

# 原子力発電プラントの性能向上と寿命延長

Performance Enhancement and Life Extension Technologies for Nuclear Power Plants

大久保 修 浅野 直樹 藪 智彦

■ OKUBO Osamu ■ ASANO Naoki ■ YABU Tomohiko

国内では運転開始後30年を超える原子力発電プラントが増加しており、また地球温暖化対策の観点からも、既存の原子力発電プラントの信頼性や経済性の向上と寿命延長が重要な課題となっている。

この課題に対処するため東芝は、長期間の運転に伴う経年劣化の解消と経済性向上を実現するタービン設備の性能向上技術及び、狭あい部が多く補修が困難な原子炉内部に対してはレーザーを応用した保全技術、電源系統の再構築と老朽設備更新により電源強化を実現する電源系統のリフレッシュ技術を開発し、実機への適用を進めている。

About half of the nuclear power plants in Japan have been operating for more than 30 years. There is consequently an increased need for improvements in reliability and profitability as well as lifetime extension of existing nuclear power plants as a countermeasure against global warming.

As a solution to these issues, Toshiba has developed the following technologies for existing nuclear power plants: (1) a performance-enhancing technology for steam turbines to prevent degradation due to aging, (2) various laser-based maintenance and repair technologies for inside reactor vessels, and (3) technologies to enhance power supply systems by reconstructing the entire system and renewing aging facilities.

## 1 まえがき

国内で運転している原子力発電プラントは54基あり、運転を開始してから30年を経過したプラントが増加している。地球温暖化の観点からも既存の原子力発電プラントの安定運転はますますその重要性を増してきている。また、既存の発電所は60年以上の運転を目指して寿命の延長が計画されており、経年劣化対策や検査補修の困難な部位の解消など、信頼性を向上させる技術の開発と実機への適用が必要である。

ここでは、タービン設備の性能向上技術、レーザーを応用した原子炉内部の保全技術、及び電源強化を実現する電源系統のリフレッシュ技術について述べる。

## 2 タービン設備の性能向上技術

高い稼働率と信頼性向上を確保しつつ経済性向上をも実現する手段に、タービン設備の性能向上技術がある。

原子力発電プラントのタービン設備では、内部を流動する蒸気が液滴を含んでいる。このため低圧タービンの内部ケーシングなどは、液滴による浸食で経年的に劣化が発生しており、定期的な点検と補修を要するだけでなく、劣化の進展によっては取替えが必要になる。

そこで、耐食性の高い材料を採用し浸食を低減することで、信頼性向上と寿命延長を実現することが可能である。

また、既存のタービン設備には供用開始から長期間を経たものも多く、その間に開発した高性能化技術を適用することに

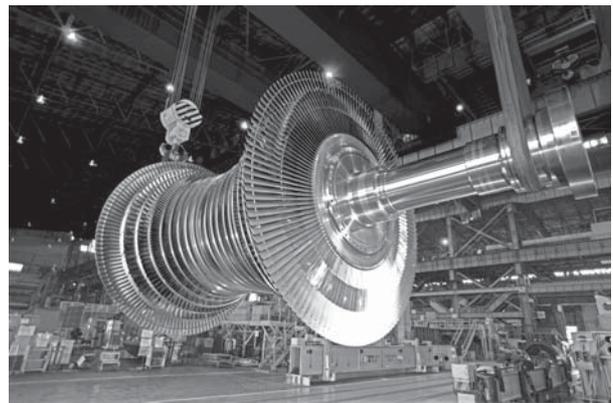


図1. 1,100 MW向け高性能タービンローター—性能向上技術を適用した1,100 MW用の低圧タービンローターである。

High-performance low-pressure turbine

より蒸気タービンの性能改善が可能である。例えば3次元形状の翼設計により高いエネルギー変換効率を得る技術や、回転部と静止部との間げきの形状を最適化してタービン内部の漏れ蒸気を低減する技術、低圧タービンに既設よりも長い最終段翼を適用して蒸気タービンの排気損失を低減するなどの性能向上技術を適用することで、高性能化することができる。

東芝はこれらのタービン高性能化技術を適用して、定格電気出力784 MW及び1,100 MW原子力発電プラントで、原子炉の熱出力を変えずに、それぞれ約5%の電気出力増加を実現した(図1)。

