JNC TN9410 2001−003

# 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）—

（技術報告書）

２０００年７月

技術情報室
No.
2001. 4. 25
サイクル機構大洗工学センター

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

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)
2000

Ⓚ

JNC TN9410 2001－003
２０００年７月

# 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）－

**（技術報告書）**

報告者　菊地　晋※、　北澤　健夫※2、
永峯　剛※、　松元　慎一郎※

## 要　旨

渦電流探傷技術の照射後試験への適用を目指し、ホットセル外（以下、セル外）において性能試験を実施してきた。その結果、被覆管材料等の欠陥検査への適用性を確認でき、照射材への適用の見とおしを得た。このうち、前報では燃料―被覆管化学的相互作用（Fuel Cladding Chemical Interaction:FCCI）測定試験（減肉測定）を除いた、セル外での外面、内面、貫通孔の探傷性能について述べた。

本報告では、セル外における模擬 FCCI 測定試験の結果について述べると共に、外面欠陥、内面欠陥、貫通孔、FCCI のそれぞれの標準欠陥ピンを用いた渦電流探傷装置のセル内導入後の校正試験の結果について報告する。

模擬 FCCI 測定試験では試験結果を基に測定条件や模擬 FCCI 量と渦電流信号値の相関関係を確認し、渦電流試験による FCCI 測定の見通しについて検討した。模擬 FCCI 測定試験の結果、測定の最適条件はそれぞれ①ピンの搬送速度:20mm/sec、②試験周波数：32kHz、③位相：0DEG、④利得：-10dB、⑤フィルター：0 であった。また、模擬 FCCI 量と渦電流信号値の間に相関関係があり、300μm オーダーの肉厚量をもつ被覆管に対して、50μm 以上の減肉変化が認められる場合、FCCI を検出できる見通しを得た。また、セル内導入後の校正試験を実施した結果、セル外における性能試験とほぼ同等の性能があることをを確認した。

---

※　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

※2　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
（現　本社　国際・核物質管理部　解体プルトニウム処分協力推進グループ）

JNC TN9410 2001－003
July,2000

# Development of Eddy Current Techniques at PIE Facility
## － phase Ⅱ testing for FCCI measurement －

Shin Kikuchi ※ Takeo Kitasawa※2
Tsuyoshi Nagamine※ Shinichiro Matsumoto※

## Abstract

Eddy current techniques have been tested for future Post irradiated Experiment ;PIE applications outside hot cell(the following, cell outside). As the result, applicability to the defects inspection such as the cladding tube material was able to be confirmed, and an outlook to the application to the irradiation material was obtained. The last time, report described results of the external surface defects, inside defects, and open holes outside hot cell except for Fuel- Cladding Chemical Interaction (FCCI) measurement testing

This paper mainly describes the results of the trial FCCI measurement testing outside hot cell. Other tests include the results of external surface defects, inside defects, and open holes in the proofreading tests. The proofreading tests used a standard defect pin inside hot cell.

In the trial FCCI measurement testing outside hot cell, the correlation between reduction in thickness and eddy current signal value was comfirmed , and the prospect of FCCI measurement by the eddy current testing was examined. As the result, the optimum conditions for measuring the FCCI quantity are respectively ①carrier speed of the pin :20mm/sec, ② test frequency : 32kHz, ③phase : 0DEG, ④ gain :-10dB, ⑤filter : 0.The correlation between trial FCCI quantity and eddy current signal value was found on the basis of the test result, and the prospect which could detect FCCI was obtained when there is reduction in thickness of over 50 μm for the cladding tube with wall thickness quantity of the 300 μm order. And, theproofreading test inside hot cell on eddy current measurements were confirmed to be equivalent to the performance test outside hot cell .

---

※ Fuel Monitoring Section , Fuels and Materials Division ,
Irradiation Center , O-arai Engineering Center

※2 Fuel Monitoring Section , Fuels and Materials Division ,
Irradiation Center , O-arai Engineering Center
(Surplus weapon Pu Dispostion Group ,
International Cooperation and Nuclear Material Control Division)

# 目次


1. はじめに・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1

2. 渦電流探傷技術の概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2

3. 試験方法・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3
   3.1 試験装置の構成・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3
      3.1.1 試験対象ピン・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3
      3.1.2 コイル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4
   3.2 試験計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4
      3.2.1 減肉測定試験（模擬 FCCI 予備試験）・・・・・・・・・・・ 4
      3.2.2 模擬 FCCI 測定試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 5
      3.2.3 セル内導入後の校正試験・・・・・・・・・・・・・・・・・ 6

4. 試験結果及び考察・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 13
   4.1 減肉測定試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 13
      4.1.1 最適測定条件の選定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 13
      4.1.2 金相試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15
      4.1.3 減肉量と渦電流信号値の相関関係・・・・・・・・・・・・・ 16
   4.2 模擬 FCCI 測定試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 22
      4.2.1 模擬 FCCI に対する信号の位相解析・・・・・・・・・・・・ 22
      4.2.2 模擬 FCCI ピンによる肉厚変化と渦電流信号値との相関・・・・・・・・ 23
      4.2.3 腐食剤もしくは腐食生成物の影響・・・・・・・・・・・・・ 24
      4.2.4 ピン単位に限定した相対的な FCCI 分布の評価・・・・・・・・・・・・ 25
      4.2.5 繰り返し誤差を含めた精度評価・・・・・・・・・・・・・・ 26
      4.2.6 模擬 FCCI 測定試験結果のまとめ・・・・・・・・・・・・・ 26
   4.3 セル内導入後の校正試験・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 54
      4.3.1 信号応答・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 54
      4.3.2 周波数依存性・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 54
      4.3.3 今後の計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 55

5. まとめ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 60

6. 今後の展開・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 61

7. 謝辞・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 62

8. 参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 63

Appendix・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 64
付録－1　渦電流探傷技術・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 65
付録－2　渦電流探傷技術に関する用語説明・・・・・・・・・・・・・・・・・ 72

# 表リスト

表 3.1－1　標準欠陥ピン（外面欠陥、内面欠陥、貫通孔）・・・・・・・・・・・・・・・・ 10
表 3.1－2　模擬 FCCI ピンの仕様・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 11
表 3.2－1　セル内校正試験用標準欠陥ピン・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 12

別表 1－1　国内の渦電流探傷装置の性能・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 68
別表 1－2　各国の渦電流探傷装置の性能・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 69

# 図リスト


図 3.1－1　セル外における渦電流装置の構成概念図・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7
図 3.1－2　既設セル内における渦電流試験装置の配置図・・・・・・・・・・・・・・・ 8
図 3.1－3　酸腐食ピンの仕様・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 9

図 4.1－1　各試験周波数による信号応答の相違（32,64,128kHz）・・・・・・・・・・ 17
図 4.1－2　渦電流信号値の周波数依存性（減肉）・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 18
図 4.1－3　送り速度による信号応答の相違・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 19
図 4.1－4　測定ポイント数（1 点及び 7 点）の違いによるバラツキ・・・・・・・・・ 20
図 4.1－5　渦電流信号値と肉厚との相関関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 21
図 4.2－1　Acid-1 ピン（減肉）の位相角・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 27
図 4.2－2(1)　FCCI－1 ピン（Cs-Te700℃×50h で腐食）の位相角・・・・・・・・・・ 28
図 4.2－2(2)　FCCI－3 ピン（Cs-Te600℃×100h で腐食）の位相角・・・・・・・・・ 29
図 4.2－2(3)　FCCI－4 ピン（Te600℃×50h で腐食）の位相角・・・・・・・・・・・ 30
図 4.2－2(4)　FCCI－5 ピン（Te600℃×100h で腐食）の位相角・・・・・・・・・・・ 31
図 4.2－2(5)　FCCI－6 ピン（CsOH-CsI 600℃×50h で腐食）の位相角・・・・・・・ 32
図 4.2－3　FCCI 模擬ピンの切断位置・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 33
図 4.2－4　FCCI－1 ピン（Cs-Te700℃×50h で腐食）の金相写真・・・・・・・・・・ 34
図 4.2－5　FCCI－3 ピン（Cs-Te600℃×100h で腐食）の金相写真・・・・・・・・・ 34
図 4.2－6　FCCI－5 ピン（Te600℃×100h で腐食）の金相写真・・・・・・・・・・・ 35
図 4.2－7　FCCI－6 ピン（CsOH-CsI600℃×50h で腐食）の金相写真・・・・・・・ 35
図 4.2－8　FCCI－5 ピン（Te600℃×100h で腐食）の
渦電流信号値と肉厚との相関・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 36
図 4.2－9　FCCI－6 ピン（CsOH-CsI600℃×50h で腐食）の
渦電流信号値と肉厚との相関・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 37
図 4.2－10　渦電流信号値と肉厚との相関・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 38
図 4.2－11　全面腐食及び粒界腐食による肉厚変化と渦電流信号値との比較・・・・・ 39
図 4.2－12　FCCI-7 ピン（CsOH-CsI600℃×100h で腐食）の
渦電流信号と肉厚との相関・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 40
図 4.2－13(1)　FCCI－1 ピン（Cs-Te700℃×50h で腐食）
の腐食剤除去前後の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 41
図 4.2－13(2)　FCCI－3 ピン（Cs-Te600℃×100h で腐食）
の腐食剤除去前後の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 42

図 4.2－13(3)　FCCI－4 ピン（Te600℃×50h で腐食）の
腐食剤除去前後の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 43
図 4.2－13(4)　FCCI－5 ピン（Te600℃×100h で腐食）の
腐食剤除去前後の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 44
図 4.2－13(5)　FCCI－6 ピン（CsOH-CsI600℃×50h で腐食）の
腐食剤除去前後の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 45
図 4.2－14(1)　FCCI－1 ピン（Cs-Te700℃×50h で腐食）の腐食前後の位相角・・・ 46
図 4.2－14(2)　FCCI－6 ピン（CsOH-CsI600℃×50h で腐食）の腐食前後の位相角・ 47
図 4.2－15　腐食生成物に対する信号を除去した場合の
渦電流信号値と肉厚量の関係・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 48
図 4.2－16　FCCI－1 ピン（Cs-Te700℃×50h で腐食）の
各軸位置における渦電流信号値と被覆管肉厚量との相関・・・・・・・・ 49
図 4.2－17　FCCI－3 ピン（Cs-Te600℃×100h で腐食）の
各軸位置における渦電流信号値と被覆管肉厚量との相関・・・・・・・・ 50
図 4.2－18　FCCI－5 ピン（Te600℃×100h で腐食）の
渦電流信号値と被覆管肉厚量との相関・・・・・・・・・・・・・・・・ 51
図 4.2－19　FCCI－6 ピン（CsOH-CsI600℃×50h で腐食）の
渦電流信号値と被覆管肉厚量との相関・・・・・・・・・・・・・・・・ 52
図 4.2－20　繰り返し精度・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 53
図 4.3－1　外面欠陥、貫通孔、内面欠陥のセル外試験結果と
セル内試験結果の比較（1024kHz）・・・・・・・・・・・・・・・・・ 56
図 4.3－2　FCCI のセル外試験結果とセル内試験結果の比較・・・・・・・・・・・ 57
図 4.3－3　外面欠陥の信号値と周波数の相関・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 58
図 4.3－4　貫通孔の信号値と周波数の相関・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 58
図 4.3－5　内面欠陥の信号値と周波数の相関・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 58
図 4.3－6　FCCI の信号値と周波数の相関・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 58
図 4.3－7　外面欠陥の SN 比と周波数の相関・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 59

別図 1－1　カーボンファイバー部位の欠陥信号の 3 次元表示例・・・・・・・・・・ 70
別図 1－2　日本原子力研究所の渦電流探傷装置・・・・・・・・・・・・・・・・・ 71

# 1. はじめに

高速炉燃料被覆管の内外表面を遠隔でかつ非破壊で欠陥を探傷する技術は被覆管の健全性を確認する上で有力な照射後試験技術の一つと考えられる。現在、照射燃料集合体試験施設（Fuel Monitering Facility:FMF）では非破壊で被覆管の内面と外面における欠陥、貫通孔の探傷、燃料―被覆管化学的相互作用（Fuel Cladding Chemical Interaction:FCCI）による FCCI 量の測定等を行なう目的で、渦電流探傷装置を用いた探傷技術開発を進めている。渦電流探傷試験とは、交流を流したコイルを被検体である金属に近接させると、金属内部に渦電流が誘導されるが、渦電流は割れなどの欠陥によって影響を受けることから、その結果生じた渦電流の反作用を検出して探傷を行う方法である。この方法は非接触かつ短時間で金属の内外面における傷を検出できることから、鉄鋼や非鉄金属の製造時の検査、製品の検査、および発電所や化学プラントにおける熱交換器や復水器における配管の保守検査などに広く用いられている。FMF では、渦電流探傷試験による被覆管の欠陥探傷及び FCCI 検出への適用性を検討するために、模擬ピンを用いた性能試験を行ってきた。これまでに外面欠陥、内面欠陥、貫通孔については、信号位相角の相違により信号識別の見通しを得ている。[7]

本報では渦電流探傷装置のセル外における FCCI 検出に関する性能試験結果及びセル内における校正試験結果について述べる。前者の性能試験においては、模擬酸腐食ピンを用いた減肉試験、模擬 FP（Cs,Te,I）で腐食させた模擬 FCCI ピンを用いた試験について、後者ではセル内における外面欠陥、内面欠陥、貫通孔、FCCI のすべての欠陥等について校正試験を実施し、セル外で取得した結果と比較検討した。

## 2．渦電流探傷技術の概要

渦電流探傷試験（Eddy Current Testing:ECT）は各種プラントの保守・点検等において、非破壊検査手法の一つとして多用されている。ECT が保守・点検等に多用される理由としては、数千本の管を短期的に探傷でき、減肉、傷に感度が良いことが挙げられる。最近では、ニューラルネットワークを利用した信号パターン認識技術などの向上により、より短時間で探傷することが可能になりつつある。（付録参照）ただし、このニューラルネットワークの技術は、位相解析によるリサージュ等の信号パターンのデータベースによるところが大きく、被検体が同一ロットであることが前提条件であり、供用期間中検査（ISI）などには有効である。

FMF における渦電流探傷技術の適用対象として、被覆管の外面欠陥、内面欠陥、貫通孔に加えて、肉厚測定（FCCI 量の測定）等の評価が検討されてきたが、照射後試験のように随時ロットの違う試験をする場合では、ニューラルネットワーク技術を用いることは困難である。FMF では、この技術の適用は困難であるが、材質や形状などが類似している被覆管については、ほぼ同一の測定条件として試験を実施している。材質や形状による定性的な信号識別は、材質や形状の異なる信号データを出きる限り取得し、信号のパターン認識により可能となる。そのため、ほぼ同一の材質や形状の被検体についてデータを取得して、データの再現性を得ること必要となるとともに、材質や形状等のそれぞれの条件において、信号パターンのデータベースを構築しておくことが必要と思われる。

また、本報告書で主に述べる FCCI 測定技術に関してはセル外における性能試験においても検討はしたが、定性的な評価が限界であった。なお、FCCI 検出に関する渦電流探傷技術の適用性は、国内外においても同様な状況である。このため、セル内における渦電流技術の確立には、試験により信号データの拡充、新技術の導入や装置の運用方法の検討等が必要と思われる。

産業界における渦電流探傷試験技術の適用例等についての詳細は、後述の付録を参照。

# 3. 試験方法

## 3.1 試験装置の構成

性能試験で用いた渦電流装置及びその周辺機器（測定器）の構成について、図 3.1-1 に示す。装置はコイル、コイル保持機構、架台から構成される渦電流探傷検出部、試験対象ピン（標準欠陥ピン）を移送する駆動装置、駆動装置制御系、欠陥探傷装置制御盤、FCCI 測定装置制御盤、記録装置から構成される。欠陥探傷用の試験周波数は 16～3072kHz、FCCI 肉厚測定用の試験周波数は 8～128kHz の範囲でそれぞれ周波数調整をすることが可能である。また、周波数弁別[付録－2(1)]、位相調整[付録－2(2)]、リジェクション[付録－2(3)]処理及び 2 周波試験[付録－2(4)]が可能である。検出部においては、ピンの曲がりを考慮したピン矯正機構を設け、試料通過の際のセンタリング性を確保している。なお、図 3.1-1 に示すように肉厚測定においては、標準欠陥ピンのリファレンスとの比較から、測定を行なう。

また、渦電流探傷装置のセル内導入後の装置配置を図 3.1-2 に示す。

### 3.1.1 試験対象ピン

性能試験では実際の照射後試験で想定される欠陥を模擬した標準欠陥ピンを使用した。以下に標準欠陥ピンの仕様の詳細を示す。

(1) 外面、内面、貫通孔ピンの仕様

外面欠陥、内面欠陥、及び貫通孔についての標準欠陥ピンの仕様を表 3.1-1 に示す。標準欠陥ピンは被覆管の材質である SUS316 に放電加工を施したものである。

(2) 酸腐食ピン、模擬 FCCI ピンの仕様

減肉測定試験に用いるピンとして、酸腐食ピンの製作を行なった。酸腐食ピンの仕様を図 3.1-3 に示す。酸腐食ピンは全部で 10 本製作し、被覆管内面を混合酸（$HCl:HNO_3:H_3PO_4:H_2O=10:2:1:7$）をステップ 1 からステップ 5 まで段階的に注入し、各々の侵食時間において全面腐食させた。

また、模擬 FCCI ピンは、全面腐食及び粒界腐食などの腐食形態をもつ実際の FCCI の状況を模擬するため、模擬 FP として Te,Cs-Te,CsOH-CsI 等で腐食させた標準欠陥ピンを製作した。模擬 FCCI ピンの腐食温度、腐食時間などの仕様を表 3.1-2 に示す。

### 3.1.2 コイル

コイルは貫通コイルとプローブコイルの 2 種類を使用した。外面欠陥、内面欠陥、貫通孔の標準欠陥ピンについては、貫通コイルを使用し、酸腐食ピン及び模擬 FCCI ピンについては、プローブコイルを使用した。
貫通コイルを用いた欠陥検出は、自己比較方式 [a5]を適用し、一方プローブコイルを用いた減肉測定には標準比較方式（相互比較方式）[a6]を採用した。

## 3.2 試験計画

本報では、前報 [7] で実施したセル外での欠陥探傷試験に引き続いて、セル外における模擬 FCCI 測定試験を実施した。

FCCI は燃料から発生した FP により被覆管内面が化学的に腐食する現象である。この腐食により被覆管の肉厚は減肉するのだが、単純に肉を削ぎ取った減肉でなく、全面腐食、粒界腐食などの様々な腐食形態をとる。従って、腐食形態の違いにより、渦電流応答が異なることが予想されるため、これらの信号応答の相違を確認する必要がある。これらの信号応答の相違を利用し、腐食形態の識別ができると考えられる。さらに、FCCI 量の測定を行なう際に、腐食生成物の有無や種類が試験装置の測定能力へ悪影響を及ぼすことが懸念される。従って、まず渦電流による FCCI 測定を単純な減肉検出と仮定し、予備試験として①酸腐食ピンを用いた減肉測定試験を実施し、続いて模擬 FP により全面及び粒界腐食した模擬 FCCI ピンを用いて、②FCCI 測定試験をすることとした。これらの試験では、欠陥検出能力、欠陥信号の周波数依存性などについて着目した。

さらに、前報 [7] で言及した欠陥探傷データを含むセル外で現在まで取得したデータを総括して、外面欠陥、内面欠陥、貫通孔、FCCI のそれぞれを対象としたのセル内での校正試験を実施した。以下にこれらの試験方法の詳細を示す。

### 3.2.1 減肉測定試験（模擬 FCCI 予備試験）

ここでは、FCCI 測定の第一段階として、模擬試験体として、前述の 10 本の酸腐食ピン（全面腐食）を用いて、肉厚変化に対する最適な測定条件及び渦電流探傷信号と肉厚変化量の相関関係について調査した。最適な測定条件の選定については、以下に示すような項目について検討した。

(1) 送り速度

標準欠陥ピンをロボットアームを使用して、コイルから引き抜く速度を 5,10,20mm/sec に段階的に変化させたときの信号応答性を検討する。

(2) 試験周波数と位相

8,16,32,64,128kHz のそれぞれの場合において、最適な応答性を示したものを選定する。

(3) フィルター[付録－2 (10)]

ノイズ除去のために、LPF（ローパスフィルター）と HPF（ハイパスフィルター）を使用する。最適な応答性を示したものを選定する。

(4) ゲイン[付録－2 (11)]

最適な応答性を示したものを選定する。

また、渦電流探傷信号と肉厚変化量の相関関係を調査するため、実際に肉厚変化量の測定を行なうが、酸腐食ピンに限らず、減肉したピンの肉厚を正確に測定することは、非破壊試験技術の分野では非常に難しい。超音波探傷でさえ、十数ミクロンの測定誤差が生じてしまう。実際の減肉量を知る手段としては破壊試験により、被覆管の肉厚を直接観察するしかないのが現状であり、ここでは以下の手順で金相試験から減肉量を求めた。

① 酸腐食ピンを軸方向に切断（10～20mm 程度）し、樹脂に固めて試料を作る。
② 試料を研磨する
③ 光学顕微鏡で測定ポイントの肉厚を測定し、減肉量を求める。

### 3.2.2 模擬 FCCI 測定試験

本試験では、予備試験として行なった前述の減肉測定試験から求めた最適測定条件下で、セル外において模擬 FP により全面腐食及び粒界腐食させた肉厚変化と渦電流信号との相関を以下の点に着目して、調査する。

(1) 模擬 FCCI 量の相関関係と前述の減肉測定試験で得られた相関関係との比較を行ない、セル外において、模擬 FP によって発生した全面腐食を渦電流により検出する見とおしを得ること。
(2) FCCI は全面腐食に加え、粒界腐食のような腐食形態をとるため、模擬 FP により粒界腐食させた肉厚変化と渦電流信号値との相関を調査すること。
(3) 粒界腐食と全面腐食の位相を比較し、模擬 FP により発生した粒界腐食を渦電流により検出する見とおしを得ること。

(4) 腐食剤（模擬 FP）除去前後のデータを比較して、腐食生成物・腐食剤の影響について検討すること。

なお、模擬 FCCI 量の測定は減肉測定と同様に破壊試験（金相試験）によって、以下の手順により求めた。

① 模擬 FCCI ピンを用いて渦電流試験を行なう。
② 測定ポイントが判別できるようにマーキングをしておき、破壊試験で模擬 FCCI ピンの肉厚量を求める。
③ 上記の結果から、渦電流値と肉厚の相関性をみる。

### 3.2.3 セル内導入後の校正試験

FCCI の性能試験終了後、平成 11 年 10 月 26 日に渦電流探傷装置を既設試験セル内に搬入据付けを行った。現在までに取得した性能試験データを基に、外面欠陥、内面欠陥、貫通孔、FCCI についてセル内導入後の校正試験を実施した。試験は、表 3.2-1 に示すようにセル内に搬入した校正試験用の標準欠陥ピンを用い、性能試験で取得したデータと比較し、セル内における渦電流探傷装置の性能について確認する。本試験での測定条件を以下に示す。

(1) 外面欠陥、内面欠陥、貫通孔の検出

・試験周波数：16,32,64,128,256,512,1024,3072kHz
・ゲイン　0dB
・位相　0
・LPF　OFF
・HPF　OFF
・リジェクション　0

(2) FCCI の検出

・試験周波数：8,16,32,64kHz
・ゲイン　-26dB
・位相　0°
・LPF　1Hz

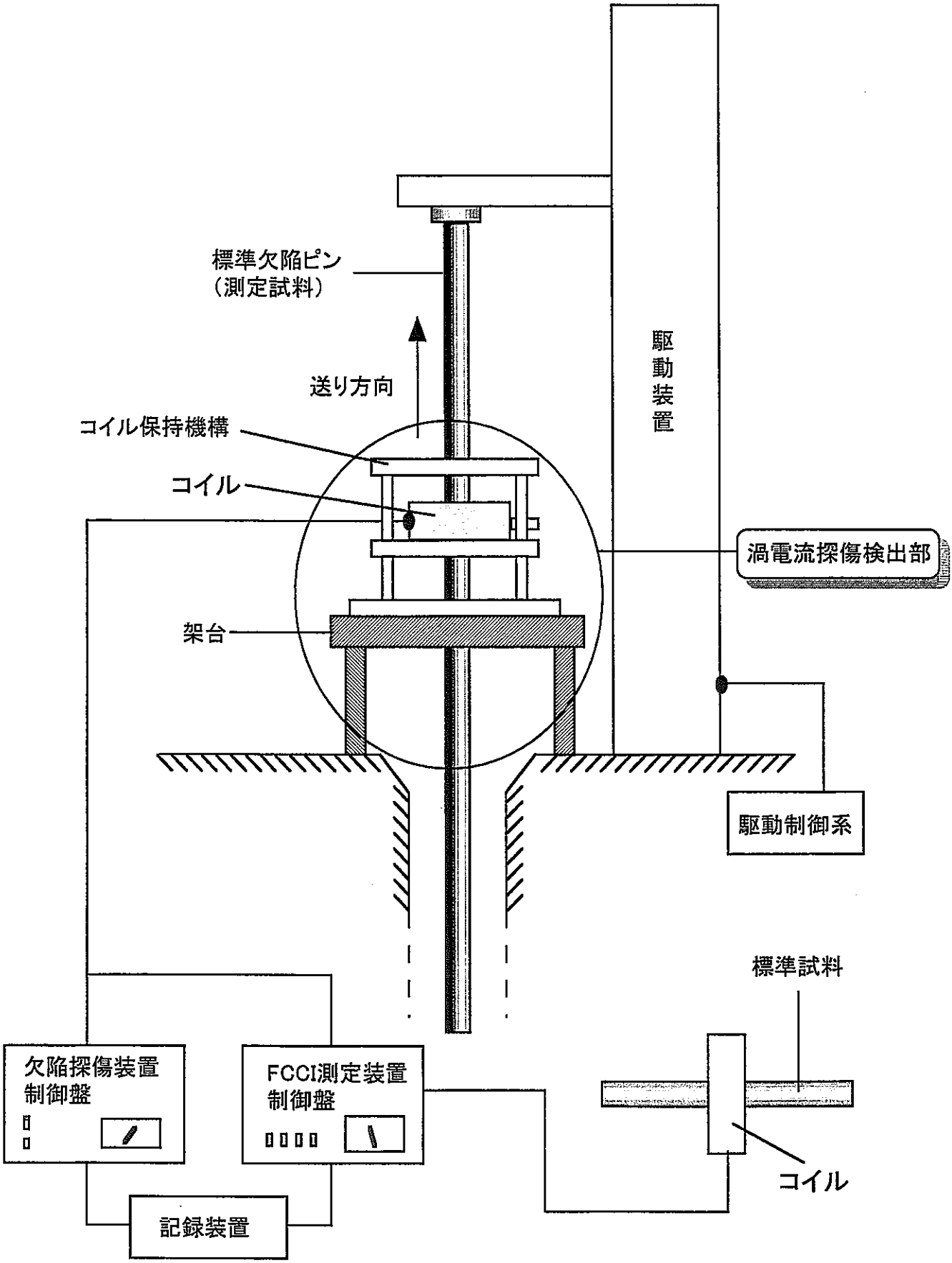
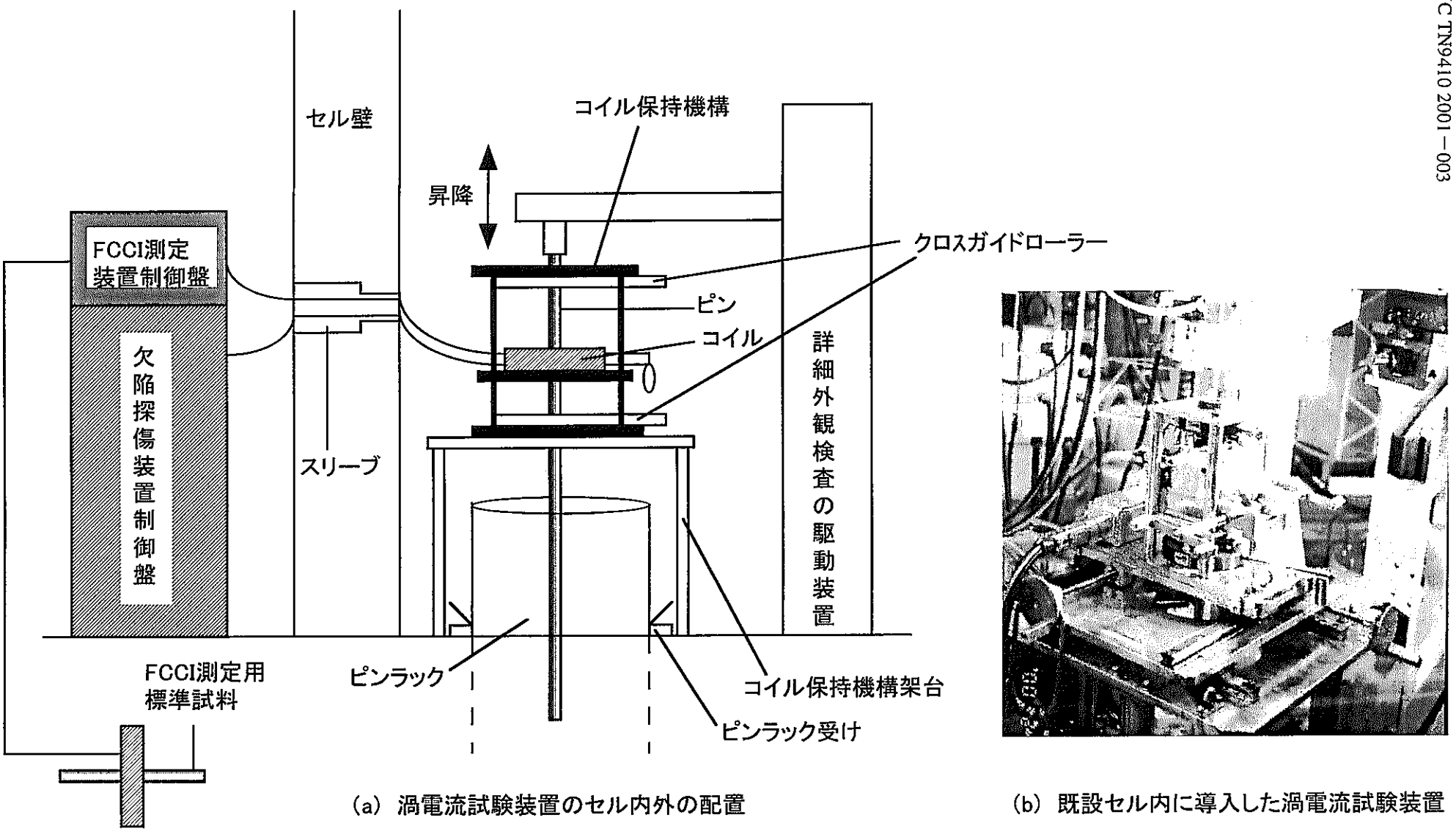


