

2021年度成果報告会

## 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 地熱発電所の利用率向上に関する研究

東芝エネルギーシステムズ(株)

問い合わせ先  
東芝エネルギーシステムズ株式会社  
パワーシステム事業部  
市川 裕之  
E-mail:  
hiroyuki.ichikawa@toshiba.co.jp  
TEL: 050-3175-3939

# 事業概要

## 1. 期間

開始 : 2018年8月

終了 : 2021年2月

## 2. 最終目標

- 発電所のトラブルや設備診断について、IoT/AI技術の適用により予知・予見できるシステム構築を行い、**トラブル発生率を20%低減する。**
- 実地熱蒸気を使用し、経年的なタービンスケールの付着を薬剤注入とタービンスプレーを組み合わせることで抑制するシステムを構築し、**タービンスケールの付着を20%抑制する。**

## 3. 成果・進捗概要

- A発電所とB発電所にIoTサーバを設置し、**オンラインによる予兆診断システムならびに性能監視システムの検証を実施**した。A発電所のプラントデータから、**20%以上のトラブル発生率を抑制できることを確認**した。
- A発電所において**タービンスケール抑制効果を検証する実証試験を実施**した。選定した薬剤をスプレー噴霧することにより、**20%以上のスケール抑制効果があることを確認**した。

# Contents

01 研究開発の内容・目標

02 これまでの実績

03 成果報告

04 まとめ

# 1. 研究開発の内容・目標

## 1. 1 研究開発の具体的な内容

予兆診断による稼働率の向上



スケール  
対策による  
利用率向上



# 1. 研究開発の内容・目標

## 1. 2 研究開発の目標

発電所の稼働率向上に寄与するIoT/AIを含んだシステムの技術開発を行うために、

### 1. 対象発電所の稼働率に影響するトラブル因子について整理し、稼働率のベースラインを設定

#### 上記1で評価されたトラブルの発生率を20%低減（目標）

- トラブルについてIoT/AI技術の適用により予知・予見できるシステムを構築

### 2. 薬剤により、スケールの付着を20%抑制（目標）

- 実地熱蒸気を使用し、経年的なスケール付着を薬剤注入とタービンスプレーを組み合わせることで、抑制するシステムを構築

## 1. 研究開発の内容・目標（まとめ）

研究開発項目	目標	達成手法
(1) ビッグデータ解析技術を活用した予兆診断	【最終(2021年2月末)目標】 トラブルの発生率を20%低減	ビッグデータ 分析ツールの 実装と運営
(2) 稼働率を下げるスケールに対し、これを抑制する対策	【最終(2021年2月末)目標】 スケール付着量を20%抑制	羽根の潤滑を 良くする薬剤を ミスト状に散布

## 2. これまでの実績

### 1. 予兆診断による稼働率向上

- 地熱向け設備診断アセット<sup>\*1</sup>の構築、チューニング 2019年6月から継続
- A発電所にIoTサーバを設置し、オンライン検証 2019年7月から継続
- B発電所の運転履歴データ、トラブル事例集を入手し、  
社内解析ツールへ実装し、トレンドグラフを利用した分析 2020年1月完了
- B発電所にIoTサーバを設置し、オンライン検証 2019年10月から継続

<sup>\*1</sup> アセットとは予兆診断を可能とするプロセス量のグループ

### 2. スケール抑制対策

- 薬剤効果検証ラボ試験 2019年3月完了
- 実証試験設備検討のためのラボ試験結果の定量評価 2019年4月から継続
- 実証試験計画の立案 2019年4月から継続
- A発電所のスケール付着状況確認(2回目<sup>\*2</sup>) 2019年5月完了
- 薬剤排水処理検討 2019年8月から継続
- A発電所の蒸気サンプリング(2回目<sup>\*2</sup>) 2019年11月完了

<sup>\*2</sup> 再現性の確認のため

## 2. これまでの実績 | 予兆診断による稼働率向上

### ● 地熱向け設備診断アセット\* 構築手順

運転履歴データを元にアセット\*を構築し、**致命的な障害に至る前に異常をとらえる**

監視対象の入力点を選定

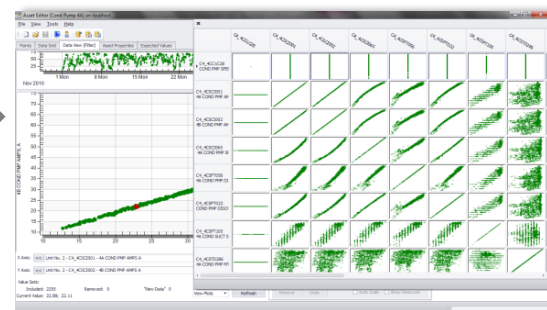


- ・発電機出力
- ・主蒸気圧力
- ・各井戸蒸気流量
- ・復水器真空度
- ・軸受温度  
など

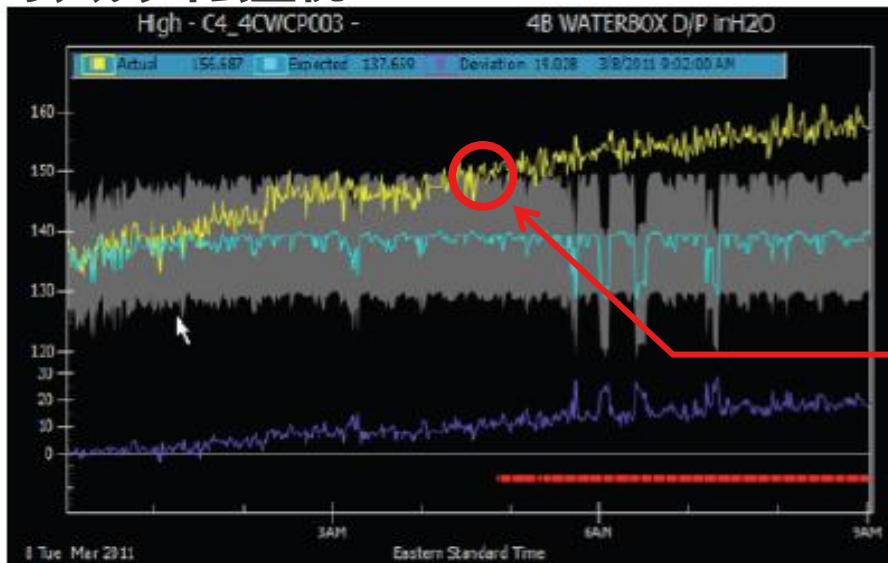
過去正常データを登録



相関関係からアセット\*を定義



リアルタイム監視



異常を検知

— : 現在値  
— : 理想値

\* アセットとは予兆診断を可能とするプロセス量のグループ



## 2. これまでの実績 | 予兆診断による稼働率向上

### ● 地熱向け設備診断アセット\* 構築、チューニング

#### ✓ STEP1 入力点の選定

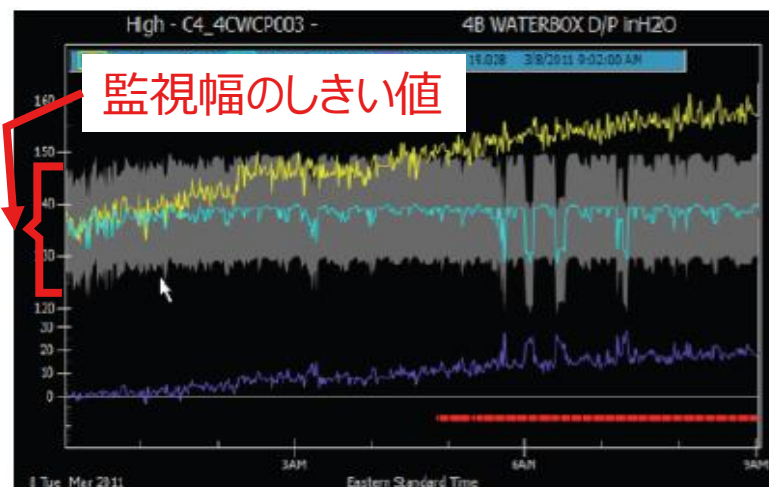
主管系統図より、監視対象とする設備の個数を確認し、センサー等の入力点を、設備毎のアセット\*に選定する。

