

## 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／光ファイバマルチセンシング・ A I による長期貯留層モニタリング技術の開発

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

団体名 (株) 物理計測コンサルタント、(株) 地球科学総合研究所、(国) 東北大学、  
(国研) 産業技術総合研究所、(株) レーザック、地熱エンジニアリング (株)

問い合わせ先 (株) 物理計測コンサルタント <https://www.gsct.co.jp/>

## 1. 背景・課題・目的

【背景】地熱発電所の持続的な操業を妨げる要因として

- ・ 蒸気・熱水の過剰摂取
- ・ 過度な還元量
- ・ 不適切な坑井配置



発電量の低下  
坑井管理コスト増加

坑内・貯留層の特性変化を連続的にモニタリングすることが重要

【課題・目的】地熱発電の効率的かつ持続的な操業への貢献

- ・ 現状では温度・圧力のポイントモニタリングが主流で、貯留層全体の時間的・空間的变化を詳細に把握できていない
- ・ 高温高圧環境下で高精度なセンサや複雑な電子部品を長期安定的に使用することが困難

最新の光ファイバセンシング技術を駆使したマルチセンシングシステムの開発

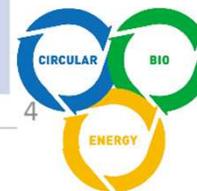
- ① 高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発
- ② 光ファイバケーブル設置技術開発
- ③ AI-IoT技術を活用した大容量データ遠隔モニタリングシステム開発

# 事業概要



## 2. 研究実施期間

研究開発項目	担当	2021年度	2022年度	現在	中間	最終	
				2023年度	2024年度 (参考)	2025年度 (参考)	
① 高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発	物理計測 東北大  再委託先 産総研 レーザー 地熱エッジ	OFケーブル調査・選定 短尺ケーブル製作	→	長尺ケーブル 製作	→	実証試験	
		圧力計測手法検討 室内試験等（2手法）	→	圧力および流量 計測システム 試作・評価	→	課題抽出・改良	
		流量計測手法検討 室内試験等（2手法）	→				
		次世代型OFセンシング 研究調査	→				
② 光ファイバケーブル設置技術開発	物理計測	OFケーブル 降下・設置 手法調査	→	設置器具 坑口装置 製作	→	実証試験	
		坑口装置 調査・検討	→	模擬坑井試験 評価	→	課題抽出・改良	
			→	設置器具 坑井実証試験 評価	→		
③ AI-IoT技術を活用した大容量データ遠隔モニタリングシステム開発	地科研	手法調査	→	性能評価	→	実証試験	
		AI機能 基本設計	→	試作	→	課題抽出・改良	
		システム 概念設計	→		試験	→	
			→		性能確認	→	

