

## 2023年度成果報告会

# 地熱発電導入拡大研究開発/地熱発電高度利用 化技術開発/地熱貯留層設計・管理のための耐 高温・大深度地殻応力測定法の実用化

発表日：2023年1月31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 伊藤高敏（東北大学）

\*（国）東北大学，（株）物理計測コンサルタント，応用地質（株）

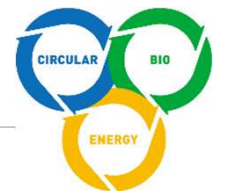
問い合わせ先 東北大学 E-mail: takatoshi.ito.c5@tohoku.ac.jp

## 1. 背景・目的

- 地下深部からの地熱流体の上昇が、既存の断層に沿って起こっており、その断層の中でも面に作用する応力が臨界状態にあるものが主要な役割を担っていることが、地熱を対象にした数多くの研究で明らかになっている。
- このため、地殻応力に基づいて地熱開発を行うことが、生産井の成功率を高め、貯留層の持続性を向上させるなど、調査から運用に至る様々な段階の大きなコスト削減につながると期待されている（例えば、米国エネルギー省, GeoVision, 2017）。
- そこで、超臨界地熱を対象としたNEDO研究開発プロジェクト（フェーズⅠ、2018～2020年度）では、大深度かつ高温な岩体の地殻応力測定を実現するための新しい方法（二重解放コア変形法）の原理の検証を行い、それを具体化する技術（二重ビットコアリング）の開発に成功した。
- これを踏まえて本プロジェクト（フェーズⅡ）では、現実に即したシビアな掘削環境とコストを考慮し、同方法を信頼性・堅牢性のあるものに完成させるための研究開発を行う。

