

# NEDO再生可能エネルギー分野成果報告会2025 プログラムNo.2-9

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

発表日：2025年7月17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 地熱技術開発（株） 佐藤 真丈

\*団体名 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

問い合わせ先 地熱技術開発（株） E-mail: msato@gerd.co.jp TEL:03-5541-9072

## 1. 背景・目的

地熱発電所の利用率低下は主に地下貯留層の影響によるため、発電設備と蒸気生産設備を含むシステム全体の統合管理が重要です。そのため、地下情報のデータ（貯留層・坑井）も含めた監視システムを構築し、AIや数値シミュレータを活用して利用率の向上を目指します。

## 2. 実施期間

2021年6月 ～ 2026年3月

## 3. 実施内容・目標（中間・最終）

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て実証試験を行う。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。	

## 4. 成果・進捗概要

地熱発電所の管理ツールとして、TOMONIを基盤に地上と地下を統合管理するシステムを開発し、外部ツール連携も可能にした。短期予測モデルの精度向上により、操作シミュレータ（バルブ開閉操作に応じたバルブ操作ガイダンスシステム）の実現可能性を示し、地下貯留層モデルや発電設備シミュレーションの連携を実証。さらに、ES-MDA法を活用した将来予測手法の開発を進めた。ドローン技術では、配管の3Dデータ取得と統合システムを構築し、配管健全性評価や交換時期の把握を可能にした。これらにより、地熱発電所の効率的な管理と長期運用の可能性が拡大した。



# 研究方針（課題に対する対策）

■ : 研究項目

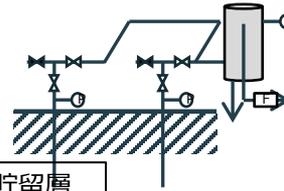
## A データ統合による最適運転管理手法の構築

【課題】  
事業者によって別管理されることが多いデータを一元管理

発電設備 蒸気生産設備

【対策】  
プラント全体の状態推定  
運転データから現状の井戸の噴気状態とプラント性能（劣化状態）を推定。

現状に即したプラント、貯留層モデルに反映



## D 非在来型データによる潜在不具合の解消

【課題】  
蒸気生産設備の腐食等に係る健全性評価等のトラブルの予測・回避が難しく、発生すると利用率に対して、大きな影響を与える。

【対策1】  
ドローン技術により、地上設備の状態変化等、外観目視点検を自動化する。

【対策2】  
配管厚の通年計測を可能にすることで、配管内部の健全性評価と問題が顕在化する前の補修を可能にする。

## B 生産井異常の予測・回避技術の開発

【課題】  
不安定な挙動を示す井戸の扱いが難しく、稼働率を下げる原因となっている。

【対策1】  
時系列データから井戸の急落を予測し、噴気停止を回避する

【対策2】  
不安定化させない運用方法（生産、還元方法）の推定

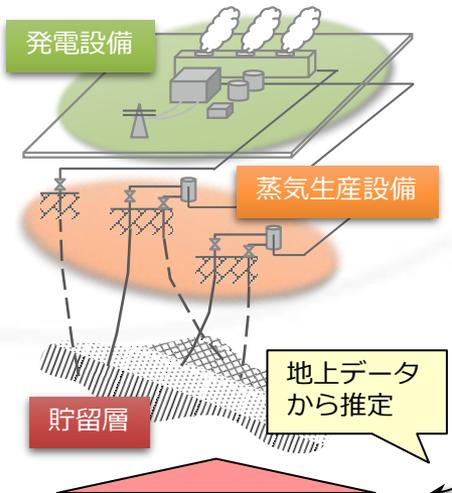
## C データ統合による資源利用の最適化

【課題】  
新設時の計画に最適化された発電設備が井戸の減衰や発電設備の劣化により最適な運転状態ではなくなっている。

【対策】  
発電設備  
蒸気生産設備  
貯留層

現状の運転状態に合わせて最適化

■ 地上設備（発電設備・坑口・配管等）  
（直接観測することができる）



■ 貯留層および坑井の地下設備  
（直接観測することができない）

現状（2024年度末時点）での推定成果 11% + a（概算目論見）

不安定坑井の急落回避による利用率向上

貯留層の状態に合わせた運転点の最適化による利用率向上

定期的なモニタリングにより突発的な利用率低下を回避

総合して15%程度の利用率改善を目指す

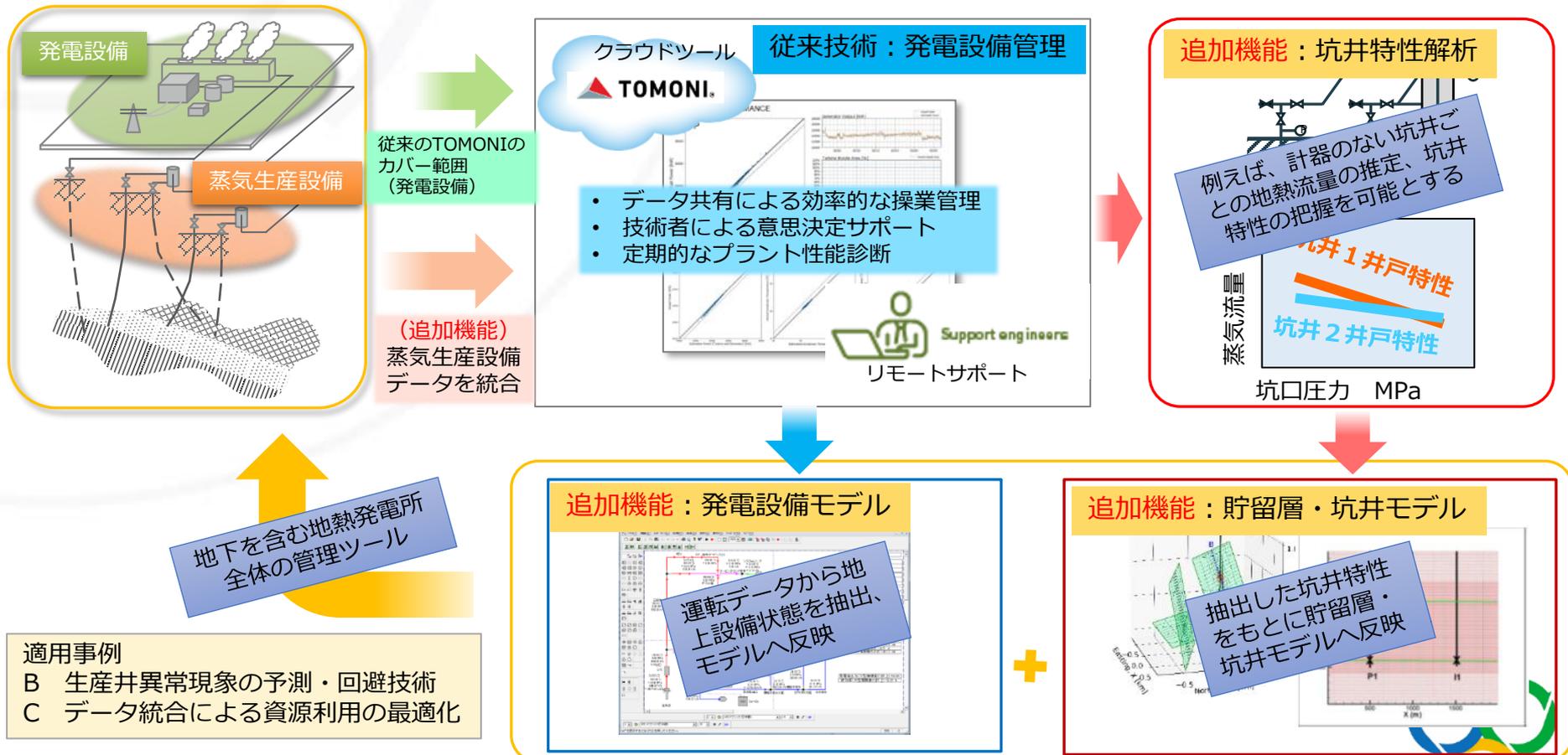




# A データ統合による最適運転管理手法の構築

## 【本研究開発での実施内容】

地熱発電所（発電設備）の管理ツールとして既の実績がある“TOMONI®”をベースとし、“坑井等の発電設備”および“貯留層・坑井”を追加し、**地上と地下をシームレスに管理するための地熱発電所の統合管理システムを開発**。開発は完了済み。

