

原子力発電プラントの安定運転と設備利用率向上に貢献する技術

Technologies Achieving Stable Operation and Improving Capacity Factor of Nuclear Power Plants

黒田 理知 KURODA Masatomo 日隈 幸治 HIGUMA Koji 長谷川 学 HASEGAWA Manabu 小岩井 正俊 KOIWA Masatoshi

原子力発電プラントの再稼働後は、安全を最優先とした安定運転と設備利用率向上の観点から、運転状態の監視、及び最適な保全計画の立案と効果的な実行が重要になる。

東芝エネルギーシステムズ(株)は、原子力発電所構内に、電力事業者の運営技術と当社のフィールド・設計技術の緊密な連携を可能にする仕組みとして、運転&定期検査(以下、定検と略記)管理センター(O&OCC)を設置する検討を進めている。O&OCCでは、プラント設計や、支援経験と人工知能(AI)技術などを用いた分析・評価ツールの開発で、効果的・効率的なプラント運営に貢献する。また、点検・保全・更新に最新技術を導入することで、プラント信頼性を確保しつつ、発電量の最大化を目指している。

From the viewpoint of placing the highest priority on safe and stable operation and improvement of the capacity factor of restarted nuclear power plants, there is a need for technologies to monitor their operating conditions and to plan and efficiently implement maintenance scenarios.

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has devised a new scheme called the Operation and Outage Control Center (O&OCC) for installation in nuclear power stations. The O&OCC can provide engineering support services through close collaboration of the electric power company's plant operation technologies and our field and design technologies. This will make it possible to enhance the effectiveness and efficiency of plant operations through the development of analysis and evaluation tools based on our plant design and support experience and artificial intelligence (AI) technologies. In addition, we are aiming to maximize electric power generation while ensuring plant reliability by applying latest technologies for inspection, maintenance, and renewal work.

1. まえがき

我が国では、稼働停止中の原子力発電プラントは、グリーントランスフォーメーション(GX)の推進、及びエネルギー安全保障の観点から、安全を最優先した上で再稼働させていく。その後は、着実に安定運転を実施し、ベースロード電源として、プラント寿命中の発電量を最大とすることで社会貢献する。

そのためには、原子力規制委員会の新規制基準に適合した追加安全対策設備を含む設備機器の信頼性向上と保全コスト低減の両立、新検査制度に対応した発電設備の状態監視、最適な保全の計画・実行、及び新検査制度に対応したプラント運営遂行が必要であり、その結果として、原子力発電プラントの安定運転、設備利用率の向上を実現していく(図1)。

これらの実現のため、電力事業者の運営技術と原子力発電プラントメーカーのフィールド・設計技術との連携を一層強化し、リスク情報に基づく保全・運営活動を推進していく仕組みが重要である。

そこで東芝エネルギーシステムズ(株)は、保全・運営活動

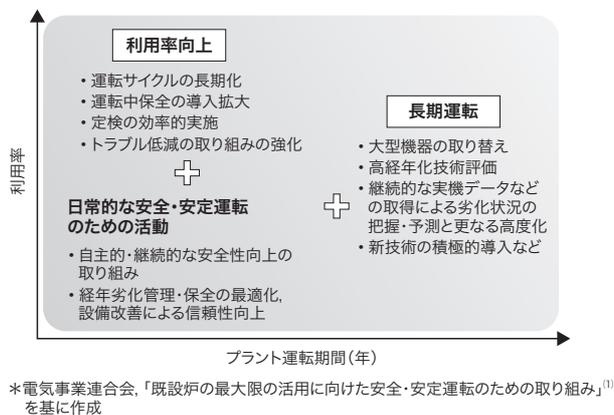


図1. 既設炉の最大限の活用に向けた安全・安定運転のための取り組みの全体像

再稼働後、事業者が安全・安定運転のための取り組み方針を利用率向上、長期運転の観点で示した。

Overview of initiatives to maximize utilization of existing reactors for safe and stable operation

により原子力発電プラントの価値を高めるために、O&OCC構想の策定と、それに関連する保全技術の開発を進めている。ここでは、これらの取り組みについて述べる。

2. O&OCC 構想

O&OCCは、運転や保全に関わる電力事業者との協業の場として、構想している(図2)。東日本大震災の前から実施していた、プラント安定運転のための技術を支援する東芝運転プラント支援サービス(TOPS: Toshiba Operation Plant Service)に加えて、早期再稼働や、定検短縮、設備利用率向上、保全コスト削減などを実現するために、運営支援、保全計画支援、及び現場作業管理・工程管理支援の3分野の支援技術を開発している。

