

本資料は 年 月 日付けで登録区分、  
変更する。2001. 6. 6

[技術情報室]

# 高速増殖炉用燃料被覆管の冷間加工度測定法 の開発(第3報)

Investigation for Nondestructive Testing of Cold Work  
Percentages in Type 316 Stainless Steel. (III)

1979年3月

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2001

高速増殖炉用燃料被覆管の冷間加工度測定法の開発 (第3報)

Investigation for Nondestructive Testing of Cold Work

Percentages in Type 316 Stainless Steel. (III)

実施責任者 三 浦 信\*

報 告 者 佐 藤 政 一\*

五十嵐 幸\*

上 村 英 昭\*

期 間 1978年4月1日～1978年10月31日

目 的 高速増殖炉用燃料被覆管の冷間加工度の非破壊検査測定技術開発を目的とする。

要 旨 第2報に引き続きSUS316オーステナイト系ステンレス鋼の冷間加工度を残留磁気量測定によって非破壊的に評価する方法の開発を行なった。前報では、冷間加工度を正確にコントロールできる板状試料を用いて加工度と残留磁気量の間により相関が得られた。本報告は、実用化を目的として、試作「もんじゅ」燃料被覆管の冷間加工度を磁気法で測定した結果について行うものである。

また、標準試料として被覆管の室温における引張材の使用を試みた。X線によるマルテンサイトの定量は第2報で使用した試料により行ない公称加工度との比較を行なった。これらの試験の結果、同一の冷間加工度でも製造条件が異なれば残留磁気量も変化することがわかった。その大きな因子は結晶粒度と硬さが考えられる。すなわち残留磁気量は同一加工度でも結晶粒度が大きくなることにより増加し、硬くなることによっても増えていく傾向を示した。加工マルテンサイトのX線相対強度は冷間加工度が大きくなるに伴って増加する傾向を示した。集合組織については体心正方(200)面が圧延面に沿って配向していることがわかった。

## 目 次

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 1. はじめに                           | 1  |
| 2. 試験方法                           | 2  |
| 2-1 試験片                           | 2  |
| 2-1-1 試作被覆管                       | 2  |
| 2-1-2 模擬冷間加工度試験片                  | 7  |
| 2-1-3 X線回折試験片                     | 7  |
| 2-2 測定装置                          | 9  |
| 2-3 測定方法                          | 10 |
| 2-3-1 脱磁及び着磁操作                    | 10 |
| 2-3-2 最適測定条件設定                    | 10 |
| 2-3-3 残留磁気量測定                     | 11 |
| 2-4 その他の試験                        | 11 |
| 2-4-1 結晶粒縦横比測定                    | 11 |
| 2-4-2 X線回折                        | 12 |
| 3. 試験結果及び考察                       | 13 |
| 3-1 最適条件設定試験結果                    | 13 |
| 3-2 試作被覆管の結果                      | 19 |
| 3-2-1 試作被覆管の残留磁気測定結果              | 19 |
| 3-2-2 製造条件と残留磁気測定結果について           | 45 |
| 3-3 模擬冷間加工度試験片の残留磁気測定結果           | 55 |
| 3-4 その他の試験                        | 57 |
| 3-4-1 結晶粒縦横比測定結果                  | 57 |
| 3-4-2 X線回折結果                      | 63 |
| 1) 体心正方晶(マルテンサイト)(200)の精密相対強度測定結果 | 63 |
| 2) 極点図形作成結果                       | 67 |
| 4. まとめ                            | 70 |
| 5. 参考文献                           | 72 |

## 1. はじめに

前報までにおいて板状試験片の残留磁気量と冷間加工度の関係を調らべてきたが、本報告では「もんじゅ」燃料被覆管の冷間加工度をオンラインで測定することを目的として試験を行なった。このため試験片は回転駆動装置に使用できるような管状の試験片が主に使用された。

また、本報告では、磁気法による結果と比較するためX線回折により加工マルテンサイトの定量試験も行なったが、そのための試験片としては、X線回折に都合が良い板状の試験片を前報に引き続き使用した。管状試験片は、冷間加工によって発生する加工マルテンサイトに影響を与えると考えられる諸因子すなわち熱処理温度、時間、結晶粒度および硬さを考慮した、試作燃料被覆管のうちから抜取り、試験片としたもの及び室温における引張で冷間加工を模擬した試験片の2種類とした。このように本報告は、実際の被覆管をその全長にわたって残留磁気量を測定するなど磁気法による冷間加工度測定の実用化をめざした試験を数多く行なって回転駆動装置による連続測定法の実証を目的とした。

## 2. 試験方法

### 2-1 試験片

#### 2-1-1 試作被覆管

本試験片は国内被覆管製造メーカー（S社およびK社）で、高速増殖炉「もんじゅ」炉心用被覆管の仕様に基づき47年度から49年度までに製作されたものの中から選んだ。選定の基準は冷間加工による加工マルテンサイトの発生に影響をあたえと考えられる因子、すなわち加工条件（熱処理温度、時間）結晶粒度および硬さに置き、各社各ロットから数本ずつ抜き取った。

表1にS、K社の47～49年度までの「もんじゅ」試作被覆管の製造履歴及び抜き取り数を示す。表2～表4は製造元ミルシート値を示す。S社製の試験片は47年度が3ロットとも同一加工条件であったことから、3つのロットからランダムに10本を選んだ。48年度は、ロット3より5本、49年度はロット2から5本を抜き取り、計20本とした。K社については47年度、48年度が単一ロット、49年度は5ロットで製造されているが、47年度材の熱処理温度と時間は不明であった。47年度材から10本、48年度材から5本を選んだ。49年度材は5ロットとも加工条件、結晶粒度、硬さに違いがあるが、ロット5は48年度と同一条件であるため、ロット1～ロット4から各2本計8本を抜き取った。したがってK社製は合計23本となり冷間加工度測定に用いる被覆管はS、K社合わせると43本となった。表2は各年度試作管の化学成分値を示す。また、この他に第1報<sup>1)</sup>において使用した冷間加工度を加えて製作された数本の被覆管についても同様な試験を行なった。

試料番号は管端に電気ペンによって刻記した。試料の方向を区別するために本文中では試料番号を刻記した側を「 $\mu$ 側」反対側を「反 $\mu$ 側」として表わした。

表1. 試作被覆管の製造履歴（製造元ミルシートより）

ZN841-79-20

| 項目             |                     | S 社                                       |   |   | K 社            |                |   |
|----------------|---------------------|---|---|---|----------------|----------------|---|
|                |                     | 4 7                                       | 4 8                                       | 4 9                                       | 4 7            | 4 8            | 4 9   |
| 年 度            |                     | 4 7                                       | 4 8                                       | 4 9                                       | 4 7            | 4 8            | 4 9   |
| Lot と 管 番 号    |                     | ①S2001~2153<br>②S2154~2344<br>③S2345~2500 | ①S3001~3223<br>②S3224~3342<br>③ 3343~3711 | ①S5001~5089<br>②S5090~5183<br>③S5184~5288 | K2001<br>~2363 | K3101<br>~3350 | ①K4001~4057<br>②K4058~4065<br>③K4066~4500<br>④K4501~4780<br>⑤K4781~4500 |
| 公称冷間加工度<br>〔%〕 |                     | ①20<br>②20<br>③20                         | ①21<br>②20<br>③19                         | ①20<br>②21<br>③20                         | 17.5%          | 18             | ①20 ⑤18<br>②20<br>③20<br>④20  |
| 加工条件           | 熱処理温度<br>(°C)       | ①1000<br>②1000<br>③1000                   | ①1020<br>②1020<br>③1020                   | ①1020<br>②1010<br>③1020                   | /              | 1025           | ①1125° ④1085°<br>②1125° ⑤1030°<br>③1085°                                |
|                | 時 間<br>(分)          | ① 2<br>② 2<br>③ 2                         | ① 2<br>② 2<br>③ 2                         | ① 2<br>②1.5<br>③1.5                       |                | 2              | ① 3 ④ 3<br>② 3 ⑤ 3<br>③ 3   |
| 金相試験結果         | 硬 さ<br>(荷重500g)     | ①270<br>②270<br>③272                      | ①276<br>②276<br>③275                      | ①277<br>②278<br>③266                      | 290            | 270            | ①278 ④283~287<br>②274~283 ⑤280<br>③271~287                              |
|                | 結 晶 粒 度<br>(ASTM #) | ①8.0<br>②8.0<br>③8.0                      | ①7.5<br>②7.5<br>③7.5                      | ①7.5<br>②7.5<br>③7.5                      | 9.0            | 9.5            | ①8.0~8.3 ④8.5~9.0<br>②8.0~8.3 ⑤9.3<br>③9.0                              |
| 抜 取 本 数<br>(本) |                     | 10  | Lot3より<br>5本                              | Lot2より<br>5本                              | 10本            | 5本             | Lot1: 2本<br>Lot2: 2本<br>Lot3: 2本<br>Lot4: 2本<br>計8本                     |

合 計 43本

表2 試作被覆管の化学成分値 (S社製造元ミルシート)

ZN841-79-20

47年度

| 冷間加工<br>度 (%) | 加工条件      |             | 化 学 成 分 % |      |      |       |       |       |       |      |      |        |        |       |       |      |           |    |       | ASTM | HV  |     |
|---------------|-----------|-------------|-----------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|--------|--------|-------|-------|------|-----------|----|-------|------|-----|-----|
|               | 温度<br>(°) | 時間<br>(min) | C         | Si   | Mn   | P     | S     | Ni    | Cr    | Mo   | Co   | B      | N      | Al    | As    | Cv   | Nb<br>+Ta | Ti | V     |      |     | O   |
| 20            | 1,000     | 2           | 0.053     | 0.56 | 1.75 | 0.008 | 0.008 | 13.00 | 17.00 | 2.48 | 0.02 | 0.0002 | 0.0078 | 0.001 | 0.002 | 0.23 | 0.002     | /  | 0.015 | /    | 8.0 | 271 |
|               |           |             | 0.053     | 0.56 | 1.75 | 0.008 | 0.008 | 13.10 | 17.00 | 2.48 | 0.02 | 0.0002 | 0.0078 | 0.001 | 0.002 | 0.23 | 0.002     | /  | 0.015 | /    |     |     |

48年度

| 冷間加工<br>度 (%) | 加工条件      |             | 化 学 成 分 % |      |      |       |       |       |       |      |      |        |        |        |       |      |           |       |       | ASTM   | HV  |     |
|---------------|-----------|-------------|-----------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|--------|--------|--------|-------|------|-----------|-------|-------|--------|-----|-----|
|               | 温度<br>(°) | 時間<br>(min) | C         | Si   | Mn   | P     | S     | Ni    | Cr    | Mo   | Co   | B      | N      | Al     | As    | Cv   | Nb<br>+Ta | Ti    | V     |        |     | O   |
| 19            | 1,020     | 2           | 0.051     | 0.51 | 1.80 | 0.021 | 0.007 | 12.85 | 16.85 | 2.56 | 0.01 | 0.0001 | 0.0128 | 0.0010 | 0.002 | 0.13 | 0.002     | 0.002 | 0.001 | 0.0049 | 7.5 | 275 |
|               |           |             | 0.052     | 0.52 | 1.80 | 0.021 | 0.007 | 12.89 | 16.95 | 2.56 | 0.01 | 0.0001 | 0.0126 | 0.0010 | 0.002 | 0.13 | 0.002     | 0.002 | 0.001 | 0.0053 |     |     |

49年度

| 冷間加工<br>度 (%) | 加工条件      |             | 化 学 成 分 % |      |      |       |       |       |       |      |      |        |        |       |       |      |           |       |       | ASTM   | HV  |     |
|---------------|-----------|-------------|-----------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|--------|--------|-------|-------|------|-----------|-------|-------|--------|-----|-----|
|               | 温度<br>(°) | 時間<br>(min) | C         | Si   | Mn   | P     | S     | Ni    | Cr    | Mo   | Co   | B      | N      | Al    | As    | Cv   | Nb<br>+Ta | Ti    | V     |        |     | O   |
| 21            | 1,010     | 1.5         | 0.043     | 0.50 | 1.53 | 0.019 | 0.008 | 13.10 | 17.60 | 2.50 | 0.01 | 0.0001 | 0.0078 | 0.011 | 0.002 | 0.08 | 0.002     | 0.002 | 0.002 | 0.0015 | 7.5 | 278 |



表3 試作被覆管の化学成分値 (K社製造元ミルシート)

47年度

| 冷間加工<br>度 (%) | 加工条件      |             | 化 学 成 分 % |      |      |       |       |       |       |      |       |        |       |       |       |       |           |       |   | ASTM | HV  |     |
|---------------|-----------|-------------|-----------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|---|------|-----|-----|
|               | 温度<br>(°) | 時間<br>(min) | C         | Si   | Mn   | P     | S     | Ni    | Cr    | Mo   | Co    | B      | N     | Al    | As    | Cv    | Nb<br>+Ta | Ti    | V |      |     | O   |
| 17.5          | 1,020     |             | 0.05      | 0.67 | 1.63 | 0.010 | 0.006 | 13.81 | 17.52 | 2.24 | 0.037 | 0.0003 | 0.007 | 0.005 | 0.001 | <0.05 | <0.05     | <0.05 |   |      | 9.0 | 290 |

48年度

| 冷間加工<br>度 (%) | 加工条件      |             | 化 学 成 分 % |      |      |       |       |       |       |      |      |        |       |       |       |      |           |       |      | ASTM   | HV  |     |
|---------------|-----------|-------------|-----------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|--------|-------|-------|-------|------|-----------|-------|------|--------|-----|-----|
|               | 温度<br>(°) | 時間<br>(min) | C         | Si   | Mn   | P     | S     | Ni    | Cr    | Mo   | Co   | B      | N     | Al    | As    | Cv   | Nb<br>+Ta | Ti    | V    |        |     | O   |
| 18            | 1,025     | 2           | 0.048     | 0.67 | 1.66 | 0.011 | 0.005 | 13.87 | 17.48 | 2.25 | 0.04 | 0.0003 | 0.007 | 0.004 | 0.002 | 0.01 | 0.015     | 0.004 | 0.03 | 0.0036 | 9.5 | 270 |
|               |           |             | 0.051     | 0.67 | 1.65 | 0.011 | 0.005 | 13.87 | 17.48 | 2.25 | 0.04 | 0.0003 | 0.007 | 0.004 | 0.002 | 0.01 | 0.015     | 0.004 | 0.03 | 0.0036 |     |     |

49年度 (Lot 1)

| 冷間加工<br>度 (%) | 加工条件      |             | 化 学 成 分 % |      |      |       |       |       |       |      |      |        |        |       |       |       |           |       |       | ASTM   | HV          |     |
|---------------|-----------|-------------|-----------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|--------|--------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|--------|-------------|-----|
|               | 温度<br>(°) | 時間<br>(min) | C         | Si   | Mn   | P     | S     | Ni    | Cr    | Mo   | Co   | B      | N      | Al    | As    | Cv    | Nb<br>+Ta | Ti    | V     |        |             | O   |
| 20            | 1,125     | 3           | 0.056     | 0.49 | 1.56 | 0.010 | 0.006 | 13.68 | 16.78 | 2.49 | 0.08 | 0.0008 | 0.0064 | 0.005 | 0.002 | 0.028 | 0.01      | 0.005 | 0.027 | 0.0019 | 8.0<br>~8.3 | 278 |

1  
G  
1

表4 試作被覆管の化学成分値 (K社製造元ミルシート)

ZN841-79-20

49年度 (Lot 2)

| 冷間加工<br>度 (%) | 加工条件      |             | 化 学 成 分 % |     |     |      |      |      |      |     |     |       |       |      |      |      |           |      |      | ASTM  | HV          |             |
|---------------|-----------|-------------|-----------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|-------|-------|------|------|------|-----------|------|------|-------|-------------|-------------|
|               | 温度<br>(°) | 時間<br>(min) | C         | Si  | Mn  | P    | S    | Ni   | Cr   | Mo  | Co  | B     | N     | Al   | As   | Cv   | Nb<br>+Ta | Ti   | V    |       |             | O           |
| 20            | 1,125     | 3           | 0057      | 048 | 180 | 0004 | 0005 | 1344 | 1690 | 241 | 002 | 00008 | 00054 | 0014 | 0002 | 0022 | 001       | 0027 | 0005 | 00018 | 8.0<br>~8.3 | 274<br>~283 |

49年度 (Lot 3)

| 冷間加工<br>度 (%) | 加工条件      |             | 化 学 成 分 % |     |     |      |      |      |      |     |     |       |       |      |      |      |           |      |      | ASTM  | HV  |             |
|---------------|-----------|-------------|-----------|-----|-----|------|------|------|------|-----|-----|-------|-------|------|------|------|-----------|------|------|-------|-----|-------------|
|               | 温度<br>(°) | 時間<br>(min) | C         | Si  | Mn  | P    | S    | Ni   | Cr   | Mo  | Co  | B     | N     | Al   | As   | Cv   | Nb<br>+Ta | Ti   | V    |       |     | O           |
| 20            | 1,085     | 3           | 0058      | 048 | 179 | 0004 | 0005 | 1381 | 1688 | 241 | 002 | 00007 | 00047 | 0015 | 0002 | 0022 | 001       | 0024 | 0005 | 00016 | 9.0 | 271<br>~287 |

49年度 (Lot 4)

| 冷間加工<br>度 (%) | 加工条件      |             | 化 学 成 分 % |     |     |     |      |      |      |     |     |       |       |      |      |      |           |      |      | ASTM | HV          |             |
|---------------|-----------|-------------|-----------|-----|-----|-----|------|------|------|-----|-----|-------|-------|------|------|------|-----------|------|------|------|-------------|-------------|
|               | 温度<br>(°) | 時間<br>(min) | C         | Si  | Mn  | P   | S    | Ni   | Cr   | Mo  | Co  | B     | N     | Al   | As   | Cv   | Nb<br>+Ta | Ti   | V    |      |             | O           |
| 20            | 1,085     | 3           | 0057      | 049 | 153 | 001 | 0006 | 1351 | 1681 | 250 | 008 | 00004 | 00067 | 0005 | 0002 | 0027 | 001       | 0007 | 0026 | 0002 | 8.5<br>~9.0 | 283<br>~287 |

## 2-1-2 模擬冷間加工試験片

一般にこれまで各年度に試作された被覆管の公称冷間加工度の値は接近しているため、本試験のように加工度と残留磁気量の関係を詳しく調べるには水準が不足である。これを補うために被覆管に引張荷重をかけ、その伸びの変形によって冷間を加工模擬することを試みた。

引張による変形は被覆管加工時と方向が異なるけれども磁気法による冷間加工度測定では加工方向の影響は少ないと考えられるので充分使用可能であろうと思われた。試験片にはS社の48年度試作管を用いた。この試験片の化学成分、硬さ、結晶粒度は表1および表2に示されているとおりである。模擬加工は真空中で焼鈍を行ってから引張試験機で引張ったものと焼鈍操作抜きで引張を加えたものの2種類とした。焼鈍は被覆管製造工程にない温度1,020℃、保持時間15分で行なった。2種類の模擬加工方法を採用した理由は焼鈍材の引張だけでは30%以上の伸びを期待できなかったため、冷間加工を受けている受け入れ材に引張りによる変形分を付加することで高い加工率を持つものに相当する試験片を得るためである。引張は被覆管がくびれを起さないよう最大抗張力を下廻る荷重に制限した。模擬加工における変形量は軸方向伸びにより表現し、ここでは被覆管製造時の冷間加工度と同等に扱った。表5にはこの模擬試験片の加工履歴を示す。

## 2-1-3 X線回折試験片

第2報<sup>2)</sup>に引き続き板状試験片を用いて冷間加工後のオーステナイト(面心立方)とマルテンサイト(体心正方)の同定のためX線回折試験を行なった。試験片は冷間加工度0, 10, 20, 30, 50(%)の5種類を用いた。この試験片は回折試料台にアルミニウム製または黄銅製の試料支持板に固定してセットするため、支持板の枠に入るように原材料から所定の寸法に高速度カッターで加工した。試料はコンパウンドで支持板に固定した。

表5 模 擬 試 験 片

| 試験片<br>No. | 素 材       | 模擬冷間加工度値<br>$\frac{l_0-l}{l} \times 100$ [%] | 試験片のび<br>[%] | 引張荷重<br>[kg] |
|------------|-----------|--|--------------|--------------|
| 3838 - 4   | 熱 処 理 材   | 1 8.0 4                                      | 2 2.5 0      | 4 0 0        |
| - 5        | 熱 処 理 材   | 7.8 0  | 1 0.2 0      | 3 1 0        |
| - 6        | 熱 処 理 材   | 1.4 4  | 2.4          | 2 2 0        |
| - 7        | 熱 処 理 材   | 1 9.1 2                                      | 2 5          | 4 1 0        |
| - 8        | 熱 処 理 材   | 5.7 2  | 7            | 2 8 0        |
| - 9        | 冷 間 加 工 材 | 5.8 4  | 7.8          | 7 0 0        |
| -10        | 冷 間 加 工 材 | 1 8.3 6                                      | 1 7.4        | 7 0 3        |
| 3839 - 4   | 熱 処 理 材   | 1 4.2 4                                      | 1 7.7 5      | 3 7 0        |
| - 5        | 熱 処 理 材   | 3.3 2  | 4.4          | 2 5 0        |
| - 6        | 熱 処 理 材   | 1 1.1 6                                      | 1 5.4        | 3 5 0        |
| - 7        | 熱 処 理 材   | 2 3.5 6                                      | 3 0.4        | 4 3 0        |
| - 8        | 熱 処 理 材   | 3 4.5 6                                      | 4 4.6 0      | 4 6 0        |
| - 9        | 冷 間 加 工 材 | 9.0 4  | 1 2.2        | 4 8 5        |
| -10        | 冷 間 加 工 材 | 1 7.4 0                                      | 1 9.0        | 6 9 0        |

2-2 測定装置

a) 残留磁気検出器

高感度磁気検出器

三島光産社製

Model 123A

AC測定レンジ使用

出力端子：Recorder out

フィルター

NF回路設計ブロック社製

Low Pass : 5Hz 使用

記録計

理化電機社製

Model XB-34型

記録紙送り：120mm/min

設定レンジ：50mv/FS

脱磁-着磁装置

特殊塗料社製

脱磁コイル：130V

着磁コイル：7.15V(3,000G)

駆動装置

三恭製作所製

非磁性材質

管状試験片回転数：460~2,200[rpm]

b) 金相試験用電解研磨装置

APPARATUS FOR MICROSTRUCTURAL ANALYSIS.

