JAEA-Research
2013-017

JAEA-Research

グローブボックス用導電性グローブの開発

—グローブの試作および性能評価—

Development of the Conductive Glove for Glove Box Operation

-Production of Prototypes and Their Experimental Results-

古田土 和雄　江沼 誠仁　川崎 猛　野上 嘉能
金子 一徳　木村 真則　安森 友和

Kazuo KODATO, Masahito ENUMA, Takeshi KAWASAKI, Yoshitaka NOGAMI
Kazunori KANEKO, Masanori KIMURA and Tomokazu YASUMORI

東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所
プルトニウム燃料技術開発センター

Plutonium Fuel Development Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Tokai Research and Development Center

February 2014

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

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構　研究技術情報部　研究技術情報課
〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2014

JAEA-Research 2013-017

グローブボックス用導電性グローブの開発
－グローブの試作および性能評価－

日本原子力研究開発機構東海研究開発センター
核燃料サイクル工学研究所プルトニウム燃料技術開発センター
古田土　和雄、江沼　誠仁、川崎　猛、野上　嘉能
金子　一徳※、木村　真則＊1、安森　友和＊2

（2013 年 6 月 27 日　受理）

プルトニウム燃料製造施設におけるグローブボックス用グローブには、素材としてクロロスルフォン化ポリエチレン系合成ゴム（以下、ＣＳＭゴムという）が多く用いられている。

ＣＳＭゴムは、主鎖に 2 重結合を有しない構造であることから、耐放射線性の観点で優れた素材であるが、直接α線が接触する環境では、劣化の進行が速くなる。

プルトニウム燃料製造施設では、グローブボックスにおいてプルトニウム粉末を直接取り扱うことから、グローブの劣化は、主として、グローブ表面に付着したプルトニウム粉末からのα線により生じることになる。そのため、グローブ表面へのプルトニウム粉末の付着を減少させることにより、グローブの劣化の進行を遅らせることができる。そこで、グローブ表面の静電気の発生を抑える導電性グローブを開発・試作試験し、グローブに要求される物性等の測定試験を実施した結果、従来のグローブと比較して、粉末が付着しづらいことを確認した。

核燃料サイクル工学研究所：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33
※　技術開発協力員
＊1　㈱コクゴ
＊2　三興化学工業㈱

JAEA-Research 2013-017

Development of the Conductive Glove for Glove Box Operation
－Production of Prototypes and Their Experimental Results－

Kazuo KODATO, Masahito ENUMA, Takeshi KAWASAKI
Yoshitaka NOGAMI, Kazunori KANEKO※
Masanori KIMURA*1 and Tomokazu YASUMORI*2

Plutonium Fuel Development Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Tokai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 27, 2013)

The glove used at glove boxes in the nuclear fuel plants is usually made with Chlorosulfonated polyethylene rubber. The rubber is excellent in terms of resistance to radiation because it has no double bond in its main chain of the component, however, it deteriorates rapidly in high dose environment such as direct contact of alpha ray. Plutonium oxide powder is treated in glove boxes at plutonium fuel facilities where the alpha ray from plutonium oxide powder adhered on surface of a glove causes the deterioration of the rubber. Therefore the effective method for prevent of the rapid deterioration is to decrease the amount of adhered powder, and the glove with conductive property which can prevent static electric charge on its surface has been developed and tested. The results showed that the rubber has less adherent property to powder compared with conventional one.

Keywords: Glove, Glove Box, Conductive Property, Plutonium Oxide Powder, Rubber

---

※ Collaborating Engineer
＊1 Kokugo Co.,Ltd.
＊2 Sanko Chemical Industry Co.,Ltd.

目　次

1.　緒言 …… 1
2.　ＣＳＭゴムへの導電性材料の配合試験 …… 2
　2.1　試験概要 …… 2
　2.2　配合液へのフィラー添加量確認試験 …… 2
　2.3　ゴム皮膜加工性確認試験 …… 3
　2.4　ゴム皮膜の物性評価試験 …… 4
　2.5　ゴム皮膜の導電性および粉末付着性の確認試験 …… 5
　2.6　まとめ …… 5
3.　導電性短型グローブの試作試験 …… 7
　3.1　試験概要 …… 7
　3.2　短型グローブの試作 …… 7
　3.3　試作グローブの物性測定・試験 …… 7
　3.4　粉末付着性の確認試験 …… 8
　3.5　試作グローブの改良 …… 9
　3.6　まとめ …… 11
4.　実装用導電性グローブの試作試験 …… 12
　4.1　試験概要 …… 12
　4.2　実装用グローブの試作 …… 12
　4.3　試作グローブの物性測定・試験 …… 12
　4.4　まとめ …… 13
5.　結　論 …… 14
参考文献 …… 14

Contents

1. Preface ····· 1
2. The examination which blends conductive materials with CSM rubber ····· 2
2.1 Examination outline ····· 2
2.2 The conducting material addition check test to combination liquid ····· 2
2.3 Rubber membrane workability check test ····· 3
2.4 The physical-properties evaluation test of Rubber membrane ····· 4
2.5 The check test of the conductivity of rubber membrane, and powder adhesion ····· 5
2.6 Summary ····· 5
3. The trial production examination of short model conductivity gloves ····· 7
3.1 Examination outline ····· 7
3.2 The trial production of short model gloves ····· 7
3.3 Physical-properties measurement and examination of trial production gloves ····· 7
3.4 The test of powder adhesion ····· 8
3.5 Improvement of trial production gloves ····· 9
3.6 Summary ····· 11
4. The trial production examination of the conductive gloves for mounting ····· 12
4.1 Examination outline ····· 12
4.2 The trial production of the gloves for mounting ····· 12
4.3 Physical-properties measurement and an examination of trial production gloves ····· 12
4.4 Summary ····· 13
5. Conclusion ····· 14

References ····· 14

図表リスト

表 2.1　導電性付与材 ･･･ 15
表 2.2　試作に使用したフィラー ･･･ 15
表 2.3　配合試験における合否の判定基準 ･････････････････････････････････････ 16
表 2.4　経時変化確認の合否評価基準 ･･･ 17
表 2.5.1　AG-B（アセチレンブラック 1～2mm 顆粒）の試験結果 ･････････････････ 18
表 2.5.2　OB-85（オイルファーネスブラック 85nm）の試験結果 ･････････････････ 18
表 2.5.3　CB-55（チャンネルブラック 55nm）の試験結果 ･････････････････････ 19
表 2.5.4　CB-23（チャンネルブラック 23nm）の試験結果 ･････････････････････ 19
表 2.5.5　CB-19（チャンネルブラック 19nm）の試験結果 ･････････････････････ 20
表 2.5.6　CB-30（チャンネルブラック 30nm）の試験結果 ･････････････････････ 20
表 2.5.7　KB-P（ケッチェンブラック　ペースト状）の試験結果 ･････････････････ 21
表 2.5.8　KP-G（ケッチェンブラック　顆粒）の試験結果 ･････････････････････ 21
表 2.6　ゴム皮膜加工性の確認方法と合否判定基準 ･････････････････････････････ 22
表 2.7　ゴム被膜加工性試験結果 ･･･ 23
表 2.8　ゴム皮膜の物性測定・試験方法 ･････････････････････････････････････ 24
表 2.9　ゴム皮膜の物性等の合否判定基準 ･････････････････････････････････････ 24
表 2.10　ゴム皮膜の物性測定結果 ･･･ 25
表 2.11　ゴム皮膜の導電性および粉末付着性試験の合否判定基準 ･････････････････ 26
表 2.12　ゴム皮膜の体積固有抵抗率および表面抵抗率の測定結果 ･････････････････ 26
表 2.13　ゴム皮膜の粉末付着性試験結果 ･････････････････････････････････････ 27
表 2.14　作製した導電性ゴム皮膜の物性値 ･････････････････････････････････････ 28
表 3.1　短型グローブ加工性の確認方法と合否判定基準 ･････････････････････････ 28
表 3.2.1　短型グローブの物性測定・試験方法（1） ･････････････････････････････ 29
表 3.2.2　短型グローブの物性測定・試験方法（2） ･････････････････････････････ 30
表 3.3.1　試作グローブの物性測定・試験結果 ･････････････････････････････････ 31
表 3.3.2　試作グローブのピンホール試験・耐電圧試験結果 ･････････････････････ 31
表 3.4　試作グローブの粉末付着性試験結果 ･････････････････････････････････ 32
表 3.5.1　表層のみに導電性を有する試作グローブの物性測定・試験結果 ･････････ 33
表 3.5.2　表層のみに導電性を有する試作グローブのピンホール試験・耐電圧試験結果 ･ 33
表 3.6　表層のみに導電性を有する試作グローブの粉末付着性確認結果 ･････････････ 34
表 4.1　実装着試作グローブの物性測定・試験結果 ･････････････････････････････ 35
表 4.2　実装用試作グローブの粉末付着性試験結果 ･････････････････････････････ 36
図 2.1　導電性材料配合試験手順 ･･･ 37
図 2.2　フィラー添加条件確認試験で使用した装置類 ･････････････････････････････ 38
図 2.3　被膜加工性確認試験で使用した装置類 ･････････････････････････････････ 38
図 2.4.1　フィラー添加量と引張強さの関係 ･････････････････････････････････ 39
図 2.4.2　フィラー添加量と最大伸びの関係 ･････････････････････････････････ 39
図 2.4.3　フィラー添加量と老化残留率（強さ）の関係 ･････････････････････････ 39
図 2.4.4　フィラー添加量と老化残留率（伸び）の関係 ･････････････････････････ 39
図 2.4.5　フィラー添加量と突き刺し強度の関係 ･････････････････････････････ 40
図 2.4.6　フィラー添加量と引裂強度の関係 ･････････････････････････････････ 40
図 2.4.7　フィラー添加量と 100%引張応力の関係 ･････････････････････････････ 40
図 3.1　導電性短型グローブ試作試験手順 ･････････････････････････････････････ 41

図 3.2　短型グローブ試作に使用した装置類 ･････････････････････････････････････ 42
図 3.3　試作グローブの物性測定・試験装置類 ･････････････････････････････････････ 43
図 3.4　ピンホール試験可能な導電性鉛入りＣＳＭゴムグローブの構造 ･････････････ 43
図 4.1　実装用導電性グローブ試作試験手順 ･････････････････････････････････････ 44
図 4.2　実装用グローブ試作に使用した装置類 ･････････････････････････････････････ 45

1. 緒　言

プルトニウムを取扱うグローブボックス用のゴム製のグローブには、劣化によるひび割れ発生などによる放射性物質の漏えいを防止する観点から、耐放射線性が要求される。放射線によるゴムの劣化は、主に放射線によるラジカルの生成により生じることから、ラジカルを生成しやすい不飽和結合がゴムの化学構造に含まれない素材ほど、耐放射線性に優れる。現在、プルトニウム燃料施設では、そのような視点から、主鎖に二重結合を有しないクロロスルホン化ポリエチレン系合成ゴム（以下ＣＳＭゴムという）製のグローブを主に使用している。

グローブボックスでプルトニウム粉末を取扱う場合、グローブの放射線劣化は、主としてグローブ表面に付着したプルトニウム粉末からのα線が原因となる[1)]。よって、プルトニウム粉末の付着量が多くなると、グローブの劣化の進行が速くなる。さらに、プルトニウムの娘核種であるアメリシウムからのγ線により、作業員の被ばく量の増加にも繋がる。

そこで、グローブ表面へのプルトニウム粉末の付着を減少させることを目的として、グローブ表面への粉末付着の主な要因であると考えられる静電気の発生を抑えるために、導電性グローブを開発することとした。

ゴムは本来電気絶縁体であるが、静電気除去や帯電防止などの目的で、ゴムに導電性を付与したゴム製品が一般産業界において広く使用されている。導電性ゴムは、天然ゴム、合成ゴムなどのゴム素材に導電性のカーボンブラックや金属粉末を配合して製造することが一般的である。グローブボックス用グローブへの導電性の付与も同様な方法で可能と考えられることから、耐放射線性に優れておりグローブボックス用グローブ用として最も優れた材料であると考えられるＣＳＭゴムを素材として、それに適切な導電性材料を配合することで、導電性グローブを開発することとした。

