

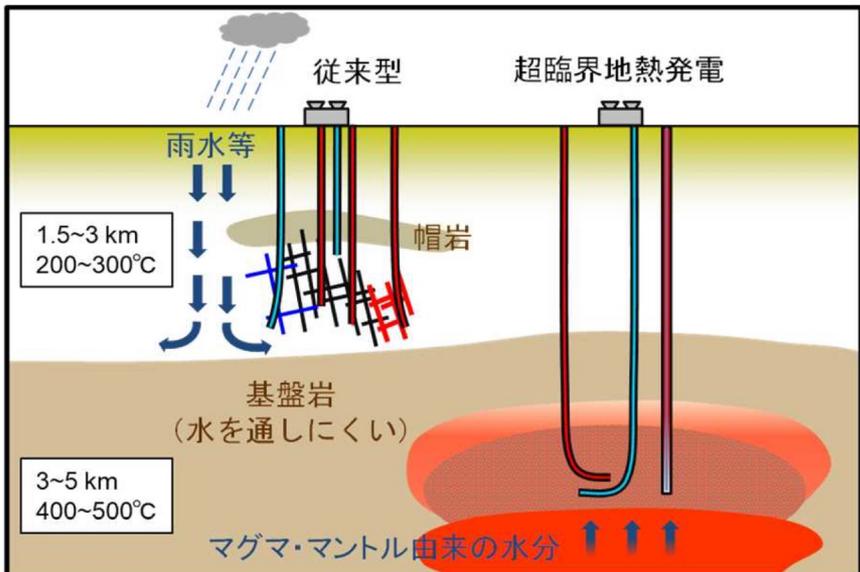
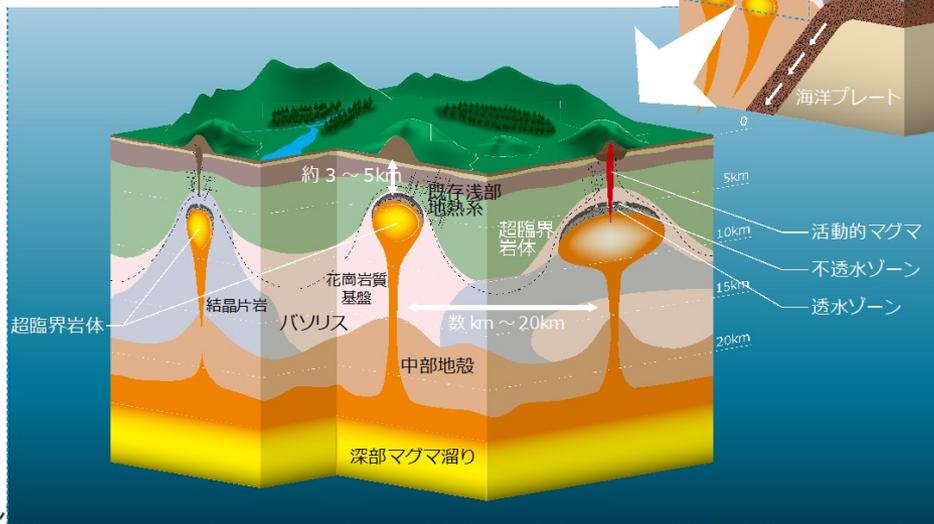
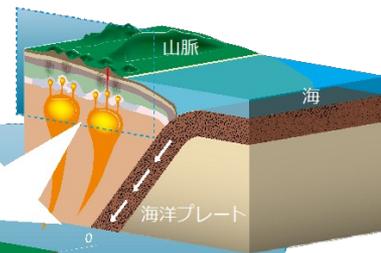
超臨界地熱資源評価に 比抵抗構造探査が果たす役割

山谷祐介・浅沼 宏

国立研究開発法人産業技術総合研究所

超臨界地熱発電の概念

超臨界地熱システムのイメージ



NEDO(2021)

	在来型地熱	超臨界地熱
深度	1,500~3,000 m	3,000~5,000 m
温度	200~300℃	400~500℃
流体起源	表層の雨水等が割れ目を経由して地下に流れ込む	プレートテクトニクスにより地下に引き込まれた海水が起源
特徴	発電方式は資源の温度・汽水比等に応じて異なる	在来型発電よりも大出力化が期待される

NEDO(2021)

葛根田地熱地域での 超臨界地熱資源評価の例

■ 地質学的解釈と温度構造推定

- Akatsuka, T. et al. (2022), Geothermal geology and comprehensive temperature model based on surface and borehole geology in Sengan, Northeast Japan, Geothermics.

