

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

地熱発電持続可能性維持のためのIoT-AI技術開発

大里和己

地熱技術開発(株)

2023年2月2日

【委託先】

地熱技術開発(株)
三菱重工業(株)
(一財)電力中央研究所
(国)九州大学
(学)早稲田大学

【再委託先】

(国)京都大学

問い合わせ先

地熱技術開発株式会社

E-mail:osato@gerd.co.jp

TEL:03-5541-9071

事業概要

1. 背景・目的

地熱発電所における利用率低下の主な原因は、地下（坑井設備・地熱貯留層）の影響である場合が多く、プラント全体で利用率を大幅に向上させるためには、地上設備と地下を含む複雑な循環系全体を統合して管理する全体システムの構築が不可欠である。

システム構築にあたっては、保安上のリスクを回避しながら、低コストで地上設備のデータだけでなく、地下データの変化観測も含めて多岐にわたる情報収集を可能とするクラウドを活用したIoTシステムを実現するための基盤技術を開発する。

また、このIoTシステムにAIや数値シミュレータを活用することによって、地熱発電所の利用率維持・向上を実現することを目的とする。

2. 実施期間

2021年6月～2025年3月（予定）

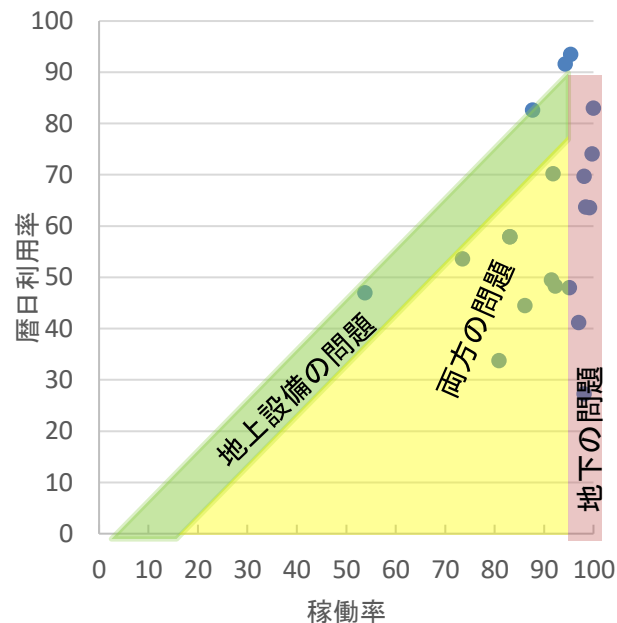
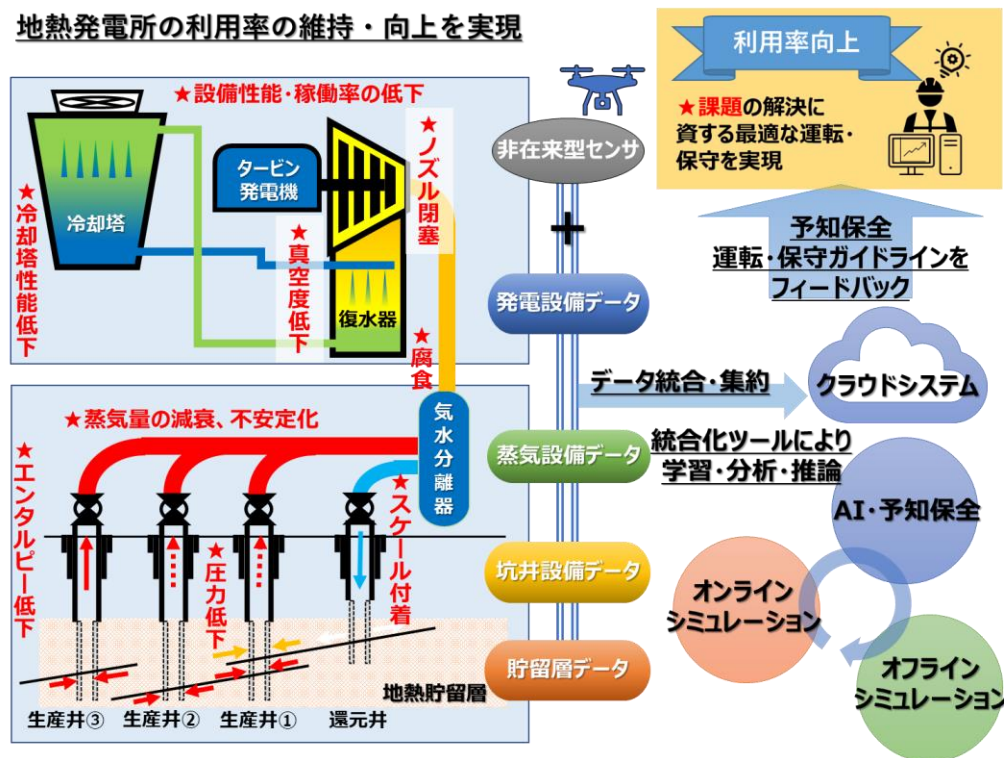
3. 実施内容・最終目標

研究項目	中間目標（2023年度末）	最終目標（2025年度末）
全体システム設計	対象発電所の過去データで持続的に利用率向上を示す。	発電プラント全体のシステムとしてまとめ、実証試験を行う。2019年度比較で実証試験実行部分の改善率と未実行部分の理論的な改善率を合算して15%以上の利用率改善の見通しを示す。
各要素技術	実証試験を行う発電所で検証試験を行い、個々の要素技術の検証を行う。	

本事業のコンセプト

- ◆ 地熱発電の稼働率低下の原因は貯留層の状態に大きく依存するため、対象となる地熱発電所(貯留層)に即した操業管理システムを構成する必要がある
- ◆ 本事業では、今後実案件(適用先)としてどこか対象の地熱発電所が決まった場合に、当該発電所に見合ったシミュレーション技術等を、特定のインターフェースのもと有機的に結合できるような操業管理システムの枠組みを確立することを目指している
- ◆ 上記枠組みのもと、本事業で選定したモデルフィールドに対して、その特徴に合わせたシミュレーション及び管理技術を開発、それらをインテグレートして稼働率向上の検証を行うものである

地熱発電所の利用率の維持・向上を実現



2019年度の国内地熱発電所の暦日利用率と稼働率の関係(データ:火原協(2020))

研究開発の課題

- ◆ 一般的な地熱発電所では蒸気生産設備と発電設備の管理事業者が異なり、運転データもそれぞれ別管理されていることがある
- ◆ 地熱発電所の利用率向上のためには貯留層の適切な管理が不可欠だが、直接観測することが困難
- ◆ このためこれら地上データの一元管理、および非在来型センサーからのデータを有効活用することにより、地下状態を適切に予測管理する技術が重要

管理する事業者が異なる場合の壁

	貯留層	蒸気生産設備	発電設備
構造	貯留層構造、および水源、熱源の位置関係が直接観測できない	設計情報があり既知	設計情報があり既知
状態推定	流体情報（温度・圧力・流量）が観測できない	流体情報の計測値あり 二相流の流量・気液比はわからない 坑井管内の状態はわからない	流体情報の計測値あり 目視や音などで状態推定可能
トラブル	水源の枯渇、熱源の減衰 貯留層間隙の閉塞（透水率低下）	配管内スケール 配管腐食、減肉、破口 弁固着	配管内、タービンスケール 配管腐食、減肉、破口 弁固着 電気設備故障