本開発においては、以下のようにステップ毎に目的を設定し、それに応じた試験を計画・実施している。

第１段階；導電性材料の選択とその適切な添加量の決定

第２段階；第１段階の結果に基づくグローブの試作と性能の確認

第３段階；実装試験用グローブの製作と性能評価

最終段階；グローブボックスでの実装性能の確認

本報告書では、第３段階までの試験結果を報告する。

2.　ＣＳＭゴムへの導電性材料の配合試験

2.1　試験概要

加硫ゴムの体積固有抵抗エラストマーの種類によって異なるが、加硫天然ゴムの電気絶縁性の場合、通常 10^{15}Ω・cm 程度で電気絶縁性が優れている。しかし、配合剤の種類及び量を適当に選べば、これを 1～10^{15}Ω・cm の間に低下させることができる。このように、体積固有抵抗を低下させた加硫ゴムを導電性ゴムという[2)]。ゴムに導電性を付与する材料（フィラー）としては、表 2.1 に示す材料がある。

本試験では、これらのフィラーの中から、導電性、安定性、コストなどの観点から、カーボンブラックを選定し、その中で製法や粒度が異なるものについて、ゴムに対するフィラーの添加量をパラメータとして、現状のＣＳＭゴムグローブ製造方法と同様な方法でゴム皮膜（グローブと同様な厚みを有するゴム膜）を作製し、各種試験を実施した。試験の手順を図 2.1 に示す。電気抵抗値の目標としては、一般的に導電性材料とされる 10^{7}Ω・cm 以下とし、体積抵抗率（単位体積当たりの抵抗）、表面抵抗率（単位面積当たりの抵抗）ともに、目標値を達成できることとした。

導電性グローブは、プルトニウム粉末の取扱量が多い高線量のグローブボックスに取付けることを想定していることから、鉛入りＣＳＭゴムグローブに導電性を持たせることを想定した。鉛入りグローブは鉛入りＣＳＭゴム層を通常のＣＳＭゴム層で挟み込んだ 3 層構造であるが、表面層材質に導電性があれば、中間層（鉛層）が絶縁性被膜であっても、表面層素材により放電され帯電することはないと考えられる。このことから表面層材質であるＣＳＭゴムに導電性を持たせることにより、中間層へのフィラーの添加は必要がない。

よって、今回の試験では、鉛を含有させない通常のＣＳＭゴムに導電性を付加したゴム皮膜を作製した。

2.2　配合液へのフィラー添加量確認試験

導電性のゴム皮膜を作製するためには、型に浸せきさせる配合液にフィラーを添加する必要がある。そこで、適切な性質を有する配合液を得るためのフィラー添加量を確認するための試験を実施した。

2.2.1　試作に使用したフィラー

フィラーは、主流となっているカーボンブラックから 4 種類を使用した。また、粒径の違いが試作品の品質に与える影響を確認するために、同一種類で平均粒径の異なるものも使用した。試作に使用したフィラーを表 2.2 に示す。

2.2.2　フィラー添加量のパラメータ

フィラー添加量は、まずゴムに対して重量比 5%（ゴム：フィラー＝100：5）とし、ニーダ配合、ロール配合、ロール切断、溶解、異物除去の何れのプロセスでも問題が発生しないものについて、添加量を 10%、15%、30%と増やしていくことにした。なお、2 種類のフィ

ラーについて試験を実施した時点において、添加量 10%については、満足な結果が得られる可能性が小さいと判断し、それ以降の試験では、添加率 10%の試験は省略した。

2.2.3　試験方法

現行のＣＳＭゴムグローブの配合液作製と同様の手順（ニーダ配合、ロール配合、ロール切断、溶解、異物除去）において、フィラーを添加した場合に、配合性が良好であり配合液が問題なく作製できるかどうかを確認した。配合試験における合否の判定基準を表 2.3 に示す。試験に使用した装置を図 2.2 に示す。

2.2.4　経時変化確認

配合液は工程上 60 日間程度の経時変化で液性の変化がないことが必要となるため、60 日間の液性の変化を確認した。経時変化確認における合否の判定基準を表 2.4 に示す。

2.2.5　試験結果

各フィラーの試験結果から、判断基準を満足するフィラーおよびその添加量は、以下のとおりであった。

AP-G（アセチレンブラック 1～2mm 顆粒）　5%および 10%
CB-55（チャンネルブラック 55nm）　5%および 15%
CB-30（チャンネルブラック 30nm）　5%、15%および 30%
CB-23（チャンネルブラック 23nm）　5%および 15%
KP-G（ケッチェンブラック　顆粒）　5%および 15%

試験結果を表 2.5.1～2.5.8 に示す。

2.3　ゴム皮膜加工性確認試験

配合液からゴム皮膜に加工する工程において、フィラーを添加しない場合と同様の加工性を有する必要があることから、フィラーを添加した配合液のゴム皮膜への加工性を確認するための試験を実施した。

2.3.1　試験方法

2.2 節の試験で良好であった 11 種類の配合液について、ゴム皮膜作製の各工程（配合液の浸せき、乾燥、ビード加工、加硫、離型）において、ゴム皮膜が適切に加工できるための条件を満足しているかどうかを確認した。なお、実際に使用するグローブの製造のために必要となる、ビード加工、および 3 層構造とするための積層皮膜加工についても、参考として数種類の配合液について問題の有無を確認した。本試験において使用した装置を図 2.3 に示す。本試験における合否の判定基準を表 2.6 に示す。

2.3.2　試験結果

全ての配合液について良好な結果が得られた。また、ビード加工性、積層皮膜加工性についても、良好な結果であった。試験結果を表 2.7 に示す。

2.4　ゴム皮膜の物性評価試験

2.3 節の試験で加工されたゴム皮膜について、現行のＣＳＭゴムグローブとの強度等の物性の比較評価を実施した。

2.4.1　試験方法

以下のゴム皮膜および現行グローブの物性を測定した。

・AP-G 添加量 5%および 10%のゴム皮膜；略称 AP-G(5)、AP-G(10)
・CB-55 添加量 5%および 15%のゴム皮膜；略称 CB-55(5)、CB-55(15)
・CB-30 添加量 5%、15%および 30%のゴム皮膜；略称 CB-30(5)、CB-30(15)、CB-30(30)
・CB-23 添加量 5%および 15%のゴム皮膜；略称 CB-23(5)、CB-23(15)
・KP-G 添加量 5%および 15%のゴム皮膜；略称 KP-G(5)、KP-G(15)
・ＣＳＭゴムグローブ（三興化学工業㈱製、CL-W）；略称 CL-W

測定項目は、ゴムの物性を示す以下の 6 項目とした。

1) 引張強さ
2) 最大伸び
3) 老化残留率（強さおよび伸び）
4) 突き刺し強度
5) 引裂強度
6) 100%引張応力

それぞれの物性測定・試験方法を表 2.8 に示す。本試験における合否の判定基準を表 2.9 に示す。

2.4.2　試験結果

ゴム皮膜およびＣＳＭゴムグローブの物性測定結果並びにＣＳＭゴムグローブの規格値を表 2.10 に示す。各種物性値とフィラー添加量との関係を図 2.4.1～図 2.4.7 に示す。

試験に供した全てのゴム皮膜について、全ての物性がＣＳＭゴムグローブの規格値を満足していることが確認できた。また、現行のＣＳＭゴムグローブの物性値に対しては、最大伸びは劣るものの、その他の物性については同等または優れる値を示した。フィラー添加によって、現行のＣＳＭゴムグローブと比較して、強度が高くなる一方で最大伸びが低下したことは、ゴム皮膜としては硬くなっていることを示している。

フィラー添加量が増加した場合の各物性値との変化としては、引張強さ、最大伸び、老化残留率（強さ）、突き刺し強度については低下、引裂強度、100%引張応力については増加、老化残留率（伸び）についてはほぼ変化なし、という傾向が見られた。フィラーの種類と物

性値との関係において、全体的な特徴は見られなかったが、KP-G のみ、100%引張応力が高くなる傾向にあった。

2.5　ゴム皮膜の導電性および粉末付着性の確認試験

2.4 の試験に供した全てのゴム皮膜について、期待した導電性および粉末付着性が得られているかどうかを確認するための試験を実施した。

2.5.1　試験方法

ゴム皮膜および現行ＣＳＭゴムグローブについて、以下の項目の測定・試験を実施した。

1) 導電性の確認（体積固有抵抗率および表面抵抗率の測定）

(財)化学物質評価研究機構に以下の測定を依頼した。

測定方法；JIS K6271　加硫ゴムおよび熱可塑性ゴムー体積抵抗率および表面抵抗率の求め方

試験方法；二重リング電極法

測定機器；体積固有抵抗率・表面抵抗率測定器

2) 粉末付着性の確認

一般的に流通している発泡スチロールをヤスリで削り、発泡スチロールの粉体を作製する。ゴム皮膜をカードケースに入れ、ナイロンなどで擦り、一時的に帯電させる。カードケースからゴム皮膜を取り出し、ゴム皮膜を発泡スチロール粉体から一定距離（20mm）離した状態で、発泡スチロールの付着性を確認する。

体積固有抵抗率および表面抵抗率は一般的に導電性材料とされる 10^7Ω・cm 以下を目標値としたが、目標値を達成しない場合でも、目標値に近い値となったゴム皮膜については、粉末付着性を確認することとした。本試験における合否判定基準を表 2.11 に示す。

2.5.2　試験結果

体積固有抵抗率および表面抵抗率の測定結果を表 2.12 に示す。体積固有抵抗率および表面抵抗率ともに目標値を達成したものは無かったが、目標値に近い値を示した CB-30(30)および KP-G(15)について、粉末付着性を確認した。

粉末付着性試験の結果を表 2.13 に示す。現行ＣＳＭゴムグローブには多数の発泡スチロールが付着した一方で、CB-30(30)および KP-G(15)は、両方ともに発泡スチロールの付着がなく良好な状態であり、導電率の向上によりゴム表面に粉末が付着しづらくなることが確認できた。

2.6　まとめ

本試験において、8 種類のカーボン系フィラーを現行ＣＳＭゴムグローブの作製過程で 5～30%添加し、それぞれの配合液の性質、ゴム皮膜への加工性、ゴム皮膜の物性、導電性および粉末付着性を確認した結果、

CB-30(30)のゴム皮膜（平均粒径 30nm のカーボンブラックを 30%添加して作製したもの）
KP-G(15)のゴム皮膜（顆粒状のケッチェンブラックを 15%添加して作製したもの）
が何れも良好な物性を示した。なお、導電性については、当初の目標値には達しなかったが、発泡スチロールが付着しなかったことから良好と判断できる。これらのゴム皮膜の物性値をまとめて表 2.14 に示す。

以上のことから、これらのゴム皮膜を作製した条件を用いてＣＳＭゴムグローブを作製することにより、当該グローブに導電性を持たせ、表面への MOX 粉末の付着を少なくすることができると考えられる。

実装用グローブを製造することを考慮した場合に、CB-30(30)と KP-G(15)を比較すると、KP-G(15)が優れている。その理由は、

1) フィラー添加量が CB-30(30)の半分であり、コスト面で有利である（CB-30(30)と比較して約 5%安くなる）。
2) フィラー添加量が少ないことにより、100%引張応力が低い値になっていることから、グローブとして KP-G(15)の方が軟らかく感じることになり、使用しやすい。

よって、開発する導電性鉛入りＣＳＭゴムグローブとしては、顆粒状ケッチェンブラックを 15%添加したものに絞ることとする。また、開発過程において問題が生じた場合の予備候補を、CB-30(30)（平均粒径 30nm カーボンブラックの 30%添加）とする。

3. 導電性短型グローブの試作試験

3.1 試験概要

グローブボックスに実装する導電性鉛入りＣＳＭゴムグローブの作製に向けて、作製条件に関するデータを取得するために、小規模試験として、短型グローブを試作した。短型グローブは、鉛入りＣＳＭゴムグローブと同じ工程で作製し、その過程で 2 章の試験結果をもとに、導電性材料を配合した。グローブに加工するための型は、実装用のものよりも短尺のものを使用した。試作した短型グローブの品質を確認するために、各種物性測定・試験を実施した。試験フローを図 3.1 に示す。

