

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.2

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（湯沢南部地域）

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 清水 正太

団体名 日鉄鉱コンサルタント（株）

問い合わせ先 日鉄鉱コンサルタント E-mail: chinetsu@nmconsults.co.jp

1. 背景・目的

NEDO先行研究開発で賦存範囲と資源量の試算結果が示された秋田県湯沢南部地域を対象として、超臨界水状態把握および資源量評価技術のさらなる高度化を図り、超臨界地熱資源の試掘に向けた実効性のある調査・評価技術の完成を目指すこと、100MW規模の資源量を抽出することを目的とする。

2. 実施期間

2021年6月 ～ 2024年3月

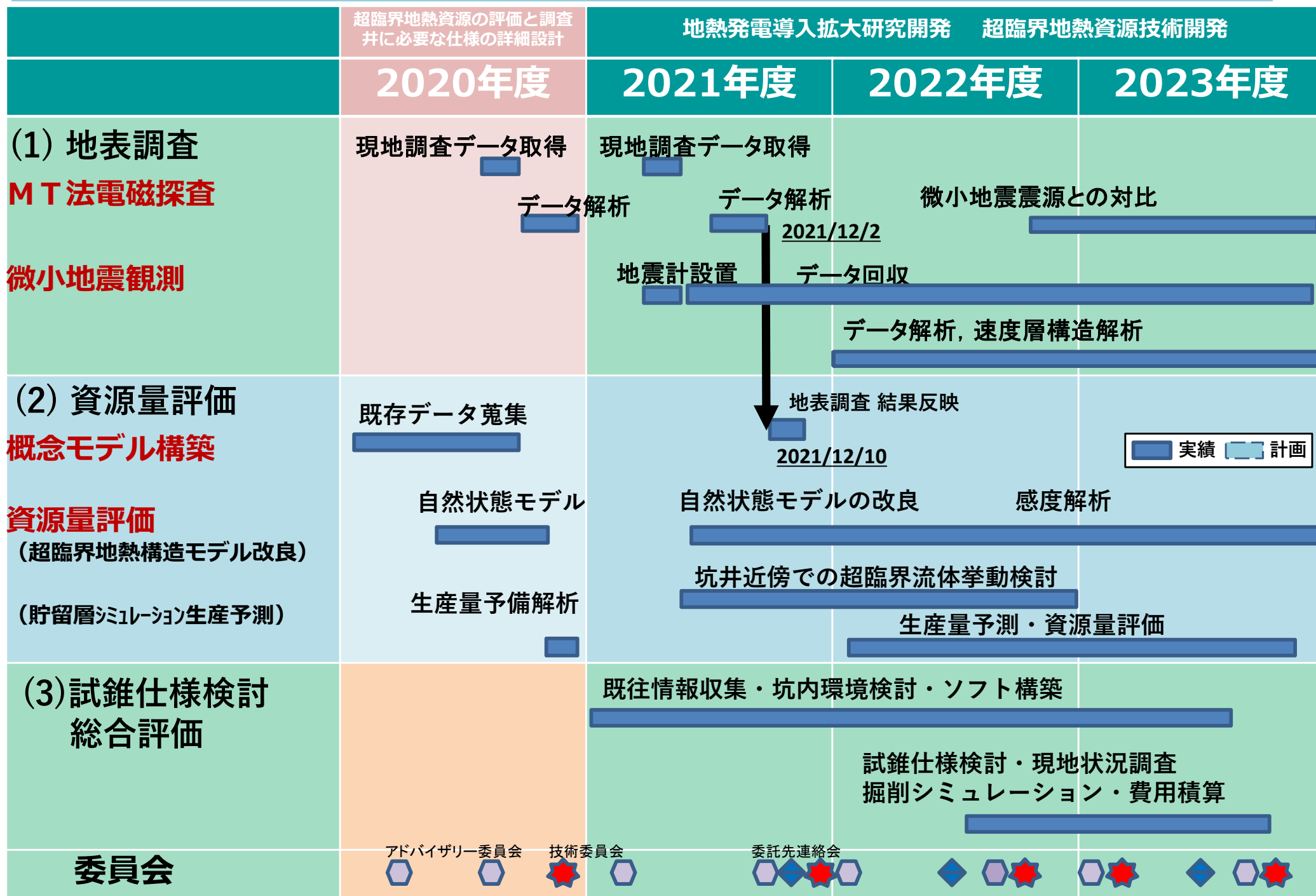
3. 実施内容・目標

- MT法探査および微小地震探査を行い、超臨界地熱系概念モデルを改良する。
- 詳細で精緻な数値シミュレーションを行うことにより超臨界領域を推定し、超臨界地熱資源の資源量および発電規模を定量的に評価する。
- 深部構造調査試錐および超臨界地熱調査井の仕様やHSEを策定する。

4. 成果・進捗概要

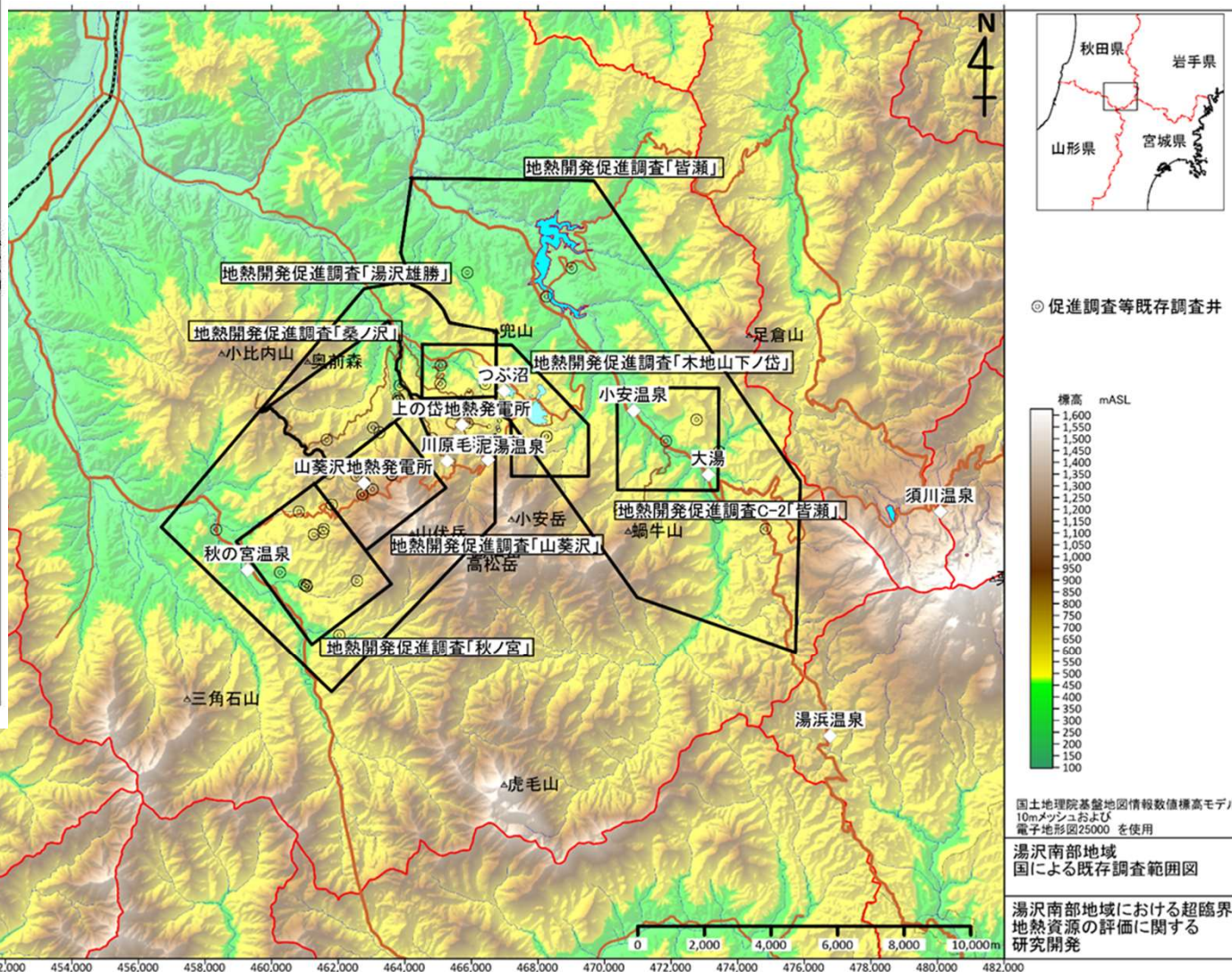
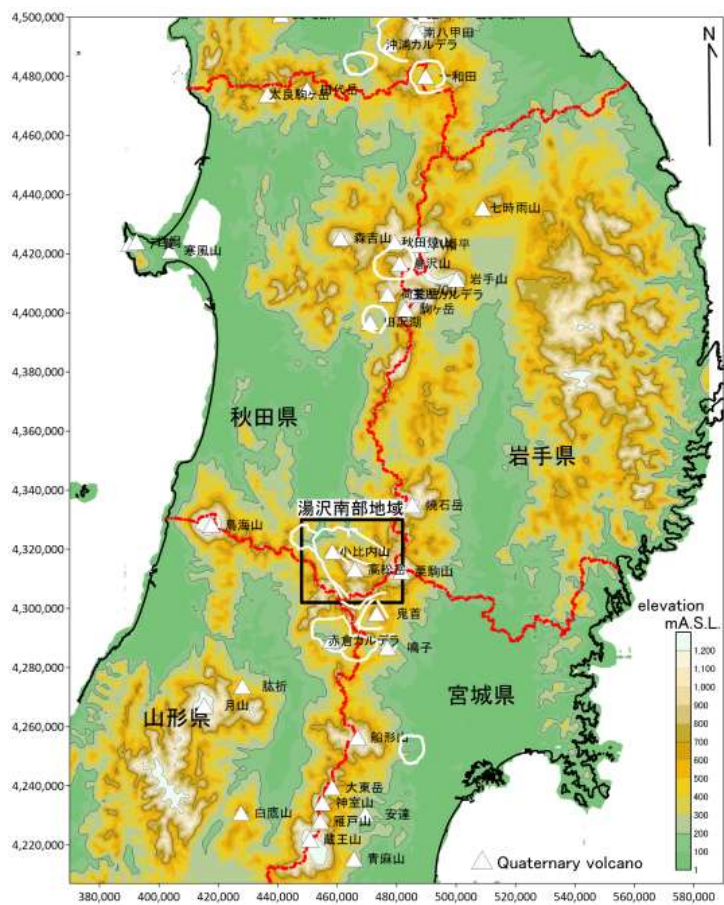
- 湯沢南部地域の深部（地下5km以浅）に超臨界流体が賦存することを推定。
- 100MW規模の発電が可能となる用件を整理。
- 資源量評価に基づき、坑井仕様や経済性評価を実施。

