

NEDOエネルギー・地球環境分野成果報告会2026
プログラムNo. B1-2-14

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：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. 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

要素技術として、地熱発電所の管理ツールであるTOMONIを基盤に外部ツールとの連携を行うことで、地上と地下を統合管理するシステムを開発した。AIによる短期予測モデルの開発により、バルブ操作ガイダンスシステムを実現した。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。ドローン技術・配管厚測定技術により、配管の3Dデータ取得と統合システム等を構築し、配管健全性評価や交換時期の把握を可能にした。これらの技術の適用により、澄川地熱発電所において2019年度比にて主蒸気圧力減圧操作により約12.5%、AIモデル適用による不安定坑井のオペレーション安定化により約6%の利用率向上が期待され、目標である15%の利用率改善を達成できる見通しを得た。



研究方針（課題に対する対策）

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

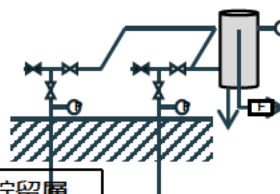
発電設備

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】

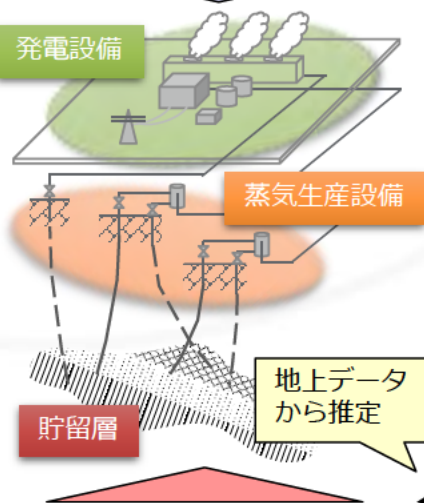
発電設備

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%+α（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

総合して15%程度の利用率改善を目指す

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



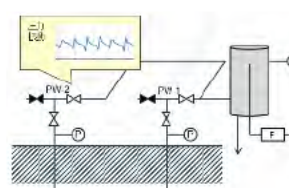
開発技術の適用による利用率向上に対する効果 【当初目標に対する成果】



■プロジェクトの目標

国内地熱発電所を対象とし、2019年度基準で15%の利用率向上を示す。

⇒ 下記3項目の合計にて15%の向上を見込む。

適用する 開発技術	【要素技術Aの適用】		【要素技術Bの適用】	
	◆ 主蒸気圧力減圧操作 データ統合技術の応用により、各生産井の蒸気流量の把握可能となり、減圧による効果が算定可能になった。TOMONIをベースとし、EnergyWinの解析技術を組み込んだ新しい管理技術により、プラント状況を把握しつつ調整管理を可能とする（MHI・電中研）。 ◆ 絞り損失の改善 主蒸気圧力低下とそれに伴う蒸気量増加によりG V開度80%程度まで改善し、絞り損失を0にできる可能性を示した（MHI）。 		◆ 生産井の生産量の振動・生産停止による利用率低下を避けるため非定常坑井シミュレータの開発（九大）および短期予測と中期予測モデルを組み合わせたバルブ操作ガイダンスシステムを構築（早大）。 	
利用率向上に対する効果	◆ 設備改変を伴わない場合 個別の坑井の感度解析により寄与度の大きい坑井を特定し、その設備の圧力損失を低減させることにより、元の圧力のまま蒸気流量をさせ出力が増加することで年間利用率7.7%程度の増加を示した。	◆ 設備改変を伴う場合 坑井の圧力損失による影響に加えて、圧力、流量に合わせてタービン入口ノズル面積を改造、絞り損失を低減することにより更に4.7%の出力増が可能となり、併せて年間利用率12.5%程度の増加を示した。	◆ 生産量の変動・停止などが年間30回程度発生しており、本技術の適用により生産停止が無く、その間発電が続けられた場合に年間利用率6.0%程度の増加が見込める。	
対象となる事例	◆ 対象となる地熱発電所 ・主に集合セパレータ利用の発電所 ・建設当時から生産量が大きく減少している地熱発電所 ・蒸気流量が大幅に変わる場合には運用変更時に注意が必要		◆ 対象となる地熱発電所 ・マルチフィードポイントを持つ坑井などで生産量の経時的な変動・生産停止が生じ、発電量へ影響を与えている地熱発電所	

開発技術の適用による利用率向上に対する効果

【利用率向上への効果が期待される成果】



適用する
開発技術

【要素技術Cの適用】

- ◆ TOMONIとEnergyWinとの連携システムを用いて、エゼクタ運用変更の事前評価を実施。エゼクタ駆動条件、および、非凝縮性ガスの変動範囲内においてエゼクタ駆動蒸気を減量することにより、タービン作動蒸気量が増加し、発電出力が増大する。



【要素技術Dの適用】

- ◆ ドローン技術による設備健全性評価技術開発（早大）
- ◆ 超音波を用いたエッジデバイス対応型配管厚計測（GERD）
- ◆ ザク等により著しい減肉が発生しているエルボ管を坑口チーズに変更することにより、固体粒子エロージョンが発生する蒸気配管設備の長寿命化が期待できる。

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、発生した場合、利用率に与える影響が大きくなる。

本技術の適用により、致命的なトラブルを回避することで、大幅な利用率の低下を回避する。



利用率向上に対する効果

- ◆ 上の岱地熱発電所において、エゼクタ駆動圧力の変更により年間利用率0.3%程度の増加が見込める。

- ◆ 配管トラブル等が発生すると月単位での対応が必要なケースもある。突発的な利用率低下を避けることで、全体の利用率向上を担保する技術と位置付ける。
- ◆ 大沼地熱発電所において、エルボ管を年1回交換していた運用を、坑口チーズを隔年1回交換する運用に変更すると年間50万円程度の資材コスト削減が見込める。

対象となる事例

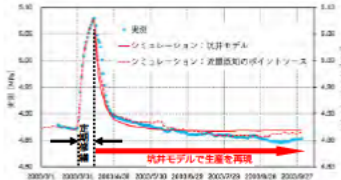
- ◆ 対象となる地熱発電所
 - ・ 生産井の減衰や発電設備の劣化により設計点に対して最適な運転状態ではなくなっている発電所に対する利用

- ◆ 対象となる地熱発電所
 - ・ 全地熱発電所が対象
 - ・ 特に酸性流体などを生産する発電所、および冬季の積雪量が多い地熱発電所などでの操業リスクを低減する。
 - ・ 生産井や蒸気配管の固体粒子エロージョンが発生している発電所に対する利用

