

# 「超臨界地熱発電技術研究開発」

## (事後評価)

(2018年度～2020年度 3年間)

## プロジェクトの概要 (公開)

分科会資料抜粋版

NEDO

新エネルギー部

2021年10月27日

### I. 事業の位置付け・必要性 (1)事業の目的の妥当性

#### ◆事業実施の背景と事業の目的

##### 社会的背景

- 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。
- 地熱は、再生可能性エネルギーの中でも**安定した出力**が得られるので、**ベースロード電源**として扱われており、注目されている電源である。

##### 事業の目的

- 未利用となっている大深部には、**大規模開発可能な超高温の地熱資源(=超臨界地熱資源)**が賦存する可能性があり、超臨界地熱資源の有効活用のための技術開発により、我が国の地熱発電の導入拡大を促進することを目的とする。具体的な事業テーマは以下のとおりである。
  - 超臨界地熱資源の評価
  - 調査井の資材(ケーシング材及びセメント材)等の開発
  - 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発
  - 調査井掘削に資する革新的技術開発

◆政策的位置付け

■ 「エネルギー基本計画(第6次)」(素案が公開)

- 2050年カーボンニュートラル実現に向けた課題対応、2050年を見据えた2030年に向けた政策対応(GHG削減量46%へ引き上げ)など。
- 再エネの主力電源化を最優先の原則のもとで最大限の導入に取り組み、水素・CCUSについても社会実装を進める。
- 再エネの電源構成比率が、現行22~24%から、36~38%へ引き上げ。地熱は現状維持<1.4-1.5GW、102-113億kWh>。

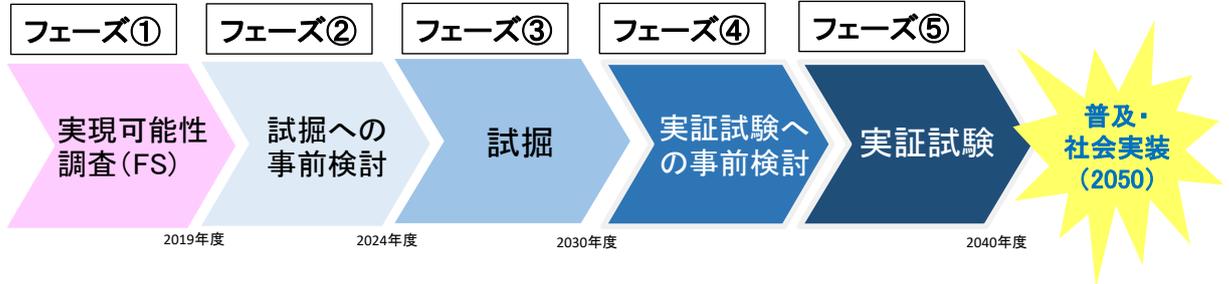
◆政策的位置付け

■ 次世代に向けた取り組みの方針

- 「エネルギー・環境イノベーション戦略」(内閣府、2016年)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超臨界地熱発電技術が位置づけられた。2050年頃の普及を目指すロードマップが策定された。
- これは、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。

◆政策的位置付け

【2050年頃の社会実装を目指す超臨界地熱発電の技術開発シナリオ】



出典)内閣府(エネルギー・環境イノベーション戦略、2016)に基づく  
注)各年次については、NEDO事業より追加記載

◆政策的位置付け

①洋上風力・太陽光・地熱産業 (地熱) の成長戦略「工程表」

- 導入フェーズ: 1. 開発フェーズ 2. 実証フェーズ 3. 導入拡大・コスト低減フェーズ 4. 自立商用フェーズ
- 具体化するべき政策手法: ①目標、②法制度(規制改革等)、③標準、④税、⑤予算、⑥金融、⑦公共調達等

