

2024年度NEDO再生可能エネルギー一部成果報告会 プログラムNo.3

契約件名 地熱発電導入拡大研究開発／ 超臨界地熱資源技術開発／ 資源量評価（葛根田地域）

発表日：2024年12月18日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

発表者名 (国研)産業技術総合研究所 浅沼 宏

団体名 (国研)産業技術総合研究所, (国)東北大学, (国)秋田大学, 地熱エンジニアリング(株), (国)東京工業大学,
(国)京都大学, 地熱技術開発(株), 日本オイルエンジニアリング(株), エスケイエンジニアリング(株),
(株)INPEXドリリング

問合せ先 E-mail: h.asanuma@aist.go.jp TEL:050-3522-8715

1. 背景・目的

既往研究開発を通じて、葛根田地域の浅部マグマ上部に超臨界地熱システムが形成されている可能性が高いことが示されてきた。本事業は同地域を対象に超臨界地熱システムモデルの精緻化，資源量評価，調査井仕様の策定，経済性評価等を行うことを目的とする。

2. 実施期間

開始： 2021年6月
終了： 2024年3月

3. 実施内容・目標（最終）

①補完地表調査・概念モデル構築，②資源量評価，③深部構造調査試錐の検討，④超臨界地熱調査井仕様の検討，⑤経済性評価，⑥総合評価を通じて以下を達成する。

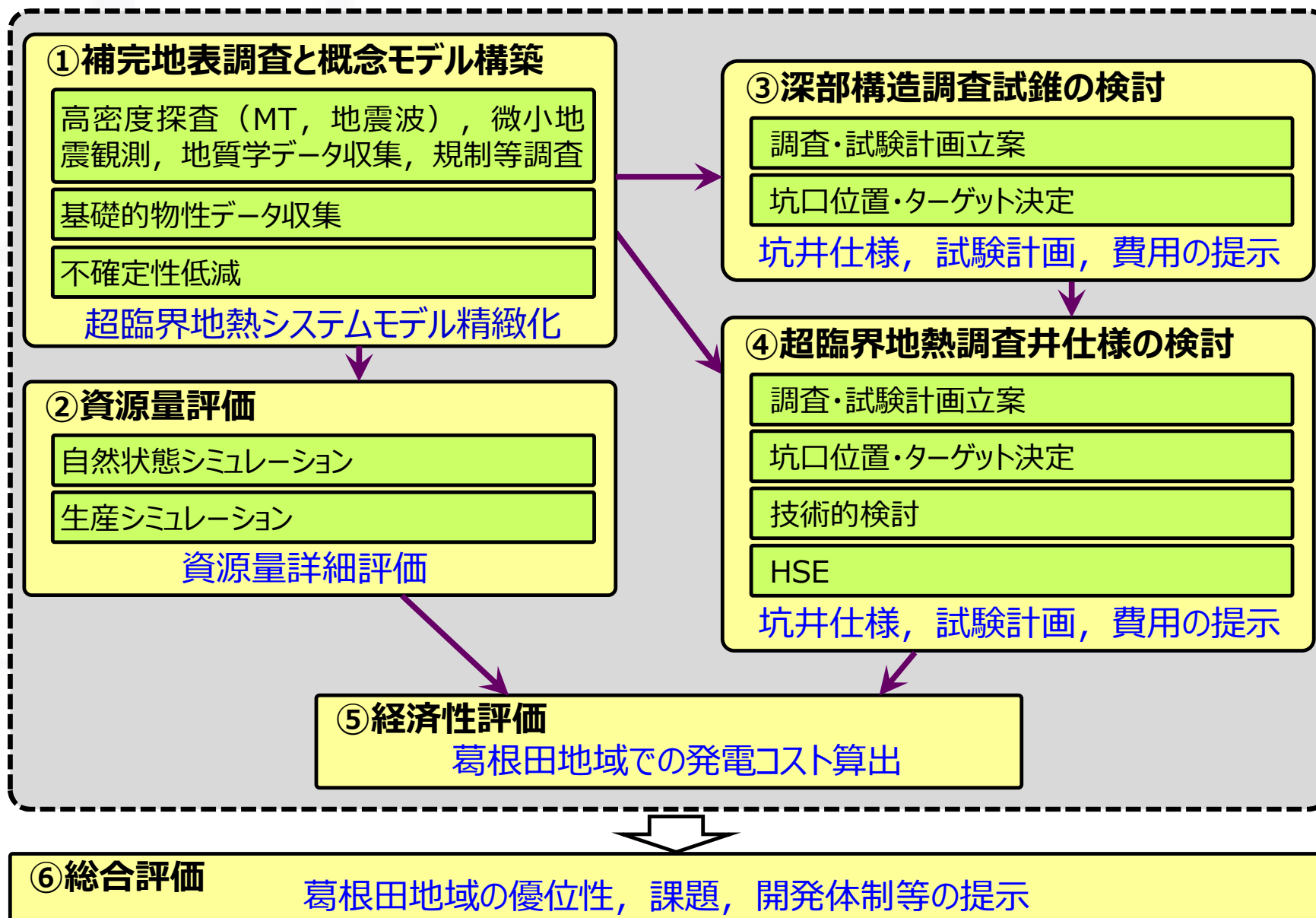
(a) 超臨界地熱システム精緻モデルの同定，抽熱方式，発電可能量の提示