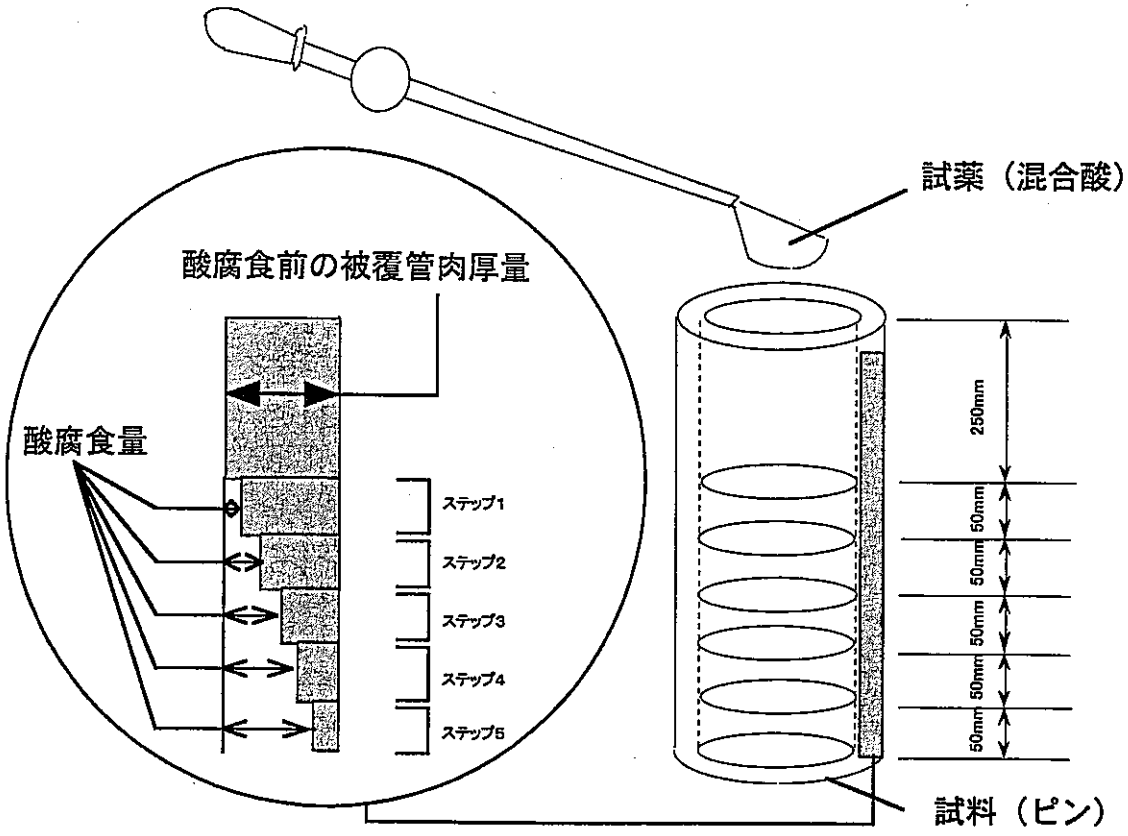

図3.1-1 セル外における渦電流装置の構成概念図




(a) 渦電流試験装置のセル内外の配置

(b) 既設セル内に導入した渦電流試験装置

図3.1-2 既設セル内における渦電流試験装置の配置図



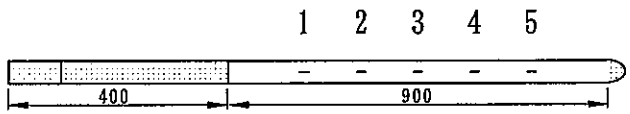

浸食時間(分)

| 酸腐食ピンの種類 | ステップ1 | ステップ2 | ステップ3 | ステップ4 | ステップ5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Acid-1 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| Acid-2 | 10 | 30 | 50 | 70 | 90 |
| Acid-3 | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 |
| Acid-4 | 20 | 45 | 70 | 95 | 120 |
| Acid-5 | 20 | 35 | 50 | 65 | 80 |
| Acid-6 | 30 | 50 | 70 | 90 | 110 |
| Acid-7 | 45 | 60 | 75 | 90 | 105 |
| Acid-8 | 45 | 70 | 95 | 120 | 145 |
| Acid-9 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 |
| Acid-10 | 60 | 120 | 180 | 240 | 300 |

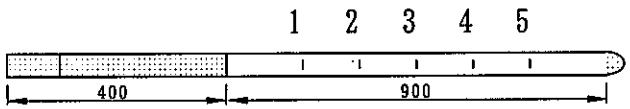
図3.1-3 酸腐食ピンの仕様

表3.1-1 標準欠陥ピン（外面欠陥、内面欠陥、貫通孔）

## 外面欠陥

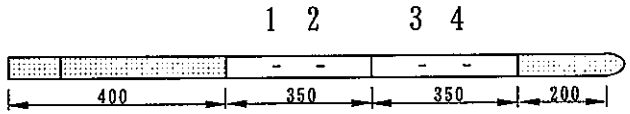


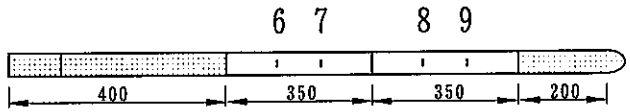

| | D(mm) | W(mm) | L(mm) |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.020 | 0.192 | 2.995 |
| 2 | 0.047 | 0.193 | 3.993 |
| 3 | 0.073 | 0.195 | 2.992 |
| 4 | 0.177 | 0.196 | 2.995 |
| 5 | 0.261 | 0.274 | 3.020 |

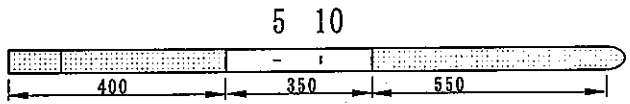



| | D(mm) | W(mm) | L(mm) |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.018 | 0.185 | 2.985 |
| 2 | 0.042 | 0.186 | 2.995 |
| 3 | 0.070 | 0.190 | 2.998 |
| 4 | 0.172 | 0.205 | 3.002 |
| 5 | 0.260 | 0.205 | 3.005 |

## 内面欠陥

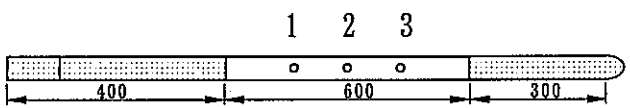



| | D(mm) | W(mm) | L(mm) |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.021 | 0.190 | 2.998 |
| 2 | 0.043 | 0.190 | 3.000 |
| 3 | 0.069 | 0.190 | 3.000 |
| 4 | 0.177 | 0.196 | 3.004 |
| 5 | 0.261 | 0.197 | 3.020 |
| 6 | 0.018 | 0.188 | 2.991 |
| 7 | 0.042 | 0.188 | 2.995 |
| 8 | 0.073 | 0.178 | 2.995 |
| 9 | 0.173 | 0.196 | 2.958 |
| 10 | 0.261 | 0.198 | 2.968 |

## 貫通孔



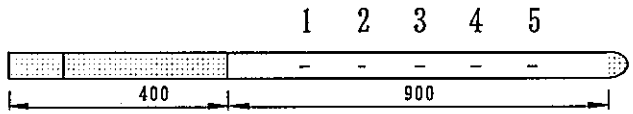

| | ピンホール |
|---|---|
| 1 | φ0.1 |
| 2 | φ0.2 |
| 3 | φ0.3 |

表3.1-2 模擬FCCIピンの仕様

| | 腐食剤 | 腐食温度 | 腐食時間 | 腐食形態 | 用途 |
|---|---|---|---|---|---|
| FCCI-1 | Cs-Te | 700℃ | 50hr | 全面腐食 | 渦電流試験、金相試験 |
| FCCI-2 | | 600℃ | 50hr | | 渦電流試験のみ |
| FCCI-3 | | | 100hr | | 渦電流試験、金相試験 |
| FCCI-4 | Te | | 50hr | | 渦電流試験、金相試験 |
| FCCI-5 | | | 100hr | | 渦電流試験、金相試験 |
| FCCI-6 | CsOH-CsI | | 50hr | 粒界腐食 | 渦電流試験、金相試験 |
| FCCI-7 | | | 100hr | | 渦電流試験、金相試験 |

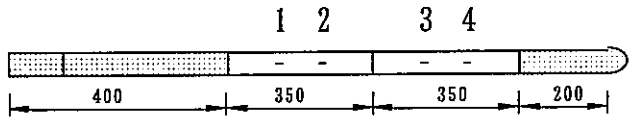
## 表3.2-1 セル内校正試験用標準欠陥ピン

### 外面欠陥



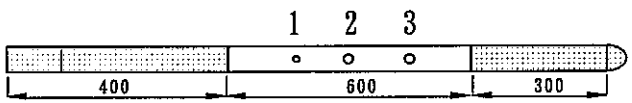

| | D(mm) | W(mm) | L(mm) |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.020 | 0.192 | 2.995 |
| 2 | 0.047 | 0.193 | 3.993 |
| 3 | 0.073 | 0.195 | 2.992 |
| 4 | 0.177 | 0.196 | 2.995 |
| 5 | 0.261 | 0.274 | 3.020 |

### 内面欠陥



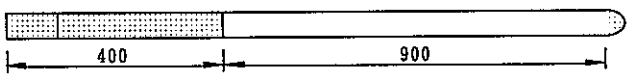

| | D(mm) | W(mm) | L(mm) |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.021 | 0.190 | 2.998 |
| 2 | 0.043 | 0.190 | 3.000 |
| 3 | 0.069 | 0.190 | 3.000 |
| 4 | 0.177 | 0.196 | 3.004 |

### 貫通孔




| | ピンホール |
|---|---|
| 1 | φ0.1 |
| 2 | φ0.2 |
| 3 | φ0.3 |

### FCCI




反応条件　試薬　Te
温度　600℃
時間　50h
雰囲気　Ar

# 4. 試験結果及び考察

## 4.1 減肉測定試験

ここでは、前章で示した酸腐食ピンを用いた減肉測定結果に基づいて、減肉に対する最適測定条件及び金相試験結果による減肉量と渦電流信号値の相関関係を中心に検討した。

### 4.1.1 最適測定条件の選定

FCCI 量の測定において、肉厚変化を検出するためには最適な測定条件を選定しておく必要がある。測定条件としては、3.2.1 項に示したように(1)試験周波数と位相、(2)送り速度、(3)ゲイン、(4)フィルタなどがあり、それぞれについての最適条件について検討した。

(1) 試験周波数と位相

試験周波数は、測定感度に直接影響するため、Acd-1 ピン（図 3.1-3 参照）を用いて、32,64,128kHz について試験を行なった。信号データの比較を容易にするために、X 信号検出側のみに信号出力をするために、32kHz では 0°、64kHz では 30°、128kHz では 60℃に位相を設定した。試験結果を図 4.1-1 に示す。測定はサンプリング時間と渦電流信号値のデータを取得しており、図のようなチャートとして出力している。減肉部の位置については、これらのサンプリング時間と送り速度から逆算して求めているが、読取誤差などを考慮しないといけないため、探傷試験結果は、チャートのまま記載することとした。肉厚変化に対する渦電流信号値の応答は、低周波数ほど大きく、肉厚変化に対して敏感であるが、同時に低周波数になるほどノイズレベルも増加している。そこで、信号値とノイズの比（S/N 比：Signal/noise）から、検出感度を評価した。図中の A 点、B 点、C 点は、周波数条件がそれぞれ 32,64,128kHz において、肉厚変化による信号が最も顕著であった箇所で、ほぼ同じ軸位置での測定データを示している。これらのポイントの S/N 比は 32kHz では約 6、64kHz では約 4.5、128kHz では約 3.5 であった。このことから、低周波数であるほど、減肉に対する検出感度は良い傾向にあり、渦電流の特長である表皮効果（周波数を上げるほど渦電流は浸透しにくくなる）の表れであることを指している。

本 FCCI 減肉測定装置には 8、16kHz の試験周波数まで設定できるが、ブリッジバランスの調整が難しく実使用には適さない。従って、現状では FCCI 減肉量検出の最適周波数は 32kHz である。このことは、図 4.1-2 に示すように渦電流装置のセル内導入後直前に実施した最終確認試験からも 32kHz が最適周波数であることを確認している。なお、最終確認試験で使用した試料は、表 3.1-2 で示した FCCI-4（Te を腐食

材とし、600℃×50h）である。

以上のことから、FCCI 測定における試験装置の最適探傷周波数を 32kHz とすることが妥当であることが確認された。また、位相についてはX信号側に減肉信号を読み取る場合、現状では 0deg が最適値であった。

(2)送り速度

送り速度は、試験時間の効率化の観点から、より高速であることが望ましいが、高速になると、サーマル効果や信号の高周波化が問題となる。サーマル効果とは、渦電流によって、発生した熱が原因で発生するノイズが問題となることを言う。一方、信号の高周波化は、一般に高周波であるノイズと周波数成分が近くなり、ノイズと信号の判別が困難になる現象を引き起こす。

従って、これらの 2 つの問題を同時に満たす送り速度条件を選定しなければならない。本渦電流装置の設置場所として決定した FMF 既設の詳細外観装置の駆動系は最大で 20mm/sec の送り能力を有する。そこで、送り速度のパラメータを 5,10,20mm/sec に設定し、Acid-1 ピンを用いて、性能確認試験を実施した。なお、試験周波数は前述で最適条件として示された 32kHz とした。また、信号データについては、データの比較を単純化するために、すべてX信号出力側に表示するように位相を設定した。試験結果を図 4.1-3 に示す。図の上段がX信号、下段がY信号であり、縦軸は肉厚変化（FCCI 量）に対する渦電流信号値、横軸がサンプリング時間である。記録測定器のメモリの制限上、速度の遅い、5,10mm/sec については、測定データが途中から表示されており、5mm/sec においては、サンプリング時間内に減肉部が収まらなかったため、減肉部以外の比較的信号が明確な C 点について比較検討した。Y 信号の出力結果を見ると、いずれの送り速度におけるデータにも信号出力の変動はなく、X 信号に着目した比較検討を行なえばよいことになる。

まず、送り速度の違いによる記録計の応答速度の影響をみると、20mm/sec の測定データに対して、10mm/sec、5mm/sec の測定データは各々2 倍、4 倍に波形が引き延ばされているだけの同波形である。つまり、波形そのものはサンプリング間隔が変化しただけであり、信号の応答もれは生じていない。従って、20mm/sec までの送り速度では記録計の応答速度への影響はないと言える。

次に信号強度を比較してみる。G 点と G'点は、前述の図 4.1－1 で示した減肉部のピーク値であり、これらのポイントでの渦電流信号値は同等であった。また、5mm/sec の場合は減肉部の信号が装置の制約上取得できなかったため、ほぼ同じ軸位置である A 点、B 点、C 点における信号について比較検討した。これらのポイントの渦電流信号値はほぼ同じ値(0.11V)であり、ノイズレベルも同等（0.02V）であった。このことは、20mm/sec 以下の送り速度では信号強度の変化はなく、サーマル効果はないに等しいことを意味している。一般的にサーマル効果を懸念する送り速度域は、鉄鋼業界

における塊鋼の巣検出などにおいて数 m/sec 付近であると言われている。

信号の高周波化については、フィルタを OFF にしているにも係わらず、ノイズは渦電流信号値に比べて十分小さいことから、特に問題ないと考えられる。

従って、送り速度は試験効率の観点からも、20mm/sec が最適条件と設定することができた。

(3) ゲイン

利得は検出感度が高すぎるとデータ記録をする上で、信号振幅が振りきれてしまう。従って、これらの考慮した利得は上記で選定された測定条件（送り速度 20mm/sec、試験周波数 32kHz）では酸腐食ピンでは 10dB、後述する模擬 FCCI ピンでは-26dB であった。

(4)フィルタ

フィルタは信号とノイズの周波数成分差を利用して、必要信号のみを取出すよう調整するが、本試験では、ノイズが十分小さいことからフィルタを LPF ：1Hz とした。

4.1.2　金相試験

図 3.1-3 で示された 10 本の酸腐食ピンを用いて、上記の最適測定条件下で渦電流による肉厚測定試験を実施した。その後、酸腐食ピンの実際の肉厚を知るために破壊試験として、金相試験を実施した。金相試料は、渦電流測定結果から信号応答が大きい軸位置をピン当たり 10 ポイント選択して、合計 100 試料採取した。肉厚測定は渦電流プローブが接触していた範囲の肉厚を数点測定し、その平均を肉厚値とすることが望ましいが、酸腐食ピンは粒界腐食を伴わず、周方向にほぼ均一に減肉しているため、プローブが接触している中心点のみを測定した場合と数点の肉厚を平均した場合とで相違があるか測定に先立ち以下の通りに確認した。

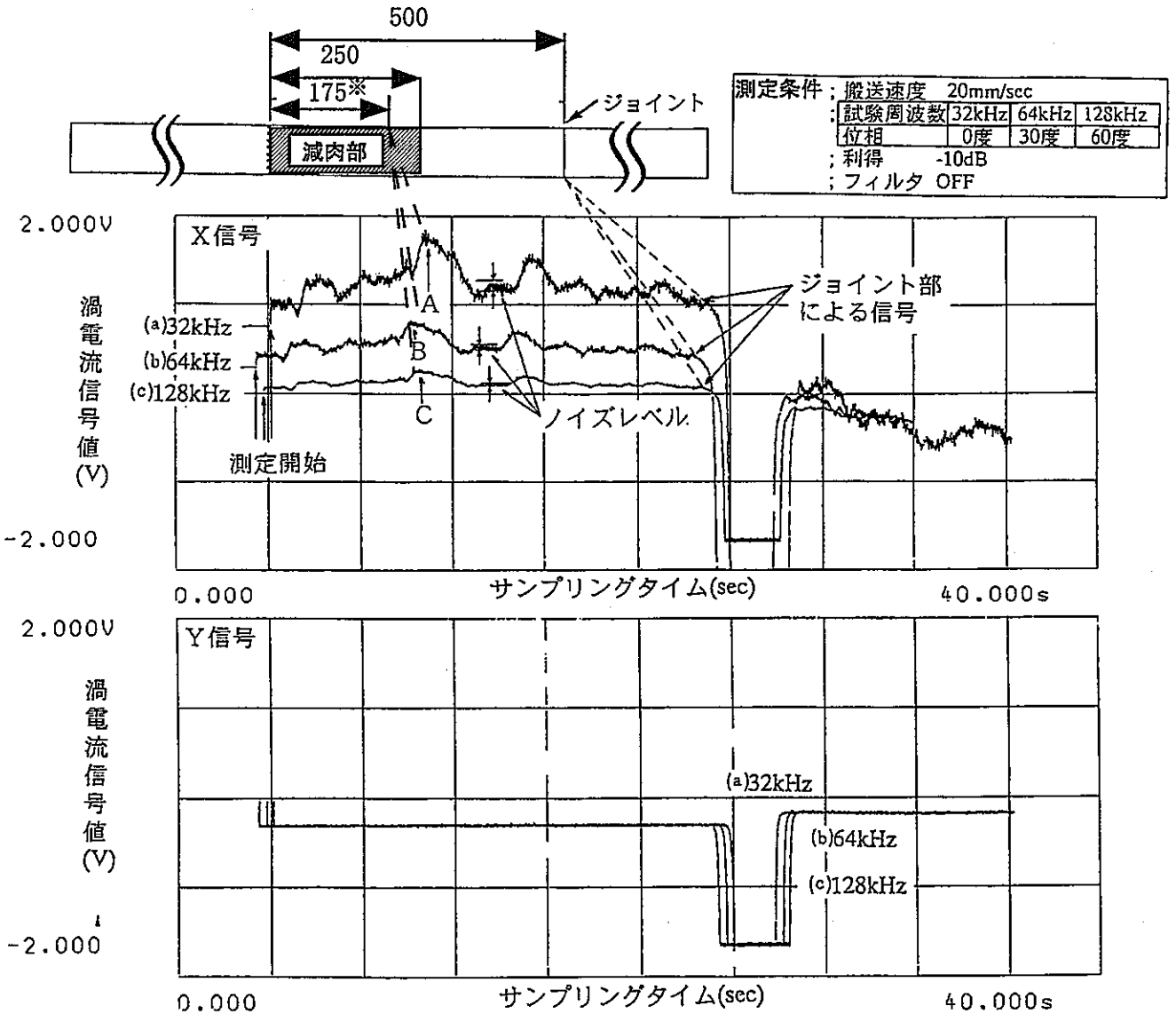
酸腐食ピン（Acid-1 ピン）について、全試料写真撮影を行ない、プローブが接触していた領域について、中心から等間隔に左右 3 点、合計 7 点の肉厚の平均値と顕微鏡観察で測定した 1 点の肉厚データとの比較を行なった。両者の比較を図 4.1-4 に示す。横軸はピンの軸位置を示しており、同軸位置における両者の測定結果をシンボルを変えて、プロットした。両者は完全には一致していないが、一方の測定結果が過大または過小に肉厚測定している傾向はみられず、均等にばらついている。また、両者の測定差は平均 3$\mu$m と小さいことから、1 点測定でも特に問題ないと判断し、全ての試料を 1 点測定で肉厚測定することとした。

肉厚は採取した 100 試料の 0,90,180,270 度方向の合計 400 ポイントについて測定した。

### 4.1.3　減肉量と渦電流信号値の相関関係

全ピンについて、金相試験による肉厚測定値と渦電流信号値の相関を示したものを図 4.1-5 に示す。なお、図 4.1-5 に示された渦電流信号値は X 信号出力側にのみ信号出力させるために、位相を設定し相関を評価した。その他の測定条件については、4.1.1 で示した最適測定条件とした。図 4.1-5 の図中の中央線は肉厚測定値と渦電流信号値の相関を最小二乗法で求めたものであり、外側の二本の線はデータを囲むように中央線から等幅に引いた包絡線である。

図 4.1-5 から肉厚変化と渦電流信号値には相関関係が見られ、渦電流信号値から肉厚量を推定する場合、300μm オーダーの肉厚をもつ被覆管に対して、その精度は±10μm であった。




※A,B,C点における軸位置は、送り速度とサンプリング時間から算出した。

図4.1-1 各試験周波数による信号応答の相違(32、64、128kHz)

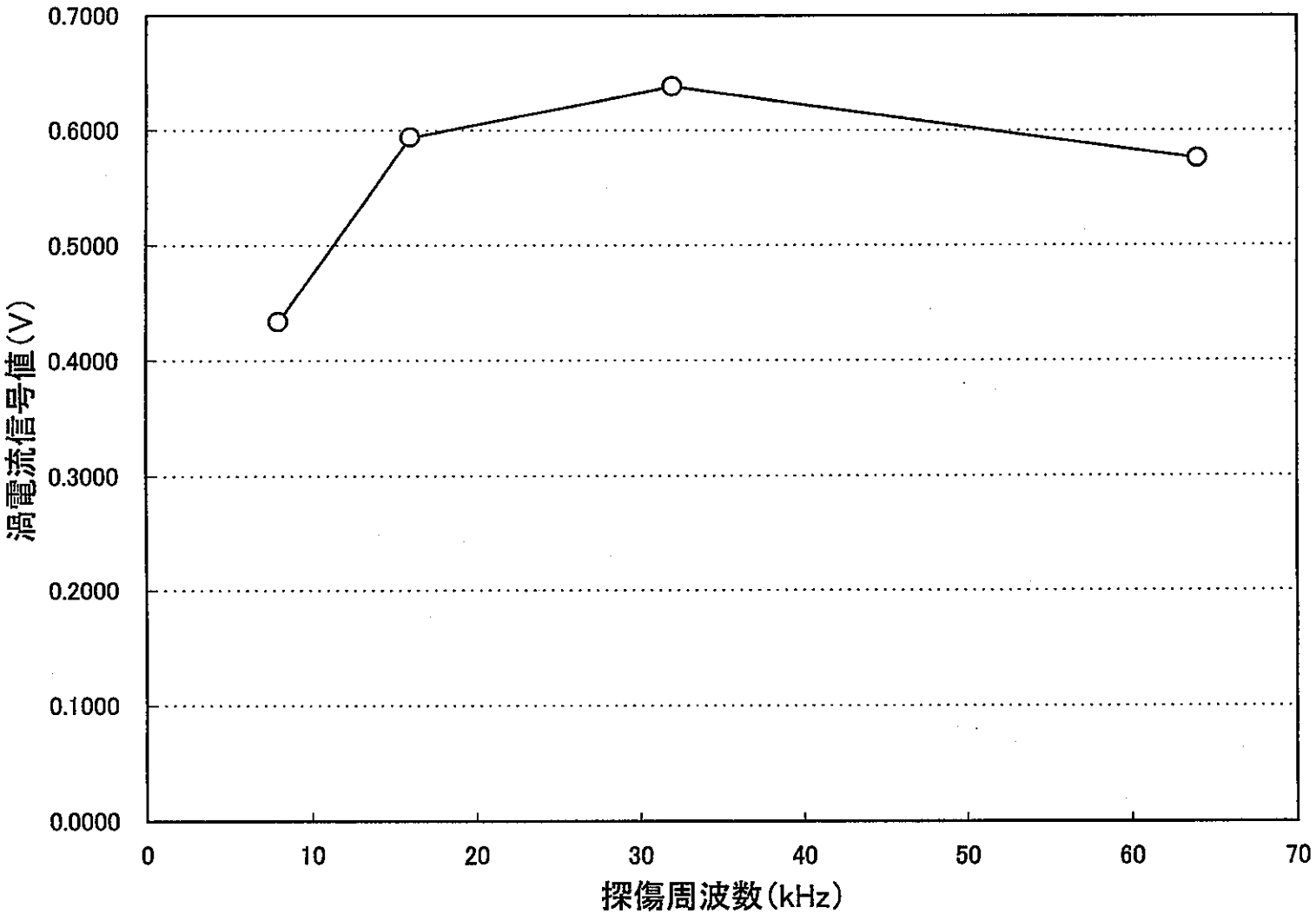
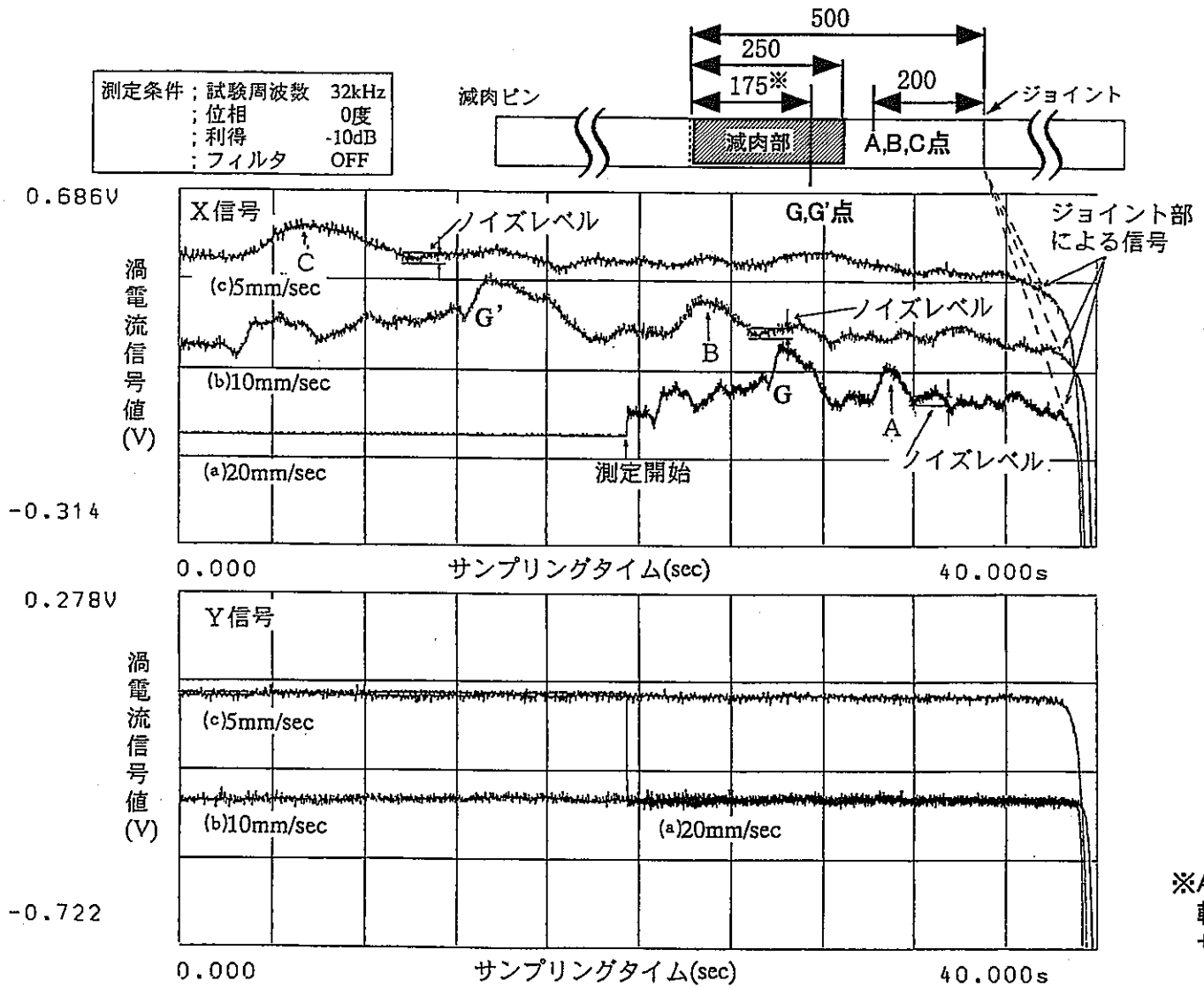



