

ICT を活用した火力発電用ボイラ向け 運転・保守支援サービスの高度化

Advanced Operation and Maintenance Service for Thermal Power Station by ICT

川 部 浩 隆	資源・エネルギー・環境事業領域ボイラ SBU 保守技術統括センター技術サポート部
柴 田 浩 意	資源・エネルギー・環境事業領域ボイラ SBU 保守技術統括センター技術サポート部
橋 本 文 朗	資源・エネルギー・環境事業領域ボイラ SBU 保守技術統括センター技術サポート部
小 島 史 生	資源・エネルギー・環境事業領域ボイラ SBU 保守技術統括センター技術サポート部
福 島 仁	資源・エネルギー・環境事業領域ボイラ SBU 保守技術統括センター センター所長

世界各国の電源構成のなかで重要な役割を担っている火力発電所を運営しているお客さまを支援するため、IHI はデジタル技術を活用して、運転支援と保守支援で貢献するシステムをお客さまとともに開発している。運転支援サービスでは、IHI 専門家による遠隔運転監視・指導に加えて、自動監視システムの導入によりさらなる計画外停止の回避や短縮を実現する。保守支援サービスでは、火力発電所の定期検査時に更新する範囲を最適化することを目指し、ボイラデータと運転状態解析により各部の状態を正確に評価するデジタルモデルを構築し、ボイラ耐圧部の寿命を管・部位ごとの細部まで評価する。また、更新履歴を 3D 図面で表現することで、把握が容易となり誤認をなくして正確な判断を導く支援をする。

IHI has developed the advanced operation and maintenance assistance system of the thermal power stations with customers by the recent information technologies. The operation assistance services, in addition to the manual remote monitoring and consultation service by our operation experts, realize minimum unplanned shutdown period by the automatic diagnosis system. IHI aims to help the appropriate region and schedule of the parts replacement with the maintenance assistance services. The digital twin system precisely estimates the residual life of the boiler parts to optimize the parts replacement interval. The three dimensional drawing system visualizes the repair and maintenance history of the parts to help judging the replacement region.

1. 緒 言

最新のデジタル技術は、膨大な運転データを解析したり、その内容を分かりやすく画面に表示したり、過去の運転を記憶して現在の運転状態を評価したりと、火力発電所のような膨大なデータを確認しながら運転している設備に対し、非常に役立つ情報をタイミングよく提示できるようになってきている。

一方、火力発電所は、従来のベース電源の役割に加えて、加速される脱 CO₂ のための再生可能エネルギー電源構成比率拡大に伴い、自然条件で電力供給が増減する再生可能エネルギーに対する補完電源の役割も担っており、責務がさらに広がっている。また、一部の発展途上国では、発電設備の計画外停止が頻繁に発生しており、電力供給の不安定性が課題となっている。さらに、発電効率の低下を解消するため化石燃料の使用量が增大する場合があります。地球環境への高い負荷も問題視されている。

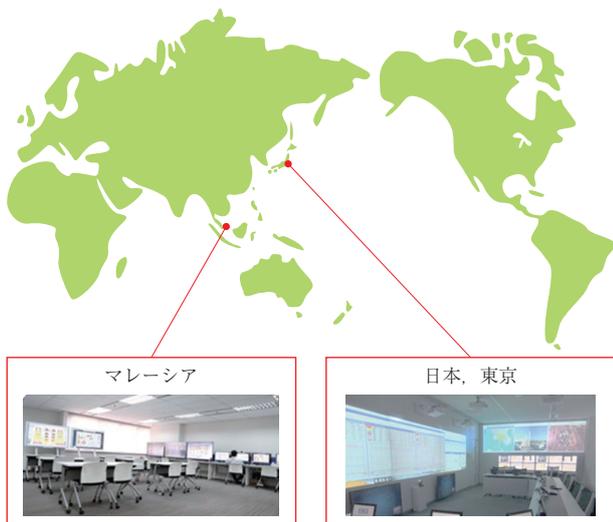
火力発電用ボイラを供給してきた IHI としても、火力

発電所の運転が安定して継続できるよう、デジタル技術の活用を考え、お客さまが行うボイラ運転時の支援とボイラ設備の定期検査計画時の支援をするシステムを開発したので、本稿で紹介する。

