

# 解説 記事

## NDT 技術のやさしい解説（保全技術者向け）

— 1 回目 —

一般財団法人 発電設備技術検査協会

牧原 善次 Zenji MAKIHARA

### 1. はじめに

私たちは多くの設備、工業製品を利用して、不自由のない生活を送っている。しかし、ひとたびこれらに故障、破壊などが起きた場合、例えば、乗り物(航空機、船舶、鉄道、自動車)であれば人と物資の輸送の停滞、発電所であれば電気の供給の遮断などの事態に陥り、日常生活及び経済活動に支障が生じる。最悪のケースでは人命をも奪う甚大な災害をもたらす。したがって、日頃から設備などの信頼性を高める保全活動を行わなければならない。設備は多くの機器、部品などで構成されており、一つ一つ点検して健全であることを確認しなければならない。点検の内容も機械系、電気系などにわたるため、実施項目も膨大かつ複雑多岐にわたる。

多くの実施項目の中で、設備の構造健全性維持に大きな役割を担っているのが非破壊試験 (NDT: Non Destructive Testing) である。この非破壊試験について今回からシリーズで解説する。今回は、設備保全について、非破壊試験 (用語、必要性、用途と役割及び非破壊試験の種類)、きず検出のための非破壊試験などについて触れる。以降、各種非破壊試験手法、製造検査 (製造時に生じるきずと適用する非破壊試験手法)、定期検査 (供用期間中に生じるきずと適用する非破壊試験手法)、信頼性の高い非破壊試験を行うための注意事項などについて解説する予定である。

### 2. 設備保全

最初に保全 (Maintenance) について記す。日本産業規格 JIS Z 8141:2001 「生産用語」で、設備保全について“設備性能を維持するために、設備の劣化防止、劣化測定及び劣化回復の諸機能を担う、日常的又は定期的な計画、点検、検査、調整、整備、修理、取替えなどの諸活動の総称。”と定義している。つまり、点検、整備、検査などによって設備の故障を排除し、使用可能な状態を保つ

活動をいう。

#### 2.1 保全の目的と進め方

保全は安全性 (安定かつ安全運転) と社会性 (環境などの社会要求) 及び経営的視点 (生産性) の三つを考慮して、設備ごとに適した活動をする。例えば、人命に関わる航空機では信頼性中心保全 RCM (Reliability Centered Maintenance) を導入している<sup>[1]</sup>。石油・化学プラントではコストと信頼性のバランスを考慮した RBI (Risk Based Inspection) を導入している<sup>[2]</sup>。原子力プラントもこれまでのプラント運転実績に基づく手法が整備されている<sup>[3]</sup>。さらにリスク情報を指標とした試験・検査の実施に向けた検討<sup>[4]</sup>、運転年数が 40 年を超えるプラントに対する特別な保全を実施している<sup>[5]</sup>。

#### 2.2 保全方式

保全は、表 1 で示すように故障が起きる前に行う予防保全と故障が起きた後に行う事後保全の方式に分類され、公共の安全性、設備利用率など故障が及ぼす影響を考慮して選択する。

表 1 保全方式

分類	内容 (JIS Z 8141:2001)
保全	予防保全 ・故障に至る前に寿命を推定して、故障を未然に防止する方式、生産停止又は性能低下をもたらす状態を発見するための点検・診断、初期段階に行う調整、修復の 2 つの側面をもつ。 ・時間を定めて行う時間計画保全 (時間間隔を定めるものと累積時間によるもの) と連続的又は定期的監視によって使用中の動作状態の確認、劣化傾向の検出などを行う状態監視保全の 2 つの方式がある。
	事後保全 ・設備に故障が発見された段階で、その故障を取り除く方式。緊急保全と通常事後保全に分けられる。

#### 2.3 保全活動

保全活動は、図 1 及び表 2 に示すように保全対象範囲及び保全活動管理指標を設定した後、①保全の実施計画 (Plan)、②保全の実施 (Do)、③保全の有効性評価

(Check)、④保全計画の見直し (Action) の流れで行われる。特に実施結果に基づく有効性評価によって保全計画の見直し、改善に努めていくことが重要である。