## 2. 実施期間

開始 : 2021年6月  
終了（予定） : 2024年3月

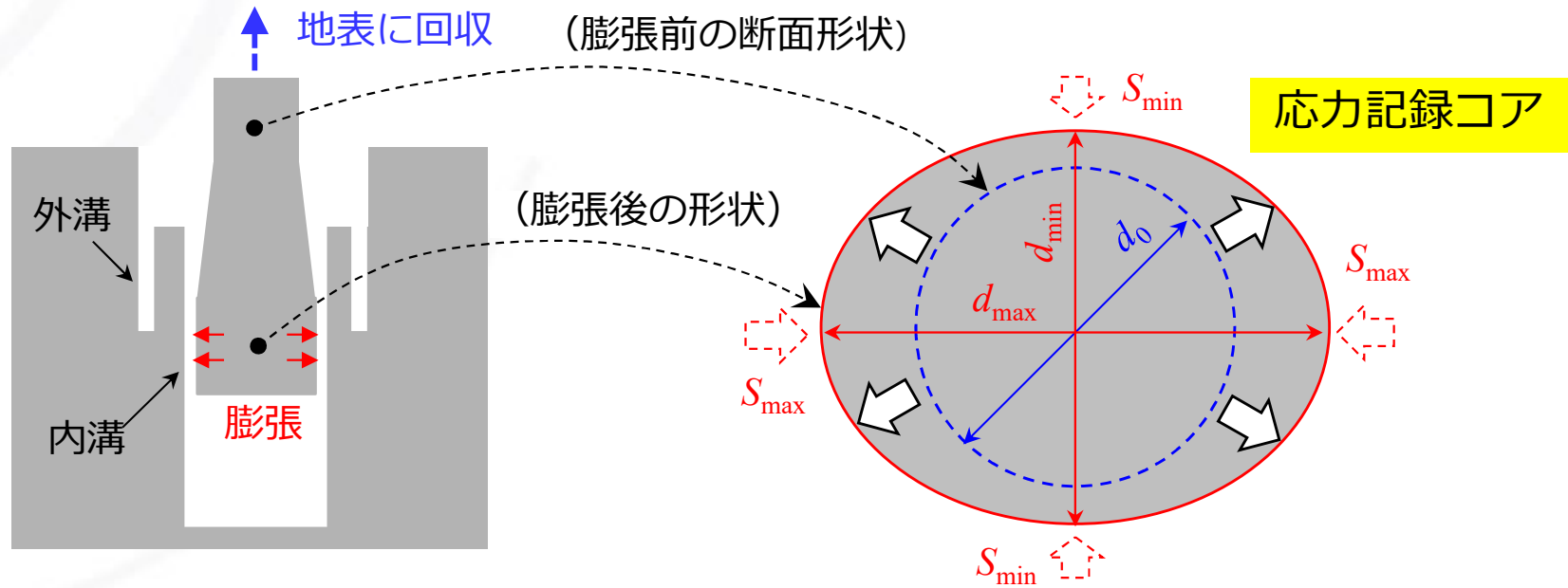


# 事業概要 (続き)

新たな原理に基づく応力測定法：二重解放コア変形法

二重ビットコアリングとコア

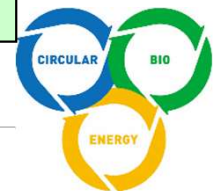
地表に回収されたコアの断面形状



変形後の形状 - 変形前の形状 = 変形量  $\longleftrightarrow$  地殻応力

- 原位置試験が不要
- パッカーやひずみゲージ等の耐久性の低い部品が不要

適用深度／温度条件  
の大幅な向上



## 3. 実施内容・最終目標

本プロジェクトでは、2.5 km以上の深度で、応力記録コアを定方位で2個以上、連続的に採取でき、250℃以上の耐熱性能を有する二重コアリングツールを完成させる。また、数値シミュレーション結果に基づき、地殻応力を考慮することで調査・生産井の掘削および貯留層維持・管理に要するコストを10～20%削減できることを明らかにする。これらを達成するために下記のテーマ①～③の研究開発を実施する。

### ① マルチ二重ビットコアリングツールの開発

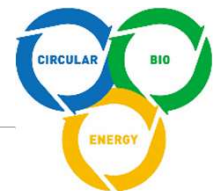
2つの方式（ワイヤーライン型および改良ロッド型）による二重ビットコアリングツールを開発してコア掘削試験を行い、性能評価と課題を抽出し、それを踏まえた改良を行ってコアのマルチ化を実現する。

### ② コア方位測定方法の開発

耐熱性があるメモリ記録型の方位測定器を開発する。さらに、その測定器を①の二重ビットコアリングツールと組み合わせてコアチューブの方位を測定する方法を開発する。

### ③ 地熱開発における地殻応力の有効性評価

地殻応力が調査・生産井の掘削等にもたらす効果を、数値シミュレーションによって定量化する。また、断裂系の地熱貯留層を模擬する数値モデルを作成し、地熱流体の分布、効率的な生産井の配置、生産量の変化などに対する地殻応力の影響を明らかにする。



# 研究成果（項目①）

## ① マルチ二重ビットコアリングツールの開発

- 一回の揚降管により、隣接した深度で2個分の応力記録コアを採取できるツールを製作
- これを実現するために旧型で内コアバレルが掘管と直結していた構造を外バレルが掘管と直結する構造に改造
- さらに繰り返し脱着できようようにツールと掘管の連結機構（J-slot）を改造
- 北上山地で地表から掘削した鉛直坑井および神岡鉱山の坑道床面に掘削した鉛直坑井で動作検証

