

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(3)

高松 洋 Hiroshi Takamatsu
関西電力株式会社

はじめに

開発初期の蒸気発生器 (Steam Generator:以下SGという) 伝熱管材料にはSUS材が使用されていたが、復水器等からの塩分混入による塩化物環境に対する耐食性向上のため、インコネル-600 (75%NiのNi基合金でインコ社商標名) 製伝熱管が採用されてきた。1959年フランスのDr.Coriouがインコネル-600は純水中でも高応力条件下でSCCが発生することを報告した⁽¹⁾ が当時のインコネルの腐食関係者はそれを信用せず実験法に問題があったのではないかと議論が続いていた。1971年にドイツのオブリッヒハイム発電所SG (伝熱管はインコネル-600) の管板拡管部 (拡管法はスキップロール) で一次側よりSCCが発生したとの報告⁽²⁾ があり、インコネル-600に対するSCC解明に向けた試験が活発になった。一般に純水或いはPWR一次系環境中での高応力条件下で発生するSCCをPWSCC (Primary Water Stress Corrosion Cracking) 或いは最初の現象発見者の名からコリオクラック (Coriou Crack) と呼んでいる。これ以降米国のSGでデンティンゲに起因したPWSCCが報告された^{(3), (4)}。我が国でも伝熱管U字部 (曲げ端部) 及び管板拡管部でPWSCCが発生してきた。我が国のPWSCCは当時正常に製作されたSGでは世界で最初に発生が確認された事象であった。また取り付け済みの栓及び機械式スリーブ補修部の伝熱管拡管部に、更にはSGの設計、製作法及び伝熱管材料の耐食性に改良を加えた第二世代のSGにおいても拡管部にPWSCCが発生してきた。

本号ではPWSCC関連損傷対策及びその他の損傷として機械的損傷対策について述べる。

1. PWSCC対策について

1-1) U字管部PWSCCについて

a) 損傷事例とその原因

最初に高浜1号機で運開後約2年の1977年に伝熱管

漏洩が発生し、抜管調査等によりU字曲げ端部に内面より発生した応力腐食割れ (PWSCC) が判明 (図-1) して以来、表-1に示すように、当初はWH社が伝熱管を製造し、曲げ加工をした最小曲げ半径管 (最小半径55mmの管でR-1と称する) の曲げ端部で発生した。海外ではデンティンゲ (炭素鋼製管支持板が腐食し伝熱管を圧迫し変形さす事象⁽⁵⁾) に伴う管支持板変形によりU字部脚間距離が接近しU字部頂部の扁平が増し管内面からPWSCCが発生していた⁽⁴⁾。高浜1号機の損傷例は当時海外でも経験が無く原因究明に多大の努力がなされた。

高浜1号機はWH社製SGであることから、WH社から実物曲げ管を入手し材料特性、曲げ加工に伴う真円度、応力等を調査し併せて国産の曲げ管のそれらと比較検討した。図-2に示すように曲げ加工に使用するマンドレル (芯金) の材質、形状により曲げ加工部特に曲げ端部に大きい残留応力が生じることが判明した^{(6), (7)}。PWSCC発生時間は図-3に示すように引張応力の大きさに依存 (一般には降伏応力以上) する。長期間の

