

地熱発電技術研究開発/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

大里 和己

地熱技術開発(株), 西日本技術開発(株)

三菱日立パワーシステムズ(株), (学)早稲田大学

発表日 2019年10月17日

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

GERD 地熱技術開発株式会社  
Geothermal Energy Research & Development Co., Ltd.

九電グループ  
西日本技術開発株式会社

MI MHPS  
三菱日立パワーシステムズ

WASEDA University  
早稲田大学

## 1. 期間

開始 : 2018年7月

終了(予定): 2021年3月

## 2. 最終目標

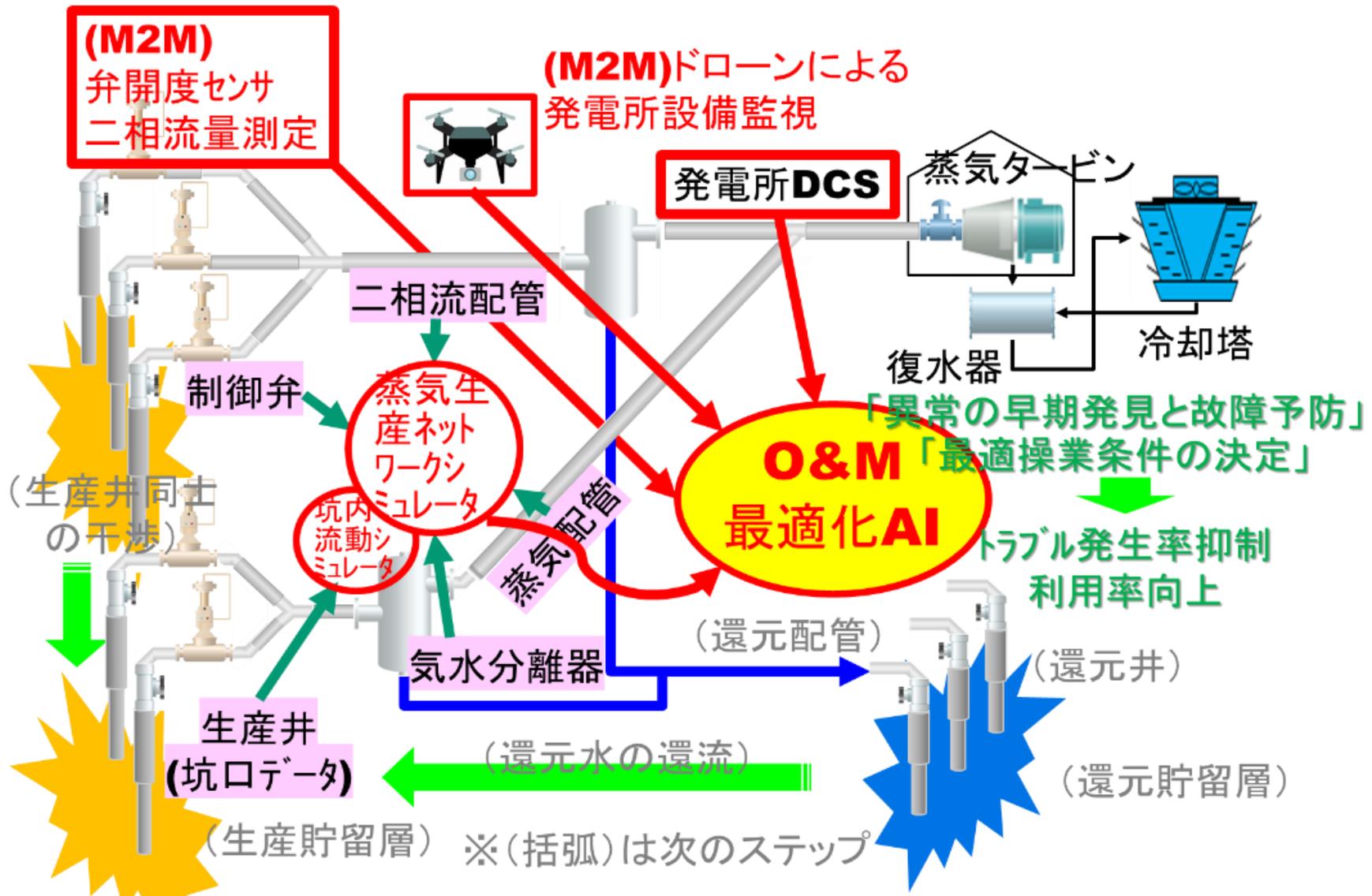
実際の発電所のヒアリング調査に基づき、地熱発電所の坑井(流体流入点～坑内～坑口)～蒸気設備・還元設備～発電設備において、「最適操業条件決定システム」と「故障予兆監視・検知システム」による操業アシストシステムを構築して、経験の短い技術者のアシスト、発電所トラブルの回避や性能低下の早期発見によって、地熱プラントのトラブル発生率の**20%**抑制と設備利用率の**10%**向上を目指す。

## 3. 成果・進捗概要

(2018年度成果)①既設地熱発電所のヒアリング→発電設備、蒸気・熱水輸送設備O&M最適化の課題抽出。②シミュレーションモデル(坑井・蒸気生産設備・発電設備)の概念設計、地熱発電プラントシミュレーションモデル構築着手。③地熱用M2Mセンサ=既存の二相流量測定センサの調査と有望な既存技術の抽出。④ドローンによる発電所調査。⑤AI技術を活用した地熱発電設備O&Mの最適化のための概念設計ならびに計算環境整備。⑥既存地熱発電所の操業データを入手、データ分析着手。

(2019年度進捗)①既設地熱発電所において二相流合流管に接続された複数の生産井の解列問題について、AI技術による解列予測の検討を実施中。②地熱発電プラントシミュレーションモデル(坑井・蒸気生産設備・発電設備)を構築中。③上述の生産井の解列問題について、モデル化および検証を実施中。④地熱発電所に不足している情報を補完するM2Mセンサ試験(2020年度実施)のためのセンサ選定、試験設計を実施中。⑤ドローンの適用検討。

