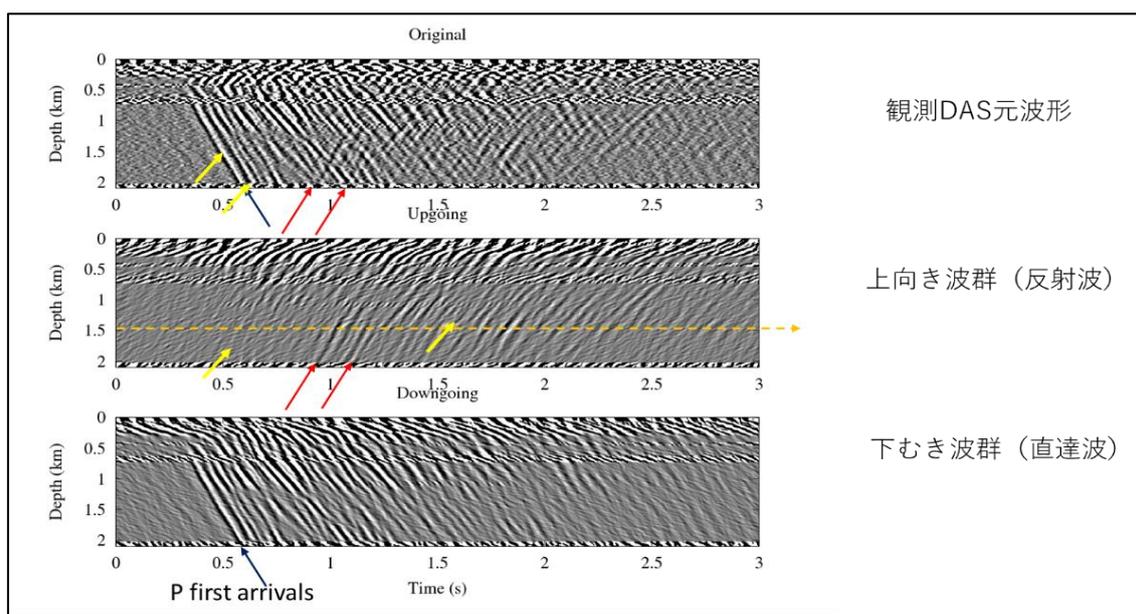
### Ⅲ. 研究開発成果

#### (1) DAS 観測及び解析の成果

2020 年度に実施された大沼地熱発電所での観測例と解析（イメージング処理）例を以下に示す。

○大沼地熱発電所地熱坑井内で取得した DAS 記録の例

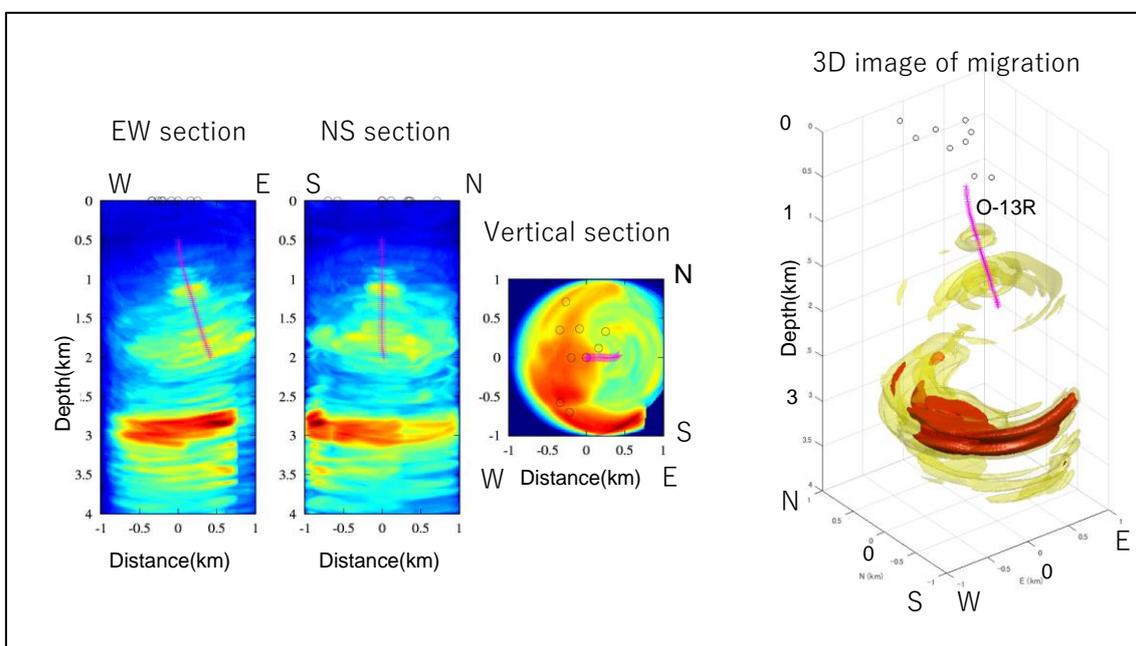
図Ⅲ(4.3)-1 に DAS 記録の例を示す。



図Ⅲ(4.3)-1 DAS 記録例（大沼地熱発電所）

- ・(上) 原 DAS 波形
- ・(中) F-K フィルターを適用し反射波成分にしたもの。赤矢印は深さ 2.8-3.0 km に確認された地震波反射層。未知の地熱貯留層の可能性が高い。黄矢印は現在の地熱貯留層からの反射波と一致する。
