

加圧水型原子力発電所蒸気発生器 トラブルの解決に向けた技術開発 の歴史 (2)

Review of R&D focused on the Resolution of
Pressurized Water Reactor-Steam Generator Issues.

高松 洋 Hiroshi TAKAMATSU
関西電力株式会社

はじめに

前号で述べたように蒸気発生器 (Steam Generator、以下SGという) 伝熱管の腐食減肉対策として二次系水処理をリン酸塩処理から揮発性薬品処理 (All Volatile Treatment、以下AVTという) に切り替えた以降は腐食減肉は完全に防止できた⁽¹⁾。しかし、AVTへの切り替えに際してSGを十分に洗浄しSG器内残留リン酸ソーダの排除を行ったが、新たに別モードの伝熱管の腐食損傷が発生した。今までに経験した損傷を図-1に示すが、今回はこれらの内最も難問であった二次側からの応力腐食割れ/粒界腐食について、損傷のメカニズム究明とその解決のための水質管理技術、検査技術及び補修技術の開発について述べる。

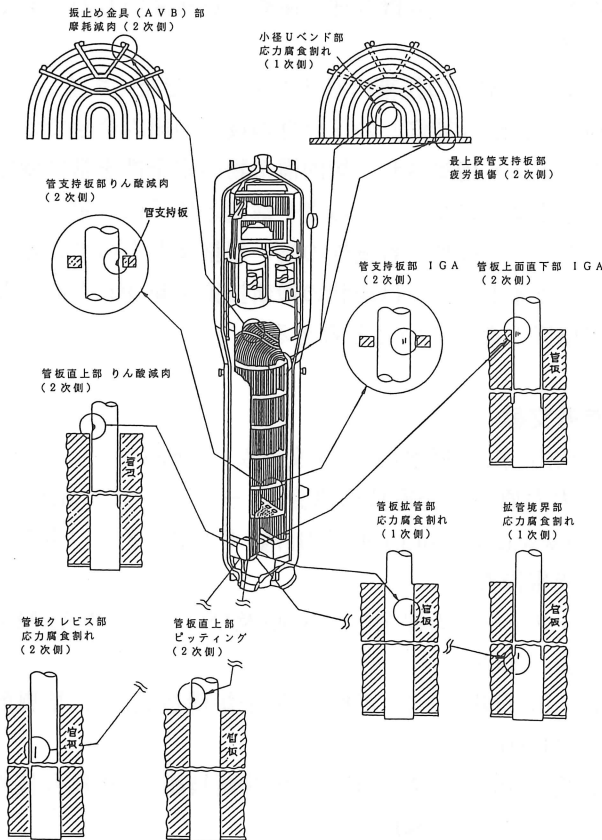


図-1 国内蒸気発生器伝熱管損傷発生状況

1. 管板クレビス部応力腐食割れ対策

1-1) 管板クレビス部応力腐食割れのメカニズム⁽²⁾

初期のWH社設計タイプの美浜2号、高浜1、2号、玄海1号SGは管板部 (Tube Sheet、TSと略す) に幅約0.2mm、長さ約450mmの隙間 (クレビスという) を有している。

AVTへの切り替え後約1年の運転で伝熱管漏洩の発生により、TSクレビス部応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking、以下SCCという) が判明した。この損傷は運転時にリン酸塩処理を経験した美浜2号、高浜1号の高温側TSクレビス部のみに発生した。実機損傷管の抜管調査から、図-2に示すように損傷は二次側からの軸方向粒界割れであり、TS上面から下方約100-200mmの位置に見られた。管付着物の分析からクレビス部は高アルカリ環境であることが判明した。また、伝熱管材料はインコネル600の仕様と合致しており正常なものであった。原因究明として、応力面では管外表面残留応力の調査からWH社製管 (高浜1号、美浜2号B-SG) に比較的高い周方向引張残留応力が存在している (250-300 MPa) こと及び運転時に内圧による作用応力 (フープ応力) が重畳すること並びに環境面ではTS上面に堆積したスラッジ中に微量の残留リン酸ソーダが確認されたことから、(1)式に示す

