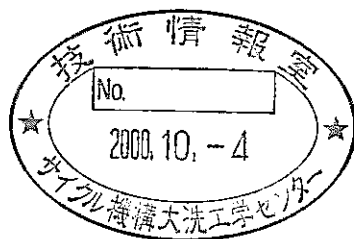


高速炉用炭・窒化物燃料の照射後試験  
— 燃料ピンの非破壊試験結果 —  
(技術報告)

2000年9月



核燃料サイクル開発機構  
大洗工学センター

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

Inquires 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)  
2000

## 高速炉用炭・窒化物燃料の照射後試験

### —燃料ピンの非破壊試験結果— (技術報告書)

報告者 勝山幸三<sup>1)</sup> 永峯剛<sup>1)</sup> 前田宏治<sup>1)</sup> 松元慎一郎<sup>1)</sup>

#### 要旨

日本国内初の高速炉（実験炉「常陽」）を用いたウラン・プルトニウム混合炭・窒化物燃料（以下 炭・窒化物燃料）の照射試験は、高速炉における照射挙動及び燃料ピンの健全性を確認し、新型燃料の評価に資するために実施した。本研究では炭化物燃料ピン 1 本、窒化物燃料ピン 2 本を最大燃焼度約 40GWd/t まで照射した。

炭・窒化物燃料の非破壊照射後試験は大洗工学センター照射燃料集合体試験施設において平成 11 年 10 月から開始し、平成 12 年 3 月に終了した。本報告書は炭・窒化物燃料の非破壊照射後試験結果について報告するものである。

主な結果を以下に示す。

- (1) 照射後非破壊試験結果から炭・窒化物燃料ピンの健全性を確認した。
- (2) 炭・窒化物燃料のスタック伸び率は、高速炉用 MOX 燃料のそれよりも大きく、これは燃料スエリング挙動の違いに起因している現象と予測される。
- (3) 炭・窒化物燃料のスタック部の $\gamma$ 線強度分布に特異な挙動は確認されなかった。窒化物燃料では下部熱遮蔽ペレット部及び燃料ペレット外周部への Cs137 の移動挙動に差異が認められた。炭化物燃料では明確な Cs137 の移動は確認されなかった。
- (4) 燃料ピン寸法測定から直径ギャップ幅の小さい炭化物燃料及び窒化物燃料ではスタック部に FCMI に起因すると予測される 50 $\mu$ m 前後の外径増加が確認された。一方、直径ギャップ幅の大きい窒化物燃料ではペレットのリロケーションに伴うと予測される比較的顕著なオーバリティが観察された。
- (5) 窒化物燃料の FP ガス放出率は 3.3%と 5.2%を示し、高速炉用 MOX 燃料と比較すると低い値であった。

---

1) 核燃料サイクル開発機構 照射施設運転管理センター 燃料材料試験部 照射燃料集合体試験室

Post irradiation examination of (U,Pu) C and (U,Pu) N fuel for fast reactor  
— Non-destructive examination result of the fuel pin —

KOZO KATSUYAMA<sup>1)</sup> TSUYOSHI NAGAMINE<sup>1)</sup>

KOJI MAEDA<sup>1)</sup> SHIN-ICHIRO MATSUMOTO<sup>1)</sup>

abstract

In order to evaluate irradiation behavior of (U, Pu) C and (U, Pu) N fuel using fast reactor, (U, Pu) C and (U, Pu) N fuel pins were irradiated in JOYO for the first time in Japan. In this study, one (U, Pu) C fuel pin and two (U, Pu) N fuel pins were irradiated to maximum burn up about 40GWd/t. Post irradiation examination of (U, Pu) C and (U, Pu) N fuel pins started in Fuel Monitoring Facility (FMF) at JNC from October 1999, and it ended in March, 2000. The results of non-destructive post irradiation examination reported in this document.

Main results are shown in the following.

- (1) The soundness of all (U,Pu) C and (U,Pu) N fuel pins were confirmed from the non-destructive examination result.
- (2) The fuel stack elongation of (U,Pu) C and (U,Pu) N is bigger than it of the MOX fuel for fast reactor.
- (3) The singular behavior from the gamma ray scanning measurement in the stack area was not confirmed. The migration of Cs137 to lower insulator pellet and outside of the pellet was confirmed in (U,Pu) N B9N02 pin. In (U,Pu) C fuel, the migration of Cs137 was not confirmed.
- (4) In (U,Pu)C B9C01 pin and (U,Pu)N B9N02 pin in which the gap width was small, diameter of cladding increase around 50  $\mu$ m in the stack area which originates for FCMI was confirmed. In (U,Pu) N B9N01 pin in which the gap width was wide, the ovality which originates from the relocation of the pellet was confirmed.
- (5) Fission gas release rate of (U,Pu)N were 3.3% and 5.2%, and the low value compared to the MOX fuel was shown.

---

1) JNC, O-arai Engineering Center, Irradiation Center, Fuels and Materials Division, Fuel Monitoring Section

## 目次

1. はじめに	1
2. 燃料仕様	1
3. 照射条件	1
4. 試験方法	2
4.1 燃料ピン詳細外観検査	2
4.2 燃料ピン X線ラジオグラフィ	2
4.3 燃料ピン重量測定	2
4.4 燃料ピン $\gamma$ 線スキャニング	2
4.5 燃料ピン寸法測定	3
4.6 燃料ピンパンクチャ試験	3
5. 試験結果	3
5.1 燃料ピン詳細外観検査	3
5.2 燃料ピン X線ラジオグラフィ	5
5.3 燃料ピン重量測定	5
5.4 燃料ピン $\gamma$ 線スキャニング	5
5.5 燃料ピン寸法測定	6
5.6 燃料ピンパンクチャ試験	7
6. 考察	7
6.1 スタック伸び	7
6.2 外径変化挙動	8
6.3 Cs137 移動挙動	8
6.4 FP ガス放出挙動	8
7. まとめ	9
8. 謝辞	9
参考文献	10

## 表 リ ス ト

表2.1 「常陽」照射炭・窒化物燃料ピンの基本仕様	11
表3.1 炭化物燃料ピン[B9C01]照射状況	12
表3.2 窒化物燃料ピン[B9N01]照射状況	12
表3.3 窒化物燃料ピン[B9N02]照射状況	12
表5.1.1 ディンプルに起因する接触跡の発生位置	13
表5.1.2 被覆管表面の接触跡発生位置	13
表5.2.1 燃料ピンX線ラジオグラフィー内部状況観察結果	14
表5.2.2 燃料ピンX線ラジオグラフィースタック長測定結果	14
表5.3.1 燃料ピン重量測定結果	15
表5.4.1 定点スペクトル測定結果	16
表5.5.1 全長測定結果	17
表5.5.2 曲がり測定結果	17
表5.5.3 外径測定結果	17
表5.6.1 パンクチャ試験結果	18
表5.6.2 ガス質量分析結果	18

## 図 リ ス ト

図2.1 炭化物燃料ピン図面	19
図2.2 窒化物燃料ピン図面	20
図2.3 PFB090炭窒化物燃料ピン装荷位置	21
図2.4 燃料ピン及びピンタイロッド位置関係図	22
図5.2.1 スタック伸び率と燃焼度との関係	23
図5.4.1 軸方向スキャンング測定結果(B9C01)	24
図5.4.2 軸方向スキャンング測定結果(B9N01)	25
図5.4.3 軸方向スキャンング測定結果(B9N02)	26
図5.4.4 軸方向スキャンング測定結果(B9C01,スタック部)	27
図5.4.5 軸方向スキャンング測定結果(B9N01,スタック部)	28
図5.4.6 軸方向スキャンング測定結果(B9N02,スタック部)	29
図5.4.7 スペクトルチャート(B9C01)	30
図5.4.8 スペクトルチャート(B9N01)	31
図5.4.9 スペクトルチャート(B9N02)	32
図5.4.10 スペクトル測定による軸方向 $\gamma$ 線強度分布(B9C01)	33
図5.4.11 スペクトル測定による軸方向 $\gamma$ 線強度分布(B9N01)	33
図5.4.12 スペクトル測定による軸方向 $\gamma$ 線強度分布(B9N02)	33
図5.4.13 トモグラフィ像(Rh106)	34
図5.4.14 トモグラフィ像(Zr-95)	35
図5.4.15 トモグラフィ像(Cs-137)	36
図5.4.16 トモグラフィ像(Co-58)	37
図5.5.1 曲がり測定プロファイル	38
図5.5.2 軸方向外径プロファイル(B9C01)	39
図5.5.3 軸方向外径プロファイル(B9N01)	40
図5.5.4 軸方向外径プロファイル(B9N02)	41
図5.5.5 軸方向詳細(12方向)外径測定プロファイル(B9C01)	42
図5.5.6 軸方向詳細(12方向)外径測定プロファイル(B9N01)	43

図5.5.7 軸方向詳細(12方向)外径測定プロファイル(B9N02) .....	44
図5.5.8 軸方向平均外径プロファイル .....	45

写 真 リ ス ト

写真5.1.1 デンプル接触跡観察結果(B9C01) .....	46
写真5.1.2 デンプル接触跡観察結果(B9N01) .....	47
写真5.1.3 デンプル接触跡観察結果(B9N02) .....	48
写真5.1.4 被覆管表面状況観察結果(B9C01) .....	49
写真5.1.5 被覆管表面状況観察結果(B9N01) .....	50
写真5.1.6 被覆管表面状況観察結果(B9N02) .....	51
写真5.1.7 上下中間端栓溶接部の表面状況観察結果 .....	52
写真5.2.1 X線ラジオグラフィー観察写真(B9C01:0° 方向) .....	53
写真5.2.2 X線ラジオグラフィー観察写真(B9C01:90° 方向) .....	54
写真5.2.3 X線ラジオグラフィー観察写真(B9N01:0° 方向) .....	55
写真5.2.4 X線ラジオグラフィー観察写真(B9N01:270° 方向) .....	56
写真5.2.5 X線ラジオグラフィー観察写真(B9N02:0° 方向) .....	57
写真5.2.6 X線ラジオグラフィー観察写真(B9N02:90° 方向) .....	58

実施した。トモグラフィー測定は燃料ピンを $0^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $120^{\circ}$ 、 $150^{\circ}$ 、 $240^{\circ}$ 、 $270^{\circ}$ 度の6方向から約70点径方向スキャンし、得られた $\gamma$ 線強度から燃料の横断面核種分布を評価した。

#### 4.5 燃料ピン寸法測定

##### (1) 全長測定

燃料ピンをピン寸法測定装置に装荷し、レーザーによる外径測定時の軸方向移動量をエンコーダにより検出する。全長測定は4方向 $45^{\circ}$ 間隔で測定した。なお、燃料ピン全長測定の精度は $\pm 1.0\text{mm}$ である。

##### (2) 曲がり測定

燃料ピンの最大曲がり方向を目視により確認し、燃料ピンの上端と下端の垂線からのずれを曲がり量とした。なお、曲がり量測定の精度は $\pm 0.5\text{mm}$ である。

##### (3) 外径測定

燃料ピン全長の外径測定はレーザーにより周方向 $45^{\circ}$ 間隔、軸方向 $1\text{mm}$ ピッチで、原研で製作したスタック部を含む $800\text{mm}$ の範囲については周方向 $15^{\circ}$ 間隔で測定した。燃料ピン外径測定の精度は $\pm 0.003\text{mm}$ である。

#### 4.6 燃料ピンパンクチャ試験

パンクチャ試験装置により、燃料ピンプレナム部を穿孔し、穿孔前後の圧力差から燃料ピン内のガス量及びピン内容積を測定する。また、捕集したガスをガスクロマトフィにより分析し、Xe、Kr量を測定するとともに、ガス質量分析装置によりXe、Krの同位体組成比を測定する。

### 5. 試験結果

#### 5.1 燃料ピン詳細外観検査

炭・窒化物燃料ピンは図2.3に示すようにグリッド素子によってコンパートメント内で固定されている。このグリッド素子には、燃料ピンを固定するためのディンプルが設けられており、このディンプルとの接触跡が被覆管表面に観察されている。このため、このディンプルに起因する接触跡とそれ以外の被覆管表面状況及び端栓溶接部の観察結果について以下に示す。

##### (1) ディンプルに起因する接触跡観察（グリッドマーク観察）

表5.1.1にグリッド素子のディンプルによって発生したグリッドマークの発生位置を示す。発生位置は、図面から予測される位置と測定結果はほぼ一致した。写真5.1.1～5.1.3にグリッドマークの観察写真を示す。写真から、燃



料部に位置するグリッド No. 46 (DFPB : 478 mm) 及びその上下に位置するグリッド No. 47 (DFPB : 278 mm), No. 45 (DFPB : 678 mm) の接触跡は、他に比べ比較的大きく観察された。後述するピン寸法測定においてこれらの接触跡の位置では顕著な外径減少は確認されていないことから燃料ピン健全性への影響はないと予測される。

## (2) 被覆管表面状況観察

### ①変色

全ピンの被覆管表面に黒及び赤茶変色が観察された。この変色については、「常陽」で照射された同一の被覆管鋼種の高速炉用MOX燃料ピンにおいても観察されており、炭・窒化物燃料ピン特有の現象ではなく健全性に影響しない。

### ②接触跡

全ピンの被覆管表面にコンパートメント内面との接触跡及び隣接ピンに起因すると推測される跡が観察された。表 5.1.2 に被覆管表面の接触跡等の発生位置等をまとめた表を、写真 5.1.4~5.1.6 に被覆管表面の接触跡等観察写真を示す。コンパートメント内面及び隣接ピンに起因すると推測される接触跡は、軸位置 DFPB : 577mm~588mm の範囲で観察された。この位置はスタック上端 (DFPB : 578mm) 付近であり、グリッド間のほぼ中心でもある。また、発生角度は隣接ピンどうしが接触する可能性のある方向 0、150、210°と一致していた。

## (3) 端栓溶接部の表面状況観察

炭・窒化燃料は、原研で製作した 800 mmの燃料ピンに長尺の上部中間端栓及び下部中間端栓を取付け、「常陽」で照射している。このため原研で製作した 800mm の燃料ピンの端栓溶接部及び上下中間端栓と燃料ピンの溶接部について観察した。原研で製作した 800mm の燃料ピンの端栓溶接部については全ての燃料ピンともに特異な挙動は観察されなかった。一方、上下中間端栓と燃料ピンの溶接部において B9N01 で 1 箇所、B9N02 で 3 箇所のワレが観察された。写真 4.1.7 にワレが観察された溶接部の観察写真を示す。その他の溶接部については、異常は観察されなかった。

今回観察された燃料ピンと中間端栓の溶接部の割れについては、廻り止めのための溶接が施されている個所であり、燃料ピンの密封性に影響を及ぼす溶接部ではないことから健全性への影響はない。

## 5.2 燃料ピン X 線ラジオグラフィ

X 線ラジオグラフィにより燃料ピンの内部状況を観察した結果を表 5.2.1 に、X 線ラジオグラフィ観察写真を写真 5.2.1~5.2.6 に示す。全ての燃料ピンで中心空孔、ペレット間ギャップは観察されなかったが、ペレットの部分的な割れは観察された。

スタック長測定結果を表 5.2.2 に示す。スタック長の伸びは、窒化物燃料 B9N01 が最も大きく 3.6mm (1.8%) であった。その他のスタック伸び量は炭化物燃料 B9C01 が 3.0mm (1.5%)、窒化物燃料 B9N02 が 2.7mm (1.4%) であった。

炭・窒化物燃料と高速炉用 MOX 燃料のスタック伸び率の比較を図 5.2.1 に示す。炭・窒化物燃料は低密度 85%TD であるが、スタック伸び率は高密度 93%TD 高速炉用 MOX 燃料と比較すると同等かやや大きく、低密度 85%TD MOX 燃料よりも明らかに伸び率が大きい。

## 5.3 燃料ピン重量測定

燃料ピン重量測定結果を表 5.3.1 に示す。全ての燃料ピンにおいて照射前後で有意差 $\pm 0.4\text{g}$  を超える重量変化がなかったことから、燃料ピン破損等はなく健全であることを確認した。

## 5.4 燃料ピン $\gamma$ 線スキャンニング

### (1) 軸方向スキャンニング測定

燃料ピン全長の軸方向スキャンニング測定結果を図 5.4.1~5.4.3 に、スタック部(200 mm)の拡大図を図 5.4.4~5.4.6 に示す。全長の軸方向スキャンニング測定結果から、燃料の FP 核種である Rh106 や Zr95、被覆管の放射化核種である Co58、Mn54 については特異な挙動は観察されない。Cs137 についてはスタック部での顕著な移動は観察されていないが、窒化物燃料 B9N01 の下部熱遮蔽ペレット部で下端側ほど強度が高くなっているのが確認される。この傾向は上部熱遮蔽ペレット部では観察されていない。また、窒化物燃料 B9N01 では下部プレナムスリーブ部の上下端においても Cs137 のピークが確認され、上部側のプレナムスリーブ部と比較すると明らかに  $\gamma$  線強度が高い。Cs137 の移動傾向は同じ窒化物燃料である B9N01 と B9N02 を比較すると、B9N02 では移動が確認されていない。

図 5.4.4~5.4.6 のスタック部(200 mm)拡大図から、 $\gamma$  線の強度分布はスタック部でほぼ平坦であり、軸方向の燃焼分布に大きなピーキングがないことが予測される。この結果は「常陽」炉心中心付近 200mm の範囲の軸方向出力分布と一致している。また、これらの図より炭化物燃料と窒化物燃料では大きな違いは無く、両者ともほぼ同様な分布を示している。

## (2) 定点スペクトル測定

スタック中心位置の定点スペクトルチャートを図 5.4.7～5.4.9 に示す。代表的な FP 核種である Rh106、Zr95、Cs137、Cs134、Pr144、Ru103、被覆管の放射化核種である Mn54、Co58、Co60 のスペクトルピークが確認できた。

定点スペクトル測定結果を表 5.4.1 に示す。スタック部上中下の 3 点の平均  $\gamma$  線強度を 1 として規格化した軸方向分布を図 5.4.10～5.4.12 に示す。スタック部の軸方向  $\gamma$  線強度のピーキングはスタック中心位置が最大で 1.05 程度であり、スタック部 200 mm の軸方向  $\gamma$  線強度分布はほぼ平坦である。

## (3) トモグラフィー測定

トモグラフィー測定は各ピンのスタック中心部 DFPB : 478 mm について実施した。その結果を図 5.4.13～5.4.16 に示す。Rh106、Zr95 の  $\gamma$  線強度分布からペレット内での燃焼分布は平坦であることが予測される。Cs137 については窒化物燃料 B9N02 においてペレット外周部になるほど多く観察されており、ペレット外周部への移動が予想される。この結果は上述した軸方向分布での Cs137 の移動傾向 (B9N02 が B9N01 よりも顕著である) と同様であった。

## 5.5 燃料ピン寸法測定

## (1) 全長測定

全長測定結果を表 5.5.1 に示す。炭・窒化物燃料ピンの全長は 1531.9mm～1532.8mm の範囲であり、製造値データ (FAB.) と比較した結果、全ピンとも測定誤差 ( $\pm 1.0$  mm) を超える変化は観察されなかった。

## (2) 曲がり測定

測定結果を表 5.5.2 に、曲がり測定プロファイルを図 5.5.1 に示す。曲がり方向は全ピンともにコンパートメント内においてピン束がピア樽状に膨らむ方向に曲がっており、PFB090 の他のコンパートメントに装荷された MOX 燃料と同様であった。最大曲がりを示したのは窒化物燃料ピン B9N01 の 31° 方向、軸位置 DFPB : 626.4 mm、最大曲がり量 9.2 mm であった。

## (3) 外径測定

45° 間隔で実施した燃料ピン全長の外径測定プロファイルを図 5.5.2～5.5.4 に示す。全ピンにグリット素子ディンプルとの接触で発生した接触跡の影響によると予測される局所的ピークがグリッドのある位置で観察された。同様な局所的ピークは、「常陽」で照射されたグリッドタイプの燃料ピンにおいても観察されている。

15° 間隔で実施したスタック部を含む 800mm の範囲の外径測定結果を表 5.5.3 に、外径プロファイルを図 5.4.5~5.4.7 に、12 方向平均外径プロファイルを図 5.5.8 に示す。図 5.5.5 及び 5.5.7 に示す炭化物燃料ピン B9C01 と窒化物燃料ピン B9N02 では各方向ともにほぼ同様な外径増加が観察されるのに対し、図 5.5.6 に示す窒化物燃料ピン B9N01 ではオーバリティが観察された。製造仕様では直径ギャップ幅は B9C01:0.18 mm、B9N01 :0.32 mm、B9N02 :0.17 mm となっており、ギャップ幅の小さい B9C01、B9N02 ではスタック部で 50 $\mu$ m 前後の外径増加が、ギャップ幅の大きい B9N01 ではオーバリティが観察された。一方、ギャップ幅の小さい B9C01 と B9N02 において炭化物燃料と窒化物燃料による外径プロファイルの相違は明確には観られなかった。

#### 5.6 燃料ピンパンクチャ試験

パンクチャ試験は窒化物燃料ピン 2 本 (B9N01、B9N02) について実施した。ピン内圧等の測定結果を表 5.6.1 に、Xe、Kr の同位体組成比分析結果を表 5.6.2 に示す。これらからピン内に FP ガスが保持されており、窒化物燃料ピンにリーク等がなく、健全であることを確認した。燃料ピン内圧は B9N01 が 1165.6Torr、B9N02 が 1311.8Torr であった。FP ガス放出率は B9N01 が 3.3%、B9N02 が 5.2% であった。また、Xe、Kr の同位体組成比はこれまで取得している MOX 燃料の組成比とほぼ同様であった。

## 6. 考察

燃料ピンの非破壊試験結果から高速炉用炭・窒化物燃料の照射挙動について考察した。

### 6.1 スタック伸び

X-RG 観察結果から算出したスタック伸びから予測されるスエリング挙動について考察した。炭・窒化物燃料と高速炉用 MOX 燃料のスタック伸び率の比較を示した図 5.2.1 から、炭・窒化物燃料のスタック伸び率は、同じ低密度 85%TD の高速炉用 MOX 燃料と比較すると、明らかに大きい値を示している。単位燃焼度当たりの伸び率を算出すると低密度 85%TD の MOX 燃料は約 0.08%/10000MWd/t であるのに対し、今回の炭・窒化物燃料では 0.4%/10000MWd/t を示し、約 5 倍伸び率が大きい。これらは炭・窒化物燃料のスエリングが大きい特性を示しているものと予測される。

今回測定したスタック伸びについて燃料スエリングが等方的に発生していると仮定すると体積膨張率は 3.4~5.8%になると推定される。

## 6.2 外径変化挙動

ピン寸法測定結果から、図 5.5.5 及び 5.5.7 に示す炭化物燃料ピン B9C01 と窒化物燃料ピン B9N02 では各方向ともにほぼ同様な外径増加が観察されるのに対し、図 5.5.6 に示す窒化物燃料ピン B9N01 ではオーバリティが観察された。これらは製造時の直径ギャップ幅に影響を受けていると予測され、ギャップ幅の小さい B9C01、B9N02 ではスタック部で 50 $\mu$ m 前後の外径増加が、ギャップ幅の大きい B9N01 では顕著なオーバリティが観察された。炭・窒化物燃料は、MOX 燃料と比較して熱伝導度が高く、クリープ速度も小さい。直径ギャップ幅の狭い燃料ピンはスミア密度が小さく、燃料スエリングの吸収幅が少ないために FCMI が比較的顕著に発生しているものと予測される。直径ギャップ幅の広い燃料ピンでは、熱応力で燃料ペレットにクラックが生じた際に隙間が多いことによってペレットのリロケーションがより顕著に発生し、燃料ピンのオーバリティを引き起こしたと予測される。

## 6.3 Cs137 移動挙動

一般的に高速炉用 MOX 燃料では燃料中心温度が高いために Cs137 は高温側から低温側へ移動する傾向が顕著である。窒化物燃料ピン B9N02 の軸方向強度分布では Cs137 の下部熱遮蔽ペレット部及び下部プレナム部への移動が確認された。また、同ピンでは燃料ペレット内の径方向強度分布においてもペレット外周部への Cs137 の移動が確認された。窒化物燃料ピン B9N02 は製造時の直径ギャップ幅が 0.17 mm と B9N01 の 0.32 mm よりも小さいため、燃料温度が低く Cs137 の移動も少ないと予測されたが、B9N01 よりも移動が顕著であった。この原因については線出力の違いが影響していると予測される。窒化物燃料ピン B9N02 の最大線出力は 781W/cm、B9N01 は 742W/cm であり、この線出力の差はペレット径の違いによる。照射初期の燃料温度は直径ギャップ幅の差による影響を主に受け、直径ギャップ幅の広い B9N01 の方が直径ギャップ幅の狭い B9N02 よりも高くなっていると予測されるが、クラック等によるリロケーションの発生以降は線出力レベルの違いが燃料温度に影響していると予測される。

## 6.4 FP ガス放出挙動

窒化物燃料の FP ガス放出率は 3.3% と 5.2% であり、MOX 燃料と比較すると低い値を示した。これは窒化物燃料は熱伝導度が高いために燃料温度が低く、Xe、Kr の拡散が小さく、ペレット内に FP ガスが保持されているためである。

FP ガス放出率は直径ギャップ幅が広く燃料温度が高いと予測された B9N01 が 3.3% であり、直径ギャップ幅が狭く燃料温度が低いと予測された B9N02 が 5.2% であった。同様の燃焼度で比較した場合、FP ガス放出率は燃料温度の高い方が大

きくなると予測される。上述した Cs137 の移動及び FP ガス放出挙動から、燃料温度は直径ギャップ幅の広い B9N01 よりも直径ギャップ幅の狭い B9N02 の方が高くなっていた可能性がある。

## 7. まとめ

高速炉用炭・窒化物燃料ピンの非破壊照射後試験を実施し以下の結果が得られた。

- 1 照射後非破壊試験結果から炭・窒化物燃料ピンの健全性に影響を及ぼす結果は確認されなかった。
- 2 炭・窒化物燃料のスタック伸び率は、高速炉用 MOX 燃料のそれよりも大きく、燃料スエリング挙動の違いに起因している現象と予測される。
- 3 炭・窒化物燃料のスタック部の  $\gamma$  線強度分布に特異な挙動は確認されなかった。窒化物燃料では下部熱遮蔽ペレット部及び燃料ペレット外周部への Cs137 の移動挙動に差異が認められた。この原因は線出力が異なることに起因していると予測される。炭化物燃料では明確な Cs137 の移動は確認されなかった。
- 4 燃料ピン寸法測定から直径ギャップ幅の小さい炭化物燃料ピン B9C01 及び窒化物燃料ピン B9N02 ではスタック部に FCMI に起因すると予想される  $50\mu\text{m}$  前後の外径増加が確認された。一方、直径ギャップ幅の大きい窒化物燃料ピン B9N01 ではペレットのリロケーションに伴うと予測される比較的顕著なオーバーリティが観察された。詳細な FCMI 挙動、オーバーリティ挙動については燃料横断面の金相観察により確認していく予定である。
- 5 窒化物燃料の FP ガス放出率は 3.3% と 5.2% であり、高速炉用 MOX 燃料と比較すると低い値を示した。

## 8. 謝辞

炭・窒化物燃料の非破壊照射後試験計画策定に助言頂きましたシステム部燃料材料技術開発 Gr 井上 賢紀氏に感謝致します。また、照射後試験のデータの整理をしていただきました検査開発部の三澤 進氏に感謝致します。

参考文献

- 1) 荒井 康夫 他：「常陽」照射用ウラン・プルトニウム混合炭化物及び窒化物燃料ピンの製作、JAERI-Research 96-009

表2.1 「常陽」照射炭・窒化物燃料ピンの基本仕様

燃料ピン番号	・製造番号	B9C01	B9N01	B9N02
	・PIE番号	L412	L413	L414
燃料ピン長さ	原研製作時(mm)	799.5	799.4	799.5
	照射時(mm)	1533	1533	1533
被覆管	材質	PNC1520	PNC1520	PNC1520
	外径(mm)	8.50	8.50	8.50
	内径(mm)	7.60	7.60	7.60
	肉厚(mm)	0.45	0.45	0.45
直径ギャップ幅(mm)		0.18	0.32	0.17
スミヤ密度(%TD)		81.0	77.8	82.2
燃料ペレット	種類	MC	MN	MN
	C/MorN/M	1.078	1.001	1.013
	外径(mm)	7.42	7.28	7.43
	高さ(mm)	8	8	8
	Pu富化度(wt%)	21.00	18.62	18.62
	U235濃縮度(wt%)	19.40	19.39	19.39
	理論密度比(%TD)	85.0	84.8	86.0
	N(wt%)	0.12	5.56	5.62
	C(wt%)	5.15	0.11	0.16
	O(wt%)	0.09	0.02	0.02
	スタック長(mm)	199.5	200.1	198.8
熱遮蔽ペレット	種類	UC	UN	UN
	C/MorN/M	1.065	0.983	0.983
	外径(mm)	7.42	7.28	7.43
	高さ(mm)	8	8	8
	Pu富化度(wt%)	-	-	-
	U235濃縮度(wt%)	0.71	0.71	0.71
	理論密度比(%TD)	83.6	85.9	86.0
	N(wt%)	0.07	-	-
	C(wt%)	-	0.22	0.22
	O(wt%)	0.02	0.02	0.02
スタック長(mm)	105.6	104.2	104.4	