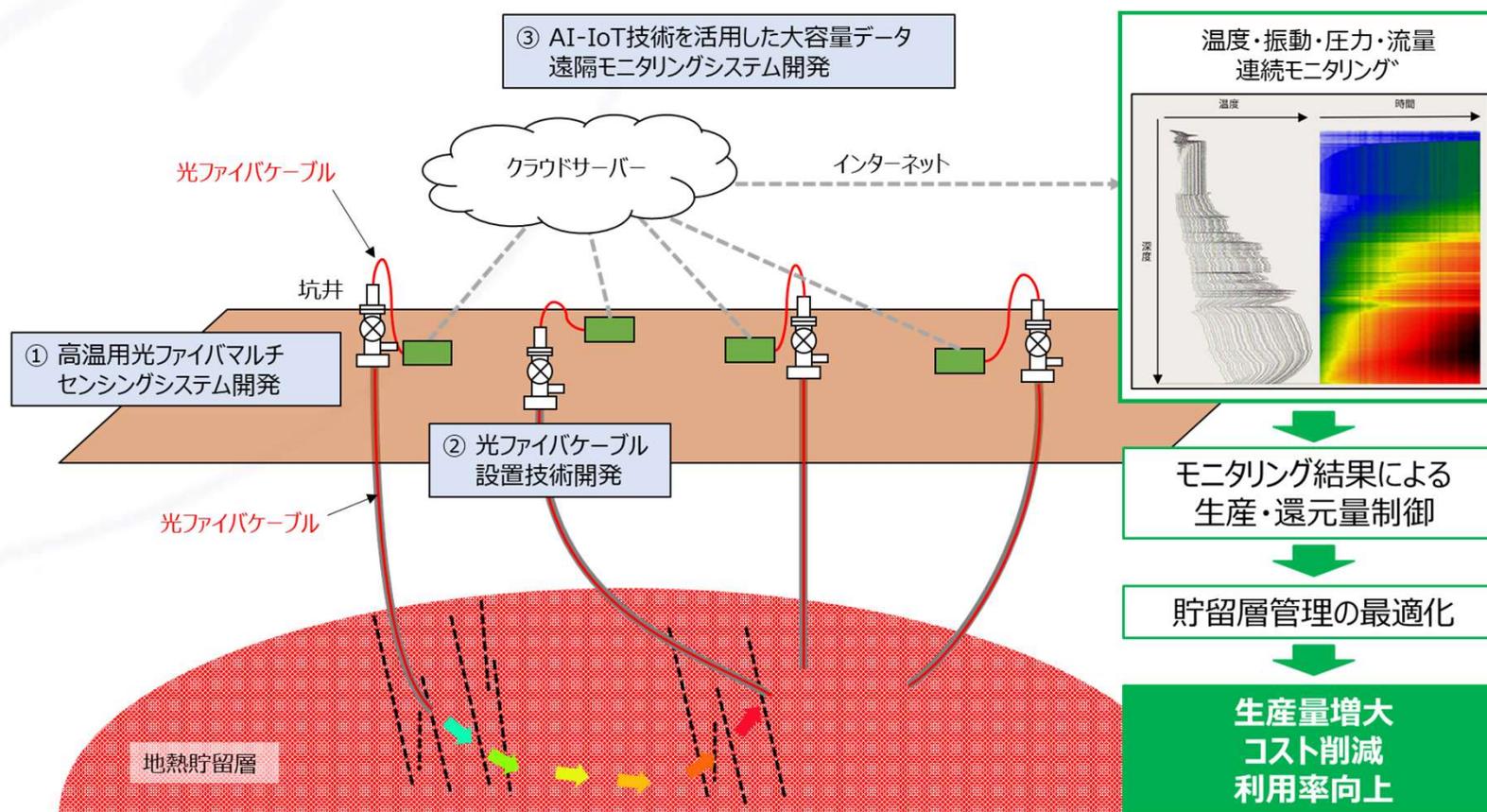


## 3. 実施内容・目標（中間2024年3月・最終2026年3月）

- ① 高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発
  - （中間）マルチセンシングシステムの実用性の確認
  - （最終）マルチセンシングシステムを用いたモニタリングシステムの確立
- ② 光ファイバケーブル設置技術開発
  - （中間）光ファイバに損傷を与えない降下・設置方法の検討
  - （最終）坑口圧20MPa、温度125℃で1年間の条件における耐久性の確認
- ③ AI-IoT技術を活用した大容量データ遠隔モニタリングシステム開発
  - （中間）AI-IoTシステムのプロトタイプ完成
  - （最終）モニタリングデータから解析にかかる人的費用の90%削減

## 3. 実施内容・目標

- テーマ① 高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発
- テーマ② 光ファイバケーブル設置技術開発
- テーマ③ AI-IoT技術を活用した大容量データ遠隔モニタリングシステム開発



事業概念図

## 1. 高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発

1-1. 高温マルチセンシング用光ファイバケーブルの開発

1-2. 光ファイバによる温度・振動フィールド計測

1-3. 高温型光ファイバ圧力計の検討・開発

① ファブリ・ペロー(FP)干渉型センサ

② フェムト秒レーザを用いたFBGセンサの開発

1-4. 光ファイバ流量計測手法の検討・開発

① 乱流振動法

② カルマン渦式FBG法

## 1. 高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発

### 1-1. 高温マルチセンシング用光ファイバケーブルの開発

- 高温マルチセンシング用光ファイバケーブルの市場調査・調達
  - 高温高圧環境下で耐久性の高い（～400℃、30MPa）光ファイバケーブル（FIMT：Fiber in Metal Tube）の市場調査を行った
  - 金でコーティングされた短尺(10mおよび100m)FIMTを調達した
- 金コート光ファイバ素線の融着には特殊な溶剤が必要となり、その取り扱いには注意が必要であることを確認した
- 高温高圧試験装置にて最高温度400℃、最高圧力60MPaに曝し(※1)、ケーブルの耐熱耐圧性能を確認した  
(※1)： JISなどに準拠し，保持時間は10分とした（・・・液体を使用する場合，常用の圧力の1.5倍以上，圧力保持時間は5～20分間）
- 金コートFIMTの価格は非常に高価である

## 1. 高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発

### 1-2. 光ファイバによる温度・振動フィールド計測

- 光ファイバセンシングの最先端技術を調査し、以下の機器を導入した
  - Silixa社製 振動計測（DAS）用インテロゲータ（iDAS）
  - 横河電機社製 温度計測（DTS）用インテロゲータ（DTSX200）
- 地熱井5件、石油・ガス井1件でDAS計測、地熱井2件でのDTS計測を実施し、機器の稼働状況に問題はなかった
- 計測に係る課題（DASインテロゲータ内部ファンの回転変化によるノイズ等）を確認したが、適切なデータ処理で解決できることを確認した



iDAS (Silixa社製)