(b) 深部構造調査試錐井・調査井の仕様，工程概要，本坑井を使用した調査・試験プラン等の提示

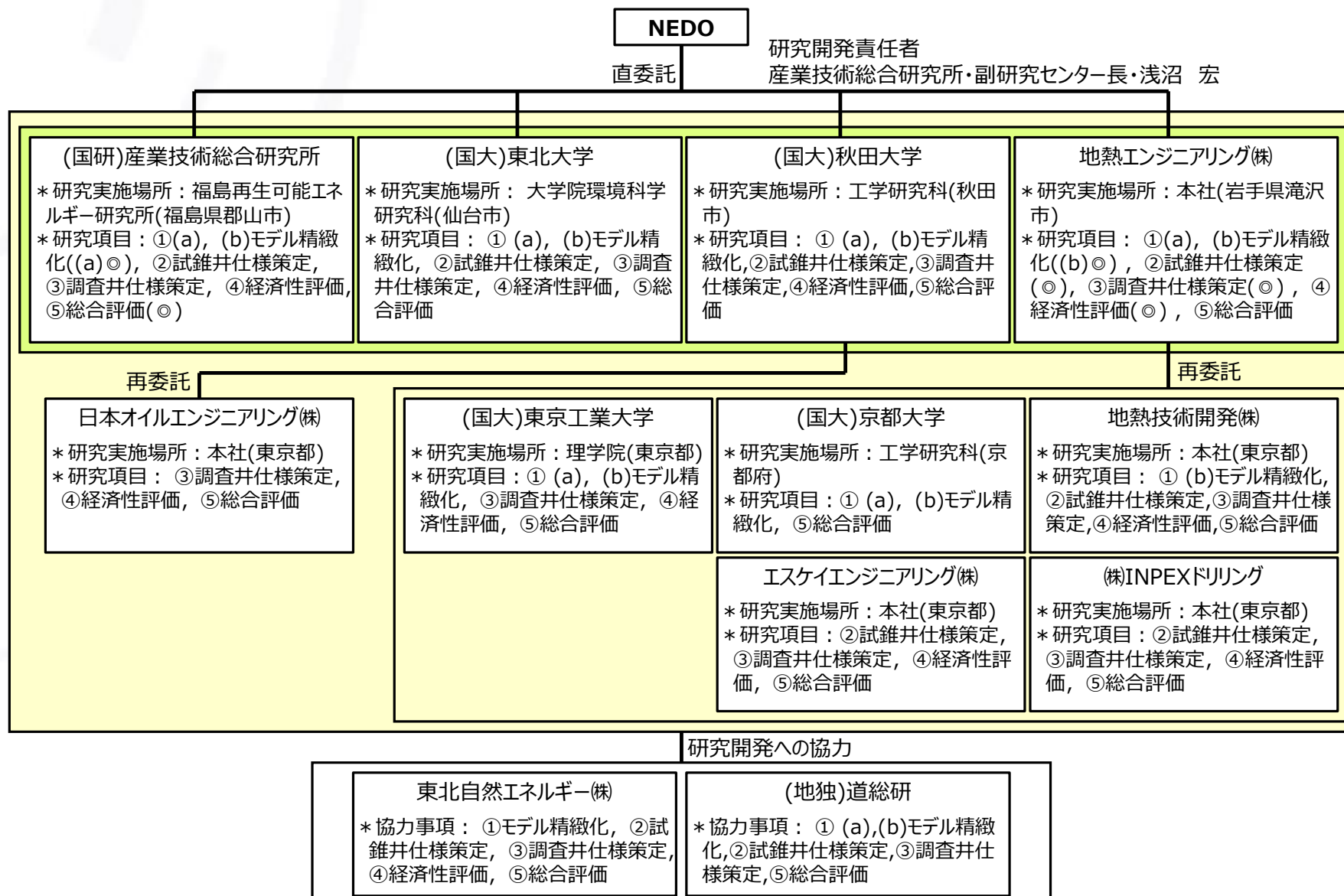
(c) 当地域での超臨界地熱発電の経済性

(d) 当地域での調査井掘削，試験の優位性提示。今後の課題，体制等の整理

事業概要（研究開発要素）



事業概要（研究開発体制）



事業概要（研究開発工程）

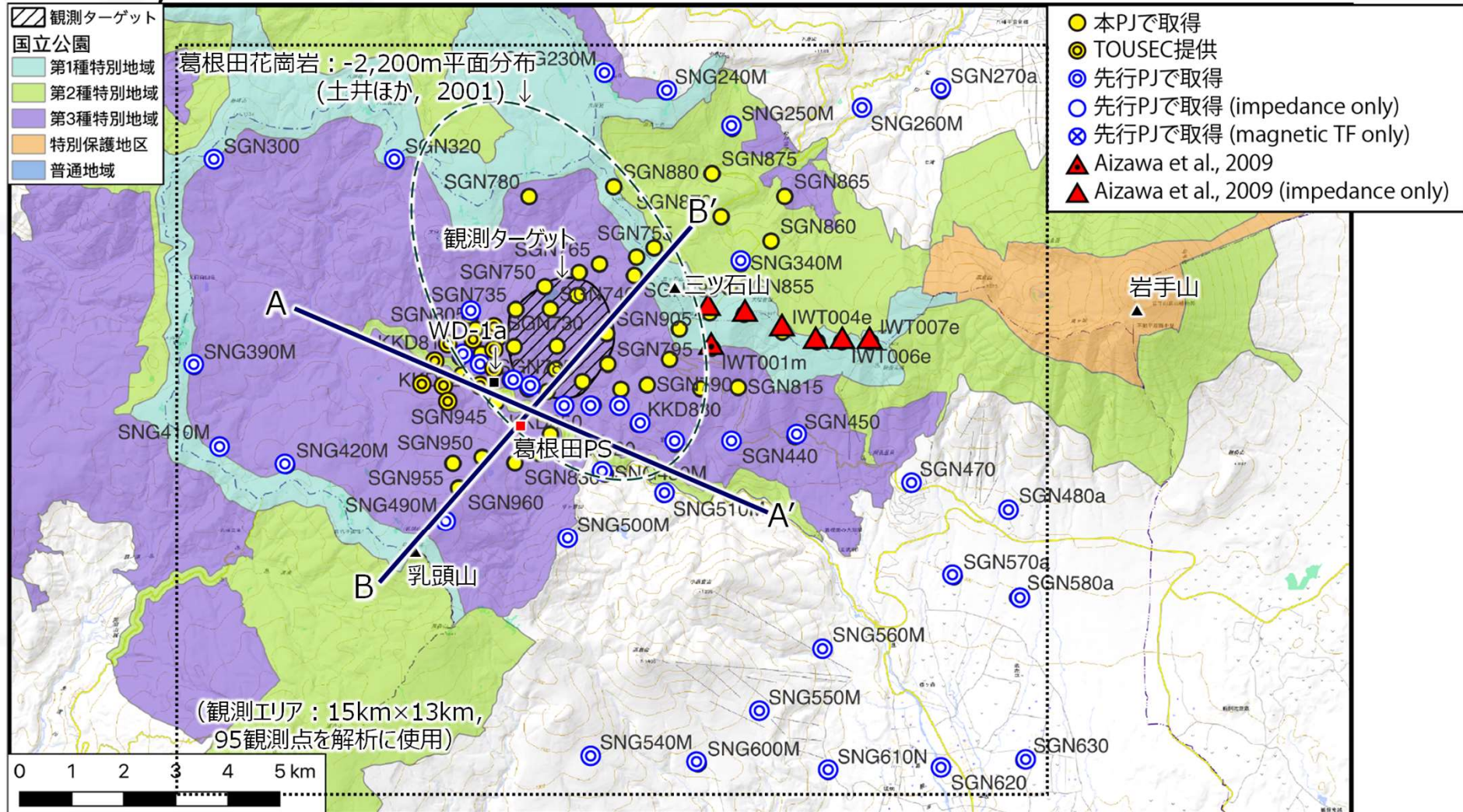


研究開発項目	FY2021	FY2022	FY2023
①補完地表調査と概念モデル構築	高密度MT法探査 反射法地震探査 地質学的データ収集 概念モデル精緻化		
②資源量評価		自然状態シミュレーション	生産シミュレーション
③深部構造調査試錐の検討	試験計画策定 仕様策定・技術的検討		
④超臨界地熱調査井仕様の検討	試験計画策定	仕様策定・技術的検討 HSE	
⑤経済性評価			経済性評価
⑥総合評価			総合評価



研究成果 (①補完地表調査と概念モデル構築)

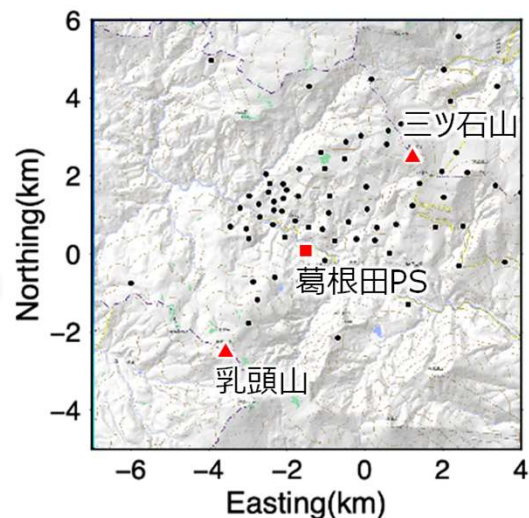
MT法観測, 解析地域



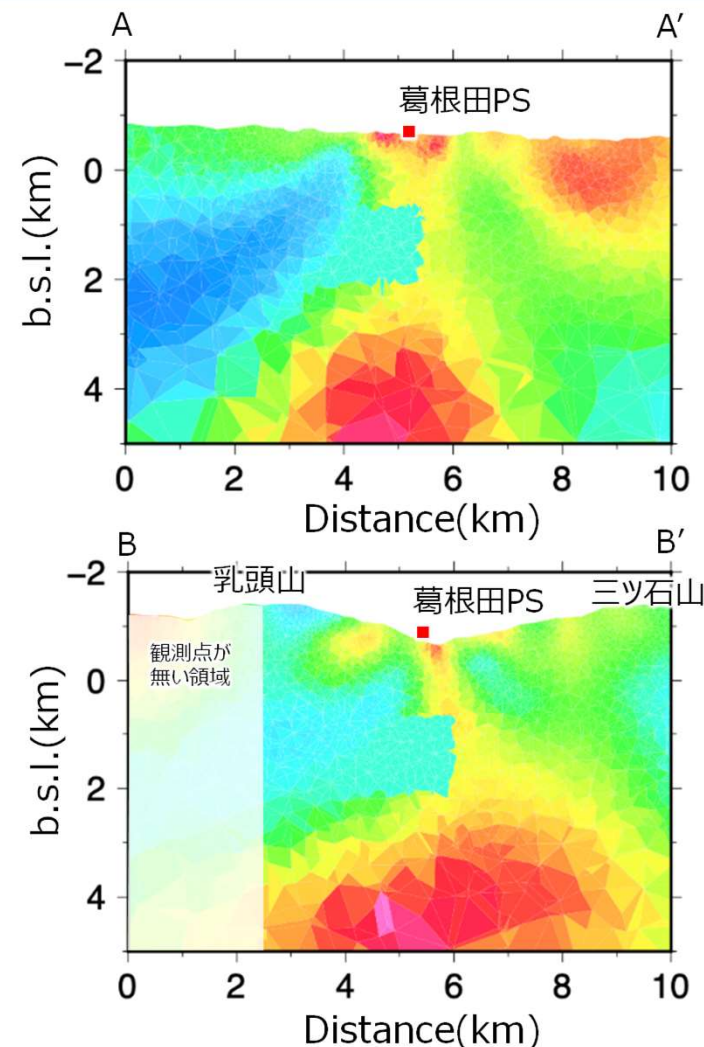
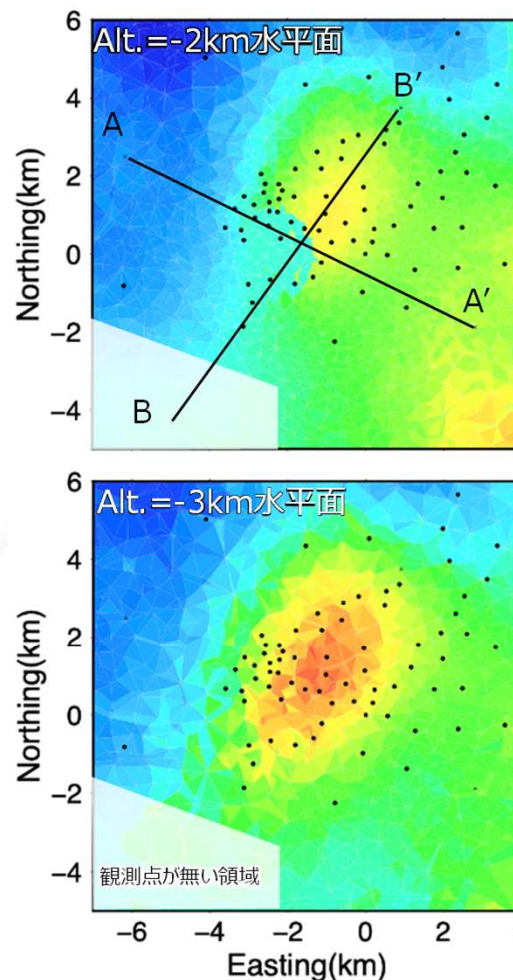
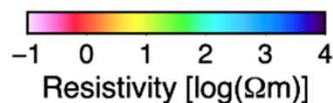
- 先行PJで検出された低比抵抗体 (Yamaya et al., 2022) をターゲットにした新規観測, 解析を実施。