表3.1 炭化物燃料ピン[B9C01]照射状況

		第29サイクル	第30サイクル	第31サイクル	第32サイクル	第33サイクル
照射日数(EFPD)		約24	約60	約55	約69	約68
最大線出力(W/cm)	BOC	734	713	690	687	680
	EOC	727	698	677	670	664
最高燃焼度(MWd/t)		3,743	12,680	20,610	30,450	40,090
最大中性子照射量(n/cm <sup>2</sup> )	total	6.71E+21	2.28E+22	3.74E+22	5.60E+22	7.46E+22
	fast	4.59E+21	1.57E+22	2.57E+22	3.85E+22	5.13E+22
被覆管肉厚中心最高温度(°C)	BOC	649	634	629	634	643
	EOC	647	630	626	629	638

表3.2 窒化物燃料ピン[B9N01]照射状況

		第29サイクル	第30サイクル	第31サイクル	第32サイクル	第33サイクル
照射日数(EFPD)		約24	約60	約55	約69	約68
最大線出力(W/cm)	BOC	742	720	699	695	686
	EOC	735	705	686	678	670
最高燃焼度(MWd/t)		3,682	12,480	20,300	30,000	39,460
最大中性子照射量(n/cm <sup>2</sup> )	total	6.89E+21	2.34E+22	3.85E+22	5.76E+22	7.66E+22
	fast	4.71E+21	1.61E+22	2.64E+22	3.96E+22	5.27E+22
被覆管肉厚中心最高温度(°C)	BOC	650	635	630	634	643
	EOC	648	630	626	629	638

表3.3 窒化物燃料ピン[B9N02]照射状況

		第29サイクル	第30サイクル	第31サイクル	第32サイクル	第33サイクル
照射日数(EFPD)		約24	約60	約55	約69	約68
最大線出力(W/cm)	BOC	781	758	732	730	722
	EOC	773	742	719	713	705
最高燃焼度(MWd/t)		3,679	12,460	20,240	29,920	39,380
最大中性子照射量(n/cm <sup>2</sup> )	total	6.88E+21	2.34E+22	3.84E+22	5.74E+22	7.65E+22
	fast	4.71E+21	1.61E+22	2.63E+22	3.95E+22	5.26E+22
被覆管肉厚中心最高温度(°C)	BOC	650	635	630	635	643
	EOC	648	631	626	630	638

表 5.1.1 ディンプルに起因する接触跡の発生位置

グリッド No.	図面から確認された位置		B9C01		B9N01		B9N02	
	軸位置 (mm)	角度 (°)	DFPB (mm)	角度 (°)	DFPB (mm)	角度 (°)	DFPB (mm)	角度 (°)
48	78	0	78.2	0.0	79.5	0.3	79.6	0.0
		120	79.2	120.3	79.9	120.1	79.9	120.0
		240	79.5	243.2	79.6	241.6	79.9	242.3
47	278	0	279.3	5.2	280.0	4.1	279.7	359.0
		120	279.4	121.4	279.6	120.7	279.5	120.7
		240	279.3	241.3	279.6	241.8	279.5	240.2
46	478	0	479.0	4.8	480.1	0.3	478.0	0.0
		120	479.1	118.6	479.1	121.0	479.8	128.9
		240	479.1	236.6	477.3	237.9	479.7	241.0
45	678	0	678.7	358.7	679.2	11.3	678.9	5.6
		120	678.9	114.8	678.8	117.1	678.9	121.1
		240	678.9	241.3	679.1	244.8	678.8	240.5
44	878	0	878.1	0.2	878.3	1.8	878.3	1.0
		120	878.1	115.4	878.0	113.9	878.3	116.1
		240	878.0	242.3	878.0	244.2	878.2	242.4
43	1,078	0	1,077.7	0.4	1,077.9	356.0	1,078.3	0.3
		120	1,077.9	118.6	1,077.9	115.8	1,078.3	121.0
		240	1,077.9	237.7	1,077.8	233.1	1,078.3	241.0
42	1,278	0	1,277.5	358.0	1,277.5	0.5	1,277.9	359.0
		120	1,277.2	119.9	1,277.4	120.5	1,277.6	122.0
		240	1,277.5	241.4	1,277.4	237.9	1,277.8	238.3

表 5.1.2 被覆管表面の接触跡発生位置

観察内容	項目	B9C01	B9N01		B9N02	
コンパートメント内面との 接触跡 (0° 方向)	DFPB (mm)	579.3	584.0		577.0	582.0
	角度 (°)	0	358		1	1
	長さ (mm)	1.3	2.0		0.7	0.6
	巾 (mm)	1.1	0.8		0.8	0.9
隣接ピンに起因すると推定 される跡 (150° 方向)	DFPB (mm)	586.4	583.0		578.0	588.0
	角度 (°)	151	154		149	155
	長さ (mm)	14.0	12.3		5.2	6.5
	巾 (mm)	0.6	0.8		0.8	0.5
隣接ピンに起因すると推定 される跡 (210° 方向)	DFPB (mm)	576.0	577.7	587.5	580.0	
	角度 (°)	211	212	214	212	
	長さ (mm)	3.4	4.9	9.9	13.5	
	巾 (mm)	1.2	0.8	0.8	0.3	

表 5.2.1 燃料ピン X線ラジオグラフィー内部状況観察結果

ピンNo	中心空孔	ギャップ 1mm 以上	ギャップ 1mm 未満	ペレット割れ	ペレットかけ	スプリング のへたり
B9C01	無	無	無	有	無	有
B9N01	無	無	無	有	無	有
B9N02	無	無	無	有	無	有

表 5.2.2 燃料ピン X線ラジオグラフィースタック長測定結果

試料ペレット部のスタック長

ピンNo	製造時 スタック長 (mm)	照射後 スタック長 (mm)	変化量 (mm)	変化率 (%)
B9C01	199.5	202.5	+3.0	+1.5
B9N01	200.1	203.7	+3.6	+1.8
B9N02	198.8	201.5	+2.7	+1.4

表 5.3.1 燃料ピン重量測定結果

ピンNo.	製造時重量 (g)	照射後重量 (g)	重量差 (製造時-照射後)
B9C01	625.7	625.3	-0.4
B9N01	630.2	630.0	-0.2
B9N02	637.6	637.3	-0.3

表5.4.1 定点スペクトル測定結果

ビンNo	軸位置 DFPB (mm)	Rh-106		Zr-95		Mn-54		Cs-137		Cs-134		PR-144		Co-60		Co-58		Ru-103	
		計数値(counts)	規格値(-)	計数値(counts)	規格値(-)	計数値(counts)	規格値(-)	計数値(counts)	規格値(-)	計数値(counts)	規格値(-)	計数値(counts)	規格値(-)	計数値(counts)	規格値(-)	計数値(counts)	規格値(-)	計数値(counts)	規格値(-)
B9C01	351.8	26499.2	-	225735.5	-	38505.3	-	54776.0	-	8010.7	-	5964.5	-	541.0	-	196224.4	-	378095.2	-
	403.0	168148.7	1.01	1394502.0	1.01	41312.5	1.01	314007.0	1.01	37723.4	1.05	38358.5	1.03	549.8	1.23	216962.3	1.02	1977056.0	1.01
	478.0	169400.1	1.02	1412996.0	1.02	41157.3	1.01	316954.2	1.02	37356.8	1.04	37775.2	1.01	286.0	0.64	215521.9	1.01	2002117.0	1.02
	553.0	160374.6	0.97	1338685.0	0.97	39786.8	0.98	299283.3	0.97	32805.2	0.91	36059.9	0.96	502.7	1.13	205650.6	0.97	1895222.0	0.97
	604.2	23439.1	-	199371.4	-	35969.9	-	45004.7	-	5173.4	-	5783.7	-	431.3	-	186256.8	-	328836.6	-
	803.0	0.0	-	0.0	-	19884.6	-	605.1	-	147.3	-	0.0	-	11476.2	-	70453.2	-	0.0	-
B9N01	351.8	21549.0	-	184330.1	-	29958.4	-	49583.9	-	8556.3	-	5032.2	-	368.9	-	156687.0	-	304586.2	-
	403.0	128933.9	1.01	1115589.0	1.01	32907.1	1.02	247405.1	1.01	31209.3	1.05	30504.4	1.02	444.2	1.04	170867.6	1.01	1543448.0	1.01
	478.0	131132.3	1.03	1128941.0	1.02	32217.6	1.00	252289.9	1.03	31161.3	1.05	30657.8	1.02	489.2	1.15	170493.8	1.01	1560855.0	1.02
	553.0	123077.3	0.96	1063403.0	0.96	31223.0	0.97	233803.8	0.96	26397.1	0.89	28634.0	0.96	344.8	0.81	163760.8	0.97	1473789.0	0.97
	604.2	19364.8	-	163327.2	-	27729.2	-	34340.7	-	3503.9	-	4456.0	-	333.2	-	144942.1	-	268389.4	-
	803.0	0.0	-	0.0	-	15113.3	-	218.4	-	0.0	-	0.0	-	7395.6	-	54801.8	-	0.0	-
B9N02	351.8	31303.7	-	267904.3	-	42273.0	-	97065.5	-	21472.1	-	7248.1	-	477.2	-	222385.9	-	438928.0	-
	403.0	181666.6	1.01	1582268.0	1.01	44984.3	1.02	342690.0	1.01	42445.4	1.06	42466.1	1.01	624.4	1.17	232546.9	1.02	2169320.0	1.01
	478.0	184957.5	1.03	1599834.0	1.02	43811.4	1.00	350515.1	1.04	42020.2	1.05	43012.6	1.02	508.1	0.95	230886.8	1.01	2193898.0	1.02
	553.0	173148.7	0.96	1512892.0	0.97	43016.0	0.98	320789.3	0.95	35568.8	0.89	40507.3	0.96	473.6	0.88	223739.3	0.98	2071163.0	0.97
	604.2	28479.2	-	241553.7	-	38979.2	-	51290.8	-	5230.8	-	6676.8	-	511.9	-	204796.6	-	397180.6	-
	803.0	0.0	-	0.0	-	22718.7	-	740.4	-	0.0	-	0.0	-	12198.2	-	80787.0	-	0.0	-

規格値はDFPB403, 478, 553mmのスタック部のγ線強度の平均値を1として規格化した。

表5.5.1 全長測定結果

ピンNo.	測定角度 (°)	全長 (mm)		変化量(mm)
		照射後	製造時	PIE-FAB
B9C01	0	1532.5	1532.5	0.0
	45	1532.5		0.0
	89	1532.6		0.1
	135	1532.8		0.3
	Ave	1532.6		0.1
B9N01	0	1531.9	1532.5	-0.6
	45	1532.1		-0.4
	90	1532.0		-0.5
	135	1532.1		-0.4
	Ave	1532.0		-0.5
B9N02	179	1532.3	1532.5	-0.2
	45	1532.3		-0.2
	89	1532.2		-0.3
	135	1532.3		-0.2
	Ave	1532.3		-0.2

表5.5.2 曲がり測定結果

ピンNo.	軸位置 (mm)	角度(°)	曲がり量(mm)
B9C01	634.1	29	4.6
B9N01	626.4	31	9.2
B9N02	646.0	16	5.6

表5.5.3 外径測定結果

ピンNo.	項目	12方向測定											
		0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°
B9C01	最大外径値(mm)	8.533	8.528	8.537	8.535	<b>8.536</b>	8.524	8.526	8.528	8.530	8.526	8.525	8.526
	軸位置(mm)	394.7	427.5	576.1	549.7	<b>548.6</b>	478.7	549.7	476.9	475.8	465.1	575.6	572.6
	REF(mm)	8.492	8.491	8.491	8.490	<b>8.490</b>	8.490	8.491	8.491	8.490	8.491	8.490	8.490
	ΔD(mm)	0.041	0.037	0.046	0.045	<b>0.046</b>	0.034	0.035	0.037	0.040	0.035	0.035	0.036
	ΔD/D(%)	0.479	0.441	0.546	0.526	<b>0.547</b>	0.401	0.412	0.440	0.466	0.414	0.411	0.423
B9N01	最大外径値(mm)	8.534	8.528	8.525	8.535	8.528	8.530	8.539	8.536	<b>8.538</b>	8.532	8.519	8.527
	軸位置(mm)	421.0	420.9	544.3	543.3	541.7	458.3	458.5	453.5	<b>474.2</b>	475.3	393.7	436.2
	REF(mm)	8.481	8.480	8.480	8.480	8.479	8.478	8.479	8.478	<b>8.478</b>	8.479	8.479	8.479
	ΔD(mm)	0.053	0.048	0.045	0.055	0.049	0.052	0.060	0.058	<b>0.060</b>	0.053	0.040	0.048
	ΔD/D(%)	0.623	0.560	0.529	0.645	0.581	0.610	0.706	0.681	<b>0.708</b>	0.631	0.475	0.567
B9N02	最大外径値(mm)	8.536	8.534	8.536	8.531	8.531	8.531	<b>8.537</b>	8.531	8.531	8.528	8.533	8.534
	軸位置(mm)	532.8	524.9	569.5	501.5	509.0	510.0	<b>458.7</b>	466.4	485.8	562.8	569.4	569.2
	REF(mm)	8.483	8.481	8.481	8.482	8.481	8.481	<b>8.481</b>	8.481	8.482	8.482	8.482	8.481
	ΔD(mm)	0.053	0.053	0.055	0.049	0.050	0.050	<b>0.056</b>	0.050	0.049	0.046	0.051	0.053
	ΔD/D(%)	0.621	0.625	0.647	0.582	0.587	0.593	<b>0.662</b>	0.589	0.581	0.543	0.601	0.620

※ REFにはプレナムスプリング部(DFPB 753~853mm)の軸方向平均外径値を採用した。尚、太字はそのピンの最大外径値である。

表5.6.1 パンクチャ試験結果

pin No.	ピン平均燃焼率 at%	ピン内容積 (cc)	ピン内ガス圧 (Torr)*1	ピン内ガス量 (cc)*1	ガスクロ分析結果(%)						FPガス放出率*2 (%)
					Kr	Xe	Ar	N2	He+α	Xe/Kr	
B9N01	4.20	10.79	1165.6	14.66	2.2	19.3	0.0	0.0	78.5	8.77	3.3
B9N02	4.19	10.35	1311.8	15.58	3.5	29.8	0.0	0.0	66.7	8.51	5.2

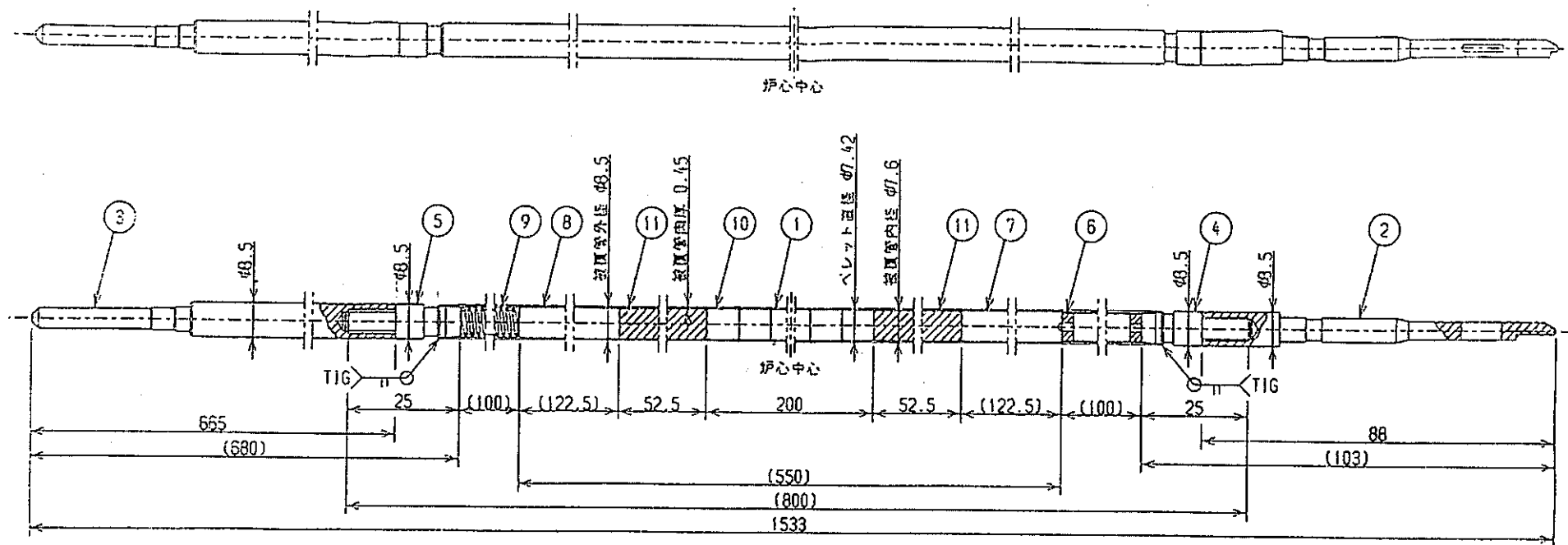
\*1 標準状態(0°C, 1atm)での値

\*2 FPガス放出率に用いたFPガス生成量は、L413ピン→22.68(CC-STP/at%)  
L414ピン→23.80(CC-STP/at%)を使用した。

表5.6.2 ガス質量分析結果

	B9N01		B9N02	
	同位体組成比 mol%	標準偏差*3	同位体組成比 mol%	標準偏差
<sup>78</sup> Kr	0.000	0.000	0.000	0.000
<sup>79</sup> Kr	1.227	0.089	0.709	0.049
<sup>80</sup> Kr	0.251	0.285	0.193	0.163
<sup>82</sup> Kr	1.771	0.134	1.031	0.063
<sup>83</sup> Kr	15.323	0.243	15.473	0.227
<sup>84</sup> Kr	27.410	0.266	27.508	0.214
<sup>85</sup> Kr	5.854	0.141	6.025	0.090
<sup>86</sup> Kr	48.164	0.450	49.060	0.325
<sup>124</sup> Xe	0.020	0.021	0.025	0.002
<sup>126</sup> Xe	0.012	0.020	0.024	0.006
<sup>128</sup> Xe	0.050	0.004	0.030	0.002
<sup>129</sup> Xe	0.047	0.004	0.028	0.002
<sup>130</sup> Xe	0.082	0.004	0.075	0.003
<sup>131</sup> Xe	14.800	0.086	14.870	0.113
<sup>132</sup> Xe	22.882	0.104	22.371	0.063
<sup>133</sup> Xe	0.065	0.004	0.040	0.002
<sup>134</sup> Xe	33.253	0.214	33.381	0.215
<sup>136</sup> Xe	28.788	0.228	29.156	0.208

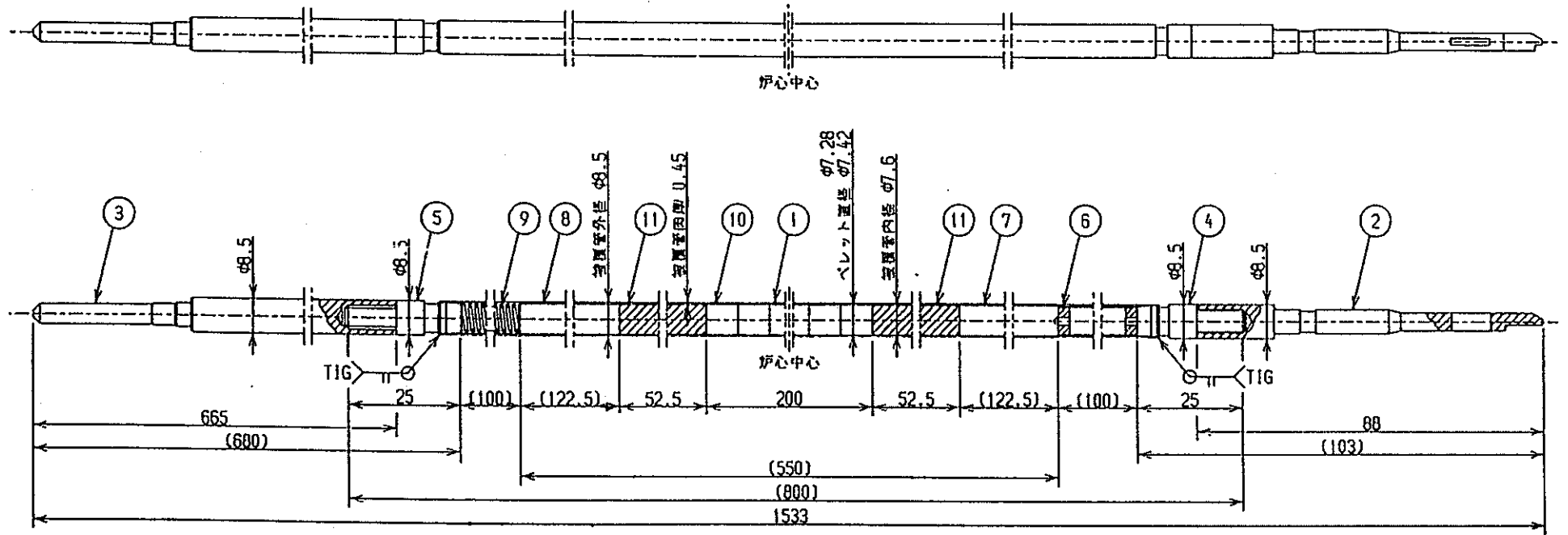
\*3:20回スキャンによる標準偏差



11	熱遮蔽ベレット(7)	UC		
10	燃料ベレット(1)	PuC-UC		
9	プレナムスプリング(7)	SUS304WPB	1	
8	上部反射体ベレット(7)	40Niチタンステアイト ステンレス鋼(A)	1	
7	下部反射体ベレット(7)	40Niチタンステアイト ステンレス鋼(A)	1	
6	抑え板付プレナムスリーブ(8)	SUS316	1	
5	上部中間破径(1)	40Niチタンステアイト ステンレス鋼(A)	1	
4	下部中間破径(1)	40Niチタンステアイト ステンレス鋼(A)	1	
3	上部端径(9)	40Niチタンステアイト ステンレス鋼(A)	1	
2	下部端径(9)	40Niチタンステアイト ステンレス鋼(A)	1	
1	被覆管(9)	40Niチタンステアイト ステンレス鋼(A)	1	
品番	品名	材質	個数	備考
図名	B型試験用集合体 試験用要素(1)構造図			

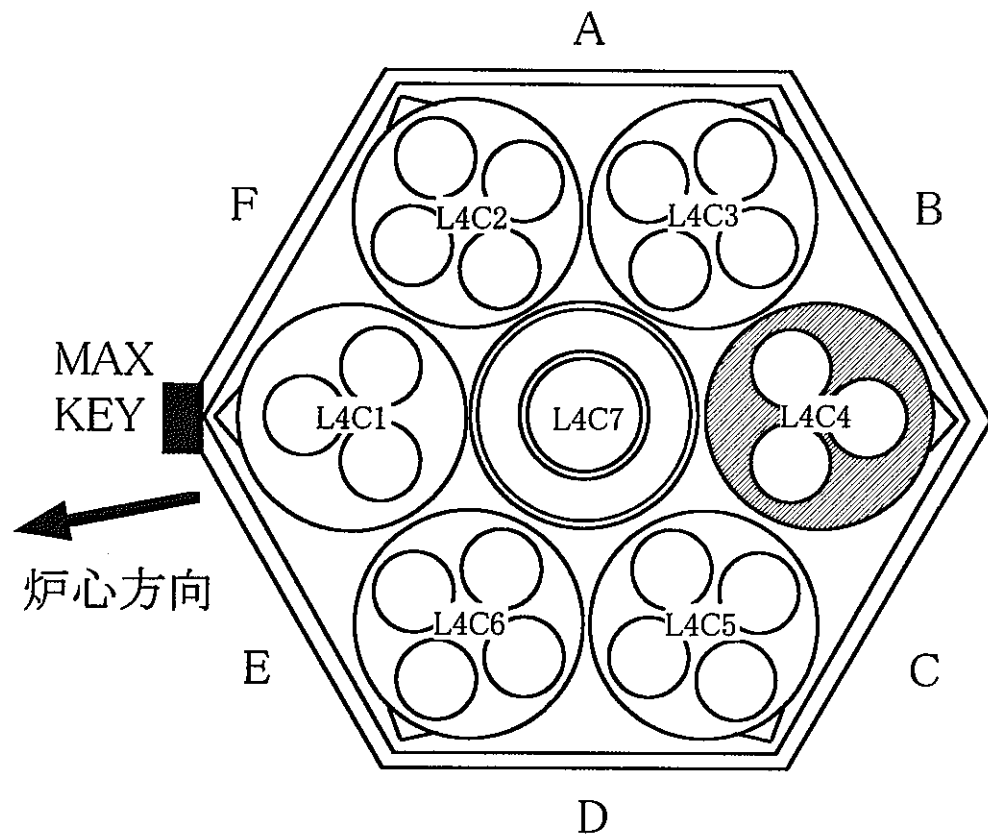
図 2.1 炭化物燃料ピン図面



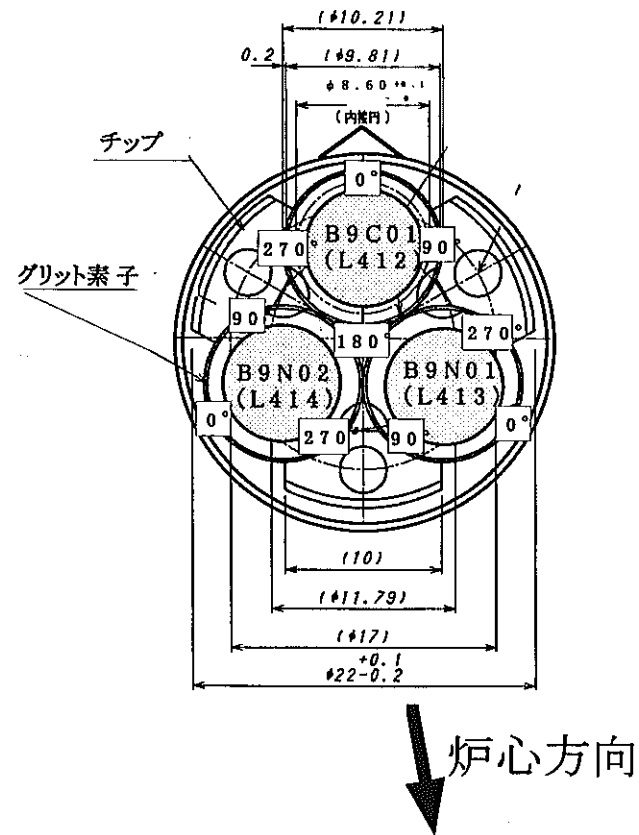


11	熱遮蔽ベレット(8)、(9)	UN			
10	燃料ベレット(2)、(3)	PuN-UN			
9	プレンラムスプリング(7)	SUS304WPB	1		
8	上部反射体ベレット(7)	高純オーステナイト系 ステンレス鋼(A)	1		
7	下部反射体ベレット(7)	高純オーステナイト系 ステンレス鋼(A)	1		
6	抑え板付プレンラムスリーブ(8)	SUS316	1		
5	上部中間端柱(1)	高純オーステナイト系 ステンレス鋼(A)	1		
4	下部中間端柱(1)	高純オーステナイト系 ステンレス鋼(A)	1		
3	上部端柱(9)	高純オーステナイト系 ステンレス鋼(A)	1		
2	下部端柱(9)	高純オーステナイト系 ステンレス鋼(A)	1		
1	被覆管(9)	オーステナイト系 ステンレス鋼	1		
品番	品名	材質	個数	備	考
図名	B型試験用集合体 試験用要素(2)-①、-② 構造図				