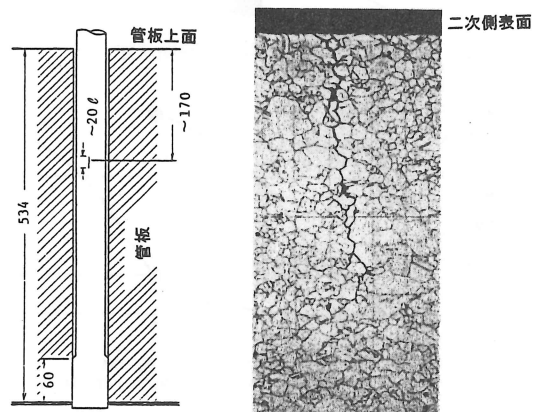


図-2 TSクレビス部SCCの例

信号を比較する自己比較型ボビンコイルECTでは検出が困難であることが判かり、TSクレビス部の検査には健全部の信号と比較する標準比較型ボビンコイル（シングルコイル）ECTも適用することになった⁽⁸⁾。

これらの損傷抑制対策を実施した結果、TSクレビス部SCCの損傷検出は減少したが少数であるが検出は継続した。損傷検出状況を図-4（前頁）に示す。

1-4) TSクレビス部SCCの補修法⁽¹⁾

a) 施栓：当初は溶接栓を使用していたが、作業工程が多く被曝低減の観点から、より簡便な施栓技術である機械式栓（Mechanical Plug）の開発導入を図った（図-5 参照）。

b) スリーブ補修：施栓では供用伝熱管本数が減少し熱効率が悪化するため、損傷部のみを修理して伝熱管は継続使用できるスリーブ技術を開発した⁽¹⁰⁾。

損傷はTS部に限定されているため、TS厚さに相当する長さのスリーブを管内に挿入し、その両端をTIG溶接し損傷部を隔離する溶接スリーブを試行したが、作業効率向上のため上部は機械式シールを採用して溶接数を減らした機械式スリーブ（Mechanical Sleeve）を開発した。機械式シールはスリーブ外面に突起を形成し（突起は管を切削して形成する）、機械式ローラ拡管によりスリーブ突起部を内面から拡管し突起を伝熱管に圧入（噛み込ます）してシールする。このシール性と拡管保持力で冷却材バウンダリーを形成する。スリーブ材料はインコネル600の耐食性を改善した特殊熱処理材（最終焼鈍熱処理後700℃で15時間保持する熱処理を加える）を用いた。スリーブ施工は内径約19mmの伝熱管内部での作業であること及び被曝低減の観点から全て遠隔操作による施工が可能となる作業ロボットの開発が中心課題であった。

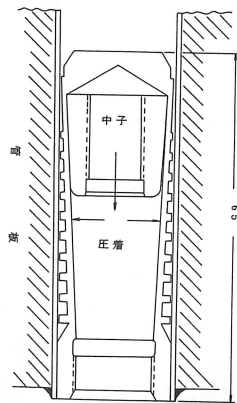


図-5 機械式栓の概要

2. 管支持板部／管板上面直下部粒界腐食

2-1) 管支持板部／管板上面直下部粒界腐食の損傷メカニズム^{(4),(5),(9)}

二次系水処理に過去に燐酸塩処理を経験していないプラントも含め管支持板部（Tube Support Plate、以下TSPと略す）或いはTS上面直下部（TSクレビス上部）に運転開始後約7年で粒界腐食損傷（Intergranular Attack、以下IGAという）が検出され始めた。初期のIGA発生プラントは高浜2号、大飯1号及び玄海1号であり、長期間運転後には他のプラントでもIGAが発生した。以下に損傷原因究明のために行った調査結果を示す。

a) 実機IGA損傷管の抜管調査結果

損傷はクレビス内で軸方向主体の粒界割れで、多くの損傷が伝熱管外周に広く分布して存在していた（図-6 参照）。クレビス部スケール分析ではアルカリ環境或いは酸性環境を明確に示す証拠は見られなかった。前記3プラントの損傷管のスケール下層（管表面と接触する部分）に亜酸化銅（Cu₂O）等の存在が確認され、損傷部は酸化性雰囲気であることが示唆された。また破面酸化皮膜のAuger分析では外表面に近い破面（損傷起点部近傍）では酸化皮膜中のCr組成比が低く、損傷先端部近傍の破面ではCrが高くなっている。図-7に示すCr酸化物の溶解特性から、損傷はCr溶解度の大きいアルカリ環境で発生し、以降環境改善によりほぼ中性環境でも損傷が進展していたことが示唆された⁽⁹⁾。

