

JAERI-M
89-174

内装型制御棒駆動装置の開発研究(その1)

1989年11月

石坂 雄一・伊藤 泰義

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura,
Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1989

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

内装型制御棒駆動装置の開発研究（その1）

日本原子力研究所東海研究所原子力船研究開発室

石坂 雄一・伊藤 泰義

(1989年10月6日受理)

安全性、経済性に優れた改良船用炉の実現のため、本炉に搭載する制御棒駆動装置(CRDM)は、先行炉において安全評価を要求してきた“制御棒飛び出し事故”を設計基準内事象から排除することを狙いとして、原子炉圧力容器に内装することを目論んでいる。

これらを踏まえてCRDMに要求される設計条件を整備し、小型・簡素化が達成可能なCRDMの基本概念を構築すると共に将来に渡る開発スケジュールを策定しての具体化研究を実施した。

特に、本CRDMを原子炉圧力容器内水熱雰囲気に導入する上で大きな課題は、電気品の耐熱・耐絶縁性である。CRDM電気品の内、駆動源を成す電磁部(ビルトインモータ、スクラムマグネット)に着目して、使用環境を考慮したそれぞれの構造を具現化し、これらを基にコイル材料として使用可能と考えられる代表的な耐熱電線を選出した。

更に、上記電線を用いた実用化のための基礎試験、また、この試験により選定された候補電線を用いてのミニチュアコイル試作・試験を通じて、本CRDM電磁部のコイル材料として有望な耐熱電線を見出した。

A Feasibility Study on the Innovative Control Rod
Driving Mechanism (1)

Yuichi ISHIZAKA and Yasuyoshi ITOH

Office of Nuclear Ship Research and Development
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 6, 1989)

The objectives of this study are to establish innovative Control Rod Driving Mechanisms (CRDMs) in order to achieve a highly safe and economic Advanced Marine Reactor (Ship). The innovative CRDMs to be carried this ship with Advanced Marine Reactor are to be installed in the reactor pressure vessel, since the internal CRDMs can eliminate "Control Rod Ejection" which had been one of the design bases accidents on the licensing issues for conventional LWR with external CRDMs.

This report presents the following works.

After the discussion of the design requirement on the innovative CRDMs which had been selected as "Concept Design of Advanced Marine Reactor (1), System Design (1), Design Study for Simplification of System", the scheme of the selected concept were considered and set up tentatively. Subsequently the development plan of the innovative CRDMs was made out.

The major assets required for the internal CRDMs were heat-resistance and insulation-resistance of those electro-parts. The concept on the following key parts of the innovative CRDMs' electro-parts were embodied.

- Built-in-Motor
- Scram-Magnet

Based on the concept, some kinds of typical heat-resistance wires estimated to be eligible used in the reactor pressure vessel were nominated. After the basic characteristics test screened out them to be a few, the heat-resistance wire eligible for the internal CRDMs' electro-parts were specified by the trial manufacturing and performance test of

miniature coils made of selected wires.

Keywords: Marine Reactor, Reactor Shutdown System, CRDM, Reactivity Control, Rod Ejection, LWR, Heat-Resistance Wire

目 次

まえがき	1
1. 小型化の検討	2
1.1 設計条件の整理	2
1.2 全体概念の基本検討	5
1.3 研究開発内容の整備	6
2. 電磁部の構造概念の検討	18
2.1 モータ方式の選定	18
2.2 ビルトインモータの構造概念の検討	19
2.3 スクラムマグネットの構造概念の検討	21
2.4 線材の選定	21
3. 電磁コイルの試作・試験	32
3.1 試験	32
3.2 試作	32
3.3 電線特性試験内容	32
3.4 コイル試験内容	37
3.5 電線の選定	38
あとがき	81
謝 辞	81
引用文献	81
付録1 改良船用炉用制御棒駆動装置の概念	82
付録2 耐放射線特性	87
付録3 耐熱電気絶縁膜被覆線の特性	91

Contents

Introduction	1
1. Scheme of the innovative CRDMs	2
1.1 Design requirement	2
1.2 Discussion of the scheme	5
1.3 Development plan	6
2. Description of the CRDM's electro-parts	18
2.1 Selection of the Built-in-Motor	18
2.2 Built-in-Motor	19
2.3 Scram-Magnet	21
2.4 Typical heat-resistance wires	21
3. Manufacturing and performance test of the CRDMs' electro-parts ..	32
3.1 Test	32
3.2 Manufacturing	32
3.3 Characteristics test of the wires	32
3.4 Miniature coils test	37
3.5 Selection of the heat-resistance wires	38
Conclusion	81
Acknowledgments	81
Reference	81
Appendix 1 CRDMs' Concept of Advanced Marine Reactor	82
Appendix 2 Irradiation-resistance of ceramics	87
Appendix 3 Characterization of the heat-resistance wire	91

表 リ ス ト

表 1.1	設計条件の整理	8
表 1.2	C R D M主要目	9
表 2.1	モータ方式の比較 (1)	23
表 2.2	モータ方式の比較 (2)	24
表 3.1	電線の一般特性	39
表 3.2	長時間絶縁特性（破壊電圧）	40
表 3.3	絶縁破壊電圧（室温）	40

図 リ ス ト

図 1.1	RCC の配置	10
図 1.2	CRDM 基本概念図	11
図 1.3	保護管内ケーブル配置	13
図 1.4	保護管布設状況	14
図 1.5	保護管布設状況(平面)	15
図 1.6	改良船用炉 CRDM 開発スケジュール(長期開発計画)	16
図 1.7	改良船用炉 CRDM の研究フローチャート	17
図 2.1	ビルトインモータ概念図	25
図 2.2	永久磁石の動作点の概念	26
図 2.3	スクラムマグネット概念図	27
図 3.1	高温安定性試験用容器(バイレックスガラス製品)	41
図 3.2	長時間絶縁特性の変化(絶縁破壊電圧)	42
図 3.3	ボビン形状	43
図 3.4	ボビンコイルの仕様	44
図 3.5	ボビンコイル製作フローシート	45
図 3.6	長時間絶縁特性試験用容器	46
図 3.7	絶縁抵抗の変化	47

<付録1>

図 A 1.1	改良船用炉次期設計炉(MRX)の制御棒駆動装置	84
図 A 1.2	改良船用炉用小型CRDM 作動概念	85
図 A 1.3	分割ボールナットの概念	86

<付録2>

図 A 2.1	Al_2O_3 の電子線及び中性子照射による電気伝導度の吸収線量率依存性 (Klaffky らの研究より, 1980)	89
図 A 2.2	電離放射線照射による Al_2O_3 の電気伝導度の温度変化 (Klaffky らの研究より, 1980)	89
図 A 2.3	ZrO_2 の γ 線及び中性子照射による電気伝導度	90

写 真 リ ス ト

写真 2.1	線材の外観（その 1）	28
写真 2.1	線材の外観（その 2）	29
写真 2.1	線材の外観（その 3）	30
写真 2.1	線材の外観（その 4）	31
写真 3.1	絶縁破壊電圧測定用試料（その 1）	48
写真 3.1	絶縁破壊電圧測定用試料（その 2）	49
写真 3.1	絶縁破壊電圧測定用試料（その 3）	50
写真 3.1	絶縁破壊電圧測定用試料（その 4）	51
写真 3.2	可とう性試験（その 1）	52
写真 3.2	可とう性試験（その 2）	53
写真 3.2	可とう性試験（その 3）	54
写真 3.2	可とう性試験（その 4）	55
写真 3.3	密着性試験（その 1）	56
写真 3.3	密着性試験（その 2）	57
写真 3.3	密着性試験（その 3）	58
写真 3.4	耐熱衝撃性試験（その 1）	59
写真 3.4	耐熱衝撃性試験（その 2）	60
写真 3.4	耐熱衝撃性試験（その 3）	61
写真 3.4	耐熱衝撃性試験（その 4）	62
写真 3.5	長時間絶縁特性試験（その 1）	63
写真 3.5	長時間絶縁特性試験（その 2）	64
写真 3.5	長時間絶縁特性試験（その 3）	65
写真 3.6	ポリイミドテープ捲線の熱劣化（その 1）	66
写真 3.6	ポリイミドテープ捲線の熱劣化（その 2）	67
写真 3.7	SHR-2 の熱劣化（その 1）	68
写真 3.7	SHR-2 の熱劣化（その 2）	69
写真 3.8	SHR-3 の熱劣化（その 1）	70
写真 3.8	SHR-3 の熱劣化（その 2）	71
写真 3.9	セラミック溶射処理	72
写真 3.10	ボビンコイル（ポリイミドフィルム捲線）試作写真（その 1）	73
写真 3.10	ボビンコイル（ポリイミドフィルム捲線）試作写真（その 2）	74
写真 3.11	ボビンコイル（SHR-3）試作写真（その 1）	75
写真 3.11	ボビンコイル（SHR-3）試作写真（その 2）	76
写真 3.12	ボビンコイル（SHR-2）試作写真（その 1）	77
写真 3.12	ボビンコイル（SHR-2）試作写真（その 2）	78
写真 3.13	恒温炉中でのサンプル設置状況（375 °C）	79

写真 3.14 恒温炉中でのサンプル設置状況 (450 °C) 80

<付録3>

写真 A 3.1	被覆線	94
写真 A 3.2	アルミ箔電極の取り付け状況	95
写真 A 3.3	捲付け法による評価	95
写真 A 3.4	3倍径捲付け	96
写真 A 3.5	5倍径捲付け	96
写真 A 3.6	10倍径捲付け	97
写真 A 3.7	ねじり回数10回	98
写真 A 3.8	断面観察 (No. 1)	99
写真 A 3.8	断面観察 (No. 2)	100
写真 A 3.8	断面観察 (No. 3)	101
写真 A 3.8	断面観察 (No. 4)	102
写真 A 3.9	ピンホールテスト状況	103
写真 A 3.10	サンプル保管状況	103
写真 A 3.11	無機絶縁電線の断面写真 (No. 1 ~ 2)	104
写真 A 3.11	無機絶縁電線の断面写真 (No. 3 ~ 4)	105

まえがき

安全性、経済性に優れた改良船用炉の実現のためには、信頼性が高く、小型の制御棒駆動装置の開発が必要である。そのために改良船用炉の開発においては、先行炉において従来より安全評価を要求されてきた制御棒飛び出し事故に対し、これを設計基準内事象から排除するため、原子炉圧力容器内に内装することを目論んでいる。

原子炉圧力容器内は高温高圧水蒸気であり、放射線線量も高い。このような過酷な蒸気条件の中で、しかも無冷却で安定に稼働する簡素化された機器とするための最も大きな課題は、電気品（制御棒駆動装置電磁部）の耐環境性である。

これらを踏まえ、制御棒駆動装置の小型化に関する検討及び耐熱性に関する研究を実施した。

本書は、小型化及び耐熱性に関し、以下の内容をまとめたものである。

「小型化の検討」では、設計条件を設定し、全体概念の検討を行う。更に今後の研究開発項目及びそのスケジュールを抽出、整理する。

「電磁部の構造概念の検討」では、モータ、マグネットの構造概念を具体化し、それらに使用可能と考えられる代表的な線材（耐熱電線）を選出する。

「電磁コイルの試作、試験」では、上記電線を用いた実用化のための基礎試験、更にその試験により選定される候補電線を用いたミニチュアコイルの試作・試験を実施する。

1. 小型化の検討

改良船用炉次期設計炉（MRX）の使用条件に整合する制御棒駆動装置（以下、CRDMという。付録1）の主要な構成要素であるモータ電磁部を中心に、小型化のための概念検討を行い、基本概念図を作成した。併せて、今後、本CRDMの実用化をにらんだ場合に必要な研究開発項目及びその開発スケジュールを摘出、整理した。

1.1 設計条件の整理

当室が実施した「改良船用炉プラントの概念設計(II), システム設計(1), システム簡略化の検討¹⁾」（以下、システム簡略化の検討という。）で抽出された小型化達成可能なCRDMの新規概念（付録1）を基本とし、CRDMへ要求される一般機能につき、小型内装化を念頭において検討し、設計条件を設定した。

尚、検討及び設定に際しては、船用炉プラント特有の事項（例えば、船体動搖時の運転性、各種の船体事故等）を勘案した。

(1) 炉心配置への適合性

炉心配置への適合性の観点で、CRDMへの要求事項は、制御棒クラスタ（以下、RCCという。）の配列ピッチ内で干渉しない大きさとすることであり、具体的にはCRMの外径が制限されることになる。

図1.1に、RCCの配置（案内管の配置）を示す。本配置図と燃料集合体の配列ピッチは、システム簡略化の検討結果によるもので、配列ピッチは173 mmである。

従って、RCCの配置から、CRDMが干渉しない外径制限は、 $173 \times \sqrt{2} = 245$ mmとなり、寸法公差等を考えて240 mmがCRDM外径の幾何学的寸法制限となる。

CRDMからのケーブルの引き回しは、RCCが配置されない燃料集合体上部にスペースがあり、このスペースを利用することで可能と考えられ、CRDMの外径は240 mm以下で原子炉容器上部に余裕をもって納まればよい。

従って、本検討では、小型化を計ることから上記制限寸法を考慮して、電磁部の外径は200 mm以下を設計条件とする。

(2) 制御棒引き上げ力及び駆動速度

CRDMに要求される制御棒引き上げ力（駆動力）は、RCC、駆動軸の重量及びこれに付加される船体動搖による加速度分とスクラム加速バネ反力以上の力が必要である。各重量は、システム簡略化の検討のRCC仕様及びCRDMの検討結果から概略以下の値に設定する。

- RCCの重量 30 kg
- 駆動軸の重量 25 kg

また、付加加速度については、IMO原子力船安全基準(案)(以下、IMO基準という。)のプラント状態階級(PPC)、安全等級(SC)に対応させ、CRDMの駆動力に関係する上下方向付加

加速度を以下の値に設定する。

- PPC-4 a 0.85 G
- SC-1, PPC-3 0.7 G
- SC-2, 3 0.6 G
- SC-4 0.5 G

従って、制御棒引き上げ力は、全ての状態で引き上げる場合があると仮定すると、加速バネ反力を除き、自重に加速度を考慮し 102 kg (55 kg × 1.85 G) の力を有している必要がある。

スクラム加速バネの反力を設定するために、加速バネの設計の考え方を整理すると以下のようになる。

- a) スクラム加速の観点で、引抜きが開始される時点、即ち、全挿入時でも加速ばね力が生じている状態とする。
- b) 全挿入時に生じているばね力は、船体が 180° 転覆している状態でも RCC が抜けない、即ち自重 (30 + 25 = 55 kg) 以上の力とする。
- c) RCC の引抜きストロークにより、ばねが撓み、ばね力は大きくなる。既に、全挿入時に自重分 (55 kg) のばね力は働いているので、引抜きストローク分の撓みによるばね力の増加はできるだけ小さくする。即ち、ばね定数の小さなばねとする。

以上の考え方から、ばね反力は以下の値に設定した。

- | | |
|---------------------|-------------------------------|
| a) 挿入時ばね力 | 60 kg (運転温度) > 55 kg (自重) |
| | ↓ |
| | 67 kg (常温) |
| b) 引抜きストロークによる増加ばね力 | 27 kg (運転温度) |
| | ↓ |
| | 30 kg (常温) |

従って、引き上げ力 ; F は以下の値を設計条件とする。

$$F = 102 \text{ kg} + 67 \text{ kg} + 30 \text{ kg} \approx 200 \text{ kg}$$

加速ばね反力に関する要因として、RCC のストロークがある。ストロークを大きくすると、撓み量が大きくなり、反力は増加する。従って、CRDM側からはストロークは小さい方が望ましいことになるが、核的 requirement もあり、ここではシステム簡略化の検討で炉心高さが 1000 mm であることから、吸収体が炉心から完全に抜ける 1000 mm をストローク長に設定する。

駆動速度については、負荷変動に追従する観点から速いことが望ましい。どのくらいの速度で負荷変動に追従できるかは、詳細なプラント動特性解析を実施しなければならないので、ここでは、舶用炉で炉心は小さくなっているが、速い応答を考慮して陸上PWR炉並みの 1200mm / 分に設定する。

(3) 停止位置精度

停止位置精度は、制御棒グループ間の偏差による出力分布の歪みの制限により設定される。即ち、歪みが大きくなるとトリップするように制御されており、設定されたトリップ点に対し、陸上PWR炉では約 ± 90 mm、「むつ」では ± 5 mm が検出精度を含めた許容誤差となっている。

従って、開発目標として定めたシステム簡略化の検討での停止位置精度±0.02 rev.は、ボルねじのリードを6 mmとすれば±0.12 mmであり、炉心要求からは問題なく、停止位置精度としては±0.02 rev.以下に設定する。

(4) スクラム機能要求並びにスクラム時間

IMO基準によるスクラム機能要求は以下の通りである。

「原子炉緊急停止（スクラム）系は90°までの角度において原子炉を停止させ得るように設計され、且つ全ての角度において停止状態を維持し得るものでなければならない」

即ち、CRDMが通常の状態（0°）から横置き状態（90°）迄は、スクラム機能が要求されるということで、更に90°を越える場合、最悪180°（重力方向と正反対）の場合でも炉心からRCCが抜けるのを防止する必要があるということである。

90°迄の角度とスクラム時間の組合せ及び既に記した付加加速度とスクラム時間の組合せについては、炉心設計、安全設計等を考慮し、今後定めていく必要があるが、ここでは「むつ」での条件を参考に、デラッヂ時間（スクラム母線断からCRDM作動迄の時間）を含め、全引抜きから全挿入（ストローク1000 mm）迄の時間を以下のように設定する。

- a) 傾斜 0°, 加速度 (1 ± 0.6)g 1.4 秒以下
- b) 傾斜 30°, 加速度 (1 ± 0) g 1.4 秒以下
- c) 傾斜 0°, 加速度 (1 ± 0.85)g 3 秒以下
- d) 傾斜 60°, 加速度 (1 ± 0) g 3 秒以下
- e) 傾斜 90°, 加速度 (1 ± 0) g 5 秒以下
- f) 傾斜 90°以上, 加速度 (1 ± 0) g 時間制限なし

90°以上傾斜の場合は、IMO基準上はスクラム要求はない（90°以下でスクラムしていることもある）が、炉停止状態を維持するとすれば、スクラム後（スクラム中）RCCが抜けない機構が必要である。

抜け止め機構は、2方式が考えられる。即ち、加速ばねを利用し、駆動力が伝達しない（スクラム等で駆動軸が開放されている状態）場合には、ばねの押し付け力により制御棒の抜け出しを防止する方式と、ラチエット機構のような機構を設け、機械的に抜け出しを防止する方式である。

機械的な方式ではシステム簡略化の検討でも提案しているが、マグネット、プランジャー、ラチエットリンク等の構成部品から成り、通常運転時にはマグネットを励磁し、ラチエットリンクを駆動軸から切り離しておき、スクラム時の非励磁の場合に、ラチエット機構が働き、抜け出し方向には作動しない方式がある。

加速ばねを利用する方式では、このような機構を設ける必要はなく構造は簡素であり、この意味からは信頼性は高いが、ばねの場合、長時間保持しているとリダクションの問題があり、今後のCRDMの開発と共に検討していく必要があるが、ここでは設計条件の整備という観点から、抜け出し防止構造として加速ばねを利用する想定し、f) の条件を含むこととした。

(5) 燃料交換性

燃料交換を行うためには、CRDMも含め燃料集合体上部にある構造物を取り外す必要があ

る。このため、CRDMについても燃料交換が支障なく行なえる構造ということで、以下の条件を満足する構造が要求される。

- a) 原子炉容器蓋の取外しを阻害しない構造であること。

具体的には、原子炉容器蓋を貫通しているケーブル配管等があれば、原子炉容器蓋の取外しに対し支障とならない構造であることが要求される。

- b) 駆動軸（ボールねじ）とCRDM本体が切り離せる構造であること。

これは、スクラム動作と同じであり、当然切り離しは行なえる構造となっている。

- c) CRDM本体が炉内構造物と共に取り外せる構造であること。

CRDM本体は上部炉心支持板に取りつける計画であり、共に取り外すことは可能である。

- d) 駆動軸とRCCが切り離せる構造であること。

RCCは、駆動軸のグリッパで連結する計画であり、CRDM本体取外し後、駆動軸にグリッパ操作治具を取りつけ、RCCを切り離すことができる。

以上の検討結果をまとめて表1.1に示す。

1.2 全体概念の基本検討

(1) CRDM基本概念

前項で設定した設計条件及び次項の電磁部の構造概要の検討結果を考慮し、主要構成要素の概念をまとめたCRDMの基本概念図を図1.2に示す。

CRDMの主要構成要素としては、ビルトインモータ、スクラム（ラッチ）マグネット、ラッチ機構（分割ボールナット、駆動軸、リンク機構）があり、ケーシング内に収納されている。このほか、回転検出器、位置検出器、加速ばね等の構成要素がある。

スクラム（ラッチ）マグネットを励磁し、ボールとアーマチュアが吸着している状態で、リンク機構を介し分割ボールナットと駆動軸（ボールねじ）が係合しており、ビルトインモータの回転により分割ボールナットが回転し、駆動軸を上、下に作動させる。

スクラム（ラッチ）マグネットを非励磁すると、アーマチュアがボールと切り離され、リンク機構により分割ボールナットが開き、駆動軸が乗離るので、自重及び加速ばね力によりスクラムされる。

スクラムマグネット、ビルトインモータ、回転検出器のケーブル及び軸方向位置検出器のシーズについては次項で示すように保護管内に収納し、炉外に引き出している。図1.2から分かるように保護管はケーブル、シーズだけを収納しており、駆動軸はRCC全引抜き状態でも炉内設置のケーシング内にある。また、保護管も炉内設置としており、ケーブル、シーズだけを炉外に引き出す構造としている。

従って、炉外に出ている圧力バウンダリは無く制御棒飛び出し事故に繋がる破損想定を除外していると共にシール部材が破損しても小LOCAの事象は発生するが、駆動軸はケーシング内、即ち炉内にあり、差圧が生じることはないのでRCCの飛び出しは生じない。

(2) ケーブル仕様

CRDMに必要なケーブルにはビルトインモータ用動力ケーブル、スクラムマグネット用電源

ケーブル、回転検出器用信号ケーブル等がある。

これらのケーブルはいずれも保護管内に収納することとするが、周囲が高温、高压水、放射線下であることを考慮し、これら環境条件に耐える可能性の高いMIケーブルを使用することとする。

各ケーブルの仕様については、モータ、マグネット、検出器（センサ）共、現状では電流容量、電圧等未確定であることから、暫定的に定めた。

保護管内のケーブルの配置状況を図1.3に示す。モータ用及びマグネット用ケーブルと信号ケーブルとはノイズ防止のためのシールドで分離するようにしている。

保護管は図1.2に示すように、原子炉圧力容器蓋を貫通し、炉外に導かれる。

保護管の炉内布設状況を図1.4～1.5に示す。

尚、ケーブルの暫定仕様は以下の通りである。

a) ビルトインモータ用動力ケーブル

- i) シース：外径12mm、材料 ステンレス鋼
- ii) 芯 線：芯径3mm、材料 銅、芯数 3本
- iii) 絶縁材：MgO
- iv) ケーブル数：1本

b) スクラムマグネット用動力ケーブル

- i) シース：外径11mm、材料 ステンレス鋼
- ii) 芯 線：芯径3mm、材料 銅、芯数 2本
- iii) 絶縁材：MgO
- iv) ケーブル数：1本

c) 回転検出器用信号ケーブル

- i) シース：外径8mm、材料 ステンレス鋼
- ii) 芯 線：芯径1mm、材料 銅、芯数 2本
- iii) 絶縁材：MgO
- iv) ケーブル数：6本

(3) 主要目

全体概念の基本検討で定めたCRDMの主要目を表1.2に示す。

1.3 研究開発内容の整備

小型・内装CRDMの技術を確立するために、必要な研究開発項目及びその開発スケジュールを抽出、整理した。その概略を図1.5に長期開発計画としてまとめた。

開発計画の前提条件を以下とした。

- a) 実機設計製作を設計開始後14年目からとする。
- b) 設計開始11～13年の3ヶ年を確性試験期間とする。
- c) 設計開始8～10年の3ヶ年を実証試験期間とする。

従って、要素開発、機構開発研究は7年間で完了させる必要があり、具体的な内容を盛り込んだ

スケジュールを検討した結果を図1.7に示す。

図1.6に示す内容の要旨は、以下の通りである。

- a) 1年目は電磁部品（モータ、マグネット）のコイルに使用する耐熱電線について使用候補材を選定し、一般特性試験、高温試験（長時間絶縁特性試験）からなるスクリーニングテストを実施する。更に、コイルを試作して試験を実施する。これらにより、コイル（主としてビルトインモータ用ステータコイル）の実現性の見通しを得る。
- b) 2年目は、今年度選定された電線を用いたビルトインモータ、スクラムマグネットの試設計を実施し、CRDMとして要求される性能が得られることを確認する。
- c) 3年目は元年度の試設計結果を受け、ビルトインモータの回転子に用いる永久磁石の高温試験を実施する。また、この他ラッチ機構を代表する分割ボールナット、回転検出器、位置検出器についても試設計を実施する。
- d) 4年目以降は、ビルトインモータ用ステータコイル、ラッチマグネット、分割ボールナット並びに位置検出器の試作を行い、更に、試作した各要素について室温あるいは高温中の試験を実施する。

次に、各要素の試験結果を受けてCRDMとしての要素を製作し、ラッチ機構、ビルトインモータそれぞれ単独での試験や、両者を組み合わせた機構開発研究を実施する。また、CRDM高温高圧試験用の装置を製作し、環境試験も実施する。

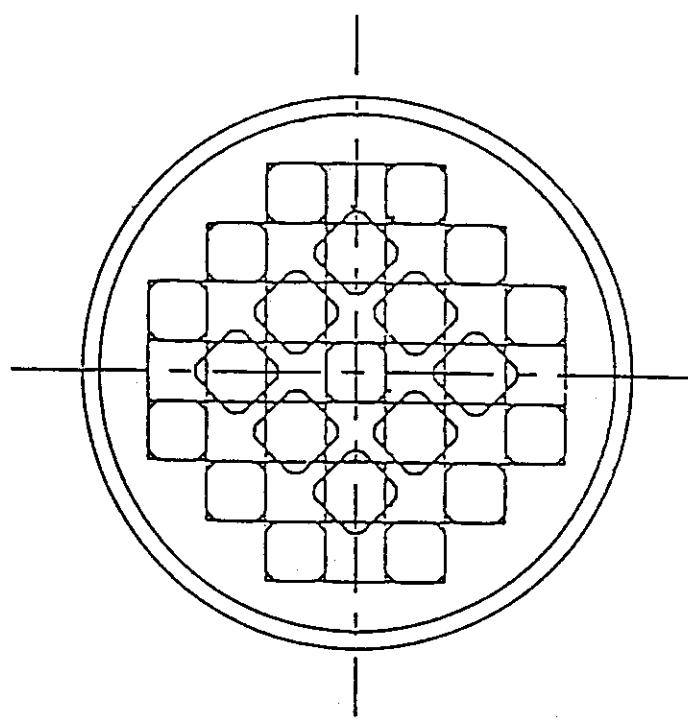
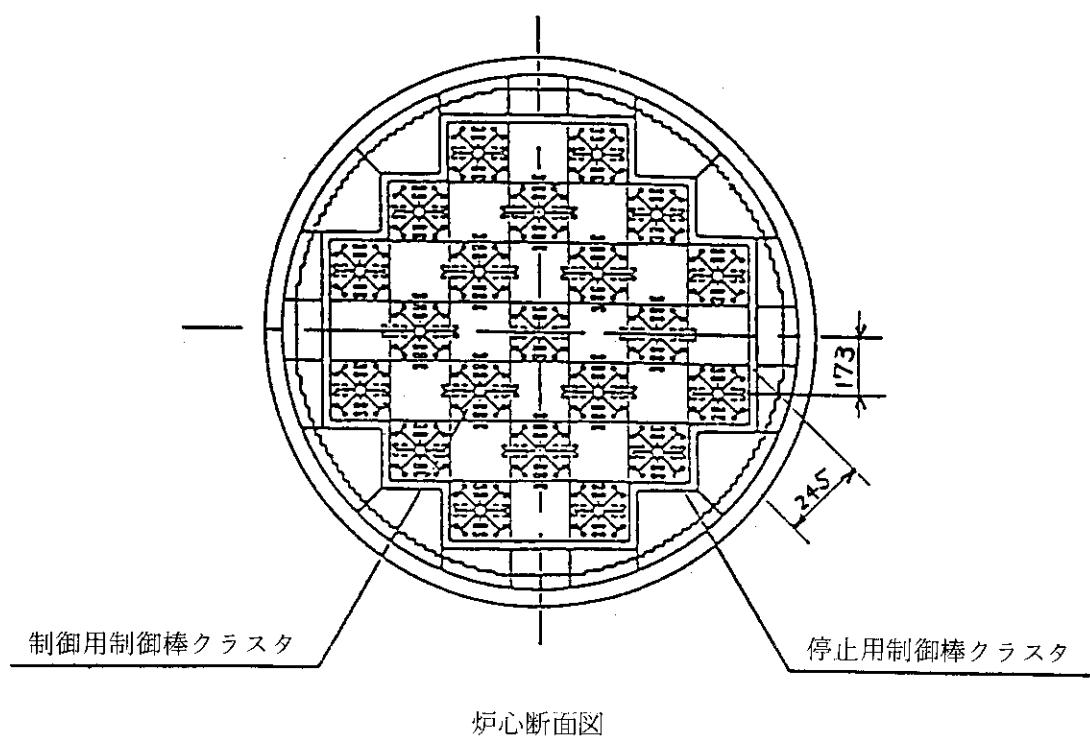
尚、図1.5～1.6に示す開発スケジュールは、今後の設計進捗やR&Dの成果を受けて見直しがあり得ることを付記しておく。

表 1.1 設計条件の整理

機能	条件項目	設計条件
炉心配置への適合性	CRDM 外径	<ul style="list-style-type: none"> ・電磁部外径 200 mm以下 ・CRDM外径 210 mm以下
制御棒引き上げ力 及び駆動速度	引き上げ力	<ul style="list-style-type: none"> ・ 200 kg (モータトルク 30 kg-cm)
	駆動速度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 0 ~ 1200 mm/min. (0 ~ 200 rev./min. : リード 6 mm)
	ストローク	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1000 mm
停止位置精度	停止位置精度	<ul style="list-style-type: none"> ・ ± 0.02 rev. (± 0.12 mm)
スクラム機能要求 並びにスクラム時間	状態と時間	<ul style="list-style-type: none"> ・ 傾斜 0° 加速度 (1 ± 0.6)g 1.4 秒以下 ・ 傾斜 30° 加速度 (1 ± 0)g 1.4 秒以下 ・ 傾斜 0° 加速度 (1 ± 0.85)g 3 秒以下 ・ 傾斜 60° 加速度 (1 ± 0)g 3 秒以下 ・ 傾斜 90° 加速度 (1 ± 0)g 5 秒以下 ・ 傾斜 90° 以上加速度 (1 ± 0)g 制限なし
燃料交換性	機能条件	<ul style="list-style-type: none"> ・ 原子炉容器蓋の取外しを阻害しない構造であること ・ 駆動軸と CRDM 本体が切り離せる構造であること ・ CRDM 本体が炉内構造物と共に取り外せる構造であること ・ 駆動軸と RCC が切り離せる構造であること

表 1.2 C R D M 主 要 目

項 目	仕 様
型 式	分割ボールナット方式
駆 動 方 法	モータ駆動
制御棒挿入方式	重力落下+ばね加速
駆 動 速 度	0 ~ 1200 mm/min
モータ回転数	0 ~ 200 rev./min
駆 動 力	200 kg
ス ト ロ ー ク	1000 mm
停止位置精度	0.02 rev. (0.12 mm)
C R D M 外 径	210 mm
駆 動 部 高 さ	1400 mm