図4.1-2　渦電流信号値の周波数依存性(減肉)




※A,B,C,G,G'点における
軸位置は、送り速度と
サンプリング時間から算出

図4.1-3 送り速度による信号応答の相違

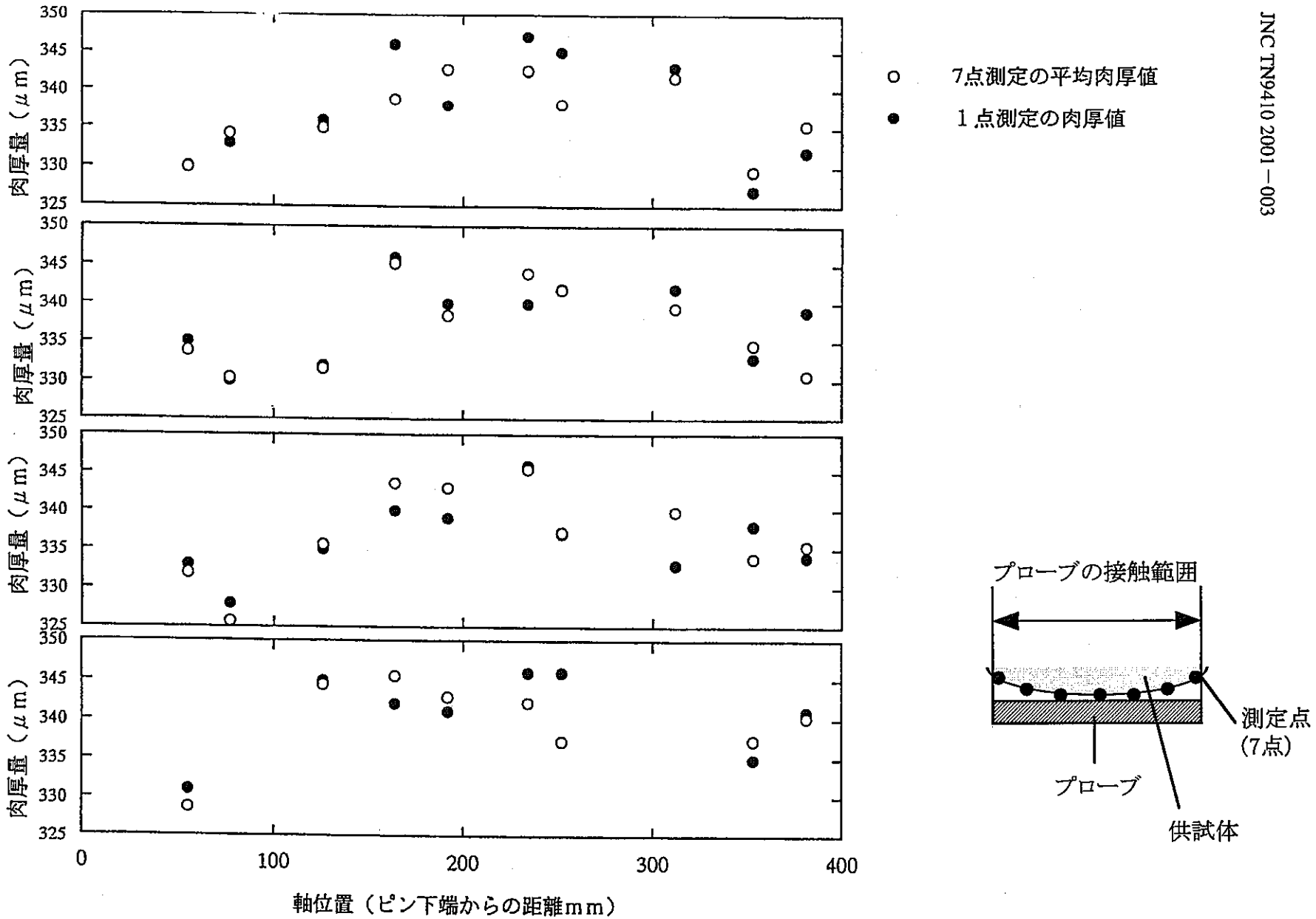



図4.1-4 測定ポイント数（1点及び7点）の違いによるバラツキ

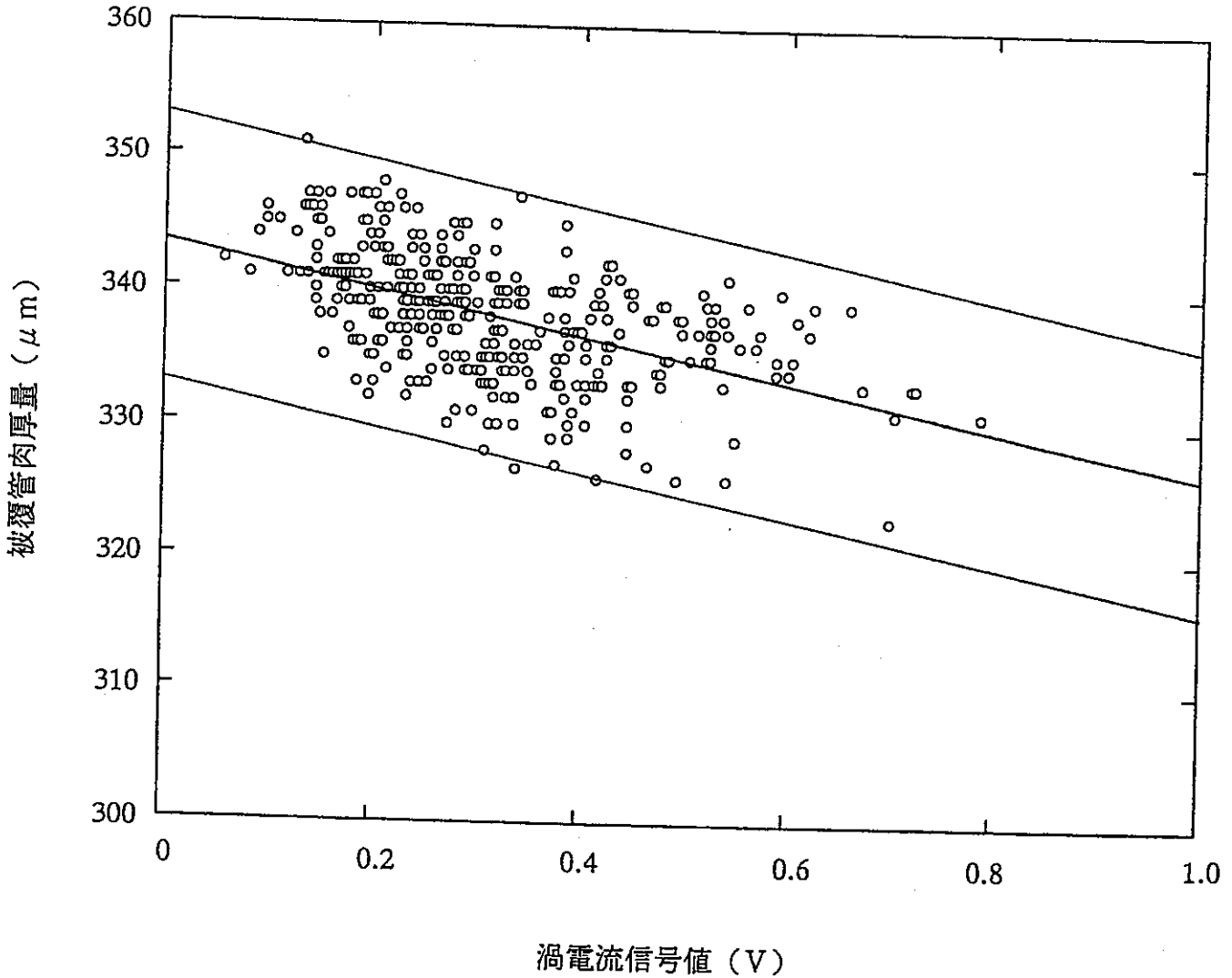



図4.1-5 渦電流信号値と肉厚との相関関係

## 4.2　模擬 FCCI 測定試験

表 3.1-2 で示された模擬 FP により腐食させた模擬 FCCI ピンを用いて、セル外において模擬 FCCI 測定試験を実施した。以下に試験結果とその考察を述べる。

### 4.2.1　模擬 FCCI に対する信号の位相解析

前項の減肉測定試験において、酸腐食による肉厚変化と渦電流信号値との相関が見いだされた。模擬 FCCI による全面腐食と酸腐食による全面腐食はみかけ上同じ肉厚変化であるが、その腐食形態は異なるため、渦電流に対する応答が異なることが懸念される。そこで、酸腐食ピンで適用した測定条件にて、模擬 FCCI ピンの測定を行ない、得られた信号の位相を解析することで両ピンの全面腐食に対する応答具合を調べ、模擬 FCCI による全面腐食検出の可能性を検討した。

まず、酸腐食ピン 10 本について酸腐食による減肉（全面腐食）に対する信号の位相を解析した。代表として、Acid-1 ピンで取得された信号の位相解析結果を図 4.2-1 に示す。縦軸が渦電流の Y 信号、横軸が X 信号である。図中の 0-180° 方向に変化している信号が減肉に対する応答であり、この信号の位相角は約 5 度である。他の酸腐食ピンの測定結果から、減肉に対する信号の位相角は 0～10° の範囲であった。

なお、図 4.2-1 で 200 度方向に示される信号は酸腐食ピンの長さを延長するためにつないだジョイント部からの信号である。

次に酸腐食ピンと同様に腐食生成物の除去後の模擬 FCCI ピンについての信号の位相を解析した。位相解析に供した模擬ピンは FCCI-1、3、4、5、6 であり、測定結果をそれぞれ図 4.2-2(1)～(5)に示す。なお、図 4.2-2(1)～(5)で示されているリサージュ波形における全面腐食部、粒界腐食部、ジョイント部は、後述する金相試験結果の結果から抽出した。図 4.2-2(1)は FCCI-1 ピン（Cs-Te700℃×50h 腐食）の信号の解析結果である。図中、0-180 度方向に変化している信号が肉厚変化に対する応答であり、この信号の位相角は約 0 度である。この肉厚変化は全面腐食による減肉であることが金相試験から確認されており、渦電流試験では酸腐食による減肉と同じ信号である。

なお、同図には 270 度方向に大きな応答がみられるが、この位置には後述の金相試験において腐食剤を入れていたルツボの破片がピン内面に癒着していることが確認されたことから、これによる応答と考えられる。図 4.2-2(2)は FCCI-3 ピン（Cs-Te600℃×100h 腐食）の信号の解析結果であるが、有意な信号は検出されなかった。これは、腐食がほとんど発生していないことを意味しており、これらは後述の金相試験においても確認された。

同様に図 4.2-2(3) 、(4)は Te 腐食、図 4.2-2(5)は CsOH-CsI 腐食による模擬 FCCI ピンの信号の解析結果である。図 4.2-2(3) 、(4)で 10-190 度方向に変化している信号が肉厚変化に対する応答であり、この信号の位相角は約 10 度である。この肉厚変化も Cs-Te 腐食と同じく、全面腐食による減肉であることが後述の金相試験から確認され

た。

図 4.2-2(5) では、図中に 10-190 度方向及び 100-280 度方向に変化する信号があるが、この信号は金相試験の結果、10-190 度方向の信号は全面腐食に対する応答、100-280 度方向の信号は粒界腐食を伴う全面腐食に対する応答であった。なお、同図には 110 度方向にも信号が見られるが、金相試験ではこの部分には腐食がないことが確認しており、他の因子による応答であることが推測される。応答因子としては、腐食剤除去のための硝酸洗浄時、ブラシなどによって付いたピンへの傷によるものと推定されたが、金相写真からは確認できなかった。

以上のように、模擬 FP による全面腐食は酸腐食による減肉と同じ位相角をもつ信号であり、渦電流試験上は同じ信号として取り扱うことができる。また、全面腐食と粒界腐食を伴う全面腐食では位相差があるため、腐食形態の違いを識別できる可能性がある。

### 4.2.2 模擬 FCCI ピンによる肉厚変化と渦電流信号値との相関

酸腐食ピンと同様に測定終了後、腐食生成物などの除去後の模擬 FCCI ピンの FCCI 量を測定するため、金相試験を行なった。各ピンの試料採取位置を図 4.2-3 に示す。また、FCCI-1 ピン（Cs-Te700℃×50h）、FCCI-3 ピン（Cs-Te600℃×100h）、FCCI-5 ピン（Te600℃×100h）、FCCI-6 ピン（CsOH-CsI600℃×50h）の金相写真を各々図 4.2-4～図 4.2-7 に示す。写真から明確に粒界腐食が確認できるのは、FCCI-6 ピンのみであり、他のピンは全面腐食による FCCI であった。通常、渦電流探傷試験では、全面腐食の測定範囲としては、図 4.2-6 の領域 A、粒界腐食を伴った全面腐食の測定範囲は図 4.2-7 の領域 B になる。なお、酸腐食ピンと同様に X 信号に肉厚変化の信号を出力するよう位相を設定したが、肉厚変化によって、わずかであるが、位相角が異なるため、肉厚変化の信号を X 信号に全て出力することはできない。従って、肉厚変化に対する応答を全て拾えるように、$\sqrt{(X^2+Y^2)}$とした値を渦電流値とした。FCCI が明確に確認された FCCI-5 ピン及び FCCI-6 ピン（0 度方向）の渦電流信号値と模擬 FCCI 量との相関を図 4.2-8、図 4.2-9 に示す。図の下段が渦電流信号値、上段が金相試験による模擬 FCCI 量を同軸上に示したものである。図から渦電流信号値と模擬 FCCI 量には、明確な相関関係があることがわかる。また図 4.2-8 ほど明確でないが、図 4.2-9 にも同様なことが言える。

次に全データについて相関をみたものを図 4.2-10 に示す。●シンボルの 6 点以外は、肉厚変化と渦電流信号値には明確な相関がみられる。金相試験の結果、この●シンボルの位置には腐食剤を封入していたルツボの破片が癒着していることが確認されており、このルツボの破片に対する応答である可能性が高い。これらのデータについては後述の 4.2.3 腐食剤もしくは腐食生成物の影響にて検討することとする。図中の中央線は肉厚変化と渦電流信号値との相関を最小二乗法により求めたものである。なお、

この中央線から上下に等幅に包絡線を示した。この相関線を用いると、渦電流信号値から 100～300μm の肉厚をもつ被覆管の減肉測定は、±35μm 幅でバラツキいている。

この相関線は全データに対する相関としたが、この肉厚変化は全面腐食によるもの（図 4.2-6 の領域 A)、粒界腐食を含む全面腐食によるもの（図 4.2-7 の領域 B）であり、両者を分別した検討を行なった。全面腐食による肉厚変化、粒界腐食を含む肉厚変化を分けて、渦電流信号値との相関をみたものを図 4.2-11 に示す。図中の 2 本の線はそれぞれ全面腐食のみによる肉厚変化、粒界腐食を含む肉厚変化との相関を最小二乗法により求めたものであるが、明確な相違は認められなかった。粒界腐食量は、金相観察では数μm から十数μm であり、全面腐食量 50μm の肉厚変化に対してわずかであることから、渦電流探傷装置の検出感度においては検出限界以下となる。

従って、粒界腐食量も全面腐食量として減肉測定を実施するならば、現行の渦電流試験装置において実施可能である。なお、位相角による信号の識別は、燃料要素内の内部構造物による影響なども今後、考慮しないといけないため、その信号パターンをデータベース化しておく必要がある。

### 4.2.3 腐食剤もしくは腐食生成物の影響

FCCI-7 ピン（CsOH-CsI 600℃×100h）を用いて、腐食剤の影響を確認するために腐食剤除去前後の渦電流探傷試験を実施した。その結果、図 4.2-12 に示すように腐食剤除去前では渦電流信号値と模擬 FCCI 量に相関がみられないことがわかったが、腐食剤除去後は 4.2.2 で示した通り模擬 FCCI 量と渦電流信号値との相関が認められた。そこで、他の模擬 FCCI ピンに対しても、腐食剤もしくは腐食生成物の除去前後で渦電流試験を行ない、その結果の比較から、腐食剤もしくは腐食生成物の影響について検討した。

図 4.2-13(1)～(5)に腐食剤除去前後の渦電流試験結果を示す。腐食がほとんど確認されなかった FCCI-3 ピン以外は、どのピンも腐食剤除去前はかなり大きな応答があり、特に FCCI-5、FCCI-6 ピンなどは肉厚変化とは考えられないほど鋭いピーク状の応答がある。これらの信号は腐食剤を除去することで消滅しており、腐食剤もしくは腐食生成物が渦電流に対して応答していたことがうかがえる。つまり、これらは信号応答量へ影響しており、渦電流による FCCI 検出上はノイズとなる。従って、このノイズの影響度合いを評価し、FCCI 検出の可否を以下に検討した。

X 信号に着目してみると、腐食剤除去前後で図 4.2-13(5)に示される FCCI-6 ピンについては X 信号側に若干の差異が認められるが、それ以外はほとんど変化していない。つまり肉厚変化と腐食剤もしくは腐食生成物に対する信号は位相差を持っている事になる。従って、X 信号には肉厚変化、Y 信号には腐食剤もしくは腐食生成物の応答が出力されるように位相を設定することで、肉厚変化信号のみを検出することが可能で

ある。このことを確認するために、X 信号に応答が見られかつ腐食剤除去前には Y 信号に大きな信号応答が見られる FCCI-1、FCCI-6 ピンの肉厚変化部に対する信号の位相角を調べた。結果を図 4.2-14(1)、(2)に示す。図 4.2-14(1)の腐食剤除去後の信号の位相角をみると、肉厚変化に対する信号変化は必ずしも直線的に変化していない。つまり、肉厚変化に対する信号を全て X 信号に出力するよう位相を調整することは不可能である。従って、可能な限り腐食剤もしくは腐食生成物の信号を除去するため、図 4.2-14(1)、(2)に示すように肉厚変化に対する信号を X 信号に投影した信号値で評価した。図 4.2-14(1)から腐食剤除去前の X 信号値を求めると、0.168v あり、除去後では 0.164v である。この差 0.04v を肉厚変化に換算すると、図 4.2-9 の肉厚変化と渦電流相関線から 11μm となった。同様に図 4.2-14(2)では電圧差 0.04v であったため、肉厚換算で 11μm となった。従って、この程度のノイズ成分が肉厚測定に対する腐食剤の影響となった。なお、このノイズ成分は、前項 4.2.2 で示した腐食剤除去後の測定結果のバラツキ±35μm に付加されるもので、腐食剤の影響まで考慮すると、約±50μm 程度のバラツキとなる。

また、前述の図 4.2-10 中の●シンボルの位置にはルツボが癒着しており、このルツボは腐食剤もしくは腐食生成物が介在して癒着している可能性が高い。そこで、上述の方法を用いてルツボが癒着していた位置の信号を評価した。結果を図 4.2-15 に示す。6 点全てのデータとも信号強度は減り、肉厚変化と渦電流信号値との相関上に移行している。このように、ルツボのような不純因子があっても X 信号を評価することで、肉厚変化の応答のみを取出すことが可能である。

以上のように X 信号には肉厚変化、Y 信号には腐食生成物の応答を出力されることで腐食生成物の影響を排除できると考えられる。なお、実際の燃料ピンにおいては、被覆管内に様々な内部構造物が存在し、セル外試験のようにそれらを除去することはできない。従って、セル内試験においては、これらの内部構造物の影響を考慮する必要があると思われる。

### 4.2.4 ピン単位に限定した相対的な FCCI 分布の評価

酸腐食ピンの試験で示されたピン単位で評価することでより高い相関を得られた。これは、同じ仕様の被覆管においても、ロットに若干の差があるため、同一ピンで測定することで、測定のバラツキが小さくなるためである。このことから、同様に模擬 FCCI ピンの試験においてもピン単位の評価を行なった。図 4.2-16、図 4.2-17 に FCCI-1、FCCI-3 ピン（Cs-Te 腐食）の 0 度方向、図 4.2-18 に FCCI-5 ピン（Cs-Te 腐食）の各方向、図 4.2-19 に FCCI-6 ピン（CsOH-CsI 腐食）の各方向別に信号を取得した軸位置とその軸位置における被覆管肉厚量との相関をみたものを示す。なお、これらの図は肉厚変化の軸方向プロファイルと信号値の軸方向プロファイルの変化を

定性的に比較して示しているだけであり、縦軸に示される渦電流信号値と被覆管減肉量との相関は厳密ではない。図 4.2-16、図 4.2-17 から、FCCI-1、FCCI-3 ピンとも腐食量は最大でも 20μm と小さく、前述したように渦電流探傷装置の検出限界以下の範囲えあるため、肉厚変化に対して信号値の変化は明確には表れていない。図 4.2-18 から、肉厚変化に対して腐食剤除去前後とも信号変化も良く似た推移を示していることがわかる。また、図 4.2-19 においても図 4.2-18 ほど明確ではないが、肉厚変化に対する信号変化は似た推移をしている。これらの図より、肉厚変化に対する信号値の変化は肉厚変化量が大きくなるほど、その相関関係が強くなり、50μm 以上から有意な信号変化が見られる。肉厚変化量と信号値とは相関があることがこれらの図からも明らかである。以上から、FCCI 等の全面腐食は 50μm 程度から定性的に検出可能である見とおしを得た。しかし、前項で示したように測定のバラツキが最大で±50μm 程度であることから、数十μm 程度の腐食量を定量的に評価することはできないと考える。

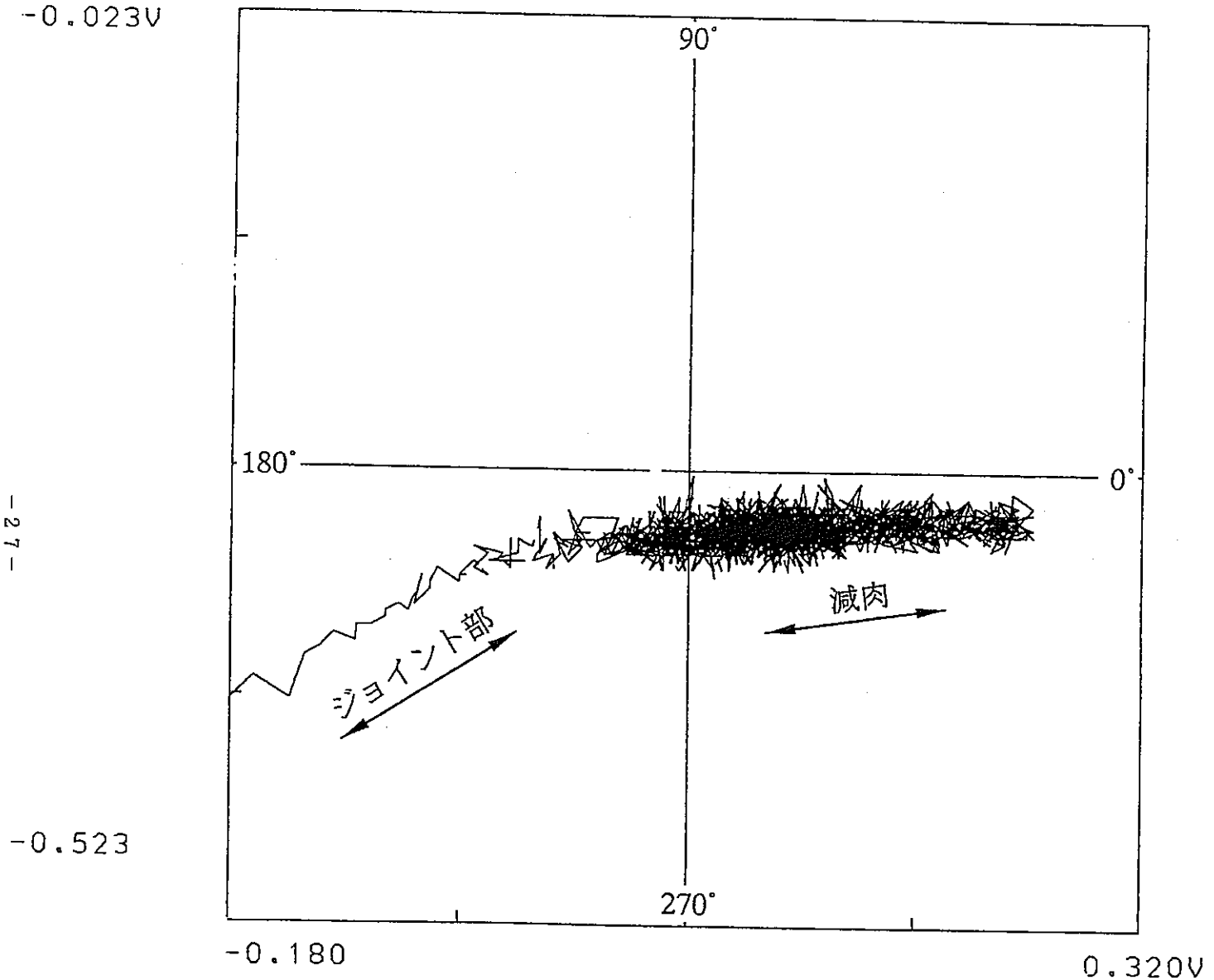
### 4.2.5　繰り返し誤差を含めた精度評価

FCCI 測定は、1 回の測定において、減肉変化の領域を精度よく検出できることが作業効率の観点から望ましい。そのため、ここでは測定の再現性を考慮し、測定誤差について検討することとした。測定は FCCI-5 ピンを使用し、測定条件は前述の最適条件を採用し、同軸方向をプローブ探傷により 5 回繰り返し測定を実施した。再現性の結果を図 4.2-20 に示す。測定結果より、最大値と最小値が最大になったピン下端から 116mm の位置における信号で、そのバラツキは 0.00012V であった。このバラツキを肉厚変化に換算すると、約±3.5μm となった。

なお、この誤差は前述の模擬 FCCI 量測定のバラツキに含まれるものである。

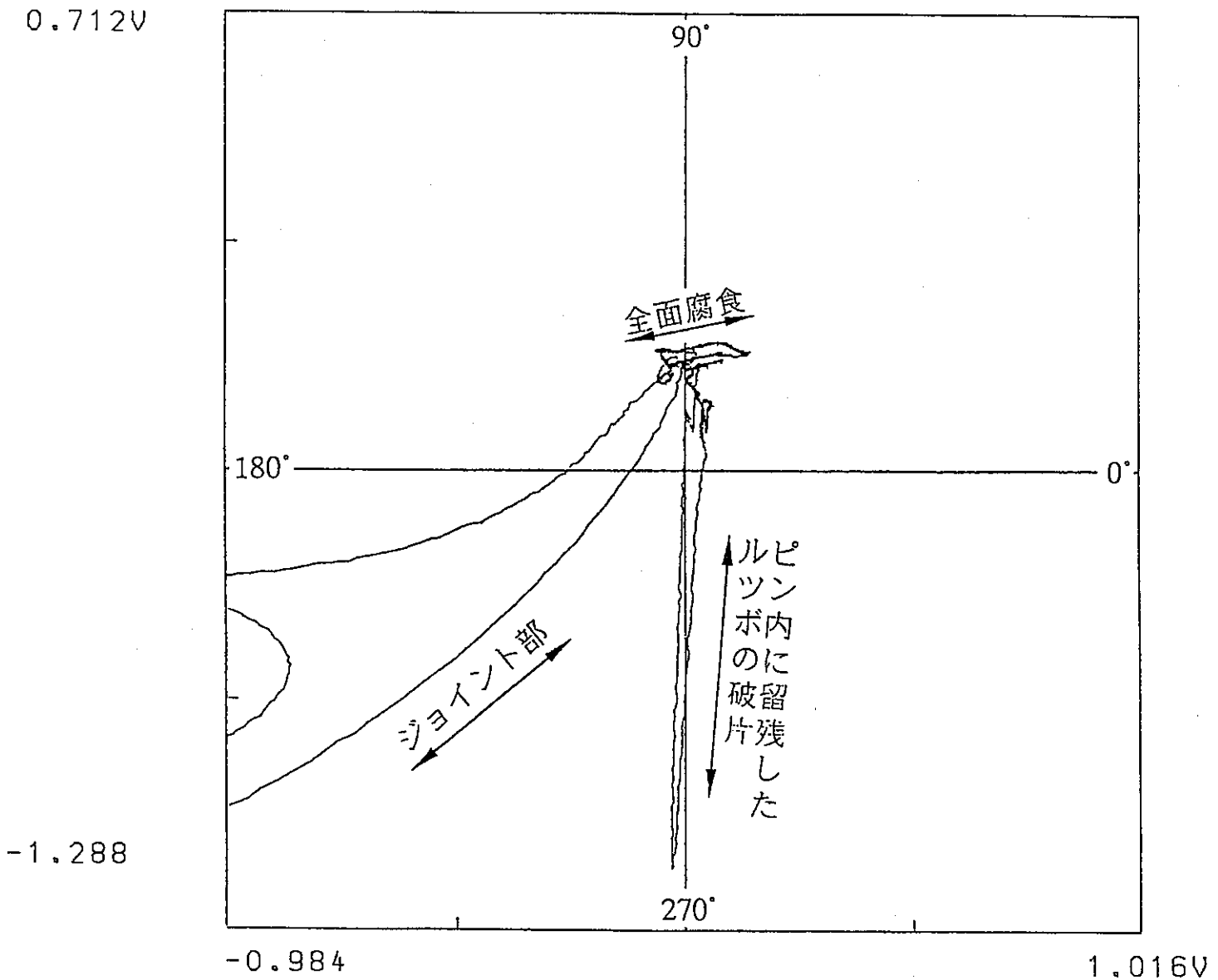
### 4.2.6　模擬 FCCI 測定試験結果のまとめ

模擬 FCCI ピンを用いたセル外における模擬 FCCI 量の測定では、300μm オーダーの肉厚をもつ被覆管に対して、50μm 以上の減肉変化が認められる場合、定性的には FCCI を検出できる見通しを得た。ただし、信号の位相から粒界腐食と全面腐食を識別することは困難であったため、粒界腐食による腐食反応相部分を全面腐食の一部とみなすことにした。また、定量評価については、腐食剤の影響等を考慮した測定のバラツキが約±50μm となり、測定精度が悪いため、困難であるとの結論に至った。さらに、実燃料要素ではこれらに加え、内部構造物の影響などを考慮しないといけないため、定量的な評価をすることは極めて難しくなるものと思われる。渦電流試験の定量評価は、一般に産業界においても同様な状況であり、定性的な評価の範囲にとどまっている例が多い。[2)3)]