研究内容と工程



調査位置

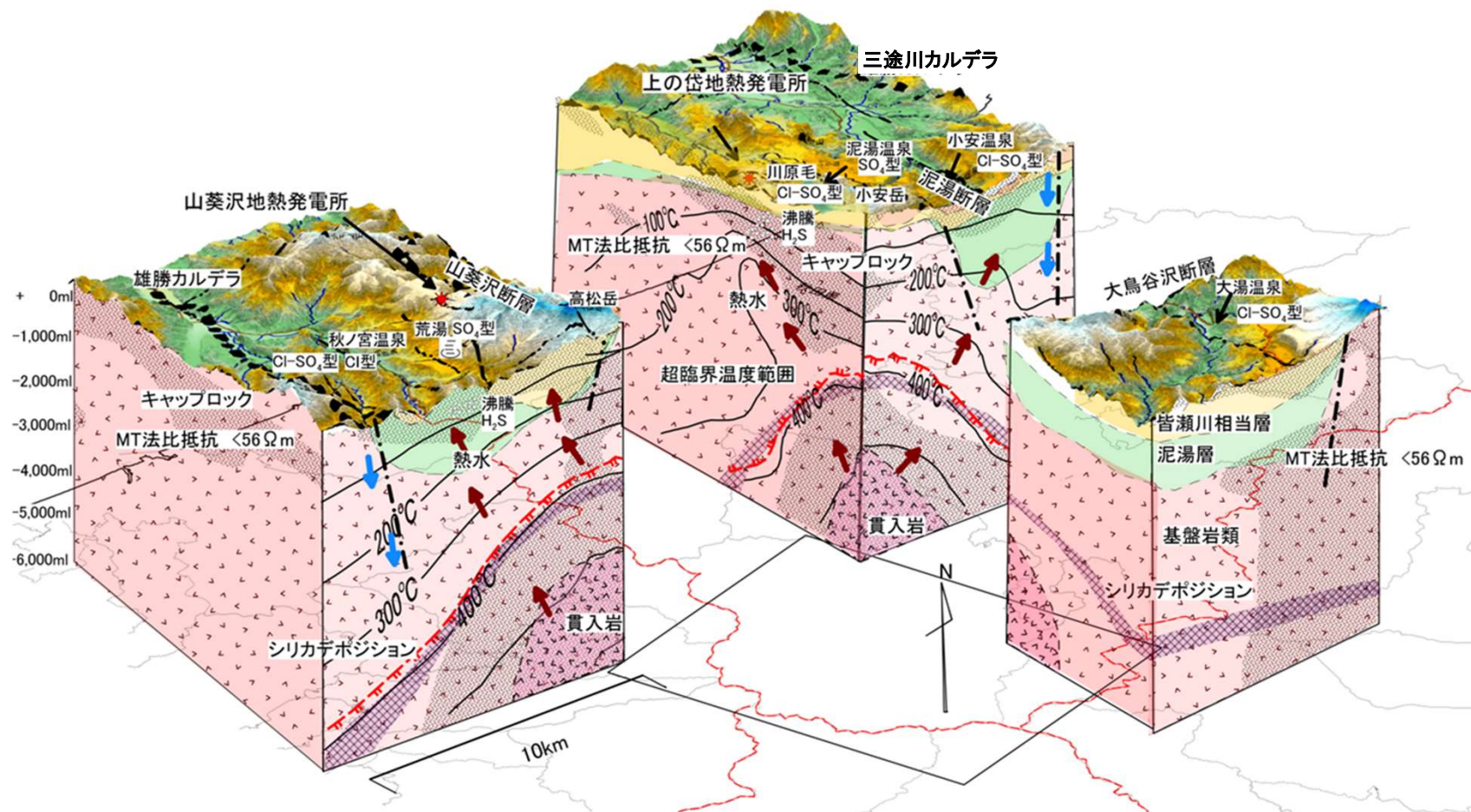
本地域には以下の地熱発電所が位置。
 「上の岱地熱発電所」平成6年(1994年)3月
 「山葵沢地熱発電所」令和元年(2019年)5月
 「かたつむり山発電所」2027年運転予定



湯沢南部地域における過去のNEDO促進調査範囲と既存地熱発電所位置

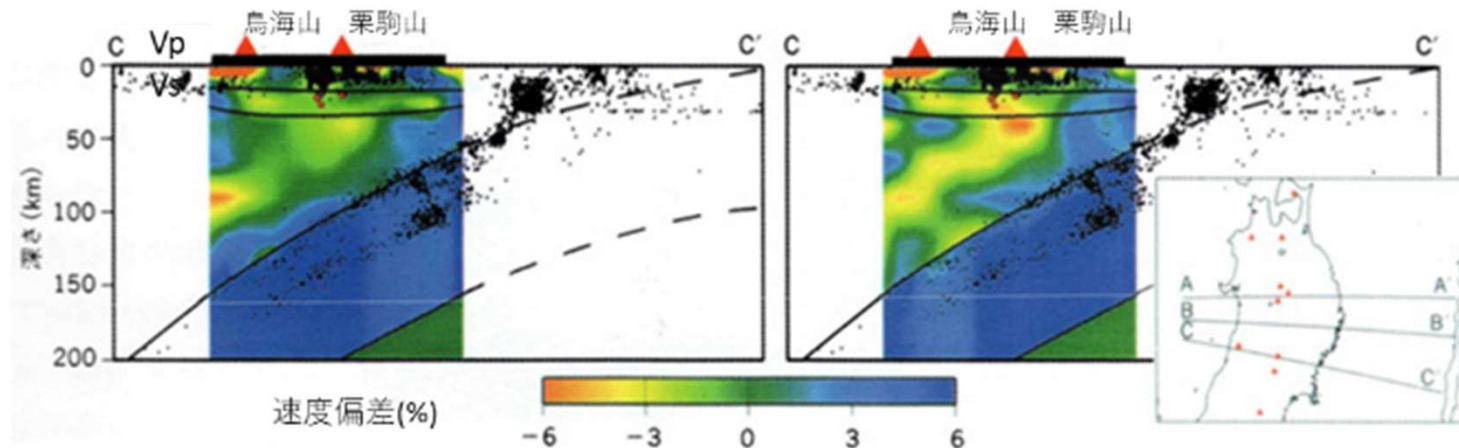
地質構造と地表兆候

- 高松岳火山岩類に関係するマグマ溜まり (0.4~0.2Ma) が熱源。
- 鬼首-湯沢マイロナイト帯 (笹田, 1988) に沿って、鳴子火山、鬼首カルデラ、三途川カルデラ (竹野, 1986) が連なる。
- 三途川カルデラ内には川原毛、泥湯、新湯、赤湯又沢、湯ノ又温泉、小安温泉、大湯、秋ノ宮温泉等の地熱兆候が広く分布。布原ほか(2021; 2024)では変質帯等の地表兆候やTLデータ、微小地震震源分布から、川原毛から赤湯又沢付近に最も熱的影響がある範囲と推定。
- 湯沢南部地域では基盤岩の隆起に伴い発達したフラクチャーが地熱流体の流路となっている。



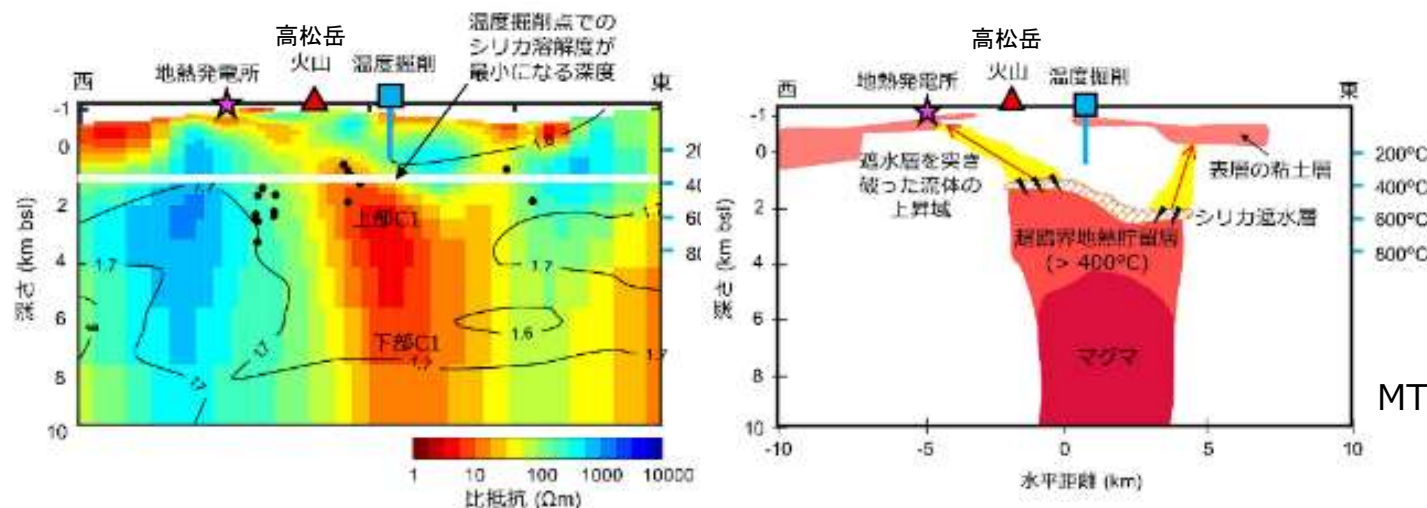
深部流体の供給

- 弾性波速度断面ではマントルウェッジの100km程度の深さからP波低速度帯、S波低速度帯が栗駒山深部に伸びる。低速度帯は沈み込んだ海洋地殻の相転移に伴って供給された水の上昇経路を示す(長谷川, 2002)。



弾性波速度断面(長谷川, 2002)

- Ishizu et al. (2022)では湯沢南部地域（高松岳）の深部に低比抵抗帯を推定し、坑井温度や地質情報等からこの深部低比抵抗帯の上部は超臨界地熱貯留層を表していると結論づけている。



