

# 照射後試験用渦電流探傷技術の開発 — PFC030 照射燃料ピン試験結果 — (技術報告)

2004年3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  
電話：029-282-1122（代表）  
ファックス：029-282-7980  
電子メール：jserv@jnc.go.jp

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)  
2004

## 照射後試験用渦電流探傷技術の開発

### —PFC030 照射燃料ピン試験結果—

(技術報告)

報告者 宮地 紀子\*、永峯 剛\*、勝山 幸三\*、  
菊地 晋\*、松元 慎一郎\*

### 要　　旨

照射燃料集合体試験室（FMS）では、照射された高速炉用燃料ピン被覆管の健全性について、非破壊かつ遠隔で確認するために、渦電流探傷装置を用いた技術開発を進めている。同装置は、照射燃料集合体試験施設（FMF）の既設側へ搬入し、高速原型炉「もんじゅ」仕様模擬腐食燃料ピン（外径 6.5 mm、被覆管肉厚 0.47 mm）を用いて、セル外で被覆管内面腐食探傷試験を実施した。さらに、セル内で高速実験炉「常陽」で照射した「もんじゅ」仕様燃料ピンに対して測定を行い、欠陥及び腐食探傷の可能性を検討した。

模擬腐食燃料ピンの内面腐食探傷試験では、渦電流によって腐食を探傷できる結果を得た。また、被覆管肉厚量と渦電流信号値には相関関係があり、肉厚が小さくなると信号値が大きくなる傾向を示した。

「常陽」で照射した燃料ピンの欠陥探傷では、ピン表面の傷が識別可能な渦電流信号値は認められなかった。また同燃料ピンの内面腐食探傷を実施した結果、腐食量が小さく、信号値から腐食を確認することはできなかった。しかしながら、これまでに得られたデータから判断して、照射後燃料ピンについても、明確な腐食があれば渦電流にて探傷できるものと考える。

---

\* 大洗工学センター 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

Development of Eddy Current Testing Technique  
for Irradiated Fuel Pins  
— ECT results of irradiated fuel pins of PFC030 —

Noriko Miyaji\* Tsuyoshi Nagamine\* Kozo Katsuyama\*  
Shin Kikuchi\* Shinichiro Matsumoto\*

**Abstract**

In the Fuel Monitoring Facility (FMF), eddy current testing (ECT) technique has been developed in order to check the soundness of irradiated fuel pins non-destructively and remotely. The ECT apparatus was installed in the Existing FMF and used for inspecting inner corrosion of cladding at the outside of a hot cell, using an imitation corrosion fuel pin of 6.5mm outer diameter and 0.47mm thickness, which size is of the prototype fast breeder reactor MONJU. After that, it was examined if defects and corosions were detected using the MONJU typed fuel pins irradiated in the experimental fast reactor JOYO.

As the results of experiment for an imitation corrosion pin, ECT detected the corosions. And, the signal of eddy current became larger as the thickness of cladding became smaller, because there was some correlation between the signal and thickness.

As for the irradiated fuel pins, any special signal of defects was not detected, and also, inner corosions were not recognized from the signals because their sizes were too small. However, judging from gained data, inner corosions of an irradiated fuel pin may be recognized if they are formed clearly.

---

\* Fuel Monitoring Section, Fuel and Materials Division,  
Irradiation Center, O-arai Engineering Center

## 目 次

1. はじめに	1
2. 非照射模擬腐食燃料ピンに関する試験	2
2.1 試験方法	2
2.1.1 試験内容	2
2.1.2 試験試料	2
2.1.3 試験条件	2
2.2 試験結果	3
2.2.1 連続測定結果	3
2.2.2 定点測定結果	3
2.2.3 金相試験結果	3
2.2.4 最適試験周波数の検討	4
2.2.5 リサーチュ結果の検討	4
2.2.6 湧電流信号値と被覆管肉厚量の相關関係	5
3. 照射後燃料ピンに関する試験	6
2.3 試験方法	6
2.3.1 試験内容	6
2.3.2 照射条件	6
2.3.3 試験試料	6
2.3.4 試験条件	7
2.4 欠陥探傷試験結果	8
2.4.1 リサーチュ結果	8
2.4.2 詳細外観検査結果と欠陥探傷試験結果の比較	9
2.5 被覆管内面腐食探傷試験結果	9
2.6 試験結果の検討	9
2.6.1 他 PIE 結果との比較	9
2.6.2 リサーチュの検討	10
2.7 金相試験結果及び検討	11
2.7.1 金相試験結果	11
2.7.2 湧電流探傷試験結果との比較	11
2.7.3 湧電流信号値と被覆管肉厚量の相關関係	11

4. おわりに	12
5. 謝辞	13
6. 参考文献	14

## 表リスト

表 3.1.1 PFC030 (C3M) の照射条件	15
表 3.1.2 漩電流探傷試験対象ピンの照射条件	15

## 図リスト

図 2.1.1 模擬腐食ピン仕様及び定点測定ポイント、金相試料採取ヶ所	16
図 2.1.2 金相試験フロー	17

図 2.2.1 模擬腐食ピンの連続測定試験結果（測定方向：0 度）	18
図 2.2.2 各試験周波数における模擬腐食ピンの定点測定結果（測定方向：0 度）	18
図 2.2.3 連続測定のリサーチュ結果	19
図 2.2.4 漩電流信号値と被覆管肉厚との相関（ $\phi 6.5 \text{ mm}$ ピン）	20
図 2.2.5 漩電流信号値と被覆管肉厚との相関（ $\phi 5.5 \text{ mm}$ ピン）	20
図 2.2.6 試験体とプローブの接触具合と渦電流信号値の関係	21

図 3.1.1 「常陽」 MK-II 炉心における PFC030 (C3M) の装荷位置	22
図 3.1.2 PFC030 ピン配置図	23
図 3.1.3 PFC030 特殊燃料集合体燃料ピン構造	24
図 3.1.4 G311 ピンの金相試験位置	25

図 3.2.1 欠陥検出試験結果（試験周波数：1024kHz）	26
図 3.2.2 再現性の確認（X-方向）（G351 ピン）	27
図 3.2.3 標準欠陥ピン（ $\phi 5.5 \text{ mm}$ ）のリサーチュ	28
図 3.2.4 G303 ピン欠陥探傷リサーチュ結果	29

図 3.3.1 G311 及び G340 ピンの被覆管内面腐食検出試験結果 (測定方向：270 度)	30
---	----

図 3.4.1 G311、G340 ピンの被覆管内面腐食検出試験結果と 外径寸法測定結果の比較（90–270 度方向）	31
図 3.4.2 G303 ピンの被覆管内面腐食検出試験結果（測定方向：90 度）と 曲がり結果（曲がり方向：87 度）の比較	32
図 3.4.3 G311, G340, G358 ピンの被覆管内面腐食検出試験結果 (測定方向：270 度) と $\gamma$ スキャンによる Cs 137 計測結果の比較	32
図 3.4.4 燃料上端部のリサーチュ	33
図 3.5.1 湧電流信号値と肉厚との相関（ $\phi 6.5 \text{ mm}$ 燃料ピン）	34

### 写真リスト

写真 2.2.1 模擬腐食ピンの金相観察結果	35
写真 3.2.1 G303 ピンの自己ワイヤ跡	36
写真 3.5.1 G311 ピンの金相観察結果（最大腐食量を示した 270 度方向）	37

## 1. はじめに

渦電流探傷装置は、照射した高速炉燃料ピン被覆管の健全性を非破壊かつ遠隔にて確認するために、照射燃料集合体試験施設（FMF : Fuel Monitoring Facility）に導入されたものである。本装置は、燃料ピン被覆管のような細径、薄肉の試験体を高速で探傷できる。また、探傷には接触媒体を必要とせず、照射後試験施設で要求される保守性にも優れている。

渦電流探傷検査の概略は以下のとおりである。交流を流したコイルに試験体を近づけて渦電流を誘導する。試験体に欠陥等が存在すると渦電流は変化し、その結果渦電流によって発生するコイル内部の磁束も変化する。渦電流探傷検査は、そのコイル内部の磁束の変化をコイルの起電力の変化として欠陥等を検出する。

これまでに FMF では、高速実験炉「常陽」(以下、「常陽」という)仕様の非照射模擬燃料ピン(外径 5.5 mm、被覆管肉厚 0.35 mm、PNC316 鋼製)を用いて、セル外にて渦電流探傷検査を実施してきた。その結果、被覆管の欠陥は渦電流によって探傷でき、信号位相角の相違により、内面、外面欠陥及び貫通孔が識別できる可能性を得た。また、被覆管内面腐食は、0.3 mm オーダーの肉厚量を持つ被覆管に対して、0.05 mm 以上の減肉変化が認められる場合、渦電流により探傷できる見通しである。これらの検査は、セル内で試験を実施した場合でも、セル外とほぼ同等の試験性能が確保できることを確認している<sup>1)</sup>。

本報では、その後に実施した次の 2 点について報告する。第 1 番目は、高速原型炉「もんじゅ」(以下、「もんじゅ」という)仕様の非照射模擬燃料ピン(外径 6.5 mm、被覆管肉厚 0.47 mm、PNC316 鋼製)のセル外検査を実施した結果についてである。模擬燃料ピンは、化学薬品を用いて被覆管内面を腐食させたピンである。第 2 番目は、「もんじゅ」仕様の照射した燃料ピンのセル内試験結果についてである。対象とした燃料ピンは「常陽」MK-II 炉心 C 型特殊燃料集合体 PFC030(C3M)において照射されたものである。

「もんじゅ」仕様の非照射模擬燃料ピンの検査は、同燃料ピンにおける渦電流探傷検査の有効性を確認するため、及び照射した同仕様燃料ピンの検査結果を評価するために実施した。一方、照射した燃料ピンの検査は、FMF において初めて実施するものであり、照射後燃料ピンに対しても有効であることを確認するために行った。

非照射模擬燃料ピンについては内面腐食探傷、照射後燃料ピンについては欠陥と内面腐食探傷の検査を行った。本報では、これらの結果を順次報告する。

## 2. 非照射模擬腐食燃料ピンに関する試験

### 2.1 試験方法

#### 2.1.1 試験内容

模擬燃料ピン（外径 6.5 mm、肉厚 0.47 mm）の被覆管内面を CsOH で全面腐食させ、渦電流探傷検査に供した。検査は連続測定と定点測定に分けて行った。前者は内面腐食探傷の可否及び内面腐食信号を表す位相角について、後者は最適試験周波数及び被覆管肉厚量と渦電流信号値の相関関係について、確認するために実施した。被覆管肉厚量は金相試験により求めた。

#### 2.1.2 試験試料

連続測定及び定点測定とともに、同一の模擬燃料ピンを用いて試験を実施した。試験に供したピンは、燃料等の内部構造物が装填されていない中空ピンである。その内面を、およそ 10 mm 間隔で、長さ 33 mm にわたって 3 箇所全面腐食させた。なお、その 3 箇所とは別に、同じ 33 mm 長さ 1 箇所を腐食させずにリファレンスとした。図 2.1.1 に腐食箇所を含めた模擬燃料ピンの概略図を示す。

#### 2.1.3 試験条件

##### (1) 被覆管内面腐食探傷試験

連続測定及び定点測定とともに内面腐食探傷は、 $\phi 6.5$  mm 用プローブコイルを用いた標準比較方式（相互比較方式）<sup>\*)</sup>により実施した。連続測定の試験条件は、これまでに実施した  $\phi 5.5$  mm 模擬燃料ピンの試験結果を参考に<sup>1)</sup>、位相 270 度、周波数 32kHz とした。定点測定のほうは、位相 270 度で、8kHz、16kHz、32kHz、64kHz の 4 つの周波数を用いた。連続測定、定点測定とともに、0, 90, 180, 270 度の 4 方向について実施した。定点測定は 1 方向につきリファレンス部及び各腐食部について 5 箇所ずつ、一方合計 20 箇所、4 方向合計 80 箇所について測定した。定点測定箇所は図 2.1.1 に示している。

<sup>\*)</sup>標準比較方式（相互比較方式）：

一対のコイルのうち一方を試験体に、他方を標準体に作用させ、それら 2 つのコイルの応答差を検出する方式

##### (2) 金相試験

模擬燃料ピンの内面腐食後の被覆管肉厚量を確認するために、金相試験を実施した。金相試験は、定点測定箇所と基本的に同一とし、1方向につき端栓付近を除いた各部4箇所ずつ、一方方向合計16箇所、4方向合計64箇所について実施した（図2.1.1参照）。

なお、試験は、図2.1.2に示す金相試験フローに従って実施した。

## 2.2 試験結果

### 2.2.1 連続測定結果

模擬燃料ピンの連続測定を実施した。その結果、各測定方向ともに同傾向を示すことがわかった。代表として0度方向の結果を図2.2.1に示す。信号値はリファレンス部がほぼ0、腐食部②～④はそれぞれプラスであった。また信号値は腐食部②と④がほぼ同等であり、腐食部③はそれより小さい値を示した。

なお、セル外には自動試料送り装置が無く手動にて測定を実施したため、引き抜き速度が一定せず、軸位置の特定はできなかった。

### 2.2.2 定点測定結果

図2.1.1に示した測定箇所において、定点測定を実施した。最適試験周波数を確認する目的で、32kHzに加えて8kHz、16kHz、64kHzの合計4つの周波数で試験を実施した。結果を図2.2.2に示す。同図には、代表として周波数ごとの0度方向の結果を示した。リファレンス部及びそれぞれの腐食部における測定箇所は、各周方向に対して5点、合計20点であり、図2.2.2にはこれらの測定結果を結んだ折れ線として示した。

同図より、リファレンス部は各周波数ともにほぼ0、腐食部は周波数が低いほど信号値は大きくなつた。また、64kHzを除く各周波数とも、腐食部②と④の信号値はほぼ同等、腐食部③は②、④より信号値が小さくなつたが、この信号値の差は周波数が高くなるほど小さくなつた。64kHzでは腐食部②、③、④で信号値にほぼ差は見られなかつた。

### 2.2.3 金相試験結果

模擬燃料ピンのリファレンス部及び腐食部について、定点測定箇所の金相試験を実施した。金相試験結果の代表を写真2.2.1に示す。リファレンス部及び減肉部の被覆管肉厚は金相試験結果から算出した。内面腐食量は、腐食させなかつたリファレンス部から腐食部の肉厚量を差し引いて算出した。その結果、各測定方向において内面腐食部の肉厚量に多少のバラツキはあるが、4方向平均腐食量は図2.1.1に示す腐食部②が105μm、腐食部③が61μm、

