U.D.C. 621.039.536.4-791.2.001.575.4:620.179.16]:621.039.524.46

# 新型転換炉原型炉「ふげん」圧力管モニタリング 装置モックアップ

# Mock-up of Pressure Tube Monitoring Apparatus for the Prototype Heavy Water Moderated Boiling Light Water Cooled Reactor "FUGEN"

新型転換炉原型炉「ふげん」の圧力管集合体は,従来型軽水炉における原子炉圧 力容器に相当する機器であり,高度の信頼性が要求されているが,その信頼性向上 のための一手段として重要視されているのが供用期間中検査である。

圧力管集合体の供用期間中検査装置の開発の目的で、その構造及び材料等の特殊 性を考慮した圧力管モニタリング装置モックアップを製作し、実機適用条件を模擬 した条件下で超音波による体積検査、ボアスコープとITVによる内表面検査、直線 式可変差動変圧器及び振子式差動変圧器による圧力管内径並びに傾きの測定を実施 した結果、実機への適用が十分な精度をもって可能であることが確認された。

成尾一輝*	Naruo Kazuteru
柴藤英造**	Shibatô Eizô
鈴木賢一**	Suzuki Ken'ichi

### 1 緒 言

原子力発電所を構成している機器の中で,特に原子炉一次 主冷却系統を構成する機器に対しては高い信頼性が要求され ている。信頼性向上のための一手段として重要視されている ボアスコープとITV(工業用テレビジョン)を使用しての内表 面検査及び圧力管形状寸法上の健全性の確認を目的とする直 線式可変差動変圧器及び振子式差動変圧器を用いた内径,真

のが、供用期間中検査(Inservice Inspection 以下、ISI と 略す)である<sup>1)</sup>。これは、従来の火力発電プラントの定期検査 に相当するものであるが、対象が原子炉であるため、放射線 から検査員を防護するため、空間的制約により機器に接近す ることが困難なことなどにより、特殊技術の開発が必要であ る。ISIを実施するためには、高度の非破壊検査技術及び検 査装置の遠隔操作技術が要求され、各種の研究開発が実施さ れている。

新型転換炉原型炉「ふげん」(以下,「ふげん」と略す)においても、本情勢にかんがみ、原子炉本体機器の開発と平行して表1に示す一連の試作開発計画に沿って、炉心部圧力管(軽水炉の圧力容器に相当する)のISI装置が開発されてきた。

本「ふげん」 圧力管のISI 装置は、超音波による体積検査、

直度の測定を実施する機能をもっている。これら検査用の各 装置は各々別個に開発され,最終的には図1に示す圧力管モ ニタリング装置に一体化され,タレット機構により順次圧力 管内に挿入されるインテグレーテッドタイプのISI装置とな っている。

日立製作所は、本ISI装置のうち、超音波探傷装置及び同 駆動装置<sup>2)</sup>,並びに各検査装置を圧力管内に挿入するための駆 動装置、各検査装置を目的に応じて各圧力管にセットするた めのタレット機構及びISI装置全体を搭載し移動・位置決め するための組立式特殊台車の開発を担当した。本稿では、実 機圧力管モニタリング装置の開発に先立って行なわれた圧力 管モニタリング装置モックアップのうち、主として超音波探 傷装置に関して述べる。

表 | 「ふげん」圧力管モニタリング装置試作開発計画表 本家 試作開発の経緯を示したものである。

本表は、実機ISI装置開発に至るまでの

段階	試作開発項目	1971年	1972年	1973年	1974年	1975年	1976年	内容
1	超音波探傷装置試作開発							<ul> <li>(1)探触子照射試験</li> <li>(2)探傷法決定試験</li> <li>(3)ストロークだけ 立の実物大試作装置の試作</li> </ul>
2	超音波探傷装置機能試験 <sup>2)~4)</sup>							<ul><li>(1)遠隔操作機能試験</li><li>(2)超音波探傷試験</li></ul>
3	圧力管モニタリング装置モック アップ試作							<ul> <li>(1)検出装置,圧力管モニタリング装置モックアップ</li> <li>組立式特殊台車,ICE-PLUG装置などの試作</li> <li>(2)試作装置の機能試験</li> </ul>
4	圧力管下部延長管異種金属溶接部 超音波探傷装置開発試験							<ul><li>(1)超音波探傷装置試作</li><li>(2)超音波探傷試験</li></ul>
								(1)モックアップ装置の改造





## 2 「ふげん」圧力管のISI

### 2.1 特 徴

「ふげん」は、国産自主技術により核燃料の有効利用を目的 として開発された原子炉で、重水減速沸騰軽水冷却圧力管型 原子炉であり、原子炉本体の構造も軽水炉に比べて全く異なっている。

