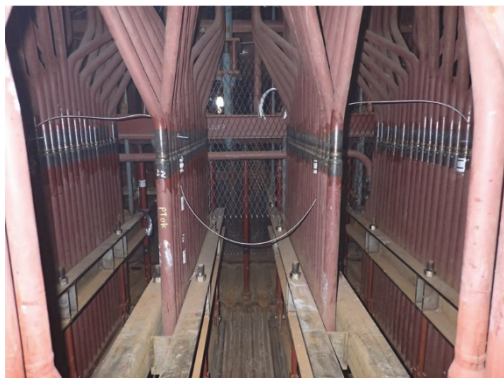


# プラント状態監視・保守計画の合理化のための 光ファイバ温度計による多点温度計測技術

## Multipoint Temperature Measurement by Optical Fiber Sensor for Rationalization of Plant Condition Monitoring and Maintenance Planning



吉田 茂\*<sup>1</sup>  
Shigeru Yoshida

森 真一郎\*<sup>2</sup>  
Shinichiro Mori

坂口 貴士\*<sup>3</sup>  
Takashi Sakaguchi

宮本 大樹\*<sup>4</sup>  
Daiki Miyamoto

河島 弘毅\*<sup>5</sup>  
Hirotake Kawashima

竹内 和広\*<sup>6</sup>  
Kazuhiro Takeuchi

電力・化学・石油・ガス等のプラント業界では、設備の老朽化や運転員・保守員の不足といった問題に直面し、状態監視に基づく合理的な運転・保守と安定操業の維持が課題となっている。そこで三菱重工株式会社では、プラントの状態監視に役立つ多点温度計測技術を開発した。本技術は耐熱性に優れた光ファイバ温度計を用いており、1本で多点の温度計測が可能である。

例えば火力発電用ボイラプラントで使用される多数の伝熱管の温度監視に使用することで、異常の早期発見や、検査・更新工事の適正化などが可能となる。実機ボイラで実施中の長期実証試験では、従来よりも低コスト・短時間で設置可能であることや定格運転中の温度分布を把握可能なことを確認し、1年以上の連続計測も達成した。今後も長期間の耐久性や計測性能の検証を継続するとともに、各種プラント設備へ適用し、状態監視・保守計画の課題解決に貢献する。

### 1. はじめに

電力・化学・石油・ガス等のプラント業界では、設備の老朽化、運転員・保守員の高齢化・人材不足と技術・技能伝承力の低下、デジタル社会の進展やカーボンニュートラル対応など、業界共通の問題や様々な環境変化への対応が求められている。このような中で業界各社は、従来よりも少ない人員と限られた保守費用でプラントの安定運用を継続する必要に迫られており、プラントの状態監視に基づく、異常の早期発見や保守計画の合理化ニーズが高まっている。

このようなプラントの安定運用に関する課題に対して、三菱重工株式会社(以下、当社)では、状態監視をより効率的に行うことを可能とする多点温度計測システムを開発した。本報では、光ファイバ温度計を用いた多点温度計測システムの概要・特徴について紹介したのち、火力発電プラントを例に、監視データを活用したプラント運用・保全の考え方を述べる。また、稼働中のボイラでの実証試験状況と今後の展望について紹介する。

### 2. 光ファイバ温度計について

光ファイバを各種センサとして活用する技術自体は古くから研究されており、温度・歪み・圧力・振動などを計測するために様々な光ファイバ構造や計測原理が提案されてきた。一部は、橋梁や電線等のインフラ監視などに実用化されているが、300°Cを超える高温環境で使用できる光ファイバセンサは少ない。一方、発電設備や化学プラントをはじめとする当社製品は、高温・高圧といった過酷な環境で長期間使用されることから、このような製品の重要部品の状態監視に光ファ

\*1 総合研究所 電子・物理研究部

\*2 総合研究所 製造研究部 主席研究員

\*3 エナジードメイン SPMI 事業部 技術部 主席技師

\*4 エナジードメイン SPMI 事業部 技術部

\*5 エナジードメイン SPMI 事業部 技術部 次長 技術士(機械)