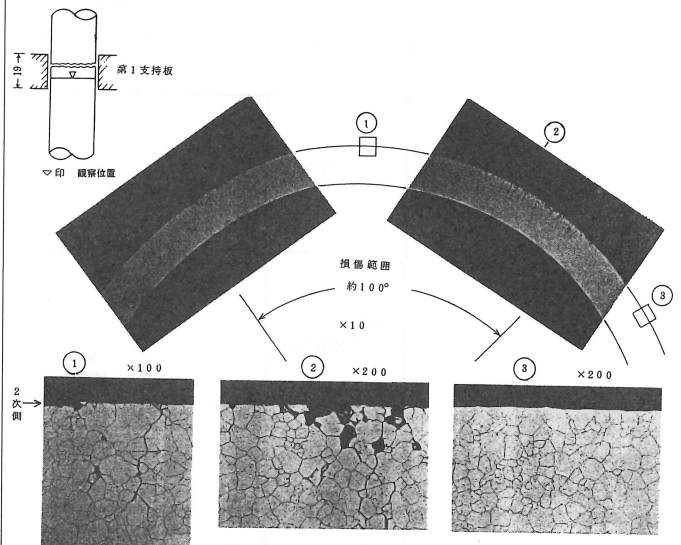


図-6 TSP部IGAの例

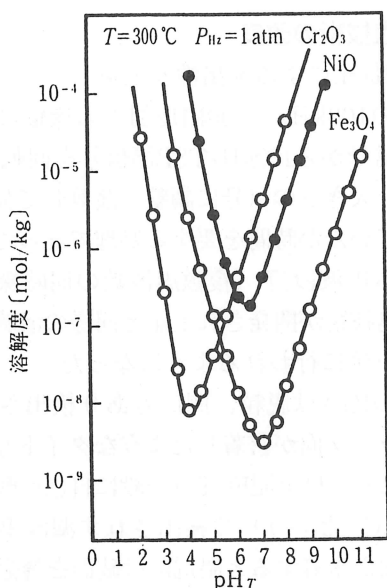


図-7 300°高温水中の酸化物の溶解度のpH依存性

b) 二次系水質調査結果^{(4),(7)}

損傷検出時点でのSG器内水質、SGハイダウトリターン（運転時クレビス内で不純物が沸騰濃縮し、停止時に沸騰停止により濃縮した不純物が拡散によりSG器内水中に排出される）データからは腐食環境の形成は見られなかった。