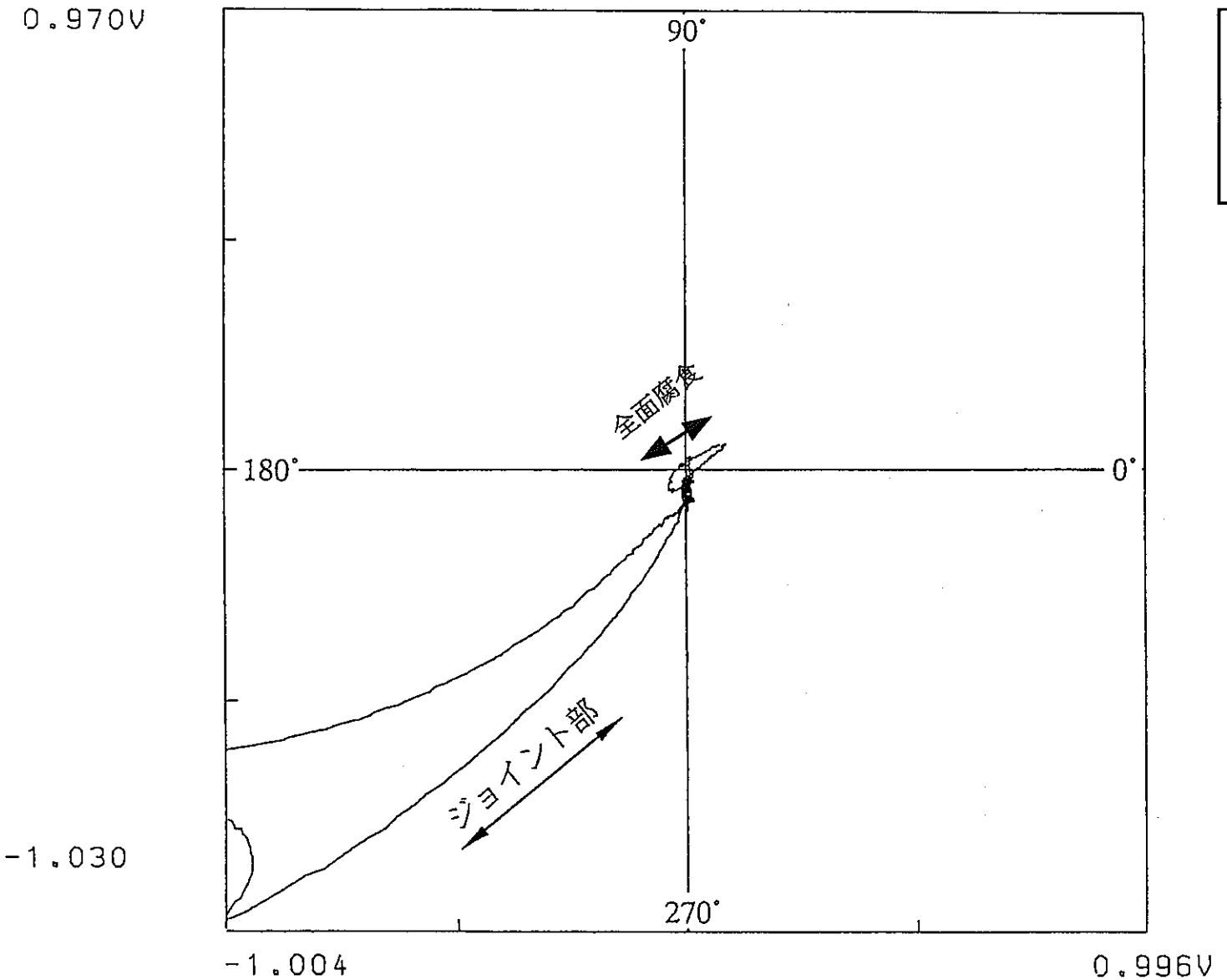

| 測定条件 | | |
|---|---|---|
| | :搬送速度 | 20mm/sec |
| | :試験周波数 | 32kHz |
| | :位相 | 0度 |
| | :利得 | −10dB |
| | :フィルタ | OFF |

図4.2-1　Acid-1ピン（減肉）の位相角




測定条件：搬送速度　20mm/sec
：試験周波数　32kHz
：位相　0度
：利得　-26dB
：フィルタ　OFF

図4.2-2(1)　FCCI-1ピン(Cs-Te700℃×50hで腐食)の位相角




| 測定条件 | | |
|---|---|---|
| | :搬送速度 | 20mm/sec |
| | :試験周波数 | 32kHz |
| | :位相 | 0度 |
| | :利得 | -26dB |
| | :フィルタ | OFF |

図4.2-2(2)　FCCI-3ピン(Cs-Te600℃×100hで腐食)の位相角

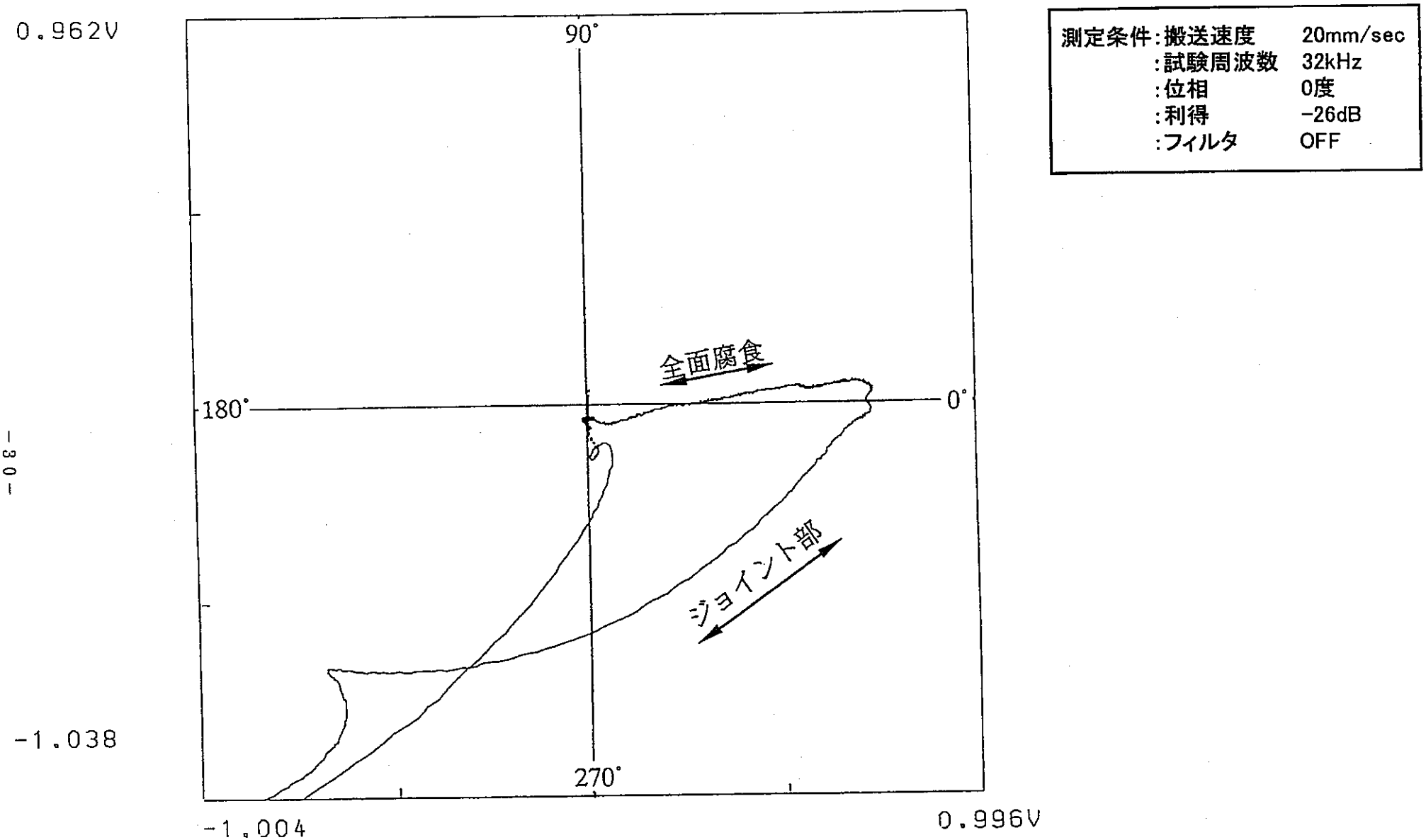
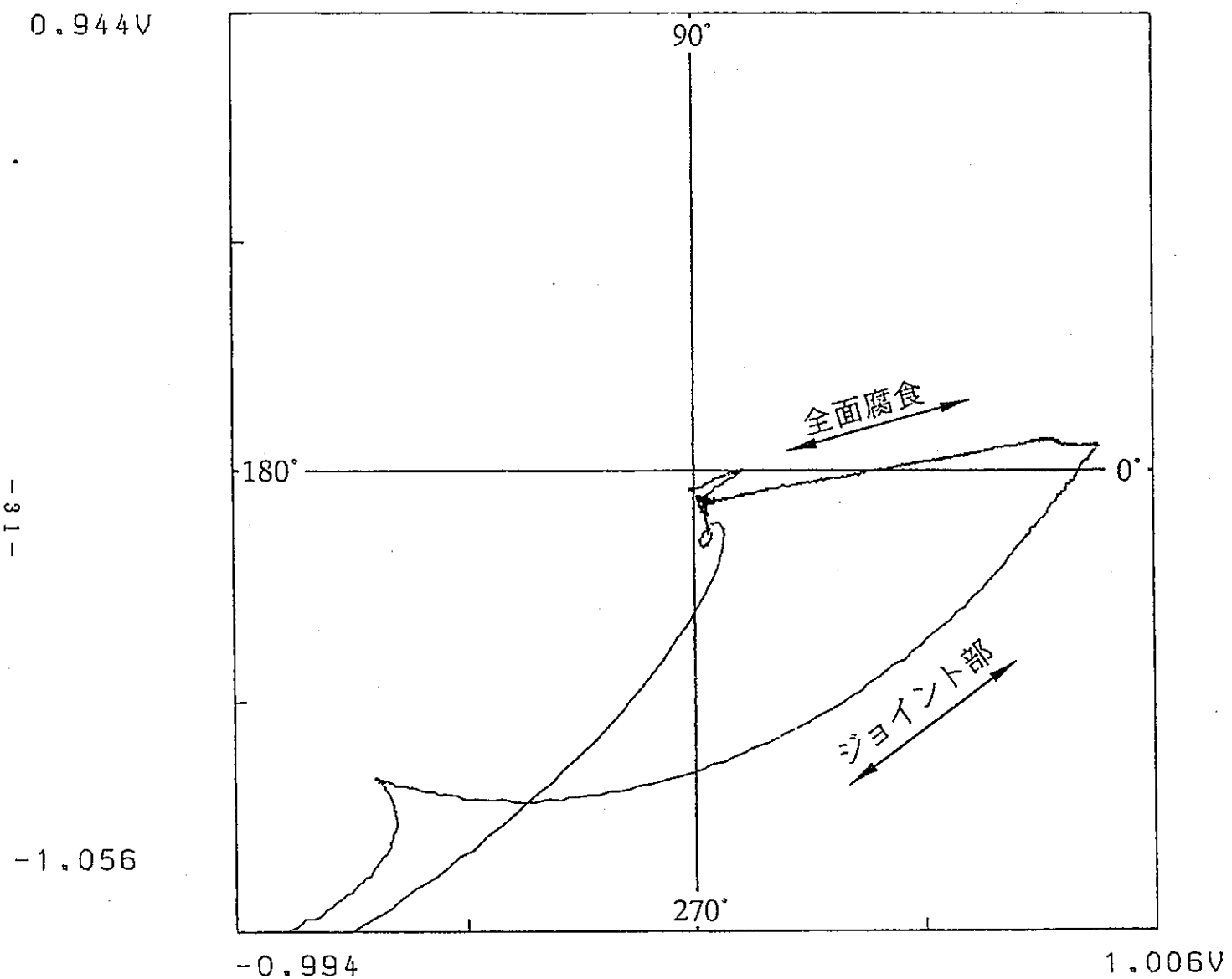
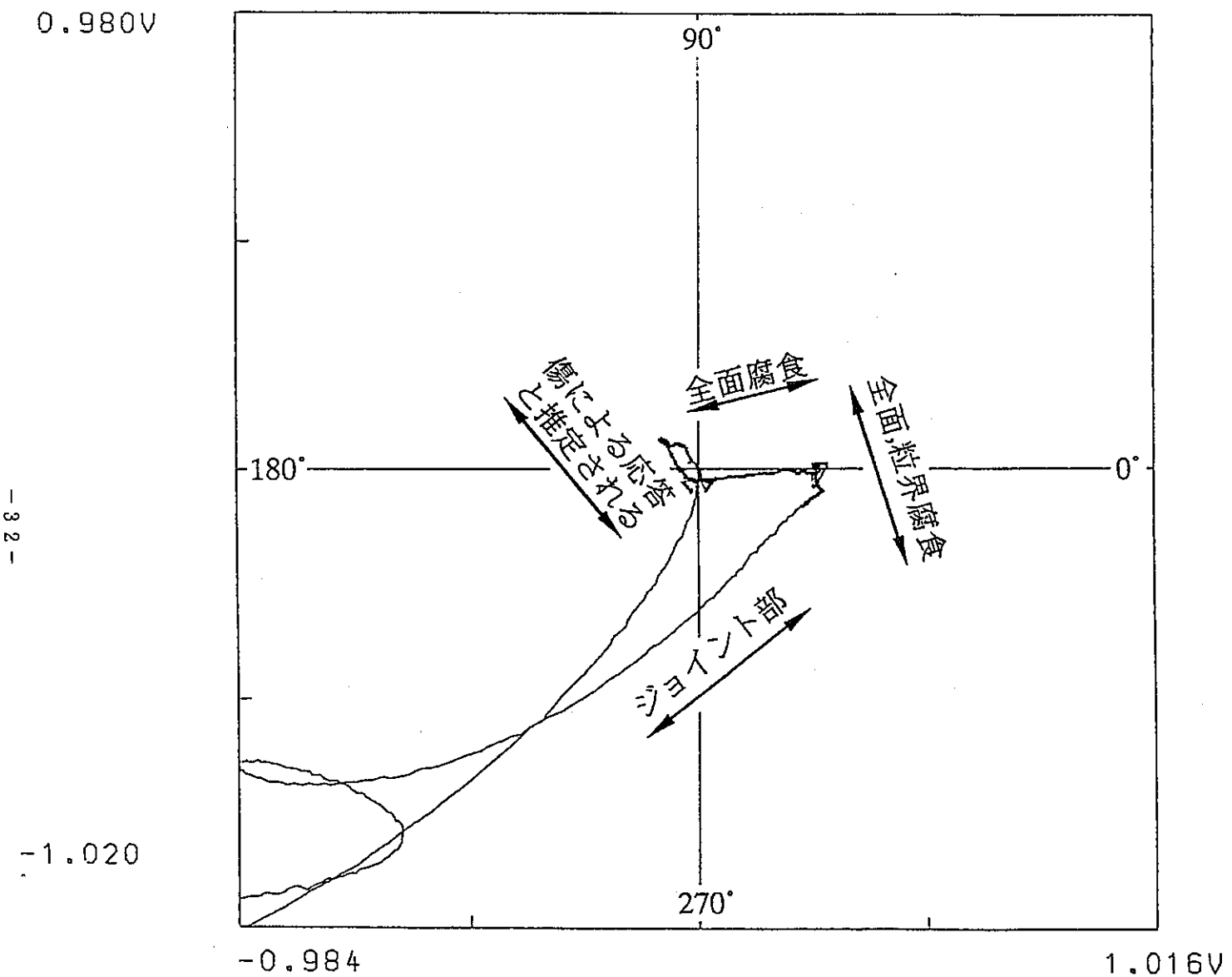



図4.2-2(3) FCCI-4ピン(Te600℃×50hで腐食)の位相角




| 測定条件 | | |
|---|---|---|
| | :搬送速度 | 20mm/sec |
| | :試験周波数 | 32kHz |
| | :位相 | 0度 |
| | :利得 | -26dB |
| | :フィルタ | OFF |

図4.2-2(4)　FCCI-5ピン(Te600℃×100hで腐食)の位相角




| 測定条件 | | |
|---|---|---|
| | :搬送速度 | 20mm/sec |
| | :試験周波数 | 32kHz |
| | :位相 | 0度 |
| | :利得 | -26dB |
| | :フィルタ | OFF |

