

NEDOエネルギー・地球環境分野成果報告会2026 プログラムNo.1-2-17

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

発表：2026年7月22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 地熱エンジニアリング(株) 梶原 竜哉

団体名 地熱エンジニアリング(株)、三井金属資源開発(株)、(国研)産業技術総合研究所

問い合わせ先 地熱エンジニアリング株式会社, <http://www.geothermal.co.jp/> TEL:019-691-9300

1. 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。

2. 実施期間 開始：2021年6月,終了：2026年3月

3. 実施内容・目標（最終）

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



地熱発電所の課題

事業者ニーズ

課題

地熱井(生産井・還元井)の
長寿命化と安定運用

地熱井のトラブル

ケーシング破損(腐食・圧潰)
スケール付着による坑内閉塞
による生産還元流量の減衰

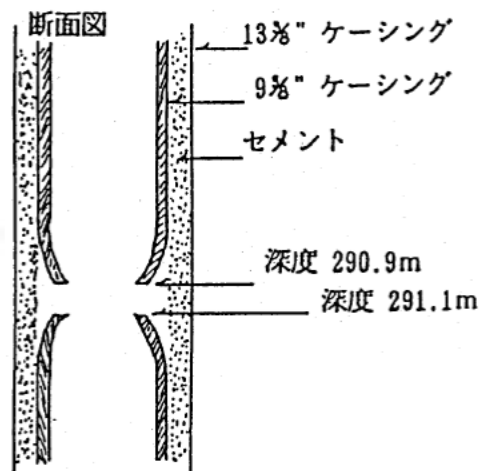
トラブル原因
の究明

坑内を直接視
覚的に確認し
たい

原因物質を特
定したい

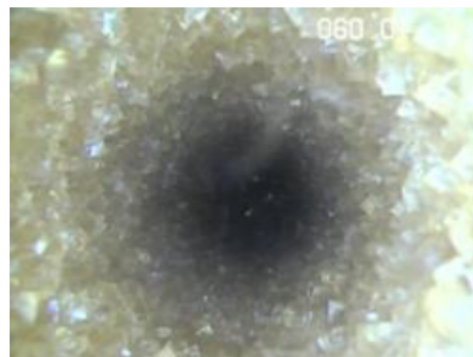
カラー画像の耐熱高い坑内カメラ
測定器がない(現状100℃)
200℃耐熱はモノクロ・コマ送り

耐熱以下とするために注水すると、
スケール剥離による詰まりやケー
シング損傷を助長するリスクあり

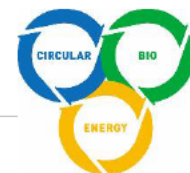


低温熱水の流入
による生産流量の
低下につながる

ケーシング損傷



スケールによ
る坑内閉塞
⇒生産・還元
流量の減衰



研究開発概要



事業課題

測定器関係

できる限り注水させない
手法・測定器の開発
(測定機器の耐熱向上)

画像関係

スケール等の浮遊
物による視認性障
害の除去

データ処理関係

作業員による損傷等の目視確認
⇒
異常の見逃し・長時間にわたる
作業時間

事業内容

- 1) 200℃程度の耐熱性能を持つボアホール光学カメラ検層器 (BHS) の開発
- 2) 画像鮮明化機能の開発
- 3) 画像から坑内異常を自動検出するAI機能からなるシステムの開発

事業の効果

クリアな画像による坑内トラブル
の視覚的な把握の迅速化・作業効
率化



最適な改修
工法検討・
対策実施



地熱井(生産井・
還元井)の長寿命
化・安定運用



研究開発概要

耐熱坑内可視カメラ (BHS)
課題および取組・成果品イメージ



坑内可視カメラ(BHS)

画像鮮明化処理

坑内異常検出

以前

耐熱100℃, 要注水

特になし

作業員の目視による抽出

現状*

耐熱200℃,
作業可能時間2時間

3次元ノイズフィルタ
による限定的処理

作業員の目視
による抽出

解決
課題

作業可能時間の延長

視認性阻害要素(浮遊
物・混濁等)の除去

AI機能による
坑内異常検出

研究
開発

耐熱坑内可視カメラ
(BHS) の開発

画像鮮明化処理技術
の開発

AI学習を用いた坑内異常の
自動検出システムの開発

アプ
ローチ

耐熱性能向上
(作業時間4時間以上)
前方視用測定器開発
側方視用測定器開発
(ミラータイプ/魚眼
タイプ)

鮮明化処理技術開発
かすみ除去・2次元・3次元ノ
イズフィルタ・ガンマ補正
(ソフトウェアと
ハードウェア)
超解像処理(ソフトウェア)

