

2023年度成果報告会

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

2023年1月31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） 大里 和己

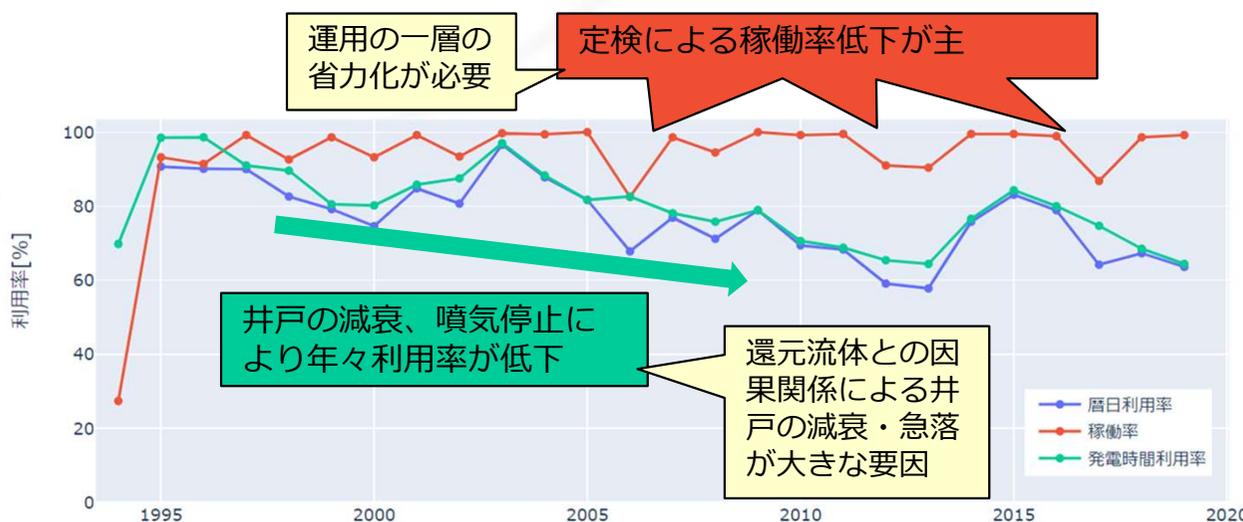
団体名：地熱技術開発（株）、三菱重工業（株）、（一財）電力中央研究所、
（国）九州大学、（学）早稲田大学

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

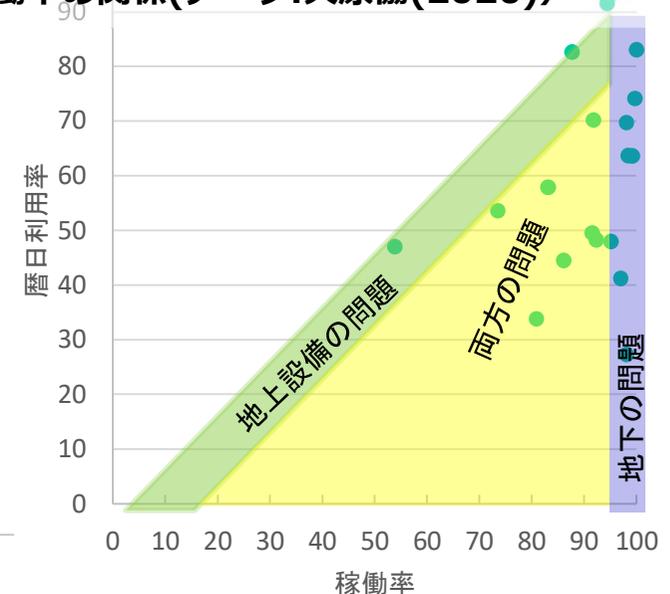
1. 事業目的

- 地熱発電所での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を統合・管理する全体システムの構築が不可欠である。
- 全体システムの骨格は、多岐にわたる情報を集約可能とするクラウドを活用したIoTシステムとし、保安上のリスクを考慮した上で基盤技術の開発を行う。
- 開発する全体システムにAI技術や数値シミュレータを連携させ、未知データの推定精度を上げることにより、地熱発電所の利用率の維持・向上を実現する。

地熱発電所における利用率の推移・利用率低下の要因



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))



2. 実施期間

開始 : 2021年6月

終了（予定） : 2026年3月

3. 実施目標（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。	<ul style="list-style-type: none">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。	

事業の背景



地熱発電所管理での困難さ、利用率低下の現状

A) 地熱発電所は発電設備・蒸気設備・地下情報のデータが別管理となっており、全体の最適化ができていない。これは、発電設備側から見ると、データに内在する経年的な坑井特性変化等の地下の影響が切り分けできず、設備の正確な状態把握と最適修繕計画の策定を困難なものにしている。

A データ統合による最適運転管理手法の構築

B) 各生産井・還元井の流量把握や検層の頻繁な実施は、コスト・リスクの面から現実的ではない。個別データがなく、正確な状態把握ができない中で、利用率を大きく下げる要因である不安定な坑井の調整はベテランの経験値に依って対応されているが、その暗黙知・ノウハウの継承には困難さを伴う。

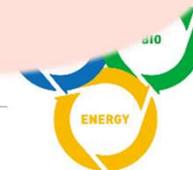
B 生産井異常の予測・回避技術の開発

C) 地熱発電所のボイラーである地下の情報は、得られるデータ・情報も限られ、自然由来であるが故に変化もある。限られた情報を元に専門技術者によるシミュレーション等で貯留層の状態を予測しているものの、多大なコスト・時間を要するため、貯留層の現状に合わせた柔軟な調整が難しい。

C データ統合による資源利用の最適化

D) 蒸気設備における配管系統は、不具合が顕在化すると大きな利用率の低下につながる。しかし、保守・点検範囲が非常に広範囲であり、地形に制約された厳しい設置状況も多いことから、全設備をきめ細かに外観点検・内部点検を実施することは非常に困難。