2. ボイラの運転支援

2.1 運転支援の背景と課題

主に東南アジア・アフリカ地域において、IHI は運転支援サービスをとおしてお客さま設備の稼働率向上・効率向上をサポートしている。第 1 図に遠隔監視センターを示す。各発電所の運転データを IHI 遠隔監視センターにリアルタイムで集約し、IHI 専門家による監視・分析を行っている。IHI 専門家が発電所の運転データを見ながら、徐々に変化する特性に対してアドバイスを与え、ときには現地へ赴き調整を行っている。また、設備点検結果と運転データを合わせた分析によって、より稼働率・効率を改善するソリューションを提供している。しかし、監視は人手によるため、対応できる時間や対象設備数に制限があるこ



第 1 図 遠隔監視センター
Fig. 1 Remote monitoring centers

とが課題となってきた。そこで、ICT を活用した自動診断により、監視の高度化・省人化を目指している。

2.2 監視および支援のアプローチ

IHI は、IHI 専門家による監視、定常診断（自動）、免疫診断（自動）という三つのアプローチにて運転監視を行っている。

(1) IHI 専門家による監視

世界各地の発電所稼働データを監視センターへ集約し、IHI 専門家が監視する。運転上の異常が生じれば、お客さまへ連絡・訪問し、解決に至るまで支援する。ここでは、人間系だけでは限界があるため、以下の ICT システムを活用して効率的に監視を行っている。

(2) 定常診断（自動）

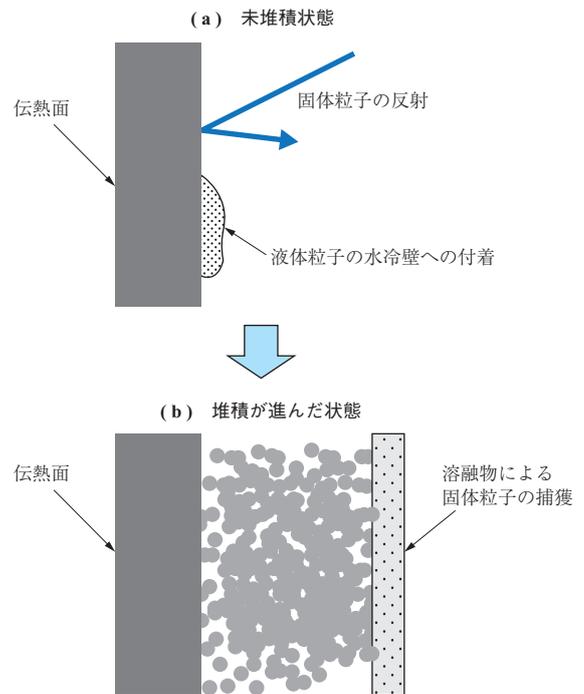
IHI が独自に開発した統計学的機械学習手法に基づいたシステム⁽¹⁾により、これまで蓄積したプラント稼働状態から乖離^{かいり}した運転状態を自動検知する。過去に未経験の運転状態が生じれば、(1)に示す IHI 専門家がプラント稼働状態評価を行う。

(3) 免疫診断（自動）

IHI のトラブル経験に基づいた異常検知システムにより、過去に経験したことのある異常の再発を自動検知する。

2.3 異常検知事例（石炭灰障害）

免疫診断による検知事例を示す。石炭焼き火力発電所のボイラでは、燃料とする石炭の燃焼灰が、伝熱面に付着堆積する。第 2 図に堆積機構⁽²⁾を示す。未堆積状態において、熔融灰粒子は伝熱面に付着するが、固体粒子は表面で



