

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（八幡平地域）

岩崎 隆一

三菱マテリアルテクノ(株)

2023年2月2日

【委託先】  
三菱マテリアルテクノ(株)

【再委託先】  
地熱解析(株)

問い合わせ先  
三菱マテリアルテクノ(株)  
担当: 岩崎  
E-mail: tiwasaki@mmc.co.jp  
TEL: 03-6628-6913

# 事業概要

## 1. 背景・目的

「超臨界地熱発電技術研究開発」の一環として、超臨界地熱資源の分布、性状、規模等を把握することを目的に、超臨界地熱資源システムが形成される可能性が高い地域における超臨界水状態把握と資源量評価の詳細検討を行う。

## 2. 実施期間

開始 : 2021年6月  
終了(予定) : 2024年2月

## 3. 実施内容・最終目標

**対象地域(モデルフィールド)**: 「八幡平地域」(岩手県八幡平市)

**研究開発項目**: 地表調査, 資源量評価, 調査井仕様の検討, 経済性評価

**最終目標**: 地表調査を行うことで、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)を特定し、超臨界地熱資源の質、量及び規模を定量的に評価する(1地域あたり100MW 規模)。

# 研究開発フロー

2019～2020年度

前回PJ※成果

- MT法電磁探査, 微小地震観測データ
- 予察的資源量評価

2021～2023年度

①補完地表調査と  
概念モデル構築

- MT法電磁探査(補足調査)
- 微小地震観測
- 重力探査

数値モデル化

概念モデル  
の修正

掘削ターゲット, 想定温度・圧力環境

②資源量評価

温度・圧力  
試算結果

③深部構造調査試錐の検討

最適生産システムを  
ベースとした検討

④超臨界地熱調査井の検討

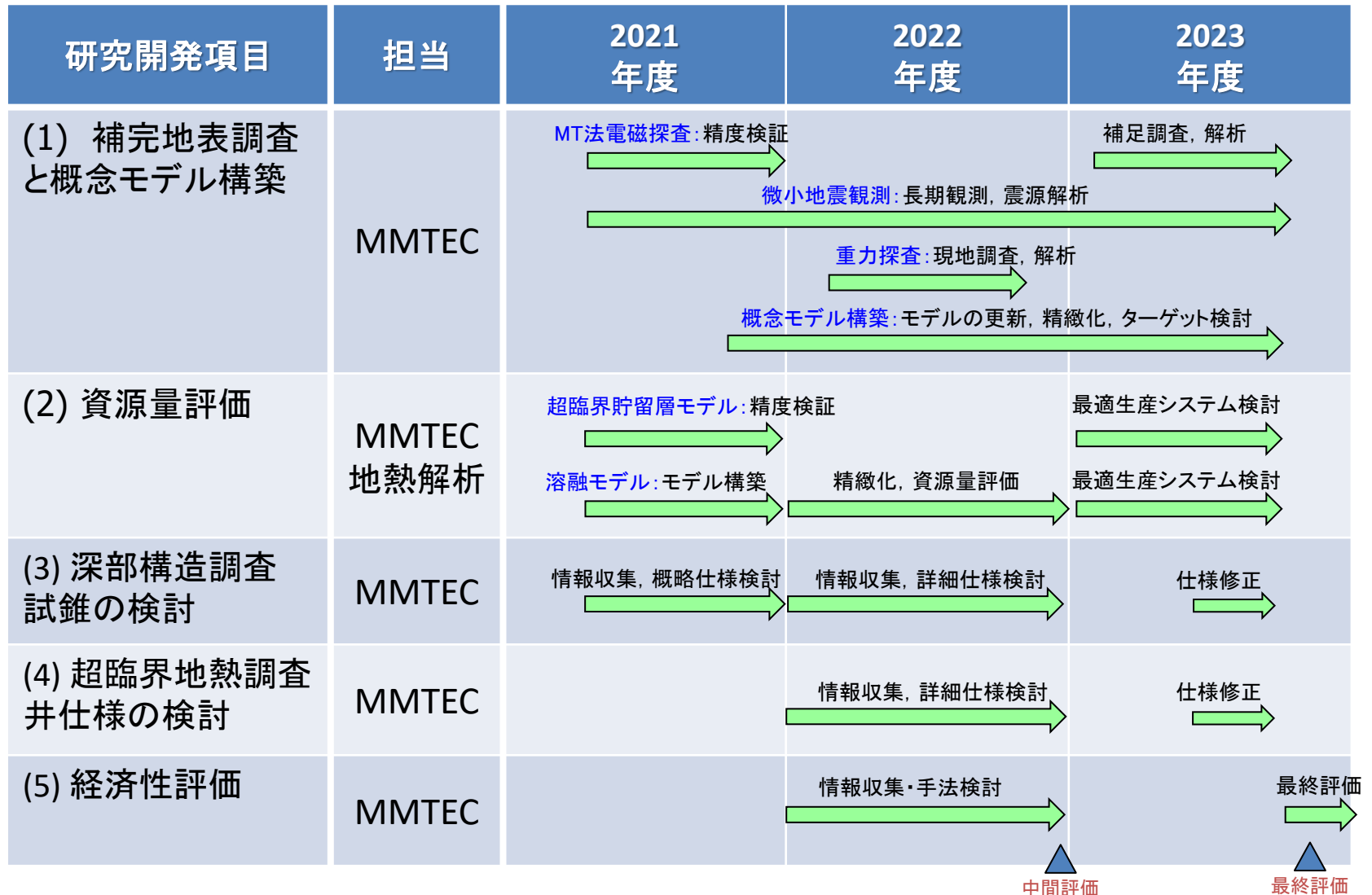
掘削費用を考慮

⑤経済性評価

※2019～2020年度「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/  
八幡平地域における超臨界地熱資源の評価に関する研究開発」