制御棒案内管配置図

図 1.1 RCCの配置

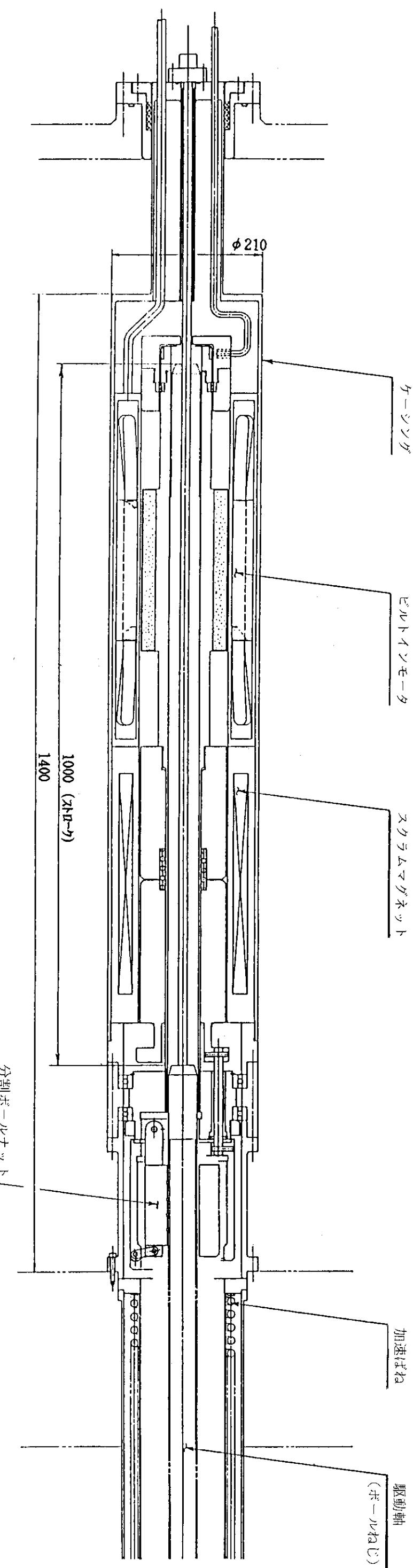


図1.2 CRDM 基本概念図

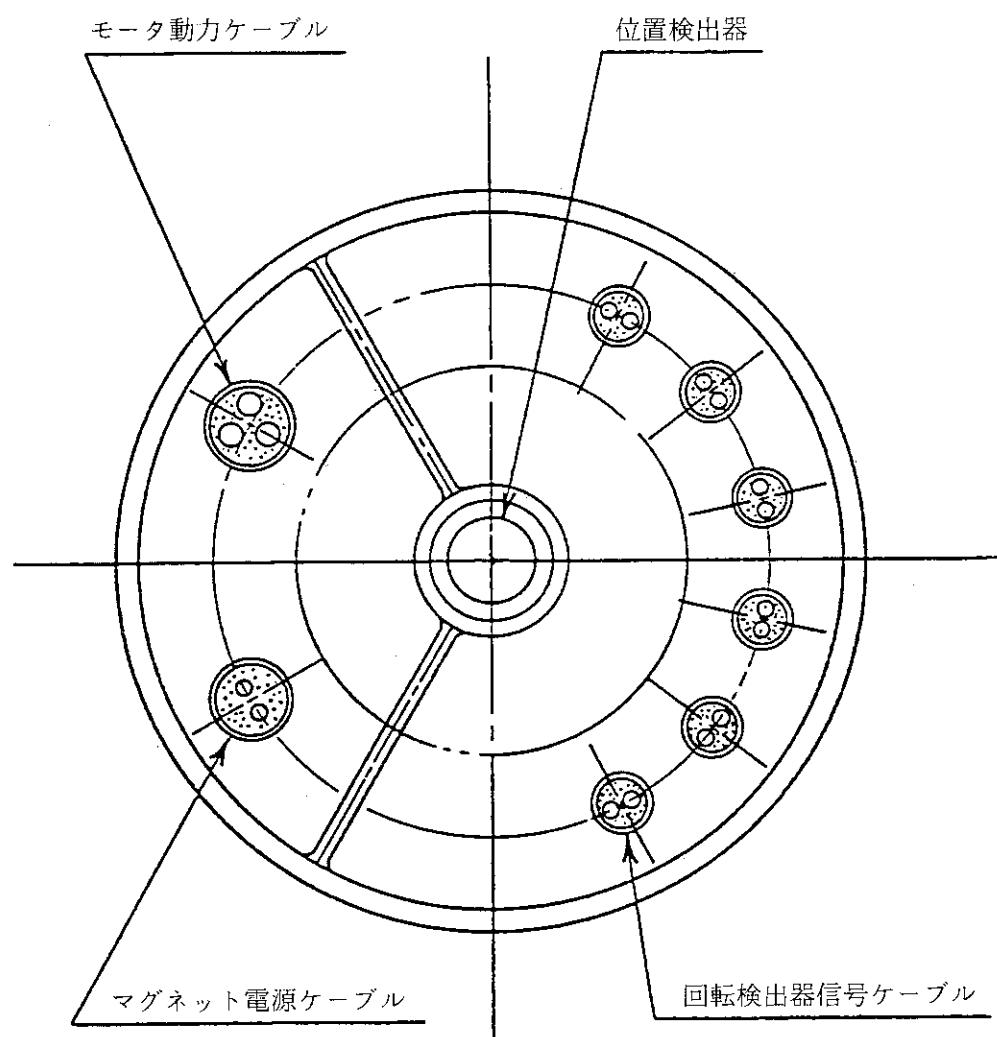


図1.3 保護管内ケーブル位置

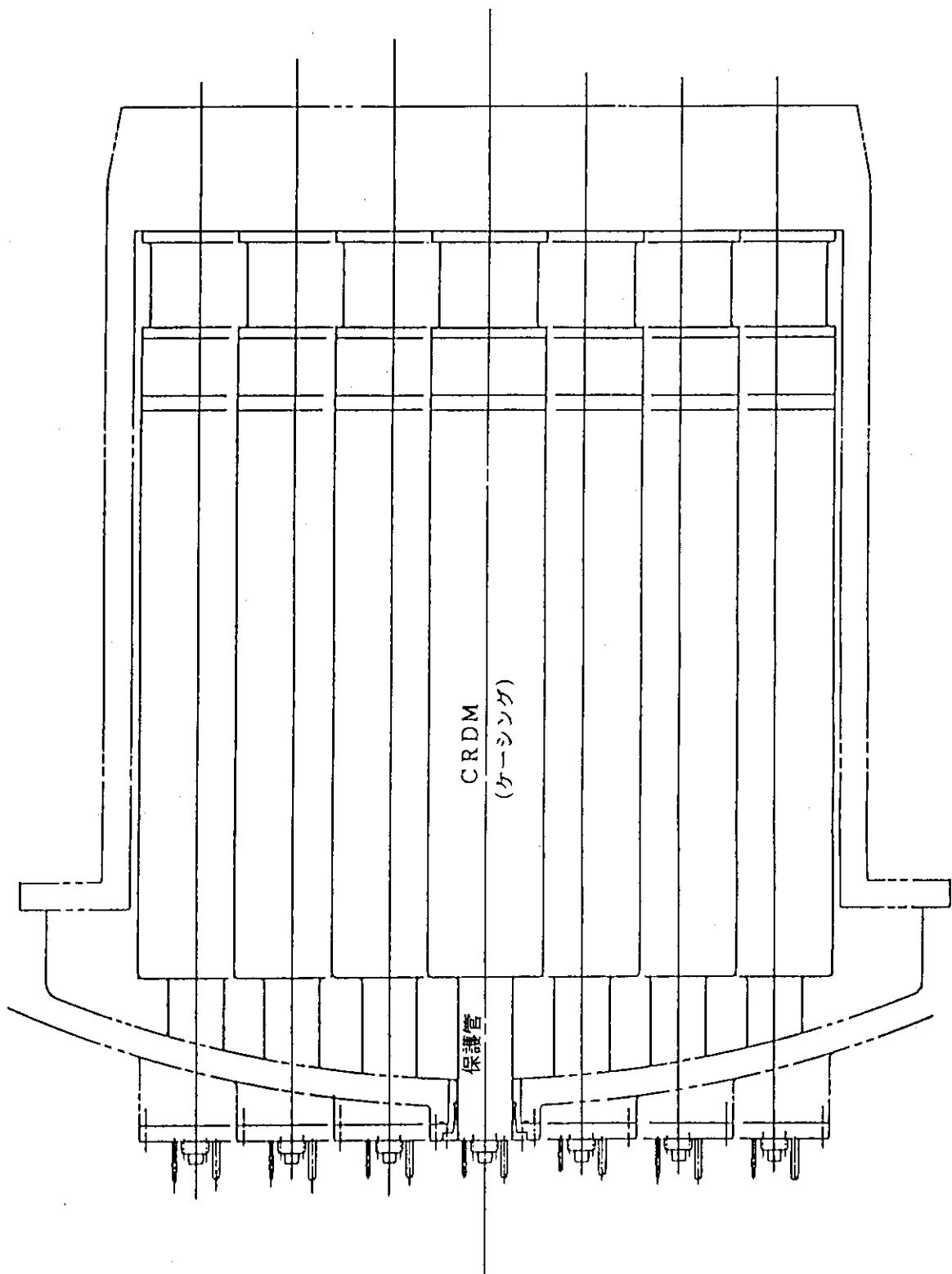


図 1.4 保護管布設状況

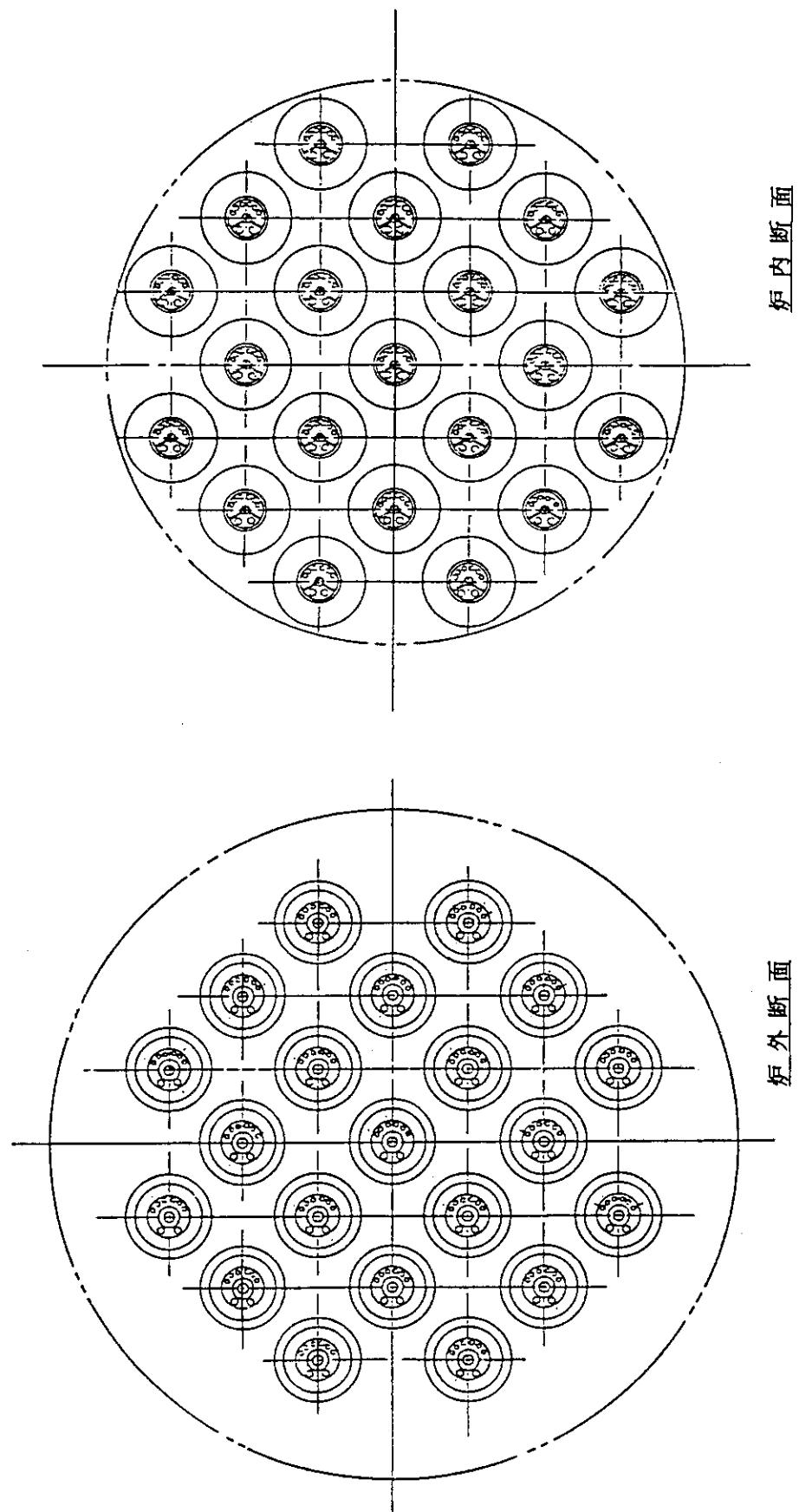


図 1.5 保護管布設状況（平面）

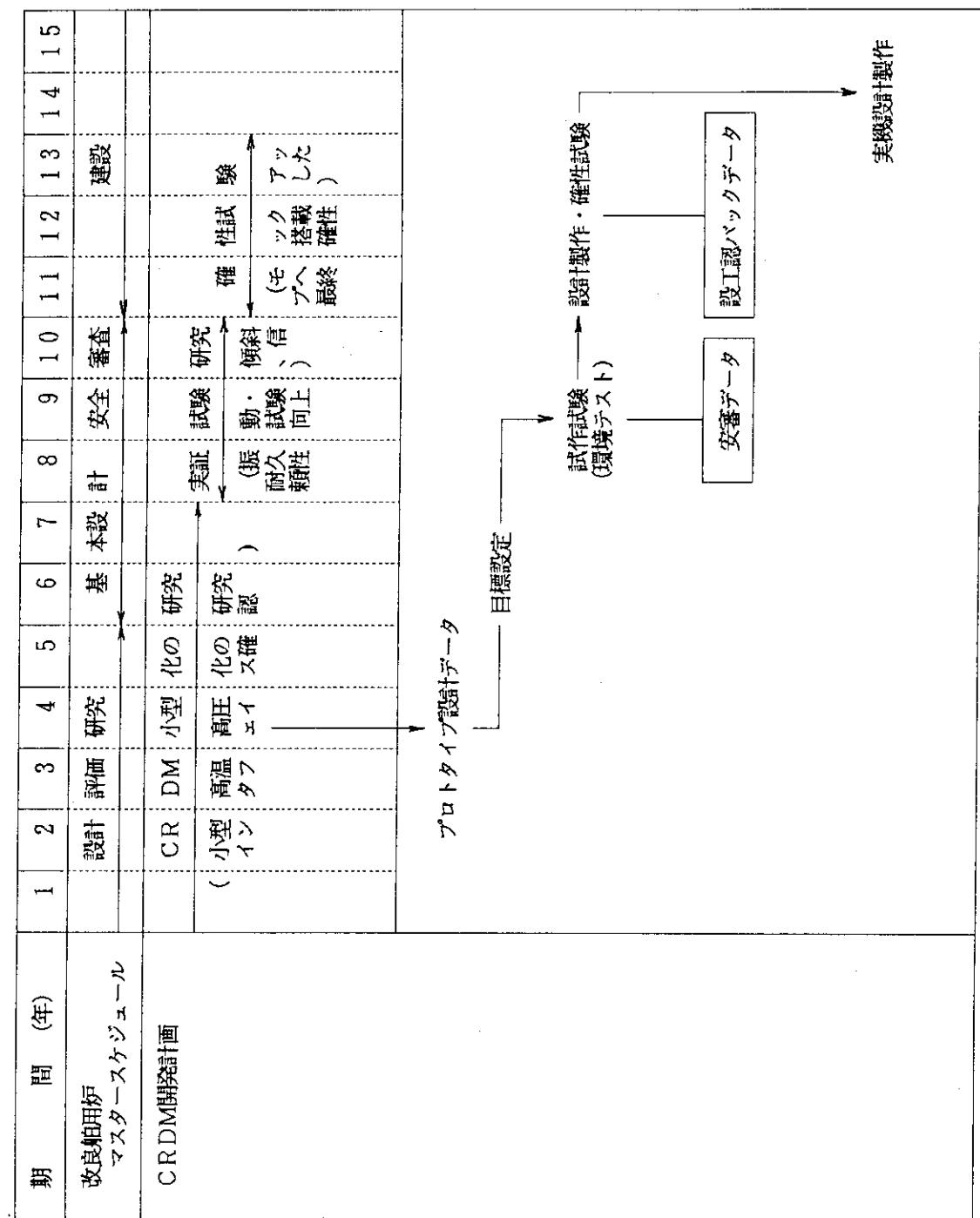
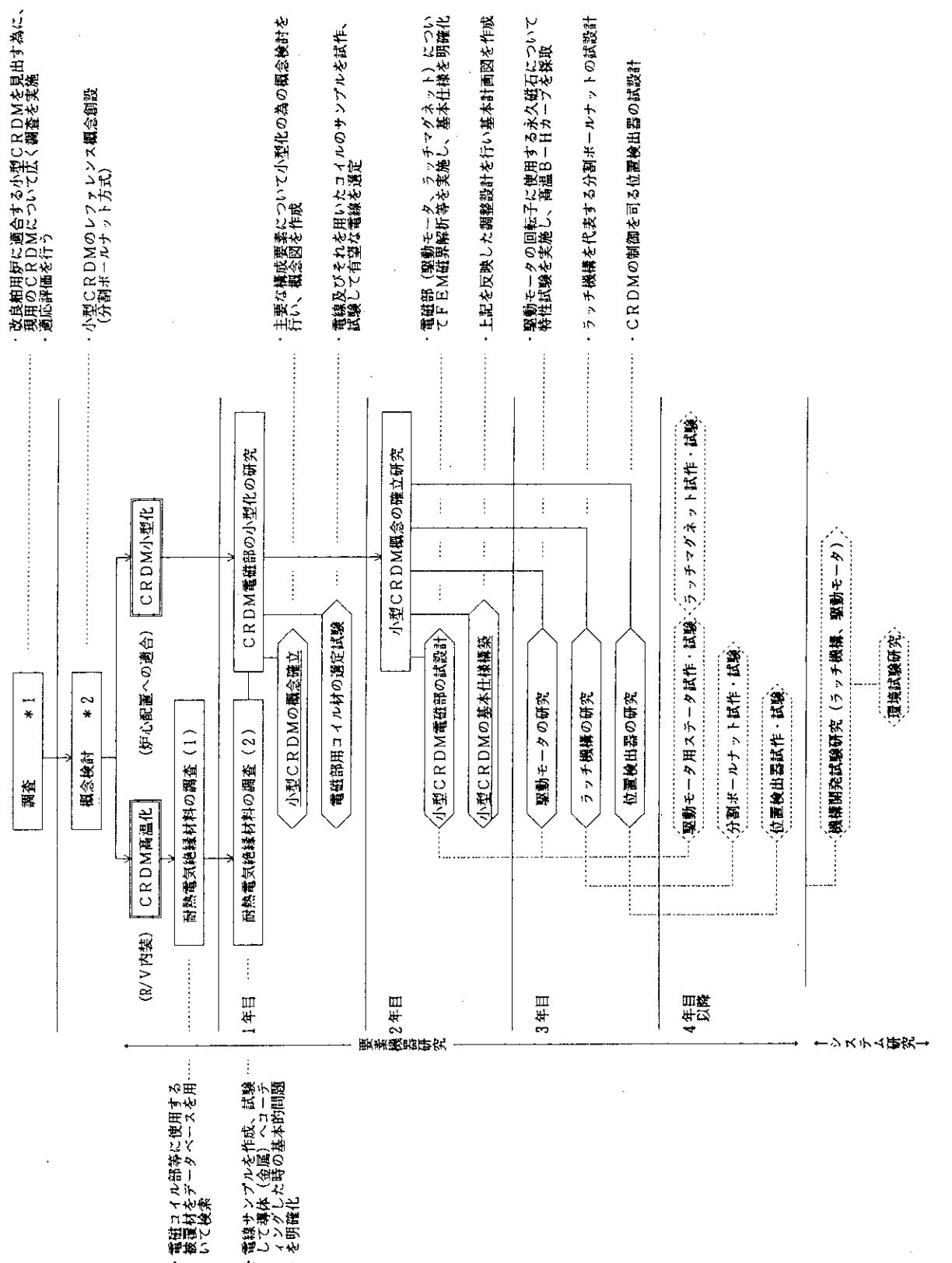


図 1.6 改良船用炉 CRDM開発スケジュール（長期開発計画）



2. 電磁部の構造概念の検討

CRDM駆動用のビルトインモータ及びスクラム（ラッチ）マグネットに着目して、原子炉圧力容器内の高温・高圧水下の環境条件を考慮して、構造概念を定めた。

2.1 モータ方式の選定

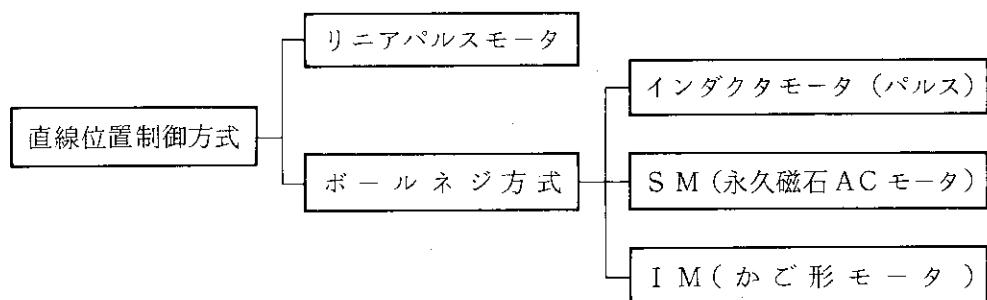
(1) モータ方式

CRDMに用いるモータは、基本的には直線位置制御を要求されており、これを実現する方式としては、直接直線制御を行う方式（リニア方式）と、回転運動をボールネジで直線運動に変える2つの方式に大別できる。

リニア方式にもパルスモータ方式とインダクションモータ方式があるが、位置決め精度の観点でパルスモータの方が有利である。

回転運動を直線運動に変える方式では、同期モータ（SM）、誘導モータ（IM）及びパルスモータの原理を応用したインダクタモータの3種類がある。

これら以外にも小型モータとしては種々の方式があるが、特殊な回転子構造を採用することは小型化の観点で困難であり、実現性のあるモータ方式として以下の候補とする。



(2) モータ方式の比較

モータ方式の候補である各種方式の構造、特徴を比較して表2.1に示す。リニアパルスモータとインダクタモータは脱調の恐れがあることから、SM方式とIM方式に絞って検討する。

(3) モータ方式の選定

絞りこんだ2方式（SM, IM）についての詳細比較を表2.2に示す。両方式とも実現の可能性があり、明確な優劣はつけがたいが、より小型化を図れる可能性があるSM方式を選定する。

2.2 ビルトインモータの構造概念の検討

CRDM駆動用のビルトインモータの電磁検討を原子炉圧力容器の高温、高圧水下の環境条件を考慮して実施し、図2.1に示す構造概念を想定した。

(1) 回転子の構造概念

ビルトインモータの回転子は、磁束を発生するための永久磁石、隣合う永久磁石の背をつなぎ磁束を通しやすくするための磁気ヨークで構成される。また、永久磁石は、高温高圧水に直接触れないように、非磁性材のケースに封入される。

(2) 固定子の構造概念

ビルトインモータの固定子は、前述の回転子の発生する磁束を通す電機子鉄心、この電機子鉄心の内周に設けたスロットに納めた電機子コイルで構成される。この電機子コイルに電流が流されることにより、モータトルクが発生する。また、電機子コイルと電機子鉄心は、高温、高圧水に直接ふれないように、非磁性材のケースに封入される。

(3) 永久磁性材の候補材

ビルトインモータの回転子に用いる永久磁石は、高温環境下において、残留磁束密度(B_r)及び保磁力(H_c)が充分に大きいことが必要である。永久磁石材の一般的な特性より、この条件を満足する可能性がある材料を選定すると、 Sm_2Co_{17} 系の希土類磁石のみが候補に残る。他の永久磁石は、以下の理由により本モータの候補に適さない。

a) フェライト系磁石

B_r , H_c 共に小さく、高温環境下で使えない。

b) アルニコ系磁石

高温環境下で使えるが、 H_c が小さい。

c) ネオジウム系磁石

B_r , H_c 共に大きいが、高温環境下で使えない。

尚、候補材の Sm_2Co_{17} 系磁石においても、高温環境下において H_c が低下する傾向が知られており、高温不可逆減磁に対する充分な設計上の配慮と、磁石材料の充分な吟味が必要である。また、一方で本磁石材料が放射線環境下に置かれるということで、誘導放射化することが懸念されるが、炉心から充分離れていることからその度合いは比較的小さいと考える。今後の検討にもよるが、CRDMへのアクセスの必要が生じた場合、作業員の被曝量軽減策として専用メンテナンスキャスクの採用、予備品との交換を前提とした修理要領の確立等必要な対策を講ずる必要があるかもしれない。

(4) 永久磁石の動作点の概念

永久磁石の特性を図2.2のように仮定する。

a) 常温環境下の特性(20°C)

$B_r = 9\text{ kガウス}$, $H_c = 9\text{ kエルステッド}$

b) 高温環境下の特性(350°C)

$B_r = 7.5\text{ kガウス}$, $H_c = 5\text{ kエルステッド}$

回転子単独の常温環境下における動作点をA点、回転子と固定子を組み合わせた常温環境下

における動作点をB点、この状態のまま温度を上昇させ高温環境下とした場合の動作点をC点となるよう永久磁石動作点の設計を行えば、B-Hカーブの直線範囲に全ての動作点が入る。この過程は、モータの組み立てから完成後の高温環境下での運転状態に至るまでの永久磁石の動作点の軌跡に相当する。逆に、C点→B点→A点の過程は、モータ環境の降温から分解に至るまでに相当し、全ての動作点をB-Hカーブの直線範囲に設定することにより高温不可逆減磁を理論上避けることができる。

(5) モータ横断面の各部寸法決定の概念

ビルトインモータに許容される寸法制限内に、回転子の電磁ヨーク、永久磁石、非磁性材の耐水ケース、空隙、固定子の非磁性材の耐圧ケース、電機子コイル、電機子鉄心を配分する。永久磁石の動作点は、これらの諸寸法の全てと、永久磁石のB-Hカーブの複雑な関数となっているため、最適寸法配分に至るまでの検討の各段階において、前述の高温不可逆減磁を避ける条件を満足していることを確認しながら設計をすすめる必要がある。

a) 電磁ヨークの寸法決定の概念

永久磁石が発生する全磁束が電磁ヨークを通るので、磁気飽和を生じない寸法が必要。

b) 永久磁石の寸法決定の概念

高温不可逆減磁を生じない寸法が必要。

また、空隙の磁束密度分布が、正弦波に近い分布となる事を確認する必要がある。

c) 電機子鉄心の寸法決定の概念

永久磁石が発生する磁束が、電機子鉄心を通るので、磁気飽和を生じない寸法が必要。

d) 電機子コイルの寸法決定の概念

永久磁石が発生する磁束が、電機子コイルに美しい正弦波の3相起電力を発生するように、電機子コイルの分布を決める必要がある。また、モータの単位長さ当たりのトルクを大きく、モータの全長を短くするため、電機子コイルを納めるスロットは前述の電機子鉄心の磁気飽和を生じない範囲で可能な限り大きくする必要がある。

e) その他の寸法決定の概念

回転子の非磁性材の耐圧ケース、固定子の非磁性材の耐圧ケースは、電磁設計上可能な限り薄くすることが望ましい。従って、今後、機械強度の検討と溶接性、耐触性、加工性などに優れた素材の調査などを進める必要がある。

(6) 固定子の耐圧ケースの損失の概念

固定子の耐圧ケースの回転子に対向する面には、永久磁石によって発生した回転磁束が貫通する。この回転磁束は、耐圧ケースに渦電流を誘導するため、回転子の回転数にほぼ比例したブレーキトルクと回転子の回転数のほぼ2乗に比例した発熱を生じる。従って、電機子コイルに電流を流して発生するモータトルクの設計値は、所要の軸出力トルク、水中で回転する回転子の流体損失によるブレーキトルクに、この渦電流によるブレーキトルクを加えた値以上としなければならない。また、ビルトインモータの冷却設計においては、モータトルク発生のために電機子コイルに通電することによって生じるジュール損とともに、この渦電流による耐圧ケースの発熱を考慮する必要がある。

2.3 スクラムマグネットの構造概念の検討

スクラム（ラッチ）マグネットは、ポール、アーマチュア、コイルで構成され、その構造概念を図2.3に示す。

(1) ポール、アーマチュアの構造概念

スクラムマグネットのポール、アーマチュアは、同軸上に配置された磁性材円筒で構成される。ポールとアーマチュアの間には、空隙が設けられ、コイルに流された電流によって発生する磁束がその間を渡ることによって、両者の間に吸引力が発生する。

(2) コイルの構造概念

スクラムマグネットのコイルは、高温、高圧水に直接触れないように耐圧ケースに封入される。また、この耐圧ケースは、コイルに流された電流によって発生した磁束をポールとアーマチュアに導くための磁路として機能する。従って、ポールとアーマチュアの間の空隙に対向する内筒の一部は非磁性材、他の部分は磁性材によって構成される。

(3) 吸引力発生の概念

ポールとアーマチュアの間に発生する吸引力は、空隙の磁束密度の2乗と空隙の面積に比例する。空隙の磁束密度B(T), 空隙の面積S(m²), 真空誘磁率μ₀(H/m)から、概略次式によって示される吸引力f(N)が発生する。

$$f = \frac{B^2}{2} \times \frac{1}{\mu_0} \times S \quad (N) \quad \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \quad (H/m)$$

なお、空隙の磁束密度は、ポールとアーマチュアの間の空隙長の増大によって著しく低下するので、コイルに流す電流の大きさは、所要の吸引力と空隙長の関係に合わせて設定する必要がある。また、コイルの耐圧ケースは、コイルに流された電流によって発生する全磁束が通るので、機械強度に対する検討とともに、磁気飽和による空隙磁束密度への影響を考慮した設計としなければならない。

2.4 線材の選定

320°Cの環境下で稼働させるビルトインモータ及びマグネットに使用可能な線材の選定を行うに当たって、以下の条件を設けた。

1) 耐加工劣化性

捲線時の加工劣化のより厳しいと予想されるビルトインモータを基準とした。

2) 耐熱性

稼働時の温度上昇を従来の知見より約80°Cと仮定し、更に温度マージンの50°Cを勘案して450°Cを目標とした。

なお、この耐熱電線に関し、導体の耐熱性は絶縁被膜それ自身以上に重要と考えられるが、ここでは時間的制約から、ニッケルメッキ銅線を主として用いることとし、絶縁被膜を変化させて検討を行った。

絶縁層としては、耐熱性に問題はあるが、耐加工劣化性に優れる有機電線、可とう性バインダーとセラミックとの複合材料からなるセラミック化耐熱電線（有機／無機電線）と可とう性に問題はあるが、完全な無機材料で構成された M I ケーブルを開発済の電線の中から選択し、候補材料として試験した。

尚、高温用線材としては、MK ワイヤの使用実績が知られているので、同時に試験した。しかしながら、本件のような放射線下での適用に際しては、ボロンアタックによる放射線劣化の影響が不明であるので参考データにとどめた。従って、ここでとりあげた S H R シリーズの電線は、ボロンフリーのものである。

候補とした線材の外観を写真 2.1 に示す。

また、放射線がセラミックや有機材料に及ぼす影響について机上検討したので、その内容を付録 2 に示す。

表 2.1 モータ方式の比較(1)

方 式	メ リ ッ ト	デ メ リ ッ ト	評 価
リニアパルスモータ	モータ構造簡単 制御容易	空隙寸法小 脱調の恐れあり。	×
インダクタモータ	モータ構造簡単 低速制御に適す。	空隙寸法小 脱調の恐れあり。	×
ボールねじ S M 方式	壁際が大きくとれる。 AC サーボの制御技術例 多い。	多極サーボ例なし。	○
ボールねじ I M 方式	モータ構造簡単 回転子内径を大きくとれる。	S M に比し若干損失大	○

リニアパルスモータ	インダクタモータ
S M 方式	I M 方式

表 2.2 モータ方式の比較(2)

項目	方式	S M 方 式	I M 方 式
回転子構造	永久磁石		
	磁極材料：アルニコ又はREC (注) RECはアルニコに比し保磁力 エネルギー積が大きいので小型 軽量化が可能		導体材料：アルミ又は銅（合金） (注) アルミダイキャストは量産に適 す金型が必要。 銅バー、リングの場合はロー付
	鉄心：普通鋼		鉄心：電気鋼板（積層）
固定子構造	コイル： 3相バラ巻	コイル： 3相バラ巻	
	鉄心：電気鋼板（積層） 内径側：SUSキャンシール	鉄心：電気鋼板（積層） 内径側：SUSキャンシール	
極 数	4 P or 8 P (注)多極機の製作は今後の課題		24 P 多極機設計は容易 但し励磁電流大
制御方式	正弦波PWMインバータ（電流形）	正弦波PWMインバータ（電圧形）	
位置検出	ロータリーエンコーダ (ACサーボモータに先行例あり)	エンコーダ等	
寸 法	小形、軽量達成の可能性あり	SMより寸法は大 (但し容量、制御方法による)	

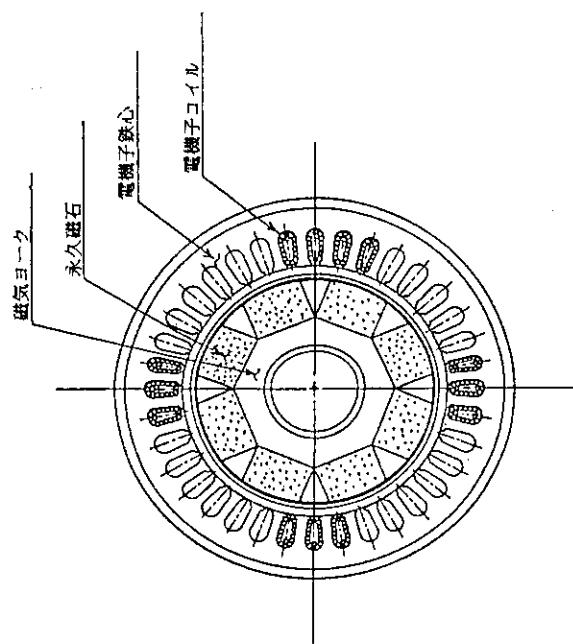
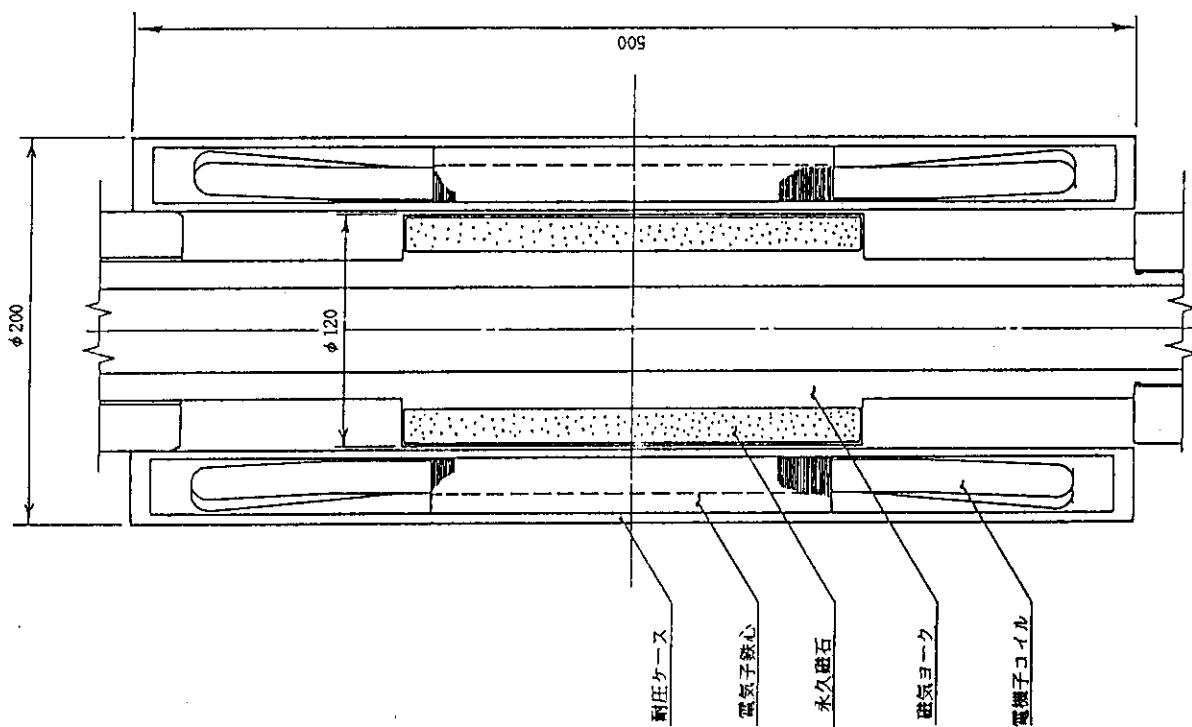


図 2.1 ビルトイソモータ概念図



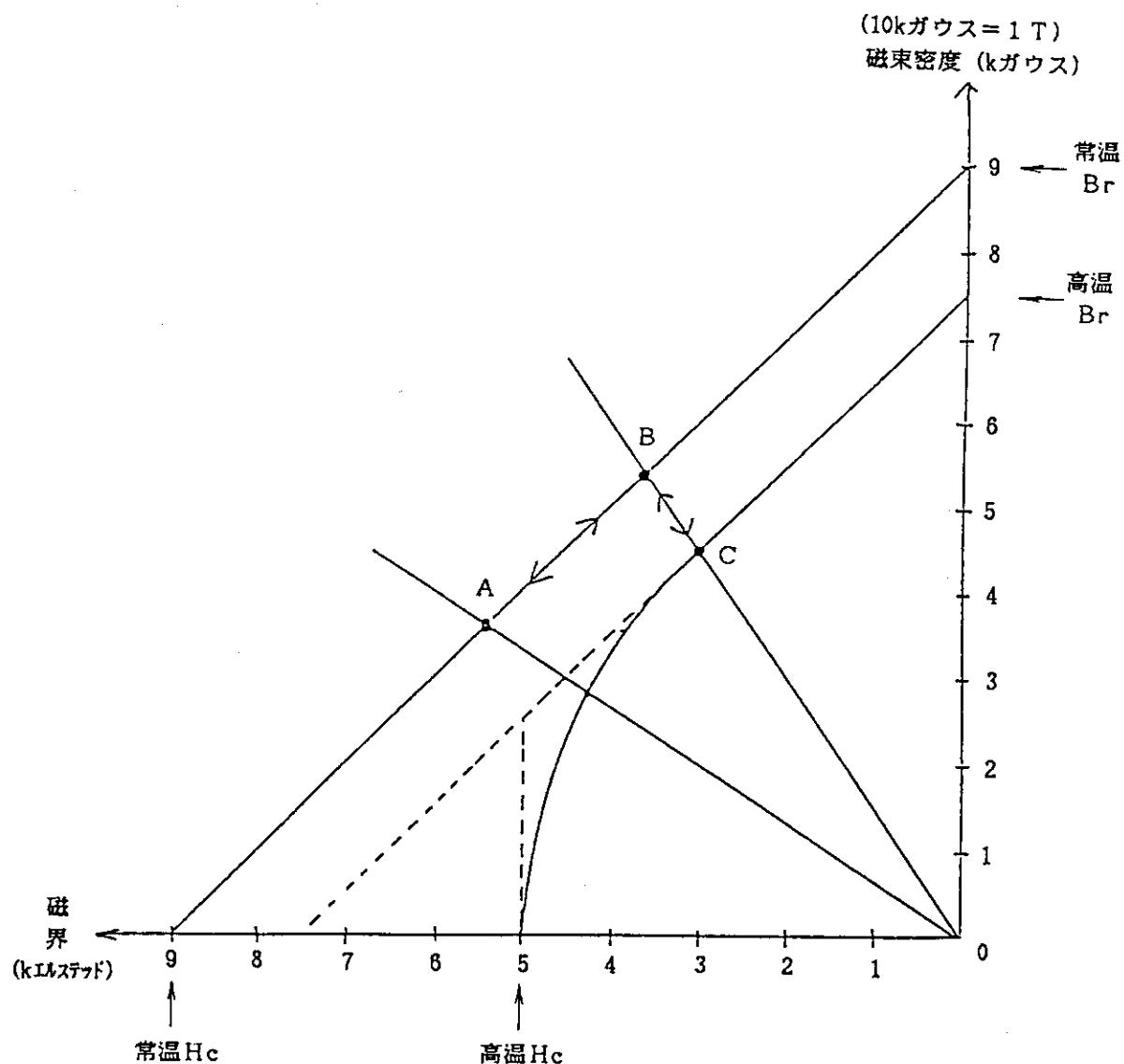


図 2.2 永久磁石の動作点の概念

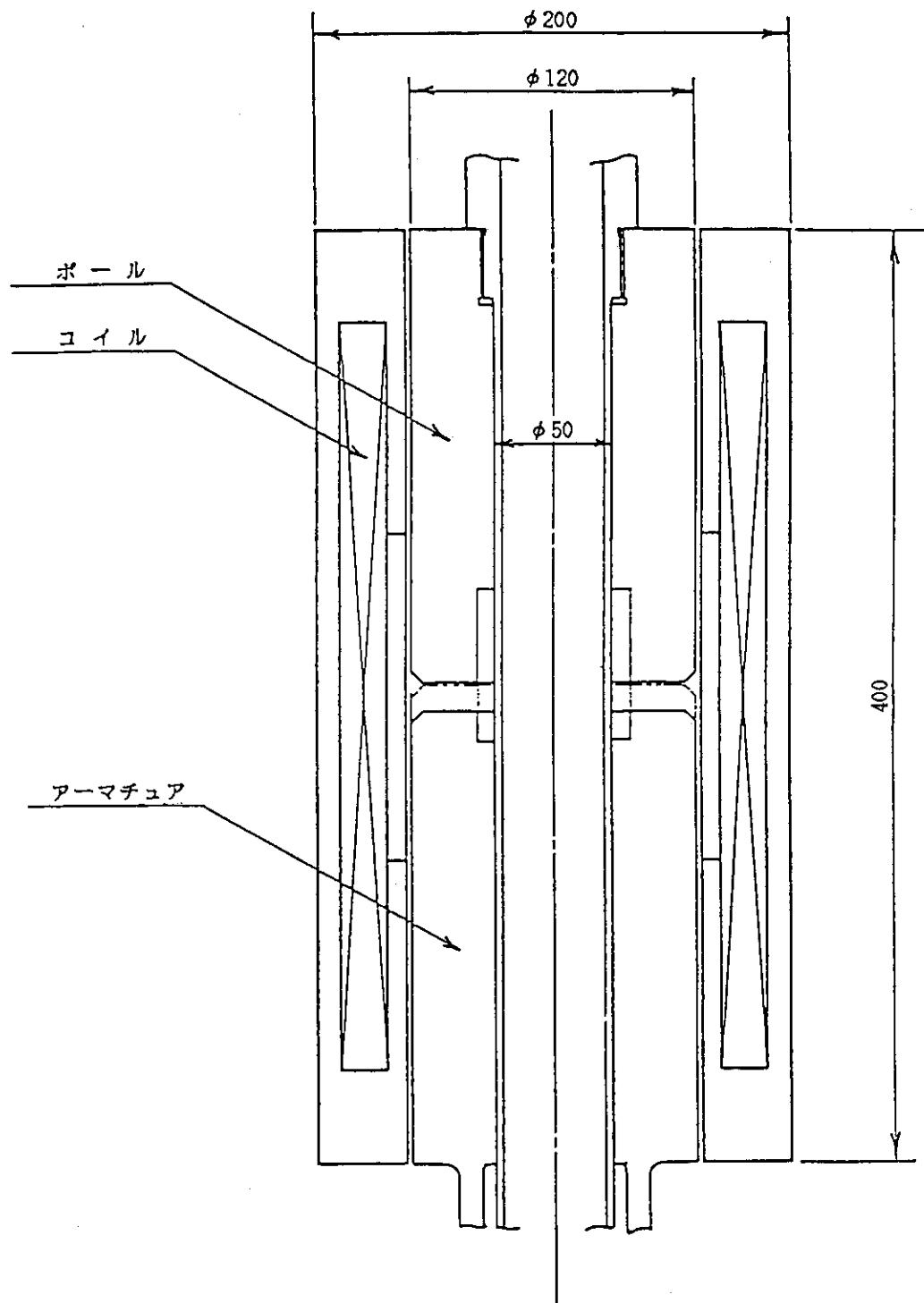
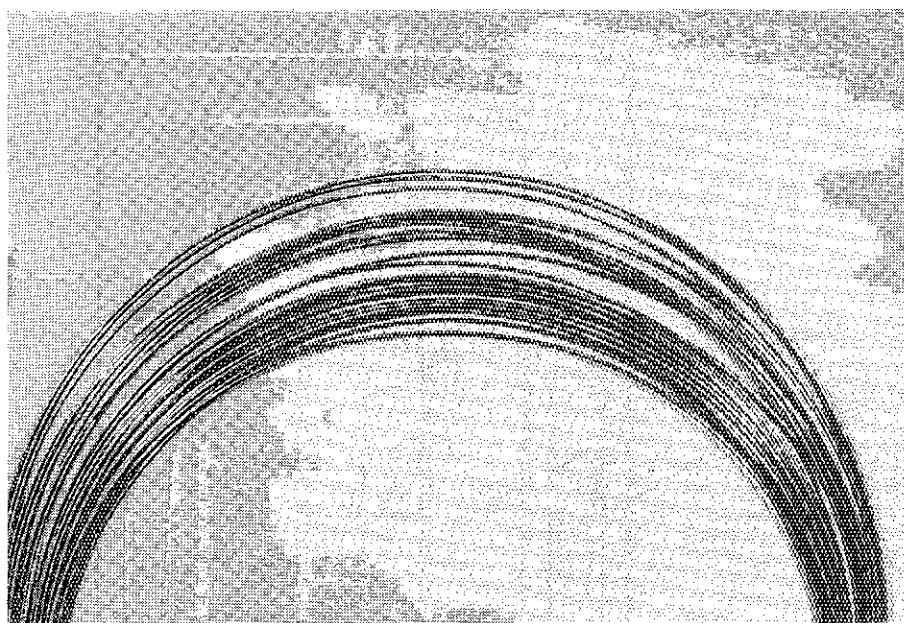
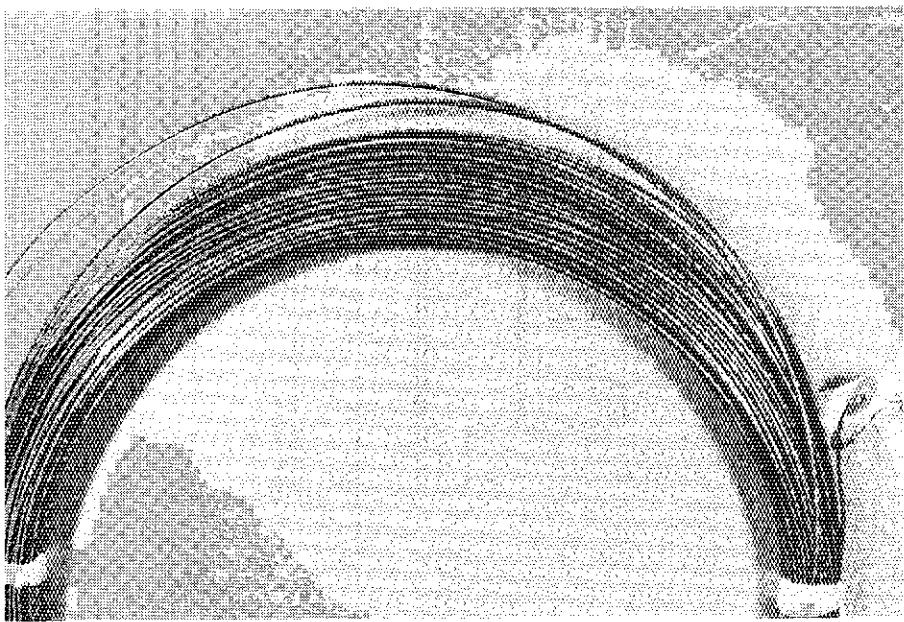


