

原子力発電プラントのリコンストラクションと価値向上

Enhancing the Value of Nuclear Power Plants by Plant Reconstruction™

畠沢 守 山本 哲夫 鈴木 茂

■ HATAZAWA Mamoru ■ YAMAMOTO Tetsuo ■ SUZUKI Shigeru

国内では、運転を開始してから30年以上経過した原子力発電プラントが増えている。東芝が開発した“プラントリコンストラクション™”は、高経年設備の予防保全を推進することにより、60年間安定に運転させ稼働率を向上させる優れた保全技術である。この技術により再生されたプラントは、劣化更新だけにとどまらず、信頼性や性能の向上、新しい規制への対応、被ばく低減、保守性改善などあらゆる点で検討されており、原子力発電プラントの価値が向上し、高い投資対効果を得ることになる。

The number of nuclear power plants in Japan that have been operating for more than 30 years since their commissioning is increasing.

Toshiba has developed a high-quality maintenance technology called Plant Reconstruction™, for the preventive maintenance of aged nuclear power plant equipment. The use of this technology for maintenance makes it possible to improve the operating rate of a nuclear power plant and achieve as much as 60 years of stable operation. Plants to be reconstructed with this technology are considered in terms of various aspects including improvement of reliability and performance, compliance with new regulations, reduction of radioactivity, and improvement of maintainability, thereby contributing to enhancement of the value of the plant and realizing a high return on investment.

1 まえがき

東芝は、信頼性と経済性を両立させながら、原子力発電プラントの価値向上に向けた技術開発を推進している。これまでの豊富な保守・保修の経験を生かし、“プラントリコンストラクション™”という総合的な保全の手法を考案し、原子力発電プラントの価値向上を実現する最適な施策を顧客に提案している。

2 プラントリコンストラクション™

2.1 概要

プラントリコンストラクション™とは、原子力発電プラントの確実な60年運転と、将来の運転及び保守に対応した高稼働率での安全・安定運転をコンセプトとして、設備利用率は90%以上、性能向上は5%以上、及び被ばく線量は世界標準レベル以下、を目標とした施策である。更に、定期検査（以下、定検と略記）と運転を一貫したプラント状態の監視強化を図ると同時に、定検作業の技術・品質レベルの向上を目指している（図1）。これらを達成するため、次に示す三つの施策を柱として、個々のプラントのスペックや設備状態、時間要素を勘案し、総合的に計画している。

- (1) 安定運転の確保 既設設備が60年間安定に運転できるかどうかを詳細に評価したうえで、的確な付加価値を加えて計画する。例えば、60年運転が困難な設備を抽出し、損傷リスクが高い設備については応力腐食割れ(SCC)対策の実施など予防保全を図る。また、未点検部

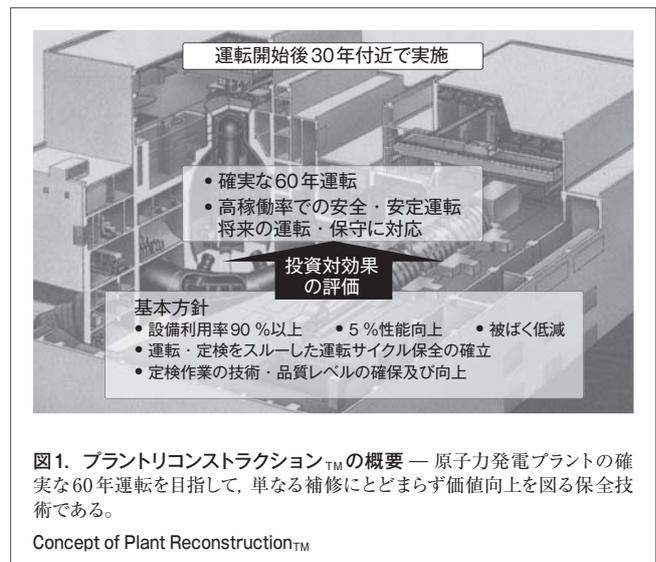


図1. プラントリコンストラクション™の概要 — 原子力発電プラントの確実な60年運転を目指して、単なる補修にとどまらず価値向上を図る保全技術である。

Concept of Plant Reconstruction™

位や規制に合致させなければならない設備、廃型品や輸入品など保守が不可能な設備については、部品単位又は機器一式で更新することにより長期安定運転を達成させる。更に、更新の設備について、被ばく低減、定検短縮、及び保守性・操作性・監視性・居住性向上の観点から付加価値を高める。一方、施工にあたり同調機器や隣接機器と一括して更新するなど工事費を抑制できるように計画する。

- (2) 定検の短縮 機器の入替方式を採用することにより、通常定検で実施している大型機器の保守・点検を運転中へシフトさせる。このために総合リサイクルセンターを

建設する。このセンターには除染・除却機能を持たせ、設備更新によりプラントから発生する大型撤去品の廃材の減容と一般の産業廃棄ができるようにする。また、作業体制の強化、作業物量の低減、及び治工具や加工機の改善により、定検時にクリティカルな工事について作業の効率化を図る。

- (3) 効率の向上 改良タービンの採用や電力の所内使用率（以下、所内率と略記）を改善することによる発電量の増加、新検査制度などに対応した監視・診断・保全支援技術の適用、点検・保守性の向上、水質改善、及び効率的な除染など、あらゆる角度から検討して、プラントの効率向上を実現していく。