\*6 エナジードメイン SPMI 事業部 営業部 主席技師

イバセンサを適用するためには、光ファイバの耐熱性を向上する必要があった。そこで当社は、阿德レード大学・南オーストラリア大学との共同研究を実施し、耐熱性に優れた光ファイバ温度計を開発した<sup>(1)</sup>。

当社の光ファイバ温度計は FBG (Fiber Bragg Grating) と呼ばれる方式のセンサで、その特徴を表 1 に示す。光ファイバにレーザー光を入射すると、FBG の部分で特定の波長が反射される。この反射光の波長は温度によってシフトするため、反射波長を計測することで温度センサとして機能する。反射波長の異なる複数の FBG を光ファイバの長手方向に複数配置することで、1 本の光ファイバで多点の温度を計測することができる(図 1)。このため、センサ施工作業を効率化でき、大規模な温度計測システムを低コストに構築可能である。

当社の光ファイバ温度計の最大の特徴は、特殊構造の光ファイバ上に特殊プロセスで FBG を描画することにより、1000℃以上の超高温環境で動作する高い耐熱性を有している点である<sup>(2)</sup>。また、電気信号を使用しないことから電磁干渉が懸念される場所でも使用することができる。さらに、計測した大量の時系列温度データは、当社またはお客様のクラウド・遠隔監視基盤を通じて収集・可視化し、リアルタイムに設備の状態監視や分析を可能としている。加えて、当社の光ファイバ温度計が採用している FBG は、長さ数 mm の感温部をファイバの長手方向にわたって複数配置した“離散型”センサである。一方、“分布型”と呼ばれる別の方式の光ファイバ温度計の場合、数百 mm 毎の平均的な温度が計測される(図 2)。したがって、分布型の場合は比較的長い領域をチューブに対し接触させる必要があるが、当社の光ファイバ温度計の場合は感温部のみを局所的に固定すれば良く、作業性が良好である。

表1 光ファイバ温度計の特徴

項目	仕様
温度範囲	-200℃～1200℃
感温部 (FBG) サイズ	数 mm
1 本あたりの計測点数	数十点 (計測器の仕様と計測したい温度範囲による)
計測周期	1 秒～60 秒
計測器	市販の FBG 用インテロゲータを使用可能
データ可視化	ローカル・クラウドそれぞれのダッシュボードでリアルタイム表示
その他	電磁干渉への耐性良好、遠隔での設定変更やメンテナンスが可能

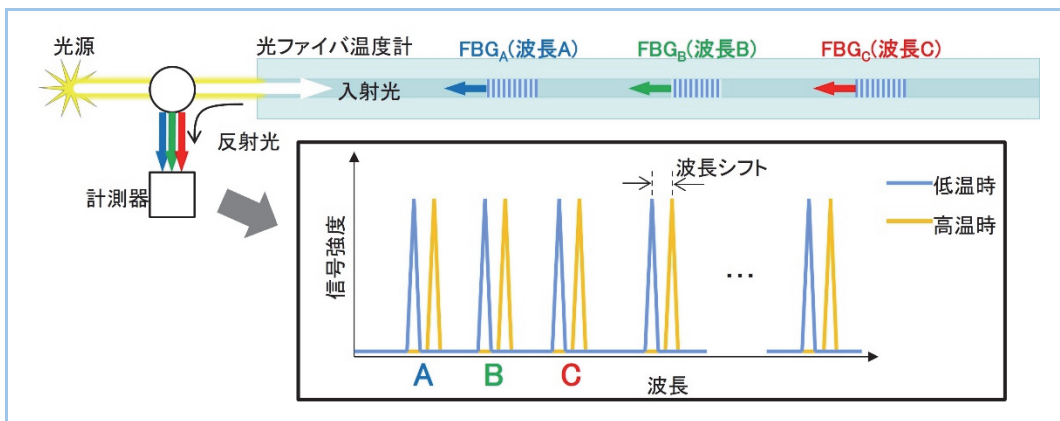


図1 光ファイバ温度計の原理(FBG 方式)