# 研究開発スケジュール

2023年1月現在

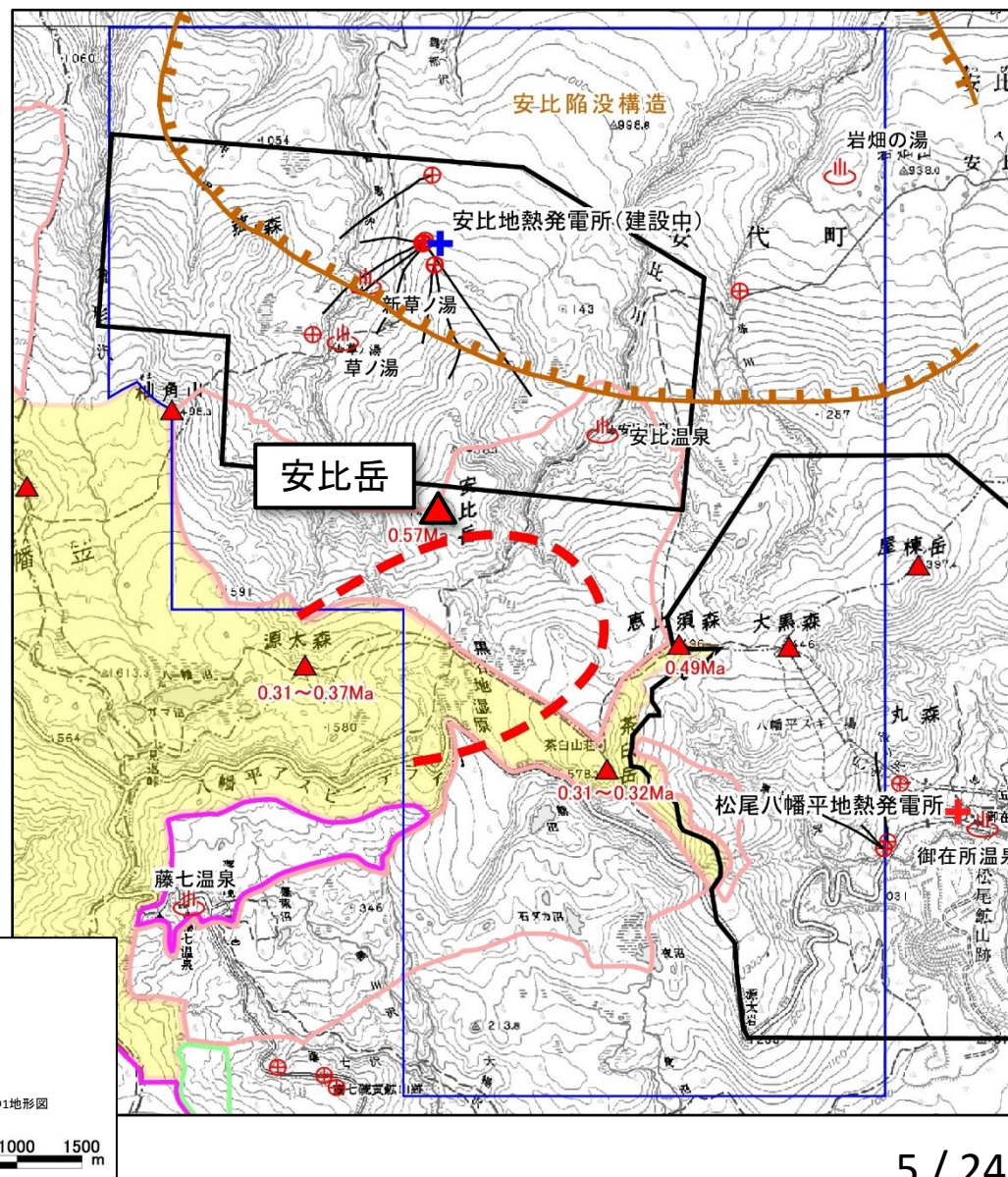


※MMTEC: 三菱マテリアルテクノ株式会社, 地熱解析: 地熱解析株式会社

# 対象地域

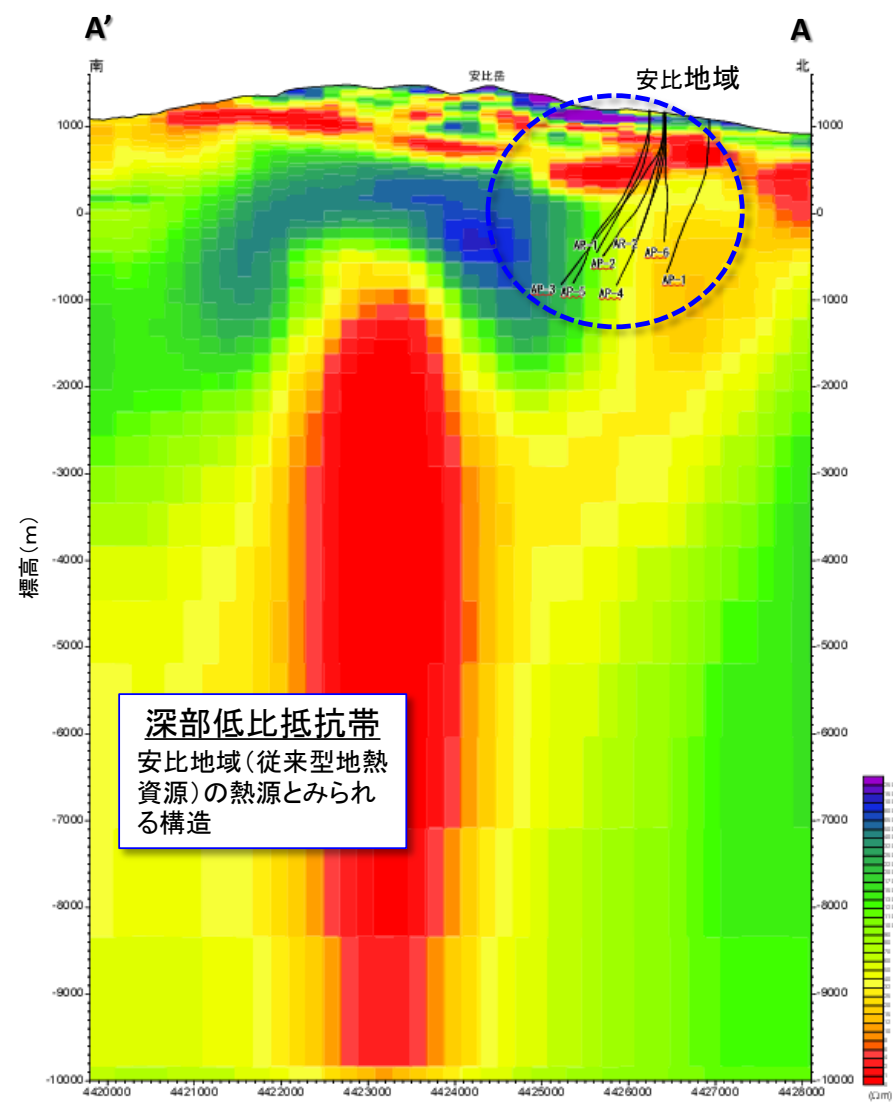
## 「八幡平地域」(岩手県八幡平市)

- 本地域には第四紀火山が多数分布し、安比および松尾八幡平地域で従来型地熱資源の開発が行われている。
- 過去の地熱調査における掘削により、 $300^{\circ}\text{C}$ を超える高温が実測で確認されており、超臨界地熱資源が賦存する可能性が高い。
- 前回PJにおいて、その高温の地熱資源の熱源とみられる構造(深部低比抵抗帯)が安比岳の南方深部に検出された。

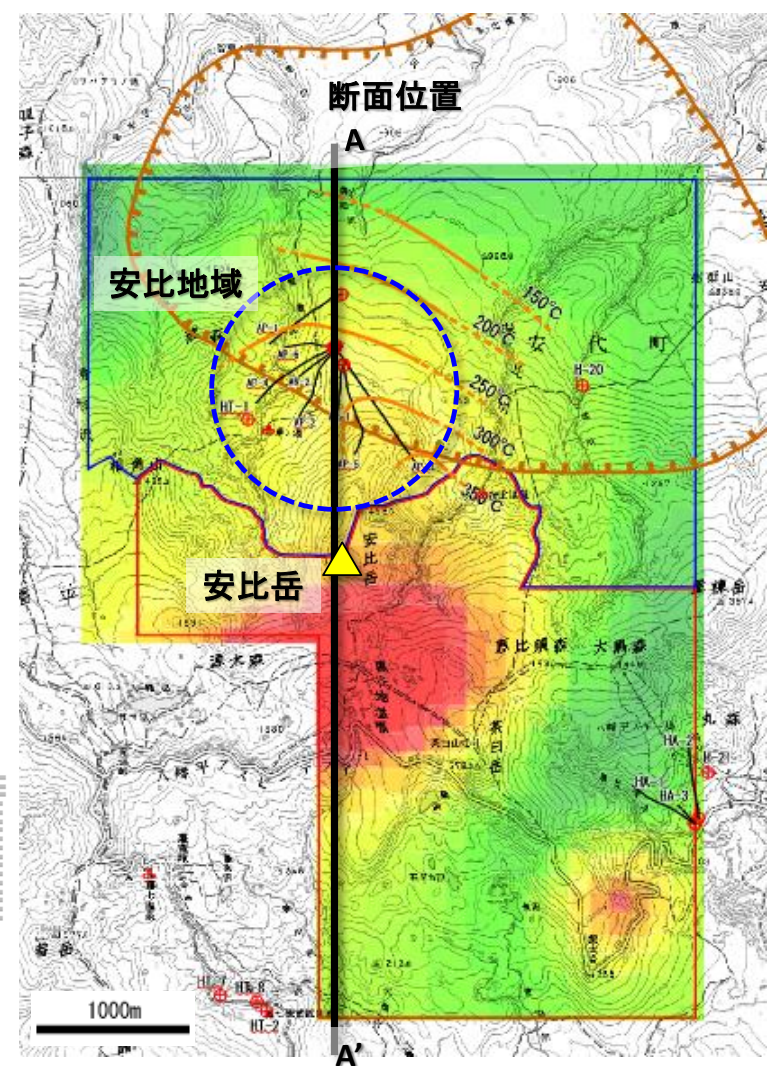


