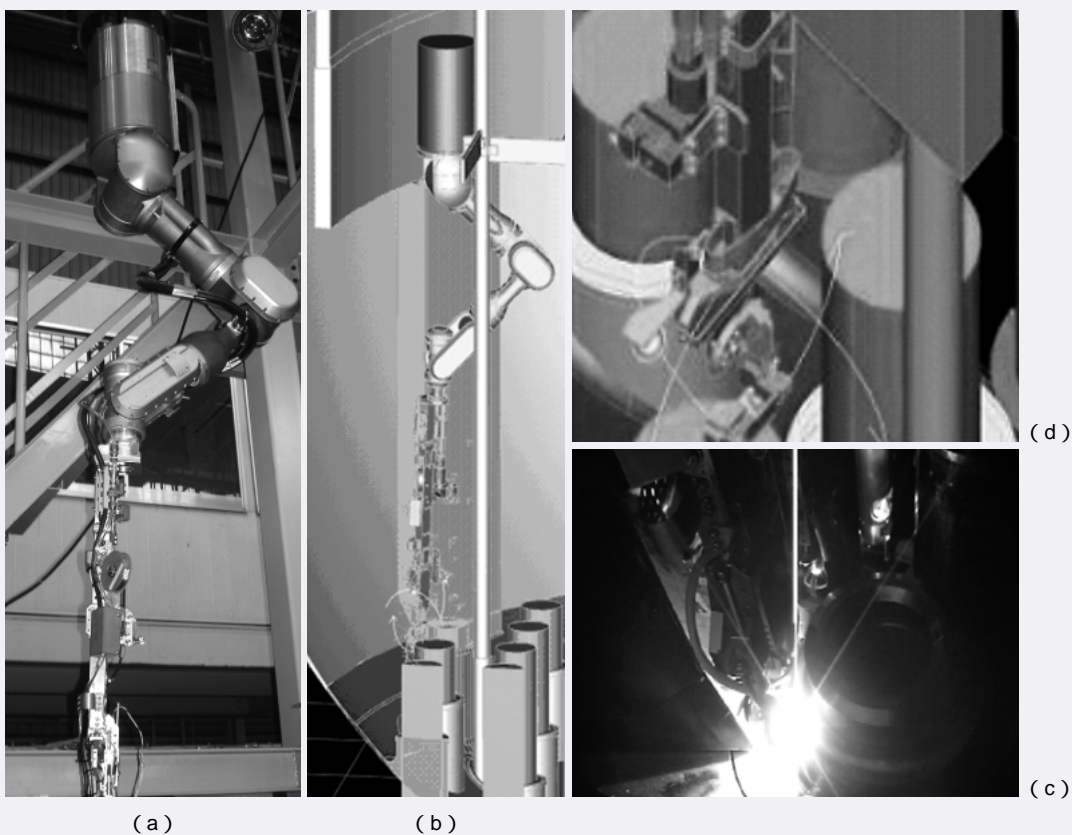


原子力発電所の長期安定運転に向けた高度保全技術

High-Reliability Maintenance Technologies for Long-Lasting Safety Operation of Nuclear Power Plants

坂下 元昭 *Motoaki Sakashita*
柴下 直昭 *Naoaki Shibashita*

松田 将省 *Masami Matsuda*
荒木 憲司 *Kenji Araki*



原子炉底部補修装置と開発ツールとして用いた三次元CADモデル

CRD(Control Rod Drive)スタブチューブ補修装置(a)、(a)の三次元CAD(Computer-Aided Design)モデル(b)、ICM(Incore Monitor)ハウジング取替用溶接装置(c)、および(c)の三次元CADモデルの適用状況(d)を示す。

地球温暖化対策やエネルギーの安定供給確保の観点から、長期的に原子力発電所の規模を維持、拡大し、将来的に既設の原子力発電所を最大限に活用していくことが、国の基本方針になりつつある。既設の原子力発電所の中には、運転年数が30年を越すものもあり、今後は高経年化対策などを計画的に行い、長期的に安定し

た運転のできる発電所にすることが重要である。

このため、日立製作所は、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受ける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言する。

