

2025年度NEDO再生可能エネルギー一部成果報告会 プログラムNo.2-7

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：2025年7月17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 小川浩司（応用地質）

*（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N E D O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った。

2. 実施期間

開始：2021年6月

終了：2025年3月

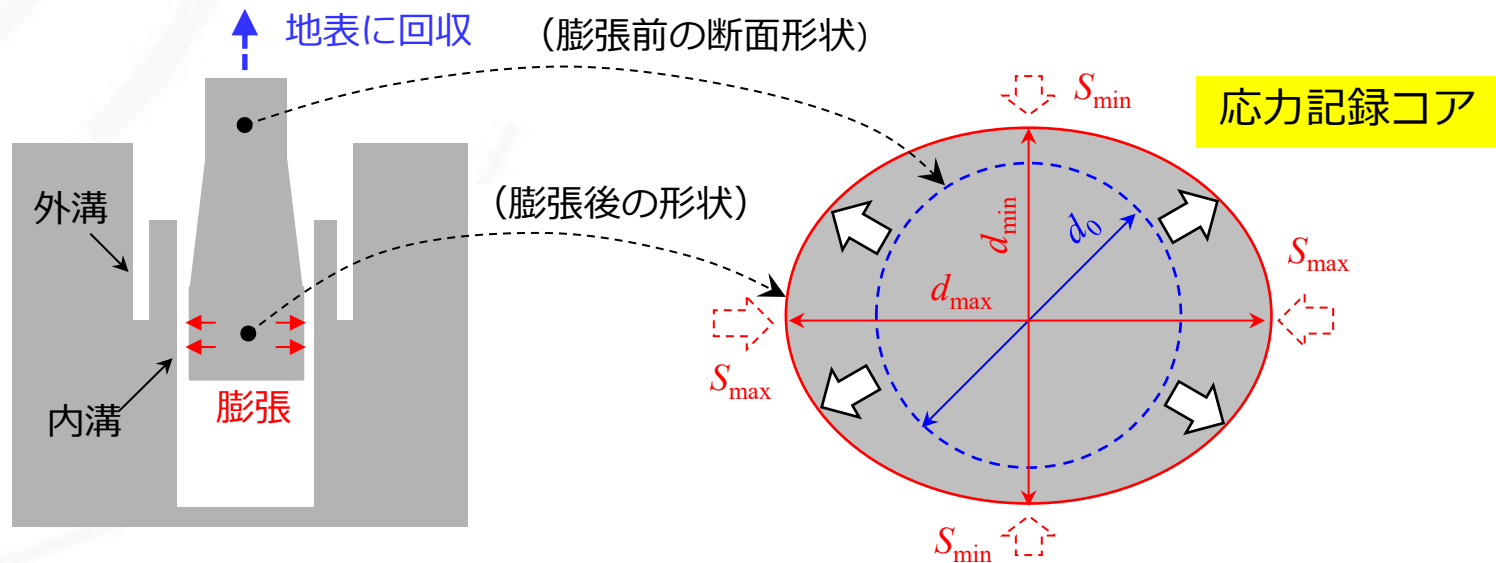
事業概要（続き）

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

（注：開発当初の要領）

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

事業概要（続き）



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

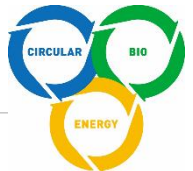
2つの方式（ワイヤーライン型および改良ロッド型）による二重ビットコアリングツールを開発してコア掘削試験を行い、性能評価と課題を抽出し、それを踏まえた改良を行ってコアのマルチ化を実現する。

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角測定器を開発する。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角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

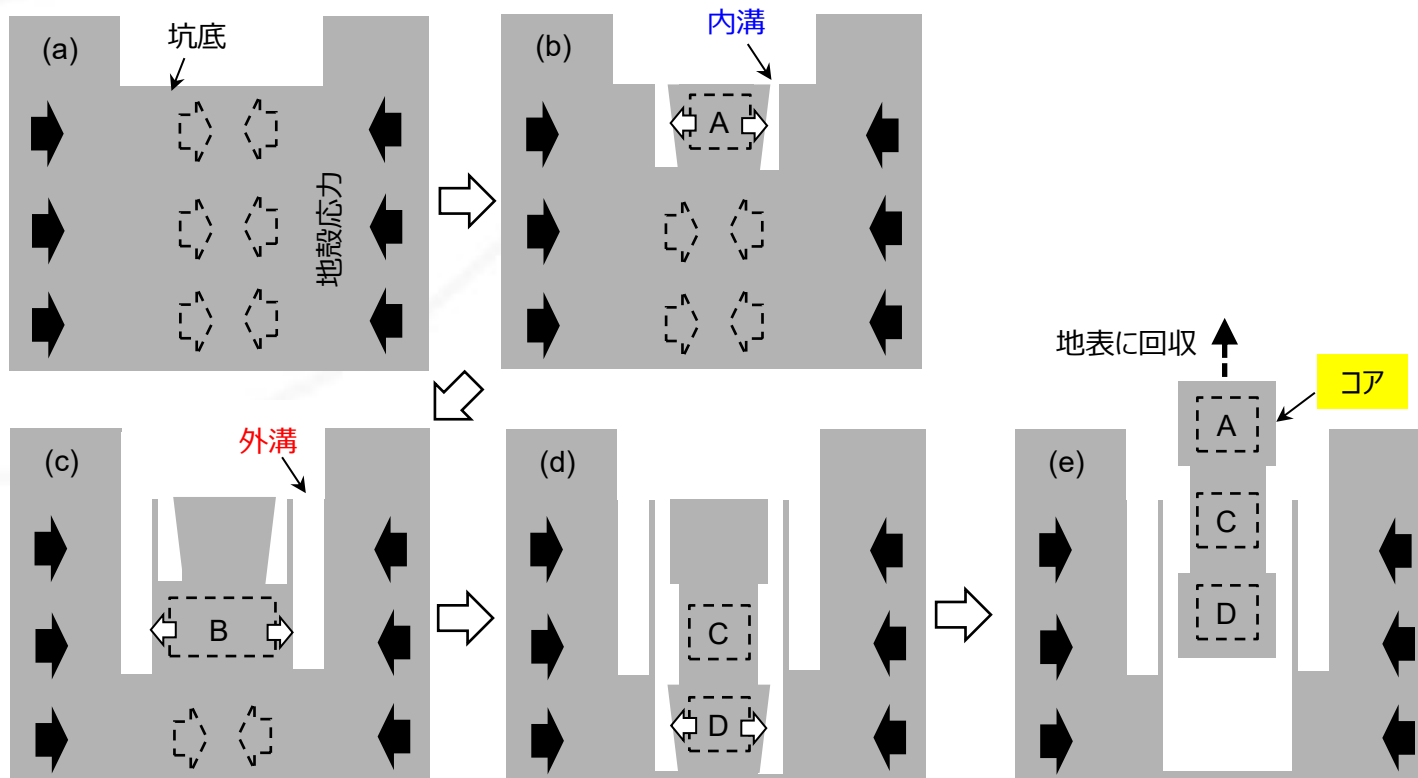
地殻応力が調査・生産井の掘削等にもたらす効果を、数値シミュレーションによって定量化する。また、断層系の地熱貯留層を模擬する数値モデルを作成し、地熱流体の分布、効率的な生産井の配置、生産量の変化などに対する地殻応力の影響を明らかにする。



