

超臨界地熱発電技術研究開発／超臨界地熱資源
への調査井掘削に資する革新的技術開発／
二重解放コアを用いた地殻応力測定法の研究開発

(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
東北大学流体科学研究所
伊藤高敏
E-mail: ito@ifs.tohoku.ac.jp
TEL: 022-217-5234

1. 期間

開始 : 2018 年 8月

終了 : 2021 年 2月

2. 最終目標

地熱発電に必要な熱水／蒸気の地下の流れを評価・予測するためには、経路となる割れ目の幅や分布を支配する地殻応力の把握が重要となる。そこで、従来法が適用できなかった、大深度かつ高温な岩体の地殻応力を測定できる方法を構築する。このため、昨年度までの成果を踏まえた下記の2項目を実施して、二重解放コア変形法と呼ぶ新しい原理で地殻応力測定するための掘削ツール(二重コアビット)の開発と妥当性の検討を行う。

①二重コアビットの開発

二重コアビット(実験ツール)の結果を踏まえ、超臨界地熱開発の掘削坑井として想定される8-1/2inの口径で二重コアビット(実用ツール)を製作し、超臨界地熱環境(深度4～5km、温度400℃～500℃)の岩体中で使用可能な方法を提案する。

②測定結果に及ぼす各種因子の影響評価

二重解放コア変形法によって誤差20%以内の精度で地殻応力を測定できる応力レベルと岩体温度の範囲などの測定条件を提示する。この結果と①で製作した二重コアビットの仕様に基づき、深度4～5kmと想定される超臨界地熱貯留層に作用する地殻応力を直接あるいは間接的に測定する方法を明らかにする。

3.最終年度の成果

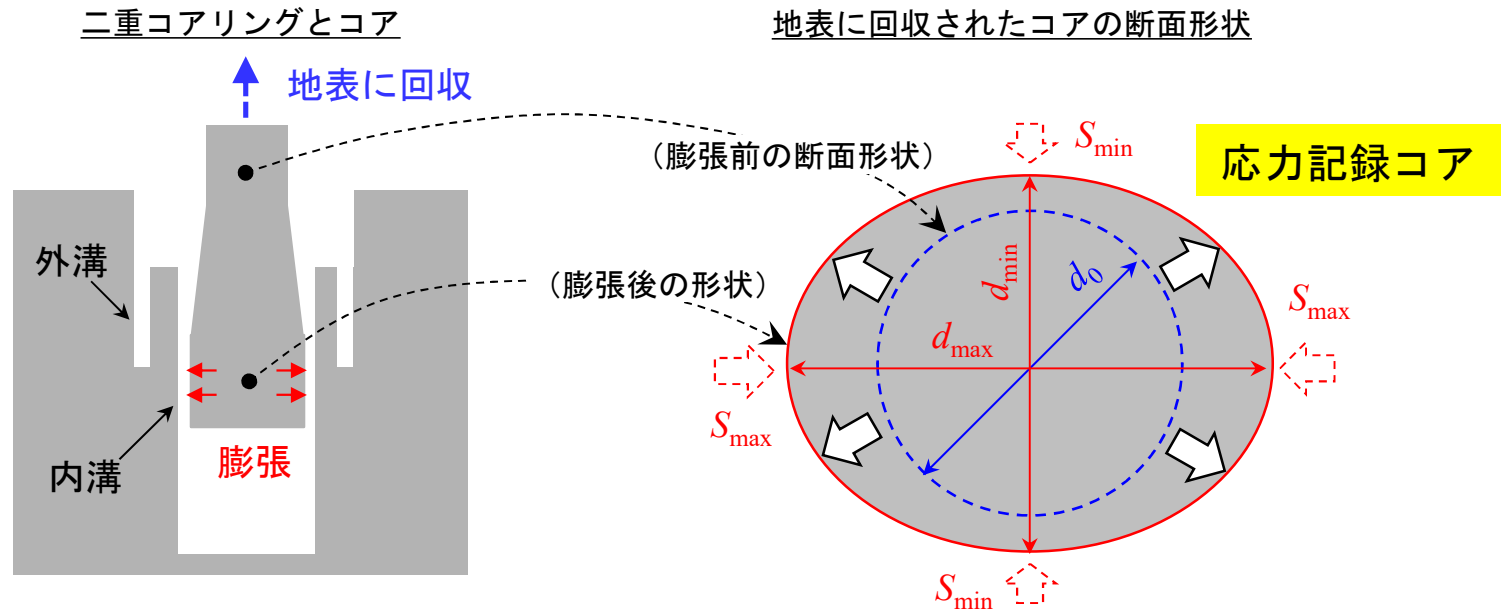
- 神岡鉱山で試験を実施して、小口径実験ツールによる実坑井での鉛直掘削試験に成功し、また、堀管との連結を外溝ビットから内溝ビットへ切り替える機構の動作をドリルマシンによる堀管の支持力の変化から遠隔で検出できることを確認した。
- これらの結果を踏まえ、超臨界地熱開発で掘削される大口径(8-1/2in)の坑井を想定した二重コアビットの実機モデルツールを製作した。これにより、掘削機メーカーの地表試験設備を用いた掘削試験を行って正常に動作することを確認した。また、大型の泥水ポンプによるツール内の通水試験を行い、超臨界地熱地層の掘削時に坑底温度を許容範囲に低下させるために必要な通水流量を確保できる見通しを得た。
- 一方、加熱した試験片に模擬地殻応力を負荷してコアを掘削採取する室内実験を行った。これにより、岩体が高温でも提案手法によって模擬地殻応力を正しく評価できることを確認した。また、二重コアリングを数値シミュレーションで再現し、掘削する二重の円周溝の最適な形状を決定した。さらに、掘削過程においてコアを損傷させるような異常な応力が発生しないことを確認した。
- 以上の結果から、深度4～5kmと想定される超臨界地熱貯留層の温度と応力環境でも提案手法によって誤差20%以内の精度で地殻応力を測定できる見通しを得た。