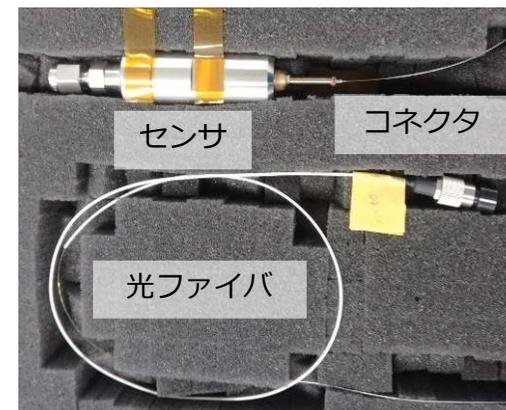
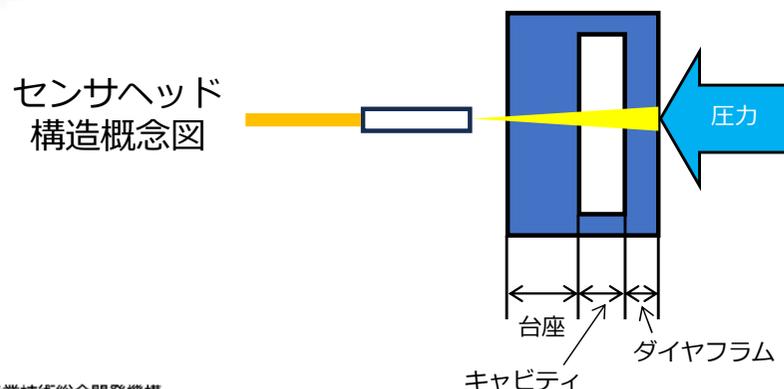
DTSX200 (横河電機社製)

## 1. 高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発

### 1-3. 高温型光ファイバ圧力計の検討・開発

#### ① サファイアMEMSのセンサヘッドを利用したファブリ・ペロー(FP)干渉型センサ

- 概念設計と仕様について検討し、試作品を製作した
- 通常の長尺光ファイバによる影響試験を実施し、精度に問題がないことを確認した
- 耐熱試験を実施し、センサヘッド部のO-ringシール機構に課題があることを確認→シール機構をロウ付けとした試作品を製作中
- インテロゲータによる光損失特性を確認した

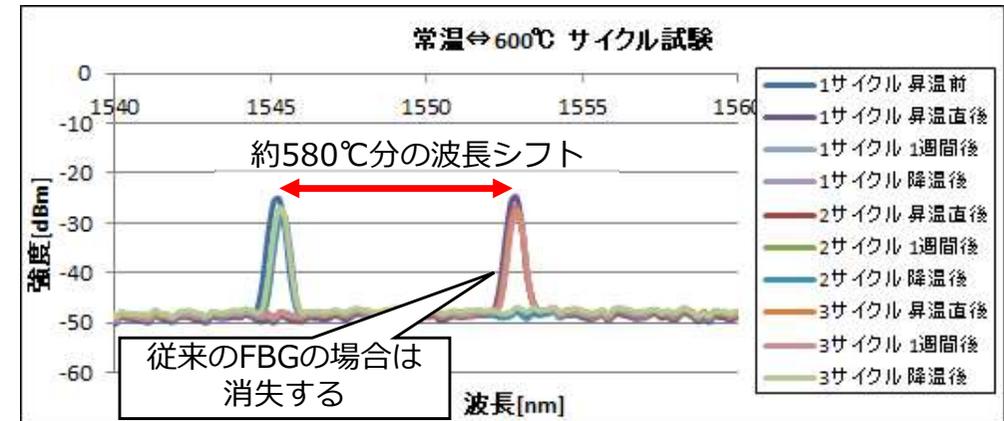
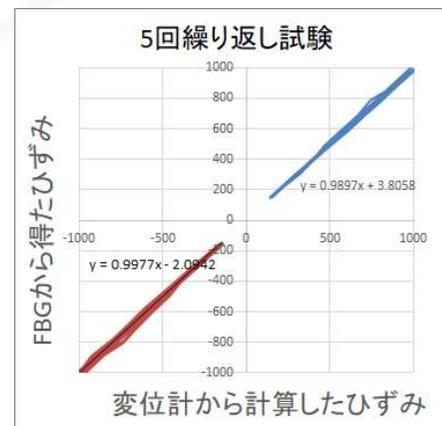


## 1. 高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発

### 1-3. 高温型光ファイバ圧力計の検討・開発

#### ② フェムト秒レーザを用いたFBGセンサの開発

- 従来のFBGの製法では300°Cが長時間続くとFBG自体が消失するため、フェムト秒レーザを用いた新たなFBGを導入した
- 歪み感度・温度感度・偏波依存性においても従来のFBGと遜色なく動作することを確認した



