

# 原子力発電所の高経年化に対応した高度保全技術

Highly-reliable Maintenance Technologies for Aged Nuclear Power Plants

坂下 元昭 Motoaki Sakashita  
佐藤 深一郎 Shinichiro Sato

花木 洋 Hiroshi Hanaki  
菅野 明弘 Akihiro Kanno

小川 雪郎 Yukio Ogawa

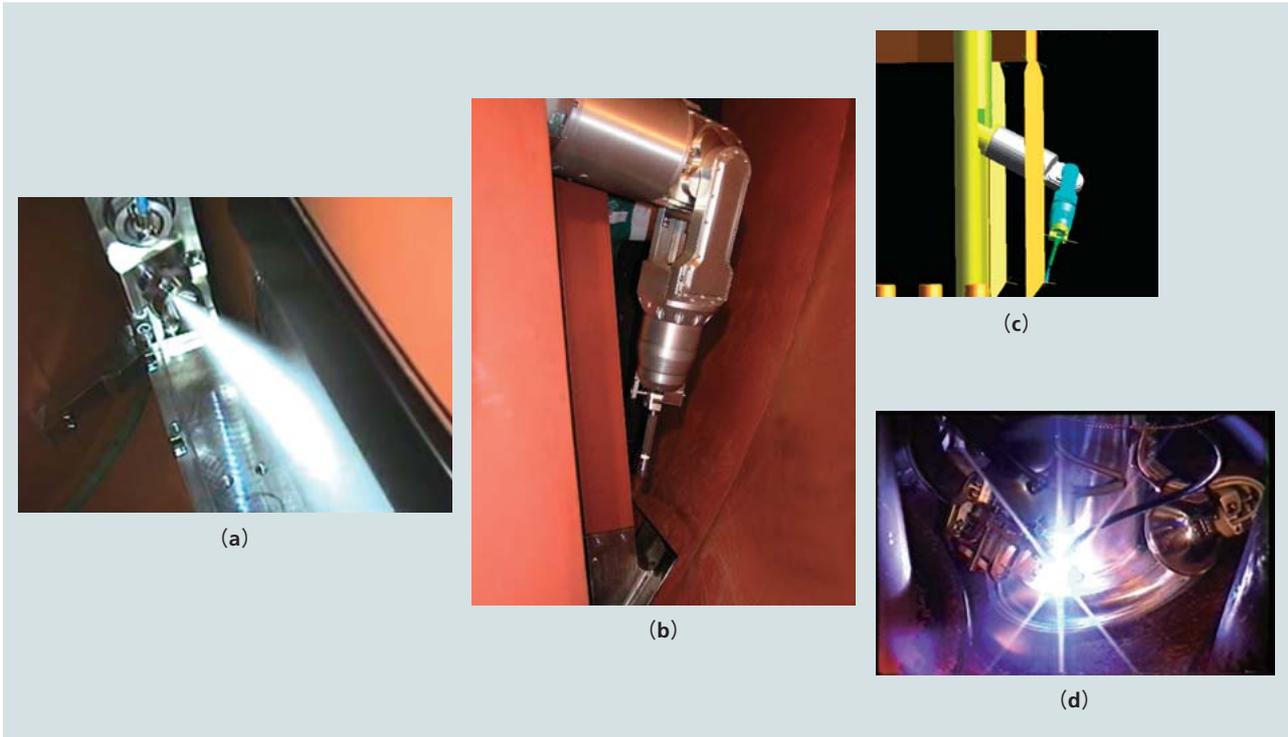


図1 炉内機器の応力改善技術であるWJP装置および三次元CADモデル

シュラウドH7外面用WJP (Water Jet Peening) 装置を(a)、シュラウドサポート用多関節WJP装置を(b)、(b)の三次元CAD (Computer-aided Design) モデルを(c)、および原子炉底部に位置する機器(中性子計測配管)の溶接状況を(d)にそれぞれ示す。日立は、さまざまな炉内機器への適用実績を持つWJPについて、今後も既存設備の応力改善技術としての期待に応え、さらなる改善を進めている。