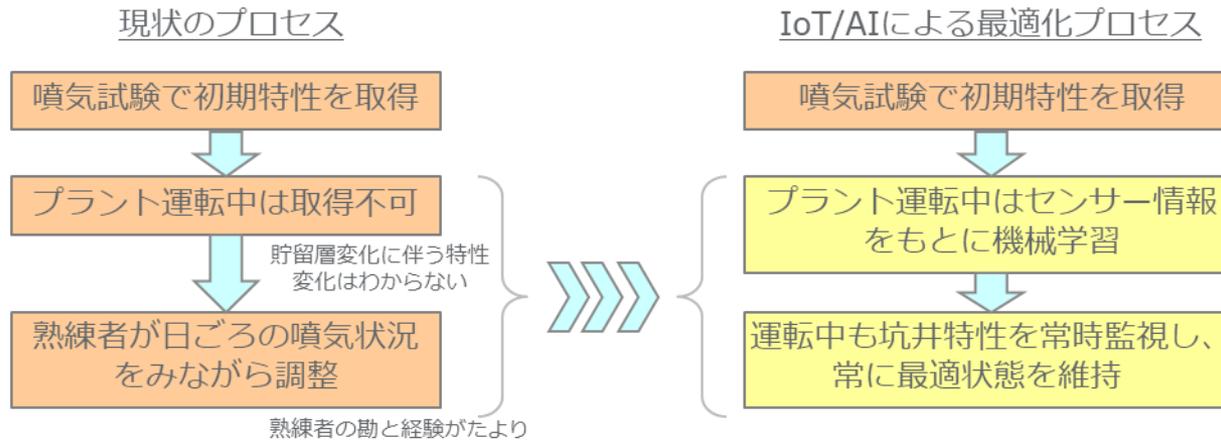
# 研究開発のイメージ



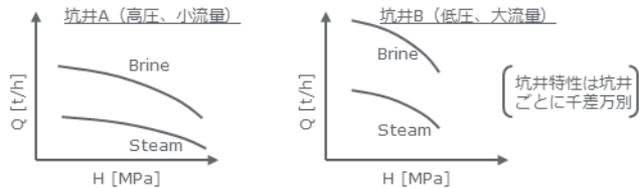
# 地熱発電システムにおける運転等の高度利用化に係る技術開発

## 今回の研究開発の特徴

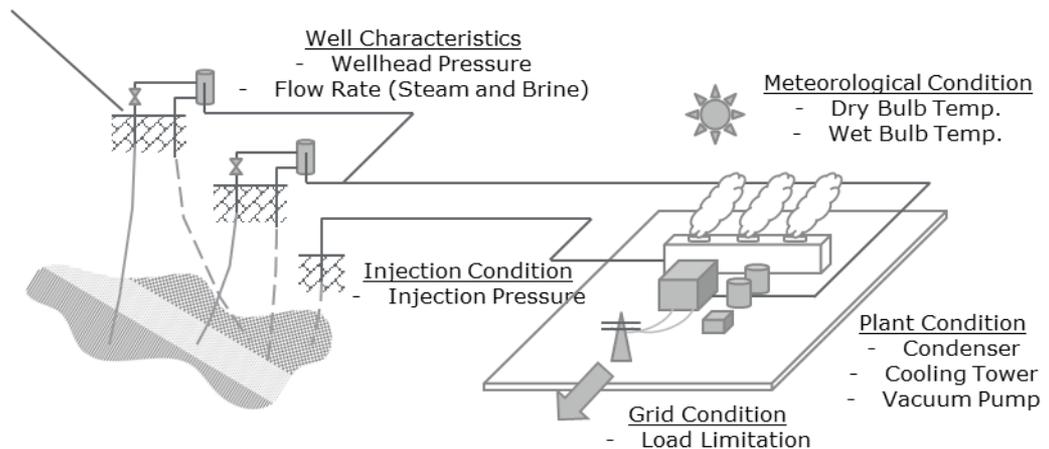
- 現状坑井の弁運用は、坑井特性を熟知した熟練者の勘と経験のもと操作・設定を行っている。
- これに対し、坑井特性を機械学習システムで自動取得し、最適な坑井運用指示を提示することにより省力化を図る。



### 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



# 井戸の管理の例(成果イメージ)

井戸が変化したら全体の系はどう変わるかを予測する

井戸毎の条件計算  
(WELL)

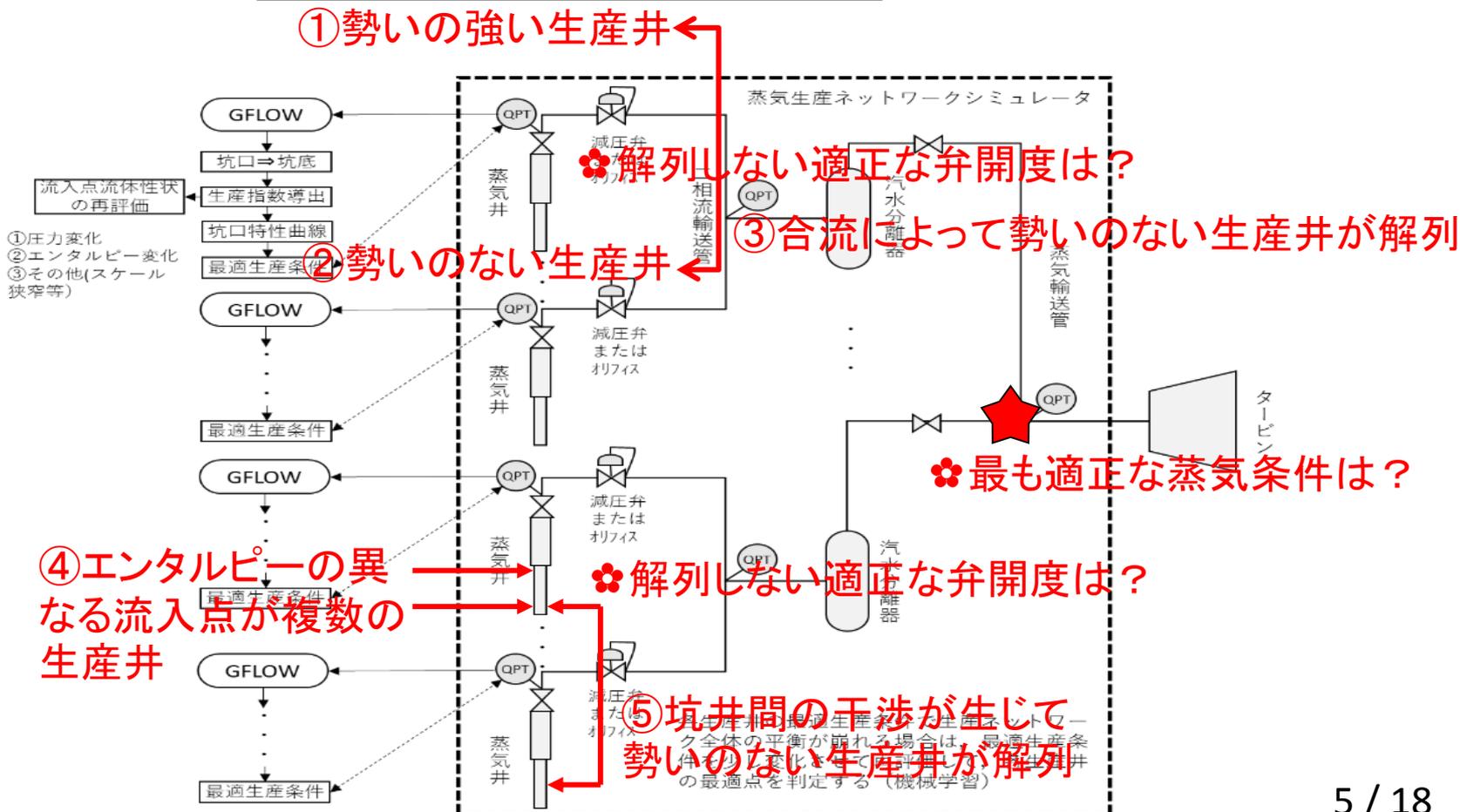


生産ネットワークの条件計算  
(SAGS)

