

# BWRプラントにおけるSCC対策の実機適用と評価

東京電力株式会社 原子力運営管理部・山下 裕宣・岡村 祐一

Hironobu YAMASHITA Yuichi OKAMURA

・安川 宏・水谷 淳

Hiroshi YASUKAWA Jun MIZUTANI

財団法人電力中央研究所・二見 常夫

Tsuneo FUTAMI

## 1. 背景および概要

沸騰水型原子炉（BWR）プラントにおける応力腐食割れ（SCC）の発生事例は、1974年に米国で原子炉一次系のステンレス鋼配管に確認され、国内においても、多くの事例が確認されている。

炉心シュラウドについては、1990年にスイスで、1993年には米国、翌年には東京電力福島第一2号機でも確認された。

本稿では、国内BWRプラントにおけるSCC対策として実機に適用された工法と評価について述べる。

## 2. 原子炉内大型構造物の取替

### 2-1) 概要

1994年に福島第一2号機シュラウド中間リング溶接部（H3）のSCC損傷事例が確認されたことを期に、幾つかの予防保全技術を開発、適用する一方、シュラウド取替工法について、BWR電力共通研究として取替工法概念検討が開始され、1996年には実機への適用性を検討する研究を開始した。シュラウド取替工法は、各種取替用機器の設計・製作・機能試験が実施され、実機への適用見通しが得られたことから、福島第一3号機をモデルとしてフルスケールモックアップ試験を実施し、民間で開発した技術が十分な信頼性を有することを国の立場からも実証・確認する作業が行われた。

### 2-2) 取替シーケンス

シュラウド取替の主なシーケンスを以下に示す。  
 原子炉開放 ⇒ 炉内機器取外 ⇒ 炉内化学除染 ⇒ 旧炉心シュラウド等切断取外 ⇒ ジェットポンプ取外 ⇒ シュラウドサポート開先加工 ⇒

ジェットポンプ復旧 ⇒ 新炉心シュラウド復旧 ⇒ 炉心支持板等復旧 ⇒ 原子炉復旧

### 2-3) 線量低減対策

中性子照射を受けた原子炉压力容器及び炉内構造物は放射化しており、更に表面には放射化された金属酸化物も付着している。取替作業には遠隔自動技術を多用するが、作業効率、施工の確実性の確保および故障時対応等の観点から必要に応じて炉内へ人がアクセス可能となるように放射線レベルを極力低減することは重要である。主な線量低減対策は、金属酸化物の除去を目的とした化学除染の実施、及び放射化している炉内領域部への遮へい体設置である。

#### ①化学除染（図-1）

炉心シュラウドを切断する前に、酸化還元除染法の一つであり、比較的高い除染効率（DF）が得られ、二次廃棄物発生量が少ないという特徴を有するCORD法を用いての炉内化学除染を実施した。

CORD法は、除染液を原子炉再循環ポンプを使用して循環させ、溶解した放射性金属をイオン交換樹脂に吸着させる。

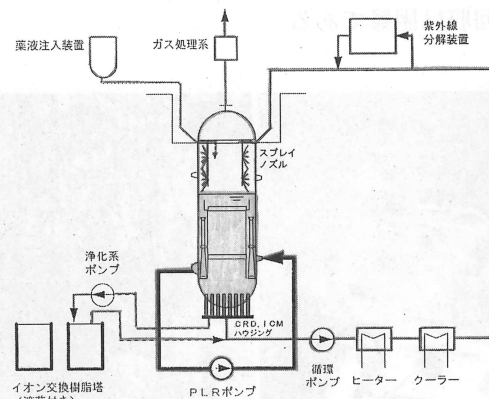


図-1 化学除染系統図

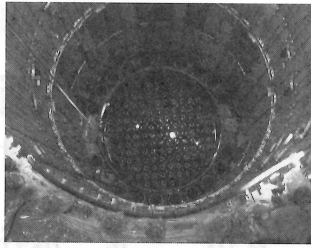


図-2 炉内遮へい取付状況

酸化還元過程を2～3回繰り返して実施した結果、プラントによって廃棄物発生量やDFに多少の差は見られたものの平均的な廃棄物発生量は約5m<sup>3</sup>、炉底部のDFは水中測定値で約40であった。

②炉内遮へい (図-2)

压力容器フランジから吊下げた遮へい体で、放射した压力容器内壁からの放射線量を低減するための遮へいである。遮へい材には鉛やタンゲステンを用い、設置した状態でジェットポンプライザープレスで压力容器壁面に溶接するための開閉可能な窓を取付けた。

