

# タービンロータ浸透探傷検査装置の開発

## Development of Fluorescent Penetrant Testing System for Turbine Rotor

東京電力株式会社	小野 繁利	Shigetoshi ONO	Non Member
株式会社 東京エネシス	宮川 英己	Hideki MIYAGAWA	Non Member
株式会社 東京エネシス	後藤 信二	Shinji GOTO	Non Member

This paper outlines the development of fluorescent penetrant testing system for turbine rotors. At TEPCO's nuclear power plants, the inspection for turbine rotors implements dye penetrant testing. the inspection for turbine rotors using dye penetrant testing often needs many workers and work hours from our previous experience. We succeeded in the development of fluorescent penetrant testing system for turbine rotors, which can implement the inspection automatically and shortly. This paper also outlines various element test results which apply to this fluorescent penetrant testing system.

**Keywords:** Fluorescent Penetrant Inspection, Turbine Rotor

### 1. はじめに

原子力発電プラントでは、安全性・信頼性を確保するために、定期検査を実施している。そのために、保守要員は、高度の技能・技術を駆使しているが、一方では、多くの人手に頼らなければならない作業もある。機器の検査という面から見ると、近年、検査装置の改善により、かなり自動化は進んでいるが、原子力プラントに設置された機器及び分解された部品等に対しては、未だ、人に頼った検査を実施せざるを得ないのが現状である。

前述の状況を改善すべく、本稿では、原子力発電プラント主要機器であるタービンロータの非破壊検査を対象として、従前より人海に依存して行っていた染色浸透探傷検査を改善した水洗性蛍光浸透探傷検査装置を開発したので、これに至るための技術課題の解決と機能を中心に論ずる。

### 2. 現行方法

現行のタービンロータの健全性確認として、染色浸透探傷検査を実施している。

タービンロータのシュラウドは、円板に植え込まれた羽根の外周を固定するように円環形状を呈しており、テノンには、シュラウド外周を固定するように等ピッチにて、凸形状にてカシメ固定している。Fig.1に、タービンロータの外観を示す。その形状及び運用から、主に、タービンロータのテノン、シュラウドの外周面にきずが認められた例がある。

そのような状況から、主に、シュラウド、テノンの外表面を重点的に、表面検査を実施している。

さて、既述のように、シュラウド外表面は、テノンが存在することから、凹凸形状になっている。更には、シュラウド外周直径は、2～3mにも及び、その段数は、60段にも及ぶ。検査に当っては、人手も必要とされるが、人の手による細やかな処理も必要であるため、現行の検査方法は、染色浸透探傷検査を採用している。

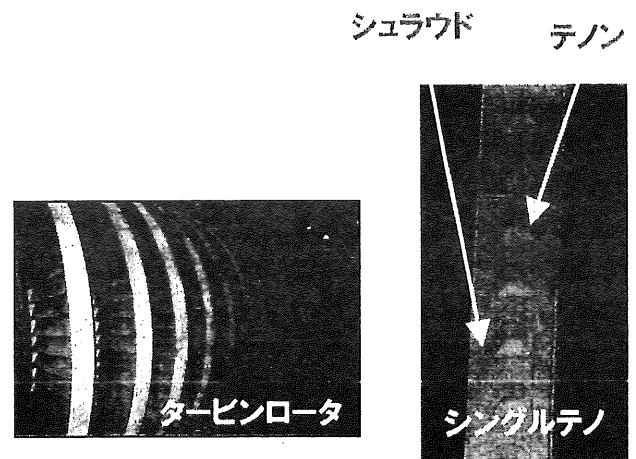


Fig.1 タービンロータ外観

### 3. タービンロータ浸透探傷検査の自動化

#### 3. 1 自動化のための検査法の選定

従前の検査方法では、人海に依存して処理せざるを得ない状況のため、この点を改善したいと考えたもの

である。それ実現するために、検査の自動化を目指すことにした。

現行の染色浸透探傷検査は、多量の洗浄水と速乾式現像剤を使用する。これは、沸騰水型原子炉という形式を採用している原子力プラント内の検査場所は、放射線管理区域内であるため、管理区域内で使用した多量の洗浄水は放射性汚染物となり、また、速乾式現像剤は、揮発性の高い溶剤が含まれているため固化しやすい性質を持つことから、自動化の足かせになることが予想された。

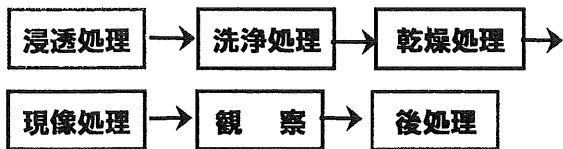
また、原子力プラントの特徴として、作動蒸気が湿り蒸気であることから、経年的に、タービンロータの表面が浸食されて、あばた状の表面を呈してくる。

さて、東京電力の原子力発電所には、タービンロータ回転架台と称するタービンロータを回転させることで、ロータの清掃作業を容易にする治具が備えられている。これを用いて、ロータを回転させることで、検査出来ないか模索した。