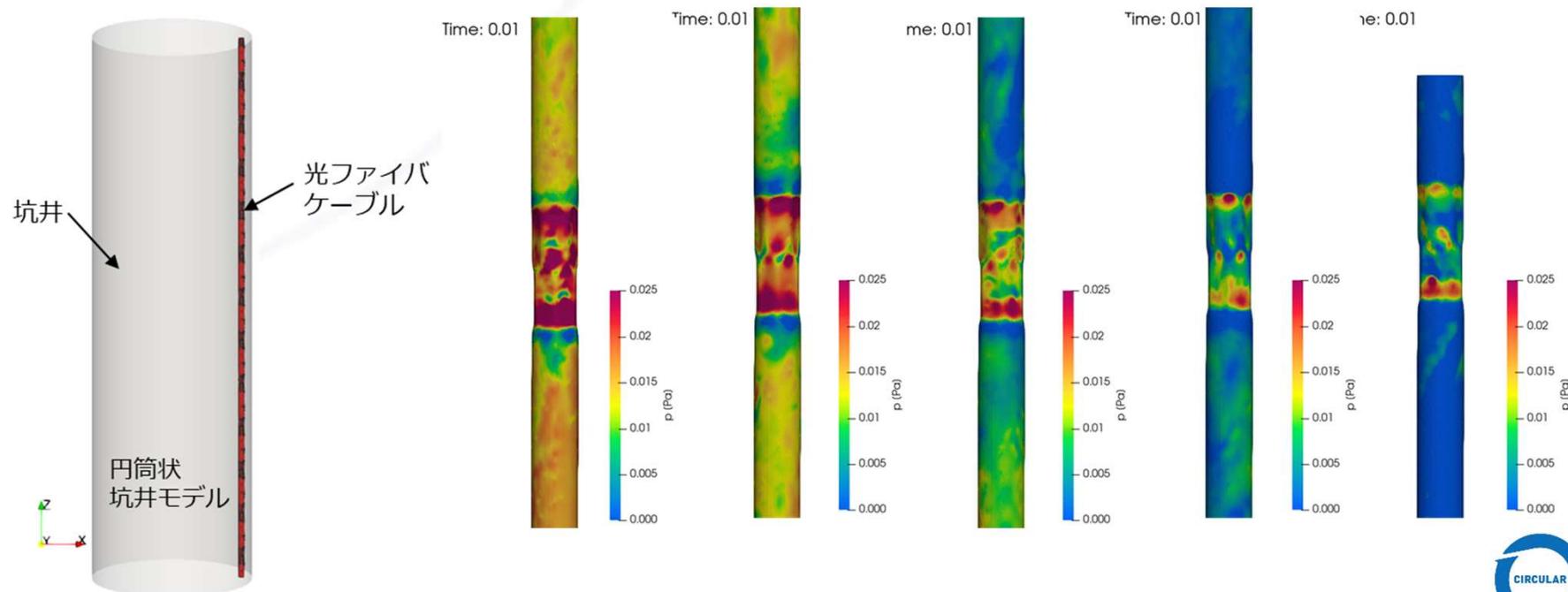
## 1. 高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発

### 1-4. 光ファイバ流量計測手法の検討・開発

#### ① 乱流振動法：FIMT周辺に発生する乱流振動を利用した流量計測手法

##### 流体振動シミュレーション計算

- FIMT表面における乱流振動に関するスペクトル解析を実施した。

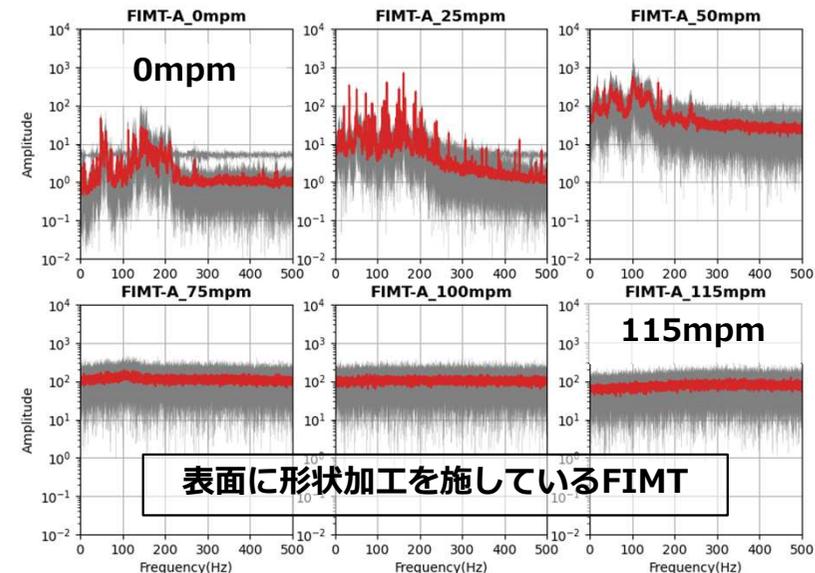
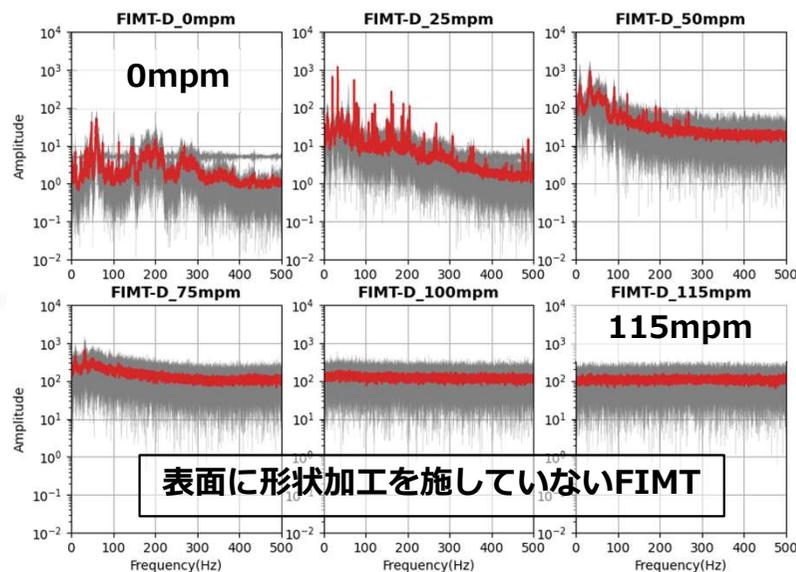