# 前回PJにおける成果

## MT法電磁探査により検出された深部低比抵抗帯



比抵抗断面図(南北:A-A'断面)



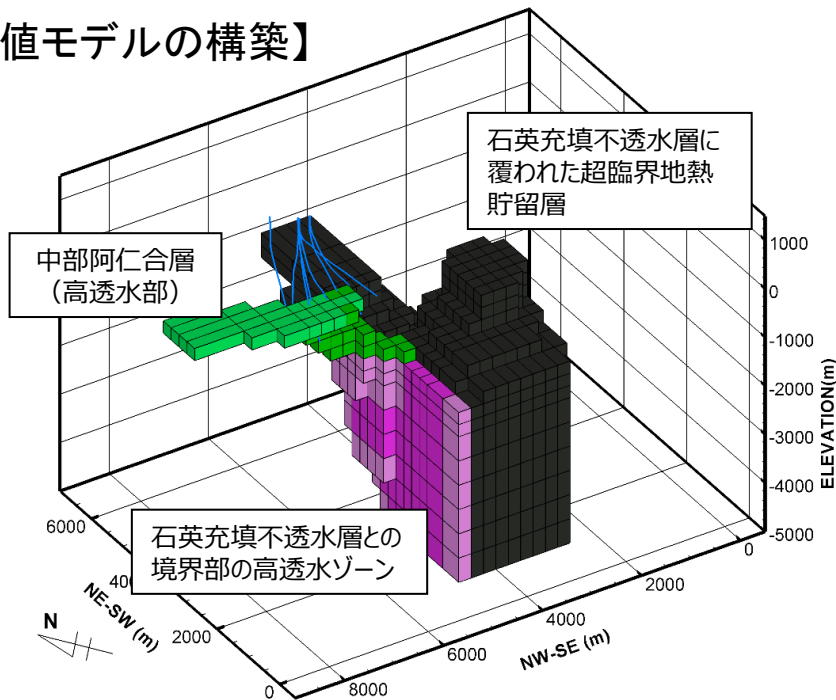
比抵抗平面図  
(標高-3000mの比抵抗分布を投影)

国土地理院発行5万分の1地形図「八幡平」・「田山」を使用

# 前回PJにおける成果

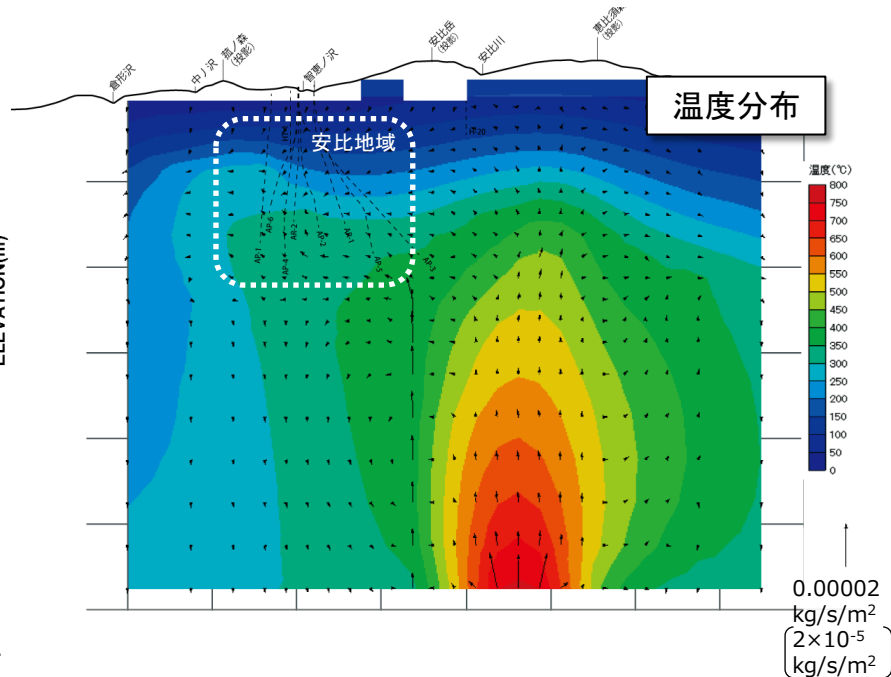
# 前回PJにおける資源量評価の概要

## 【数値モデルの構築】

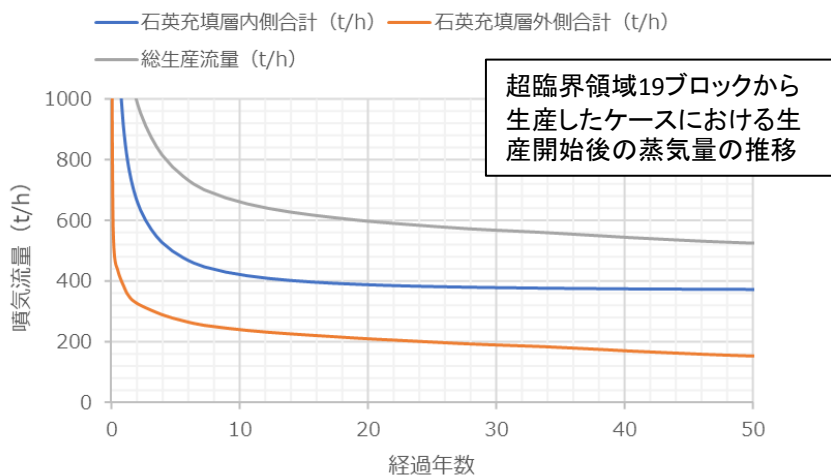


## 【自然状態シミュレーション】

流体流動・加熱機構の再現



## 【生産予測シミュレーション】 生産蒸気量の予測計算



## 【資源量評価結果】

手法名	超臨界地熱資源量
モンテカルロ容積法	<b>170 MW</b> (40~300MW)
数値モデルによる 生産予測	<b>110 MW</b> (生産開始10年後)