- ・(下) 直達波成分。縦軸は深さ(km)、横軸は到達時間(秒)。

○イメージング処理の例（大沼地熱発電所）  
 処理例を図Ⅲ(4.3)-2に示す。



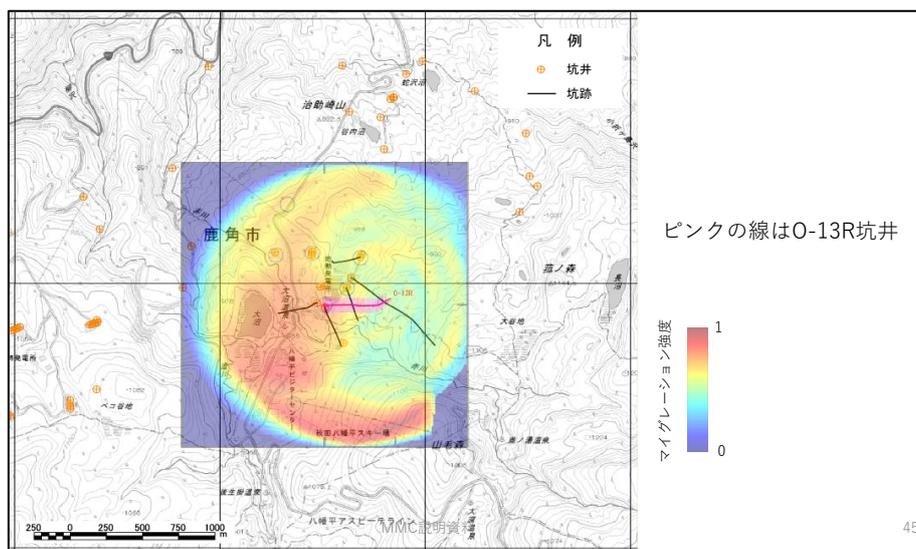
図Ⅲ(4.3)-2 統合化したマイグレーション\*結果

左図：東西、南北、上下のイメージング処理  
 右図：3次元マッピング結果

図Ⅲ(4.3)-2の深さ2.8-3.0kmに求めた赤い部分は地震波を強く反射する部分で今回の調査で明らかになった。未知の地熱貯留層の可能性が高い。

\*マイグレーション：反射法地震探査データ処理に含まれる処理ステップのひとつ。観測した反射波を反射点に戻す処理。反射法記録に含まれる構造形態の歪みの補正と分解能の向上を目的とする。