図 2.3 スクラムマグネット概念図

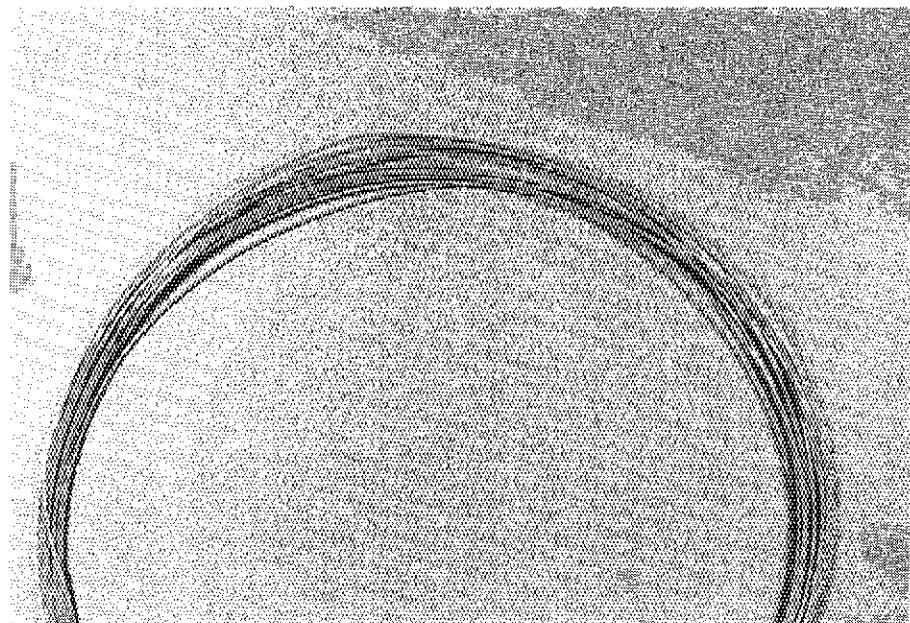


ポリイミドフィルム捲線

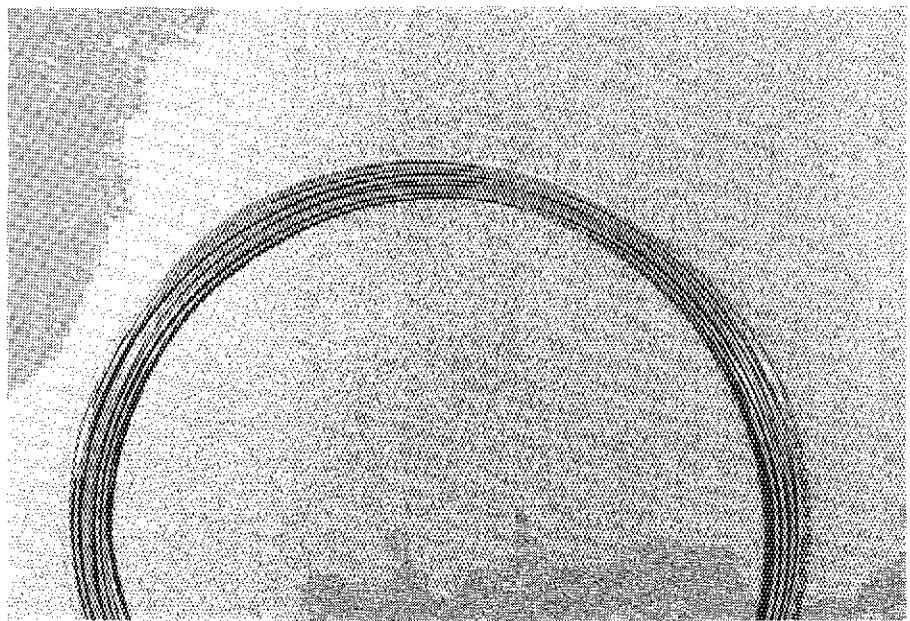


ポリイミド複合線

写真 2.1 線材の外観（その 1）

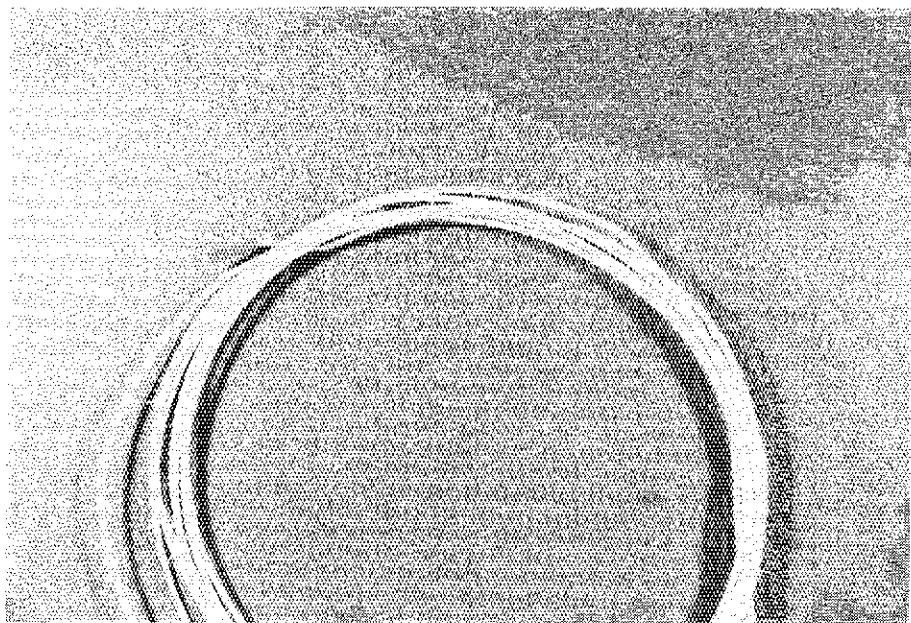


SHR-1

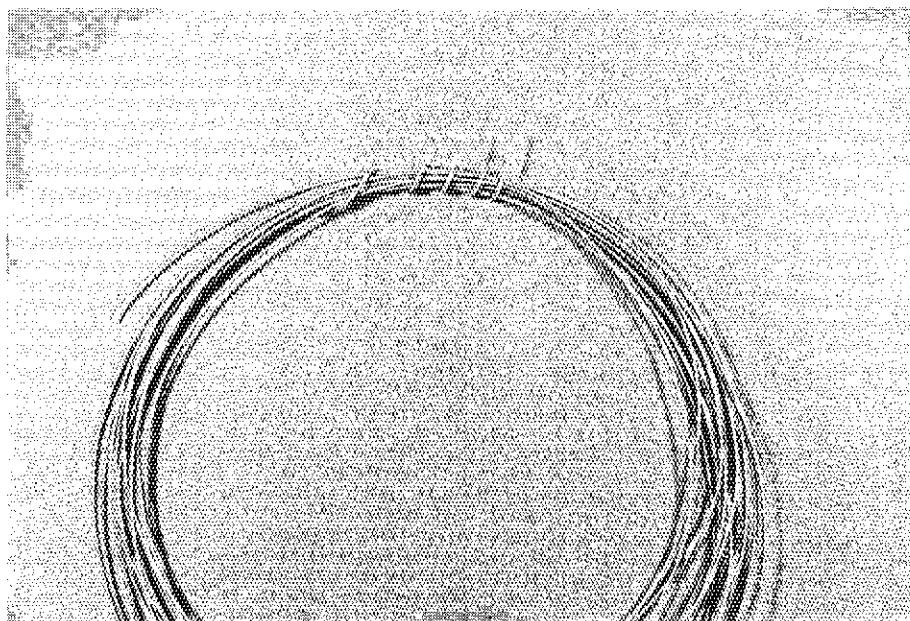


SHR-2

写真 2.1 線材の外観（その 2）

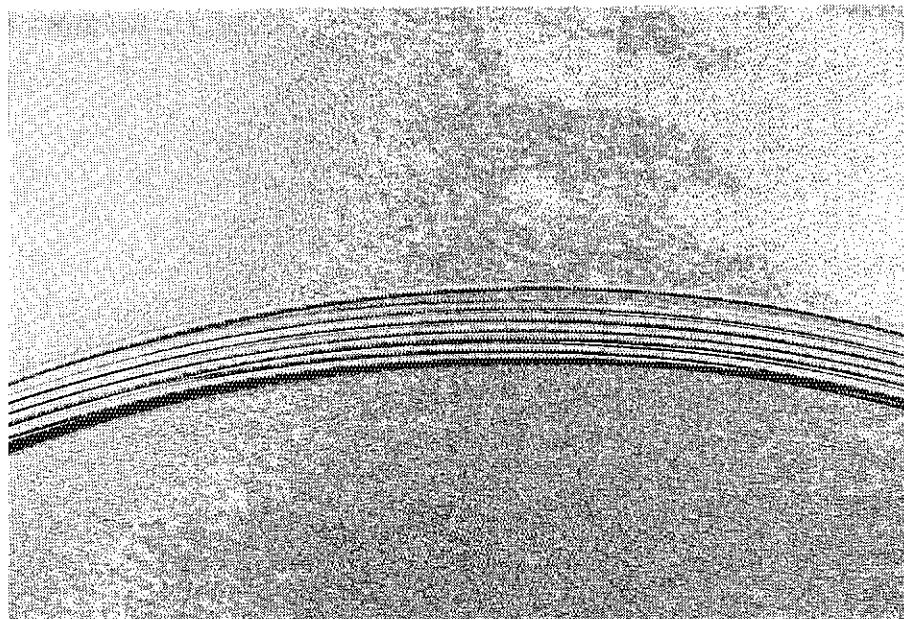


SHR-3



MK (参考)

写真 2.1 線材の外観 (その 3)



MI ケーブル

写真 2.1 線材の外観（その 4）

3. 電磁コイルの試作・試験

前章までの検討に基づき、高温条件下で使用可能と考えられる代表的な線材を用いて、電線及びコイルのサンプルを試作し試験することで、将来有望な電線を見出すと共に耐熱コイル製作技術を確立するための一助とした。

3.1 試験

(1) 電線特性試験

a) 一般特性試験

- 絶縁破壊電圧
- 可とう性
- 密着性
- 耐熱衝撃性

b) 長時間絶縁特性試験……… 300 °C, 375 °C, 450 °C 各 1,000 時間

- 絶縁特性

(2) コイル試験…………… 375 °C, 450 °C 各 1,000 時間

- 絶縁特性

3.2 試作

(1) 電線の試作

- 無機電線…………MI ケーブル ϕ 2.3
- 有機電線…………ポリイミド絶縁電線 ϕ 1.0
- 有機／無機電線…セラミック化シリコン線, MKワイヤ ϕ 1.0

(2) 測定容器の製作

- 高温安定性試験容器(図 3.1(a), (b))
- 長時間絶縁特性試験用容器(図 3.6)

(3) コイル試作

- ボビン(図 3.3)
- コイル(図 3.4 ~ 3.5)

3.3 電線特性試験内容

ビルトインモータ及びマグネットに使用する電線を選定するため、一般特性試験を 4 項目に渡って実施した。

a) 絶縁破壊電圧

絶縁被膜の電気的特性を端的に示す絶縁破壊電圧を、実用を模擬したモデルである2個撲り法を中心に評価した。

b) 可とう性

絶縁電線の曲げに対する被膜強度を求めるもので、マンドレルに巻きつけた際、外径側には引張力、内径側には圧縮力が加わり、導体との密着性との相関で“われ”として認定される。

c) 密着性

絶縁電線において、絶縁体が導体に密着している強さであり、捻回により評価した。

d) 耐熱衝撃性

絶縁電線がある状態に加工されたときの熱衝撃強度の目安とするもので、一般には可とう性（撲きつけ性）試験に耐えたものを想定する最高試験温度に急激にさらし、また、取り出すことにより評価している。可とう性で得られる撲きつけ倍径と同一であれば良いとされている。

(1) 試験方法

a) 一般特性試験

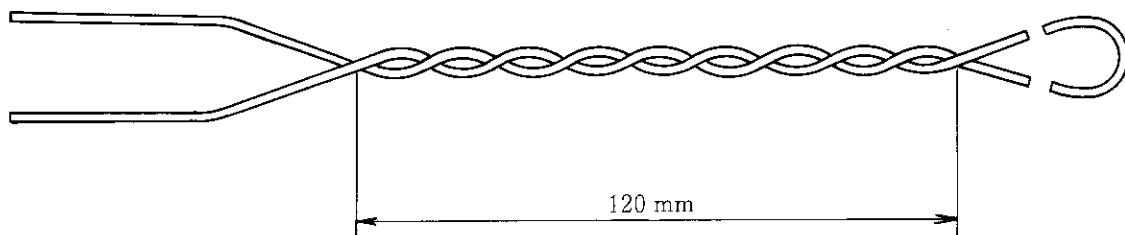
原則的にはJIS C 3003に準拠して行うが、本開発に使用する電線固有の特性も考慮し、現在廃止されている試験方法も一部取り入れる。

i) 絶縁破壊電圧

電圧は約500V/sec.の割合でなるべく一様な速さで上昇させ、絶縁破壊電圧を測定する。但し、絶縁破壊電圧が低いと予想される場合には約50V/sec.の割合とする。

イ) 2個撲り法

各々試験片を2つに折り合わせ、14.7Nの張力を加えながら、約12cmの長さの部分を9回より合わせた後張力を取り去り、折り目部分を切って、この2本の導体間に50Hzまたは60Hzの正弦波に近い波形をもった交流電圧を加える。



ロ) 金属はく法

この方法は本来、平角線に適用するものであるが、試験片長が充分でない時に用いるものとする。長さ約30cmの試験片一本を採り、これに約50mm間隔の4箇所にそれぞれ約10mmの正弦波に近い波形をもった交流電圧を加える。尚、試験片長が不足の時は、試験片数を増加させるものとする。

ii) 可とう性

イ) 滾きつけ

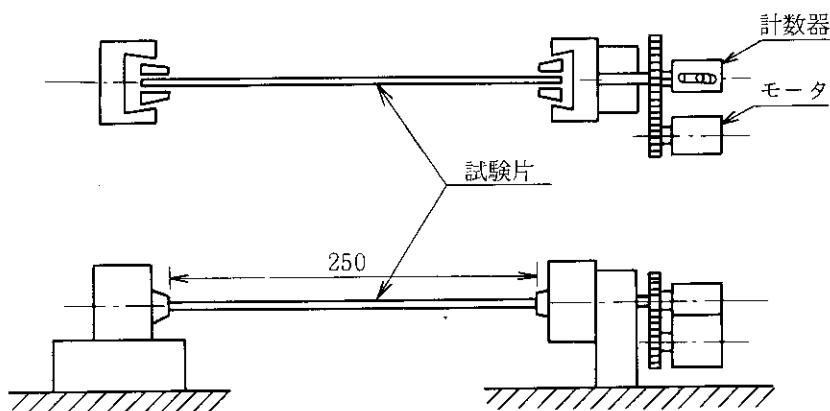
同一捲棒から適当な長さの試験片3本を採り、それぞれについて試験片自身の周囲又は規定の径をもつ表面滑らかな丸棒に線と線とが接触するように緊密に10回捲きつけた時、被膜に導体が見える亀裂を生じないかを目視で調べる。

iii) 旧規格であるが本開発品の特性を評価するのに適当であると判断し、本法を採用する。

イ) ねじり法

同一捲棒から長さ約35cmの試験片3本を採り、試験片がたるまないように試験機につかみ、標線距離250mmとして固定する。次に試験片の一端を毎分30~60回の割合で同一方向に回転して試験片をねじり、目視で導体が見えるまでの回数を測る。但し、ねじりの途中で試験片が切断した場合は、同一捲棒から更に試験片をとり同様の試験を行う。

尚、試験片長・標線距離とねじり回数は、各々比例出来るものとする。



捻回はく離装置・旧JIS法

iv) 耐熱衝撃

イ) 滾きつけ

同一捲棒から長さ約50cmの試験片3本を採り、規定の径をもつ表面滑らかな丸棒に、線と線とが接触するように緊密に10回捲きつけた後、規定の恒温槽中で1時間以上加熱する。これを恒温槽から取り出し試験片の温度が常温に戻った後、被膜に導体が見える亀裂が生じないかを目視で調べる。

尚、試験片長が不足の時は、試験片数を増加させるものとする。

b) 長時間絶縁特性試験

原則として酸化が支配的な劣化要因とならないよう微量空気中や不活性ガス中で試験を実施する。そのため、試片を300°Cで真空ベーキングした後、高温安定性試験容器(図3.1(a), (b))中に不活性ガスと共に封入する。尚、(b)は必要があればガス分析ができるものである。試片は2個捲り状とした。

i) 加熱法

電気式恒温炉中にシールドチューブをセットし、300 °C, 375 °C並びに450 °Cで1000時間程度の熱劣化を与える。

ii) 劣化の評価

封入試片を傷つけないよう注意しながらシールドチューブを破碎して試片を取り出した後、すみやかに絶縁破壊電圧を求める。

電圧は、約500 V/sec. の割合で、なるべく一様な速さで行い、絶縁破壊が生じる電圧を求め、劣化前データと対比し評価する。

但し、絶縁破壊電圧が低いことが予想される場合には、約50 V/sec. の割合で試験する。

(2) 一般特性試験結果

7種類の電線に対して行った一般特性試験の結果を表3.1に示す。

a) 絶縁破壊電圧(写真3.1)

有機電線(ポリイミドテープ及びポリイミド複合線)は、優れた電気特性を持つポリイミドテープのため、高い破壊電圧を示す。両者の差は、ポリイミド複合線に均一で特性の優れたエナメル層があるため、ポリイミドテープ捲線より高い値を示したと考えられる。

有機／無機電線のうちSHR-1, SHR-2及びMKワイヤの3種類の電線は0.66～0.83Vと同程度の値を示す。一方、SHR-3及び無機電線(MIケーブル)は若干高い値を示す。これは絶縁厚さが前記3種類より厚いことによる。有機／無機電線及び無機電線は絶縁層が多孔質であるため、有機電線に比較すると低い値になったと考えられる。

b) 可とう性(写真3.2)

有機電線2種類(ポリイミドテープ捲線及びポリイミド複合線)と有機／無機電線4種(SHR-1, SHR-2, SHR-3及びMKワイヤ)の中では、SHR-2が2倍径(2d)良で最も優れており、以下、有機電線2種類とSHR-3の3倍径、SHR-1及びMKワイヤの4倍径となる。無機電線(MIケーブル)は、シースにSUS304があるため固く、5倍径以上という結果になった。

c) 密着性(写真3.3)

有機電線はポリイミドテープがSHR-1, SHR-2及びMKワイヤは電線表面のエナメル層が、また、SHR-3はセラミックファイバが破断した回数である。結果は、SHR-2が若干弱く、有機電線2種(ポリイミドテープ捲線及びポリイミド複合線)とSHR-1及びMKワイヤがほぼ同等である。また、SHR-3は外側層がファイバ捲のため、最も良好な結果となった。無機電線(MIケーブル)については、電線の構造上、この試験は適切ではないので実施しなかった。

d) 耐熱衝撃性(写真3.4)

可とう性の試験結果と同じ捲きつけ径において、7種類の電線とも良好な結果を示している。いずれも熱衝撃による被膜への影響は認められない。

尚、この試験は空気中で行うため、高温ではポリイミドテープの酸化劣化が予想されたので、有機電線2種(ポリイミドテープ捲線及びポリイミド複合線)のみ試験温度を300

°Cとして実施した。

尚、科学技術庁無機材質研究所において試作した耐熱電気絶縁膜被覆線の特性試験結果を参考のため付録3に示す。この被覆線は、当室と科学技術庁無機材質研究所との委託調査「内装制御棒駆動装置用電気絶縁材料の耐熱性に関する調査研究（その2）」に基づき試作したものである。試験方法は前記¹⁾試験方法に示す内容とほぼ同様であるが、コロイド状の無機絶縁被膜自身の接着力の向上や耐絶縁性能を確保するための被膜厚の増大等、今後に課題を残した。

(3) 候補電線の選出

一般特性試験の4項目の結果から、長時間絶縁特性及びコイル試験を行う電線の選出を検討した。

有機電線2種類では、破壊電圧値は両者とも充分である。しかし、可とう性のデータではテープ層にマスクされて同等の結果となっているが、下層のエナメル層の可とう性に問題があることが判明したことなどから、エナメル層のないポリイミドテープ捲線を選出した。

有機／無機電線については、SHR-1とSHR-2がほぼ同等の特性を示しているが捲線工作上重要な可とう性に優れたSHR-2を選出した。また、被膜厚さが若干大きいものの、4項目の特性にバランスのとれたSHR-3も選出した。

MKワイヤについては、2.4項の理由により、また、無機電線（MIケーブル）については、作業性に劣ることや導体の線積率が低いことから捲線材としては除外した。

以上より、ポリイミドテープ捲線、SHR-2及びSHR-3の3種類を選出した。

(4) 長時間絶縁特性試験結果

候補電線として選出したポリイミドテープ捲線、SHR-2及びSHR-3の3種類の電線の試験容器への封入状況を写真3.5に示す。また、試験の結果を表3.2、図3.2に示す。各温度での1000時間劣化後の絶縁破壊電圧値（室温）を劣化前の値と比較を行い、下記の結果を得た。

a) ポリイミドテープ捲線

酸化劣化を極めて少なくした今回のテストによると、375°Cまでは健全であるが450°Cで急激な劣化が絶縁層の色相変化、クラックの発生として認められた（写真3.6）。

b) SHR-2

有機／無機絶縁層を焼成した後に無機絶縁層を形成させたものであり、375°Cまでは外観も劣化前サンプルと同様であったが、450°Cでは被膜の不均一性が顕著となり、若干の絶縁破壊電圧の低下となって現れた（写真3.7）。

c) SHR-3

SHR-2はセラミックポリマ上にエナメル層を設けているが、この電線は、エナメル層相当部にセラミックファイバを捲きつけたものであり、焼成工程での有機物の消失による多層巻コイルの“ゆるみ”防止をねらったものである。この電線は、上層のセラミックファイバにより下層のセラミック層が保護されるためか、450°Cでも絶縁破壊電圧は低下していなかった。

これらの結果から375°C近辺までは無酸素下という条件つきながらポリイミド捲線が充分使用可能であるが、設計温度（400°C）に温度マージンを見込んだ450°Cでは無機被膜／

セラミックファイバ捲きのSHR-3が最も安定した線材であることが判った(写真3.8)。

3.4 コイル試験内容

電線特性試験で抽出した3種類の耐熱電線(ポリイミドテープ捲線、SHR-2及びSHR-3)を用い、実機模擬テストとして時間的に採用可能なコイル試験を実施した。

コイルは、ボビンに巻いた構造であり、実験室的に扱いやすい大きさと捲层数(4層)を採用し、かつ電線間の絶縁特性も測定できるよう並列巻とした。

(1) 各構成部材の選定

a) ボビン材質

耐熱、耐蝕性に優れ、熱処理炉材、窒化炉部品や蒸発管に採用されるインコネル-600を選定し、図3.3の形状に加工した。

b) ボビン-コイル間絶縁部材

有機電線を用いる系に関しては、電線絶縁体と同じポリイミドフィルムを採用し、接着剤を用いず電線で押さえ込む方法で固定した。

有機／無機電線を用いる系に関しては、次の2種類絶縁体を採用した。

i) プラズマ溶射膜絶縁

セラミックスをプラズマを用いて瞬間的に溶融し、高速のキャリアガスによりボビン内周面に衝突させ、セラミックス被膜を形成させた(写真3.9)。この方法によると溶射のままで捲線を行え、溶射膜の焼成は不要であるなど利点が多いが、専用の装置が必要である。

ii) アルミナクロスシート捲絶縁

無機塗料を塗布したアルミナクロスをシート捲し、捲線全体を焼成する際に無機化するものである。絶縁層がやや厚くなること、多層捲コイルでは焼成に長い時間を要するなど欠点も多いが、簡便な処理方法として採用した。

これらを用いた各種ボビンコイルの仕様を図3.4に示す。また、コイル製作フローシートを図3.5に、各プロセス毎の外観を写真3.10～12に示す。

(2) 絶縁特性試験法

原則として、酸素が支配的な劣化要因とならないよう微量空気中や不活性ガス中で試験を実施し、初期値特性と劣化特性の比較を行う。

a) 初期絶縁特性

コイル線間、対地絶縁について絶縁抵抗、絶縁破壊電圧を測定し、初期値を得る。それぞれの測定は、吸湿の少ない状態下の室温で行い、絶縁抵抗はDC 100 V/1分値を、絶縁破壊電圧は急速上昇法でポリイミドフィルム捲線は500 V/sec. SHR-2とSHR-3は50 V/sec. で実施した。

b) 長時間絶縁特性

コイルを測定用リード付の準密封容器(図3.6)に封入し375 °C, 450 °Cの電気式恒温炉中にセットし、配管により外部からアルゴンガスをフローさせ、酸化劣化を防止した。

絶縁抵抗は、1000時間の劣化テスト中、300時間後にDC 100 V／1分値を測定した。

また、絶縁破壊電圧の測定は、1000時間の劣化終了後、初期値と同様にして室温で測定した。

(3) 絶縁特性試験結果

a) 絶縁特性

375 °C, 450 °Cにおける絶縁抵抗の経時変化を測定した。測定状況の一部を写真 3.13, 14 に示す。測定結果を図 3.7 に示す。

線間絶縁ではポリイミドフィルム捲線が、大きな温度依存性を示し、450 °Cでは劣化の進行が予想され、長期信頼性に欠ける。一方、無機系の SHR-2, SHR-3 は温度依存性、安定性ともに優れた結果が得られた。

対地絶縁も同様の傾向があり、無機絶縁系の SHR-2, SHR-3 が 450 °C下でも安定した特性を示すことが確認できた。

絶縁抵抗は、わずかな差（同桁内程度の）でその優劣を判断すべきものではないが絶縁構成などを勘案し、強いて順位をつけると線間絶縁では SHR-3 の方が、また、対地絶縁では SHR-2 の方が優れていると考える。

b) 絶縁破壊電圧

乾燥処理後、室温で絶縁破壊電圧を測定し、結果を表 3.3 に示す。線間の絶縁破壊電圧は、375 °C 1000 時間劣化後まではポリイミド絶縁が高いが 450 °Cで急激に低下する。一方、無機系は絶縁破壊電圧値は低いものの、熱劣化に対しては安定であり、SHR-3 が若干高い値である。対地絶縁の方をみると、線間絶縁と傾向的には同じであるが、無機系絶縁 SHR-2, SHR-3 間に差は認められない。

絶縁破壊電圧のデータは、本来大きなバラツキをもっているが、今回は 450 °Cを除くポリイミドがボビンとの、また、他のデータは距離の長い空隙の最弱点部の気相の絶縁破壊であったため、データとしては 2 つのグループに大別されて極めて近似した値となったものと考えられる。

3.5 電線の選定

電線特性試験の結果から、実機を想定した場合のコイル用電線として有望な 3 種類の電線を抽出し、これらをボビンに捲きつけてコイルの試作を行い、375 °C, 450 °Cで 1000 時間に及ぶコイル試験を実施した。

コイル試験の結果を総合すると、無機系で構成した SHR-2, SHR-3 が有望な特性を示し、中でも SHR-3 の電線が優れていることが判った。

ただ、SHR-3 については、現状では電線としての仕上がり外径が大きいこと、今回導体として使用したニッケルメッキ銅線の 400 °Cを越える長期（20～30 年）使用に対する信頼性が充分ではない可能性があるなど、今後究明すべき点が残っている。また、今回のモデルが小型で単純な形状のボビンであって、モータのような複雑な形状に対応するためには、さらに工夫を要す。

表3.1 電線の一般特性

有機電線		有機／無機電線 ⇌ 無機電線				無機電線	
ポリイミドフィルム捲線		ポリイミド複合線		S H R - 1 * 4	S H R - 2 * 4	S H R - 3 * 4	M K (参考)
構造	導体／シース	ポリイミドフィルム捲	ポリイミド複合線	セラミックポリマー-1／エナメル	セラミックポリマー-2／エナメル	セラミックファイン捲	ボロシリコキサソ／エナメル
絶縁	体	ポリイミドフィルム捲	ポリイミドフィルム捲	1.139	1.212	1.094	1.106
仕上寸	外径	1.000	1.000	—	—	1.004	1.004
セラ法	ミクサ	厚さ	—	—	—	0.031	0.041
mm	エナメル	厚さ	—	0.046	0.015 * 2	0.011 * 2	—
セラミックファイバ厚さ	(フィルム)	(フィルム)	0.0695	0.060	—	—	0.010 * 2
絶縁破壊電圧(kV)	2個捲り法	8.61	15.3	0.71	0.83	2.81	0.66
*5特	金属箔法	12.3	16.0	—	—	—	3.13
密着性	と性	3d良	3d良	4d良	2d良	3d良	4d良
耐熱衝撃性(450°C×12h)	(回)	14	14	13	7	20	13
ボビンコイル製作	○	○	○	○	○	○	—

* 1 : 300 °C × 12 h

* 2. 構成以上の消生

卷之三

* 4 : SHRは商品名ではなく、試料名

*5：計上數計各 15 個 網繩碰撃管五件不外他比冒低價至三十

১৮৪ প্রাচীন বাঙালির জীবন ও সমাজ

表 3.2 長時間絶縁特性（破壊電圧）

(単位 : kV)

	ポリイミドフィルム捲線	S H R - 2	S H R - 3
初 期	8.6	0.8	2.8
300 °C	8.2	0.8	2.6
375 °C	8.4	0.7	2.6
450 °C	1.4 *	0.5	2.0

* クラック発生

表 3.3 絶縁破壊電圧（室温）

a. 線間絶縁

n=1 (kV)

		ポリイミド フィルム捲線	S H R - 3	S H R - 2
初 期 (劣化前)		10.5 *	3.2	2.5
劣化後	375 °C	10.0 *	3.1	2.6
	450 °C	2.0	3.0	2.1

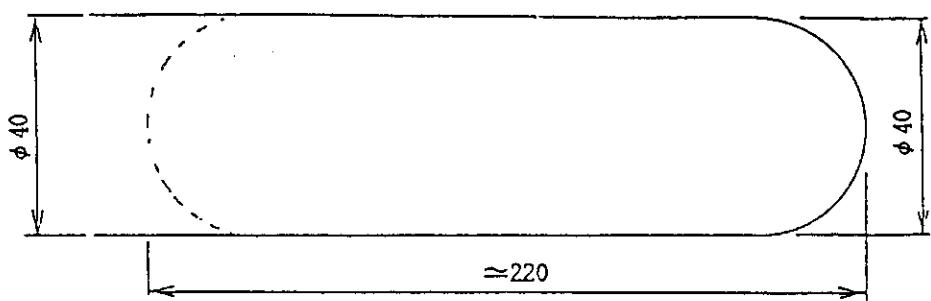
* □出部でボビンと閉絡

b. 対地絶縁

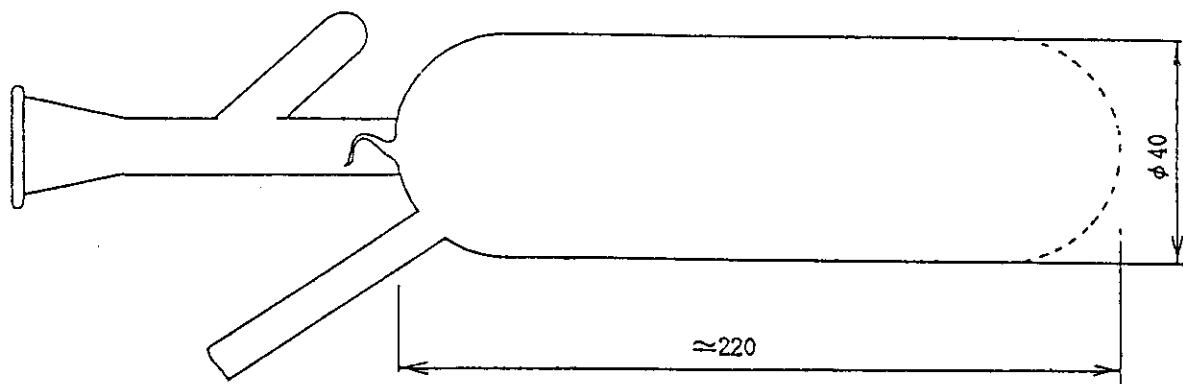
n=1 (kV)

		ポリイミド フィルム捲線	S H R - 3	S H R - 2
初 期 (劣化前)		10.5 *	2.1	2.2
劣化後	375 °C	10.3 *	2.1	2.2
	450 °C	2.0	2.1	1.7

* □出部でボビンと閉絡



(a)



(b)

図 3.1 高温安定性試験用容器（パイレックスガラス製品）

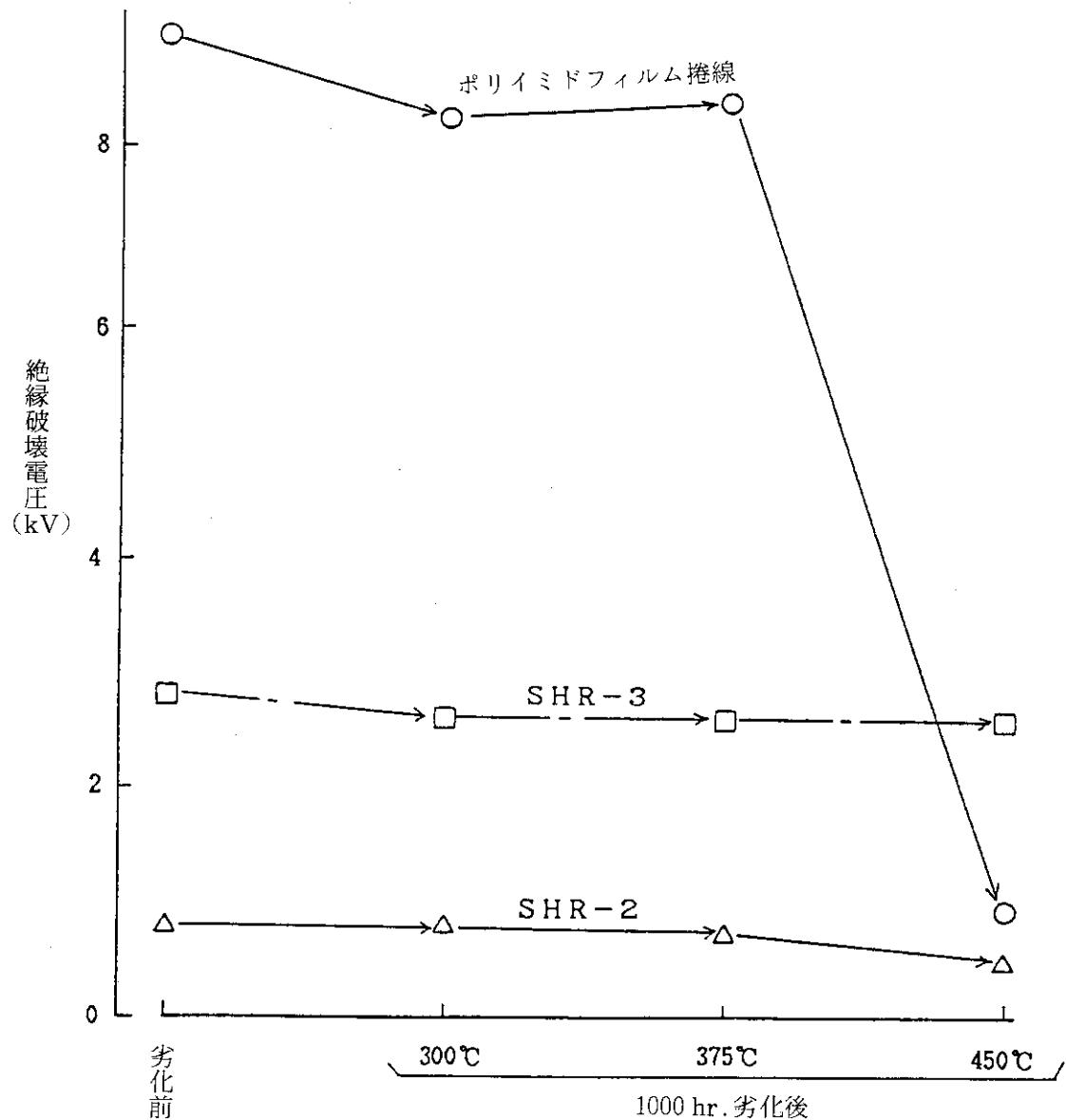


図 3.2 長時間絶縁特性の変化（絶縁破壊電圧）

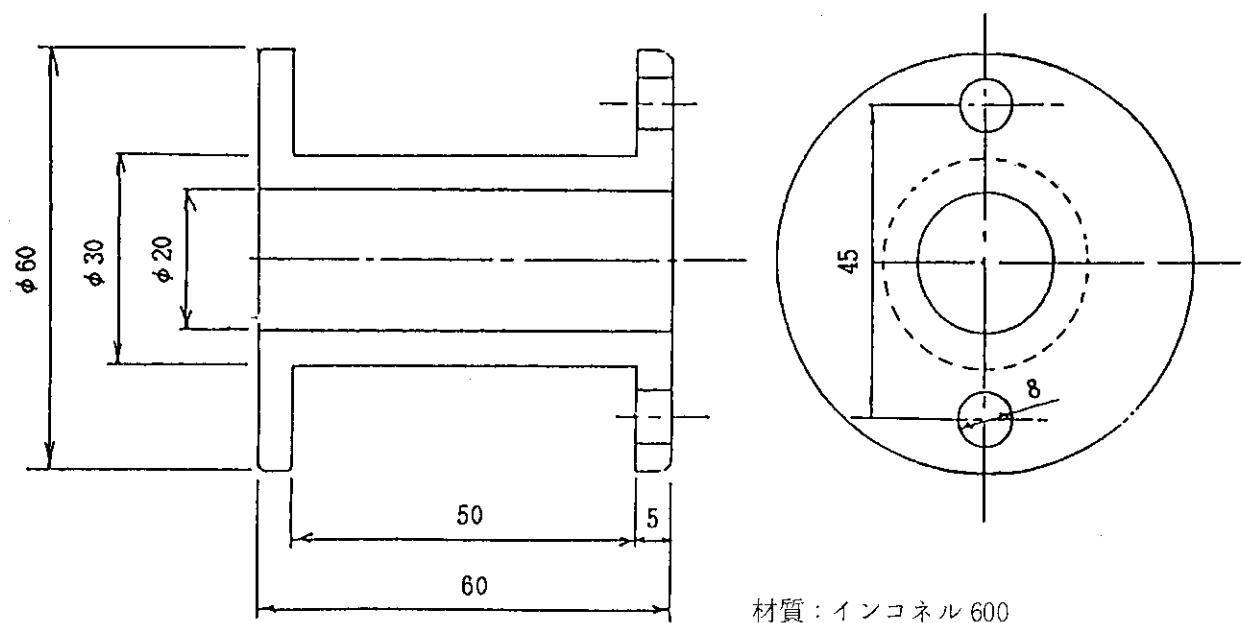
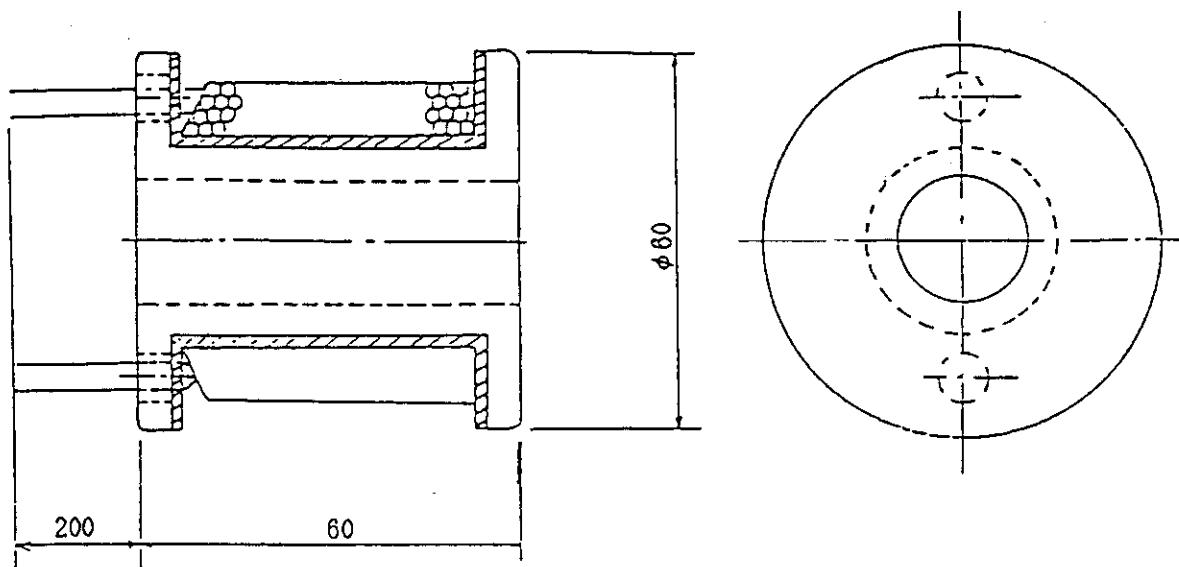
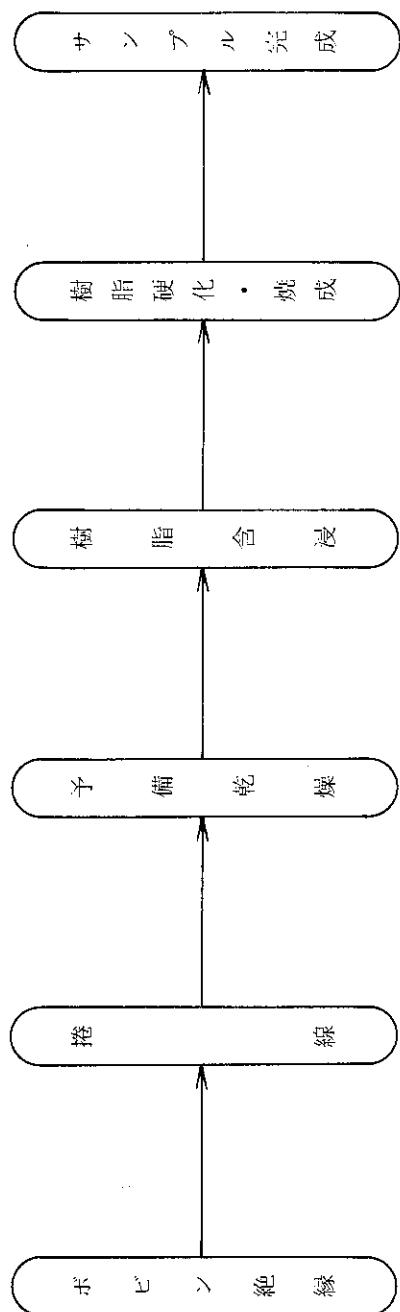


