

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)

【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

西島 潤

(国)九州大学

2023年2月2日

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

事業概要

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。

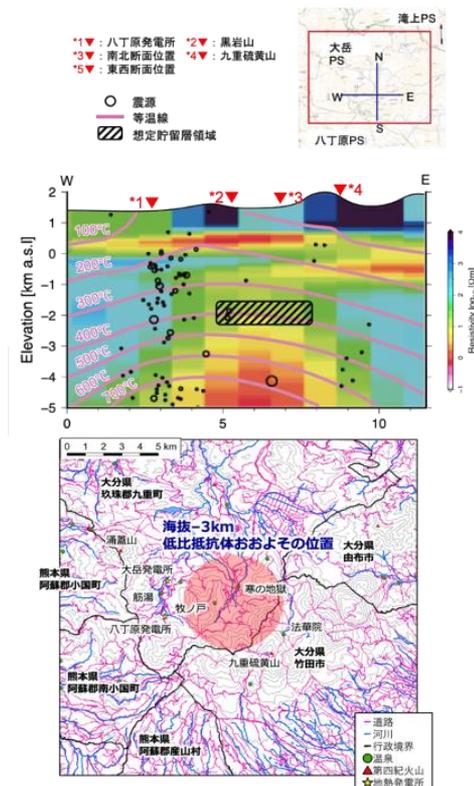
2. 実施期間

開始 : 2021年6月

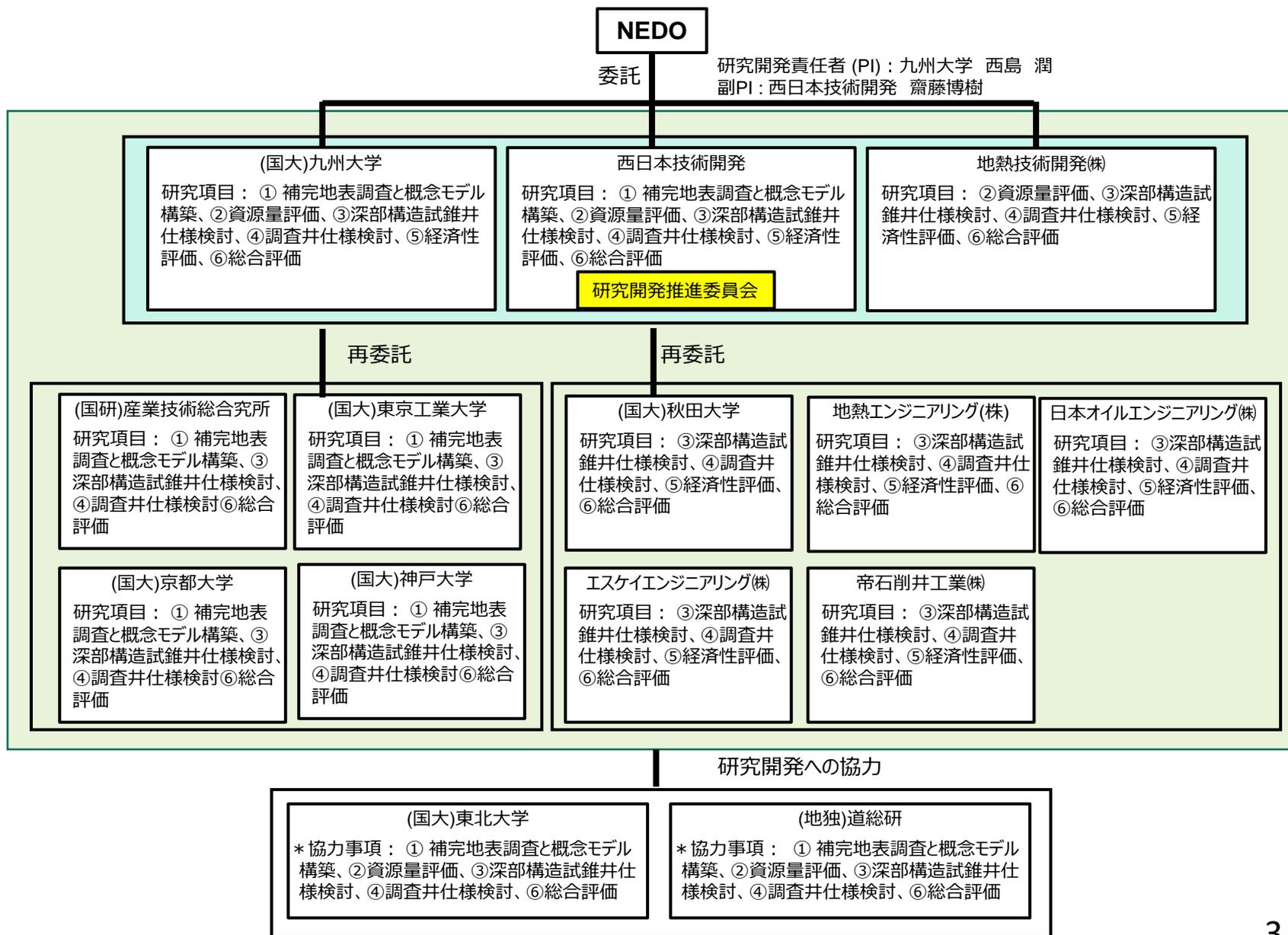
終了(予定): 2024年3月

3. 実施内容・最終目標

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(100MW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	2024fy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



研究実施体制



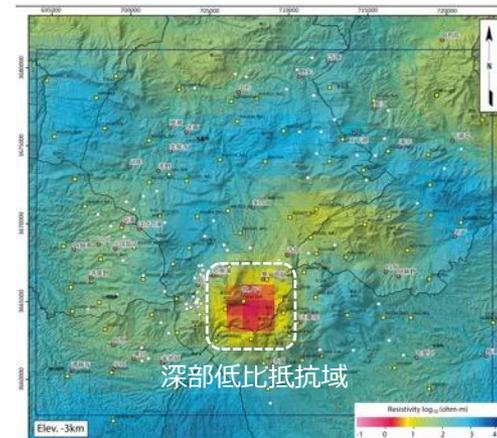
研究成果

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 a.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】