#### ✓ STEP2 監視幅の設定

各アセット\*に、運転履歴データから過去の正常データを登録し、標準偏差( $3\sigma$ を標準)により、監視幅のしきい値を算出する。

#### ✓ STEP3 チューニング

工場環境で各アセット\*の試験を行い、監視幅等のチューニングを行う。



\* アセットとは予兆診断を可能とするプロセス量のグループ

## 2. これまでの実績 | 予兆診断による稼働率向上

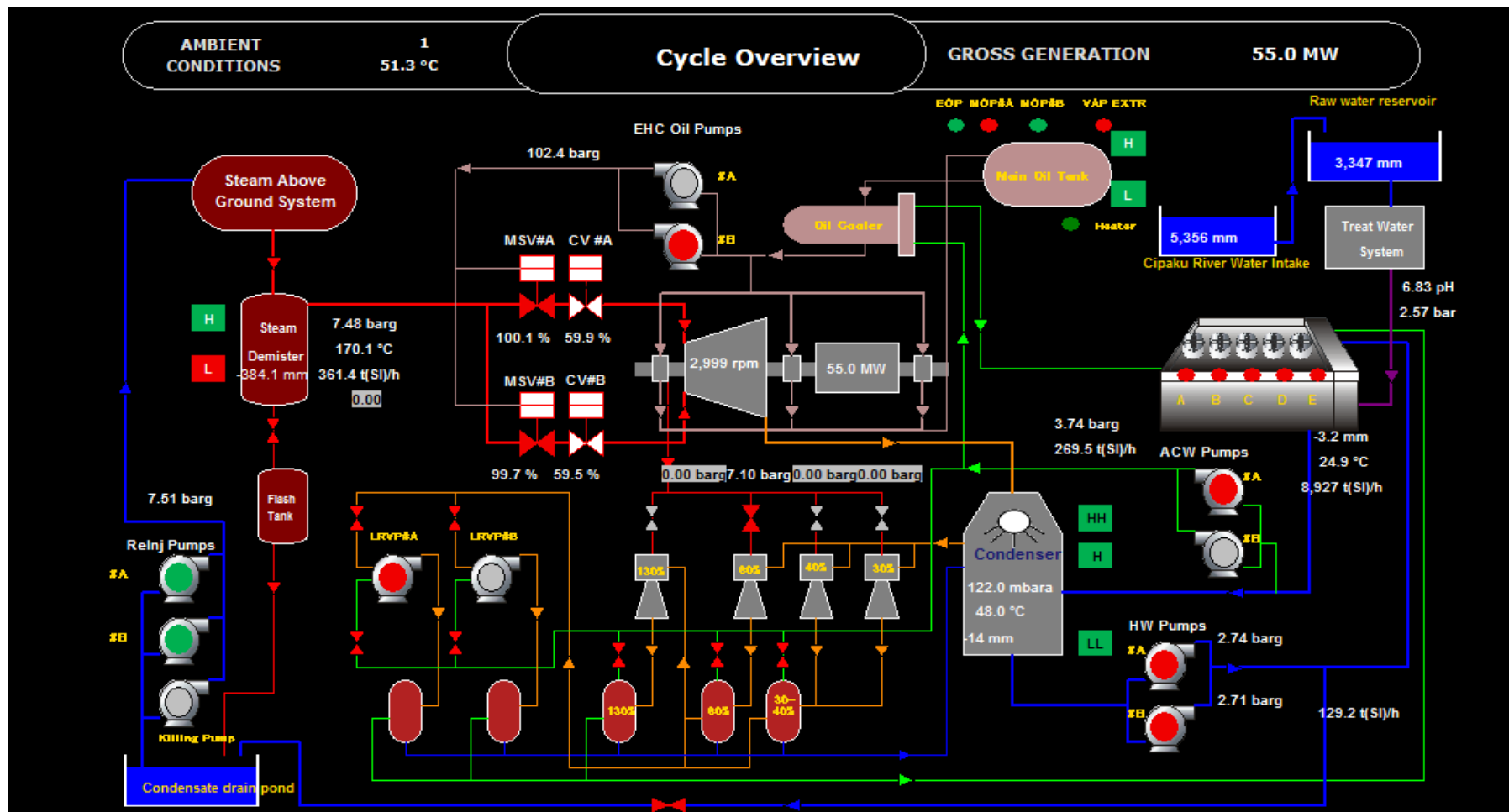
### ● 設備診断アセット\*一覧

A発電所	B発電所	
復水器	復水器	冷却塔
蒸気溜	蒸気溜	冷却水ポンプA/B
ガス圧縮機	真空ポンプA/B	冷却塔ファンA/B/C/D/E
発電機冷却器	発電機冷却器	計装用空気系統
発電機（電気関係）	ホットウェルポンプA/B	原水ブースターポンプA/B
蒸気タービン（機械関係）	蒸気タービン（機械関係）	原水排水系統
蒸気タービン（性能）	蒸気タービン（性能）	復水器ドレン再注入ポンプA/B

\* アセットとは予兆診断を可能とするプロセス量のグループ

## 2. これまでの実績 | 予兆診断による稼働率向上

### ● B発電所向け設備診断アセット\* Overview



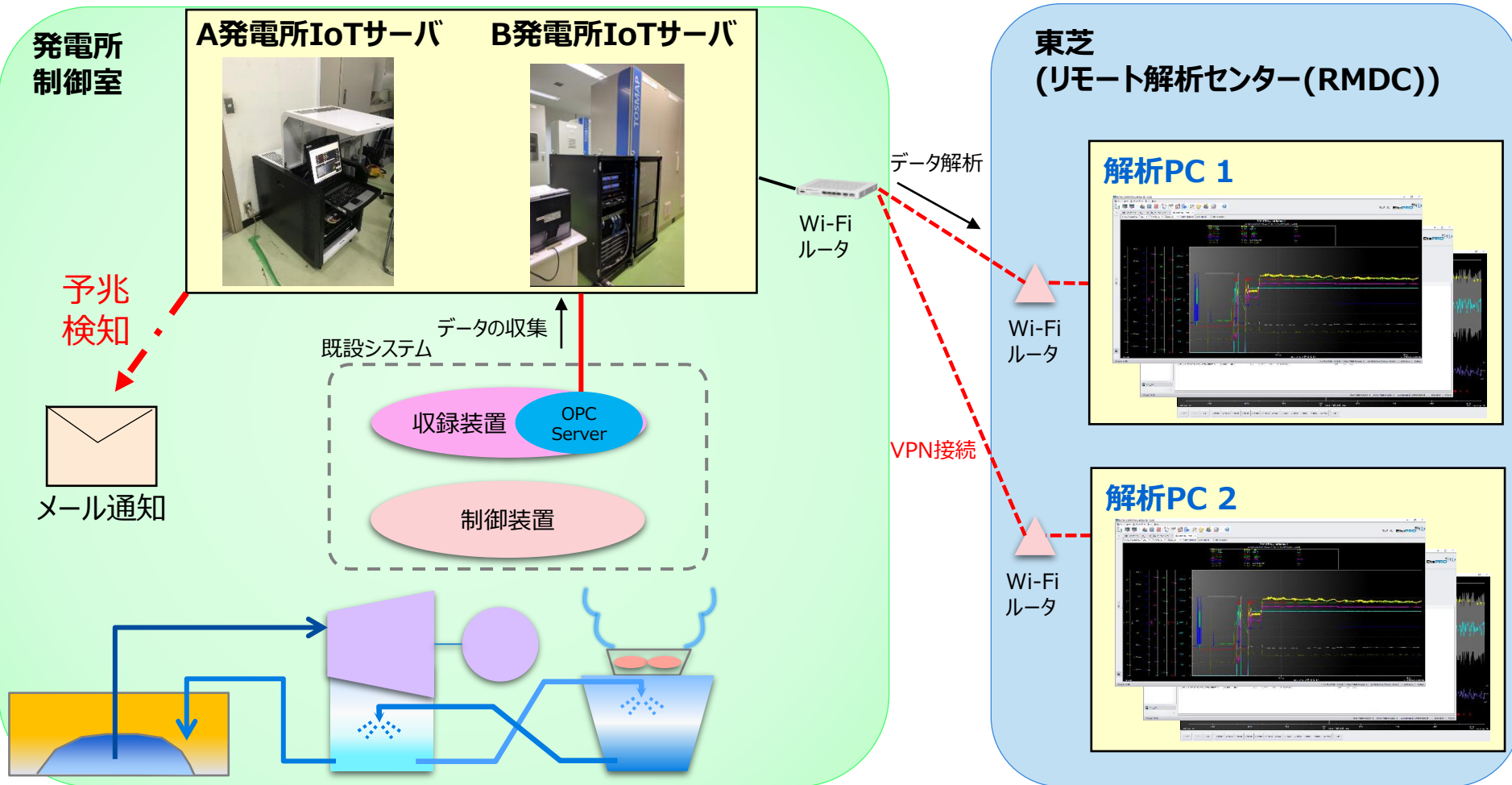
・総アセット数：25

・当社営業日に社内向けの日報を作成し、発電所オーナー会社へ月報を提出

\* アセットとは予兆診断を可能とするプロセス量のグループ

## 2. これまでの実績 | 予兆診断による稼働率向上

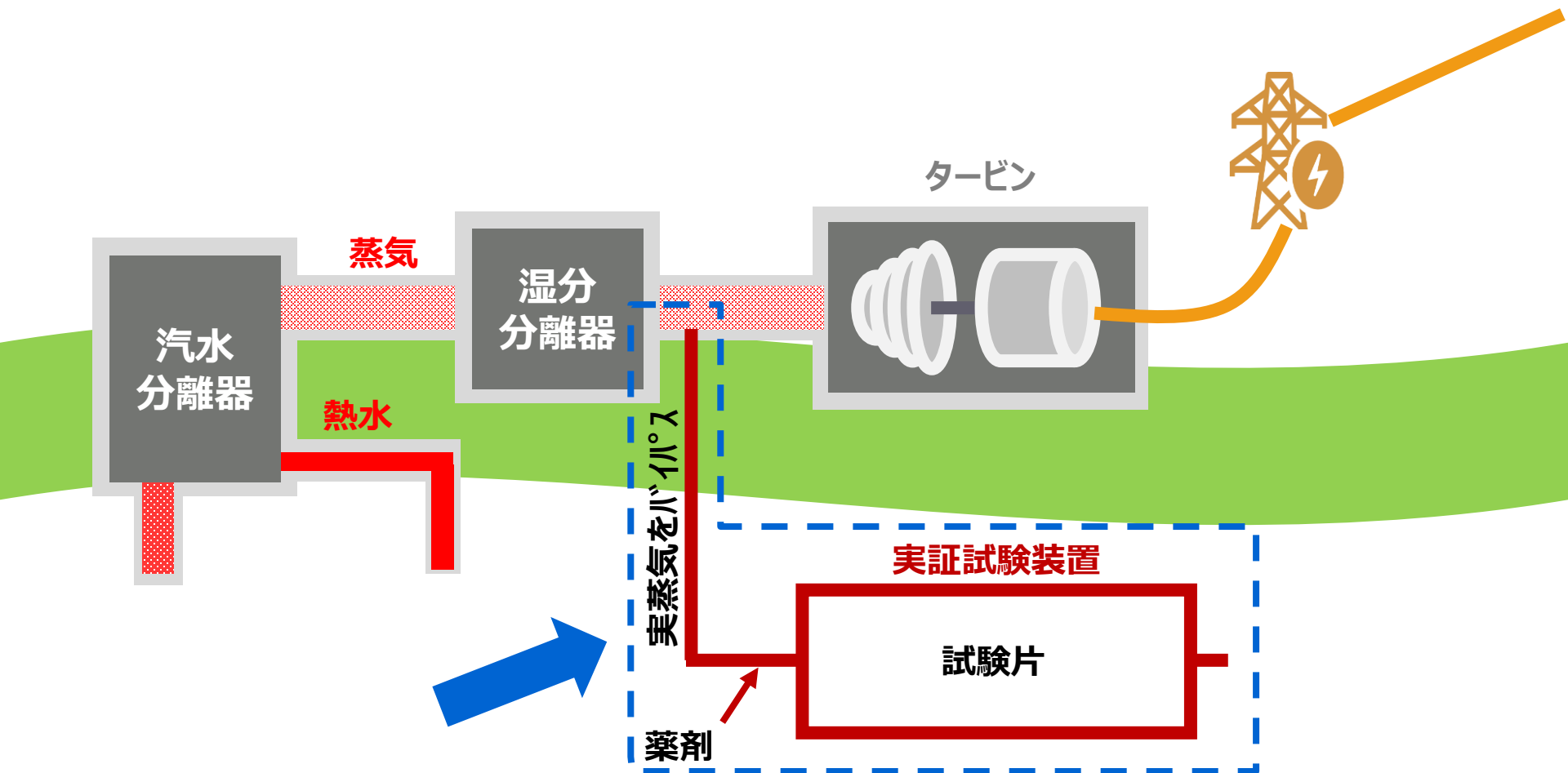
### ● A/B発電所にIoTサーバを設置し、オンライン検証実施中



リモート接続により、予兆診断システムの遠隔監視が可能

## 2. これまでの実績 | スケール抑制対策

### ● 実証試験計画の立案    試験イメージ



## 2. これまでの実績 | スケール抑制対策

### ● 実証試験計画の立案 試験と実用設備の条件比較

	ラボ試験	実証試験	実用設備
試験流体	A発電所の蒸気性状を模擬した溶液	A発電所の実蒸気	同左
スケール生成環境	大気圧下での ・常温沈降 ・100℃での蒸発 ・200℃での蒸発	タービン羽根・ノズル出口蒸気条件 (*状態値固定)	タービン羽根・ノズルでの蒸気条件 (状態値の連続変化)
薬液導入方法	試験流体との混合	A発電所の実蒸気を用いて、小型試験装置内にて薬液を噴霧	A発電所の実蒸気中に薬液をスプレーにて噴霧

