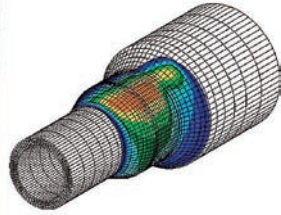
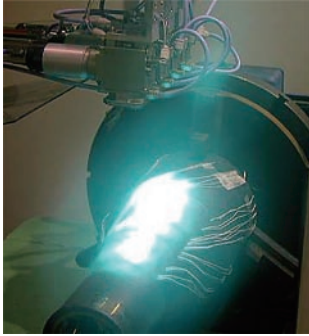


特 集 論 文



加圧水型原子炉 (PWR) の長期安定運転を支える保全技術 (応力腐食割れ対策技術)

Maintenance Technologies for SCC which Support Stable Operations of Pressurized Water Reactor Power Plants

沖村 浩司^{*1}
Koji Okimura

堀 展之^{*1}
Nobuyuki Hori

向井 正行^{*2}
Masayuki Mukai

増本 光一郎^{*3}
Koichiro Masumoto

鴨 和彦^{*4}
Kazuhiko Kamo

黒川 政秋^{*5}
Masaaki Kurokawa

日本国内では 23 基の加圧水型原子炉 (PWR) が稼働中であり、初期のものは運転開始より 30 年を経過している。設備の高経年化が進む中で、応力腐食割れなどのように運転時間に伴い顕在化する損傷が海外・国内とも PWR プラントにて確認されている。本報では応力腐食割れ対策に着目し、安全安定運転に向けた各技術として、機器の健全性を確認する検査技術、損傷を未然に防止するための劣化緩和技術、損傷に対する補修技術・取替技術など、最新の保全技術を紹介する。

1. はじめに

原子力発電所を始めとしてトラブルの未然防止は重要なテーマであり、プラントの高経年化に伴う压力容器や配管などの構成部位の余寿命診断、劣化緩和、補修も重要な課題となっている。

運転時間に伴い損傷が顕在化するものとして応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking: SCC) があり、損傷の要因として、図 1 に示す、環境、材料、応力の 3 因子の重畳によるものと考えられている。近年、加圧水型原子炉 (Pressurized Water Reactor: PWR) においても、高ニッケル合金 600 (以下 600 合金) の応力腐食割れによる損傷事例が国内外において顕在化してきている。従来の PWR プラントにおける 600 合金使用部位を図 2 に示す。PWR プラント 1 次系水環境条件下での応力腐食割れは PWSCC (Primary Water SCC) と言われ、PWSCC 感受性を有している 600 合金が加工や溶接などによる高残留応力条件下

で使用される場合に、損傷に至るものと考えられている。

長期安定運転に向け損傷・漏えいを防止するための、最新の検査技術、図 1 に示す劣化緩和としての応力改善技術・材料改善技術、補修技術の代表的な保全技術を説明する。

2. 検査技術

機器の信頼性を確実なものとするため、欠陥検出及び欠陥定量化の精度向上に向けた開発を進めている。例えば、図 3 に示す蒸気発生器伝熱管 (内径約 20 mm の小口径薄肉管が約 4000 本の管群で構成されている) では、検査時間の短縮及び微小欠陥の検出精度を向上させる精密検査を目的とし、ノイズ低減効果の高い相互誘導方式のコイルを高密度に配置したインテリジェント ECT (Eddy Current Test: 渦流探傷検査) 技術を開発・適用している。また配管溶接部に対しては、フェーズドアレイ UT (Ultrasonic Test:

