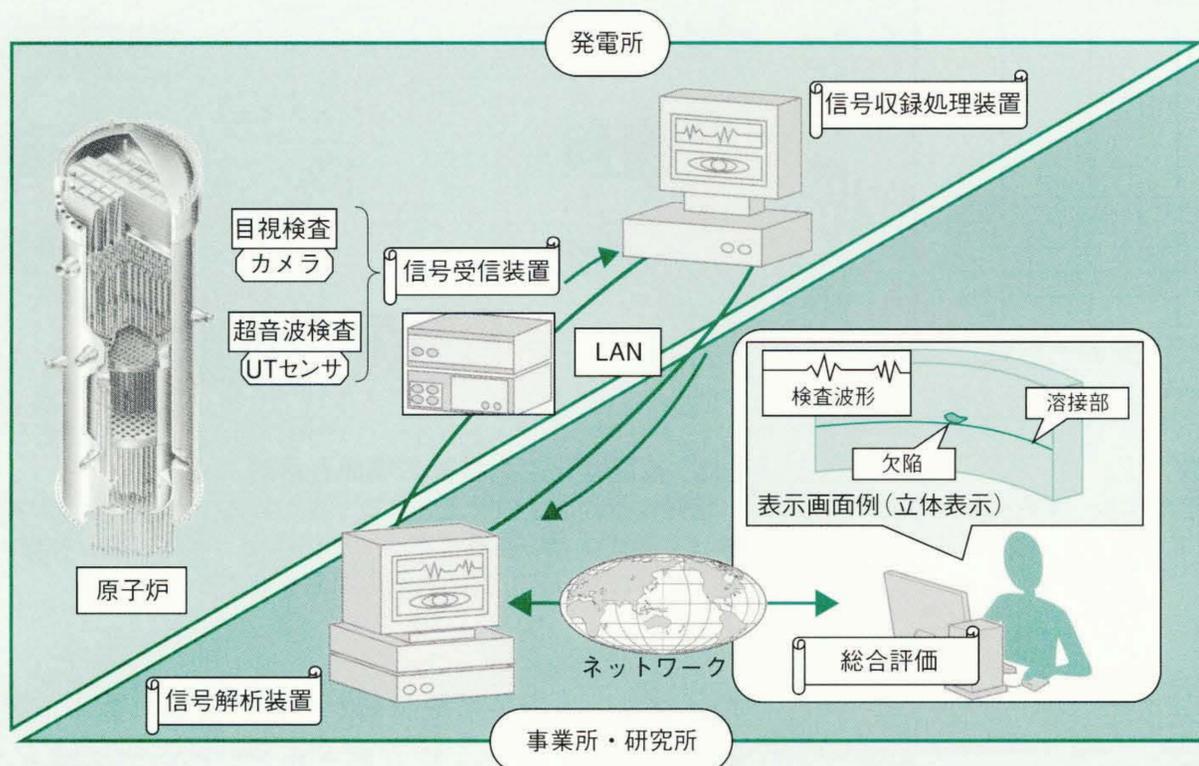


原子力発電プラントの高経年化対応技術

Plant Life Management and Maintenance Technologies for Nuclear Power Plants

池上 司 *Tsukasa Ikegami*
青木昌隆 *Masataka Aoki*
志村孝夫 *Takao Shimura*

貝森公大 *Kimihiko Kaimori*
小池正浩 *Masahiro Koike*



注：略語説明
UT (Ultrasonic Test ; 超音波探傷法)

原子力発電プラント総合点検検査システムの概要

日立製作所は、各種非破壊検査によって構造材料と機器の健全性を総合的に点検検査し、ホログラフィーなどを利用して検査結果を立体的に表示することにより、これらを評価できるシステムを開発している。

将来は発電所と事業所や研究所をネットワークで結び、情報を共有化する遠隔検査評価システムの開発を目指している。

わが国のエネルギー源として重要な位置を占め、電力使用量の約三分の一を供給している原子力発電では、現在、電力事業の規制緩和の中で、いっそうの経済性の向上が求められている。また、原子力発電の新規計画プラントの着工が後倒しとなる中で、既設プラントを長期にわたって運転し、その安定性を確保することが重要となっている。このため、経済産業省、電力会社、学識経験者およびプラントメーカーが一体となり、高経年化対応の技術開発を推進している。

日立製作所は、このような状況の下で、安全性と信頼性を確保しながら既設原子力プラントの運転を長期にわたって継続するために、点検検査、補修および保全の技術開発を進めてきている。今後はこれらの技術を組み合わせた点検検査と保全計画を提案し、プラントライフ全体から見たトータルコスト ミニマムな保全計画の推進に取り組んでいく。

1 はじめに

わが国の1999年度の全発電電力量の35%を占め、電力供給源として重要な位置にある原子力発電では、ベースロードとしての経済性の向上が求められている。電力事業の環境が大きく変化している中で、既設プラントの保全計画では、(1) 安定した運転継続、(2) 運転保守の経済性の追求、および(3) 設備の信頼性の確保が重要な課題である。