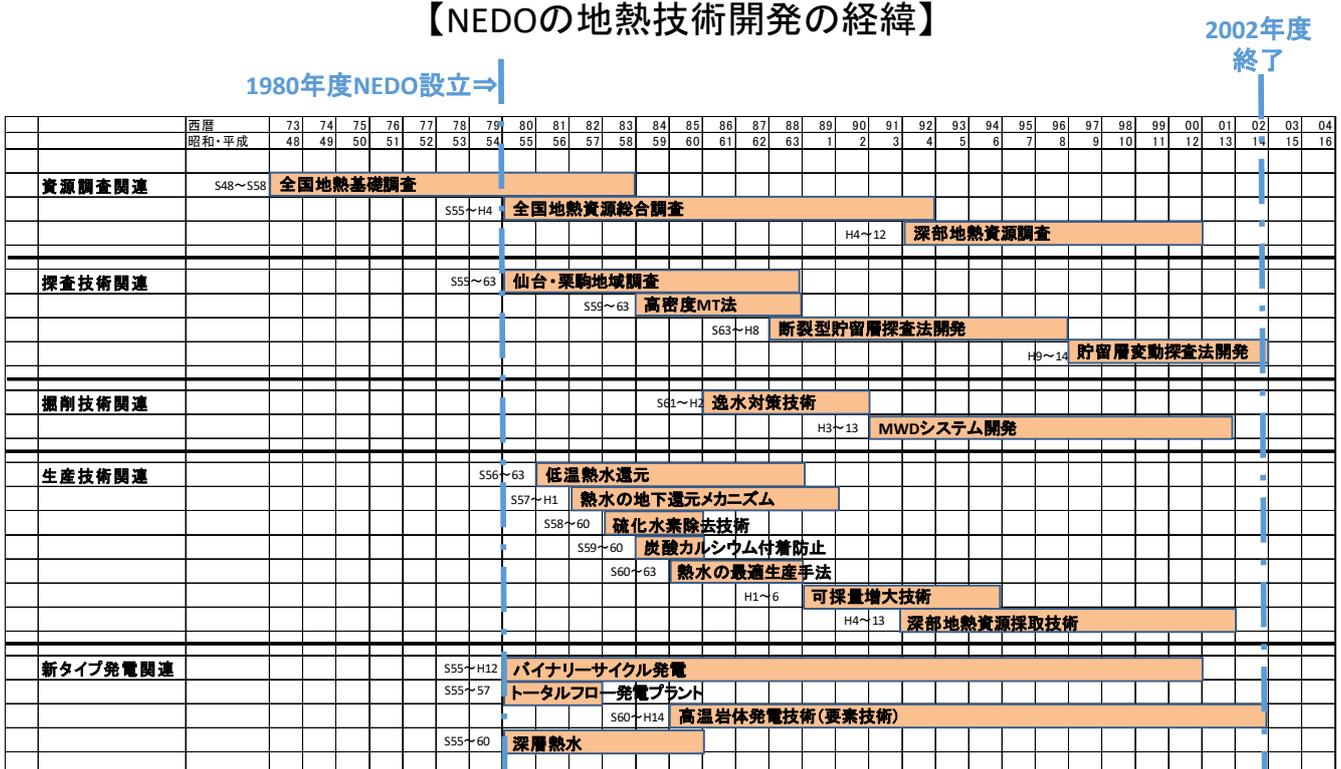
	2021年	2022年	2023年	2024年	2025年	~2030年	~2040年	~2050年
リスクマネー供給、理解促進	・JOGMECによる地熱資源調査		・JOGMECから事業者への引き継ぎ ・事業者による開発		・地熱開発事業者に対する助成金、出資、債務保証等の開発支援			「地熱開発加速化プラン」の推進 ・地球温暖化対策推進法に基づく地熱開発の促進区域の指定 ・温泉事業者等の地域の不安や自然環境への支障を解消するための科学データの収集・調査を通じ円滑な地域調整の実施 ・地域の不安払拭や合意形成に資する温泉モニタリングの推進
関連法令の運用見直し	・自然公園法の運用見直し(自然公園内における地熱発電等の許可基準及び審査要件の明確化等)		・温泉法の運用見直し(離隔距離規制や本数制限等についての撤廃を含めた点検、規制の内容及び科学的根拠の公開、科学的知見を踏まえた考え方や方向性の提示等)		・その他の法令等を含めて、随時見直しについて検討し、必要に応じて措置			
次世代型地熱発電技術(超臨界地熱発電技術)	・大深度の掘削技術の開発 ・強力な酸性・超高温の流体対策(抗井やタービンの腐食防止等)		ポテンシャルの調査		国内数カ所において、超臨界地熱発電技術を用いた発電実証事業を実施		商用化に向けた調査、開発及び建設(リードタイムを、約10年と想定)	