BUEHLER LTD.

c) 模擬試験片製作装置

引張試験機

Instron 社製

Model 1123

真空熱処理炉

協和科学社製

熱処理温度：1,020°C

霧囲気時間：15分

d) X線回折装置

ガイガーフレックス

理学電機社製

Cat No2028

半自動極点図形装置

理学電機社製

Cat No2456A1

極点図形測定コントローラ

理学電機社製

Cat No5257A1

極点処理用電子計算器

YHP社製

パーソナルコンピュータ Model 30

X-Yプロッタ

e) 結晶粒縦横比測定装置

イメージ・アナライザ

Boush & Lonb 社製

視野大きさ：50mm 正方

## 2-3 測定方法

### 2-3-1 脱磁及び着磁操作

残留磁気量測定に先立って次のような操作を試験片に行なった。

#### a. 脱磁操作

試験片を強力な交番磁界中に通すことにより、内部に生成されている加工マルテンサイトの磁区方向をランダムにし、見かけ上残留磁気がない状態にする。

#### b. 着磁操作

着磁装置の着磁コイル鉄心ギャップ内に3,000Gの直流磁界を発生させ試験片を回転させずに直進送りをして着磁させた。

### 2-3-2 最適測定条件設定

第1報をもとに動的測定方法は実用化を考慮して再度検討された。基本的には微少残留磁気を測定することから外部の磁氣的雑音をシールドすることが重要であった。このため第1にそれまで使用していた駆動装置の鋼製ボールベアリングを非磁性材料のルーロンに変えた。第2に測定器等からの磁氣的影響を考慮して検出部付近をパーマロイで囲い磁気シールドをほどこした。測定方法には第1報で示したように試験片全長にわたって検出器の直流出力をレコーダに記録し、バックノイズ（地磁気等）と測定値との差から残留磁気量を得る方法と同じ検出器出力から被覆管回転に伴う周期的な磁気の変動分だけを取り出す2種類の方法がある。

本試験においては、磁気法により実際の被覆管全長にわたる冷間加工度測定を主目的としたことから測定は前述の直流出力をレコーダに記録する方法により行なった。このような測定を精度良く行なり最適条件をみつけるため以下で述べるように2つの試験を実施した。

#### a. 最適フィルター値設定試験

この試験は検出されるいかなる残留磁気量分布においても最適の状態での測定できるような条件を探ることが目的であることから、S社の47年度「もんじゅ」試作被覆管の中から次の3本を選び出し試験に使用した。すなわち①残留磁気量が一定レベルとして検出されるもの、②残留磁気量が周期をもって脈動するものそして③冷間加工の不均一と考えられる特異なピークを生じるものである。試験は着磁力を第1報で示した飽和領域である

3,000 G一定とし回転数を超音波探傷試験時と同じ1,500 rpmと一定にしてフィルター値を1 Hz～50 HzまでのLow passモード（以下LPと略す）で変化させレコーダに記録される直流出力の平均レベル等を調べ最適点をみつけることで行なった。

#### b. 最適回転数設定試験

この試験に使う駆動装置は本計画の特徴を考慮して非磁性材質のアルミニウムで製作された回転送り機構を持っている。（駆動装置は第1報に写真で示したものである。）

前述の如く残留磁気量は回転送り状態で被覆管全長にわたって測定されることから、被覆管の回転数が検出感度等に影響を及ぼすことが考えられたので回転数を1,500 rpmを中心に460～2,200 rpmまで変化させレコーダへの記録結果を比較した。そして記録結果から残留磁気量の記録に適する回転数範囲を調べた。

### 2-3-3 残留磁気量測定

2-3-2で示した試験方法により磁気法による冷間加工度測定最適条件を回転数、フィルターのLp周波数等について探した。ここではその成果を用いて各社各年度試作の中から採取した被覆管についてその冷間加工度測定を行なった試験中に注意しなければならなかったことは試験片から発生する残留磁気が極めて微量であることから測定損失を少なくするためプローブを可能な限り被覆管に近づけること、そして試験片表面に磁性等を有する付着物がついていないかを確認した後測定を行なうことであった。

## 2-4 その他の試験

### 2-4-1 結晶粒縦横比測定

#### a) 金相試験

冷間加工に伴う被覆管の金属組織変化を観察した。試料は各製造メーカ、各ロットごとに管端の10 mmと、製造メーカにおける冷間加工の不均一と考えられる残留磁気量の特異的なピークを生じた部分の2箇所から採取した。試験片は高速度セッターで切り出され、50%硝酸溶液にて縦断面を電解エッチングした後、観察及び写真撮影を行なった。金相写真は400倍一定とし主に結晶粒形状について観察した。

#### b) 結晶粒縦横比測定

冷間加工により試験片内部の結晶粒は圧延方向に伸ばされている。ここではこの伸ばされた結晶粒の縦横比を測定し、冷間加工度との相関を求めた。又被覆管全長にわたる残留磁気測定により明らかになった特異的なピークをもつ試験片についてもその部分を切り出し、金相写真上から結晶粒径比を測定し、均一に加工されていると考えられる部分（残留磁気に変化を生じていない部分）と比較した。測定には第2報で用いたと同じ画像解析装置を使用して400倍の縦断面金相写真上の圧延方向と圧延直角方向の結晶粒径比を求めた。

## 2-4-2 X線回折

第3報では前報に引き続きオーステナイト相（面心立方）とマルテンサイト相（体心正方）の同定を行なうためX線回折試験を行なった。管球は2次X線の発生がCuより少ないMoを用い、 $K\alpha$ 線が用いた。回折図形は $2\theta = 17^\circ \sim 90^\circ$ の範囲を $2^\circ/1$ 分で測定し、マルテンサイト相の(200)が現われると予想される。 $2\theta = 27.5^\circ \sim 29.5^\circ$ の範囲は $1^\circ/8$ 分で精査した。オーステナイト相の各格子面は回折強度が強くあらわれるがマルテンサイト相は極微量しかないので体心正方(200)はステップ・スキャンニング（定時計数法）で再度回折が行なった。回折条件はステップ巾 $0.05^\circ$ 計数時間40secである。又オーステナイト相とマルテンサイト相の集合組織を観察することで圧延されたことによる結晶粒格子の配向を知ることができるので極点試料台を用いて極点図を作成した。回折条件は管電圧〔オーステナイト(220)：40KV，マルテンサイト(200)：35KV〕管電流〔オーステナイト(220)：30mA，マルテンサイト(200)：15mA〕とし、格子面移動角 $\alpha = 20^\circ \sim 90^\circ$ の $5^\circ$ 毎に、格子面回転 $\beta = 0^\circ \sim 360^\circ$ を $5^\circ$ 毎として行なった。これらのデータ処理には、小型計算機とX-Yプロッタを用いた。



### 3. 試験結果及び考察

#### 3-1 最適条件設定試験結果

##### a. 最適フィルター値設定試験結果

残留磁気量の分布形態が異なる3本の試作被覆管のフィルター試験を実施した。図1～3の一番上のチャートに3本の試作被覆管の原信号波形を代表例として示す。又ローパス5 Hz (以下LP 5 Hz) とローパス1 Hz (以下LP 1 Hz) のフィルター使用した時の原信号波形の推移を示す。横軸は被覆管の長さを示しており、縦軸は残留磁気量を示している。

図1～3に書き込まれた数値は2本の補助線間隔すなわち残留磁気量を示している。LP 50 Hz～LP 10 Hzを使用した場合は原信号波形とかわらない結果となったため図に示されていない。LP 5 Hz とLP 1 Hzでも残留磁気量が $10^{-2}$  mG程度しか変動しなかった。全体的にLP 5 Hzの場合の信号波形が原信号にくらべて小さい脈動成分がかなりカットされており、LP 1 Hzでは管端部分の急激な立ち上り部の磁気量レベルが原信号にくらべてやや低く検出される傾向であった。またLP 1 Hz信号はLP 5 Hz信号と比較してよりなされていき細かな信号が失われてしまう恐れがある。以上これらのことを総合して判断すると、原信号の余分な脈動成分をカットし、管端部分の立ち上りにも影響がなく雑音レベルも抑えられるLP 5 Hzのフィルター条件を用いた。

##### b. 最適回転数試験結果

図4に試験片を460～2,200 rpmまで変化させて回転させた時の検出される磁気量をチャートに記録し波形の変動と回転数との関係を求めた結果を示す。図の横軸は回転数 (rpm) で縦軸はその回転数において検出された残留磁気量である。ここではフィルター値設定試験で使用したと同じ3本の被覆管を使用して残留磁気量の最大・最小値の回転数による変化を調べた。図より明らかなように試験片S 2 2 2 0-3は1100 rpm以上の回転数で検出される磁気量 (脈動分の上限, 下限値の差) が低下していく傾向にあった。これは図2からも明らかなようにS 2 2 2 0-3の最大と最小値は管全長にわたるうねりの山と谷に夫々相当していることから回転数の増加により両者の繰り返し速度が速くなり3-1, aで設定したフィルター値を越える周波数成分を持ったか、レコーダの応答速度を越えたかのどちらかに原因するものと考えられる。しかし実際問題として回転数によって変化する磁気量の変動分は検出器の分解能 $10^{-2}$  mG以下であることから大きな影響はないと考える。他の2本の試験片については回転数にかかわらず磁気量がほぼ一定のレベルであった。これらの結果より試験片をかなり的高速で回転させても検出される磁気量は大きな変化をうけないことがわかったので今回は超音波探傷試験等で用いられている1500 rpmの回転数を用いることにした。図5に1,500 rpm時の管状試験片の残留磁気測定チャート例を示す。図中の数字は検出される残留磁気量の最大値付近と最小値付近の値である。

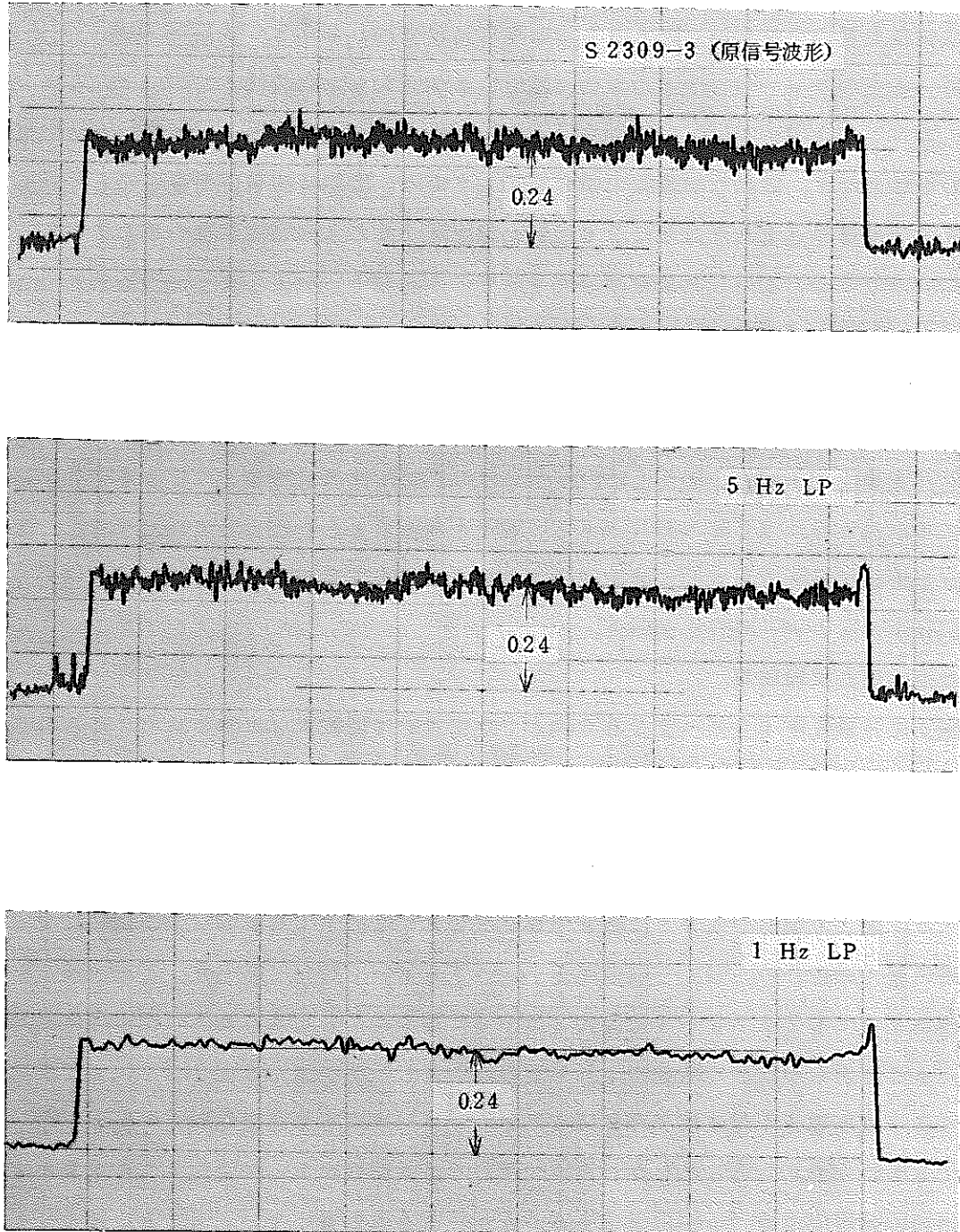


図1 残留磁気量が一定レベルとして検出される試作被覆管の  
フィルター試験結果

10 cm

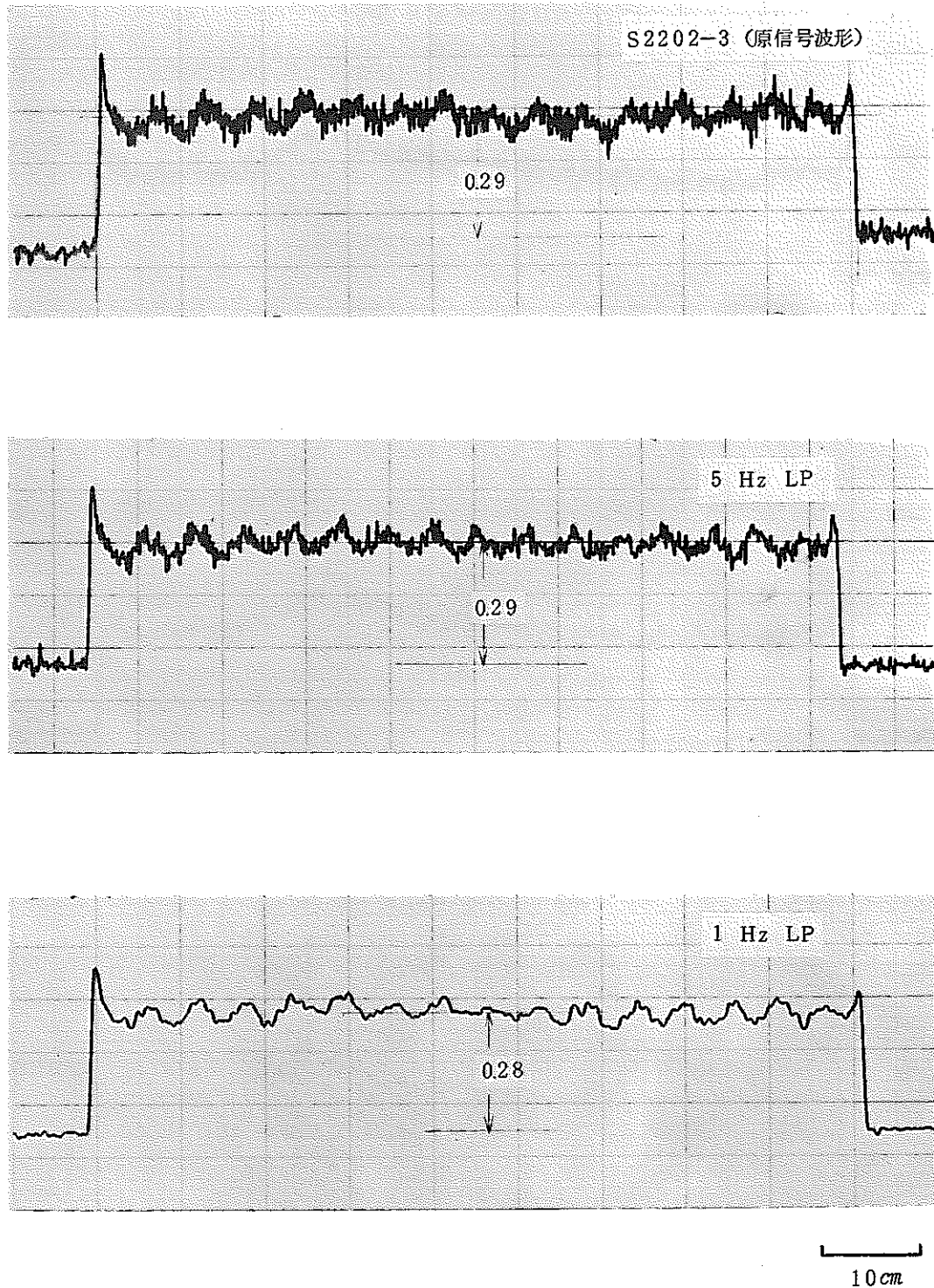


図2 残留磁気量が周期をもって脈動する試作被覆管の  
フィルター試験結果

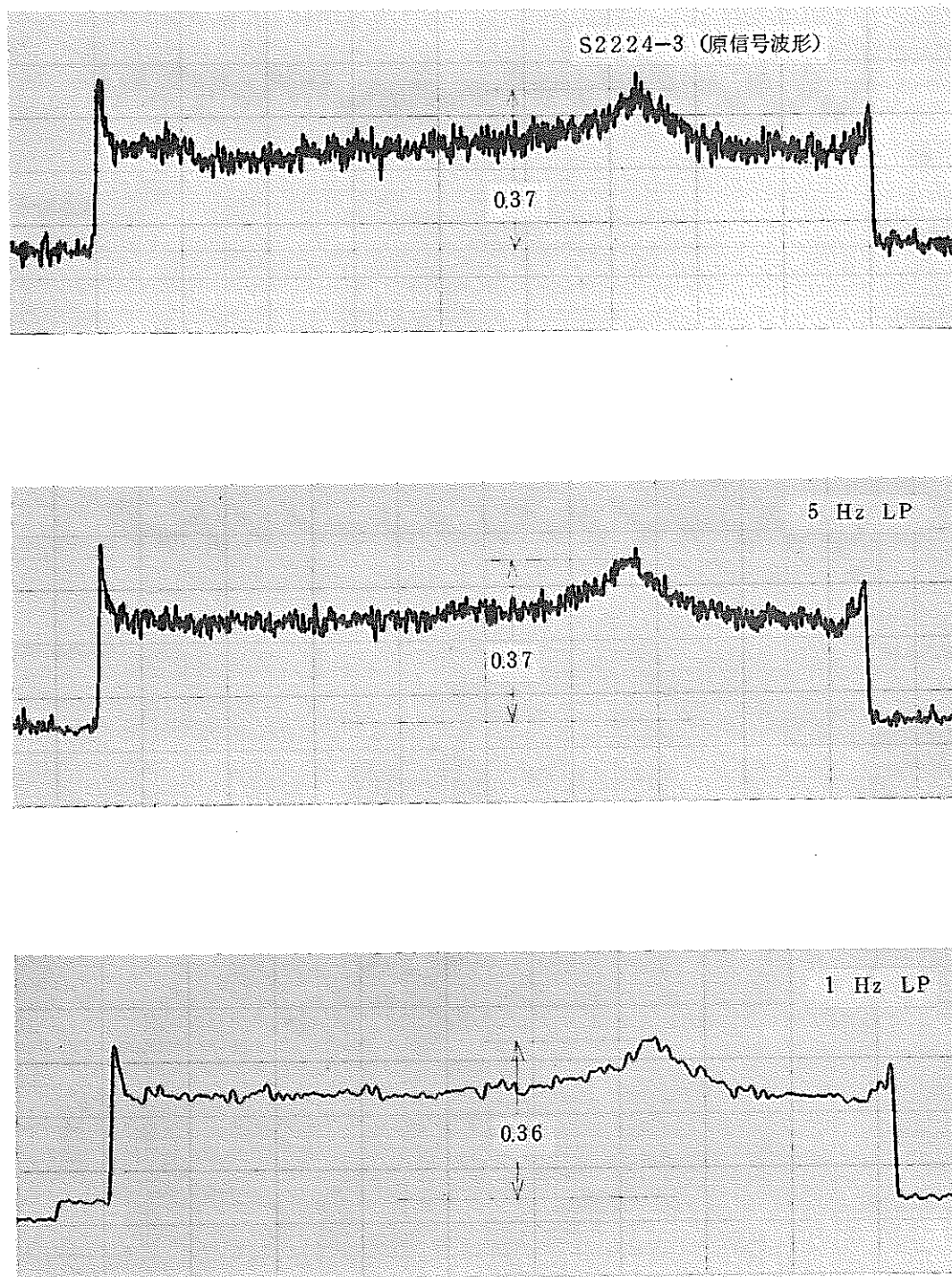


図3 残留磁気量に特異なピークを生じる試作被覆管の  
フィルター試験結果

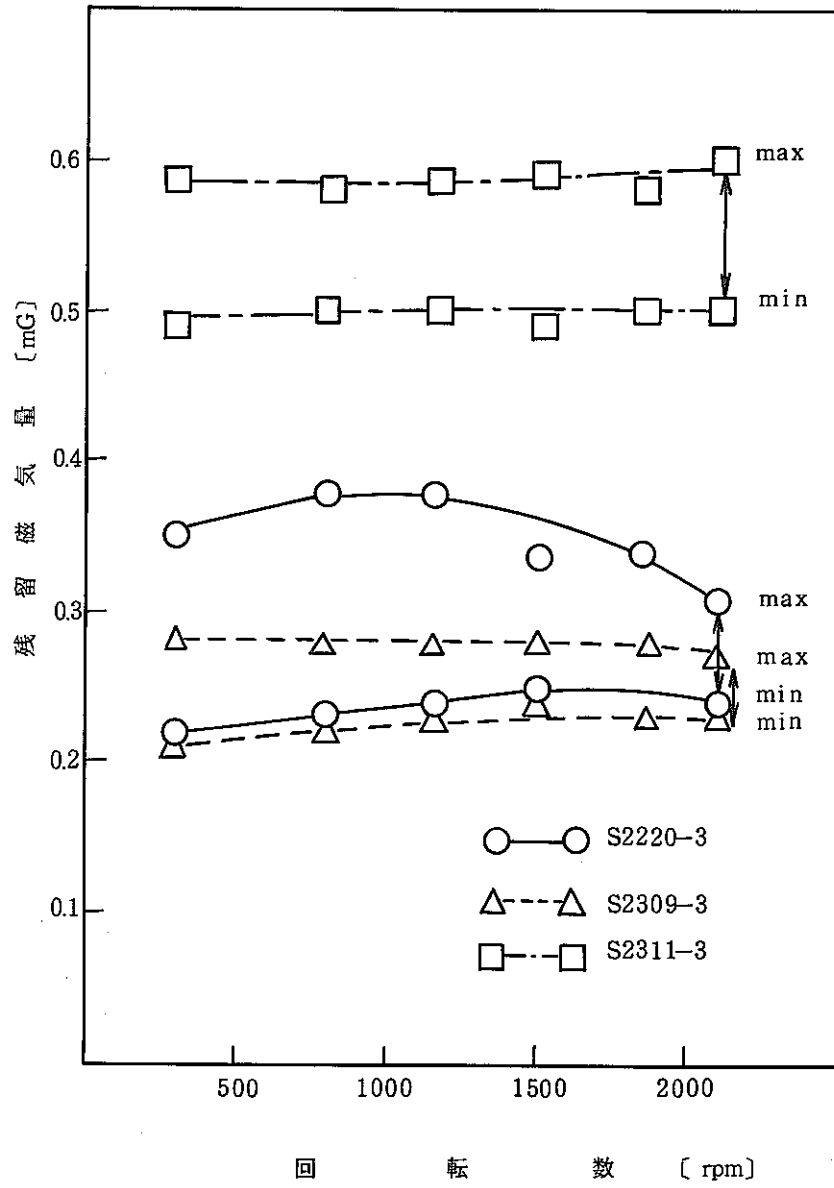
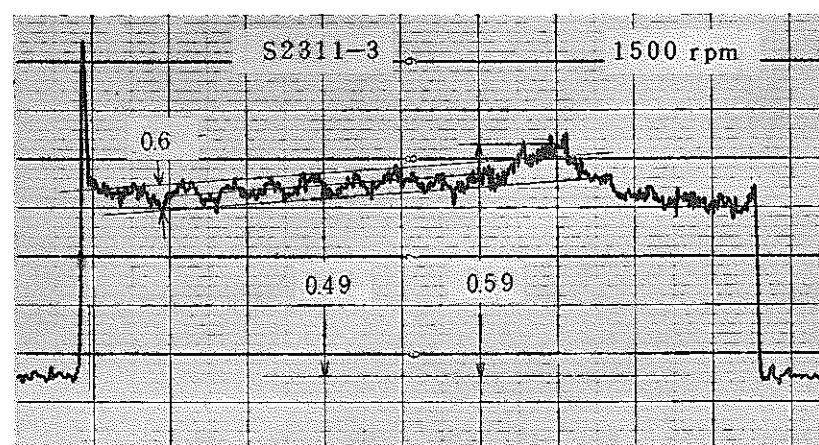
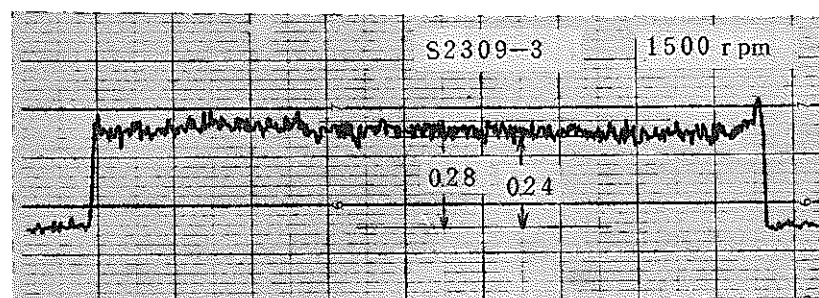
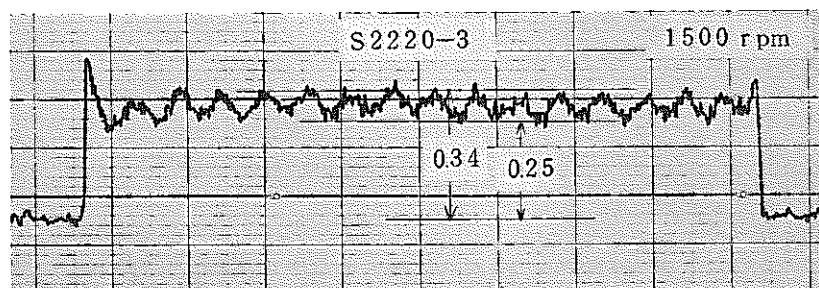


図4 回転数試験結果



単位 [mG]