運転開始から30年を迎える原子力発電所については、運転を継続するために高経年化の技術評価を行い、それに基づいた今後の保全計画を立案する。保全計画では、経済性と信頼性を考慮し、高経年化プラントの実状に合

うように計画することが求められる。その後は、プラントの点検を適切に実施し、必要な補修や予防保全を計画的に行うことが重要となる。

ここでは、日立製作所が取り組んでいる各プラントの実状に合った高経年化対応のプラント保全計画の構築、保全に必要な機器・材料の経年変化メカニズムの把握と寿命評価、適切な点検検査、および補修・取り替えなどの技術について述べる。

2 高経年化プラントの課題と対応

電力自由化に伴い、高経年化プラントでも経済性の向上が求められており、その条件下で安全かつ安定した発電を行うことが課題である。現在わが国で運転中の

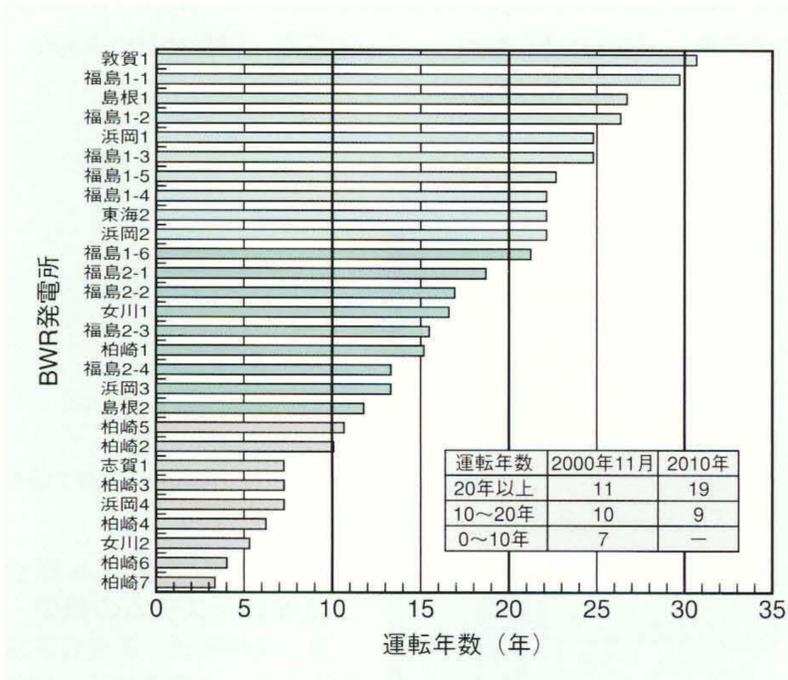
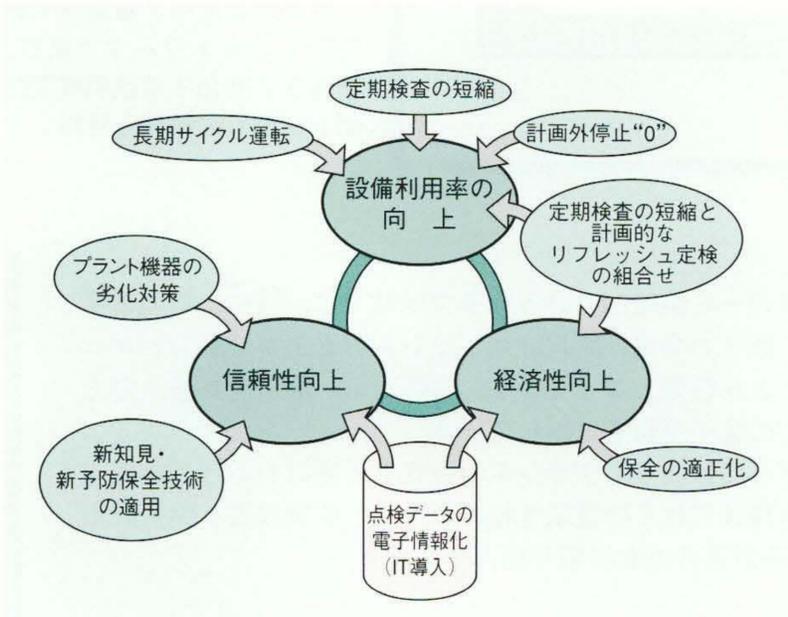


図1 わが国のBWR発電所の運転年数

現在運転中のわが国のBWR発電所のうち、運転開始から20年経過したプラントは2000年11月現在で11基あり、2010年には19基とほぼ倍増する。



注：略語説明 IT (Information Technology)

図2 プラント保全の課題と対応

計画外停止のない信頼性の高い運転や定期検査の短縮実現に加え、IT導入による高効率化などによって合理性を維持しながら、設備利用率の向上、ひいては経済性の向上を図る。

BWR(沸騰水型原子炉)のうち運転年数が20年以上となるプラントは2000年11月現在で11基あり、2010年には19基とほぼ倍増する(図1参照)。原子力発電の経済性を確保するためには、これら高経年化プラントをさらに長期にわたって安定して運転する技術が不可欠である。