健全・スケール付着・
ケーシング損傷映像の
**学習(ディープラーニン
グ)による異常検出機能
開発**
**浮遊物追跡による異常検
出機能開発**

*)現状とは本NEDOプロジェ
クト開始前の状況を示す

現地実証試験・システム統合

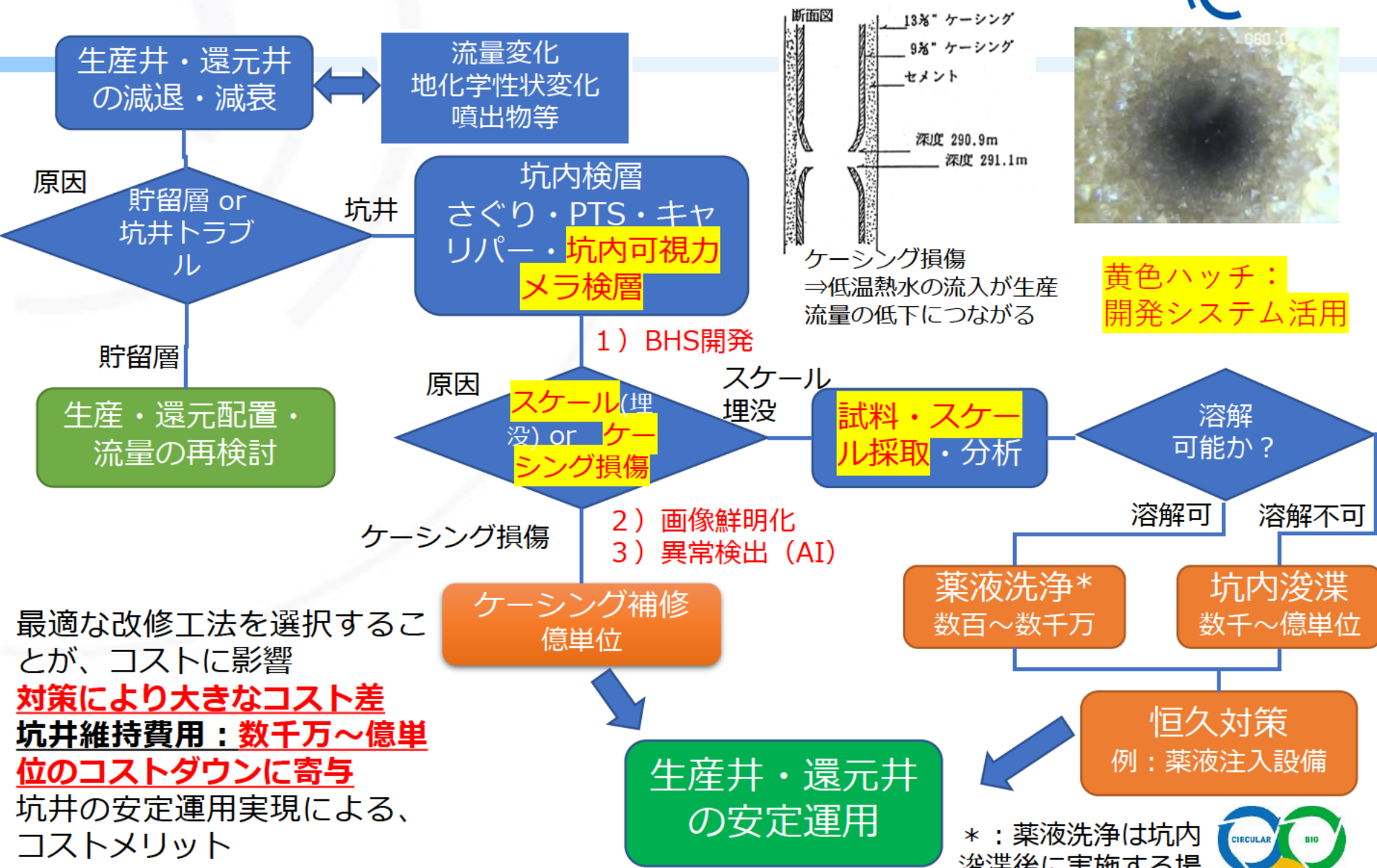
成果品

坑内異常自動検出AI方式, 耐熱坑内可視カメラ (BHS)