1 はじめに

地球温暖化対策やエネルギーの安定供給確保の観点から、将来的に既設の原子力発電所を最大限に活用していくことが国の基本方針となりつつある。原子力発電所の中には、運転開始から30年を越すものもあり、今

後、高経年化対策や長期サイクル運転、出力向上などを計画的に進めていくことが重要である。

日立製作所は、長年の原子力発電所の保全業務を通じて培った技術を基に、高度保全技術の実用化に取り組んでいる。

ここでは、その内容について述べる。

2 原子力発電所の高度保全技術の概要

原子力発電所の運用には、安全、信頼性、情報公開に基づく安心感の醸成が重要である。また、世界各国の原子力発電所の設備利用率に比べると、わが国の原子力発電所の設備利用率は低く、設備利用率の向上による発電コストの低減が重要である。さらに、わが国の原子力発電所の作業従事者の受ける線量は、世界各国の原子力発電所に比べて多く、線量の低減も重要である。

そのため、日立製作所は、「長期安定運転ができる」、「設備利用率が高い」、「作業従事者の受ける線量が少ない」原子力発電所を目指した「高度保全技術」の実用化に取り組んでいる(表1参照)。

長期安定運転を行うためには、機器の計画的な点検、保守、取替、過去に発生した不具合に対する再発防止対策を行うとともに、その管理を確実にすることが重要である。

設備利用率を向上させるためには、発電量の増加、長期サイクル運転の導入、定期点検の短縮が考えられ、各発電所の実状に応じて適切な方法を組み合わせ実施することが、重要かつ合理的であると考えられる。

作業従事者の受ける線量を少なくするためには、線源除去、遮へい、遠隔作業などが考えられる。具体的には、除染後の放射性物質の再付着抑制による線量上昇の抑制と、遠隔作業方法の開発が必要となる。なお、機器の状態監視に基づき、適切に保全を行うことにより、

表1 高度保全技術の概要

「高度保全技術」は、「長期安定運転」、「設備利用率が高い」、および「作業従事者の受ける線量が少ない」という三つの達成を目指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	機器の劣化更新	<ul style="list-style-type: none"> ● シュラウド取替 ● 復水器管束取替
		確実な不具合対策	<ul style="list-style-type: none"> ● WJP, IHSI ● UT/ECT検査 ● ヒドラジン注入
		予兆管理	<ul style="list-style-type: none"> ● ガイド波配管減肉検査
	確実な点検	運転中の状態監視 <ul style="list-style-type: none"> ● 弁状態監視 点検記録のDB化 <ul style="list-style-type: none"> ● 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 <ul style="list-style-type: none"> ● 高圧タービンのCCB化 ● 低圧タービン翼伸張化 原子炉出力の上昇 <ul style="list-style-type: none"> ● 熱バランスシフト 	
	長期サイクル運転	<ul style="list-style-type: none"> ● 24か月連続運転 	
	定期点検短縮	定期点検工事の削減 <ul style="list-style-type: none"> ● RCM/CBM 作業の高速化 <ul style="list-style-type: none"> ● 高速FHM 	
作業従事者の受ける線量が少ない	線量上昇防止	除染 <ul style="list-style-type: none"> ● HOP法 放射性物質再付着抑制 <ul style="list-style-type: none"> ● RHR低温投入 ● ハイパーバルブ 	
	遠隔作業	<ul style="list-style-type: none"> ● ロボット検査、補修 	
	遮へい計画	<ul style="list-style-type: none"> ● 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)