◆ 国外の超臨界地熱資源開発の動向

- アイスランドをトップランナーとして、米国、メキシコ、ニュージーランド、イタリアで大深度、超高温をターゲットとした研究開発が進行している。
- 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)では、2008～2012年にかけて、IDDP-1号井(Krafla地域)を掘削し、噴出試験にも成功し、坑口状態で、温度450℃、圧力14MPa、出力30MW相当の過熱蒸気の噴出が確認された。
- その後、2016～2017年にかけて、IDDP-2号井(Reykjanes地域)を掘削し(深度4,650m)、坑底温度427℃及び圧力34MPaにより、地熱流体が超臨界状態で存在しているであろうとの知見を得た。次の掘削計画(IDDP-3)も検討されている。
- さらに、アイスランドでは、より深部の超臨界地熱資源領域への還元・涵養を通して、浅部の既開発領域からの蒸気生産量を増大するプロジェクト(DEEPEGS)があり、これは、3つのEGSタイプ(高温岩体、涵養、透水性改善)の組み合わせの手法という点で大変注目される。
- 米国では、DOEプログラムにより、米国3大地熱地帯といわれるザ・ガイザース、ソルトンシー及びコソにおいて、それぞれ、超臨界地熱資源量の評価のスタディが実施された(2017)。在来型資源量と同程度のポテンシャルがあると報告された。

◆ 他の機関との関係

【NEDOの地熱技術開発の経緯】



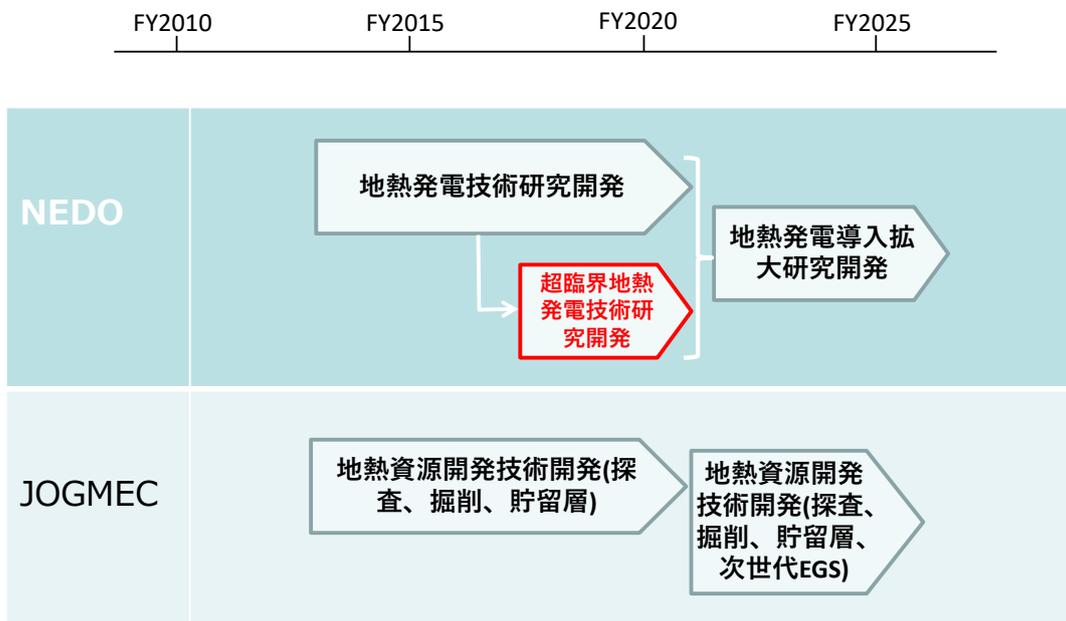
◆他の機関との関係

地熱発電開発の国の支援体制概要

対象		探査技術 (資源探査、貯留層、掘削等)	利用技術 (井戸～地上設備、環境保全技術等)
導入支援	在来型地熱	 資源量調査補助金、 出資・債務保証事業等	資工庁 固定価格買取 制度等
技術開発	在来型地熱・EGS	 地熱発電技術研究 開発事業	 地熱発電技術研究 開発事業
	超臨界地熱発電	 超臨界地熱発電技術研究開発事業	

