



JAEA-Technology

2006-036



JP0650400

## 照射後試験用渦電流深傷技術の開発（2） －高燃焼度照射燃料ピン試験結果－

Development of Eddy Current Testing Technique  
for Irradiated Fuel Pins(2)  
-ECT Results of Irradiated Fuel Pins of High Burn Up-

宮地 紀子 永峯 剛 勝山 幸三  
Noriko MIYAJI, Tsuyoshi NAGAMINE and Kozo KATSUYAMA

大洗研究開発センター  
燃料材料試験部  
Fuels and Materials Department  
Oarai Research and Development Center

June 2006

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology  
Koboriouji

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に刊行している研究開発報告書です。  
本レポート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下さい。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課

Tel. 029-282-6387, Fax. 029-282-5920

This report is issued by Japan Atomic Energy Agency irregularly.  
Inquiries about the copyright and reproduction should be addressed to:

Intellectual Resources Section,

Intellectual Resources Department

2-4, Shirakata-shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, JAPAN

Tel. 81 29 282 6387, Fax. 81 29 282 5920

©日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency, 2006

## 照射後試験用渦電流探傷技術の開発(2)

### —高燃焼度照射燃料ピン試験結果—

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター 燃料材料試験部  
宮地 紀子、 永峯 剛、 勝山 幸三

(2006年3月1日受理)

照射燃料集合体試験施設（FMF）に設置した渦電流探傷装置を用いて、照射された高速炉用燃料ピン被覆管の健全性を、非破壊で確認するための技術開発を進めてきた。これまでに、高速実験炉「常陽」仕様及び高速原型炉「もんじゅ」仕様の非照射模擬燃料被覆管や、「常陽」で照射した「もんじゅ」仕様燃料ピンを対象とした試験を実施してきた。

本試験では、被覆管外径 6.55 mm、肉厚 0.45 mm の 15Ni-15Cr-Ti 鋼非照射模擬燃料被覆管及び、「常陽」で照射した同仕様の燃料ピンを対象に、被覆管内面腐食の確認を目的として渦電流探傷を行い、同技術を用いた腐食探傷の可能性を検討した。

非照射模擬燃料被覆管を対象とした腐食探傷の結果、周波数 32kHz を用いて腐食箇所を探傷できる結果を得た。また渦電流信号値と被覆管肉厚の間には相関があり、被覆管肉厚が減少すると信号値が大きくなる傾向を示した。この結果は「常陽」仕様及び「もんじゅ」仕様模擬燃料被覆管と同様であった。

「常陽」で照射した燃料ピンの腐食を探傷した結果、腐食が小さく、渦電流信号から腐食箇所を確認することはできなかった。しかし本試験では、いくつかの要因で信号の出力することがわかった。その一つは冷却材であるナトリウムによる被覆管外面の腐食である。この腐食はラッピングワイヤ巻き付け位置と関係し、ワイヤの有無で信号の大きさが変化していることが示唆された。また、照射による被覆管の電磁気的特性の変化に加えて、FP ガスや PCMI (ペレットと被覆管の機械的相互作用) による被覆管内圧も渦電流信号に影響を及ぼす可能性の高いことが示唆された。

**Development of Eddy Current Testing Technique  
for Irradiated Fuel Pins (2)**  
**— ECT Results of Irradiated Fuel Pins of High Burn Up —**

Noriko MIYAJI Tsuyoshi NAGAMINE and Kozo KATSUYAMA

Fuels and Materials Department  
Oarai Research and Development Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received March 1, 2006)

Eddy current testing (ECT) technique has been developed in order to check the soundness of irradiated fuel pins non-destructively. The ECT apparatus was installed in the Fuel Monitoring Facility (FMF) and used for inspecting inner corrosion of cladding, using the experimental fast reactor JOYO typed and the prototype fast breeder reactor MONJU typed imitation fuel pins and the MONJU typed irradiated fuel pins.

This paper describes the results that it was examined if corrosions were detected using an imitation fuel pin of 6.55mm outer diameter and 0.45mm thickness, made of 15Ni-15Cr-Ti and same type of the fuel pins irradiated in JOYO.

As the results of the experiment for an imitation pin, ECT detected the corrosions using frequency 32kHz. And, the signal of eddy current became larger as the thickness of the cladding became smaller, because there was some correlation between the signal and thickness. This tendency was same as JOYO and MONJU typed imitation fuel pins.

As for the irradiated fuel pins, inner corrosions were not recognized from the signal because their sizes were too small. However, outside corrosion by sodium as coolant might have an influence on the signal. It was related with the position of lapping wire and it was suggested that size of the signal changed in presence of the wire. And, as well as a change of the electromagnetic characteristics of cladding by irradiation, inner pressure by FP gas and PCMI might have an influence on the signal.

**Keywords:** ECT, Fuel Pin, Cladding, Inner Corrosion, Irradiation

## 目 次

|  |    |
|--|----|
| 1. はじめに.....                             | 1  |
| 2. 非照射模擬燃料被覆管に関する試験.....                 | 2  |
| 2.1 試験内容及び試験方法 .....                     | 2  |
| 2.1.1 模擬燃料被覆管の渦電流探傷試験.....               | 2  |
| 2.1.2 金相試験.....                          | 3  |
| 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.....                        | 4  |
| 2.2.3 金相試験結果.....                        | 4  |
| 2.3 試験結果の検討 .....                        | 4  |
| 2.3.1 渦電流信号の検討 .....                     | 4  |
| 2.3.2 最適試験周波数の検討 .....                   | 5  |
| 2.3.3 渦電流信号値と被覆管肉厚の関係.....               | 5  |
| 3. 照射済み燃料ピンに関する試験.....                   | 7  |
| 3.1 試験内容 .....                           | 7  |
| 3.2 試験試料の照射条件 .....                      | 7  |
| 3.3 試験方法及び試験条件 .....                     | 8  |
| 3.4 試験結果 .....                           | 8  |
| 3.4.1 燃料ピンの渦電流探傷試験結果 .....               | 8  |
| 3.4.2 金相試験結果.....                        | 9  |
| 3.5 試験結果の検討 .....                        | 9  |
| 3.5.1 被覆管内部構造物の影響 .....                  | 10 |
| 3.5.2 被覆管の外面腐食の影響 .....                  | 10 |
| 3.5.3 照射による信号への影響について(燃料部) .....         | 12 |
| 3.5.4 被覆管内部圧力の影響について(燃料部) .....          | 13 |
| 3.5.5 照射済み燃料ピンの渦電流信号への影響因子について(まとめ)..... | 15 |
| 4. おわりに .....                            | 16 |
| 謝 辞 .....                                | 16 |
| 参考文献 .....                               | 17 |

## Contents

|  |    |
|--|----|
| 1. Introduction.....   | 1  |
| 2. An Imitation Fuel Pin Test.....                                       | 2  |
| 2.1 Procedure.....   | 2  |
| 2.1.1 Eddy current test.....   | 2  |
| 2.1.2 Metallographic test.....   | 3  |
| 2.2 Results.....   | 3  |
| 2.2.1 Consecutive measurement results.....                               | 3  |
| 2.2.2 Fixed points measurement results.....                              | 4  |
| 2.2.3 Metallographic test results.....                                   | 4  |
| 2.3 Discussion.....  | 4  |
| 2.3.1 Eddy current signals.....  | 4  |
| 2.3.2 Best frequency.....  | 5  |
| 2.3.3 Relations between ECT signals and thickness of the claddings ..... | 5  |
| 3. Irradiated Fuel Pins Test.....  | 7  |
| 3.1 Procedure.....   | 7  |
| 3.2 Irradiated conditions.....   | 7  |
| 3.3 Test conditions.....   | 8  |
| 3.4 Results.....   | 8  |
| 3.4.1 ECT results.....   | 8  |
| 3.4.2 Metallographic test results.....                                   | 9  |
| 3.5 Discussion.....  | 9  |
| 3.5.1 Influence of the cladding inner structures.....                    | 10 |
| 3.5.2 Influence of the cladding outer corosions.....                     | 10 |
| 3.5.3 Influences to ECT signals (Fuel parts) .....                       | 12 |
| 3.5.4 Influence of the cladding inner pressure (Fuel parts) .....        | 13 |
| 3.5.5 Influence factors to ECT signals (Conclusions) .....               | 15 |
| 4. Conclusions.....  | 16 |
| Acknowledgements.....  | 16 |
| References.....  | 17 |

## 表リスト

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 表 3.2.1 PFC040(C4F)の照射条件       | 18 |
| 表 3.2.2 漩電流探傷試験対象ピンの燃料上端部の照射条件 | 18 |
| 表 3.4.1 スプリング部及びプレナム部の信号の特徴    | 19 |

## 図リスト

|   |    |
|---|----|
| 図 2.1.1 模擬燃料被覆管仕様及び定点測定と金相観察位置  | 20 |
| 図 2.1.2 金相試験フロー   | 21 |
| 図 2.2.1 模擬燃料被覆管の連続測定結果（測定方向：0 度）  | 22 |
| 図 2.2.2 各試験周波数における模擬燃料被覆管の定点測定結果<br>(測定方向：0 度)                          | 22 |
| 図 2.3.1 漩電流信号値と被覆管肉厚の関係<br>( $\phi 6.55 \text{ mm}$ , 15Ni-15Cr-Ti 鋼ピン) | 23 |
| 図 2.3.2 漩電流信号値と被覆管肉厚の関係（「もんじゅ」仕様ピン）                                     | 23 |
| 図 3.1.1 PFC040(C4F)の燃料ピン構造図   | 24 |
| 図 3.1.2 PFC040(C4F)の燃料ピン配置図   | 25 |
| 図 3.2.1 「常陽」MK-II 炉心における PFC040(C4F)の装荷位置                               | 26 |
| 図 3.3.1 M227, M231, M235 ピンの金相試験位置                                      | 27 |
| 図 3.4.1 燃料ピンの渦電流探傷試験結果 (M227 ピン)  | 28 |
| 図 3.4.2 燃料ピンの渦電流探傷試験結果 (M231 ピン)  | 29 |
| 図 3.4.3 燃料ピンの渦電流探傷試験結果 (M235 ピン)  | 30 |
| 図 3.4.4 M227 ピン燃料部の被覆管肉厚観察結果  | 31 |
| 図 3.5.1 M227 ピン 180 度方向と M228 ピン 0 度方向の渦電流信号の比較                         | 33 |

|   |    |
|---|----|
| 図 3.5.2 M228 ピン 180 度方向と M229 ピン 0 度方向の渦電流信号の比較         | 33 |
| 図 3.5.3 M229 ピン 180 度方向と M230 ピン 0 度方向の渦電流信号の比較         | 35 |
| 図 3.5.4 M230 ピン 180 度方向と M231 ピン 0 度方向の渦電流信号の比較         | 35 |
| 図 3.5.5 ペレット-被覆管間ギャップと渦電流信号の比較<br>(M227, M231, M235 ピン) | 37 |
| 図 3.5.6 M231 ピンの渦電流探傷結果と<br>X 線ラジオグラフィー観察結果の比較          | 37 |

### 写真リスト

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 写真 2.2.1 模擬燃料被覆管の金相観察結果            | 39 |
| 写真 3.4.1 M235 ピンの金相試験結果（測定方向：90 度） | 41 |

## 1. はじめに

高速炉燃料ピン被覆管は照射中、FCCI (Fuel Cladding Chemical Interaction)により、その内面の肉厚が減少し、健全性が損なわれる可能性がある。照射燃料集合体試験施設 (FMF:Fuels Monitoring Section) では、この腐食による被覆管肉厚の減少箇所を非破壊で確認するために、渦電流探傷装置による探傷技術開発を進めている。

渦電流探傷は、交流電流を流したコイルにより試験体に渦電流を誘導し、健全部と比較して、その変化をコイルの起電力の変化として検知することにより、欠陥等を検出する技術である。同技術は燃料ピン被覆管のように薄肉、細径の試験体を短時間で探傷できる特徴がある。

これまでに FMF では、同装置を用いて高速実験炉「常陽」及び高速増殖炉原型炉「もんじゅ」仕様の非照射模擬燃料被覆管及び「常陽」で照射した燃料ピンを対象に、標準比較方式により探傷を実施した。なお、これらの被覆管材料は、オーステナイト系ステンレス鋼である PNC316 鋼である。

非照射模擬燃料被覆管を渦電流によって探傷した結果、「常陽」仕様、「もんじゅ」仕様被覆管とともに、腐食によって被覆管の肉厚が小さくなっている箇所に有意な信号が出力することを確認した。また、肉厚が減少するほど信号値は大きくなる傾向があり、信号値から肉厚を予測できる見通しが得られた。

一方、照射した燃料ピンは腐食が小さく、腐食部の被覆管肉厚はほとんど減少していなかったため、腐食を示す有意な渦電流信号は出力しなかった。なお、金相試験結果から得られた肉厚と信号値の関係は、非照射模擬燃料被覆管のデータのばらつき範囲内に含まれることを確認した<sup>4)5)</sup>。

そのため本稿では、内面腐食が大きいと想定される高燃焼度まで照射した燃料ピンを対象に実施した渦電流探傷試験の結果について報告する。対象とした燃料ピンは、日仏交換照射として C 型特殊燃料集合体（集合体名：PFC040）を用いて「常陽」MK-II 炉心で照射されたもので、最高燃焼度 143.9Gwd/t、照射量  $22.29\text{n/m}^2$  ( $E > 0.1\text{MeV}$ ) を達成している。その被覆管材料はオーステナイト系 15Ni-15Cr-Ti 鋼（以下、15-15-Ti 鋼とする）で、外径及び肉厚はそれぞれ 6.55 mm、0.45 mm である。

本試験にあたっては、同じ仕様の被覆管を用いた非照射模擬燃料被覆管を用いた試験も実施した。その模擬燃料被覆管は、化学薬品を用いてその内面を腐食させている。同模擬燃料被覆管の試験は、照射した同仕様燃料ピンの試験結果を評価するために、照射した燃料ピンの試験に先駆けて行うものである。

## 2. 非照射模擬燃料被覆管に関する試験

### 2.1 試験内容及び試験方法

#### 2.1.1 模擬燃料被覆管の渦電流探傷試験

##### (1) 試験内容及び目的

高速炉供用中の燃料ピンについては、FCCI (Fuel Cladding Chemical Interaction) により被覆管肉厚が減少する可能性がある。この腐食に対する影響が大きい核分裂生成物には Cs が挙げられる。そのため、模擬燃料被覆管の内面を、CsOH で全面腐食させ、渦電流探傷試験に供した。なお、本模擬燃料被覆管は、照射試験に用いたものとは別に同じ仕様 (15-15-Ti 鋼製、外径 6.55 mm、肉厚 0.45 mm) で製作したものである。

試験は連続測定及び定点測定に分けて実施した。前者は、渦電流による内面腐食箇所探傷の可否について、後者は同腐食を探傷する最適な試験周波数及び被覆管肉厚と渦電流信号値の相関関係について、それぞれ確認するため測定を行った。腐食させた被覆管の肉厚は、金相試験により求めた。

##### (2) 試験試料

連続測定及び定点測定とともに、同一の模擬燃料被覆管を用いて実施した。測定に供した模擬燃料被覆管は、燃料等の内部構造物が装填されていない中空のものである。その模擬燃料被覆管の製作については、長さ 33 mm に切断した無垢の被覆管を 4 個用意した。そのうち 3 個については、深さを変えて内面を腐食させた。腐食させていない 1 個とあわせ、それらを 10 mm 間隔でもとの被覆管状につなぎ合わせた。図 2.1.1 に、腐食箇所を含めた模擬燃料被覆管の概略図を示す。

