



平成 11 年 8 月 30 日
日本原子力発電株式会社

敦賀発電所 2 号機の原因調査・解析状況について

平成 11 年 7 月 12 日に格納容器内での 1 次冷却水漏えいにより手動停止しました、当社、敦賀発電所 2 号機（加圧水型軽水炉：定格出力 116.0 万 KW）につきまして、原因究明のために、割れが確認された配管エルボ及び管台の民間試験施設での破面に関する調査や引張り試験等及び現場での再生熱交換器健全性確認調査等を実施しております。

また、損傷原因調査計画に基づき解析評価を実施するとともに、解析評価のベースとなる再生熱交換器内部の流動を模擬した試験等を実施しております。

8 月 12 日にこれまでの点検・調査状況をお知らせいたしましたが、その後に判明しましたことを別紙のとおりとりまとめましたので、お知らせします。

今後、引き続き中段再生熱交換器胴本体の調査（切断した試験片の民間調査機関での詳細調査）を実施するとともに、流動模擬試験で得られたデータを用いてさらに詳細な解析評価を行い、原因を特定してまいります。また、これら原因調査結果を踏まえ、再発防止対策の検討を行ってまいります。

以上

別 紙	<u>敦賀発電所 2 号機の原因調査・解析状況について</u>
別 添 1	<u>損傷原因調査計画の全体概要</u>
別 添 2	<u>再生熱交換器抽出側配管損傷要因分析図</u>

敦賀発電所2号機の原因調査・解析状況について

本報告は、「損傷原因調査計画の全体概要」（別添1）及び「再生熱交換器抽出側配管損傷要因分析図」（別途2）に基づき実施している当該エルボ及び上流側管台の詳細調査結果、解析評価、流動模擬試験の予備的試験の実施状況等について取りまとめた。

1. 発電所における再生熱交換器に関する調査

【1】再生熱交換器胴本体の超音波探傷試験等

再生熱交換器中段の抽出側出口管台付近の再生熱交換器胴について超音波探傷試験を実施した結果、5箇所の領域に指示が認められた。中段熱交換器胴はその後切断し、切断した胴及び鏡板について内面の浸透探傷試験を実施した結果、胴内面に熱疲労割れに特有の亀甲状の指示が多数認められた。また切断後、内筒第二支持リングと胴内側との間隙を測定した結果、上下左右とも直径で約3mmであった。

なお、再生熱交換器上段及び下段の抽出側出口管台付近の胴について超音波探傷試験を実施した結果、指示は認められなかった。

【2】再生熱交換器下段支持脚と架台の拘束状態調査

再生熱交換器下段支持脚（摺動側）の拘束状態を確認するため、熱膨張による方法と油圧ジャッキによる方法で支持脚に荷重を加えた結果、支持脚が移動することを確認した。また、支持脚の締付けボルトの状態を確認した結果、過大締付け等の異常は無かった。

2. 民間調査機関等での調査

【1】破面に関する調査

（1）再生熱交換器と同じ材質であるSUS316について疲労試験を行い、き裂伝播速度と疲労破面の関係を観察した結果、き裂伝播速度が比較的遅い場合に損傷エルボ部の破面に認められた組織状模様等が生じることが確認された。

冷却材の漏えいに至った貫通割れは、定期検査時期に対応すると推測されるビーチマークが8本観察されていること等から、比較的長時間かかって割れが貫通に至ったと考えられる。

（2）貫通割れの破面の酸化膜厚さを測定した結果、割れの先端に行くに従って酸化膜は徐々に薄くなっていることがわかった。

【2】 引張り試験

当該エルボ及び管台から引張り試験片を切出し、試験を実施した結果、耐力等の機械的性質は規格値内に入っており、異常のないことがわかった。

【3】 管台サーマルスリーブに関する調査

当該エルボの上流側管台サーマルスリーブは、周方向で内面の色合が異なっているため、酸化膜厚さを測定した結果、酸化膜厚さに有意な差があることが認められた。このことから、サーマルスリーブの周方向で温度が異なっていた可能性があると考えられる。

3. 損傷要因分析の結果

これまで実施してきた敦賀発電所における調査や民間調査機関における破面調査等の結果を踏まえて検討評価した結果、今回の損傷は高サイクル熱疲労によるものである可能性が高いと考えられる。

4. 解析評価等

【1】 解析評価の考え方

- (1) 今回の損傷原因は、熱疲労割れであると推定されることから、当該部には、定常的に作用する「平均応力」と温度変動で生じる「変動応力」が作用していたことが考えられる。
- (2) この「平均応力」と「変動応力」を区分して、それぞれ検討する。
- (3) 平均応力については、応力解析や実測値から評価する。
- (4) 変動応力については、破面観察の結果や再生熱交換器内部の流動状況を模擬した試験の結果等を踏まえ、熱流動解析、応力解析、熱変形解析、疲労解析、亀裂進展解析等を実施し、評価していく。