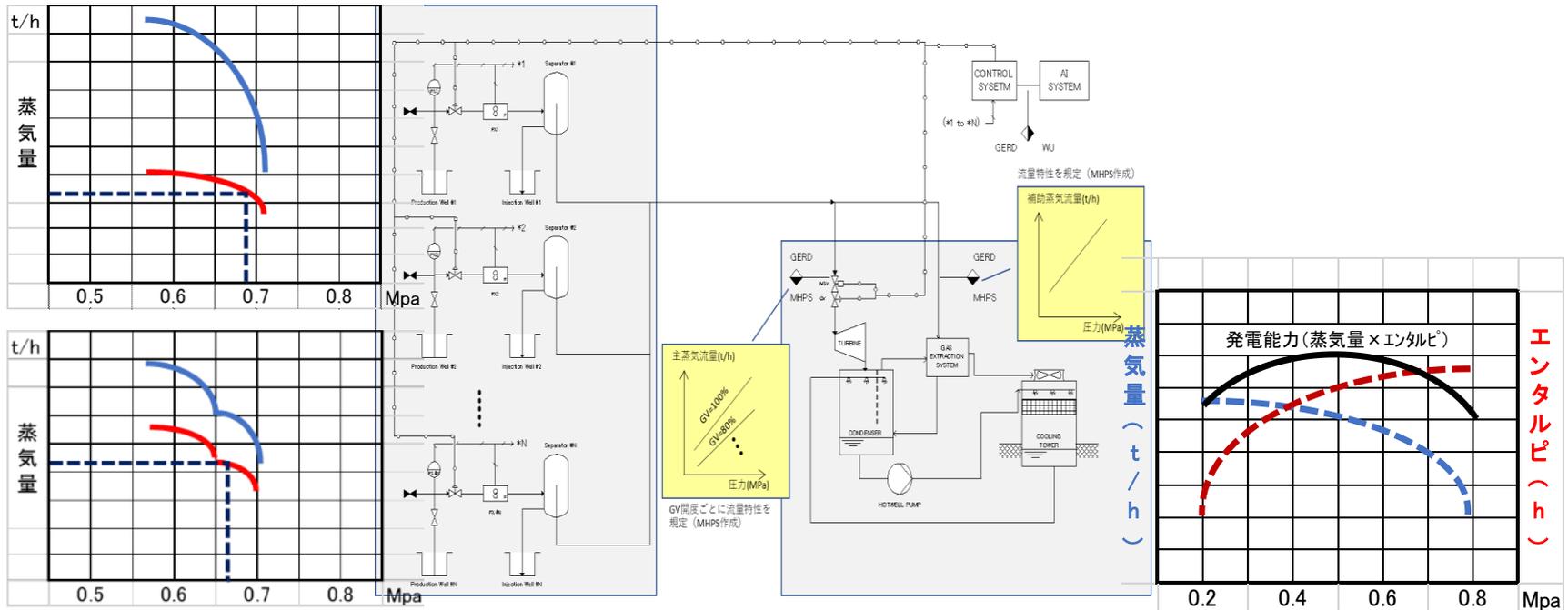


発電プラントの条件計算  
(PS)

AIが最適運用条件を予想する



# 操業最適化(成果イメージ)

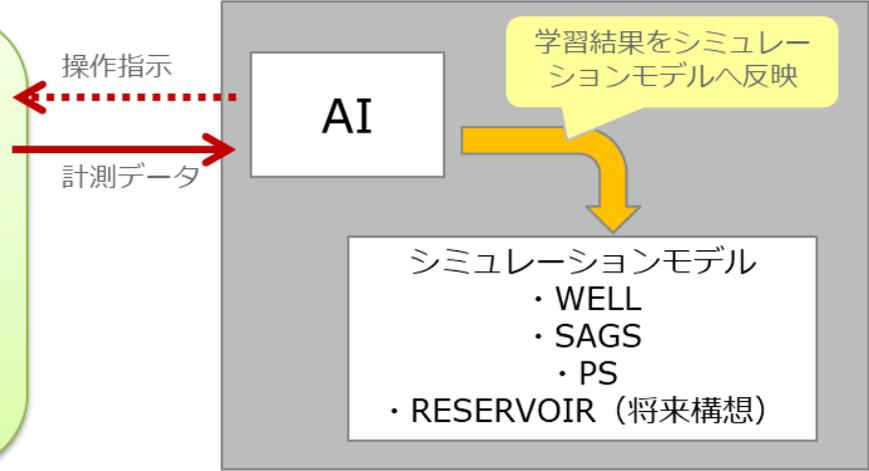
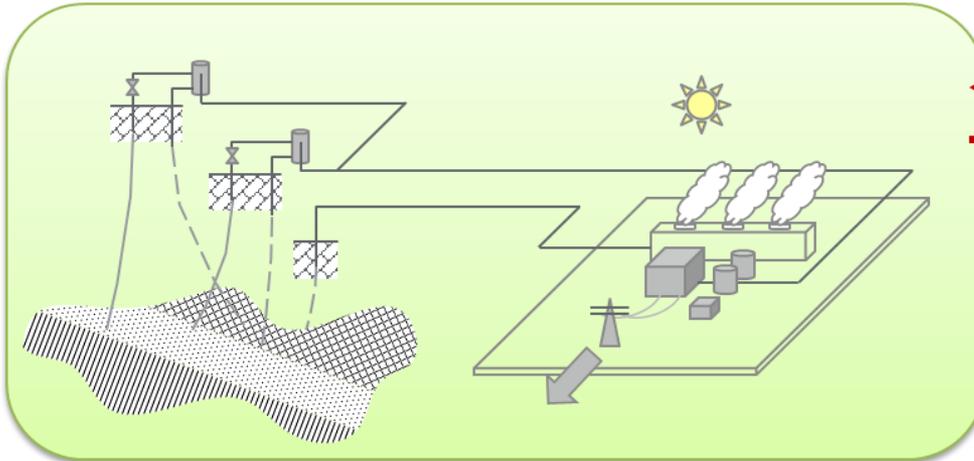


- ・運用圧力を下げると蒸気量は増えるが、一方でエンタルピーが下がる。
- ・また、運用圧力を下げると還元熱水や浅部低温水の取り込みで噴出が不安定や蒸気井相互の干渉も懸念される。
- ・今回思考するシミュレーションで、このように複数の要素を調整して、しかも数年間の発生電力量を最大化することを目指す。