開発技術の適用による利用率向上に対する効果

【利用率向上への効果が期待される成果】

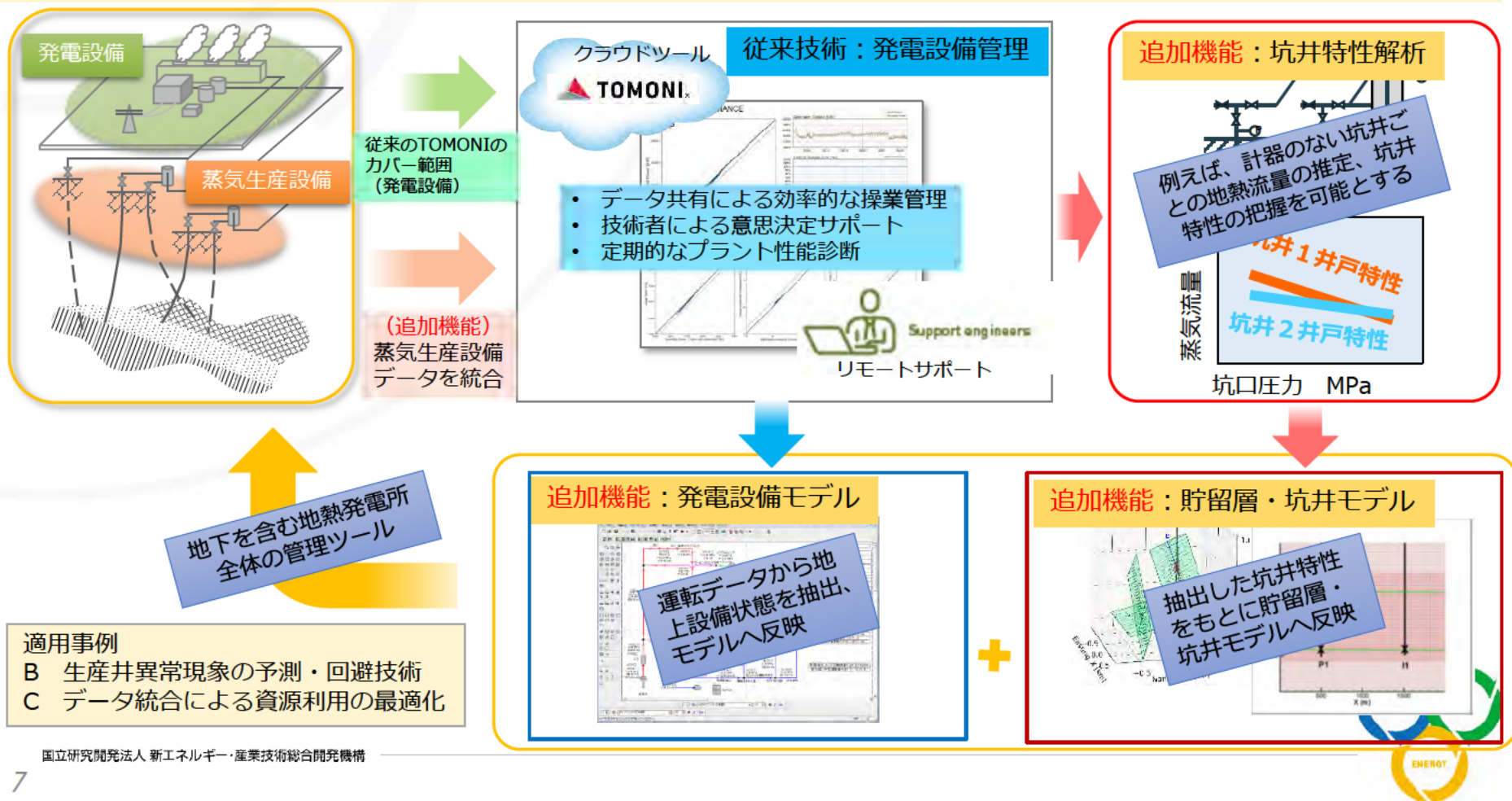


適用する 開発技術	【要素技術Aの適用】 ◆ 圧力損失を考慮した坑井毎の配管径の最適化 坑井特性を評価した上で、それに合った配管径に最適化することで、圧力損失を最小化させ、発電量を向上させるアプローチにも活用が可能 ◆ TOMONIとEnergyWinとの連携システムを用いて、プラント性能を逐次解析・分析。冷却塔の性能管理手法について、従来の冷却塔出口温度監視から、<u>冷却塔能力監視へアップグレードが可能。</u> 	【要素技術Bの適用】 ◆ 坑井-貯留層連結シミュレータによる将来予測に基づく運転管理 坑井-貯留層連結シミュレータの開発により生産流量、貯留層の応答の再現とトレーサ試験の再現をすることができた。このシミュレータは坑井の脈動もモデルに含めている。さらに、このシミュレータを使って、<u>生産・還元方法に関する仮想的な条件シナリオでケーススタディをすると、ケースによって将来の生産量を予測できる見通しを得た。</u>  圧力モニタリングの再現
利用率向上に対する効果	◆ 坑井特性を評価した上で、それに合った配管径に最適化することで、圧力損失を最小化させ、発電量が向上することにより利用率向上の効果が期待される。 ◆ 上の岱地熱発電所において、定検前後に冷却塔能力の改善効果を確認するなど、定検時事後評価に活用。日々の性能監視および定検時の事前・事後評価に係る<u>人件費の削減</u>が見込める。	◆ このような高精度のシミュレーションによる将来予測に基づいて運転管理を行うことで、<u>将来的な発電量の増加に伴い、利用率向上の効果が期待される。</u>
対象となる事例	◆ 対象となる地熱発電所 ・新設の地熱発電所にこの設計思想を取り入れることを提案。 ・フラッシュ方式、ダブルフラッシュ方式、バイナリー方式などすべての方式の発電所に対する利用	◆ 対象となる地熱発電所 ・貯留層管理を行っている全ての地熱発電所

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。

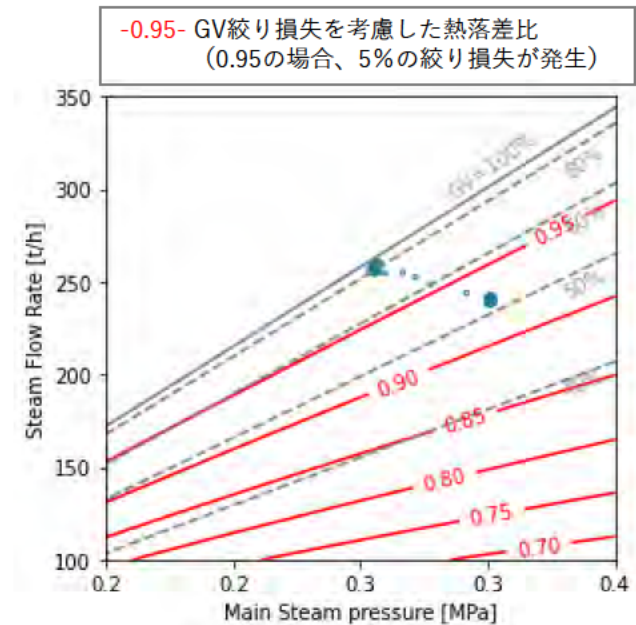
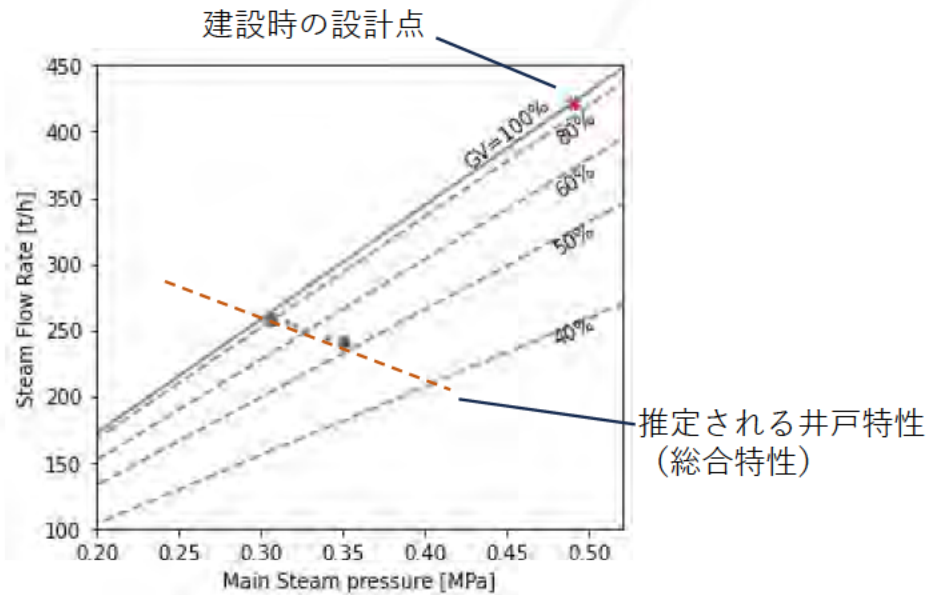