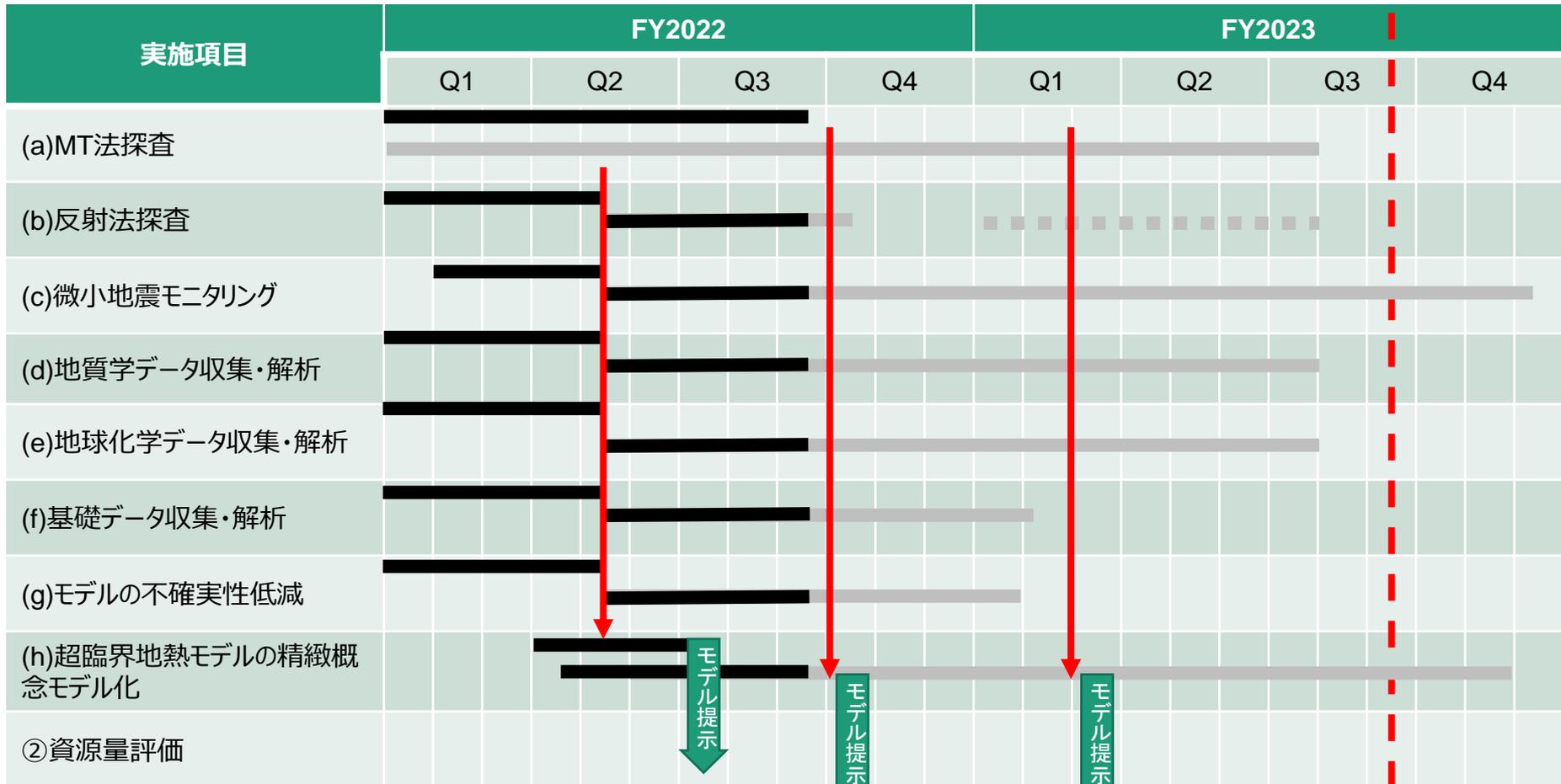


要素技術	先行研究での成果	本研究での開発項目
(a) MT法探査	<ul style="list-style-type: none"> • 超臨界貯留層を示唆する深部低比抵抗域が解析された。 	<ul style="list-style-type: none"> • 深部低比抵抗域周辺で40点程度の追加MT法探査を実施し、既存データを含めた3次元解析による、深部低比抵抗域の推定精度の向上。
(b) 反射法探査	<ul style="list-style-type: none"> • なし 	<ul style="list-style-type: none"> • 準3次元反射法屈折法統合地震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	<ul style="list-style-type: none"> • なし 	<ul style="list-style-type: none"> • 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	<ul style="list-style-type: none"> • 既存の文献情報の収集を行った。 	<ul style="list-style-type: none"> • 流体含有物、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	<ul style="list-style-type: none"> • 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。 	<ul style="list-style-type: none"> • 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	<ul style="list-style-type: none"> • 既存データを用いた温度構造推定 	<ul style="list-style-type: none"> • 既存重力データの再解析
(g) モデルの不確実性低減	<ul style="list-style-type: none"> • なし 	<ul style="list-style-type: none"> • 情報統計学的手法に基づくモデルの不確実性低減手法の開発
(h) 超臨界地熱モデルの精緻概念モデル化	<ul style="list-style-type: none"> • 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。 	<ul style="list-style-type: none"> • 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