腐食部④が  $41 \mu\text{m}$  であり、腐食部②が最大、腐食部④が最小の腐食量を示した。一方、渦電流信号値は腐食部②と④がほぼ同等、腐食部③がそれより小さく、信号値の大きさと腐食量に相関関係は見られなかった。

#### 2.2.4 最適試験周波数の検討

渦電流探傷検査の特徴として、試験体に誘導される渦電流は試験体の内部に侵入するにつれて減衰する。この現象は同一試験体を用いて試験を実施した場合、試験周波数が大きいほど減衰は大きくなる。渦電流によって探傷できる試験体内の深さの目安として、浸透深さがある。これは、渦電流の振幅が試験体表面の約 37% に減衰する深さである。同一試験体の試験をする場合、浸透深さは試験周波数の  $1/2$  乗に反比例する。したがって、周波数  $32\text{kHz}$  の浸透深さは、周波数  $8\text{kHz}$  の浸透深さの  $1/2$  になる<sup>3), 4), 5)</sup>。

また渦電流探傷試験では、試験体の健全部に試験コイルがあるときにもある一定の電圧を発生しているが、この信号は不要なため、ブリッジによって打ち消している（以下、ブリッジバランスという）。ブリッジバランスが崩れると、不要な信号が最終的に得られる渦電流信号値に現れ、内面腐食の評価が困難になる。一般にこのブリッジバランスは低周波になるほど調整が難しくなる。これまでに、周波数の低い  $8\text{kHz}$ 、 $16\text{kHz}$  ではこの調整が難しく実使用には適さないことが報告されている<sup>1)</sup>。

模擬燃料ピンのように中空ピンの場合、浸透深さが大きすぎても内面腐食以外の信号は出力されない。しかし、実燃料ピンはピン内部に燃料等の内部構造物が装填されており、浸透深さが大きすぎる場合、内部構造物の情報までも信号値として出力する可能性がある。したがって、被覆管内面腐食を探傷する場合は、試験周波数を低すぎないように設定することが重要である。

以上の検討と定点測定結果から、 $\phi 6.5\text{ mm}$  燃料ピンの試験周波数には  $\phi 5.5\text{ mm}$  燃料ピンと同様の  $32\text{kHz}$  を適用することとした。

#### 2.2.5 リサージュ結果の検討

連続測定の腐食部のリサージュを図 2.2.3 に示す。リサージュは信号電圧と基準とする電圧（発信器出力電圧）の位相の差を示すもので、リサージュからは、得られた信号の位相角がわかる。位相は試験体内部の深さによって異なり、試験体内の傷等の深さによって渦電流の反作用の位相が異なることになる。

図中に示す角度は、各測定方向における腐食部②～④の平均位相角である。図から、模擬燃料ピンでは位相角を 270 度に設定した場合、内面腐食を表すリサージュは、各測定角度ともにほぼ一定の方向に現れる。その角度は、344

度～347 度の範囲にあり、平均 346 度であった。以上から位相をあらかじめ 270 度に設定した場合、 $\phi 5.5 \text{ mm}$  模擬燃料ピンの内面腐食信号方向は 0 度(360 度) であったのに対して、 $\phi 6.5 \text{ mm}$  模擬燃料ピンは 346 度であり、後者は前者と比較して位相角が約 14 度ずれていることが予想できた。したがって、 $\phi 6.5 \text{ mm}$  模擬燃料ピンでは、284 度に位相を設定すると、内面腐食を表すリサーチュ信号はほぼ 0 度方向に現れるという推定結果が得られた。

### 2.2.6 湧電流信号値と被覆管肉厚量の相関関係

図 2.2.4 に、 $\phi 6.5 \text{ mm}$  ピン被覆管肉厚量と湧電流信号値の相関を示す。同図から被覆管肉厚と湧電流信号値には相関があり、被覆管肉厚が減少（減肉）すると、信号値は大きくなる傾向を示した。この傾向は $\phi 5.5 \text{ mm}$  ピン被覆管と同様であった。しかし、 $\phi 5.5 \text{ mm}$  ピンと比較して $\phi 6.5 \text{ mm}$  ピンのデータのバラツキは大きく、前者が約 $\pm 30 \mu\text{m}$  であったのに対して後者は約 $\pm 40 \mu\text{m}$  となった。参考として図 2.2.5 に、 $\phi 5.5 \text{ mm}$  模擬燃料ピン被覆管の湧電流信号値と被覆管肉厚の相関を示す。ただし、両図中の中央線は最小二乗法にて算出したもの、上下線は全データを包絡するように中央線と平行に引いたものである。

ここで、信号値のバラツキが大きくなった原因について検討する。これまでに予備試験として、接触具合の信号値への影響を確認する目的で、試験体をプローブに①通常接触させた場合、②強く押し付けた場合について、定点測定を実施している。その結果を図 2.2.6 に示す。この試験に供した試験体は被覆管内面を腐食させた、外径 6.55 mm、肉厚 0.45 mm、15Ni-15Cr-Ti 鋼模擬燃料ピンである。腐食仕様は図 2.1.1 に示す SUS316 鋼模擬燃料ピンと同等である。なお、15Ni-15Cr-Ti 鋼は SUS316 と同じオーステナイト系ステンレス鋼であり、電磁気的特性は SUS316 とほぼ同等と考えられる。予備試験の結果から、通常状態と比較して試験体をプローブへ強く押し当てるとき、信号値は小さくなることがわかる。この結果から、プローブと試験体の接触具合は信号値に影響を与え、手動によるピンの引き抜きを実施した結果、プローブへのピンの接触具合が一定せず、信号値のバラツキが大きくなつた可能性がある。

なお、「2.2.3 金相試験結果」では信号値と被覆管肉厚量に相関関係は見られなかったが、これらのデータは図 2.2.4 からデータのバラツキ範囲内であることがわかる。

### 3. 照射後燃料ピンに関する試験

#### 3.1 試験方法

##### 3.1.1 試験内容

###### (1) 照射後燃料ピン被覆管の欠陥探傷試験

「常陽」MK-II炉心特殊燃料集合体 PFC030 (C3M) で照射した燃料ピン（外径 6.5 mm、被覆管肉厚 0.47 mm、PNC316 鋼製）の被覆管表面の傷（自己ワイヤ跡等）を探傷し、既に取得している詳細外観検査結果と比較した。

###### (2) 照射後燃料ピン被覆管の内面腐食探傷試験

欠陥探傷に供したものと同一の照射後燃料ピンの被覆管内面腐食を探傷し、金相試験結果と比較検討した。

##### 3.1.2 照射条件

###### (1) 集合体の照射条件

PFC030 の装荷位置を図 3.1.1 に示す。PFC030 は、「常陽」MK-II 炉心において第 9~20 サイクルまでは 3E1 位置にて(12" サイクルで一旦ラック内に取り出し、12'" サイクルで再び 3E1 位置に装荷)、第 21~23'" サイクルまで 2D2 位置にて照射した。照射条件を表 3.1.1 に示す。トータル照射日数は 836.7 日 (E.F.P.D)、集合体の最大中性子照射量及び最高燃焼度はそれぞれ、 $17.8 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$  ( $E \geq 0.1 \text{ MeV}$ ) 及び 119.2GWd/t である。

###### (2) 燃料ピンの照射条件

燃料ピンの配置を図 3.1.2 に示す。試験対象ピンについても同図に併記した。試験対象ピンの照射条件は表 3.1.2 のとおりである。同表に示す値は燃焼度、中性子照射量とともに、燃料上端部付近（燃料部下端からの軸位置：525 mm、ピン下端からの軸位置：909.3 mm）の値である。燃料上端部付近において中性子照射量、燃焼度が最大であったピンは G351 ピンであり、それぞれ  $9.7 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$  ( $E \geq 0.1 \text{ MeV}$ )、77.4GWd/t である。

##### 3.1.3 試験試料

###### (1) 照射後燃料ピン被覆管欠陥探傷試験

照射後燃料ピン 6 本を欠陥探傷試験に供した。試験に供した燃料ピンの内部には燃料等の内部構造物が装填されている。図 3.1.3 に PFC030 特殊燃料集合体燃料ピンの構造を示す。試験対象燃料ピン番号は以下のとおりで

ある。

- ・ 試験対象燃料ピン番号 : G303、G304、G311、G340、G351、G358

### (2) 照射後燃料ピン被覆管内面腐食探傷試験

欠陥探傷試験に供した照射後燃料ピン 6 本を、被覆管内面腐食検出試験に供した。試験対象燃料ピン番号は以下のとおりである。

- ・ 試験対象燃料ピン番号 : G303、G304、G311、G340、G351、G358

### (3) 金相試験

欠陥及び内面腐食探傷試験実施後に、G311 ピン 1 本を金相試験に供した。G311 ピンは、これまでの試験結果から、内面腐食が認められた燃料ピンの燃焼度及び被覆管内面温度とほぼ同条件であったことから、金相観察を行うこととした。金相試験対象燃料ピン番号は以下のとおりである。

- ・ 試験対象燃料ピン番号 : G311

## 3.1.4 試験条件

### (1) 欠陥探傷試験

試験は、 $\phi 6.5 \text{ mm}$ 用貫通コイルを用いた標準比較方式で実施した。試験条件は、これまでに行った $\phi 5.5 \text{ mm}$ 標準欠陥ピンを用いたホット校正試験時の最適値をもとに、位相は欠陥信号が X 信号のプラス側に検出されるよう調整し、周波数は 1024kHz とした。なお、測定時の試料の送りは自動で行い、送り速度は 20 mm/s とした。また、取得したデータの再現性を確認するために、G351 ピンは同条件で 5 回測定を実施した。

### (2) 被覆管内面腐食探傷試験

試験は、 $\phi 6.5 \text{ mm}$ 用プローブコイルを用いた標準比較方式で実施した。試験条件は、模擬燃料ピンの測定結果をもとに決定し、位相は 284 度、試験周波数は 32kHz とした。試験時の 0 基準点はリファレンス試料としたが、試験結果は、照射の影響が小さいと推測されるプレナム部が 0 となるように補正した。測定方向は 0、90、180、270 度の 4 方向とした。また、測定時の試料の送りは自動で行い、送り速度は 20 mm/s とした。

### (3) 金相試験

G311 ピンについて、金相試験を実施した。観察位置は照射温度、燃焼度とともに高く、被覆管内面腐食の発生する可能性が高いと予想される燃料上端部（ピン下端からの距離 : 932.8 mm）とした。観察位置を図 3.1.4 に示

す。

金相試験は、図 2.1.2 に示す模擬燃料ピンと同様のフローにて実施した。また、腐食量算出時のリファレンスには、観察部の健全な部分を採用した。

### 3.2 欠陥探傷試験結果

照射後燃料ピンの欠陥探傷試験を実施した。結果の代表例として G303 及び G311 ピンの試験結果を図 3.2.1 に示す。

試験の結果、各燃料ピンとともに信号値の傾向は同様であり、すべての燃料ピンに、インシュレーターペレットと反射体の境界部、スプリング部に対して顕著な信号が表れた。また、特に燃料部においてノイズと推察される信号が多く出力した。しかしながら、自己ワイヤ跡等を信号値から判別することはできなかった。

また、G351 ピンについて、データの再現性を確認するために 5 回の繰り返し測定を実施した。代表として X 信号の結果を図 3.2.2 に示す。X、Y 信号とともに、5 回の測定とも、ほぼ同じ波形が得られ、渦電流探傷検査データには再現性があることが確認できた。

#### 3.2.1 リサージュ結果

これまでに、渦電流探傷検査で得られる  $\phi 5.5 \text{ mm}$  標準欠陥ピンの内面欠陥、外側欠陥、貫通孔の位相角はそれぞれ 127 度、157 度、150 度であることがわかっている。しかし、 $\phi 6.5 \text{ mm}$  標準欠陥ピンを用いた試験は実施されていない。したがって、ここでは  $\phi 6.5 \text{ mm}$  照射後燃料ピンの欠陥探傷リサージュから得られた位相角を、 $\phi 5.5 \text{ mm}$  標準欠陥ピンのそれと比較して評価した。 $\phi 5.5 \text{ mm}$  標準欠陥ピンのリサージュは図 3.2.3 に示すとおりである。

試験対象燃料ピン 6 本のうち、代表として G303 ピンのリサージュを図 3.2.4 に示す。欠陥の識別を容易にするために、燃料ピンをピン上端から上部反射体と燃料部の境界部まで（領域 I）、燃料部（領域 II）、下部反射体と燃料部の境界部からピン下端まで（領域 III）に分割した。その結果、領域 I は 30 度、領域 III は 20 度の位相角が得られたが、領域 II は位相角の特定は困難であった。これらの位相角は、標準欠陥ピンとは異なっており、欠陥探傷で得られた信号は傷によるものか、他の要因によるものかを識別することはできなかった。

G303 以外の燃料ピンのリサージュについても位相角は  $\phi 5.5 \text{ mm}$  標準欠陥ピンと異なっていた。

しかしながら、 $\phi 6.5 \text{ mm}$  と  $\phi 5.5 \text{ mm}$  の燃料ピンでは欠陥を表す位相角が異

なる可能性がある。したがって、今後 $\phi 6.5$  mmの標準欠陥ピンを作成し、その位相角を確認したうえで、今回試験した照射材の欠陥探傷試験結果を再評価する必要がある。

### 3.2.2 詳細外観検査結果と欠陥探傷試験結果の比較

詳細概観検査の結果、G303 ピンのピン下端から 443 mmの被覆管表面に長さ 8.6 mm、幅 0.7 mm程度の自己ワイヤ跡が観察された。写真 3.2.1 にその観察結果を示す。自己ワイヤ跡は図 3.2.4 中に示すとおり領域Ⅱにあり、欠陥信号は領域Ⅱに出力されるはずであるが、信号値からは自己ワイヤ跡の検出及び識別はできなかった。

## 3.3 被覆管内面腐食探傷試験結果

照射後燃料ピンの被覆管内面腐食探傷試験を実施した。代表として、G311 及び G340 ピンの 270 度方向の測定結果を図 3.3.1 に示す。同図下方の燃料ピンポンチ絵は、すべての燃料ピンに出力した反射体間境界部に対応する軸位置の信号を、軸方向位置の基準点として示した。

試験結果から、反射体境界部、スプリング及びタグガスカプセルに相当する軸位置に、燃料ピンや測定方向にかかわらず、共通する信号が出力した。しかし、内面腐食に相当すると推察される信号を検出することはできなかつた。また、燃料部においては、燃料ピンごとかつ測定方向ごとに信号値は異なっていた。