高経年化プラント保全の課題とその対応を図2に示す。日立製作所は、プラントの健全性と設備利用率の向上のため、機器劣化対策や予防保全の新技术の開発、ITの導入による点検データの電子化などに取り組んでいる。ま

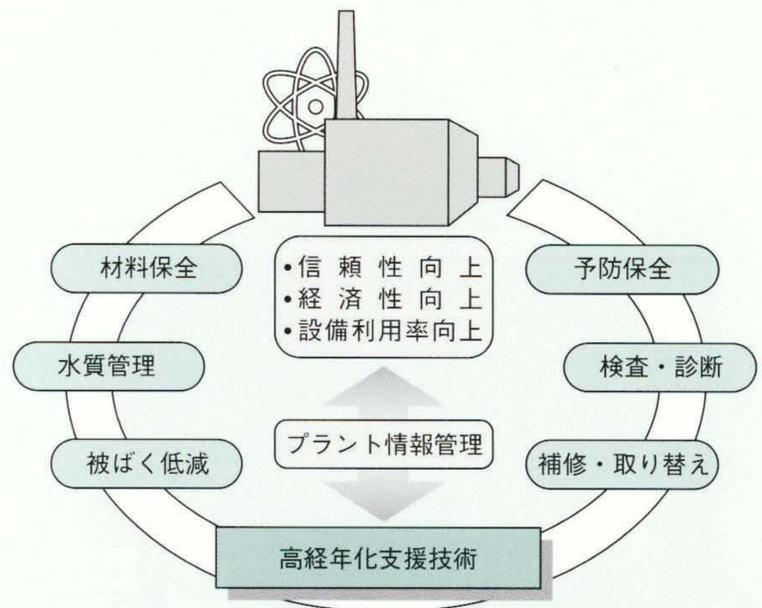


図3 高経年化対応技術の構成と目的

信頼性や経済性の向上を実現するために、材料保全、水質管理、被ばく低減などの基盤技術や、予防保全、点検検査、補修・取り替えなどの高経年化対応技術の開発を進めている。

た、プラントの各系統設備から電気設備に至る主要機器の点検検査、補修・取り替えなどについて必要となる、プラントライフのトータルコスト ミニマムとなる保全計画では、材料保全、水質管理や被ばく低減などの基盤技術、予防保全、点検検査や補修・取り替えなどの高経年化対応技術の開発を進めている(図3参照)。

特に、原子炉内は放射線当量率が高く、狭隘(あい)な場所であるため、アクセス性が悪く、人が近づくことができない。その結果、点検検査や補修・取り替えなどに多大な時間と費用を要している。

このため、原子炉内の保全には、以下のような高度な技術開発が必要であり、日立製作所は、これらを組み合わせることにより、合理的な保全計画を推進している。

- (1) 安定運転維持のための点検検査・評価技術
- (2) 炉内加工・溶接などの補修技術
- (3) 水質環境改善や残留応力改善などの予防保全技術
- (4) 損傷リスクの低減を図るための部分取り替えと全体取り替え技術

3 点検検査の技術開発

原子力発電プラントで60年以上の運転を実現するためには、信頼性を確保し、長期運転時の機器の健全性を評価、確認することが必要である。高経年化プラントの点検検査と診断評価では、(1) 材料の劣化評価、(2) 点検検査・診断の信頼性向上、(3) 遠隔操作の装置化などのための技術が求められる。特に、原子炉の炉内構造物を