「低炭素社会づくり行動計画」において、発電過程で二酸化炭素を排出しない原子力発電は、今後も、低炭素エネルギーの中核として、地球温暖化対策を進めるうえできわめて重要な位置を占めるとされている。

原子力発電所の新規建設も計画されているが、これからは、既設の原子力発電所を最大限に活用し、高経年化対策を計画的に行い、長期的に安定した運転ができる発電所にするのが重要となる。

日立は、長年の原子力発電所の保全業務を通じて培ってきた技術を基に、原子力発電所の長期安定運転とともに、設備利用率の向上と発電所の作業従事者の被ばく線量の低減に寄与する、原子力発電所の高度保全技術を提供している。

## 1. はじめに

原子力発電は、エネルギーの安定供給および地球温暖化対策に引き続き貢献していくことを期待されており、2008年7月に閣議決定された「低炭素社会づくり行動計画」においても低炭素エネルギーの中核として位置づけられている。この行動計画では、2020年をめどに発電電力量に占める「ゼロ・エミッション電源」の割合を50%以上に引き上げることが目標とされ、発電電力量の中で原子力発電が担う比率を高める必要がある。

この目標を実現するには、既設炉を最大限に活用するために、運転サイクルの延長、定期検査期間の短縮による設備利用率の向上や出力の向上を早期に実現することが求められる。

これらの社会的なニーズに応えるため、日立は長年にわた

る原子力発電所の保全業務を通じて培ってきた技術を基に、高度保全技術の実用化に取り組んでいる(図1参照)。

ここでは、原子力発電所の高度保全技術の概要、新検査制度への対応技術、炉内機器および配管の保全技術、およびプラント高出力化技術について述べる。

## 2. 原子力発電所の高度保全技術の概要

世界各国の原子力発電所と比べた場合、わが国の原子力発電所の設備利用率は低い。また、作業従事者の被ばく線量が多いという昨今の状況を踏まえ、日立は、「長期安定運転ができる」、「設備利用率が高い」、「作業従事者の被ばく線量が少ない」原子力発電所をめざした「高度保全技術」の実用化に取り組んでいる(表1参照)。

2008年8月に経済産業省原子力安全・保安院から示された「保全プログラムを基礎とする検査(新検査制度)の導入について」では、原子力発電所の安全性確保をいっそう向上することを目的として、事業者に対して保全重要度・保全計画・保全の有効性評価などを記載した「保全プログラム」を策定させ、これに基づく保全活動の実施状況を厳格に確認することとしている。この中では、安全が確保されることが確認されれば、定期検査の間隔を従来の13か月以内から最大24か月以内に延長することが認められ、長期サイクル運転が可能と

表1 高度保全技術の概要

「高度保全技術」とは、「長期安定運転」、「設備利用率が高い」、「従事者の被ばく線量が少ない」の三つの達成をめざした保全技術である。

高度保全技術	項目		具体例
長期安定運転	運転中の不具合発生防止	機器の更新	● シュラウド取り替え ● 復水器管束取り替え
		応力改善	● WJP, IHSI
		高度検査技術	● UT/ECT検査
		水質環境改善	● 貴金属注入
		予兆管理	● ガイド波配管減肉検査
	運転中状態監視	● 弁状態監視	
確実な点検	点検記録DB化	● 配管減肉管理システム	
設備利用率が高い	出力向上	設備の効率向上	● 高圧タービンCCB化 ● 低圧タービン翼伸張化 ● 湿分離加熱器
		原子炉出力の上昇	● 超音波給水流量計 ● 熱バランスシフト
	長期サイクル運転		● 24か月連続運転
	定検(定期検査)短縮	定検作業の重点化	● RCM/CBM
		作業の高速化	● 高速FHM
従事者の被ばく線量が少ない	線量上昇防止	除染	● HOP法
		放射性物質再付着抑制	● RHR低温投入 ● ハイパーバルブ ● Hi-Fコート
	遠隔作業		● ロボット検査、補修
	遮へい計画		● シミュレータ利用