実証試験では**使用できる蒸気流量、試験設置場所、試験設備の設計製造期間**などの条件がある中で、スケール析出とその抑制の検証を実施することが重要である。よってタービン内部の環境(羽根・ノズル出口蒸気条件)を固定し、スケール析出・抑制の検証をする。

\* 代表条件として、スケール付着が確認されたタービン条件から温度と圧力を設定

## 2. これまでの実績 | スケール抑制対策

### ● ラボベースでのスケール抑制効果の定量評価

#### 薬剤効果の検証試験



滴下試験体系例

薬剤滴下試験を実施しスケール抑制効果を検証

PVPポリビニルピロリドン

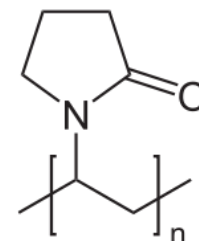
(重合度A) 64~100%

PVP(重合度B) 36~53%

ジヒドロキシエチルグリシンナトリウム  
47~77%

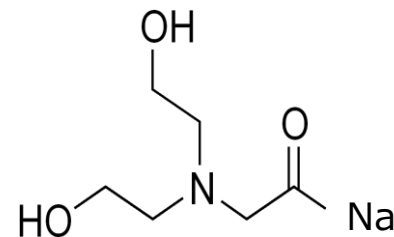
PVP（重合度A）が高い抑制効果があることを確認

<候補スケール抑制剤 1>



ポリビニルピロリドン (PVP)