2-4) 遠隔自動機器の開発

①シュラウド切断装置 (一次切断)

既設炉心シュラウド切断は、細断作業エリアの水深遮へい効果を確保するため、上半部と下半部に分けて切断する。

上半部切断には、放電加工 (EDM) 切断装置 (図-3) 又はロールカッター (図-4) を用い、下半部については、新シュラウドとの取合い溶接部となることから、加工作業を考慮し、EDM切断装置を用いた。

EDM切断装置は、4台の切断装置が円形架台上に設置され、独立して走行する構造となっている。各切断装置には回転式グラファイト電極および切断粉回収フードが取付けられているが、切断部位での切断粉の100%回収は困難である。

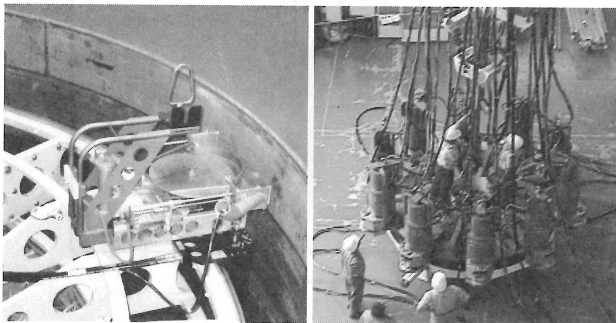


図-3 回転式グラファイト電極 図-4 ロールカッター全景

ロールカッターは対角に径の異なる円盤状の10枚の刃をシュラウド内側に押し付けながら回転させて押し切る装置で、EDM切断装置に比べ切断装置および被切断物の荷重が大きくなるものの、切断粉やエアロゾル等の発生が殆ど無い点の特徴である。

②シュラウド他切断装置 (二次切断)

切断に使用する工法は、切断性能・二次生成物の発生量・切断エリアにおける装置の操作性等を評価し、水中プラズマ切断および超高压アブレッシブウォータージェット切断 (UHP/図-5・6) の何れかを採用することとした。

水中プラズマ切断は、水中にて電極と切断物との間にプラズマアークを発生させて被切断物を溶融し、この溶融された金属を、ガス気流のジェットにより連続的に除去する方法である。

UHPは、空気搬送した研磨材を高圧水と共に切断物に吹き付けて切断する機械的切断工法である。

水中プラズマ切断では、二次生成物の発生量は少ないもののエアロゾルが発生するため、作業環境の悪化が懸念されることから、専用のガス処理装置を設置し対応した。

UHPでは、アブレッシブが全て二次発生物となるため、回収処理装置の設置エリアが必要となり、廃棄物発生量も多くなる。

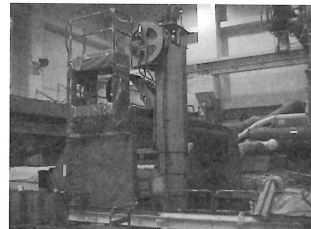


図-5 UHP装置全景

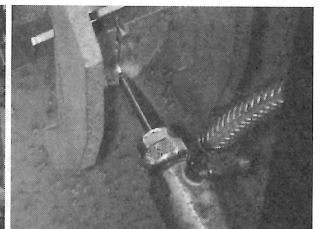


図-6 構造物切断状況

③新シュラウド溶接装置 (図-7・8)

新炉心シュラウド溶接接合に際しては、溶接入熱量を低減し溶接時間を短縮するために狭開先形状としている。新炉心シュラウドでは溶接接合部にクレビス部を生じさせないことおよび外表面を滑らかに仕上げることを目的として、炉心シュラウド内外の両面から溶込み溶接を実施する構造とした。

新炉心シュラウドと既設シュラウドサポートの溶接は、外側から溶接を行った後に内側から溶接を実施する。溶接時の変形防止の観点から2台の溶接機が軌道上を走行する。炉心シュラウド外側にはジェットポン

プが近接しており、溶接機の走行スペースを確保するため、外側溶接部にあらかじめフィラーワイヤを取り付けておくことで、溶接機を薄型の形状とした。内側の狭開先溶接においては、ワイヤーリールを搭載した2台の内側溶接機が軌道上を走行して溶接を行った。