## 1. 高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発

### 1-4. 光ファイバ流量計測手法の検討・開発

#### ① 乱流振動法：室内実験

- 室内実験データのスペクトル解析では形状と振動に明確な関連性を認められず
  - 試験方法を再検討し、試験井を使用した試験の実施
- DASインテロゲータのダイナミックレンジに制限があることを確認した

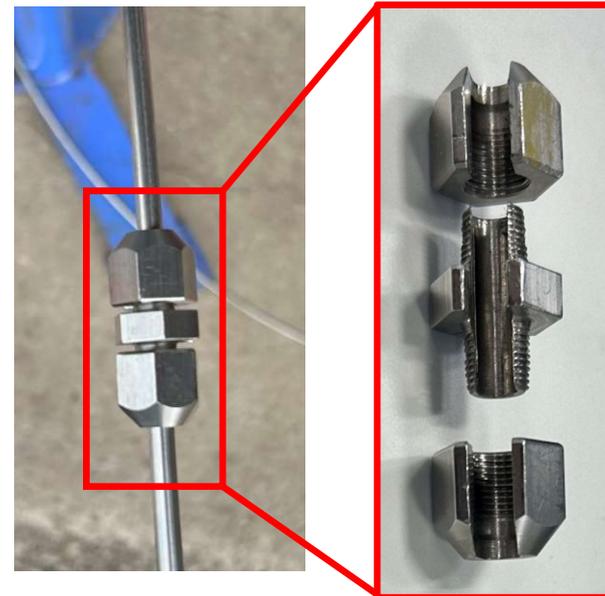
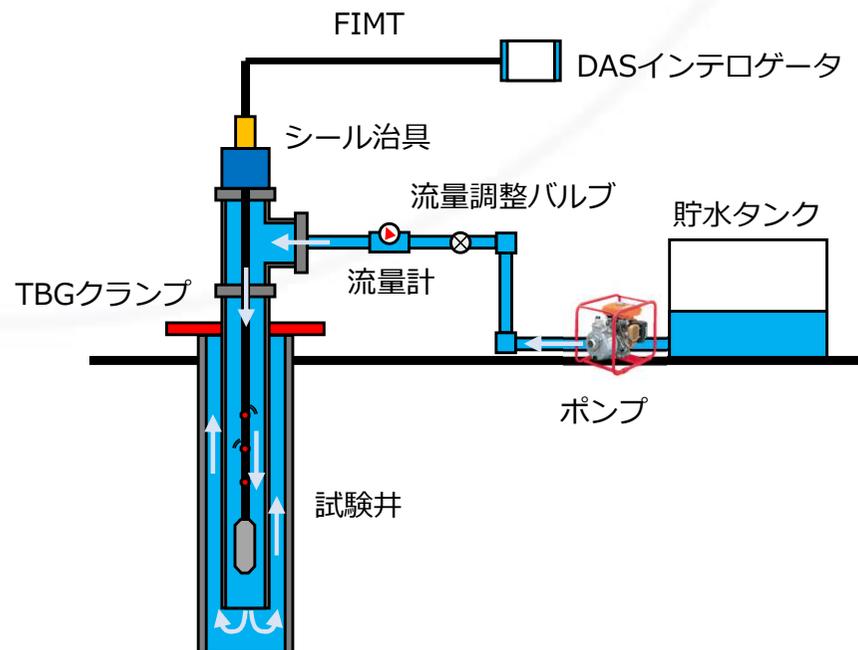


## 1. 高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発

### 1-4. 光ファイバ流量計測手法の検討・開発

#### ① 乱流振動法：坑井を利用した計測実験

- 坑井を利用することでFIMTに錘による張力を負荷させた状態で試験を実施した
- FIMTの形状を再検討し、凸状の器具（下図）を開発した



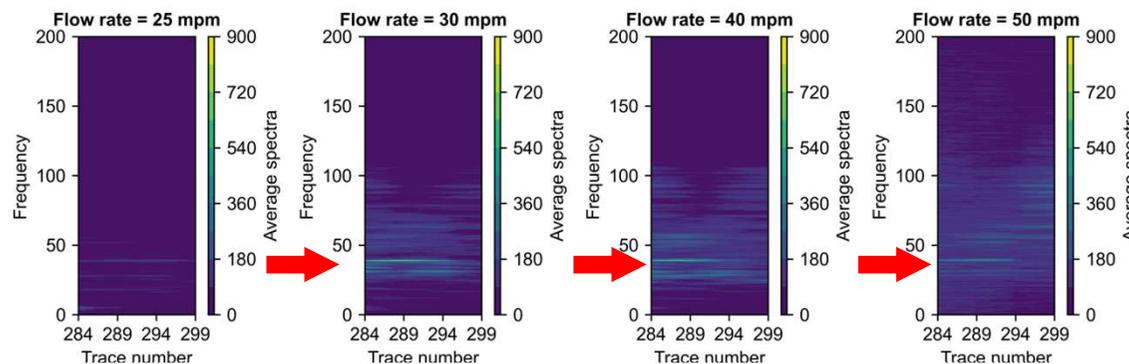
## 1. 高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発