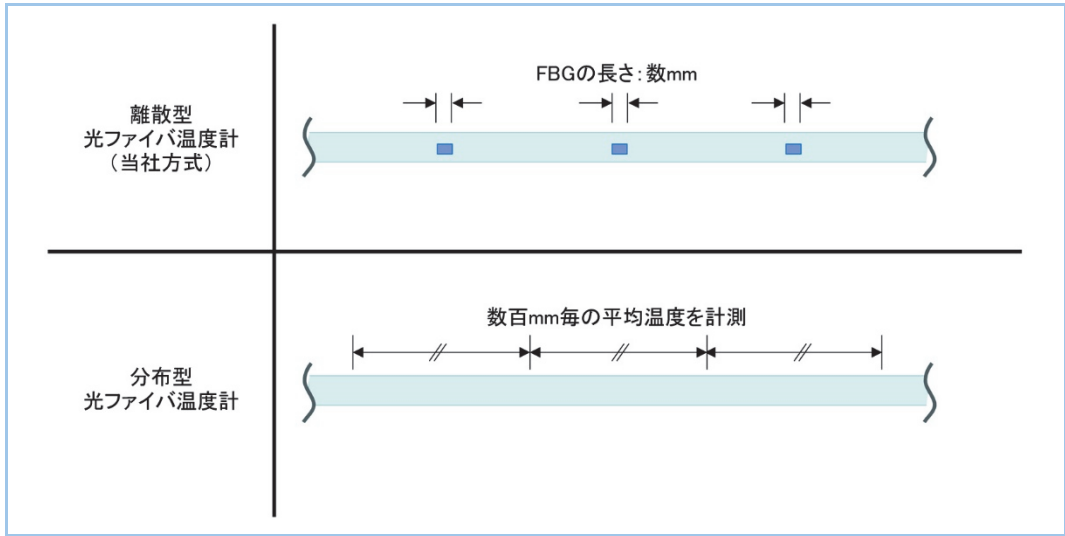


図2 光ファイバ温度計の方式による違い

### 3. 火力発電プラントにおける多点温度データの活用

火力発電プラントでは、2017年に改正された電気事業法施行規則において、十分な検査体制に加え高度かつ十分な保守管理を実施することで最大6年まで定期事業者検査(現行:定期自主検査)時期が延伸可能となった。他方、地球温暖化対策として火力発電から再生可能エネルギー電源へのシフトが進んでおり、火力発電への大規模な設備投資が難しい状況下で、経年設備の確実な保守管理を如何に効率的に遂行できるかという点が以前にも増して重要となってきた。ここでは、火力発電プラント(ボイラ)の運転中及び定期点検時それぞれの場面において、多点温度計測データをどのように活用することができるかについて述べる。

#### 3.1 運転中の状態監視・運用高度化

運転中は、設備の状態を正確に把握して適切な運転を行うことや、不具合及びその予兆を早期に発見することがポイントとなる。多点温度計測によって監視点数が増えることで、例えばボイラ耐圧部のメタル温度分布を詳細に把握することが可能となり、ボイラ伝熱管クリープ損傷漏洩(ボイラ長期停止)に至る異常過熱見逃しリスクを低減できる(図3)。また、当社のインテリジェントソリューション TOMONI<sup>®</sup>(3)を活用することで、プラント全体の遠隔監視データや制御状態に関するデータを元に、最適な運用ガイダンスや、耐圧部を長寿命化するための温度偏差の平準化などが可能となる。