図Ⅲ(4.3)-3に大沼地熱発電所付近の地図と重ねた図を示した。今回の調査から明らかになった深さ2.8-3.0m kmに存在する地震波の(地熱貯留その可能性がある)強い反射ゾーンは既設発電所の南西に位置する。



図Ⅲ(4.3)-3 図上にマッピングした結果

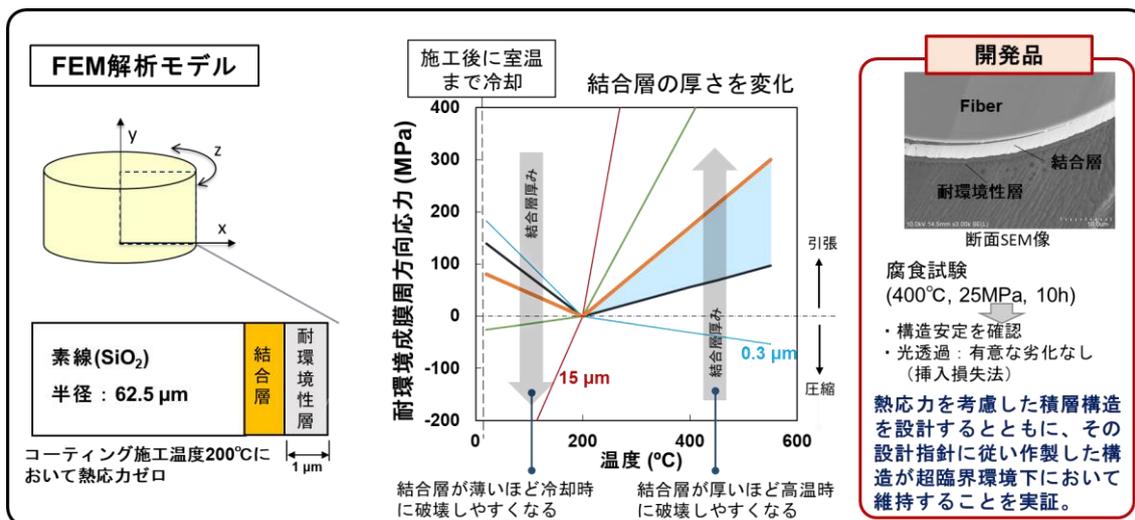
図Ⅲ(4.3)-3に示す通り、現存の大沼地熱発電所の南西の位置に、深さ2.8-3.0 kmに広がる地震波の高反射ゾーンの存在が明らかになった。この領域は周囲より密度が20%以上低下し地熱貯留層の可能性が高い。求めた反射層の深さの精度は~100mである。

## (2) 耐環境性光ファイバーの開発成果

耐腐食性、水素遮蔽性に優れた素材を用いて熱応力を考慮したコーティングの積層構造を設計するとともに、その設計指針に従い作製した構造が超臨界環境下において維持することを実証した。

また、耐食性が評価されたAuを被覆した光ファイバーは超臨界環境下(400℃)において光透過損失が認められなかったことから、既存製品においても適用可能性が示唆された。