図 2.2 窒化物燃料ピン図面



PFB090コンパートメント装荷位置



コンパートメント内炭窒化物燃料ピン装荷位置

図2.3 PFB090炭窒化物燃料ピン装荷位置

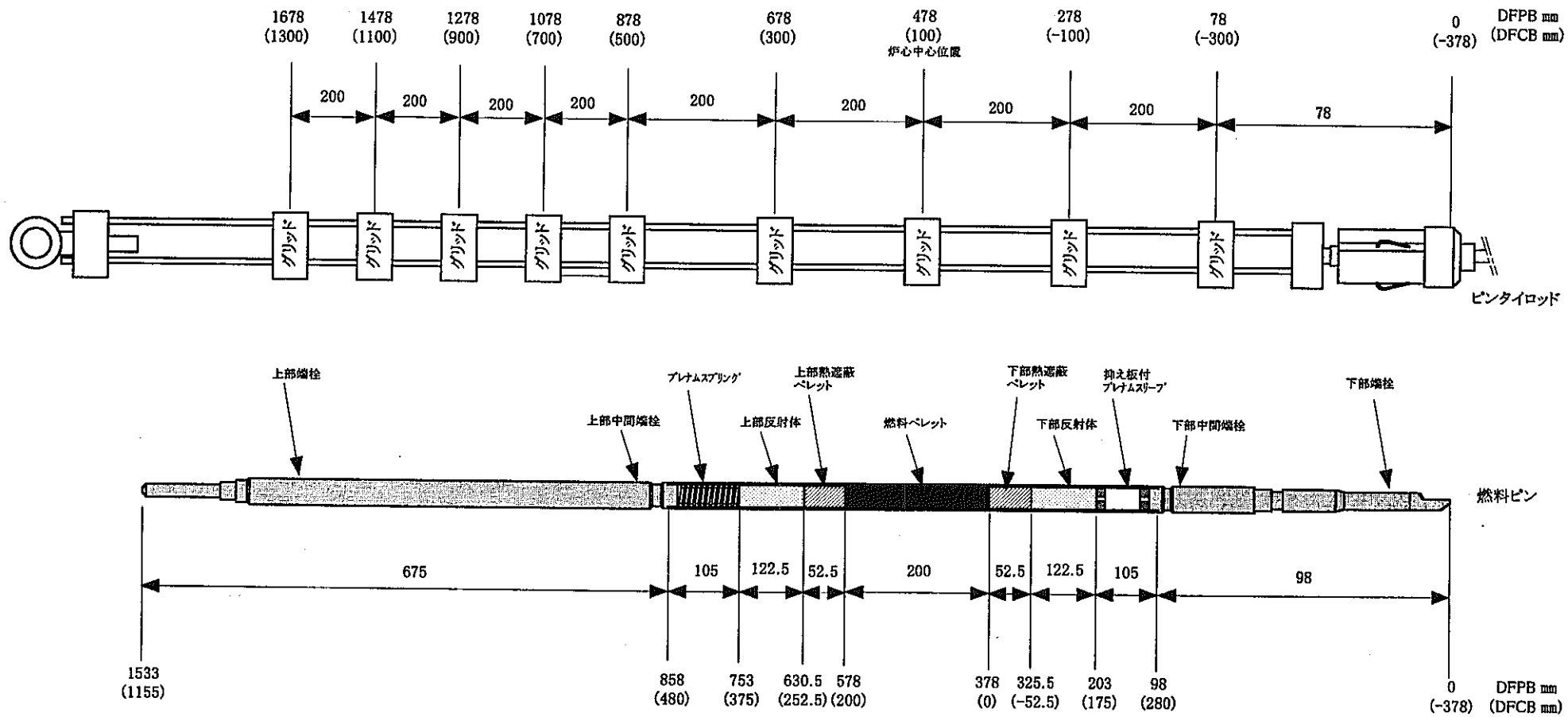


図2.4 燃料ピン及びピンタイロッド位置関係図

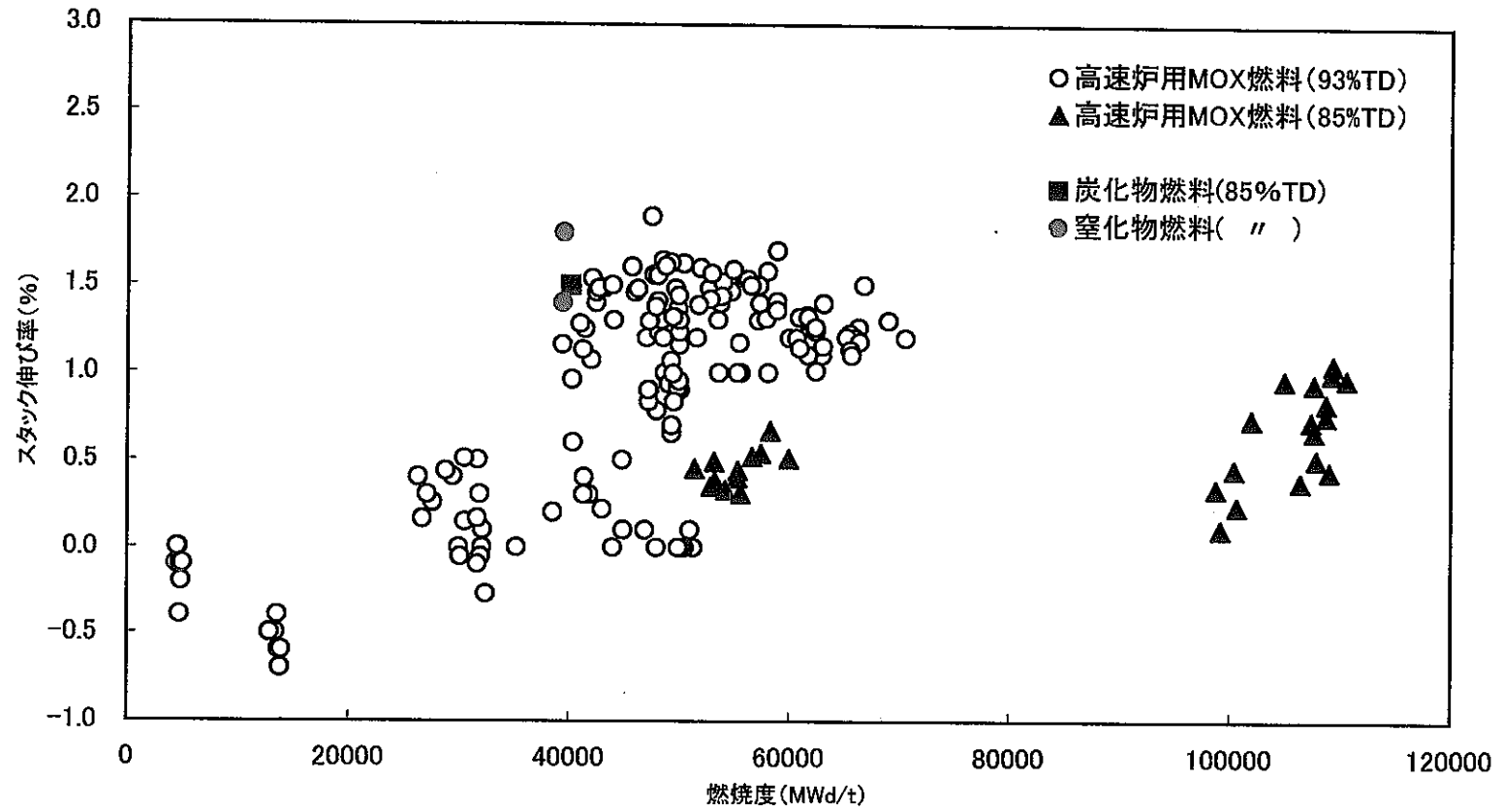


図5.2.1 スタック伸び率と燃焼度との関係

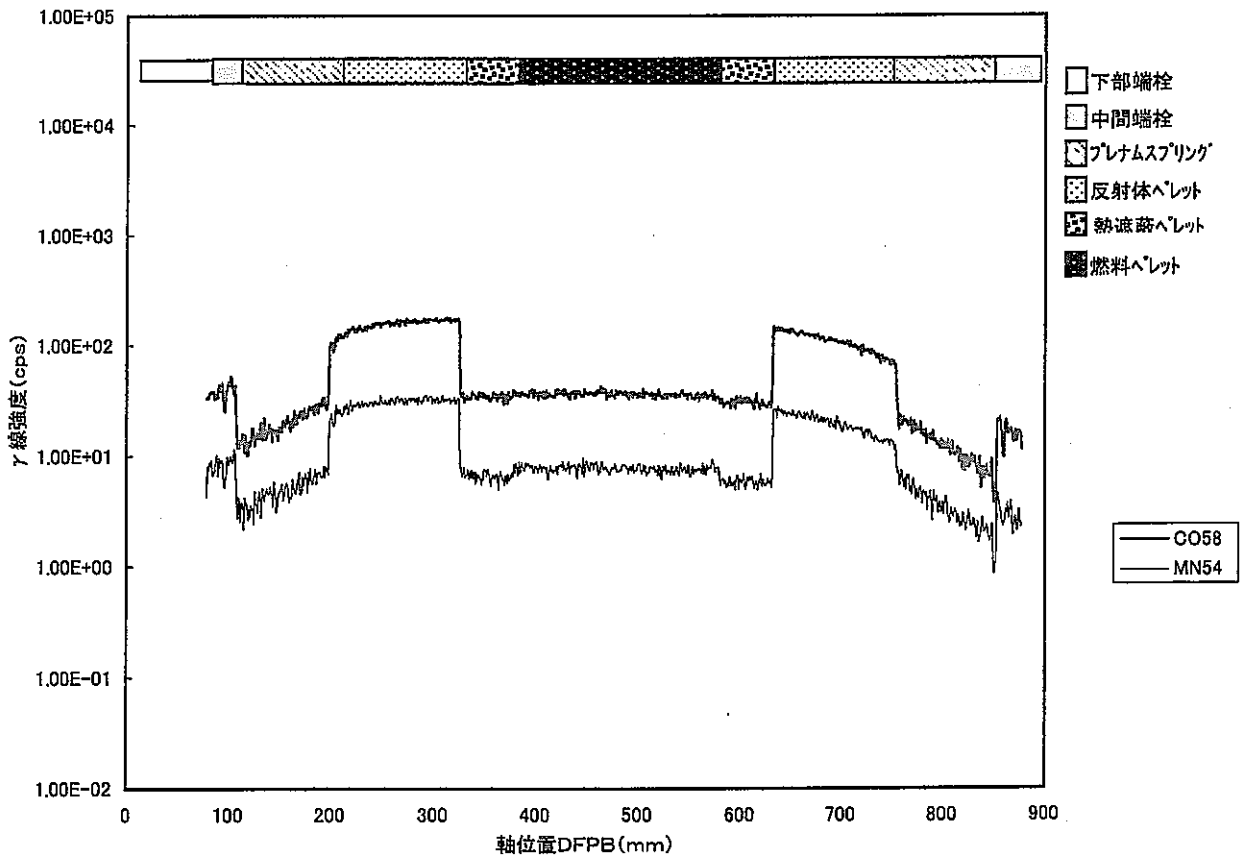
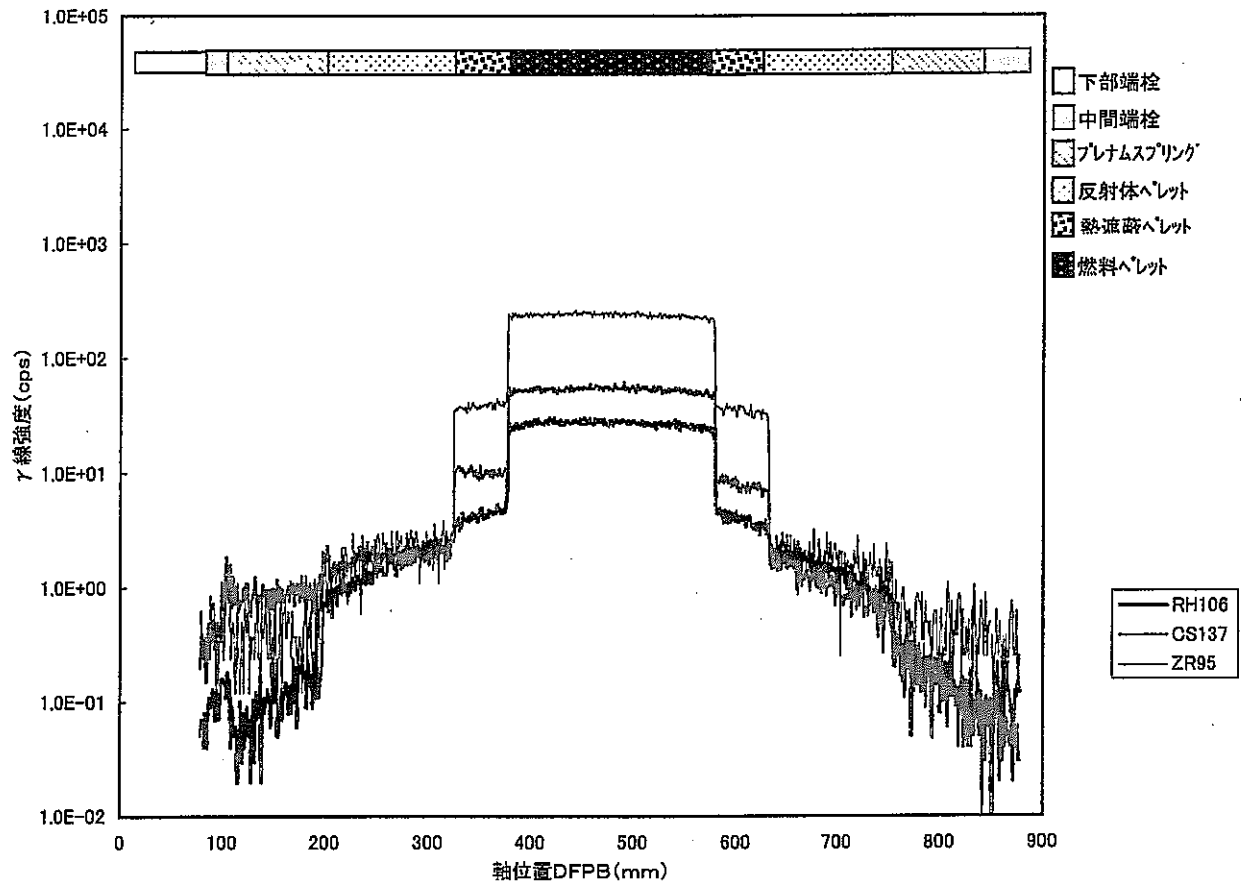


図5.4.1 軸方向スキャンング測定結果(B9C01)

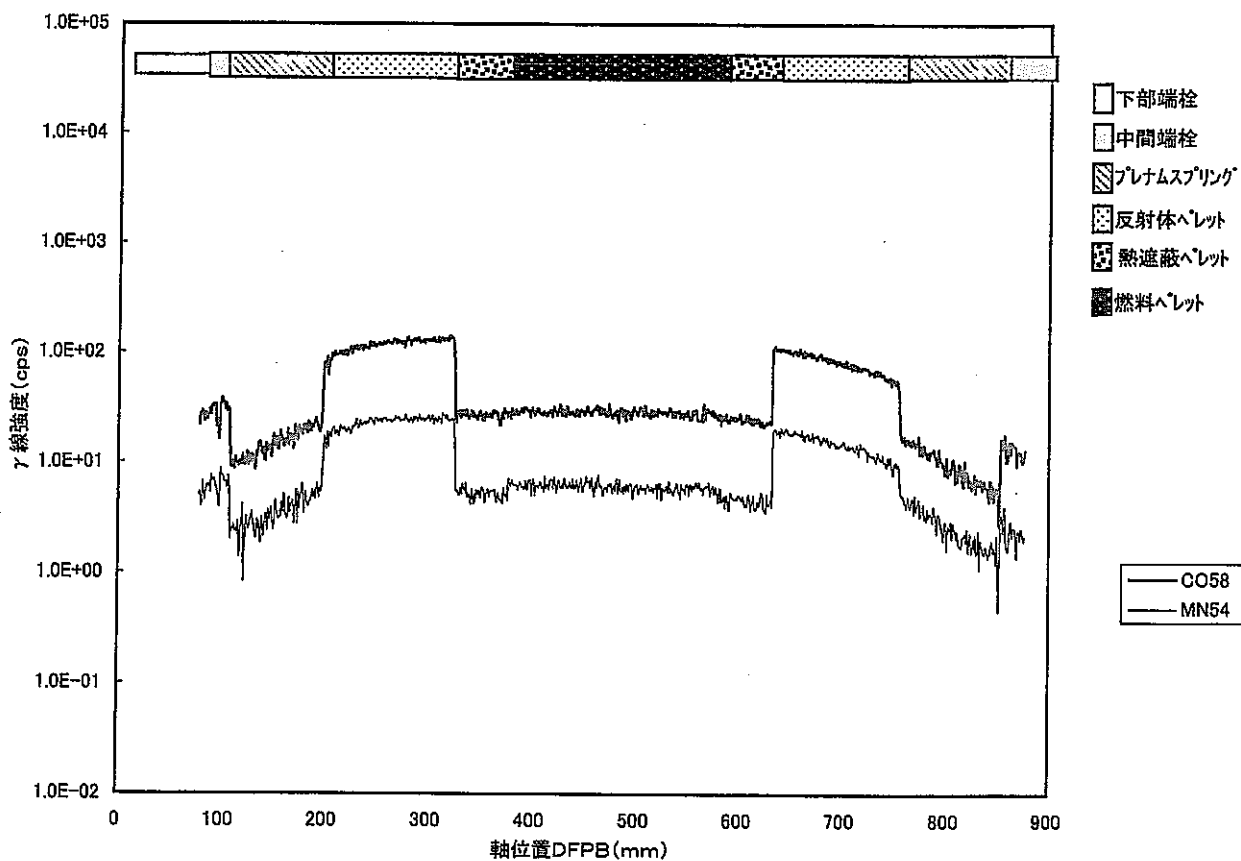
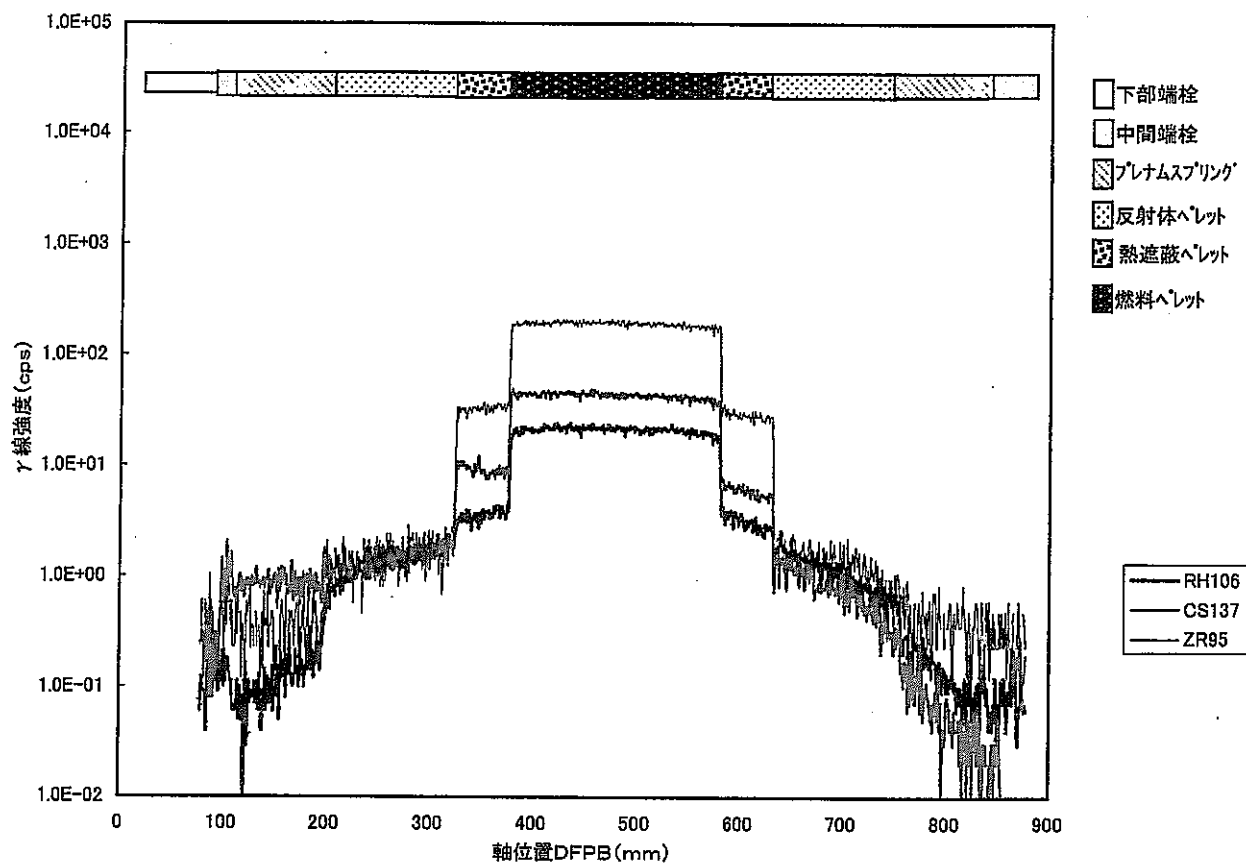


図5.4.2 軸方向スキャンング測定結果(B9N01)

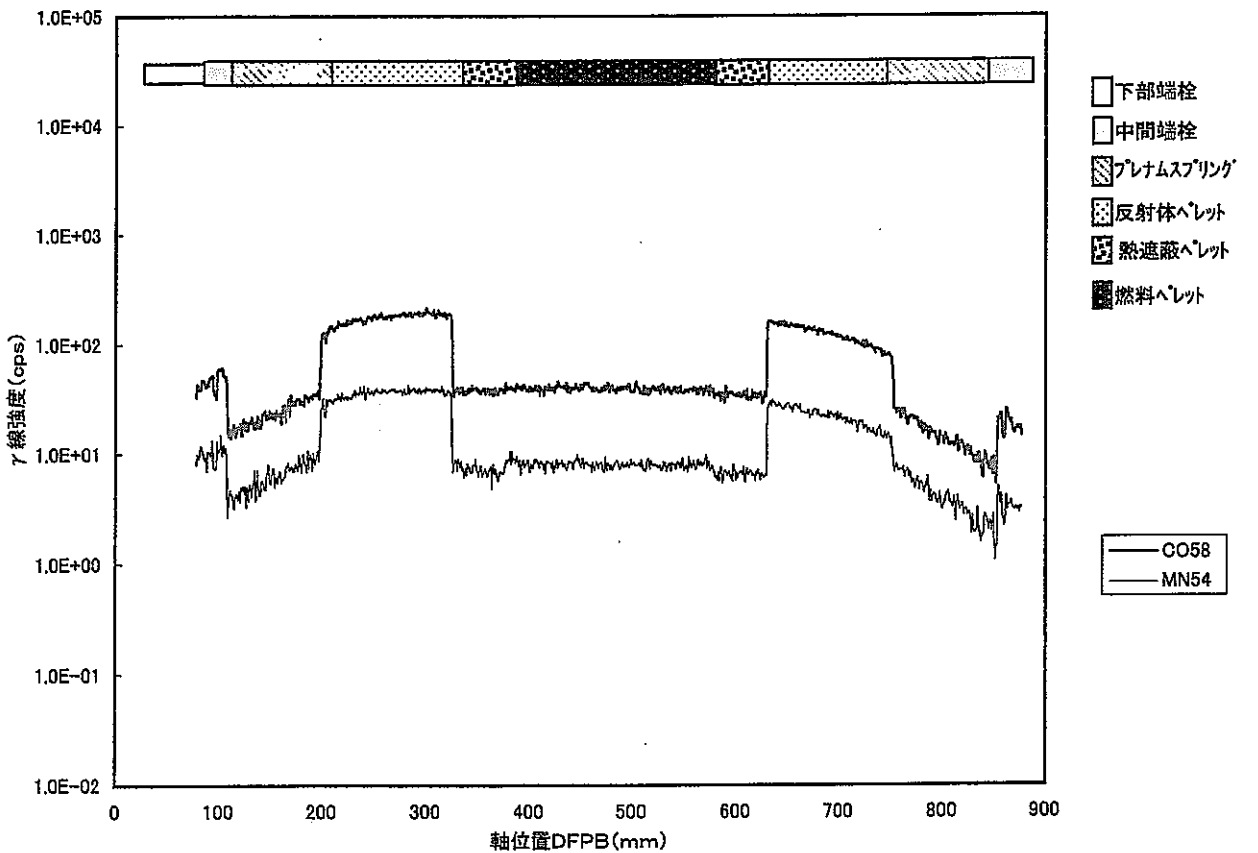
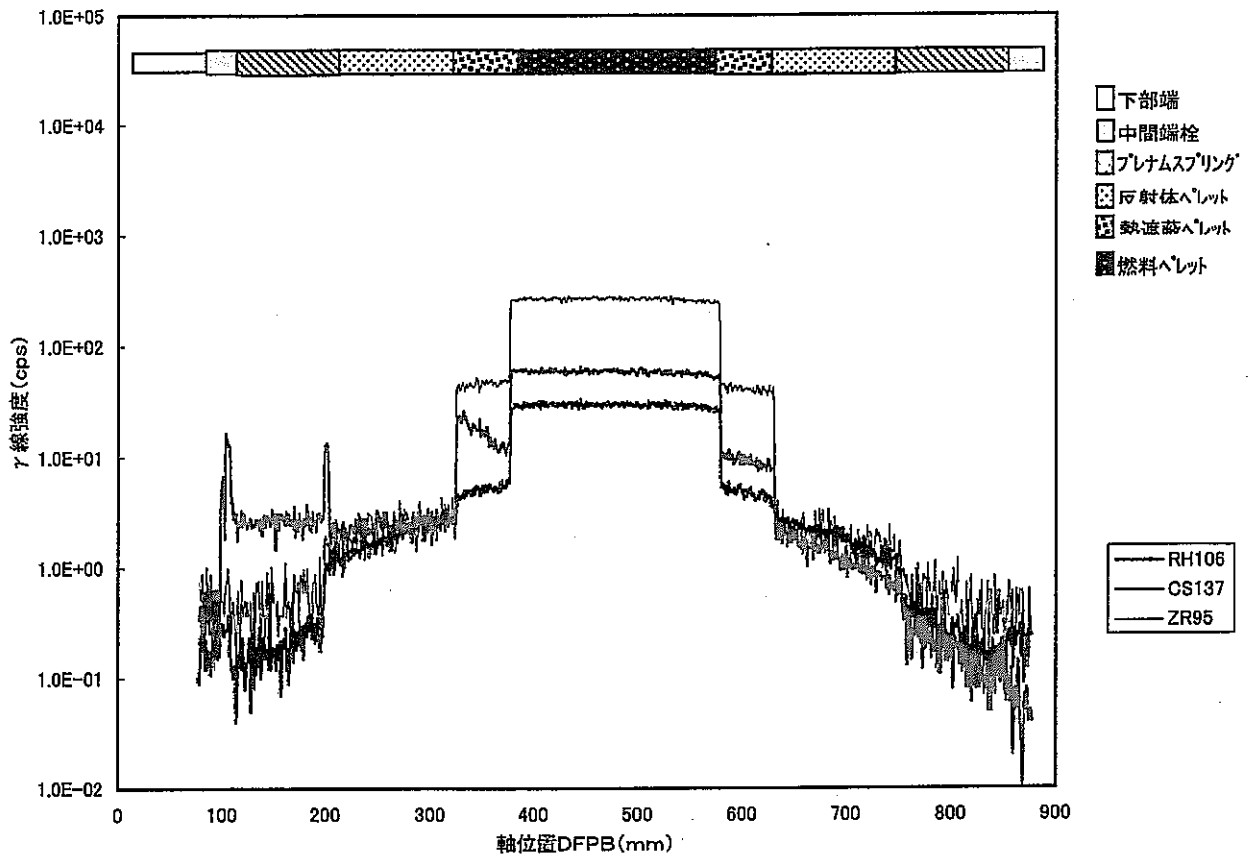


図5.4.3 軸方向スキャンング測定結果(B9N02)

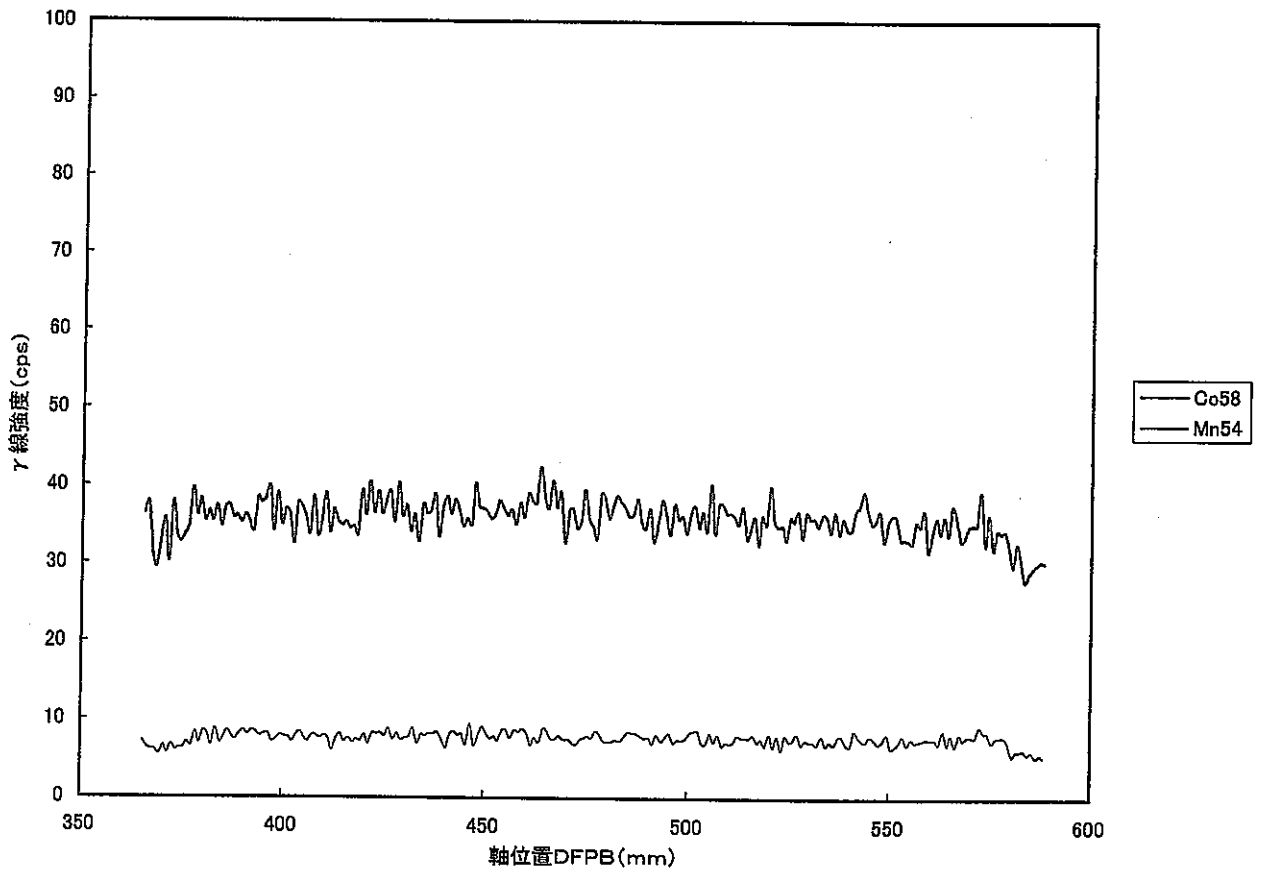
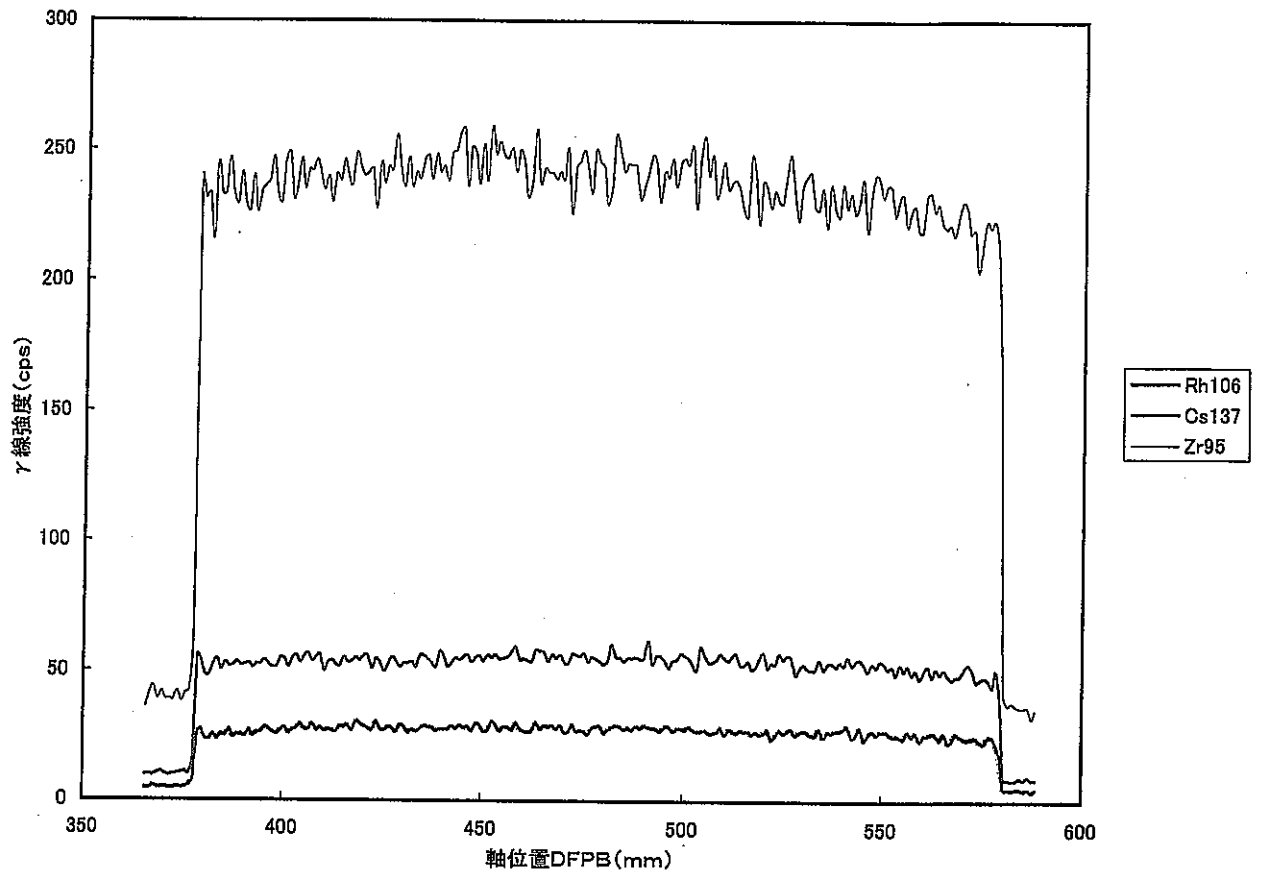