製作したツール





# 研究成果 (続き)

## 開発したコアリングツールによる作業手順

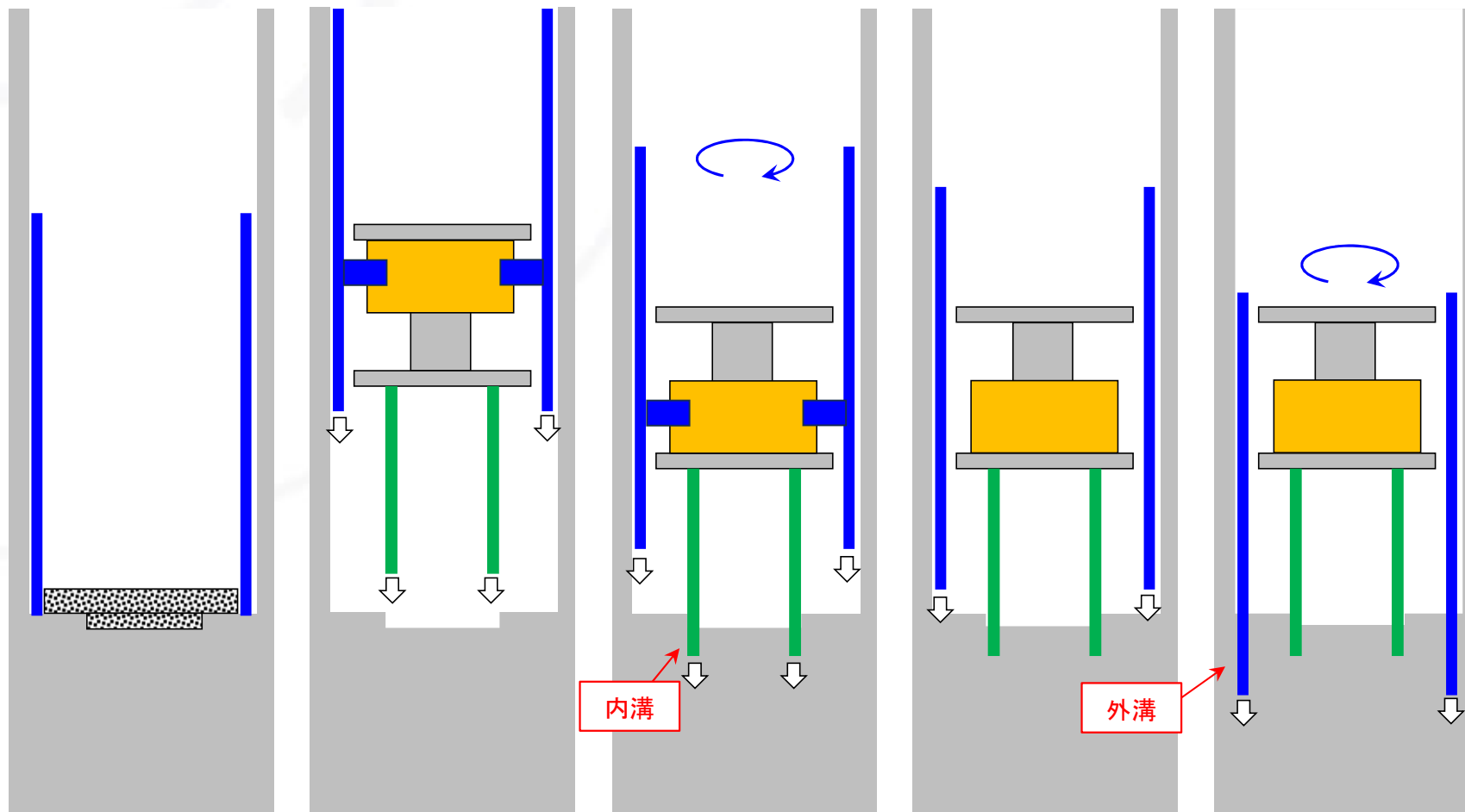
パイロット孔の掘削・揚管

①降管

②内溝掘削