図 3.3 ボビン形状

絶縁仕様

コイル 詳細			
	No. 1	No. 2	No. 3
ボビン	ポリイミドシート捲	セラミック溶射	アルミナクロスシート捲
素線	ポリイミドフィルム捲線 2 - φ 1.0	S H R - 3 2 - φ 1.0	S H R - 2 2 - φ 1.0
巻数 (4層巻)	8 2	5 8	8 6
1Tの平均長さ(mm)	1 0 9	1 1 4	1 0 5
全長(m)	2 × 9.0	2 × 5.4	2 × 9.4

図3.4 ボビンコイルの仕様



No.	ポリイミドシート 捲付	ポリイミドフィルム捲線 捲付処理	吸着水 脱水処理	ポリイミド樹脂 含浸 (保護テープ捲付)	ポリイミド樹脂 硬化
No. 1	セラミック溶射	SHR-3	吸着水 揮発分処理	無機ポリマー 含浸 (保護テープ捲付)	無機ポリマー 硬化
No. 2	無機塗料 塗布シート 捲付	SHR-2	吸着水 揮発分処理	無機ポリマー 含浸 (保護テープ捲付)	無機ポリマー 硬化
No. 3					

図 3.5 ポビンコイル製作フローシート

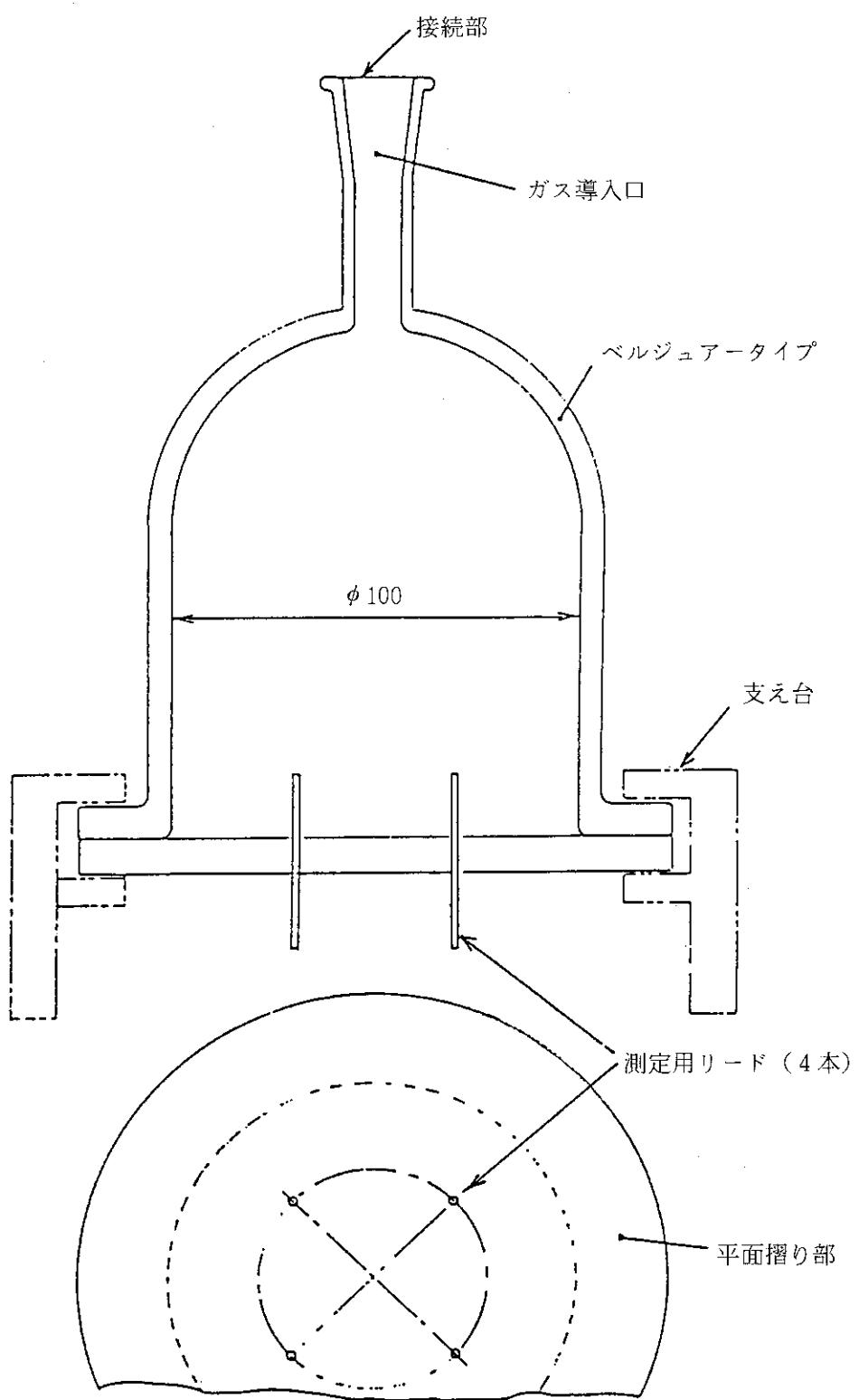


図 3.6 長時間絶縁特性試験用容器（石英ガラス／アルミナ磁器製）

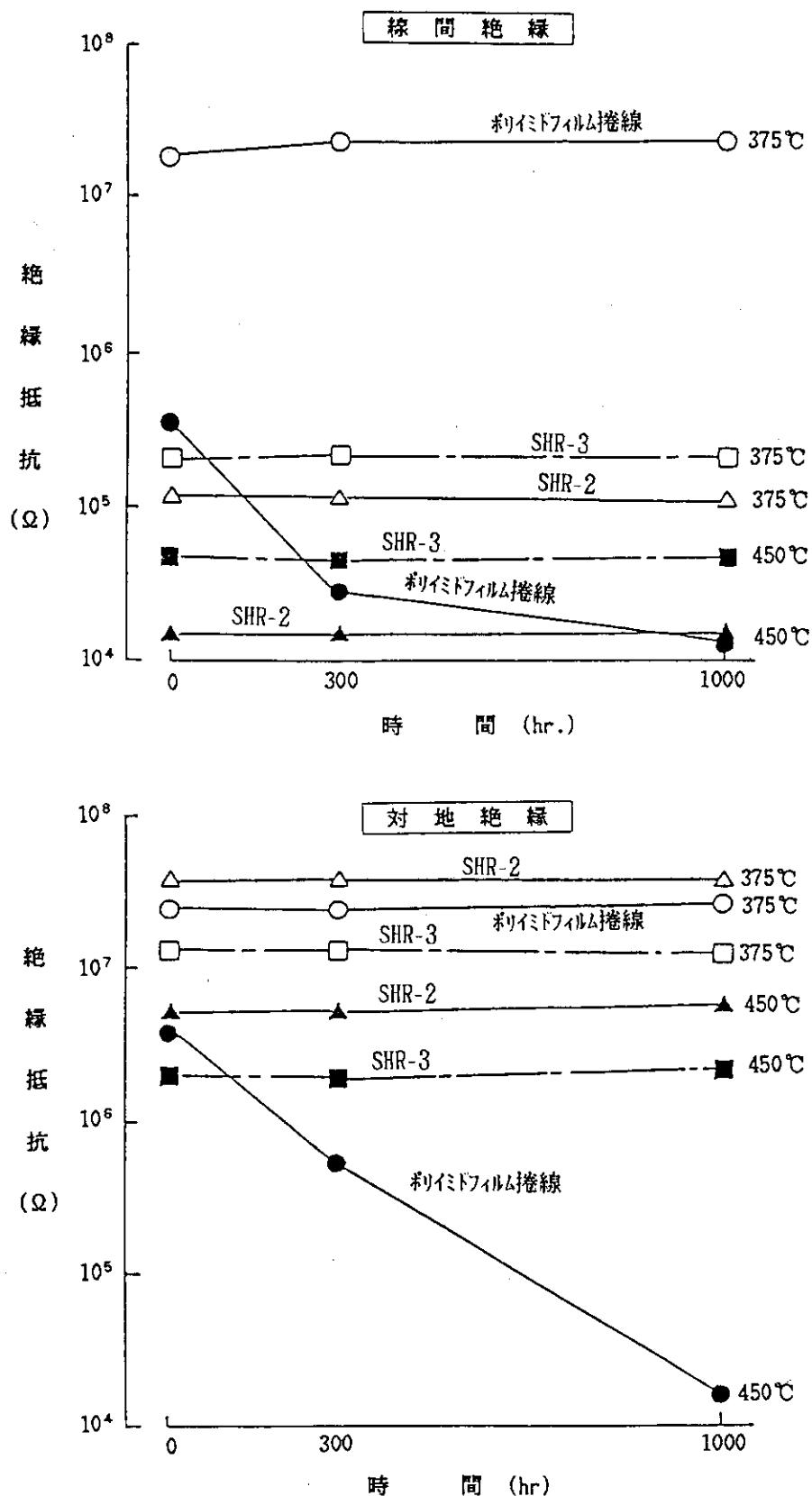
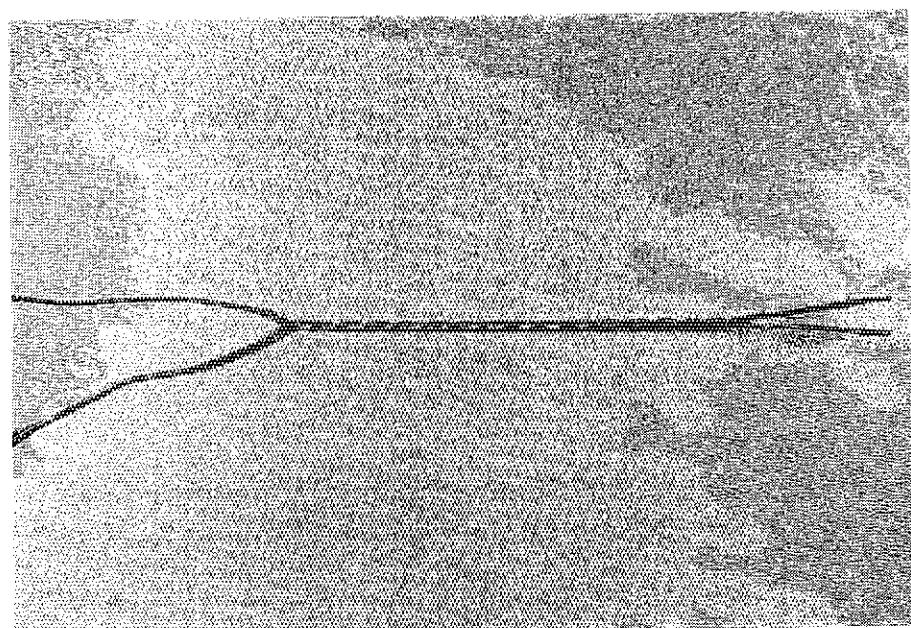
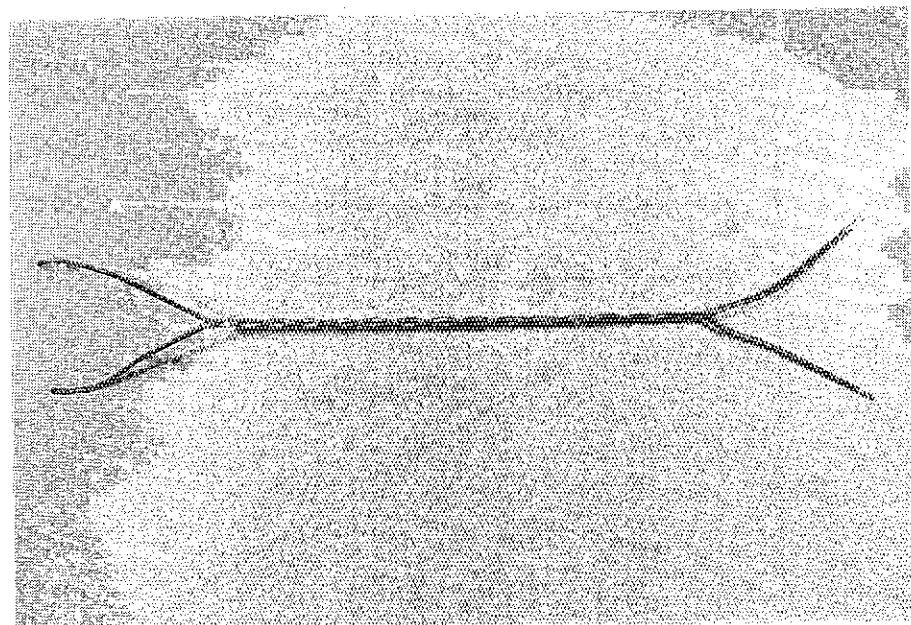


図 3.7 絶縁抵抗の変化

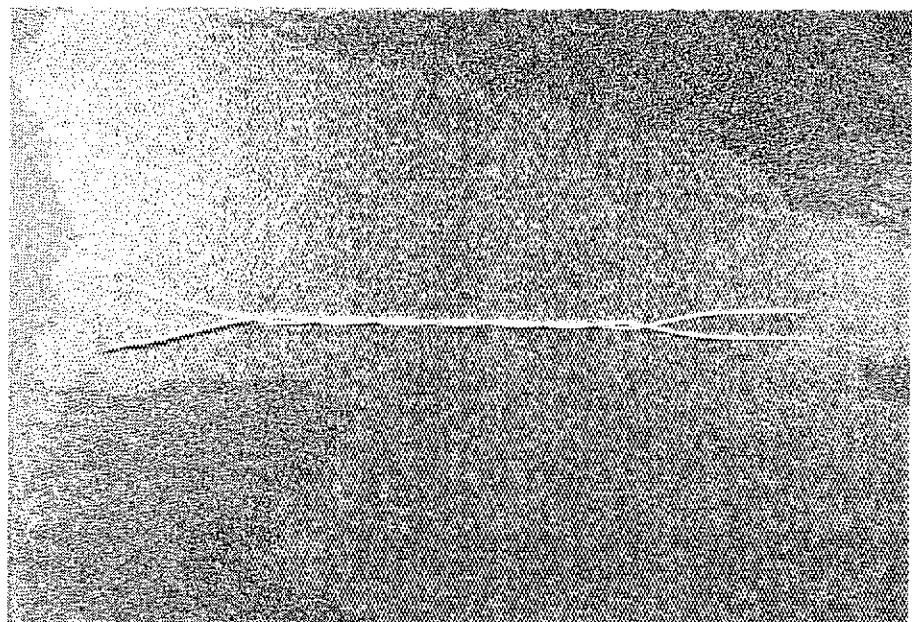


ポリイミドフィルム捲線

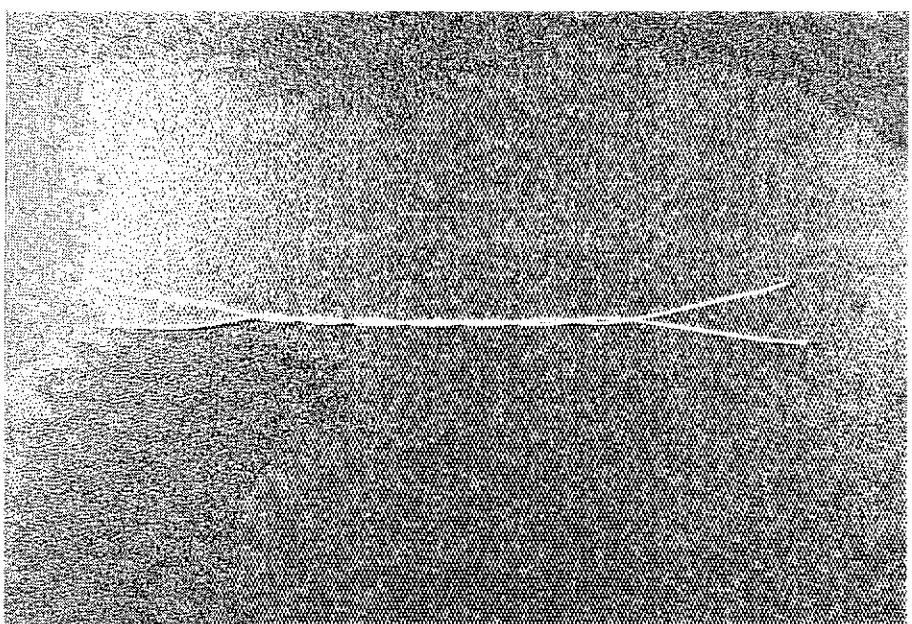


ポリイミド複合線

写真 3.1 絶縁破壊電圧測定用試料（その 1）

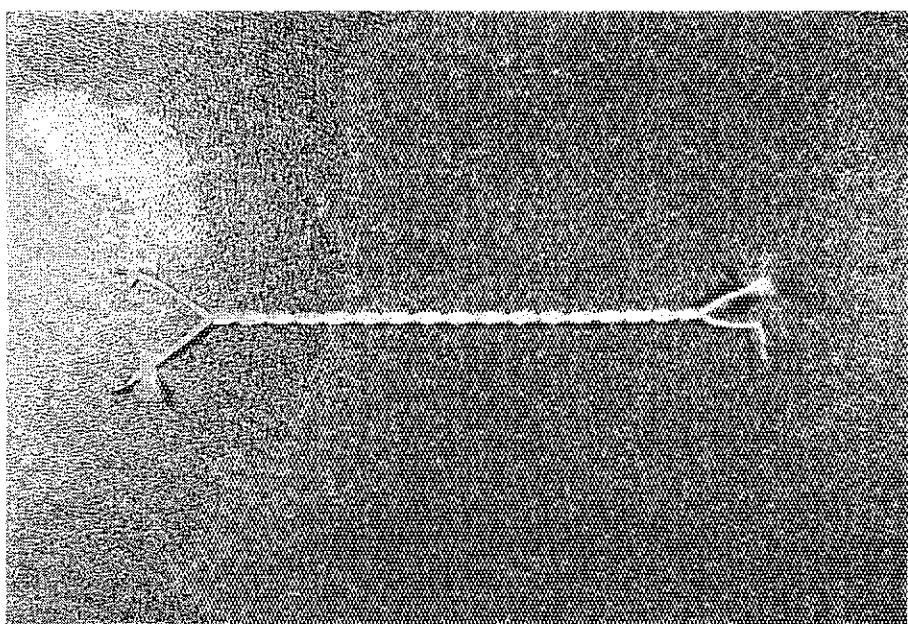


SHR-1

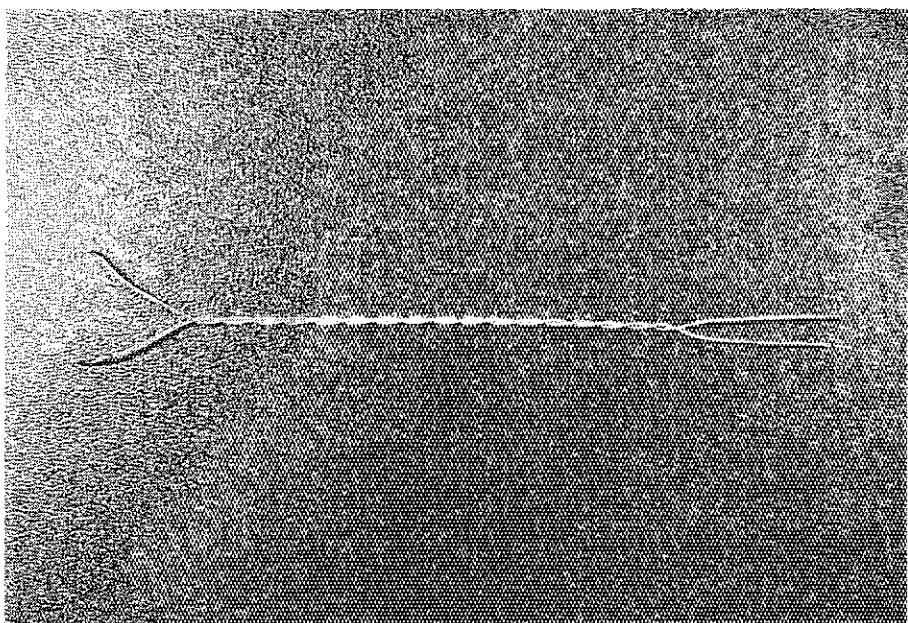


SHR-2

写真 3.1 絶縁破壊電圧測定用試料（その 2）

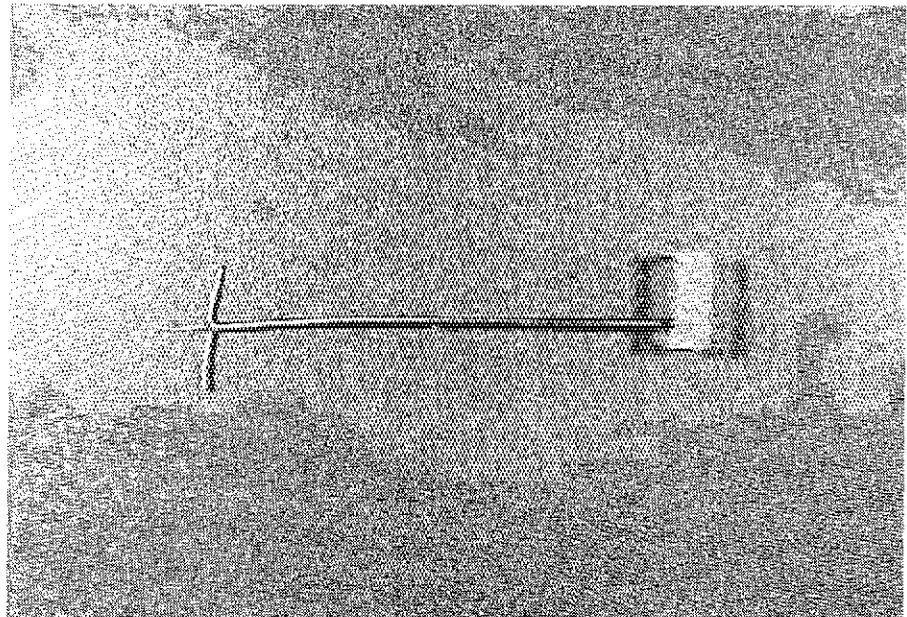


SHR-3



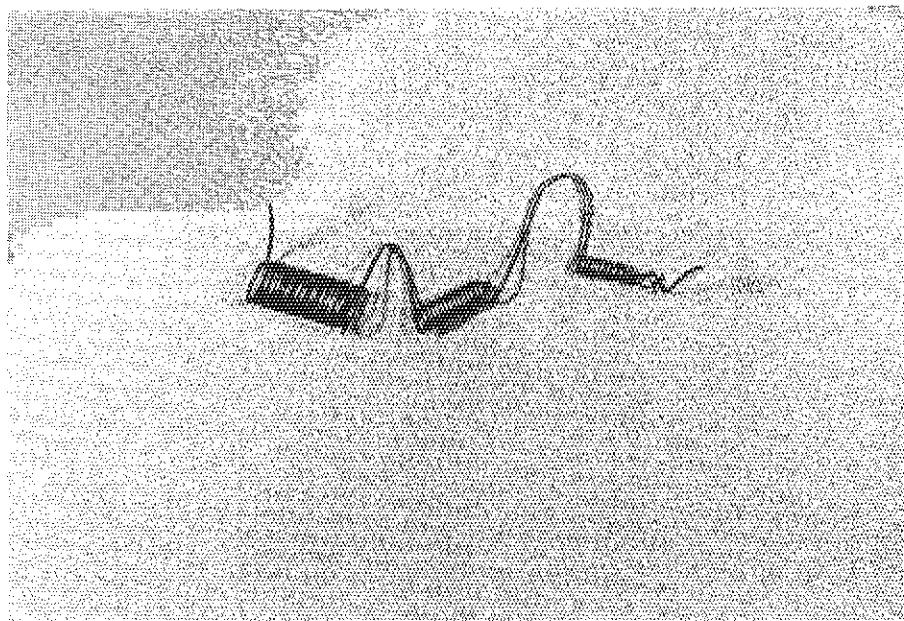
MI (参考)

写真 3.1 絶縁破壊電圧測定用試料（その 3）

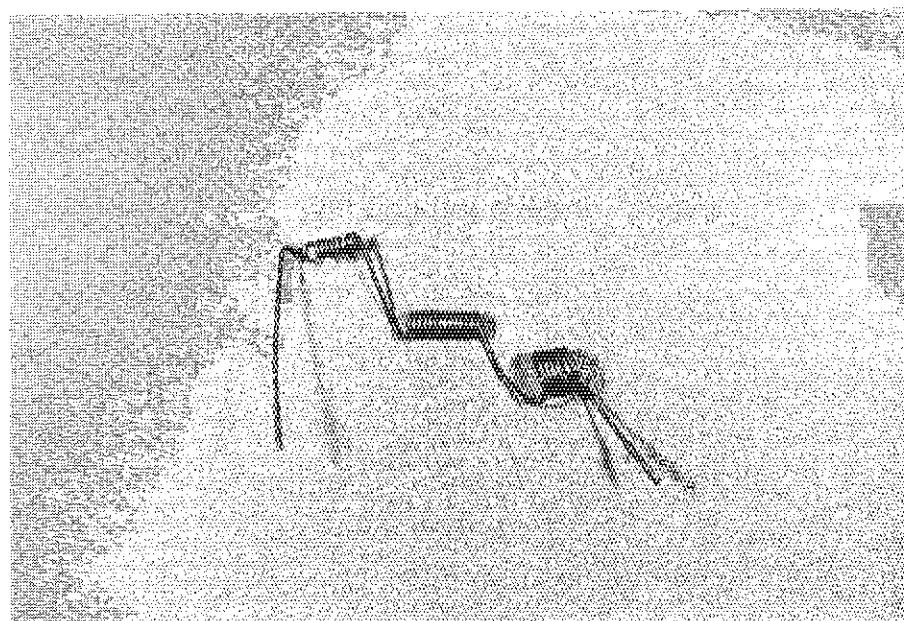


MI ケーブル

写真 3.1 絶縁破壊電圧測定用試料（その 4）

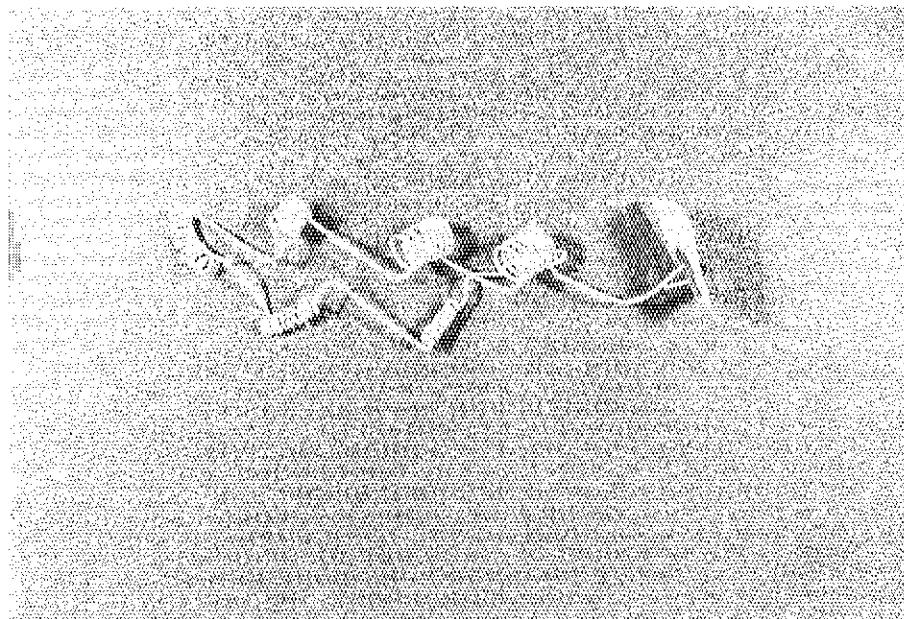


ポリイミドフィルム捲線

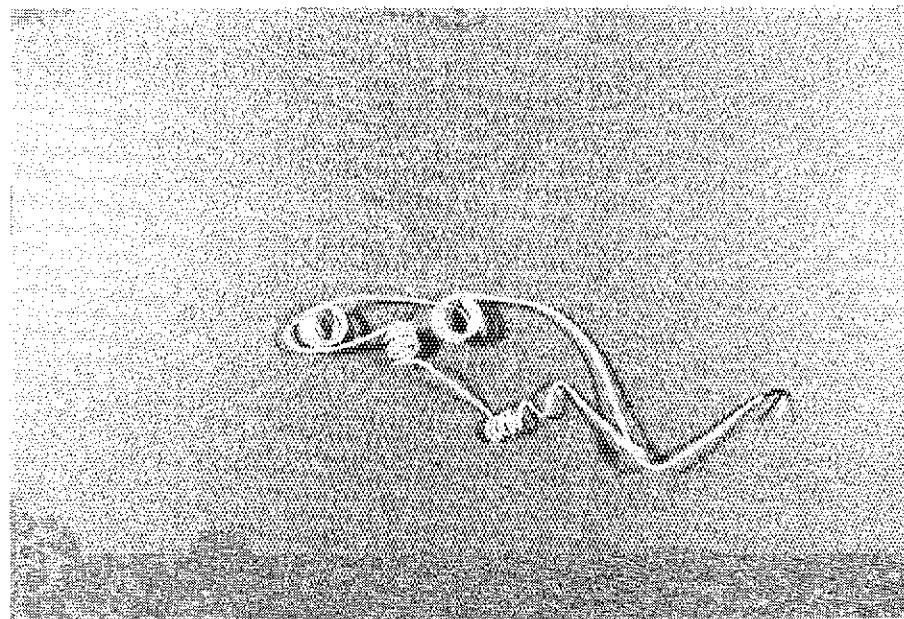


ポリイミド複合線

写真3.2 可とう性試験（その1）

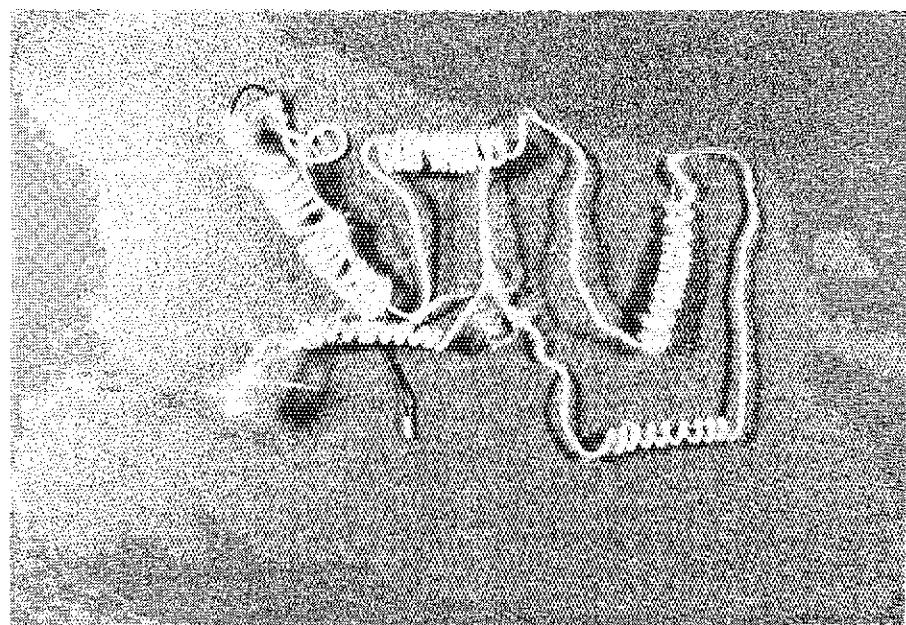


SHR-1

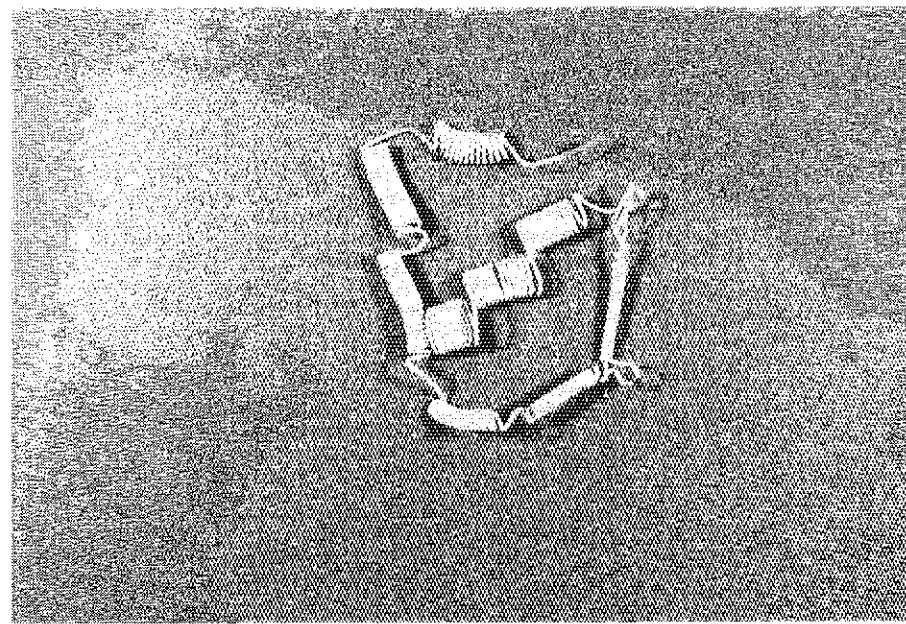


SHR-2

写真 3.2 可とう性試験（その 2）

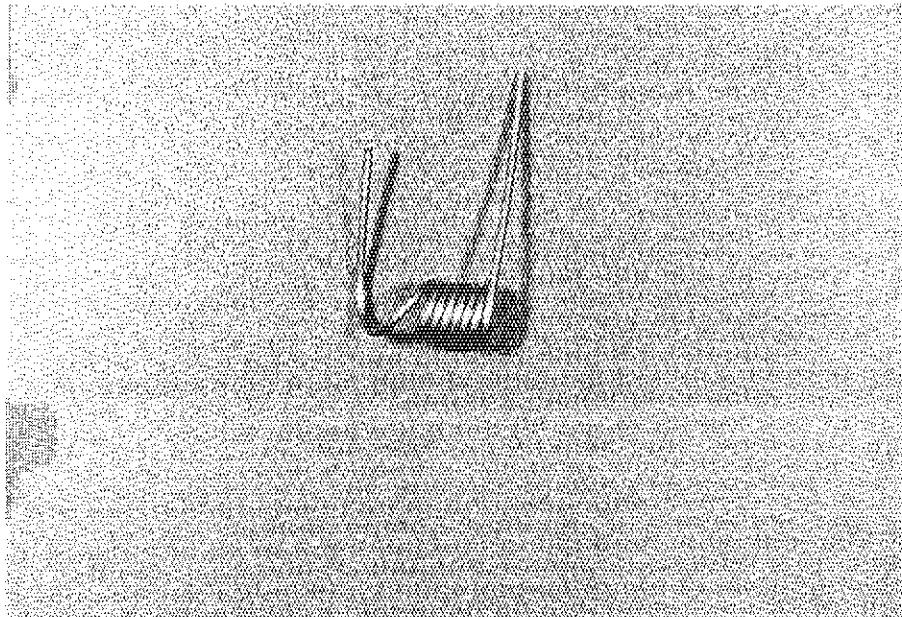


SHR-3



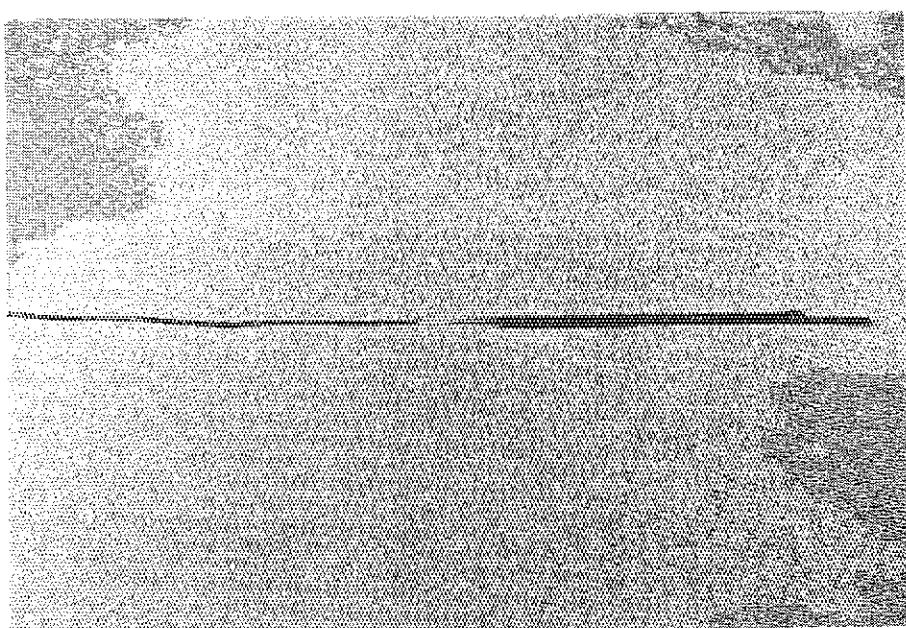
MK (参考)