図5.4.4 軸方向スキャンング測定結果(B9C01,スタック部)



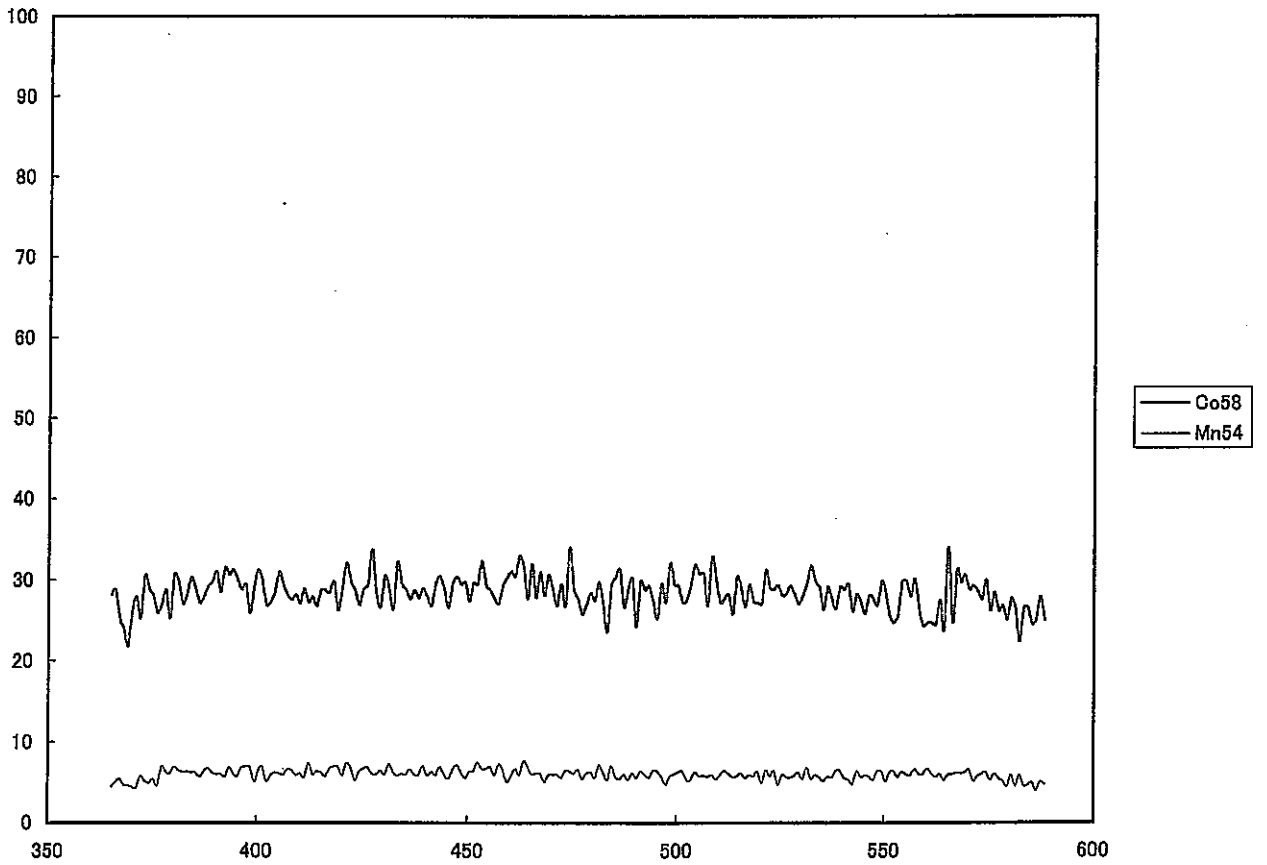
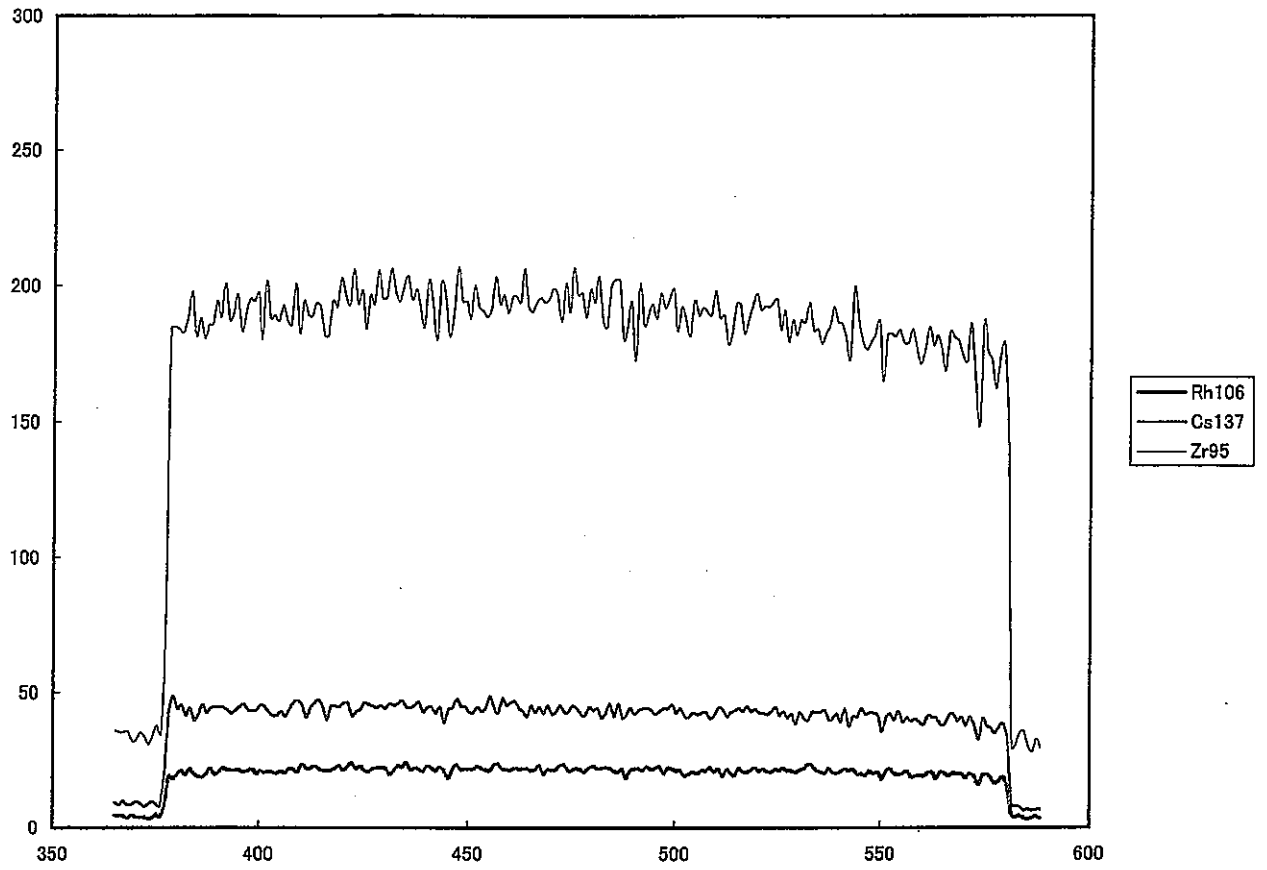


図5.4.5 軸方向スキヤニング測定結果(B9N01,スタック部)

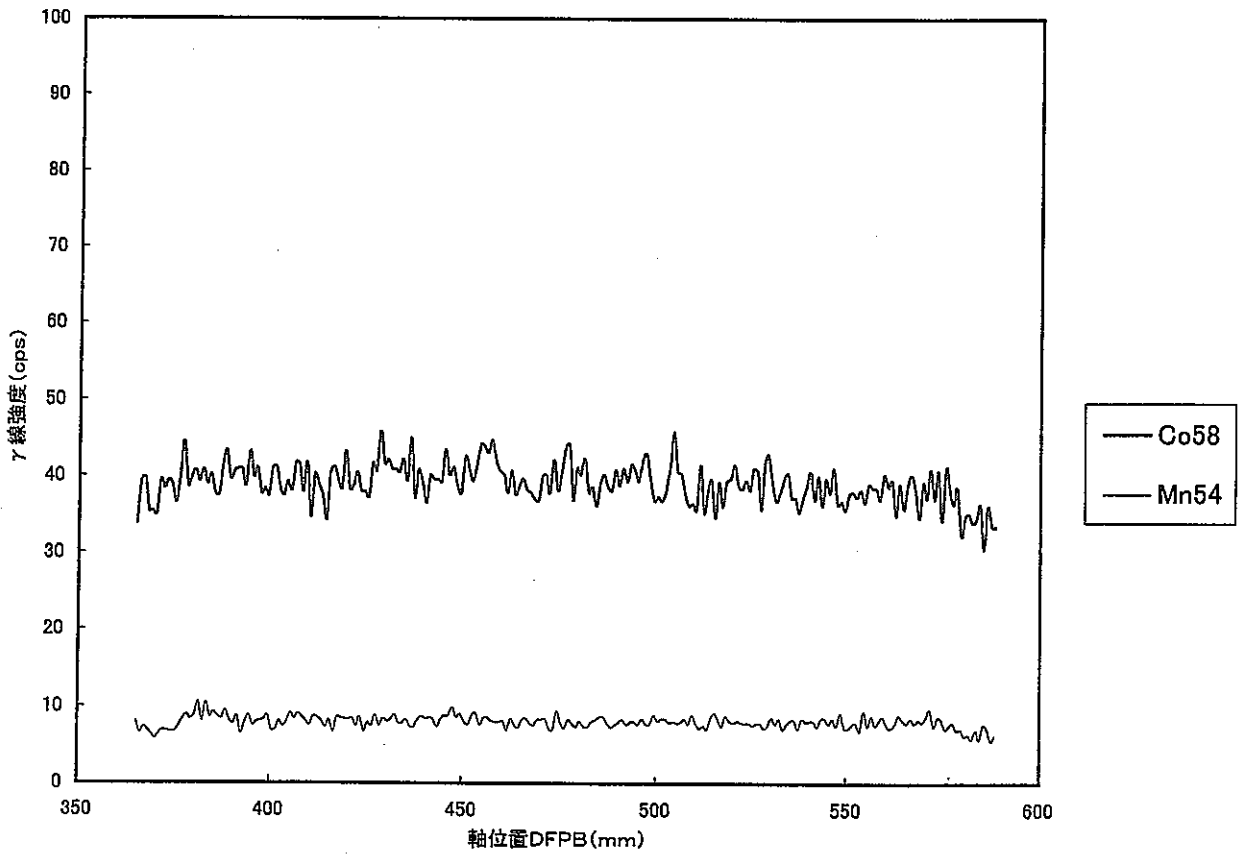
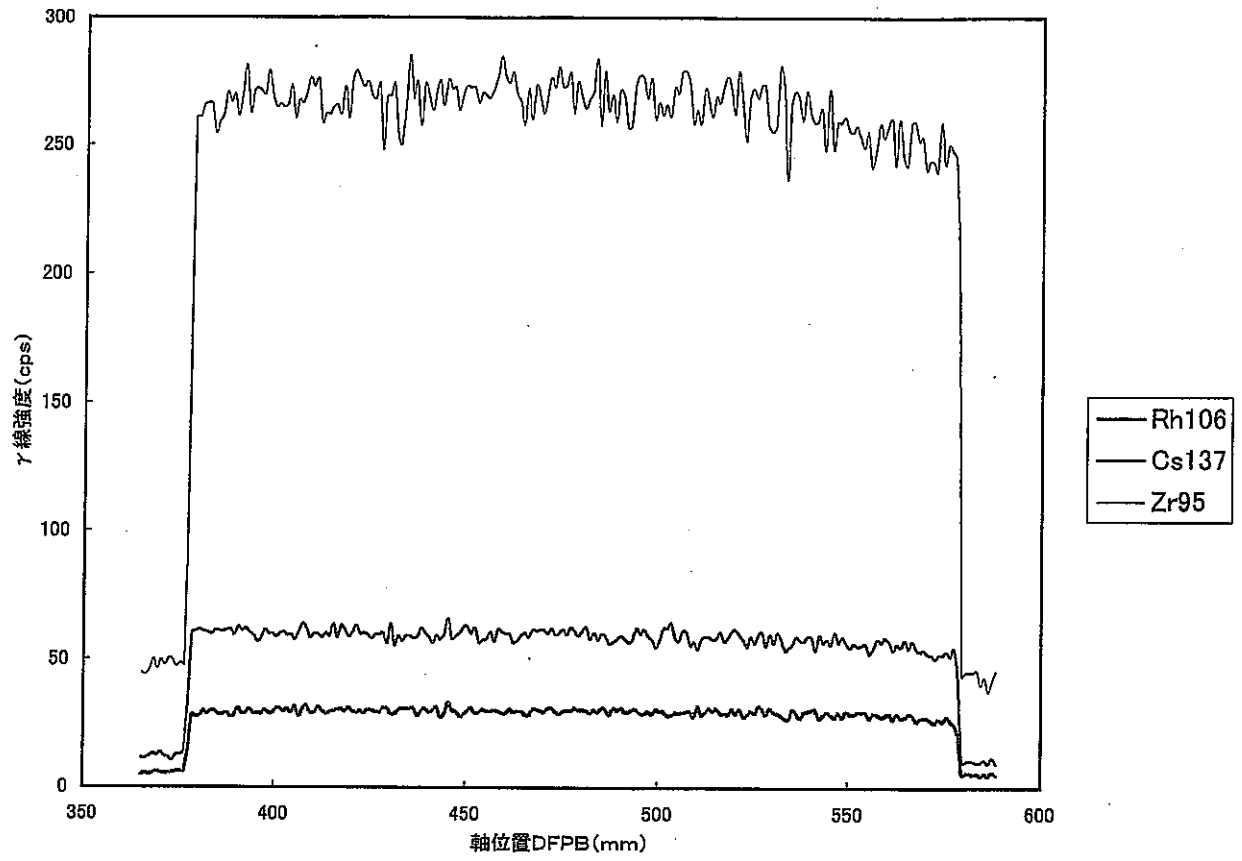


図5.4.6 軸方向スキヤニング測定結果(B9N02,スタック部)

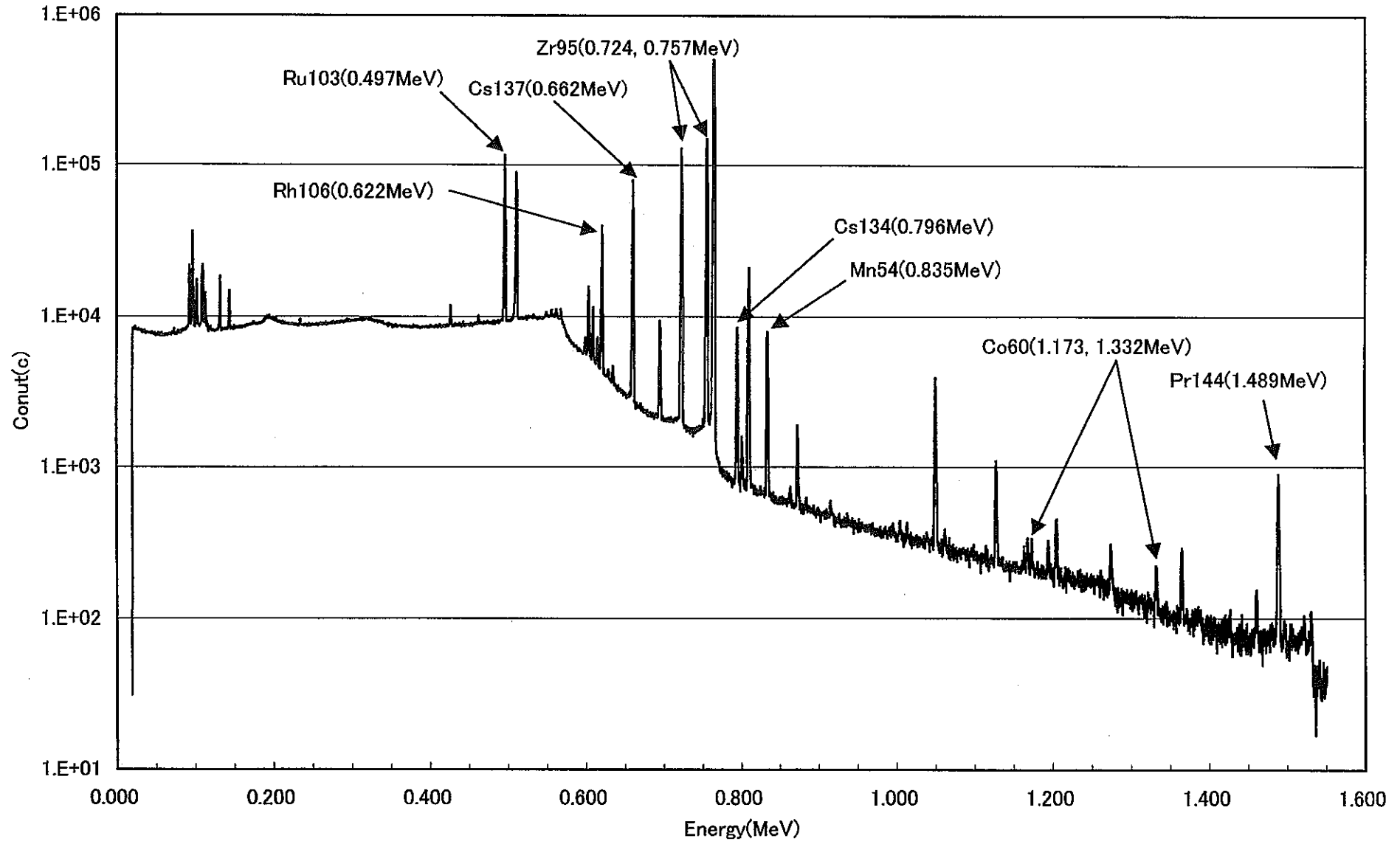


図5.4.7 スペクトルチャート(B9C01)

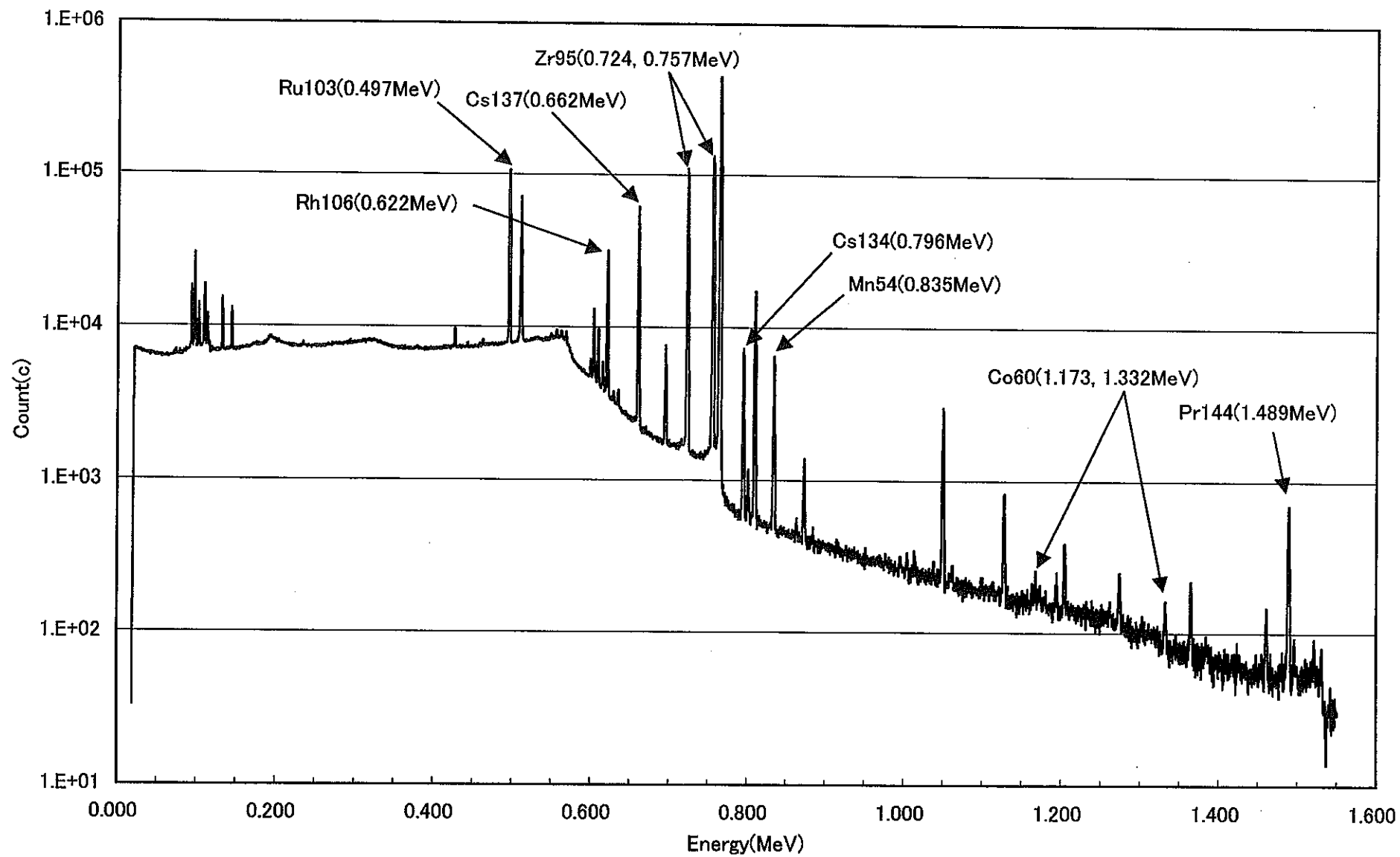


図5.4.8 スペクトルチャート(B9N01)

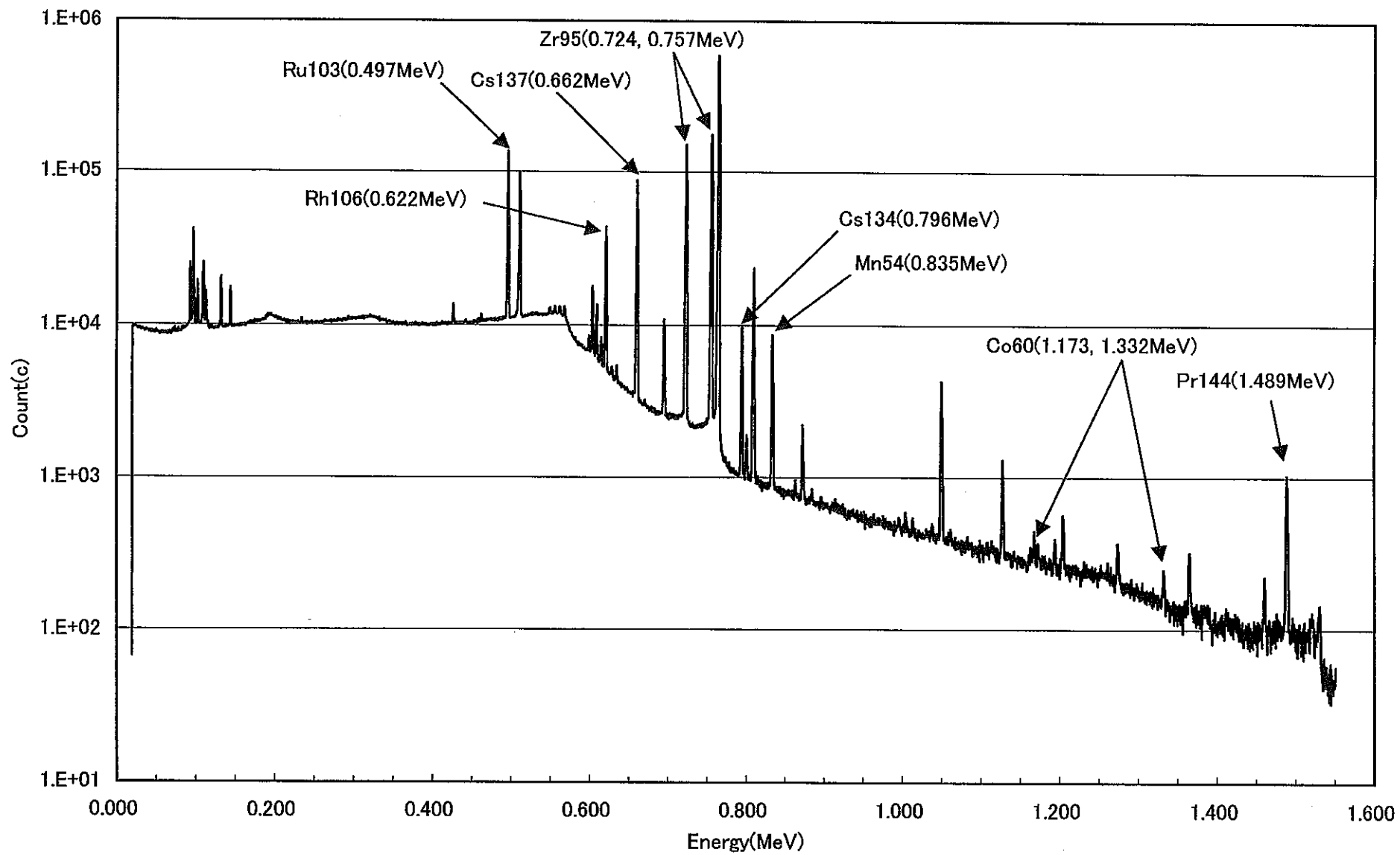


図5.4.9 スペクトルチャート(B9N02)