注:略語説明 WJP(Water Jet Peening), IHSI(Induction Heating Stress Improvement), UT(Ultrasonic Testing), ECT(Eddy-current Testing), DB(Database), CCB(Continuous Cover Blade), RCM(Reliability-centered Maintenance), CBM(Condition-based Maintenance), FHM(Fuel Handling Machine), HOP(Hydrazine Oxalic Acid and Potassium Permanganate), RHR(Residual Heat Removal), Hi-F(Hitachi Ferrite)

なった。また、「保全プログラム」は高経年化技術評価および定期安全レビューと連動したものとすることが求められ、高経年化対策がより計画的に実施されることになる。

プラントメーカーとしては、事業者の新検査制度への対応をサポートすること、高経年化BWR(Boiling Water Reactor:沸騰水型原子炉)プラントにおける炉内機器のSCC(Stress Corrosion Cracking:応力腐食割れ)対策技術の確立、および出力向上技術の実用化が急務と考えている。

## 3. 新検査制度への対応技術

新検査制度は2009年1月1日に施行され、同年4月1日以降開始の定期検査から適用される。「適切な機器を適切な時期に適切な方法で」保守する仕組みを確立することにより、保全の最適化を図る制度である。

具体的には、分解点検時の手入れ前状態データの蓄積、およびその評価、設備診断技術を活用した状態監視の結果などを活用して、運転サイクルごとに保全活動の有効性評価を行い、その評価結果を次の保全計画(例えば、点検項目・点検頻度など)に反映することで、保全活動の継続的な改善を行うものである。

日立は以前から、プラントレベルではヒートバランス計算に基づくプラント性能監視診断システム、システムレベルでは水質評価技術に基づく水質診断システム、機器レベルでは配管減肉管理システムなどの各種状態監視システムを構築してきた。保全の最適化を図るためには、機器の保全履歴・状態データ・サーベイランス試験データなど、さまざまなデータの管理・評価がさらに重要となってくる。これらのデータ量は膨大で、かつ適切な管理や合理的な評価が求められる。日立は、このようなニーズに応えるために、機器の総合状態監視システムの構築をめざしている。

## 4. 炉内機器および配管の保全技術

原子力発電所の長期安定運転および設備利用率の向上には、機器類の計画的な点検、保守による健全性確保、計画外停止につながる不具合の発生を未然に防止する対策が重要である。

ステンレスあるいはニッケル基合金を材料とする炉内機器およびPLR(Primary Loop Recirculation:原子炉再循環系)配管では、高経年化に伴う溶接部近傍のSCC対策が最重要課題である。それぞれの対象機器類の場所と環境に応じ、溶接部近傍の圧縮応力化(応力改善)・腐食環境の緩和(環境改善)・材料改善といった予防保全技術を個々あるいは組み合わせ合わせて適用することで、機器の健全性確保および不具合発生を予防している。

## 4.1 炉内機器, PLR配管の保全技術

### 4.1.1 応力改善技術

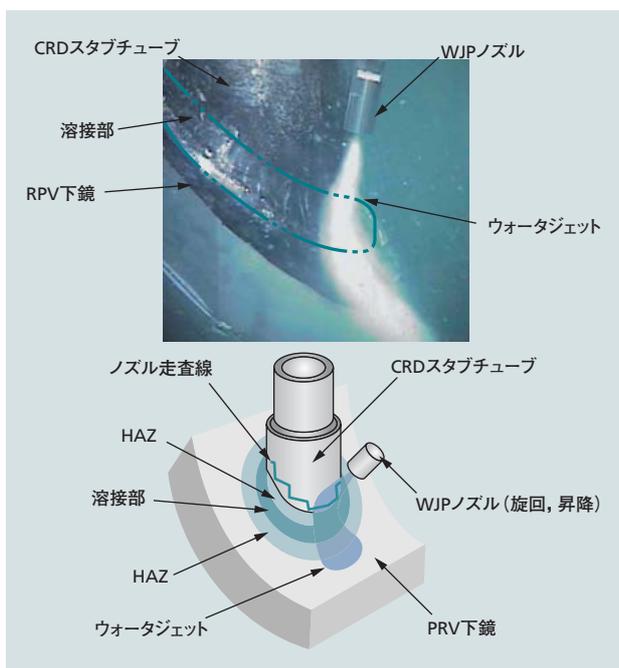
既存設備の応力改善技術として用いている工法には、材料表面に機械的に応力改善を行う工法と、温度勾(こう)配を用いて応力改善を行う工法があり、対象機器の場所と環境条件によって適切に選択されている。