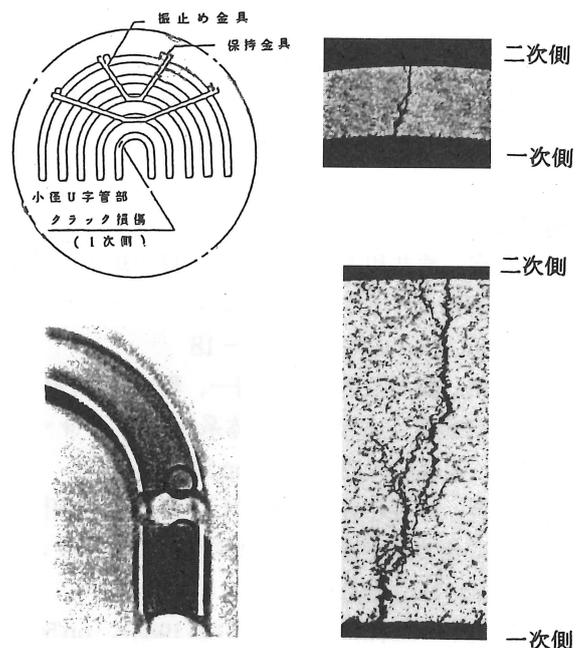


図-1 U字管部PWSCC

表-1 SG伝熱管損傷発生状況

損傷モード	損傷発生状況 (単位・本数)																				損傷発生プラント											
	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98	00	02	73	75	77	79		81	83	85	87	89	91	93	95	97	99	01
① U字管部応力腐食割れ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	高浜1 大飯1,2 美浜2
② 管板拡管部および管板拡管境界部応力腐食割れ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	大飯1,2 高浜1,3,4 美浜2,3 伊方1,2 方海2 玄海2 川内1
③ 振止め金具部摩耗減肉	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	伊方1,2 美浜2,3 大飯2 高浜3,4 高熱賀2 川内1,2
④ 最上段管支持板部疲労損傷	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	美浜2

運転後には比較的残留応力の小さい国産の曲げ加工管を採用した大飯2号機にも発生した。

b) 検査技術の改良

伝熱管公称内径は約19mmであるが、曲げ半径の小さいU字部はプローブの外径と長さの関係で通常のECTプローブが通過しにくく、そのため外径が小さいプローブを用いていた。U字部ではプローブの揺動が大きく、特に小半径U字部ではプローブの揺動及び曲

げに伴う管内径の局所の変化によるノイズ信号が重畳し、他部位に比べ欠陥判定が困難であったが、得られたECT信号等の評価から管支持板信号振幅に対する曲げ端部信号振幅の比及び曲げ端部信号の経年変化を併用して欠陥評価を行ってきた。

しかし、大飯2号機では長い軸方向PWSCC(深さ方向の変化が小さい)であり従来プローブでは検出困難であったため、より検出性に優れた回転型プラスポイントECTを適用して信頼性確保に努めた⁽⁸⁾。