ここでは、3分野で有用な当社の技術について述べる。

なお、これらの支援は運転を開始した施設の機能要求・設計仕様・実設備との整合性を維持管理するコンフィグレーションマネジメント(構成管理)が重要であるため、当社はプラントメーカーとして設計図書の変更管理を通して整合維持に取り組んでいる。

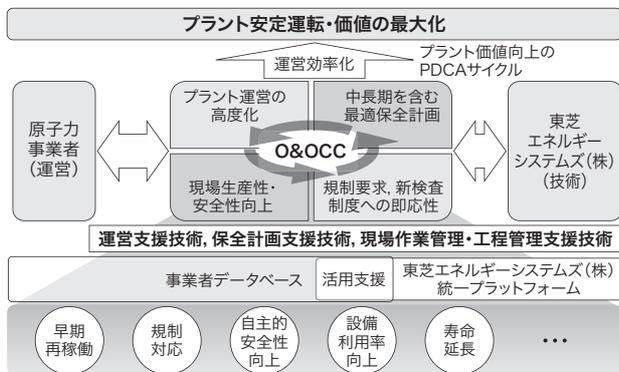
2.1 運営支援技術

プラントの安定運転には、プラントの運転状態を把握し、異常予兆の把握などにより、適切な運用改善、保全計画に結び付けることが重要になる。ここでは、運営支援のための、プラントメーカー視点に立った開発技術について述べる。

■異常予兆検知システム

原子力発電プラントの軽微な異常を検知して早期に対策を実施することが、プラントの安定運転につながることから、異常予兆検知システムを開発した(図3)。プラント動特性とプロセス量の微小変動を別々に学習することで、正常状態を高精度に予測する最新AI技術(2段階オートエンコーダー)を駆使している。

異常予兆検知システムは、数百点以上のプロセス量を同



PDCA: Plan-Do-Check-Act

図2. O&OCCの概念

事業者(運営)と当社(技術)をO&OCCで生かし、プラント安定運転・価値向上を最大化する。

Concept of O&OCC

時に監視しながら、過渡変化を含めたプラント運転状態を広くカバーして、異常予兆を検知する。監視対象とするプロセス量・期間の絞り込みなどのユーザー負荷は最小限で、システムを使い始めることができる。更に、プラントメーカーとしての設計知識・保全ノウハウを組み合わせることで、検知後の具体的な原因分析・対策立案の効率的な支援が可能である。

■発電リスク評価技術(Generation Risk Assessment)

原子力発電プラントでは、リスク評価を基に信頼性向上と保全コスト低減を図る手法の導入を進めている。そこで、プラントの設計情報と機器の故障率情報から、各機器の故障が発電量低下に及ぼす影響を解析することで、保全や監視の優先順位を定量的に評価するシステムを開発した。

2.2 保全計画支援技術

従来の原子力発電プラントの機器保全是、定期的な分解点検である時間基準保全(TBM: Time Based Maintenance)を厳格に行う手法が主流で、設備機器の信頼性向上と保全コスト低減を両立するための保全最適化の検討は十分とはいえなかった。このため、機器の状態に応じて保全時期を決める状態基準保全(CBM: Condition Based Maintenance)の導入や、TBM周期の最適化を進める必要がある。

■機器カルテシステム

分解点検で得られた部品の摩耗状況などのデータや、機器の運転中の性能データ、軸受の振動や温度といった状態データなどについて、トレンド状況や交換基準に対する余裕を可視化し、機器の総合的な故障リスクを評価することで、CBM導入やTBMの頻度低減が可能となる。しかし、原子力発電プラントでは対象となる機器が数万点に及ぶため、機器の重要度に応じた評価や、膨大なデータの合理的な管理が必要である。