WJP (Water Jet Peening) は、水中で水ジェットを噴射するときに発生するキャビテーションを多量に含んだ水ジェットを材料表面に吹き付け、表面近傍でキャビテーション気泡が崩壊するときの圧力波を利用して材料表面を叩く(ピーニングする。)ことにより、材料表面の応力を圧縮側に改善する技術である(図2参照)。これまでにさまざまな炉内機器への適用実績があり、ほとんどの炉内機器をカバーしつつある(図3参照)。

今後も引き続き実機適用が見込まれ、さらなる工事期間の短縮に向けた効率的な施工をめざし、日々改善を図っている。

また、機械的な応力改善工法として従来用いられている磨き工法についても、さらなる改善を進めており、GE-Hitachi Nuclear Energy Americas LLC (以下、GEHと記す。)との協業による高機能化検討も進めている。

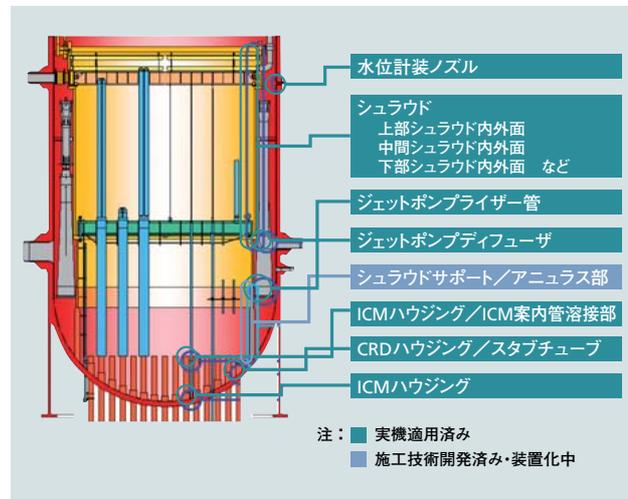
温度勾配を用いて応力改善を行うIHSI (Induction Heating Stress Improvement: 高周波誘導加熱応力改善) 工法によるPLR配管のSCC予防保全についても、応力改善機能をより高めた改良IHSI工法が実用化され、適用実績を積み重ねている(図4, 図5参照)。



注:略語説明 CRD (Control Rod Drive), HAZ (Heat Affected Zone), RPV (Reactor Pressure Vessel)

図2 WJP施工イメージ

キャビテーション気泡が崩壊する際に生じる圧力波を利用して応力改善するWJPのイメージを示す。



注:略語説明 ICM (In-core Monitor)