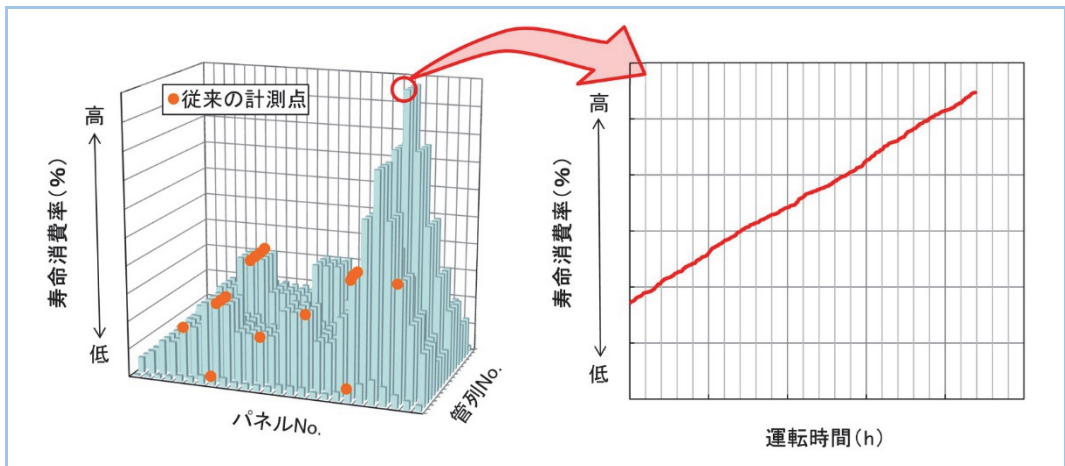


図3 ボイラ耐圧部メタル温度の詳細監視イメージ

そして昨今は燃料コストの低減のために多様な炭種に切り替えて使用するケースや、再生可能エネルギー電源の普及により高頻度の負荷変動運転が実施されるケースがみられる。またカーボ

ンニュートラル対応のためにバイオマス混焼や将来的にはアンモニア混焼が検討されている。このように燃料・運転が多様化する場合において、燃焼状態やメタル温度を詳細に把握することは、スートブロウ(蒸気噴射による付着灰除去装置)の最適運用による高効率化、トラブル未然防止と安定運用のために有効であり、CO<sub>2</sub>排出量削減にも貢献可能である。

### 3.2 定期点検時の検査・補修工事の合理化

ボイラの定期点検時は、クリープ損傷、高温酸化減肉及び疲労損傷等を早期に発見することを目的に、高温部の伝熱管や管寄せといった部位の目視検査や非破壊検査が実施されている。検査で損傷が顕著な箇所が発見された場合には、詳細な評価を実施し残寿命を推定のうえ、処置が決定される。検査補修工事の計画・遂行にあたっては、損傷部位を特定し検査範囲を選定することが重要であるが、目視点検では材料の経年劣化を見逃すリスクがある。また、限られた工期で多数の伝熱管に対して精密な検査を実行するのは困難という課題もある。そこで、多点温度計測データを活用して、劣化状態をより詳細に把握することで、点検範囲の見逃しリスクの回避や、過剰な検査の適正化による検査コスト・検査工期の低減が可能となる。また、温度データだけでなく、検査結果や運転状況を総合的に組み合わせることで、寿命評価の精度が向上し、メンテナンス計画の立案に貢献する。

図4に、多点温度計測を実施して検査数量・メンテナンス計画を合理化するイメージを示す。従来は計測データが限られることから損傷リスクを適切に評価するために多数の検査を実施する必要があったが、多点計測によって広範囲の劣化状態を詳細把握することで、必要最小限の検査を適切なタイミングで計画することが可能となる。また、各定期点検において、多点計測に基づいて評価した損傷リスクと詳細検査を組み合わせることで、取替数量の最小化や次回定期点検への繰越などで工事が平準化されることで、クリティカル工事日数が減少するため、総停止期間を従来よりも短縮することが可能となる。