##### (3) 試験条件及び方法

連続測定、定点測定とともに腐食の探傷は、 $\phi 6.5$  mm 用プローブコイルを用いて、標準比較方式により実施した。標準比較方式は、交流を流した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 つのコイルの起電力の応答差を検出する方法である。具体的には、コイルを作用させることによって誘導される渦電流が試験体と標準体で異なる場合、それぞれのコイルの起電力に差が生じる。これらのコイルの起電力の差が得られる渦電流信号である<sup>\*</sup>。連続測定、定点測定とともに、測定に用いた標準体は、模擬被覆管と同仕様のもので、内部構造物が装填されておらず、

かつ内面を腐食していない中空の被覆管（以下、標準被覆管という）である。

連続測定の試験条件は、これまでに実施した「もんじゅ」仕様模擬燃料被覆管の試験結果を参考に、位相 270 度、試験周波数 32 kHz とした<sup>3)</sup>。定点測定は、位相 270 度<sup>\*\*)で、8k, 16k, 32k, 64kHz の 4 つの周波数を用いた。連続測定、定点測定ともに模擬燃料被覆管の 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それぞれ 5 箇所ずつ、合計 20 箇所、4 方向合計 80 箇所について実施した。定点測定箇所は図 2.1.1 に示している。</sup>

\*) 漩電流信号の出力値は以下で示される。

$$\text{渦電流信号} = (\text{標準体のコイルの起電力}) - (\text{試験体のコイルの起電力})$$

$$\text{コイルの起電力} = (\text{コイルの磁束}) - (\text{渦電流からの反作用の磁束})$$

渦電流が標準体と試験体とで異なる場合、反作用の磁束がそれぞれ異なるため、コイルの起電力に差が生じる。したがって、渦電流信号が発生する。

\*\*) 位相は、被覆管肉厚の減少による渦電流信号がプラス信号として出力するように設定したものである。

## 2.1.2 金相試験

模擬燃料被覆管の肉厚及び腐食量を測定するために、金相試験を行った。その試験箇所は、基本的に定点測定箇所と同一としたが、リファレンス部、各腐食部とも、定点測定箇所より 1 箇所少ない 4 箇所、1 方向合計 16 箇所、4 方向合計 64 箇所とした（図 2.1.1 参照）。

なお、金相試験は、図 2.1.2 に示す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

周波数 32 kHz で模擬燃料被覆管の連続測定を実施した。その結果、各測定方向とともにリファレンス部の信号はほぼ 0、腐食部はそれぞれプラスの X 信号が出力した。代表として 0 度方向の結果を図 2.2.1 に示す。信号は、腐食部③の一部が高くなつたが、全体としては腐食部②、③がほぼ同等、腐食部①はそれらより大きい値を示した。

なお、セル外には自動試料送り装置がなく、手動により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つた。しかし、試験に供した模擬燃料被覆管の腐食箇所に、有意なプラス信号が出力することを確認した。

## 2.2.2 定点測定結果

図 2.1.1 に示した箇所の定点測定を実施した。その結果、すべての周波数、測定方向において、腐食部①～③にプラスの信号が出力した。代表例として測定方向 0 度の結果を図 2.2.2 に示す。リファレンス部及び各腐食部の測定は、周波数ごとに 1 方向各 5 点、合計 20 点であり、図 2.2.2 にはこれらの測定結果を各部ごとに結んだ折れ線として示した。

定点測定の結果、腐食部①～③とともに、周波数が高いほど信号値は小さくなつた。また、同一腐食部の測定箇所ごとに多少のバラツキはあるものの、信号値は腐食部①、③、②の順に小さくなり、その差は低周波ほど明確であった。逆に周波数が高くなると腐食部間の信号差は小さくなり、64kHz では腐食部間の信号差はほとんど見られなかった。

## 2.2.3 金相試験結果

合計 64 点の定点測定箇所について金相試験を実施した。その代表例を写真 2.2.1 に示す。観察の結果、CsOH による腐食部に腐食反応相とそれが剥離して欠落している箇所が一部に確認された。腐食量は、腐食させなかつたリファレンス部の平均肉厚をもとに、腐食部の肉厚を差し引いて算出した。腐食部の肉厚には、被覆管強度の観点から、腐食反応相を含まないものとした。

金相試験の結果、測定方向ごとに多少のバラツキはあるが、4 方向平均腐食量は、減肉部①が  $109 \mu\text{m}$  (残留肉厚  $300\sim332 \mu\text{m}$ )、腐食部②が  $82 \mu\text{m}$  (残留肉厚  $330\sim354 \mu\text{m}$ )、腐食部③が  $30 \mu\text{m}$  (残留肉厚  $380\sim408 \mu\text{m}$ ) であり、腐食部①の腐食量が最大 (肉厚最小)、腐食部③の腐食量が最小 (肉厚最大) となつた。なおリファレンス部の肉厚は  $414\sim438 \mu\text{m}$  であり、平均  $425 \mu\text{m}$  であった。

## 2.3 試験結果の検討

### 2.3.1 涡電流信号の検討

模擬燃料被覆管の連続測定の結果、リファレンス部の信号はほぼ 0、腐食部にはプラスの信号が出力した (図 2.2.1 参照)。この結果は、リファレンス部では標準被覆管とほぼ同様の状態であったが、腐食部では異なつた状態であつたことを示すものである。

被覆管に誘導された渦電流は、被覆管内部に入るに従つて減衰する特徴がある。したがつて標準被覆管と比較して、肉厚の薄い腐食部では、被覆管内面の渦電流は大きくなり、コイルの起電力は小さくなる。したがつて、標準被覆管との差である信号は大きくなつたと考えられる。一方、リファレンス

部では、発生する渦電流は標準被覆管と模擬燃料被覆管で同じであったため、信号はほぼ0となつたと考えられる。

### 2.3.2 最適試験周波数の検討

交流を流したコイルを試験体に近づけると、試験体には渦電流が誘導される。このコイルに流す電流の周波数が試験周波数である。試験周波数は、試験体中の渦電流の浸透深さに影響を及ぼす。浸透深さは渦電流が試験体においてどの程度まで浸透するかを示すものであり、渦電流による探傷が可能な深さを示す目安である。浸透深さと試験周波数の間には、周波数が高いほど浸透深さは浅くなるという関係がある<sup>7)8)9)</sup>。

燃料ピンに適用する試験周波数については、その構造及び被覆管肉厚（表面から腐食部までの距離）を考慮して決定する必要がある。燃料ピンの場合、燃料ペレット等の内部構造物が装填された状態で探傷を実施することになる。この点から、浸透深さが深すぎると、内部構造物等の情報を信号として出力する可能性が考えられ、周波数は低く設定しすぎないことが重要である。

また、試験周波数が低いと、腐食とは関係のない電圧（不平衡電圧）を打ち消すためのブリッジバランスの調整が困難であり、最終的に得られる渦電流信号に影響を及ぼす可能性が高い。この点からも、低い周波数は試験周波数として適当ではないと考えられる。

一方、被覆管肉厚（表面から腐食部までの距離）の問題については、図2.2.2に示したように、周波数が高いほど腐食に対する感度が低下する傾向の見られることを考慮する必要がある。これは、試験周波数が高いほど渦電流は被覆管外周部を流れ、腐食部まで浸透しないため、模擬燃料被覆管の腐食部と標準被覆管に誘導される渦電流に差がなくなったためと考えられる。この点から、浸透深さが浅すぎると被覆管内面まで渦電流が浸透せず、腐食による減肉を探傷できないことから、試験周波数は高く設定しすぎないことも重要なことがある。

以上より、図2.2.2の結果からも、今回用いた試験周波数のなかで、8kHz、16kHzではやや低く、64kHzでは逆に高すぎると判断できる。したがって、今回の燃料ピン仕様（被覆管外径6.55mm、肉厚0.45mm）に対しても試験周波数には、「常陽」仕様及び「もんじゅ」仕様燃料ピンと同様の32kHz<sup>4)5)</sup>を適用することとした。

### 2.3.3 渦電流信号値と被覆管肉厚の関係

図2.3.1に渦電流信号値と被覆管肉厚の関係を示す。同図より、肉厚が減少すると信号が大きくなる傾向にあったが、詳細にみると図中○で示すデー

タ集団では、その傾向から少しはずれ、被覆管肉厚の割に信号が大きい結果となった。このデータ集団は、すべて図 2.2.1 の腐食部③の信号であったが、CsOH による腐食条件および渦電流探傷条件とともに、腐食部①、②及びリフレンス部と相違はなく、試験条件に問題はなかった。したがって、これらのデータ集団も含めて最小二乗法によって算出した近似線を図中に中央線として記した。なお、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。

同図より、○で示すデータ集団を含めても被覆管肉厚と信号値には相関関係があり、肉厚が減少すると、信号値は大きくなる傾向を示した。この傾向は、これまでに実施した「常陽」仕様及び「もんじゅ」仕様模擬燃料被覆管と同様であった<sup>4)5)</sup>。参考として図 2.3.2 に「もんじゅ」仕様模擬燃料被覆管の肉厚と信号値の関係を示す。

### 3. 照射済み燃料ピンに関する試験

#### 3.1 試験内容

##### (1) 燃料ピンの渦電流探傷試験

「常陽」MK-II炉心C型特殊燃料集合体PFC040(C4F)にて照射した燃料ピン(公称値外径6.55mm、被覆管肉厚0.45mm、15-15-Ti鋼製)を対象に、渦電流による探傷試験を実施した。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3.1.1にPFC040特殊燃料集合体燃料ピンの構造を、図3.1.2に試験対象燃料ピンの集合体内配置図を示す。試験対象燃料ピンは、M227, M228, M229, M230, M231, M232, M235, M239の8本である。

##### (2) 金相試験

照射した燃料ピンの内面状況について確認するために、金相試験を実施した。試験に供した燃料ピンは、渦電流探傷試験を実施したものうち、高出力ピン(M227)、中心ピン(M231)、低出力ピン(M235)の合計3本である。

#### 3.2 試験試料の照射条件

##### (1) 集合体の照射条件<sup>6)</sup>

PFC040の装荷位置を図3.2.1に示す。PFC040は、「常陽」MK-II炉心において第16~35サイクルまで3C2位置にて照射した(23"~23")サイクル、28~29'サイクルで一旦ラック内に取り出し、それぞれ24、30サイクルで再び3C2に装荷)。照射条件を表3.2.1に示す。照射日数は1019.33日(EFPD)、最大中性子照射量及び集合体最高燃焼度は、それぞれ $22.29 \times 10^{26} n/m^2$ (E $\geq 0.1 MeV$ )及び143.90Gwd/tである。

##### (2) 試験対象燃料ピンの照射条件

試験対象燃料ピンの燃料上端部の照射条件を表3.2.2に示す。燃料ピン被覆管の内面は、燃料から核分裂によって生成した核分裂生成物(FP)によって腐食される可能性がある。腐食に対する影響が大きい核分裂生成物にはCsがあり、このCsはペレット温度の低い燃料上下端付近に集積する特徴がある。また腐食は、被覆管内面温度と燃焼度がある一定以上である場合に発生することから、腐食によって被覆管肉厚が減少する可能性が最も高いのは燃料上端部付近である<sup>10)</sup>。試験対象燃料ピンのうち、燃料上端部付近の燃焼度が最大であったのはM227ピン(燃焼度84.24Gwd/t、EOLの内面温度531.9°C)、被覆管内面温度が最高であったのはM229ピン(燃焼度80.46Gwd/t、内面温

度 572.0°C) である。

### 3.3 試験方法及び試験条件

#### (1) 涡電流探傷試験

試験は、模擬燃料被覆管を対象とした試験と同様に、 $\phi 6.5\text{ mm}$ 用プローブコイルを用いて、標準比較方式で実施した。試験に用いた標準被覆管は、模擬燃料被覆管の試験に用いたものと同一である。試験条件は、模擬燃料被覆管の試験結果から位相を 270 度、周波数を 32kHz とした。試験時の 0 基準点は標準被覆管としたが、照射済み燃料ピンの試験結果は、内部構造物が安定しており、かつ、照射の影響が小さいと推測される下部反射体部が 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。

#### (2) 金相試験

高出力ピンである M227、中心ピンである M231、低出力ピンである M235 ピンの 3 本について、渦電流探傷試験終了後に、金相試験を実施した。試験は模擬燃料被覆管と同様に、図 2.1.2 に示すフローに従って行った。観察位置は、内面腐食が発生する可能性が高いと予想される燃料上端部付近とした。ただし、最も燃焼度の高かった M227 ピンについては、燃料上端部を含め合計 6 つの軸位置について観察した。具体的には、燃料部下端からの距離が 10.6 mm、74.9 mm、274.4 mm、375.0 mm、475.4 mm、544.7 mm の位置である。なお、M231 及び M235 ピンの観察位置はともに燃料部下端からの距離が 545.3 mm の位置である。図 3.3.1 に各燃料ピンの金相試験位置を示す。

### 3.4 試験結果

#### 3.4.1 燃料ピンの渦電流探傷試験結果

照射した燃料ピンの渦電流探傷試験を実施した。代表例として M227, M231, M235 ピンの結果を図 3.4.1~3.4.3 に示す。これら各図に示した燃料ピンポンチ絵については、X 線ラジオグラフィーの結果をもとにその寸法（長さ方向）の補正を行っている。そのポンチ絵と渦電流信号とは、燃料ピン下端側の反射体間に output するピーク（図に①で示したもの）を基準として合わせた。

渦電流信号については、いずれの燃料ピンにおいても、下端側では 2 つの反射体間でピークが見られた（図中①）が、上部側の反射体部では、X 信号、Y 信号ともに一旦低下する傾向が見られた（図中②）。スプリング部については、M235 ピンのみ、X 信号が短い間隔で上下したが、その他の燃料ピンについては、信号の急な変化は小さかった。

プレナム部は、コーナーピンである M227, M235 ピンのそれぞれ測定 4 方向のうち、隣接ピンがない測定 3 方向の X 信号はほとんど変化がなかったが、他の燃料ピンと接する残りの測定 1 方向（M227 ピン 180 度方向及び M235 ピン 0 度方向）は、両燃料ピンとともにパルス状の信号が出力していた。これら以外の燃料ピンのプレナム部には、M231 で見られたのと同様に、あるパターンの信号が繰り返されていた。燃料部は、燃料ピンごと、測定方向ごとに多種多様な信号が出力していた。スプリング部、プレナム部の信号についてそれぞれ特徴別に分類した結果の一覧を表 3.4.1 に示す。

### 3.4.2 金相試験結果

M227, M231, M235 ピンの燃料上端部付近について、金相試験を実施した。M227 ピンに対しては、このほかに 5 つの軸位置についても試験を行った。なお内面腐食量は腐食箇所近傍の健全部から腐食部の被覆管肉厚を差し引いて算出した。

まず、燃料上端部の試験結果について述べる。燃料上端部（燃料部下端より約 543 mm）には、M227, M231, M235 ピンとともに内面腐食が観察された。燃料上端部における腐食量は M235 ピンの 90 度方向が最大で、 $14 \mu\text{m}$ （残留肉厚  $438.5 \mu\text{m}$ ）、次いで M231 ピンの 0 度方向が  $11 \mu\text{m}$ （残留肉厚  $430.3 \mu\text{m}$ ）、最小であったのは M227 ピンの 135 度方向で、 $9 \mu\text{m}$ （残留肉厚  $450.4 \mu\text{m}$ ）であった。代表として、腐食が最も大きかった M235 ピンの観察結果を、写真 3.4.1 に示す。