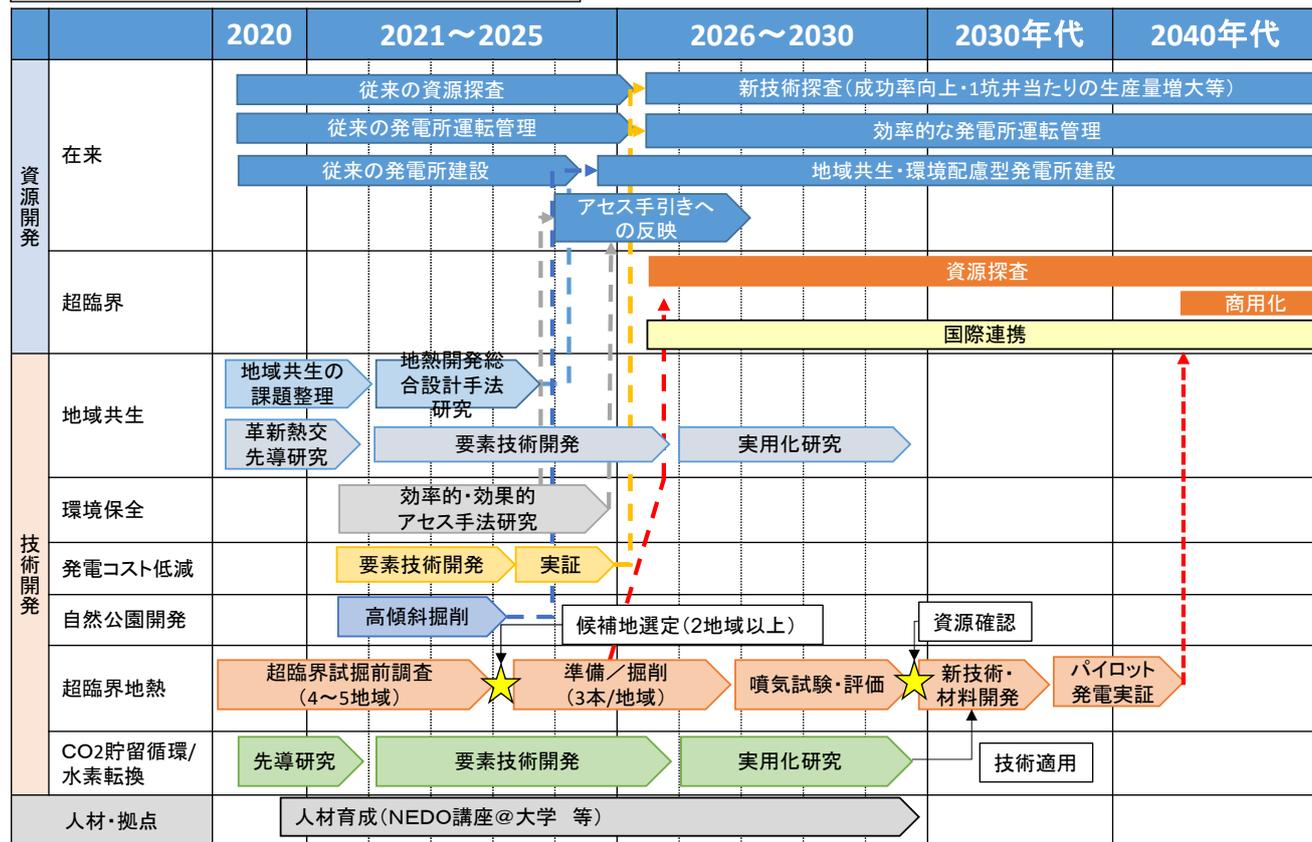
◆他の機関との関係

NEDOとJOGMECとの役割分担



1. 事業の位置付け・必要性 (2)NEDOの事業としての妥当性

◆技術戦略



出典:NEDO 技術委員会資料(2020)

1. 事業の位置付け・必要性 (2)NEDOの事業としての妥当性

◆技術戦略

超臨界地熱資源開発研究開発の技術課題  
～調査井掘削の詳細検討における重要テーマ～

テーマⅠ:超臨界地熱資源探査及び評価

- (1)モデルフィールド資源量評価⇒ポテンシャル**0.5GW(>100MW/地域)**
- (2)地質構造試錐掘削(深度**3,000m**)
- (3)探査技術手法開発(**MT法**、地震波モニタリング技術等)