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

- 各種の試験結果を踏まえて、掘削要領を前々頁に示した開発当初のものから下記に変更
- 掘管を坑井内に置いたままで、何度でもコアリングが可能
- 想定通りにコア形状から地殻応力を評価できることを、数値シミュレーションならびに、
①神岡鉱山の坑道床面および②登米で地表からそれぞれ掘削した実坑井を用いた試験で検証

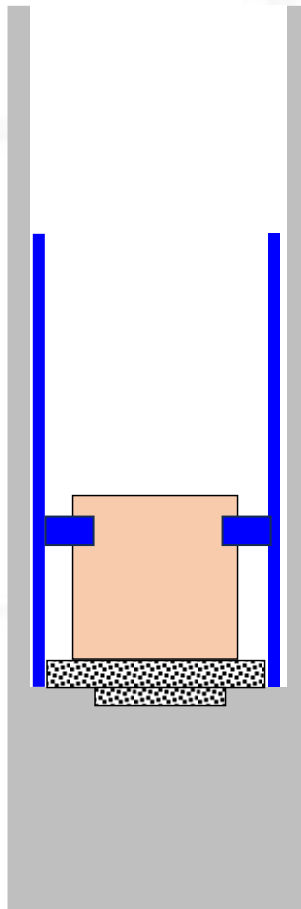


研究成果（続き）

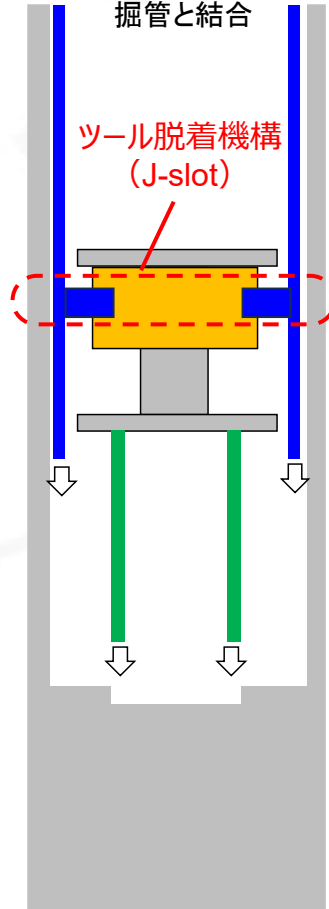
改良した要領で二重ビットコアリングを行う具体的手順

(例えば、Ito et al., *US Rock Mech./Geomech. Symp.*, 2024)