耐環境性評価結果の概要を図Ⅲ(4.3)-4に示す。



図Ⅲ(4.3)-4 コーティングの耐環境性評価試験結果概要

(3) 目標と成果、達成度

研究開発の目標と成果、達成度を表Ⅲ(4.3)-1に示す。

表Ⅲ(4.3)-1 最終目標に対する成果と達成度

研究課題	開発目標	成果	達成度
① 浅部簡易実証試験	地熱坑井内の比較的浅部にDAS(分布型地震計)を設置し、周辺で起きる地震あるいは人工震源の振動を坑井に沿って5-10m間隔で計測する。そして、坑井内におけるDASのS/Nを定量的に評価するとともに逆伝播を行う。これらにより、DAS技術の有効性を確認し、課題を把握する。	メディポリス地熱フィールド内のIK-4坑井において1540mまでの深度でDAS計測をおこなった。5-10m間隔で計測を行い、長時間観測を行うことによるS/Nの改善を評価した。DAS技術が極めて有効であることを確認した。	◎
② 解析・イメージング技術の開発	全波形インバージョンでは地下100-500mブロック内の位置と形、物性の状態について観測結果とインバージョンを用い推定する。	全波形インバージョンを実施しモデルの再現性を評価した。その結果、位置、形状、Vpの再現性は良かったが、Vs, 密度の再現性はVp程では無かった。これは観測網の形状にも依存する。	◎
③ 耐環境性光ファイバーの開発	開発した光ファイバーが超臨界水環境下(374°C以上、22MPa以上)で、要求性能を満たす耐水素性と耐食性を有する事を実証し、経済性を評価する。	耐腐食性、水素遮蔽性に優れた素材を用いて熱応力を考慮した積層構造を設計するとともに、その設計指針に従い作製した構造が超臨界環境下において維持する	◎

		ことを実証した。また、既存光ファイバーのコストをもとに開発光ファイバーの経済性評価を行った。さらに、既存光ファイバーの耐食性を評価した結果、Auを被覆した光ファイバーは超臨界環境下（400℃）において光透過損失が認められなかったことから、既存製品においても適用可能性が示唆された。	
④ 深部実証試験	使用可能な地熱坑井深度と坑井内の状態、使用可能な光ファイバーなどを勘案しながら、地熱坑井内にDASを設置し超臨界水貯留層が存在する深さに可能な限り接近する。そこで、深さ5kmまででかつ坑井周辺3km四方の物性変化、貯留層の存在の有無等を明らかにできる手法を開発する。	1. 971km深度まで坑井内にDASを設置した。超臨界水域としては浅すぎたが、メディポリス地熱フィールドでは深さ3.6kmに超臨界層の可能性を示唆するゾーンの存在を見つけた。大沼地熱フィールドでは深さ2.8-3.0kmに地震波反射ゾーンを見つけた。これは超臨界水域としては少し浅い。坑井周辺3km、深さ5kmの貯留層検出の可能性はほぼ達成できた。物性の評価も行った。短時間では変化は見られなかった。	◎

#### IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

##### (1) 課題

- ・本研究を通じ坑井内に設置した DAS を用いた地震波探査が地熱地帯であっても地下構造に有効であることがメディポリス地熱フィールドと大沼地熱フィールドで有効であることを実証できた。しかし、地震波の反射ゾーンとしてマッピングできた地下3km、4kmのゾーンが地熱貯留層かどうかの同定には越えなければいけない壁がある。地震波反射強度分布からその場所の物性を明らかにしていくことが必要であろう。
- ・DAS を用いた地震学的アプローチで地熱構造を推定できたのは2か所であり、他の地熱フィールドでどの有効性の程度を明らかにしていく必要がある。
- ・今回開発した耐環境性光ファイバーを製作する場合、複数のコーティング工程が必要であるため、全体の製造コスト0k

が高くなることが想定される。既存光ファイバーの価格を参考に製造コストを試算した結果、使用上限温度が約300℃である光ファイバーに対してファイバー長1mあた

り約2万円の価格増加になることがわかった。

- ・実際にこの耐環境性光ファイバーを実用化する場合、数 km におよぶ連続被覆処理が必要になる。これを実現するには、設備メーカー・ファイバーメーカーを含めた要素技術開発が必要と考えられる。

(2) 取り組み

- ・今後地質と地熱構造の異なった日本各地の地熱フィールドにおいて実証試験をして本方法の有効性、有効な調査法、有効な解析法を確立してゆきたい。
- ・地震波反射強度から物性の推定には理論波形の利用、インバージョンの利用、反射率の計算などを行い、より精度の高い解析方法を適用していきたい。
- ・既存光ファイバーを DAS 用光ファイバーとして実用的に利用可能にするためには、  
i) センシング機能の耐久性予測法の構築、 ii) 使用環境下において適用可能なファイバーシステム構造の有効性を示すことが必要となる。