# 2021年度成果

## 地表調査:微小地震観測

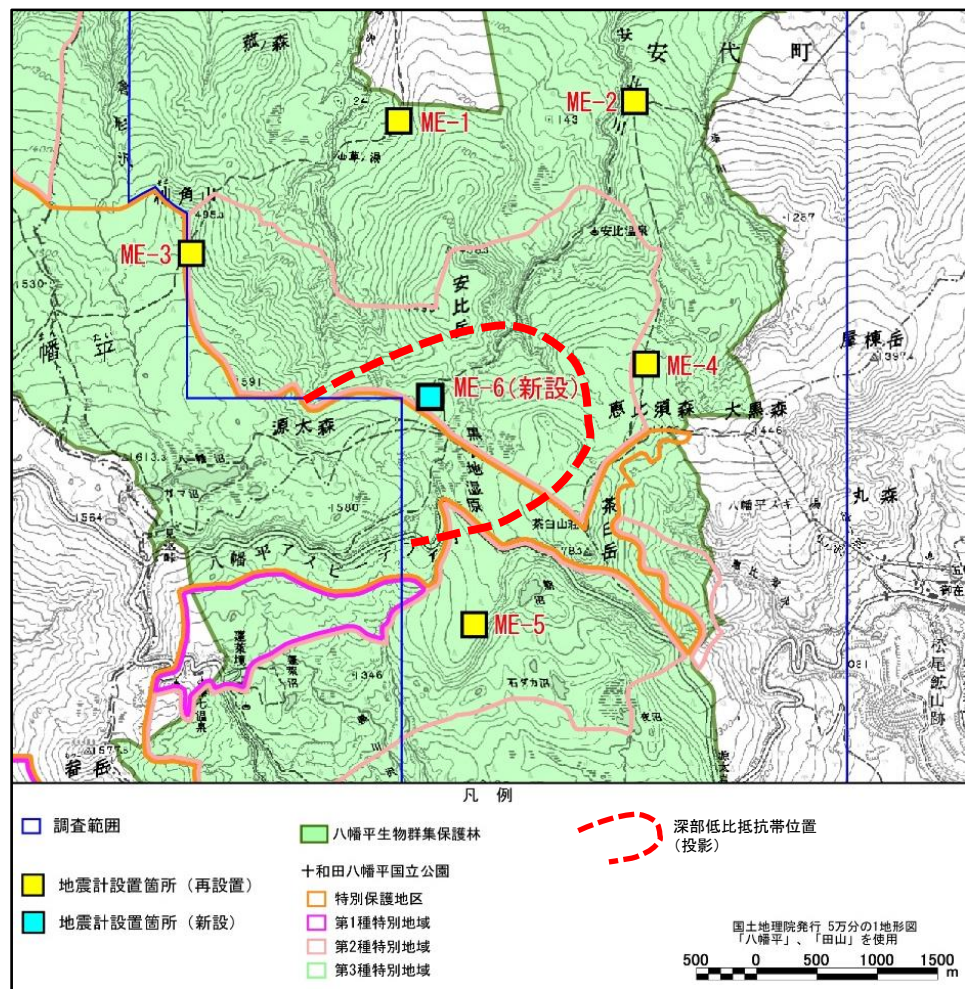
超臨界領域では、岩石は延性的な挙動を示し、微小地震の発生は少ないと考えられることから、微小地震観測により震源分布を把握し、超臨界領域の分布を推定する。

### 【微小地震観測点】

安比岳南方地下の深部低比抵抗帯を囲むように6測点 (ME-1~6) を設置

### 【観測期間】

2021年9月14日~2023年秋(冬季含む)





#### 【震源解析】

- S-P差が約2秒以内の明瞭な地震を抽出し、震源解析を実施
- 震源決定にはHirata & Matsu'ura(1987)を使用
- マグニチュードの算出には渡辺(1971)を使用

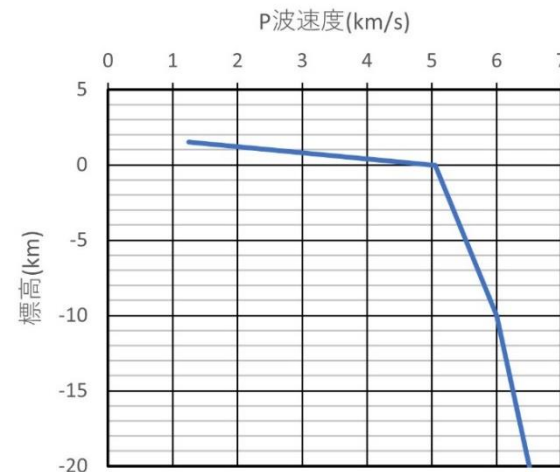
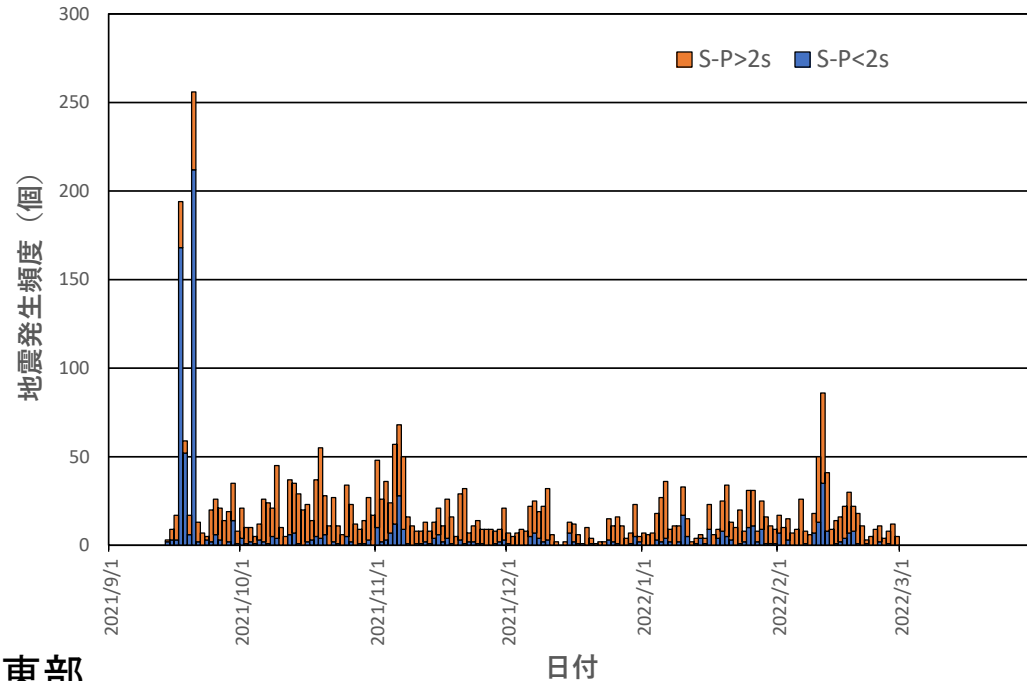
$$0.85 (M - 2.04 \log r) = \log A + 2.50$$

( $r < 200$  km)

$M$ : マグニチュード     $A$ : 最大振幅     $r$ : 震源距離

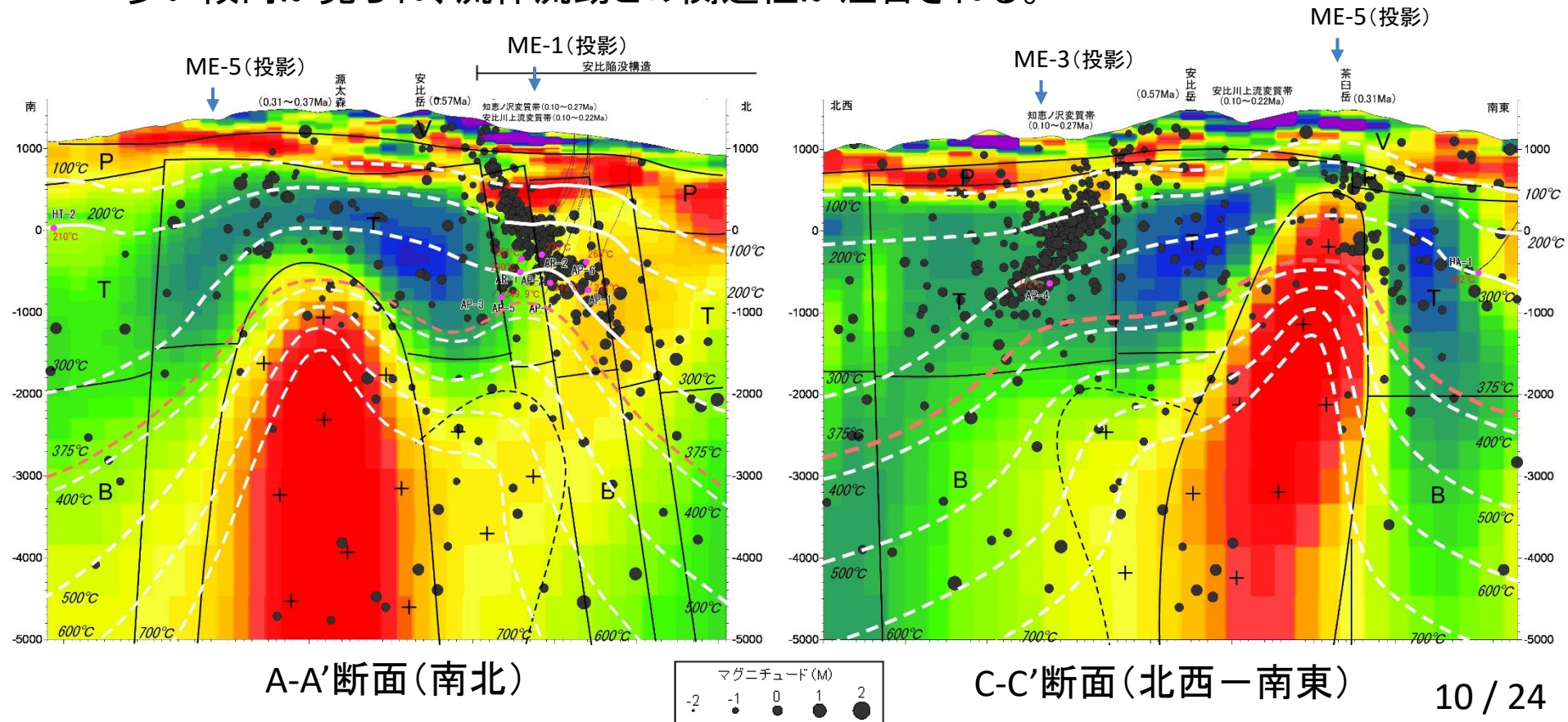
- 速度構造は、地熱開発促進調査・八幡平東部地域 (NEDO, 1981) 及び日本列島下の三次元地震波速度構造モデル (NIED) より設定 (S波速度構造は $V_p/V_s=1.73$ )

