

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.5

地熱発電導入拡大研究開発

超臨界地熱資源技術開発

超臨界地熱資源量評価(九重地域)

発表日：2024年12月18日

【委託先】(国)九州大学・西日本技術開発(株)・地熱技術開発(株)

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

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 西島 潤 (国)九州大学

問い合わせ先 (国)九州大学大学院 E-mail:nishijima@mine.Kyushu-u.ac.jp

TEL: 092-802-3323

1. 背景・目的

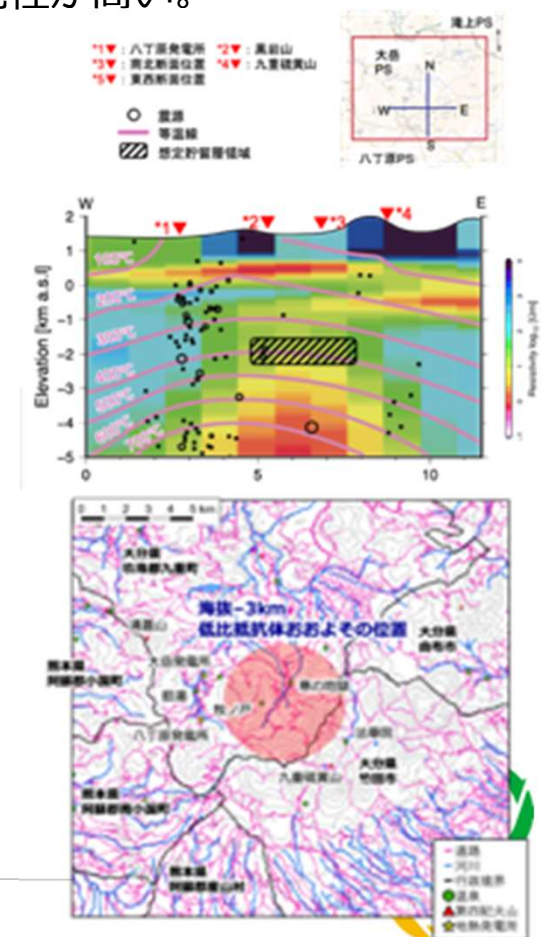
- ・ 九重地域の地下深部（4km以浅）に超臨界地熱システムが存在する可能性がある。
- ・ 開発計画に資する明瞭な超臨界貯留層の形状が得られているとは言い難い。
- ・ 大深度かつ高温の掘削ターゲットを開発するための技術的な課題が指摘されている。
- ・ 様々な社会的事情から掘削地点がターゲットから離れた地点になる可能性が高い。

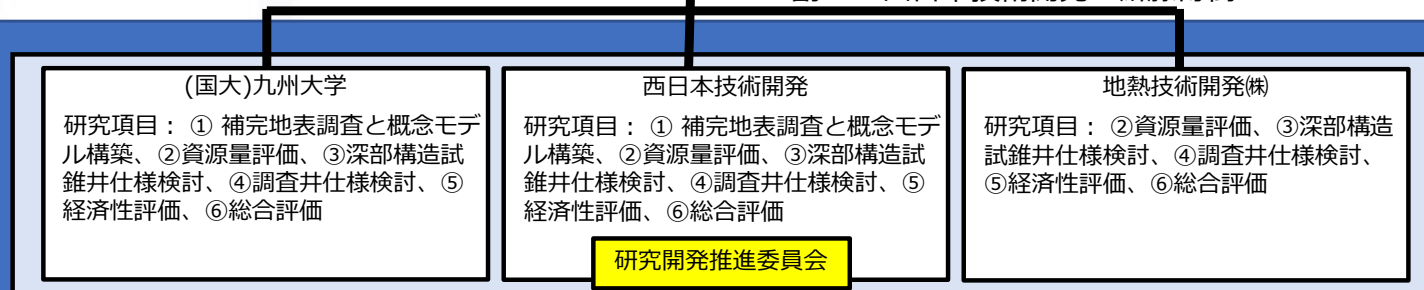
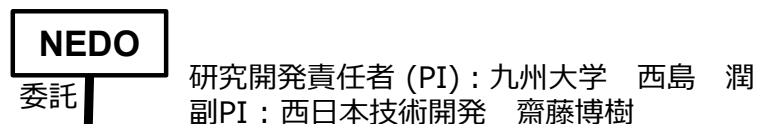
2. 実施期間

開始 : 2021年6月
終了 : 2024年3月

3. 実施内容・目標（中間・最終）

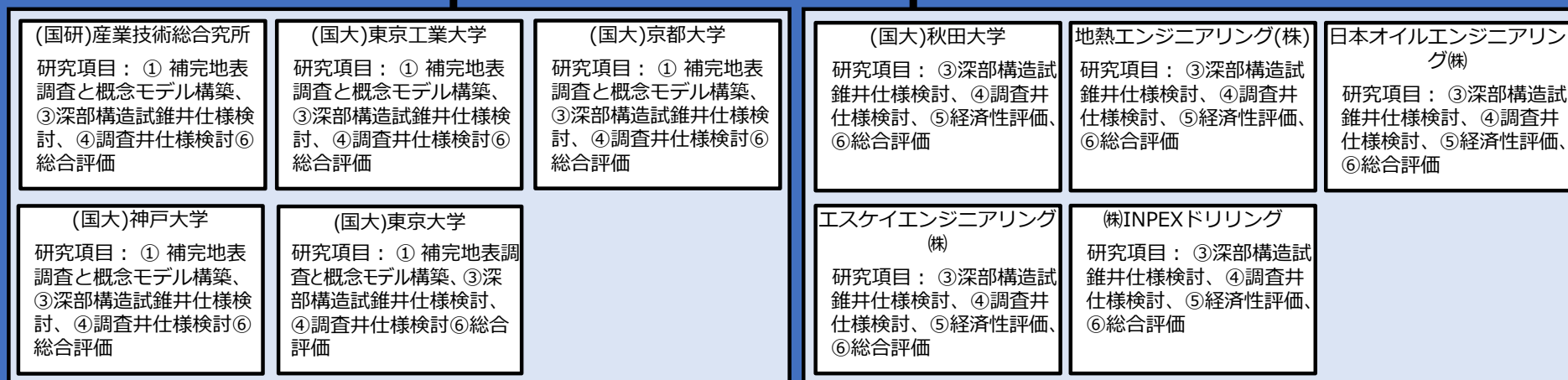
研究項目	中間目標	最終目標(2024fy末)
①補完地表調査と概念モデル構築	超臨界地熱システムの概念モデルを構築する	九重地域の地下5km以浅に超臨界領域を特定する
②資源量評価	浅部熱水系を含めた地熱系概念モデルを再現しうる数値モデルを複数比較検討する	超臨界地熱資源の質、量および規模を定量評価する（100 MW規模）
③深部構造調査試錐の検討	深部構造調査試錐井の仕様、工程概要、費用等を提示する	中間目標と同じ（2023fyで終了）
④超臨界地熱調査井仕様策定	調査井を用いた試験計画を策定する	調査井のターゲット、仕様、調査内容、費用等を決定する
⑤経済性評価	2024 f y に実施予定	在来型地熱発電と同等以下のコストであることを示す



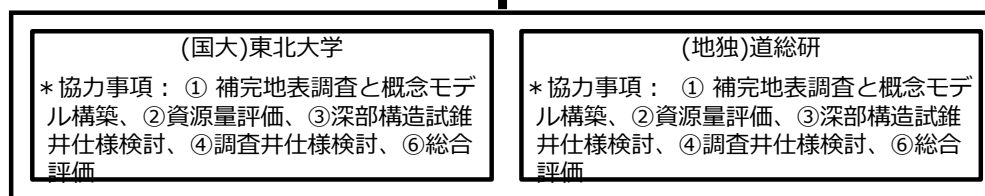


再委託

再委託



研究開発への協力



研究開発項目①：補完地表調査と概念モデル構築

【課題】

- ・ 先行研究において3km b.s.l.以深において超臨界貯留層の存在を示唆する低比抵抗域が推定された。
- ・ ただし、MT法の探査測点間隔の大きさ、深部における解析分解能の低下の問題から、超臨界貯留層分布域に関しては依然として不確実性が存在する。
- ・ 上記課題を解決するため、深部低比抵抗域を対象とした追加MT法探査、断裂系等の抽出に適した反射法探査、微小地震モニタリングおよび基礎データの収集解析を実施する。

【研究開発内容】

要素技術	先行研究での成果	本研究での開発項目
(a) MT法探査	超臨界貯留層を示唆する深部低比抵抗域が解析された。	深部低比抵抗域周辺で40点程度の追加MT法探査を実施し、既存データを含めた3次元解析による、深部低比抵抗域の推定精度の向上。
(b) 反射法探査	なし	準3次元反射法屈折法統合地震探査データの取得およびデータ解析による超臨界地熱貯留層の正確なイメージング化。
(c) 微小地震モニタリング	なし	30点程度の微小地震モニタリングにより超臨界貯留層の動体を探査する。また、震源決定に必要なモデルは微動探査で構築したものを利用する。
(d) 地質学データ収集・解析	既存の文献情報の収集を行った。	流体包有物、カッティングス等の既存データの収集再解析
(e) 地球化学データ収集・解析	八丁原地熱発電所孔井から採取された地熱流体の化学分析を行い、400度程度の高温のマグマ由来成分の供給があることを推定した。	有望地点近傍の数地点で地熱流体・噴気のサンプリングを実施し、流体組成および各種同位体比について収集・詳細解析する。
(f) 基礎データ収集・解析	既存データを用いた温度構造推定	既存重力データの再解析
(g) モデルの不確定性低減	なし	情報統計学的手法に基づくモデルの不確定性低減手法の開発
(h) 超臨界地熱モデルの精緻概念モデル化	九重地域において超臨界貯留層が存在する可能性を示した。	上記(a)~(g)の結果を基により精緻な浅部地熱系までふくめた精緻概念モデルを構築する。

Figure 1: Geological map and stratigraphic column of the Mt. Hida area.