以上を総合的に勘案し、自動化にあたっては、試験体の粗さの影響が受けにくく、余剰浸透液の除去を必要最低限の洗浄水で出来る方法として、現像剤を適用しない水洗性蛍光浸透探傷試験—無現像法が最適と考えた。

Fig.2 に現行方法（染色浸透探傷検査）と自動化で採用した検査方法（水洗性蛍光探傷検査）の手順の比較を示す。

現行方法



自動化で採用した検査方法

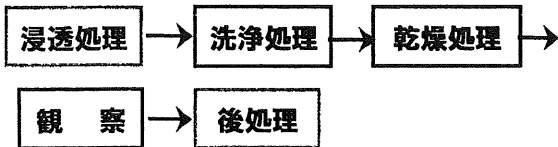


Fig.2 検査方法の比較

### 3.2 タービンロータ浸透探傷検査装置の構成

3.1項にて述べたように、タービンロータの回転架台を使用することを前提に、タービンロータ自動検

査装置の構成を構築した。タービンロータ浸透探傷検査装置の構成とそれぞれの課題を下記に示す。

#### 1) 浸透液塗布ユニット

- ・水洗性蛍光浸透液の選定
- ・浸透液塗布ノズルの形式選定、噴射圧力、流量
- ・拡張エアノズルの形式選定、噴射圧力、流量

#### 2) 洗浄ユニット

- ・洗浄ノズルの形式選定、噴射圧力、流量
- ・乾燥エアノズルの形式選定、噴射圧力、流量

#### 3) 観察ユニット

- ・デジタルカメラ（ビデオカメラ）
- ・録画装置（ロータ回転角度表示）

#### 4) 制御ユニット

- ・浸透液塗布量の制御
- ・浸透液塗布圧力及び洗浄水圧力の設定
- ・各処置の起動停止（エンコーダー）

以上に示すように、検討課題は、多種の渡る。従って、本稿では、以下きず検出ということに焦点を絞り、蛍光浸透液の検討ときず検出装置として、最低限必要とされる要素について、記述する。

### 3.3 蛍光浸透液の検討

検討する蛍光浸透液は、機器のSCC防止という観点から、低ハロゲン・低イオウであること、また、水洗性で検出感度が無現像法で、現行方法と同等であることが必要である。今回は、更に、PRT法（可視光線透過法）の適用を受けない成分で製造し、JISZ2343-2で規定している型式試験を満足することを条件とした。

以上の条件を考慮し、選定した蛍光浸透液と現行方法の比較を、Table 1に示す。結果として、ほぼ同等な検出感度が得られた。

Table 1 浸透液の比較試験

（試験条件：浸透時間 7分、現像時間 10分）

	現行方法	自動化による検査
タイプ1 対比試験片 50μm		
タイプ1 対比試験片 30μm		
タイプ3 対比試験片		

### 3. 4 検査装置の要素試験

この試験では、主として、洗浄性について、確認している。検査場所が原子力プラント内の放射線管理区域であるから、使用する探傷剤や洗浄剤は極力少ない方がよいことは、既に述べた。そのため、各ノズルの形状選定や各種使用条件の決定にあたっては、それらを満足するようにしている。

定期点検中のタービンロータは、分解後、タービンロータ回転架台に設置され、点検時は必要に応じ、回転させながら点検する。タービンロータ回転架台上のタービンロータの回転数は、約毎分0.5回転であるが、ロータ各円板のシュラウド直径が異なるため、検査対象範囲のテノン・シュラウドの周速度が異なる。従って、各ノズルの形状選定や各種使用条件の決定にあたっては、ある範囲に適用できるような柔軟性を持った検査装置が望まれる。

そのため、あらかじめ、検査対象範囲のテノン・シュラウドの周速度への適用範囲を把握しておき、検査装置の要素試験へ適用した。即ち、それらは、自動化の許容範囲を決定するため、各周速度に対応する浸透液の塗布量及び余剰浸透液の除去に使用する洗浄水量の検討に使用された。

検査装置の要素試験としては、電動スライダを用いて各周速度を再現させ、ノズル形状の選定や浸透液及び洗浄水の使用条件範囲を把握した。この試験では、タイプ2、3対比試験片を併用し、きずの検出を絶対条件に、適切な浸透液噴霧条件や洗浄液噴霧条件を見出した。洗浄の良否は、タイプ2対比試験片の蛍光の残光で確認した。一般的に余剰浸透液の除去度合いにより、きずの検出に、大きく影響する。今回の要素試験でも確認されている。

試験の条件は、JISZ2343-1に規定されている洗浄圧力に準じて実施した。(0.275MPa以下)

#### 要素試験結果

- ・周速度の範囲：30～100 mm/s
- ・タイプ2対比試験片のRa-10まで可能であった。
- ・タイプ3対比試験片の浸透指示模様は、良好に確認された。
- ・使用した洗浄水の量は、0.84ml/minであった。
- ・浸透液は、はけ塗りとしている。

