

敦賀発電所2号機の定期検査の状況について (高圧タービンからの蒸気漏れの原因と対策)

敦賀発電所2号機（加圧水型軽水炉：定格電気出力116万キロワット）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、原子炉を停止しました。

高圧タービン上部車室を点検した結果、9月19日に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ました。

このため、下部車室についても点検したところ、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ました。

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）が確認されました。

また、調査のため採取した上部車室（制御装置側）のピンでも、溶接部外表面に傷は認められていませんが、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ました。

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した。

高圧タービンは、今定期検査において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、ピンや閉止栓も同じ材質にしています。

低合金鋼を溶接する際には、溶接部の硬さを柔らかくし割れ等を防止するため溶接後に熱処理をする必要がありますが、今回割れの認められたスミ肉溶接部について調査した結果、工場にて熱処理を行っていたことが確認されました。

本件は、原子炉等規制法に基づく報告対象に該当するものと判断し、9月19日、原子力安全・保安院へ報告しております。

なお、本事象による周辺環境への放射能の影響はありませんでした。

※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、溶接中あるいは溶接後数日中に割れが発生する。この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素（水分）と、溶接部の組織硬化、溶接に伴う拘束応力の3要素が基因して発生することが知られており、この割れは、溶接前に母材を予熱しておく、溶接材料を十分乾燥させる、溶接後に熱処理を行うなどにより発生を防止できる。

※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。

[平成２０年９月１６日、９月１９日、９月３０日、１０月３１日発表済]

これまでの調査で割れの特徴から、溶接後に発生する低温割れの可能性が考えられたため、試験研究機関および工場において再現試験を行いました。

１．調査結果

（１）再現性試験および聴き取り調査等

製作メーカーの工場での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が具体的にどのように行われたかを確認しました。また、作業実績の記録がなかったことから、溶接作業等から聞き取りを行いました。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いました。これらの結果、以下のことが判明しました。

① 作業指示書の確認および作業等からの聞き取り結果

- ・ 作業指示書は、溶接担当部署が作成し、その内容については所定の承認者により承認されていました。
- ・ 作業等は作業指示書での予熱温度※^３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用いて２００℃に加熱し、接触式の温度計で２００℃を確認したため、加熱を止め、溶接中の加熱は実施していませんでした。
- ・ 溶接後の熱処理※^４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いましたが、作業等はガスバーナー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６８０℃以上に到達したのを確認したため、加熱を止めていました。
- ・ 溶接方法については、作業指示書通りＴＩＧ溶接※^５で実施されていました。

※３：溶接材料の水素除去や、硬化を防止するため、溶接前に材料を適切な温度に加熱する。また溶接作業中には、その状態を保つ。

※４：溶接部の残留応力の除去、金属組織の軟化などのために溶接後の溶接金属及び母材を適切な温度に熱してから保持すること。

※５：不活性ガス雰囲気中で、電極と溶接部の間にアークを発生させ、このアークで溶接棒を溶かして溶接する方法。

②再現試験での結果等

- ・ 溶接前の予熱温度確認試験では、溶接開始時には２００℃を下回り、必要な予熱温度が保持できていませんでした。
- ・ 溶接後の熱処理温度確認試験では、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ませんでした。
- ・ 今回のスミ肉溶接部は、熱容量が大きい厚肉の高圧車室にピンが取り付けられていることから、予熱時および溶接後に必要な温度、時間が保持されませんでした。
- ・ 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、ピン下部の温度の低い部分と車室の隙間に水滴が残存する可能性があることが確認されました。

- ・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ませんでした。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、複数箇所で見られました。
- ・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ました。

(2) 品質保証に関する調査結果

製作メーカーでの高圧タービン車室の溶接作業に係わる品質保証について調査した結果、以下のことが確認されました。

- ・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、ピン溶接部の熱処理に関して、車室の熱容量やガスバーナーを使用した熱処理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ませんでした。
- ・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ましたが、溶接施工条件の妥当性確認が不足していました。また、ピンは車室の一部と考え、ピンに特化した検討はなされませんでした。
- ・溶接作業の実績を記録する指示がな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ませんでした。なお、当社における品質管理において割れの発生した当該箇所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ませんでした。