研究成果 (①補完地表調査と概念モデル構築)

比抵抗最終モデル



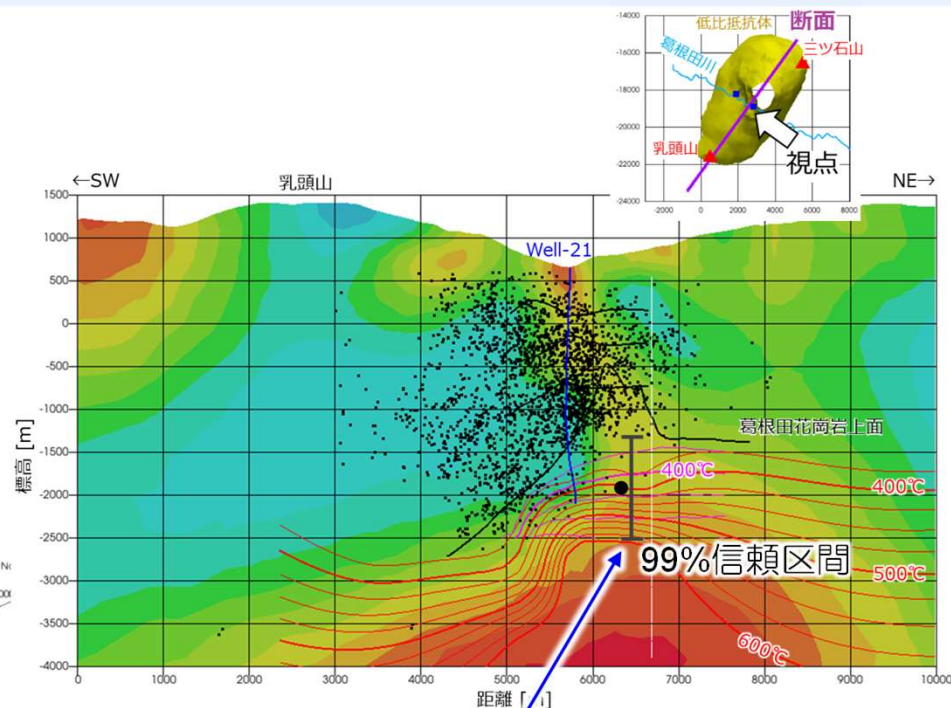
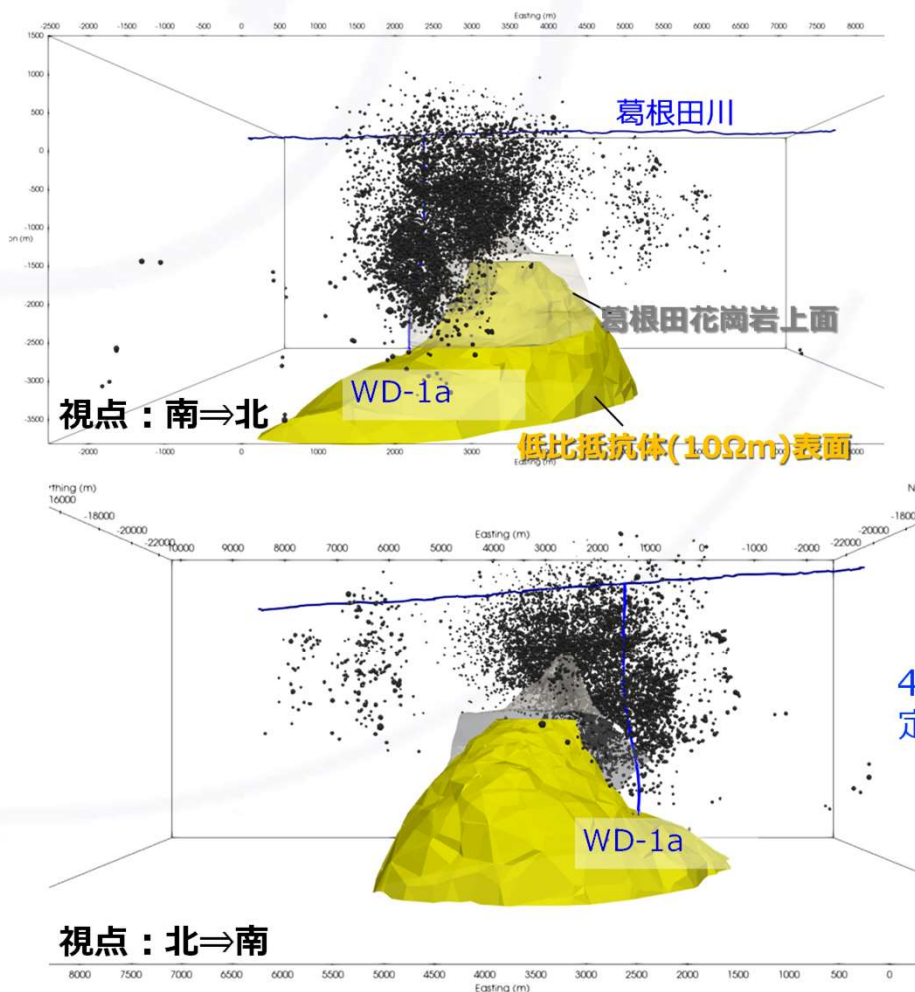
- 逆解析には, FEMTIC (Usui et al., 2015; 2017) を使用



- 正四面体要素を使用した3次元逆解析により, 比抵抗構造を推定。
- 電気検層と整合するように逆解析による最適モデルへ最小限の修正を加えたモデルを, 最終の比抵抗モデルとした。
- 超臨界地熱貯留層の領域, 浸透率の推定に代表的な比抵抗値を使用するため, 比抵抗値の範囲を評価。

研究成果 (①補完地表調査と概念モデル構築)

本PJで取得された微小地震データ



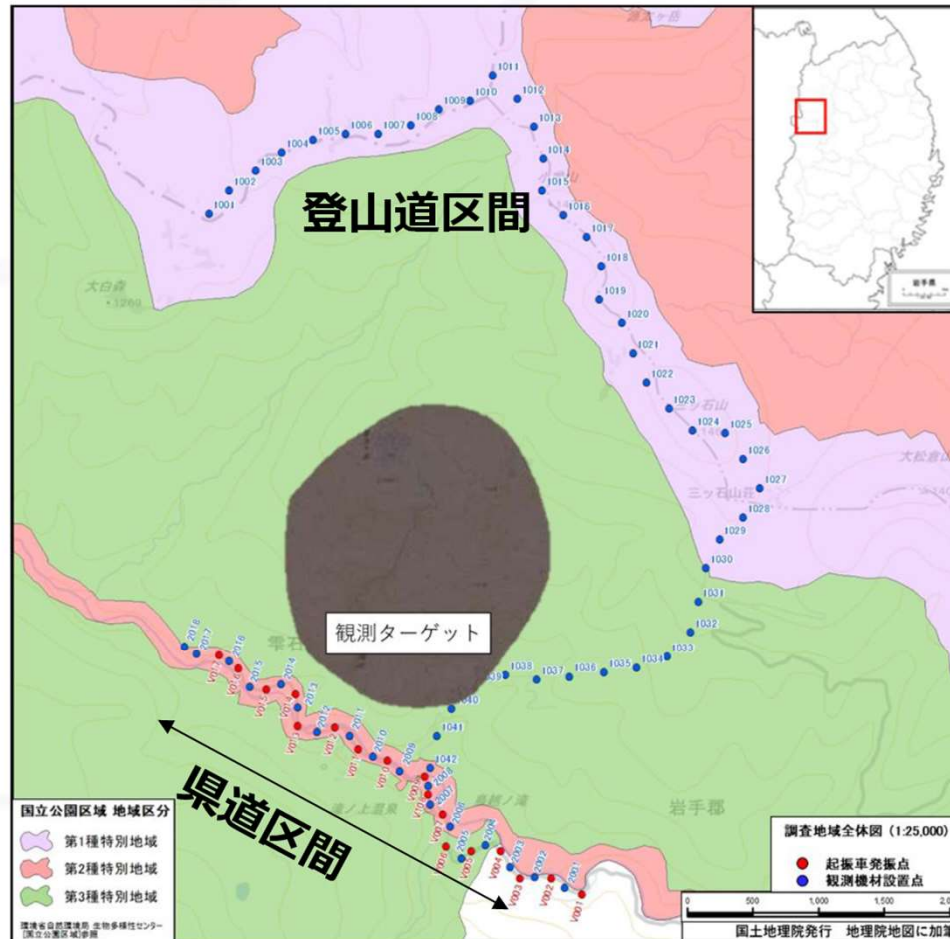
400℃以上、かつ低比抵抗体内に位置するイベントもあるが、震源決定誤差や同様なイベント数が僅かなことを鑑みると、信頼度は高い

期間：2020年12月～2022年10月
イベント数：約10,000（手動精査，DD法適用済）
観測点数：最大28点

- 微小地震震源は低比抵抗体の外部周辺域に分布。400℃以上となる高温域には分布せず。

研究成果 (①補完地表調査と概念モデル構築)