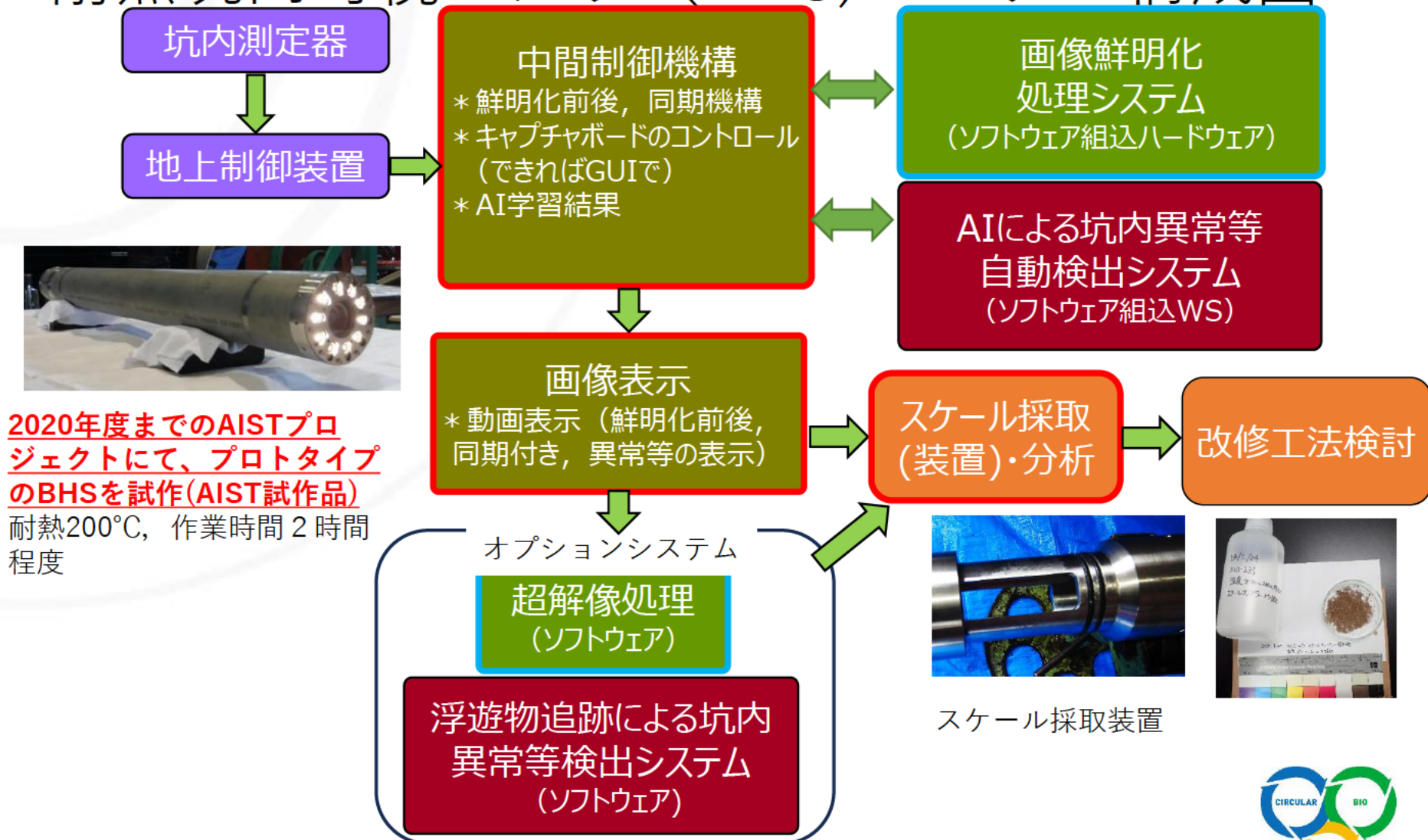
研究開発概要

開発システムの活用方法・
安定運用/コスト削減への貢献



研究開発概要

耐熱坑内可視カメラ (BHS) システム構成図



2020年度までのAISTプロジェクトにて、プロトタイプ
のBHSを試作(AIST試作品)
耐熱200℃, 作業時間 2 時間
程度

研究開発概要

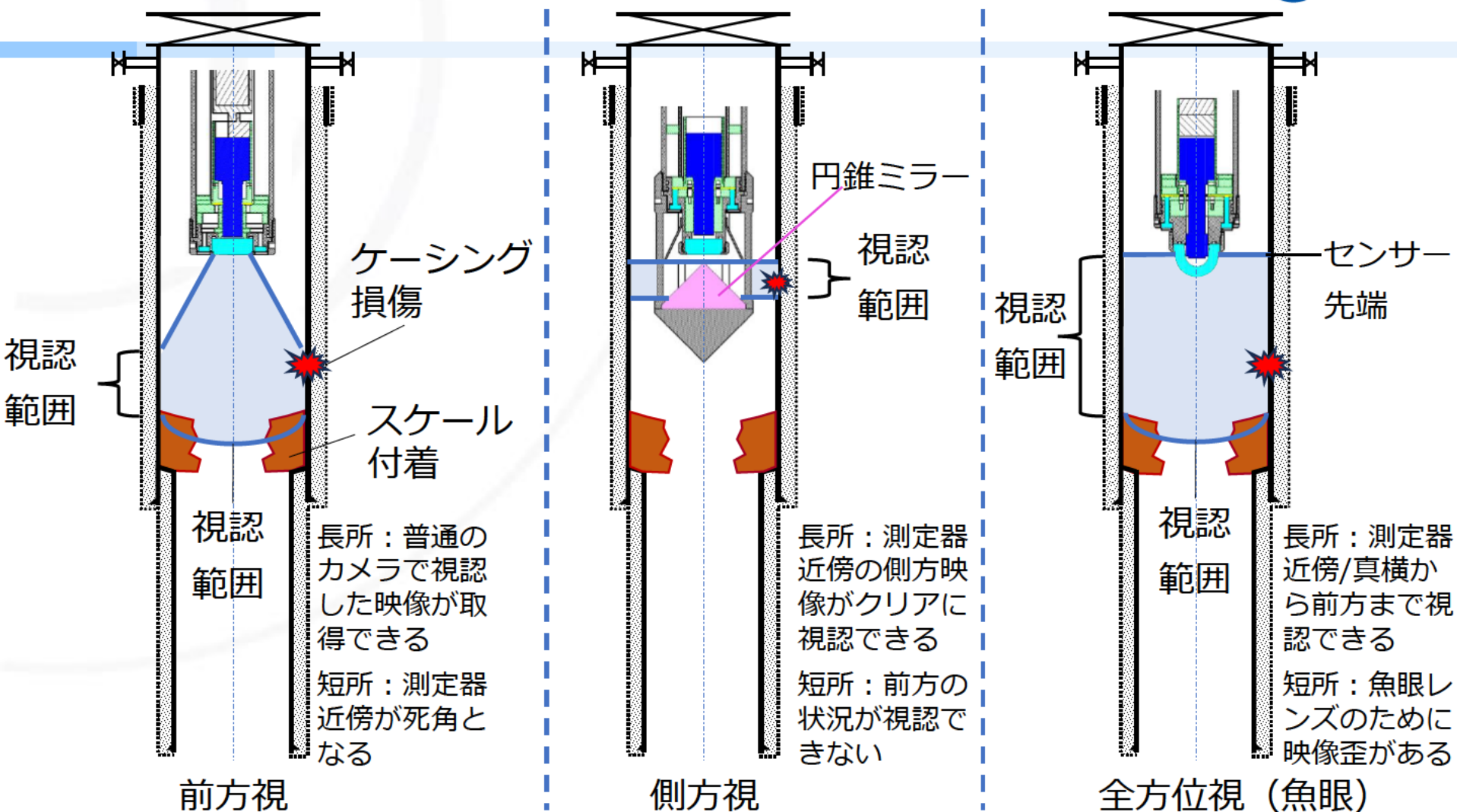


技術開発スケジュール

研究開発項目	担当	2021 年度	2022 年度	2023 年度	2024 年度	2025 年度
①高耐熱ボアホール スキャナの開発	○Geo-E, MINDECO, AIST		高耐熱ボアホールスキャナの開発(前方視)		側方視・全方位視	
				スケール採取 装置開発		
②画像鮮明化処理 技術の開発	Geo-E, ○MINDECO, AIST		画像鮮明化処理技術の開発			
			画像鮮明化処理ソフトウェアの開発		超解像処理システムの開発	
				ハードウェアの開発		
③AI学習を用いた 坑内異常の自動検 出システムの開発	Geo-E, MINDECO, ○AIST		AI学習を用いた坑内異常の自動検出システムの開発			
			坑内画像データの学習		全方位視データ機能付加・人工データによる学習	
			坑内異常検出システムの開発		AI機能開発・想定データによる検証	
					浮遊物の検出・追跡による坑内異 常箇所の抽出	
					浮遊物の検知・追跡	流動データの処理、異 常検知
④現地実証試験	○Geo-E, MINDECO AIST		現地実証試験			
⑤システム統合	○Geo-E, MINDECO, AIST			システム統合		