③ツールと掘管の連結を外す

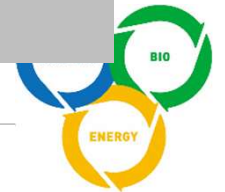
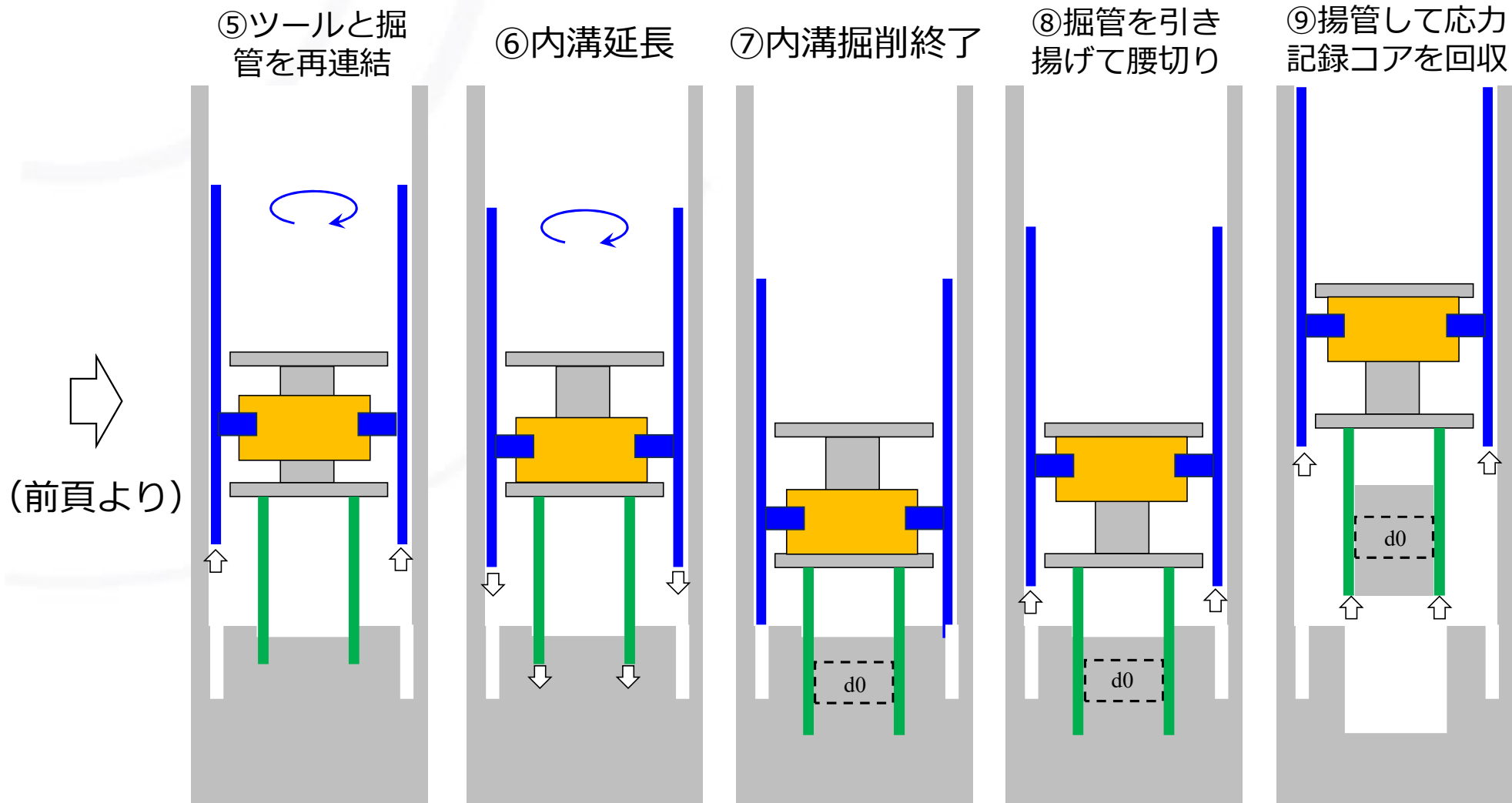
④外溝掘削



➡  
(次頁へ)