図5 1500 [rpm] 時の管状試験片の残留磁気量

### 3-2 試作被覆管の結果

#### 3-2-1 試作被覆管の残留磁気測定結果

試験片は内部の磁気を打ち消す脱磁工程を済ませ、磁気量の飽和領域である 3,000 G の磁界中において磁化させ残留磁気測定を行なった。図 6 に第 1 報で使用した冷間加工度をかえて製造された試作被覆管（以下 PCW と略す）の今回の試験方法において測定された残留磁気量値を示す。PCW の公称冷間加工度は 0, 10, 20, 30（%）の 4 種類である。図より明らかなように同一加工度とされている 3 本の試作被覆管の検出される残留磁気量はかなりの範囲に分布していた。公称冷間加工度 0, 10（%）の残留磁気量は、同程度のレベルで検出された。しかしそれ以上の公称冷間加工度においては、第 1 報、第 2 報でも報告したように加工度と残留磁気量の間には指数関数的な傾向がみられた。図 7, 8 には、各製造メーカーの試作被覆管の全長にわたる残留磁気測定結果チャート例である。残留磁気量値はチャート上の波形に補助線を引いて、バックグラウンドからの高さを検出される残留磁気量の平均値として得た。なお残留磁気量分布に偏りを持っているものは試作被覆管中央の値で示した。これらの結果から S 材、K 材夫々の残留磁気量の分布状態は 4 種類に分類された。すなわち①均一な分布、②ピークの存在するもの、③管端部にのみするどい立ち上りをみせるものそして④周期的な分布を示すものである。1 本の管についての残留磁気量は冷間加工度に比例していると考えられるため、残留磁気量の分布をもとに試作被覆管の冷間加工度状態を推定することができる。①については冷間加工度が全体に均一である。②については部分的に強く加工された箇所がみられるもの。③については、管端部切断の影響があったもの。そして④については製造時のムラがあると考えられるものである。②の試作被覆管については特異的な箇所を金相試験と結晶粒縦横比測定を行なった。この結果については後述する。

図 9, 10 は試作被覆管の公称冷間加工度値と残留磁気量平均値の関係を PCW の測定値と比較した結果である。試作被覆管の公称冷間加工度値は表 1 から明らかなように 17.5～21（%）の範囲である。S 材の試作管については 19, 20, 21（%）の 3 種類である。図 9 から明らかなように 19% と 21% の残留磁気量は 20% PCW の磁気量よりも幾分低い値を示していた。公称加工度 20% の試作被覆管は 20% PCW とほぼ同じ残留磁気量を示したが、残留磁気量値は全体的に試作被覆管、PCW とともに各公称冷間加工度においてもバラツキていた。K 材の試作管については、17.5, 18, 21（%）の 3 種類の試作被覆管について試験を行なった。図 10 から明らかなように 17.5%, 18% の残留磁気量は 20% PCW の測定値とほとんど同一であった。しかし 20% 試作被覆管の残留磁気量は 20% PCW の磁気量よりも低めに検出された。K 材、S 材ともに試作被覆管の公称冷間加工度値と残留磁気量との間により相関を示されなかった原因として次のことが考えられた。①試作被覆管の公称加工度値が PCW の加工度よりも小さな範囲であることから残留磁気量に差を生

じるまでに行かなかった。これは、検出される残留磁気量それぞれにバラツキの程度が大きかったことも原因と思われる。②試作被覆管の製造条件や材料そのものの影響を強くうけていることなどが考えられる。よってこれからは、このことを重点的に検討を行なった。