c) 損傷防止対策

対策としては発生が予測されるR-1、及び/或いはR-2の伝熱管(R-1、2各々94本/SG)を全て予防

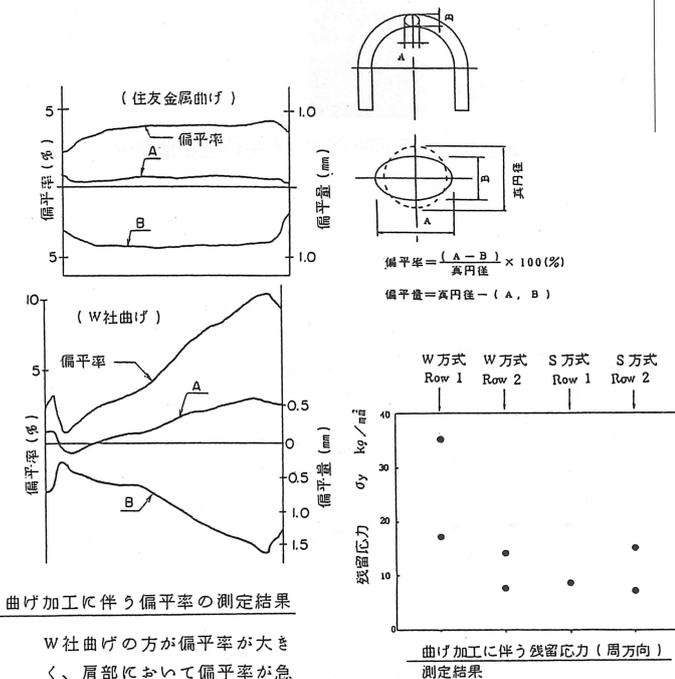


図-2 U字曲げによる扁平及び残留応力

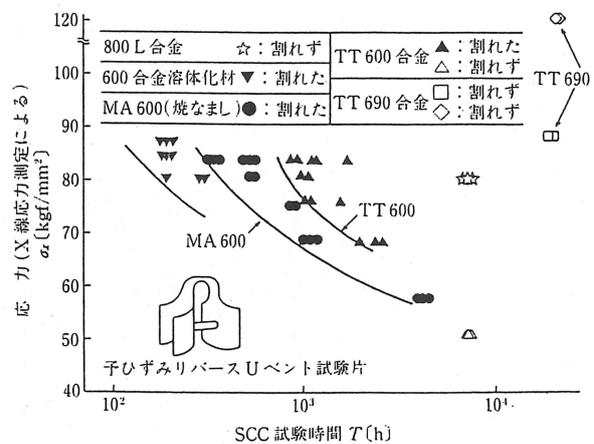


図-3 360°C一次系模擬水中PWSCC

的に施栓することとした。海外ではU字管曲げ部に電熱ヒータを挿入しヒータ加熱による熱処理により応力除去する方策も採用された。しかし、運転開始前に応力除去熱処理を実施したプラントでは効果が大きかったが、運転開始後に適用したプラントでは既に微小クラックが存在する可能性が高いことからその効果は適用時期によっては限定されたものであった。

川内1号機以降の特殊熱処理管（インコネル-600TT材或いはインコネル-690TT材）採用プラントはU字曲げ加工後R-10まで応力除去し、U字部のPWSCC防止を図っている。

1-2) 管板拡管部／拡管境界部PWSCCについて

a) 損傷事例とその原因

管板部では内圧等による引き抜き力に対して、伝熱管を機械式ローラ拡管で管板に密着させ保持している。初期の4プラント（美浜-2、高浜-1、2、玄海-1）は管板下部約60mmのみの部分拡管（1-2ステップのローラ拡管）であり、それ以降はクレビス除去の観点から管板全厚にわたる全厚拡管（22ステップのローラ拡管：ローラをズラしながら22回拡管を繰り返す）である。表-1に示すように拡管境界部及び拡管部にPWSCCが発生した（図-4参照）。拡管に用いるローラは硬い特殊工具鋼であり、その施工法により大きい引張り残留応力が生じることが判明した。

図-5に示すように正常拡管の場合管内面は圧縮応力となるが、拡管末端の境界部では管変形による比較的大きい引張り残留応力が、拡管施工が不十分の場合

（拡管ステップの重なりが不十分或いは管板管穴が不整である場合）には非常に大きい引張り残留応力が生じる。また大飯1号機に見られた様にローラの欠損等管理不十分なローラを使用すると拡管境界部に軸方向引っ張り残留応力が生じる。一般に拡管に伴う残留応力は周方向引っ張り応力が大きく、軸方向引っ張り応力はそれより小さくなっているため、主として軸方向PWSCCが検出される⁽⁷⁾。（図-3参照）。

しかし、表-2に示すように第二世代SGのうち拡管法改良の過渡期のSG（液圧拡管と全厚ローラ拡管併用）ではローラ拡管が不十分の場合は伝熱管熱処理（TT処理）後に拡管による冷間加工を加えることとなり耐食性向上効果を相殺してPWSCCが発生したものと考えられた⁽⁹⁾。

