NEDO再生可能エネルギー分野成果報告会2025　（分野：地熱発電）
発表No.：1-6-5

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／

坑内異常自動検出AI 方式，耐熱坑内可視カメラ（BHS）開発

団体名：地熱エンジニアリング株式会社、三井金属資源開発株式会社、国立研究開発法人　産業技術総合研究所

【事業概要】 [開始：2021年6月：終了：2026年3月]

【背景・目的】

地熱井の長寿命化・安定運用のためには、坑内のスケール付着やケーシング破損（圧潰・腐食等）の対策が重要であり、その検討において坑内状況の適切な把握を行なう必要がある。

本事業の成果により、地熱井の坑内で生じている異常箇所を効率的・視覚的に把握して、トラブル要因の一つであるスケール試料を採取し、最適な対策修繕計画の立案に資する情報提供を行えるようにすることで、地熱井の長寿命化・安定運用に寄与することを目的とする。

【実施内容・最終目標】

1) **200℃耐熱の坑内可視カメラ**（以下、BHSと略記する）とスケール採取装置の開発

200℃、2,000m程度の環境下で4時間以上作業ができること。魚眼レンズを用いた全方位視認タイプ及びミラーを用いた側方視タイプのBHSが開発されていること。BHSで確認したスケールを採取する装置が開発されていること。

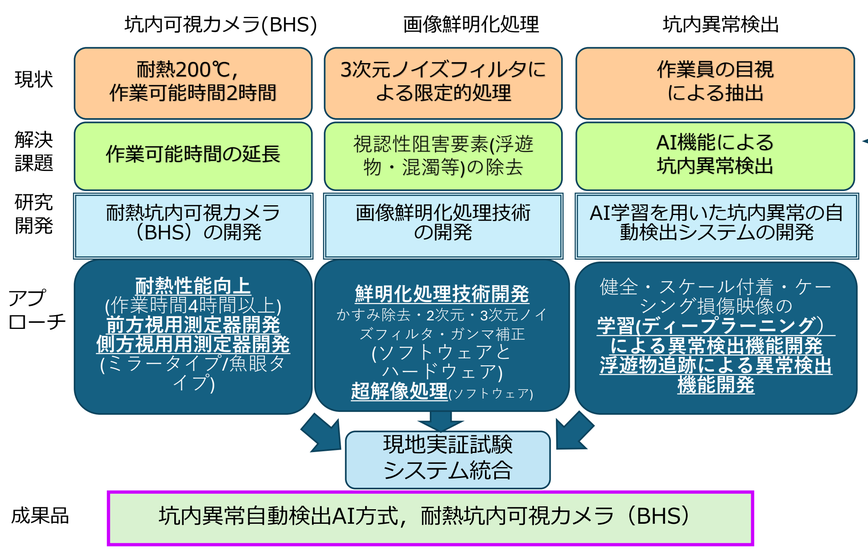
2)**画像鮮明化機能**開発

画像鮮明化処理システムのソフトウェアが完成するとともに、ハードウェアへの組み込みが完了し、 現場において、鮮明化した画像を視認できる状況になっていること。超解像によるシステムを用いることで、特定の区間の坑内画像をさらに鮮明化するシステムが完成していること。