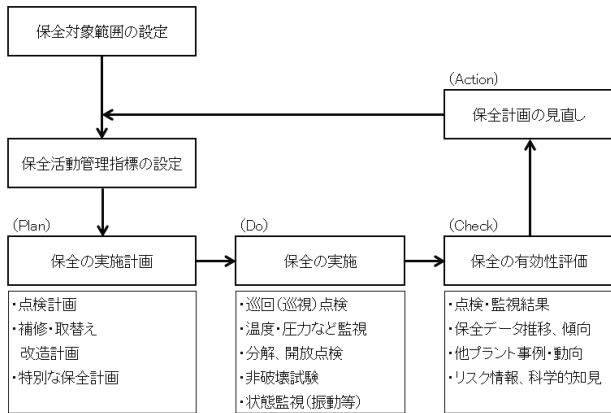


図1 保全活動の流れ

表2 保全活動の項目

保全活動	活動内容
① 保全の実施計画 (Plan)	<ul style="list-style-type: none"> <li>点検、補修・取替え、改造、特別な保全などの計画策定。</li> <li>策定は法令、規格類への適合及び保全活動管理指標を基に行う。</li> <li>保全活動管理指標は、保全の有効性を監視、評価するために保全重要度を踏まえて設定する。</li> </ul>
② 保全の実施 (Do)	<ul style="list-style-type: none"> <li>実施計画に従った点検、補修・取替えなど。</li> <li>実施項目は、設備の巡回点検、温度、圧力の監視、分解による設備の内部点検、非破壊試験など。</li> </ul>
③ 保全の有効性評価 (Check)	<ul style="list-style-type: none"> <li>点検結果などの情報を基にして、設備の機能・性能を評価して所定の状態であることの確認。</li> <li>所定の機能を発揮できない場合は、是正処置を講じる。</li> <li>保全の有効性確認及び継続的な改善へのフィードバック</li> <li>保全データの推移、長期的な傾向、他プラントの経年劣化に係るデータ、リスク情報、科学的知見、トラブルなどの運転経験などを参照して評価する。</li> </ul>
④ 保全計画の見直し (Action)	<ul style="list-style-type: none"> <li>保全計画の見直し、改善の継続</li> <li>設備は時間とともに変化し、得られる知見も更新される。見直しを継続して①保全の実施計画へ反映する。</li> </ul>

### 3. 非破壊試験

#### 3.1 用語

本節では、非破壊試験を解説する上で必要な主な用語について示す。

##### (1)非破壊試験、非破壊検査、非破壊評価

非破壊試験、非破壊検査及び非破壊評価は、表3で示すように日本産業規格 JIS Z 2300:2009「非破壊試験用語」で定義されている。

非破壊試験、非破壊検査、非破壊評価の用語は、類似しているものの意味は異なる。もの(素材、製品)の状態を示すデータを採取することを非破壊試験といい、判定などの行為は含まない。非破壊試験の結果に基づき規格類で示される基準にしたがって合否判定を下す行為を非破壊検査という。非破壊試験の結果だけではなく試験体

に関する情報(性質、使用性能など)を加えて総合的に解析、評価する行為を非破壊評価という。

表3 非破壊試験、非破壊検査、非破壊評価

用語	定義 (JIS Z 2300「非破壊試験用語」)
非破壊試験 Non-Destructive-Testing	素材や製品を破壊せずに、きずの有無及びその存在位置・大きさ・形状・分布状態などを調べる試験をいい、略号は NDT (えぬでいーてい) を用いる。
非破壊検査 Non-Destructive-Inspection	非破壊試験の結果から、規格などによる基準に従って合否を判定する方法をいい、略号は NDI (えぬでいーあい) を用いる。
非破壊評価 Non-Destructive-Evaluation	非破壊試験で得られた指示を、試験体の性質又は使用性能の面から総合的に解析・評価すること。略号は NDE (えぬでいーいー) を用いる。

##### (2) 指示

非破壊試験の結果は、試験装置上に図形又は数値として表示される場合と試験体上に出現する模様として表示される場合がある。これらを指示(インディケーション)という。

##### (3)不連続部

試験体の形状・寸法の急変部、試験体の金属組織、きずが存在する部分などでは、健全部と異なる指示が現れる。この部分を不連続部という。

##### (4)きずと欠陥

きずと欠陥は表4で示すように区分する。きずは不連続部で現れる指示の総称をいい、このうち規格などの基準にしたがって不合格となるきずを欠陥という。つまり、残っていても支障のないものをきず、残してはだめなものを欠陥という。

