

# 「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)

NEDO

新エネルギー部

2021年10月27日

I. 事業の位置づけ・必要性

- (1)事業の目的の妥当性
- (2)NEDOの事業としての妥当性

II. 研究開発マネジメント

- (1)研究開発目標の妥当性
- (2)研究開発計画の妥当性
- (3)研究開発の実施体制の妥当性
- (4)研究開発の進捗管理の妥当性
- (5)知的財産等に関する戦略の妥当性

III. 研究開発成果

- (1)研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義
- (2)成果の普及
- (3)知的財産権の確保に向けた取組

IV. 成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通し

- (1)成果の実用化・事業化に向けた戦略
- (2)成果の実用化・事業化に向けた具体的取組
- (3)成果の実用化・事業化の見通し、波及効果など

## ◆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。

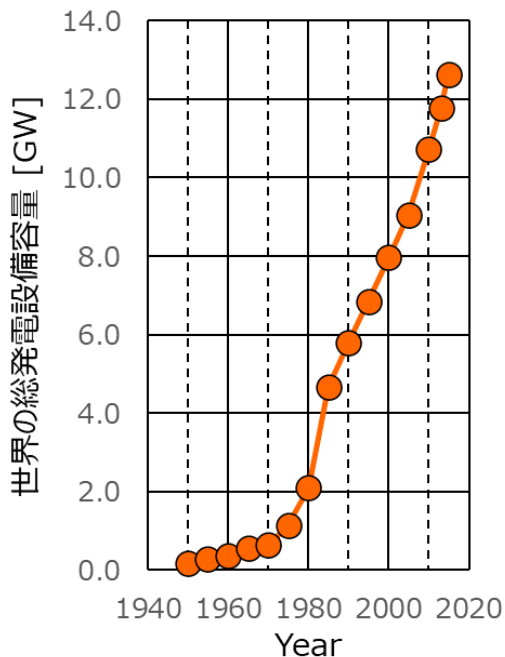
### 事業の目的

- 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

## ◆ 国内外の地熱発電動向と地熱導入拡大の課題

### 【海外動向】

- 世界の地熱発電の設備容量は平均で年間270MWの増加率で急速に拡大している（2015～2020年の期間では、約3,649MWの発電容量の増加を達成）。
- インドネシア、ケニア、トルコ、米国において発電設備容量が顕著に増加。
- フィリピン、メキシコ、イタリア、日本において、開発は停滞の傾向。

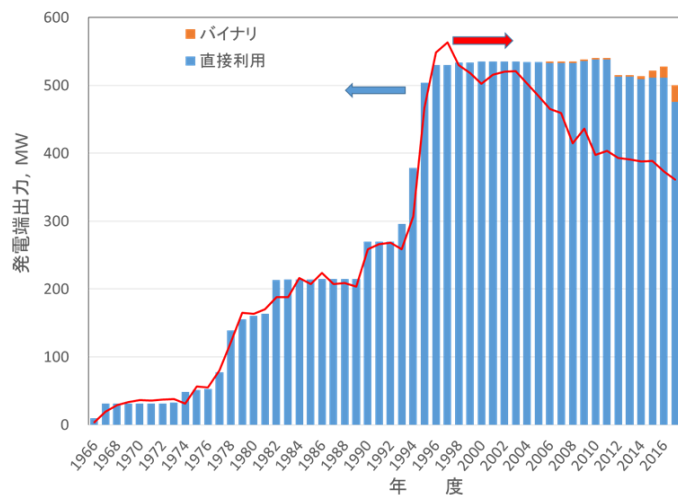


出典：IGA website 火原協を基に作成

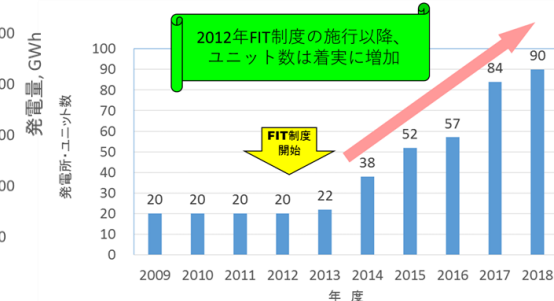
### 【国内動向】

- 我が国は、米国、インドネシアに次ぎ世界第三位の地熱ポテンシャルを有するが、そのポテンシャルを十分に生かし切れていない。
- FIT導入によりバイナリ-方式の導入が進む。近年の大規模設備案件では、山葵沢46.2MWe、松尾八幡平7.5MWe（2019年）となる。

出典：地熱発電の現状と動向 2018年（一財 火原協）



- ▽ FIT開始以降、新規に60件以上が稼働。
- ▽ 開発リスクの少なく、リードタイムが短い中小規模が貢献。



### 課題解決に向けた取り組み

- 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。
- こうした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く、大規模開発が可能となり、発電原価低減化に寄与する。
- 併せて、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地熱発電を実現する。



## ◆政策的位置付け

### ■ 「エネルギー基本計画(第6次)」(素案が公開)

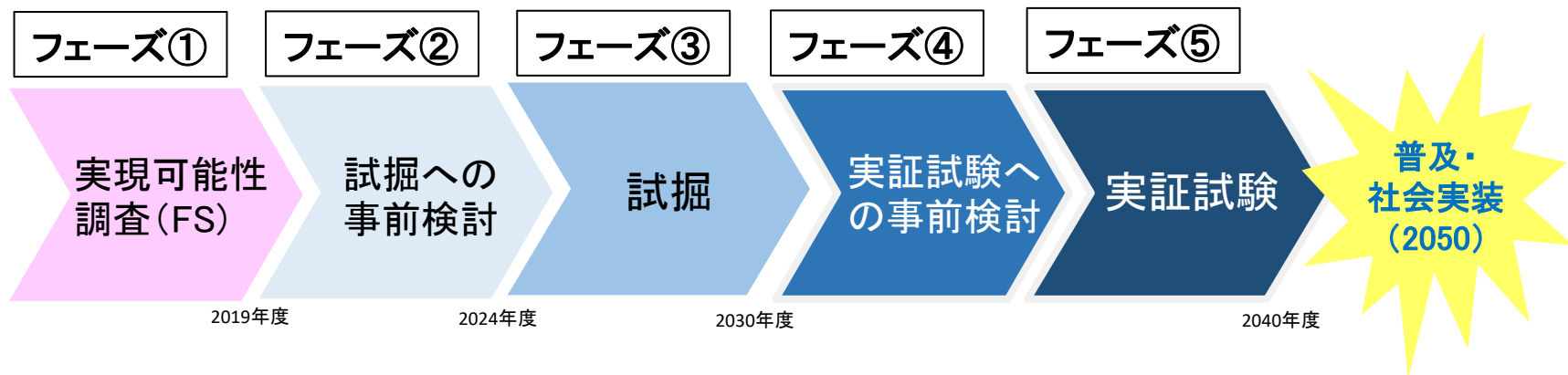
- 2050年カーボンニュートラル実現に向けた課題対応、2050年を見据えた2030年に向けた政策対応(GHG削減量46%へ引き上げ)など。
- 再エネの主力電源化を最優先の原則のもとで最大限の導入に取り組み、水素・CCUSについても社会実装を進める。
- 再エネの電源構成比率が、現行22～24%から、36～38%へ引き上げ。地熱は現状維持<1.4-1.5GW、102-113億kWh>。

## ◆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	
	・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）		ポテンシャルの調査		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）		国内数力所において、超臨界地熱発電技術を用いた発電実証事業を実施	

## ◆国内の大深度へ向けた地熱技術開発の動向

■1988年度NEDO地熱探査技術等検証調査(仙岩地域)において、計画深度3,000mで掘削された調査井N61-SN-7Dで、噴気試験の結果、**約20MW出力相当の蒸気量<国内最高>**が確認され、深部に有望な地熱資源の賦存が期待された。

■1995年度NEDO深部地熱資源調査において、計画深度4,000mで掘削された調査井WD-1aでは、地熱系での**最高温度500°C(推定)<国内最高>**が確認されたが、断裂系への逢着は達成されなかった。

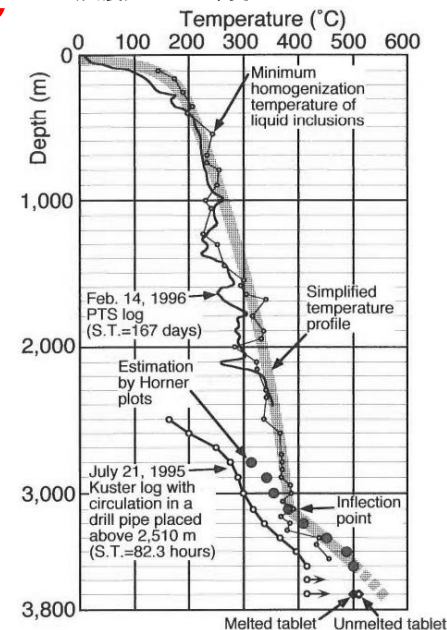
■アイスランドでの超臨界地熱資源調査(2006~2012)の成果(IDDP-1井)を受け、国内での超臨界地熱資源への研究が開始され、NEDOにおいて以下の事業が実施された。

- 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)
- 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)
- 超臨界地熱発電の実現可能性調査(2017年度)

【SN-7D噴気試験】



(出展)NEDO40年史



【WD-1a温度検層】

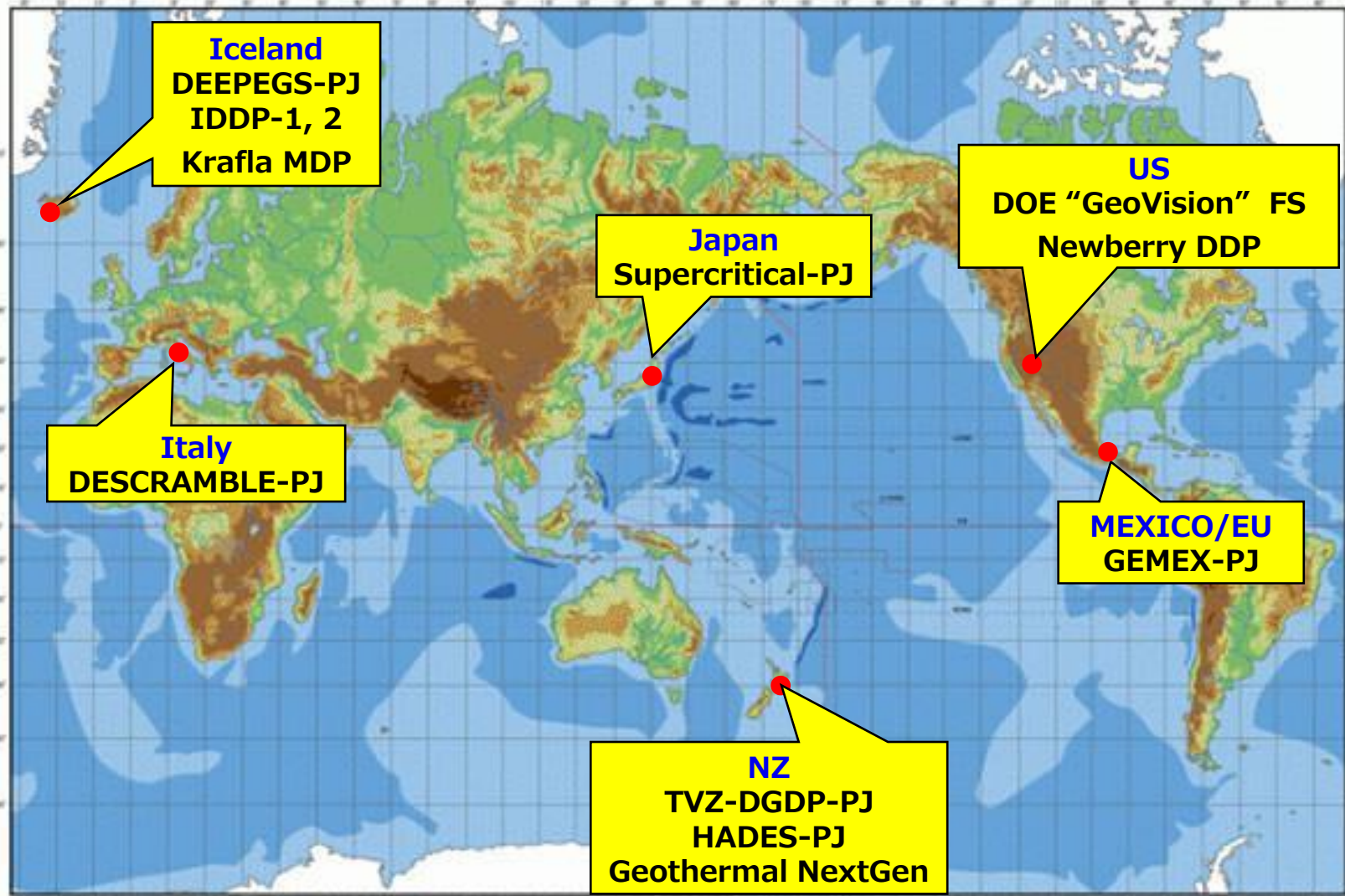
(出展)地質調査所(2000)

## ◆ 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°C、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°C** 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。



## ◆ 国外の超臨界地熱資源開発の動向



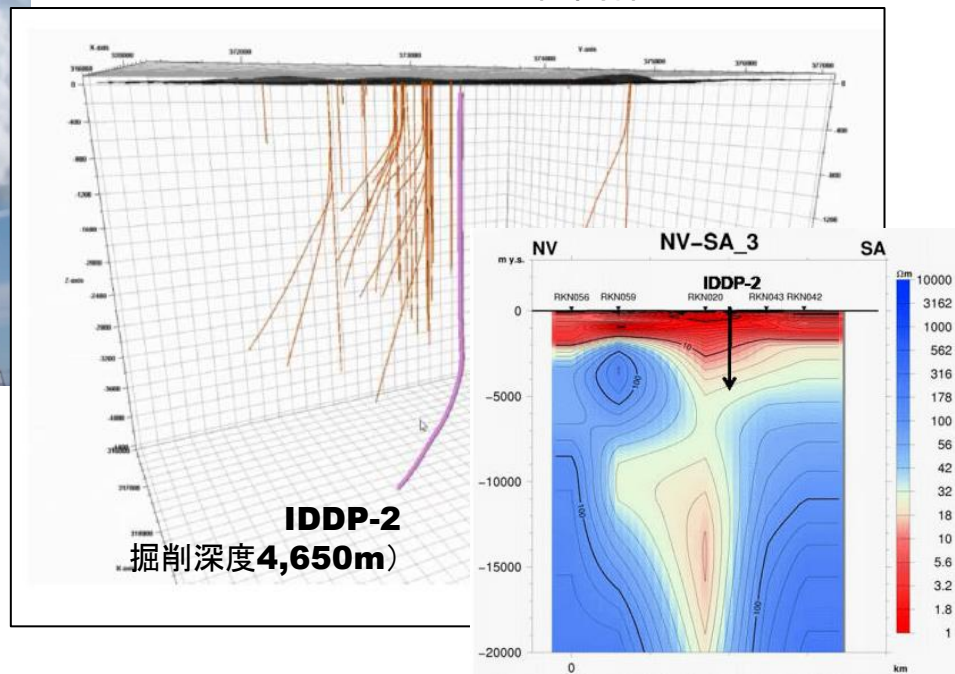
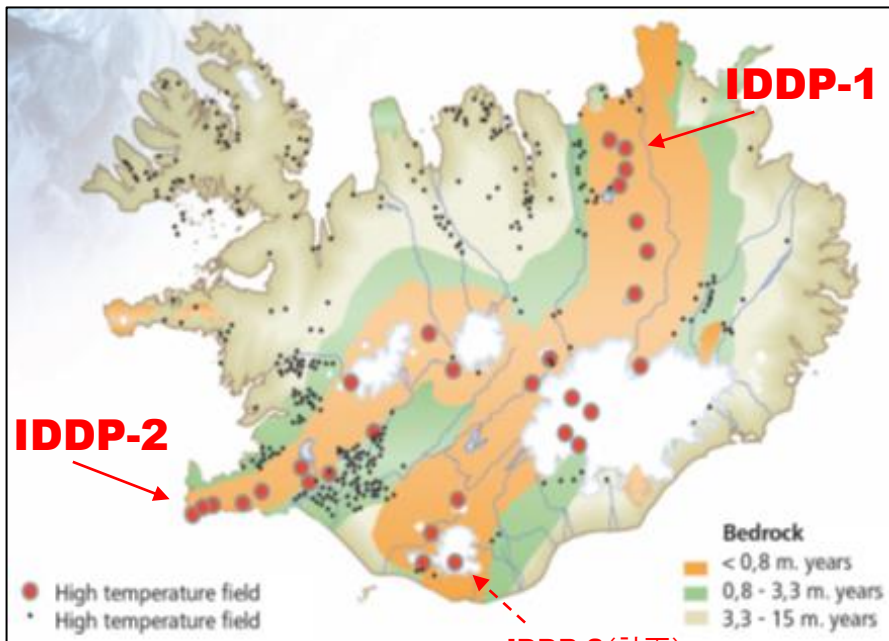
# ◆ 国外の超臨界地熱資源開発の動向

IDDP-1 (Krafla地域、深度2,100m) の噴気試験 (2010~2012)  
 (地上での測定値: 450°C、13.8MPa ≒ 30MW相当)

アイスランド Reykjanes地熱地域の坑跡図  
 とIDDP-2の位置関係



アイスランドの地熱資源マップ



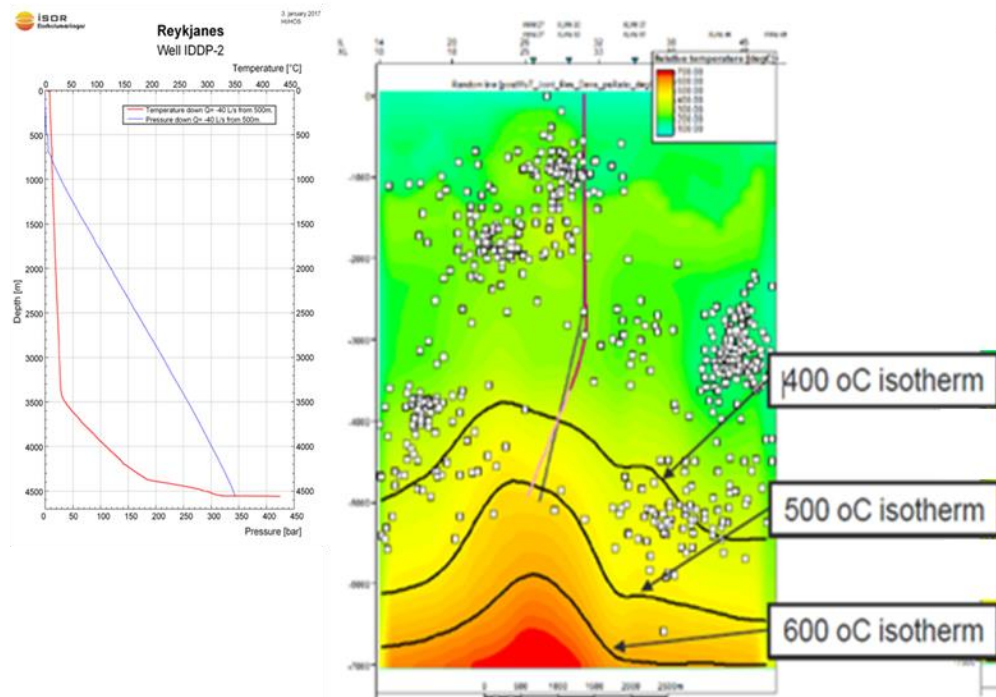
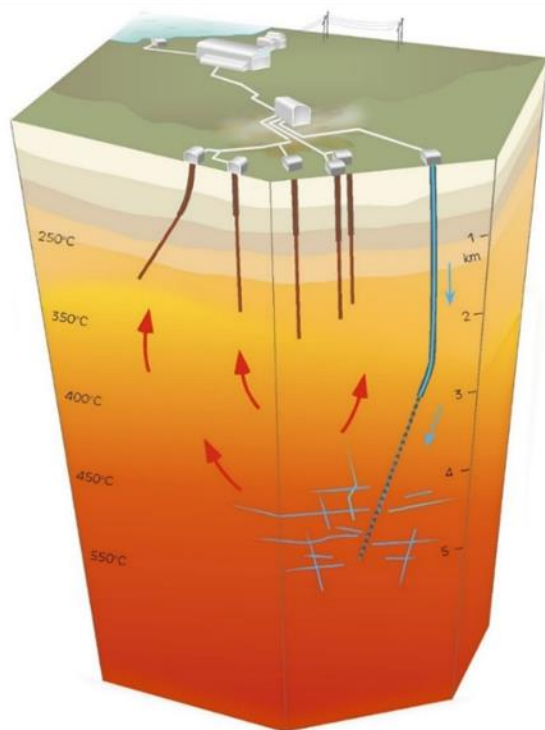


## ◆ 国外の超臨界地熱資源開発の動向

### P J の例 : DEEPEGS

(出展)NEDO技術委員会資料(2019)

P J 名	期間	委託元	主な受託者	総予算 (推定値)	概要
DEEPEGS	FY2015～ FY2019	EU (H- 2020)	○HS-Orka, ISOR, ENEL-Greenpower, BRGM, KIT	44ME	* アイスランドレイキャネス地域での超臨界地熱システムへの掘削とアイスランドにおける浅部-深部結合型EGSの可能性を実証 * Iceland Deep Drilling Project (IDDP) -2 井の掘削・試験の一部をEUが負担 (他: 民間資金, ICDP予算, NSF予算等)



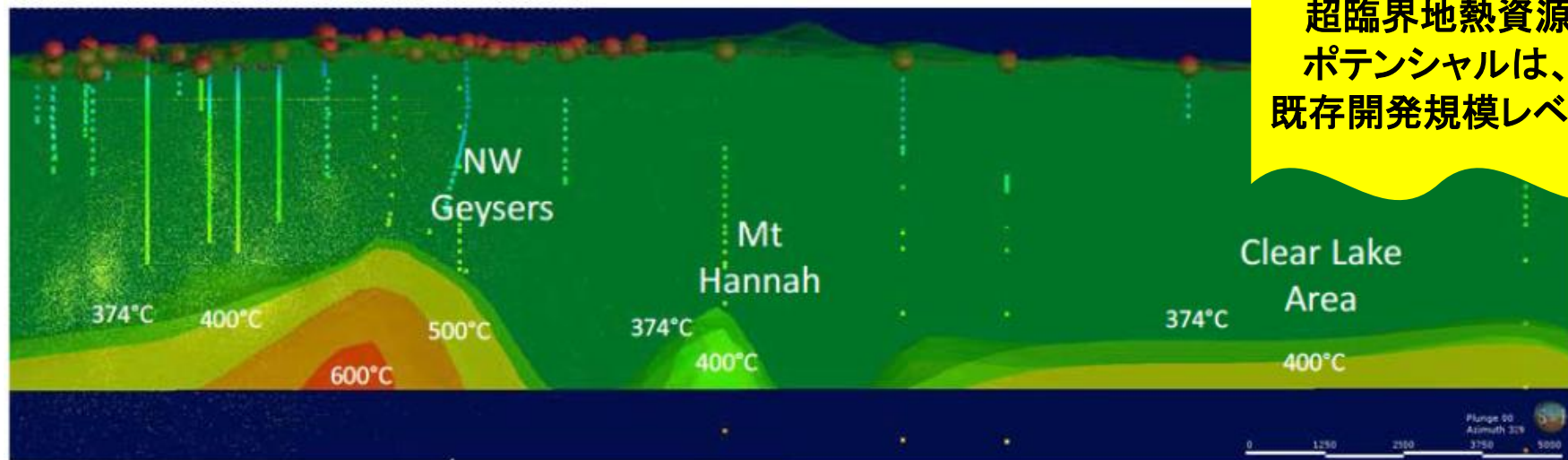
DEEPEGSの概念図 (HS-Orka, Personal Comm.) 。玄武岩質基盤岩内部の天然亀裂システム (超臨界状態) と浅部熱水系を接続し、抽熱可能量の増大を目指している。

IDDP-2井の温度・圧カプロフィール (左) と比抵抗プロフィール・微小地震震源分布 (HS-Orka, Personal Comm.)