軽水炉の原子炉圧力容器に相当する圧力管集合体の構造は 図2に示すとおりで、224体が垂直に設置されている。炉心部 の圧力管は、ジルコニウム合金製の薄肉管で管外面からの接 近が不可能であること等により、ISIに取り組む基本的な思 想は軽水炉に対するものと同様であるとしても、その具体的 な実施方法においては、実機の構造あるいは材料の特殊性を 考慮した特別な配慮が必要である。その主な特徴を次に示す。 (1) 軽水炉においては、厚肉大形単一容器に対する健全性の 評価を目的としているのに対し、「ふげん」では多数の圧力管 に対する健全性を同レベルで評価できることを目的としてい る。

(2) 圧力管が薄肉直管(内径117.8mm,肉厚4.3mm)形状をしていることにより,健全性の評価の対象となる欠陥の大きさが軽水炉に比べて比較的小さいことから,精度の高い検査が必要である。なお,圧力管の健全性の評価は,材料の脆性特性に関する確認結果<sup>5)~7)</sup>に基づき行なわれる。

図 | 「ふげん」圧力管モニタリング装置取付図 本図は「ふげん」の ISI装置一式の概要を示したものである。図中の特殊台車は、モニタリング装置 の位置決め装置であり、ISI実施時に組み立てて使用する。 (3) すべての検査は, 圧力管の内面から管の周方向及び垂直 方向に実施される。

(4) 放射線から検査員を防護するため、検査対象部に直接近 づくことを可能な限り避けるために、すべての検査が遠隔操 作で行なわれることが望ましい。

2.2 圧力管モニタリング装置モックアップ

#### 2.2.1 概 要

前記の特徴を考慮し、合理的ISIが実施できることを目的 に開発された装置がインテグレーテッドタイプの圧力管モニ





図2 圧力管集合体 圧力管集合体は、炉心部圧力管、上部及び下部延長部より構成され、これら各部位の長さは各々約5m,約1.5m,約3mである。圧力管と延長部の継手部はロールド・ジョイントにより結合されている。

46

表 2 圧力管モニタリング装置モックアップ概要

本表は, 圧力管モニタリング装置モックアップ

一式の構成及び主要駆動仕様を示したものである。

		軸 方 向 馬	回転方向駆動仕様			
構成	ストローク(mm)	速度	位置決め精度(mm)	検出装置駆動軸振れ (mm)	速度	位置決め精度
1.圧力管下部の模擬遮蔽兼シールプラグの着 脱を行なうプラグ着脱装置	3,500	3,000mm/min±20% 60mm/min±20%				
2. 超音波探傷ヘッドを圧力管内で上・下,回転させる超音波探傷検出駆動装置	7,790	3,000mm/min±10% 350mm/min±10% 30mm/min±10%	±5	±3	1rpm 1rps (370deg/s,オー バラップ10deg)	
3. 内径・真直度測定器を圧力管内で上・下, 回転させる内径・真直度測定器駆動装置	7,970	1,200mm/min±20%	±5	±3		
4. 内表面観察装置を圧力管内で上・下,回転 させる内表面観察駆動装置	6,800	3,000mm/min±20% 100mm/s±20%	±5	±3		
5.各検出装置を所定の圧力管位置に旋回させ るタレット装置					90deg/min ± 20% 動作方向 内径・真直度測定装置 プラグ着の内表面観 脱装置 超音波探傷装置	±1mm 基準位置 5 6 1 € 2 3 4

注:ただし,駆動仕様は,50Hzにおける値を示すものである。

タリング装置モックアップである。その概要を表2に示す。 圧力管モニタリングは、図3に示す作業手順により、遠隔操



作により検査装置を圧力管集合体内に最大約8mまで挿入した状態で実施できる。

開発段階では、タレット装置の位置決め精度、検出装置駆動軸の防振性、超音波探傷ヘッドの自動調心機能、探触子の耐放射線性、軸方向位置決め精度など種々解決すべき事項があったが、結果として要求仕様が満足できる装置にまとめることができた。特に、探触子を高放射線環境下で使用することの可能性については、照射試験で、使用上十分耐え得ることが確認されている。

#### 2.2.2 超音波探傷法

図4は、超音波探傷法の概念図である。

探触子は, 10mm×5mm平面長方形のものを2個用い, 管軸 方向に長い欠陥及び円周方向に長い欠陥それぞれに対して最 大感度をもつように配置されている。なお, この探触子は1 探触子法用のものである。