作業従事者の受ける線量を低減できることも考えられるため、定期点検作業内容を精査することも重要である。

3 長期安定運転を目指した保全技術

長期安定運転を行うためには、計画的な機器の点検、保守と、不具合の発生を予防する対策を行うことが重要である。

3.1 炉内機器、PLR配管の保全技術

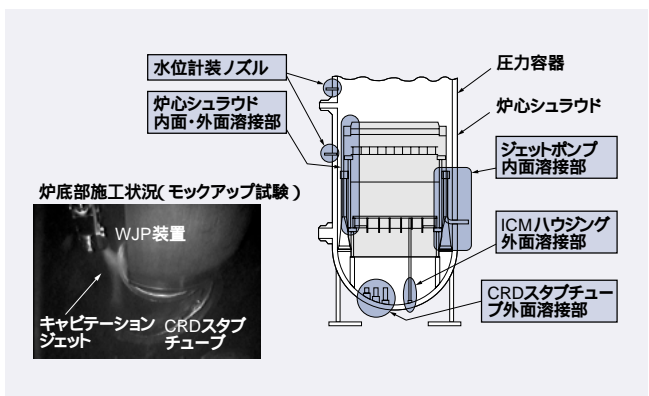
BWR(Boiling Water Reactor:沸騰水型原子炉)プラントの炉内機器、PLR(Primary Loop Recirculation System:原子炉再循環系)配管では、高経年化に伴う溶接部近傍のSCC(Stress Corrosion Cracking:応力腐食割れ)対策が最重要課題である。SCCの発生を防止または抑制する方法として、溶接部近傍の圧縮応力化(応力改善)、腐食環境の緩和(環境改善)、材料改善がある。

3.1.1 応力改善・補修技術

WJP(Water-Jet Peening)は、水中で水ジェットを材料表面に吹き付け、キャビテーション気泡の崩壊エネルギーを利用して、材料表面の応力を圧縮化する汎用性の高い技術である。これまでにさまざまな個所に数多く適用しており(図1参照)、いっそうの適用範囲の拡大、効率的な施工を目指している。

炉内機器の補修技術としては、SCCの発生した部位を研削などによって切除する方法がある。構造的に欠陥の切除が適さない部位には、溶接肉盛りによって覆うことで、SCCの進展防止、または抑制する方法(封止溶接)があり、その工法、遠隔装置もすでに開発している。

PLR配管のSCC予防策としては、従来のIHSI(Induction Heating Stress Improvement:高周波誘導加熱応力改善)工法から、応力改善機能をいっそう高めた改良IHSI工法を実用化している(図2参照)。



注:略語説明 ICM(Incore Monitor), CRD(Control Rod Drive)

図1 WJP実機の適用実績

WJPのBWR(Boiling Water Reactor)プラントへの適用実績個所を示す。

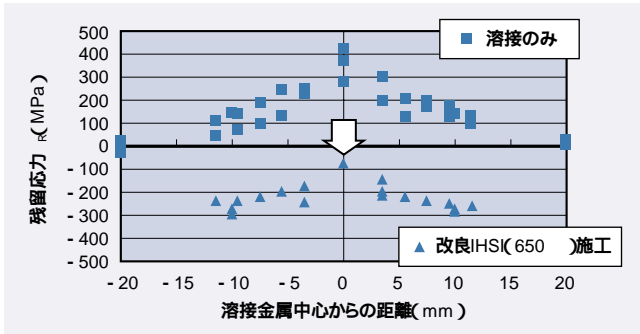


図2 改良IHSIの応力改善効果例(600A配管)
改良IHSIと従来溶接をそれぞれ実施したときの軸方向残留応力を比較したものを示す。

溶接部に欠陥が確認された場合、新規配管材を要しない補修工法として、WOL(Weld Overlay)を開発している。WOLは、欠陥のある溶接部周辺の外面に複数層の全周溶接肉盛りを形成する工法で、補修方法の選択の幅を広げるものである。

3.1.2 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。近年では、HWCを補強する技術として、NMCA(Noble Metal Chemical Addition:貴金属注入)に関する検討を進めている。さらに、脱酸化剤であるヒドラジンを注入し、腐食を促進する酸化剤を効率的に低減する技術の開発を推進している。

3.1.3 材料改善技術

グラインドなどによる表面加工により、SCC発生の感受性が上昇することが知られている。日立製作所は、表面研磨によって加工層を除去し、引張残留応力を低減する工法を採用している。また、化学成分や組織を制御してSCCの発生、進展を抑制した材料の開発を進めている。

3.2 検査技術

炉内には、複雑かつ狭い個所が多くあり、的確に検査できることが信頼性向上につながる。炉内検査では、VT(Visual Testing:目視検査)で傷が確認された場合、その深さをUT(Ultrasonic Testing:超音波探傷検査)で測定する。また、必要に応じて傷の長さをECT(Eddy-Current Testing:渦電流探傷)で詳細に測定する。複雑かつ狭い個所には機動性の高いVT用ROV(Remotely-Operated Vehicle)を開発し、適用している(図3(a)参照)。さらに、UTセンサを搭載したタイプも開発している(図3(b)参照)。