蒸気タービンの排気を凝縮する復水器の場合には、冷却に使用する海水の温度が夏場に高くなるため、復水器内部の真空度が低下して蒸気タービンの性能低下、及び電気出力の低下を招く。そこで改良した伝熱管配列設計を適用することで、海水温度が高い夏場の真空度低下を抑制し、タービン性能を向上できる。

当社は、1,100 MW 発電プラントでこの高性能な伝熱管配列設計による改造を行い、夏場の電気出力約1%の改善を達成した。

また、一部の発電プラントでは復水器の伝熱管に黄銅管を採用しており、酸化皮膜形成のための鉄イオン注入による伝熱性能低下や、酸化皮膜損傷による海水漏えい、閉止栓増大による伝熱性能低下を経験している。

伝熱管素材にチタンを採用した当社製復水器では、海水の無漏えい運転を30年以上にわたり継続しており、高い設計製造技術が海水漏えいの防止を可能にしている。

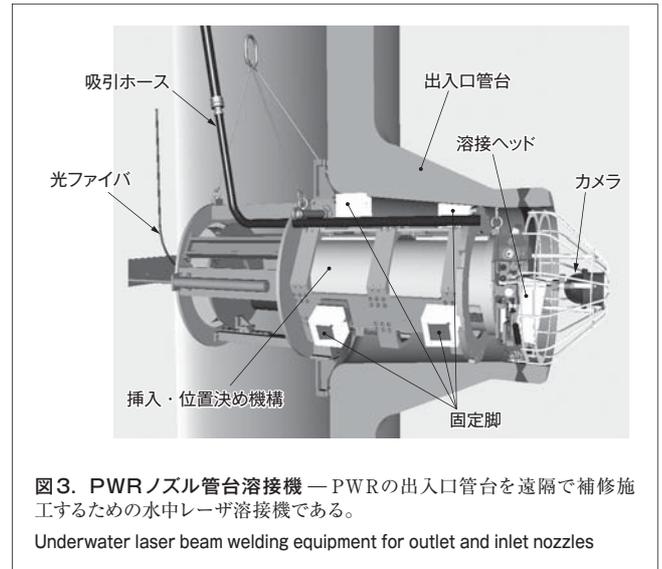
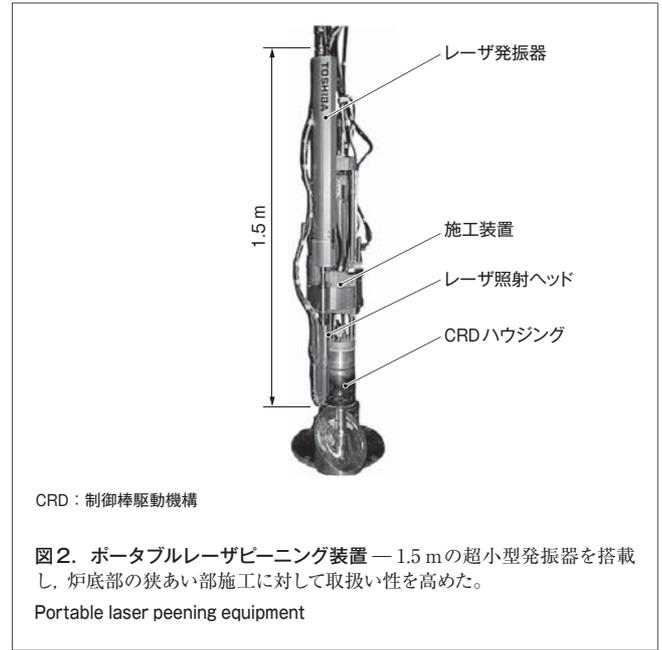
### 3 レーザを応用した原子炉内保全技術