■ 3次元比抵抗構造と浸透率の推定

- Yamaya, Y. et al. (2022), 3-D resistivity imaging of the supercritical geothermal system in the Sengan geothermal region, NE Japan, Geothermics.

■ 微小地震解析から推定される構造、流体の振舞い

- Okamoto, K. et al. (2022), Structures and fluid flows inferred from the microseismic events around a low-resistivity anomaly in the Kakkonda geothermal field, Northeast Japan, Geothermics.

■ 塩水の電気伝導度、超臨界地熱貯留層の比抵抗解釈

- Watanabe, N. et al. (2022), Electrical conductivity of H₂O-NaCl fluids under supercritical geothermal conditions and implications for deep conductors observed by the magnetotelluric method, Geothermics.

■ 超臨界地熱貯留層のモデル化

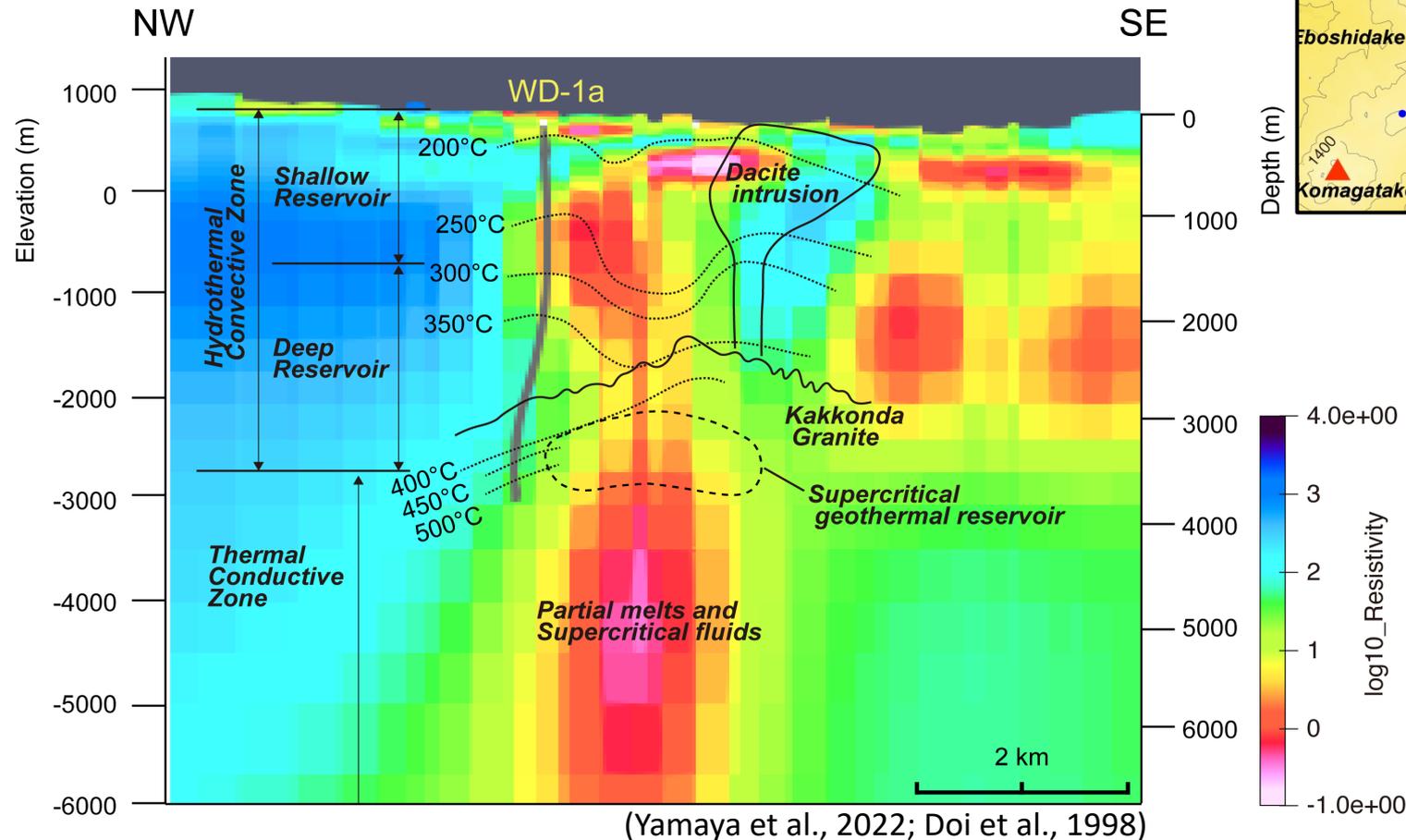
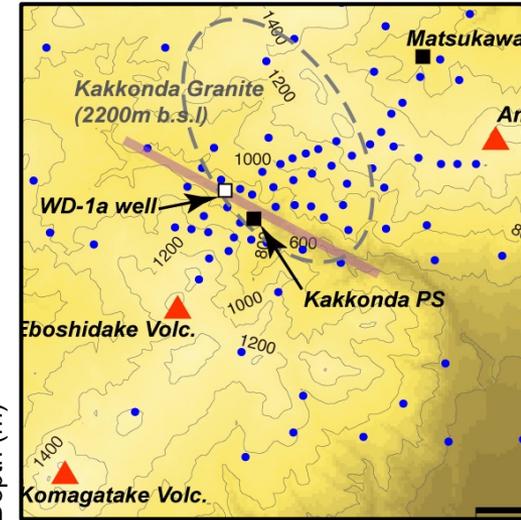
- Suzuki, Y. et al. (2022), Estimation of an ultra-high-temperature geothermal reservoir model in the Kakkonda geothermal field, northeastern Japan, Geothermics.