第 2 図 堆積灰の成長機構
Fig. 2 Mechanism of the ash accumulation

跳ね返る。一方、堆積が進んだ状態では、堆積灰は伝熱管表面において断熱材として働き、表面温度が上昇し熔融する。この熔融物が固体粒子を捕獲することにより、加速的に灰堆積は進行する。炉内灰除去装置によって堆積灰を定期的に除去するが、堆積が限度を超えると固着して正常運転が困難になる。

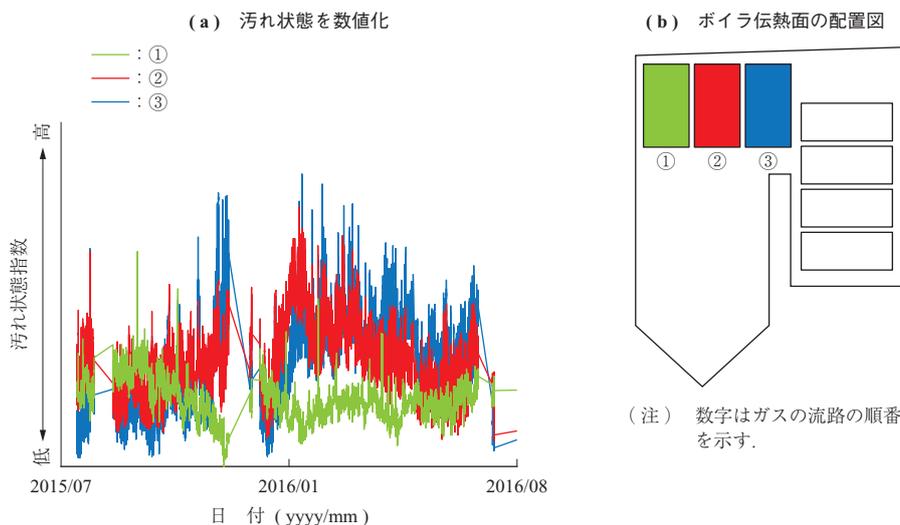
このような灰障害は既存の監視システムだけでは評価しにくく、ボイラプラントの計画外停止の主要因となることがある。

今回開発した診断ソフトウェアは、灰障害による伝熱障害の状態を各伝熱面の汚れ状態指数として直接表現することができる。第 3 図は汚れ状態指数（伝熱障害が大きくなると高い値）が伝熱面の灰障害を示している例である。汚れ状態指数トレンドの示す 1, 2, 3 では、伝熱面での重度な灰堆積によって計画外停止になった。汚れ状態指数が通常時期に比べ高い値を示し、汚れ状態指数で伝熱面の汚れを定量的に示す灰障害の見える化が可能であることを確認できる。IHI は、計画外停止の回避に向けて、本指数に基づく運転変更（スートブロウの増出力など）を提言している。

3. ボイラ定期検査計画の支援

3.1 支援の目標

定期検査（以下、定検）の計画を支援するサービスで



第3図 灰障害の見える化
Fig. 3 Visualization of the ash accumulation

は、火力発電所の定検時に行う検査や更新の対象範囲を、適切に判断できるように必要なデータを分かりやすく提示することを目標としている。

判断が適切さを欠いた場合、検査・更新範囲が過剰であれば定検期間の長期化やメンテナンスコストの増大につながる恐れがある。一方、範囲が過少であると損傷懸念箇所を見逃し、稼働中に損傷が発生した際にはボイラ停止と損傷復旧に伴う稼働時間の低下を招くことになる。そのため、定検時の保守計画策定には、適切さが要求され、火力発電所では、ここに常日ごろから並ならぬ努力を注いでいる。