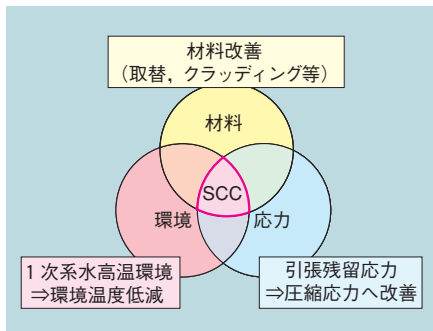


図 1 応力腐食割れの 3 因子と劣化緩和対策

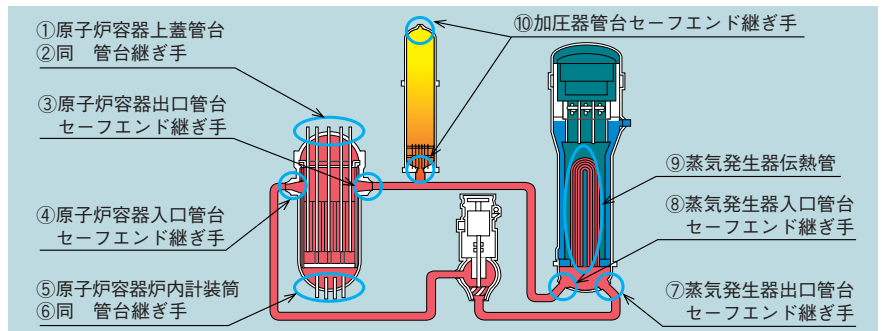


図 2 加圧水型原子炉発電プラント 1 次系耐圧バウンダリでの高ニッケル合金 600 (600 合金) 使用部位

^{*1} 神戸造船所原子力保全技術部計画課

^{*2} 神戸造船所原子力機器設計部機器設計課

^{*3} 神戸造船所品質保証部原子力サービス品質管理課

^{*4} 技術本部高砂研究所製造技術開発センター主席

^{*5} 技術本部高砂研究所電子・光技術研究室主席

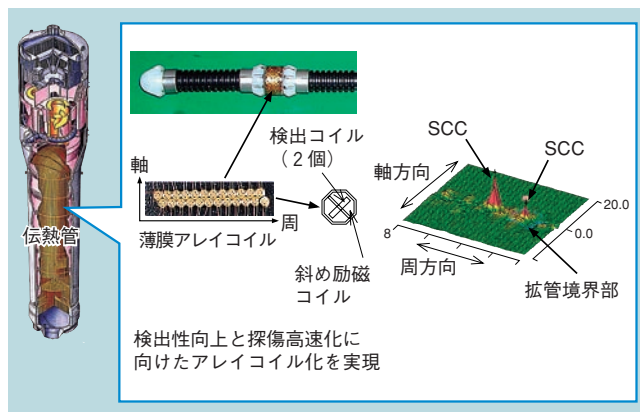


図3 蒸気発生器伝熱管検査技術
インテリジェント ECT 技術.

超音波探傷検査) 法を開発しており、これは複数の振動子を有した UT プローブにて超音波ビームの方向や焦点位置を任意に変えることで、複雑形状部位の探傷や微小欠陥の定量化精度の向上を図ることができ、これにより従来は困難であった部位についても検査が可能となると考えている。

600 合金は、原子炉容器管台セーフエンド継ぎ手(管台(ノズル)と配管を接続するための短管)などの複雑な形状や異材継ぎ手に用いられている。PWSCC に起因する劣化事象に対しては、1 次系水接液表面からの損傷発生であり、表面検査が有効な手法と考え、遠隔化・自動化を前提とした ECT について、実機適用に向け開発検証中である。図4に原子炉容器出入口管台セーフエンド継ぎ手(600 合金)に対する検査技術の一例を示す。当該溶接部に対する ECT では非常に小さなきずを識別できるめどを得ている。

また複数の検査ヘッドを搭載できるようにすることで、異なった検査手法を同時に適用できることとなり、例えば、ECT できずを検出した場合、きず深さを計

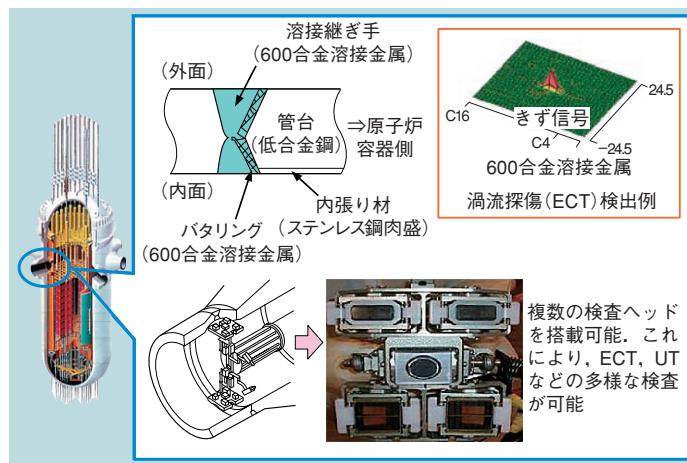


図4 溶接部に対する検査技術
原子炉容器出入口管台セーフエンド継ぎ手の例.