■ 抽熱シミュレーションおよび全般

- NEDO (2022), 2018年度～2020年度成果報告書 超臨界地熱発電技術研究開発/超臨界地熱資源の評価と調査井仕様の詳細設計/東日本・九州地域における超臨界地熱資源有望地域の調査と抽熱可能量の推定.

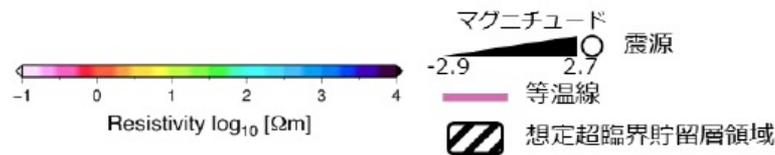
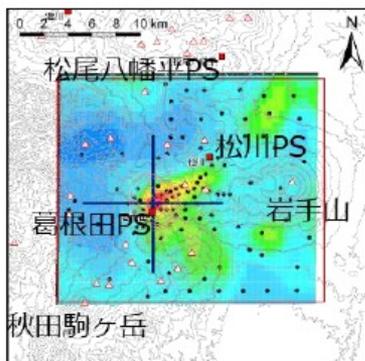
葛根田地熱地域

- **WD-1a**調査井が約3,700mまで掘削され、**500°C**以上の温度が実測された。
- 第四紀花崗岩（葛根田花崗岩）が約2800m以深で確認された。
- 葛根田花崗岩中央部に顕著な低比抵抗体が推定された
(Yamaya et al., 2022)