図3 WJPの実機への適用実績

WJPをBWR (沸騰水型原子炉) プラントに適用した箇所を示す。

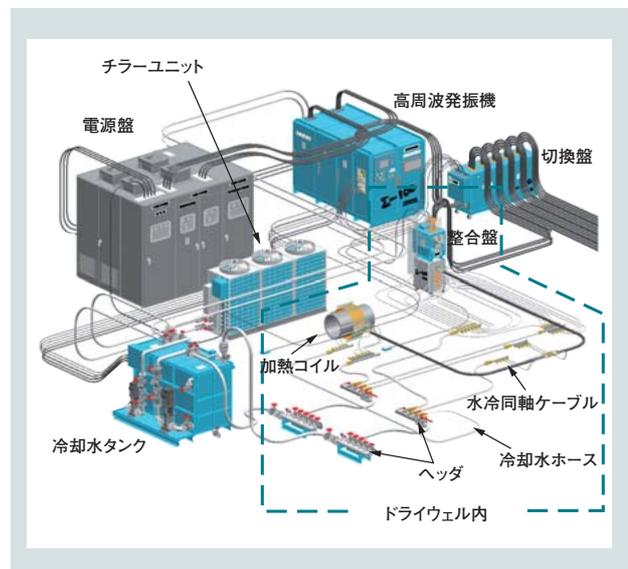


図4 IHSIの設備概要

温度勾(こう)配を用いて応力改善を行うIHSI設備の概要を示す。



図5 IHSIの設備

IHSIの設備のうち、加熱コイル部と冷却水タンクを示す。

#### 4.1.2 補修技術

炉内機器の補修技術として、補修そのものを行う技術と、補修のために必要な情報を得るための技術を開発し、実機適用を進めている。

補修技術には、SCCの発生した部位を研削や放電加工などによって完全除去する方法や、構造的にSCC除去が適さない部位向けに溶接肉盛りによってSCCを炉水環境から遮断し、SCCの進展を抑制する方法(封止溶接工法)があり、その遠隔操作装置の開発を行った。

また、補修のために必要なSCCの寸法形状や表面性状などの情報は、従来、カメラ画像からの確認や、ポートサンプルなどの材料を直接切り出して確認が行われているが、非破壊でより正確な情報を得るために炉水中でのレプリカ転写技術を開発し、実用化している(図6参照)。

#### 4.2 環境改善技術

炉内の腐食環境を改善する手法として、HWC(Hydrogen Water Chemistry:水素注入)技術を実機に適用している。この技術は定格運転時以外に、応力条件の厳しい起動時に適用することで環境緩和効果のさらなる向上を図っている。

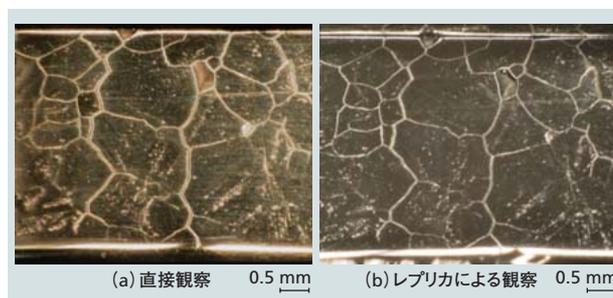
近年では、海外原子力発電所で多くの適用実績があるHWCを補強するNMCA(Noble Metal Chemical Addition:貴金属注入技術)に関して、サイクル末期に注入する従来方式に加え、運転中に少量を一定期間注入する手法をGEHと協力して取り組んでおり、国内原子力発電所への適用をめざしている。

#### 4.3 材料改善技術

低炭素ステンレス鋼のSCC機構解明とともに、対策材料の開発を進めている。その結果、加工層除去の有効性の確認や、残留応力低減が期待できるレーザー溶接技術の開発、SCC抑制効果が期待できる材料として粒界性格制御材の開発を行った。

### 5. プラント高出力化技術(タービン効率向上, 原子炉出力向上)

プラント高出力化技術は、原子力発電プラントの電気出力を向上させる技術である。原子炉の定格熱出力を増加させることや、タービン発電機の効率を向上させることにより、従来に比べて高い電気出力を得る。プラント高出力化技術を適用するには、プラントライフマネージメントを踏まえた総合的な予防保全の取り組みが不可欠である。すなわち、原子力発電所の安定運転に寄与するプラントリフレッシュ(計画的な経年劣化更新)の実施状況、プラント性能診断による発電量低下要因の分析などを考慮した高出力化計画を立案することにより、



注:\* インコネルは、スペシャルメタル社の登録商標である。

図6 レプリカ実施例

SCC(応力腐食割れ)のエッチング後のレプリカとしてインコネル®600の観察例を示す。

発電性能を最適化して優れた経済性の提供が可能となる。

日立は、個々のプラントの運転開始からの経過年数に応じた高出力化技術の提案とともに、多彩なニーズに対応する技術開発を行っている。

#### 5.1 タービン効率向上への取り組み

最長52インチまでの低圧タービン最終段動翼<sup>1),2)</sup>や、AVN(Advanced Vortex Nozzle)<sup>1),2)</sup>、CCB(Continuous Cover Blade)<sup>3)</sup>などのタービン高効率化技術、チタン製細管の採用による復水器の高性能化、湿分分離加熱器の採用による再熱サイクル導入などの高効率化技術を適用し、優れた経済性を持つタービン設備を建設している。既設プラントにこれらの最新技術を適用することにより<sup>4)</sup>、日立の検討例では、定格電気出力から5%程度の向上が可能との結果が得られている(図7、図8参照)。