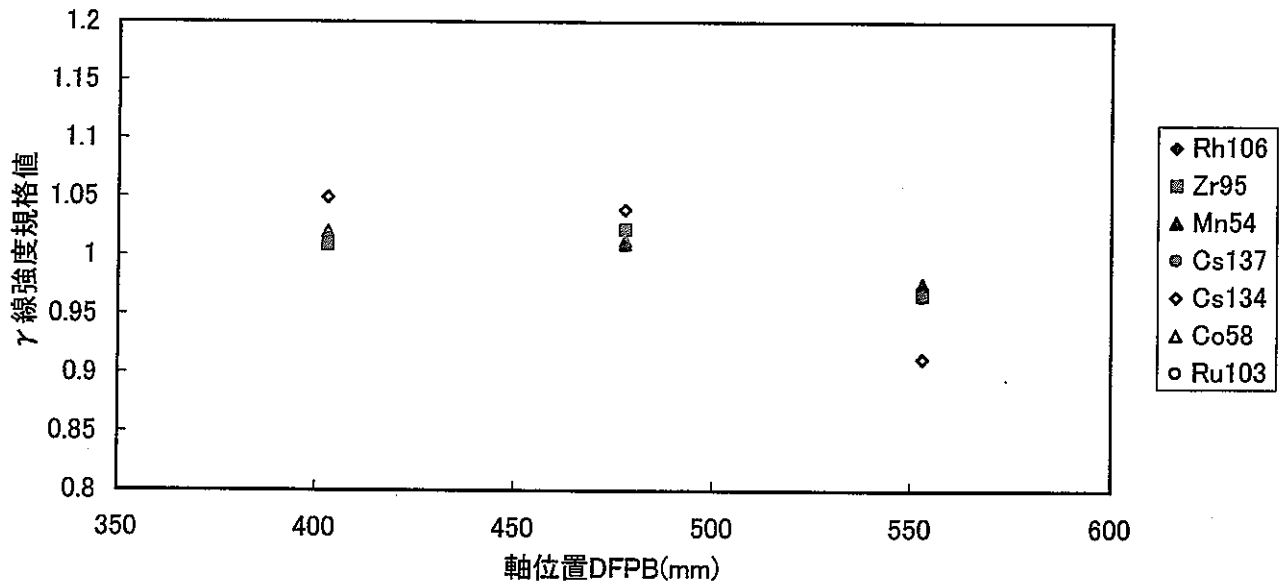


図 5.4.10 スペクトル測定による軸方向  $\gamma$  線強度分布 (B9C01)

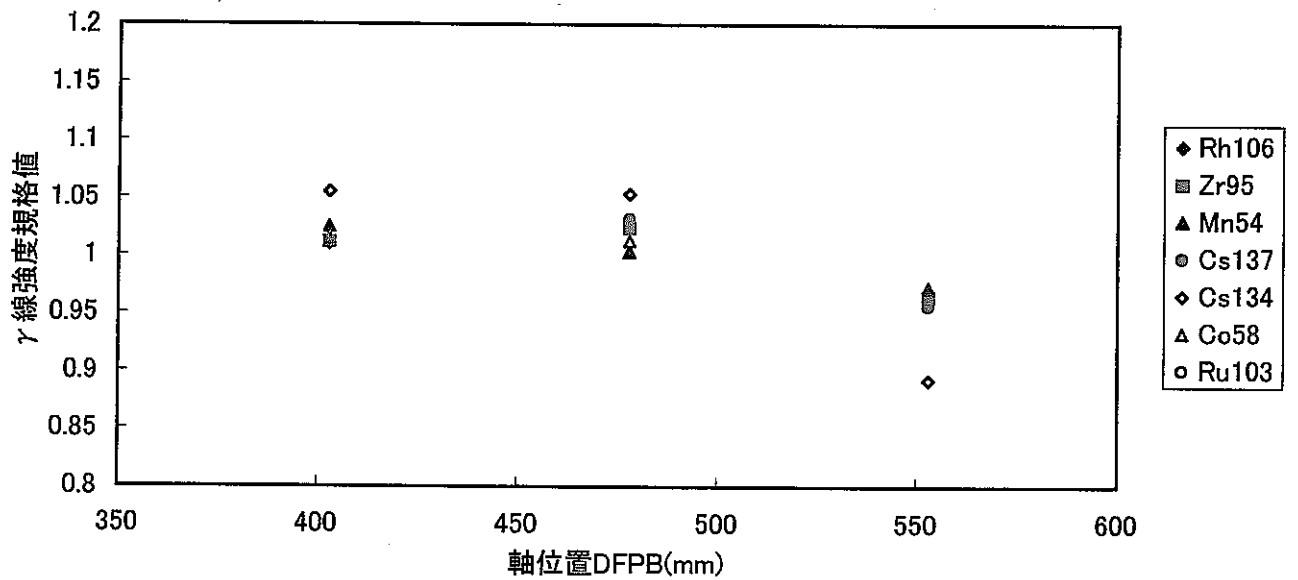


図 5.4.11 スペクトル測定による軸方向  $\gamma$  線強度分布 (B9N01)

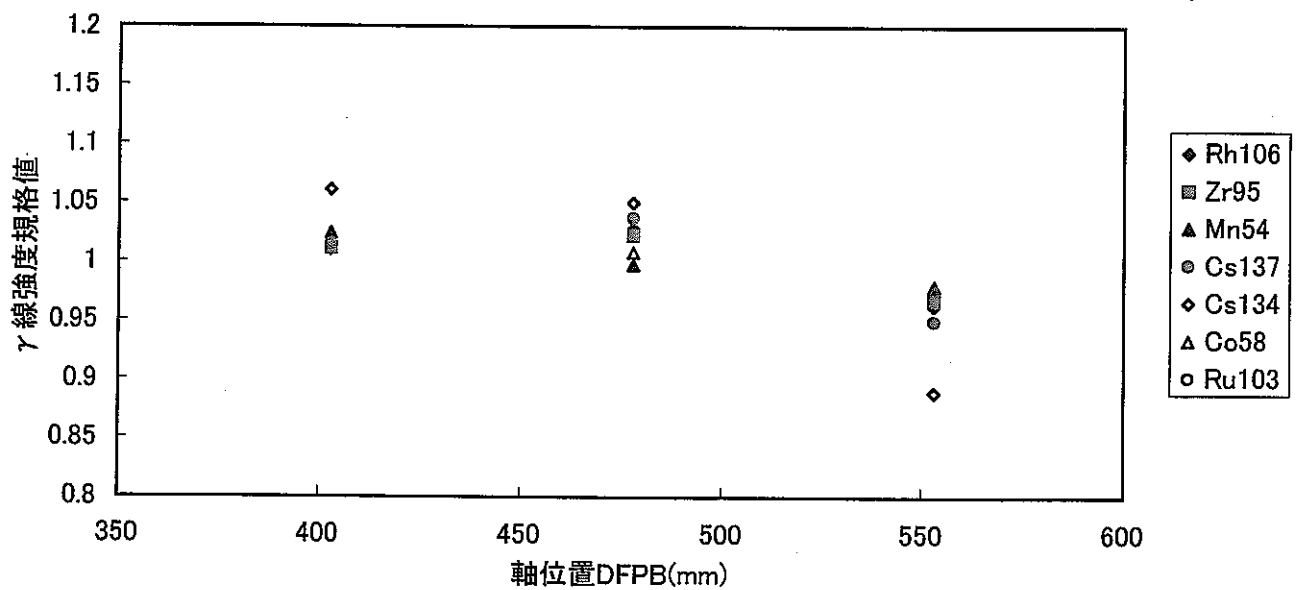


図 5.4.12 スペクトル測定による軸方向  $\gamma$  線強度分布 (B9N02)

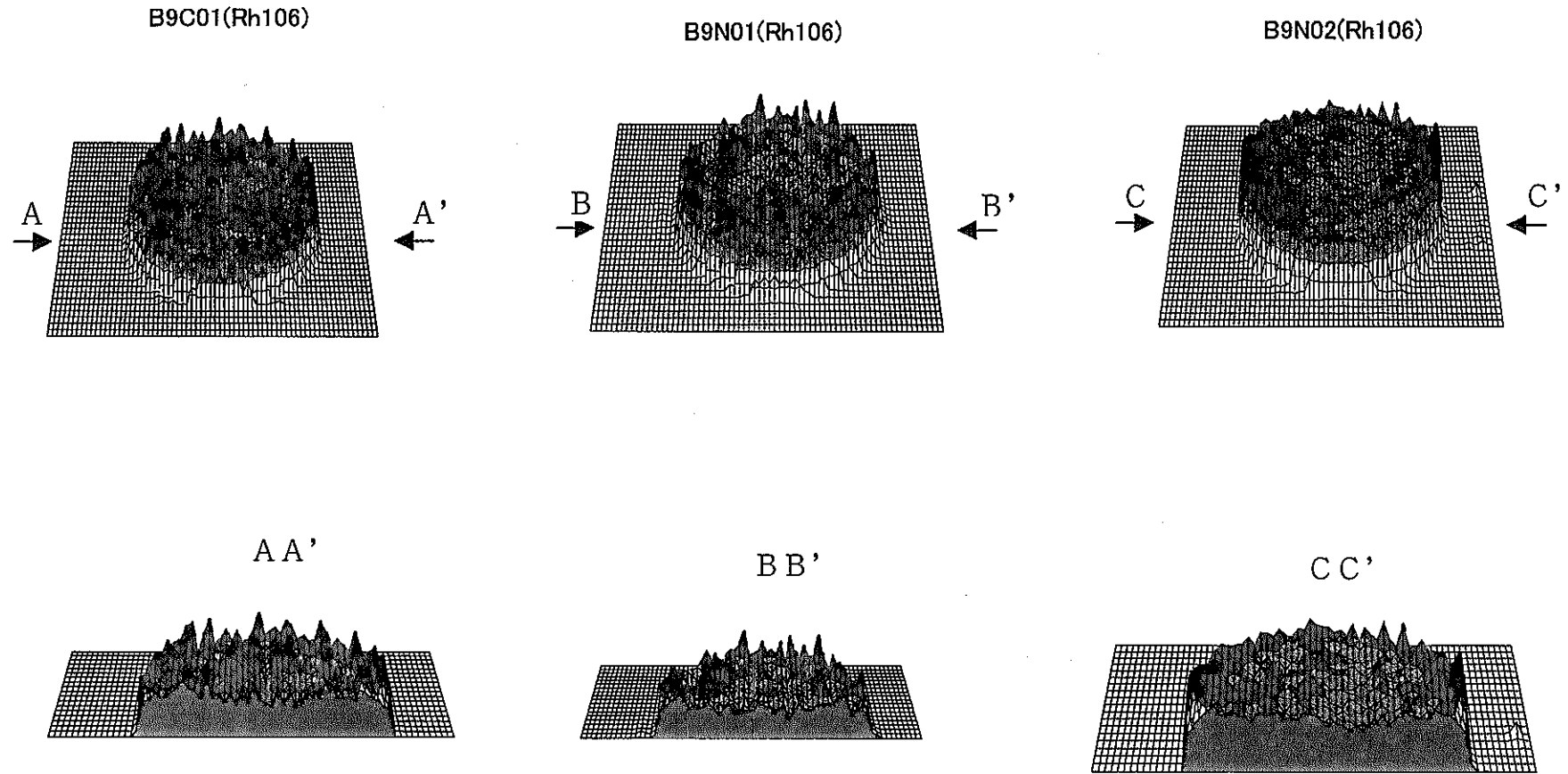


図5.4.13 トモグラフィー像(Rh106)

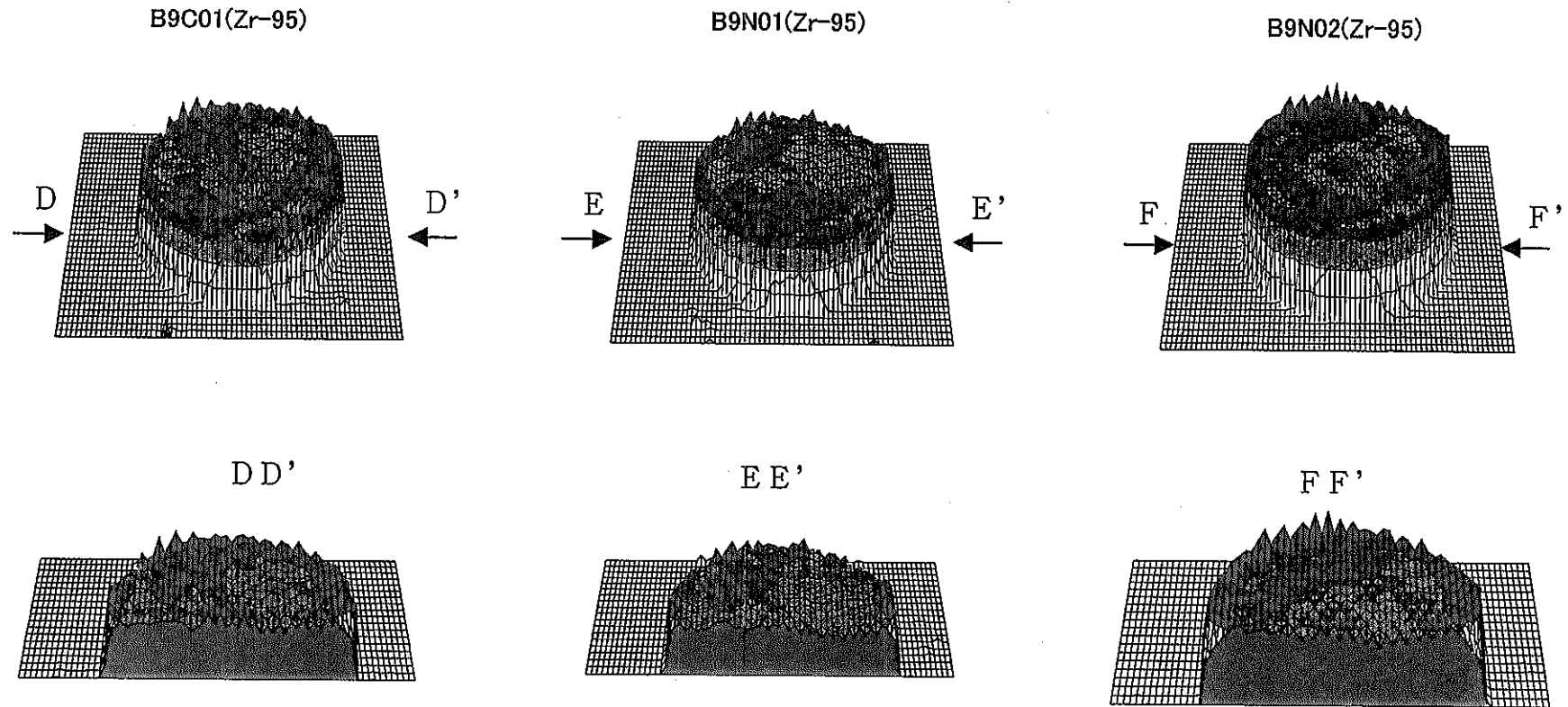


図5.4.14 トモグラフィー像(Zr-95)



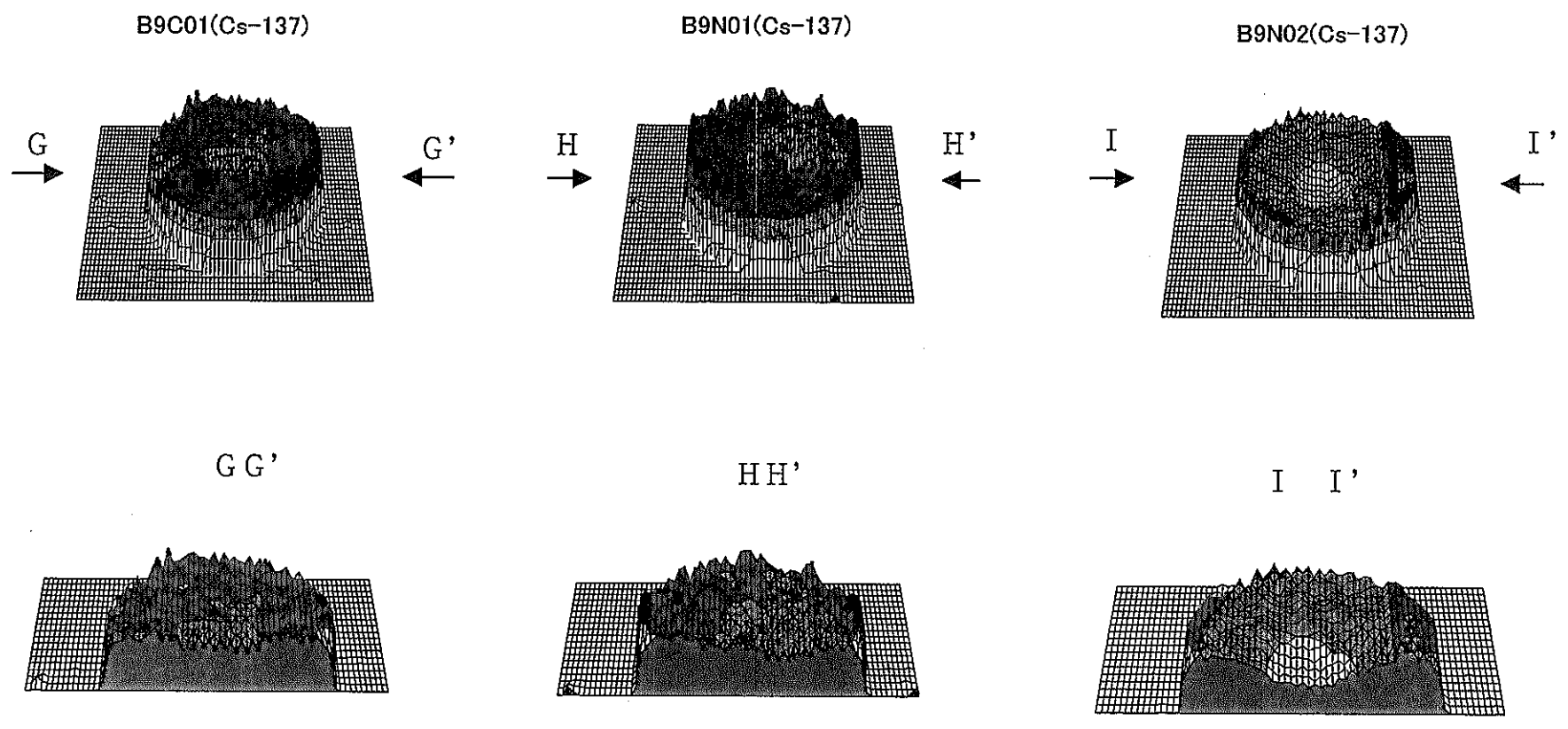
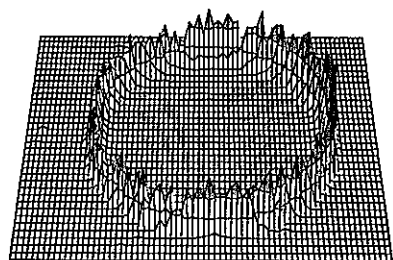
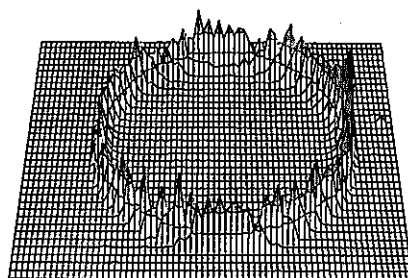


図5.4.15 トモグラフィ像(Cs-137)

B9C01(Co-58)



B9N01(Co-58)



B9N02(Co-58)

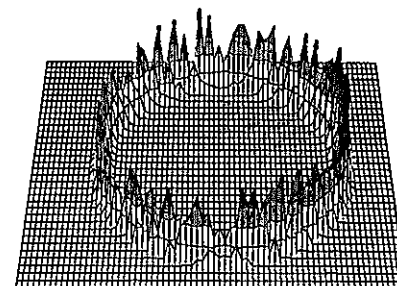


図5.4.16 トモグラフィー像(Co-58)

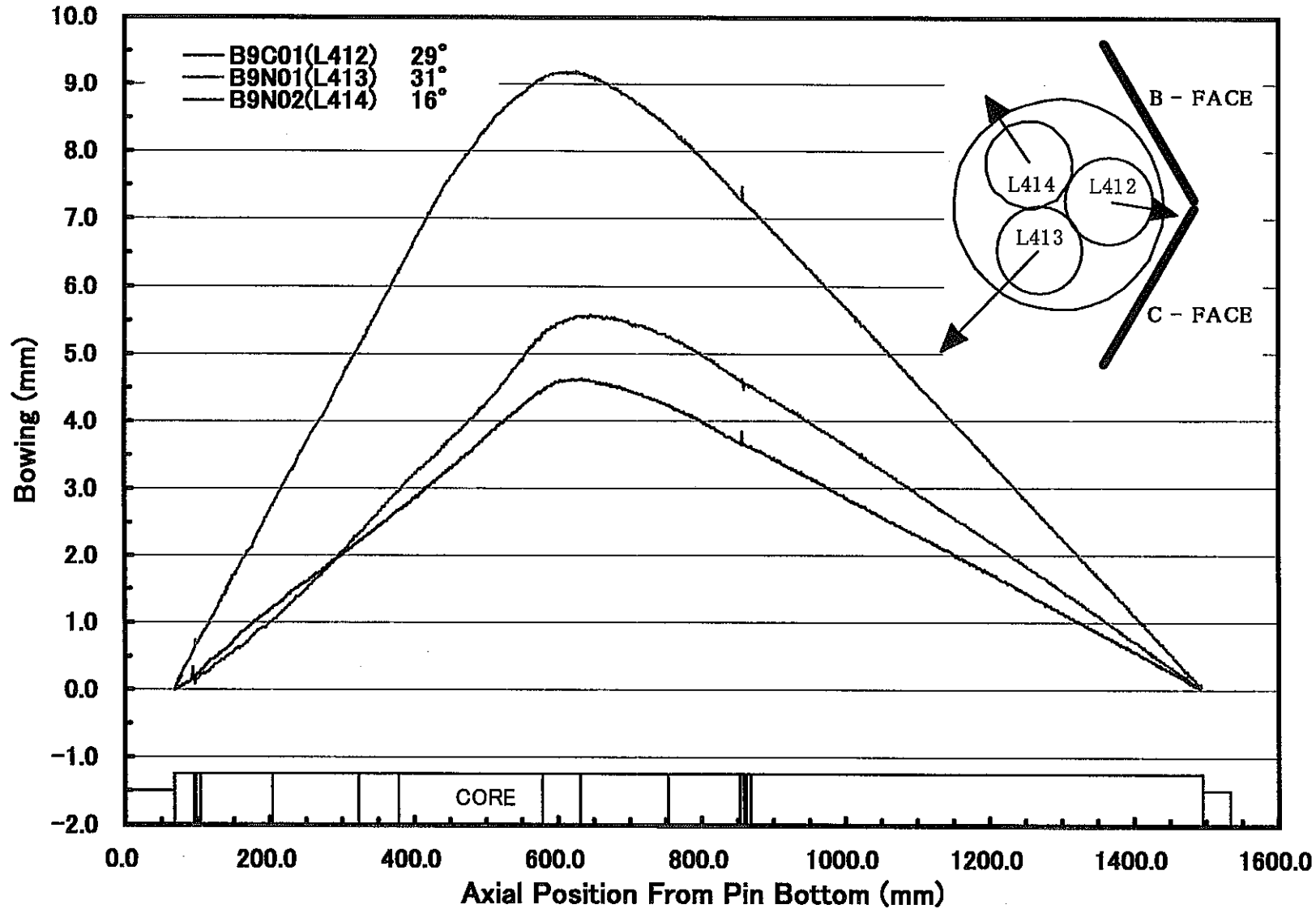


図5.5.1 曲がり測定プロファイル

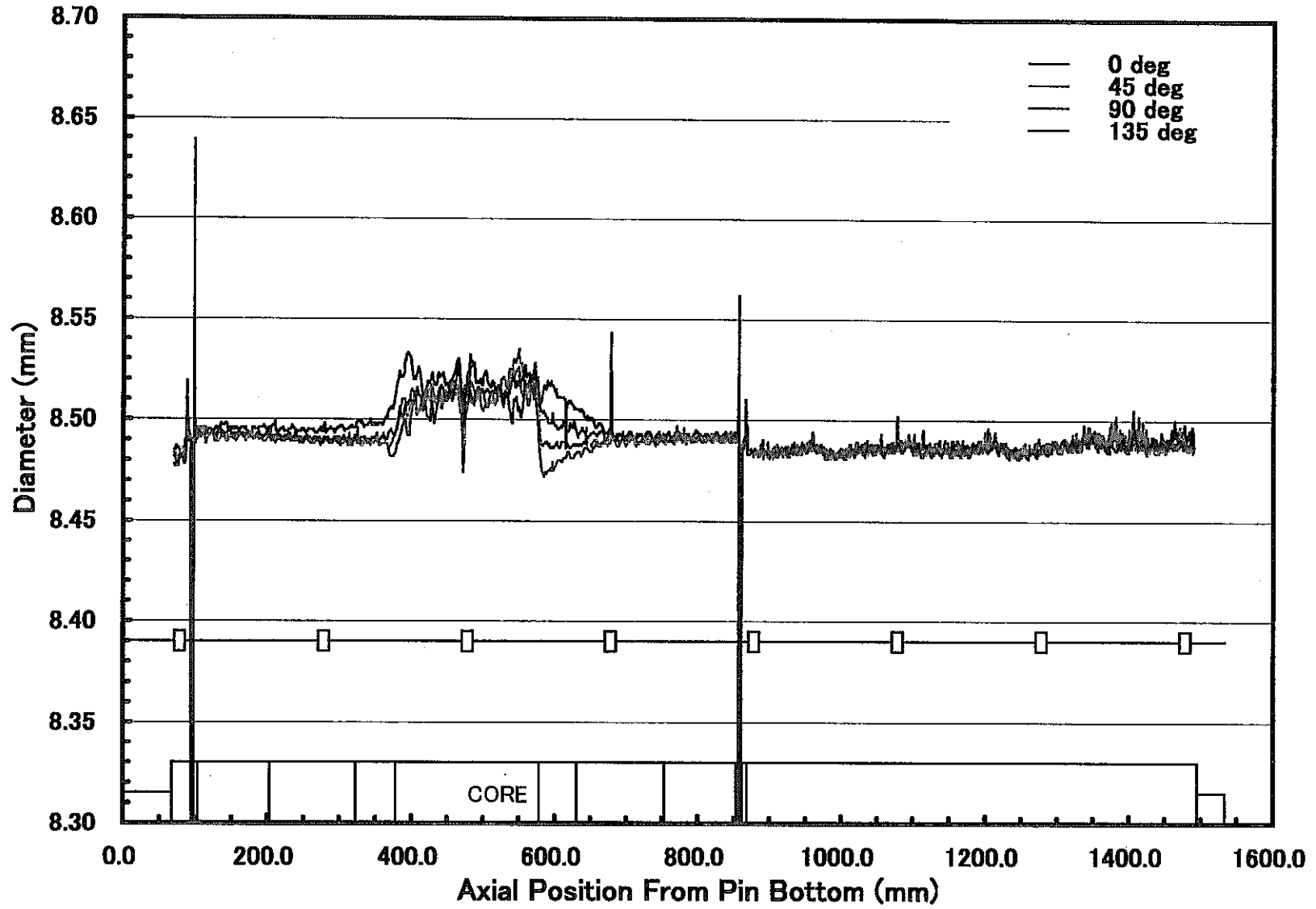


図5.5.2 軸方向外径プロフィール(B9C01)

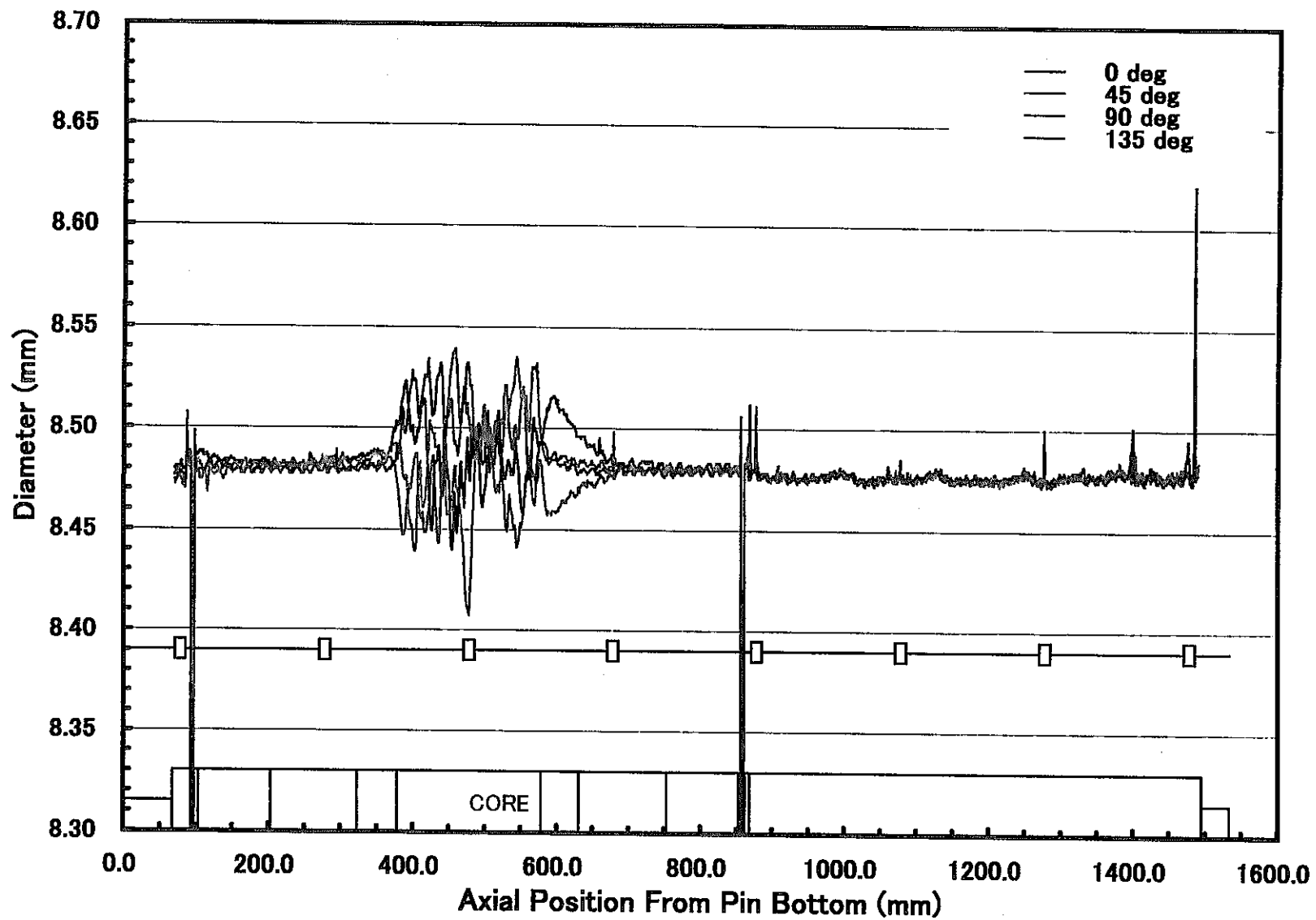


図5.5.3 軸方向外径プロファイル(B9N01)