# 研究成果 (続き)

## 開発したコアリングツールによる作業手順 (続き)





# 研究成果（続き）

## 実坑井試験サイト

### 北上坑井試験（地表掘削坑井）

- 実際の坑井掘削工程と環境での検証試験が可能
- ただし深度百m程度のため地殻応力はほぼゼロ

### 神岡鉦山坑井試験（坑道床面掘削坑井）

- 床面直下の極浅い深度で十MPa以上の応力が作用する岩体中での検証試験が可能

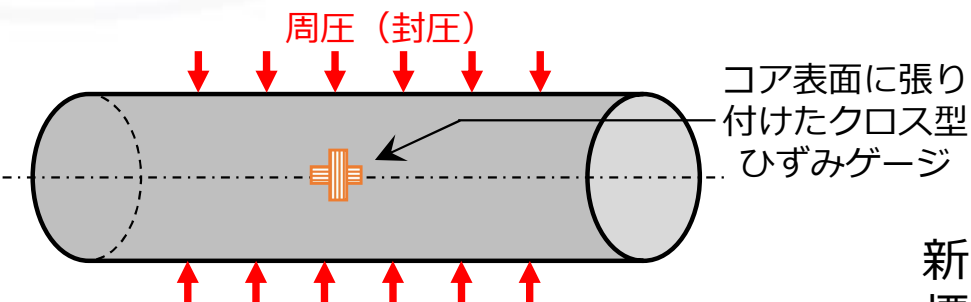
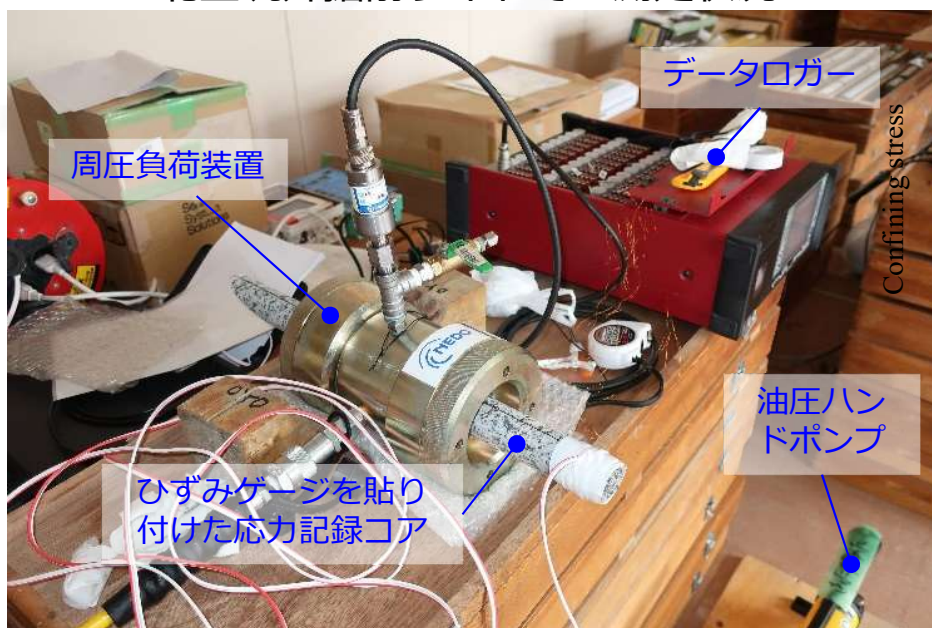




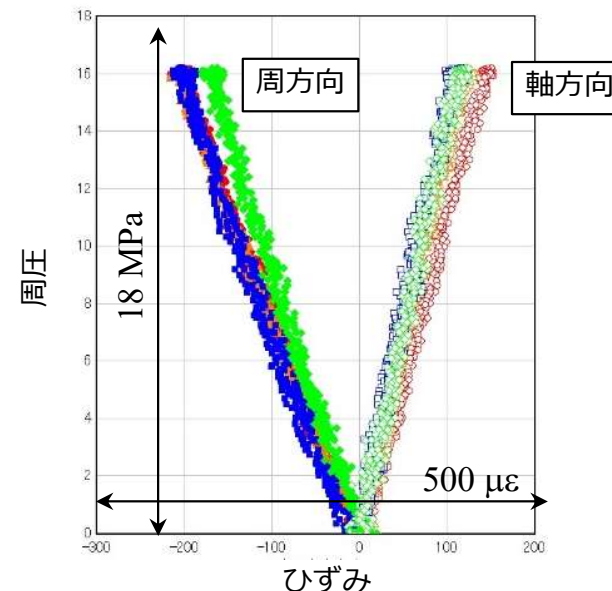
# 研究成果 (続き)

新開発の可搬型ヤング率測定装置の実証  
(整形をせずに応力記録コア自体を用いてヤング率を直接測定する装置)

北上坑井掘削サイトでの測定状況



測定された周圧-ひずみ関係の例 (No.6)



現地測定結果

後日にコアから切り出した円柱試験片を用いて実施した一軸圧縮試験結果

供試体	周圧载荷試験		一軸载荷試験	
	E, GPa	$\nu$ , -	E, GPa	$\nu$ , -
No.2	74.4	0.299	69.0	0.191
No.6	63.6	0.236	65.7	0.164
No.7	62.1	0.282	70.8	0.169

