

# HTTR 原子炉圧力容器溶接線部に対する 超音波深傷試験

—下鏡ドーム子午線方向溶接線—

Ultrasonic Test Results for the Reactor Pressure Vessel of the HTTR  
-Longitudinal Welding Line of Bottom Dome-

野尻 直喜 大和田 博之 加藤 康  
Naoki NOJIRI, Hiroyuki OHWADA and Yasushi KATO

大洗研究開発センター  
高温工学試験研究炉部

Department of HTTR  
Oarai Research and Development Center

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

## HTTR 原子炉圧力容器溶接線部に対する超音波探傷試験 －下鏡ドーム子午線方向溶接線－

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター  
高温工学試験研究炉部  
野尻 直喜・大和田 博之※・加藤 康※

(2008年4月2日受理)

本報は高温工学試験研究炉（HTTR : High Temperature Engineering Test Reactor）の供用期間中検査（ISI）として行った原子炉圧力容器の溶接線部に対する超音波探傷試験について、検査方法、検査範囲等、並びに2008年に実施した下鏡ドーム子午線方向溶接線の探傷結果を記載したものである。また、供用期間中検査の結果から欠陥の発生、進展等を評価するために必要な供用前検査結果（1996年実施）についても記載している。

---

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002  
※出向職員

# Ultrasonic Test Results for the Reactor Pressure Vessel of the HTTR

## - Longitudinal Welding Line of Bottom Dome -

Naoki NOJIRI, Hiroyuki OHWADA\* and Yasushi KATO\*

Department of HTTR  
Oarai Research and Development Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received April 2, 2008)

This paper describes the inspection method, the measured area, etc. of the ultrasonic test of the in-service inspection (ISI) for welding lines of the reactor pressure vessel of the HTTR and the inspection results of the longitudinal welding line of the bottom dome. The pre-service inspection (PSI) results for estimation of occurrence and progression of defects to compare the ISI results is described also.

Keywords : HTTR, In-service Inspection, Ultrasonic Test, Reactor Pressure Vessel

---

\* Research Staff on Loan

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 原子炉圧力容器の供用期間中検査 (ISI) .....	2
2.1 HTTR 原子炉圧力容器の概要 .....	2
2.2 HTTR における RPV の ISI .....	3
3. 原子炉圧力容器の下鏡ドーム子午線方向溶接線の供用前検査 (PSI) 結果 .....	11
3.1 検査方法 .....	11
3.2 検査装置 .....	12
3.3 検査範囲及び探傷範囲 .....	12
3.4 検査結果 .....	12
4. 原子炉圧力容器の下鏡ドーム子午線方向溶接線の供用期間中検査 (ISI) 結果 .....	18
4.1 検査範囲 .....	18
4.2 検査方法及び検査装置 .....	18
4.3 入射点及び屈折角の測定 .....	18
4.4 基準感度の設定 .....	18
4.5 探傷範囲 .....	19
4.6 検査結果 .....	20
4.7 考察 .....	20
5. まとめ .....	37
謝辞 .....	38
参考文献 .....	38

## Contents

1 . Introduction.....	1
2 . In-service inspection of the RPV.....	2
2.1 Outline of the RPV of the HTTR .....	2
2.2 In-service inspection of the RPV of the HTTR .....	3
3 . Results of the pre-service inspection (PSI) of the longitudinal welding line of the bottom dome .....	11
3.1 Method .....	11
3.2 Instilments .....	12
3.3 Measured part and Inspection area.....	12
3.4 Results.....	12
4 . Results of the in-service inspection (ISI) of the longitudinal welding line of the bottom dome .....	18
4.1 Measured part .....	18
4.2 Method and instilments.....	18
4.3 Measurement of incidence point and reflecting angle.....	18
4.4 Setup of specified sensitivity .....	18
4.5 Inspection area .....	19
4.6 Results.....	20
4.7 Discussion .....	20
5 . Conclusion .....	37
Acknowledgement .....	38
Reference .....	38

## 1. はじめに

高温工学試験研究炉（HTTR）は熱出力 30MW、原子炉出口冷却材温度 850°C/950°C（定格運転時／高温試験運転時）の高温ガス炉である<sup>1)</sup>。HTTR は高温ガス炉技術の基盤の確立及び高度化のための試験研究並びに高温に関する先端的基礎研究のために、日本原子力研究所大洗研究所（現、日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター）において日本初の高温ガス炉として 1991 年から建設が始められた。1998 年 11 月に臨界到達し、2004 年 4 月に原子炉出口温度 950°C に到達した。これまでに出力上昇試験運転、安全性実証試験運転並びに定格運転を重ね、高温ガス炉技術の基盤となる運転データの蓄積を行っている。

原子炉圧力容器等の原子力施設の主要機器は、設計・製作の段階において厳格な基準に基づき品質管理を行っており、原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する容器、配管について内蔵する放射性物質の放出の危険性から特に高い健全性と信頼性が要求される。発電用軽水炉では、電気事業法に基づき、原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する容器、配管について、その寿命期間中を通じて、有害な欠陥がないことを確認し、万一何らかの欠陥が発生した場合に速やかにこれを検出するとともに、対策をとることにより健全性を確保することを目的とした供用期間中検査（ISI）を実施することが義務づけられている。

HTTR は試験研究炉であり、ISI を法律上義務づけられているものではないが、HTTR は日本初の高温ガス炉であること、また、圧力容器材料としてクリープ温度域で強度の優れた 2.25Cr-1Mo 鋼をはじめて使用していることから、原子炉圧力容器の ISI を実施することとした。

本報は HTTR の原子炉圧力容器の ISI について、検査方法、検査範囲等並びに 2008 年に行った下鏡ドーム子午線方向溶接線の ISI 結果について記載したものである。また、供用期間中検査の結果から欠陥の発生、進展等を評価するために必要な供用前検査結果（1996 年実施）についてもあわせて記載している。

## 2. 原子炉圧力容器の供用期間中検査 (ISI)

### 2.1 HTTR 原子炉圧力容器の概要

#### (1) 概要

HTTR の原子炉本体の構造<sup>2)</sup>を図 2.1 に示す。原子炉圧力容器 (RPV) は内部に燃料体、制御棒案内ブロック等の炉心構成要素並びに固定反射体ブロック、高温プレナムブロック等の炉内構造物等を収納し、核加熱されたヘリウムガスを取り出すための容器であり、原子炉圧力バウンダリを構成する HTTR の最重要機器の一つである。

冷却材であるヘリウムガスは RPV の下部に接続されている二重管の外管から入り、RPV の内側壁周辺を上昇し、RPV 上部の空間に到達した後に炉心内を下方に流れる。炉心で加熱されたヘリウムガスは高温プレナム部に集められた後に二重管の内管から RPV の外側に取り出される。そのため、炉心で加熱されたヘリウムガスは原子炉圧力容器には直接接触しない構造となっている。

原子炉の通常運転時の圧力は 4MPa、原子炉入口冷却材温度は 395°C、原子炉出口温度は 950°C (定格運転モードでは最高 850°C) に達し、通常運転時の RPV の最高温度は約 400°C に達する。表 2.1 に HTTR 原子炉圧力容器の設計仕様を示す。

#### (2) 構造

RPV の縦断面を図 2.2 に示す。RPV は、上部及び底部が半球状の縦置き円筒型であり、胴体下部には RPV を支持するための円筒型のスカートが溶接により取り付けられている。

上部（上鏡）は圧力容器ふたとなっており、圧力容器ふたの上部にはスタンドパイプ 31 本及びマンホール 1 本が溶接により取り付けられている。圧力容器ふたはスタンドパイプ及びマンホールの管台を含め 1 体鍛造で製造され、フランジと溶接されている。圧力容器ふたは圧力容器胴体部とフランジでスタッドボルトにてボルト締めされている。

胴体部は上部外面に地震時の水平荷重を支持するスタビライザー 6 個が設置され、下部には高温プレナム部温度計測（横型）スタンドパイプが 3 本取り付けられている。胴体部の下には圧力容器スカートが胴半球鏡ペタルを介して溶接され、圧力容器の自重はコンクリート台座で支持される。また、胴体内面には炉内構造物の地震時水平荷重を支持するラジアルキー座が設けられている。胴体部は板 4 つを熱間成形し、周方向 2 枚、縦方向 2 枚を溶接し、上部にフランジを溶接により接合している。

底部（下鏡）の胴半球鏡ドームには 1 次冷却材の出入口となる 1 次ヘリウムノズル、補助ヘリウムノズル、圧力逃がし管等が取り付けられている。胴半球鏡ドームの内面には炉心支持格子を支持するサポートトリブが設けられている。底部半球ドームは 4 枚の板を熱間成形し、溶接により接合されている。

### (3) 材料

HTTR の RPV は定常運転時に約 400°C の高温となるため、RPV の主要材料には軽水炉で使用されている Mn-Mo 鋼よりもクリープ温度領域で強度の優れた 2.25Cr-1Mo 鋼を用いている。2.25Cr-1Mo 鋼は原子炉圧力容器としては HTTR で初めて使用されるものである。

主要材料として 2.25Cr-1Mo 鋼 NT 材を使用しているが、圧力容器ふた半球鏡、ふた側・胴側フランジ、胴半球鏡ペタルには鍛造材 (SFVA F22B) を、圧力容器円筒胴、圧力容器スカート等には鋼版 (SCMV4-2 NT) を、スタンドパイプの一部に管材 (STPA24) を使用している。HTTR の RPV に使用する 2.25Cr-1Mo 鋼 NT 材は中性子照射は熱時効による脆化を改良するために不純物 (P や Si 等) の含有量を JIS 規格の範囲内で制限し、JIS 規格に基づいた焼きならし・焼き戻しの熱処理が施されている。

スタッドボルトには JIS 規格に基づいた焼きならし・焼き戻しの熱処理が施された SNB16 が使用されている。

## 2.2 HTTR における RPV の ISI

ISI は原子炉施設において特に高い健全性と信頼性が要求される RPV 等の容器、配管について、その寿命期間中を通じて、有害な欠陥がないことを確認し、万一何らかの欠陥が発生した場合に速やかにこれを検出するとともに、対策をとることにより健全性を確保することを目的とした検査である。

我が国において発電用軽水炉における ISI は、電気事業法により原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する容器、配管について、事業者が経済産業省令で定める技術基準に適合していることを確認する検査として定期的に実施することを義務づけられている。非破壊検査等を実施した検査結果を記録保管しなければならず、検査中に欠陥を検出した場合には健全性評価を実施し、国に報告しなければならない。具体的な実施方法については、日本電気協会より電気技術規定「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査」(JEAC4205) が発行されており、その中で、検査範囲、検査程度、検査方法、評価などが詳細に定められている<sup>3)</sup>。

HTTR は試験研究炉であり、ISI を法律上義務づけられているものではないが、我が国初の高温ガス炉であり、原子炉出口冷却材温度が 950°C に達する等の他の原子炉にはない特徴を有するため、当時、HTTR の監督官庁であった科学技術庁が ISI 等に関して外部委員会等に検討を依頼し、調査・検討を進めてきた。HTTR における RPV の ISI に関しては具体的な方法を示した規定がないため、外部委員会の検討報告書等<sup>4)</sup>を参考にし、以下の考え方に基づいて実施するものとする。

### (1) HTTR における ISI の考え方

HTTR では、原子炉冷却材圧力バウンダリが破損して軽水炉の 1 次冷却材喪失事故に相

当する減圧事故が生じた場合、工学的安全施設の作動を期待しなくとも、燃料最高温度は許容温度である 1600°C を超えることはなく、燃料粒子被覆層の有意な破損及び著しい劣化が生じることはない。つまり、HTTR の原子炉冷却材圧力バウンダリを構成している機器が破損したとしても、HTTR は固有の安全性を有しており、大量の核分裂生成物を放出するなどの重大な事態には至らない。しかし、仮に原子炉冷却材圧力バウンダリが破損した場合の影響として、破損箇所からの空気浸入による炉内構造物の酸化、炉内に沈着していた核分裂生成物が外部に放出されることによる従事者の被ばく等が考えられ、運転停止に至る可能性がある。

そのため、HTTRにおいては、原子炉冷却材圧力バウンダリが破損した場合に他の設備へ影響を及ぼしたり、有意な核分裂生成物の放出を伴う可能性のある機器については ISI の対象とする。

## (2) RPV の ISI の対象部位

RPVは破損時に有意な核分裂生成物を放出するためISIの対象機器となる。ISIの対象となるのは亀裂の発生・進展が懸念されるのは溶接部もしくは母材部において腐食・浸食等を伴う部位である。母材部に関してはHTTRは冷却材として純度管理されたヘリウムガスを使用しているため、問題となるような腐食・浸食等が生じないので、母材部はISIの実施対象としない。

溶接部については①照射脆化を受ける箇所、②起動停止に伴う繰り返し応力の結果、疲労を起こしやすい箇所が対象となるが以下の理由により HTTR では問題とならない。

### ①照射脆化を受ける箇所

照射脆化については寿命期間にわたる最大中性子照射量が重要であり、HTTR の原子炉圧力容器の累積高速中性子照射量は最大で  $8 \times 10^{16} \text{n/cm}^2$  である。一般には JEAC4201 の「原子炉構造材の監視試験方法」で「設計寿命末期の最大中性子照射量が、容器内面で  $1 \times 10^{17} \text{n/cm}^2$  ( $E > 1 \text{MeV}$ ) を超えると予想される原子炉圧力容器に対しては（高速中性子照射せい化の影響を考える必要があり）監視試験を実施すること」と規定している。なお、HTTR 原子炉圧力容器の主要材料である 2.25Cr-1Mo 鋼について、高速中性子による機械的性質の変化が  $10^{18} \text{n/cm}^2$  まではほとんど変化がないことを確認<sup>4)</sup>しており、よって、照射脆化に関しては無視できる。

### ②起動停止に伴う繰り返し応力の結果、疲労を起こしやすい箇所

一般に形状不連続部等の高い応力が発生する部位では、疲労を起こしやすく ISI 検査部位として重要である。しかし、HTTR は、冷却材としてヘリウムガスを使用していることから、軽水炉に比べ温度変化が急激でなく熱疲労が小さいため、累積疲れ損傷係数は 0.1 以下であり、疲労はそれほど問題とならない。むしろ、HTTR では材料を高温域で使用するため、累積クリープ損傷が問題となるが、溶接部近傍の応力分布及び温度分布から評価又は推定すると累積クリープ破損係数は 0.1 以下であり、その破損