表4 きずと欠陥

用語	定義 (JIS Z 2300「非破壊試験用語」)
きず Flaw	非破壊試験の結果から判断される不連続部(非破壊検査で検出されるが、不合格とする必要がない不完全部又は不連続部)。
欠陥 Defect	規格、仕様書などで規定された判定基準を超え、不合格となるきず。

##### (5)試験体

検査又は試験対象物のことを試験体として表現する。

#### 3.2 非破壊試験の必要性

##### (1)必要性

“社会の安全と安心は検査によって確保される”という言葉をよく耳にする。この言葉は工業分野、医療分野のどちらも共通しており、この検査は、工業製品であれば形と機能を損なうことなく、身体であればきずつけることなく行わなければならない。すなわち、工業、医療を問わず非破壊的な検査が必要とされている。

(2)非破壊試験を怠った場合

非破壊試験を怠っても多くのケースは何事も起きない。しかし、怠ったこと又は忘れて行わなかったことで重大な事故を招くことがある。国内で起きた二つの事故例を以下に示すが、検査を怠ると取り返しのつかない事態を招くことを教訓としなければならない。特にコストを下げるために安易に検査を省略することは許されない。

a. ジェットコースターの脱線事故

2007年にジェットコースターの車軸の破断によって人命が喪われた事故<sup>6)</sup>。その原因として1年に1回以上行うべき非破壊試験(超音波探傷試験、磁粉探傷試験)を怠り、目視検査だけを行っていたこと、検査時期を先送りしたこと(利益優先)などがあげられている。

b. 管の破断事故

2004年に局部減肉により原子力発電所の復水管が破断したことによって、5名の人命が喪われた事故<sup>7)</sup>。検査対象部になっていたが、点検台帳への記載漏れで長い期間(27年)検査を行っていなかったことなどが原因とされている<sup>7)</sup>。

(3)検査時期

工業製品の健全性を維持する上で検査時期が定められている。健全性維持は人の健康維持に近いものがある。健全性維持と健康維持のために行われている検査の時期を表5に示す。

人で例えれば、健康で丈夫な赤ちゃんが誕生するための保健指導、基本健診、発育状態の確認に始まり、誕生後まもなくの産後健診などによる順調な成長の確認、さらに学校、職場などでの定期健康診断、生活習慣病が懸念される年齢での人間ドック、特定健診又は特定病因(がんなど)を対象とした検診を通じて健康維持の確認を行

表5 身体の健康維持と製品の健全性維持

身体の健康維持		製品の健全性維持	
誕生前	保健指導 基本健診 発育状態確認など	製造	製造検査 ・材料検査 ・溶接検査
誕生直後	産後健診など	完成	使用前検査 試運転
維持 (成長～寿命)	個別受診(体調不良時) 定期健康診断(学校・職場) 人間ドック/特定健診 検診(がんなど特定病因)	維持 (稼働～寿命)	日常点検 定期検査(標準) 定期検査(個別) 特別点検
実施項目の一例 内視鏡検査(胃部、腸部) X線撮影/CT検査(頭部、肺部、腹部) エコー検査(胎児の発育、腹部)		実施項目の一例 ・目視試験 ・放射線透過試験 ・超音波探傷試験	

う。工業製品もまったく同じで製造検査、試運転、定期検査などによって健全性の維持を確認する。

3.3 非破壊試験の用途及び役割

(1)製造メーカーにおける非破壊試験の役割

製造メーカーは、高品質の製品を安価かつ短期間で製作することを目指す。このためには、①製作段階で生じる不良(欠陥)の低減と早期発見、②製造技術の改善に努める。非破壊試験は、欠陥の早期発見と製造技術の改善(結果に基づく改善へのフィードバック)の役割を担っている。

(2)使用者(保全に係る者)における非破壊試験の役割

使用者は、保全活動を通じて設備の安定運転、事故の未然防止(安全の維持)を図る。保全の指標の一つに[(所定の機能・性能を満たして稼働し得る期間) / (期待される寿命)]で表される設備利用率がある。非破壊試験によって劣化兆候を早期に検出し、あるいは劣化傾向を監視する。その結果を補修・取替え時期の計画に役立てて設備利用率を高める。

3.4 非破壊試験の種類

ものを壊さず状態を調べる方法として、古くから人の感覚(視覚、聴覚、味覚、嗅覚、触覚)が用いられてきた。感覚は人によって左右されたり検知能力に限界があったりする。これに置き換えるものとして1920年代前後より様々な物理現象を利用する非破壊試験技術が発展してきた。表6は現在、工業製品に適用されている代表的な非破壊試験の種類を示す。表6以外にもきず近傍での塑性変形によって生じる弾性波を利用したアコースティック・エミッション(AE: Acoustic Emission)、きず部と健全部で生じる温度差を赤外線によって検出する赤外線

