

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                             |                         |                                   |                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------|
| UME－320                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 資料の出典（資料名、著者、巻、号、頁など）<br>Z.-G. Yang, Y. Gong and J.-Z. Yuan: Materials and Corrosion 2012, 63, No. 1                                        |                         |                                   | 本資料の作成者名<br>・<br>梅村文夫                               |
| 整理番号                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 資料のタイトル<br>Failure analysis of leakage on titanium tubes within heat exchangers in a nuclear power plant. Part I: Electrochemical corrosion |                         |                                   |                                                     |
| 失敗事例のタイトル<br>熱交換器チューブの拡張部隙間（管／管板間）部に生じた各種障害                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                             |                         |                                   | 一次原因（材料要素）<br>異種金属接触腐食、隙間腐食、水素誘起腐食（水素脆化、ブリストリング）、減肉 |
| 機種<br>多管式熱交換器                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 部品<br>チューブ                                                                                                                                  | 材料<br>チタン/<br>Gr.2 純チタン | 使用環境<br>チューブ外面側：脱塩水<br>チューブ内面側：海水 |                                                     |
| 損傷発生時の状況<br>中国で運転されている原子力プラントの循環水の多管式熱交換器のチタンチューブ（径 19、厚さ 0.71、長さ 14630 mm）で生じた事例である。運転開始後 3 年（2003～2006 年）で、多数のチューブに閉塞、減肉、機械的強度の低下、漏洩等が頻繁に発生するようになり、運転の安全性と経済性を著しく損なう事となった。<br><br>本熱交では、チューブ外面側は循環冷却水が、チューブ内面側は土砂を含む海水が流れていた。循環冷却水の温度は 41.5℃（入口）～35℃（出口）であり、海水の温度は 30.5℃（入口）～35.1℃（出口）であった。                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                             |                         |                                   |                                                     |
| 調査内容とその結果<br>顕微鏡観察結果では、損傷を受けた部分及びその近傍と、損傷部から離れた健全のまま残っている材料について、両者間の相違は見られなかった。<br>チューブ健全部の材料調査の結果、チューブの材質は、Gr.2 の純チタンであり、金属組織、強度も規格を満足している事が確認された。<br><br>熱交の入口管板はチタンクラッドの鋼製であり、海水に触れる入口側の拡張部近傍では、0.5 mm以下の隙間が存在していた。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                             |                         |                                   |                                                     |
| 損傷発生のシナリオ<br>熱交の入口管板はチタンクラッド（Gr.1 3 mm T）が施されている鋼板であり、管板入り口近くのチタン管と管板の管との間には管板の母材（鋼）にまで達する隙間（隙間幅 0.5 mm以下）が存在していた。管の拡張加工の工程管理が不十分であったために生じた隙間と思われる。そのため、鋼（卑）とチタン管（貴）間にガルバニックコロージョン（鋼が腐食）を生じた。また、海水に触れる入口側の拡張部近傍の隙間部では海水中の塩化物イオンが濃縮するとともに、鋼の腐食生成物が堆積しチタンの隙間腐食（デポジットアタック）を生じた。これらの腐食により、水素が発生し、HAC（hydrogen-assisted corrosion）が生じ、管に膨れが生じた。内面側に膨れた個所は、土砂を含む海水によるエロージョン等を受け、減肉した。<br><br>通常チタンの HAC は 70℃以上で生じる現象であるが、ガルバニックコロージョンやすきま腐食の影響を受け、35～40℃の本環境でも HAC、すなわち HB（hydrogen blistering）及び HE（hydrogen embrittlement）等を生じた。管内面側の膨れは HB に起因すると判断できる。 |                                                                                                                                             |                         |                                   |                                                     |
| 対策（損傷発生時にとられた対策あるいは現在とるべきと考えられる対策）<br>データを採録した原文では管板とチューブ管の隙間に樹脂を流し込み、隙間をシールする事が提案されている。<br><br>本損傷事例は中国の事例であり、土砂を含む海水を冷却用に用いたため、チューブの膨れた個所ではエロージョン・コロージョンを生じ、減肉した。日本国内では、土砂を含む海水を冷却用に使用する事は無い。対策として、土砂を巻き込まないようにして海水を取水する。土砂の巻き込みが避けられない場合は、フィルター等で土砂を除く事が、減肉の対策となる（データ採録者加筆）                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                             |                         |                                   |                                                     |
| 教訓<br>チタンの水素脆化やブリストリングは、ガルバニックコロージョンやすきま腐食が伴うと、70℃以下の温度でも生じる事がある。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                             |                         |                                   |                                                     |
| 備考                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                             |                         |                                   |                                                     |

|          |                   |           |             |
|----------|-------------------|-----------|-------------|
| 主要因      |                   | 教訓とすべき対象者 |             |
| チェックボックス |                   | チェックボックス  |             |
|          | 当時の技術レベルでは不可抗力    |           | 設計者         |
|          | 情報伝達不備・不足         | ○         | 製作者 / 建設担当者 |
| ○        | 担当者不勉強/教育不十分/意識不測 | ○         | 検査者         |
|          | 指示ミス              |           | 使用者         |
|          | うっかり、ぼんやり         |           | メンテナンス者     |
|          | その他               |           | その他         |

2 ページ以降に写真、図表等を添付してください