研究成果

研究開発項目①: 補完地表調査と概念モデル構築

12月時点での項目1スケジュール進捗と今後の予定



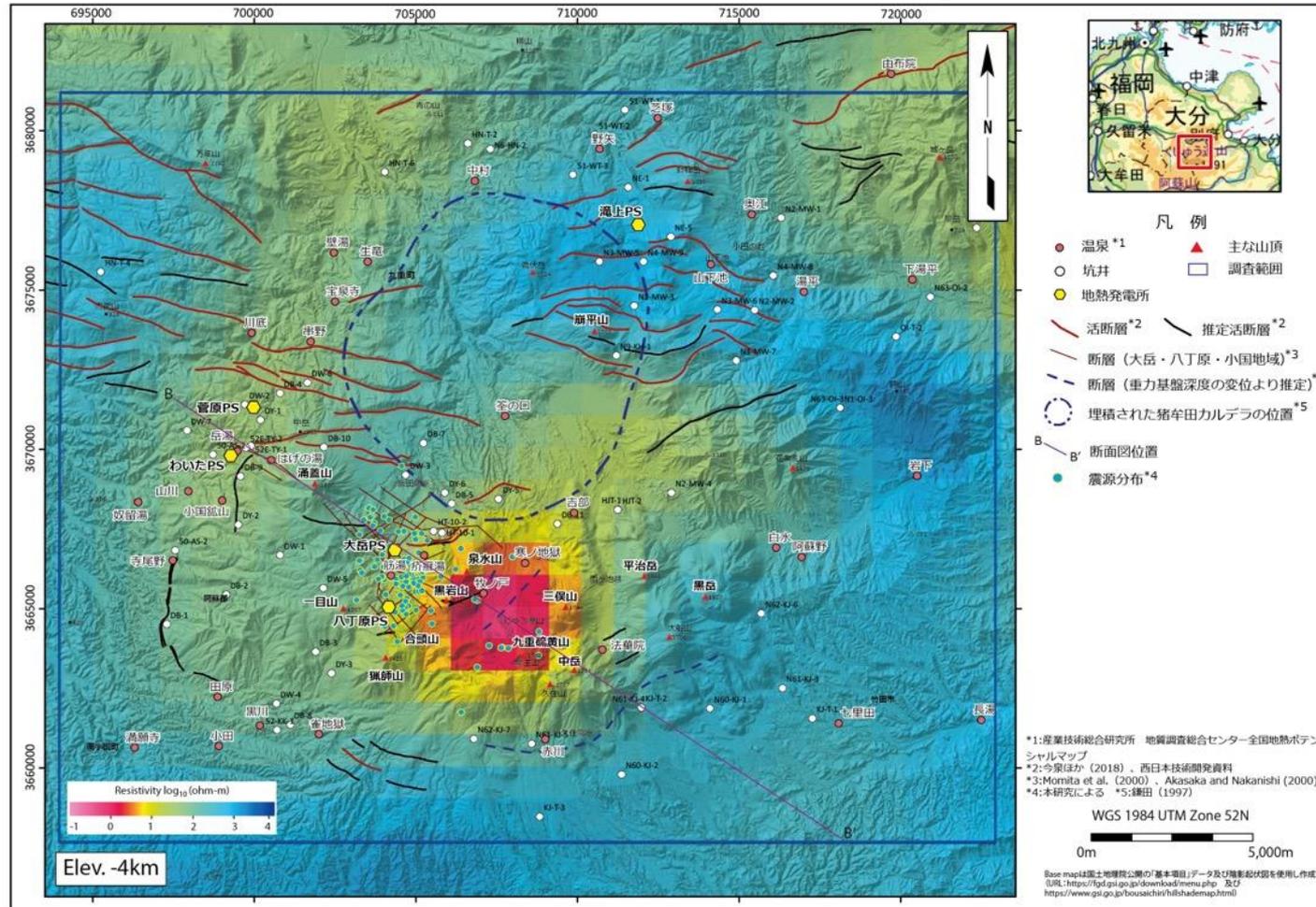
初版概念モデル
第2版・第3版モデル

: 前プロジェクトの比抵抗構造 + 地質、温度、地化学、重力、微小地震
: 初版 + 反射法、MT法結果を取入れ改良

研究成果

研究開発項目①: 補完地表調査と概念モデル構築

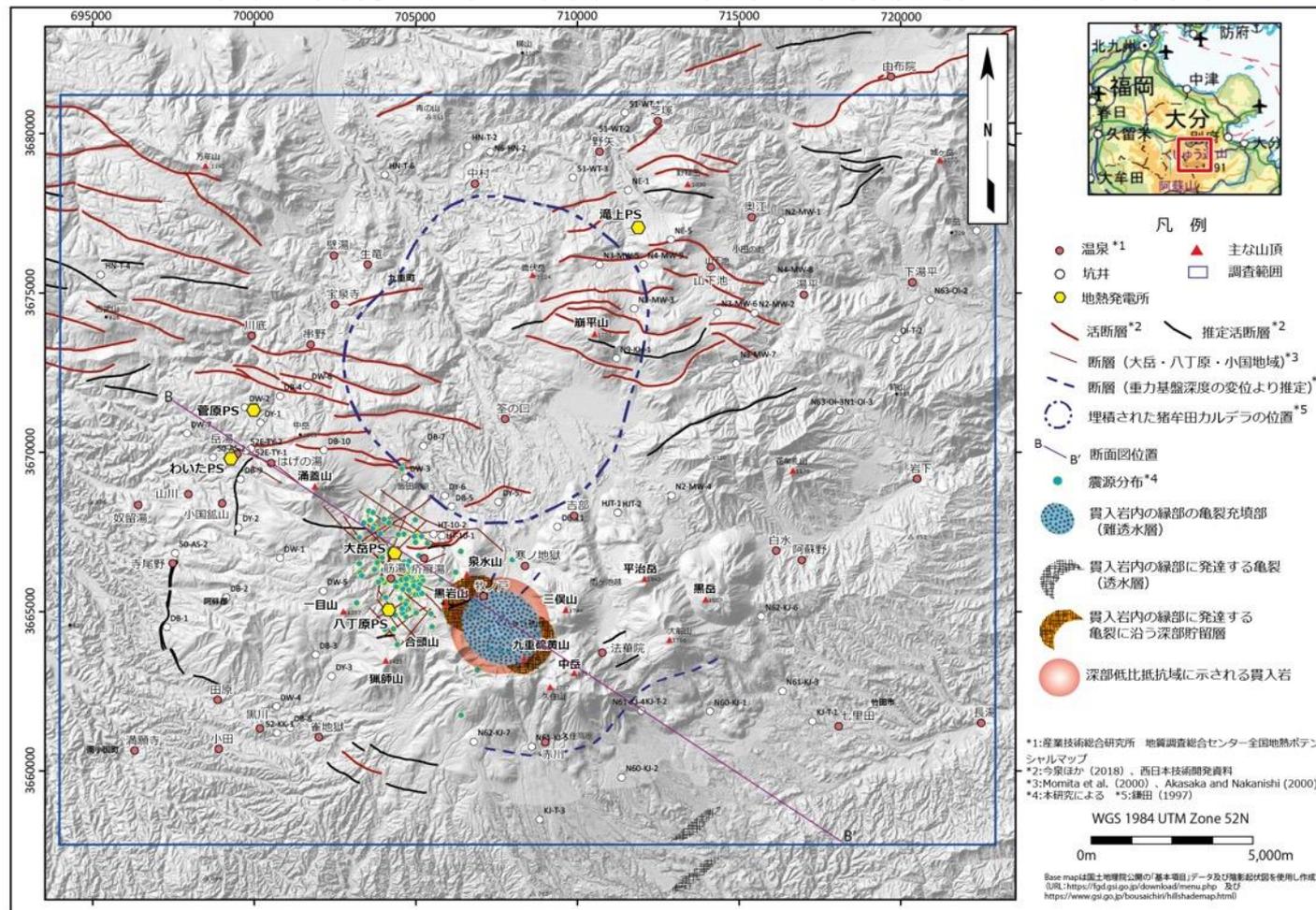
断層分布・震源分布・比抵抗構造@-4.0 km



研究成果

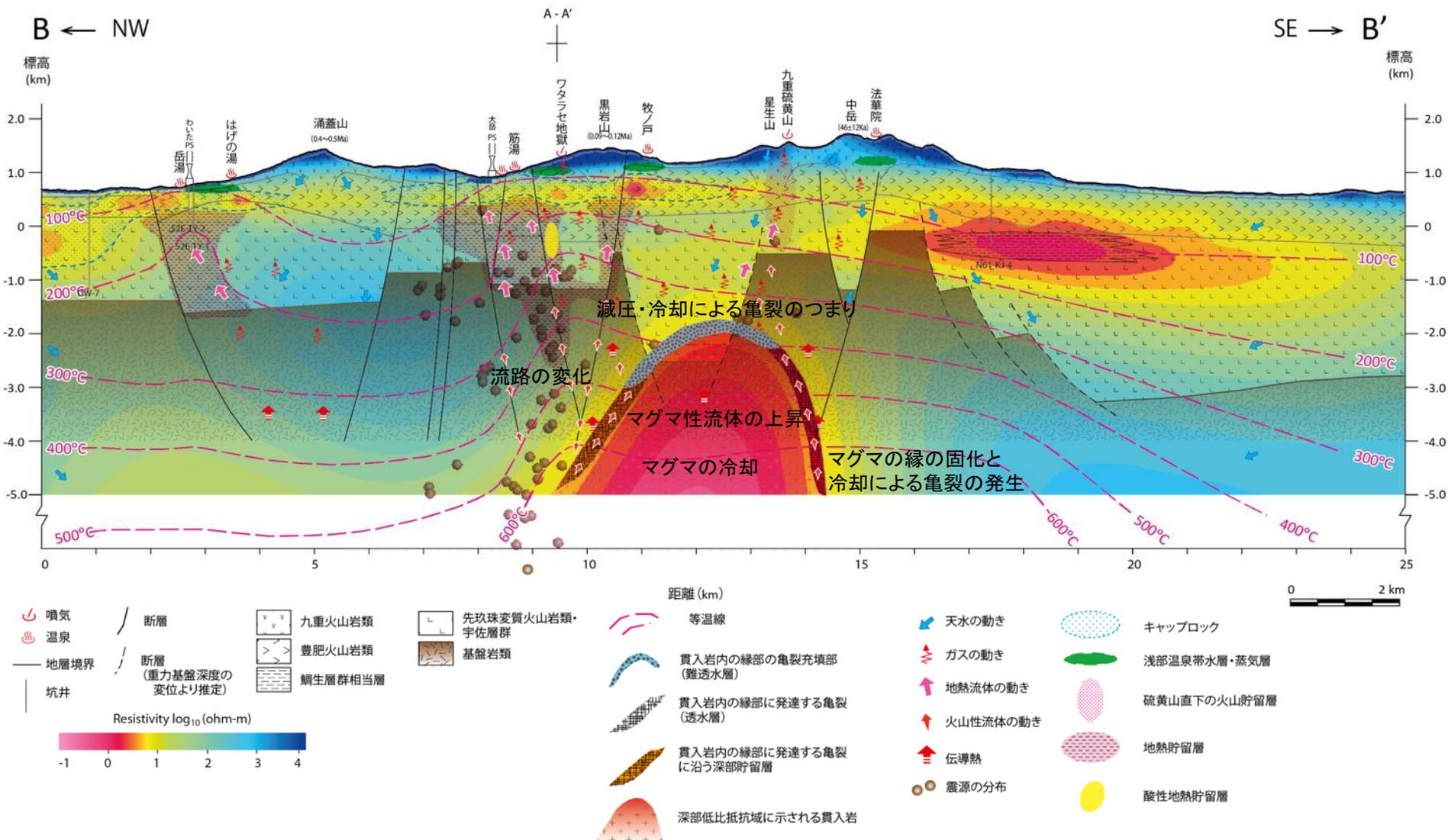
研究開発項目①: 補完地表調査と概念モデル構築

貫入岩縁辺部のキャップと深部貯留層の推定分布範囲



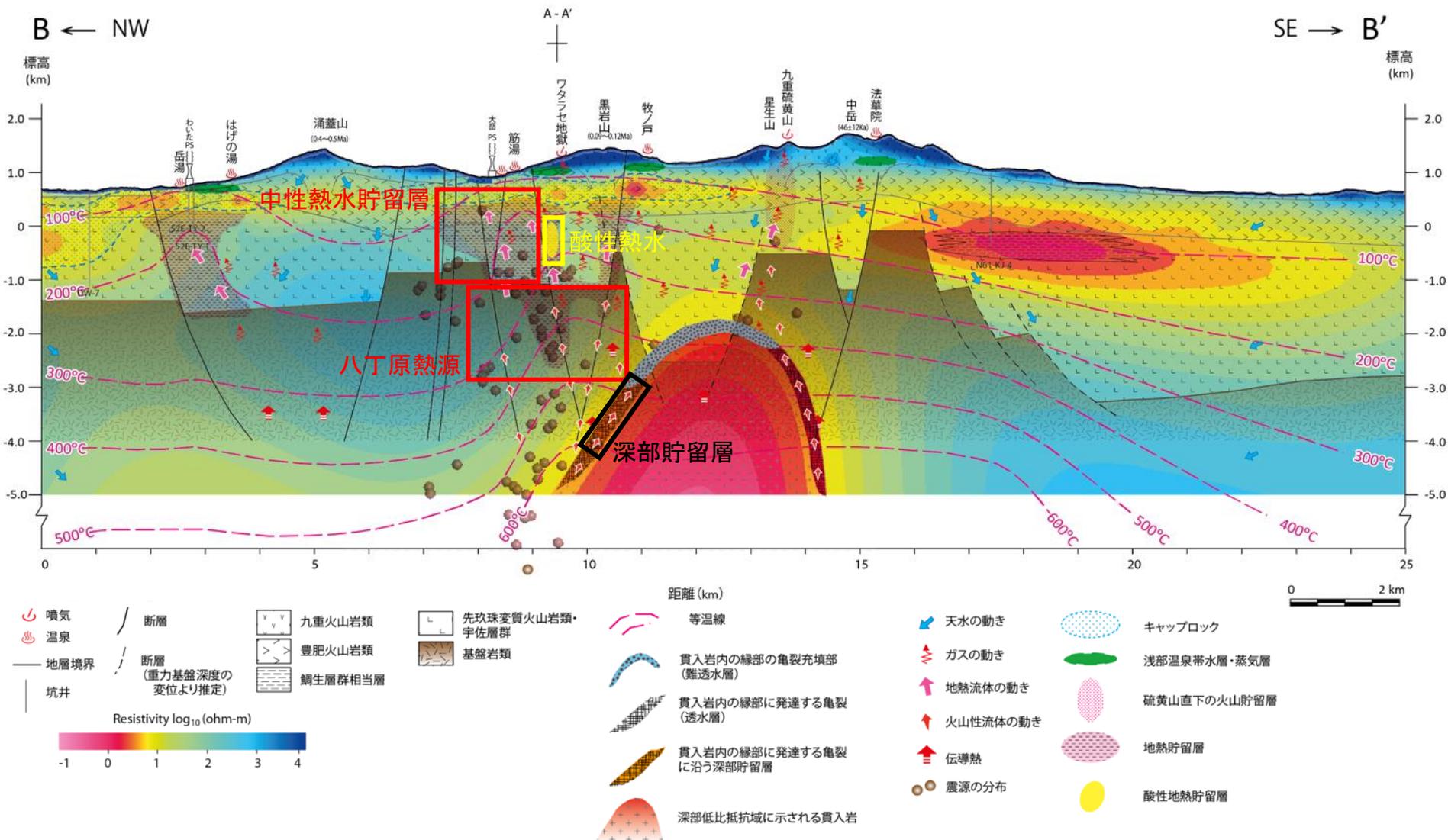
研究成果

研究開発項目①: 補完地表調査と概念モデル構築



研究成果

研究開発項目①: 補完地表調査と概念モデル構築



研究成果

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、3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。

研究成果

研究開発項目②: 資源量評価

概念モデル