D 非在来型データによる潜在不具合の解消



研究成果



本プロジェクトでの開発技術

A データ統合による最適運転管理手法の構築

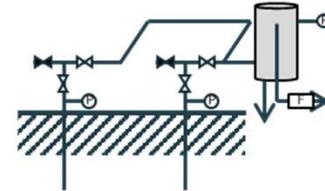
事業者によって別管理されることが多いデータを一元管理

発電設備

蒸気生産設備

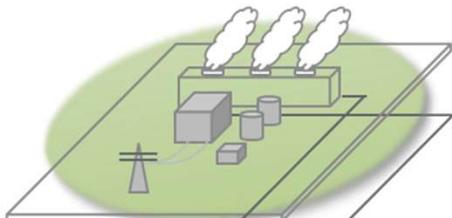
プラント全体の状態推定

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）が推定可能となった。



現状に即したプラント、貯留層モデルに反映

地上設備
直接観測することができる



地上データから推定

地下貯留層
直接観測することができない

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い。
→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。
→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。

発電設備

蒸気生産設備

貯留層

現状の運転状態に合わせた最適化

現状（2023年度末時点）での推定成果（概算目論見）

急落回避することができれば
6%程度利用率向上

貯留層の状態に合わせた
運転点の最適化により5%
程度利用率向上

D 非在来型データによる潜在不具合の解消

課題：
蒸気設備の腐食等に係る健全性評価が難しい。
→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、設備の状態変化等、外観目視点検を自動化する。