原子炉に設置されている炉内構造物は、材質によっては炉水環境中で溶接部に応力腐食割れ (SCC) を生じることがよく知られている。既設の発電プラントに対して寿命延長などを目的とした保全を行うには、放射線の遮へいを考えて水中遠隔で施工できる技術が必要である。SCCは、材質、環境と応力が重畳したときに発生する。溶接部の場合は引張残留応力がSCC発生の要因であり、この残留応力の改善には部材表面への圧縮応力付与が有効である。レーザーピーニングは、レーザー照射で高圧プラズマを発生させて圧縮応力を与える方法であり、振動などで周囲に影響を与えることなく炉内の狭い部位にも安定した施工が可能である。

当社は、このレーザーピーニングを1999年に沸騰水型原子炉 (BWR) のシュラウド溶接部に世界で初めて適用して以来、炉底部や加圧水型原子炉 (PWR) のノズル管台の溶接部への施工を行い実績を積み重ねてきた。更に工事期間の短縮や機材の簡素化にも対応できるポータブルレーザーピーニング装置を開発し (図2)、国内外を問わず適用拡大を推進している。

SCCにより溶接部にひび割れが生じた場合、ひび割れの除去には大規模工事が必要になる。一方で、放射線環境下の中での溶接補修は非常に困難で、限られた機器に対してダイバーによる手動溶接が実施されてきた。

当社は、レーザー光をシールドガスで覆って局部的に気中空間を設けることで、遠隔自動で溶接する水中レーザー溶接を開発し、2006年にBWRのジェットポンプ計装管補修に世界で初めて適用した。その後はPWRのノズル管台溶接部に適用できる水中レーザー溶接機 (図3) の実用化試験を完了し、1年後の実機適用を目指してウェスティングハウス社と共同で補修工法を確立した。



SCCによるひび割れが溶接部近傍に生じた場合、その深さを検知するのに圧電素子を用いた超音波探傷が一般的であるが、狭い部分への適用は難しい場合がある。

当社は、レーザー照射で材料中に生成する超音波を活用した探傷法を開発し、難しいとされてきたPWRの炉底部にある炉内計装筒 (内径9.5 mm) に適用できる小型探傷ヘッドを実用化した (図4)。これは、深さ0.1 mmのひび割れの検知が可能で、深さ0.5 mm以上では0.2 mmの精度を持ち、2004年に実際の発電所で世界初のレーザー探傷に成功した。

レーザー超音波探傷法は、原子力発電プラントだけでなく、航空機や鉄鋼などの一般産業にも適用の拡大が期待でき、今後その実現に向けて取り組んでいく計画である。

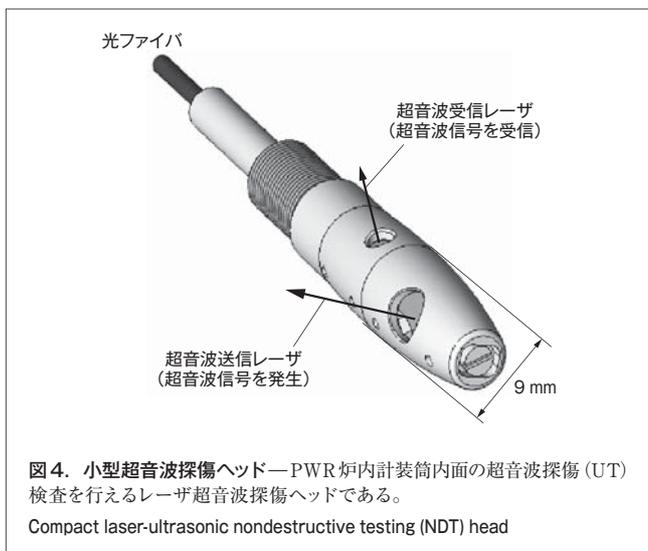


図4. 小型超音波探傷ヘッド—PWR炉内計装筒内面の超音波探傷 (UT) 検査を行えるレーザー超音波探傷ヘッドである。

Compact laser-ultrasonic nondestructive testing (NDT) head

## 4 電源系統のリフレッシュ技術

原子力発電プラントの高経年化設備の対策、稼働率の向上、及び運転期間延長を実現するために、電気設備側でも施策が必要になっている。そのための施策として、送・受電系統、発電系統及び高圧所内系統の電源主幹系統全体を対象に、電源系統の再構築と設備更新を行うことにより、老朽設備の信頼性と耐力の向上、電源の連携強化、及び耐震・耐火性の向上を図ることが有効である。