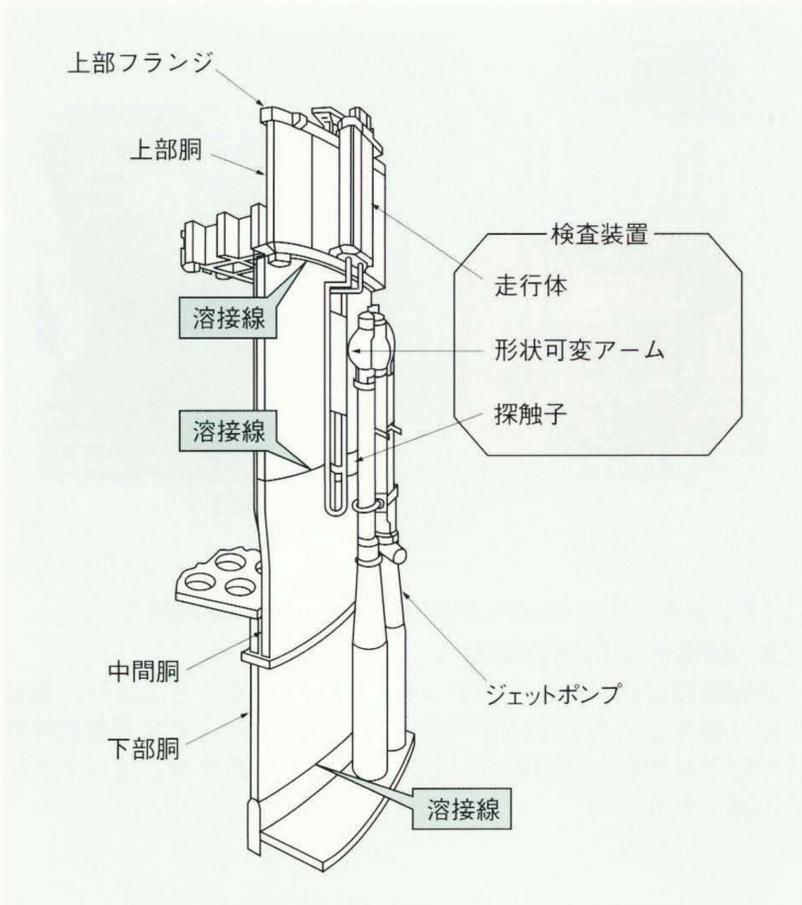


図4 シュラウド検査装置の概略
遠隔操作による装置の走行、検査およびデータ処理を自動化することにより、溶接部の検査精度の向上を図っている。

対象とした点検検査では、狭隘部にアクセスする遠隔操作技術と機器の健全性評価が必要である。炉内点検検査関連の技術開発の事例について以下に述べる。

3.1 シュラウド検査装置

主要炉内構造物の一つとされているシュラウド溶接部の健全性を遠隔操作によって正確に検査できる非破壊検査装置を開発した¹⁾。この装置は、シュラウド上部フランジをレールとして周方向に移動するシュラウド検査装置走行体と、探触子を先端に搭載した形状可変なアームで構成している(図4参照)。シュラウドとジェットポンプとの非常に狭い部分を通過できるこの装置を用いることにより、すべてのシュラウド溶接線の検査が可能である。

3.2 小型水中ROV

原子炉内狭隘部には点検検査時に行う目視検査が困難な場所があり、これに対応するための小型〔幅200×高さ200×長さ230(mm)〕水中ROV(Remotely Operated Vehicle)を開発した。この小型水中ROVにより、従来の点検作業では困難とされていた狭隘部に対する点検が可能となった。

小型水中ROV本体の構成と、これに搭載したカメラによって原子炉炉底部構造物の検査の試験を実施している状況を図5に示す。

3.3 超音波ホログラフィーによる欠陥評価技術

構造物の健全性を評価するためには、欠陥の大きさを精度よく測定することが必要である。このため、超音波ホログラフィーを用いることにより、このような欠陥の大きさを三次元的に表示してサイジングを行う技術を開発した²⁾。この技術を適用することにより、欠陥を立体的に表示し、検査結果を精度よく評価することができる。今後、炉内検査に適用する計画である。超音波ホログラフィーによる欠陥の表示結果の例を図6に示す。

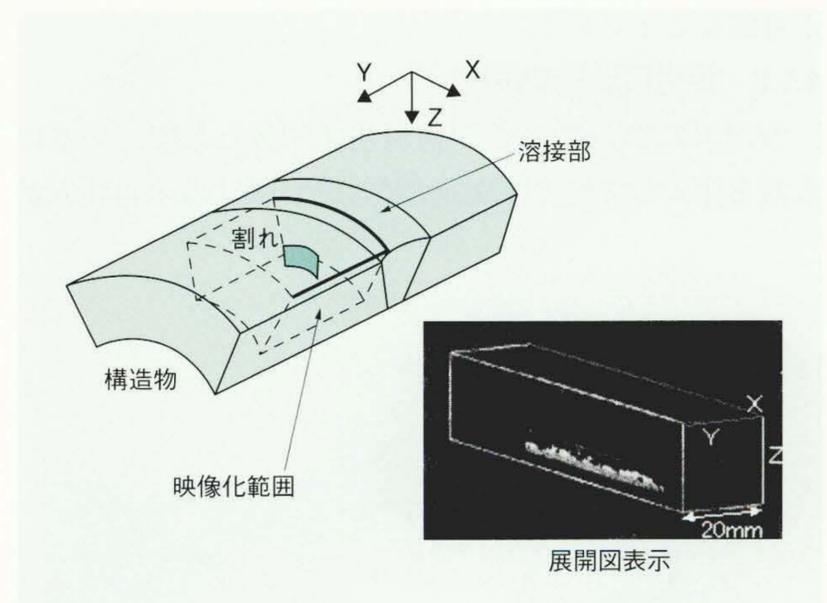
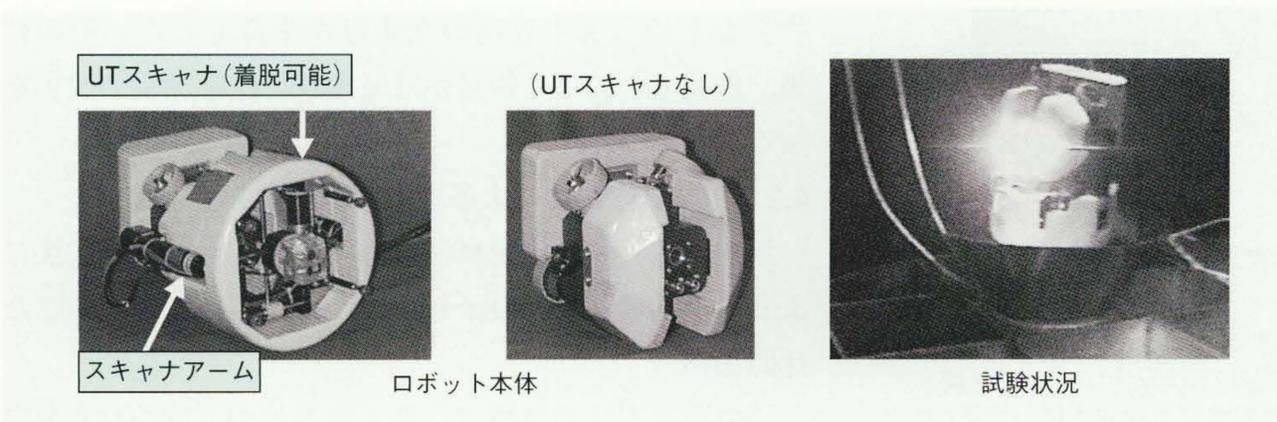