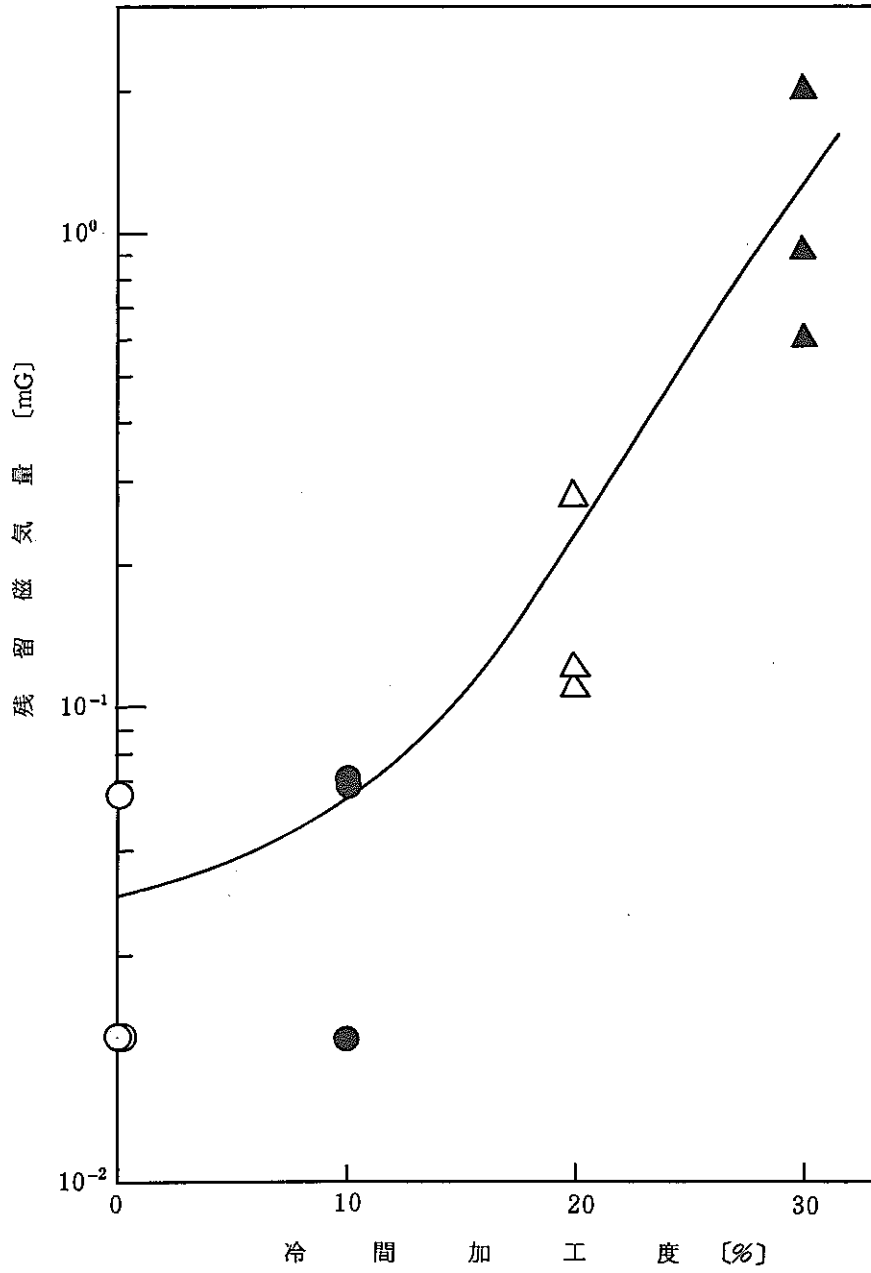


図6 冷間加工度の異なる試作被覆管の残留磁気測定結果

図7 試作被覆管の残留磁気測定チャート

製 造 元 S社

試 験 条 件

着 磁 量： 3,000 G

検出器の出力端子： Recorder Out 端子

フ ィ ル タ ー： 5 Hz Low Pass

管状試験片の回転数： 1,500 rpm

測 定 単 位： mG

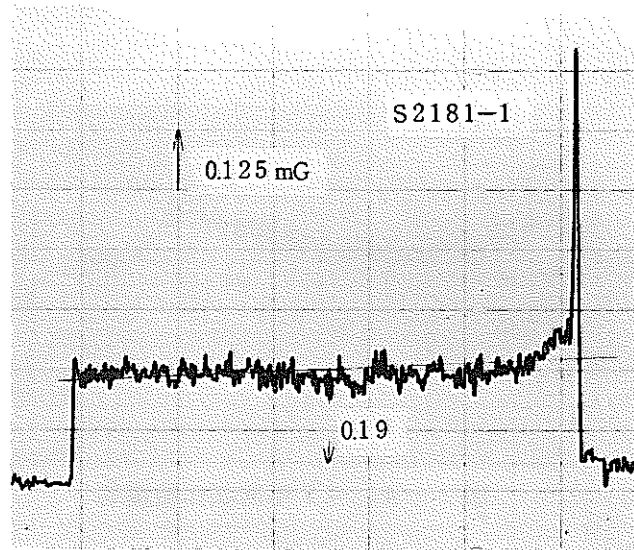


图 7 - 1 47 年度試作被覆管

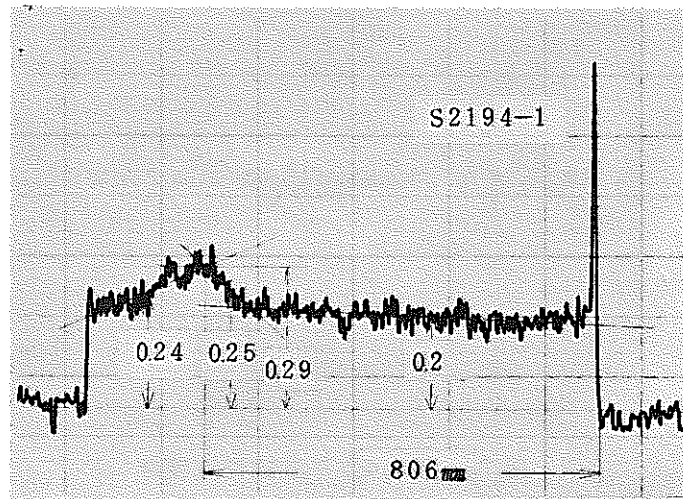


图 7 - 2 47 年度試作被覆管

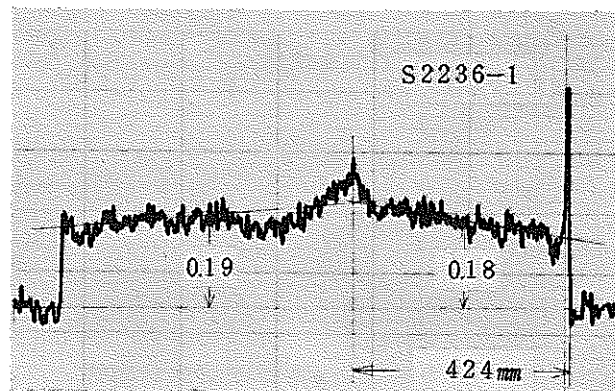


图 7 - 3 47 年度試作被覆管

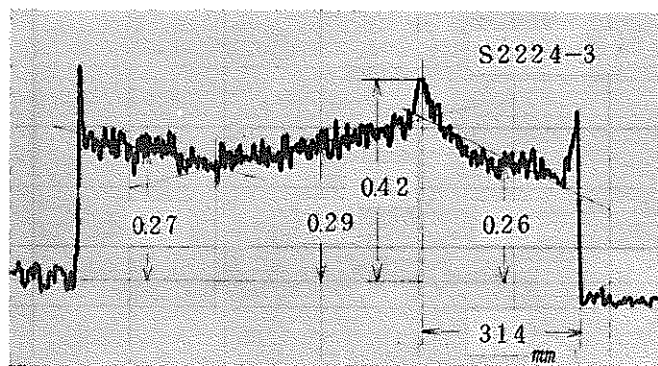


图 7-4 47年度試作被覆管

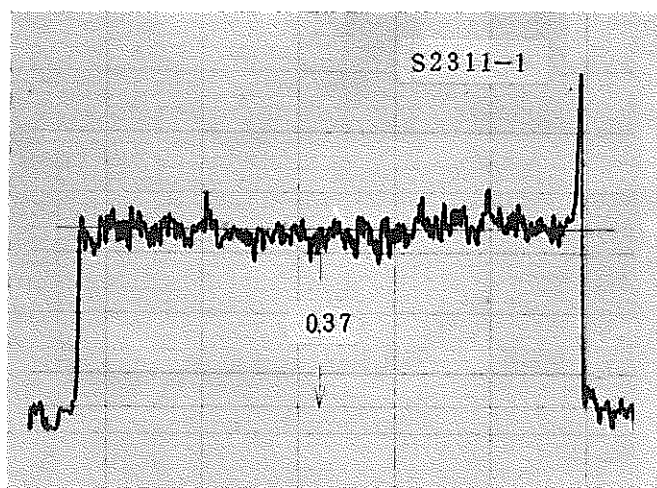


图 7-5 47年度試作被覆管

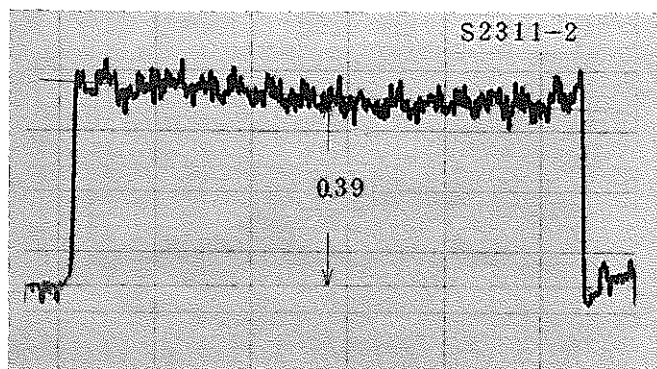


图 7-6 47年度試作被覆管

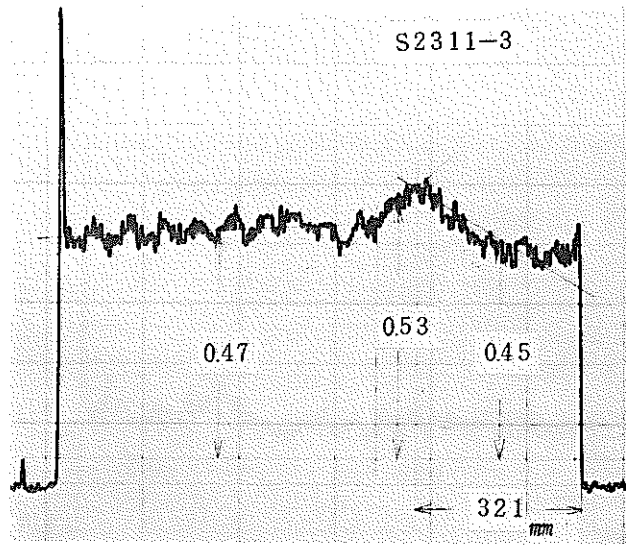


图 7-7 47 年度試作被覆管

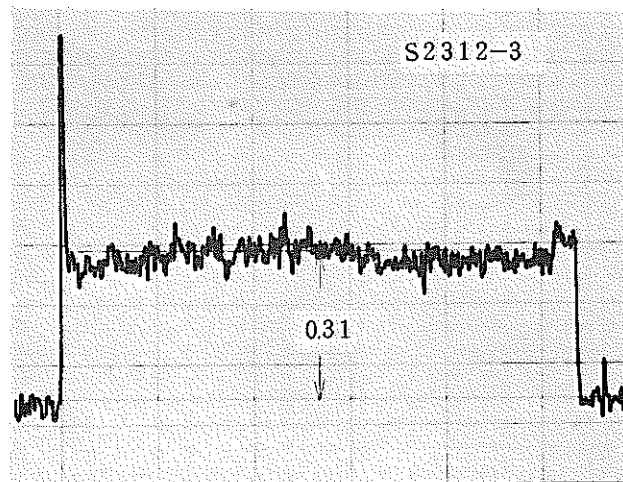


图 7-8 47 年度試作被覆管

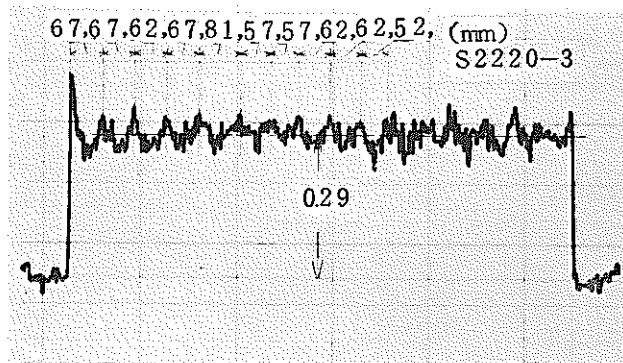


图 7-9 47 年度試作被覆管

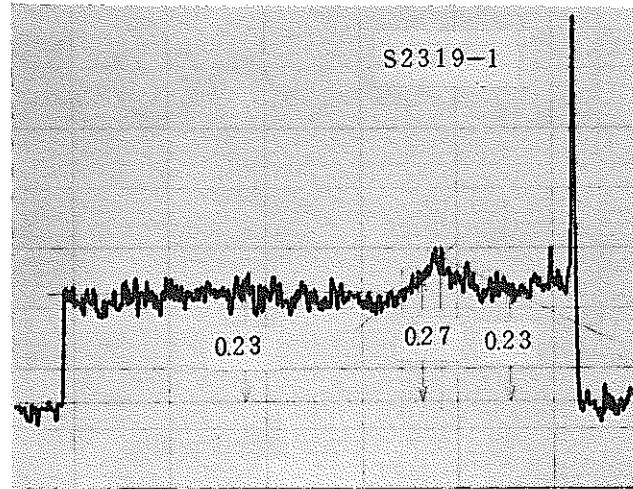


図 7 - 10 47 年度試作被覆管

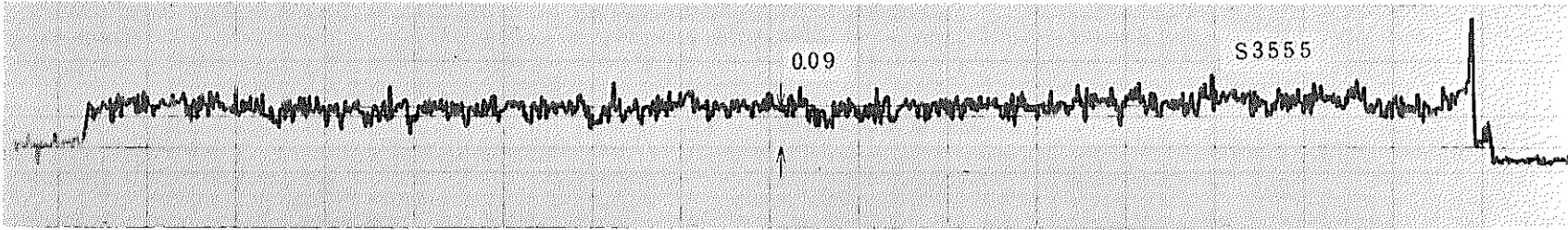


図 7 - 11 48 年度試作被覆管

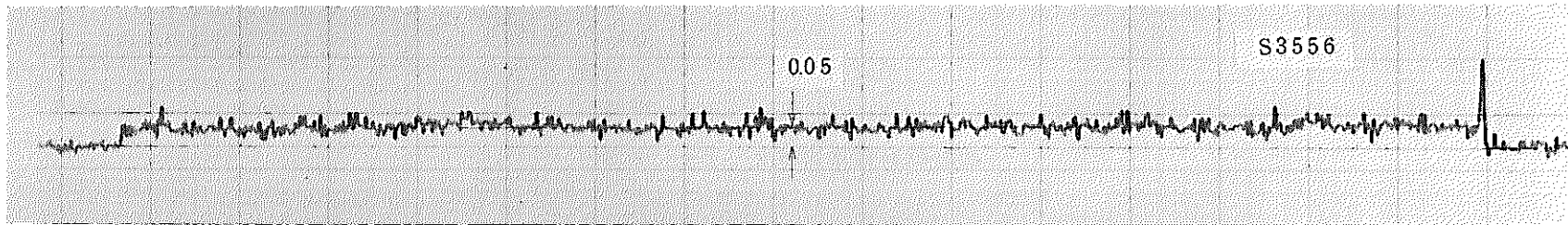


図 7 - 12 48 年度試作被覆管

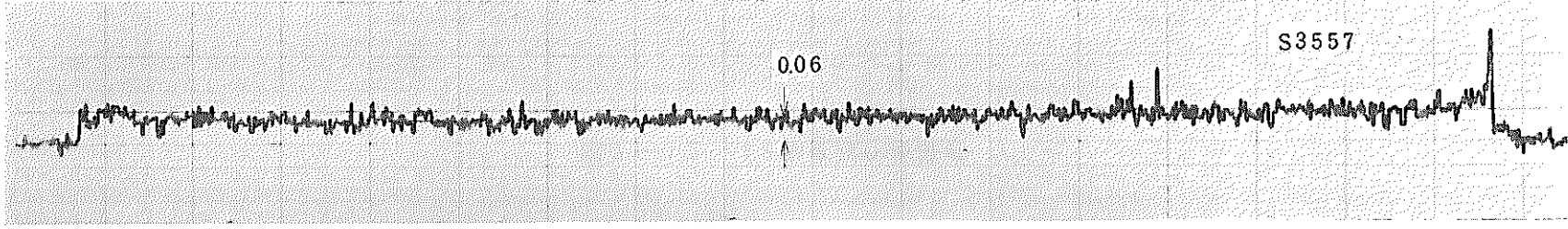


図 7 - 13 48年度試作被覆管

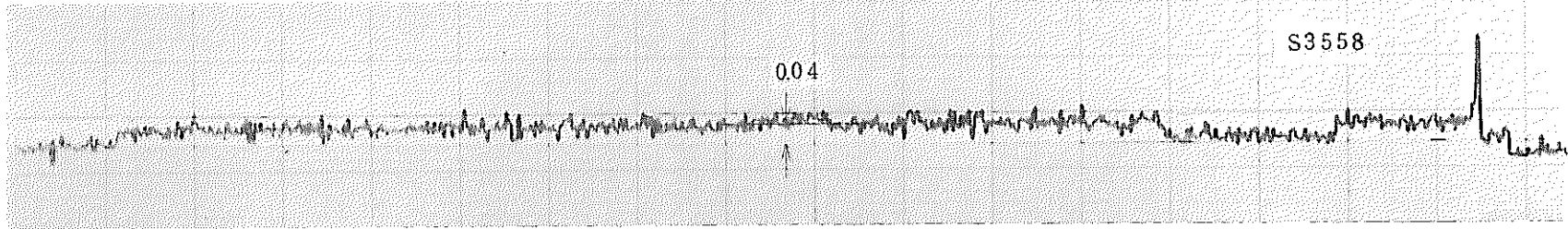


図 7 - 14 48年度試作被覆管



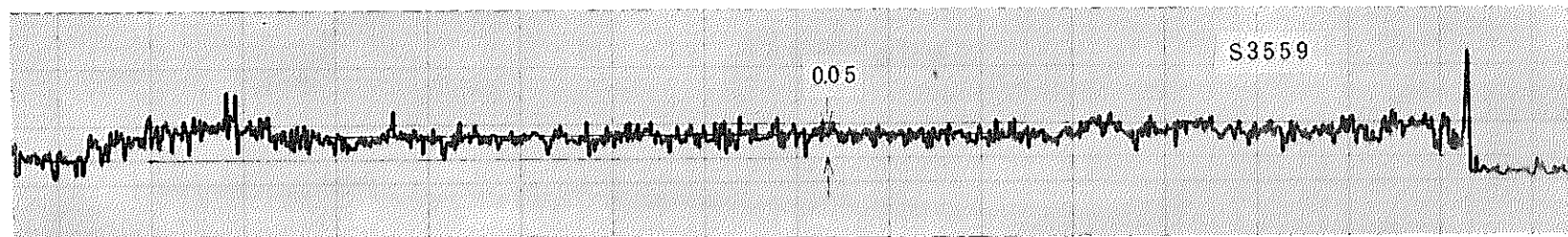


図 7-15 48年度試作被覆管

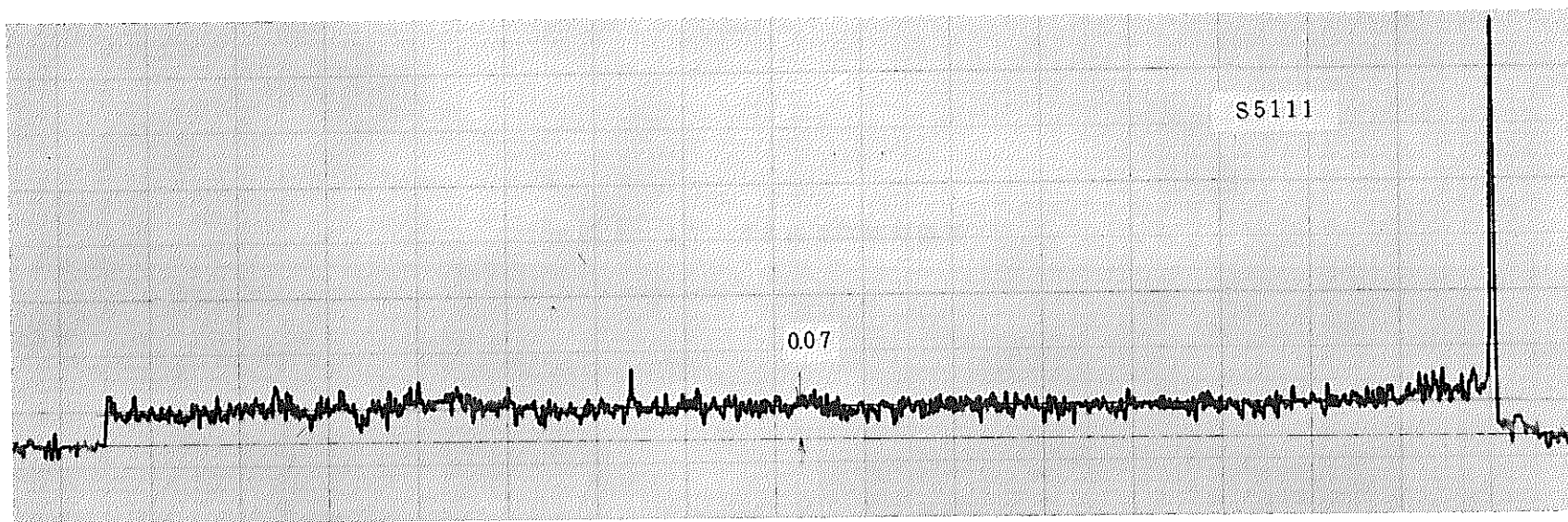


図 7-16 49年度試作被覆管

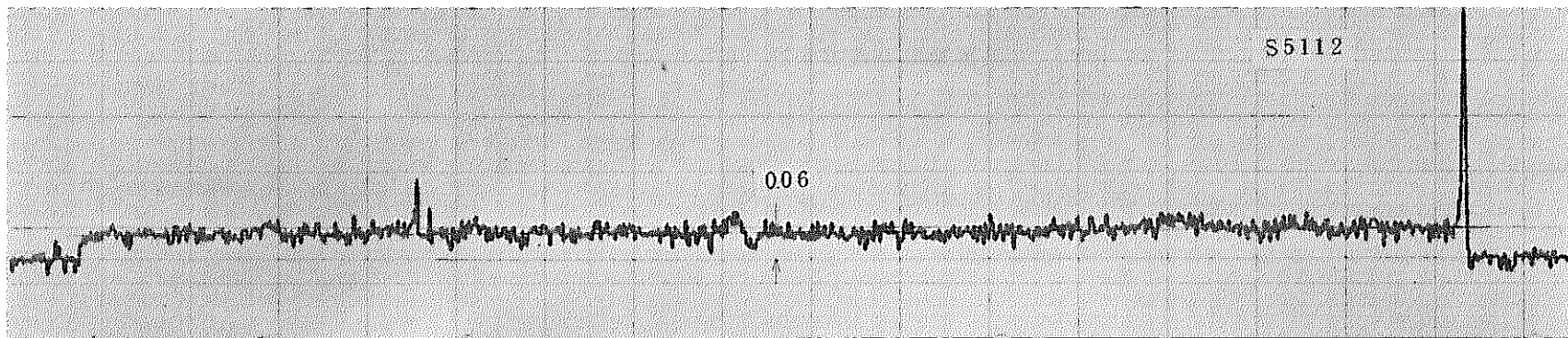


图 7-17 49年度試作被覆管

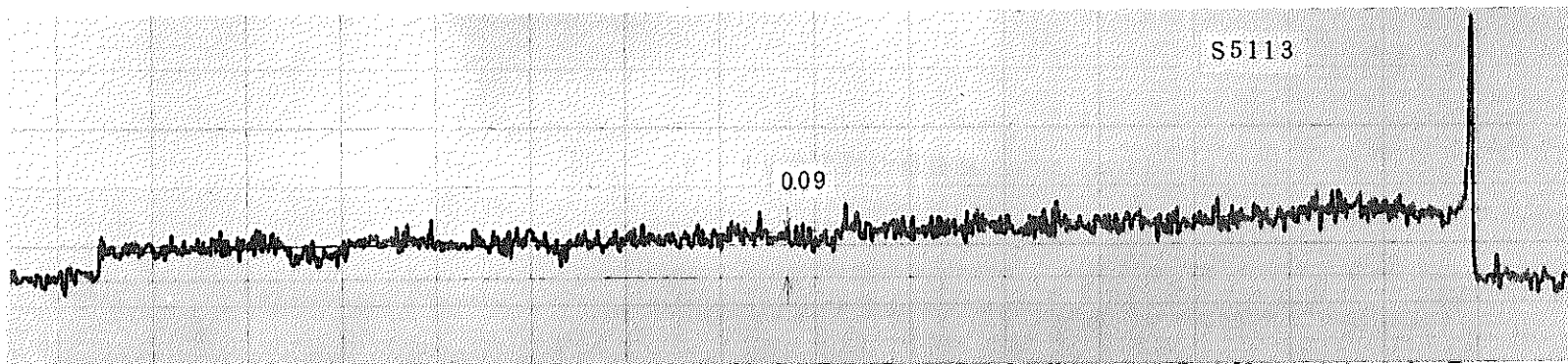


图 7-18 49年度試作被覆管

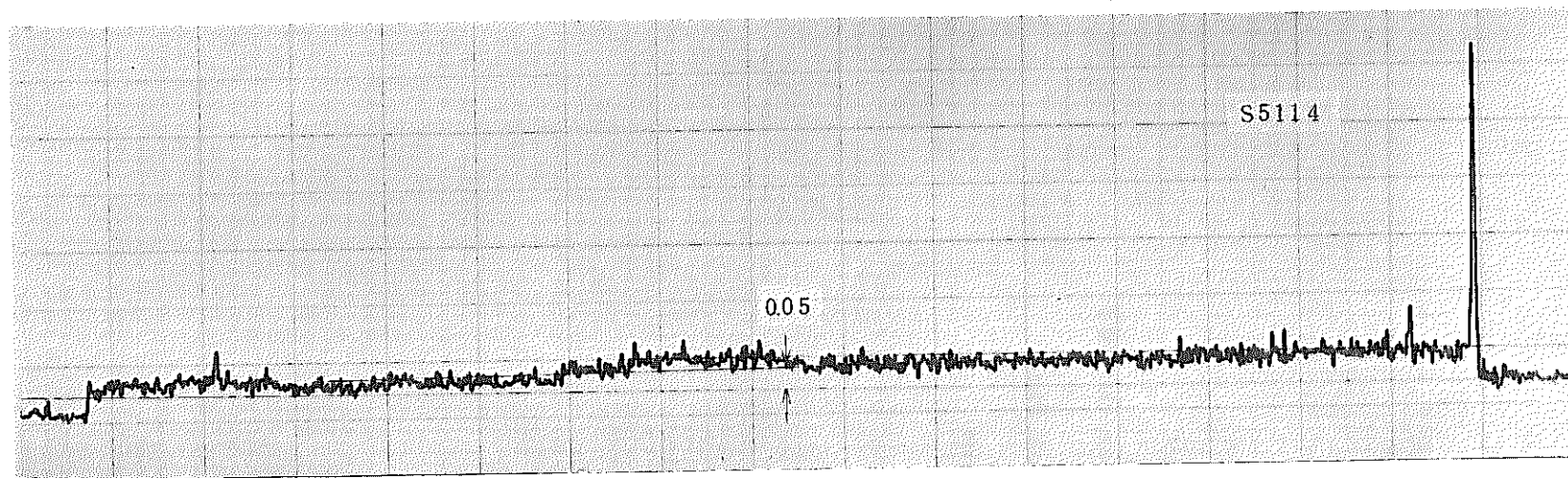


图 7-19 49年度試作被覆管

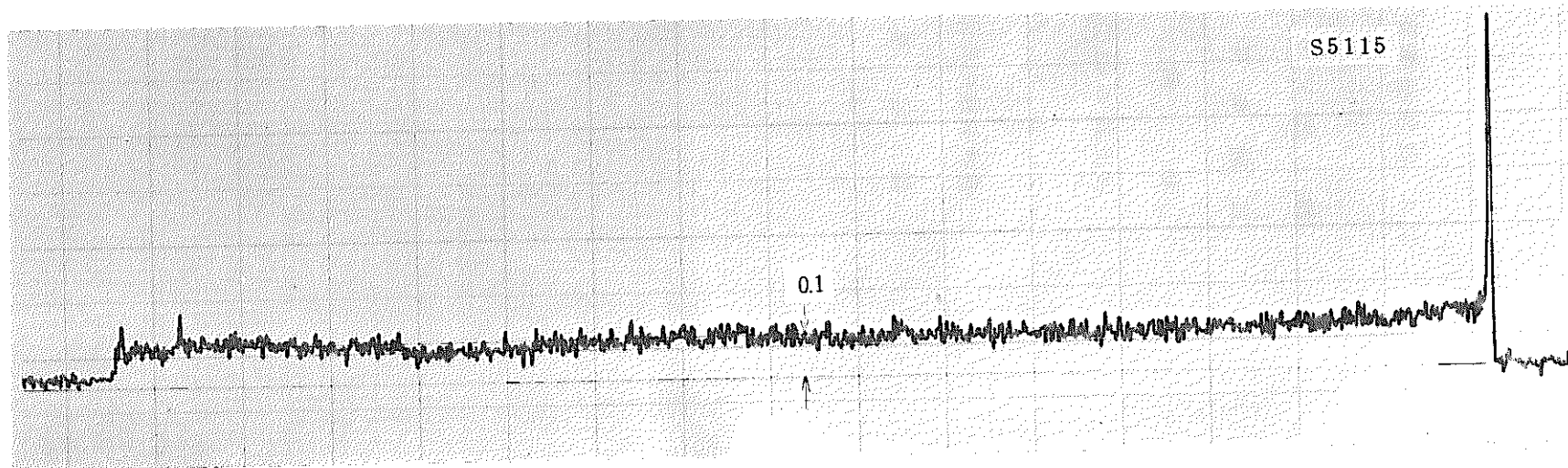


图 7-20 49年度試作被覆管

図8 試作被覆管の残留磁気測定チャート

製 造 元 : K 社

試 験 条 件

着 磁 量 : 3,000 G

検出器の出力端子 : Recorder Out 端子

フ ィ ル タ ー : 5 Hz Low Pass

管状試験片の回転数 : 1,500 rpm

測 定 単 位 : mG

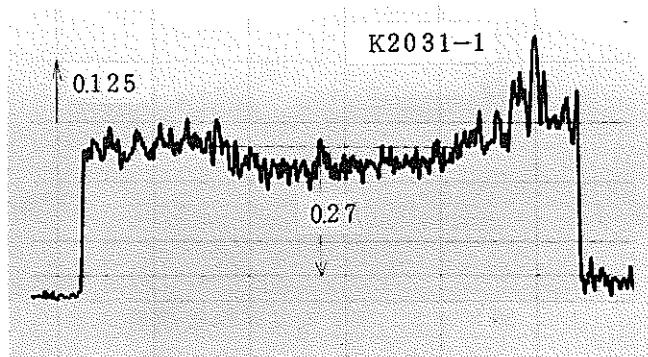


図 8 - 1 47年度試作被覆管

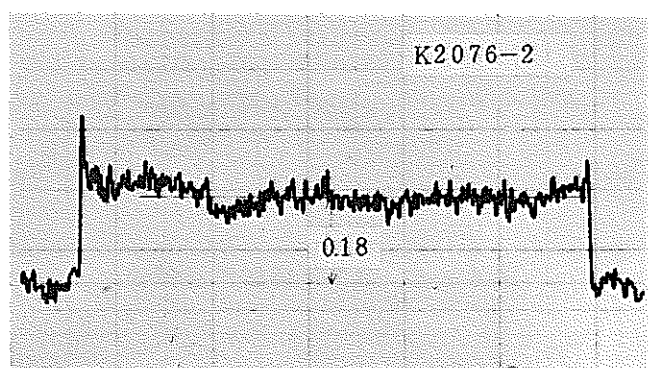


図 8 - 2 47年度試作被覆管

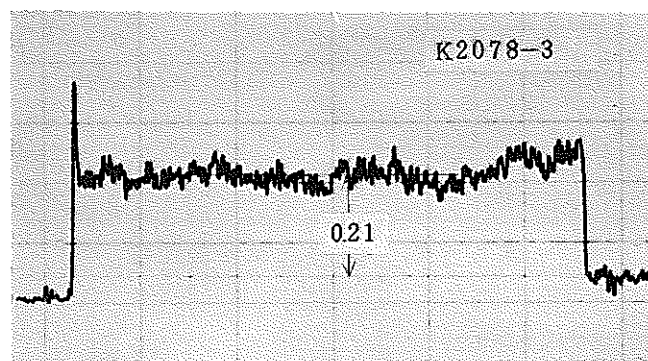


図 8 - 3 47年度試作被覆管

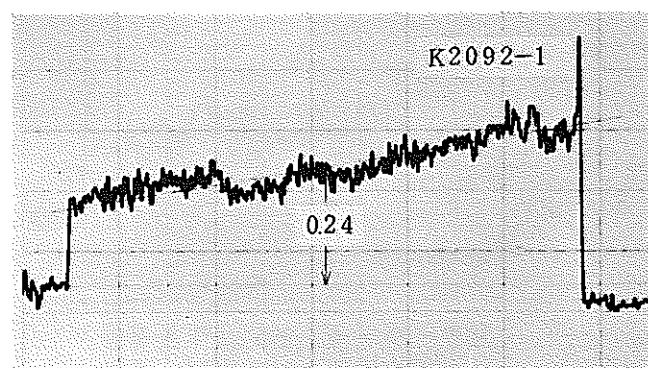


図 8 - 4 47年度試作被覆管

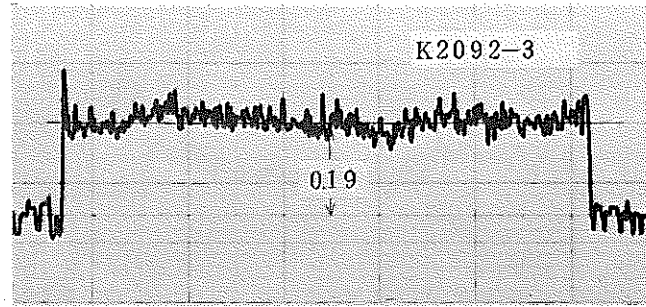


図 8 - 5 47 年度試作被覆管

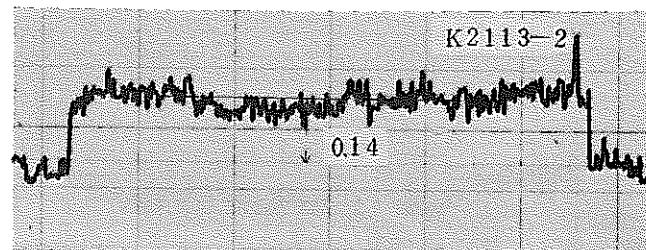


図 8 - 6 47 年度試作被覆管

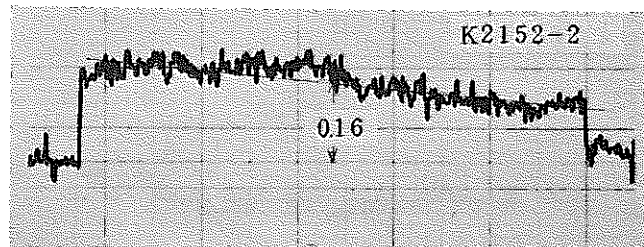


図 8 - 7 47 年度試作被覆管

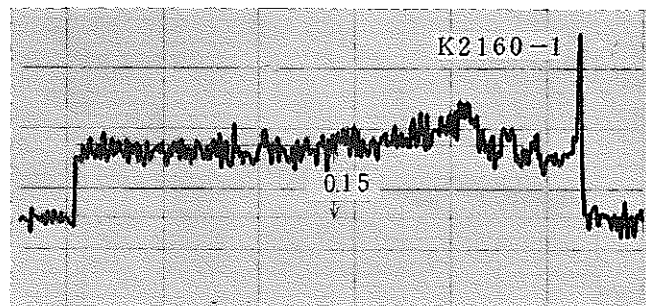


図 8 - 9 47 年度試作被覆管

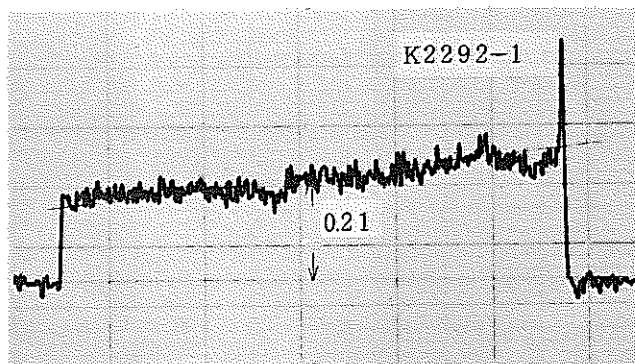


图 8 - 10 47 年度試作被覆管

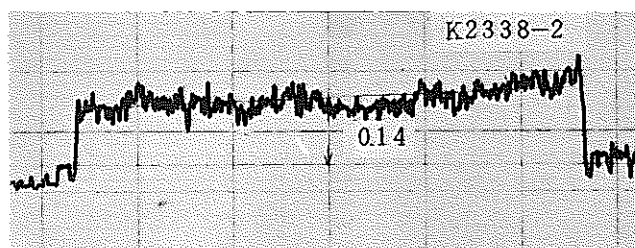


图 8 - 11 47 年度試作被覆管

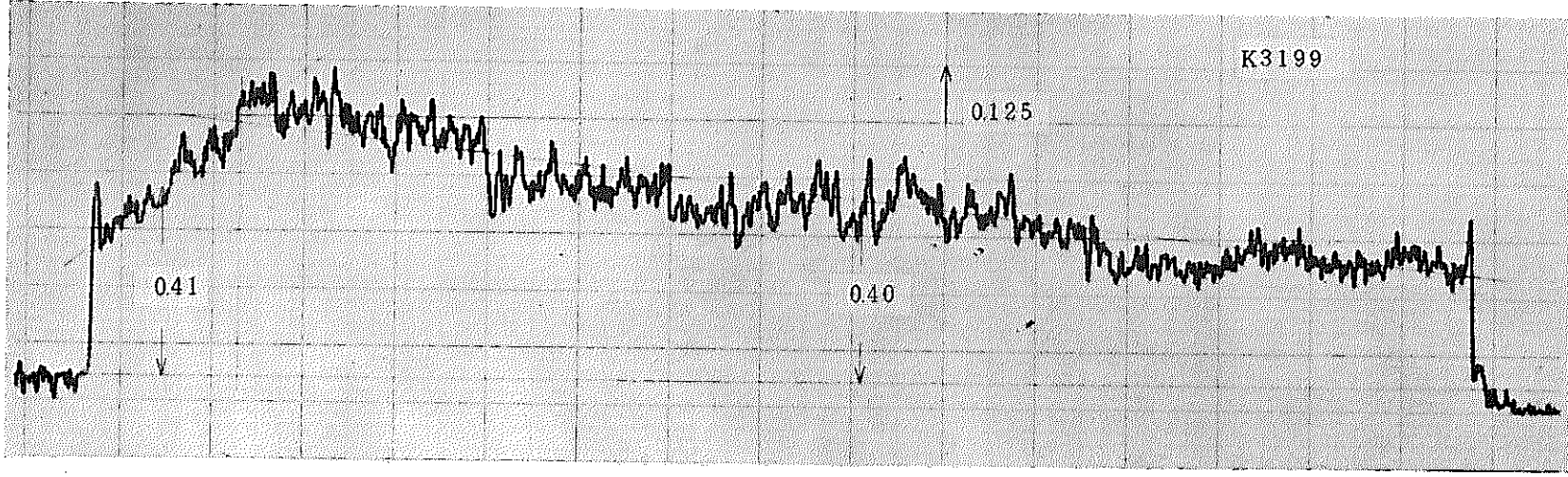


图 8-12 48年度試作被覆管

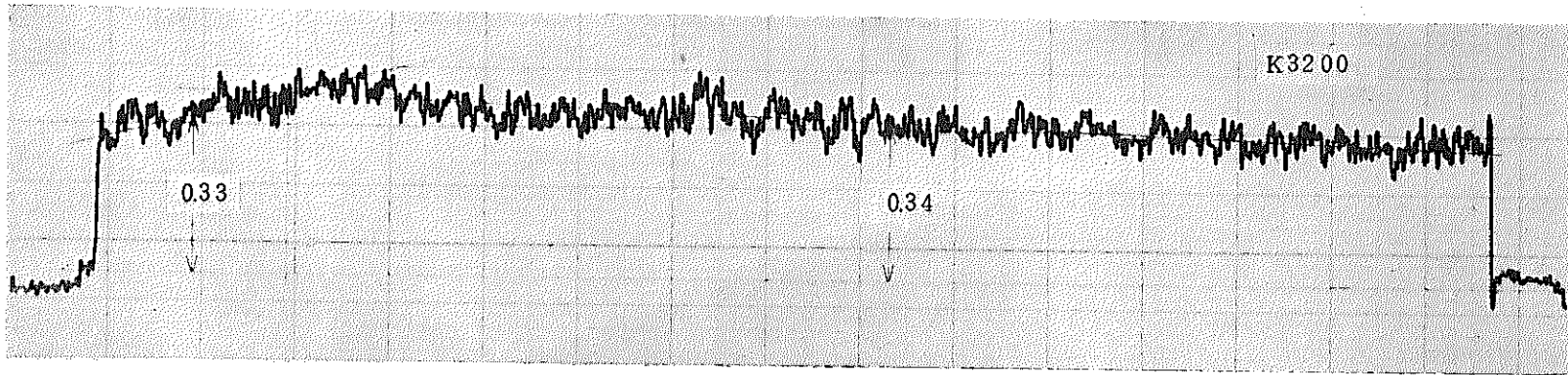


图 8-13 48年度試作被覆管



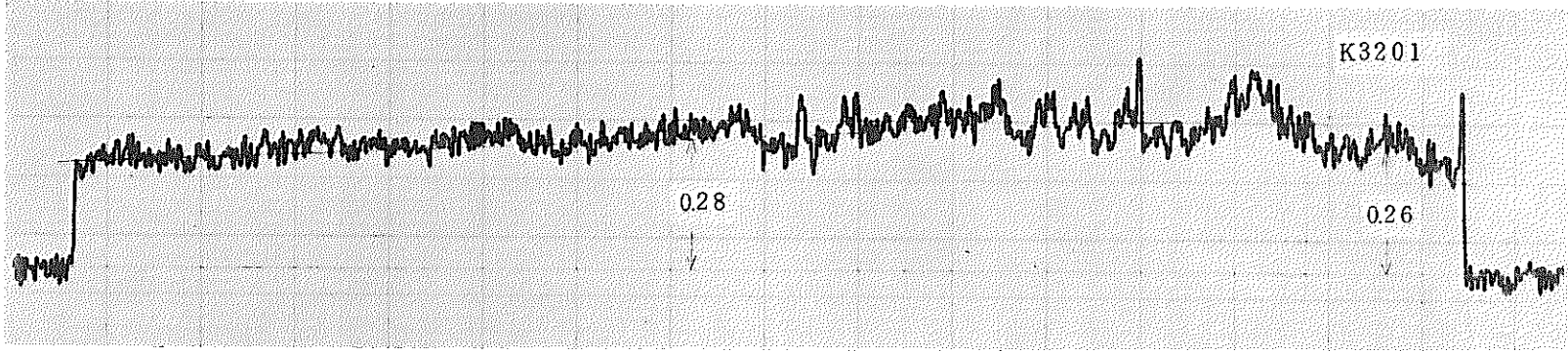


図 8 - 14 48 年度試作被覆管

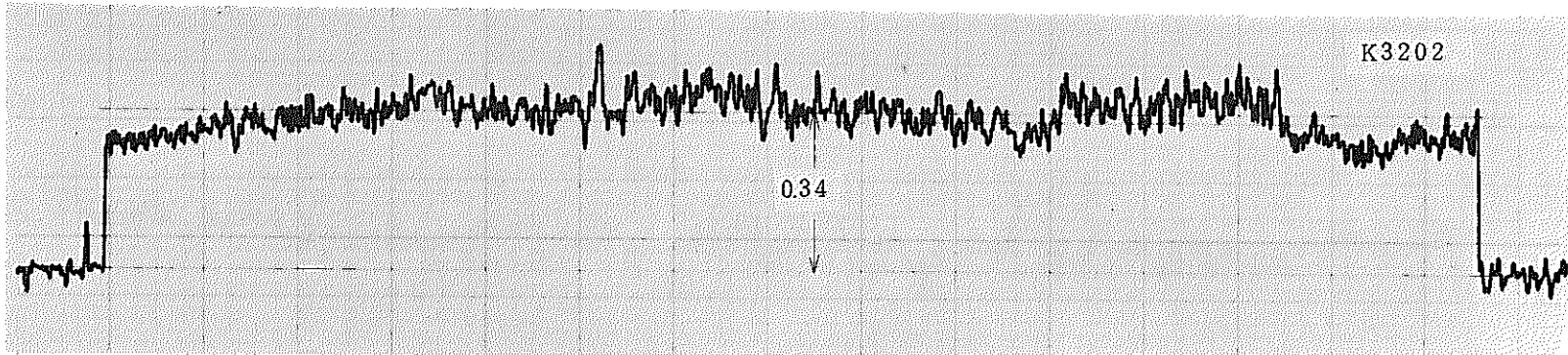


図 8 - 15 48 年度試作被覆管

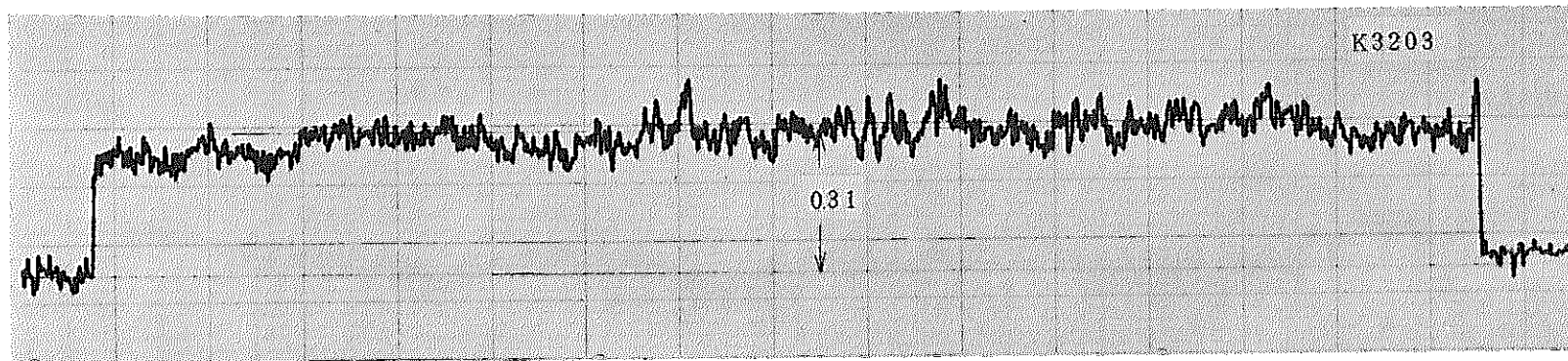


图 8-16 48年度試作被覆管

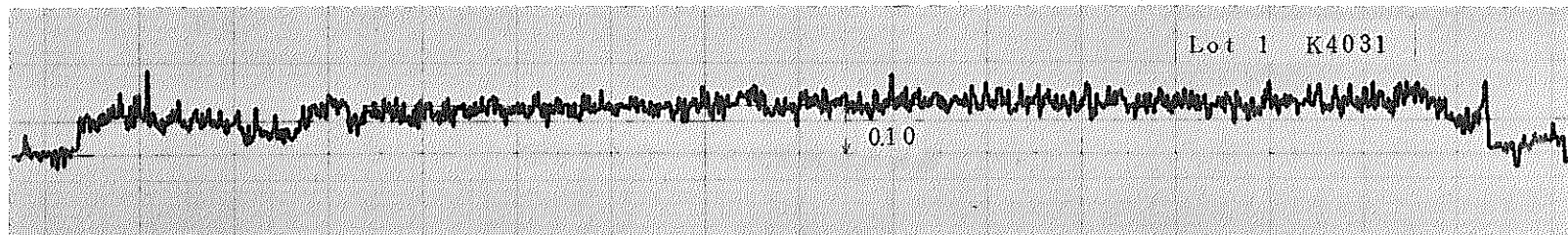


図 8 - 1 7 4 9 年度試作被覆管 ( Lot 1 )