<候補スケール抑制剤 2>



ジヒドロキシエチルグリシンナトリウム

薬剤効果：PVP(重合度A) > PVP(重合度B) ≧ ジヒドロキシエチルグリシンナトリウム ⇒  
薬液効果の高いPVPを選定



## 2. これまでの実績 | スケール抑制対策

- A発電所向け実証試験装置の製作・社内試験（1）

- 実証試験設備社内試験場搬入：2020年6月15日



- 実証試験設備機器据付、単体試験



- 実証試験設備試運転、操作・手順の検証



- 実証試験設備社内試験場搬出：2020年8月29日



水道水を使用してスケールが最も付着している環境近傍の蒸気条件の再現を確認

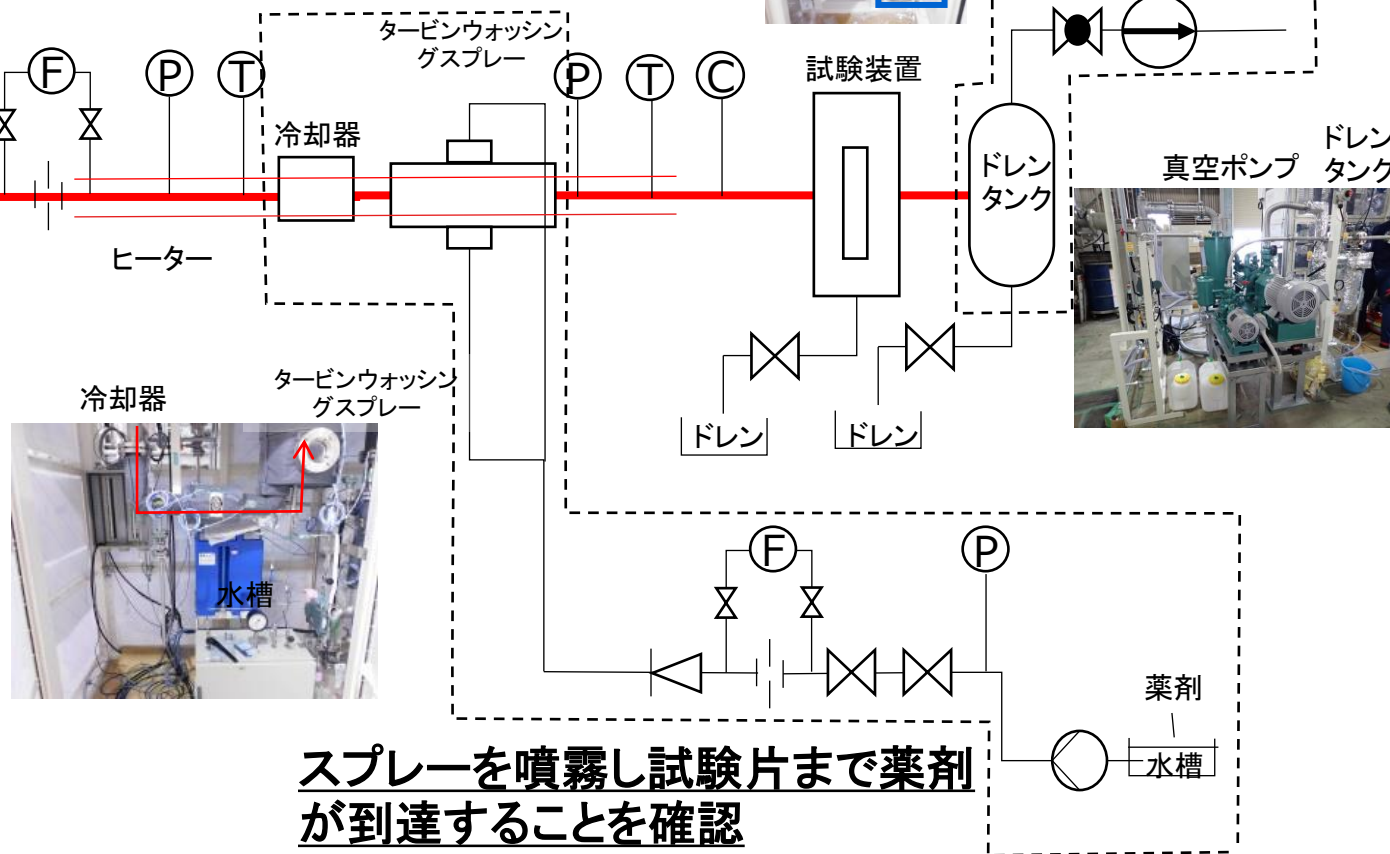


## 2. これまでの実績 | スケール抑制対策

### ● A発電所向け実証試験装置の製作・社内試験 (2)

減圧弁・真空ポンプ・冷却器、ヒータを用い  
スケール付着環境の蒸気条件  
(31kPa 70°C)とすること確認

水道水をボイラを通して  
タービン入り口条件の  
蒸気を供給



スプレーを噴霧し試験片まで薬剤  
が到達することを確認

## 2. これまでの実績 | スケール抑制対策

### ● A発電所での実証試験装置の据付・実証試験（1）

#### ● 実証試験設備現地搬入：2020年8月31日



#### ● 実証試験設備据付



#### ● 実証試験設備運転開始： 2020年9月8日

#### ● 実証試験設備運転終了： 2020年10月31日

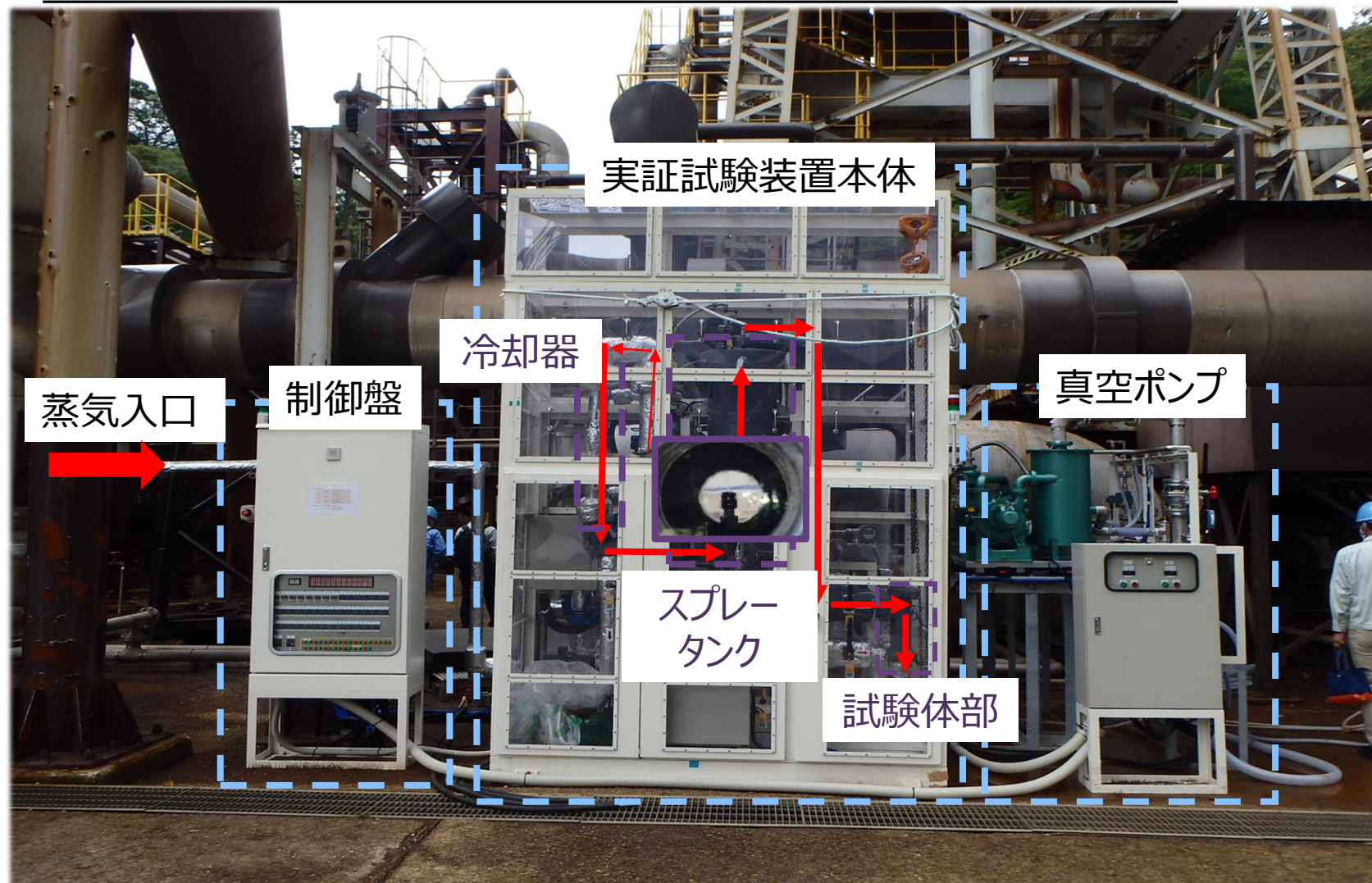


実蒸気にてスケール付着環境の蒸気条件の再現を確認



## 2. これまでの実績 | スケール抑制対策

### ● A発電所での実証試験装置の据付・実証試験（2）



## 2. これまでの実績 | スケール抑制対策

### ● A発電所での実証試験装置の据付・実証試験（3）

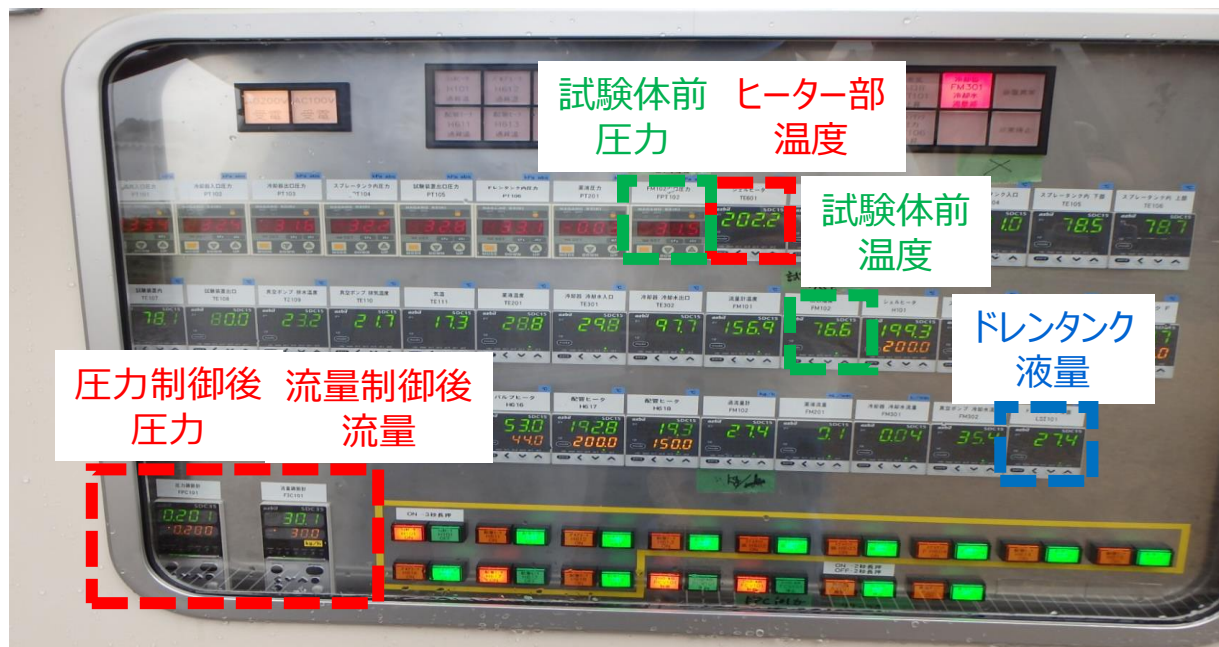


試験体部サンプル設置

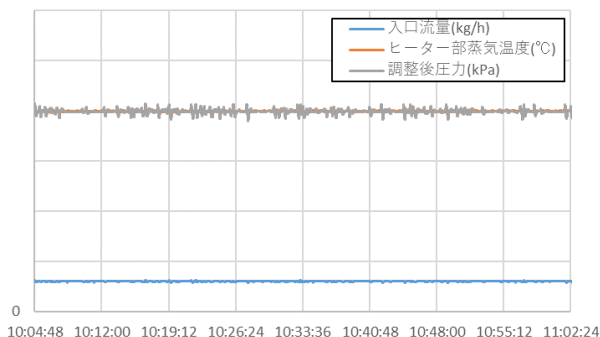


## 2. これまでの実績 | スケール抑制対策

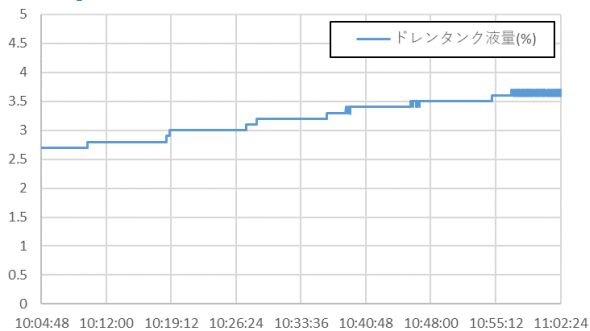
### ● A発電所での実証試験装置の据付・実証試験（4）



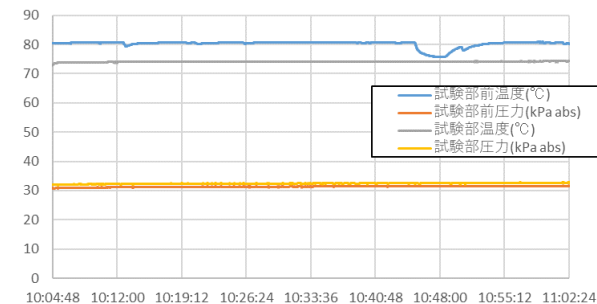
#### 1. 入口蒸気の安定化



#### 2. ドレンタンク液量増加 (湿り条件)



#### 3. 試験体前温度、圧力安定

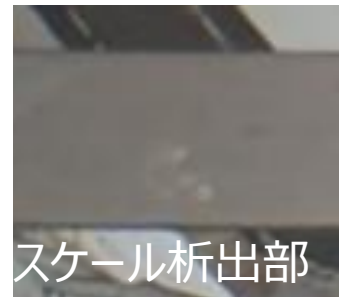


## 2. これまでの実績 | スケール抑制対策

### ● A発電所での実証試験装置の据付・実証試験（5）



回収試験体表面



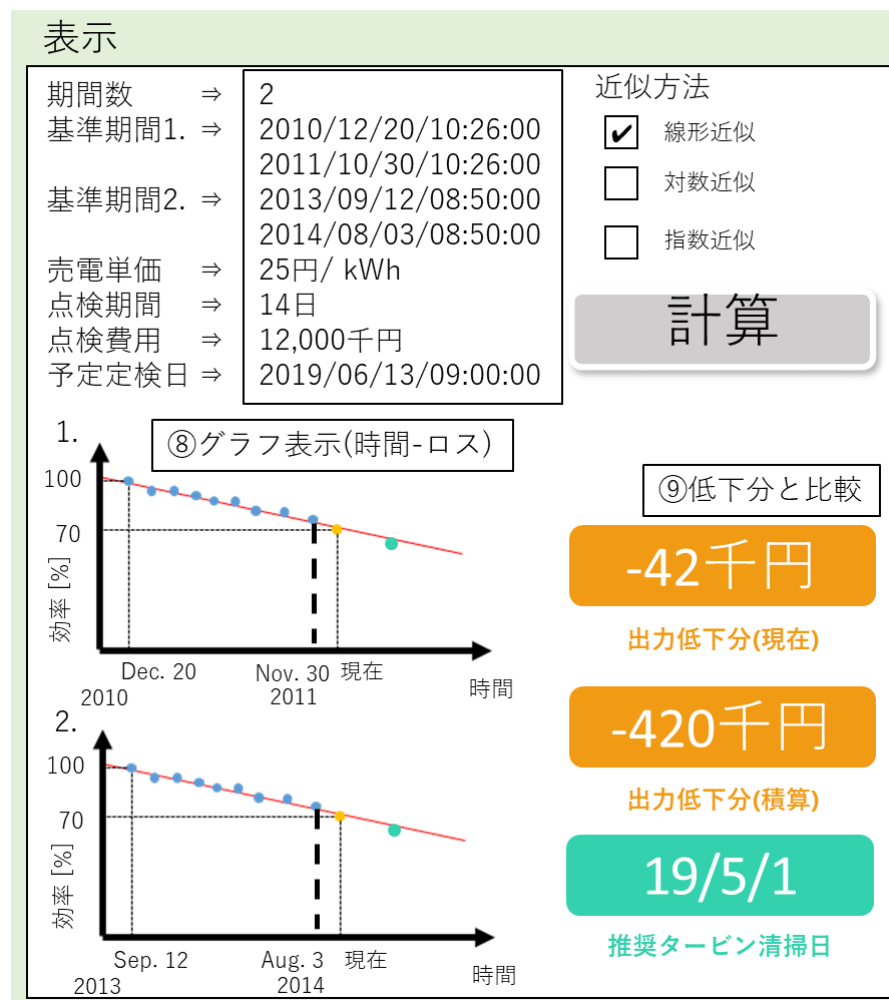
回収試験体裏面

小時間でスケールを確認

## 2. これまでの実績 | スケール抑制対策 (スケール可視化ツール)

### ● スケール可視化ツール データから間接的にスケール量を推定

1. スケール除去対策のタイミングを推定
2. スケール体積の傾向が見えると、対策の方法も考えられる
3. スケール量の推定曲線の挙動から、将来の利益損失を予測



## 2. これまでの実績 | スケール抑制対策 (スケール可視化ツール)

### スケール量の計算アルゴリズム概要

- タービン入口の体積流量を既設プラントデータから算出
- スケールがタービンに付着すると体積流量は減少
- 時間経過による体積流量の減少傾向を確認する

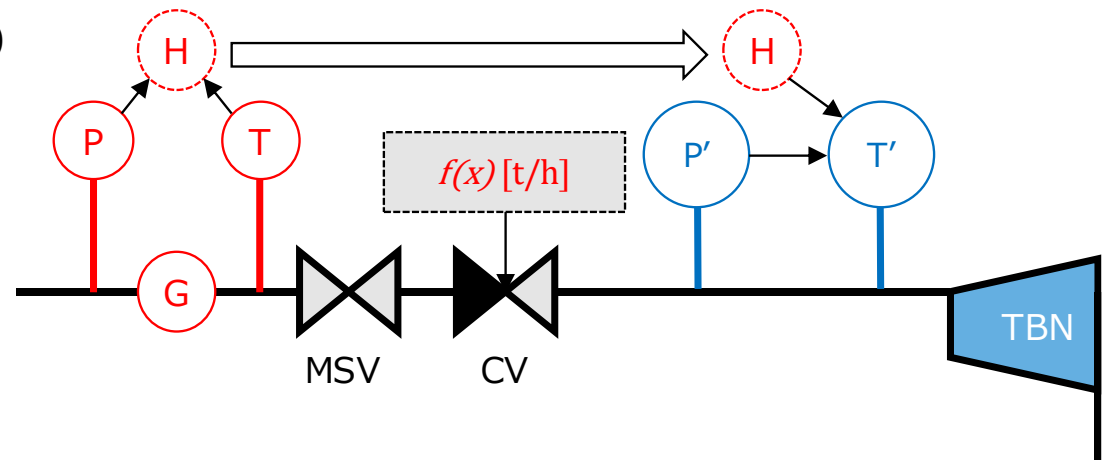
$$\text{等価} V_{Ft}(t) \left[ \frac{m^3}{sec} \right] = G(t) \left[ \frac{t(SI)}{h} \right] \times \frac{1}{3600} \times 1000 \times SPEC$$