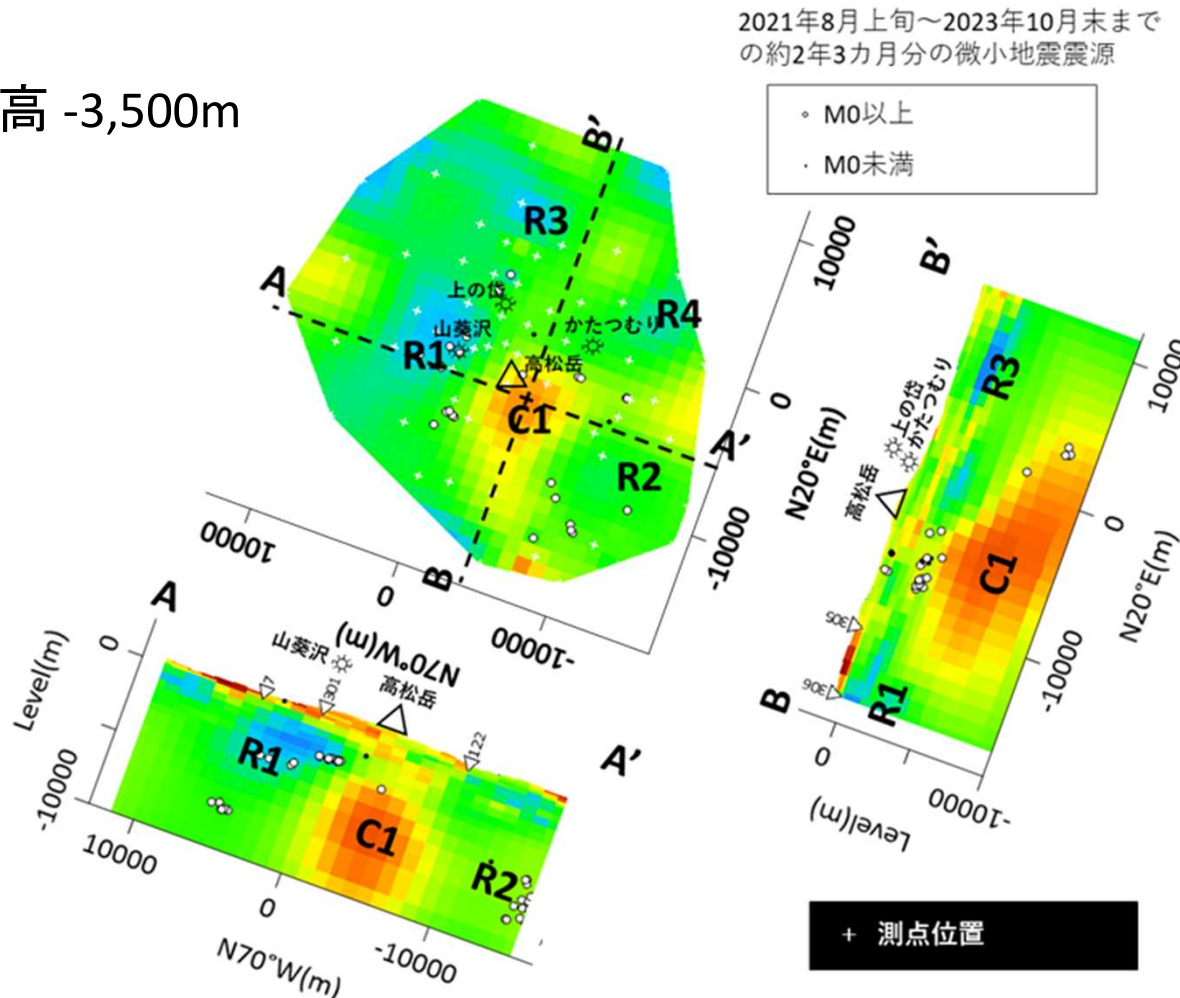
MT法比抵抗断面 (Ishizu et al., 2022)

比抵抗構造と微小地震の震源分布

- MT法探査および微小地震観測を実施した結果、既往研究と同様に高松岳の深部に低比抵抗帯を推定。
- 微小地震の震源は低比抵抗領域には分布せず、低比抵抗領域を取り囲むように中～高比抵抗領域に分布する。

⇒深部低比抵抗帯は深部流体の存在を示唆している。

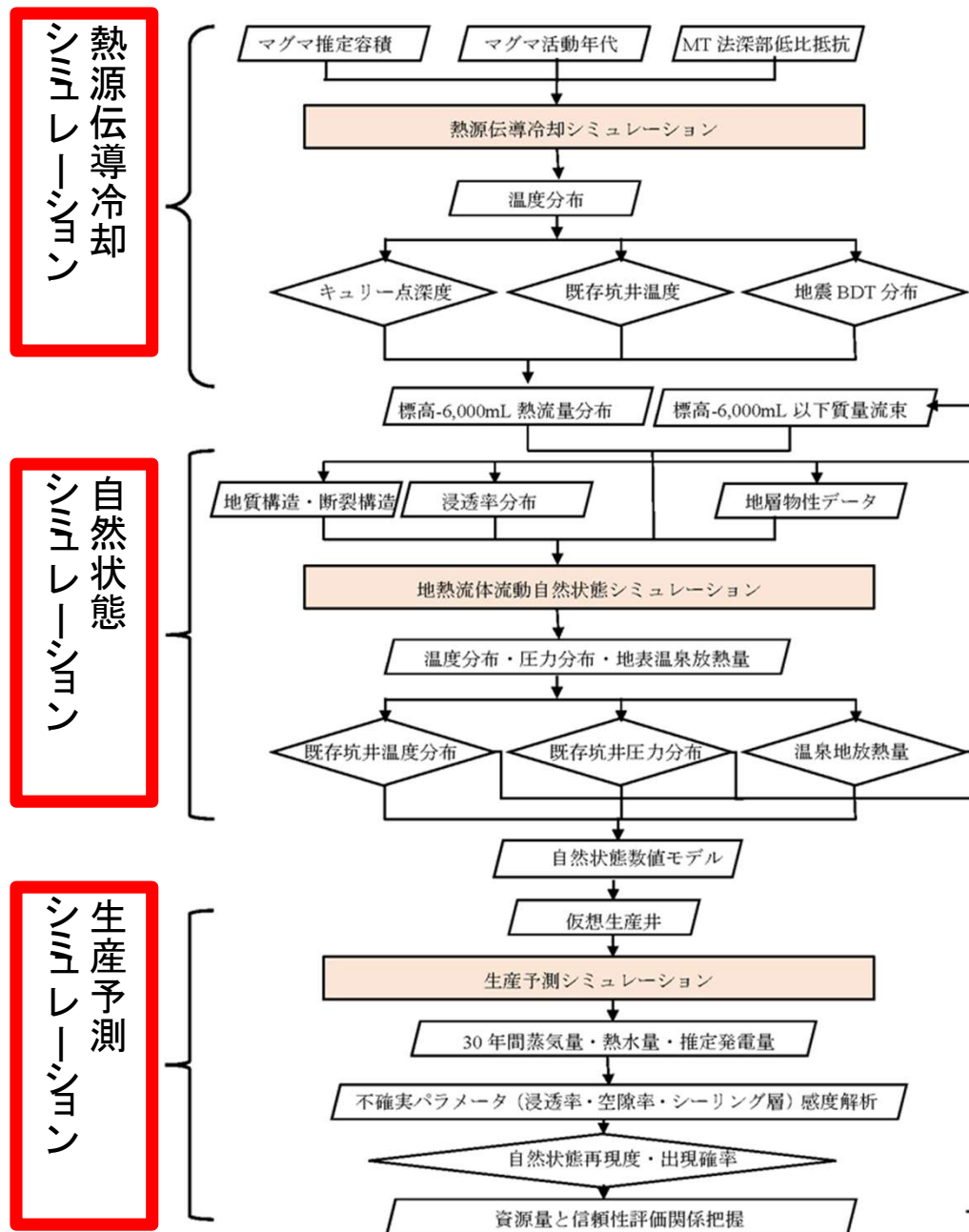
標高 -3,500m



資源量評価のプロセス

超臨界地熱の資源量評価にあたり、地下深部は不確定な要素が多いことから湯沢南部地域では大きく分けて3段階のシミュレーションを実施。都度、妥当性を確認しながら資源量評価を実施。

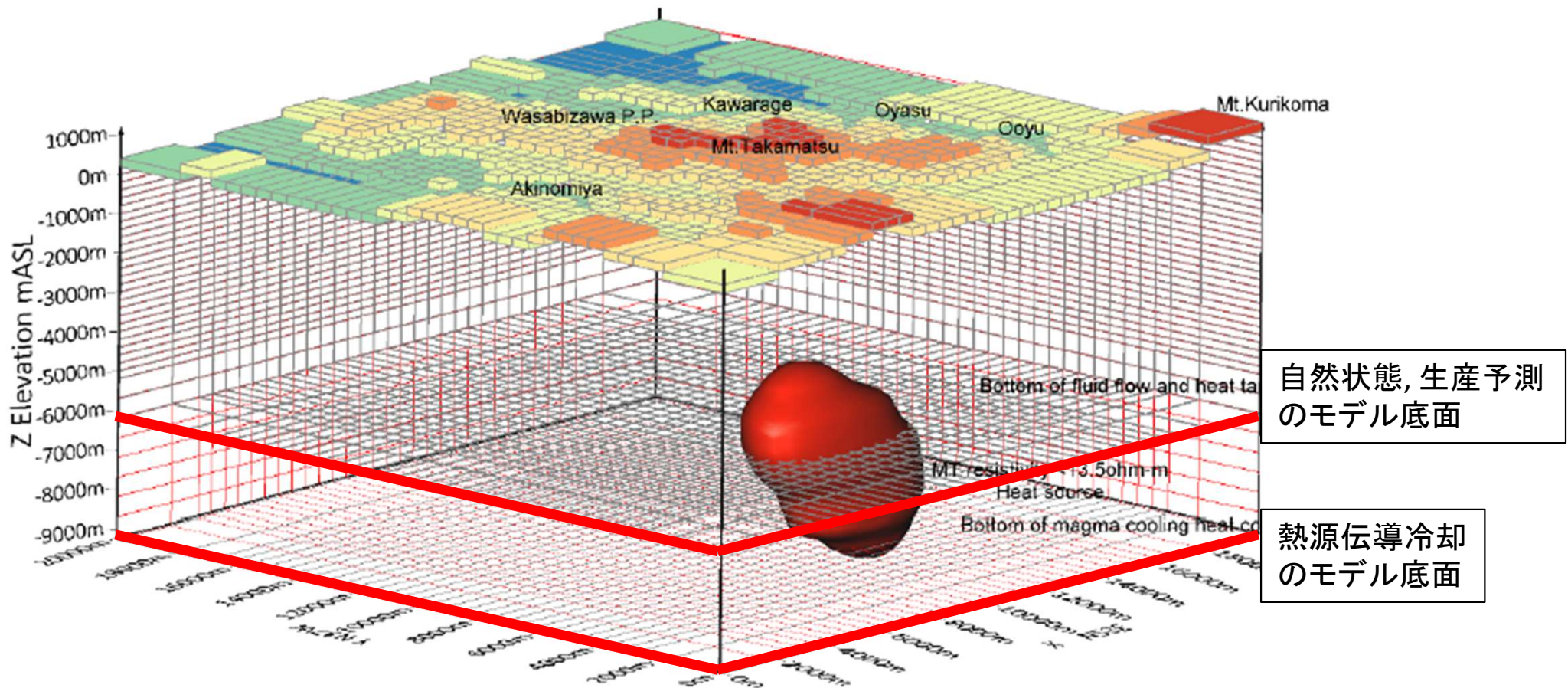
	段 階	目 的
①	熱源伝導冷却シミュレーション	マグマ溜まり(熱源)の推定
②	自然状態シミュレーション	超臨界領域の推定
③	生産予測シミュレーション	超臨界地熱の生産量および発電量の予測



シミュレーション範囲

NE×SW : 20km×20km (26km×26km)
深度 : 地表~-9,200mASL (熱源伝導冷却)
地表~-6,200mASL (自然状態, 生産予測)
分割数 : 32(NE)×32(SW)×34(深度)
34(NE)×34(SW)×41(深度)

ブロック : 500×500×200m
総ブロック数 : 34,801個 (42,818個)
南西, 北東, 南東 : 閉境界
地表, 北西 : 温度圧力一定境界
南西, 北東, 南東, 北西 : 閉境界



マグマ溜まりの推定(熱源伝導冷却シミュレーション)