確率は極めて小さく累積クリープ損傷も問題とはならない<sup>4)</sup>。

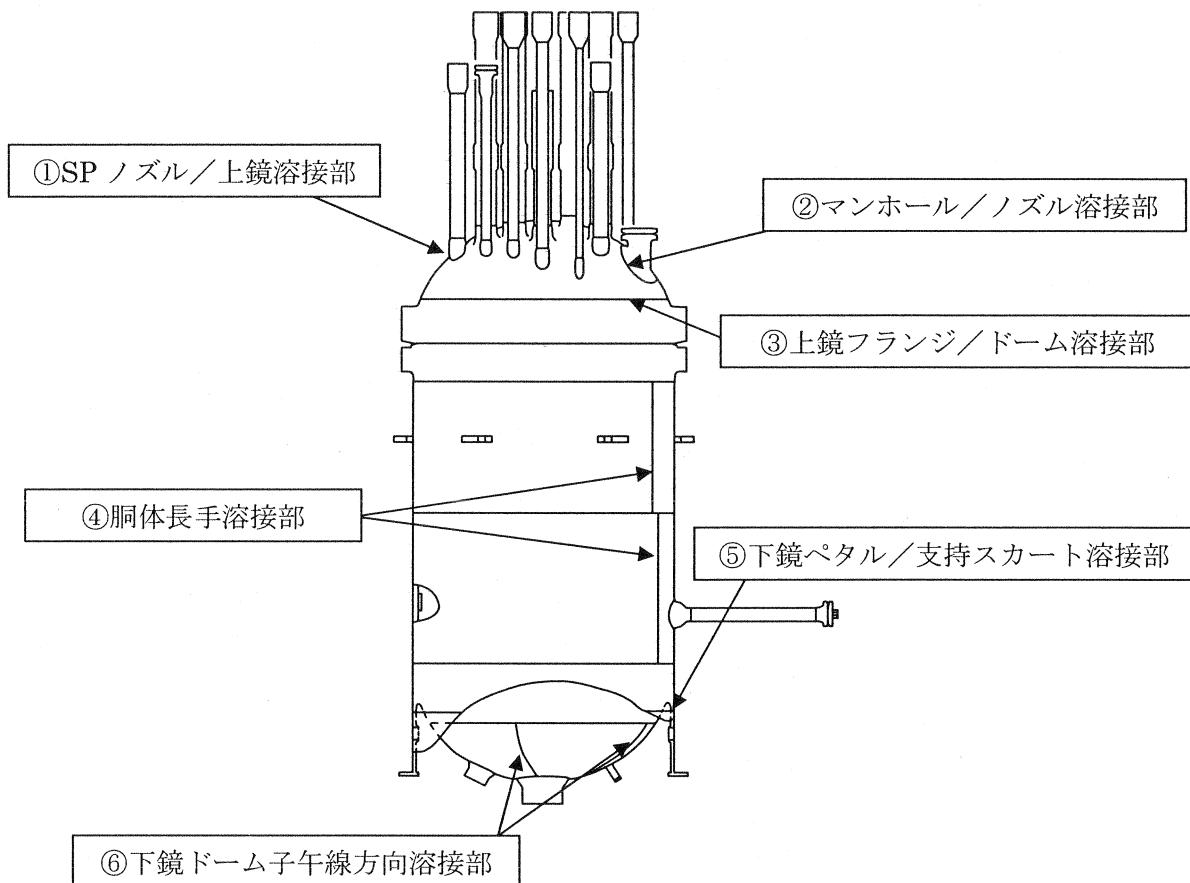
上記のように①照射脆化を受ける箇所、②起動停止に伴う繰り返し応力の結果、疲労を起こしやすい箇所として特別の位置の選定は必要がないため、任意の溶接線を抜き取りで ISI を実施することとした。RPV の代表溶接線を図 2.3 に示し、このうちの ISI の対象とする溶接線を表 2.2 に示す。

具体的な試験方法は電気技術規定「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査」(JEAC4205) を準用し、溶接線に対する超音波探傷試験による体積検査とする。

表 2.1 HTTR 原子炉圧力容器の設計仕様

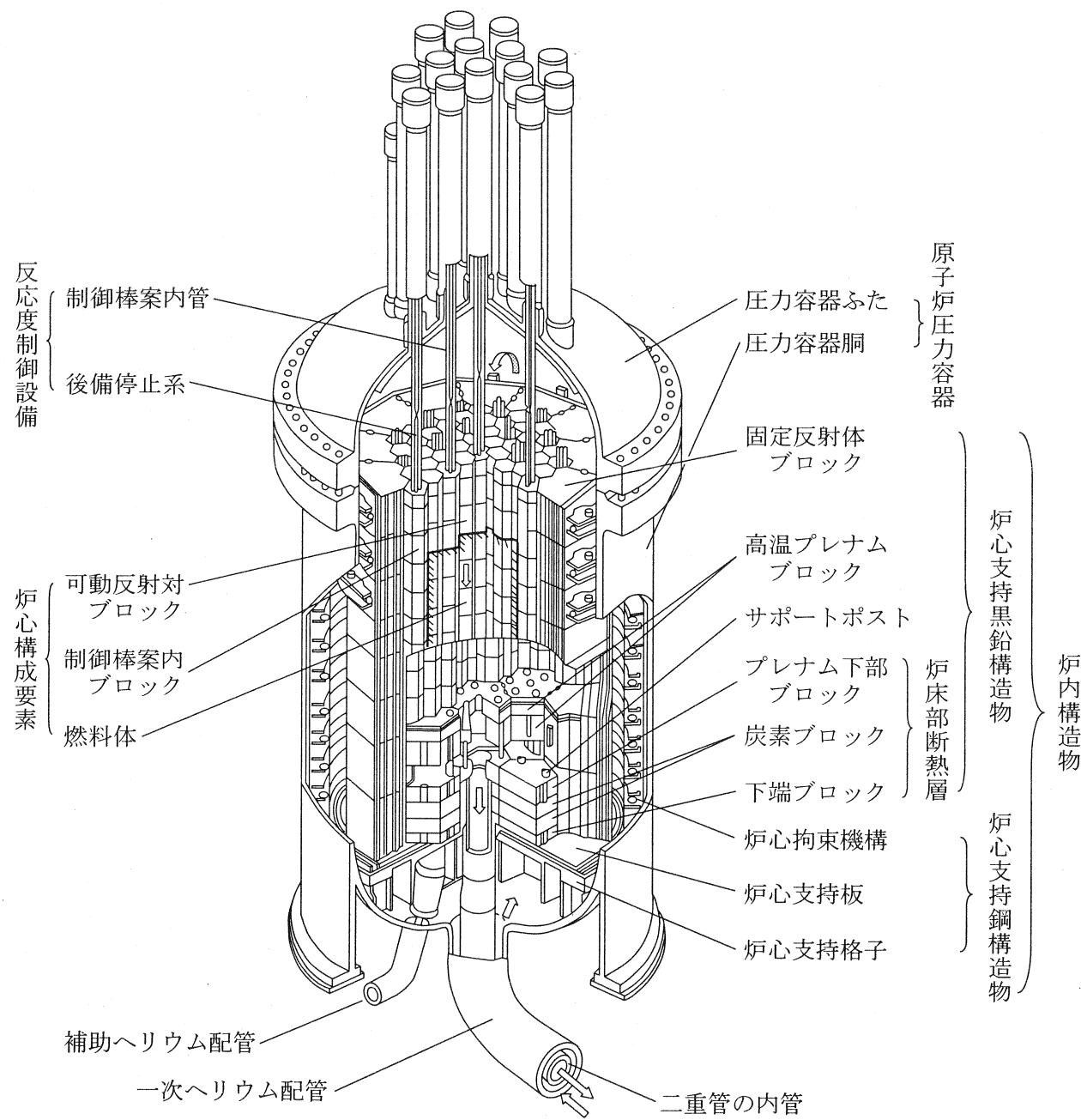
原子炉圧力容器	種類	たて置き円筒型								
	機器種別	高温ガス炉第1種容器								
	耐震クラス	As								
	流体の種類	ヘリウムガス								
	最高使用圧力	4.7 [MPa]								
	最高使用温度	440 [°C] (ボルトは 410 [°C])								
	主要寸法	内径	5500 [mm]							
		全高 (内のり)	13220 [mm]							
		圧力容器内筒胴厚さ	122 [mm]							
		圧力容器ふた半球鏡厚さ	160 [mm]							
		圧力容器胴半球鏡厚さ	122 [mm]							
スタンドパイプ	主要材料	圧力容器ふた半球鏡	SFVA F22B							
		ふた側フランジ	SFVA F22B							
		胴側フランジ	SFVA F22B							
		圧力容器円筒胴	SCMV4-2 NT							
		圧力容器胴半球鏡	SCMV4-2 NT、SFVA F22B							
		スタッドボルト、ナット	SNB 16							
	名称		制御棒スタンダードパイプ	照射スタンダードパイプ						
圧力容器スカート	種類		円筒型							
	機器種別		高温ガス炉第1種容器							
	耐震クラス		As							
	流体の種類		ヘリウムガス							
	最高使用圧力		4.7 [MPa]							
	最高使用温度		375 [°C] (スタンダードパイプクロージャは 150) (高温プロテクション部温度計装スカートパイプは 440)							
	主要寸法	外径	mm	525	460	440	8B(216.3)			
		厚さ	mm	20	17.5	17.5	Sch40(8.2)			
		個数		7	9	3	2			
	主要材料		SFA F22B				SFVA F22B STPA24			

表 2.2 ISI 対象の原子炉圧力容器溶接線



対象溶接線	全溶接長さ (m)	厚さ (mm)	ISI 対象範囲 (%/検査周期)	ISI 実施範囲 (m)
①SP ノズル／上鏡溶接部	5箇所 ( N27,N28, N29,N30,N 31) *	24 or 28	100%	5箇所 ( N27,N28, N29,N30,N 31) *
②マンホール／ノズル溶接部	1箇所	165	50%	-
③上鏡フランジ／ドーム溶接部	17m	165	10%	1.7m
④胴体長手溶接部	13.6m	128	20%	2.7m
⑤下鏡ペタル／支持スカート溶接部	18m	77	5%	0.9m
⑥下鏡ドーム子午線方向溶接部	9.5m	127	10%	1.0m