このため、試運転時まで遡っての水質調査と評価のための各種確認試験を実施した。それらの結果を表-1に示す。調査結果は上記抜管調査結果をサポートするものであった。

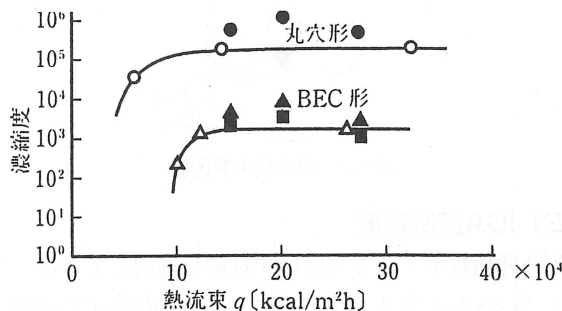
表-1 IGA原因究明に係る水質調査の結果

プラント別調査項目	IGA発生数の多いプラント	りん酸塩処理経験プラント	軽微なIGAプラント	IGAの発生していないプラント
(アルカリ)	建設時の溶接作業に伴い試運転時に多量の持込み	同左	同左	試運転時はコンデミにより持込みは抑制された
遊離アルカリ(Na等)の持込源、持込時期	第1サイクル以降は量は減少したが持込継続(補給水等)	同左 AVT切換直後のサイクルに残留りん酸塩よりアルカリを生成	第1サイクル以降は減少したが持込継続(補給水等)	第1サイクル以降はコンデミにより持込みは抑制された
	コンデミ設置後は持込は抑制された	-	コンデミ設置後は持込は抑制された	-
(酸化剤) 酸化銅、ヘマタイトの有無の差	試運転時に系統への酸素持込量が大きく酸化銅が生成しSGへ持込まれた	りん酸塩処理時にSG器内水のpHは高く酸化銅は生成し難かった	試運転時に系統への酸素持込量が少なく酸化銅が生成し難かった	試運転時よりヒドラジン濃度が高くヘマタイトはSGへ持込まれなかった
	ヒドラジン濃度が低くヘマタイトがSGへ持込まれた	同左	同左	ヒドラジン濃度が低くヘマタイトはSGへ持込まれなかった
	コンデミ設置後は持込は抑制された	-	コンデミ設置後は持込は抑制された	-
(中和剤)	顕著な中和剤の持込は認められない	AVT切換後も最近までSG器内にPO ₄ が残留 海水リークの例有	-	顕著な中和剤の持込は認められない

c) クレビス濃縮試験^{(6),(9)}

二次系水処理は全てAVT処理で管理され運転時のSG器内水質環境は中性近傍に、また腐食電位も低く還元性電位に維持されているので不純物が濃縮するクレビス部以外は腐食しない。図-8に示すように丸穴型TSPクレビス部では10⁵~10⁶の濃縮倍率を示すことが判った。このため微量の不純物であってもクレビス内では腐食発生環境になりうる場合もありえると考えられる。

大飯発電所に設置した実機クレビス模擬のモデルボイラ装置で実機二次系水を用いたクレビス環境評価ではほぼ中性を示していた。



記号	管支特板	試験圧力 (ata)
●	丸穴形	62.5
▲	BEC形	
○	丸穴形	1.03
△	BEC形	

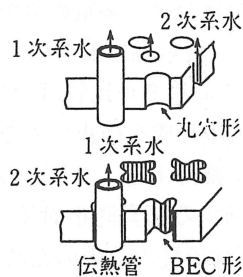


図-8 TSPクレビス部の熱流束と濃縮度の関係

d) IGA進展評価試験⁽¹²⁾

実機クレビス部を模擬したモデルボイラ装置を用いて、1)ラボにおけるAVT環境模擬の試験、2)実機二次系水を用いた発電所構内での試験を行い、AVT環境でのIGA進展速度を求めた。実機運転時に相当するSG器内水中Na濃度<1ppbのAVT環境で (<1~6) × 10⁻⁵ mm/hrの進展速度が得られた。