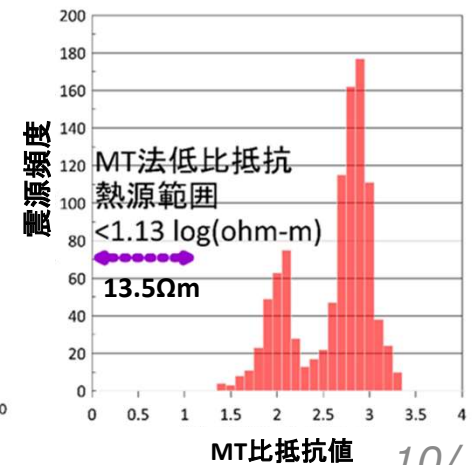
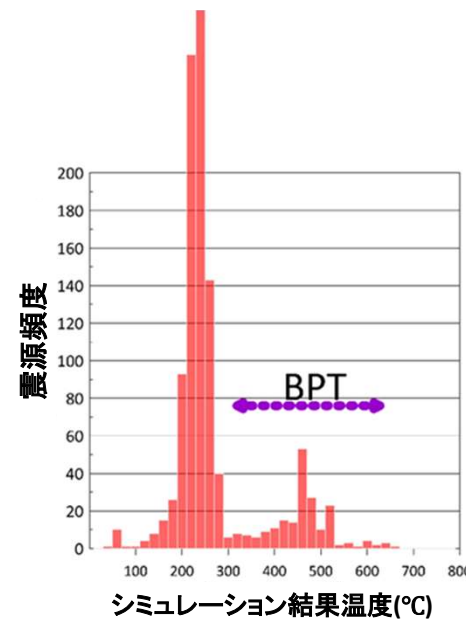
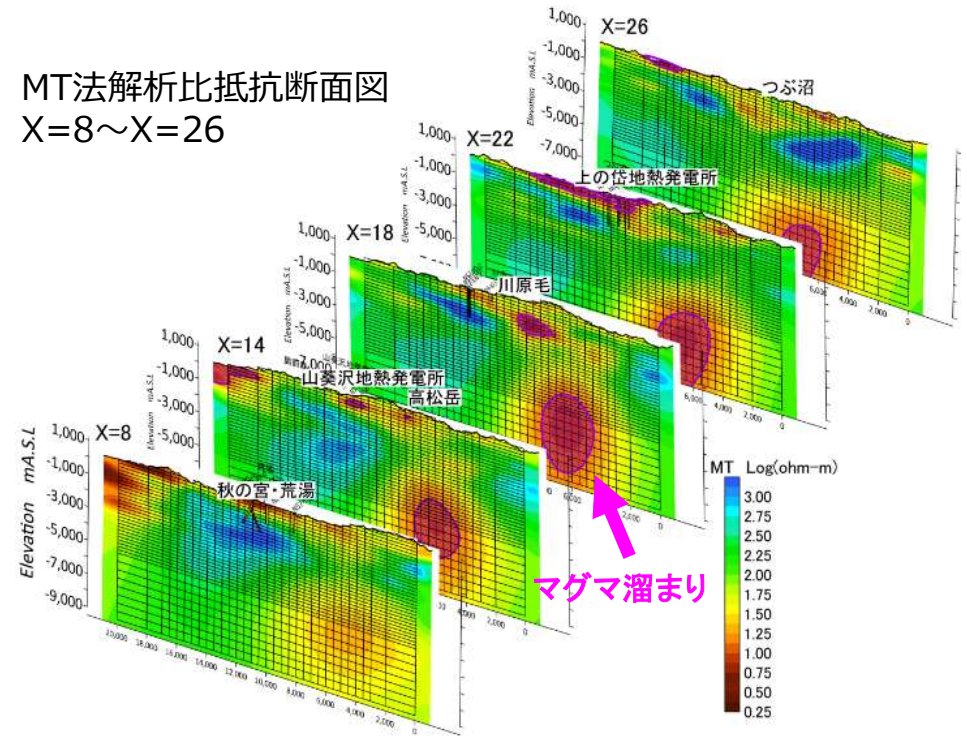
高松岳火山岩類及び兜山火山岩類から推定した噴出量 75km^3 に相当する容積をMT法解析結果と比較し、 $13.5\Omega\text{m}$ 以下をマグマ溜まりの位置と大きさと仮定。

このマグマ溜まり（熱源）を底部境界条件として計算。

- 脆性-塑性境界(BPT)温度で微小地震の震源頻度が減少。
- 600°C の範囲とキュリー一点深度(NEDO, 1984)が調和的。
- 熱伝導型の既存坑井の温度分布をよく再現。

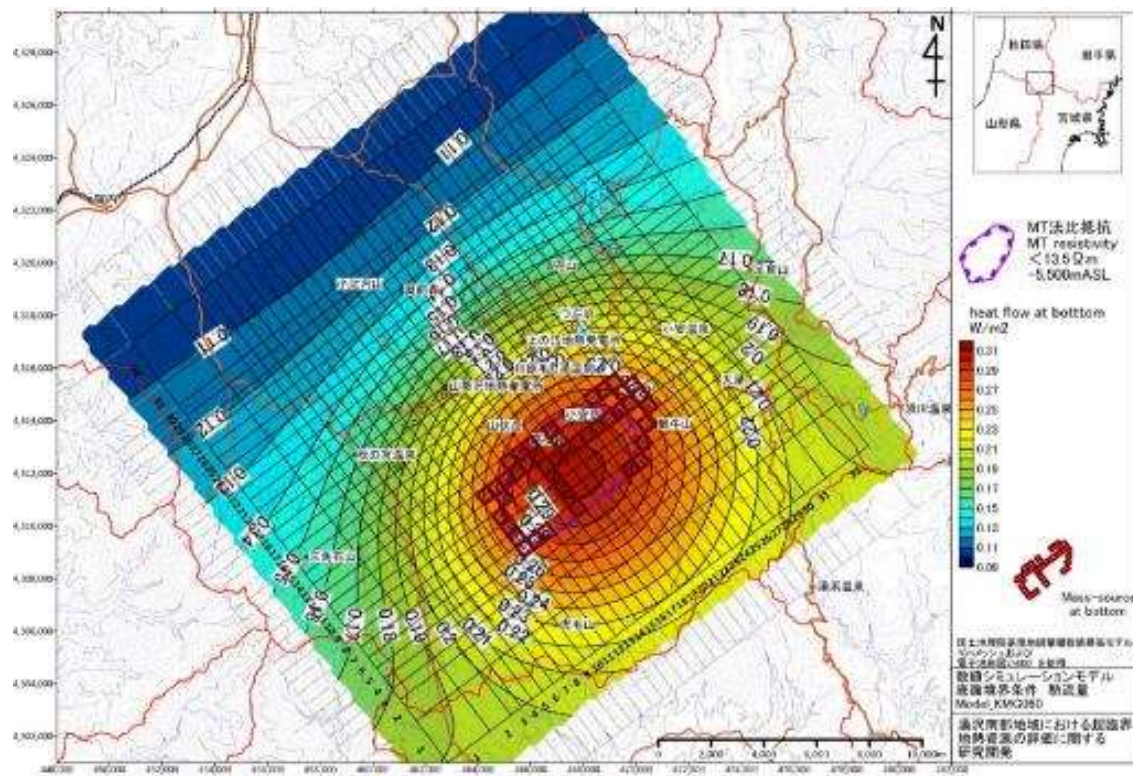
⇒ **MT法から推定した熱源の妥当性を確認。**

MT法解析比抵抗断面図
X=8~X=26

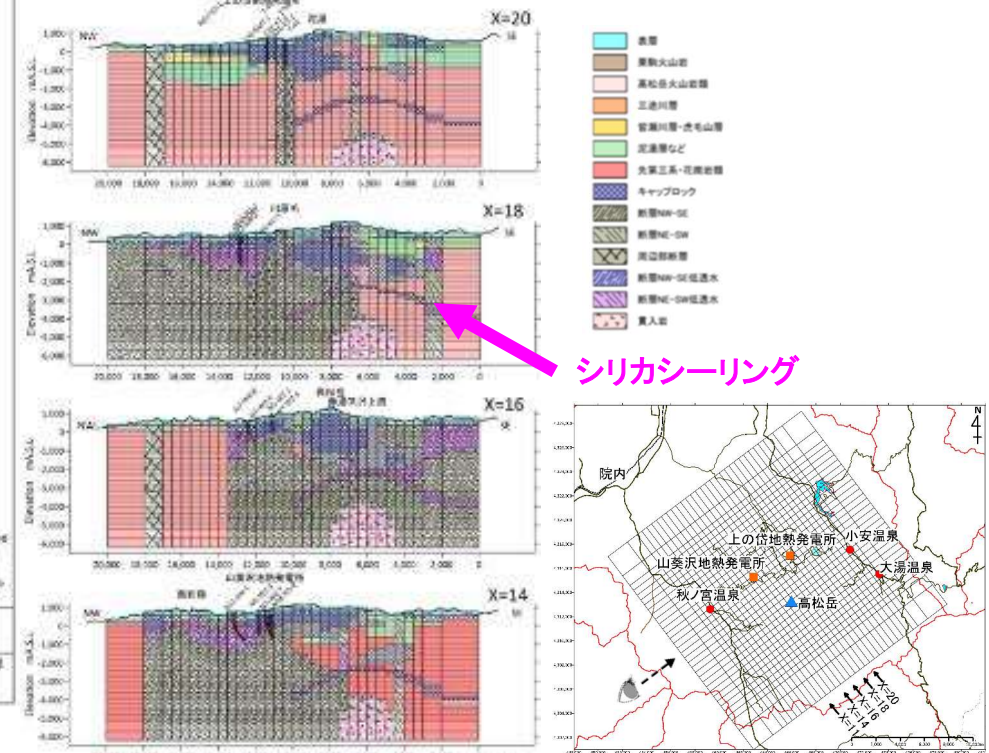


超臨界領域の推定(自然状態シミュレーション)

- 豊富な既存データから地質構造モデルを構築。
- 熱源伝導冷却シミュレーションにより底面境界条件(熱流量)を決定。また、400℃付近にシリカシーリングを設定。
- これら条件で自然状態シミュレーションを行い、試行錯誤的に最適モデルを選定。