Geological Map: The map shows the topography of the Mt. Hida area. Key peaks include Mt. Kuroiwa (1,502m), Mt. Goto (1,384m), Mt. Ryōshi (1,423m), Mt. Hida (1,762m), Mt. Nakadake (1,791m), Mt. Takem (1,786m), Mt. Hida (1,643m), and Mt. Kurodake (1,357m). The Hatchobaru GPP is marked. The map is color-coded by volcanic activity stage: Stage 1 (0-200 ka), Stage 2 (200-400 ka), Stage 3 (400-600 ka), and Stage 4 (600-800 ka). Symbols indicate Fumarole (red star), Hot Springs (yellow circle), Active volcano (red triangle), and Quaternary volcano (black triangle). A scale bar indicates 2 km.

Stratigraphic Column: The column shows the vertical sequence of rock units and their ages. The vertical axis represents depth in meters (m) from 0 to 150. The horizontal axis represents time in millions of years (Ma) from 0 to 150. The column is divided into three main sections: Quaternary (0-0.2 Ma), Tertiary (0.2-1.5 Ma), and Cretaceous (1.5-150 Ma).

Depth (m)	Age (Ma)	Rock Type / Description	Classification
0-30	0-0.2	山麓堆積物 (Alluvial deposits)	山麓堆積物
30-50	0-0.2	同輝石含有角閃石安山岩, 石英安山岩, 同質火砕岩類 (Andesite with hornblende, quartz andesite, and homogeneous pyroclastic rocks)	山麓堆積物
50-250	0-0.2	輝石安山岩質火砕岩類, 角閃石安山岩類 (Pyroxene andesite pyroclastic rocks, hornblende andesite rocks)	山麓堆積物
250-400	0.2-0.4	角閃石含有輝石安山岩類 (Hornblende andesite rocks with pyroxene)	山麓堆積物
400-600	0.4-0.6	2.1±0.4Ma (K-Ar) HT=4号井 (500.3m) (2.1±0.4Ma (K-Ar) HT=4号井 (500.3m))	山麓堆積物
600-700	0.6-0.8	同輝石安山岩溶岩, 同質火砕岩類 (Andesite solvolite, homogeneous pyroclastic rocks)	山麓堆積物
700-800	0.8-1.0	一輝石, マトリックスの緑泥石化 (One pyroxene, matrix greenish alteration)	山麓堆積物
800-900	1.0-1.2	一新鮮部は暗灰色 (A fresh part is dark gray)	山麓堆積物
900-1000	1.2-1.4	一下部に石英, 硬石膏脈発達 (In the lower part, quartz and gypsum veins develop)	山麓堆積物
1000-1100	1.4-1.6	4.8±1.0Ma (K-Ar) HT=4号井 (1,117m) (4.8±1.0Ma (K-Ar) HT=4号井 (1,117m))	山麓堆積物
1100-1200	1.6-1.8	同輝石安山岩溶岩 (Andesite solvolite)	山麓堆積物
1200-1300	1.8-2.0	一緑灰~淡緑灰色 (One greenish gray~pale greenish gray)	山麓堆積物
1300-1400	2.0-2.2	一緑泥石, 緑れん石, 方解石生成 (One greenish clay, greenish calcite, calcite formation)	山麓堆積物
1400-1500	2.2-2.4	一熱水脈発達, 石英, 硬石膏 (One hydrothermal vein develops, quartz, gypsum)	山麓堆積物
1500-1600	2.4-2.6	角閃石安山岩質火砕岩類 (Hornblende andesite pyroclastic rocks)	山麓堆積物
1600-1700	2.6-2.8	一亀裂少なく熱水脈減少 (One crack is few, hydrothermal veins decrease)	山麓堆積物
1700-1800	2.8-3.0	同輝石安山岩溶岩 (Andesite solvolite)	山麓堆積物
1800-1900	3.0-3.2	一節溶結 (One consolidation)	山麓堆積物
1900-2000	3.2-3.4	デイサイト (Dacite)	山麓堆積物
2000-2100	3.4-3.6	輝石安山岩溶岩: 黒色緻密 (Pyroxene andesite solvolite: black dense)	山麓堆積物
2100-2200	3.6-3.8	火山礫岩及び凝灰質頁岩 (Volcanic breccia and tuffaceous sandstone)	山麓堆積物
2200-2300	3.8-4.0	一礫径3~5cm, 礫種: 安山岩, 先第三紀基盤岩類 (One gravel diameter 3~5cm, gravel type: andesite, pre-Tertiary basement rocks)	山麓堆積物
2300-2400	4.0-4.2	結晶片岩類: 弱変質 (Metapelite: weakly metamorphosed)	山麓堆積物
2400-2500	4.2-4.4	花崗閃緑岩 (Granodiorite)	山麓堆積物

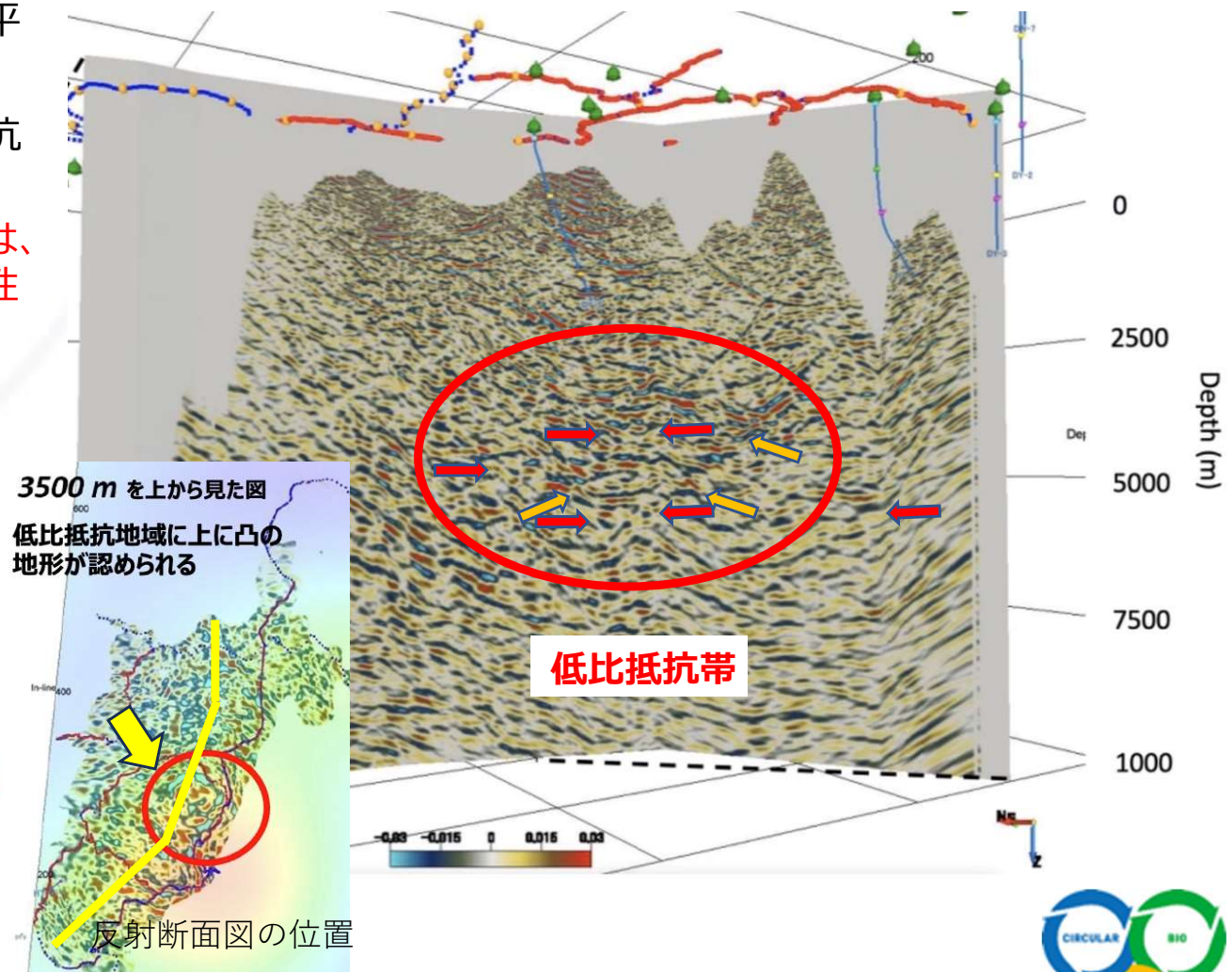
研究開発項目①：補完地表調査と概念モデル構築

反射法地震探査：低比抵抗部にある強反射面の解釈

- 上に凸の反射面（橙矢印）や、水平の強反射面（赤矢印）が存在
- 周辺の地層は連続的だが、低比抵抗部は反射面が不連続的
 - 周辺の地層と斜交する反射面は、マグマ性流体に関する可能性