## ◆ 国外の超臨界地熱資源開発の動向

## 【Geysers-Clear Lakeの温度構造】

(深さ5kmまでの推定地下温度分布図)



(各温度範囲とその容積)

Isosurface (°C)	From	To	Volume km <sup>3</sup>
374	374	400	120.0
400	>400	500	95.4
500	>500	600	11.4
600	>600	650	1.5
650	≥650		0.1
Total	≥374		228.4

推定された超臨界地熱資源分布域  
⇒約**228km<sup>3</sup>**

推定超臨界地熱資源量  
⇒約**890MW** (※50%信頼度)

1. 事業の位置付け・必要性 (2)NEDOの事業としての妥当性

◆他の機関との関係

【NEDOの地熱技術開発の経緯】





2002年度  
終了

1980年度NEDO設立⇒

	西暦	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04
	昭和・平成	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
資源調査関連	S48~S58	全国地熱基礎調査																															
	S55~H4	全国地熱資源総合調査																															
	H4~12	深部地熱資源調査																															
探査技術関連	S55~63	仙台・栗駒地域調査																															
	S59~63	高密度MT法																															
	S63~H8	断裂型貯留層探査法開発																															
	H9~14	貯留層変動探査法開発																															
掘削技術関連	S61~H2	逸水対策技術																															
	H3~13	MWDシステム開発																															
生産技術関連	S56~63	低温熱水還元																															
	S57~H1	熱水の地下還元メカニズム																															
	S58~60	硫化水素除去技術																															
	S59~60	炭酸カルシウム付着防止																															
	S60~63	熱水の最適生産手法																															
	H1~6	可採量増大技術																															
新タイプ発電関連	H4~13	深部地熱資源採取技術																															
	S55~H12	バイナリーサイクル発電																															
	S55~57	トータルフロー発電プラント																															
	S60~H14	高温岩体発電技術(要素技術)																															
S55~60	深層熱水																																

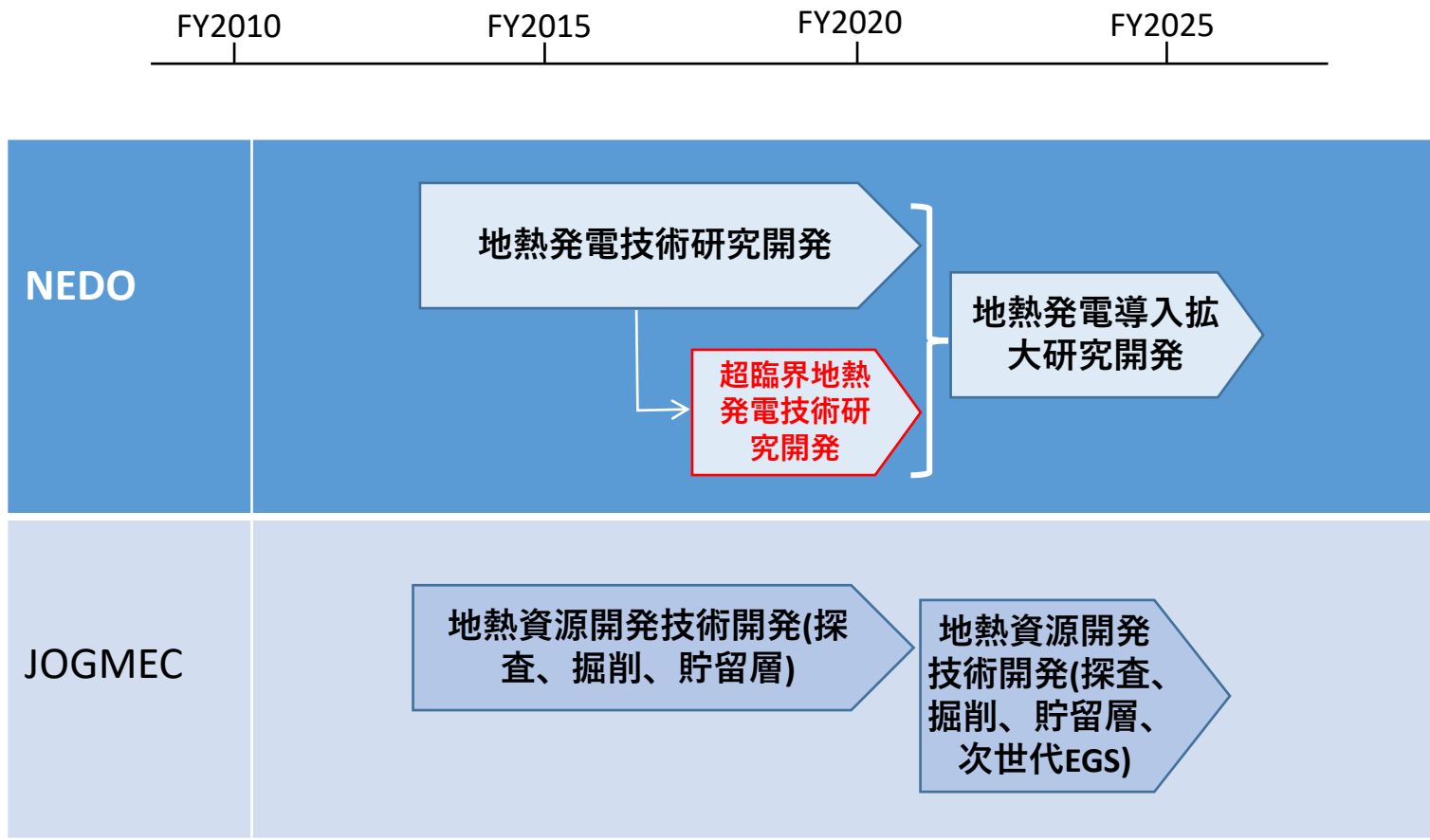
## ◆他の機関との関係

## 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	 JOGMEC 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	 JOGMEC 地熱発電技術研究 開発事業	 NEDO 地熱発電技術研究 開発事業
	超臨界地熱発電	 NEDO 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





# 地熱発電や地中熱等の導入拡大に向けた技術開発事業 令和2年度概算要求額 31.1億円 (29.6億円)

## 事業の内容

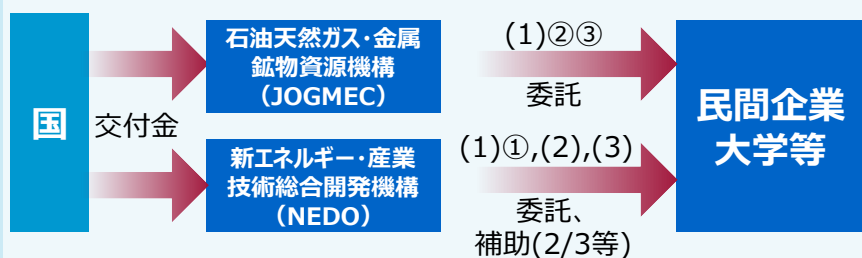
### 事業目的・概要

- 地熱発電は、天候等の自然条件に左右されず安定的な発電が可能なベースロード電源の一つであり、我が国は世界第3位の資源量 (2,347万kW) を有していることから、その導入拡大が期待されています。
- その一方で、(1)調査段階では、他の再エネと比べ、地下構造の把握や資源探査に係る開発リスク・コストが高いという課題、発電段階では、高性能な地熱発電システムや環境アセスメント関連の技術開発が求められ、(2)また、より発電能力の高い次世代の地熱発電 (超臨界) に関する技術開発が求められています。
- さらに、(3)地中熱など再エネ熱の活用は、エネルギー需給構造の効率化のために重要ですが、コスト低減等の課題があります。
- 本事業では、地熱開発や地中熱等の導入促進に向け、技術開発により諸課題の解決を図ることで、本格導入を後押しします。

### 成果目標

- (1)(2)地熱発電は、平成25年度から平成32年度までの8年間の事業であり、調査段階における坑井の掘削成功率を現状の約3割から約4割に向上 (改善率30%) することなどを目指します。
- (3)再エネ熱は、令和1年度から令和5年度までの5年間の事業であり、トータルコストの低減を図り、投資回収14年 (2030年までに8年) を目指します。

### 条件 (対象者、対象行為、補助率等)



## 事業イメージ

### (1) 従来型地熱発電に関する技術開発 <委託・補助>

#### ① 開発・運転の効率化 <委託・補助>

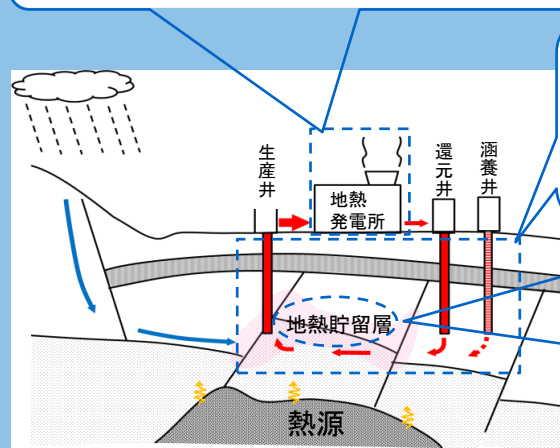
IoT-AI技術等を活用した運転管理技術の確立により、効率的な開発・運転を実現。また、環境アセスメントの迅速化に向けた環境評価技術の研究

#### ② 出力安定化 <委託>

運転後の出力安定化のための評価・管理技術を確立し、長期に安定的な発電を実現

#### ③ 探査精度と掘削速度の向上 <委託>

地下構造の詳細な把握を可能とし、開発リスクを低減するとともに、低コストかつ短期間での掘削を可能とする機材等を開発



※地熱貯留層とは、蒸気や熱水が溜まっている層

### (2) 次世代の地熱発電に向けた技術開発 <委託>

- 地下の超高温・高圧の状態 (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) に関する詳細調査を行います。

### (3) 再エネ熱利用に係るコスト低減技術開発 <委託・補助>

- 再エネ熱の導入に関わる上流から下流までの事業者等を集めたコンソーシアム体制を構築し、導入コスト、ランニングコストの低減につながる各主体共通の技術開発や、業界・ユーザーの連携による普及策に取り組みます。

## ◆NEDOが関与する意義

### 社会的必要性が大きい

- **再生可能エネルギーの普及の拡大**による温室効果ガス排出量削減
- 国産のエネルギーの有効活用によるエネルギーセキュリティへの貢献と国内産業活性化

### 民間企業単独での実施が困難

- 目標としている発電設備容量達成には、迅速に対応する必要がある。
- **技術開発の難易度が高い。**
- 開発期間が長期であり、リスクが高い。

### JOGMECとのデマケ

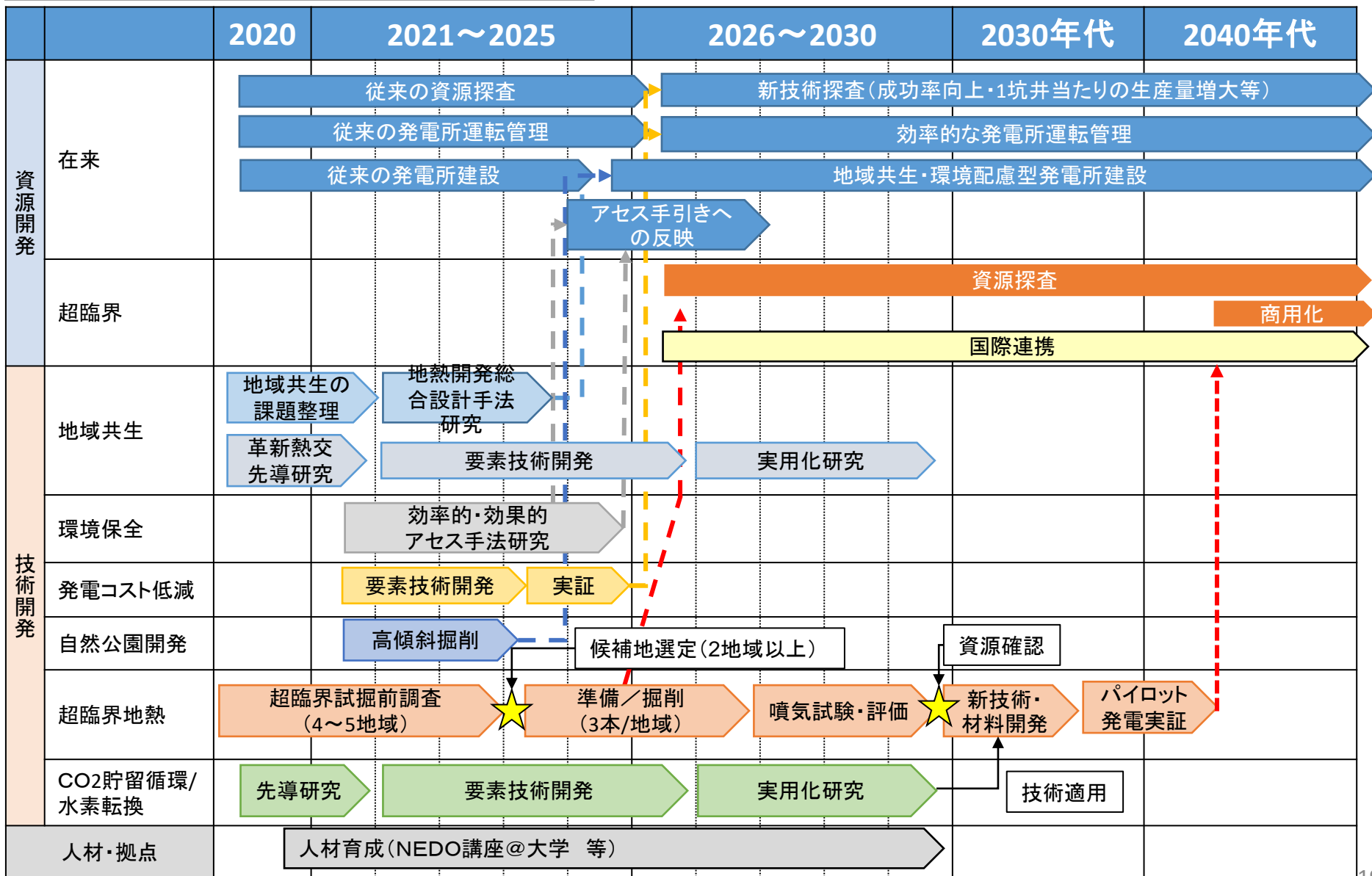
- **研究開発機関としてノウハウ**を有し、JOGMEC(現行事業の支援)にない専門性(特に、革新的技術開発など)がある。
- お互い連携して進めることが現状の課題解決には不可欠。



NEDOが推進すべき事業である

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





## ◆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

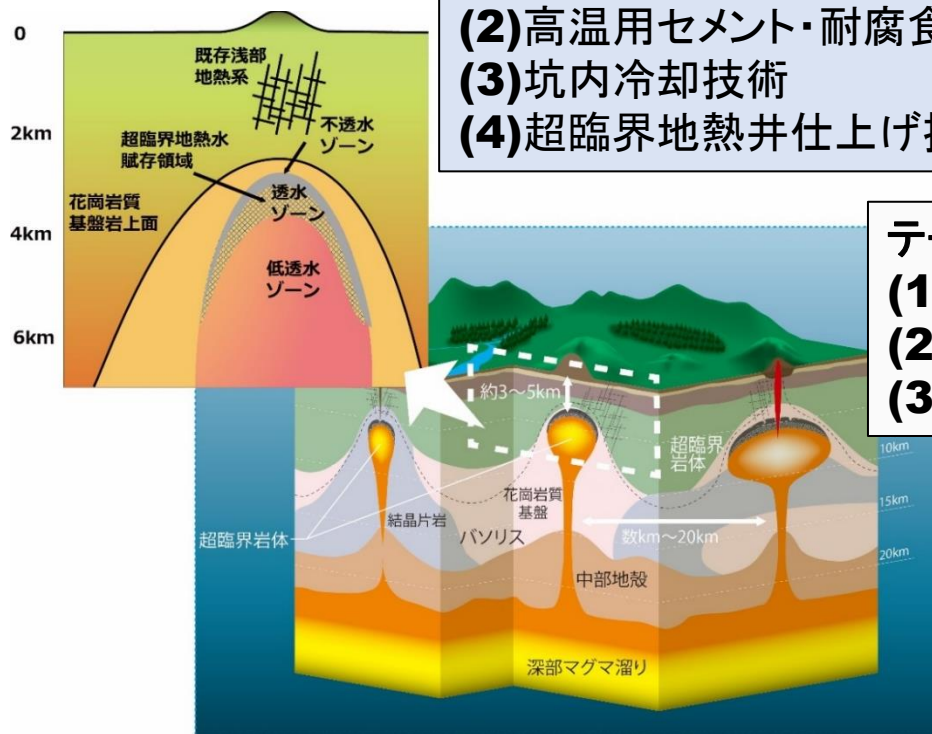
- (1)調査井掘削工事仕様
- (2)高温用セメント・耐腐食性ケーシング開発
- (3)坑内冷却技術
- (4)超臨界地熱井仕上げ技術

## 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

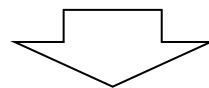


**◆実施の効果（費用対効果）**

- 2050年頃に、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CO2排出削減量は、約4,500万トン-CO2/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。

プロジェクト費用の総額

NEDO負担分 : 10.5億円 (FY2018～FY2020年度)



導入予測(2050年頃)

発電容量 : 最大で約11GW

発電量 : 781億kWh

市場規模予測 : 約11兆円

CO<sub>2</sub>削減効果 : 約4,500万トン-CO<sub>2</sub>/年

**◆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**

調査井に必要な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。

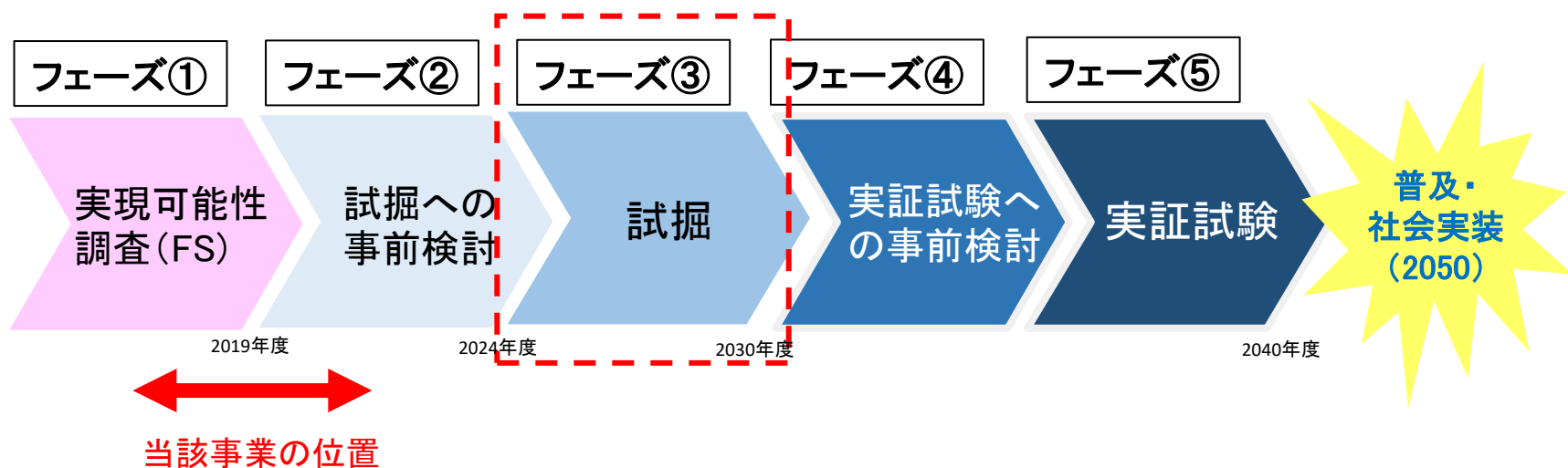
**(3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発**

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

【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

## ◆ 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	ステージゲート		
	経済性評価	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	水圧・減圧破砕手法の検討	人工貯留層造成手法開発			
	法令調査・HSE検討			モデリング手法開発	
(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。

