

ホワイト水素およびオレンジ水素開発の 掘削ターゲット決定のための探査技術

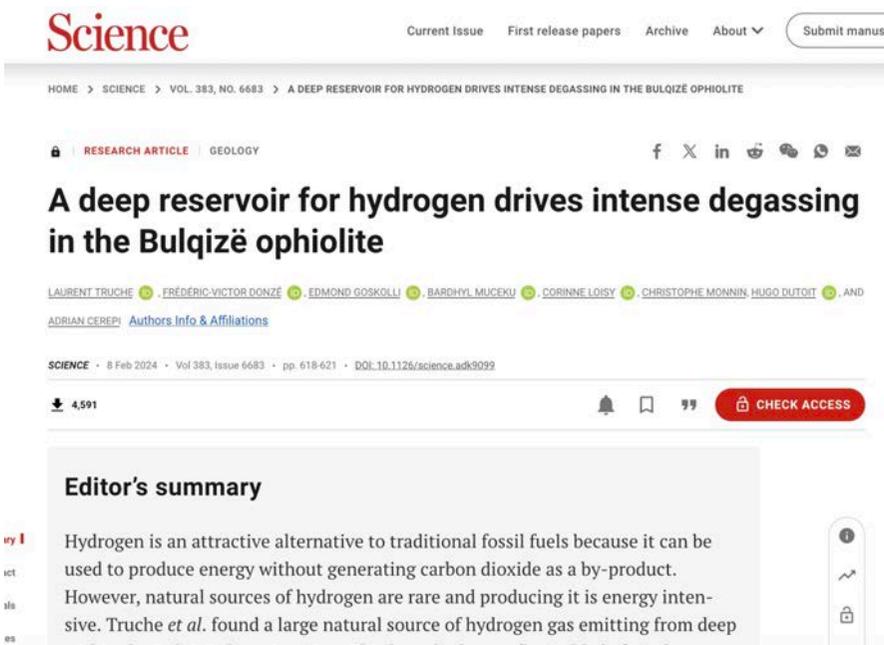
辻 健

東京大学大学院 工学系研究科



最近ホットな天然水素

- 多くの研究者は、地球内部に水素が含まれていることはよく知っていた
- しかし、地中の水素をエネルギーとして利用できるポテンシャルがあるとは、考えてこなかった



多くの人が、本当に資源として使えるだけのポテンシャルがあるのか？と疑問に思っている（私も）

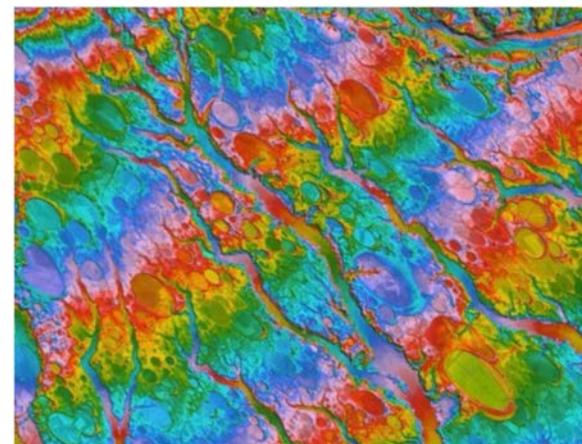
環境

大量に噴出する水素ガスを発見、世界を変えるエネルギー源に？

過去最大級の噴出量、安価でクリーンな天然水素の時代への一歩か、アルバニア

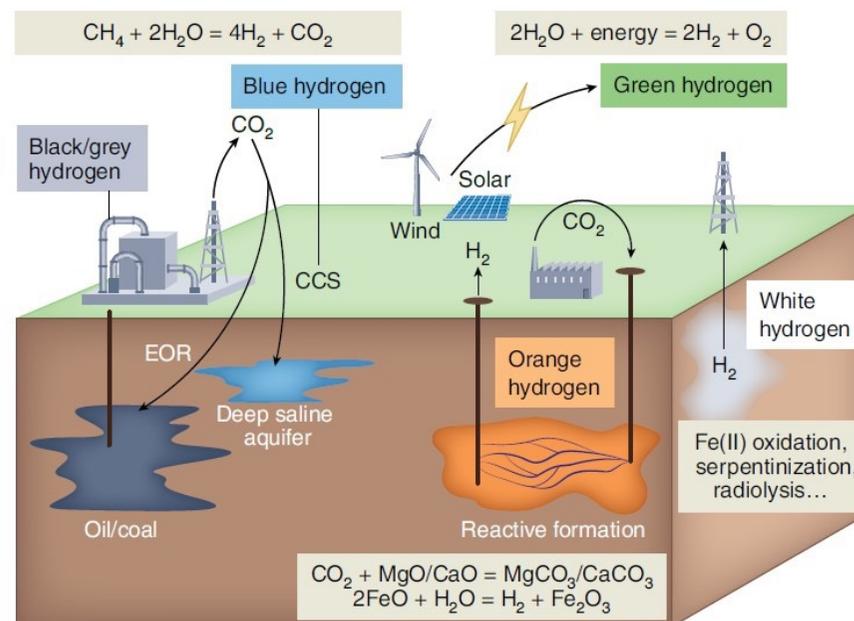
2024.04.03

📄 ポスト 🍌 いいね! 1,337 📄



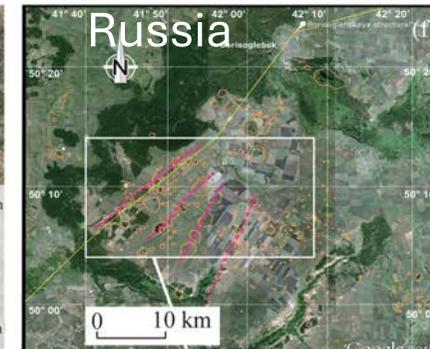
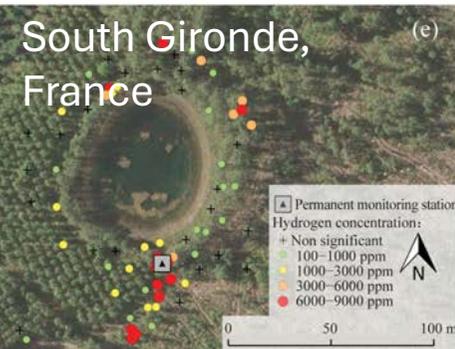
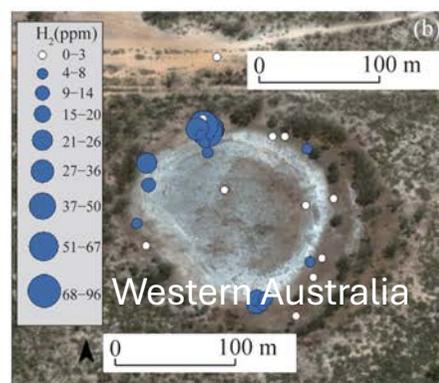
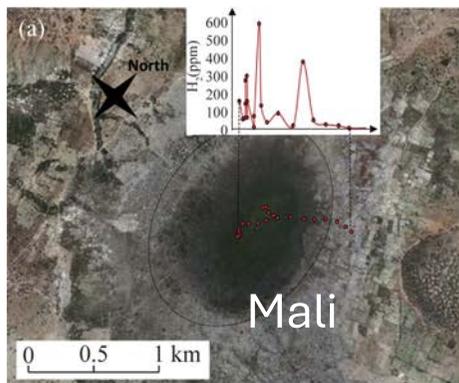
米ノースカロライナ州沿岸部のLIDAR（光による検知と測距）画像。地中から漏れ出している水素ガスによって、明るく円形に色づいて見える。地中から水素を回収できれば、温室効果ガスを排出せずに発電できるため、水素が大量に蓄えられた場所を探す取り組みが続けられている。（PHOTOGRAPH BY VIACHESLAV ZGONNIK AND MICHAEL DAVIAS）

[画像のクリックで拡大表示]



地表から水素が漏洩している場所の中には、フェアリーサークルとして観察される場所も存在

A large hydrogen-seeping “fairy circle” in Brazil. The features may form when high-pressure hydrogen causes land to rise, then sink.
Alain Prinzhofer



Circular, elliptical depressions (“fairy circles”) where natural hydrogen leaks to the surface (after Larin N et al., 2015; Zgonnik V et al., 2015; Prinzhofer A et al., 2018, 2019; Frery E et al., 2021; Halas P et al., 2021).

Natural Hydrogen Flow Rates

Location	H ₂ , %	H ₂ Flow Rate, '000 m ³ /day	H ₂ Flow Rate, kg/day
USA	17.9	208.8	17,813
Russia	58.9	104.3	8,900
USA	26.3	64.7	5,522
USA	17.9	37.0	3,158
USA	26.3	16.8	1,436
Ukraine	19	5.7	488
Russia	27.3	4.5	388
Mali	98	1.5	128
Iceland	24.1	1.0	89
Ukraine	13.7	0.8	66
USA	19.5	0.3	25

H₂ flow rates from selected wells. From: Various sources AVALIO PTY LTD.