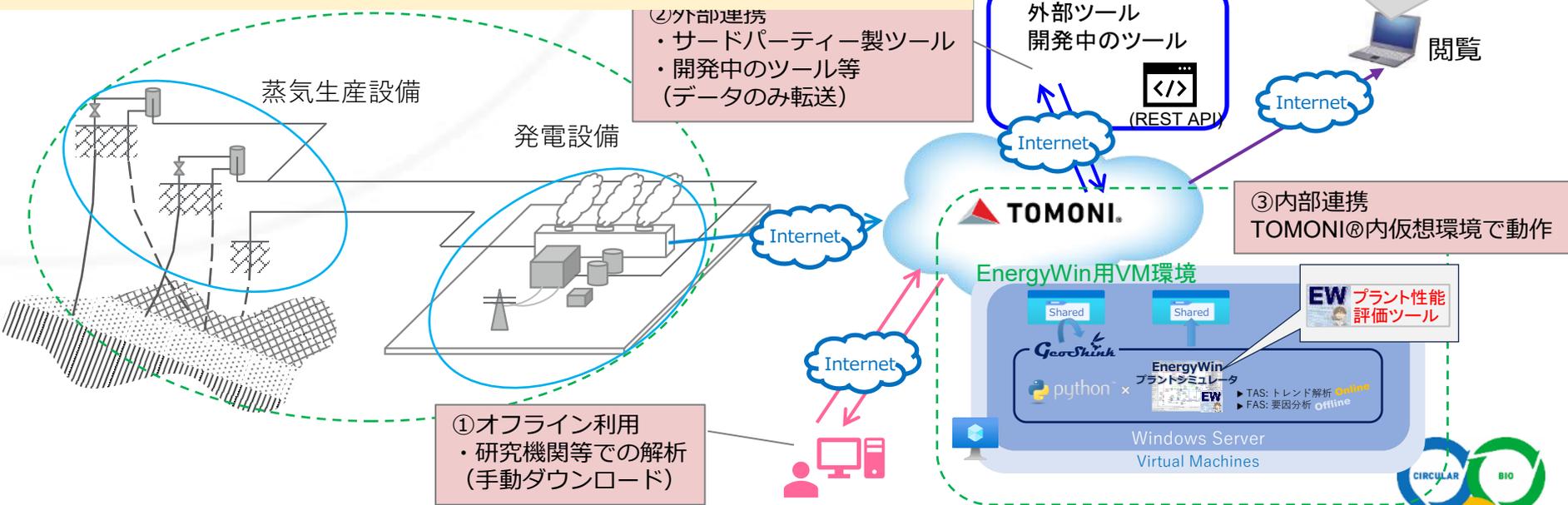
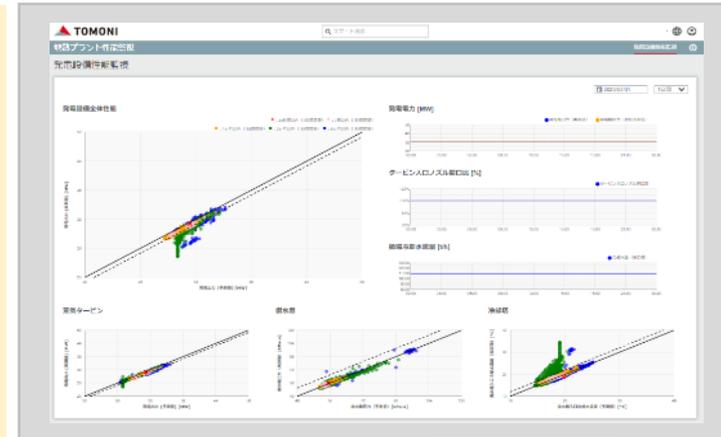


# A データ統合による最適運転管理手法の構築

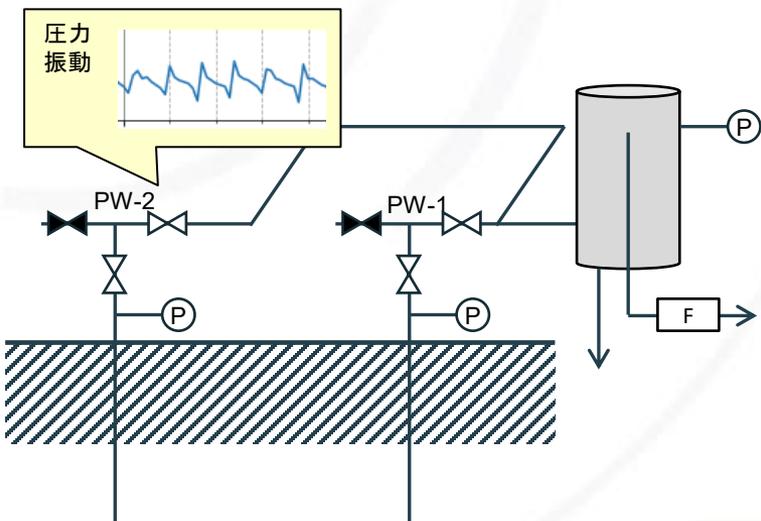


## 【開発成果】

- 地熱発電プラントはベースロード運転が基本であるため、データのリアルタイム性よりも長期的な性能管理が重要である。
- 本研究では、TOMONI@のデータを間欠的に転送する機能を活用し、地熱発電所からデータを手動で送信することによりオフラインでデータ登録、表示するシステムを構築した。
- データの利活用方法として、①オフライン利用、②外部連携、③内部連携のインターフェースを想定。
- 具体例として、以下のインターフェースを実装した。
  - ②外部連携：REST APIによるデータ送受信
  - ③内部連携：TOMONI@内のVM環境において既存ツールEnergyWinを動作

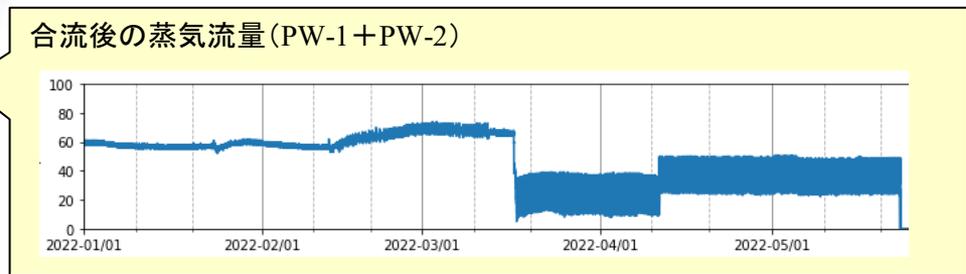


# A データ統合による最適運転管理手法の構築



**蒸気設備管理上の問題点**

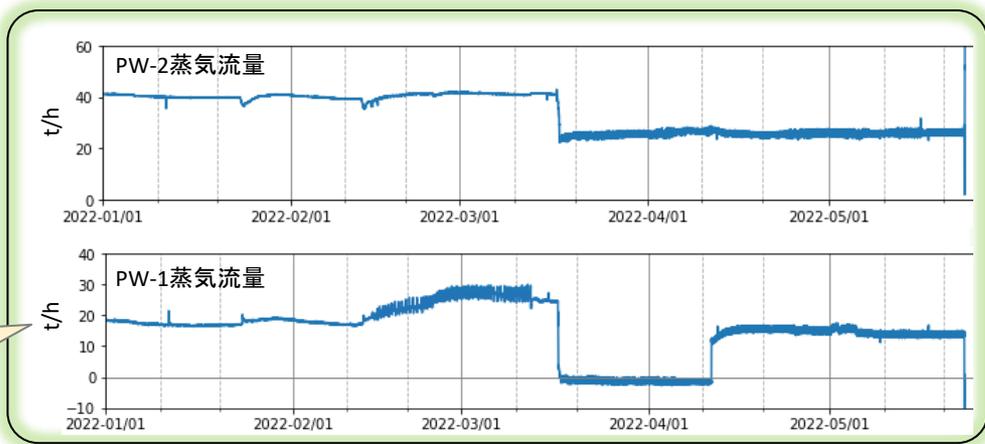
- 複数坑井が単一セパレータに接続されている場合、個別の生産量がわからない
- 圧力振動を有する坑井の場合、流量に幅があり正確な生産量を把握しづらい