- ・超臨界地熱貯留層を胚胎する貫入岩体は冷却過程にある。
- ・前PJにおいて、超臨界地熱流体は高濃度NaCl流体であると推定されている。

3次元 定常解析(純水系)
*従来の自然状態SIMのイメージ

○純水系シミュレーション

- ・ 将来予測シミュレーションに用いる、数値モデルの構築

モデル構築フロー

初期数値モデルの構築

貯留層シミュレーションによる、
準定常状態の解の取得

計算結果と測定値の比較

両者の一致
は十分か

YES
終了

石戸(2002) 地熱貯留層工学
「自然状態シミュレーションの
フロー」, (社)日本地熱調査会

モデル調整
・浸透率分布
・境界条件

NO

2次元 非定常解析(純水系/塩水系)
*2次元モデルによる簡易解析

○純水系シミュレーション

- ・ 地熱系概念モデルの妥当性評価が主目的。
- ・ 貫入岩体の冷却および浅部地熱系の形成(加熱)をシミュレーションで再現。

○塩水系シミュレーション

- ・ 浅部貯留層と超臨界地熱貯留層を隔てるシール構造についての検討が主目的。
- ・ 超臨界地熱貯留層に存在する高濃度NaCl流体の浅部への流出に関するシミュレーション。
- ・ 今後、本事業で推定されたシール構造について、シミュレーションの実施仕様を検討。

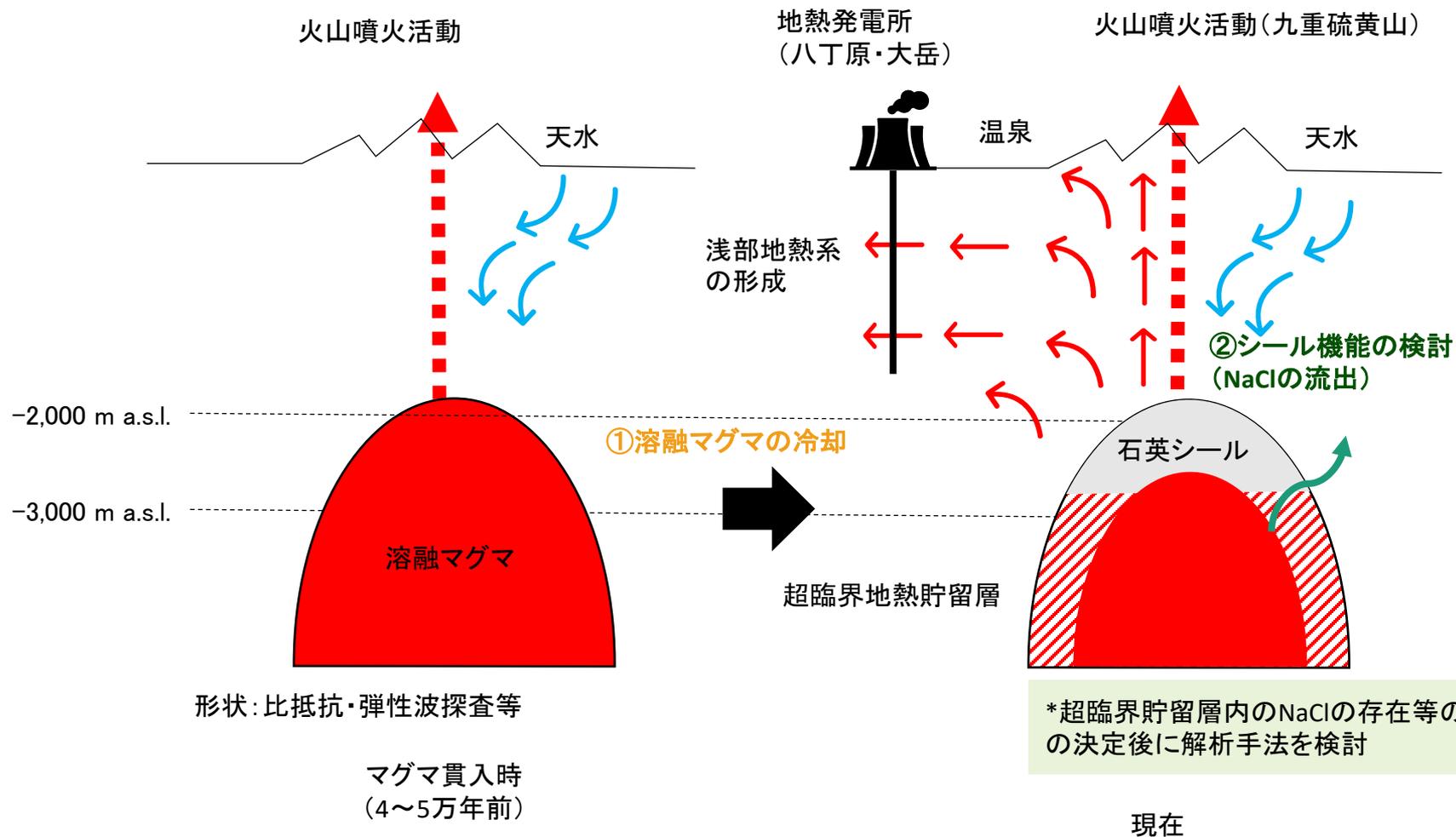
2次元解析の結果は、概念モデルの精緻化や、3次元数値モデル構築時の各種条件設定に反映させる。