## 3.4 試験結果の検討

### 3.4.1 他 PIE 結果との比較

一般的な渦電流探傷試験の特徴として、試験コイルが試験体から離れば離れるほどリフトオフ効果<sup>4)</sup>により信号値は大きくなる<sup>3)4)5)</sup>。また、予備試験の結果から、基準状態と比較して試験体に強くコイルのプローブを押し当てるとき、信号値は小さくなることがわかっている。これらの観点から、渦電流プロファイルと①寸法測定結果、②曲がり測定結果との比較を行った。また、内面腐食と関係が深いと考えられる Cs137 についても、 $\gamma$  スキャンの Cs137 分布結果と比較した。

\*リフトオフ効果：コイルと試験体表面の間の距離が変化するとコイルのインピーダンスが変化し、雑音が発生すること。

#### (1) 外径寸法測定結果との比較

外径寸法が大きくなった場合、基準状態と比較してコイルのプローブは試験体である被覆管に強く押し当てられた状態になる。したがって、外径寸法が大きくなると渦電流信号値は小さくなることが予想される。これを前提とし、内面腐食発生の可能性のある燃料部に着目して寸法測定結果と渦電流探傷検査結果を比較した。代表として G311 及び G340 ピンの 90 度と 270 度方向の結果の比較を図 3.4.1 に示す。

これらの図から、G311、G340 ピンともに燃料部中心付近に被覆管の寸法変化に対応した渦電流信号値の変化が見られるが、明確な相関関係は確認できなかった。その他のピンについても、外径寸法測定値と渦電流信号値に明確な相関関係は見られなかった。

### (2) 曲がり結果との比較

10 mm を超える曲がりが確認されたピンは G303 及び G351 ピンであり、それぞれの曲がり方向は 87 度、334 度方向であった。G303 については 90 度方向の、G351 ピンについては 0 度と 270 度方向の渦電流試験結果と比較した。代表として G303 ピンの比較結果を図 3.4.2 に示す。

ここで被覆管に曲がりが生じた場合も外径寸法が大きくなつた場合と同様に、基準状態と比較して、プローブは被覆管に強く押し当てられた状態になり、信号値は小さくなると考えられる。しかしながら、両ピンとともに曲がりに対応した明確な渦電流信号値の変化は確認できなかった。

### (3) Cs137 分布との比較

フランスでは、内面腐食の発生は Cs137 の蓄積と非常に関係が深いことから、内面腐食発生箇所の特定に Cs137 分布を参照している。したがって、ここでも渦電流試験結果とガンマスキャンによる Cs137 分布の比較を行い、Cs137 の蓄積箇所に有意な渦電流信号値が見られるか否かを確認した。代表として、G311、G340 及び G358 ピンの 270 度方向の比較結果を図 3.4.3 に示す。

G358 を除くすべてのピンの燃料上端部に顕著な Cs137 のピークが見られた。しかし、Cs137 ピーク位置及びその近傍においても内面腐食を示す顕著な渦電流信号値は表れなかった。

## 3.4.2 リサージュの検討

被覆管内面腐食の発生を確認するために、リサージュを検討した。リサージュは、最も腐食発生の可能性が高いと予測される燃料上端部について行った。軸位置の特定には、照射後ピンの X 線ラジオグラフィーの結果を

用いた。

燃料上端部のリサーチュを図 3.4.4 に示す。腐食が発生している場合、リサーチュは 0 度方向付近に出力する。同図から、大きく 0 度方向に信号値が出力した燃料ピンは無く、リサーチュからは被覆管内面が腐食した燃料ピンを確認することはできなかった。

### 3.5 金相試験結果及び検討

#### 3.5.1 金相試験結果

G311 ピンについて金相観察を実施した。観察位置は最も腐食の可能性が高いと考えられる燃料上端部(軸位置: 932.8 mm)とした。結果を写真 3.5.1 に示す。観察の結果、渦電流探傷試験で実施した 0, 90, 180, 270 度方向すべてにおいて腐食が認められた。腐食量が最大であったのは 270 度方向であり、その量は約  $14 \mu\text{m}$  であった。腐食量の算出には、腐食部近傍の健全部 4箇所を測定し、その肉厚量の平均から腐食部の肉厚を差し引いて算出した。

#### 3.5.2 渦電流探傷試験結果との比較

金相観察を実施した G311 ピンに関して、図 3.3.1 に示す試験結果及び図 3.4.4 に示すリサーチュ結果からは、減肉を示す信号は確認できなかった。その理由の一つとして、 $14 \mu\text{m}$  程度では減肉量が小さいため、渦電流信号値に反映されなかつた可能性が考えられる。

#### 3.5.3 渦電流信号値と被覆管肉厚量の相関関係

模擬燃料ピンの渦電流探傷信号値と被覆管肉厚の相関及び G311 ピンの信号値と肉厚の相関を比較した。結果を図 3.5.1 に示す。同図より、G311 ピンの信号値と肉厚の相関は模擬燃料ピンのデータのばらつき範囲内に包括されていた。この結果から、腐食量がデータのばらつき範囲である約  $40 \mu\text{m}$  を超える場合は、照射後燃料ピンにおいても渦電流信号値から被覆管肉厚量を推定できる可能性がある。

#### 4. おわりに

φ 6.5 mm 模擬燃料ピン及び「常陽」Mk-II 炉心 C 型特殊燃料集合体 PFC030 で照射した φ 6.5 mm 燃料ピンの渦電流探傷試験を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- ① 模擬燃料ピン被覆管内面腐食探傷試験の周波数に、φ 5.5 mm 燃料ピンと同様の 32 kHz を適用できることを確認した。
- ② 模擬燃料ピン被覆管内面腐食探傷試験の位相角は、284 度に設定すると減肉を表すリサージュ信号が 0 度方向の信号として検出できることがわかった。
- ③ 模擬燃料ピンの渦電流信号値と被覆管肉厚量には、相関があり、渦電流信号値が大きくなると被覆管肉厚量は小さくなる傾向を示した。この傾向は φ 5.5 mm 模擬燃料ピンの傾向と一致していた。
- ④ 照射した燃料ピンの欠陥探傷試験から、長さ 8.6 mm、幅 0.7 mm 程度の傷では渦電流信号値から識別することは不可能であった。
- ⑤ 照射した燃料ピンの被覆管内面腐食量は 14 μm 程度と小さく、渦電流信号値から腐食を確認することができなかった。
- ⑥ 照射後燃料ピンの渦電流信号値と被覆管肉厚量の関係は、模擬燃料ピンのデータのバラツキ範囲内であり、照射材でも明確な内面腐食も渦電流にて探傷できるものと考える。

## 5. 謝辞

本試験を実施するにあたり、試験データの取得及び整理にご協力いただいた  
原子力技術(株) 大谷 昭氏、またデータの評価にご協力して頂いた方々を始め、  
ご指導頂いた方々に厚く感謝の意を表します。

## 6. 参考文献

- (1) 菊地晋、北澤健夫、永峯剛、松元慎一郎：「照射後試験における渦電流探傷技術の開発 探傷技術の開発（その2 FCCI 測定技術）」  
JNC TN9410 2001-003(2000)
- (2) FBR 開発本部 燃材グループ：「FCCI 関連研究のまとめ（57年度まで）」 PNC TN241 83-16(1983)
- (3) 社団法人 日本非破壊検査協会 非破壊検査技術シリーズ 「渦電流探傷試験Ⅰ」 1995年版
- (4) 社団法人 日本非破壊検査協会 非破壊検査技術シリーズ 「渦電流探傷試験Ⅱ」 1995年版
- (5) 社団法人 日本非破壊検査協会 非破壊検査技術シリーズ 「渦電流探傷試験Ⅲ」 1990年版

表3.1.1 PFC030(C3M)の照射条件

集合体名称	PIE No.	照射条件			
		照射日数 (EFPD)	サイクル	装荷位置	最高燃焼度 (GWd/t)
PFC030	G3	836.7	9-12'	3E1	
			12"-12"	ラック	
			13-20	3E1	119.2
			21-23"	2D2	17.80

※: E ≥ 0.1 MeV

表3.1.2 涡電流探傷試験対象ピンの照射条件

ピン番号	G303			G304			G311			G340			G351			G358		
	燃料下端 から の 距離 (mm)	525	275	25	525	275	25	525	275	25	525	275	25	525	275	25	525	275
燃焼度 (GWd/t)	72.8	119.5	88.5	71.9	117.6	87.6	71.5	116.1	86.5	74.5	121.6	89.4	77.4	126.0	93.0	77.0	124.8	92.0
中性子 照射量※ ( $10^{26} n/m^2$ )	9.1	16.9	10.4	9.0	16.5	10.3	8.9	16.3	10.1	9.3	17.2	10.5	9.7	17.9	11.0	9.7	17.7	10.8

燃料下端から の距離	ピン下端から の距離
525mm	909.3mm
275mm	659.3mm
25mm	409.3mm

※: E ≥ 0.1 MeV

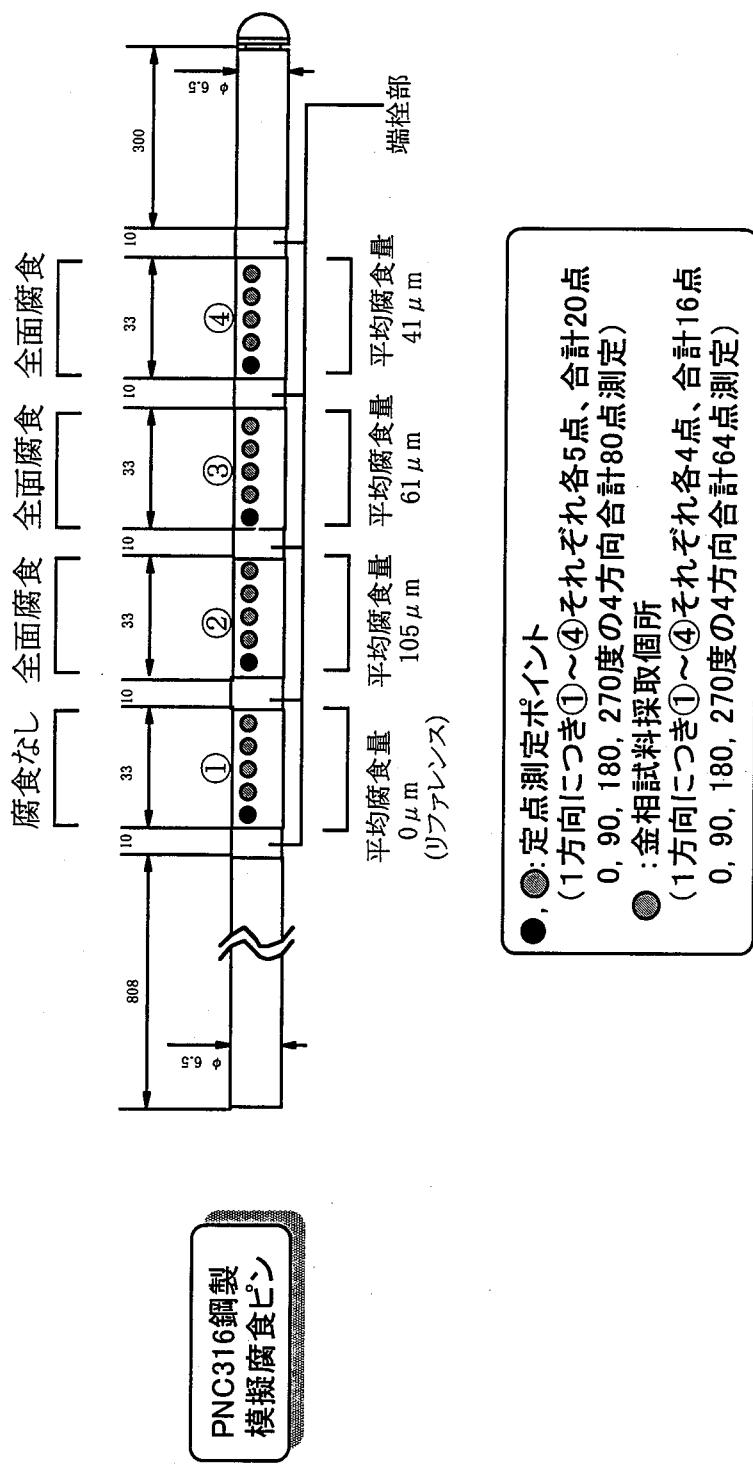
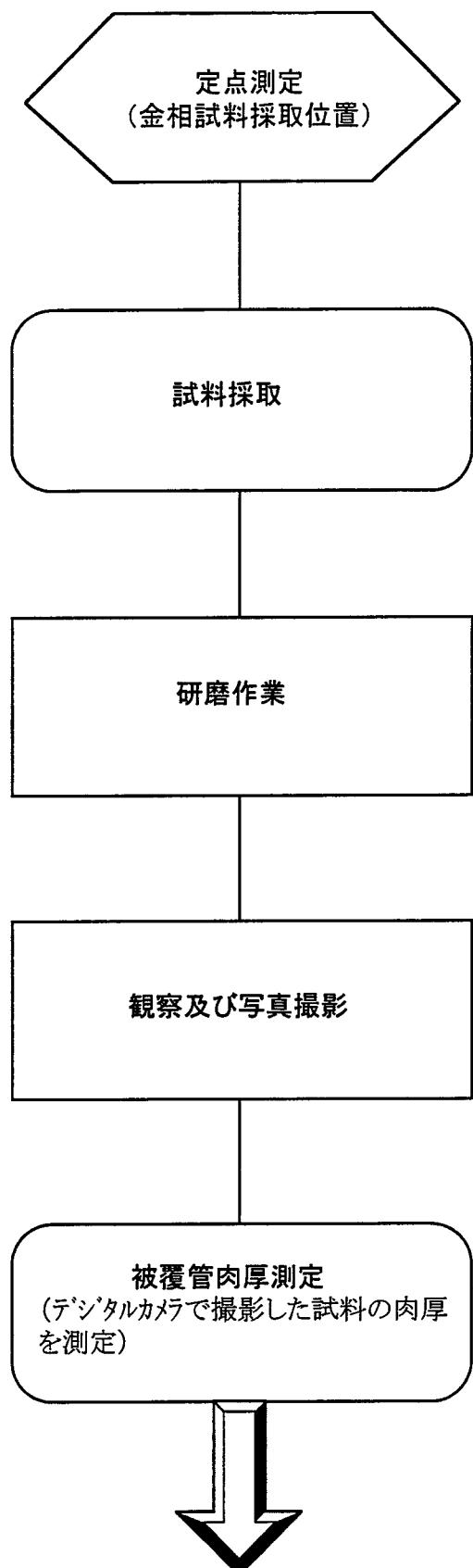


