

JAERI - M  
93-252

HTTRのPGX黒鉛構造物の  
受入検査における渦流探傷試験

1994年1月

石原 正博・七種 明雄・伊与久達夫  
塩沢 周策・大岡 紀一・神戸 護\*  
高橋 正昭\*

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。  
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division  
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-  
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所  
印 刷 いばらき印刷株

## HTTRのPGX黒鉛構造物の受入検査における渦流探傷試験

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部

石原 正博・七種 明雄・伊与久達夫・塩沢 周策

大岡 紀一・神戸 護\*・高橋 正昭\*

(1993年12月9日受理)

高温工学試験研究炉（HTTR）の炉心支持黒鉛構造物のうち、原子炉級準等方性PGX黒鉛構造物の受入検査として渦流探傷試験を計画している。多孔質材料である黒鉛材料は、金属材料と特性が異なり、鋼構造物等の金属材料に対して確立された渦流探傷試験方法をそのまま黒鉛構造物に適用できない。このため、原子炉級微粒等方性IG-110黒鉛については、既に渦流探傷試験の方法等を策定した。しかしながら、PGX黒鉛は、IG-110黒鉛に比べ粒径が大きくさらにより気孔径も大きく探傷面での表面状態に相違があるため、渦流探傷試験による欠陥の検出性が異なり、IG-110黒鉛に対する規定をそのまま適用できない。このため、PGX黒鉛の欠陥の検出性を調べ渦流探傷試験の方法及び条件を策定した。

Eddy Current Testing on Structures of Nuclear-grade  
PGX Graphite for Acceptance Test in HTTR

Masahiro ISHIHARA, Akio SAIKUSA, Tatsuo IYOKU, Shusaku SHIOZAWA  
Norikazu OOKA, Mamoru KAMBE\* and Masaaki TAKAHASHI\*

Department of HTTR Project  
Oarai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received December 9, 1993)

Acceptance test with eddy current testing is planned to be applied to the core support graphite structures made of PGX graphite, nuclear-grade near-isotropic graphite, in the HTTR. The eddy current testing widely applied to metallic components is not applicable to porous graphite materials due to different characteristics compared with metallic ones. Hence, the eddy current testing method for the fine-grained, nuclear-grade IG-110 graphite had been established. However, this method is also not applicable to the PGX graphite owing to the different flaw detectability because the PGX consists of larger grains and pores than the IG-110. Therefore the eddy current testing method and condition for the PGX graphite were established on the bases of the experimental investigation.

Keywords: Graphite, Eddy Current, Nondestructive Inspection, HTTR,  
Gas-cooled Reactor, Acceptance Test

---

\* Fuji Electric Co., Ltd.

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 試験方法 .....	5
2.1 試験装置 .....	5
2.2 試験体 .....	5
3. 試験結果と考察 .....	13
3.1 試験装置の検討 .....	13
3.2 探傷方法の検討 .....	16
3.3 欠陥の検出性 .....	17
4. 結 論 .....	29
謝 辞 .....	29
参考文献 .....	29
付録 PGX黒鉛構造物の渦流探傷試験方法 .....	30

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Experimental Method .....	5
2.1 Experimental Apparatus .....	5
2.2 Specimen .....	5
3. Results and Discussion .....	13
3.1 Testing Apparatus .....	13
3.2 Scanning Method .....	16
3.3 Flaw Detectability .....	17
4. Conclusion .....	29
Acknowledgements .....	29
References .....	29
Appendix Eddy Current Method on PGX Graphite Structures .....	30

## 1. はじめに

高温工学試験研究炉（HTTR）の炉心支持黒鉛構造物は、固定反射体、高温プレナムブロック、サポートポスト、炉床部断熱層等から構成している。これらの炉心支持黒鉛構造物は、燃料体黒鉛ブロック、制御棒案内ブロック、可動反射体ブロック等の炉心黒鉛構造物を支持し、荷重を圧力容器に伝えるとともに熱遮へい、放射線遮へい等の機能を有している。HTTRの炉内構造物の配置を第1.1図に示す。

炉心支持黒鉛構造物の設計、使用材料の選定及び検査は、「高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針」<sup>(1)</sup>に基づいて行う。なお、黒鉛構造物の検査の詳細については、「黒鉛検査基準」<sup>(2)</sup>に定められている。具体的には、材料検査、非破壊検査、寸法検査及び外観検査について定められ、特に黒鉛構造物の素材及び加工後の製品に対しては、構造物の健全性を保証するため、非破壊検査による欠陥検査が規定されている。第1.1表は、黒鉛検査基準において安全機能及び応力状態を勘案して定められている非破壊検査を必要とする構造物を示したものである<sup>(2)</sup>。黒鉛検査基準では、素材の段階で内部欠陥の検出を目的とした非破壊検査（超音波探傷試験）を行うことが規定されており、その具体的な試験方法及び条件については、既に策定した<sup>(3)</sup>。また、加工後の製品段階では、表面欠陥の検出を目的とした非破壊検査（渦流探傷試験）を行うことが規定されており、原子炉級微粒等方性黒鉛（IG-110黒鉛）構造物に対しては、その検査方法及び条件について既に策定した<sup>(4)</sup>。しかしながら、炉心支持黒鉛構造物の主要材料である原子炉級粗粒準等方性黒鉛（PGX黒鉛）は、IG-110黒鉛に比べて結晶粒径が1桁程度大きく、さらにより気孔径も大きく渦流探傷面での表面状態に相違があるため、渦流探傷試験による欠陥の検出性が異なる。このため、既に策定したIG-110黒鉛に対する渦流探傷試験の方法、条件をそのまま適用できない。そこで、PGX黒鉛に対する渦流探傷試験の方法、試験条件等について、探傷部位を模擬した試験体を用いた各種条件下での渦流探傷試験により検討した。なお、本試験を適用する炉心支持黒鉛構造物は、第1.2図に示すシール用高温プレナムブロック及びキー結合用高温プレナムブロックである。

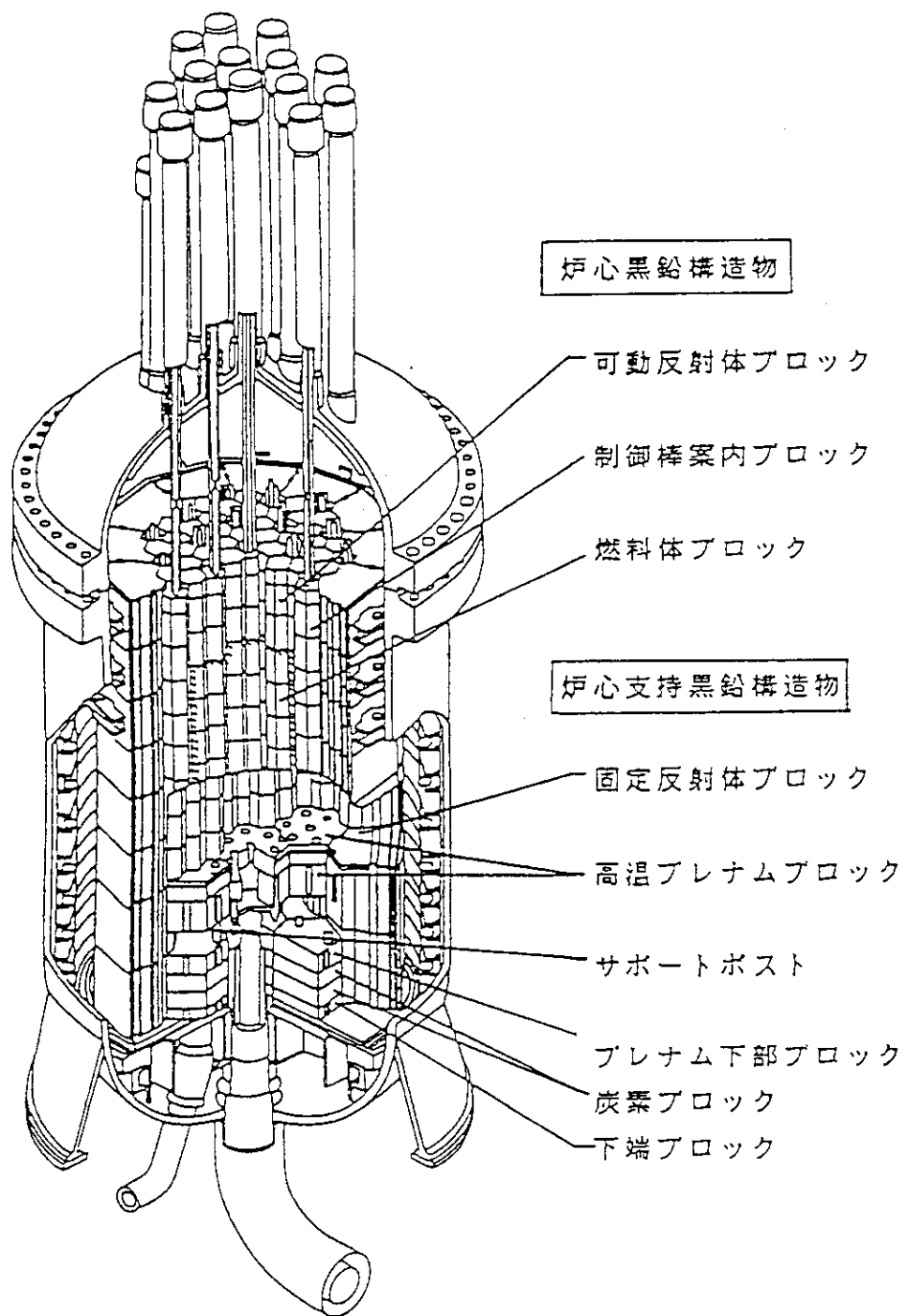
本報告は、HTTRのPGX黒鉛構造物の受入検査における渦流探傷試験の試験方法、試験条件に対する検討結果をまとめたものである。付録に本検討の結果策定したPGX黒鉛構造物に対する渦流探傷試験の方法を示す。

第1.1表 非破壊検査を実施する構造物<sup>(2)</sup>

構 造 物	非破壊検査		備 考
	素材	加工後	
制御棒案内ブロック	U T	E T	E Tはダウエル部近傍のブロック表面について実施する。
シール用高温プレナムブロック	--	E T	E Tはダウエル部近傍のブロック表面について実施する。
キー結合用高温プレナムブロック	--	E T	E Tはキー溝部表面について実施する。
サポートポスト /シート	U T	E T	E Tはポスト・シート接触部のみ実施する。

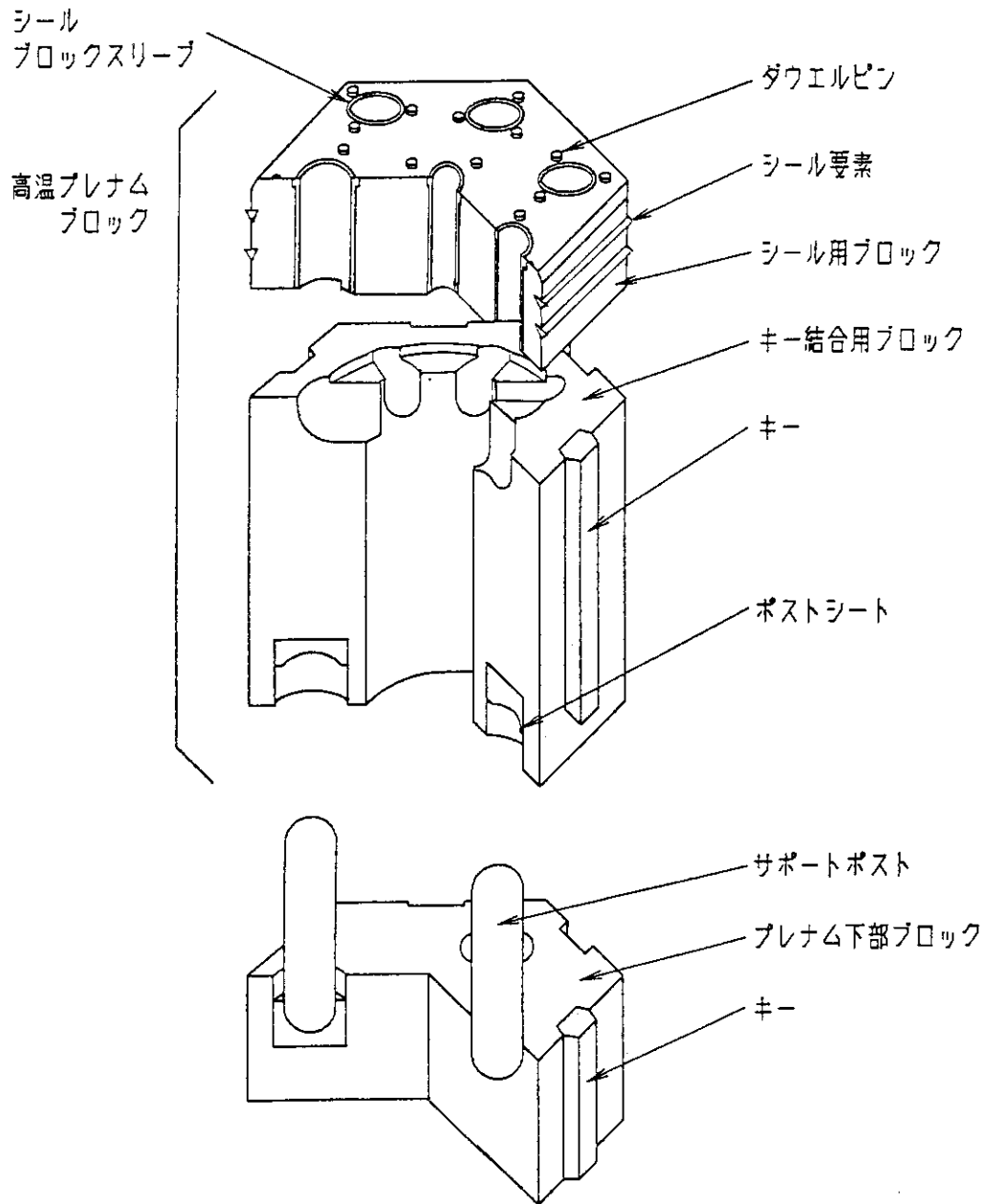
注1) U T : 超音波探傷試験、E T : 渦流探傷試験

注2) 制御棒案内ブロックのダウエル部はダウエル孔とダウエルソケットを、  
高温プレナムブロックのダウエル部はダウエル孔をさす。



第1.1図 HTTRの黒鉛構造物の配置図





第1.2図 シール用高温プレナムブロック及びキー結合用高温プレナムブロックの構造図

## 2. 試験方法

### 2.1 試験装置

渦流探傷試験には、以下の渦流探傷器、プローブ等を用いた。

#### 2.1.1 渦流探傷器

PGX 黒鉛に対する渦流探傷試験の試験周波数は、高い周波数の使用が推奨されており<sup>(5)</sup>、これまでの適用例では、1 MHz が使用されてきている<sup>(5) (6)</sup>。そこで渦流探傷器としては、9.9MHzまでの適用が可能なディフェクトスコープ渦流探傷器(フェルスタ社製、型式; SD2.832)を用いた。試験に用いた渦流探傷器の仕様を第2.1表に示す。

#### 2.1.2 プローブ

プローブには、自己誘導型と相互誘導型とがあるが、第2.1図に示すように両者間の感度及び欠陥の検出性には差が認められない<sup>(6)</sup>。そこで、炉心支持黒鉛構造物の探傷面が平面や曲面であるため、構造が簡単で小型化が可能な自己誘導・自己比較型のマイクロプローブを用いた。試験では、周波数が1MHz及び4MHzの2種類のプローブを用いた。試験に用いたプローブの仕様を第2.2表に示す。

#### 2.1.3 探傷装置

プローブと探傷面との距離(リフトオフ)及びプローブの走査ピッチを一定に保ちながらプローブ走査が行えるように、第2.2図に示すプローブの走査を行うスキャナ部及び試験体の回転位置決めを行うターンテーブルから構成する自動探傷装置を用いた。スキャナは、プローブを固定保持し、回転、左右方向、前後方向及び上下方向の各走査により三次元方向の探傷走査が可能である。

### 2.2 試験体

試験条件や探傷性能を検討するために、高温プレナムブロックのダウエル孔近傍のブロック表面及びキー結合用高温プレナムブロックのキー溝表面を模擬した試験体をPGX黒鉛で製作した。探傷に用いた試験体の形状を第2.3図から第2.5図に示す。試験体は、ブロック