反射法地震探査

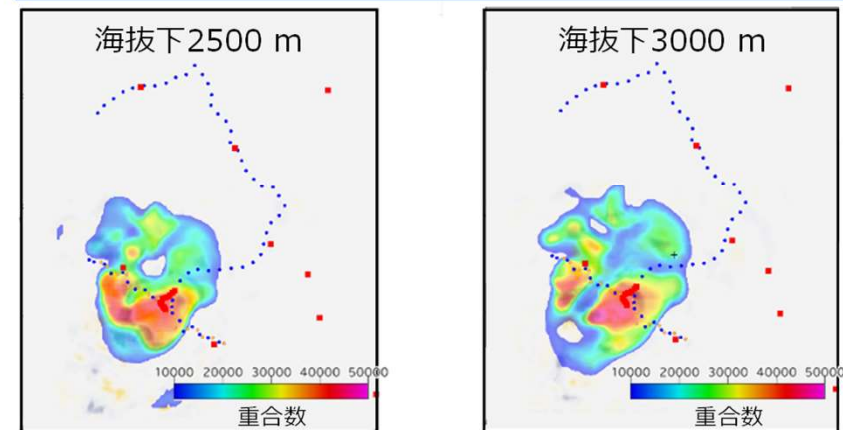


- * 実施担当：(株)地球科学総合研究所
- * 現地作業：2022年9月4日～9月17日（済）

バイブロサイスと自然地震を使用して、対象地域の反射法イメージング、およびトモグラフィを実施

登山道：スタンドアロンのジオフォンを250m程度の間隔で配置（42点）
県道：通常のジオフォンを配置（18点）
* そのほか、既存の地震観測網も利用

人工震源：県道沿いで、バイブレータ2台を利用
自然震源：ジオフォン、および既存地震観測網で観測



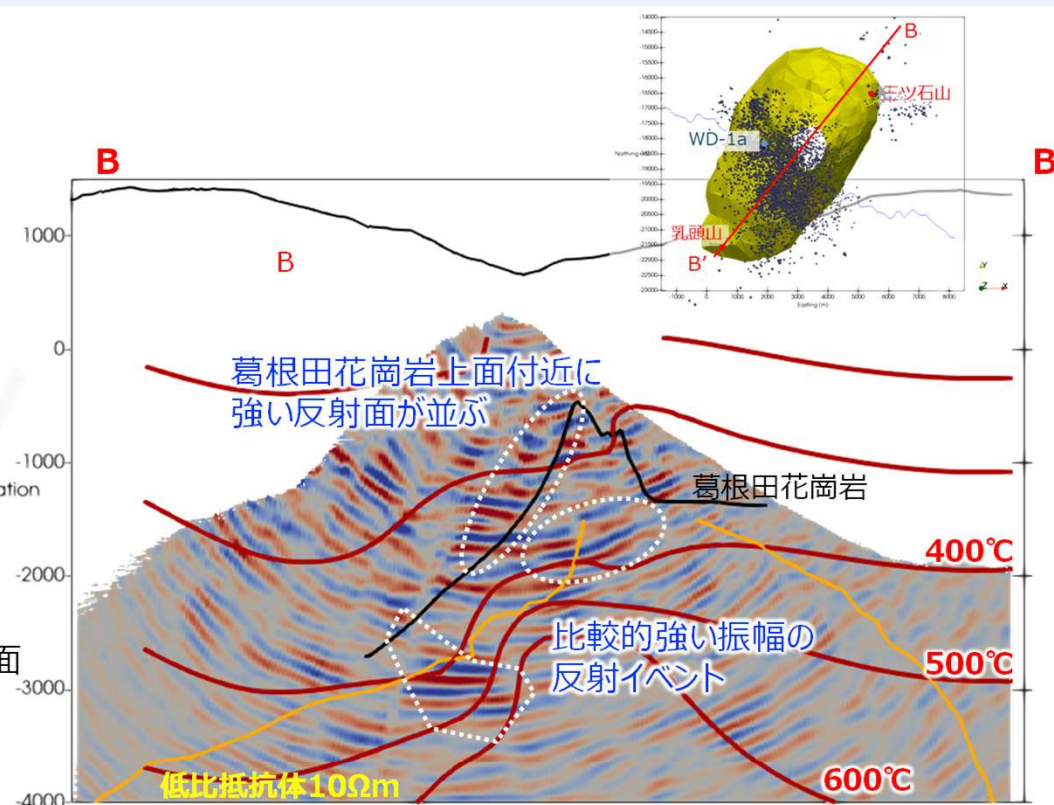
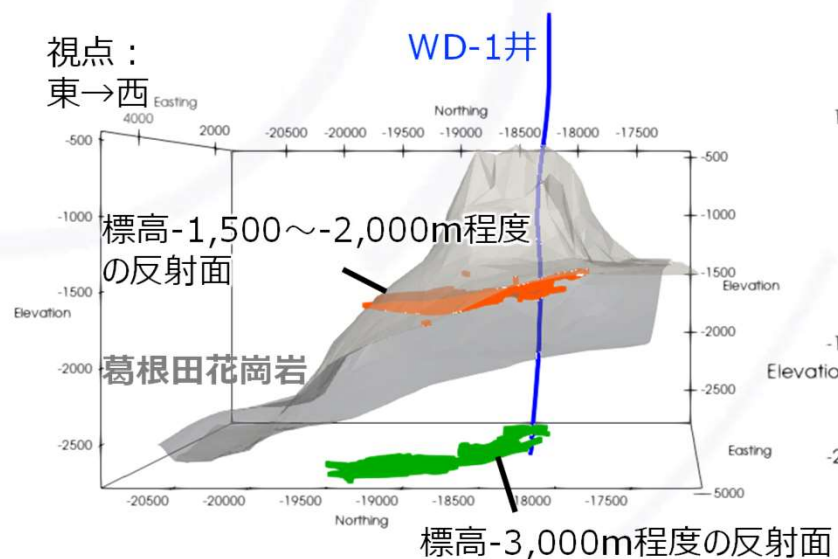
重合数マップ

(定性的には高重合数領域では反射イメージの確度が上昇)

- 急峻な地形や、国立公園区域等の制約があるため、登山道へのジオフォン配置、自然地震の活用。
- 低比抵抗体を含む領域のイメージングを実現。

研究成果 (①補完地表調査と概念モデル構築)

反射イベントの解釈



標高-1,500~-2,000m程度の反射面：

400℃付近に位置。超臨界貯留層上面（流体が存在）と周囲の音響インピーダンス差に起因する可能性有。

⇒他の情報により得られた貯留層モデルを支持

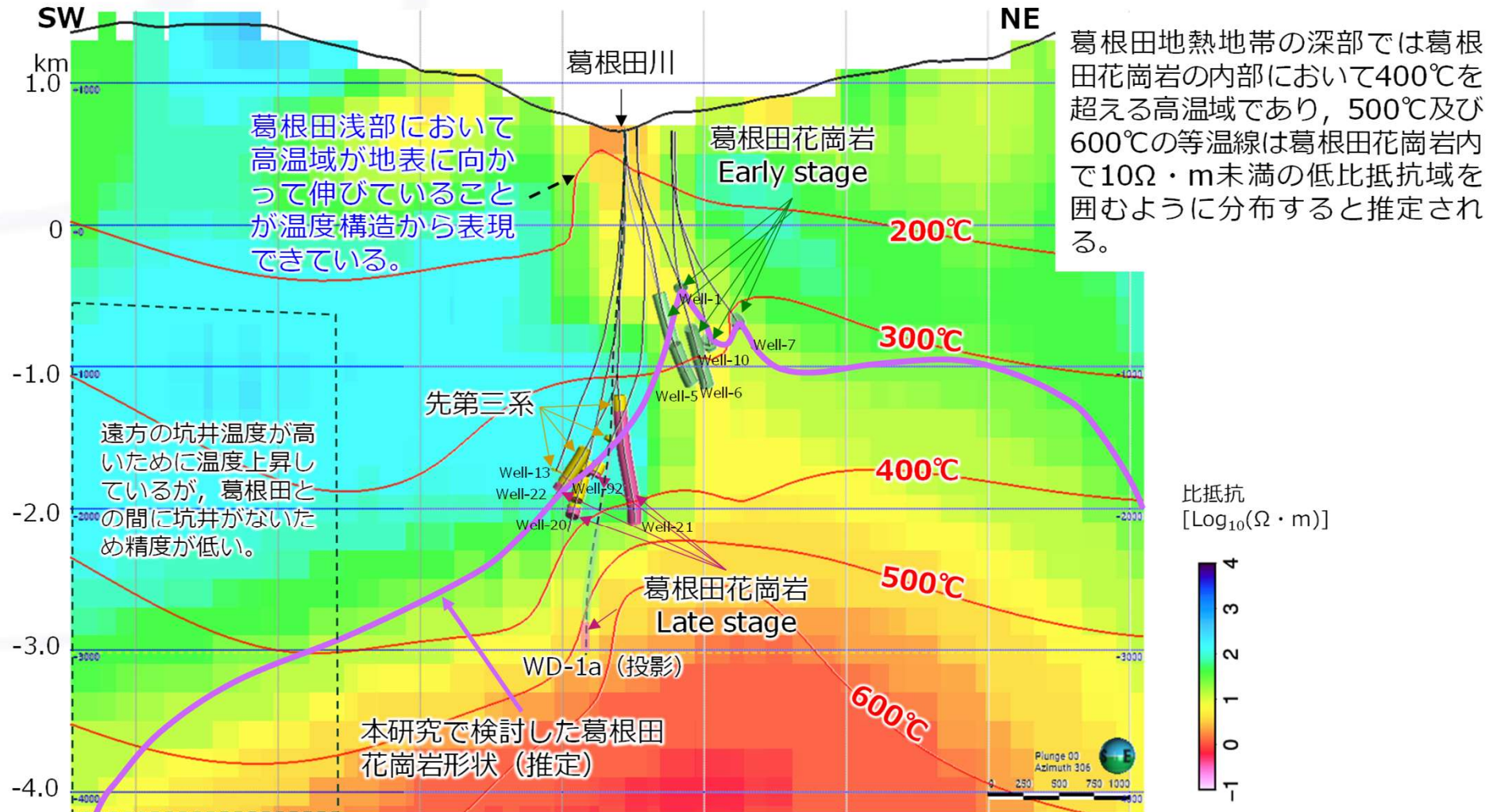
標高-3,000m程度の反射面：

500℃付近に位置。石英の結晶構造変化や、高圧の間隙水の存在に起因する可能性有。

- 低比抵抗体内部に比較的低振幅の反射イベントを検出。超臨界地熱貯留層上面付近に対応する可能性有。

研究成果 (①補完地表調査と概念モデル構築)