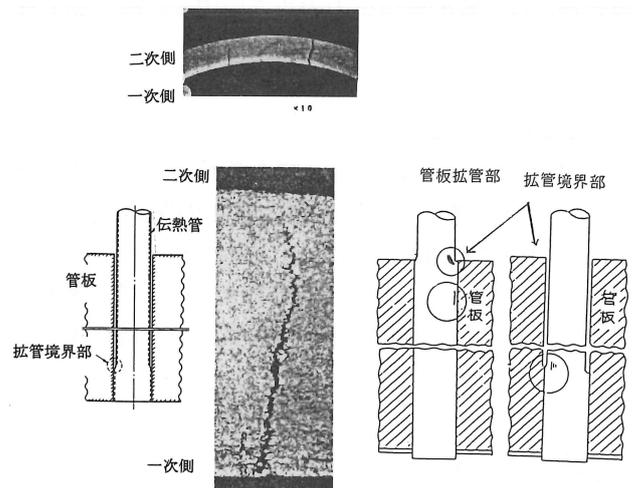


図-4 管板部PWSCC発生位置と損傷例

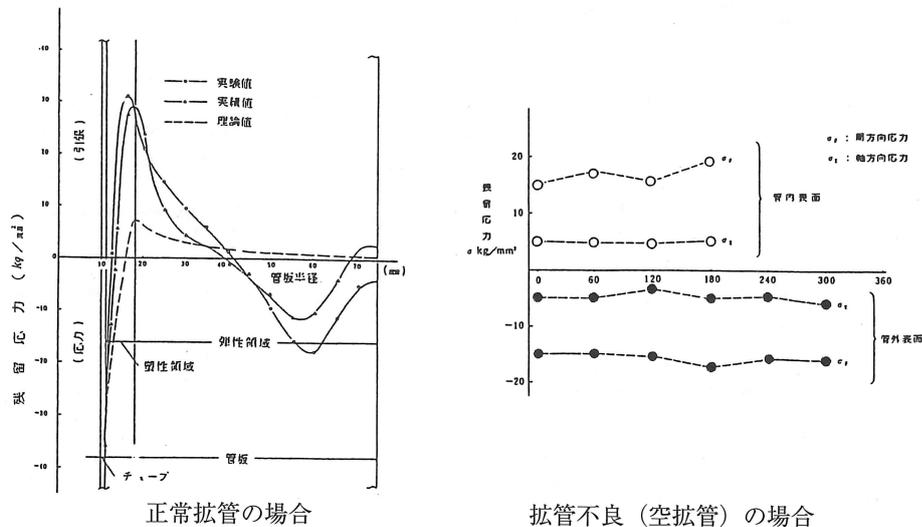


図-5 拡管による残留応力

表-2 SG設計パラメータの変遷

世代	第一世代	第二世代	第三世代
プラント名	美浜1,2,3 高浜1,2 玄海1,2 大飯1,2 伊方1,2	川内1,2 高浜3,4 敦賀-2 泊 1,2	大飯3,4 玄海3,4 伊方3 取替SG
伝熱管材料	MA600	TT-600	TT-690
管支持板形状/材料	Drill Hole/CS*1	BEC/SUS*3	BEC/SUS
拡管法	Mechanical (Roll) Expansion*2	Hydraulic Expansion*4	Hydraulic Expansion
伝熱管損傷	1次側	○(8プラント)	○(3プラント)
	2次側	○(9プラント)	-
	機械的損傷	○(5プラント)	○(5プラント)
SG取替	全プラント	なし	-
注	*1:美浜-1はEgg Grate/Drill/CS *2:高浜-1, 2 & 玄海-1は部分口一拡管	*3:川内-1はDrill/SUS *4:川内-1,高浜-3,4は液圧拡管+全厚ローラ拡管 他は液圧拡管+1ステップローラ拡管	

b) 検査技術の改良

管板拡管境界部は管変形によるECTノイズ信号が大きく欠陥信号の検出が困難な場合がある。このため境界部を細かい領域毎に信号検出する(コイルピッチを2mm→1mmに)ことで境界部変形信号を抑えること及びプローブを管内面に密着させ運動によるノイズを抑え欠陥検出性向上を図ったプローブを開発し適用した。これらは軸方向PWSCCのためボビン型プローブで良かったが、大飯1号機の周方向PWSCCはボビン型では検出不可であり、発生可能性ある部位にはバンケーキ型の8×1プローブを適用した⁽⁸⁾。

c) 損傷防止対策

対策としては損傷管には施栓或いはスリーブ補修によったが、予防対策として、①部分拡管プラントに対しては施栓に加えてリロール(クレビス閉鎖)による拡管境界部の移動(新たな境界部にする)或いはリロール後に応力除去のためショットピーニングの施工、後半のリロールでは残留応力の低減が図れる液圧拡管を採用した⁽⁵⁾。②全厚拡管プラントは運転開始後の応力除去はその効果が限定されることから施栓或いは予防スリーブ補修によった。海外ではショットピーニング等の応力除去が施工された。

