特集 電力・エネルギー (電力・エネルギー分野の最新開発技術)

発電設備用インテリジェント計測・診断技術

Intelligent Measurement and Diagnosis Techniques for Non-destructive Inspections

高橋文信 Fuminobu Takahashi 西村 章 Akira Nishimura 出海 滋 Shigeru Izumi



原子力・火力発電設備の 監視・検査装置

計測・診断技術を活用した 各種監視・検査装置は,機 器・構造材の健全性評価・確 認を通して,発電設備の高い 信頼性の確保および稼動率の 向上に寄与している。

原子力・火力発電設備は電力供給の基幹を担っており、設備・機器の高信頼性を維持しながら、いっそうの稼動率の向上が 求められている。

日立製作所製沸騰水型原子力発電プラントの計画外停止回数は、最近5年間で、年間1基当たり0.24件という低い値であり、 平均設備利用率82.3%の高い水準を保持している。今後、さらにいっそうのプラント稼動率向上を図るため、日立製作所は、 プラント事業推進に関する管理体制の強化はもちろんのこと、従来の信頼性向上活動に加え、より効率的でより高度な、信頼 性確保につながる種々の計測・診断技術の開発と、それらを活用した製品検査にも取り組んでいる。

発電プラントの稼動率の向上のためには、プラント設備・機器ごとの信頼性を高めるとともに、定期検査の効率化を図って プラント停止期間を短縮することが重要な課題である。さらに、設備・機器ごとの信頼性確保、定期検査の効率向上につなが る各種計測・診断技術の高度化も、この課題の重要な解決策の一つとなっている。日立製作所は、設備・機器の信頼性を確保 しながら、素材の受け入れ時から定期検査、または廃棄処分までの検査を効率化することを目的に、計測・診断技術を開発し、 それらを活用して各種製品の非破壊検査に適用した。

はじめに

発電プラントの定検(定期検査)では、各種設備・機器

超音波, 渦電流, 放射線を使い, 肉眼では見ることがで きない内部の微小なきずや変形を検知する。そこで, 非 破壊検査をスピーディに, かつ簡便に実行すれば, 定検 の期間を短縮できる。また, 設備・機器の製造段階か ら, 高度化した診断技術を素材・材料の受け入れ検査な どに適用すれば, 製品の信頼性をいっそう向上できる。 ここでは, 発電プラント設備・機器の高信頼性を確保 するための計測・診断技術について述べる。

の起動試験・分解点検・動作試験,経年部品の交換・ 修理などが実施されるほか,かなりの工数をかけて構造 物内部の損傷や変形の有無を確認するための非破壊検査 が実施されている。この非破壊検査は,対象とする構造 物や機器を切断あるいは分解せずに調べる方法であり,

2 計測・診断技術と製品の信頼性

製品の信頼性を確認するため,設計,製造,保守サー ビスの各段階で種々の試験,検査を実施している。設計 段階では,試作品の機能動作・現象・寿命を確認し,製 造段階では,素材・部品の受け入れから出荷時に至るま で,不良・不具合の有無を綿密に調査する。保守サービ スの段階では,定検による納入品の調整だけでなく,劣 化部品の交換,補修時の動作試験・検査を実施し,最終 的に廃棄時まで製品の信頼性を確保するための努力を継 続している。

各段階での試験・検査では,製品に何ら影響を与えず に実施できる非破壊検査が重要であるが,この方法では, 抜き取りによる破壊試験に比べ,迅速かつ高精度の測定, 評価を要求される場合が多い。そこで,計測・診断技術の いっそうの高度化を図り,(1)受け入れ材の全数検査と ともに,使用中の構造材の経年変化の評価を可能にし, (2)遠隔操作ツールを用いて手順を簡素化した検査の迅速 化と,(3)高感度センサによって透視検査の高精度化・ 高速化を実現した,新しい非破壊検査技術を開発した。 すために硬化処理が施されている。例えば,蒸気弁では, 低合金鋼の表面から窒素原子を浸透させ,表面から深さ 200 μmまでの硬さを素材の2倍以上に高める。

これまで,硬化処理層の厚さは,鋼材を切断し,その 切断面の肉厚方向20µmごとにマイクロビッカースで硬 さを測定し,確認していた。この測定法自体の精度は高 いが,測定時間が長いこと,使用中の鋼材で測定できな いことが難点である。そこで,短時間で硬化層の厚さを 非破壊評価でき,さらに使用中の硬化層の残存厚さも測 定できる計測・診断技術を開発した。