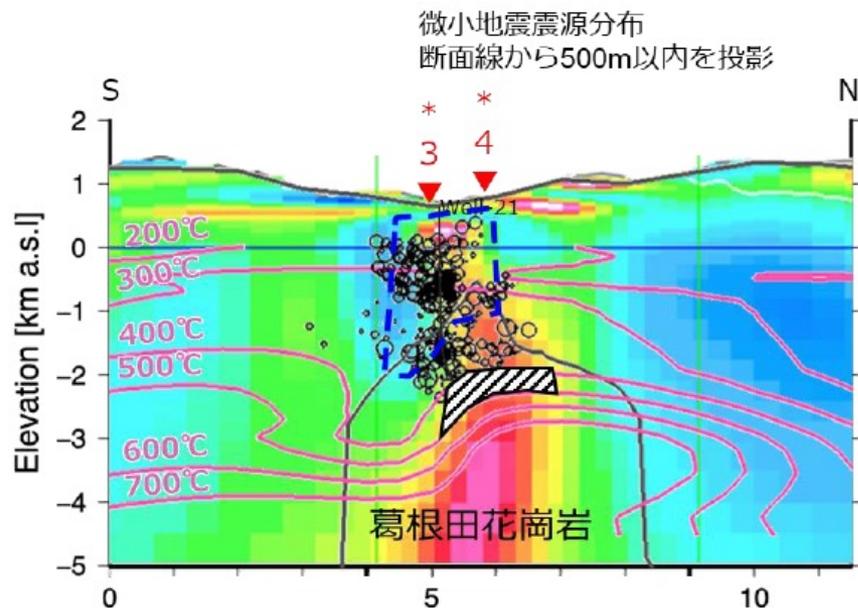
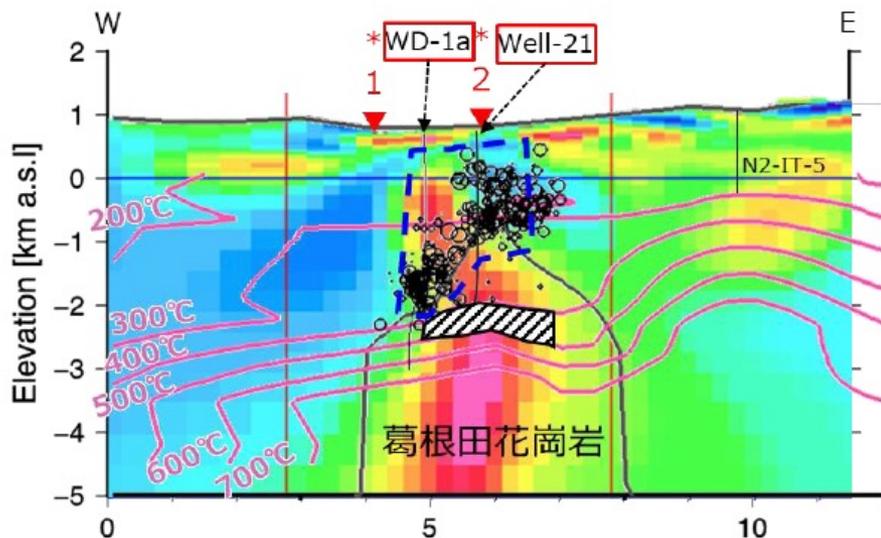


超臨界地熱貯留層の推定：総合解釈

- 葛根田花崗岩内部に低比抵抗体が温度構造に斜交して分布している。WD-1a付近の葛根田花崗岩は未変質であり、やや高比抵抗である。それに対して、低比抵抗体では花崗岩中の孔隙率や塩水含有量が増加して比抵抗が下がっている可能性がある。
- 微小地震は地層温度400℃より低温側に集中しておりその下にBDTが存在すると考える。



- *1▼ : 葛根田川
 - *2▼ : 南北断面位置
 - *3▼ : 葛根田川
 - *4▼ : 東西断面位置
- 従来型地熱貯留層
 * 葛根田地熱貯留層



(NEDO, 2022)