→ (c)発電可能量の推定: 将来予測シミュレーション

研究成果

研究開発項目②: 資源量評価

2次元非定常解析の概念図 (暫定*)



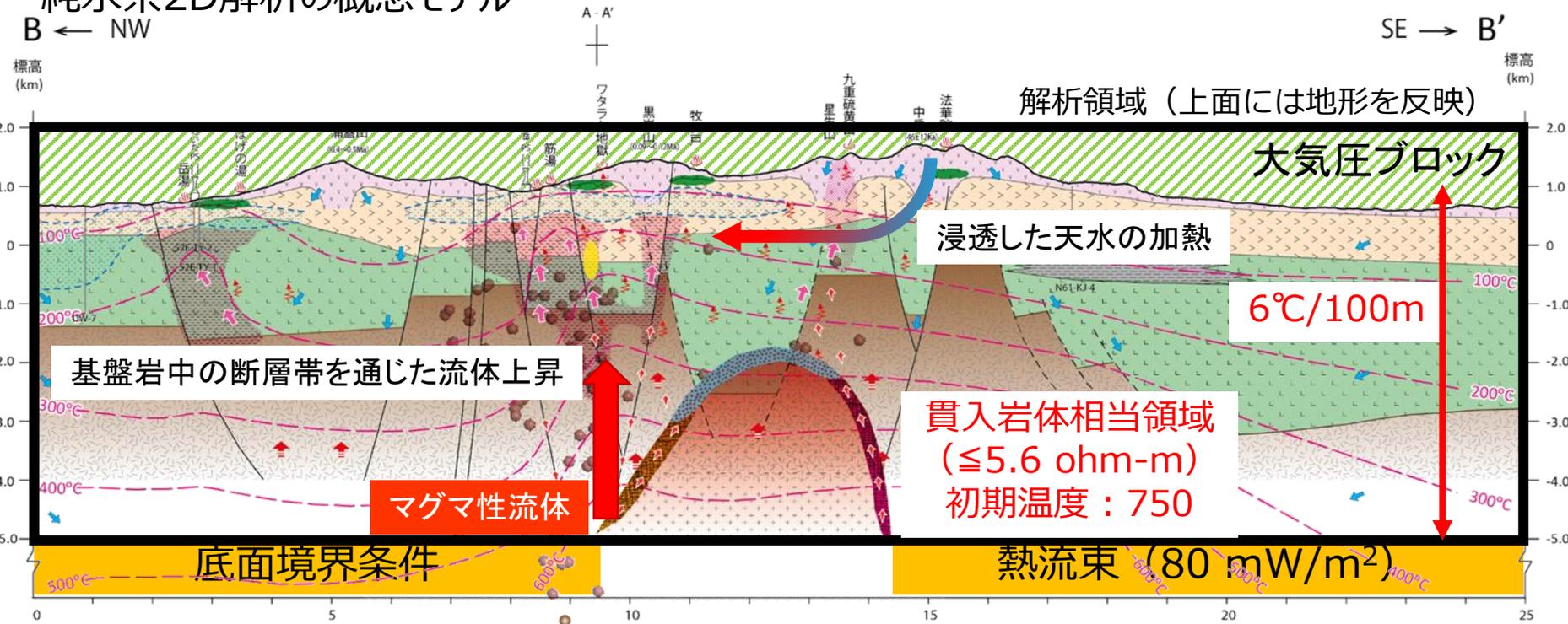
研究開発項目②: 資源量評価

- 純水系2次元非定常解析(岩体冷却シミュレーション)
地質断面図, 概念モデルに基づいた数値モデル構築
収束安定性や本地域の地熱系モデルの再現に向けてモデル調整中
- 純水系3次元定常解析(自然状態シミュレーション)
概念モデル(項目①)に基づいた3D数値モデル構築に向けた検討
(解析範囲の再検討, グリッド分割, 浸透率分布, 境界条件)

研究成果

研究開発項目②: 資源量評価

純水系2D解析の概念モデル



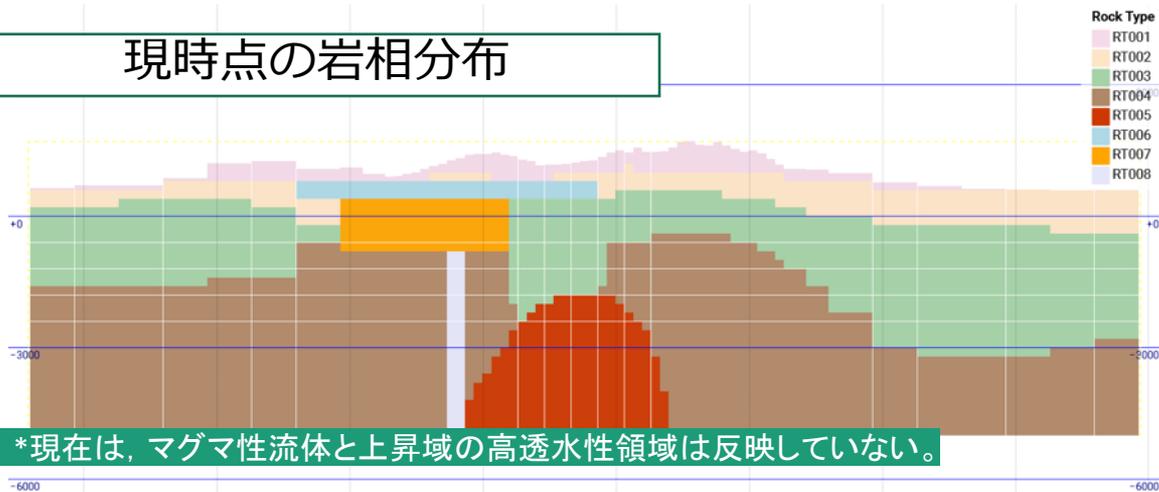
初期温度分布

- ① 数値モデル全体に対して、地温勾配(6°C/100m)に基づく温度分布を付与。
- ② 貫入岩体岩体相当領域に対して、750°Cの初期条件を上書き。

研究成果

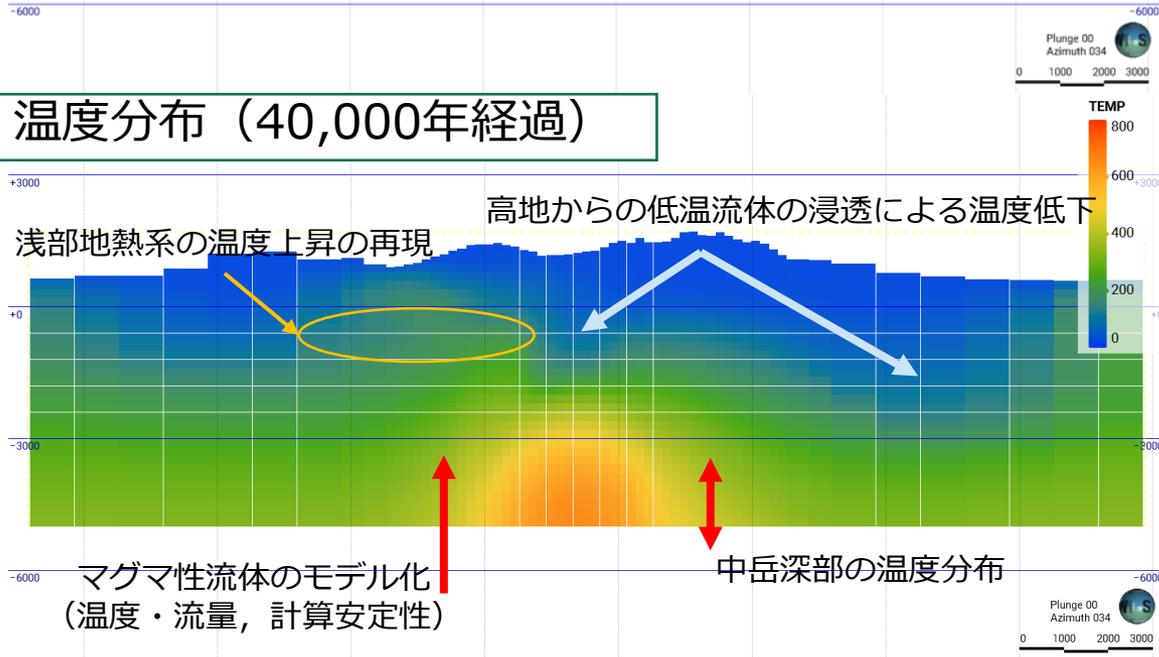
研究開発項目②: 資源量評価

現時点の岩相分布



*現在は、マグマ性流体と上昇域の高透水性領域は反映していない。

温度分布 (40,000年経過)