また、ボイラの構造は複雑で、節炭器、火炉、過熱器、再熱器などの熱交換をする幾つかのパスが存在する。それらのパスは、数百～1000本程度の伝熱管で構成されるが、伝熱管は三次元の構造でかつ長大であるため、どの管のどの位置を検査・更新するのかは、熟達者でなければ正しく見極められない傾向がある。したがって、複雑さを克服するためにはデータを分かりやすく表現できることが重要であり、お客さまが苦慮するところの一つとなっている。

3.2 保守履歴管理とカルテから保守管理表

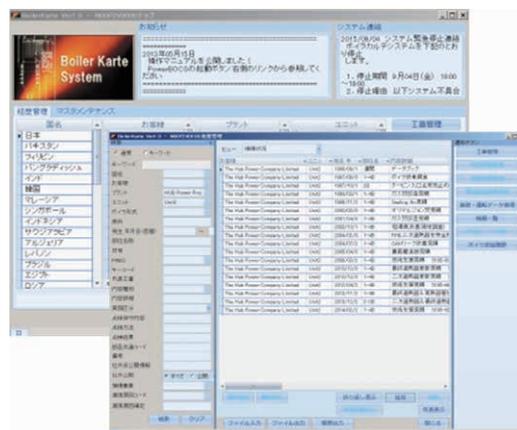
ボイラは40～50年、または、それ以上の長期間にわたって修理をしながら使い続けられる設備である。そのため、火力発電所を運営するお客さまは、全設備に対し運転開始から現在までの保守内容を細やかに記録し、それを維持管理している。そうした記録や運転時の状況が加味されて、定検で実施する保守内容が計画される。もちろん、定

検中に看過できない損傷が認められれば、その補修も行われる。

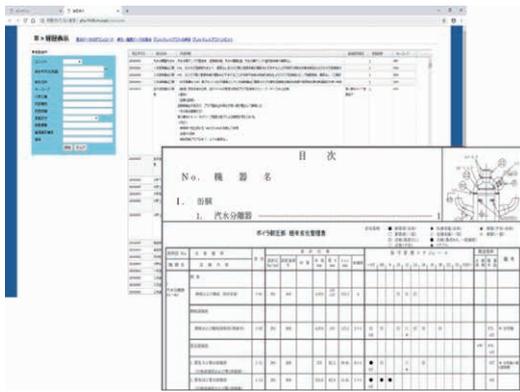
一方、ボイラメーカー側であるIHIも、供給ボイラで発生した損傷およびその補修、実施した予防保全の内容を当該ボイラの履歴として記録している。IHIではその記録を、医師が患者ごとに医療行為を記録するカルテになぞらえ、ボイラカルテと称している。その例を第4図に示す。

定検での検査・更新計画を策定する際に、お客さまと我々メーカーとの間で上記情報が相互に確認可能な状態であれば、より効率的で効果的な計画立案が可能であるため、これを共有することにした。

第5図にお客さまの情報を統合し、データ化されたボイラカルテの例を示す。共有した情報は体系的に整理・電子化し、履歴管理のデータベースを構築した。これにより情報の検索や絞り込みといった閲覧性が向上したことに加



第4図 ボイラカルテの例
Fig. 4 Example of Boiler Karte (Maintenance history records)



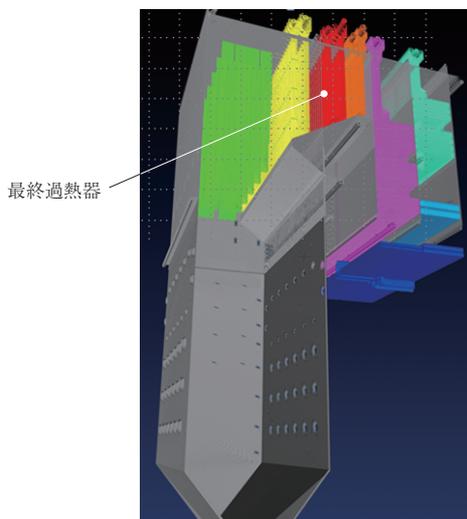
第 5 図 共有化されたお客さまのデータ（ボイラカルテ）の例
Fig. 5 Example of customer records in Boiler Karte