$$SPEC = Vmix(P', T', JSME1999, NCG)$$

$$T' = PHTmix(P', H, JSME1999, NCG)$$

$$P' \cong P \times \frac{f(CAM)}{f(MAX)}$$

$$H = Hmix(P, T, JSME1999, NCG)$$

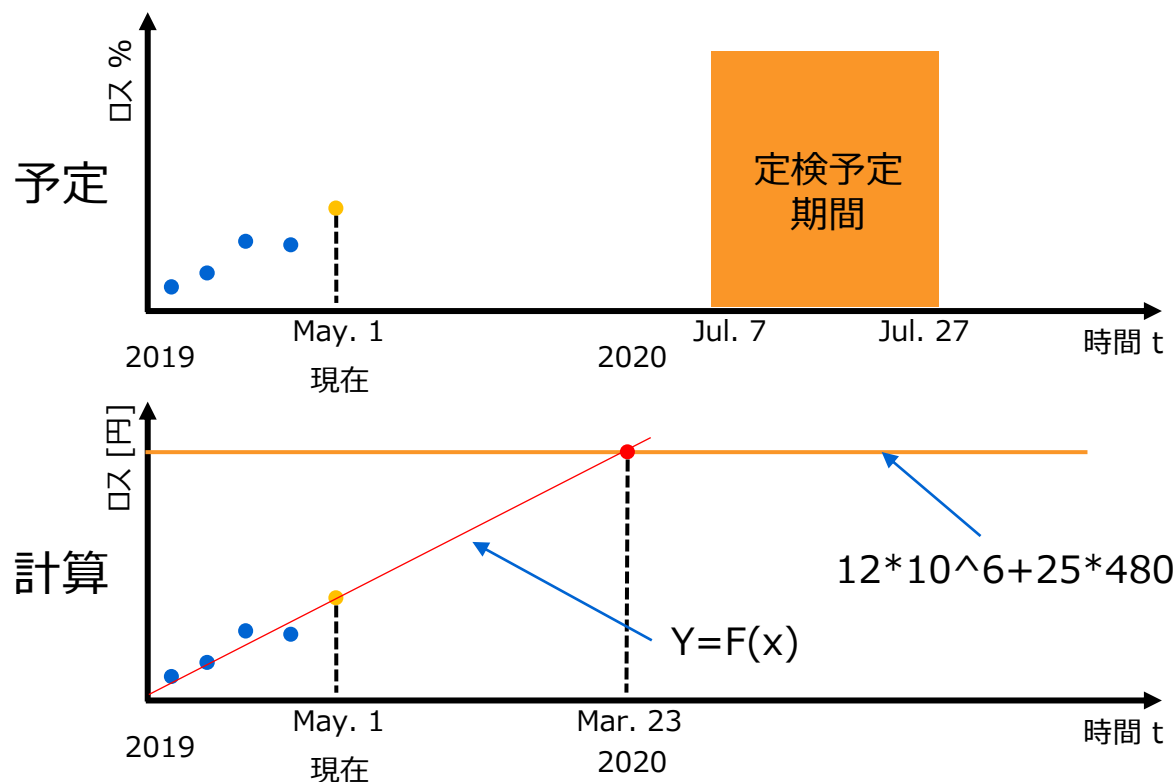




## 2. これまでの実績 | スケール抑制対策 (スケール可視化ツール)

### 定検推奨日計算アルゴリズム概要

- 定検期間、定検費用、売電単価から定検にかかるコストを算出
- スケールによる発電ロスの実績値から将来のロス曲線を予測
- 「定検コスト<スケールによる発電ロスの積算値」となる日付を表示



20/5/23

推奨タービン清掃日

$F(x)$  : 数値モデルを使った近似式  
(現在は2次関数近似)

### 3. 成果報告

————→ : 計画      —————→ : 実績

研究開発項目	担当	2018年度				2019年度				2020年度				
		1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	
<b>1. 予兆診断による稼働率向上</b>														
1-1. ビッグデータ分析ツールの実装運営	市川													
1-2. 過去のトラブルの分析	市川													
1-3. プラント性能監視システムの実装運営	市川													
1-4. 運転データの分析・評価	市川													
<b>2. スケール抑制対策</b>														
2-1. ラボでの研究	古谷													
2-2. 実証試験	古谷													

細かい実績は、次スライドよりご説明致します。

### 3. 成果報告

#### 1. 予兆診断による稼働率向上

- A発電所での地熱向け設備診断アセットの実証試験 2019年8月開始
- A発電所でのプラント性能監視システムの実証試験 2020年4月開始
- B発電所での地熱向け設備診断アセットの実証試験 2020年6月開始
- B発電所でのプラント性能監視システムの実証試験 2020年7月開始
- A/B発電所へのメール通知機能の追加 2020年10月完了
- 地熱向け設備診断アセットを利用した過去事例の評価 2021年2月完了

\*1 アセットとは予兆診断を可能とするプロセス量のグループ

#### 2. スケール抑制対策

- 薬剤排水処理検討 2020年4月完了
- ラボベースでのスケール抑制効果の定量評価 2020年7月完了
- A発電所向け実証試験設備の製作／社内試験 2020年8月完了
- A発電所での実証試験設備の据付／実証試験 2020年11月完了
- A発電所での実証試験結果の分析／評価 2021年2月完了

青字は、次スライドより詳細な進捗報告を行います。

### 3. 成果報告 | 予兆診断による稼働率向上

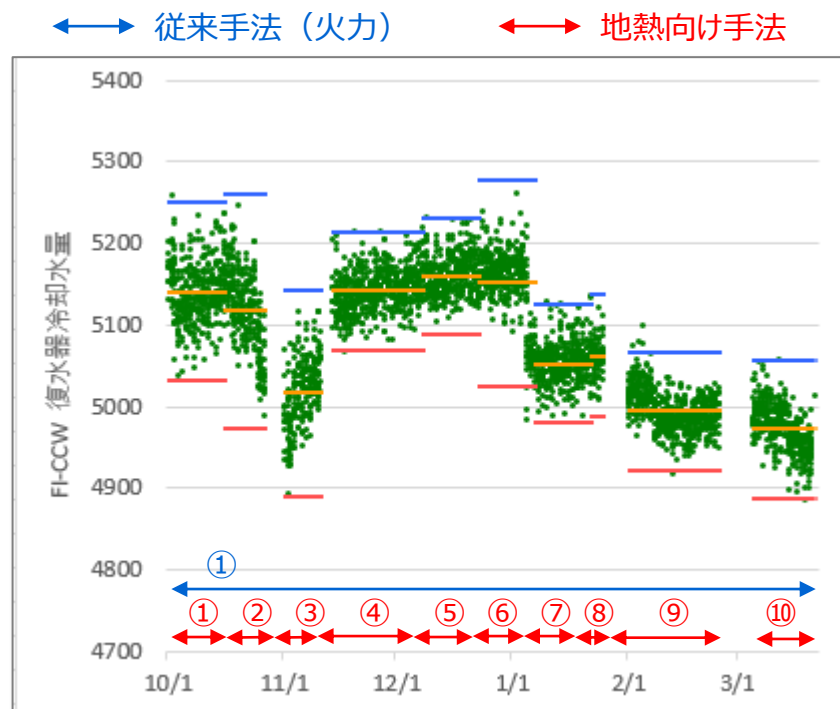
#### ● 地熱向け設備診断アセット\* 監視幅のしきい値算出方法

##### ◆ 火力と地熱の条件の違い

火力はボイラから安定した蒸気が供給されるため、正常運転時はプロセス値の変動が少なく、監視幅のしきい値算出の精度が高いが、地熱は正常運転時においても蒸気状態等の変動が大きいいため、従来の火力の手法を流用すると、監視幅のしきい値算出の精度が低い。

##### ◆ 地熱向け仕様

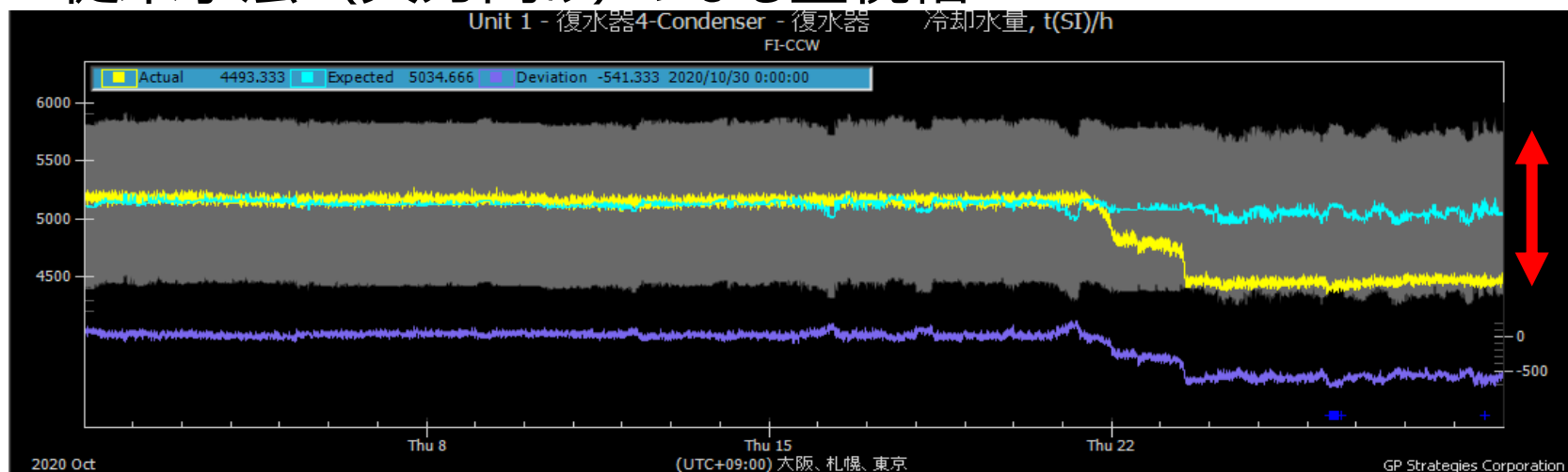
- ✓ 正常データを10分割にクラスタ化
- ✓ クラスタ毎にしきい値を算出
- ✓ 各クラスタのしきい値の平均を採用