図2.1.1 模擬腐食ピン仕様及び定点測定ポイント、金相試料採取ヶ所



金相試験結果により、以下の事項を確認  
①模擬腐食ピンの内部状況把握(腐食状態)  
②腐食量と渦電流信号値の相関関係の把握

図2.1.2 金相試験フロー

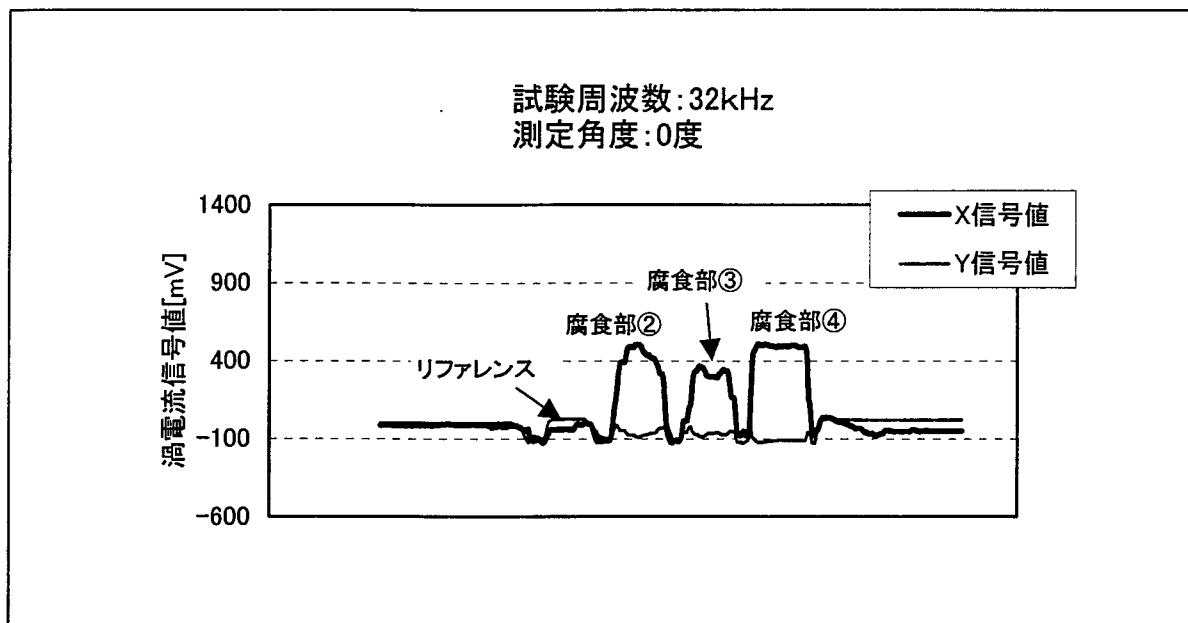


図2.2.1 模擬腐食ピンの連続測定試験結果(測定方向:0度)

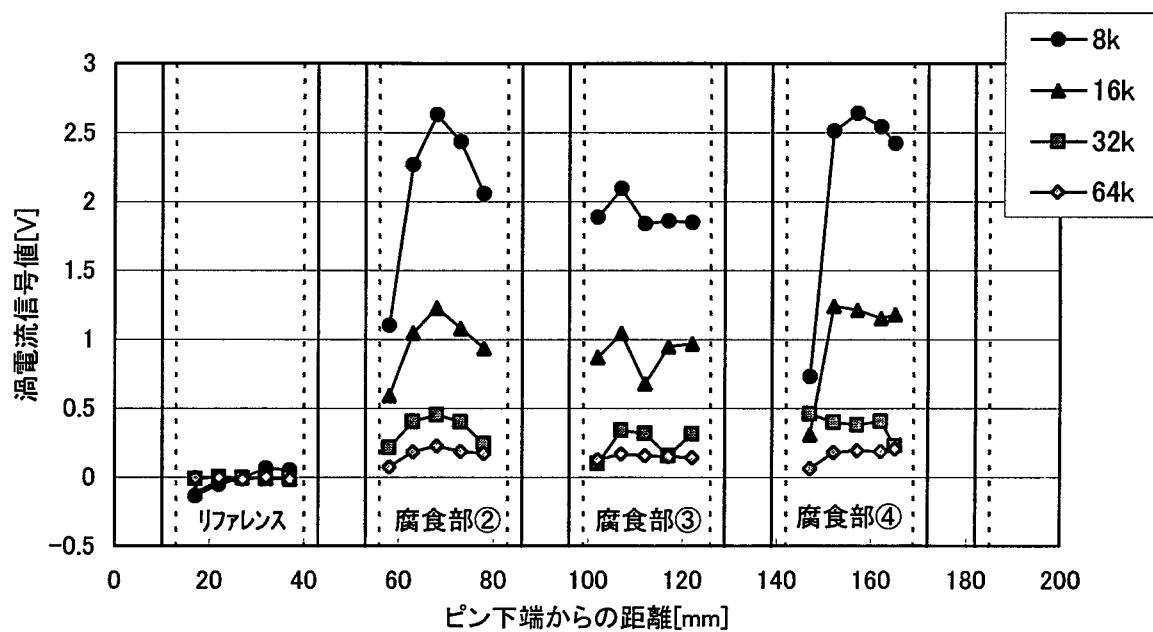
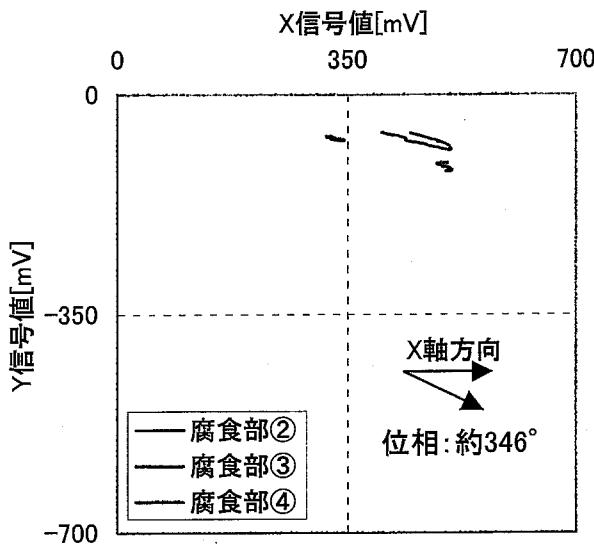
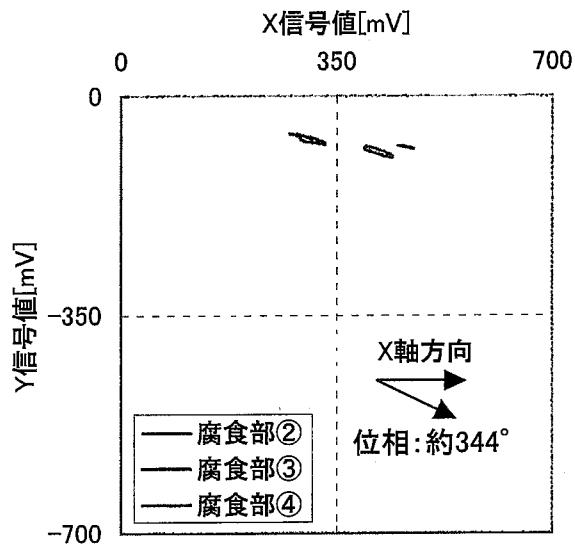


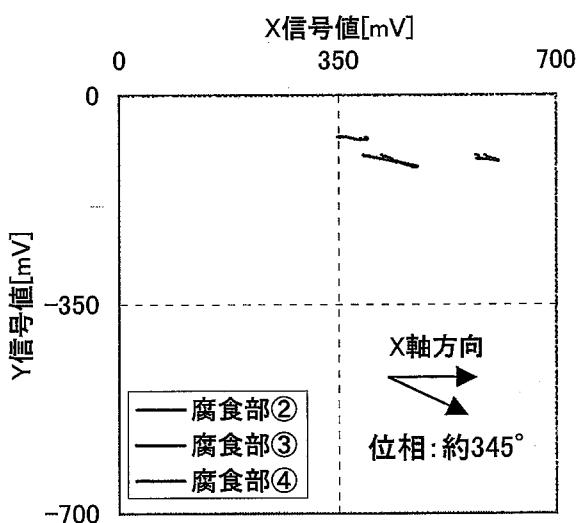
図2.2.2 各試験周波数における模擬腐食ピンの定点測定結果(測定方向:0度)



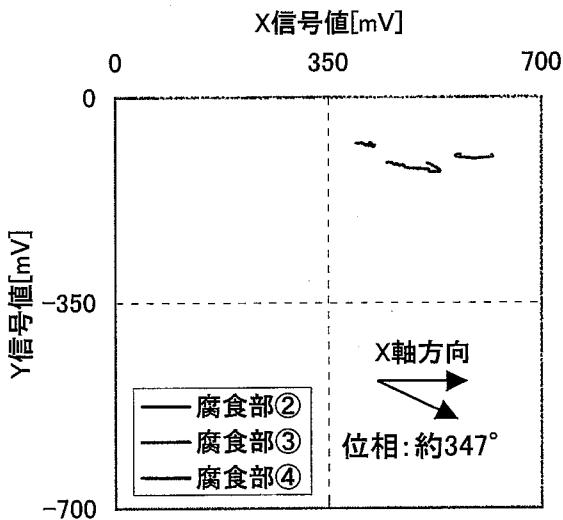
(a) 0度方向の腐食部リサージュ



(b) 90度方向の腐食部リサージュ



(c) 180度方向の腐食部リサージュ



(d) 270度方向の腐食部リサージュ

図2.2.3 連続測定のリサージュ結果

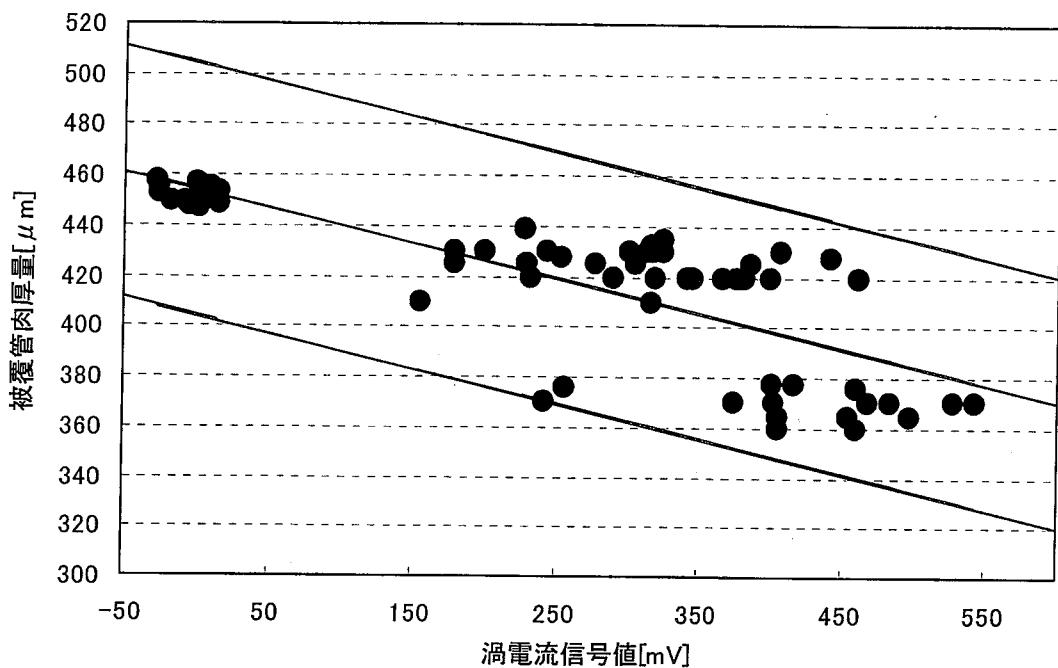


図2.2.4 漩電流信号値と被覆管肉厚との相関  
( $\phi 6.5\text{mm}$ ピン; 被覆管肉厚に腐食反応層を含まない)

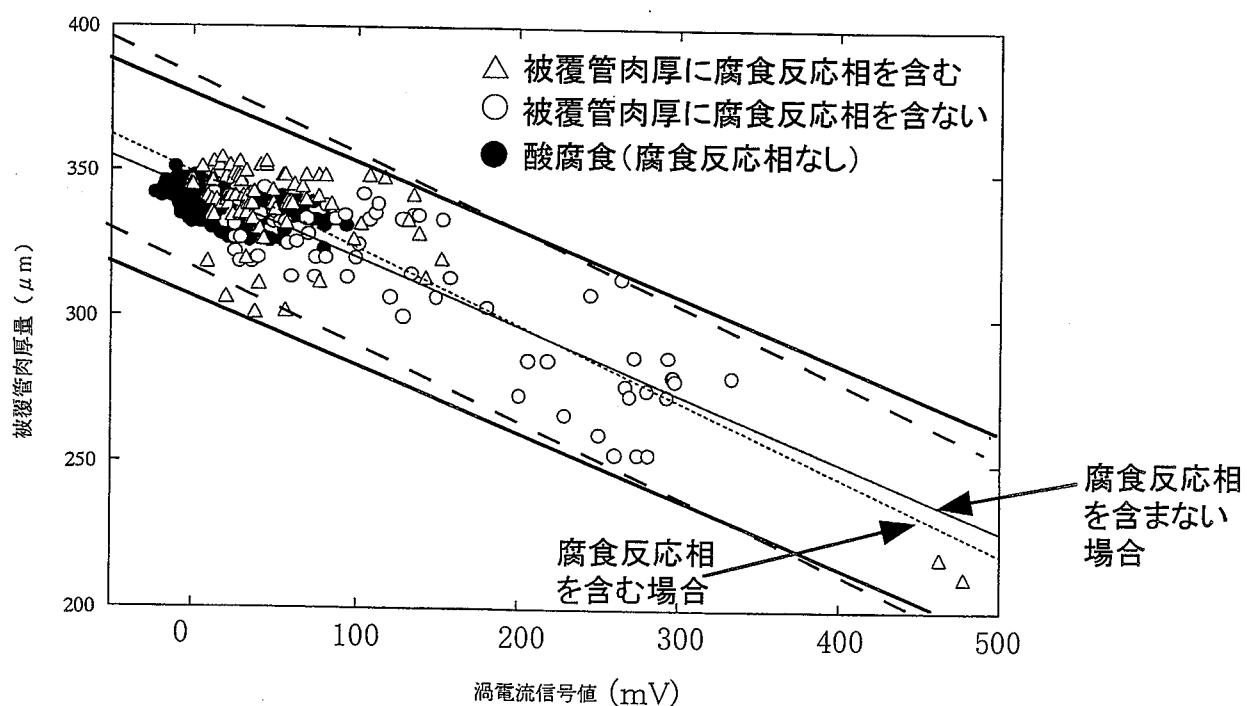


図2.2.5 漩電流信号値と被覆管肉厚との相関 ( $\phi 5.5\text{mm}$ ピン)