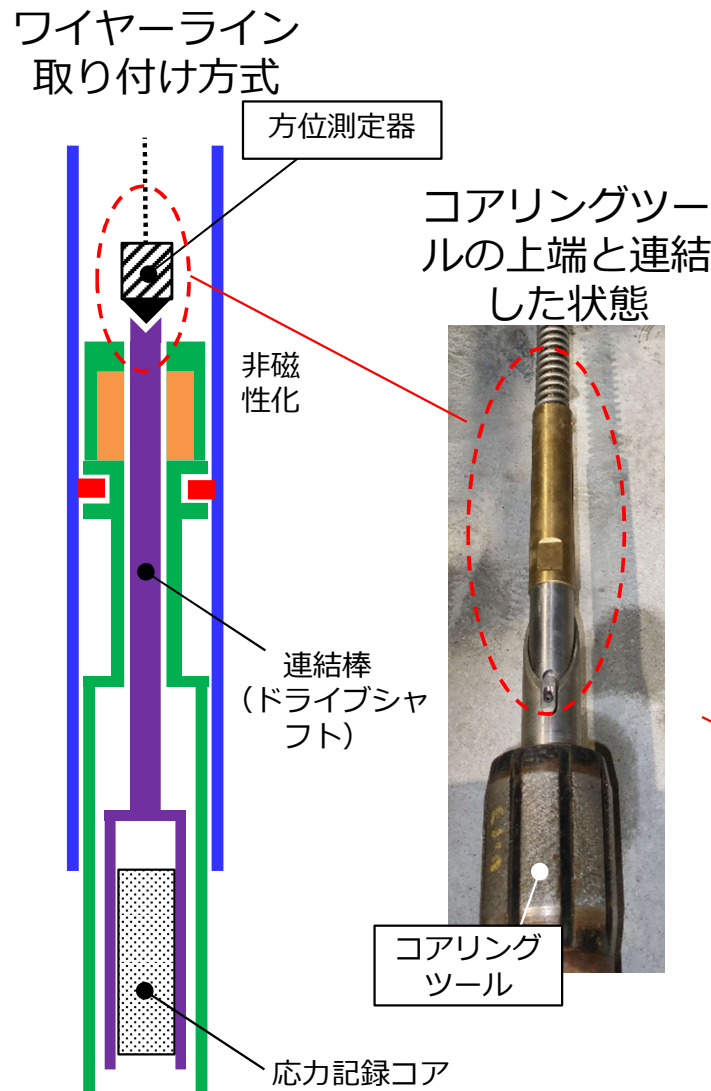
新開発の可搬型装置で測定されたヤング率は、従来の標準的手法によるものと10%前後の誤差で一致

# 研究成果 (項目②)

## ②コア方位測定方法の開発

- 掘管の中を降下させ、コアリングツールの上端と一時的に連結させてコアの方位を記録するツールを製作
- 方位記録が終わったら、コアリングツールと切り離してワイヤーラインで回収
- 北上山地で地表から掘削した鉛直坑井および神岡鉱山の坑道床面に掘削した鉛直坑井で動作検証