上面ダウエル孔近傍の平滑面に長さ( $l$ ) 5 mmの人工欠陥を設けたもの、ブロック側面のキー溝を模擬した部分に長さ3~10 mmの人工欠陥を設けたもの及び欠陥の検出性に与える探傷面の曲率の影響を調べるための探傷面の曲率が10 mmの曲面上に長さ5 mmの人工欠陥を設けたものである。なお、人工欠陥の幅及び深さは、それぞれ0.3 mm、1 mmで同一とした。試験に用いたPGX黒鉛の主要特性値を第2.3表に示す。

第2.1表 試験に用いた渦流探傷器の仕様

名 称	型 式	試験周波数範囲	メ ー カ
デフェクトスコープ	SD2.832	100Hz~9.9MHz	フェルスタ

第2.2表 試験に用いたプローブの仕様

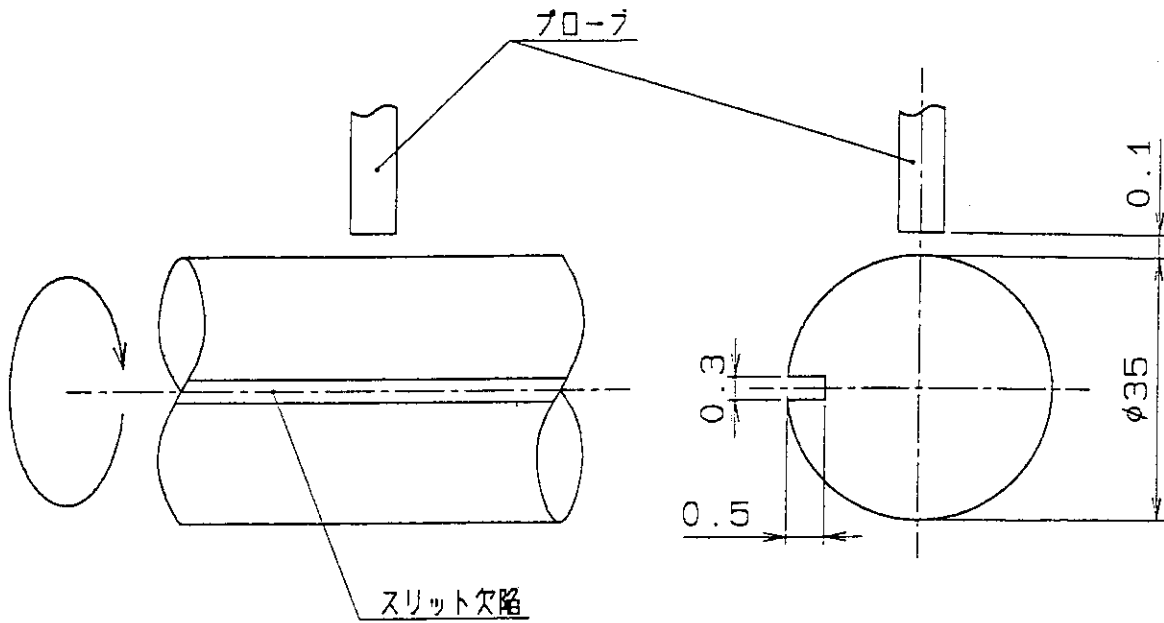
名 称	型 式	プローブ 周波数	メ ー カ
マイクロプローブ	自己誘導・自己比較型	1 MHz	ユニ電子
マイクロプローブ	自己誘導・自己比較型	4 MHz	ユニ電子

第2.3表 PGX黒鉛の主要特性

密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.73
平均引張強さ (MPa)	8.1 (T)* <sup>1</sup>
平均圧縮強さ (MPa)	30.6 (T)* <sup>1</sup>
ヤング率 (GPa)	6.5* <sup>2</sup>
粒径 (μm)	800 以下

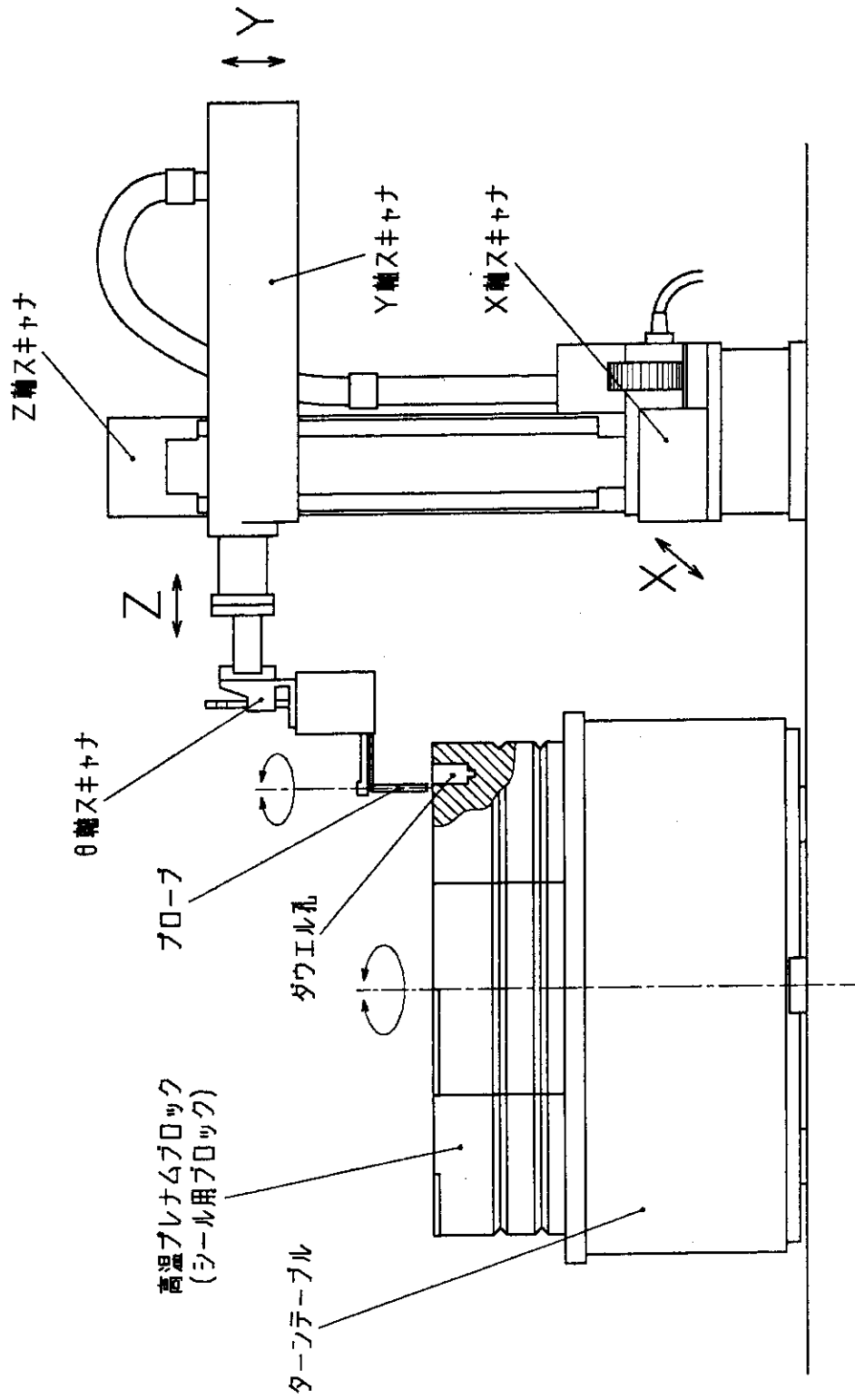
\*1: 素材の長軸方向に垂直な方向 (径方向)