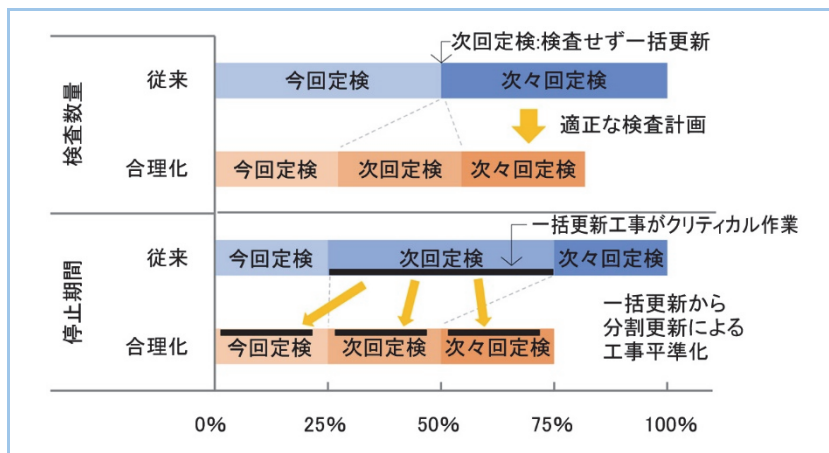


図4 検査数量削減と停止期間短縮のイメージ

## 4. 実証試験

### 4.1 試験状況

光ファイバ温度計の計測精度や長期間の耐久性などを実際のプラント稼働環境で確認するため、石炭焚ボイラ(650MW/三菱超臨界圧変圧運転貫流ボイラ放射再熱形)において実施中の実証試験状況について紹介する。当該ボイラの三次過熱器出口管寄せ管台は、過熱器系統で最も高温で使用される耐圧部材であり、且つ、管本数が約700本あり寿命管理が難しい部位である。そこで実証試験では、図5に示すようにボイラ天井ハウジング内の三次過熱器出口管寄せ管台部分に、光ファイバ温度計を炉幅方向に設置した。感温部(FBG センサ)を含む耐熱光ファイバを金属保護管の内部に挿通することで、外力や粉塵から保護するとともに、施工時の取扱いを容易にした。管台のメタル温度を正しく計測できるように、特殊な固定方法で、金属保護管入りの



光ファイバを管台チューブ表面に固定した。また、センサ部以外のファイバの敷設に関しては、温度上昇に伴う構造物の熱伸び等の影響を受けにくいルートとした。

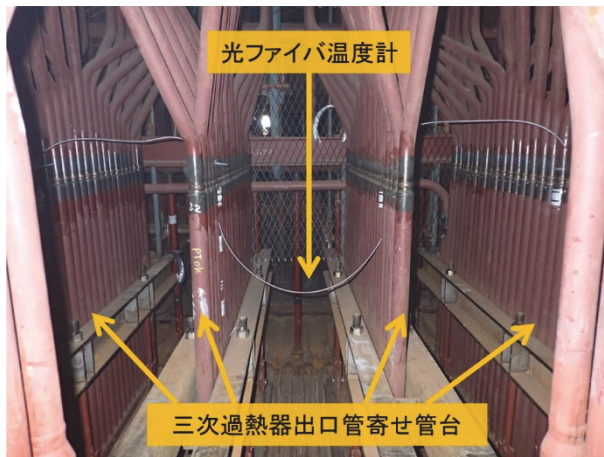


図5 光ファイバ温度計の設置状況

#### 4.2 計測システム構成と計測例

実証試験時の多点温度計測システムの機器構成を図6に示す。光ファイバ温度計は炉外に引き出し、延長ケーブルを介して現場ラック内に設置した計測器と接続した。計測器は市販のFBGセンサ用のものが使用でき、本試験では、160nmの広い波長帯域を有するインテロゲータEFOX-1000B(株式会社共和電業)を使用した。計測器は産業用エッジコンピュータで制御し、計測データはLTEルータを介してSSL(Secure Sockets Layer)通信によりTOMONIサーバに送信している。そのほか、現場ラックには、UPS、直流電源装置、遠隔制御リレー、冷却ファンが格納されており、停電時の計測継続、夏場の高外気温への対応、計器またはソフトウェア停止時の遠隔リセットを可能な仕組みとした。

図7にTOMONIの可視化ソフトウェア上に構築したダッシュボード画面を示す。このように、三次過熱器出口管台の炉幅方向の温度分布が把握可能なことを確認した。なお、本ダッシュボードは、光ファイバ温度計のデータだけでなく、その他の状態値と組み合わせるなど、監視・分析の目的に応じて自由にカスタマイズが可能である。