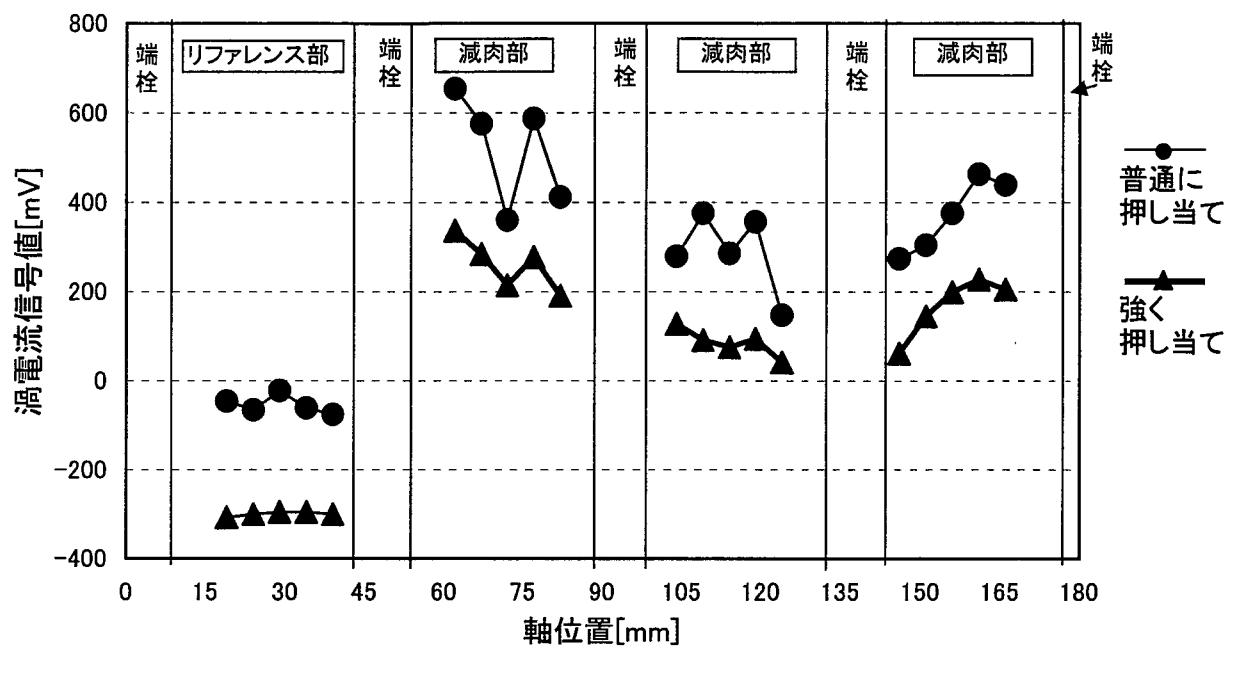
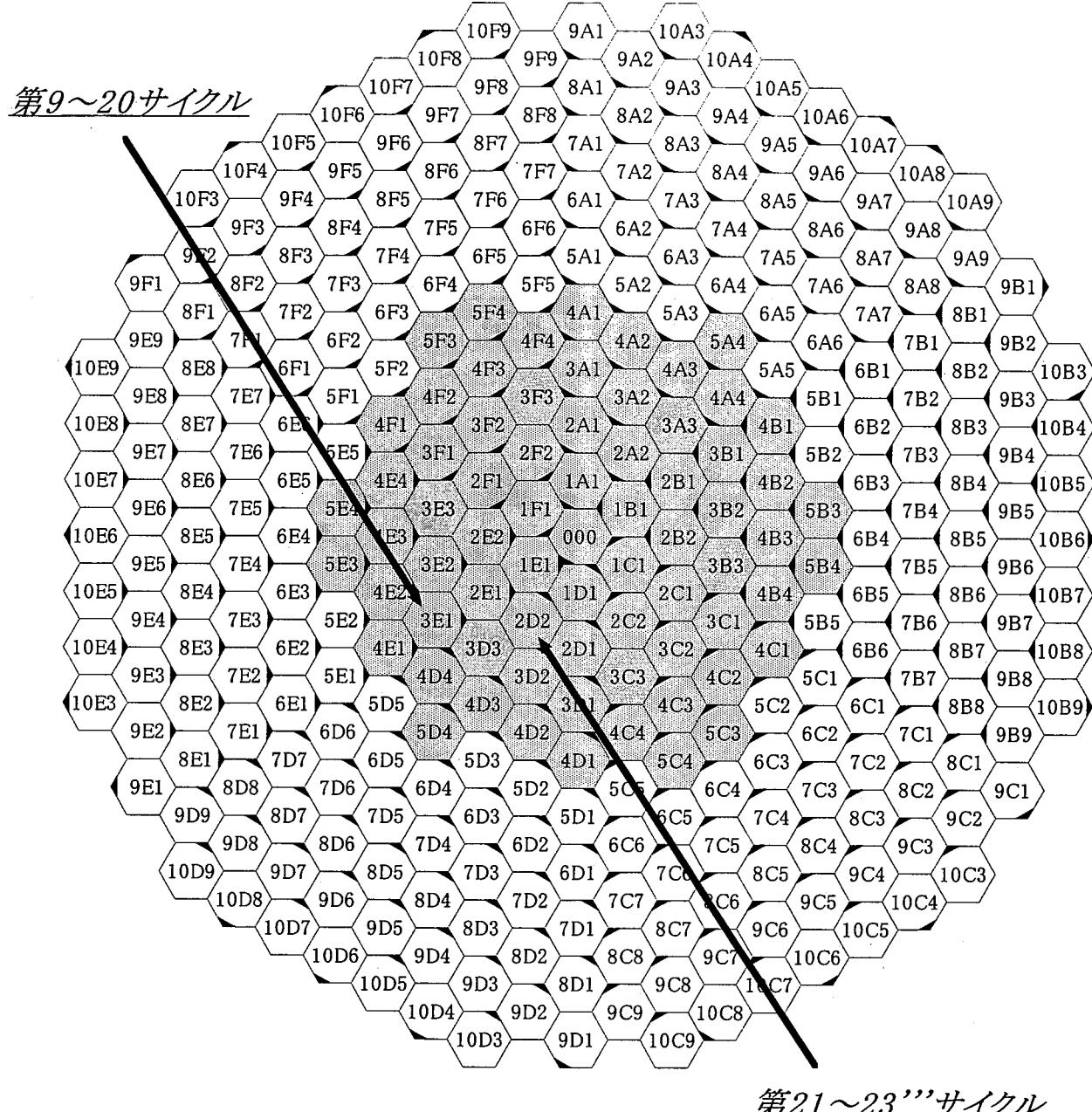


図 2.2.6 試験体とプローブの接触具合と渦電流信号値の関係



炉心燃料集合体



制御棒

図3.1.1 「常陽」MK-II 炉心におけるPFC030(C3M)の装荷位置

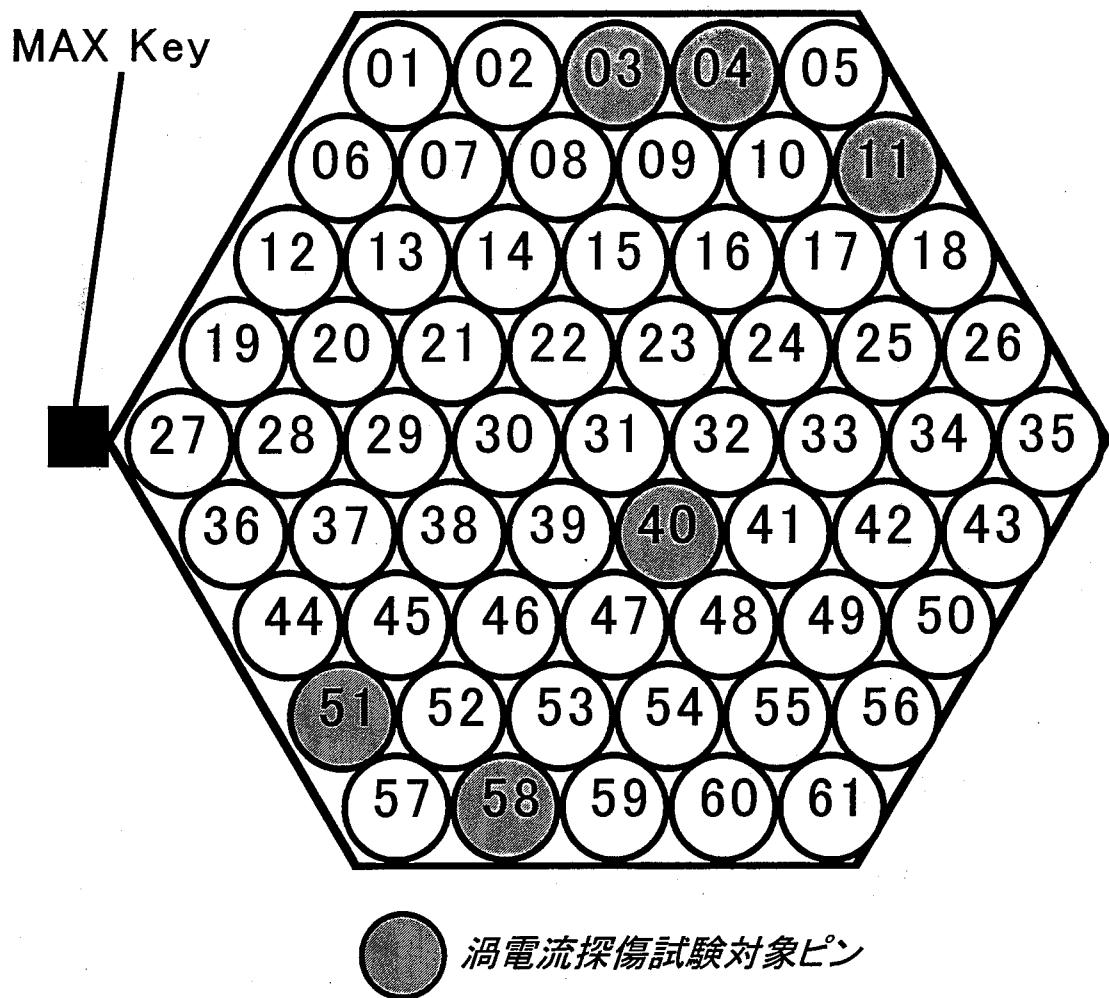
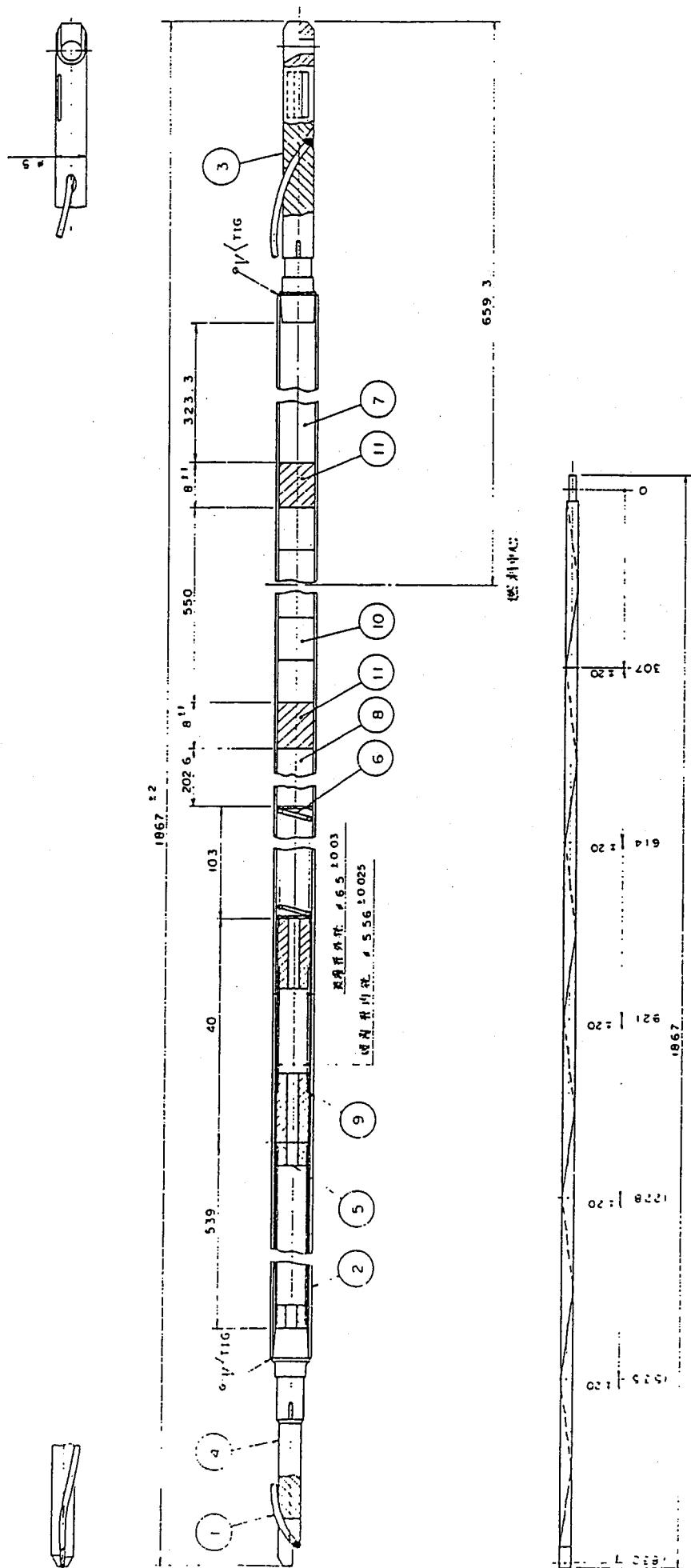


図3.1.2 PFC030ピン配置図



品番 名 称	C 型 特 殉 燃 料 集 合 体 II 型 特 殉 燃 料 集 合 体	要 素	個数
11	インシュレーターベルト	劣化UO <sub>2</sub>	2
10	荷重用ハーフト	PuO <sub>2</sub> UO <sub>2</sub>	2
9	タガカラスカフェルミー	SUS316	1
8	要素反射体(上)	SUS316	3
7	要素反射体(下)	SUS316	2
6	フレームスプリング	SUS304	1
5	押え板付フジルムスリーブ	WPB	1
4	上部端栓	SUS316	1
3.	下部端栓	SUS316	1
2	被覆管	SUS316相当	1
1	ツッピングワイヤ	SUS316相当	1