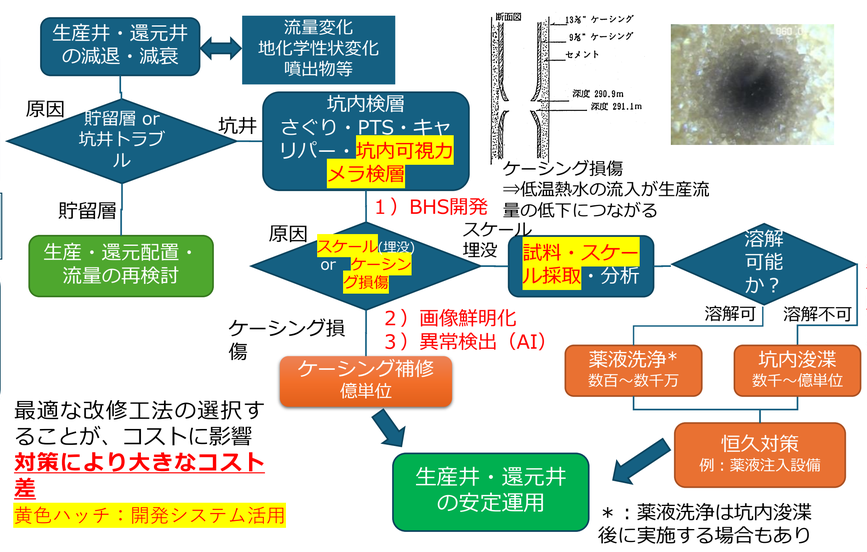
3)画像から**坑内異常を自動検出するAI機能**開発

生画像および鮮明化処理後の画像からスケール付着・ケーシング損傷部を自動検出できるシステムが完成し、現地で画像鮮明化処理結果及びAIによる異常検出結果が確認できるシステムとなっていること。解析時のデータ処理時間が従前の1/3程度となること。全方位視認タイプ・ミラータイプの画像に対する画像についてAI学習(再学習含む)機能を用いて異常検出できるシステムが構築されていること。浮遊物検出システムにより、坑内浮遊物を自動検出・追跡することで坑内外間の流体の流入出を検出し、画像で認識できない微細な損傷検知ができるシステムが構築されていること。

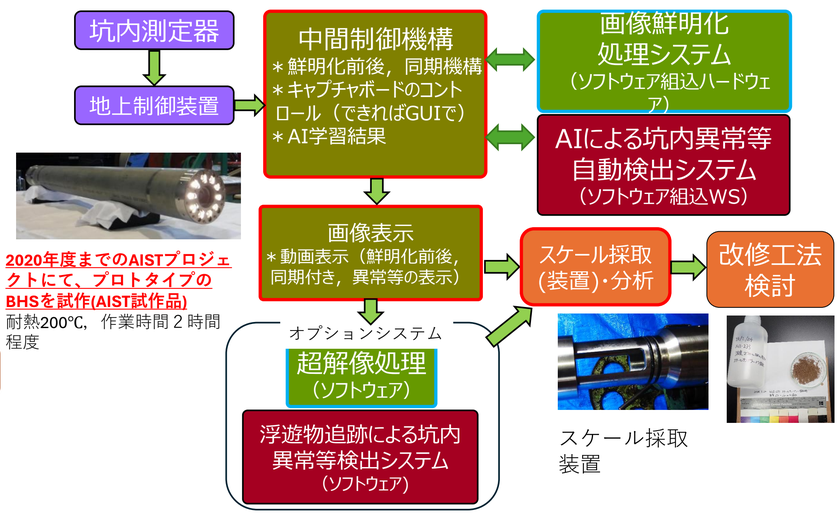
【研究開発概要】



耐熱坑内可視カメラ(BHS)課題及び取組・成果品



開発システムの活用方法・安定運用/コスト削減への貢献



耐熱坑内可視カメラ(BHS)システム構成図

【研究成果】

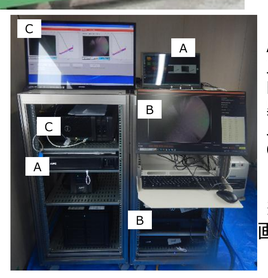
a)耐熱BHS測定器開発

- 耐熱BHS測定器開発は、2023年度までに前方視用の測定器の開発完了、耐熱200℃、動作4時間以上の目標を達成
- 2024年度は側方視用測定器開発としてミラータイプの測定器開発を行い、地上での実証試験を行った。

BHS測定器
(耐熱200℃,耐圧20MPa,
動作時間4時間以上[4.5時間程度])