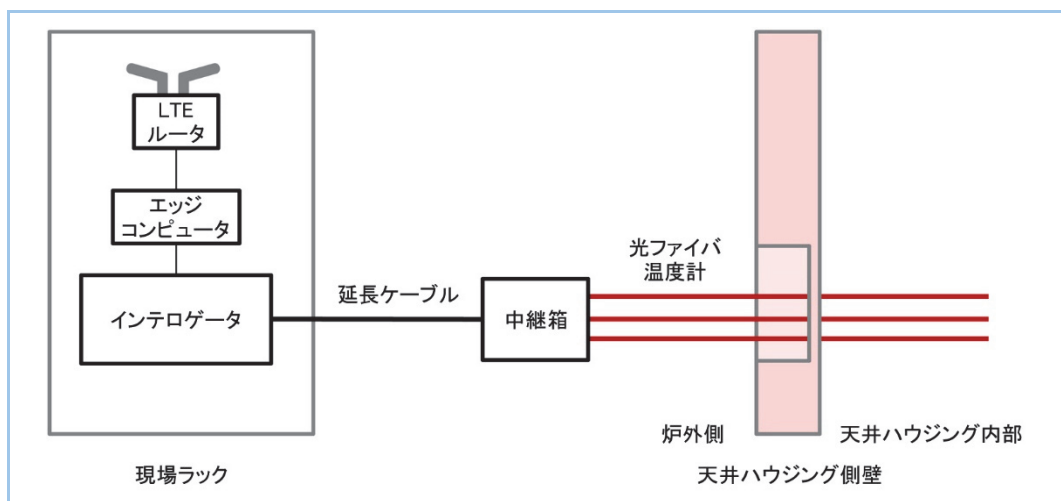


図6 光ファイバ多点温度計測システムの機器構成

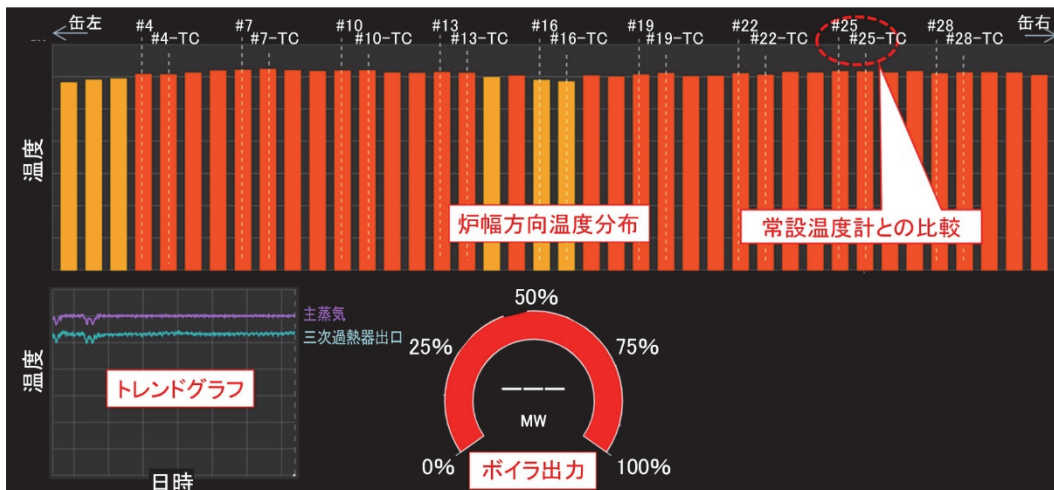


図7 温度データ可視化ダッシュボード

### 4.3 温度計測精度・耐久性

温度計測精度については、常設計器であるパッド型熱電対との比較評価を実施した。図 8 に評価結果を示す。定格運転中の 4 時間の温度データ(サンプリング間隔 5s)について、平均絶対誤差(MAE)は、1.3°C~4.5°Cであり、600°Cにおける JIS クラス 2 熱電対の許容誤差 4.5°Cと同等であった。なお、平均絶対誤差(MAE)は、常設熱電対の計測値とファイバ温度計の計測値の差の絶対値(絶対誤差)を算出し、評価期間全ての絶対誤差を平均化したものである。