表6 代表的な非破壊試験の種類

分類	種類	略号	利用する物理現象
表面試験 <sup>※1</sup>	目視試験 Visual testing	VT	光、色彩
	浸透探傷試験 Penetrant testing	PT	毛細管現象
	磁粉探傷試験 <sup>※3</sup> Magnetic Particle testing	MT	磁気現象(きず部の漏えい磁束)
体積試験 <sup>※2</sup>	渦電流探傷試験 Eddy Current testing	ET (ECT)	電磁誘導作用
	放射線透過試験 Radiographic testing	RT	写真作用 (放射線による写真の黒化)
	超音波探傷試験 Ultrasonic testing	UT	音響 (音響境界面での反射)
備考	※1: 表面及び表面直下2~3mm程度の表層部の調査 ※2: 表面及び内部を含む体積調査 ※3: 近年、磁気探傷試験という。		

サーモグラフィ（TT：Infrared Thermography testing）などがあるが、今回からの解説では除く。

## 4. きず検出のための非破壊試験

### 4.1 きずの種類と有害度

#### (1) きずの種類

製品に生じるきずには様々な種類があるが、製造時と供用中で分けると発生するきずの種類を予測できる。また、製造時においても製作方法に応じてきずの種類を予測できる。表7に予測される主なきずを示す。きずの種類によって適する非破壊試験、適さない非破壊試験があるので、予め対象とするきずを定めて非破壊試験の種類を選択する。

表7 予測されるきず

発生段階		予測される主なきず	
製造	素材	鋼板	二枚割れ、非金属介在物、水素によるきず
		鍛鋼品	焼割れ、ざくきず、非金属介在物、砂きず 白点、二次パイプ
		鋳造品	割れ、引け巣（線状、樹枝状）、砂かみ・介在物 ブローホール、鑄ぐるみ
製造	溶接	割れ（低温割れ、高温割れ、再熱割れ） 溶込み不良、融合不良 ブローホール、パイプ、スラグ巻込み、タングステン巻込み 外観不良（アンダーカット、オーバラップ）	
		供用期間中	疲労亀裂（低サイクル疲労、高サイクル疲労、熱疲労） 応力腐食割れ（粒界型、粒内型） 腐食減肉（流れ加速、液滴衝撃エロージョン） 材質変化（クリープ、熱時効）

#### (2) きずの有害度

製品が漏えい、破損に至る前に要因となる有害なきず（欠陥）を検出しなければならない。きずの有害度は、きずの形状、発生位置などによって異なる。図2に有害度に関するイメージを示す。簡潔に言えば、製品の表面に開口しており、板厚貫通方向に延びかつ先端が鋭利に尖った形状のきずが製品にとって最も有害である。その代表が割れ（亀裂）である。身近な例としてカップメンなどのスプーン又は具材入りの袋を考えてみる。通常、袋には切欠きがあり、切欠き部分では切り裂きやすいが、それ以外の部分では切り裂き難い。つまり切欠き部分は壊れやすいことを意味する。破壊力学を用いれば応力集中の現象で説明される。応力集中は切欠き、溝など先端が鋭い部分がある場合、その部分の応力が他の部分より大きくなる現象をいい、想定以下の荷重又は期間で破壊が起きたりする。

したがって、スプーンなどの袋であれば切欠きは便利であるが、工業製品にとっては切欠き形状の割れ（亀裂）は

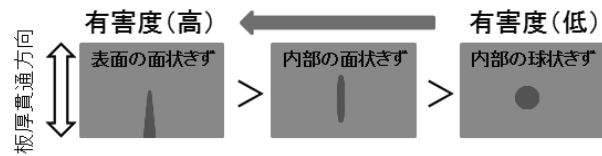


図2 きずの有害度(イメージ)

特に有害である、発電設備などでは製造時における溶込み不良、融合不良、アンダーカットなどのきずも破壊を引き起こす恐れのある有害なきずとして扱い、これらを非破壊試験で確実に検出することが求められる。