電源系統リフレッシュ技術は、長期的な更新計画の策定により、定期検査期間とその端境期の発電プラント運転中に電源システムの機能を維持しつつこの電源強化を効率的に実現する。

電源系統の再構築の例としては、受変電設備の増容量化、及び発電所間の母線連絡機能の強化がある。設備更新の例としては、開閉所機器のガス絶縁開閉装置 (GIS) 化、油浸紙絶縁 (OF) ケーブルの架橋ポリエチレン絶縁ビニルシース (CV) 化、油入変圧器の更新、高圧ケーブルの更新、高圧閉鎖配電盤 (M/C) マグネブラスト遮断器 (MBB) の真空遮断器 (VCB) 化更新、及び原子炉格納容器のケーブルペネトレーション (電気配線貫通部) 更新がある (図5)。これら電源系統の構成要素を電源システム全体との調和を保って部分更新を進めていくことで、定期検査期間を延長することなく既設の所内電源系統全体をリフレッシュできる。

また、ケーブル更新の工期短縮を実現するため、ケーブル探査技術並びに延焼防止剤はく離技術を開発した。ケーブルペネトレーション更新に対しては、干渉物の削減による工期短縮と放射性廃棄物の削減を目的に、3分割構造の現地組立型ケーブルペネトレーションを開発した。

これらの電源系統リフレッシュ技術を適用することにより、原子力発電プラントの高経年化に向けて、長期の安定運転を可能にし、更なる高い信頼性を実現することができる。

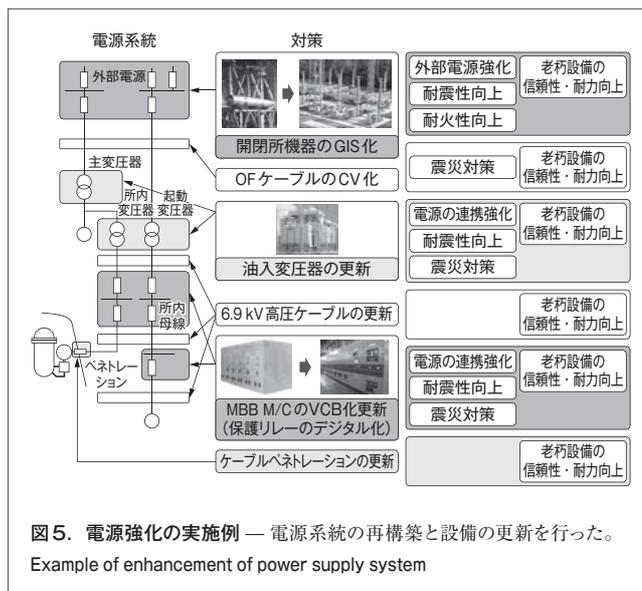


図5. 電源強化の実施例 — 電源系統の再構築と設備の更新を行った。  
Example of enhancement of power supply system

## 5 あとがき

発電由来の二酸化炭素発生を抑制して地球温暖化防止に貢献できる原子力発電プラントの重要性がますます増してきている。その中で性能向上、寿命延長、及び信頼性向上を支える技術は、既存の原子力発電プラントの価値を高めるために重要な役割を果たす。

当社は、タービン設備の性能向上技術、レーザーを応用した原子炉内部の保全技術、及び電源強化を実現する電源系統のリフレッシュ技術を開発し、実機への適用を推進してきた。今後も原子力発電プラントの価値向上を目指して、これらの技術開発と適用を推し進めていく。



大久保 修 OKUBO Osamu

電力システム社 原子力事業部 原子力タービンシステム設計部長。原子力タービンシステム設計に従事。日本機械学会会員。Nuclear Energy Systems & Services Div.



浅野 直樹 ASANO Naoki

電力システム社 原子力事業部 原子力電気設計部長。原子力発電所電気システムのエンジニアリング業務に従事。電気学会、火力原子力発電技術協会会員。Nuclear Energy Systems & Services Div.



藪 智彦 YABU Tomohiko

電力システム社 京浜事業所 原子炉機器部長。原子炉機器の技術開発・製造に従事。日本原子力学会会員。Keihin Product Operations