- 打ち手**
- 各坑口圧力、およびセパレータ圧力をもとに個別の蒸気流量を推定
  - FFT処理により振動成分を除去



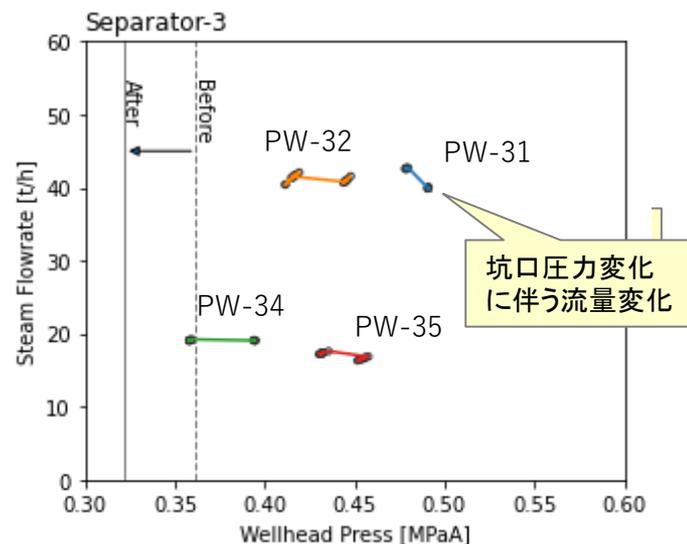
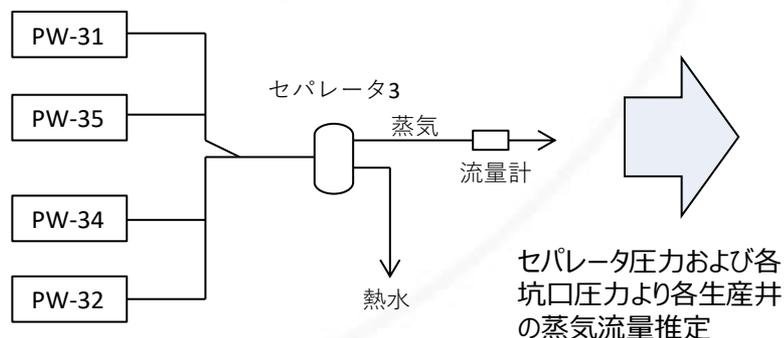
これまで不可能であった、坑井ごとの蒸気流量を表示できるようになった。



# A データ統合による最適運転管理手法の構築

- ひとつのセパレータに4つの生産井が接続しているケースについて、各坑井の生産量推定を行った。
- 期間中にセパレータ圧力が変動するイベントがあり、その際の変動から坑井ごとの圧力流量特性を推定した。その結果、最も感度が高いのはPW-31であり、10kPa減あたり2.5t/h増加する。
- 坑口圧力を減圧することにより生産量が增大することは知られているが、今回開発した技術により坑井ごとの感度がわかるようになった。

## 生産基地生産設備構成



	推定蒸気流量	坑井特性（傾き）
PW-31	40～44 t/h程度	（10kPa減あたり）2.5t/h増
PW-32	40～50 t/h程度	（10kPa減あたり）0.3t/h増
PW-34	19～24 t/h程度	（10kPa減あたり）0.05t/h増
PW-35	12～18 t/h程度	（10kPa減あたり）0.32t/h増

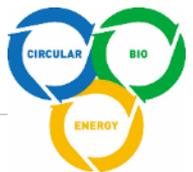
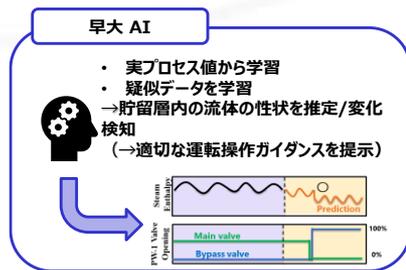
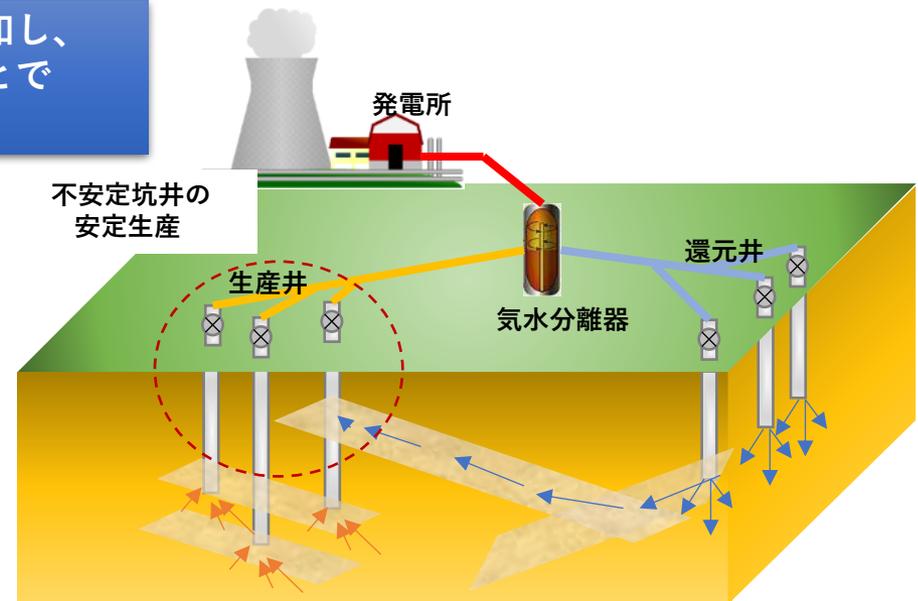
# B 生産井異常の予測・回避技術の開発

早稲田大学・九州大学

- 物理シミュレーションによる坑井不安定要因の把握（恒久的対策の検討）
- AIを用いた制御システムの開発（運転中における操作ガイダンスの提供）

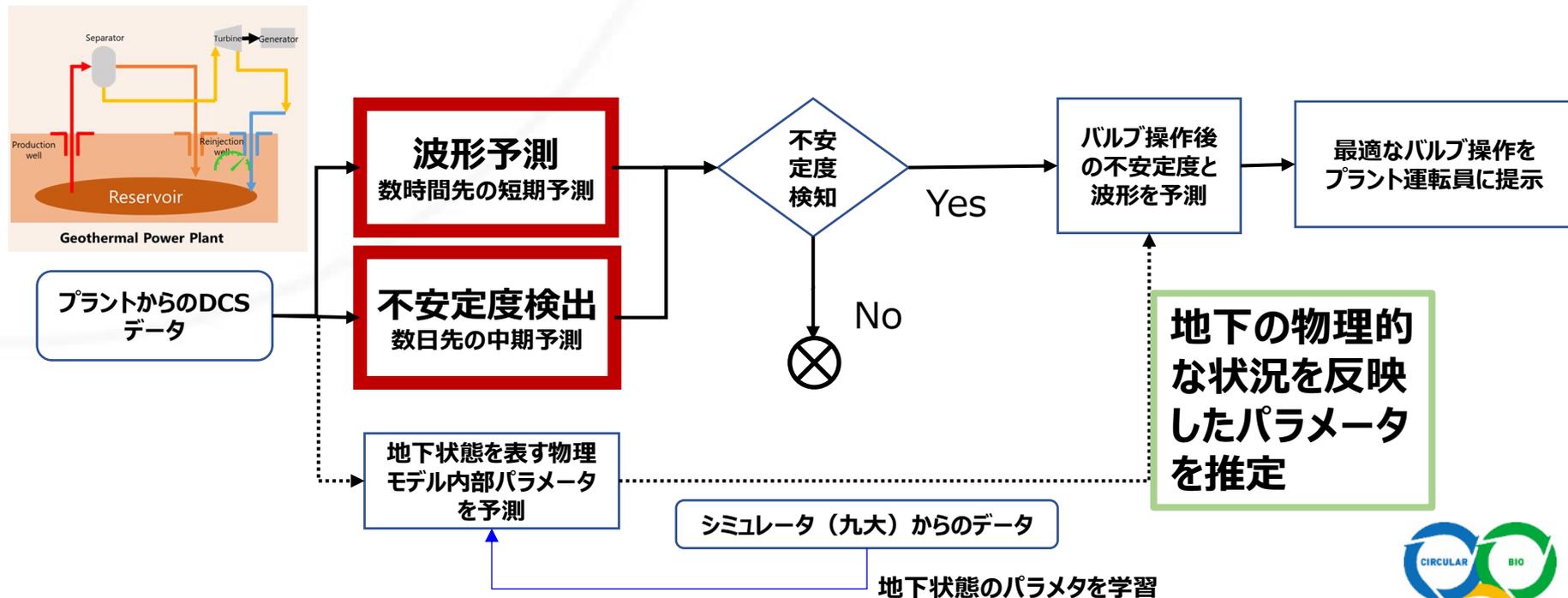
不安定坑井、例えば、坑口圧力急落事象の予兆を検知し、急落防止の弁操作を提案するシステムを構築することで設備利用率の維持・向上を目指す。