超臨界地熱貯留層の推定：浸透率の推定方法

MT法によって推定された比抵抗に基づき、RGPZモデル (Glover et al., 2006) によって貯留層の浸透率推定を行った。

$$k_{RGPZ} \cong \frac{d^2}{4am^2F^3} = \frac{d^2\phi^{3m}}{4am^2} = \frac{3d^2\phi^{3m}}{32m^2}$$

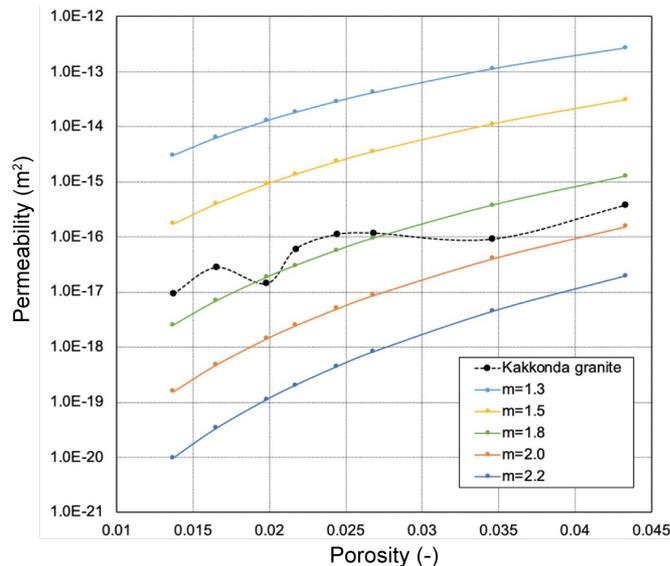
浸透率

F : formation factor ($=\rho_{\text{bulk}}/\rho_{\text{fluid}}$)

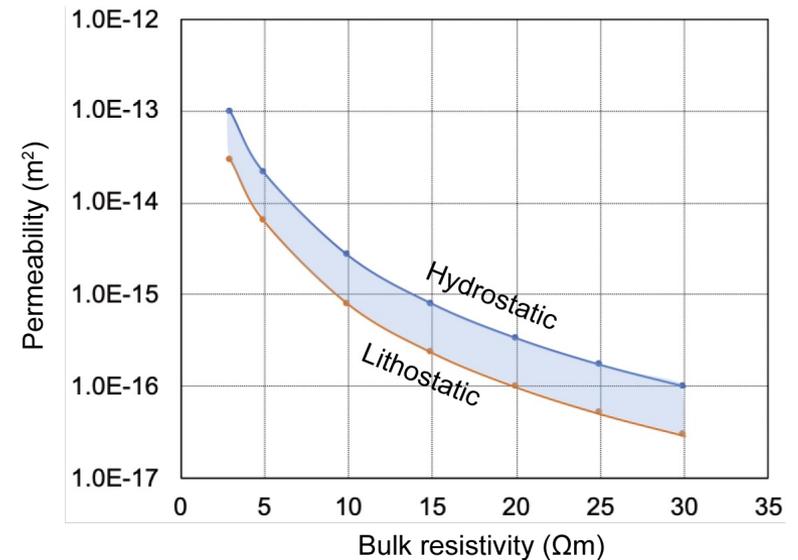
Φ : porosity m : cementation factor

d : grain size a : tortuosity factor = 8/3

- 葛根田花崗岩の岩石記載(Kanisawa et al, 1994)を参考として、 $d=1\text{mm}$ と仮定した。
- 間隙水 (6wt% NaCl) の比抵抗はWatanabe et al. (2021; 2022)に基づき、380~400 °C, 35~78 Mpaの条件で0.03~0.045 Ωm と仮定した。
- 葛根田花崗岩サンプルの浸透率と空隙率の実験室測定値 (Fujimoto et al., 2000) $m=1.8$ と推定した。



m の決定 (Yamaya et al., 2022)