プラントリコンストラクション™を実施する最適な時期は、運転開始後30年付近と考えている。30年目は、プラントとして高経年対策を検討するうえでの節目であること、炉内維持規格点検などの実施時期であることも大きな要因である。ただし、実施方法には、従来の定検期間に合わせて約5回の定検で完遂させる分散方式と、長工期の必要な炉内リニューアルに合わせて一度の定検に集中し統合保全⁽¹⁾として実施する集中方式があり、客先ニーズやプラントごとの実情に合わせて選択できるようにしている。

プラントリコンストラクション™は、プラント全体にかかわるリニューアルであるため、実施するには一時的な投資が必要となる。しかし、一括実施の効果や安定運転の向上により、保守費用を抑制できるうえに性能向上や被ばく低減ができるため、最終的には高い経済効果を得ることができる。

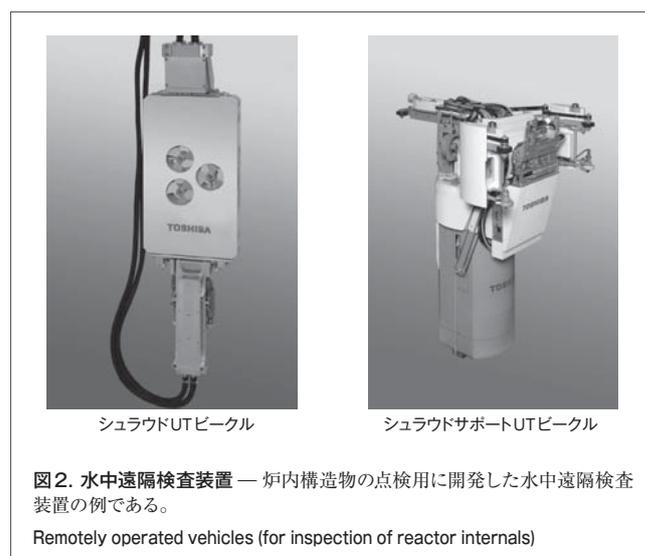
2.2 安定運転確保

原子力発電プラントを安定に運転するための保全技術を、以下に示す。

2.2.1 検査技術 炉内構造物の検査は超音波探傷（UT）が有効である。当社は探傷速度の向上と欠陥の検出性能を上げるため、マルチチャンネル（256 ch）型フェーズドアレイ UT 装置の開発を進めてきた。この技術は、探傷データの画像化による内部欠陥の可視化や、当社独自の水浸法の適用による非接触探傷に特長がある。2001年に中部電力（株）浜岡原子力発電所1号機の制御棒駆動機構（CRD）スタブチューブの下部溶接部で発生した炉水漏えい事象に対して初めて実機適用⁽²⁾し、その後2002年以降にシュラウドで見つかったひびの深さ測定法として、多数のプラントで種々の溶接部に適用した。いずれの適用部位についても良好な測定精度を得ている。

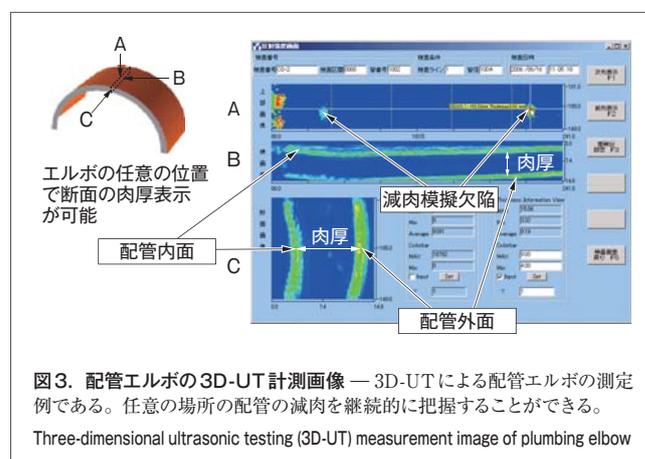
フェーズドアレイによる炉内構造物の点検には、各種の水中遠隔検査装置を開発し適用している（図2）。シュラウド UT ビークルはシュラウドの内外面に吸着して走行し、周方向溶接線の UT に用いている。また、バッフルプレート下の溶接線の UT にシュラウドサポート UT ビークルを開発した⁽³⁾。

更に、この検査技術を米国内沸騰水型原子炉（BWR）の炉



内点検に適用するため、米国電力中央研究所（EPRI）を中心とするBWR炉容器及び炉内構造物プロジェクト（BWRVIP）及び米国機械学会（ASME）Sec.XIのPDIプログラム（Performance Demonstration Initiative Program）に従った性能実証（PD）資格試験を受験している。UT装置と要領の認証では、当社のフェーズドアレイ UT 技術のPDを2004年に受験して高い探傷性能を実証し、米国内BWRのシュラウド点検においてフェーズドアレイ UT の適用が可能になった。また、シュラウドサポートについても2006年に受験した。検査員の技量認証に関しては、米国内でBWR炉内構造物 UT での最終評価者の認証を得るため、検査員をEPRIに派遣してPDIプログラムを受験させ、合格している。