方位測定器本体とPCを接続して測定条件の設定  
ないし測定データの読み取りをしている状況



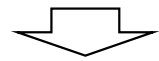
製作したコア方位測定ツール全景



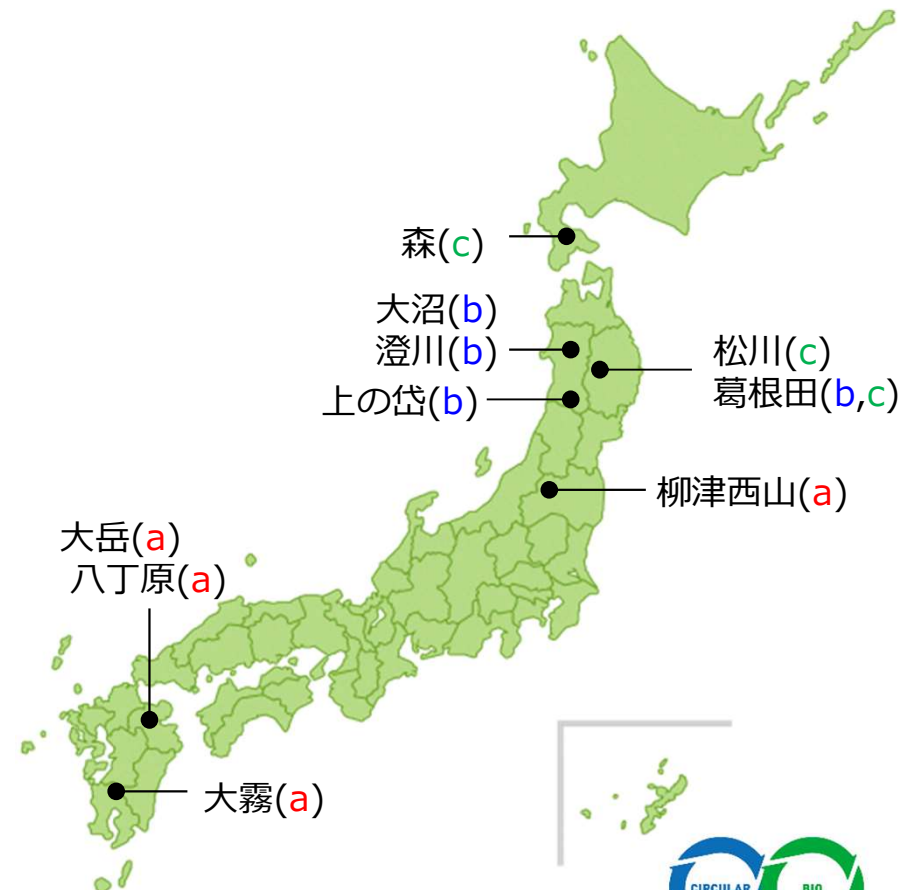
# 研究成果（項目③）

## ③地熱開発における地殻応力の有効性評価

国内の地熱地帯を構成する熱源および貯留層と断裂構造を調査



- 国内の全発電所において、地熱貯留層は熱源により加熱された流体が断裂帯を通じて流動し、流動がキャップロックによって規制される構造  
(窪田, 電中研報告, 2017)
- 断裂系から見た地熱貯留層は、**a. 主断層**、あるいは**b. 多数の断裂系**に支配されたもの、および**c. 貫入岩に規制**されたものに分類  
(玉生, 地熱エネルギー, 1995)
- 対応する主な地熱地域は右図の通り  
(窪田, 電中研報告, 2017)