深度 (km)	P波速度 ( $V_p$ , km/sec)
0.00	5.00
0.02	5.05
10.0	6.00
20.0	6.50
40.0	7.50
600	8.20



### 【地熱構造モデルと微小地震震源分布】

- 2022年2月までの震源をプロット(各断面位置の両側1km以内の震源を投影)
- 震源分布は、浅部に多く、深部低比抵抗帯内部には少ない傾向を示し、その範囲において延性的な環境である可能性を示唆した。
- 比抵抗値の変化部(特に高比抵抗～中・低比抵抗間)に分布が多い傾向が見られ、流体流動との関連性が注目される。

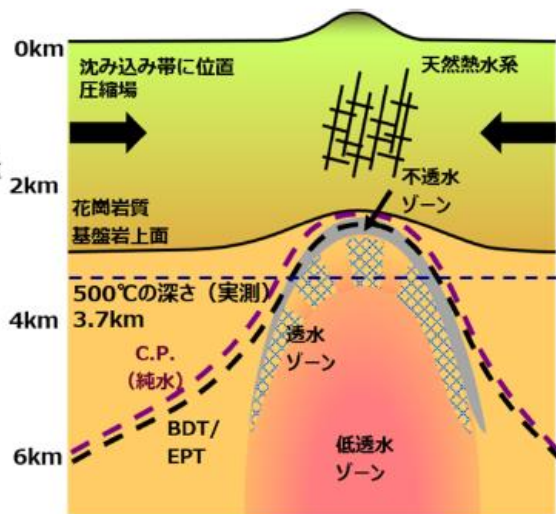


# 2021年度成果

## 地熱構造モデルの構築

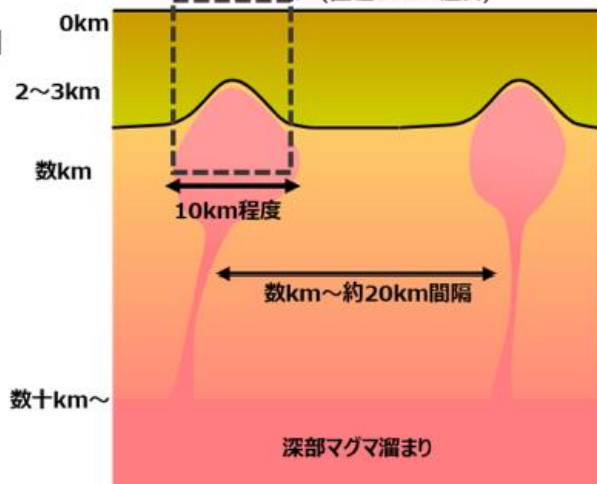
### 東北地方 詳細概念図

岩体あたり発電量  
~1.4GW  
(葛根田地域)



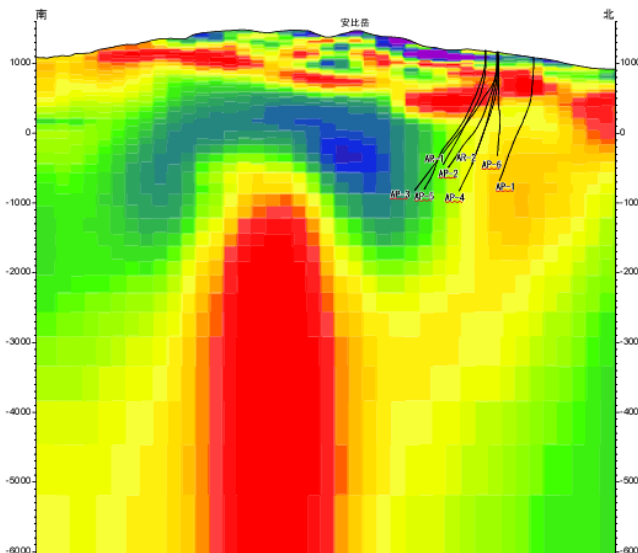
低比抵抗帯  
(直径10km程度)

### 東北地方 広域概念図



東北地方(葛根田)の超臨界  
岩体の概念図(NEDO(2019))

MT法電磁探査で検出された深部低比抵抗帯

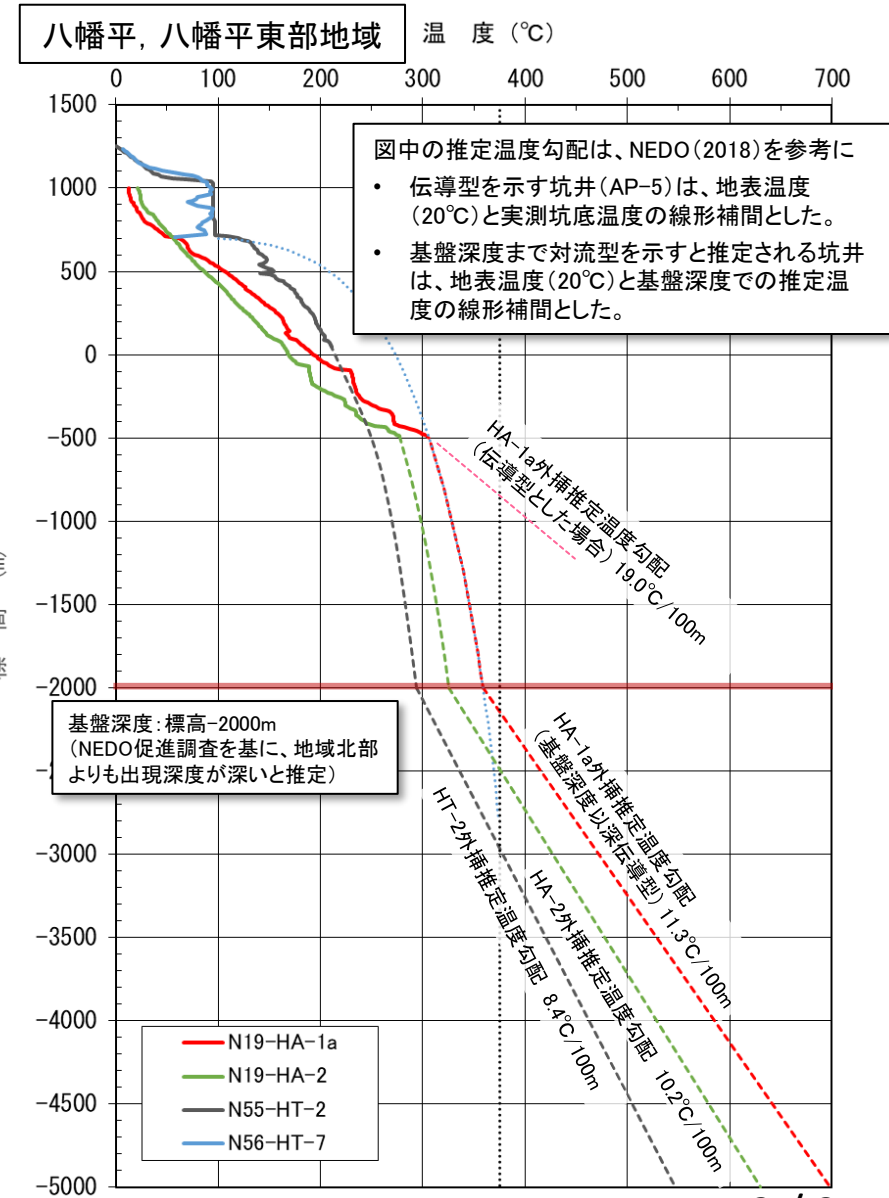
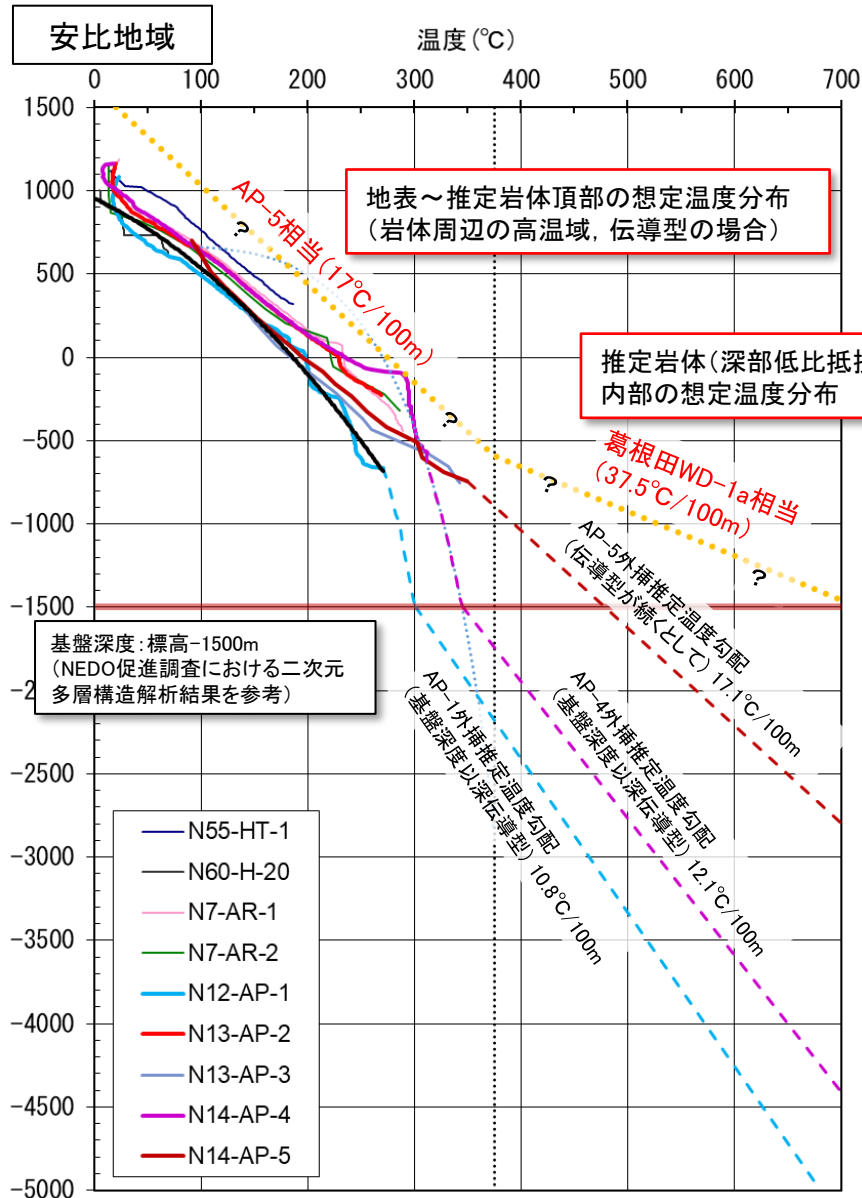