配管の減肉検査に対して新しい技術を適用した例を示す。配管は、流れ加速腐食及び液滴やキャビテーションによるエロージョンなどに対し、適切に計測して減肉傾向を継続的に把握する必要がある。当社は、従来の超音波板厚計測に加えて、ダイナミックレンジの広いカラー I.I.™（Image Intensifier）、マルチセンサによる3次元 UT（3D-UT）などの検査技術を開

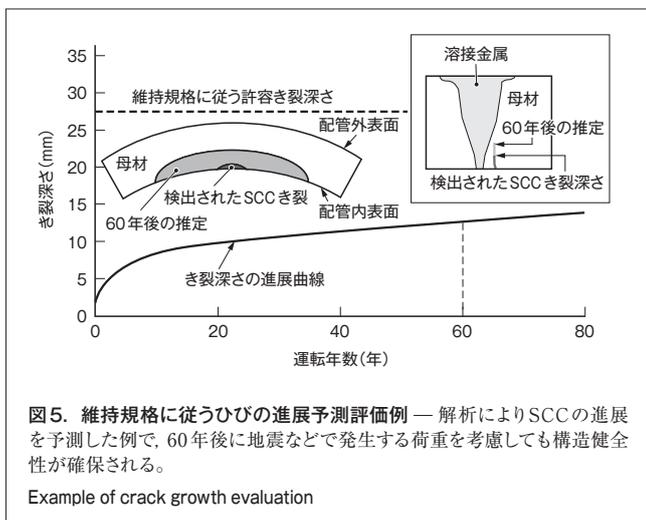
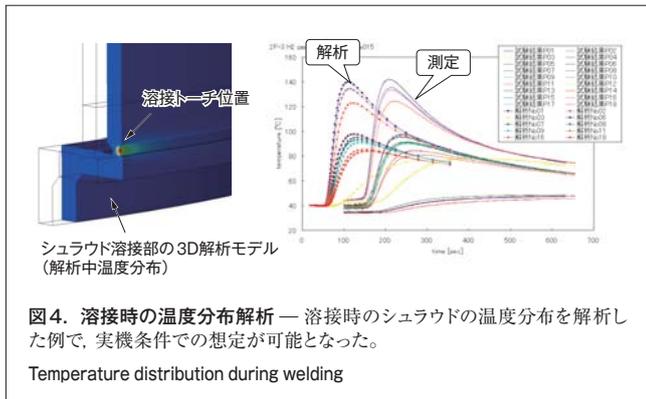


発し、スクリーニング計測やリアルタイム計測を実現して検査の効率化を図ってきている(図3)。また、膨大な点検記録と設計情報を統合して効果的な点検を計画するとともに、データ分析による適切な補修計画を提供する減肉管理システムも整備して活用している。

2.2.2 SCC評価技術 炉心シュラウドや原子炉再循環系(PLR)配管などに発見されたSCCを対象に、維持規格に基づいたき裂進展予測と破壊評価を迅速に行うため、溶接残留応力解析、き裂進展及び崩壊予測などの技術開発を進めている。当社では従来から実施されてきた熱弾塑性解析による残留応力解析に加え、ほかの手法に比べ格段に高速で高精度な3次元伝熱解析手法を開発した⁽⁴⁾。これは、移動熱源である溶接トーチとシュラウドの相対運動の関係を移動座標系で記述するモデル化が大きな特徴である。

炉心シュラウドを対象とする温度解析例を図4に示す。これにより、実機大の模擬品を用いて溶接時の温度を測定することなく、実機条件での溶接時の温度履歴を解析により想定することが可能になった。

また管の内表面に発見されたSCCの進展予測評価例を図5に示す。この事例では、地震などで発生する荷重を考慮



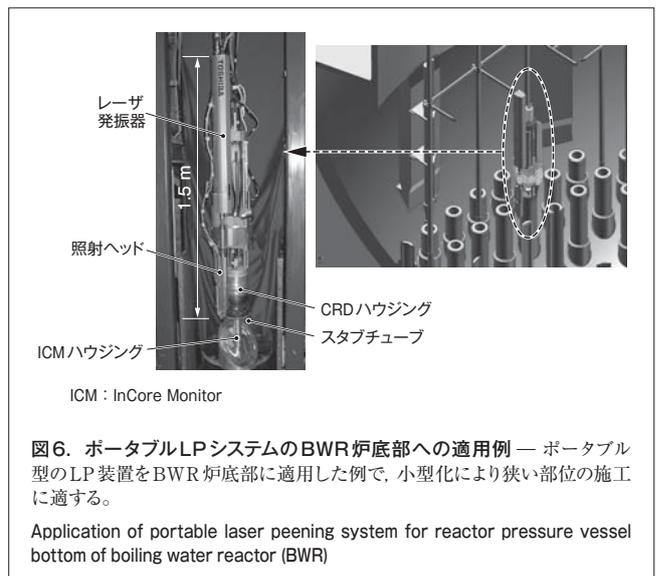
しても、構造健全性が60年後でも確保されることがわかる。

更に、シュラウドなどにき裂が存在する状態で地震による荷重が加わった場合の健全性を評価するため、弾塑性大変形解析技術による座屈を考慮した崩壊解析技術を開発するとともに、電力共同研究などを通じて解析手法の妥当性を確認している。