新設SGの管板拡管は表-2に示すように第二世代SGから液圧拡管法を採用し残留応力低減に努めた。液圧拡管では拡管長さの管理が難しく初期(3プラント)

は液圧拡管と22ステップのローラ拡管を組み合わせ残存クレビス長さの管理を行ったが技術開発により以降のプラントは液圧拡管のみでクレビス管理が可能となり液圧拡管+1ステップローラ拡管とした。

1-3) 補修部でのPWSCCとその対策について

- ・管板クレビス部OD-SCC対策で施工した機械式スリーブ⁽⁷⁾の上端部の伝熱管拡管境界部でPWSCCが発生した(1986年)。原因は機械式スリーブ施工でクレビス内に腐食生成物が蓄積した状態で管及びスリーブをローラ拡管したため拡管不整による高引張残留応力によるものと考えられた。
- ・美浜-1号機の減肉対策として予防施栓に用いた爆着栓(火薬による爆発力を利用して密着)の拡管境界部でPWSCCが発生した(1983年)。対策として施工時被爆の低減が図れるインコネル-600TT製メカニカルプラグ(棒材から加工により製作)に取り替えた。
- ・海外では図-6に示すようにインコネル-600TT製のメカニカルプラグの中子引き抜きによる押し抜け部で周方向PWSCCが発生しプラグ頂部分離し、内圧によりそれが飛弾し、U字部で管を貫通し漏洩事故を引き起こした(1989年)⁽¹⁰⁾。このためわが国では予防的に高温側のインコネル-600TT製のメカニカルプラグを全て取り替えの未然に損傷防止を図った。旧プラグを切削、除去後、当時開発されていた格段に耐食性に優れたインコネル-690TT製のメカニカルプラグを再取り付けするものである。これらの経験から補修を含む新技術の採用に当たっては十分な実証試験による健全性確認の必要性を痛感した。

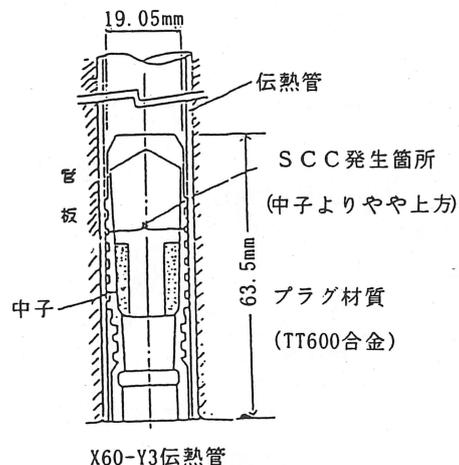


図-6 メカニカルプラグの破損例(ノースアンナ1号機)

・ 補修部の健全性について

美浜 1 号機の爆着栓のPWSCCに鑑み、新たに採用する部品の健全性確認の重要性が認識され、以降採用したメカニカルプラグ及びろう付けスリーブ、レーザ溶接スリーブについて実機模擬環境下での健全性実証試験により長期健全性の確認を行った。インコネル-600TT材のメカニカルプラグは実証試験では長期信頼性が得られていたが、米国での実機メカニカルプラグのPWSCCはTT温度等の差異により金属組織（粒界Cr炭化物析出程度）が変わりSCC寿命が異なることが判明したが、図-3に示すように応力が大きければインコネル-600TT材でもSCC感受性を有すると判断し取替えを行った。

2. 伝熱管の機械的損傷について

2-1) フレティング磨耗

a) 損傷事例とその原因

SGの伝熱管U字部領域の二次側はボイド率約90%の水-蒸気二相流が約4m/sで流れている。このため流動励起振動防止のため伝熱管U字部は振れ止め金具（Anti-Vibration Bar:AVBと言う）により4点で支持されている（図-7(a)参照）。表-1に示すように長時間運転後の実機SGでAVB部に摩耗減肉が発生した。AVBと伝熱管の間に比較的大きい隙間が存在すると振動防止の役目が果たせず、管に流動励起振動が発生し⁽⁷⁾、この振動の振幅はAVBとの隙間量で制限される。管はAVBとの衝突により摩耗減肉損傷が発生したものと考えられ、運転時間と摩耗量の程度から当時の知見からこの振動は流動励起ランダム振動と考えられた。