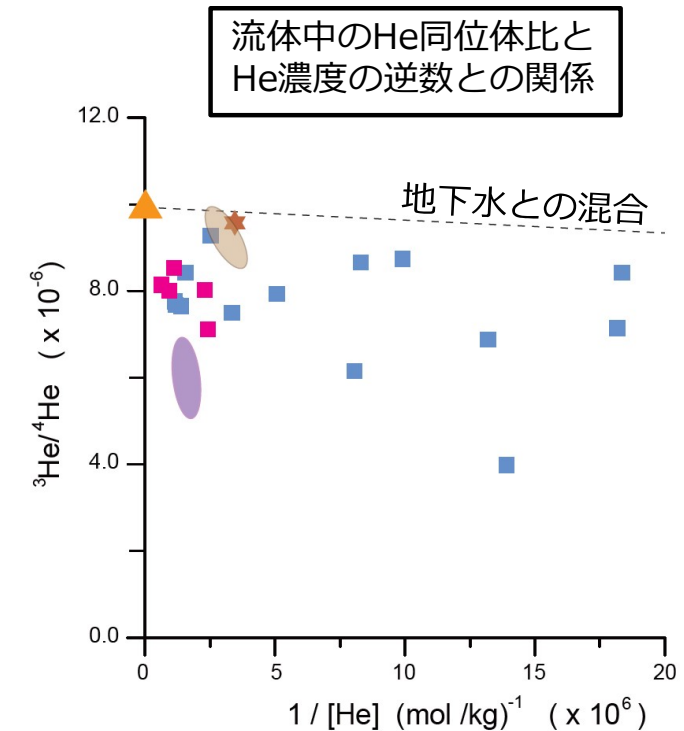
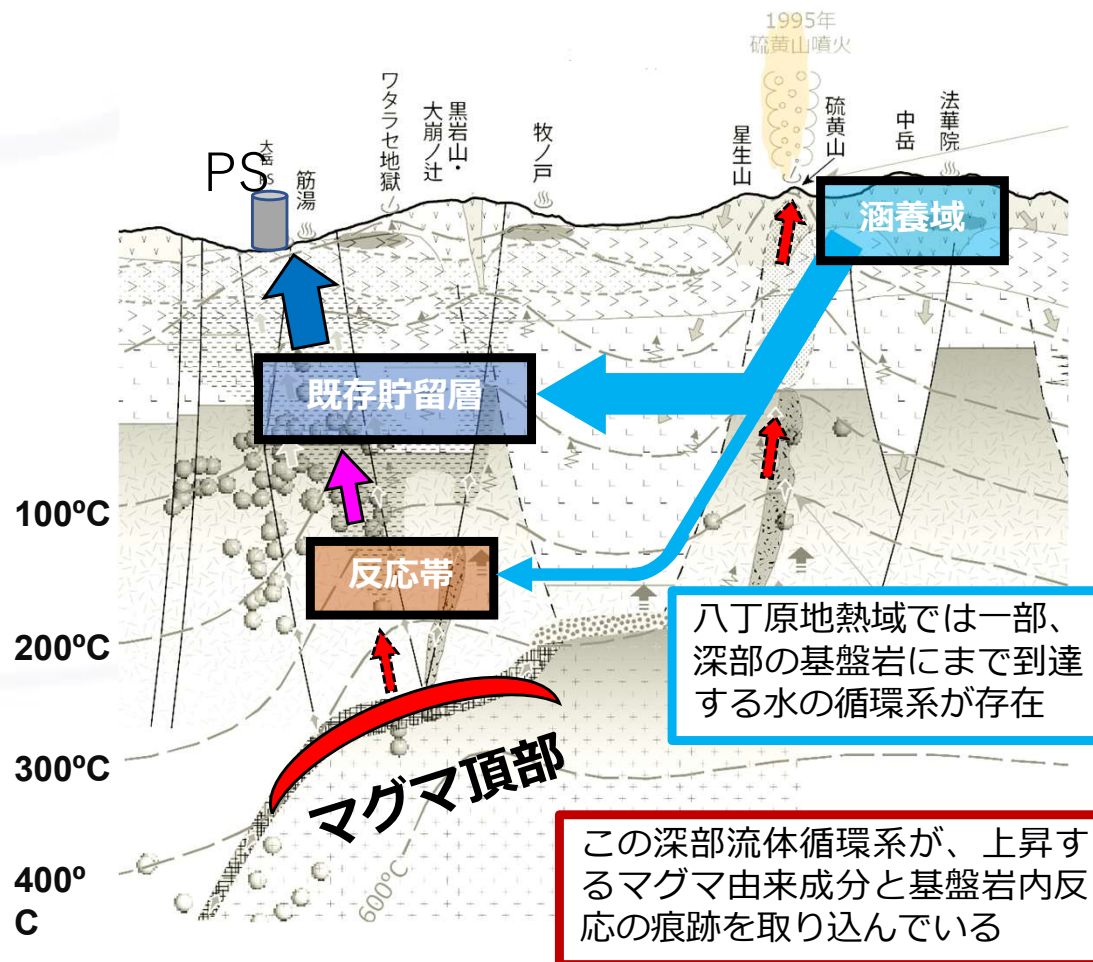
強反射面の振幅（高いインピーダンス境界）の理由

- 何らかの物性境界がある
- もし均質なマグマ溜まりだけであれば、その内部には物性境界がないはずで、反射面はない（低インピーダンス境界となる）
 - 強反射面は、貫入構造（不均質性の強い構造）と解釈できる
 - 一部の反射面はマグマ性流体の境界を示している可能性はある



研究開発項目①：補完地表調査と概念モデル構築

地化学：深部に到達する熱水循環系



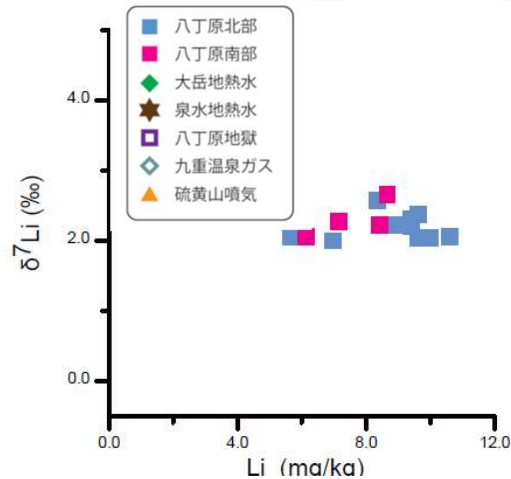
- 八丁原南部の流体において、He濃度が高いにもかかわらずHe同位体比がやや低いという特徴が見られた
- 基盤岩(～90Ma)中に蓄積された U, Th に由来する放射起源Heの付加を考えるとうまく説明できる



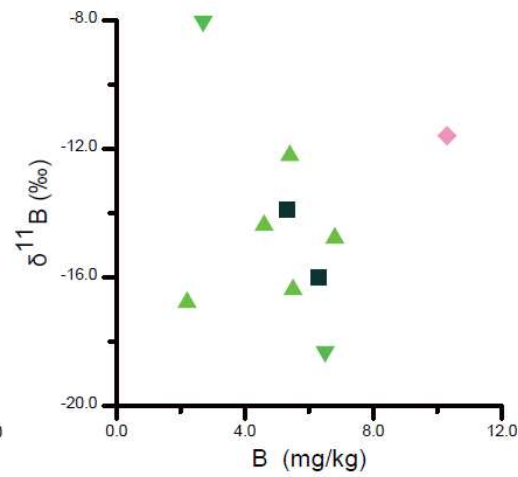
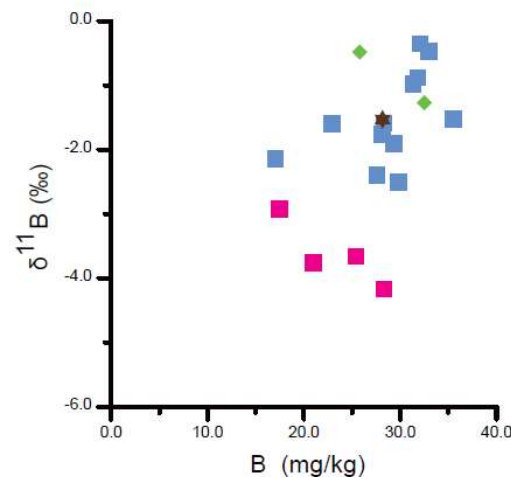
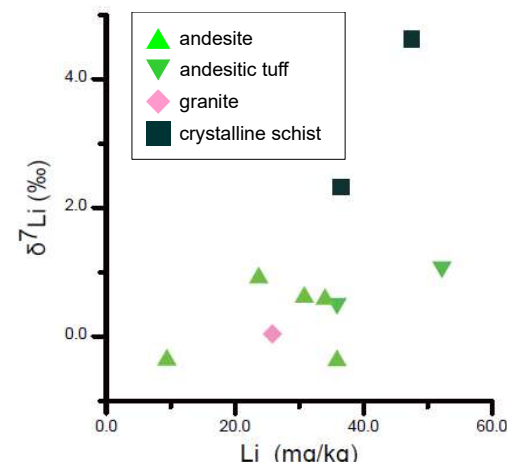
研究開発項目①：補完地表調査と概念モデル構築