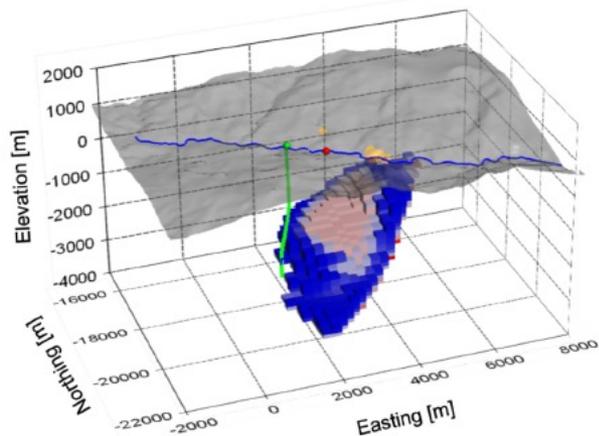
バルク比抵抗と浸透率(Yamaya et al., 2022)

超臨界地熱貯留層の推定：浸透率モデルの例

温度 $\geq 380^{\circ}\text{C}$ 、浸透率 $\geq 10^{-16}\text{m}^2$ 、厚さ500mの領域を抽出

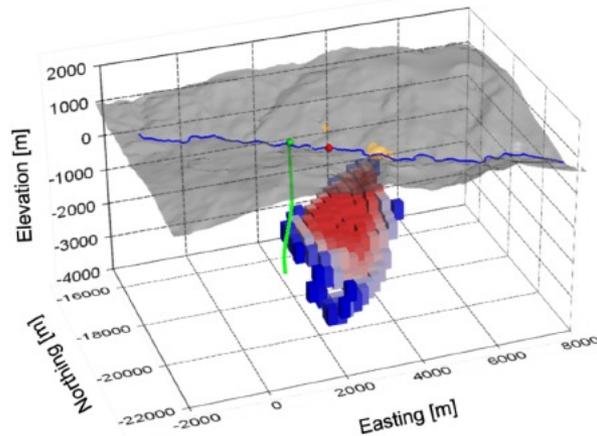
单相

(a)