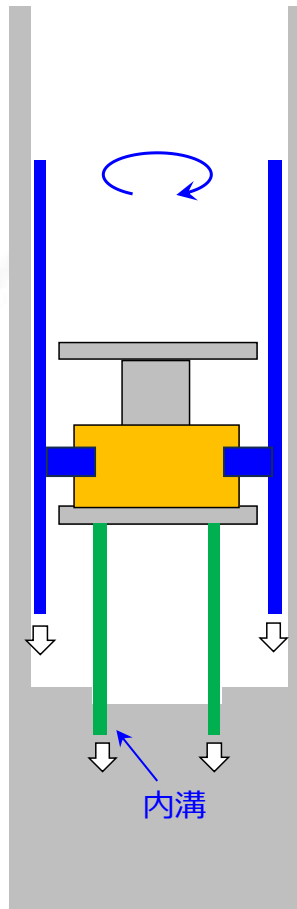
①専用ツールで
坑底整形



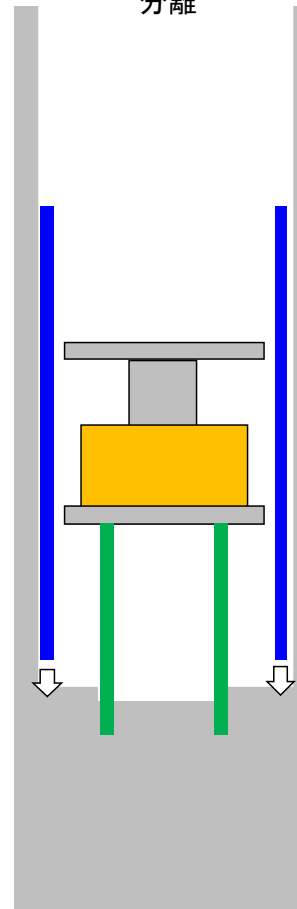
②二重コアリング
ツールを降下し、
掘管と結合



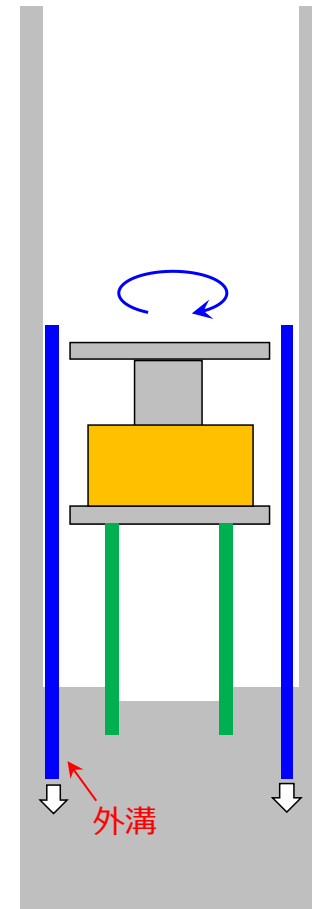
③内溝掘削



④二重コアリング
ツールを掘管から
分離

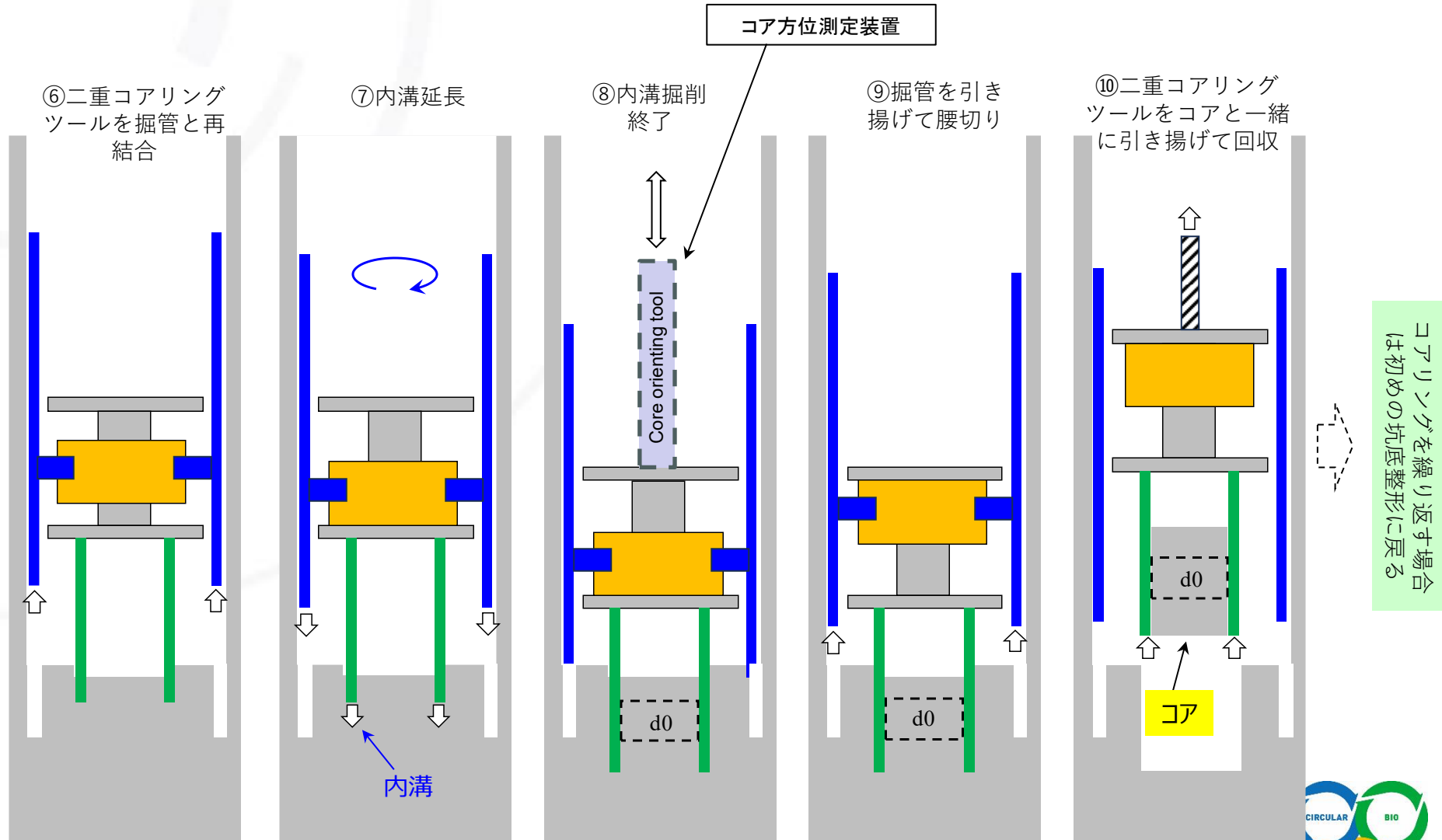


⑤外溝掘削



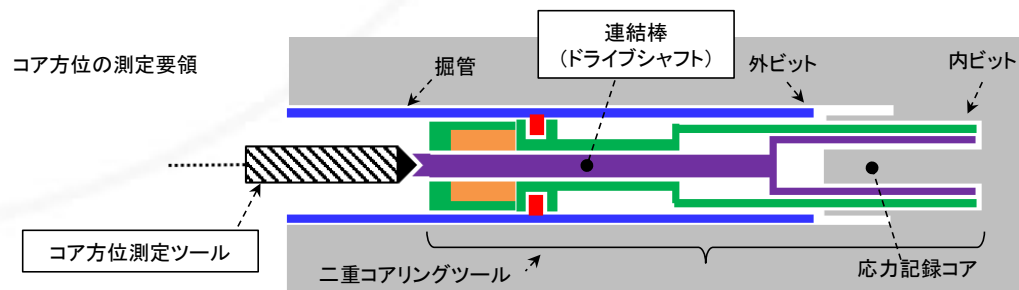
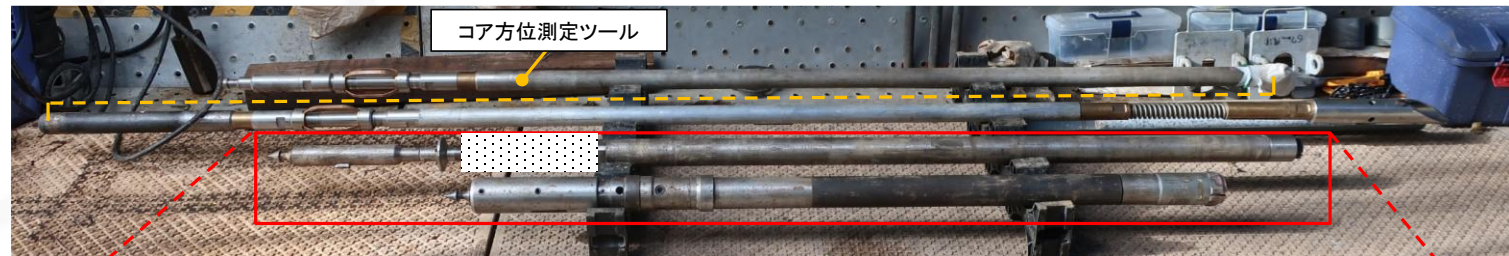
(次頁に続く)