傷の深さを測定するUTセンサとしては、複雑な形状でも使用可能な小型アレイセンサを開発し、炉内のシュラウド溶接部などへの適用を進めている(図3(c)参照)。

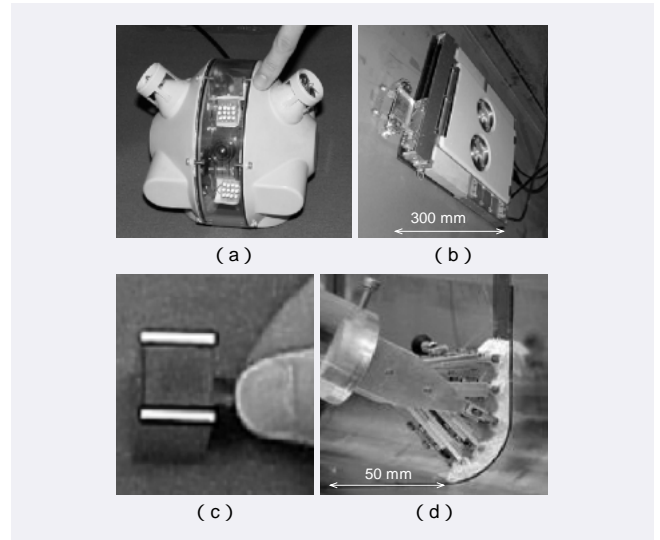


図3 検査用ROVとセンサの外観
VT(Visual Testing)用ROV(Remotely-Operated Vehicle)(a)、UTセンサ搭載タイプ(b)、小型アレイセンサ(c)、および新型ECTセンサを示す。

さらに、UTシミュレータを活用して、検査精度の高度化を図っている。

また、フレキシブルな基板上に多数のECTコイルを設置した新型ECTセンサによって、平面から曲率半径20 mmまでの曲面の検査ができるようにした(図3(d)参照)。

3.3 配管の減肉検出、管理技術

2004年8月に発生したPWR(Pressurized Water Reactor:加圧水型原子炉)の二次系配管破断事故は、配管の減肉が原因であり、このような事故を繰り返さないためには、配管の減肉検査、管理が重要である。