- MT法電磁探査で検出された深部低比抵抗帯は、その局所的な分布形状から考えて、熱源に相当する最近の火山活動を反映したものと推定される。
- 分布深度が比較的浅く、安比地域に高温の蒸気卓越型貯留層が形成された要因と考えられる。
- 熱源に相当する構造であれば、低比抵抗を示す要因として、マグマ起源の高塩濃度の流体の分布を反映している可能性がある。

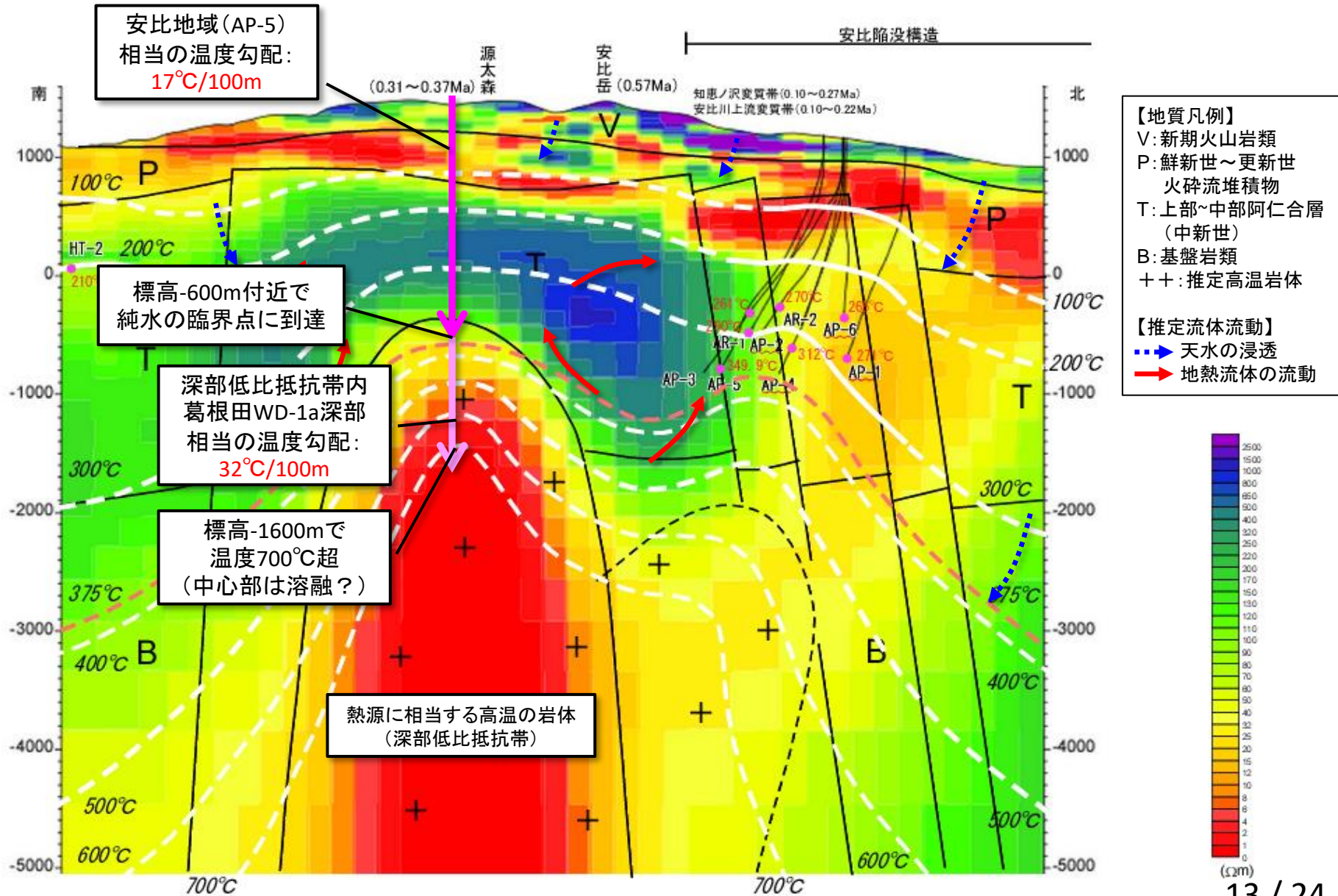
# 2021年度成果

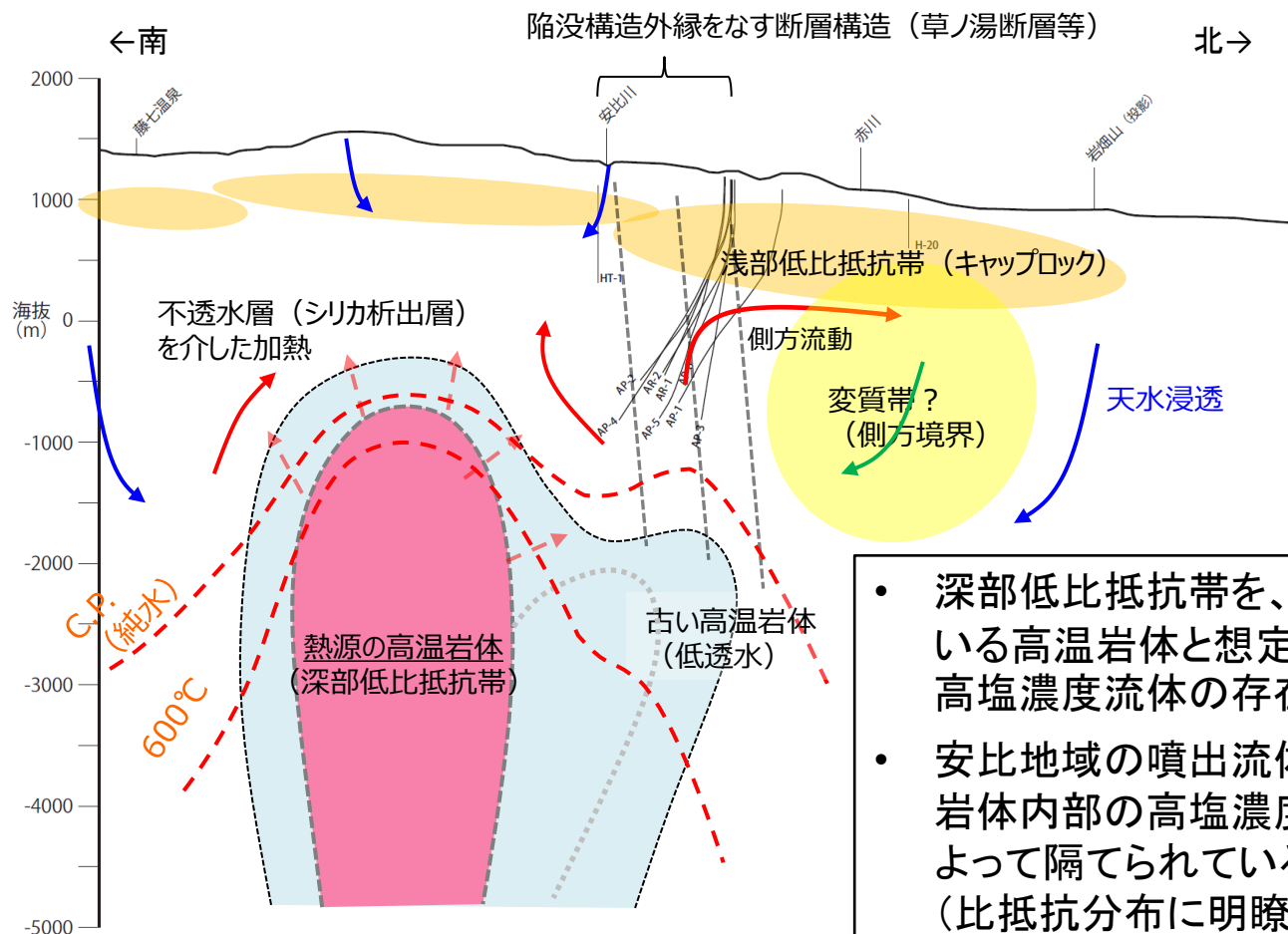
## 地下温度構造の推定

既存坑井温度データ(検層)等の外挿により、  
標高-5kmまでの地下温度分布を推定。



### 【A-A'断面(南北)における推定図】



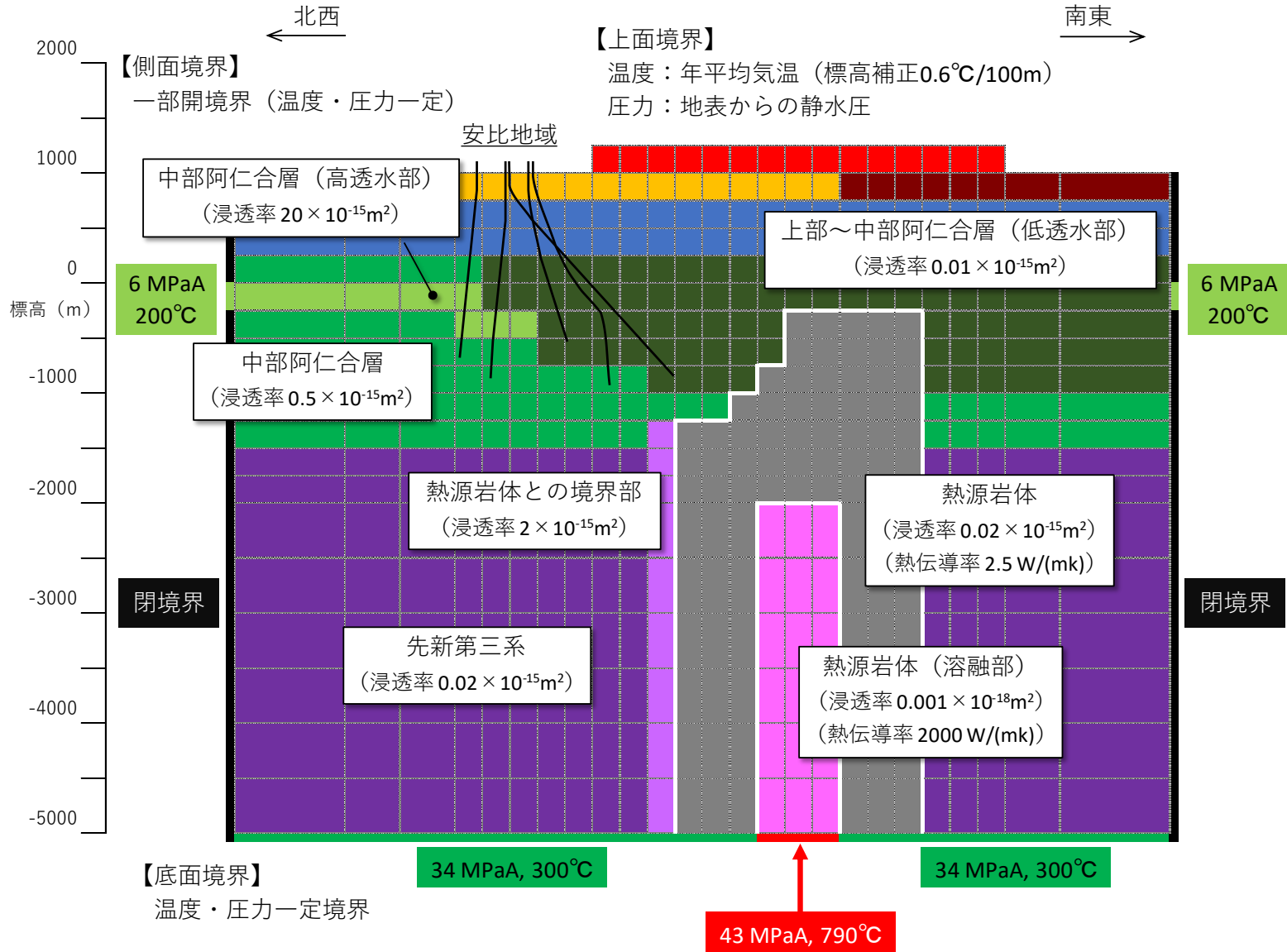


- 深部低比抵抗帯を、安比地域の熱源となっている高温岩体と想定。低比抵抗を示す要因は、高塩濃度流体の存在によるものと推定される。
- 安比地域の噴出流体は天水起源であり、高温岩体内部の高塩濃度流体とは、不透水構造によって隔てられている状態と推定。(比抵抗分布に明瞭なコントラスト)
- その場合、浸透した天水は、不透水層を介した熱交換により加熱され、通路となる構造(断層, 陥没構造)を通じて流動し、現在の安比地域地熱貯留層を形成したと解釈される。

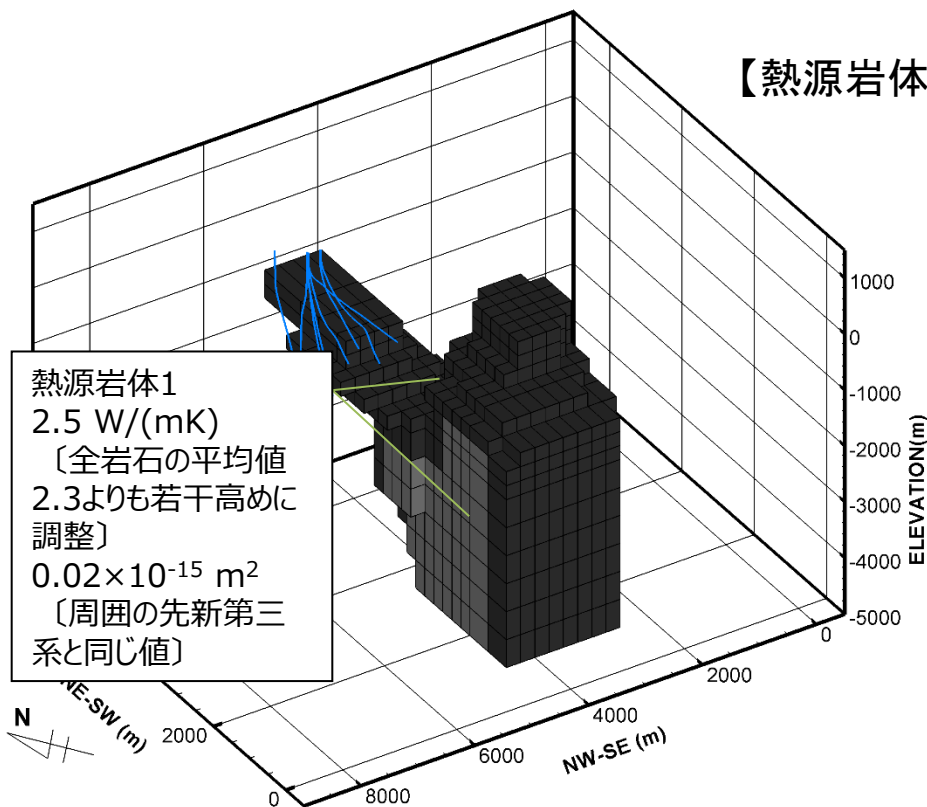
単純に考えると2つのモデルで表現される。

	①超臨界貯留層モデル(前回PJ)	②熱伝導モデル(2021年度検討)
モデル図		
熱源岩体内部の構造	<ul style="list-style-type: none"> <li>外縁部に不透水層(シリカ析出層)が形成された低透水の岩体</li> <li>内部に高温流体の流動が存在</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>極低透水～不透水の岩体</li> <li>熱源岩体中心部に高温溶融部が残存</li> </ul>
低比抵抗の要因	<ul style="list-style-type: none"> <li>マグマ起源の高塩濃度流体が、貯留層を形成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>マグマ起源の高塩濃度流体が、熱源岩石中に包有されている</li> </ul>
熱の供給	<ul style="list-style-type: none"> <li>熱源岩体内深部より高温流体が流入・循環することにより熱を供給</li> <li>不透水層を介した熱交換で天水を加熱</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>溶融部からの熱伝導により熱を供給</li> <li>不透水層を介した熱交換で天水を加熱</li> </ul>