この診断法は,鋼材表層部を伝搬する超音波(表面波 と呼ぶ。)の音速が,鋼材の硬さによってわずかに変化す る現象をとらえる。試験体の表面に一定間隔(最短6 mm) で送信と受信探触子を設置し,その間を伝搬する表面波 音速を5億分の1秒の高精度で測定すると,硬化層の厚さ に比例して音速が変化することがわかる(図1参照)。し たがって,未処理鋼材での音速と比較することにより, その音速増加分から硬化層の厚さを20 µmの精度で評価 できる。この非破壊評価法は簡便に実施できるので,処 理材の全数検査が可能となった。

3 非破壊診断による耐摩耗材の全数検査

弁軸や車軸などのしゅう動部や摩擦部では, 硬さを増



一方,使用中の蒸気弁では,その表面に酸化層が形成 されるため,表面波音速だけでは硬化層の厚さを評価で きなくなる。そこで,酸化層が硬化層と電磁気特性が異



(b) 超音波・渦電流複合法による測定結果

図1 超音波表面波音速と硬化層厚さの関係 超音波音速の高精度測定により、鋼材表層部の硬化層(窒化処 理)の厚さとその表層部を伝搬する表面波の音速には、比例関係が 成り立つことがわかった。

図2 蒸気弁の酸化層と硬化層の厚さの測定結果 超音波・渦電流複合法により、これまでは破壊試験でしか得られなかった蒸気弁の酸化・硬化層の厚さを、初めて非破壊測定することに成功した。

56

なることを利用し, 表面波音速法と渦電流法を併用し て、酸化層と硬化層の厚さを同時に評価できるようにし た。実機で使用した蒸気弁の酸化層と硬化層の厚さの測 定結果を図2に示す。同図中, (a)は切断試験で実測した 厚さを、(b)は開発技術で非破壊評価した厚さをそれぞ れ示す。(b)では、酸化層、硬化層ともに、その厚さと 分布が(a)よりも詳細に非破壊評価できていることがわ かる。このように、使用中の鋼材の残存硬化層の厚さを 簡便かつ正確に非破壊評価することにより, その健全性 を確認するだけでなく、より適正な交換時期を見定める ことも可能になるものと期待できる。

遠隔操作ロボットを使った迅速な点検 4

発電設備では、(1)配管が入り組んでいて狭い、(2) 線量率が高い, (3) 温度が高い, (4) 水中にあるなど, 検査員がアクセスしにくい場所がある。そこで、検査員 の代わりに、小型ロボットとRT(放射線透過法)を使っ て、狭い場所にある配管をスピーディに遠隔点検して、 その健全性を確認する点検装置を実用化した。



注: 略語説明 CCD (Charge Coupled Device; 電荷結合デバイス) CRD (Control Rod Drive;制御棒駆動装置)

図4 配管肉厚測定用遠隔点検ビークル

ビークルは、画像ナビゲーション方式の遠隔操縦により、制御 棒案内管群の狭いすきまを通過して圧力容器下部にあるドレン配 管にアクセスし, 放射線透過法で配管を点検する。

沸騰水型原子炉の圧力容器の下には制御棒案内管が多 数設置されているので、そのすきまは狭い(図3参照)。 したがって、ドレン配管にアクセスして、その健全性を 確認するのに長時間の作業が必要であった。

そのため、(1) 先端に搭載した超小型CCD(Charge Coupled Device)カメラで前方を監視しながら遠隔操縦 し、制御棒案内管のすきま(145 mm)を通過し、ドレン



配管にアクセスする走行・作業ビークル、(2) イリジウ ム線源(Ir-192)による y 線透過像を光情報として蓄積す る高感度IP(Imaging Plate)を用いたRT装置をそれぞれ 採用した遠隔点検ビークルを開発した(図4参照)。IPに よって透過像の高度なディジタル処理が容易となり、配 管の外壁,内壁,および模擬欠陥の輪郭を強調すること により、分解能0.3 mmの鮮明な映像を表示できる。ビー クルを使ったRTにより,短時間(最短3分)の遠隔点検を 可能にするとともに,透過像の位置の再現性と映像の鮮 明さを飛躍的に向上させた。