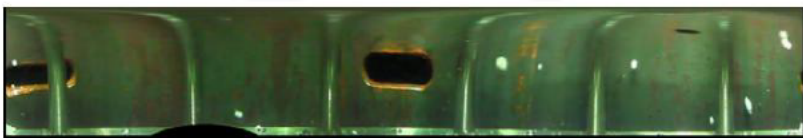
研究成果



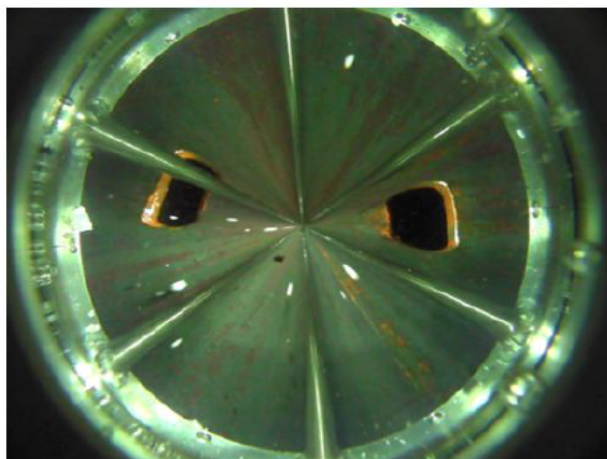
開発した測定器の種類と視認範囲のイメージ

研究成果

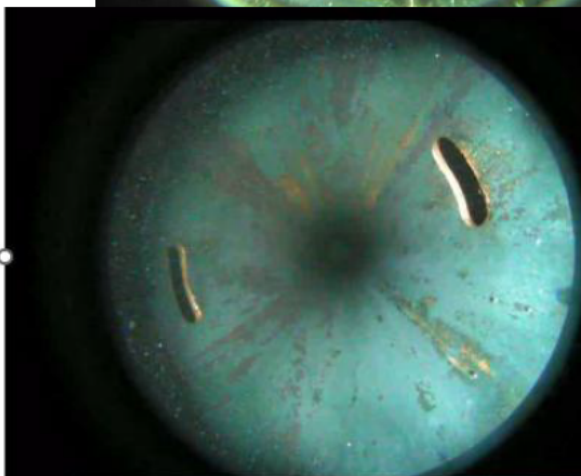
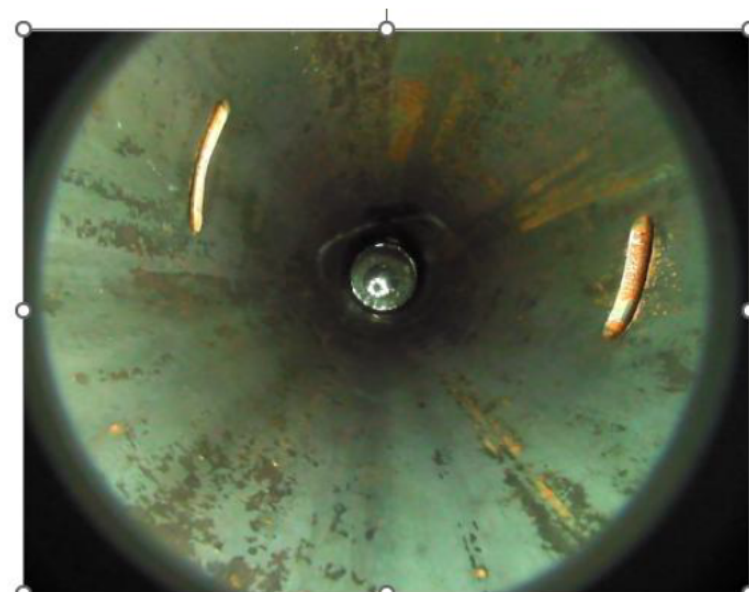
3種類の測定器による見え方の違い



展開図映像をリアルタイムで同時に表示



⇐側方視 穴の形状は正確に把握できるが、前方が見えない、ピラーが邪魔には感じる

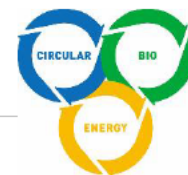


⇐全方位視
側方から前方まで視認できる



↑前方視 穴の形状は見にくくなってしまう

展開図映像をリアルタイムで同時に表示



研究成果

前方視と全方位視による映像の比較

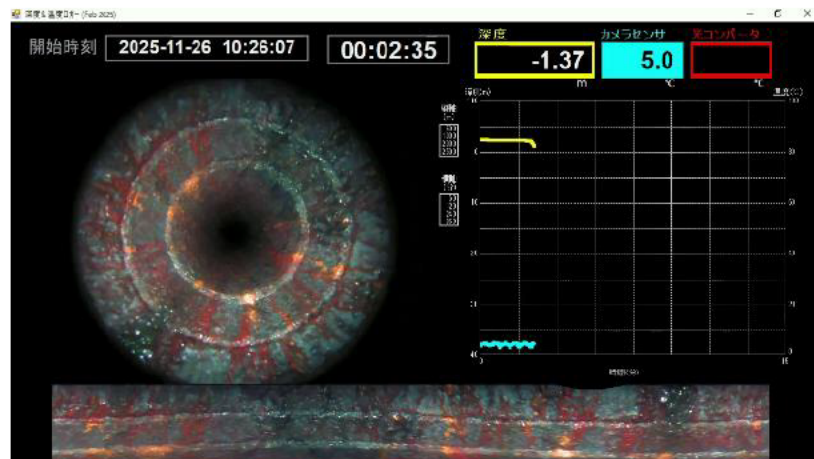
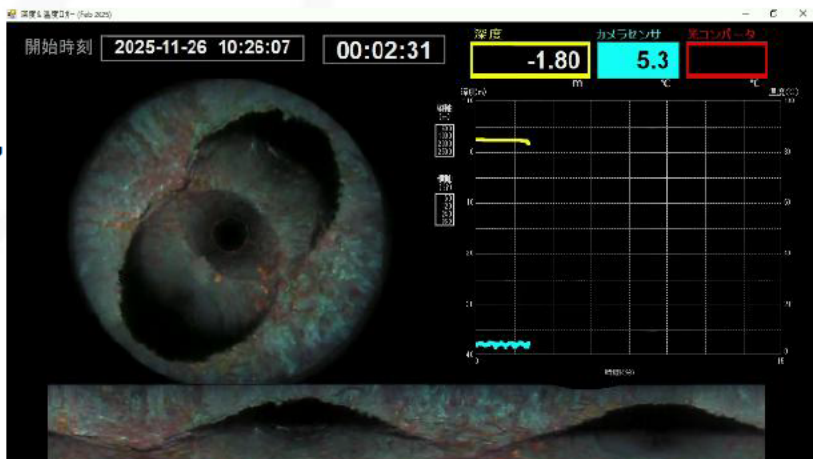


坑口装置付近

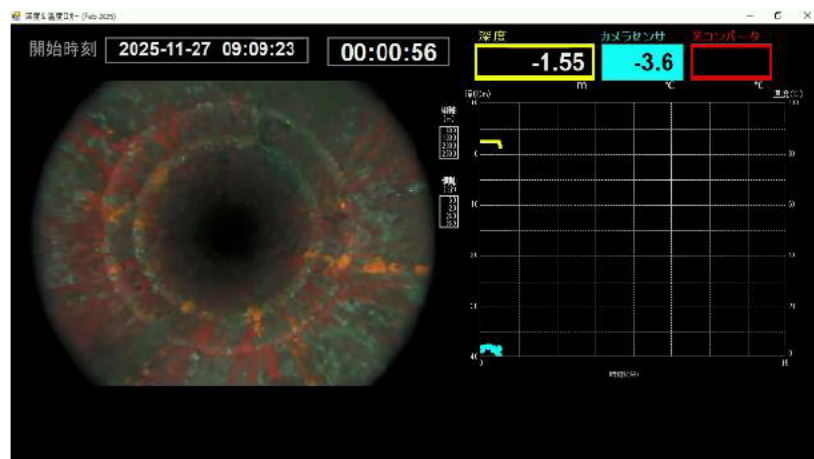
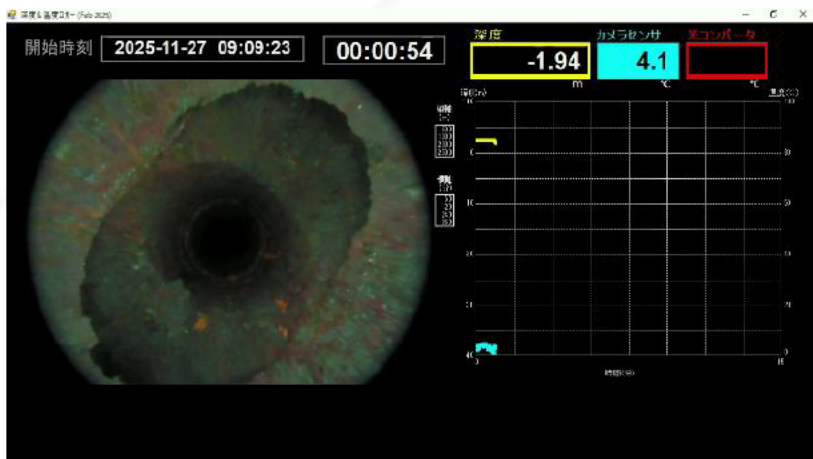
横向き配管