写真 3.2 可とう性試験（その 3）

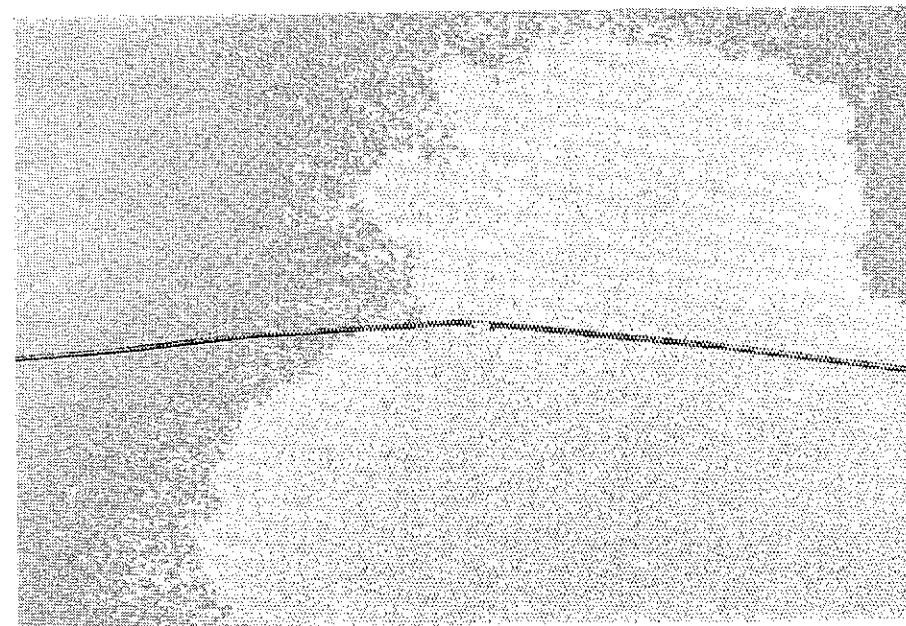


MI ケーブル

写真 3.2 可とう性試験（その 4）

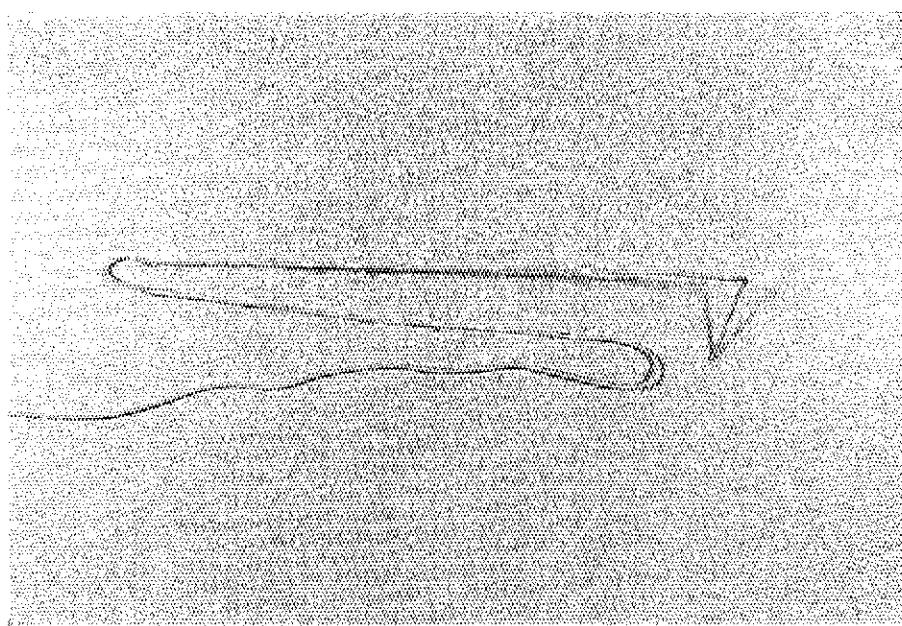


ポリイミドフィルム捲線

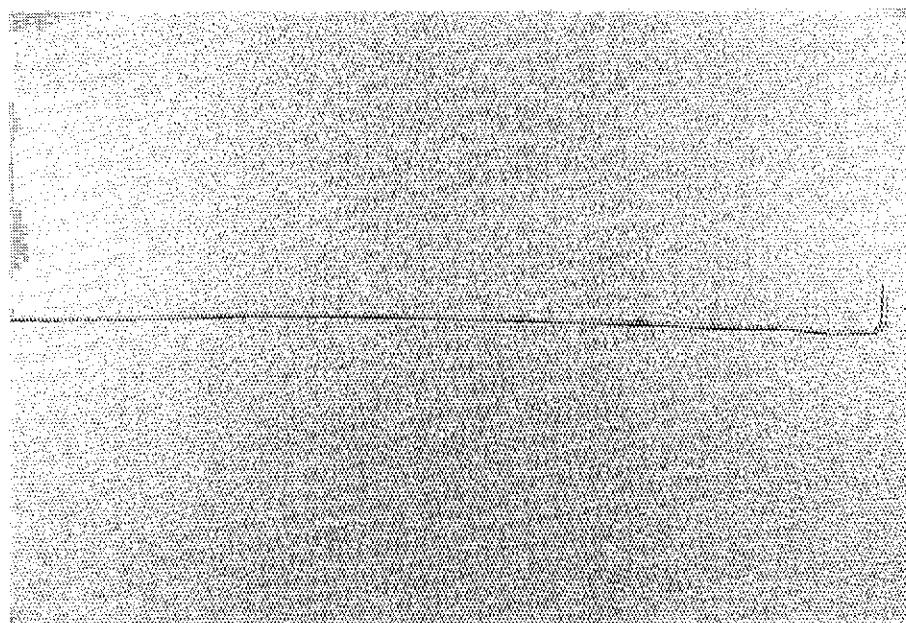


ポリイミド複合線

写真 3.3 密着性試験（その 1）

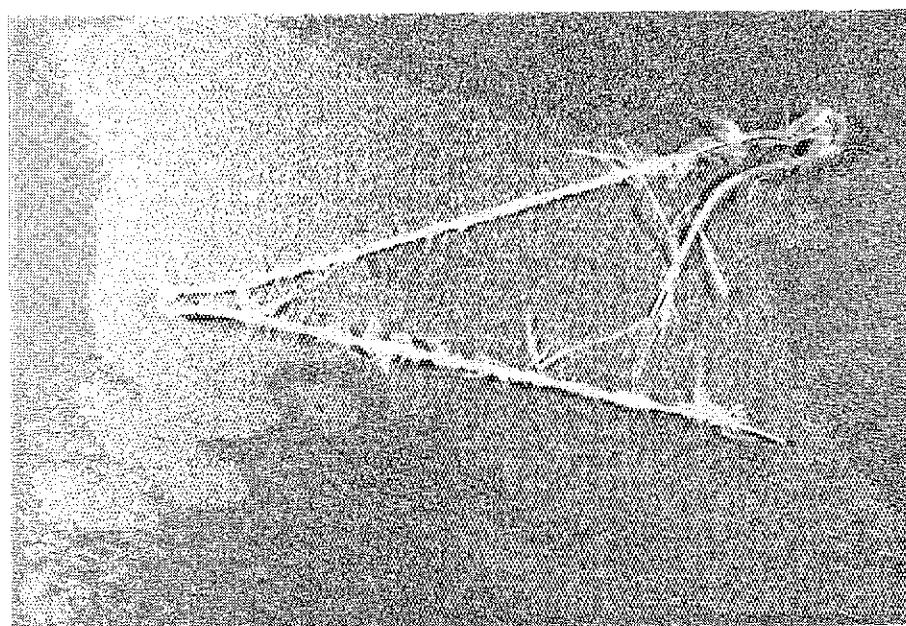


SHR-1

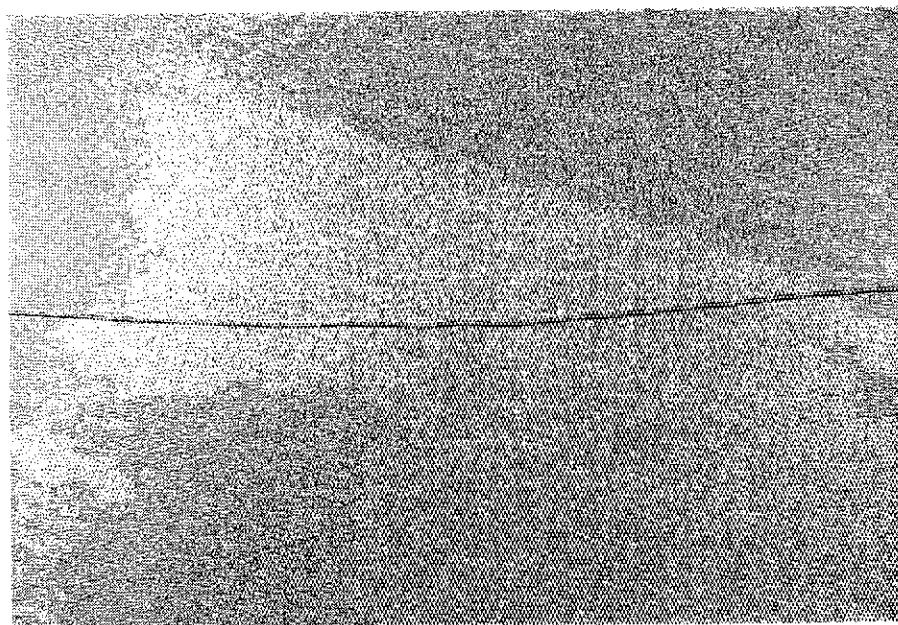


SHR-2

写真 3.3 密着性試験（その 2）

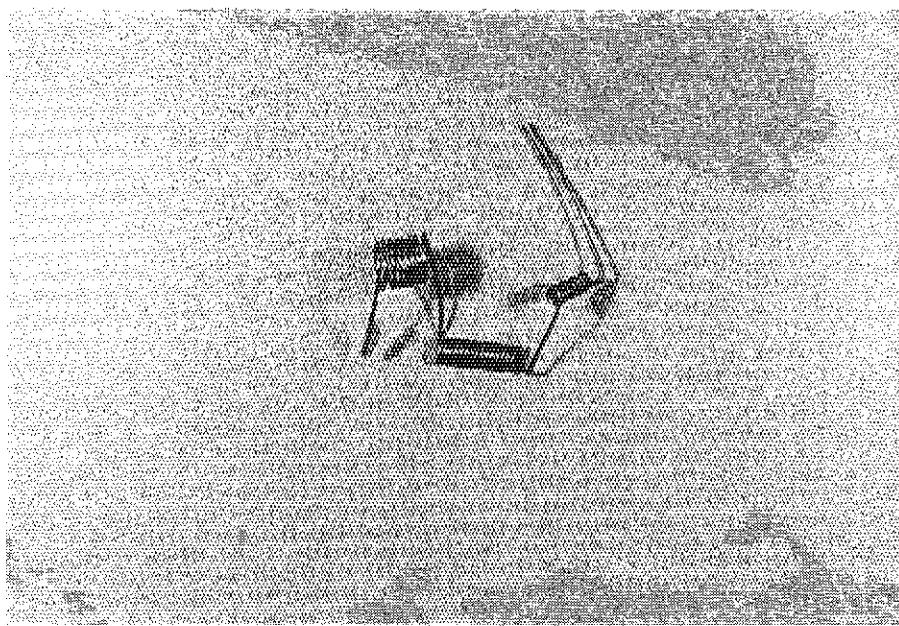


SHR-3

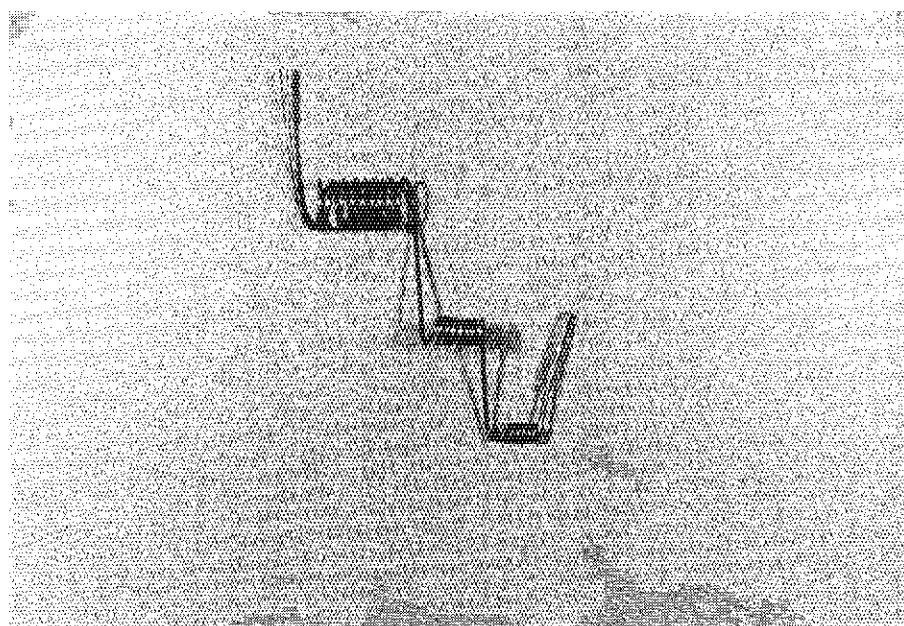


MK (参考)

写真 3.3 密着性試験（その 3）

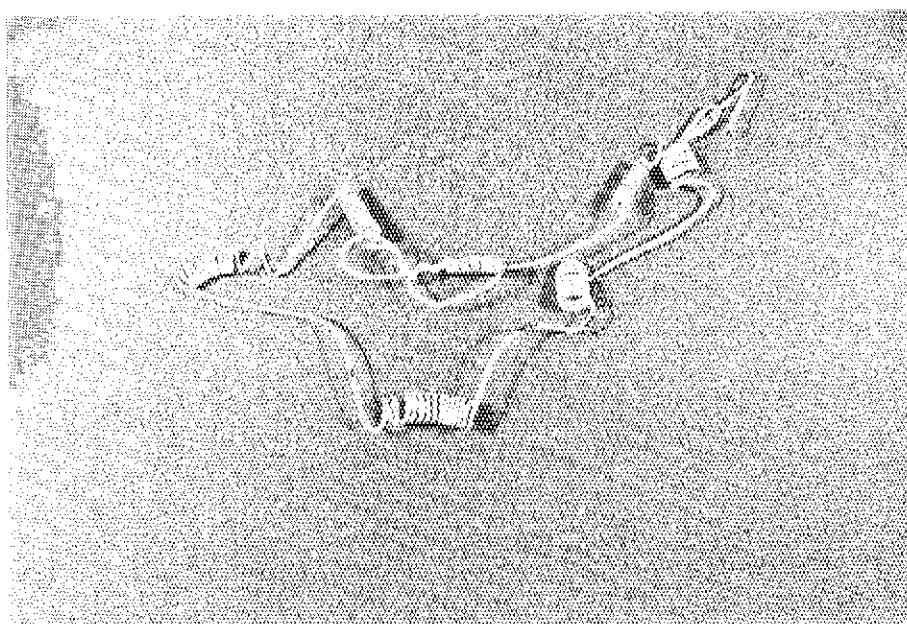


ポリイミドフィルム捲線

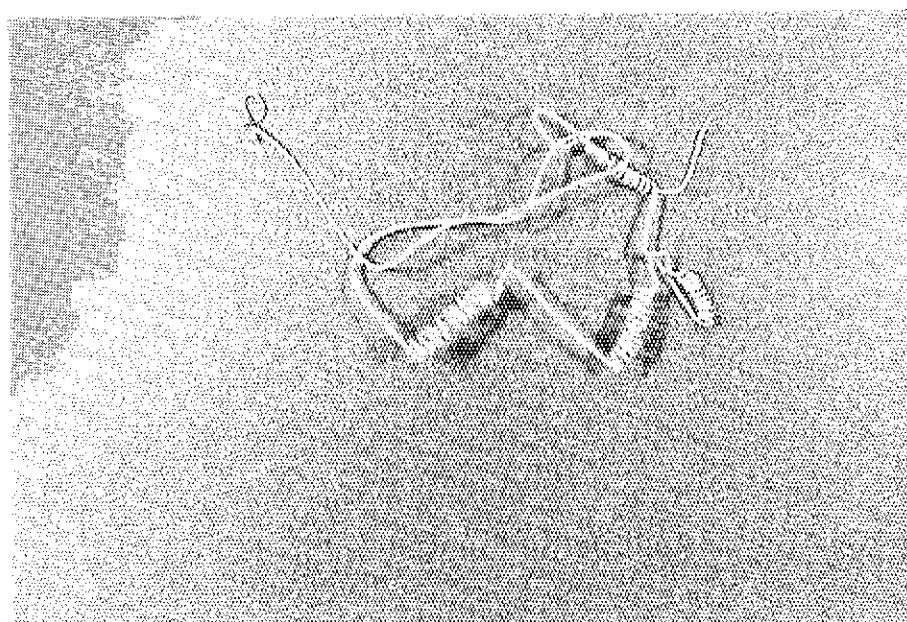


ポリイミド複合線

写真 3.4 耐熱衝撃性試験（その 1）

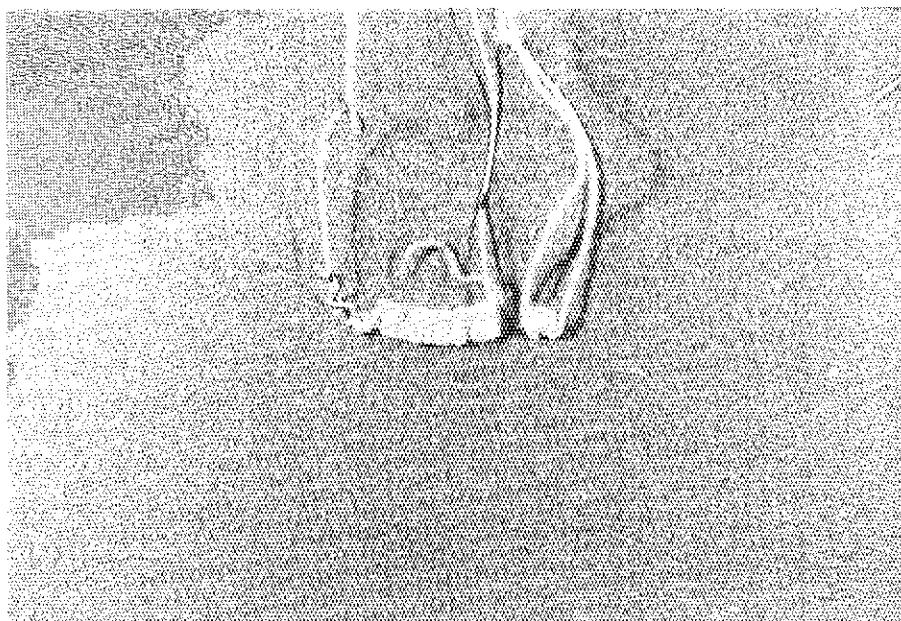


SHR - 1

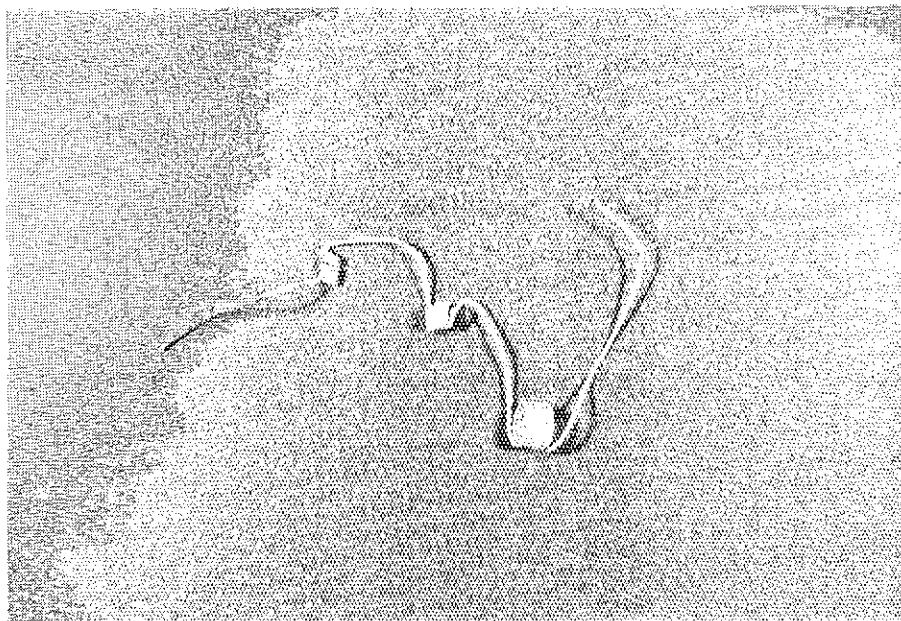


SHR - 2

写真 3.4 耐熱衝撃性試験（その 2）

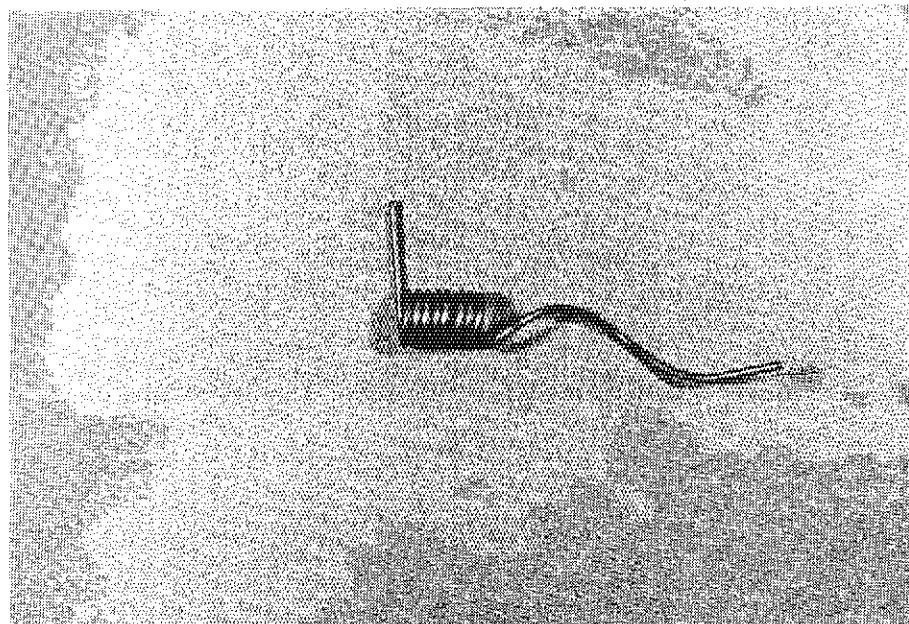


SHR-3



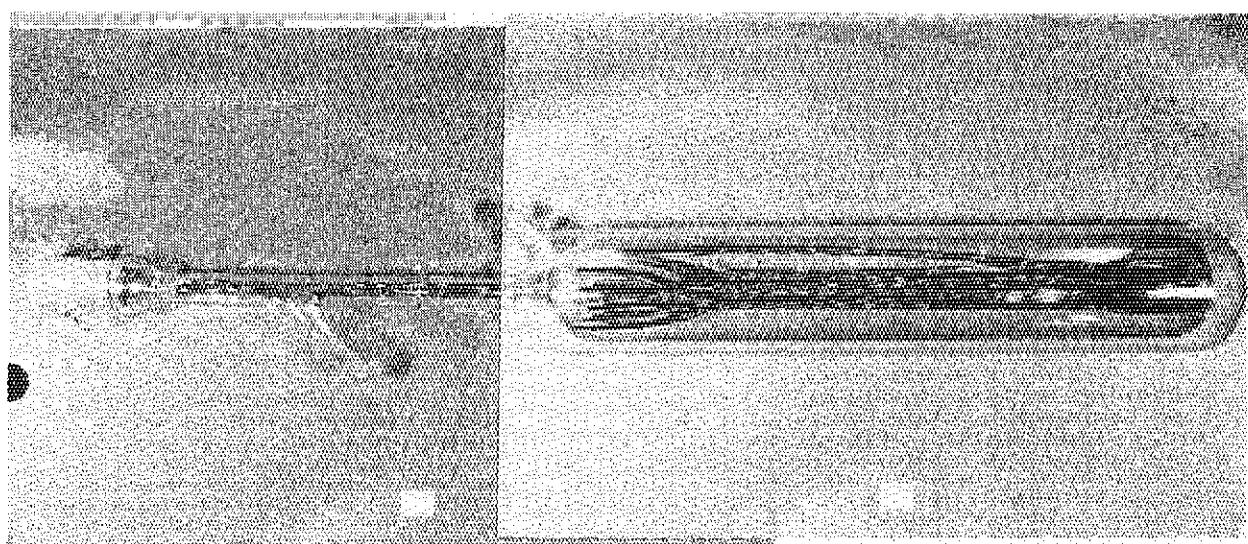
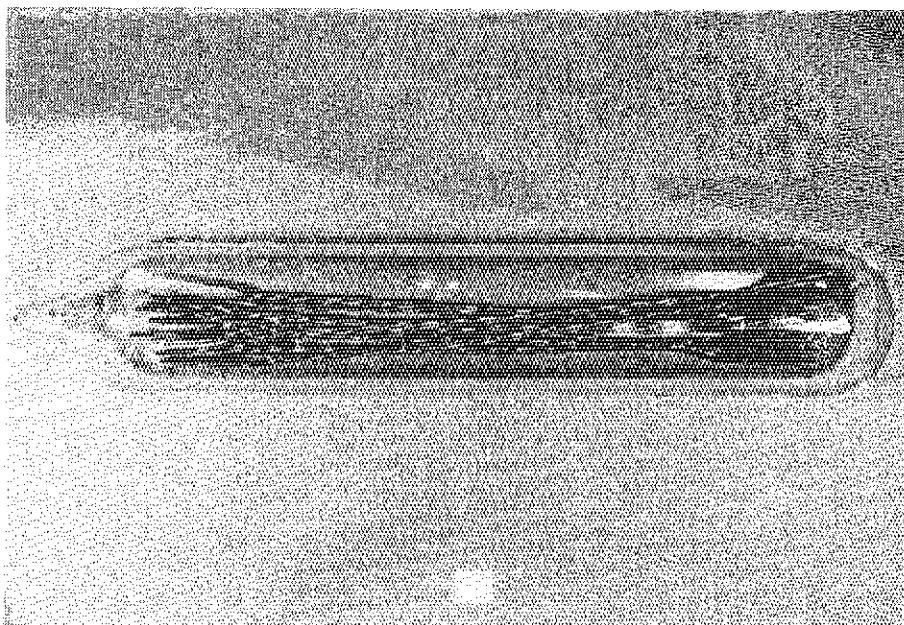
MK (参考)

写真 3.4 耐熱衝撃性試験（その 3）



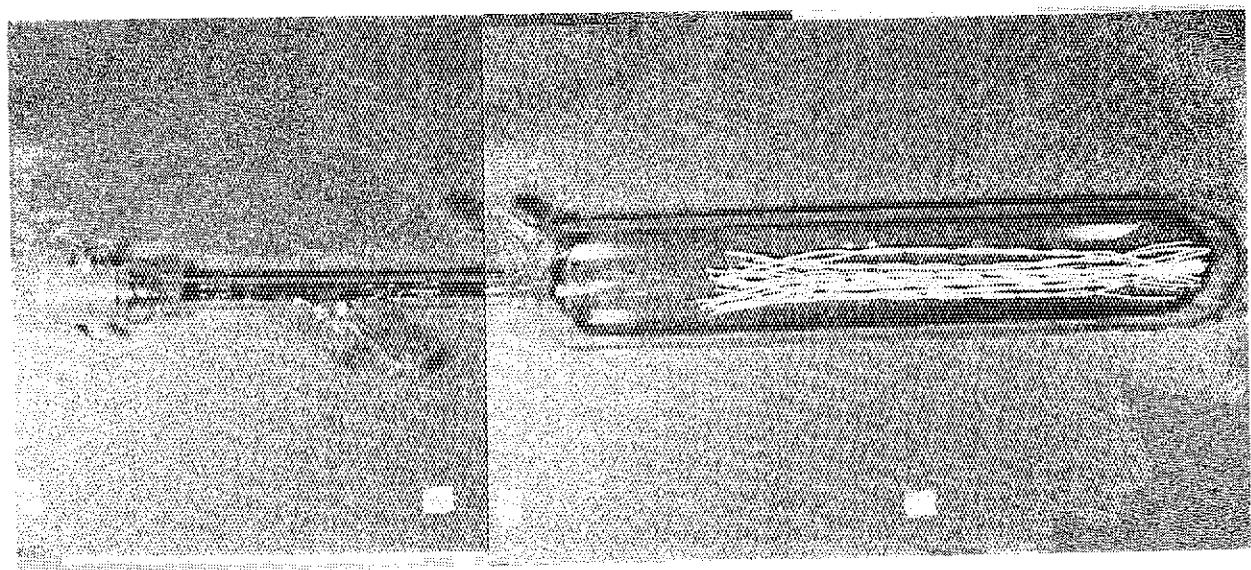
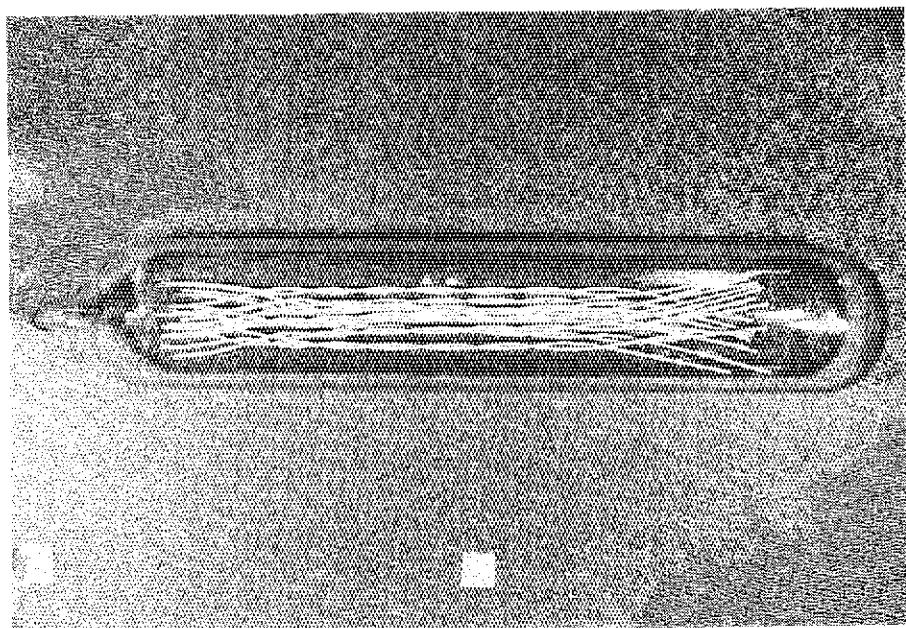
MI ケーブル

写真 3.4 耐熱衝撃性試験（その 4）



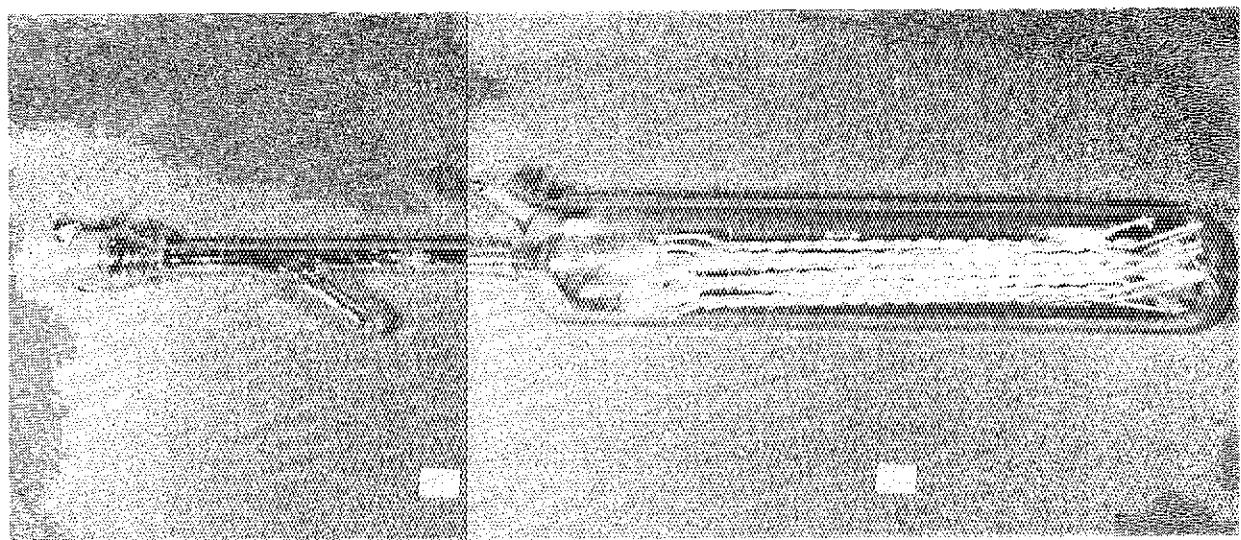
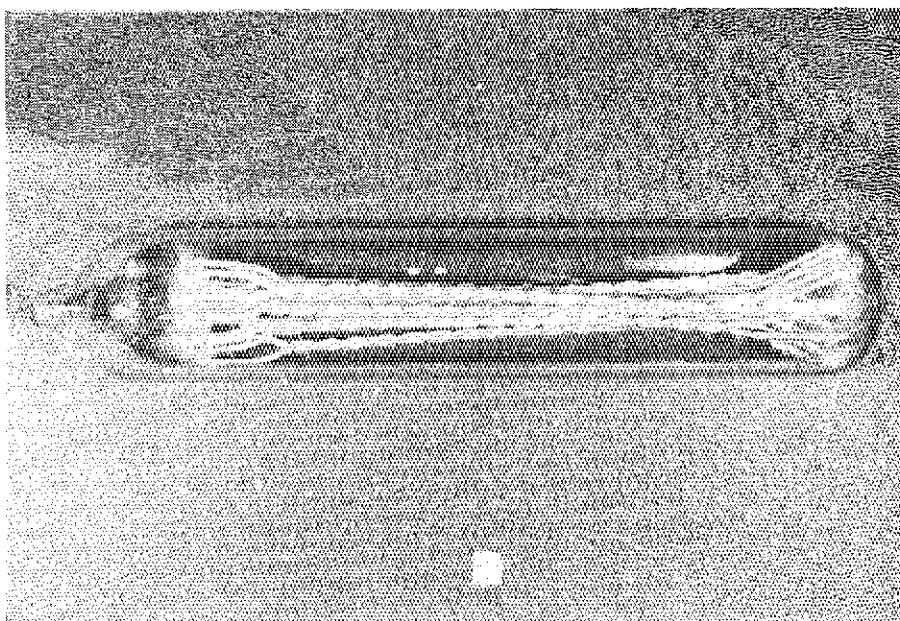
ポリイミドフィルム捲線