この量を見るとポテンシャルがあるように見える

水素の移動経路

Fracture (or fault) systems, which serve as pathways for H₂ migration from deep geological formations, could play a crucial role in locating H₂ reservoirs.

Mali (Africa)



In **Mali**, water flows up vertical fractures carrying H₂ and can pass through sedimentary rock but trapped by a volcanic **dolerite dyke**

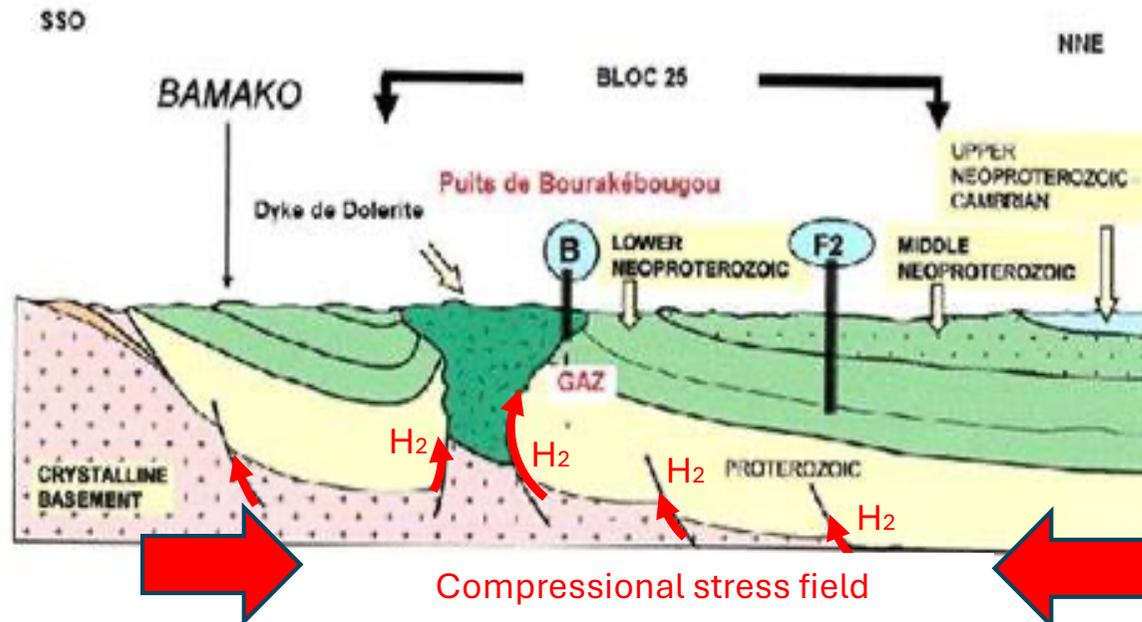
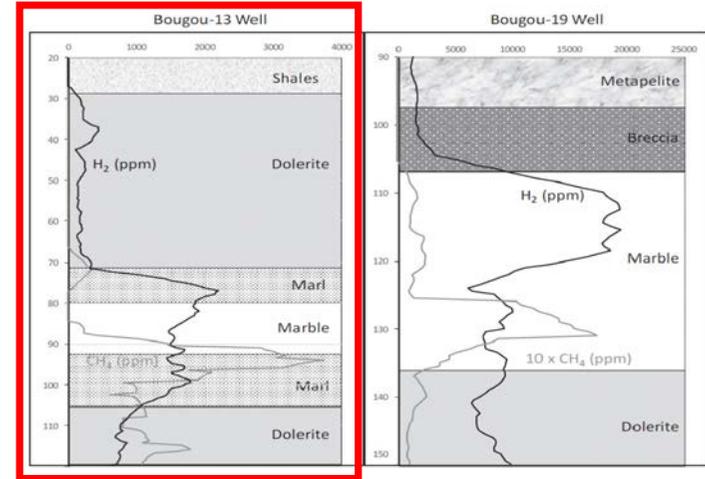
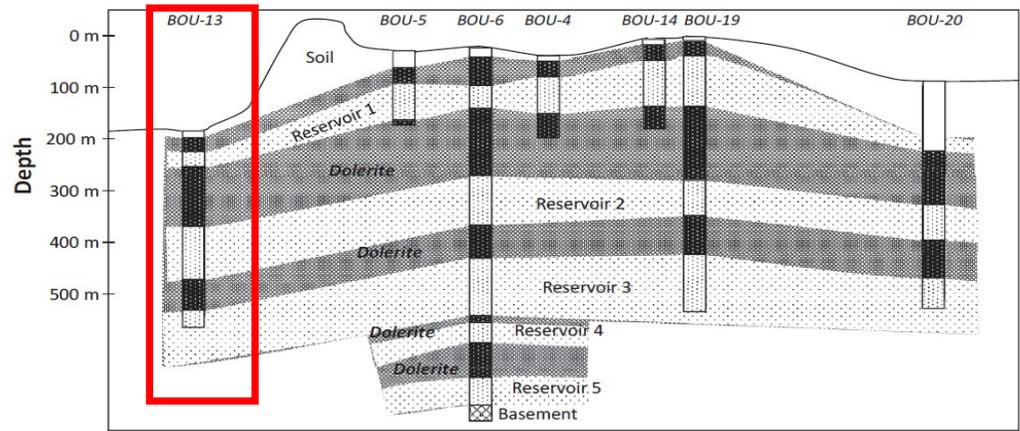


Figure: Courtesy of Brian Evans

水素のシール構造？（トラップされた水素）

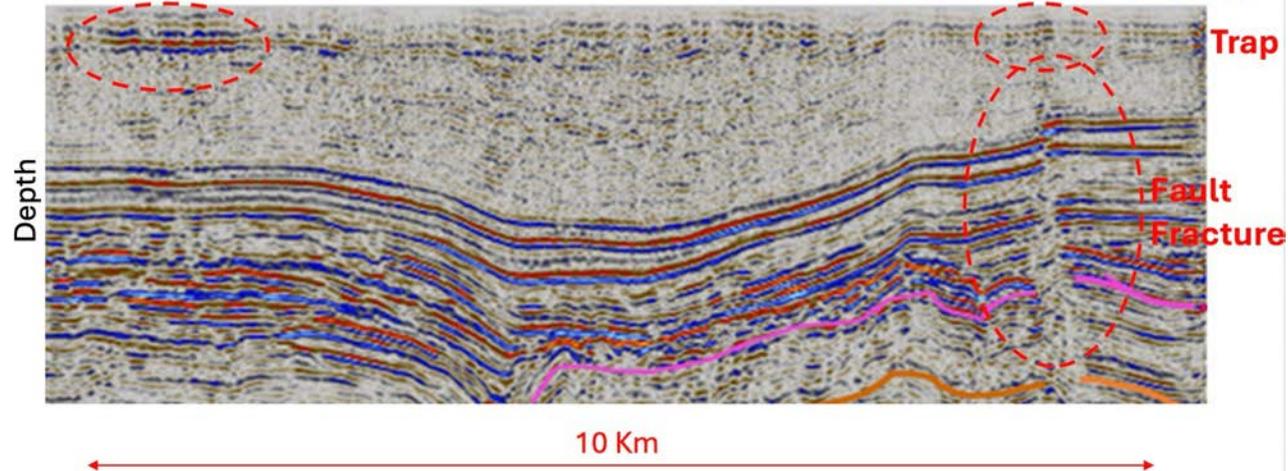
- 水素貯留層は、従来の石油・ガス貯留層とは異なる
 - H₂は拡散性が非常に高い
- マリの水素貯留層
 - 非常に浸透性の低いドレライトという岩石がシール層となっている