坑井3次元補間法による葛根田及び周辺の温度構造推定 (北東-南西断面)

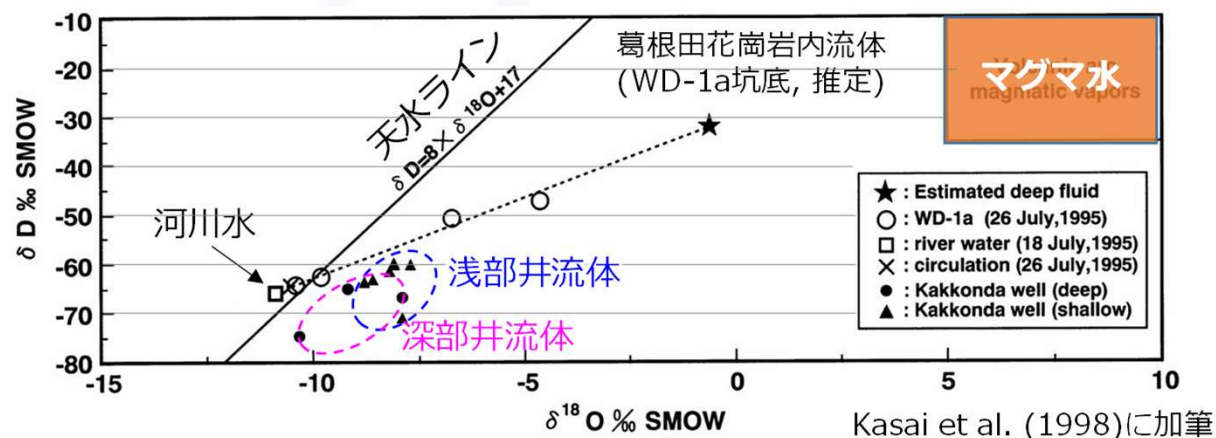


- 葛根田花崗岩内部，海拔約-2km以深において400℃を超える高温域の存在を推定。

研究成果 (①補完地表調査と概念モデル構築)

葛根田地熱系の地化学，特に酸性熱水の起源

葛根田地域の河川水，地熱流体の酸素・水素同位体比



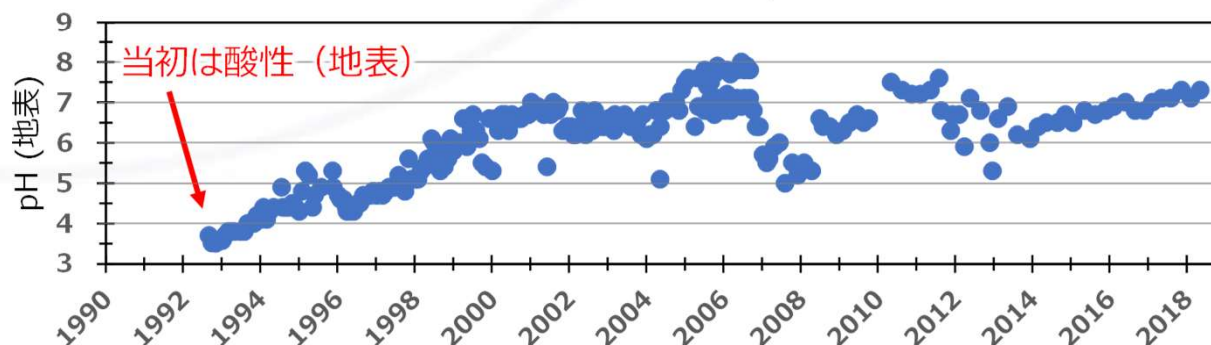
【目的】

地熱水，特に酸性熱水の起源の検討

【結果】

- 酸性熱水は深部貯留層（対流域）と葛根田花崗岩内に分布する
- 深部井の噴出流体は当初，酸性（地表）であったが，次第に中性に変化した
- 浅部の地熱貯留層を流動する地熱流体の水素同位体比は河川水と同程度かそれより軽く，マグマ水の寄与は明らかでない
- 葛根田花崗岩内の流体はマグマ水であり，浅部の地熱貯留層の地熱水（天水起源）とは異なる
- 葛根田浅部井と深部井の噴出熱水は噴気継続しても天水ラインの近くにプロットされる
- 葛根田花崗岩内から葛根田浅部の地熱貯留層への火山性ガスの付加は多量でない可能性を考える

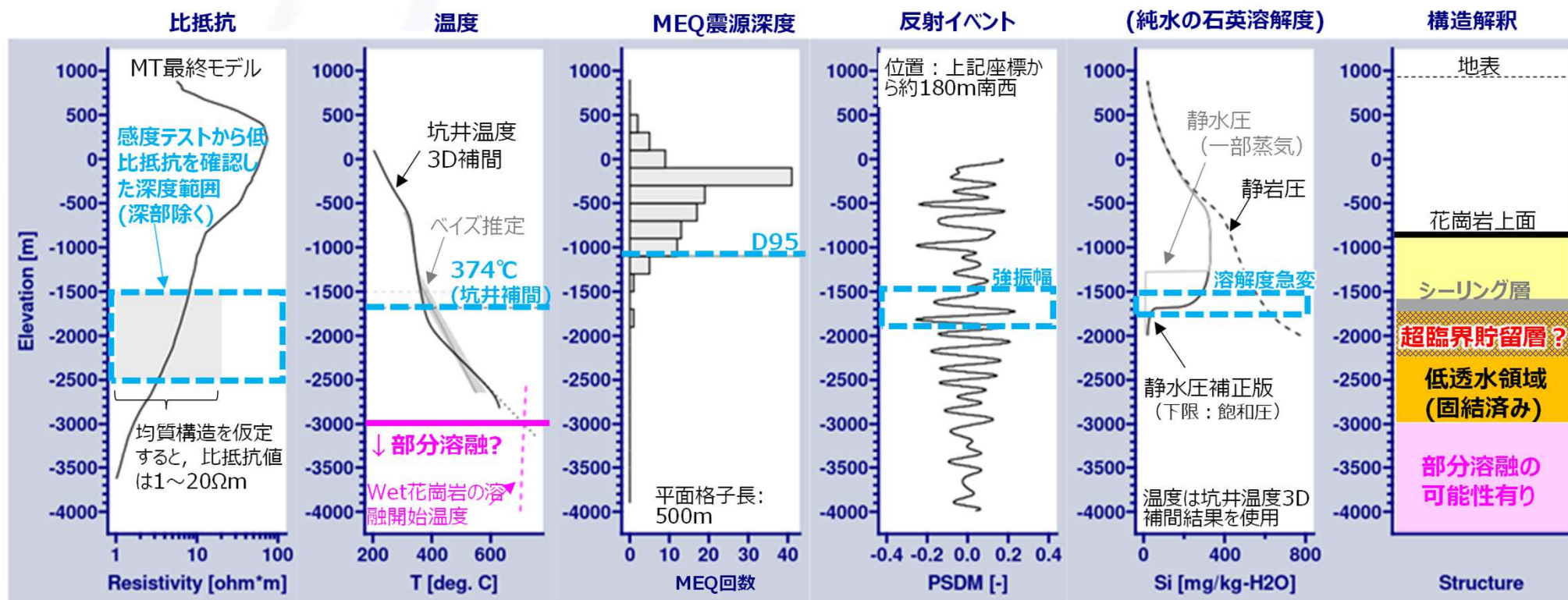
深部井（Well-13）の噴出熱水pH経年変化



- 葛根田浅部熱水系にマグマ水が定常的に多量流入していることを示す地化学分析データはない。

研究成果 (①補完地表調査と概念モデル構築)

深部低比抵抗体中央付近での鉛直プロファイル (Easting=3.2km, Northing=-18km)