配管の減肉検査は、検査する範囲の保温材を取り除

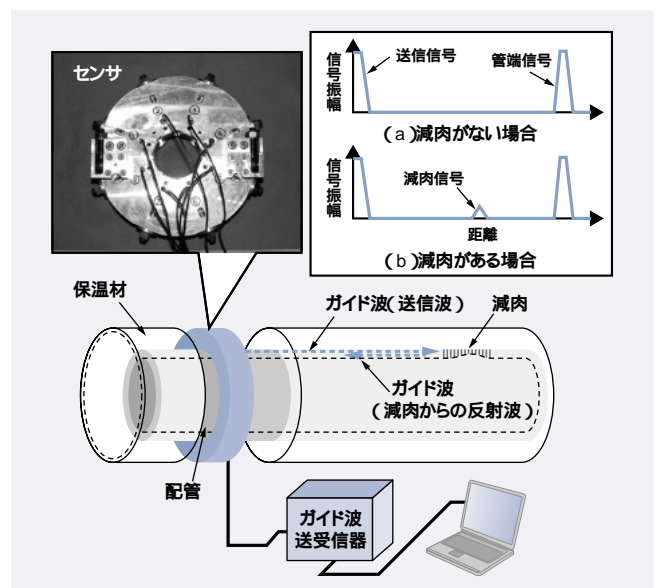


図4 ガイド波を用いた配管減肉検査システムの概要
超音波の一種である「ガイド波」を用いた減肉検査システムの概要を示す。

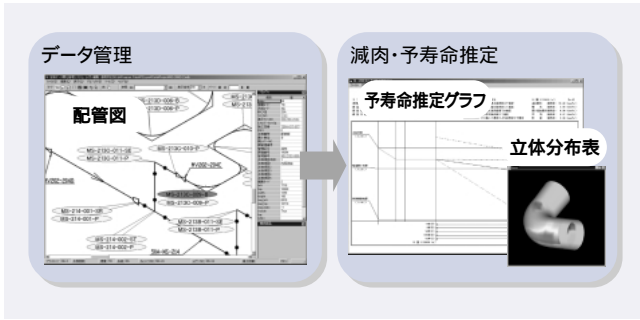


図5 配管減肉管理システムの画面例
配管減肉管理システムでは、配管仕様、流体条件、運転履歴、点検結果などのデータを有機的に関連づける。

いて超音波厚み計を複数の位置に接触させて測定するため、時間を要した。そのため、超音波の一種である「ガイド波」を使って配管の健全性を効率的に検査する技術を開発した(図4参照)。従来のガイド波検査では波形がゆがむ欠点があったが、送信波形を形成する独自の方式を採用したことで、配管断面積の0.2%の減肉を検出可能にした。これにより、センサの前後合わせて16mまでの範囲の減肉部位の特定を容易にした。

さらに、一度の探傷で肉厚分布を詳細に計測できる多チャンネル超音波探傷装置を開発中である。

日立製作所は国内20プラントで減肉管理の支援を実施しており、その数はプラント当たり約6,000か所に及ぶ。管理データは、配管仕様、流体条件、運転履歴、点検結果など多岐にわたる。「配管減肉管理システム」では、これらのデータを有機的に関連づけ、経年対策を支援する(図5参照)。その特徴は、(1)短時間でシステム化が可能、(2)関連データとの整合性の維持、(3)三次元CAD(Computer-Aided Design)が利用可能、(4)高い拡張性で、すでに電力会社への納入実績がある。

3.4 状態監視技術

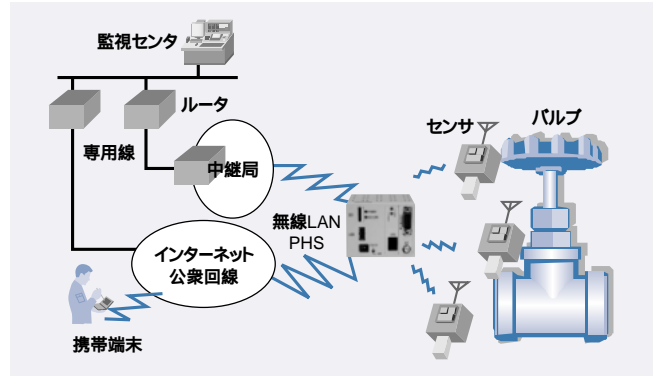
機器の運転状態を監視し、その兆候により、不具合が発生する前に点検、補修をすることは、不具合の発生防止に有効な方法である。

その一つとして、弁に歪みセンサを内蔵し、無線LAN(Local Area Network)を用いて測定したデータを管理サーバに送信し、離れた位置から集中監視する方法(図6参照)を開発中で、実機への適用を目指している。

また、センサネットを用いた技術は、機器の状態監視以外にもさまざまな利用方法が考えられる。その一例として、誘導避難システムの開発に着手している。

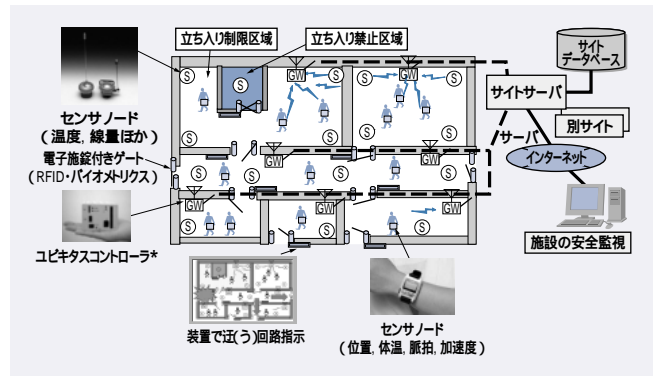
原子力発電所内では、業務災害につながる事故発生時に、(1)作業従事者の状態、(2)管理区域内での環境、および(3)作業従事者への指示伝達の情報を統合的に管理する必要がある。