[illegible]

A データ統合による最適運転管理手法の構築

【減圧操作に関する発電備側の理解】

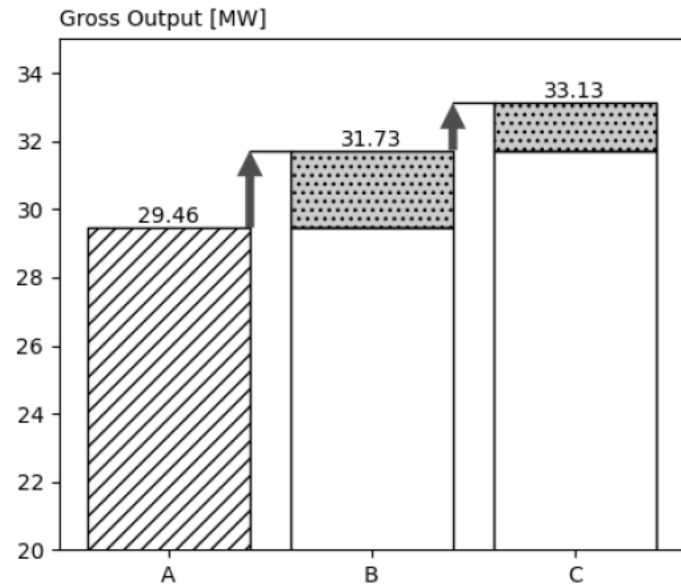
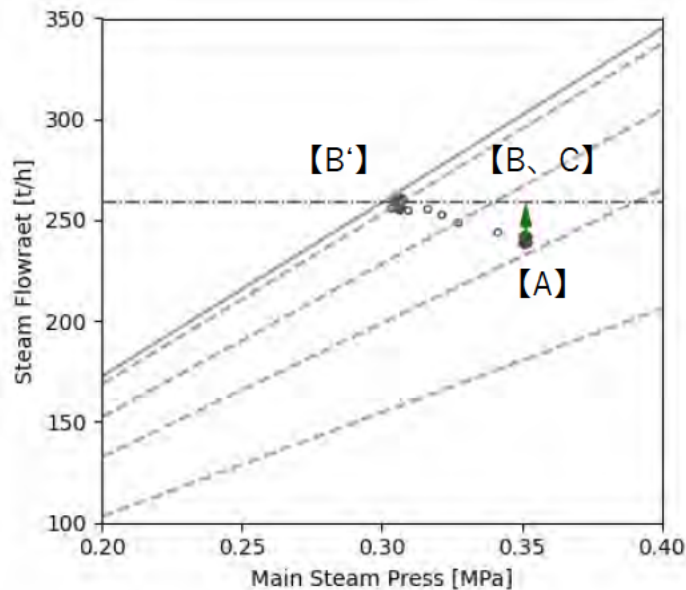
- 建設時から生産量が大きく減少（設計流量の約65%）している。
- 減圧操作前において、GV開度50%程度の絞り運転であったが、主蒸気圧力低下とそれに伴う蒸気量増加によりGV開度80%程度まで改善した。
- 減圧操作前の絞り損失は7%程度であった。タービン入口ノズル改造（開口面積減）により、主蒸気圧力維持のままだでも減圧操作と同程度の出力増加が期待できる。



A データ統合による最適運転管理手法の構築

【蒸気生産設備と発電設備の双方の設備最適化による出力増の目論見】

- 前述のとおり、個別の坑井の感度解析により寄与度の大きい坑井（例えばPW-31）を特定し、その設備の圧力損失を低減させることにより、元の圧力のまま蒸気流量をさせ出力が増加する（A⇒B；+7.7%）
- さらにB点の圧力、流量に合わせてタービン入口ノズル面積を改造、絞り損失を低減することにより出力が増加する（B⇒C；+4.7%）
- これらの蒸気生産設備と発電設備を組み合わせた全体最適化によりあわせて12.5%の出力増が得られる



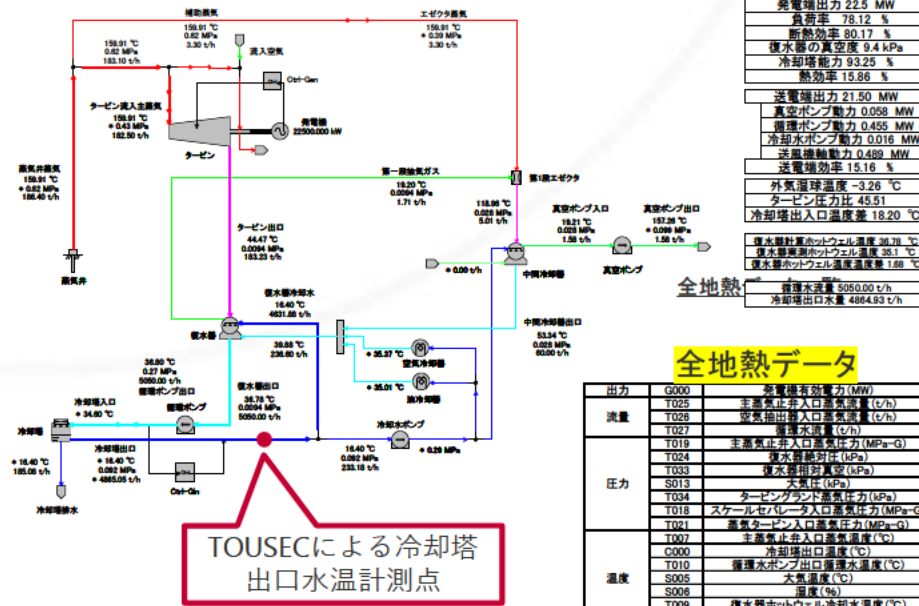
A データ統合による最適運転管理手法の構築 (プラント性能傾向管理の高度化)



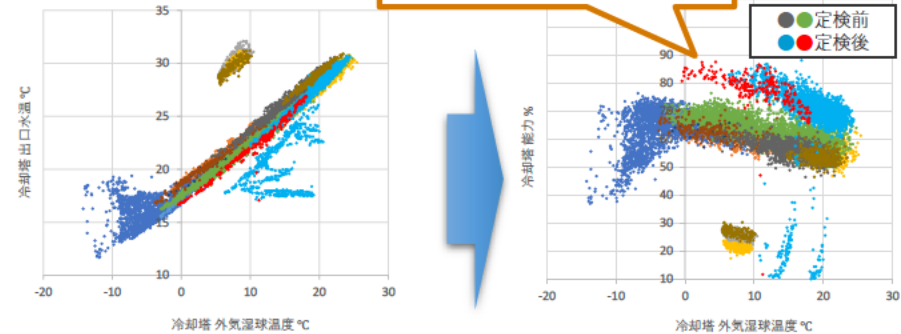
- TOMONIとの連携システムにより、プラント性能を逐次解析・分析
- 従来の**冷却塔出口温度監視**から、**冷却塔能力監視**へアップグレード
- メーカー提出の冷却塔熱性能値の数値異常を指摘