3.2 短型グローブの試作

3.2.1 試作グローブに添加するフィラーの種類と量

ＣＳＭゴムグローブへの導電性材料の配合試験結果から、15%の顆粒状ケッチェンブラックを試作グローブの表裏層に添加することとした。

3.2.2 試作方法

現行鉛入りＣＳＭゴムグローブ（XL-W）と同様の手順（ニーダ配合、ロール配合、ロール切断、溶解、異物除去）で配合液を作製した。フィラーの添加は、ニーダ配合時に実施した。XL-W と同じ表層、中間層、裏面の 3 層構造とするために、配合液に、型を 3 回浸せきさせ、乾燥させたのち、ビード加工を行い、型から離すことで短型グローブを作製した。試験に使用した装置を図 3.2 に示す。短型グローブの加工性に関する合否の判定基準を表 3.1 に示す。

3.2.3 試作結果

配合液の作製においては、XL-W 製造時の配合液と同様の配合性・溶解性があり、配合液として問題なく使用できることが確認できた。

短型グローブへの加工における浸せきから離型の過程において、合否判定基準は全て満足しており、作製されたグローブの外観も問題ないことを確認できた。

以上により、所定のフィラーを添加しても、短型グローブは問題なく加工できると判断できる。このことから、実装用グローブも問題なく作製できると考えられる。

3.3 試作グローブの物性測定・試験

3.3.1 物性測定・試験方法

XL-W と試作グローブの性能を比較するために、XL-W の規格になっている物性・試験項目について、測定・試験を実施した。測定・試験項目と使用した装置類は以下のとおり。

1) ピンホール試験／耐電圧試験機
2) 強度検査・永久伸び・引裂試験／ショッパー型抗力試験機
3) 空気加熱老化試験／ギャー式老化試験機

4) 突き刺し試験・硬度試験／万能試験機
5) オゾン劣化試験／オゾンウェザーメーター
6) 硬度試験／スプリング式タイプ A　硬度測定機
7) 鉛当量試験／X 線発生器・X 線検出器・X 線発生装置
8) 電気的特性／体積固有抵抗率・表面抵抗率測定器

使用した装置類を図 3.3 に示す。物性測定・試験方法を表 3.2.1、3.2.2 に示す。

3.3.2　試験結果

物性測定・試験結果を表 3.3.1 および表 3.3.2 に示す。試作グローブは、ピンホール試験および永久伸びを除く全ての物性測定・試験項目において、XL-W の基準を満足していた。XL-W と比較して差を生じたものなどについての考察を以下に示す。

1) 最大伸び

試作グローブは、XL-W の判定基準下限値であった。2 章の試験結果では、ゴム皮膜の最大伸びは 450%であったが、3 層構造になったことにより、中間層最大伸びの値が下がったものと考えられる。

2) 永久伸び

試作グローブは、僅かに判定基準外となったが、これは、最大伸びが 400%であるにも係わらず、永久伸び試験で 300%まで伸ばした影響と考えられる。つまり、XL-W の場合、最大伸びが 600%であるため、永久伸び試験で 300%まで伸ばしても、最大伸びの 50%の伸ばし率になる。一方で、試作グローブでの伸ばし率が 75%と大きいため、永久伸びも大きくなってしまう。そこで、永久伸び試験を、最大伸びの 50%の伸ばし率として測定したところ、試作グローブでも永久伸びは 5%となり、判定基準を満足することになった。よって、今後、永久伸び試験の方法は、検討する必要がある。

3) 硬度試験

試作グローブは、XL-W よりも硬い傾向にある。100%引張応力においても同様に XL-W より高い値を示し、やはり硬い傾向が認められる。

4) 電気的特性

試作グローブは、判定基準の $10^8\Omega$ 以下であり、導電性を有しているものと考えられる。

5) ピンホール試験

ピンホール試験は、グローブに電圧を掛け、グローブに流れた電流からピンホールの有無を判別するものであるが、試作グローブは導電性を有するために、電流が流れやすく、ピンホールの判別ができないことが分かった。表 3.3.2 に示したように、実際にピンホールをあけた試作グローブを測定しても、ピンホールが無い試作グローブと測定結果はほぼ同じである。よって、代替方法について検討する必要がある。

3.4　粉末付着性の確認試験

試作グローブと XL-W について、2.5.1 項のゴム皮膜の試験と同じ方法で、粉末付着性の確認試験を実施した。その結果、XL-W には多数の発泡スチロールが付着した一方で、試作

グローブには発泡スチロールの付着がなく良好な状態であり、ゴム表面に粉末が付着しづらくなることが確認できた。粉末付着性試験の結果を表 3.4 に示す。

3.5　試作グローブの改良

3.5.1　試作グローブの課題と解決策

グローブの使用前にピンホールの有無を確認しておくことは、安全上必須であり、何等かの方法でピンホール試験を実施する必要がある。試作した短型グローブでは、従来の耐電圧試験が実施できないことが判明したため、そのままでは、実用化できない。そこで、耐電圧試験が実施できる方法を検討することとした。

鉛入りＣＳＭゴムグローブは、3 層構造になっており、中間層に鉛を配合したＣＳＭゴムとしている。試作短型グローブでは、導電性をグローブに付与するために、表層および裏層の両面にフィラーを添加したＣＳＭゴムとしたため、表面、裏面ともに電気抵抗が小さくなり、耐電圧試験ができなかった。そこで、粉末の付着を抑制する必要があるグローブボックス内側になる面（表層）のみに導電性を持たせ、裏層は、通常のＣＳＭゴム層となるグローブを試作し、ピンホール試験と裏層の材質の変更による物性変化の確認を実施することとした。図 3.4 にグローブの構造を示す。

3.5.2　表層のみ導電性を有する短型グローブの試作

図 3.1 の導電性グローブ試作試験手順に、裏層用の配合液（フィラー、鉛ともに添加しないもの）に調製を加え、型への浸せき工程では、表層用配合液（フィラーが添加されたもの）、鉛層用配合液、裏層用配合液の順に型を浸せきさせた。それにより表層のみに導電性を有する 3 層構造の短型鉛入りＣＳＭゴムグローブを試作した。試作過程では、加工性の評価も行った。試作で使用した装置および加工性に関する合否の判定基準は、最初に試作した短型グローブと同様である。

試作した結果、加工性に問題がないことが確認できた。

3.5.3　表層のみ導電性を有する短型グローブの物性測定・試験

表層のみ導電性を有する短型グローブの物性測定・試験を実施した。測定・試験項目、測定・試験方法および使用した装置類は最初に試作した短型グローブと同様である。

測定・試験結果を表 3.5.1 および表 3.5.2 に示す。試作グローブは、全ての物性測定・試験項目において、XL-W の基準を満足していた。XL-W および最初に試作した短型グローブ（表裏層ともに導電性のもの）と比較して差を生じたものなどについての考察を以下に示す。

1）最大伸び

表層のみ導電性の試作グローブは、最初に試作したグローブと比較して、最大伸びは 2 割増加した。これは、伸びを低くする導電性の層を片面のみにした効果と考えられる。

2) 永久伸び

最初に試作したグローブは、僅かに判定基準外であったが、表層のみ導電性の試作グローブでは、判定基準を満足した。これは、最大伸びが増加したことにより、永久伸び試験における 300%の伸びに対して余裕が生じたことによると考えられる。よって、表層のみ導電性のグローブでは、最初に試作したグローブにおいて課題になった永久伸びの試験方法については、従来通りで良いことになる。

3) 硬度試験

表層のみ導電性の試作グローブは、XL-W よりも硬い傾向にあるが、ゴムを硬くする導電性の層を片面のみにしたことにより、最初に試作したグローブよりも若干軟らかくなっている。

4) 電気的特性

表層のみ導電性の試作グローブは、判定基準の $10^8\Omega$ 以下であり、導電性を有しているものと考えられる。最初に試作したグローブよりも導電性が大幅に向上しているが、この原因は不明である。

5) ピンホール試験

耐電圧試験の結果、表面のみ導電性の試作グローブは 5000V でも漏えい電流値は 16.3mA に留まり、十分な絶縁性を有することが確認できた。現行鉛入りＣＳＭゴムグローブと比較して、漏えい電流は、平均 1.52 倍である。これにより、耐電圧試験によりピンホールの発見が可能である。

この試験結果を基に、実装用導電性グローブのピンホール試験における試験条件合否判定基準を検討する。印加電圧については、感度の観点からできるだけ高い方が良いことから、5000V に設定する。合否判断基準については、漏えい電流が、現行鉛入りＣＳＭゴムグローブに対して、表層のみ導電性の試作グローブは 1.52 倍であったこと、実装用導電性グローブと同じ長さ（800mm）の現行鉛入りＣＳＭゴムグローブの印加電圧 5000V での漏えい電流が 28.0mA であったことから、ピンホールの無い実装用導電性グローブの予想される漏えい電流は、

28.0mA×1.52＝42.7mA

となることから、この約 1.5 倍の漏えい電流であればピンホールが無いと判断し、60mA とする。

3.5.4　粉末付着性確認

表層のみ導電性の試作グローブの粉末付着性について確認した結果、導電性を有する表層に発泡スチロールが付着しなかったことから、ゴム表面に粉末が付着しづらくなることが確認できた。一方だけでなく、導電性を有しない裏層についても同様粉末が付着しづらい性質であることが確認できたことから、表層への導電性付与が裏層の粉末付着性にも影響したものと考えられる。（表 3.6）

3.6　まとめ

本試験の結果、最初に試作した表裏層ともに導電性の短型グローブについては、加工性は良好であり、物性についても問題ないものであったが、導電性のために耐電圧試験によるピンホール試験が実施できないという問題が生じた。そこで表層のみを導電性とした短型グローブを試作したところ、ピンホール試験が実施可能であることが確認できた。さらに、同グローブは、加工性も良好であり、物性については硬さや伸びの面で改善が図られ、グローブ表面に粉末が付着しづらいことが確認できた。

これらのことより、表層のみ導電性とした短型グローブの試作と同様な方法で、実装試験用のグローブも製作できる見通しが得られた。なお、表層のみ導電性を有するグローブを製作する場合､配合液を 3 種類とする必要が生じることから､液槽が 1 つ多く必要になること、型の移動が必要になることなどにより、XL-W と比較して、約 1.3 倍のコストになる（両面導電性の場合は、約 1.1 倍）。

4. 実装用導電性グローブの試作試験

4.1 試験概要

導電性短型グローブの試作試験結果をもとに、グローブボックスに実装するための導電性鉛入りＣＳＭゴムグローブを試作し、その加工性を確認するとともに、品質を確認するために、各種物性測定・試験を実施した。試験フローを図 4.1 に示す。

4.2 実装用グローブの試作

4.2.1 実装用試作グローブに添加するフィラーの種類と量

実装用試作グローブの表層に、15%の顆粒状ケッチェンブラックを添加した。

4.2.2 試作方法

XL-W と同様の手順（ニーダ配合、ロール配合、ロール切断、溶解、異物除去）で配合液を作製した。フィラーの添加は、表層用配合液のニーダ配合時に実施した。XL-W と同じ表層、中間層、裏面の 3 層構造とするために、3 種類の配合液（表層用のみフィラーを添加）のそれぞれに型を浸せきさせ、乾燥させたのち、ビード加工を行い、型から離すことで実装用グローブを作製した。試験に使用した装置を図 4.2 に示す。グローブの加工性に関する合否の判定基準は短型グローブと同じである。（表 3.1）

4.2.3 試作結果

配合液の作製においては、XL-W 製造時の配合液と同様の配合性・溶解性があり、配合液として問題なく使用できることが確認できた。

実装用グローブへの加工における浸せきから離型の過程において、合否判定基準は全て満足しており、作製されたグローブの外観も問題ないことを確認できた。

以上により、実装用試作グローブの加工性は良好であった。

4.3 試作グローブの物性測定・試験

4.3.1 物性測定・試験方法

XL-W と試作グローブの性能を比較するために、XL-W の規格になっている物性・試験項目について、測定・試験を実施した。測定・試験項目と使用した装置類は短型グローブの場合と同様である。（図 3.3、表 3.2.1、3.2.2）