e) IGAのメカニズム

以上からIGAは図-9に示す要因で発生し、改善された水質条件下でも徐々に進展していたものと考えられる。

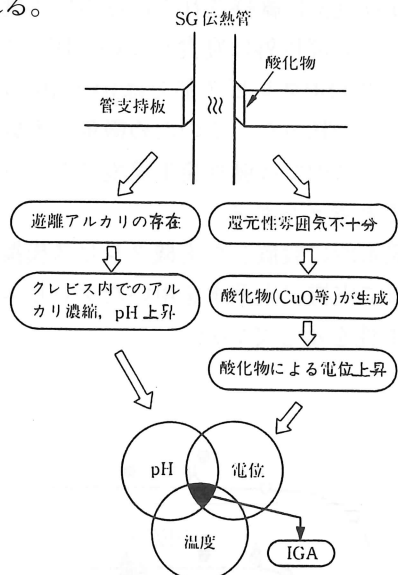


図-9 IGA発生要因図

2-2) IGA抑制対策

IGA抑制対策として次に示す対策を適用してきた^{(4),(9)}。

- ・ SGへの有害不純物の持ち込みを抑制するため、起動時配管等の清浄度管理の強化（表-1に示すようにプラント建設時あるいは定期検査時の配管溶接工事後残留溶接スラグはアルカリ生成源となる。この為、復水脱塩装置（コンデミ）とクリーンアップ系を組合せ、多量の水で効果的洗浄を行なう。）及び、復水脱塩装置のイオン交換樹脂再生法の改善によるモル比管理（ $Na/Cl < 1$ ）によりアルカリ環境形成を防止することで、クレビスを中性環境に維持する。これらの考えは全てのプラントに共通する腐食防止対策である。
 - ・ SG器内の腐食環境の改善のため、硼酸注入により管表面あるいは潜在微小IGA破面に形成されている酸化皮膜中へのボロン取り込みによる耐食性のある皮膜を形成する。
 - ・ SG器内残留不純物の系外への排出のため、高圧ジェット水によるスラッジ除去（より確実に除去できる管群内挿入型スラッジランシング技術の適用）、減圧沸騰によるTSP/TSクレビス洗浄、及びスラッジの溶解除去を図る化学洗浄の実施。
- これらの対策により、徐々にではあるが腐食抑制を図られた。

2-3) 検査技術の改良

a) 一次側加圧による検出性向上策

従来の100kHz/400kHz別々の探傷による複合TSP部信号から100kHzTSP部信号を回転縮小して両者同じ大きさの信号に調整、演算して欠陥信号を評価していたが時間を要する処理であったため、新たに多重周波ECT（複数周波数の同時探傷ができる）探傷技術が開発され上記と同様の演算処理が迅速且つ正確に行われるようになった。

初期のIGAは脱粒、開口もあり検出されていたが、クラック面が密着したようなタイトなIGAが発生し、これらは上記ECT（一般に自己比較型ペンコイルECTという）で検出されず漏洩事象に至った。破面が密着すると渦電流は破面を透過し欠陥検出を不能にする。このため、IGA発生プラントでは検出性改善策としてECT検査前に一次側を加圧して密着破面を開口させた後検査するようになった。

b) 付着物信号を除去できるECT⁽⁸⁾

IGA対策として還元性雰囲気強化のためヒドラジン濃度を上げて運転しているが、TS上面に堆積したスラッジ中に酸化銅が存在すると、この酸化銅は還元され金属銅に転換する。この金属銅はECTでは大きい銅信号ノイズとなり欠陥信号の判定を困難にし、このため高浜2号機では欠陥が検出できず漏洩に至った。対策として銅信号ノイズを除去し欠陥信号を取り出す3周波数（100、400、600kHz）演算処理法を適用し検出性向上を図った。

IGA抑制対策、検査技術の改良を踏まえたTSP/TSクレビス部IGA検出本数の推移を図-4に示す。

2-4) TSP/TSクレビス部IGA損傷管の補修法

IGA検出本数は比較的多く施栓での対応では認可を受けた施栓本数制限（許容施栓率）を越える恐れがあったため、スリーブ技術の適用が不可避となった。TS部用に開発した機械式スリーブは損傷位置の関係で適用できないため、新たな開発が必要となった。

a) ろう付け式スリーブ（Brazed Sleeve）⁽¹⁰⁾

新たにTS部上面部及びTSP部まで適用できる「ろう付け」式スリーブを、全て遠隔操作で施工できる装置を開発した。図-10に示すように80%Au-20%Niの金ろうを取り付けたスリーブを損傷部に挿入し、液圧拵管で所定位置に保持し、電熱ヒータにより金ろうを溶融し伝熱管-スリーブを融合させ、損傷部

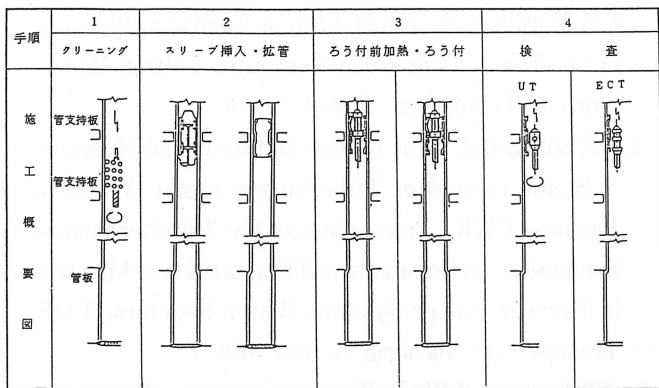


図-10 ろう付けスリーブ施工概要図

を隔離する技術である。スリーブ溶接部の検査は施工時UTで健全性を確認し、以降は磁気飽和型ボビンコイルECTを用いる⁽⁸⁾。TSP等はヒートシンクになるため、ろう付け位置はそれらから離しておく必要がある。このためスリーブが長くなり、適用範囲が限定される。施工本数が多いため作業の効率化のため水室内工具案内装置は3軸同時制御可能な多関節アーム型ロボットを導入した(図-11参照)。