2016年に開発した地熱発電所用のEnergyWin解析モデルを用いて、プラント性能を逐次解析・分析

上の地熱発電所トレンド解析



定検前後の差は明確



冷却塔出口温度監視

冷却塔能力監視

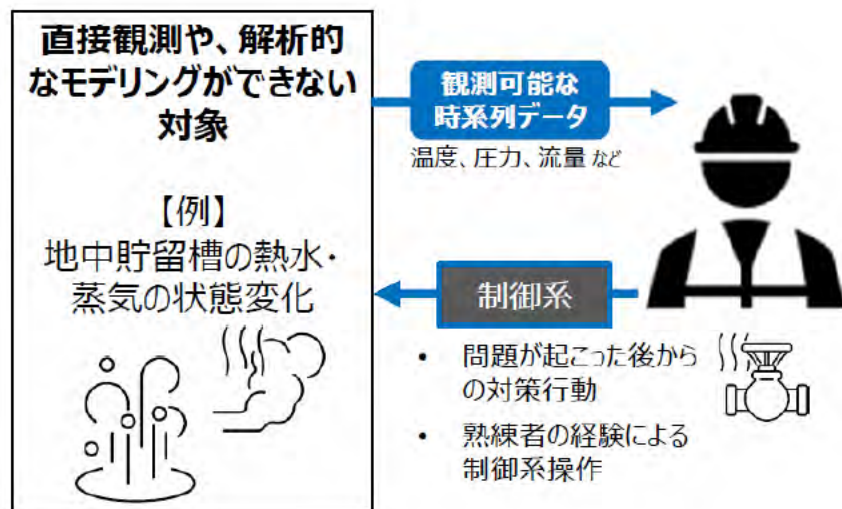
- ❑ 定検前後に冷却塔能力の改善を確認
ただし、要求仕様:100%には未達 ⇒ **70.5%**
👉 出口水温の計測位置の違いが原因と特定
- ❑ 冷却塔の熱交換性能に係る定義値の一つである「熱性能値:KaV/L」について、メーカー提出の性能試験報告書に数値異常があることを指摘
(2025/5) 👉 現在もメーカー回答待ち



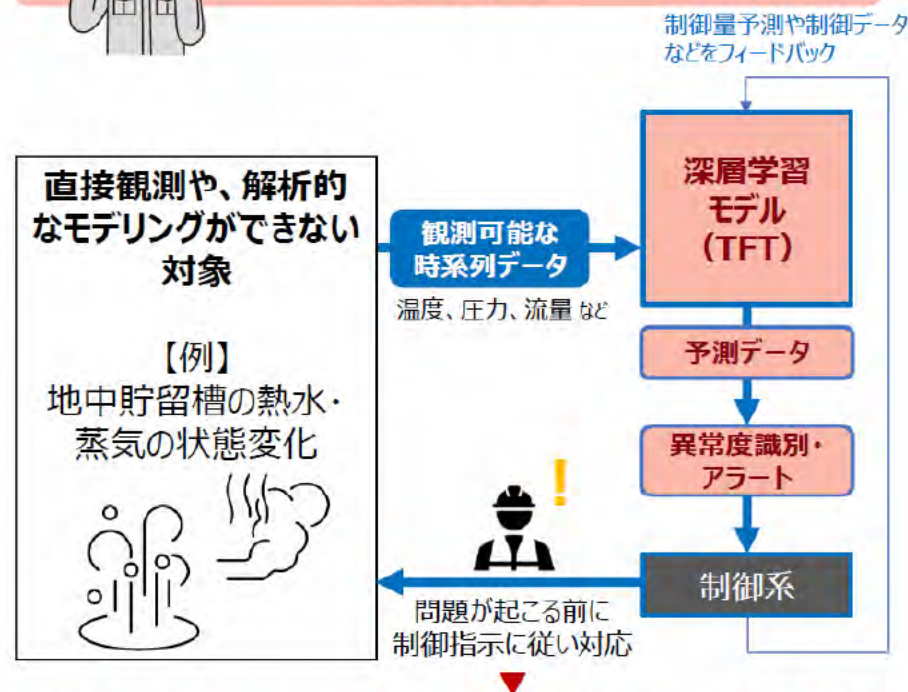
B 生産井異常の予測・回避技術の開発 バルブ操作ガイダンスシステムの構築 (早稲田大学成果)



従来



今回の発明



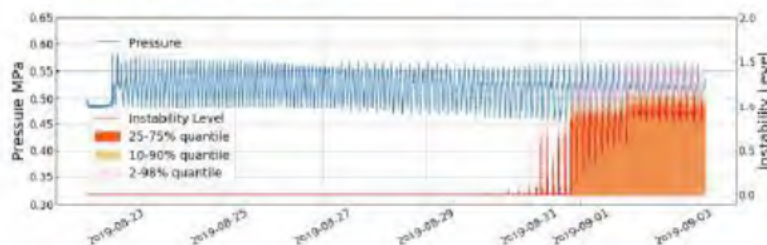
TFTを制御系に組み込むことで、直接観測できない量を基準に、問題が起こる「前」の段階で制御可能に

B 生産井異常の予測・回避技術の開発 バルブ操作ガイダンスシステムの構築 (早稲田大学成果)

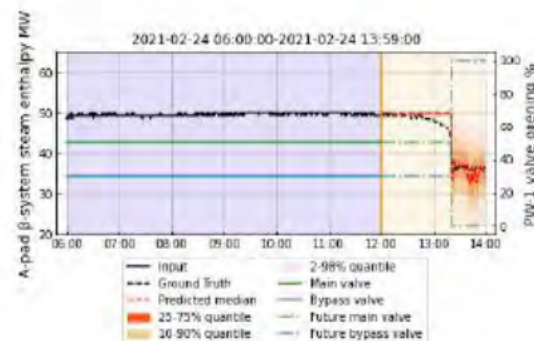


○異常予兆検知モデルの構築

観測可能な状態量から異常予兆を捉えるモデルを構築する。圧力を入力して、不安定度を出力する仕様になっている。



○波形予測モデルの構築



○異常予兆検知モデルと波形予測モデルを用いたバルブ操作ガイダンスシステムの構築

従来は経験に依存せざるを得なかった不安定生産井のバルブ操作に対し、観測量から「不安定度」を出力する深層学習モデルを構築することでバルブ操作を自動化する制御系構築の見込みが立った。坑井を安定化させる方向に寄与するバルブ操作の組み合わせの提示が可能になった。

システムインターフェースの例

提案したバルブ操作を実行すると不安定度が減少していることが確認された。

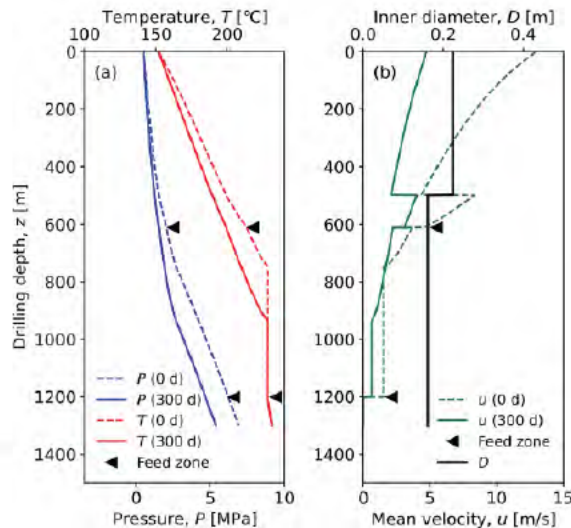


B 生産井異常の予測・回避技術の開発 (九州大学成果)

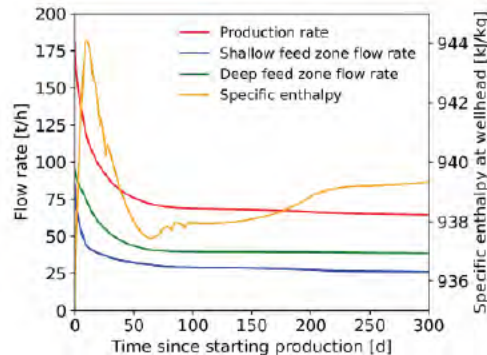
地熱資源の開発・生産の現場で直接観測され、地熱発電所の操業にも直接的に関わる貯留層と坑井の挙動にフォーカスし精緻に再現・予測するために設計された、独自のモデリング・数値計算手法を実装。複数のフィードゾーンを持つ坑井内の圧力・温度・流速分布や、観測井の圧力・温度・トレーサー濃度の推移、数十年間の操業中の蒸気生産流量の推移などを、精緻に再現・予測します。

詳しくは...