図4.2-2(5) FCCI-6ピン(CsOH-CsI 600℃×50hで腐食)の位相角

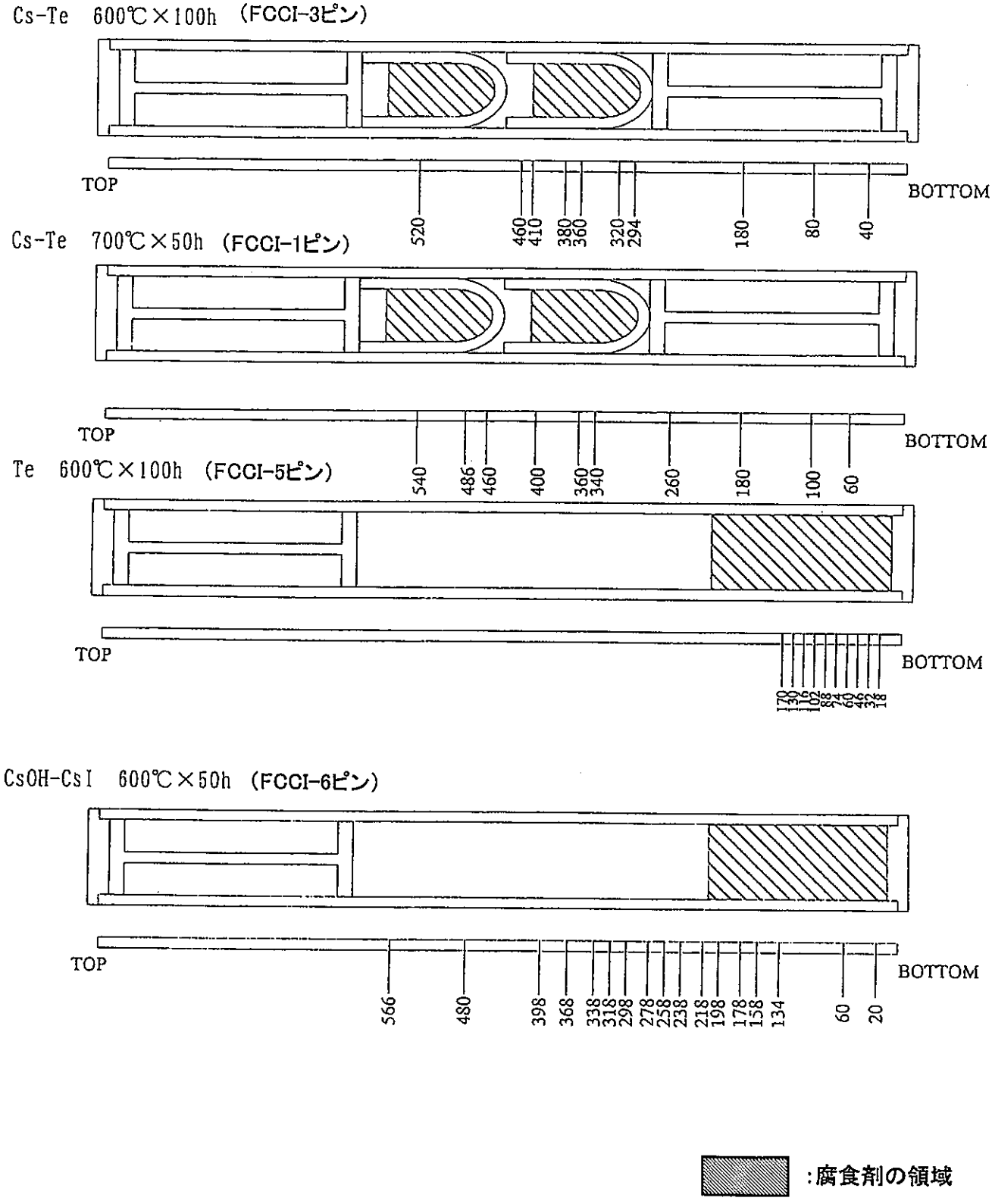



図4.2-3 FCCI模擬ピンの切断位置

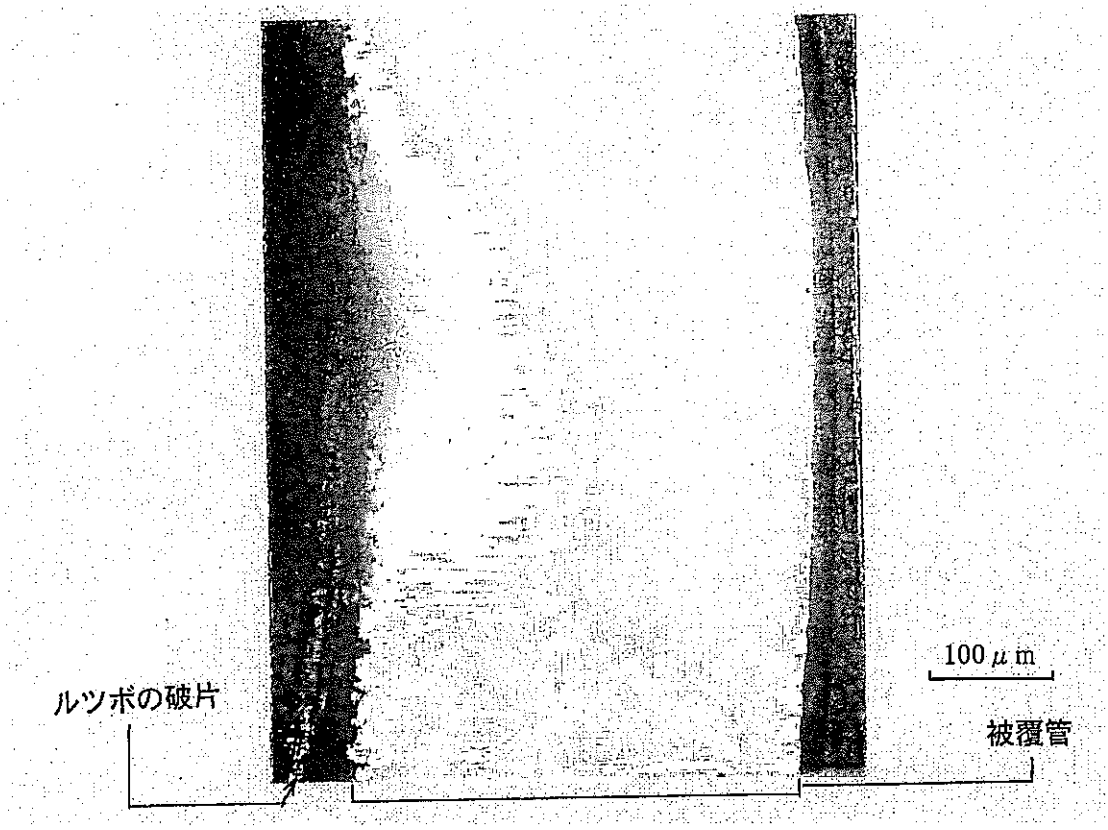



図4.2-4 FCCI-1ピン（Cs-Te 700℃×50hで腐食）の金相写真

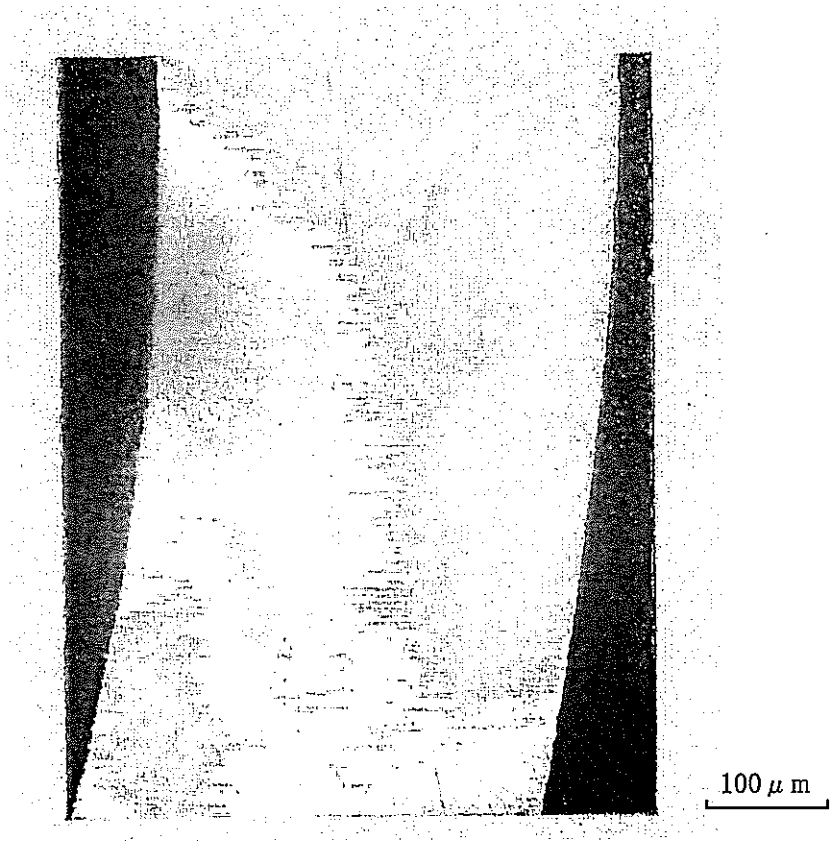



図4.2-5 FCCI-3ピン（Cs-Te 600℃×100hで腐食）の金相写真

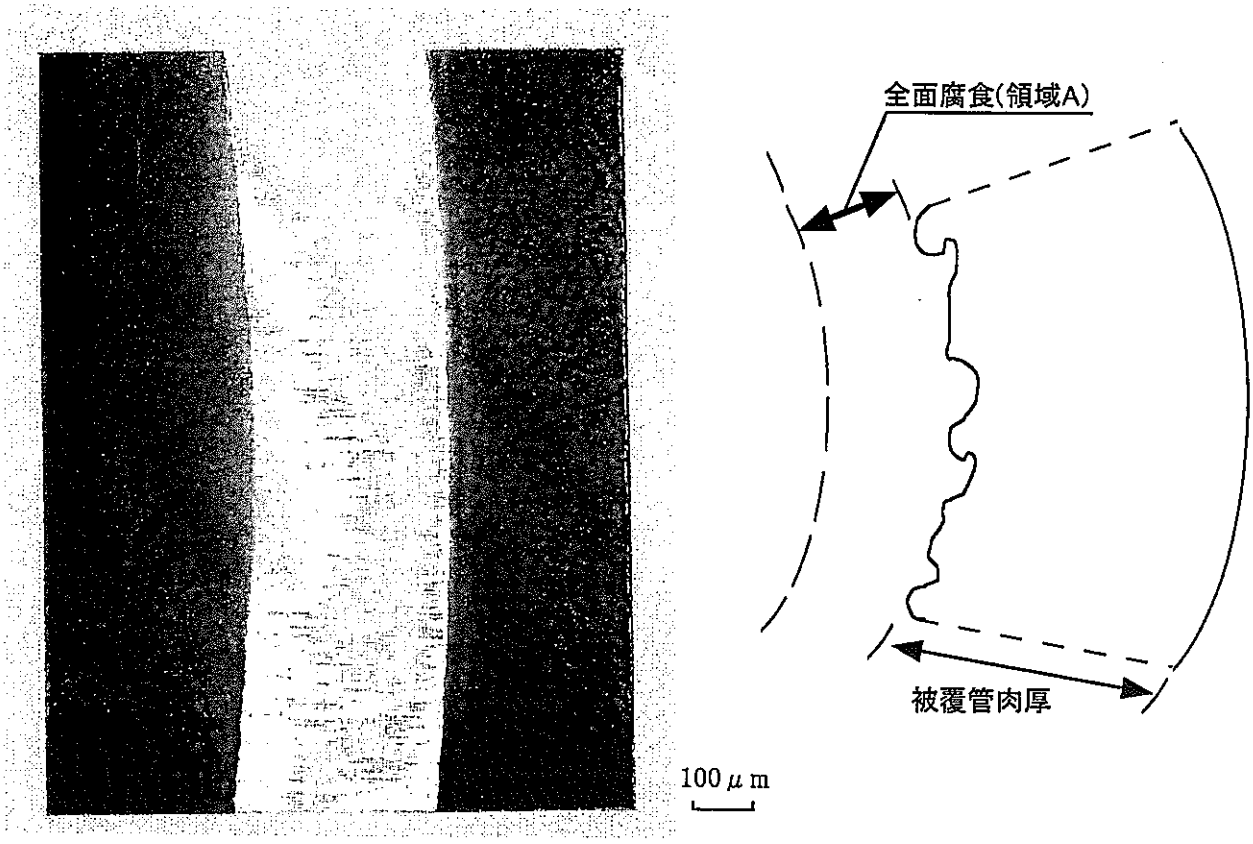



図4.2-6 FCCI-5ピン(Te 600℃×100hで腐食)の金相写真

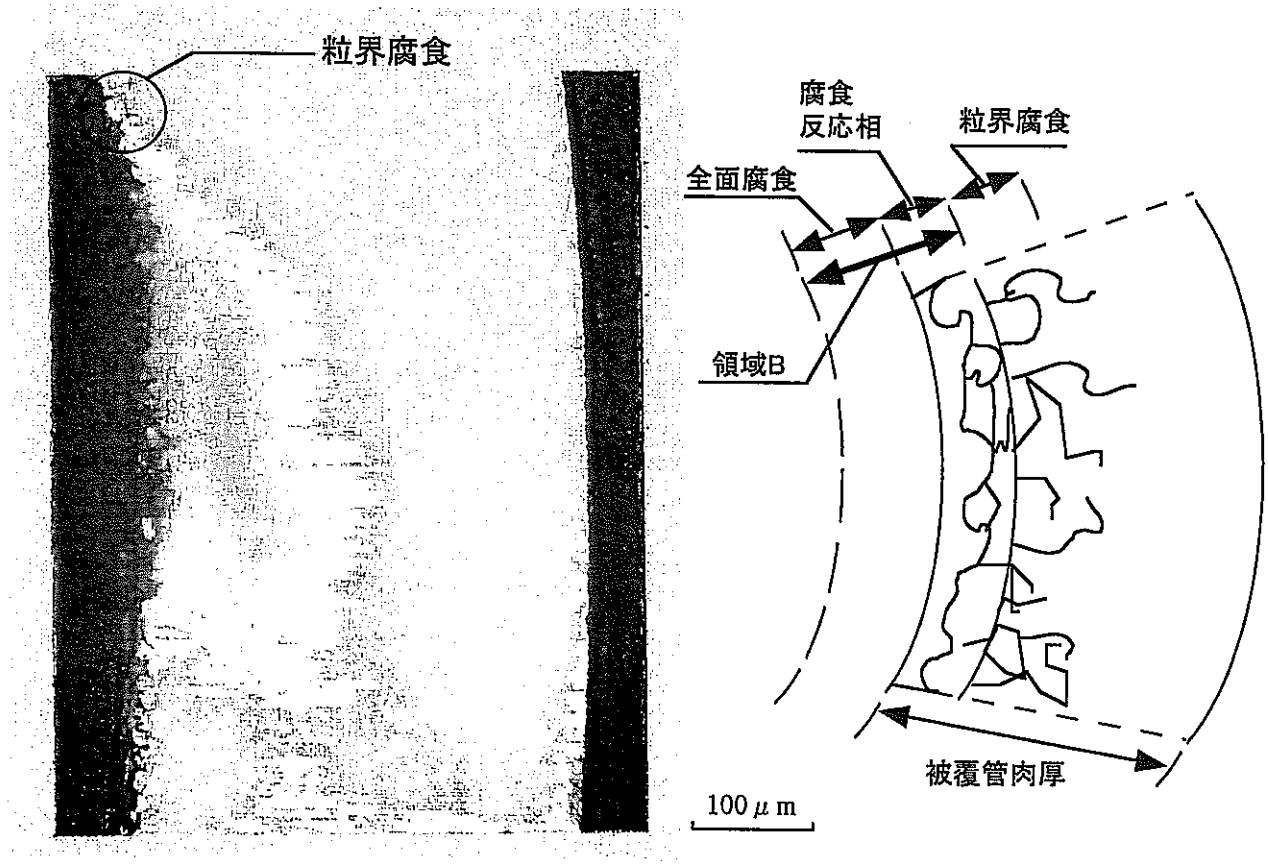
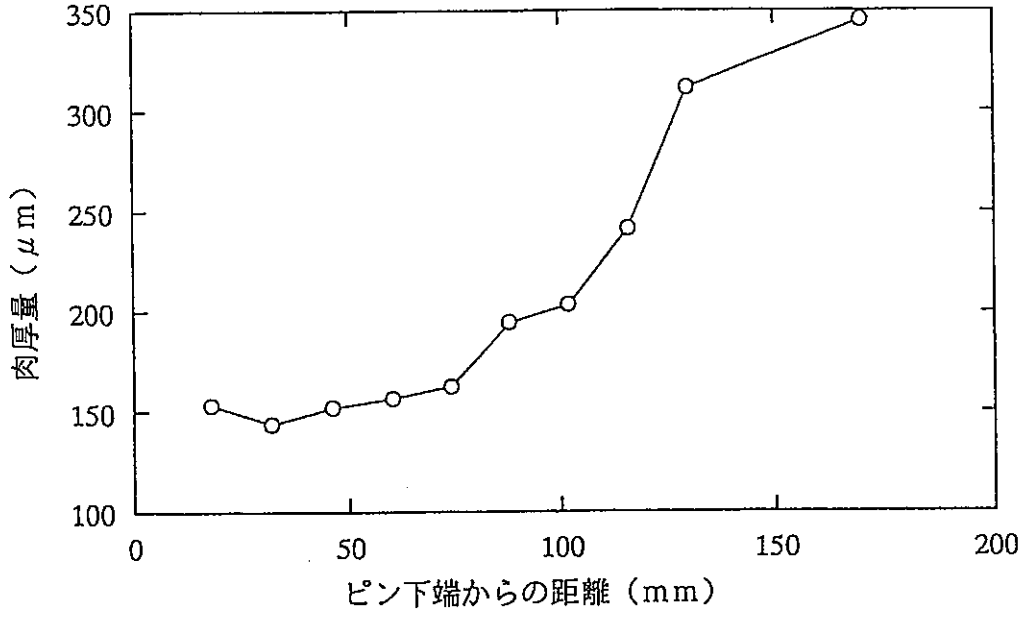
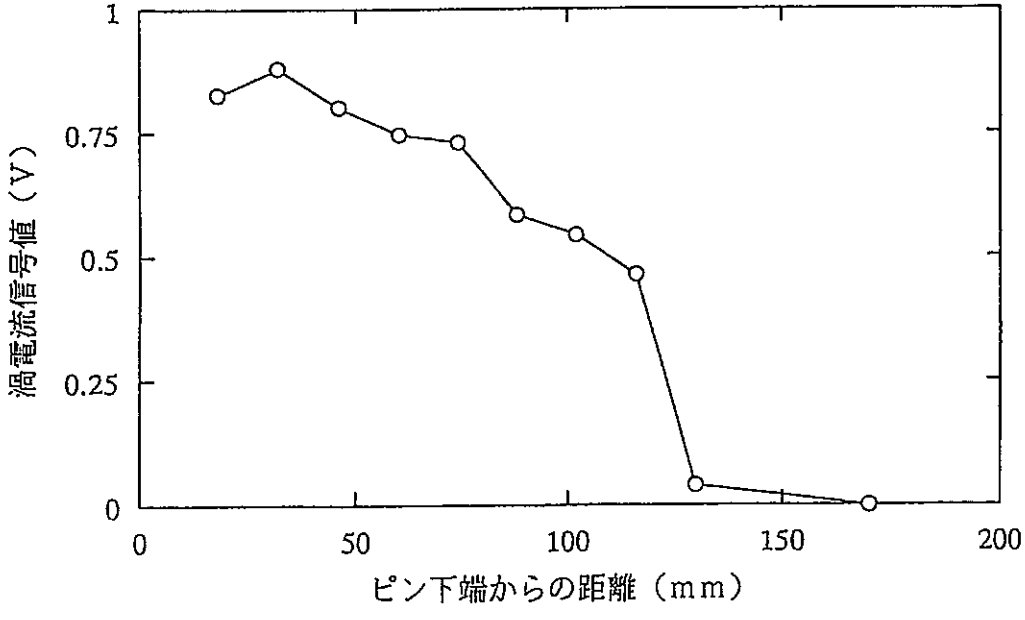



図4.2-7 FCCI-6ピン(CsOH-CsI 600℃×50hで腐食)の金相写真

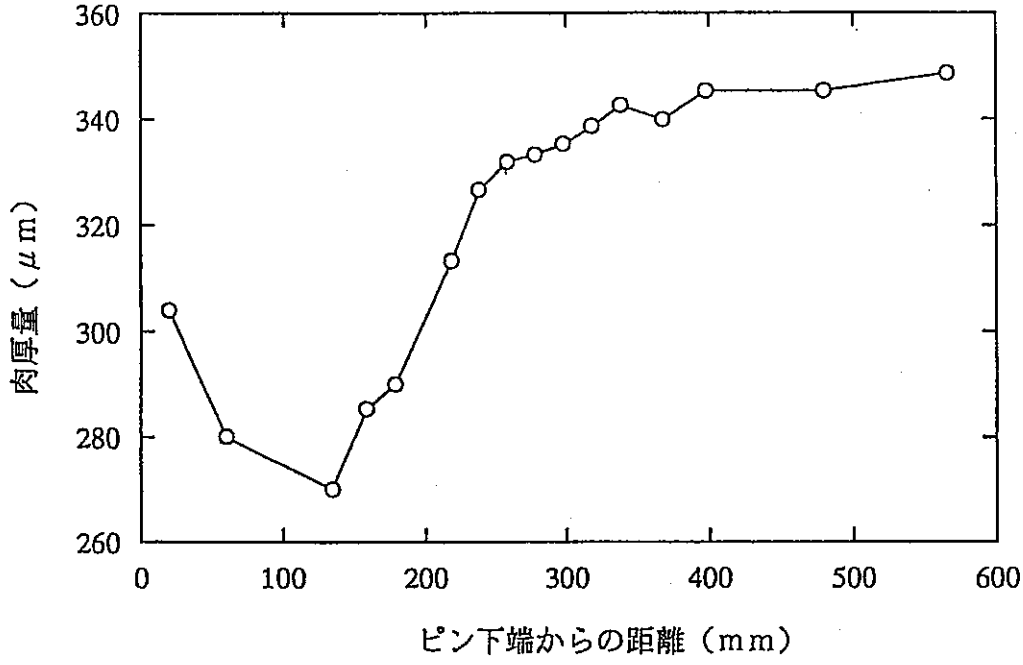



(a) 金相による測定

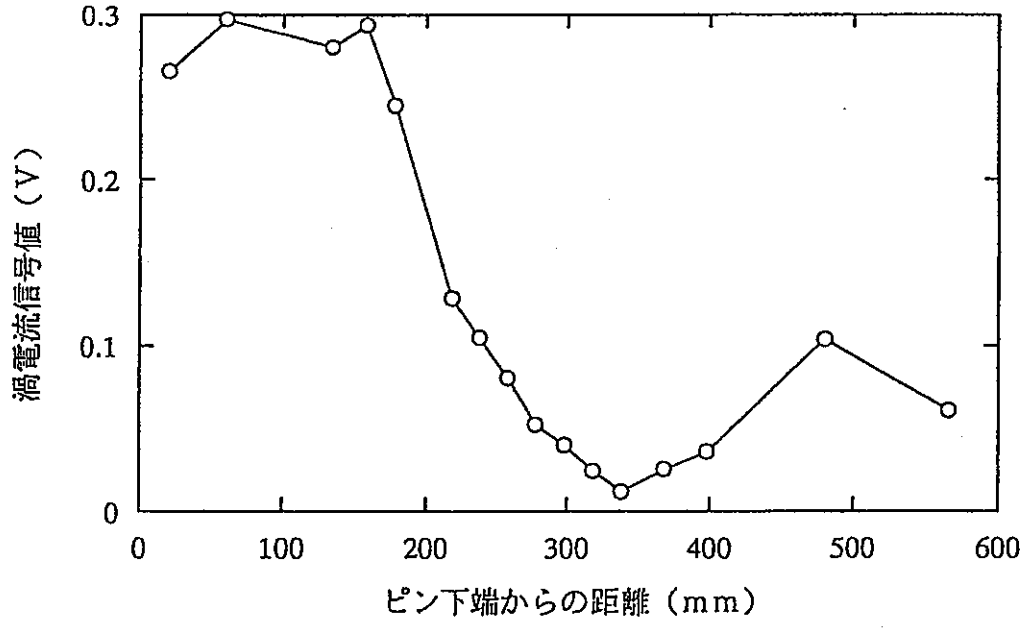



(b) 渦電流測定

図4.2-8 FCCI-5ピン（Te600℃×100hで腐食）の
渦電流信号と肉厚との相関




(a) 金相による測定




(b) 渦電流測定

図4.2-9 FCCI-6ピン（CsOH-CsI 600℃×50hで腐食）の
渦電流信号と肉厚との相関

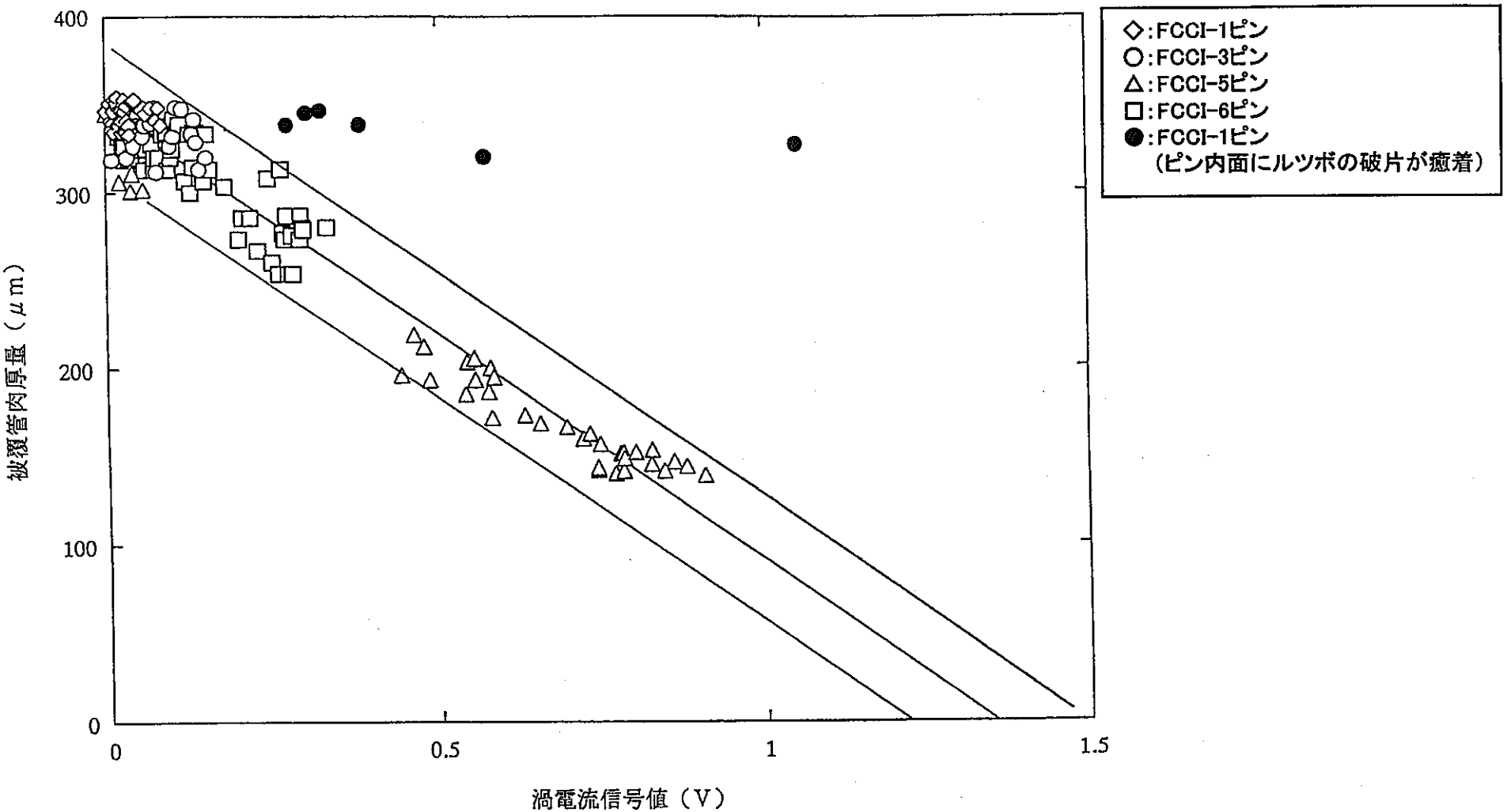



図4.2-10 渦電流信号値と肉厚との相関

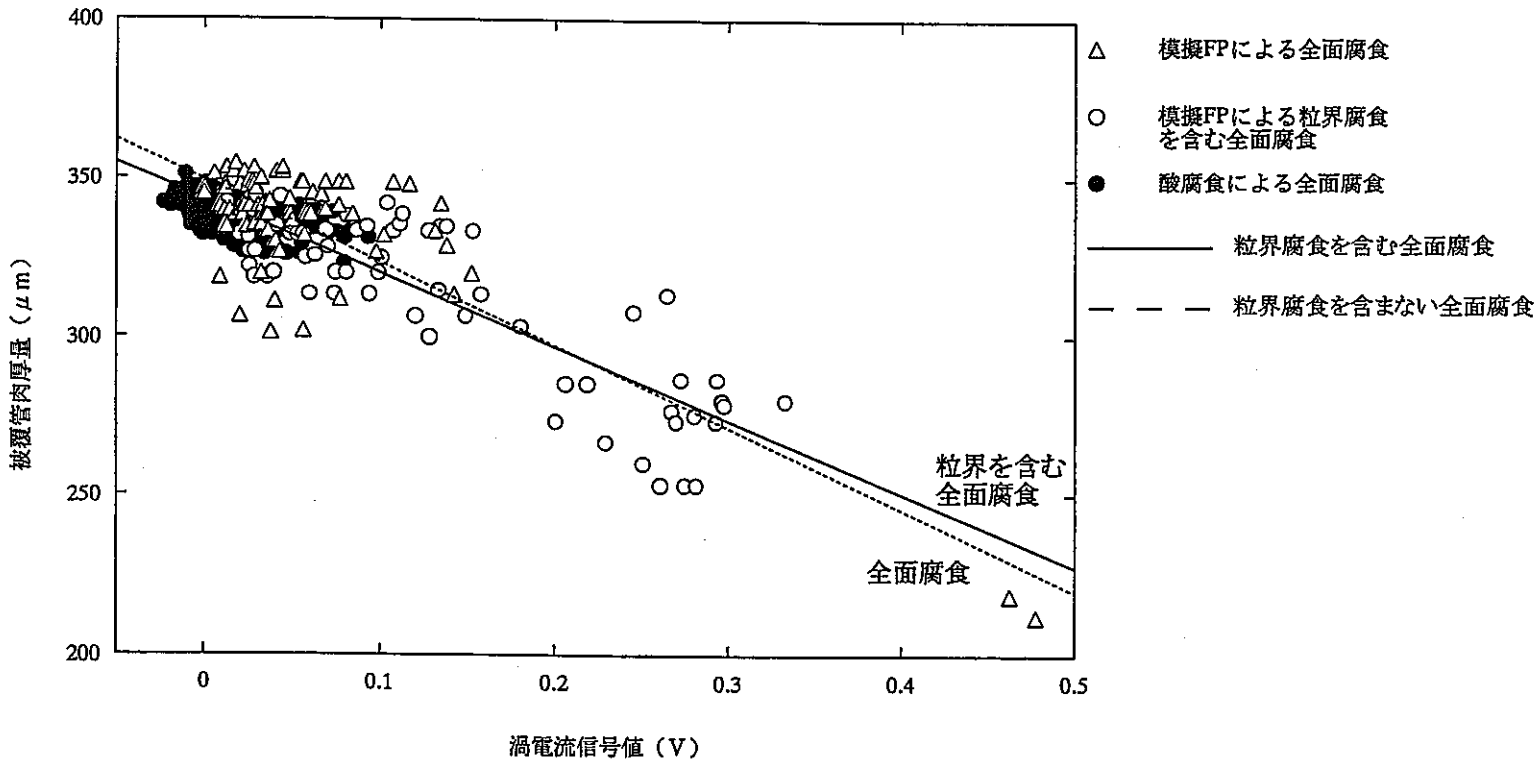
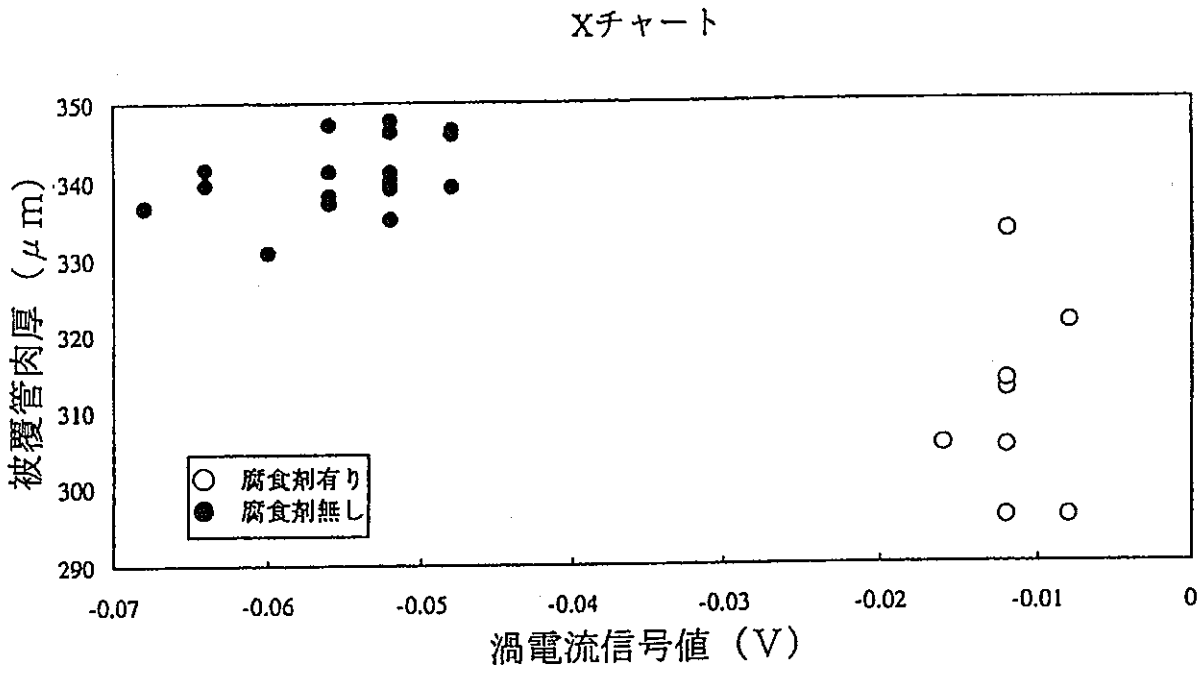