### 4.2 非破壊試験技術の選択

表6で示したように非破壊試験には幾つかの種類があるが、それぞれに特徴（長所と短所）があり万能ではない。したがって、試験の目的に応じて適した手法を選択しなければならない。手法の選択にあたっては、①試験体の材質、形状、②検出対象のきず（種類、大きさ、方向、位置など）③アクセス性（接近性）、手法の操作性、④設備の重要度などを考慮しなければならない。選択を誤ると検出できるきずも検出できなくなる。詳細は次回以降に解説するが、表面に開口していないきずを浸透探傷試験で検出することはできない、オーステナイト系ステンレス鋼の表面きずを磁粉探傷試験で検出することはできないなどが例である。

### 4.3 試験技術者

非破壊試験は人の操作によって行う。技量を持たない人が行えば大きな過ちを犯す。医療でいえば資格を持った医者が携わらなければならない。したがって、非破壊試験も同様に資格を持った技術者が試験を行う。また、病因によって内科、外科、皮膚科、眼科など専門の医者にかかるのと同様に非破壊試験も種類に対応した資格を持つ技術者が行う<sup>18)</sup>。

図3に試験技術者の技量について示す。試験技術者は、日本産業規格 JIS Z 2305 : 2013 「非破壊試験－技術者の資格及び認証」に従って認証機関から認証された者をいい、3段階のレベルで格付けされ、レベルに応じて許可される実施項目が定められている。さらに工業分野ごとに扱う製品が異なり、対象とするきず、規格なども異なるため、製品に応じた訓練を行って技量向上を図っている。原子力分野においても供用期間中検査で適用される超音波探傷試験の従事者を対象とした訓練制度を検討している。

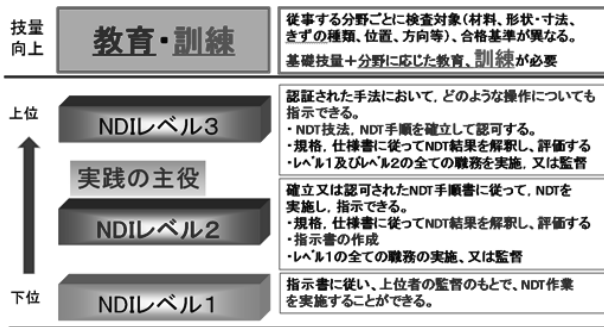


図3 非破壊試験技術者の技量

#### 4.4 試験装置及び手順書

非破壊試験を正しく実施する場合、試験技術者の他に対象きずの検出に適した手順書と試験装置を準備しなければならない。試験技術者、手順書及び試験装置は非破壊試験の信頼性に大きく影響する。この詳細については、次回以降に予定する非破壊試験の信頼性の中で触れる。

### 5. まとめ及び今後の予定

今回、保全活動の概要、保全に適用する非破壊試験の概要などについて簡単に触れた。次回は、試験体の表面の状態を調査する浸透探傷試験 (PT)、磁粉探傷試験 (MT)、渦電流探傷試験 (PT)、目視試験 (VT) の解説を予定している。

#### 参考文献

[1] 出町和之編著, “原子力保全工学”, オーム社, p6, p8, p20

[2] 小林英男編書, “リスクベース工学の基礎”, 内田老鶴圃, pp.10 - 11 (2011)

[3] 原子力規制委員会, “運転段階の安全規制”, 原子力規制委員会ホームページ,  
<http://www.nsr.go.jp/activity/regulation/reactor/unten/unten0.html>

[4] 原子力規制委員会, “新規制基準について”, 原子力規制委員会ホームページ,  
[https://www.nsr.go.jp/activity/regulation/tekigousei/shin\\_kisei\\_kijyun.html](https://www.nsr.go.jp/activity/regulation/tekigousei/shin_kisei_kijyun.html)

[5] 原子力規制委員会, “実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイド”,

[6] 原子力規制委員会ホームページ,  
<http://www.nsr.go.jp/data/000069250.pdf>

[7] 特定非営利活動法人 失敗学会, “失敗事例: エキスポランドジェットコースター事故”,  
<http://www.shippai.org/fkd/cf/CZ0200802.html>

[8] 小林英男編書, “破壊事故”, 共立出版, pp.176 - 180 (2011)

[9] 日本産業規格 JIS Z 2305 : 2013 「非破壊試験—技術者の資格及び認証」

(2019年7月9日)

#### 著者紹介



著者: 牧原 善次  
 所属: (一財) 発電設備技術検査協会  
 専門分野: 非破壊検査技術