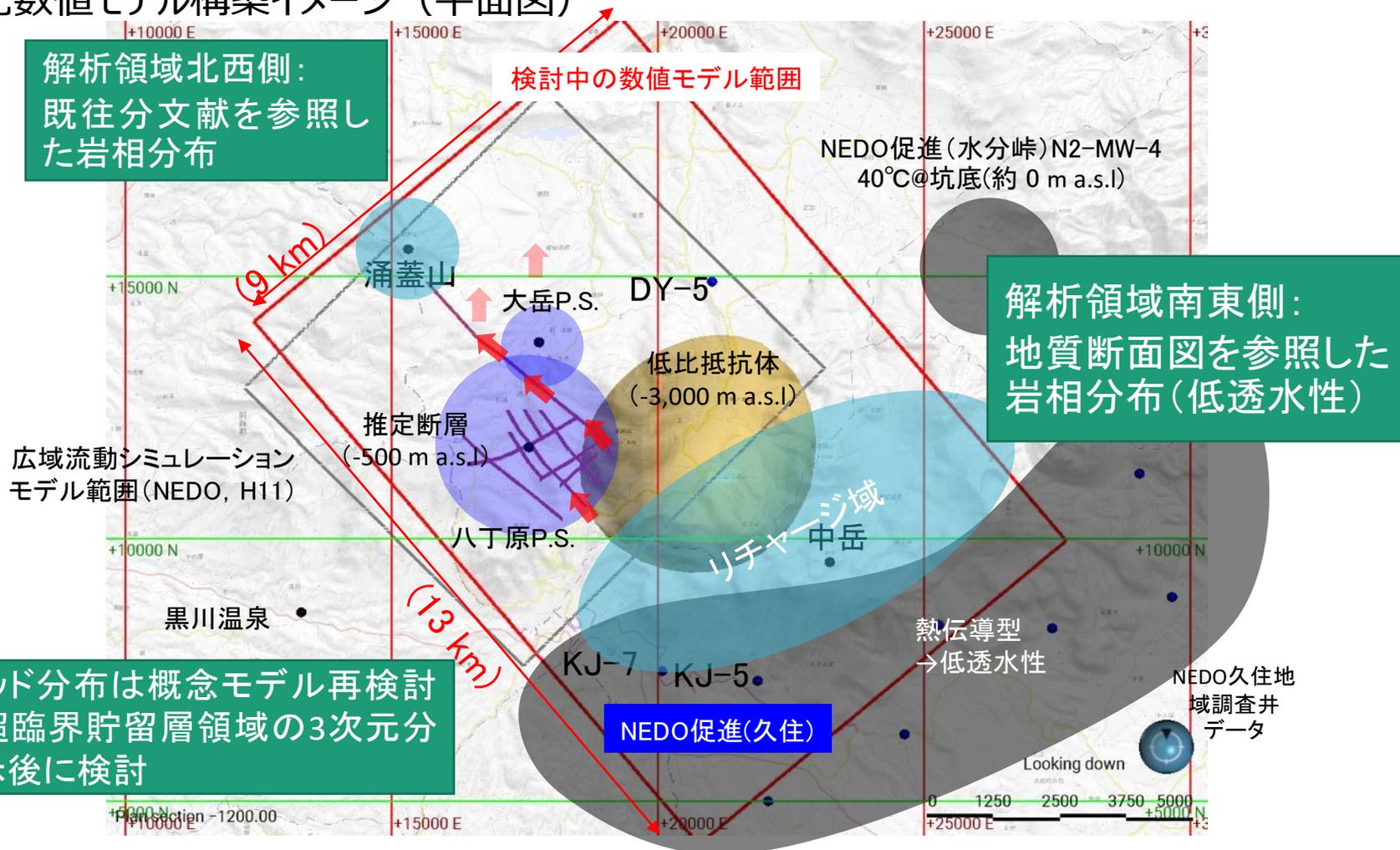
岩相	孔隙率[-]	浸透率 [m ²]
RT001	0.080	1.0 × 10 ⁻¹⁵
RT002	0.080	1.0 × 10 ⁻¹⁵
RT003	0.100	1.0 × 10 ⁻¹⁵
RT004	0.010	1.0 × 10 ⁻¹⁷
RT005	0.120	1.0 × 10 ⁻¹⁸
RT006	0.040	1.0 × 10 ⁻¹⁶
RT007	0.100	1.0 × 10 ⁻¹⁴
RT008	0.050	(1.0 × 10 ⁻¹⁷)

全体的にモデル温度が推定温度分布と比較して小さいため、モデル調整を実施中。

研究成果

研究開発項目②: 資源量評価

3次元数値モデル構築イメージ (平面図)

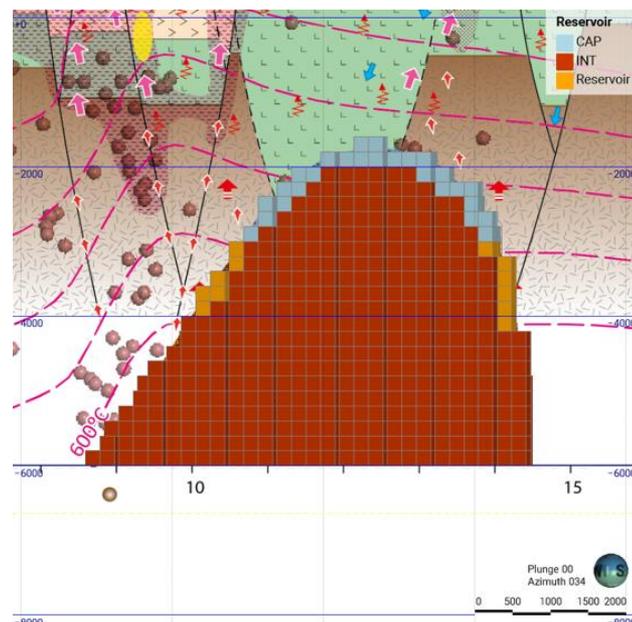
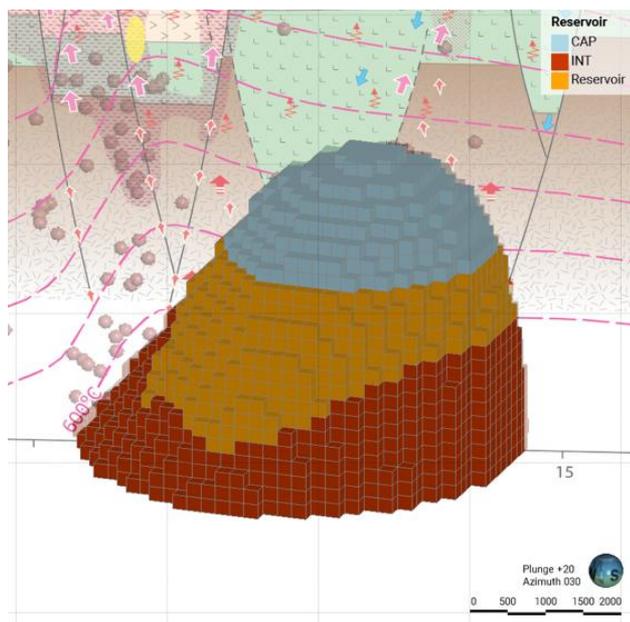


研究成果

研究開発項目②: 資源量評価

項目①によって同定された超臨界地熱貯留層領域に基づいて、3次元構造化を行った。
超臨界地熱貯留層領域の条件

- 深部低比抵抗体内
(比抵抗値の対数で0.6以上, 0.75以下)
- 標高-3,000m a.s.l 以深
- 温度600°C以上



超臨界地熱貯留層の3次元モデル化
(左: 鳥観図, 右; B-B' 断面における断面図)