【対策2】
配管厚計測の簡易測定手法と傾向監視方法の確立により、内部の健全性評価と事前補修を可能にする。

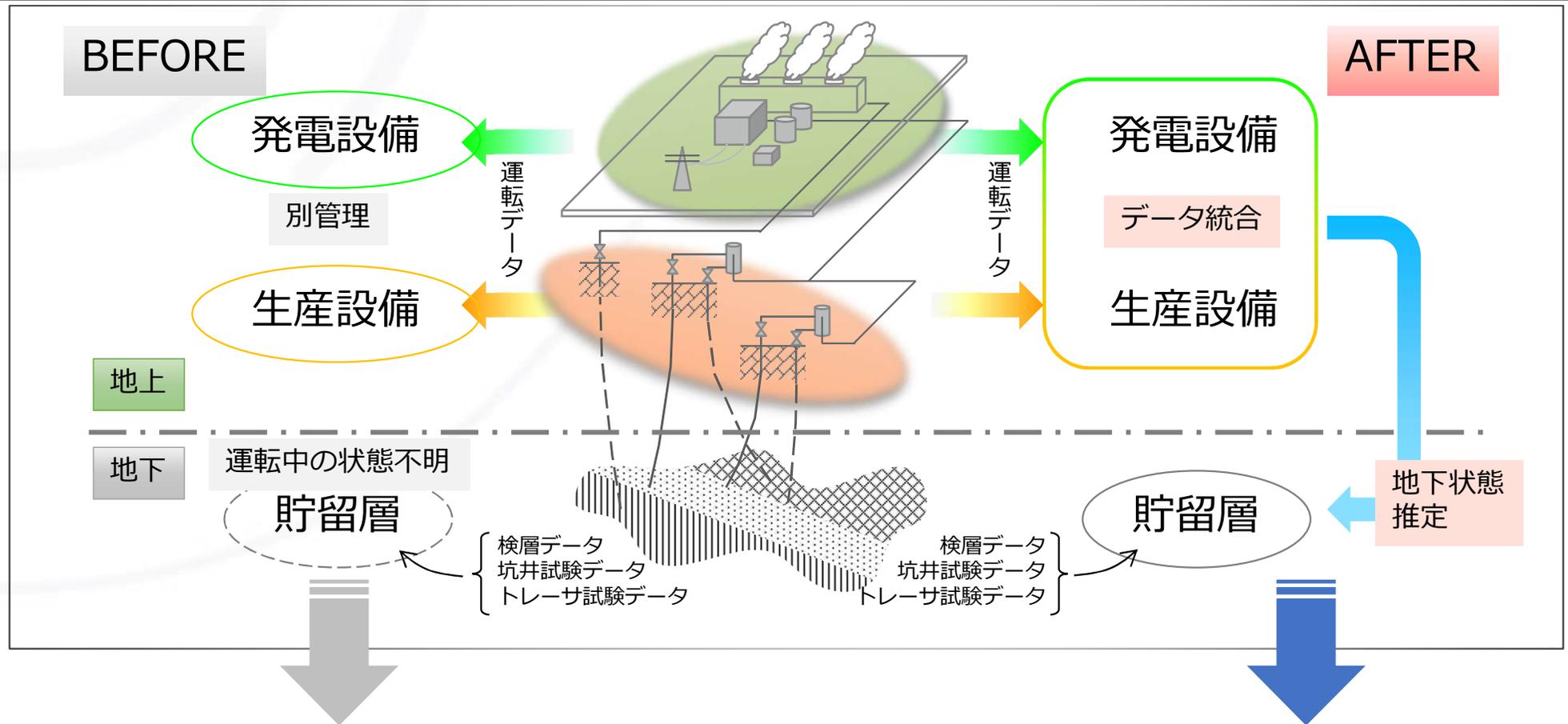
定期的なモニタリングにより突発的な利用率低減を回避



研究成果

コンセプト：運転データ統合と地熱発電所全体の最適化

- 運転データを統合するとともに地下状態を推定し、その推定した状態をもとに、地下も含めた地熱発電所全体の最適化を行い、利用率向上につなげる



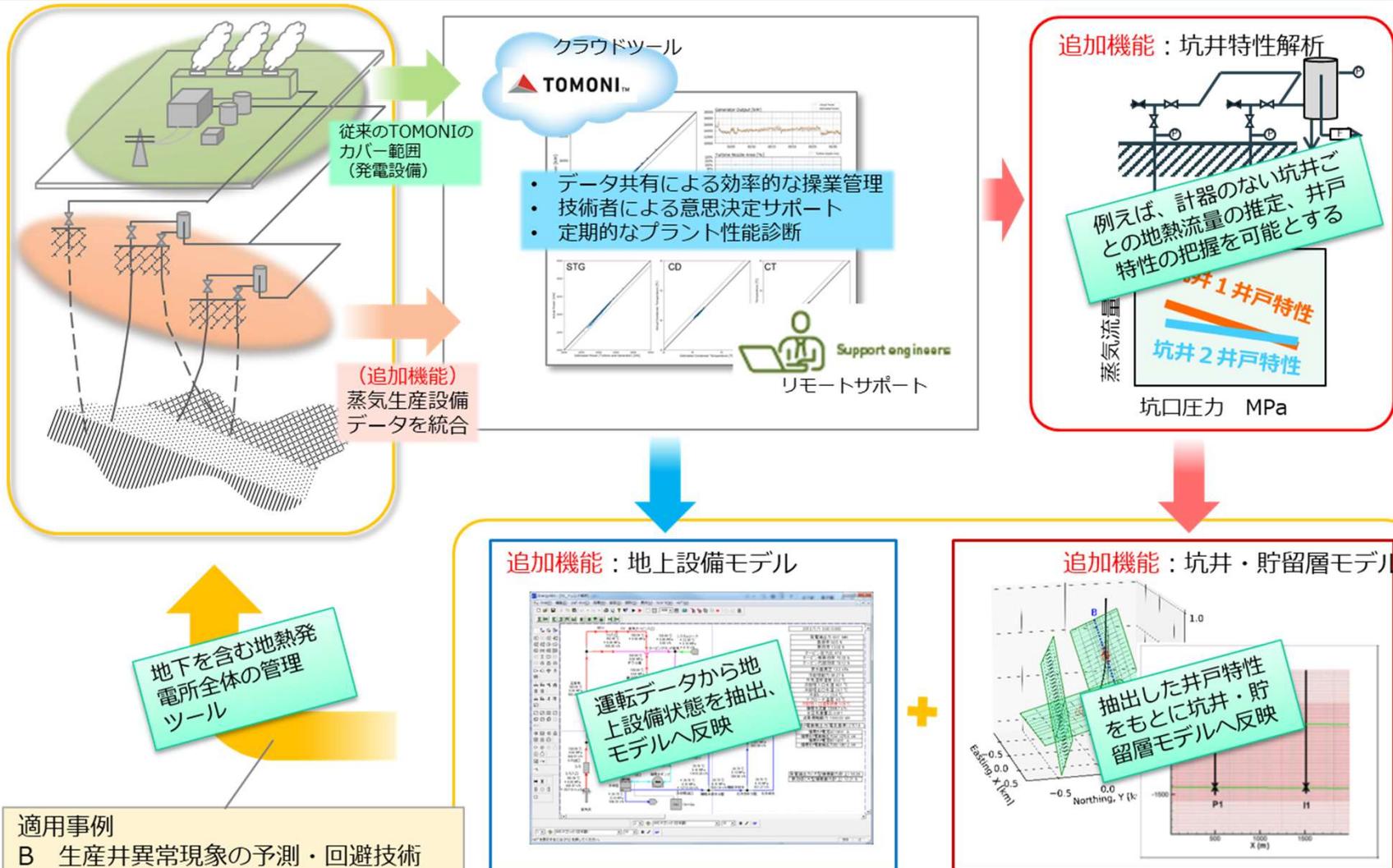
- 設備ごとのデータが別管理であることが多い
- 地下の状態は停止中に行われる坑井試験でしかわからず、運転中の経時変化がわからない。

- 実運転データをもとに経時的に状態を把握。
- 経時変化を考慮した地熱発電所全体の最適化を実現する。

研究成果

A データ統合による最適運転管理手法の構築

- 地熱発電所（発電設備）の管理ツールとして実績があるTOMONIをプラットフォームに、地下を対象とした新たな操業管理機能を追加することにより、地熱発電所全体の管理ツールに拡張する。

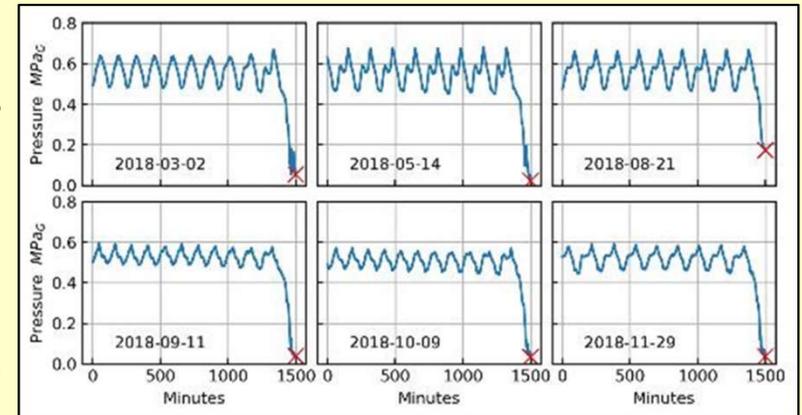


- 適用事例
- B 生産井異常現象の予測・回避技術
 - C データ統合による資源利用の最適化

研究成果

B 生産井異常の予測・回避技術の開発

- モデルプラントの運転データを解析したところ、坑井不安定現象とそれに伴う圧力急落、噴気停止により利用率を大きく損ねていることが分かった。
- この事象を事前に検知して急落回避することにより、利用率低下を避けることが可能である。
- また、シミュレーションモデルをもとにそもそも不安定化を起こさない運用（生産方法や還元方法）を特定することにより、長期的な安定化を図る。



【効果】右図の急落事象を回避することにより6%程度(*)の利用率向上が見込める。

*効果は2023年度末の想定値

本事業では2つのアプローチにより事象の回避を目指す

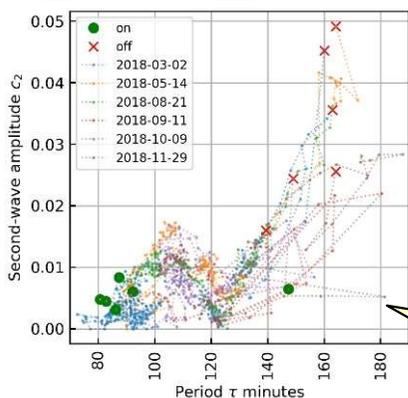
データ駆動型アプローチ
(AIによるアプローチ)