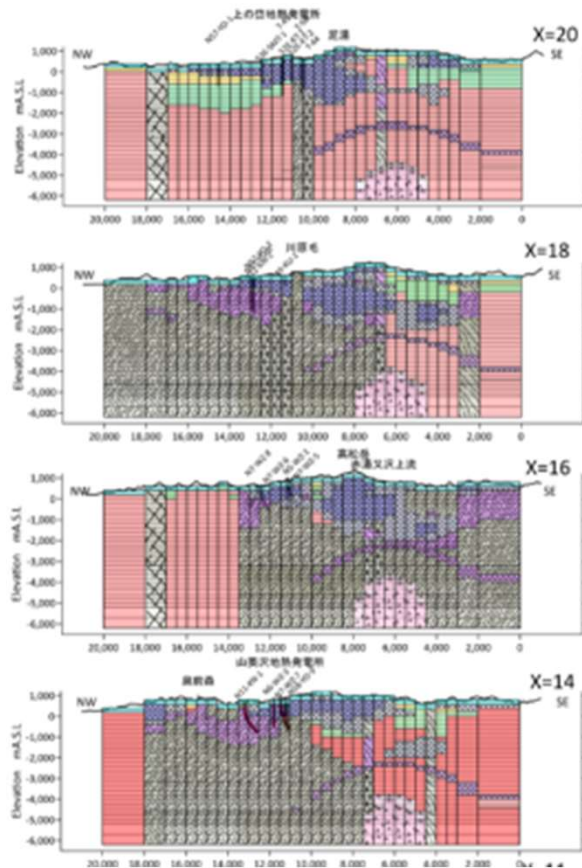
地質構造モデル断面



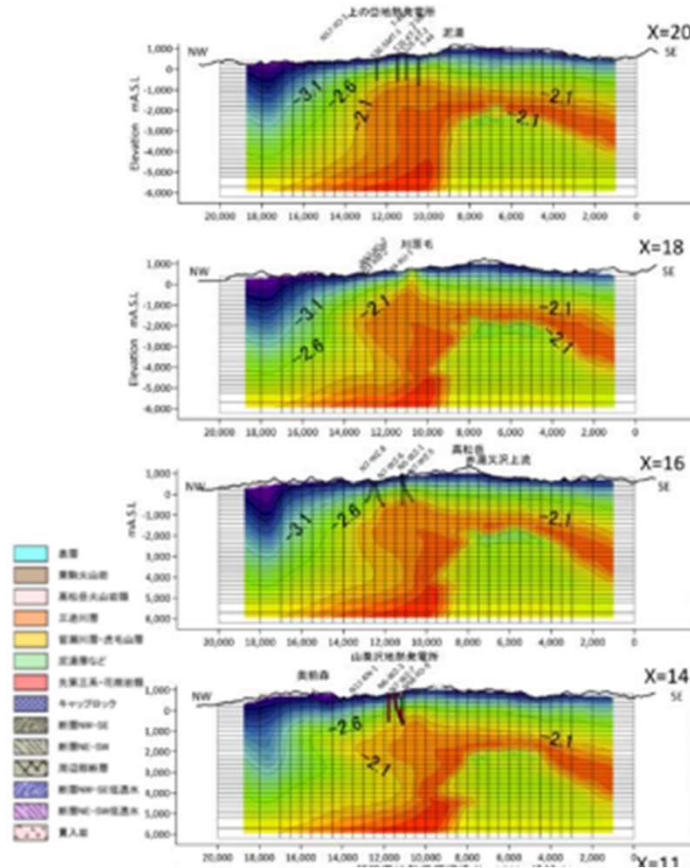
質量流束源（流体流入）42箇所
地表境界条件：温度压力一定
北西境界：温度压力一定
南東・南西・北東境界：閉境界

超臨界領域の推定(自然状態シミュレーション)

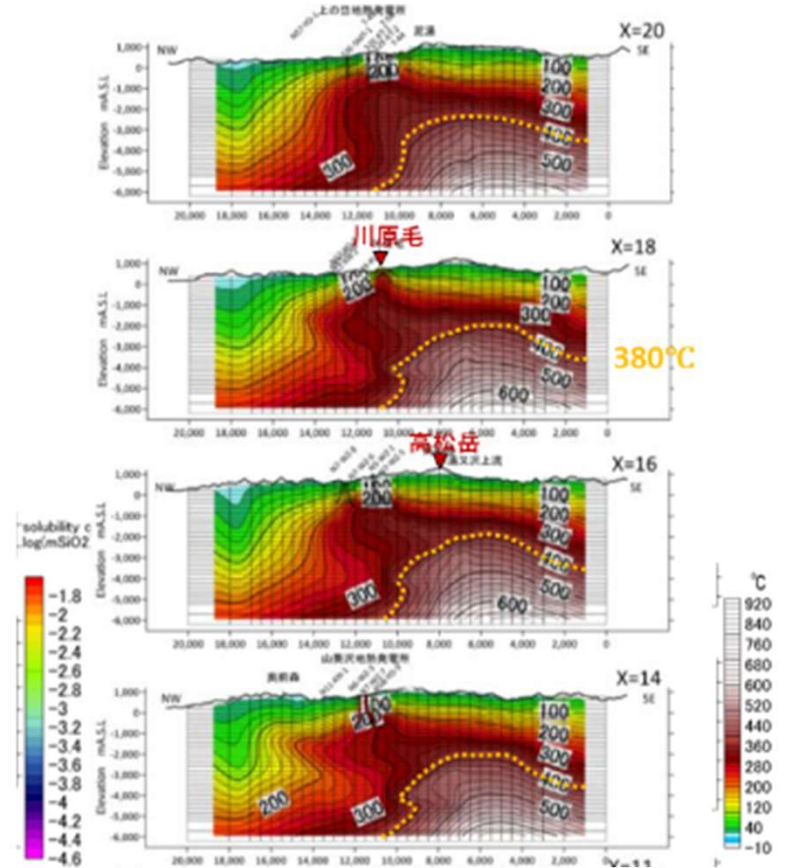
地質構造モデル断面



シリカ溶解度断面

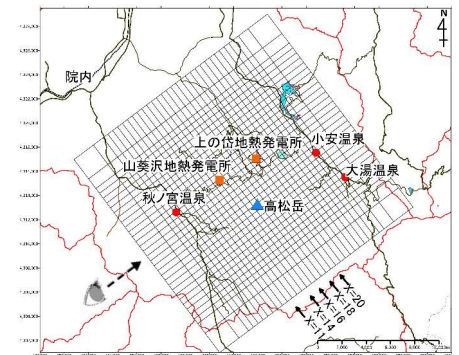


温度断面



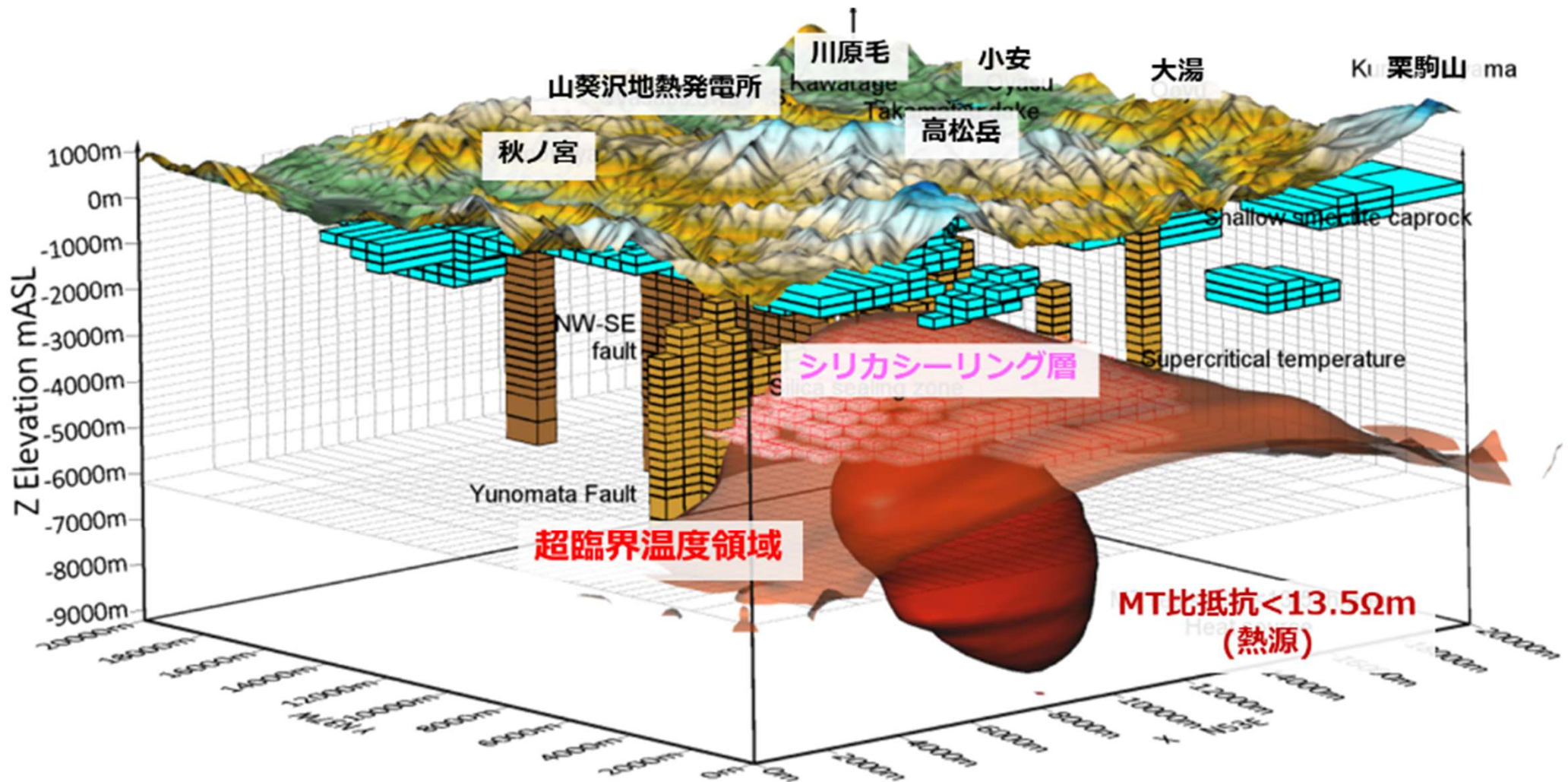
温度分布や地表放熱量を再現できる最適なモデルを選定。

- シミュレーション温度圧力結果からシリカ溶解度を計算し、シリカシーリング設定位置とシリカ溶解度の極小域が概ね一致。
- 高松岳東部の標高-2,000m以深のシリカシーリング内部に超臨界地熱資源の存在を推定。