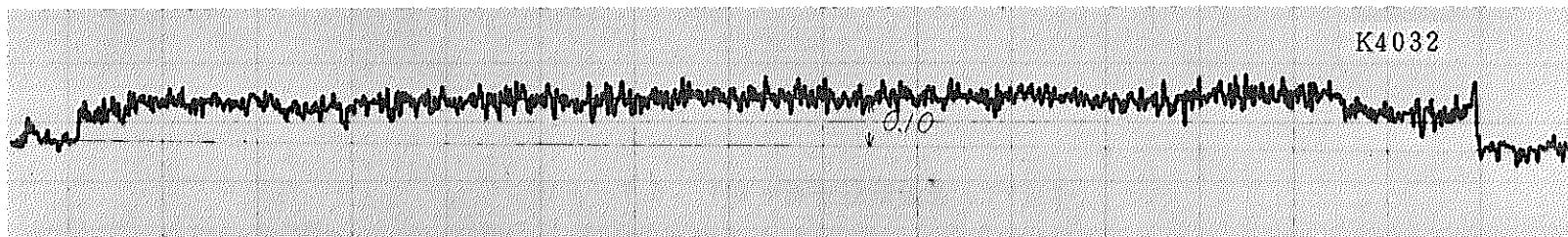


図 8 - 1 8 4 9 年度試作被覆管 ( Lot 1 )

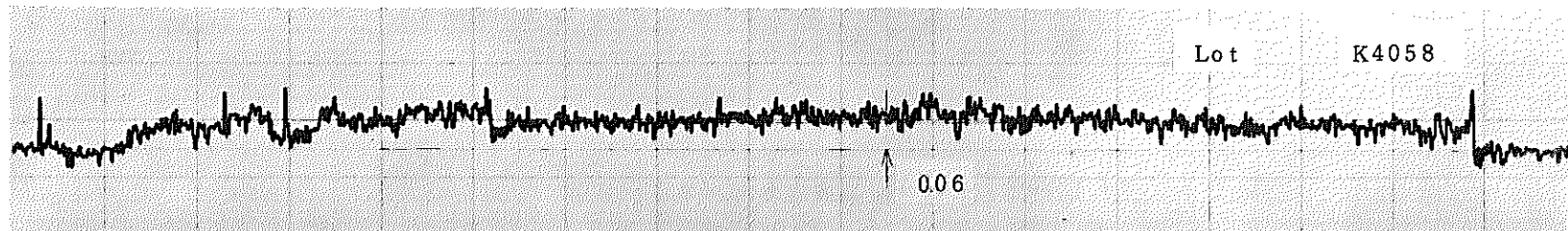


図 8 - 1 9 4 9 年度試作被覆管 ( Lot 2 )

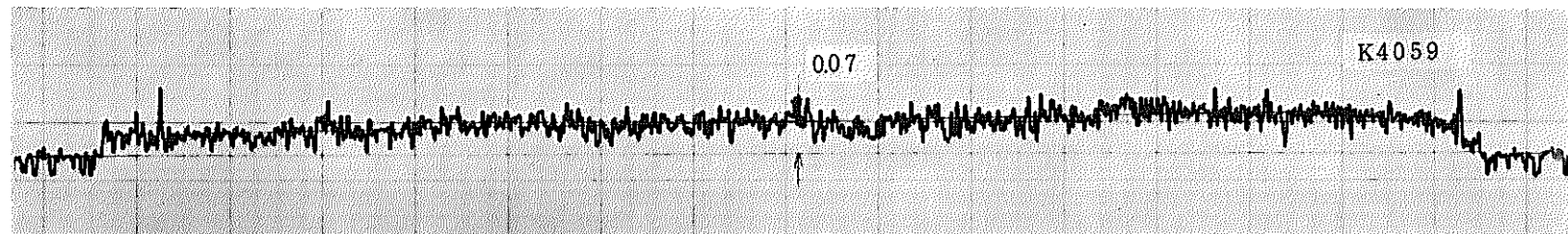


図 8 - 2 0 4 9 年度試作被覆管 ( Lot 2 )

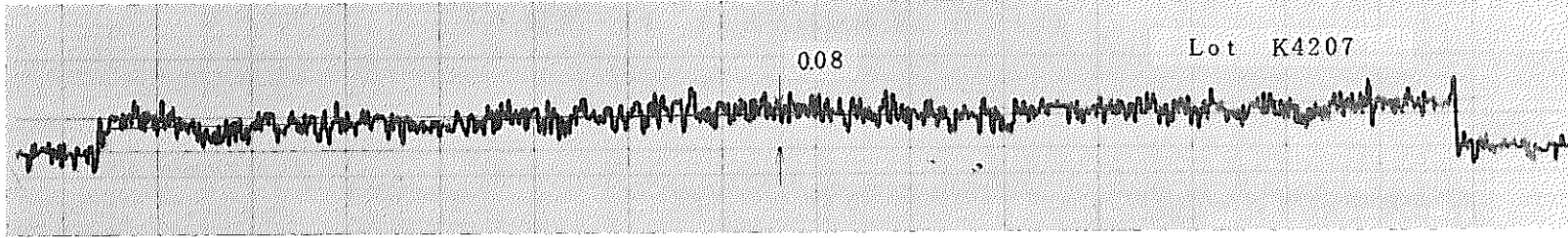


図 8 - 2 1 49 年度試作被覆管 (Lot 3)

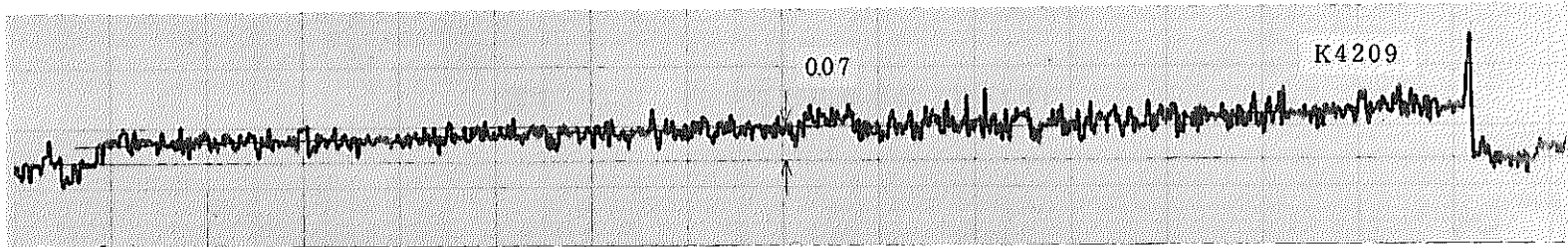


図 8 - 2 2 49 年度試作被覆管 (Lot 3)

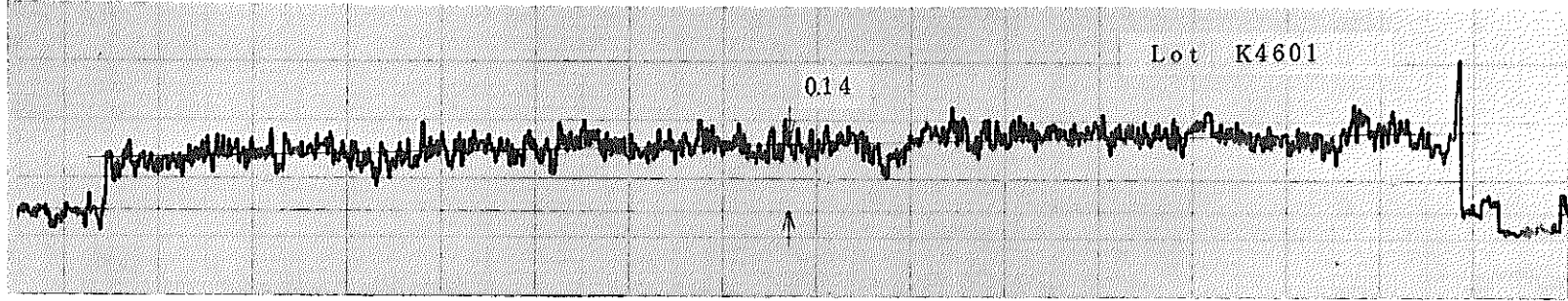


図 8 - 23 49 年度試作被覆管 (Lot 4)

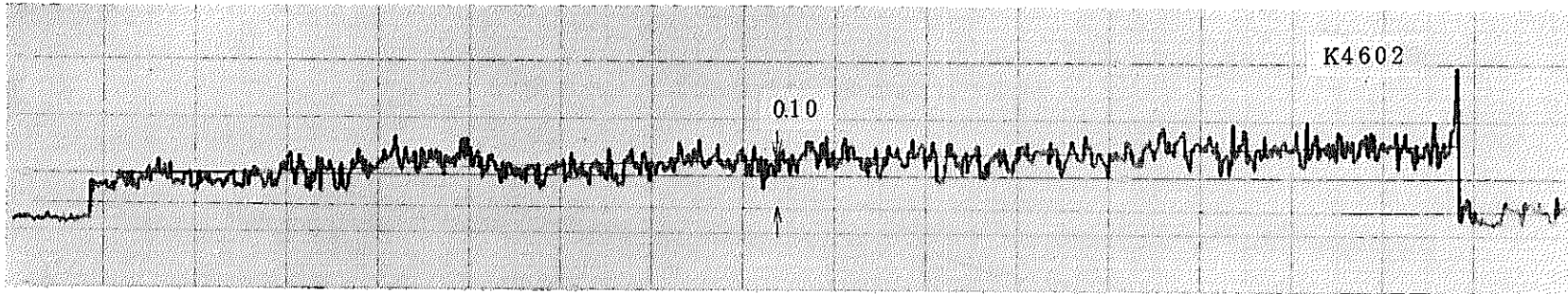


図 8 - 24 49 年度試作被覆管 (Lot 4)

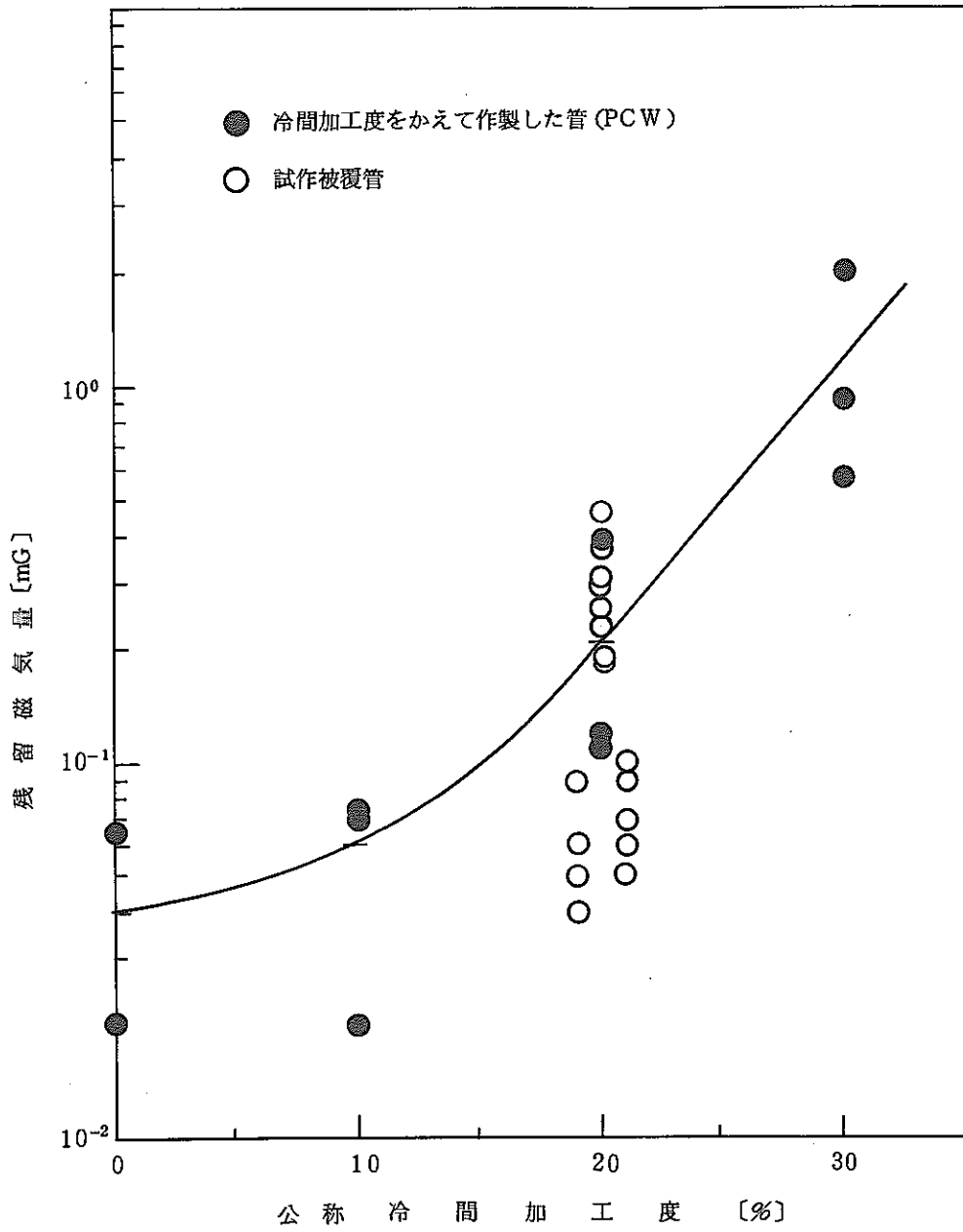


図9 試作被覆管の残留磁気測定結果 (S材)

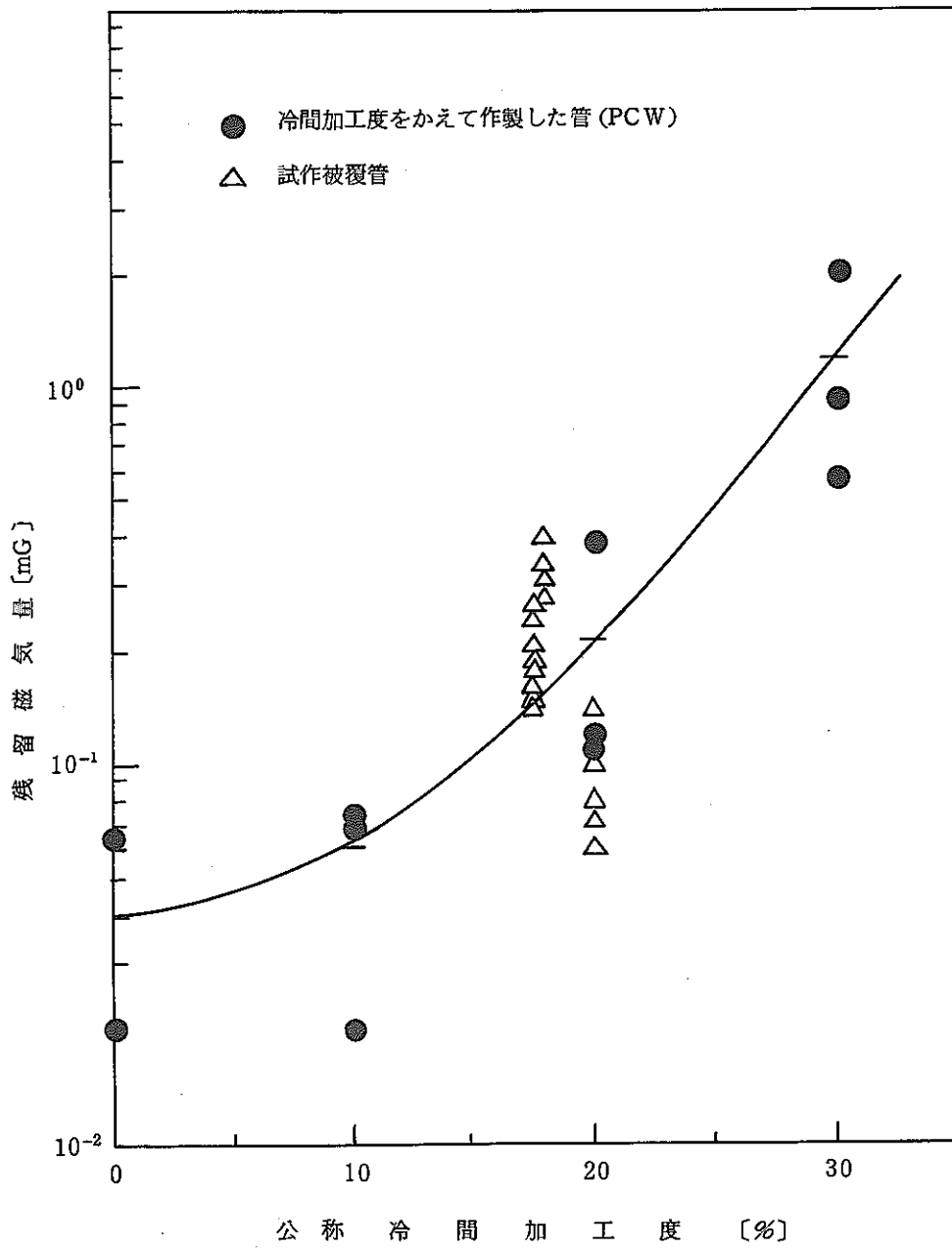


図10 試作被覆管の残留磁気測定結果 (K材)



## 3-2-2 製造条件と残留磁気測定結果について

## a) 冷間加工度をかえて製造した試作被覆管の結果

図11にPCWの公称冷間加工度と管端から10mmの位置の縦断面方向の硬さ(マイクロビッカース荷重500g)の関係を示す。図から明らかなように硬さは冷間加工度が上昇するにつれて硬くなっていった。図12に冷間加工度と粒度番号の関係を示す。図より明らかなように結晶粒度は冷間加工度が大きくなるにつれてASTM NO.が増えていく傾向を示した。図13にPCWにおける残留磁気量と粒度番号の関係を示す。図から結晶粒度が増加するにしたがって残留磁気量は増える傾向がみられるが、これは残留磁気量が冷間加工度に比例するものとの仮定に立つと図12に示した粒度番号(ASTM NO.)と冷間加工度の関係との比較からも当然のことである。図14にPCWにおける硬さと残留磁気量の関係を示す。図14より明らかなように残留磁気量は硬さが硬くなるにしたがって増加する傾向を示した。この図は図11のX軸とY軸を交換したものに相当しており、両者の傾向は全く一致する。この結果からも硬さを仲介として、冷間加工度と残留磁気量の間には硬さにかかわらずある関係の存在することが明らかになった。図11より明らかなようにPCWの硬さは、冷間加工度が10%に達したところからほぼ一定の増加率を保つ傾向を示したが、0%から10%までの変化は比較的急激であった。また図14での残留磁気量と硬さの関係において0%は10%に同程度ぐらいの残留磁気量を示していた。この件については、なお検討し後述する。

## b) 各社各年度試作被覆管の結果

図15, 16に試作被覆管の公称冷間加工度17.5%~21%の熱処理温度(溶体化処理時の温度)に対する粒度および硬さの関係を示す。図より明らかなようにS社製とK社製では粒度番号(ASTM NO.)は同じ熱処理温度にもかかわらず異なっており、これは熱処理以前の製造歴の相異のためと思われる。しかし、両社ともに熱処理温度が高くなるにつれて結晶粒度が大きくなっていく傾向を示した。しかし硬さは両社ともほぼ同じ傾向を示し、熱処理温度980°~1,125°の範囲では、ほぼ一定の値を示した。このように試作被覆管はPCWの場合とは異なって硬さは冷間加工度や熱処理温度と関係をもたないことが明らかになった。図17は公称冷間加工度17.5%~21%までの結晶粒度と残留磁気量の関係を示す。すでに示した図は参考のためのPCWのデータも含んでいる。残留磁気量が結晶粒度が大きくなるにしたがって増加する傾向を示している。しかし、PCWを除いてはS材、K材ともに公称冷間加工度、結晶粒度の順序はバラバラである。このことは、PCWのように一定の処理条件で製造されたものでは冷間加工度と結晶粒度の間に明瞭な相関がみられるが、材料、製造履歴が異なると同一冷間加工度でも必ずしも同じ結晶粒度にならないことを示している。