テーマⅡ:掘削技術

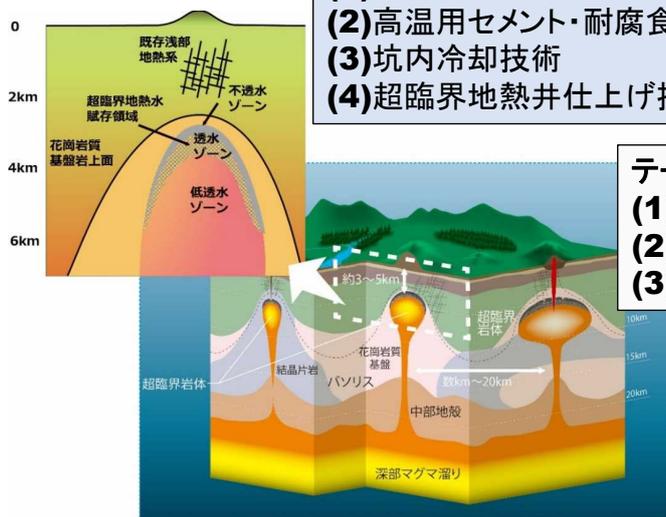
- (1)調査井掘削工事仕様
- (2)高温用セメント・耐腐食性ケーシング開発
- (3)坑内冷却技術
- (4)超臨界地熱井仕上げ技術

テーマⅢ:人工貯留層造成技術

- (1)地殻応力測定技術手法開発
- (2)水圧破碎手法開発
- (3)数値シミュレーション開発

テーマⅣ:地上設備

- (1)噴気試験仕様
- (2)蒸気清浄化装置
- (3)熱交換装置



出典:NEDOニュースリリース(2018)

出典:NEDO技術委員会資料(2019)6

◆ 事業の目標

[研究開発項目と最終目標]

(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を行う。

◆ 研究開発のスケジュール

- 地熱発電技術研究開発事業の中で、2017年度に「エネルギー・環境イノベーション戦略(H28.4)」を受け、超臨界地熱発電に係る実現可能性調査を実施。
- 2018年度から、超臨界地熱発電研究開発事業を立ち上げ、実現可能性調査のフォローアップと、試掘への詳細検討を実施した。

研究開発項目	H29 2017	H30 2018	R1 2019	R2 2020	
(1) 超臨界地熱資源の評価	超臨界地熱資源の国内外調査	モデルフィールドでの詳細検討			
	熱抽出の解析				
(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・機器性能調査	坑井・発電システム検討	ステータス アップデート	ケーシング材・セメント材開発	
	経済性評価	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	水圧・減圧破砕手法の検討	人工貯留層造成手法開発		モデリング手法開発	
	法令調査・HSE検討				
(4) 革新的技術開発	調査井に必要とされる革新的技術開発				

第①フェーズ  
(実現可能性調査)

第②フェーズ  
(試掘の詳細検討)