4.3.2 試験結果

物性測定・試験結果を表 4.1 に示す。実装用試作グローブは、全ての物性測定・試験項目において、XL-W の基準を満足しているとともに、電気的特性以外は、殆どが XL-W と類似した値を示しており、XL-W と遜色ない性質を有していると言える。

4.3.3　粉末付着性の確認試験

試作グローブと XL-W について、2.5.1 項のゴム皮膜の試験と同じ方法で、粉末付着性の確認試験を実施した。その結果、XL-W には多数の発泡スチロールが付着した一方で、実装用試作グローブには発泡スチロールの付着がなく良好な状態であり、ゴム表面に粉末が付着しづらくなることが確認できた。粉末付着性試験の結果を表 4.2 に示す。

4.4　まとめ

本試験の結果、実装用の導電性試作グローブについては、加工性は良好であり、物性値から XL-W に対しても遜色ない性質を有しており、グローブ表面に粉末が付着しづらいことも確認できた。

このことにより、本試験における作製方法で、実装用の導電性グローブの製造が可能であると考えられる。

5. 結　論

グローブの劣化や作業員の被ばくの原因となるグローブ表面へのプルトニウム粉末の付着を減少させることを目的として、グローブ表面への粉末付着の主な要因である静電気の発生を抑えるために、XL-W に導電性を付与させることを試みた。

ゴムに導電性を付与するために、ゴムに配合するフィラーを選定するための試験を実施した結果、カーボンブラックの一種である顆粒状のケッチェンブラックを 15%配合することで、ゴムに良好な導電性を与えることができた。フィラーを配合した短型グローブを、XL-W と同様の作製方法で試作したところ、グローブへの加工性、物性および粉末付着性については良好であったものの、導電性を付与したことによりグローブの検査項目として必須であるピンホール試験ができないことが判明した。

この原因は、3 層構造になっているゴムの表層と裏層の両方に導電性を付与したことにより、耐電圧試験において大きい漏えい電流が発生してしまうためであったため、表層のみに導電性を付与した結果、XL-W の 1.5 倍程度の漏えい電流にすることができ、ピンホール試験が可能になった。そこで、XL-W と同じ寸法の実装用導電性グローブを、表層のみに導電性を付与させて試作した。その結果、加工性、物性および粉末付着性について、いづれも良好であり、ピンホール試験も可能であった。

以上のように、導電性の鉛入りＣＳＭゴムグローブを作製する方法を確立させることができた。

今後、試作したグローブをプルトニウムを取り扱っているグローブボックスに装着し、プルトニウム粉末のグローブ表面への付着性を確認するとともに、グローブの劣化や被ばく量の低減への効果を確認していく予定である。

参考文献

1) 齋藤浩介他，プルトニウム燃料施設におけるグローブボックス用グローブ材の模擬アルファ線照射効果試験、JAEA-Research 2012-027，2012.

2) 日本ゴム協会，ゴム用語辞典，1978 年.

表 2.1　導電性付与材

系　統	分　類	種　類	特　徴
カーボン系	カーボンブラック	アセチレンブラック	高純度
		ｵｲﾙﾌｧｰﾈｽﾌﾞﾗｯｸ	高導電性
		チャンネルブラック	低導電性・低コスト
		ケッチェンブラック	高性能・高品質
		他	低コスト
	カーボンファイバー	PAN 系	高コスト
		ピッチ系	難加工性
金属系	金属微粉末	金、銀、銅	酸化変質有り
	金属酸化物	酸化亜鉛	低導電性
その他	導電性高分子	ﾎﾟﾘｱﾆﾘﾝ系高分子	難加工性
	単独ゴム	スチレンゴム	良耐候性

表 2.2　試作に使用したフィラー

分類	種類	平均粒径	フィラーの略称
カーボンブラック	アセチレンブラック	1～2mm（顆粒）	AP-G
	ｵｲﾙﾌｧｰﾈｽﾌﾞﾗｯｸ	85nm	OB-85
	チャンネルブラック	55nm	CB-55
		30nm	CB-30
		23nm	CB-23
		19nm	CB-19
	ケッチェンブラック	ペースト状	KB-P
		2～4mm（顆粒）	KP-G

表 2.3　配合試験における合否の判定基準

手　順	工　程	判定基準
1	ニーダ配合	ニーダで原料ゴムとカーボンを混練したときに、 ○：原料ゴムとカーボンが均一に混練でき、機械的に問題ない。 ×：原料ゴムとカーボンが均一に混練できない、若しくは機械的に問題がある。
2	ロール配合	混練ゴムをロール機作業したときに、 ○：薬品の分散が均一に行われ、シート状に加工できる。 ×：薬品の分散が均一に行われない、若しくはシート状に加工できない。
3	ロール切断	ゴムシートを切断機に通したとき ○：ゴムシートを 10mm 程度に切断できる。 ×：切断できない、若しくは粘着する。
4	溶　解	アジターで切断ゴムを溶解したとき （カーボンフィラーの場合） ○：8 時間以内で溶解できる ×：溶解に 8 時間以上を必要とする。 （金属酸化物フィラーの場合） ○：フィラーを添加しても分散し、発熱しない。 ×：フィラーを添加するとゲル化する、発熱するなど。
5	異物除去	配合液を 120 メッシュ網でろ過したとき ○：スムーズにろ過できる。網に異物が殆ど残らない。 △：ろ過できるが、時間を要する。 ×：ろ過できない、網に異物が多く残る。

表 2.4　経時変化確認の合否評価基準

測定・観察項目	判定基準
粘度測定	溶解から 1 日後、7 日後、14 日後、28 日後、40 日後、60 日後の測定において、 ○：溶解初期の粘度が 3000cps 以下であること。 ○：前回測定値から 2000cps 以上上昇しないこと。 △：60 日後に粘度調整可能範囲である 5000cps～10000cps ×：60 日後に粘度調整不可の 10000cps 以上
分離性	粘度測定前の配合液の状態が、 ○：ゴムと溶剤が分離していないこと。 ×：ゴムと溶剤が分離して、分離層ができている。
分散性	粘度測定前の撹拌のとき、 ○：沈殿物が再分散できる。 ×：沈殿物が保管容器底で硬化し再分散できない。
ゲル化確認	撹拌したとき、 ○：配合液が液体として撹拌でき、製造上問題ないと判断される。 ×：配合液が液体ではなく、製造上問題ありと判断される。

表 2.5.1　AP-G（アセチレンブラック 1～2mm 顆粒）の試験結果

工　程		フィラー添加量			
		5%	10%	15%	30%
配合試験	ロール配合	問題なし	問題なし	問題なし	－
	ロール切断	問題なし	問題なし	問題なし	－
	溶解	問題なし	問題なし	問題なし	－
	異物排除	問題なし	問題なし	異物発生	－
粘度経時変化	溶解 1 日後	1300cps	1580cps	－	－
	溶解 7 日後	2060cps	2460cps	－	－
	溶解 14 日後	2460cps	2520cps	－	－
	溶解 28 日後	2680cps	2520cps	－	－
	溶解 40 日後	2580cps	3000cps	－	－
	溶解 60 日後	2860cps	3460cps	－	－
評価		良	良	否	不適

表 2.5.2　OB-85（オイルファーネスブラック 85nm）の試験結果

工　程		フィラー添加量			
		5%	10%	15%	30%
配合試験	ロール配合	問題なし	問題なし	－	－
	ロール切断	問題なし	問題なし	－	－
	溶解	問題なし	問題なし	－	－
	異物排除	問題なし	異物発生	－	－
粘度経時変化	溶解 1 日後	1220cps	－	－	－
	溶解 7 日後	1920cps	－	－	－
	溶解 14 日後	6300cps	－	－	－
	溶解 28 日後	>10000cps	－	－	－
	溶解 40 日後	－	－	－	－
	溶解 60 日後	－	－	－	－
評価		否	否	不適	不適

表 2.5.3　CB-55（チャンネルブラック 55nm）の試験結果

工　程		フィラー添加量		
		5%	15%	30%
配合試験	ロール配合	問題なし	問題なし	発熱
	ロール切断	問題なし	問題なし	－
	溶解	問題なし	問題なし	－
	異物排除	問題なし	問題なし	－
粘度経時変化	溶解 1 日後	2560cps	1420cps	－
	溶解 7 日後	2760cps	2040cps	－
	溶解 14 日後	2720cps	2140cps	－
	溶解 28 日後	2920cps	2720cps	－
	溶解 40 日後	3680cps	2960cps	－
	溶解 60 日後	3340cps	2900cps	－
評価		良	良	不適

表 2.5.4　CB-23（チャンネルブラック 23nm）の試験結果

工　程		フィラー添加量		
		5%	15%	30%
配合試験	ロール配合	問題なし	問題なし	発熱
	ロール切断	問題なし	問題なし	－
	溶解	問題なし	問題なし	－
	異物排除	問題なし	問題なし	－
粘度経時変化	溶解 1 日後	1960cps	2080cps	－
	溶解 7 日後	2500cps	2600cps	－
	溶解 14 日後	3480cps	2760cps	－
	溶解 28 日後	2680cps	3980cps	－
	溶解 40 日後	3020cps	3620cps	－
	溶解 60 日後	4150cps	3400cps	－
評価		良	良	否

表 2.5.5　CB-19（チャンネルブラック 19nm）の試験結果

工　程		フィラー添加量		
		5%	15%	30%
配合試験	ロール配合	問題なし	－	－
	ロール切断	問題なし	－	－
	溶解	不溶解	－	－
	異物排除	－	－	－
粘度経時変化	溶解 1 日後	－	－	－
	溶解 7 日後	－	－	－
	溶解 14 日後	－	－	－
	溶解 28 日後	－	－	－
	溶解 40 日後	－	－	－
	溶解 60 日後	－	－	－
評価		否	不適	不適

表 2.5.6　CB-30（チャンネルブラック 30nm）の試験結果

工　程		フィラー添加量		
		5%	15%	30%
配合試験	ロール配合	問題なし	問題なし	問題なし
	ロール切断	問題なし	問題なし	問題なし
	溶解	問題なし	問題なし	問題なし
	異物排除	問題なし	問題なし	問題なし
粘度経時変化	溶解 1 日後	1920cps	1680cps	1240cps
	溶解 7 日後	2480cps	1780cps	1740cps
	溶解 14 日後	2500cps	1640cps	2680cps
	溶解 28 日後	3060cps	2060cps	3980cps
	溶解 40 日後	2940cps	2820cps	3680cps
	溶解 60 日後	3440cps	2560cps	4900cps
評価		良	良	良

表 2.5.7　KB-P（ケッチェンブラック　ペースト状）の試験結果

工　程		フィラー添加量		
		5%	15%	30%
配合試験	ロール配合	問題なし	－	－
	ロール切断	問題なし	－	－
	溶解	問題なし	－	－
	異物排除	問題なし	－	－
粘度経時変化	溶解 1 日後	1600cps	－	－
	溶解 7 日後	1720cps*	－	－
	溶解 14 日後	－	－	－
	溶解 28 日後	－	－	－
	溶解 40 日後	－	－	－
	溶解 60 日後	－	－	－
評価		否	不適	不適

* 並行して実施していた被膜加工性試験において乾燥性に問題が生じたため、KB-P は使用不可と判断

表 2.5.8　KP-G（ケッチェンブラック　顆粒）の試験結果

工　程		フィラー添加量		
		5%	15%	30%*
配合試験	ロール配合	問題なし	問題なし	－
	ロール切断	問題なし	問題なし	－
	溶解	問題なし	問題なし	－
	異物排除	問題なし	問題なし	－
粘度経時変化	溶解 1 日後	1920cps	2500cps	－
	溶解 7 日後	2080cps	2940cps	－
	溶解 14 日後	2720cps	3620cps	－
	溶解 28 日後	2920cps	4600cps	－
	溶解 40 日後	3460cps	4500cps	－
	溶解 60 日後	3000cps	4800cps	－
評価		良	良	－