地化学：基盤岩内の反応をLi, B同位体比で確認

地熱流体の同位体比／濃度



地質試料の同位体比・濃度

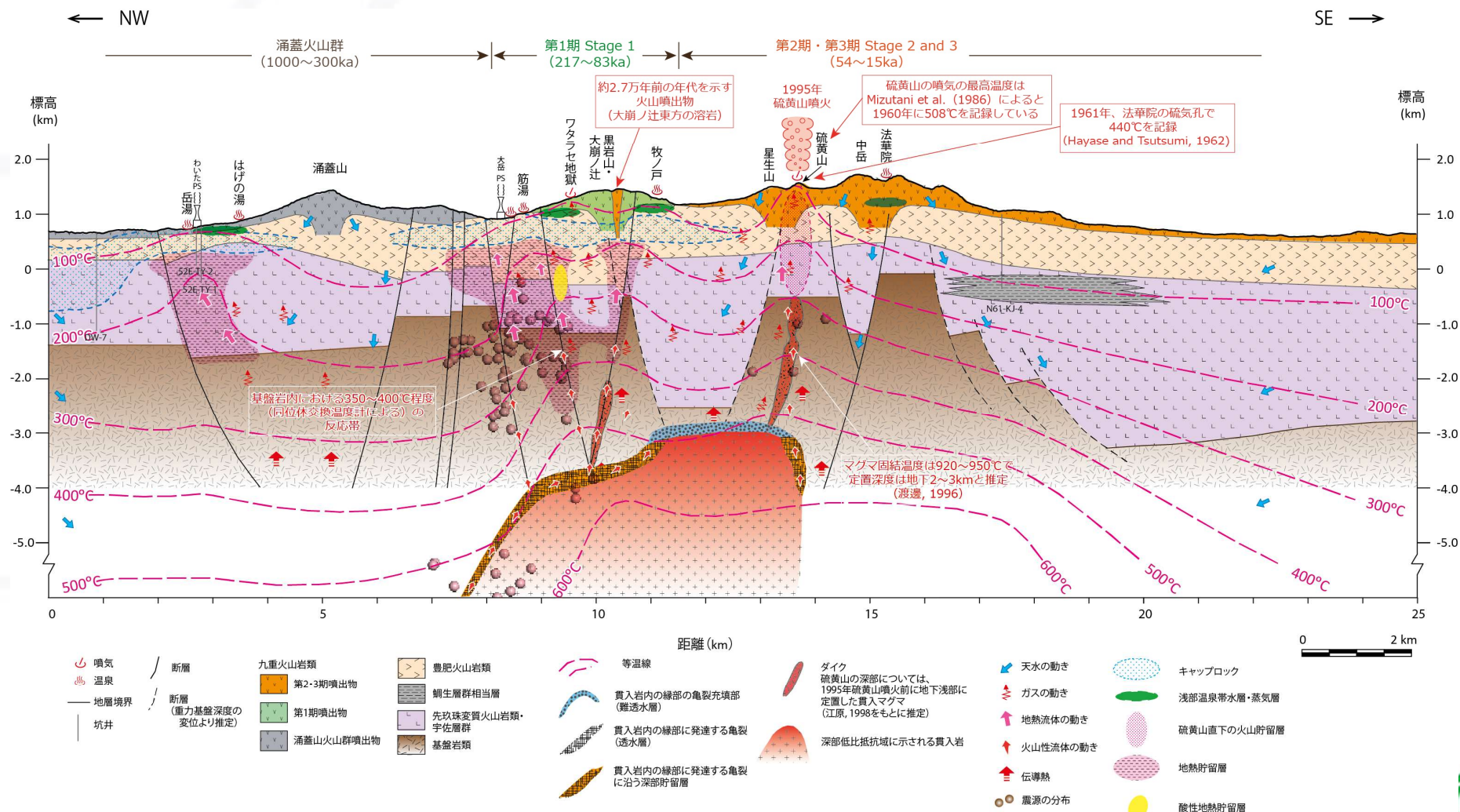


- 基盤岩内での反応の痕跡を確認するために、流体と地質試料（コア・カッティングス）を対象にLi, B同位体比測定を追加で行った
- 地熱流体では $\delta^7\text{Li}=2-3\text{‰}$ の範囲に集中し、この値は火山岩の $\delta^7\text{Li}=-1-1\text{‰}$ に近い
- 結晶片岩はやや重い $\delta^7\text{Li}$ 値で、その影響がいくつかの地熱流体に僅かに認められるようだ
- 南部と北部の地熱流体では明瞭に異なる $\delta^{11}\text{B}$ 値が見られた一方で、岩石の $\delta^{11}\text{B}$ 値はこれより軽い範囲の値であった（変質を経ると重くなる）
- B濃度が高い基盤花崗岩との反応が南部の軽い $\delta^{11}\text{B}$ 値に強く寄与している可能性がある



研究開発項目①：補完地表調査と概念モデル構築

概念モデル最終版



研究開発項目②：資源量評価

【研究実施内容の概要】

数値モデルの作成および自然状態モデルの構築

- ・研究開発項目①で構築された概念モデルに基づいて、三次元の数値モデルを作成する。
- ・概念モデルを再現する自然状態シミュレーションを実施する。

生産予測シミュレーション

- ・現在の地熱系が十分再現された自然状態モデルを用いた生産予測シミュレーションを実施する。
- ・本地域の超臨界地熱資源量を推定する。

発電可能量の推定

- ・最適な生産システム(還元/涵養等)を検討し複数ケースの予測を行う。
- ・周辺の既開発エリアへの影響（干渉）なども考察する。

【研究開発内容】

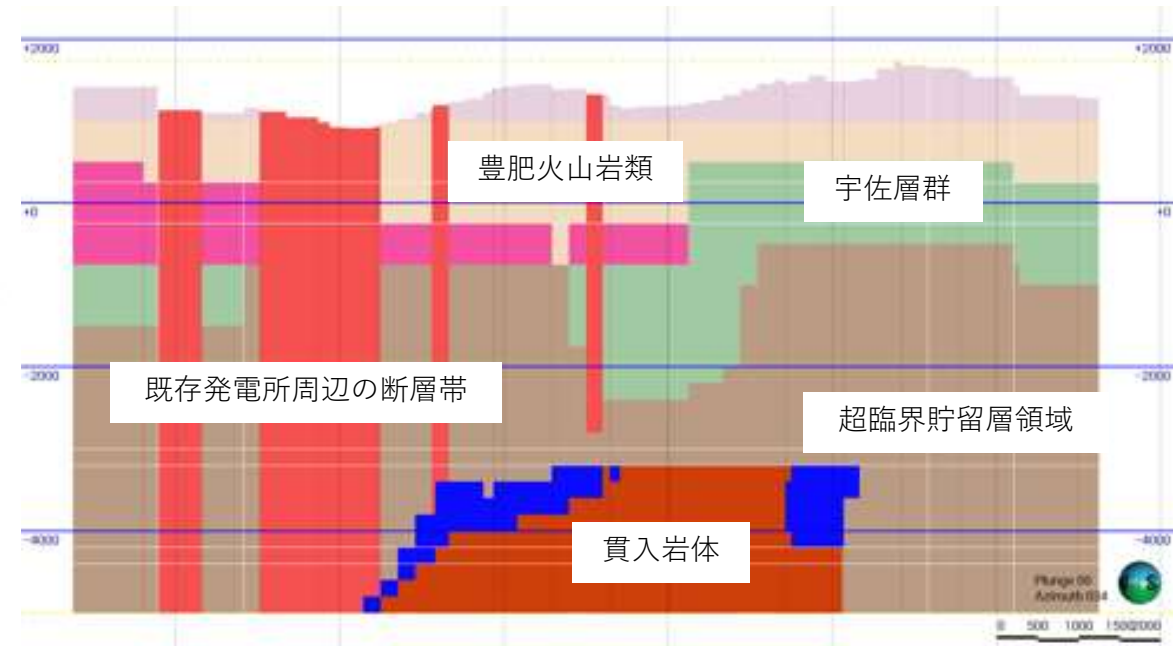
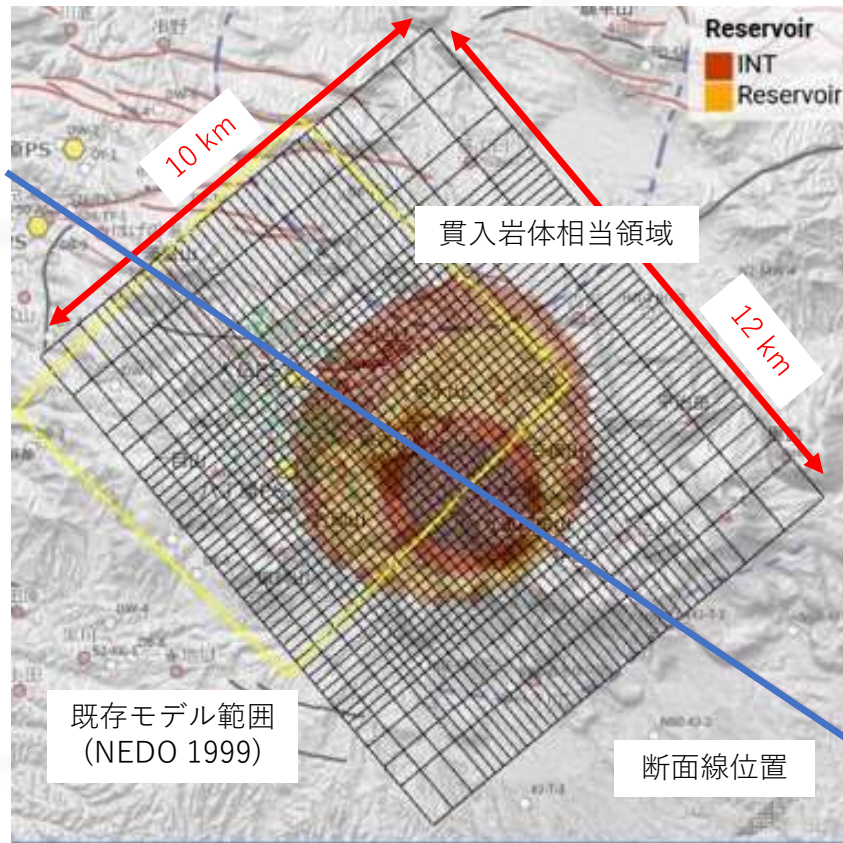
	研究開発内容
(a)自然状態シミュレーション*	研究開発項目①で同定された、既存及び超臨界地熱システムを対象に、自然状態シミュレーションを実施する。
(b)生産シミュレータ整備	既存コードをベースに、超臨界地熱システム固有の現象を表現できるシミュレータを整備する。
(c)発電可能量の推定*	(a)自然状態シミュレーションを通じて妥当と評価された超臨界地熱システムモデルを対象に生産シミュレーションを実施する。