また、原子力プラントの運転状態と設計時のプラント特性の差異を分析して、機器の劣化などの電気出力低下要因を診断する機能を備えたプラント性能監視診断システムを実用化している(図9参照)。プラント診断から得られる性能回復策を実施することで、最適なプラント電気出力を実現することができる。

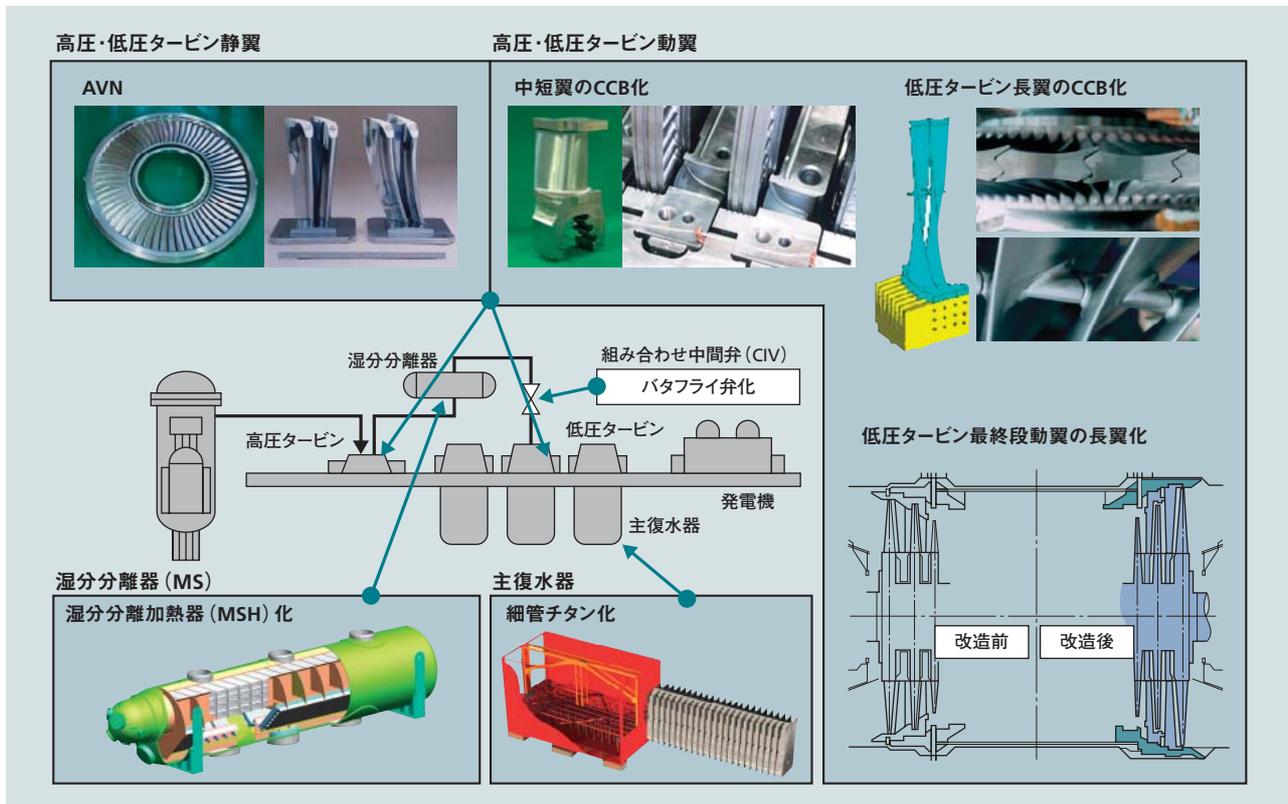
#### 5.2 原子炉出力向上への取り組み

米国原子力規制委員会(NRC:Nuclear Regulatory Commission)の定義ではS型(SPU:Stretch Power Uprate)、MU型(MUR:Measurement Uncertainty Recapture)、E型(EPU:Extended Power Uprate)の三つのタイプがあり、日立はすべてのタイプの出力向上に取り組んでいる。