## ◆ 研究開発目標と根拠

テーマ①超臨界地熱資源評価

※支援研究

(テーマ④-1a) AIによる資源評価技術

(テーマ④-3) 探査・モニタリング技術手法開発

補完調査

ポテンシャル調査  
先導調査

モデルフィールドの地域数を増やすために資源量の概略評価と有望地でのMT法探査を実施

テーマ②調査井資機材等検討

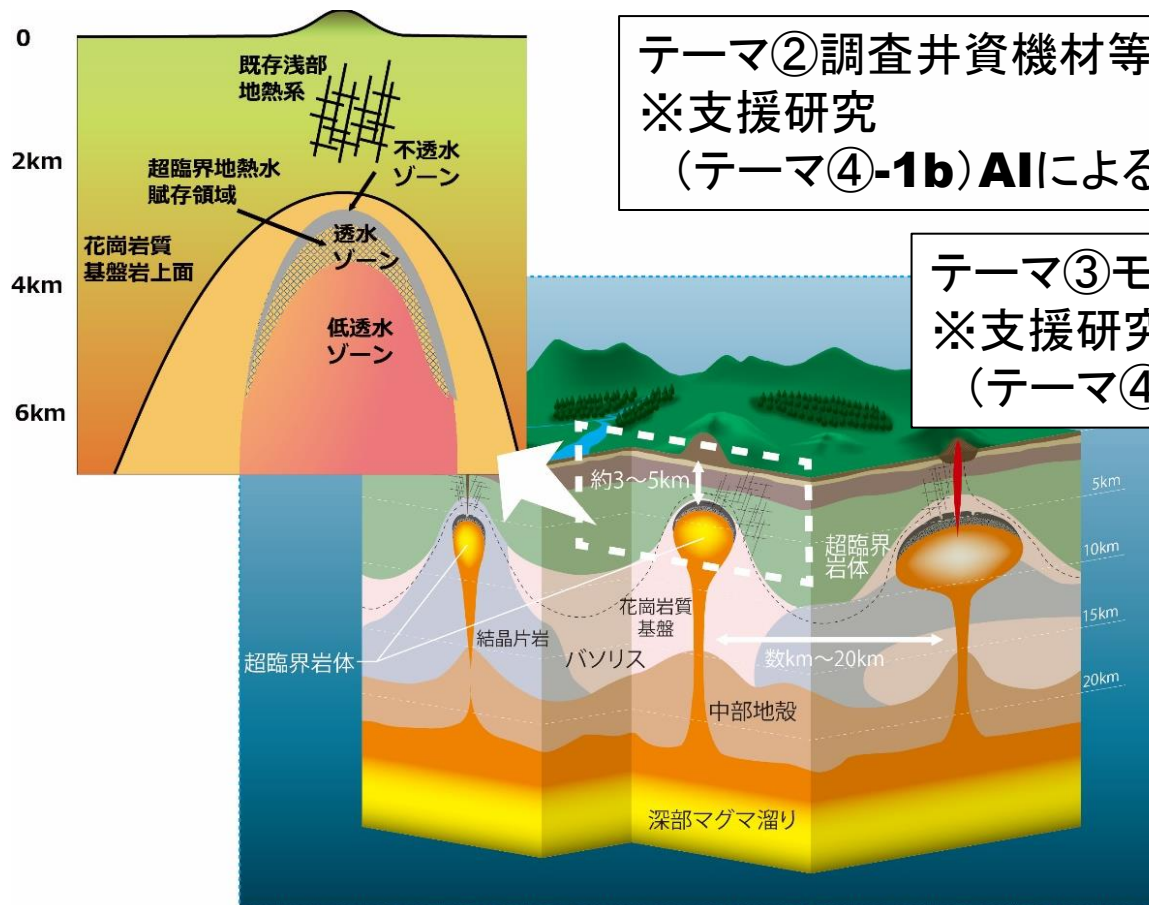
※支援研究

(テーマ④-1b) AIによる掘削技術

テーマ③モデリング技術手法開発

※支援研究

(テーマ④-2) 地殻応力測定の手法開発



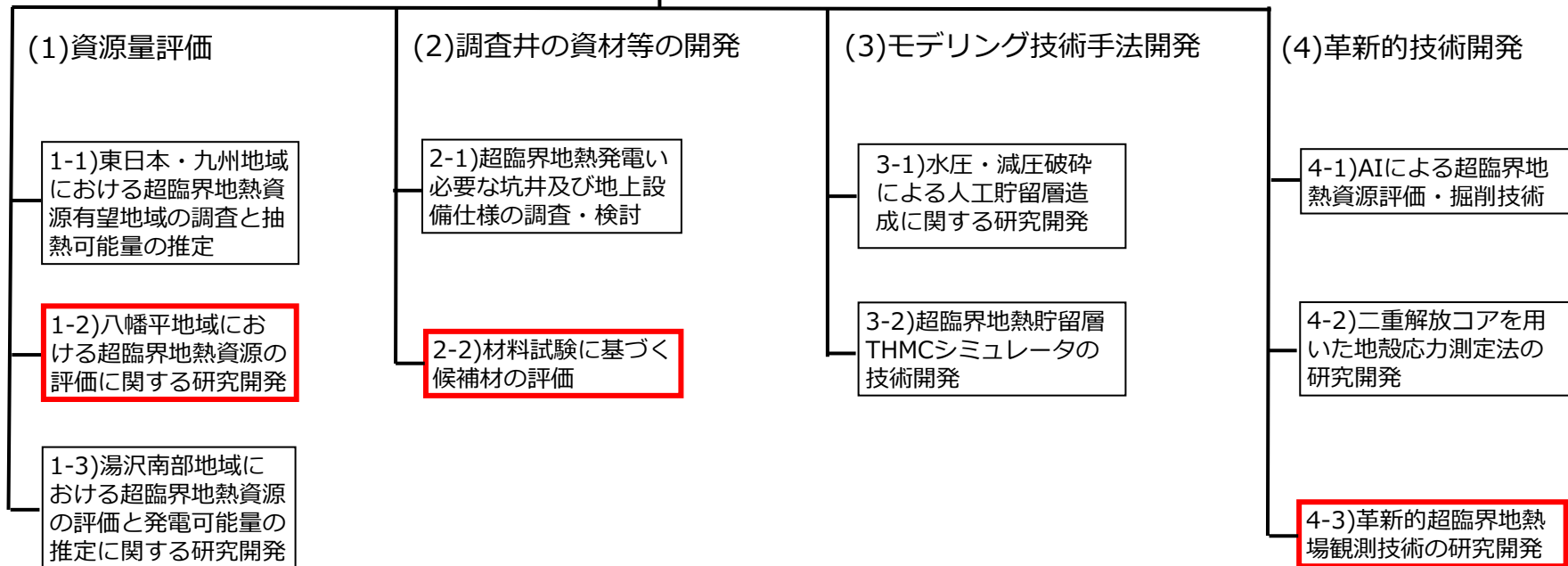


◆ 研究開発の実施体制

全体概要

研究開発テーマ名

NEDO



凡例

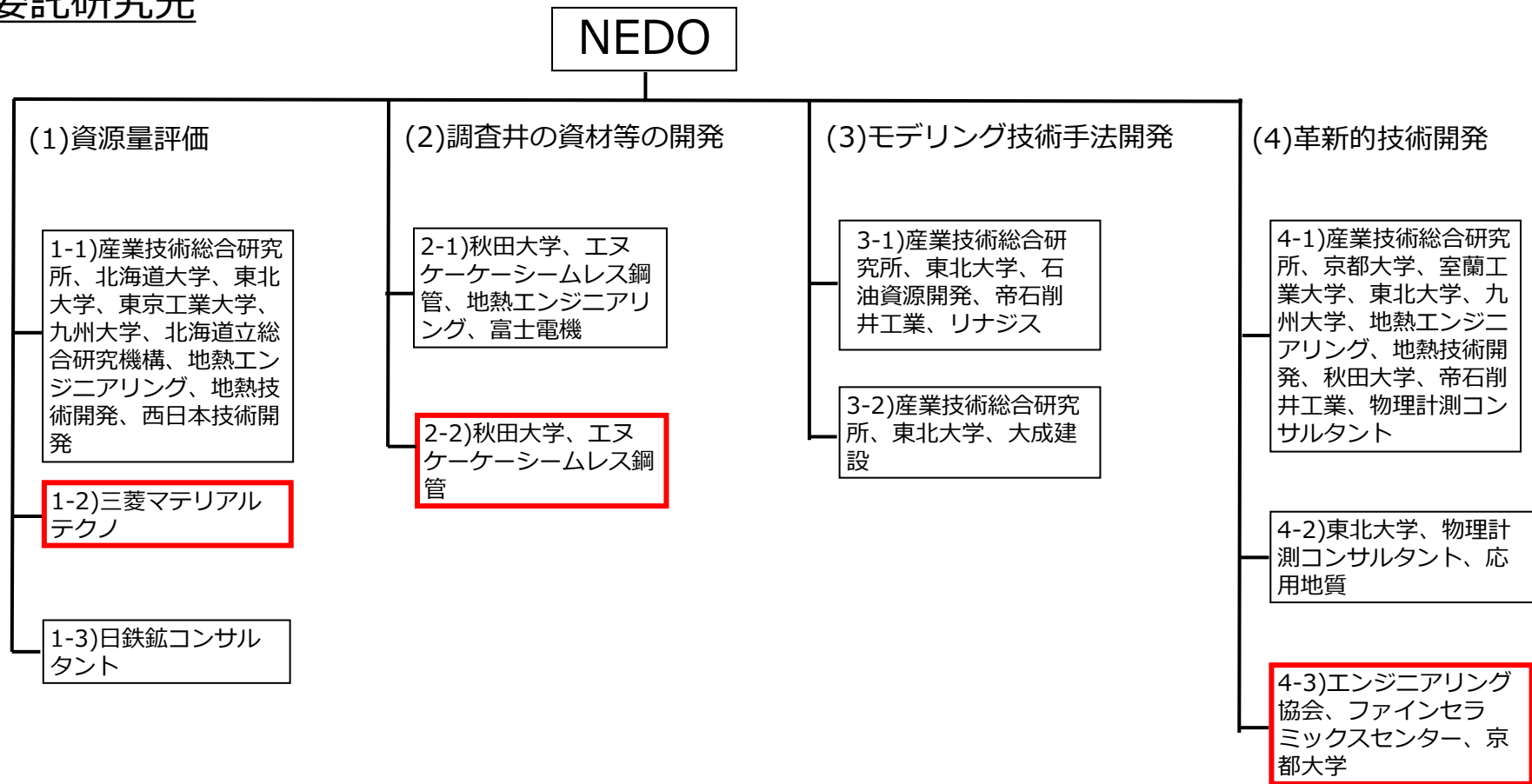
非公開発表



◆研究開発の実施体制

全体概要

委託研究先



凡例

非公開発表

## Ⅱ . 研究開発マネジメント (2) 研究開発計画の妥当性

## ◆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

## ◆ 研究開発の進捗管理(1)

- ① 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**を開催し、NEDO および実施者で実施内容や進捗を確認する会議を設け、必要に応じた対応方法の修正等を実施した。また、**ステージゲート審査**により、次フェーズへの移行について審査した。
- ② 超臨界地熱発電研究開発への期待が高まる社会情勢を鑑み、追加公募を複数回実施する等、時勢を捉えた**モデルフィールド追加、新しい手法(DAS地震波モニタリング、地殻応力測定、AIによる資源評価など)**を新規に採択。また、当該事業の進め方・あり方について、外部有識者による検討委員会をNEDOにて設置し、今後の開発方針(**ロードマップの詳細検討など**)に関する議論も実施した。
- ③ 事業開始前に、「地熱発電技術研究開発事業」の**酸性熱水対策技術の成果を資材開発(ケーシング材)に導入**した。併せて、海外資本の**ケーシングメーカーを参入**させた。

## ◆ 研究開発の進捗管理(2)

- ③ **地熱学会学術講演会オーガナイズドセッション**(2020年度)にて成果の進捗について報告し、第三者と多くの意見交換を行った。特に資源量評価手法については、既開発エリアと深部の超臨界地熱資源との関係を検討するなど重要な指摘があり、成果普及のためのアピールとなった。
- ④ **日本地熱協会と技術交流会**を開催し、成果が得られている超臨界地熱資源量評価や革新的探査技術などの各テーマの紹介を行うとともに、2021年度以降の新規テーマについて意見交換を行い、地熱事業に関わる会社関係者から要望等(例えば、在来型資源と超臨界地熱資源をつなぐ開発など)を受けた。
- ⑤ **JOGMEC**と定期的に連絡会を実施し(2018年度より開始)、お互いの事業について情報交換を実施し、NEDO事業の成果の継承などを議論した(特に将来の調査井掘削については、JOGMECとの連携が不可欠など)。

## ◆ 動向・情勢の把握と対応

関係省庁との情報交換を密にすることにより、動向と情勢を把握しつつ、開発マネジメントに活かしている。

情勢	対応
内閣府で2016年4月に策定された「 <b>エネルギー・環境イノベーション戦略(NESTI2050)</b> 」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超臨界地熱発電技術が挙げられた。	この政策を受け、2017年度には、「 <b>超臨界地熱発電の実現可能性調査</b> 」を実施した。2018年度以降は、地熱発電技術研究開発から独立させ、単独の事業とした。
内閣府で2020年1月に策定された「 <b>革新的環境イノベーション戦略</b> 」において、NESTI2050を継承し、有望な革新的技術として超臨界地熱発電技術が選定された。	この政策を受け、2021年度から新規事業に対する予算要求を実施し、超臨界地熱発電技術に対して、テーマの選択と集中により「 <b>超臨界地熱資源開発</b> 」と「 <b>革新的探査技術手法開発</b> 」について予算を確保した。
内閣府で2021年6月に2050年のカーボンニュートラルを目指す「 <b>グリーン成長戦略</b> 」において、地熱技術開発として、超臨界地熱発電技術が選定された。	2021年度より、地熱発電導入拡大研究開発事業を新規事業として開始し、その一つの研究開発課題に、「 <b>超臨界地熱資源開発</b> 」(計画FY2021～FY2024)を選定した。

## ◆ 中間評価(2018年度実施)結果への対応

※本事業の前の事業「地熱発電技術研究開発」の中間評価の中で、テーマ「超臨界地熱発電の実現可能性調査」が評価された。

	前回の指摘	対応
1	NEDOとともにJOGMECが技術開発を行っている ので、NEDOの事業だけでは地熱分野の全体像 がよく見えない。 2030年のエネルギーミックス、また2050年のあ るべき姿に向けて、 <b>両機関がどのように連携し て取組んでいくのか</b> を明示すべき。	2019年度に地熱技術を俯瞰した地熱技術戦略 を策定し、2021年度以降の新規事業のテーマ 探索を実施した。 NEDOの成果をJOGMECでフォローすることを 提案・協議中。 2018年度より連絡会を定期的開催している。
2	超臨界地熱システムというチャレンジングな目標 に向けて、経済性を含めた基礎的な検討がなされ たことは、2050年を見据えた <b>地熱エネルギー の利用拡大</b> という視点から評価できる。	特になし
3	超臨界地熱発電技術開発は、高温高压に耐える 新素材開発など、 <b>多種の要素技術開発を並行 して進めていく必要がある</b> 。 先の長いテーマである。 <b>段階的な目標を設定し、 確実に進め行くことが肝要</b>	内閣府で策定されたロードマップをベースに、詳 細な取り組み方針を整理するとともに、METIと 協議し、2021年度以降のテーマを選定した。
4	超臨界地熱システムのFSにおいて、技術面と経 済面での検討が行われたが、環境面での検討も 必要である。 <b>開発に伴う地震の発生</b> にかかる課 題への対応など。	水圧破砕手法の検討において、誘発地震につ いて海外事例を調査済み。今年度以降のモデル フィールド調査においては、HSEを検討する 予定。

## ◆ステージゲート審査(2019年度実施)結果への対応

フェーズⅠ(実現可能性調査)を完了し、次フェーズ移行の是非を審査するためステージゲート審査を実施した。併せてモデルフィールドの絞り混みに関する意見を聴取した。

	指摘事項	対応
1	<p>1. 資源量評価</p> <p>① 比抵抗だけでなく、地震データも増やす必要がある。</p> <p>② 坑井データが少ない地域では、民間企業データの利用が必要である。</p> <p>③ 浅部の既開発エリアへの影響なども評価すべきである。</p>	<p>①微小地震観測などを実施する予定。</p> <p>②坑井データが十分ない地域は、今年度以降中止した。</p> <p>③数値シミュレーションで評価する予定(今年度以降)。</p>
2	<p>2. 資材等開発</p> <p>超臨界地熱資源の性状は、まだ確定していないので、あらゆる可能性を考慮して、蒸気清浄化に取り組むこと。</p>	<p>蒸気清浄化装置については、湿式スクラバーを検討する予定(乾式システムは、実現可能性が低いと判断された)。</p>
3	<p>3. 人工貯留層造成技術手法開発</p> <p>減圧破砕について、実現可能性が確認できない。今後は、水圧破砕に絞って検討を続けることとする。</p>	<p>減圧破砕は中止し、水圧破砕に絞り込む。</p>

## ◆ 知的財産権等に関する戦略および知的財産管理

- ・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。
- ・案件別に**委託先間で知財合意書を締結**し、研究開発責任者の法人が知財マネジメント委員会を実施し、特許申請や成果の公表等を審議した。



## ◆ 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	<p>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)</p>	<p>(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)。</p> <p>(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。</p> <p>(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。</p>	<p>○</p> <p>○</p> <p>○</p>	<p>(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。</p> <p>(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</p> <p>(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</p>

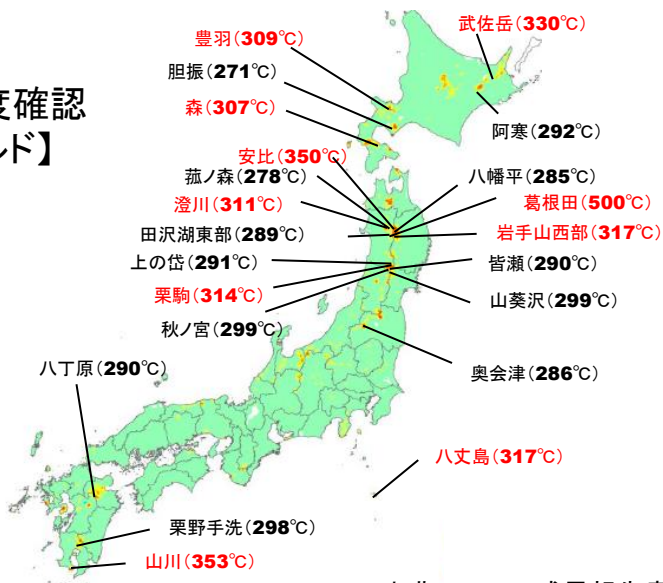
Ⅲ. 研究開発成果

(1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

◆ 各実施者の開発概要

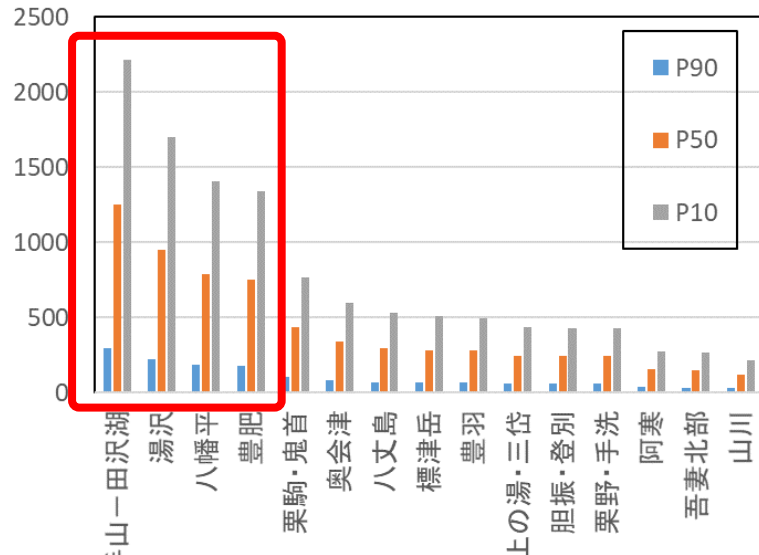
(1) 超臨界地熱資源量の評価

【高温確認フィールド】



出典: NEDO 成果報告書 (2019、2020)

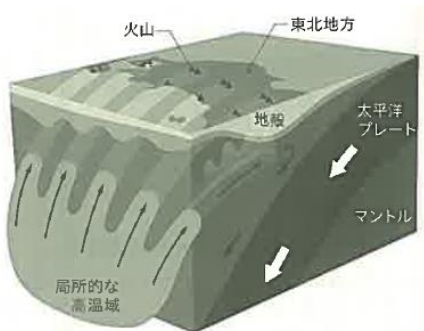
(MW) 【容積法によるポテンシャル調査】



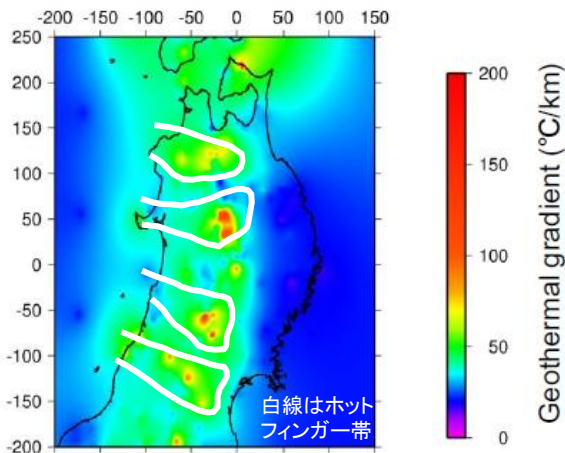
P90	P50	P10
1.6GW	6.5GW	11.6GW

参考

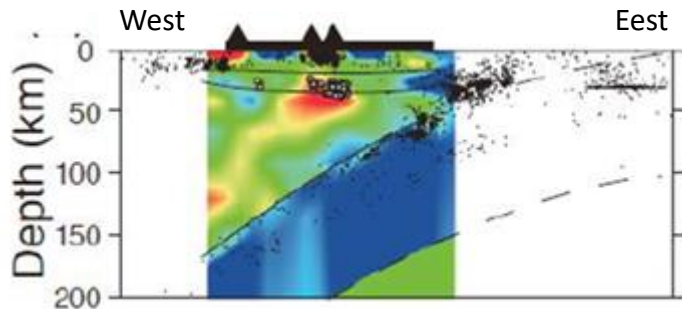
【東北地方のホットフィンガーモデル】



(出典) 中島純一 (2018)



(出典) 建築研究所年報資料 (2011)