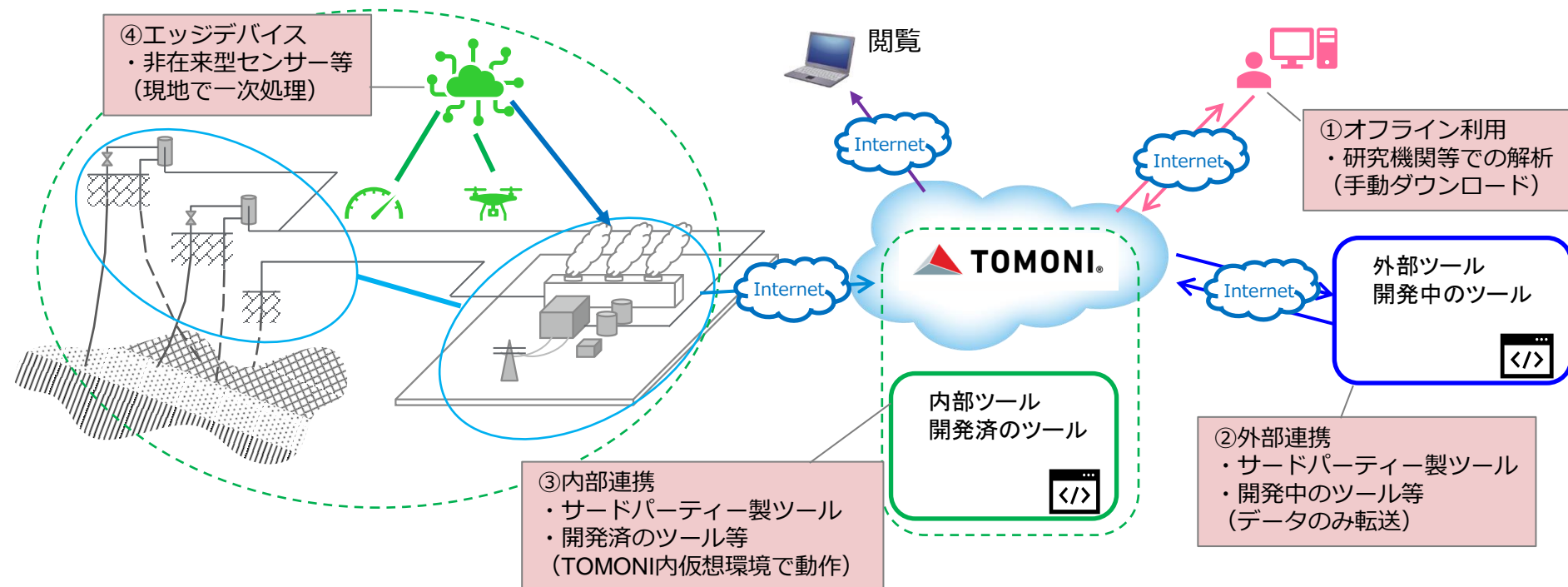
地上設備データ
および非在来型センサー
を活用したシミュレーションにより予測管理する

在来型センサー（温度、圧力、流量）情報で管理することが重要
（+非在来型センサーで補完）

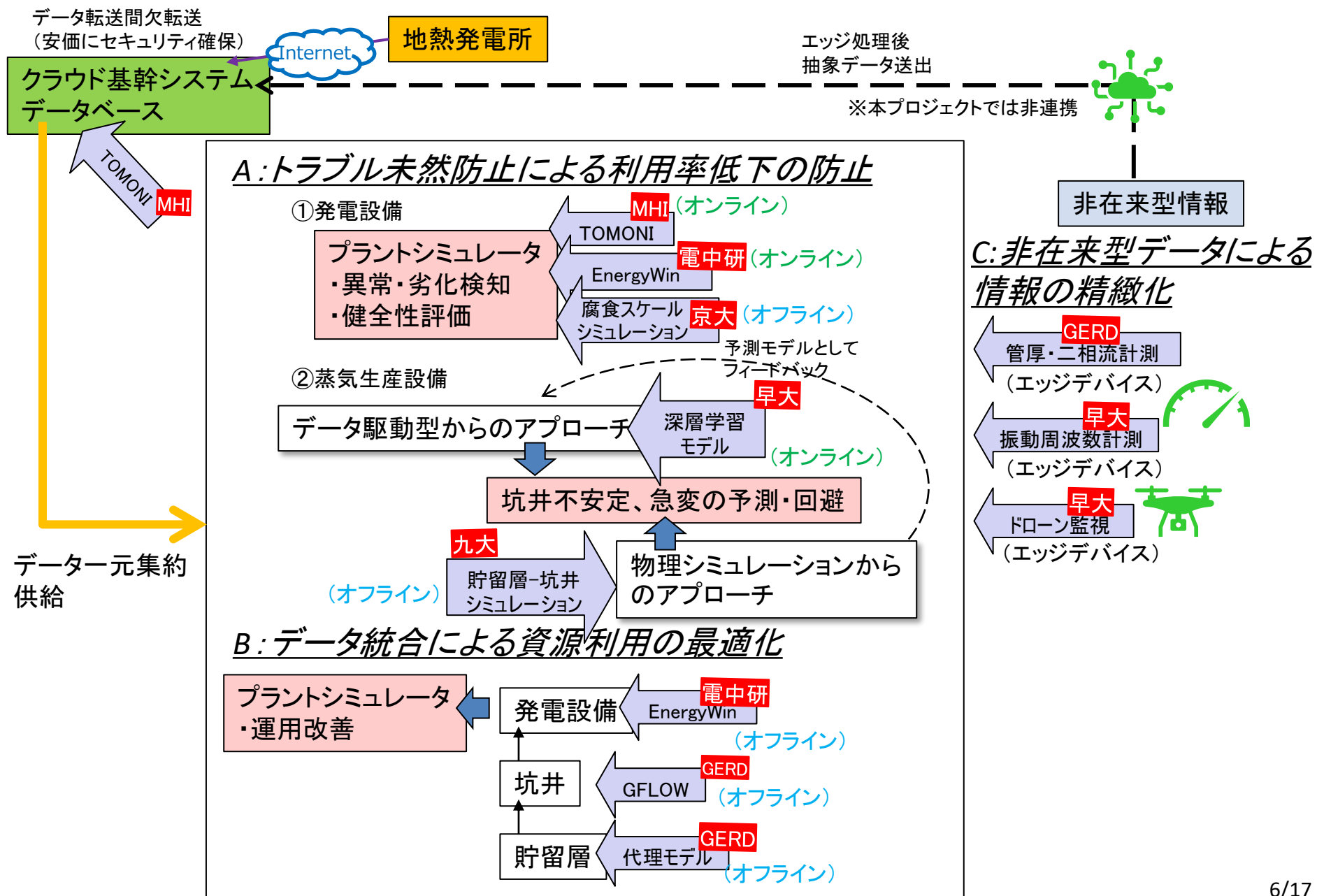
操業管理ツール要素間の連携イメージ

地熱発電プラントで実運用されているTOMONI(三菱重工業株式会社)を基幹システムとして、各操業管理ツール要素との連携動作を以下の4パターンに体系化した。それぞれのツールの特性、および開発状況に応じて適切な接続法が選択可能。