\*2: 応力歪曲線における引張及び圧縮基準強さの1/3点を結んだ直線の勾配

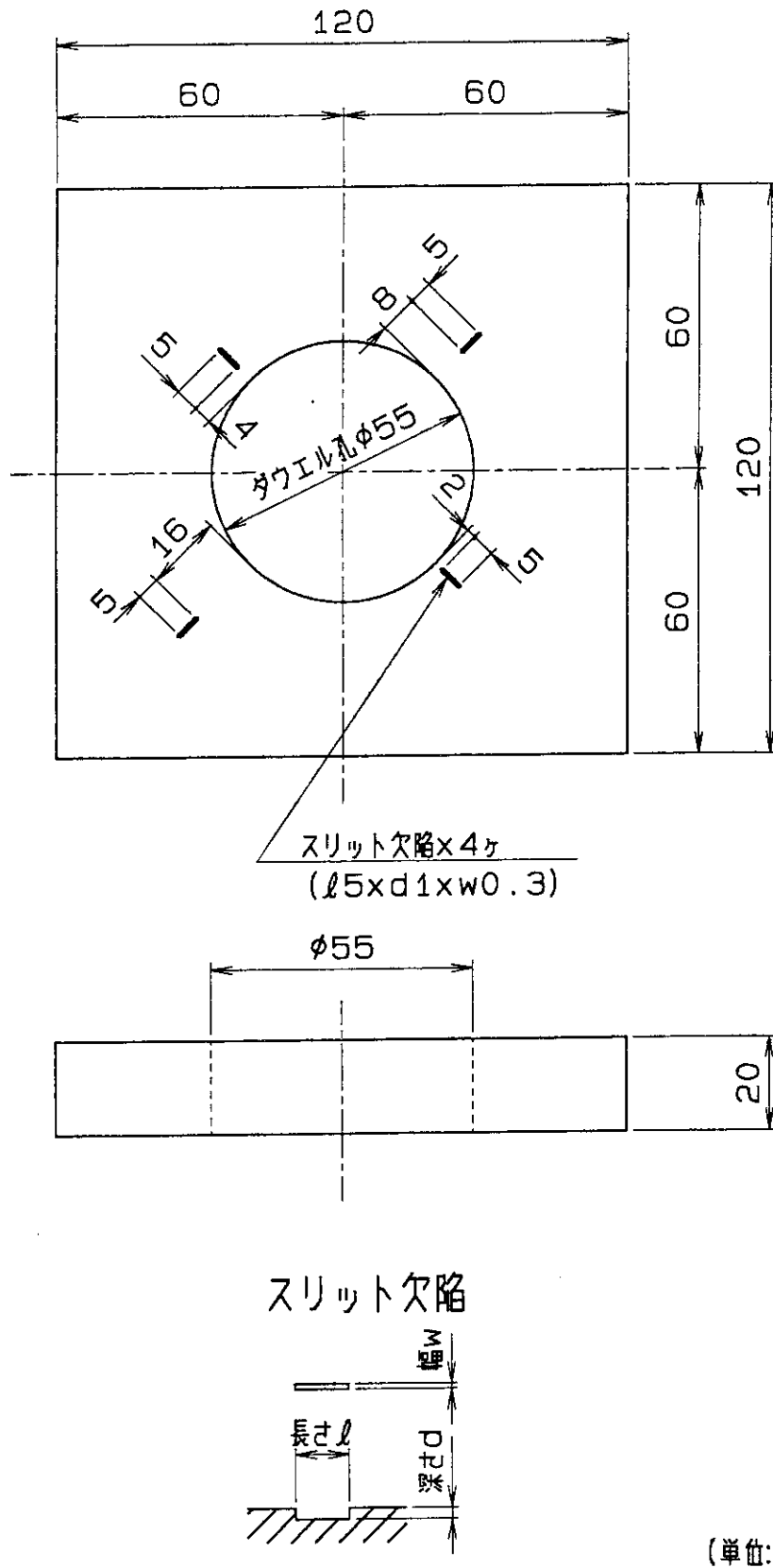


プローブ	
相互誘導・自己比較型	自己誘導・自己比較型
試験周波数: 512kHz ゲイン: 28dB	試験周波数: 512kHz ゲイン: 26dB

第2.1図 相互誘導・自己比較型プローブと自己誘導・自己比較型プローブの比較

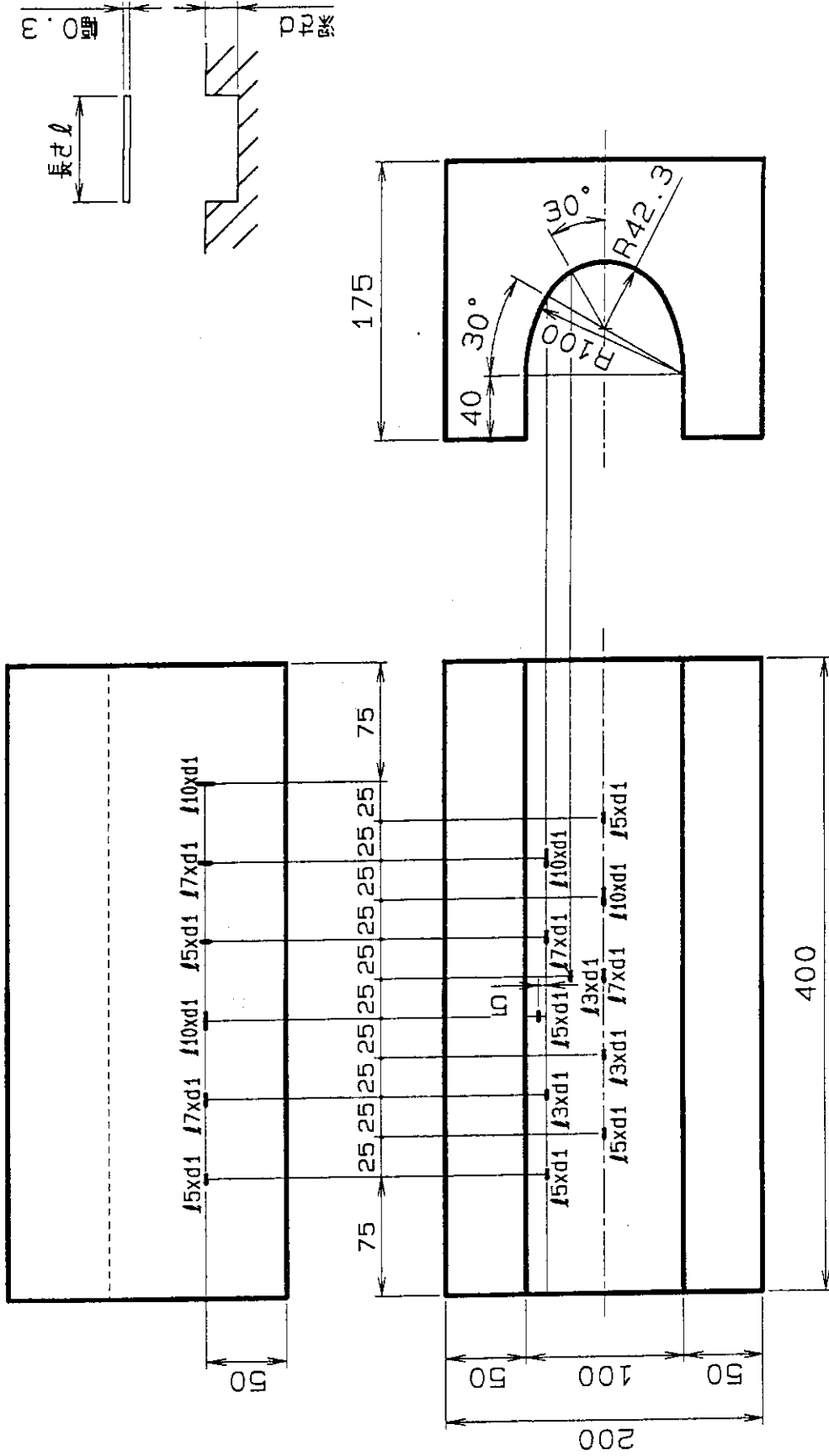


第2.2図 自動探傷用試験装置概略図



第2.3図 高温プレナムブロックのダウエル部近傍の  
ブロック表面を模擬した試験体

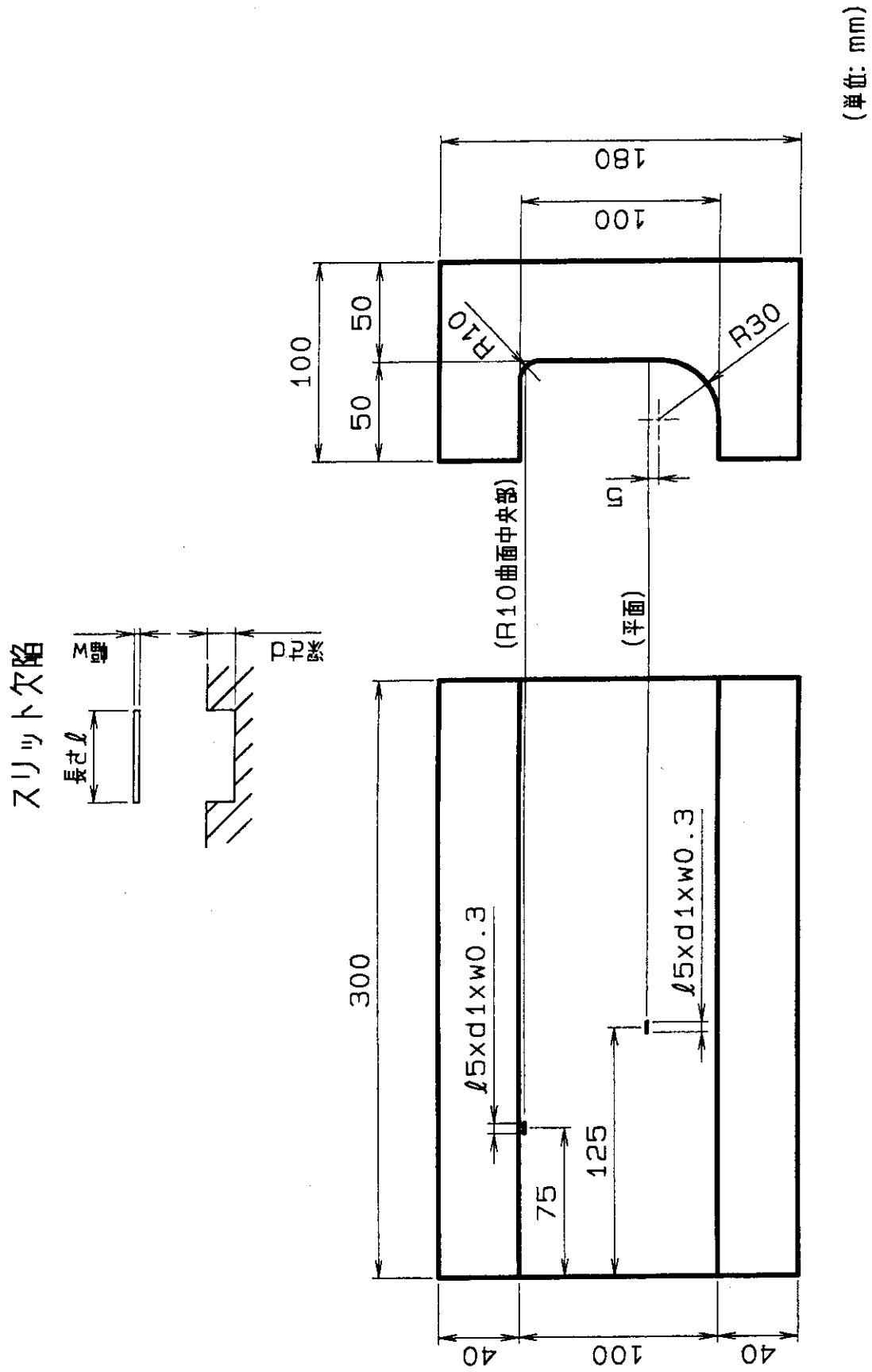
スリット欠陥



(単位 mm)

第2.4図 キー結合用高温プレナムブロックのキー部表面を模擬した試験体





第2.5図 コーナー部の曲率を変えた試験体

### 3. 試験結果と考察

#### 3.1 試験装置の検討

##### 3.1.1 試験周波数

試験周波数は、プローブ、探傷器及び検査対象となる材料の組み合わせで最もマッチングのとれる良好な欠陥の検出性を有する帯域とする必要がある。そのため、平面及び曲率が10mmの曲面に設けた長さ5mmの人工欠陥に対して、周波数が1MHz及び4MHzのプローブを用い試験周波数を変化させて欠陥の検出性を調べた。その結果を第3.1図に示す。図中、Sは欠陥信号出力、Nは欠陥信号出力近傍におけるノイズ信号出力の最大である。この図から、プローブ周波数が1MHzの場合では試験周波数が1.2~1.6MHz、プローブ周波数が4MHzの場合では試験周波数が3.2~4.4MHzの範囲で、それぞれ良好な欠陥の検出性が得られることがわかる。

プローブ周波数1MHzとプローブ周波数4MHzでは、欠陥の検出性はほぼ同等である。ここでは、これまでの適用例として実績があり、探傷データの蓄積も多いプローブ周波数1MHz<sup>(5)</sup><sup>(6)</sup>(試験周波数は、1.5MHz)を以下の試験で用いた。

なお、試験周波数1.5MHzでは、欠陥の検出性は平滑面と曲率が10mmの曲面部で、ほぼ同じであり(わずかの差は認められるが、これはばらつきの範囲と考える)、部位・形状の違いによる欠陥の検出性には変化はないと考えてよい。これは、曲率の影響が出にくい極めて小型のプローブを使用しているためと考えられる。従って、受入検査での曲率約40mmの曲面部の探傷に十分適用できる。

以上より、受入検査における渦流探傷器及びプローブは、本試験と同等の性能を有するものとし、試験周波数は1.5MHzとした。

##### 3.1.2 探傷感度の調整

###### (1) 探傷感度調整レベル

欠陥の探傷では、まず、ノイズ信号出力を越える欠陥が存在する場合は、確実にこの欠陥をブラウン管(CRT)上に検出できるような探傷感度を確保することが必要である。このためには、少なくとも最大ノイズ信号出力( $N_{max}$ )がCRT上に認められるような探傷感度にする必要がある( $N_{max} > 0\%$ )。次に、少なくとも検出レベル以下の信号出力を有する欠陥については、その欠陥信号がCRT、Y軸フルスケールの中に収まるようにすることが欠陥を検出し、かつ、その程度を評価する上で重要である。ここで、PGX 黒鉛構造物に対する検出レベルは、欠陥信号出力(S)と $N_{max}$ との比が $3(S/N_{max}=3)$ となるように、 $N_{max}$ に対して、3倍高いレベルとしている<sup>(2)</sup>。

従って、 $N_{max}$ のCRT上の調整高さ(探傷感度の調整レベル)は、受入検査において  $S/N_{max}=3$ がCRTで観察できるようCRT、Y軸30%とした。

## (2) 感度増幅値(STB-A1試験片感度)

黒鉛に対する対比試験片の規格がないため、受入検査においては、公的に検定・管理された標準試験片であり、安定した再現性の良い信号が得られるJIS Z 2345(1987)「超音波探傷用標準試験片」の超音波探傷用A1形標準試験片(STB-A1試験片)を対比試験片として用いることとした。STB-A1試験片の形状を第3.2 図に示す。PGX 黒鉛以外の対比試験片を用いるため、試験周波数1.5MHzにおいてPGX 黒鉛でNmaxの調整高さがCRT, Y 軸30% を得るために必要なSTB-A1試験片の感度を調べた。その結果を第3.3図に示す。本図より、STB-A1試験片の感度(0.5mm 幅スリット信号出力をリフトオフ0mm で探傷し、CRT, Y軸100%に調整した後増幅すべきdB値)はPGX黒鉛探傷時のリフトオフと比例関係にあることがわかる。本図より、リフトオフが0mm(手動にて探傷する場合)及び0.5mmから0.8mm(自動探傷装置を用いた場合)に応じたSTB-A1試験片の感度、即ち、STB-A1試験片の0.5mmスリット信号出力をCRT, Y軸100%に調整した後の増幅すべきdB値は、13dB(リフトオフ0mm)、22dB(リフトオフ0.5 mm)、24dB(リフトオフ0.6mm)、26dB(リフトオフ0.7mm)及び28dB(リフトオフ0.8mm)となる。なお、この探傷感度は試験周波数1.5MHzにおいて、PGX 黒鉛のNmaxが、それぞれのリフトオフに応じてCRT, Y軸30% になるような探傷感度に相当している。この増幅量によってSTB-A1 試験片とPGX 黒鉛間の探傷感度の違いを補正していることになるが、補正の内容には、STB-A1試験片とPGX 黒鉛との探傷時のリフトオフの違い、探傷感度調整に使用する対象の違い(STB-A1試験片では0.5mm幅スリット、PGX 黒鉛では材料表面のバックグラウンドノイズ)が含まれる。

以上の検討結果に基づき、受入検査における探傷感度の調整手順としては、まずSTB-A1試験片の0.5mm幅スリットをリフトオフ0mmで探傷して得られる信号出力がCRT, Y軸の最大となるように位相を調節し、次にこの信号出力をCRT, Y軸100%になるようにした後、PGX黒鉛探傷時のリフトオフに応じて探傷器のゲインを高めることとした。

### 3.1.3 位相角の調整

信号電圧と基準とする電圧の位相差である位相角は、欠陥の検出性(S/Nmax)に影響を及ぼす。PGX黒鉛を探傷するための位相角は、欠陥信号出力が最大となる位相角でもなければ、ノイズ信号出力の最小になる位相角でもなく、それらの比S/Nmaxを最大とするものである。そのため、PGX黒鉛における欠陥の検出性が最も良くなる位相角を調べた。

#### (1) 欠陥の検出性(S/Nmax)が最大となる位相角

試験周波数が1.5MHzで位相角を変化させた場合の欠陥検出特性を長さ5mmの人工欠陥について調べた。結果を第3.4図に示す。図は、リフトオフが0 mm 欠陥信号出力がY 軸で最大になる位相角を0° として示してある。図より、位相角が-15° から+15° の範囲で、良好な欠陥の検出性(S/Nmax $\geq$ 3)を示すことがわかる。受入試験においては、位相角が0° 近傍のものとし、位相角を0°  $\pm$  15° の範囲で探傷することとした。

## (2) STB-A1試験片感度調整時の位相角調整

受入検査において対比試験片としてSTB-A1試験片を用いるため、PGX 黒鉛で最大の S/Nmaxを得るのに必要なSTB-A1試験片の位相角補正值を定める必要がある。そこで、リフトオフをパラメータに試験周波数1.5MHzにおいてSTB-A1試験片の位相角補正值を求めた。その結果を第3.3図に点線で示す。本図は、STB-A1試験片の0.5mm幅スリット信号出力が最大となる位相角とPGX 黒鉛のスリット欠陥で最大のS/Nmaxを得るために必要な位相角の違いを示したものである。リフトオフが0mm及び0.5mmから0.8mmに応じたSTB-A1試験片位相角補正值は、 $-35^\circ$  (リフトオフ0mm)、 $-30^\circ$  (リフトオフ0.5mm)、 $-28.5^\circ$  (リフトオフ0.6mm)、 $-28^\circ$  (リフトオフ0.7mm)及び $-27.5^\circ$  (リフトオフ0.8mm)となりリフトオフが変化しても位相角補正值はあまり変化しないことが明らかとなった。従って、リフトオフが0.8mmの範囲内では、位相角補正值を一定にしてもよいと考えられる。これを確認するために、位相角補正值を $-30^\circ$ 一定にして、リフトオフを変化させた場合のS/Nmaxの変化を調べた。その結果を第3.5図に示す。同図より、リフトオフが0.8mm以下の試験範囲内ではS/Nmaxの値はほとんど変化しないことがわかる。以上より、受入検査では、STB-A1試験片の0.5mm幅スリット信号出力がCRT、Y軸で最大となるように位相角を定めて感度調整を行い、その後、探傷器の位相角調度を $-30^\circ$ 補正することとした。

この位相角補正值には、STB-A1試験片とPGX 黒鉛の材質の違い、STB-A1試験片とPGX 黒鉛における対象欠陥の形状の違い、STB-A1試験片とPGX 黒鉛での探傷時のリフトオフの違いによる影響が含まれる。

## 3.1.4 最大ノイズ信号出力(Nmax)

受入検査においてPGX 黒鉛に対するNmaxを実機で用いる探傷装置で定める必要がある。このため、試験周波数1.5MHzを用いて、リフトオフが0mmから1.0mmの範囲におけるNmaxを調べた。試験は、S/NmaxがCRT、Y軸で最大となる位相角に調整して行った。その結果を第3.6図に示す。同図より、Nmaxはリフトオフの1次関数として(3.1)式で表される。

$$N_{\max} = 19 L + G \quad (3.1)$$

ここで、 $N_{\max}$  : 最大ノイズ信号出力(dB)

$L$  : リフトオフ(mm)(0~1.0mmの範囲)

$G$  : リフトオフ0mmにおけるNmaxをCRT、Y軸100%に調整するのに必要な装置のゲイン調度目盛りの読みで、探傷器およびプローブの組み合わせによって決まる定数(dB)。

なお、プローブの交換等でGの値が変わる場合には、感度調整を行い、Gの値を補正すべきである。

## 3.2 探傷方法の検討

### 3.2.1 リフトオフの影響

試験周波数1.5MHzについて、リフトオフを変化させた場合のS/Nmaxの変化を調べた。この結果を第3.7図に示す。本図より、長さ5mmの水平及び垂直方向のスリット欠陥を黒鉛検査基準で規定された検出レベル(S/Nmax=3)で検出するためには、リフトオフが0.8mm以下とすれば良いことがわかる。従って、受入検査では、リフトオフを0.8mm以下とした。なお、自動探傷装置を用いる場合には、プローブのPGX 黒鉛の表面への接近性を考慮してリフトオフの下限を0.5mmとし、0.5mm~0.8mmの範囲のリフトオフとした。また、手動走査による探傷の場合にはリフトオフを0mmとした。

### 3.2.2 走査速度の影響

試験周波数1.5MHzを用いて、リフトオフを0.6mmとし走査速度を変化(装置の最大走査速度:200mm/s)させた場合の欠陥の検出性を第3.8図に示す。同図より、走査速度が200mm/sまでは、走査速度が変化しても欠陥の検出性に影響しないことが明らかとなった。従って、受入検査においては、走査速度を200mm/s以下に制限した。

### 3.2.3 走査ピッチの影響

試験周波数1.5MHzを用いて、リフトオフを0mmから1.0mmの範囲で変化させた場合のS/Nmax=3となる走査ピッチを第3.9図に示す。図より、長さ5mmのスリット欠陥をS/Nmax=3で検出するための走査ピッチは、リフトオフが0mmの場合では1.3mm以下、リフトオフが0.8mmの場合では0.7mm以下となることがわかる。

従って、受入検査では、リフトオフが0.5mmから0.8mm(自動探傷装置を用いた探傷試験時)の範囲においてプローブの走査ピッチを0.7mm以下に、またリフトオフが0mmの手動探傷試験時には走査ピッチを1.3mm以下に制限した。

### 3.2.4 探傷範囲

渦流探傷試験の場合、端部のように探傷面が急変している部位では、急変部の影響を受け、端面部は欠陥信号を明瞭に検出することができない。そのため、直径2mm、深さ1mmの欠陥を用いて端面部における欠陥信号を調べた。この結果を第3.10図に示す。同図から、端面部より約2mmの範囲に存在する欠陥信号は、端面部の影響を受け判別しにくいことがわかる。これは、黒鉛材料に特有の問題ではなく、渦流探傷の端末効果によるものである。

炉心支持黒鉛構造物の探傷部は、シール用高温プレナムブロックのブロック上面ダウエル部近傍及びキー結合用高温プレナムブロックのキー溝部と規定<sup>(2)</sup>されている。実際の受入検査においては、上記検討結果を踏まえ以下の箇所を探傷範囲とした。