- 不安定現象の実プロセスデータに基づくAIによる学習。
- 検層等により最適化された地熱貯留層と坑井シミュレーションに基づくフィードバック。
- AIによるバルブ操作ガイダンスにより、ベテランでなくとも最適な坑井運用を可能にする。



# B 生産井異常の予測・回避技術の開発

- 異常予兆を不安定度として検出し、**制御系を構築可能**：特願2025- 65346
- 2025年7月の国際会議で成果公開予定。
- シミュレータ（九大開発）の出力波形特徴から、**物理的なパラメータ群が推定可能であること**の目処をつけた。
- 2025年9月の国際会議で速報予定



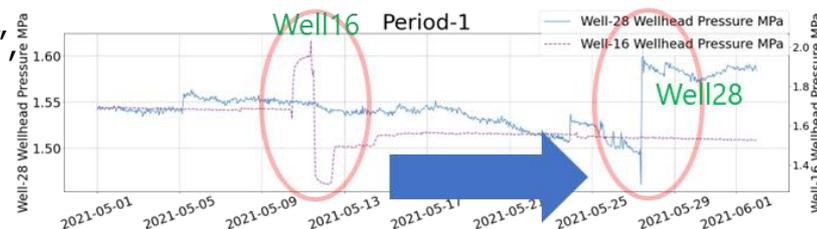
# B 生産井異常の予測・回避技術の開発



**【実施内容】** 坑口圧力減衰の要因の一つである、**生産井同士の干渉の有無を因果分析する**データ駆動型の手法を国際会議(ECOS2024)で報告した。

因果分析手法；坑口圧力予測モデルを説明性能が高い深層学習のフレームワークで構築し、学習後のモデルを分析することで、現場のエキスパートの意見と同様の結果を得られたことから、干渉する生産井をデータから抽出可能との見込みを得た [1]

[1] Kosuke Mori, et al, "Interference analysis between production wells in geothermal power plant using deep learning", proc .ECOS.2024/07/04



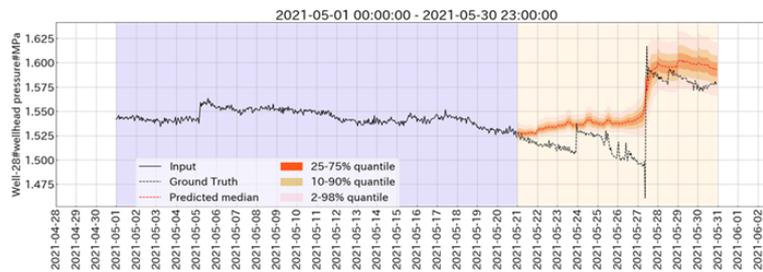
坑口圧力予測モデルの構築

説明性能が高い  
深層学習モデル  
(TFT)を採用

Attention分析による予測に影響を与えるパラメータの特定

現場ヒアリング（エキスパートの知見）と比較

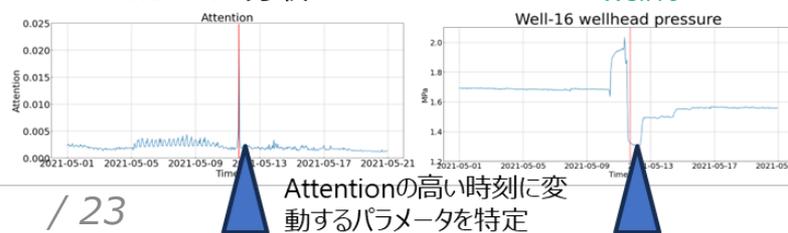
Well-28坑口圧力予測モデルの構築



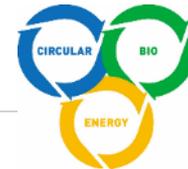
干渉を受ける  
生産井の坑口  
圧力を予測

Attentionが高い  
時刻に大きな変  
動をする入力パラ  
メータを特定

Attention分析



Attentionの高い時刻に変動するパラメータを特定



# B 生産井異常の予測・回避技術の開発 (恒久的対策の検討)

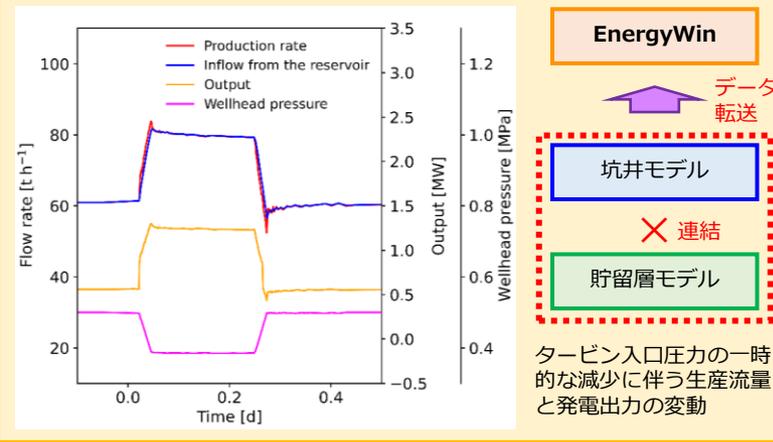


## 開発中シミュレータの位置付け

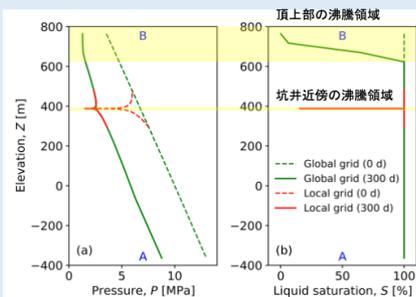
	坑井試験	開発中	ブロックモデル
モデルのイメージ			
スケール	～数日	～数十年	～数万年
複雑さ・構築コスト	小 (～数ヶ月)	中 (～1年)	大 (数年～)

操業や掘削の現場で直面する貯留層～坑井の挙動の問題に特化し、現場の課題解決に有効な示唆を迅速に与えるモデリング/シミュレーション手法を確立したい。

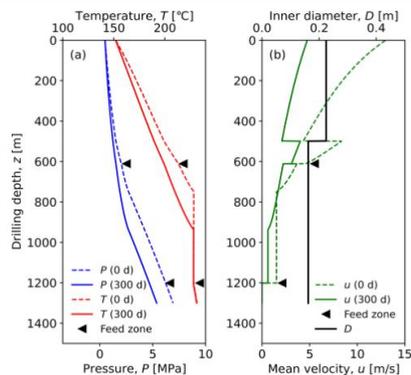
### 応用例2：発電設備シミュレータ (EnergyWin) と連携し、貯留層・坑井の挙動に応じた発電出力の変動を再現



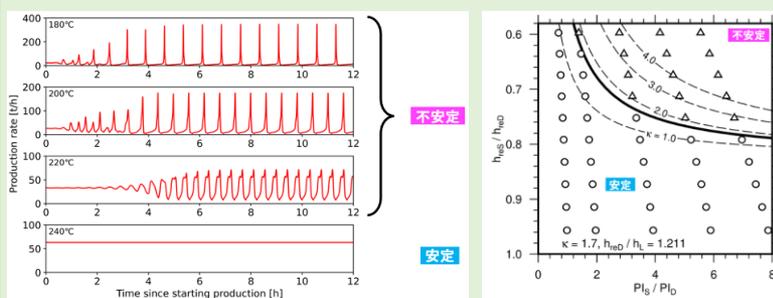
### 応用例1：貯留層と坑井をシームレスに連結し、貯留層内と坑井内の測定可能な値を直接・連続的に再現



貯留層断裂内の圧力・液飽和率の分布 (左) と、その断裂を通過する坑井内の圧力・温度・流速・内径の分布 (右)



### 応用例3：周期的変動など、坑井内の過渡的な流動現象を再現



生産井の噴出流量の周期的変動 (左) と、条件毎に流動の安定性を整理したマッピング結果 (右)