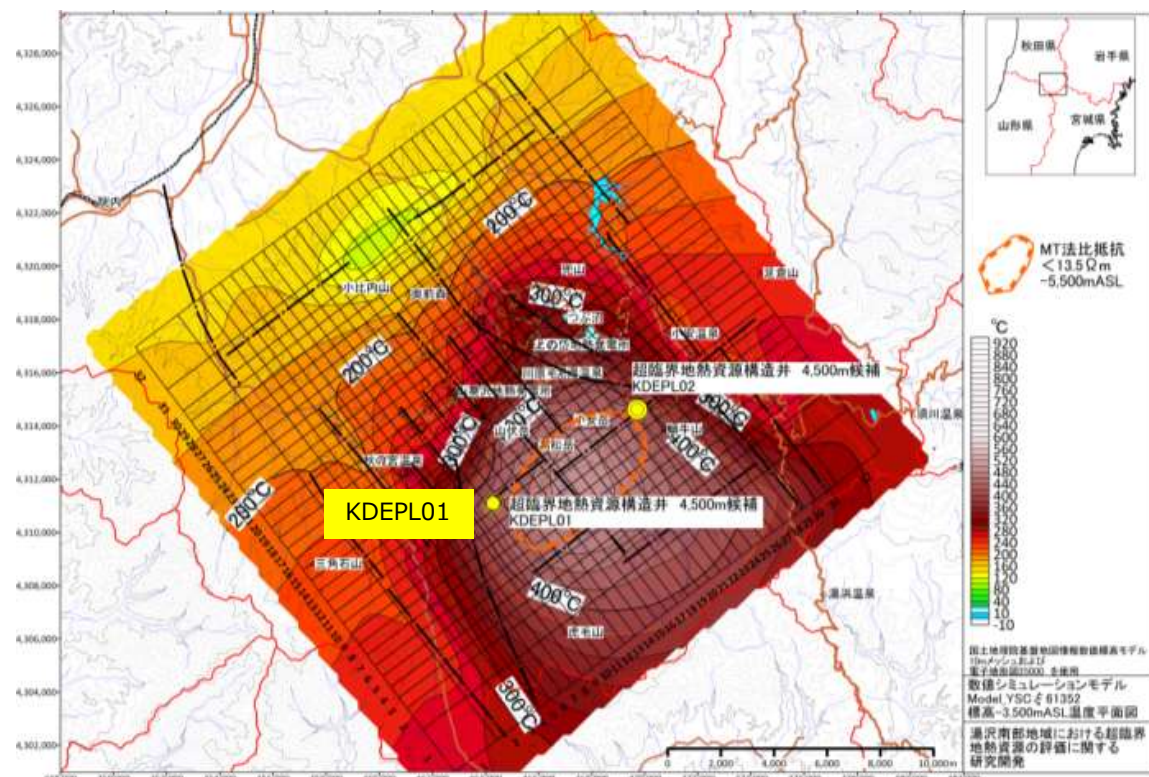
超臨界領域の推定(自然状態シミュレーション)

温度分布や地表放熱量を再現できる最適なモデルを選定し、高松岳東部の標高-2,000m以深に超臨界地熱資源の存在を推定。

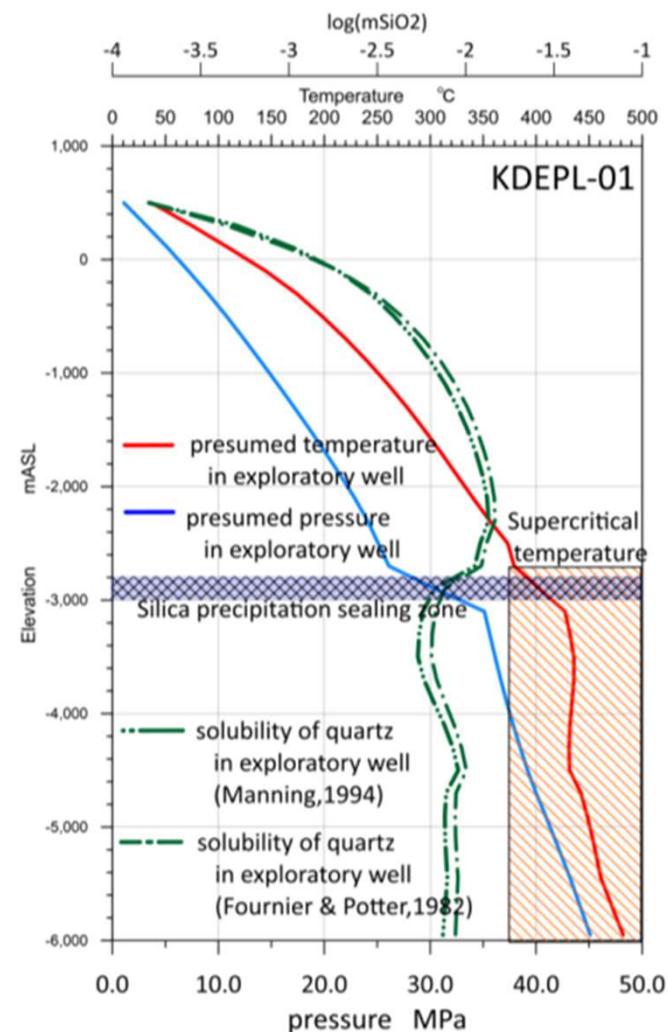


温度圧力分布

- 自然状態シミュレーションによる温度分布(標高-3,500m)から試錐候補地点を選定。
- KDEPL01で掘削した場合の温度・圧力・シリカ溶解度プロファイルから、シリカシーリングゾーン以深に超臨界流体が存在すると推定される。
- シリカの溶解度が急激に低下している（シリカの沈殿が生じる）領域とシリカシーリングは整合的。



標高-3,500mの温度分布と試錐候補位置



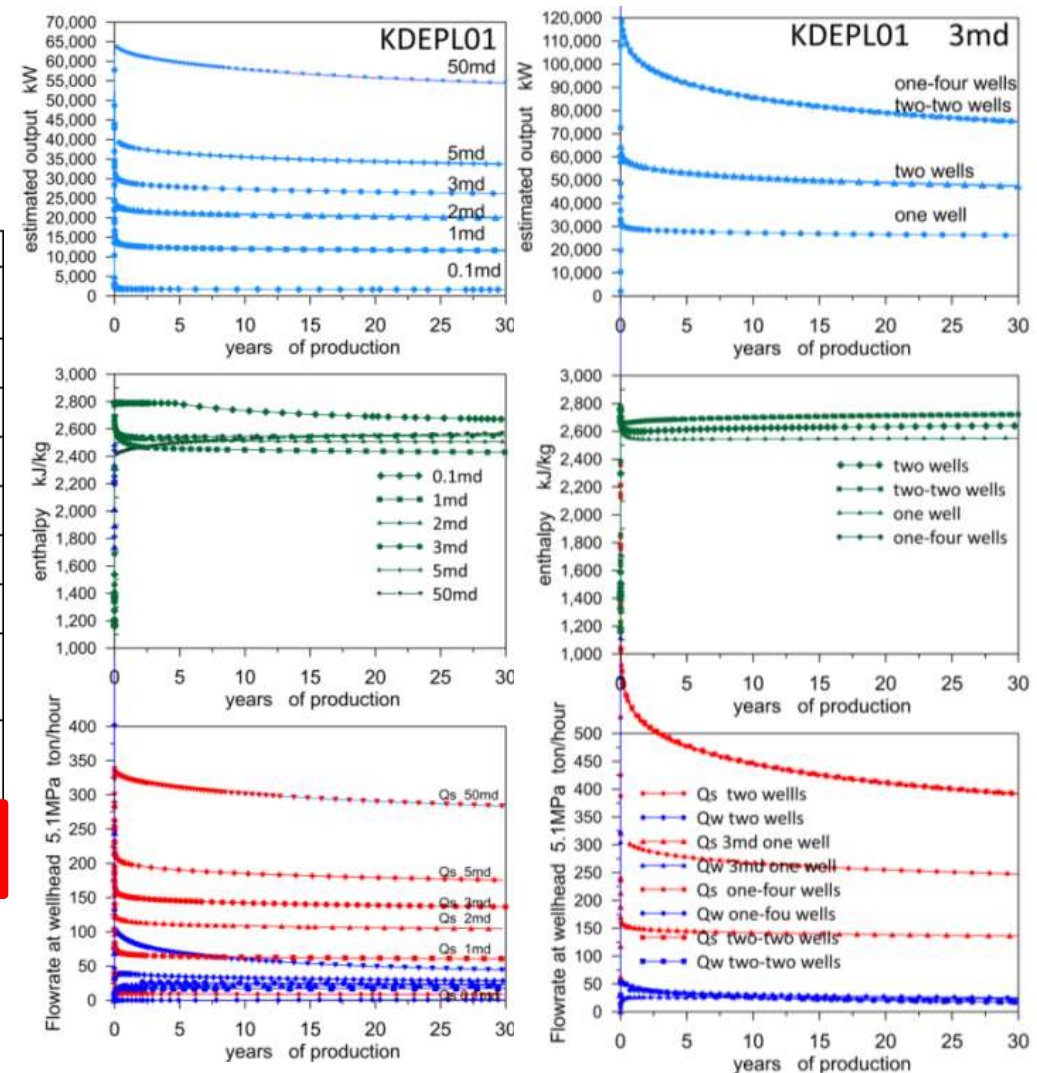
温度・圧力・シリカ溶解度プロファイル

生産予測シミュレーション

KDEPL01における生産予測を実施。
貯留層やシリカシーリングの浸透率、坑井数などの感度解析を実施して100MWを達成する要件を整理した。

生産予測のまとめ一覧表

井戸数	浸透率	3か月後			30年後		
		蒸気量 t/h	熱水量 t/h	推定発電 量MW	蒸気量t/h	熱水量 t/h	推定発電 量MW
1本	0.1md	9.8	0.0	1.9	8.5	0.7	1.6
	1md	70.1	12.6	13.4	60.7	17.1	11.6
	2md	119.7	19.0	23.0	104.5	21.9	20.1
	3md	155.3	24.2	29.8	136.5	23.4	26.2
	5md	205.0	38.3	39.3	175.5	28.4	33.7
	50md	329.3	96.3	63.2	283.4	44.1	54.4
2本	3md	308.0	37.2	59.1	247.5	25.1	47.5
4本2ブ ロック	3md	578.3	50.1	111.0	392.2	17.2	75.3
4本4ブ ロック	3md	575.4	49.6	110.4	390.6	17.6	75.0



生産予測30年間出力推移
(坑井1本)

生産予測30年間出力推移
(複数坑井)

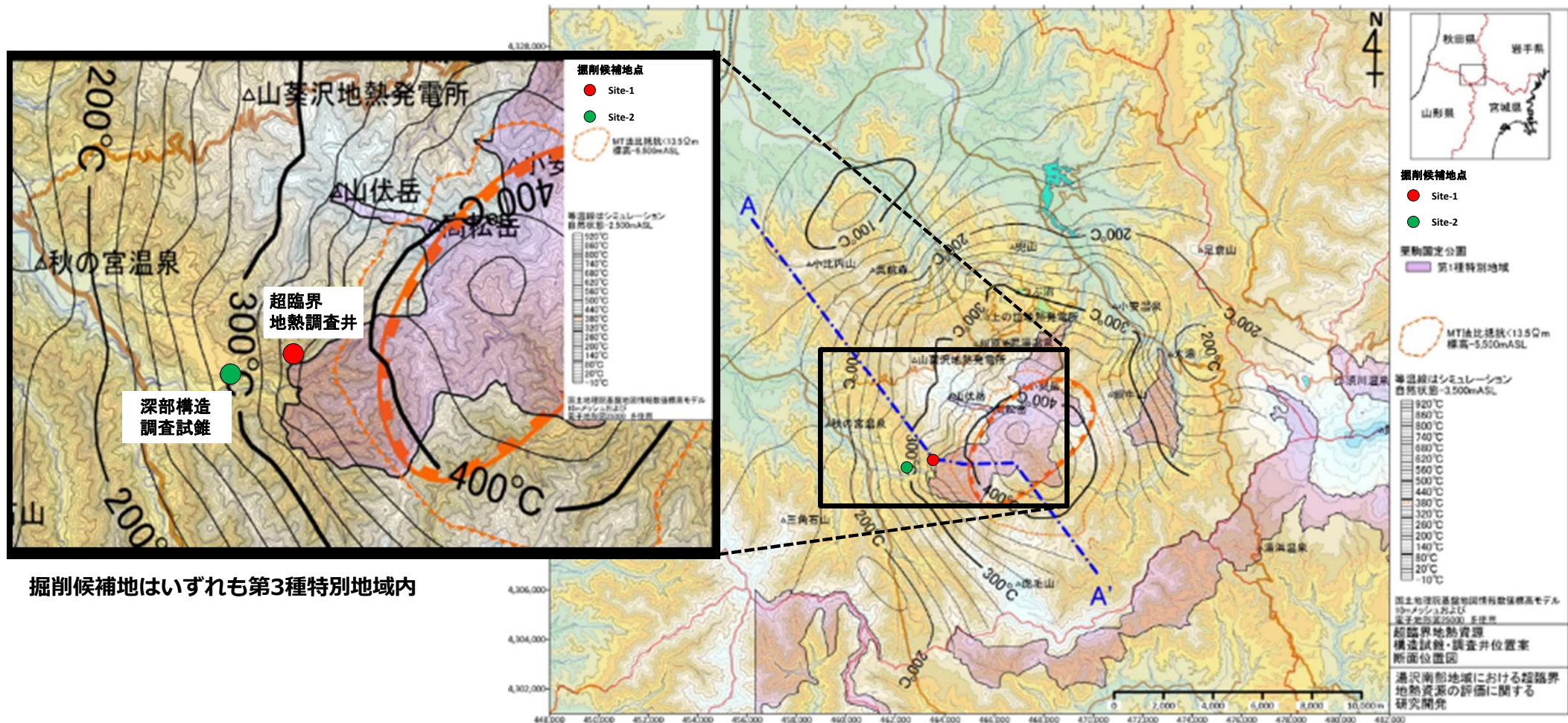
- 貯留層浸透率3mdの場合、3か月後に約30MWの出力となる。
- 生産井4本を仮定すると、3か月後に約110MWの出力。