- ① オフライン利用: 研究機関等で手動ダウンロードして利用
- ② 外部連携: ツールは外部サーバ上にあり、データ転送して処理実行後、結果をフィードバック
- ③ 内部連携: TOMONI内仮想環境で動作
(セキュリティを考慮し、検証が終了した安定版のみ内部取り込み)
- ④ エッジデバイス: 主に非在来型デバイスとして、現場にて一次解析まで実施
(本プロジェクトではオフライン検証までとするが、将来的にクラウドとの連携動作も可能)



本事業での開発要素



操業管理ツールの構成

	項目	担当	連携方法	利用率向上への寄与		
				A	B	C
1	設備全体の予知保全システム	MHI	内部動作	○	○	
2	発電設備のトレンド分析・シミュレーション	電中研	内部動作	○	○	
3	坑井の不安定現象における異常予兆検知	早大	外部動作	○		○
4	サロゲートモデル	GERD	オフライン動作		○	
5	坑井の不安定現象のシミュレーション	九大	オフライン動作	○		
6	腐食・スケール成長シミュレーション	京大	オフライン動作	○	○	
7	管厚計測、二相流計測	GERD	エッジデバイス			○
8	三次元モデル生成	早大	エッジデバイス			○

利用率向上への寄与

A: トラブル未然防止による利用率低下の防止

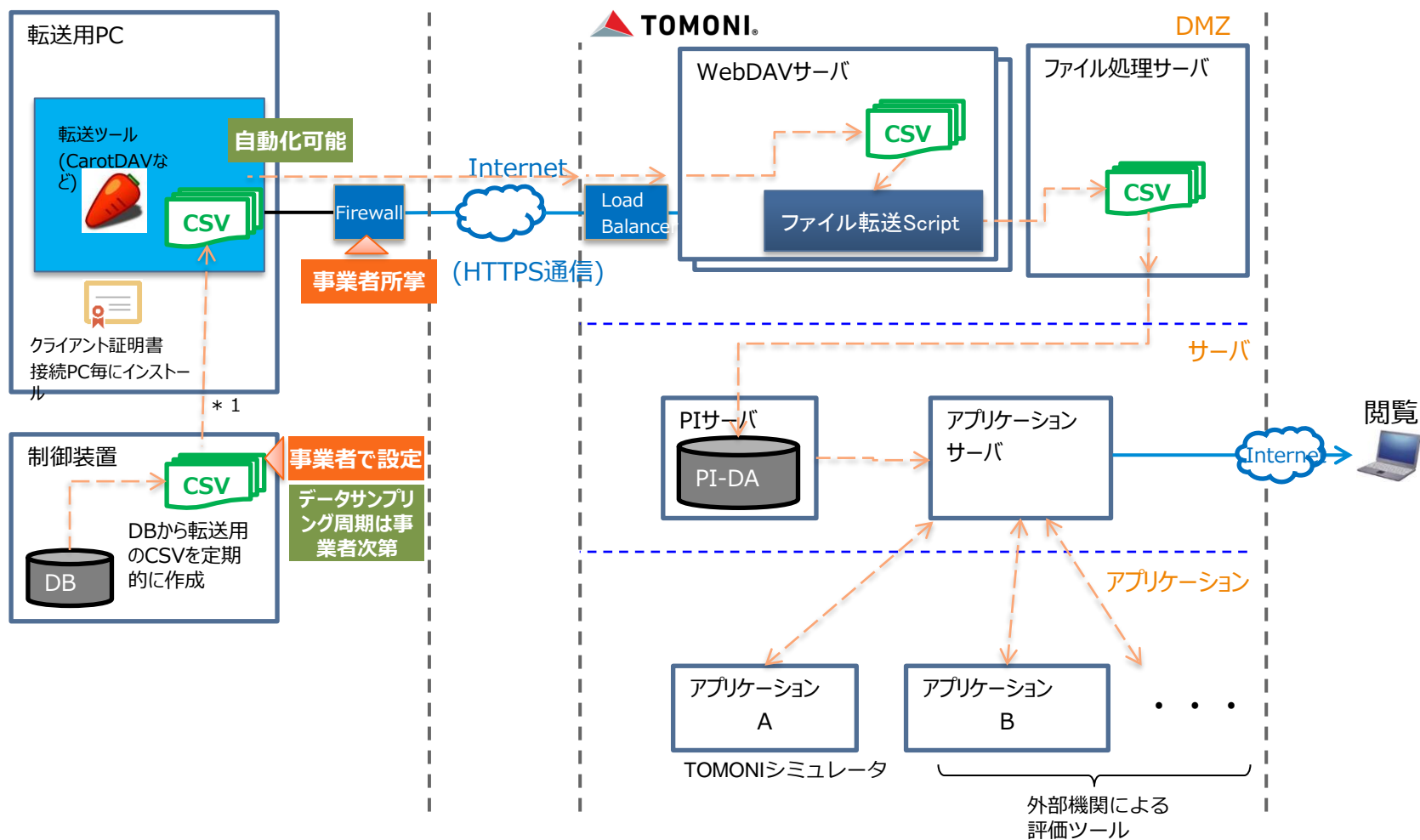
B: データ統合による資源利用の最適化

C: 非在来型データによる情報の精緻化

A:トラブル未然防止による利用率低下の防止

TONOMI®を活用したプラットフォームの構築

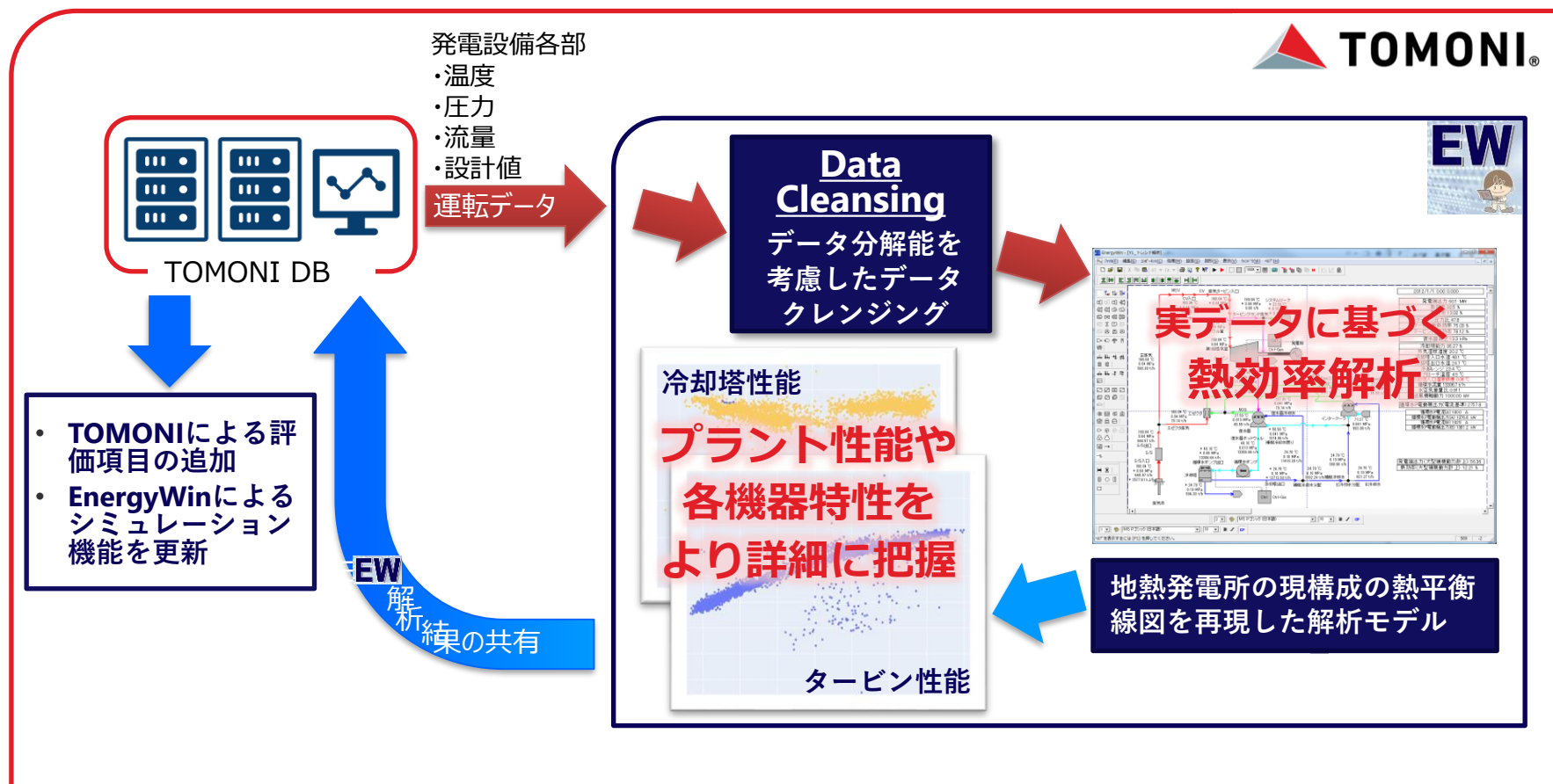
- ◆ 発電設備のセキュリティを考慮し、基幹システムとは切り離された転送用PC経由でデータ転送を行う簡易通信方式を採用
- ◆ アプリケーションサーバにて、複数のアプリケーションを統合動作し、評価結果を表示する



A:トラブル未然防止による利用率低下の防止

EnergyWinによるトレンド分析機能の連携(オンライン)

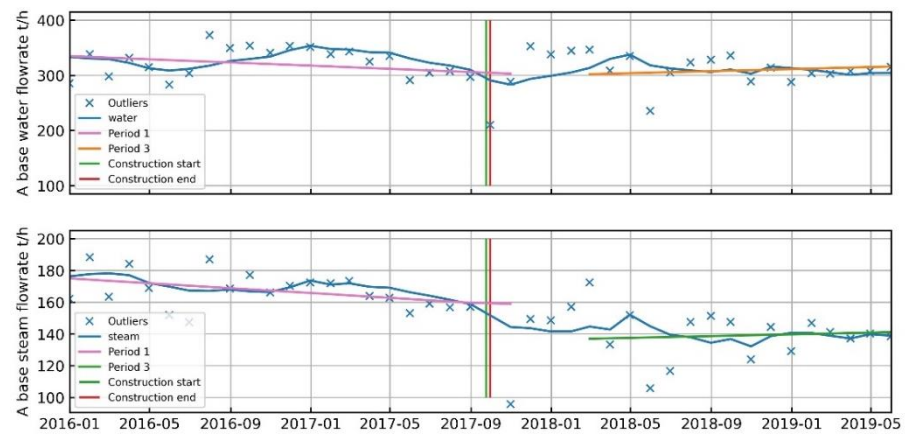
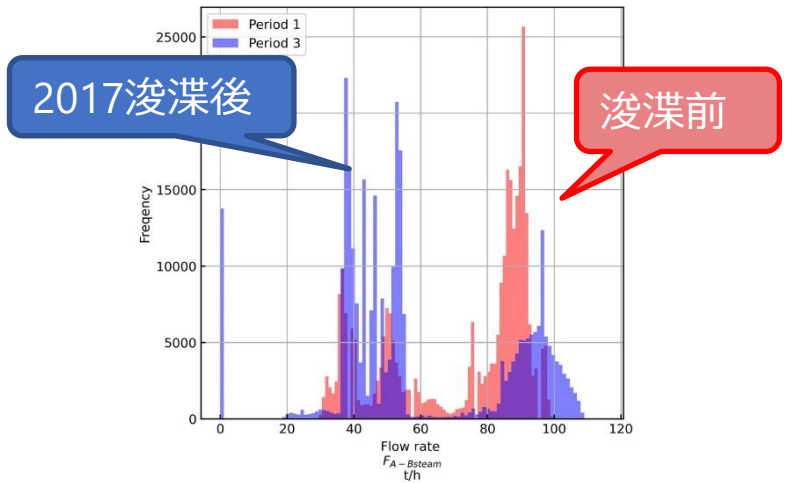
- ◆ TOMONIより運転データをDLし、EnergyWinによる熱効率解析を実施
- ◆ 現状のプラント性能を解析し、解析結果をTOMONIと共有
- ◆ EnergyWinによるシミュレーションのために、各機器特性を分析



