

平成20年12月25日
原子力安全対策課
(20-87)
<15時記者発表>

敦賀発電所2号機 高圧タービンからの蒸気漏れの原因と対策について

このことについて、日本原子力発電株式会社から下記のとおり連絡を受けた。

記

敦賀発電所2号機(加圧水型軽水炉；定格電気出力116.0万kW)は、平成19年8月26日から第16回定期検査中で、平成20年8月8日に調整運転を開始した後、9月16日、タービン弁の定期試験(1回/月)後に現場を確認したところ、高圧タービン主蒸気入口配管付け根部付近を覆う保温材より僅かな蒸気漏れを発見し、当該部の点検を行うため、同日23時39分、原子炉を手動停止した。

今回の蒸気漏れによる周辺環境への影響はなかった。

高圧タービン上部車室を点検した結果、蒸気の流れによりタービンの静翼が回転することを防ぐため車室に設置されているピン(回り止めピン)のうち、発電機側のピン1本のスミ肉溶接部で貫通傷が確認された。このため、下部車室についても点検したところ、回り止めピン2本のスミ肉溶接部で傷が確認され、他のスミ肉溶接部についても浸透探傷試験を行った結果、上部車室にある空気抜き穴の閉止栓1本のスミ肉溶接部でも傷が確認された。

傷が確認された溶接部を切り取り、試験研究機関にて詳細調査したところ、割れは全て溶接部底部から外表面に向かって貫通し、破面を観察した結果、溶接部での低温割れ^{*1}に認められる筋状模様(擬へき開破面)やブロック状模様(粒界破面)が確認された。また、調査のため採取した上部車室(制御装置側)の回り止めピンでも、溶接部外表面に傷は認められていないが、底部から上部に向かう割れが認められ、割れの様相は同様な特徴が認められた。

なお、硬さ測定の結果、溶接部は母材部に比べ非常に硬い状態であった。

高圧タービンは、今定期検査で耐食性向上の観点から、車室の材質を炭素鋼から低合金鋼^{*2}に変更しており、回り止めピンや閉止栓も同じ材質にしている。

低合金鋼を溶接する際には、溶接後の割れ等を防止するため、溶接前後で熱処理が必要となることから、工場での溶接や熱処理について調査した。その結果、熱処理を行ったことは確認されたが、溶接部の硬さが硬いことから、熱処理の効果が十分機能していないことも考えられた。このため、割れの原因をさらに特定し、今後の対策を検討するため、試験研究機関および工場において、タービン製作時の溶接および熱処理の再現試験を行うこととした。

[平成20年9月16日、9月19日、9月30日、10月31日 発表済]

- ※1 低温割れとは、溶接を行った後、溶接部の温度が常温付近に低下してから発生する割れで、溶接の数日後に割れることもあるため、「遅れ割れ」ともいわれる。
- 低温割れの原因は、溶接金属に溶解している水分（水素）と、溶接部の組織硬化、溶接に伴う拘束応力の3要素を基因として発生することが知られており、割れを防止するために、溶接前に母材や溶接棒を予熱し十分乾燥させる、溶接後には熱処理を行うことが必要である。
- ※2 低合金鋼は、炭素鋼より強度や耐食性を高めるため、炭素鋼に微量のクロムやモリブデンを添加している。この材料を溶接すると溶接部が硬くなり、水素を原因として溶接後に低温割れが発生することが知られているため、溶接前後で確実な熱処理が必要となる。具体的な例は以下のとおり。
- ・溶接材料の水素除去や、溶接後の硬化を防止するため、溶接前に材料を200℃以上に加熱（予熱）し、溶接作業中その状態を保つ。
 - ・溶接後は、溶接部の硬さを柔らかくし、割れを防止するため、溶接部全体を680～700℃まで加熱し15分以上保持する。

1. 調査結果

製作メーカー工場での回り止めピンのスミ肉溶接の施工について、作業指示書の作成状況や溶接作業の管理状況を確認した。また、作業実績の記録がなかったことから、溶接作業等からも聞き取りを行った。その内容を基に、溶接条件等をほぼ同等に再現した試験を行った。これらの結果、以下のことが判明した。

(1) 作業指示書の確認および作業からの聞き取り結果

- ・作業者は、作業指示書での予熱温度（200℃）に基づき、溶接前に溶接部（車室とピン）の表面をガスバーナーを使用して加熱し、接触式の温度計で200℃を確認後、加熱を止め、溶接中の加熱は実施していなかった。
- ・溶接後の熱処理では、溶接部全体を680～700℃まで加熱し、15分以上保持することが作業指示書に記載されており、作業者はガスバーナー1本で熱処理を実施し、ある程度全体を加熱した後、局部的に加熱し、この部分が所定の温度に到達したのを確認したため、加熱を止めていた。
- ・溶接時の電流等の溶接条件は、問題なかった。