ドレライトの下部にトラップされた天然水素？

Evans, 2024

水素の移動経路となる亀裂



白馬水素フィールド

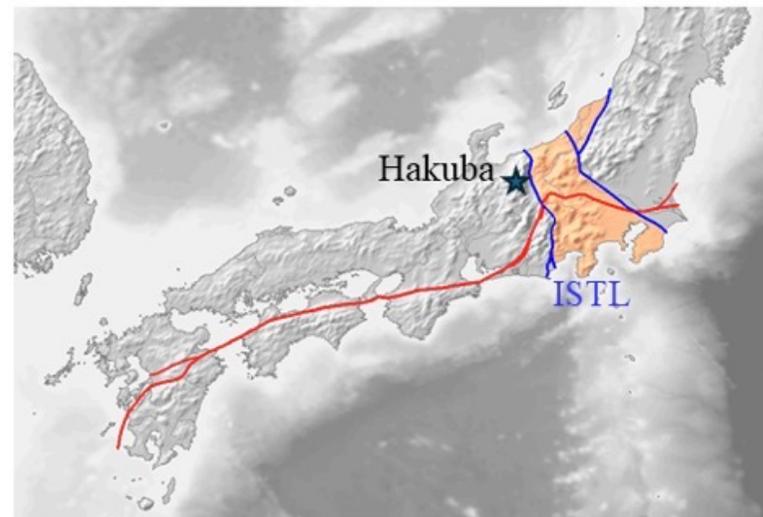
Source

- 蛇紋岩化
- 移動経路
- 亀裂
- シール層は？

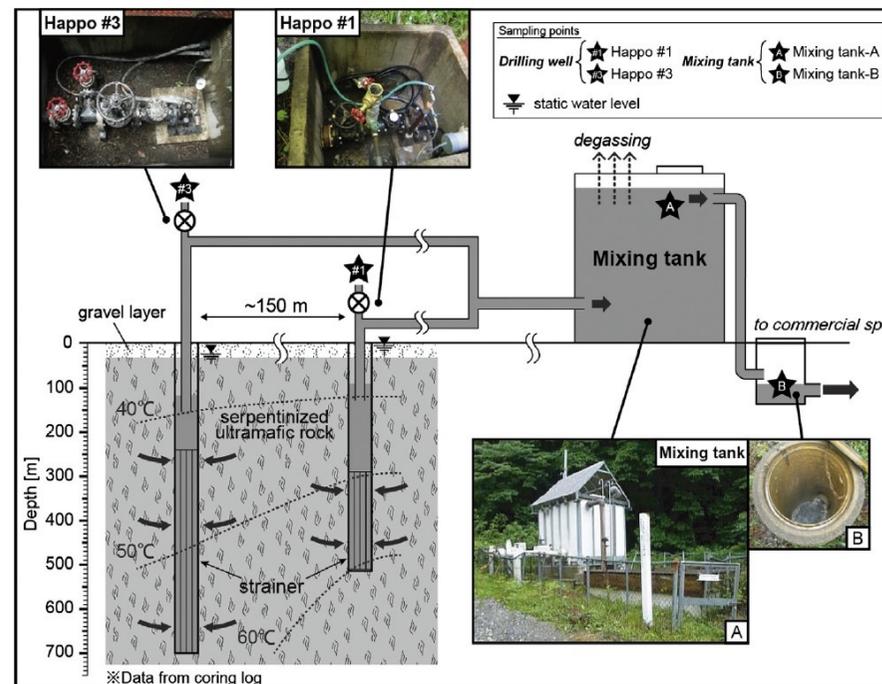


水素の貯留システム（割れ目に貯留しているのか、シール層でトラップされているのか）は不明

➤ 探査で可視化する必要がある



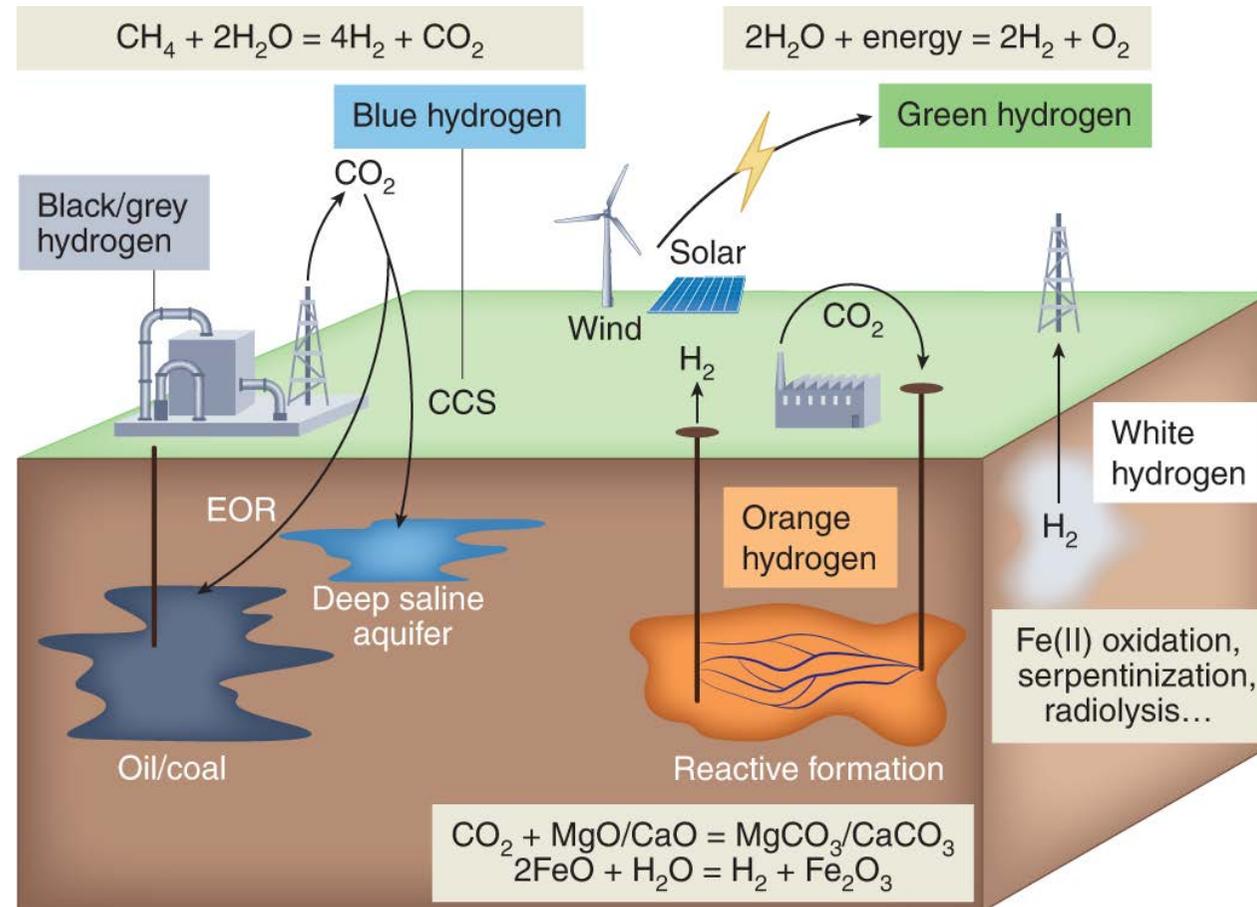
ISTL: Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line
NVC: Norikura volcanic chain