2. 推定原因

以上の調査結果から、次のことが確認されました。

- ・溶接前の予熱および溶接中の温度保持不足で、加熱に使用したプロパンガスの燃焼により発生した水滴がピンの隙間に残留し、溶接時に溶接金属に水素として混入しました。
- ・溶接後の熱処理に必要な温度および時間が確保されなかったため、溶接部の組織が硬いままでした。
- ・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ました。

以上のことから、ピン等の溶接部で発生した割れは、溶接前の予熱や溶接中の温度保持、溶接後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ました。

また、溶接後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ったことや、ピンは車室の一部と考え、ピンに特化した検討がなされなかったことなど、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ました。

当社においても、溶接部検査記録の提出について明確でなかったため、溶接中の熱処理記録や非破壊検査記録等が確認出来ませんでした。

3. 対策

(1) 高圧タービン

今回、低温割れが確認されたピン4本と空気抜き穴閉止栓1本、また、傷は確認されていませんが同じ構造のピン4本と空気抜き穴閉止栓1本の計10本を、新品のピンおよび閉止栓にて車室に溶接し復旧します。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予熱や溶接後の熱処理を確実にを行います。なお、高圧タービン車室フランジ面の歪を防止する観点から、溶接部の硬さを柔らかくするための熱処理は行わず、ピンおよび閉止栓の材質を溶接後も硬さが柔らかい炭素鋼に変更します。

溶接作業実施にあたって、当社は、製作メーカーの溶接作業要領の改善が行われ、溶接作業に問題がないことを確認するとともに、溶接作業に立会うこととします。

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ない49箇所について、溶接金属の変更等を含め、溶接をやり直します。

(2) 品質保証

今回の高圧タービン取り替えに係る不具合は、一義的には製作メーカーの品質保証の問題と考えていますが、当社としても発注した製品が適切に製作されていることを検証する観点から改善する点があることから、今後、製作メーカーでの品質保証活動が適切に行われているかを確認するために、製作メーカーの自主検査範疇であっても、特定の溶接部位については溶接作業に係る温度記録等の作成を要求し、品質記録を確認します。

また、従来、設置変更許可申請や工事計画認可申請等を伴う工事を対象に、製作開始時のみに実施していた外部監査を、今後は、製作過程の管理が重要になる機器については、製作期間中にも外部監査を行うよう計画し、製作メーカーの製作過程の管理を徹底させます。

さらに、製作メーカーが行う短期的な再発防止対策と根本原因分析について、当社が状況調査を実施し、製作メーカーの品質保証活動が改善されていることを確認するために、外部監査を継続的に行います。

当社においても、今回の事象を踏まえ、発注した製品が適切に製作されていなかったことについて、設計開発の観点から根本原因分析を行い必要な対策を行います。

製作メーカーにおいては、速やかに溶接作業指示の明確化や溶接記録の充実を行うとともに、今後、今回の問題について根本原因分析を行い、品質保証活動の改善に取り組み、原子力安全文化の更なる向上に繋げることであります。

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月中旬となる見込みです。

4. 添付資料

高圧タービンからの蒸気漏れの原因と対策

(参 考)