\* アセットとは予兆診断を可能とするプロセス量のグループ

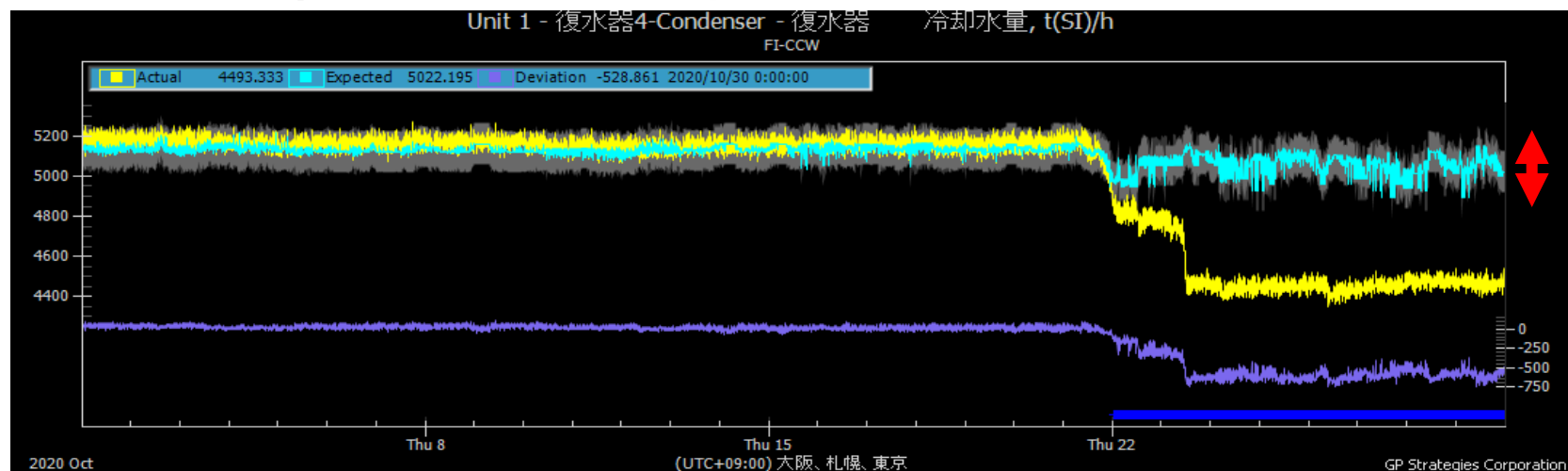
### 3. 成果報告 | 予兆診断による稼働率向上

#### • 従来手法（火力向け）による監視幅



監視幅  
大

#### • 新手法（今回の地熱向け）による監視幅



監視幅  
小

変動が大きい場合でも適切な監視幅を設定する手法を確立

### 3. 成果報告 | 予兆診断による稼働率向上

#### ● 予兆診断システム導入によるトラブル抑制効果の評価まとめ

\* 評価結果 ○：予兆検知可、△：異常検知可、×：検知不可

No.	発生日	件名	評価結果 *	予兆検知時間
1	2014/5/24	蒸気井 圧力低下	△	約10時間前
2	2014/6/27	タービン振動異常	○	約8日前
3	2014/4/30	蒸気井 蒸気温度低下	○	約23日前
4	2015/7/29	タービン振動異常	○	約12日前
5	2016/8/1	発電機界磁地絡によるトリップ	×	—
6	2016/12/1	蒸気溜圧力低下	×	—
7	2018/4/4	GCPガス調節弁・出口ガス流量ハンチング発生	△	(評価継続中)
8	2018/5/1	復水器水位調節弁開度指示不具合	△	約5時間前
9	2018/7/2	沈砂池水位計不具合	○	約1日前

9件中、4件は予兆検知可能であることから、  
20%以上のトラブル発生率を抑制できることを確認

### 3. 成果報告 | 予兆診断による稼働率向上

- 地熱向け設備診断アセットを利用した過去事例の評価例

✓ 件名：2014年6月27日 タービン振動異常

✓ 事象：

タービン振動値が、自主点検(2014年5月28日～6月10日)後の1.8/100mmP-Pから徐々に上昇し、6月26日には2.9/100mmP-Pまで漸進し、タービン開放点検に至った。

原因：スケールの付着または剥離進行によるロータアンバランス発生

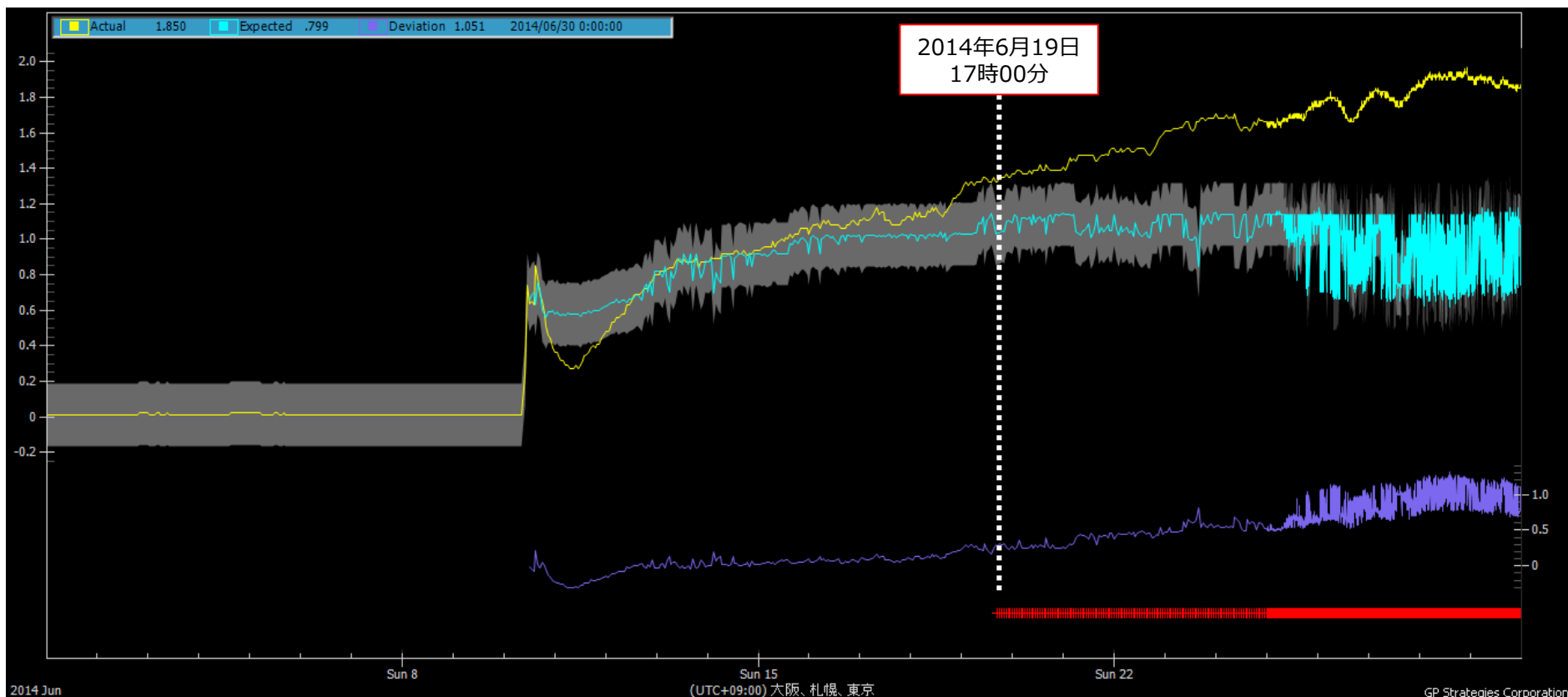
✓ タービン停止期間：2014年9月18日～9月27日

### 3. 成果報告 | 予兆診断による稼働率向上

#### ● 地熱向け設備診断アセットを利用した過去事例の評価例

✓ 過去正常データ範囲：2013年5月1日～2014年5月1日

✓ 検知されたアセットとその監視点：蒸気タービン(機械関係) タービン振動2軸水平



発生日の約8日前に検知できることを確認



### 3. 成果報告 | 予兆診断による稼働率向上

#### ● プラント性能監視システム

物理式に基づくプラントモデルに運転データを入力し、性能の経年劣化を評価する

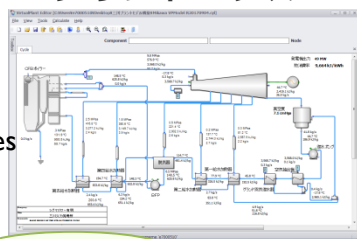
監視画面

設計データ



- Heat balance Dia.
- Characteristic curves
- Design specification etc.

プラントモデル



プラント  
モデル

期待値

製作

ギャップ可視化

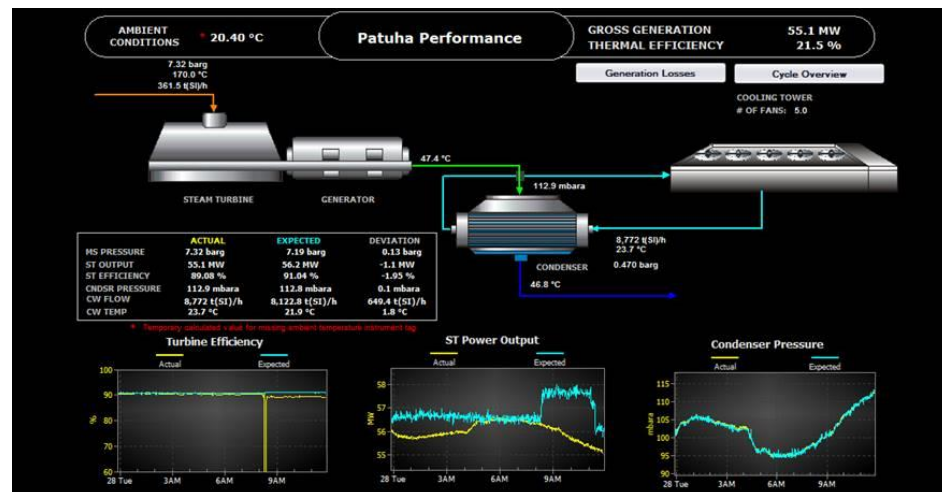
比較

実プラント



実プラント性能

オンライン  
データ



	ACTUAL	EXPECTED	DEVIATION
HS PRESSURE	7.32 barg	7.19 barg	0.13 barg
ST OUTPUT	55.1 MW	56.2 MW	-1.1 MW
ST EFFICIENCY	89.08 %	91.04 %	-1.95 %
CNDRS PRESSURE	112.9 mbara	112.8 mbara	0.1 mbara
CW FLOW	8,772 t(SI)/h	8,122.8 t(SI)/h	649.4 t(SI)/h
CW TEMP	23.7 °C	21.9 °C	1.8 °C