##### (1) S型(～7%出力向上)

S型は既設設備の余裕の範囲内で実施する出力向上であり、早期の国内導入が期待されている。日立はこれまでに各種の技術評価を実施しており、出力向上の早期実現に向けた取り組みを続けている。

##### (2) MU型(～1.7%出力向上)



注:略語説明 AVN(Advanced Vortex Nozzle), CIV(Combined Intermediate Valve), MSH(Moisture Separator Heater)

図7 タービン高効率化技術

最新のタービン高効率化技術を適用することで、電気出力の向上が可能である。

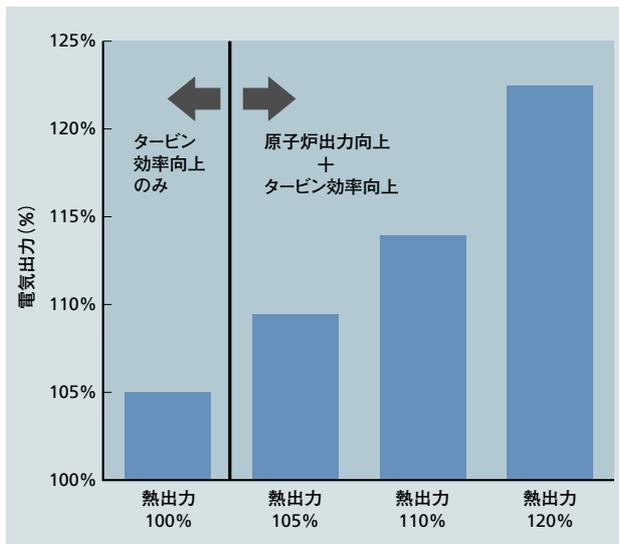


図8 プラント高出力化の効果(評価例)

タービン効率向上と原子炉出力向上を合わせて実施することで、高い電気出力が実現する。

MU型は原子炉の熱出力の測定を、より高精度に行うことで原子炉の出力を向上させる。MU型の国内実施例はまだないが、事実上、米国NRCがMU型用に認可している唯一の原子炉給水流量計であるChordal型超音波給水流量計を、日立は、中部電力株式会社浜岡原子力発電所5号機、四国電力株式会社伊方発電所1~3号機にそれぞれ納入しており、Chordal型超音波給水流量計を用いた実機での高精度

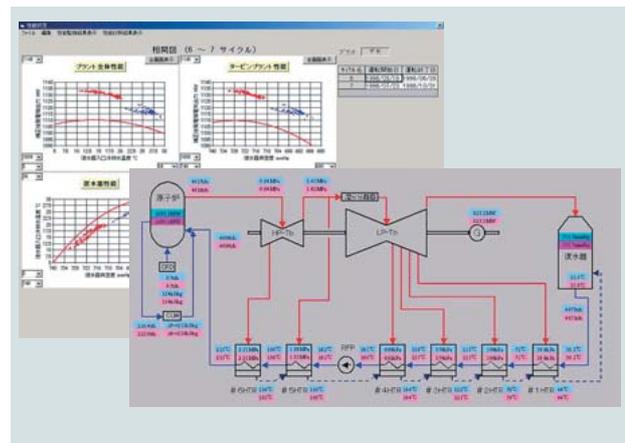


図9 プラント性能監視診断システム

性能低下要因の分析・診断により、最適な高出力化が可能である。

の流量計測の実績を重ねている(図10参照)。

(3) E型(〜20%出力向上)