V. 発表・特許等の状況

(1) 特許

No	出願日	出願番号	出願に係る特許等の標題	出願人
1	2020/1/7	特願 2020-733	光ファイバ	ファインセラミックスセンター、エンジニアリング協会*

(2) 論文

No	発表者	所属	タイトル	雑誌名	発表年月日	査読有無
1	笠原順三	エンジニアリング協会	Seismic Imaging of Supercritical Geothermal Reservoir Using Full-waveform Inversion Method.	Proc. 44th Stanford Geothermal Workshop, 2019	SGP-TR-214	有
2	笠原順三	エンジニアリング協会	Seismic Time-lapse Approach to Monitor Temporal Changes in the Supercritical Water Reservoir	Proc. 44th Stanford Geothermal Workshop, 2019	SGP-TR-214	有

3	笠原順三	エンジニアリング協会	The second seismic study at the geothermal field in southern Kyushu, Japan using an optical fiber system and surface geophones	Prod. 45th Stanford Geothermal Workshop, 2020	SGP-TR-216	有
4	笠原順三	エンジニアリング協会	Possibility of high Vp/Vs zone in the geothermal field suggested by the P-to-S conversion	Prod. 45th Stanford Geothermal Workshop, 2020	SGP-TR-216	有
5	笠原順三	エンジニアリング協会	Time-lapse imaging of air injection using the ultra-stable ACROSS seismic source and reverse-time imaging method	Elsevier Pub. In “Active Geophysical Monitoring, 2nd ed.” 編集著	2020 /1	有
6	笠原順三	エンジニアリング協会	Time-lapse approach to detect possible pre-slip associated with the Nankai Trough mega-earthquake by monitoring the temporal change of the strong seismic reflector at the subducting Philippine Sea Plate	Elsevier Pub. In “Active Geophysical Monitoring, 2nd ed.” 編集著	2020 /1	有
7	笠原順三	エンジニアリング協会	ACROSS time lapse for the field study in the desert area of Saudi Arabia	Elsevier Pub. In “Active Geophysical Monitoring, 2nd ed.” 編集著	2020 /1	有
8	笠原順三	エンジニアリング協会	A DAS-VSP study around the geothermal field of the Ohnuma geothermal power plant in northern Honshu, Japan	Prod. 46th Stanford Geothermal Workshop, 202	SGP-TR-218	有

				1		
9	笠原順三	エンジニアリング協会	Seismic Feasibility Study to Identify and Characterize Supercritical Geothermal Reservoirs Using DTS, DAS, and Surface Seismic Array	Proceedings of World Geothermal Congress 2020+1	2020年予定を1年延期	有
10	笠原順三	エンジニアリング協会	Simulation of Seismic Imaging of Supercritical Geothermal Reservoir Using the Full-Waveform Inversion Method	Proceedings of World Geothermal Congress 2020+1	2020年予定を1年延期	有

(3) 学会発表

No	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月日
1	笠原順三	エンジニアリング協会	A feasibility study to identify geothermal reservoirs on southern Kyushu Island using DTS and DAS systems	2019年度地球惑星連合大会	2019/5/27
2	笠原順三	エンジニアリング協会	A possible geothermal source at around 4 km depth estimated by the seismic observation in Ibusuki geothermal area	同上	同上
3	笠原順三	エンジニアリング協会	Seismic feasibility study to identify supercritical geothermal reservoirs in a geothermal borehole using DTS and DAS	81st EAGE Conference & Exhibition	2019/6/5
4	羽佐田葉子	エンジニアリング協会	Feasibility study of seismic imaging of supercritical reservoir(s) using DAS and DTS methods in the Ibusuki geothermal field	2019年度物理探査学会春季大会	2019/6/5