\* : スタンドパイプ番号



図中の➡はヘリウムの  
流れを示す。

図 2.1 原子炉本体の構造

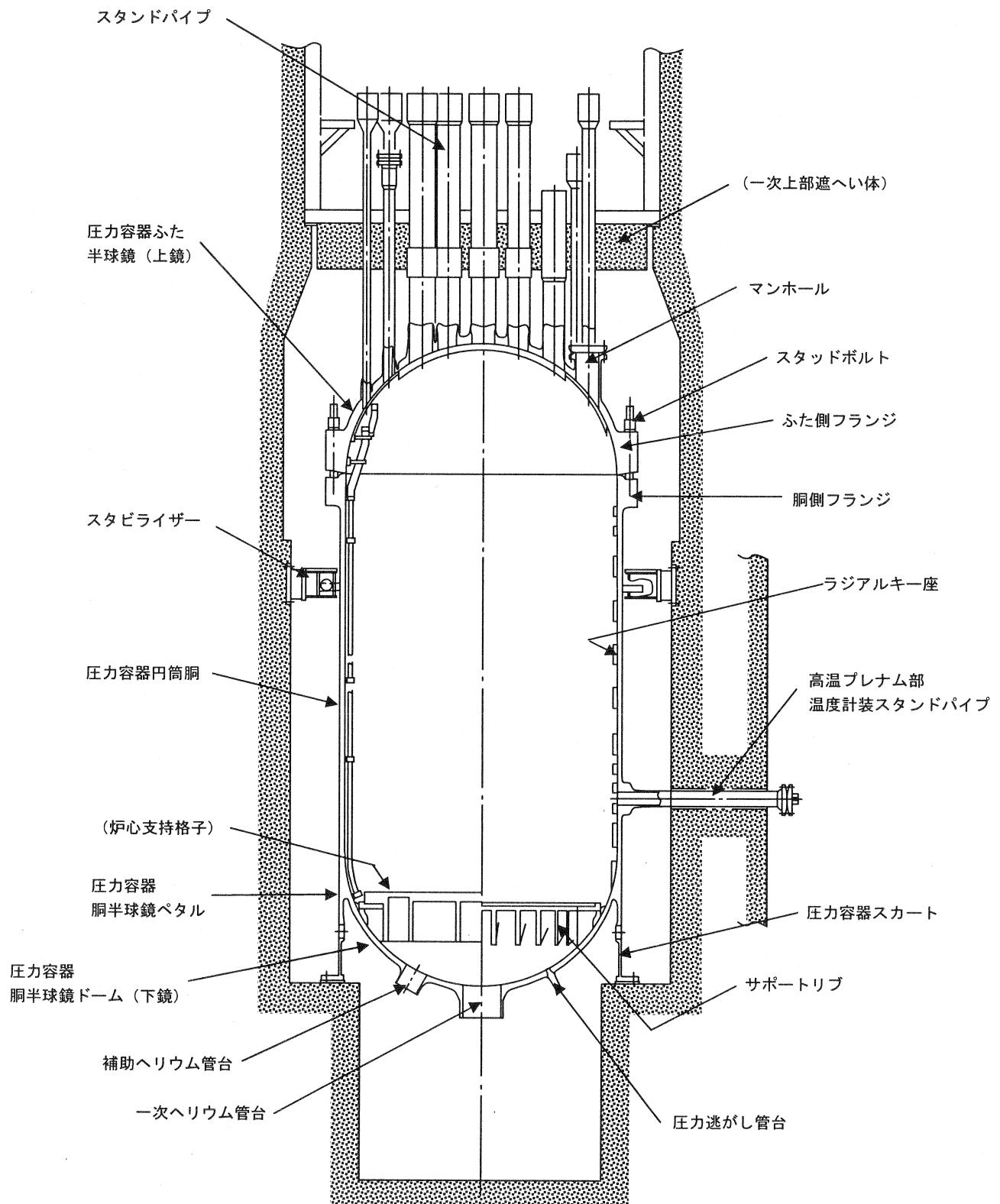


図 2.2 原子炉圧力容器の縦断面

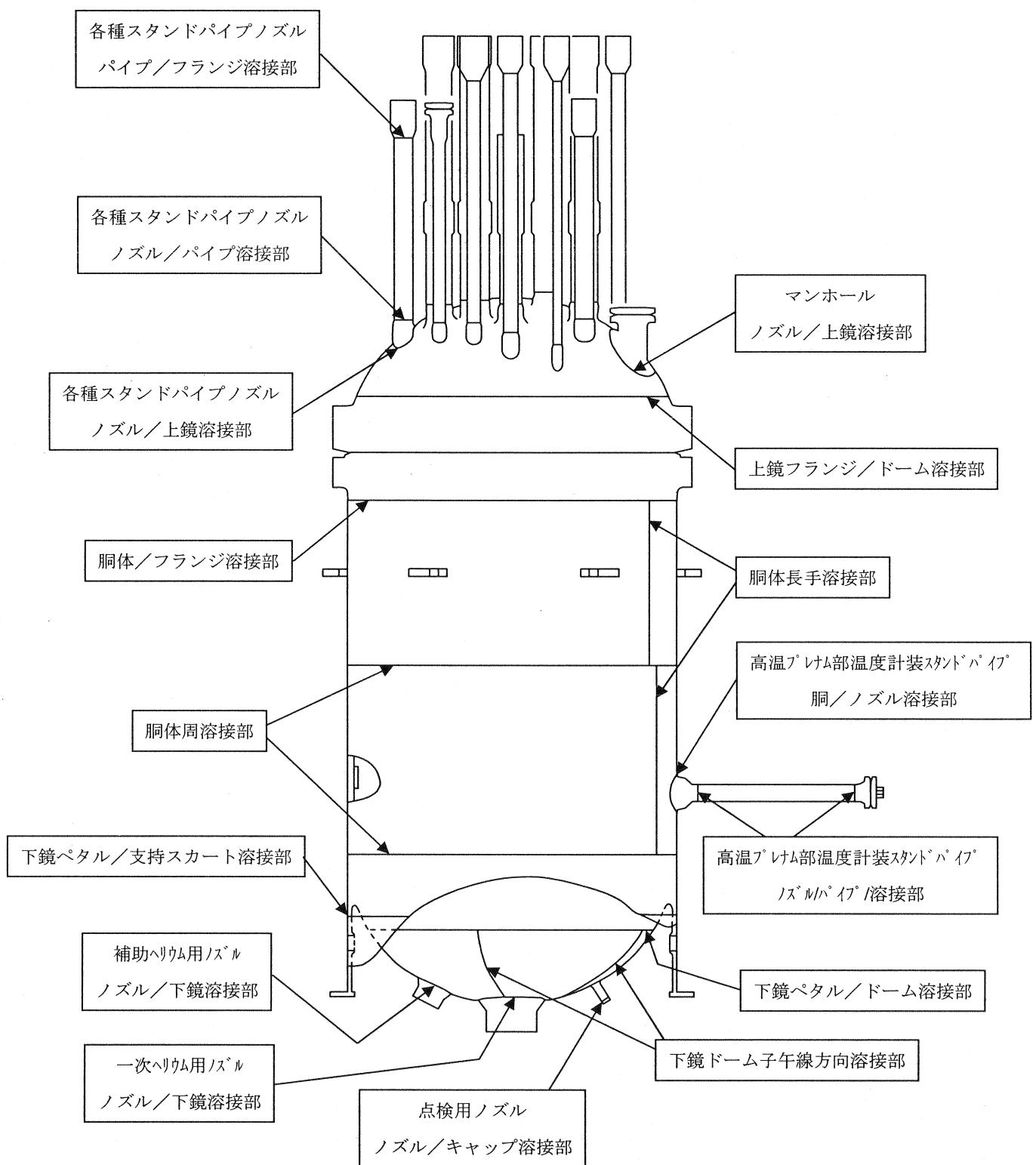


図 2.3 HTTR 原子炉圧力容器の代表溶接線

### 3. 原子炉圧力容器の下鏡ドーム子午線方向溶接線の供用前検査（PSI）結果

#### 3.1 検査方法

供用前検査（PSI）は供用期間中に先立って、プラント運転開始前に ISI 対象部の基礎データを採取し、ISI の試験結果と比較するために行う検査である。原子炉圧力容器の PSI は平成 8 年 12 月～平成 9 年 1 月にかけて行われた。（圧力容器の耐圧試験完了後であり、かつ、燃料装荷前の状態。）

PSI の実施対象範囲及び試験、評価方法については日本電気協会電気技術規程「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査」（JEAC4205-1995）及び日本電気協会電気技術規程「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中における超音波探傷試験指針」（JEAG 4207-1995）を準用し、計画を作成した。

検査員は社団法人 日本非破壊検査協会認定の資格を有した者で実施した。

検査範囲は ISI 対象範囲である上鏡フランジドーム溶接部、胴体長手溶接部、下鏡ペタル支持スカート溶接部、下鏡ドーム子午線方向溶接部、SP ノズル上鏡溶接部、及びマンホールノズル溶接部である。PSI 対象範囲を表 3.1 に示す。

PSI は上記の対象範囲について実施したが、以下の検査方法、検査装置、検査範囲及び探傷範囲及び検査結果については、2008 年に行った ISI である下鏡ドーム子午線方向溶接部に関するものを記載する。

- (1) 探傷器及び探触子は、JIS Z 2344 「金属材料のパルス反射法による超音波探傷試験方法」に従って性能試験を行い、その結果を記録する。
- (2) 斜角探傷子は、公称屈折角の  $\pm 2^\circ$  以内の実測屈折角を有しているものを使用する。
- (3) 探傷角度は  $0^\circ$ （垂直）、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$  で実施。
- (4) 接触媒質はグリセリンを使用。
- (5) 基準感度の調整（下鏡ドーム子午線方向溶接線）

##### a. 垂直探傷の基準感度

対比試験片（HTTR-2）（図 4.4 参照）の  $1/4T$ 、 $2/4T$ 、 $3/4T$  の位置にある基準穴を探傷し、超音波探傷装置の距離振幅補正回路（DAC 回路）とソフトウェアの DAC 機能によりそれぞれの反射波が CRT フルスケールの 80%になるように機器を調整し、これを基準感度（DAC カーブ）とする。

##### b. 斜角探傷の基準感度

対比試験片の  $1/4T$ 、 $2/4T$ 、 $3/4T$  の位置にある基準穴を  $1/8S$ 、 $2/8S$ 、 $3/8S$ 、 $5/8S$  で探傷し、超音波探傷装置の距離振幅補正回路（DAC 回路）とハードの DAC 機能によりそれぞれの反射波が CRT フルスケールの 80%になるように機器を調整し、これを

基準感度（DAC カーブ）とする。

- (6) 垂直探傷及び斜角探傷とともに DAC20%を超える反射波においては、位置、ビーム路  
程、エコー高さ、及び探触子移動距離を記録する。

### 3.2 検査装置

自動超音波探傷装置（オートポジショナー及びマニュアルポジショナー）は探傷部、超音波探傷器、データ収録用コンピュータ、走査制御器等から構成される。図 3.1 に自動超音波探傷装置の外観図を示す。マニュアルポジショナーは干渉物がありオートポジショナーの走行ができない部分がある上鏡フランジドーム溶接部の一部に使用した。自動超音波探傷装置はアスペクト製  $\alpha$  UT-2 装置、探触子は ASPECT 社製 (2C20N、2C20×20A45、2C20×A60) を使用した。

### 3.3 検査範囲及び探傷範囲

下鏡ドーム子午線方向溶接部の探傷位置を図 3.2 に示す。自動超音波探傷装置によるオートポジショナーを使用。構造的にポジショナーを使用できない場所は手動により探傷した。

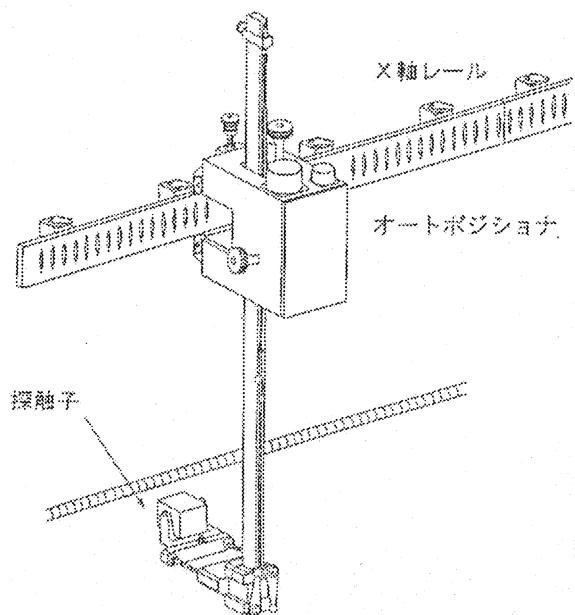
探傷範囲は溶接部及び溶接部端より両側に各々板厚の半分 ( $1/2T$ ) の母材を含めた領域とし、溶接線に対して直角な 2 方向及び並行な 2 方向の計 4 方向を原則として試験を実施した。

### 3.4 検査結果

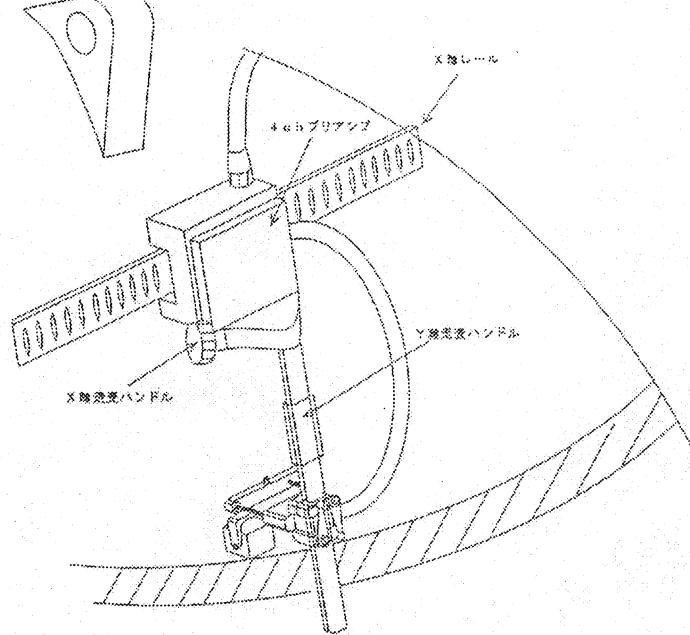
下鏡ドーム子午線方向溶接線の検査結果、DAC20%以上のインディケーションは検出されなかった。下鏡ドーム子午線方向溶接線の検査記録を図 3.3(1),(2)に示す。

表 3.1 PSI 対象範囲

対象溶接線	溶接番号	探傷方法
①SP ノズル上鏡溶接部	W2208	手動により探傷。
	W2209	
	W2210	
	W2211	
	W2212	
②マンホールノズル溶接部	W2101	手動により探傷。
③上鏡フランジドーム溶接部	W1201	自動超音波探傷装置（オートポジショナー、マニュアルポジショナーを使用）構造的に自動装置を使用できない場所は手動により探傷。
④胴体長手溶接部	W1101	自動超音波探傷装置（オートポジショナーを使用）
	W1103	
⑤下鏡ペタル支持スカート溶接部	W1301	自動超音波探傷装置（オートポジショナーを使用）
⑥下鏡ドーム子午線方向溶接部	W1105	自動超音波探傷装置（オートポジショナーを使用）構造的に自動装置を使用できない場所は手動により探傷。
	W1106	
	W1107	
	W1108	



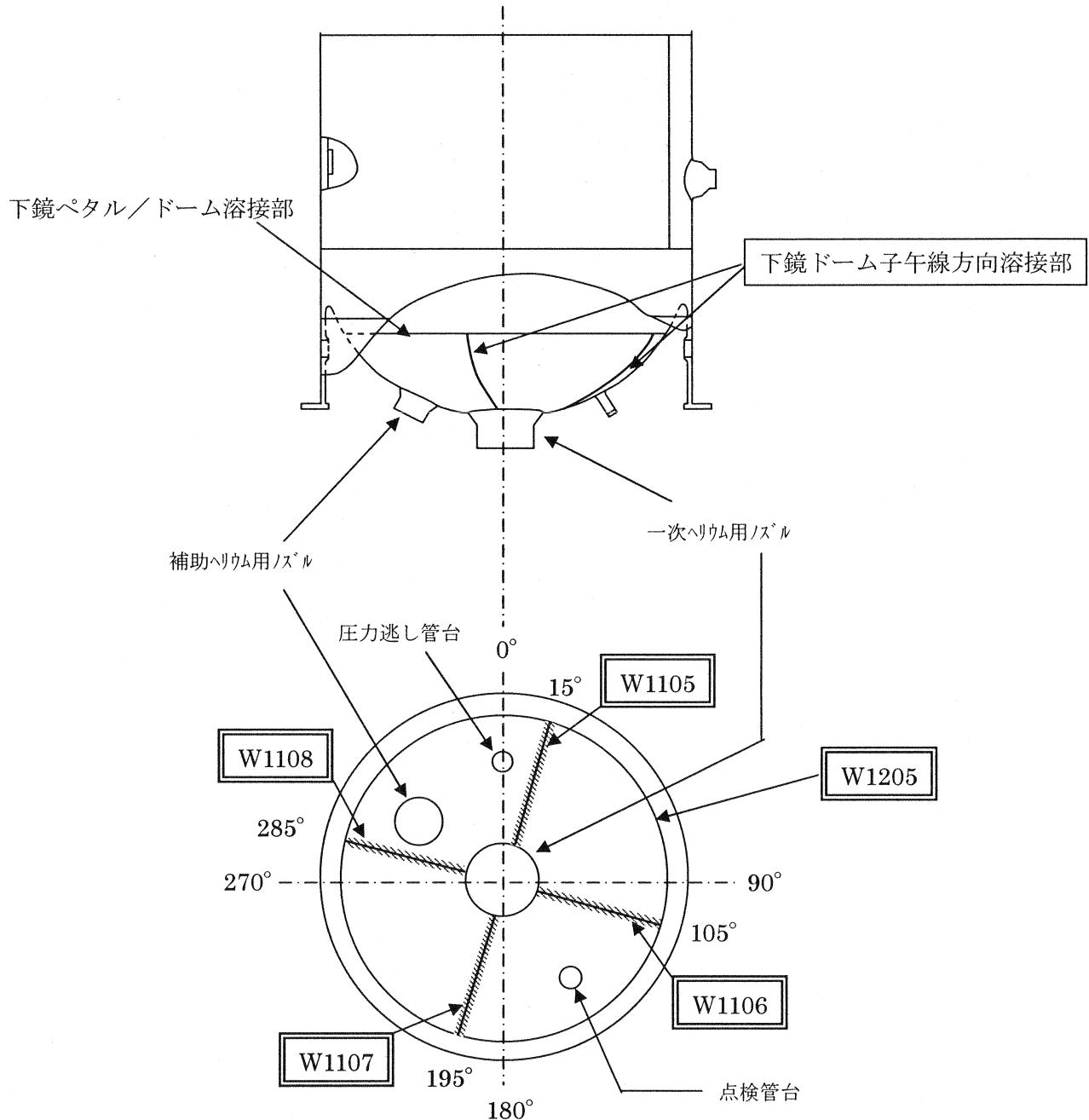
a) オートポジショナー



b) マニュアルポジショナー

図 3.1 自動超音波探傷装置の外観図

(原子炉压力容器下部)



(原子炉压力容器を下から見た図)

図 3.2 下鏡ドーム子午線方向溶接部の探傷位置

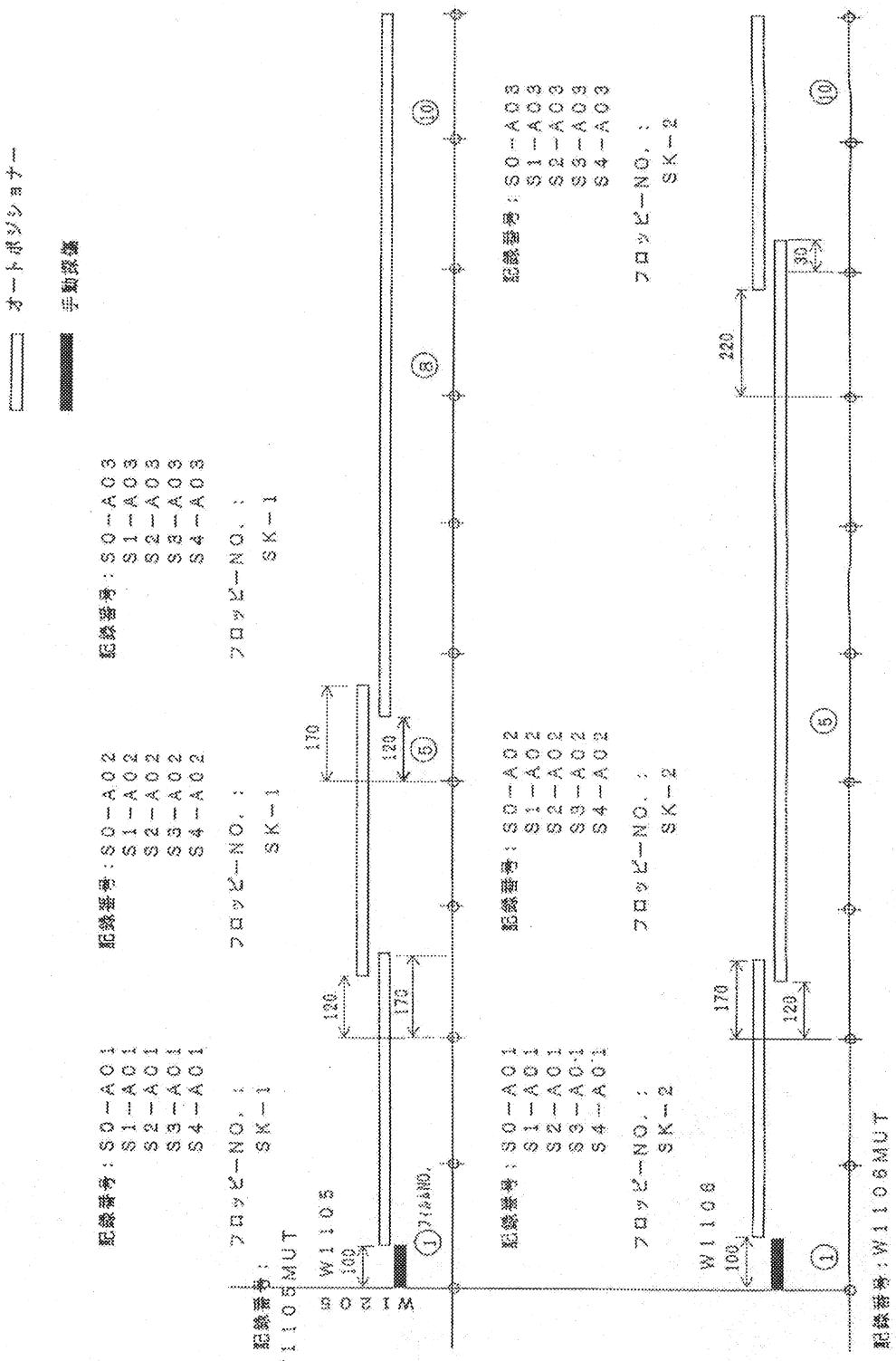


図 3.3(1) 下鏡ドーム子午線方向溶接部の検査記録

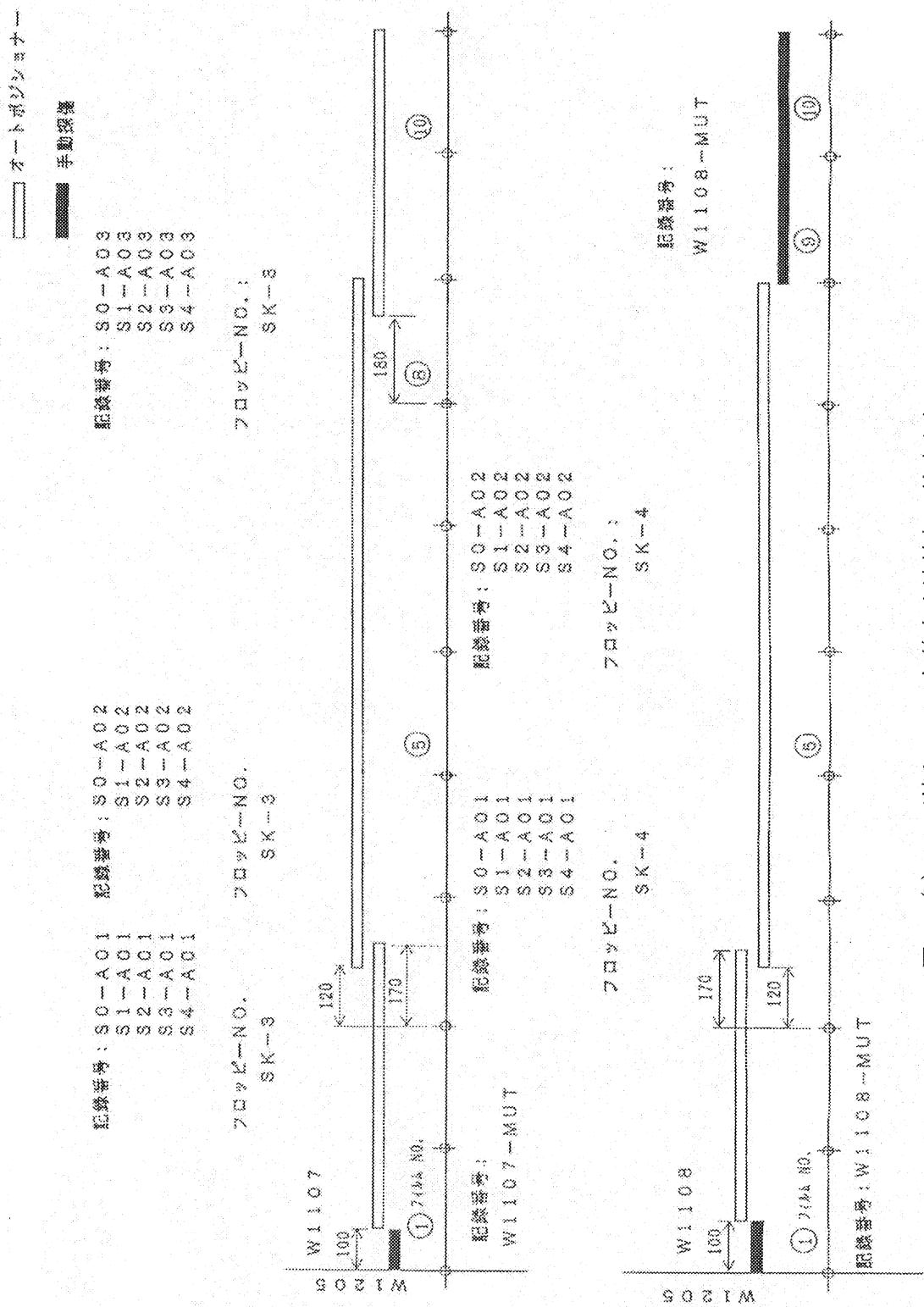


図 3.3(2) 下鏡ドーム子午線方向溶接部の検査記録

## 4. 原子炉圧力容器の下鏡ドーム子午線方向溶接線の供用期間中検査（ISI）結果

### 4. 1 検査範囲

本検査では、HTTR の ISI 対象箇所である RPV 下鏡ドーム子午線方向溶接部（計 4 箇所）のうち  $15^\circ$  方向に位置する溶接線 No.W1105 (1.0m) について、超音波探傷検査（UT）を行った。図 4.1 に検査対象部位及び検査箇所を示す。

### 4. 2 検査方法及び検査装置

「軽水炉型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験指針（JEAG4207-2004）」及び「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査（JEAC4205-2000）」に準拠し検査を行った。

検査に使用した機器は、日本クラウトクレーマー社製のパルス反射式自動探傷装置 USI- $\alpha$  である。この装置は、探触子、走査装置、制御装置、探傷装置、データ収録装置及び X, Y 軸軌道レール等から構成される。図 4.2 に探傷装置の概要を示す。データ収録プログラムは JEAG に適合した走査ができるようになっている。探傷装置の仕様を表 4.1 に、探触子の仕様を表 4.2 に示す。

探傷装置は、日本工業規格「超音波探傷装置の性能測定方法」（JIS Z 2352）に基づき測定し、増幅直線性  $\pm 3\%$  の範囲、時間軸直線性  $\pm 2\%$  の範囲、感度余裕値 40dB 以上の性能を満足するもので、その性能を使用開始時及び 12 ヶ月以内ごとに性能を確認したものを使用する。

探触子は、ASPECT 社製の垂直探触子及び斜角探触子 ( $45^\circ$ 、 $60^\circ$ ) を使用した。

### 4. 3 入射点及び屈折角の測定

斜角法においては、検査部位から有意なインディケーションが検出された場合、位置、深さを判断するには探触子各々の入射点及び屈折角が重要になってくる。超音波探傷試験前には標準試験片を用い確認することが必要である。

入射点の測定は、「超音波探傷用標準試験片」（JIS Z 2345）に規定する標準試験片（STB-A1）を用いて 1mm の単位で測定し、屈折角の測定は、標準試験片（STB-A1）を用いて  $0.5^\circ$  の単位で測定した。標準試験片(STB-A1)を図 4.3 に示す。

### 4. 4 基準感度の設定

同一欠陥でも、そのエコー高さはビーム路程によって変化する。すなわちビーム路程が長くなる程、エコー高さは見かけ上小さくなる。このため、探傷部位と寸法、形状が同等で超音波特性の近似した材料で作られた対比試験片（HTTR-2）（図 4.4 参照）により距離

振幅補正（DAC）する必要がある。基準感度の設定方法は以下のとおりである。本検査で用いた DAC 曲線を図 4.5 に示す。

(1) 垂直法の基準感度設定（試験部の厚さが 25mm を超える場合）

- i) 対比試験片の T/4 位置にある横穴からのエコー高さが最大となる位置に探触子を置き、エコー高さがブラウン管の全目盛の 80%になるように感度を調整し、そのままの感度で 3T/4 位置にある横穴からの最大エコー高さを求める。
- ii) 対比試験片の 2T/4 位置に横穴が設けられている場合で、その最大エコー高さが他の横穴からの最大エコー高さより高い場合は、これをブラウン管の全目盛の 80%になるように感度を調整し、そのままの感度で T/4 位置、3T/4 位置にある横穴からの最大エコー高さを求める。
- iii) これらのエコー高さを線で結び、必要な時間軸範囲にわたって延長して DAC 曲線とする。
- iv) DAC 回路を使用する場合は、必要な時間軸範囲にわたってブラウン管の全目盛の 80%又は 50%になるように感度を調整する。

(2) 斜角法の基準感度設定（試験部の厚さが 51mm を超える場合）

- i) 対比試験片の T/4 位置にある横穴からのエコー高さが最大となる位置(1/8)S に探触子を置き、エコー高さがブラウン管の全目盛の 80%になるように感度を調整し、そのままの感度で(3/8)S のエコー高さを求める。
- ii) 対比試験片の 2T/4 位置に横穴が設けられている場合で、(2/8)S のエコー高さが(1/8)S のエコー高さより高い場合は、これをブラウン管の全目盛の 80%になるように感度を調整し、そのままの感度で(1/8)S、(3/8)S のエコー高さを求める。
- iii) これらのエコー高さを線で結び、必要な時間軸範囲にわたって延長して DAC 曲線とする。
- iv) DAC 回路を使用する場合は、必要な時間軸範囲にわたってブラウン管の全目盛の 80%又は 50%になるように感度を調整する。

#### 4. 5 探傷範囲

下鏡ドーム子午線方向溶接部（No.W1105）1.0m について JEAG4207-2004 及び JEAC4205-2000 に準じ、溶接線の左右 10mm を含む範囲を試験範囲として垂直（0°）1 ケース及び斜角（45°、60°）8 ケースの計 9 ケースの探傷を行った。（図 4.6、図 4.7 参照）

本 ISI における検査範囲を図 4.8(1)～(5)に示す。

#### 4. 6 検査結果

今回の対象部位ほぼ全範囲について自動探傷装置にて検査を実施した。本 ISI では全ての箇所において有意なインディケーションは検出されなかった。探傷結果の 1 例を図 4.9 に示す (W1105\_45CW 001)。探傷検査において、探触子と試験体の音響結合が確実に行われているか否かの確認は、本装置内蔵のカップリングチェック機能 (CC 機能) を用いたが、溶接線及び溶接線近傍の形状と探触子の形状により探触子の接触が不十分である箇所が数箇所あった。そのような CC 異常の箇所については、手動探傷による再検査を実施した。

探傷結果から、全てのデータにおいて「記録すべきエコー（欠陥）は無し」と有資格者により判定された。

本 ISI においては有意なインディケーションが検出されなかった為、検査結果に何も表示されていないが、有意なインディケーションが検出された場合の例を図 4.10 に示す。このデータは人工的に欠陥を施してあるモックアップ試験体を用いて取得したものである。欠陥が検出されると、C スコープ（母材表面方向から見た透過図）、F-B スコープ（溶接線に平行な断面方向から見た透過図）S-B スコープ（溶接線に垂直な断面方向から見た透過図）上に反射エコーの大きさに応じ色分けされた点がプロットされる。スコープ下の表は欠陥エコーの位置、大きさ等を示したものである。

#### 4. 7 考察

##### (1) 作業環境について

現在の炉容器下部室は、表面密度が  $\beta(\gamma) < 0.4 \text{Bq/cm}^2$  であり立入者装備は比較的軽装で、搬入物品に関しても厳重な養生を必要としなかった。今回の作業では、炉容器下部室からの退出時、物品搬出時の検査においては、汚染は検出されなかったが、炉容器下部室内は埃が舞っており、汚染された埃が体や物品に付着する可能性もある。

さらに、ISI の準備作業として、圧力容器表面の錆除去を実施するため、汚染物の付着の可能性は高くなる。

今後 HTTR の運転実績が重ねられるにつれて、炉容器下部室内の空間線量率や表面密度は上昇していくことが予想され、作業員の装備、搬入物品の最少化、養生方法や汚染が発生した時の対策などを検討しておく必要がある。

##### (2) 作業時間について

今回の炉容器下部室内作業は、1人当たり 1 日 2 時間までを目安とし、午前、午後の 2 回に分けて行う計画であったが、今回は作業員（有資格者）も不慣れな自動探傷装置を使用したことから予定よりも長時間作業（3 時間程度）になってしまった日もあった。作業エリアの空間線量率が低かったので作業員の被ばくをそれほど考慮せずにできたが、今後行われる胴溶接部付近は比較的高線量率 (H18.9 測定時で  $30\sim100 \mu \text{Sv/h}$ ) があるので、少しでも個人被ばく線量を抑えるには事前の綿密な打ち合わせや炉外にお

ける自動探傷装置の取扱い技術の習熟訓練を十分に行い、作業時間の短縮を図ることが重要である。

### (3) 個人線量について

今回の作業の計画被ばく線量は、炉容器下部室内作業環境を考慮に入れ算出し、 $0.21\text{mSv}$ とした。作業エリアの線量率  $\text{Max.}2\mu\text{Sv/h}$  であったため、個人被ばく線量においても、ISI 実作業に係った作業者全員の被ばくはなかった。

圧力容器 ISI については、今後検査対象とする溶接部によっては高線量率下での作業をせざるを得ない場面も想定される。作業員の増員や作業時間の短縮等の対策を立て、個人被ばく線量を可能な限り抑えることが重要である。

### (4) 探傷装置について

今回の ISI には、PSI と同様に自動探傷装置を使用して行った。自動探傷装置は、(欠陥) エコーが検出された場合、場所の特定、深さ、大きさが PC 画面上に表示され、また探傷結果が残せる利点がある。

今回の問題点としては、下鏡ドーム子午線方向溶接部は、曲率付きマグネット軌道を用いることで装置を設置でき走査可能であるが、長いビーム路程を必要とする  $60^\circ$  斜角探触子を使用しての走査時軌道レールから離れた位置において探触子が探傷面から浮き上がってしまうことがあった。今回の作業では探触子が浮き上がってしまう箇所については、探触子を手で抑えながら走査を行い対処した。下鏡ドームは曲率面であり、それにあわせた軌道レールが必要である。

表 4.1 探傷装置の仕様

製造元	日本クラウトクレーマー株式会社
型式	AL2100
チャンネル数	2Ch
探傷方法	パルス反射法
増幅直線性	±3%以内 (JIS Z 2352 準拠)
時間軸直線性	±1%以内 (JIS Z 2352 準拠)
周波数帯域	0.5~3MHz
繰り返し周波数	最大 8kHz
探傷感度	0~90dB
フィルタ	LPF:1,2,5,10MHz HPF:1,2,5,10MHz
機構部コントロール	2 軸コントロール
Y 軸走査速度	最大 250mm/sec
探傷ピッチ	最小 1mm
重量・寸法	約 8kg (W365×H145×D420)

表 4.2 探触子の仕様

	垂直探触子	斜角探触子 (45° )	斜角探触子 (60° )
製造元	ASPECT	ASPECT	ASPECT
型式	2C20N	2C20×20A45	2C20×20A60
製造番号	12226	12223	12225
周波数	2MHz	2MHz	2MHz
寸法	W60×H30×D25	W60×H30×D25	W60×H30×D25

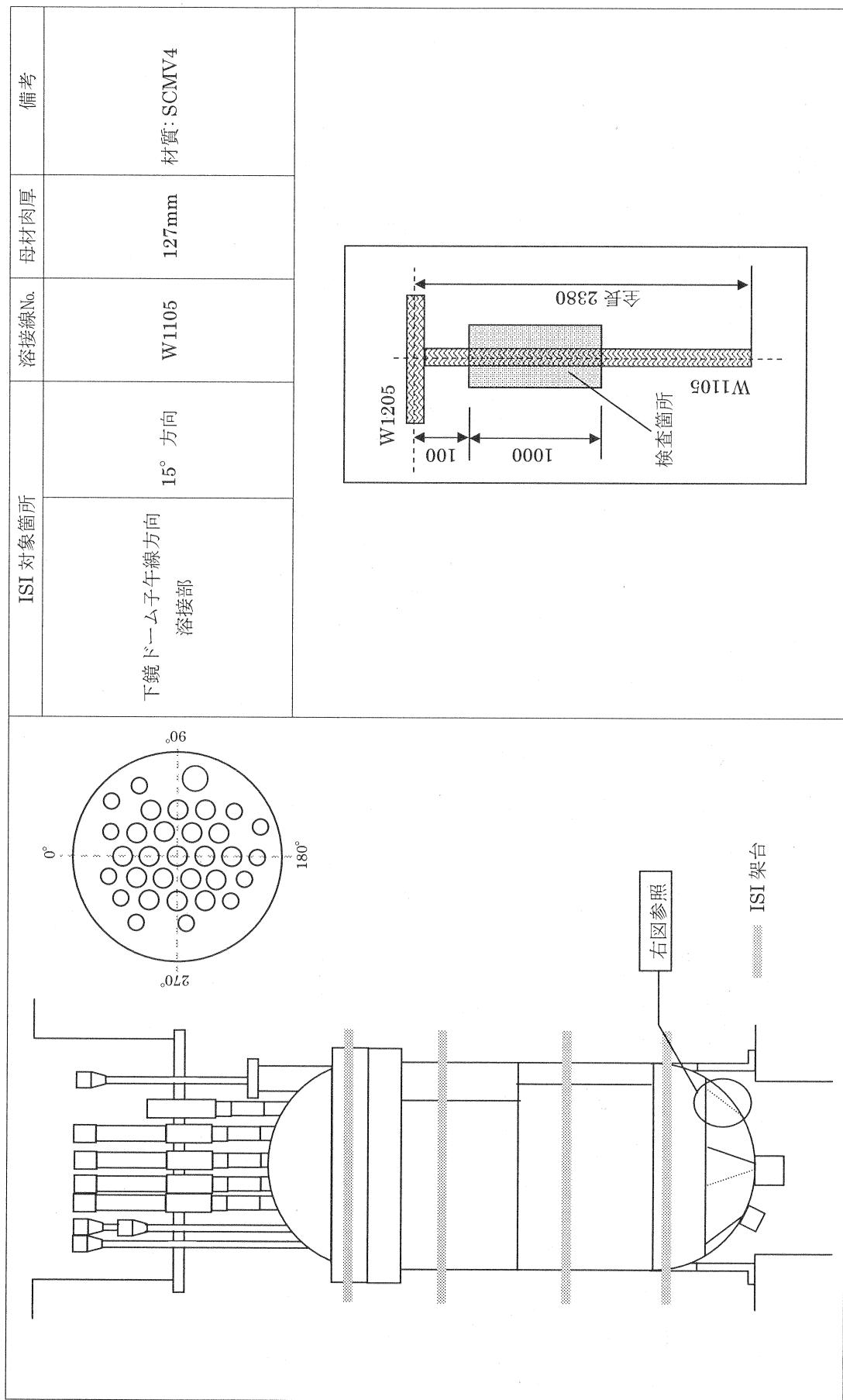


図 4.1 原子炉圧力容器 ISI 實施箇所

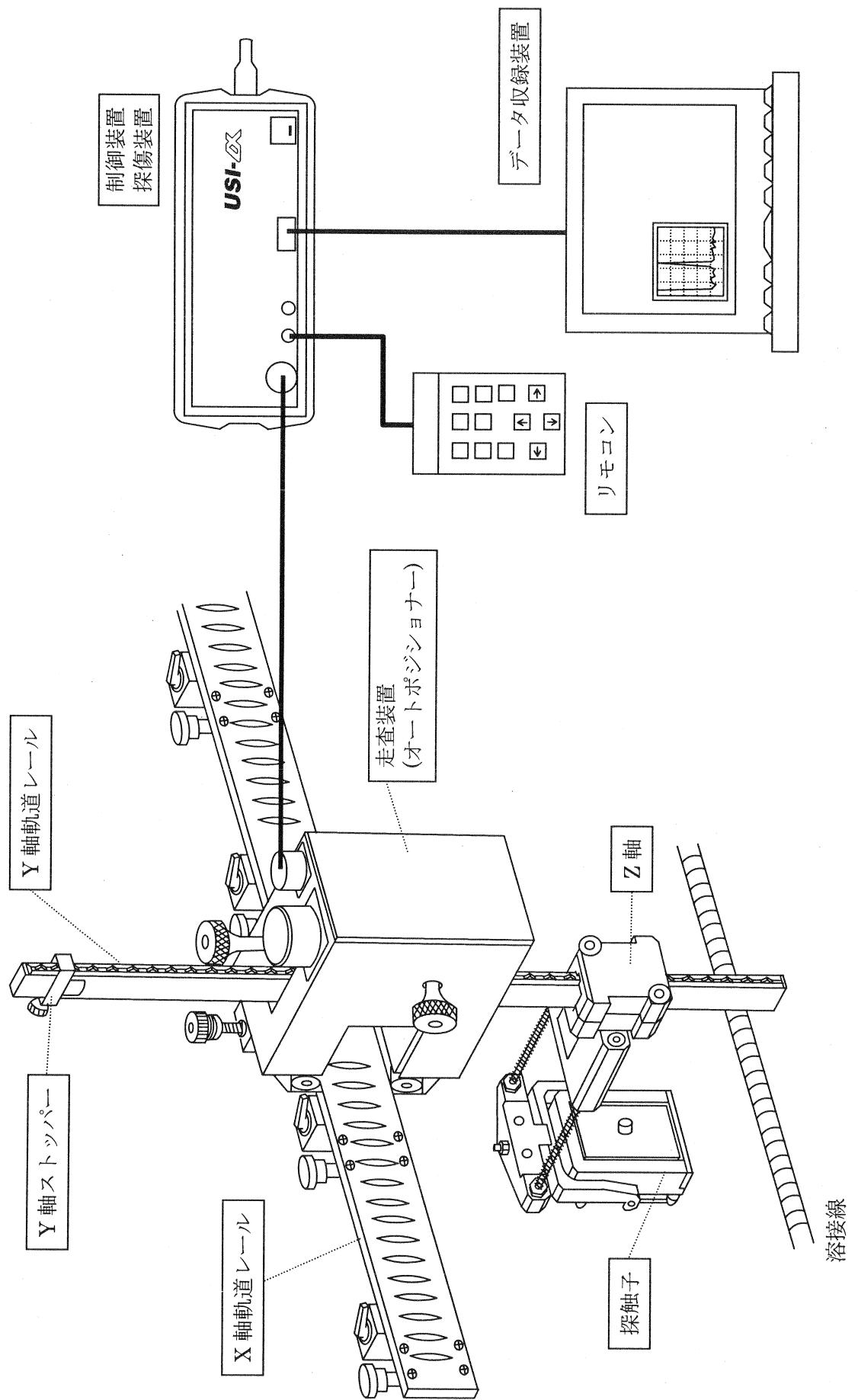


図 4.2 探傷装置の概要

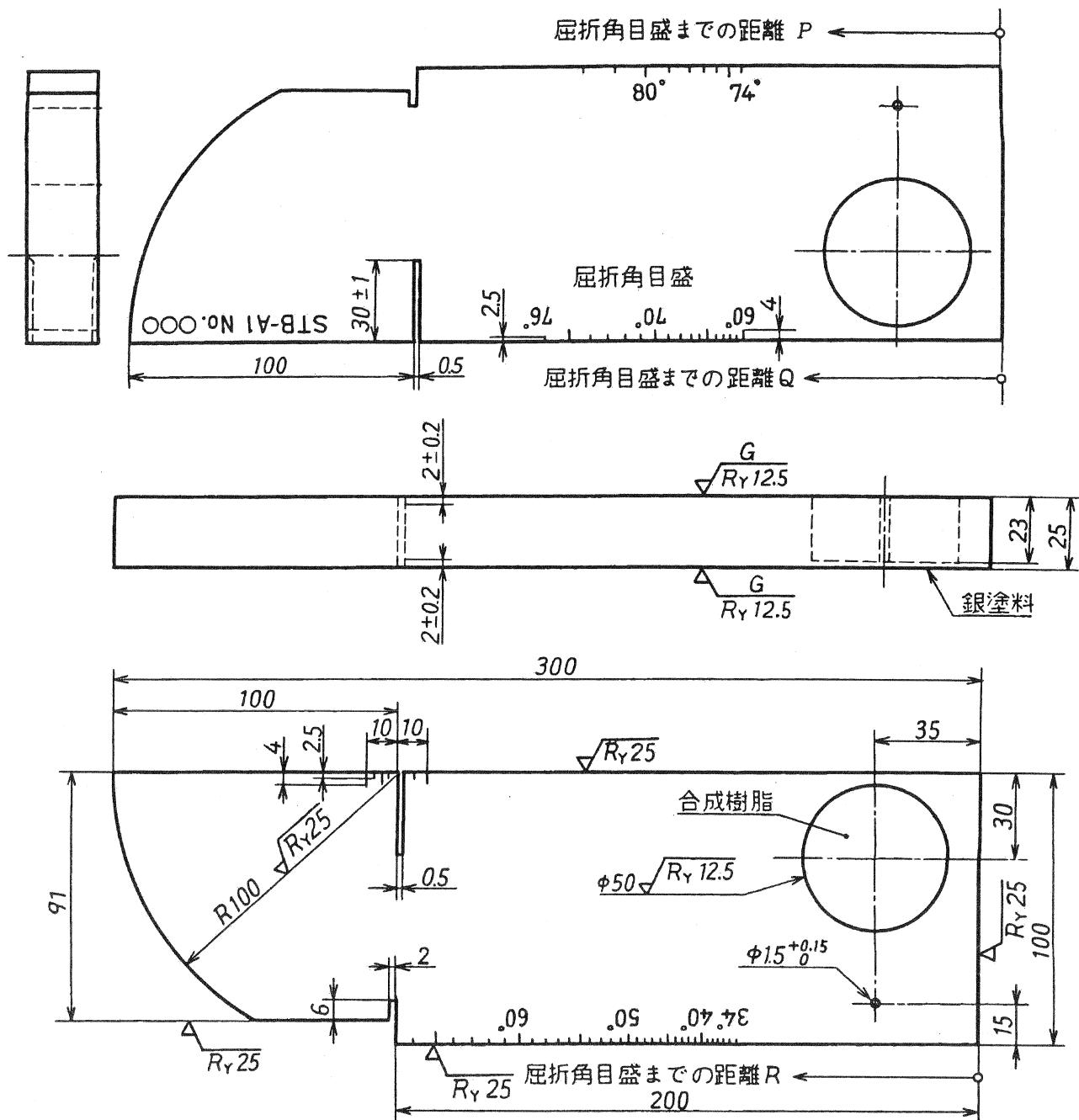
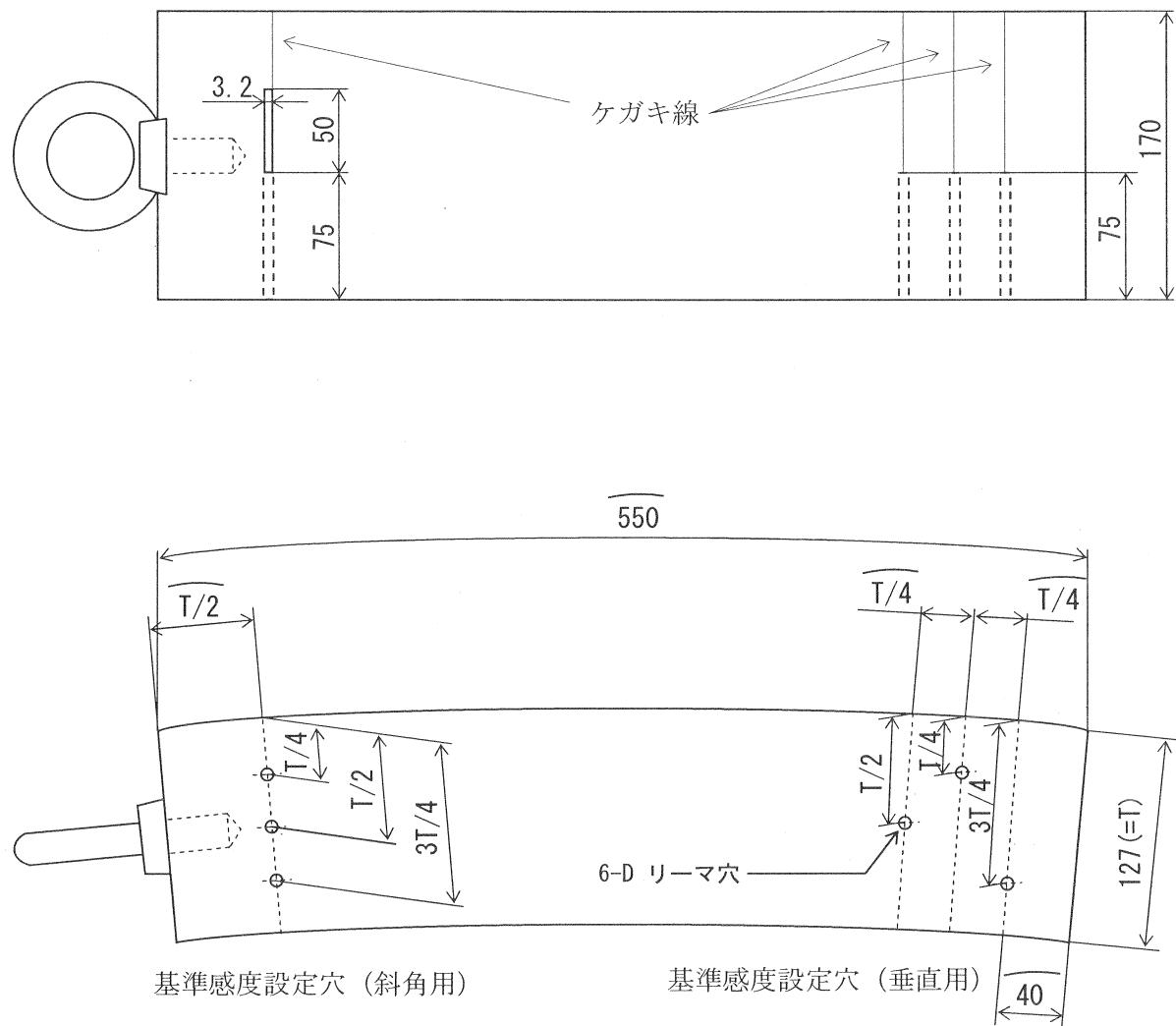


図 4.3 標準試験片 (STB-A1)



品名	材質	試験片番号	重量
対比試験片	SCMV4·2 NT	HTTR·2	92.0kg

図 4.4 対比試験片

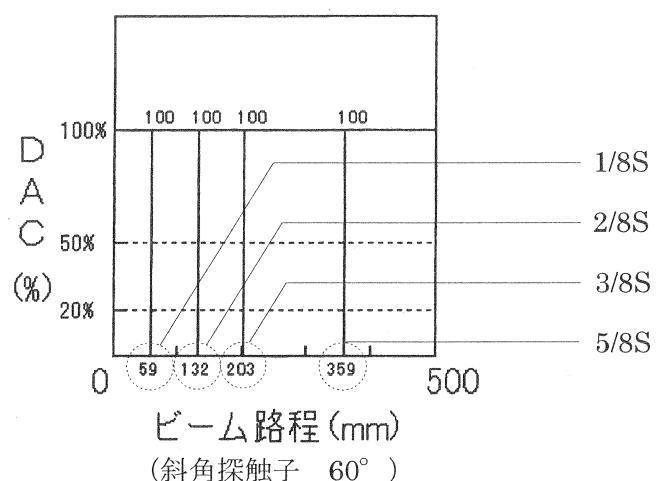
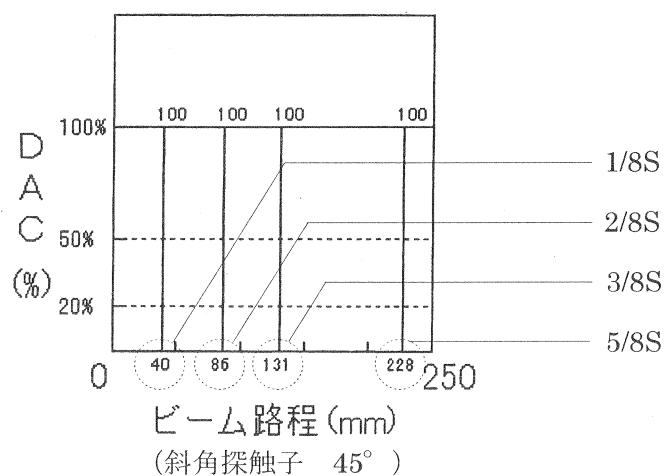
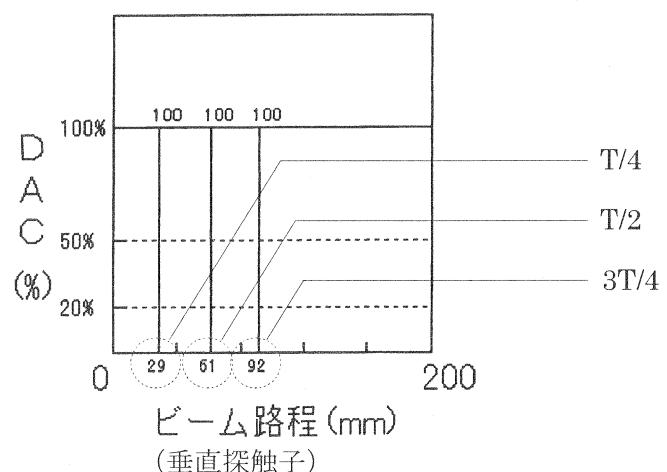


図 4.5 D A C 曲線

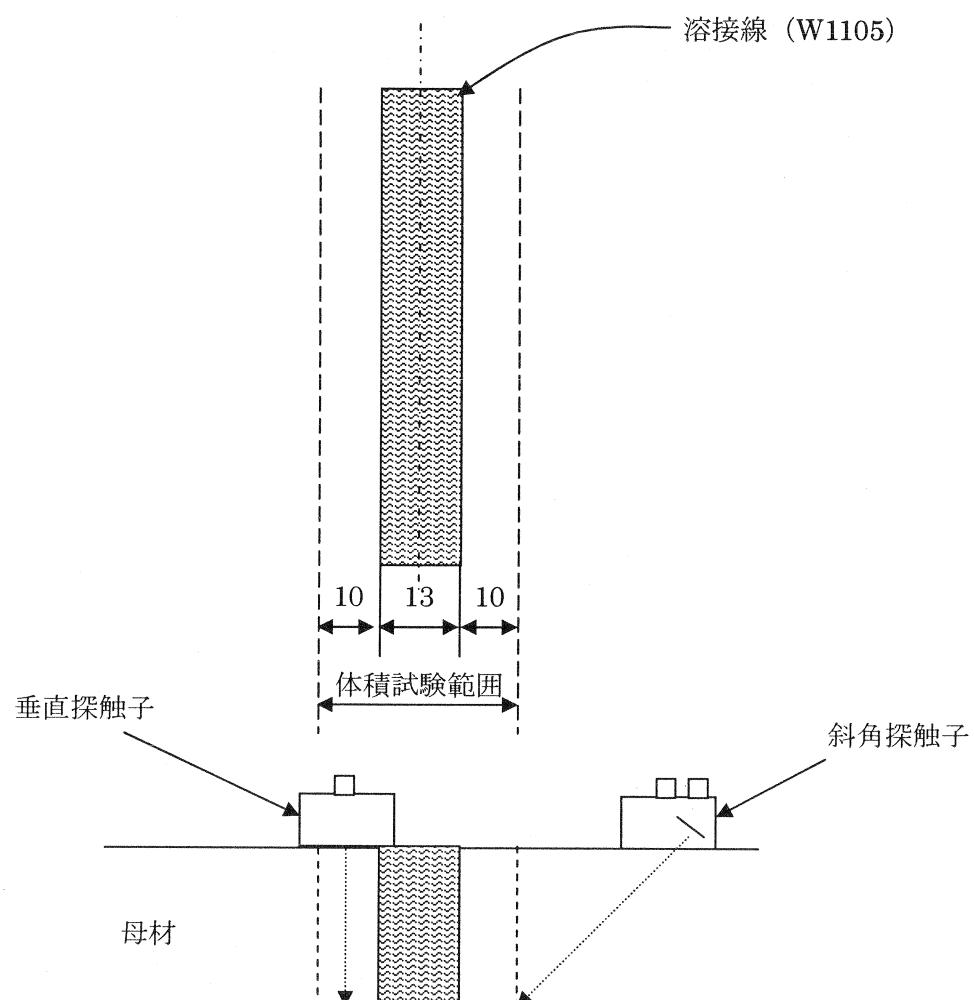


図 4.6 体積試験範囲

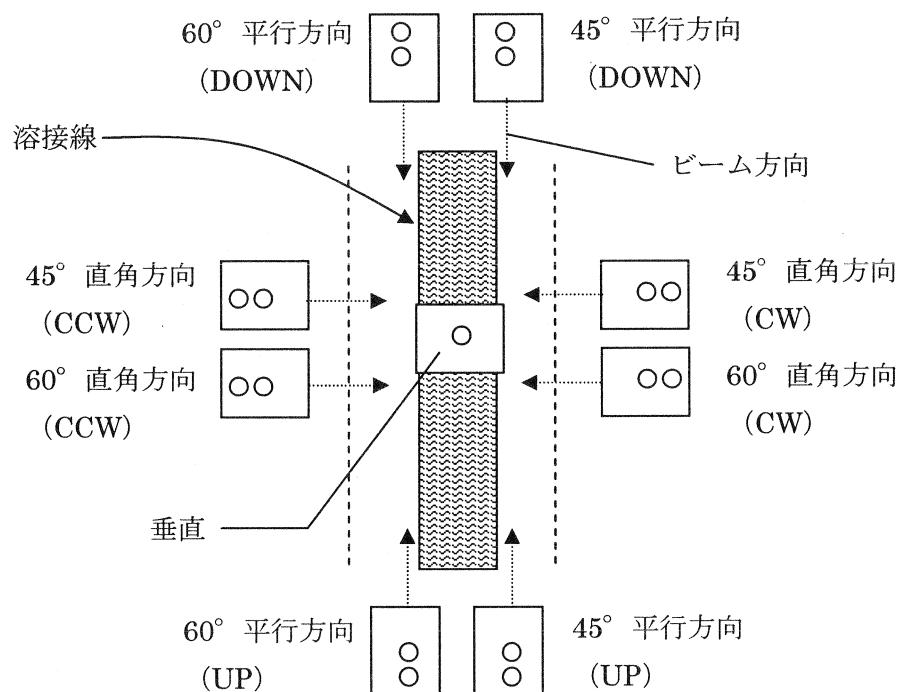


図 4.7 走査方向

試験記録概要

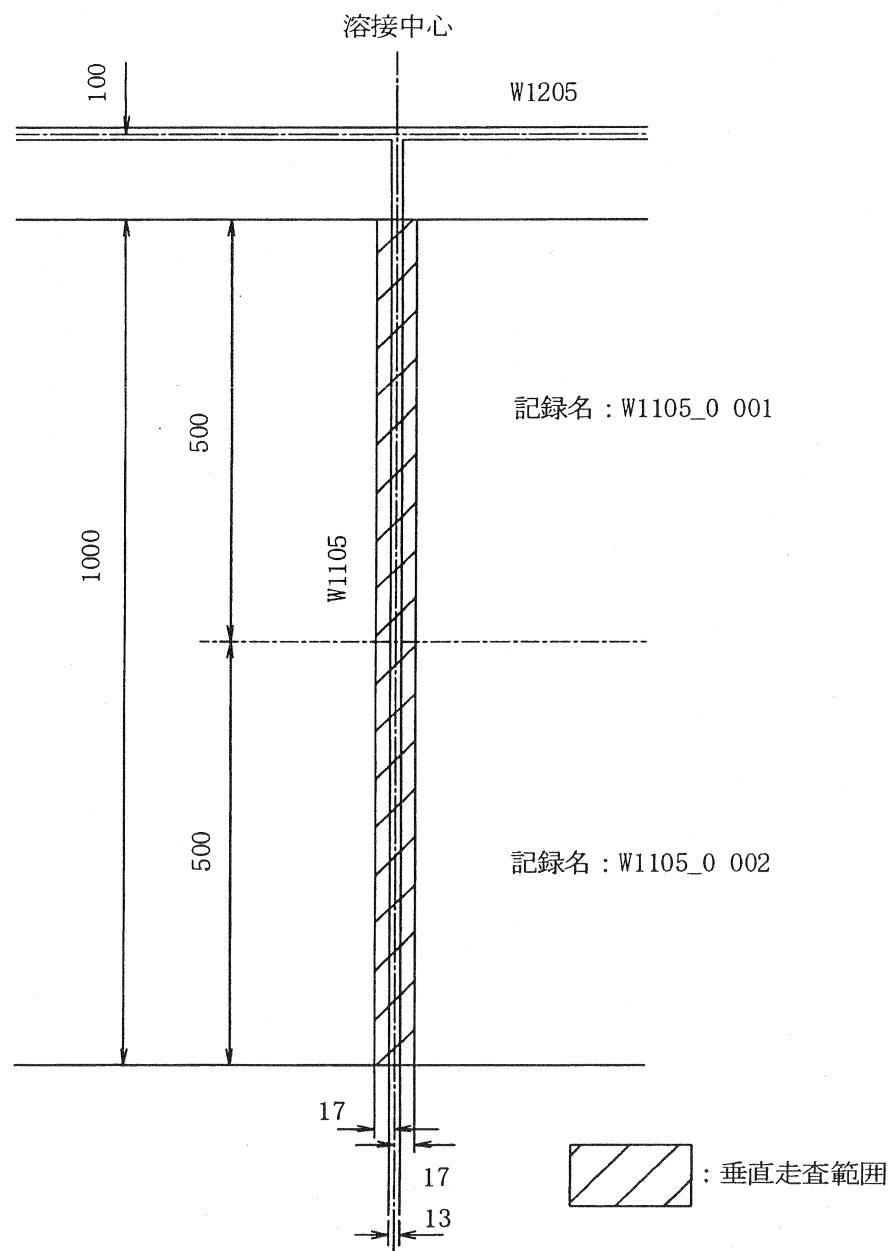


図 4.8(1) ISI 検査範囲（垂直）

試験記録概要

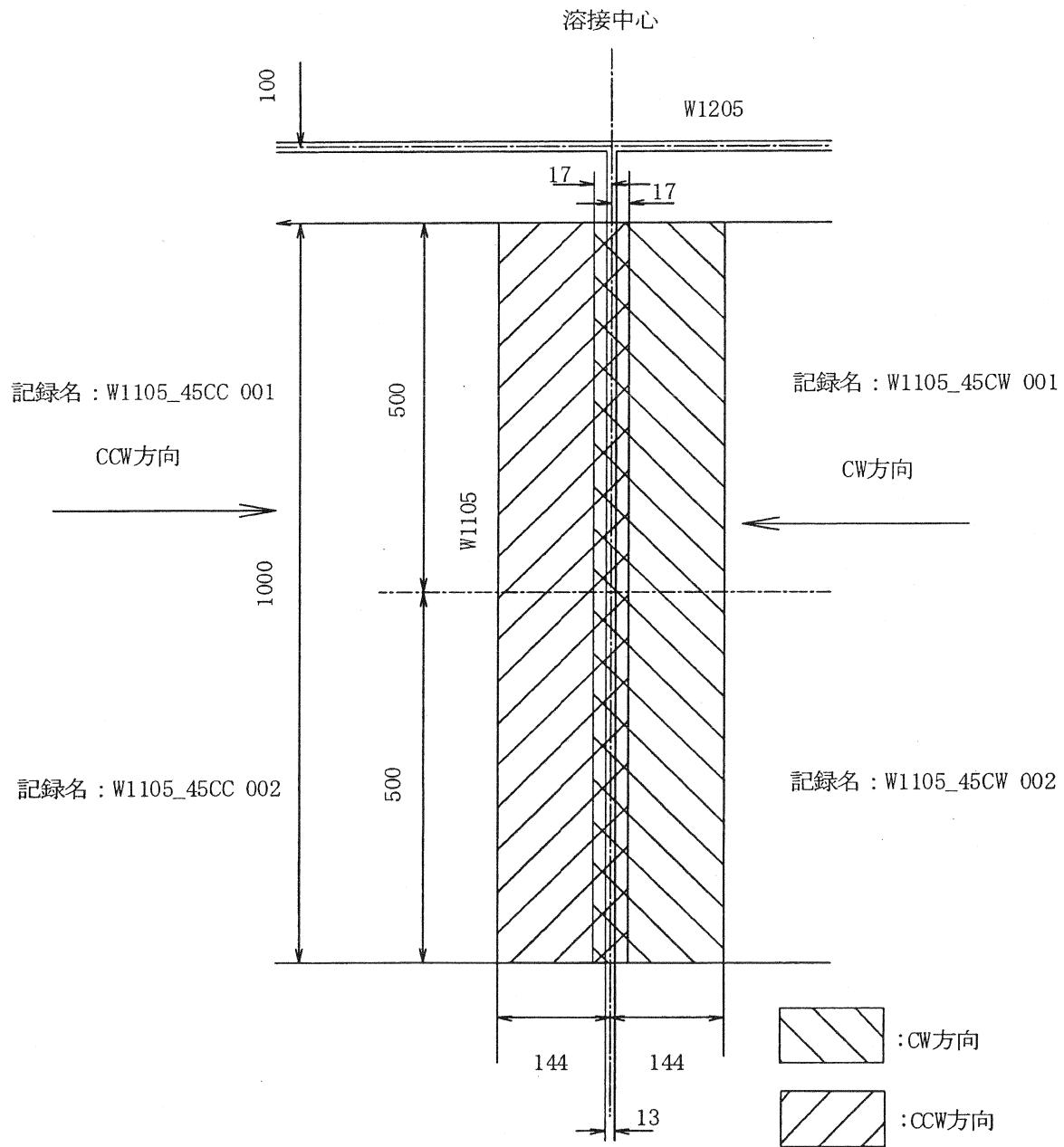


図 4.8(2) ISI 検査範囲（斜角（45°）直角方向）

## 試験記録概要

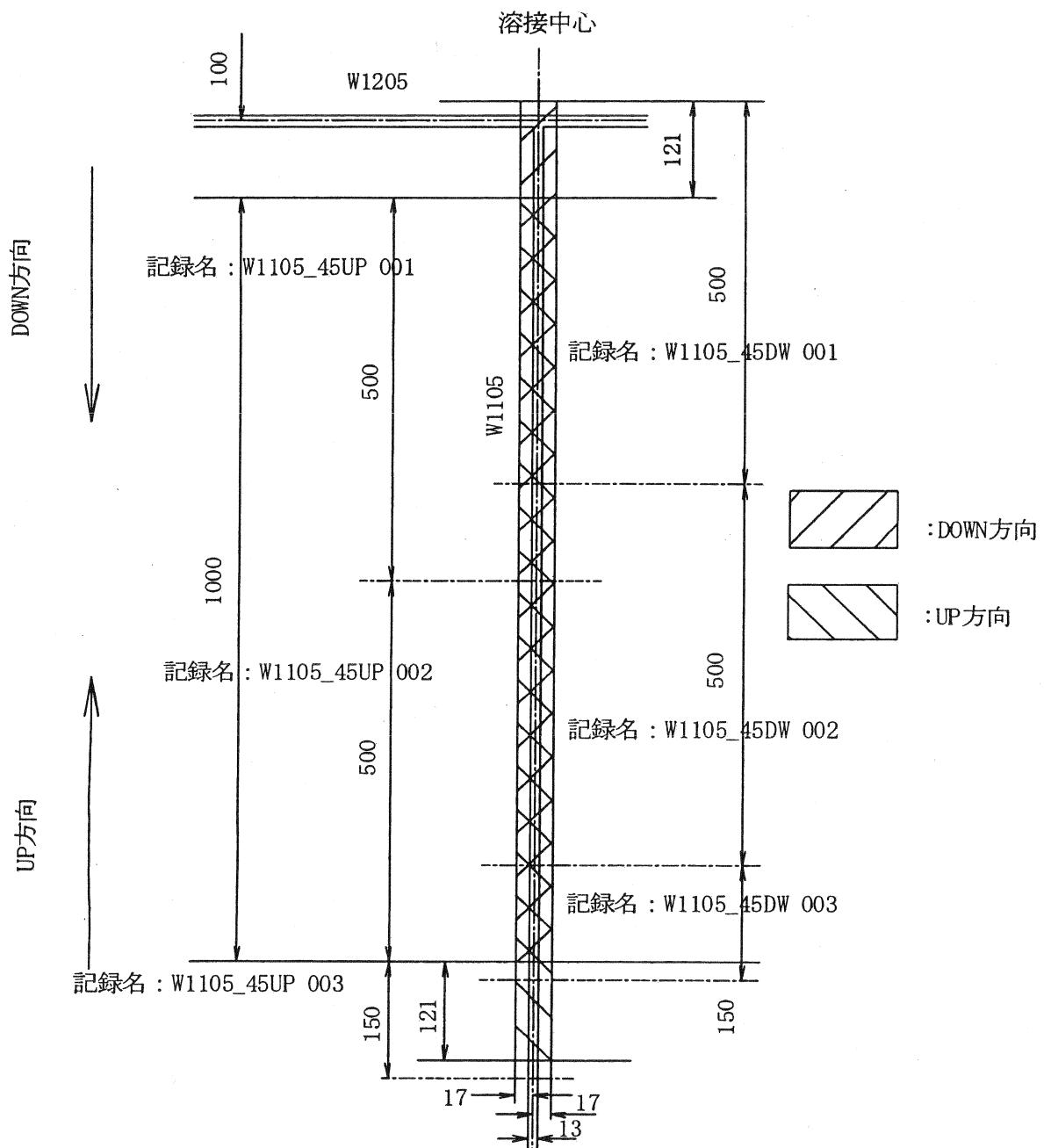


図 4.8(3) ISI 検査範囲（斜角（45°）平行方向）

試験記録概要

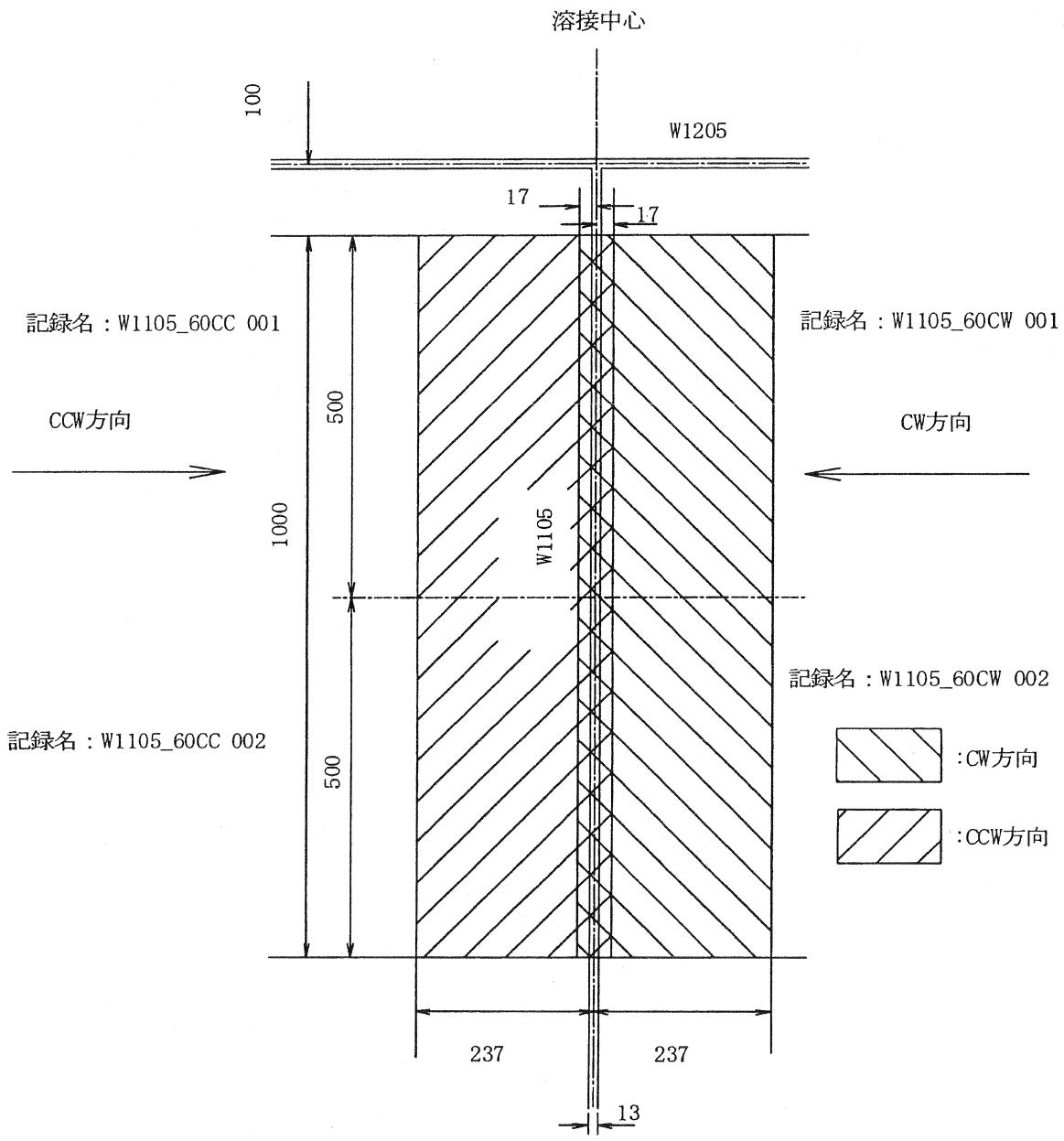


図 4.8(4) ISI 検査範囲（斜角（60°）直角方向）

## 試験記録概要

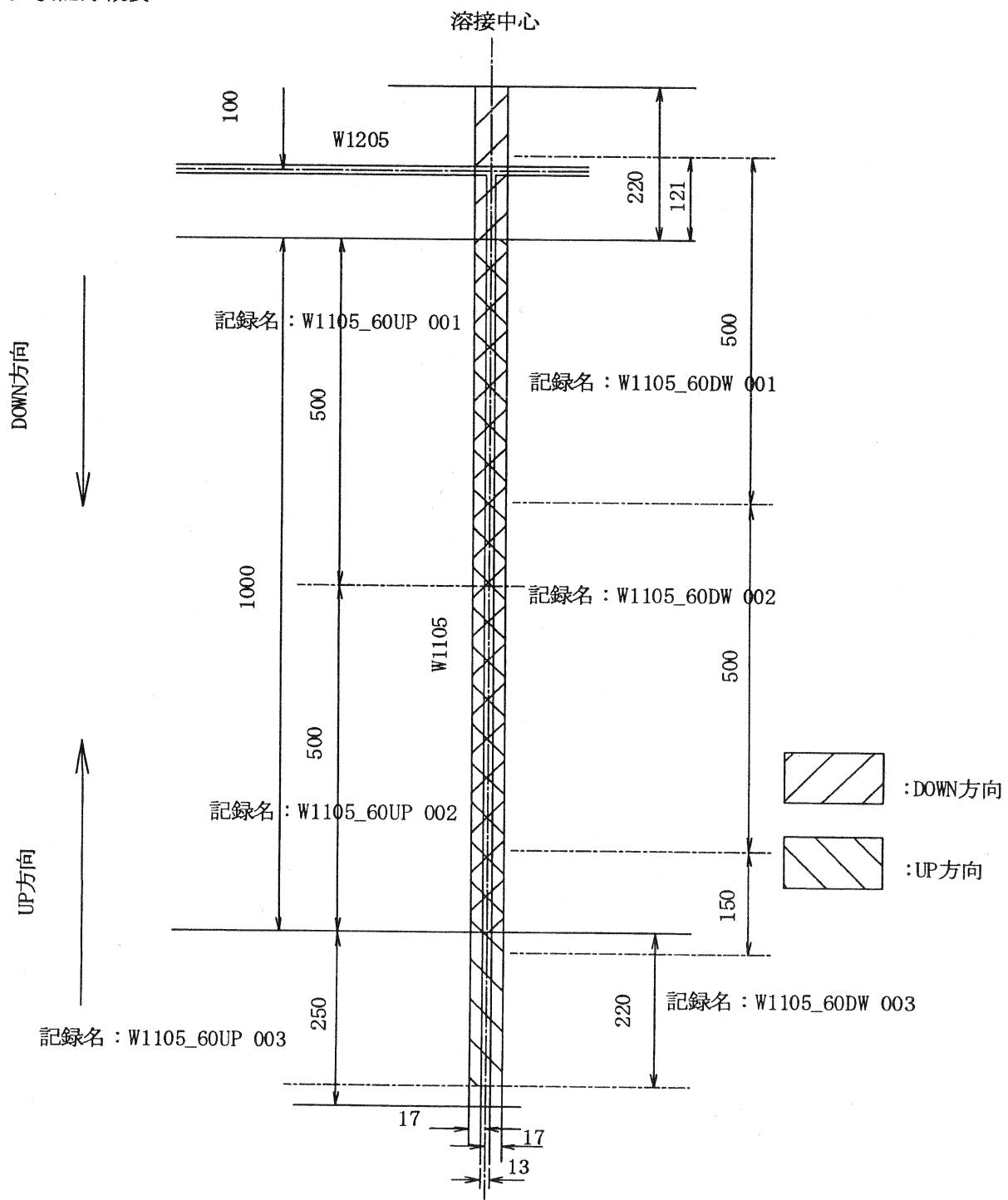
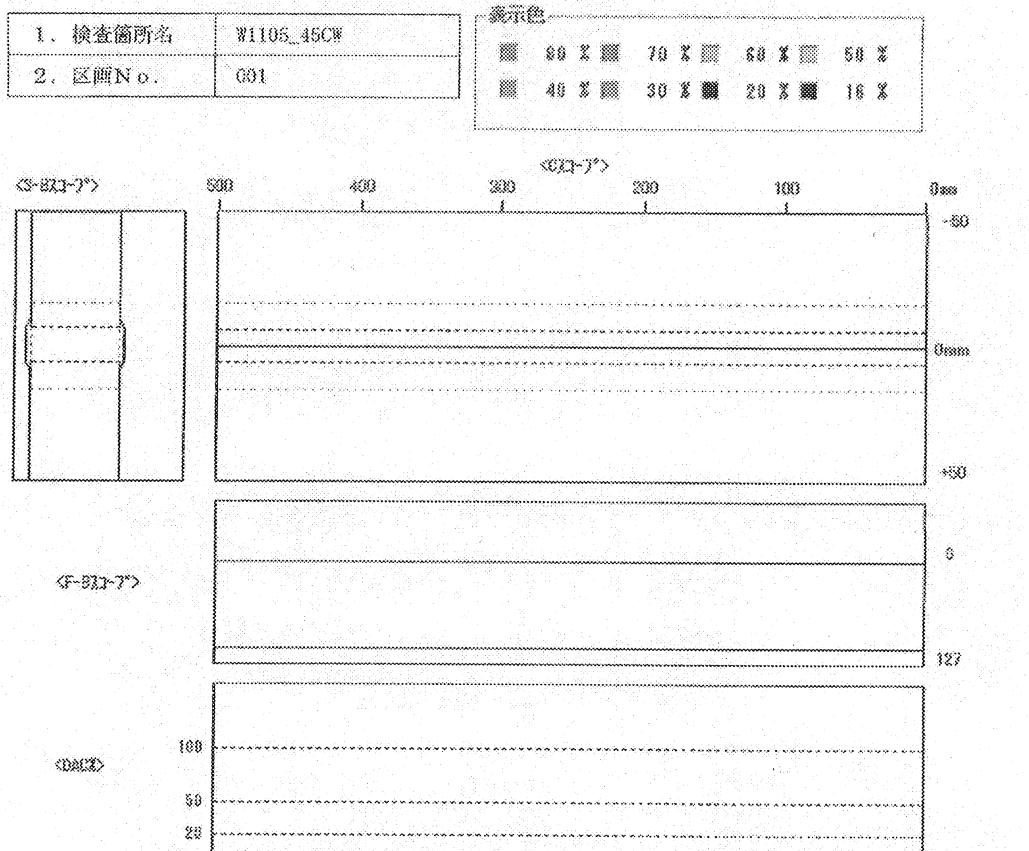


図 4.8(5) ISI 検査範囲 (斜角 (60°) 直角方向)

## « 検査記録（合成） »

2008.1.23 W1105\_45CW 001



板厚：127.0 X 127.0 mm 検出レベル：30%

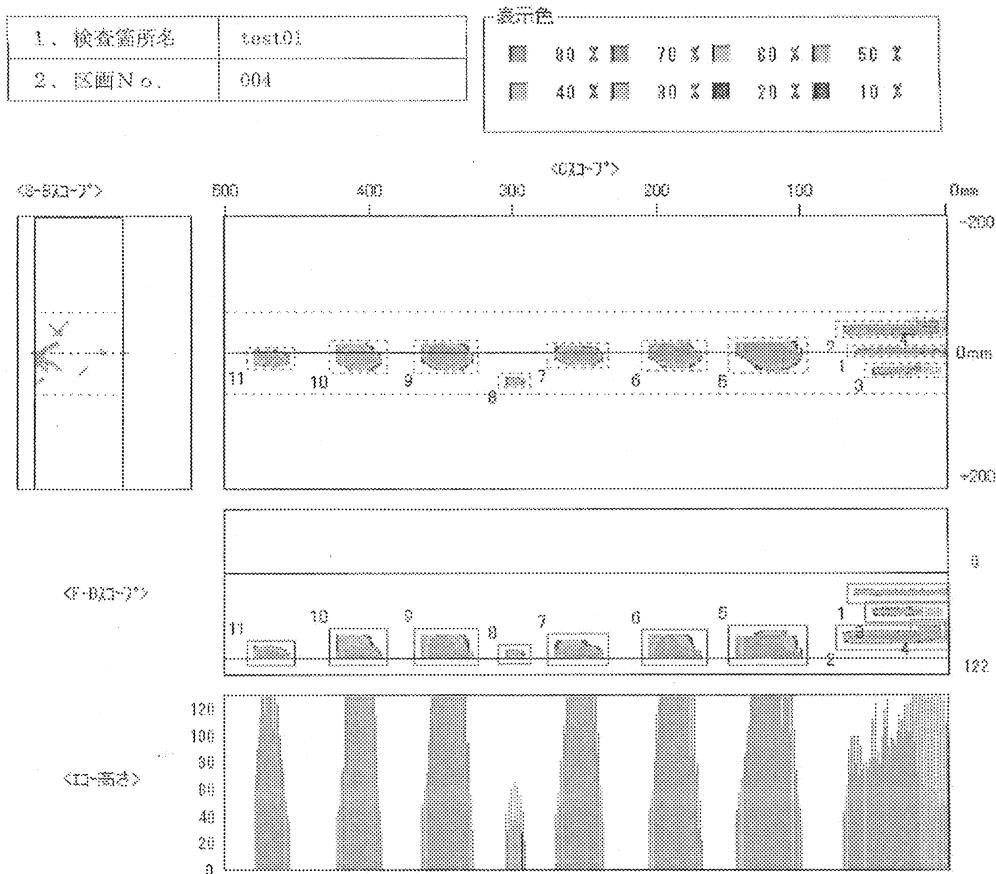
No.	エコー 高さ (DAC%)	ピーム 路線 (mm)	欠陥位置						スクリプト	欠陥種別
			探触子 X (mm)	探触子 Y (mm)	d (mm)	k (mm)	始端 (mm)	指示長 (mm)		
--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

無欠陥

図 4.9 UT 検査結果

## « 検査記録（合成） »

2007.9.18 test01 004



板厚 : 122.0 × 122.0 mm

検出レベル : 20%

No.	X (%)	Y (mm)	欠陥位置						スカラ	備考
			探触子 X (mm)	探触子 Y (mm)	d (mm)	k (mm)	始端 (mm)	指示長 (mm)		
1	76	43.2	4	-34.0	29.2	-2.5	0	63	0.5	
2	127	134.7	4	-131.0	91.2	-30.9	0	71	0.5	
3	61	280.2	8	-134.0	54.1	25.0	4	47	1.0	
4	51	241.5	12	-221.0	80.3	-41.0	6	14	1.0	
5	127	185.5	106	-136.0	118.2	3.1	100	46	1.0	
6	127	184.1	174	-132.0	119.2	6.1	170	37	1.0	
7	127	182.4	243	-130.0	120.3	6.9	239	33	1.0	
8	65	187.2	299	-98.0	117.1	42.4	293	13	1.0	
9	127	180.7	333	-125.0	121.5	9.7	329	36	1.0	
10	127	183.1	397	-127.0	119.9	10.4	393	31	1.0	

図 4.10 モックアップ試験体での検査結果例

## 5.まとめ

HTTR では RPV の ISI として溶接線に対する超音波探傷試験を実施した。平成 8 年 12 月から平成 9 年 1 月にかけて ISI の結果から欠陥の発生、進展等を評価するために必要な供用前検査 (PSI) を実施し、平成 20 年 1 月～2 月には下鏡ドーム子午線方向溶接線について ISI を実施した。それらのまとめについて以下に示す。

- (1) 平成 8 年実施の PSIにおいて、ISI 対象溶接線全てに対して超音波探傷試験を実施した。  
下鏡ドーム子午線方向溶接線については、4 方向全ての溶接線に対して実施し、その結果、DAC20%を超えるインディケーションは検出されなかった。
- (2) 平成 20 年に下鏡ドーム子午線方向溶接線に対する超音波探傷試験を HTTR の RPV の初の ISI として実施した。その結果、有意なインディケーションは検出されず、全てのデータにおいて「記録すべきエコー（欠陥）は無し」と判定された。
- (3) 下鏡ドーム子午線方向溶接線に対する作業において、作業環境、作業時間、探傷装置等についての問題点が明らかになった。作業環境、作業時間の問題については、少しでも個人被ばく線量を抑えるには事前の綿密な打ち合わせや炉外における自動探傷装置の取扱い技術の習熟訓練を十分に行い、作業時間の短縮を図ることが重要である。探傷装置については下鏡ドームの曲率にあわせたレールが作業効率上必要である。

謝 辞

原子炉圧力容器下鏡ドーム子午線方向溶接部の超音波探傷による ISI 作業を実施するにあたり、作業区域の確保、工程調整等について協力して頂きました HTTR 運転管理課の皆様に深く感謝致します。また、本レポートをまとめるにあたって貴重なコメントを下さいました高温工学試験研究炉部 小森芳廣部長、同部 中澤利雄次長、HTTR 技術課 西原哲夫課長、HTTR 計画課 藤本望課長に感謝の意を表します。

参考文献

- (1) S. Saito, T. Tanaka, Y. Sudo, et al., JAERI 1332, (1994).
- (2) 寺戸昇輝 他 : JAERI-Tech 96-034, “HTTR 原子炉圧力容器の設計・製作” (1996).
- (3) 日本電気協会 原子力専門部会, “軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査 (JEAC4205-2000)” (2001).
- (4) (財) 原子力安全技術センター : 平成 9 年度科学技術調査資料作成委託調査報告書, “高温工学試験研究炉 (HTTR) の定期検査 10 年計画作成に関する調査” (1998).

# 国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
波数	メートル	m <sup>-1</sup>
密度(質量密度)	キログラム毎立法メートル	kg/m <sup>3</sup>
質量体積(比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量)の濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>
屈折率	(数の)1	1

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad	$m \cdot m^{-1}=1^{(b)}$
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	$m^2 \cdot m^{-2}=1^{(b)}$
周波数	ヘルツ	Hz	$s^{-1}$
圧力	ニュートン	N	$m \cdot kg \cdot s^{-2}$
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
工作效率、放熱束	ジュール	J	$N \cdot m$
電荷、電気量	ワット	W	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
電位差(電圧)、起電力	クーロン	C	$J/s$
静電容量	アンドラード	F	$s \cdot A$
電気抵抗	オーム	Ω	$W/A$
コンダクタンス	シemens	S	$C/V$
磁束密度	テスラ	T	$V/A$
インダクタンス	ヘンリイ	H	$V \cdot s$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>	°C	$Wb/m^2$
光束	ルーメン	lm	$Wb/A$
(放射性核種)の放射能吸収線量、質量エネルギー一分与、カーマ	ベクレル	Bq	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	グレイ	Gy	$kg \cdot s^{-2}$

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。
- (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srが単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表 4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-1}$
表面張力	ニュートンメートル	N · m	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}$
角速度	ニュートン每メートル	N/m	$kg \cdot s^{-2}$
角加速度	ラジアン每秒	rad/s	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}=s^{-2}$
熱流密度、放射照度	ラジアン每平方秒	rad/s <sup>2</sup>	$m \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}=s^{-2}$
熱容量、エンタルピー	ワット每平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$kg \cdot s^{-3}$
熱容量、エンタルピー(比熱容量)	ジュール每ケルビン	J/K	$kg \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール每キログラム	J/(kg · K)	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
質量エントロピー	每ケルビン		
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール每キログラム	J/kg	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル每ケルビン	W/(m · K)	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m <sup>3</sup>	$m^{-1} \cdot kg \cdot s^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$m \cdot kg \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$
体積電荷	クーロン每立方メートル	C/m <sup>3</sup>	$m^{-3} \cdot s \cdot A$
電気変位	クーロン每平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$m^{-2} \cdot s \cdot A$
誘電率	フアラド每メートル	F/m	$m^{-3} \cdot kg^{-1} \cdot s^4 \cdot A^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$m \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1}$
モルエントロピー	ジュール每モル每ケルビン	J/(mol · K)	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
モル熱容量	クーロン每キログラム	C/kg	$kg^{-1} \cdot s \cdot A$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム		
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$m^2 \cdot s^{-3}$
放射強度	ワット每ステラジアン	W/sr	$m^4 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> · sr)	$m^2 \cdot m^{-2} \cdot kg \cdot s^{-3} = kg \cdot s^{-3}$

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペクタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼット	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表 6. 國際単位系と併用されるが國際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h = 60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	$1^\circ=(\pi/180) \text{ rad}$
分	'	$1'=(1/60)^\circ=(\pi/10800) \text{ rad}$
秒	"	$1''=(1/60)'=(\pi/648000) \text{ rad}$
リットル	L	$1L=1 \text{ dm}^3=10^{-3} \text{ m}^3$
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$
ネーベル	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) \ln 10 (Np)$

表 7. 國際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される數値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる數値
電子ボルト	eV	$1eV=1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{ J}$
統一原子質量単位	u	$1u=1.6605402(10) \times 10^{-27} \text{ kg}$
天文単位	ua	$1ua=1.49597870691(30) \times 10^{11} \text{ m}$

表 8. 國際単位系に属さないが國際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる數値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600) m/s
アード	ル	$1a=1 \text{ dam}^2=10^2 \text{ m}^2$
ヘクタール	ha	$1ha=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{ m}^2$
バル	bar	$1 \text{ bar}=0.1 \text{ MPa}=100 \text{ hPa}=10^5 \text{ Pa}$
オングストローム	Å	$1 \text{ Å}=0.1 \text{ nm}=10^{-10} \text{ m}$
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=10^{-28} \text{ m}^2$

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる數値
エルグ	erg	$1 \text{ erg}=10^{-7} \text{ J}$
ダイニ	dyn	$1 \text{ dyn}=10^{-5} \text{ N}$
ボアズ	P	$1 P=1 \text{ dyn} \cdot s/cm^2=0.1 \text{ Pa} \cdot s$
ストークス	St	$1 St=1 \text{ cm}^2/s=10^{-4} \text{ m}^2/s$
ガウス	G	$1 G=10^{-4} T$
エルステッド	Oe	$1 Oe=\frac{1}{4}(1000/4\pi) A/m$
マクスウェル	Mx	$1 Mx=10^{-8} Wb$
スチール	sb	$1 sb=1 cd/cm^2=10^4 \text{ cd/m}^2$
ホル	ph	$1 ph=10^4 lx$
ガル	Gal	$1 Gal=1 \text{ cm/s}^2=10^{-2} \text{ m/s}^2$

表10. 國際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる數値
キュリ	Ci	$1 Ci=3.7 \times 10^{10} Bq$
レントゲン	R	$1 R=2.58 \times 10^{-3} \text{ C/kg}$
ラド	rad	$1 rad=1 \text{ cGy}=10^{-2} \text{ Gy}$
レム	rem	$1 rem=1 \text{ cSv}=10^{-2} \text{ Sv}$
X線単位		$1 X \text{ unit}=1.002 \times 10^{-4} \text{ nm}$
ガンマ	γ	$1 \gamma=1 \text{ nT}=10^{-9} T$
ジアンスキー	Jy	$1 Jy=10^{-26} W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$
フェルミ	fm	$1 fermi=1 \text{ fm}=10^{-15} \text{ m}$
メートル系カラット		$1 metric \text{ carat}=200 \text{ mg}=2 \times 10^{-4} \text{ kg}$
トル	Torr	$1 Torr=(101.325/760) \text{ Pa}$
標準大気圧	atm	$1 atm=101.325 \text{ Pa}$
カラリ	cal	
ミクロ	μ	$1 \mu=1 \text{ um}=10^{-6} \text{ m}$