* ケッチェンブラックの高導電性を考慮し、30%の試験は不要と判断

表 2.6　ゴム皮膜加工性の確認方法と合否判定基準

手順	評価項目	判定基準
1	浸せき	浸せきしたとき、 ○：空気を巻き込まずに浸せきできる。 ×：空気を巻き込みながら浸せきする。
2	乾燥性	輪転乾燥したとき、 ○：皮膜が吸湿せず、30 分程度で流れなくなる。 ×：皮膜が吸湿して乾燥しない。 ×：30 分程度で乾燥せず、停止させると流れる。
3	ビード加工 （参考）	ビード加工時に、 ○：巻き加工でき加硫後もずれない。 ×：巻き加工できない。加硫後にずれる。
4	離型性	試験型から被膜を剥離するとき、 ○：スムーズに剥離ができる。 ×：剥離できるが時間を要する。 ×：皮膜が粘着する。 ×：皮膜に剥離跡・キズが残る。
5	外観	剥離後の皮膜が、 ○：均一に平滑であること。 ×：異物・アワなどがあり均一ではない。
－	積層皮膜加工性 （参考）	○：積層皮膜加工ができる。 ×：積層皮膜加工ができない。

表 2.7　ゴム被膜加工性試験結果

配合液		評価項目 （○：良好、×：不良、－：未実施）					
フィラー略称	フィラー添加量	浸せき	乾燥性	離型性	外観	ビード加工性	積層被膜加工
AP-G	5%	○	○	○	○	－	－
	10%	○	○	○	○	－	－
CB-55	5%	○	○	○	○	－	－
	15%	○	○	○	○	－	－
CB-23	5%	○	○	○	○	－	－
	15%	○	○	○	○	－	－
CB-30	5%	○	○	○	○	－	－
	15%	○	○	○	○	－	－
	30%	○	○	○	○	○	○
KP-G	5%	○	○	○	○	○	○
	15%	○	○	○	○	○	○

表 2.8　ゴム皮膜の物性測定・試験方法

測定項目	試験項目	測定・試験方法
引張強さ 最大伸び	引張試験	ショッパー型引張試験機を用いて、JIS K6251 の方法により測定する。試験片は、ダンベル 3 号で打ち抜き、引張速度は 500mm/min とし、引張強さ・最大伸びは破断時の値とする 1 検体から 3 本打ち抜き、中央値を測定値とする。
老化残留率	老化試験	ギヤー老化試験機を用いて、JIS K6257 の方法により測定する。引張試験と同一のゴム皮膜からダンベル 3 号で打ち抜き、70℃で連続 168 時間促進老化させる。促進老化後、JIS K6251 の方法により引張強度を測定する。老化残留率は、老化促進前と比較した引張強度、最大伸びの割合。
突き刺し試験	同左	万能試験機を用いて、ゴム皮膜を突き破る力を厚さ 1mm 換算し荷重で表す。R1 に加工された治具先端を、速度 500mm/min で皮膜に突き刺す。破断時の値を突き刺し強度とする。
引裂試験	同左	ショッパー型引張試験機を用いて、JIS K6252 の方法により測定する。試験片はアングル型で打ち抜き、引張速度は 500mm/min とし、引裂強度は破断時の値とする。
100%引張応力	応力測定	万能試験機を用いて、皮膜の応力を測定する。試験片はダンベル 2 号で打ち抜き、引張速度は 500mm/min とし、伸張 100%の測定値を 100%応力とする。

表 2.9　ゴム皮膜の物性等の合否判定基準

評価項目	判定基準
引張強さ （破断時の強度）	○：16MPa 以上 ×：16MPa 未満
最大伸び （破断時の伸び）	○：400%以上 ×：400%未満
老化残留率 （老化促進前と比較した残留率）	○：強さ 90%以上、伸び 70%以上 ×：強さ 90%未満、伸び 70%未満
突き刺し強度 （破断時の強度）	○：5kg/mm 以上 ×：5kg/mm 未満
引裂強度 （破断時の強度）	○：20N/mm 以上 ×：20N/mm 未満
100%引張応力	参考値

表 2.10　ゴム皮膜の物性測定結果

ゴム皮膜	強さ (MPa)	最大伸び (%)	老化残留率 強さ(%)	老化残留率 伸び(%)	突き刺し強度 (kgf/mm)	引裂強度 (N/mm)	100%引張応力 (MPa)
規格値	16	400	90	70	5	20	―
CL-W（比較用現行グローブ）	18.7	700	98.7	82.3	9.6	48.4	2.1
AP-G(5)	33.6	500	117.0	90.0	15.7	44.1	1.8
AP-G(10)	33.9	480	104.4	89.6	14.8	47.7	2.5
CB-55(5)	36.8	490	96.5	91.8	14.7	44.2	2.6
CB-55(15)	32.1	480	104.0	87.5	13.4	59.8	4.0
CB-23(5)	30.2	510	133.1	88.2	16.5	39.3	1.8
CB-23(15)	34.6	450	110.7	95.6	14.1	56.3	2.9
CB-30(5)	28.9	510	123.5	88.2	14.1	42.2	2.0
CB-30(15)	27.3	560	123.4	73.2	14.0	57.1	3.9
CB-30(30)	29.1	440	106.2	86.4	12.9	74.3	7.1
KP-G(5)	31.0	500	106.1	82.0	13.9	55.3	3.7
KP-G(15)	35.5	450	90.4	82.2	15.8	55.5	4.7

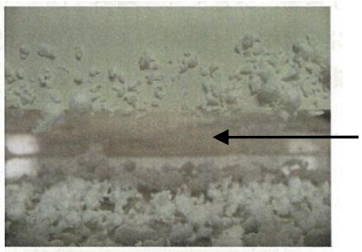
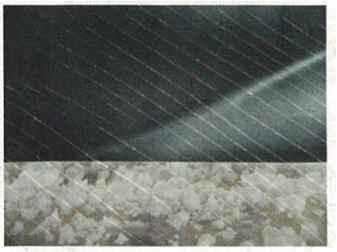
表 2.11　ゴム皮膜の導電性および粉末付着性試験の合否判定基準

試験項目	判定基準
体積固有抵抗率	体積固有抵抗値が、 ○：10^7（Ω・cm）以下の場合 △：10^7～10^{10}（Ω・cm）の場合 ×：10^{10}（Ω・cm）以上の場合
表面抵抗率	表面抵抗値が、 ○：10^7（Ω・cm）以下の場合 △：10^7～10^{10}（Ω・cm）の場合 ×10^{10}（Ω・cm）以上の場合
粉末付着性	ゴム皮膜を発泡スチロールに対して一定距離に置いたとき、 ○：発砲スチロールが付着しない。 △：発砲スチロールが付着するが、僅かである。 ×：発砲スチロールが多く付着する。

表 2.12　ゴム皮膜の体積固有抵抗率および表面抵抗率の測定結果

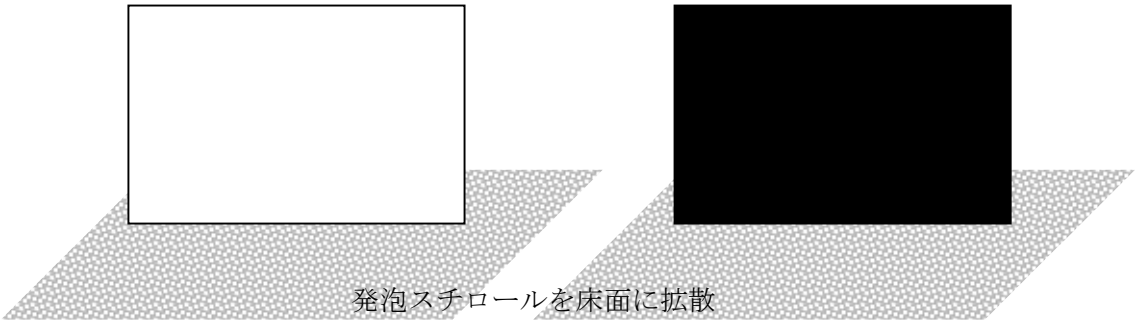
ゴム皮膜	体積固有抵抗率 （Ω・cm）	表面抵抗率 （Ω・cm）	評　価
CL-W	6.1×10^{12}	1.6×10^{16}	－
AP-G(5)	3.6×10^{12}	5.3×10^{15}	×
AP-G(10)	2.2×10^{12}	1.1×10^{15}	×
CB-55(5)	1.6×10^{13}	3.8×10^{12}	×
CB-55(15)	3.2×10^{13}	2.4×10^{12}	×
CB-23(5)	1.9×10^{12}	5.3×10^{15}	×
CB-23(15)	2.1×10^{13}	2.0×10^{12}	×
CB-30(5)	1.6×10^{12}	6.3×10^{14}	×
CB-30(15)	1.5×10^{13}	1.6×10^{12}	×
CB-30(30)	3.7×10^{8}	7.8×10^{6}	体積固有抵抗率：△ 表面抵抗率：○
KP-G(5)	4.8×10^{11}	3.5×10^{10}	×
KP-G(15)	2.4×10^{8}	5.0×10^{7}	体積固有抵抗率：△ 表面抵抗率：△

表 2.13　ゴム皮膜の粉末付着性試験結果

ゴム皮膜	試験結果*	評価
CL-W （比較用現行ＣＳＭゴムグローブ）		発泡スチロールが引き寄せられ、多数付着している。
CB-30(30)		発泡スチロールが付着せず、良好な状態。
KP-G(15)		発泡スチロールが付着せず、良好な状態。

*写真撮影時の状況（試験開始時）

床面から少し離した状態でグローブを縦に設置



現行ＣＳＭ鉛入りグローブ（白色）　　試作グローブ（黒色）

表 2.14　作製した導電性ゴム皮膜の物性値

フィラー種類	CB-30(30) カーボンブラック （平均粒径 30nm）	KP-G(15) ケッチェンブラック （顆粒状）	規格・目標値
フィラー添加量	30%	15%	
強さ（MPa）	29.1	35.5	16.0
最大伸び（%）	440	450	400
突き刺し強度（kgf/mm）	12.9	15.8	5.0
引裂強度（N/mm）	74.3	55.5	20.0
100%引張応力（MPa）	7.1	4.7	－
体積固有抵抗率（Ω・cm）	3.7×10^{8}	2.4×10^{8}	10^{7} 以下
表面抵抗率（Ω・cm）	7.8×10^{6}	5.0×10^{7}	10^{7} 以下

表 3.1　短型グローブ加工性の確認方法と合否判定基準

手順	評価項目	判定基準
1	浸せき	浸せきしたとき、 ○：空気を巻き込まずに浸せきできる。 ×：空気を巻き込みながら浸せきする。
2	乾燥性	輪転乾燥したとき、 ○：皮膜が吸湿せず、30 分程度で流れなくなる。 ×：皮膜が吸湿して乾燥しない。 ×：30 分程度で乾燥せず、停止させると流れる。
3	ビード加工	実装着グローブと同様の作業をしたとき、 ○：巻き加工でき、加硫後もずれない。 ×：巻き加工できない。加硫後にずれる。
4	離型性	短型からグローブを剥離するとき、 ○：スムーズに剥離できる。 ×：剥離できるが時間がかかる。 ×：皮膜に剥離跡・キズが残る。
5	外観	剥離後の皮膜が、 ○：均一に平滑である。 ×：異物・アワなどがあり均一ではない。