研究成果（続き）

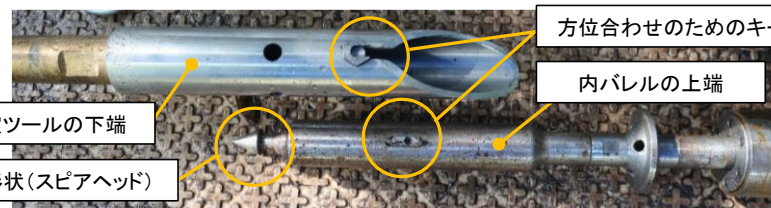


研究成果（項目①+②）

完成したツル一式（下画像はHQ坑井用、地熱開発を想定したPQ坑井用を別途開発済）



コア方位測定ツールと二重ビット
コアリングツールの内バレルとの
連結機構



研究成果（項目②続き）

ワイヤーライン取り付け方式コア方位測定ツール

ワイヤーライン
取り付け方式

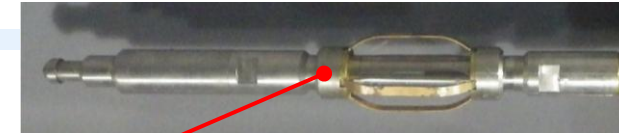
コア方位測定
ツール

非磁
性化

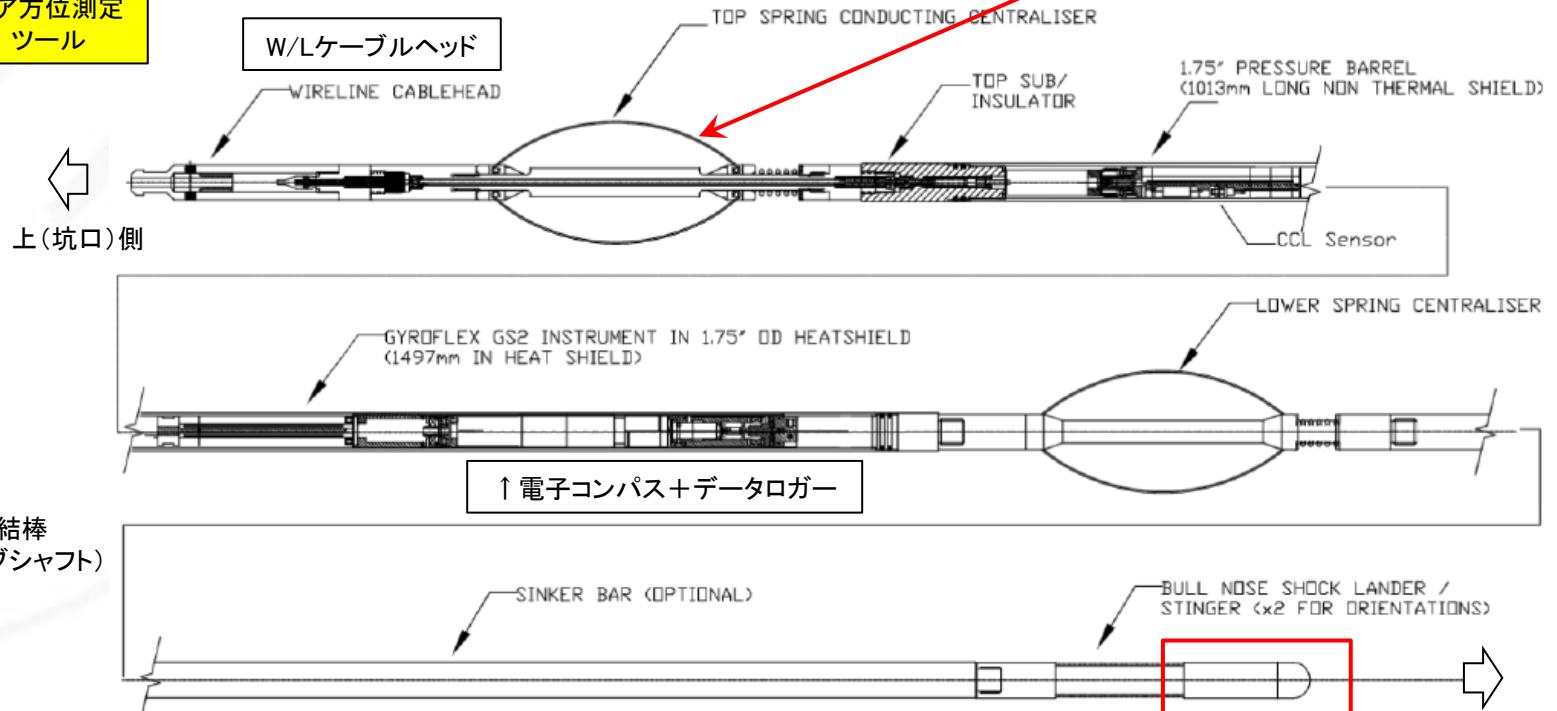
連結棒
(ドライブシャフト)

応力記録コア

- コア切りする前に一時的に連結させてコア方位を記録
- 耐熱性: 204°C × 8h
- より高温の地層では、事前に泥水循環して坑底を冷却
- さらに高温の場合は、コア岩石の残留磁化を利用して定方位化