## 運用のイメージと今回の研究開発のアプローチ

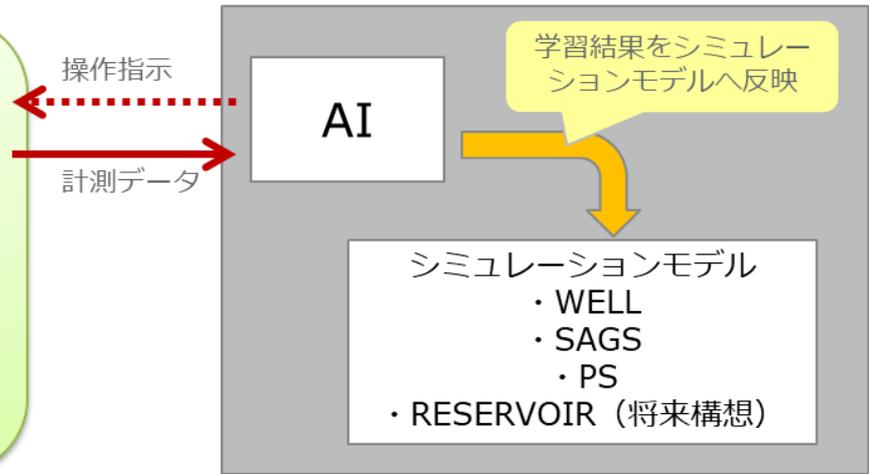
### 実運用のイメージ

実プラントの計測データをもとにAIが学習し、システム内部のシミュレーションモデルを精緻化する



### 今回(FS)でのイメージ

実プラントを模擬したシミュレーションモデルをAIの教師データとする  
模擬モデルの内部パラメータを伏せた状態で運用し、そのパラメータが正しく再現できるか、が判定基準



## 研究開発計画(1/2)

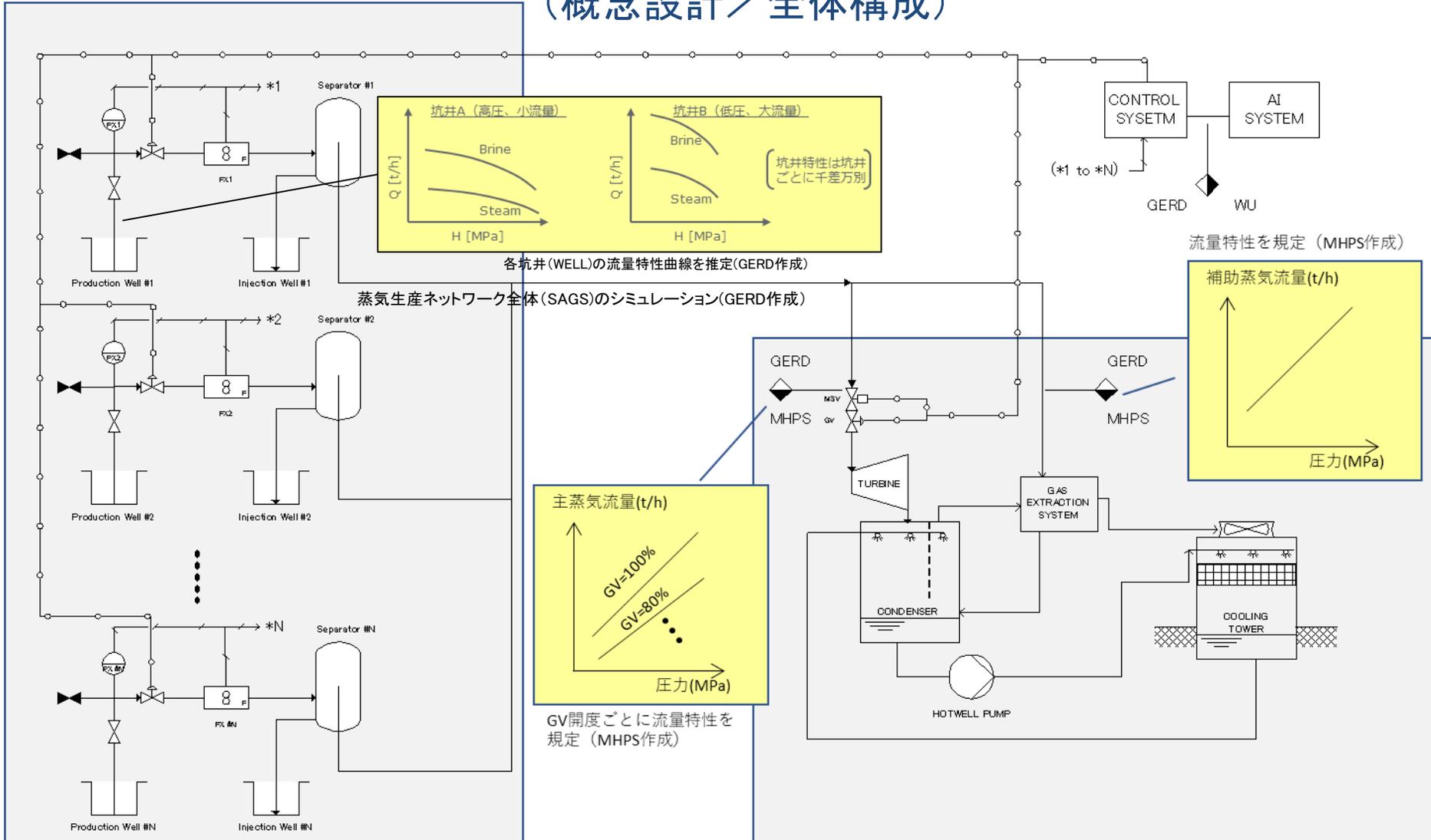
研究開発項目	担当 *主担当	2020				2019				2020				
		1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	
(1)全体システム設計	GERD* 西技 MHPS 早大					動作検証法の設計・クラウドサーバー設定				基本モデル作成・動作検証準備 クラウドサーバー設定・運用				基本モデル作成・動作検証準備・クラウドサーバー設定・運用
(2)蒸気・熱水輸送設備のO&Mの最適化	西技* MHPS					ヒアリング調査 不具合把握 方法体系化				坑口弁操作要領 の概念設計				改良
(3)地熱発電設備のO&Mの最適化	MHPS* 西技					ヒアリング調査 不具合把握 方法体系化				トラブル・性能低下 評価方法/概念設計・ 地熱発電設備一連 の系での評価システム 構築				改良
次ページへ														

## 研究開発計画(2/2)

研究開発項目	担当	2018				2019				2020			
		1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
(4)蒸気生産ネットワークシミュレータの開発	GERD*		坑内二相流動シミュレータ設計・開発 蒸気生産ネットワークシミュレータ基本設計			坑内二相流動シミュレータ開発 蒸気生産ネットワークシミュレータ試作				坑内二相流動シミュレータ改良 蒸気生産ネットワークシミュレータ開発			
(5)地熱特有のM2Mセンサー技術の開発	GERD* 早大		ヒアリング調査 地熱環境用センサ技術整理			M2Mセンサ技術の試作・整備 ドローン技術試験				M2Mセンサ技術の地熱環境試験・実用検証システム構築 仕様・開発指針 ドローン技術検証			
(6) AI技術を活用した地熱発電設備O&Mの最適化	早大*		ヒアリング調査 蒸気・熱水系合流蒸気制御系推定システム概念設計			体系化した各種AIツールによる効果検証・発電所半模擬データによる最適運用方策推定システムの検証と改良				AI技術を用いた異常診断システムの評価・AIによるO&Mの最適運用方策の総合評価			