図3.1.3 PFC030特殊燃料集合体燃料ビン構造 (1/5)

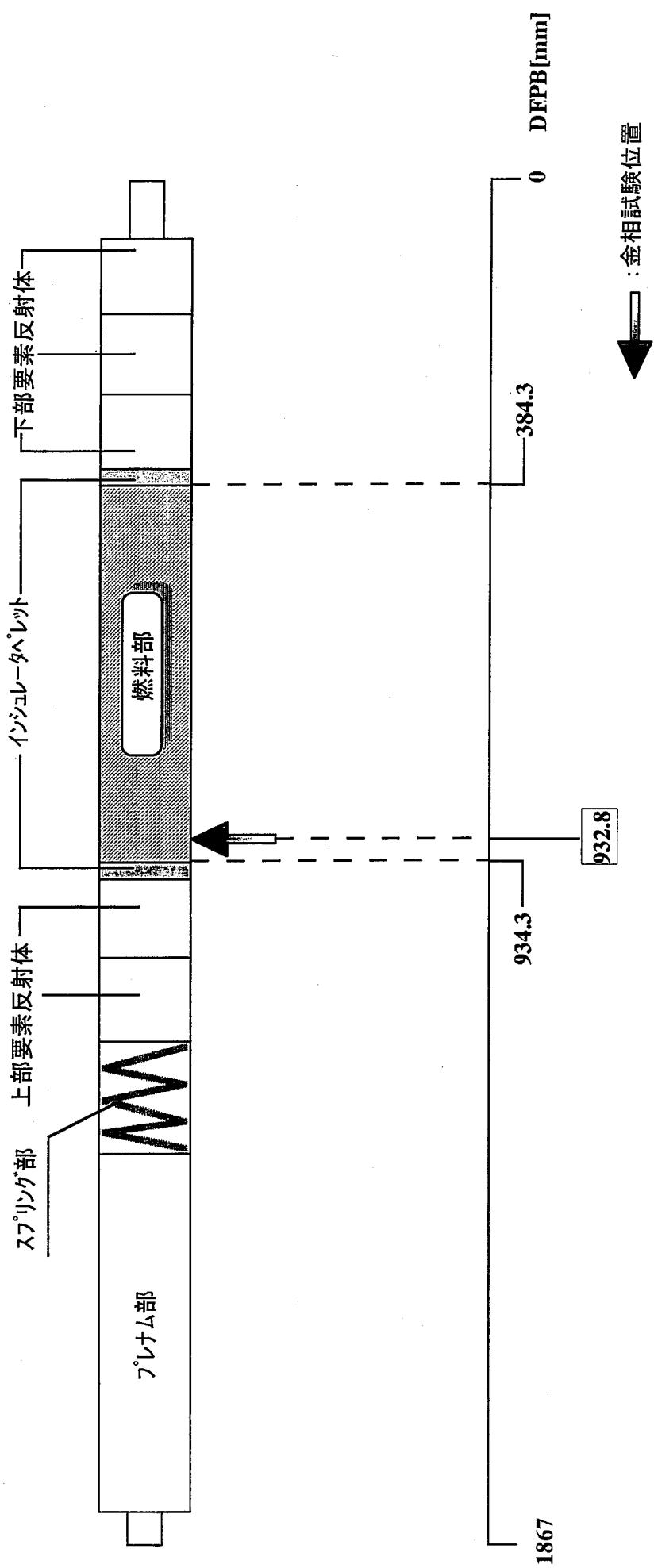
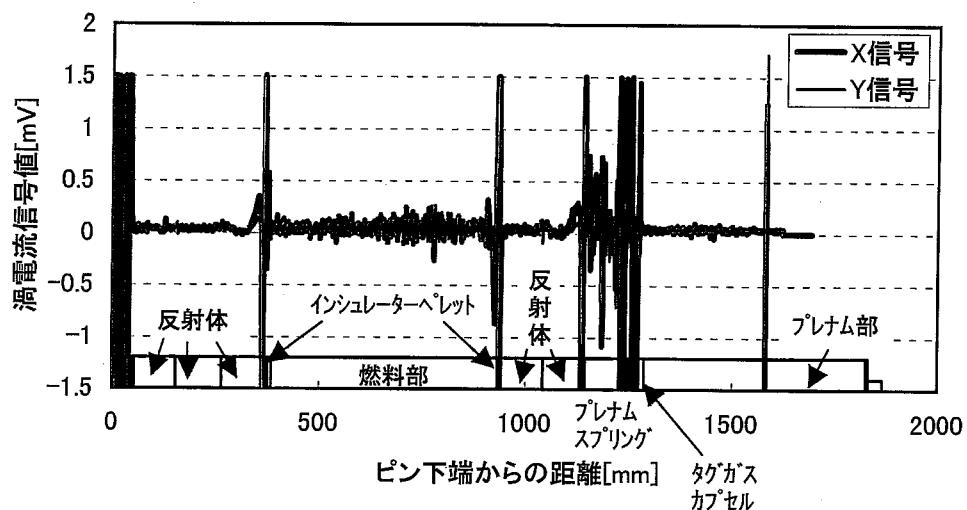
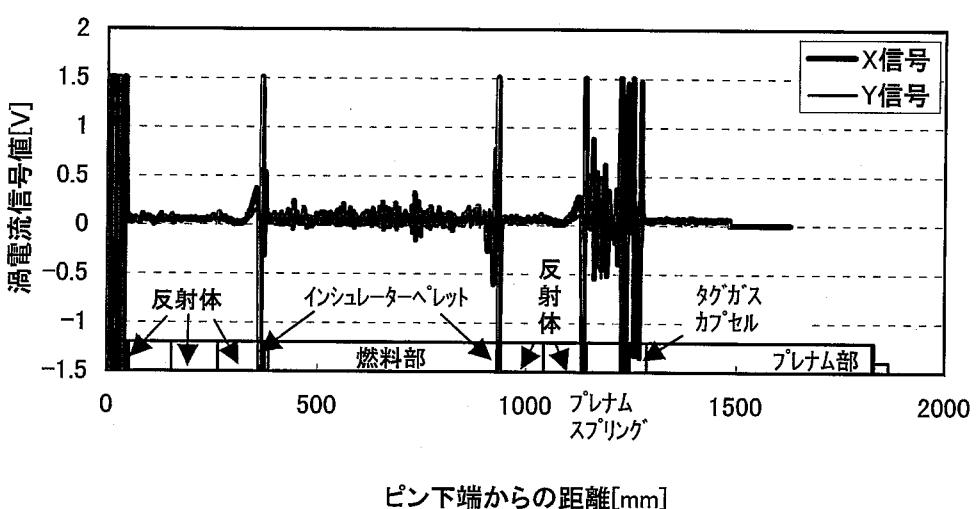


図3.1.4 G311ピンの金相試験位置



(a)G303ピンの欠陥検出試験結果



(b)G311ピンの欠陥検出試験結果

図3.2.1 欠陥検出試験結果  
(試験周波数:1024kHz)

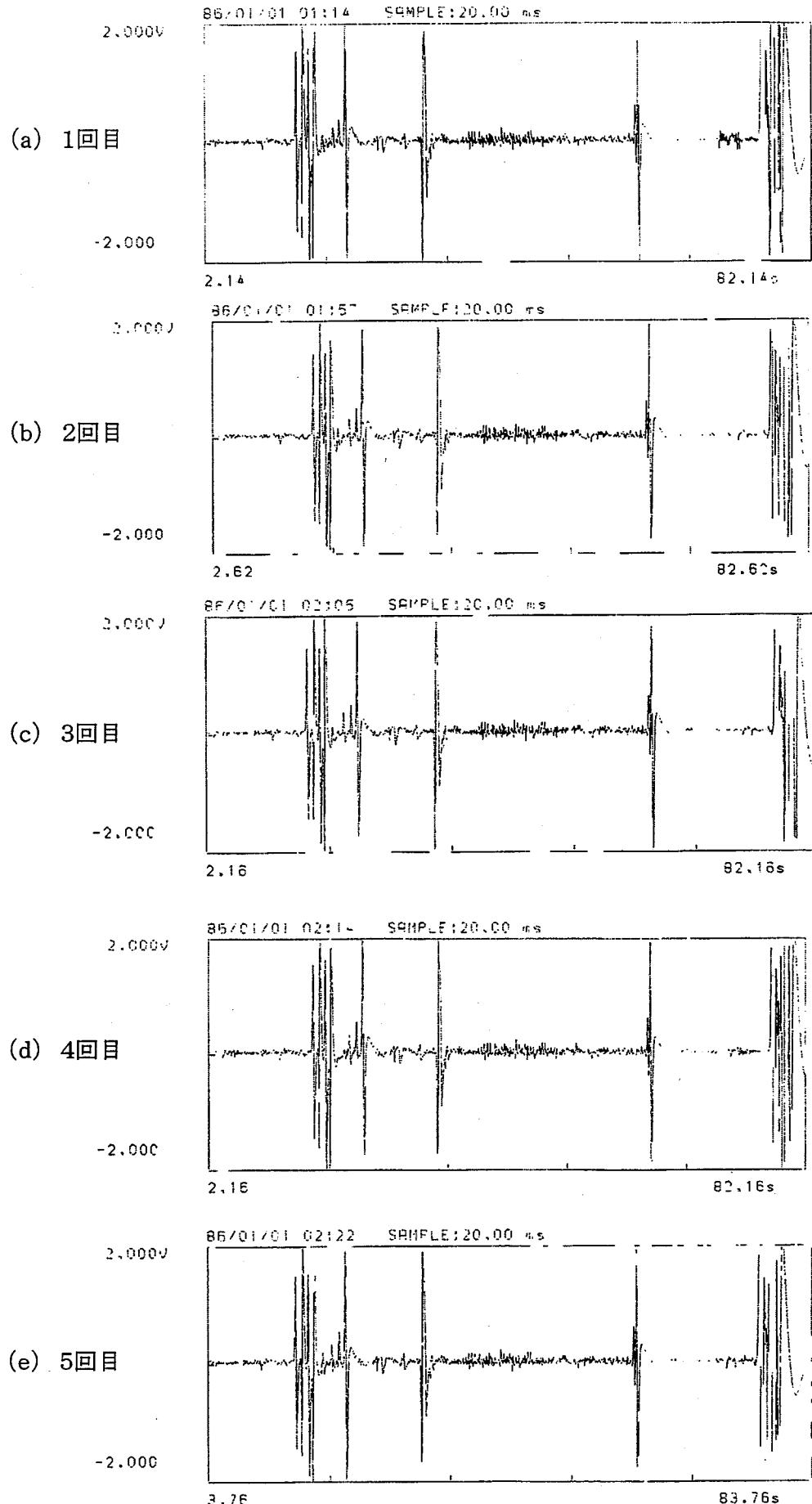


図3.2.2 再現性の確認(Xー方向) (G351ピン)