*シミュレーションでは、石戸経士(2002)「地熱貯留層工学」（日本地熱調査会）に記載される、「自然状態モデリング」および「生産予測シミュレーション」をそれぞれ参考にする。



研究開発項目②：資源量評価

自然状態シミュレーション



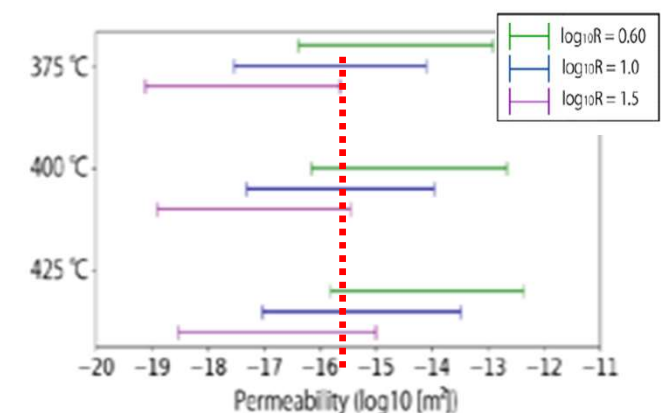
○浅部領域や既存開発領域の浸透率[m²]

八丁原	: $1.0 \times 10^{-16} \sim 4.0 \times 10^{-14}$
大岳	: $5.0 \times 10^{-17} \sim 5 \times 10^{-15}$
宇佐層群	: $5.0 \times 10^{-17} \sim 5 \times 10^{-16}$
基盤岩	: $1.0 \times 10^{-17} \sim 1.5 \times 10^{-16}$

(自然状態SIMによる調整結果)

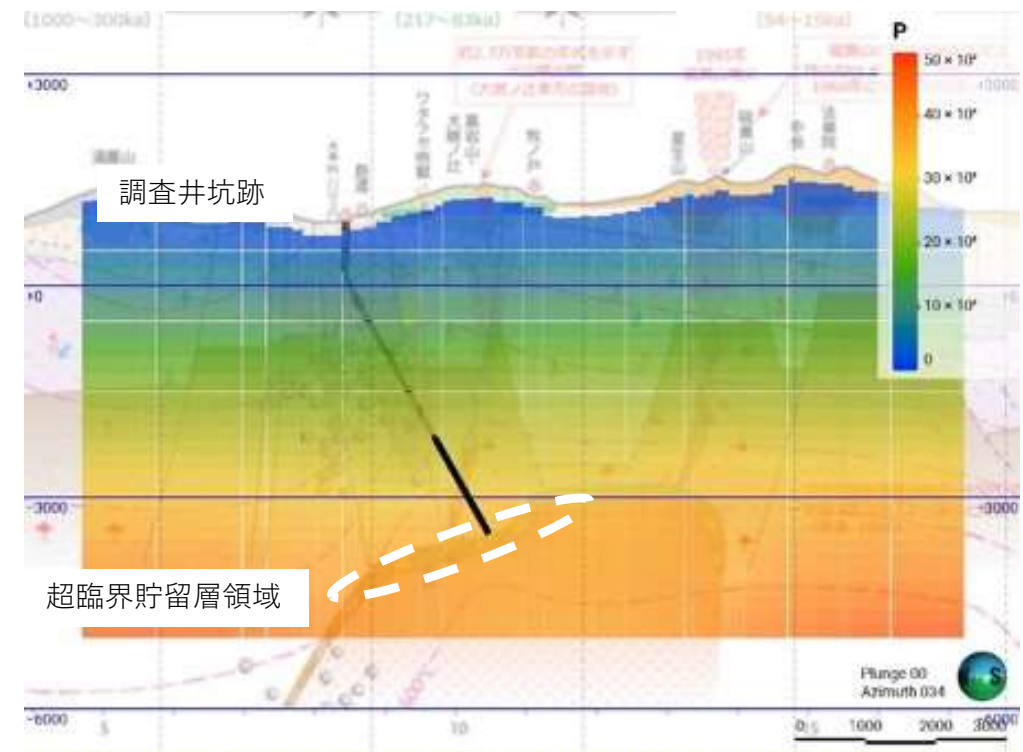
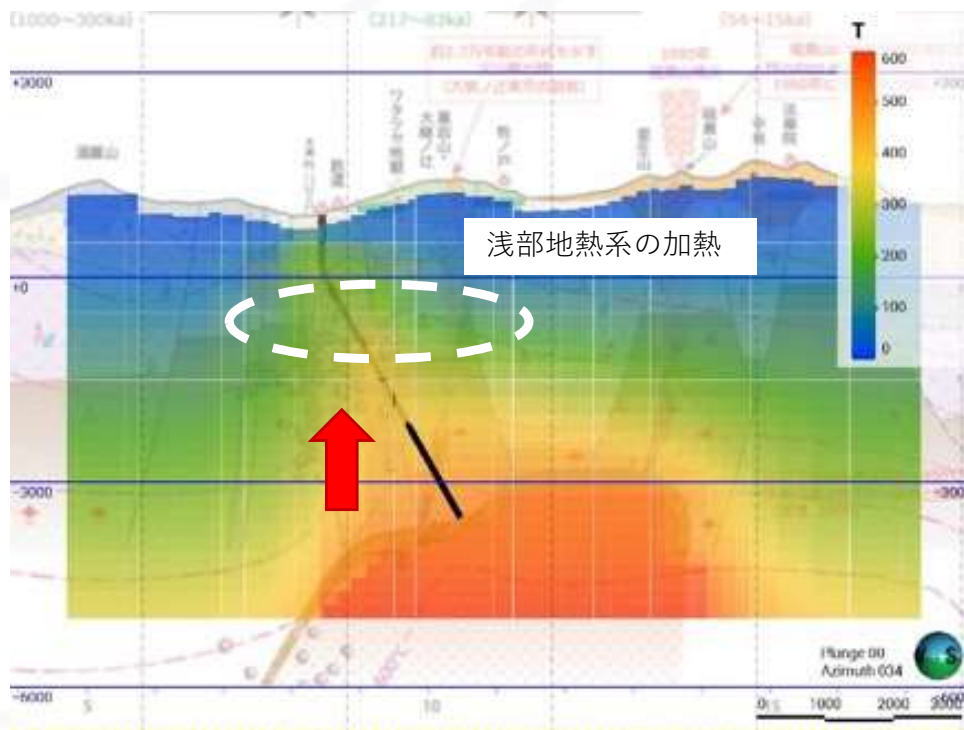
○超臨界貯留層領域の浸透率: 1.0×10^{-15} [m²]

(バイズ推定結果に基づく浸透率)