5	笠原順三	エンジニアリング協会	地熱貯留層のイメージングのための全地震波形インバージョン (FWI)	2019 年度日本地震学会	2019/9/16
6	笠原順三	エンジニアリング協会	南九州のメディポリス地熱地帯における光ファイバーDAS と地表地震計を用いた地震学的研究	同上	同上 (ポスター)
7	笠原順三	エンジニアリング協会	Possibility of high Vp/Vs zone in the geothermal filed suggested by the P-to-S conversion	2019 年度 秋季物理探査学会	2019/10/30
8	羽佐田葉子	エンジニアリング協会	革新的超臨界地熱場観測測技術の研究開発	2019 年度 地熱学会	2019/4. 3/21
9	笠原順三	エンジニアリング協会	Seismic approach characterizing geothermal reservoirs using DAS and FWI	EAGE (ヨーロッパ物理探査学会)	2019/4. 3/22
10	笠原順三	エンジニアリング協会	九州メディポリス地熱フィールドにおける超臨界地熱へむけての地震波モニタリング技術評価の概要	地熱学会令和 2 年度学術講演会 オーガナイズドセッション	2020/4. 3/10 ~14
4.3	笠原順三	エンジニアリング協会	メディポリス地熱フィールド地下 3.6 km の高 Vp/Vs 域が示唆する物理的意味	地熱学会令和 2 年度学術講演会 一般研究発表	同上
4.3	笠原順三	エンジニアリング協会	超臨界地熱へむけての地震波モニタリング:九州メディポリス地熱フィールドにおける第二回評価試験	物理探査学会第 143 回 (2020 年度秋季) 学術講演会	2020/4. 3/27
13	笠原順三	エンジニアリング協会	メディポリス地熱フィールド地下 3.6km の高 Vp/Vs 域の意義	同上	同上
14	笠原順三	エンジニアリング協会	DAS and DTS measurements in the Medipolis geothermal borehole in southern Japan and subsurface	SEG (Society of Exploration Geophysicists) - AGU Advances	2024. 3/9

			characterization	in Sensing for Geophysics Workshop)	
--	--	--	------------------	---	--

(4) 講演

No	発表者	所属	タイトル	講演先	発表年月日
1	笠原順三	エンジニアリング 協会	Seismic approach to characterize the magma intrusion and/or super critical reservoir	アイスランド ISOR(Iceland Geo survey)	2019/6/10

## 添付資料 2

### プロジェクト基本計画

## 「超臨界地熱発電技術研究開発」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

2017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155万kW（2017年度実績 51万kW）、発電電力量113億kWh（2017年度実績 24億kWh）の導入拡大が掲げられている。

これに加え、2016年4月に策定された「エネルギー・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次世代地熱発電技術が位置づけられた。その具体例として超臨界地熱発電の技術開発が特定され、2050年頃の普及を目指すロードマップが策定されている。

## 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も注目を集めている。

近年の地熱開発では、山葵沢・秋ノ宮地域（岩手県）では、2019年5月に1万kW以上の国内地熱発電として23年ぶりに運転を開始し、バイナリー発電では、滝上バイナリー発電所や山川バイナリー発電所等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）等で大型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11.4万kW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2017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、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  
の成果が上がっている。

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、前述の2050年頃の普及を目指すロードマ  
ップの初めのステップにあたる「超臨界地熱発電の実現可能性調査(2017年度)」が  
実施され、一定の成果が挙げられている。

### 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、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。

こうした中、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年につ  
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3万kW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。

### ④ 本事業のねらい

本事業は、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発電技術の研究開発を実施し、より一層の地熱発電の導  
入拡大を促進することを目的とする。

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。

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

2017 年度実施された「実現可能性調査」において、超臨界地熱水の状態把握、当該貯留層からの熱抽出の検討、人工貯留層造成の検討、高温環境で使用可能な機材・資材の検討、経済性評価等に関する調査がそれぞれ実施され、以下の知見を得た。

- アイスランドでは、超臨界地熱資源をターゲットとして調査井が 2 本掘削され、1 本あたり数万 kW 規模の出力が得られることが確認された。
- 数値モデルから、一定の前提条件を与えることにより、上記結果と同様の出力が得られることを確認した。
- 岩石物性試験の結果、超臨界条件においても亀裂の生成が確認され、その結果を用いたモデリングから亀裂の進展について検討がなされた。
- 掘削用資材として、ケーシング材では SiC 製の特性を調査するとともに、セメント材ではアルミナセメントの基礎試験を行った。
- 経済性評価では、一定の前提条件を与えた結果、採算性は確保できることが示された。