ジョイント

全方位視
タイプ
(魚眼
レンズ)



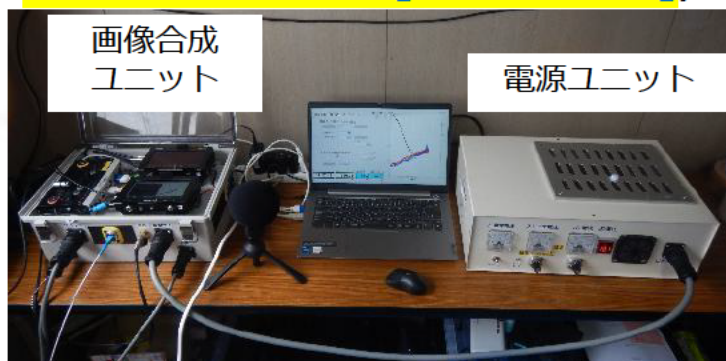
前方視
タイプ



研究成果



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])



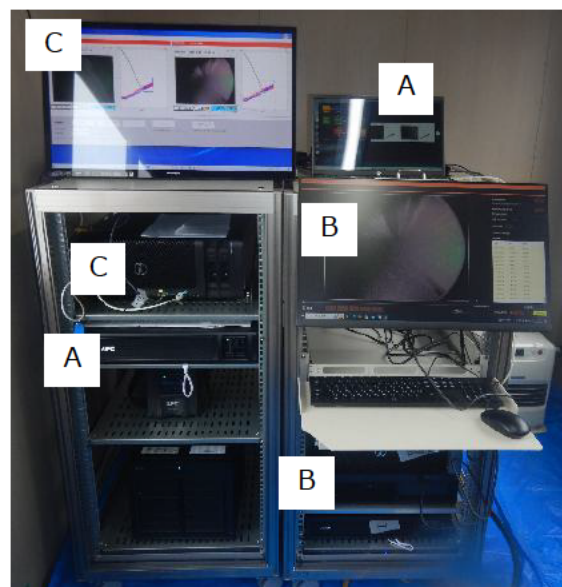
画像合成
ユニット

電源ユニット

BHS地上ユニット



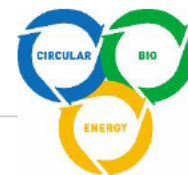
ウィンチ
光ファイバー複
合ケーブル



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



ボアホールスキャナー 試作品一覧



外径：101.2mm

	全長 (mm)	実証試験 [動作時間]	重量 (kg)
1号機	1,320	2.5時間程度(推定)	約42
2号機	2,805	3.5時間程度	約60
3号機	3,880	4.0時間以上 [4.5時間程度]	約95