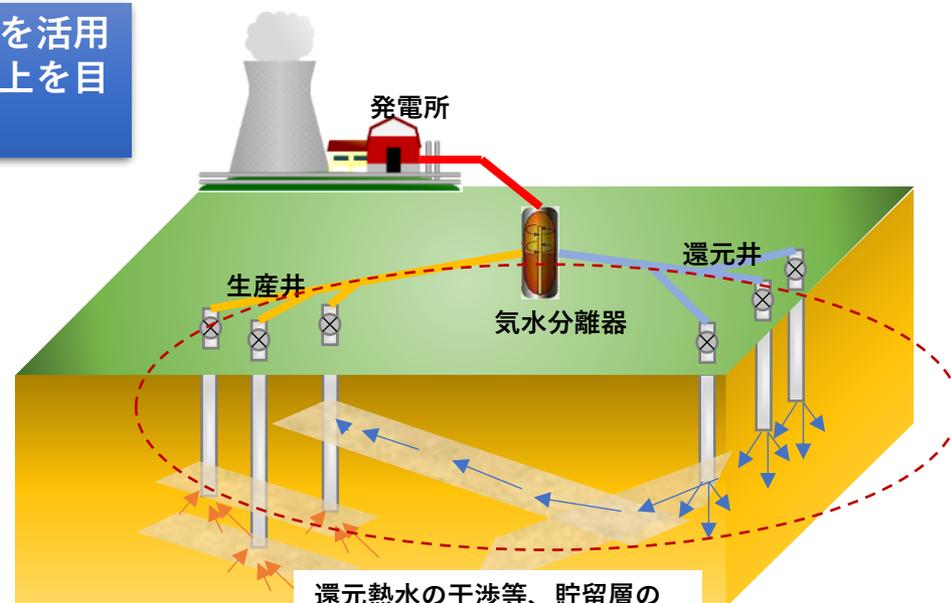
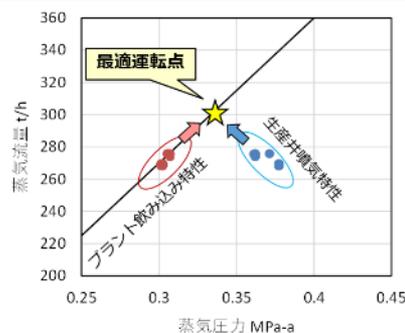
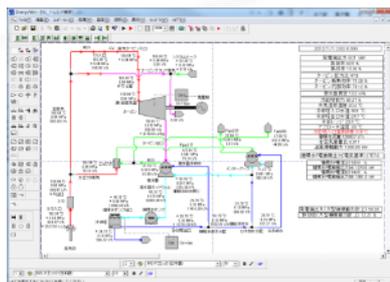
# C データ統合による資源利用の最適化

電力中央研究所・九州大学・地熱技術開発

- 地上設備シミュレーションモデルでの解析
- 貯留層・坑井のAIおよびシミュレーション解析

地下を含めた地熱発電所全体のシミュレーションをAIを活用することで可能にすることで、設備利用率の維持・向上を目指す。

- 定期点検においてどの部位を修繕すべきか提案が可能になる。
- 還元の影響やタービン圧力の減少などによる将来的な貯留層の状態を、AIを用いた機械学習により得ることで、貯留層に対して最適な発電（圧力）条件をで運用することが可能になる。



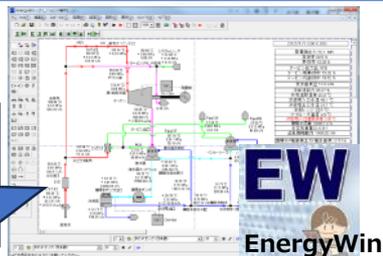
還元熱水の干渉等、貯留層の将来的変動予測に基づくオペレーション

# C データ統合による資源利用の最適化

## 【本研究開発での実施内容】

生産井の減衰や発電設備の劣化により設計点に対して最適な運転状態ではなくなっている発電所に対する利用率向上策として、**発電設備および貯留層・坑井に対して最適な運用方法を導くためのシステムを開発。**本技術開発では、**地上設備を改造すること無し**に利用率の向上を目指す。

## 【地上設備（プラント飲み込み特性）の最適化】 発電設備シミュレーションモデルでの解析



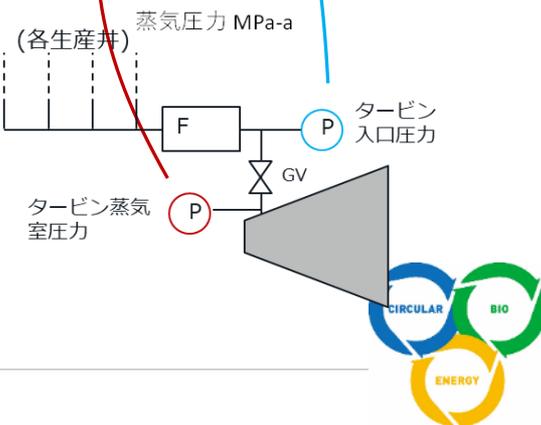
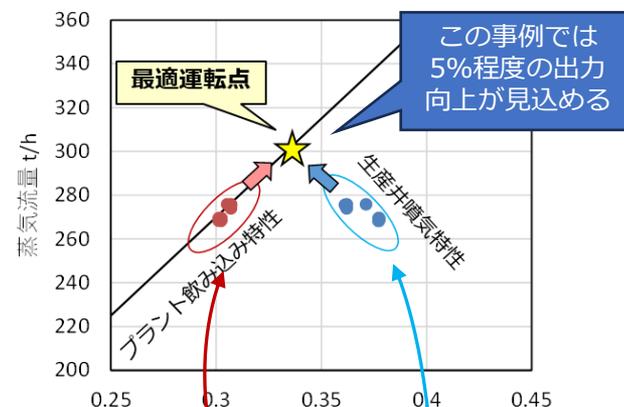
【2022年度】  
蒸気輸送設備の  
シミュレーション  
を可能とした

【開発成果】  
両技術の適用による最適運  
転点提供による利用率向上

## 【貯留層・坑井（将来の噴気特性）の最適化】 AIによる将来予測に基づき坑井の噴気特性を推定

課題	AIによる将来予測に基づく噴気特性予測	坑井条件変更時のプラントの過渡的な状態予測
開発内容	<ul style="list-style-type: none"> <li>貯留層シミュレーションの最適パラメータを得るためのAIを構築。</li> <li>現行では貯留層シミュレータとして、TOUGH2を利用。</li> </ul>	<p>研究成果Bで開発した貯留層・坑井連成シミュレータと、既開発のEnergyWinを連結したシミュレータの開発可能性・有用性を検証。 ※ 本事業では検証段階までとする</p>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>AI技術により専門技術者でなくとも貯留層シミュレーションを実施可能にする。</li> <li>最適な貯留層モデルを元に、将来予測ならびに坑井特性（圧力に対する生産量）を得る。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>貯留層と坑井のシームレスな非定常連成シミュレーションが可能。</li> <li>地下設備と地上設備の双方向での境界条件の授受が可能。</li> <li>将来的に、左記の貯留層シミュレータの代替も期待できる。</li> </ul>