### 1-4. 光ファイバ流量計測手法の検討・開発

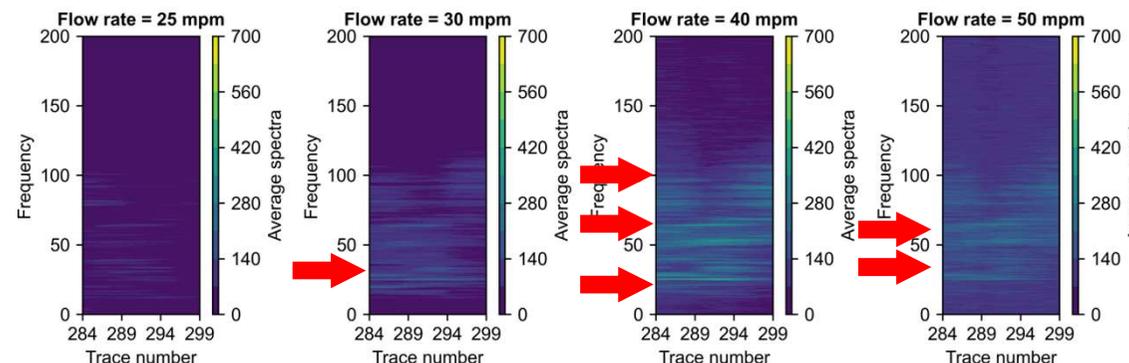
#### ① 坑井における乱流振動計測結果のスペクトル解析

- 凸状器具のありなしで異なる周波数でのピークが確認された。

凸状器具  
なし



凸状器具  
あり

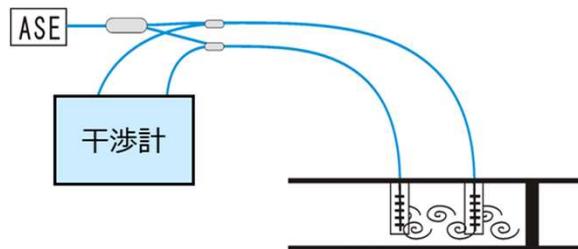


## 1. 高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発

### 1-4. 光ファイバ流量計測手法の検討・開発

#### ② カルマン渦式FBG法

- カルマン渦周波数により流速情報を検出可能であることを見出した
- 坑内で使用可能なセンシング部を設計し、試作中



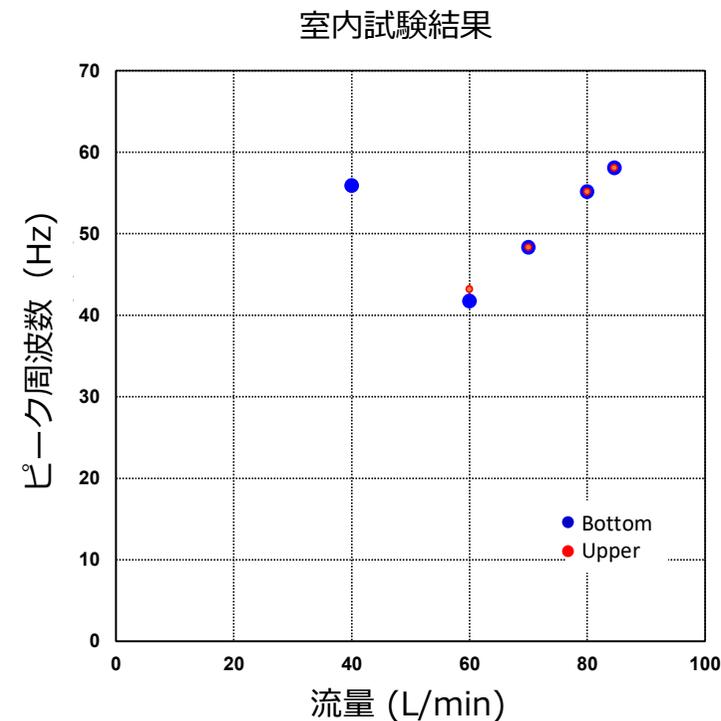
測定概念図



センシング部試作品



室内試験



## 2. 光ファイバケーブル設置技術開発

2-1. 光ファイバケーブル降下および設置技術の調査・検討

2-2. 坑口装置の調査・検討・選定

## 2. 光ファイバケーブル設置技術開発

### 2-1. 光ファイバケーブル降下および設置技術の調査・検討

- 光ファイバケーブル降下・設置技術動向を調査し、整理した
- 地熱井においても既製品で対応が可能であることを確認した

降下手法	測定可能項目	設置箇所	備考
ワイヤーライン	温度、圧力 振動、流量	ケーシング内 チュービング内裸孔内	ウィンチ・クレーン 必要
ビハインド ケーシング	温度、振動 ひずみ	ケーシング背後 (アニュラス)	坑井仕上げ時に降下する 必要あり
アロング チュービング	温度、圧力 振動、流量	ケーシング内 裸孔内	リグもしくはクレーン 必要
インサイドCT	温度、圧力 振動、流量	ケーシング内 チュービング内裸孔内	CT機材必要