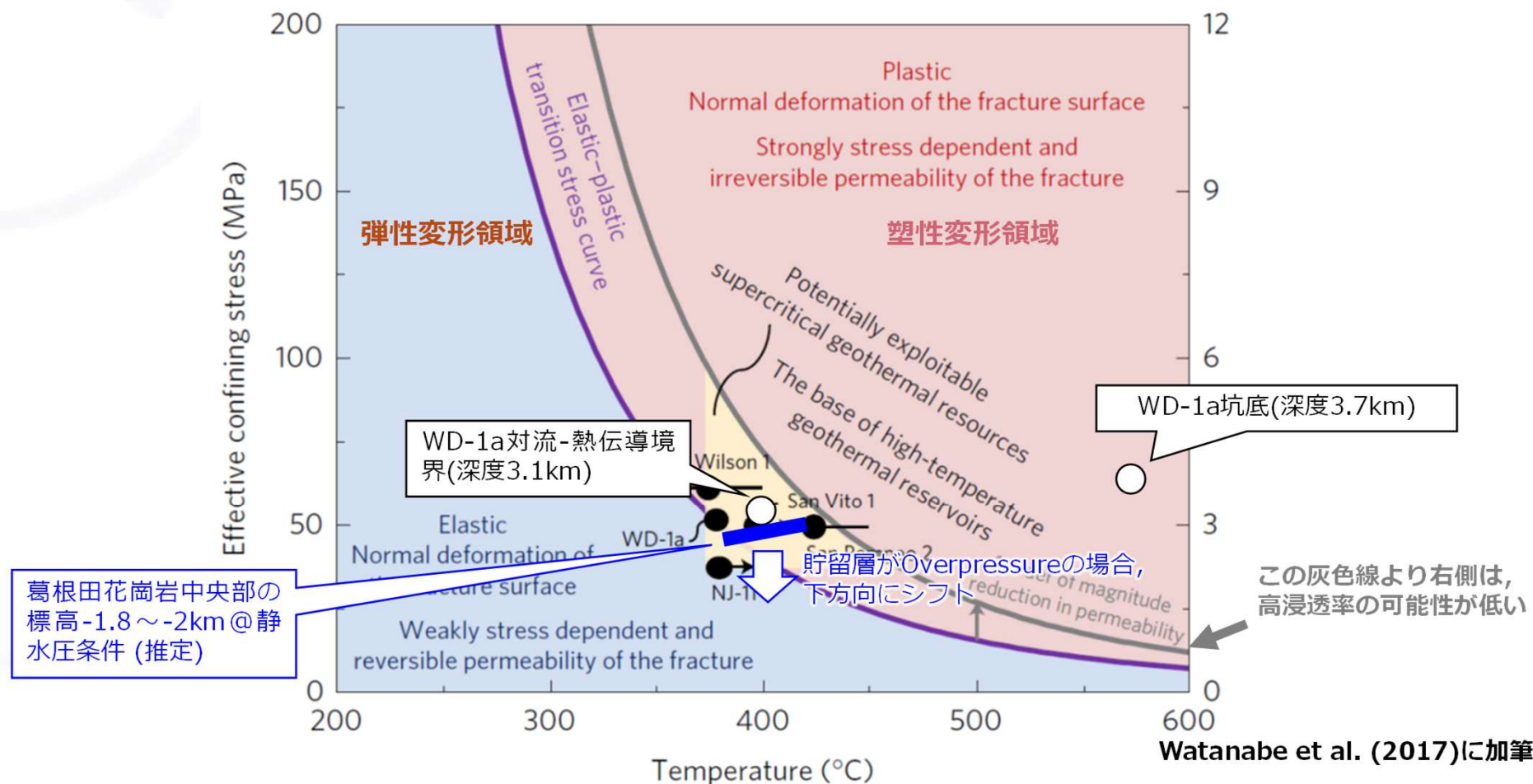


- ・ 地震D95深度：D95深度以浅は花崗岩BDT温度（一般的な地殻の歪み速度において約360～400℃と推定）以下である可能性が高い。
- ・ 石英溶解度（純水）：溶解度の急変部または静岩圧から静水圧に急低下する箇所でシリカシーリング層が形成される可能性。
- ・ 超臨界貯留層の上面深度は、温度推定結果の幅を考慮し標高約-1.5～-1.8kmと推定。貯留層下面深度の推定は困難。

- 各調査・推定に不確定性があるものの、比抵抗構造と温度から推定される超臨界地熱貯留層上面深度と、地震D95深度、反射イベント、石英溶解度急変深度（静水圧条件下）は概ね整合的。

研究成果 (①補完地表調査と概念モデル構築)

浸透率の推定



- 葛根田における超臨界地熱貯留層の応力・温度条件と高温高圧下において花崗岩き裂が高浸透率を有する条件 (Watanabe et al. 2017)を比較。推定した超臨界地熱貯留層の応力・温度条件は、同論文が示す高浸透率を期待できる領域内に位置しており、貯留層の存在を否定するものではない。

標高 [km]

←SW 乳頭山 三ツ石山 NE→

葛根田川

天水

浅部貯留層 (褶曲, 断層)

深部貯留層 (断層, 冷却節理)

縁辺部の鉱物粒界に火山性ガス・ブラインが残存

熱放出

シリカシーリング層

対流-熱伝導境界/臨界点/BDT

超臨界貯留層

マグマ水 (max 30-50t/h)

部分溶融域

固結領域 (低透水性)

※複数の貫入体の集合体である可能性あり

熱

浅部の地熱流体にマグマ水の定常的な影響は見られず, 浅部との水理的な接続は限定的と想定

高塩濃度マグマ水がトラップされ, 超臨界地熱貯留層を形成している可能性; 流体圧はOverpressureの可能性が高い

葛根田花崗岩 (熱源岩)

- ・実測500-510℃@標高-3km
- ・一部は部分溶融の可能性
- ・約0.35~0.1Maに少なくとも3回貫入
- ・形状は北東-南西方向に長軸を持つ

距離 [km]

- 

研究成果 (②資源量評価)



シミュレーションパラメータ

パラメータ名	値	根拠
貯留層側方境界	比抵抗 $\leq 30\Omega\text{m}$	MT感度解析により低比抵抗域である可能性が高いことを確認できた範囲。楽観的な値。
	比抵抗 $\leq 12\Omega\text{m}$	MT感度解析により低比抵抗域である可能性が高いことを確認できた範囲。悲観的な値。
貯留層浸透率／間隙率	$1\text{E-}16\text{m}^2 / 2.7\%$	浸透率はNEDOの指定。間隙率はRGPZ式($m=1.8$, 粒径 $=1\text{mm}$)から推定。 m と粒径は葛根田花崗岩コアの実測値をもとに決定（浸透率が $1\text{E-}16\text{m}^2$ 程度の場合に間隙率は2.5～3.5%（藤本他, 1998））
	$5\text{E-}15\text{m}^2 / 2.9\%$	先行PJで示された生産に資する浸透率の下限值。間隙率は、粒界微視亀裂よりもやや大きい亀裂が存在すると仮定し、 $m=1.5$ と仮定してRGPZ式から推定。
	$5\text{E-}14\text{m}^2 / 4.8\%$	浸透率はNEDOの指定。間隙率は、粒界微視亀裂よりもやや大きい亀裂が存在すると仮定し、 $m=1.5$ と仮定してRGPZ式から推定。
貯留層間隙流体圧	貯留層上面31MPa, それより深部は静水圧	高温下で $\text{H}_2\text{O-NaCl}$ 流体が高導電率を有する相（单相／気液二相）であるためのおおよその下限値（流体が貯留層下面から500℃で流入、貯留層厚みは500mを想定し算出）
	貯留層上面50MPa, それより深部は静水圧	現時点でMPDでコントロール可能な圧力上限の楽観的な値。泥水比重1.8～2, 垂直深度2,946mを想定。
深部流体供給量	50 t/h（貯留層広がり楽観的な場合）	マグマ固結に伴う地殻放水量の推定の最大値（先行PJでの土屋先生提案式）。貯留層断面積 11km^2 （暫定）、厚み0.5km, 放出水比50%, 単位期間1万年を仮定した場合の計算値
	なし	現在の貯留層に流入するマグマ脱水量が無視できるほど小さい場合
貯留層厚み	600m	花崗岩浸透率の応力・温度依存性にもとづくと最大で300-1000m程度と推定。
岩石密度	2.7 kg/m ³	WD-1a花崗岩Late-stageコアの測定値（本PJで実施）
岩石比熱	1 kJ/kg/K	WD-1a花崗岩Late-stageコアの測定値（本PJで実施）
岩石熱伝導	2 W/m/K	WD-1a花崗岩Late-stageコアの測定値（本PJで実施）

- 先行研究、本事業で実施した各種調査で得られた知見、及びNEDOから指示のあった条件等を考慮して、資源量評価シミュレーションで評価する超臨界地熱貯留層のパラメータを決定。

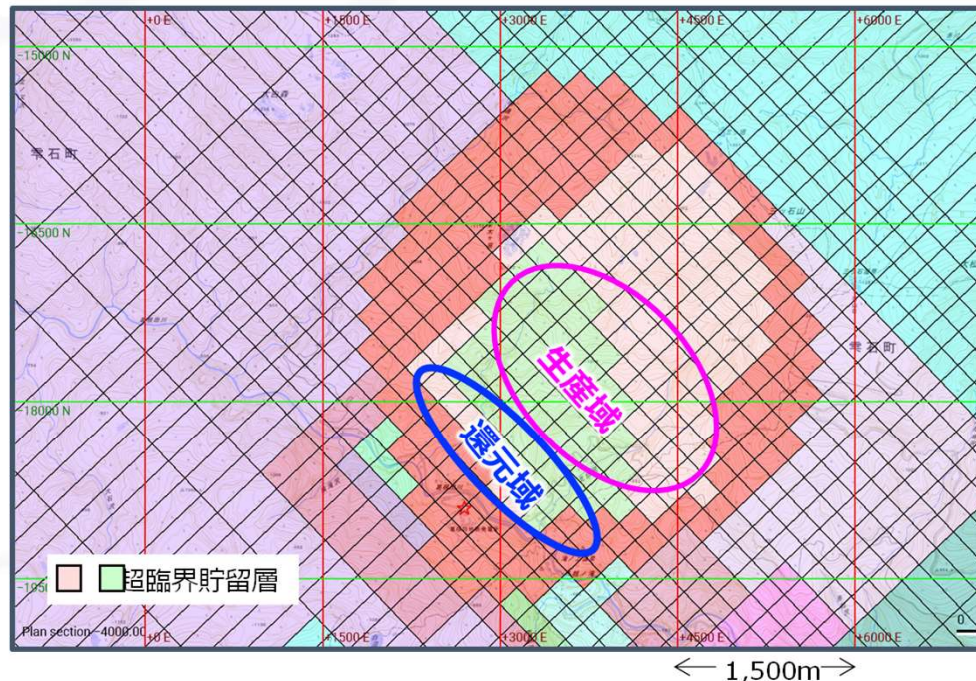


研究成果 (②資源量評価)