#### (1) シール用高温プレナムブロックのブロック上面ダウエル部近傍

この部位においては、地震時にダウエルピンを介して、ブロック側のダウエル孔に水

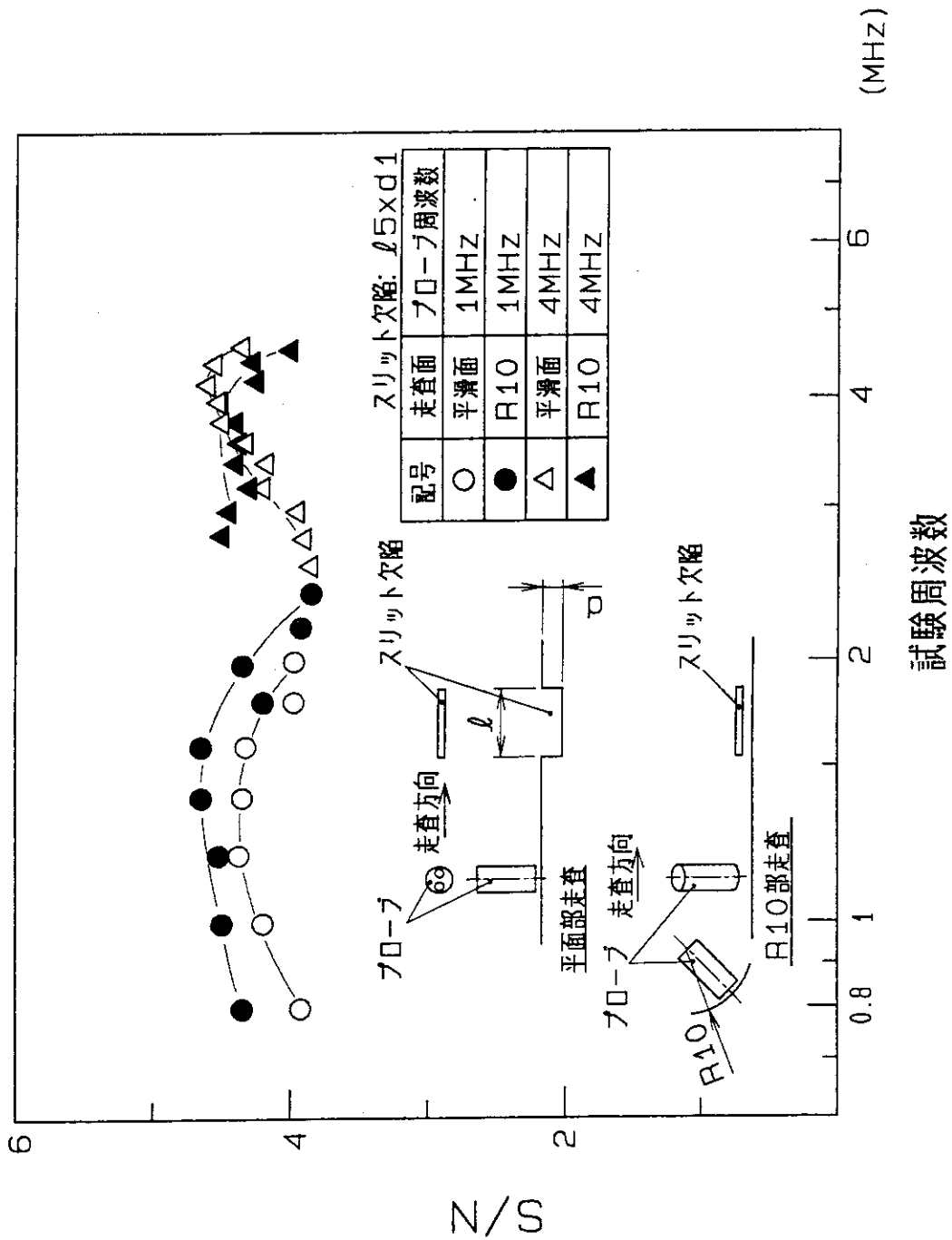
平荷重がかかる。その結果、ダウエル孔の周囲部が高応力部分となるため、受入検査ではダウエル孔の周囲15mmの範囲を探傷範囲とした。

(2) キー結合用高温プレナムブロックのキー溝部

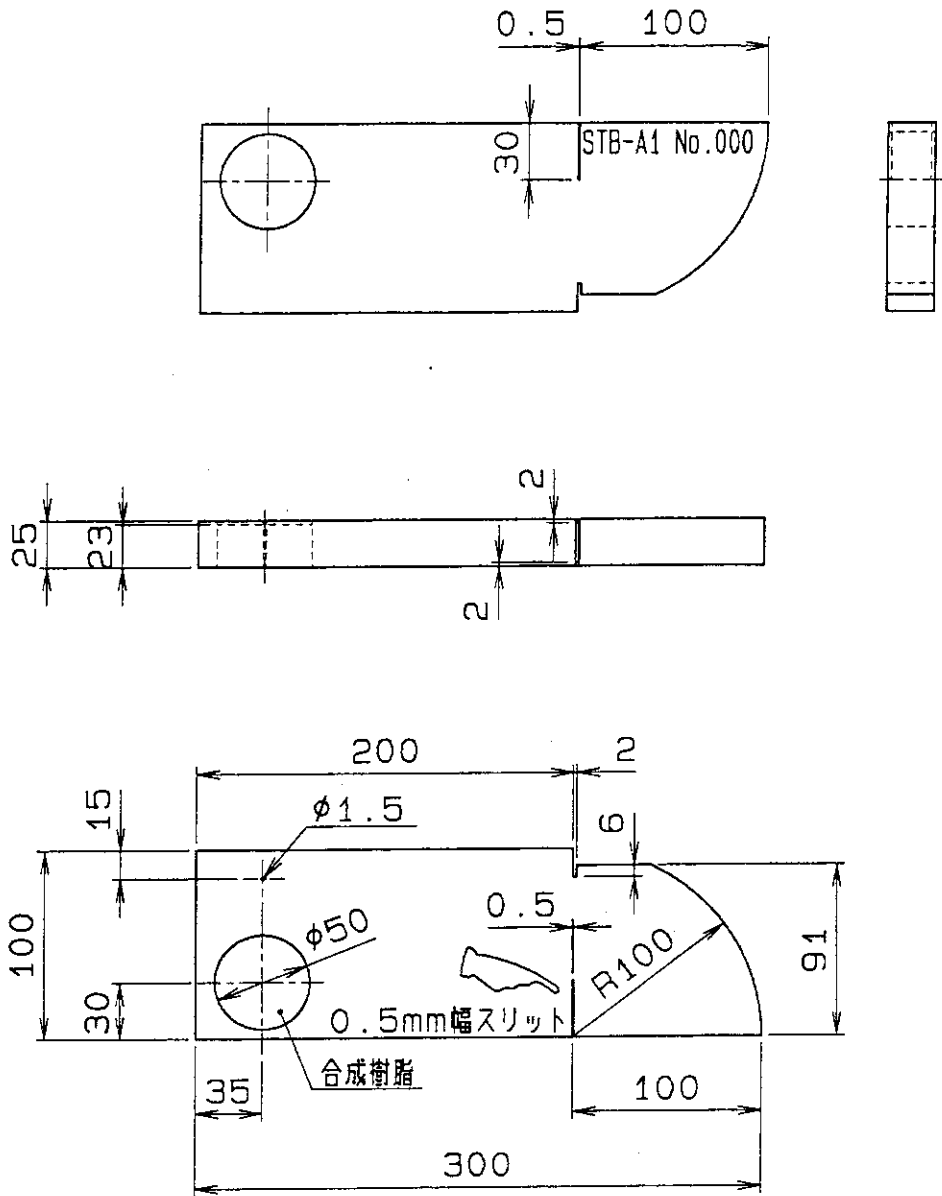
この部位においては、構造上、地震時にキーからの水平せん断荷重がかかる。その結果、キー溝内面の曲面部に応力集中を生じるため、受入検査ではキー溝内面の曲面部を探傷範囲とした。

### 3.3 欠陥の検出性

上記3.1及び3.2での検討結果より策定した付録に示す渦流探傷試験の方法を用いて、欠陥の検出性を調べた。試験では、ディフェクトスコープ渦流探傷器(フェルスタ社製、型式; SD2.832)及び自己誘導・自己比較型のマイクロプローブを使用し、自動探傷により試験周波数1.5MHz、リフトオフ0mmから1.0mm、走査速度200mm/s以下の条件で、試験体に設けた長さ5mm、深さ1mm、幅0.3mmのスリット欠陥を探傷した。この結果を第3.11図に示す。ここで、縦軸は欠陥の検出性を表す欠陥信号出力(S)と最大ノイズ号出力(Nmax)の比(S/Nmax)を示す。本図より、付録に示した渦流探傷試験の方法に基づけば、上記の欠陥は全てS/Nmaxが3以上で検出可能なことがわかる。



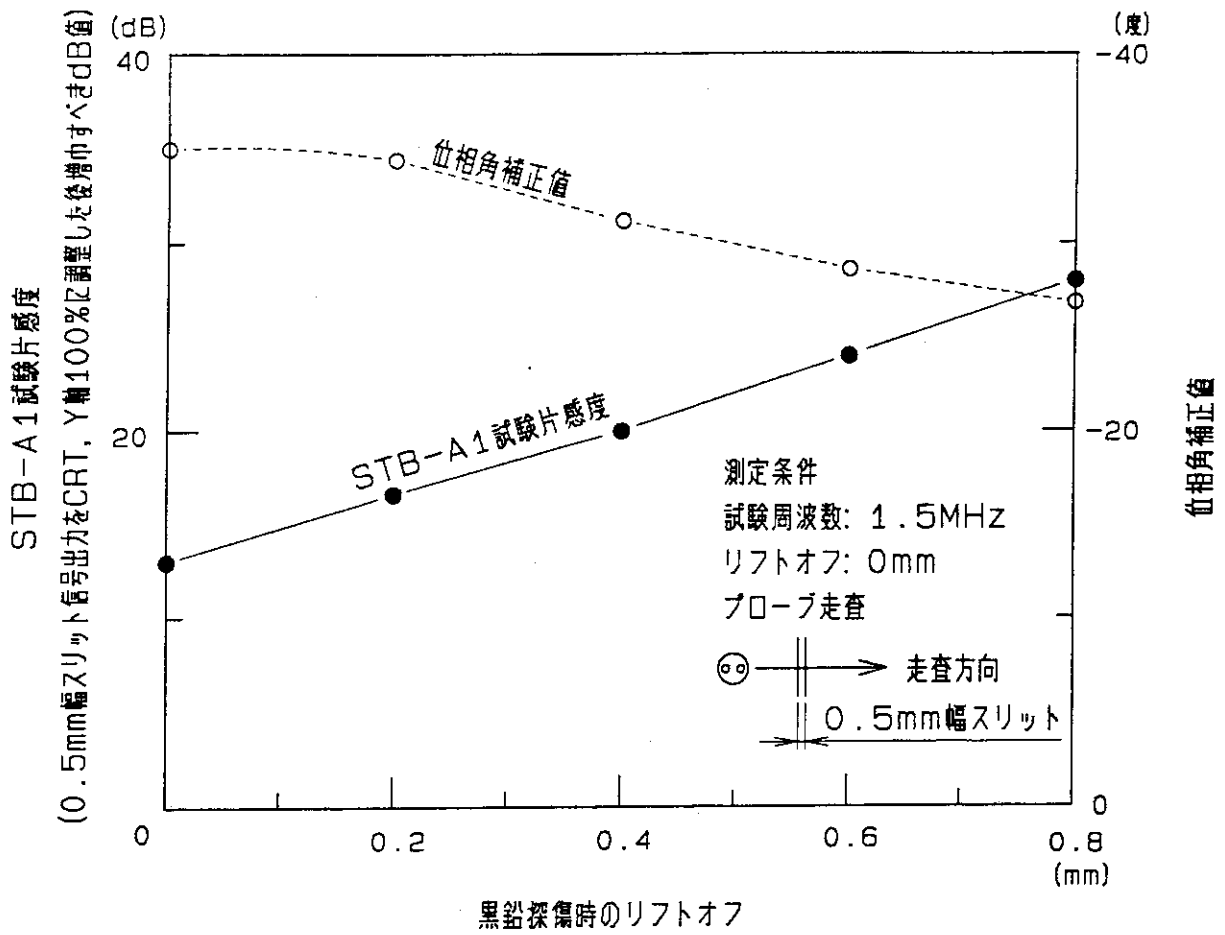
第3.1図 試験周波数と欠陥の検出性の関係



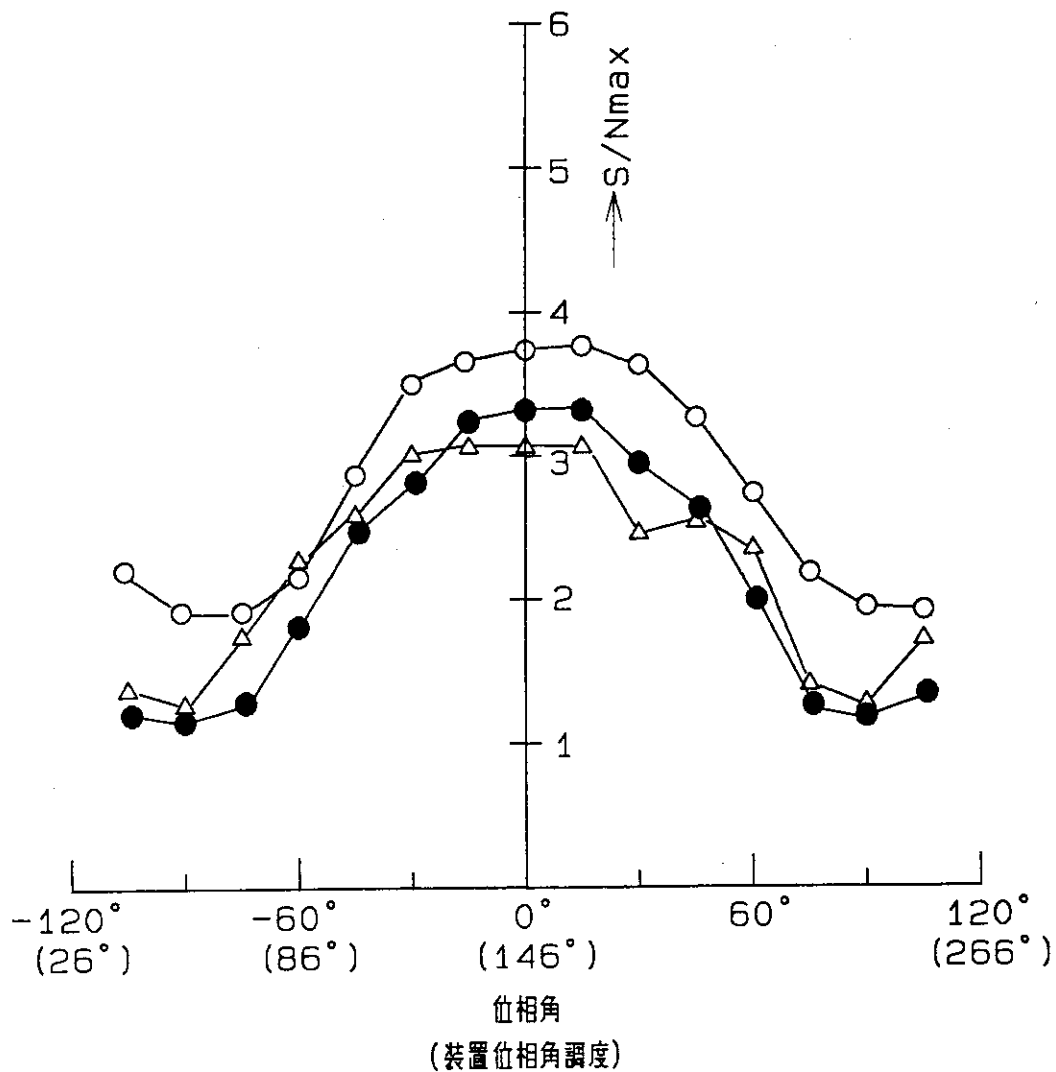
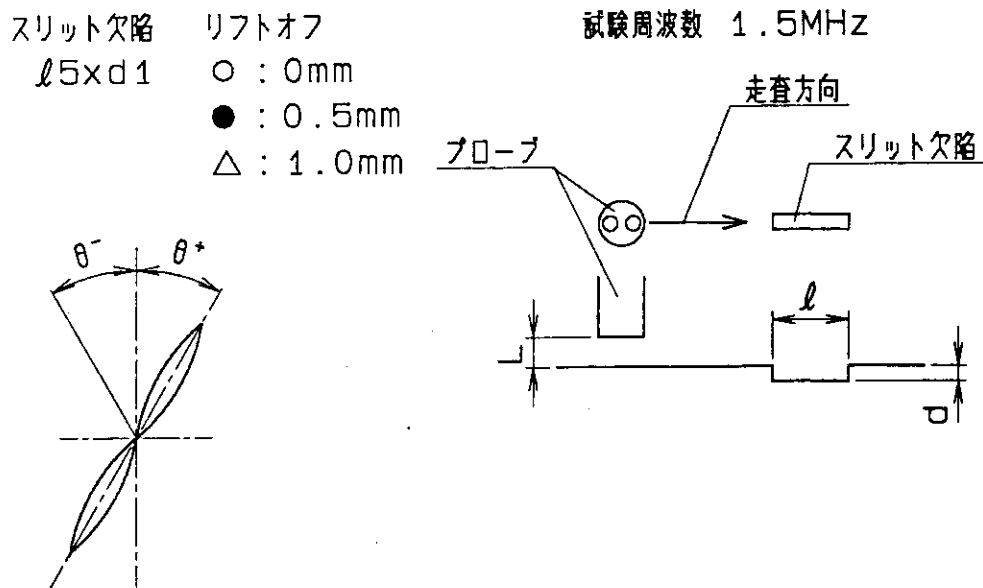
(単位 mm)

第3.2図 STB-A1試験片の形状 (JIS Z2345)