図6 疲労割れの映像例
構造物の溶接熱影響部に設けた模擬疲労割れを三次元表示した例を示す。これにより、欠陥を精度よくサイジングできるようにした。



注：略語説明
UT (Ultrasonic Test；超音波探傷法)

図5 小型水中ROVの構成と試験状況

小型水中ROVの開発により、従来点検が困難だった狭隘部の目視試験を可能とした。また、着脱式のUTスキャナの搭載もできる。

4 予防保全と補修・取り替え技術

運転プラントの信頼性や経済性を確保するためには、点検検査の結果により、適切な補修・取り替えなどの予防保全を実施することが必要である。特に、炉内の予防保全技術や補修・取り替え技術の開発事例について以下に述べる。

4.1 予防保全技術

4.1.1 WJP技術

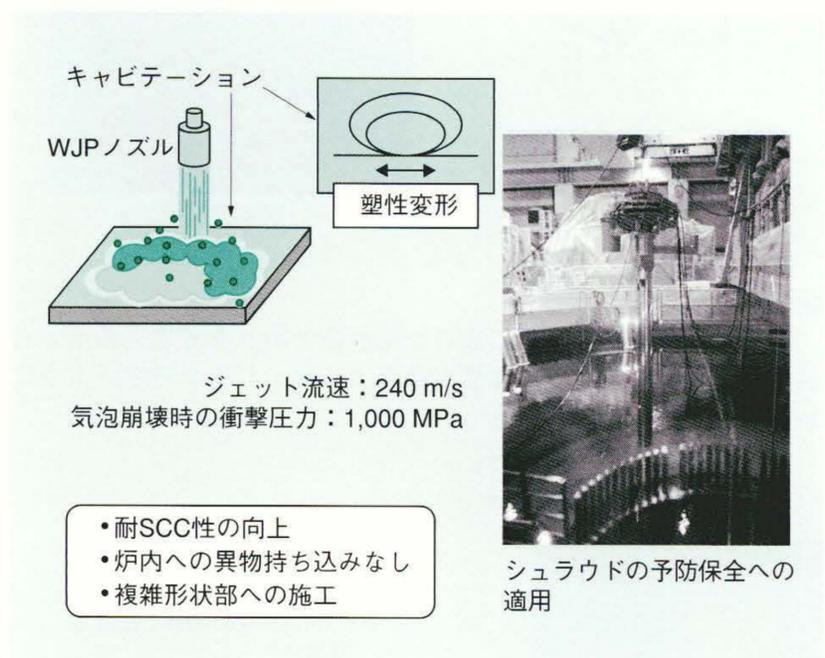
高圧水を噴射してステンレス鋼など金属材料表面の残留応力を緩和させるWJP(Water-Jet Peening)技術を開発し、国内のBWR発電所の炉内構造物に世界で初めて適用した。

WJPは、高圧水を水中で噴射したときに発生するキャビテーション気泡を材料の表面に当て、気泡が崩壊する際に生じる数千気圧の衝撃力によって金属表面に圧縮残留応力を付与し、応力腐食割れを防止する技術である³⁾(図7参照)。

この技術の最大の特徴は、作動流体が水であるため炉内に異物を残す心配がなく、炉内狭隘部に対しても適用が可能なことである。

4.1.2 炉内環境緩和技術

わが国のBWRでは、炉内環境緩和策として、炉水に水素を注入して酸化性成分の濃度を低減する水素注入が

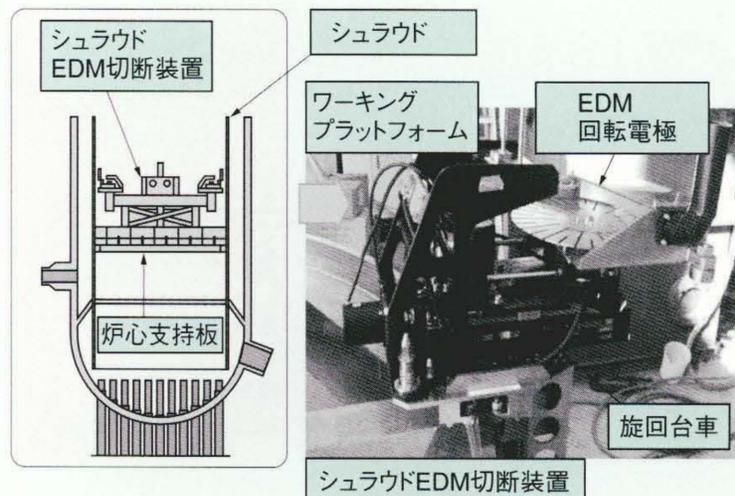


注：略語説明

SCC (Stress Corrosion Cracking；応力腐食割れ)