耐久性については、ボイラの実機環境で想定される高温環境下での長期間暴露、起動停止による伸縮、燃焼ガス成分、粉塵、停止中の工事といった様々な懸念に対して、数年スパンの長期耐久性を検証継続中であり、検証開始から 1 年以上の連続計測を達成している(図 9)。途中、一部の系統において断線が発生したことから、断線箇所の特定、端面処理、融着接続、融着部保護といった補修要領を検討し、断線箇所の補修と、敷設ルート及び保護構造の対策を講じている。今後も試験を継続し、センサの劣化などを注視しながら、さらに長期間の耐久性や計測性能を検証していく予定である。

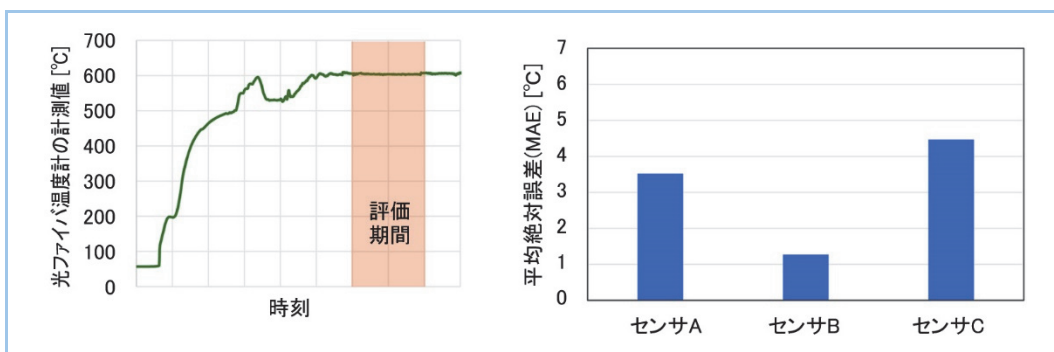


図8 温度計測精度の評価

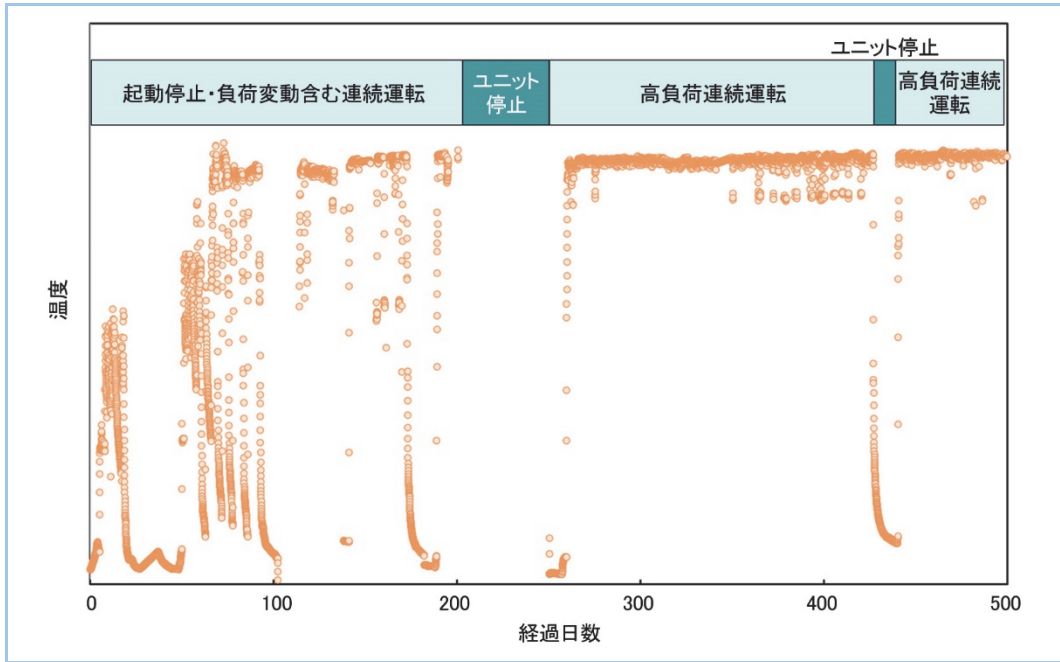


図9 長期連続計測データ

#### 4.4 施工性・設置コスト

実証試験では、光ファイバ温度計の精度や耐久性だけでなく、施工性についても計画と実績を評価し、より効率的に施工・保守を行うための知見を蓄積している。実機ボイラに設置するのは今回が初めての試みであったが、実績として31点分のセンサ設置に要した正味の作業期間は約2日であり、想定よりスムーズに作業完了できることがわかった。熟練化により今後はさらに短期間での設置が可能と考えている。設置コストについて、光ファイバ温度計と従来手法(熱電対)を比較した結果を図10に示す。熱電対の設置では、シース線を1本ずつ敷設・養生する工数、ボイラ内部から外側へシース線を引き出す貫通部の部品数、先端パッド部の溶接前処理(研磨)・溶接・PT 検査などの付帯作業が増加し、温度計測点数の増加に伴い設置コストが大幅に増加する。一方、光ファイバ温度計は1本で多点の計測が可能であるため、敷設・養生に係る工数と貫通部の部品数を少なくすることができる。また、溶接前処理(研磨)・溶接・PT 検査などの付帯作業を無くすことができる。したがって、点数にもよるが熱電対と比較して設置コストを30%程度低減することができ、大規模多点計測に最適である。加えて短工期で設置できるため、チューブブリークなどのトラブル対応時にも有効な手法である。