探触子の走査としては,全面探傷を行なうために5mmピッ チで軸方向に送るごとに1回転させる方法を用いている。探 傷法としては,表面傷が主な対象となるため斜角法を採用し, これを水浸法で行なっている。その他,不感帯をなくす意味 で探触子の回転角度は370度とし,10度のオーバラップを行 なっている。

欠陥の表示には,超音波探傷器のブラウン管上に"A"ス コープ法による表示を行ない,更にゲート回路を併用するこ とにより欠陥信号だけをペン書きオシログラフを使用してチ ャート紙上に記録している。このため,従来,超音波探傷の 欠点とされていた欠陥記録の保存性という面が改良されてお り,また,本装置に内蔵された標準欠陥付圧力管試験片を用 いて最初に感度の校正を行なっておけば,その後は半自動的



# に探傷と記録とを同時に行なうことが可能となっている。 2.2.3 圧力管モニタリング装置モックアップ 今回の試作の目的は,事前に実施された超音波探傷装置機 能試験の成果<sup>2)~4)</sup>及び知見をもとに,遠隔操作で各々の検査 装置を自動的に選択し,それを圧力管内へ最大8m挿入して 所定の検査を行なうというモニタリング技術を確立すること,

図3 「ふげん」圧力管ISI作業手順流れ図 本図はISI時,実機ISI装置を使用して圧力管のモニタリングを実施する際の作業手順概要を示す流れ図である。

47

### 298 日立評論 VOL. 59 No. 4 (1977-4)







記録図形(ペン書きオシログラム)

図 4 超音波探傷法概念図 探傷ヘッドで検出された信号は、ケーブ ルを通して超音波探傷器に入り、ここでブラウン管上に表面エコーとともに表 示される。更にここで欠陥信号だけが選別され、ペン書きオシログラフにより チャート紙上に記録される。

図5 圧力管モニタリング装置モックアップ及び試験装置全体 本図は、動力炉・核燃料開発事業団大洗工学センターにおける総合機能試験状 況を示すものである。架台上部中央にある管が試験用の圧力管であり、その下 にあるのが圧力管モニタリング装置モックアップ及び組立式特殊台車である。

ストロークが4mから8mになったことによる超音波探触子の自動調心機能性の再確認及び探触子への信号ケーブルがこれまでの40mから80mと長くなったことによる探傷感度の低下その他の問題の有無を調べることであった。

圧力管モニタリング装置モックアップ及び試験装置全体は 図5に、検査装置取付状態は図6に、超音波探傷駆動装置全体は図7に、探傷ヘッド部は図8に、また探触子の取付状態 は図9に示すとおりである。

本装置の開発に当たって留意したのは次の点である。

(1) 探触子の走査に当たっては, 探触子より圧力管管壁までの距離が一定である必要があるのに対して, ストロークが4 mから8mになったことにより, 検出装置駆動軸の振れのため, 本装置の軸心と圧力管のそれとが一致しない場合が予想される。そのため, 自動調心機構の他に新たに防振機構を装備して, 圧力管と探傷ヘッドの軸心とが自動的にある誤差範囲内で一致するようにすること。

(2) 万一, 欠陥が発見された場合に, 機器の健全性の面から その時点では問題なしと判断された場合でも, その欠陥は継



続して監視され得ることが必要であることを考慮し,欠陥位 置を正確に知るとともに探触子をその位置に精度良く位置決 めできること。

本装置では、探触子の軸方向送り機構として長尺ボールスクリューを用いることにより、位置決め精度の向上を図って

いる。

48

図6 検査装置取付状態 本図は、図5を上方より撮影したもので、 超音波探傷装置佐及びプラグ着脱装置佑が、圧力管モニタリング装置モックア ップに取り付いている状態を示すものである。

### 新型転換炉原型炉「ふげん」圧力管モニタリング装置モックアップ 299

(3)標準欠陥で感度校正後,圧力管集合体の下端より探傷へ ッドを挿入して水浸式の超音波探傷を行なうため,装置自体 に超音波探傷感度校正用の標準欠陥付パイプ及び圧力管集合 体下部延長管下端に対する特殊な水シール機構を備えること。

2.2.4 試験結果

-----

(1) 遠隔操作機能

タレット装置の位置決め精度,検出装置駆動軸の防振性,自動調心機能,軸方向位置決め精度及び水シール性について試験を実施し,次に述べるような成果が得られた。

(a) タレット装置の位置決め精度

各々の測定ヘッド駆動軸において,各々の停止位置のず





# 

図8 超音波探傷ヘッド 本図は,探傷ヘッド部機構を示すもので,探触子の自動調心はフレキシブルジョイントにより行なわれ,探触子の左右回転は回転駆動軸を介してプロペラシャフトにより行なわれる機構である。