写真 3.5 長時間絶縁特性試験（その 1）



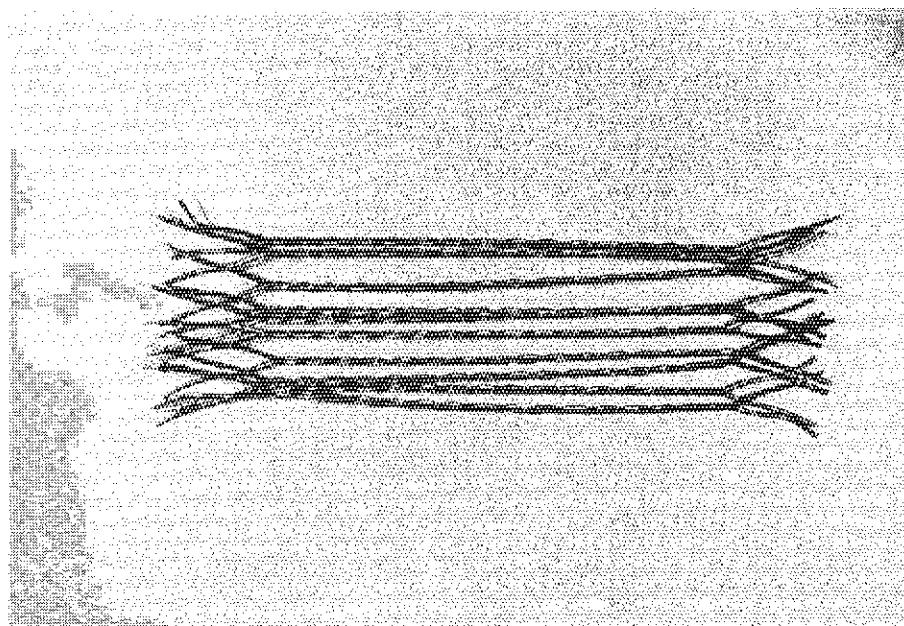
SHR-2

写真 3.5 長時間絶縁特性試験（その 2）

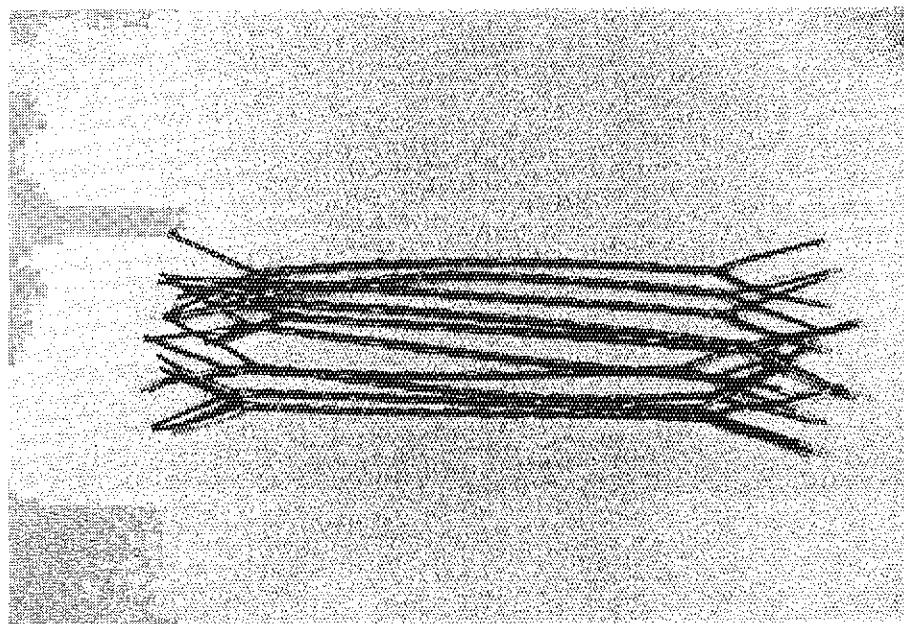


SHR-3

写真 3.5 長時間絶縁特性試験（その 3）

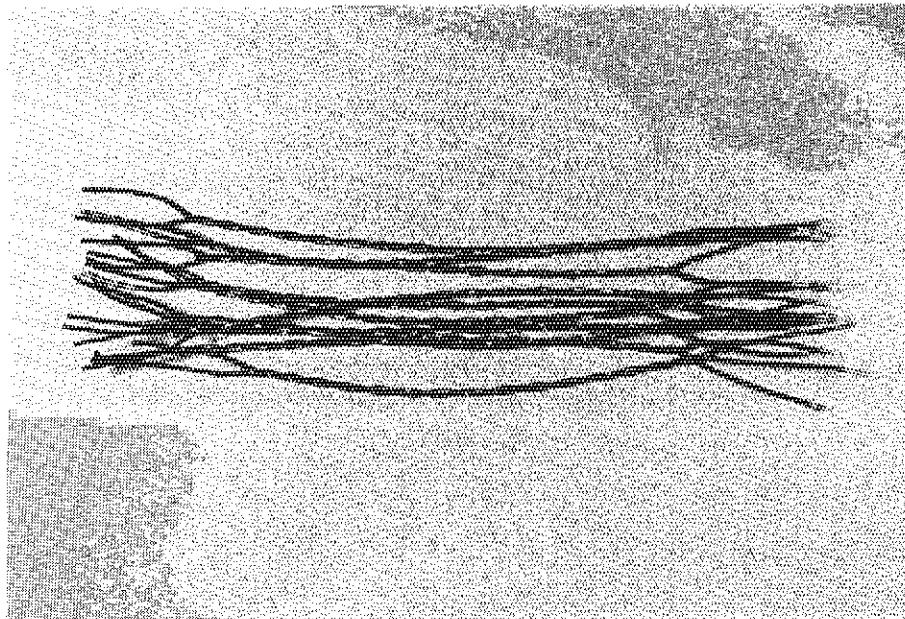


300 °C 1000 時間後



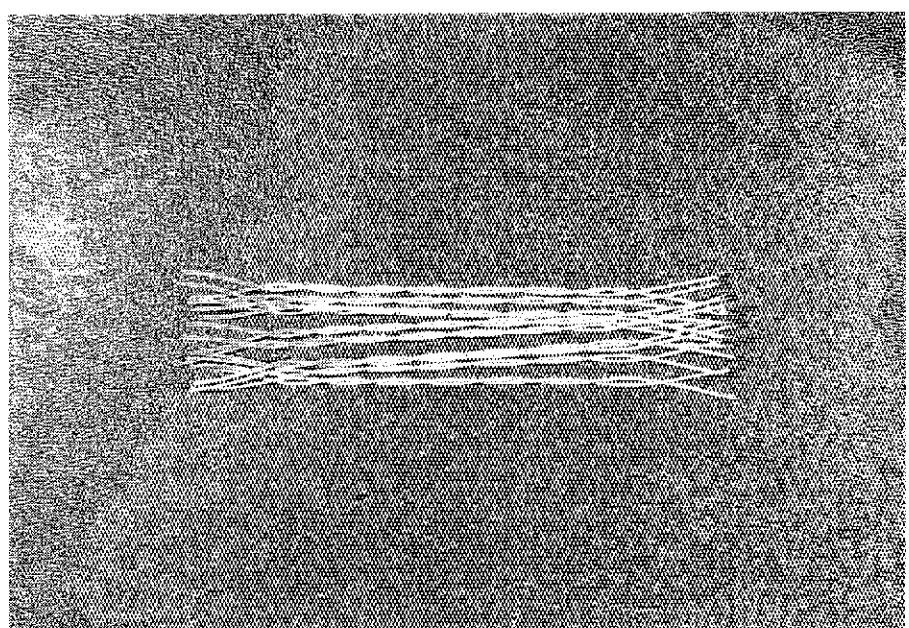
375 °C 1000 時間後

写真 3.6 ポリイミドフィルム捲線の熱劣化（その 1）

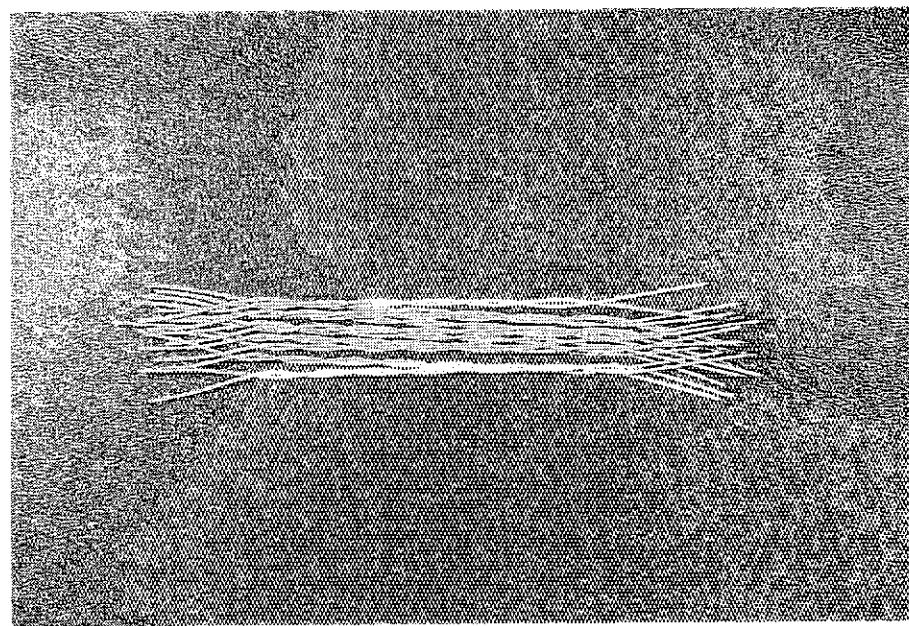


450 °C 1000 時間後

写真3.6 ポリイミドフィルム捲線の熱劣化（その2）

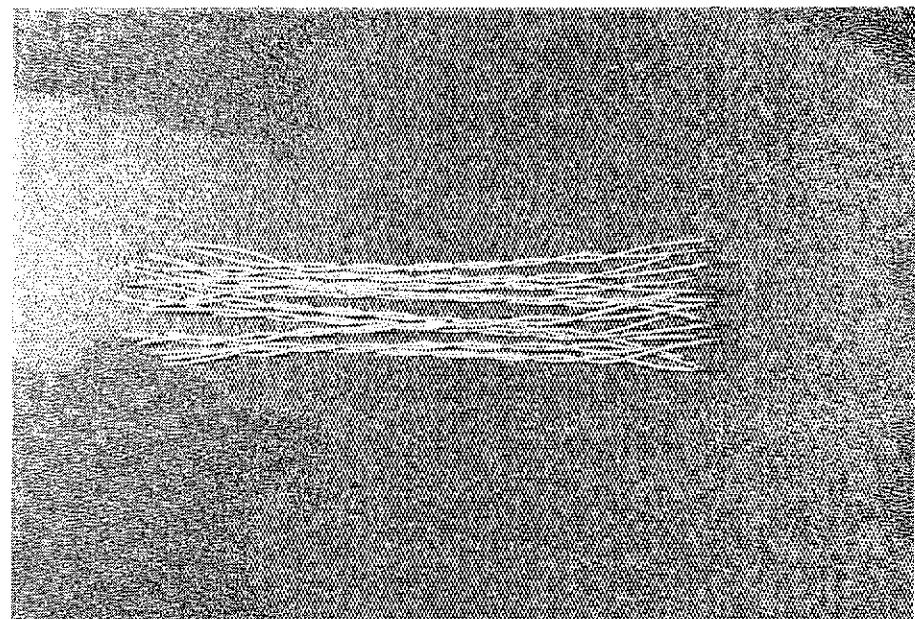


300 °C 1000 時間後



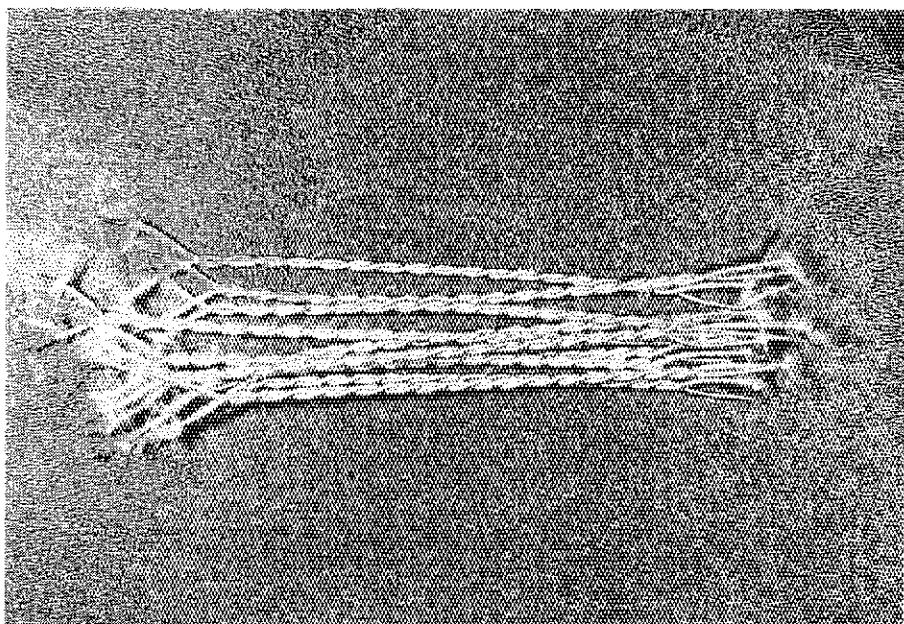
375 °C 1000 時間後

写真 3.7 SHR-2 の熱劣化（その 1）

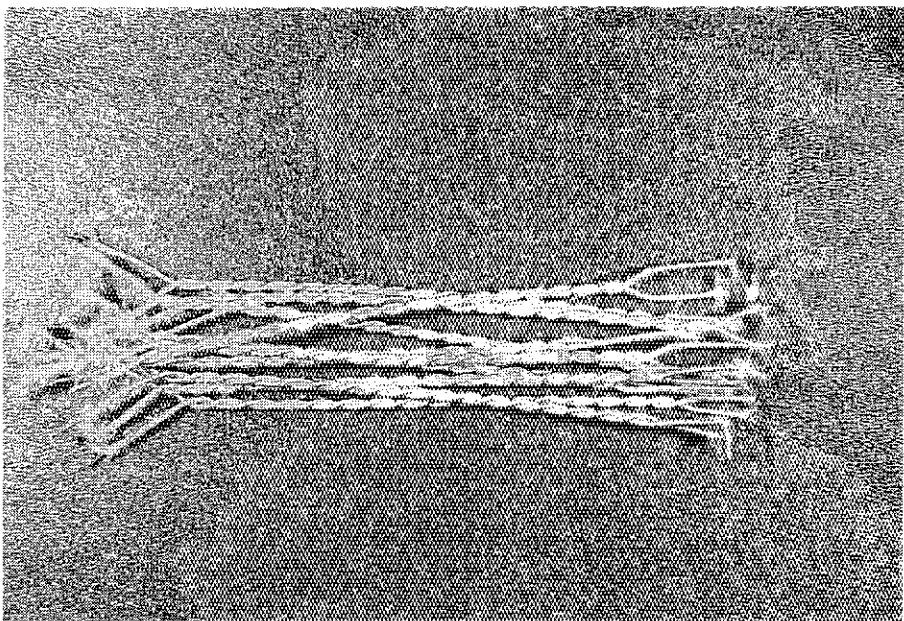


450 °C 1000 時間後

写真 3.7 SHR-2 の熱劣化 (その 2)

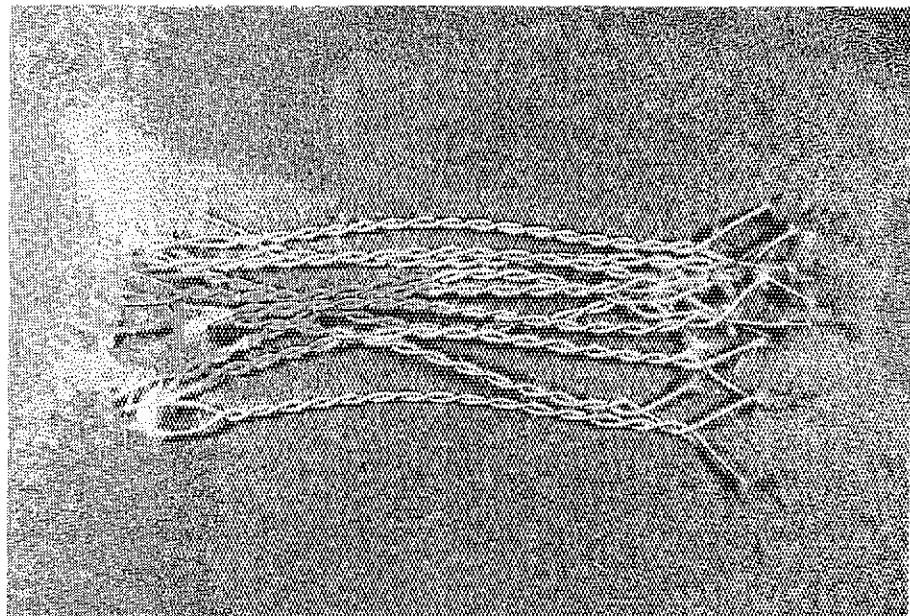


300 °C 1000 時間後



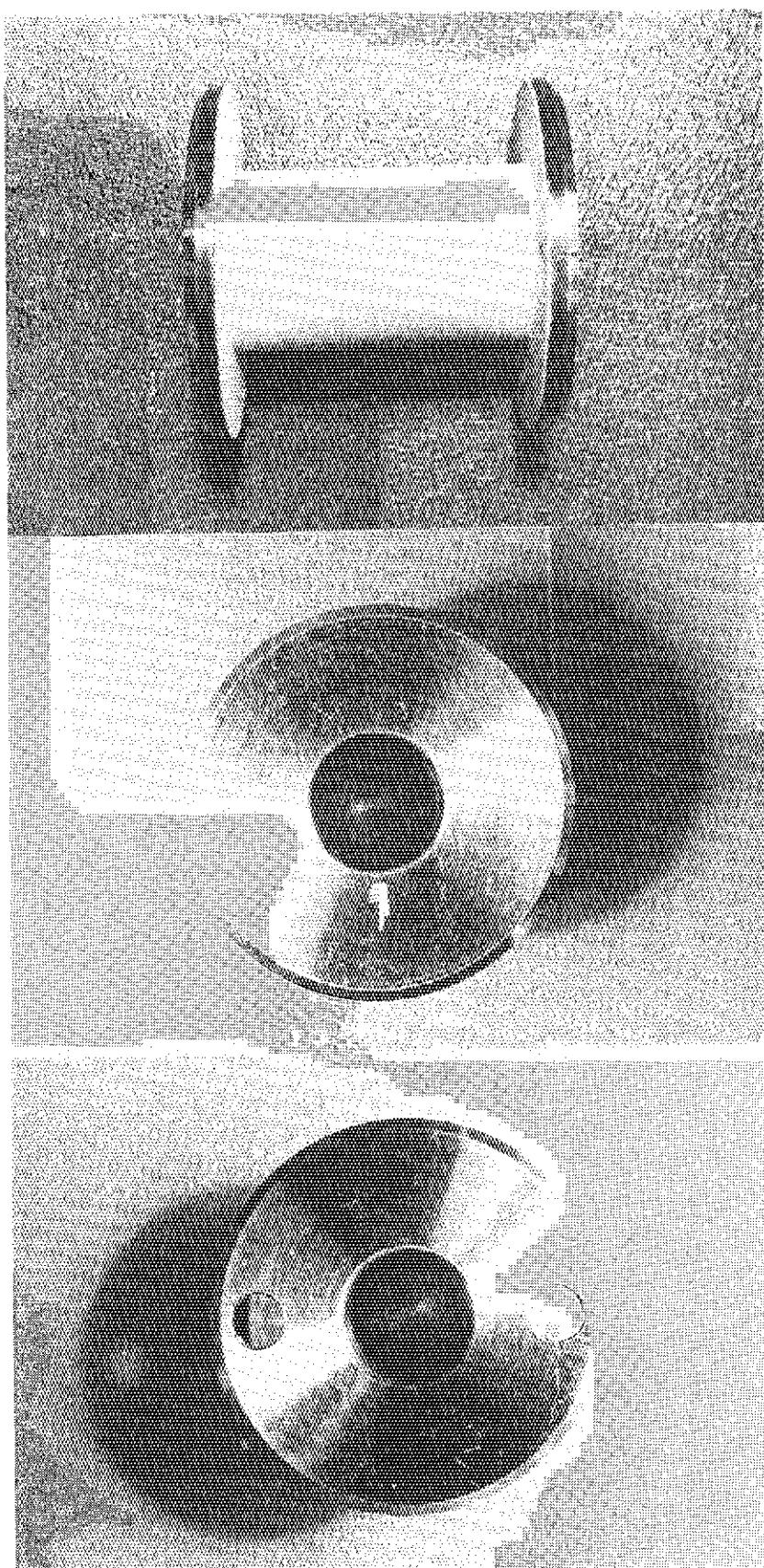
375 °C 1000 時間後

写真 3.8 SHR-3 の熱劣化（その 1）



450 °C 1000 時間後

写真 3.8 SHR-3 の熱劣化（その 2）

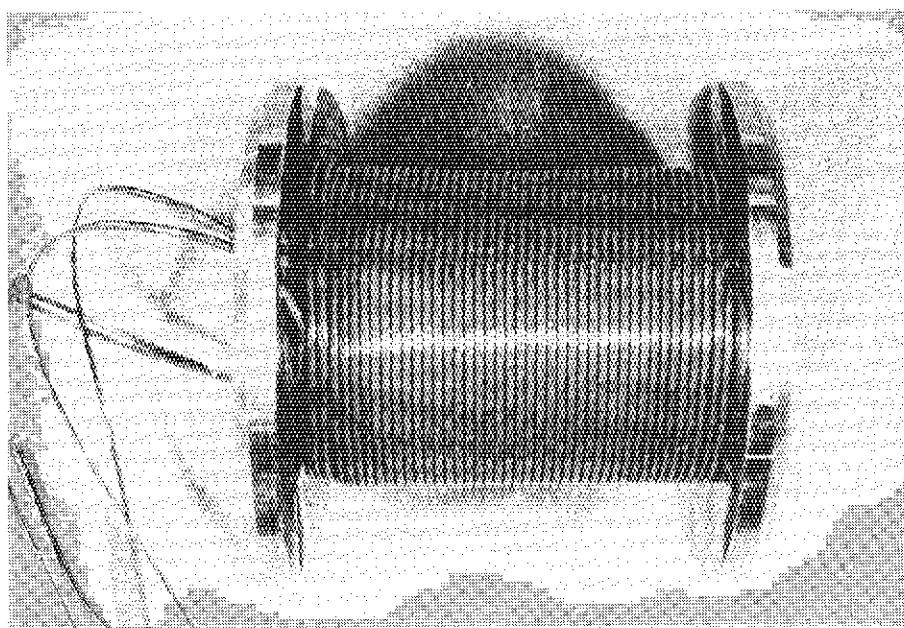


セラミック絶縁
(胸部)

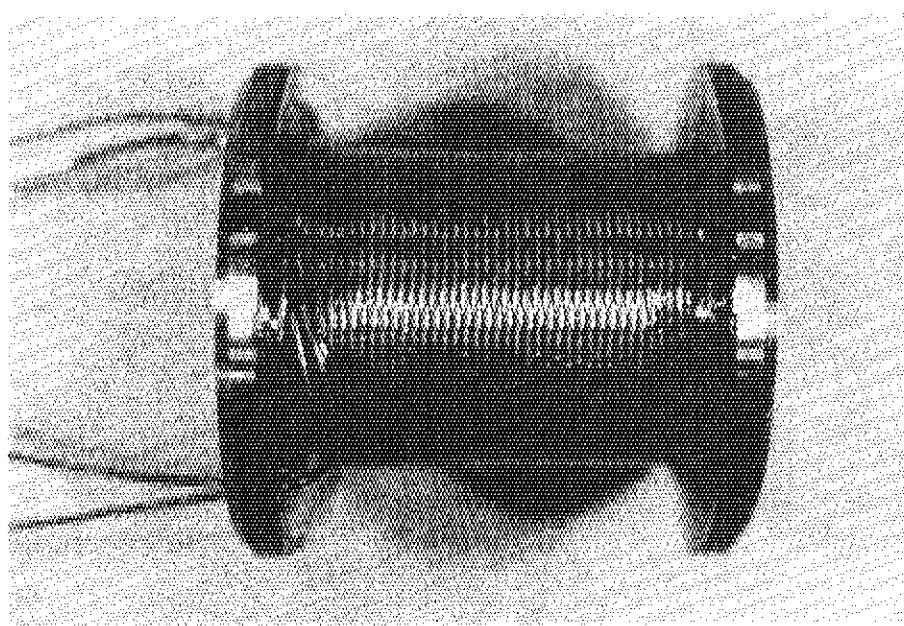
ボビン下面

ボビン上面
(リード部)

写真 3.9 セラミック溶射処理

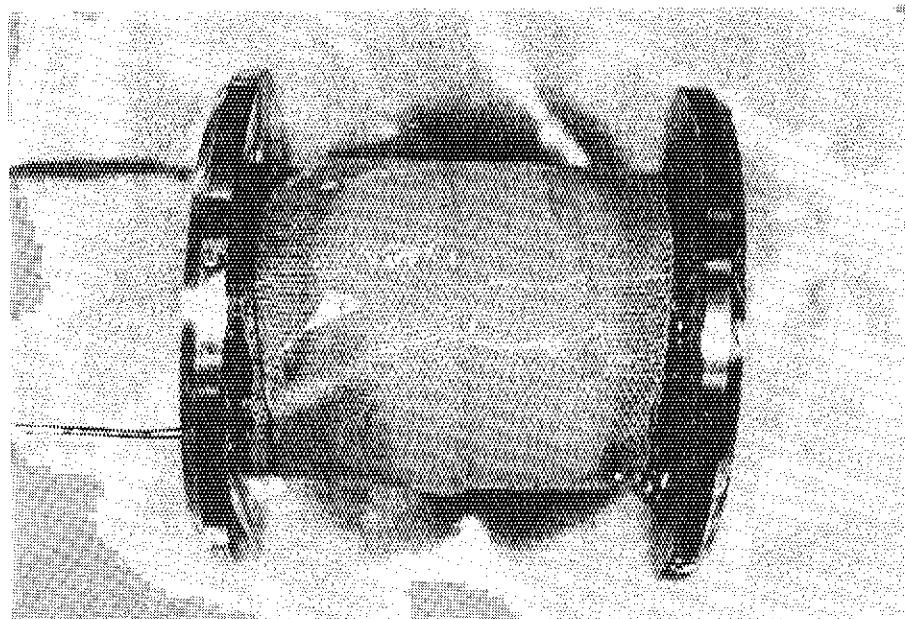


コイル巻後

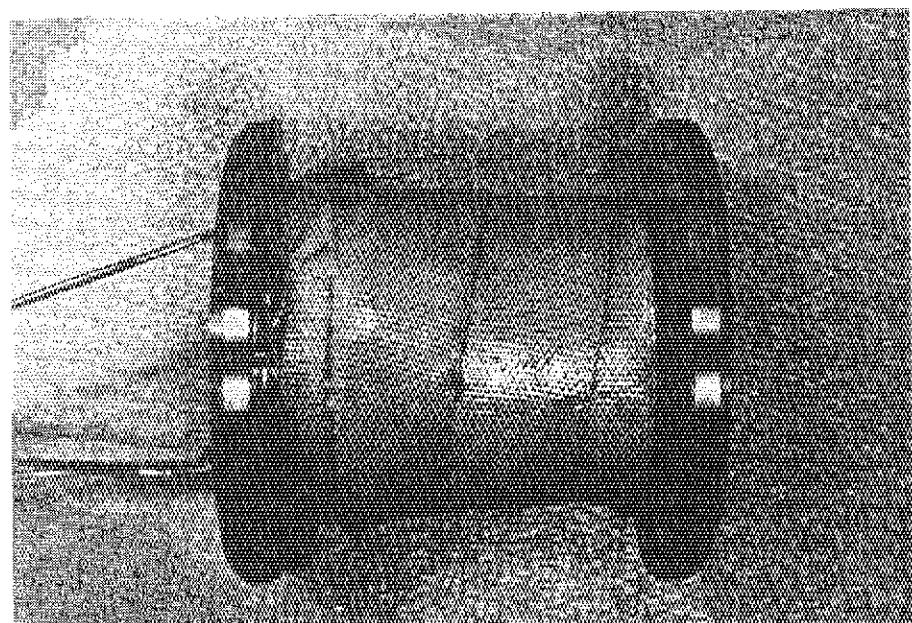


含浸後

写真 3.10 ポビンコイル（ポリイミドフィルム捲線）試作写真（その 1）

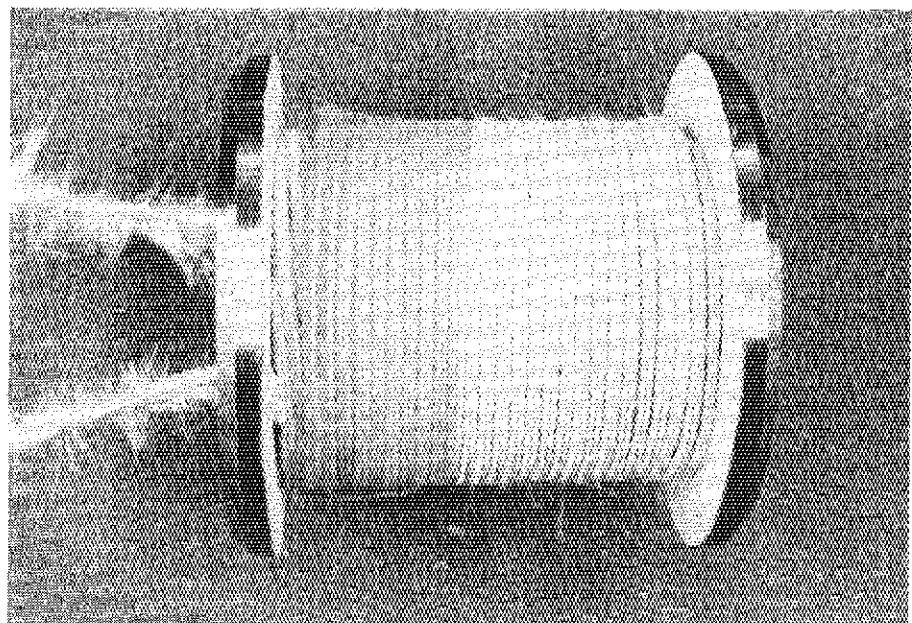


保護テープ巻後

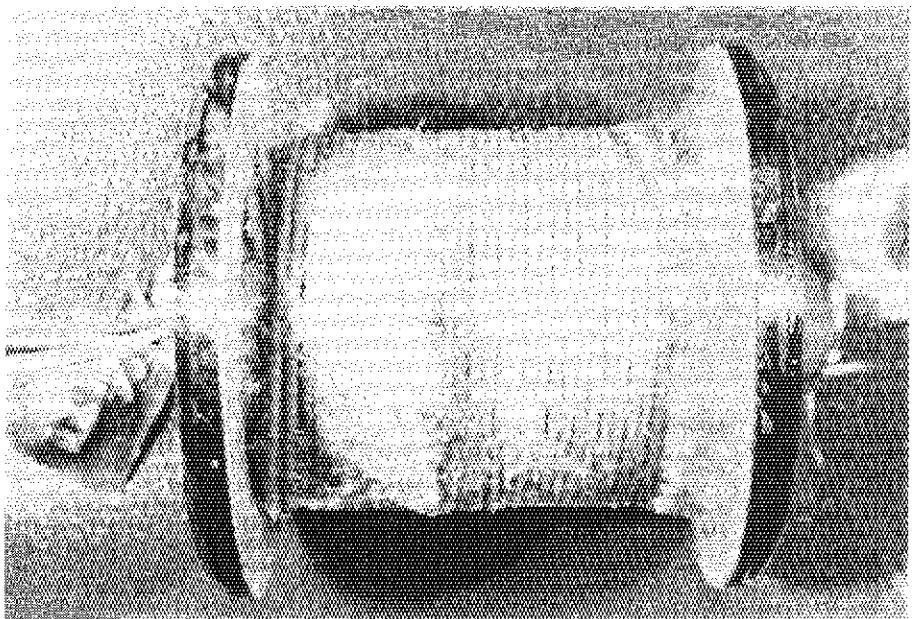


完 成

写真 3.10 ボビンコイル（ポリイミドフィルム捲線）試作写真（その 2）

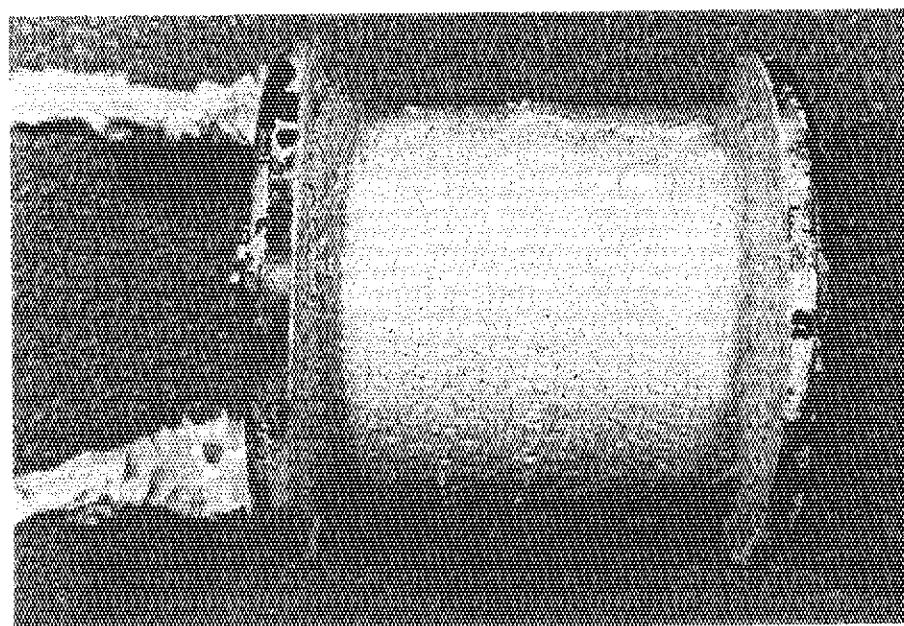


コイル巻後

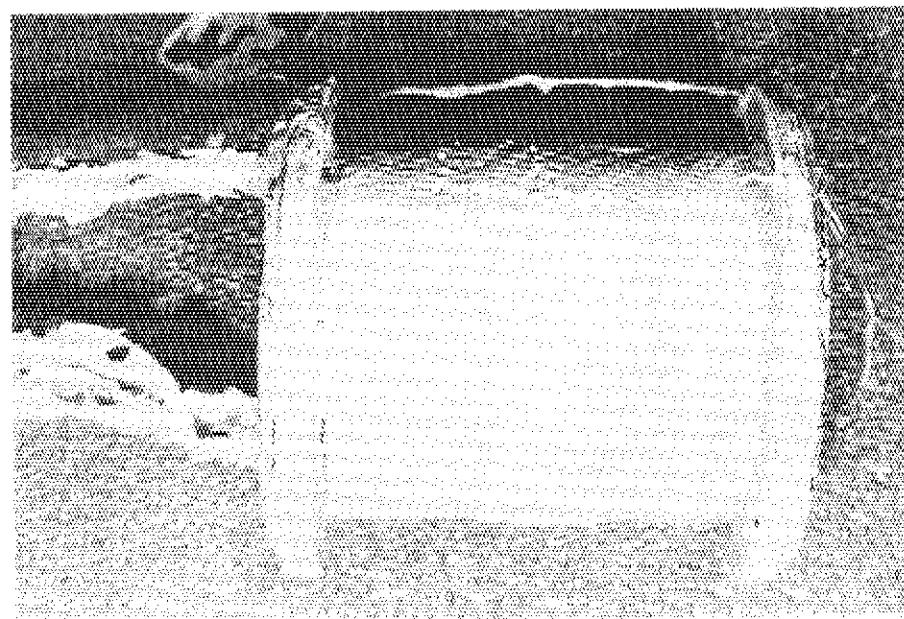


含浸後

写真 3.11 ボビンコイル (SHR-3) 試作写真 (その 1)

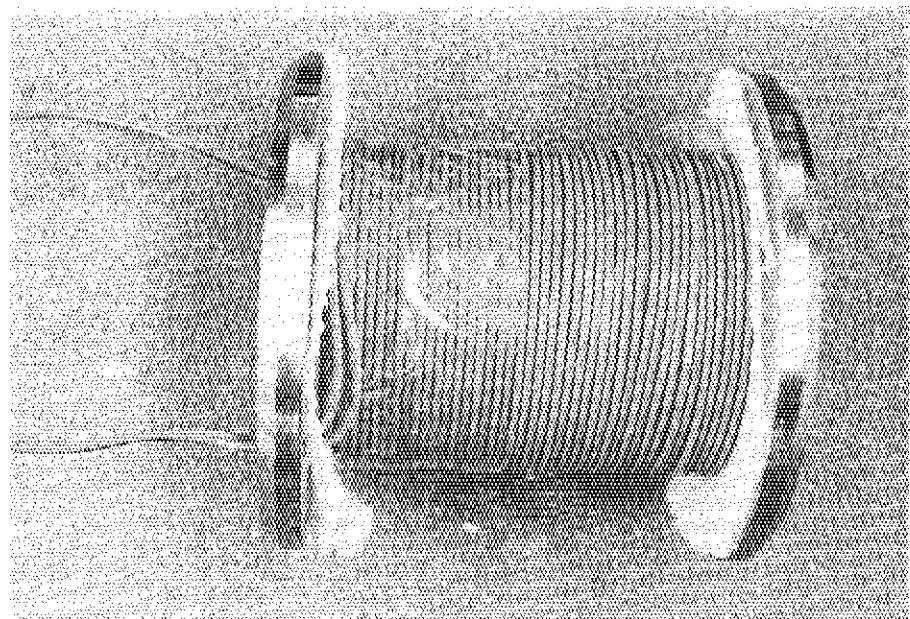


保護テープ巻後

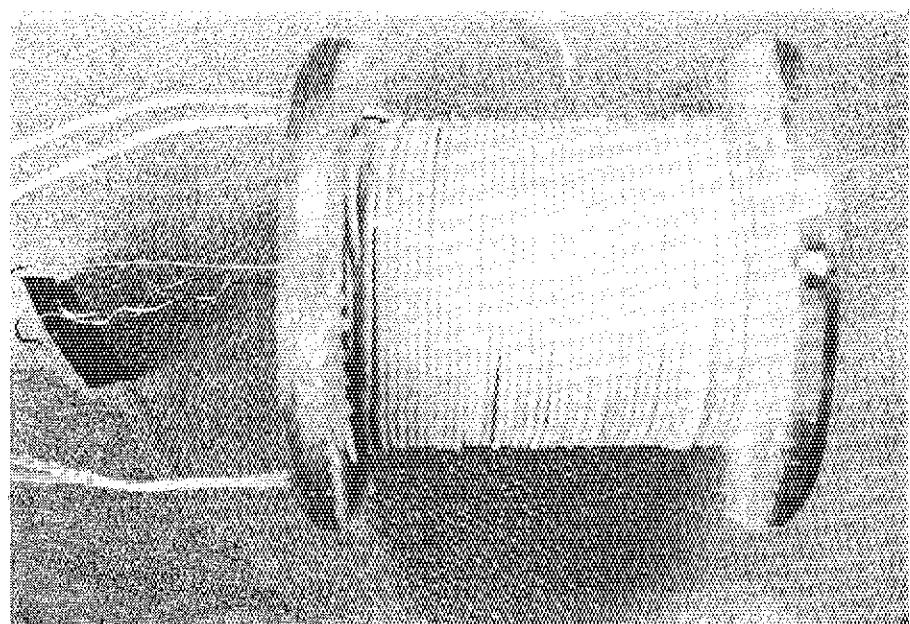


完 成

写真 3.11 ポビンコイル (SHR-3) 試作写真 (その 2)

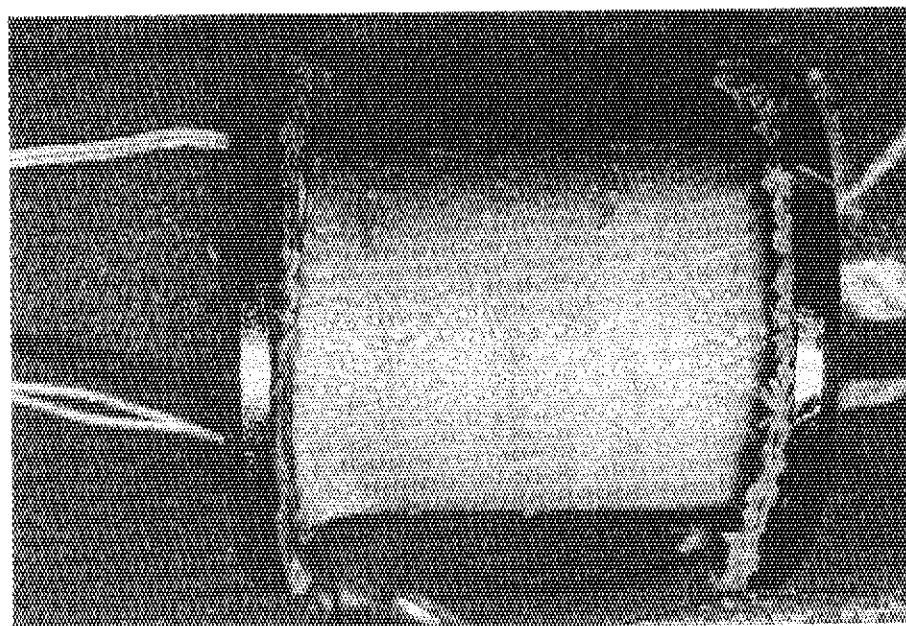


コイル巻後

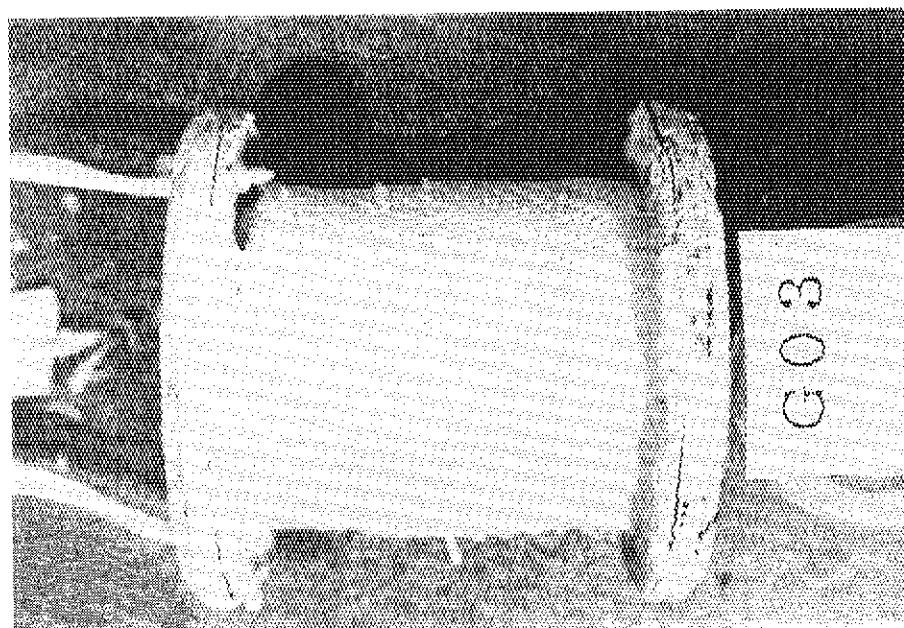


含浸後

写真 3.12 ポビンコイル (SHR-2) 試作写真 (その 1)

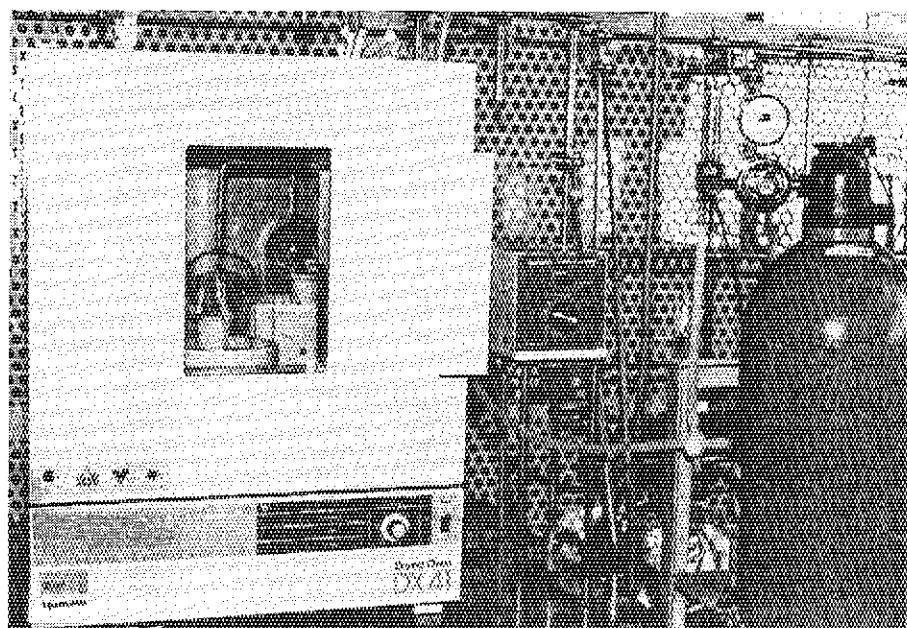


保護テープ巻後



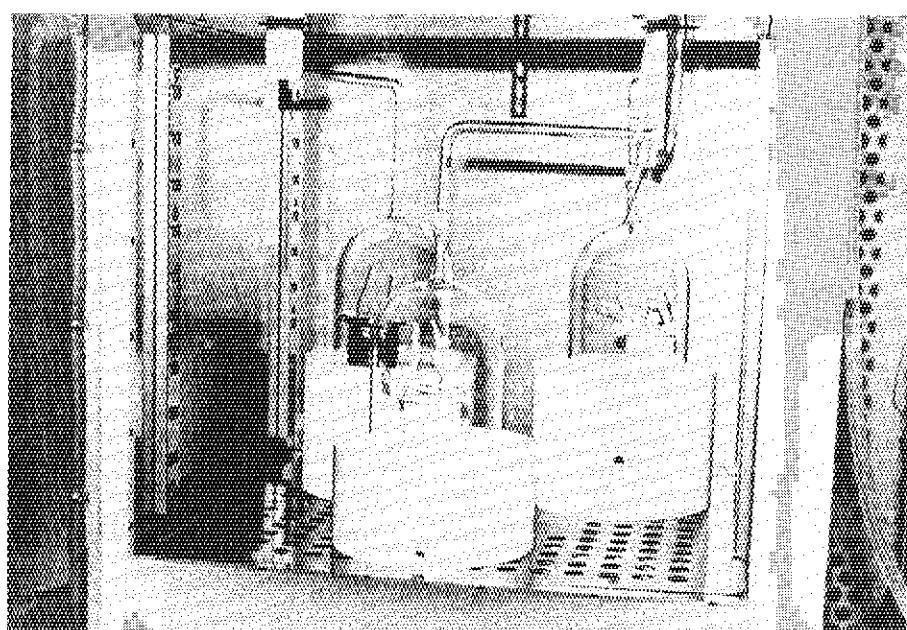
完 成

写真 3.12 ボビンコイル (SHR-2) 試作写真 (その 2)