b) レーザ溶接スリーブ (Laser Welded Sleeve)⁽¹¹⁾

更なる適用範囲の拡大と効率化のため局所加熱が可能なレーザー加熱法を用いたレーザー溶接スリーブを開発した。図-12に示すようにスリーブと伝熱管の一部を溶融し、伝熱管-スリーブを融合させ、損傷部を隔離するものである。レーザーはガラスファイバーで遠方まで伝送可能なYAGレーザーを用いた。

スリーブ適用範囲及び施工効率を機械式スリーブ、ろう付けスリーブと比較して図-13に示す。

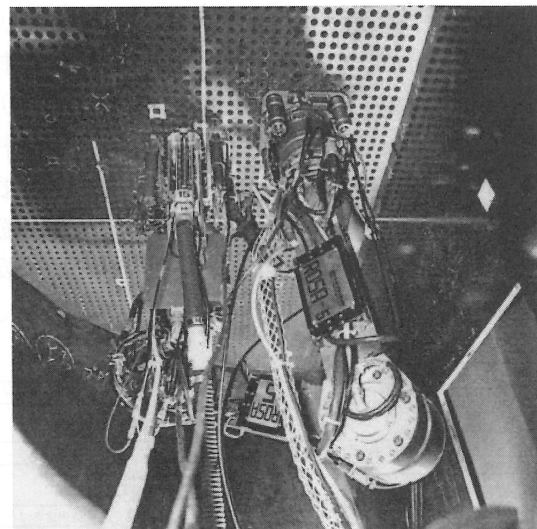


図-11 SG水室内工具案内ロボット (ROSA)

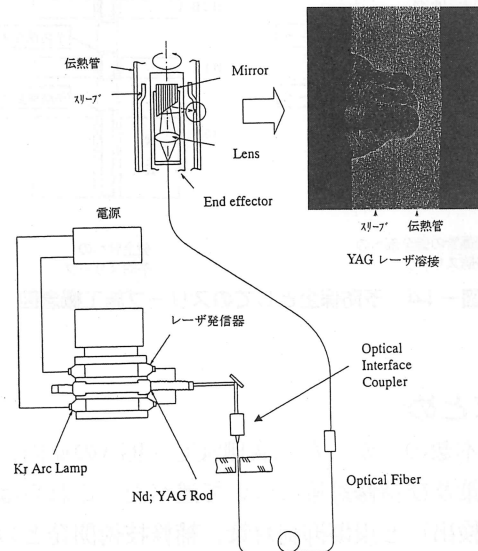


図-12 レーザ溶接スリーブの概要図

スリーブ技術	機械式スリーブ		ろう付けスリーブ		レーザー溶接スリーブ	
	管板	管支持板	管板	管支持板	管板	管支持板
概要						
適用範囲	10 rows	2~3 rows	3~4 rows	~1 row	1~2 rows	
適用不可の範囲	60%	83%	78%	97%	95%	
施工効率	5 sleeves/day	20 sleeves/day	6 sleeves/day	32 sleeves/day	22 sleeves/day	

注: Degradation: 損傷位置 T.S.: 管板, T.S.P.: 管支持板 rows: 管列の数

図-13 各種スリーブの適用範囲、効率化の比較

広範囲且つ効率的（高速化）なレーザー溶接スリーブの適用が可能となったので、過去に施栓した損傷管を抜栓し再検査の上、損傷部をレーザー溶接スリーブで補修し再使用する技術も可能となり、施栓率の上昇抑制に効果があった。また、損傷発生が予想される部位を計画的に予めレーザー溶接スリーブで補修（Preventive Sleeve）し、IGAの発生（検出）本数を低減させる予防保全の道も開けた（図-14参照）。