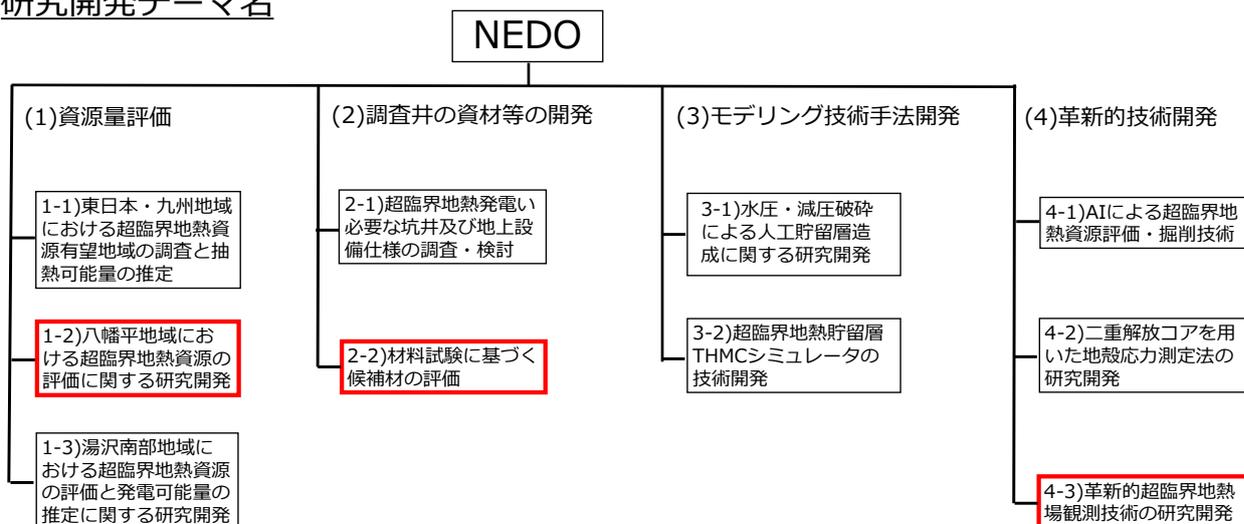
◆ 研究開発目標と根拠

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10万kW規模)。	超臨界地熱資源の開発を実施するための具体的な地域を選定するためには、モデルフィールドを設定した資源量評価が不可避となる。
(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。	超臨界地熱系を掘削するためには、重要な資材としてケーシングとセメントがあり、それぞれの評価が必要となる。
(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手法を開発する。	透水性が低い場合を想定し、水圧破碎などの人工貯留層造成技術が必要となる。
(4) 調査井掘削に資する革新的技術開発	AIを適用した資源評価及び掘削技術向上、二重コアによる地殻応力計測技術、地震波モニタリング技術手法開発をそれぞれ実施する。	調査井掘削には、新規の技術が必要であり、資源探査や掘削に係る技術の手法開発が要求される。

◆ 研究開発の実施体制

全体概要

研究開発テーマ名

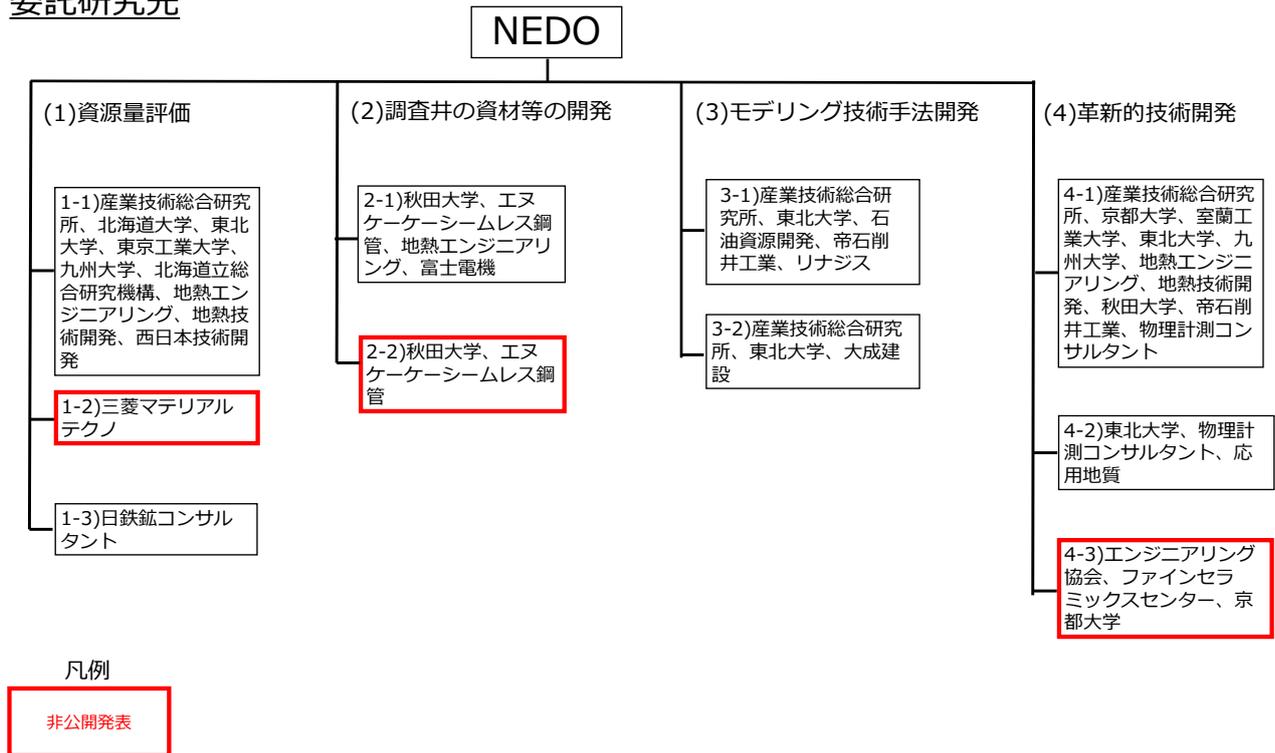


凡例

非公開発表

◆研究開発の実施体制 全体概要

委託研究先



◆プロジェクト費用

◆予算実績

(単位: 百万円)