【地下深部の地震波低速度帯、(長谷川&中島、2008)】

# ◆各実施者の開発概要

【モデルフィールド選定】

資源量評価

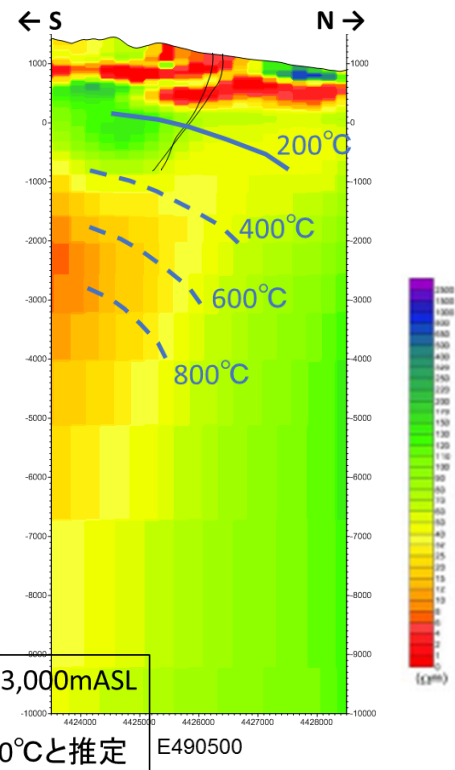
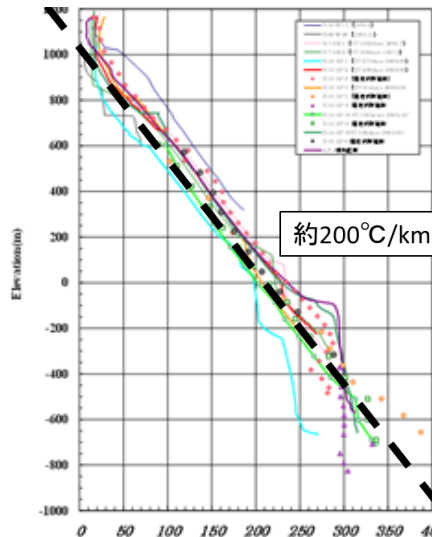
- 地表調査
- 概念モデル構築
- 数値シミュレーション



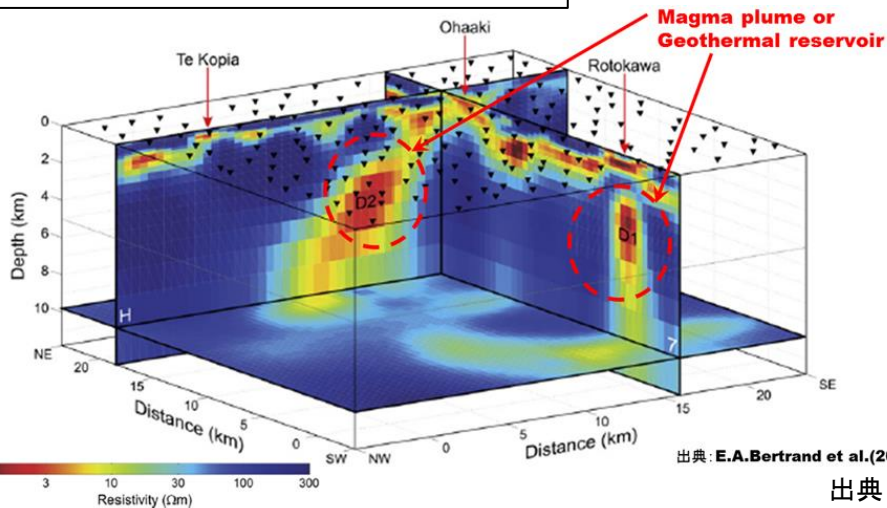
出典：環境省(2013)平成25年度地熱発電に係る導入ポテンシャル精密調査・分析委託業務、火原協(2017)

## (1) 超臨界地熱資源量の評価

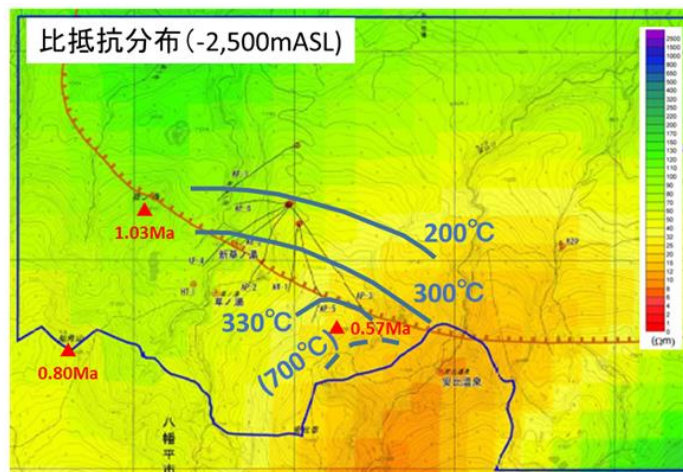
深部の温度分布と比抵抗構造



## 【参考】ニュージーランドでの広域MT法探査



出典：E.A.Bertrand et al.(2015)



注) 等地温線： 実線(-500mASL)⇒実測値に基づく  
 破線(-2,500mASL)⇒実測値からの外挿に基づく

出典：加藤(2019)



Ⅲ. 研究開発成果

(1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

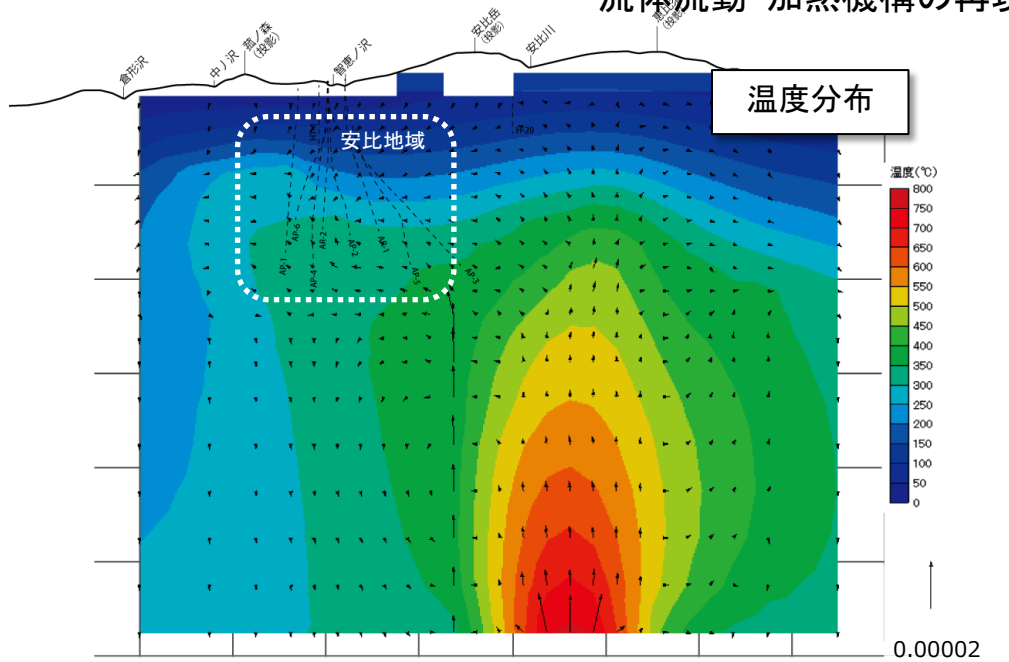
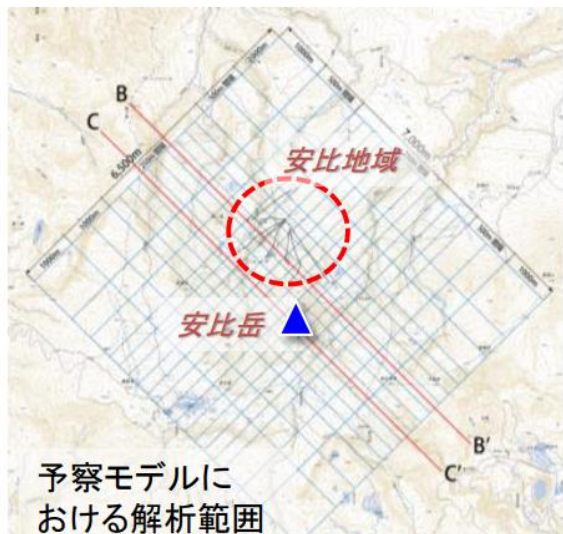
◆ 各実施者の開発概要

(1) 超臨界地熱資源量の評価

【自然状態シミュレーション】

流体流動・加熱機構の再現

【数値モデルの構築】

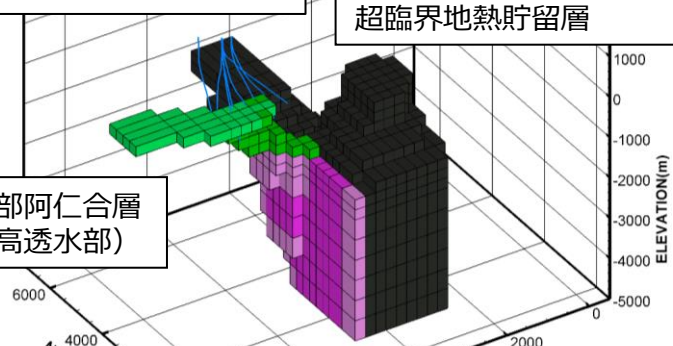


超臨界領域19ブロックから生産したケースにおける生産開始後の蒸気量の推移

石英充填不透水層に覆われた超臨界地熱貯留層

中部阿仁合層 (高透水性)

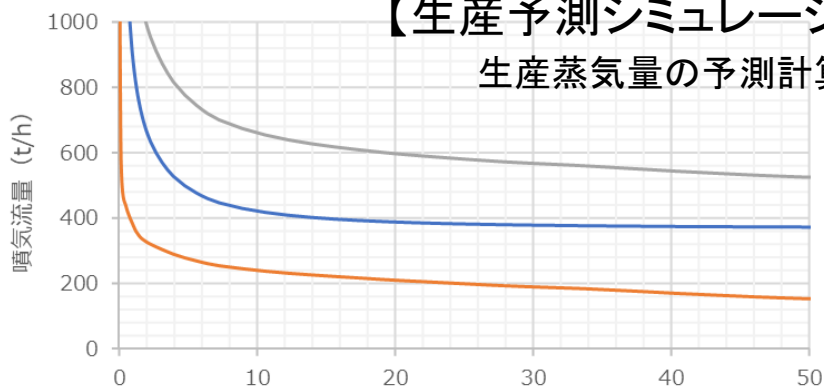
石英充填不透水層との境界部の高透水ゾーン



— 石英充填層内側合計 (t/h) — 石英充填層外側合計 (t/h)  
— 総生産流量 (t/h)

【生産予測シミュレーション】

生産蒸気量の予測計算



## ◆ 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	調査井に必要なとなる酸性環境(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。	<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）、シッキングタイム：200℃×6h以上を確認した。</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を確認した。</li> <li>・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。</li> <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 style="text-align: center;">○</p> <p style="text-align: center;">○</p> <p style="text-align: center;">○</p> <p style="text-align: center;">○</p> <p style="text-align: center;">○</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> <li>・発電システムの湿式スクラバの設計および実証</li> <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>

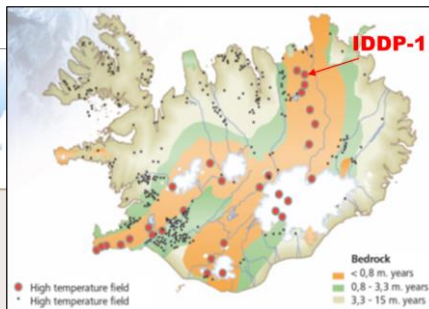
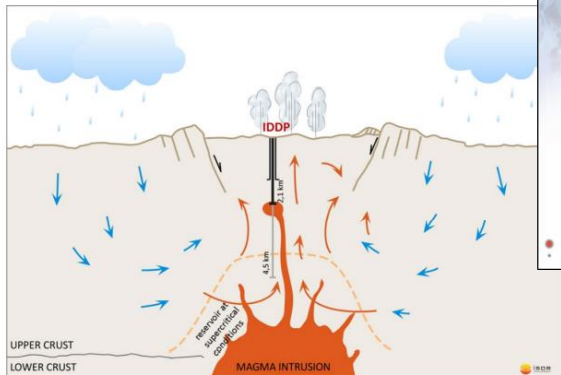
◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

◆ 各実施者の開発概要

(2) 調査井の資機材等の開発

① 調査井仕様の検討



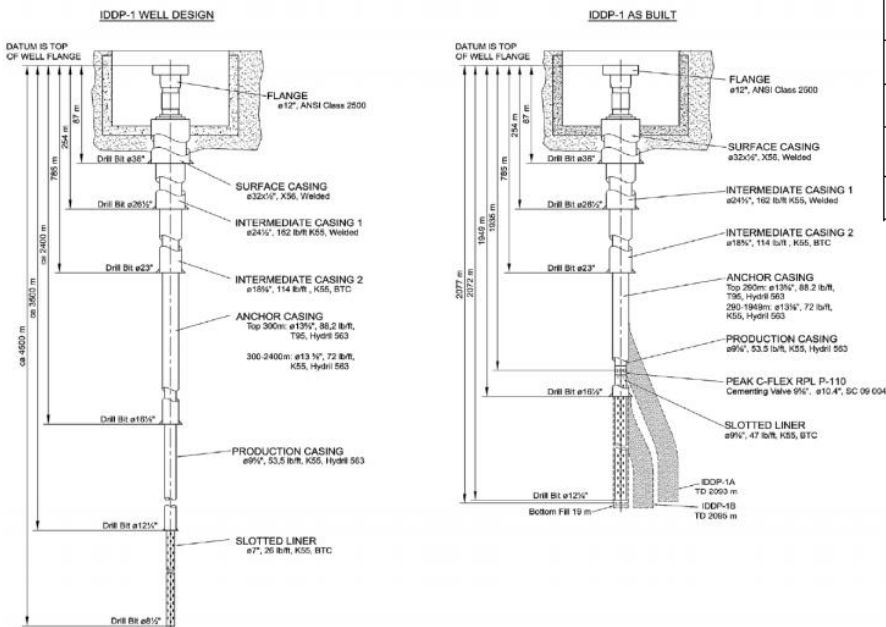
<IDDP-1 スプール損傷部拡大>



<IDDP-1 坑口装置全景>

出典: NEDO 成果報告書 (2020)

IDDP-1 掘削状況の概念図 (Friðleifsson, 2015)



IDDP-1 の計画 (左) および実績 (右) の坑内図 (Þórhallsson et al., 2014)

IDDP-1 噴気試験時の坑口特性 (Einarsson et al., 2015)

	Date	P(bar)	T(°C)	H(kJ/kg)	Condition
I	2010.3	70-120	285-325	2700(?)	二相
II	2010.3/11-8/24	20	210-380	2700-3200	過熱蒸気
III	2011.5/17-5/25	55-70	340-390	3030-3130	過熱蒸気
IV	2011.8/9-8/11	40-80	320-380	3000-3100	過熱蒸気
V	2011.9/28-2012.7/24	138-142	380-440	3000-3150	過熱蒸気

IDDP-1の噴気試験(2010-2012)

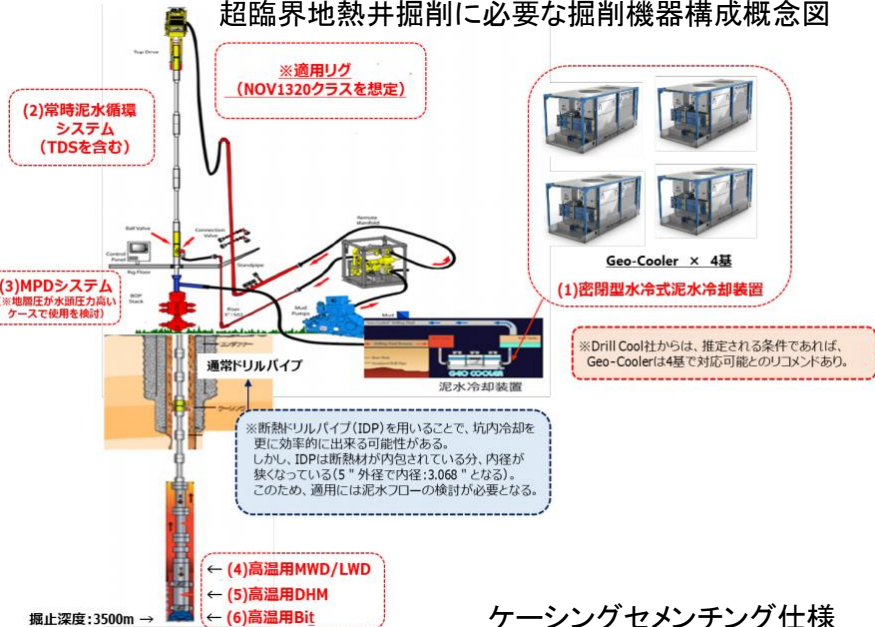


出典: IDDPウェブサイト

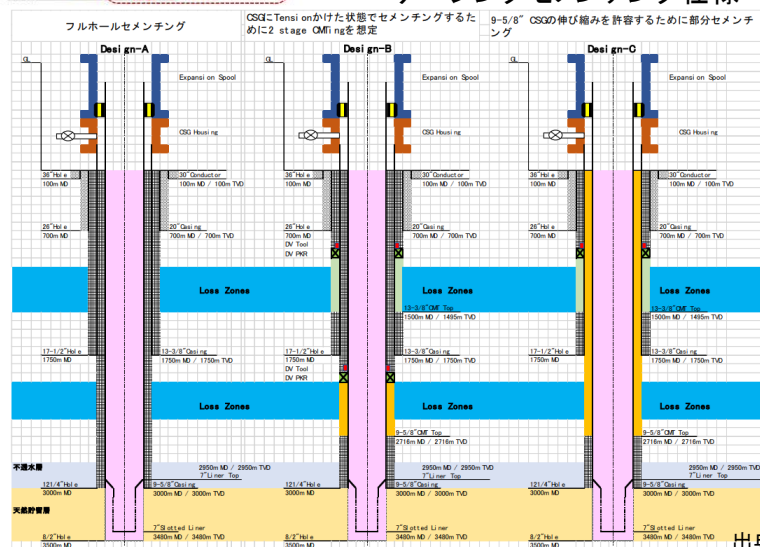


# ◆ 各実施者の開発概要

超臨界地熱井掘削に必要な掘削機器構成概念図



## ケーシングセメンチング仕様

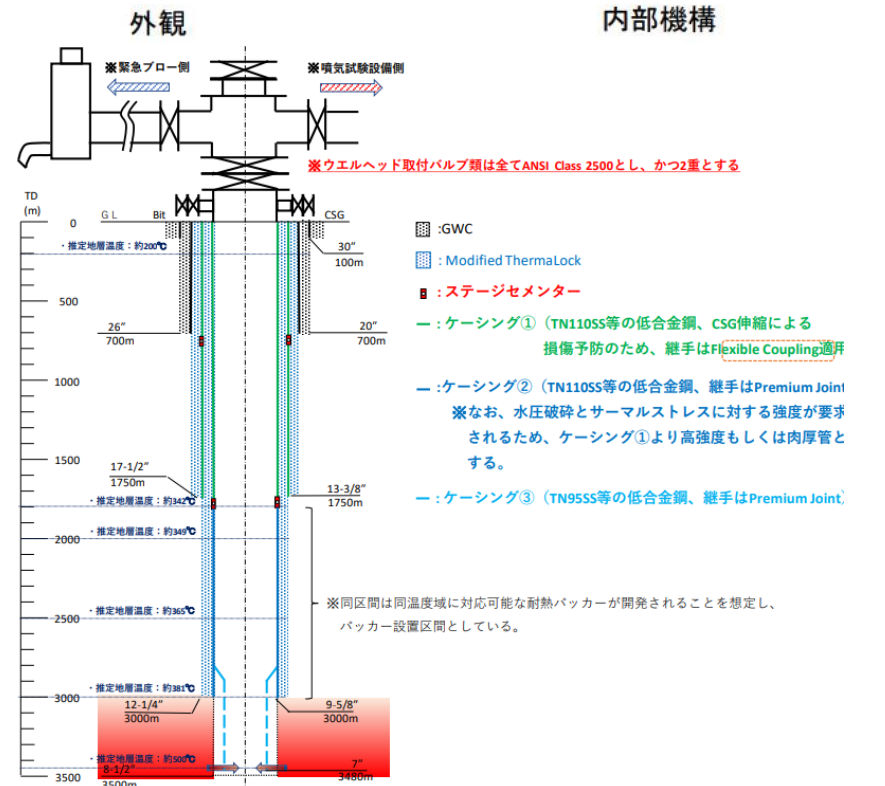
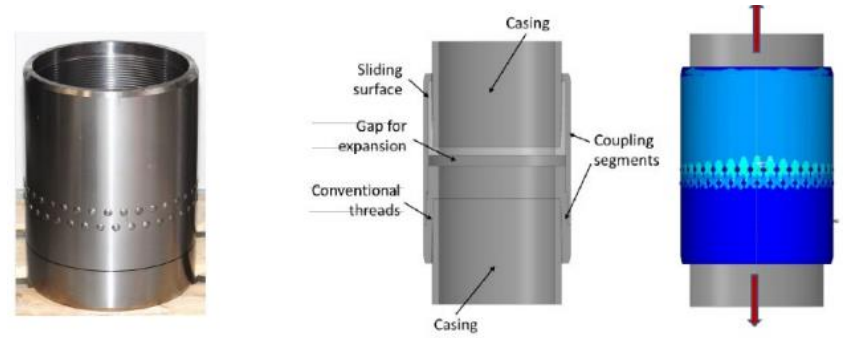


出典: NEDO 成果報告書 (2020)