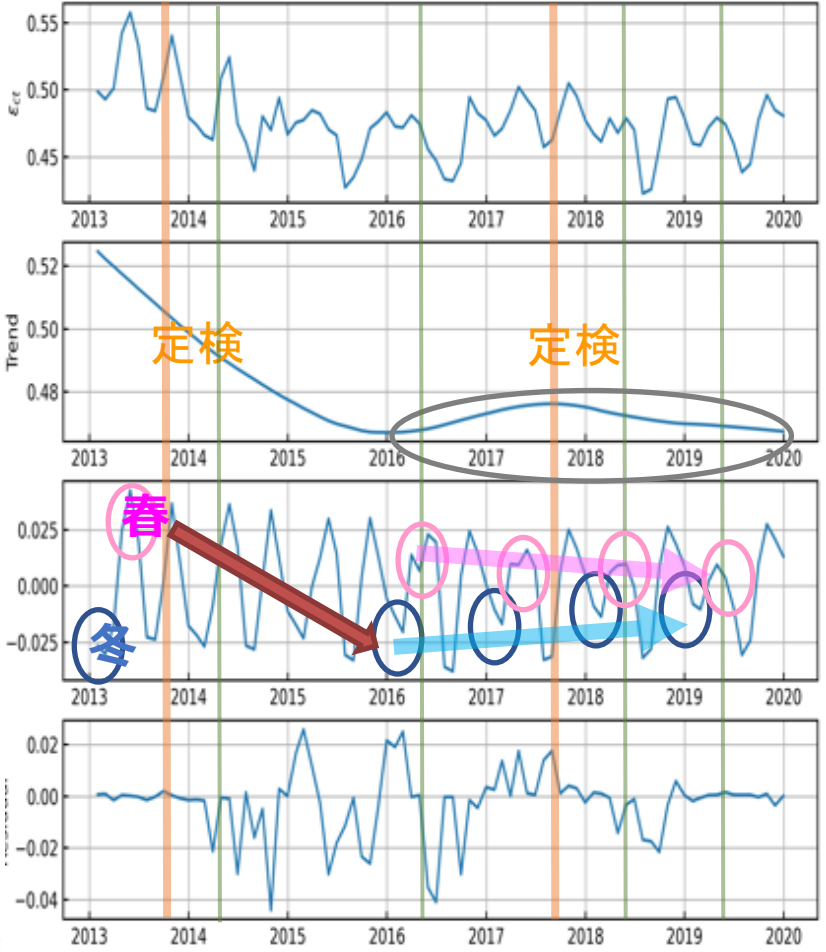
A:トラブル未然防止による利用率低下の防止

DCSデータ解析によるプロセス状態分析

- ◆ 坑井浚渫などのイベントとその効果検証から予測へ
- ◆ ソフトセンシング: 未観測の状態量を, データ駆動モデルの逐次更新で推定し見える化



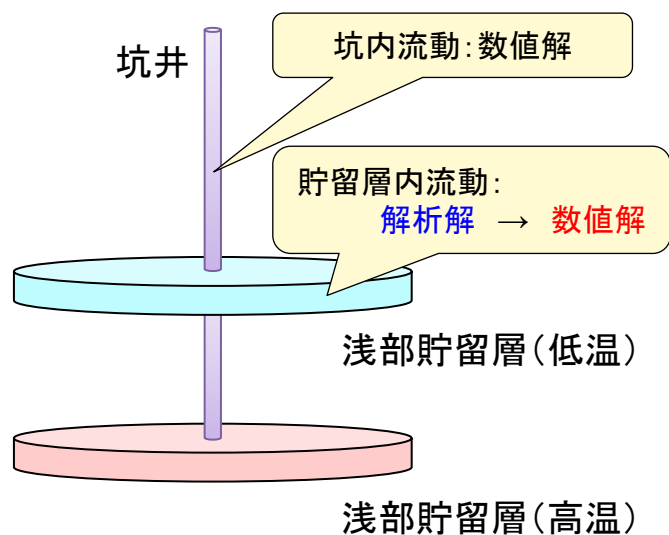
冷却塔効率のトレンド+変動成分への分解



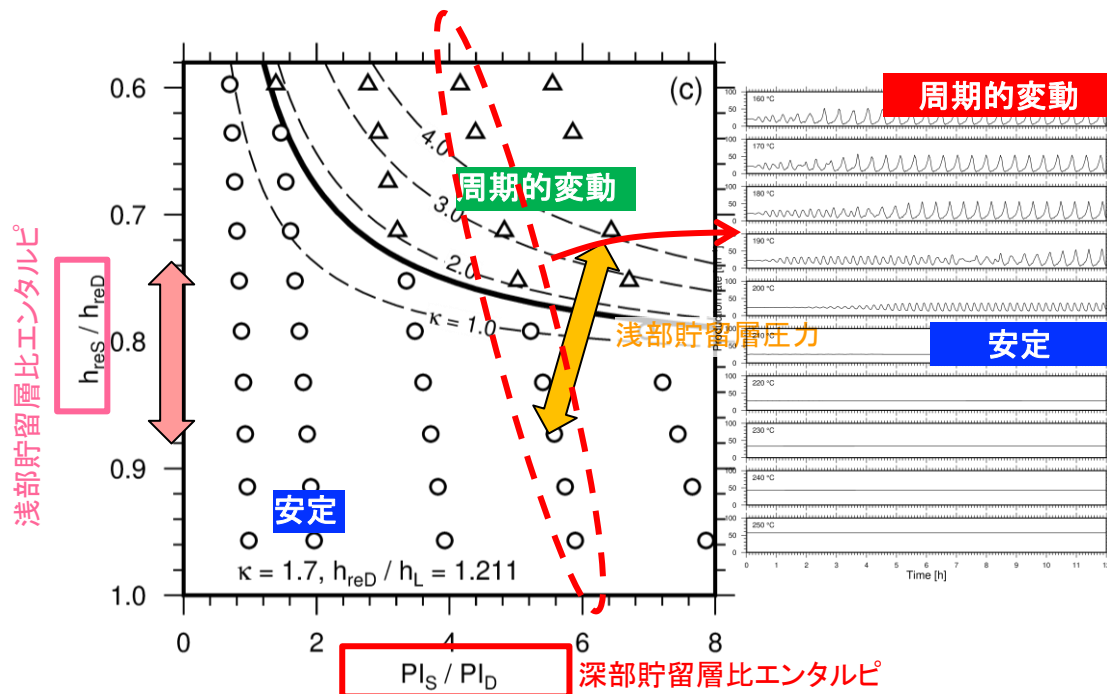
A:トラブル未然防止による利用率低下の防止

坑井近傍・周辺貯留層内流動のシミュレーション手法の数値解化(オフライン)

- ◆ 先行研究の経験式をベースに、坑井が掘り抜く2枚の貯留層の圧力・比エンタルピの変化に応じた坑内流動の安定条件の経験式を拡張
- ◆ この経験式により、坑井シミュレーションを経ずに坑内流動の安定性を即座に判定可能(=計算負荷の劇的な軽減)



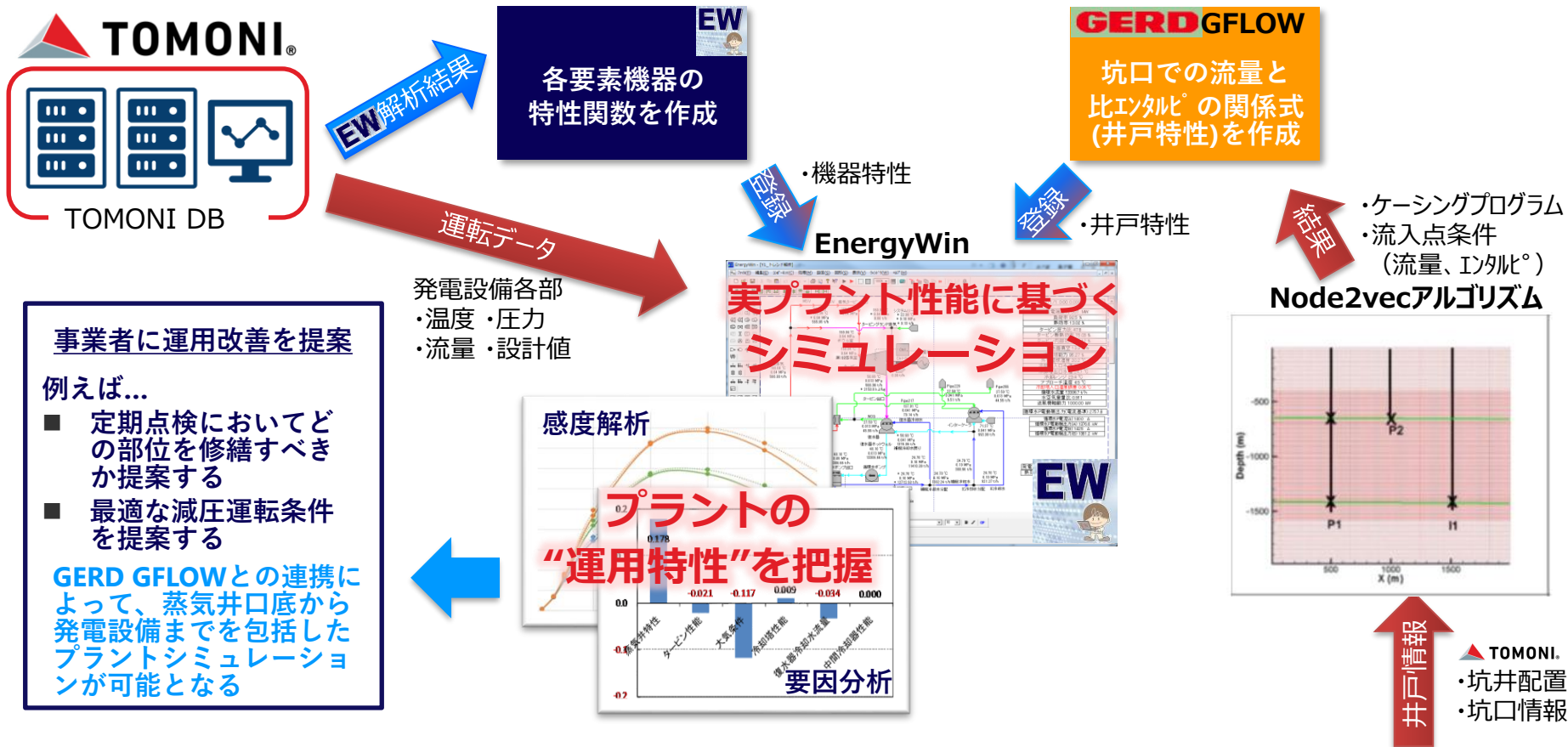
坑井シミュレータの概念図(例)