図4.2-11　全面腐食及び粒界腐食による肉厚変化と渦電流信号値との比較



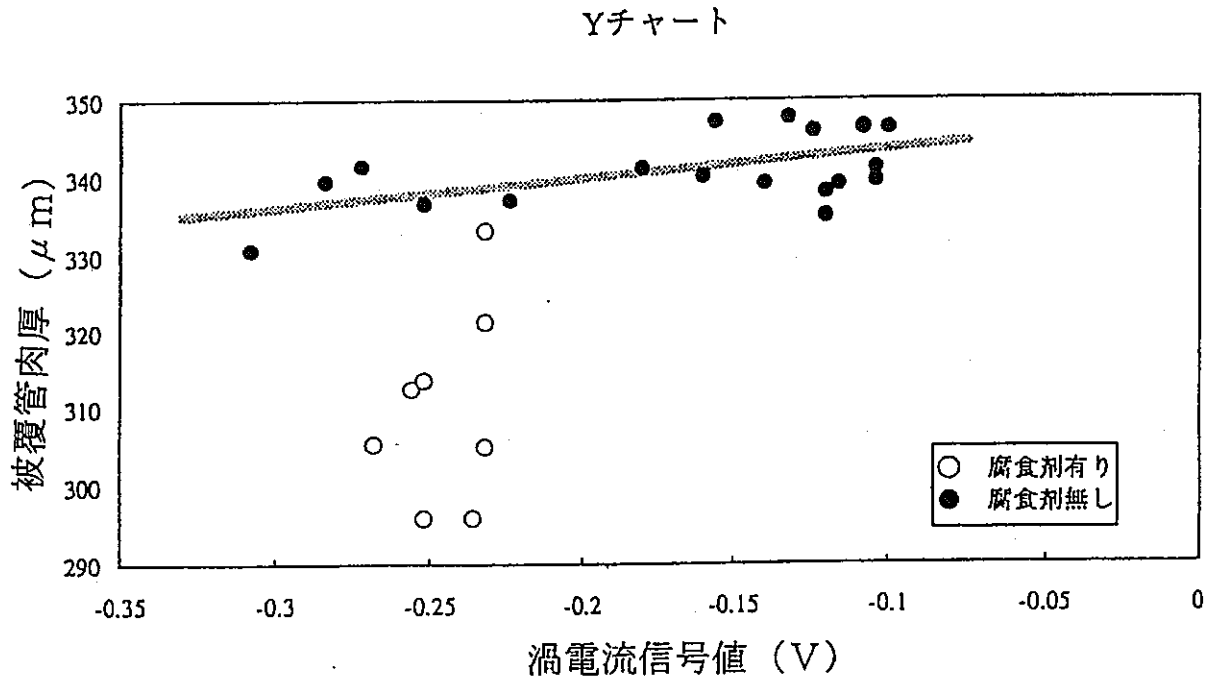




図4.2-12 FCCI-7ピン（CsOH-CsI 600℃×100hで腐食）の
渦電流信号と肉厚との相関

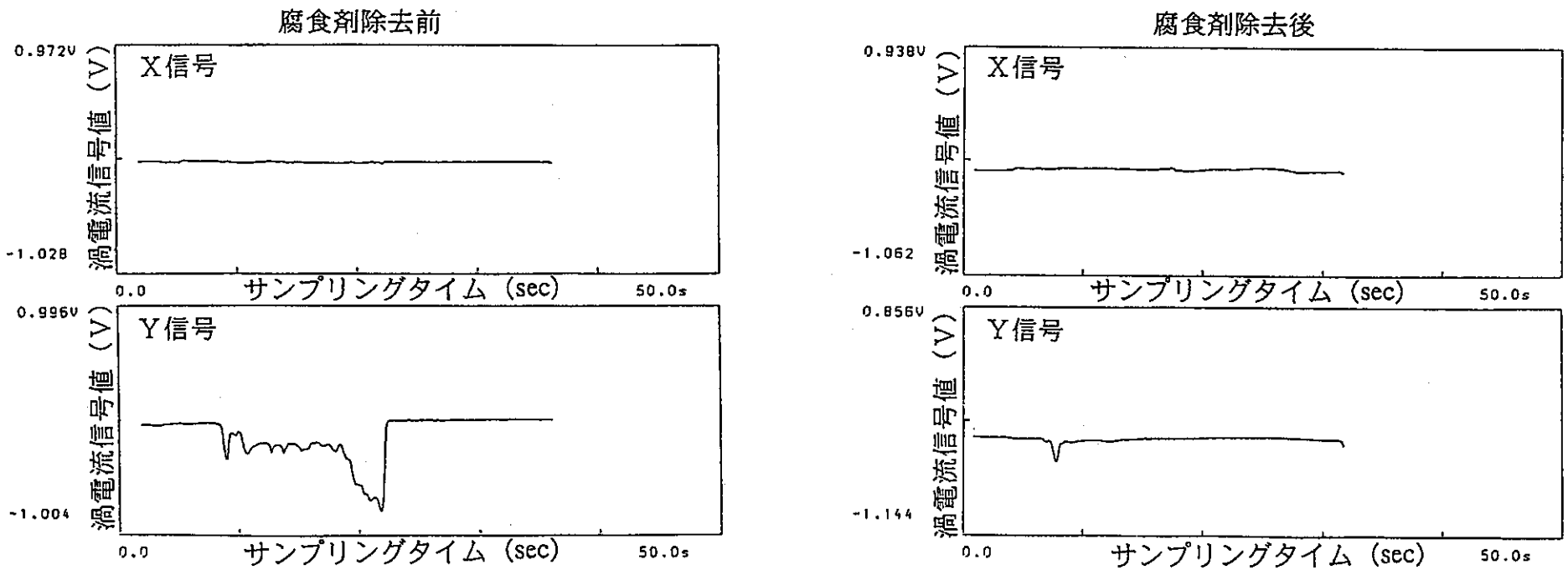



図4.2-13(1)　FCCI-1ピン(Cs-Te 700℃×50hで腐食)の腐食剤除去前後の比較

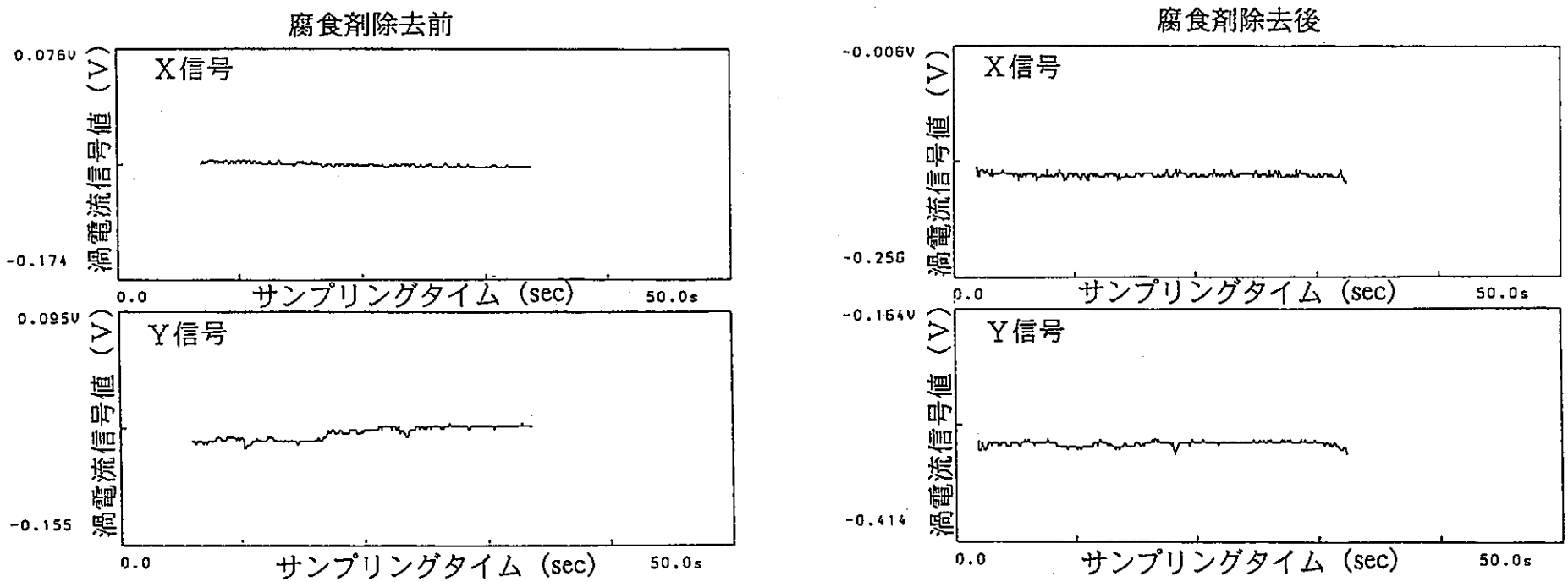



図4.2-13(2)　FCCI-3ピン(Cs-Te 600℃×100hで腐食)の腐食剤除去前後の比較

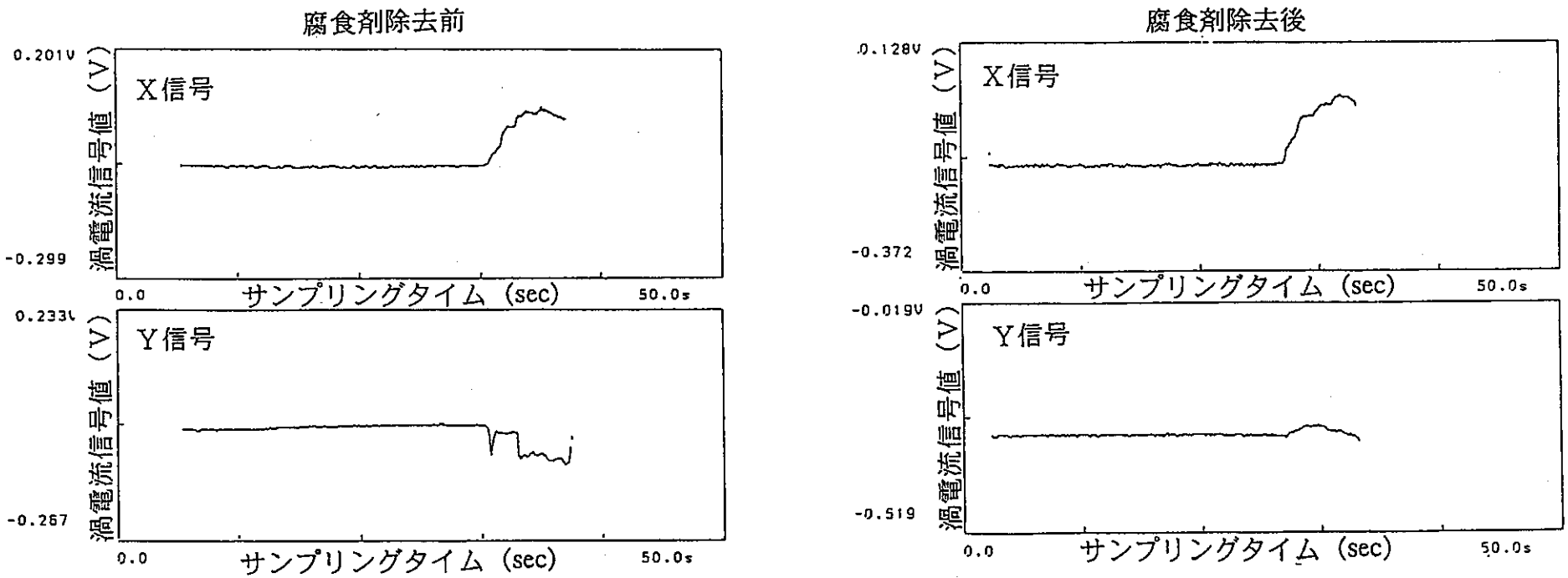



図4.2-13(3)　FCCI-4ピン(Te 600℃×50hで腐食)の腐食剤除去前後の比較

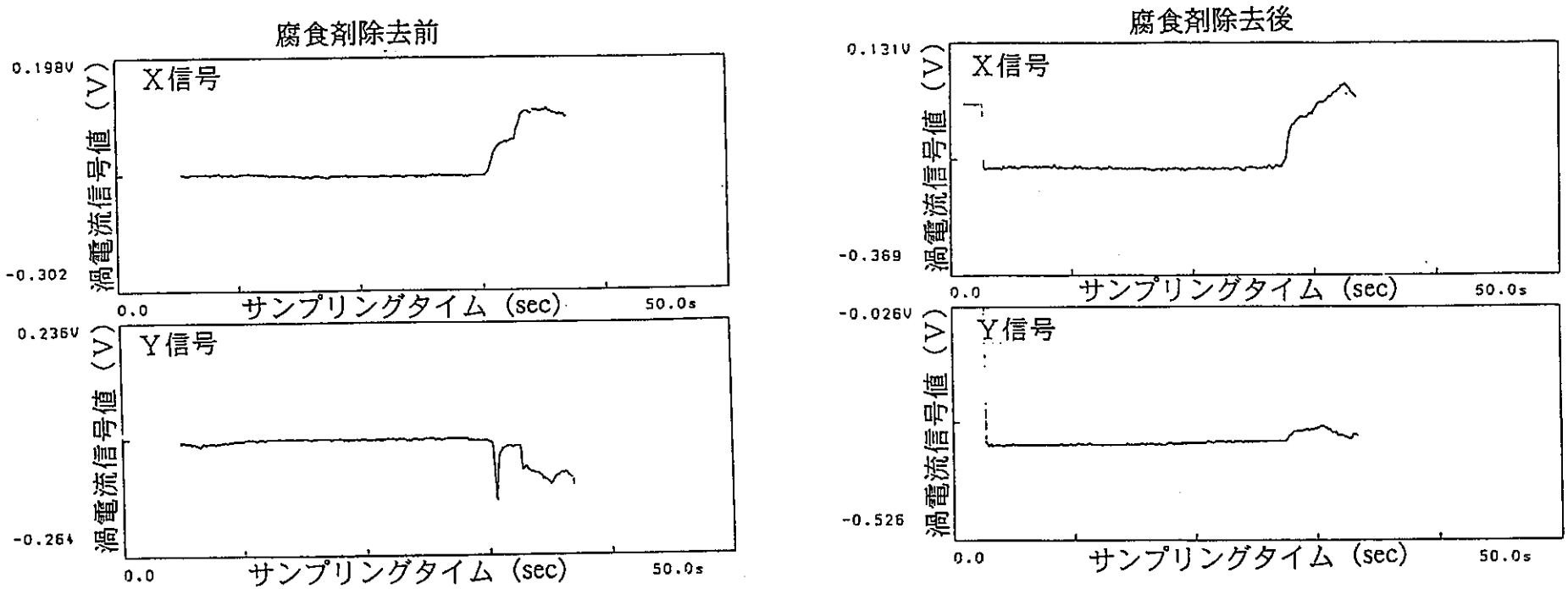



図4.2-13(4)　FCCI-5ピン(Te 600℃×100hで腐食)の腐食剤除去前後の比較

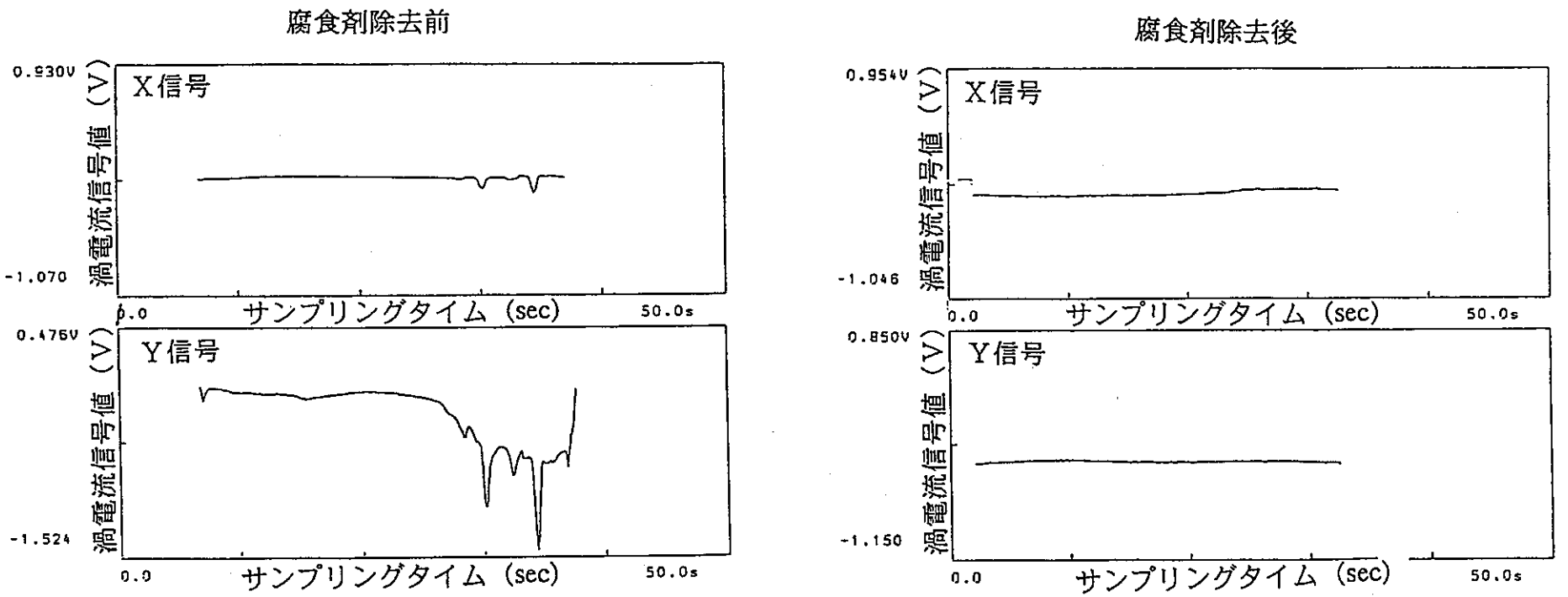



図4.2-13(5)　FCCI-6ピン(CsOH-CsI 600℃×50hで腐食)の腐食剤除去前後の比較

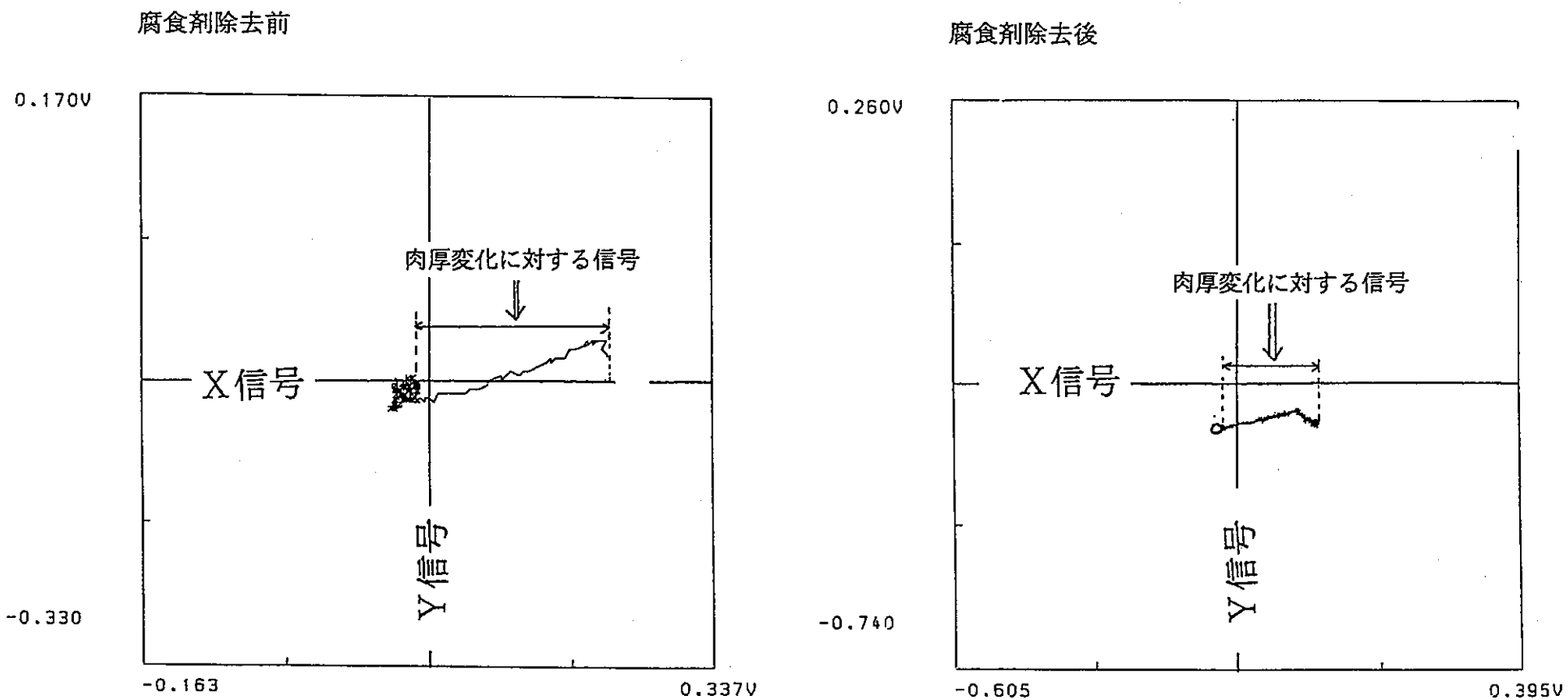



図4.2-14(1)　FCCI-1ピン(Cs-Te700℃×50hで腐食)の腐食前後の位相角

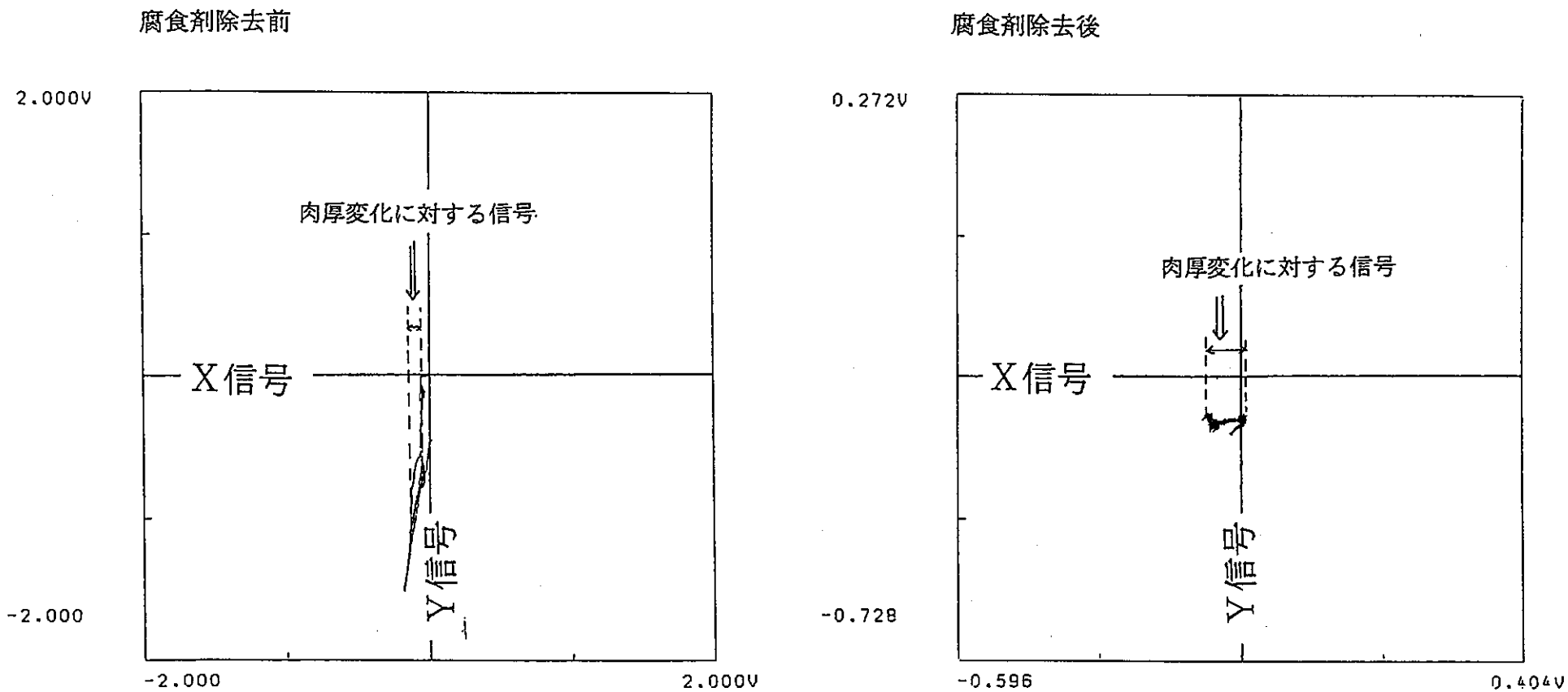



図4.2-14(2) FCCI-6ピン(CsOH-CsI 600℃×50hで腐食)の腐食前後の位相角

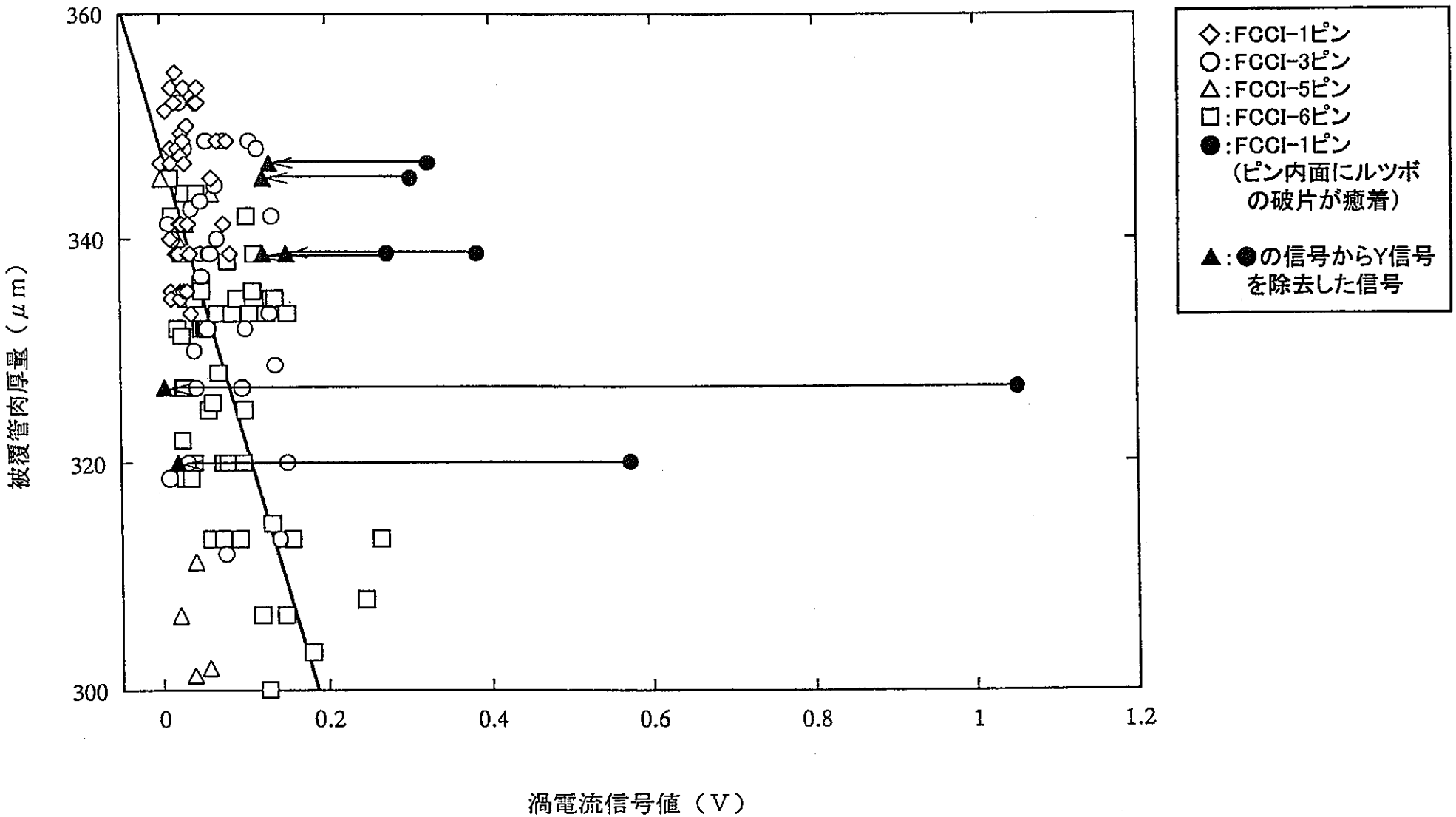



図4.2-15 腐食生成物に対する信号を除去した場合の渦電流信号値と肉厚量の関係

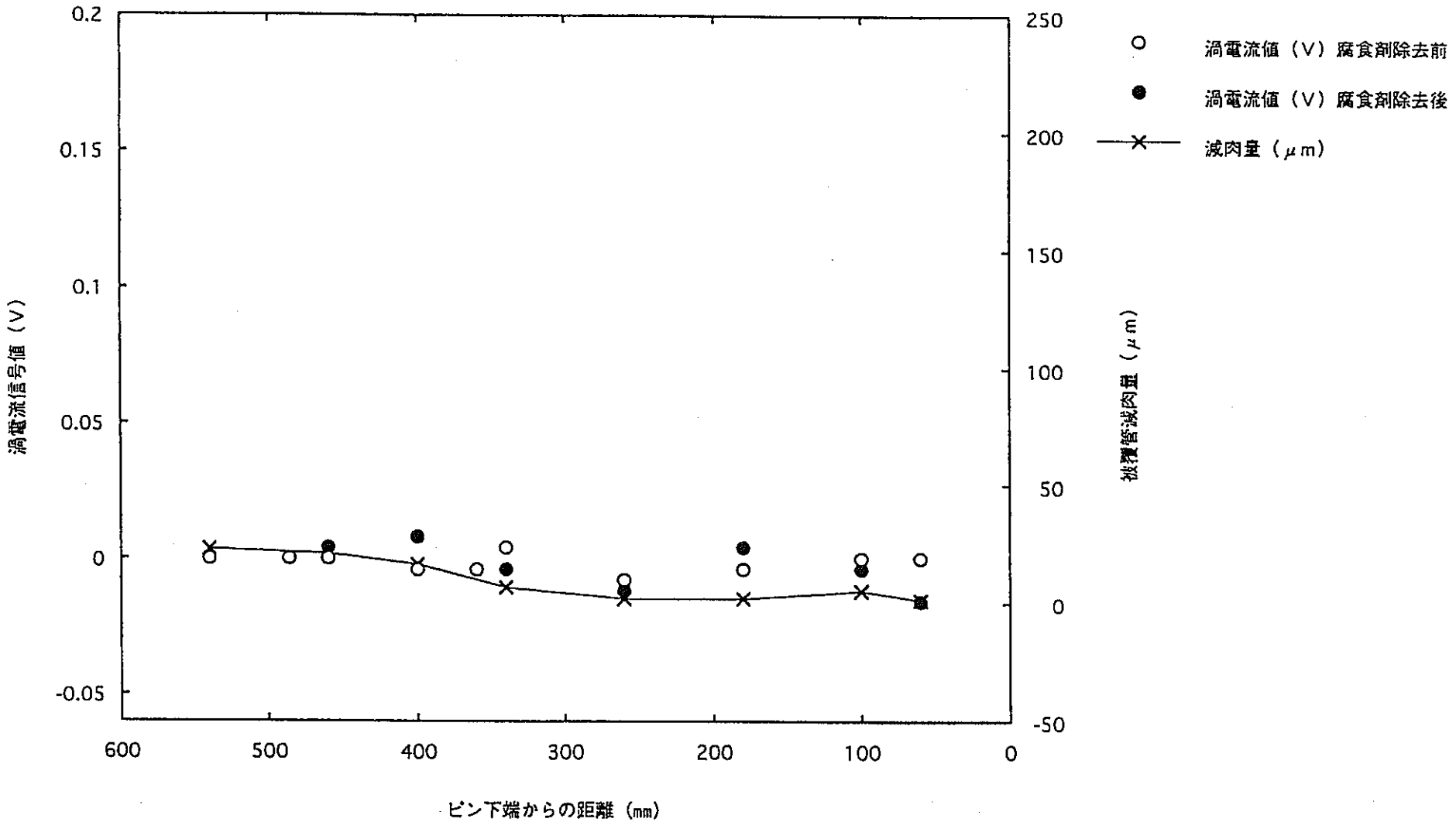



図4.2-16　FCCI-1ピン（Cs-Te700℃×50hで腐食）の
各軸位置における渦電流信号値と被覆管肉厚量との相関

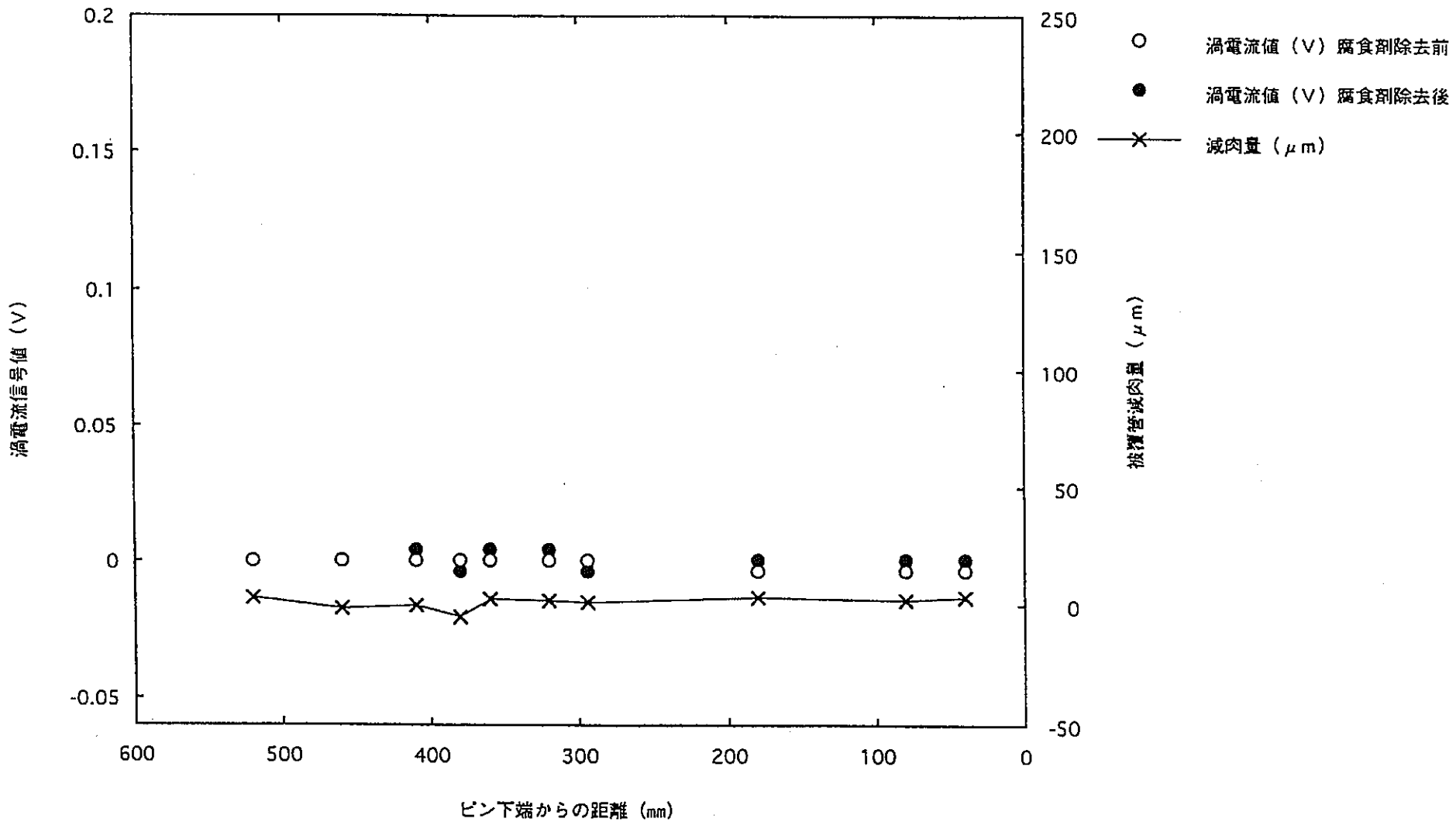
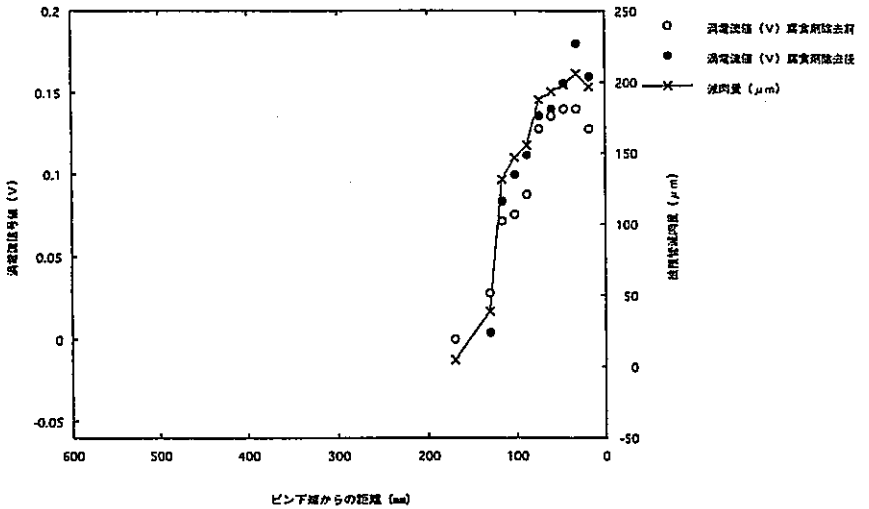
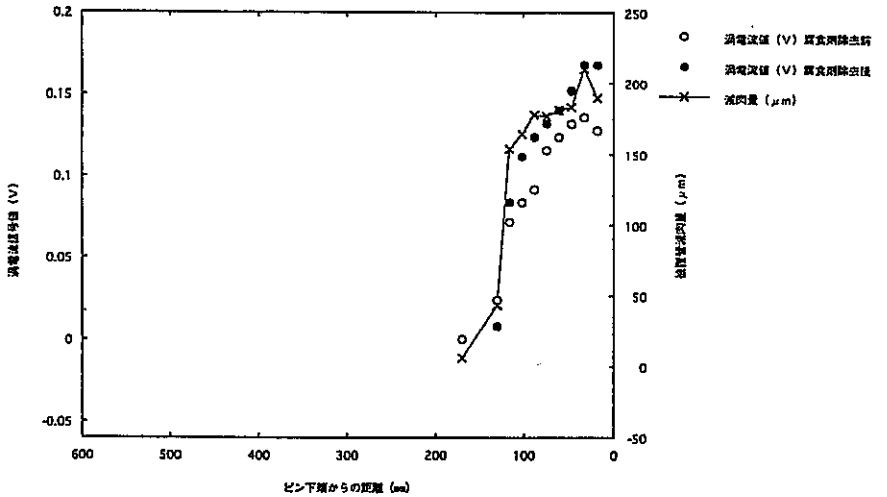