## (2) 調査井の資機材等の開発

### ① 調査井仕様の検討

### フレキシブル継手 (Flexible Coupling)



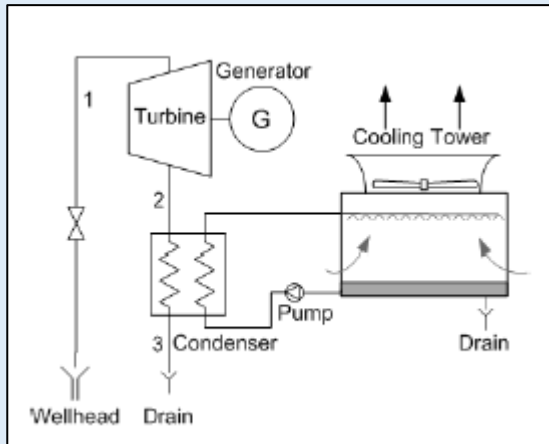
フレキシブル継手を適用した調査井ケーシング計画案

◆各実施者の開発概要

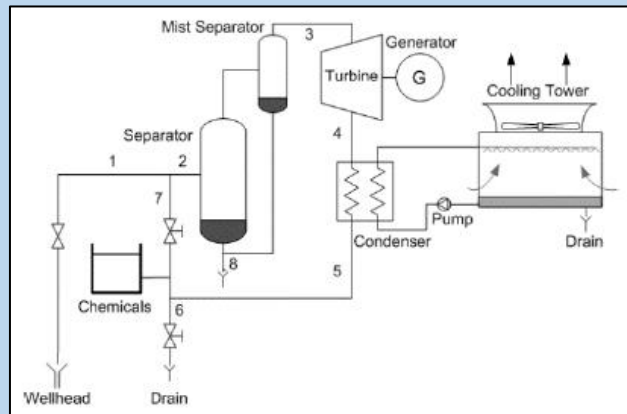
(2) 調査井の資機材等の開発

② 地上設備仕様の検討

【ドライスチーム・サイクル】

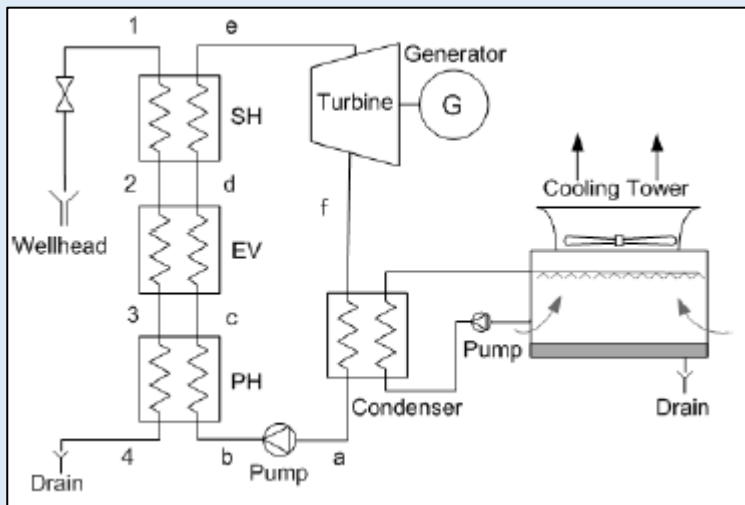


【湿式スクラバー・サイクル】



基本設備

【バイナリー・サイクル】



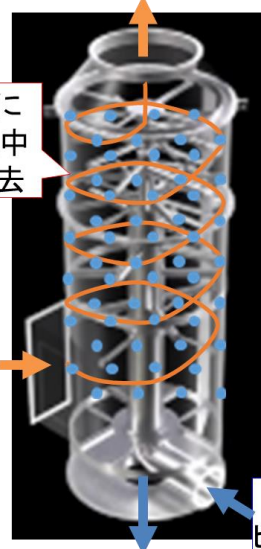
タービン供給蒸気

スクラビングにより過熱蒸気中のシリカを除去

過熱蒸気

スクラビング水

シリカ排液



富士電機製の船舶用排ガス脱硫サイクロンスクラバの概略図(加藤ほか、2019)

Ⅲ. 研究開発成果

(1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

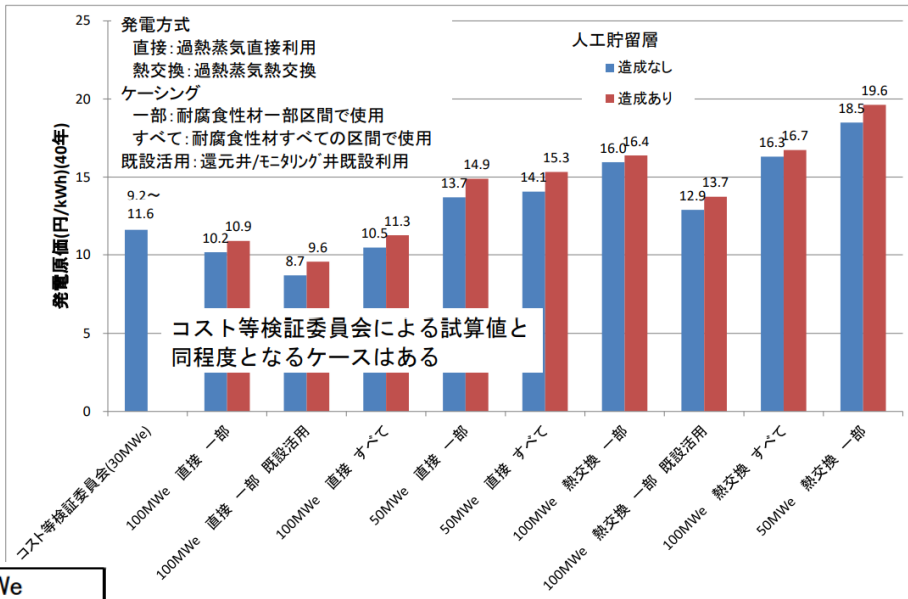
◆ 各実施者の開発概要

(2) 調査井の資機材等の開発

③ 経済性評価

発電方式別の地上設備費用

発電方式	設備種類	100MWe	50MWe
過熱蒸気直接利用	蒸気設備	220億円	135億円
	発電設備	300億円	185億円
過熱蒸気熱交換	蒸気設備	270億円	165億円
	発電設備	280億円	175億円



発電方式別の必要蒸気量と還元量

発電方式	人工貯留層造成	蒸気流量/坑井	100MWe		50MWe	
			所要蒸気流量	還元流量	所要蒸気流量	還元流量
過熱蒸気直接利用	なし	186t/h@7.7MPa	496t/h	55t/h	250t/h	27.5t/h
	あり	195t/h@5MPa	477t/h	27t/h	245t/h	14t/h
過熱蒸気熱交換	なし	186t/h@7.7MPa	687t/h	705t/h	340t/h	359t/h
	あり	195t/h@5MPa	639t/h	699t/h	340t/h	372t/h

発電原価試算結果まとめ (生産井3,500m)

ケース別の発電原価試算比較

		単位: 円/kWh (40年)		
		資源存在深度		
		浅い	深い	
資源密度		3,500m井	4,000m井	5,000m井
人工貯留層造成不要	過熱蒸気直接利用	10.2	10.6	11.6
	既設活用	8.7	9.0	9.6
	過熱蒸気熱交換	16.0	16.7	18.5
人工貯留層造成必要	過熱蒸気直接利用	10.9	11.4	12.4
	既設活用	9.6	9.9	10.6
	過熱蒸気熱交換	16.4	17.2	18.9

試掘井等、坑井掘削費用・調査費用

掘削深度	試掘井 (構造試錐井) / 還元井	生産井		モニタリング井	調査費用		水圧破碎費用	備考
		一部耐腐食性ケーシング	全部耐腐食性ケーシング		地質調査	検層		
2,000m	-----	-----	-----	627,200	8,794	217,695	60日 537,190	
3,500m	3,819,158	4,443,190	5,039,798	-----	15,807	787,509		
4,000m	4,347,146	5,065,018	6,034,506	-----	18,066	831,660		
5,000m	5,558,532	6,276,404	7,618,772	-----	22,582	1,037,273		

水圧破碎の期間は(3)のテーマにおける成果を参考にしている。  
注) 調査・掘削コストについては、現時点での為替/コストに基づき試算したものである。

### Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

## ◆各実施者の開発概要

### (2) 調査井の資機材等の開発

#### ④セメント材開発

試作アルミナセメント基本性能比較 (比重1.70)

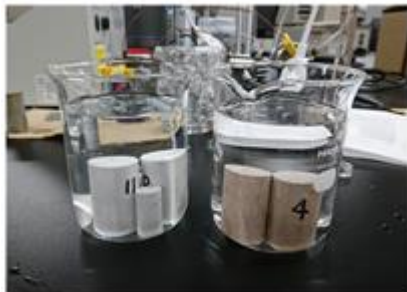
セメント 比較項目	HASF: アルミナセメント+シリカ(細)
シッキングタイム TT@150°C	6:00以上 遅硬化剤 2.0%
シッキングタイム TT@175°C	5:49 遅硬化剤 4.0%
シッキングタイム TT@200°C	1:18 遅硬化剤 4.0%
一軸圧縮強度CS@ 250°C×24hrs	6.4MPa 遅硬化剤 4.0%
ハンドリング性	△
体積増加	なし
コメント	<ul style="list-style-type: none"> <li>CS 3.5MPa以上</li> <li>TT 5:49@175°C</li> <li>ハンドリング性に課題</li> </ul>
評価	○

### 超臨界地熱井用セメント材料候補

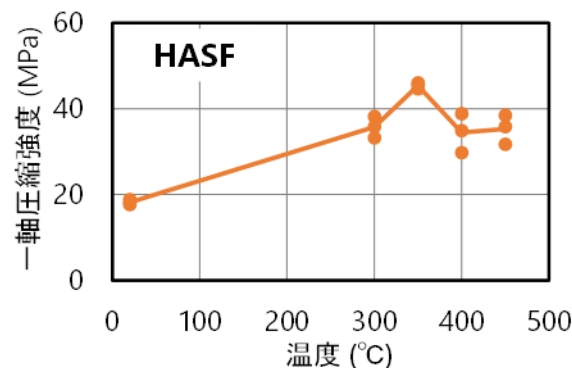
名称	GWC (Geothermal Well Cement)	ThermaLock	Modified ThermaLock	TSRC (Thermal Shock Resistant Cement)	本プロジェクト HASF, HASFL	
状態	製品化	製品化	DESCRAMBLE PJで 使用	研究段階	試作中	
メーカー	宇部興産 テルナイト	BNL ハリバートン	BNL ハリバートン	BNL	AGCセラミックス テルナイト	
ベース材	ポルトランドセメント+シリカ	アルミナセメント(CaP)+フライアッシュ	アルミナセメント(CaP)+フライアッシュ	アルミナセメント(CaC)+フライアッシュ	アルミナセメント(CaC)+シリカ	
シッキングタイム(TT)	200°C×6hr	100°C×3hr~	200°C対応可	85°C×6hr~	200°C×6hr	
長期安定性	耐熱性	~300°C	~300°C	~500°C	~600°C	~500°C
	耐酸性	耐酸性(Mg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 等)	耐CO <sub>2</sub> 性、耐酸性(pH0.5、H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 、NaCl+Mg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 等)	N/A	耐酸性(pH0.5、H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 、NaCl+Mg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 等)	耐酸性(pH2、H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 、H <sub>2</sub> S、HCl)

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)を開発目標  
 ⇒HASFの価格: 600~750円/kg程度、GWCの価格: 100円/kg程度(セメント用添加剤は含まない)

#### 水中浸漬



#### オートクレーブ装置





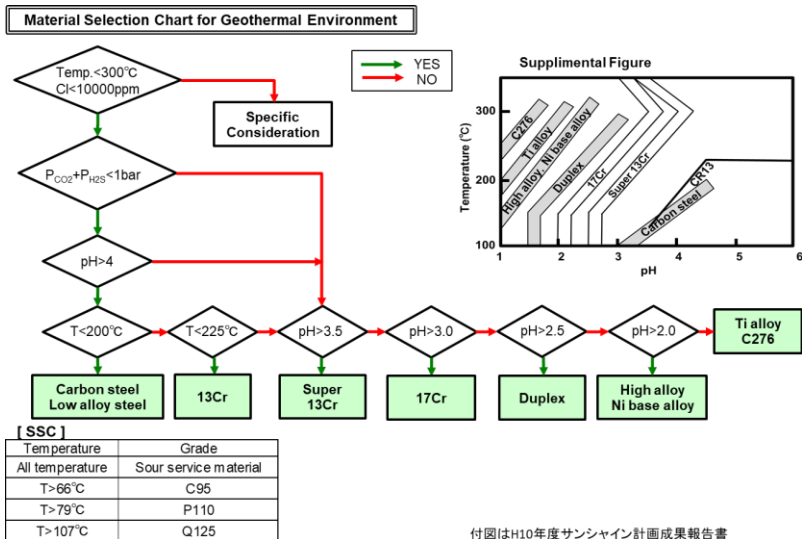
# Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

## ◆ 各実施者の開発概要

### (2) 調査井の資機材等の開発

#### ⑤ ケーシング材開発

材料選定のフローチャート

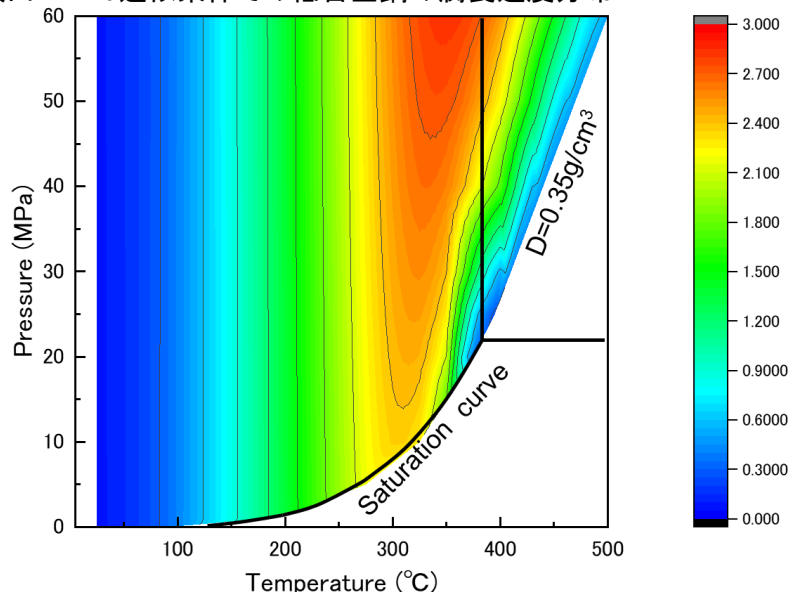


[SSC]	
Temperature	Grade
All temperature	Sour service material
T > 66°C	C95
T > 79°C	P110
T > 107°C	Q125

in accordance with NACE

付図はH10年度サンシャイン計画成果報告書「深部地熱用金属材料の解析評価」の図に追記

葛根田WD-1a近似条件での低合金鋼の腐食速度分布 Corrosion Rate



#### 腐食速度予測

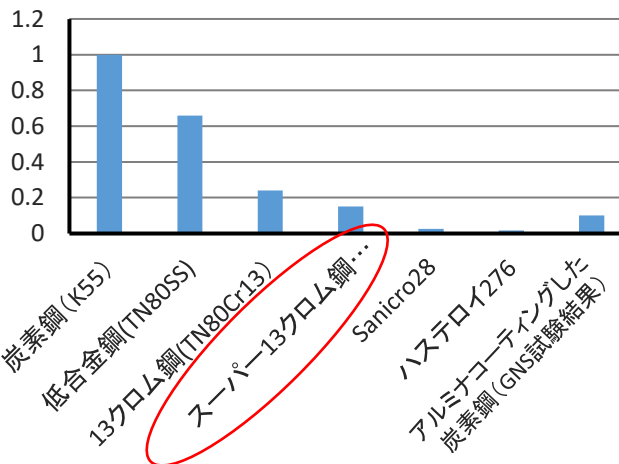
2021.4.14  
CRcal.ver.0.4.3

Input	Case #	Case 1	Data range
	Temp(°C)	300	100~300
pH	3.00	1~6	Super 13Cr, 17Cr
Cl(ppm)	10000	0~121000	150~350
CO2(bar)	1.16	0~16	2~5
H2S(bar)	0.14	0~3	0~10000
Time(hr)	192	1~336	0~16
			0, 0.001~1
			1~192

Corrosion rate (mm/y)	ばらつき	ばらつき
	K55	5.64
CrMo	2.36	1/3~3倍
13Cr	1.30	1/5~5倍
Duplex	0.16	1/10~10倍
C276	0.03	1/5~5倍
Super 13Cr	0.52	1/5~5倍
17Cr	0.37	1/3~3倍

#### 材料腐食速度相対値



## ◆ 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>	○ ○ ○ ○ ○	<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



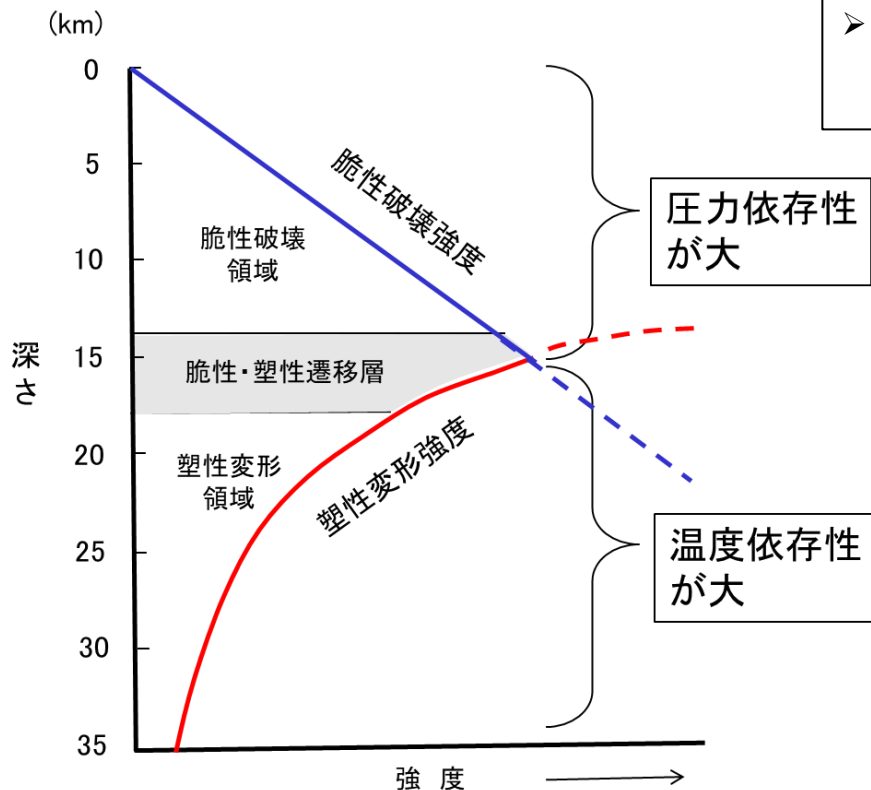
## ◆ 各実施者の開発概要

## (3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発

## ① 人工貯留層造成技術

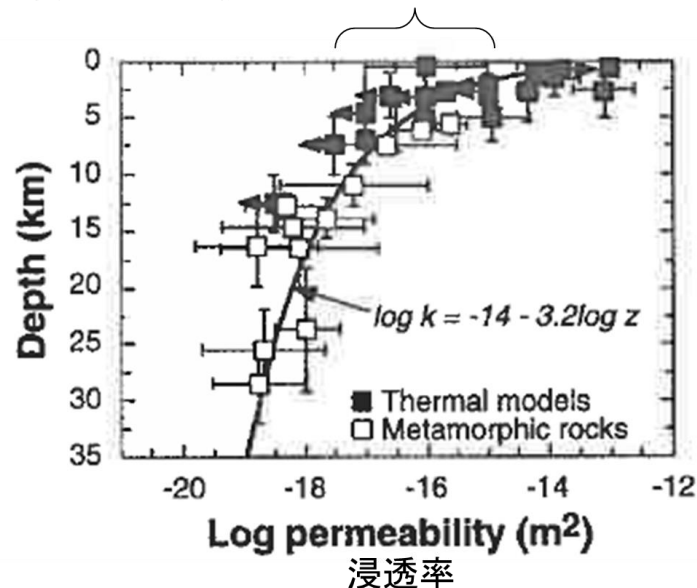
- 地殻の強度分布は、深度が浅い(温度が低い)深さでは、脆性破壊強度に支配され、亀裂が生成される。
- しかし、ある程度深くなると、温度が上昇し、応力が掛かっても脆性破壊ではなく、塑性変形が生じる。
- こうした特性より、地殻の浸透率は、一般に深度に伴い低下する。安定した蒸気生産には、 $10^{-5}$ オーダーの浸透率が必要となり、人工貯留層造成技術が不可欠となる。

【地殻の強度分布】



(出典)中島純一(2018)

【大陸地殻の浸透率の深度依存性】

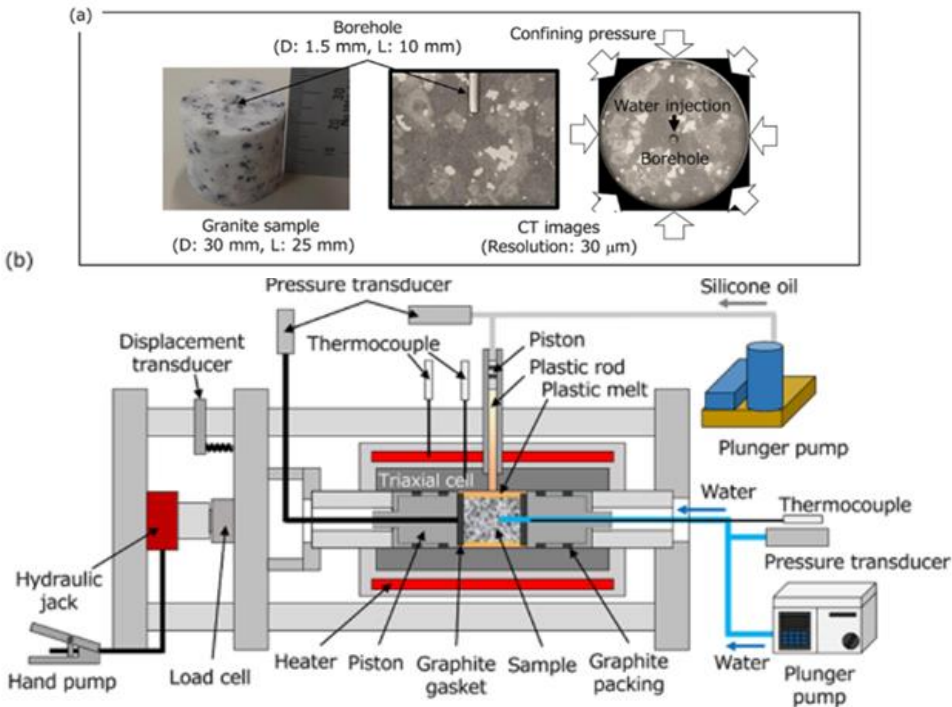
深度5kmでの浸透率:  $10^{-16.5}$  (  $10^{-17}$  ~  $10^{-15}$  )  $m^2$ 温度上昇により  
脆性領域から  
延性領域へ推移安定した蒸気生  
産には、 $10^{-15}$   
オーダーの浸透  
率が必要人工貯留層造成  
技術が必要

### Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

## ◆ 各実施者の開発概要

- 360℃～450℃, 応力5～100 MPaの範囲での様々な条件下での**花崗岩の水圧破碎**実験を実施した
- 生成された亀裂は熱抽出に有利な複雑なパターンを示し, 浸透率は $1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 程度に達しうることが示された
- 既存微視亀裂を起点とした様々な箇所が存在する既存微視亀裂への高圧・低粘性流体の侵入によって引き起こされる破壊メカニズムであることが示された(本メカニズムによれば寸法効果は顕著でないと判断できる)
- このメカニズムの妥当性を有限要素法を用いた微視的シミュレーションを用いて検証した

#### 【封圧三軸応力下的水圧破碎実験における実験試料と実験装置】



### (3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発

#### ① 人工貯留層造成技術

【室内実験による亀裂パターンの例(蛍光樹脂で可視化)】

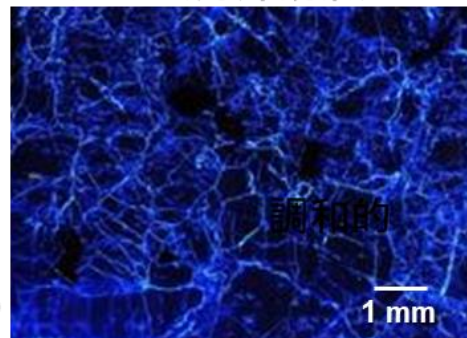
温度: 450℃

最大主応力: 40 MPa

中間主応力: 15 MPa

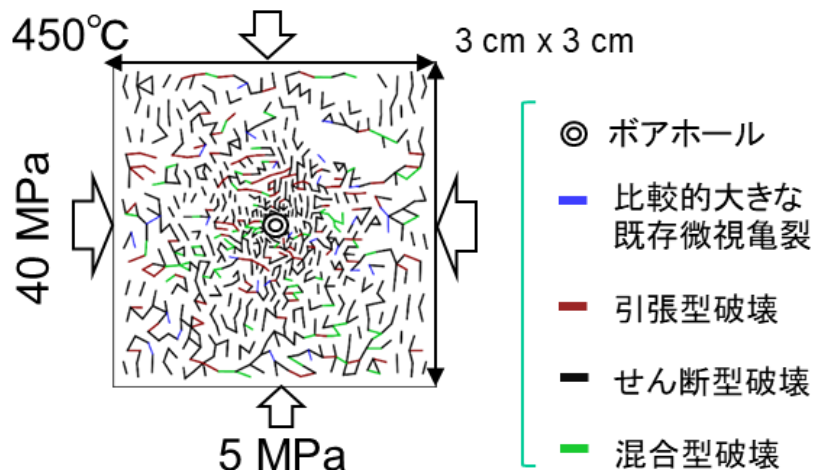
最小主応力: 5 MPa

熱抽出に有利な複雑な亀裂パターン(薄片観察)



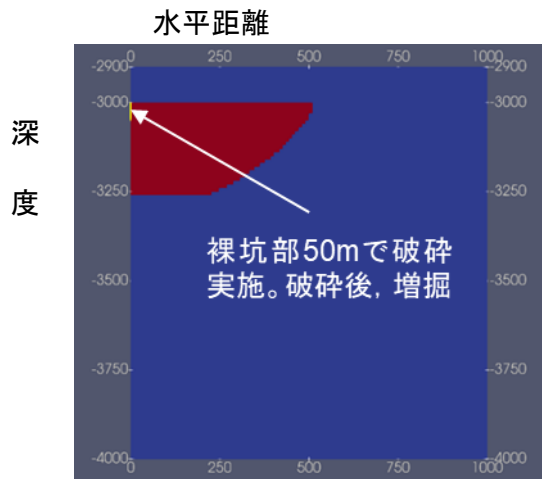
Watanabe et al.  
(2019, Sci. Rep.)

#### 【微視的シミュレーションによる亀裂パターンの例】

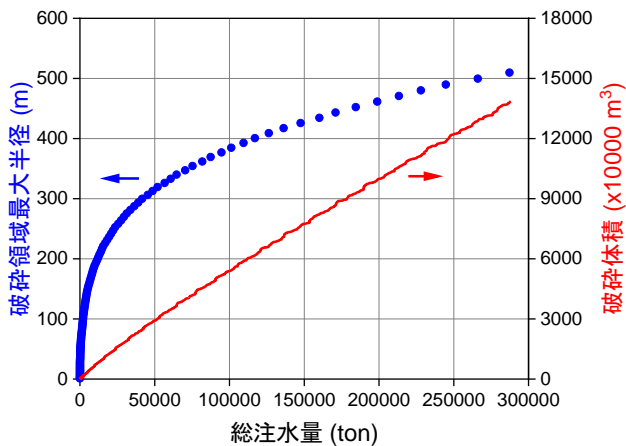


# ◆各実施者の開発概要

【モデルによる亀裂発生シミュレーション】



基準モデルの全坑(500m)  
加圧では半径方向の進展が遅い  
⇒裸坑部が短い状態で破砕実施

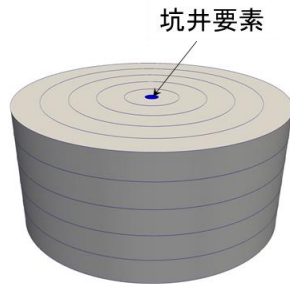


約28万tで破砕領域最大半径が500mに到達

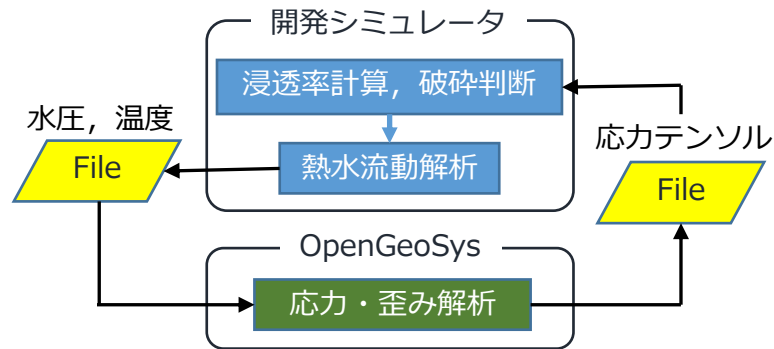
破砕体積は総注水量に比例

## (3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発

### ①人工貯留層造成技術



既存の2次元(円盤モデル)  
コードを拡張し、簡易3次元  
(円柱モデル)に対応させた



2つの独立したシミュレータを交互に動作させる陽的連成

### 【フィールドでの水圧破砕シナリオ事例】

	シナリオA (基準ケース)	シナリオB (増掘)
使用機器	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 送水ポンプ (流量 100t/h, 耐圧 140MPa) × 2台</li> <li>✓ ケーシング (耐熱: 調査中, 耐圧 92MPa)</li> <li>✓ パッカー (耐熱 200℃, 耐圧 100MPa)</li> </ul>	
工程	<p>500℃まで掘削 (不透水層の下は裸坑)</p> <p>→</p> <p>原位置の透水性を評価 (注水流量を推定)</p> <p>→</p> <p>パッカーを200℃の深度に設置</p> <p>→</p> <p>加圧注水 注水量: max 200t/h 坑口圧: max 70MPa 加圧期間: 2週間 破砕半径: 150m</p>	<p>不透水層から100mの深度まで掘削</p> <p>→</p> <p>原位置の透水性を評価</p> <p>→</p> <p>パッカーを200℃の深度に設置</p> <p>→</p> <p>加圧注水 加圧期間: 65日 破砕半径: 500m</p> <p>→</p> <p>500℃の深度まで増掘</p>

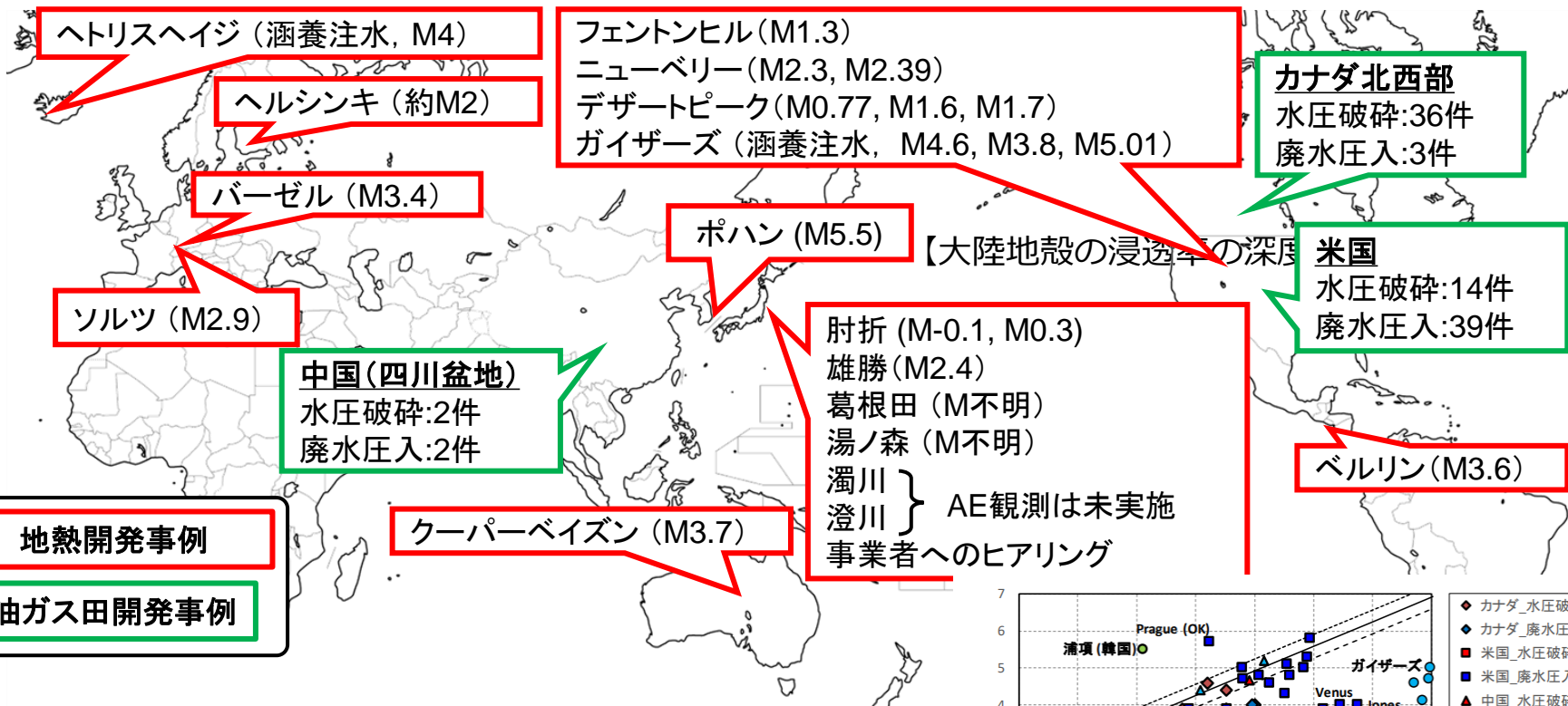
出典: NEDO 成果報告書(2020)

# ◆各実施者の開発概要

## (3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発

### ①人工貯留層造成技術

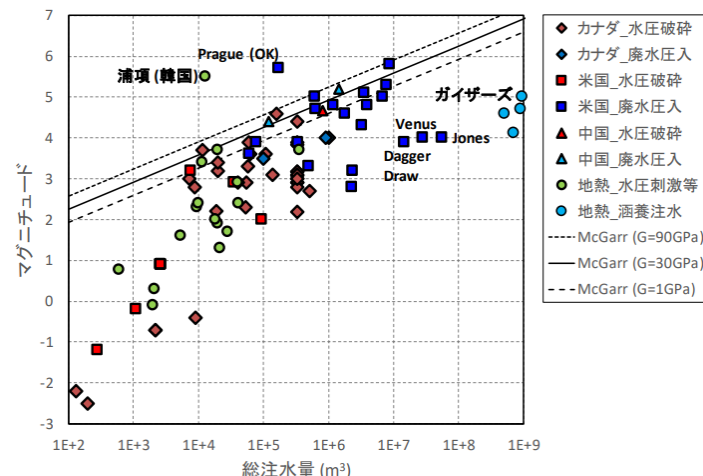
【水圧破碎等事例調査】



地熱開発事例  
油ガス田開発事例

国内外の加圧注水・水圧破碎事例および微小地震観測事例について調査を実施した

1. 地熱開発事例については、目標10件に対して17件を調査したほか、国内事業者を対象にヒアリング調査を実施した
2. 油ガス田開発事例については、目標10件に対して96件を調査した



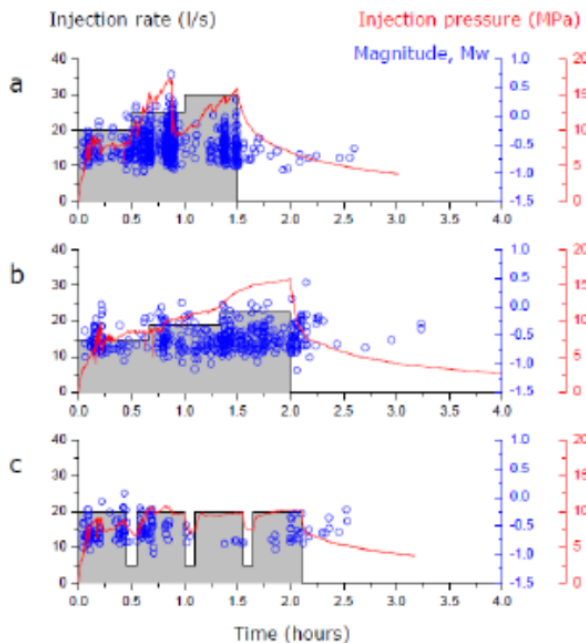


### Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

## ◆ 各実施者の開発概要

【水圧破碎で誘発地震を抑制する技術開発】

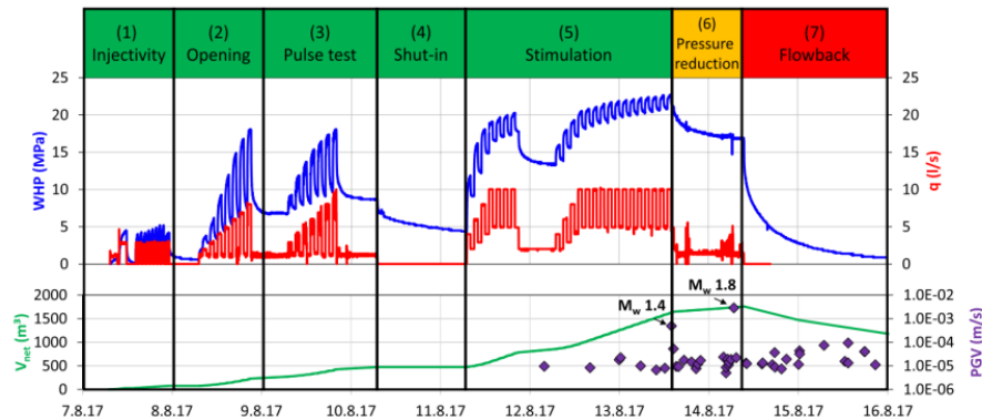
P J 名	期間	委託元	主な受託者	総予算 (推定値)	概要
DESTRESS	FY2016～ FY2020	EU (H- 2020)	OGFZ, ETH, KICT, U. Strasbourg	27.7M€	<ul style="list-style-type: none"> <li>* 誘発地震発生を抑制した水圧破碎法の開発と実証試験</li> <li>* シミュレーションにより「Cyclic Stimulation」の有効性を提示</li> <li>* 韓国Pohangサイトでの実証試験で、誘発微小地震発生を抑制した水圧破碎を実現</li> </ul>



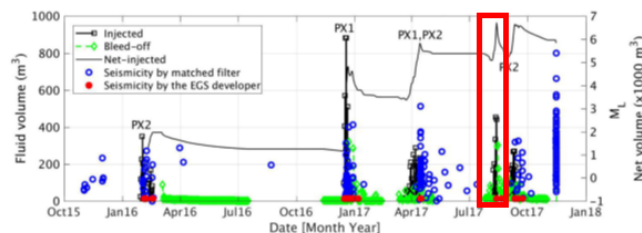
水圧破碎シミュレーション結果の例 (Farkas et al. 2018)。Cyclic stimulation (c)では誘発地震の発生数が少ないことがわかる。

### (3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発

#### ① 人工貯留層造成技術



韓国Pohangでの水圧破碎実験結果 (Hofmann et al. 2018)。Cyclic stimulationを行うことにより、誘発微小地震数、マグニチュードを抑制することに成功した。



Pohangサイトでの水圧破碎履歴 (Kim et al. 2018)

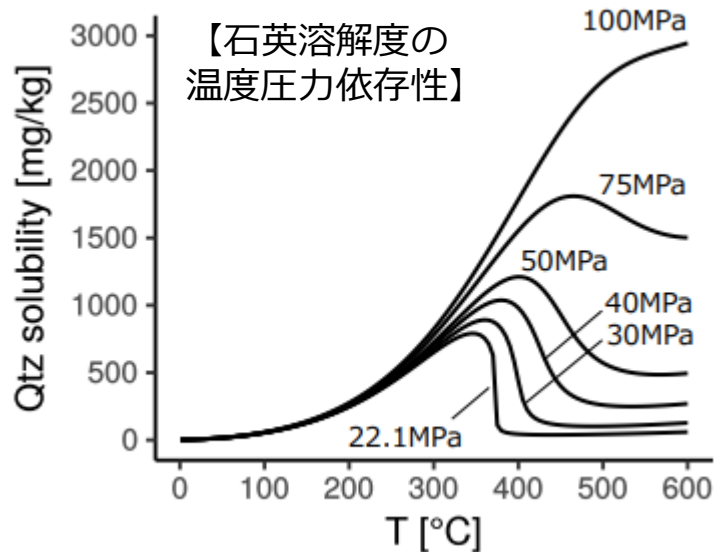
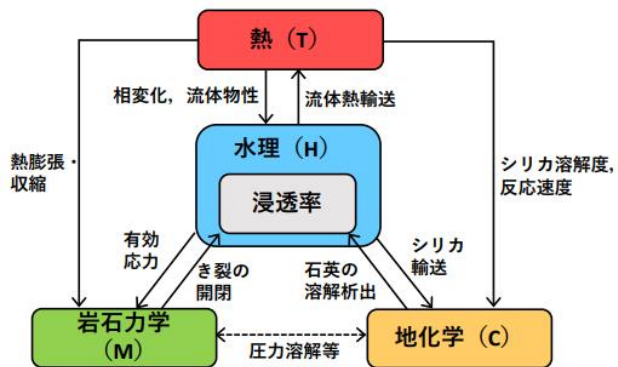
Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

◆ 各実施者の開発概要

(3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発

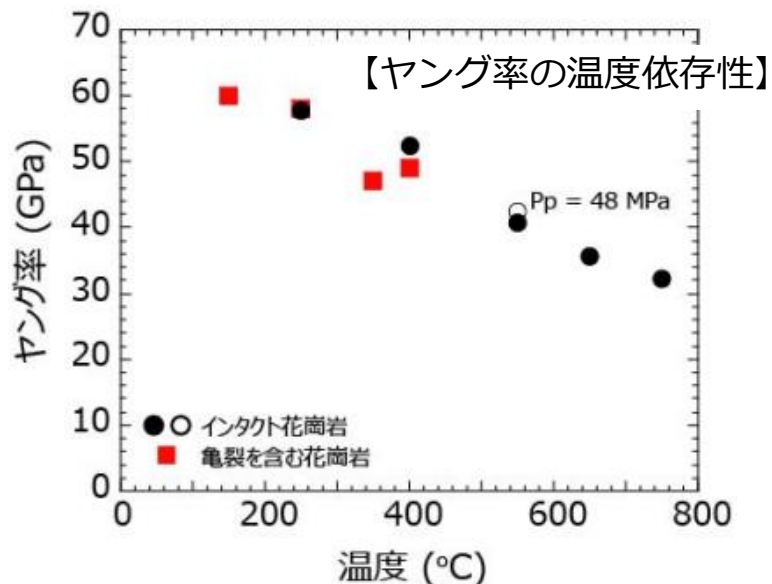
① THMCモデリング技術

超臨界地熱貯留層内の THMC 連成挙動の概念図



【既存シミュレータと本研究の比較】

温度領域	機能	TOUGH REACT	TOUGH REACT & FLAC3D	CSMP++	HYDROTHERM M拡張版 (受託者の先行研究)	本事業の目標
亜臨界	熱水流動	○	○	○	○	○
	反応輸送	○	○	△平衡反応のみ?	△シリカ	△シリカ
	岩石力学	×	○	×	△ (有効応力変化)	○
超臨界	熱水流動	○	○	○	○	○
	反応輸送	開発中		△シリカ平衡反応	△シリカ	△シリカ
	岩石力学	×		×	△ (有効応力変化)	○
離散化手法		IFDM	IFDM / FDM	CVFEM	IFDM	FEM
THM一体型連成解法 (計算安定性に関連)		-	×	-	-	○
備考			・ 超臨界条件での適用事例なし	・ 超臨界塩水に対応	・ 浸透率の有効応力依存性(EPT)	・ 浸透率の有効応力依存性(EPT)