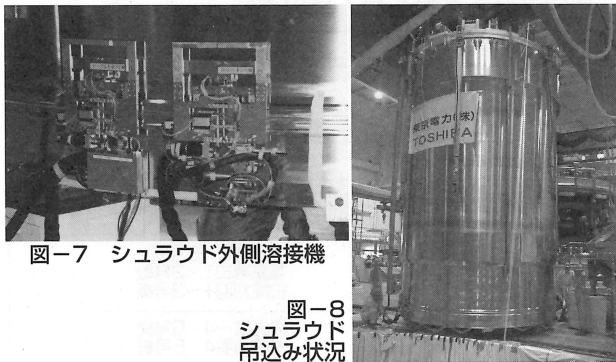


図-7 シュラウド外側溶接機

図-8  
シュラウド  
吊込み状況

## 2-5) 原子炉内大型構造物の取替実績

プラント	日数	総線量当量	従事者数
3号機	423日	13.0人・Sv	約3000人
2号機	331日	7.7人・Sv	約2300人
5号機	299日	6.1人・Sv	約1900人
1号機	230日	4.6人・Sv	約1900人

## 2-6) 新シュラウドの構造

既設炉心シュラウド胴部は、曲げ加工したステンレス板を溶接して円筒状に、リング部は、円弧状に切出した板を溶接してリング状に、円筒状の胴とリングを溶接し周溶接が8箇所、縦溶接が32箇所て構成されていた。

(図-9左側 3/2/5号機)

新炉心シュラウドは、SCC発生ポテンシャルを低減するためリング一体鍛造とし、溶接線の数を削減した。3つの円筒状の胴と下端リングで構成されており、周溶接線を4箇所、縦溶接線を2箇所に削減した。(図-9右側 3/2/5号機)

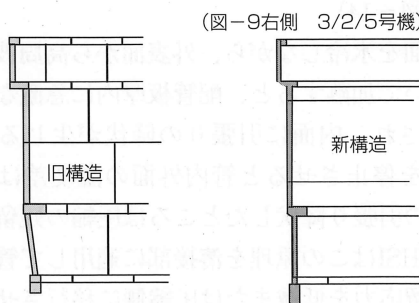


図-9 シュラウド構造比較

## 2-7) 放射性廃棄物の処理

切断した旧炉心シュラウドは二次切断エリアである機器貯蔵ピット (DSP) に移送し、保管容器に入る形状に更に切断する。DSPのスペースは限られていることから、順次、切断し搬出しなければならない。初号機の作業においては、切断速度が速く、廃棄物発生量の少ないプラズマ切断を使用したが、作業効率等の観点から工法を見直し、2基目以降ではUHPを採用した。廃棄物は線量区分により、サイトバンカー・固体廃棄物貯蔵庫とそれぞれに運搬した。サイトバンカーには、放射能レベルの高い廃棄物を、固体廃棄物貯蔵庫には比較的低いものを保管した。

## 3. SCCが発生した場合の構造物の補修

### 3-1) シュラウド中間リング (図-10)

福島第一2号機シュラウド中間部リングのひびについては、ひびの貫通を仮定した強度評価等を実施し、問題のないこと確認したが、強度上の裕度を増すため、海外で施工実績のあるブラケット工法にて補修した。

(その後、シュラウド取替時に撤去)

### 3-2) ジェットポンプ入口配管 (図-11)

福島第一1号機ジェットポンプ入口配管のひびについては、貫通を仮定した破壊力学的手法により強度評価を実施し、問題のないこと確認したが、貫通した場合を仮定し、プラントの性能に影響がないようクランプを取付けた。(その後、シュラウド取替時に撤去)

### 3-3) 炉心スプレイスパージャ (図-12)

福島第一1号機炉心スプレイ系スパージャのひびについては、ひびが全周にわたっても強度が確保できるよう、ひびをはさみこむ形でクランプを取付けた。

当該クランプは、全周破断し分離配管を所定位置に保持する機能を有することをモックアップ試験にて確認した。(その後、シュラウド取替時に撤去)

### 3-4) シュラウド中間胴・下部リング (図-13)

福島第二3号機シュラウド下部リングおよび2号機中間胴のひびについては、亀裂進展評価を実施した結果、ひびは停留し、必要な肉厚が確保されることが分かった。今後のプラント運転に万全を期すため、海外で施工実績のあるタイロット工法にて補修した。