### 【熱伝導モデルの設定】





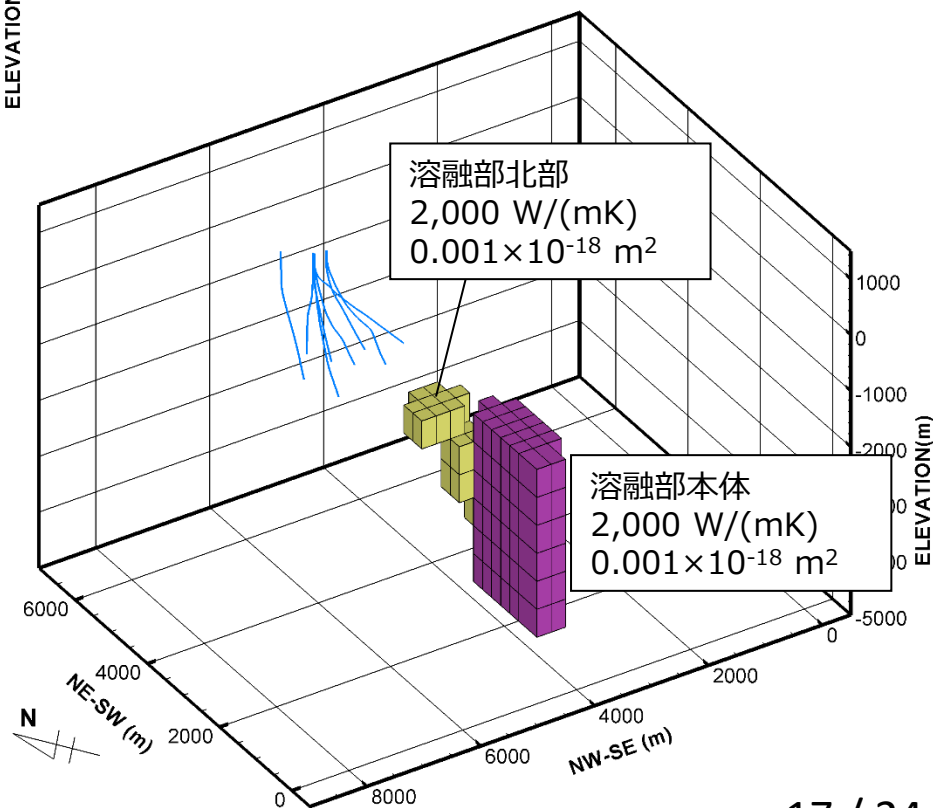


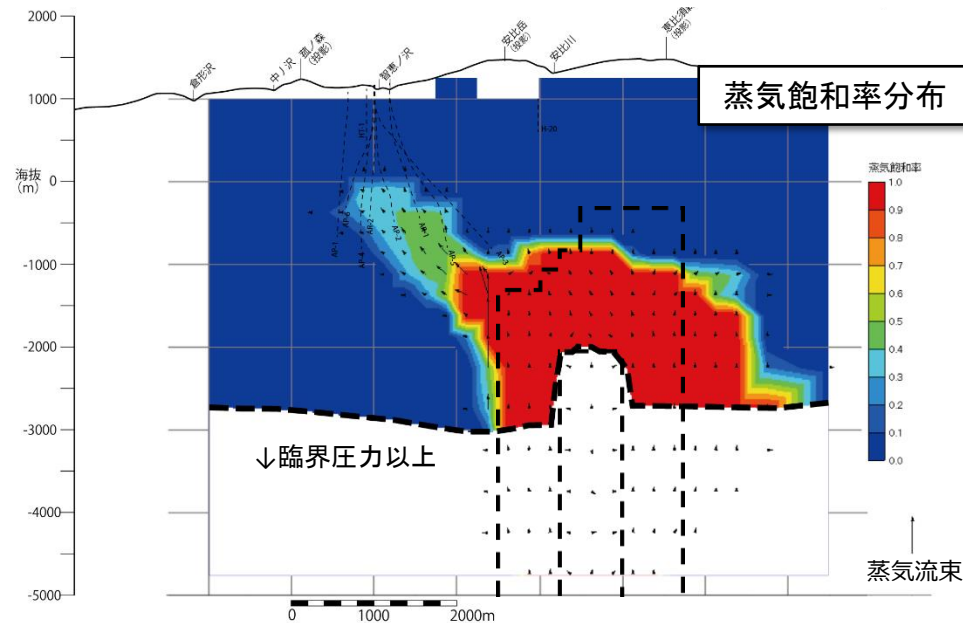
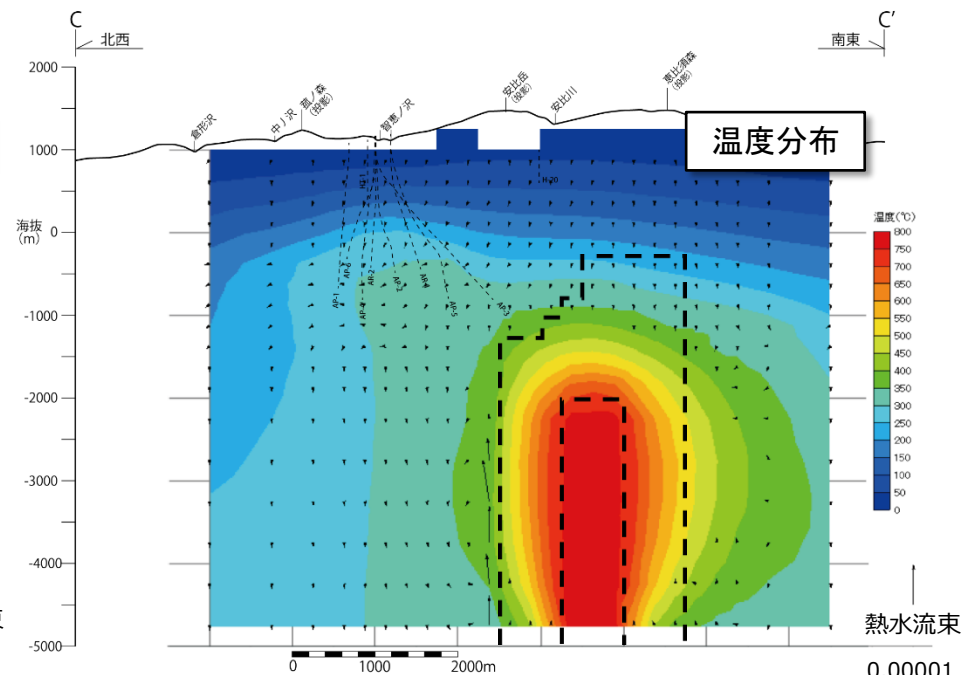
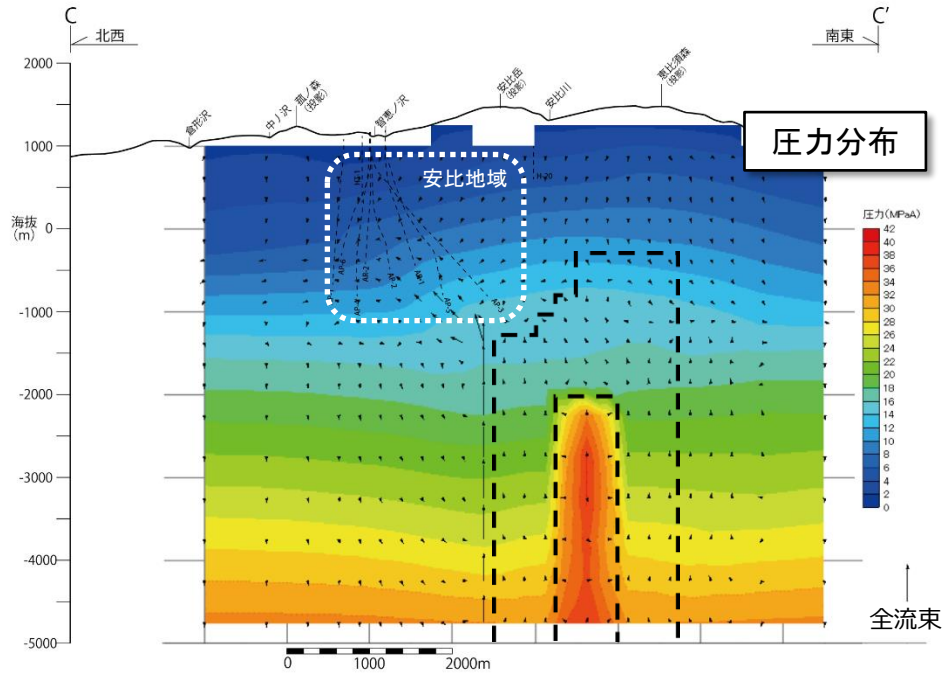
### 【熱源岩体(溶融部周辺)の透水性・熱伝導率設定】

- 熱源岩体は、中心部を除き、全体が低透水（周囲の先新第三系基盤岩と同程度）の岩石からなると想定。
- 熱源岩体外側の設定は超臨界貯留層モデルと同じ。

### 【溶融部の透水性・熱伝導率設定】

- 熱源岩体の中心に、溶融部の表現として海拔-2,000 m以深に790°Cの等温・不透水ブロックを設定。
- 溶融部は、溶融した岩石の対流・凝固潜熱による熱輸送を表現するために極端に大きな熱伝導率(実質的には等温ブロック)とした。

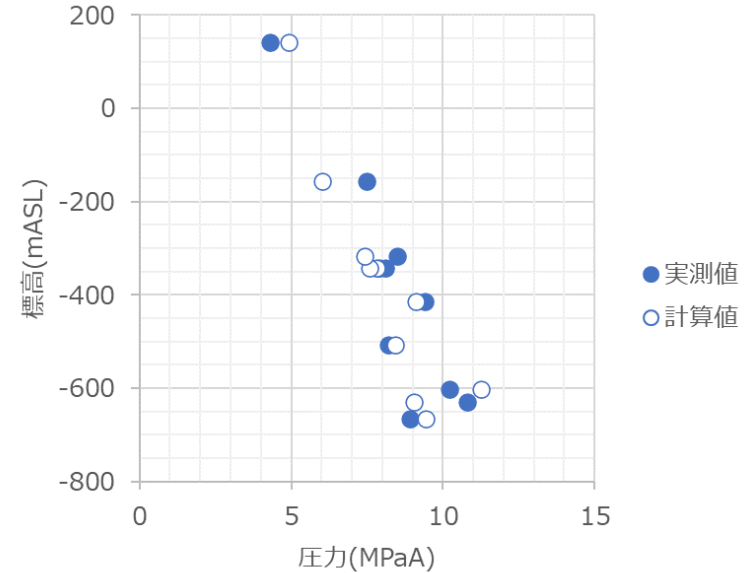
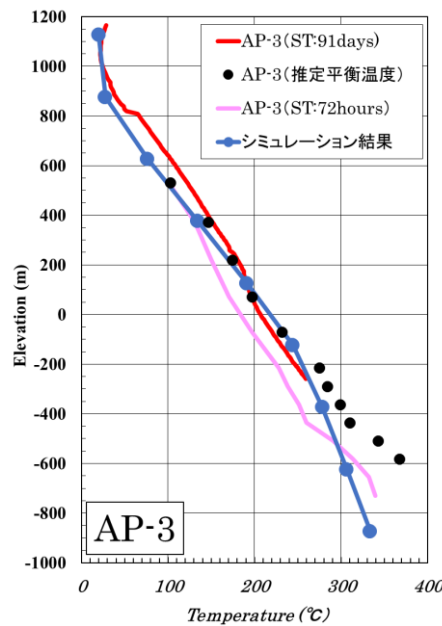
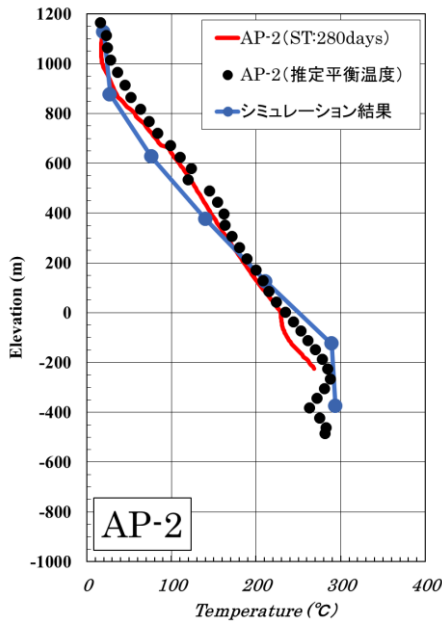




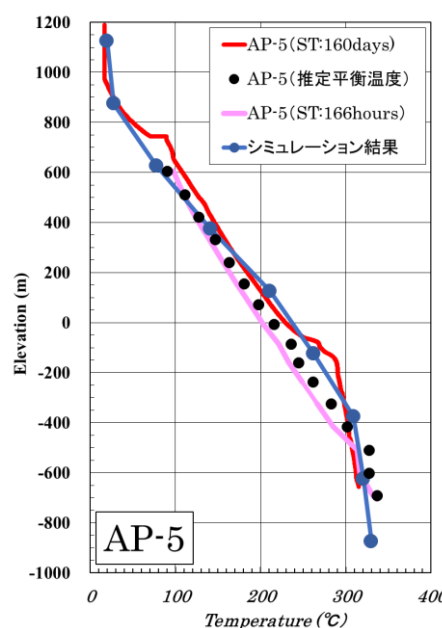
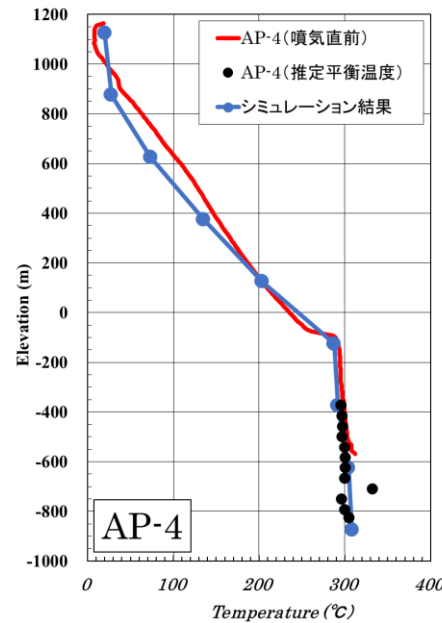
- 熱源岩体の外側に、蒸気単相(過熱状態)の流体が生じ、安比地域生産ゾーンまで広がっている状態が表現された。
- 再現度は、超臨界貯留層モデルと同等。

#### シミュレータ

- iTOUGH2 V7.1
- EOS1SC(純水・超臨界対応・最高温度800°C)