2.2.3 レーザを用いた保全技術 炉内構造物のき裂を補修したり、予防保全として耐食性のある金属を肉盛溶接できる水中レーザー溶接技術を開発した。レーザー溶接は、従来の溶接方法に比べて入熱量が小さく、レーザーピーニング(LP)と同様に機器の小型化が容易で、狭い部位の施工にも適している。遠隔操作による水中での溶接を可能にしたため、作業員の放射線被ばく量を大幅に低減できる。この技術は、(財)発電設備技術検査協会の確性試験(性能を確認する試験)で技術検証を完了し、現在、実機への適用を検討している。

当社が開発したLP技術⁽⁵⁾は、BWR炉内機器のSCC予防保全として、1999年から炉心シュラウドや原子炉压力容器底部のCRD貫通部スタブチューブに適用しており、これまでに国内のBWRの8プラントで11件の工事を、近年では、国内の加圧水型原子炉(PWR)の2プラントで3件の工事を実施した。今後の海外プラント(BWR, PWR)への適用拡大も視野に入れ、小型レーザー発振器を搭載したポータブルLPシステムを開発している⁽⁶⁾(図6)。これは、複数台で同時に施工することによる工期の短縮と、小型化による操作性及び施工の信頼性の向上を図ったシステムである。また、これに合わせて、非接触探傷であり微小な表面き裂の検出や高精度なき裂深さ測定に特長があるレーザーUT法も開発し、LPと組み合わせてPWRの内面検査に適用した⁽⁷⁾。

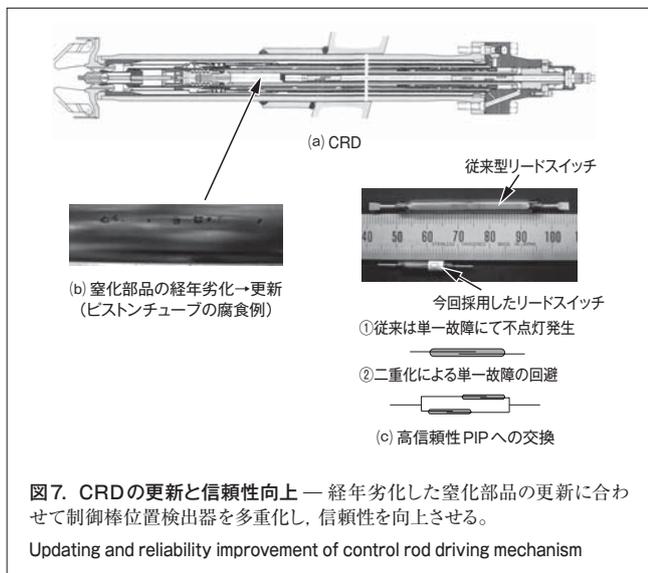
2.2.4 タービン系機器の保全 低圧タービン内部の車室は、長期の運転で侵食による顕著な減肉が進行し、溶接補



修量が増加するが、更に進むと内部車室の劣化更新の必要性が高くなって来る。その際に、従来より耐侵食性に優れた内部車室に取り替える。それと同時に低圧タービンを高性能化することにより、電気出力を大幅に増加させることができる。このように、劣化更新を基本として、同時に性能、保守性、及び信頼性の向上を図る。

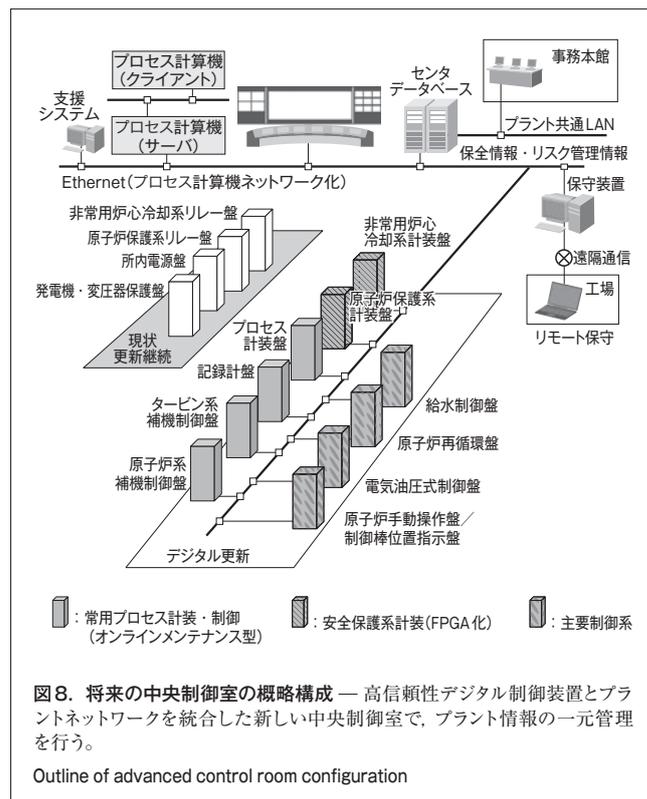
発電機に対して定期的な絶縁診断を行い、冷却水漏れ対策済みの改良型固定子コイルを計画的に巻き替えることで、設備の信頼性を向上させている。また、励磁装置は、サイリスタ直接励磁方式へ全面更新を行い、設備の信頼性向上だけでなく、静止化による装置の簡素化で復旧時間の短縮も実現した。