生産予測シミュレーションで想定した発電方式と生産還元域

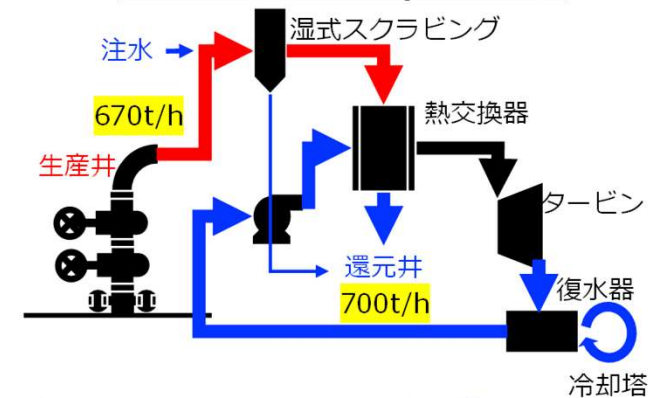
以下の2つの発電方式を想定した。

- ・過熱蒸気熱交換方式（生産量：670 t/h，還元量：700 t/h）
- ・過熱蒸気直接利用方式（生産量：505 t/h，還元量：60 t/h）



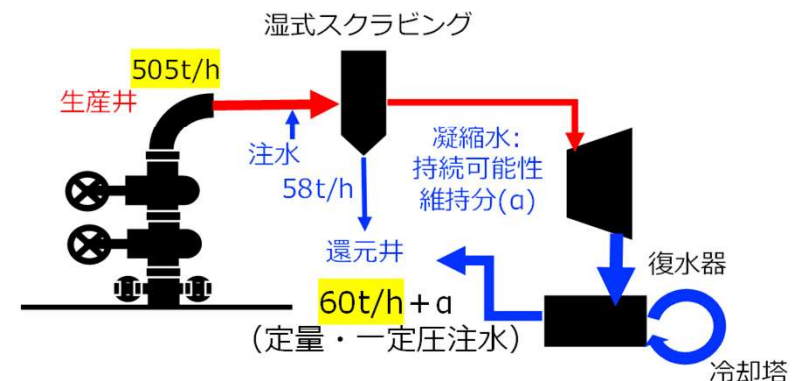
還元域（ブロック）は，生産域よりも深部の超臨界貯留層内に設定

過熱蒸気熱交換方式（間接方式）



利点：全量地下還元で閉鎖系でも持続的生産可能
欠点：生産井・還元井の掘削本数増加(開発コスト増大)

過熱蒸気直接利用方式（直接方式）



利点：生産井・還元井の数抑制
欠点：持続可能性の維持困難

- 2つの発電方式で生産予測シミュレーションを実施。

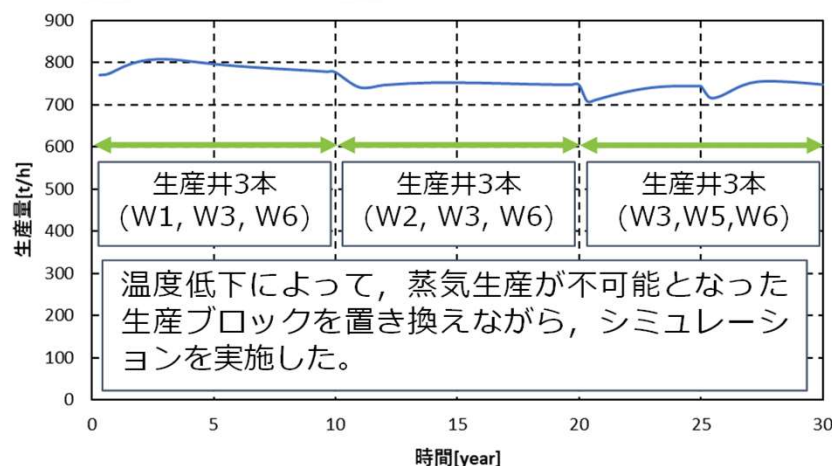
研究成果 (②資源量評価)



開発シナリオ

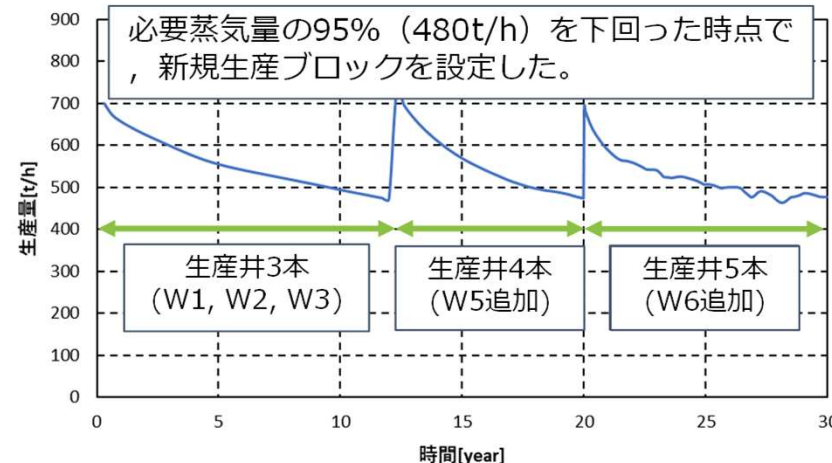
- 過熱蒸気熱交換方式：100 MWeの発電に必要な最小の生産ブロックで予測シミュレーションを開始し、適宜、補充井を追加して30年間のシミュレーションを実施。
- 過熱蒸気直接利用方式：貯留層圧力維持のための追加涵養（+約320t/h）を付与し、同様の予測を実施。

過熱蒸気熱交換方式（必要生産量：670 t/h、還元量：700 t/h）



30年間の蒸気生産には、初期生産井3本・補充井2本の計5本の生産井となる計算結果を得た。

過熱蒸気直接利用方式（必要生産量：505 t/h、還元量：378 t/h）



30年間の蒸気生産には、初期生産井3本・補充井2本の計5本の生産井となる計算結果を得た。

開発シナリオを想定した生産シミュレーション結果（左：過熱蒸気熱交換方式、右：過熱蒸気直接利用方式）

- 過熱蒸気熱交換方式においては、生産量の減衰は小さいものの温度低下が大きい生産井があるため、必要に応じて生産ポイントを置き換えた結果、合計5本の生産井によって、100 MWeの蒸気生産を30年間維持できるとの結果。
- 過熱蒸気直接利用方式においては、初期生産井3本・補充井2本の、合計5本の生産井によって、100 MWe相当の蒸気生産を30年間維持できるとの計算結果。
- 浅部熱水系への影響（温度、圧力の変化）はほとんどないことを示す結果。



深部構造調査試錐の検討／技術的検討（調査井掘削に向けた技術課題対策）

- * 深部構造調査試錐井の掘削計画に対して、既存の技術・資機材をベースにして坑井設計・掘削シミュレーションソフトウェアを用いたケーシング強度設計，ハイドロリクス，トルク&ドラグ等のシミュレーションを行い，掘削計画の妥当性・安全性を評価した。
- * 策定した調査・試験計画に対して事前地上予備試験を実施した。

超臨界地熱井仕様の検討／技術的検討（超臨界地熱条件への掘削・仕上げ）

- * 調査井で実施する試験・調査計画を立案した。
- * 調査井を用いた「資源存在実証シナリオ」を立案した。
- * 調査井の掘削計画に対して，超臨界地熱環境を想定したケーシング強度設計，ハイドロリクス，トルク&ドラグ等のシミュレーションを行い，掘削計画の妥当性・安全性及び坑井の健全性を評価した。
- * 長期噴気試験を想定した坑内状況シミュレーション等により，坑井健全性，坑井仕様の安全性を評価した。
- * 調査・試験計画に対して，必要に応じて，事前地上予備試験を実施した。

HSE（Health, Safety & Environment）

- * 先行研究開発を通じて得られた超臨界地熱システムへの掘削時における簡易的なHSEリスク評価結果をベースに，最終掘削候補地における詳細掘削計画，調査・試験計画に対してHSEマネジメント方針・実施体制案を策定した。葛根田地域の地下および法令上の制限等を勘案して試験井の掘削や各種試験の実施に係るHSEリスクを再評価した上で，HSEマネジメントプランを最終化した。

研究成果 (⑥総合評価)