## (1) 全体システム設計

## 地熱発電設備性能評価システム (概念設計／全体構成)



GERD担当: SAGS + WELL

MHPS担当: PS

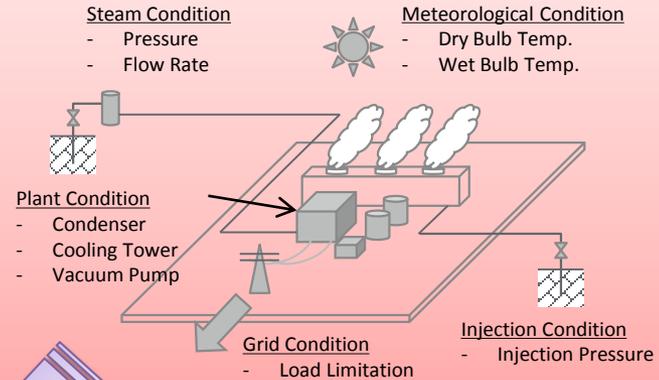
## 地熱発電設備性能評価システム (概念設計／発電設備モデル)

### (1) 全体システム設計

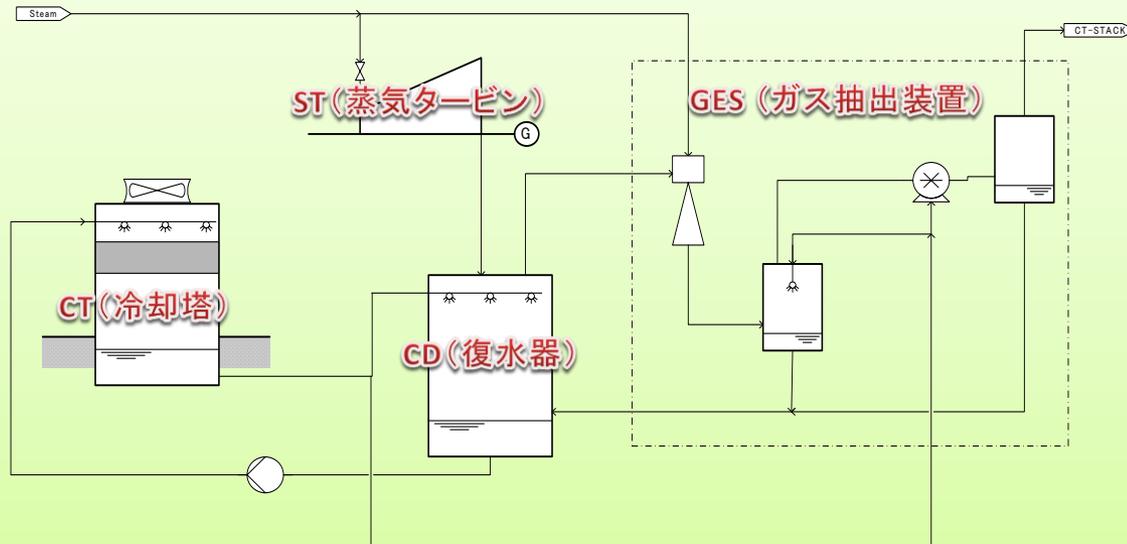
- 実体地熱プラントのうち発電設備に関するプラントモデル。
- 主要機器構成は、以下の4設備から構成される。  
ST(蒸気タービン)  
CD(復水器)  
CT(冷却塔)  
GES(ガス抽出装置)

- 実態プラントの圧力・温度・流量の計測データとプラントモデルのあるべき運転状態との差異を分析
- 性能・機能の劣化、異常の予兆を評価
- 運転指針(売電端出力最大化など)、保守指針(補修箇所・タイミング)の提供

#### 実体プラント



#### プラントモデル(地熱プラントシミュレータ)



## (2)蒸気・熱水輸送設備のO&Mの最適化(WJEC)

ヒアリング（9箇所）の結果，以下の検討課題を抽出した。

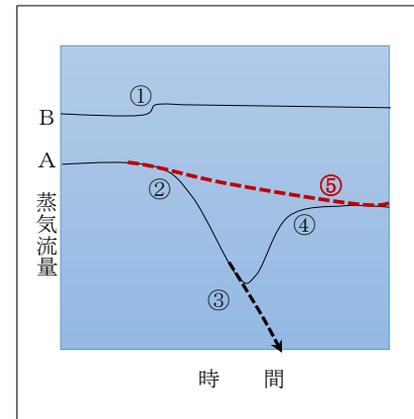
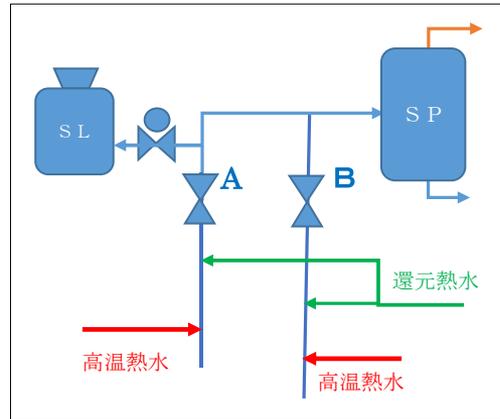
### 【顕在事象への対応】

- 坑井間干渉の早期検知、干渉する坑井の最適運用への対応
- 運転中の生産井の経年変化の動向把握
- 蒸気輸送配管の保温、ドレントラップ劣化確認
- 計器、LCV動作不具合の早期検知

### 【潜在事象への対応】

- 坑井間の相関性評価（1:1, 1:多, 多:1, 多:2, 多:3, . . .）
- 最適運用（積算最大蒸気量、瞬時最小還元量）の提案
- 定修延長（4年）への潜在する課題抽出と対応策

### 坑井干渉(事例)坑井干渉(事例)



- ① 還元熱水の影響を受ける2つの坑井があり、バランスして噴出
- ② 何らかの要因でB坑井への還元熱水流入量減⇒A坑井への流入量増
- ③ A坑井の噴出勢力低下
- ④ A坑井を一部大気側へ除外
- ⑤ A坑井噴出維持⇒勢力を減じて安定
- ⑥ 何らかの要因(兆候)を把握して早期の対応で噴出を減じることを回避