想定掘削位置

- 数値シミュレーションにより推定された超臨界領域に可能な限り近い掘削地を検討した結果、本地域の東側には既に開発中の地熱プロジェクトが存在するため西側の掘削地を候補地とした。

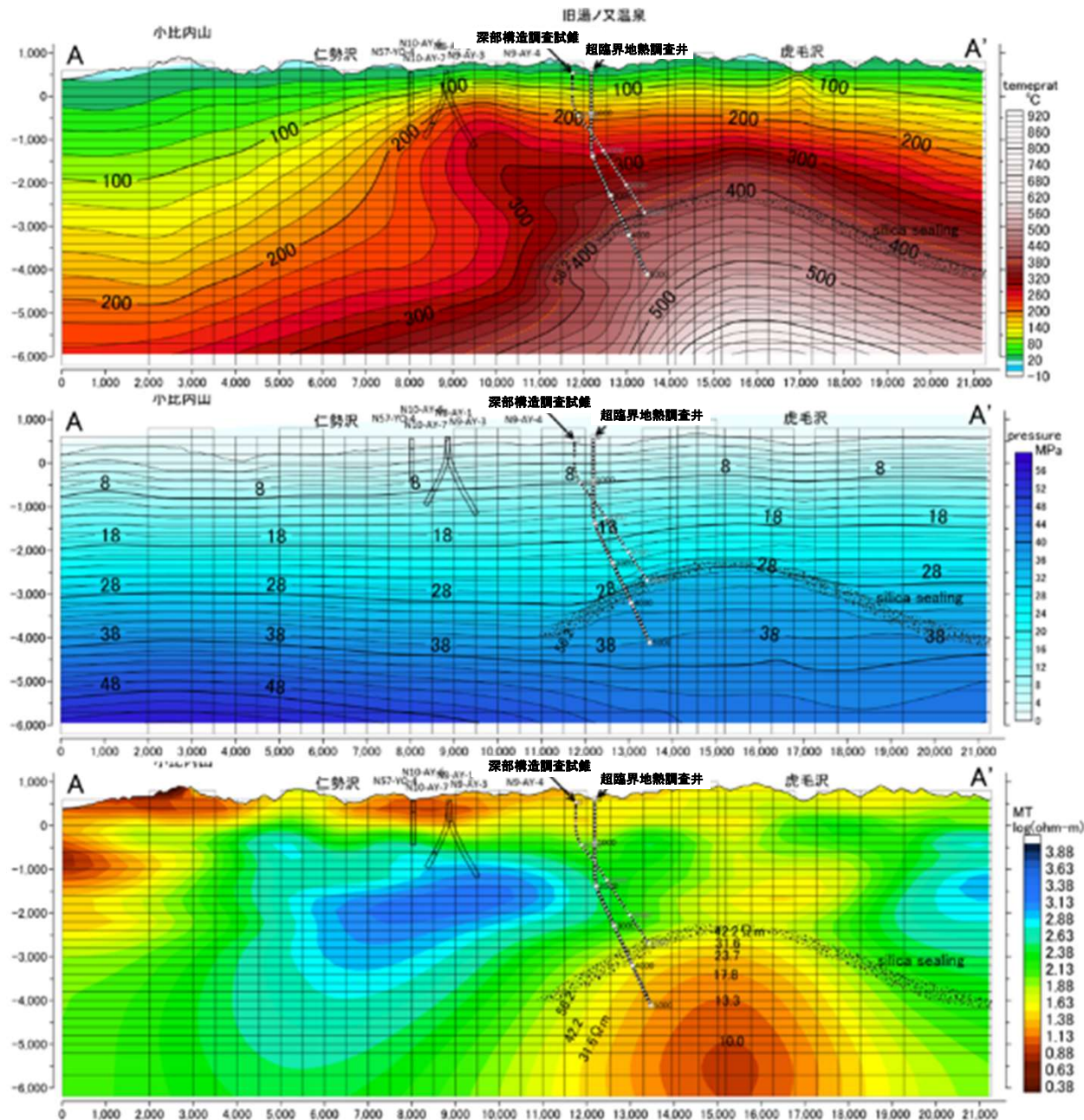
深部構造調査試錐 ⇒ 搬入路および敷地造成の条件が比較的良好な候補地。

超臨界地熱調査井 ⇒ より熱源に近い候補地。

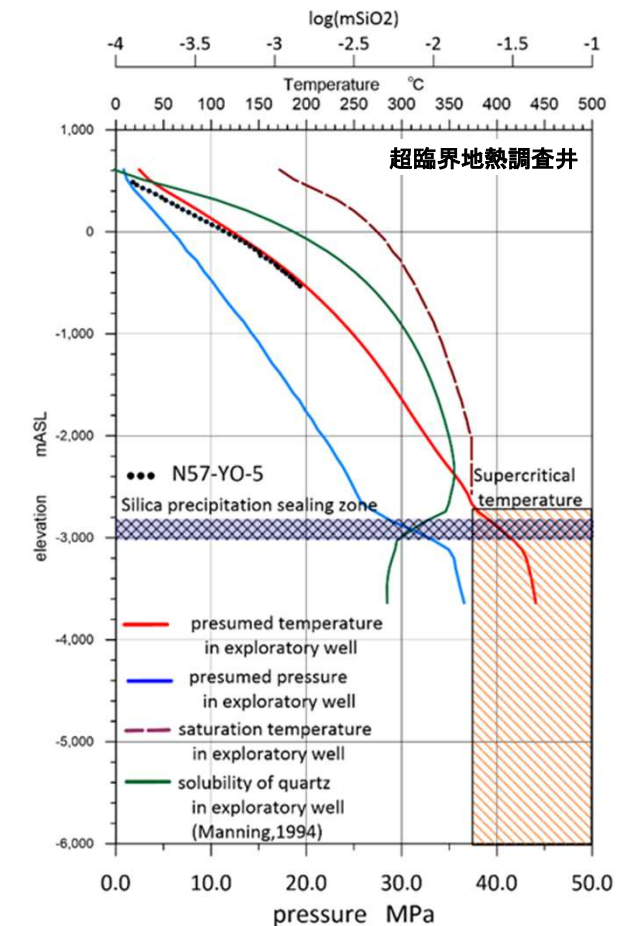


坑井断面

- 自然状態シミュレーションから推定した地下の温度・圧力・比抵抗断面

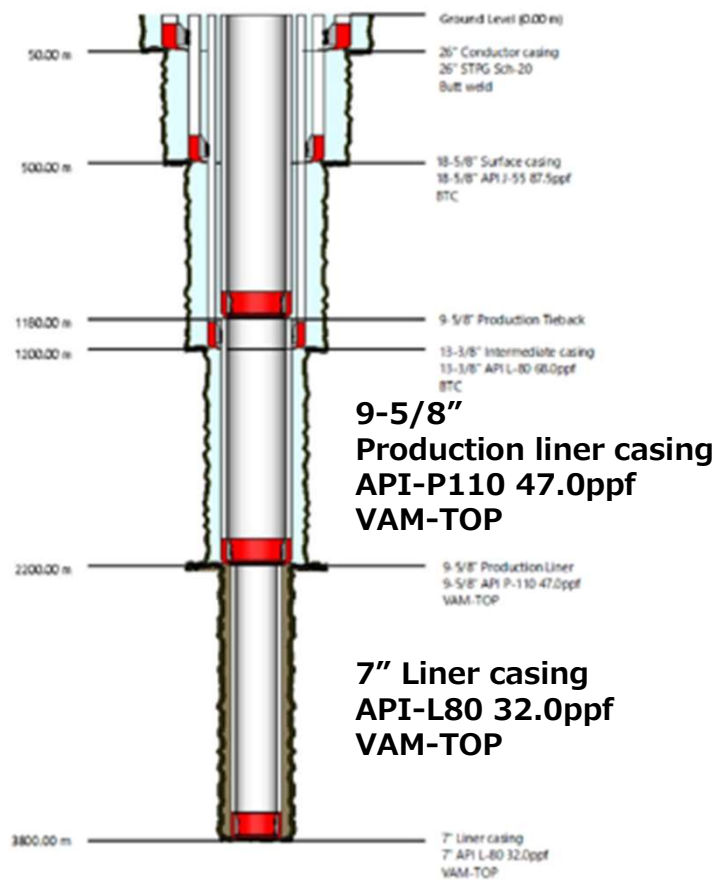


- ✓ 深部構造調査試錐はシリカシーリングの直上まで掘削
(左図で構造試錐井は投影)
- ✓ 超臨界地熱調査井は超臨界領域まで掘削



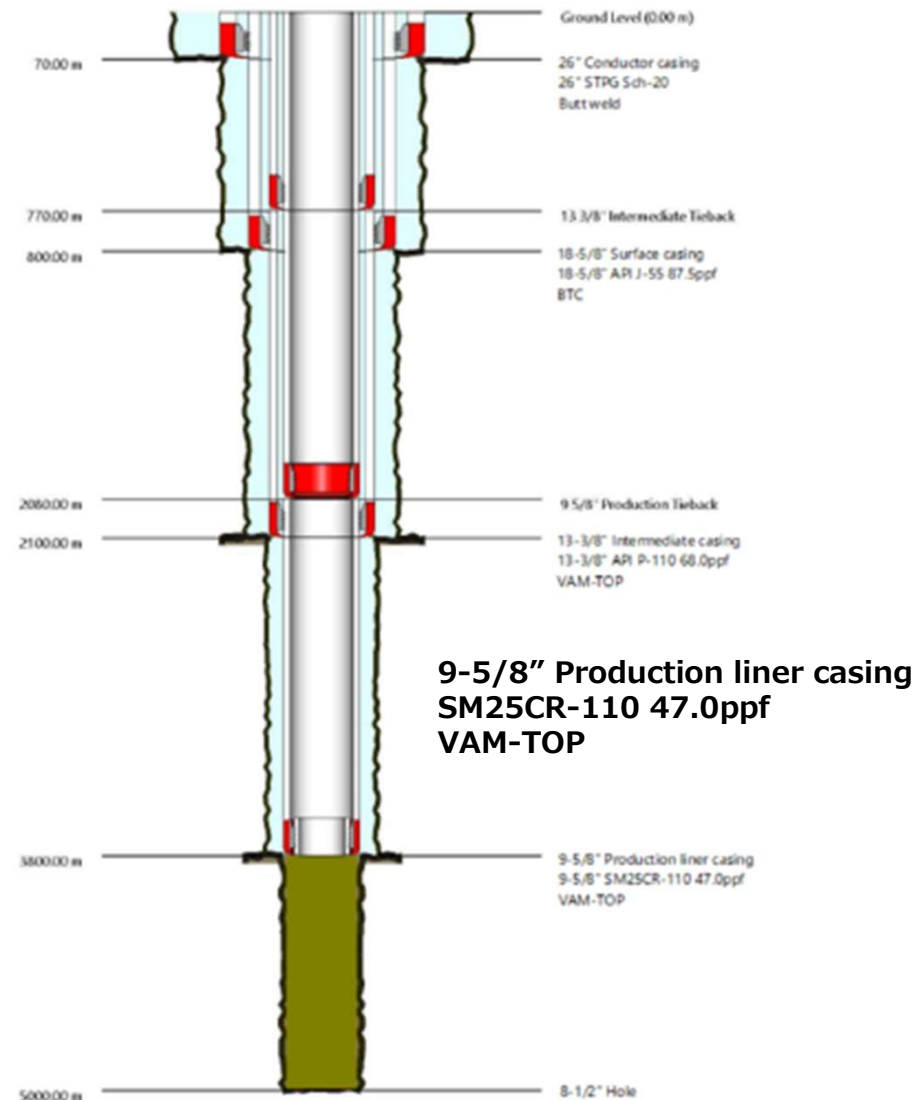
坑井の仕様

深部構造調査試錐



掘削深度 : 3,800.00m
KOP : MD=550.00m
傾斜角度 : 37.20°
垂直深度 : 3,215.04m
偏距計 : 1,799.92m

超臨界地熱調査井



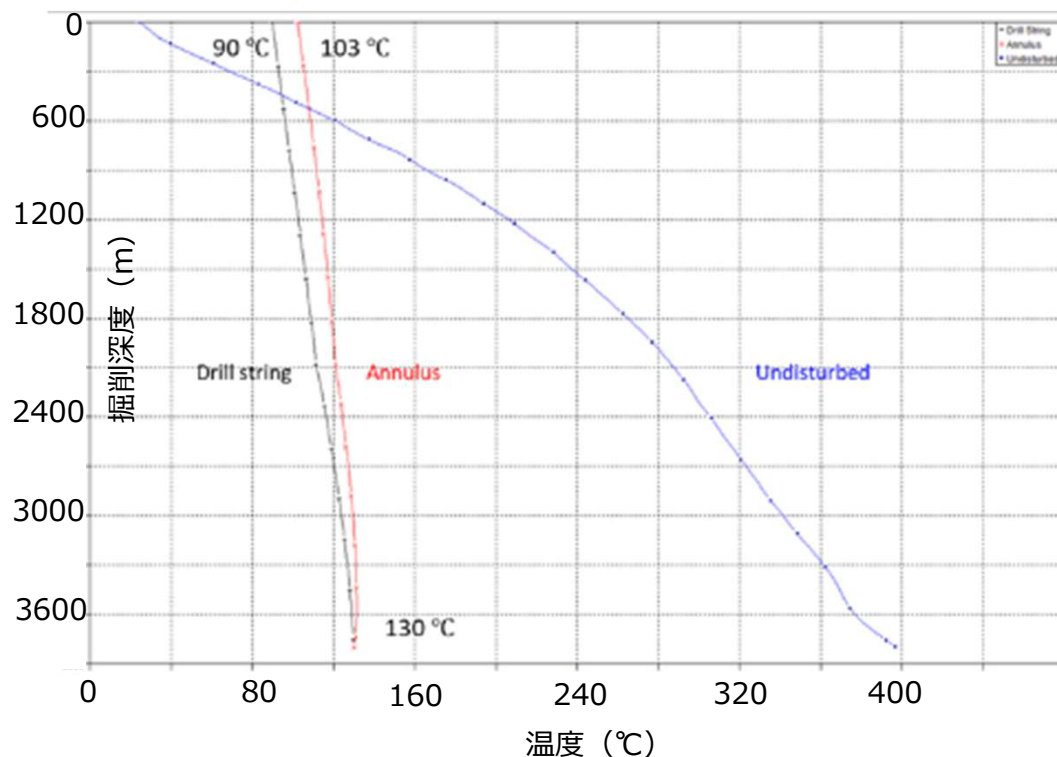
掘削深度 : 5,000.00m
KOP : MD=1,700.00m
傾斜角度 : 25.00°
垂直深度 : 4,722.57m
偏距計 : 1,288.62m

掘削シミュレーション

- 想定される温度圧力条件や掘削条件に基づき、回転トルク、フックロード、泥水循環温度等の掘削シミュレーションを実施。

(例) 12-1/4"坑掘削時循環温度予測

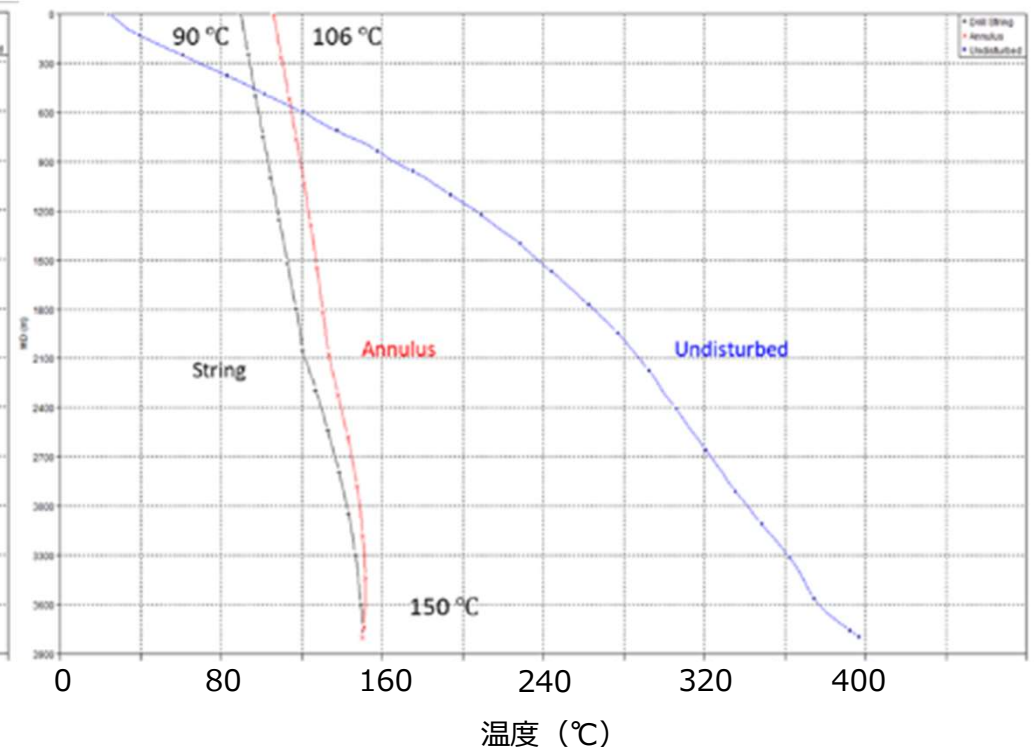
ポンプレート : 3,000 L/min



(例) 9-5/8"ライナーケーシング挿入時循環温度予測

ポンプレート : 2,500 L/min

循環時間 : 24時間



- 泥水冷却については地上冷却が重要である。
- しかし、敷地の制約により大容量ピットでの冷却が困難である。
- 特に高温が想定される超臨界地熱調査井においては、深部構造調査試錐の状況に基づき海外製冷却システムを検討する必要がある。

経済性評価

資源量評価の結果に基づき、発電出力100MW規模を想定し、
先行研究(NEDO, 2018)の過熱蒸気直接利用方式に倣って経済性評価を実施。