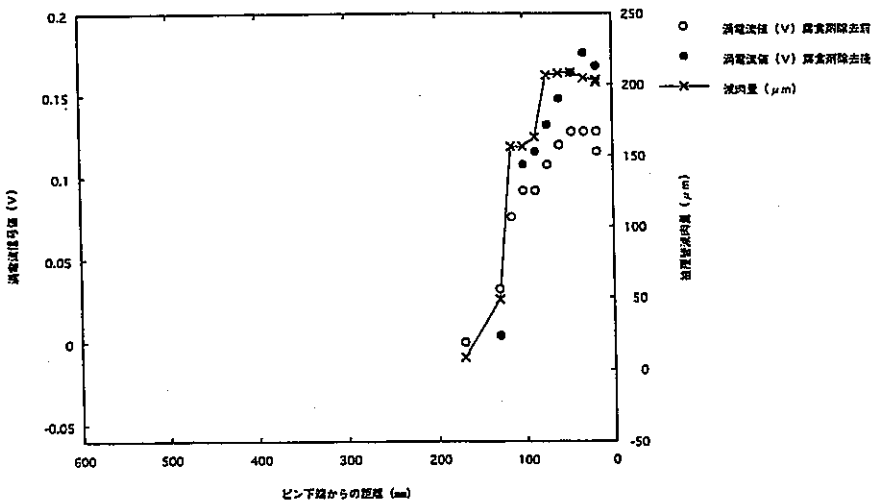

図4.2-17　FCCI-3ピン（Cs-Te600℃×100hで腐食）の
各軸位置における渦電流信号値と被覆管肉厚量との相関



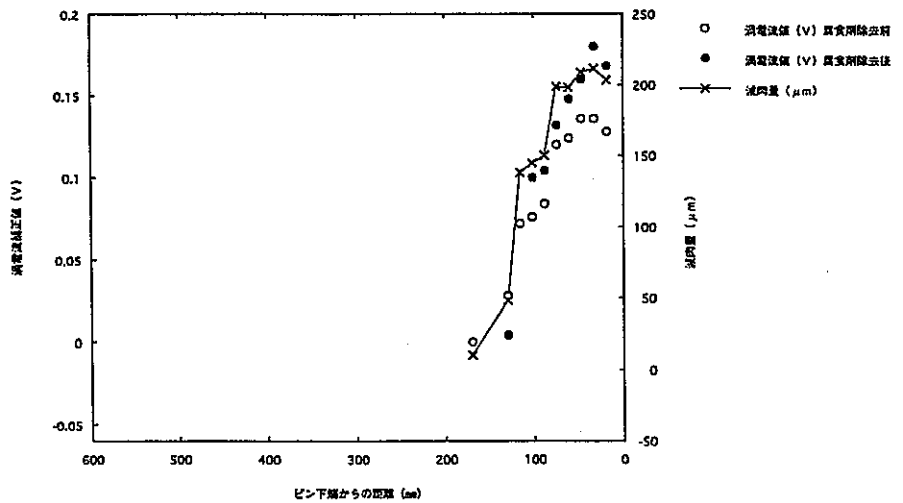

（a） 0度方向




（b） 90度方向

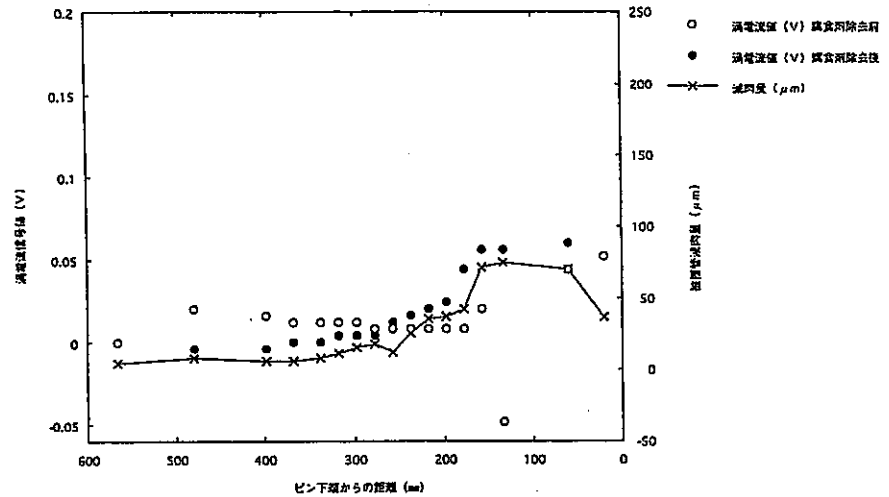



（c） 180度方向

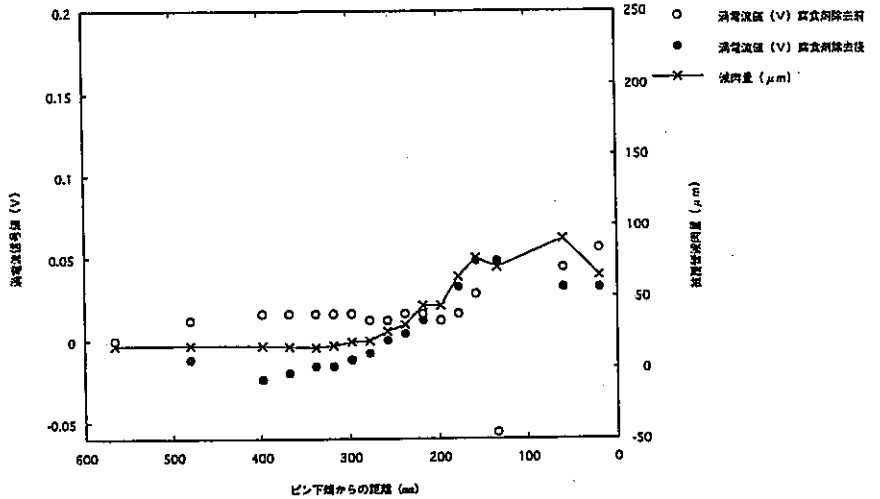



（d） 270度方向

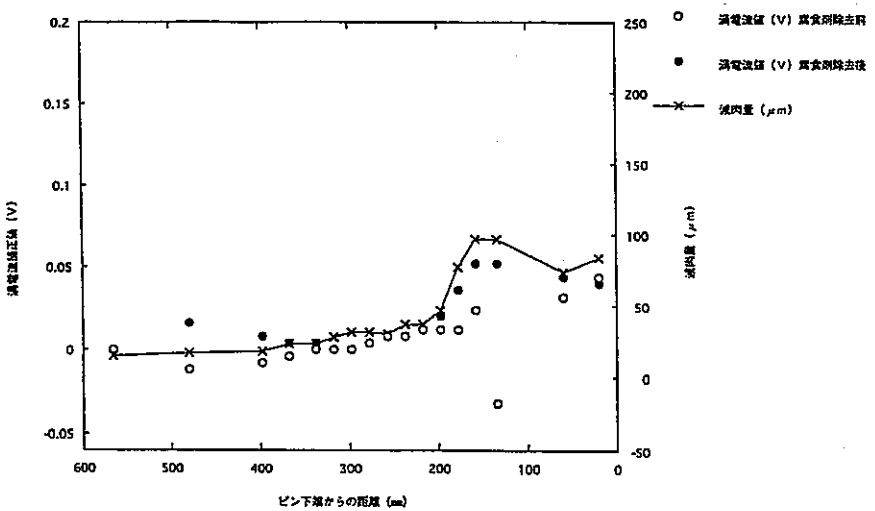
図4.2-18　FCCI-5ピン（Te 600℃×100hで腐食）の渦電流信号値と被覆管肉厚量との相関



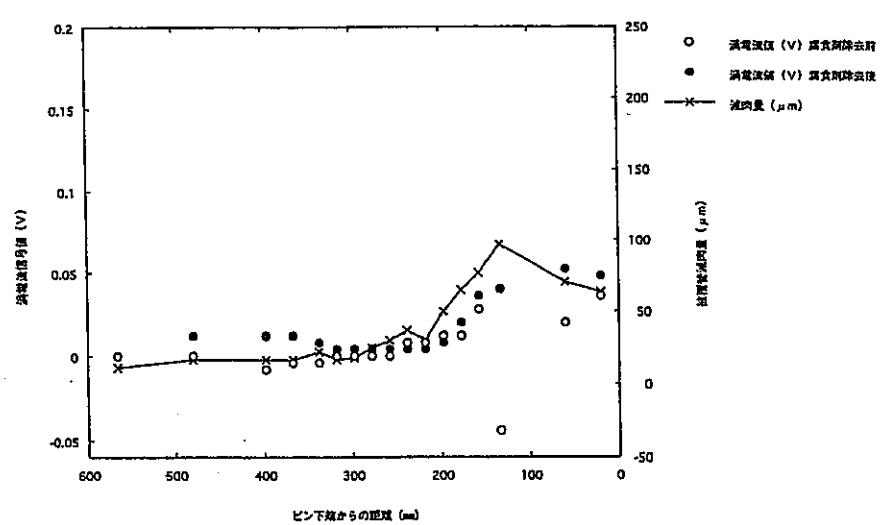

(a) 0度方向




(b) 90度方向




(c) 180度方向




(d) 270度方向

図4.2-19　FCCI-6ピン(CsOH-CsI 600℃×50hで腐食)の渦電流信号値と被覆管肉厚量との相関

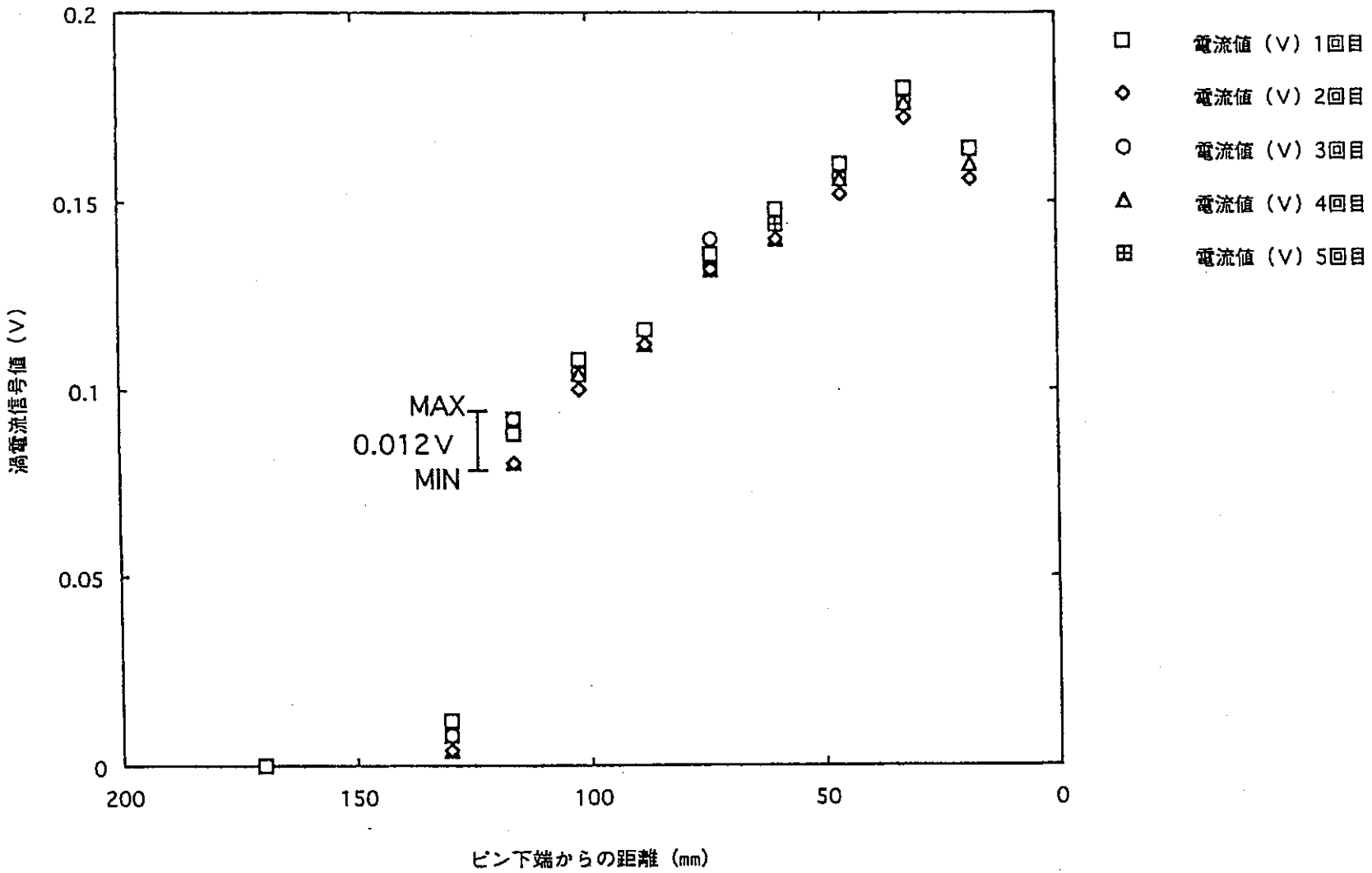



図4.2-20 繰り返し精度

## 4.3　セル内導入後の校正試験

渦電流探傷装置の既設試験セル内への導入は、平成 11 年 9 月 6 日～7 日に試験装置用架台、試験検出部（コイル、コイル保持装置）、校正試験ピン（標準欠陥ピン）、平成 11 年 10 月 26 日に電気プラグの交換を実施し、導入作業を完了した。本装置は、詳細外観装置の作業エリアに設置し、詳細外観装置の支援システムとして運用を開始する予定となっている。セル内導入後においては、渦電流探傷装置がセル外での状態と同等であることを確認する必要がある。そのため、表 3.2-1 に示したようにセル外試験で使用していた外面欠陥、内面欠陥、貫通孔、FCCI のそれぞれの標準欠陥ピンを用いて、セル内導入後の校正試験を実施した。

### 4.3.1　信号応答

同一測定条件下におけるセル内導入後の校正試験結果とセル外試験の結果を比較したものを図 4.3-1、図 4.3- 2 に示す。図 4.3-1 では、外面欠陥、貫通孔、内面欠陥についての代表として試験周波数が 1024kHz の場合を示している。図 4.3-1 より、信号応答に定性的な差異は認められず、信号値はほぼ一致する傾向にあった。これらは、装置の信号ケーブルが長さにより信号強度が小さくなるなどの信号応答性に影響していないことを示す結果である。またノイズについては、セル内においてほとんど認められず、装置検出部であるコイルの周辺装置の振動等によるノイズはないものと思われる。一方、セル外試験の結果ではノイズが発生し、信号強度が大きくなっているが、これらはセル外試験で使用したロボットアームの性能によるものである。ノイズについてはロボットアームの振動による影響である。また信号強度については、ロボットアームの送り速度の変化による影響である。減肉試験以外の欠陥探傷試験では、信号強度のむらをなくすため、可能な限り送り速度を一定にする必要がある。しかし、セル外で使用したロボットアームは、送り速度が既設詳細外観検査装置の駆動系よりむらがあり、瞬間的に速度変化が生じるため、信号応答が若干大きくなるところが生じてしまうのである。なお、位相角もセル外試験と比較してほぼ一致しており、それぞれの欠陥を位相角の相違により識別することがセル内試験でも可能であることを確認した。一方、FCCI の検出についても図 4.3- 2 に示すように、セル外試験結果とセル内試験結果の間に定性的な差異は認められなかった。

### 4.3.2　周波数依存性

ここでは、セル外試験結果において見られた信号応答（検出感度）と周波数との相関について、セル内試験結果についても同等の相関が得られるかを確認するため、セル内外の試験結果を比較検討した。外面欠陥、貫通孔、内面欠陥、FCCI のそれぞれの渦電流信号値の周波数依存性について図 4.3-3～図 4.3-6 に示す。図 4.3-3 に示され

る試験周波数 3072kHz の信号値の差異以外はいずれの欠陥についても、セル内試験結果はセル外試験結果と同じ傾向を示すことを確認した。また、図 4.3-3 で示された外面欠陥でのセル内試験結果とセル外試験結果の差異は、SN（シグナル/ノイズ）比について評価すれば、図 4.3-7 に示すようにセル内試験結果はセル外試験結果と同じ傾向を示した。図 4.3-3 で見られた差異は信号のノイズ成分が影響していたと考えられ、それらを考慮した SN 比で評価すると、検出感度の周波数依存性については、他の図でみられた相関関係と同等であった。さらに、3072kHz の周波数は欠陥検出の試験周波数の最適値が 512kHz～1024kHz であることから、データ取得には直接影響しないものと考える。

以上から、外面欠陥、貫通孔、内面欠陥については、周波数が大きくなるとともに、渦電流値が大きくなる表皮効果がセル内試験においても再確認された。FCCI についても図 4.3-6 より、探傷信号の周波数依存性はセル内とセル外で同じ傾向を示すことが確認された。最適な探傷周波数は、16～32kHz であることがわかり、今後実機燃料集合体の燃料要素の FCCI（減肉）測定試験において、32kHz で測定できる見とおしを得た。

なお、当初予想された放射線環境下における信号応答や試験周波数への影響は認められなかった。

### 4.3.3 今後の計画

本報告では、上述したとおりセル外においても使用した標準欠陥ピンを用いて、セル内の環境下で校正試験を実施した結果、特にセル外試験とセル内試験の間に差異は認められなった。しかし、実機燃料集合体の燃料要素を実際に用いた測定を実施するまでは、渦電流探傷技術を確立したとは言えない。今後は、実機燃料集合体の燃料要素を用いた探傷性能（検出性能）の確認試験を実施していく予定である。実燃料要素を用いた確認試験を実施する上で、被覆管の材質及び外径の相違による探傷信号への影響、内部構造物（ペレット、スプリングなど）による探傷信号への影響などが懸念される。これらの点に着目して、被覆管表面の欠陥探傷試験については、詳細外観試験の結果を、FCCI 測定試験については金相試験の結果を参考にし、比較検討していく予定である。