実データ

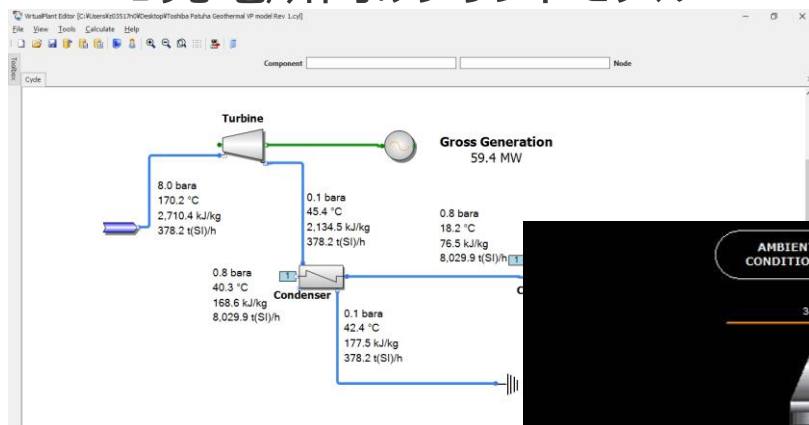
期待値

ギャップ

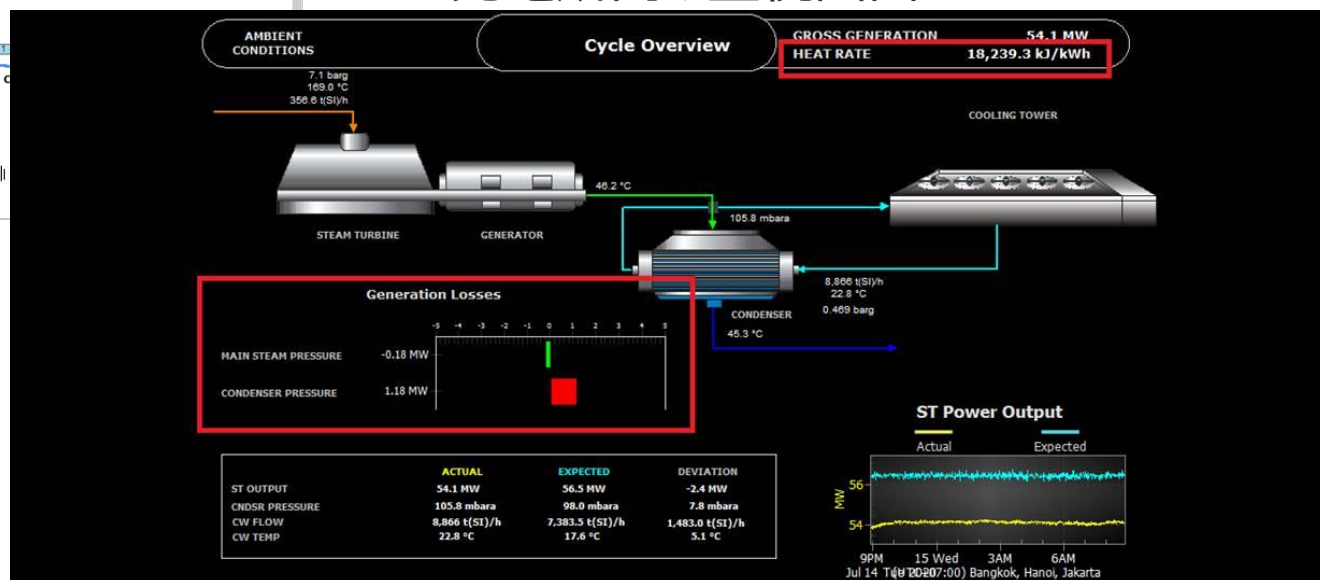
### 3. 成果報告 | 予兆診断による稼働率向上

#### ● プラント性能監視システム

A/B発電所のプラントモデルを構築し、**実データからリアルタイムで性能評価**  
B発電所向けプラントモデル



#### B発電所向け監視画面



しかし、A/B発電所とも、評価期間中に定期点検／生産井設備改良工事が行われたため、経年劣化の影響が評価不可となってしまった

### 3. 成果報告 | スケール抑制対策

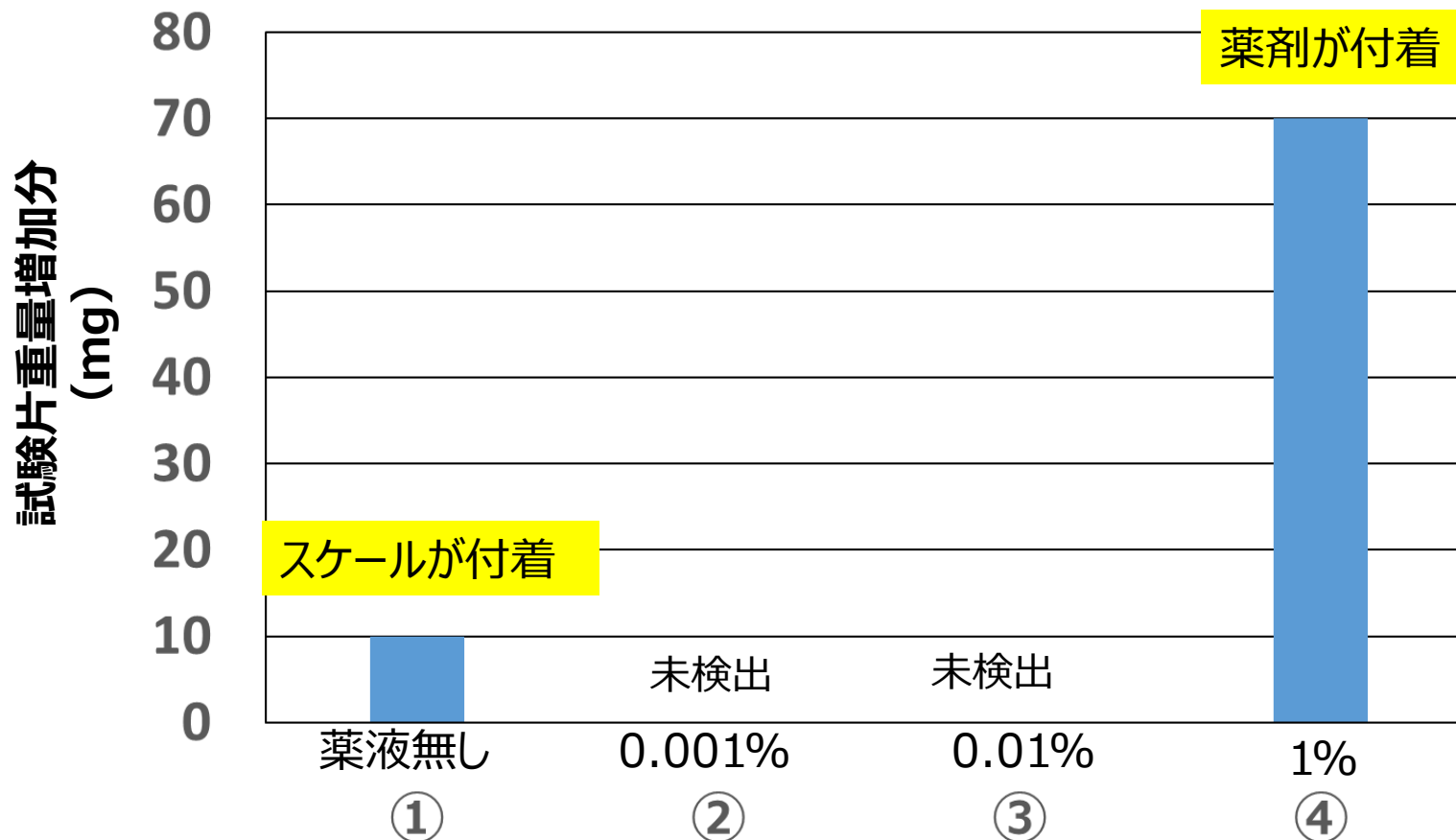
#### ● A発電所での実証試験リスト

試験番号	薬液濃度	設定薬液量	設定蒸気量	試験時間
①	薬液無し	0kg/h	30kg/h	163h (9/28 17:30 ~10/6 9:30)
②	0.001%	1.5kg/h	30kg/h	163h (10/24 15:40 ~10/31 13:45)
③	0.01%	1.5kg/h	30kg/h	163h (10/6 16:30 ~10/13 14:20)
④	1%	1.5kg/h	30kg/h	163h (10/15 14:40 ~10/22 16:45)

約 1 週間の曝露試験を薬液濃度毎に実施

### 3. 成果報告 | スケール抑制対策

#### ● A発電所での実証試験結果：重量測定



低薬液濃度②③にてスケール重量未検出  
(抑制効果確認)

### 3. 成果報告 | スケール抑制対策

#### ● A発電所での実証試験結果：サンプル外観



①PVP0%  
(薬注なし)



