原子炉圧力容器の供用期間中検査と超音波探傷技術 In-Service Inspection and An Ultrasonic Testing Technigue for Reactor Presure Vessel

Requirements for the in-service inspection of reactor pressure vessels and design considerations for reactor pressure vessels and their surroundings in the interest of their in-service inspection are described. Also, applicability of the automatic remote controlled ultrasonic inspection technique using a compound scanning system is discussed.

藤本弘次*	Hirotsugu Fujimoto
伊藤 甫*	Hajime Itô
神田喜美雄**	Kimio Kanda
佐々木荘二**	Sôji Sasaki

11 緒 言

原子炉圧力容器は原子力発電プラントにおける心臓部とも いわれ、安全上最も重要な機器であり、その設計においては あらゆる運転状態を想定して安全性を検討しており、材料, 製作及び検査に対しては高度の品質保証体制がとられている。 したがって,原子炉圧力容器は十分安全性を確保していると 考えられるが、その安全性を積極的に確認して行くために、 アメリカにおいては昭和45年以降運転に入った原子炉の一次 冷却系に対して、一定期間ごとに供用期間中検査(In-Service **Inspection**:以下, **ISI**と略す)を実施することが要求さ れ(1),わが国においてもほぼ同一の内容で日本電気協会の規 程として制定され(2)、これを採用するようになってきた。以 下,原子炉圧力容器に対する ISI 要求の概要を紹介し,要 求を満たす検査を実施するための設計上の配慮について述べ るとともに, ISIに関連して, 遠隔自動操作による複合走 査方式を用いた超音波探傷法についてその研究の概要につき 報告する。

(3) フランジと上鏡又は胴体溶接部及びノズルと胴体の溶接 部のように不連続形状により応力集中が起こる部分 その他の部分に対しては10年間で5~25%の抜取り検査であ る。

2.2 | S | に用いる検査方法

図1に示すように、ISIにおける検査は、肉眼検査、表面検査及び体積検査に大別されており、現時点で採用できる検査技術は次のとおりである。

2 原子炉圧力容器における | S |

2.1 ISIの目的と検査対象

原子炉圧力容器の設計は適切な安全上の余裕をもたせて進 められ,材料,製作及び検査に対しては高度の品質保証体制 がとられているが,定期的に検査を行なうことにより積極的 に安全性を確認することは,上述の設計方針からも必要なこ とである。すなわち,脆性破壊のような不安定破壊の原因と なる可能性のある割れ性の欠陥,繰返し応力による疲労及び ステンレス鋼構造物の応力腐食が,原子炉圧力容器に発生し ていないことを監視するとともに,万一これらの欠陥が発生 した場合には,検査結果に基づき原子炉圧力容器の安全性を 的確に解析するデータを得ることがISIの目的である。

図1は10年間の一定検査間隔に実施することを要求されている検査内容と検査量を検査対象別に示したものであるが、

このような規格上の検査要求は前述のISIの目的に応じて 決められたものである。すなわち,次のような部分に対して は10年間に100%の検査が要求されている。

(1) 累積疲労係数が他の部分よりも比較的高いスタッド ボルト及びノズル内面コーナー曲面部

(1) 肉眼検査

(a) 肉眼(b) ボアスコープ(c) テレビジョン カメラ
 (2) 表面検査

(a) 磁粉探傷(b) 液体浸透探傷(c) スメック ゲージ(3) 体積検査

(a) 超音波探傷(b) 放射線探傷

原子炉圧力容器のISIにおける体積検査の方法は次のよう な理由で超音波探傷が一般に採用されている。

(1) 遠隔自動操作による検査が可能であり、検査員の放射線 被曝線量を低く抑えることができる。

(2) 検査装置が小形であるため検査位置への接近性が良い。
(3) 検査結果を電気信号で得られるため、検査記録の処理、 蓄積が容易である。

2.3 | S | 実施に対する設計上の配慮

原子炉圧力容器のISIにおいて,要求される体積検査と して超音波探傷法を採用した場合,圧力容器の内面からの検 査と外面からの検査の二とおりが考えられる。一般に沸騰水 型原子炉においては,次の理由で後者が有利であると考えら れている。