外観……左端；電気式恒温炉（改造）

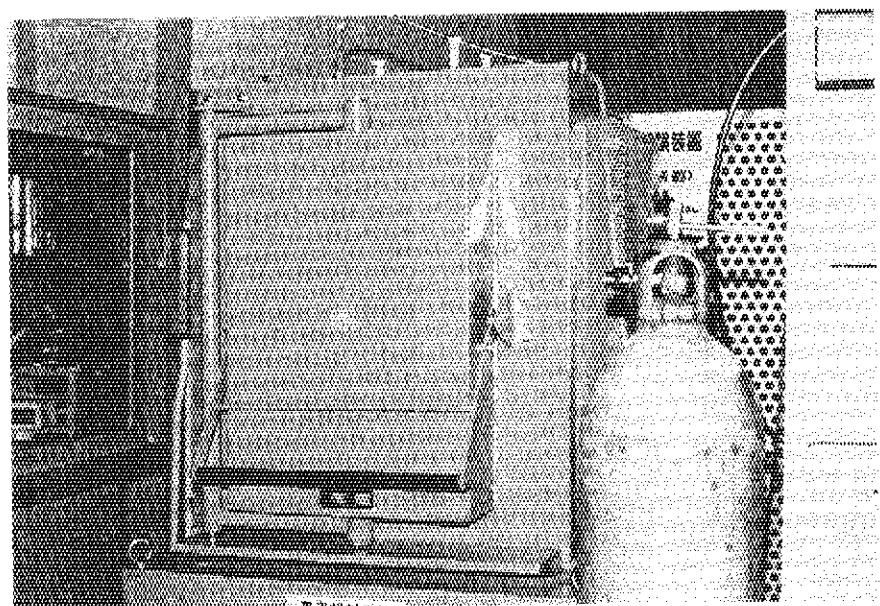
右端；Ar ガスポンベとレギュレータ



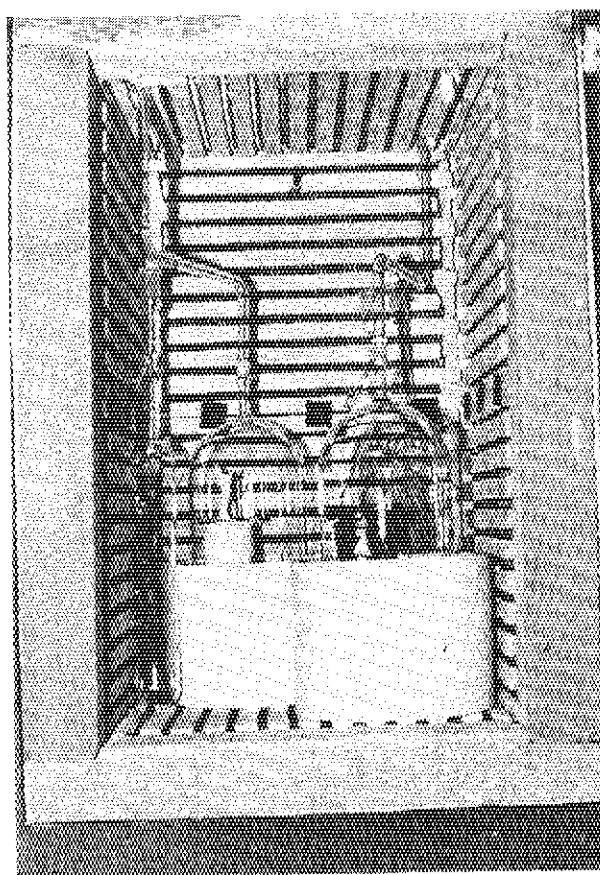
内部……ガス導入口付の準密封容器中にセット

されたボビンコイル。配線には Pt 線
とセラミック端子を使用。

写真 3.13 恒温炉中のサンプル設置状況（375 °C）



外観……電気式恒温炉と Ar ガスポンベ



内部……ガス導入口付の準密封容器中にセットされたボビン
コイル。配線には Pt 線を使用。周囲にはシールドチ
ューブに封入したサンプルを配置。

写真 3.14 恒温炉中でのサンプル設置状況（450 °C）

あとがき

改良船用炉次期設計炉（M R X）に搭載する小型制御棒駆動装置に要求される設計条件を整理、設定した。これに基づき小型制御棒駆動装置全体の基本概念を構築し、主要目をまとめた。また、今後必要となる研究開発項目を整理し、その開発スケジュールを策定した。

小型制御棒駆動装置の駆動源となる電磁部（ビルトインモータ、ラッチャマグネット）については、詳細な概念検討を実施して構造概念を構築すると共に、ビルトインモータ用ステータコイル及びマグネットコイルに使用可能な耐熱電線を選定した。

更に、選定された電線並びにこれらを用いたミニチュアコイルを試作し、基本特性を調べる試験を実施した。

以上、これらの検討、試験により、小型化が目論める制御棒駆動装置の基本概念が明らかになると共に、本装置を高温条件下で使用可能とする上で最も問題となる電磁部について、そのコイル材料となる有望な耐熱電線を抽出できた。

謝 辞

本研究は、三菱重工業株式会社、三菱原子力工業株式会社及び三菱電機株式会社の協力を得て実施したもので、その御協力に感謝致します。

引 用 文 献

- 1) 安保他、改良船用炉プラントの概念設計(II) システム設計(I); システム簡略化の検討
: JAERI - M 89 - 158 (1989)

あとがき

改良船用炉次期設計炉（M R X）に搭載する小型制御棒駆動装置に要求される設計条件を整理、設定した。これに基づき小型制御棒駆動装置全体の基本概念を構築し、主要目をまとめた。また、今後必要となる研究開発項目を整理し、その開発スケジュールを策定した。

小型制御棒駆動装置の駆動源となる電磁部（ビルトインモータ、ラッチャマグネット）については、詳細な概念検討を実施して構造概念を構築すると共に、ビルトインモータ用ステータコイル及びマグネットコイルに使用可能な耐熱電線を選定した。

更に、選定された電線並びにこれらを用いたミニチュアコイルを試作し、基本特性を調べる試験を実施した。

以上、これらの検討、試験により、小型化が目論める制御棒駆動装置の基本概念が明らかになると共に、本装置を高温条件下で使用可能とする上で最も問題となる電磁部について、そのコイル材料となる有望な耐熱電線を抽出できた。

謝 辞

本研究は、三菱重工業株式会社、三菱原子力工業株式会社及び三菱電機株式会社の協力を得て実施したもので、その御協力に感謝致します。

引 用 文 献

- 1) 安保他、改良船用炉プラントの概念設計(II) システム設計(I); システム簡略化の検討
: JAERI - M 89 - 158 (1989)

あ　と　が　き

改良船用炉次期設計炉（M R X）に搭載する小型制御棒駆動装置に要求される設計条件を整理、設定した。これに基づき小型制御棒駆動装置全体の基本概念を構築し、主要目をまとめた。また、今後必要となる研究開発項目を整理し、その開発スケジュールを策定した。

小型制御棒駆動装置の駆動源となる電磁部（ビルトインモータ、ラッチマグネット）については、詳細な概念検討を実施して構造概念を構築すると共に、ビルトインモータ用ステータコイル及びマグネットコイルに使用可能な耐熱電線を選定した。

更に、選定された電線並びにこれらを用いたミニチュアコイルを試作し、基本特性を調べる試験を実施した。

以上、これらの検討、試験により、小型化が目論める制御棒駆動装置の基本概念が明らかになると共に、本装置を高温条件下で使用可能とする上で最も問題となる電磁部について、そのコイル材料となる有望な耐熱電線を抽出できた。

謝　　辞

本研究は、三菱重工業株式会社、三菱原子力工業株式会社及び三菱電機株式会社の協力を得て実施したもので、その御協力に感謝致します。

引　用　文　献

- 1) 安保他、改良船用炉プラントの概念設計(II) システム設計(I); システム簡略化の検討
: JAERI - M 89 - 158 (1989)

付録1 改良舶用炉用制御棒駆動装置の概念

「システム簡略化の検討」より抜粋

1. CRDM概念の概要

本CRDM概念は、中空モータ（ビルトインモータと称している）、分割ボールナットを用いたラッチ機構等新規の概念を用いたもので、図A 1.1に示す通り小型化を達成した上で、原子炉圧力容器内装を可能にしている。

このCRDMは大別して、ビルトインモータ、スクラムマグネット等の電気品を設けた駆動源部、分割ボールナットで代表されるラッチ機構部、駆動軸アセンブリ等で構成される。

(1) 動作概念

本CRDMは従来の陸上PWRに用いられているマグジャック型と異なり、分割ボールナットによる駆動方式を採用し、制御棒クラスタ（以下、RCCという）を以下の通り駆動する。

RCCの駆動は、ビルトインモータの回転により回転駆動伝達軸を回転させると分割ボールナットが回転し、これに係合する駆動軸（ボールねじ）が軸方向に移動するように動作する。

また、スクラムマグネットの電源を切る（消磁）と分割ボールナットが駆動軸から外れて駆動軸（RCCに結合）は自重及びばね加速により炉心内に落下（スクラム）し、原子炉を停止させる。

駆動軸と分割ボールナットの係合は、マグネットを励磁することにより行う。上記作動概念を図A 1.2、A 1.3に示す。

(2) 特徴

本CRDMの特徴として、以下の事項が挙げられる。

- a) 採用しているACサーボは周波数コントロールによるので暴走することではなく連続的に正確な位置決めができる。
- b) スクラムはモータとは別回路のマグネット電源（DC）を落とすことにより行う。尚、モータの電源が落ちた場合は比較的低速で制御棒は挿入される。

（フェイルセーフの原則）

- c) 常に RCC の実位置を検出することができる。

- d) ビルトインモータの中空部を RCC のストロークスペースとして利用することにより、短尺化を図っている。

(3) 耐環境性

CRDMを原子炉圧力容器に内装すると、最も大きな問題は電気品の耐環境性である。

本CRDMに採用したビルトインモータ、スクラム用マグネットでは耐熱コイルを用いることとしている。耐熱コイルそのものは数百度（°C）のものが開発されており、耐久性、通電特性（電流密度、抵抗等）が把握されれば実用に供し得るものと考えられるが、製作難易度の高いビルトインモータについては、工夫を要す。

また、ビルトインモータに用いる永久磁石は、通常特性より若干性能が劣化することが考え

られるが、機能を果すことは可能であろう。鉄心は特に問題ないと考えられる。

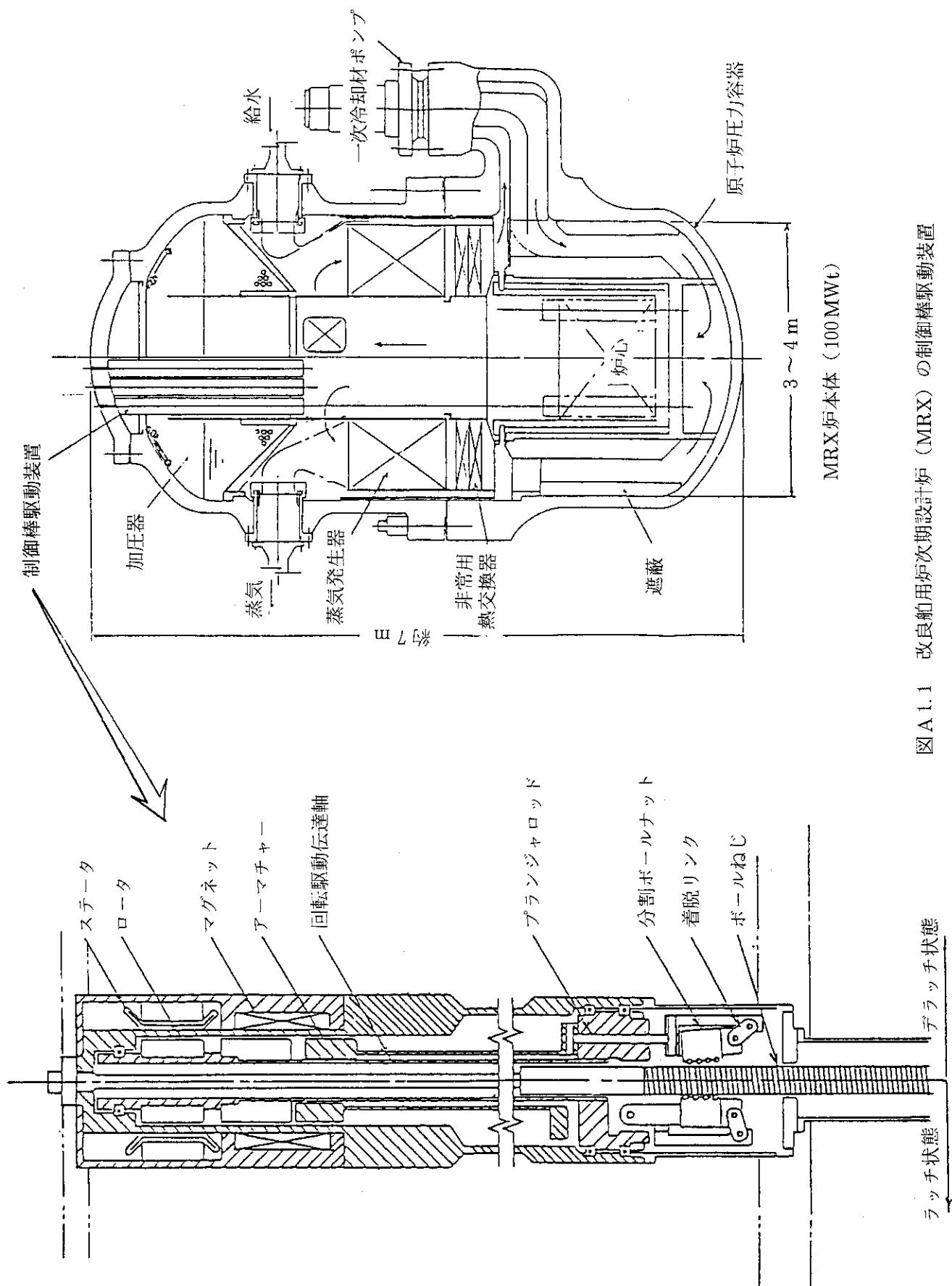
この他、計装関係（回転検出器等）では、センサアンプを内装することは困難なため、これを炉外設置とし、センサ部の材料構成に耐熱性のものを選択することにより対処する。

以上のように、耐熱性材料という観点からは適切な材料選択により内装は可能と考えられる。雰囲気流体（水）に対しては、腐食が問題となるが、これも材料選択によるところが大きい。熱膨張については設計での対策が必要である。何れにしても、耐環境性に対しては性能確認、耐久性確認のための研究開発を要する。

(4) 制御棒（RCC）抜け出し防止機構

船用炉のCRDMは船体転覆を想定した場合にも、RCCが抜け出さないように制御棒抜け出し防止機構を設ける。

この機構はマグネット、プランジャー、ラチエットリンク等から成り、通常運転時にはマグネットを励磁してラチエットリンクを駆動軸から切り離しておき、スクラム等により電流が遮断された場合に、RCCが全挿入位置近傍に挿入された状態でラチエットリンクが駆動軸と噛み合い、抜け出し方向に対する抵抗となり抜け出しを防止し、挿入方向に対する拘束しないというものである。従って、分割ボールナット型CRDMの場合、駆動軸のねじ部より下位の部分に当該機構を設けることとなろう。



小型CRDMの構造と作動概念

a. 構 造 小型CRDMは下記の要素から構成されている。

- ① 駆動部：ビルトイントモータ
- ② 駆動機構部：分割ボールナット
アーマチャ
音枕リシク
回転駆動伝達軸
- ③ 駆動軸アセンブリ

分割ボールナット

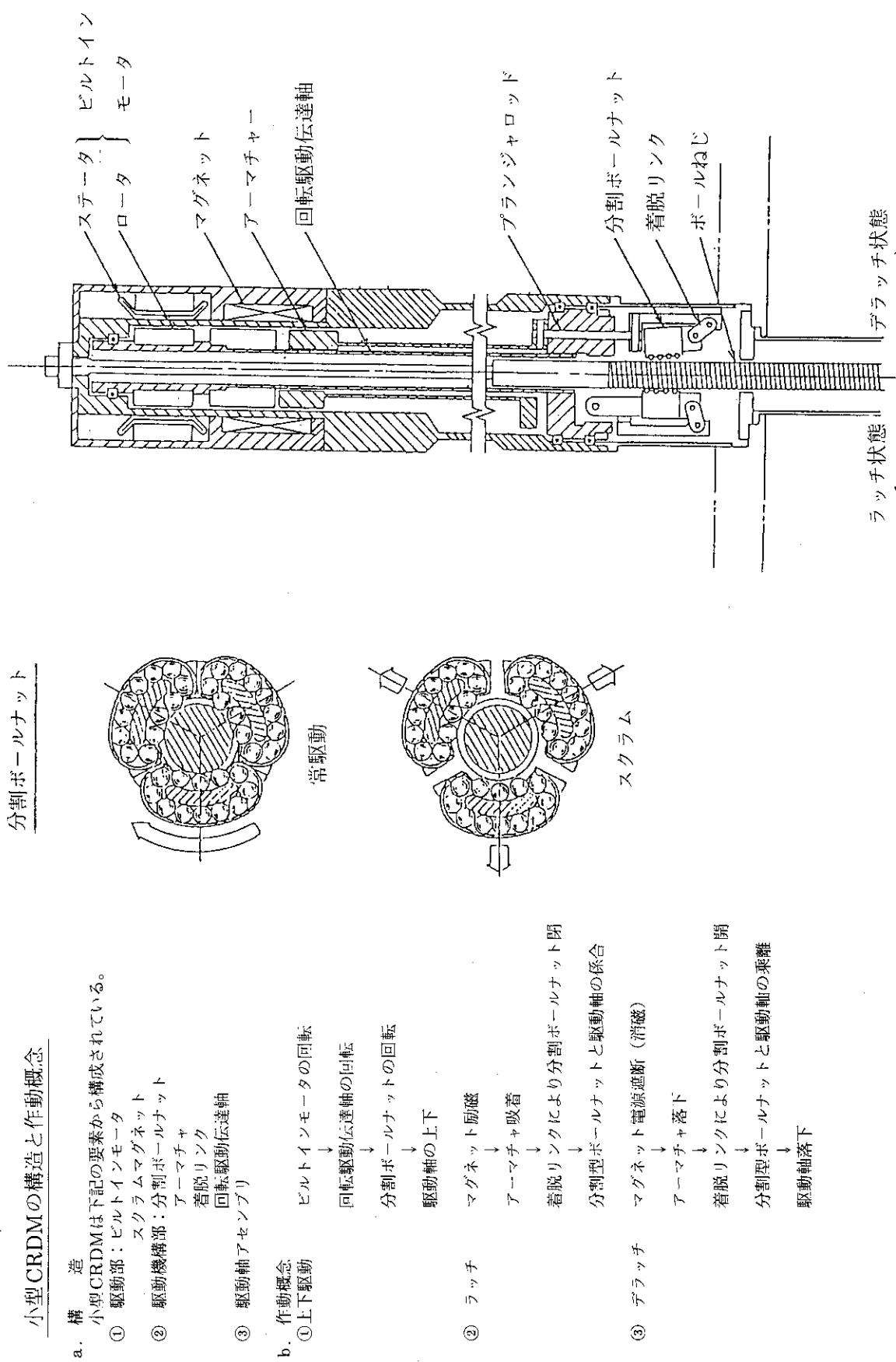
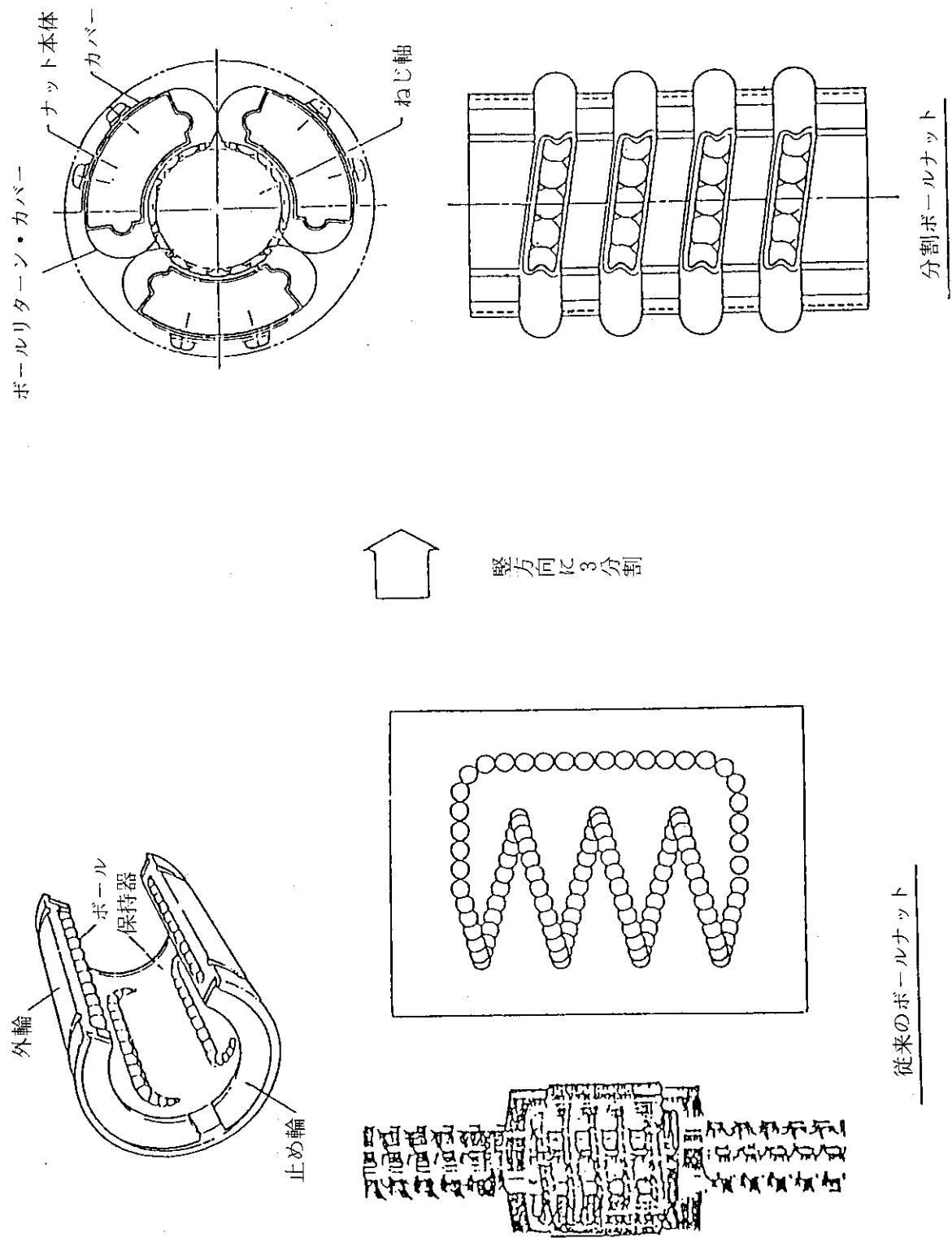


図 A 1.2 改良船用炉用小型CRDM作動概念



図A1.3 分割ボールナットの概念、

付録 2 耐放射線特性

電気絶縁用材料として採用できる可能性をもつセラミックスに、放射線が及ぼす影響について述べる。

(1) セラミックス材料について

放射線がセラミックス材料に与える影響についての研究は、原子力プラントにおける安全性の向上や将来の核融合炉及び宇宙空間利用の拡大などのために必要であり、また、セラミックス材料自体の電気物性を調査するための手法としても重要である。特に、原子力分野においては、セラミックスを中心とする機能材料への期待が大きいものの、その研究開発は他の材料の研究に比較してかなり立ち遅れている。現状、セラミックス材料（無機）の耐放射線性については、代表的な数種類の材料について照射による電気的・光学的特性並びに相安定性などに与える影響に関するデータが取得され、それらに対する検討が鋭意進められている。しかし、その他のセラミックス材料については、これから具体的な研究が実施される段階にある。

今回、検討の対象となる候補のセラミックスについても同様である。現状実験データもないことから前記した代表的なセラミックス材料に関する照射データから類推する方法しかない。尚、本セラミックスは電気絶縁用として使用される機能材料であるために、スウェーリング及び熱伝導度変化についての照射効果というより、電気的並びに機械的特性に着目した照射効果データより推定することとなる。

候補材料に関する照射効果のデータはないが、代表的なセラミックスである Al_2O_3 について簡単に述べる。図 A 2.1 ~ 2 は Al_2O_3 の照射効果を示すものである。 Al_2O_3 の電気伝導度は中性子照射により小さくなる¹⁾が、電離放射線を照射すると放射線の線量率に比例して大きくなる²⁾。

また、科学技術庁無機材質研究所の $\text{TiO}_2 + \text{CeO}_2$ の内、 CeO_2 については燃料電池に用いられる安定化ジルコニア電解質（イオン導電性セラミック）と同等の特性を示すと考えられる。照射量、照射速度やその時の温度により電解質抵抗がどうなるか一概に比較することはできないし、そこまで言及された照射効果研究はなされていないものの、唯一、 $\text{Y}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2$ 系部分安定化ジルコニア（PSZ）について γ 線及び中性子照射による電気伝導度特性が最近測定されている³⁾。

その結果を図 A 2.3 に示す。図 A 2.3 から γ 線については照射前後の電気伝導度特性にはほとんど差異はない。また、中性子照射については未照射時のものに比べてわずかに小さくなる傾向を示していることが判る。

以上のことから、本文中に示す候補材料並びに $\text{TiO}_2 + \text{CeO}_2$ （無機材質研究所提供）としてお互いが共存しているセラミックスにあっても、 Al_2O_3 から推察される照射効果が顕著に現れると考えられる。しかしながら、これはあくまで推察であり、それについて照射データを取得するための試験計画を策定し、所定の照射試験を実施する等、段階的に研究を進めていく必要であろう。

また、主に光通信ファイバーに使用される SiO_2 についても、前記と同様のことが言えると考える。

従って、本文中に示す候補材料並びに $\text{TiO}_2 + \text{CeO}_2$ などの遷移元素を含む酸化物は、一般的に各種放射線に侵されにくいという優れた性質を有していると考えられ、耐放射線性無機セラミックス材料として登用することが今後期待できる。

一方、有望な候補材料の一つとしてリストアップされたボロシリケート系（BとSiとO₂を主鎖とする）無機ポリマー材料については、ボロン（B）が若干含まれており、その内に含まれる濃縮¹⁰Bは17%程度（他は自然ボロン；¹¹B）であるものの、中性子捕獲断面積が大きく中性子照射に対し物理的損傷を伴う絶縁劣化が懸念される。この点についても必要なら将来照射試験で確認することになろう。

(2) 有機（ポリマー）材料について

有機材料については、これまで多くの研究者によって数々の実験が報告されてきている。その主なものは有機高分子絶縁材料に及ぼす放射線照射効果に関するものであり、今まで精力的に研究が展開され多くの知見が得られている。一例ではあるが、参考までに以下に紹介する。

有機高分子絶縁材料の中で代表的なポリイミド（主鎖が芳香環で構成された全芳香族系ポリマー）について、種々の環境下における耐放射線性及び損傷・劣化機構の検討が行なわれ、放射線によって架橋し易いか、主鎖切断が起こり易いかなどのメカニズムは化学構造に強く依存することが明らかにされてきた。その他、ポリエーテル・エーテル・ケトン（PEEK）をマトリックス樹脂に用いた炭素繊維強化材料（CFRP）は耐放射線性に優れ、照射により高温特性が改善されることが明らかにされてきている。

さらに、原子力用ケーブル類として主に供せられる有機高分子材料を使用した絶縁電線について、その放射線・熱複合劣化による寿命（予測）は、通常、より短時間の試験で結果の得られる高温域（約120°C以上）の活性化エネルギーを用いて外挿法によって求められるとしている。

参考文献

- 1) F.W. Clinard, Jr.: Ceramics for Fusion Devices, J. Mater. Eng. Sys. 6(1984)100.
- 2) R.W. Klaffky, B.H. Rose, A.N. Goland and G.J. Dienes: Phys. Rev., 1980, vol.B21, pp3610-3634.
- 3) H. Ohno, T. Nagasaki, Y. Katano, J. Tateno and H. Katsuta: Electrical Properties and Phase Stabilities of Some Ceramics Irradiated by Neutrons and Ions, J. Nucl. Mater. 155&157(1988)372.

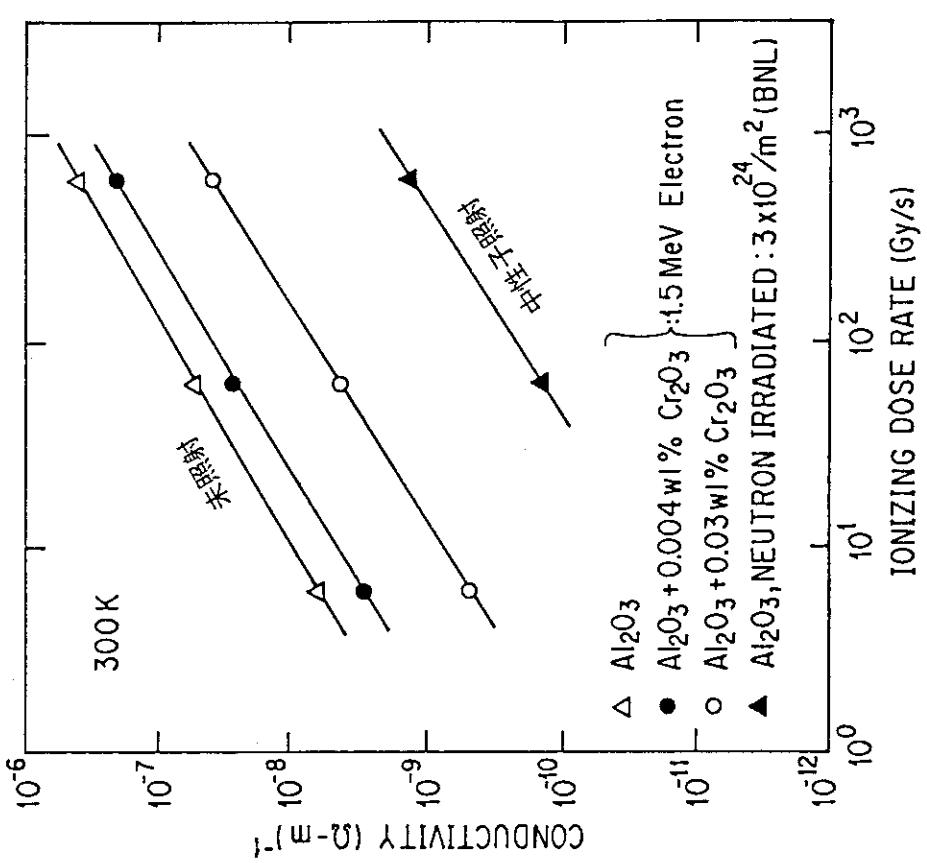


図 A 2.1 Al_2O_3 の電子線及び中性子照射による電気伝導度の吸収線量率依存性 (Klaffky らの研究より, 1980)

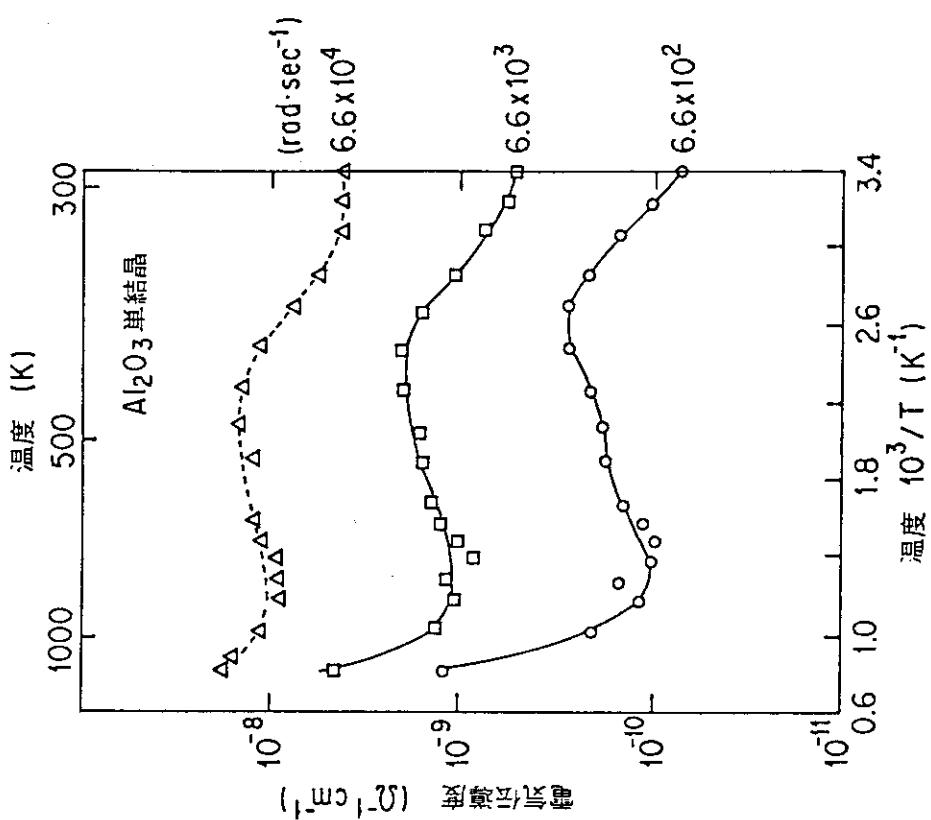
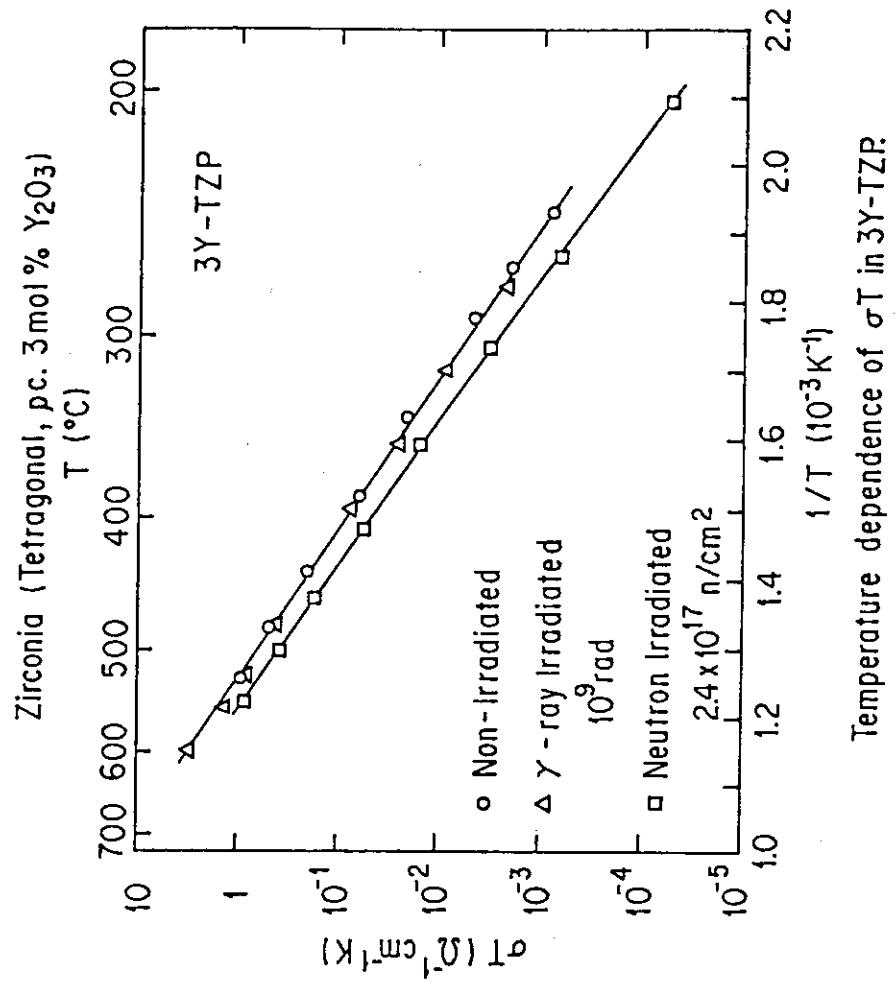


図 A 2.2 電離放射線照射による Al_2O_3 の電気伝導度の温度変化
(Klaffky らの研究より, 1980)

図 A 2.3 ZrO_2 の σT 及び中性子照射による電気伝導度

付録3 耐熱電気絶縁膜被覆線の特性

無機材質研究所殿 提供

1. 被覆線（試作品）の仕様（1／13付 無機材研・和田氏メモによる）

1.1 コーティング膜

- CeO₂ - TiO₂ ゾルゲルコーティング

1.2 処理材及び処理方法

- 芯 線（コア）

φ 1.0 SUS 304（市販品、酸処理なし）を1200 °Cでアニール後、表面の酸化膜を機械的に剥離した。但し、一部酸化膜は残っている。

- 絶縁膜の形成

5日間熟成した頭記ゾル液中に芯線を浸漬し、引き上げ乾燥後 500 °Cの電気炉中で10分間加熱処理し膜厚およそ 1 μm程度のサンプル（有効絶縁長、100 mm）を得た。

処理本数 …… 30 本（写真 A 3.1）

2. 一般特性

2.1 絶縁破壊電圧

- 電 極

サンプル（3本）の下端より約 30 mm と 80 mm の部位に幅 10 mm のアルミ箔電極を設け接地電極（写真 A 3.2）とし、芯線を高電圧電極とした。

- 絶縁破壊電圧の測定

大気中、60 Hz, 25 V/sec の割合で昇圧させ絶縁破壊電圧を測定した。

- 結 果

絶縁破壊電圧(V)

サンプルNo.	上 部	下 部
1	118 *	163 *
2	45	157 *
3	22	143 *

* 電圧再印加可能

2.2 可とう性

- 卷付け法による評価

3, 5, 10倍径（それぞれ φ 3.0, φ 5.0, φ 10.0）の外径を持つマンドレルに緊密にサンプルを巻付け、皮膜に導体が見えるき裂を生じないかを目視で調べた。各サンプルとも外観上顕著な劣化はなかった（写真 A 3.3～6）。

2.3 密着性

- ねじり法による評価

標線距離を 100 mm とし、試験片の一端を 30 ~ 60 回／分の割合で同一方向に回転して試験片をねじり、目視で導体が見えるまでの回数を測った。

- 結果

ねじり回数 7 ~ 8 回（標準法換算では 18 ~ 20 回）でサンプルに縞模様が発生する。

（写真 A 3.7 はねじり回数 10 回）

また、77 回（標準法換算 193 回）ではサンプル中央部で芯線が破断する。この時、皮膜は一部パウダー状に飛散する。

上記 2 ケースとも導体は見えるに至らない。

2.4 耐熱衝撃

- 巻付け法による評価

3 倍径のマンドレルに巻付けたサンプルを 300 °C の恒温槽中に投入し、1 時間加熱する。

これを恒温槽から直ちに取り出し、試験片の温度が常温に戻った後、皮膜に導体が見えるき裂が生じないかを目視で調べた。

- 結果

密着性と同様、異常なし。

3. 考察

上記の結果から皮膜の形成状態をマクロに把握する必要があると判断し簡単な評価を追加した。

3.1 断面形状からの評価

- 試片の調査

1 本のサンプルの被覆部を長さ方向に 4 分割し樹脂で注型した後、切り出してエメリーペーパで研磨し、断面形状を光学顕微鏡で観察した（サンプル番号は任意）。

- 結果

写真 A 3.8 は 1000 倍に拡大したものであるが、絶縁膜はコロイド状に不均一に形成されている。

なお、写真 A 3.11 は 100 倍に拡大した全周のカラーコピーである。

3.2 ピンホールテスト

- 試験法

フェノールフタレンの 3 % アルコール溶液の適量を滴下した 0.2 % 食塩水中にサンプルを浸し、液を正極、試験片の導体を負極とし 12 V の直流電圧を 1 分間加えて発生するピンホール数を調べる。