B: データ統合による資源利用の最適化

EnergyWinによるシミュレーション機能の連携(オフライン)

- ◆ GERD開発のAI技術を用いた坑井-貯留層モデルにより、生産井流入点条件を算出
- ◆ GERD GFLOWにより、井戸特性(生産井坑口における二相流体流量・比エンタルピの関係式)を作成
- ◆ 電中研 EnergyWinにより、井戸特性を組み込んだプラントシミュレータを構築
- ◆ MHI TOMONIよりEW解析結果をDLL、現状の各機器特性関数に基づくシミュレーションを実施
 ☞ プラントの運用特性を把握し、事業者に運用改善を提案



B: データ統合による資源利用の最適化

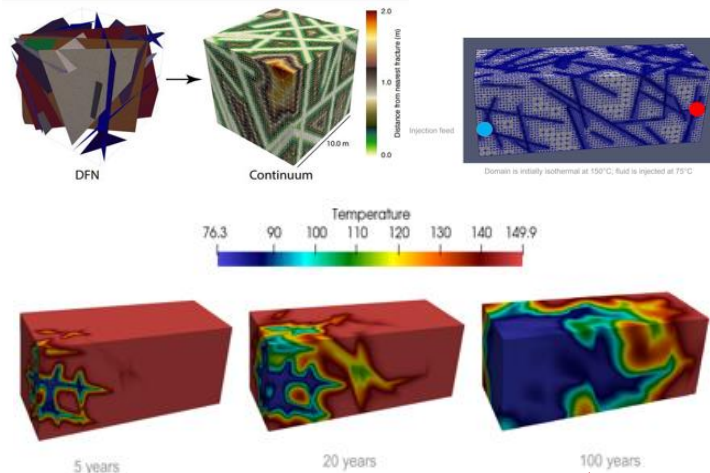
AI 技術を用いた坑井—貯留層モデルの最適化

- ◆ フラクチャ内の流体挙動を3次元CFDで解くには高速な計算環境と膨大な計算時間が必要であり、現状の発電所操業データを逐次処理・推定することは困難
- ◆ 計算をグラフ理論に置き換えることで高速化する

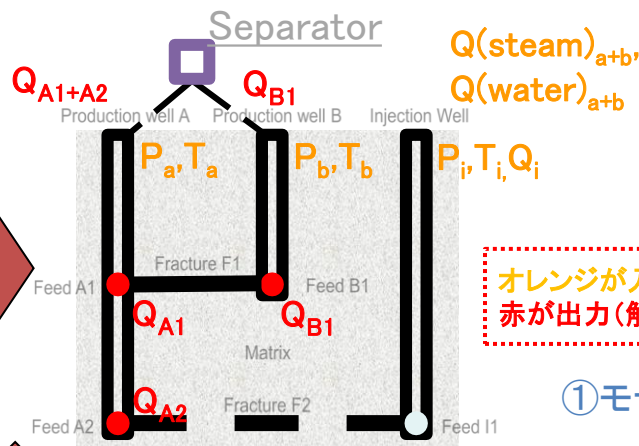
※ グラフ理論とは

ノード(節点・頂点、点)の集合とエッジ(枝・辺、線)の集合で構成されるグラフに関する数学の理論

「つながり方」に着目して抽象化された「点とそれらをむすぶ線」の概念がグラフであり、グラフがもつ様々な性質を探求する方法がグラフ理論である。グラフを表現するのに、図ではなく、隣接行列を用いることができる。

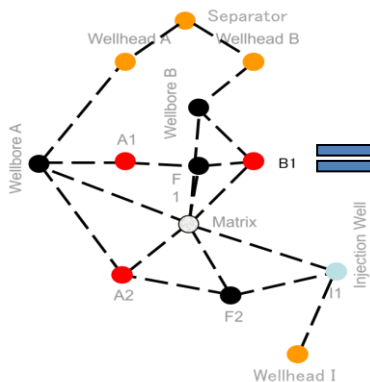


3次元シミュレーションのイメージ

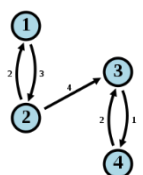


①モデルを単純化

坑井・岩盤・フラクチャーモデル



辺の重みを持ち、多重辺を持つ有向グラフ



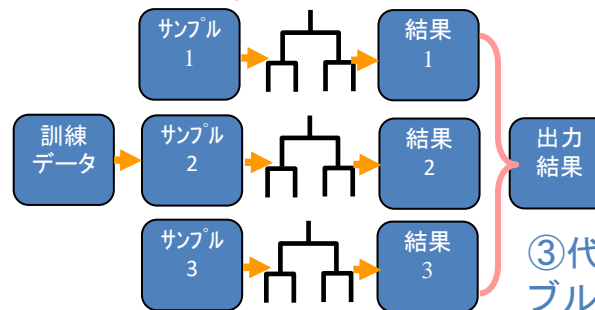
ループを持たない左のグラフの可約隣接行列

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 3 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 0 \end{pmatrix}$$

②計算をグラフ理論に置き換えてベクトル化によって計算を高速化

トポロジー表示(グラフ理論※)

樹木モデル



③代理モデル(アンサンブル学習法)による解(坑口毎の流量・流体流入点毎の流量)の導出(即時)