しかし、この損傷経験を反映して管-AVBの隙間を出来るだけ小さくするため、設計通りの管ピッチで微小隙間となるようAVBの組立に改良を加えた高浜3号機等に比較的短時間でAVB部に摩耗減肉が検出された。これらはランダム振動からは予想できない摩耗速度であり、各種情報及び研究から起振源は強い励振力を持つ流力弾性振動により管がAVBと衝突、すべりによる摩耗減肉の可能性もあると評価された（AVBの組立法の改良は大きい隙間は無くしたが結果的に小さい隙間が多く存在するものとなった）。

b) AVB部振動防止対策

既設SGに対しては、磨耗の起こりにくい材料を用いて、図-7(b)に示すように管-AVBの隙間を零とするFlexible AVB（Slot付きAVBとSlide式AVBを組み合わせたもの）と交換する事とした。また新設SGの製作ではAVB支持点が6点となる3本組AVBとし、管外径計測データを基に管-AVBの隙間がほぼ零となるように組み立てることとした。

対策を実施したSGは以降両者ともAVB部での磨耗損傷は発生していない。

2-2) フレティング疲労

1991年2月美浜2号機の最上段管支持板直上部の低温側伝熱管が破断事象が発生した。破断原因はAVBが正規の位置まで挿入されていなかったことから二次側の高流速の水-蒸気二相流（約4m/s）条件下で長期間にわたり流力弾性振動が生じ、管-管支持板間のクレビス部に腐食生成物が硬く充満し固着状態であったため管支持板部でフレッチング疲労による周方向クラックが発生し破断に至ったものと考えられた⁽¹²⁾。損

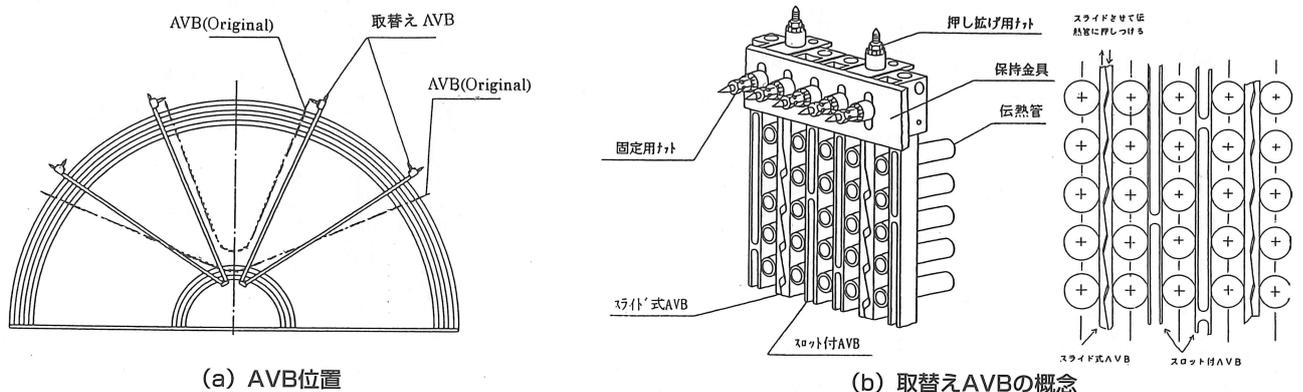


図-7 AVB位置と取替えAVBの概念

傷メカニズムについては図-8 参照。

破断管周囲の伝熱管は多くが初期の燐酸減肉損傷で施栓されており、またECTでは欠陥信号抽出のためノイズ信号源であるAVB信号を演算除去して評価していたためAVBの有無確認がなされなかったことも長期間気づかなかった要因となった。本事象は我が国で初めてECCSが作動しプラントは安全に停止したが、幾多の課題が指摘された。SG関連では検査技術の向上、経年変化状況の評価及び損傷に係わる知見の整備等であり、多大な努力の結果現在は格段にSG技術が向上してきた。