2.2.5 CRD CRDの更新例を図7に示す。経年劣化した窒化部品を更新するとともに、制御棒位置検出器(PIP)の交換を行う。従来に比べ小型化し、検出器の二重化を図ることで単一故障による不点灯を回避し、信頼性を高めている。



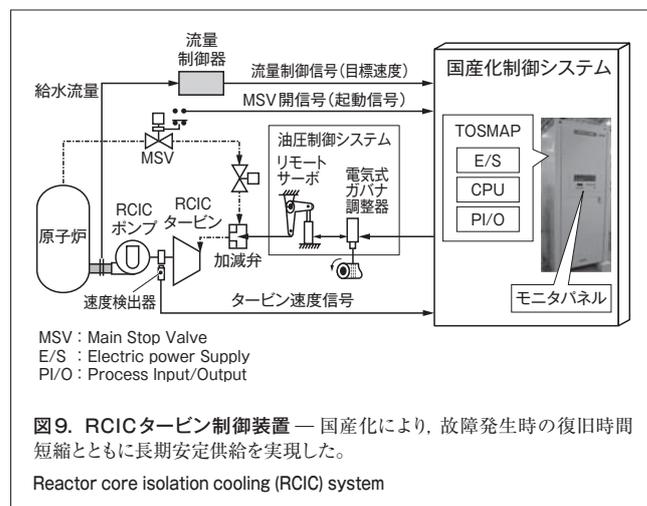
2.2.6 電気計装制御 電気計装制御分野では、経済性及び保守性の向上はもちろんのこと、設備信頼性の向上、故障発生時の復旧時間短縮、及び製品の長期安定供給が重要である。アナログシステムのデジタル化に際しては、多重化と冗長化、自己診断の充実化、基板交換の容易化など、デジタルの特長を生かしたシステム設計により信頼性向上及び復旧時間の短縮を図り、総合デジタルシステムとして更新している。新検査制度への対応にはプラント情報の一元管理が必須であり、図8に示すネットワーク化の推進でこれに対応している。また、ネットワーク分割更新やユニット更新などの採用で短期間での更新が可能となり、定検を短縮できる。

マイクロプロセッサを使ったデジタル装置の場合、部品製造中止時には回路や基本ソフトウェア(OS)、アプリケーションソ



フトウェアの変更が必要となり、これが長期安定供給を阻む大きな要因となっている。この課題の解決手段としては、CPUを使用しない集積論理素子(FPGA: Field Programmable Gate Array)化がある。これにより、供給メーカーに依存することなく、プラントライフにわたる製品供給が可能になった。FPGA化した核計装・放射線モニタ監視ユニット A-TOSDIA やトリップモジュール TM1000は、部品点数が大幅に削減され、発熱も抑制されており、長期安定供給だけでなく設備信頼性の更なる向上も実現した。

プラントの運転制限にかかわる重要な設備であるRCIC (Reactor Core Isolation Cooling system) タービン制御装置



は、米国製制御装置の製造中止に対応してデジタルコントローラTOSMAPを用いて国産化することにより、復旧時間短縮とともに長期安定供給も実現した(図9)。この制御装置は、安全系のHPCI(High Pressure Coolant Injection system)タービン制御装置にも適用可能である。

2.3 定検短縮

定検を短縮する施策例を以下に述べる。

2.3.1 総合リサイクルセンター 定検では、分解点検対象機器を用意された点検スペースへ搬出し、予備品による復旧を行い、分解点検は定検終了後に実施することで、プラントの定検期間を大幅に短縮することが可能になる。しかし、原子力発電プラントの供用期間延長に伴う大型改造工事などにより、廃棄物発生量の増加が予想される。また、大型改造工事に伴う廃棄物の搬出や運搬、保管は、限られたスペースでの作業となり工事の制約になる。そこで、廃棄物を効率的に受け入れ、処理して減容するとともに、クリアランスレベルの廃材の有効活用が必要となる。これらを同時に達成するため、廃材などを除染して再利用するための資源サイクルと、入替方式点検のための機器サイクルを合わせたセンターの概念を構築し、その設置を提案している(図10)。センターの設置により、①廃棄物の低減や資源の有効活用、②プラント定検期間の短縮と稼働率の向上、③定検時に集中する作業の平準化と作業スペースの確保、④作業員の確保とスキルの維持・向上による点検作業の品質向上、を達成することができる。

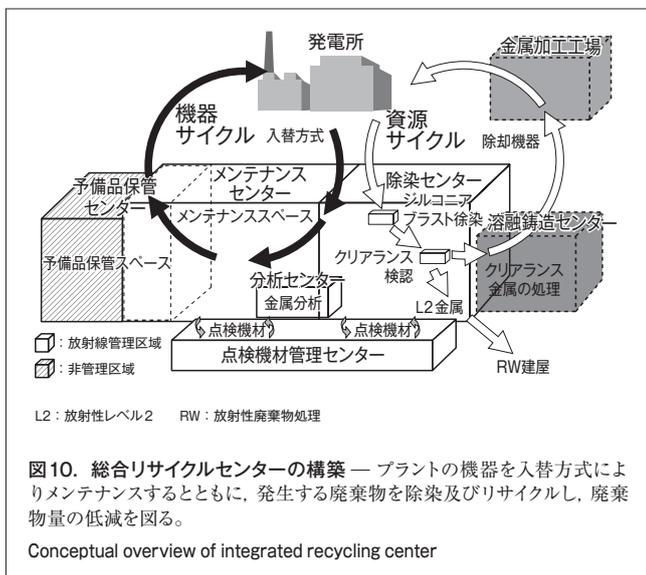


図10. 総合リサイクルセンターの構築 — プラントの機器を入替方式によりメンテナンスするとともに、発生する廃棄物を除染及びリサイクルし、廃棄物量の低減を図る。

Conceptual overview of integrated recycling center

2.3.2 現地施工

現地施工についても、治工具や加工機の改善による工期短縮の技術開発を進めている。まず、新計測器の導入により計測精度を向上させ、工場製作に反映する。この結果、現地での加工工程が大幅に低減できる。また、加工に時間がかかる作業に関しては、配管切断加工機や