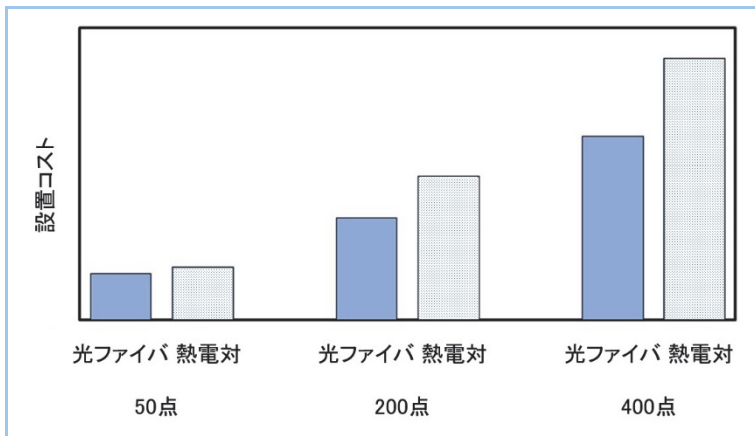


図10 設置コストの比較

## 5. まとめ

本報では、プラントの状態監視・保守計画に有効活用可能な、当社の光ファイバ温度計の特徴として、優れた耐熱性や簡便に多点計測を実現可能といった特徴を紹介した。また、火力発電プラントを例に、伝熱管クリープ損傷の見逃しリスク低減、最適な運用ガイダンス、検査数量・時期の適正化、工事計画の合理化など、運転中及び定期点検時の多点温度データの活用例について述べた。さらに、稼働中のボイラ実機で、多点温度計測の実証試験を実施中であり、1年以上の連続計測を達成したことなどを紹介した。今後も試験を継続して長期間の動作を実証するとともに、3章で述べたデータ活用についても具体的に検討・試行し、実機適用を進めていく予定である。また、化学・石油・ガス・セメント・製鉄などの火力発電以外のプラント設備にも適用を進め、プラント業界の状態監視・保守計画の課題解決に貢献する所存である。

TOMONI<sup>®</sup>は、三菱重工業株式会社の日本及びその他の国における登録商標です。

## 参考文献

- (1) <https://www.adelaide.edu.au/news/news91324.html>
- (2) Warren-Smith, S. et al., Stability of Grating-Based Optical Fiber Sensors at High Temperature, IEEE Sensors Journal, Vol.19, Issue 8
- (3) 安形 友希子ほか, 重要インフラの高度保守運用を実現するインテリジェントソリューション TOMONI<sup>®</sup>, 三菱重工技報, Vol.59, No.3 (2022)