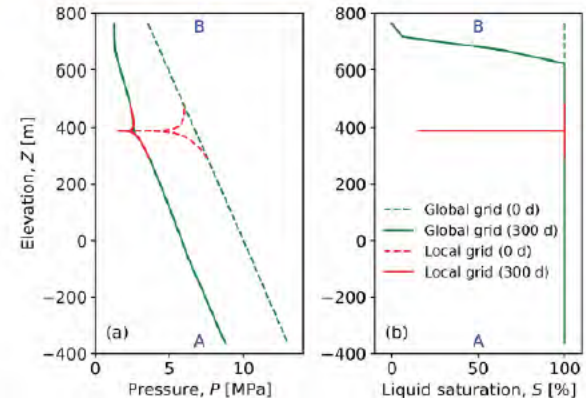
Matsumoto et al. (2023) Numerical simulator for the coupled model of wells and fractured reservoirs. Proceedings of 45th New Zealand Geothermal Workshop.



2カ所のフィードゾーンを持つ生産井の流動を再現



生産井の流量とエンタルピーの推移を再現



生産井が掘り抜く断裂内の圧力と液相飽和率を再現

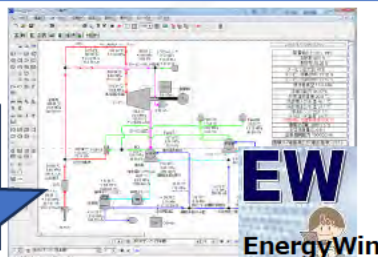
C データ統合による資源利用の最適化 (電力中央研究所・九州大学成果)



【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入する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



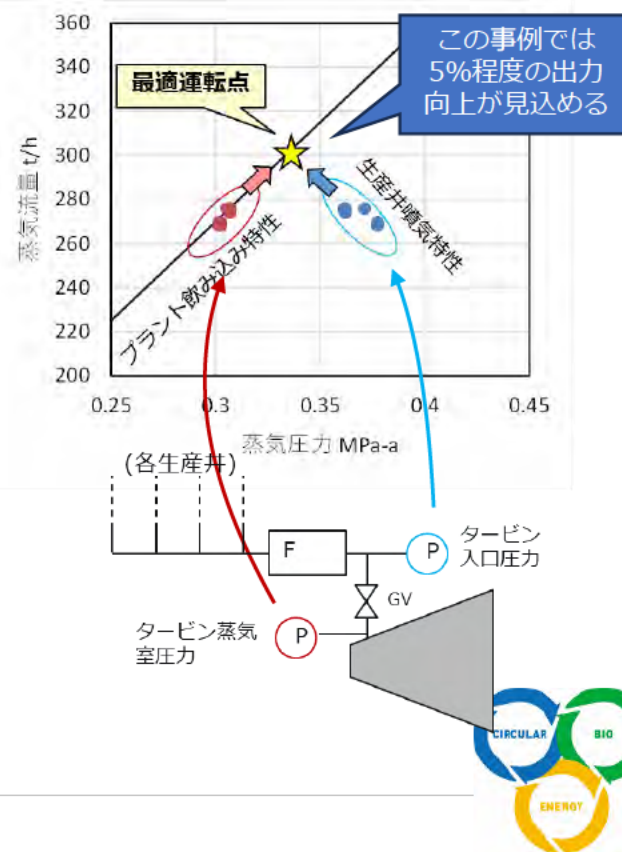
【2022年度】
蒸気輸送設備の
シミュレーション
を可能とした

【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

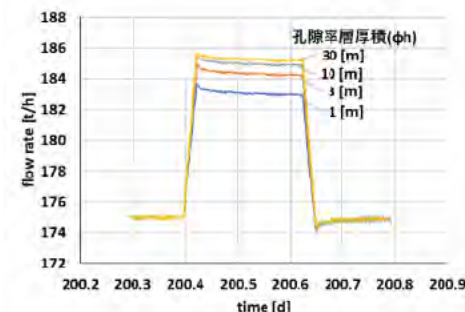
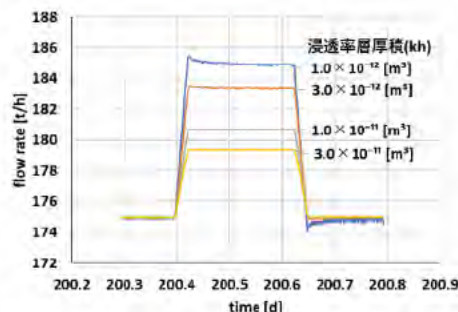
課題	AIによる将来予測に基づく 噴気特性予測	坑井条件変更時のプラントの 過渡的な状態予測
開発内容	- 貯留層シミュレーションの最適パラメータを得るためのAIを構築。 - 現行では貯留層シミュレータとして、TOUGH2を利用。	研究成果Bで開発した貯留層・坑井連成シミュレータと、既開発のEnergyWinを連結したシミュレータの開発可能性・有用性を検証。 ※ 本事業では検証段階までとする
特徴	- AI技術により専門技術者でなくとも貯留層シミュレーションを実施可能にする。 - 最適な貯留層モデルを元に、将来予測ならびに坑井特性（圧力に対する生産量）を得る。	- 貯留層と坑井のシームレスな非定常連成シミュレーションが可能。 - 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。 - 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。

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

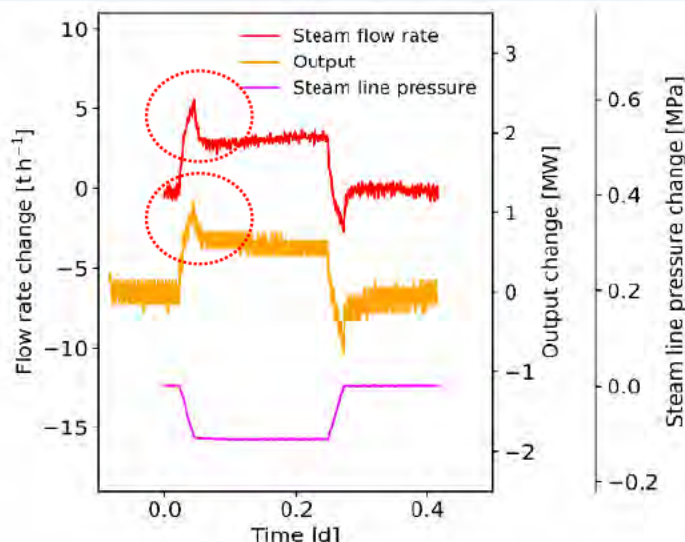


C データ統合による資源利用の最適化 (坑井条件変更時のプラントの過渡的な状態予測)