測する UT プローブを搭載しておくことで、欠陥定量化(きず深さの確認)も行えることとなる。

また、検出性向上は劣化緩和を行う前の機器の健全性確認(施工前検査)としてもニーズがある。施工前検査による健全性確保と劣化緩和による損傷抑制の相乗効果にて、より信頼性を増すことができると考える。

3. 応力改善技術

PWSCC 発生因子の一つである高残留応力への対策の一つとして、対象機器が施工時に気中環境の場合はショットピーニング、水中環境の場合はウォータージェットピーニングを適用し、1 次系水接液面の引張残留応力を圧縮応力に改善している。図5にこれらのピーニング技術の概要を示す。ウォータージェットピーニングではキャビテーション崩壊時の衝撃圧にて、ショットピーニングではショット材の衝突力にて、材料表面に塑性ひずみを付与することで、内表面近傍を圧縮応力に改善できることを確認している。ショット

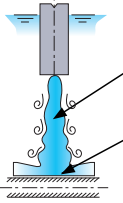
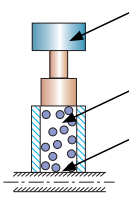
原理と特徴	ウォータージェットピーニング	超音波ショットピーニング
	 キャビテーション気泡群を伴うウォータージェット キャビテーション崩壊時の衝撃圧にて、表層面に塑性ひずみを付与	 ショット材駆動源(ピエゾ素子) 粒径の大きいショット材 ショット衝突力にて、表層面に塑性ひずみを付与
	ウォータージェットによるキャビテーション衝撃圧により材料表層面を圧縮応力に改善 ウォータージェットピーニング施工状況の一例 (原子炉容器炉内計装管管台継ぎ手) 引張残留応力場で内表面近傍を圧縮応力に改善	ショット材の衝突力により材料表層面を圧縮応力に改善  WJPノズル キャビテーションジェット

図5 ピーニングによる応力改善技術

ピーニングにおいては深い応力改善効果と異物管理の容易化などを目的に、粒径の大きいショット材を用い、ショット材の駆動源としてコンパクトで大きな力を出せるピエゾ素子による超音波振動を用いた手法での適用を計画している。

一方、配管など内表面にアクセスが困難な場合、外面からの応力改善手法が必要であり、その手法の一つとして、高出力レーザービームを外面に移動させながら照射し、外面を急速加熱することで板厚内温度差による熱膨張ひずみを用い、内面を圧縮応力に改善する手法（レーザー外面照射応力改善法）を開発している。本手法はレーザー照射による急速加熱を実現できることから、適切な条件を選定することにより内面の水冷効果を期待することなく、適用可能とする特徴を持つ。図6は管台周継ぎ手への適用例を示しており、内表面の溶接部及び溶接部近傍の高い引張残留応力を圧縮応力に改善できることを確認している。

4. 材料改善・環境遮断技術

材料を変更して1次系水接液表面に耐PWSCC性の優れた材料である高ニッケル合金TT 690（690合金）を用いる対策がある。690合金は600合金に対しクロム（Cr）量をおよそ倍量に増加させることで耐PWSCC性を向上させている。

具体的には1次系水接液表面に肉盛溶接すること、600合金を接液させないようにする環境遮断クラディングと、次節の取替による材料改善がある。

劣化緩和技術の原子炉容器出口管台セーフエンド継ぎ手（600合金）への適用例として、図7に原子炉容器ノズル溶接部へのクラディング技術を示す。流路確保や検査性確保のため、あらかじめ溝加工を行い、