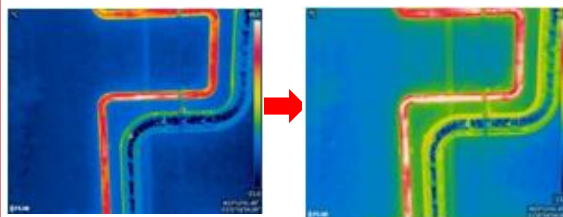
サロゲート(代理)モデリング(暫定)

C:非在来型データによる情報の精緻化

屋外環境における遠赤外線カメラ画像の温度計測精度向上

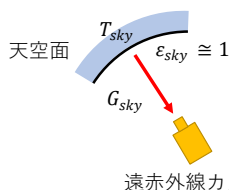
- ◆ 3つの手法を組み合わせることで、5°C以上の温度変化を検知可能となった

計測環境変化を補正



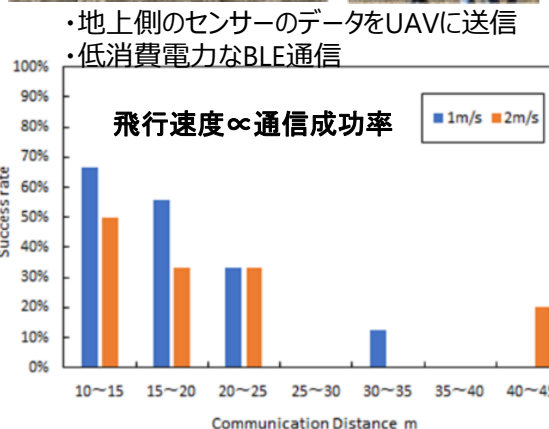
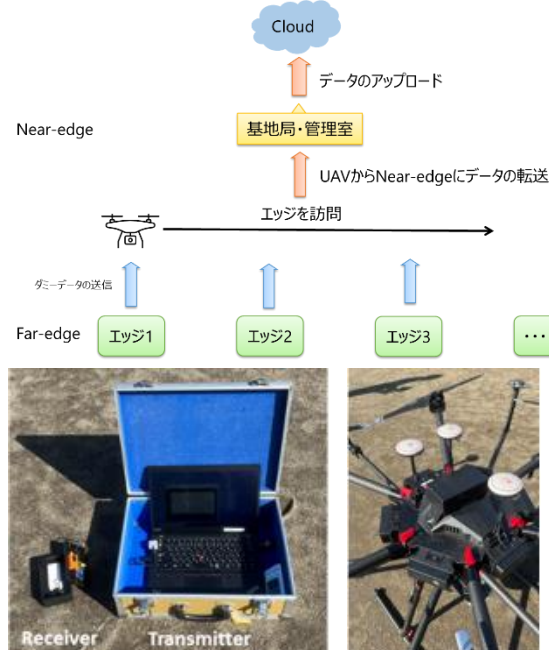
天空反射の影響を補正

- ・直接法と実験式を組み合わせる手法により最適な天空温度を導出
- ・放射率の指向変動を考慮



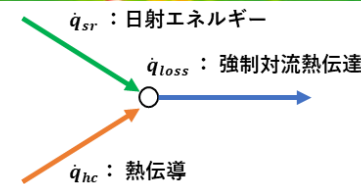
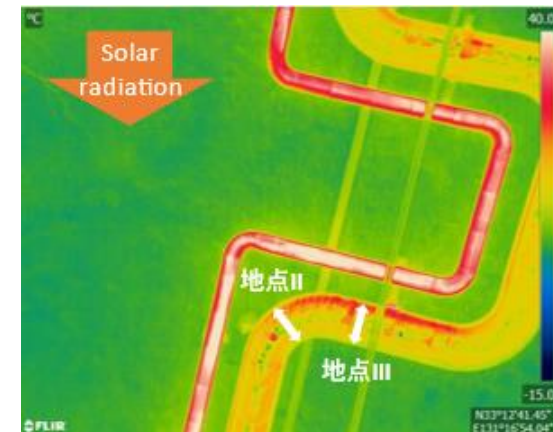
遠赤外線カメラの測定精度の向上