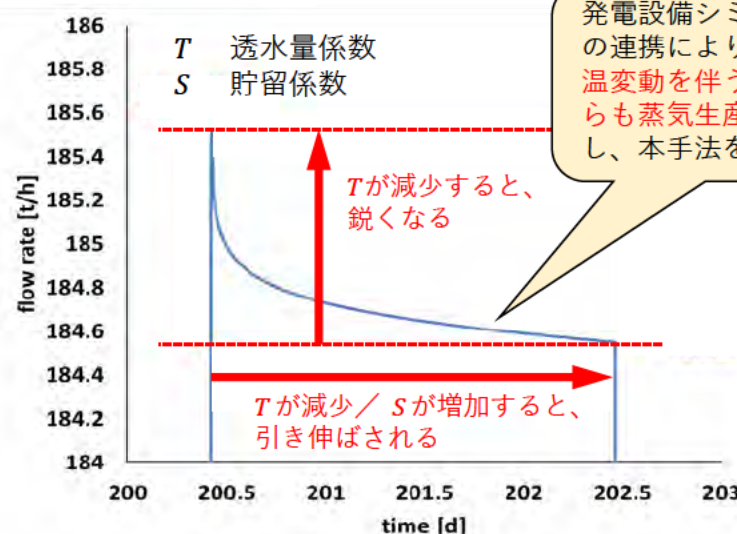
- 開発中の貯留層・坑井シミュレータと、発電設備シミュレータを連結し、その有用性を確認。
- タービン入口の減圧運転試験で認められた蒸気流量と発電出力のオーバーシュート現象を再現し、種々のパラメータへの依存性を調査。
- オーバーシュートの形状(タイプカーブ)から、貯留層固有のパラメータである透水量係数と貯留係数を決定できる可能性が示唆された。
- 一連の決定方法を、標準作業手順として整理中。



浸透率層厚積(左)と空隙率層厚積(右)に応じた、オーバーシュート現象の変化の再現



減圧運転試験で認められたオーバーシュート現象



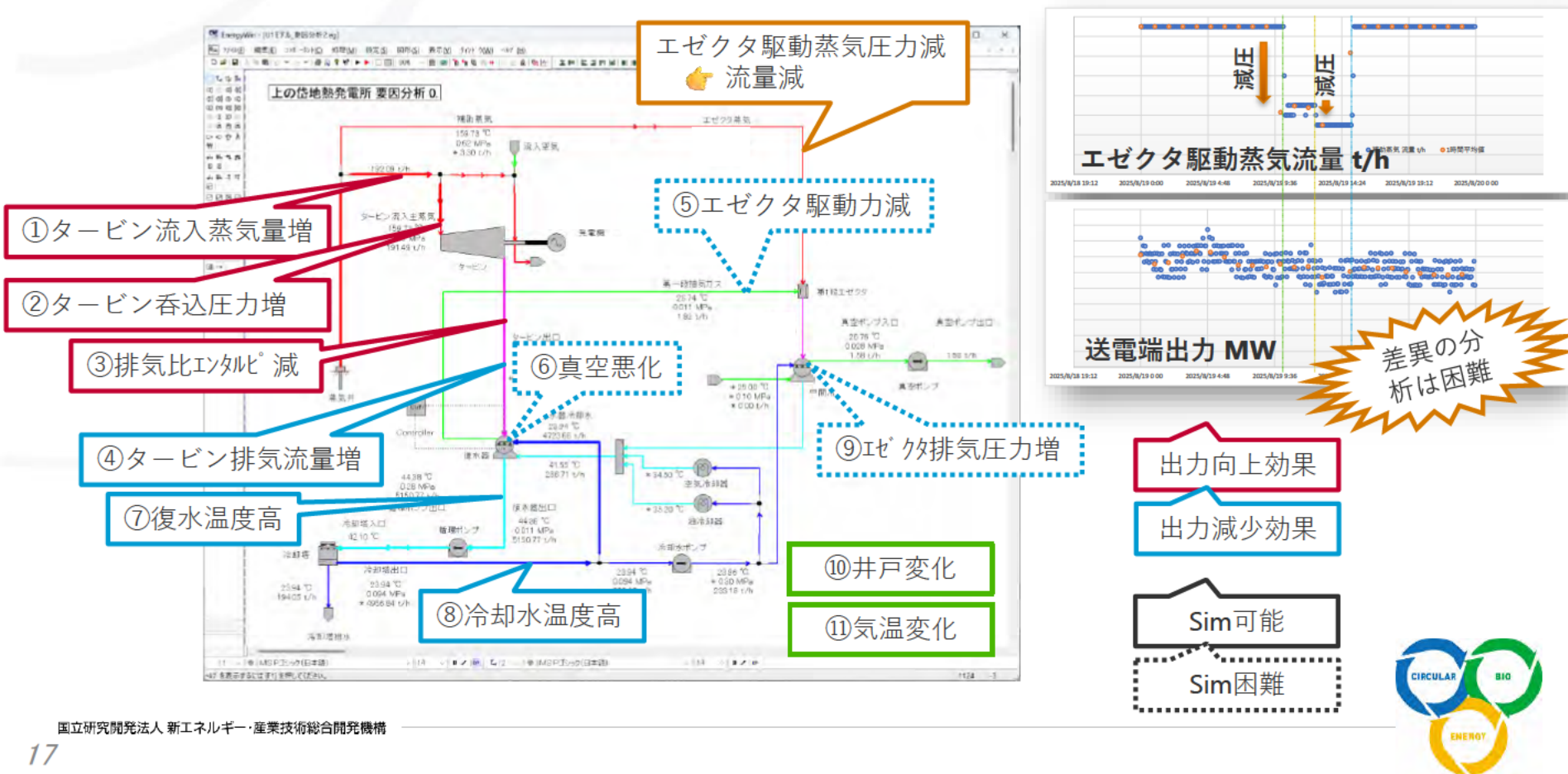
発電設備シミュレータとの連携により、例えば気温変動を伴う発電出力からも蒸気生産流量を推算し、本手法を適用可能。

カーブ形状のパラメータへの依存性



C データ統合による資源利用の最適化 (エゼクタ運用改善策の評価)

- エゼクタ駆動蒸気の圧力変更による出力向上効果はシミュレーションのみでは推定困難
- 出力向上**および**減少効果**を**自然変動**と切り分けて分析可能
- TOMONIとの連携システムにより、プラント性能を解析・要因分析



C データ統合による資源利用の最適化 (エゼクタ運用改善策の評価)