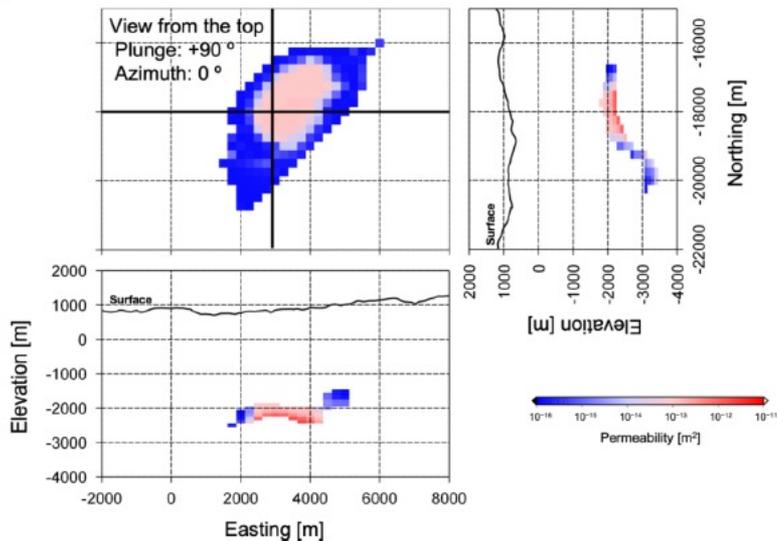


二相卓越

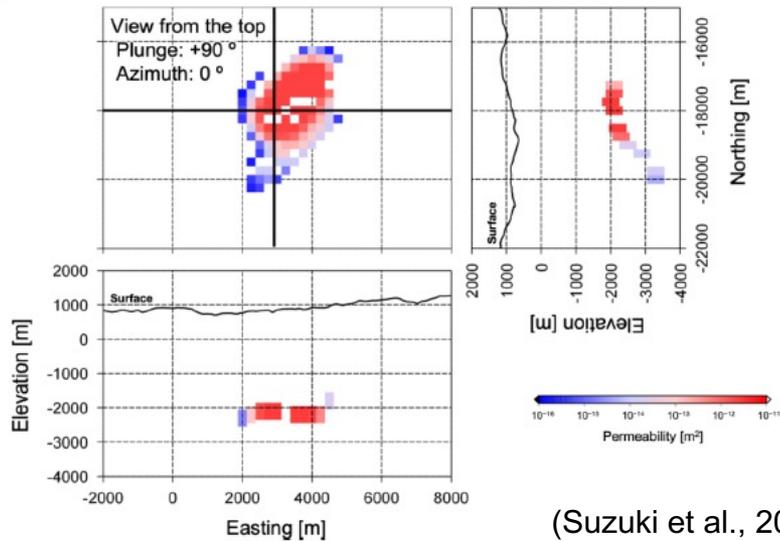
(a)



(b)



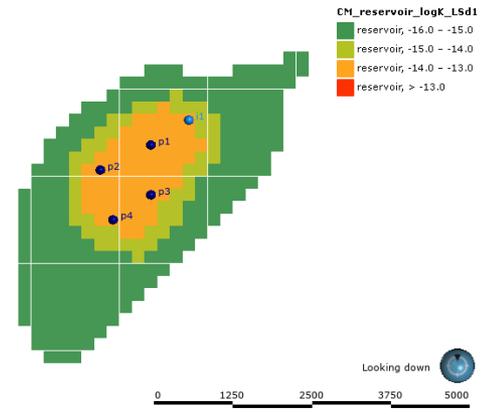
(b)



(Suzuki et al., 2022)

抽熱シミュレーション

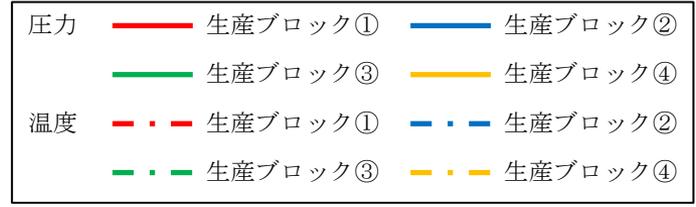
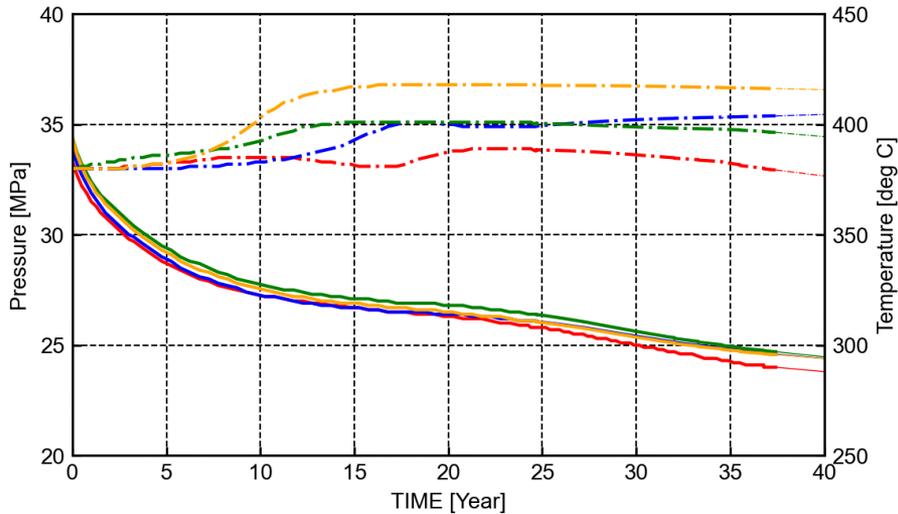
貯留層パラメータ 推定条件	過熱蒸気熱交換方式 (間接方式)	過熱蒸気直接利用方式 (直接方式)
流体性状：二相	○ 40年経過時点も100MWe 相当の蒸気量を生産可能	× 40年経過時点では100MWeに 相当する蒸気量は生産不可
流体性状：单相	○ 40年経過時点も100MWe 相当の蒸気量を生産可能	× 40年経過時点では100MWeに 相当する蒸気量は生産不可