地上センサーによる校正

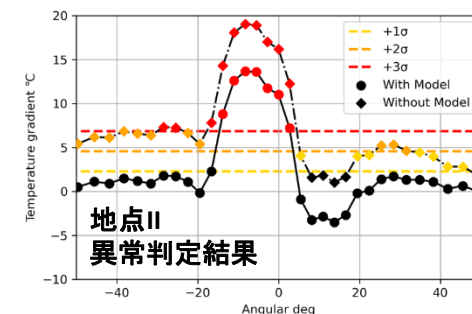


データをUAVによって自動回収

日射を考慮した異常判定



- ・モデルによって配管表面温度を推定 ⇒ 日射がある場合でも異常判定が可能
- ・仮想的な高温異常部を高精度に検出

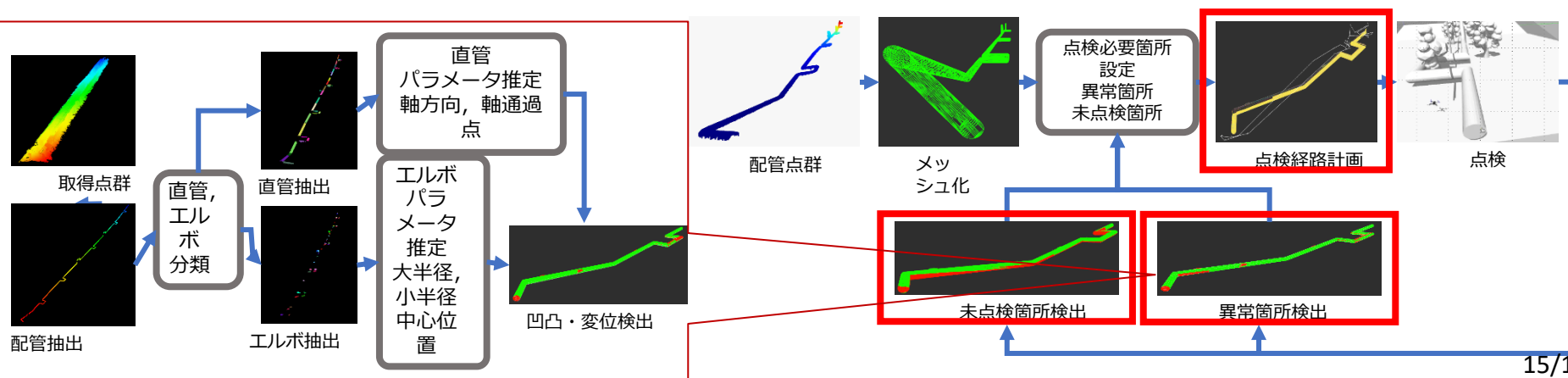
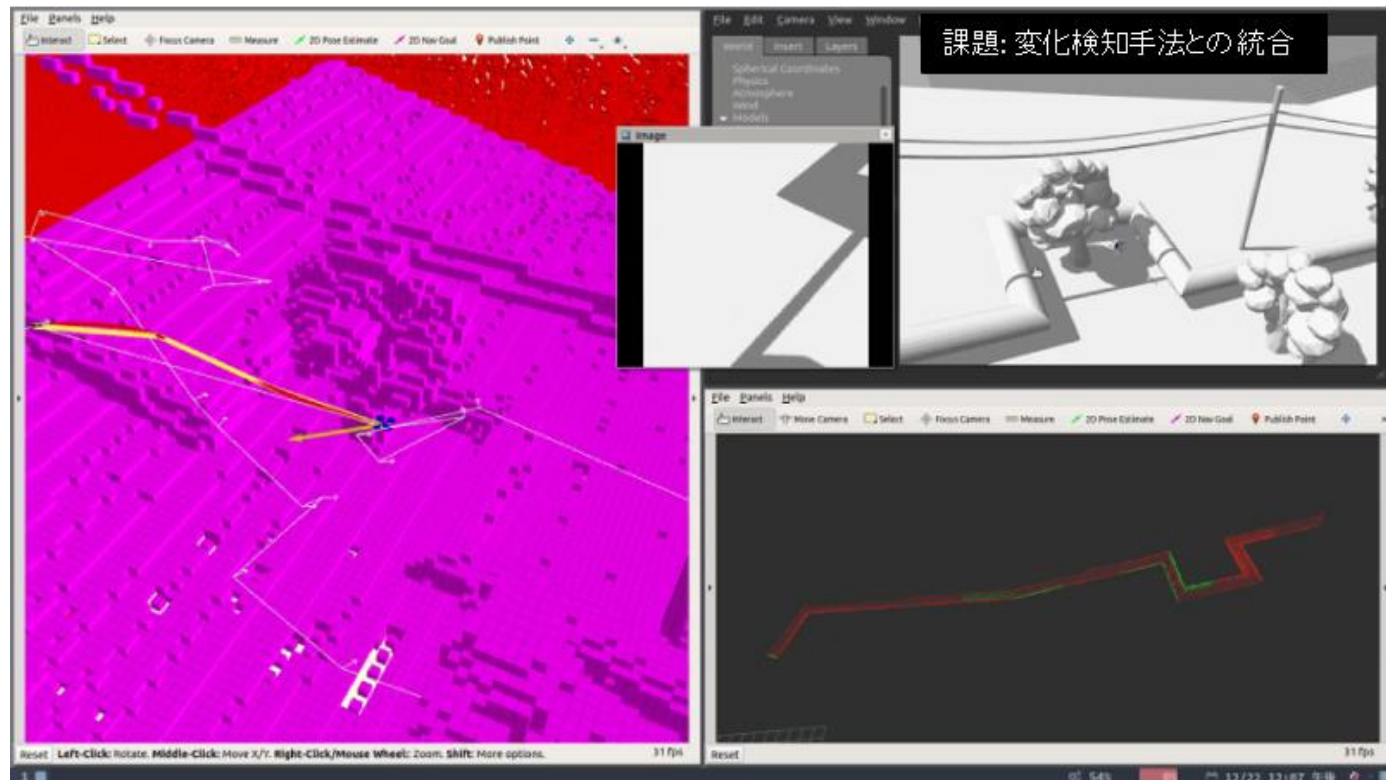


環境にロバストな異常検出

C:非在来型データによる情報の精緻化

UAVのナビゲーションを最適化することでUAV計測データ精度を向上させる

- ◆ 目的: UAV点検経路の自動作成
- ◆ 課題: 大規模構造物への手法適用
- ◆ 手法: 未点検箇所・異常箇所の事前の抽出による, 重点的な点検箇所のための経路生成
- ◆ 結果: 点検の網羅性と異常検出精度の向上の達成



C:非在来型データによる情報の精緻化

配管厚計測計の開発

- ◆ 地熱蒸気配管(二相流配管含む)で発生するエロージョンの長期計測を目的に、管厚の変化を精度10%以内で検出可能なエッジデバイス対応型配管厚計測計を開発
- ◆ 配管厚計測計としてET410センサを調達。2021年度は配管材料での動作試験を実施

【基本仕様】

- 最高使用温度:300°C。
- 測定最小肉厚 $\geq 6\text{mm}$
- 配管径 $\geq 100\text{mm}$
- $\pm 0.025 \sim 0.050 \text{ mm}$ の変動を
6 / 12 / 24時間毎に測定。
- バッテリー寿命:9年
(12時間/測定)
- 取付方式:マグネット・SSバンド

【通信方式】

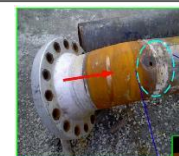
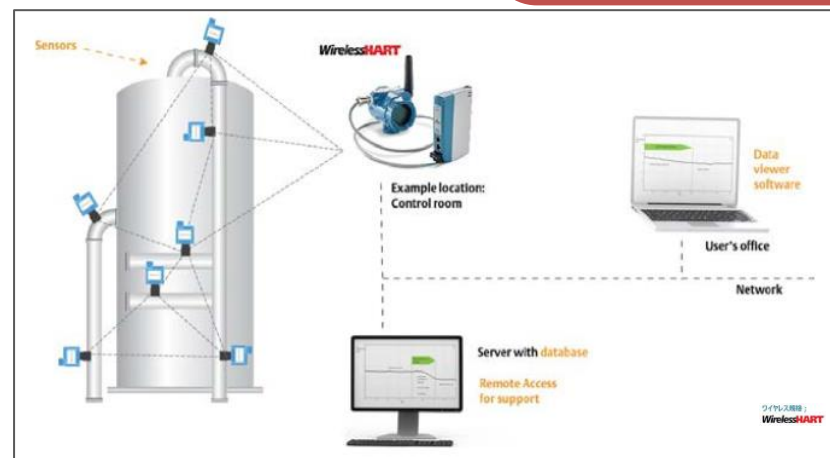
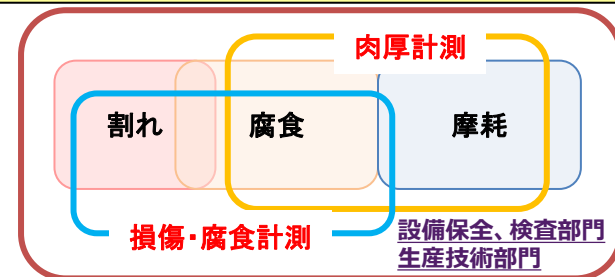
- WirelessHART

■今後の予定

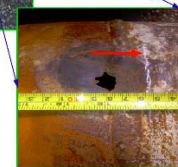
【2022年度】

- 追加機器調達。多点同時測定試験, ならびにエッジデバイスとしてのデータ共有方法の検討。
- 実証試験フィールド選定

【2023年度】実証試験



エルボ部の腐食



2021年度成果と2022年度課題

- **2021年度**
 - 全体システムの体系化
 - 坑口生産データ(DCSデータ解析)によるプロセス状態分析による予兆
 - ドローンによるUABナビゲーションを最適化することでUAV計測データ精度を向上
 - 屋外環境における遠赤外線カメラ画像の温度計測精度を向上
 - 非定常坑内流動シミュレーションの数値実験による安定条件の定式化と坑井近傍・周辺の貯留層内流動のシミュレーション手法の数値解化の検討
 - サロゲートモデルによる流体流入点推定法アルゴリズムの検証
 - 配管腐食計測の調達
 - 腐食スケール生成シミュレータの製作(層流)
- **2022年度**
 - 全体システムの具体化
 - 不足するデータ量を九大シミュレーションで補う
 - AIモデルの精度を検証し エッジ処理の課題を整理する