	深部構造調査試錐 (Site-2)	超臨界地熱調査井 (Site-1)
土木工事 ※復旧工事費含まず	590,800	1,348,400
掘削工事	2,516,200	4,745,900
総建設費	86,614,878	
調査段階コスト (うち掘削コスト)	10,621,729 (7,262,100)	
開発段階コスト (うち掘削コスト) (うちパイプライン, 発電設備, 送電費用)※	75,993,150 (14,650,271) (57,000,000)	

(単位：千円)

※NEDO (2018)を踏襲

資源量評価（シミュレーション）に基づき、生産井4本、還元井2本を想定。
調査段階で掘削する深部構造試錐を還元井、超臨界地熱調査井を生産井に転用することを想定した。

経済性評価

試算仮定

- 売電単価は15年間で26円/kWh、16年目以降を15円/kWhとした。
- 本事業では計算上の制約により運開後2年目に補充井を1本掘削し3年目に併入、以降は補充井を掘削しない想定とした。

試算結果

- 生産井から噴出した過熱蒸気を直接利用する発電方式のIRR（15年）は11.75%と試算された。
- 発電単価については、30年間の平均単価が9.89円/kWhと試算され、10円/kWhを下回る結果となった。

※補充井の掘削本数はIRRを低下させる大きな要因であり、実際にはより多くの補充井が必要となる場合が十分考えられる。

※本事業において積算した掘削費等は積算時点での金額であり、実際の掘削フェーズでは価格変動により費用が増加する可能性もある。

まとめ

- MT法探査、微小地震探査、豊富な既存データを用いて湯沢南部地域の数値シミュレーションを実施し、湯沢南部地域の深部（地下 5 km以浅）に超臨界地熱流体が賦存することを推定した。
- 湯沢南部地域で100MW規模の発電が可能となる要件を整理した結果、貯留層浸透率を3md、生産井4本を仮定すると、3か月後に約110MW、30年後に約75MWの出力が得られることが推定された。
- 自然状態シミュレーションの結果に基づき、深部構造調査試錐および超臨界地熱調査井について掘削シミュレーションを実施。その結果を基に仕様について検討した。
- 100MW規模を想定した概略の経済性評価を行った結果、生産井から噴出した過熱蒸気を直接利用する発電方式のIRR（15年）は11.75%と試算された。発電単価については、30年間の平均単価が9.89円/kWhと試算され、10円/kWhを下回る結果であった。