## 2. 光ファイバケーブル設置技術開発

### 2-2. 坑口装置の調査・検討・選定

- 標準的な坑口装置の特徴を調査・整理した結果、地熱井においても既製品で対応が可能であることを確認した
- 既存の坑口装置を用いて耐圧・耐熱試験を実施し、問題がないことを確認した



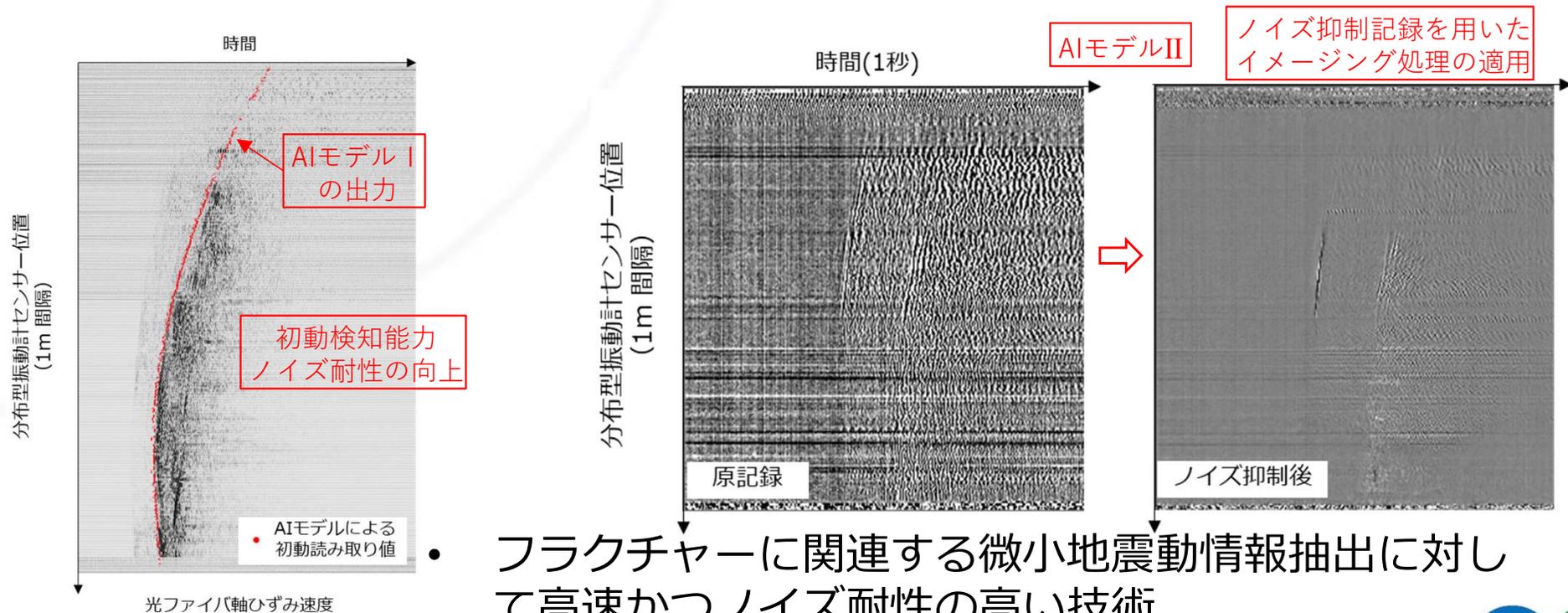
## 3. AI-IoT技術を活用した大容量データ遠隔モニタリングシステム開発

- 3-1. AI機能による観測システムの概念実証
- 3-2. オンサイトに設置するサーバの試作
- 3-3. 情報の可視化、集約システムの試作

## 3. AI-IoT技術を活用した大容量データ遠隔モニタリングシステム開発

### 3-1. AI機能による観測システムの概念実証

- AIモデルⅠ：初動検知タスクを分布性により精度向上させる
- AIモデルⅡ：ノイズ抑制しイメージング処理の適用性を向上させる

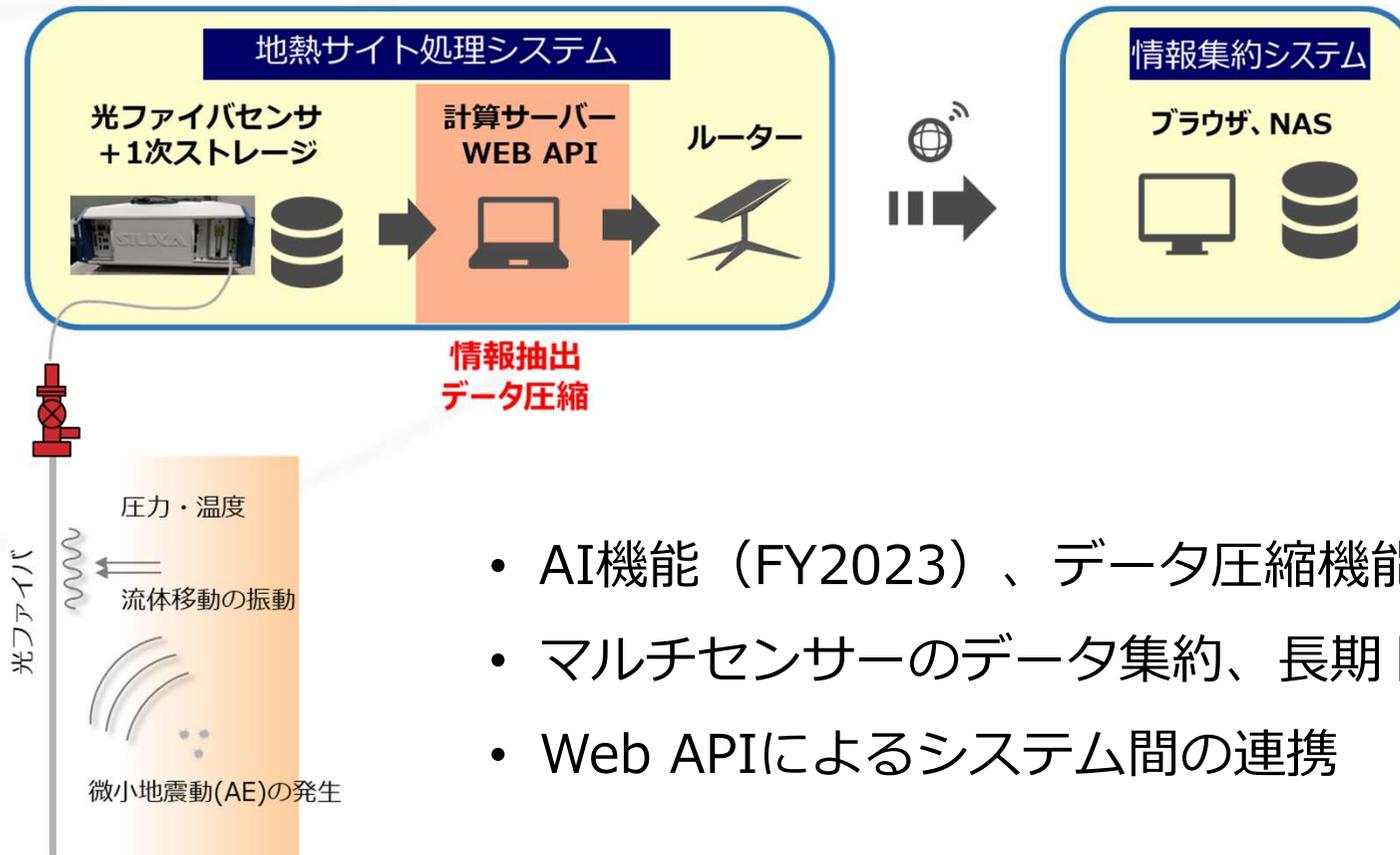


- フラクチャーに関連する微小地震動情報抽出に対して高速かつノイズ耐性の高い技術
- 長期観測のコスト削減に向けた適用フローの実装

## 3. AI-IoT技術を活用した大容量データ遠隔モニタリングシステム開発

### 3-2. オンサイトに設置するサーバーの試作

### 3-3. 情報の可視化、集約システムの試作



- AI機能 (FY2023)、データ圧縮機能
- マルチセンサーのデータ集約、長期トレンドの解析
- Web APIによるシステム間の連携

## 1. 高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発

- 長尺の金コート光ファイバと測定システムを組み合わせた計測試験の実施