研究成果

側方視センサー

全方位視センサー



側方視タイプのカメラ
センサー部

全方位視タイプのカメラ
センサー部



センサーの先端

ほぼ真横から前面まで視認できている

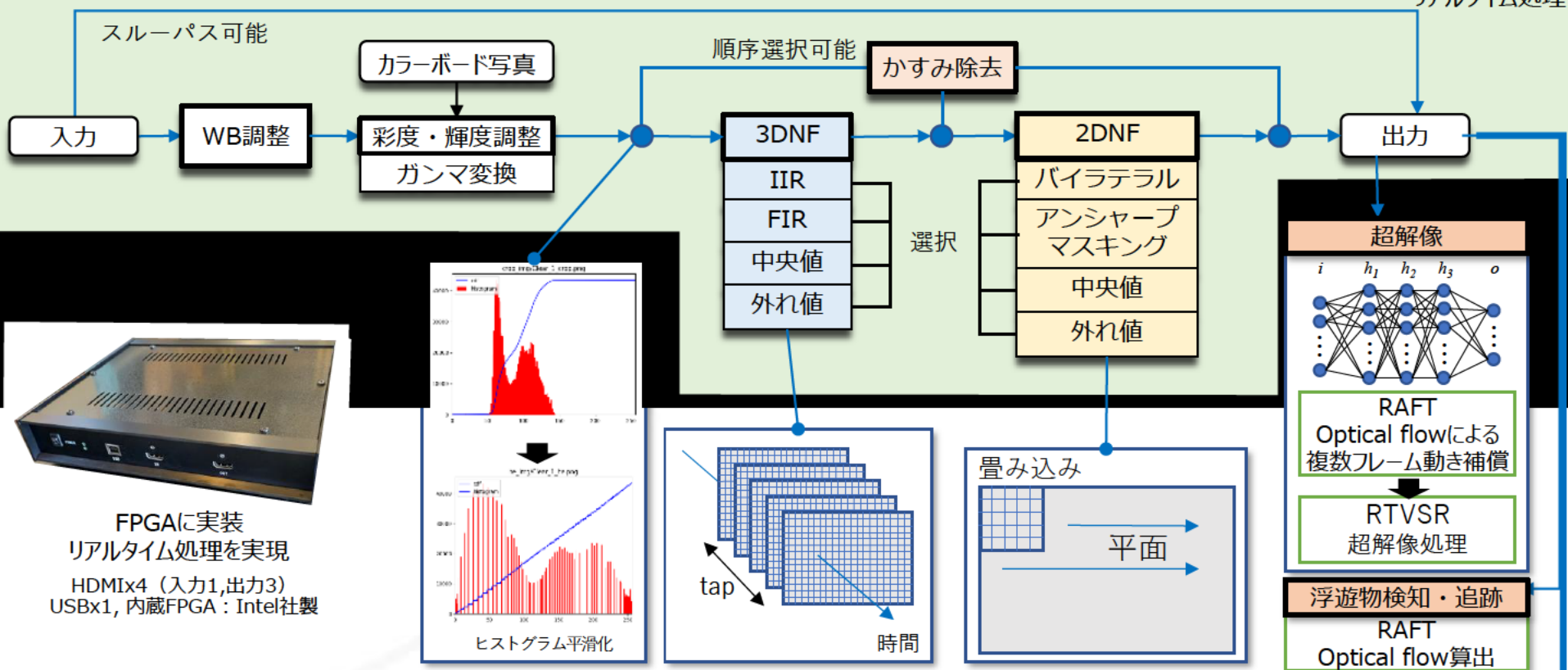
両センサーは試作2号機ないし3号機の先端部に装着可能

研究成果

画像鮮明化処理システムと 超解像・浮遊物追跡システム開発の流れ



リアルタイム処理

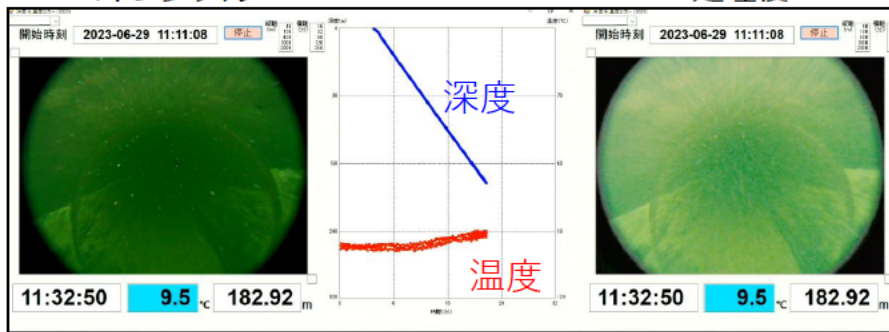
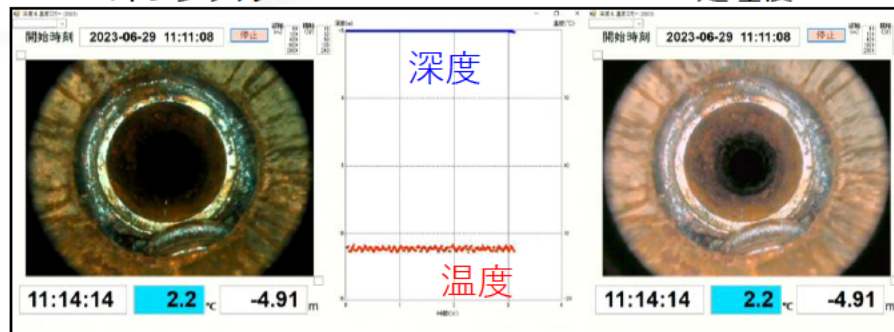


オリジナル

処理後

オリジナル

処理後



研究成果

超解像と浮遊物検出のためのAIモデルのアーキテクチャ

- Frame rate : 60fps
- 降下速度 : 5m/min
- 深度差 : 1-2mm/f
→類似した隣接frame

超解像処理
(RTVSR¹とRAFTの統合)

BHS映像

浮遊物検出・追跡処理
(RAFT²単体)

親和性

RTVSR

入力処理部

RGB入力→YCbCr→Y(輝度)

Motion estimation
Y利用
Coarse & fine flow
estimation

RAFT-sr
Y(輝度)利用

Spatio-temporal ESPCN

Early Fusion:複数フレーム結合
Sub-pixel convolution:フレーム拡大

超解像映像

入力処理部

RGB入力

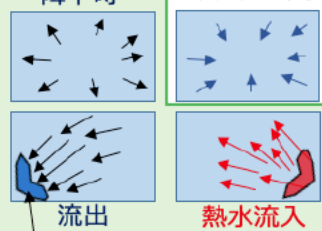
RAFT-fl

RGB3チャンネル(色彩)利用

予想される粒子運動

降下時

上昇時：不使用



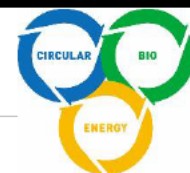
開口/損傷部

浮遊物のOptical flow

比較

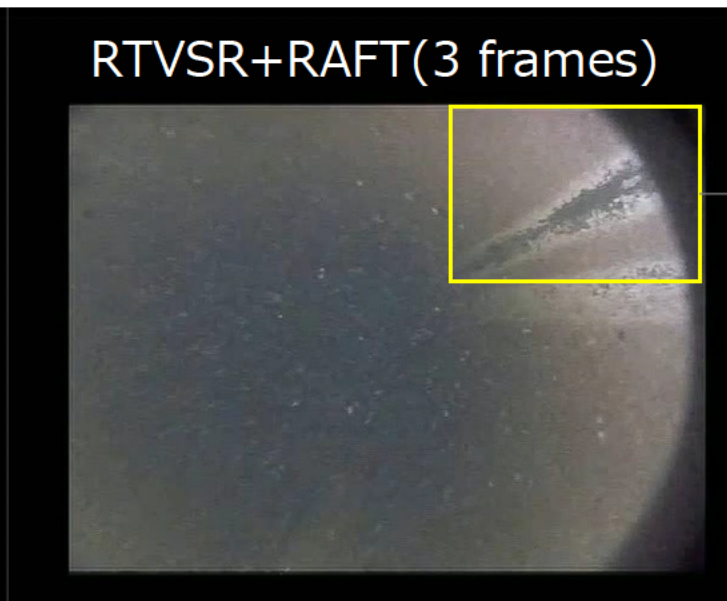
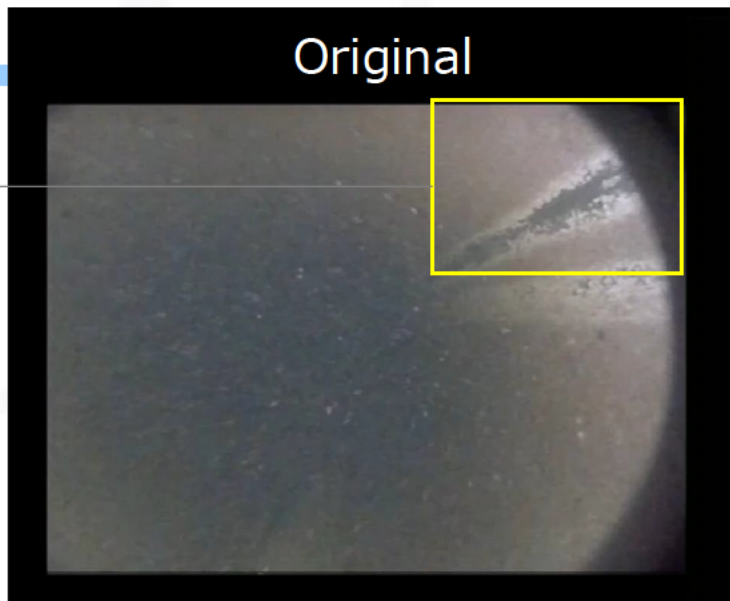
EVS³のOptical flow