- エゼクタ駆動蒸気の圧力変更試験を2025/3/11および2025/8/19に実施
- TOMONIとの連携システムにより、プラント性能を解析・要因分析

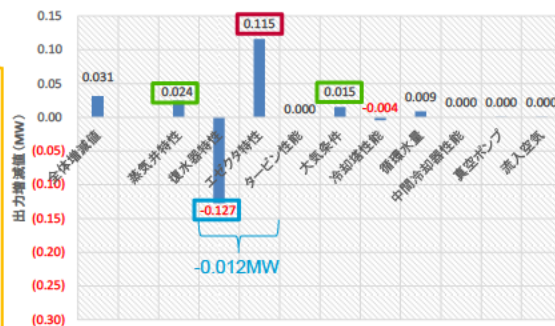
エゼクタ駆動蒸気圧力変更試験

2025/8/19
夏期は復水器
性能悪化

2025/3/11
冬期は復水器性
能に変化なし

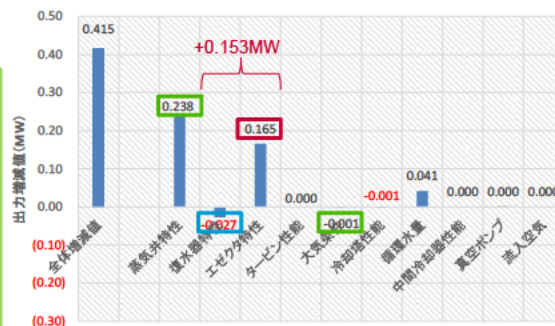
2025/8/19

出力は増加したが、**自然変動**を除外
すると**出力は12kW減少**していた

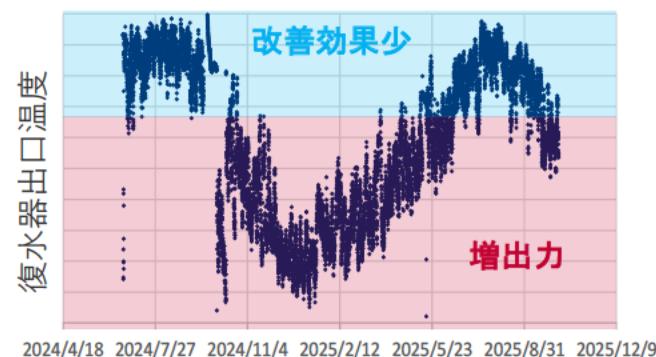


2025/3/11

出力が大幅に増加したが、**井戸変動**
を除外すると**153kWの増出力効果**



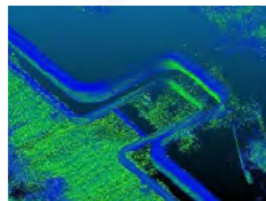
利用率向上が見込める運用条件範囲



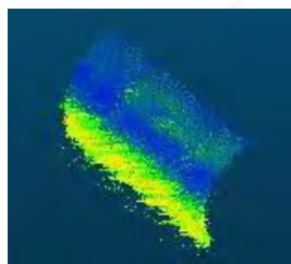
- 2025/3/11に実施したエゼクタ駆動蒸気の圧力変更試験結果を分析 ⇒ **153kWの増出力**
 増出力効果が期待できる冬期のみ減圧運用を適用すると、**0.27%の利用率向上**が見込める

ドローン等による設備健全性確認 システムの全体概要

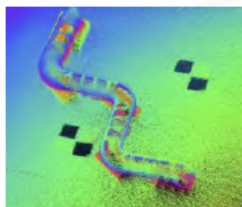
複数センシングシステムの
データを統合して三次元
地図情報を構成する



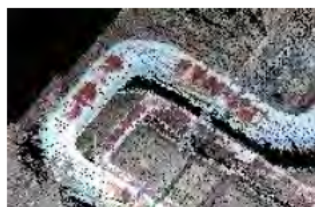
配管の変形検出



配管の位置ずれ検知



配管表面の温度異常検出



配管表面の変色検出

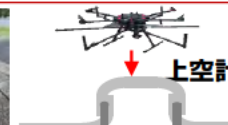
健全性を評価するKPIをモニタリングし変化検知
を自動化する仕組みをパッケージ化



上空計測用UAV



接近計測用UAV



上空計測

接近計測

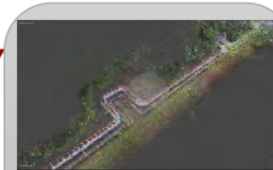
3次元計測システムの処理

(1)3次元点群構築と最適
な飛行経路立案

(2)複数のセンサデータを用いて、配管の
「位置ずれ」、「変形」、「色」、「温度」
変化を検知するシステムをそれぞれ構築

(3)4つの異常検知システムの統合

(4)配管の健全性評価



テストサイトにて実際に
点群生成精度が十分で
あることを確認。

【開発成果】接近計測用UAVの飛行経路を提案し、現地にてその経路で飛行して得たデータから高精度な三次元点群を生成できることを確認したとともに、3種のセンシングシステム（大型UAV、小型UAV、ハンドヘルド）を開発し、システムを統合するための環境を構築した。

2025年度は、温度データを簡易モデルにレジストレーションする仕組みを構築し、すべてのデータ処理をパッケージ化完了予定。

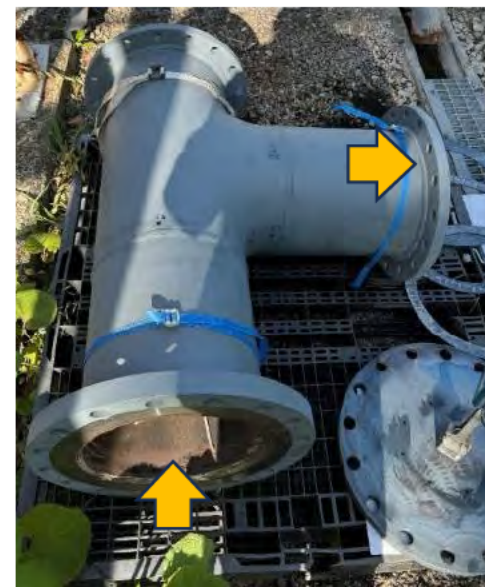
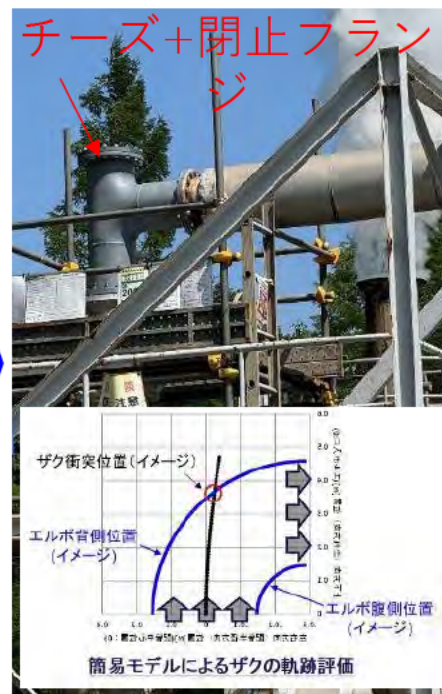
D 非在来型データによる潜在不具合の解消 超音波を用いたエッジデバイス対応型配管厚計測



- ✓ 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。
- ✓ 2025年6月、SUSフランジに交換し、減肉度合を定量的に把握する計画。
- ✓ 2025年10月、ステライト肉盛を施した炭素鋼フランジに交換し、耐摩耗性を確認する計画。



測定位置	穴深さ [mm]
ELB7	6.2



設置された坑口チーズ
(T継手)

気水分離器上流側の配管レイアウトの変更状況

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)

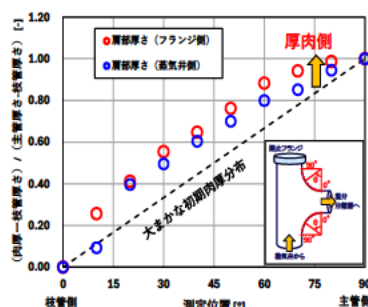


- ・ ザクにより著しい減肉が発生しているエルボ管を坑口チーズに変更し、2024/6～2026/6に暴露試験を実施
- ・ 年1回の交換頻度を隔年1回に延命できる可能性を示した 🖐 事業者が運用変更を検討中



生産井蒸気配管の暴露試験を実施

- A) T継手: 1年の供用後も問題なし
 🖐 2年間以上の供用にも耐えうる可能性あり
 T継手の非破壊肉厚計測手法の確立が望まれる
- B) 炭素鋼フランジ/WC溶射: 1年の供用後に9mm減肉
 🖐 2年間の供用は難しい
 WC溶射の施工方法次第では高寿命化も可能
- C) SUSフランジ: 半年の供用後に2.8mmの減肉
 🖐 2年間の供用に耐えうる可能性あり
- D) 炭素鋼フランジ/ステライト肉盛り: 2026年6月まで暴露試験中
 🖐 2026/2末～3月上旬に高温型UTによる肉厚計測実施予定
 有識者を含む見立てでは、減肉はほとんど生じない
 2年間以上の供用に耐えうる可能性あり