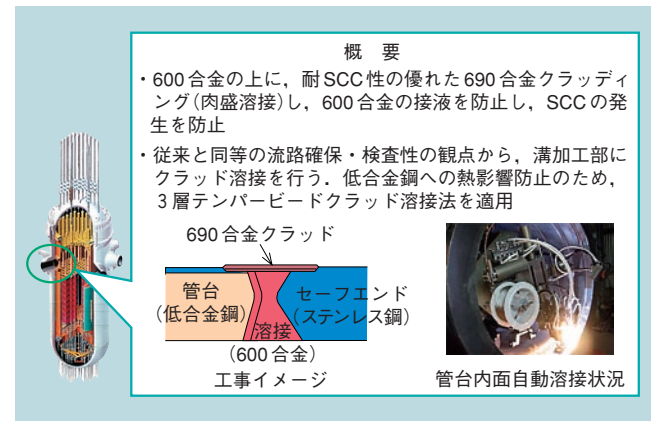


図7 環境遮断・クラディング技術
原子炉容器出口管台セーフエンド継ぎ手の例。

肉盛溶接を実施している。溶接後熱処理を不要にできる、自動溶接による3層テンパービードクラッド溶接法を開発し実機に適用している。また補修技術としても上部原子炉容器管台継ぎ手へ適用している。

5. 取替による材料改善技術

耐SCC性の優れた材料を用いて製作した機器への一体取替（上部原子炉容器取替、蒸気発生器取替、炉内構造物取替など）がある。図8に大型機器取替の一例として、炉内構造物一体取替を示す。PWRプラントの炉内構造物は取外し可能な構造であることから、一体で保管容器に収納・保管し、新しい炉内構造物に取替えている。炉内構造物一体取替は世界初であり、3つの国内PWRプラントで実施されている。

一体取替が困難な場合や万一の損傷時の補修として、部分取替（例えば管台セーフエンド継ぎ手取替など）技術も開発している。部分取替は補修だけでなく、予防保全としての材料改善手法の一つとしても計