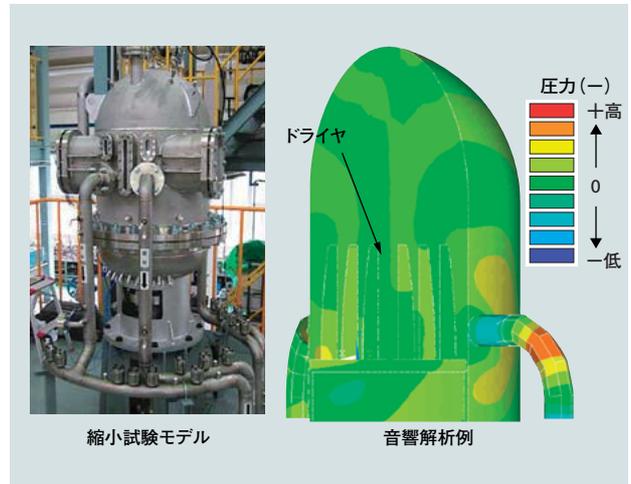
E型は積極的に経済性を追求した出力向上である。日立は、将来の日本国内での実施に向けた技術開発や、海外で多くの実績を持つGEHとの連携を推進している。

一例として、米国で発生した蒸気乾燥器の音響共鳴振動に関しては、蒸気ドーム内の音響解析や蒸気乾燥器の構造解析を行うとともに、縮小モデルによる空気試験で解析手法の検証を進めている。

今後は、実温・実圧での蒸気試験によるさらなる検証の実



**図10 Chordal型超音波給水流量計**  
 実機の給水配管に設置された超音波給水流量計の外観を示す。



**図11 蒸気乾燥器の音響共鳴評価**  
 縮小試験モデルと音響解析例を示す。

施を計画している(図11参照)。また、GEHと共同で実機での測定・評価や解析手法の高度化にも取り組む予定である。

## 6. おわりに

ここでは、原子力発電所の高度保全技術の概要、新検査制度への対応技術、炉内機器および配管の保全技術、およびプラント高出力化技術について述べた。

日立は、各電力事業者などの協力を得て、原子力発電所の保全に関連した数多くの工事を実施してきた。今後も、原子力発電所の長期安定運転をめざし、常に新技術を開発するとともに、技術と技能の維持、伝承を図っていく考えである。

### 参考文献

- 1) 梶山, 外:中部電力株式会社浜岡原子力発電所第5号機の建設, 日立評論, 87, 2, 193~198(2005.2)
- 2) 山成, 外:北陸電力株式会社志賀原子力発電所2号機の完成, 日立評論, 88, 2, 173~178, (2006.2)
- 3) 工藤, 外:世界最大環帯面積の48インチ鋼製タービン最終段動翼, 日立評論, 88, 2, 197~200(2006.2)
- 4) 坂下, 外:原子力発電所の長期安定運転に向けた高度保全技術, 日立評論, 88, 2, 183~188(2006.2)

### 執筆者紹介



#### 坂下 元昭

1978年日立エンジニアリング株式会社入社, 日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 原子力サービス部 所属  
 現在, 原子力発電所の予防保全計画の取りまとめに従事  
 技術士(原子力・放射線部門)  
 日本原子力学会会員, 日本保全学会会員, 日本技術士会会員



#### 佐藤 深一郎

1987年日立製作所入社, 日立GEニュークリア・エナジー株式会社 原子力技術本部 原子力予防保全技術部 所属  
 現在, 原子力発電所の予防保全のプロジェクト業務に従事



#### 花木 洋

1992年日立製作所入社, 日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 原子力サービス部 所属  
 現在, 原子力発電所の予防保全計画の取りまとめに従事  
 日本原子力学会会員



#### 菅野 明弘

1990年日立製作所入社, 日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 原子力設計部 所属  
 現在, 原子力発電所の炉内機器の予防保全計画・工事の取りまとめに従事



#### 小川 雪郎

1999年日立製作所入社, 日立GEニュークリア・エナジー株式会社 日立事業所 原子力サービス部 所属  
 現在, 原子力発電所の出力向上, 効率向上計画の取りまとめに従事  
 博士(工学), 技術士(原子力・放射線部門), PMP (Project Management Professional)  
 日本原子力学会会員, 日本技術士会会員