- 2手法で検討中の圧力および流量計測手法について、それぞれの特徴を整理し、総合評価する
- FP干渉型圧力センサの性能とシール機構の検討
- FBG圧力センサの金コートファイバのフェムト秒レーザFBGの歪み感度の調査
- 乱流振動法による流量計測は、坑井内試験の条件をもとにシミュレーションを実施し、結果を比較する
- カルマン渦式FBG法による流量計測は、坑内で使用可能なセンシング部試作品の性能試験を実施する

## 2. 光ファイバ設置技術開発

- フィールド試験用の坑口装置を準備し、その耐圧・耐熱性能を確認する

## 3. AI-IoTを利用した大容量データ遠隔モニタリングシステム開発

- AI機能を搭載した微小地震動の自動検知システムを構築する
- マルチセンサーデータの集約・可視化・解析による長期モニタリングシステムを構築する



## 1. 高温用光ファイバマルチセンシングシステム開発

- 高温用の光ファイバを調査・選定し、単体での耐熱・耐圧性能を確認した。今後は測定システムと組み合わせ、センサとしての耐熱・耐圧性能を確認していく。
- 圧力および流量計測手法について2つの手法で実験を行い、検討した。今後はそれぞれの実験結果をもとに適用範囲や特徴を整理し、実作業での適応性や活用方法など総合評価を行う。

## 2. 光ファイバ設置技術開発

- 光ファイバの坑井内への設置方法を整理し、その特徴をまとめた。
- 光ファイバ設置のための機材の市場調査を行い、既製品の組み合わせで対応できること、設置機材の耐熱・耐圧性について確認した。

## 3. AI-IoTを利用した大容量データ遠隔モニタリングシステム開発

- DASによる計測データから、初動検知能力ならびにノイズ抑制機能を向上させるAI機能の開発を行った。
- 今後データの集約・可視化・解析によるシステムにより人的コストの削減を行う