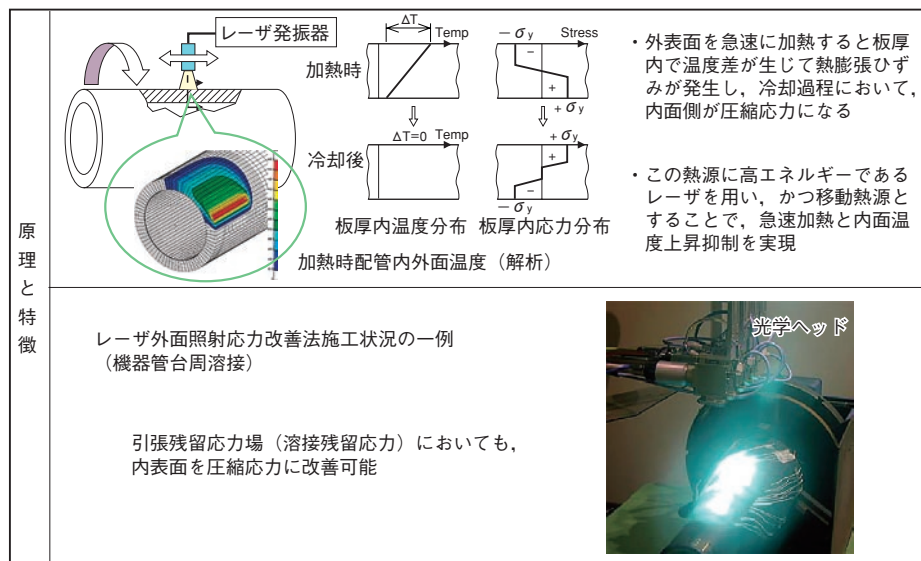


図6 レーザ外面照射による応力改善技術

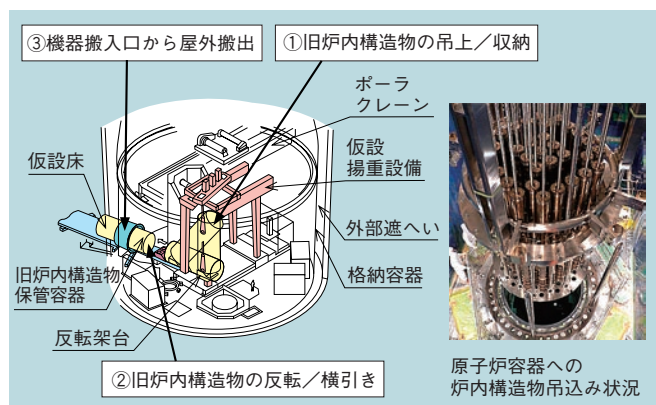


図8 大型機器取替技術
炉内構造物一体取替の例

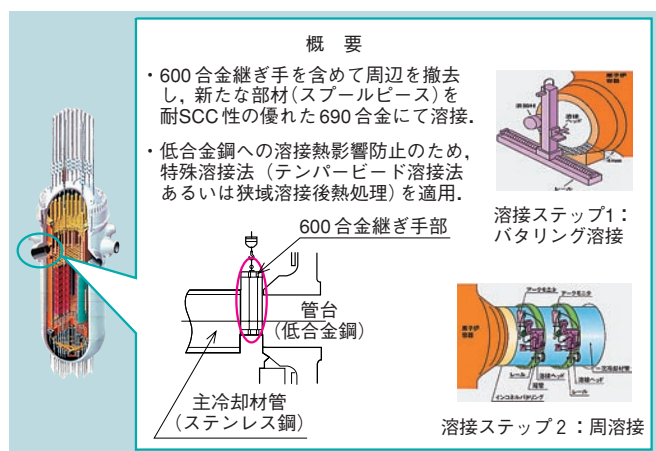


図9 部分取替技術
原子炉容器出口管台セーフエンド継ぎ手の例。

画されている。図9には一例として、原子炉容器出口管台セーフエンド継ぎ手取替技術を示す。600合金継ぎ手を含む短管を撤去し、新たな短管を取付ける際に耐SCC性の優れた690合金溶接材料にて溶接する方法である。

6. 補修技術

万一損傷指示があった場合の補修技術として、欠陥除去、新バウンダリ設置がある。図10に原子炉容器炉内計装筒に対する補修技術一例を示す。

欠陥除去とは、きずを除去しても機器の構造が許容される場合、部分的に若しくは周囲も含め全面的に切削除去することで機器の健全性を確保する技術である。

新バウンダリ設置とは、機器の外側にキャップなど

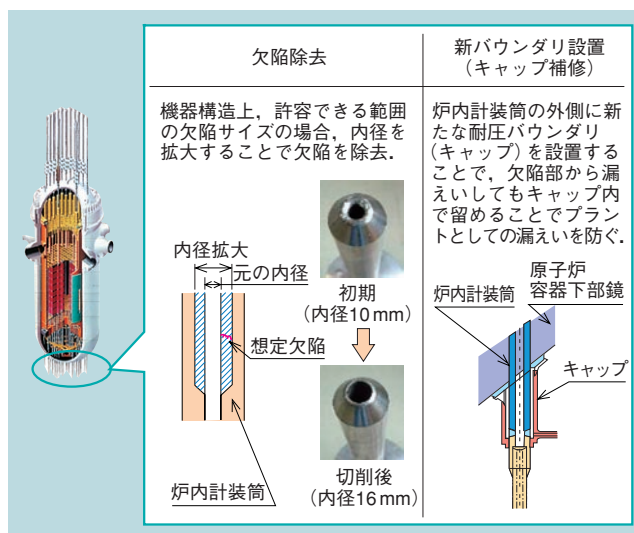
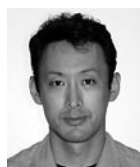


図10 補修技術
原子炉容器炉内計装筒の例。

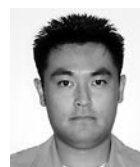
を取付けることで、キャップなどを耐圧バウンダリとし、損傷からの漏れいをキャップ内に留めることで漏れいを防止する技術である。

7. おわりに

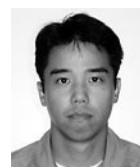
当社の取組んでいる検査技術、応力改善技術、材料改善・取替技術及び補修技術の最新保全技術について述べたが、これら保全技術によって原子力発電プラントの安全性と信頼性を向上させ、長期間の運転にわたって経済的に運転を継続するのに役立つものと考えている。今後とも、検査技術、劣化緩和・補修取替などの開発・検証を積極的に推進し、高度化・高性能化を進めていく。



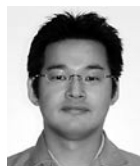
沖村浩司



堀展之



向井正行



増本光一郎



鴨和彦



黒川政秋