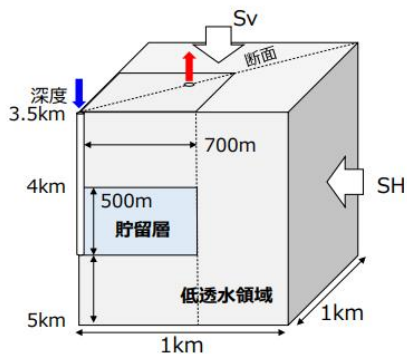


### Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

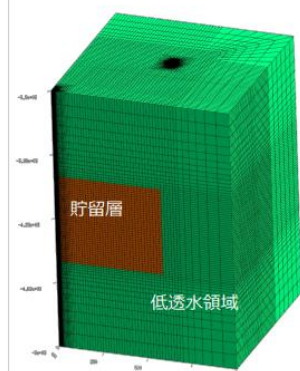
## ◆ 各実施者の開発概要

【3次元数値モデルと計算メッシュ】

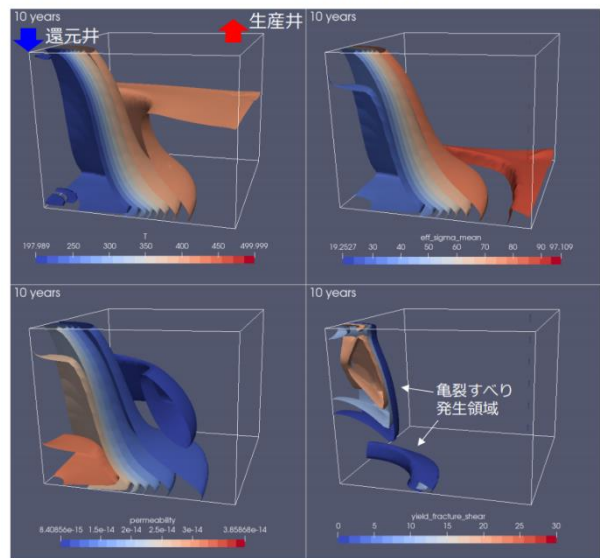
(a) 数値モデル



(b) 計算メッシュ



(a) 温度



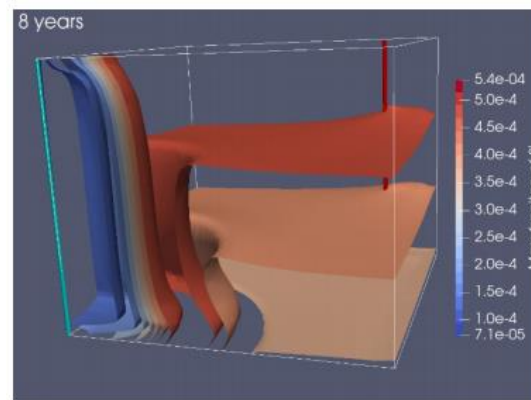
(c) 浸透率

(d) 亀裂すべり破壊基準

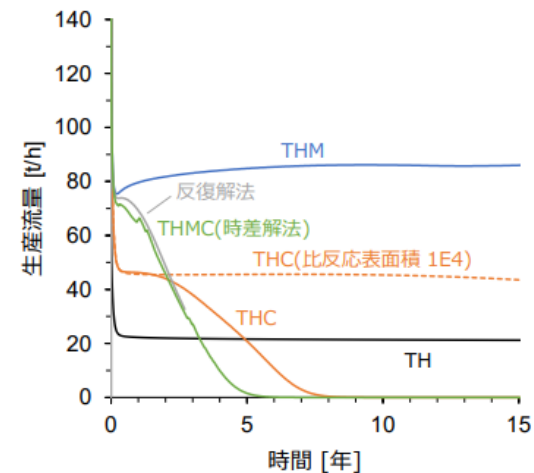
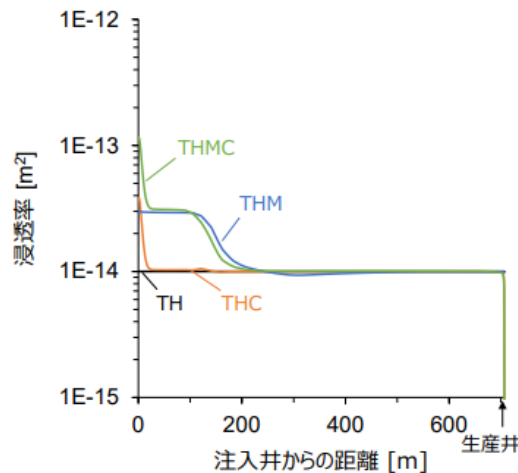
### (3) 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発

#### ① THMCモデリング技術

(a) Si 質量分率 【8年後のシミュレーション結果 (THCモデル)】



(a) 5年後の坑井間の浸透率@z=-4250m (b) 生産流量の経時変化



【シミュレーション結果による各モデルの比較】

【10年後のシミュレーション結果 (THMモデル)】

## ◆ 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	<p>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。</p> <p>② 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。</p> <p>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。</p>	<p>① 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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>	<p>○</p> <p>◎</p> <p>◎</p>	<p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p>

◎ 大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

Ⅲ. 研究開発成果 (1) 研究開発目標の達成度及び研究開発成果の意義

◆ 各実施者の開発概要

(4) 調査井掘削に資する革新的技術開発

① AIによる資源評価

【地質変質データ】

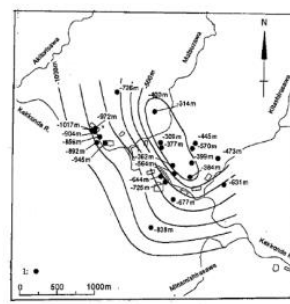
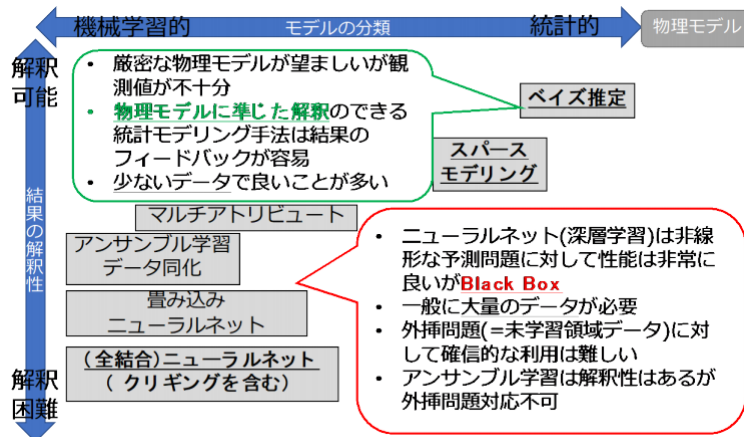
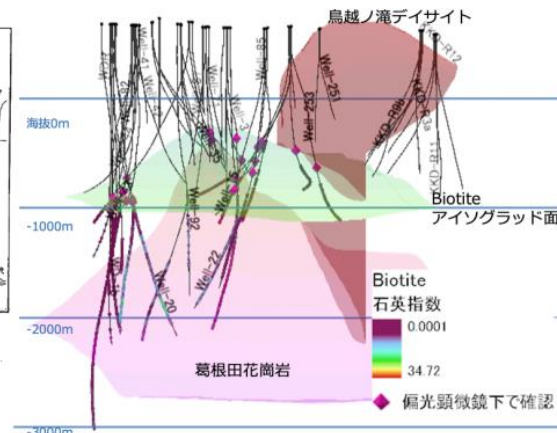
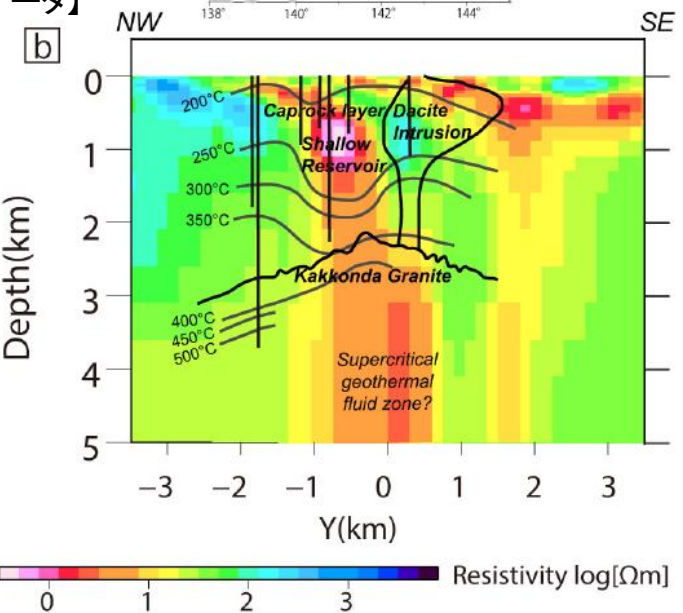
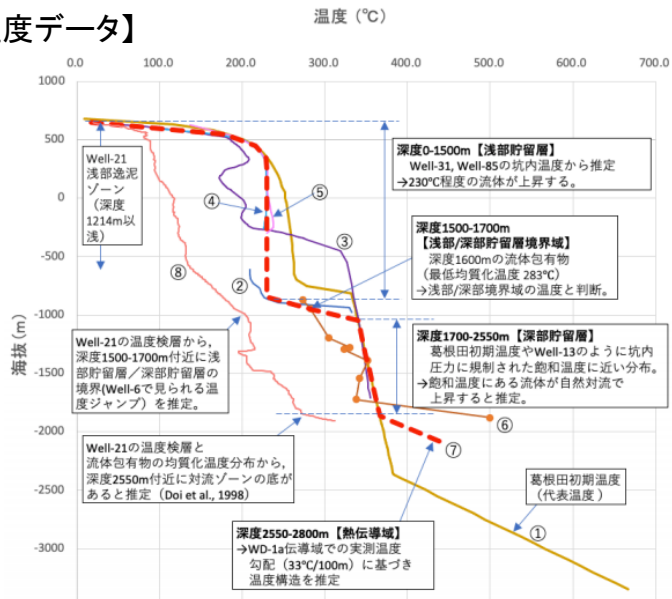


Fig. 9 Map showing biotite isograd. Contours in meters above sea level. (solid circle): first appearance of biotite by contact metamorphism. (加藤・佐藤, 1995)



【比抵抗データ】

【温度データ】



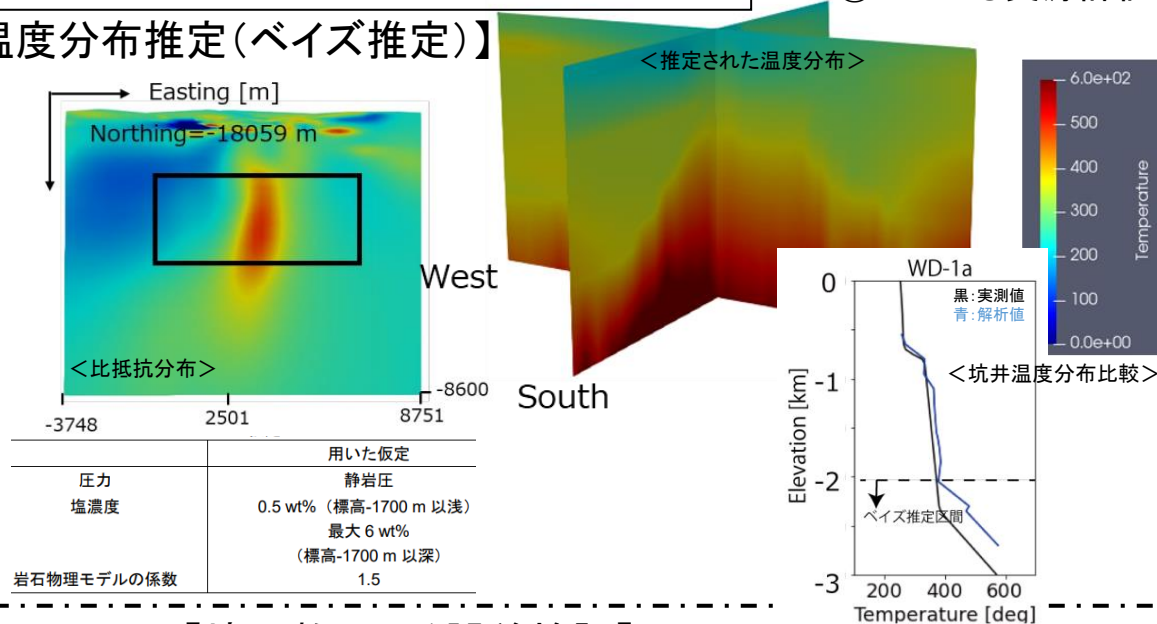


# ◆各実施者の開発概要

## (4) 調査井掘削に資する革新的技術開発

### ① AIによる資源評価

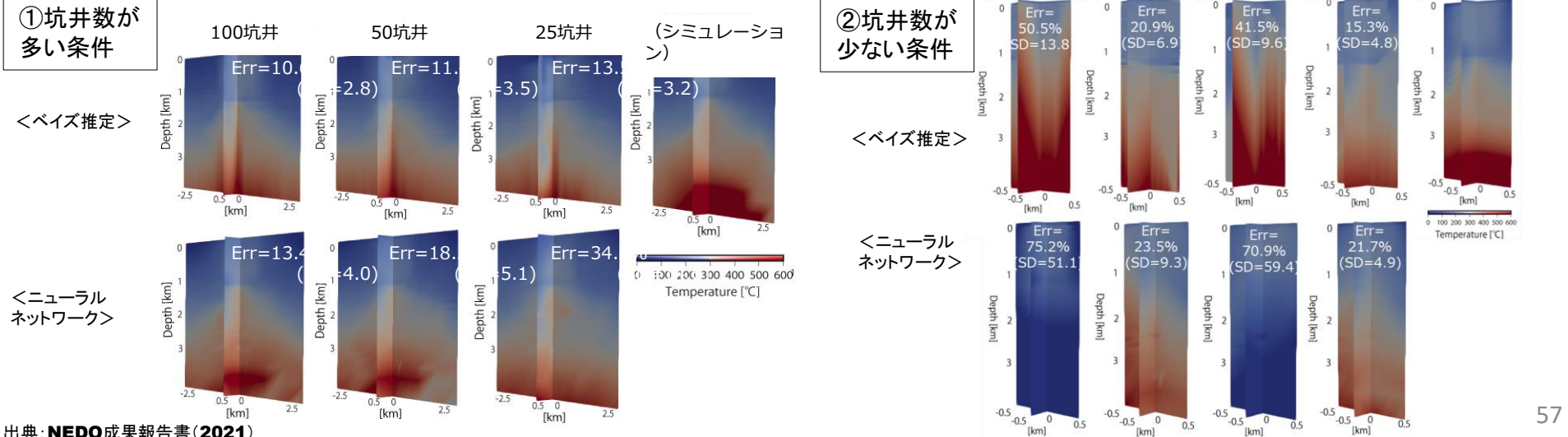
#### 【温度分布推定(ベイズ推定)】



#### 入力データの条件と推定結果への影響

データ手法	既存坑井数	既存坑井深さ	岩石、間隙水物性データ	物理探査データ
ニューラルネットワーク	<ul style="list-style-type: none"> <li>貯留層全体をカバーする広域では数十坑井必要。</li> <li>深部構造が似ている狭い範囲のみの推定では、坑井数の影響は少ない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>影響が大きく、ターゲットに近い深さが必要。</li> <li>実データのみ学習の場合、比抵抗変化に対応する深部坑井温度が必要。人工データセットにより改善の可能性あり。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>不要。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3次元比抵抗・深部高温の推定には震源分布(D95)が必須</li> <li>浅部温度分布の推定に重力異常が効果的な場合あり。</li> </ul>
ベイズ推定	<ul style="list-style-type: none"> <li>坑井数の影響は比較的小さいが、解析対象の水平範囲をカバーしていることが好ましい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>影響が大きく、ターゲットに近い深さが必要。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>岩石の比抵抗、空隙率、塩濃度のデータにより精度向上。</li> <li>別モデルの導入により浸透率等も考慮可能。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>3次元比抵抗のみ</li> </ul>

#### 【坑井数による誤差検証】



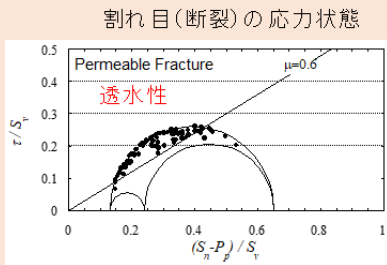
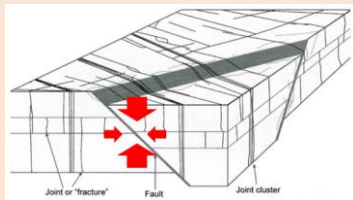
# ◆各実施者の開発概要

- (4) 調査井掘削に資する革新的技術開発
- ② 二重コアによる地殻応力計測技術

【地殻応力計測の重要性】

## 断裂系評価

断裂の透水性は現在の応力場に強く影響される

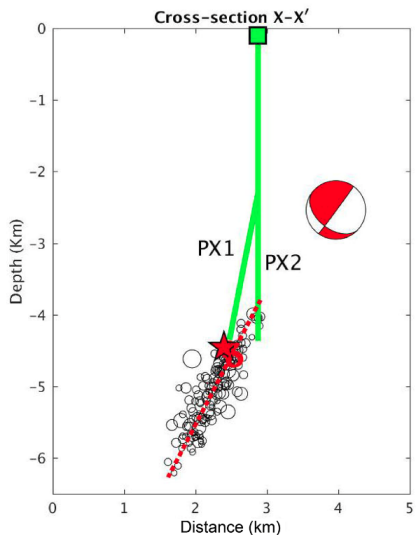


[Barton, Zoback & Moos, 1995]

## 誘発地震リスクの低減

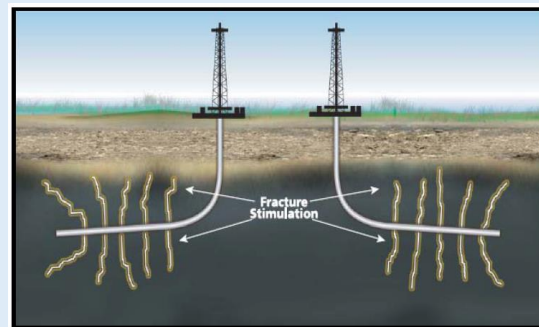
韓国・浦項の誘発地震Mw5.4

大量の注水が臨界状態にあった断層を刺激し地震を招いた(Kim, 2019)

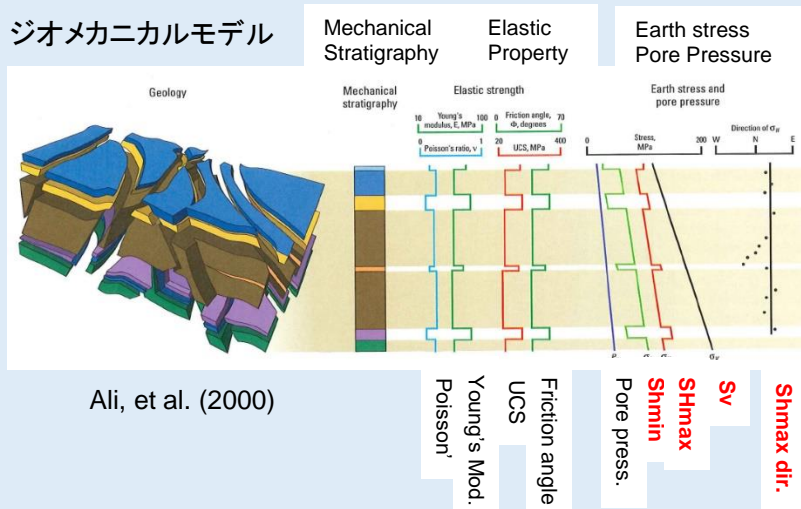


## 水圧破碎の設計

シェール開発では水圧破碎のデザインが成否の鍵を握る



ジオメカニカルモデル



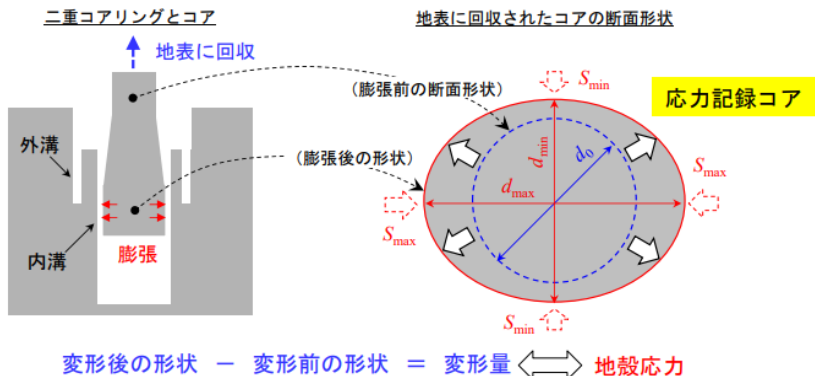
Ali, et al. (2000)

# ◆各実施者の開発概要

## (4) 調査井掘削に資する革新的技術開発

### ② 二重コアによる地殻応力計測技術

二重解放コアを用いた地殻応力測定法の基本概念



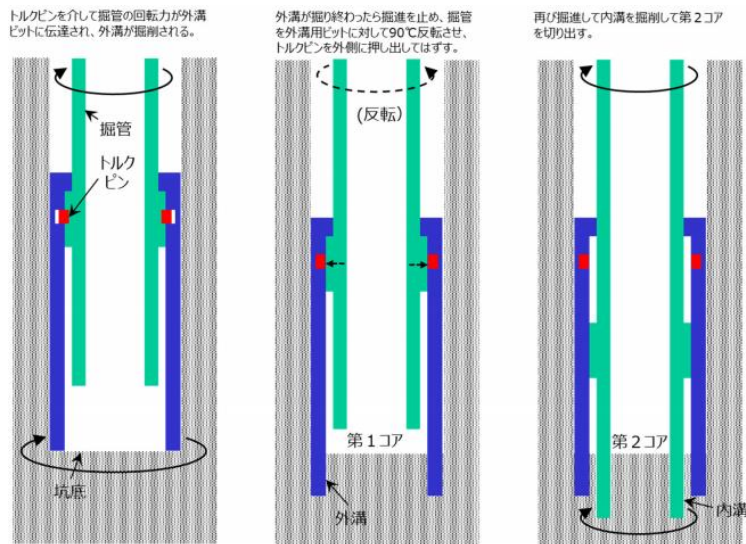
実際に製作した二重コアビット



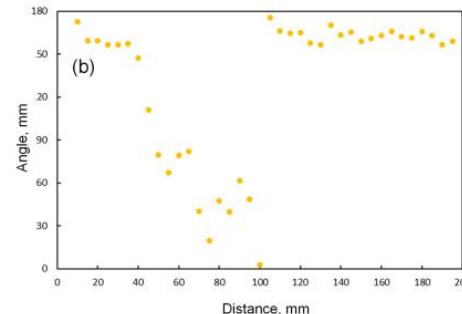
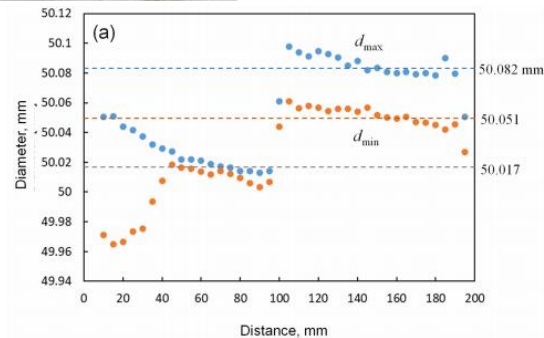
採取されたコア