セントラライザを変更



掘削ツールと連結するための
部品(↓)に変更

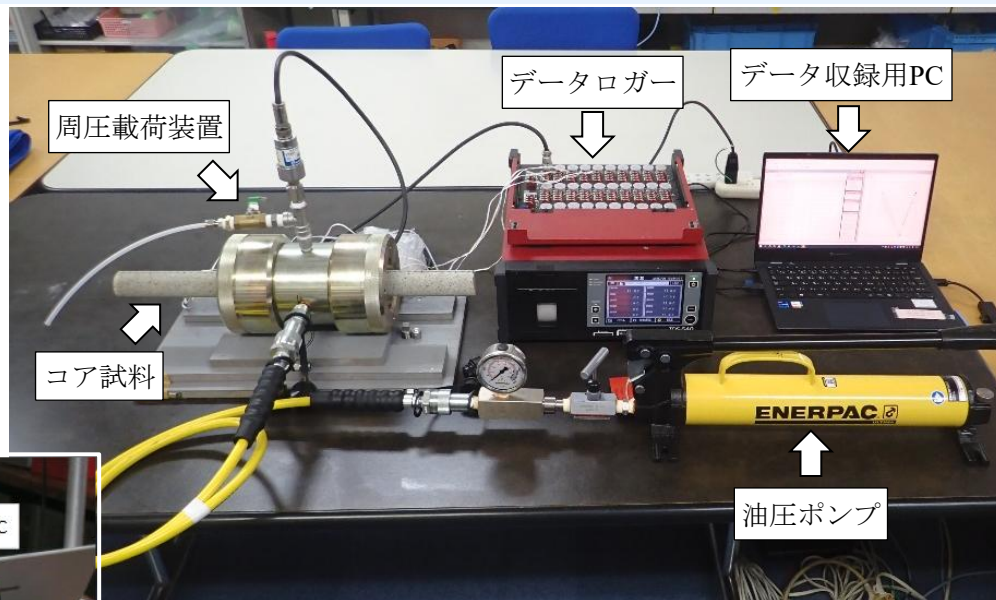
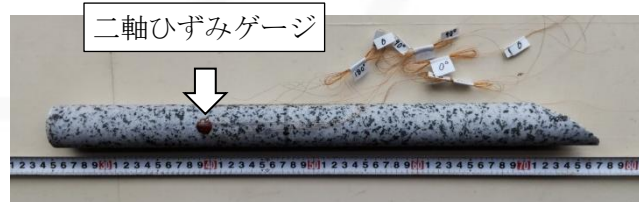


下(坑底)側

研究成果（周辺機器の開発）

可搬型コアヤング率測定器

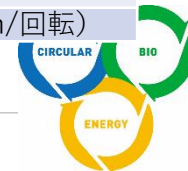
- 応力評価に必要なコアのヤング率を、掘削現場で測定するための装置
- コアの表面に二軸ひずみゲージを貼り付け
- コアに周圧を直接負荷し、そのときの周圧とひずみの関係からヤング率を評価



可搬型コア直径測定器

- 応力評価に必要なコア直径を、掘削現場で測定するための装置
- コアの側方から照射したLED光のシルエット画像からコア直径を測定
- コアを回転させながら測定することで、コア直径の周方向分布を取得

項目	仕様
コア直径レンジ	30～200mm
コア長レンジ	100～1000mm
分解能	0.00001mm
繰り返し精度	±0.00015mm
回転速度	可変（通常は 3 or 1.5 min/回転）