シミュレーションに用いた
浸透率分布と坑井配置の例
(NEDO, 2022)

持続可能性維持モデル

◎ (長期に渡る持続可能性が示された)
過熱蒸気直接利用方式でも、間接方式と同程度に貯留層圧力が維持される

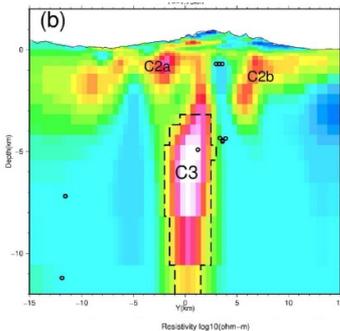


貯留層シミュレーションにおける生産ブロック
の温度・圧力推移 (持続可能性維持モデル)
(NEDO, 2022)

超臨界地熱資源評価における 比抵抗構造探査の現状と課題

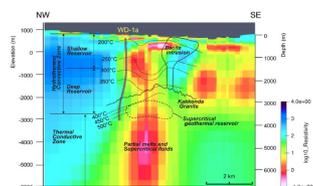
比抵抗構造探査の現状と課題

二セコ



Tamura et al. (2022)

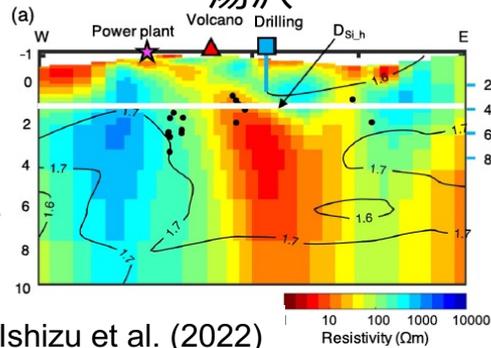
葛根田



Yamaya et al. (2022)

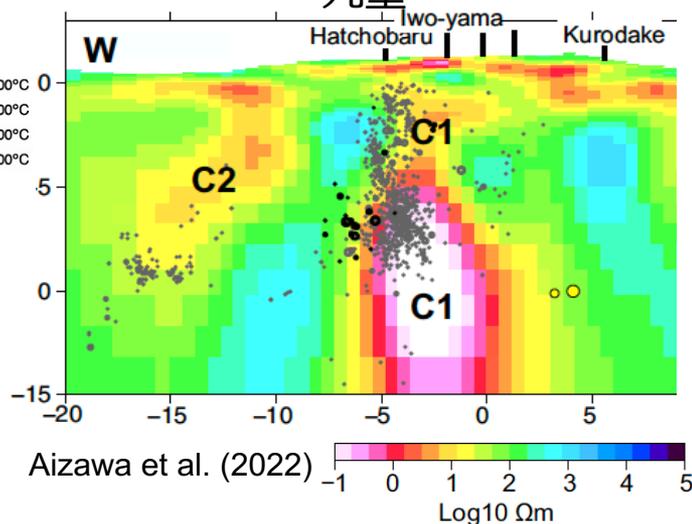
※距離スケールが一致するように配置した。
※比抵抗カラーバーは、地域ごとに異なる。

湯沢



Ishizu et al. (2022)

九重



Aizawa et al. (2022)

現状

- 高温地熱地域の地下2~5kmを上面とする顕著な低比抵抗体が見つかっており、超臨界地熱貯留層が存在する証左の一つになっている
- 超臨界地熱貯留層に感度がある3次元探査は、ほぼ比抵抗（MT法）探査のみ
- MT法探査の現状性能を超える期待
→理想としては、掘削ターゲットを決定できるくらいの構造探査

課題

- 空間分解能、比抵抗値の信頼性の向上（探査法、解析法）
- 超臨界地熱貯留層内外の比抵抗値の解釈法の確立（超臨界流体の電気伝導度、岩石電気伝導度モデル）
- 貯留層の高精度モニタリング手法 etc.