¹ Real-Time Video Super Resolution (Caballero et al., 2016)
² Recurrent All-pairs Field Transforms (Teed and Deng, 2020)
³ Event-based Vision Sensor



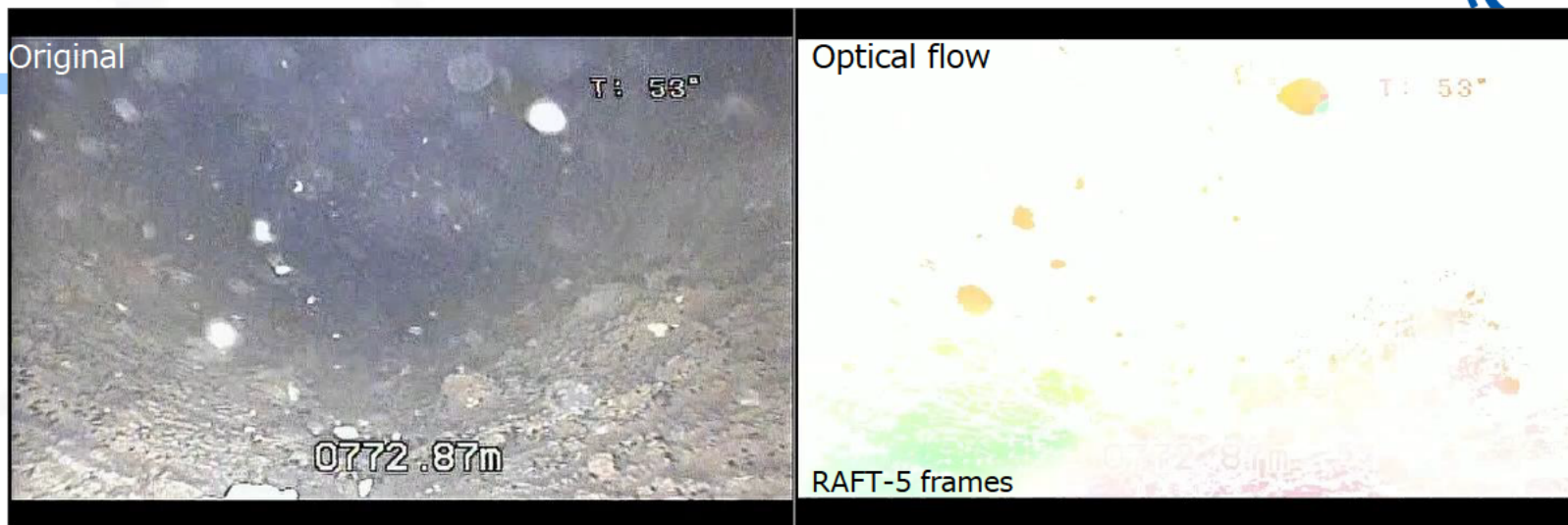
Original

RTVSR+RAFT(3 frames)



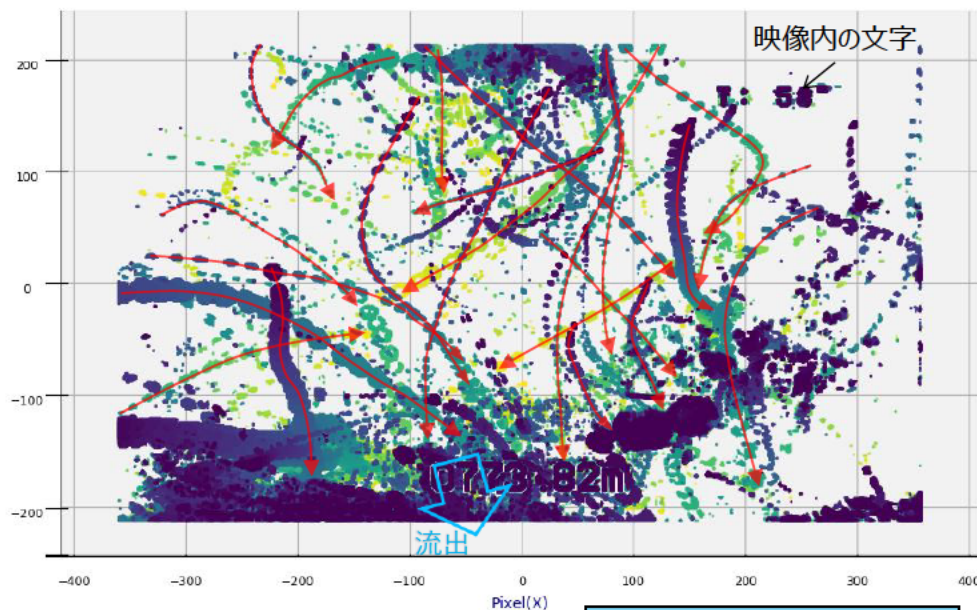
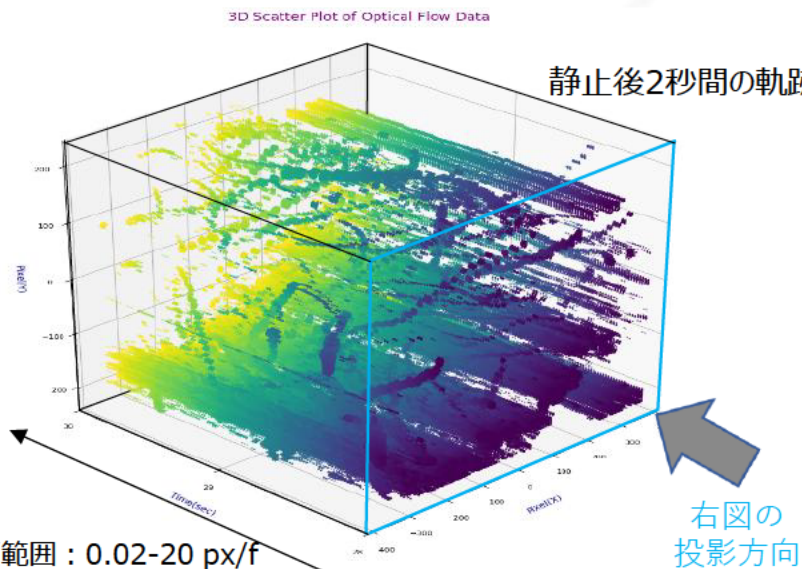
拡大率 : x3