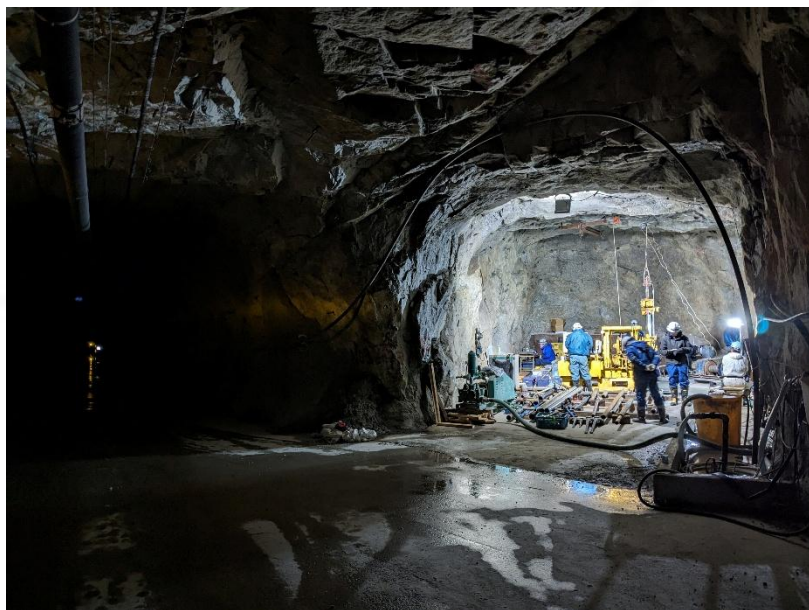
実規模試験の実施状況

登米坑井試験（地表掘削坑井） ⇨

深度約50mの坑井を掘削してPQ坑井用ツールの動作検証

神岡鉱山坑井試験（坑道床面掘削坑井）

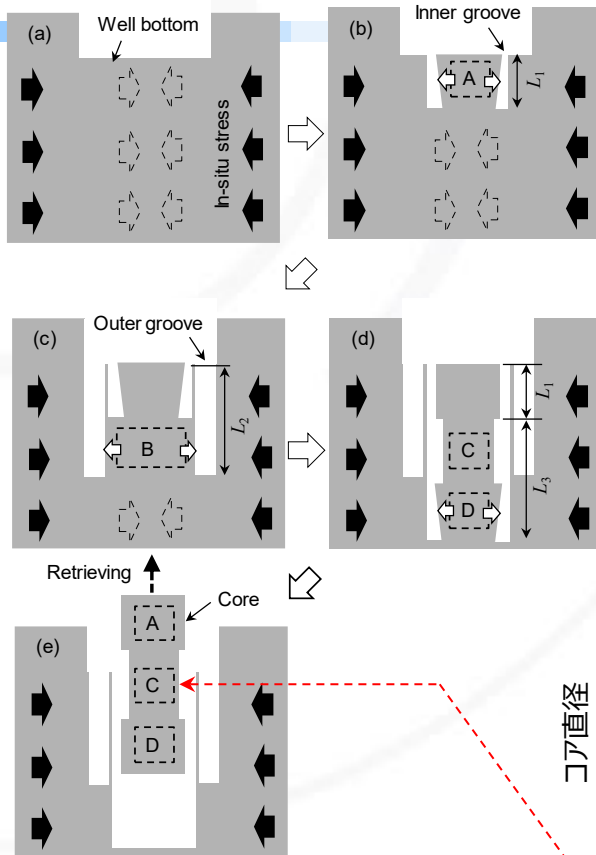
床面直下の極浅い深度で10MPa以上の応力が作用する
岩体中での検証試験



国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

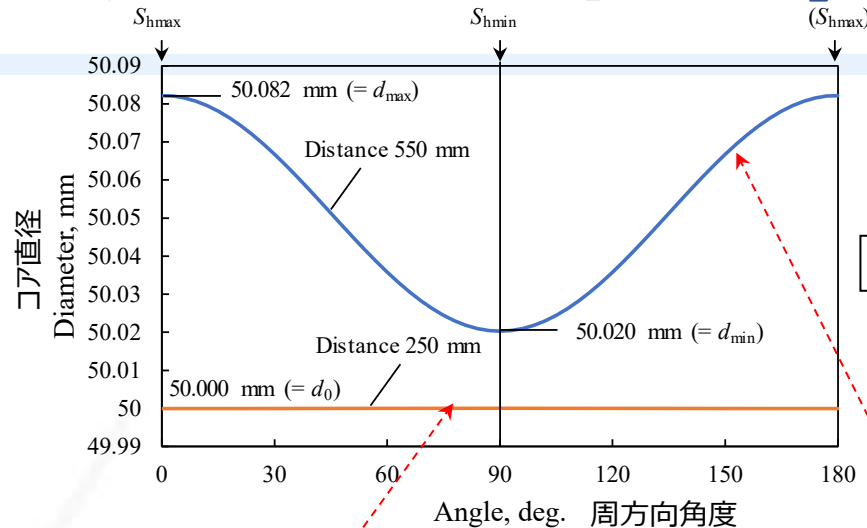


研究成果（測定原理の検証）



条件

- 3D FEM simulator: RS3 of Rocscience Inc.
- 外ビット: 外径 $\phi 100$ mm, 内径 $\phi 75$ mm
- 内ビット: 外径 $\phi 75$ mm, 内径 $\phi 50$ mm
- L_1 : 200 mm, L_2 : 400 mm, L_3 : 400 mm,
- E : 10 GPa, ν : 0.2
- S_{hmax} : 20 MPa, S_{hmin} : 10 MPa, S_v : 10 MPa
- S_{hmax} 方位(θ): 0°



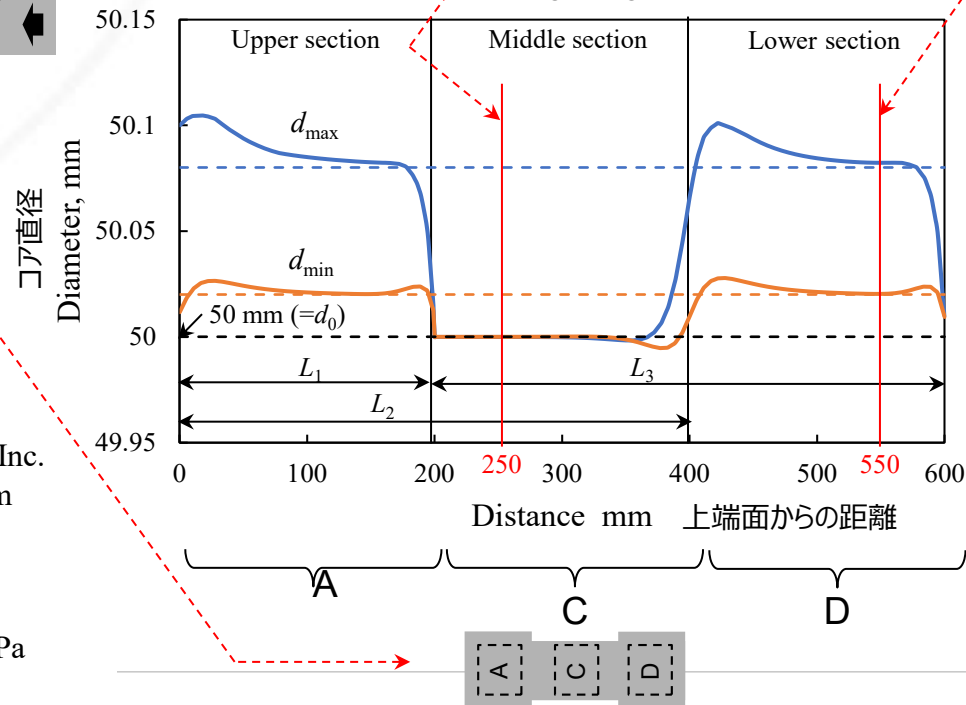
応力評価結果

S_{hmax} : 20.42 MPa

S_{hmin} : 10.08 MPa

θ : 0°

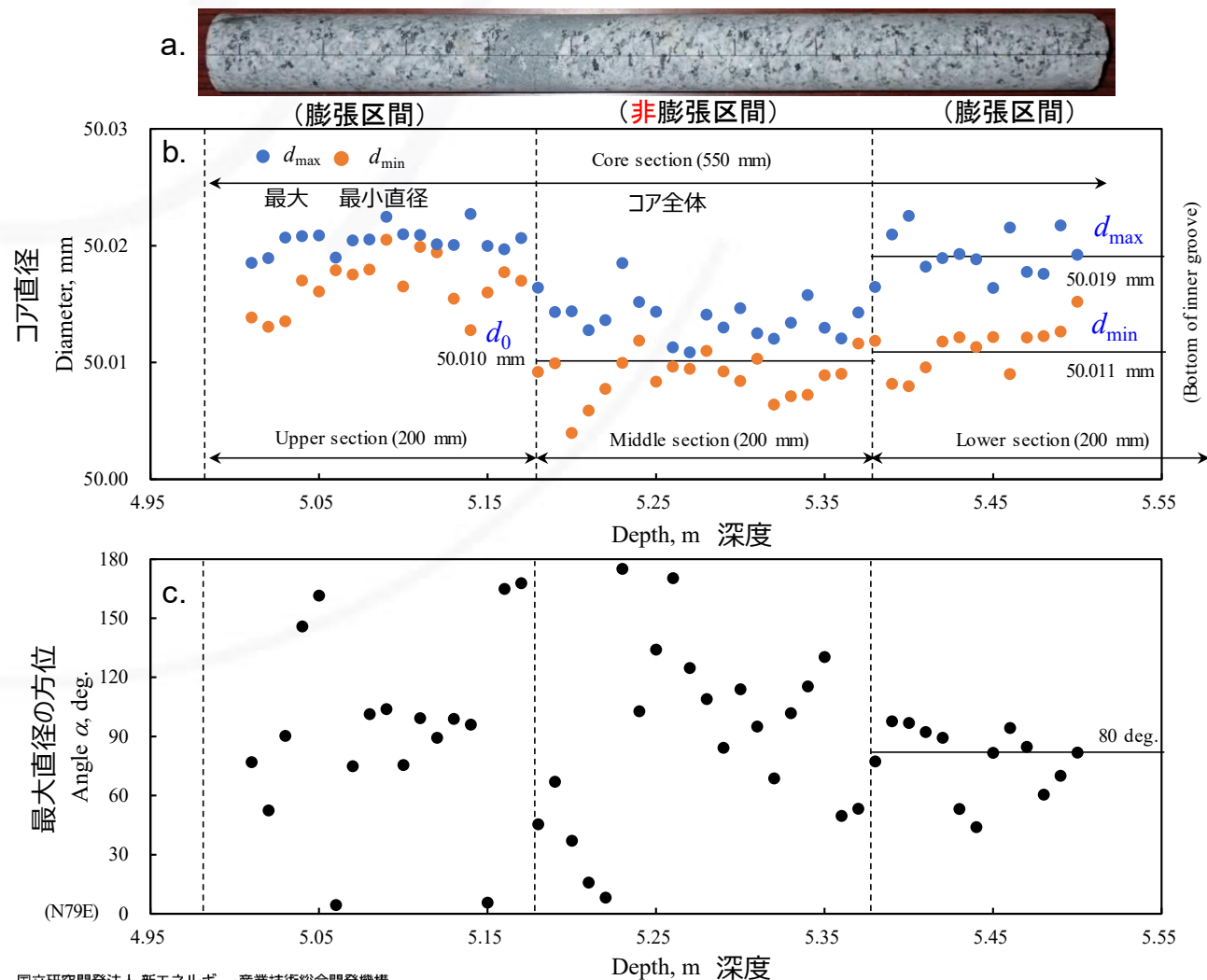
(S_v は既知と仮定)