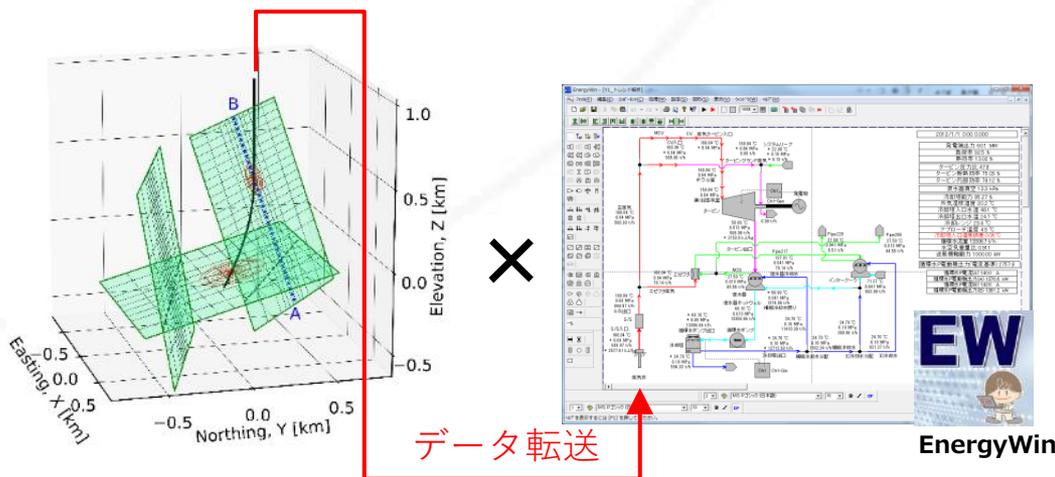
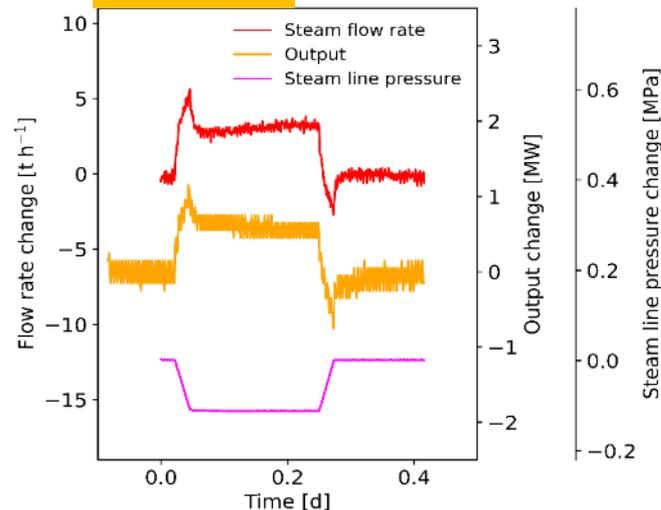
## 発電設備と蒸気生産設備の運用方法の最適化により出力の向上を狙う



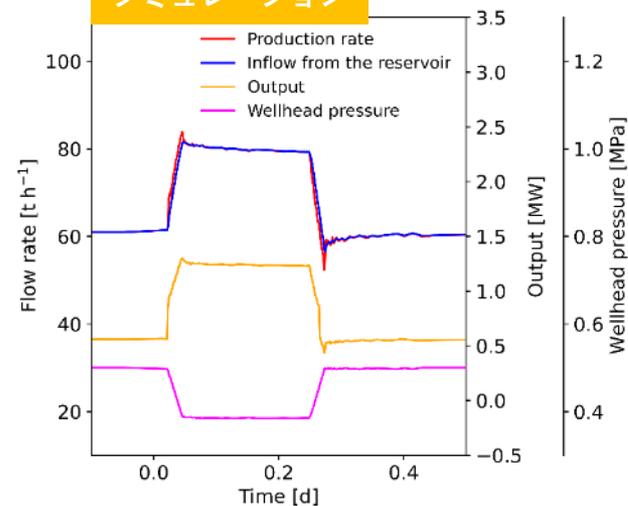
# C データ統合による資源利用の最適化 (坑井条件変更時のプラントの過渡的な状態予測)

- 開発中の貯留層・坑井シミュレータと、発電設備シミュレータ (EnergyWin) の関係方法を検討・実装。
- 事業者からデータ提供を受けたタービン入口圧力の減圧運転試験を念頭に、貯留層・坑井・発電設備の連結シミュレーションを実施。
- 坑井内の非定常シミュレーションの寄与により、出力応答を定性的に再現できることを確認。

実測データ



シミュレーション



貯留層・坑井・発電設備連結シミュレーション

タービン入口圧力の減圧運転試験の実測データ(上)と、シミュレーション例(下)



# C データ統合による資源利用の最適化 AIによる将来予測に基づき坑井の噴気特性を推定



**Tough2** 貯留層パラメータを振ることにより、複数条件の貯留層シミュレーションを実施。

**GFlow** Tough2の試算結果をInputとして坑井（生産井）の坑口特性を計算し、それらの結果を教師データとした機械学習を行う。

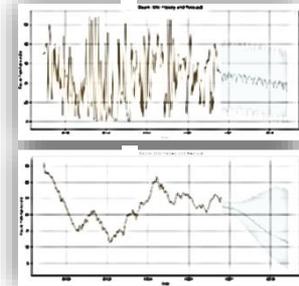
**Ensamble法(ES-MDA)の適用**  
坑井特性と合致する貯留層パラメータの最適値の導出

**最適パラメータによる将来予測**  
最適パラメータに基づく将来予測

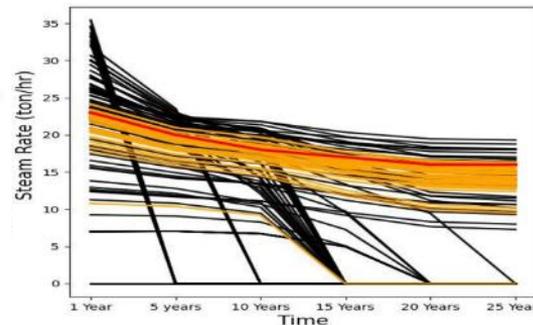
**将来の坑口特性曲線導出**  
将来（例えば2年後の坑口圧力に対する流量の予想）を算出

**今後の予定**  
将来予測結果のpython化(EnergyWinへの引き渡し)  
他の生産井への拡張

**生データのクレンジング**  
データからの人為的な雑音の除去  
(Prophetによる処理)

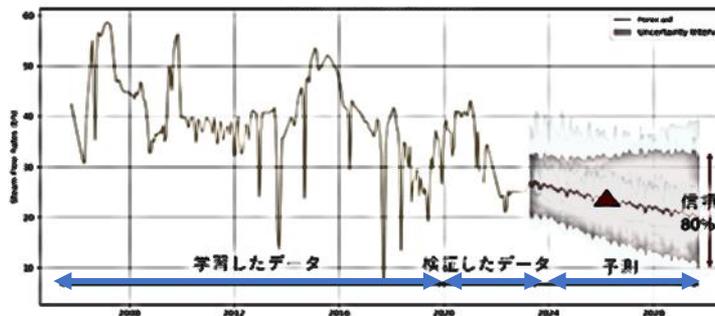


上) 生データ  
下) クレンジング後



最もよく一致する坑口生産特性曲線となるモデルを選択

Ensamble法(ES-MDA)の適用

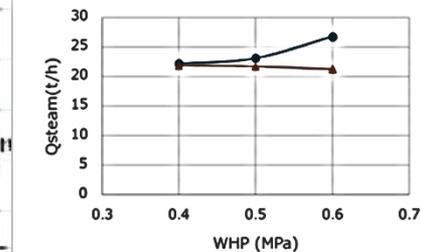


学習データ

検証データ

予測

2026年の坑口特性予測結果



既設発電所のデータにて検証中

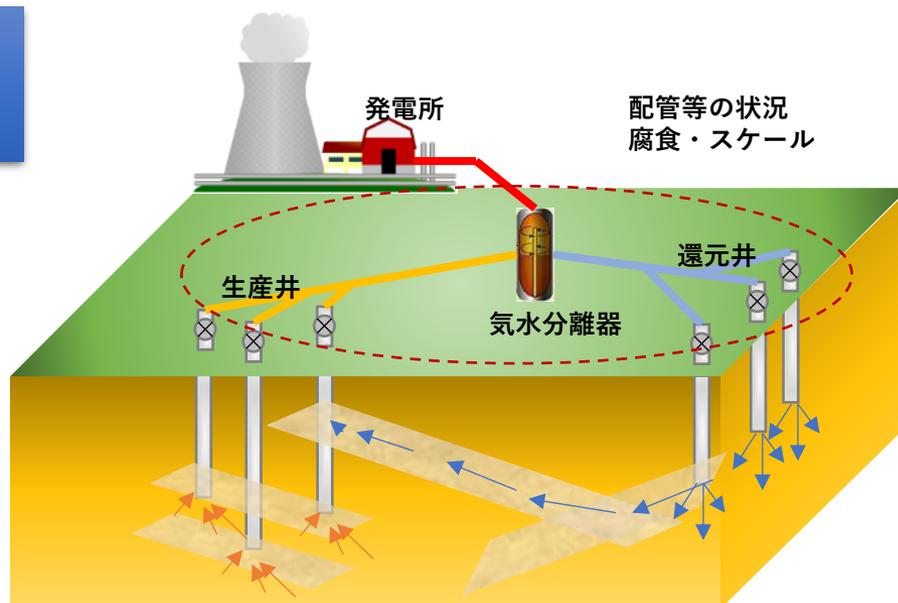
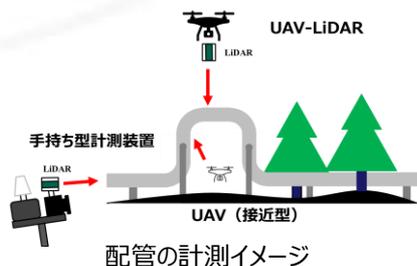