え、図面や工事記録、各種報告書の電子データも関連付けられているので、効率化にも寄与している。また、計測データもデータ化されているため、経時劣化の傾向などの整理もしやすくなっている。

3.3 3D 保守履歴管理システム

第 6 図にボイラの構造を示す。ボイラは、管が束になって各パスを構成している。たとえば、赤く着色されているのは、最終過熱器といわれるもので、約 500 本の伝熱管が吊り下げられている。その他のパスも、同様に構成されており、図中に見える壁も伝熱管である。その合計は約 8 000 本となり、その管をつなげていくと総延長は東京から広島辺りまでの距離となるが、実ほどの管が損傷してもボイラは停止しなければならない。

そうした伝熱管に対して、過去にどのような部位で損傷が発生したか、あるいは経時劣化などによりどの部位を更新したのかなど、保守履歴に関する位置情報を正確に把握することは履歴管理を行ううえで非常に重要である。



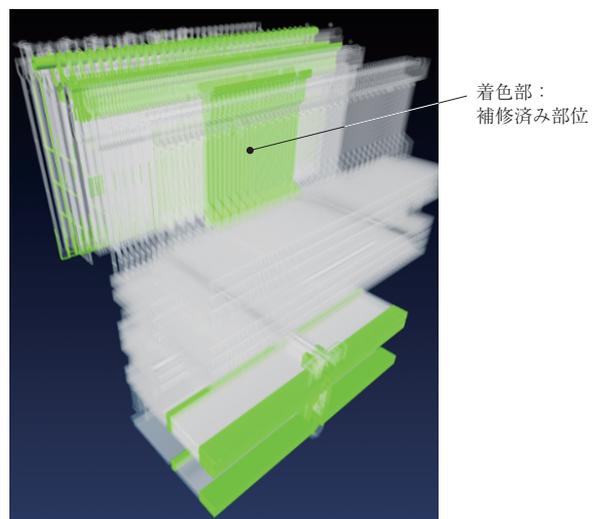
第 6 図 ボイラの構造
Fig. 6 Boiler structure

しかし、実際のボイラ内で当該箇所を把握しようとするとき、記録として残っている 2D 図面では把握が意外に難しい。それらが 3D モデルで表現されると、ボイラ内での確認も簡単に行うことが可能となる。加えて、更新時期を色分けすれば、劣化傾向も把握しやすくなる。第 7 図に 3D 表現の例を示す。また、このように更新履歴が 3D モデルで把握できるようになると、次に更新する範囲を理解しやすくなることはもちろん、定検時の必要なアクションを漏れなく計画できるようになると期待している。

3.4 寿命管理システム

ボイラの更新範囲を検討する際には、さまざまな損傷要因が考慮され、それらの損傷状況を検査や計測で確認したうえで更新する範囲が確定される。たとえば、溶接部や管における腐食状況、摩耗状況、変形状況、残肉厚、割れの有無、クリープ寿命などである。IHI は、定検時の非破壊検査などをとおしてその支援を行っているが、すべてを短時間で検査することは難しい。そのため、対象の絞り込みを行って実施するのが一般的であるが、更新範囲検討の支援の一環として、寿命管理システムを構築した。

寿命管理システムでは、運転データからボイラ伝熱管の寿命を管ごとに評価することを目標とした。これは、前述のとおり、管 1 本の損傷でもボイラは停止を余儀なくされるものであり、それが発電所の計画外停止となるためである。寿命を極力正しく判断するには、各管の温度を計測することが必要と考えられるが、管本数が多いこと、また加熱部の雰囲気温度が非常に高温であることが熱電対での全数計測を困難にしている。そのため、パス内の温度分布を精度よく推定できる必要十分な数のセンサをパス出口の