実施計画

| 事業項目 | FY2018 | | | | FY2019 | | | | FY2020 | | | |
|----------------------------|--------|----|----|----|--------|----|----|----|--------|----|----|----|
| | 1Q | 2Q | 3Q | 4Q | 1Q | 2Q | 3Q | 4Q | 1Q | 2Q | 3Q | 4Q |
| ①二重コアビットの開発 | | | | | | | | | | | | |
| ＊小口径ビット(実験ツール)の開発と検証 | | | | | | | | | | | | |
| ＊大口径ビット(実用ツール)の開発 | | | | | | | | | | | | |
| ＊標準法との比較検証 | | | | | | | | | | | | |
| ②測定結果に及ぼす各種因子の影響評価 | | | | | | | | | | | | |
| ＊室内実験装置の製作 | | | | | | | | | | | | |
| ＊室内実験による岩体温度および応力レベルの影響評価 | | | | | | | | | | | | |
| ＊数値シミュレーションによる応力解析と実験結果の検証 | | | | | | | | | | | | |
| ③まとめ | | | | | | | | | | | | |

新たに提案した二重解放コア変形法の原理

コアリング時の応力解放で膨張したコア断面形状から坑井直交面内の地殻応力差を求める方法(Funato & Ito, 2017)を最大および最小の各成分を求められるように拡張