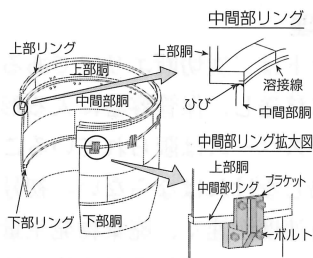


図-10 ブラケット取付概念

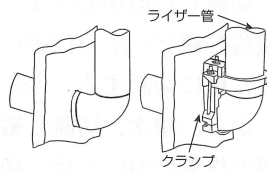


図-11 ライザークランプ取付概念

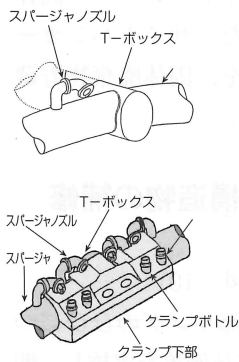


図-12 スーパージャークランプ取付概念

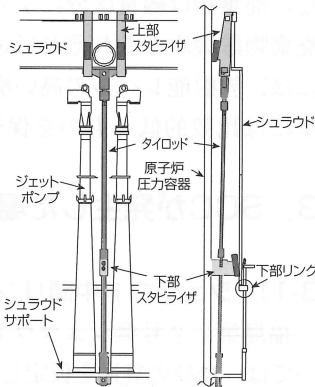


図-13 タイロッド取付概念

## 4. 原子炉再循環系配管の取替

### 4-1) 概要

1974年に米国プラントの再循環系バイパス管に貫通クラックが発見され。この事象に伴い国内では、試運転中を含む全BWR設置者に対し科学技術庁指示により、原子炉再循環系 (PLR) バイパス管の点検が行われた。その結果、福島第一1号機および浜岡1号機に、にじみ又はUTによる指示が発見された。

以降、原子炉一次系のステンレス鋼配管溶接部の点検が実施され、非常用炉心冷却系・原子炉水位計装ノズルや炉水浄化系配管等にひび割れが確認された。

1977年には、BWRのSCC対策の有効性を実証するために、通商産業省の溶接部等熱影響部信頼性実証試験のプロジェクトが発足した。

### 4-2) SCC対策工法と取替実績

1980年頃は、SCC発生原因の3因子である、材料、応力および環境のうち1因子以上を排除又は軽減する事によって充分防止し得ると考えられていた。

具体的な対策としては、以下の工法である。

#### ①溶接継手の容体化熱処理工法 (SHT)

#### ②内面溶接肉盛工法 (CRC)

#### ③内面水冷溶接工法 (HSW)

#### ④高周波加熱による応力緩和法 (IHSI)

#### ⑤耐SCC性ステンレス鋼 [SUS316L/SUS316(LC)] の採用

#### ⑥不要配管の撤去や炭素鋼への置き換え

これら対策実績を以下に示す。

不要配管撤去	福島第一1~5号機
低炭素鋼の採用	福島第一1~6号機 福島第二1~4号機 柏崎刈羽1~5号機
配管取替	福島第一1~5号機
配管部分取替	福島第二1~4号機 柏崎刈羽1~5号機
IHSI	福島第一6号機 福島第二1・3号機 柏崎刈羽1~3号機
HSW	福島第一4・5号機 柏崎刈羽4・5号機
CRC	福島第一2・3・5・6号機 福島第二1号機
SHT	福島第一2・3・6号機 福島第二1号機

## 5. 応力面からの対策

応力腐食割れは、引張り応力が大きい部位で発生する。これまで溶接部近傍で応力腐食割れが発生していることが確認されているが、これは溶接部近傍では溶接による入熱よりひずみが生じ、高い残留応力が生じているためである。

従って、溶接残留応力を低減させることが応力腐食割れを防止するために有効な対策となる。これまで溶接残留応力を低減させる対策として既に実機で適用されている工法として、IHSI、HSR、ピーニング等が適用されており、それぞれの工法の原理、効果及び適用事例について評価を行った。

### 5-1) 高周波誘導加熱応力改善

#### ①原理 (図-14)

配管内面を水冷しながら、外表面から高周波誘導コイルを用いて加熱すると、配管板厚内に急激な温度勾配を形成され、内面に引張りの降伏が生じる。その後、加熱を停止させると管内外面の温度差はなくなり、内面の引張り降伏したところは圧縮の残留応力が生じる。IHSIはこの原理を溶接部に適用して管内面の引張り残留応力を低減または圧縮側に移行させようとするものである。