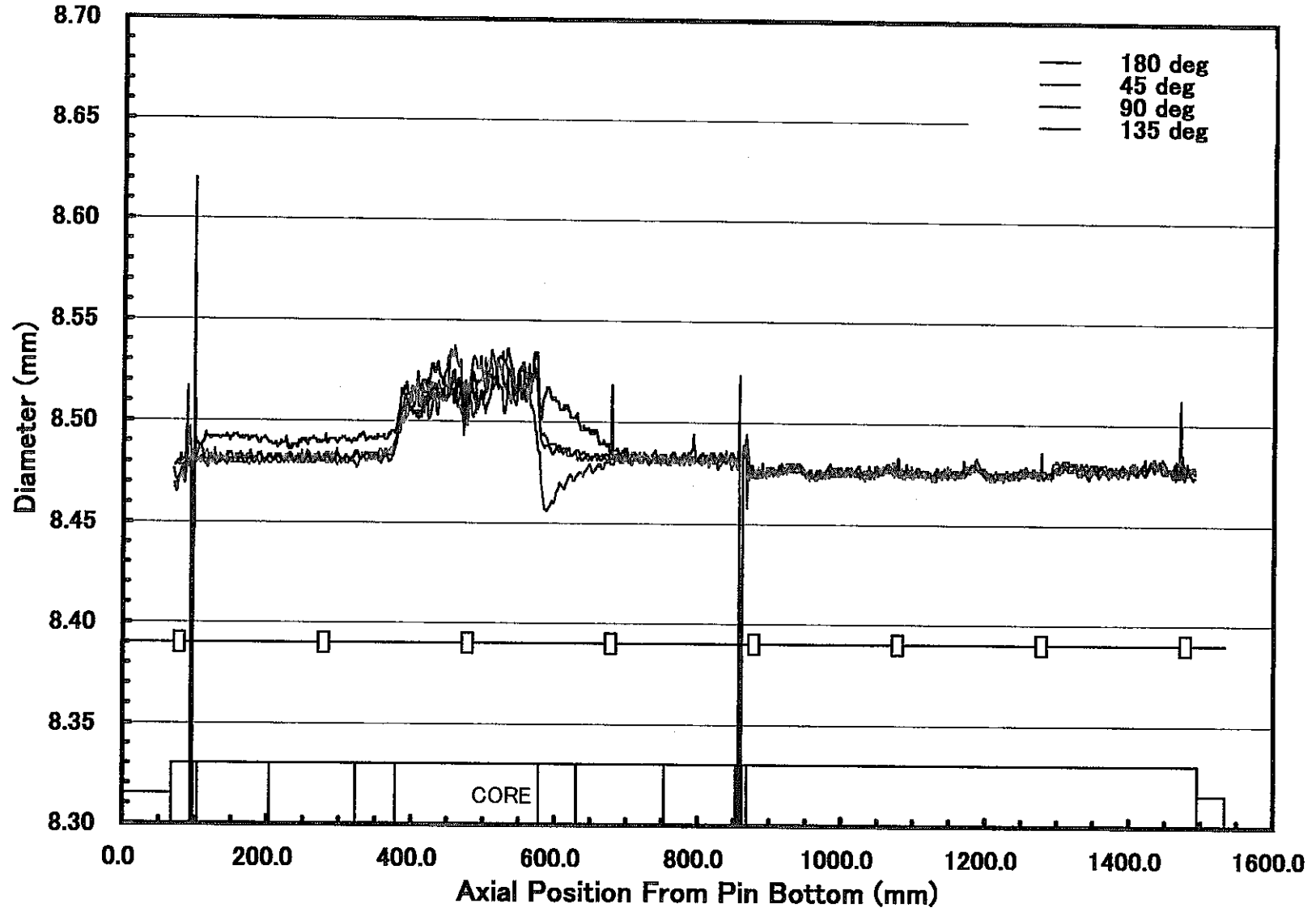


図5.5.4 軸方向外径プロフィール(B9N02)

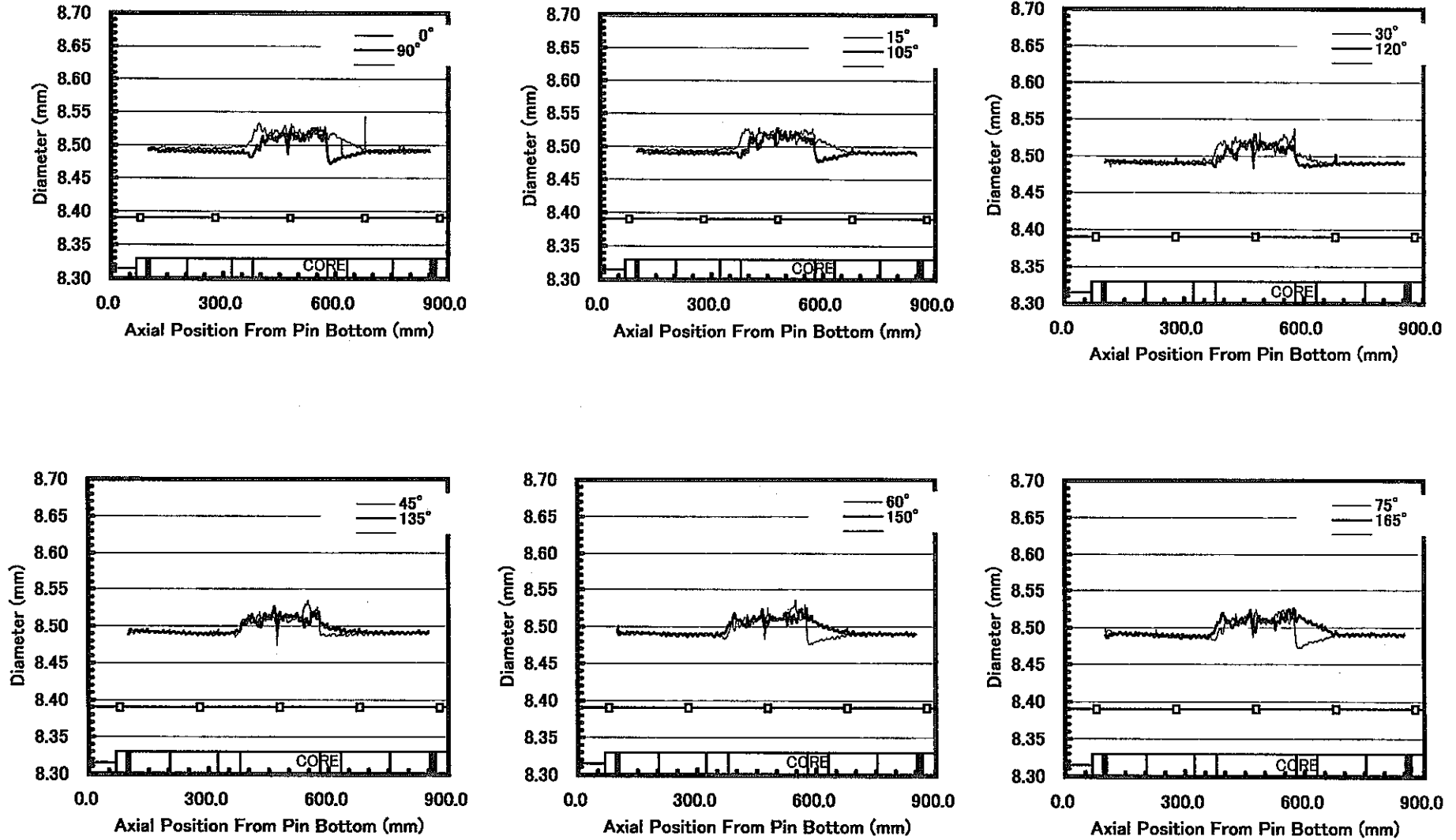


図5.5.5 軸方向詳細(12方向)外径測定プロフィール(B9C01)

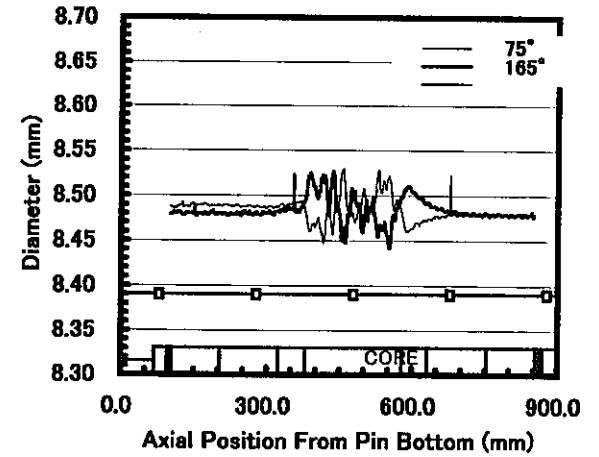
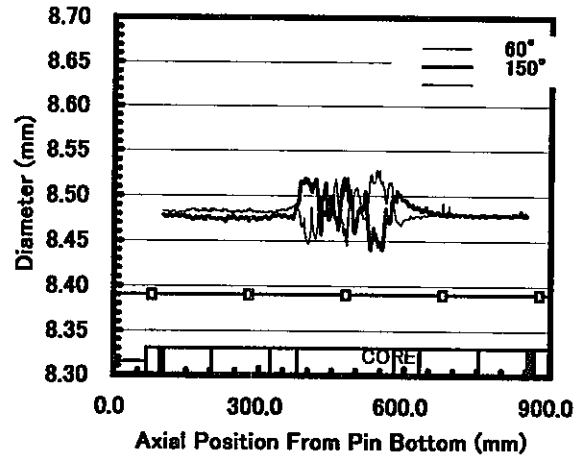
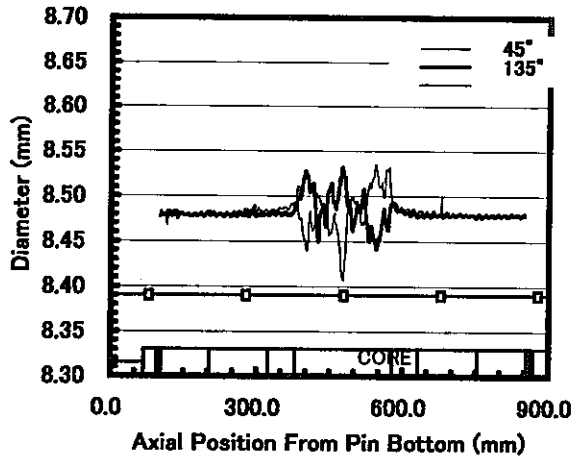
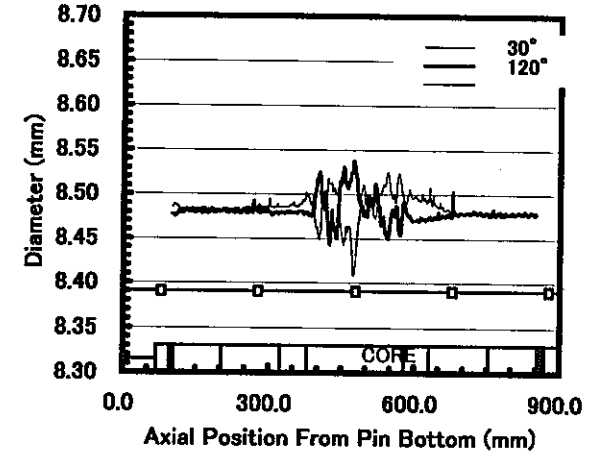
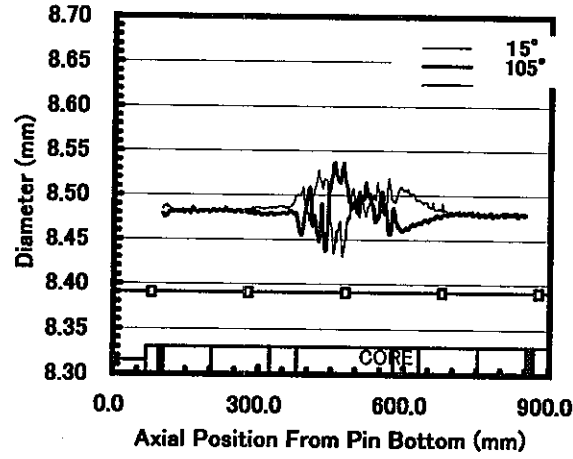
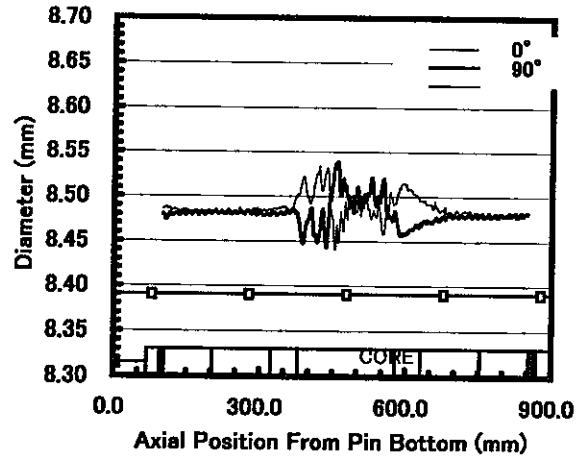


図5.5.6 軸方向詳細(12方向)外径測定プロフィール(B9N01)



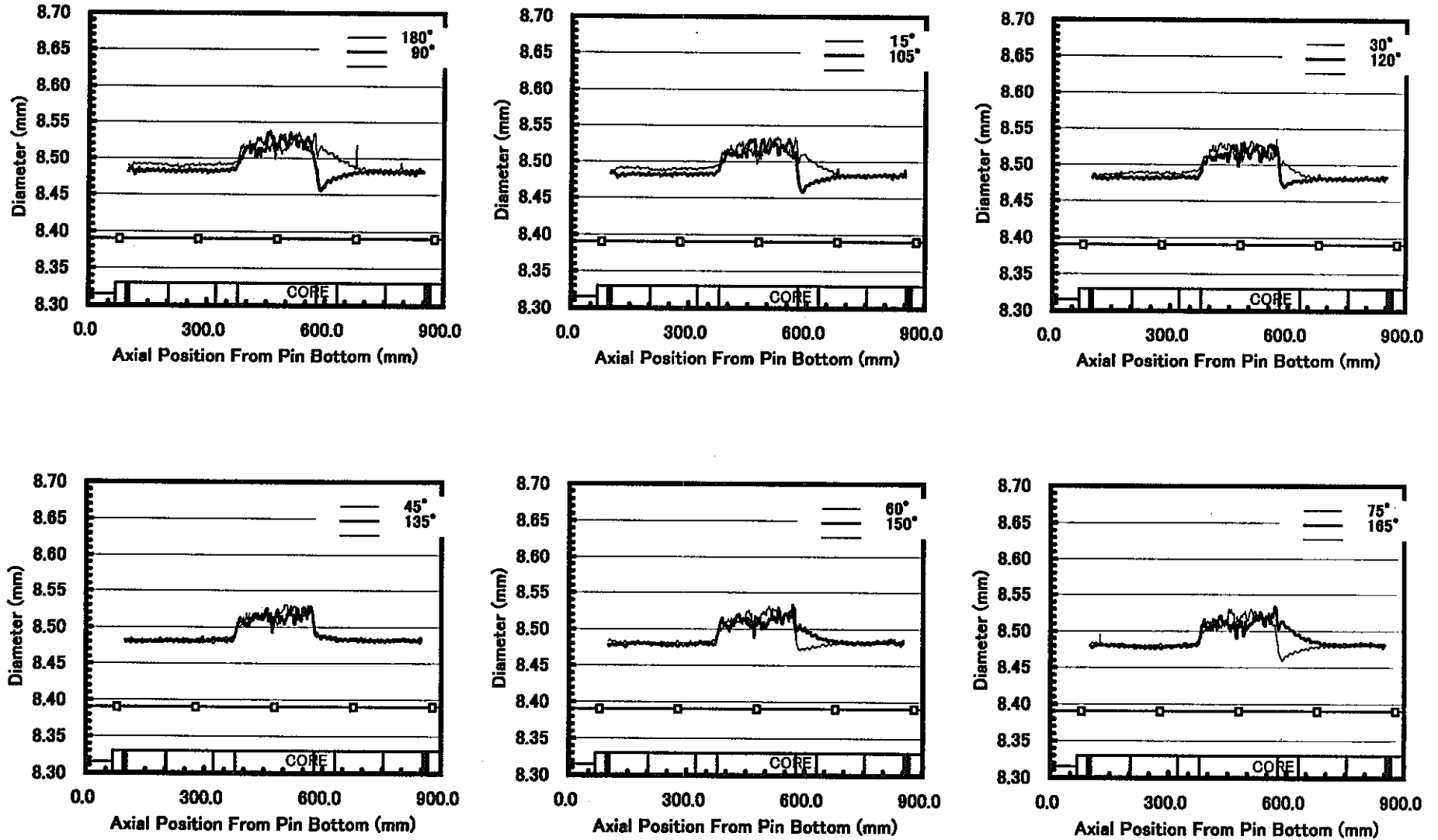


図5.5.7 軸方向詳細(12方向)外径測定プロフィール(B9N02)

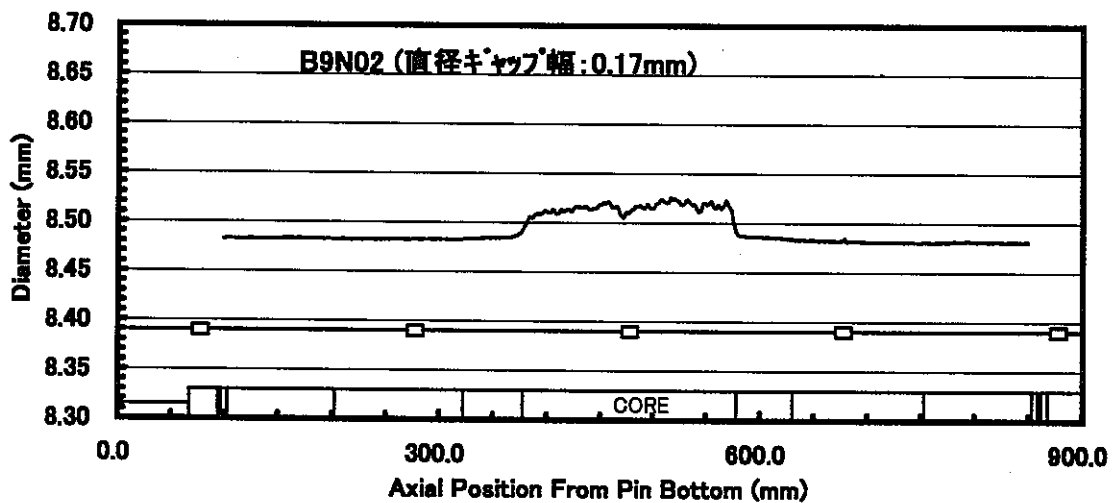
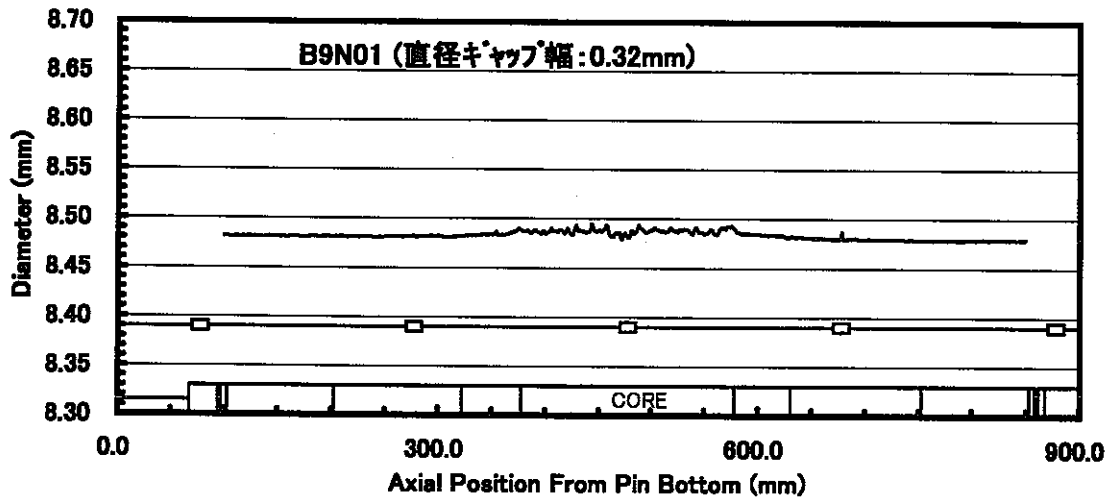
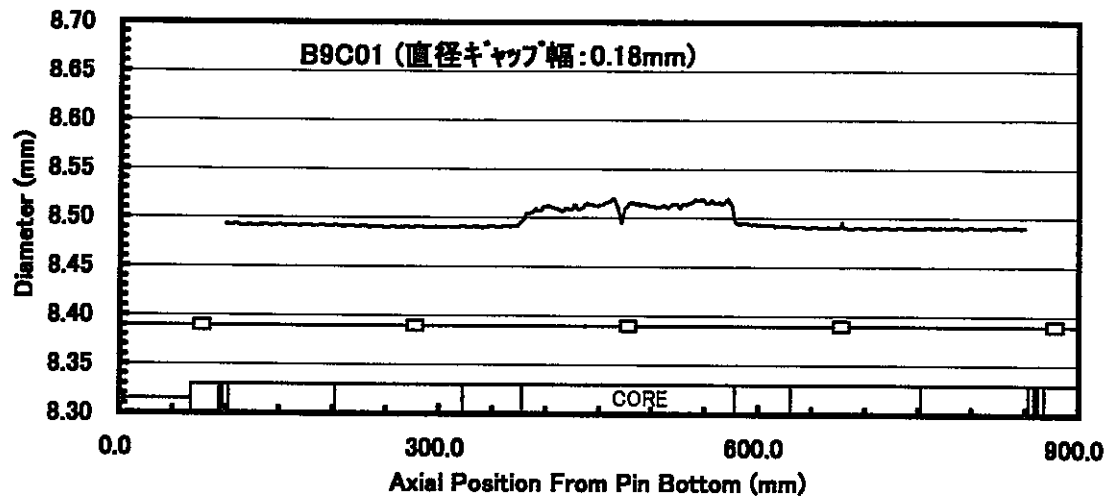
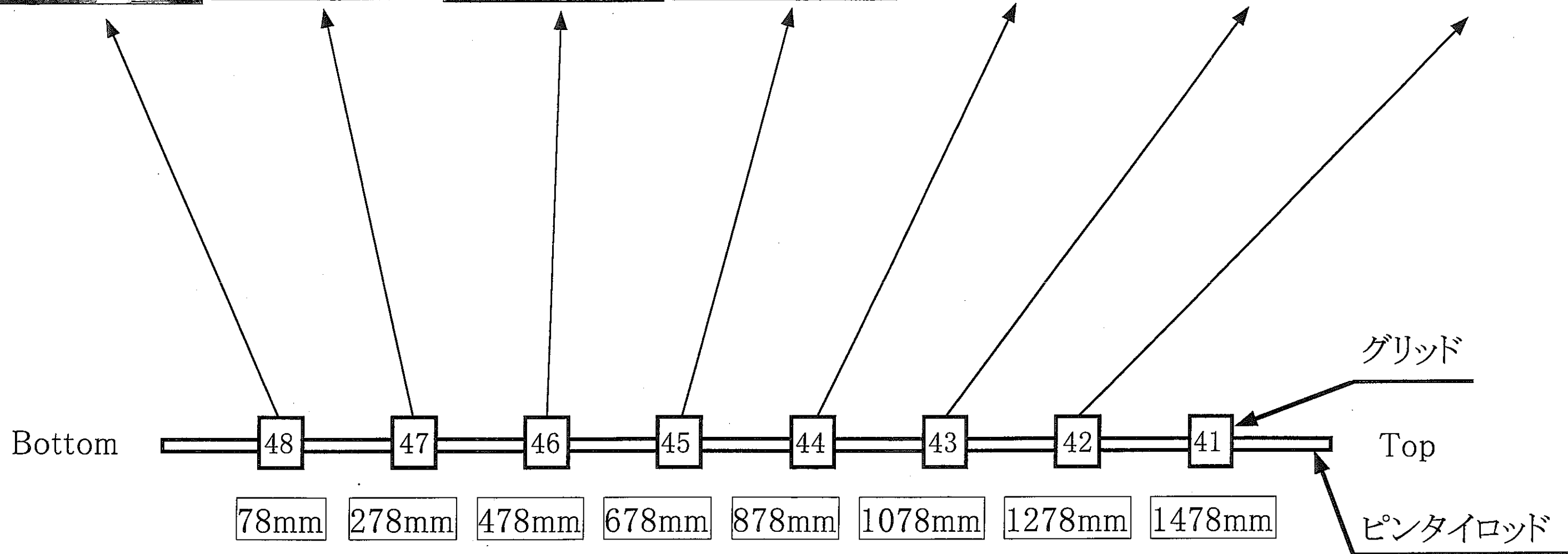
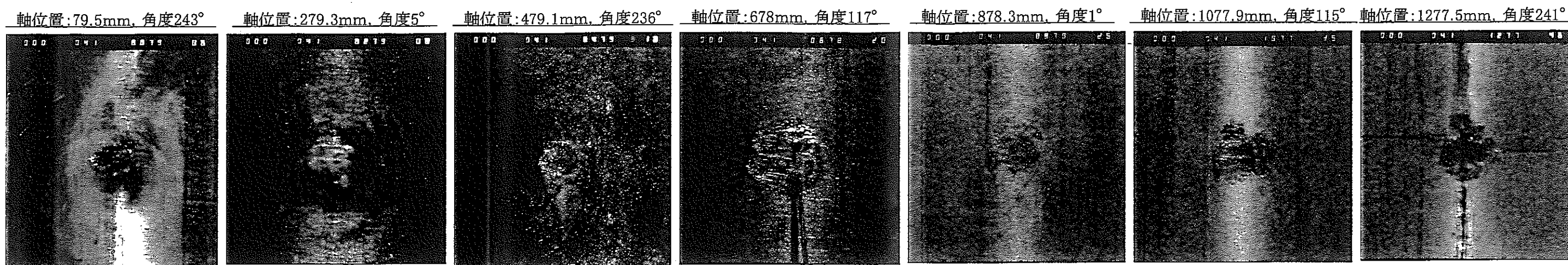


図5.5.8 軸方向平均外径プロフィール



□: グリッド素子デンプル接触跡発生ノミナル位置 (DFPB)

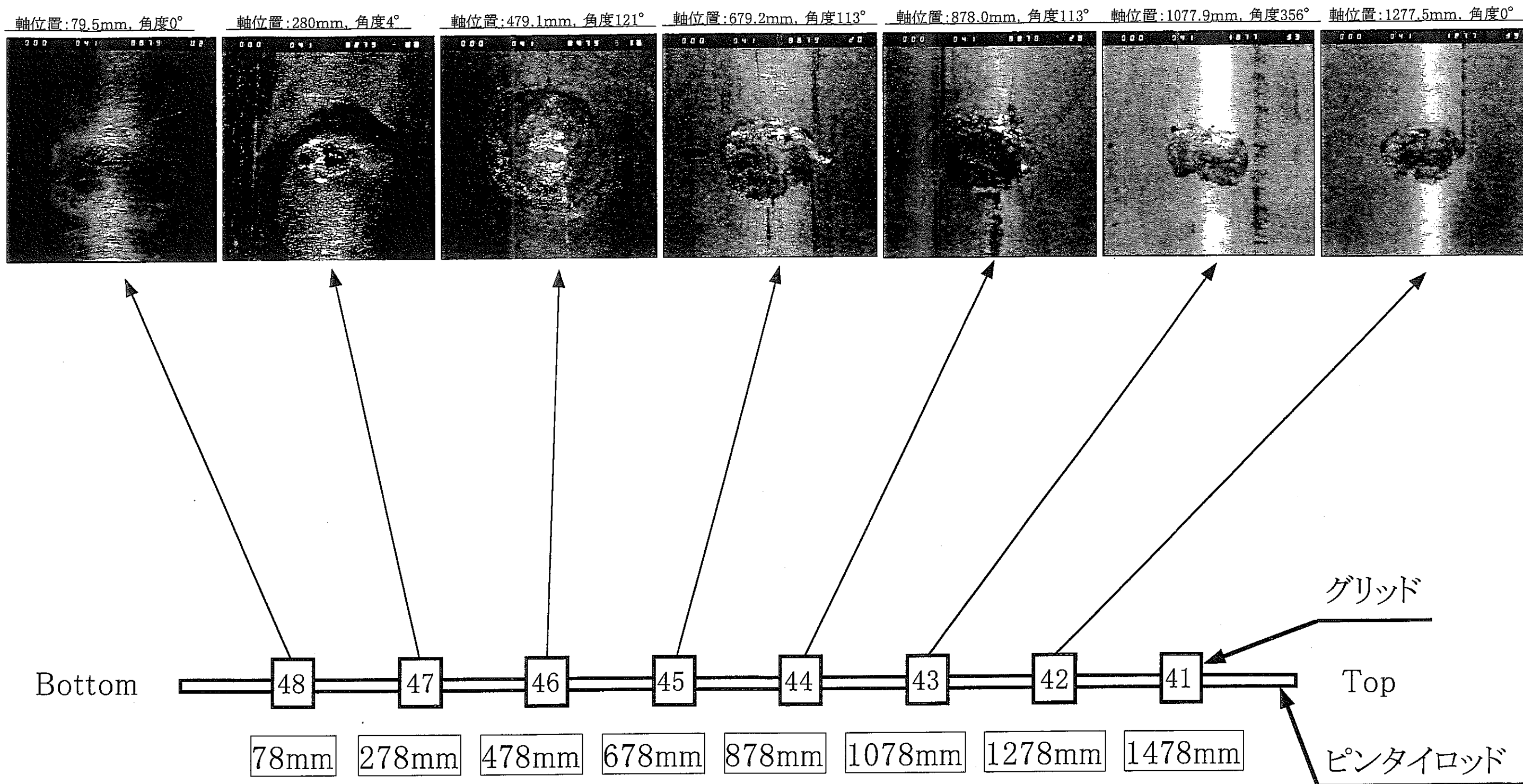
□: 41~48はグリッド刻印No.