そこで当社は、機器カルテシステムを開発した。このシステムでは、データ評価結果のカルテ表示による可視化、異

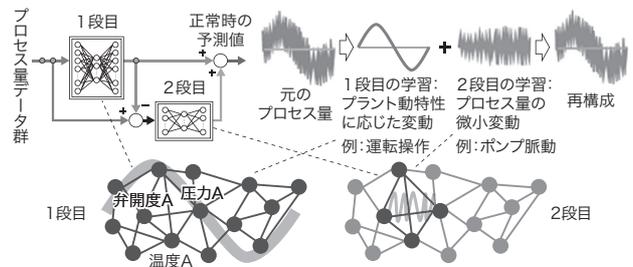


図3. 2段階オートエンコーダーの概念

大小二つの変動を二つの深層学習モデルで学習し、正常状態を高精度で予測することで、予兆検知を行う。

Outline of two-stage autoencoder for anomaly sign detection

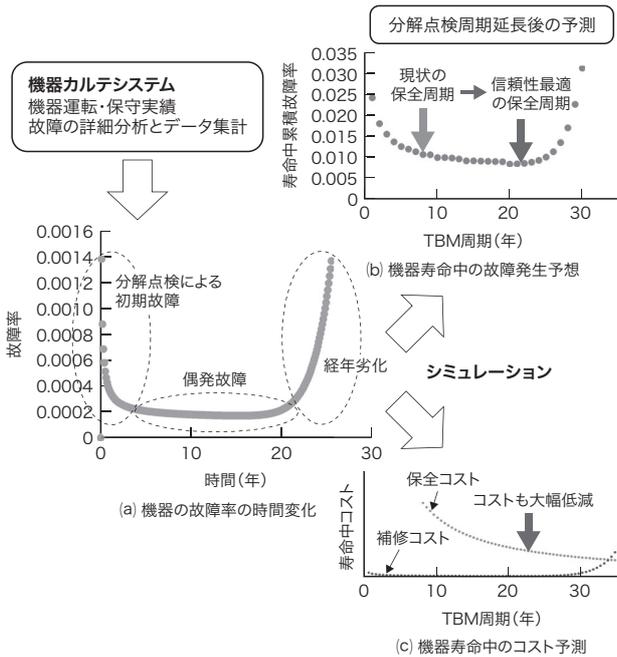


図4. 機器カルテシステムにおける機器信頼性・保全最適化評価支援の例

故障率をベースとした保全周期シミュレーションにより、機器寿命中の故障発生頻度と保全コストを可視化することで保全最適化を図る。

Example of optimization of reliability and maintenance of equipment evaluated using equipment health report system

常データの自動抽出などが可能である。

更に、蓄積されたデータから、機器の故障率(いわゆるバスタブカーブ)を推定し、これを基に機器寿命中の故障リスクを最小化し保全コストを最適化する技術も開発した。この技術の適用例を図4に示す。機器カルテシステムの故障率(図4(a))を基にTBMの周期をパラメーターとしたシミュレーションを行い、機器寿命中の故障発生頻度(図4(b))と保全コスト(図4(c))を可視化することで、信頼性と保全コストの最適化が可能になる。

2.3 現場作業管理・工程管理支援技術

現場作業では、安全・品質を確保しながら効率化を図り、スケジュールどおり工程を進めることが重要である。ここでは、現場作業管理・工程管理支援に関する開発技術について述べる。

■エリア管理システム

現場では各種工事の目標工期達成に向け、各工事会社は円滑に施工するため、日々の作業調整を実施している。この作業調整は多数の工事関係者が関わる属人的な業務であり、負担が大きかった。そこで、作業エリア情報を一元管理できるエリア管理システム(図5)を開発した。このシステムにより、各工事会社のエリア管理の状況をリアルタイム

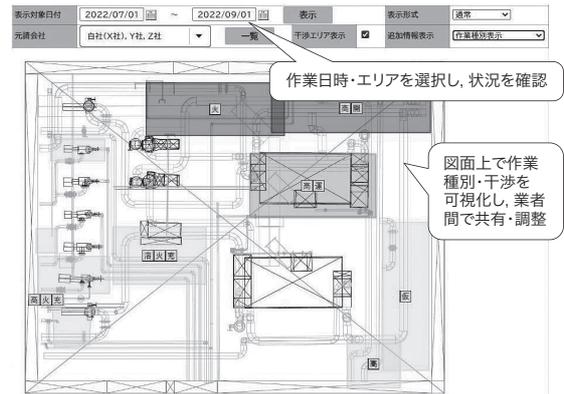


図5. エリア管理システムの画面例

エリア管理の状況をリアルタイムに一元管理し、工事関係者の負荷軽減及び現場作業の品質向上を図る。

Example of plant operation support service display

に一元管理することが可能となり、工事関係者の負荷軽減及び現場作業の品質向上が実現できる。

■系統アイソレーションシステム(電気・機械系統)

現場工事では、感電や漏水を防止するために、工事の対象箇所を周囲の配管系統や電気系統と切り離す隔離安全処置も必要である。このため、弁閉鎖や電源断などを実施する。多数の工事が並行して行われる現場では、隔離の範囲が重複・錯綜(さくそう)するため非常に難しく、かつ労働安全の観点から間違いの許されない作業である。

そこで、CAD化した図面上でこれらの処置の計画や管理を自動化するシステムを開発し、作業担当者の労力低減とミス防止に貢献する。

図6は、系統アイソレーションシステムの実用例である。設計配線図上で隔離処置による回路動作をシミュレーションすることで、工事対象箇所が通電していないことを視覚的に確認できる。