二重コアビット(J-slot型)連結機構の概念図



コア上端からの距離による (a)コア直径の最大値dmaxと最小値dmin、(b)最大直径方位の変化





## ◆ 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

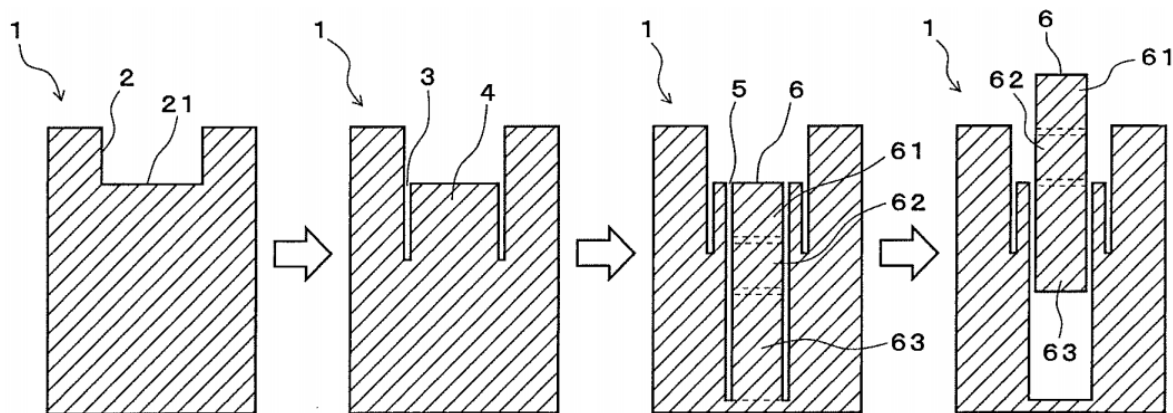
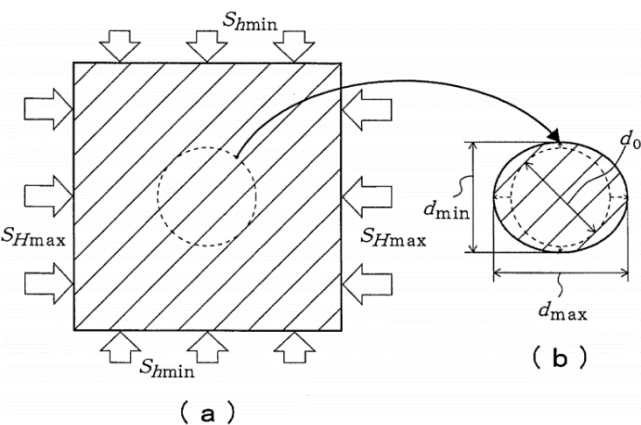
※2021年6月31日現在。

※NEDO成果報告会発表および、NEDO自身の件数は含まない

## ◆ 知的財産等の取得、成果の普及

○ 「二重解放コアを用いた地殻応力測定法の研究開発」より2件の特許出願

	No.1	No.2
特許出願	特願 2018-194190	特願 2019-172963
整理番号	1809-01	J29211A1
提出日	2018/10/15	2019/9/24
特許出願人	国立大学法人東北大学 公益財団法人深田地質研究所 応用地質株式会社	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
発明の名称	岩盤からのコア採取方法	コア採取装置



## ◆本プロジェクトにおける「実用化・事業化」の考え方

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。

## ◆ 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、

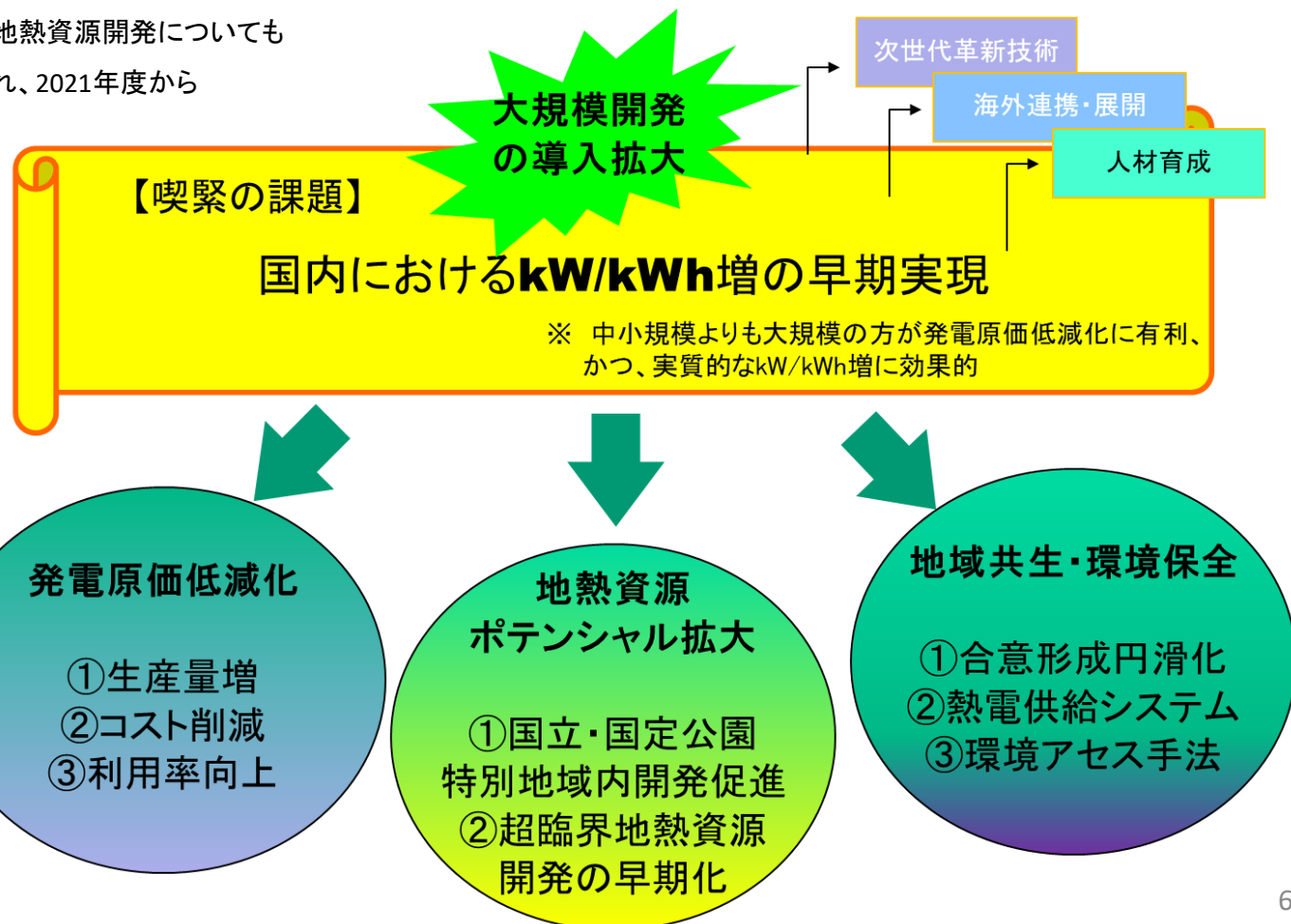
①発電原価低減化 ②地熱資源ポテンシャル拡大 ③地域共生・環境保全

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

前基本計画のスケジュール  
(2018年度～2020年度)

研究開発項目		2018年度	2019年度	2020年度
超臨界地熱発電技術	超臨界地熱発電技術	実現可能性調査		
	超臨界地熱発電技術	試掘への詳細検討		
		I 超臨界地熱資源の評価 II 調査井の資材等の開発 III 超臨界地熱貯留層のモデリング技術手法開発 IV その他 要素技術		
地熱発電技術	環境保全対策技術	環境アセス手法対策		
		・国立国定公園特別地域での手法 ・冷却塔排気に係わる調査・予測・評価手法		
	高度利用化技術	酸性対策技術		
		IoT-AI適用技術		

2021年度以降の「地熱発電導入拡大研究開発」事業の基本計画スケジュール

研究開発項目	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度
超臨界地熱資源開発	研究開発項目①-1 モデルフィールドにおける資源量評価				
	研究開発項目①-2 深部探査技術手法開発				
環境保全対策技術	研究開発項目② 硫化水素連続モニタリング装置開発				
	気象モデリング手法開発				
高度利用化技術	研究開発項目③ 貯留層管理手法開発				
	発電設備管理手法開発				

- 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。



# ◆ 実用化・事業化に向けた具体的取組

## 【地熱発電導入拡大研究開発】

### (1) 超臨界地熱資源技術開発

モデルフィールドにおける資源量評価と要素技術開発 (探査手法)

### (2) 環境保全対策技術開発

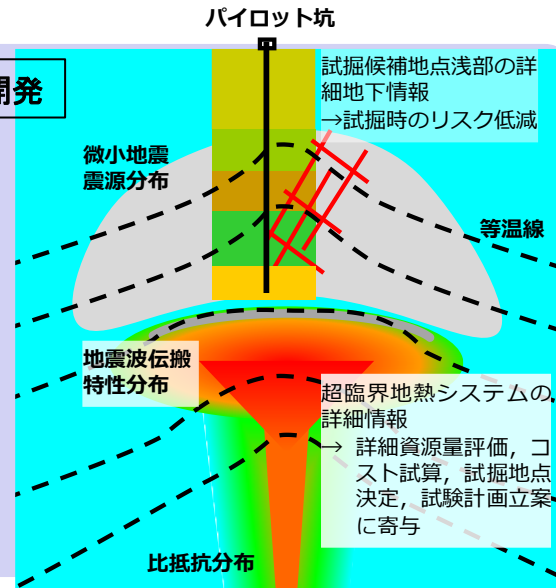
環境アセスメント手法開発 (硫化水素モニタリング装置開発と気象モデリング技術)

### (3) 発電所高度利用化技術開発

貯留層計測・解析による貯留層管理技術とドローンを利用した設備管理技術

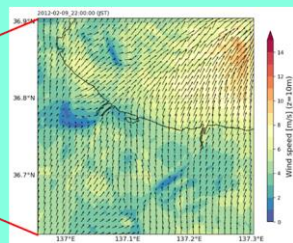
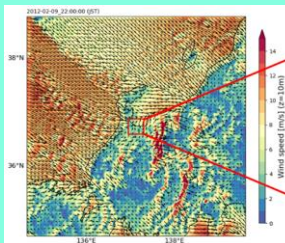
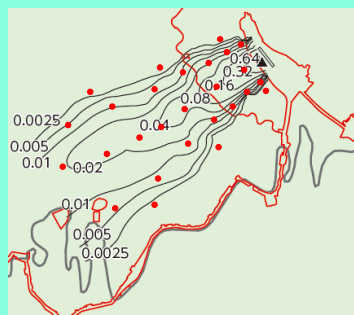
## 超臨界地熱資源技術開発

- \* モデルフィールドでの高密度MT法探査・反射法地震探査・微小地震モニタリング
- \* 試掘候補地点付近でのパイロットホール掘削 (到達目標: 3500m, 350℃程度)
- \* 資源量評価 (3次元モデルによる数値シミュレーション手法)
- \* 光ファイバーによる地震波モニタリング



## 環境保全対策技術開発

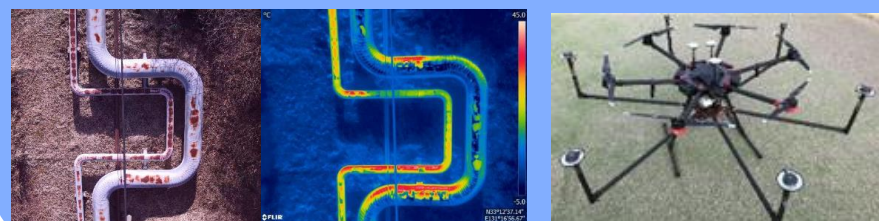
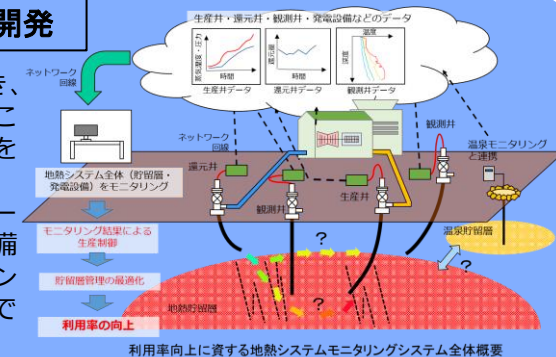
- \* 小型軽量で連続モニタリング可能な硫化水素測定器を開発し、時間・空間データを多量に取得することで、予測評価の精度向上を図る。



- \* 既存の気象データから気象モデルを構築し、発電所エリアでの気象予測を実施する。気象観測簡略化を図る。

## 発電所高度利用化技術開発

- \* 貯留層計測データに基づき、貯留層管理を最適化することにより設備利用率向上を図る。
- \* 地上設備の監視に、ドローンを適用することで、設備異常を早期発見し、ダウンタイムを低減化することで稼働率向上を図る。



# ◆ 実用化・事業化に向けた具体的取組

<研究開発項目>

<アウトプット>

<実用化・事業化>

FY2025

FY2030

FY2050

【超臨界地熱資源】  
モデルフィールドでの  
検証と要素技術開発

高精度  
な資源  
量評価  
の実現

調査井掘削と噴  
気試験による詳  
細資源量評価

地上設備検討  
と実証試験

JOGMEC資源調査

民間による資源  
調査・開発

アウト  
カム達  
成

CO2削  
減量  
4,500万  
t-CO2  
/年

波及効果

①新規ビジ  
ネス創出に  
よる地域経  
済発展

②分散型電  
源確保によ  
るレジリエ  
ンス対策向  
上

③海外技術  
移転による  
国際CO2ビ  
ジネスの拡  
大

民間による地熱開発事業

【環境保全対策技術】  
硫化水素測定器及び気  
象モデリング手法

環境ア  
セス手  
法最適  
化の達  
成

手法のマ  
ニュアル化

硫化水素測定器の  
商品化

アウト  
カム達  
成

CO2削  
減量  
630万  
t-CO2  
/年

【高度利用化技術】  
貯留層管理及び設備管  
理の最適化

発電量  
増、コ  
スト削  
減、利  
用率向  
上の達  
成

手法のマ  
ニュアル化

貯留層管理ツールの  
商品化

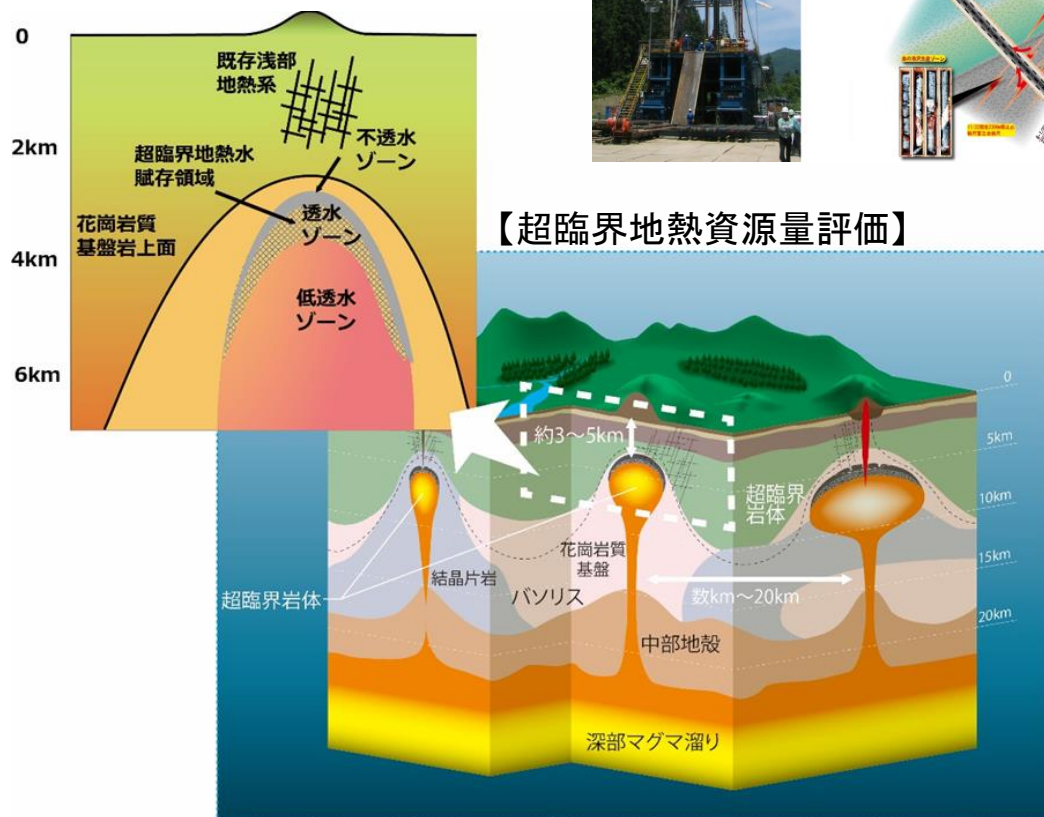
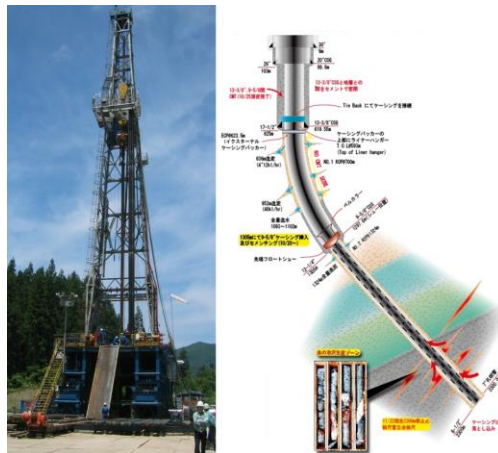
設備管理ツールの  
商品化

## ◆ 調査井掘削時の想定プレーヤー

### 【噴気試験】



### 【掘削工事】



### 【超臨界地熱資源量評価】

#### (1) 発電事業者

フィールド提供、フィールド管理など

#### (2) 掘削事業者

掘削計画、掘削工事、坑井仕上げ、水圧破砕など

#### (3) 調査サービス会社

探査・モニタリング、坑内測定、掘削資材等支援サービスなど

#### (4) エンジニアリング会社

敷地造成、噴気試験装置製作、同装置管理など

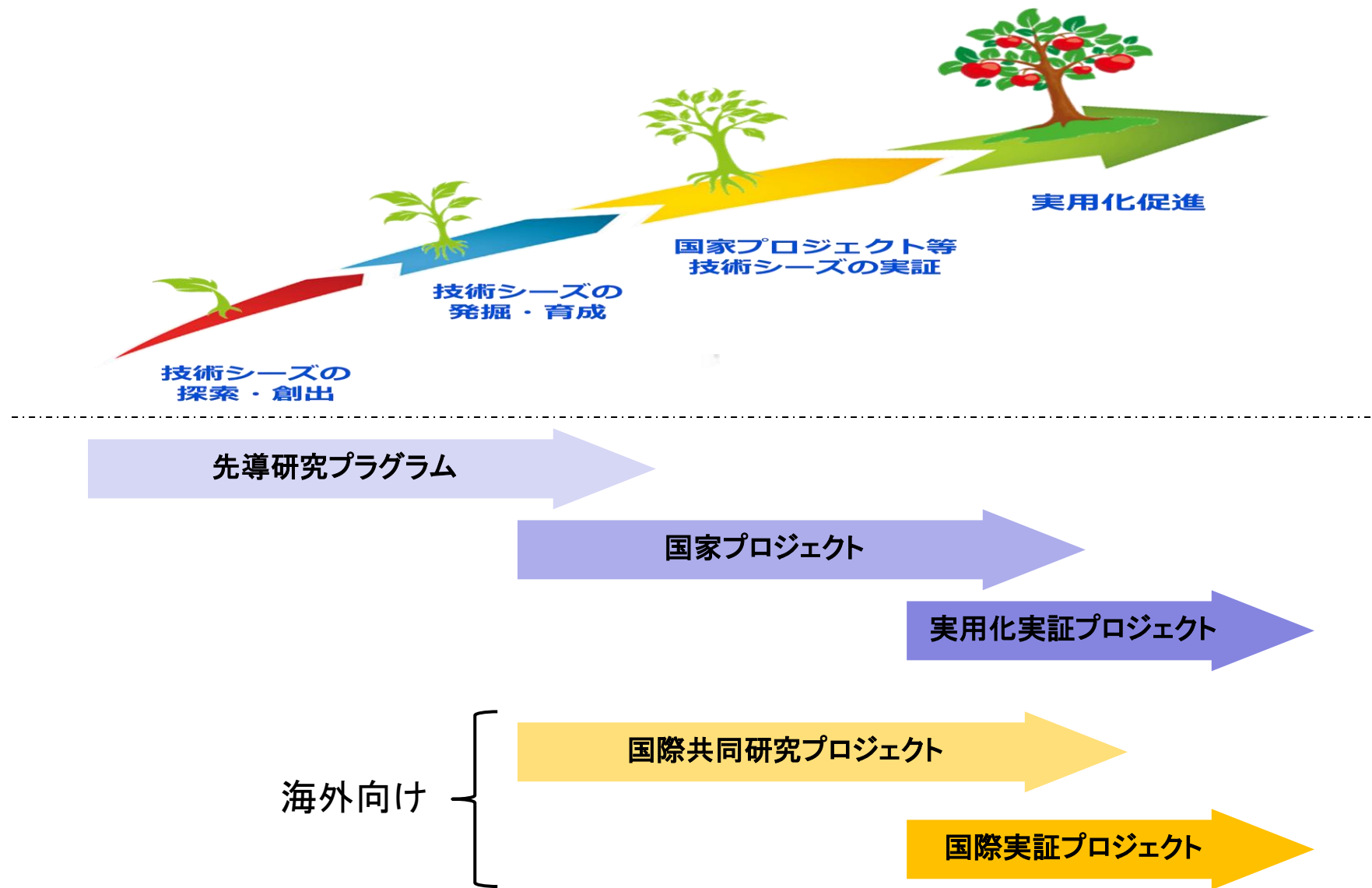
#### (5) 評価者

調査井掘削管理、噴気試験管理、資源量評価など

## ◆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)。







ご清聴ありがとうございます。