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

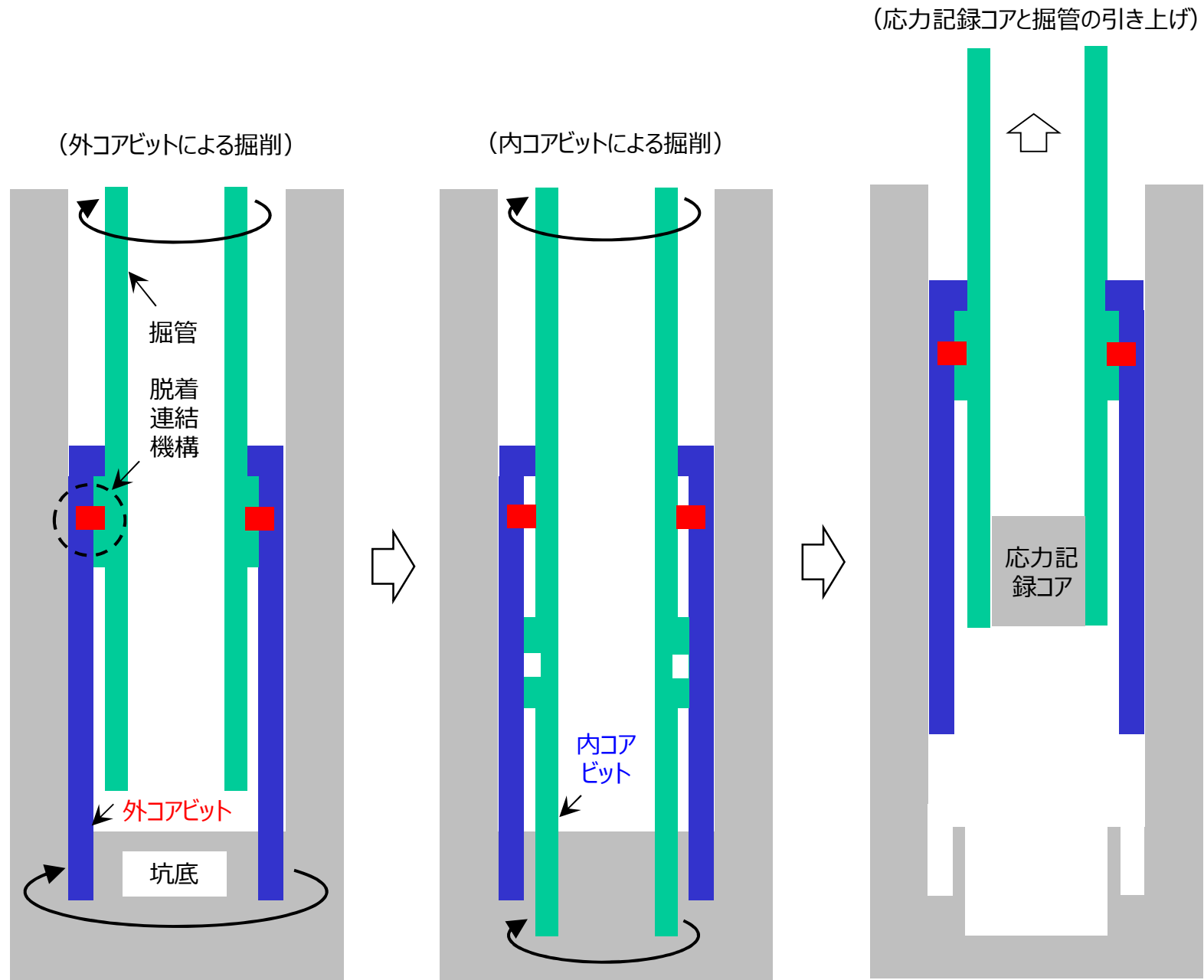
コア直径測定 (d_0, d_{max}, d_{min}) \Rightarrow
$$\begin{cases} \varepsilon_{max} = \frac{d_{max} - d_0}{d_0} \\ \varepsilon_{min} = \frac{d_{min} - d_0}{d_0} \end{cases}$$
 \Rightarrow
$$\begin{cases} S_{max} = \frac{E}{(1 - \nu^2)} (\varepsilon_{max} + \nu \varepsilon_{min}) + \frac{\nu}{1 - \nu} S_z \\ S_{min} = \frac{E}{(1 - \nu^2)} (\nu \varepsilon_{max} + \varepsilon_{min}) + \frac{\nu}{1 - \nu} S_z \end{cases}$$

岩石の弾性係数 (E, ν) および坑井軸方向応力 S_z

- 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

応力記憶コアを得るための特殊ツール（二重コアビット）による掘削過程



神岡鉱山における小口径実験ツールの鉛直掘り動作試験状況

神岡鉱山坑道入口



試験サイト



スピンドル掘削機



地表設備による大口径実用ツール試作機の動作試験状況

内溝ビットが付いた内バレル(上)および外溝ビットが付いた外バレル(下)