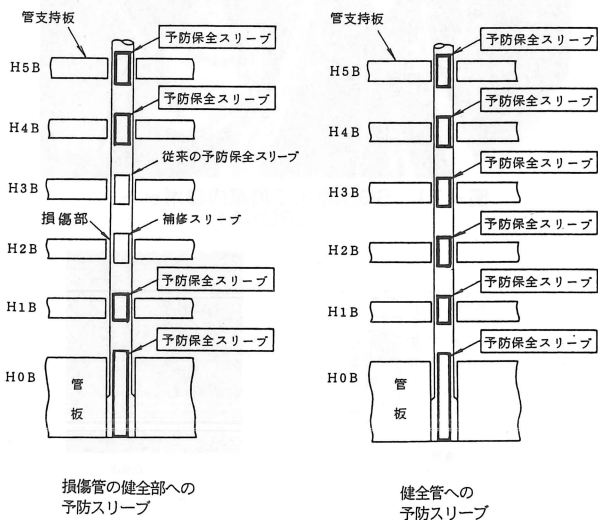


図-14 予防保全としてのスリーブ施工概念図

3. まとめ

損傷本数の多かった二次側SCC/IGAの原因、損傷抑制対策及び補修対策について述べた。これらは損傷発生（検出）と損傷抑制対策、補修技術開発との競争であったが水質改善からのみでは早急な改善効果は得られなかったが、補修技術を組み合わせ問題解決にあたった。次回は伝熱管の一次側からのSCC対策等について述べる。

参考文献

1. 高松洋、「加圧水型原子力発電所蒸気発生器トラブルの解決に向けた技術開発の歴史（1）」、フォーラム保全学Vol.1, No.2（2002）
2. A.Kishida,H.Takamatsu,「Experience with Steam Generator Tube Defects and Remedial Actions for These Defects in Japan」, Proceedings of 2nd International Topical Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations, The Atomic Energy Society of Japan, April 1988

3. L.W.Wilson,et al,「Caustic Stress Corrosion Behavior of Fe-Ni-Cr Nuclear Steam Generator Tubing Alloys」, Nuclear Technology, Vol.31（1976）
4. A.Kishida,et al,「The Causes and Remedial Measures of Steam Generator Tube Intergranular Attack in Japanese PWR」, Proceedings of the 3rd International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, TMS, Traverse City, Michigan, August 1988
5. H.Takamatsu, T.Kitera, K.Arioka,「Corrosion Experience with the Secondary Side of Steam Generators in Japan」, Proceedings of a Conference on Control of Corrosion on the Secondary Side of Steam Generators, NACE, Airlie, VA, October 1995
6. (財)発電設備検査技術協会「原子力発電所水質等環境管理技術信頼性実証試験に関する調査報告書」
[蒸気発生器伝熱管信頼性実証試験]、平成6年3月
7. S.Miyazaki,et al,「Hideout Return Behaviors in Japanese PWR Steam Generators」,Proceedings of 1988 JAIF International Conference on Water Chemistry in Nuclear Power Plants, April 1988, Tokyo, Japan
8. 高松洋、宮健三、陳振茂、「加圧水型原子力発電所における電磁非破壊検査技術開発の経緯」、日本AEM学会誌Vol.8, No.1（2000）
9. 高松洋、「蒸気発生器伝熱管の信頼性向上に関する研究」、学位論文（2001）
10. K.Hanzawa,et al,「Preventive and Corrective Actions for Tube Degradation and New Steam Generator Design Concepts」, Proceedings of 2nd International Topical Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations, AESJ, April 1986, Tokyo
11. T.Kusakabe,et al,「Preventive and Corrective Actions for Tube Degradation and New Steam Generator Design Concept in Japan」, Proceedings of 3rd JSME/ASME Joint International Conference on Nuclear Engineering, April 1995, Tokyo
12. H.Takamatsu,et al,「IGA/SCC Crack Propagation Rate Measurements on Alloy 600 Steam Generator Tubing Using a Side Stream Model Boiler」, Proceedings of 6th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, TMS, August 1993, San Diego, CA