第 7 図 更新履歴の 3D 表現例
Fig. 7 Visualization of repair history with 3D model

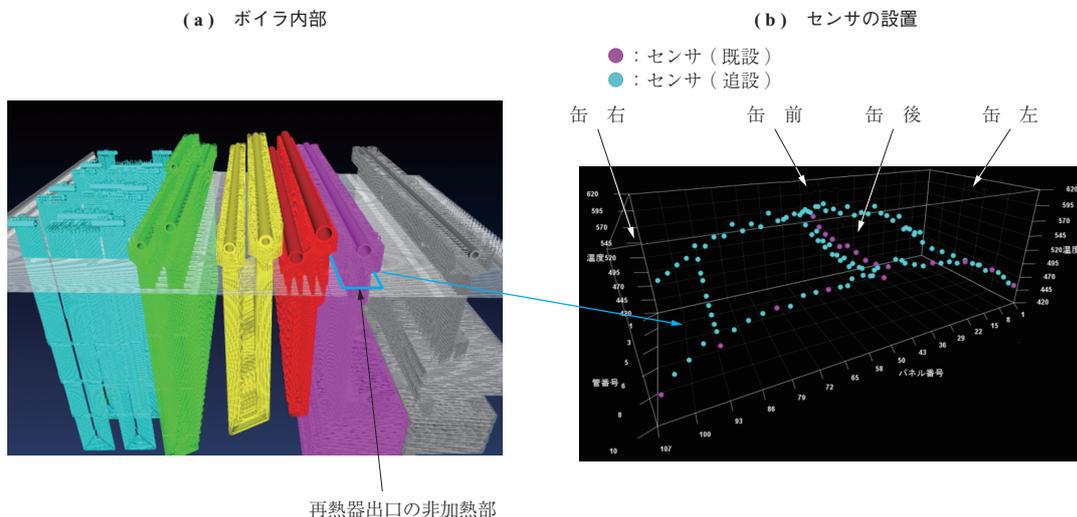
非加熱部に設置することにした。第8図にセンサ（熱電対）の設置例を示す。これは再熱器の例であるが、建設当時およびその後追加された熱電対に加えて、今回の寿命管理システム構築時にさらに熱電対を増設し、全対象管に対して約1/9の割合で熱電対を設置し、パス内の温度分布を効率的に描けるようになった。第9図に温度分布を示す。

また、熱電対増設後の温度分布と各種運転データとの相関を分析すること、および設計時に用いる解析技術を応用することで、増設前についても増設後と同様に温度分布を推定することが可能となった。

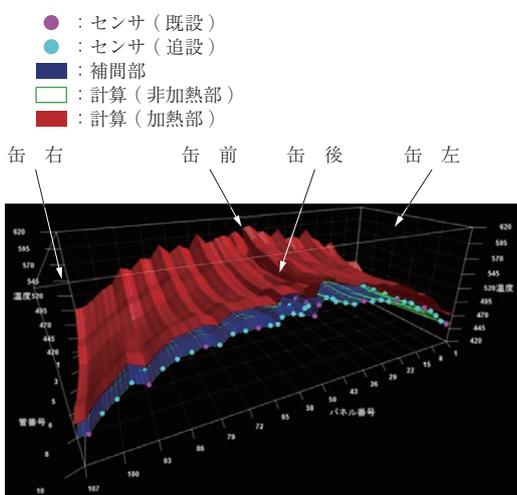
クリープ寿命や水蒸気酸化減肉、高温酸化減肉といった主たる損傷要因はメタル温度が支配的であり、第9図に示されるような精度よく推定された管ごとの蒸気温度やメタル温度は、各管の寿命を評価するうえで非常に有効である。さらに、スートブロワが設置された部位の石炭灰による