次に M227 ピンの燃料上端部を除く 5 つの観察位置の試験結果について述べる。同ピンの燃料上端部以外で内面腐食が観察されたのは、燃料部下端からの距離が 475.4 mm の 90 度方向のみであり、その量は  $5 \mu\text{m}$ （残留肉厚  $454.9 \mu\text{m}$ ）であった。その他の 4 つの観察位置に内面腐食は観察されなかつたが、被覆管肉厚は  $435.1 \mu\text{m} \sim 466.0 \mu\text{m}$  とバラツキがあった。図 3.4.4 に M227 ピンの各測定方向の燃料部下端からの距離と被覆管肉厚の関係を示す。被覆管肉厚は、燃料下部と比較して、燃料中心付近で大きく、燃料上部で小さくなる傾向にあった。これらの肉厚の変化については、次節の中で検討する。

### 3.5 試験結果の検討

試験の結果、燃料部、上下の反射体、プレナム及びスプリングの各部に特徴的な信号が出力した。出力した信号の検討にあたっては、内面腐食、被覆管内部構造物、外面腐食に加え、渦電流の浸透深さの式で示される影響因子を考慮する必要がある。浸透深さは次式①で表わされる。

$$\text{浸透深さ } (\delta) = 1/\sqrt{(\pi f \mu \sigma)} \quad \dots \quad (1)$$

ここで、 $f$ :試験周波数、 $\mu$ :透磁率、 $\sigma$ :導電率を指す。透磁率 ( $\mu$ ) は磁束の通しやすさ、導電率 ( $\sigma$ ) は電流の流れやすさを示す。

①式から、試験周波数が一定の場合、 $\sigma$  または  $\mu$  が大きくなると渦電流の浸透深さは浅くなる。すなわち渦電流の大きさは、 $\sigma$  及び  $\mu$  の影響を大きく受ける。 $\sigma$  は試験体の化学成分の影響を、 $\mu$  は結晶構造や内部応力の影響を強く受ける性質がある。

以上のように  $\mu$  及び  $\sigma$  の変化は、渦電流の発生に影響を与えることが考えられる。したがって、試験結果の検討にあたっては、被覆管内外面の腐食、被覆管内部構造物の影響に加え、 $\mu$  及び  $\sigma$  への影響因子についても検討する必要がある。以降に、それぞれの検討結果を示す。

### 3.5.1 被覆管内部構造物の影響

燃料ピンの被覆管内には、主に内部構造物として①被覆管と同じオーステナイト系のステンレス鋼製の上下の反射体、② $UO_2$  を主成分とする燃料ペレット（以下、ペレットという）が装填されている。①については、照射の影響（中性子照射量）が小さく、その化学成分は被覆管とほぼ同等であり、 $\mu$ 、 $\sigma$  もほぼ被覆管と等しいと考えられる。したがって、内部構造物にも同様に渦電流が浸透するが、それは試験体に入ると急激に減衰することから、発生する渦電流は小さくなり、コイルの起電力は大きくなる。一方境界部では、二つの反射体は接触しているものの、そこで発生する渦電流は反射体部より大きくなり、コイルの起電力は反射体より小さくなる。したがって標準被覆管との差（渦電流信号）は、反射体部よりその境界部で大きくなつたと考えられる。

②については、 $UO_2$  の  $\sigma$  はステンレス鋼と比較して非常に小さく、発生する渦電流は極めて小さくなる。したがって、ペレット部の渦電流信号への影響は小さいと考えられる。

### 3.5.2 被覆管の外面腐食の影響

プレナム部は、照射の影響が小さく、被覆管の化学成分、結晶構造が照射前とほぼ同じであり、 $\mu$  および  $\sigma$  の変化による渦電流信号への影響は小さいと考えられる。しかしながら、渦電流探傷試験の結果、同部には繰り返し信号等の特徴的な信号が出力していた（表 3.4.1 参照）。この信号を詳細にみると、各ピンの繰り返し信号の間隔はおよそ 155 mm またはその半分のおよそ 70 ~ 80 mm であった。155 mm は、燃料ピンのラッピングワイヤ（以下、ワイヤという）巻き付け間隔と同じであることから繰り返し信号は、自己または隣接ピンのワイヤと被覆管の接触に起因する信号である可能性が考えられる。し

たがって、対面する隣接燃料ピンの渦電流探傷信号を詳細外観による被覆管上の傷とともに比較した。以下にその結果を示す。

#### (1) 隣接ピンの渦電流信号及び被覆管上の傷の比較

図 3.5.1～3.5.4 に、それぞれ M227, M228, M229, M230, M231 ピンの 180 度方向とそれに対面する 0 度方向の渦電流信号を比較して示す。その結果、図 3.5.1 に示す M227 ピンと対面する M228 ピン、および図 3.5.2 に示す M228 ピンと対面する M229 ピンのプレナム部の信号は酷似していた。一方、図 3.5.3 および 3.5.4 に示す M229 ピンと対面する M230 ピン、M230 ピンと対面する M231 ピンについてはそれぞれの信号に相関は見られなかった。以下にその詳細を示す。

M227 ピンと対面する M228 ピンは、両ピンのほぼ同軸位置におよそ 155 mm 間隔でパルス状の信号が出力していた。ところが、信号出力に関する被覆管上の傷は観察されず、ワイヤと信号の相関は確認できなかった（図 3.5.1 参照）。

M228 ピンと対面する M229 ピンの信号は、詳細にみると、M228 ピンには大小 2 種類のパターン信号があった（図 3.5.2 中①と②）。これに対し M229 ピンの信号は M228 ピンの①と②に相当する信号の境界は明確ではなかった。二つのパターン信号はともにある程度の幅（長さ）があり、連続するこれらの信号の長さの和はおよそ 155 mm であった。また、M228 ピンの被覆管上の傷は、この 155 mm 間隔の信号が一旦小さくなる軸位置に観察された（図 3.5.2 参照）。

M229 ピンと対面する M230 ピンには、ピーク信号ではなく、およそ 150 mm 長さに渡りほぼ同じ大きさの信号が出力し、これを一つのパターンとして、同じ信号を繰り返していた。M230 ピンの被覆管上の傷は、M229 ピンの二つのパターン信号の間に位置していたが、M229 ピンの被覆管上の傷は信号との相関は確認できなかった（図 3.5.3 参照）。

M230 ピンには、約 155 mm 長さに渡りほぼ同じ大きさの信号が出力し、これを一つのパターンとして同じ信号が繰り返し出力していた。一方、これに対面する中心ピンである M231 ピンは、パターン信号の長さが M230 ピンの半分である約 75 mm であり、これを一つのパターンとして、信号がいくつも繰り返されていた。両燃料ピンの被覆管上の傷は M231 ピンのパターン信号の間に確認されたが、M230 ピンと傷との相関は確認できなかった（図 3.5.4 参照）。

#### (2) 被覆管外面のナトリウム腐食の影響検討

(1)の隣接ピンの信号および詳細外観観察による被覆管上の傷との比較結果から、被覆管上の傷が信号としてそのまま出力している可能性は低いと考えられる。しかしながら、M227 ピンと M228 ピン、M228 ピンと M229 ピンのプレナム部の信号は酷似していること、信号の間隔がワイヤ巻き付けピッチと同じ 155 mmであることから、ワイヤが信号に何らかの影響を及ぼしていることは間違いない。その要因としては、冷却材であるナトリウムによる被覆管外面の腐食が考えられる。

ナトリウム腐食は、その流速、温度、酸素濃度、浸漬時間等によって影響される。流速については、その速さに比例して腐食も大きくなることが知られている。被覆管外面のナトリウムの流速は、自己ワイヤがある位置、あるいは対面する相手側の燃料ピンのワイヤがある位置では遅くなるが、逆に、ワイヤ位置を過ぎた、ワイヤがない位置ではその流れは速くなるものと推定できる。したがって、ワイヤ位置ではナトリウム腐食は小さく(被覆管肉厚：大、渦電流信号：小)、ワイヤがない位置ではナトリウム腐食が大きくなる(被覆管肉厚：小、渦電流信号：大)と考えられる。

M228 ピン 180 度方向の被覆管上の傷は、M229 ピン 0 度方向の二つのパターン信号の間にある。同様に M230 ピン 0 度方向の傷は M229 ピン 180 度のパターン信号間に、M230 ピン 180 度方向と M231 ピン 0 度方向の傷は M231 ピン 0 度方向のパターン信号間にある(図 3.5.2～3.5.4 参照)。被覆管上の傷は、その位置に対面する相手側の燃料ピンワイヤがあったことを意味し、ワイヤ位置で信号が小さくなるという、前述の考察と一致している。

また一般に、自己ワイヤによるナトリウム流速低減効果は、隣接ピンのそれより大きいと考えられ、M228 ピン 180 度方向で見られたような二つの信号パターンが生じることもそれで説明できる(図 3.5.2 参照；自己ワイヤの後の信号②は、相手側ワイヤの後の信号①より大きい)。

ナトリウム腐食は温度にも影響され、温度が高いと腐食量も大きくなる。そのため、集合体コーナーの燃料ピンである M227, M235 ピンの隣接ピンがない測定方向あるいは燃料ピンの下部側ではその腐食量が少なくなり、信号は小さくなると予想できる(図 3.4.1～3.4.3 参照)。

3.4.2 項で述べたように、内面腐食がないにもかかわらず燃料上部と下部の被覆管肉厚に差が生じた原因是、このナトリウム腐食によるものと判断できる。ナトリウムによる被覆管外面腐食については、燃料ピン重量がわずかであるが、装荷前と比較して減少する傾向とも一致していた<sup>3)</sup>。

### 3.5.3 照射による信号への影響について(燃料部)

被覆管に誘導される渦電流が変化する原因には、被覆管自体の電磁気的特

性（導電率 $\sigma$ および透磁率 $\mu$ ）の変化がある。 $\sigma$ は被覆管の化学成分に強く影響され、 $\mu$ は結晶構造、析出物及び内部応力等によって強く影響される。上野らは照射による漏洩磁束密度の変化について試験を行っており、 $0.8 \times 10^{26} \text{ n/m}^2$  ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) 程度以上の照射で磁気変化と関連すると考えられる組織変化が促進され、漏洩磁束密度が非照射材と比較して増加していることを報告している<sup>1)</sup>。具体的な組織変化としては、欠陥集合体の生成や元素濃度分布の変化である。この報告から、照射の影響が大きい燃料部の被覆管の $\mu$ は標準被覆管と比較して大きくなっていると考えられる。一方 $\sigma$ は、被覆管の金属組織内の自由電子の移動が妨げられるような状態にあると、その値は小さくなることから、標準被覆管と比較して小さくなっていると考えられる。このように $\mu, \sigma$ とともに照射によって影響される。

以上から渦電流信号は照射の影響を受けるが、照射による渦電流信号の変化は、 $\mu$ と $\sigma$ のそれぞれの変化の大きさによって、発生する渦電流の大きさが変化するため、一様に整理できるものではないと考えられる。ここで、図 3.4.4 に示した、燃料下端からの軸位置と被覆管肉厚の関係を参照すると、燃料中心付近でその肉厚は大きくなっている。この結果から、燃料中心付近ではヘリウムバブルによるスエリングが生じていることも考えられ、 $\mu, \sigma$ が燃料上下部とは異なることが予想される。

### 3.5.4 被覆管内部圧力の影響について(燃料部)

被覆管には 2 つの内部圧力がかかる可能性がある。一つは、ペレットと被覆管の機械的相互作用によるもの (PCMI)、もう一つは、照射によりペレットから発生する気体の核分裂生成物 (以下、FP ガスという) によるものである。被覆管に圧力が加わるとその組織が変化し、特に $\mu$ に影響を及ぼす可能性がある。したがって被覆管にかかる圧力が及ぼす渦電流信号への影響について、前者は金相観察結果を、後者はピンパンクチャ試験結果と X 線ラジオグラフィー観察結果をもとに検討した。その結果を以下に示す。

#### (1) 金相観察結果との比較

図 3.5.5 に、M227, M231, M235 ピンの 0 度方向の渦電流探傷結果を金相観察結果による被覆管とペレットのギャップの有無とともに示す。金相観察の結果、燃料下部ではギャップは閉じ、中心部、上端部では、開く傾向にあるが、M235 ピンでは上部でもギャップが閉じていたことが確認されている<sup>2)</sup>。ギャップが閉じていた下部側の中でも、局部的な外径増加を伴う下端部では、信号は 3 本の燃料ピンとも同様に、インシュレータペレットとの境界部付近で立ち上がっていた。しかしその一方で、ギャップが閉じていた M235 ピンの

上部では、下端部に相当するような信号は確認できなかった。

### (2) ピンパンクチャ試験結果及びX線ラジオグラフィ観察結果との比較

ピンパンクチャ試験の結果、FPガスはリークすることなく燃料ピン内に保持されていたことがわかっている。放出率が最も高かったのはM228ピンの88.8%、最も低かったのはM235ピンの72.2%であり<sup>3)</sup>被覆管には高い圧力がかかっていたことが予想できる。被覆管にかかる圧力は、燃料ペレット間ギャップが生じた場合には、PCMIの分だけ小さくなると考えられる。また内圧が信号に影響を及ぼす場合、そのペレット間ギャップが生じている部分では測定4方向で共通した信号が出力するはずである。

X線ラジオグラフィ観察結果を参照すると、1mm以上のペレット間ギャップはM231ピンの軸位置484.4mm～492.8mm間の8.4mm及び503.5mm～506.8mm間の3.3mm部分に観察された<sup>3)</sup>。M231ピンの4方向の探傷結果の比較をX線ラジオグラフィ観察結果とともに図3.5.6に示す。同図から、ギャップが開いていた軸位置2箇所で信号が小さくなるという、測定4方向に共通した信号が出力していることがわかった。

### (3) 被覆管内部圧力による $\sigma$ および $\mu$ への影響の検討

上野らは照射によって生成する欠陥や元素濃度分布の変化は、母相である非磁性のオーステナイト相の安定性を低下させ、荷重負荷によって強磁性相の生成を引き起こす可能性があると報告している。しかしながらその一方で、照射によりヘリウムバブルが生成した場合には、荷重負荷による強磁性相の生成が抑制されるとも報告している<sup>11)</sup>。これらの報告から、被覆管内部圧力の影響は、照射によるヘリウムバブル生成の有無で分離して検討する必要がある。

まず、ヘリウムバブルが生成されない場合、被覆管に圧力がかかると、標準被覆管と比較して、その $\mu$ が大きくなる。 $\sigma$ も圧力に影響されるが、その影響は $\mu$ より小さく、変化量は $\sigma \ll \mu$ であると考えられる。一方、ヘリウムバブルが生成された場合には、圧力による $\mu$ の変化は前者に比べて小さくなると考えられる。

図3.4.4を参照すると、ヘリウムバブルが生成しているのは被覆管肉厚が大きくなつた燃料中心付近部であると考えられる。したがって、(1)及び(2)項の結果は、ヘリウムが生成していないものとして考察するのが妥当である。以下に、考察結果を示す。

(1) より、被覆管と燃料ペレット間ギャップが閉じていた燃料下端部で信号が一旦大きくなつたのは、燃料ペレットが被覆管に圧力をかけたことにより

$\mu$  が大きくなり、被覆管に発生した渦電流が大きくなる。その結果、コイルの起電力は標準被覆管と比較して小さくなり、結局、標準被覆管とのコイルの起電力の差である渦電流信号は大きくなつたと考えられる。