第3.3図 最大ノイズ信号出力 (Nmax) 30%を得るために必要なSTB-A1 試験片感度と位相角の補正值

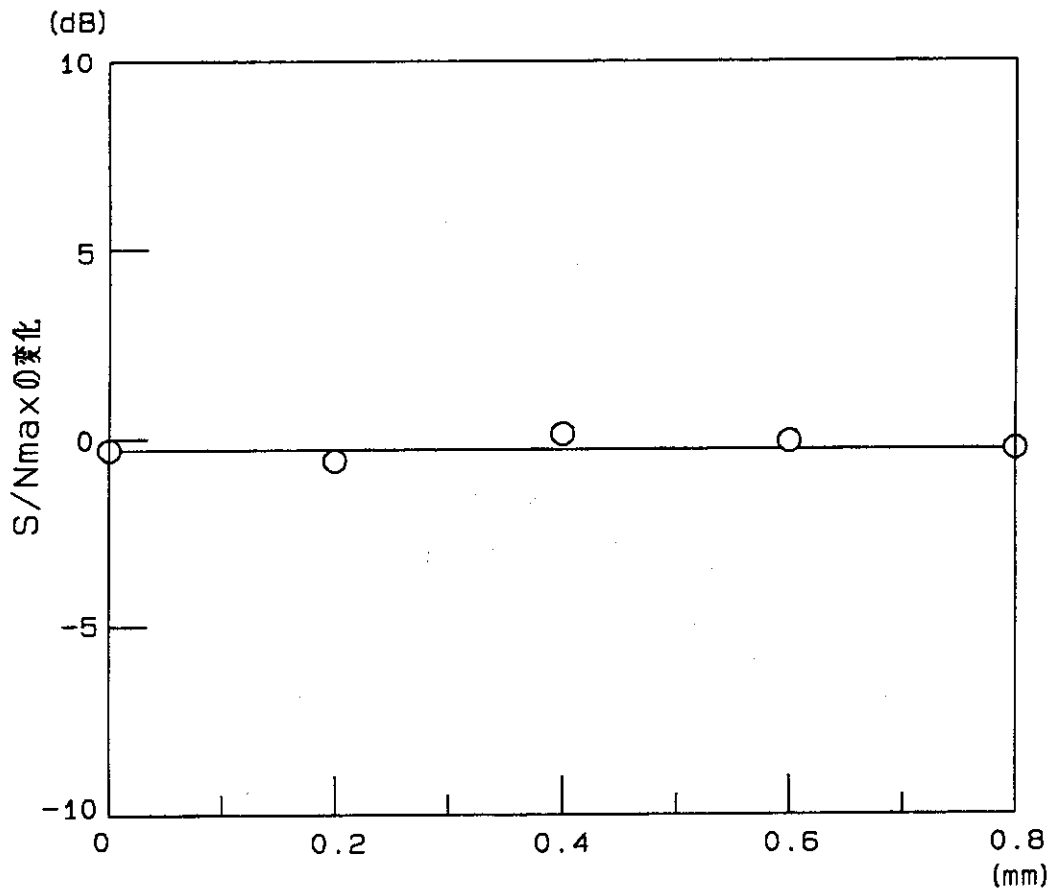
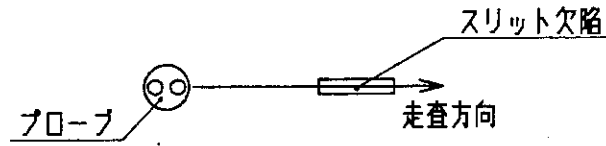


第3.4図 位相角と欠陥の検出性

試験周波数 : 1.5MHz

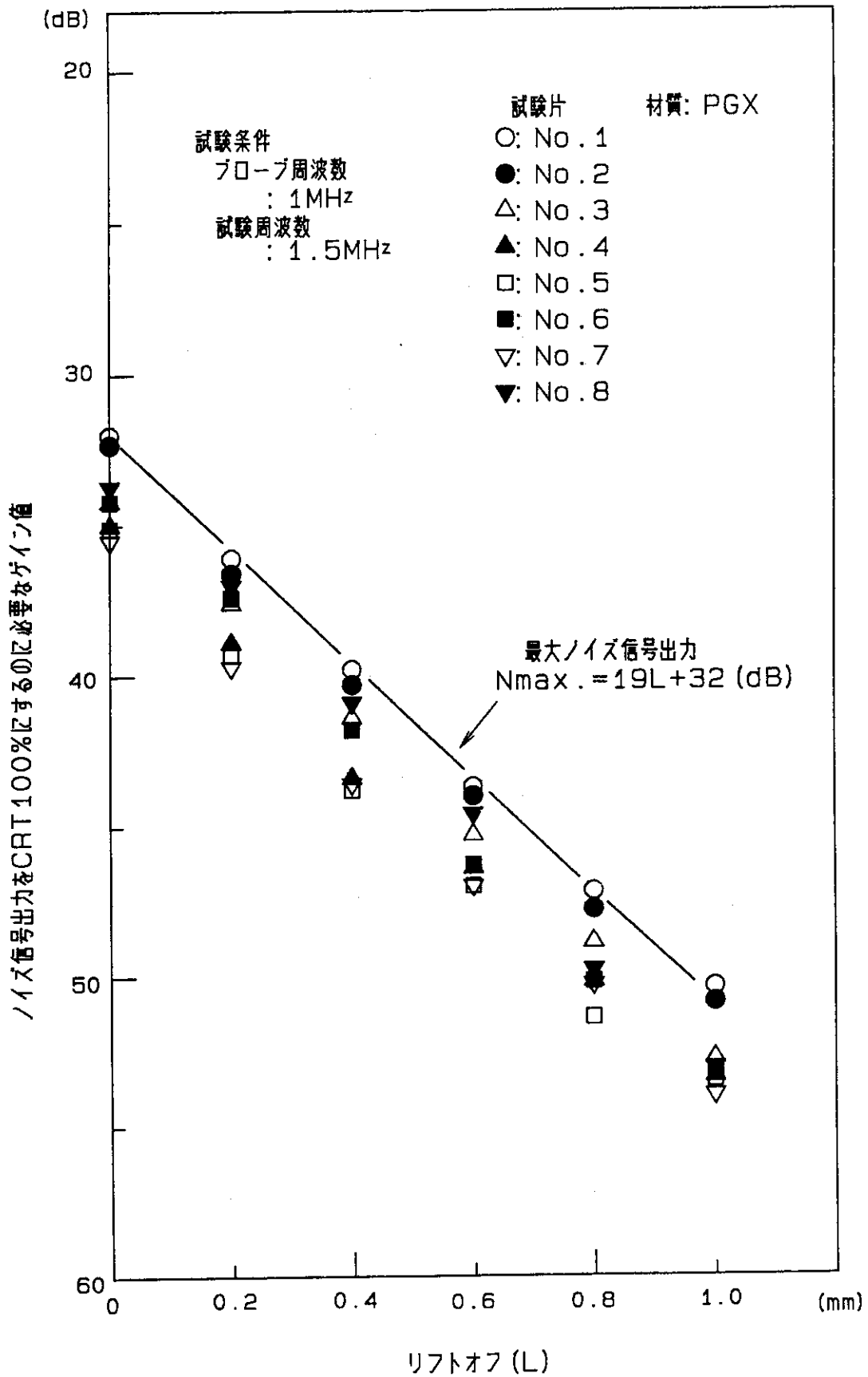
位相角 : STB-A1試験片位相角に対し $-30^\circ$ 補正  
(リフトオフ0.5mmの位相補正角に相当)

スリット欠陥: 長さ $l$ 5x深さ $d$ 1.0

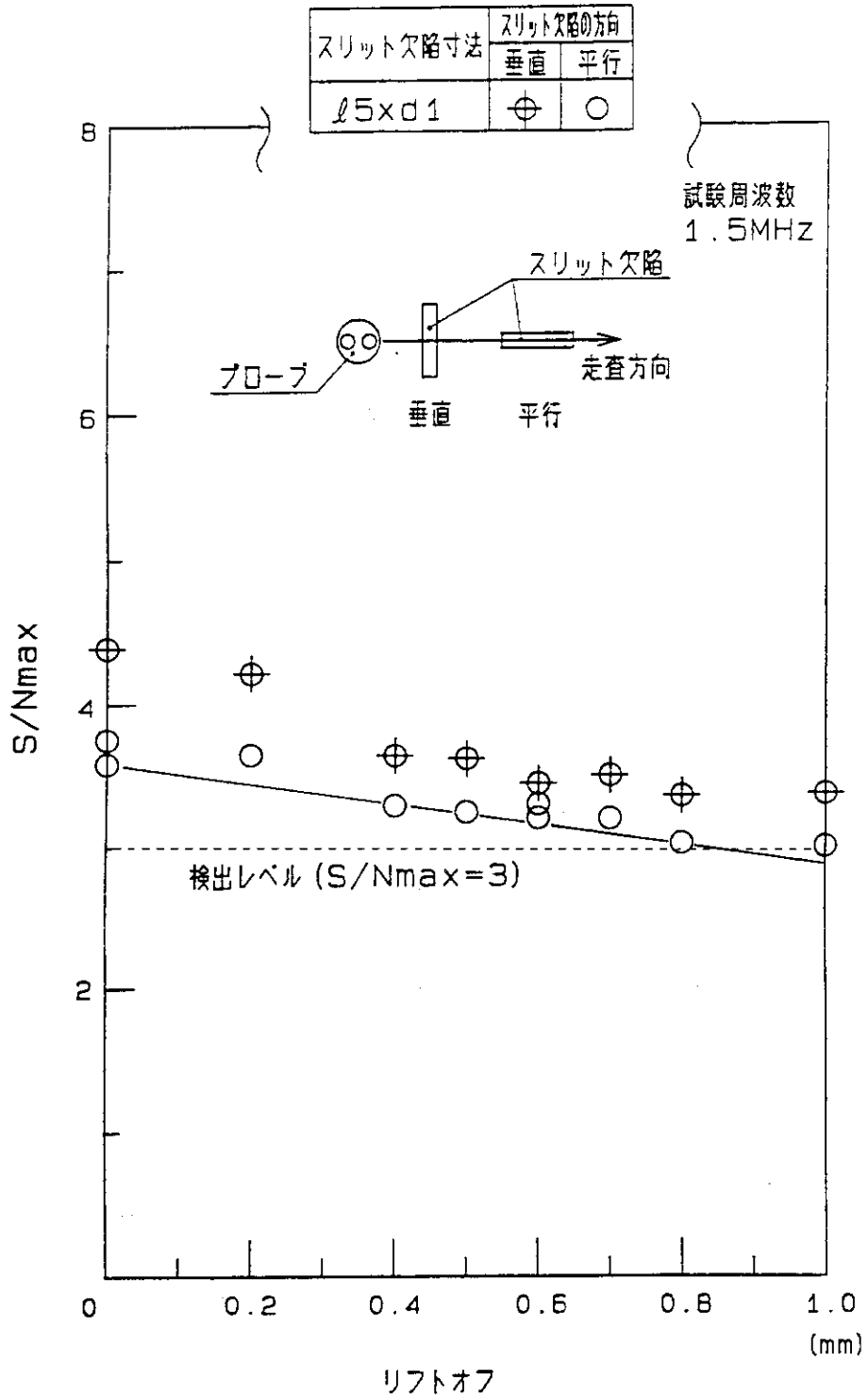


PGX黒鉛探傷時のリフトオフ

第3.5図 同一の位相角でリフトオフを変化させた場合の  
S/Nmaxの変化

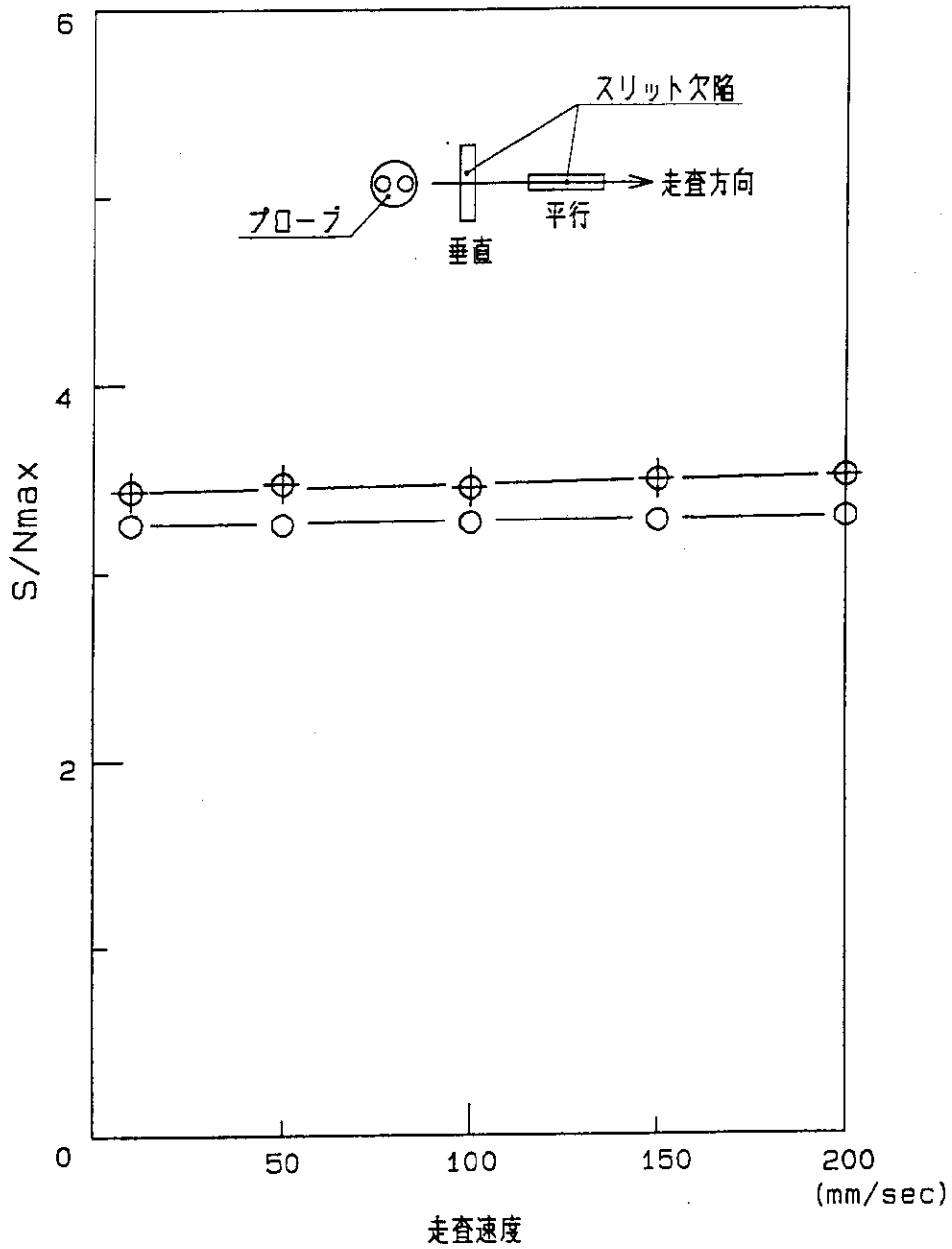


第3.6図 リフトオフとノイズ信号出力との関係  
 (試料は全て異なるロットより製作)