早稲田大学・地熱技術開発

- ・ ドローン技術による設備健全性評価技術開発
- ・ 超音波を用いたエッジデバイス対応型配管厚計測

地表設備状況の見える化による状況把握と将来予測によるリスク回避により設備利用率の維持・向上を目指す。

- 定期的な計測データによる定量的な評価の実現。
- メンテナンス計画へのフィードバック。
- 腐食・スケールシミュレーションによるリスク箇所の特定・事前対応。
- トラブル顕在化前の対応により設備利用率の維持・向上に貢献。



# D 非在来型データによる潜在不具合の解消



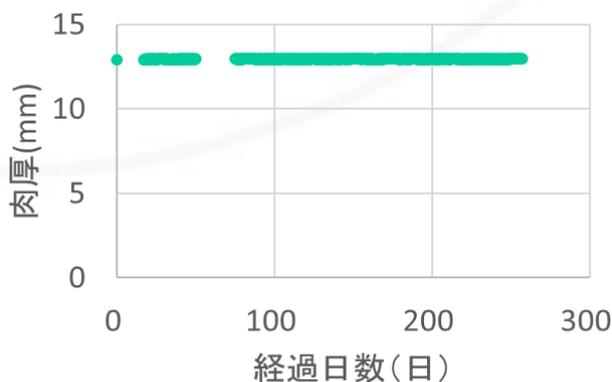
## 【本研究開発での実施内容】

蒸気生産設備において設備の健全性や腐食等によるトラブルの予測・回避は、現状は状況の把握が難しく発生すると利用率に対して大きな影響を与える。本研究開発では、**ドローン技術と連続的な配管厚測定技術により、状態把握を容易にし、致命的なトラブルの回避**により、大幅な利用率低下の回避を目指す。

## 【開発成果】

- 超音波による配管厚の連続測定について実証試験を実施。
- 冬季を含め、**通年での連続データ取得に成功し、減肉傾向を捉えることができた**。本データにより、配管交換時期を把握することででき、**配管の減肉による致命的なトラブルを回避できる見込みを得た**。

計測データ (2023/9/23~2024/6/6)



減肉速度の把握による交換時期の可視化 (トラブルの回避)



上空計測用UAV

3次元計測システムの処理

(1)3次元点群構築  
(形状・色・温度情報)

(2)複数センシングシステムのデータ統合

(3)状態変化を検知



接近計測用UAV



上空計測

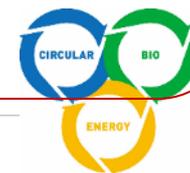


接近計測

凹凸検出の例  
異常箇所

【開発成果】配管の3次元点群を例に、**3種のセンシングシステムを開発し、データ統合する仕組みを構築することで、地上設備の健全性を把握できるシステムを開発した。**

J.Akiyama, Y.Zong, N.Shinada, T.Suzuki, Y.Amano, "High-Resolution Point Cloud Registration Method for Three-Dimensional Piping Measurements", Journal of Robotics and Mechatronics Vol.35 No.6, 2023, 2023.11.26



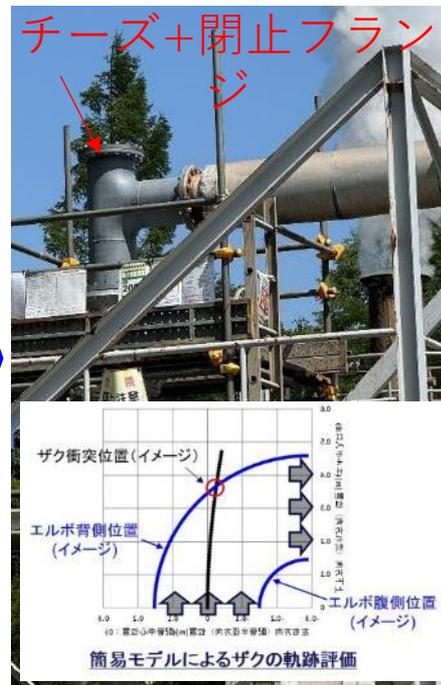
# D 非在来型データによる潜在不具合の解消 超音波を用いたエッジデバイス対応型配管厚計測



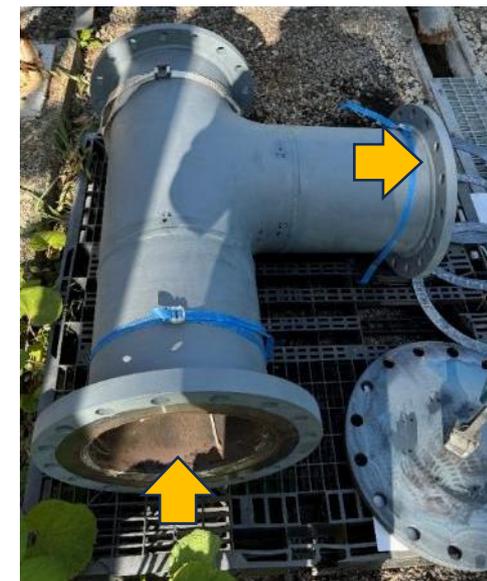
- ✓ 発電所での内視において、エルボ管内部に深さ6mm以上の減肉を確認
- ✓ 2024年6月以降、減肉対策の試みとして、エルボ配管をフランジ配管に変更。
- ✓ 変更後はブラインドフランジの減肉状況を把握するため、配管厚の連続計測を実施。
- ✓ 設置4か月後に、ブラインドフランジの開放点検を実施し、腐食状況を確認。



測定位置	穴深さ [mm]
ELB7	6.2



気水分離器上流側の配管レイアウトの変更状況



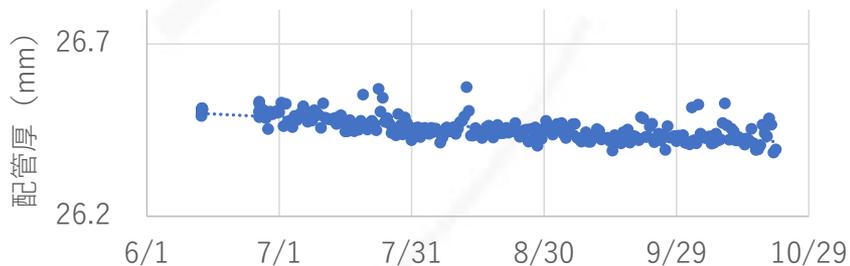
設置された坑口チーズ (T継手)

# D 非在来型データによる潜在不具合の解消 超音波を用いたエッジデバイス対応型配管厚計測

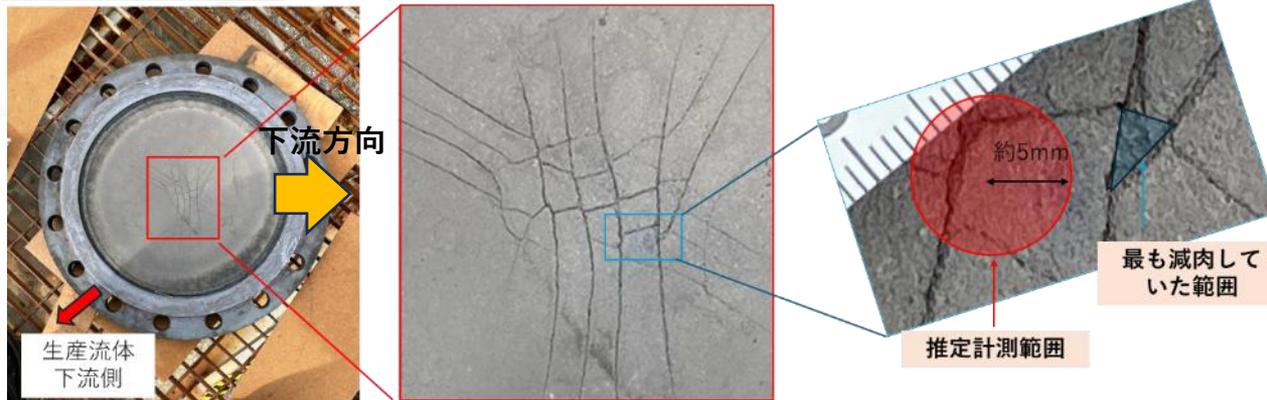


- ✓ 配管厚の連続計測の結果、年間0.3mm程度の減肉であり問題ないレベルであることを確認。
- ✓ 設置4か月後に実施したブラインドフランジの開放点検において、溶射部にひび割れのようなき裂が確認されたが、母材までは到達していないことを確認。