• 結 果

写真 A 3.9 に示すように無数のピンホールが認められる。

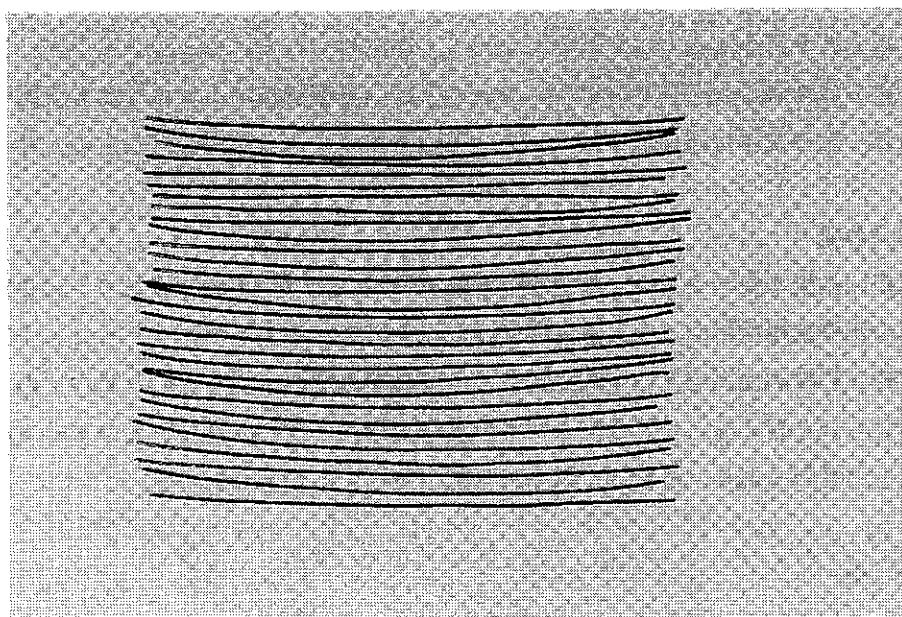
これらの結果から、本サンプルはコロイド状の無機物質が $1 \mu\text{m}$ 程度の皮膜を形成しており、その皮膜は連続性がないため、本報告書のような結果を得たものと考える。

3.3 総合評価

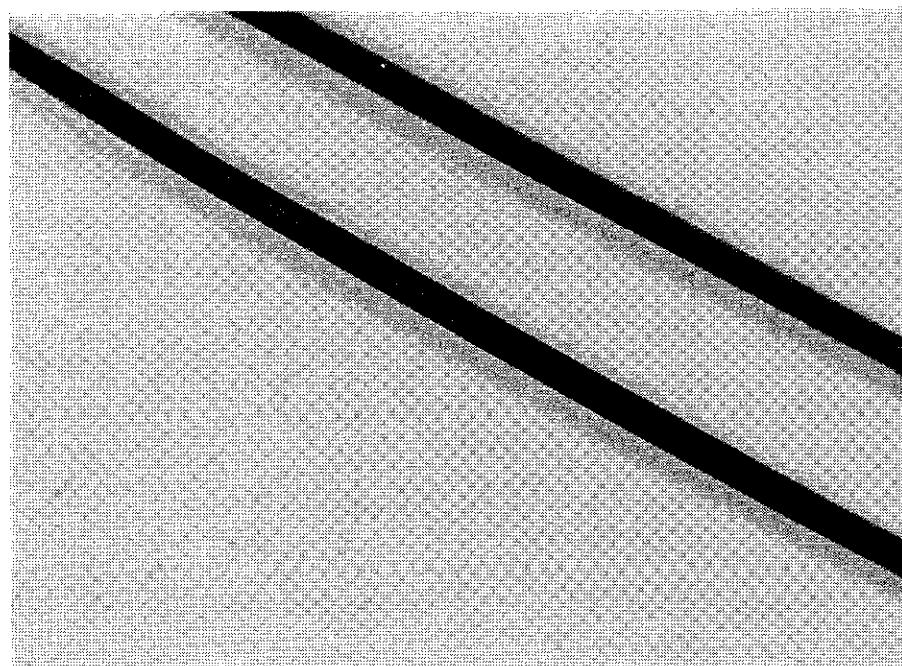
上記の結果を総合すると、本絶縁被覆線は SUS 304 (一部酸化膜あり) の表面にコロイド状の無機絶縁材料が $1 \mu\text{m}$ 程度形成されたものである。このコロイドは SUS 304との接着状態が比較的良好である反面、コロイド間の接着状況はよくないため、このような結果を得たものと考える。いずれにしても皮膜厚の増大 ($30 \mu\text{m}$ 程度) とコロイド間の接着力の向上が必要であり、現状では実用には供し得ないものと判断する。

4. そ の 他

サンプルの保管状況を写真 A 3.10 に示す。



(a) 全サンプル



(b) 拡 大

写真 A 3.1 被覆線

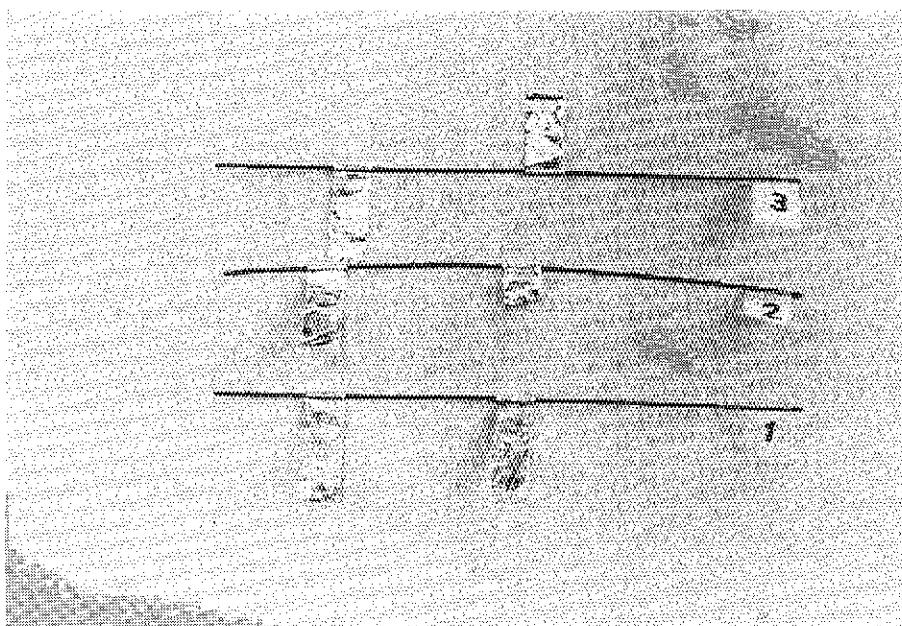


写真 A 3.2 アルミ箔電極の取り付け状況

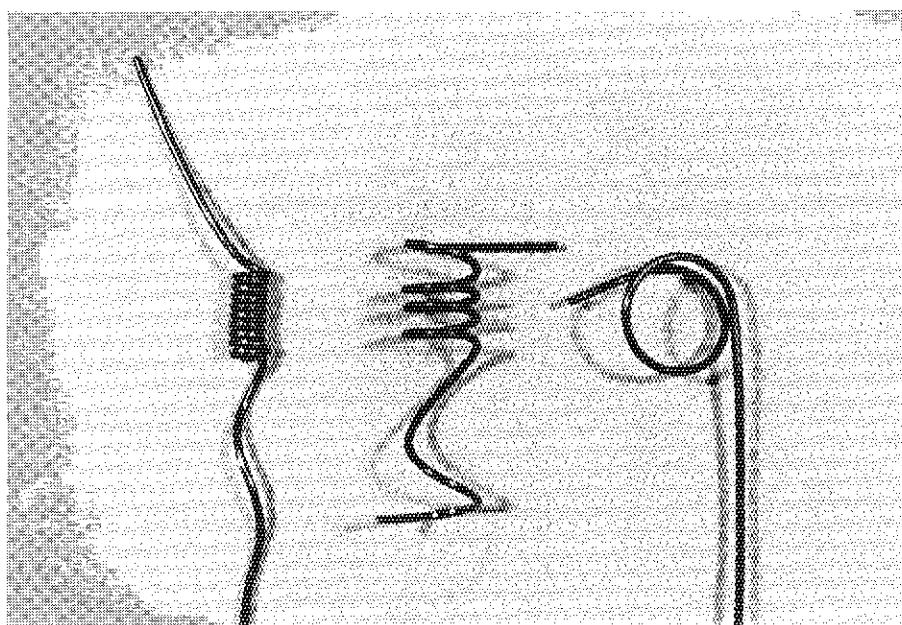


写真 A 3.3 捲付け法による評価（3, 5, 10 倍径捲付け）

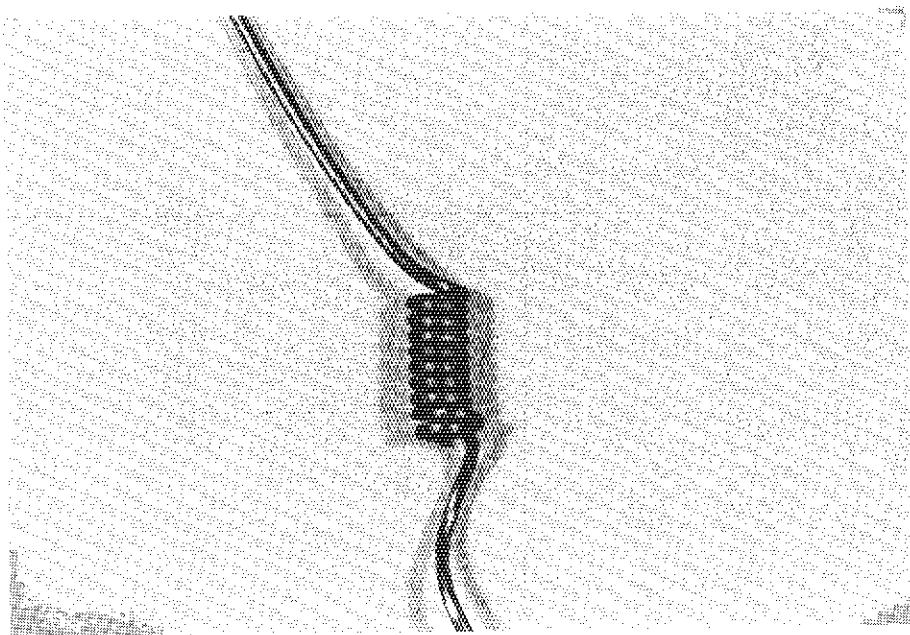


写真 A 3.4 3 倍径捲付け

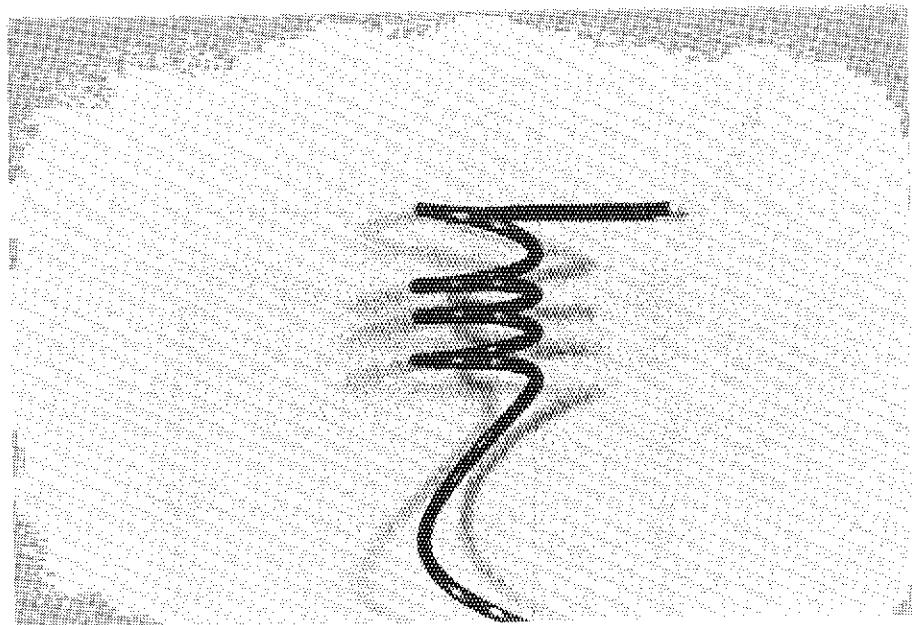


写真 A 3.5 5 倍径捲付け

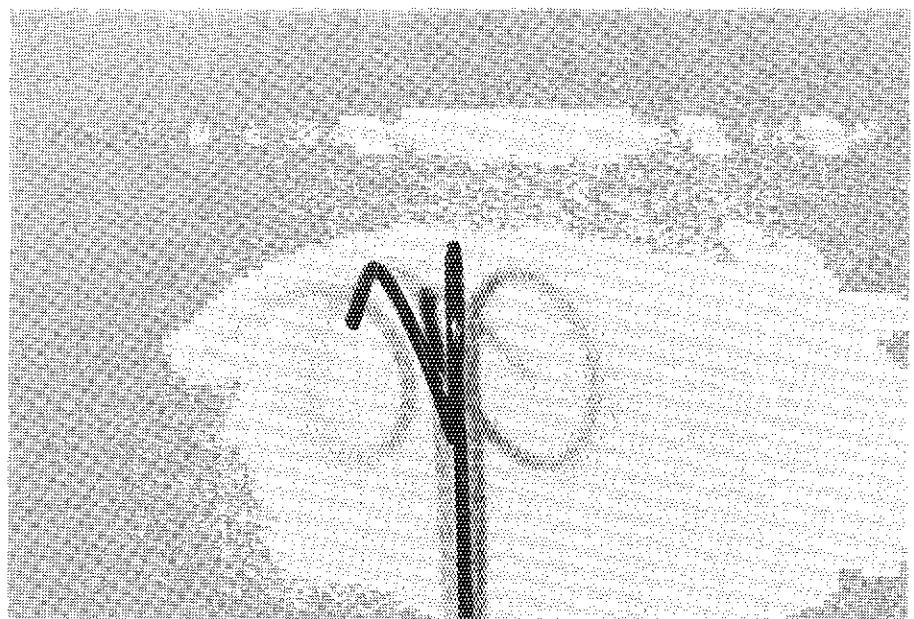
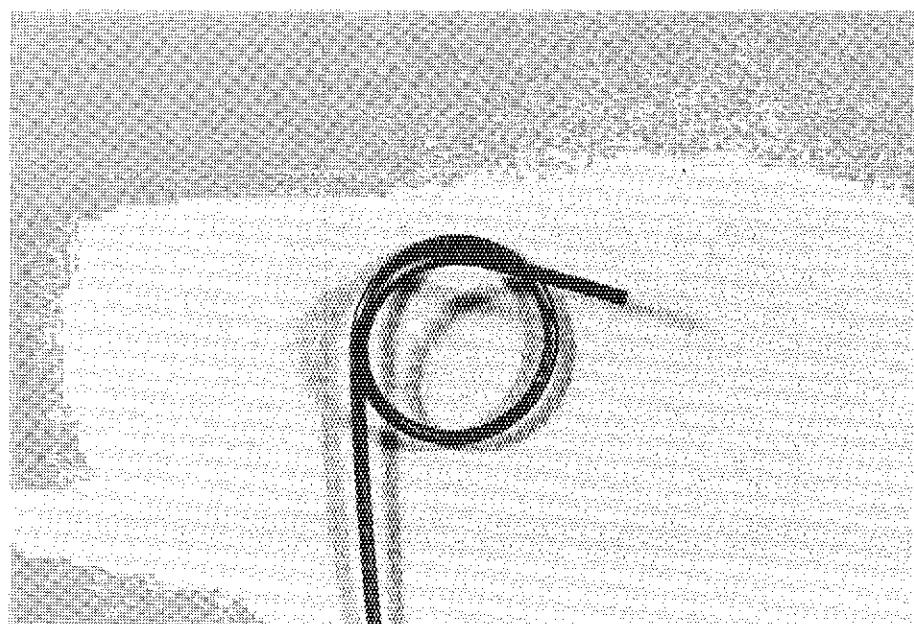
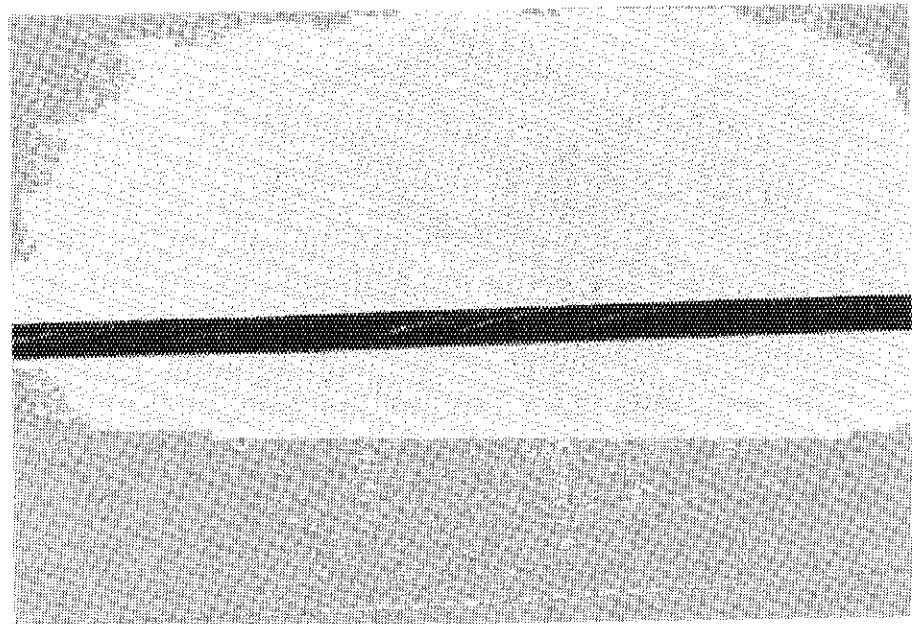


写真 A 3.6 10 倍径捲付け



写真A 3.7 ねじり回数 10回（標準法換算 25回）後の縞の発生状況

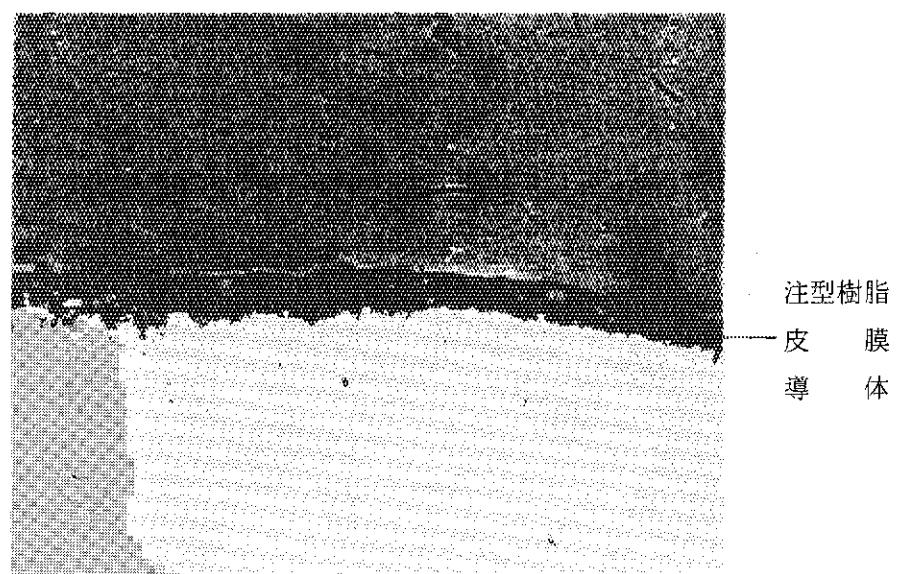
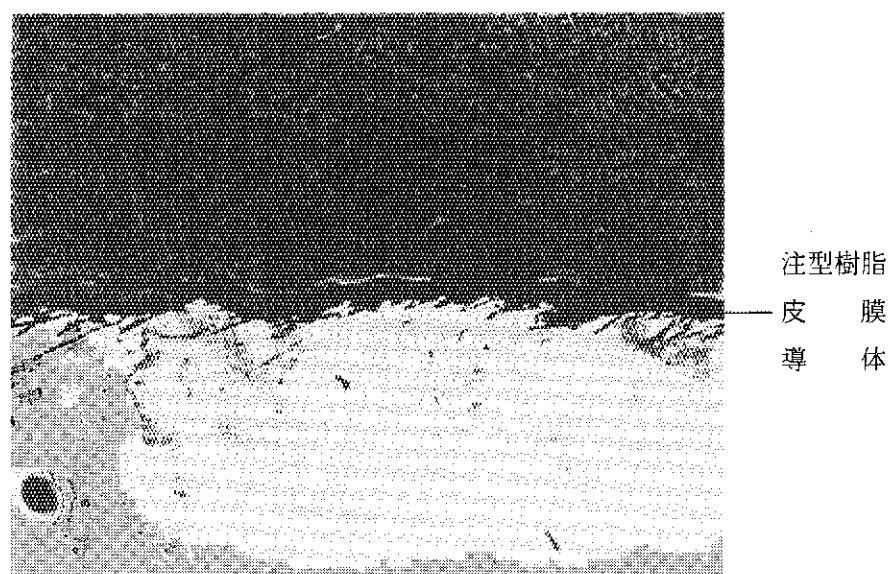


写真 A 3.8 断面観察 (No. 1) ($\times 1000$)

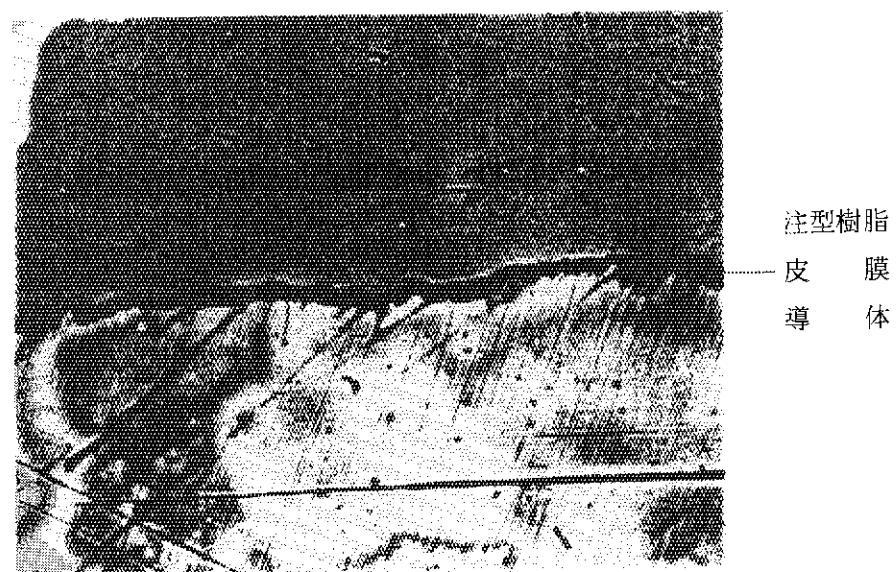
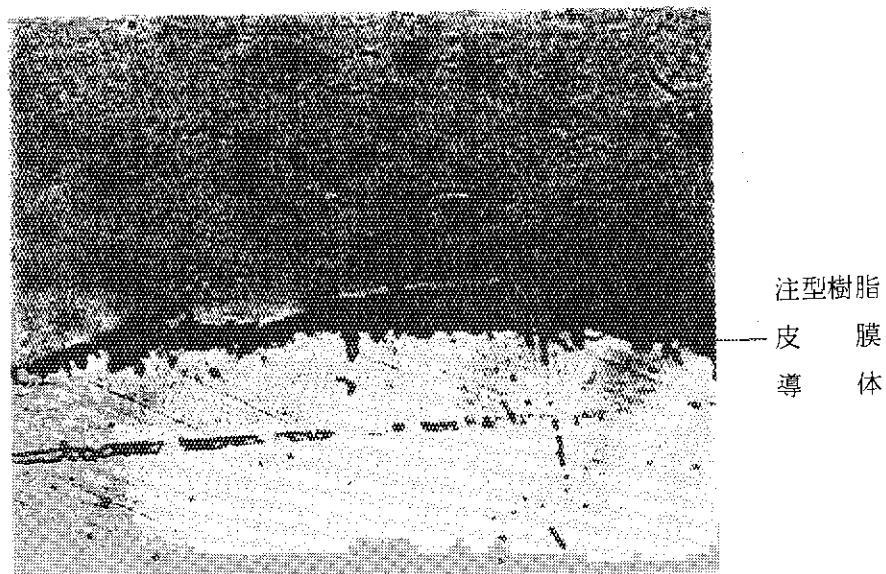
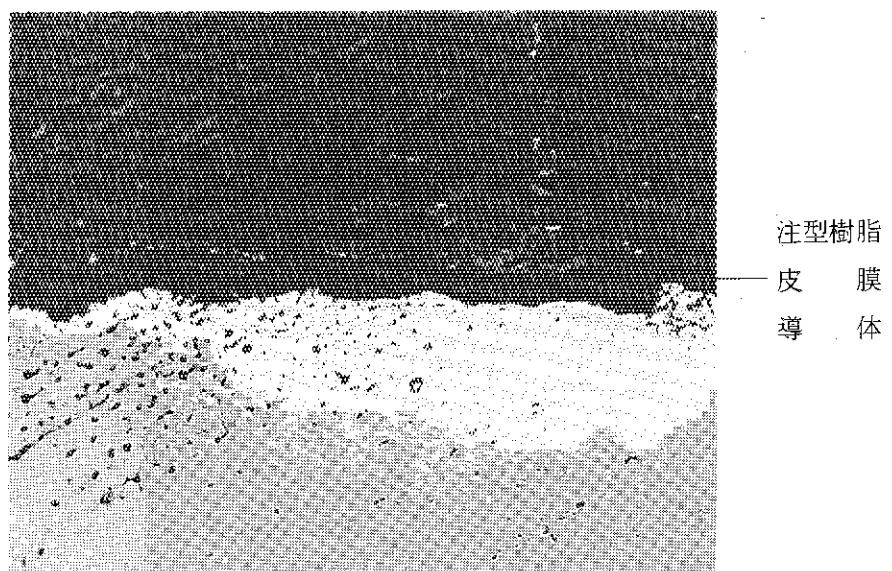
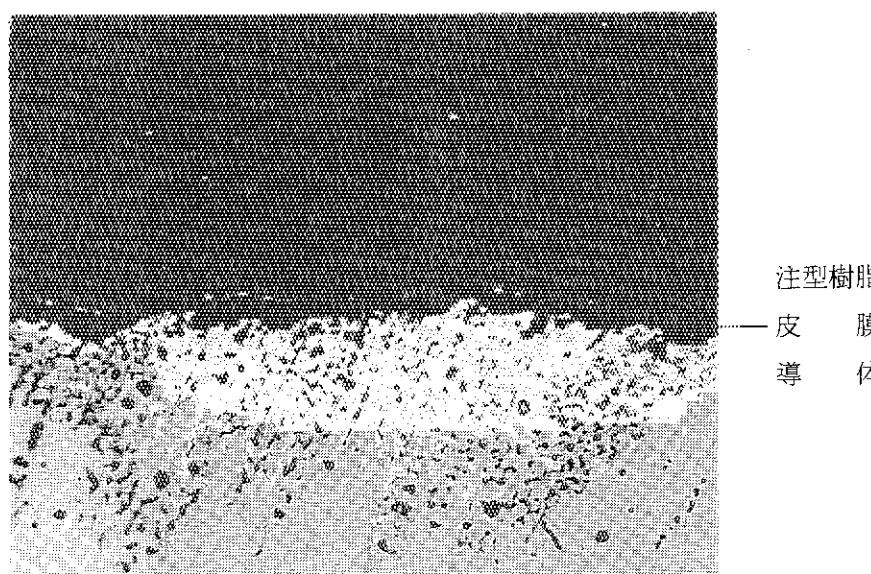
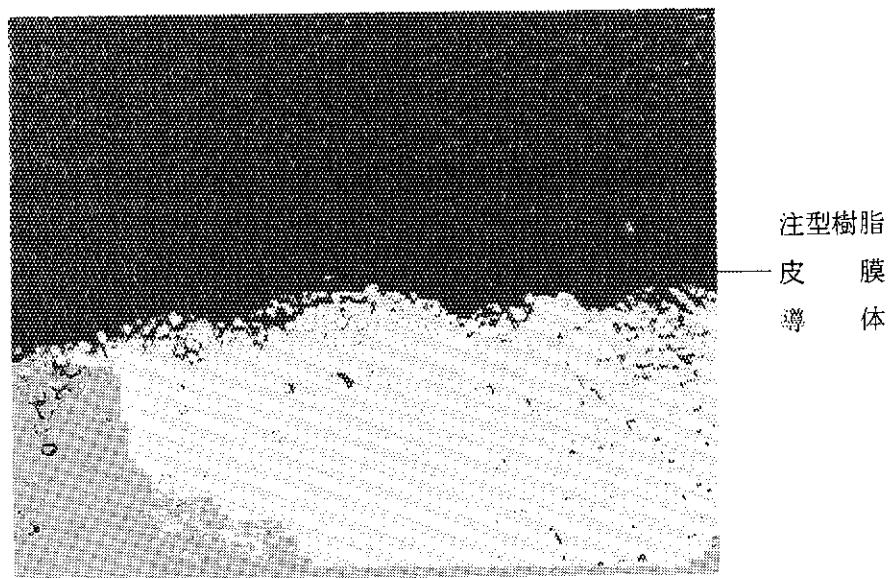
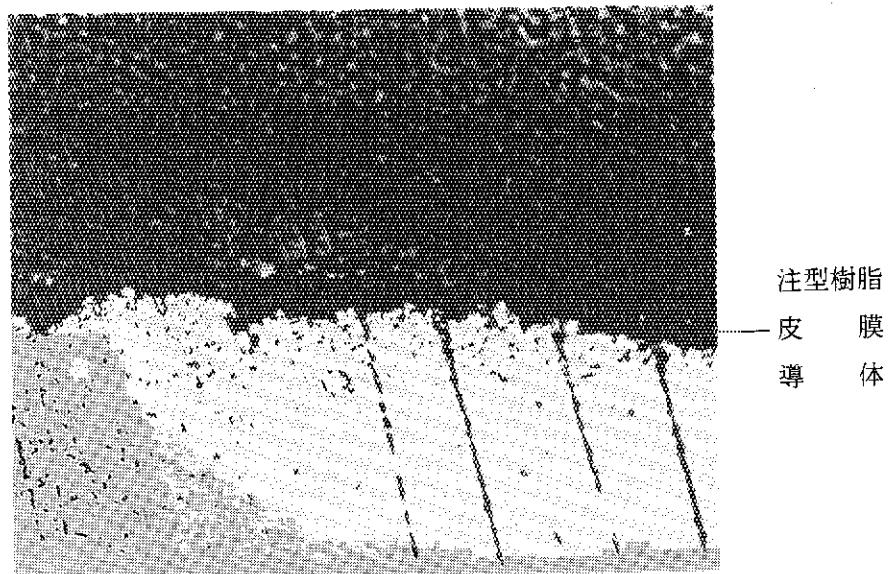


写真 A 3.8 断面観察 (No. 2) ($\times 1000$)



写真A3.8 断面観察 (No.3) ($\times 1000$)



写真A 3.8 断面観察 (No. 4) ($\times 1000$)



写真 A 3.9 ピンホールテスト状況

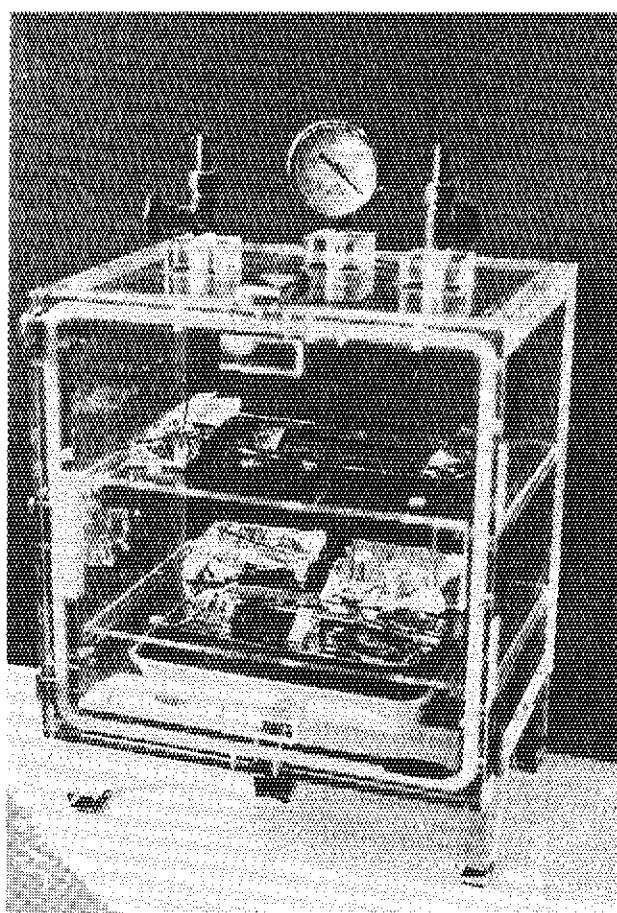
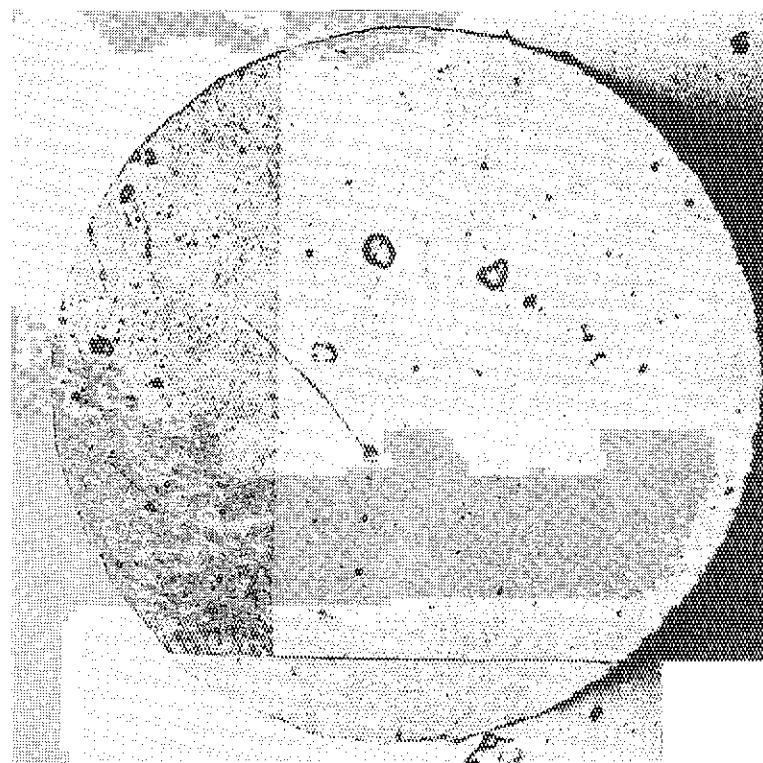


写真 A 3.10 サンプル保管状況

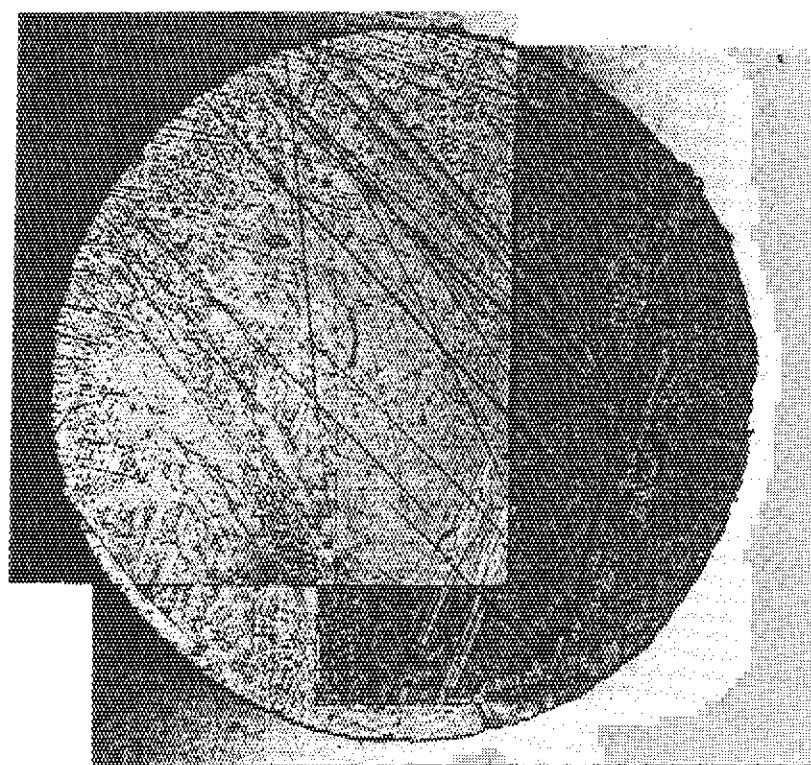
添付資料

無機絶縁電線の断面写真（倍率 100 倍）

(無機材質研究所殿 提供)



No. 1



No. 2

写真 A 3.11 無機絶縁電線の断面写真 (No. 1 ~ 2)

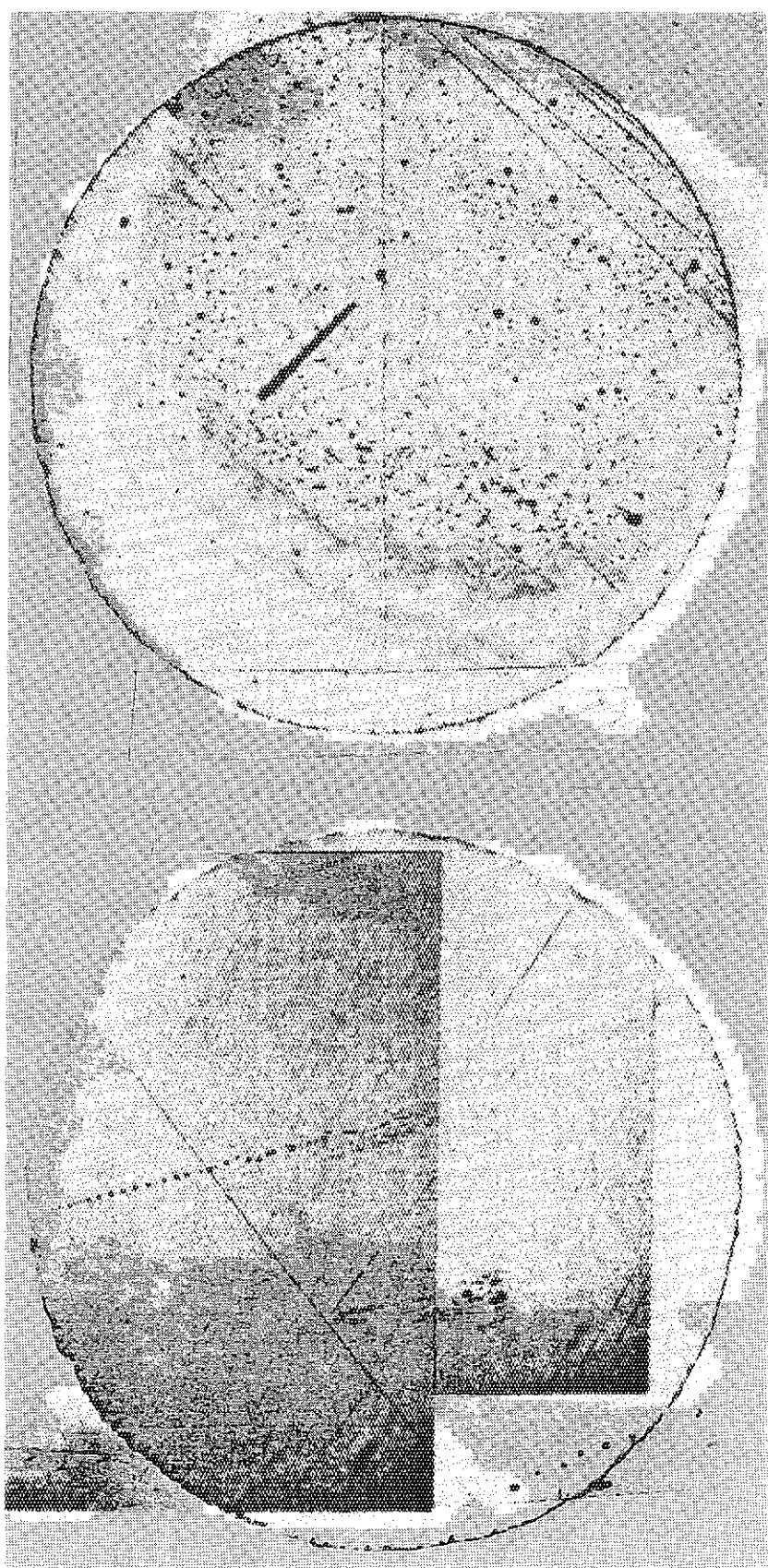


写真 A 3.11 無機絶縁電線の断面写真（No. 3～4）