模擬地殻応力を負荷した
岩石ブロック掘削試験

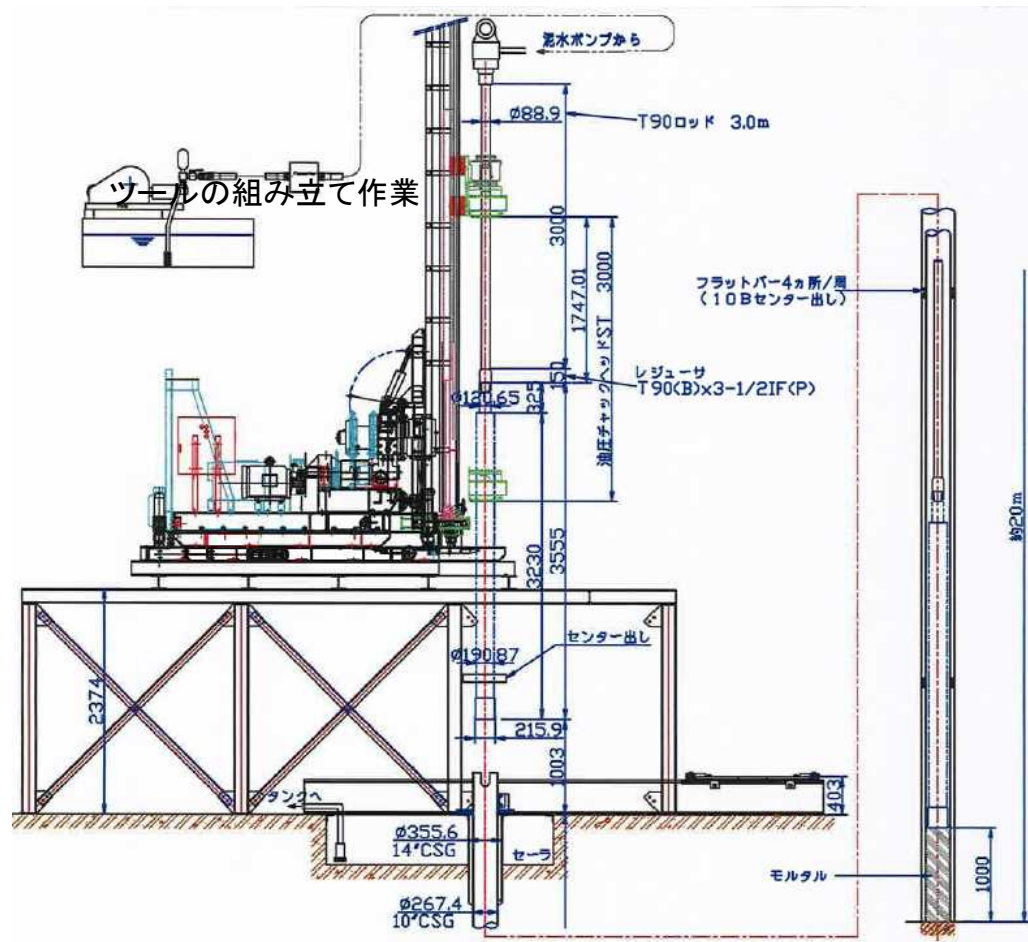


← ツールのセット状況



模擬坑井に設置した大口径実用ツール試作機の通水試験状況

試験のセットアップ



通水試験状況



コア採取状況



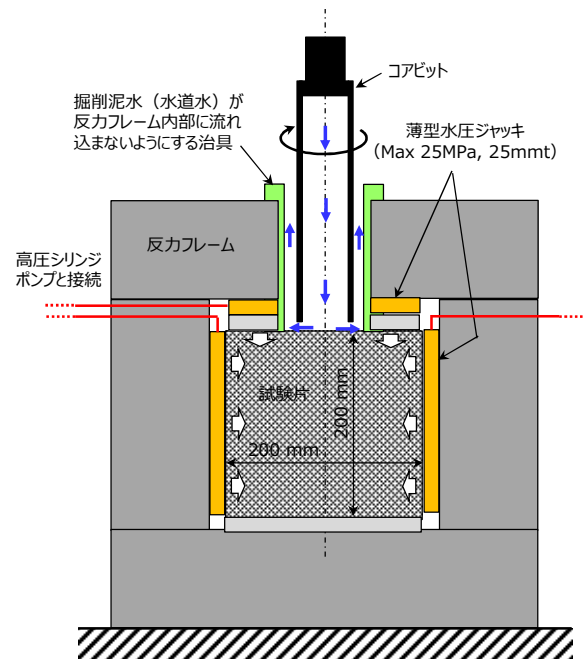
通水試験に用いたポンプ



室内実験装置

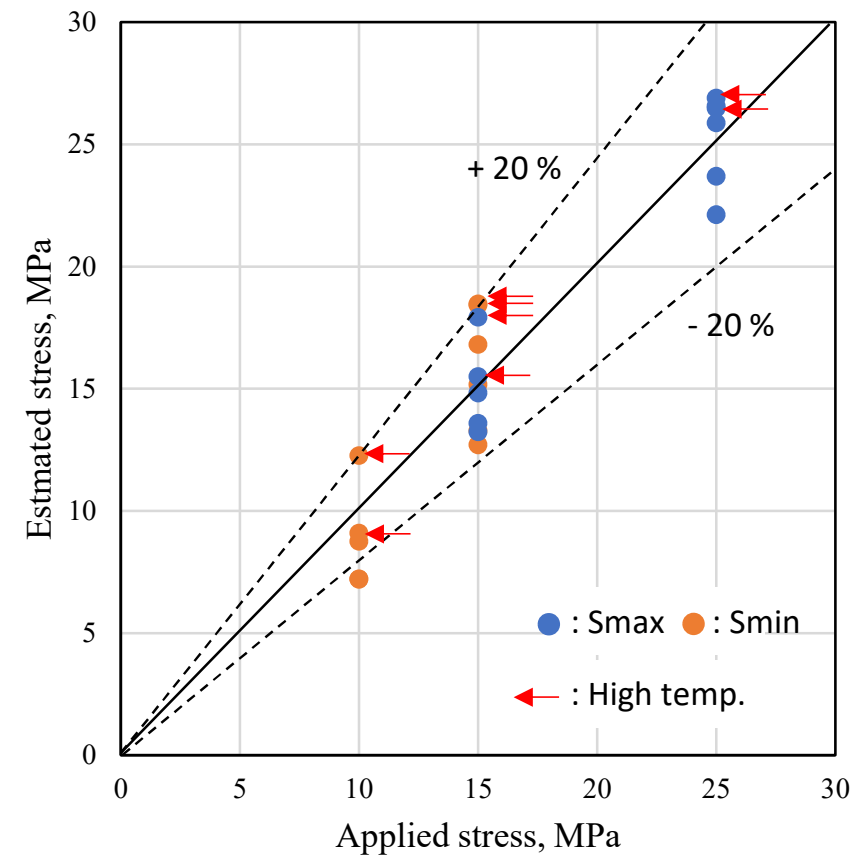


三軸載荷した試験片の掘削要領



室内実験による原理の検証

模擬地殻応力の载荷値と評価値の比較結果
(矢印が260°Cに加熱した試験片を用いた結果)



まとめと今後の課題

地殻応力は地下開発に不可欠の情報であり、その重要性は対象深度と共に大きくなる。そのため、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、**測定原理の問題から適用範囲に制限**があり、水圧破碎法は1000m以上の深度では適用が難しく、応力解放法はそもそも鉛直な坑井に適用すること自体が難しい。また、いずれも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**本事業で提案した二重解放コア変形法は、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**という極めて画期的なものである。従来の水圧破碎法および応力解放法が対象にしてきた条件にも適用でき、かつ、測定に必要な機材およびスキルは同等かむしろ簡易である。

本事業によって、二重解放コア変形法の原理の検証、それを具体化するコア掘削ツール(二重コアリングツール)の試作、さらに、試作ツールを用いて実孔井で掘削試験を行い、採取したコアから求めた地殻応力の妥当性を検証することに成功した。これらの結果に基づいて、**二重解放コア変形法を深度4～5kmと想定される超臨界地熱貯留層での応力計測に適用できることを明らかにした。**

ただし、方法自体の妥当性は確認できたものの、それを**実用に供するためには、シビアな掘削環境とコストを考慮した、信頼性・堅牢性のある方法に完成させるための技術開発がさらに必要**である。それらの課題が解決できれば、従来法を一掃するゲームチェンジャーとなる可能性が非常に高い。さらには、深度と温度の適用範囲を大幅に拡大できるので、地熱開発を含めた新たな分野への応用と市場拡大が期待される。