(2) 再現試験での結果

- ・予熱温度確認試験の結果、溶接開始時には200℃を下回り、溶接中には約100℃まで温度が低下し、必要な予熱温度が保持できていなかった。
- ・溶接後の熱処理温度確認試験の結果、局部的に集中加熱していたことや保持時間が守られていなかったことから、加熱部以外は約380℃までしか上がらず、溶接部の硬さを柔らかくするために必要な温度が確保されていなかった。
- ・今回のスミ肉溶接部は、ピン側の厚み約9mmに対し、車室の厚みは約140mmと非常に厚いため、ピン溶接部の熱処理に関して、加熱した熱が車室側に大きく伝熱することを十分考慮する必要があることがあった。
- ・ガスバーナーを用いて加熱した場合、プロパンガスの燃焼反応により水分が発生することから、ピンが全体的に十分予熱されていない場合、温度の低い車室とピンとの隙間に水滴が残存する可能性があることが確認された。

- ・再現溶接の試験材について、溶接終了90時間後に溶接部表面の浸透探傷試験を行ったところ、表面に傷は認められなかったが、溶接部の断面観察では、溶接部の底部から上部に向かう割れが、複数箇所で見られた。
- ・これらの破面を電子顕微鏡で観察した結果、低温割れの特徴である擬へき開破面や粒界破面が認められ、硬さ測定でも、溶接部が母材部に比べ硬いままであったことから、低温割れが発生していたと判断された。

(3) 品質保証体制の調査結果

- ・高圧タービン車室の材質を炭素鋼から低合金鋼へ変更した際、車室の熱容量や熱処理にガスバーナーを使用することを考慮した作業指示がなされておらず、適切な作業が実施されていなかった。
- ・車室の材質を変更することについて、設計上の検討は行われていたが、溶接施工条件の妥当性確認が不足していた。また、ピンは車室の一部と考え、ピンに特化した検討は行われなかった。
- ・溶接作業の実績を記録する指示がされていなかったことから、記録が残っておらず、作業実績が確認できなかった。なお、日本原電の品質管理において、当該部の溶接検査は製作メーカーの自主検査範疇であるため、記録の提出は要求していなかった。

2. 推定原因

調査結果から、以下のことが確認された。

- ・溶接前の予熱および溶接中の温度保持が不足し、水素が存在していた。
- ・溶接後の熱処理が不十分であったため、溶接組織が硬いままであった。
- ・板厚の厚い車室にピン等を挿入してスミ肉溶接を行っており、溶接後、当該部には拘束応力が作用していた。

以上のことから、回り止めピン等の溶接部で発生した割れは、溶接時の熱処理が不十分であったことが原因で発生した低温割れと推定された。

また、溶接時の熱処理が不十分となった背景には、熱容量の大きな高圧タービン車室の加熱方法および温度保持等に対する検討や指示が不十分であり、製作メーカーの品質保証体制に問題があったものと考えられた。

3 対策

今回、低温割れが確認された回り止めピン4本と空気抜き穴閉止栓1本、また傷は確認されていないが同じ構造の回り止めピン4本と空気抜き穴閉止栓1本の計10本を、低温割れの感受性が低い炭素鋼に変更したピンおよび閉止栓にて車室に溶接し復旧する。この溶接時には、均一に管理温度まで加熱、保持出来る電気パネルヒーターを用いて確実に熱処理を行う。

溶接作業実施にあたり、製作メーカーは、溶接作業指示の明確化や溶接記録の充実を行い、日本原電は、これらの改善が行われ、溶接作業に問題がないことを確認するとともに、溶接作業に立ち会い、施工状況を確認する。

また、高圧タービン周りの溶接部のうち、必要な温度まで加熱、保持されていたことを示す記録の無い49箇所について、溶接金属の変更等を含め、溶接をやり直す。

今回の原因は、タービン製作メーカーの管理不良であったことから、製作メーカーの品質管理の充実を図るとともに、今後、日本原電は、発注した製品が製作メーカー工場において適切に製作されていることを検証するため、材質や形状等の設計変更を伴う工事等について、品質管理や工場監査の充実を行い、製作メーカーの製作過程における管理を徹底する。