次に(2)より、被覆管にかかる圧力が小さくなるペレット間ギャップ部で、信号が一旦小さくなつたのは、 $\mu$  がペレット部より小さくなつたためと考えられる。そのため、ギャップ部で発生する渦電流は小さくなり、同様に考えて渦電流信号は小さくなると考えられる。

以上から、照射によりヘリウムバブルが生成しない場合は、圧力がかかると、標準被覆管と比較して  $\mu$  は大きくなり、試験結果として得られる渦電流信号は大きくなると考えられる。一方、ヘリウムバブルが生成した場合には、それが  $\mu$  を下げる方向に働くことも考えられることから、燃料中心部付近と燃料上下部では、圧力が及ぼす渦電流信号への影響は異なると考えられる。

### 3.5.5 照射済み燃料ピンの渦電流信号への影響因子について(まとめ)

前項までの検討結果から、渦電流信号は照射に伴う様々な因子によって変化する。具体的な影響因子は、照射そのものによる被覆管の組織変化（照射損傷）による電磁気的特性の変化、照射によって発生する FP ガス及び PCMI による被覆管への内圧、それにナトリウムによる被覆管の外面腐食である。燃料部の被覆管ではこれらが複雑に絡み合つて渦電流が発生する。

すべての燃料ピンの燃料部には多種多様な信号が output していたが、これには上記の因子が影響していることがその理由であると考えられる。今後照射の影響について、組織変化と透磁率と導電率の関係について詳細に調べたうえで、信号への影響を照射損傷や内圧によるものと、物理的要因（傷、腐食等）によるものに分離して評価する必要がある。

#### 4. おわりに

φ 6.55 mm の 15-15-Ti 鋼模擬燃料被覆管及び、PFC040 にて照射した同仕様燃料ピンを対象に、渦電流探傷技術を用いた被覆管の内面腐食探傷試験を実施した結果、以下のことがわかった。

- ① φ 6.55 mm 15-15-Ti 鋼燃料ピン被覆管の内面腐食探傷の周波数には、「常陽」及び「もんじゅ」仕様燃料ピンの探傷において使用した周波数 32kHz を適用できることを確認した。
- ② φ 6.55 mm 15-15-Ti 鋼模擬燃料被覆管の渦電流信号値と被覆管肉厚には相関があり、肉厚が減少すると信号値は大きくなる傾向を示した。この傾向は「常陽」及び「もんじゅ」仕様の模擬燃料被覆管の傾向と一致していた。
- ③ 照射した燃料ピンのプレナム部には、ナトリウム腐食による影響が信号として出力している可能性がある。
- ④ 被覆管の電磁気的特性は照射により変化し、渦電流信号に影響を与えることがわかった。照射により被覆管の透磁率は大きくなり、導電率は小さくなると予想される。
- ⑤ 照射した被覆管への FP ガスや燃料ペレットによる圧力負荷により、透磁率が大きくなることが予想された。これは、燃料ペレットと被覆管接触した燃料下端部で信号が大きくなり、FP ガスによる圧力が小さくなる燃料ペレット間ギャップ部で渦電流信号が小さくなることと一致していた。

#### 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㈱ 大谷 昭氏、またデータの評価にご協力していただいた方々を始め、ご指導いただいた方々に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- (1) 上野文義ら：原研－サイクル機構 融合研究成果報告書「照射環境における原子炉構造材料の劣化現象に関する研究」  
JAERI-Research 2005-023 JNC TY9400 2005-013(2005)
- (2) 田中康介、前田宏治：「高燃焼度 MOX 燃料 PFC040 の組織再編とギャップ幅変化」  
JNC ZN9410 2004-010(2004)
- (3) 佐々木新治、勝山幸三、阿部和幸、永峯剛、松元慎一郎：「日仏交換照射燃料集合体 PFC040 の照射後試験－燃料ピンの非破壊試験結果－」 JNC ZN9410 2004-004(2004)
- (4) 宮地紀子、永峯剛、勝山幸三、菊地晋、松元慎一郎：「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－」 JNC TN9410 2003-012(2003)
- (5) 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)
- (6) 照射施設運転管理センター 照射管理課：「「常陽」照射試験サイクル報（第 35 サイクル）」 JNCTN9440 2000-008 (2000)
- (7) 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
- (8) 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
- (9) 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
- (10) 浅賀健男、立邊和明、廣沢孝志、小山真一、櫛田尚也、井上賢紀：「「常陽」 MK-II  
炉心燃料挙動評価（中間報告）－第 4 分冊：燃料要素挙動－」 PNCZN9410 91-236  
(1991)

表3.2.1 PFC040(C4F)の照射条件

| 集合体名称  | PIE No. | 照射条件           |         |      |                     |   |
|--------|---------|----------------|---------|------|---------------------|---|
|        |         | 照射日数<br>(EFPD) | サイクル    | 装荷位置 | 集合体最高<br>燃焼度(GWd/t) | 中性子照射量※<br>( $10^{26}$ n/m <sup>2</sup> ) |
| PFC040 | M2      | 1019.33        | 16-23'  | 3C2  | 143.90              | 22.29                                     |
|        |         |                | 23"-23" | ラック  |                     |   |
|        |         |                | 24-27   | 3C2  |                     |   |
|        |         |                | 28-29'  | ラック  |                     |   |
|        |         |                | 30-35   | 3C2  |                     |   |
|        |         |                |         |      |                     |   |

※ $E \geq 0.1\text{MeV}$ 

表3.2.2 涡電流探傷試験対象ピンの燃料上端部の照射条件

| ピン番号                                      | M227  | M228  | M229  | M230  | M231  | M232  | M235  | M239  |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 燃焼度<br>(GWd/t)                            | 84.24 | 82.22 | 80.46 | 78.93 | 77.65 | 76.61 | 75.00 | 77.89 |
| 中性子照射量<br>( $10^{26}$ n/m <sup>2</sup> )※ | 11.41 | 11.15 | 10.91 | 10.73 | 10.55 | 10.39 | 10.06 | 10.59 |
| 被覆管内面<br>温度(°C)                           | 531.9 | 564.8 | 572.0 | 571.1 | 569.2 | 566.3 | 504.5 | 568.8 |

※ $E \geq 0.1\text{MeV}$

表3.4.1 スプリング部及びプレナム部の信号の特徴

| ピン   |      | 信号の特徴      |         |       |             |
|------|------|------------|---------|-------|-------------|
|      |      | スプリング部     |         | プレナム部 |             |
| ピン番号 | 測定方向 | 短い間隔で大きく振幅 | 振幅は殆ど無し | 平坦    | 同じパターンの繰り返し |
| M227 | 0    |            | ○       | ○     |             |
|      | 90   |            | ○       | ○     |             |
|      | 180  |            | ○       |       | ○           |
|      | 270  |            | ○       | ○     |             |
| M228 | 0    |            | ○       |       | ○           |
|      | 90   |            | ○       |       | ○           |
|      | 180  |            | ○       |       | ○           |
|      | 270  |            | ○       |       | ○           |
| M229 | 0    |            | ○       |       | ○           |
|      | 90   |            | ○       |       | ○           |
|      | 180  |            | ○       |       | ○           |
|      | 270  |            | ○       |       | ○           |
| M230 | 0    |            | ○       |       | ○           |
|      | 90   |            | ○       |       | ○           |
|      | 180  |            | ○       |       | ○           |
|      | 270  |            | ○       |       | ○           |
| M231 | 0    |            | ○       |       | ○           |
|      | 90   |            | ○       |       | ○           |
|      | 180  |            | ○       |       | ○           |
|      | 270  |            | ○       |       | ○           |
| M232 | 0    |            | ○       |       | ○           |
|      | 90   |            | ○       |       | ○           |
|      | 180  |            | ○       |       | ○           |
|      | 270  |            | ○       |       | ○           |
| M235 | 0    | ○          |         |       | ○           |
|      | 90   | ○          |         | ○     |             |
|      | 180  | ○          |         | ○     |             |
|      | 270  | ○          |         | ○     |             |
| M239 | 0    |            | ○       |       | ○           |
|      | 90   |            | ○       |       | ○           |
|      | 180  |            | ○       |       | ○           |
|      | 270  |            | ○       |       | ○           |