研究開発項目	2018年度	2019年度	2020年度	合計
(1)超臨界地熱資源の評価	64	164	174	402
(2)調査井の資材等の開発	42	61	38	141
(3)超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発	41	46	21	108
(4)調査井掘削に資する革新的技術開発	90	92	154	336
調査(ポテンシャル調査、先導調査)	40	24	0	64
合計	277	386	387	1,051

◆研究開発項目毎の目標と達成状況

研究開発項目	目標	成果	達成度	次フェーズの課題と解決方針
(1) 超臨界地熱資源量の評価	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、超臨界地熱資源量の規模を具体的に評価する。 (概略資源量評価では、1地域あたり100MW規模)	(1.1) 調査地域(仙岩、後志、豊肥)でのMT法3次元インバージョン最適化法により3次元地下温度構造を導出し、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)。 (1.2) 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。 (1.3) 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。	○  ○  ○	(1.1) 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) 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) 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

◆研究開発項目毎の目標と達成状況

研究開発項目	目標	成果	達成度	次フェーズの課題と解決方針
(2) 調査井の資機材等の開発	調査井に必要な酸性環境(pH3)かつ高温(400~500℃)に耐えるケーシング材並びにセメント材を開発する。	・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。 ・アルミナセメントを選定し、初期強度: 11.3MPa@250℃×24h、長期安定性: 11.9MPa@400℃×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℃×6h以上を確認した。 ・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を確認した。 ・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。 ・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。	○  ○  ○  ○  ○	・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 ・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

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

◆研究開発項目毎の目標と達成状況

研究開発項目	目標	成果	達成度	次フェーズの課題と解決方針
(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。	<ul style="list-style-type: none"> <li>水圧破碎により<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> <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> <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> <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> <li>THMC現象の基礎的な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> </ul>

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

◆研究開発項目毎の目標と達成状況

研究開発項目	目標	成果	達成度	次フェーズの課題と解決方針
(4)調査井掘削に資する革新的技術開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>①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> <li>②8-1/2in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> <li>③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。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①AI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> <li>②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。実験結果および数値シミュレーションにより、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> <li>③発電所が稼働する地熱フィールド内の観測井において、1500~2000m程度までの深度で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。</li> </ul>	<p>○</p> <p>◎</p> <p>◎</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①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> <li>②試掘井での適用に間に合うように実用ツール(定方位コア採取など)を製作し、坑井を使用したコミッションングを行う。</li> <li>③より多くのフィールドでモニタリングを実施し、既存の断裂系との検証を行う。</li> </ul>

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

◆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・事業化を促進するため、情報発信を行うように指導。
- 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。2021年6月末時点で講演3件、専門誌への寄稿2件。

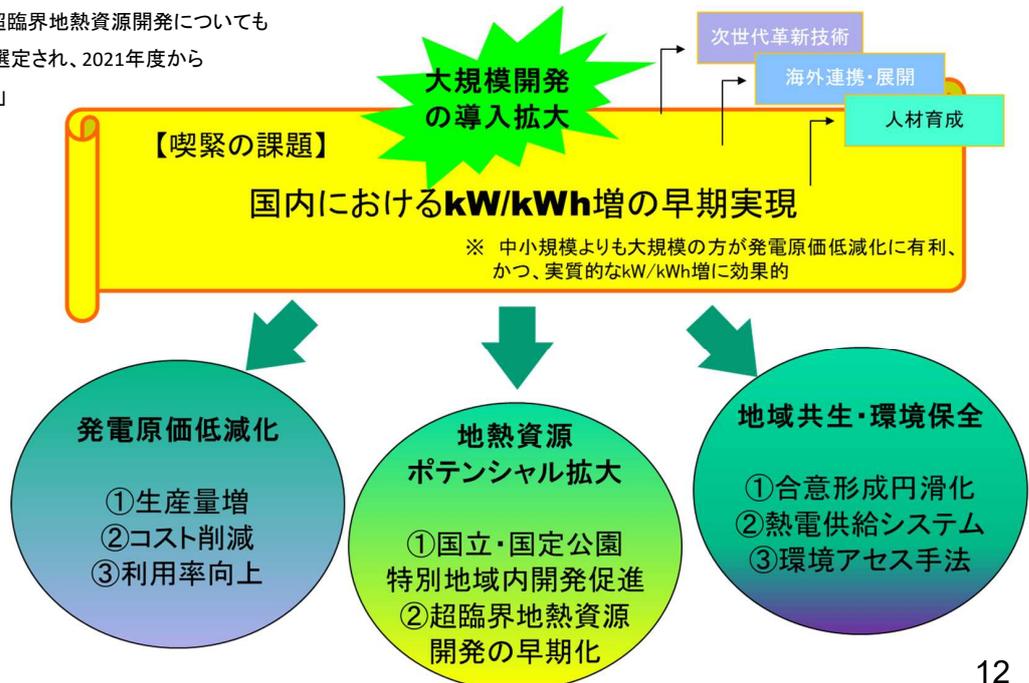
	2018年度	2019年度	2020年度	計
特許出願(うち 外国出願)	1(0)	2(0)	0(0)	3(0)
論文(うち 査読付き)	4(4)	13(12)	11(0)	28(27)
研究発表・講演	17	49	47	113
新聞・雑誌等への掲載	0	2	0	2
その他 (展示会出展等)	0	1	0	1