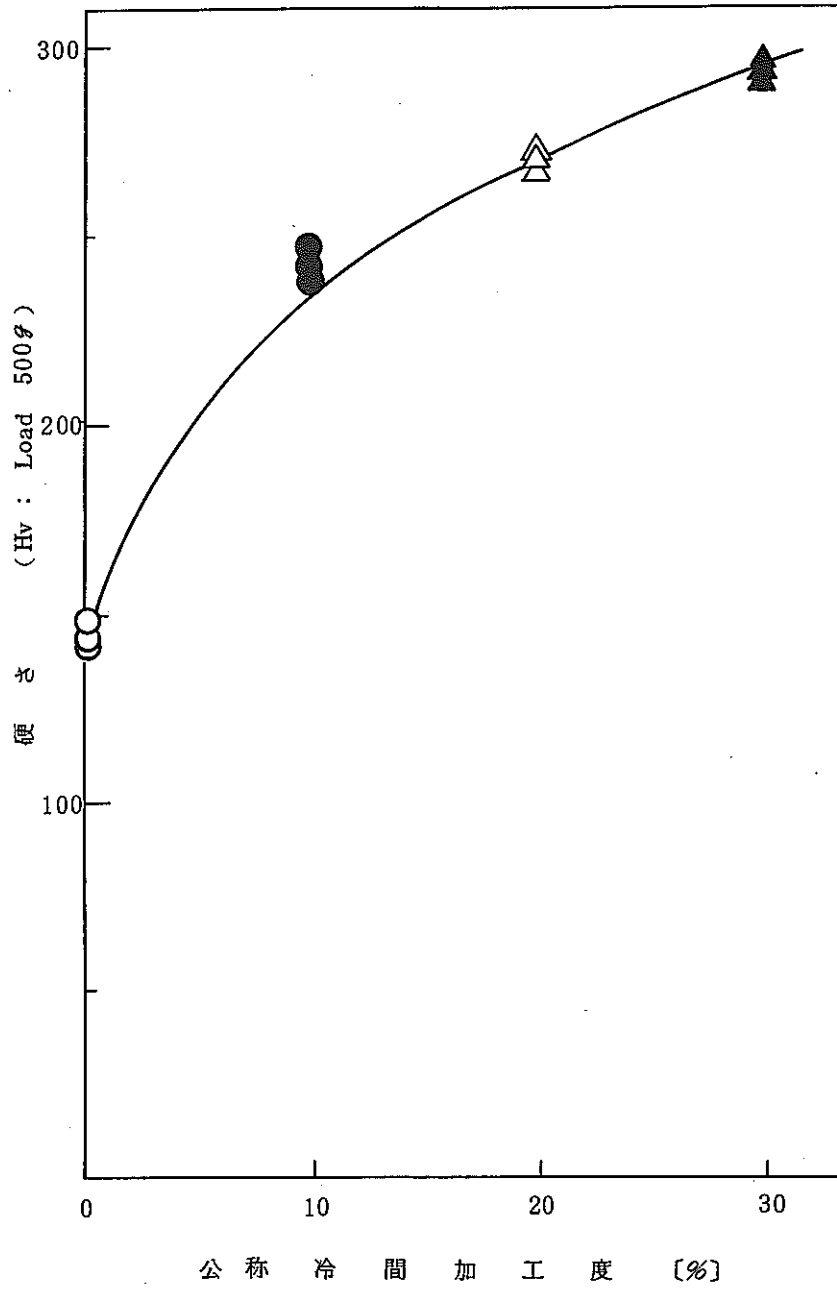


図11 冷間加工度と硬さの関係 (PCW)

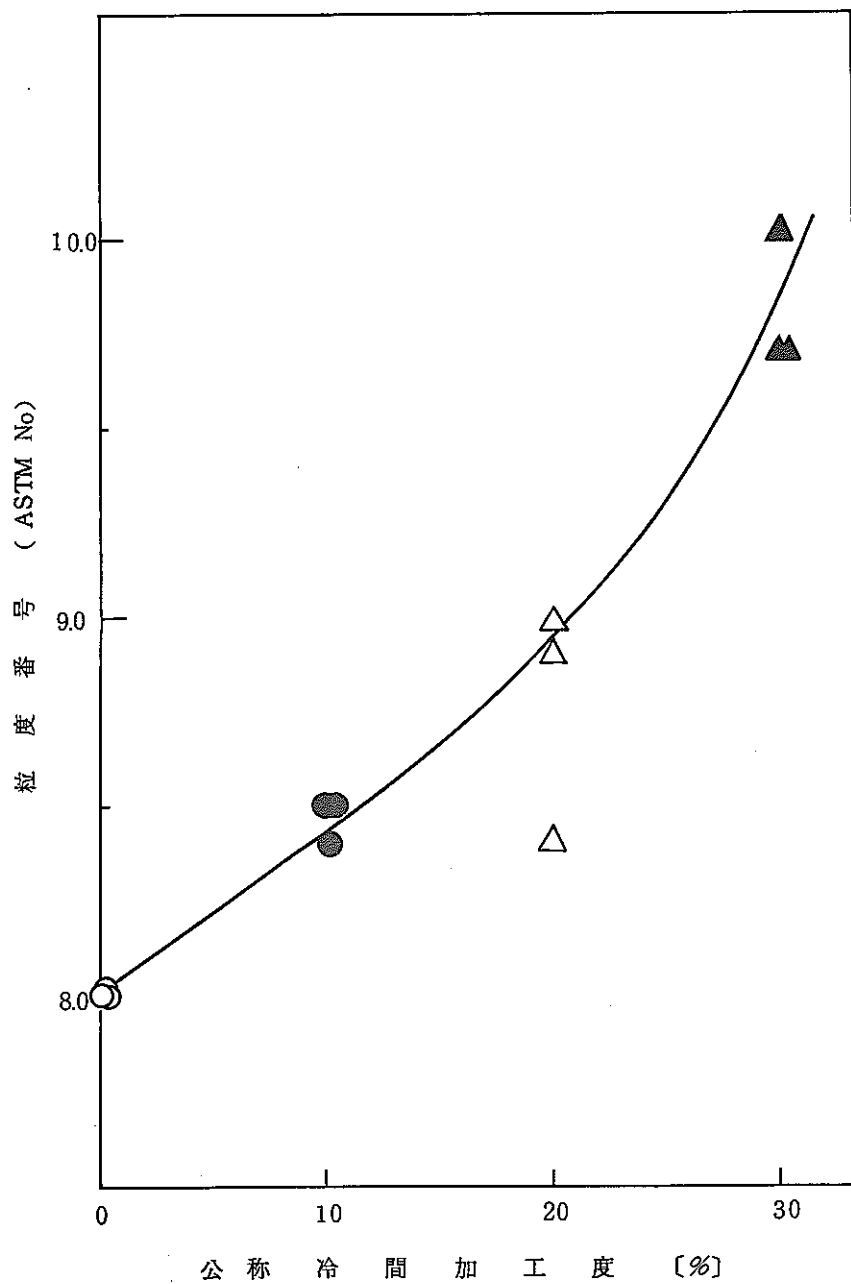


図12 冷間加工度と粒度番号の関係 (PCW)

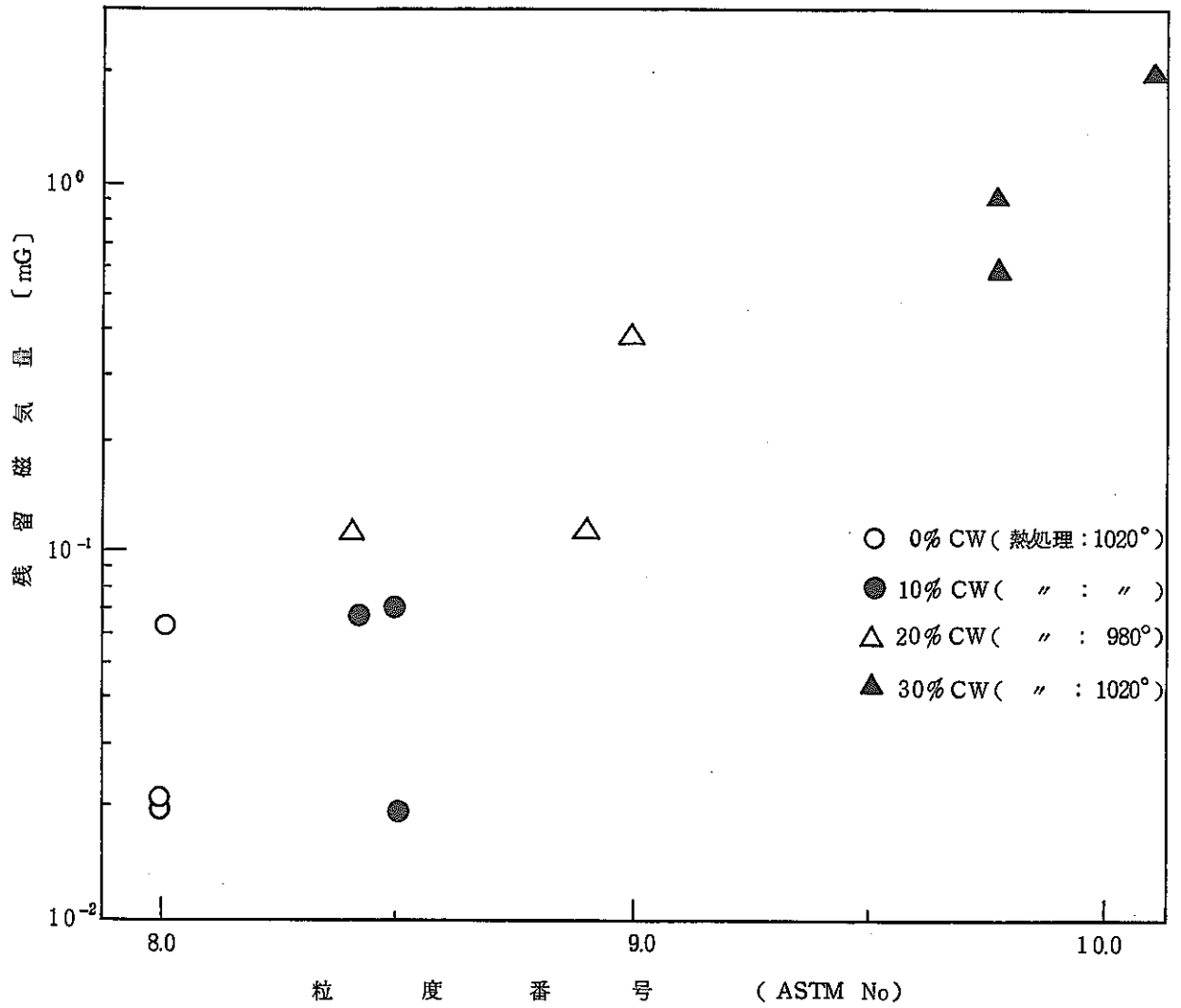


図13 加工度をかえて作製した管の残留磁気量と結晶粒度の関係

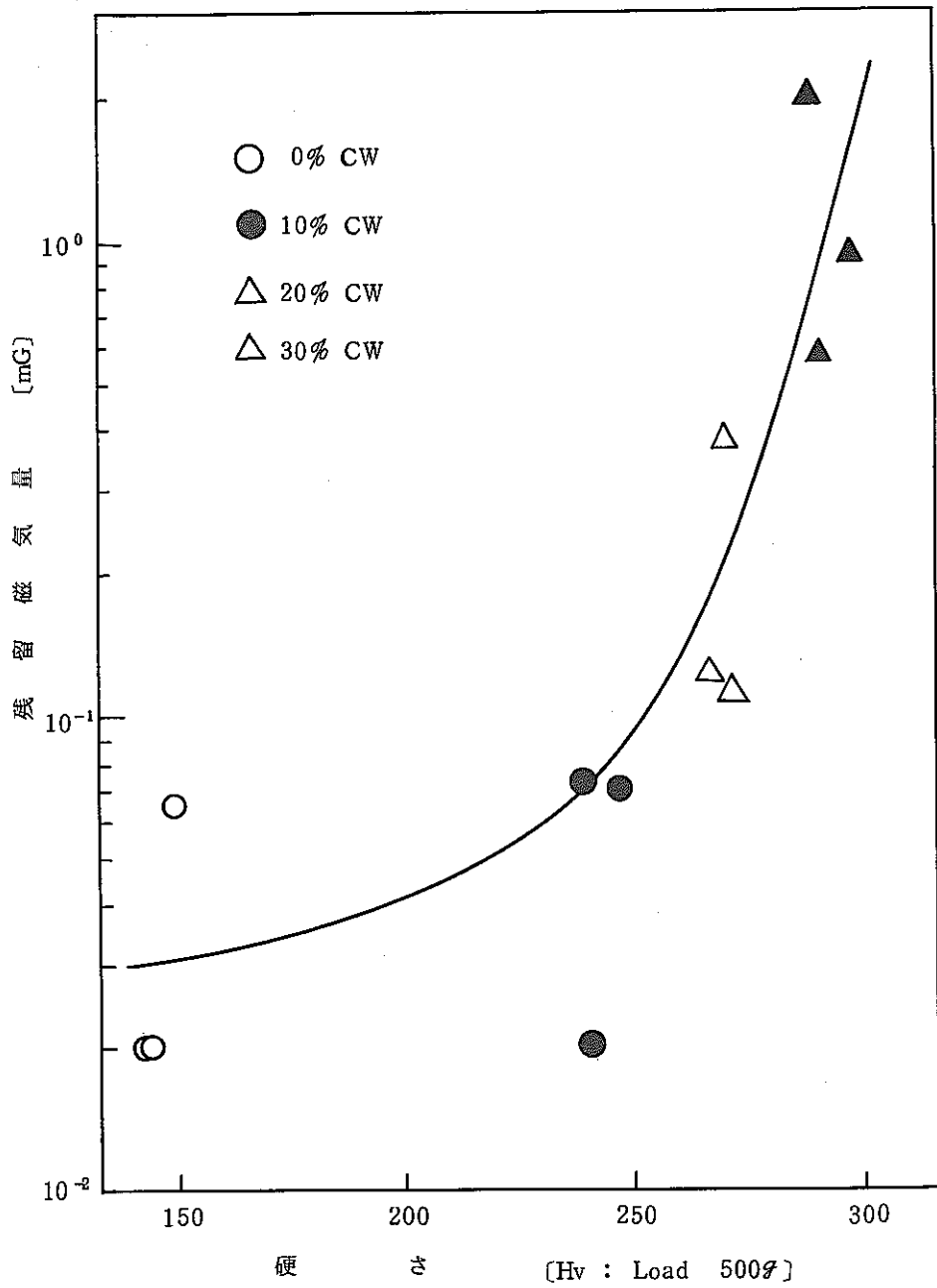


図14 加工度をかえて作製した管の硬さと残留磁気量の関係

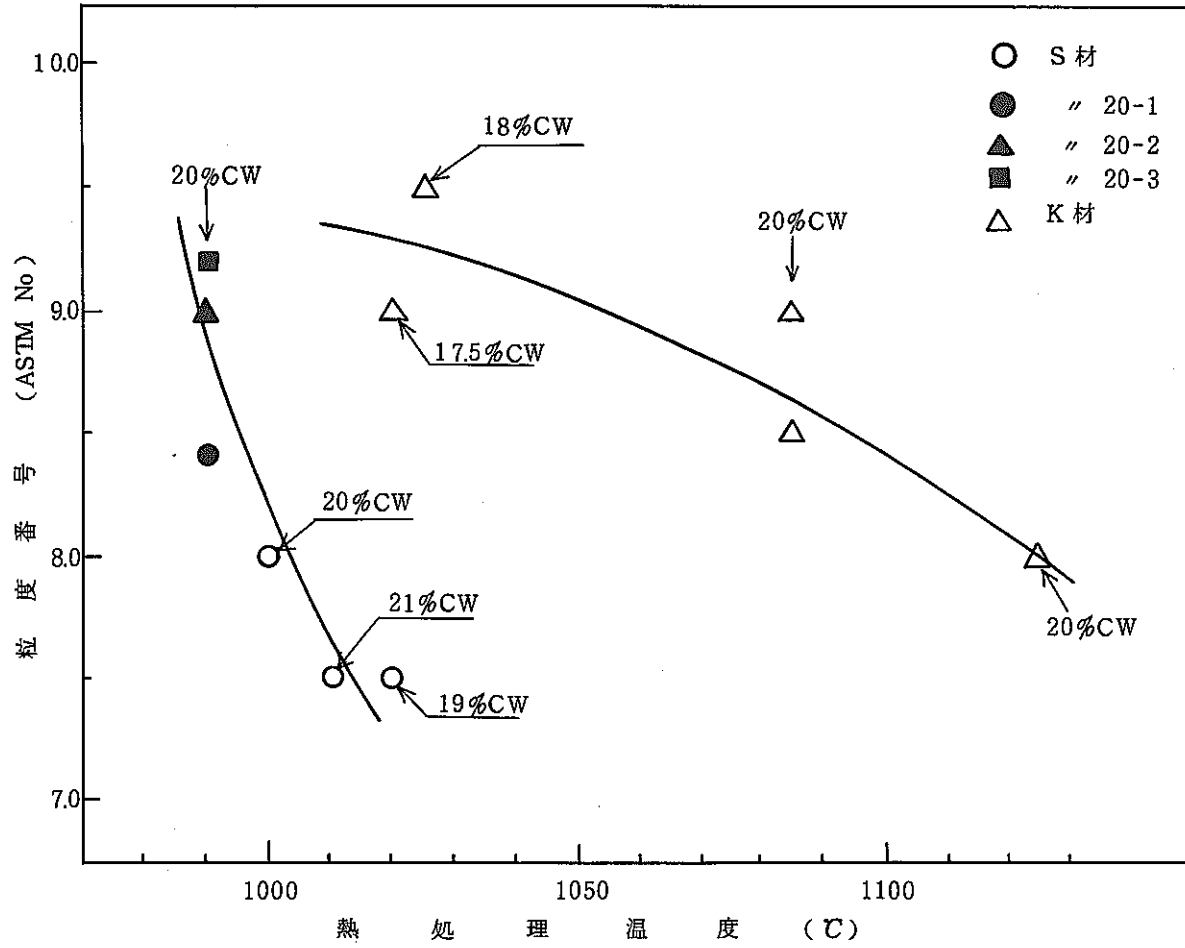


図15 試作被覆管の熱処理温度と粒度番号の関係

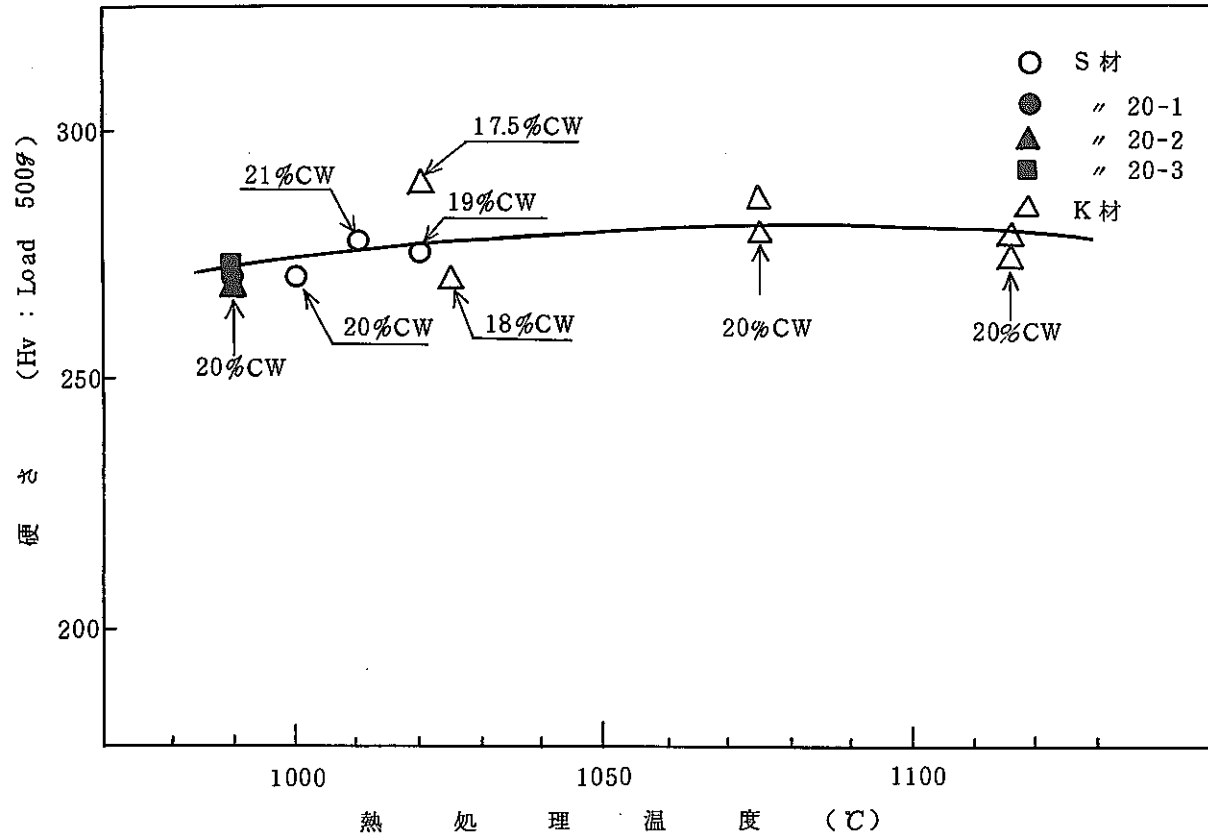


図16 試作被覆管の熱処理温度と硬さの関係

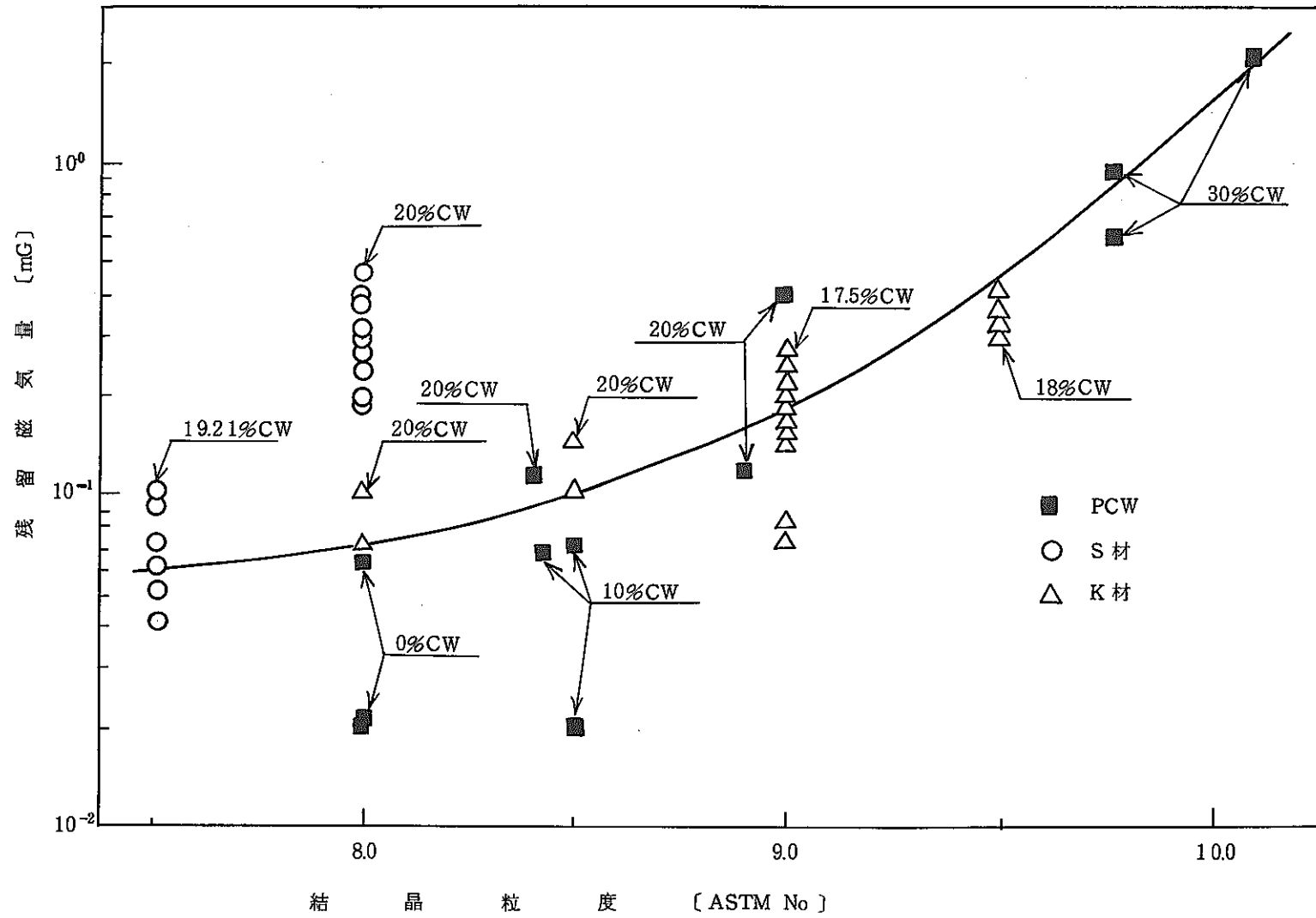


図17 試作被覆管の結晶粒度と残留磁気量の関係



図18に熱処理温度と残留磁気量の関係を示す。図より明らかなように熱処理温度の増加にもなって残留磁気量がやや減少する傾向を示しているが、この現象は熱処理温度を上げることにより結晶粒度が小さくなるために、図13に示されたように粒度番号が小さくなるとともに残留磁気量が減少することと一致する。これらの結果を総合すると、冷間加工度を測定するための磁気法は結晶粒度ひいては溶体化処理温度に大きな影響をうけることがわかった。このことから被覆管の冷間加工度を磁気法により測定する場合は同一の温度で溶体化処理された群ごとに行う必要があることがわかった。