上述の成果を受け、同調査で指摘された課題についての継続的な調査及び先行しているアイスランドの事例をさらに調査するとともに、我が国で超臨界地熱資源存在可能性が高いと想定される複数地域での詳細な調査による資源量の評価や複数モデルの提示等のほか、調査井掘削に必要な技術課題の整理を行う。併せて、同調査井に必要なとされる要素技術の研究開発を実施する。具体的には以下のとおり。

- (i) 地表調査（地質、地化学、物理探査等）を行うことで、地下 5km 以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定する。
- (ii) 掘削に必要な酸性環境かつ高温（500℃）に耐えうるケーシング材並びにセメント材を開発する。併せて、機器・材料の開発として、坑井および発電システムについて検討するとともに、それらの経済性を調査する。
- (iii) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発として、熱輸送・化学反応・

岩石物性を扱う貯留層シミュレータを開発するとともに、人工貯留層造成に関する基礎実験・モデリングの手法開発を実施する。

## ②アウトカム目標

2050年頃に、超臨界地熱資源を活用した地熱発電所(10万kW級)の普及(1か所以上)を目指す。これによるCO<sub>2</sub>削減量は、約40万トン-CO<sub>2</sub>/年である。

## ③アウトカム目標達成に向けた取組

NEDOによる調査井掘削に至った場合には、有望地の探査並びに調査井掘削については、JOGMECによる地熱調査助成金事業や地熱探査出資事業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、自然公園特別地域が開発対象地域になる場合を想定し、環境保全対策技術の研究開発にも同時並行して進め(NEDO地熱発電技術研究開発)、その成果に基づき、環境省との情報交換を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、以下の研究開発項目について、別紙1の研究開発計画及び別添の研究開発スケジュールに基づき研究開発を実施する。なお、本研究開発項目は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、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。

## 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新エネルギー部加藤久遠主任研究員を任命して、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標準化施策等との連携

地熱発電技術分野に関わりのある、国際標準化機関やフォーラムの活動概要、これらの機関における規格、ガイドライン等の検討・策定状況及びその概要、主なプレイヤーの参加状況及び日本のポジション等について調査等を行う。

④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 2. 研究開発の具体的内容(1)、(2)及び(3)」を対象として、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、2020年度以降の研究開発テーマの継続是非を2020年3月までに決定する。

(3) その他

本プロジェクトは、非連続ナショナルプロジェクトとして取り扱う。

3. 研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、2018年度から2020年度までの3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、事後評価を2021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。

#### ③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）。

#### ④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号イに基づき実施する。

## 6. 基本計画の改訂履歴

(1) 2018年5月、制定。

(2) 2020年12月、改定。研究開発項目①の一部の実施内容の削除等のため。

## (別紙1) 研究開発計画

### 研究開発項目「超臨界地熱発電技術研究開発」

#### 1. 研究開発の必要性

超臨界地熱発電は、2016年4月に策定された「エネルギー・環境イノベーション戦略（内閣府）」において、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位置づけられ、2050年頃の普及を目指すロードマップが策定されている。

本プロジェクトでは、当該ロードマップの初めのステップにあたる「超臨界地熱発電の実現可能性調査（2017年度）」を受け、指摘された課題について調査を継続するとともに調査井掘削実現に向けた技術開発を実施する。

#### 2. 研究開発の具体的内容

##### (1) 超臨界地熱資源の評価

- ① 我が国で超臨界地熱資源の存在可能性が高いと想定される複数地域で地表調査を実施し、当該地域の超臨界地熱資源の資源量評価を実施する。併せて、超臨界地熱資源の探査手法の開発を行う。