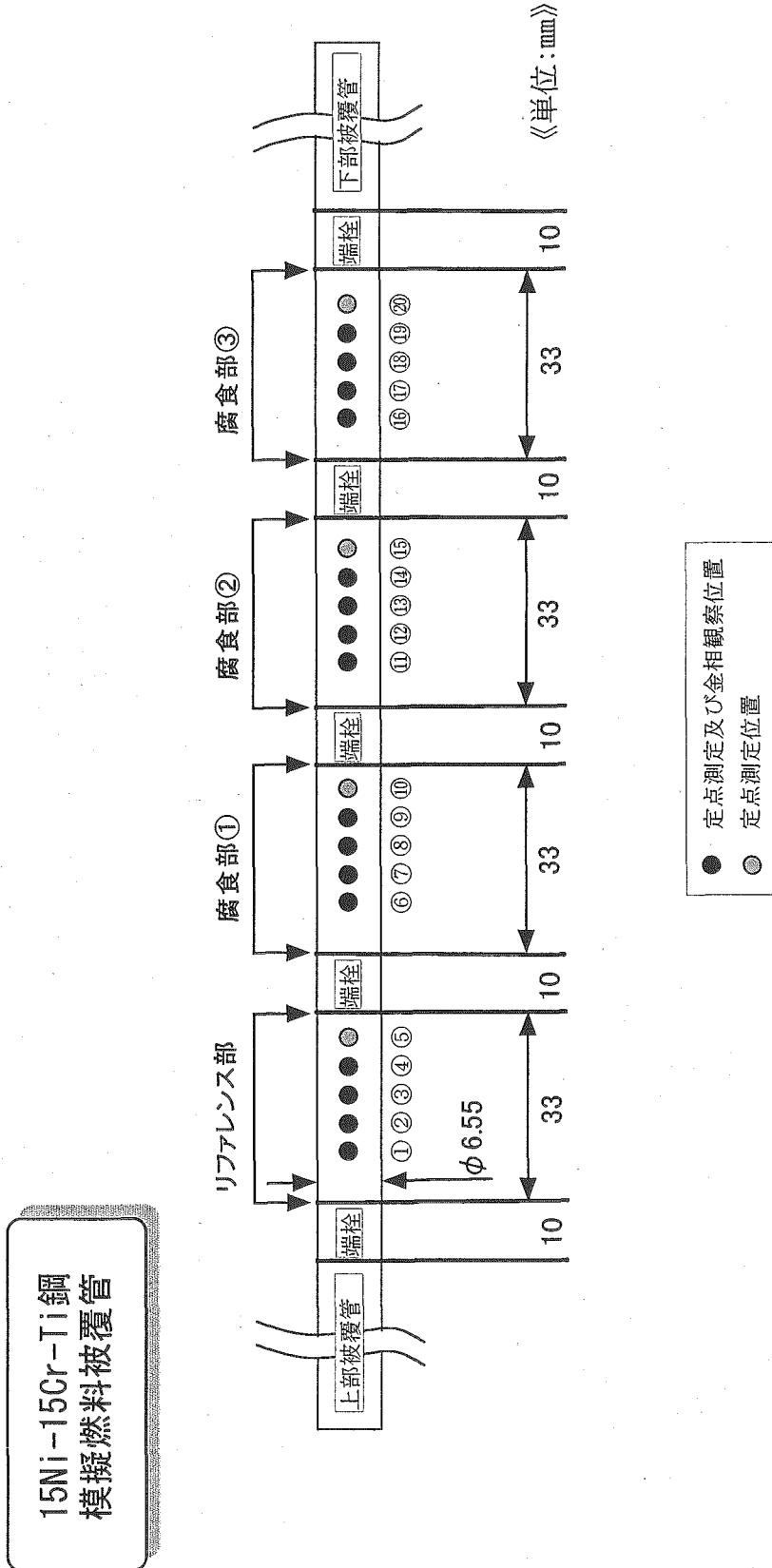


図2.1.1 模擬燃料被覆管仕様及び定点測定と金相観察位置

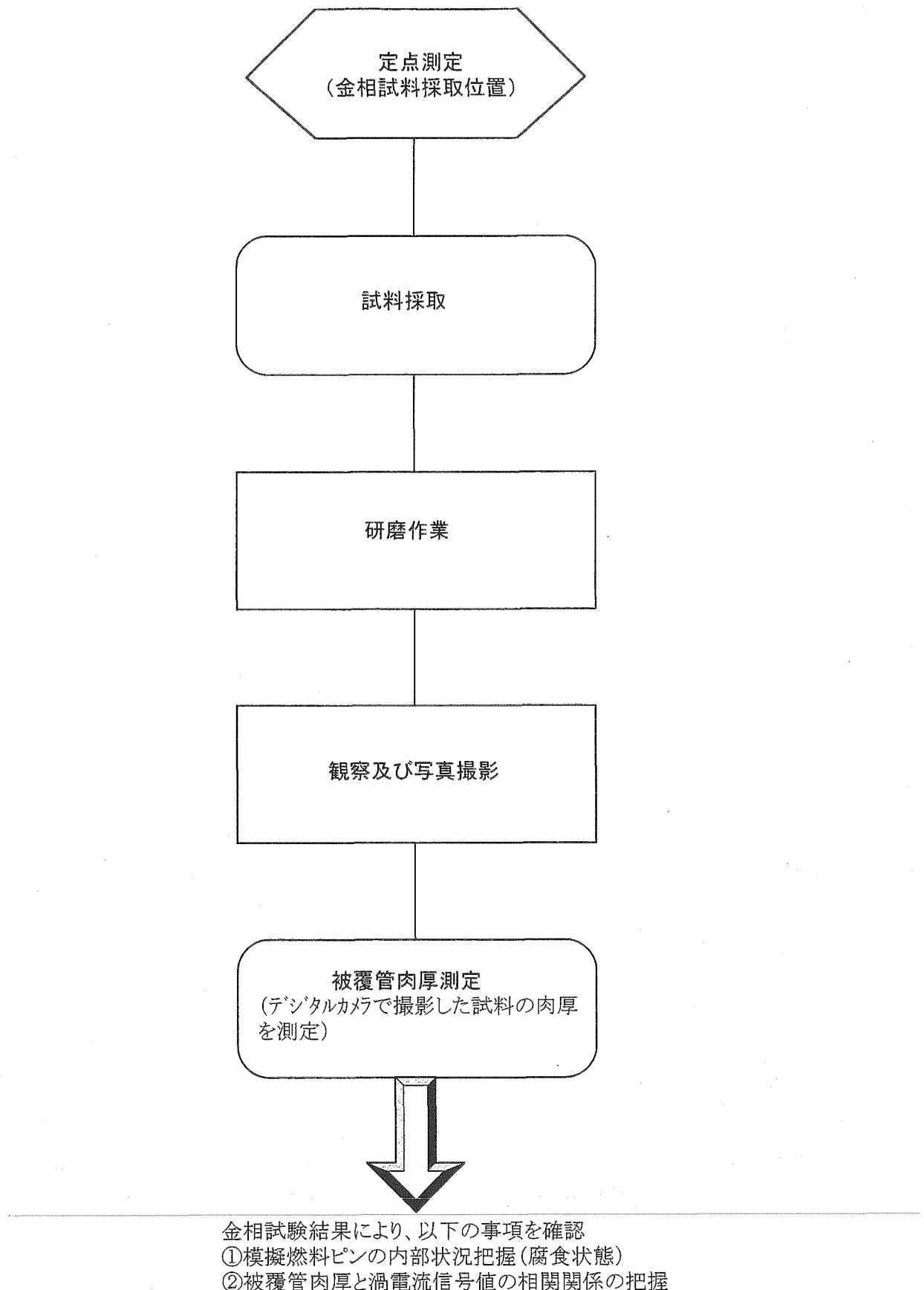


図2.1.2 金相試験フロー

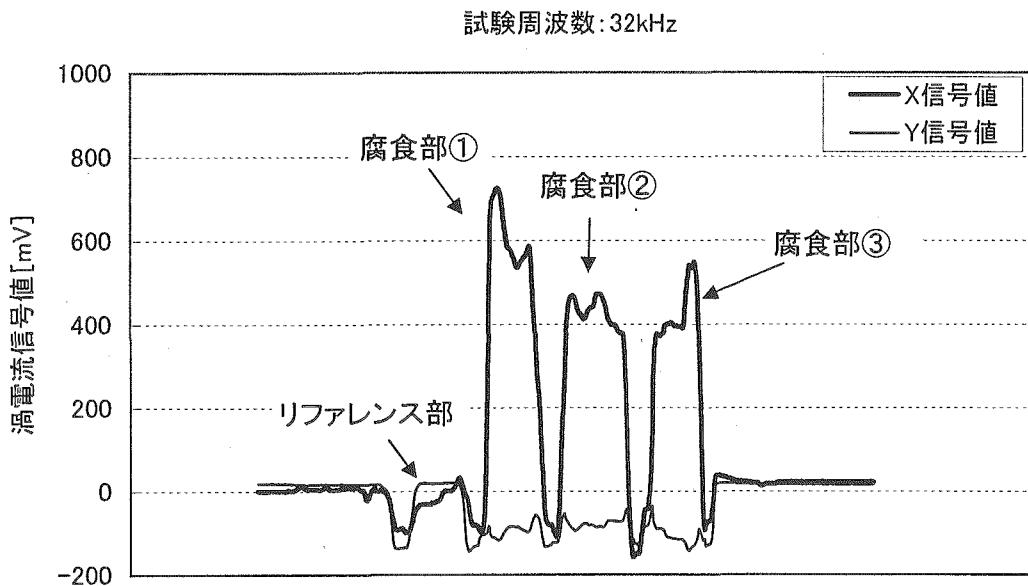


図2.2.1 模擬燃料被覆管の連続測定結果(測定方向:0度)

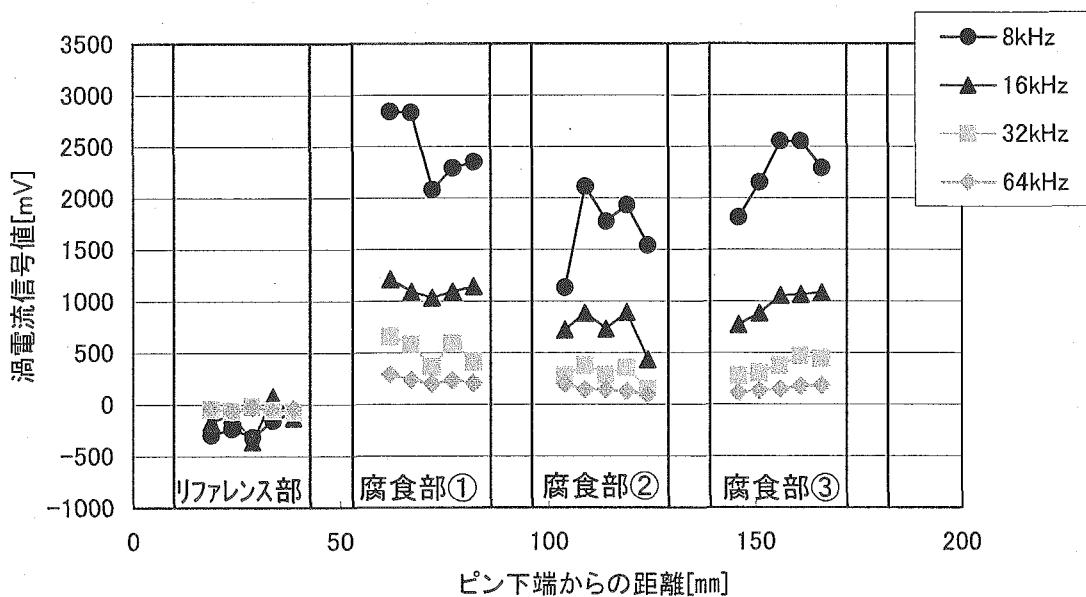


図2.2.2 各試験周波数における模擬燃料被覆管の  
定点測定結果(測定方向:0度)

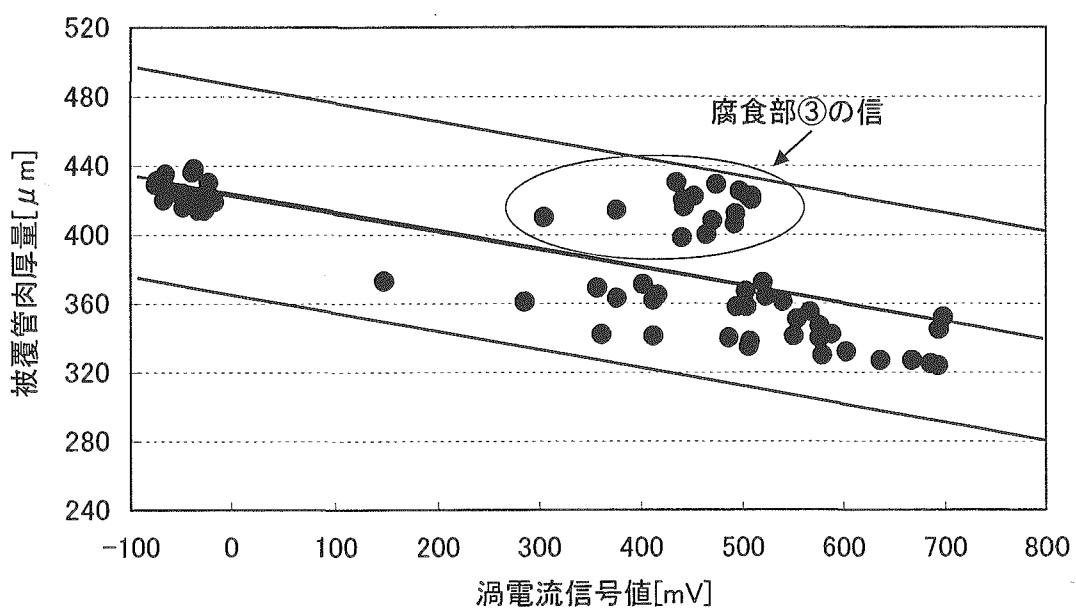


図2.3.1 漶電流信号値と被覆管肉厚の関係  
( $\phi$  6.55mm、15Ni-15Cr-Ti鋼ピン)

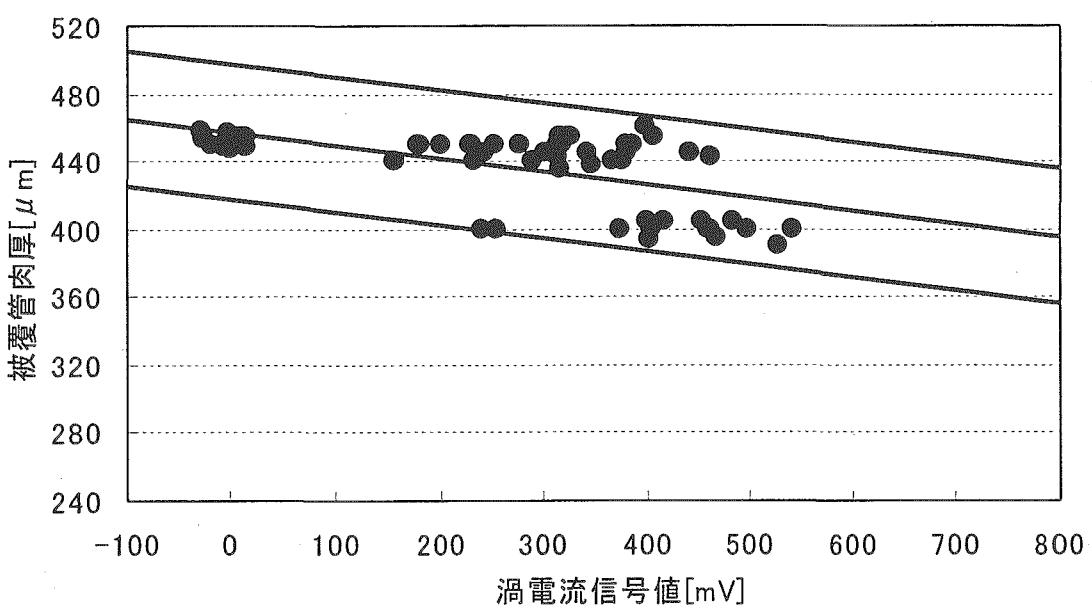


図2.3.2 漶電流信号値と被覆管肉厚の関係  
(「もんじゅ」仕様ピン)

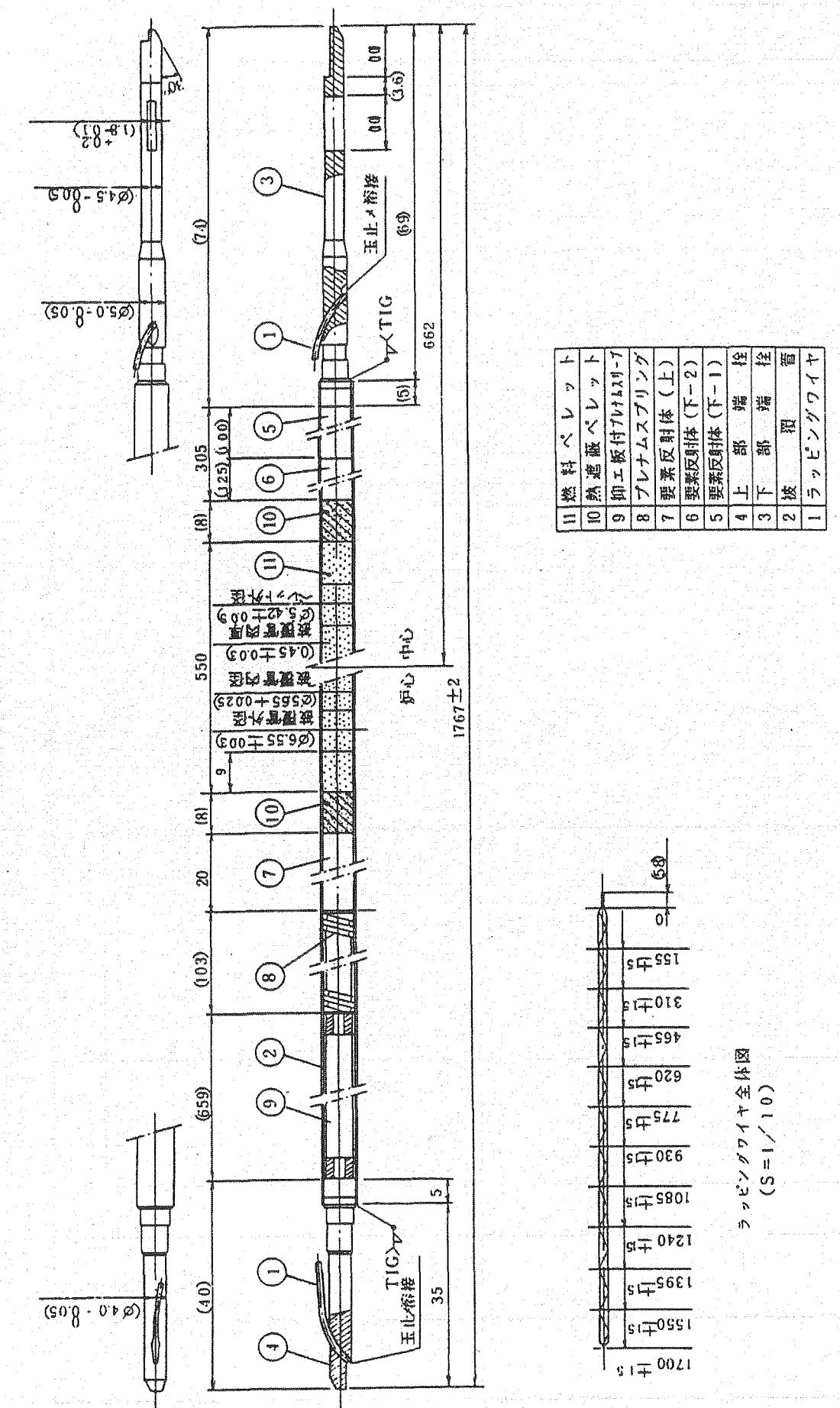
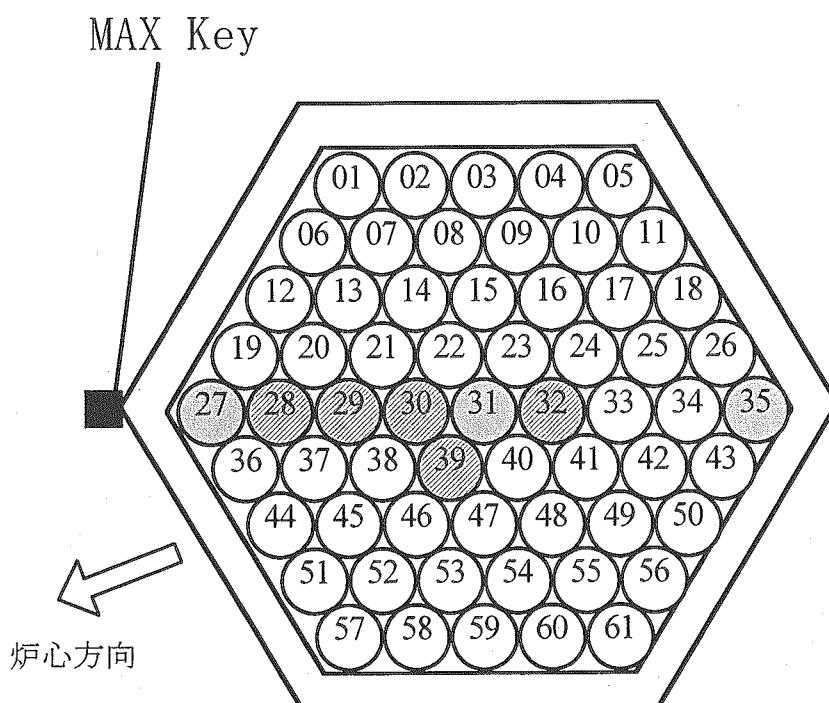