### 3-3 模擬冷間加工度試験片の残留磁気測定結果

模擬冷間加工試験片はメーカーにおいて20%の冷間加工をうけた被覆管をもう一度温度1020℃、時間15分間の条件において焼鈍したものと受け入れ材の2種類について作成した。模擬冷間加工は2-1-3で示したように室温での単純引張により行った。なおこの試験片作成にあたって困難だったのは、引張試験機の上下チャック部分に試験片を真直ぐに固定することであった。なぜならチャック部付近に曲りや、ねじれが生じると変形が均一にならないおそれがあったからである。測定ではこれらのことを考慮してチャック部付近を高速度カッターで切断し均一にのびた部分だけを測定に用いた。図19に模擬冷間加工度と残留磁気量の関係を示す。図より明らかなように模擬冷間加工度が大きくなるにしたがって検出される残留磁気量も直線的に増加して行く傾向を示している。しかし15%~20%付近の被覆管の残留磁気量は回帰直線よりも高い方向にはずれている。これは第2報で述べたごとく冷間加工によってできる加工マルテンサイトの発生点が15%付近に存在するといわれていることから、模擬加工によって急激に加工マルテンサイトができるためと考えられる。また図からも明らかなように焼針材を引張ったものも、受け入れ材を引張ったものも1本の直線に乗っており磁気法のようなマクロな測定法は、加工方法や圧止方向の影響はあまり受けないものと考えられる。また図には2.4%や4.4%のように極端に小さな変形量の試料も示したがこのような試料の残留磁気量は非常に小さく測定装置の検出限界以下であった。

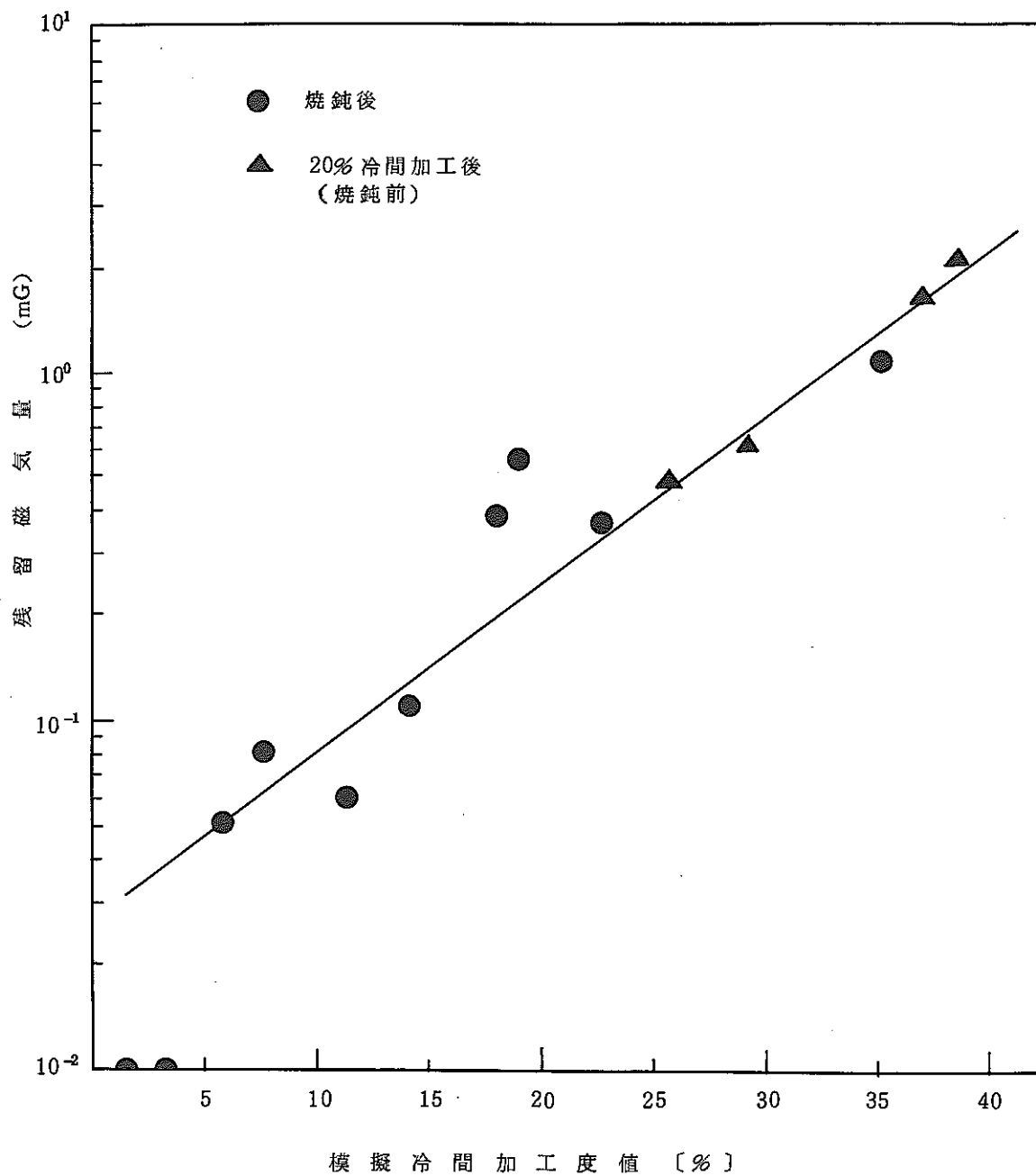


図19 模擬冷間加工試験片の残留磁気量測定結果

### 3-4 その他の試験

#### 3-4-1 結晶粒縦横比測定結果

S社及びK社の試作被覆管から抜きとった数本について結晶粒縦横比を測定し公称冷間加工度や残留磁気量との関係を調べた。結晶粒縦横比測定に使用した金相写真を写真1～3に示す。

管番号S2311-3の金相写真は残留磁気測定の記録(図7-7)上で磁気量のピークを示した部分に対応する $\phi$ 側から321mm付近の縦断面と比較のために $\phi$ 側管端から10mmの縦断面とを示している。K2092-1, 3はチャート上(図8-4, 図8-5)で見られるように磁気量が傾きをもっている。写真2は試験片の $\phi$ 側管端から25cm間隔で採取した金相写真である。図20に結晶粒縦横比と公称冷間加工度の関係を示す。図中の直線は比較のため記入したPCWの測定結果であり、第2法APPENDIX IVに示したもので、第1報の結果ともよく一致していたものである。S材、K材の試作被覆管の縦横比測定値はこの直線によくのっている。図21に結晶粒縦横比と残留磁気量の関係を示す。図より明らかなように結晶粒縦横比は残留磁気量について相関がみられなかった。これは今回の試料が加工条件のちがいのためにこれらの結果から結晶粒縦横比はどの場合でも明らかに冷間加工度の推定に使用できるが、磁気法は製造条件を固定した場合にのみ冷間加工度と一定の関係を示すことから同一メーカーの同一ロットのように制限された範囲で使用可能であると考えられる。

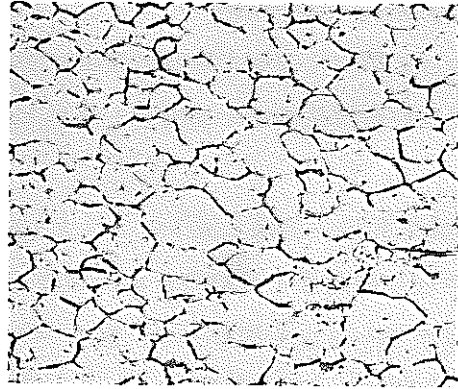
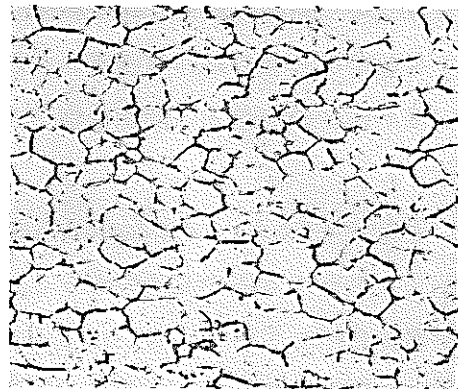
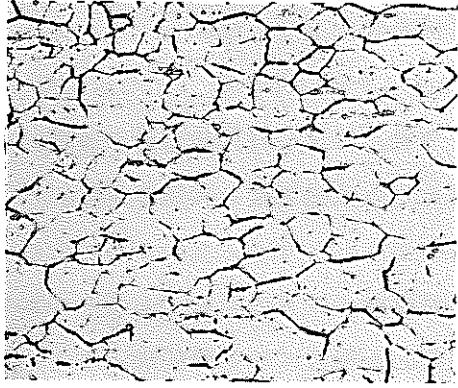
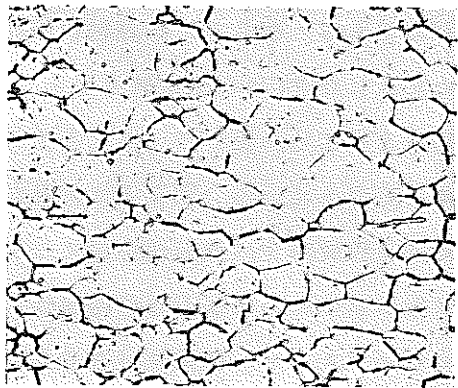
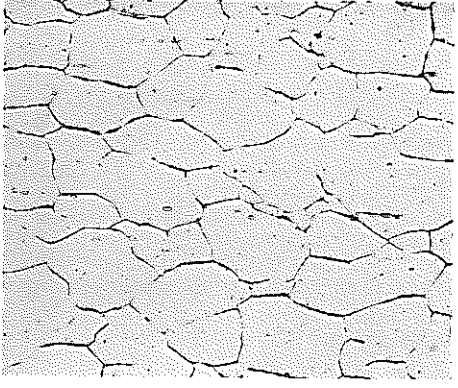
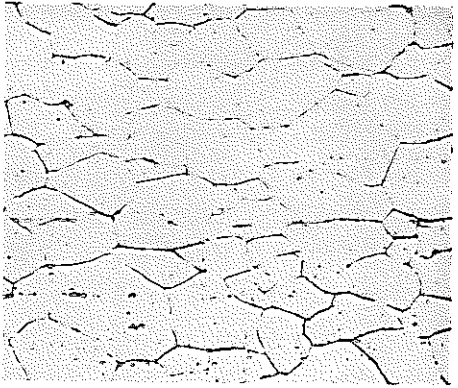
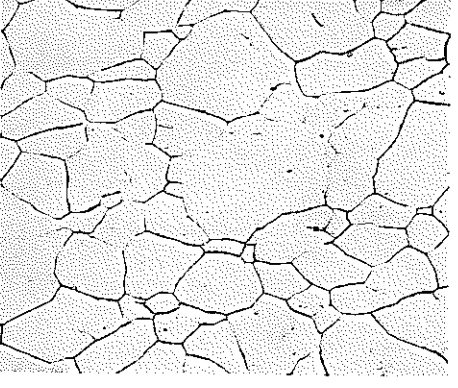
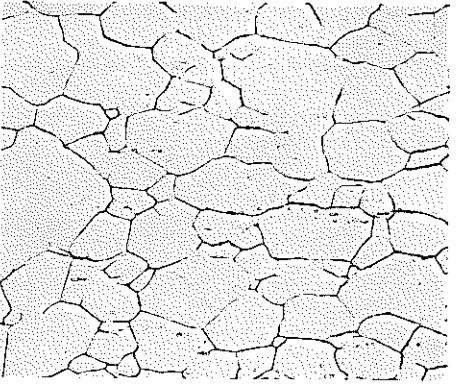
| 管 番 号                              | 縦 断 面 写 真   |  |
|------------------------------------|---|--|
| No. S2311<br>-3<br>(Noより<br>10mm)  |    |    |
| No. S2311<br>-3<br>(Noより<br>321mm) |   |   |
| No. S3555                          |  |  |
| No. S5111                          |  |  |

写真1 金相試験結果

25μ

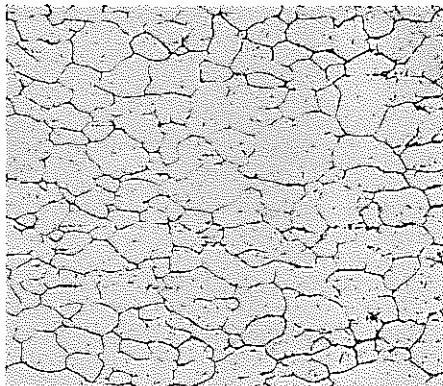
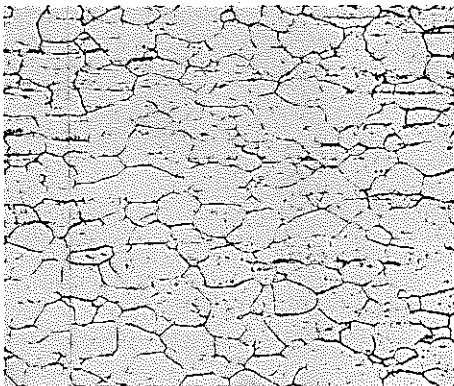
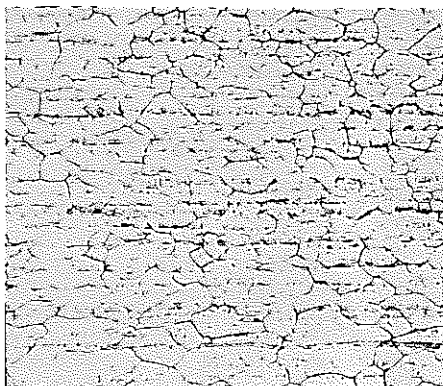
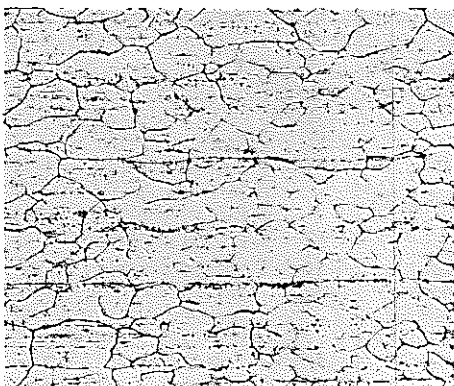

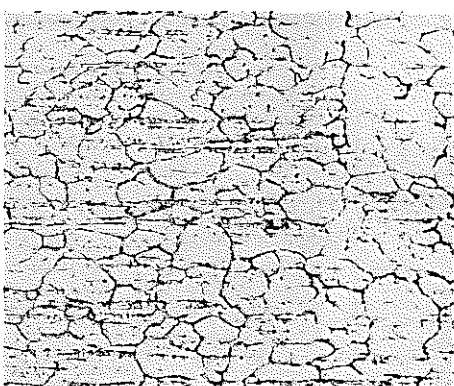
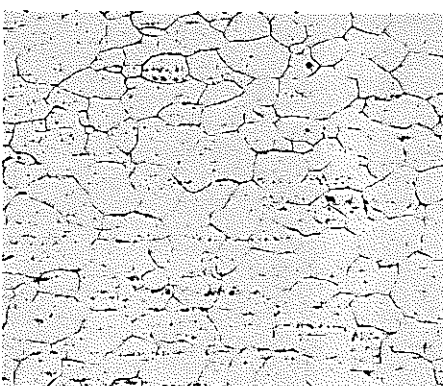
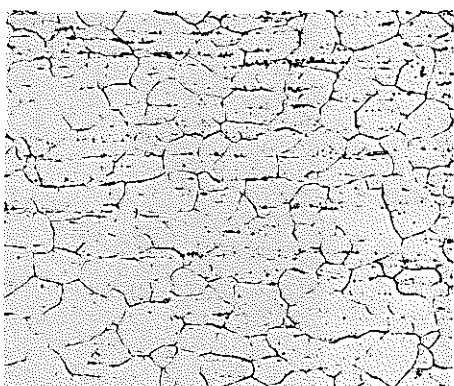
| 管 番 号             | 縦 断 面 写 真   |  |
|-------------------|---|--|
| No. K2092<br>-1-1 |    |    |
| No. K2092<br>-1-2 |   |   |
| No. K2092<br>-1-3 |  |  |
| No. K2160<br>-1   |  |  |

写真2 金相試験結果

25μ

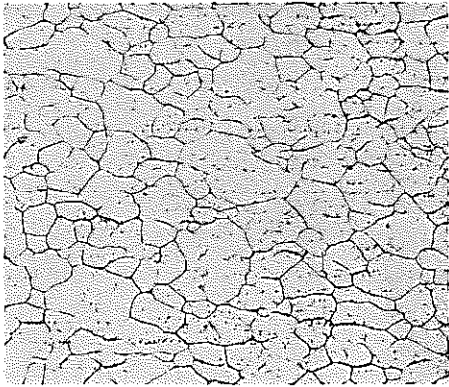
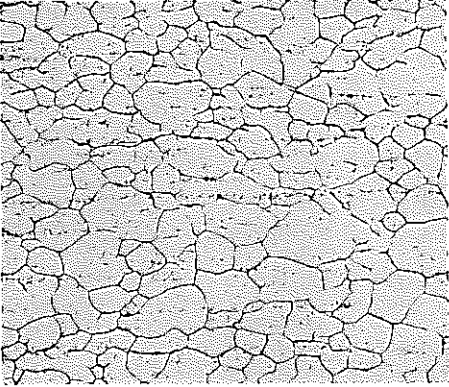
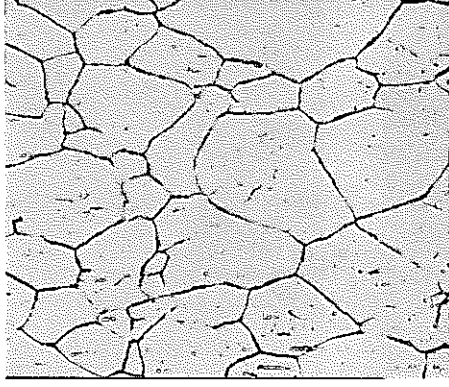
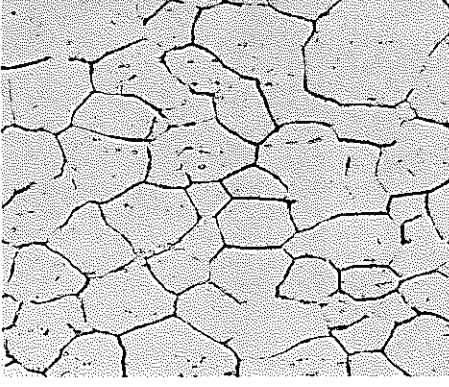
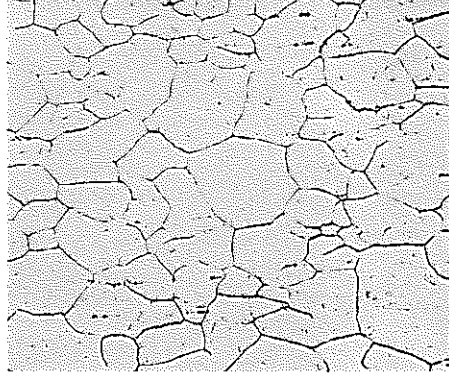
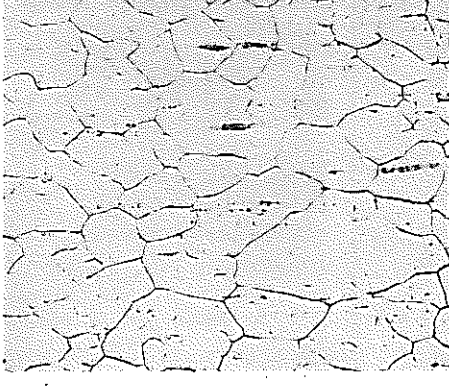
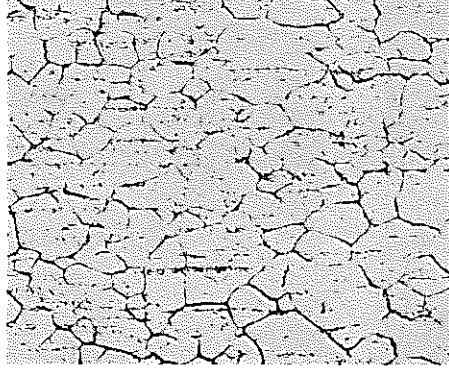
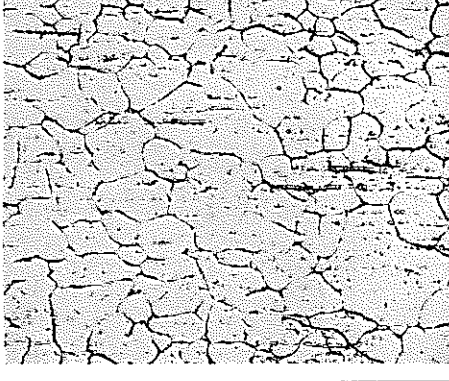
| 管 番 号     | 縦 断 面 写 真   |  |
|-----------|---|--|
| No. K3200 |    |    |
| No. K4031 |   |   |
| No. K4059 |  |  |
| No. 4207  |  |  |

写真3 金相試験結果

25 $\mu$



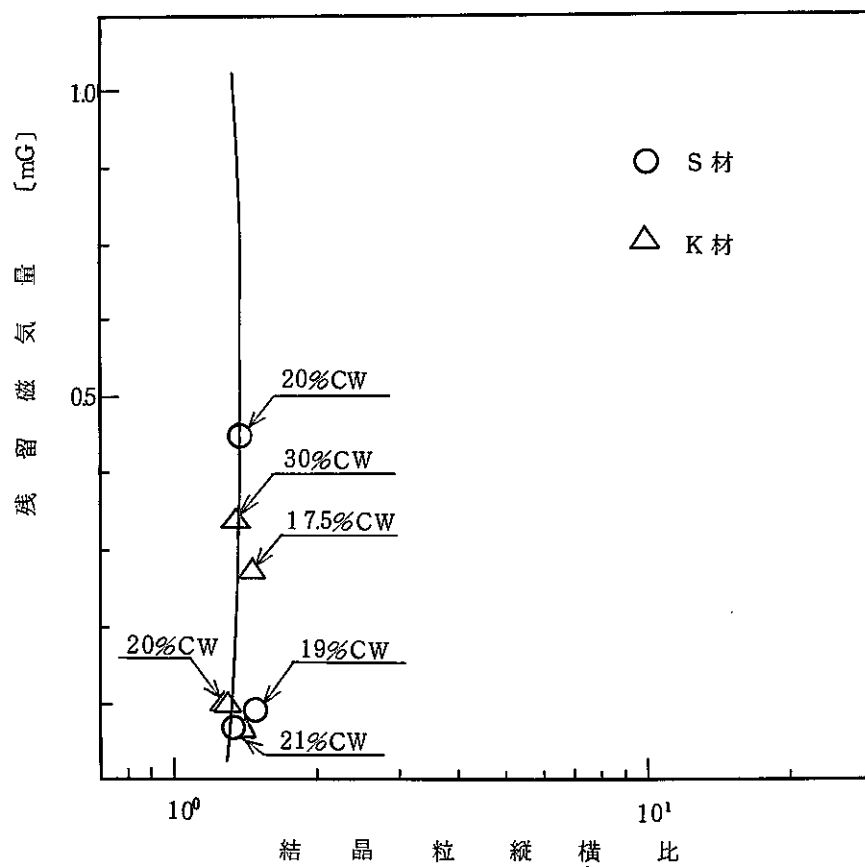


図20 結晶粒縦横比と残留磁気量の関係

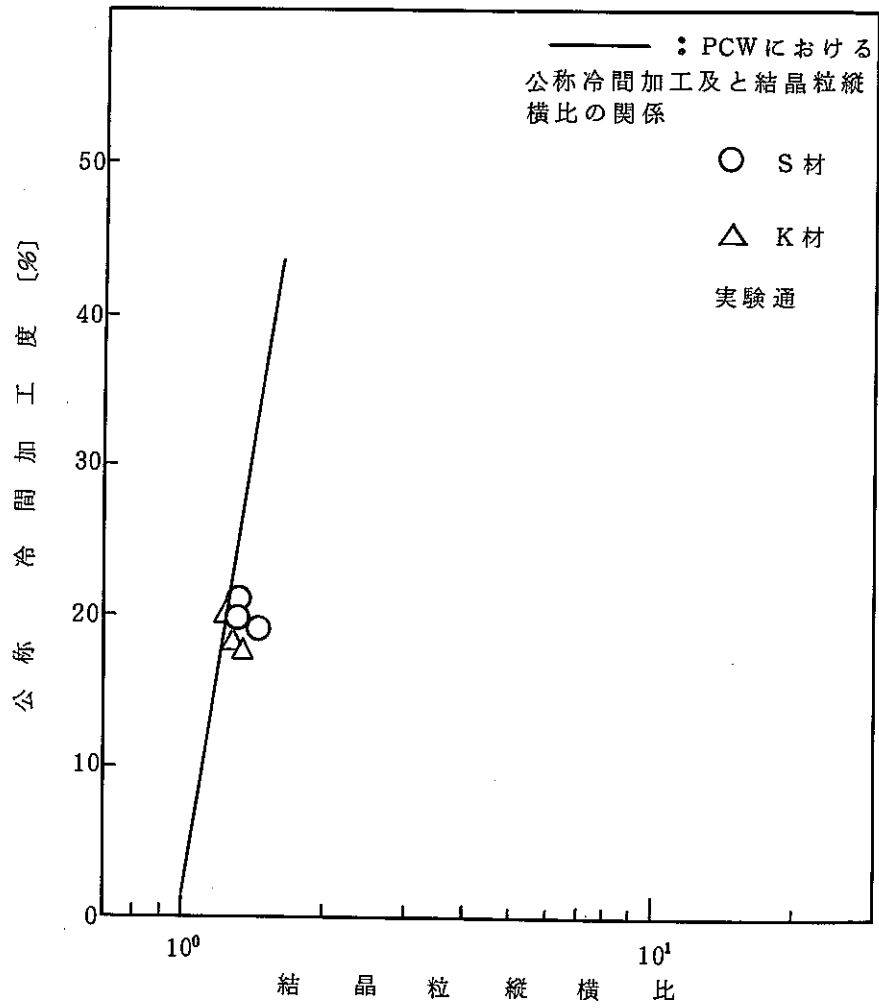


図21 試作被覆管の結晶粒縦横比と公称冷間加工度の関係

## 3-4-2 X線回折結果

体心正方晶（マルテンサイト）の回折線強度のステップスキャン法による精密測定および面心立方晶（オーステナイト）（220）と体心正方晶（200）の極点図形作成を行なった。測定条件は冷間加工度50%の板状の試験片を用いて決定した。条件については、第2報を参考にしたX線管球は、前回のCu管球よりバックグラウンドの2次X線発生が少ない。Mo管球を用いた。図22に冷間加工度50%板状試料の回折図形を示す。各結晶の格子面からの相対強度（面心立方晶（111）の計算強度値を基準にし、体心正方晶においては（110）面にした）<sup>4</sup>）ならびにブラッグ角 $2\theta$ はあらかじめその予想値を算出し、回折チャートから各結晶の格子面を推定した。図22より明らかなように面心立方晶の各格子面は顕著に表わしているが体心正方晶の各格子面の回折強度は面心立方晶の回折と重なり合う部分が多く、そして回折強度も小さいことから充分分離することができなかつた。しかし体心正方晶（200）による回折が $2\theta = 28.60^\circ$ 付近にわずかに発生していることがチャートから発見できた。計算結果から体心正方晶（200）の回折強度より強い格子面である（110）は面心立方晶（111）の強度と重なり合っていることがわかったので、体心正方晶の精密強度測定は（200）面について行なった。そして極点図形作成に用いた格子面は面心立方晶では（220）とし体心正方晶では（200）とした。