【2】 平均応力について

- (1) 定常的に作用する「平均応力」としては、下記が考えられる。
 - a. 圧力、熱によって生じる運転応力（運転応力）
 - b. スライド脚の拘束によって生じる応力（拘束応力）
 - c. 建設時の据付けによって生じる応力（据付応力）
 - d. 素材製造時の残留応力（素材/溶接残留応力）
- (2) 運転応力は、運転圧力と温度から有限要素法を用いた応力解析によって求める。
- (3) 拘束応力及び据付応力は、現地調査の結果を用いて、応力解析によって求める。

- (4) 素材/溶接残留応力は、実機のみでなく、同じ製造方法で製造されたものからデータを採取し、それらを踏まえて評価を行う。

【3】 変動応力について

- (1) 変動応力の発生メカニズムを確認するため、また、この変動応力の作用を前提とした疲労解析の妥当性を検証するため、再生熱交換器内部の流動模擬試験を実施中である。

これまでに実施した予備的試験の結果では、バイパス流が存在するため抽出水出口付近に温度変動が認められること等が確認されている。

特に、再生熱交換器胴に対し内筒支持リングを下に偏心させると、胴内部のバイパス流に低温領域が生じ、上に偏心させると、低温領域が解消されるという現象が、また、内筒支持リングの上下位置によって再生熱交換器内部の流動状況が異なることなどが確認されている。

なお、実機データ等からバイパス流の評価を行ったところ、バイパス流量は約40%（設計目標値約23%）であり、主流とバイパス流の温度差は約80℃（設計目標値約65℃）であった。

これまでの試験結果から

a. 内筒支持リングが下偏心すると、低温領域が生じて再生熱交換器胴の上下に温度差が生じ、胴本体が熱変形する。

b. 胴本体が熱変形し、内筒支持リングが上偏心の状態に近づくと、低温領域が解消される。これにより、胴本体の変形が元に戻り、内筒支持リングが再度下偏心する。となることが考えられる。すなわち、胴本体の変形により内筒支持リングが下偏心している場合と上偏心している場合が交互に生じ、これにより流動状況が変化し、温度変化（スイッチング現象）を与えると推定されるので、今後、詳細な流動模擬試験や解析評価を実施していく予定である。

- (2) 破面観察の結果、貫通に至った割れ等には明瞭なビーチマークが観察されている。

このビーチマークの寸法をもとに、破壊力学を用いて変動応力を評価することが可能と考えられるので、今後、詳細検討を行う。

5. 運転履歴調査結果

敦賀発電所2号機の化学体積制御系再生熱交換器を含む充てん・抽出系統に関して、運転開始から平成11年7月（再生熱交換器からの漏えい発生）までの運転履歴について、運転関係記録類を対象に調査を行った。

調査の結果、充てん・抽出系統に対し、温度・圧力の急激な変化を与える異常・故障事象の実績はなかった。また、運転状態における温度・圧力の変化状況は、通常運転範囲であった。

6. 今後の主な調査計画

【1】 再生熱交換器胴本体の調査

再生熱交換器中段の胴からUT指示の最大エコー部1箇所を切断し、民間調査機関へ移送して詳細調査する。

【2】 解析評価

流動模擬試験で得られたデータを用いて、さらに詳細な熱流動解析、応力解析、熱変形解析、疲労解析等を実施し、再生熱交換器内部で発生する温度変動（スイッチング現象）やその結果生じる各部の熱応力を評価にするとともに、今回のような損傷が発生し得るか、検討、評価する。

【3】 流動模擬試験

バイパス流量や内筒支持リングの隙間を変化させて試験を実施し、再生熱交換器内部の流動状況の確認や各部の温度計測を実施し、解析評価のデータベースとする。

7. 再発防止対策についての検討

現在進めている原因調査結果を踏まえ、以下の項目等について再発防止対策の検討を行う。

【1】 設計・施工

大きな温度変動が発生しにくい構造への改善等

【2】 保守

亀裂の早期発見方法（点検・検査の充実等）

【3】 運転管理

漏えい量を最小限化するための運転管理面の見直し（漏えい箇所絞り込みのための監視方法の充実等）

【4】 技術開発の推進

検査技術の高度化等

以上

損傷原因調査計画の全体概要

1. 製造履歴調査

- (1) 再生熱交換器、エルボ、連絡配管の製造履歴
- (2) 設計、製作、構造、材料、製造プロセス、等
- (3) 施工プロセス等

2. 運転履歴調査

- (1) 今回漏えい発生前後の運転パラメータ挙動調査
- (2) 過去の運転履歴調査

3. 保修復歴調査

- (1) 点検履歴調査
- (2) 保守履歴調査

4. 損傷メカニズム調査

- (1) 現地調査
外観調査、寸法調査、拘束測定、等
- (2) ラボ調査
破面調査、ミクロ組織観察、残留応力測定、等

5. 解析評価

- (1) 通常運転時発生応力評価
- (2) 連絡配管拘束条件下での応力評価
- (3) 疲労評価
- (4) 疲労き裂進展解析
- (5) 振動解析

6. 過去の事象との比較検証

7. 推定原因に関する検討評価

1～6を踏まえた推定原因に関する総合評価

再生熱交換器抽出側配管損傷要因分析図