②PVP  
0.001%



③PVP  
0.01%



④PVP  
1%



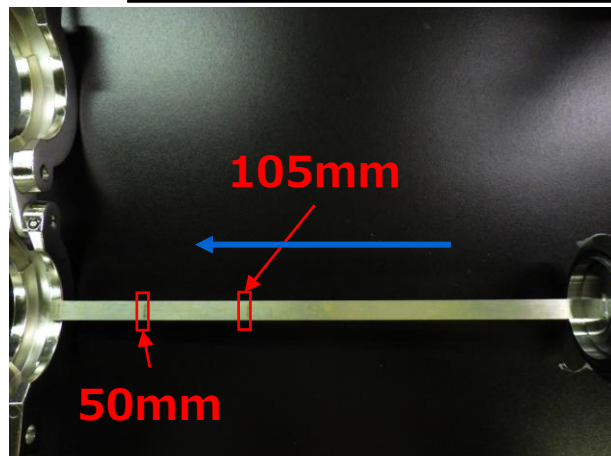
PVP1%では、サンプルから  
PVPが垂れるほど過剰に付着

黄色の物質は薬剤

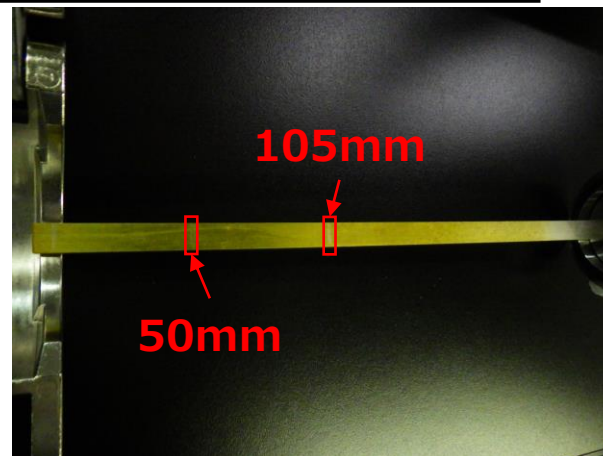
①薬注なしでスケール確認、④PVP濃度1%は過剰

### 3. 成果報告 | スケール抑制対策

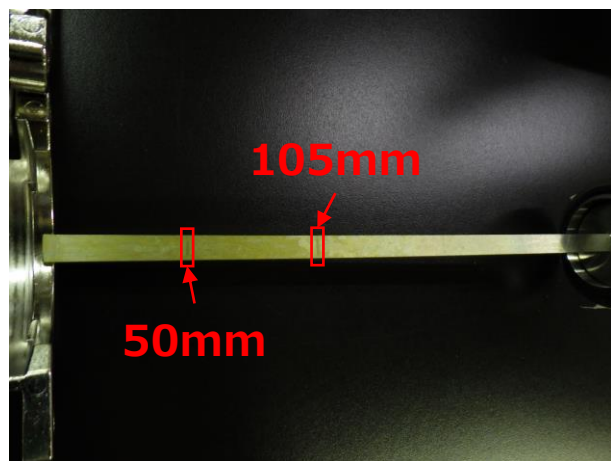
#### ● A発電所での実証試験結果：分析サンプリング部位



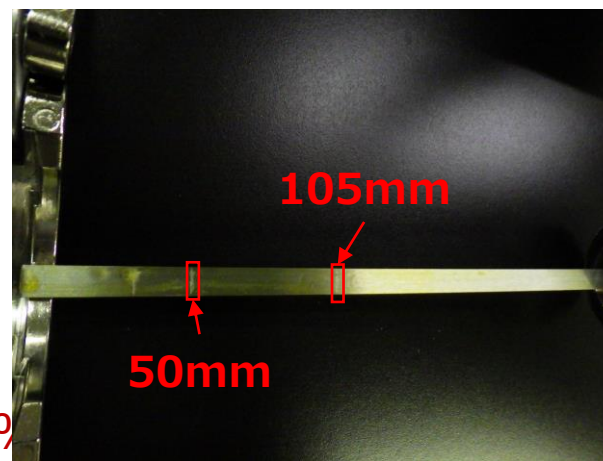
①PVP0%



③PVP0.01%



②PVP0.001%

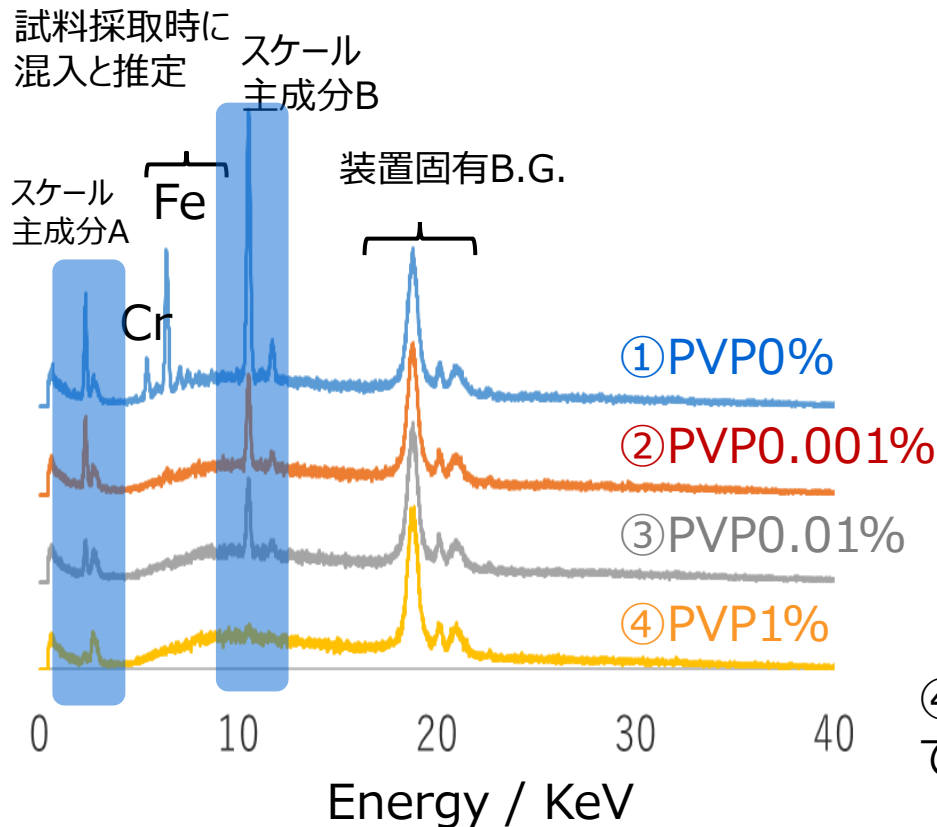


④PVP1%

各試料において、2つの部位から分析試料をサンプリング

### 3. 成果報告 | スケール抑制対策

#### ● A発電所での実証試験結果：スケールのXRF分析結果



試料先端から50mm付近をサンプリングして測定

XRF分析：照射したX線を吸収した  
原子が放射する固有のX線进行分析

スケール主成分A,Bを検出  
スケール主成分のピーク強度はPVP濃度と相反

#### スケール抑制率

	成分A	成分B
1-②/①	28.4%	57.6%
1-③/①	62.9%	65.4%
1-④/①	85.6%	85.2%

20%以上の  
抑制を確認

④PVP1%は薬剤の付着が多いの  
で望ましくない

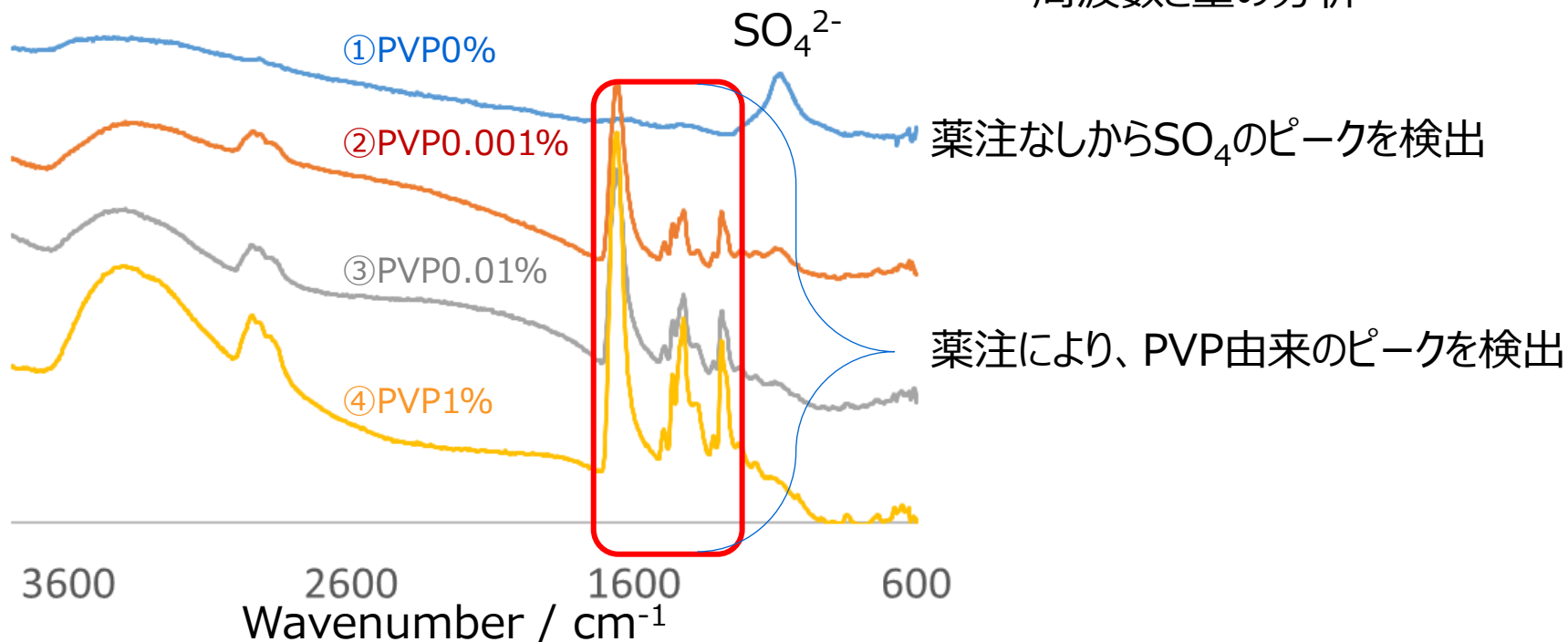
スケールの主成分A,Bを検出 PVP濃度が高いほうが抑制効果が高い。  
0.001%濃度薬剤でもスケール主成分を20%以上抑制確認



### 3. 成果報告 | スケール抑制対策

#### ● A発電所での実証試験結果：スケールのFT-IR分析結果

FT-IR分析：赤外線吸収  
周波数と量の分析



試料先端から50mm付近をサンプリングして測定

薬注によりPVPのコーティングを確認



### 3. 成果報告 | スケール抑制対策

#### ● A発電所での実証試験結果：分析結果まとめ

#### まとめ

- ✓ 試験片の重量変化から、薬注によるスケール付着が低減することが確認した。（0.01%、0.001%濃度）
- ✓ XRF分析から、薬注濃度0.001%以上で20%以上のスケール主成分の抑制効果を確認した。
- ✓ FT-IR分析から、薬注によりPVPがサンプルをコーティングすることを確認

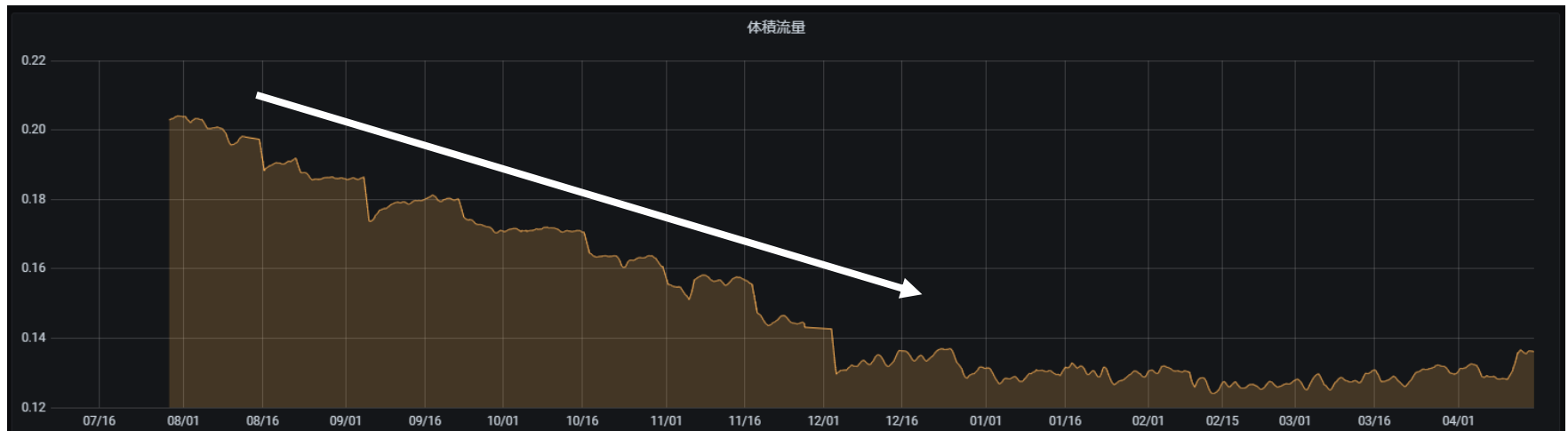
#### 今後の課題

- ✓ 薬注濃度の最適化
- ✓ スケール付着加速試験による薬注影響評価

### 3. 成果報告 | スケール抑制対策 (スケール可視化ツール)

## スケールロス計算アルゴリズム 計算結果(A発電所)

- 時間経過と共に体積流量、および発電機出力が減少していることを確認



## 4. まとめ

### 1. 予兆診断による稼働率向上

- 過去事例の分析やA/B発電所での実証試験により、地熱向け設備診断アセット、およびプラント性能監視システムを開発した。
- 設備診断アセットの導入によるトラブル抑制効果を評価した。
- 地熱発電所特有の条件を加味した設備診断アセットを構築する。また、他の発電所にも予兆診断システムを適用し、知見をさらに深める。

### 2. スケール抑制対策

- A発電所での薬剤によるスケール抑制効果の実証試験の結果、20%以上のスケール抑制効果が確認された。
- スケール可視化ツールについては特許出願を完了した。  
(出願番号：特願2021-007895)

# 事業化計画

ダッシュボードを中心として、プラント業務をシームレスに連携し、計画外停止を予防します。