図7 WJP技術の概要と適用例

高圧水を水中で噴射したときに発生するキャビテーション気泡を材料表面に当て、気泡が崩壊する際に生じる衝撃力によって金属材料表面に圧縮残留応力を付与し、応力腐食割れ損傷を防止する。



注：略語説明 EDM (Electric Discharge Machining；放電加工)

図8 放電加工切断の概要

回転電極に銀-タンゲステン材料を採用することにより、電極を取り替える回数の低減が可能となった。また、ガス状放射性物質や粒子状放射性物質の発生量がプラズマ切断技術と比べて大幅に低減できる。

1996年から採用されている。日立製作所は、緩和技術の効果を評価するため、水質解析コードや腐食電位測定技術の開発を進めてきた。

最近、海外のプラントでは、水素注入の効果を拡大するために、貴金属注入技術が採用されている。この技術では、貴金属の触媒作用を利用し、少量の水素注入で材料の腐食電位を効果的に低下させることにより、炉内構造物の応力腐食割れの発生と割れ進展を防止することができる。現在、国内のプラントへの適用性評価のための研究を電力会社と共同で実施し、適用を計画している。

4.2 補修・取り替え技術

4.2.1 炉内構造物切断技術

放射化された炉内構造物を遠隔水中で切断するために、長寿命電極を採用した放電加工技術を開発し、炉心シュラウド取り替え工事に適用した。

この技術では、回転電極に長寿命の銀-タンゲステン材料を採用した(図8参照)。これにより、電極取り替え回数を減らし、また、ガス状放射性物質や粒子状放射性物質などの二次生成物の発生量を少なくした。その結果、作業員の被ばく線量が低減され、作業環境の改善を図ることができた。

4.2.2 局部乾式法による水中TIG溶接技術

炉内構造物の水中補修溶接方法として、局部乾式法による水中TIG(Tungsten Inert Gas)溶接技術を開発した(図9参照)。

この溶接方法の特徴は、低入熱溶接が可能なパルス自

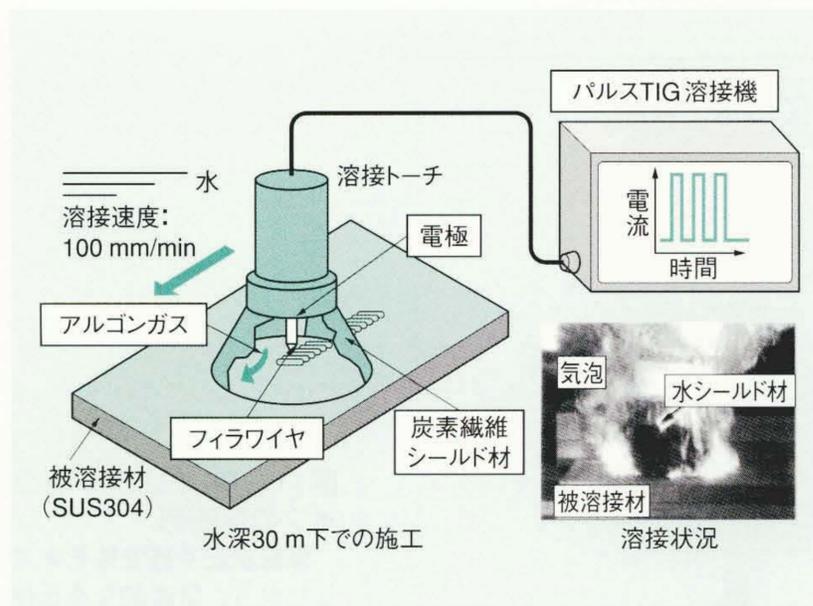


図9 局部乾式法による水中TIG溶接技術の概要と溶接状況
高放射能の部位の欠陥部を溶接によって補修する方法として、局部乾式法による水中TIG溶接技術を開発した。

動TIGを採用したこと、溶接対象部に水シールド材として炭素繊維を設置し、その内部にシールドガスを充満させることによって局部気中環境を作ったことである。現在までに、炉底部水深30 m相当の環境下での平板溶接試験を実施しており、実機施工条件を確認している。今後は、複雑な開先形状への補修溶接などへの適用を計画している。

4.2.3 RVR技術

RVR(Reactor Pressure Vessel Replacement)技術は、RPV(原子力压力容器)と炉内構造物を一体で取り替える技術である。この技術では、RPVと炉内構造物を新たに製作することから、応力腐食割れのポテンシャルを低減でき、短工期での工事が実現できるとの評価から、60年以上のプラントライフを考慮した場合の合理的な工法として注目されている。