## 1. 体心正方晶（200）の精密強度測定結果

## a) X線強度と冷間加工度の関係

ステップスキャン法（定時計数法）による体心正方晶（200）の強度と冷間加工度の関係を図20に示す。試料は0, 10, 20, 30, 50〔%〕の加工度の異なる板状試験片である。回折条件は $2\theta = 27.5^\circ \sim 29.5^\circ$ の範囲としステップ巾 $0.05^\circ$ 、定時計数時間を40secに改定し試験を行なった。図23より明らかなように冷間加工度が大きくなるにしたがって、体心正方晶（200）の強度は増加していく傾向を示した。

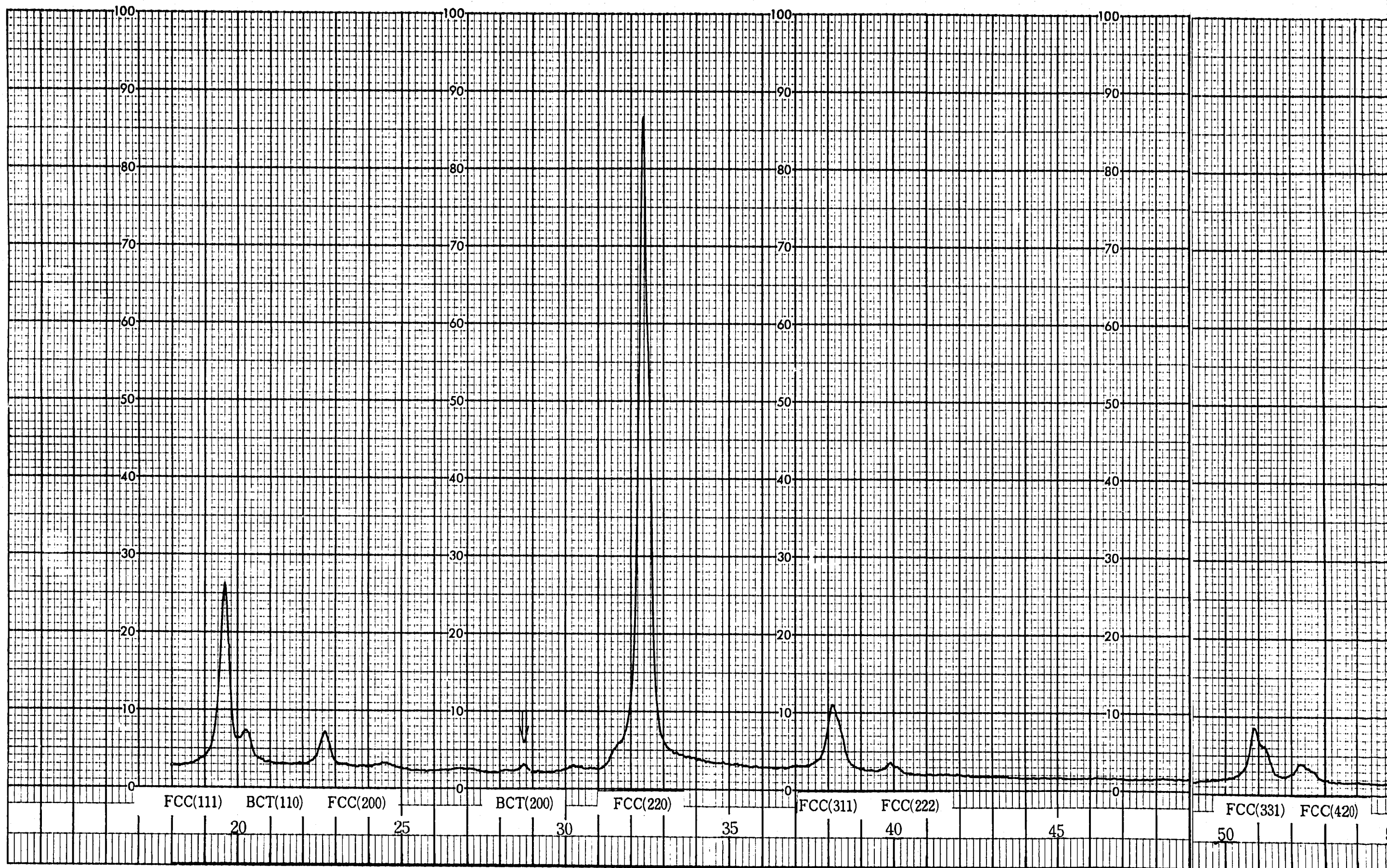


図 22 X 線 回 折 チ ャ ー ト

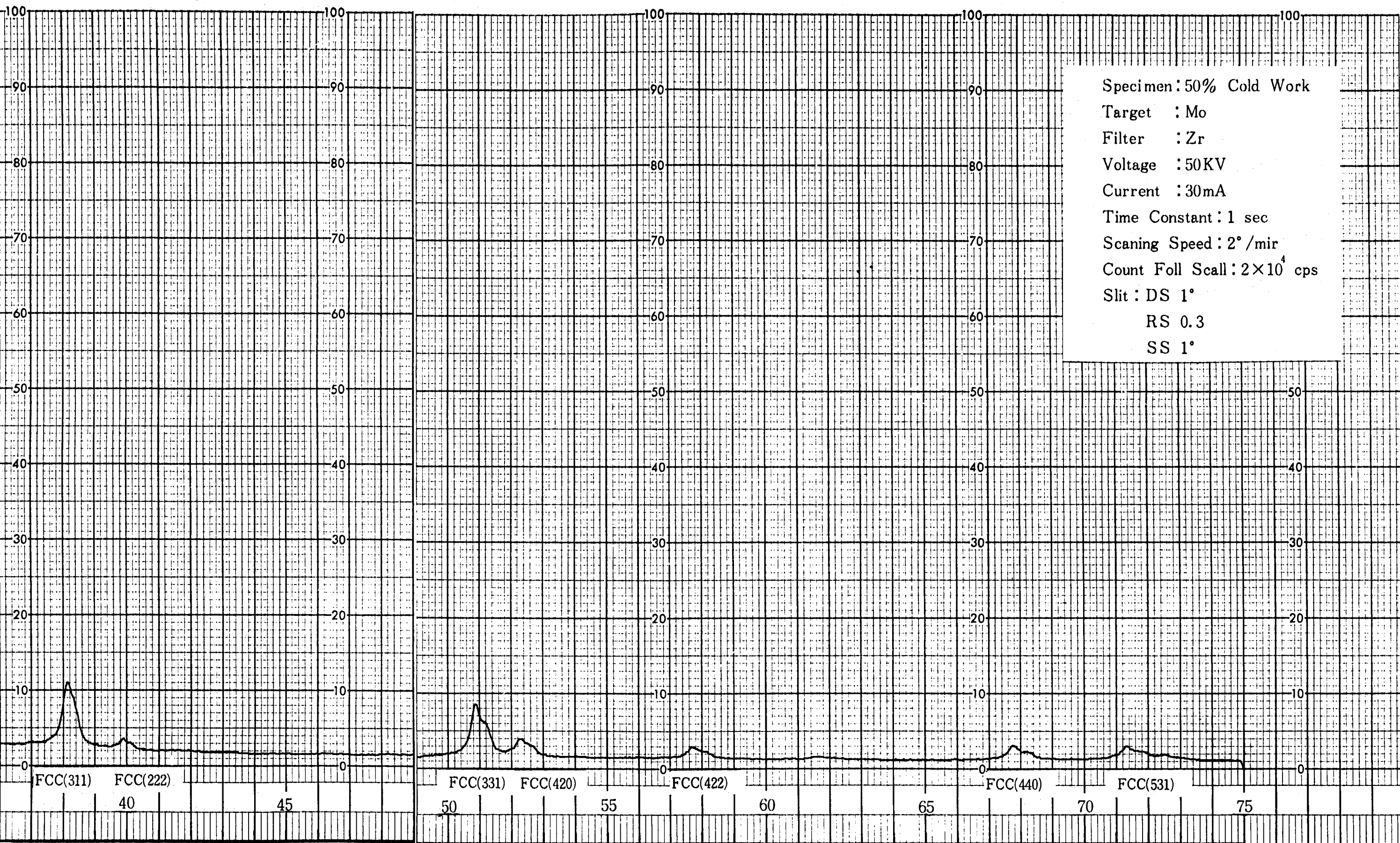


図 22 X 線 回 折 チ ャ ー ト      ブ ラ ッ グ 角  $2\theta$  [°]      ⇒

## b) X線強度と表面層研磨の関係

表面を $10\mu$ 電解研磨したことにより圧延面の残留磁気量が一定になったことを第2報において報告した。このことを確認すべくX線回折を行なった。回折はa)と同じステップスキャン法で行ない回折格子面を体心正方晶(200)とし $10\mu$ 電解研磨前後の強度の比較を行なった。図24に冷間加工度と研磨前後の強度差。そして $10\mu$ 内部の強度の関係を示す。図より明らかなように冷間加工度が大きくなるにしたがって $10\mu$ 研磨後の体心正方晶(200)面の回折強度はゆるやかな傾きをもって増加する傾向を示した。一方 $10\mu$ 研磨の前後における相対強度は20%の冷間加工度まで急増し以後は増加がゆるやかになる傾向を示した。このように図24に示された結果は圧延時に起る板材の塑性流動が表面近傍に限られることを示している。

## 2. 極点図形作成結果

オーステナイト鋼ステンレスのような面心立方格子金属の冷間圧延集合組織は(110)が圧延方向に並ぶことを第2報において報告した。図25に面心立方晶(220)と体心正方晶(200)の極点図形を作成した結果を示す。図中のx-y軸は垂直に立てた試料板がx線ビームとなす角( $\alpha$ 角)で円周方向は面内回転角( $\beta$ 角)をあらわしている。この極点図から体心正方晶(200)は $\alpha=90^\circ$ 方向に強い配向を示す極の存在することがわかった。極の配向性についてはRD(圧延方向)に集中していることから冷間加工において(220)及び(110)が圧延方向に並ぶことが明らかになった。面心立方晶(220)については $\alpha=90^\circ$ 方向に強い配向性を示していた。この面の配向性はRDならびにTD(圧延直角方向)に広がっていた。これらのことからSUS316は冷間加工することにより面心立方晶(220)と体心正方晶(200)は圧延方向に平行に配向することが明らかになった。

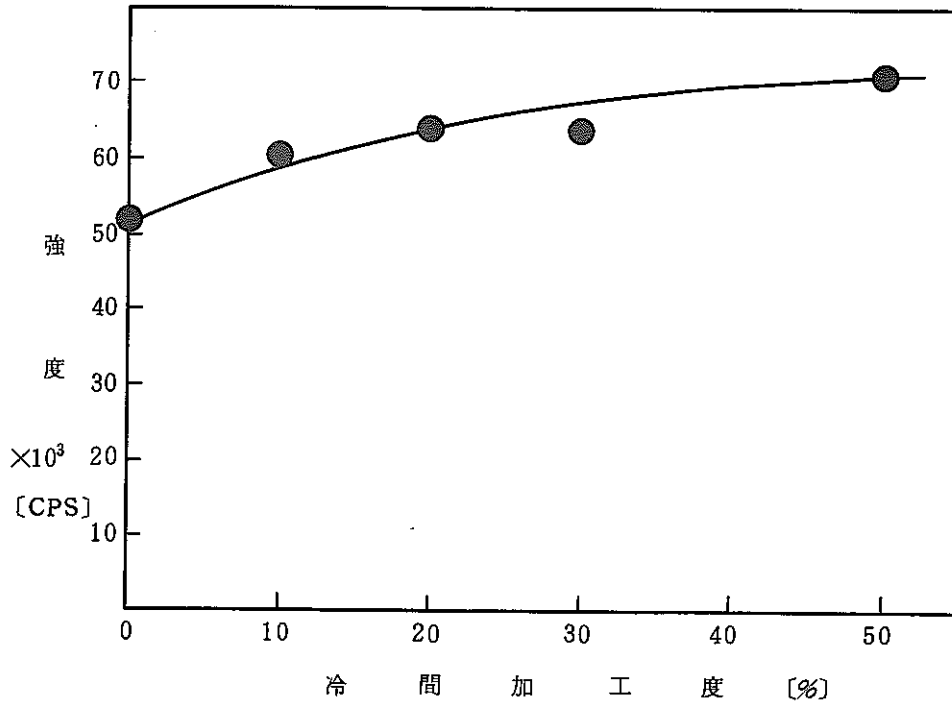


図23 体心正方晶 (200) 面の回折強度と冷間加工度の関係

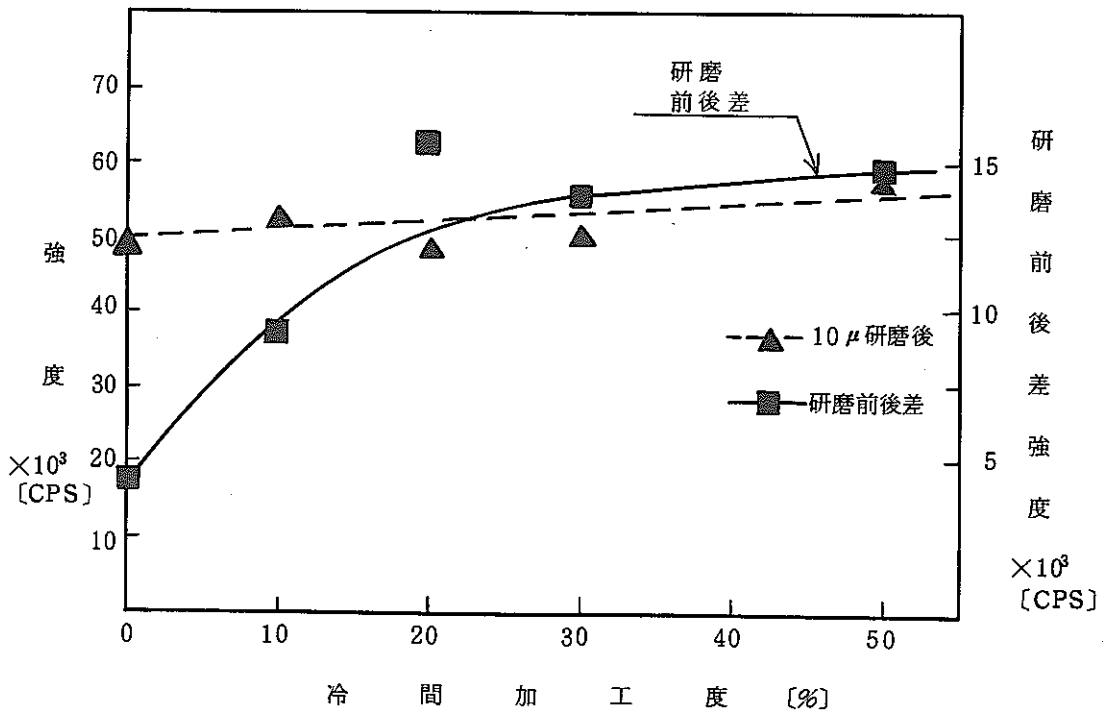
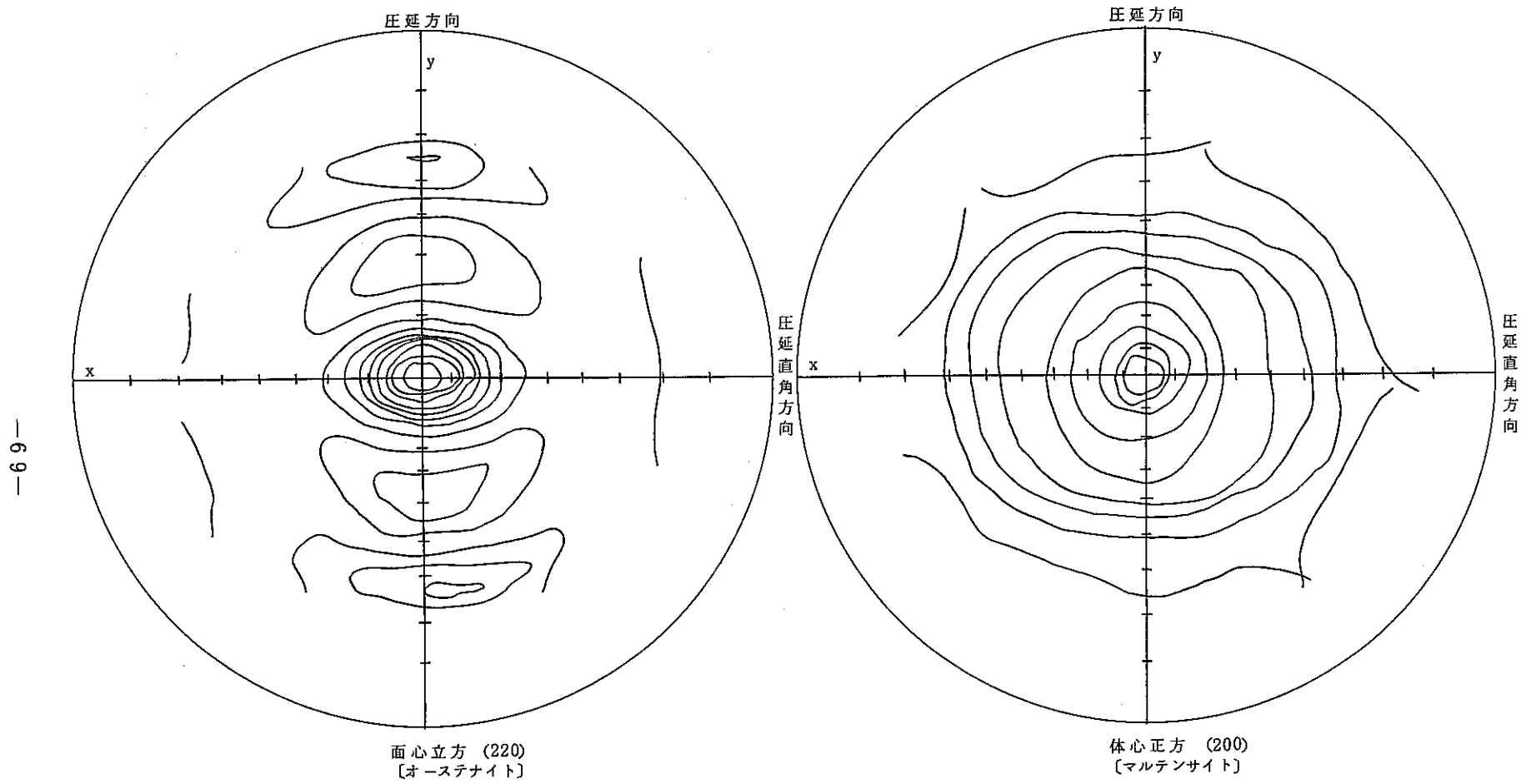


図24 体心正方晶 (200) 面の回折強度と表面層の影響



- 69 -

図 25 SUS 316 オーステナイ系ステンレス鋼 50% 冷間加工材  
極 点 図



## 4. ま と め

- (1) 第1報, 第2報に引続き SUS316オーステナイト系ステンレス鋼の冷間加工度を残留磁気法で測定した。本試験は実用化を前提としたため主な試験片は試験被覆管(加工度17.5%~21%)冷間加工度をかえて製造された被覆管(加工度17.5%~21%),そして室温における引張で冷間加工を模擬した試験片(加工度17.5%~21%)などの回転駆動方式が適用できる試験片とした。
- (2) 回転駆動方式を採用した場合の最適測定条件設定試験を行なった。その結果5HZのLow Passと回転数1500rpmの組合せが今回の試験にとって適当であることがわかった。
- (3) 冷間加工度をかえて製造された被覆管と各社の試作被覆管について残留磁気量の測定を行なった。その結果加工度をかえて製造された被覆管の残留磁気量は10%以上の公称冷間加工度において良い相関を示したが,0%材の残留磁気量は10%材とほぼ同じ値であった。試作被覆管の公称冷間加工度は17.5%~21%でありその残留磁気量は冷間加工度をかえて製造された被覆管の公称冷間加工度19%~20%の範囲に相当していたが,そのバラツキは大きかった。このバラツキは試作被覆管の製造条件等が原因していると考えられる。
- (4) 被覆管の製造条件と残留磁気量の関係について調べた結果,残留磁気量は結晶粒度,溶体化処理温度冷間加工度に硬上に関係して変化することがわかった。しかしこれらのパラメータは夫々が関連し合うためどの因子が残留磁気量のバラツキに最も強く影響するか,確かめることはできなかった。
- (5) 室温での単純引張で被覆管製造時の冷間加工を模擬した結果,単純引張時の塑性変形量と残留磁気量は非常に良い相関を示すことがわかり,単純引張で被覆管の冷間加工度を模擬できるか明らかとなった。これは容易に冷間加工度をかえた被覆管を製造できない現状を補うのに有用な技術である。
- (6) 残留磁気量測定の結果,異常な残留磁気分布を示した被覆管の部分について金相観察と結晶粒縦横比測定を行なった。その結果第1,2報で示したと同様に試作被覆管についても結晶粒縦横比は,公称冷間加工度と相関のあることがわかった。しかし,公称冷間加工度の振り幅がせまいため十分な精度で結晶粒縦横比との関係を調べることはできなかった。
- (7) X線回折を行ない冷間加工に伴って発生すると考えられている体心正方晶を持つ加工マルテルサイトの同定を行なった。その結果体心正方晶(200)のX線回折強度が公称冷間加工度の増加にしたがって増えることがわかった。また表面層の影響を調べるために電解研磨によって表面層10μを取り去った後の体心正方晶(200)のX線回折強度を測定した。その結果10μ研磨後の強度は公称冷間加工度に対しわずかな変化しか示さず,加工時の塑性流動が表面のごと近傍に限られることが明らかになった。

- (8) これらの結果から磁気法によって被覆管の冷間加工度を測する場合、製造条件が一定であればその範囲内において冷間加工度と残留磁気量は一定の関係を示すので、製造条件が一定と考えられる同一ロットの製品に対して応用は充分可能であると思われる。

## 5. 参考文献

- 1) 三浦, 角田, 佐藤, 安藤, 五十嵐, 稲田, 田中, 上村  
高速炉増殖炉用燃料被覆管の冷間加工度測定法の開発(第1報)  
PNC技術レポート ZN841-77-34
- 2) 三浦, 佐藤, 五十嵐, 上村  
高速炉増殖炉用燃料被覆管の冷間加工度測定法の開発(第2報)  
PNC技術レポート ZN841-78-18
- 3) 金属物理学方論  
幸田 成康著 コロナ社
- 4) X線回折要論  
B. D. COLLITY著, 幸田 成康校閲, 松村 源太郎訳 アグネ社
- 5) マルテンサイト変態の結晶学  
C. M. WAYMAN著  
清水 謙一訳 丸善社