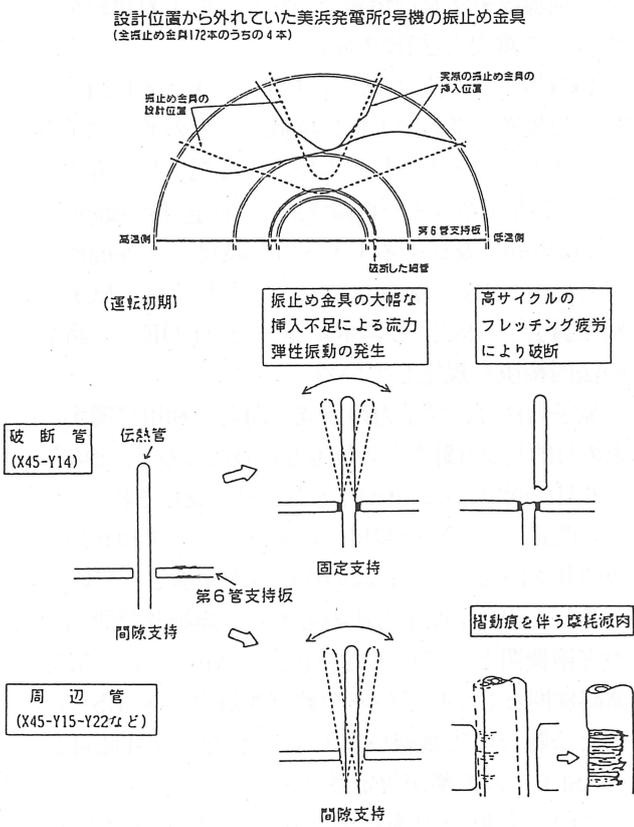


図-8 美浜2号機伝熱管破断のメカニズム

3. まとめ

前号まで腐食減肉、IGA/SCC等二次側の伝熱管腐食損傷に続き、本号で一次側損傷及び二次側からの機械的損傷の原因、対策のための技術開発について紹介したが、対策で採用した新技術の幾つかについては再度腐食損傷が発生したり、発生が予測されたものが出てきて多大の努力が費やされ、健全性確認の必要性が痛感させられた。これらには適切な試験法の確立等課

題も残されている。次号ではこれらを踏まえ開発した耐食性に格段に優れた第三世代SGの開発と第一世代SGの抜本的損傷対策としてSGの取替えについて及び最近のSGに係わる課題等について述べる。

参考文献

1. H.Coriou, L.Grall, Y.Le Gall, S.Vettier : 「Corrosion Fissurante Sous Cntrainte De L'Eau A Haute Temperature」, 3rd Colloque de Metallurgie Corrosion, Centre d'Etudes Nucleaires de Saclay, France. Amsterdam : North Holland Publishing Co., 1959, p.161
2. H.J.Schenk : 「Investigation of Tube Failures In Inconel 600 Steam Generator Tubing at KWU Obrigheim」, Material Performance (March 1976) : 25
3. O.S.Tatone, R.S.Pathania : 「Steam Generator Tube Failures : Experience with Water-Cooled Nuclear Power Reactors during 1976」, AECL-6095, February 1978
4. EPRI Steam Generator Reference Book, May 1, 1985
5. 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(2)」, フォーラム保全学, Vol.1, No.3, April 2003, 日本AEM学会
6. S.Yashima, K.Uragami, H.Utsumi, et al. : 「Stresses of Steam Generator U-Tubes Affecting Stress Corrosion Cracking」, ASME Paper 82-NE-5
7. 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, AESJ, April 1988
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, (2001)
9. EPRI TAG Presentation, Nov.1999 : 「Japanese SG Operating Experiences and Related R&D Program」
10. R.E.Gold, et al. : 「PWSCC of Alloy600TT Mechanical Plugs : Destructive Examinations of Plugs Removed from Service and the Results of Laboratory Corrosion Tests」, Colloque International, Fontevraud-2, SFEN, September 10-14, 1990
11. 通商産業省資源エネルギー庁「関西電力(株)美浜発電所2号機蒸気発生器伝熱管損傷事象について」, 平成3年11月 (平成15年5月6日)