図7は、センサネットを用いて、室内の温度、線量などの



注:略語説明 LAN(Local Area Network), PHS(Personal Handyphone System)

図6 センサネットを用いた弁の状態監視システムの構成例
センサネットを用いた状態監視システムの構成例を示す。



注:略語説明ほか RFID(Radio-Frequency Identification), S(Sensor), GW(Gateway)
*ユビキタスコントローラは、株式会社日立産機システムの登録商標である。

図7 避難誘導システムの構成例
RFIDセンサネットを利用した避難誘導システムの構成例を示す。

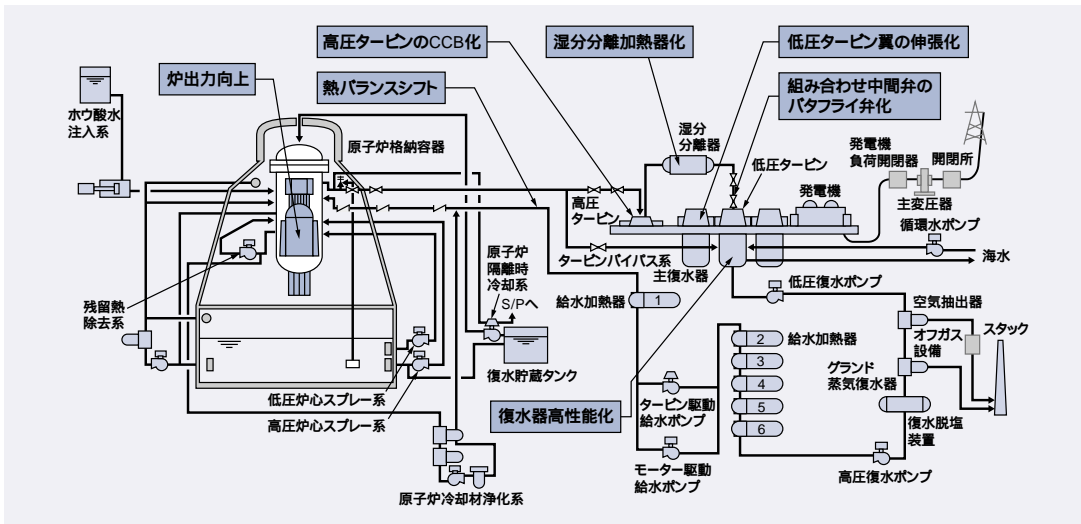
情報を収集し、作業従事者に的確に提供するシステムを示したものである。

3.5 弁の信頼性向上技術

原子力発電所では、非常に多くの弁が設置されており、これらの弁の弁座に用いているコバルト基合金の経年劣化事象(腐食、エロージョン、割れなど)が国内外で報告されている。その原因が弁座の金属組織を構成する共晶炭化物の選択的な劣化損傷であることに着目し、共晶炭化物の形態を変化させた弁(HHV:日立ハイパーバルブ)を開発した。HHVは耐食性、耐エロージョン性に優れ、摩擦が小さいなどの優れた性能を持つとともに、低残留応力と高い耐衝撃性能を兼ね備え、弁の保守性・信頼性の向上に寄与する。

4 設備利用率を高める保全技術

設備利用率を高める方策として、発電量の増加、長期サイクル運転の導入、定期点検の短縮などが考えられる。発電量の増加には、設備の効率向上と原子炉出力を増加させる方法がある。定期点検期間の短縮には、前述の状態監視技術の導入や高効率機械による作業



注:略語説明
S/R(Suppression Pool
:圧力抑制プール)

図8 出力向上方法の概要
さまざまな出力向上方法がある。

の効率化などの方策がある。これらの方策を適切に採用して90%以上の設備利用率を目指している。

4.1 出力向上技術

出力の向上方法を図8に示す。代表的なものについて以下に述べる

4.1.1 効率向上による発電量の増加技術

効率向上の一環として、タービン動翼・静翼の新技术開発・適用を推進している。

日立製作所は、最長52インチ(132 cm)の低圧タービン最終段動翼技術を保有しており、この技術を応用して、既設機の最終段翼を伸張化し、排気損失の低減による効率向上策を開発中である。