摩擦減肉などがある場合は、管の減肉も考慮しながら管ごとの寿命を評価していくことになる。

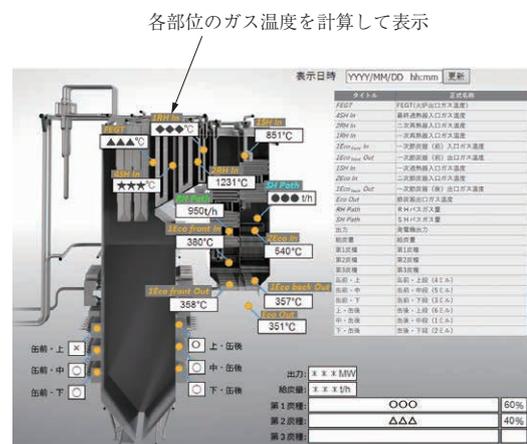
上述の寿命解析では、ほぼすべての運転パラメータが管の寿命に影響を与えるため、各部の収熱率、ガス温度、後部伝熱部のガス分配量など、細部に至るまでボイラ内部の状態を数値化することにした⁽³⁾。IHIでは、これをボイラモデルと呼び、ボイラ運転の安定状態を自動判定して、そのときの内部状態をほぼリアルタイムに計算し、グラフィックが更新される。その例を第10図に示す。この図の情報のうち、特にガス温度情報は、炭種ごとのスラッキングやファウリングの把握に役立つと考えられる。従来は、炉内観察やスプレー量、ガス分配ダンパ開度などからの判断であったが、火炉出口や各パス入出口のガス温度は、灰付着やその成長に対する新たな知見を見だし、ボイラ運用に指針を示してくれるのではないかと期待する。



第8図 センサ（熱電対）の設置例
Fig. 8 Installation sample of metal thermocouple



第9図 パスのメタル温度分布
Fig. 9 Distribution of metal temperature at heated and unheated area



第10図 ボイラモデル計算結果の例
Fig. 10 Sample of boiler model calculations

4. 今後の展望

4.1 運転支援

ボイラが異常状態に陥り、停止すべきか否かを判断することは大変難しい。運転状態やそのユニットの特性を考慮して、停止が必要と判断できるガイダンスが出せた場合、損傷による被害拡大を抑制でき、復旧するための更新工事も小規模になる。そのための精度が高く信頼性の高いガイダンスを今後とも考えていきたい。

4.2 定検支援

ボイラの計画外停止撲滅のためには、定検時の検査や補修において漏れなくカバーすることが重要となる。そのためには、伝熱管で構成されるボイラの細部までの状況把握が必要と考えられ、ボイラのデジタルモデルを計測値と運転状態解析により作り上げており、比較的精度よく寿命評価ができると考える。

現在では、数多くのメタル温度計やセンサにより、その解析を支援しているが、その設備も大型の火力発電所では、大きな設備投資となるので、その簡素化を図ることも考えていく必要があると考えている。

5. 結 言

火力発電所を運営するお客さまへ、ボイラメーカーとして

稼働率の高い安定運用に少しでも貢献できるよう、運転と定検に対する支援システムを開発し、ここに紹介した。いずれも、経験を積むことで精度が上がることで、発電所を実際に運営されているお客さまの率直なご意見をいただくことで、活用できる信頼性の高いシステムに成長していくものとする。今後も引き続きボイラメーカーとして精進を重ねる所存である。そして、これが火力発電所の関係者にとって参考となれば幸いである。

— 謝 辞 —

この定検支援システム開発においては、北海道電力株式会社の多大なるご協力のもとで達成されており、ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- (1) 袖子田志保, 木村麻衣, 鈴木由宇, 近藤智佳子: データ解析による予防保全技術の開発, IHI 技報, Vol. 54, No. 2, 2014年, pp. 26 - 31
- (2) L. D. Smoot: Fundamentals of Coal Combustion For Clean and Efficient Use, Elsevier, (1993)
- (3) 管路・ダクトの流体抵抗出版分科会: 技術資料 管路・ダクトの流体抵抗, 1979年, 第4章