表 3.2.1　短型グローブの物性測定・試験方法（1）

試験項目	測定・試験方法
外観検査	グローブの外観を目視により確認する。
ピンホール試験	グローブに水道水を満たし、これを試験水槽に入れビード部から 25mm の所まで水中に浸し、500V/sec の電圧上昇を行い、所定電圧に到達後 60 秒間電圧を保持する。この時の漏えい電流を測定する。
強度検査 (1)引張強さ (2)最大伸び	・ショッパー型抗張力試験機を用い、JIS K6251 ダンベル状 3 号型とし、グローブ周辺方向に 3 片／本を打ち抜き平行部分に 20mm の標線を記す。試験片厚さは、標線内を等分した 3 点を測定し、その中の中央値をもって肉厚とする。 ・引張速度は 500mm/min とし、引張強さおよび最大伸びの値は破断時とする。
空気加熱老化試験	ギャー式老化試験機を用いて JIS K6257 の方法により測定する。試験片は JIS K6251 ダンベル 3 号型とし、3 片／本を採取し、70℃の温度で連続 168 時間促進老化させ、その後引張強さおよび最大伸びを測定する。
永久伸び	ショッパー型抗張力試験機を用いて測定する。試験片は JIS K6251 ダンベル 3 号型とし、試験片を 2 片／本打ち抜く。無負荷時の試験片の標線間距離を JIS1 級ノギスにて測定する。次に試験片を引張速度 500mm/min で各試験伸張率まで伸ばした後、外力を解除し 10 分間放置してから標線間距離を JIS1 級ノギスにて測定する。試験伸張率は 300%とする。引張り前後の標線間距離の測定値から、永久伸びを算出する。
引裂試験	・ショッパー型抗張力試験機を用い JIS K6262 の方法により測定する。試験片は JIS 切込なしアングルとし、列理の方向と直角に打ち抜き、試験部分の 3 箇所の厚さを測定し、中央値をその試験片の厚さとする。試料は 3 片とする。 ・引張速度は 500mm/min とし、引張強さの値は破断時とする。
突き刺し試験	万能試験機・突き刺し治具を用い、皮膜を突き破る力を 1mm 厚さに換算し荷重で表す。試験片は 50mm 角とし、あらかじめ中心の厚みを測定する。治具にセットし、先端 R1・突き刺し速度 500mm/min で試験を行う。突き刺し強さの値は破断時とする。

表 3.2.2　短型グローブの物性測定・試験方法（2）

試験項目	測定・試験方法
オゾン劣化試験	オゾンウェザーメーターを用い、JIS K6259 の方法により試験する。試験片は、50mm 角片を 2 片／枚で採取する。試験片を四つ折りにし、下記条件で試験を実施し、表面の R 部分を目視により確認する。 オゾン濃度：50±5pphm 試験温度　：40℃±1℃ 伸長率　　：四つ折り 試験時間　：96 時間
硬度試験 (1)硬度測定 (2)応力	・スプリング式タイプ A の硬度測定機を用いて、JIS K6253 の方法により測定する。 ・万能試験機を用いて、伸長 100%の応力を測定する。試験片は 2 号ダンベルを用いる。
鉛当量試験	JIS Z4501（X 線防護用品類の鉛等量試験方法）並びに JIS Z4802（診療用 X 線防護手袋）の方法に準じて、管電圧 100kV、管電流 5mA で測定する。試験片は 100mm 角片を 2 片／枚採取し、鉛等量を求める。
電気的特性	JIS K6271 の方法を用いて、表面抵抗率を測定する。積層皮膜となるため、体積固有抵抗率ではなく、表面抵抗率を測定する。

表 3.3.1　試作グローブの物性測定・試験結果

試験項目		試作グローブ	現行鉛入りＣＳＭゴムグローブ（XL-W）	判定基準
外観検査		異常なし	異常なし	表裏面にクレータ等の欠点が無いこと
強度	引張強さ（MPa）	10.5	11.3	7 以上
	最大伸び（%）	400	600	400 以上
老化残留率　強さ（%）		99.3	129.2	80 以上
老化残留率　伸び（%）		92.5	98.3	70 以上
永久伸び（%）		16	6	15 以下
引裂試験（N/mm）		44.0	47.7	20 以上
突き刺し試験（kgf/mm）		4.47	7.04	3 以上
オゾン劣化試験		異常なし	異常なし	表面状態を試験前と比較し、異常がないこと
硬度試験	硬度	75	59	－
	100%応力（MPa）	5.1	2.9	－
鉛当量試験（mmPb）		0.265	0.250	0.2～0.28
電気的特性（Ω）		9.4×10^{7}	5.8×10^{15}	10^{8} 以下

表 3.3.2　試作グローブのピンホール試験・耐電圧試験結果

単位：mA

電圧（V）	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
現行グローブ（XL-W）（360mm ｶｯﾄ）	0	2.2	3.4	4.8	6.2	7.4	8.8	10.0	11.2	12.5
試作グローブ	34.0	115	×							
試作グローブ（ﾋﾟﾝﾎｰﾙ有）	30.4	140	×							

表 3.4　試作グローブの粉末付着性試験結果

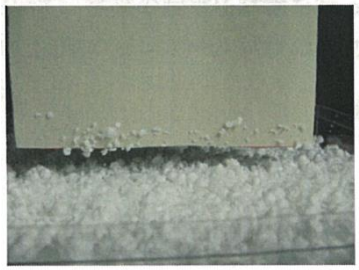
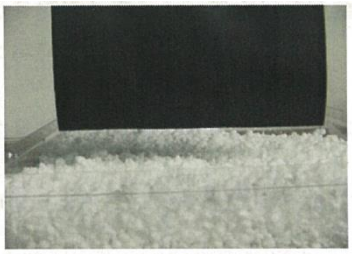
	試験結果	評価
XL-W （比較用現行鉛入りＣＳＭゴムグローブ）		発泡スチロールが引き寄せられ、多数付着している。
試作グローブ		発泡スチロールが付着せず、良好な状態。

表 3.5.1　表層のみに導電性を有する試作グローブの物性測定・試験結果

試験項目		試作グローブ（表層のみ導電性）	試作グローブ（表裏層ともに導電性）（参考）	現行鉛入りＣＳＭゴムグローブ（XL-W）	判定基準
外観検査		異常なし	異常なし	異常なし	表裏面にクレータ等の欠点が無いこと
強度	引張強さ（MPa）	8.1	10.5	12.5	7 以上
	最大伸び（%）	480	400	520	400 以上
老化残留率　強さ（%）		109.9	99.3	112.8	80 以上
老化残留率　伸び（%）		89.6	92.5	101.9	70 以上
永久伸び（%）		7	16	12	15 以下
引裂試験（N/mm）		46.9	44.0	47.7	20 以上
突き刺し試験（kgf/mm）		5.20	4.47	7.04	3 以上
オゾン劣化試験		異常なし	異常なし	異常なし	表面状態を試験前と比較し、異常がないこと
硬度試験	硬度	73	75	59	－
	100%応力（MPa）	4.0	5.1	2.9	－
鉛当量試験（mmPb）		0.235	0.265	0.250	0.2～0.28
電気的特性（Ω）		7.0×10^{5}	9.4×10^{7}	5.8×10^{15}	10^{8} 以下

表 3.5.2　表層のみに導電性を有する試作グローブのピンホール試験・耐電圧試験結果

単位：mA

電圧（V）	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
表層のみ導電性の試作グローブ	1.5	3.1	4.7	6.4	8.1	9.8	11.5	13.0	14.8	16.3
現行グローブ（XL-W）（360mm ｶｯﾄ）	1.0	2.0	3.1	4.2	5.4	6.4	7.6	8.6	9.8	10.8
現行グローブ（XL-W）（800mm）	－	－	－	－	－	－	－	－	－	28.0

表 3.6　表層のみに導電性を有する試作グローブの粉末付着性確認結果

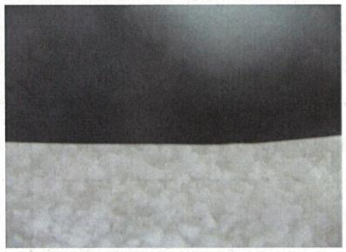
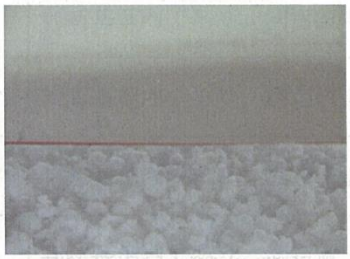
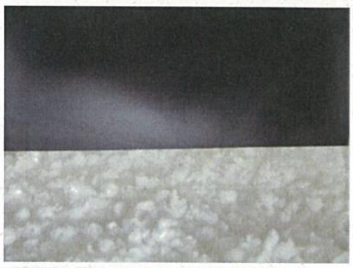
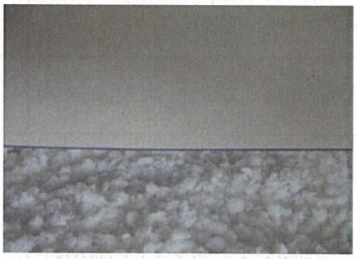
	試験結果	評価
表層（黒） （導電性あり）		発泡スチロールが付着せず、良好な状態。
裏層（白） （導電性なし）		発泡スチロールが付着せず、良好な状態。
XL-W（白） （比較用現行鉛入りＣＳＭゴムグローブ）		発泡スチロールが引き寄せられ、多数付着する。

表 4.1　実装着試作グローブの物性測定・試験結果

試験項目		試作グローブ	現行鉛入りＣＳＭゴムグローブ（XL-W）	判定基準
外観検査		異常なし	異常なし	表裏面にクレータ等の欠点が無いこと
ピンホール試験		38mA	30mA	印加電圧 5000V で 60mA 以下
強度	引張強さ（MPa）	12.7	8.7	7 以上
	最大伸び（%）	470	530	400 以上
老化残留率　強さ（%）		87.4	126.0	80 以上
老化残留率　伸び（%）		93.6	84.9	70 以上
永久伸び（%）		8	7	15 以下
引裂試験（N/mm）		45.6	44.1	20 以上
突き刺し試験（kgf/mm）		7.0	6.7	3 以上
オゾン劣化試験		異常なし	異常なし	表面状態を試験前と比較し、異常がないこと
硬度試験	硬度	59	65	－
	100%応力（MPa）	2.2	3.6	－
鉛当量試験（mmPb）		0.21	0.26	0.2～0.28
電気的特性（Ω）		5.7×10^{4}	1.5×10^{14}	10^{8} 以下

表 4.2　実装用試作グローブの粉末付着性試験結果

	試験結果	評価
表層（黒） （導電性あり）		発泡スチロールが付着せず、良好な状態。
裏層（白） （導電性なし）		発泡スチロールが付着せず、良好な状態。
XL-W（白） （比較用現行鉛入りＣＳＭゴムグローブ）		発泡スチロールが引き寄せられ、多数付着する。

計　量	主原料・薬品を秤で計量する。
↓	
ニーダ配合	主原料の混練と薬品の分散を行う。
↓	
ロール配合	混練後のゴムをロール機にて薬品の添加・分散を行い、ゴムシート状に加工する。
↓	
ロール切断	ゴムシートを 10mm 程度に切断する。
↓	
溶　解	切断ゴムを溶剤で撹拌溶解し、配合液とする（金属粉末（鉛）を添加）。
↓	
経時変化確認	粘度測定、薬品分離性確認、薬品分散性確認、ゲル化確認を行う。
↓	
異物除去	配合液をアミでろ過し、異物を除去する。
↓	
型への浸せき	配合液に試験型をディッピングする。目的の厚みまで浸せきと乾燥を繰り返す（約 0.3～0.5mm）。
↓	
乾　燥	輪転させながら乾燥する。
↓	
（ビード加工）	必要に応じてグローブと同様のビート加工を行う。
↓	
加　硫	加硫缶で加熱・加圧し架橋させる。
↓	
離　型	タルクを付着させ、試験型から皮膜を剥離する。
↓	
試験	皮膜の引張試験、老化試験、突き刺し試験、引裂試験、応力測定、体積固有抵抗率測定、表面抵抗率測定を行う。