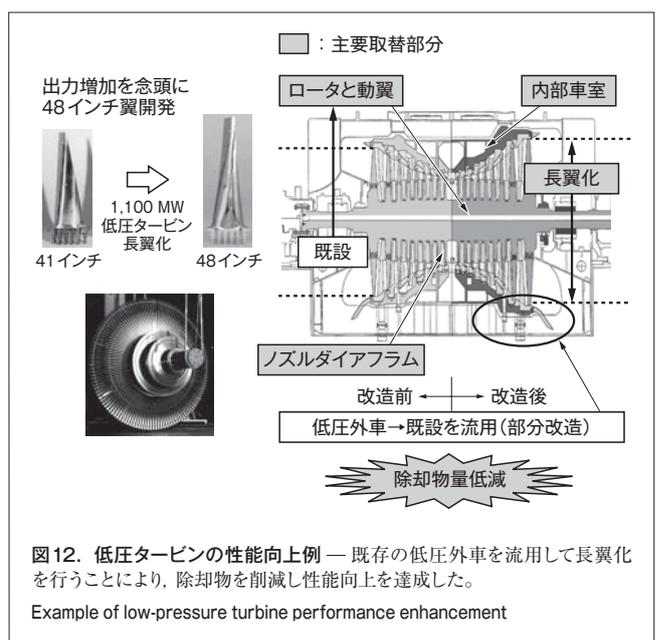
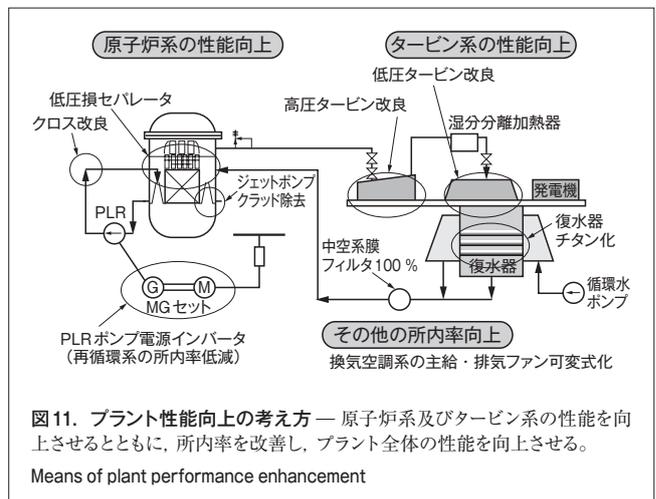
開先加工機などの専用機器を導入したり、カップリングのリーマ加工のように従来は1工程ごとの作業を多工程同時に行う方式を導入している。炉内構造物への適用例では、シュラウド溶接を同時に炉内の2か所で行うシュラウド溶接機(デュアルヘッド溶接機)を開発し、溶接時間を短縮している。更に、機器の組立作業を見直すことで、工場製作時の組立範囲を拡大し、現地作業を削減している。

2.4 効率向上

原子力発電プラントの効率を向上させる施工例を以下に示す。

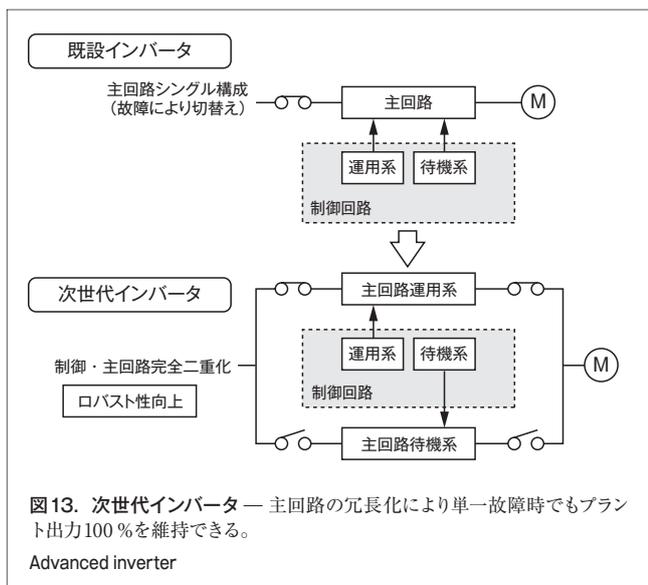
2.4.1 プラント性能向上

プラント性能向上の考え方を図11に示す。一部の機器の性能不足により全体性能が抑制されないよう、プラント全体として見直しを行うとともに、所内率を改善している。低圧タービンの性能向上例を図12に示す。既設の外車を最大限流用しており、除却物量の低減にも配慮している。