高圧タービンでは、火力用タービンで実績を重ねている動翼のCCB(Continuous Cover Blade)化により、効率を向上できる。これは、翼先端カバーを翼と一体削り出し構造としたもので、リーク蒸気の低減により、効率を向上できる。また、ロータに組み立てられた場合、全周1リングのカバー構造が実現し、信頼性向上にも寄与する。

静翼についての新技术の代表例として、AVN(Advanced Vortex Nozzle:三次元スタッキングノズル)があ

る(図9参照)。AVNは、ノズルを翼長方向に湾曲させ、腹側を凸状に形成したもので、二次流れによる流れの不均一性を緩和することで損失を低減でき、効率の向上が図れる。

4.1.2 原子炉出力向上による発電量の増加技術

原子炉の出力向上に伴い、タービンへの蒸気量が增加する。その際にも既存機器を最大限に活用できるシステムとすることが合理的である。その方策として、湿分離加熱器のMSH(Moisture Separation Heater:湿分離加熱器)への改造が有効である。MSHは、タービン入口の主蒸気の一部を加熱蒸気として高圧タービン排気蒸気を再加熱し、低圧タービン入口蒸気を過熱蒸気にするものである。その特徴は、(1)既存機器の利用可能範囲の拡大と、(2)熱効率の向上が図れることである。

従来の出力向上策では、出力の増加とともに主蒸気流量が増加し、炉内機器や高圧系機器への負荷が増加する。そのため、出力向上時の蒸気発生量を抑制し、炉心特性の改善により、経済性向上を目指した熱バランスシフト法を開発した。原子炉出力を105%に上げたときの適用例を図10に示す。給水温度を下げ、原子炉入口・出口のエンタルピー差を拡大することで、主蒸気流

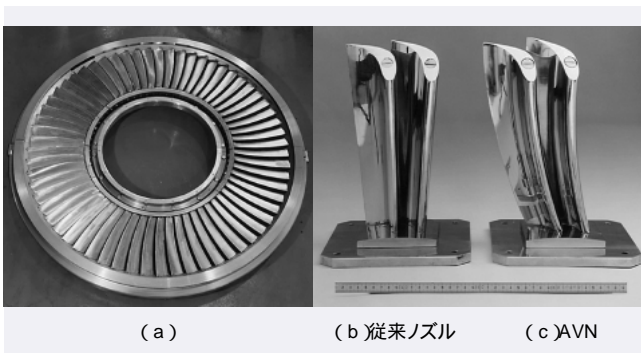


図9 静翼の外観(a)と、従来ノズル(b)およびAVN(c)の外観
AVN(Advanced Vortex Nozzle)では、二次流れによる流れの不均一性を緩和して、効率向上を図った三次元スタッキングノズルを採用した。

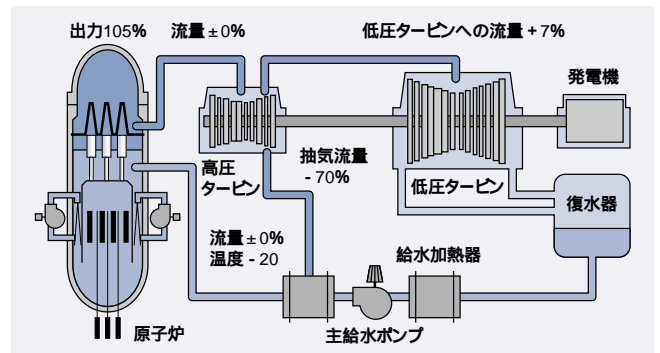


図10 熱バランスシフト法適用時の熱バランスの例
給水温度を低下させることで、発電量の増加と燃料経済性を向上させた熱バランスシフトの例を示す。

量を出力向上前と同程度に抑制する。これにより、炉内機器や高圧系機器への負荷を軽減する。給水温度は高圧タービンからの抽気量を減らすことで低下させ、主蒸気流量を出力向上前と同程度に抑制するとともに、減少させた抽気を低圧タービンに流すことで発電量を増加させる。