図 2.1　導電性材料配合試験手順

図 2.2　フィラー添加条件確認試験で使用した装置類

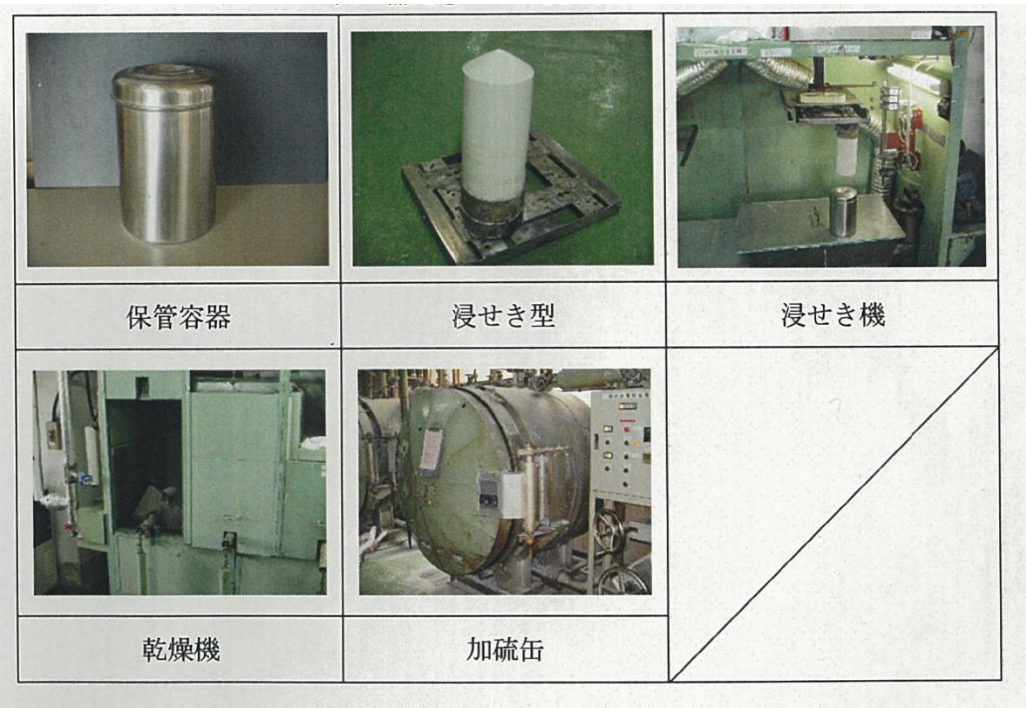


図 2.3　被膜加工性確認試験で使用した装置類

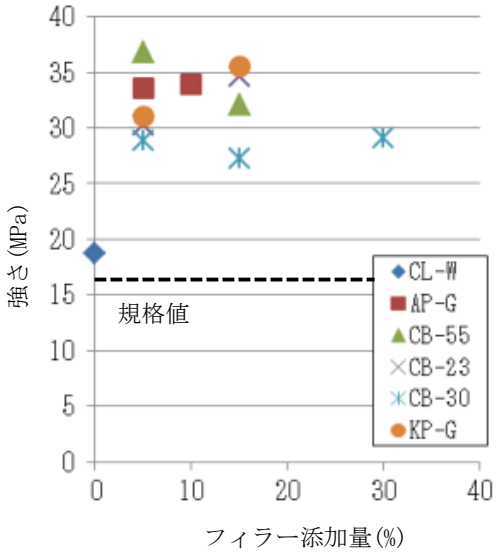


図 2.4.1　フィラー添加量と引張強さの関係

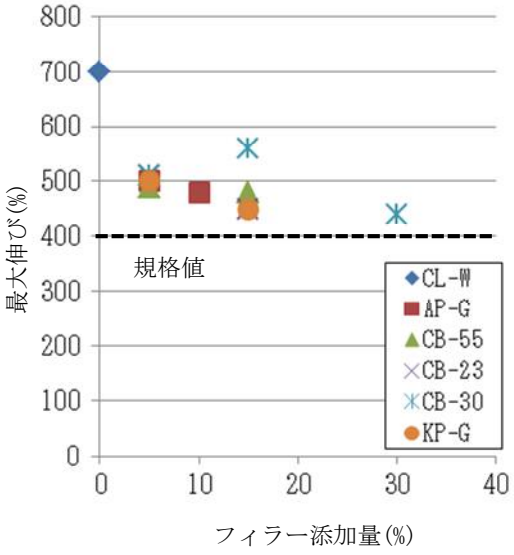


図 2.4.2　フィラー添加量と最大伸びの関係

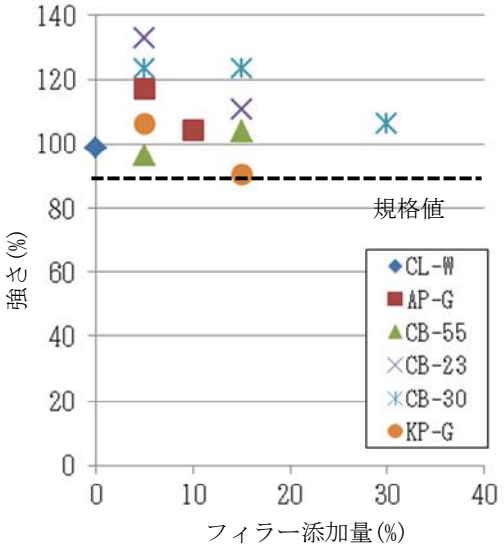


図 2.4.3　フィラー添加量と老化残留率
（強さ）の関係

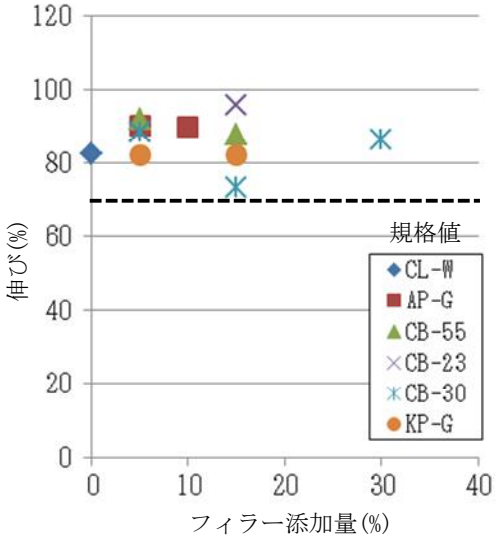


図 2.4.4　フィラー添加量と老化残留率
（伸び）の関係

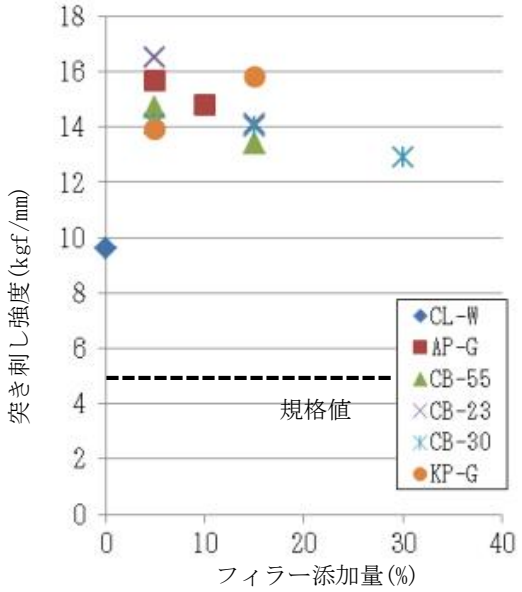


図 2.4.5　フィラー添加量と突き刺し強度の関係

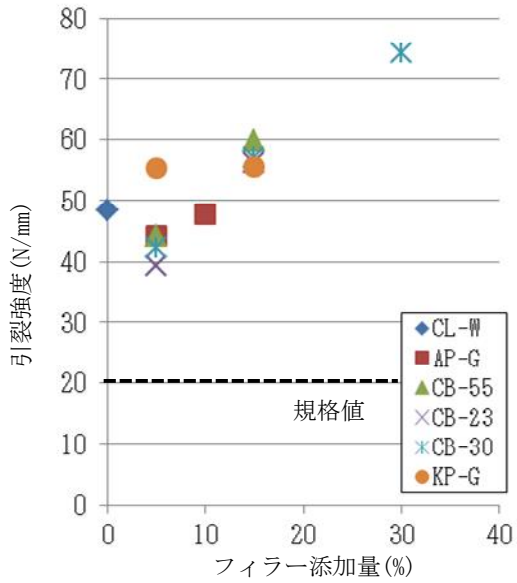


図 2.4.6　フィラー添加量と引裂強度の関係

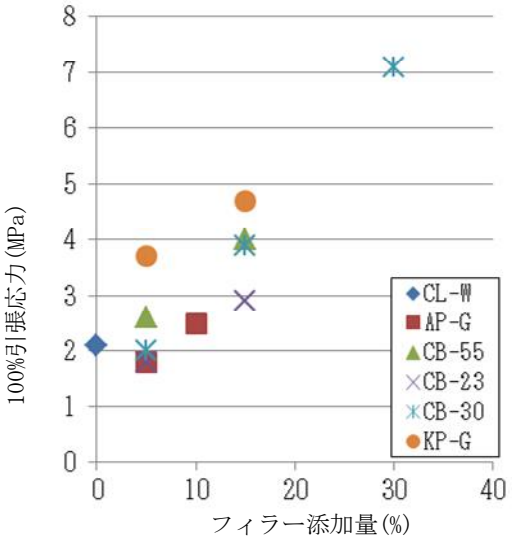


図 2.4.7　フィラー添加量と 100%引張応力の関係

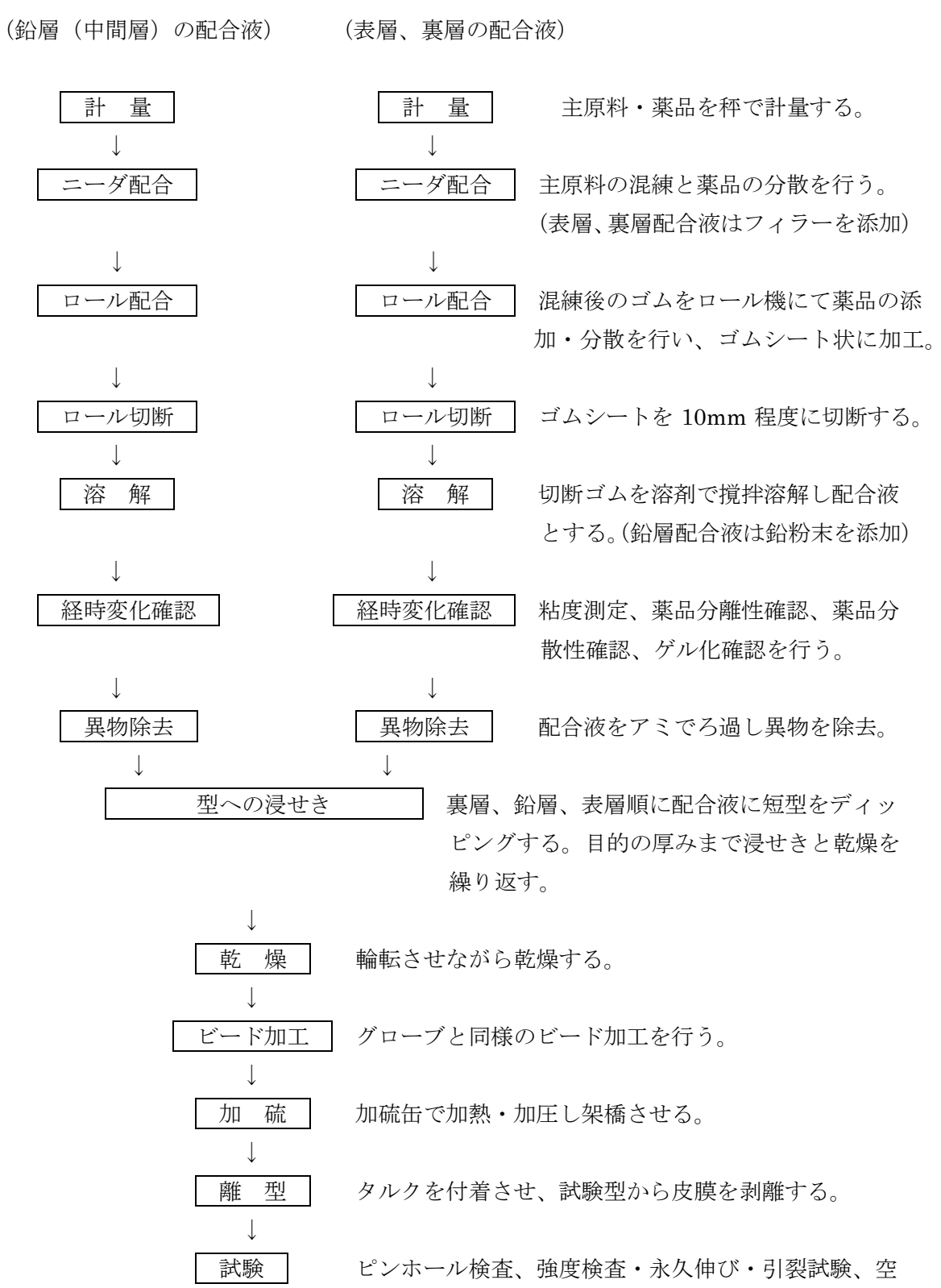


図 3.1　導電性短型グローブ試作試験手順

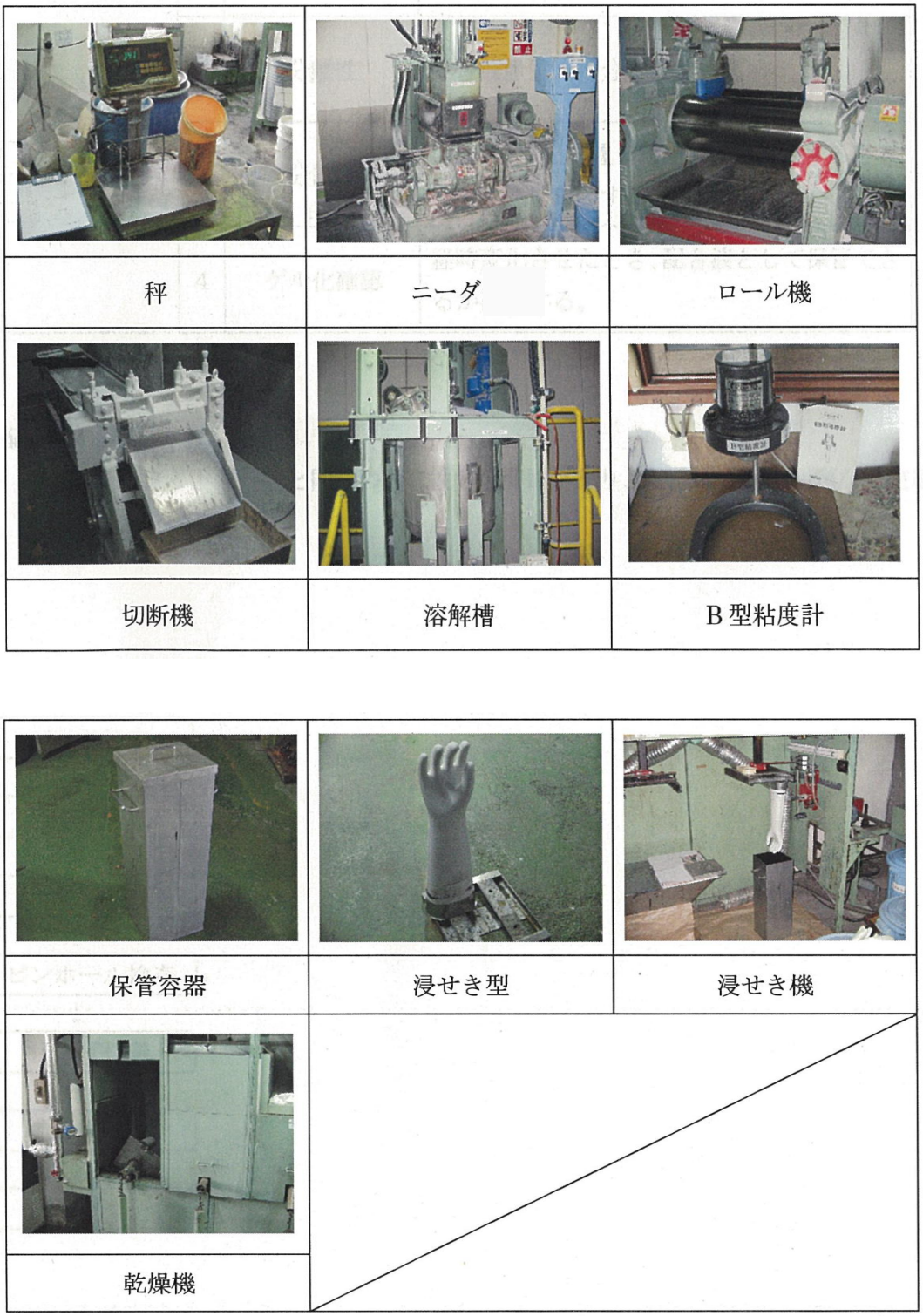


図 3.2　短型グローブ試作に使用した装置類

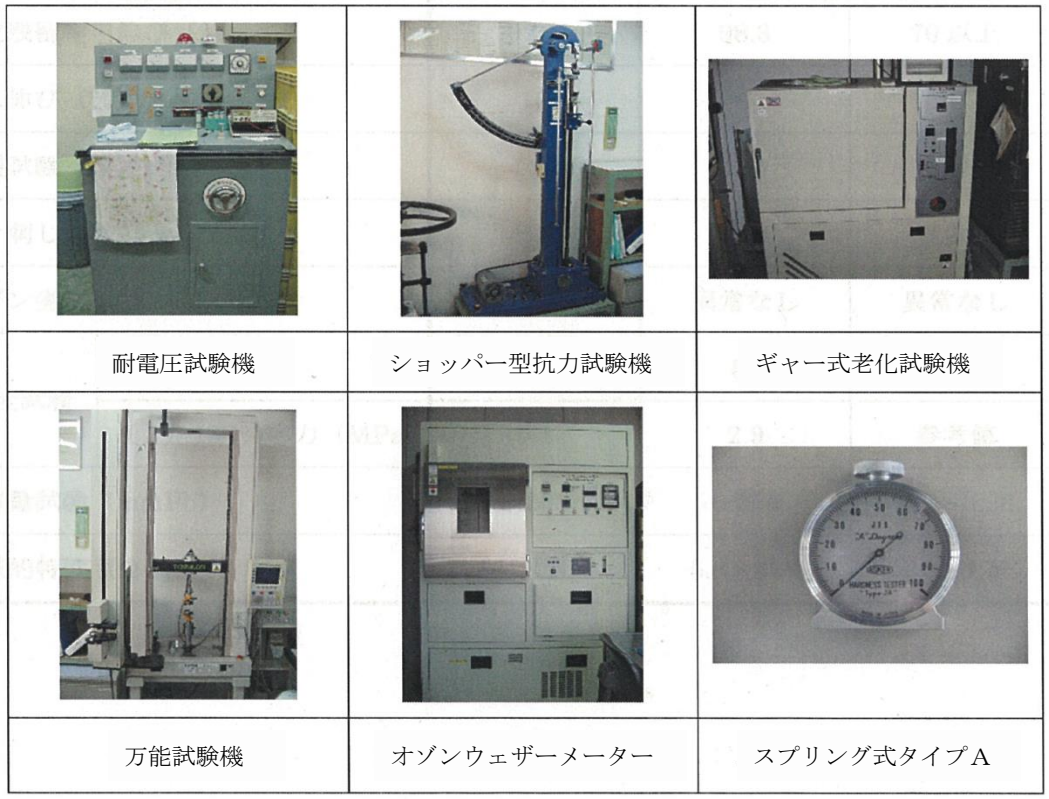
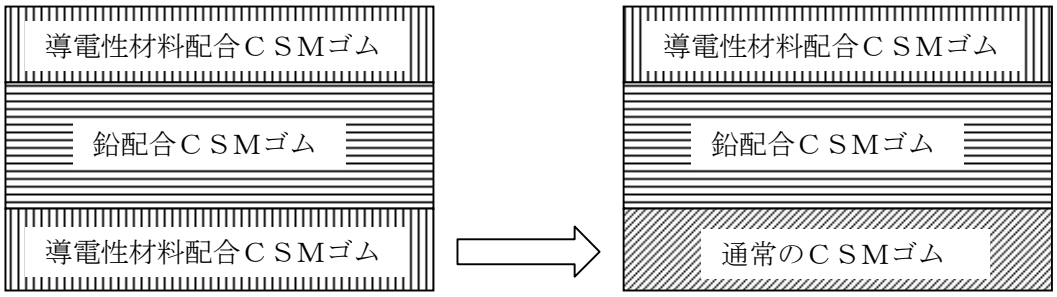


図 3.3　試作グローブの物性測定・試験装置類



（試作した短型グローブの３層構造）　　（ピンホール試験可能となる３層構造）

図 3.4　ピンホール試験可能な導電性鉛入りＣＳＭゴムグローブの構造