研究開発項目②：資源量評価

自然状態モデルの温度分布（左）及び圧力分布（右）

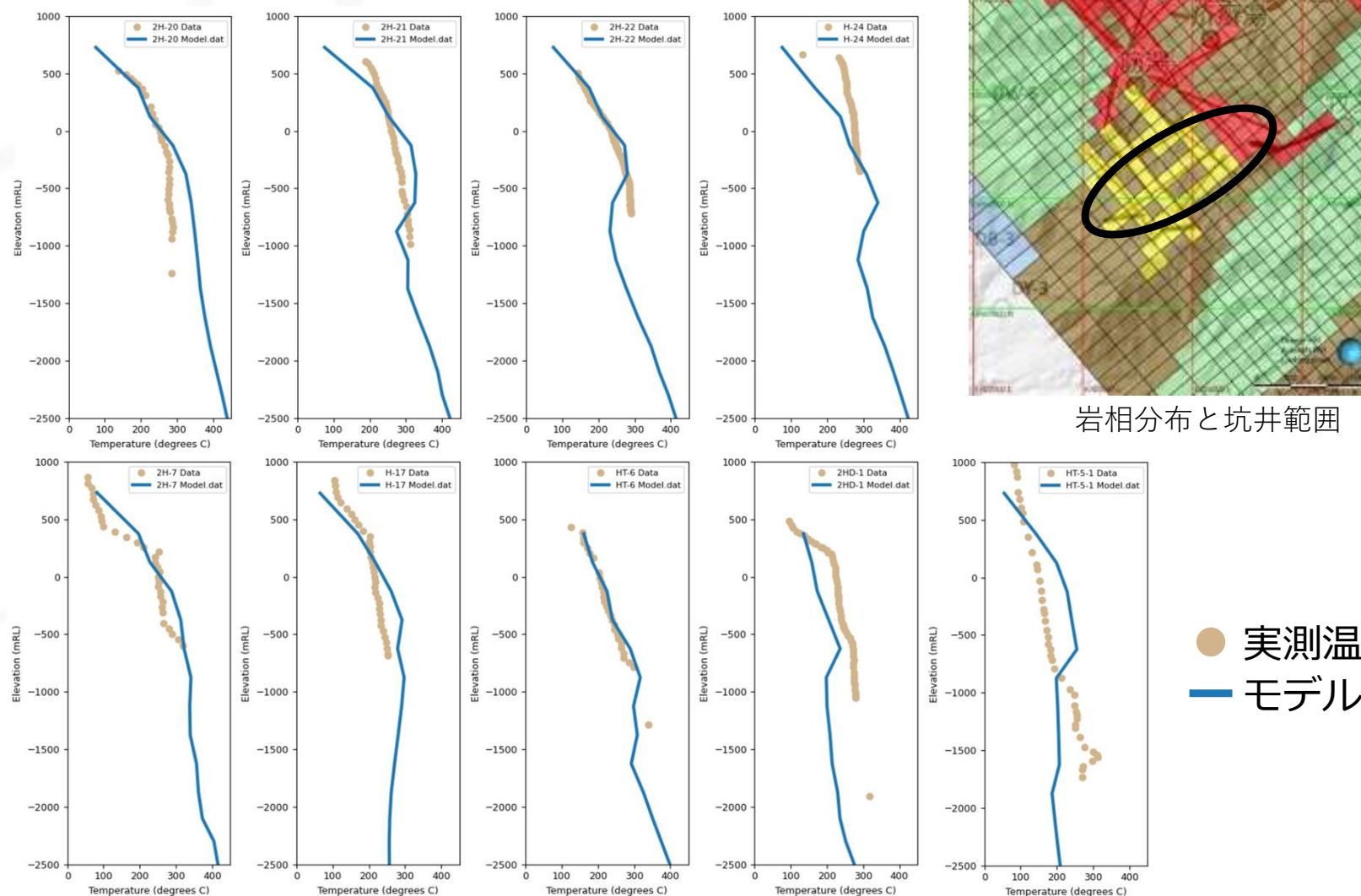


浅部地熱系を再現できる自然状態モデルが構築された。

自然状態シミュレーションから圧力分布が得られ、超臨界貯留層領域の圧力は35MPa程度と推定された。

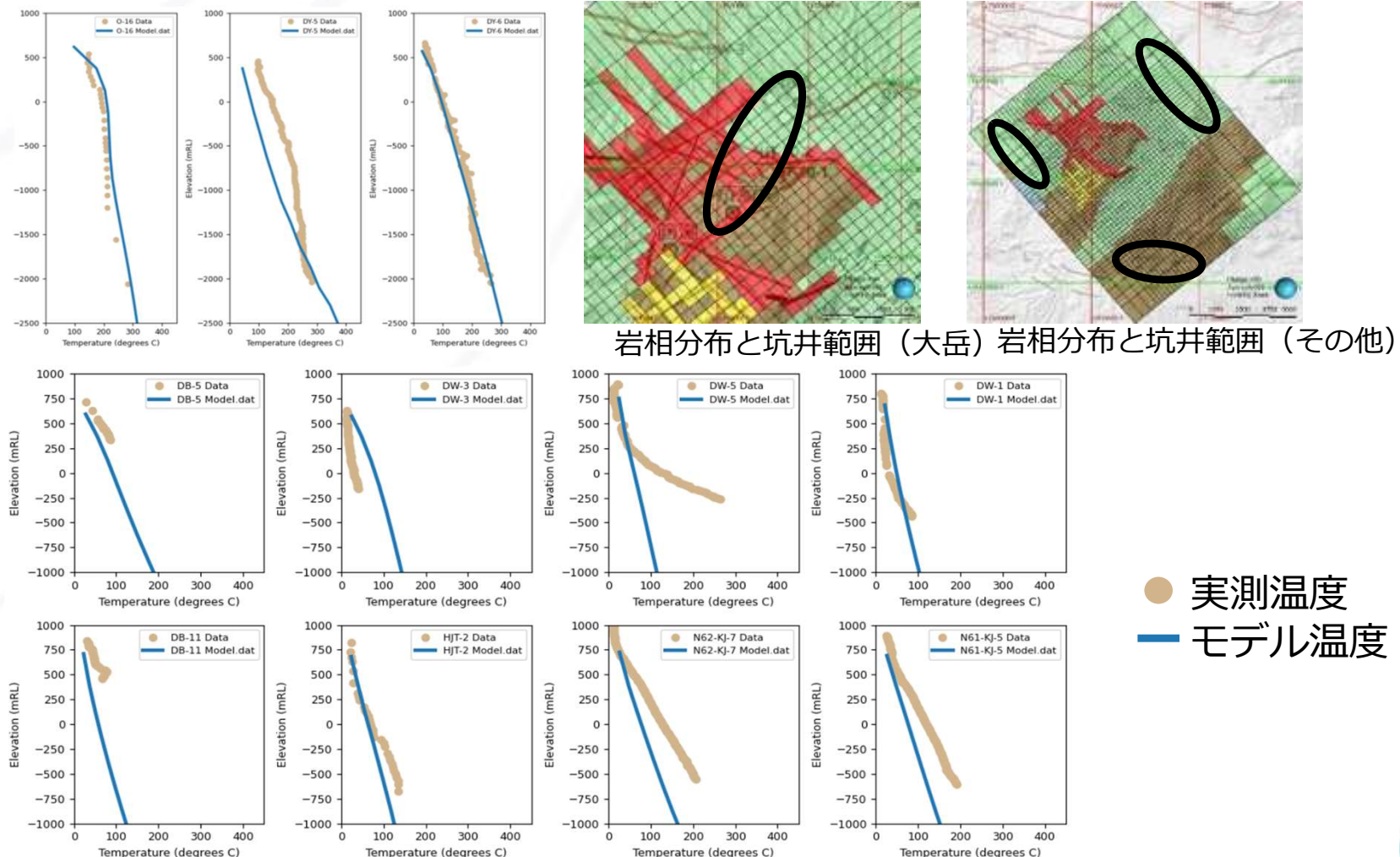
研究開発項目②：資源量評価

坑井温度とのマッチング(八丁原周辺)



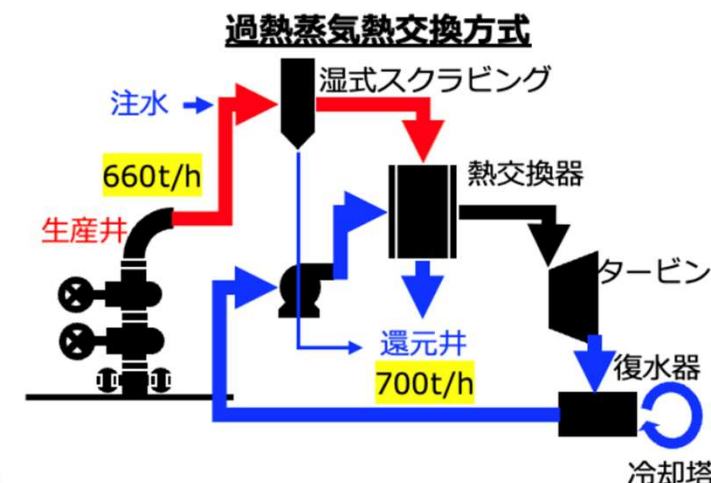
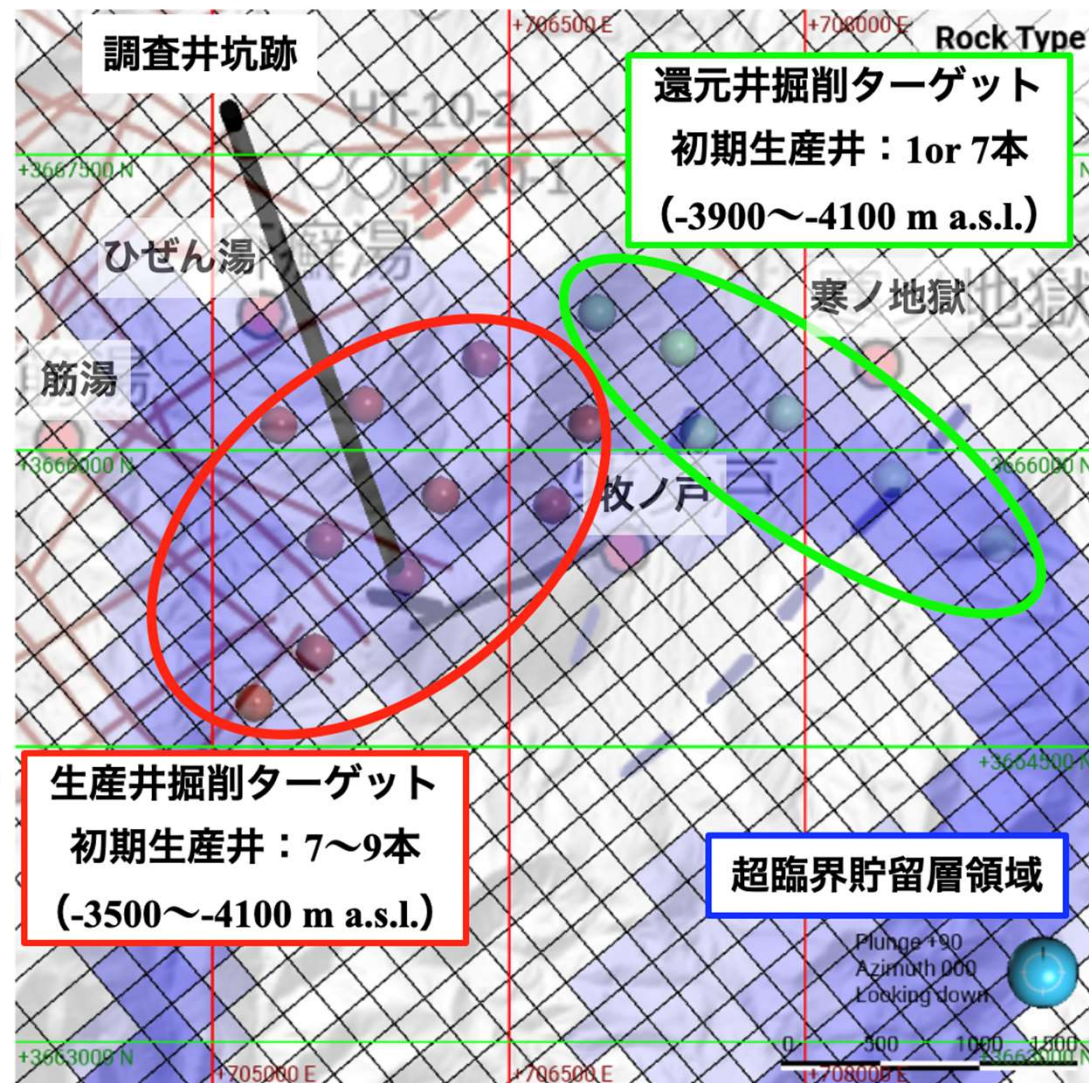
研究開発項目②：資源量評価