RVRでは、大型移動式クレーンを使用し、過去の大型モジュール建設工事などの経験を生かすことにより、安全でかつ工事期間の短縮が図れ、経済的に優れた工法の実現が期待できる(図10参照)。

現在、国内プラントへの適用性評価のための研究を電力会社と共同で実施している。

4.2.4 実規模試験による予防保全技術の実証

予防保全では、必要な各種点検検査・補修用装置や工法の開発について実規模試験を行い、装置・工法の信頼性を確認し、作業員のトレーニングを実施していくことが重要である。

このため、原子炉建屋の運転床から下部ドライウエル

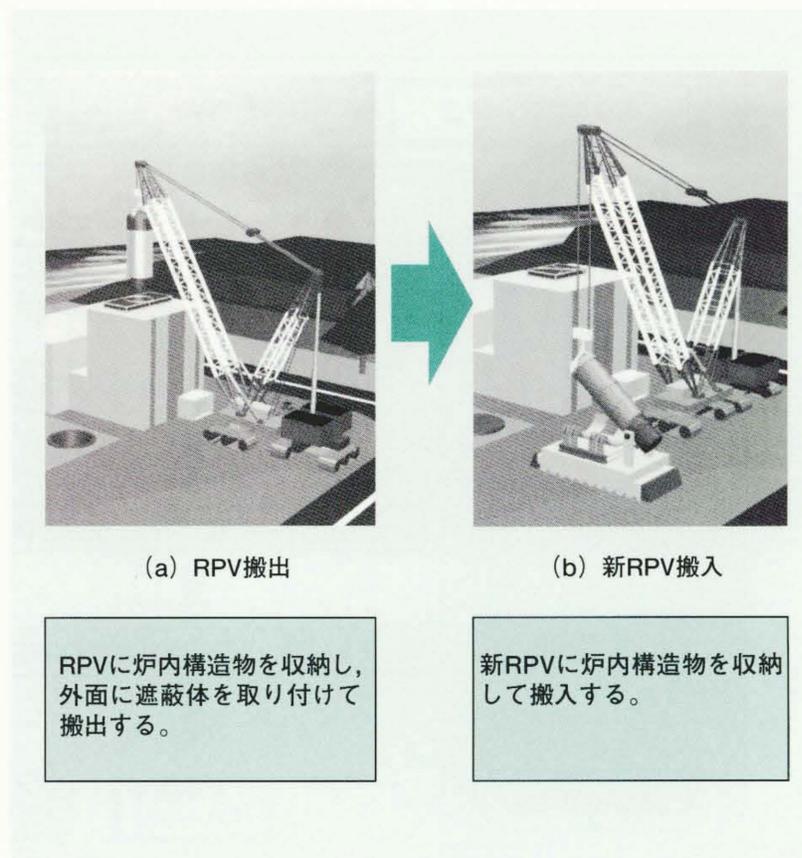


図10 原子炉压力容器取り替え技術の比較

最大つり上げ荷重が1,000~1,700 tの大型移動式クレーンを利用し、短工期を目指している。

床までを実規模で模擬できるBWR予防保全技術センターを1994年に設置した。このセンターは、直径が11 m、深さが36 mの試験ピットを持っている。この設備を用いて実規模試験を行い、開発した装置の性能の確認や、作業員のトレーニングを実施している。これまでに、シュラウド取り替えや中性子束検出器ハウジング取り替え技術の実証を行い、実機への適用を図った。

今後は、現在開発中の点検検査装置、補修・取り替え装置の性能確認や実用化試験などにこの施設を利用していく。

5 長期運転のための保全計画

信頼性と経済性を確保した長期運転を実現するためには、これまで述べてきた技術や機器の寿命評価、運転実績、運転計画や新技術の適用などに基づいてプラント保全計画を立てることが必要である。

60年プラントライフの例を図11に示す。運転状況や経済性を考慮しながら計画的な点検検査・補修を実施し、その結果に基づいて水質環境改善や残留応力改善などの予防保全と、機器の取り替えを計画する。

今後は、RVRや発電プラントの機器の取り替え・改造による出力増加も視野に入れ、大規模工事と中規模工事を組み合わせた経済的なプラント保全計画を推進していく考えである。