過去の映像



20s以降はゾンデ静止状態

静止後2秒間の軌跡



Elev=0, Azim=270

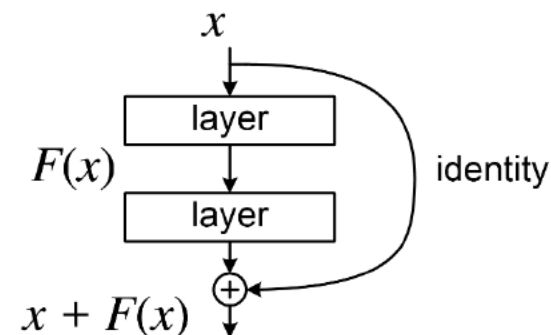
坑内水流出の軌跡

研究成果

BHS用AI(前方視)

ResNet

層数： ResNet34 (2015年)
 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
 Pretrained-Model： デフォルト
 入力サイズ： 縦480×横640



<https://ja.wikipedia.org>

残差 = モデル値 - 観測値
 モデル値 = 観測値 + 残差

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	視界不良	
正解	正常	196	0	0	196
	スケール付着	0	1265	1	1266
	視界不良	0	175	1097	1272
判定したクラスの合計		196	1440	1098	2734

正解率
93.6%

$$\text{正解率} = ((\text{TP} + \text{TN}) / N)$$

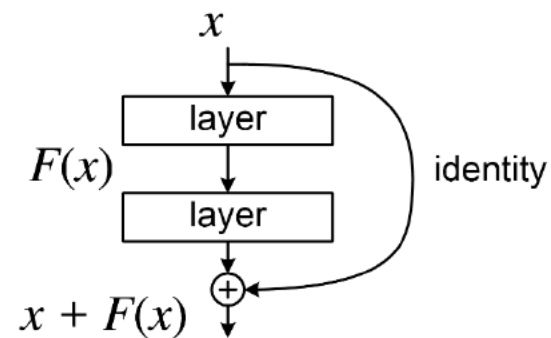
AI学習を用いた坑内異常の自動検出システム成果 前方視

研究成果

BHS用AI(側方視・全方位視)

ResNet

層数:	ResNet34 (2015年)
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
Pretrained-Model:	デフォルト
入力サイズ:	縦182×横1696 (展開) / 縦224×横224 (生)



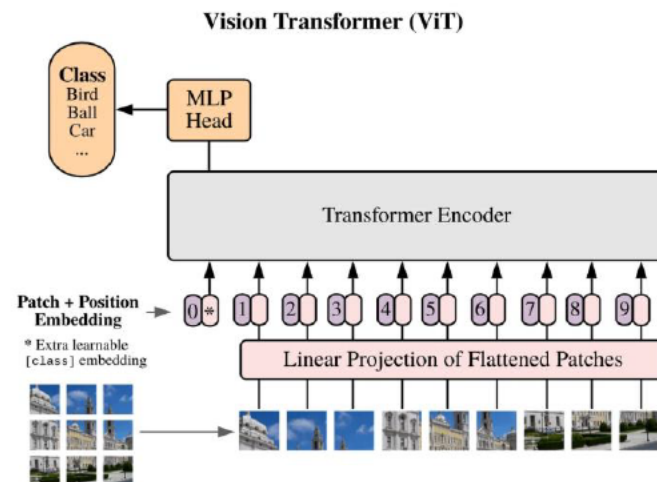
<https://ja.wikipedia.org>

残差 = モデル値 - 観測値
モデル値 = 観測値 + 残差

BHS用AI(側方視・全方位視)

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が最も小さくなった5エポック目のモデルを使用



<https://openreview.net/forum?id=9YcbFdNTTy>

展開処理画像：画像を分割してクラス分類（ResNet）

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

正解率
90.8%

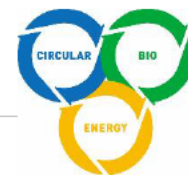
展開処理画像：画像を分割してクラス分類（VisionTransformer）

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

正解率
92.3%

$$\text{正解率} = ((\text{TP} + \text{TN}) / \text{N})$$

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



展開処理全方位視画像（分割、ResNet）

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	128	0	0	3	131
	スケール付着	0	0	0	0	0
	ケーシング損傷	2	0	41	1	44
	視界不良	0	0	0	0	0
判定したクラスの合計		130	0	41	0	175

正解率
96.6%

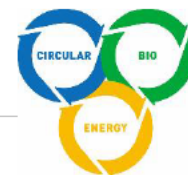
展開処理全方位視画像（分割、VT）

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	130	0	0	1	131
	スケール付着	0	0	0	0	0
	ケーシング損傷	9	0	35	0	44
	視界不良	0	0	0	0	0
判定したクラスの合計		139	0	35	1	175

正解率
98.3%

$$\text{正解率} = ((TP + TN) / N)$$

AI学習を用いた坑内異常の自動検出システム成果 全方位視



まとめ



開発項目	目標(計画時)		達成状況	改良点
測定機器開発	200℃、2,000m程度の環境下で4時間以上作業ができる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。 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。		すべて達成	組立作業効率アップ(内部構造改良) 耐熱性能(センサー耐熱向上)
画像鮮明化処理	浮遊物等のノイズを除去できる画像鮮明化処理が可能な3次元フィルタをはじめとするシステムのプロトタイプが完成し、浮遊物ノイズ等が除去されて、坑壁画像が視認できる状況に改善されていること。 ソフトウェアで処理している画像処理システムの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。 開発した画像鮮明化処理システムで処理した画像に対して、さらに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。		すべて達成	画像処理における最適パラメータ設定のノウハウ向上 全方位視映像を用いた3次元可視化技術の確立
AI 学習を用いた坑内異常の自動検出システムの開発	映像判別	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	すべて達成 前方視正答率：93.8% 全方位視正答率：98.3%	データ取得する毎に再学習機能を用いて再学習させ、AI判別性能を向上させる
	浮遊物検出	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。	達成	抽出したオプティカルフローの軽量化
システム統合	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		達成	PC台数等最適化/軽量化