研究成果

研究開発項目③: 深部構造調査試錐の検討 / 研究開発項目④: 超臨界地熱調査井仕様の検討

坑井仕様・作業工程策定

掘削ターゲット

- ・温度340°C以上
- ・低比抵抗域上部

掘削概要計画の検討

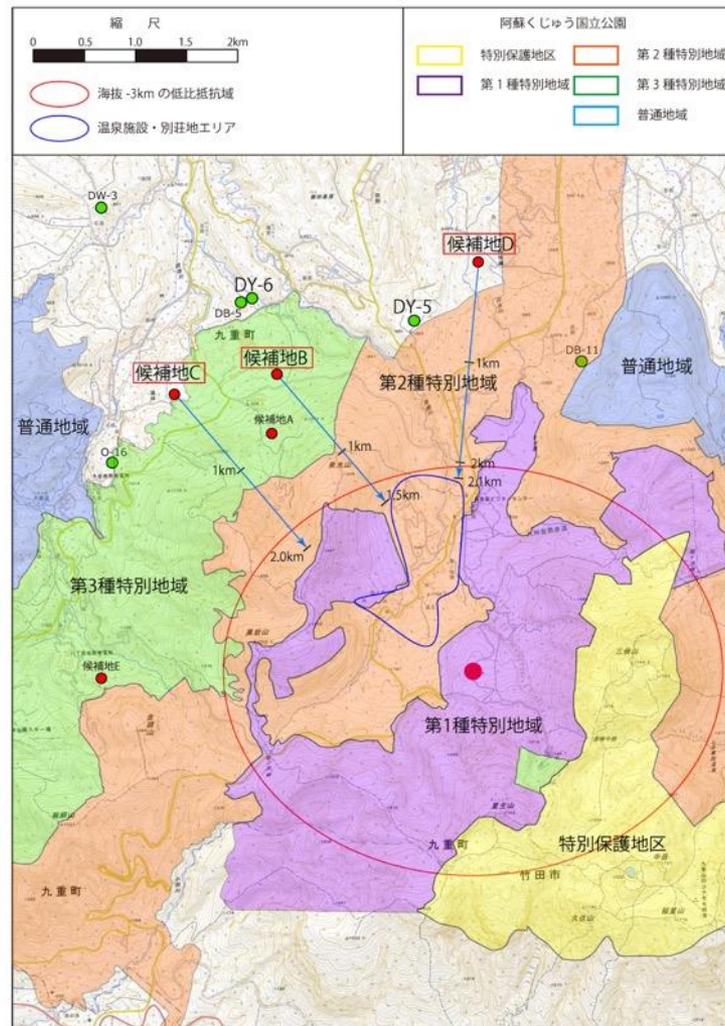
- ・候補地B、C、D
- ・ケーシングプログラム
- ・傾斜掘削計画を検討

掘削計画書、費用等の検討

- ・敷地の制約(国立公園、既存施設等)を考慮し、候補地Cからの掘削計画を検討中

深部構造調査試錐掘削計画

候補地	坑底偏距	掘削長
B	約1.5km	3,500m
C	約2km	3,800m
D	約2.1km	3,900m

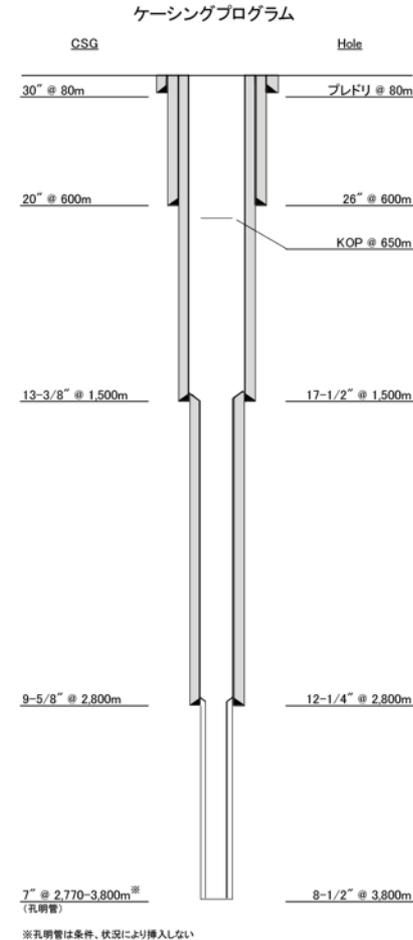
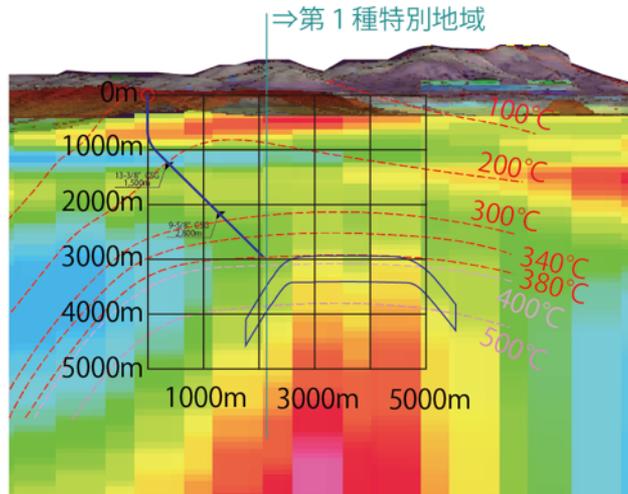


研究成果

研究開発項目③: 深部構造調査試錐の検討 / 研究開発項目④: 超臨界地熱調査井仕様の検討

坑井仕様・作業工程策定 候補地Cからの計画

構造調査試錐掘削計画概要(候補地C)				
坑口座標		X:705084.1 Y:3667727 (UTM zone52)		
坑口標高		910 m		
CSG Program		Directional program		
Hole	Casing	Depth	KOP	650 m
ブレドリ	30"	80 m	EOB	1,100m
26"	20"	600 m	BUR	3° /30m
17-1/2"	13-3/8"	1,500 m	Max Incl.	45.0 °
12-1/4"	9-5/8"	2,800 m	Azimuth	TN:140° MN:147°30'
8-1/2"	(7")	3,800 m	Vertical Depth	2,964.33 m
—		Deviation		2,077.00 m