物理シミュレーション
によるアプローチ

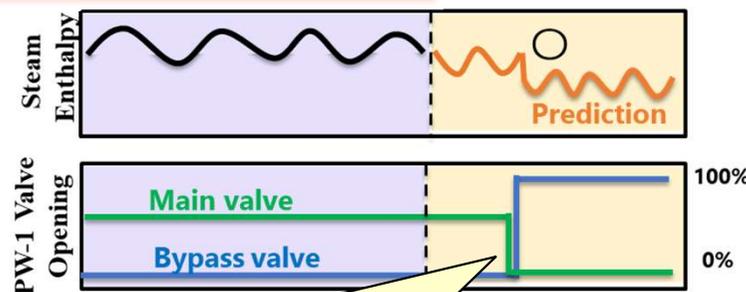
B 生産井異常の予測・回避技術の開発

データ駆動型アプローチ (AIによるアプローチ)

AIを用いた制御的な要素 ((運転中における操作ガイダンスの提供))



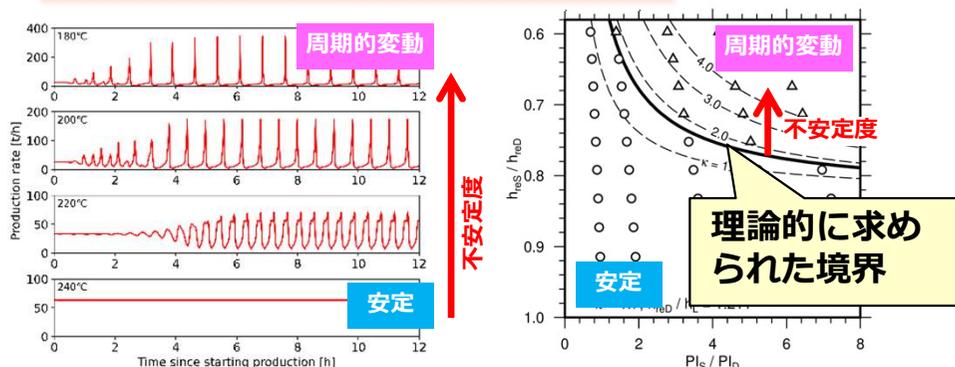
データ分析による特徴抽出



AIによる急落回避シミュレーションで操作をガイダンスする

物理シミュレーションによるアプローチ

データ駆動型アプローチとの比較検討



特定のケースでは、地下条件等の関数として坑井内流動の不安定度が定式化されている。データ駆動型アプローチで抽出されるパラメータと不安定度 (≒地下条件) との関連性を調査し、関連が大きいものを特定。

恒久的対策の検討

	坑井試験	当事業で開発	ブロックモデル
モデルのイメージ			
対象とするスケール	~10 ⁰ 日	~10 ¹ 年	~10 ⁴ 年
複雑さ	シンプル	中庸	複雑
構築コスト	小 (~数ヶ月)	中 (~1年)	大 (数年~)

操業の現場で直面する坑井~貯留層の挙動の問題に特化したシミュレータを開発。坑井配置の見直し等、恒久的対策とその効果の検討に使用。

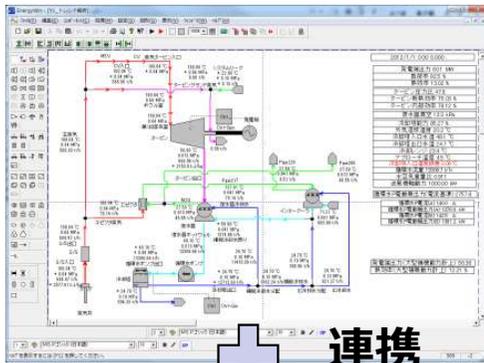
研究成果

C データ統合による資源利用の最適化

- 地上設備シミュレーションモデルと貯留層・坑井に係るAIおよびシミュレーションモデルを連携させることにより、双方の特性がマッチする運転点を算出することができる。（以下は2021年の運転実績をもとに算出した最適運転点）

【効果】 本最適運転点への変更により、設備改造することなくおよそ5%程度^(*)の出力向上が見込める。
 （今後、設備改造も含めた最適化を行い、出力向上の可能性を検討する。）

■ 地上設備シミュレーションモデルでの解析 【アプローチ】プラント飲み込み特性による最適化

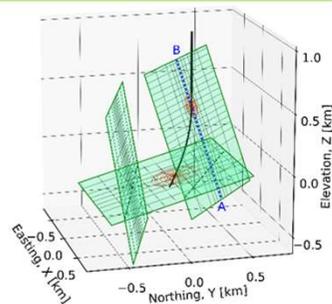
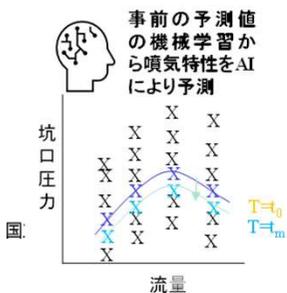


連携

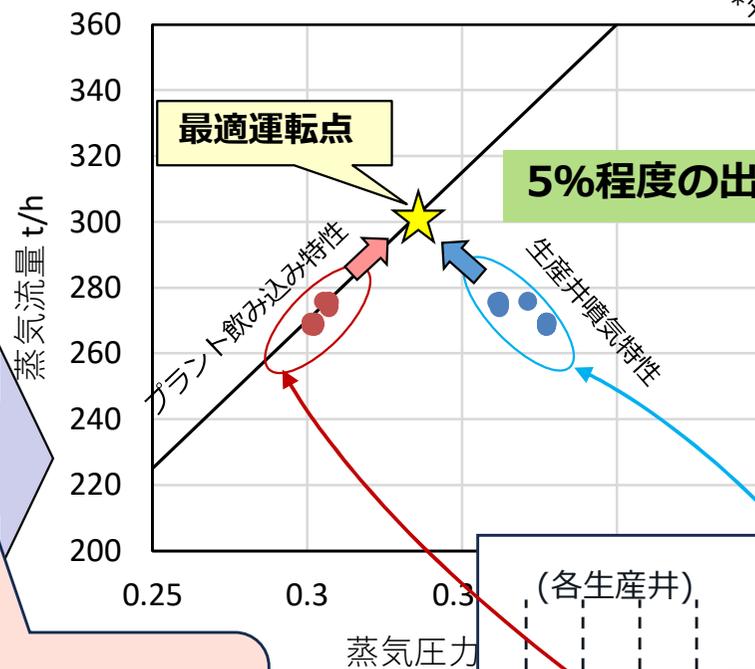
■ 貯留層・坑井のAIおよびシミュレーション解析 【アプローチ】生産井噴気特性からの最適化

AI(機械学習)による予測

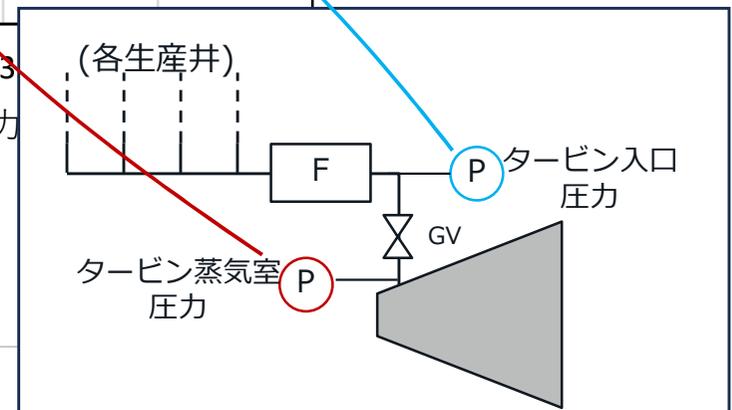
貯留層-坑井連成シミュレーション



両技術からのアプローチによる最適運転点の解析

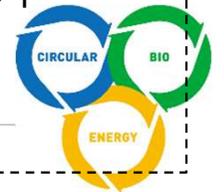
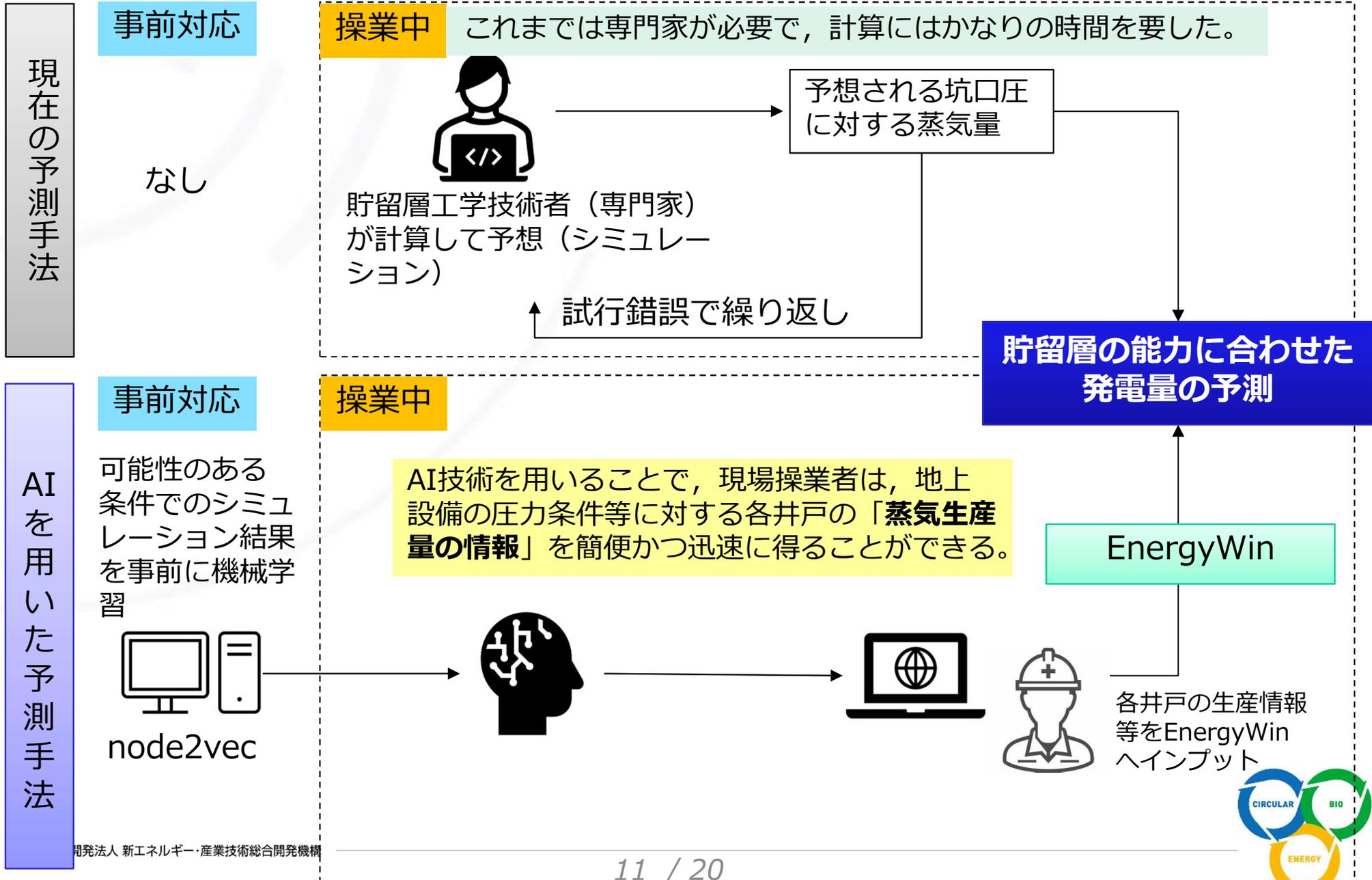


*効果は2023年度末の想定値



研究成果

C (補足) AIを用いた蒸気生産量予測のメリット



D 非在来型データによる潜在不具合の解消

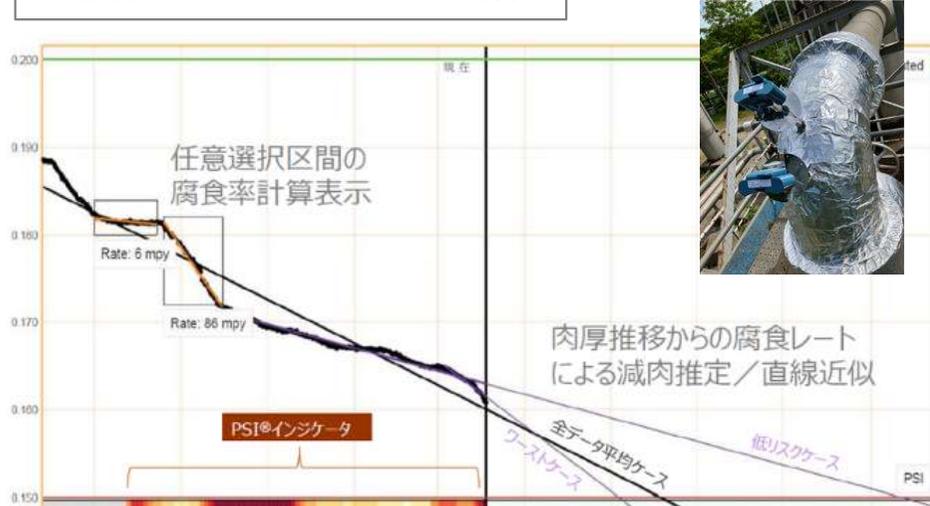
配管厚計測技術による突発的トラブルの回避

- 地上配管は腐食やエロージョンにより穿孔が発生すると長期に亘り生産能力が低下する（配管が長納期）。
- エッジデバイスを使用した配管厚の簡易測定手法と地熱発電所内の配管や圧力容器内部の減肉傾向を把握するための監視方法を確立する。

【効果】

- 配管等で使用される炭素鋼での全面腐食について、その減肉の傾向を非破壊にて簡易に把握が可能になる。
- 本測定を腐食リスクが懸念される複数点で実施することで、地熱発電所内での腐食（減肉）傾向を把握することができる。
- 本測定により、減肉による交換時期を把握できるようになることで、突発的なリーク等のトラブルを回避でき、地熱発電所の利用率維持が可能となる。

■ 配管厚計によるリスク時期の評価



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）

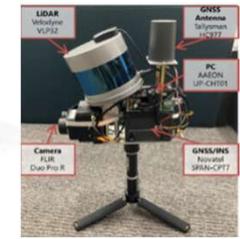
屋内外の設備の健全性をセンシングする



上空計測用

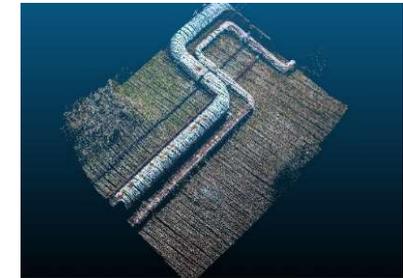


接近計測用

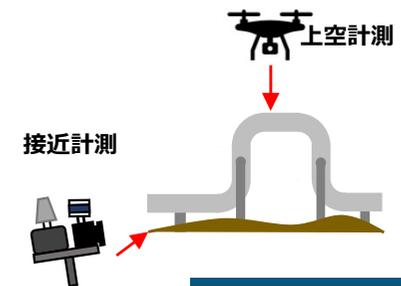


3次元計測システムの処理：

(1) 3次元点群構築
(形状・色・温度情報)

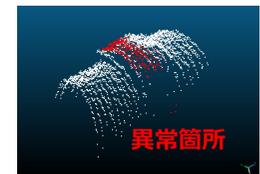


(2) 複数センシングシステムのデータ統合



(3) 状態変化を検知

凹凸検出の例



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した。

研究成果



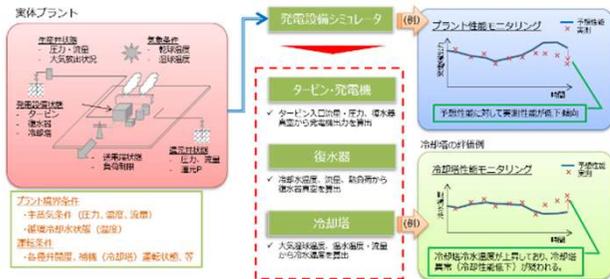
開発技術（IoT-AI）を用いた利用率向上へ向けた将来像

これまで開発した技術により、モデルフィールドにおいて11%程度の利用率向上を確認。今後の2年間では、設備改造の提案も考慮した更なる全体最適化を行い、トータル15%の利用率向上へ向けた研究を継続。

A データ統合による最適運転管理手法の構築

- 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。
- EnergyWinによる熱効率解析、各機器特性の詳細解析。
- 各機器の性能維持による設備利用率維持・向上に貢献。
- 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。

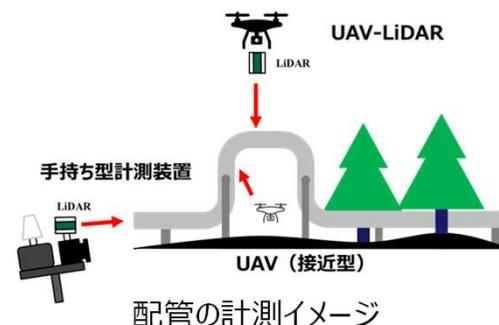
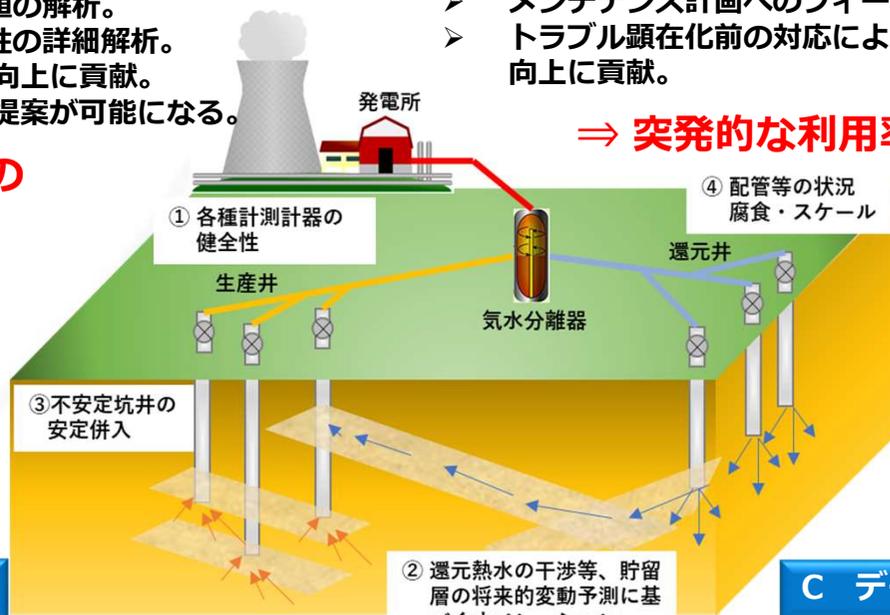
⇒ 利用率の維持・更なる向上への継続研究



D 非在来型データによる潜在不具合の解消

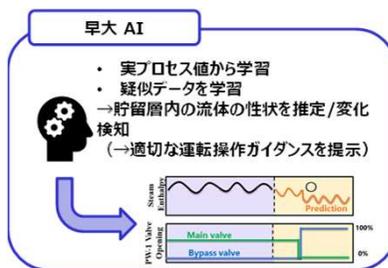
- 定期的な計測データによる定量的な評価の実現。
- メンテナンス計画へのフィードバック。
- トラブル顕在化前の対応により設備利用率の維持・向上に貢献。

⇒ 突発的な利用率低下の回避



B 生産井異常の予測・回避技術の開発

- 地下の状態を予測する物理シミュレーションの精度を、坑内検層等の実データにより向上する。
- 精度の向上した物理シミュレータによる数値実験データにより、不安定度の関係をAIで学習。実プラントのプロセス値に対する不安定度を推定。
- AIにより、バルブ操作による不安定度の応答を推定した上で、安定した噴気となるバルブ操作（制御）を提案。ベテランでなくとも最適な坑井運用が可能になる。



⇒ 6%程度(*)の利用率向上に貢献



C データ統合による資源利用の最適化

- 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。

⇒ 5%程度(*)の利用率向上に貢献

*効果は2023年度末の想定値

研究成果



地熱発電所運用に係る課題と本事業での対策アプローチ



※対策アプローチのA～D

- A: データ統合による最適運転管理手法の構築
- B: 生産井異常の予測・回避技術の開発
- C: データ統合による資源利用の最適化
- D: 非在来型データによる潜在不具合の解消

研究開発項目の達成度①



研究開発項目	中間目標 (2024年3月末)	達成度	最終目標 (2026年3月末)
① 全体システム設計	<ul style="list-style-type: none"> 対象発電所の過去データに基づき全体最適化した場合に、持続的に利用率が向上することを示す。 	<ul style="list-style-type: none"> 不安定坑井の急落事象回避による6%、および地上設備・地下（貯留層）のAI・シミュレーションモデルによる最適運転点のへの変更による5%により、持続的に11%の利用率向上の可能性を示した（達成度：2023年度末にて100%見込） 	<ul style="list-style-type: none"> 対象発電所に適用した場合に、2019年度データと比較して15%程度の利用率向上が可能なことを示す。
② IOTセンサ技術の研究開発	<ul style="list-style-type: none"> エッジデバイスによる坑井データの計測・データ収集が可能であることを示す。 非在来型センサデータを加えることによる、生産井の停止現象の予兆を捉える効果を整理する。 エッジデバイス対応型の二相流量計、配管厚計測計について、開発可能な目処を付ける。 開発するシステムの産業サイバーセキュリティ対策要件を確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 坑口配管系統に速度・加速度を計測するIoTセンサを設置し、継続的にデータ収集可能であることを確認した（達成率100%）。 新しい機械学習アーキテクチャを採用し、非在来型センサーを加えることで、生産井の停止現象の予兆を捉える効果向上をFY22に確認済み（達成率100%）。 配管厚計測は、エッジデバイスでの現地試験を開始した（達成率100%）。 二相流量計については現地試験を実施したが、測定値に対する温度依存性の課題への対応を実施している状況である（達成率50%） 国内のデベロッパーへのアンケート調査を実施し、実際に導入されているサイバーセキュリティ要件について取りまとめた（達成度100%） 	<ul style="list-style-type: none"> 坑口に設置した変動予兆検知センサによって連続監視を行い、大きな変動前の微小な変化から予兆検知が可能であることを実証する。 開発したセンサを設置して、エッジデバイスでの計測とクラウド環境下でのデータ収録が可能であることを実証する。 汽水比1以下で使用可能かつ、精度10%以内のエッジデバイス対応型二相流量計を開発する。 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する。

研究開発項目の達成度②



研究開発項目	中間目標 (2024年3月末)	達成度	最終目標 (2026年3月末)
③ 蒸気生産部門のO&M最適化の研究開発	<p>【③-1】</p> <ul style="list-style-type: none"> 既存のAI機械学習モデルの認識精度を5%向上させる。 準オンライン環境にて、オフライン環境と同程度のAIモデルの認識精度を達成する。 	<ul style="list-style-type: none"> 既存のAI機械学習モデルの認識精度は、大幅に向上した。具体的には、各分位予測値の中央値における不確かさ（RMSE）はFY22構築モデルより31.5%減少した。（達成度 100%） 準オンライン環境で動作確認した。（達成度 100%） 	<p>【③-1】</p> <ul style="list-style-type: none"> センサーフュージョン技術を活用した在来型・非在来型センサデータの統合手法と各機能について、実データを基に検証する。
	<p>【③-2】</p> <ul style="list-style-type: none"> 坑内流動の安定条件を定式化する。 坑井・貯留層の連結シミュレータの動作検証が完了し、実用性を備えていることを示す。 	<ul style="list-style-type: none"> 定式化を完了した。またその成果について、48th Stanford Geothermal Workshopで発表した。 解析解・既存コードとの比較検証を完了し、実用的な例題への適用例を示した。またその成果について、45th New Zealand Geothermal Workshopで発表した。 <p>※いずれも査読付プロシーディングを含む。 (達成度 100%)</p>	<p>【③-2】</p> <ul style="list-style-type: none"> 生産井の不安定な坑内流動の発生メカニズムについて貯留層の流体流動を含む包括的な解釈を示す。 開発したシミュレータで評価および予測精度の向上が認められること。 開発したシミュレータのユーザー向けマニュアルの整備。
	<p>【③-3】</p> <ul style="list-style-type: none"> 最適化アルゴリズムの確立と単純なモデル事例での検証が完了すること。 	<p>Node2vecアルゴリズムにおいて単純なモデルでの学習を行い、線形性の高い正答率を得られたため、現実のモデルに合わせた改修モデルを用いた教師データ作成をほぼ終了した。今後は、高速化のための新手法（Ensemble Smoother with Multiple Data Assimilation” (ES-MDA)) の採用の検討を含めて只今検討中。（達成度 90%）</p>	<p>【③-3】</p> <ul style="list-style-type: none"> 最適化アルゴリズムにより、人間の手で実施する場合と比較して1/3以下の時間で適正解に到達できること。
	<p>【③-4】</p> <ul style="list-style-type: none"> GPUによる汎用計算を用いてシミュレーション計算アルゴリズムの最適化を行い、現在の計算速度を2倍以上高速化する。 	<ul style="list-style-type: none"> GPUの導入により、以前と比較して約10倍の計算速度を達成した。これにより、オリフィスでの流速分布に係る物理シミュレーションを実施し、流速が早くエロージョンによるリスクの高い可能性のある箇所の特定ができた（達成度 100%）。 	<p>【③-4】</p> <ul style="list-style-type: none"> 腐食・スケール成長シミュレーションで実測値より10%程度早く成長を予測できること。

研究開発項目の達成度③



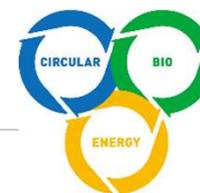
研究開発項目	中間目標 (2024年3月末)	達成度	最終目標 (2026年3月末)
④ 地熱発電プラント全体のO&M最適化の研究開発	<p>【④-1】</p> <ul style="list-style-type: none"> 発電設備向けおよび蒸気設備向けの管理アプリを開発する。 	<ul style="list-style-type: none"> 発電設備向け管理アプリは2022年度末に完成。蒸気設備向けアプリは2023年度末完成予定。 蒸気設備向けアプリとして、特定の坑井を対象とした蒸気流量分離ロジックを搭載、2024年度に他の坑井に展開して検証予定 (達成度：2023年度末にて100%見込) 	<p>【④-1】</p> <ul style="list-style-type: none"> 澄川地熱発電所において地上設備（発電設備・蒸気設備）と地下設備（坑井設備・地熱貯留層）を統合した発電プラント全体の操業管理ツールを開発し、試運用と総合評価を行う
	<p>【④-2】</p> <ul style="list-style-type: none"> EnergyWin®を用いて、蒸気生産設備の定常シミュレーションモデルを組み込んだプラントシミュレータを構築する。 EnergyWin®とTOMONI™との連携のため、クラウド環境を整備して、対象とする地熱発電所専用に地熱発電プラント性能評価ツールをマイクロサービス化するREST API等を開発する。 	<ul style="list-style-type: none"> EnergyWinを用いた坑井特性モデルを組み込んだプラントシミュレータは2022年度末に完成。同システムの要素技術を活用して、実証試験地で2022年度に実施された定期検査（定検）の期間前後で発電所の性能変化を分析。 ④-1で開発する発電設備向け管理アプリとの連携システムは2023年度末完成予定。 (達成度：2023年度末にて100%見込) 	<p>【④-2】</p> <ul style="list-style-type: none"> 開発したツールおよび最適化手法を用いて、地熱発電所の定検前後におけるプラント性能変化を解析・評価するとともに、本開発ツールおよび最適化手法の有用性を評価する。



研究開発項目の達成度④



研究開発項目	中間目標 (2024年3月末)	達成度	最終目標 (2026年3月末)
⑤ 技術実証	<ul style="list-style-type: none"> 澄川地熱発電所ならびに滝上発電所の蒸気設備において、個別技術の試験を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> 個別技術である配管厚計測は、澄川地熱発電所では腐食の影響が大きい箇所が無かったため、大沼地熱発電所にて計測を開始し、現在も継続して実施している。二相流計測については澄川地熱発電所での実証試験を実施した（達成度 100%）。 	<ul style="list-style-type: none"> 本事業で開発した技術を地上設備（発電設備・蒸気設備）と地下設備（坑井設備・地熱貯留層）を統合した発電プラント全体のシステムとしてまとめ、澄川地熱発電所において、その有用性について実証試験を行う。 澄川地熱発電所において2019年度比較で利用率が向上することを実証する。（実証にあたっては、事業者が実行した部分の改善率と各種事情で実行できなかった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）



- 各要素技術の精度向上
- 各要素技術の統合（TOMONI™(三菱重工業)）
- 地上設備シミュレーションモデルと貯留層・坑井に係るAIおよびシミュレーションモデルを連携して、双方の特性がマッチする運転点を算出
- 実証実験による検証

- **4種類に区分した各要素技術の開発**
 - A データ統合による最適運転管理手法の構築
 - B 生産井異常の予測・回避技術の開発
 - C データ統合による資源利用の最適化
 - D 非在来型データによる潜在不具合の解消
- **TOMONI™(三菱重工業) をプラットフォームに各要素技術を統合化**
- **各要素技術の実証試験**