研究成果（続き）

神岡鉱山試験で採取された(a)コアの画像、(b)測定された直径および(c)最大直径方位の軸方向分布の一例

(Ito et al., *US Rock Mech./Geomech. Symp.*, 2024)



評価値

S_{hmax} : 14.1 MPa

S_{hmin} : 6.1 MPa

θ : N21°W

(S_v は13.7 MPaで既知と仮定)



同じサイトで過去に実施された
水圧破砕法の結果 (Sano et al., 2007)

S_{hmax} : 15.0 MPa

S_{hmin} : 6.0 MPa

θ : N32°W

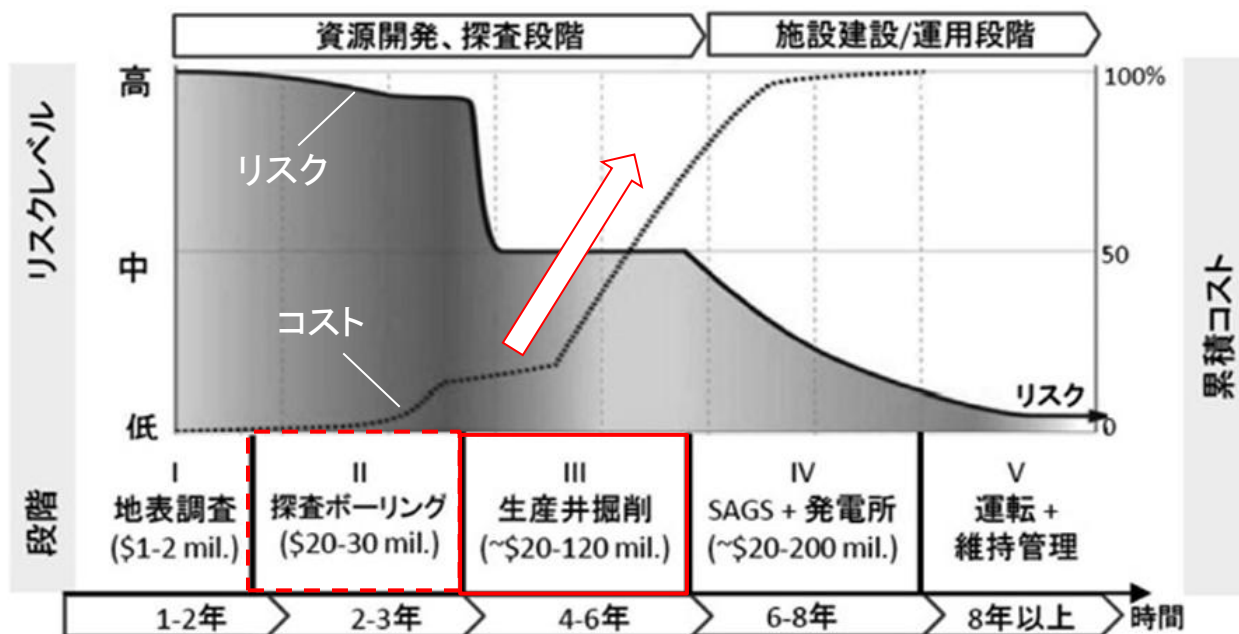
研究成果（項目③）

③ 地熱開発における地殻応力の有効性評価

- 地殻応力を考慮することで掘削成功率を向上させられることを数値シミュレーションで検証
- 地熱開発に占める掘削コストの割合が大きいので（下図）、掘削成功率が高くなれば全体的大幅なコスト低減が見込まれる