##### (2) 調査井の資材（ケーシング材及びセメント材）等の開発

- ① 経済性のある酸性環境かつ高温度（400～500℃）に耐えうるケーシング材並びにセメント材の開発方針を提案し、評価する。
- ② 機器・材料の開発として、坑井および発電システムについて検討するとともに、それらの経済性を調査する。特に、坑井に関しては、生産井仕様と調査井仕様をそれぞれ検討する。また、発電システムについては、技術課題となる蒸気清浄化対策や腐食対策について最適なシステムを提案する。

##### (3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発

- ① 人工貯留層造成のためのモデリング手法開発として、透水性不十分となる貯留層に遭遇する場合を想定し、水圧破碎等により人工的に貯留層を造成するためのより実フィールドに近いモデリング技術を開発し、リスク評価（シェールガスや高温岩体の事例調査等）も含め現場適用のシナリオを提案する。併せて、室内実験により、基礎データの取得や新たな岩盤の破碎手法の開発も実施する。
- ② 国内事例に基づき、超臨界地熱資源システムの詳細検討に基づき、同貯留層のモデリング技術の手法開発を実施する。ここでは、熱・水・化学・力学を考慮した連成シミュレータの開発も併せて行う。

- (4) 上記(1)～(3)以外で超臨界地熱資源への調査井掘削に資する革新的技術開発

### 3. 達成目標

上述の研究開発内容に対する具体的な達成目標は以下のとおりである。なお、「2. 研究開発の内容」(1)から(3)の各テーマについては、2か年の終了時にステージゲート評価を実施する。

#### (1) 超臨界地熱資源の評価と調査井に必要な仕様の詳細設計

##### 1) ステージゲート時目標

- ① 我が国の火山地帯においてモデルフィールドとして、1地域あたり出力10万kW規模の発電能力が推定されることを提示する。

##### 2) 最終目標

- ① 地表調査(地質、地化学、物理探査等)を行うことで、地下5km以浅に比較的若い年代のマグマが定置した箇所を特定し、超臨界地熱資源量の規模を具体的に評価する(1地域あたり10万kW規模)。

#### (2) 調査井の資材(ケーシング材及びセメント材)等の開発

##### 1) ステージゲート時目標

- ① 調査井仕様の掘削費が40億円規模となることを確認する。
- ② 蒸気清浄化により、必要とされる蒸気中のシリカ濃度の基準値を明確化し、これに伴う熱量の範囲の提示及び試掘ステージにおける開発目標を策定する。
- ③ 想定される超臨界地熱資源の開発に最適な坑井並びに発電システムを提案し、従来開発と同等の発電コスト(9～12円/kWh)となることを確認する(現存技術と将来技術のケース別)。
- ④ 超臨界地熱環境下(500℃、pH3前後)で適用可能で経済性のあるケーシング材・セメント材の材料開発方針を提案する(現存技術と将来技術のケース別)。

##### 2) 最終目標

- ① 調査井に必要となる酸性環境かつ高温度(500℃)に耐えうるケーシング材並びにセメント材を開発する。

#### (3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発

##### 1) ステージゲート時目標

- ① 水圧破碎及び減圧破碎、またはいずれか一方において、生産可能な浸透率(10<sup>-15</sup>m<sup>2</sup>オーダー)以上の破碎が可能なことを室内試験かつ数値シミュレーションにより立証する。
- ② 超臨界地熱環境下で水圧破碎及び減圧破碎、またはいずれか一方により、坑井周辺の数100m規模の人工貯留層造成手法のシナリオを提案する。

2) 最終目標

- ① 超臨界地熱資源システムのモデリング技術において、天然貯留層や人工貯留層造成の手法を開発する。

(別添) 研究開発スケジュール

テーマ	2018年度	2019年度	2020年度
(1) 超臨界地熱資源の評価	モデルフィールドでの 詳細検討		モデルフィールドで の詳細検討
(2) 調査井の資材等の開発	坑井・発電システム検討	ステージ ゲート	ケーシング材・ セメント材開発
	ケーシング材・セメント材開発		
(3) 超臨界地熱貯留層のモ デリング技術手法開発	人工貯留層造成手法開発		人工貯留層造成 手法開発
			モデリング 手法開発