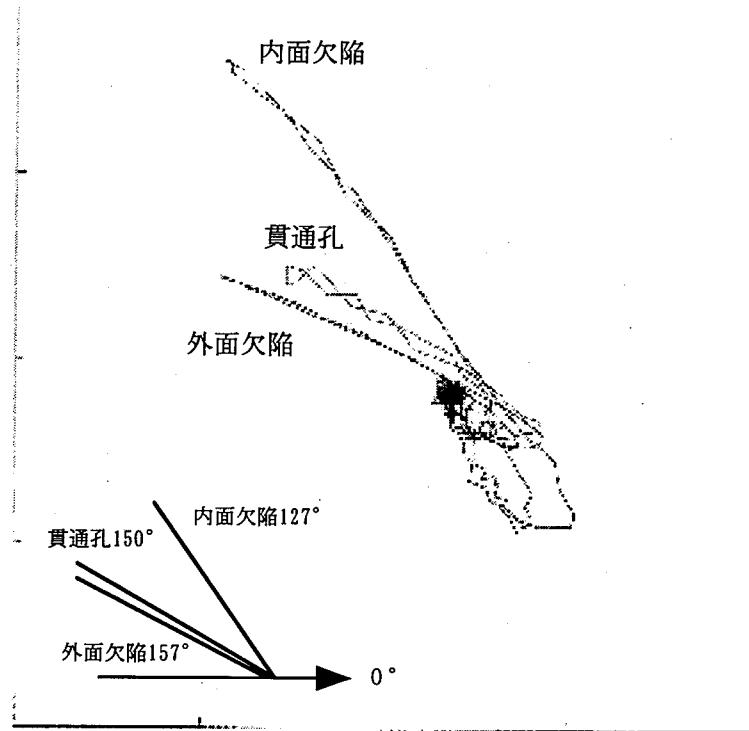


図3.2.3 標準欠陥ピン( $\phi 5.5\text{mm}$ )のリサーチュ

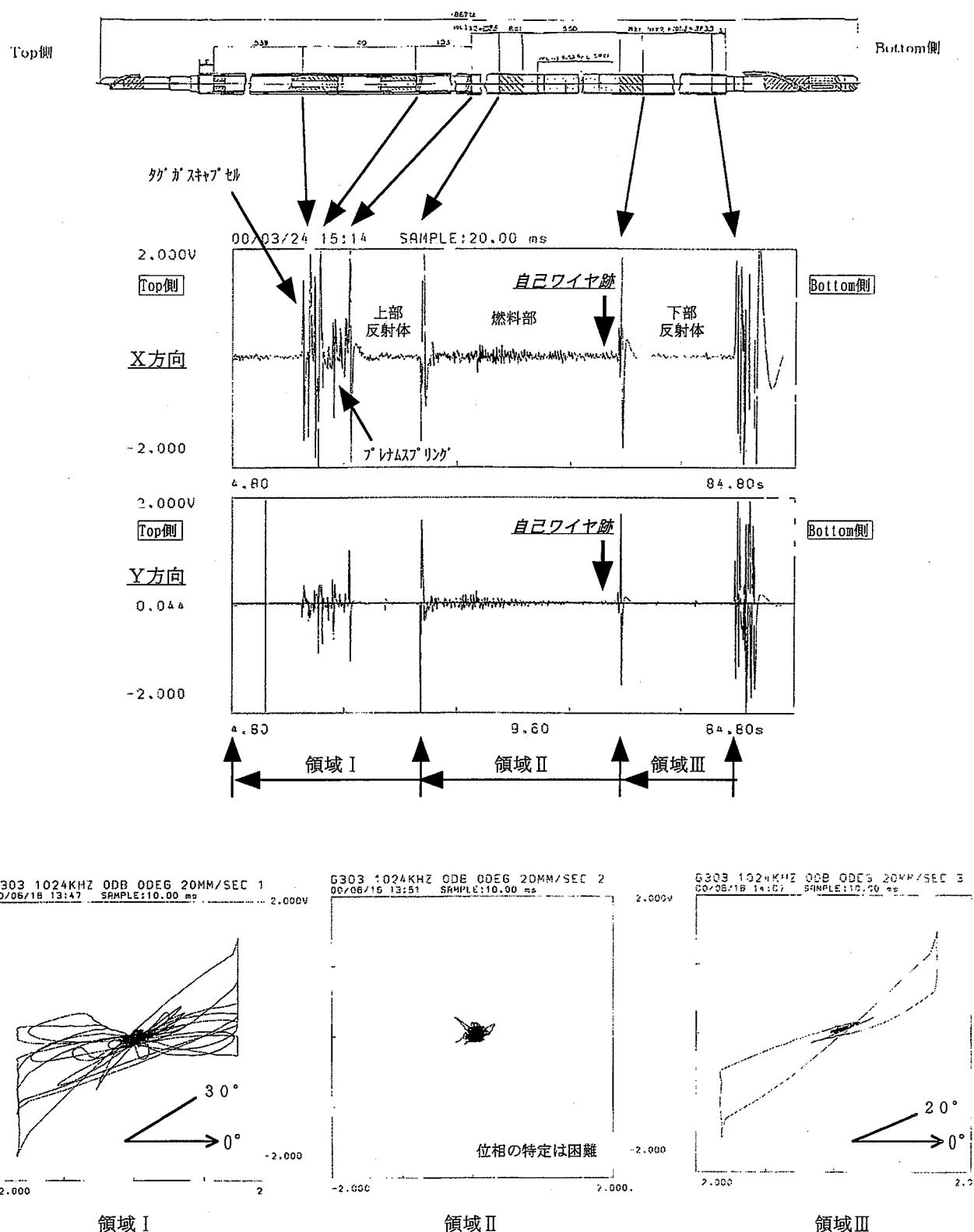
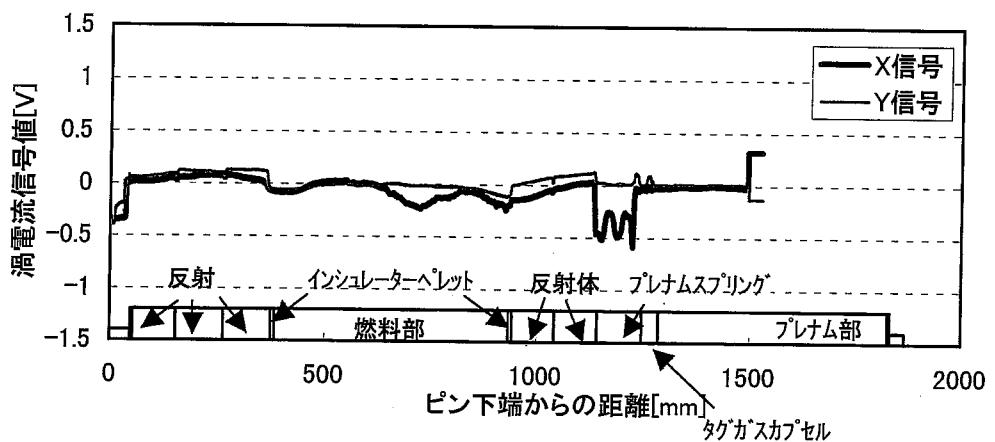


図3.2.4 G303ピン欠陥探傷リサーチ結果

(a) G311ピン



(b) G340ピン

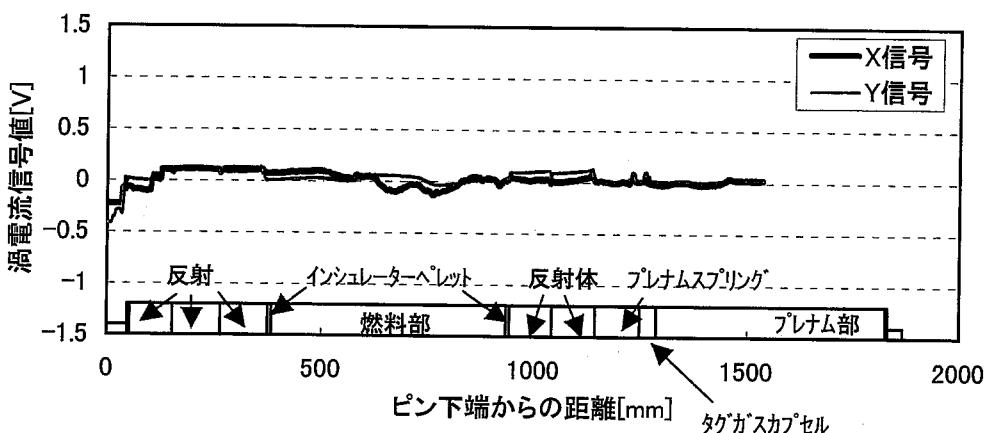
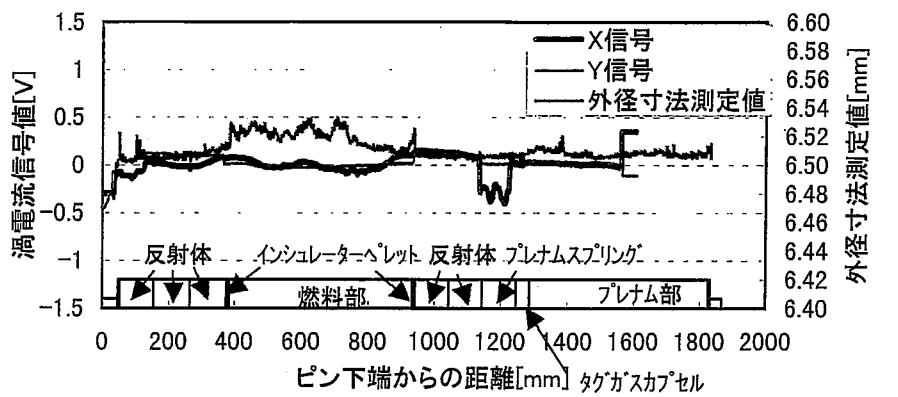
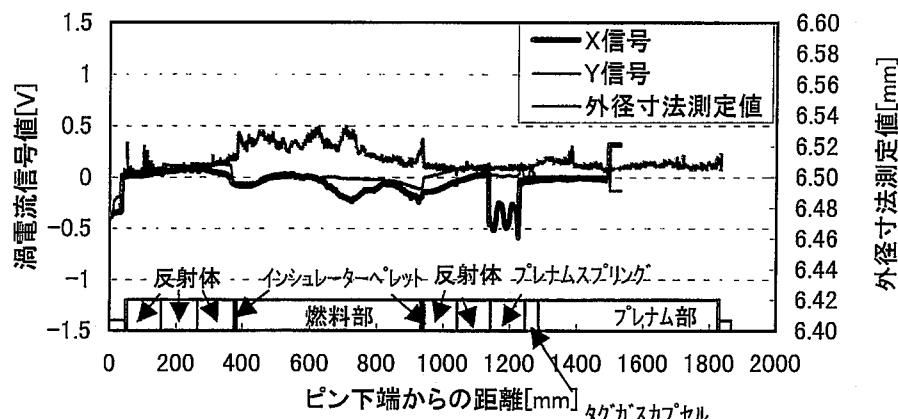


図3.3.1 G311及びG340ピンの  
被覆管内面腐食検出試験結果  
(測定方向: 270度)

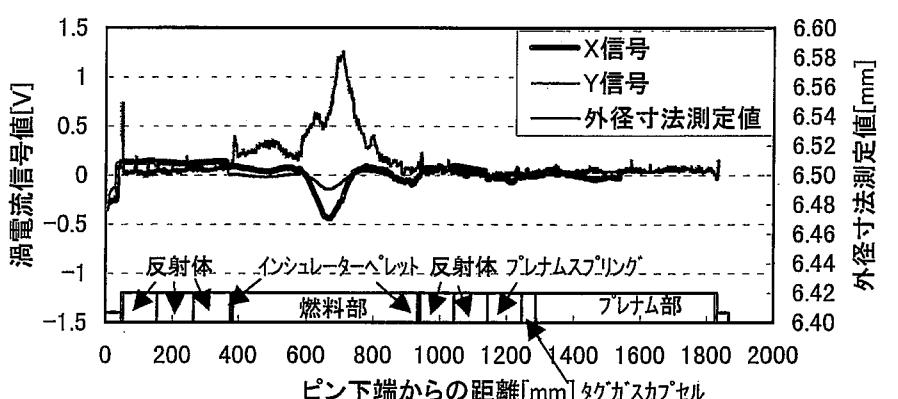
G311ピン  
ECT測定方向:90度



G311ピン  
ECT 测定方向:270度



G340ピン  
ECT測定方向:90度



G340ピン  
ECT測定方向:270度

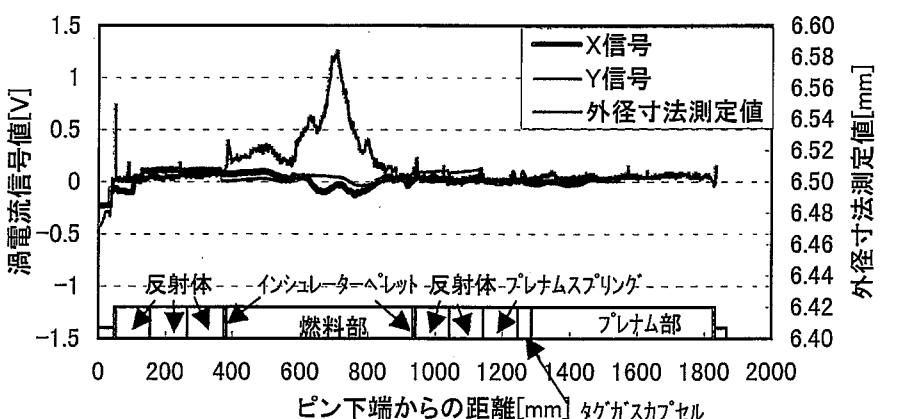


図3.4.1 G311、G340ピンの  
被覆管内面腐食検出試験結果と  
外径寸法測定結果の比較(90-270度方向)

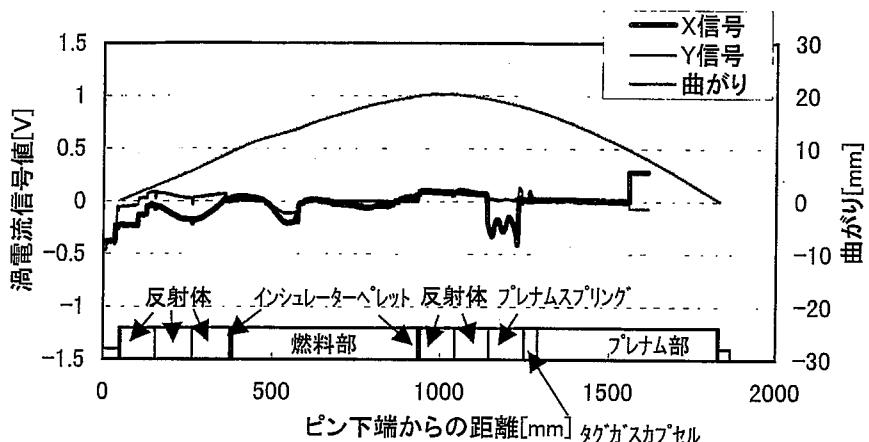


図3.4.2 G303ピンの被覆管内面腐食検出試験結果  
(測定方向:90度)と曲がり結果(曲がり方向:87度)の比較

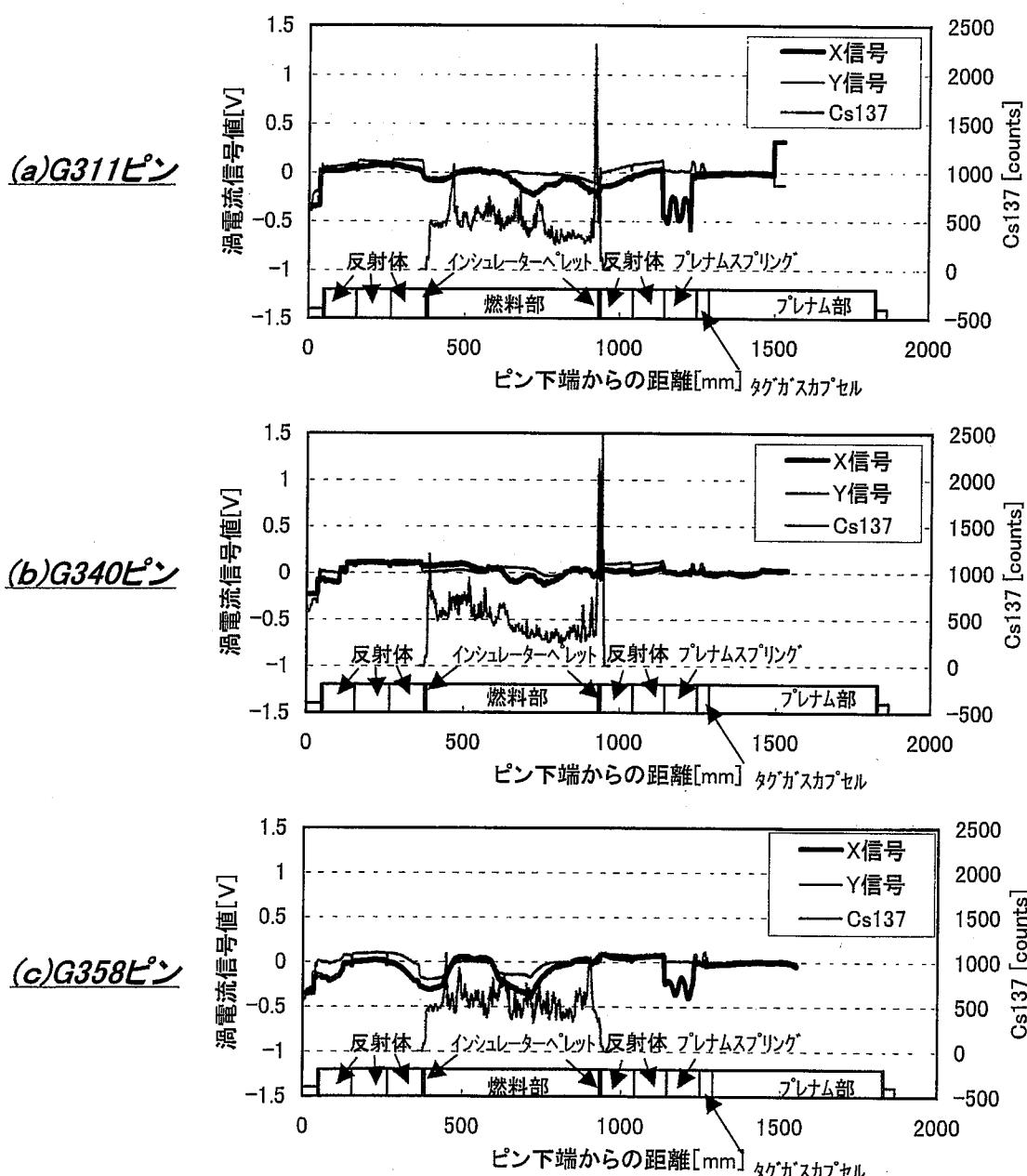
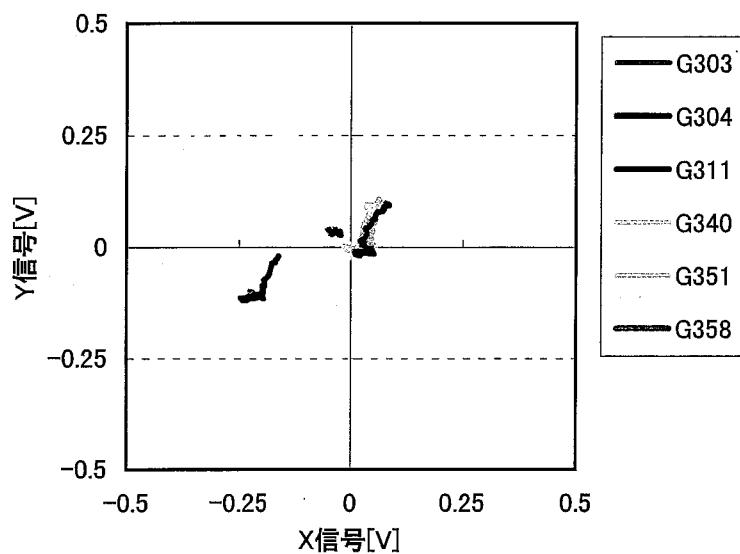