坑井温度とのマッチング(大岳周辺およびその他の領域)

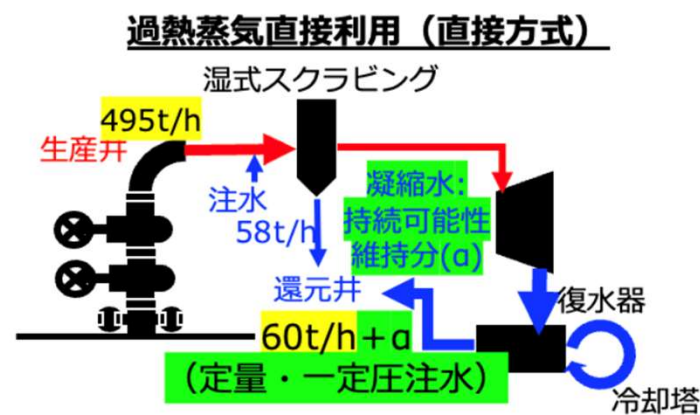


研究開発項目②：資源量評価

生産シミュレーション



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

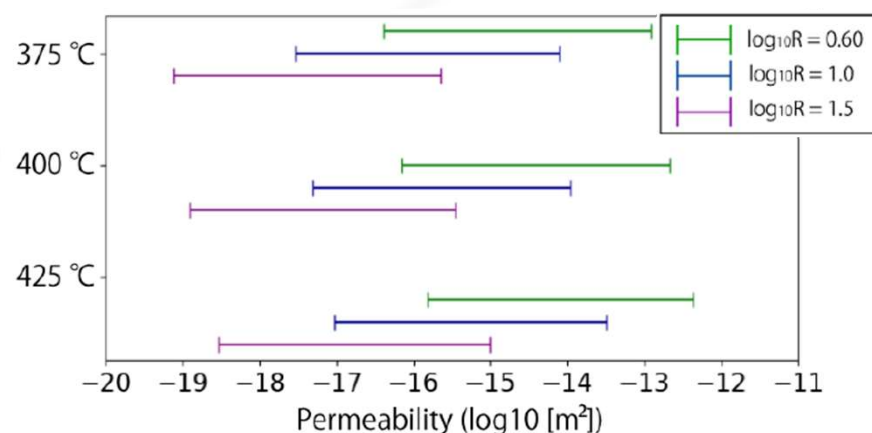


利点：生産井・還元井の数抑制
欠点：持続可能性の維持困難

研究開発項目②：資源量評価

生産シミュレーションシナリオと計算結果

貯留層モデルNo.	貯留層浸透率 (m ²)	孔隙率 (%)	熱交換方式による100MWe発電	直接利用方式による 100MWe発電
1	1×10^{-15}	4.2	△ 100MWe、30年間の生産は困難だが 数十MWe、30年の維持は可能(※)との結果	
2	5×10^{-14}	6.4	○	○
3	1×10^{-16}	2.7	△ 圧力減衰が大きく、30年間の生産は困難	



九重地域の浸透率推定結果（項目①-(g)）

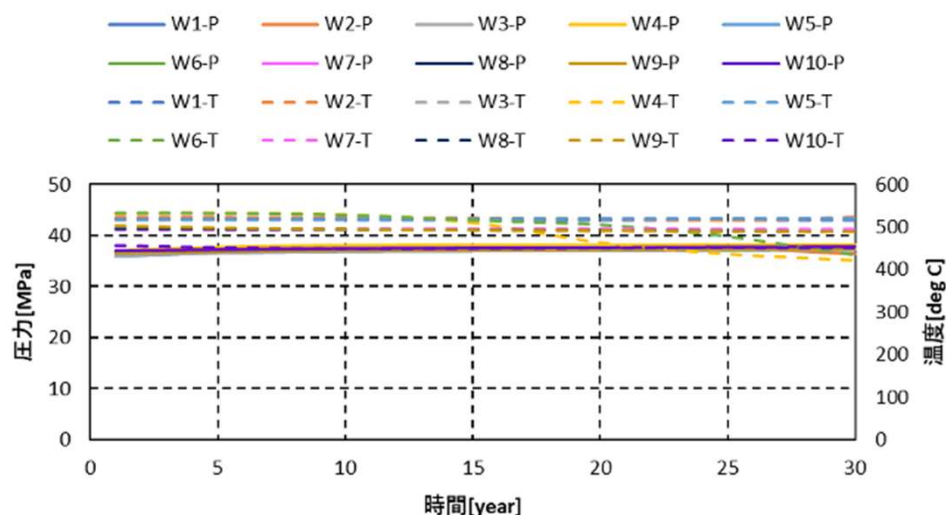
生産開始から30年経過時点において、100MWeの発電に相当する蒸気生産が可能かどうかに基づいて、ケース毎の評価を行った。

研究開発項目②：資源量評価

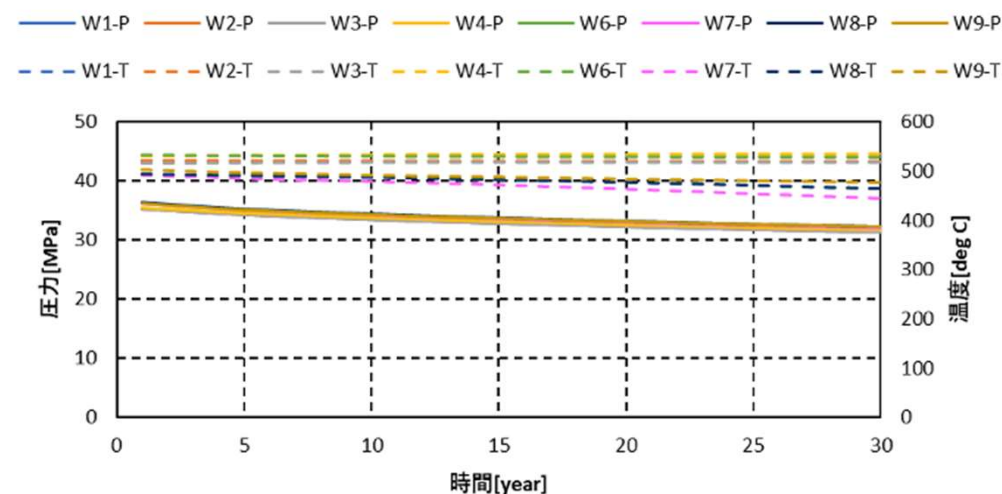
生産シミュレーションシナリオと計算結果

貯留層モデル NO.	貯留層浸透率	孔隙率	熱交換方式による 100MWe発電	直接利用方式による 100MWe発電
2	$5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$	6.4%	○	○

過熱蒸気熱交換方式（生産量：660 t/h, 還元量：700 t/h）



過熱蒸気直接利用方式（生産量：495 t/h, 還元量：60 t/h）



30年経過時点の生産ブロックの温度・圧力から、生産能力を推定した（坑内流動シミュレーション）。
⇒いずれの発電方式についても、30年経過時点における100 MWeの発電に相当する蒸気
生産が可能であると推定された。



研究開発項目②：資源量評価

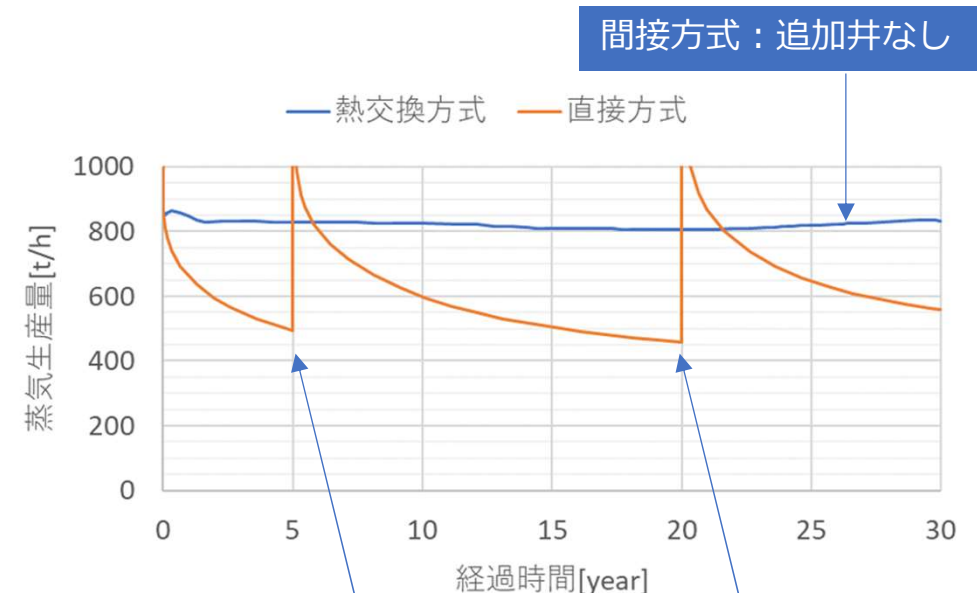
開発シナリオを想定した生産予測シミュレーション

- 以下の仮定で生産予測シミュレーションを実施
坑底圧力一定生産オプションを適用
P.I. : $1.0 \times 10^{-11} \text{ m}^3$
熱交換方式の坑底圧 : 31.4 MPa
直接方式の坑底圧 : 0-5年→31.4 MPa、5-20年→29.7 MPa、20-30年→27.5 MPa
(初期状態および生産井追加のタイミングにおいて、貯留層圧力に基づいた坑底圧。)
- 必要蒸気量の95%を下回ったタイミングを目途に、補充井相当の生産ブロックを追加