この装置を実機に適用し,該当部位の健全性を迅速に 確認できることをすでに検証しており、保温材を取り付 けた配管や弁などへの適用拡大も図っていく考えである。

X線CTの高速性・高解像度を利用した 内部の詳細透視

5

製品や使用中機器の検査では、単に欠陥の有無だけで なく, 内部構造の変形や異物の検出と識別も重要にな る。例えば、ペール缶に詰めた廃材などの確認、識別は、 環境管理上もまた資源再利用の観点からも必須技術にな

注:略語説明 CRDH (Control Rod Drive Housing)

図3 圧力容器下部のドレン配管点検の模式図 ビークルを遠隔操縦して、制御棒案内管群(間隔145 mm)を通過 させ、ドレン配管を点検する。ビークル駆動、γ線源挿入・出は すべて遠隔操作で行う。

りつつある。そこで、大きな構造物を短時間で透視し、 内容物の形状と材質を正確に識別できる高エネルギーX 線CT (Computed Tomography)装置を開発した。 この装置は,大型製品を挟んで電子線線形加速器 (6 MeV)を用いた線源と、一次元X線アレー検出器を対

57



図5 X線CT装置の構成

線形加速器を使ってX線源強度を向上させ、チャネルアレーセ ンサによって透過X線検出の高効率化を図った、撮影時間10秒の 高機能X線CT装置を開発した。

に示す。精密な断面像(CT)をスーパーインポーズするこ とにより, 被検査体内部の一部分を観察できる立体透過 像も表示可能である。

この装置の実現により, 内部形状や変形の把握にとど まらず, 電池などの内部の化学的変化挙動の画像化や, それに基づく製品自体の性能劣化原因の究明にも役立つ ものと期待できる。

おわりに 6

ここでは、発電プラント設備・機器の高信頼性を確保 するための計測・診断技術について述べた。

日立製作所は,不具合や不良を見いだすためだけの検 査にとどまらず, 高度な計測技術を駆使して, その原因 も追究できる新しい非破壊評価・診断を目指している。 今後も、顧客ニーズにこたえた簡便かつスピーディな計 測・診断により、素材の受け入れ段階から製造、出荷、 使用中, 廃棄に至るまでの一貫した, 製品の高信頼性の 確保を図っていく考えである。

向させて,回転と垂直走査をすることにより,製品内部 の透過像を再構成する(図5参照)。

電子線加速器の線源強度はきわめて強力で、放射性同 位元素を用いた y 線源に比べて、1万から10万倍の強度 が得られる。またアレー検出器は、短冊形Si-SSD(シリ コン半導体検出器)を一次元上に配列したもので、入射 した高エネルギーX線光子を通常のX線フィルムのおよ そ1万倍に相当する確率で検出する。開発した装置では、 線源強度と検出感度をともにこのように飛躍的に向上さ せて, 1,000×1,000画素当たりの撮映時間が10秒, 寸法 測定精度が0.1 mmと, 高速性と高解像度の両立を実現 した。この装置で、CT撮影のほか、並進走査だけでDR (Digital Radiography) 撮影も可能である。

この装置を使って、ターボ回転機を透視した映像を図6



参考文献

- 1) 永島, 外: 超音波音速による蒸気弁弁棒の窒化層厚さ測 定法, 第2回音弹性計測研究会-NDI資料 No.17, 34~39 (1997-5)
- 2) F. Takahashi, et al.: Development of an Ultrasonic Inspection Vehicle for BWR Core Shrouds, 14th Int. Conf. on NDE in the Nuclear & Pressure Vessel Industries, 379-384 (1996-9)
- 3) 出海:高速工業用X線CT装置を用いた非破壊検査の新手 法, 自動化技術, Vol.10, No.10, 36~39(1998-10)

執筆者紹介



高橋文信

1971年日立製作所入社, 電力·電機開発本部 原子力第2部 所属 現在,検査・診断技術と点検ロボットの研究開発に従事 工学博士 日本原子力学会会員, 応用物理学会会員, 日本非破壊検 查協会会員 E-mail: takahasi @ erl. hitachi. co. jp

出海 滋

1967年日立製作所入社, 電力·電機開発本部 計測技術研究センタ 所属 現在, 放射線と電磁気計測技術の研究開発に従事 工学博士 日本原子力学会会員, 電気学会会員, 日本機械学会会員, 日本非破壞検查協会会員 E-mail: sizumi@erl.hitachi.co.jp



西村 章 1971年日立製作所入社,日立工場 原子力プラントサービス部 所属 現在,原子力発電プラントの予防保全統括業務に従事 日本原子力学会会員 E-mail: nishimura @ cm. hitachi. hitachi. co. jp

58