タービンなどの高性能化によるプラント効率の向上は、将来の長期サイクル対応や熱出力増加を先取りしているが、機器への影響評価の検討が必要である。例えば熱出力増加について、米国出力増加プラント (BWR-3) で発生した音響共振による蒸気乾燥器損傷事象を受けて、当社は原子炉压力容器 (RPV) 及び主蒸気系配管の音響解析と、蒸気乾燥器の構造解析を実施している。主蒸気逃し安全弁の分岐管部で発生する渦を音源として、実機のRPV内の圧力測定結果で確認された音響共振のピークを再現することに成功し、安全面での解析評価が可能になっている⁽⁸⁾。

所内率の改善による売電電力量の増大には、PLRポンプモータの駆動電源であるMG (電動発電機) セットをインバータ化 (静止電源化) することが有効であり、この実現でプラントの経済性向上に貢献している。インバータシステムの信頼性向上の観点から、主回路の冗長化により単一故障時でもプラント出力100%の維持が可能な、次世代インバータを開発中である (図13)。



2.4.2 保全支援技術 新検査制度では、プラントの長期安定運転を継続していくために、よりきめ細かい保守管理が求められ、従来の時間基準保全 (TBM: Time Based Maintenance) に加えて、状態基準保全 (CBM: Condition Based Maintenance) 導入による保守の合理化も推進される。

運転中の定例試験、巡視点検、あるいは分解点検時の手入れ前データなどの採取も重要なプロセスとなる。このため、現場の状態監視にかかわる作業は増大し、情報伝送のためのケーブル敷設など負担増も予想される。このような課題に対応し、当社は図14に示すように、現場における監視作業の効率化と省力化を目的として、無線センサネットワークによる監視技術、電動弁信号ケーブル (既設ケーブル) を利用した監視

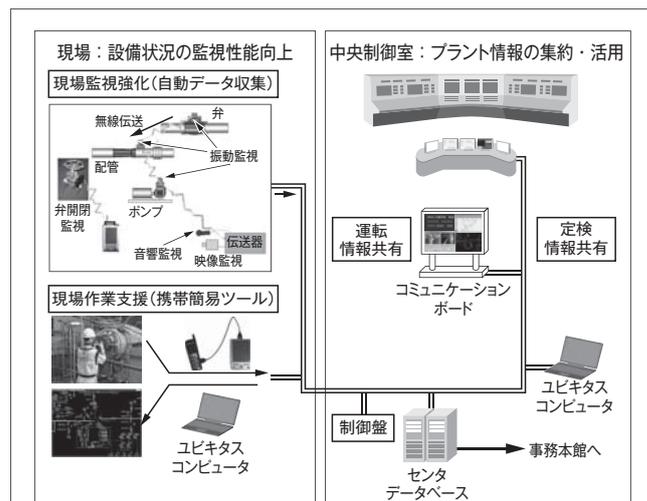
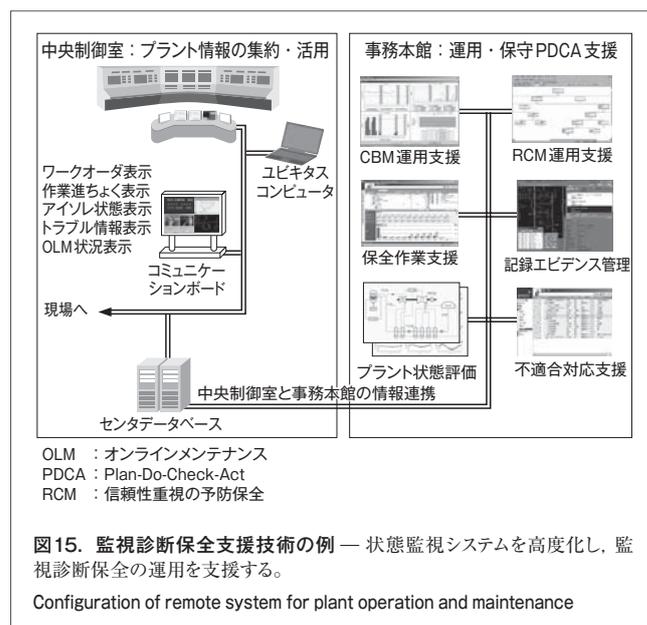


図14. 現場の監視診断保全支援の例 — データ採取システムを構築し、現場における監視作業の効率化と省力化を図る。
Remote monitoring and support system for plant operation and maintenance

データの多重伝送技術、及びFBG (Fiber Bragg Grating) を応用した光ファイバマルチセンシングシステム (温度、振動、ひずみなどの多種多点データの計測と伝送) などを開発している。

また、図15に示すような、監視診断保全の運用を支援する技術サービスや情報技術 (IT) を活用した各種システムも他社に先駆けて開発してきた。保全の実施に対して当社は、設備管理、作業管理、点検記録管理、工程管理、及びCAD技術を応用した系統隔離支援などのシステムを開発してきた。新検査制度の導入を踏まえ、運転中の検査や保全作業にも適用できるシステムの改良も実施している。将来の長期サイクル運転に対応するため、保全にかかわるすべての情報を現場~中央制御室~事務所いずれの場所でもタイムリーに共有できる、



コミュニケーションボード (情報共有端末) の開発も進めている。

3 放射性廃棄物処理設備のリストラクション

原子力発電プラントの設計、建設、保守、及び保全を通して、当社は、放射性廃棄物の発生量低減と減容・安定化に取り組んできた。また、各種の技術開発を進め、原子力プラントメーカーとして、放射性廃棄物処理 (RW) 設備の信頼性向上に努めている。