図3.4.3 G311,G340,G358ピンの被覆管内面腐食検出試験結果  
(測定方向:270度)と $\gamma$ スキャンによるCs137計測結果の比較



**図3.4.4 燃料上端部のリサーチュ**  
〔 軸位置: インシュレーター ヘッド ~ 921mm 〕  
〔 測定方向: 270度 〕

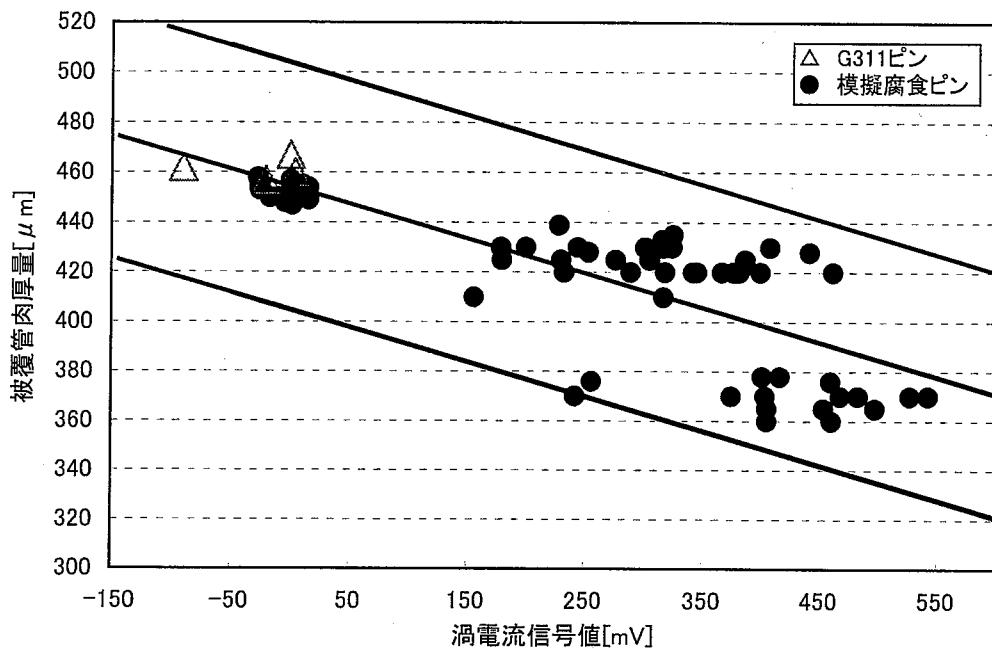


図3.5.1 湧電流信号値と肉厚との相関(Φ 6.5mm燃料ピン)

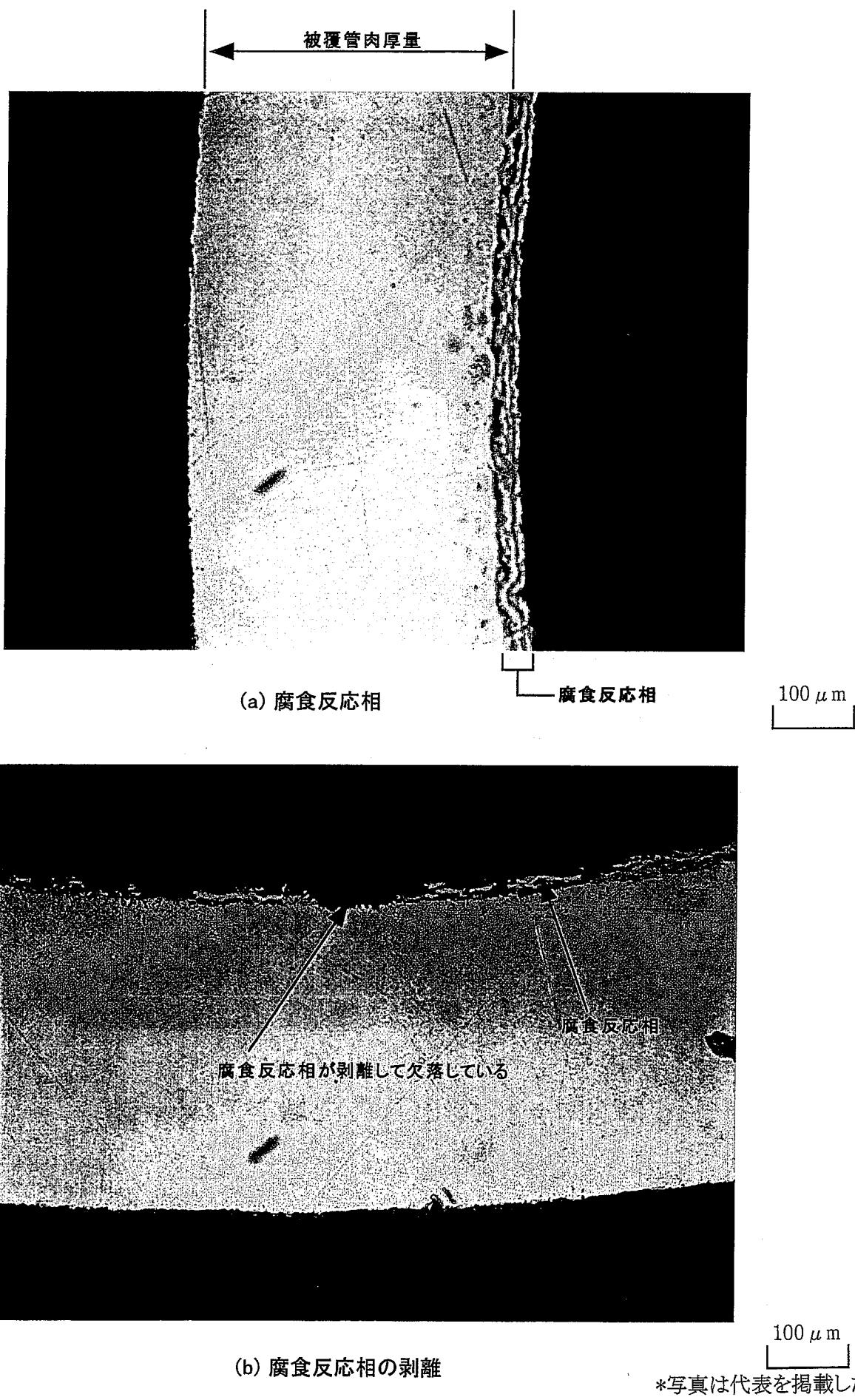


写真2.2.1 模擬腐食ピンの金相観察結果

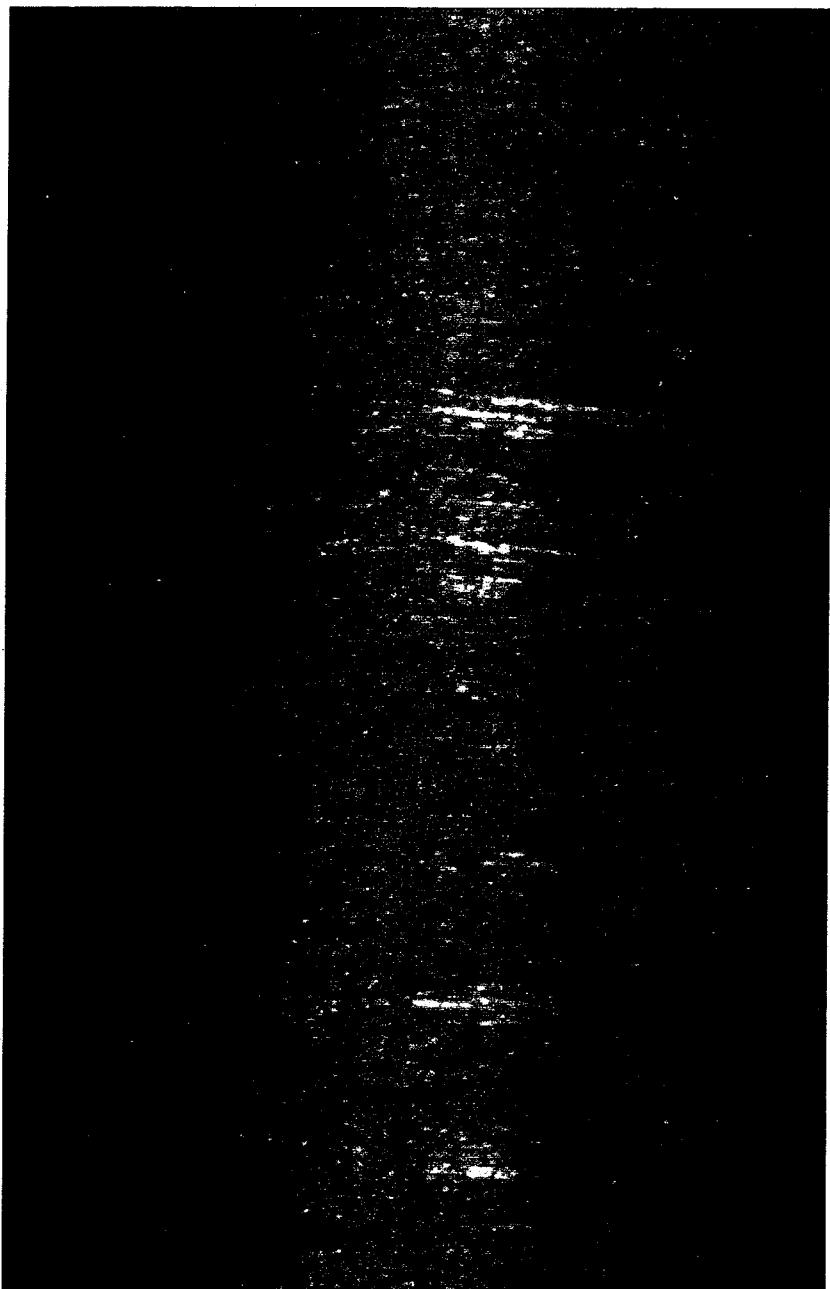
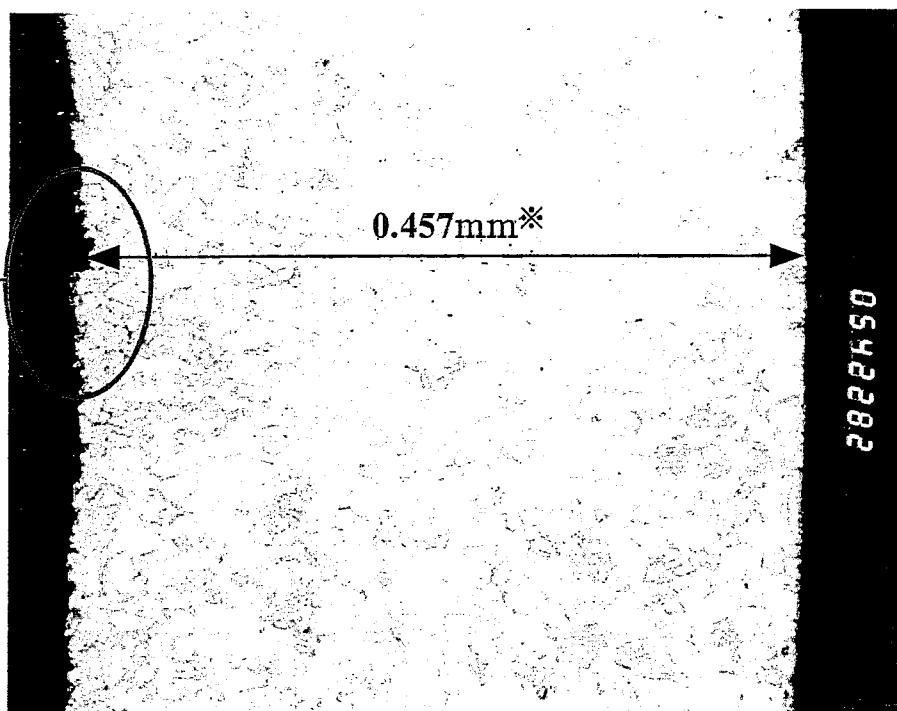


写真3.2.1 G303ピンの自己ワイヤ跡



※ 健全部における肉厚は0.471mm

100  $\mu$ m

倍率: 200倍



100  $\mu$ m

倍率: 400倍

写真3.5.1 G311ピンの金相観察結果  
(最大腐食量を示した270度方向)