(1) 燃料交換と平行して検査を行なうことができ,原子炉停止期間の長さに及ぼす影響が少ない。

(2) 検査装置が小形になるので取扱い, 据付けが容易である。

(3) 圧力容器壁に沿って検査装置を移動させるので、位置制御が二次元的に行なえる(内面からの検査では三次元になる)。

(4) 圧力容器の内面にはステンレス鋼の溶接肉盛が施されているが、肉盛の表面仕上げ状態の影響が少ない。

(5) 内部にサーマル スリーブを有するノズルの検査が可能で ある。

*(2) 低合金鋼ノズルとステンレス鋼ノズル セーブエンドの異 種金属溶接部のように熱応力発生の可能性があり、ステンレ ス鋼の応力腐食に対する監視が必要な部分 しかしながら,原子炉圧力容器の周囲には,種々の機器, 構造物及び配管が存在し,空間的にも検査対象位置への検査 員及び検査装置の接近は容易ではない。したがって,原子炉

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立研究所



図 | 原子炉圧力容器に対する供用期間中検査の要求 応力の高くなる所,低サイクル疲労の可能 性のある所及び異種金属溶接部には10年間に100%の検査量が要求されている。

Fig. I ISI Requirements for Reactor Pressure Vessel (BWR)

圧力容器の外面からの超音波探傷装置を可能にするため,信 頼性の高い遠隔自動超音波探傷機が必要となる。また,自動 超音波探傷を可能にするため及び検査員接近性を良くして被 曝線量を極力少なくするために,圧力容器やその周辺機器に 対して,次のような設計上の配慮がなされている。

(1) 原子炉圧力容器の γ線しゃへい体に取り囲まれた部分は 手動検査が不可能であるので, 圧力容器とその保温材の間に, 遠隔自動超音波探傷装置の駆動部分が走行できる程度のすき まを設ける。

(2) ノズルやノズルエンド回りの検査を行なうために、図2

8

場作業に対しても、検査実施上問題にならないよう適切な指 示を行なう。

(5) 工場製作段階で、ISIとほぼ同一内容の検査を行ない、 欠陥がある場合は適切な補修を行ない、現地耐圧試験後行な われる運転前検査(プレ サービス インスペクション)に対処 する。

(6) ISIにおいて検査員の接近及び作業性を考えて,原子 炉一次格納容器内に検査用のはしご,プラットホームなどを 設置する。.

8 複合走査方式による超音波探傷法

を開閉又は取外し可能な構造にする。 2	2.で述べたように、原子炉圧力容器のISIには、超音波
(3) 圧力容器支持スカート内部の鏡部溶接線の検査を行なう 探修	憲法が最も適当な検査方法であり、また今後の技術的な進
ために、スカートにマンホールを設けるとともに、スカート 歩れ	が望まれる。特にこの方法では、欠陥の位置、形状、方向
内部での作業性を良くするため、スカートの径を大きくする。 性な	などを実時間で表示でき,評価が容易にできることが望ま
(4) 超音波探傷を実施する溶接線に対しては、その両側に検 れる	る。
査上必要な平担部を設け,開先合せ,溶接部の余盛などの現 、	これらの目標に対しては種々な試みがなされているが、超



図2 原子炉圧力容器ノズル部分 の γ線しゃへい体プラグ及び保温 材の取外し構造 ノズル部のγ線 しゃへい体プラグは開閉ドア式, 保温材 は分割着脱式となっている。

Fig. 2 Removability Outline of γ-ray Shield Plug and Thermal Insulation Arround Nozzle of Reactor Pressure Vessel

可変角探触子

1.77

7

*

7

2

"p-h



図3 複合走査に関連する諸量の 関係 超音波の入射点から欠陥まで の距離は、アナログ的に演算される。 Fig. 3 Parameters Concerning Compound Scanning Technique

音波ビームを扇形走査しつつ移動走査を行なう複合走査方式 が最も有効であると考え、その開発を行なった。

複合走査技術そのものは、すでに医学診断の分野において 試みられているが、この技術を ISIに適用するためには下 記の問題を解決する必要があった。

- (1) 工業材料(鋼材)に対する超音波ビームの扇形走査方式の 確立
- (2) 複合走査法によるBスコープ(断面)表示技術の開発
- (3) 超音波探触子の遠隔自動駆動装置の開発