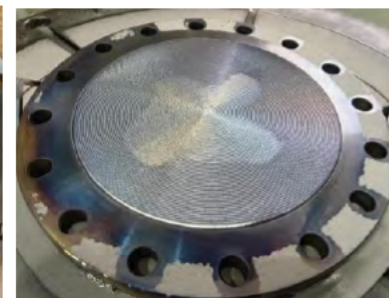
A) T継手



B) WCフランジ



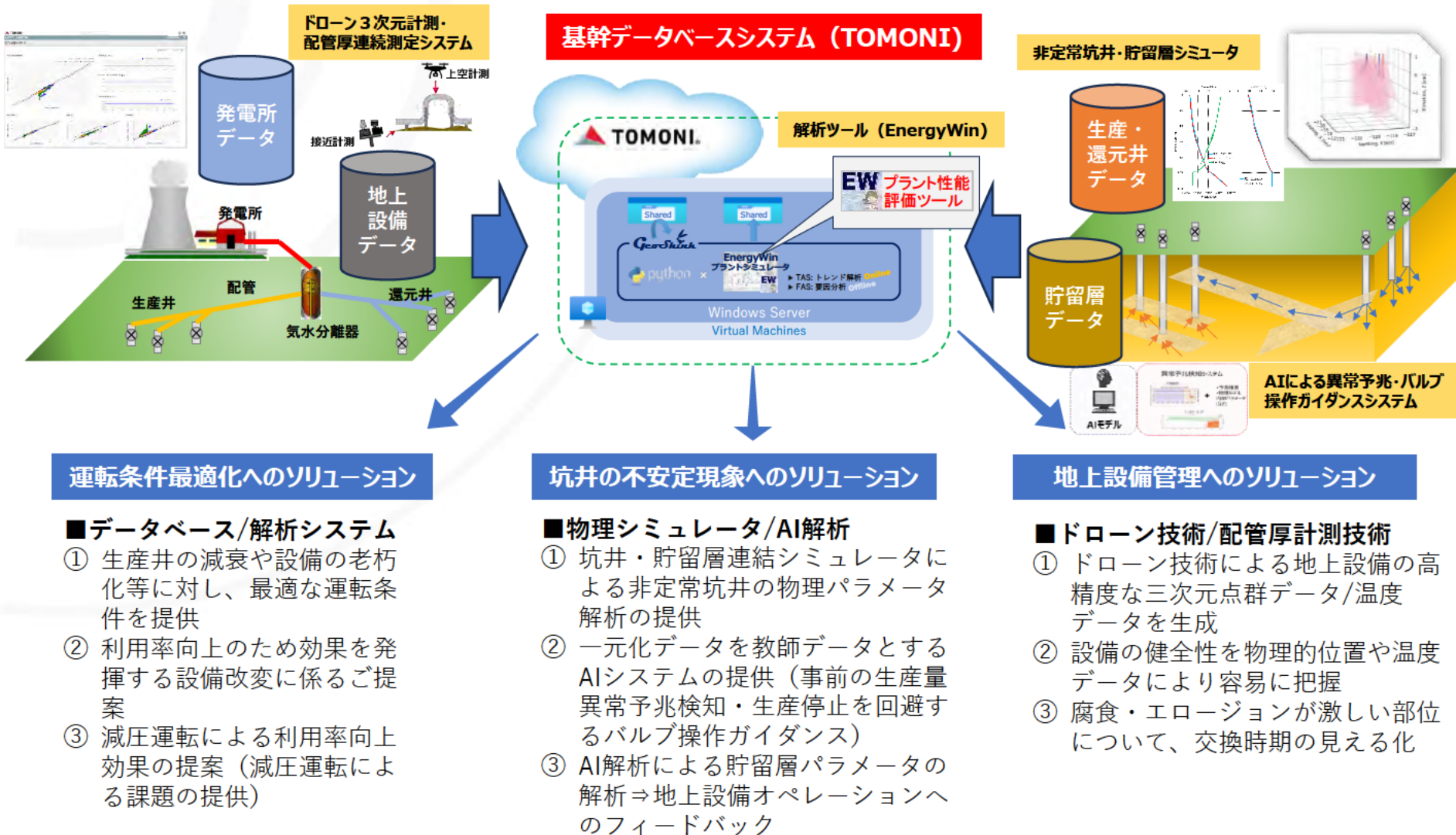
C) SUSフランジ



D) ステライトフランジ



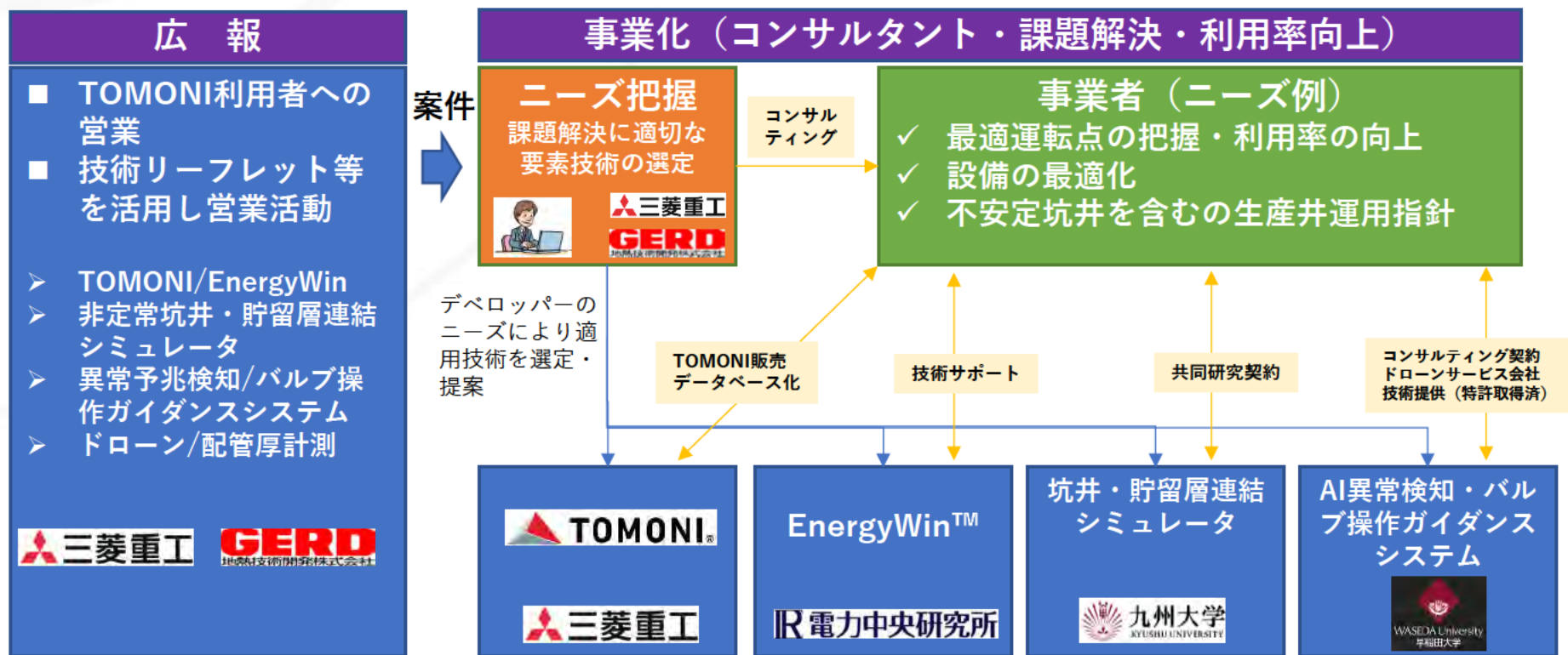
開発成果の全体像 利用率向上に対し提供可能なソリューション



成果の実用化・事業としての展開



開発成果である「基幹データベース（TOMONI）を中心とした要素技術」の適用によるソリューションについて地熱デベロッパーを中心に広く広報し、デベロッパーのニーズを把握する。その上で、適切な要素技術パッケージを提案することで、各地熱発電所の利用率向上を目指す。



ご清聴ありがとうございました。