水素の増進回収（オレンジ水素）

天然水素（ホワイト水素）だけで主要なエネルギーにすることは難しいかもしれない

➤ 無理やり地下で反応を促進させ、水素を生成する



➤ 今回のNEDOプロジェクトでも、水素増進回収に向けた検討が多数実施されており、今後、その可能性を評価できるようになる？

➤ 水素の増進回収でも、地下の岩体の分布を探查することが重要となる

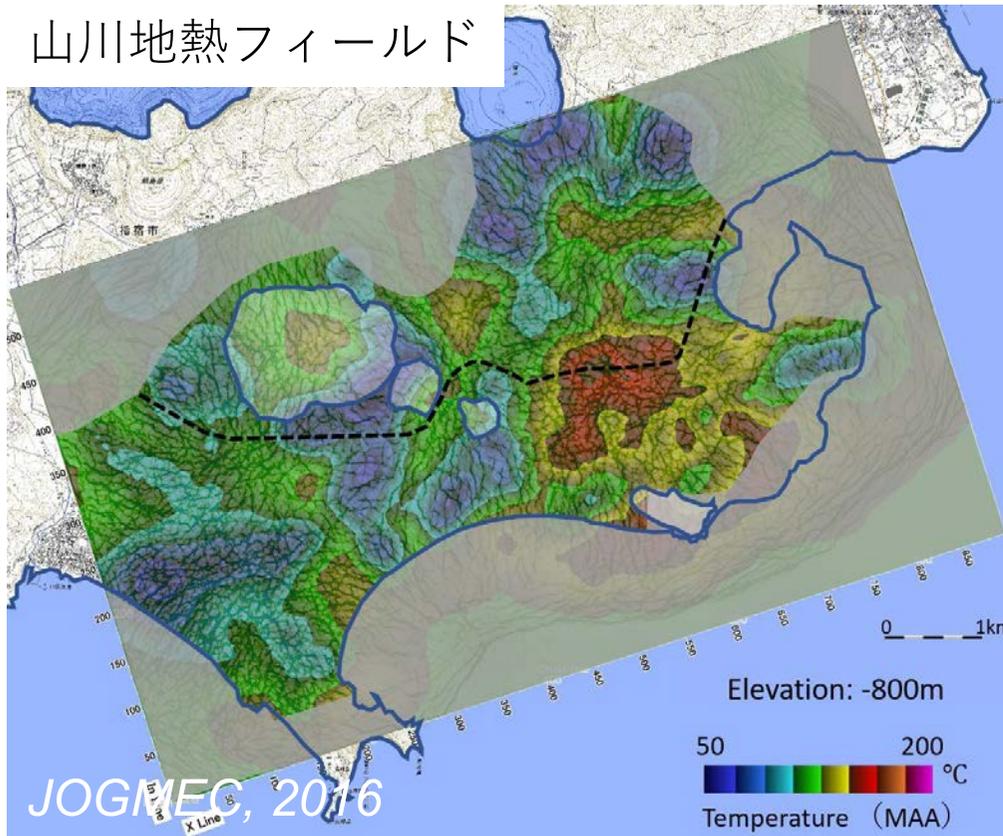
水素を調べる探査技術

水素を探査する際には、石油やガスの探査（砂泥互層）と異なり、蛇紋岩のような硬い岩石が分布する場所を調べ、さらに亀裂を見つける必要がある

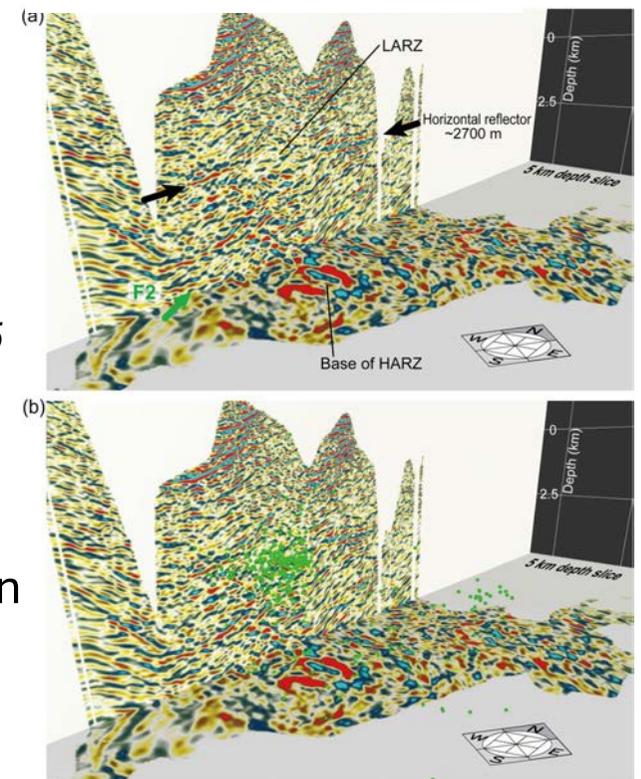
- この探査が可能となれば、水素の経路をターゲットとした掘削を実現できる
- 地下に亀裂を作って、水素生成を加速することもできる

- 白馬のような山岳地帯、固い岩石が不均に分布する場所で探査する手法の開発が必要である（地熱で開発した例を紹介）

山川地熱フィールド



九重地熱フィールド



Tsuji et al. 2015

Seismic survey in the geothermal field to identify fracture system

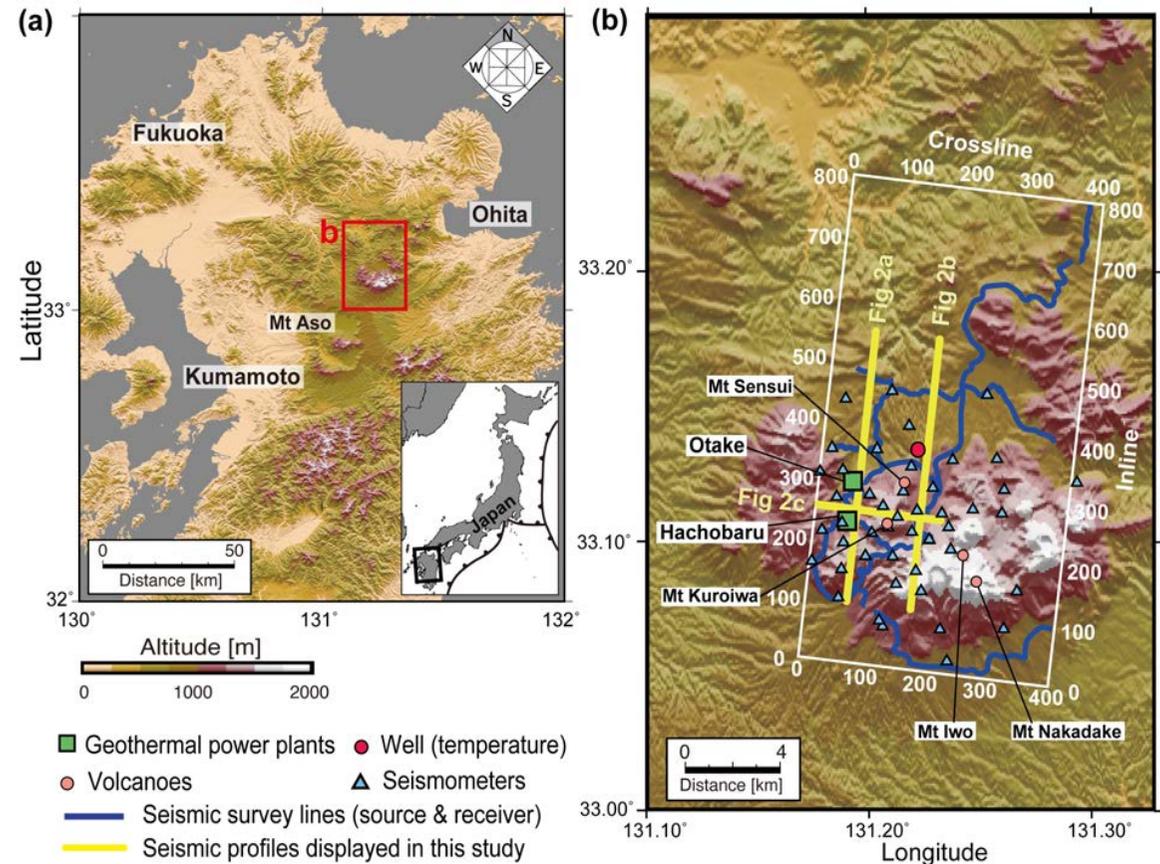
山岳地域（九重地熱地域）で反射法地震探査を実施し、 亀裂や貯留層などを推定

地震探査と自然地震観測を行ったところ、超臨界地熱を行う上で鍵となる構造がわかってきた

Seismic sources	
Number of Vibroseis	3
Hold-down weight	18.6 t/vehicle
Total number of shot points	855
Elevation range	767.7–1329.5 m
Shot-point interval	50 m
Receivers	
Component	Vertical
Natural frequency	5 Hz or 10 Hz
Receiver number	1270
Receiver interval	25 m



NEDO事業



発破位置は道路上（限られた地点）のみに限定されているため、CRSという手法を利用することにより、空間解像度の向上を試みた

反射断面図と弾性波速度プロファイル (Vp/Vs) N-S方向の測線

連続した傾斜反射面

- 亀裂帯
- 水平反射面
- 超臨界流体のシール層

高振幅反射帯 (HARZ)