図7 超音波探傷駆動装置 超音波探触子を圧力管内の所定の位置まで 挿入し、そこで探傷走査させる装置である。圧力管への挿入は、約9mのボール スクリューで行なわれ、滑らかな動作と正確な位置決めが得られる。 図 9 超音波探触子取付状態 圧力管の中から,超音波探触子がのぞいているところを示す。

49

### 300 日立評論 VOL. 59 No. 4 (1977-4)



図10 超音波探傷試験結果 本図は, 圧力管モニタリングモックアップ装置を使用して, 超音波探傷試験を実施した際の試験片仕様及び探傷試験結果を示すものである。

れは、最大1mm以内であり、実用上問題はない。

(b) 検出装置, 駆動軸の防振性

上部回転テーブルより約1m上方の位置において,各々の測定ヘッド駆動軸の振れは両振幅で最大1mmであり,探 傷上問題はない。

(c) 自動調心機能

超音波探傷ヘッドと駆動軸心との心ずれが5mm以内の範 囲では超音波探傷ヘッドが圧力管との心ずれ1mm以内に自 動的に調心されており,探傷上問題はない。

(d) 軸方向位置決め精度

8mの累積で最大1.5mm以内であり,探傷上問題はない。 (e) 水シール性能

 $2 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ の水圧で30分間保持して、漏洩は認められない。また、超音波探傷試験中を通じても漏洩は認められない。

(f) その他

圧力管集合体内への接触媒体である純水の注入及びドレン作業を含めた実機模擬状態試験の結果,炉心部圧力管全面探傷操作に要する時間は,約150分程度である。

(2) 超音波探傷試験

図10に示す種々の試験片を用いて確認試験を実施した結果, 次に述べるような結果が得られた。

(a) 最大検出感度

50

約80m離れた地点よりの遠隔超音波探傷を実施した場合, 図10に示すように最小長さ3mm, 深さ50µ(肉厚の1.2%) の欠陥まで検知可能である。

(b) チャネル間の電気的干渉問題

軸方向欠陥用及び周方向欠陥用の2チャネル同時超音波 探傷を実施した場合,チャネル間の電気干渉は認められな

## 3 結 言

「ふげん」 圧力管のISIはその特殊性のため、各種の材料特 性試験に基づく独自の検査になること、また、そのための遠 隔操作による圧力管モニタリング装置モックアップを試作し 試験を行なった結果、約80m離れた地点より、最小長さ3mm、 深さ50µの表面傷を検知することができ、かつ欠陥規模の評 価も可能であることが確認された。

最後に、本試作開発は、動力炉・核燃料開発事業団の委託 により日立製作所が行なったものであることを付記し、研究 開発の実施に当たり終始御指導、御協力をいただいた動力炉・ 核燃料開発事業団新型転換炉開発本部の明比副本部長、本多 原子炉課長、同大洗工学センターDCAの宮脇室長、竹下、 今泉、谷本、飯島の各氏、同CTLの小堀室長はじめ関係各 位、並びにこれの計画から実施まで終始御協力をいただいた 多摩川精機株式会社の関係各位及び日立製作所日立研究所の 関係各位に対し厚く謝意を表わす次第である。

### 参考文献

- ASME, Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, Inservice Inspection of Nuclear Reactor Coolant Systems (1974)
- 2) 柴藤ほか:「新型転換炉原型炉「ふげん」炉内圧力管超音波探 傷装置の開発」、日立評論、56、527(昭49-6)
- 3) 柴藤ほか:「新型転換炉圧力管インサービス・インスペクション装置の開発」日本機械学会講演論文集, No.730-3, 47-50, (昭48-4)
- 4) E. Shibato et al : Second International Conference on Pressure Vessel Technology, Part 1 1-23, Oct. (1973)

い。 (c) 欠陥規模の評価 破壊力学の観点より,発見された欠陥に関して必要な情 報は,欠陥の長さと深さである。本装置では,欠陥の長さ は,約±2mmの範囲で推定でき,欠陥深さは,反射エコー の高さから推定可能である。 5) 楠本ほか:「Zr合金管の疲れ・脆性特性に及ぼす水素濃度の影響」日本機械学会講演論文集, No.730-1, 177-180(昭48-4)
6) S. Kusumoto et al: Second International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Session F2, Sept. (1973)
7) 宇佐美ほか:「Zr合金の疲れ脆性特性(第2報)」日本機械学会講演論文集, No.730-12, 13-16(昭48-10)