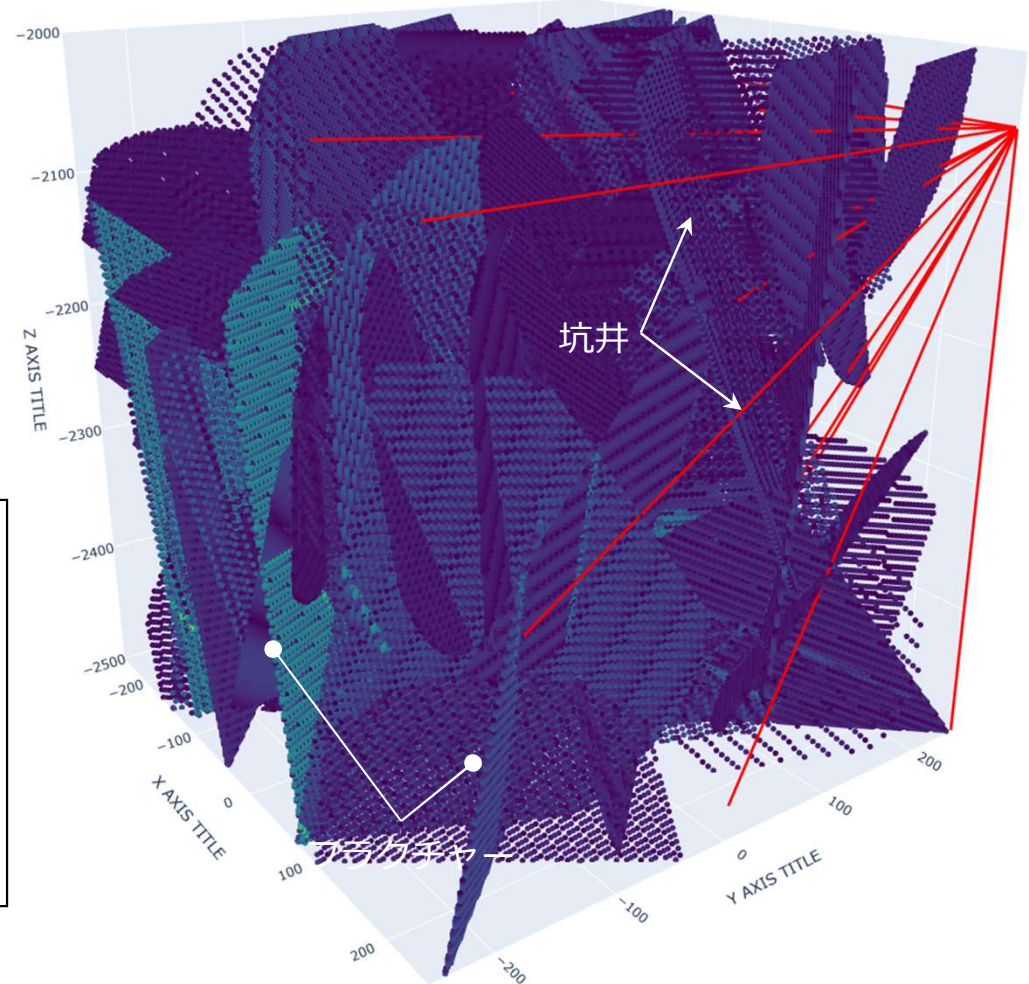
# 研究成果（続き）

- 調査結果に基づいて地熱貯留層モデルを作成
- せん断型水圧破碎シミュレータ“SHIFT”（JAPEX）によるシミュレーションに着手

## せん断型水圧破碎シミュレータ“SHIFT”（JAPEX）

離散フラクチャー・ネットワーク  
（Discrete Fracture Network: DFN）  
モデルをベースに、フラクチャーの力学的な開閉口およびせん断すべりによる透水性変化と、それに伴う岩体内の流体流動を解析するシミュレータ

SHIFTで作成した3Dモデルの例  
（面構造：フラクチャー、赤線：坑井）

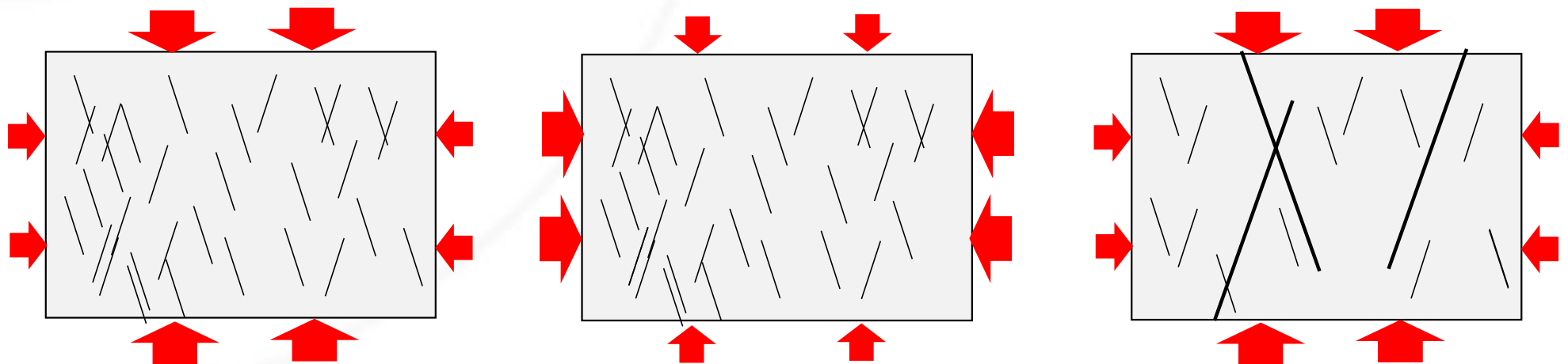




# 研究成果 (続き)

- 貯留層内における地熱流体の流れに対して、想定される影響因子と効果は下図の通り

## 地殻応力



- 高傾斜で多数の既存き裂
- 上下方向の地殻応力 (大)  
→上下方向の透水性 (大)  
→上下方向の地熱水流れ (大)
- 地殻応力の影響 (大)

- 高傾斜で多数の既存き裂
- 左右方向の地殻応力 (大)  
→既存き裂の透水性不変
- 地殻応力の影響 (小)

- 相対的に長い既存き裂が増えれば、左記のような効果がより強調

## テーマ① マルチ二重ビットコアリングツールの開発

- 事前の坑底整形のために必要となる、余分な揚降管を省くための改良
- コアリングツールを掘管内で昇降できるように改良 ←掘管を坑内に残したままでコアリングを繰り返し行えるようにするため

## テーマ② コア方位測定方法の開発

- ツールが長尺なことによる作業性の悪さを改善
- さらに高温（～250℃）の地層で測定するための対応

## テーマ③ 地熱開発における地殻応力の有効性評価

- 地熱開発における地殻応力の有効性を評価するためのシミュレーション手順の検討 ←何を指標とし、それを評価するためにどのようなシミュレーションをするのか
- シミュレーションを実施して具体的に指標を評価