3.1 複合走査方式の原理⁽¹⁾

複合走査方式は超音波ビームの扇形走査と移動走査の二つ

いま, 同図に示したように被検体面に可変角探触子を置き, 送波子Tからt=0の時間に超音波ビームが発せられたとする と、超音波ビームは Voの速度で探触子内を伝搬し、R点に入 射角度θで到達する。ここで,超音波ビームは角度φに屈折し, P点方向に向かう。

したがって、 Bスコープ表示を行なうための電子ビーム偏 向信号x, yは次式で表わされる。

$$x = x_{T} + \frac{d}{\cos \theta} \cdot \sin(\theta + \alpha) + V \cdot \frac{t - t_{R}}{2} \cdot \sin(\alpha + \phi) \\ y = y_{T} + \frac{d}{\cos \theta} \cdot \cos(\theta + \alpha) + V \cdot \frac{t - t_{R}}{2} \cdot \cos(\alpha + \phi) \end{cases}$$
(1)

の走査モードから成っている。このため、本方式によれば被 検体内の種々な方向性をもつ欠陥をも容易に検知し,表示で きることになる。しかしながら,超音波ビームは被検体内で 屈折するため、Bスコープ表示を行なう場合はこれに対応す る表示走査技術を開発しなければならない。 図3は複合走査に関連する諸量の関係を示したものである。

ここに, d: 可変角探触子の回転子の中心から被検体面ま での距離

$$t_R$$
: TからRまでの超音波の伝搬時間(= $\frac{d}{V_0 \cdot \cos\theta}$)

9

$$\phi$$
 : 屈折角度(=sin⁻¹($\frac{V}{V_0} \cdot sin\theta$))



図4 複合走査方式による超音波探傷装置のブロック図 検査結 果はテレビモニタ上に実時間で見ることができる。

Fig. 4 Block Diagram of Compound Scanning Ultrasonic Inspection System



α: 被検体面の法線と座標とのなす角度

入射角度 θ , 被検体面の法線と座標軸とのなす角度 α 並び に探触子の位置 x_T , y_T に相当する電気信号は, ポテンショメ ータなどの手段により発生される。

一方,送受波子から被検体面までの距離d,超音波の伝搬 速度V₀,Vは探触子の構成と被検体の材質により定まるが, これらも電気信号に置き換えられ,アナログ的に演算される。

上述のようにして求められた偏向信号 x, yは, 図 3の右 側に示した R' - P'の走査線を示すが、この走査線の輝度は超 音波信号の振幅により変調されているので、 P点において欠 陥を表示できる。

3.2 複合走査方式による超音波探傷装置の構成

複合走査方式による超音波探傷装置のブロック図は,図4 に示すとおりである。探触子は駆動装置に取り付けられ,X 方向に摺動されるが,その移動速度,範囲及び径路の制御 は,数値制御(NC)装置により行なわれる。探触子のX方向 の位置信号及び超音波ビームの入射角度 θの信号は偏向信 号発生回路に導かれ,ここで(1)式の演算が行なわれる。超音 波探傷器は,通常の距離補正と探触子の変角動作に伴う感度 補正の機能も備えている。

超音波断面像は,走査モード変換メモリ(シリコン ターゲット蓄積管)において偏向信号発生回路からのx,y信号と超 * 音波探傷器からの映像信号とで構成され,いったん記憶され

図5 可変角探触子 探触子の変角運動は、ステップモータを用いて行なわれ、遠隔自動制御されている。

Fig. 5 Bottom View of Variable Angle Probe



た後, テレビジョン標準信号に変換される。このようにして, 超音波断面像はテレビジョンモニタに表示され,ビデオ テー プレコーダ(VTR)に録画される。

可変角探触子の外観は図5に示すとおりである。本探触子 には送受分割形を採用し、表層部から深部までの探傷を行な えるようにした。回転子と被検体の間には固定シューを設け、 良好な接触を保てるようにした。また、探触子はホルダに取 り付けられており、ホルダの面において回転できる構成にな っており、超音波ビームを任意な方向に送出できる。扇形走 査はパルスモータにより行なわれている。