給水温度の低下により、炉心の熱的余裕の増加、燃料の有効燃焼が可能であり、熱効率は若干低下するものの、発電量の増加と燃料経済性の向上により、総合的にはプラントの経済性を向上させることができる。

4.2 高効率機械による定期点検短縮

これまで、定期点検期間の短縮を目的として、ロボット技術を応用した種々の遠隔自動装置を提供してきた。

燃料取替機は、さらに高速化することによって定期点検期間の短縮に直接的に寄与すると期待される。取扱い対象物となる燃料などの健全性確保は必須であるが、高性能で信頼性が高く、かつ快適なヒューマンマシンインタフェースを持つ製品の開発を進めている。

5 作業従事者の受ける線量の低減技術

作業従事者の受ける線量を少なくするために、(1)放射線源の低減、(2)点検作業方法の高度化、(3)遮へいの設置などによる作業環境の改善が行われてきた。近年はシュラウドの取替やPLR配管の取替工事に先立ち、化学除染が適用されている。化学除染は、配管皮膜に取り込まれた放射性物質を化学的に溶解除去するもので、HOP(Hydrazine Oxalic Acid and Potassium Permanganate)法を数多く適用して、作業従事者の受ける線量低減に大きく寄与してきた。

一方、化学除染後に原子力発電所を運転すると、新たに放射性物質が配管皮膜に取り込まれるため、継続的に低線量状態を維持するためには、配管皮膜への放射性物質の取り込みを抑制することが重要である。日立製作所は、水素注入の開始時期を調整して、配管表面に緻密な酸化皮膜を生成するプレフィリング処理を開発し、適用している。ABWR(Advanced Boiling Water Reactor:改良型沸騰水型原子炉)では、CUW(Reactor Water Clean-up System:原子炉冷却材浄化系)とRHR(Residual Heat Removal:残留熱除去)系の炭素鋼配管への放射性物質付着の抑制が重要である。CUW系では、プラントの運転開始前に弱アルカリに調整した高温の炉水で酸化処理をするアルカリプレフィリング法を、RHR系では、復水器をヒートシンクとする復水器の冷却運転温度範囲を拡大し、RHR系の運転開始温度を低下させるLT-SHQ(Lower Temperature RHR

Shutdown Cooling)法を適用している。

放射性物質の付着抑制だけでなく、線源となるコバルトの溶出抑制も重要である。3.5節で述べたHHVは、コバルト溶出量が従来の弁座材の約 $\frac{1}{10}$ (BWR給水条件下)と非常に少なく、放射線源の低減に大きく寄与できる。

6 おわりに

ここでは、原子力発電所の高度保全技術について述べた。

日立製作所は、各電力会社などの協力を得て、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目指して、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) 大塚, 外: 軽水炉増出力システム・機器の要素技術開発(1) 熱バランスシフト増出力法の提案, 日本原子力学会2005年春の大会, D12(2005)
- 2) 木藤, 外: 軽水炉増出力システム・機器の要素技術開発(2) 熱バランスシフト増出力向上法を適用した炉心の特性評価, 日本原子力学会2005年秋の大会, E9(2005)
- 3) 清時, 外: 高性能弁「日立ハイパーバルブ(HHV)」, 日立評論, 86, 2, 205-208(2004.2)

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, 日立製作所電力グループ 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組とに従事
日本原子力学会会員
E-mail:motoaki.sakashita.tc@hitachi.com



柴下 直昭

1980年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所 タービン設計部 所属
現在, 蒸気およびガスタービン本体の設計に従事
日本機械学会会員
E-mail:naoaki.shibashita.av@hitachi.com



松田 将省

1979年日立製作所入社, 電力グループ 電力・電機開発研究所 企画室 所属
現在, 発電システム, 社会・産業インフラの研究開発企画に従事
工学博士
日本原子力学会会員
E-mail:masami.matsuda.qv@hitachi.com



荒木 憲司

1984年日立製作所入社, 日立研究所 予防保全システムプロジェクト 所属
現在, 建設プラントの設計・建設, 既設プラントの予防保全システムの研究開発に従事
日本原子力学会会員, 日本建築学会会員
E-mail:karaki@gm.hrl.hitachi.co.jp