図 3.1.1 PFC040(C4F)の燃料ペレット構造図

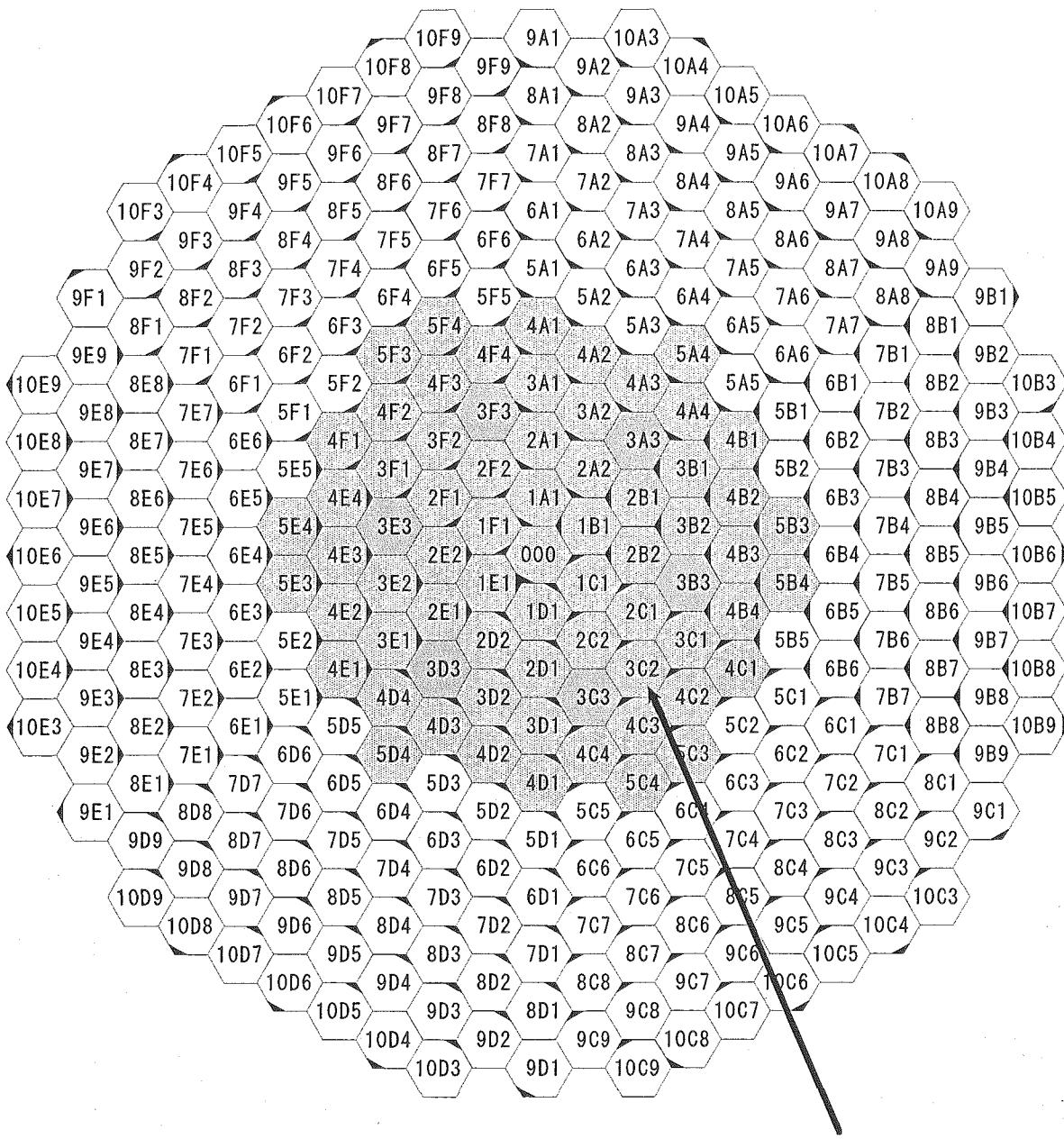


● 内面腐食探傷試験対象ピン

○ 内面腐食探傷試験及び金相試験対象ピン

※○内数字最初にM2をつけたものがピン番号である。  
(例:M2→M227)

図3.1.2 PFC040(C4F)の燃料ピン配置図



## PFC040(C4F)裝荷位置

## 炉心燃料集合体

制御棒

図3.2.1 「常陽」MK-II 炉心におけるPFC040(C4F)の装荷位置

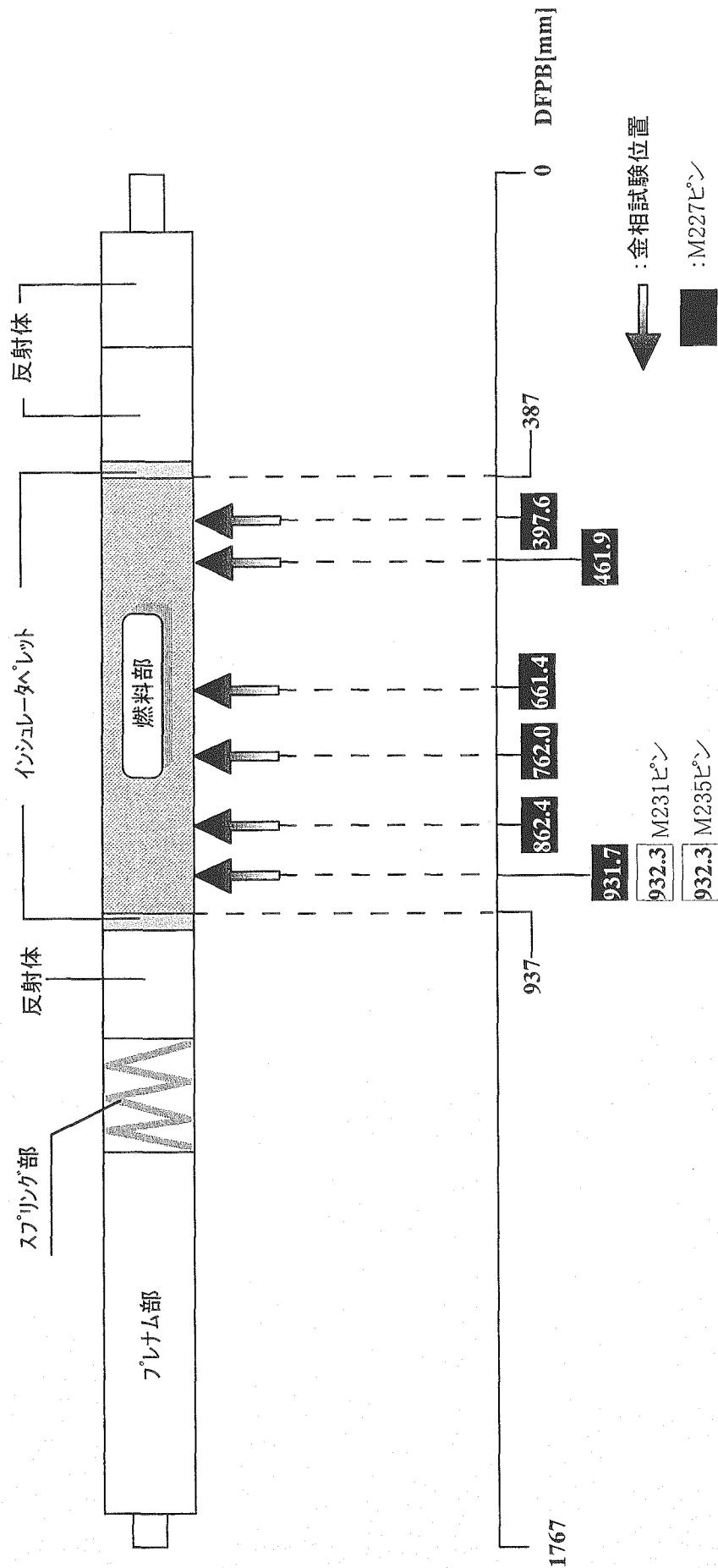


図3.3.1 M227,M231,M235ビンの金相試験位置

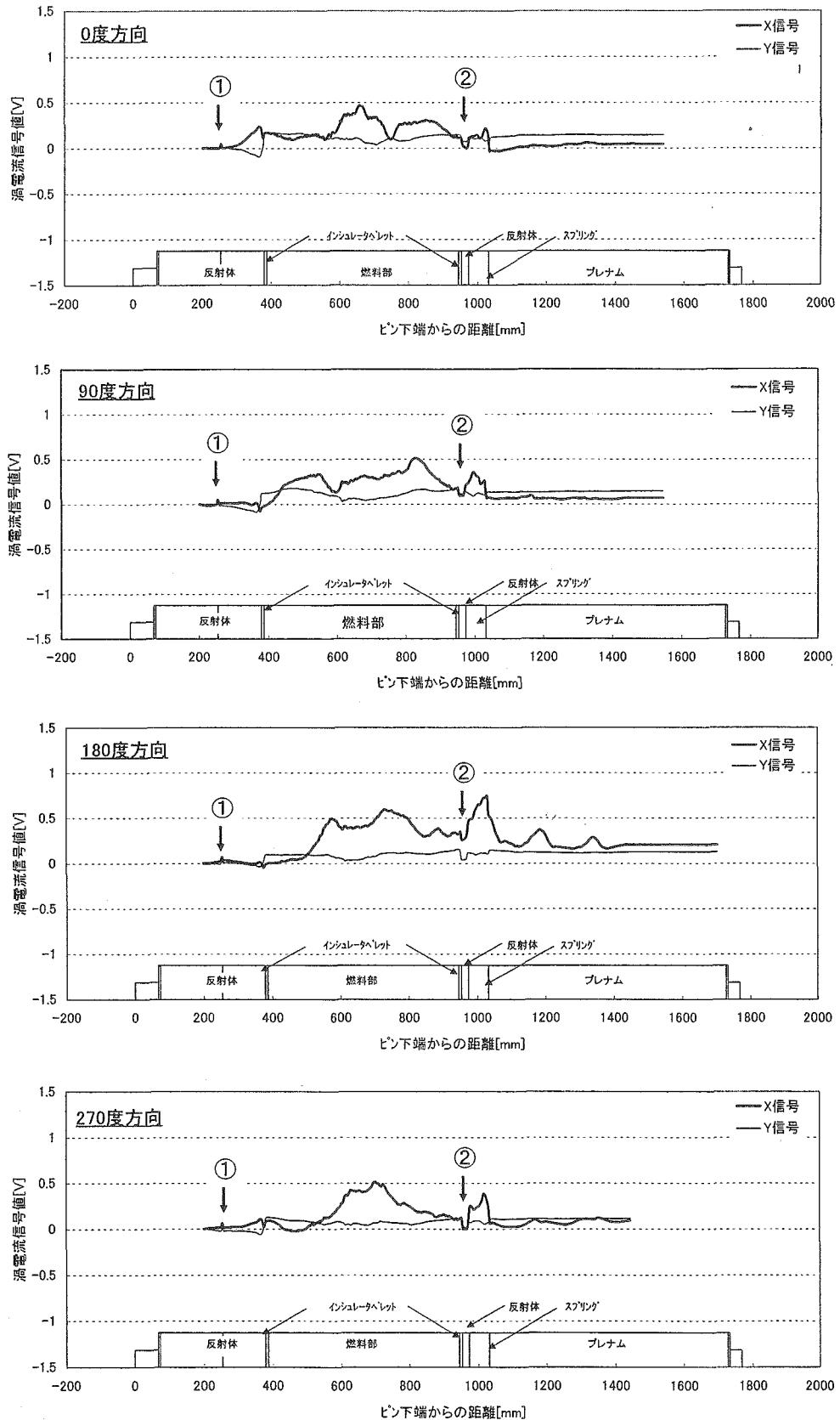


図3.4.1 燃料ピンの漏電流探傷試験結果(M227ピン)

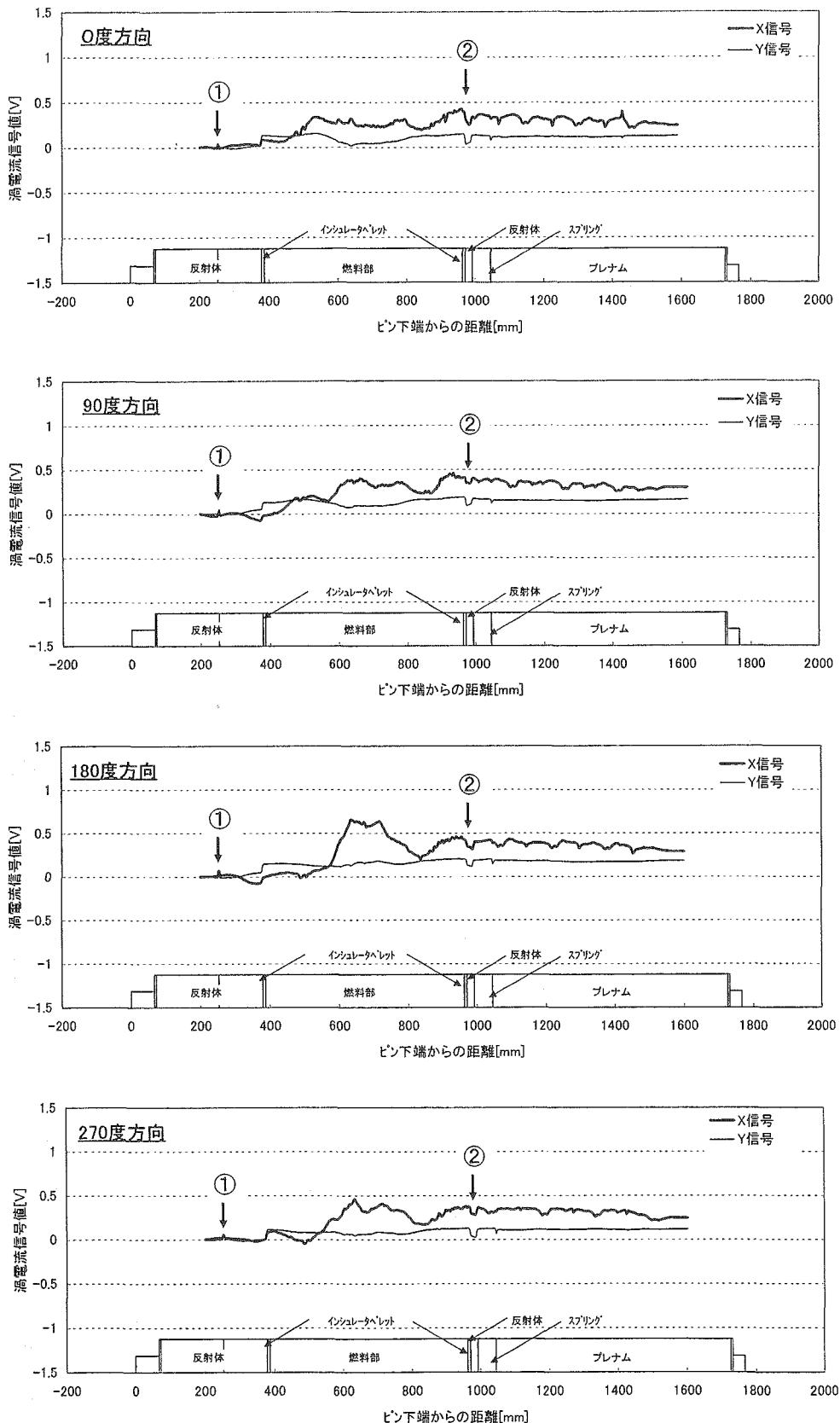


図3.4.2 燃料ピンの渦電流探傷試験結果 (M231ピン)