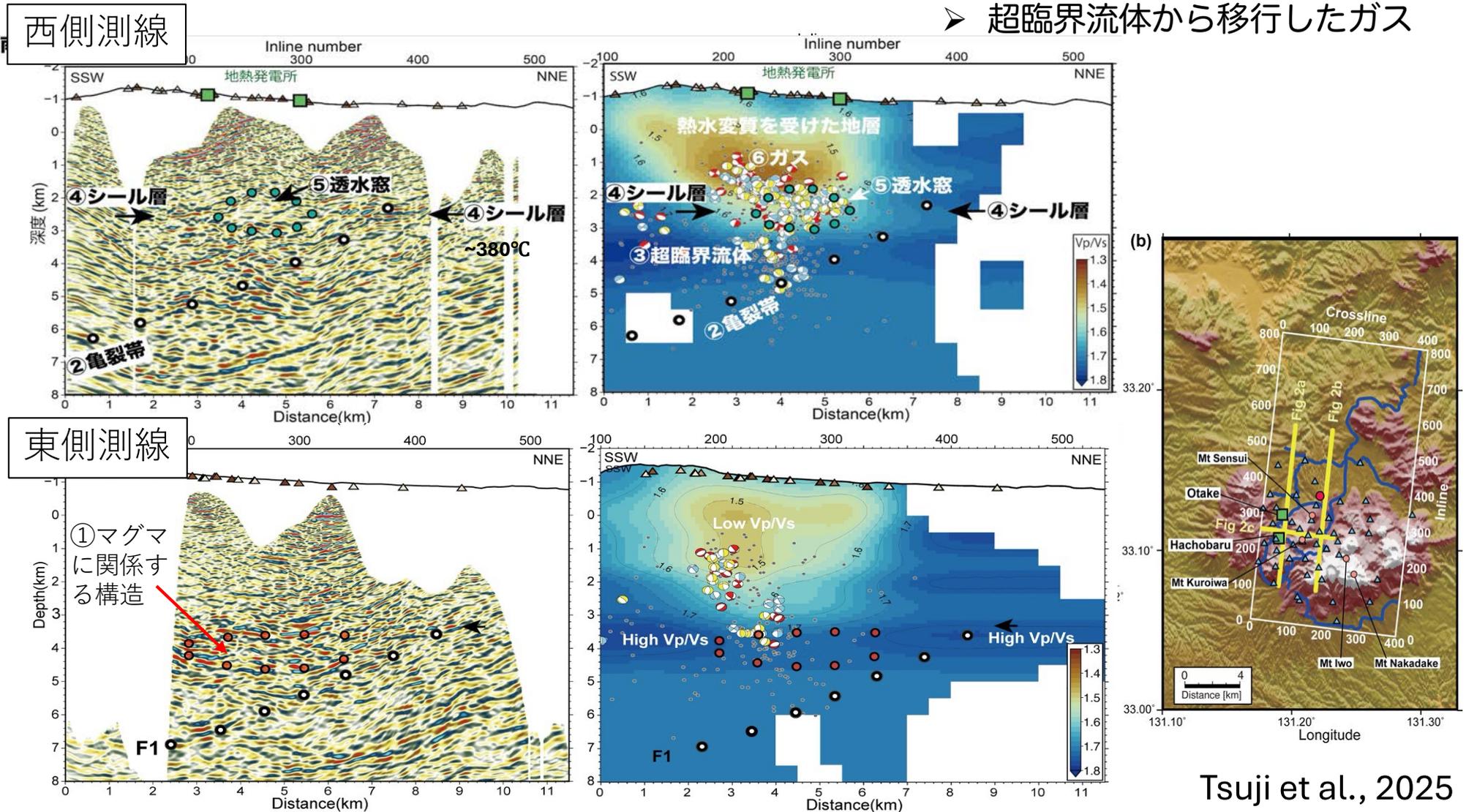
- マグマに関連する構造

低振幅反射帯 (LARZ)

- 割れ目 (流体の流路; 透水窓)

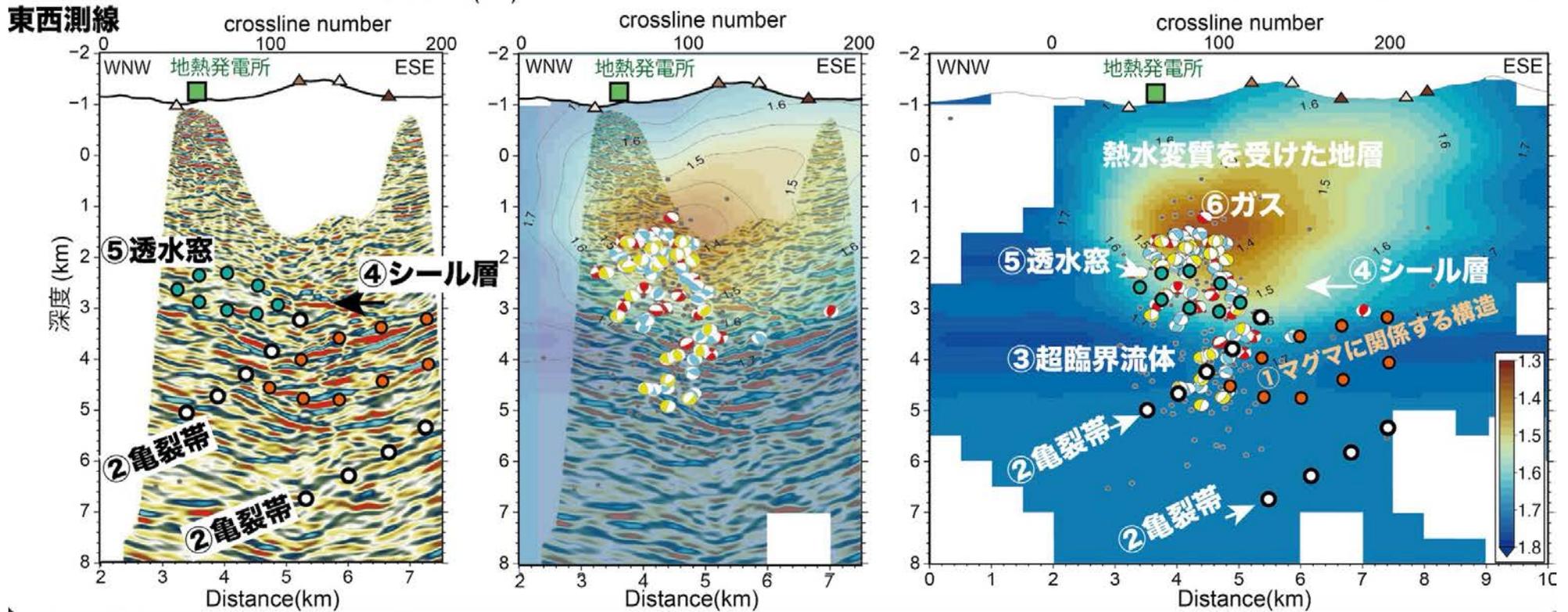
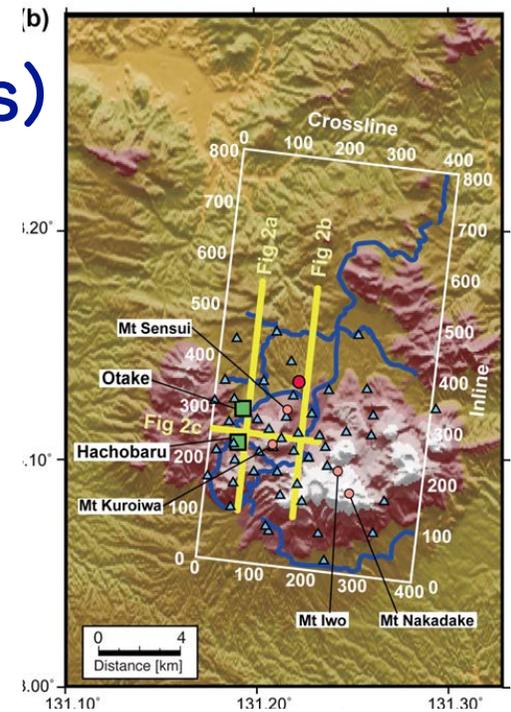
低Vp/Vs