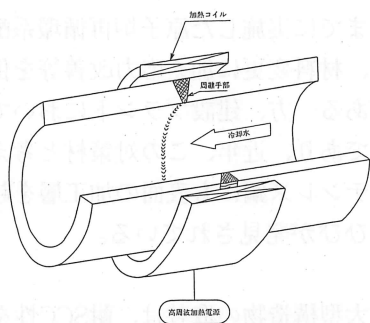


図-14 高周波誘導加熱応力改善法の概略図

②IHSI適用に対する効果の評価

IHSIの効果は確性試験で行った実証試験結果により確認されている。試験結果から内面の応力が圧縮側に、外面の応力が引張り側になることが、測定にて確認されている。

また実機においてもIHSIを施工した継手については、これまでの点検の結果からは有意なひびは確認されていない。

5-2) 水冷溶接

①原理

水冷溶接は、図-15に示すように配管溶接時の2又は3層目以降、配管内面を温水やスプレーで冷却しながら施工する方法で、管板厚内で温度差を生じさせ、これによる熱応力によって応力腐食割れの「応力因

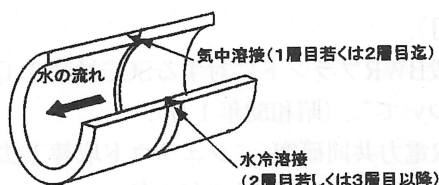


図-15 水冷溶接の概略図

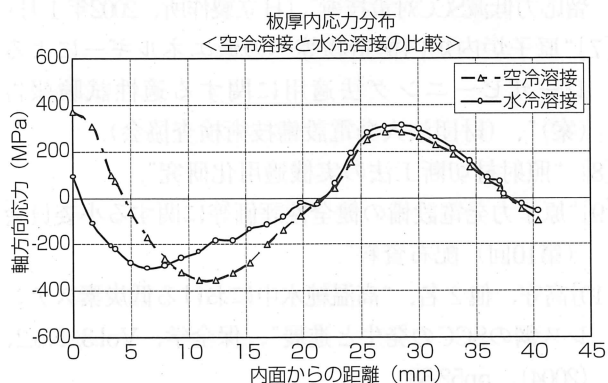


図-15 水冷溶接による内表面引張残留応力の低減効果

子」である溶接部管内表面付近の引張残留応力を低減させるものである。

水冷溶接では、図-16にて確認できるように内表面軸方向の残留応力は圧縮側となり、応力腐食割れの発生の抑制となる因子である応力改善が期待できる。

5-3) ピーニング技術

ピーニング技術は、炉心シュラウドに見えられたひびを除去するためにEDMや機械的に研削を実施した加工面の応力改善工法として、福島第一4号機、福島第二4号機および柏崎刈羽2/3/5号機で施工した。

①ウォータージェットピーニングの原理・効果

ウォータージェットピーニングは、水中で高圧水を噴射させるとキャビテーションが発生し、それが材料表面で崩壊するときに非常に高い圧力を生じる。この圧力により材料表面が塑性変形を起こし、表面近傍を高い圧縮応力に変えるものである。圧縮残留応力の深さは約1mmとなっている。(図-17・18)

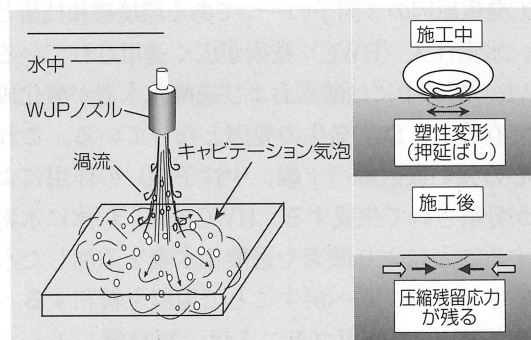


図-17 ウォータージェットピーニング施工概念

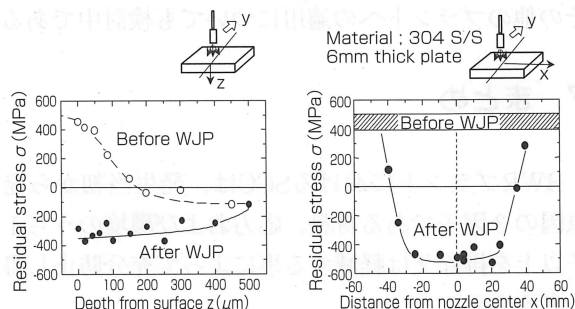


図-18 ウォータージェットピーニング残留応力改善効果

②レーザーピーニングの原理・効果

レーザーの照射により材料表面にプラズマが発生し、材料表面でプラズマが瞬間的に数GPaの圧力に達し、衝撃波が発生する。この衝撃波が材料表面を塑性変形

させることにより、周囲に伸展しようという力が作用するため材料表面に圧縮応力が形成される。

効果の確認の結果、圧縮残留応力の深さは約1000  $\mu$ m以上の深さで圧縮応力となっている。(図-19)