## ブラインドフランジの配管厚計測結果 (2024/6/26~2024/10/21)



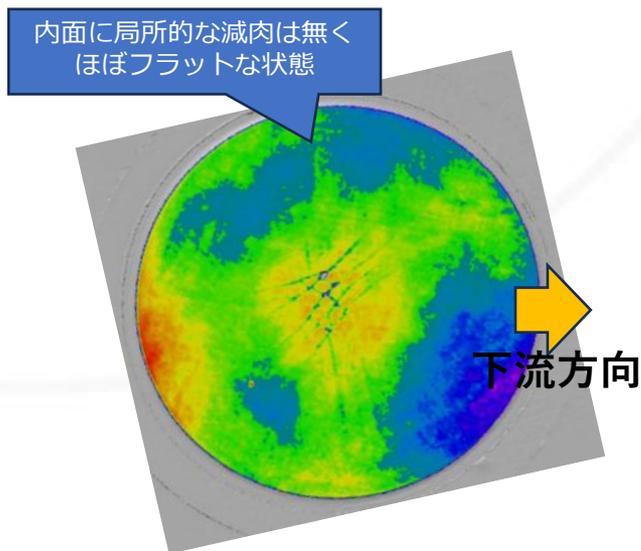
## ブラインドフランジ開放点検結果



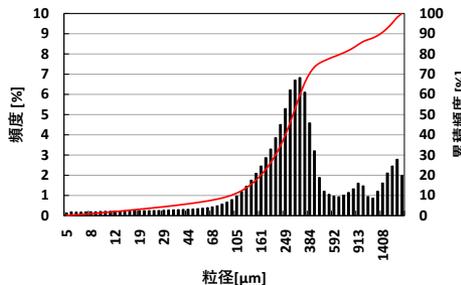
# D 非在来型データによる潜在不具合の解消 超音波を用いたエッジデバイス対応型配管厚計測



- ✓ UTでの定点測定では一部肉厚が減少している箇所があったが、目視を含めて全体的に減肉はあまり進行していないと判断
- ✓ 固体粒子による減肉率は、保守的に見積もっても2.0mm/年程度と試算される
- ✓ 母材が約25mm、溶射面が約2.5mmあり、かつ、蒸気圧は0.15MPa程度で耐圧上必要な厚さが大きくないため、**次回の定検（2025/6）までは問題はない**と考えられる
- ✓ 溶射面の剥落や、母材露出時の流れ加速型腐食の重畳も考えられるため、溶射部の割れの原因及び対策、フランジの材質変更（炭素鋼⇒低合金鋼・SUS）及び耐圧の変更なども検討を進める

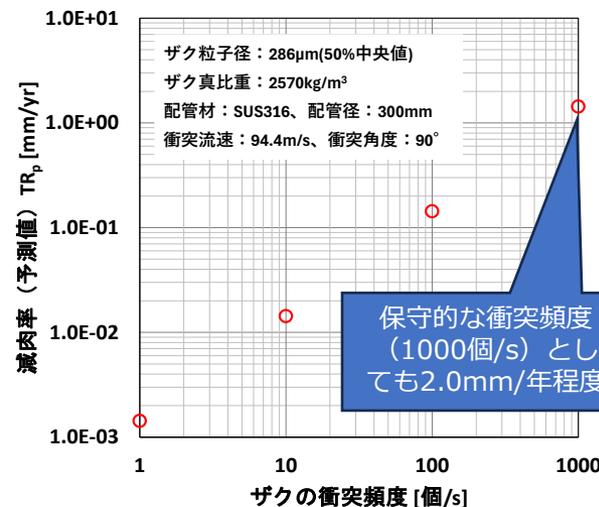


フランジ内面の3次元形状測定結果



固体粒子（ザク）の外観  
(上) とその粒径分布 (下)

※Vieira, R., et al., "Experimental and computational study of erosion in elbows due to sand particles in air flow", Powder Technology, 288, pp. 339-353 (2016)



フランジ部へのザク衝突による減肉率の予測値

# D 非在来型データによる潜在不具合の解消 超音波を用いたエッジデバイス対応型配管厚計測



- ✓ 溶射部の亀裂箇所を含め配管厚計測器を追加で3台設置し、10月23日から連続計測を開始。
- ✓ 引き続き配管厚の連続計測による状態把握を進める予定。

## 計測計の設置状況



○ これまでの計測ポイント

○ 再設置ポイント①  
最も減肉していたポイント  
肉厚：26.45-26.50mm程度

○ 再設置ポイント②  
今後き裂が生じる可能性があるポイント  
肉厚：26.90-26.95mm程度

○ 再設置ポイント③  
今後き裂が発展する可能性があるポイント  
肉厚：26.85-26.90mm程度

## 現地測定スケジュール

IoTセンサ技術の研究開発	FY2021				FY2022				FY2023				(FY2024)				(FY2025)			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
配管厚測定					機器調達								測定試験				(測定試験)			

# 利用率向上目標への成果と今後の方針



A データ統合による最適運転管理手法の構築	課題と今後の見通し	実用化の見通し
<p>利用率向上に対する成果：</p> <ul style="list-style-type: none"><li>✓ 集合セパレータ方式により把握ができない生産井毎の蒸気流量を試算する技術を開発。</li><li>✓ <u>蒸気量が減衰している坑井を特定することが可能となり、対応が可能となる。</u></li></ul>	<p>A 既設地熱発電所における利用率向上の方向性について整理の上、提示を検討。</p>	<p>① TOMONI®システムモニタリングデータによる健全性評価および各生産井の蒸気流量値の解析、ならびに、EnergyWinによる熱効率解析、機器特性の詳細解析を可能にしたことにより各機器の性能維持による設備利用率維持・向上に貢献できる見通しを得た。</p>
<p><b>B 生産井異常の予測・回避技術の開発</b></p>	<p>B 坑井の不安定状態回避について既設地熱発電所を対象に検証を進める。</p>	<p>② 不安定坑井に対して実プロセスデータに基づくAIによる学習および検層等により最適化された地熱貯留層と坑井シミュレーションに基づく解釈が可能となるとともに、AIによるバルブ操作ガイダンスにより、最適な坑井運用を可能にできる見通しを得た。</p>
<p>利用率向上に対する成果：</p> <ul style="list-style-type: none"><li>✓ <u>不安定坑井における要因の特定が可能となり、対策立案への情報提供が可能となった。</u></li><li>✓ <u>不安定を回避するバルブ操作方法のガイダンス提供を可能とした。</u></li></ul>	<p>A・C 減圧運転による効果について既設地熱発電所を対象とした実証を進める。</p>	<p>③ 非在来型データ取得の実証試験に基づき、トラブル顕在化前の対応により設備利用率の維持・向上に貢献できる見通しを得た。</p>
<p><b>C データ統合による資源利用の最適化</b></p>	<p>A・C 国内における坑口圧力低下により併入できない坑井について調査を実施し、利用率向上効果について定量化を試みる予定。</p>	
<p>利用率向上に対する成果：</p> <ul style="list-style-type: none"><li>✓ <u>タービン入口圧力の減圧運転試験において、最適運転条件の提供を可能とした。</u></li><li>✓ <u>貯留層シミュレーションのパラメータ決定をAIで実施する手法を開発し、専門家でなくとも生産状況の将来予測を目指す。</u></li></ul>	<p>D 非在来型データについて、既設地熱発電所での検証を継続予定。</p>	
<p><b>D 非在来型データによる潜在不具合の解消</b></p>	<p>以上の技術を総合し、15%程度の利用率向上効果を示す。</p>	
<p>利用率向上に対する成果：</p> <ul style="list-style-type: none"><li>✓ <u>ドローン技術ならびに配管厚の連続測定技術により、地上設備の健全性を把握し、利用率の大幅な低下を回避することを可能とした。</u></li></ul>		