### 3. 5 タービンロータ浸透探傷検査装置の検討

プロトタイプタービンロータ浸透探傷検査装置を製作し、一方、タービンロータを模したモックアップ試験装置(外径：φ2000mm)を製作し、3.4項での要素試験で得られた使用条件が、実際のタービンロータへ適用性を、実機を模擬しての試験を行った。洗浄性については、要素試験にて、ある程度を確認を実施しているため、ここでは、それらを含めて、浸透液塗布性について、試験した。

モックアップ試験装置は、模擬のテノン・シュラウドを取付け、実機ロータの各段落の周速度が再現出来るように製作した。Fig.3に、タービンロータを模したモックアップ試験装置を示す。

モックアップ試験の結果、3.4項で得られた要素試験での各使用条件でほぼ検査が可能であることが確認できた。

#### 確認結果

- ・浸透液の塗布量は、6～16ml/minで適切に処理できた。
- ・浸透液の塗布後、エアーにより試験範囲全体に拡張できた。
- ・洗浄水の使用量は、0.84ml/minであった。
- ・洗浄後はエアーにより試験面を乾燥可能であった。
- ・乾燥後、きずの検出は、良好であった。
- ・浸透液塗布は、1回転で処理ができた。
- ・洗浄は、2回転で処理ができた。
- ・全ての処理が、周速度の範囲(30～100 mm/s)で可能であった。

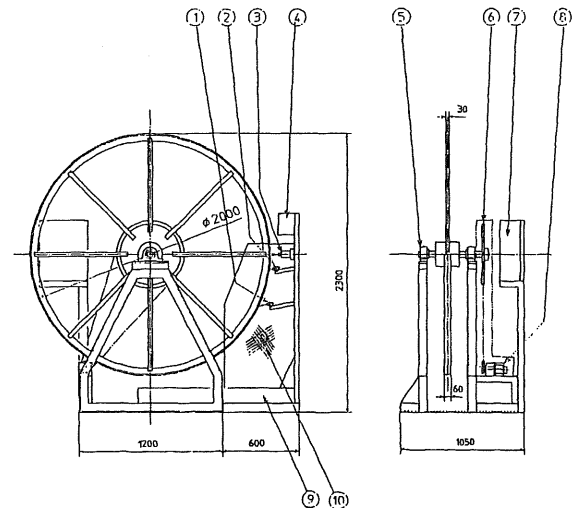


Fig.3 モックアップ試験装置

### 3. 6 実機ロータによる検証

プロトタイプタービンロータ浸透探傷検査装置を製作し、タービンロータを模したモックアップ試験装置で検証が得られたことから、本格的なタービンロータ浸透探傷検査装置を製作し、実機ロータでの検証を、東京電力福島第一原子力発電所第4号機の低圧ロータを使用して実施した。

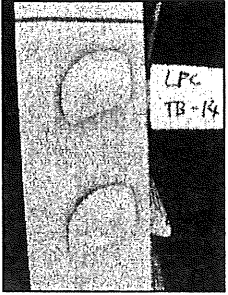
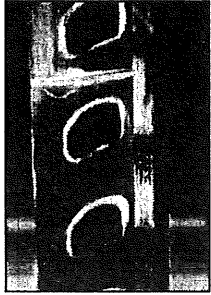
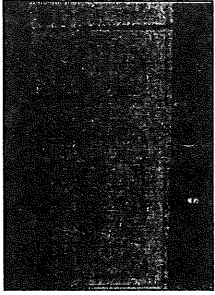
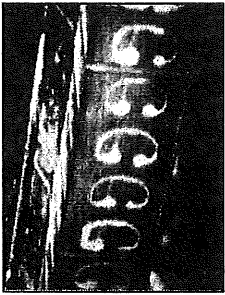
結果は、若干、蛍光浸透液特有の残光の影響が感じられるものの、満足すべき結果が得られた。観察、判定は、有資格者が行うことから、残光の影響は、問題にならないと考える。

更に、蛍光探傷検査なので、ブラックライトを必要とするが、現場では、タービンロータ下部での検査と

なり、その箇所は、20ルクス程度なので、特に、照度の調整は、必要なかった。

代表的な実機ロータによる検証結果を Table 2 に示す。参考のため、現行方法での結果も示している。左側は、現行方法であり、右側は、自動化による検査方法である。

Table 2 実機ロータによる検証試験結果（代表例）

現行方法	自動化による検査方法
	
	

#### 4. まとめ

本稿で述べたタービンロータ浸透探傷検査装置は、実機タービンロータでの検証も終了しており、ほぼ実用化に近づいている。今後は、商品化に向けての若干の改良を残すだけとなっている。

本稿では、その詳細を述べていないが、その付属設備として、検査結果を保存する録画機能を有しており、また、インディケーションを発見した場合の位置特定機能が可能であり、記録保存に対応している。

本タービンロータ浸透探傷検査装置を使用した場合、現行方法と比較した延べ検査時間は、半分以下と試算している。

#### 参考文献

[1]浸透探傷試験Ⅰ 2004年版、社団法人日本非破壊検査協会

[2]浸透探傷試験Ⅱ 2005年版、社団法人日本非破壊検査協会