- 超臨界流体から移行したガス



反射断面図と弾性波速度プロファイル (Vp/Vs) E-W方向の測線

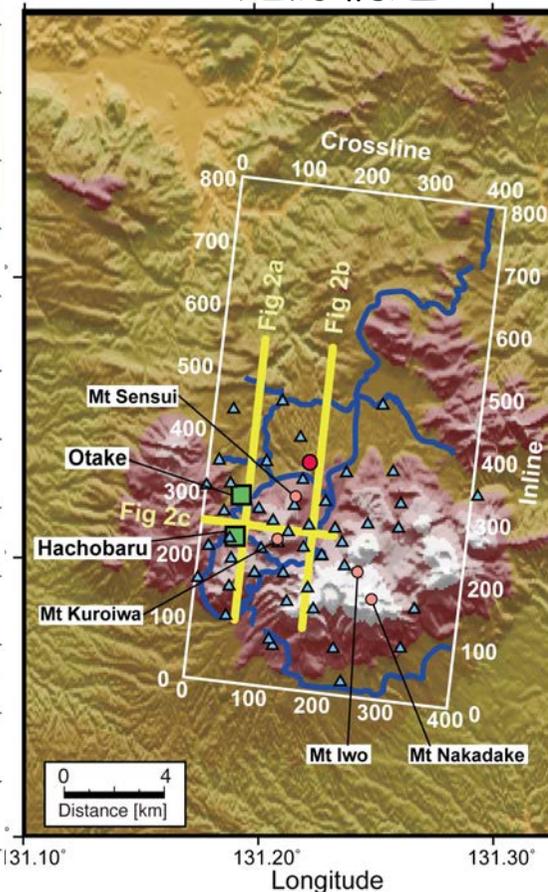
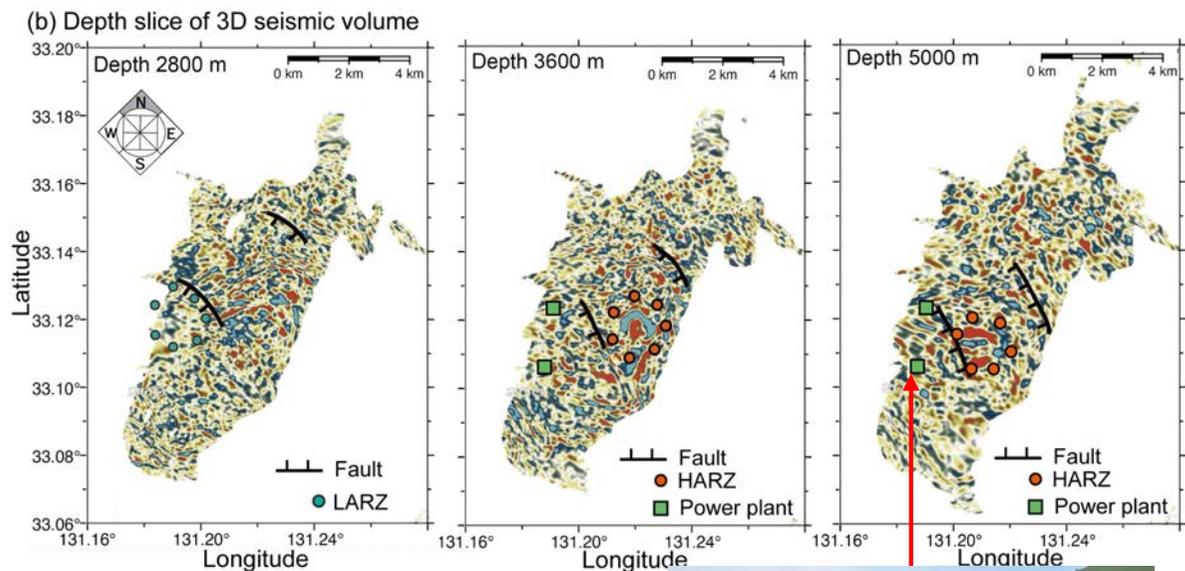
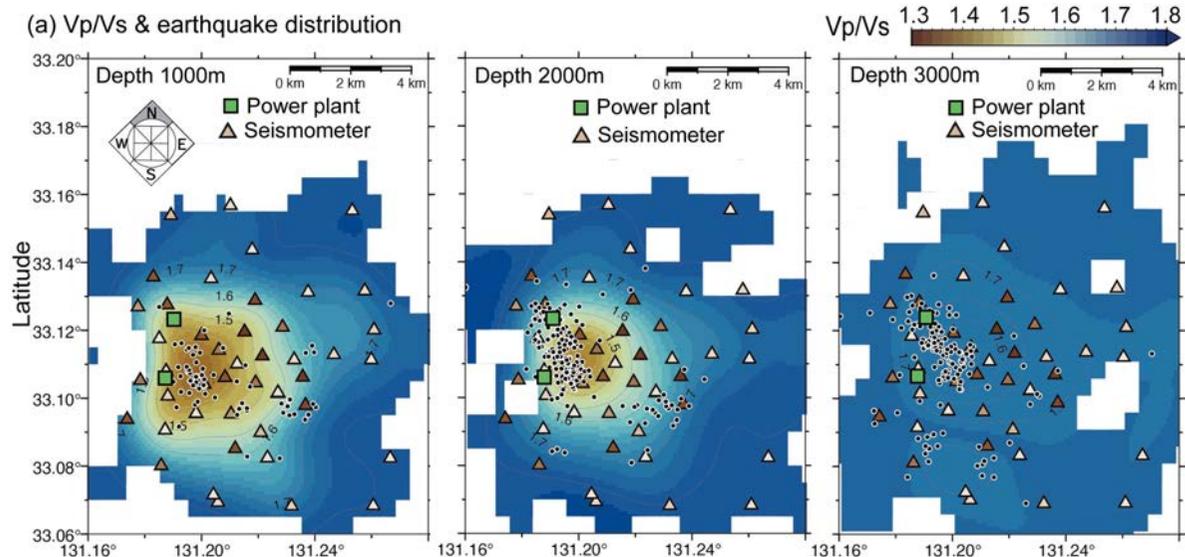
- マグマと透水窓の間に亀裂が発達
- 地震はその亀裂沿いや、低Vp/Vs領域の底部に分布している
 - 亀裂や透水窓は流体の移動経路として機能
 - 超臨界からガス等に相変化するとき地震が発生



調査地域の深部を上から見た結果

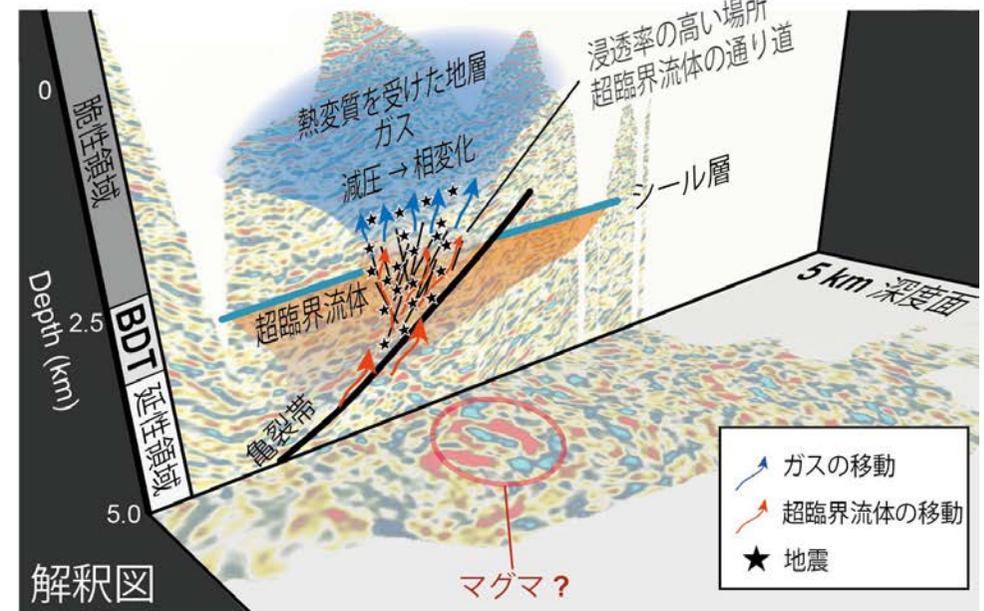
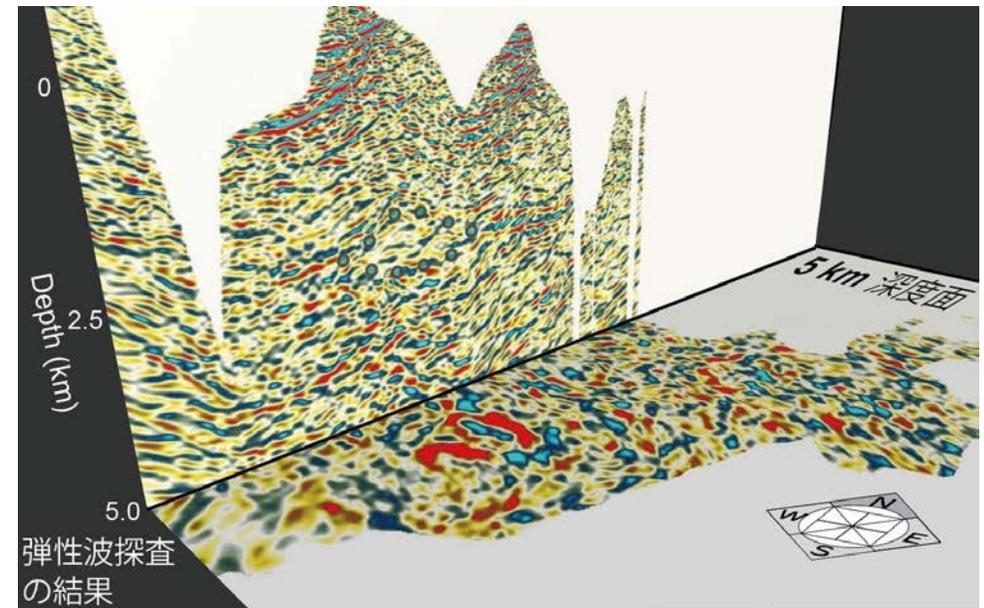
- 地熱発電所の直下に低Vp/Vs異常
➤ 相変化したガス or 熱変質