一方、原子力発電プラントの運転に伴って発生する比較的放射能レベルの高い低レベル放射性廃棄物 (L1 廃棄物) や、クリアランスレベル廃棄物の処理及び処分に向けて、様々な取組みが動き出している。今後、原子力発電プラントの寿命延長に伴って増加する L1 廃棄物、プラント停止以降発生する廃棄物、及びプラント廃止措置時に発生するクリアランスレベルを含む廃棄物の処理について考慮する必要がある。

当社は、L1 廃棄物の処理技術及びクリアランスレベルの検認技術などの開発を進めており、これらの技術に基づき、RW 設備のリストラクションを提案している。これは、今後のプラントの寿命延長及びプラント停止後の処理、保管や廃止措置時の処理など、プラントの最終処置までの時間軸を踏まえた RW 設備の高度化を図るものである。具体的には、既設の RW 設備の能力と今後の廃棄物発生量の評価、プラントの時間軸を踏まえた RW 設備に求められる条件の再設定、最新 L1 廃棄物処理技術の適用、及び L1 廃棄物処理建屋の増設に合わせた既設ユニット RW 設備又はサイト集中 RW 設備の改良と増設など、サイト全体の最適化の観点から RW 設備の高度化を計画し、実行するものである。

4 安心なプラントであるための評価技術

国の審査基準である「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」が、2006年9月19日に25年ぶりに改訂された。新しい指針では、最近の地震学や耐震工学の成果など最新の知見が取り入れられ、設計用基準地震動の考え方が変更され、かつ上下地震動も導入され、耐震条件が見直されている。原子力安全・保安院は、稼働中又は建設中の発電用原子炉施設に対して、改訂指針に基づく耐震安全性評価結果 (耐震バックチェック) の報告を求めている。

当社で開発した評価方法として、①上下地震動に対する評価技術として、炉心燃料の浮き上りの評価法や、クレーン類への上下地震動の影響も把握できる3次元非線形解析の導入、②長周期領域の設計課題であるスロッシング評価技術の導入、③振動試験結果に基づく高減衰の導入など、技術開発の成果を駆使し、合理的な評価を実現している。これらの評価技術は、大きな地震での設備の挙動を、従来の方法に比較し

てより現実的に扱うことのできる優れた特長を備えている。今後、新潟県中越沖地震の被害調査結果により、入力条件の見直しや再評価などにも対応していく。

5 あとがき

地球温暖化対策として原子力発電プラントの重要性がますます高まり、世界中で新規プラントの導入計画が具体化しているが、同時に、より高い安全性と安心感も求められている。特に中越沖地震により、耐震安全性の考え方を見直す必要も出てきており、単に機器の補修やリプレースにとどまらず、経済性の向上とともに、より高い安全性と高性能化を実現していくことが重要である。当社は、顧客のニーズに応えるため、これらの実現に向けて全力で取り組んでいく。

文 献

- (1) 岡村 潔, ほか. 原子力プラントの統合保全. 東芝レビュー. 60, 2, 2005, p.17-21.
- (2) T. Hirasawa, et al. "Phased Array UT Application for Hamaoka Unit-1 CRD Housing Stub-Tube Inconel Welds". 3rd EPRI Seminar on Phased Array Ultrasonic Examination. Seattle, Washington, USA, 2003-06, EPRI Paper 24.
- (3) Y. Yuguchi, et al. "Phased Array UT Application for Boiling Water Reactor Vessel Bottom Head". Proceeding of ICONE15, Nagoya, Japan, 2007-04, ICONE15-10818. (CD-R).
- (4) K. Uchida, et al. Steady-State Thermal Simulation of Weld Applied to a Practical Axisymmetric Weldment. JPVT, Trans. ASME. 129, May, 2007, p.262-271.
- (5) 佐野雄二, ほか. レーザの水中照射による金属材料の残留応力改善メカニズム. 日本原子力学会誌. 42, 6, 2000, p.567-573.
- (6) Y. Sano, et al. "Laser Peening without Protective Coating as a Surface Enhancement Technology". Proceeding of ICONE15, Nagoya, Japan, 2007-04, ICONE15-10812. (CD-R).
- (7) M. Yoda, et al. "Development and Application of Laser Peening System for PWR Power Plants". Proceeding of ICONE14, Miami, Florida, USA, 2006-07, ICONE14-89228. (CD-R).
- (8) Y. Kitajima, et al. "Acoustic Analysis for a Steam Dome and Piping of a 1,100 MWe-Class Boiling Water Reactor". Proceedings of ICAPP '06, Reno, Nevada, USA, 2006-06, Paper 6358. (CD-R).



島沢 守 HATAZAWA Mamoru

電力システム社 原子力事業部 原子力運転プラント技術部長。原子力発電プラントのプロジェクト管理業務に従事。日本原子力学会会員。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



山本 哲夫 YAMAMOTO Tetsuo

電力システム社 原子力事業部 原子力機器設計部長。原子炉構成機器の設計及び保全業務に従事。日本原子力学会、日本機械学会会員。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



鈴木 茂 SUZUKI Shigeru

電力システム社 原子力事業部 原子力電気計装設計部長。原子力プラント向け計装制御システムの開発設計に従事。日本原子力学会会員。
Nuclear Energy Systems & Services Div.