今後、これらの対策を行うこととし、原子炉起動は平成21年2月中旬頃になる見込みである。

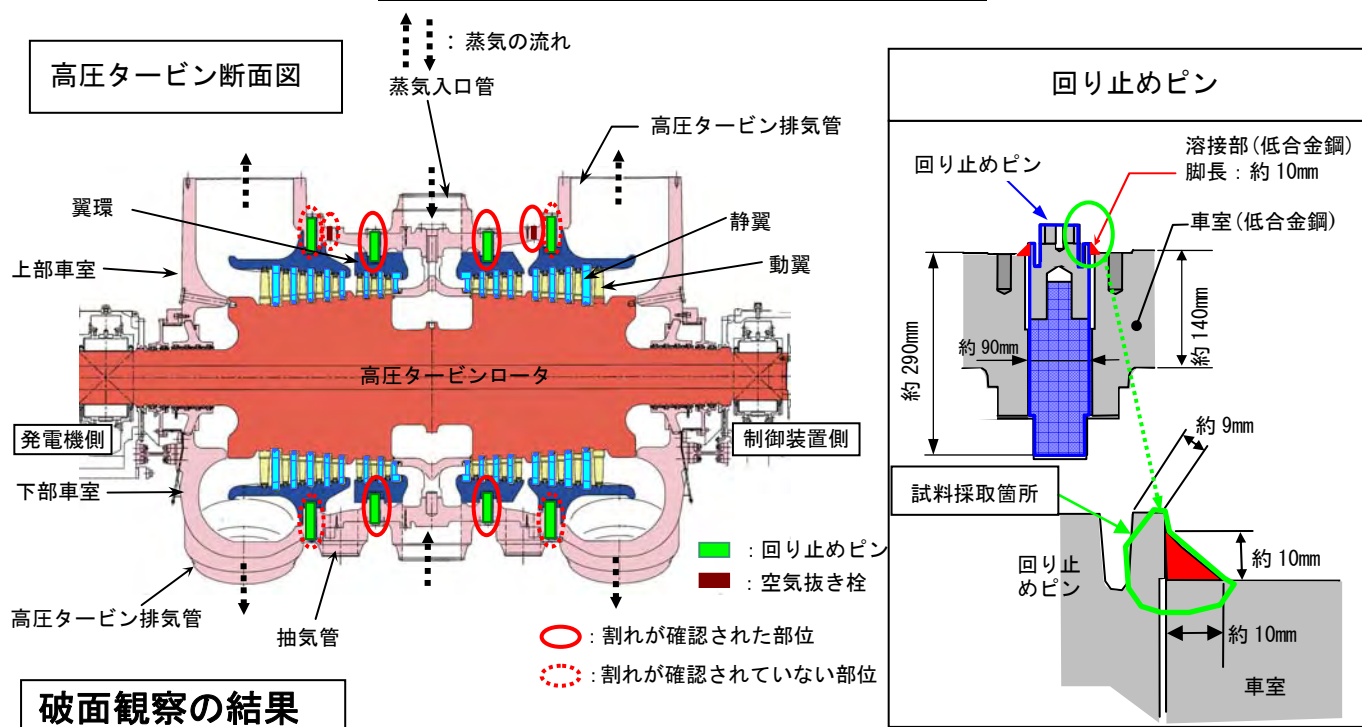
(経済産業省による I N E S の暫定評価)

基準 1	基準 2	基準 3	評価レベル
—	—	—	評価対象外

I N E S : 国際原子力事象評価尺度

問い合わせ先(担当: 吉田) 内線2352・直通0776(20)0314

高圧タービンからの蒸気漏れの原因と対策



破面観察の結果

	高圧タービンの回り止めピン	再現試験の回り止めピン
断面マクロ組織観察結果	<p>溶接部 (HV 300~450 程度)</p> <p>熱影響部</p> <p>溶接部は母材と比べ硬い状態のままであった</p> <p>溶接金属</p> <p>回り止めピン (平均 HV 約 170)</p> <p>車室 (平均 HV 約 180)</p>	<p>回り止めピン</p> <p>溶接金属 (HV 330~430 程度)</p> <p>割れ</p> <p>模擬車室</p>
断面マクロ組織観察結果 (割れ全景拡大)	<p>外表面</p> <p>回り止めピン</p> <p>割れ</p> <p>溶接金属</p> <p>車室</p>	<p>外表面</p> <p>回り止めピン</p> <p>溶接金属</p> <p>割れ</p> <p>模擬車室</p>
破面電子顕微鏡観察	<p>筋状模様 (擬へき開破面)</p> <p>ブロック状模様 (粒界破面)</p> <p>0013 15KV X500 10µm WD37</p>	<p>筋状模様 (擬へき開破面)</p> <p>ブロック状模様 (粒界破面)</p> <p>5331 25KV X500 10µm WD38</p>