写真5.1.1 デンプル接触跡観察結果(B9C01)

Photo Scale

×15: | 1mm |

\*写真は各軸で代表的なものを掲載した



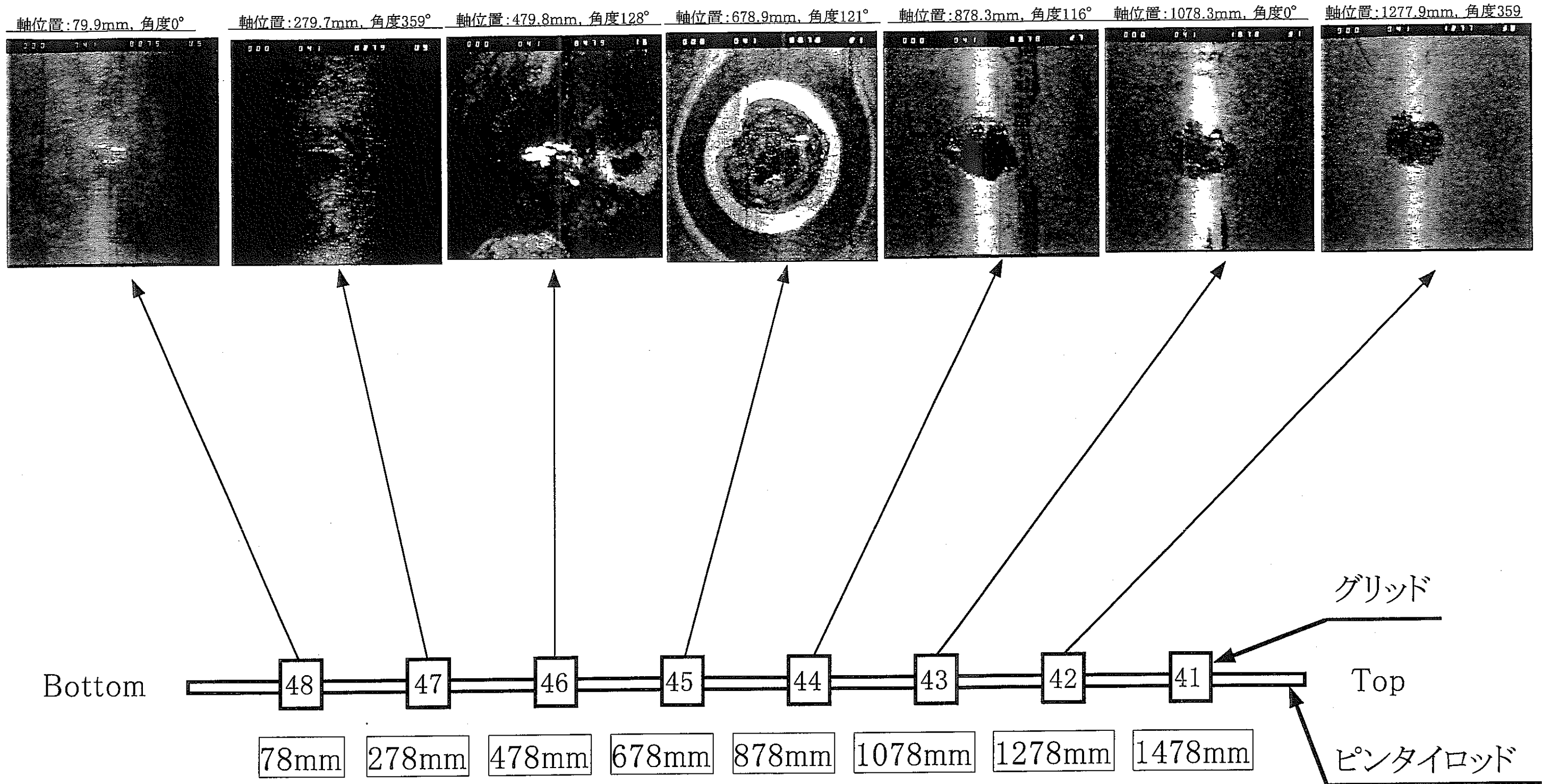
□ :グリッド素子デンプル接触跡発生ノミナル位置 (DFPB)  
 □ :41~48はグリッド刻印No.

写真5.1.2 デンプル接触跡観察結果(B9N01)

Photo Scale

×15: | 1mm |

\*写真は各軸で代表的なものを掲載した



□ :グリッド素子デンプル接触跡発生ノミナル位置 (DFPB)  
 □ :41~48はグリッド刻印No.

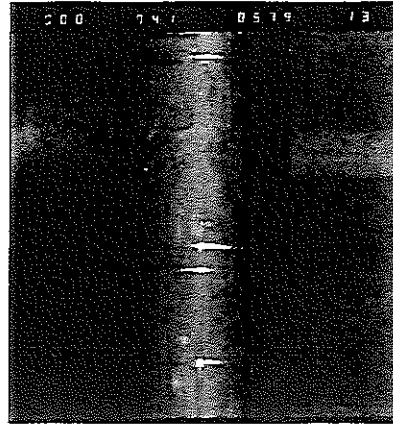
写真5.1.3 デンプル接触跡観察結果(B9N02)

Photo Scale

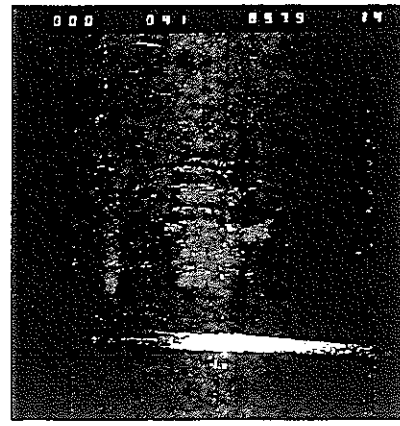
×15: | 1mm |

\*写真は各軸で代表的なものを掲載した

軸位置:579mm,角度:0° (コンパートメント内面との接触跡)

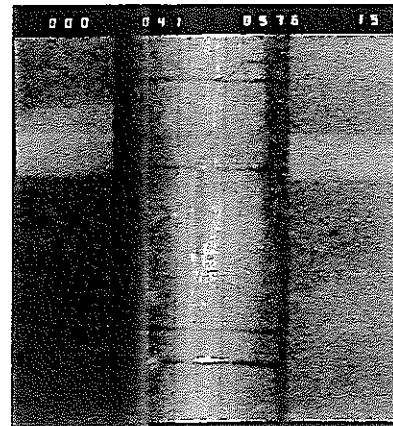


(×3)

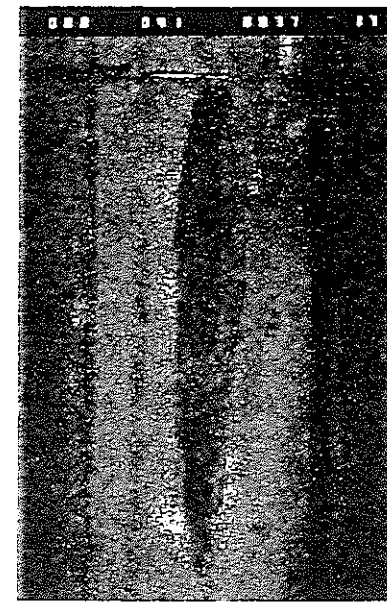


(×15)

軸位置:576mm,角度:211° (隣接ピンに起因すると推定される跡)



(×3)

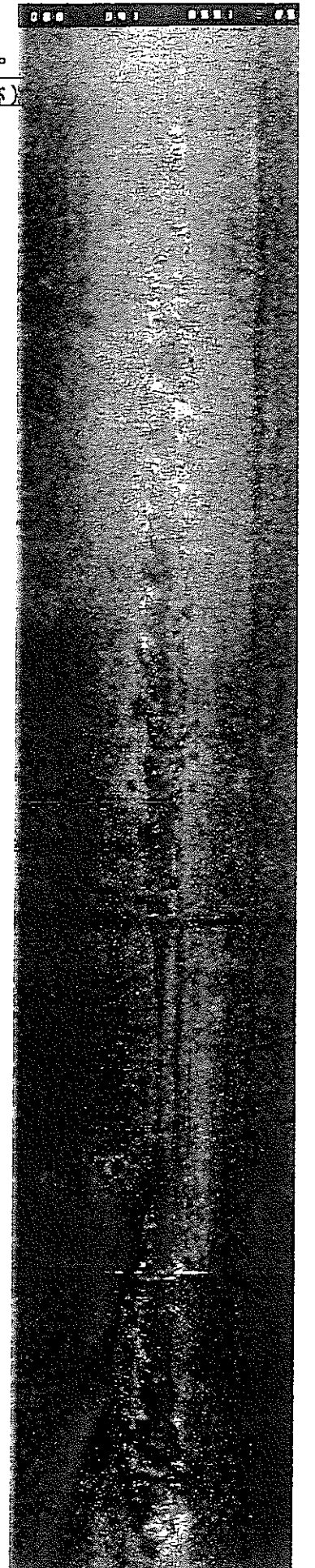


(×15)

軸位置:579~591mm,角度:151° (隣接ピンに起因すると推定される跡)



(×3)



(×15)

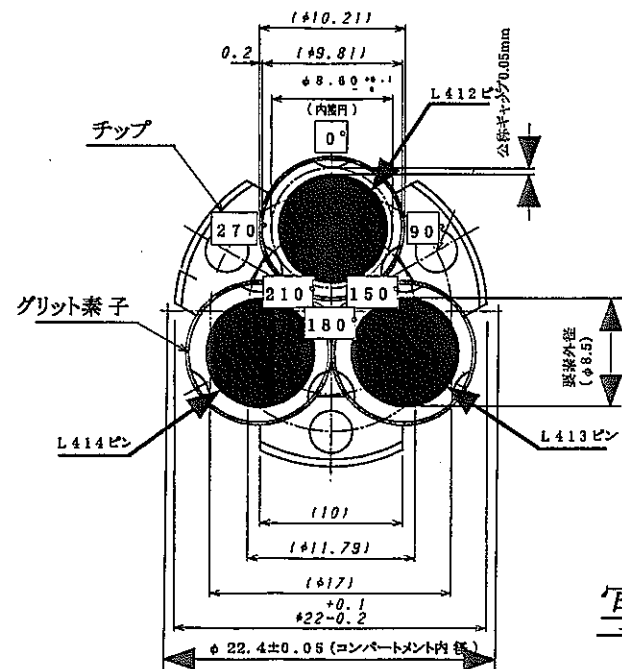


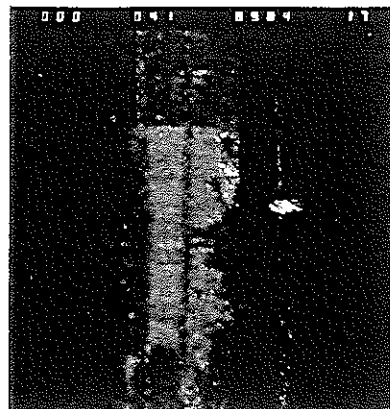
写真5.1.4 被覆管表面状況観察結果(B9C01)

Photo Scale  
 ×3 5mm  
 1mm  
 ×15 1mm  
 (×15)

軸位置:584mm,角度:358° (コンパートメント内面との接触跡)

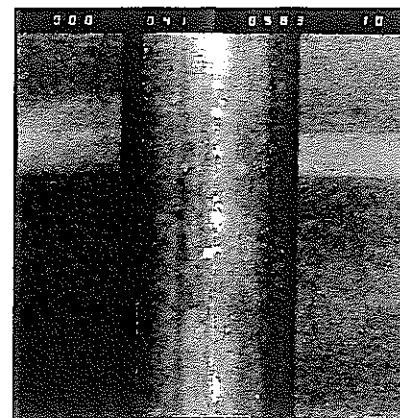


(x3)



(x15)

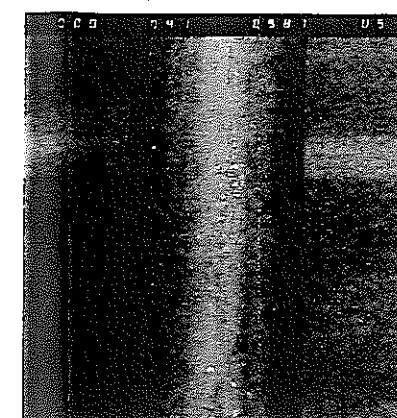
軸位置:583mm,角度:154° (隣接ピンに起因すると推定される跡) 軸位置:587mm,角度:214° (隣接ピンに起因すると推定される跡)



(x3)



(x15)

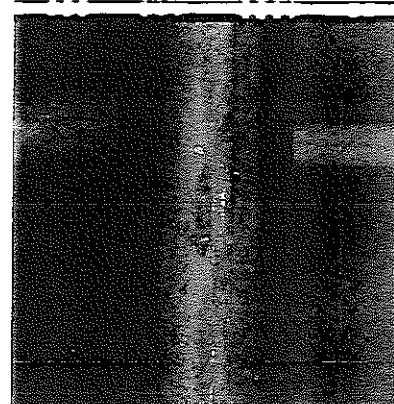


(x3)



(x15)

軸位置:577mm,角度:212° (隣接ピンに起因すると推定される跡)



(x3)



(x15)

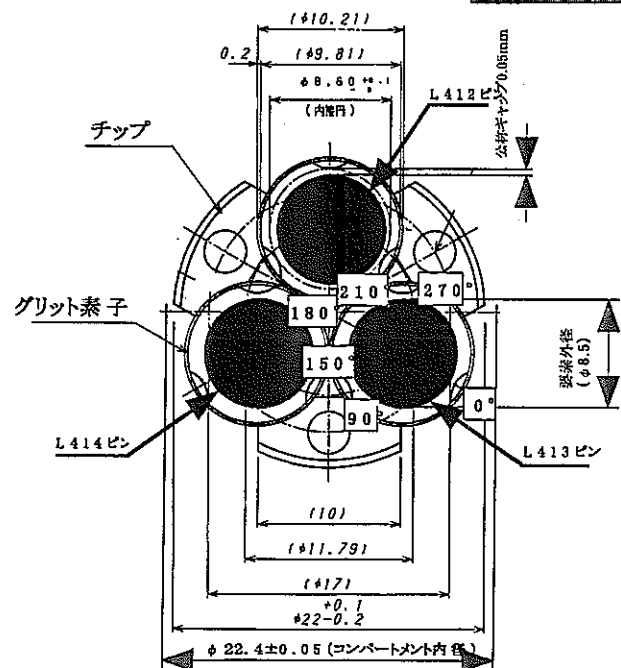
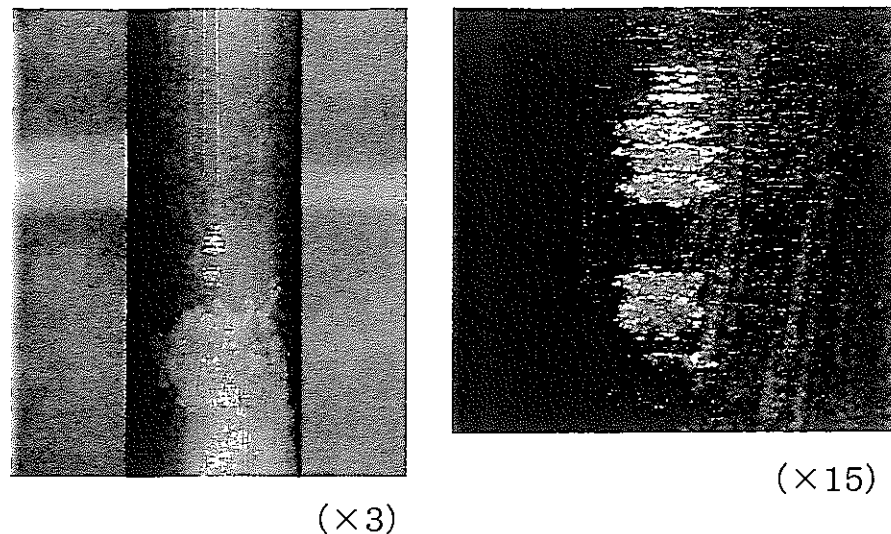


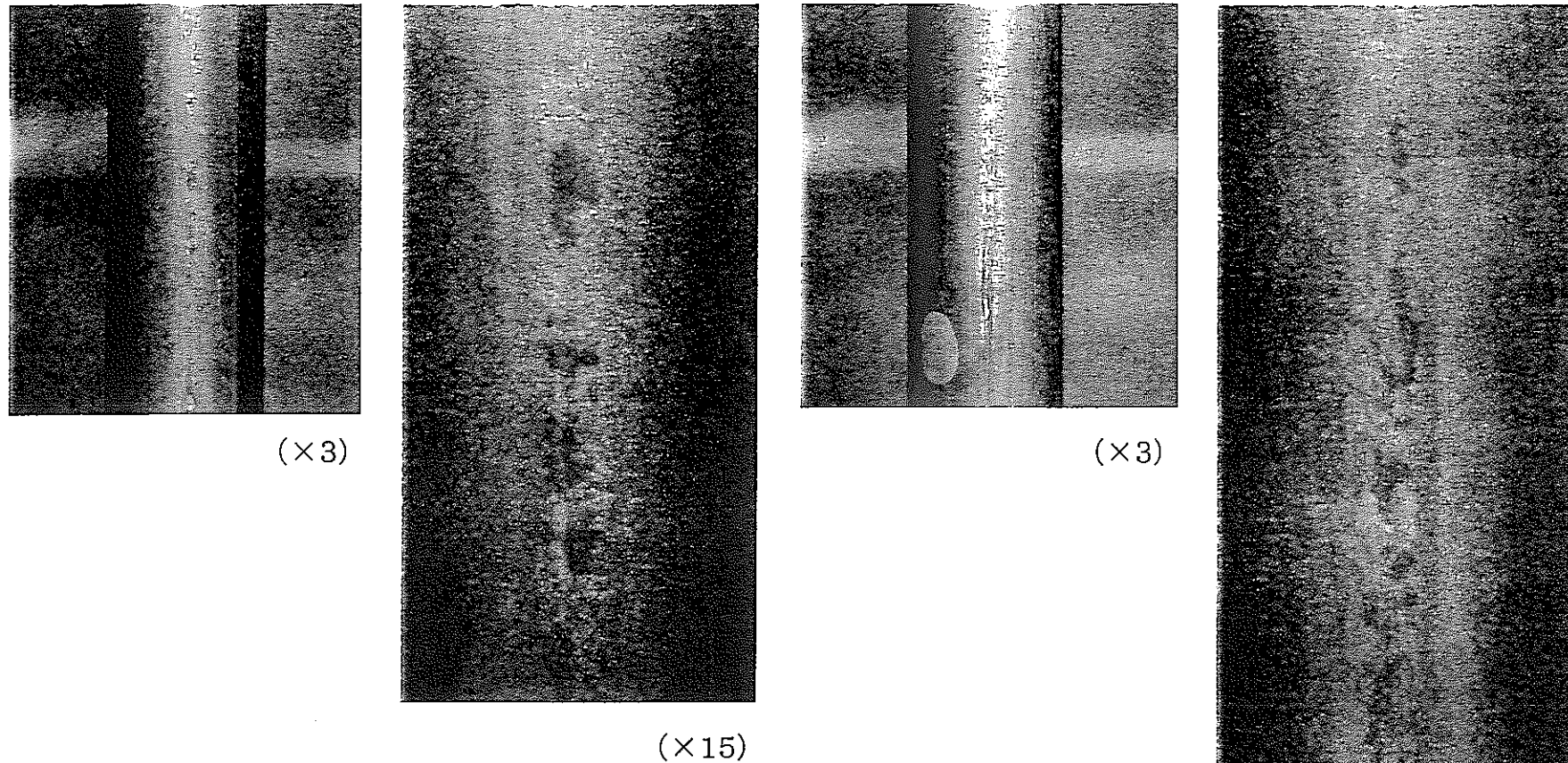
写真5.1.5 被覆管表面状況観察結果(B9N01)

Photo Scale  
 x3 | 5mm  
 x15 | 1mm

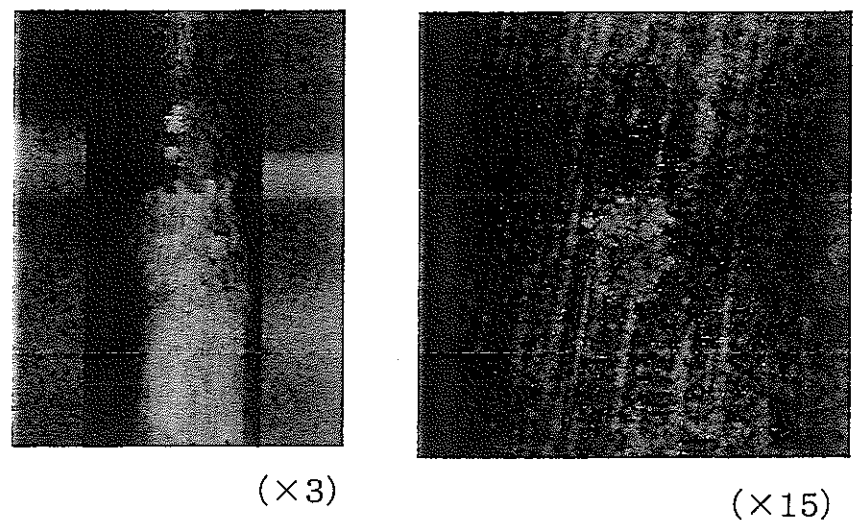
軸位置:582mm,角度:1° (コンパートメント内面との接触跡)



軸位置:587mm,角度:155° (隣接ピンに起因すると推定される跡) 軸位置:580mm,角度:212° (隣接ピンに起因すると推定される跡)



軸位置:557mm,角度:1° (コンパートメント内面との接触跡)



軸位置:575mm,角度:148° (隣接ピンに起因すると推定される跡)

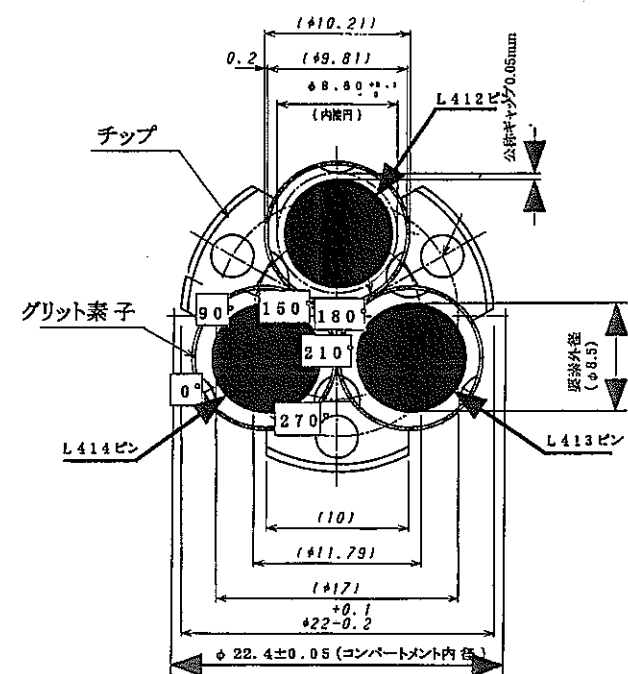
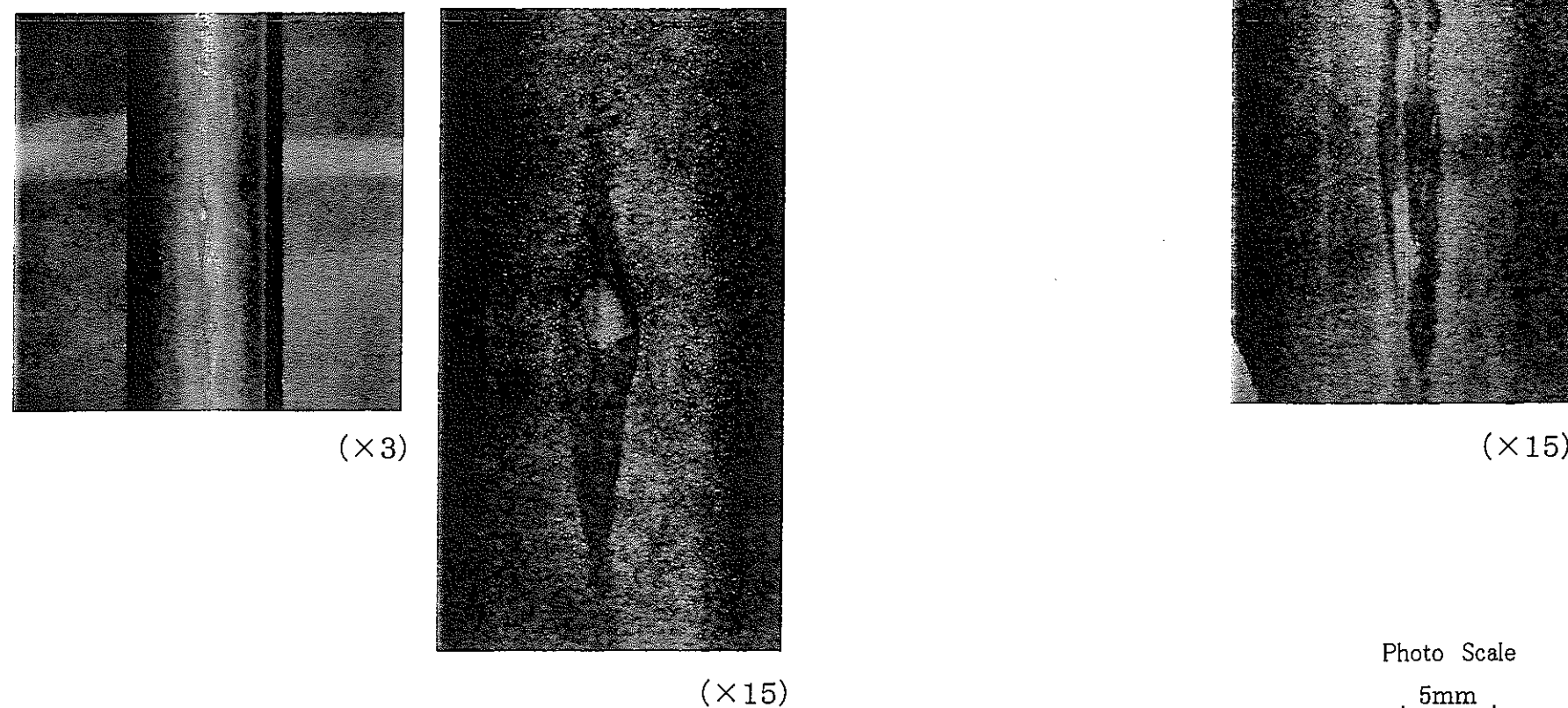


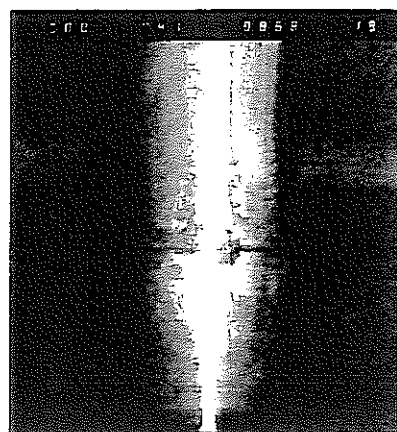
写真5.1.6 被覆管表面状況観察結果(B9N02)

Photo Scale  
 ×3 5mm  
 ×15 1mm



上部中間端栓溶接部(廻り止め)のワレ

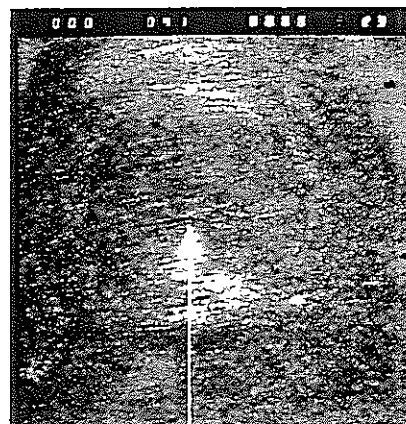
L413ピン軸位置:868mm, 角度:355°



(×3)

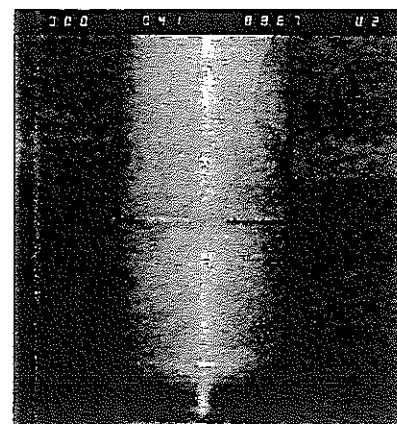


(×15)