ウィンチ
光ファイバー
複合ケーブル

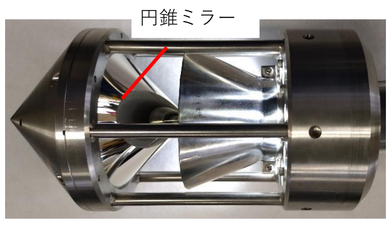
BHS地上ユニット



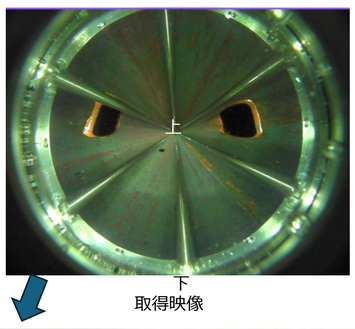
A:画像鮮明化処理システム
B:AI学習による坑内異常自動検出システム
C:中間制御システム

統合ユニット
画像鮮明化処理
AI学習処理

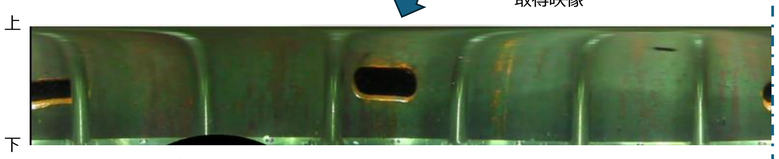
耐熱BHSシステム全体



側方視タイプのカメラセンサー部
試作2号機ないし3号機の先端部に装着可能



取得映像

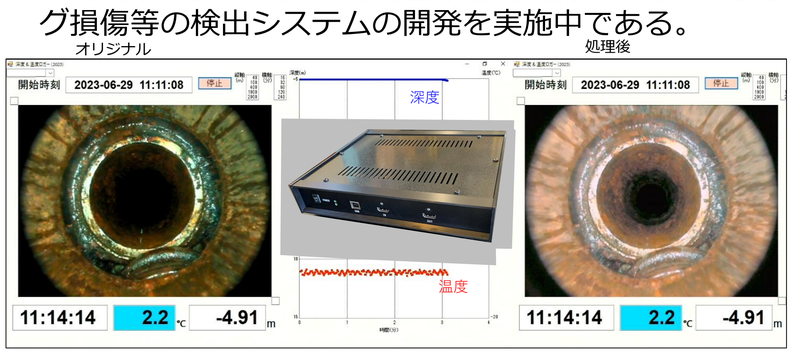


側方視用測定器(ミラータイプ)の試作と取得映像

＊坑壁全周を一度に視認できることを確認した。カメラセンサーは前方視用と同一である。

b)画像鮮明化処理/超解像/浮遊物追跡

- 画像鮮明化処理システムは、取得した坑内映像をリアルタイムで鮮明化するソフト・ハードウェアの開発を2023年度までに完了した。
- 2024年度からは、注目したい箇所の映像をさらに鮮明化する超解像システムの開発と浮遊物追跡によるケーシング損傷等の検出システムの開発を実施中である。



＊ホワイトバランス・かすみ除去・3次元ノイズフィルタ・2次元ノイズフィルタ・ガンマ変換機能があり、適用順序含め取捨選択

開発した画像鮮明化処理システムによる鮮明化映像

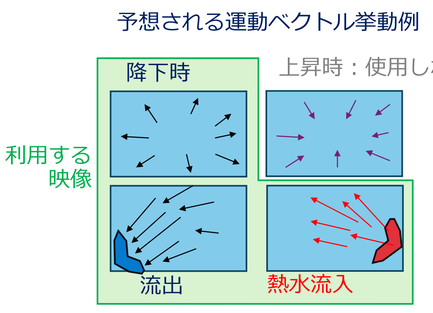
【超解像】

映像の特徴：
類似した画角＋浮遊物･坑壁

＊ピクセル単位で特徴量/類似性を抽出し、映像をさらにクリア化することを目指す。

RTVSR：映像の特徴を活かした超解像AIモデル
RAFT：フレーム間の動き補償量をピクセル単位で行うAIモデル
- 特徴量抽出
- 視覚類似性計算（**全ピクセル**）
- 推論反復更新（16段階）