※2021年6月31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

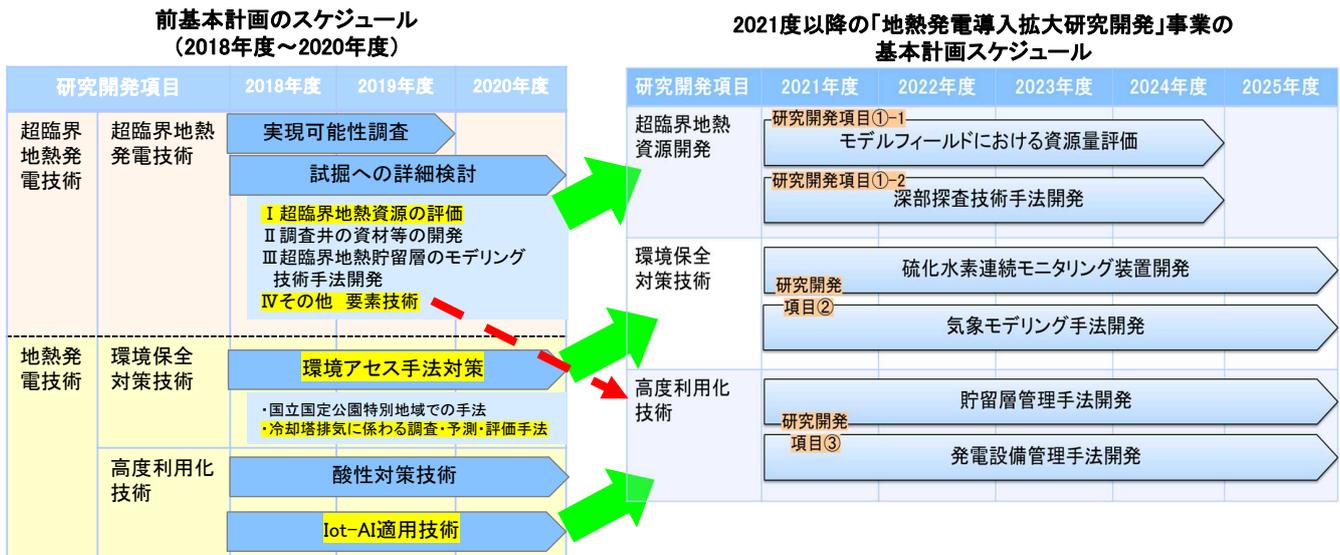
◆実用化・事業化に向けた戦略

【2021年度以降のNEDO事業の重点課題】

2019年度に2021年度以降の地熱技術戦略とテーマ探索が議論され、大規模開発導入拡大が一つのポイントとなり、その解決のための重要課題として、①発電原価低減化 ②地熱資源ポテンシャル拡大 ③地域共生・環境保全の3つの課題が抽出された。超臨界地熱資源開発についても上記②の中の一テーマとして選定され、2021年度から「地熱発電導入拡大研究開発」事業がスタートした。



### ◆ 実用化・事業化に向けた具体的取組



- ①整理： 超臨界地熱発電技術と地熱発電技術の統合化。
- ②絞り込み： 各研究開発項目の中で、テーマの選択と集中を実施。
- ③改良： 高度利用化技術(IoT-AI適用技術)で、貯留層を含めた範囲に拡張。

出典：NEDO内部資料(2021)

### ◆ 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、CO2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)。

# 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・減圧破砕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 1469 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 1469 1386"> <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						