圧力実測値との比較



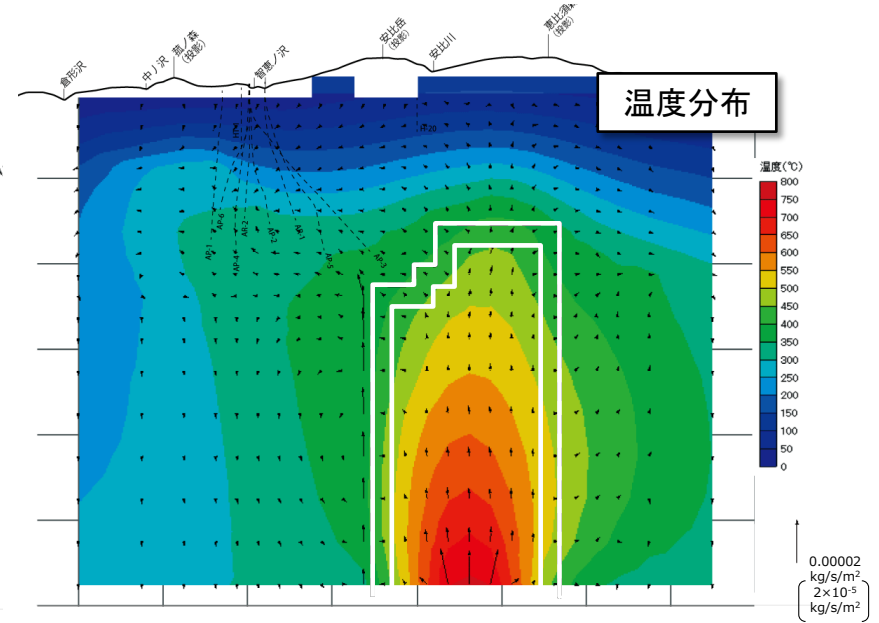
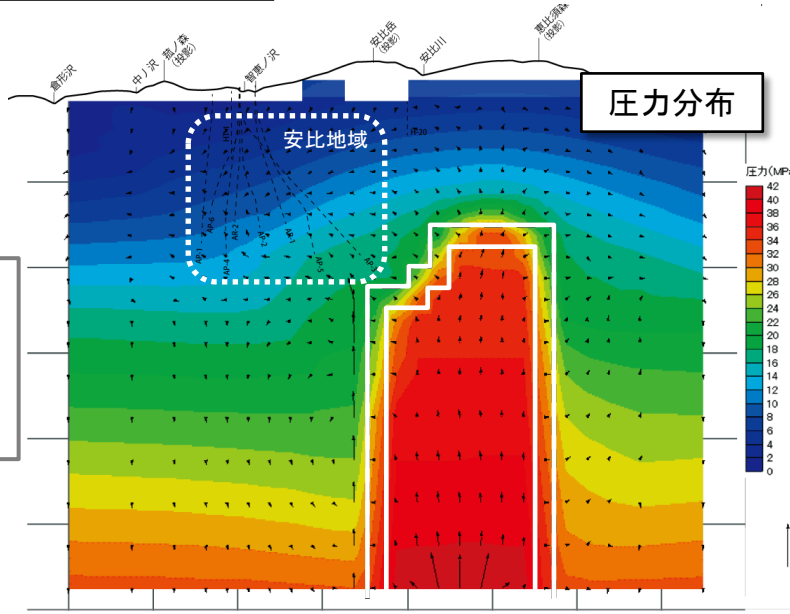
シミュレーションによる計算値は、過去に安比地域において実施された検層結果をよく再現できている。

実測温度プロファイルとの比較

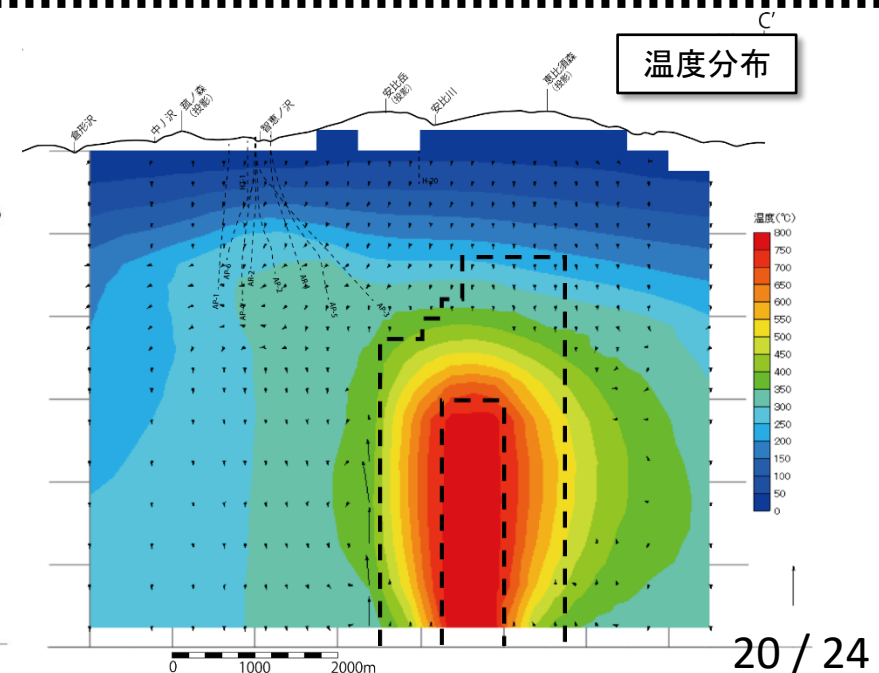
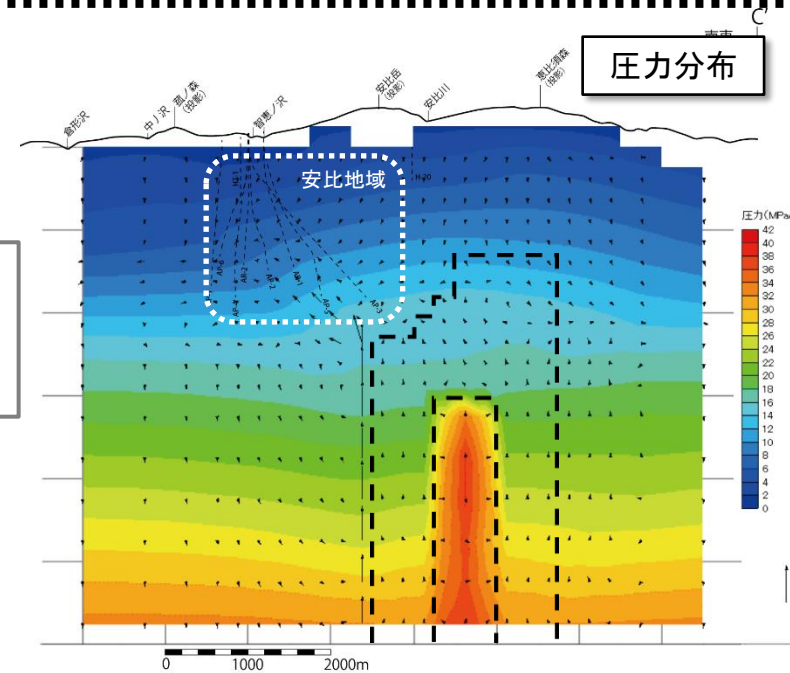
# 2021年度成果

## 超臨界貯留層モデルと熱伝導モデルの比較

超臨界貯留層モデル



熱伝導モデル



- 熱源の構造について、**超臨界貯留層モデル**、**熱伝導モデル**の両方からアプローチを行ったが、いずれの場合でも自然状態シミュレーションにて安比地域を再現することができた。
  - その点では、熱源の構造は両者の中間的なものも成立しうると考えられる。
- **超臨界貯留層モデル**では、熱源を覆う不透水層(シリカ析出層)がどのようなものかによって、信憑性が大きく左右される。
  - 不透水層の浸透率 $10^{-18}\text{m}^2$ 台では、熱源内部の高塩濃度流体が染み出す結果となる。  
⇒安比地域の生産流体との矛盾
  - 不透水層の浸透率 $10^{-21}\text{m}^2$ 台では、熱源内部の浸透率は $5\sim 10\times 10^{-15}\text{m}^2$ 必要。  
⇒延性環境下の岩石がそのような透水性を持ちうるか
- **熱伝導モデル**は、超臨界貯留層モデルより保守的な推定と言えるが、資源量の点では悲観的な評価となることが予想される。
  - マグマの結晶化に伴い放出された水の一部は、不透水層が存在する場合、熱源岩体内部に貯留されている可能性があるが、熱伝導モデルでは表現できない。

# 今後の予定

## 資源量評価：中間モデルによる検討

③中間モデル	
モデル図	
熱源岩体内部の構造	<ul style="list-style-type: none"> <li>外縁部に不透水層(シリカ析出層)が形成された低透水の岩体</li> <li>マグマ結晶化に伴い生じた流体が貯留されている部分が存在する</li> </ul>
低比抵抗の要因	<ul style="list-style-type: none"> <li>マグマ起源の高塩濃度流体が、熱源岩石中に包有されている(一部貯留層をなす)</li> </ul>
熱の供給	<ul style="list-style-type: none"> <li>溶融部からの熱伝導により熱を供給</li> <li>不透水層を介した熱交換で天水を加熱</li> </ul>

### 【中間モデル】

- 熱伝導モデルでは、熱源岩体からの生産は、基本的に人工貯留層の造成による抽熱となる。
- 一方、マグマの結晶化に伴い放出された水の一部は、不透水層が存在する場合、熱源岩体内部に貯留されている可能性がある。
- この状態を中間モデルとし、成立しうる貯留層の大きさ・透水性等を検討する。

# 今後の予定

研究開発項目		今後の予定	技術課題・備考
地表調査	MT法電磁探査	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現地調査:2023年度7月予定</li> <li>・3次元解析での詳細な感度解析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・深部低比抵抗帯の分布形状の妥当性</li> </ul>
	微小地震観測	<ul style="list-style-type: none"> <li>・観測継続(23年8月頃まで)</li> <li>・震源分布からの延性領域の推定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・震源位置精度の向上</li> </ul>
	重力探査	<ul style="list-style-type: none"> <li>・現地調査:2022年度10月</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・重力構造から熱源岩体を抽出可能か</li> </ul>
	地熱構造モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・調査結果を反映し、地熱構造モデルを更新</li> </ul>	
資源量評価	数値モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・「中間モデル」の作成</li> <li>・地熱構造モデルの最終版を反映し、モデルを最終化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・透水性等のパラメータ, 推定資源量の妥当性, 信憑性</li> </ul>
	資源量評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>・生産予測シミュレーション</li> <li>・パラメータの感度解析</li> <li>・最終的な資源量評価</li> </ul>	
掘削仕様	深部構造試錐 超臨界地熱調査井	<ul style="list-style-type: none"> <li>・掘削仕様の作成と費用試算</li> <li>・最終的なターゲットの検討</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・仕様・積算の妥当性</li> <li>・高温・高圧領域での掘削に関する不確実性</li> </ul>
経済性評価		<ul style="list-style-type: none"> <li>・資源量評価・掘削費用積算結果を基に検討</li> </ul>	

## まとめ

- 岩手県八幡平市の「八幡平地域」をモデルフィールドとして、超臨界地熱資源の資源量評価手法の研究開発を実施中。(3か年計画の1年目)
- 2021年度は、地表調査のうち微小地震観測を開始した。2022年2月までの震源分布は、浅部に多く、深部低比抵抗帯内部には少ない傾向を示し、その範囲において延性的な環境である可能性を示唆した。比抵抗値の変化部に分布が多い傾向が見られ、流体流動との関連性が注目される。
- 資源量評価では、「熱伝導モデル」を作成し、熱源岩体が極低透水～不透水の岩体で、その中心部に高温溶融部が残存し、熱伝導により熱を供給している状態をモデル化した。
- これまでに作成した「超臨界貯留層モデル」・「熱伝導モデル」のいずれにおいても、熱源岩体外側の状態を再現できたことから、2022年度は「中間モデル」を作成する。マグマの結晶化に伴い放出された水の一部は、不透水層が存在する場合、熱源岩体内部に貯留されている可能性があり、熱伝導モデルをベースに部分的な超臨界貯留層が存在する状態を表現する。