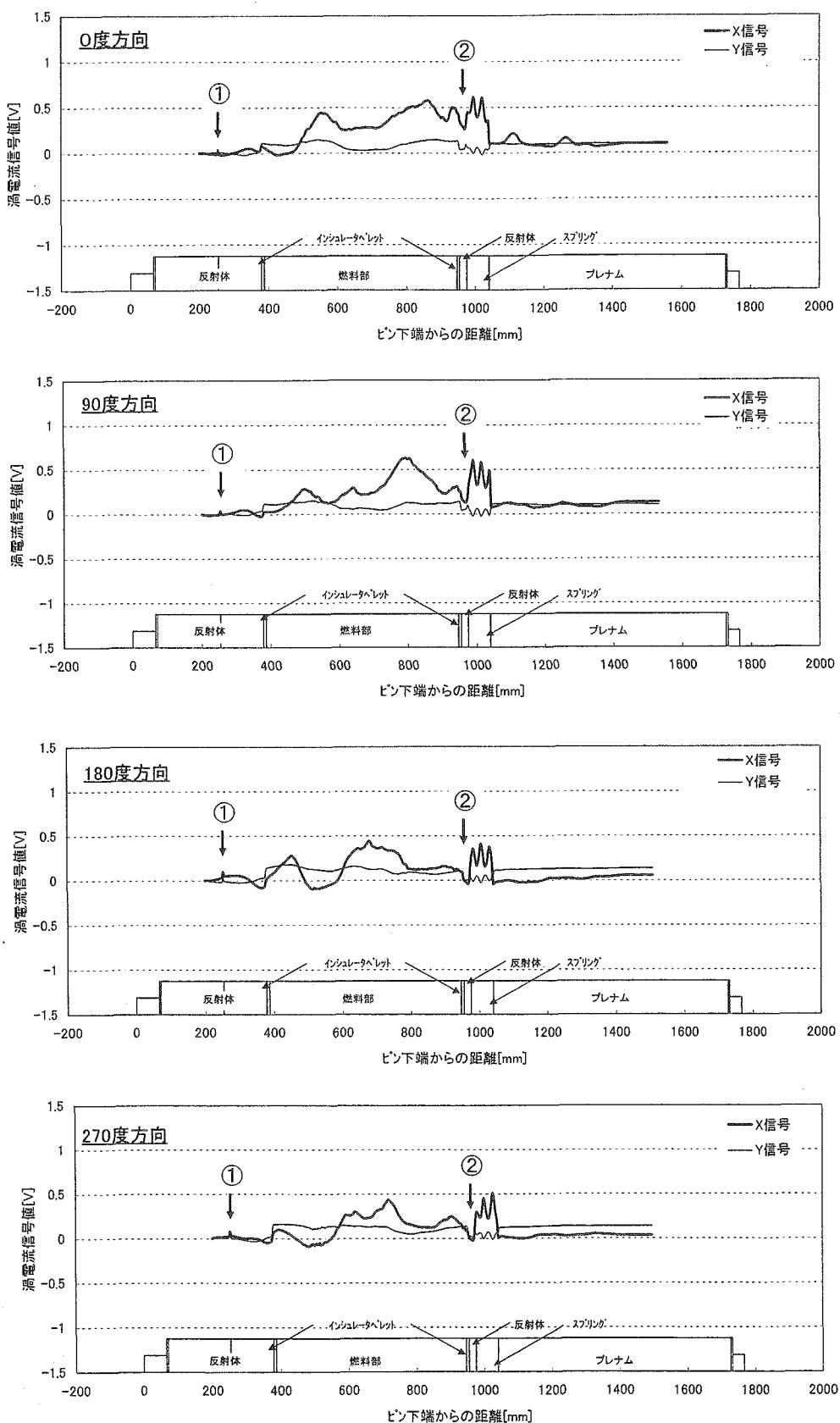


図3.4.3 燃料ピンの漏電流探傷試験結果(M235ピン)

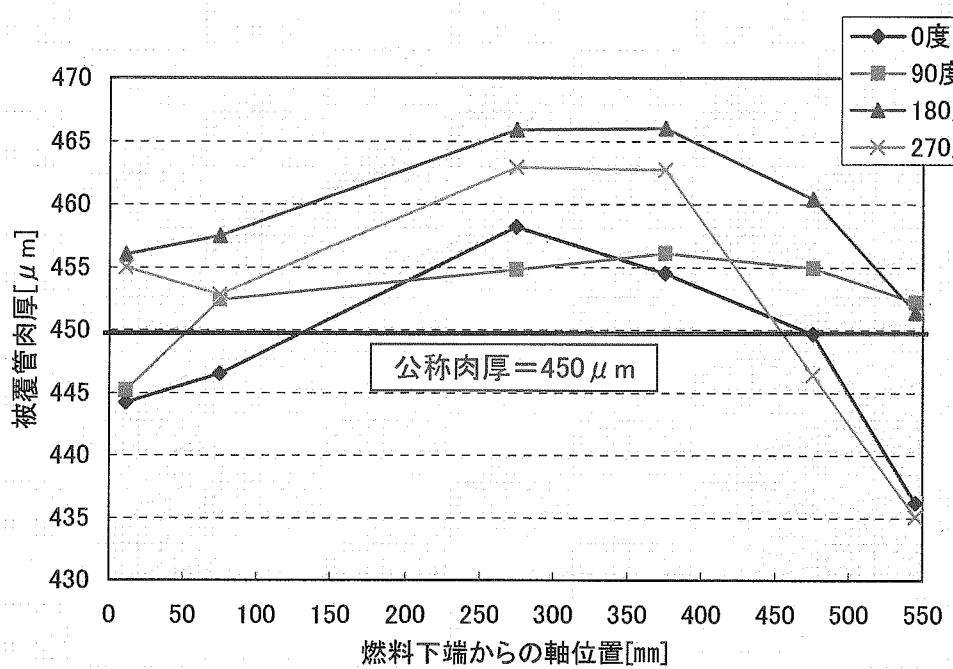


図3.4.4 M227ピン燃料部の被覆管肉厚観察結果

This is a blank page.

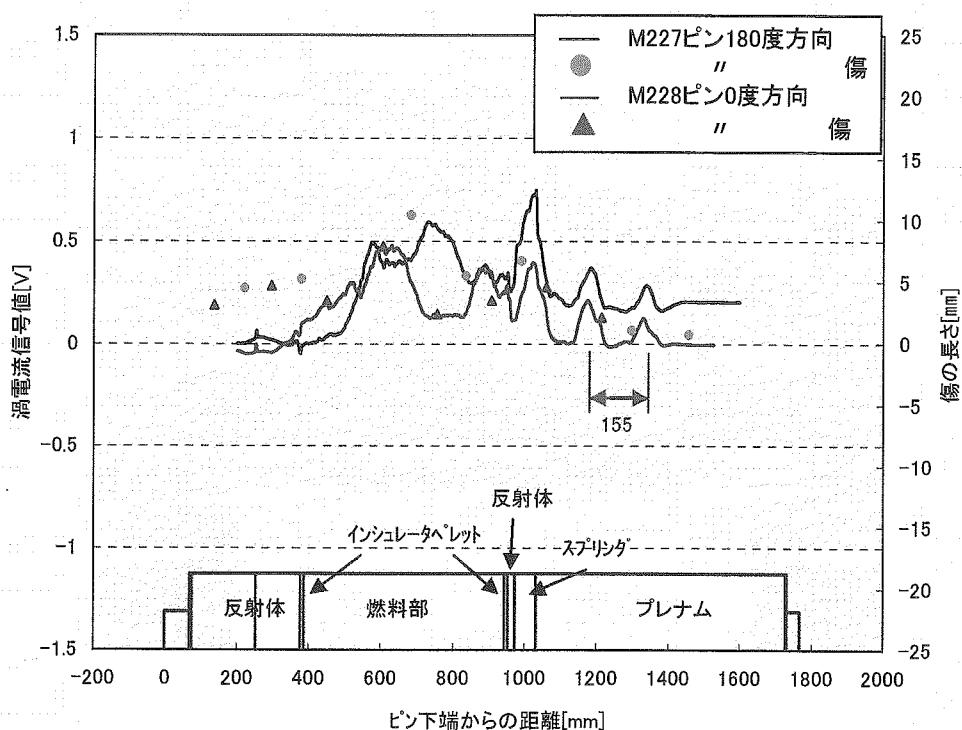


図3.5.1 M227ピン180度方向とM228ピン0度方向の渦電流信号の比較

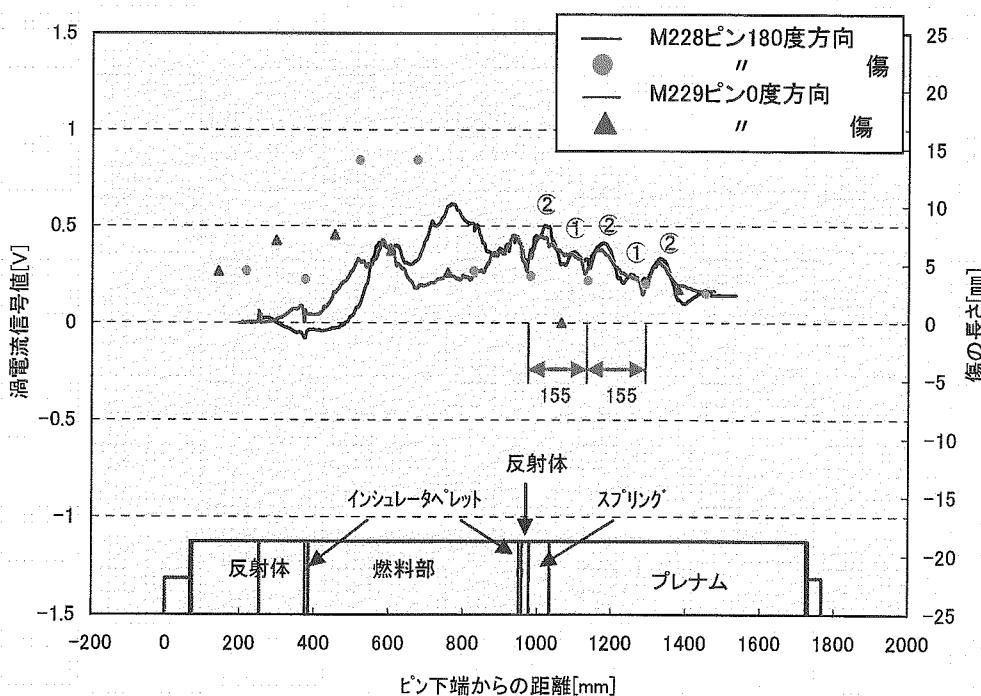


図3.5.2 M228ピン180度方向とM229ピン0度方向の渦電流信号の比較

This is a blank page.

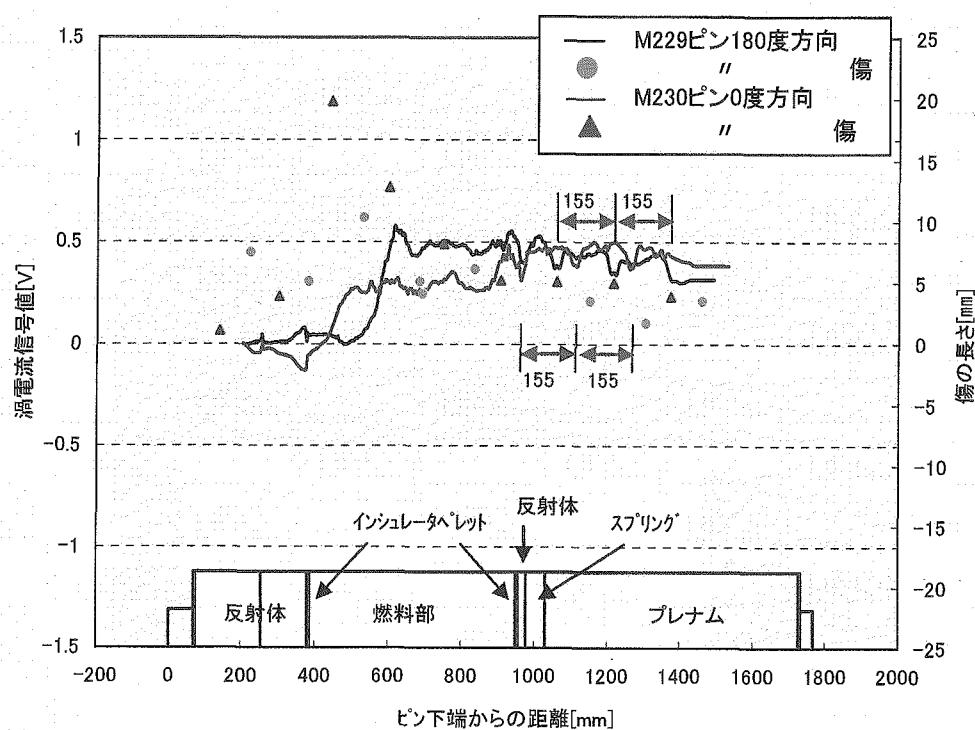


図3.5.3 M229ピン180度方向とM230ピン0度方向の渦電流信号の比較

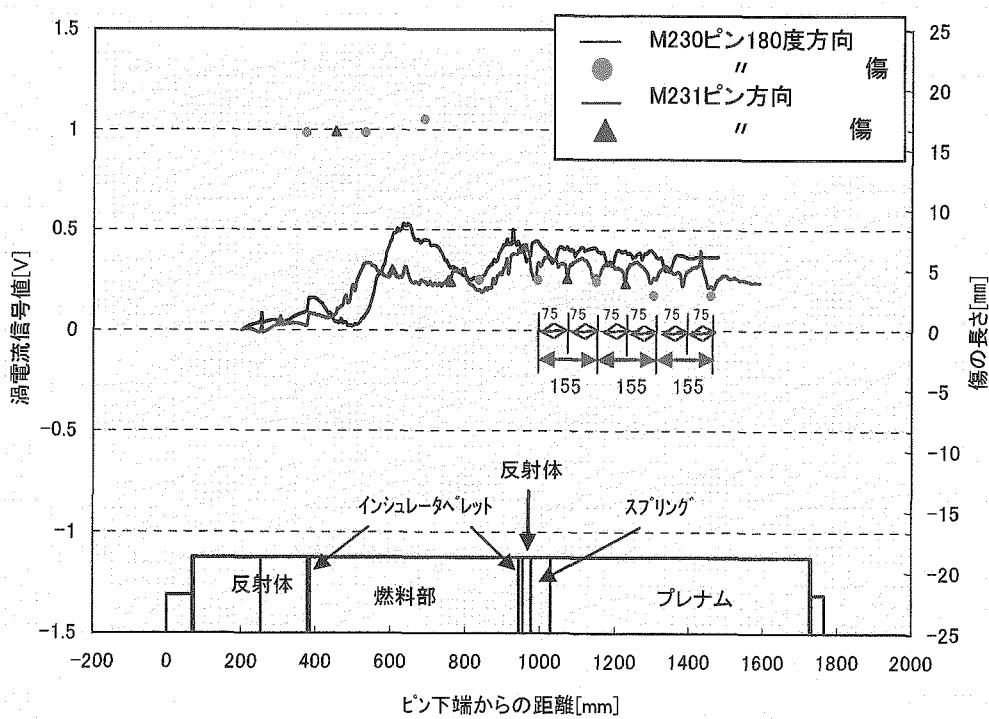


図3.5.4 M230ピン180度方向とM231ピン0度方向の渦電流信号の比較

This is a blank page.

