

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 高松 洋

本論文は、加圧水型原子力発電所（PWR）の蒸気発生器伝熱管の信頼性向上を目的として、伝熱管材料であるインコネル 600 の過去の損傷経験を踏まえながら材料および環境の両面から IGA（粒界腐食割れ）クラックの発生要因と腐食防止対策について研究したものである。さらにこれらの知見に基づいて伝熱管の検査技術の向上に関する検討も行っている。最後に、これら多方面にわたる知見を総合化して種々の改善策について考察し、それらを織り込んだ改良型蒸気発生器の取り替え策について検討している。

本論文の構成は、以下の通りである。

第 1 章は序論であり、我が国における原子力発電の必要性について述べ、原子力プラントの利用率の向上には蒸気発生器の信頼性確保が大きい役割を担っていることを指摘している。更に過去の蒸気発生器の主要損傷である伝熱管二次側損傷の実態とその対策としてこれまで実施されてきた状況の 2 点について紹介した後、本研究の特徴と構成について述べている。

第 2 章では高温アルカリ環境条件下でのインコネル 600 材の IGA 発生要因について検討している。実験によれば高温アルカリ環境下では 600MA > 600FS > 600TT の順に IGA（粒界腐食割れ）感受性が低下している。インコネル 600 材を使用している実機伝熱管から損傷管及び健全管の両方を抜管し結晶粒界の特性を調べ両者を比較した。その結果 IGA はアルカリ環境下で発生していたが、水質の改善によって、ほぼ中性の環境を実現したがそれでもき裂の進展が多く見られた。これは微小き裂がすでに存在していたためと推定された。

インコネル 600 材の耐食性向上には特殊熱処理を加えて Cr 欠乏層を生成せずに結晶粒界に Cr 炭化物を多く析出させることが有効であるが、そのような熱処理をして製造されたインコネル 600TT 材が IGA 防止という観点から最も秀れていることを明らかにした。

第 3 章では損傷発生箇所である管支持板クレビス部における不純物の挙動を解析している。実機蒸気発生器のクレビス部は狭あいであるためその環境を直接測定することが出来ない。したがって従来からプラント停止時のハイドアウトリターン現象を利用して蒸気発生器内水中に拡散排出されてくる不純物濃度を測定して、クレビス部の環境（PH）を評価してきた。評価に際しては排出される不純物は全てクレビス部からのものであることまたクレビス部では蒸気発生器内水濃度の 10 倍濃縮するとの仮定を行っている。近年水質改善が進んだこと及びブローチ型管支持板を採用するなど設計改善の進んだ蒸気発生器ではハイドアウトリターン量が少なく上記仮定が必ずしも適用できない状況になっている。このためここではクレビス部を模擬したサンプリング機構を備えたクレビス濃縮装置を開発し実機蒸気発生器内水を使用してきてクレビス濃縮液を採取し、各イオン種濃度に基づく化学平衡解析による高温 PH 値を評価する方法を確立している。

更に別途開発したクレビス濃縮解析コードを使用して、日常の測定データからクレビス

環境 (PH) を評価できることを実験との比較で確認している。このようにして IGA クラックを防止するためのクレビス環境の管理手法を確立した。これらの解析結果と蒸気発生器内水データの相関性の評価から、クレビス環境を腐食しにくい範囲 ( $5 < \text{PH} < 10$ ) に維持するには、蒸気発生器内水のイオン濃度をパラメータとして、 $\Sigma \text{C}$  (全カチオンのモル当量) /  $\text{SO}$  (モル当量) のモル比  $> 1$  及び個別イオン濃度管理 ( $\text{Na}, \text{K} < 0.7 \text{ ppb}, \text{Cl} < 1.5 \text{ ppb}$ ) を併用することで達成できることを明らかにして目標の達成に向けて大きく前進している。

第 4 章では蒸気発生器伝熱管健全性確保のための現状の検査技術を述べ、検出精度の向上を狙った新高機能プローブの開発現状を紹介している。このとき数値解析技術を利用してプローブの有効性を検証する数値シミュレーションが適用された。次に解析の高速化をはかるためき裂領域を含む想定領域の各接点でき裂が無い状態で予め解析しデータベースとして記憶しておく手法を開発し、従来法の解析に比べて解析時間が約  $1/100$  という高速化を計っている。

欠陥信号から欠陥の再構成を行う逆解析においては、想定欠陥信号と実測欠陥信号の差が最小になるよう共役勾配法を用いた。これによる逆問題解析結果では EDM (放電加工) き裂形状と再構成された形状は良く合っており、またワークステーション (SGI, Indigo2) での解析時間も反復回数 300 を超えても約 20 分である。ノイズを測定データに入れても良い再構成結果が得られている。今後は自然クラックに対しても評価できる手法の開発が望まれている。

第 5 章では改良点、問題点にスポットを当てながら蒸気発生器の取替えについて述べている。腐食感受性を有する伝熱管損傷防止対策として二次系水質管理の改善、材料面から耐食性に優れたインコネル 690TT の採用、局部濃縮が抑えられるブローチ型管支持板の採用、製作面から残留応力を低減した液圧拡管法の採用等が取り入れられている。これまでの研究成果、従来の知見を総合化した改善策が集大成されたものとして改良型蒸気発生器が提案され実施されてきた。

以上のように、本論文は加圧水型原子力発電所の蒸気発生器の伝熱管の損傷を対象に、現象を解明し、改善策を提案・実施した結果を解析・分析しており、原子力施設の信頼性・安全性向上に資するところ大である。よって本論文は博士 (工学) の学位請求論文に合格と認められる。