	熱交換	直接利用
必要蒸気量	660 t/h	495 t/h
還元量	700 t/h	60 t/h
追加涵養量	-	-
初期生産井	2本	2本
追加井	0本	2本
還元井	7本	1本
涵養井	-	-

貯留層モデル2：楽観ケース（100 MWe）

超臨界貯留層の透水性が $5.0 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ と、貯留層モデル1に対し高いケースで、100 MWeの生産・還元で30年間継続した。



直接方式：5年経過、20年経過時点で補充井を追加



【構造調査試錐 掘削ターゲット】

- 推定地下温度300℃を超える区域
- 微小地震が集中する区域
- 断層の存在が推定される区域
- 深部地熱流体・火山ガスの推定上昇域

【構造調査試錐掘削の目的】

掘削中及び掘削後の調査試験で取得されるデータを用いて地熱系概念モデルを更新し、深部貯留層の存在可能性の検証 及び存在可能性区域の精緻化を行う。また、精緻化された地熱系概念モデルに基づき、調査井の掘削ターゲット選定及び掘削計画を策定する。構造試錐井掘削により得られるデータは、調査井の掘削計画の適正化に用いる。超臨界地熱貯留層から断層を通じて上昇している流体を構造調査試錐井で捉え、この流体の性状を確認する。

【超臨界地熱調査井 掘削ターゲット】

- 推定地下温度400℃を超える区域
- 高塩分濃度の流体の流入、火山性ガスの存在区域
- 推定地下温度400℃を超え断層の存在が推定される区域

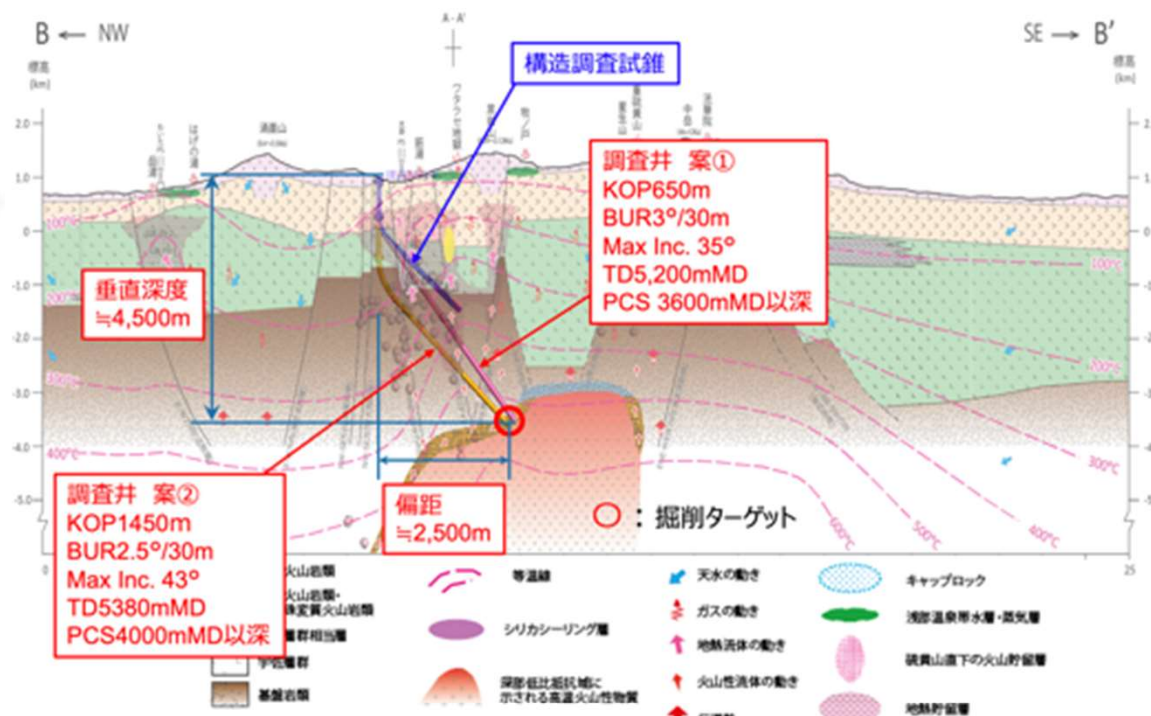
【地熱調査井掘削の目的】

超臨界地熱資源存在を実証する。掘削中及び掘削後の調査・噴気試験で取得されるデータを用いて地熱系概念モデルを更新・精緻化を行う。また、将来の坑井掘削・仕上げ技術及び発電設備等商用化に向けた研究開発に資するため、資機材評価に関連する一連の試験を実施する。



研究開発項目③④：深部構造調査試錐及び調査井仕様の検討

深部構造調査試錐及び調査井仕様の検討



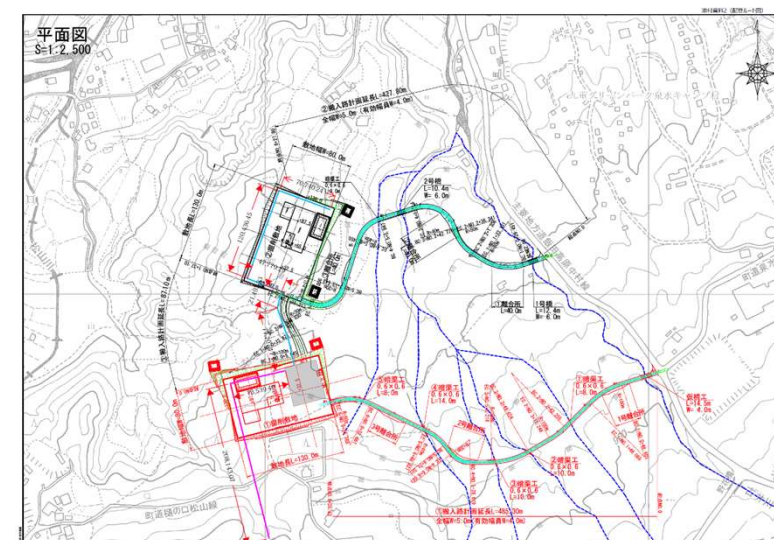
ランク	項目
A	01:掘削データ・パラメータ (全区間)
	02:カッティングス試料観察・記載 (5m間隔)
	03:カッティングス試料分析 (偏光顕微鏡観察、EPMA、XRD、流体包有物試験)
	04:フォーメーションインテグリティテスト (FIT)
	05:定方位コアリング及びコア試験 (8-1/2"坑; 手佐層群・基盤岩類 (各1深度))
	06:LWDによる比抵抗・密度・音波計測 (8-1/2"坑)
	07:坑壁画像検層(8-1/2"坑)
	08:温度回復試験 (TD到達後、アCSG挿入後)
	09:注水試験 (TD到達後、アCSG挿入後)
	10:長期放置後温度圧力検層
	11:坑内水採取及び化学分析 (TD到達後、アCSG挿入後)
	12:周辺既存坑井との圧力干渉試験
	13:トレーサー試験 (周辺生産井で採取)
B	01:TLC後のBlind Drillingの場合の地質試料採取 (ジャンクサブorコアリング)
	02:12-1/4"坑TD到達後の温度回復試験
	03:12-1/4"坑の比抵抗検層
	04:低比抵抗ゾーンにおける定方位コアリング及びコア試験 (12-1/4"坑もしくは8-1/2"坑)
C	

確実に実施する項目 (Aランク)
可能であれば実施したい項目 (Bランク)
余裕があれば実施したい項目 (Cランク)

研究開発項目⑤：経済性評価

研究開発項目③④：深部構造調査試錐及び調査井仕様の検討

ケース	発電単価 (円/kWh) [30年間平均]	総建設費 (百万円)	初期生産井数	初期還元井数
50MWe 直接 貯留層モデル1	26.5	114,802	7	2
50MWe 熱交換 貯留層モデル1	32.9	130,025	7	4
100MWe 直接 貯留層モデル2	9.3	72,894	2	1
100MWe 熱交換 貯留層モデル2	18.9	127,973	2	7



50 MW_eのケースでは、発電単価が高額となるため、100 MW_eの出力が得られるポテンシャル/貯留層の透水性があるかどうか鍵となる。

100 MW_eの直接利用方式以外のケースでは掘削コストが総建設費の内、64～76%を締めているため、掘削費用の削減が単価低減のためには必要と考えられる。

- 大分県九重地域において超臨界貯留層の形状や広がりを見定するために複数の地球物理学的調査を行った。得られた結果と既存調査結果を統合して本地域の地熱系概念モデルを改良し、精緻化することができた。
- 自然状態シミュレーションから、八丁原地域や大岳地域を中心とした、浅部地熱系を再現する自然状態モデルが得られた。
- 30年間の蒸気生産を維持可能な発電規模に相当する蒸気生産量について生産シミュレーションを行って検討した結果、貯留層の浸透率が $5 \times 10^{-14} \text{ m}^2$ の場合100 MW_eを維持できる可能性が高いことが推定された。
- 精緻化された概念モデルに基づいて構造試錐及び調査井の掘削ターゲットを選定した。
- 100 MW_eの蒸気生産を維持できるモデル2の発電単価は直接方式で9.3円/kWh、間接方式で18.9円/kWhと推定された。

研究開発項目①

観測結果や地熱系概念モデルの検証

研究開発項目②

自然状態及び生産シミュレーションの改良

研究開発項目③④

深部高温領域の掘削

掘削コスト

開発中のツールの高温下での性能

研究開発項目⑤

経済性評価（低コスト化の検討）