### (3)地熱発電設備のO&Mの最適化

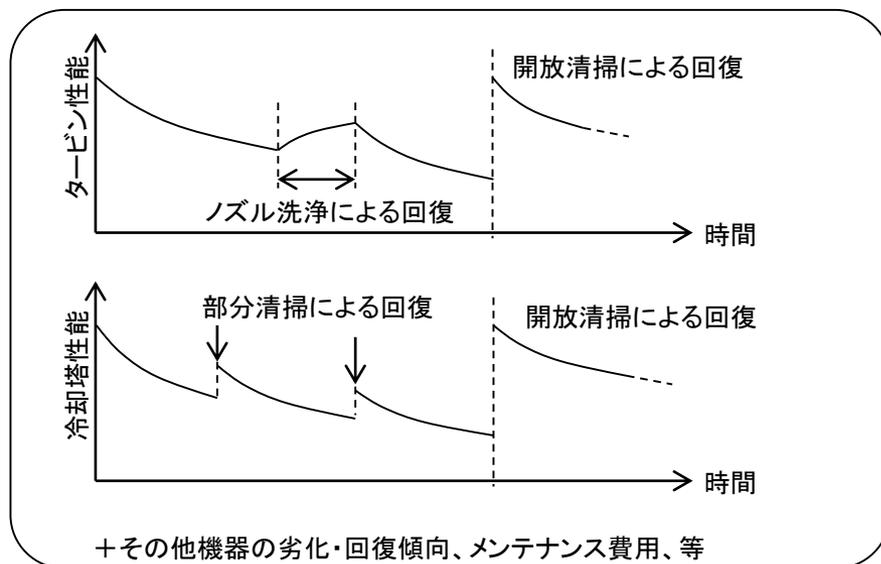
ヒアリング（9箇所）の結果，以下の検討課題を抽出した。

#### 【異常検知】

- 機器、弁、計器等の異常予兆診断（ストレーナ差圧監視等）、劣化監視（コンタクタの開閉回数、弁の動作時間チェック等）の方法を検討

#### 【性能向上】

- タービンノズル閉塞監視について、ノズル洗浄効果を分析し、最適な洗浄時間、回数を提案する方法の検討
- プラント性能（タービン、冷却塔の個別評価含む）の常時監視。また、境界条件（蒸気条件、大気温度条件）に応じた最適運用を提案する方法の検討
- プラントの点検・補修タイミングについて、各機器の故障確率、性能劣化特性、清掃による性能回復、メンテナンス費用、等のパラメータを設定することにより、機器ごとに点検、補修のタイミングを最適化する。

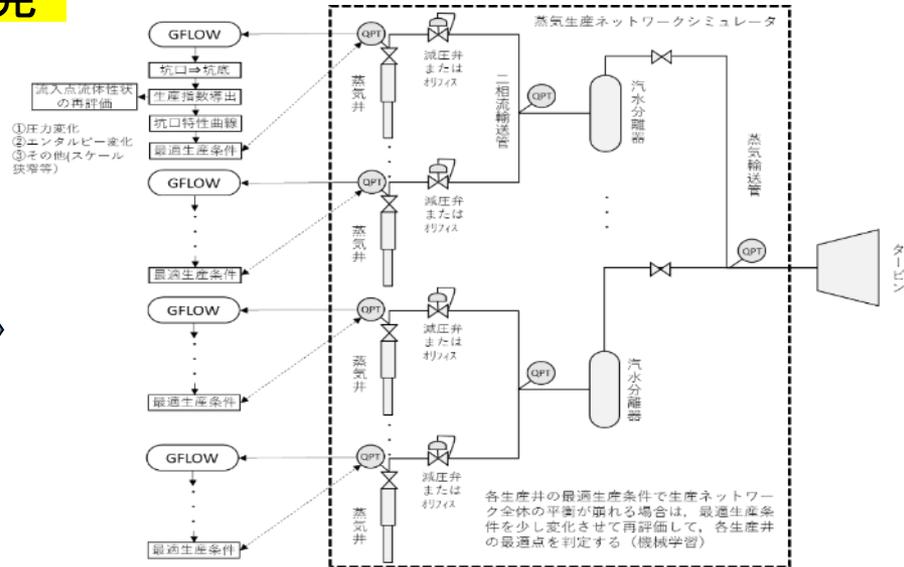


➡ 積算発電電力(kWh)を最大化する最適点検、補修インターバルを算出する

## (4) 蒸気生産ネットワークシミュレータの開発

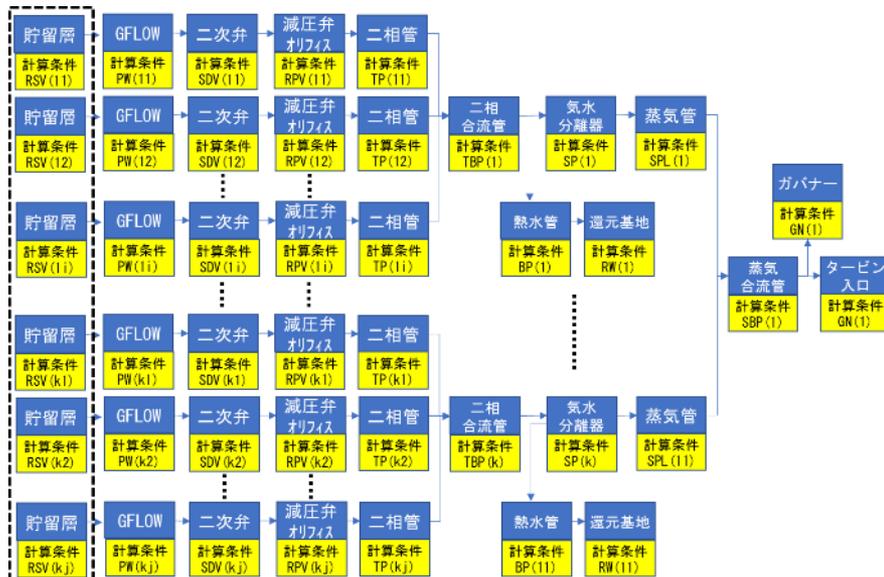
### 【目的】

- 坑口特性の異なる生産井(勢いのある井戸と弱い井戸)を二相ラインに合流すると、弱い井戸が停止あるいは不安定になる場合
  - 生産井が複数の流体流入点を持ち、個々の流入流体のエンタルピーが異なり、弁開度によってバランスが変わる場合
  - 生産井間の干渉がある場合
- ⇒ 適正な操業条件は？