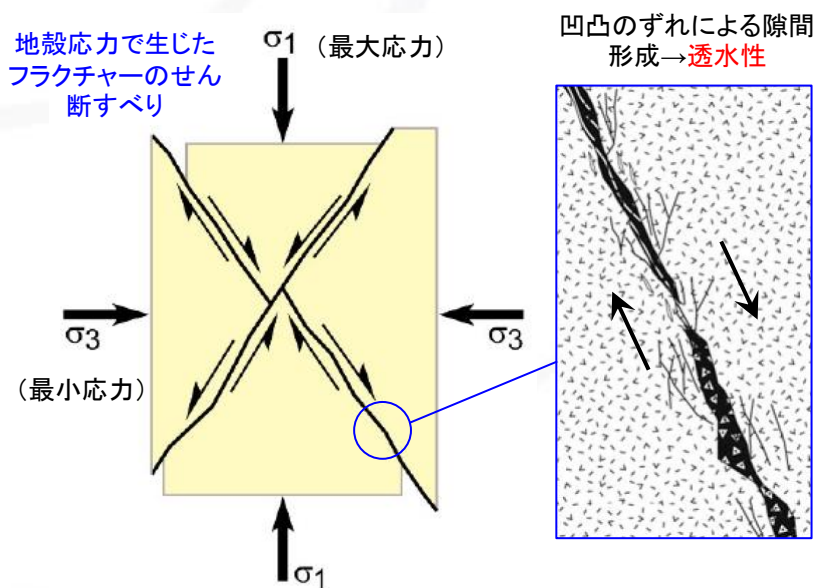
地熱開発における各開発段階のリスクとコスト

（安川ほか, 日本地熱学会誌, 2015）



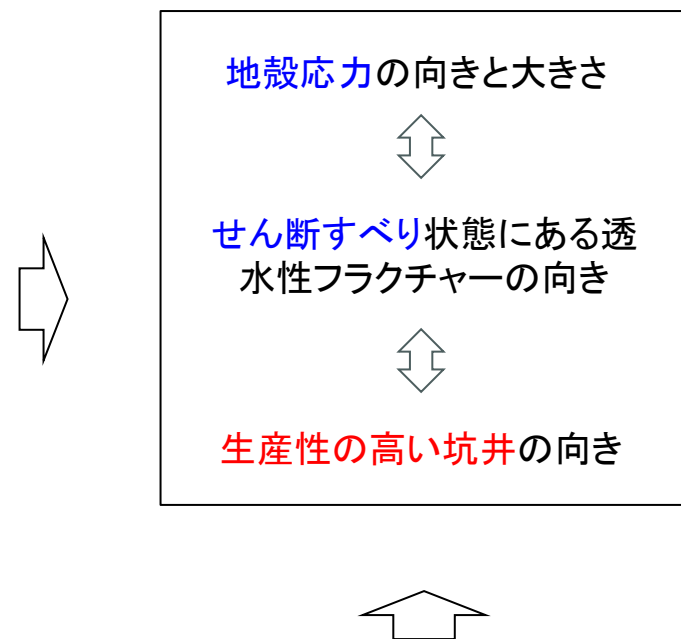
研究成果（続き）

せん断すべりによるフラクチャー 透水性の形成



- 地熱流体は、透水性フラクチャーに沿って流動
- 透水性フラクチャーの分布は非一様で、大きな地殻応力が作用する岩盤中では特に、せん断すべり状態のフラクチャーに偏る

想定される地殻応力と生産性の関係



坑井生産性が地殻主応力の向きによって変化する様子を、断裂系貯留層を想定した数値シミュレーションで評価

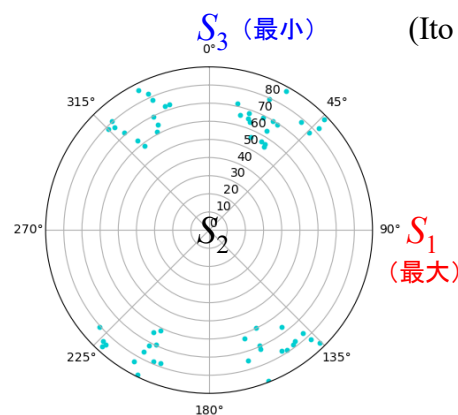
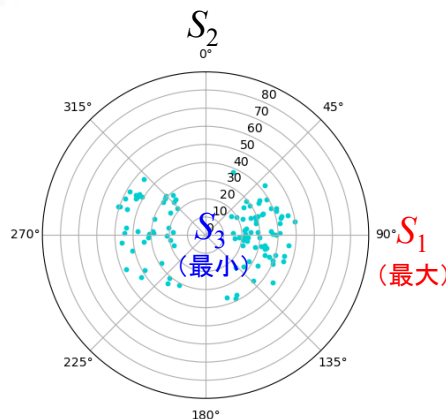
研究成果（続き）

逆断層型（左） および横ずれ断層型（右） 地殻応力状態
における数値シミュレーション結果

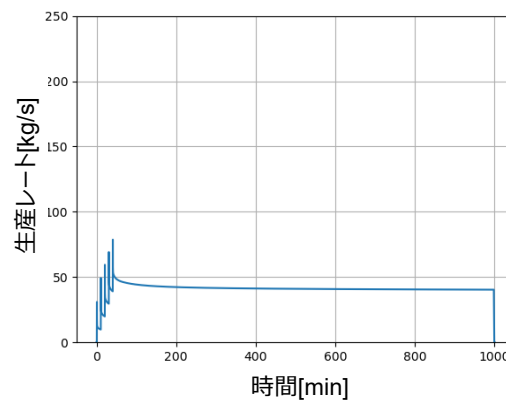
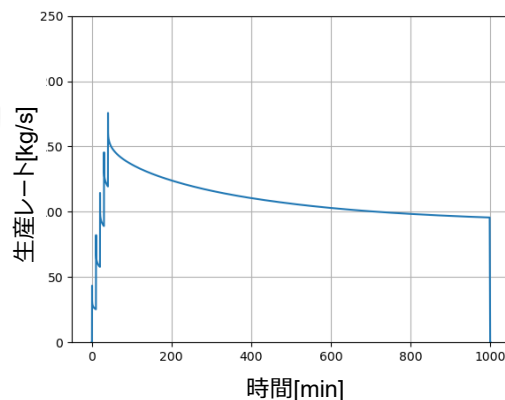
(Ito et al., *CouFrac*, 2024)

せん断すべり状態の
フラクチャーと地殻
主応力の向き

(ステレオネット下半球投影)



生産レートの
時間変化



生産レートが地殻主応力の向きによって大きく変化
→ 地殻応力状態に応じた向きに生産井を掘削することで高い生産性が期待

- 水圧破碎法および応力解放法などの地殻応力測定法が開発され、国内外で標準化もされて広く普及している。ただし、いずれも比較的浅い深度、かつ室温レベルの温度環境で用いるのが前提となっており、**地熱開発に適用することは全く不可能**である。
- これに対して本事業で提案した方法は、掘削可能な範囲であれば深度および温度によらず適用可能であり、測定に必要な機材およびスキルは従来法と同等かむしろ簡易である。
- 本事業によって提案手法を実現するための技術開発に取り組み、最終的に**深度2.5 kmおよび温度250℃以上の地層への適用を想定した測定ツールを完成**させることに成功した。
- 地熱開発における各開発段階のリスクとコストを調べた報告によれば、開発の進行と共にリスクが低下するものの逆にコストが急激に上昇し、特に掘削コストが大きく影響していることがわかっている。したがって、**地殻応力情報の導入で掘削成功率が高くなれば、全体的大幅なコスト低減**が見込まれる。
- 本事業の成果を踏まえて、地殻応力を地熱開発に応用する具体的な取り組みが始まり、それが**ブレークスルー**となって**地熱利用が大きく促進**されるものと期待される。