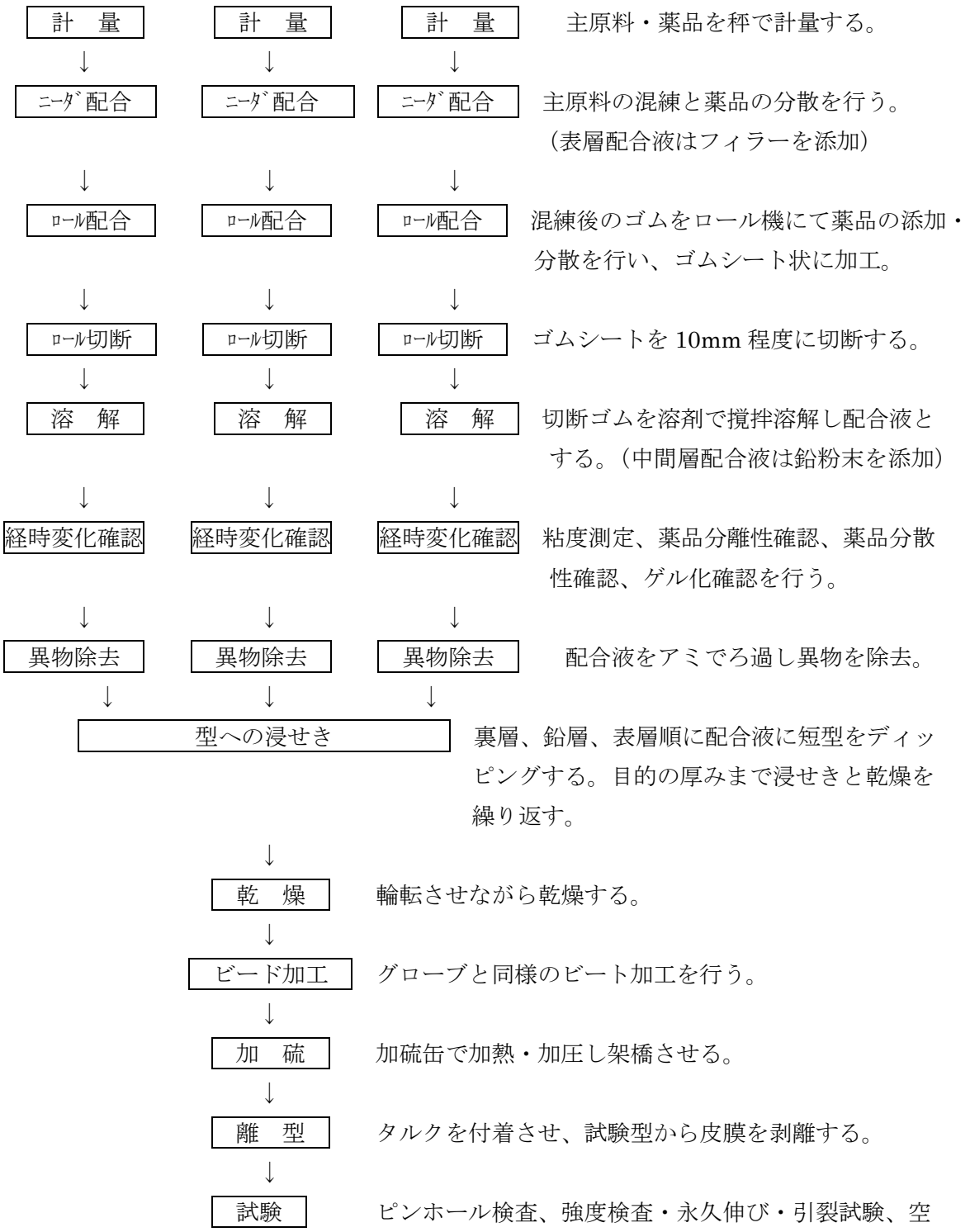


図 4.1　実装用導電性グローブ試作試験手順

図 4.2　実装用グローブ試作に使用した装置類

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

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

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の）　1	1
比透磁率[b]	（数字の）　1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

表５．SI 接頭語

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

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	$1L=11=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3$ kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}\ J$
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St\ =1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb\ =1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal\ =1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G\ =1Mx\ cm^{-2}\ =10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	$1\ \mu\ =1\mu m=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています