

地熱発電技術研究開発/地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発/地熱発電システムにおける運転等の管理高度化に係る技術開発

地熱技術開発(株)西  
日本技術開発(株)  
三菱重工(株)  
(学)早稲田大学  
(再委託)  
(国)九州大学  
三菱重工(株)

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)9072

## 事業概要

### 1. 期間

開始 : 2018年7月

終了（予定） : 2021年3月

### 2. 最終目標

実際の発電所のヒアリング調査に基づき、地熱発電所の坑井（流体流入点～坑内～坑口）～蒸気設備・還元設備～発電設備において、最適操業条件決定システム」と「故障予兆監視・検知システム」による操業アシストシステムを構築して、経験の短い技術者のアシスト、発電所トラブルの回避や性能低下の早期発見によって、地熱プラントのトラブル発生率の**20%**抑制と設備利用率の**10%**向上を目指す。

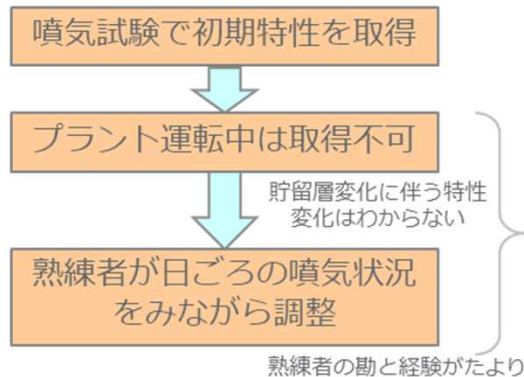
### 3. 成果概要

- ①既設発電所のデータに基づく生産井の系統除外現象の分析
- ②シミュレーション（発電サイクル・坑井流動（定常・非定常））に基づく現象の分析とO&Mの最適化
- ③AI（深層畳み込みニューラルネットワーク等）・IoT（坑口加速度計測）による系統除外現象予知の実現、ドローンによる熱水系統点検精度向上
- ④既設発電所をベースにしたモデルで生産井の坑口制御による利用率向上効果のシミュレーション（発電サイクル・坑井流動）による検証（利用率15%向上）

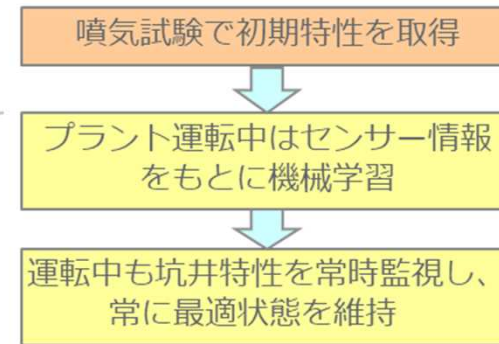
## 今回の研究開発のあらまし

- 現状坑井の弁運用は、坑井特性を熟知した熟練者の勘と経験のもと操作・設定を行っている。
- これに対し、坑井特性を機械学習システムで自動取得し、最適な坑井運用指示を提示することにより省力化を図る。

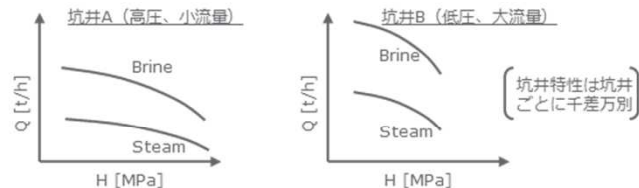
### 現状のプロセス



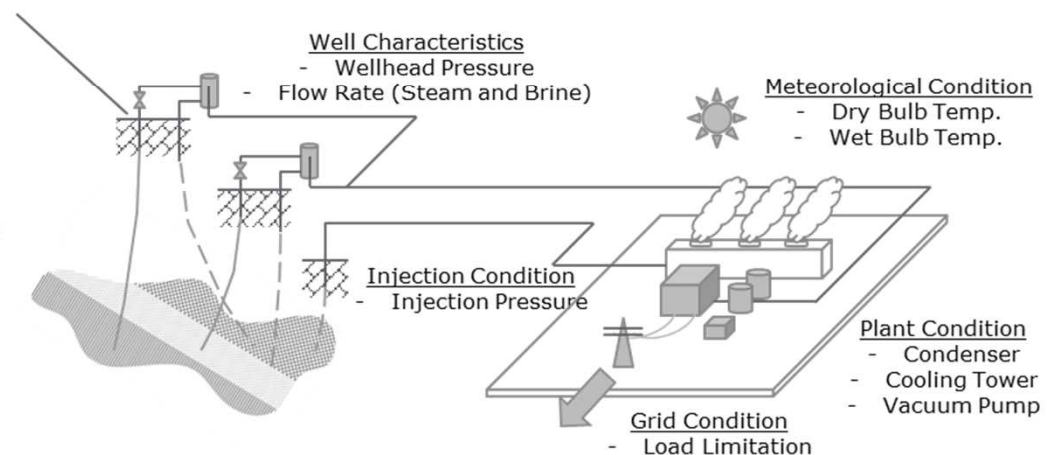
### IoT/AIによる最適化プロセス



### 坑井特性がわかれば...



- 1) 各坑井の噴気量設定の最適化が可能となる。
  - 地下からの水の抽出を最小限とする組み合わせは？ (比エンタルピーが最大となる条件の特定)
  - 冬場出力超過する際に各坑井をどの程度絞るか？
- 2) 貯留層の将来予測と保全が可能となる。
  - 減衰の早い坑井からの抽出は控える
  - 過熱化傾向のある坑井へのアラーム



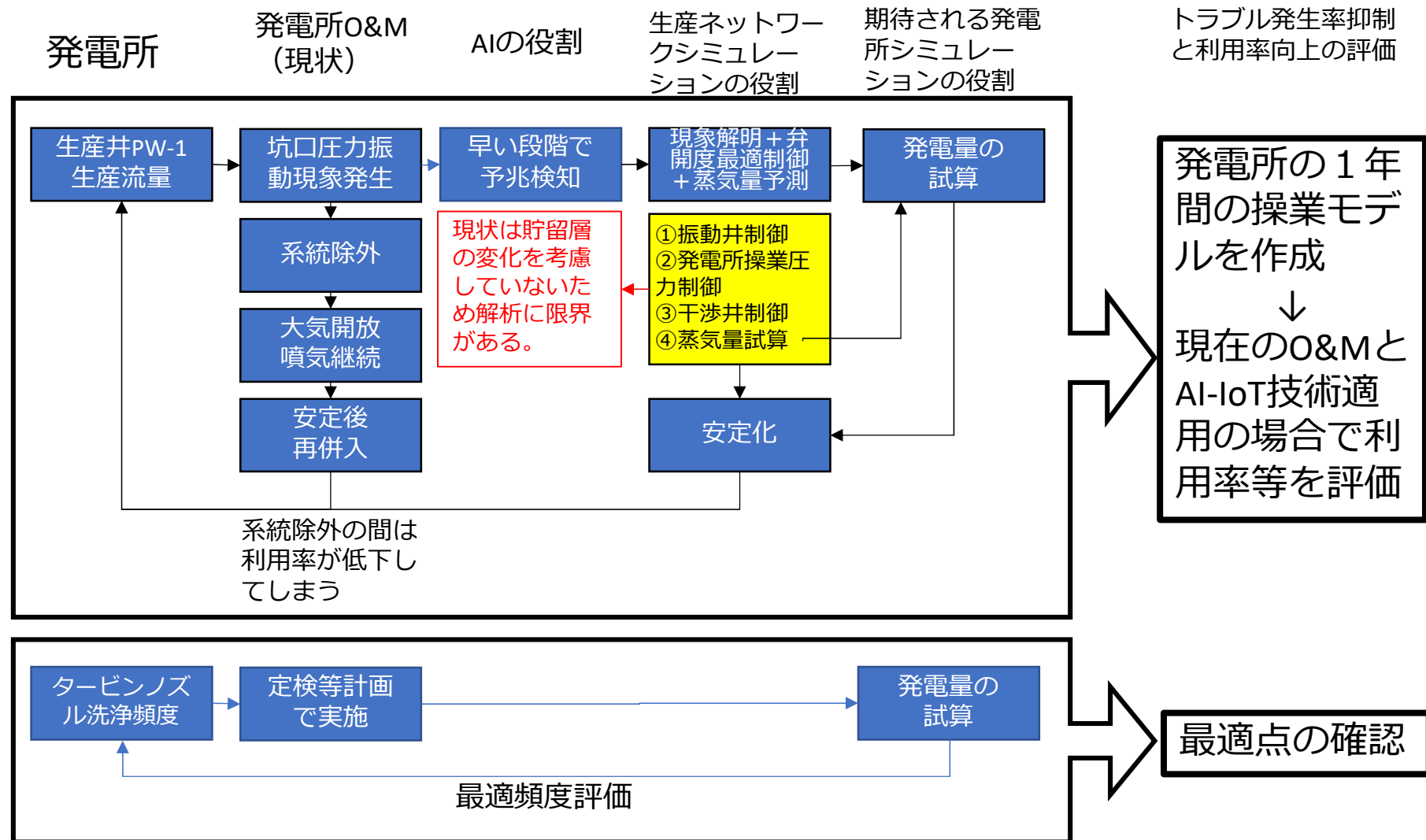
# 研究開発の内容・目標

## 研究開発の目標

実際の発電所のヒアリング調査に基づき、地熱発電所の坑井（流体流入点～坑内～坑口）～蒸気設備・還元設備～発電設備において、「最適操業条件決定システム」と「故障予兆監視・検知システム」による操業アシストシステムを構築して、経験の短い技術者のアシスト、発電所トラブルの回避や性能低下の早期発見によって、地熱プラントの稼働率と設備利用率の向上に寄与する。

研究項目 (担当)	中間 (FY2018) 目標	最終 (FY2020) 目標
①全体システム設計 GERD (システム実装・実証)	プラント操業模擬モデルの 基本形構築	「最適操業条件決定 システム」と「故障予兆監視・ 検知システム」  ↓ ①トラブル発生率の20% 抑制 ②利用率の10%向上 を目指す。
②蒸気部門・発電部門O&M 最適化 西技・三菱重工 (MHI)	プラント不具合把握方法 の体系化	
③蒸気生産ネットワークシミュレータ GERD (九大)	坑口情報から坑口生産 特性曲線自動計算	
④M2Mセンサ技術 GERD	地熱用M2Mセンサ抽出	
⑤AI技術O&M最適化 早大	推定システム概念設計	

①全体システム設計：実証に使用した事例（既設発電所のデータに基づき作成）



②-1 蒸気・熱水輸送設備のO&Mの最適化

## 2019度までの検討と2020年度の検討 (既設発電所生産井PW-1勢力低下の原因検討)

【課題】 地上設備の運転データから坑井の最適運用手法を体系化する。

【地上設備の運転データを使って発電量に影響する生産井PW-1の噴出停止を低減】  
噴出停止しない運用（影響度の大きい坑井等の調整）



【FY2019：全運転データを対象とした相関評価】

- 発電設備の変化の影響有無 ⇒ PW-1勢力低下を示す相関なし
- 配管で繋がる他坑井の圧力干渉の影響有無 ⇒ (同上)
- 蒸気井間、還元井と蒸気井との干渉有無 ⇒ 蒸気井間の相関を確認

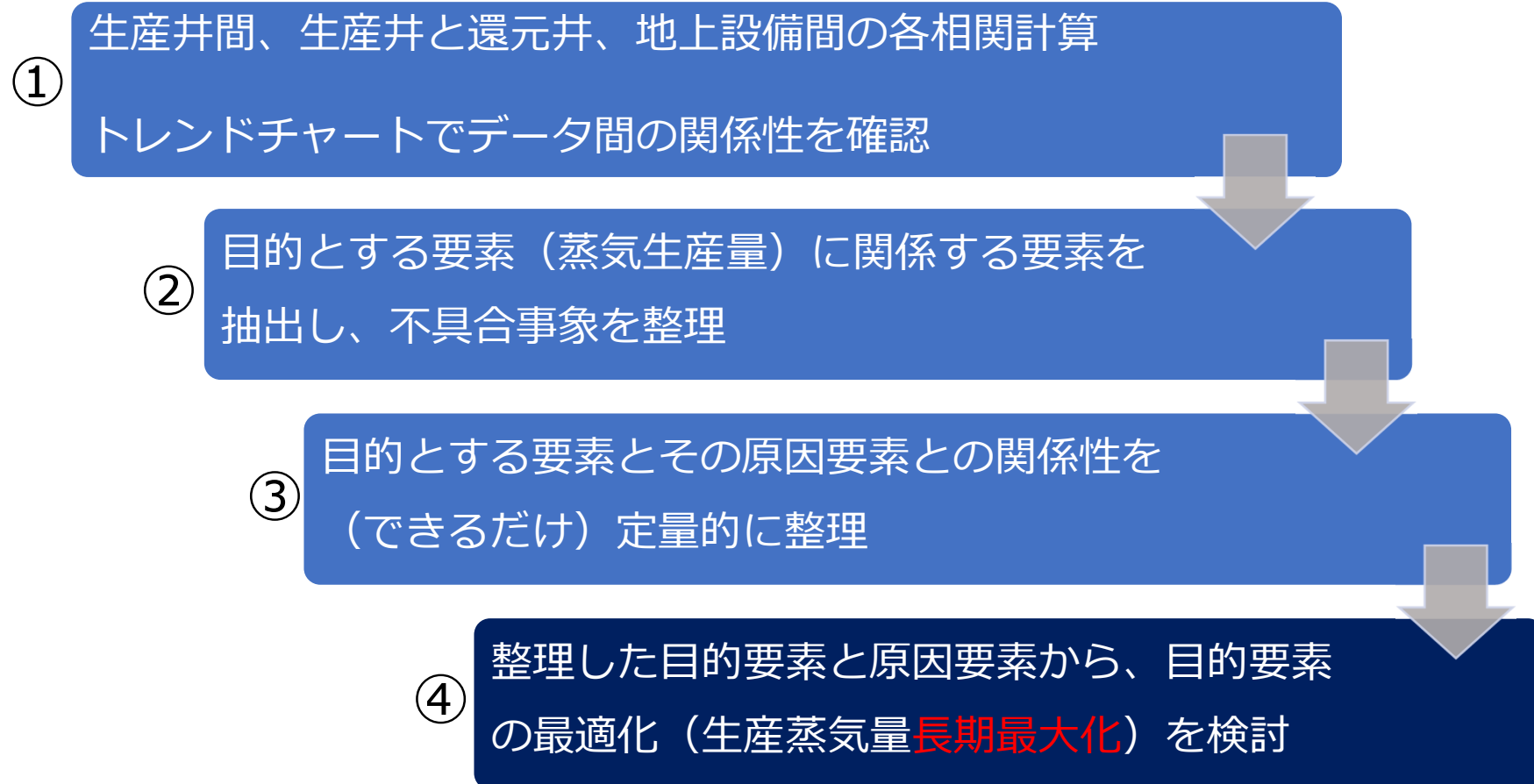


【FY2020：不具合事象の整理 → 定量化 → 対策案検討】

- 蒸気井間、および還元井と蒸気井との干渉有無  
⇒ PW-1の噴出安定に係る運転状態を確認

②-1 蒸気・熱水輸送設備のO&Mの最適化

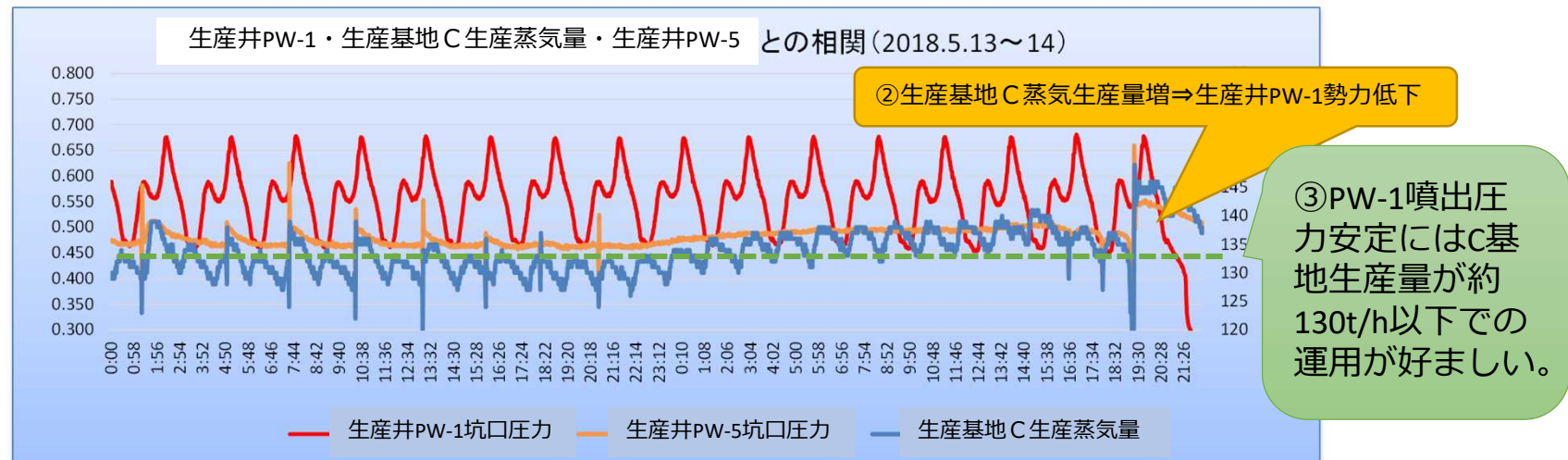
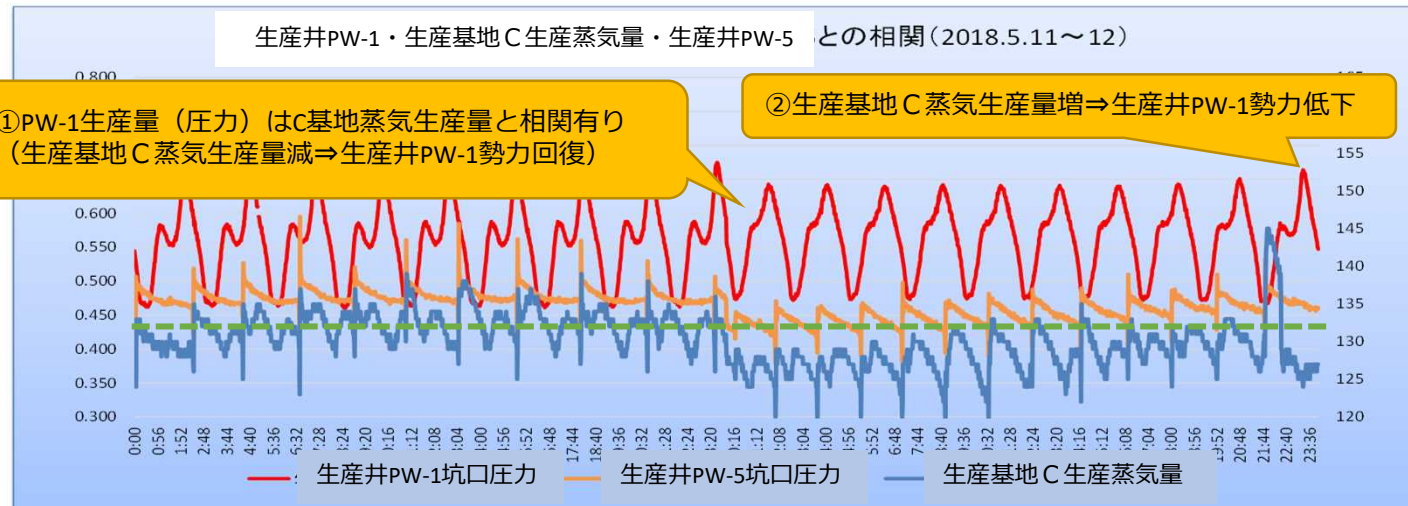
## 成果（蒸気生産量の最適化検討方法の体系化）





②-1 蒸気・熱水輸送設備のO&Mの最適化

(実事例) 生産基地C蒸気生産量の生産井PW-1への影響



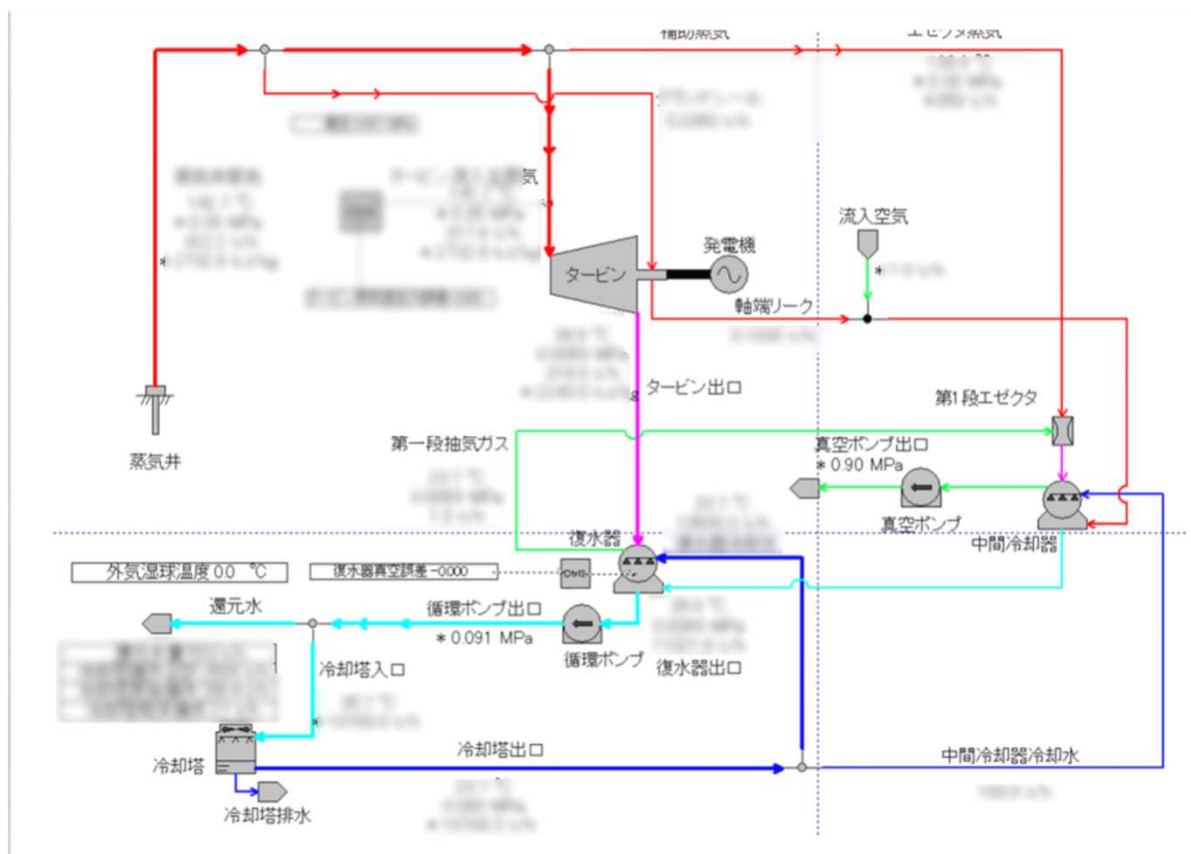
④プラント全体の長期運用としてC基地生産量130t/hが適切か検討要



## ②-2 発電設備のO&Mの最適化（地熱発電設備シミュレーションモデル構築）

2019年度までに構築した概念設計モデルを元に、地熱発電設備シミュレーションモデルを構築した。

発電所運転データをもとに算出した各機器の性能特性パラメータを設定することにより、発電設備の運転状態をシミュレートすることが可能。



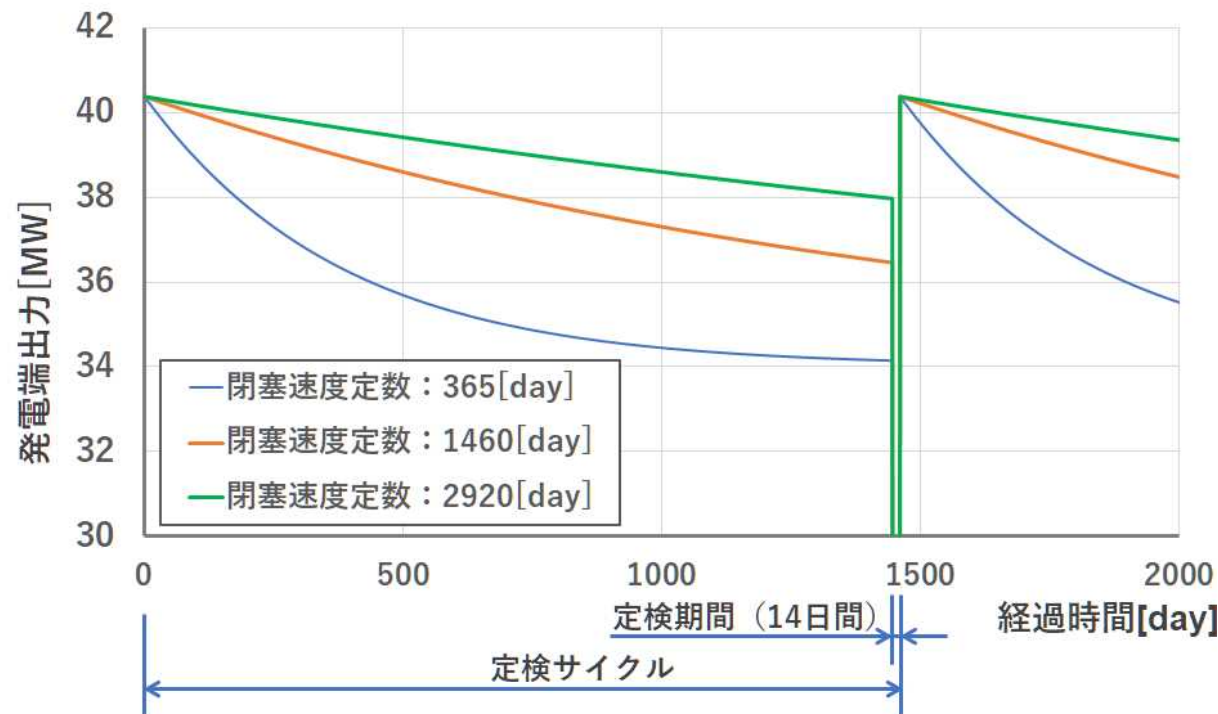
シミュレーションプログラムは、EnergyWin®（（一財）電力中央研究所製 発電システム熱効率解析汎用プログラム）による。  
なお、本ページに記載のモデルサンプルは、電力中央研究所報告M09008記載の内容をもとに再構成した。

## ②-2 発電設備のO&Mの最適化（シミュレーション事例－タービンノズル閉塞の影響）

- ・シミュレーション例として、タービンノズルが経時的に閉塞しており定検時の解放清掃で清浄化する場合についての発電出力予測計算例を示す。

（仮定）

- ・定検サイクルを1年～8年とし、定検期間を2週間とした。
- ・発電設備の最大出力を40MW級と仮定、売電単価および定検費用は公知文献をベースに設定した。
- ・蒸気生産量変化や気温変化は考慮しないものとした。



### タービンノズル開口率

$$y = y_0 - y_m (1 - e^{-t/\tau})$$

$y$  : ノズル開口率[%]

$y_0$  : 初期ノズル開口率[%]

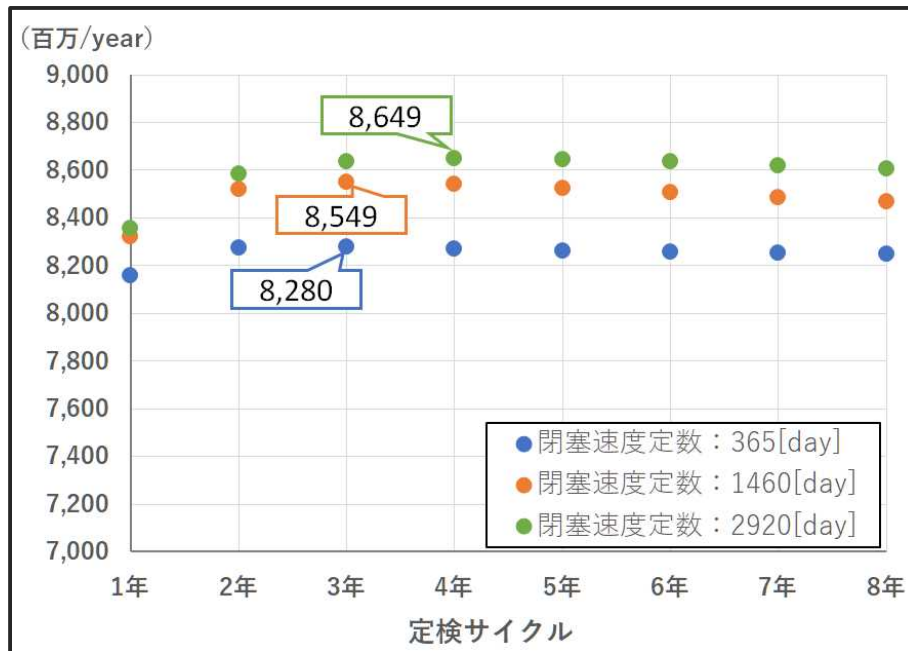
$y_m$  : 最大ノズル閉塞率[%]

$\tau$  : 閉塞速度定数[day]

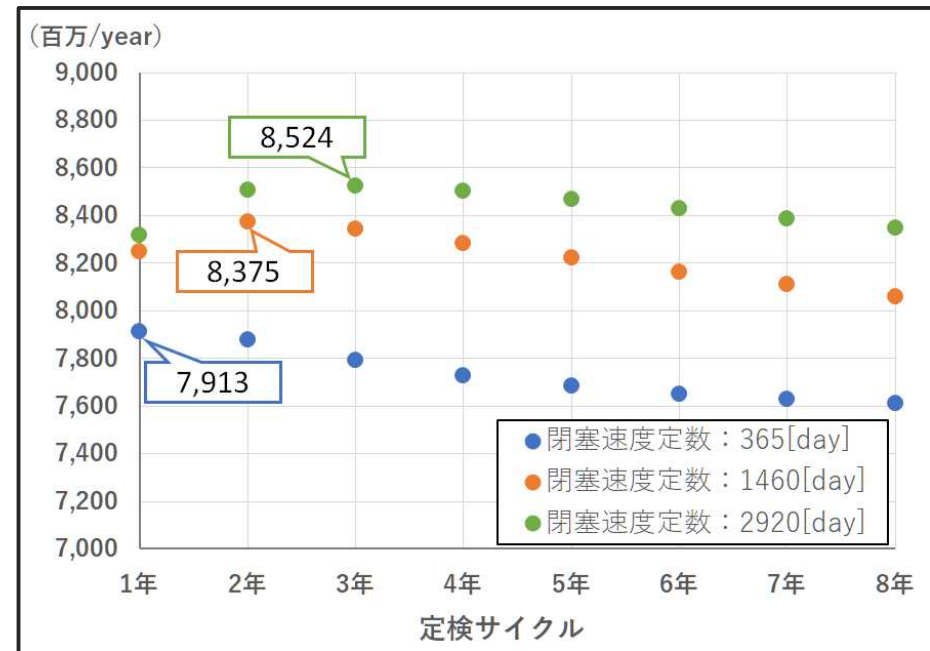
$t$  : 経過時間[day]

## ②-2 発電設備のO&Mの最適化（シミュレーション結果一定検インターバルの影響）

- ・ シミュレーション結果を示す。
- ・ 一般的に定検インターバルは長いほうが良いとされるが、スケールによる閉塞速度が極端に速い場合には定検期間を短くとったほうが経済的となるケースもあることがわかった。
- ・ ただし、本シミュレーションは仮想的な条件設定による計算例であり、それぞれの発電所の実態に応じた条件設定による詳細検討が重要である。



最大ノズル閉塞率10%



最大ノズル閉塞率20%

(条件)	タービン入口主蒸気圧力	: 一定
	大気湿球温度	: 20℃
	蒸気タービン効率	: 閉塞率10%で蒸気タービン効率1%低下
	売電単価	: 26円/kWh ※ 1
	定検費用	: 212百万円/回（建設費の1%を想定）※ 1
	定検期間	: 2週間

※ 1 日本地熱開発企業協議会資料より

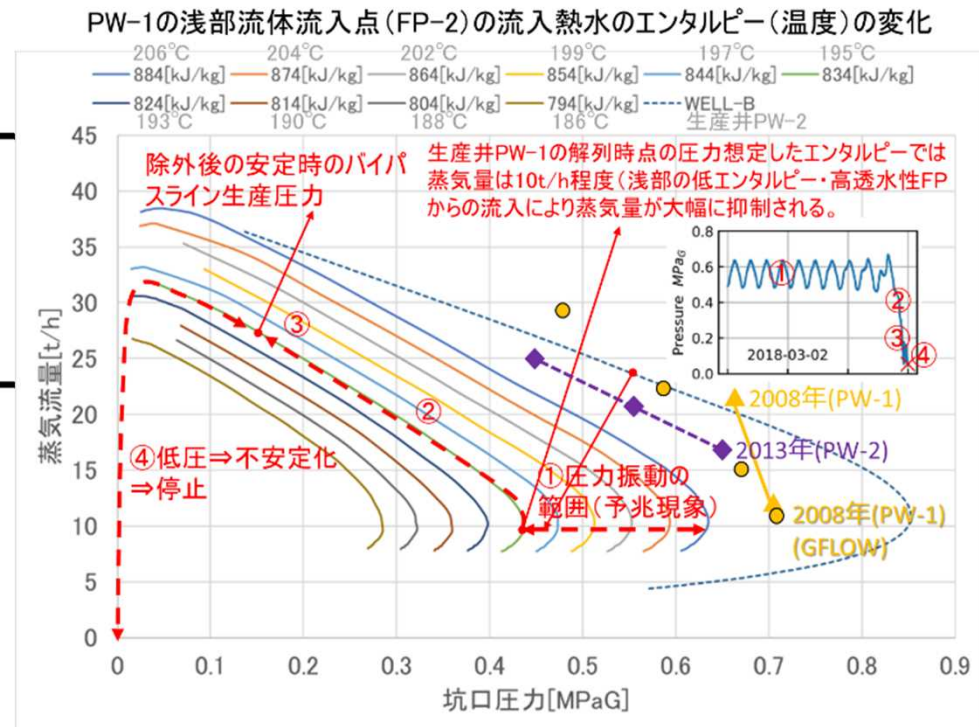
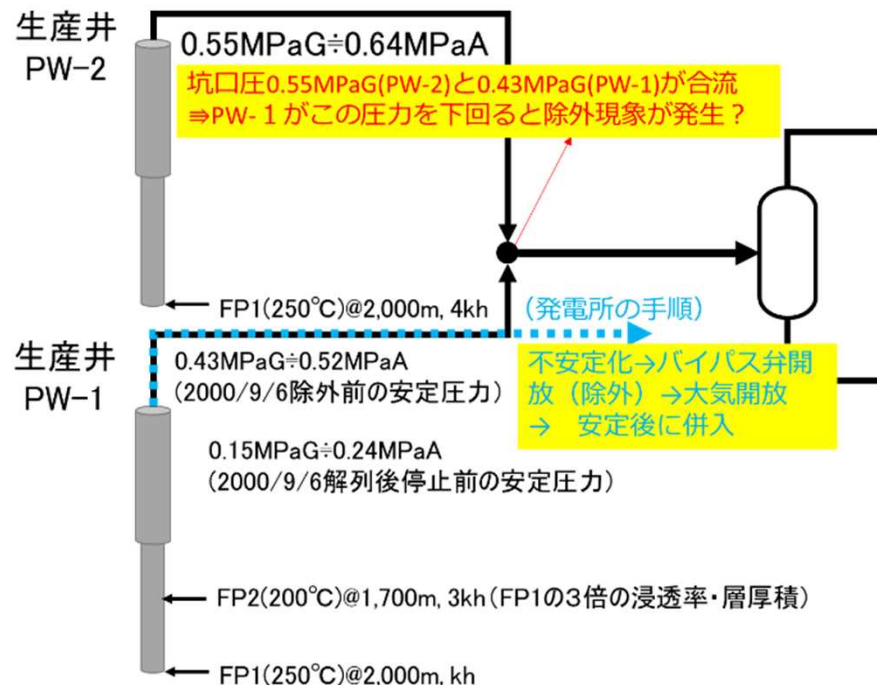
### ③定常坑井流動シミュレーション

#### 地熱生産井坑内流動の系統除外現象の坑口特性曲線の変化からの推定

(定常シミュレーションなので非定常な坑井の振動は解析できない⇒非定常シミュレーション(次ページへ))

既設地熱発電所で発生している  
2本の生産井における系統除外現象 ⇒

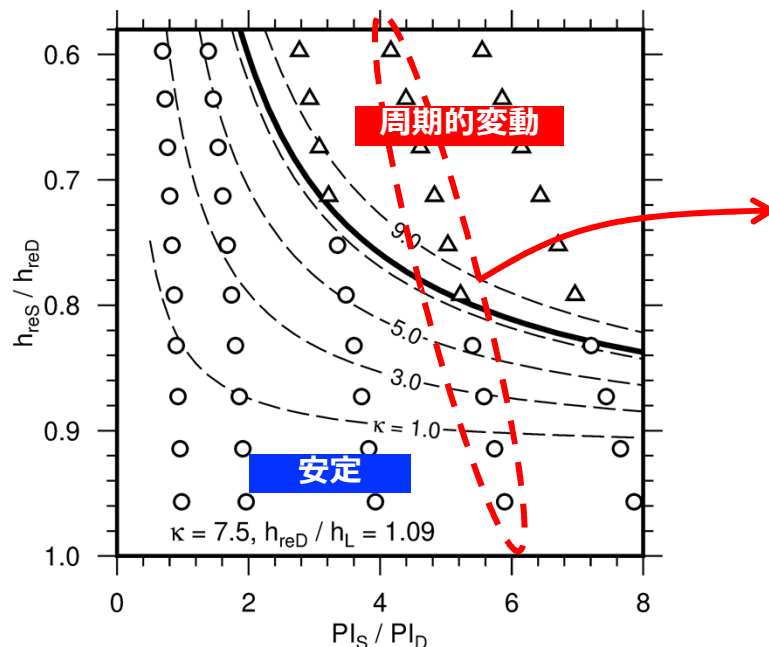
定常坑井留層シミュレーションによる  
2箇所の流体流入深度の流体変化から  
坑口特性曲線の変動を導出して現象を推定



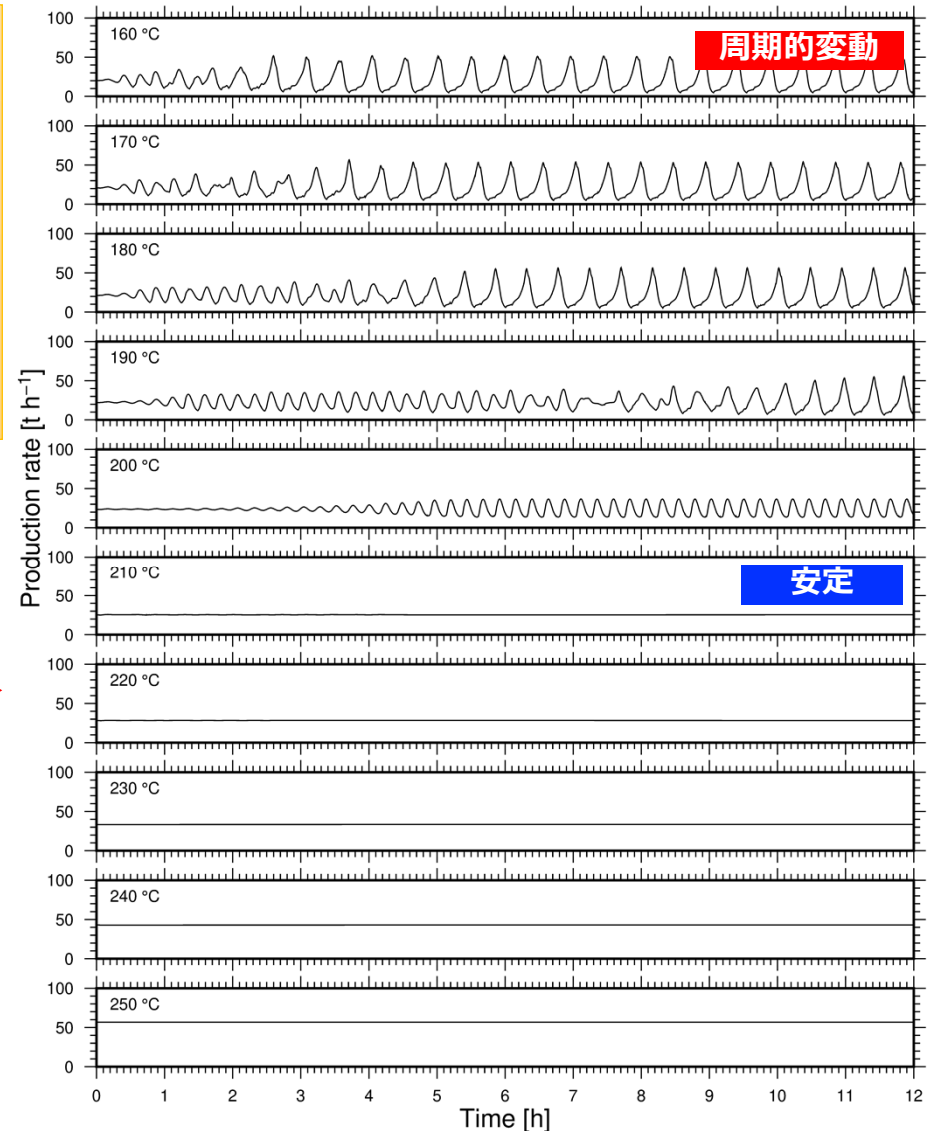
### ③非定常坑井流動シミュレーション

## 地熱生産井坑内流動の安定条件の推定

先行研究（Matsumoto et al. (2021) Geothermics 89.）が簡略化した条件下で明らかにした安定条件が、現実に応じた条件の坑井モデルでも成立することを確認。検討対象の地熱生産井の安定条件を推定した。



坑内流動の安定条件



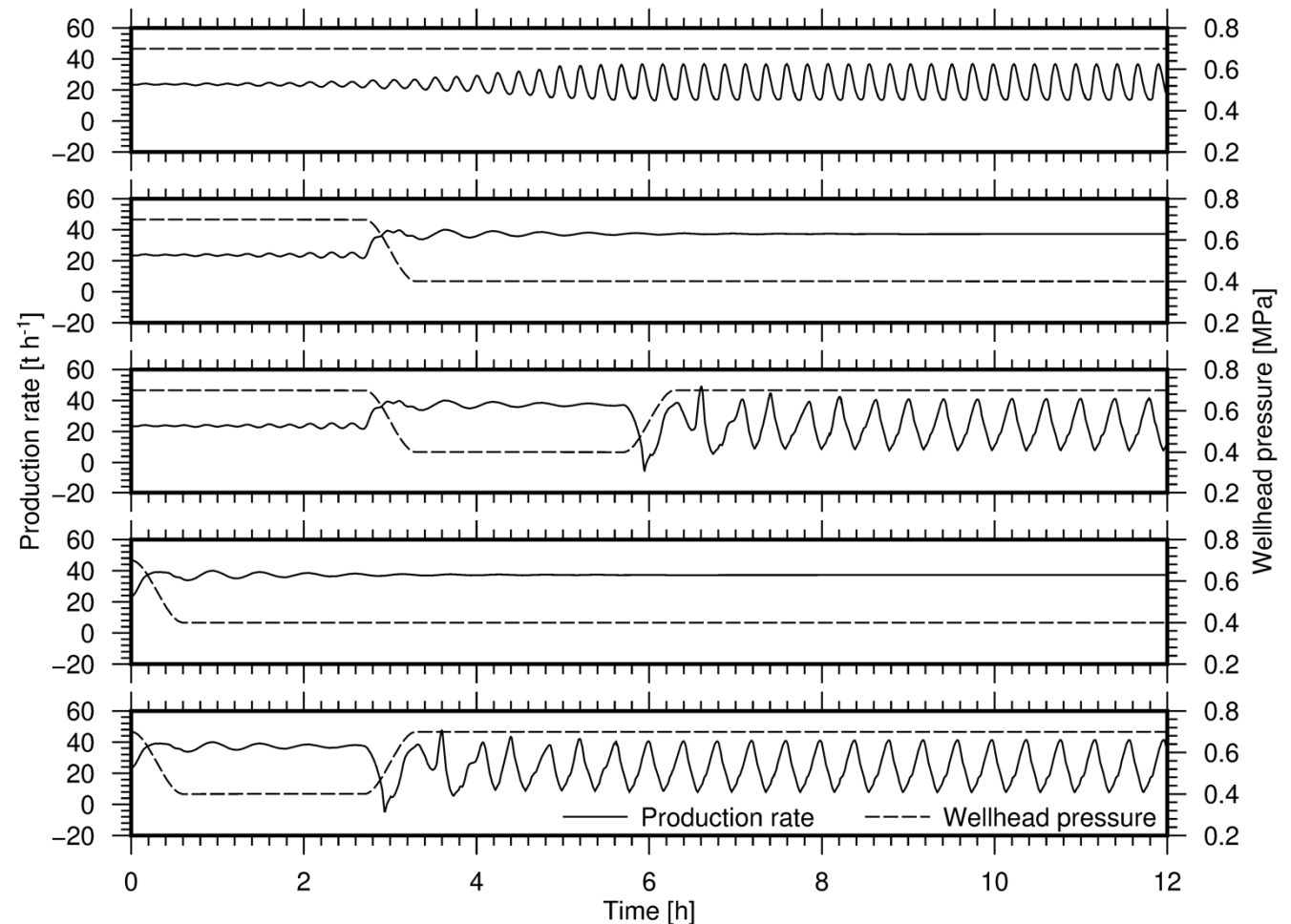
浅部貯留層温度別の噴出流量経時変化 13 / 24



### ③非定常坑井流動シミュレーション

## 坑口バルブ操作に対する応答の再現

坑口圧力の変化（坑口バルブ操作）に対する坑内流動の応答の再現を試みた結果、バルブ開度増加による流動安定化等、現実の坑井で観測される応答の一部再現に成功した。今後の課題として、更なる幅広い応答の再現には、より詳細な貯留層モデルの考慮等が必要と考えられる。



種々の坑口圧力の変化（破線）に対する噴出流量の応答（実線）

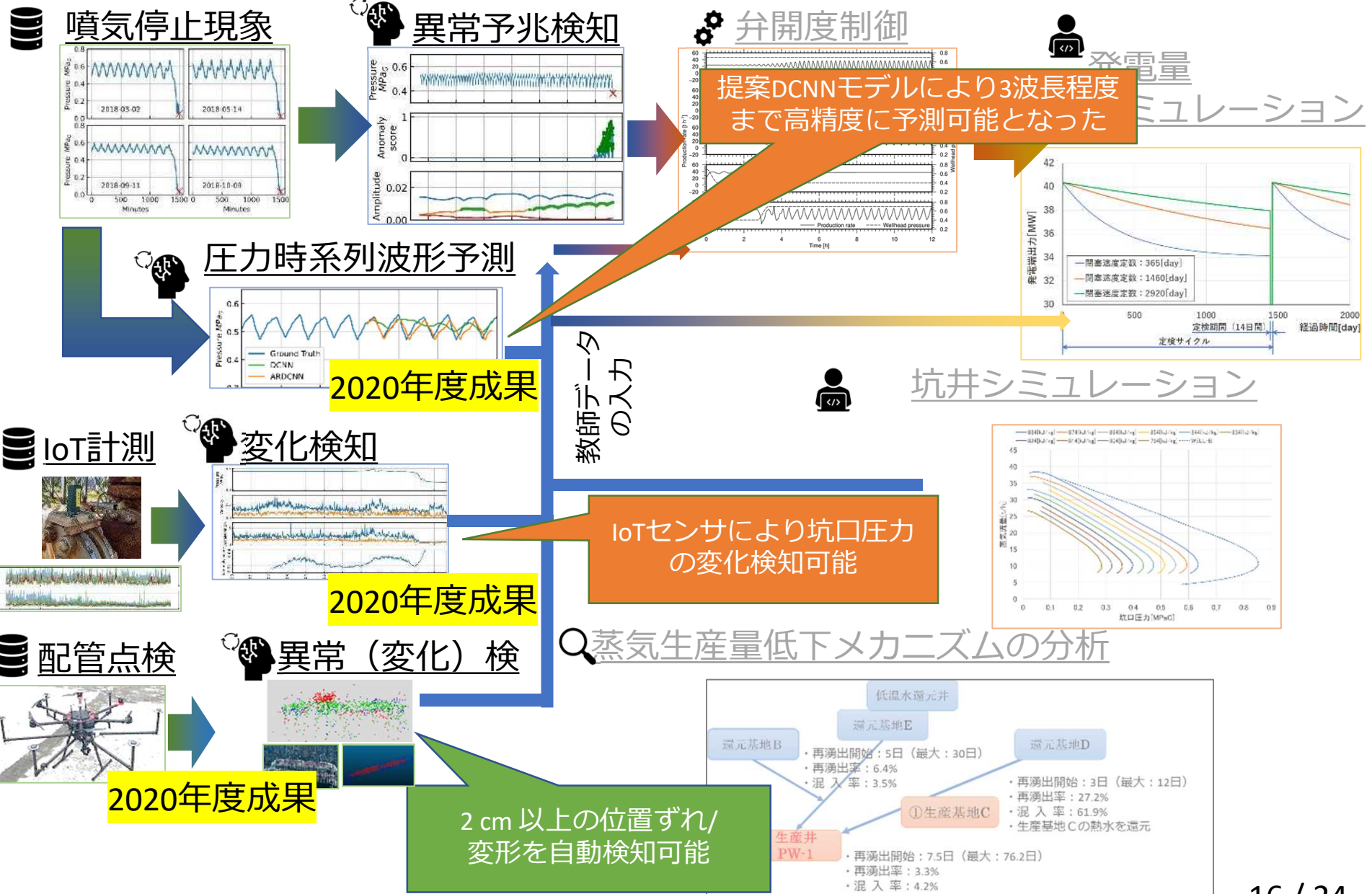
#### ④地熱特有のM2Mセンサー技術の開発 二相流量計調査

従来の多相流気液二相流(蒸気・熱水混相流)の測定は、気水分離器により飽和蒸気と飽和水に分離し、分離後の単相流体の流量を測定する方式が一般的である。この方法は高い精度をもたらすことができる一方で気水分離器等が必要となり、装置が複雑化・大型化すること、高価となることなどの欠点があり、地熱発電所の集合式気水分離器では個々の坑井の流量が判らず不明情報が多い問題がある。このため、液体と気体とを分離せずに多相流のまま、液体と気体の各流量を同時に計測可能とする気液流量計の開発・製品化の市場調査をおこなった結果、研究中のいくつかの有望なセンサが見つかった。

測定量による分類	流量計タイプ	測定原理	二相流体	特 徴
体積流量	差圧式	絞りの前後に発生する差圧が流量の2乗に比例する	×	・実流校正が不要・圧損が大きい ・直管長が必要・比較的安価
	電 磁	磁界の中を導電性流体が横切ると流速に比例した起電力が発生する	×	・圧損なし・固形分を含む液体可 ・導電性液体のみ
	面 積	テーバ管内のフロートの位置が流量に比例する	×	・現場指示計として安価 ・精度やや落ちる
	超音波	流れに斜めに伝播する超音波の速度または周波数が流速によって変化する	×	・圧損なし・配管の外部より検出可能(クランプオンタイプ)
質量流量	熱 式	流体を加熱したとき、上下流の温度上昇が流量によって変化する	×	・小口径気体用が多い ・比較的安価
	コリオリ	振動するU字管などに発生するコリオリ力が、管内を通る質量流量に比例する	×	・液体用質量流量計として精度良い ・比較的高価・中～大口径はなし
積算体積流量	容 積	流体を一定量の「ます」で測り、その回数(回転数)から流量を求める	×	・積算流量計として精度良い ・固形物を含む液体不可・定期的校正が必要
	渦	渦発生体の後流に発生するカルマン渦の周波数が流速に比例する	×	・圧損少ない ・高温・高圧の流体に適用可
	タービン	流れの中においた羽根車またはタービンの回転数が流速に比例する	×	・高精度型あり ・軸受部に寿命あり・定期的校正が必要
研究中	超音波	超音波ドップラー方式	△	・研究中のため、実用化は未定 ・地熱流体実績無し
	電磁波	高周波電磁波と配管重量変化(2点のロードセル)を用いた方式	△	・研究中のため、実用化は未定 ・地熱流体実績あり
	ガンマ線	ガンマ線透過率による密度測定方式	△	・気水比0～0.3までの検知可能 ・地熱流体実績あり



## ⑤AI, IoTによる異常予兆検知, 変化検知技術の開発 (全体成果)



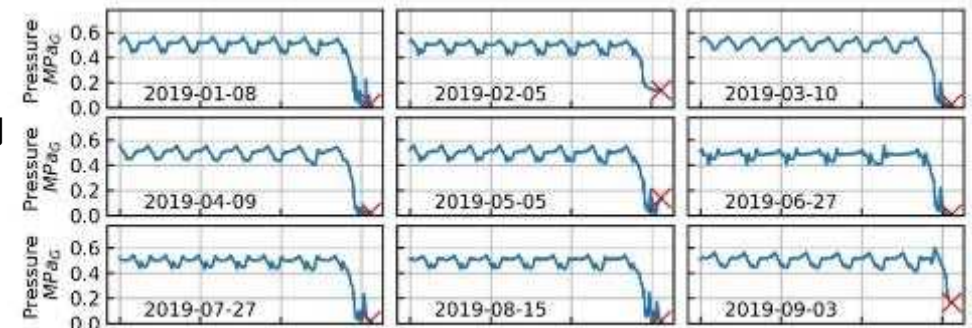
## ⑤AI, IoTによる異常予兆検知, 変化検知技術の開発

### 背景

- 坑口圧力急減後, 不安定化 (持続振動)
- その後, 噴気停止することがあり, 稼働率低下の原因の一つとなっている。
- AI技術により圧力急減の予兆をとらえ, 噴気停止に伴う利用率低下の回避を目指す。

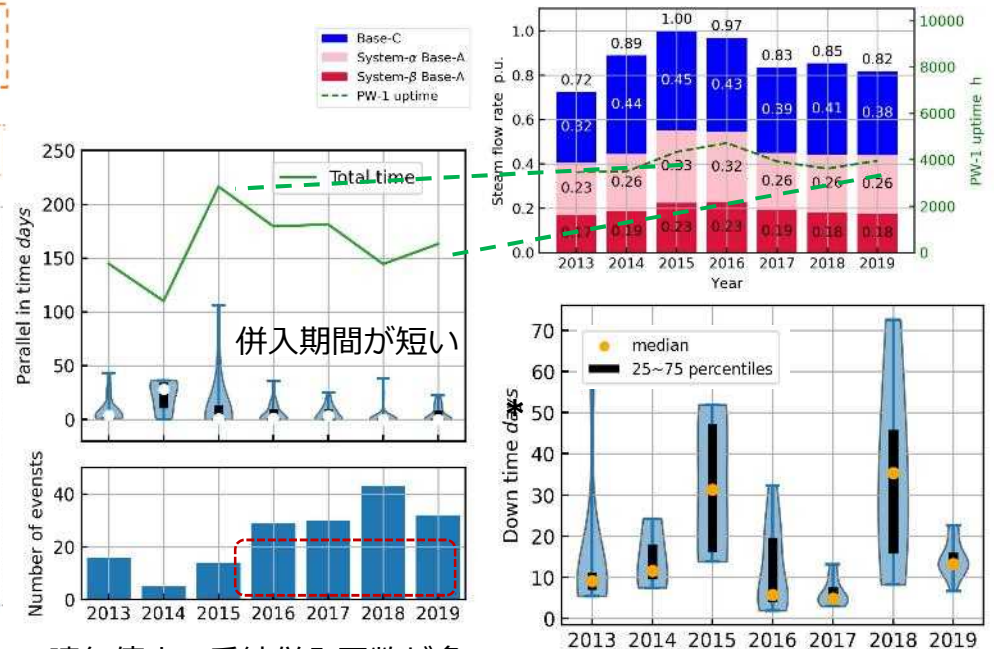
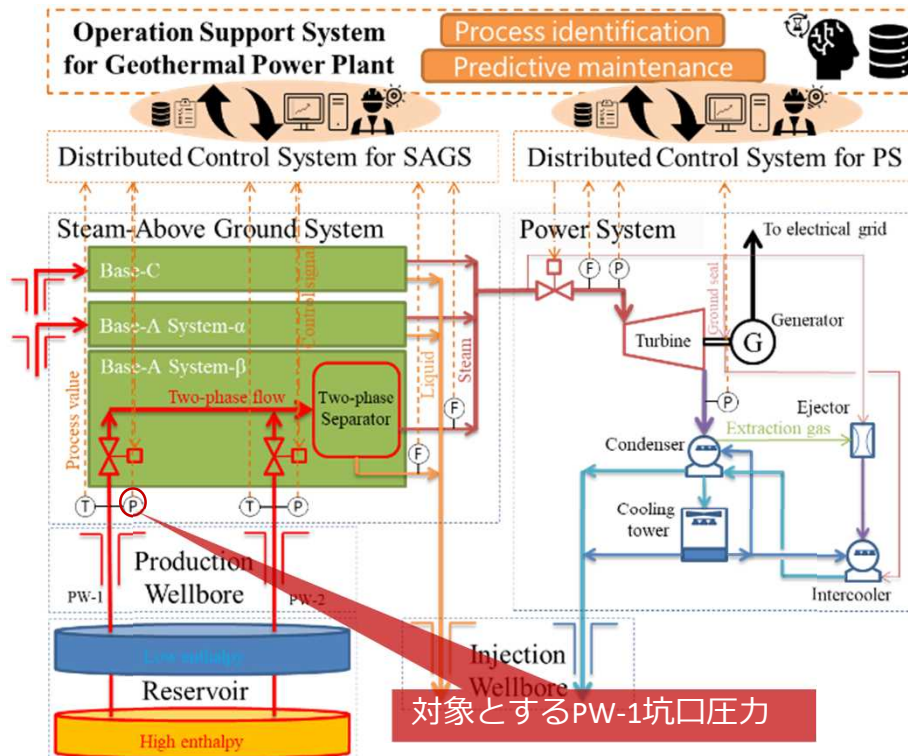
### 2020年度

- IoTセンサによる坑口圧力を変化検知
- 坑口圧力振動波形を高精度に予測
- ドローンによる蒸気・熱水系統点検精度が向上



PW-1坑口圧力振動および噴気停止

A基地β系統は全体の22%の蒸気を生産



噴気停止・系統併入回数が多い

\*「2日以上の併入→除外」イベントを抽出

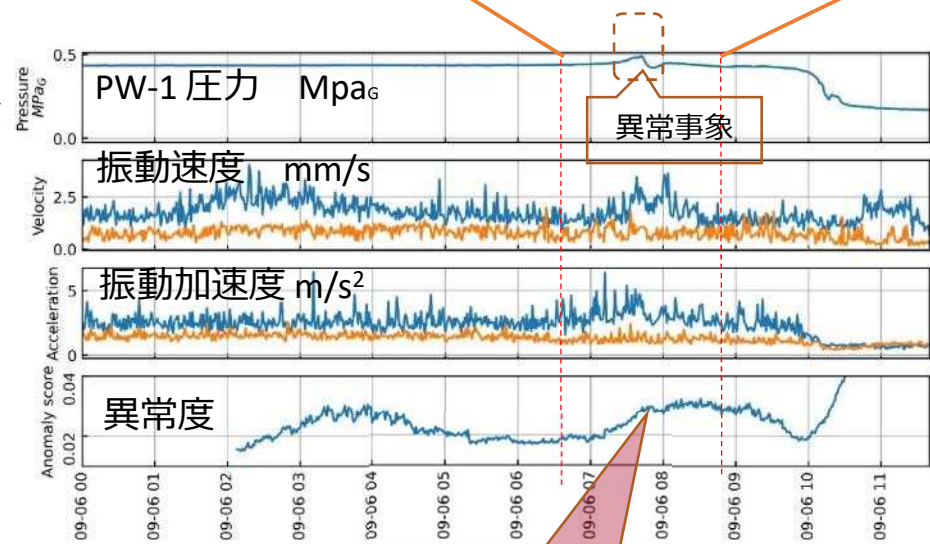
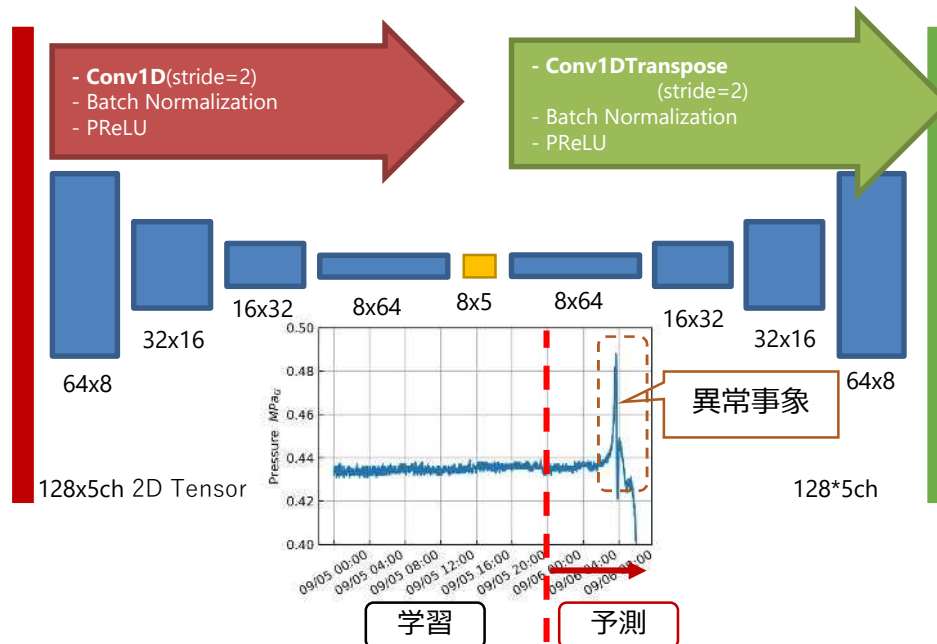
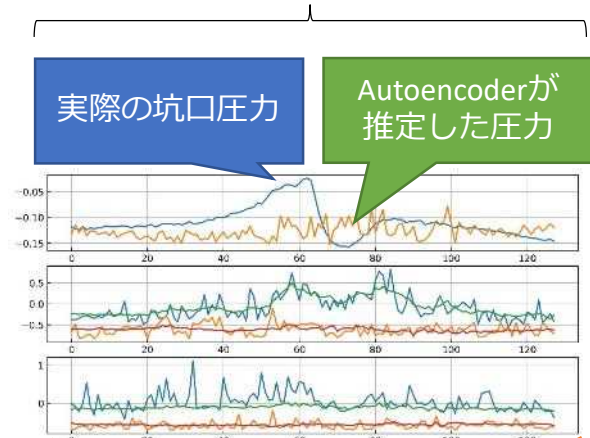
系統除外から再併入まで15日を要する

⑤AI, IoTによる異常予兆検知, 変化検知技術の開発

## 坑口圧力のIoTセンサによる変化検知

- IoTセンサ（振動加速度計）による配管系統の振動計測データを用いたプロセス**状態の変化**検知を試行
  - LoRaWAN通信する無線式の加速度計を坑口の2箇所に設置した
- 坑口圧力ならびに坑口配管系の振動速度と加速度を入力とするオートエンコーダーを構築した
  - 入力を低次元の潜在変数で表し, それを復元するように出力を学習することで, 入力データの典型的なパターンを学習する
  - 典型的なパターンからの乖離によって変化を検知した

両者の乖離から異常度を定義



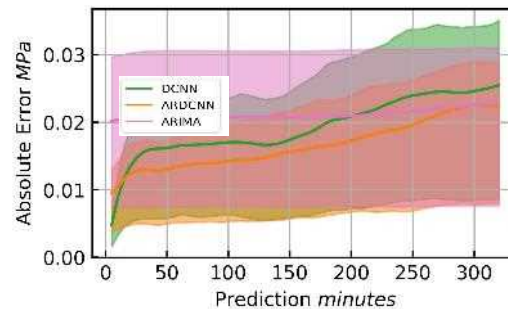
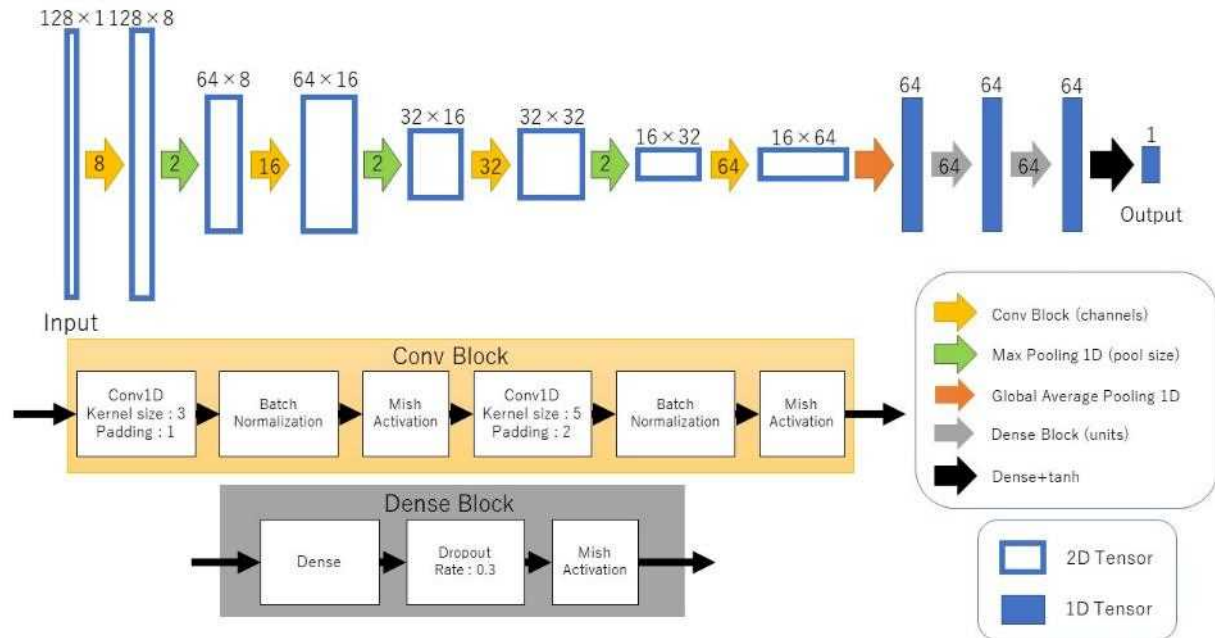
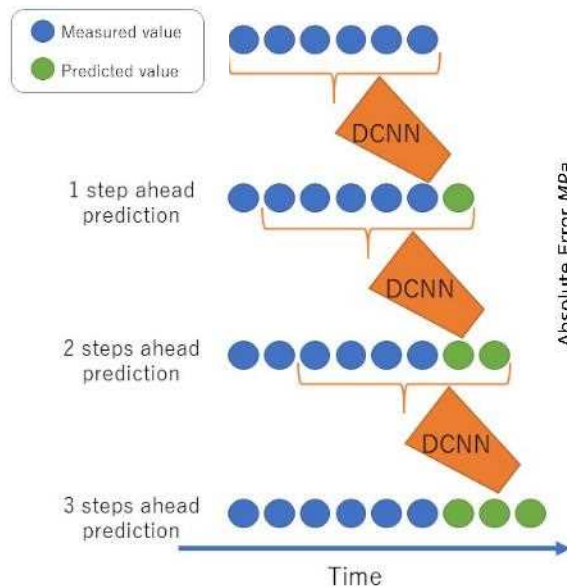


⑤AI, IoTによる異常予兆検知, 変化検知技術の開発

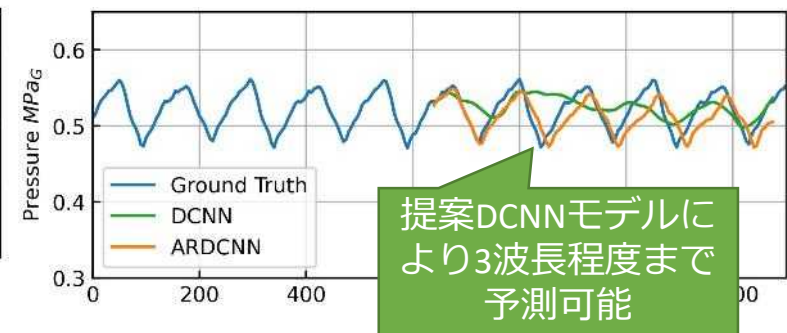
# AIにより圧力振動の時系列波形を高精度に予測

- 周期的な振動波形は各イベント, すなわち系統併入から除外まで, の自己相関係数が異なる
- 単純な自己回帰, 移動平均を使う手法, ARIMA etc., では波形予測が困難である

→自己回帰型CNNモデルを用いて学習時にマルチステップ先予測を行い, 全てステップの損失を合算して最小化した



古典的なARIMAモデルと比較して, 提案手法では短時間先予測精度に優れる

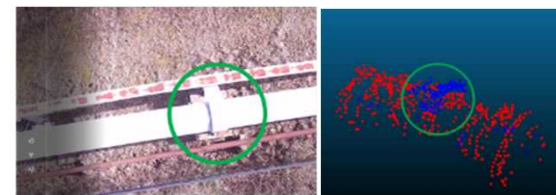
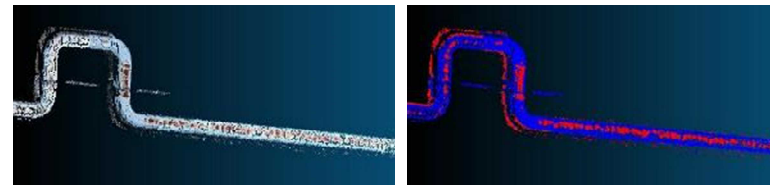
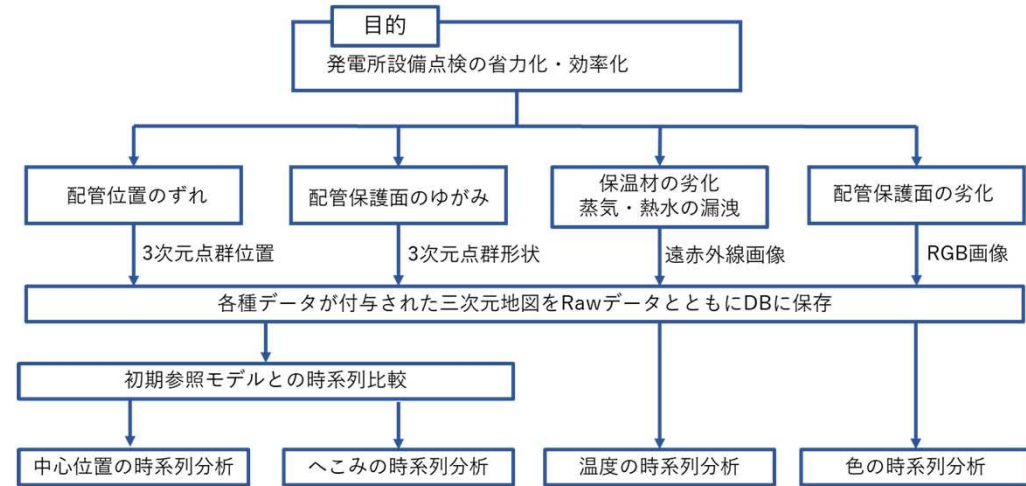
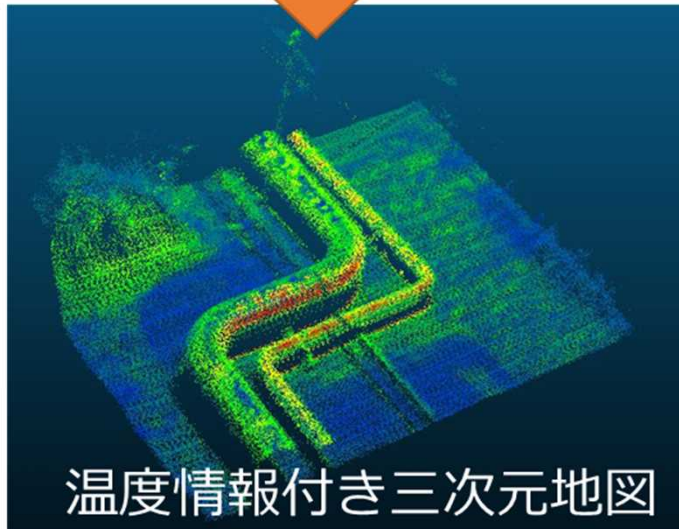
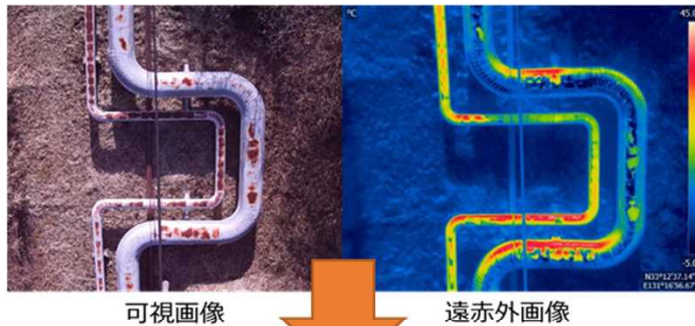


圧力時系列波形予測結果

地熱発電システムにおける運転等の高度利用化に係る技術開発

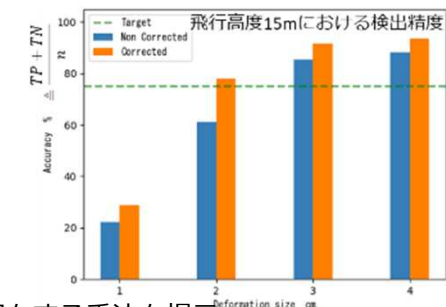
⑤AI, IoTによる異常予兆検知, 変化検知技術の開発

## ドローンによる蒸気・熱水系統点検精度を向上



ドローンによる配管点検

- ・ 配管系等の位置ずれ, 変形, 変色, 温度変化を検知をする手法を提示.
- ・ 上記モデルおよびアルゴリズムの改良により, 各種識別精度向上.
- ・ 配管系統の点群データから3次元配管系モデルを自動推定するアルゴリズム構築.
- ・ 配管系統異常の自動認識精度は飛行経路制御の改善によりさらなる精度向上が期待.



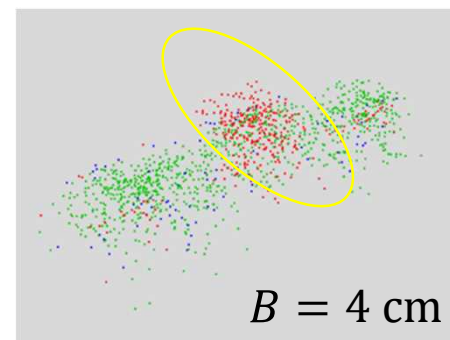
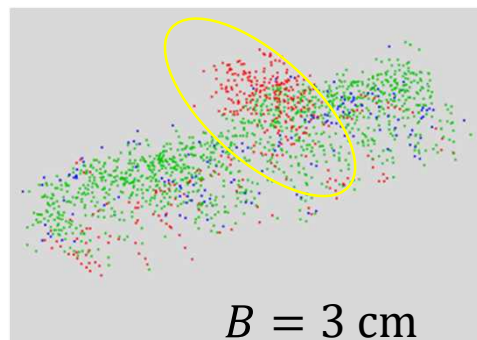
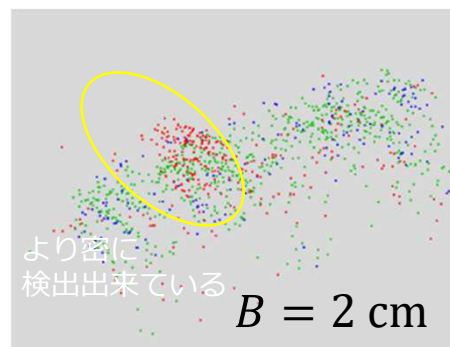
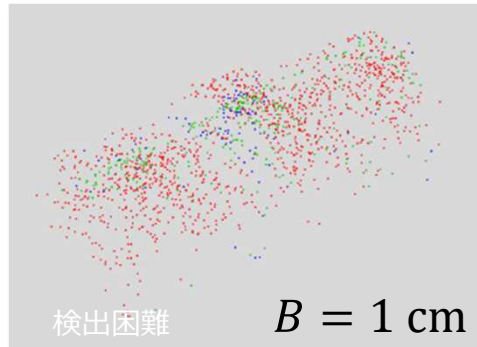
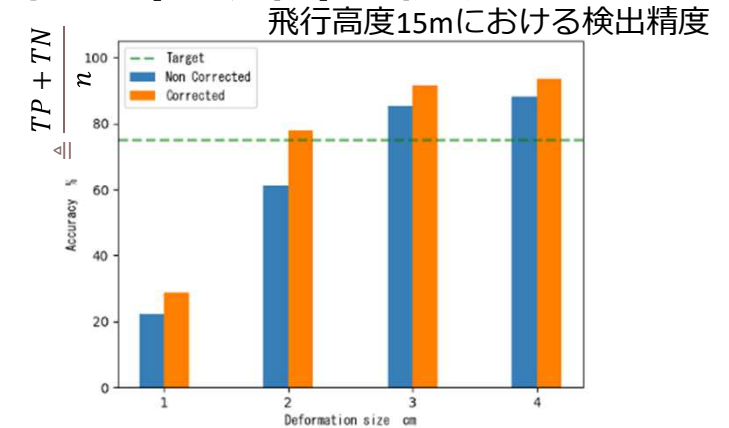
## ドローンによる蒸気・熱水配管の変化（異常）検知

- 5～15 mの飛行高度で **2 cm** 以上の変形を**自動検知**可能
- 2 cm** 程度の位置ずれを **自動検知**可能
- 配管系統変化（異常）の自動認識精度は飛行経路制御を改善すれば, さらなる精度向上が見込める

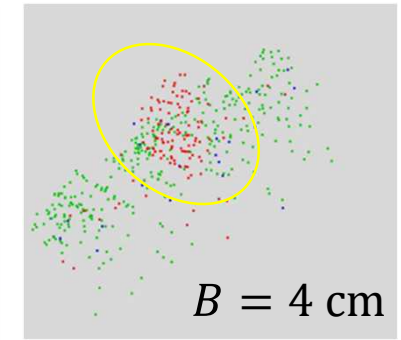
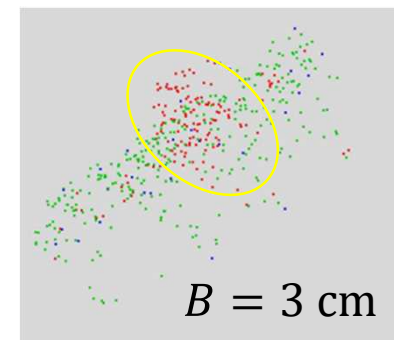
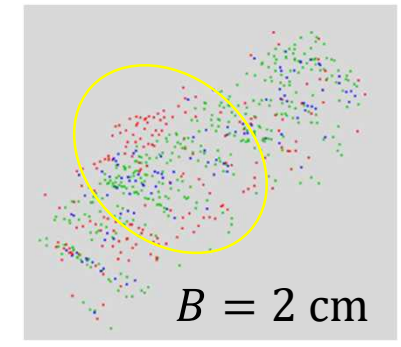
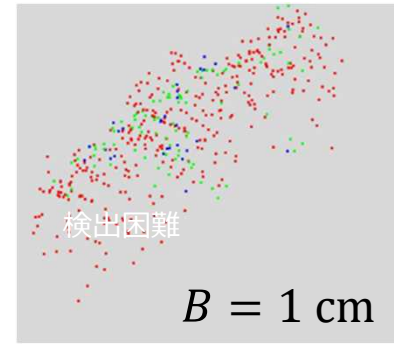
赤：異常と判定された箇所

青：閾値以上に外れたがノイズとして正常と判定された点

緑：正常と判定された点



飛行高度5m



飛行高度15m



## 地熱発電システムにおける運転等の高度利用化に係る技術開発

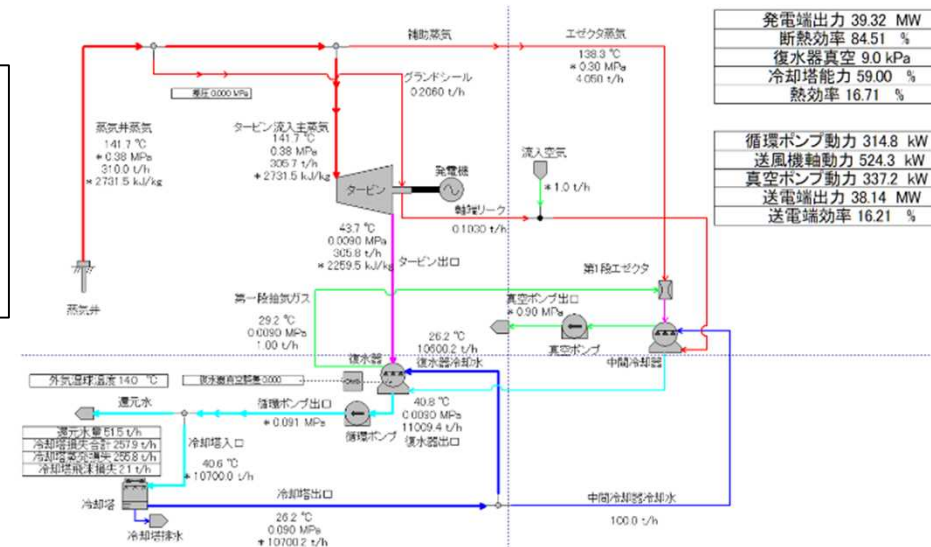
### ①既設発電所を事例としたトラブル発生率抑制と利用率向上効果について（総括）

既設発電所をベースに  
仮定した仮想モデル

タービン入口圧力  
0.38MPa(現状,上図)  
↓  
0.29MPa(下図)

定常坑井シミュレーション  
↓  
生産井毎の生産特性曲線  
↓  
(タービン入口圧力条件での)  
生産井毎の蒸気量、熱水量試算  
↓  
タービン入口での総蒸気量

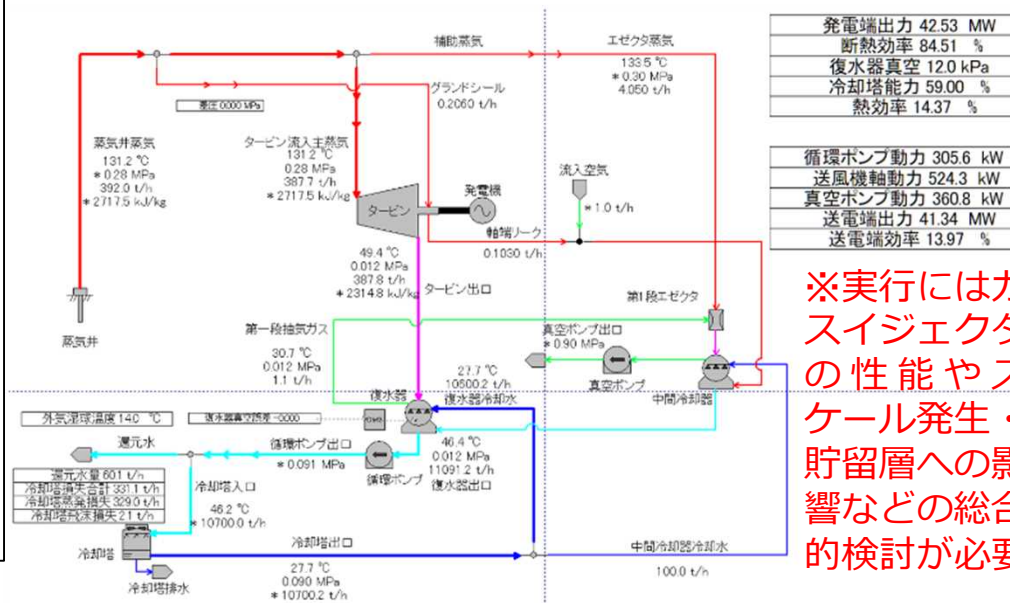
(タービン入口圧力 0.38MPaA、蒸気量 310t/h)



年間発電電  
力量[kWh]

PW-1の系統除外  
あり（年間平均で  
2.36MW(6%)の出力  
低下に相当、トラ  
ブル発生(系統除  
外)回数としては  
30回程度(2019))

(タービン入口圧力 0.28MPaA、蒸気量 392t/h)



※実行にはガ  
スイジェクタ  
の性能やス  
ケール発生・  
貯留層への影  
響などの総合  
的検討が必要

PW-1の系統除外  
なし+蒸気量の  
増加効果

トラブル発生30  
回/年→0回  
発生電力量  
100%→115%)  
+100%の抑制  
+15%の利用率向  
上



## 目標の達成度・課題

研究開発項目	成 果	達成度・課題
(1)全体システム設計	システム統合化の設計およびシステムの動作検証方法の設計（既設発電所のデータに基づく手法検討）を行ったが、AIでの予兆検知は可能であるが、最適化手法について、現実の老朽化して貯留層圧力の低下した発電所では生産井の流量圧力制御が困難であり、最適化には貯留層の変動も考慮した生産井の最適制御を行う、あるいは、発電所の運転圧力の制御も含めた最適制御が不可欠であることが判ったが、運転圧力の変化による還元熱水量やスケールの増大等の影響についても評価が必要である。	既設発電所をベースとした模擬モデルにおいて、発電所で実際に生じている生産井の不安定化と系統除外問題をモデル化して系統除外トラブルに関して、トラブル発生率抑制100%、利用率向上15%の結果を得ることができた。ただし、実行には蒸気タービンのガス抽出器の性能検討やスケールや貯留層への影響について総合的に検討する必要があるため、より正確な最適化には各坑井の二相流量測定や貯留層変動の解明が不可欠であることが判明した。
(2)蒸気・熱水輸送設備のO&Mの最適化	既設の地熱発電所のO&Mの状況に関して要因を検討し蒸気生産量低下の発生メカニズムを分析して、不具合の把握方法を体系化した。発電所のデータについて、地上設備の運転データを使った坑井間の関係性を評価し対応案を検討した。	地熱発電所のO&Mにおける蒸気生産量低下のメカニズム分析から有効な不具合の把握方法を体系化して、s発電所のデータで坑井間の関係性の評価から対応案を提示した。利用したPDA（Process Data Analysis）に関しては未だ十分な結果が得られず、有効性評価は保留する。
(3)地熱発電設備のO&Mの最適化	既設の地熱発電所のO&Mに関して要因を検討しトラブル発生メカニズム分析から不具合の把握方法を体系化した。発電所のデータに基づき、定検サイクル最適化検討のための発電設備モデルおよびシミュレーション手法を確立して最適値を得られることを確認した。	地熱発電所のO&Mにおけるトラブル発生メカニズム分析から有効な不具合の把握方法を体系化して、s発電所のデータで実証できた。

## 目標の達成度・課題

研究開発項目	成 果	達成度・課題
(4)蒸気生産ネットワークシミュレータの開発	坑内二相流動シミュレータ（定常、非定常）の開発を行い、実際の坑井で発生する系統除外現象の解明を行った。既設発電所の不安定な生産井のO&Mの最適化には、貯留層の変動が大きく関わっており、実施計画段階での予想通り、貯留層も含めて解析を行うことが必要であることが明らかになったため、今後の課題とした。蒸気生産ネットワーク全体としては、坑内シミュレータとEnergyWin®の併用によって模擬計算が可能である見通しをつけた。	坑内流動シミュレーションにより、実際の坑井の現象解明が可能であることを実証したが、最適制御については貯留層を含めた制御が不可欠であることが判明し、今後の課題とした。
(5)地熱特有のM&Mセンサ技術の開発	M2Mセンサ技術の現状調査（メーカーヒアリング）と地熱環境で利用可能なセンサー技術調査を実施して、完全な二相流量測定には未だ技術開発が必要であること、弁開度計測は既存の技術が適用可能であることが判明した。	地熱で利用可能な二相流量測定技術については研究開発レベルであり、新たな開発が必要。弁開度測定には利用可能なセンサがあった。
(6)AI技術を活用した地熱発電設備O&Mの最適化	蒸気・熱水系合流蒸気制御系の推定システムとして深層畳み込みニューラルネットワークによる坑口圧力異常検知手法を開発して運転員に替わり、圧力急減という異常の予兆を検知する見込みを得た。また、ドローンによる配管点検システムを開発した。	振動する生産井での圧力急減異常を予兆することができた。振動計の利用については、坑井の変化を検知できる見込みがあったが、観測期間中圧力急減現象に遭遇せず、目的での有効性については保留し、今後の課題とする。 ドローンによる配管点検が可能であることを実証