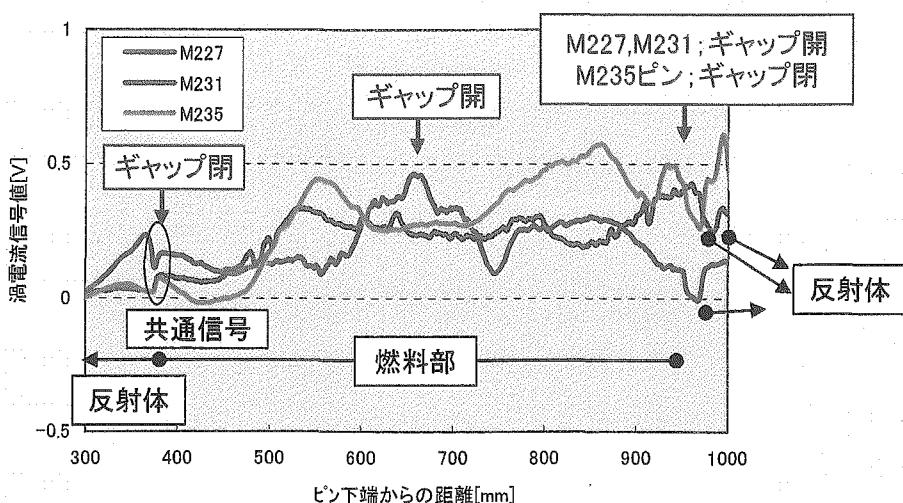


図3.5.5 ペレット-被覆管間ギャップと渦電流信号の比較  
(M227,M231,M235ピン)

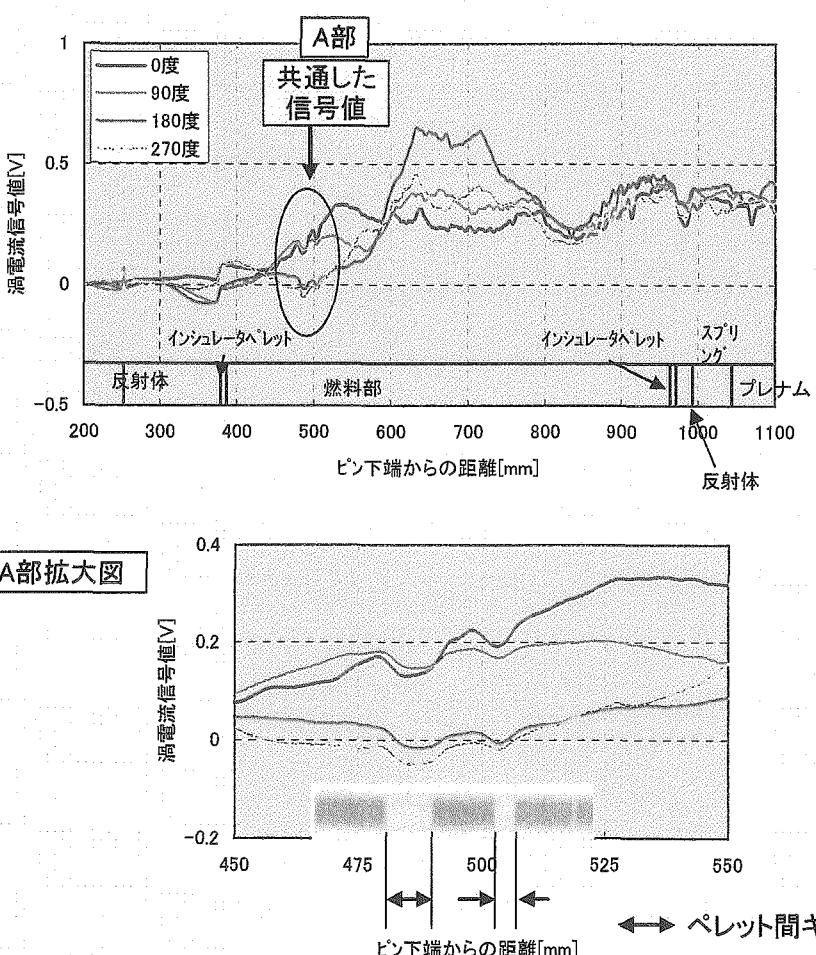


図3.5.6 M231ピンの渦電流探傷結果と  
X線ラジオグラフィー観察結果の比較

This is a blank page.

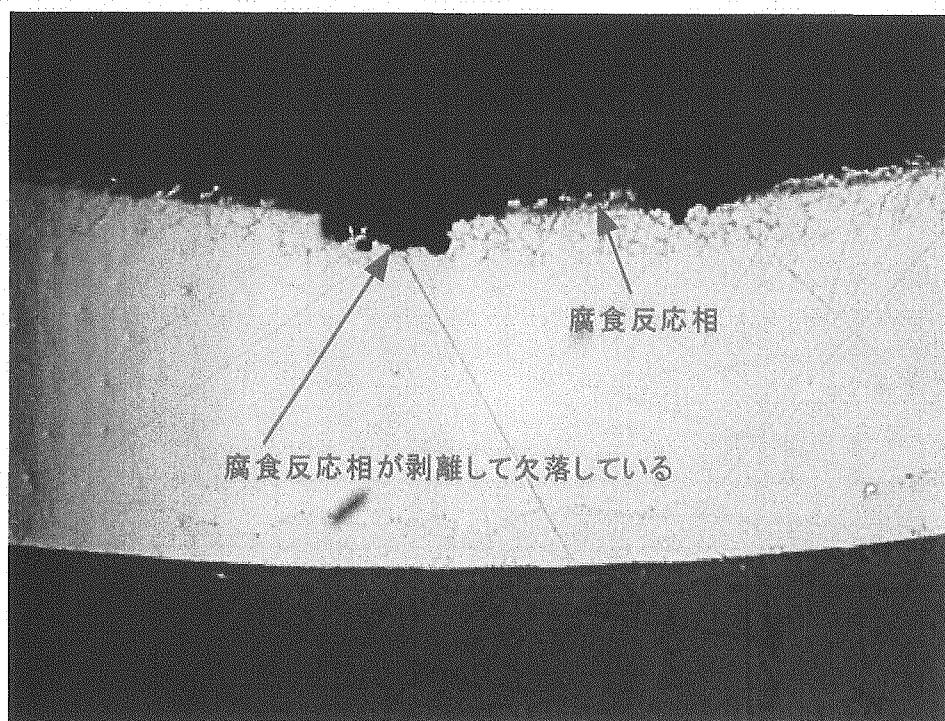
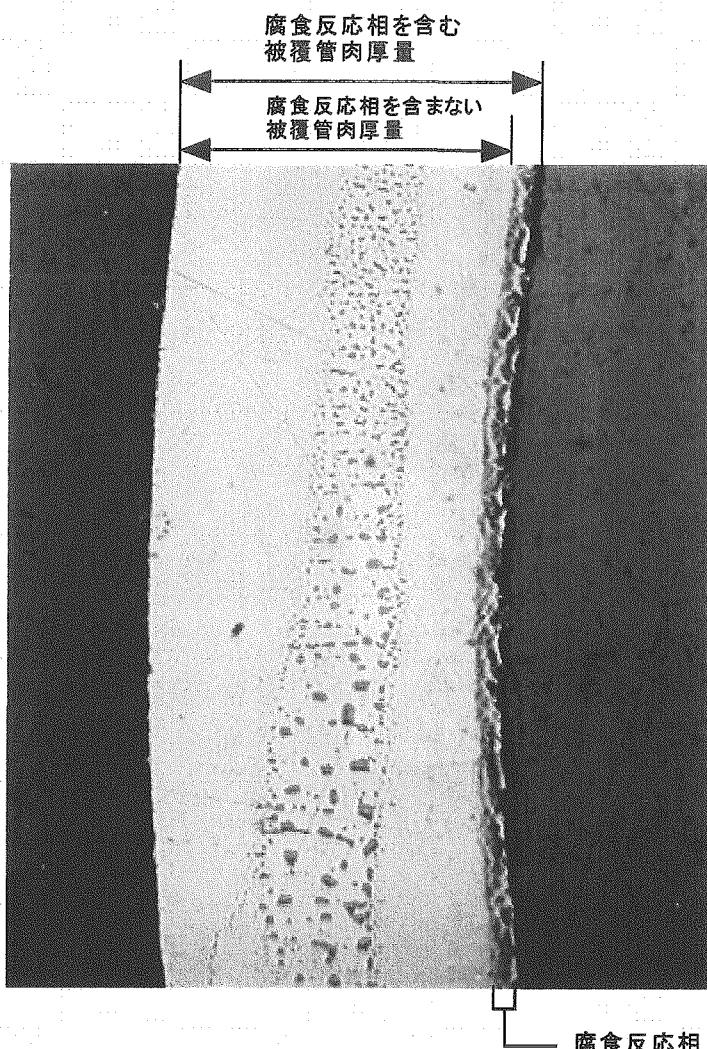


写真2.2.1 模擬燃料被覆管の金相観察結果

\*写真は代表を掲載した。

This is a blank page.

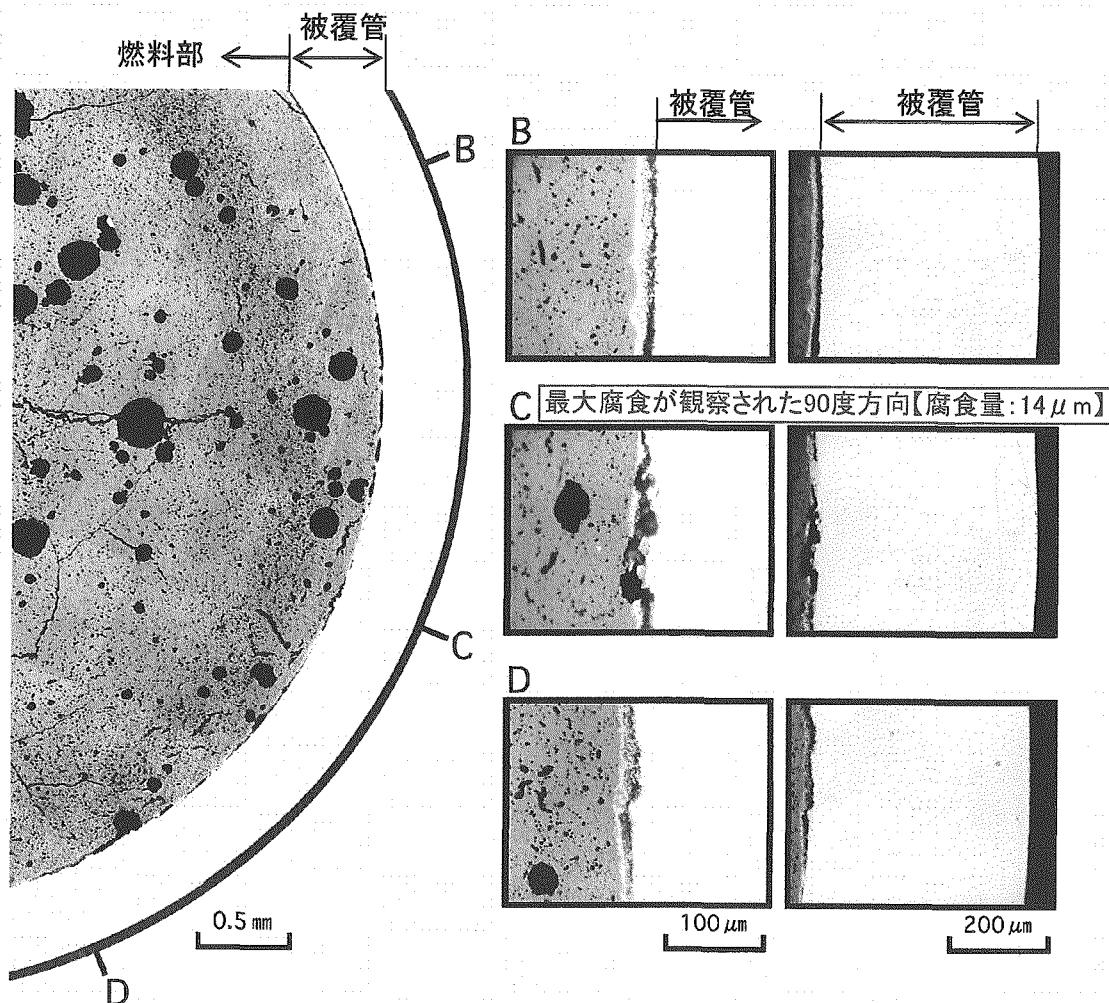


写真3.4.1 M235ピンの金相試験結果(測定方向:90度)

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

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

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

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

表 5. SI 接頭語

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

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

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

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表 4 に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表 4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

| 組立量             | SI 組立単位           |                         |   |
|-----------------|-------------------|-------------------------|---|
|                 | 名称                | 記号                      | SI 基本単位による表し方   |
| 粘度              | パスカル秒             | Pa · s                  | $\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$   |
| のモーメン           | ニュートンメートル         | N · m                   | $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$  |
| 面張力             | ニュートン毎メートル        | N/m                     | $\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$   |
| 角速度             | ラジアン毎秒            | rad/s                   | $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = \text{s}^{-2}$  |
| 角加速度            | ラジアン毎平方秒          | rad/s <sup>2</sup>      | $\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$  |
| 熱流密度, 放射照度      | ワット毎平方メートル        | W/m <sup>2</sup>        | $\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$   |
| 熱容量, エントロピー     | ジュール毎ケルビン         | J/K                     | $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  |
| 質量熱容量(比熱容量)     | ジュール毎キログラム        | J/(kg · K)              | $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  |
| 質量エンタルピー        | モル毎キログラム          | J/kg                    | $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  |
| 質量エネルギー(比エネルギー) | ジュール毎キログラム        | J/kg                    | $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$  |
| 熱伝導率            | ワット毎メートル毎ケルビン     | W/(m · K)               | $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$  |
| 体積エネルギー         | ジュール毎立方メートル       | J/m <sup>3</sup>        | $\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$   |
| 電界の強さ           | ボルト毎メートル          | V/m                     | $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$  |
| 体積電荷            | クーロン毎立方メートル       | C/m <sup>3</sup>        | $\text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$   |
| 電気変位            | クーロン毎平方メートル       | C/m <sup>2</sup>        | $\text{m}^{-2} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$   |
| 誘電率             | ファラード毎メートル        | F/m                     | $\text{m}^{-3} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$  |
| 透磁率             | ヘンリー毎メートル         | H/m                     | $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$  |
| モルエネルギー         | ジュール毎モル           | J/mol                   | $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1}$  |
| モルエンタルピー        | ジュール毎モル毎ケルビン      | J/(mol · K)             | $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$                            |
| モル熱容量           | ビット毎モル毎ケルビン       | J/(mol · K)             | $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$                            |
| 照射線量(X線及びγ線)    | クーロン毎キログラム        | C/kg                    | $\text{kg}^{-1} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$  |
| 吸収線量率           | グレイ毎秒             | Gy/s                    | $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$  |
| 放射強度            | ワット毎ステラジアン        | W/sr                    | $\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$ |
| 放射輝度            | ワット毎平方メートル毎ステラジアン | W/(m <sup>2</sup> · sr) | $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} = \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$                  |

表 6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

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

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

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

表 8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

| 名称       | 記号  | SI 単位であらわされる数値  |
|----------|-----|---|
| 海里       | mi  | 1 海里=1852m  |
| ノット      | kn  | 1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s                                     |
| アール      | a   | $1 \text{ a}=1 \text{ dam}^2=10^2 \text{ m}^2$                  |
| ヘクタール    | ha  | $1 \text{ ha}=1 \text{ hm}^2=10^4 \text{ m}^2$                  |
| バール      | bar | $1 \text{ bar}=0.1 \text{ MPa}=100 \text{ kPa}=10^5 \text{ Pa}$ |
| オングストローム | Å   | $1 \text{ Å}=0.1 \text{ nm}=10^{-10} \text{ m}$                 |
| ペイン      | b   | $1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=10^{-28} \text{ m}^2$             |

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

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

表 10. 国際単位に属さないその他の単位の例

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