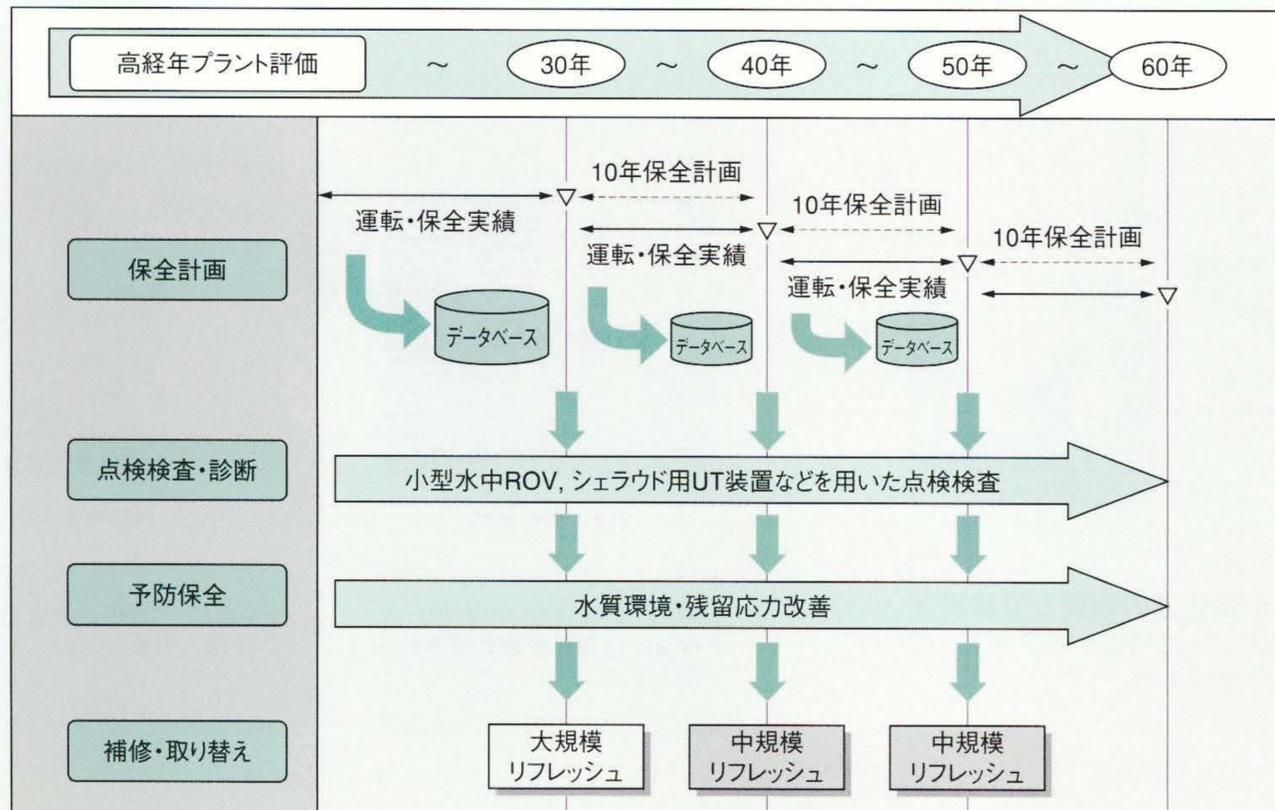


図11 60年プラントライフの計画例

運転状況や経済性を考慮しながら、計画的な点検検査、補修・取り替えおよび予防保全を実施する。補修・取り替え工事については、大規模なリフレッシュ工と、中規模リフレッシュ工事を組み合わせた、経済的なプラント保全計画を提案していく。

6 おわりに

ここでは、原子力発電プラントの高経年化対応技術について述べた。

原子力発電の高経年化対応は始まったばかりである。今後、プラントの高経年化が進む中で、安全と信頼性を維持しながら経済性にも優れたプラント保全を実現するために、電力会社をはじめ関係各機関の指導を得ながら、計画的かつ体系的な保全技術の開発と保全サービスの充実に取り組んでいく考えである。

参考文献

- 1) F. Takahashi, et al.: Development of an Ultrasonic Inspection Vehicle for BWR Core Shrouds, 14th Int. Conf. on NDE in Nuclear & Pressure Vessel Industries, 379-384 (Sept. 1996)
- 2) F. Takahashi, et al.: Sizing and Recognition of Cracks and Porosities in Weld Metals Using Acoustical Holographic Inspection, 1st Int. Conf. on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, 557-561 (Oct. 1998)
- 3) 吉村, 外: 反射噴流型ウォータージェットピーニングによる残留応力の低減, 日本機械学会材料力学部門講演会講演論文集, 469~470 (2000.10)

執筆者紹介



池上 司

1974年日立製作所入社, 電力・電機グループ 原子力事業部 日立生産本部 原子力サービス部 所属
現在, 原子力プラントの保全計画に従事
E-mail: tsukasa_ikegami @ pis. hitachi. co. jp



青木昌隆

1965年日立製作所入社, 電力・電機グループ 原子力事業部 日立生産本部 原子力サービス部 所属
現在, 原子力プラントの保全計画に従事
E-mail: masataka_aoki @ pis. hitachi. co. jp



志村孝夫

1980年日立製作所入社, 電力・電機グループ 原子力事業部 日立生産本部 原子力サービス部 所属
現在, 原子力プラントの保全計画に従事
E-mail: takao_shimura @ pis. hitachi. co. jp



貝森公大

1998年日立製作所入社, 電力・電機グループ 原子力事業部 日立生産本部 原子力サービス部 所属
現在, 原子力プラントの保全計画に従事
E-mail: kimihiro_kaimori @ pis. hitachi. co. jp



小池正浩

1982年日立製作所入社, 電力・電機グループ 電力・電機開発研究所 原子力・産業第二部 所属
現在, 非破壊検査・診断技術の研究開発に従事
日本機械学会会員, 電子情報通信学会会員, 日本非破壊検査協会会員
E-mail: masahiro_koike @ pis. hitachi. co. jp