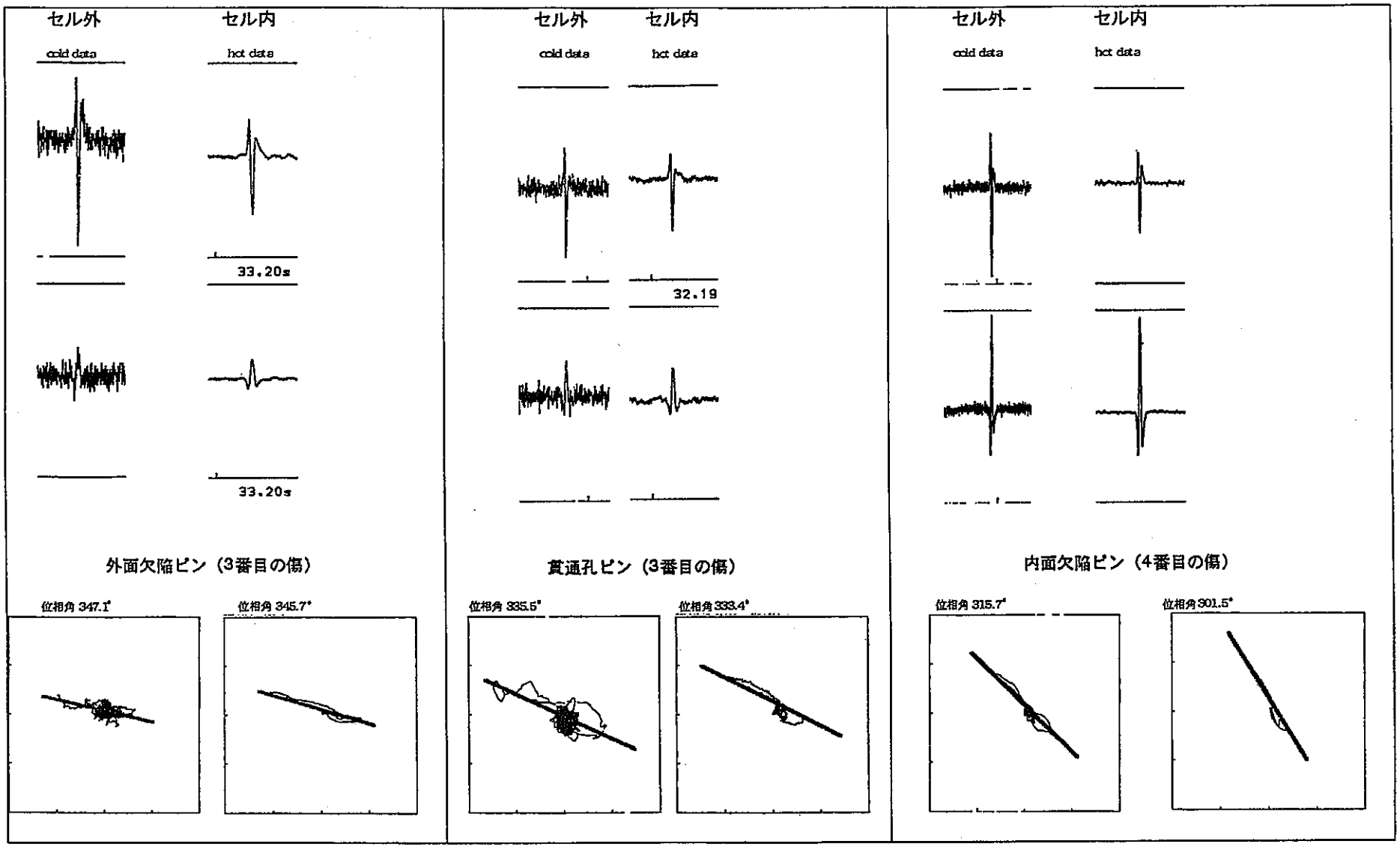



図4.3-1　外面欠陥、貫通孔、内面欠陥のセル外試験結果とセル内試験結果の比較（1024kHz）

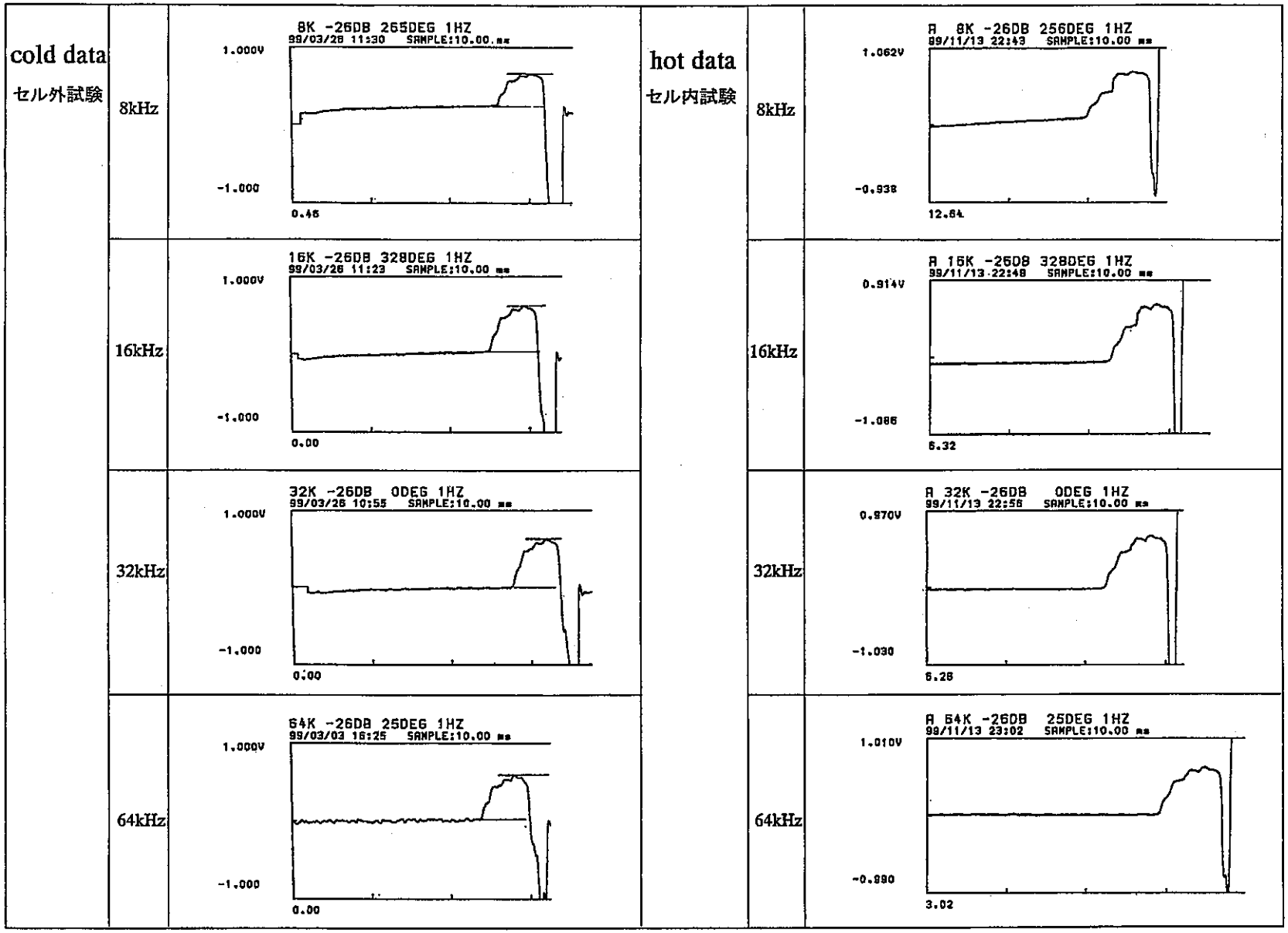



図4.3-2 FCCIのセル外試験結果とセル内試験結果の比較

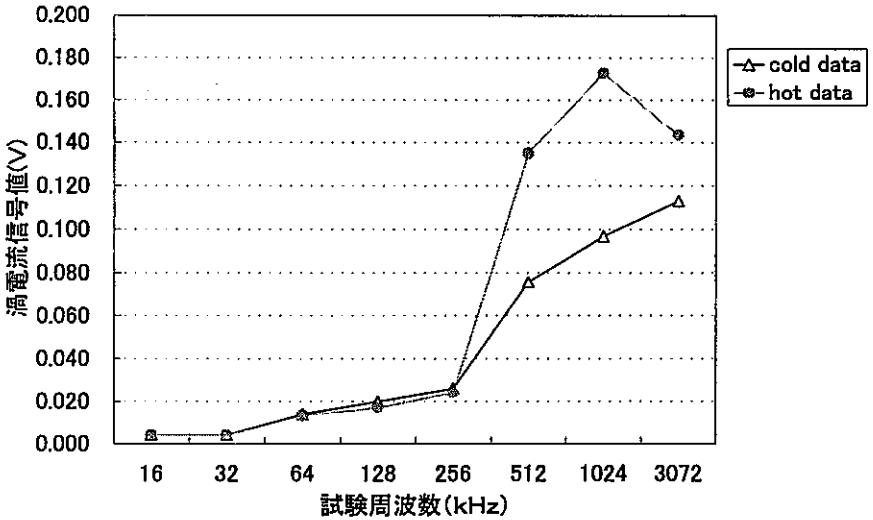



図4.3-3 外面欠陥の信号値と周波数の相関

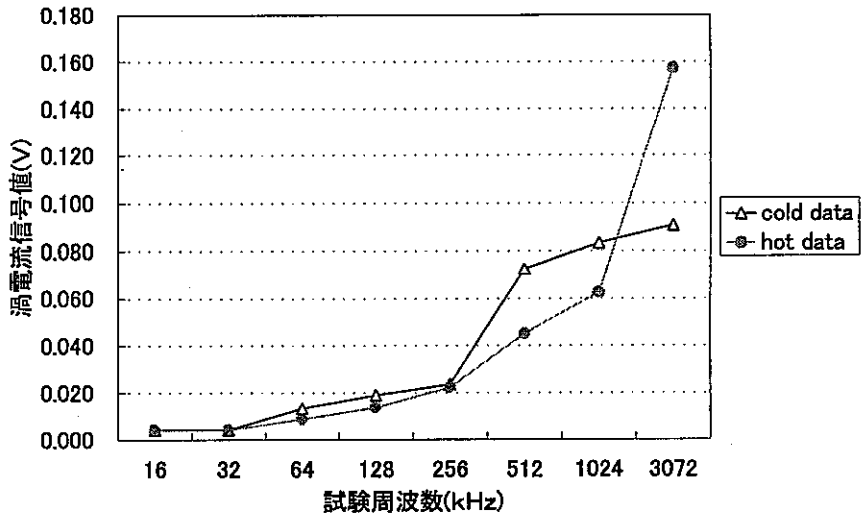



図4.3-4 貫通孔の信号値と周波数の相関

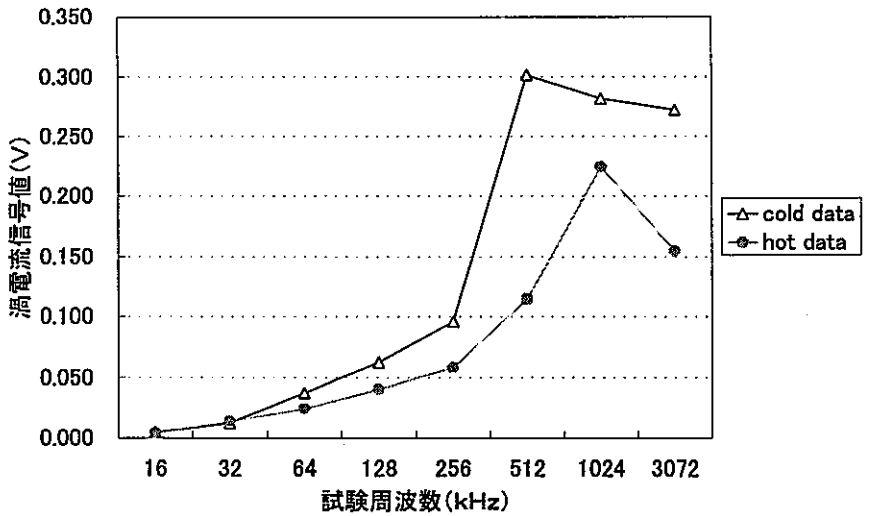



図4.3-5 内面欠陥の信号値と周波数の相関

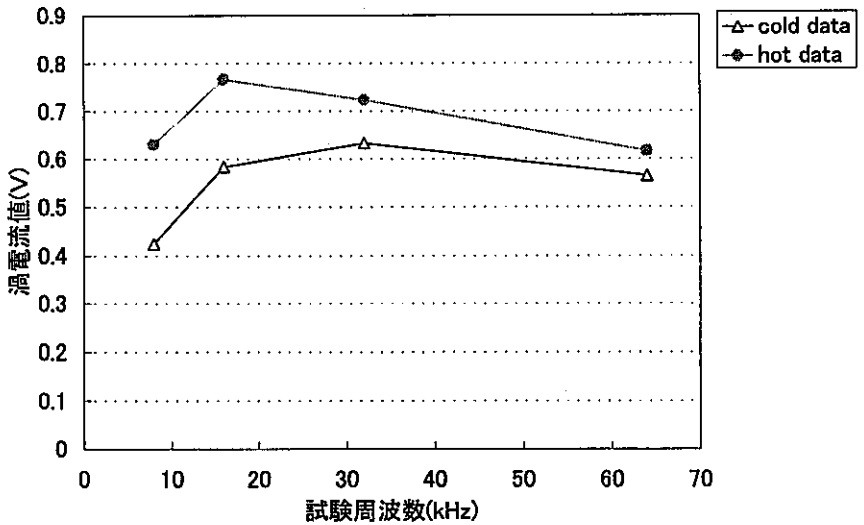



図4.3-6 FCCIの信号値と周波数の相関

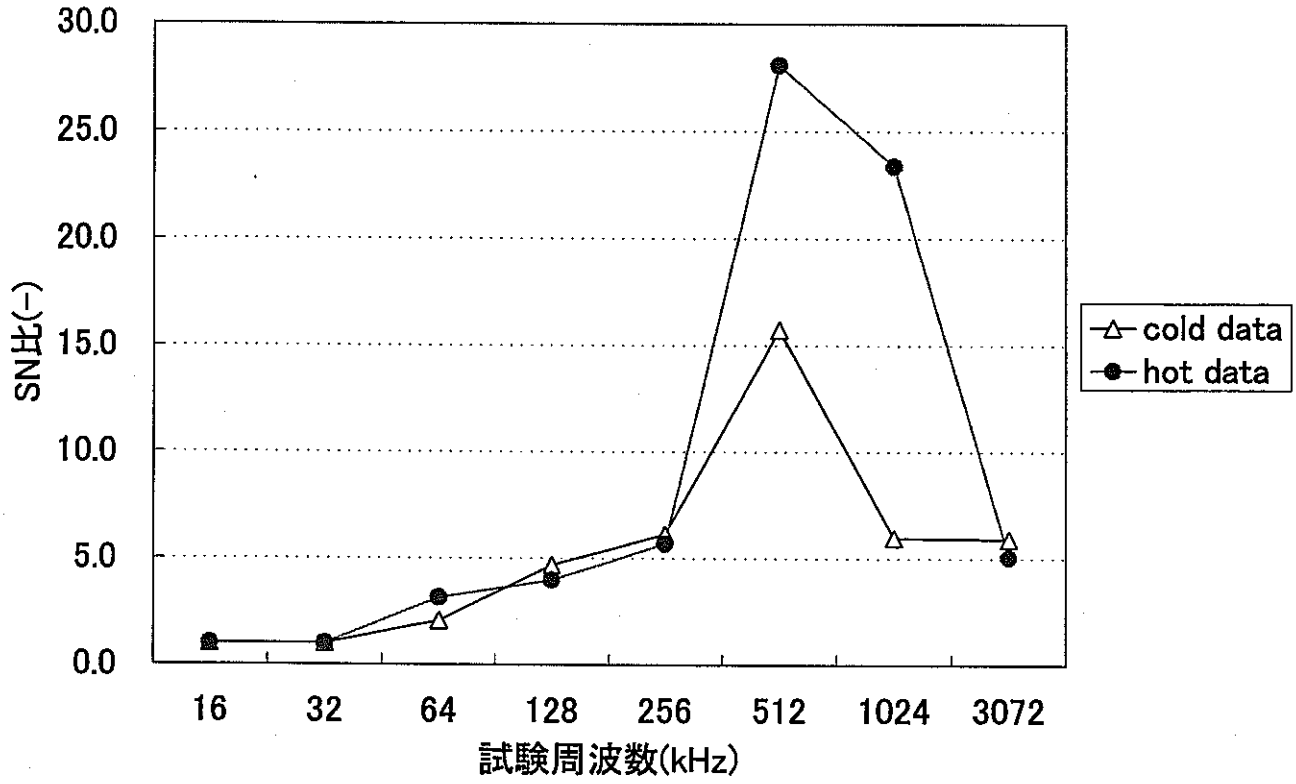



図4.3-7 外面欠陥のSN比と周波数の相関

# 5. まとめ

渦電流探傷試験装置を用いて、セル外において模擬FCCI測定の性能確認試験を実施し、以下の知見を得た。また、試験装置のセル内導入後に標準欠陥ピンを用いた校正試験を実施し、試験セル内における装置の性能確認を行ない、以下のような結果を得た。

(1) 模擬FCCIピンを用いたFCCI量測定において、最適な測定条件は、以下のようになった。ただし、位相、ゲイン、フィルター試験環境により、随時変化させて、検出感度を確保しなければならない。

- ピンの送り速度　：20mm/sec
- 試験周波数　：32kHz
- 位相　：0DEG
- ゲイン　：-26dB
- フィルター　：1Hz

(2) 模擬FCCIピンを用いた試験を行なった結果、FCCI量と渦電流信号値の間には定性的な相関関係が認められ、300μmオーダーの肉厚量をもつ被覆管に対して、50μm以上の減肉変化が認められる場合、FCCIを定性的に検出できる見通しを得た。なお、定量的な評価については見通しを得ることはできなかった。

(3) セル内導入後に外面欠陥、内面欠陥、貫通孔、FCCIのそれぞれの標準欠陥ピンを用いて、セル内導入後の校正試験を実施した結果、セル外で実施した試験で取得したデータと同程度であることを確認した。

# 6． 今後の展開

模擬FCCIピンを用いたFCCIの検出性能試験を実施した結果、定性的ではあるが、FCCI 量と渦電流信号値との間に相関関係が得らた。また、セル内導入後における校正試験においても、各欠陥探傷試験（外面欠陥、内面欠陥、貫通孔、FCCI）において、セル外で行なった試験データと同等の渦電流による信号応答が得られた。

今後は実機使用済燃料要素を用いた試験を実施し、照射後試験項目の一つとして渦電流技術による被覆管外表面傷の検出やFCCI等による減肉の測定技術の確立を目指していく。実際の燃料ピンの測定においては、被覆管内に様々な内部構造物が存在し、本文中で言及した腐食生成物のようにそれらを除去することはできない。従って、実際の試験においては、これらの内部構造物の影響を今後、考慮していく必要があると考えている。また、実燃料要素を用いた試験において、渦電流信号値と減肉量の相関関係については当面の間、破壊試験（金相試験）を実施し、相関データの拡充を図りつつ、評価していく必要があると考えている。また、ニューラルネットワーク等に代表されるノイズ抑制技術の開発などは採取データの精度向上に期するところが大きく、今後の産業界や研究開発分野の動向について注目したい。

# 7. 謝 辞

本試験を実施するにあたり、モックアップ試験のデータ取得および整理にご協力頂いた原子力技術（株）　桜井　智氏、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。

# 8. 参考文献

1) X. E. Gros and K. Takahashi: Monitoring delamination growth in CFRP materials using eddy currents , Nondestructive Testing and Evaluation, 15(1999)65-82.

2) 三菱原子力技報 「燃料被覆管精密密度測定装置の開発」No.56 18-21 1990

3) 圧力技術 「傾斜貫通コイルを用いた渦電流法による核燃料被覆管の欠陥評価」 VOL.27, No.3 20-29 1989

4) 日本原子力学会誌 「HTTR 中間熱交換器伝熱管用渦電流探傷プローブの特性試験」 VOL. 35 No.3 227-236 1993

5) 日本原子力研究所 公開パンフレット「JMTR HOT LABORATORY」1998 年版

6) JOURNAL OF JSNDI （社）日本非破壊検査協会「ニューラルネットワークの基礎と非破壊評価への応用」 VOL.45 848-853 1996

7) 北澤健夫、金井和樹、永峯剛、中村保雄、岩永繁：「照射後試験における渦電流技術の開発 探傷技術の開発（その 1）」, PNC ZN9410 93-041 1993

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 1989 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 II 1990 年版 （薄電流探傷試験 B 1984 年版）

10) 田地弘勝、中澤伸行：「各国の高速増殖炉用照射後試験施設の調査」, PNC ZN942 84-03 1984

11) 「Recent development s in post-irradiation examination techniques for water reactor fuel 」Proceedings of a Technical Committee meeting held in Cadarache,France,17-21 Octorber 1994, IAEA-TECDOC-822 1995

# Appendix

# 付録－1 渦電流探傷技術

## (1) 一般産業界における渦電流探傷試験

渦電流探傷試験は、非接触で高速探傷可能であるため、鉄工業の製造ラインにおいて、鋼管、鋼材等の断面が円形状の製品の探傷に利用され、保守検査においては、各種プラントにおける配管、化学プラントにおける熱交換器の伝熱管などに適用されている。また、最近では航空機、特にヘリコプターのローターブレードの欠陥検出、自動車のタイヤの欠陥検出やカーボンファイバーの欠陥検出など、金属部位以外にも応用されている例も見受けられる。探傷結果の一例として、カーボンファイバー部位における欠陥を3次元のスペクトルで表している様子を別図1－1に示す。[1)]

## (2) 原子力産業界における渦電流探傷試験

原子力発電設備の経年的な材料劣化として疲労、中性子照射脆化、熱脆化などが考えられる。これらをできるだけ早期に発見して、事故防止に役立てることができれば、原子力発電プラントの稼働率の向上、信頼性の確保に益することができる。渦電流探傷試験は非破壊で電磁気的特性の変化を用いる手法の一つであり、材料中に発生する渦電流の分布変化を用いて材料劣化を評価する上で有効である。

原子力発電設備における蒸気発生管の伝熱管の保守検査には従来からよく用いられている手法であり、その伝熱管の保守点検方法については、1950年代より各国で研究が進められてきた。現在では、蒸気発生器伝熱細管の供用期間中検査（ISI）には内挿コイルによる渦流探傷試験が一般的である。

## (3) 原子力研究開発分野における渦電流探傷試験

前述のように、原子力分野では渦電流探傷技術の適用は、プラントの定期検査であり、特に電力会社が所有している加圧水型軽水炉（PWR）の蒸気発生器伝熱管において多用されてきた。国内の研究開発分野では、日本原子力研究所が所有している燃料被覆管を対象とした酸化膜測定に用いられているものがあるが、極めてまれである。また、日本核燃料開発（株）で使用されている渦電流探傷装置と今回導入予定の装置とでは、駆動機構が縦型で類似している。国内の渦電流探傷装置の性能について別表1－1に示す。[2)3)4)] なお、別図1－2に日本原子力研究所が所有している渦電流試験装置の外観とデータ取得の一例を示す。[5)]

(4) 海外における渦電流探傷試験

海外での渦電流探傷装置の性能を別表1－2に示す。フランスのCadarachеにある照射後試験施設STARでのMEGAFOX（ベンチマーク型）に設置してある渦電流探傷装置の搬送装置は、横型であり、FMF既設おいて、詳細外観検査装置、FMF増設においては、ピン試験装置をベースとした縦型搬送とは異なるのが特徴的である。

(5) FMFにおける渦電流探傷試験

①FMF既設装置

FMF既設に導入した渦電流探傷試験装置は被覆管の外面欠陥、内面欠陥、貫通孔そして肉厚測定（FCCI量の測定）などの適用を目指して開発している。外面欠陥、内面欠陥、貫通孔については、前回報告書（その1）[7]で信号識別の見通しを得ている。　本装置は、既設セルの詳細外観検査装置の支援システムという位置付けから、付帯設備として、詳細外観検査装置のエリアに設置されている。探傷方法は貫通コイルとプローブコイルにより、被検体を軸方向へ搬送させる（リニアスキャン）手法をとっている。これは、後述する増設試験装置のような被検体を回転させるラジアルスキャンや被検体を回転させながら軸方向へ搬送させるスパイラルスキャンなどの用途は有していない。また、データ取得に用いているディジタルマルチメーターの処理能力が劣るため、データ取得作業の効率が悪い上、データ加工を容易に行なえないために時間がかかる。従って、現状ではホット導入後の信号を評価する上では支障はないが、将来的にデータの拡充を図る上で測定の高効率化を目指すには、これらの装置周辺機器の制御系の更新が必要と思われる。

②FMF増設装置

増設側の渦電流探傷試験装置はピン試験装置(3)に設置されている。試験項目としては、FCCI測定（減肉測定）を除く外面欠陥、貫通孔、内面欠陥の検出可能である。探傷方法は貫通コイルとプローブコイルにより、被検体をそれぞれリニアスキャン、ラジアルスキャン、スパイラルスキャンの3種類の探傷検査が可能である。信号解析に供する装置は欠陥の位置、種類及び程度を定量化する機能を有している。この装置はニューラルネットワーク的な思想を採用しており、あらかじめ取得した標準欠陥ピンの欠陥応答信号と探傷信号を比較することにより欠陥の種類、大きさ等を推定するようになっている。

(6) ニューラルネットワーク(NN)を適用した渦電流探傷試験

渦電流探傷試験では欠陥識別に経験的な要素が存在するため、熟練した欠陥識別技術が必要となるのが現状である。従って、測定者の熟練度に左右され、さらに試験対象試料が多数存在するとき、測定者の負担が大きくなる。そこで、これらの負担を軽減するため近年、渦電流探傷試験で得られる「8 の字図形」をニューラルネットワークを利用して、欠陥のパターン認識化が進められている。ニューラルネットワークとは、生物の脳神経細胞（ニューロン）による刺激や情報の伝わり方をまねて、多くの情報の組み合わせから出力が得られるしくみを表したネットワークである。これは、過去に起きたことについて多くの事例を与えると、その因果関係を学習し、未知の事象に対して、起こりそうな結果を推定して出力することができる。

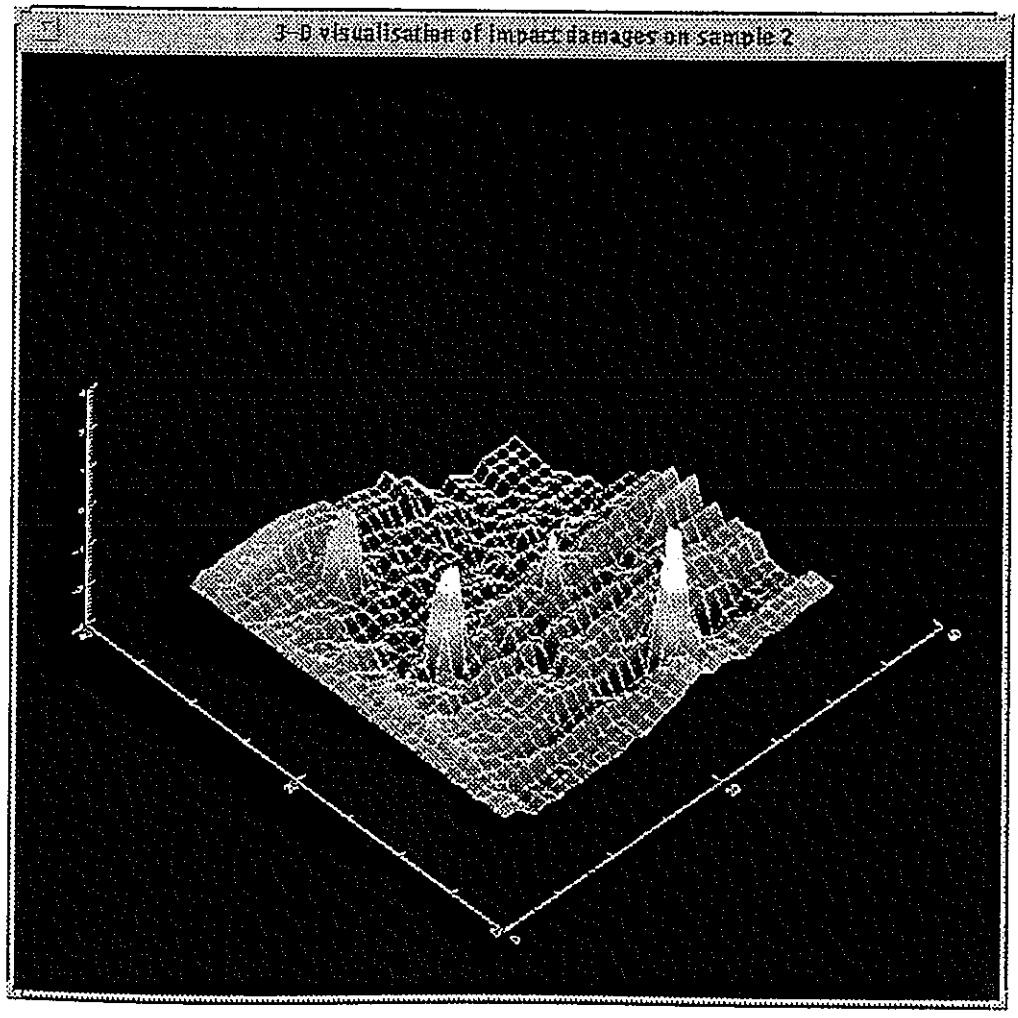
具体的には、割れ、へこみ、貫通などの種類別にいろいろの大きさの傷を人工的につくり、渦電流探傷試験を行なって、多くのデータを得る。そして、試験で得られた傷と「8 の字図形」（長さ、幅、傾き、面積）との関係をコンピューターに学習させ、それぞれの欠陥の有無、大きさ、種類などを推定可能にしている。

## 別表1－1　国内の渦電流探傷装置の性能

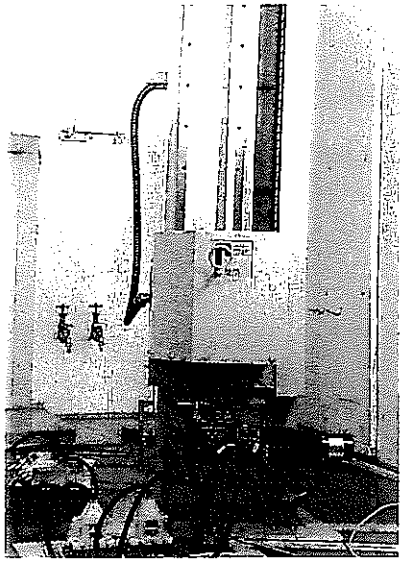
| 所属 | 性　能 |
|---|---|
| 日本原子力研究所 | （欠陥検出性能）<br>対象試験体：伝熱管<br>試験周波数：48kHz（基本周波数）<br>搬送速度：10～100mm/sec<br>ピンホール直径：0.5mm以上<br>幅：0.5mm以上<br>深さ：肉厚の20%以上 |
| 日本核燃料開発 | （欠陥検出性能）<br>対象試験体：軽水炉被覆管<br>試験周波数：128kHz<br>搬送速度：10.5mm/sec<br>ピンホール直径：0.5mm以上<br>幅：0.14mm×長さ3mm以上<br>深さ：肉厚の5～20%以上 |
| 三菱重工 | （酸化膜測定）<br>対象試験体：軽水炉被覆管<br>測定範囲：0～100μm<br>精度：±5μm<br>差動トランス方式 |
| JNC FMF（既設） | （欠陥検出性能）<br>対象試験体：FBR被覆管（5.5～6.5mm程度）<br>試験周波数：16～3072kHz（最適値：1024kHz）<br>搬送速度：20mm/sec<br>ピンホール直径：0.1mm以上<br>幅：0.2mm×長さ3mm以上<br>深さ：肉厚の5～20%以上 |
| | （FCCI量測定）<br>対象試験体：FBR被覆管（5.5～6.5mm程度）<br>試験周波数：8～128kHz（最適値：32kHz） |

## 別表1-2　各国の渦電流探傷装置の性能

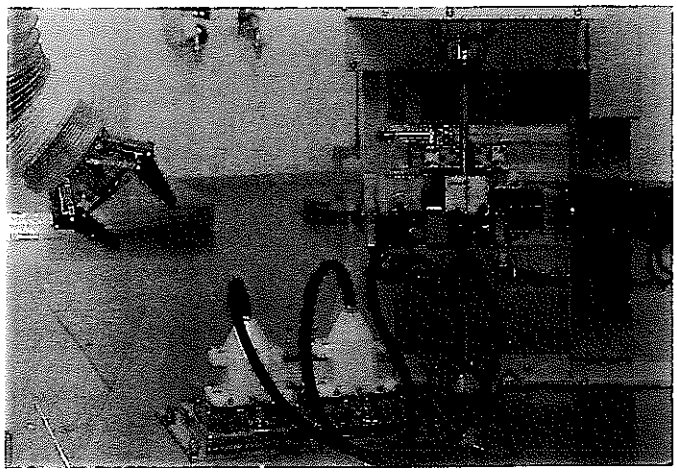
| 国 | 性　能 |
|---|---|
| アメリカ<br>HEDL Richland,Washington | （欠陥検出性能）<br>深さ±0.025mm<br>幅±0.125mm<br>長さ±0.76mm |
| フランス<br>Caderache | （酸化膜測定）<br>周波数：3MHz<br>測定範囲：0～100μm<br>精度：±5%<br>測定方式：ダイヤモンドプローブによる接触式<br>1秒当りの測定点：1<br>外径測定範囲：8～12mm（キャリブレーション）<br>（被覆管の健全性確認）<br>周波数：250MHz<br>1秒当りの測定点：10 |
| スイス<br>Paul Scherrer Institute | （酸化膜測定）<br>精度：±0.5μm |
| 日本<br>PNC FMF（既設） | （欠陥検出性能）<br>ピンホール直径：0.1mm以上<br>幅：0.2mm×長さ3mm以上<br>深さ：肉厚の5～20%以上 |
| 日本<br>PNC FMF（増設） | 同上 |




別図1－1　カーボンファイバー部位の欠陥信号の3次元表示例

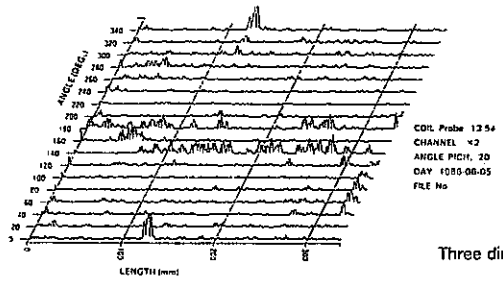


検出器と試料移動部
Detector and Sample Moving Device

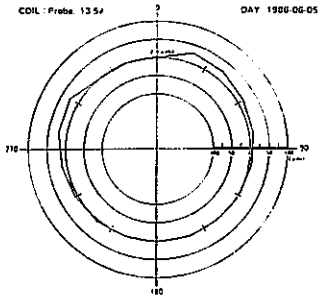


検出器
Detector

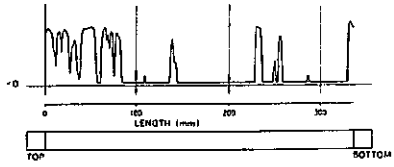
渦電流試験機
Eddy Current Testing Machine




欠陥信号の三次元表示
Three dimensional plots of defect signal




周方向酸化膜分布
Circumferential distribution of oxide layer




軸方向酸化膜分布
Longitudinal distribution of oxide layer

渦電流試験データの例
Data of Eddy Current Test

提供：日本原子力研究所

別図1－2 日本原子力研究所の渦電流探傷装置

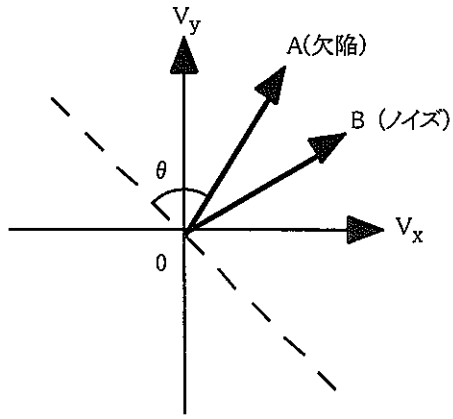
# 付録－2 渦電流探傷技術に関する用語説明

## (1) 周波数弁別

高い周波数成分のみを通過される高域フィルター（HPF：Low Pass Filter）と低い周波数成分のみを通過させる低域フィルター（LPF：High Pass Filter）を組み合わせた帯域フィルター（BPF：Band Pass Filter）により必要な信号のみを通過させノイズ信号を除去する。

## (2) 位相調整

欠陥信号、ノイズ信号は振幅と位相情報を持つため、ベクトルで表示することができる。一般に位相回路はコイルからピックアップした信号をある基準信号で検波し、信号を出力する。OT は基準信号（制御信号）であり、欠陥信号（OA）は OA・cos$\theta$ として出力される。ここで、OT とノイズ信号（OB）の位相差を 90° とすることで、OB・cos90° ＝0 となり、ノイズ信号は出力されない。欠陥信号はノイズ信号と位相が違うため OA・cos$\theta$ として出力される。




## (3) リジェクション

特定のレベル以下を消去させることで S/N 比を改善する方式

(4) 2周波試験

異なる2つの周波数の電圧を混合してコイルに印加し、各周波数別に出力分解して検出する。得られた出力信号を信号演算器で結合してノイズ信号を抑制する方法である。この方法は単周波に比べて多くの情報を得られるため、より高性能な検出ができる。また、内蔵物による信号を除去することに対しても優れている。

(5) 自己比較方式

1対のコイルを併置し、被検体における隣接した2つの部分の差異を検出する試験コイル系をいう。材質や形状・寸法のようなゆるやかな変化に対しては、2つのコイルが共に応答して相殺するが、局所的な欠陥を選択的に検出する用途に適する。また、搬送に伴うコイルと被検体の相対位置の変化や周囲温度の変化による影響も相殺するため使いやすい。

(6) 標準比較方式(相互比較方式)

一対のコイルの内の一方を被検体に、他方を標準となるものに作用させ、両者の応答差を検出する試験コイル系をいう。単一方式と同様、被検体とコイルの位置関係、被検体の材質や形状・寸法の変化による影響は受けるが、被検体における総ての変化を検出するため材質判別に用いられる。

(7) 単一方式

1個のコイルのみで試験を行なうコイルをいう。アブソリュートコイルともいう。被検体における総ての変化を検出するため欠陥にある程度対応した信号が得られるため欠陥推定の手がかりを与える可能性がある反面、被検体とコイルの位置関係、被検体の材質・寸法の変化及び温度変化に対する感度が高いため使いづらい。

(8) 表皮効果

交流電流を流したコイルに導体を接近させると、電磁誘導現象によって導体内に渦電流が誘導される。このとき、導体内に発生する渦電流は、導体に磁束を与えた励磁コイル(交流を流したコイル)に近い表面に集中して流れる。これを表皮効果と呼んでいる。

(9) 浸透深さ

半無限空間を占める平面状導体に平面波が作用する場合において、表皮効果の程度を表す目安。

(10) LPF、HPF

特定の信号だけを通過させ、それ以外の周波数領域にある信号を阻止するフィルターの種類。LPF は低周波数領域通過フィルター（ローパスフィルター）、HPF は高周波数領域通過フィルター（ハイパスフィルター）である。

(11) ゲイン

検出感度を左右するもので、感度が高すぎる場合、記録上で信号振幅が振りきれない様に設定する。

(12) dB (デシベル)

増幅回路における入力電圧（V1）に対する出力電圧(V2)の倍率をいう。

$$dB=20\times\log(V2/V1)$$

(13) インピーダンス

渦電流探傷の原理は、交流を流すことによるインピーダンスの変化を利用して傷を識別するものである。交流にはインダクタンスと抵抗がある。インピーダンスとはその２乗和の平方根を言う。また、信号は交流において、インダクタンスに位相差が生じるため、正弦波の遅れ、進みを考慮する必要がある。

(14) 位相解析法

位相解析にはブリッジアンバランス法、同期検波法とがある。

(15) 周波数解析

欠陥信号のピークを明確にするために、リジェクションと呼ばれるものを使用する。信号の周波数解析には FFT※アナライザー等を使用している。

※FFT 法　(Fast Fourie Transform Method)　高速フーリエ変換

(16) 欠陥信号

データはリサージュ図形の投影図（正弦波）で表示される。

(17) 自動平衡器(オートバランサ)

ブリッジのインピーダンスを自動的に平衡に保つユニット