葛根田地域の特徴

評価項目	優 位 な 点
超臨界地熱システム	* 多数の坑井データを使用して推定された熱構造は一定の信頼性を有し、他の手段により得られた熱構造関連情報とも整合的である * 推定された比抵抗構造は検層データおよび地質データとの整合性を有する * 葛根田川左岸から三ツ石山の間、地下2～3km付近に超臨界貯留層の上部が存在する可能性が高い * 温度構造及び流体地化学データから超臨界貯留層上部にはシリカシール層が形成されており、超臨界貯留層は浅部熱水系と水理的に分離されている可能性が非常に高い * マグマ水を一定量貯留可能な浸透率・空隙率を有する貯留構造を有すると推定された ⇒葛根田地域の超臨界地熱システムは当初想定していたモデルと非常に類似
エネルギー量	* 悲観的貯留層モデル以外について 100MWeの発電を30年以上実現可能であることが示された（地下のマスバランスを保つために還元および涵養は不可欠） ⇒NEDO等が想定している商用超臨界地熱発電所を実現可能
調査井の掘削・試験	* 掘削深度2.5～3.0km程度までの掘削で超臨界地熱システムへ到達可能である * 浅部の地下構造に関する多様な既取得情報を利用可能である * 既存の敷地を活用することでアクセス道路設置工事は不要であり、簡易な敷地整備で掘削に利用可能である * 掘削及び調査試験に必要な水を確保可能である ⇒葛根田地域において調査井の掘削・試験を比較的低コストで迅速かつ円滑に実現可能
開発・発電	* 11～13円/kWhで発電可能なケースがある ⇒掘削コストが低く、既存設備等を一部使用可能なことによる経済的メリット
法規制	* 深部構造調査試験、調査井掘削・試験時において重大な支障となる法規制・社会的条件はない ⇒適正な説明・届出等を行うことにより一連の掘削・試験を実施可能
環境影響	* 長期の発電時においても浅部熱水系への影響は極めて少なく、既存発電所や温泉への影響が生じ難い * 微小地震活動が極めて少ない脆性-延性境界以深の領域で、還元により地下のマスバランスを取りながら開発を実施するためEGSや浅部地熱系への加圧注水に比して誘発地震リスクが高くはないと想定する * 緊急時に大量の水を確保可能である ⇒調査井掘削・試験時のリスクが比較的小

今後の技術課題(本事業を通じて得られた主なもの)



研究開発項目	主な課題・研究開発項目
①補完地表調査と概念モデル構築	* MT法による比抵抗イメージングの分解能向上 * 最先端の微小地震反射法の導入による超臨界地熱システムの高度イメージング * 深部温度構造推定手法の導出 * 超臨界貯留層内流体圧力推定法の導出 * 探査データを用いた岩体・流体物性値推定法の導出 * 亜臨界-超臨界環境下での物性データ取得 * 地下モデル不確定性低減技術の開発 * シリカシール層、超臨界地熱貯留層形成プロセスの推定
②資源量評価	* 超臨界水流動・熱輸送シミュレーション技術の高度化・安定化 * マグマ水流動・熱輸送シミュレーション技術の開発 * 超臨界地熱貯留層-坑井連成生産シミュレーション技術の開発 * 超臨界地熱貯留層THMC(熱-水-力学-化学)連成シミュレーション技術(貯留層変動予測技術)の開発
③深部構造調査試錐の検討	* 掘止め判断基準(シリカシーリング層に達着)の確認手法の確立
④超臨界地熱調査井仕様の検討	* 安全確保技術・機材の開発(BOP, ガス噴出対策等) * 高性能泥水冷却システムの開発 * 高耐熱セメント, セメンティング技術の開発 * 耐腐食性ケーシング管, バルブ, 地上配管, 噴気試験設備等の開発 * 超臨界地熱井用(高耐熱)泥水の開発 * 環境に配慮した噴気試験システムの開発 * 噴出流体の清浄化技術の開発 * 坑内計測・モニタリング技術の開発
⑤経済性評価	* 資機材価格将来予測値の不確定性 * エネルギー価格将来予測値の不確定性
その他	* 超臨界地熱資源量評価手法(AI, 地質統計学等)の開発と全国規模のポテンシャルマッピング * 腐食性流体挙動の解明 * スケール・SiO₂生成機構の解明 * 超臨界地熱システム内の応力場推定技術の開発 * 人工的透水性向上技術(超臨界水圧破碎技術)の開発 * 超臨界地熱流体対応発電システム(熱交換器, 冷却システム, タービン等)の開発 * 誘発地震発生機構の解明とリスク評価

まとめ (その1)



研究開発項目	目 標	成 果
①補完地表調査と概念モデル構築	* 葛根田地域の地下5km以浅に超臨界領域（あるいはそれに準じた高温領域）を特定する。 * 熱構造，浸透率空間分布等，生産シミュレーションに必要なパラメータを決定する。	* 物理探査データ，地質学的データ等から葛根田地域の深度約2～3km付近に超臨界地熱貯留層上面が存在する可能性が極めて高いことを示した。また各種データ間に大きな齟齬はないことを示した。 * 熱構造，浸透率空間分布等，生産シミュレーションに必要なパラメータを決定するとともに，それらの不確定性を評価した。
②資源量評価	* 葛根田地域の在来型地熱系及び超臨界地熱システム全体を対象に自然状態シミュレーションを実施し，当地域の地熱系全体を表現できることを示し，モデルの妥当性・信頼性を提示する。 * 葛根田地域の超臨界地熱システムの詳細モデル化および生産シミュレーション等を通じて超臨界地熱資源の質，量および規模を定量的に評価する（100 MW規模）	* 葛根田地域の在来型地熱系及び超臨界地熱システム全体を対象に自然状態シミュレーションを実施し，当地域の地熱系全体を表現できることを示し，坑井温度プロファイルとの比較等によりモデルの妥当性・信頼性を示した。 * 葛根田地域の超臨界地熱システムの詳細モデル化および生産シミュレーション等を通じて100MWの発電を30年以上実現可能な貯留層モデル，開発方式が存在することを示した。また，30年間の開発シナリオ（補充井の追加や涵養）を提示した。
③深部構造調査試錐の検討	* 深部構造調査試錐井の仕様，工程概要，ならびに本坑井を使用した調査・試験プランを提示する。また，掘削・試験費用を算出する。	* 深部構造調査試錐の目的，調査・試験プランを検討し，坑井仕様，工程概要を提示した。また，掘削・試験費用を算出した。

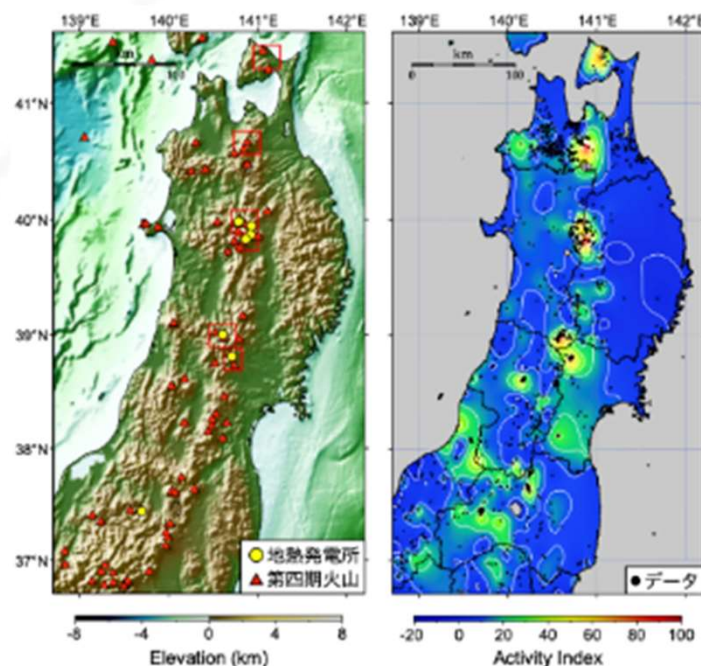
まとめ (その2)



研究開発項目	目 標	成 果
④超臨界地熱調査井仕様の検討	* 調査井の坑口および掘削ターゲットの位置を決定する。 * 調査井を用いた一連の調査・試験計画を提示する。 * HSEマネジメントプランを提示する。	* 超臨界地熱システムモデル，地理的条件，既存地熱発電所設備等を勘案し，調査井の坑口および掘削ターゲットを決定した。また，坑井仕様，掘削・試験工程，および費用を提示した。 * 科学者・技術者からの提案をベースに一連の調査・試験計画を策定し，重要度・難易度に応じてランキングした。 * 調査井掘削を念頭にHSE-MSの枠組みを構築した。さらに超臨界環境でのHSEリスク評価を行い，HAZID-WSを通じてアクションプランを策定した。
⑤経済性評価	* 葛根田地域において在来型地熱発電と同等以下のコストで超臨界地熱発電を実現可能であることを示す。	* 資機材価格等に不確定性が残るものの，葛根田地域において在来型地熱発電と同等のコストで超臨界地熱発電を実現可能な開発パターンがあることを示した。
⑥総合評価	* 葛根田地域での調査井掘削，試験の優位性を提示する。 * 調査井掘削，試験およびその後の実用化へ向けた研究開発課題，体制案を提示する。	* 葛根田地域での調査井掘削，試験の優位性を提示した。 * 調査井掘削，試験およびその後の実用化へ向けた研究開発課題，体制案を提示した。

謝辞

- 葛根田地域における超臨界地熱資源量評価において、東北自然エネルギー株式会社から多大なる御協力を得たことを記し、謝意を表する。
- 一連の超臨界地熱研究開発に従事してきたNEDOをはじめとする皆様の御尽力・御協力に心より御礼申し上げる。



GSJ (2009)のデータを使用