【浮遊物追跡による坑内異常検出】



スケール等で坑壁が覆われていて、映像からは視認できなくても、ケーシング損傷等が生じている場合において、坑内に浮遊しているスケール等の浮遊物を追跡し、その異常な動きからケーシング損傷等を検出するシステムの開発を実施中である。
超解像処理でのRAFT機能によるアウトプットであるオプティカルフローを活用する。

c)坑内異常検出システム開発

- 坑内異常検出システム開発は、2023年度までに前方視映像に対して、既存映像/取得映像をディープラーニングによる学習を行い、正常・スケール付着・視界不良の区別ができるシステム開発を完了した。【正解率：93.6%】
- 2024年度からは、側方視タイプの映像について、既存映像/取得映像で学習によるシステムの開発中である。

【側方視用AIの開発のために使用したAI】

ResNet

層数：　ResNet34
損失関数：　CrossEntropyLoss
Optimizer：　Adam
学習率：　1e-4
Augmentation：　学習画像の上下反転／左右反転／拡大・縮小／明度変更／彩度変更
PretrainedModel：　デフォルト
入力サイズ：縦182×横1696（展開）／縦224×横224（生）

VisionTransformer

層数：　ViT-L/16
Augmentation：学習画像の上下反転／左右反転／拡大・縮小／明度変更／彩度変更
損失関数：　CrossEntropyLoss
Optimizer：　Adam
学習率：　1e-4
入力サイズ：縦224×横224（展開＆分割）
パッチサイズ：　32
エポック数：15エポック学習した中でval_lossの最も小さくなった際の5エポック目のモデルを使用

【AI学習を用いた坑内異常の自動検出システム成果　側方視】

展開処理画像：画像を分割してクラス分類（ResNet）【正解率90.8%】

枚数（枚）		判定したクラス				正解クラスの合計
		正常	スケール付着	ケーシング損傷	視界不良	
正解	正常	113	0	1	15	129
	スケール付着	0	110	2	0	112
	ケーシング損傷	0	0	114	25	139
	視界不良	6	0	0	148	154
判定したクラスの合計		119	110	117	188	534

展開処理画像：画像を分割してクラス分類（VisionTransformer）【正解率92.3%】

枚数（枚）		判定したクラス				正解クラスの合計
		正常	スケール付着	ケーシング損傷	視界不良	
正解	正常	91	0	5	33	129
	スケール付着	0	111	1	0	112
	ケーシング損傷	0	0	138	1	139
	視界不良	1	0	0	153	154
判定したクラスの合計		92	111	144	187	534

【課題・今後の取組】

- 耐熱BHS測定器開発については、魚眼センサーを用いた全方位視認タイプの測定器の開発を行い、地上及び実坑井での実証試験を行う。実証試験ではこれまで開発した前方視・ミラータイプの側方視と魚眼センサーによる全方位映像それぞれを取得し、それぞれのシステムの特徴を整理し、実用化のための課題抽出と改良方針/試作品の実用化に向けた取組を行う。
- 超解像映像処理システム・浮遊物追跡システム開発では、実データを用いた学習を深化させ、開発を完了させる予定である。
- 映像判別による坑内異常検出システム開発では、実データを用いた学習を行い、正解率向上に向けた改良を行う予定である。

【実用化・事業化の見通し】

- 実際の現場作業を効率的に実行するための改良([測定器組立が容易なように])を行うとともに、研究開発時における実証試験結果を検証し、坑内温度状況による試作測定器の使い分けなどの指針を設けた後に、開発者共同での業務としてのサービス開始に向けた取組を行う予定である。

連絡先：地熱エンジニアリング株式会社
http://www.geothermal.co.jp/　TEL:019-691-9300