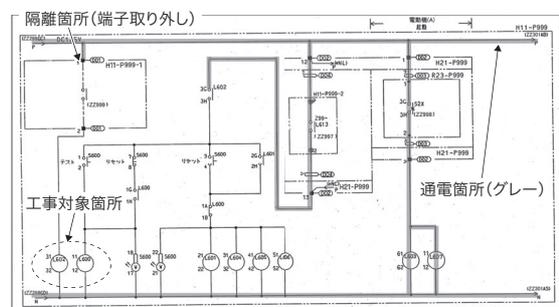


図6. 電気アイソレーションシステムによるアイソレーションの可視化例

CAD化した図面上で工事上の隔離安全処置や処置管理を自動化する。

Example of visualization of isolation using electrical isolation system

また、事業者と一体となった再稼働への取り組みでは、3D Plant Viewerを、再稼働後の支援技術として、現場工事や、運転パトロール、設計・現場調整業務などに活用していく。

3. 保全技術

設備の信頼性向上、及び定検の工期短縮は、プラントの稼働率向上と安定運転に直接寄与するものであり、特に、原子炉や、タービン、発電機などの検査の合理化や精度向上は、設計データを持つプラントメーカーの強みである。

3.1 特別点検

特別点検では、運転期間延長認可のために、原子炉圧力容器や原子炉格納容器の劣化想定部位について、非破壊検査を実施する。対象部位は、原子炉圧力容器の母材や、溶接部、接続されるノズル内面など、多岐にわたる。3D（3次元）表面や、複雑形状、狭い部分を含むため、超音波や渦電流による非破壊検査技術だけでなく、検査プローブを対象部位に沿って高精度に移動させる遠隔検査装置技術が求められる。当社は、これまで蓄積してきた技術力を生かし、短工期で効率良く検査を遂行できる装置と工法を開発済みであり、この装置は他社製の原子炉にも適用可能である。

3.2 タービン検査

当社と同型の他社製原子力タービンにおいて、検査で発見されたもの以外の動翼植え込み部が破損し、運転中に動翼が飛散する事故が発生し、プラント長期停止の要因となっている。植え込み部の損傷を早期に検知するために超音波探傷を行うが、定検中は工期の問題から動翼を分解しないで実施するため、技術上の問題から検査範囲に制限があった。

当社は、動翼を取り外さなくても、植え込み部に対して客先ニーズに適合する広範囲をカバーできる探傷技術を開発した。これにより、短工期で信頼性の高い検査が可能になり、実機への適用を予定している。

また、植え込み部でタービン長翼を固定するピン孔は、応力が集中するため損傷することがあるが、周辺が狭くショットピーニングは施工できなかった。これに対して当社は、独自のレーザーピーニングを施工することで、信頼性を向上したタービンを供給できるようになった。

3.3 タービン発電機用検査ロボット

定検の数回に1回の割合で行われる発電機の本格点検では、シャフト・ステーター鉄心主要部位などの目視検査や、超音波検査、鉄心欠陥検出試験などの詳細点検を実施する。従来は、ローターをステーターから引き抜く必要が



図7. タービン発電機用検査ロボット

ローターとステーターの間の狭いギャップを自走しながら、必要箇所の点検を実施する。

Multifunctional turbine generator inspection robot

あり、検査前後の引き抜き・再挿入が必要であった。当社は、ローターとステーターの間の狭いギャップを、自走しながら点検するタービン発電機用検査ロボット(図7)を開発し、約1か月の工期を1/2に短縮した。ロボットの適用により、定検の度に本格点検を行うことも可能となり、信頼性向上とコスト低減に大きく貢献する。この装置を用いて、海外原子力発電プラントで保全サービスを開始した。

4. あとがき

当社は、O&OCCでのフィールド・設計技術支援、及び、最新の保全関連技術により、再稼働後の原子力発電プラントの安定運転と設備利用率の向上を図ることで、社会に貢献していく。

文献

- (1) 電気事業連合会. 既設炉の最大限の活用に向けた安全・安定運転のための取り組み. 2022, 25p. <https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/denryoku_gas/genshiryoku/pdf/033_03_00.pdf>, (参照 2023-02-08).



黒田 理知 KURODA Masatomo
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 原子力システム設計部
日本原子力学会・日本保全学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



日隈 幸治 HIGUMA Koji
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 原子力機械システム設計部
日本機械学会・日本保全学会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



長谷川 学 HASEGAWA Manabu
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 フィールド統括部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



小岩井 正俊 KOIWA Masatoshi
東芝エネルギーシステムズ(株)
パワーシステム事業部 原子力電気システム設計部
日本保全学会・火力原子力発電技術協会会員
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.