複合走査方式による超音波探傷装置及びモックアップ試験 片の外観は図6に示すとおりである。右から探傷及び表示部 並びに数値制御装置,原子炉圧力容器を摸擬して製作したテ スト ブロックである。本図では、ノズルと胴体との溶接部の 探傷を行なうための探触子駆動装置がノズルに取り付けられ ている。探触子駆動装置としては、このほかに胴体溶接部用、 ノズルコーナ部用、ノズルと配管の溶接部用の各機種を試作 した。これらの外観写真を示したのが図7である。また、駆 動装置の主な仕様は**表1**に示すとおりである。

3.3 実験結果

IIW形試験片は,超音波探傷器や斜角探触子の特性試験 に用いられる標準試験片で,これの超音波エコー像を表示し た結果は図8に示すとおりである。特に,円弧状輪郭部をよ → く表現することができた。

また、厚さ200~325mmの鋼板の側面に直径1mmのドリル穴 を施し、これを表示した結果は図9に示すとおりである。同 図(a)は、ドリル穴を円弧状に配列した場合で、(b)、(c)は直線 状に配列した場合を示したものである。これらの結果から分 かるように、ドリル穴は明確に表示され、ドリル穴相互の位 置関係が容易に認識できる。 更に、上述の実物大テスト ブロックを用いて、種々の欠陥 の検出実験を行なったが、そのうちのノズルと胴体との溶接 部及び胴体溶接部の表示例は図10(a)、(b)に示すとおりである。 この場合、底面に施したドリル穴の先端が表示されている。

図 6 実験装置 右から探傷及び表示部分, 駆動機構数値制御装置並びに テスト ブロックである。

Fig. 6 View of Experimental Equipments

10



(a) 胴体溶接部用

Y

-14

1 10





(b) ノズル内面コーナR部用



(c) ノズルと胴体溶接部及びノズル内面コーナR部用



Fig. 7 Probe Driving Devices

駆動装置のおもな仕様 検査範囲及び検査速度は, 表中の任 表丨 意の条件に選ぶことができる。

Table I Some Characteristics of Probe Driving Devices

移動・動作	速度	範囲
探触子のX 軸方向への移動	0~500mm/min	$0\sim$ 450mm
駆動装置の移動 (軌道方向)	0~1,500mm/min	$0 \sim 9,999$ mm
探触子の変角動作	0 ~30deg/s	-30~+30deg 0~60deg

また,試験片でスラグ巻込みなど意識的に導入した欠陥も表 示することができた。

(d) ノズルとノズルエンド及びノズルエンドと配管溶接部用





これらの結果から, 複合走査方式による超音波探傷法によ って、 欠陥の大きさ、 方向、 位置などを明確にとらえ得るこ とが明らかになった。

4 結 言

原子炉圧力容器の供用期間中検査において,超音波探傷法



図 8 IIW形試験片の表示例 端部円弧状輪郭をよく表示することがで きた。

11

Fig. 8 Indication of IIW Type Test Block



図9 ドリル穴の表示例 ドリル穴相互の位置関係が容易に認識できる。

Fig. 9 Indication of Drilled Holes in Steel Blocks



図10 溶接部の欠陥の表示例 溶接部の自然欠陥も鮮明に表示することができた。 Fig. 10 Indications of Defects at Weld

は最も適当な検査方法であると考え,複合走査方式による超音波探傷法の適用性について検討した結果,被検体の超音波

参考文献

 The American Society of Mechanical Engineers 「ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section X1: Rules for Inservice Inspection of Nuclear Reactor Coolant Systems」(昭和46)
 社団法人日本電気協会:「原子炉冷却機圧力バウンダリの供用 期間中検査(案)」(昭和48-5)

断面像を自	動的に	実時	間でテ	レビジ	эン	モニタ	に表示し	τ,
欠陥の形状	,方向	1性,	位置な	どの識	別に	客観性。	をもたせる	らこ
とができ,	かつ証	显绿性	が良い	などの	利点	があるこ	ことが明ら	っか
になった。	このよ	うな	検査技	術は,	原子	炉圧力額	字器の供用	月期
間中検査の	みなら	ず,	広く一	般の材	料,	構造物の	の検査の高	寄性
能化及び高	能率化	にも	役立つ	ものと	考え	られる。		

12

 (3) 佐々木,多々内,神田:「複合走査Bスコープ方式による超音 波探傷法」,非破壊検査,22,584(昭48-9)