- レンズ状の反射面
➤ マグマ起源構造



超臨界地熱を開発する上で重要な構造を推定

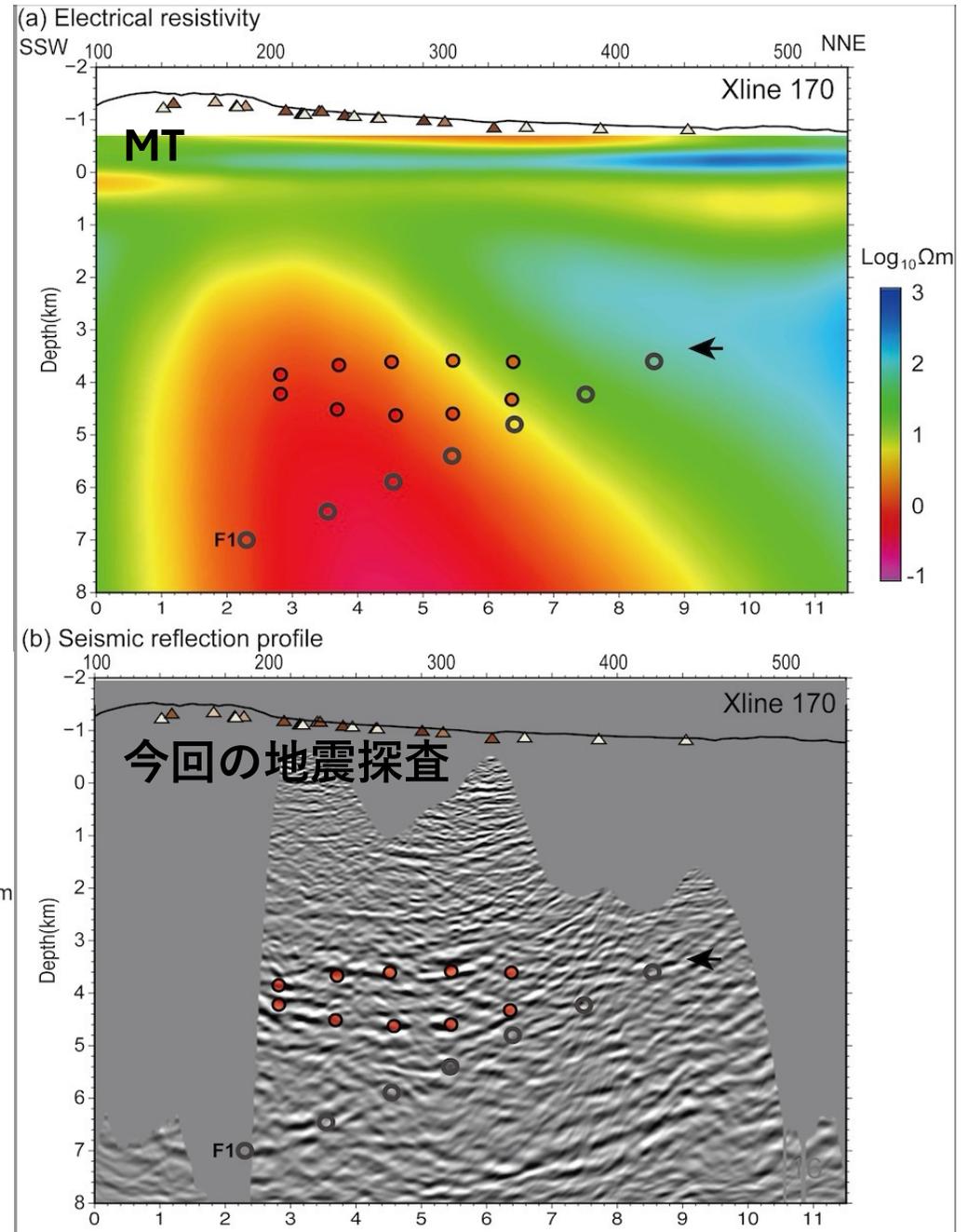
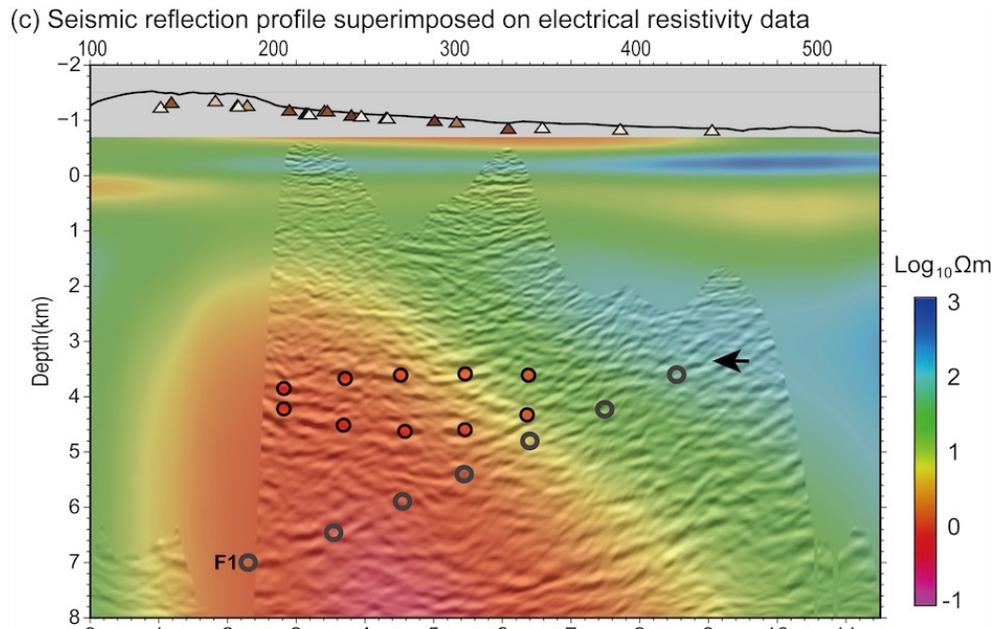
- 高振幅反射帯：マグマ起源の流体領域
 - 連続的な水平反射面：超臨界流体のシール層
 - シール層が不連続的になっている箇所にある低振幅反射帯：流体移動経路と推測され、減圧に伴う相変化などにより、地震が集中的に発生
 - LARZ上部の低Vp/Vs異常：流体移動および超臨界状態から気体への相転移を示唆
- 地震探査でも、地熱貯留層を深部まで可視化できる
- 天然水素も同様の環境であり、本手法は水素開発にも利用できそう



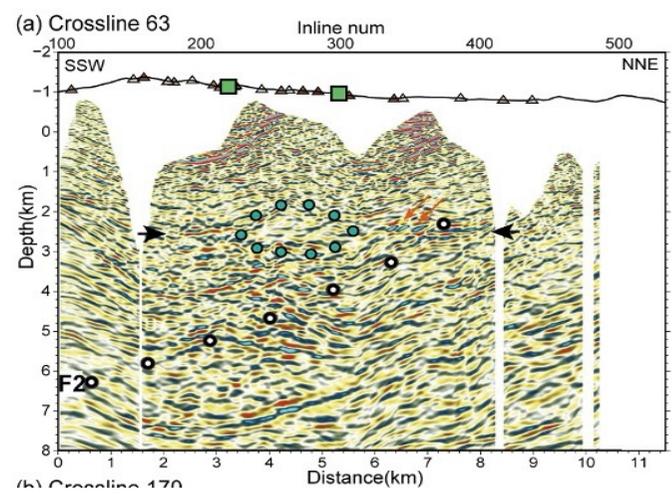
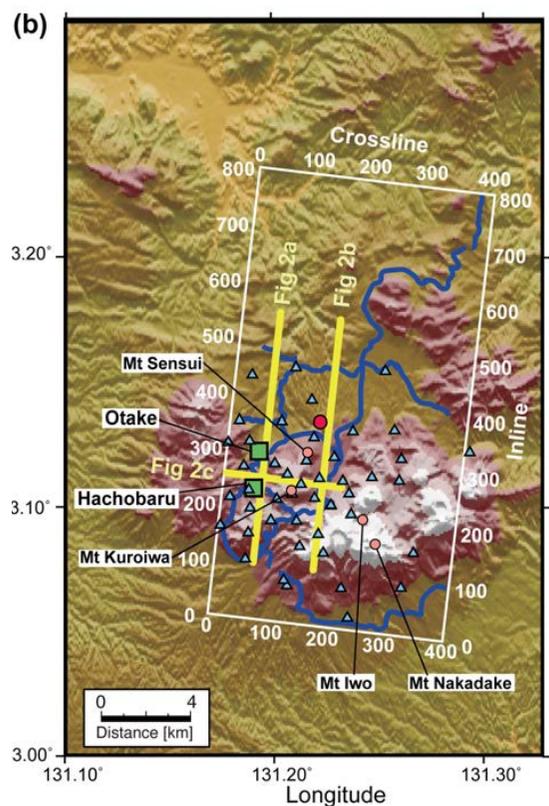
これまでの探査 (MT) との比較