低温割れの推定メカニズム

予熱	溶接作業	溶接後の熱処理
<ul style="list-style-type: none"> ・表面温度約200℃確認後に加熱停止 <p style="text-align: center;">↓</p> <ul style="list-style-type: none"> ・タービン車室の熱容量が大きく予熱に必要な200℃以上を保持出来ず、水素除去不足 ・ピン下部は、十分に加熱されず表面に水滴発生・残存 	<ul style="list-style-type: none"> ・溶接作業中、必要温度200℃以上を保持出来ず、溶接金属内に水素が残存 	<ul style="list-style-type: none"> ・局部集中加熱のため周辺の温度は上昇せず、集中加熱部が680℃確認後に加熱停止 <p style="text-align: center;">↓</p> <ul style="list-style-type: none"> ・タービン車室の熱容量が大きく、必要温度680～700℃で15分以上を保持できず、溶接組織が軟化せず。



低温割れ発生	低温割れ発生の要因						
	<p>破面の特徴や再現試験結果等から、低温割れであると推定</p> <table border="1"> <tr> <td>水素</td> <td>予熱および溶接作業中の温度保持不足により水素が存在</td> </tr> <tr> <td>硬さ</td> <td>溶接後の熱処理が不十分であったため、溶接部が硬いまま</td> </tr> <tr> <td>拘束応力</td> <td>厚い車室にスミ肉溶接のため当該部に拘束応力が作用</td> </tr> </table> <p style="text-align: right;">溶接時の予熱や溶接後の熱処理不十分により低温割れ発生</p>	水素	予熱および溶接作業中の温度保持不足により水素が存在	硬さ	溶接後の熱処理が不十分であったため、溶接部が硬いまま	拘束応力	厚い車室にスミ肉溶接のため当該部に拘束応力が作用
水素	予熱および溶接作業中の温度保持不足により水素が存在						
硬さ	溶接後の熱処理が不十分であったため、溶接部が硬いまま						
拘束応力	厚い車室にスミ肉溶接のため当該部に拘束応力が作用						

対策

<p>(代表例として回り止めピンを記載)</p>	溶接金属等に応じた熱処理の相違									
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>熱処理 溶接金属等</th> <th>予熱</th> <th>溶接後の熱処理</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>(現状) 低合金鋼</td> <td>水素除去等のため200℃以上を溶接終了まで保持</td> <td>水素除去および溶接部の硬さを軟らかくするため680～700℃で必要時間保持</td> </tr> <tr> <td>(対策後) 炭素鋼</td> <td>同上</td> <td>水素除去のため300℃以上で必要時間保持</td> </tr> </tbody> </table>	熱処理 溶接金属等	予熱	溶接後の熱処理	(現状) 低合金鋼	水素除去等のため200℃以上を溶接終了まで保持	水素除去および溶接部の硬さを軟らかくするため680～700℃で必要時間保持	(対策後) 炭素鋼	同上	水素除去のため300℃以上で必要時間保持
熱処理 溶接金属等	予熱	溶接後の熱処理								
(現状) 低合金鋼	水素除去等のため200℃以上を溶接終了まで保持	水素除去および溶接部の硬さを軟らかくするため680～700℃で必要時間保持								
(対策後) 炭素鋼	同上	水素除去のため300℃以上で必要時間保持								

敦賀発電所 2号機 低圧タービン溶接部の点検結果

今定期検査では3台ある低圧タービンも新しい設計のものに取り替えていることから、念のため低圧タービン車室（炭素鋼製）のスミ肉溶接部324箇所について点検した結果、低温割れは確認されませんでした。部分的にスミ肉溶接している位置決めピンの溶接終端部2箇所です。小さな割れが認められたため、これらの溶接部は全て溶接をやり直すこととしました。

割れが認められたのは、低圧タービンの排気を復水器に導くために車室の両端部に設置している案内板（フローガイド）を、車室に取り付ける際の位置決めピンのスミ肉溶接部2箇所（No.1およびNo.2の低圧タービン各1箇所）の溶接終端部です。

調査の結果、当該部の溶接は2層で溶接すべきところ、割れた箇所は1層で溶接されており、溶接金属の量が少なく冷却が早く進んだことで、溶接終端部で割れが発生したものと推定されました。なお、当該部は炭素鋼製であり、溶接部の厚さが規格で定められた値より小さいため、溶接前後の熱処理は不要な部位です。

対策として、位置決めピン全36本（溶接部全144箇所）について溶接をやり直します。

低圧タービン点検結果