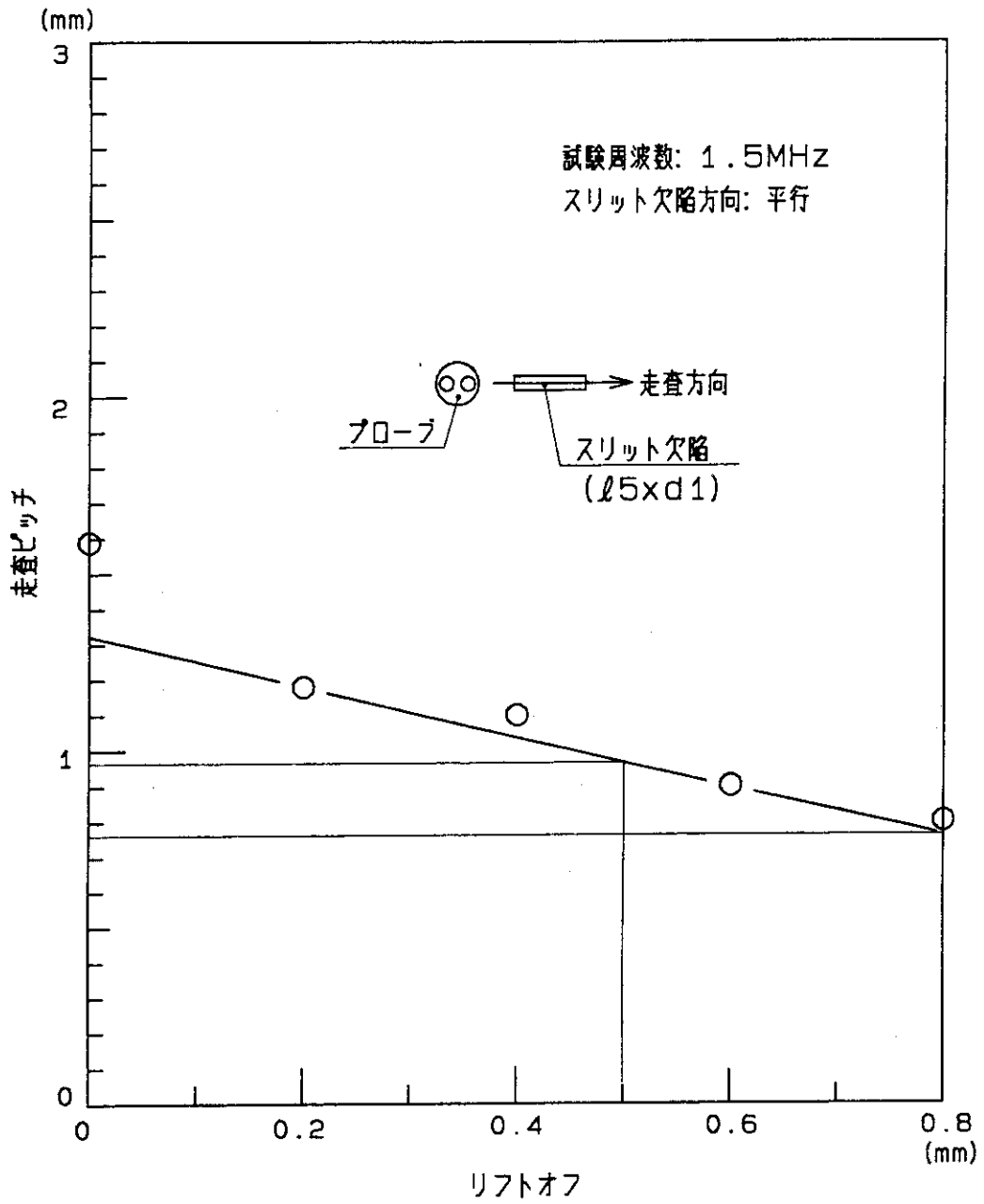


第3.7図 リフトオフと欠陥の検出性の関係

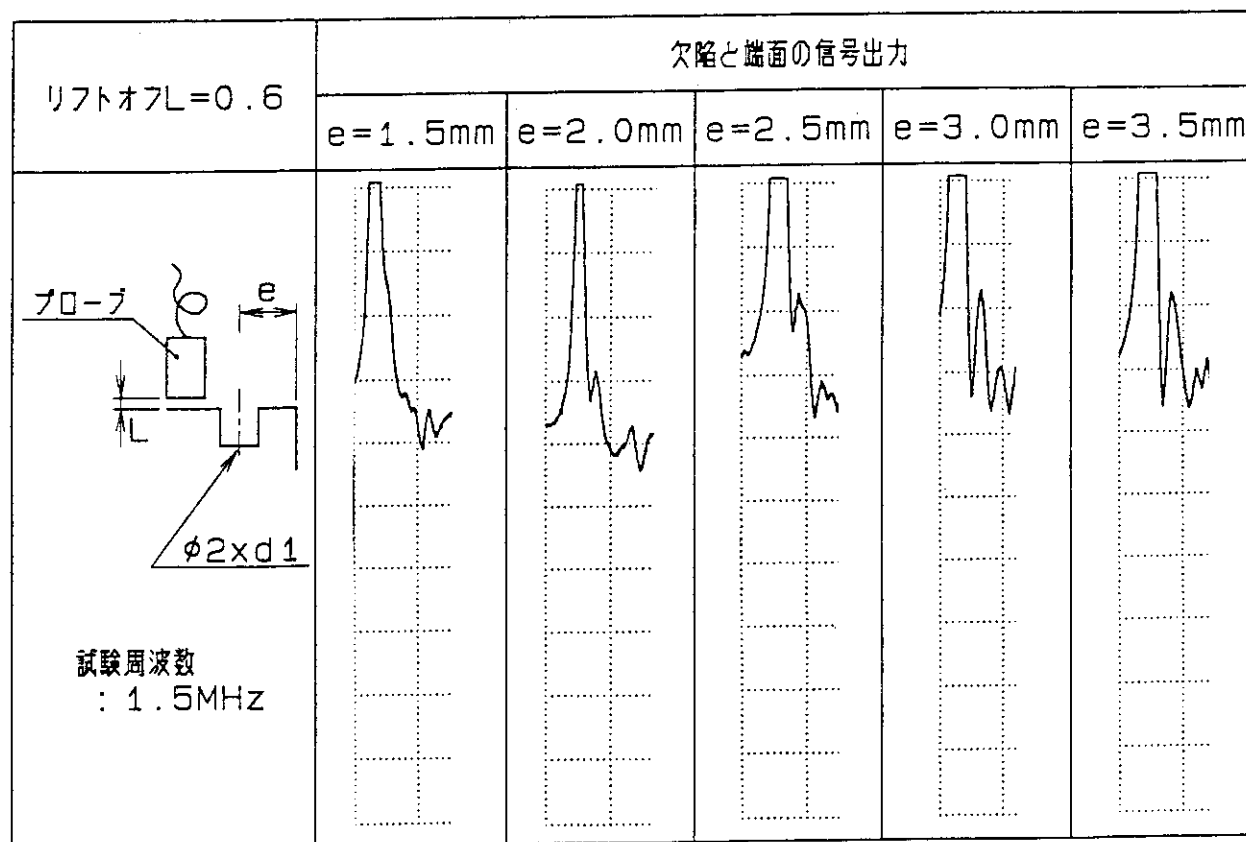
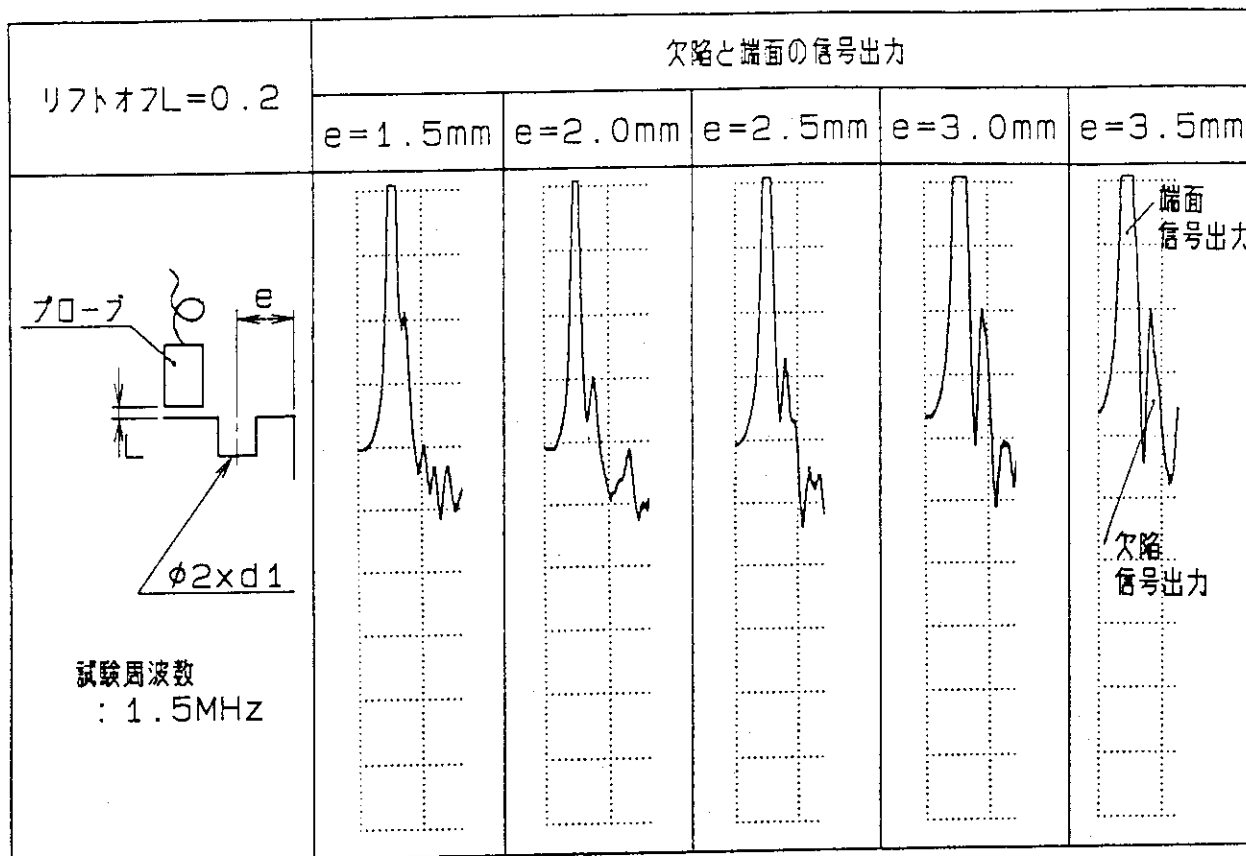
スリット欠陥                    試験周波数: 1.5MHz  
 :  $\phi 5 \times d 1$                     リフトオフ: 0.6mm  
 欠陥の方向  
 ⊕: 垂直  
 ○: 平行



第3.8図 走査速度と欠陥の検出性の関係

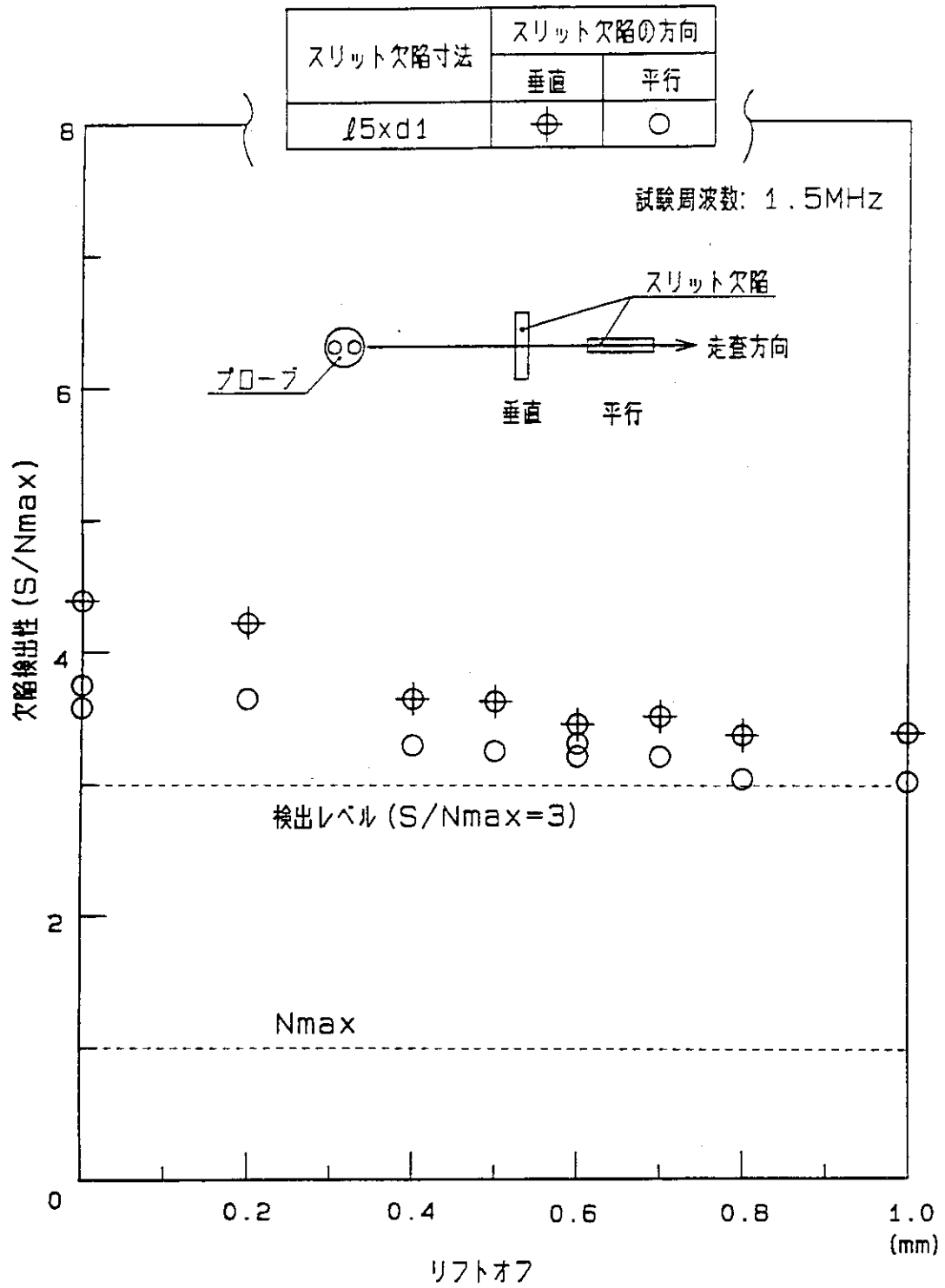


第3.9図 S/Nmax = 3における走査ピッチとリフトオフの関係



第3.10図 端面の影響





第3.11図 欠陥の検出性

## 4. 結 論

原子炉用粗粒準等方性PGX黒鉛構造物に対して、加工後の製品段階で表面欠陥の検出を目的とした渦流探傷試験が計画されている。この渦流探傷試験の方法、試験条件等を明確にするため、実機の探傷部位を模擬した試験体を用いて各種条件下で渦流探傷試験を実施した。その結果、

- (1) 欠陥の探傷感度を最適とするための渦流探傷試験装置の感度調整の方法を明確にし、
- (2) 探傷試験時におけるリフトオフ、プローブの走査速度及び走査ピッチの影響を検討して実機の受入検査におけるPGX黒鉛構造物の渦流探傷試験の方法を策定した。

## 謝 辞

本報告をまとめるにあたり、有益な御助言を頂いた高温工学試験研究炉開発部飛岡利明部長及び田中利幸次長並びに関係各位に深謝いたします。

## 参 考 文 献

- (1) 高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針、JAERI-M 89-006(1989)
- (2) 豊田純二、伊与久達夫、石原正博、多喜川昇、塩沢周策：高温工学試験研究炉の黒鉛検査基準、JAERI-M 91-102(1991)
- (3) 大岡紀一、伊与久達夫、石井敏満、多喜川昇、塩沢周策、神戸護、三木俊也、緒方隆晶、河江秀俊：HTTRの黒鉛受入検査における超音波探傷試験、JAERI-M 93-003(1993)
- (4) 石原正博、七種明雄、伊与久達夫、塩沢周策、大岡紀一、神戸護、高橋正昭、田中康博、進藤嘉久、河江秀俊：HTTRのIG-110黒鉛構造物に受入検査における渦流探傷試験、JAERI-M 93-197(1993)
- (5) T. IYOKU, S. SHIOZAWA, N. OOKA, M. KAMBE, A. IDE: Ultrasonic and Eddy Current Testing of Nuclear Graphite, Trans. 11th SMIRT Conf., Vol. G1, G15/3(1991)
- (6) 財団法人 原子力安全研究協会：黒鉛検査基準の検討、1988(私信)

## 4. 結 論

原子炉用粗粒準等方性PGX黒鉛構造物に対して、加工後の製品段階で表面欠陥の検出を目的とした渦流探傷試験が計画されている。この渦流探傷試験の方法、試験条件等を明確にするため、実機の探傷部位を模擬した試験体を用いて各種条件下で渦流探傷試験を実施した。その結果、

- (1) 欠陥の探傷感度を最適とするための渦流探傷試験装置の感度調整の方法を明確にし、
- (2) 探傷試験時におけるリフトオフ、プローブの走査速度及び走査ピッチの影響を検討して実機の受入検査におけるPGX黒鉛構造物の渦流探傷試験の方法を策定した。