研究成果

研究開発項目③: 深部構造調査試錐の検討 / 研究開発項目④: 超臨界地熱調査井仕様の検討

坑井仕様・作業工程策定 掘削基本計画表

予想層序	近隣坑井 逸脱状況 (坑径、深達、レートL/h)	ケーシング・セメンチング計画	坑径	泥水計画	ケーシング計画・傾斜制御計画	セメンチング	問題点・検討課題	対応策	補足
九重岩類 一目山岩層	DY-5, 47.7m, 3,400~L/min DY-5, 89.5m, 3,400~L/min	30° @80 m (TV660m)	34°	エア	逸脱の逸水層を掘す Φ711.2mm, t12.7mm	ケーシング周りのセメンチング (80 m付近)	・全量逸脱、地表への逸水漏洩	・エア掘削法のメリットによる逸水層の追跡	・敷設工事に実施 ・掘削機は不可
					逸脱逸水区間の追跡を目的とする 20° 94.0%, J-55, BTC, R2	・インナーストリックダブルホール (0 - 600 m) ・1.80sg GWCスライ、脱水調整剤使用 ・BHCT/BHST @BTM = xxdegC / 150degC ・OH Excess 150%準備、70%使用予定 ・地表までセメント無し場合はトップジョブ実施 ・逸脱状況に応じて、CSG CMT/LCLCMを添加する。	・掘進中の逸脱発生@90 m付近	・逸脱対策セメンチング準備、LCH準備 ・12-1/4"パイロントールの取付及び機番	【ピット計画】 IADC:231,537,615 【掘削バロメータ】 WOB: 10-15 ton, TDS: 30-50 rpm, Pump: 3000-4000 lpm
豊肥火山岩類 鳴子川火山角礫岩層	DY-5, 555m, 250~700L/min DY-5, 770m, 3,000~L/min	20° @600 m (TV660m)	26°	ペトナド 泥水	逸脱逸水区間の追跡を目的とする 13-3/8" 54.5#, J-55, BTC, R2	2ステージダブルホールセメンチング (0 - 1500 m) 1stステージ (700 - 1500 m: 800 m) ・Lead 1.60sg GWCスライ、脱水調整剤使用 ・Tail 1.85sg GWCスライ、脱水調整剤使用 ・BHCT/BHST @BTM = xxdegC / 200degC ・OH Excess 100%準備、50%使用予定	・掘進中の逸脱発生@700m, 1500m付近	・逸脱対策セメンチング準備、LCH準備 ・12-1/4"パイロントールの取付及び機番	【ピット計画】 IADC:535,615 【掘削バロメータ】 WOB: 10-15 ton, TDS: 30-50 rpm, Pump: 3000-4000 lpm
豊肥火山岩類 コトバキ山岩層	DY-6, 1,564m, 200L/min DY-6, 1,639m, 150L/min DY-6, 1,699m, 240L/min	13-3/8" @1500m (TVD1337.99m)			高温度泥水 (BX)	【傾斜制御計画】 KOP: 650 m BUR: 3.0 deg/30m (EOB: 1100 m, Inc: 45°)	2ndステージ (0 - 700 m: 700 m) ・1.80sg GWCスライ、脱水調整剤使用 ・BHCT/BHST @BTM = xxdegC / 150degC ・OH Excess 100%準備、50%使用予定 ・地表までセメント無し場合はトップジョブ実施 ・逸脱状況に応じて、CSG CMT/LCLCMを添加する。	・セメンチング中の逸脱によるTOC低下	・セメンチング前の逸脱発生によるLCHM追加 ・トップジョブ準備 (パイプ類、スライ等)
豊肥火山岩類 南平岩層			逸脱区間の追跡を目的とする 8-1/2"坑径を掘削し目標深度に到達するよう 深達率をケーシングをセッとする 9-5/8" 40#, J-55, BTC, R2	2ndステージ (1500 - 2200 m: 700 m) ・1.80sg GWCスライ、脱水調整剤使用 ・BHCT/BHST @BTM = xxdegC / 200degC ・OH Excess 100%準備、50%使用予定 ・逸脱状況に応じて、CSG CMT/LCLCMを添加する。	・掘進中の逸脱発生@1,600m, 2,000m付近	・逸脱対策セメンチング準備、LCH準備	【ピット計画】 IADC:537,617 【掘削バロメータ】 WOB: 10-15 ton, TDS: 30-50 rpm, Pump: 2000-3000 lpm		
豊肥火山岩類 八丁原岩層	DY-6, 1,983m, 50L/min DY-6, 2,080m, 250L/min DY-6, 2,262m, 800L/min	9-5/8" @2800 m (TVD2257.22m)	12-1/4"	高温度泥水 (BX or G-5005)	【傾斜制御計画】 沿角掘削	・逸脱対策セメンチングは成孔ラッド or GWC使用	・全量逸脱発生時の水不足	・事前の最大給水レートの把握 ・貯水設備 (ピット、タンク等) の準備	・Bit*PDM*F/Sub*Stab*MWD*DC2*Jar*DC2* JO*HWDP
先玖珠変質火山岩類 凝灰岩類部層				逸脱区間の追跡を目的とする 9-5/8"のオーバーラップ長50 mのライナーとする アブラコ 20#, J-55, BTC, R2 アススト 20#, J-55, BTC, R2 ベルマウスを使用する	2ndステージ (1500 - 2200 m: 700 m) ・1.80sg GWCスライ、脱水調整剤使用 ・BHCT/BHST @BTM = xxdegC / 200degC ・OH Excess 100%準備、50%使用予定 ・逸脱状況に応じて、CSG CMT/LCLCMを添加する。	・掘進中の逸脱発生@1,600m, 2,000m付近	・逸脱対策セメンチング準備、LCH準備	【ピット計画】 IADC:537,617 【掘削バロメータ】 WOB: 10-15 ton, TDS: 30-50 rpm, Pump: 2000-3000 lpm	
先玖珠変質火山岩類 輝石安山岩溶岩 火砕岩類部層	DY-6, 2,726m, 50L/min	7"孔明管 @3800 m (TVD2964.33m)	8-1/2"	高温度泥水 (BX or G-5005) / 湧水	【傾斜制御計画】 沿角掘削	・逸脱対策セメンチングは成孔ラッド or GWC使用	・全量逸脱発生時の水不足	・事前の最大給水レートの把握 ・貯水設備 (ピット、タンク等) の準備	・Bit*PDM*F/Sub*Stab*MWD*DC2*JO* HWDP*Jar*HWDP
先玖珠変質火山岩類 石英安山岩溶岩 火砕岩類部層				【傾斜制御計画】 沿角掘削	・掘進中の逸脱発生@1,600m, 2,000m付近	・逸脱対策セメンチング準備、LCH準備	【ピット計画】 IADC:537,617,627,637 【掘削バロメータ】 WOB: 8-12 ton, TDS: 30-50 rpm, Pump: 2000-3000 lpm		
鯛生層群 安山岩溶岩 火砕岩類部層					26"坑径止後: 物理検層 17-1/2"坑径止後: 温度検層、物理検層 12-1/4"坑径止後: 温度検層、物理検層 8-1/2"坑径止後: 温度検層、物理検層 アライナー降下後: 注水試験、フォールアウト試験 ※ライナーシステムで詳細検討中	・全量逸脱発生時の水不足	・事前の最大給水レートの把握 ・貯水設備 (ピット、タンク等) の準備	・DSPを使用する場合はTDSのセーパードと一緒に考える。	
						・高トルクに伴う目標深度への未達	・シミュレーションに基づいた機材選定 ・ドリルグリップの検討、準備	・逸脱によりTD到達困難となる場合は、状況 (温度など) により逸脱発生を抑制することも検討する。	・コアピットへの深い等の負荷を避けるため、ピット径及びStab径を小さくしたものを検討する。(コア径は同じ)
						・高温度環境に伴うラック損傷、泥水の劣化	・冷却システムの準備、高濃対比泥水の使用		
						・2ステージの場合は、MSCが必要の場合にカブリワゲ	・MSCの上下にピット又はリッドパイプのセットライザーを 取付け、CESS乳剤と接触しないようにする。 ・シャードは最低限とする。		
						・ライナー部でヌレが影響する。	・掘削機でカブリワゲの十分な循環量を確保する ・ゲルの使用を検討する。		
						・高トルクに伴う目標深度への未達	・シミュレーションに基づいた機材選定 ・ドリルグリップの検討、準備		
						・コア採取/100m以内の温度の上昇	・冷却システムの準備、高濃対比泥水の使用 ・掘削機高降下時、掘削開始時の十分な坑内冷却		
						・H2Sが又流出による災害	・マッドログにH2センサーの組み込み、ガスマスク等の準備		

研究成果

研究開発項目③: 深部構造調査試錐の検討 / 研究開発項目④: 超臨界地熱調査井仕様の検討

坑井仕様・作業工程策定

- 補完地表調査結果から得られる地熱概念モデルに基づく地熱調査井のターゲット整理中
- 掘削ターゲットが決まれば、掘削等条件を整理し、掘削基本計画・詳細計画の順で検討・策定を行う

技術的検討

- 坑井設計・掘削ソフトウェアを用いて泥水循環・地層温度等のシミュレーションを実施
- アルミナセメントについて、長期養生試験・耐酸性試験を実施

HSE

- HSEマネジメントシステムの構築方針については、掘削工事の実施主体のHSEポリシーに則り、構築するものであるが、構造調査試錐並びに超臨界地熱調査井の実施主体等の詳細は決ることができないため、一般的な方針等の検討、整理を実施中
- HSEマネジメント方針、実施体制等については、NEDO殿と相談しながら検討を進める

研究開発の進捗状況

- 初版の地熱系概念モデルを完成し、資源量評価シミュレーションへの取り込みを行なった。
- 初版の地熱系概念モデルに基づいた2次元シミュレーション実施し、3次元モデル計算準備へ取り掛かった。
- 構造調査試錐の掘削基本計画並びに調査・試験プラン等の検討を行なった。

今後の技術課題

研究開発項目①

最新の観測結果に基づく地熱系概念モデルの更新

研究開発項目②

2次元シミュレーションのモデル調整および、3次元数値モデルの構築と自然状態シミュレーションによるモデル調整

研究開発項目③④

構造調査試錐の詳細掘削計画及び妥当性の評価・掘削費等積算、臨界地熱調査井仕様の基本計画策定