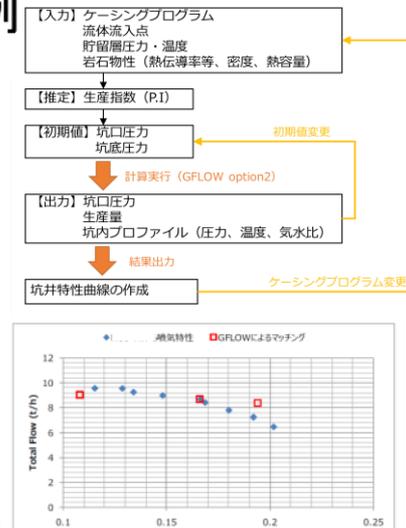
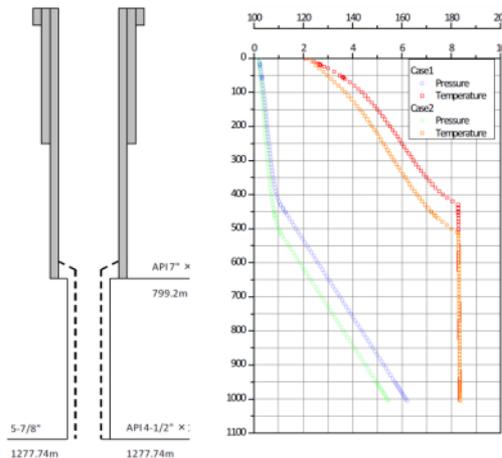


### 坑井～蒸気設備～タービン入口までの生産ネットワークシミュレーションの構築(Pythonベース)

### 坑内二相流動シミュレーション(GFLOW)の改良(坑井特性曲線の自動計算)【2019】



### GFLOW坑口特性計算例



(5)地熱特有のM2Mセンサー技術の開発

二相流量計測(既存技術調査)(GERD)

- ① 集合セパレータ方式の場合、個々の生産井の流量は連続測定されていない(ヒアリング)。
- ② 地熱の二相流配管の二相条件(例えば、汽水比1:1, 1:3, 1:6など)に対応できる市販の計測装置が必要。

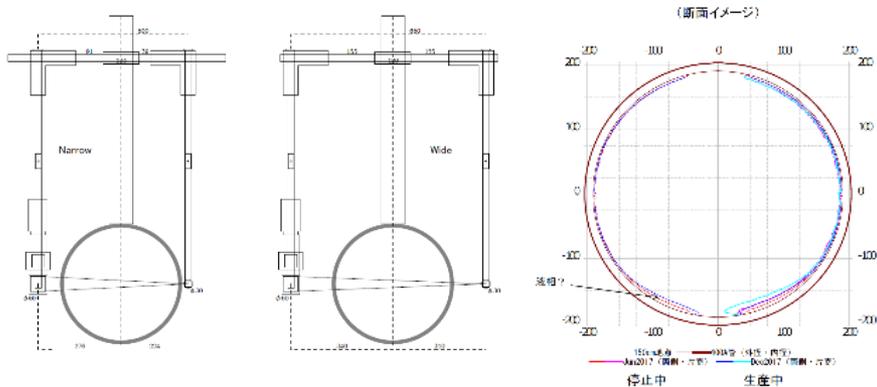
Endress+Hauser社渦流量計(Prowirl 200)

湿り検知機能(渦発生体後流の渦検出用センサーの出力信号を統計的に処理して湿り状態であるかどうかを検知)

気体/蒸気は標準で10:1~30:1・温度範囲:-200~+400°C(要求に応じて+450°C)メーカー補償範囲外で60%程度の湿り度での測定の可能性あり。課題はスケール付着。



NEDOで開発したスケールモニタリング用γ線透過式閉塞率測定装置による二相流

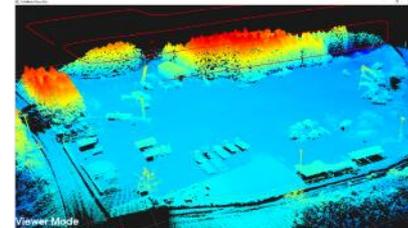


実測例(環状流:青線が気液界面)

ドローンの活用(早大)

- 配管を含めた地熱発電サイトの精密な三次元地図構築

➡ GNSS+LiDAR搭載ドローンによる三次元地図作成(早大保有技術)

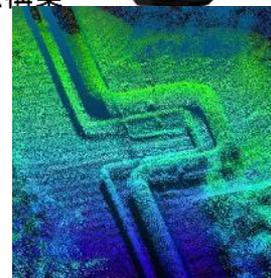


- 可視+遠赤外カメラから配管の状態の検知

- ➡ 三次元地図上へ温度情報のマッピングによる可視化
- 可視+遠赤外面像からの異常検知手法構築
- 異常個所の検出, 精密な座標特定



地熱発電所において蒸気・熱配管をドローンにより計測



➡ 配管の温度異常箇所とその精密な座標を特定する見通しを得た



# 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

## (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の概念設計

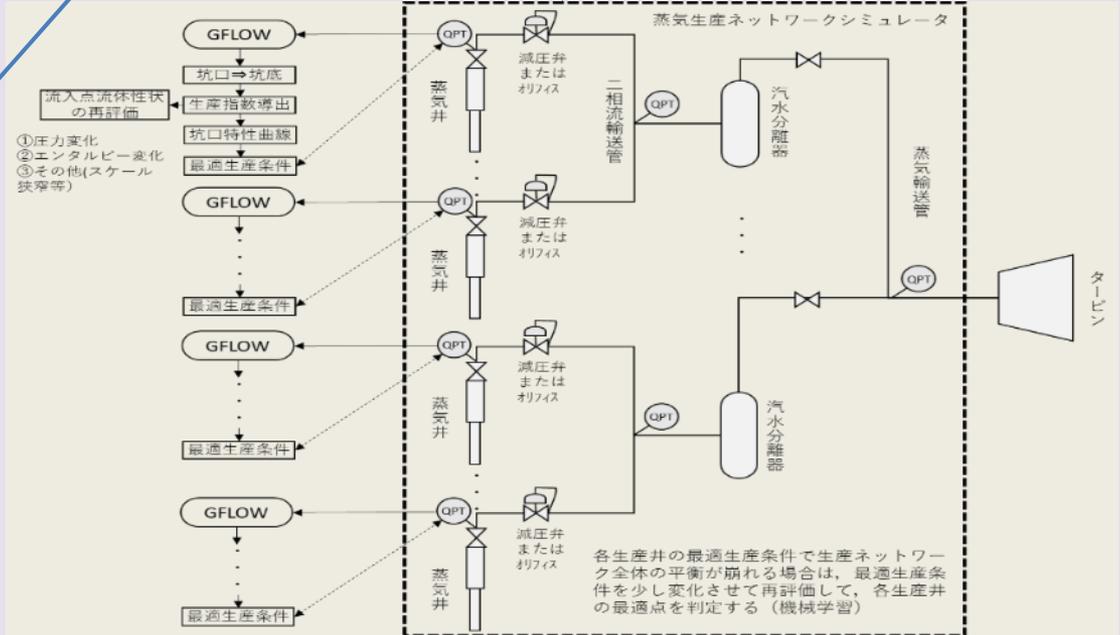
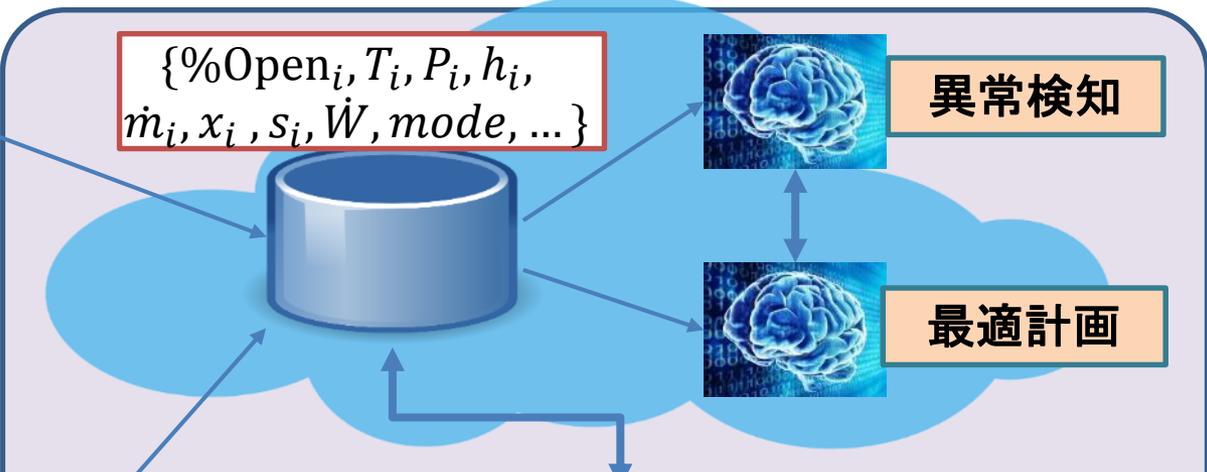
DCSによる常時監視