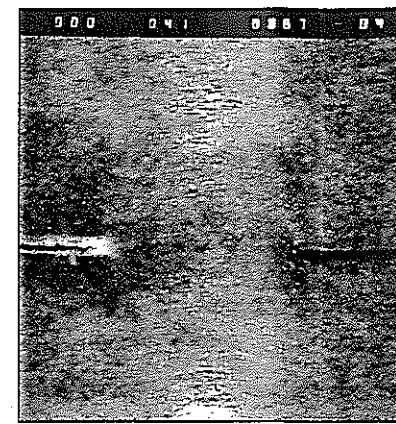


ワレ箇所 (×30)

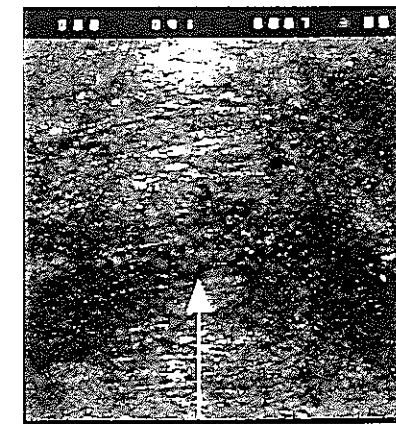
L414ピン軸位置:867mm, 角度:0°



(×3)



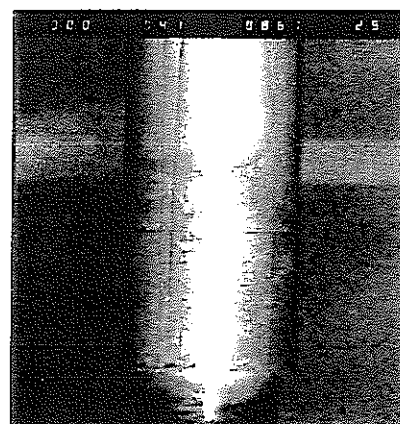
(×15)



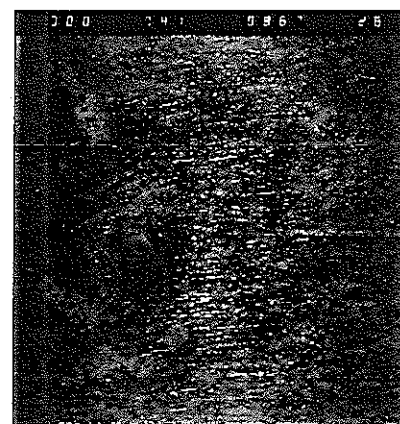
(×30)  
ワレ箇所

(健全な溶接状態)

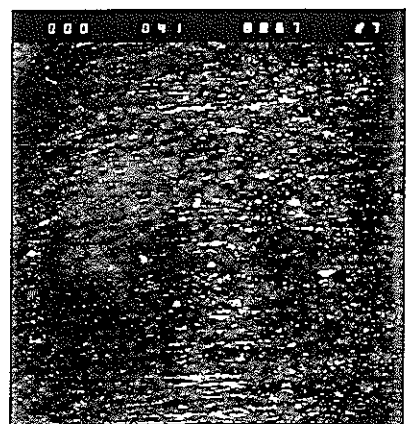
L413ピン軸位置:867mm, 角度:90°



(×3)



(×15)

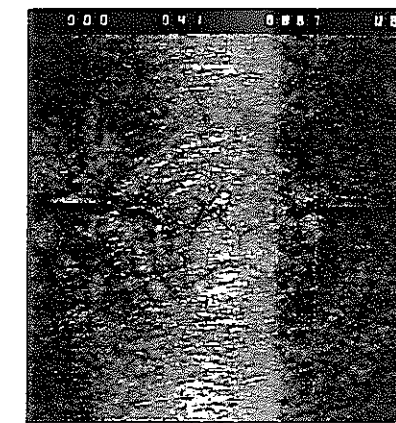


(×30)

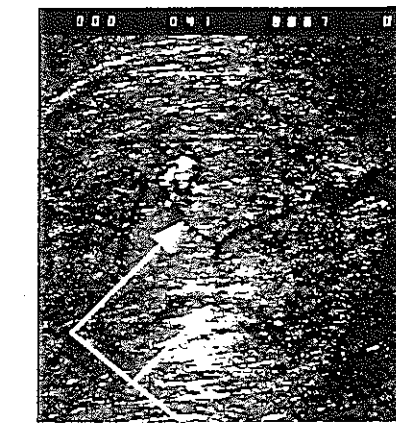
L414ピン軸位置:867mm, 角度:88°



(×3)

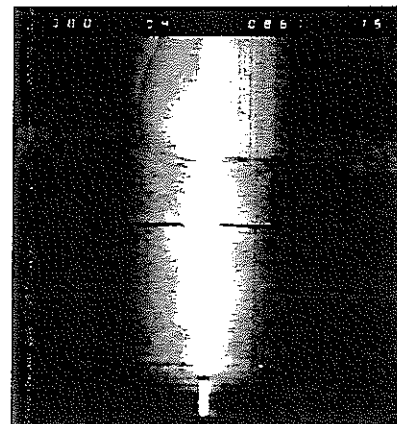


(×15)

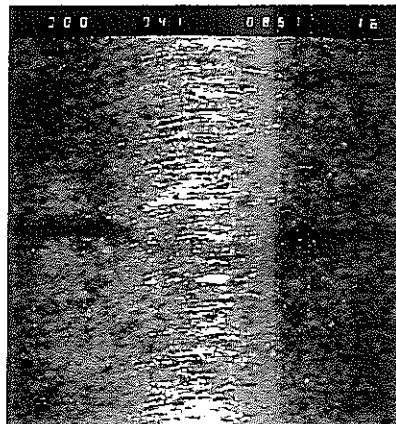


(×30)  
ワレ箇所

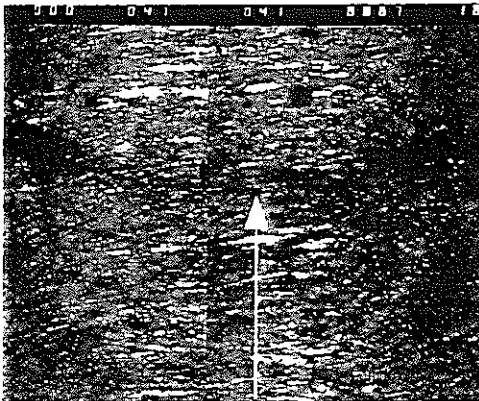
L414ピン軸位置:867mm, 角度:274°



(×3)



(×15)



ワレ箇所 (×30)

Photo Scale

×15: |1mm|

×30: |0.5mm|

写真5.1.7 上下中間端栓溶接部の表面状況観察結果

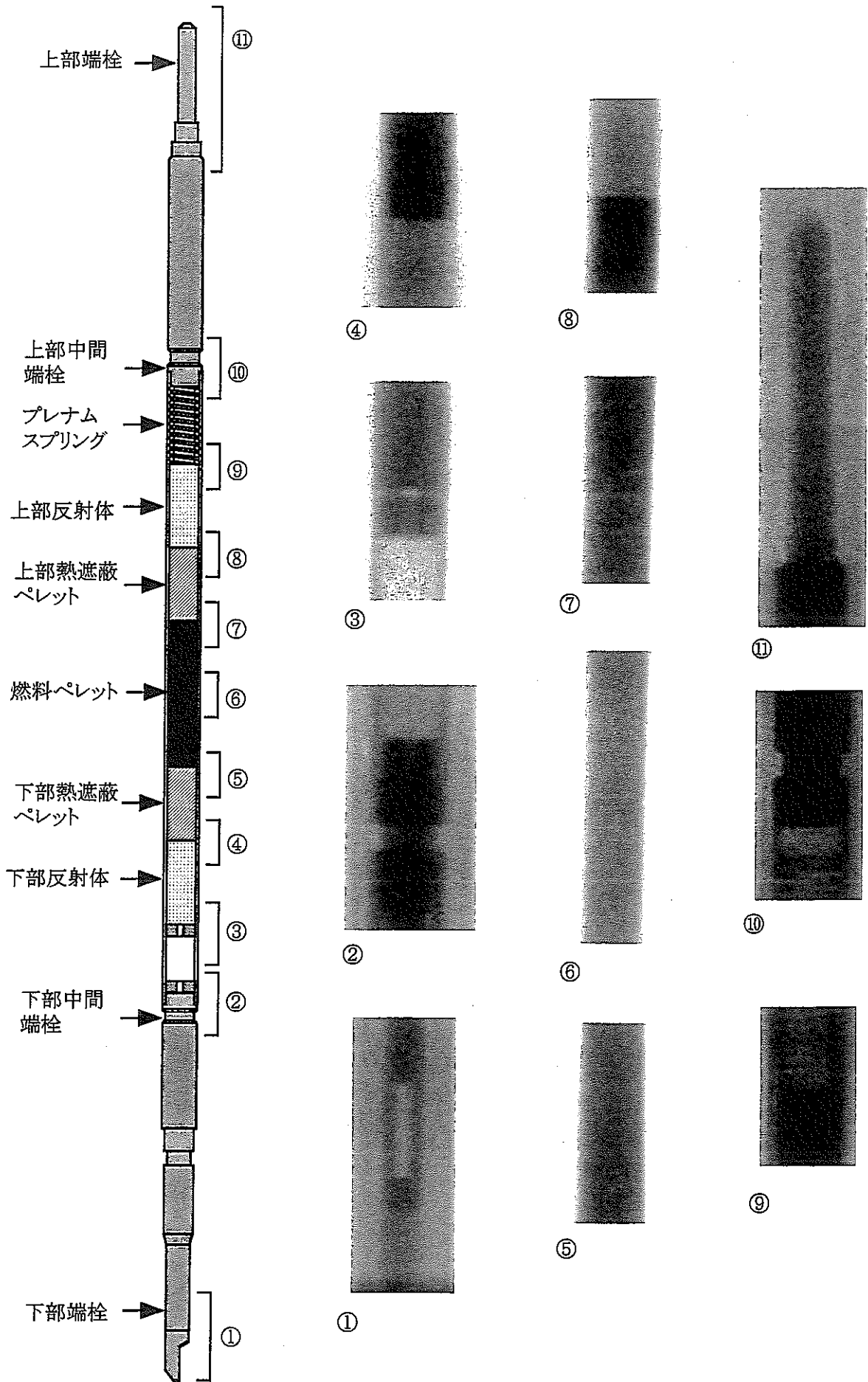


写真5.2.1 X線ラジオグラフィー観察写真(B9C01:0° 方向)

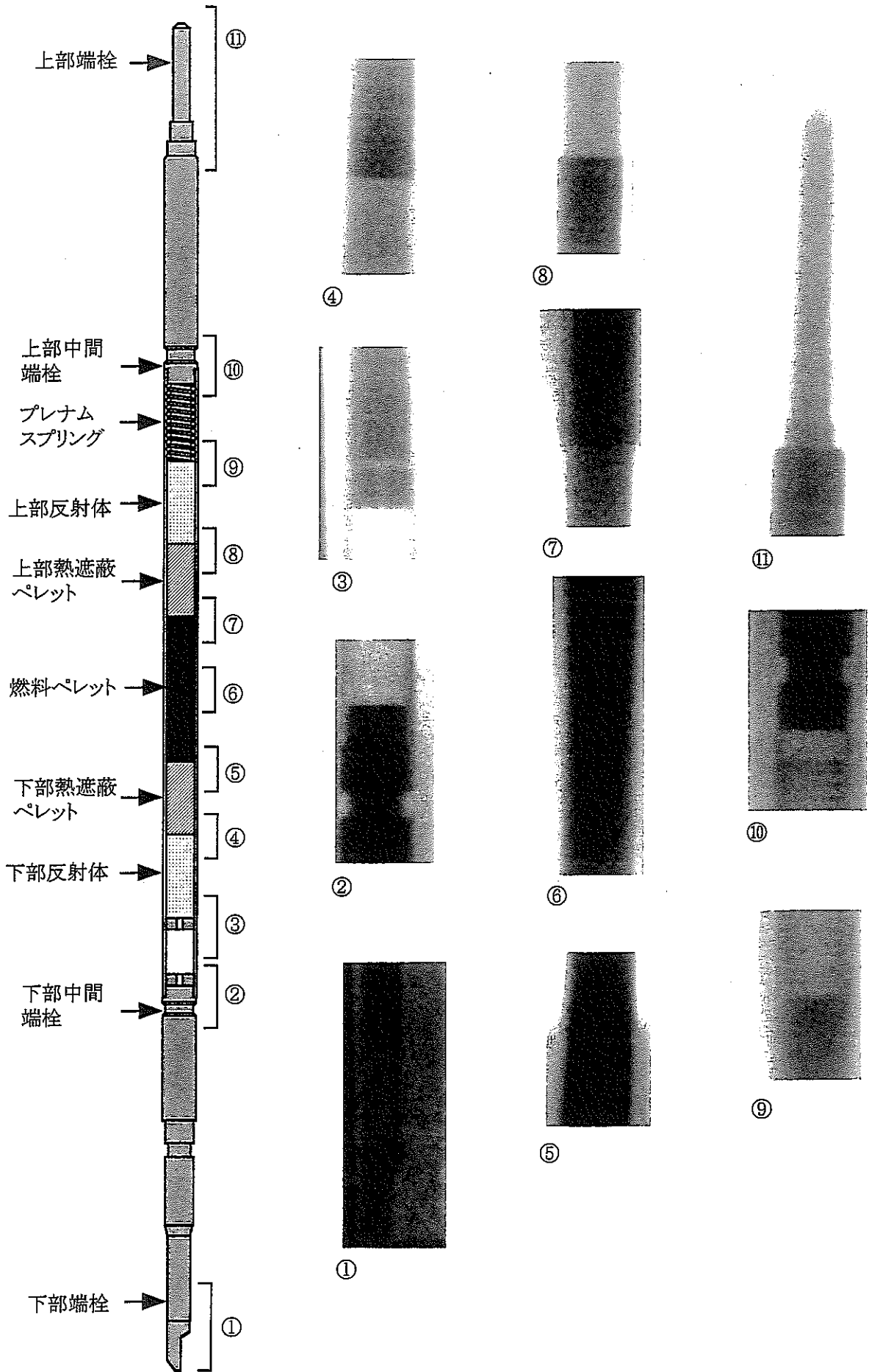


写真5.2.2 X線ラジオグラフィ観察写真(B9C01:90° 方向)

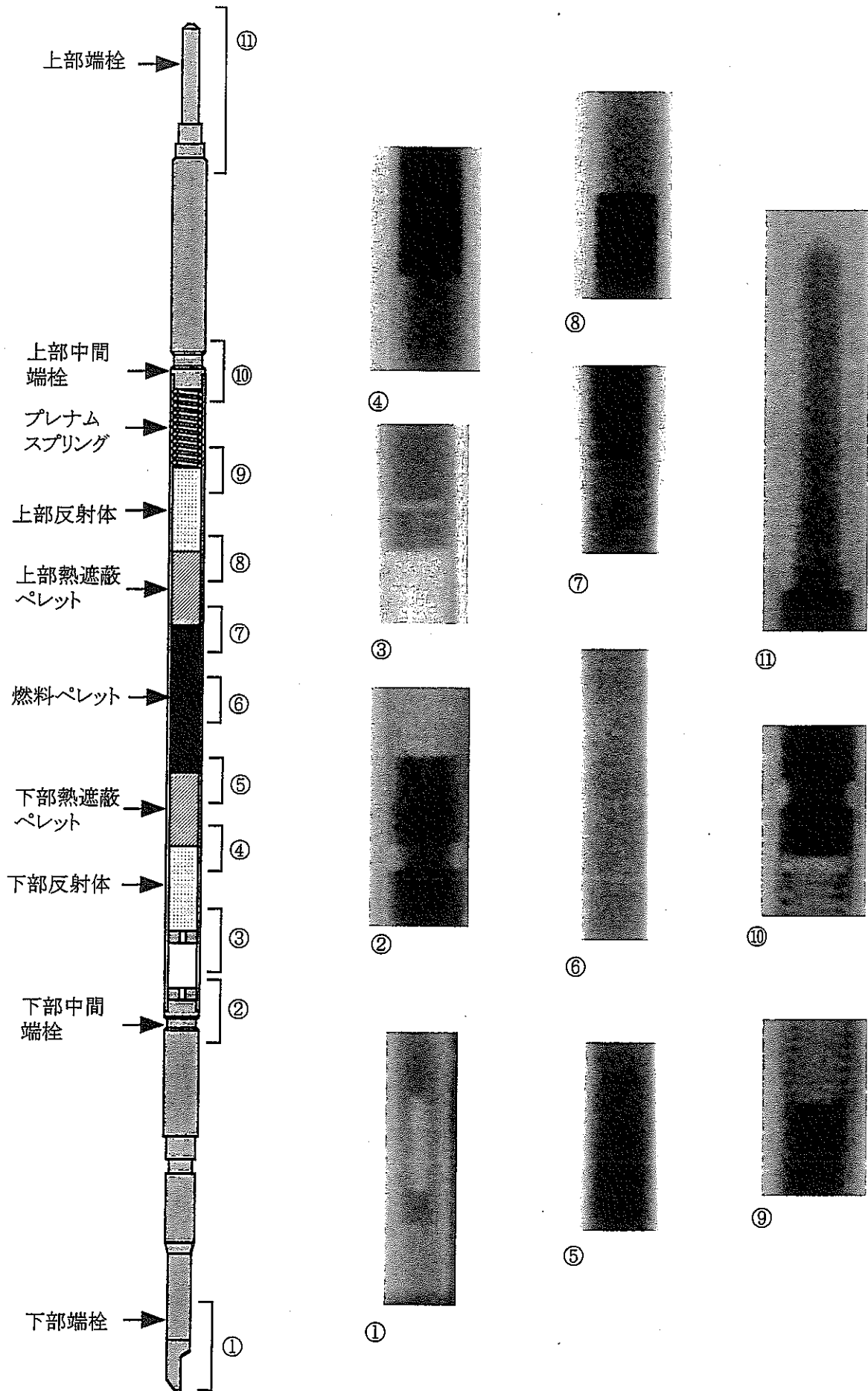


写真5.2.3 X線ラジオグラフィー観察写真(B9N01:0° 方向)

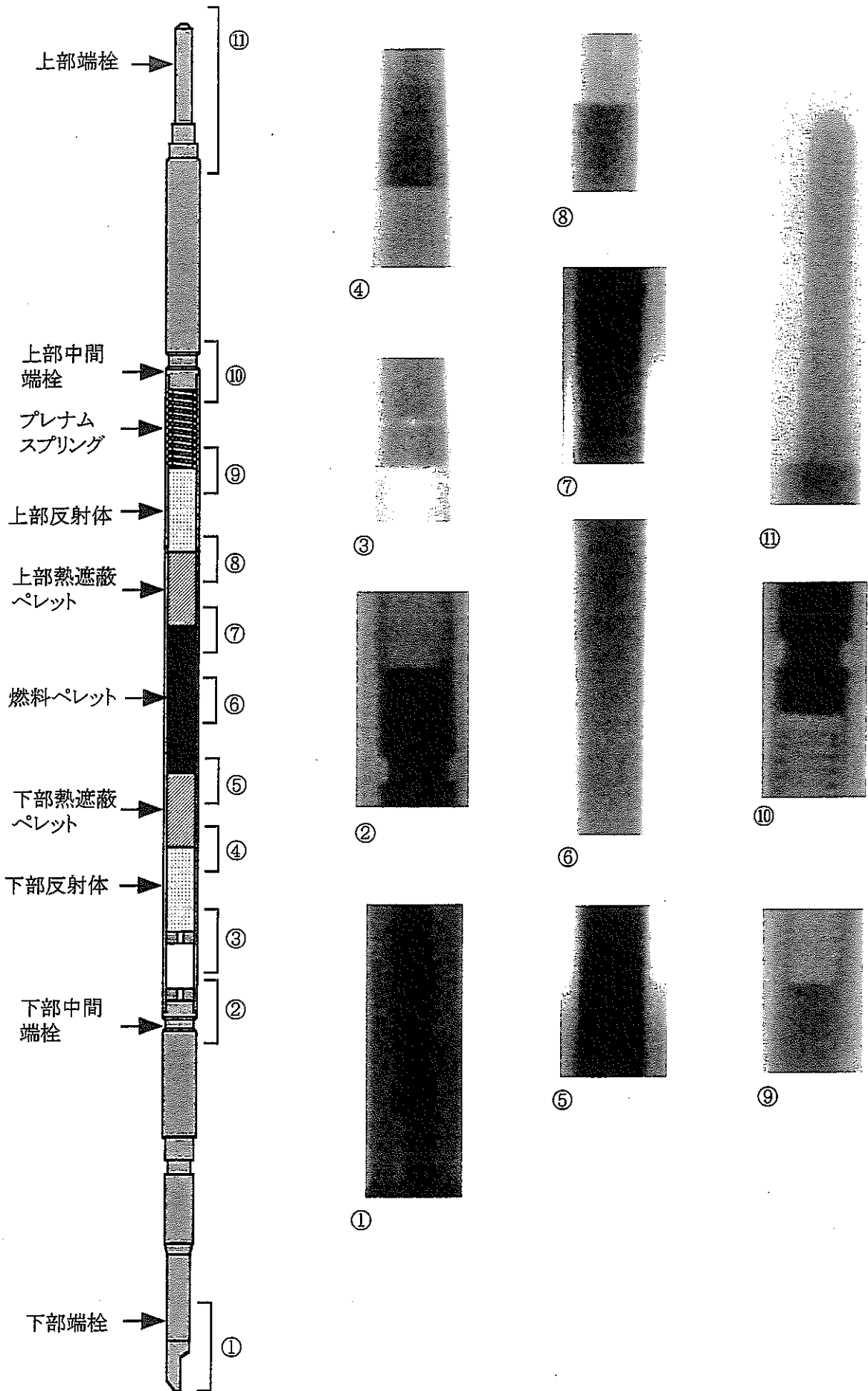


写真5.2.4 X線ラジオグラフィ観察写真(B9N01:270° 方向)

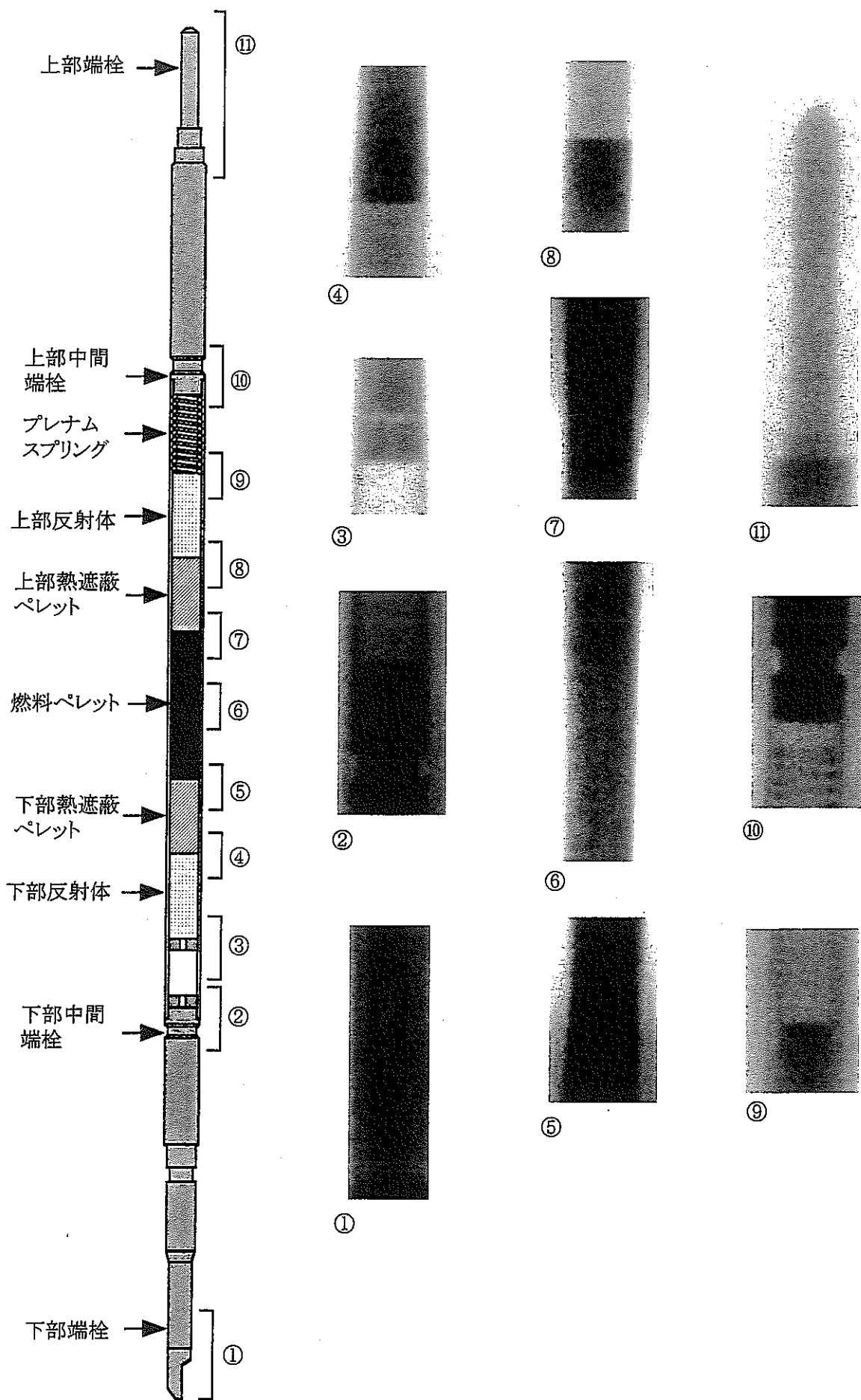


写真5.2.5 X線ラジオグラフィー観察写真(B9N02:0° 方向)

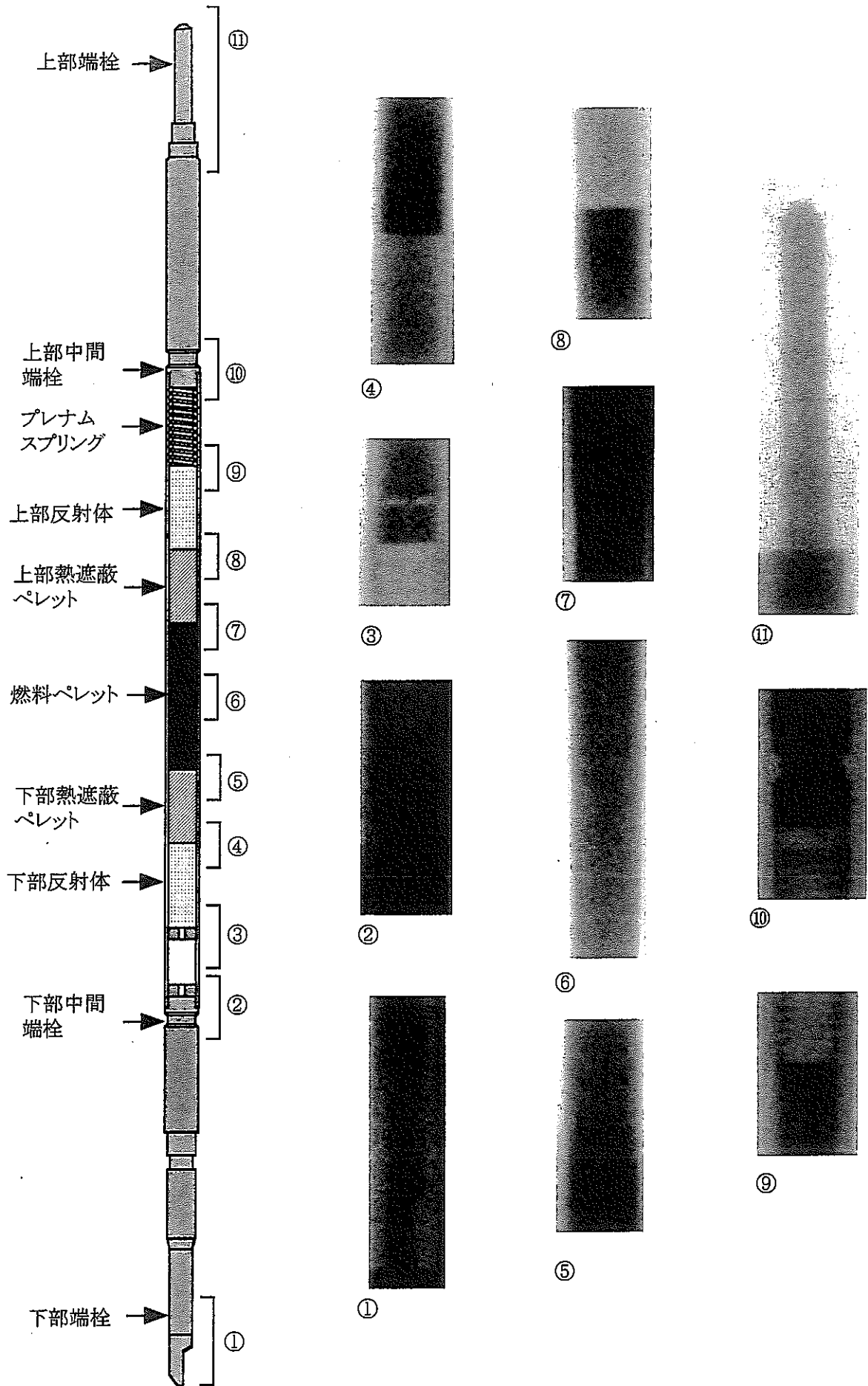


写真5.2.6 X線ラジオグラフィー観察写真(B9N02:90° 方向)