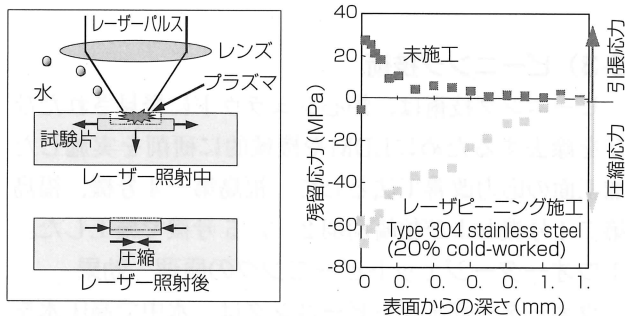


図-19 レーザピーニング施工概念・残留応力改善効果

## 6. 環境緩和対策

SCC発生原因の3因子の一つである環境緩和技術としては、水素注入(HWC)技術が広く適用されている。

BWRの炉水中には酸素および過酸化水素が酸化成分として存在し、SCC発生の要因となっている。これらは炉心の強い放射線( $\gamma$ 線、中性子線)の作用により炉水が分解されて生成する。HWCでは、炉水に水素を添加することにより酸素や過酸化水素を添加した水素と反応させ、再び水へ戻すことで環境を緩和する。

現在、HWCの適用プラントは、福島第一1~6号機、福島第二3号機および柏崎刈羽1号機であるが、その他のプラントへの適用についても検討中である。

## 7. まとめ

BWRプラントにおけるSCCは、発生当初から発生原因の3因子である材料、応力および環境のうち1因子以上を排除又は軽減する事によって充分防止し得ると考えられていた。

このことから、容易に対応可能な材料(IGSCC発生の主な原因の一つと考えられていた、溶接による熱鋭敏化に対して有効な、即ち、鋭敏化しづらい材料)が重視され、低炭素ステンレス鋼を採用し、「低炭素ステンレス鋼がSCC対策材」との思い込みが強かったように思える。

1983年頃までに実施した原子炉再循環系配管の取替に際しては、材料変更に加え応力改善等を併せて実施した経緯がある一方、建設プラントにおいては、材料のみの対策であり、近年、この対策材と考えられていた低炭素ステンレス鋼にも表面の加工層を起点としたSCCによるひびが発見されている。

原子炉内大型構造物の取替は、耐SCC性を改善することを目的としており、溶接箇所の削減や応力低減も併せて実施した。日本のBWR所有電力およびプラントメーカーによって開発した本取替工法は、炉心シュラウドと併せて他の炉内機器を取替えることにより、原子炉内の全体を改善することを可能にし、BWRプラントの信頼性向上に寄与する抜本的な対策となった。

この技術は、各プラントメーカーの遠隔操作技術、溶接技術、切断技術等を集結して開発され、入念に準備をすれば、従来困難と考えられていた炉内構造物の大規模な補修が可能であることを実証した。

## 参考文献

- [1]“福島第一原子力発電所2号機シュラウド中間部リングのひびについて”。
- [2]“福島第一原子力発電所第3号機原子炉再循環系配管管台部の欠陥調査結果に関する報告書”、(昭和58年1月)。
- [3]“BWRプラントにおけるSCC対策の概要”、(昭和58年12月)。
- [4]“既設BWRプラントに対するSCC対策3工法の適用について”、(昭和58年1月)。
- [5]BWR電力共同研究、“シュラウド取替工法に関する研究(その1)”(平成8年3月)。
- [6]“ウォータージェットピーニングによる炉内機器の残留応力低減SCC対策技術”、(日立製作所、2002年1月)。
- [7]“原子炉内炉内構造物等への低エネルギーによるレーザーピーニング法適用に関する適性試験報告(案)”、(財団法人発電設備技術検査協会)。
- [8]“照射材切断工法の実機適用化研究”。
- [9]“原子力発電設備の健全性評価等に関する小委員会(第10回)配布資料”。
- [10]高守、他2名、“高温純水中における低炭素ステンレス鋼のSCCの発生と進展”、保全学、Vol.3, No.2、(2004)、pp52-58。

(平成16年9月3日)