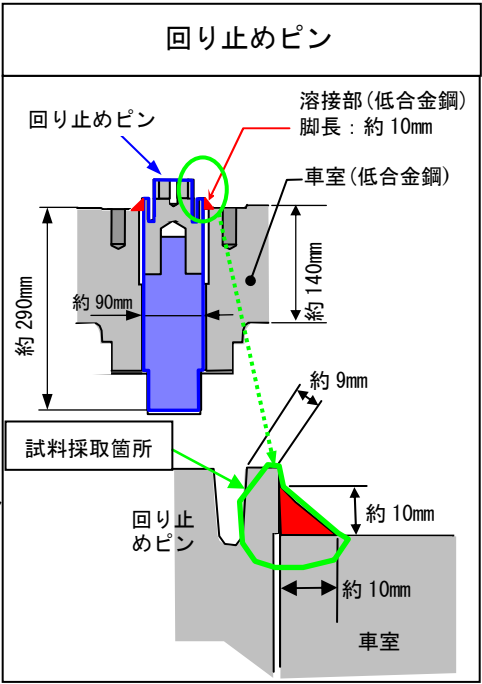
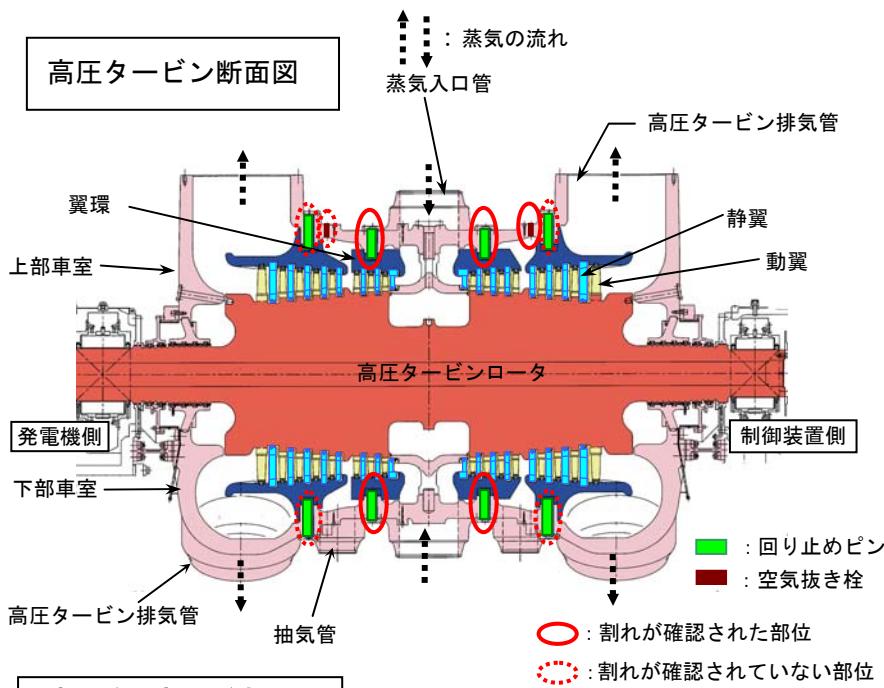
(経済産業省による I N E S の暫定評価)

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

以上

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	溶接部 (HV 300~450 程度) 溶接部は母材と比べ硬い状態のままであった 回り止めピン (平均 HV 約 170) 車室 (平均 HV 約 180) 熱影響部 溶接金属 5mm	回り止めピン 溶接金属 (HV 330~430 程度) 割れ 模擬車室 mmG
断面マクロ組織観察結果 (割れ全景拡大)	外表面 回り止めピン 割れ 溶接金属 車室	外表面 回り止めピン 溶接金属 割れ 模擬車室
破面電子顕微鏡観察	筋状模様 (擬へき開破面) ブロック状模様 (粒界破面) 0013 15KV X500 10µm WD37	筋状模様 (擬へき開破面) ブロック状模様 (粒界破面) 5331 25KV X500 10µm WD38

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
ガスバーナ (ピン) (車室) 約200℃ 伝熱 〔燃焼ガス中の水蒸気が結露し、水滴発生・残存〕	(ピン) 溶接トーチ (車室) 〔隙間に付着した水滴は、溶接中の熱で気化〕	ガスバーナ (ピン) (車室) 伝熱 〔局部加熱により680℃に加熱〕
・表面温度約200℃確認後に加熱停止 ↓ ・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	・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	・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 ↓ ・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						
(ピン) 溶接金属 (車室)	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 <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> 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	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

(代表例として回り止めピンを記載)

回り止めピン

溶接金属(低合金鋼→炭素鋼)

脚長: 約 10mm

ピン上部(低合金鋼→炭素鋼)

車室(低合金鋼)

ピン下部(クロム鋼)

溶接金属等に応じた熱処理の相違

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