## 謝 辞

本報告をまとめるにあたり、有益な御助言を頂いた高温工学試験研究炉開発部飛岡利明部長及び田中利幸次長並びに関係各位に深謝いたします。

## 参 考 文 献

- (1) 高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針、JAERI-M 89-006(1989)
- (2) 豊田純二、伊与久達夫、石原正博、多喜川昇、塩沢周策：高温工学試験研究炉の黒鉛検査基準、JAERI-M 91-102(1991)
- (3) 大岡紀一、伊与久達夫、石井敏満、多喜川昇、塩沢周策、神戸護、三木俊也、緒方隆晶、河江秀俊：HTTRの黒鉛受入検査における超音波探傷試験、JAERI-M 93-003(1993)
- (4) 石原正博、七種明雄、伊与久達夫、塩沢周策、大岡紀一、神戸護、高橋正昭、田中康博、進藤嘉久、河江秀俊：HTTRのIG-110黒鉛構造物に受入検査における渦流探傷試験、JAERI-M 93-197(1993)
- (5) T. IYOKU, S. SHIOZAWA, N. OOKA, M. KAMBE, A. IDE: Ultrasonic and Eddy Current Testing of Nuclear Graphite, Trans. 11th SMIRT Conf., Vol. G1, G15/3(1991)
- (6) 財団法人 原子力安全研究協会：黒鉛検査基準の検討、1988(私信)

## 4. 結 論

原子炉用粗粒準等方性PGX黒鉛構造物に対して、加工後の製品段階で表面欠陥の検出を目的とした渦流探傷試験が計画されている。この渦流探傷試験の方法、試験条件等を明確にするため、実機の探傷部位を模擬した試験体を用いて各種条件下で渦流探傷試験を実施した。その結果、

- (1) 欠陥の探傷感度を最適とするための渦流探傷試験装置の感度調整の方法を明確にし、
- (2) 探傷試験時におけるリフトオフ、プローブの走査速度及び走査ピッチの影響を検討して実機の受入検査におけるPGX黒鉛構造物の渦流探傷試験の方法を策定した。

## 謝 辞

本報告をまとめるにあたり、有益な御助言を頂いた高温工学試験研究炉開発部飛岡利明部長及び田中利幸次長並びに関係各位に深謝いたします。

## 参 考 文 献

- (1) 高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針、JAERI-M 89-006(1989)
- (2) 豊田純二、伊与久達夫、石原正博、多喜川昇、塩沢周策：高温工学試験研究炉の黒鉛検査基準、JAERI-M 91-102(1991)
- (3) 大岡紀一、伊与久達夫、石井敏満、多喜川昇、塩沢周策、神戸護、三木俊也、緒方隆晶、河江秀俊：HTTRの黒鉛受入検査における超音波探傷試験、JAERI-M 93-003(1993)
- (4) 石原正博、七種明雄、伊与久達夫、塩沢周策、大岡紀一、神戸護、高橋正昭、田中康博、進藤嘉久、河江秀俊：HTTRのIG-110黒鉛構造物に受入検査における渦流探傷試験、JAERI-M 93-197(1993)
- (5) T. IYOKU, S. SHIOZAWA, N. OOKA, M. KAMBE, A. IDE: Ultrasonic and Eddy Current Testing of Nuclear Graphite, Trans. 11th SMIRT Conf., Vol. G1, G15/3(1991)
- (6) 財団法人 原子力安全研究協会：黒鉛検査基準の検討、1988(私信)

## 付録 PGX黒鉛構造物の渦流探傷試験方法

本試験結果に基づいて、HTTRのPGX 黒鉛構造物の受入検査における非破壊検査（渦流探傷試験）の方法を以下のとおり策定した。

## 1. 対象機器

HTTRに使用するPGX 黒鉛の渦流探傷試験は、炉内構造物のシール用高温プレナムブロック及びキー結合用高温プレナムブロックについて行う。渦流探傷試験の対象製品の試験対象部位を下表に示す。

設備名	対象機器	ブロック数	対象部位	材料名
炉内構造物	シール用高温 プレナムブロック	7 体	ブロック上面 ダウエル孔周囲	PGX黒鉛
	キー結合用高温 プレナムブロック	7 体	ブロック側面キー溝	

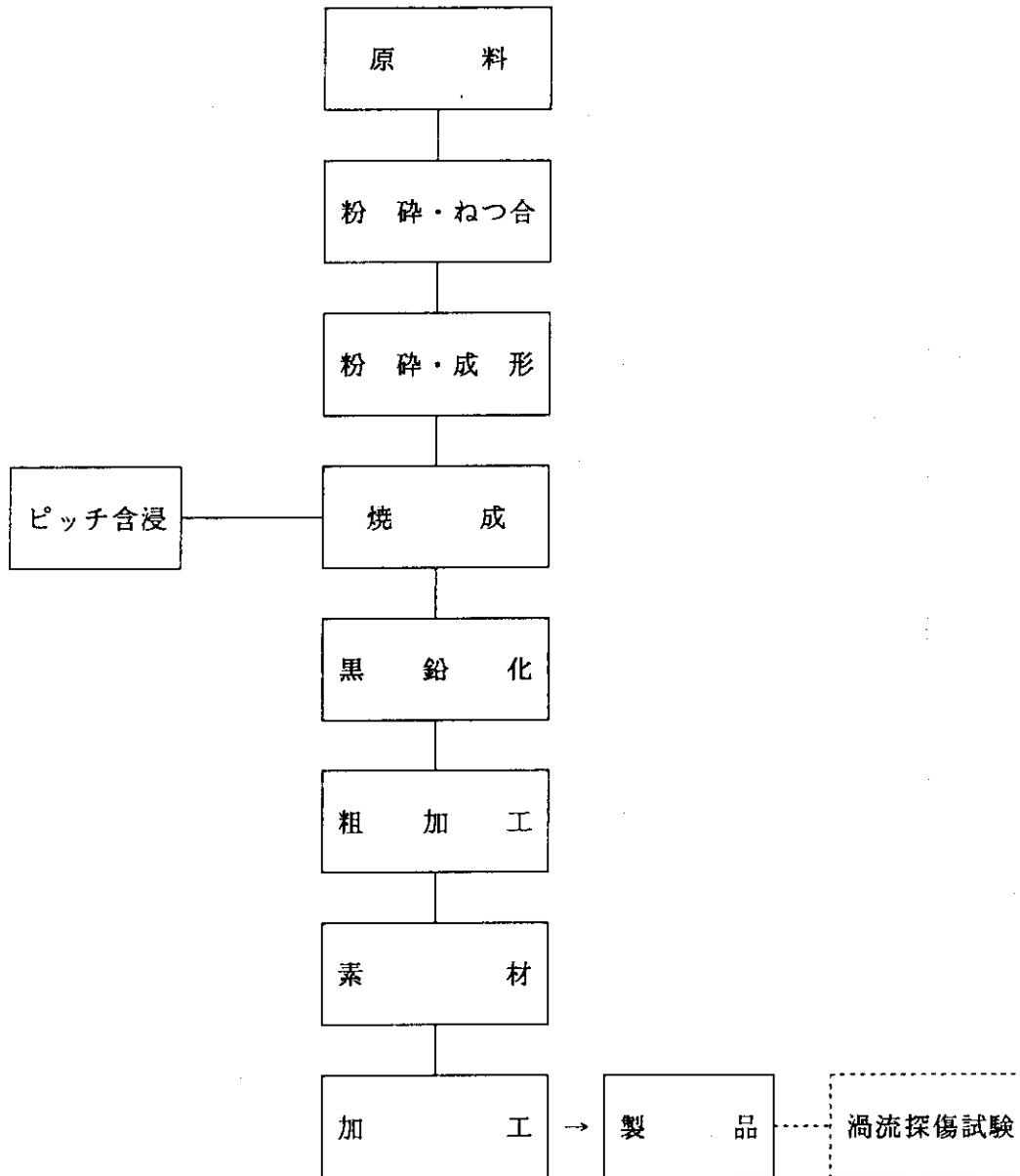
## 2. 関連規格及び基準

本渦流探傷試験を行うにあたって、下記の規格及び基準等を適用する。

- (1) 「高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針」JAERI-M 89-006(1989)
- (2) 「高温工学試験研究炉・炉心黒鉛構造設計方針の解説」JAERI-M 91-083(1991)
- (3) 「高温工学試験研究炉・炉心支持黒鉛構造設計方針の解説」JAERI-M 91-070(1991)
- (4) 「高温工学試験研究炉の黒鉛検査基準」JAERI-M 91-102(1991)
- (5) JIS Z 2345(1987) 「超音波探傷用標準試験片」

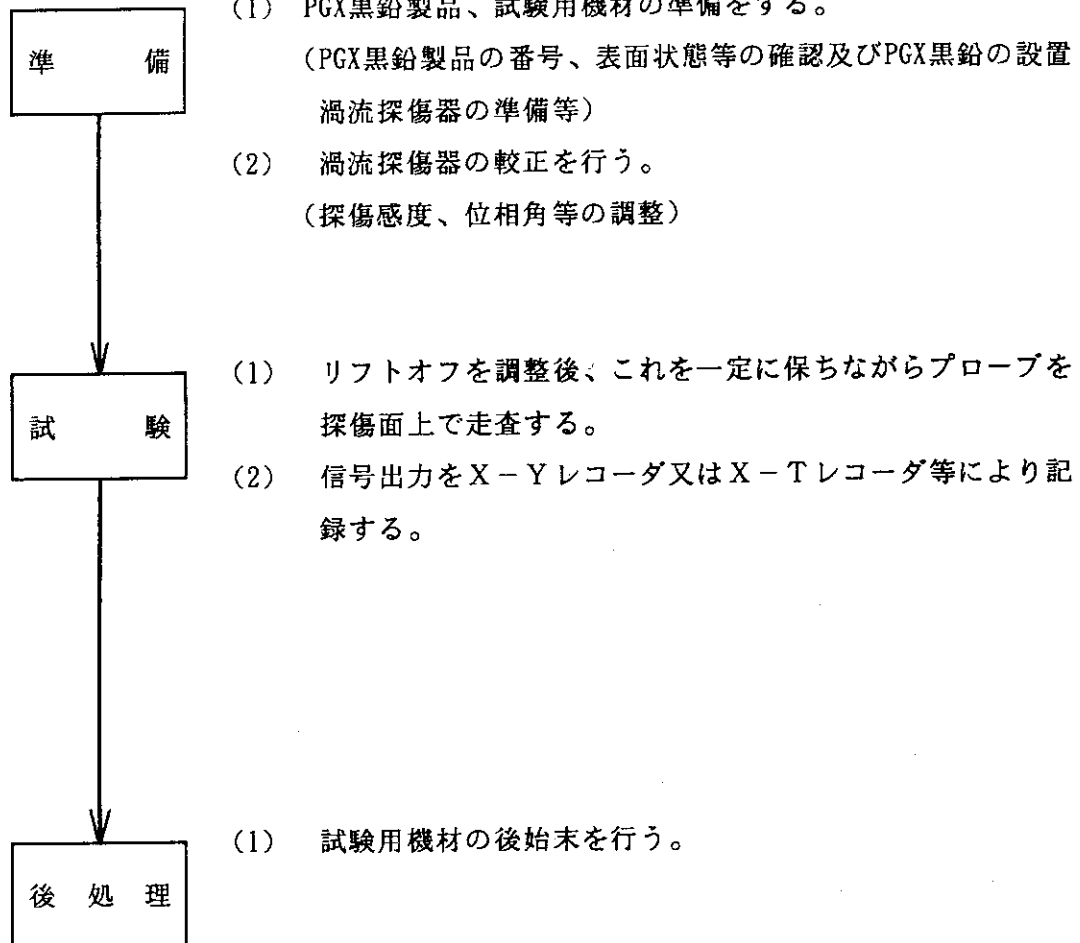
3. 試験時期

渦流探傷試験は、以下に示すPGX 黒鉛の原料から製品までの製造工程において、工場での試験対象部の最終加工後に実施する。



#### 4. 試験手順

渦流探傷試験の手順を下記に示す。



## 5. 試験実施要領

渦流探傷試験は、対象とするPGX 黒鉛製品の探傷面に対し、探傷部位の形状に応じたスキャナヘッドを備えた自動探傷装置または手動走査により実施する。

## 5.1 試験装置

## (1) 渦流探傷器

原則として、下記のポータブル型渦流探傷器又はこれと同等の性能を有するものを使用する。

名 称	型 式	試験周波数範囲	メ ー カ
デフェクト スコープ	SD 2 . 8 3 2	100Hz～ 9.9MHz	フェルスタ

## (2) プローブ

原則として、下記のプローブ、またはこれと同等の性能を有するものを使用する。

名 称	型 式	試験周波数	メ ー カ
マイクロプローブ	自己誘導・ 自己比較型	1.5MHz	ユニ電子

## (3) 渦流試験装置の概要

渦流探傷試験装置は、プローブの走査を行うスキャナ及び対象製品を保持し、回転位置決めをするターンテーブルから構成される。

付図A. 1 にシール用高温プレナムブロック及び付図A. 2 にキー結合用高温プレナムブロックのスキャナの概念図を示す。

スキャナは、プローブを固定支持し、回転、左右方向、前後方向、上下方向の各走査により三次元方向の探傷を行う。探傷中に安定した信号を得るために、リフトオフを一定に保ち自動的に探傷できる構造となっている。



## 5.2 対比試験片

対比試験片としてSTB-A1試験片を用いる。

## 5.3 探傷方法

### (1) 探傷面の状態

探傷面の表面状態は、清浄でかつ滑らかであること。

### (2) 探傷範囲

#### (i) シール用高温プレナムブロック

探傷は、付図A.3(a)に示す斜線部(シール用高温プレナムブロック上面ダウエル孔周囲)を探傷範囲とする。

#### (ii) キー結合用高温プレナムブロック

探傷は、付図A.3(b)に示す斜線部(キー結合用高温プレナムブロックの側面キー溝)を探傷範囲とする。

### (3) 渦流探傷装置の調整

#### (i) 探傷感度の調整

探傷感度は、STB-A1試験片の0.5mm幅スリットをリフトオフ0mmで探傷し、信号出力の最大がCRT、Y軸と一致するように位相を調整し、かつ、信号出力がCRT、Y軸100%になるように感度を調整する。その後、探傷時のリフトオフに応じてリフトオフが0mmの場合は13dB、0.5mmの場合は22dB、0.6mmの場合は24dB、0.7mmの場合は26dB及び0.8mmの場合は28dB感度を高める。

#### (ii) 位相角調整

位相角は、(3)の(i)により探傷感度を調整した後、PGX黒鉛材料で得られる欠陥の検出性( $S/N_{max}$ 、 $S$ :欠陥信号出力、 $N_{max}$ :最大ノイズ信号出力)が最大となるように装置の位相角調度を $-30^\circ$ 補正する。

#### (iii) 検出レベル

検出レベルは、PGX黒鉛の $N_{max}$ と $S$ との比( $S/N_{max}$ )が3となるように、 $N_{max}$ に対して3倍高いレベルとする。

(4) プローブの走査方法

プローブ走査は、渦流探傷試験装置の自動走査または手動走査により、以下のとおり実施する。

(i) シール用高温プレナムブロック

自動探傷の場合には、ブロック上面、ダウエル孔周囲の探傷面とプローブのリフトオフを、シックネスゲージ等を用いて0.5 mm～0.8mm の範囲の所定の位置に調整し、付図A.4 (a) に示すようにプローブをダウエル孔径方向 (x) へ走査して、周方向 (r) にピッチ送りを行う。走査速度は、200mm/s 以下、走査ピッチは0.7 mm以下とする。

なお、手動探傷の場合には、リフトオフ0mm、走査速度200mm/s以下、走査ピッチ1.3 mm以下とする。

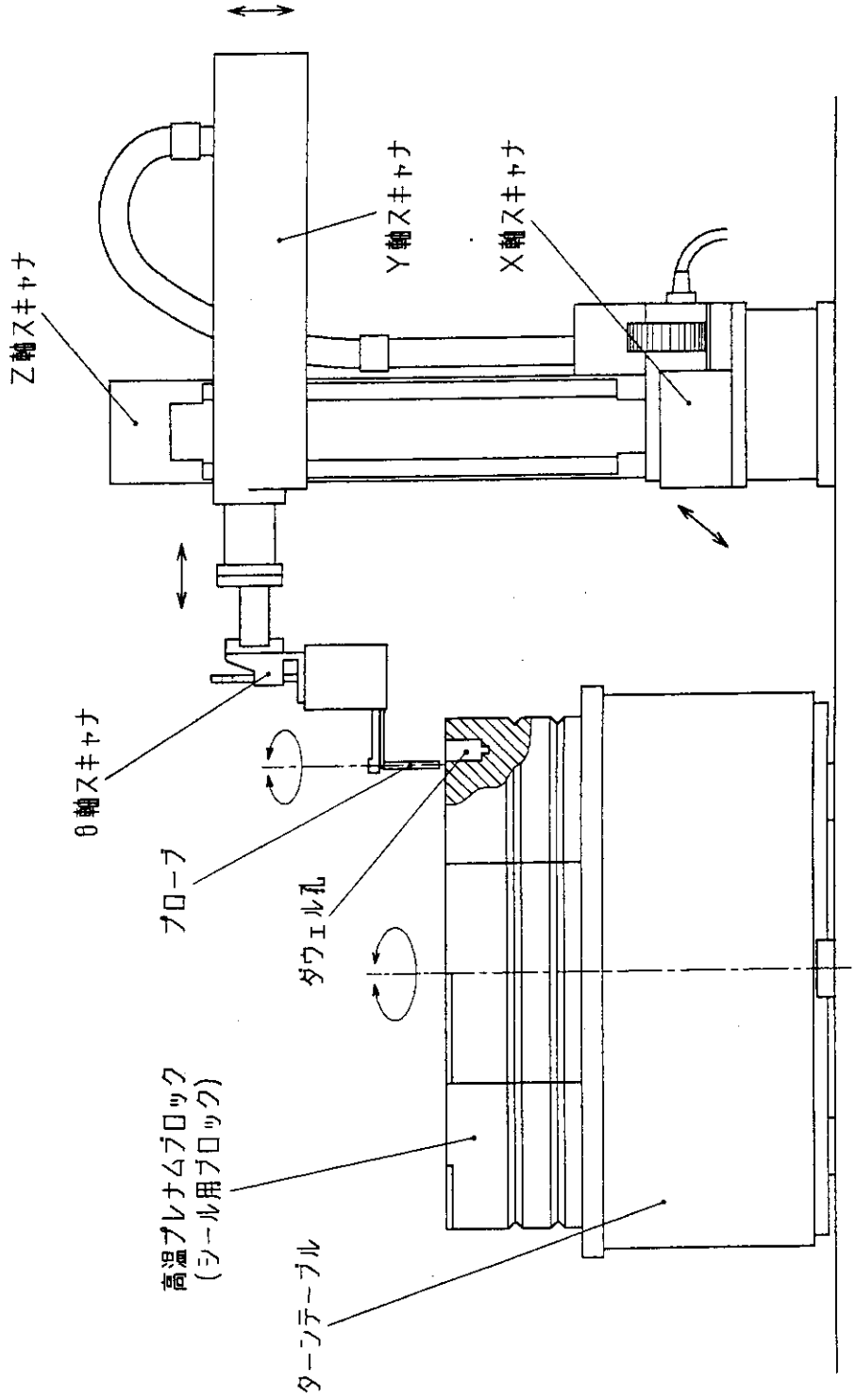
(ii) キー結合用高温プレナムブロック

自動探傷の場合には、キー溝部の探傷面とプローブのリフトオフを、シックネスゲージ等を用いて0.5mm ～0.8 mm の範囲の所定の位置に調整し、付図A.4(b)に示すようにプローブをキー溝面の長手方向 (x) へ走査し、周方向 (r) にピッチ送りを行う。走査速度は、200mm/s以下、走査ピッチは0.7mm以下とする。

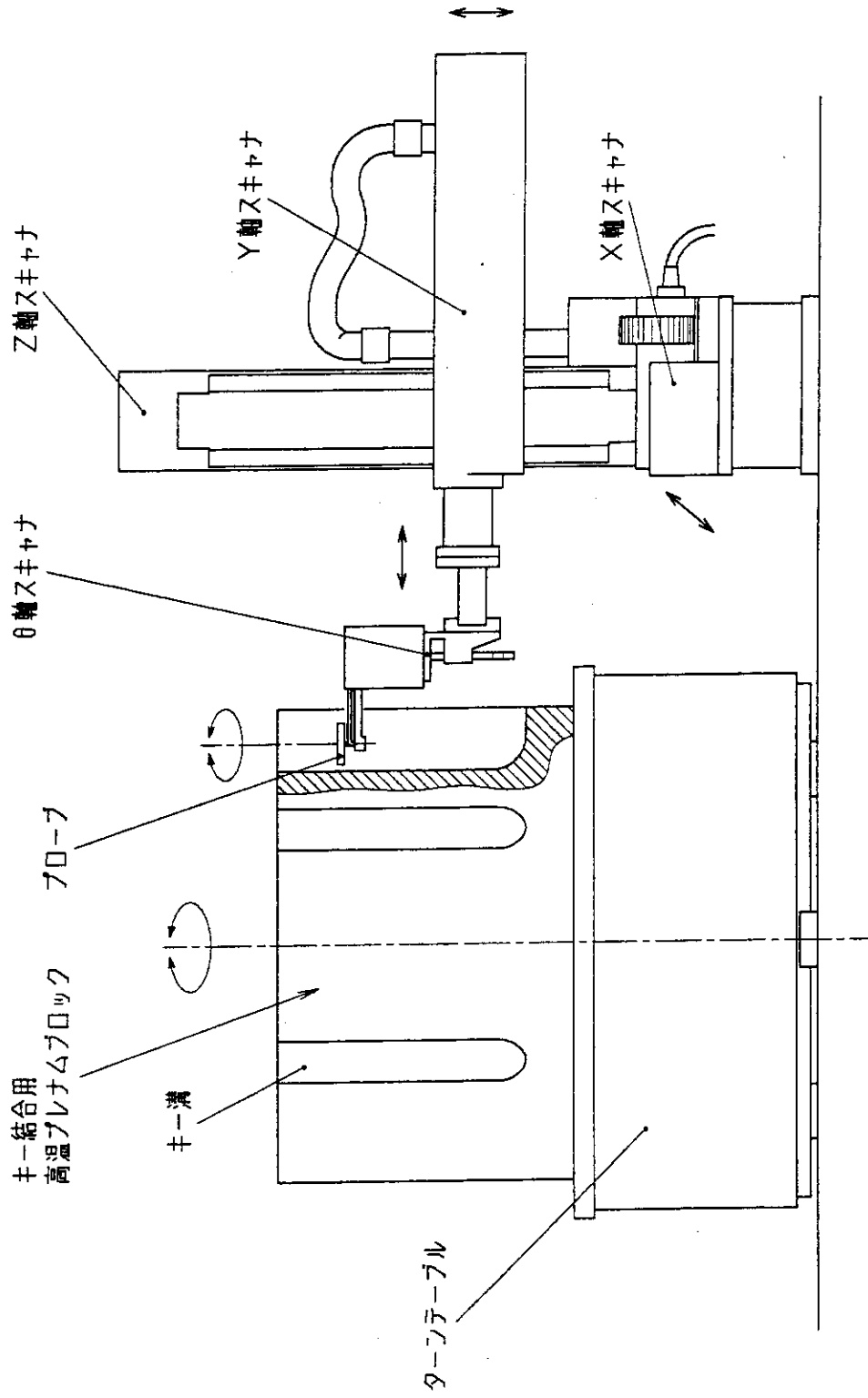
なお、手動探傷の場合には、リフトオフ0mm、走査速度200mm/s以下、走査ピッチ1.3 mm以下とする。

6. 判定基準

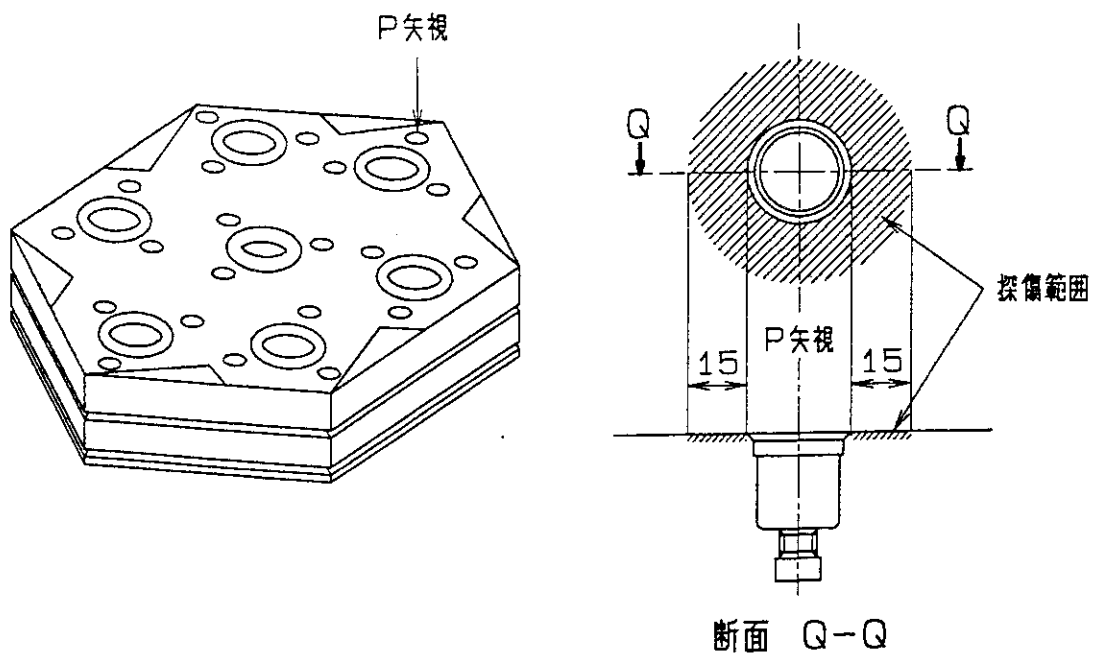
受入れ検査における渦流探傷試験の判定基準は、ノイズの高さとの比較において、有意な欠陥信号がないことをいい、具体的には検出レベル以上の欠陥信号出力 ( $S/N_{max.} \geq 3$ ) が検出されないこと。



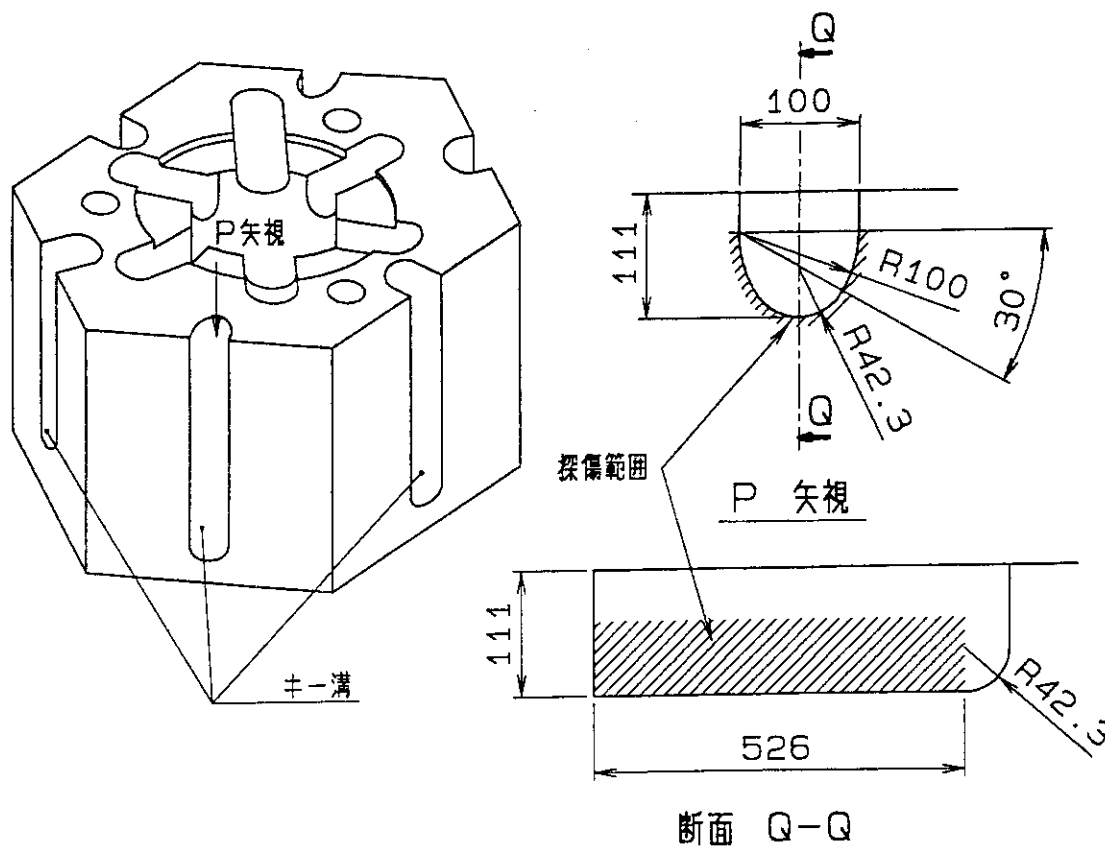
付図A.1 シール用高温プレナムブロックのスキャナの概念図



付図A.2 キー結合用高温プラチナムブロックのスキャナ概念図

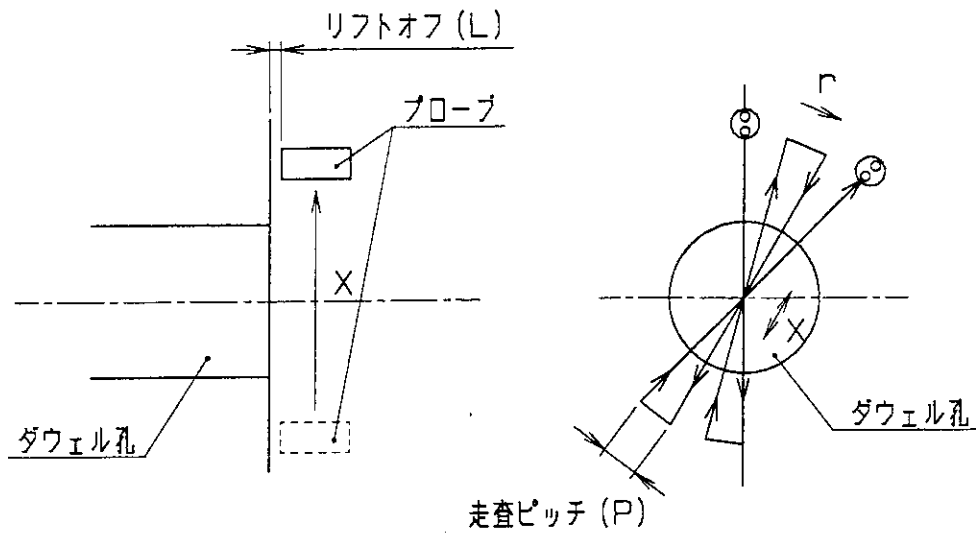


(a) シール用高温プレナムブロック

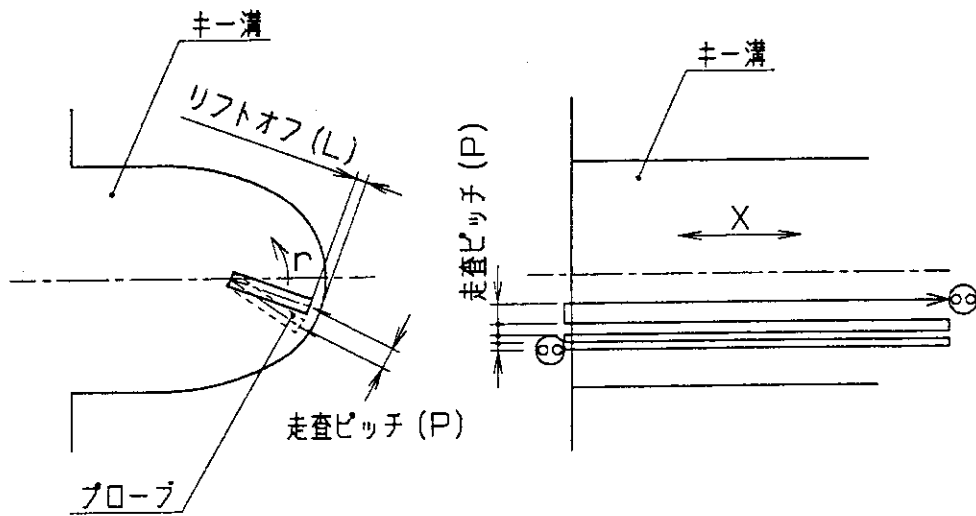


(b) キー結合用高温プレナムブロック

付図A.3 キー結合用高温プレナムブロックとシール用高温プレナムブロックの探傷範囲



(a) シール用高温プレナムブロック



(b) キー結合用高温プレナムブロック

付図A.4 シール用高温プレナムブロックとキー結合用高温プレナムブロックのプローブ走査方法