ドローンによる定期監視

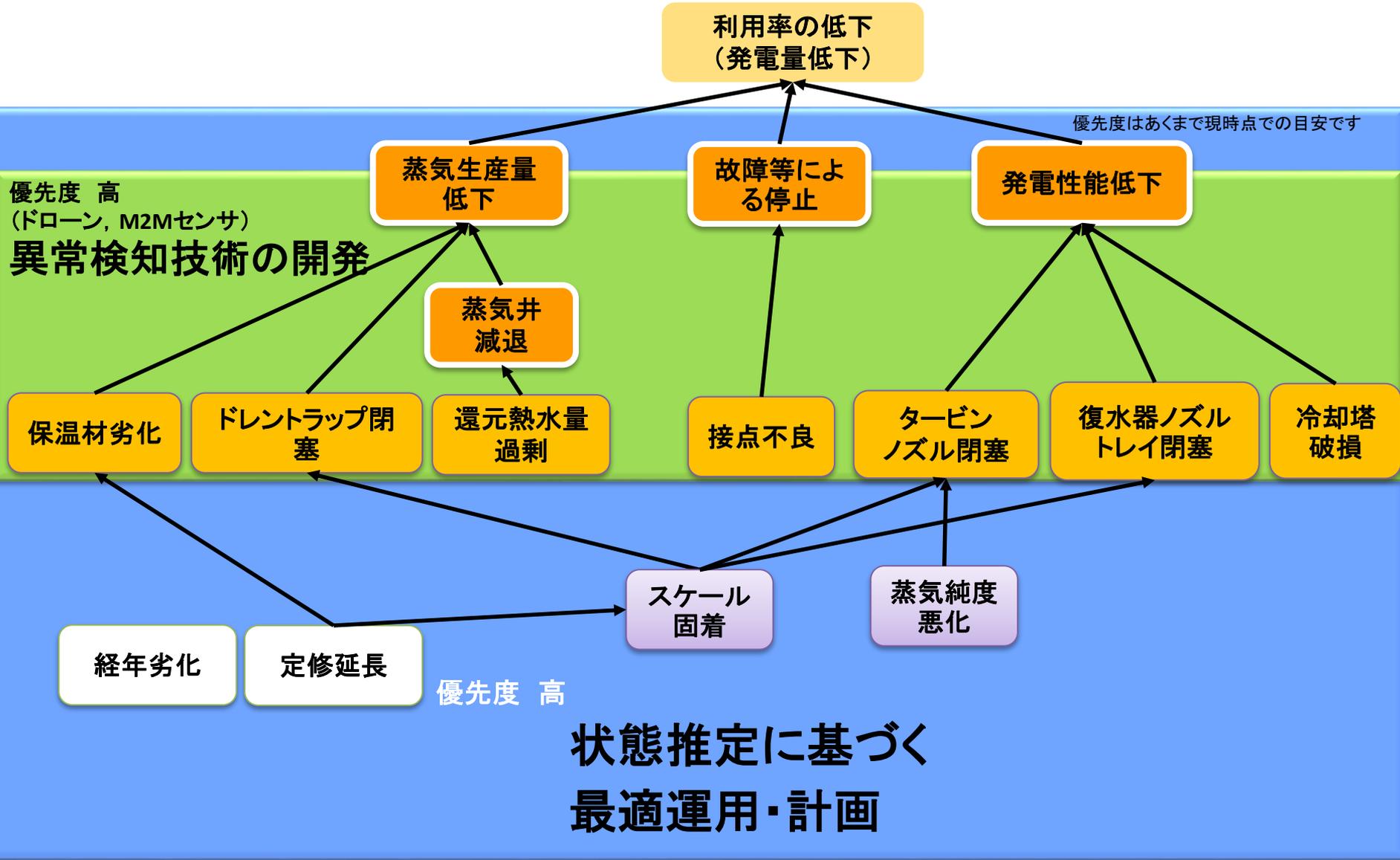


$\{\%Open_i, T_i, P_i, h_i, \dot{m}_i, x_i, s_i, \dot{W}, mode, \dots\}$



デジタルツイン

(6) AI技術を活用した地熱発電設備O&Mの最適化



## まとめ・今後の課題

### (2018年度の成果)

- 既設地熱発電所のヒアリングを行い、発電設備、蒸気・熱水輸送設備のO&Mの最適化の課題抽出
- シミュレーションモデル(坑井・蒸気生産設備・発電設備)の概念設計を行い、地熱発電プラントシミュレーションモデルの構築に着手
- 地熱特有のM2Mセンサとして、既存の二相流量測定センサの調査を行い、有望な既存技術の抽出実施
- ドローンによる既設地熱発電所蒸気設備の計測実施
- AI技術を活用した地熱発電設備O&Mの最適化のための概念設計ならびに計算環境整備
- 既存地熱発電所の操業データを入手して、データ分析に着手

### (2019年度の進捗)

- 既設地熱発電所において二相流合流管に接続された複数の生産井の解列現象について、AI技術による解析を実施中である。
- 地熱発電プラントシミュレーションモデル(坑井・蒸気生産設備・発電設備)を構築中。上述の生産井の解列問題について、モデル化および検証を実施する予定である。
- 地熱発電所に不足している情報を補完するM2Mセンサ試験(2020年度実施)のためのセンサ選定、試験設計を実施中である。ドローンによる地熱発電所蒸気設備調査技術の検討継続。