これまでの探査では、掘削ターゲットの明確化が難しかったが、地震探査（最近の解析やセンシング技術）を利用すれば、それが可能になる

今回の地震探査とMTの比較

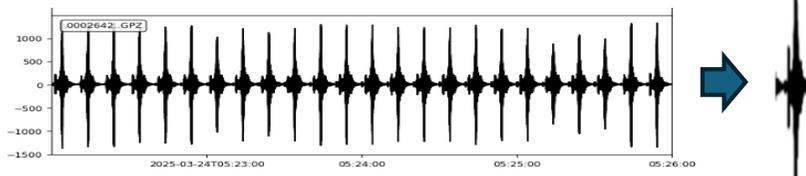


現在の大きな装置では限られた地点でしか、 発信・受信できない



- バイブロサイスがアクセスできない場所で発震を行えば、空間分解能が大きく向上

➤ **ポータブルな地震源が必要である**



最新の装置を導入

小型地震計

小型震源PASS



細い道は多くある



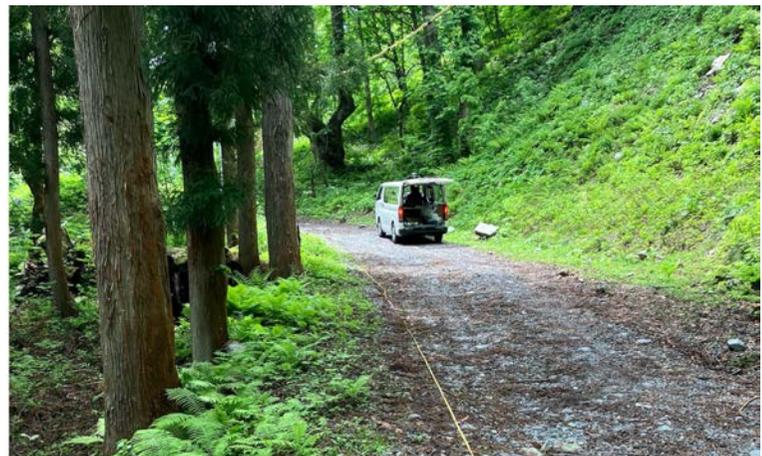
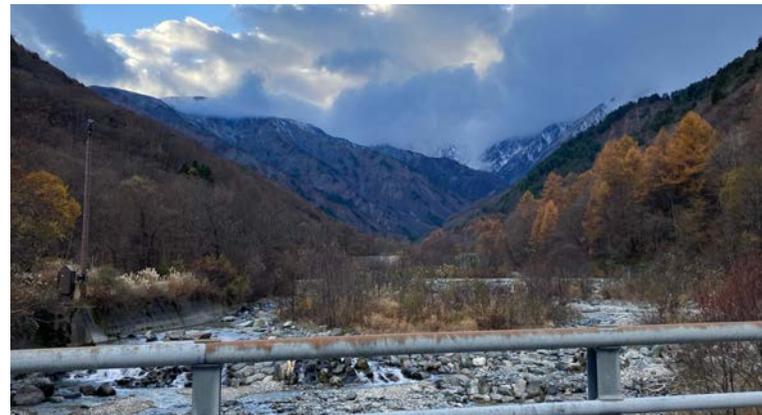
足し合わせることで
エネルギーを増幅
➤ 小型でも遠地まで
信号を伝達

白馬等の水素フィールドでも、地震探査は可能なのか？

- 小規模弾性波探査により浅部の地層境界や断層構造を明らかにし、今後は大規模探査へ展開して深部構造を解明する

白馬水素フィールドでの簡易地震探査

2025年6月に実施

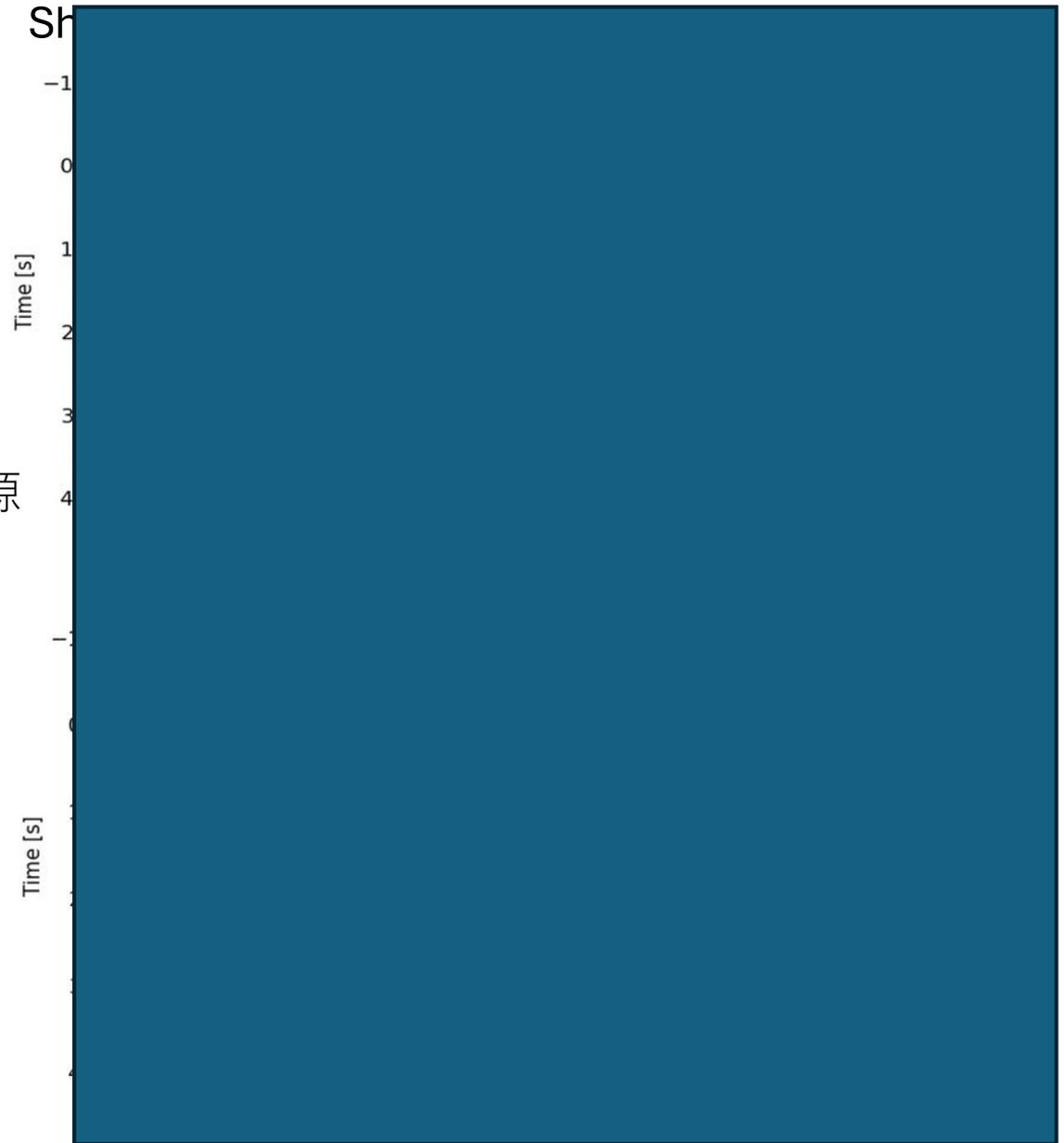


白馬での水素フィールドでPASS震源を利用した探査を実施



Size: 25 × 37 × 19cm
Weight: 40 kg
Max Freq: 30 Hz
Force: 1,500N@30Hz
Phase Adjustment
: Stepping Motor Control
Power Supply: AC 100V or Battery
Power Consumption: 200 W

中型のPASS震源



川やダムなどのノイズが卓越していたものの、信号は1 km以上に渡って伝達した

屈折法地震探査の結果

地下浅部に固い地層（蛇紋岩）があり、屈折波が深部まで伝達せず、浅い場所だけの探査になった

水素の井戸がある場所は、浅い部分にまで蛇紋岩が存在している場所の端に相当する

反射波の解析はこれから実施する

- 今後、九重で実施したような大規模探査を実施し、亀裂や岩盤の分布を可視化したい



地下を正確にマッピングし、地下の三次元モデルを作る技術が必要

- 天然水素の移動経路やトラップ構造を明らかにすることが、薄く広く分布する天然水素資源を有効に回収するうえで不可欠（掘削ターゲットの明確化が必要）
- 人工的に地下で水素を生成を促進する場合にも、岩石内部に亀裂を形成する場所を選定するために、地下における岩石の分布形態を把握する必要

近年の探査技術の発展により、これらの目的を達成するための手法が実現しつつある