

核燃料再処理施設におけるグローブボックス用 グローブの物性調査

－定期交換したグローブの物性と使用可能年数の推測－

Physical Property Investigation of Gloves for Glove Boxes
in Nuclear Fuel Reprocessing Plants

－ Physical Properties of Used Gloves and Estimation of Its Life-time –

山本 昌彦 西田 直樹 小林 大輔 根本 良
林 宏幸 北尾 貴彦 久野 剛彦

Masahiko YAMAMOTO, Naoki NISHIDA, Daisuke KOBAYASHI, Ryo NEMOTO
Hiroyuki HAYASHI, Takahiko KITAO and Takehiko KUNO

核燃料・バックエンド研究開発部門
核燃料サイクル工学研究所
再処理廃止措置技術開発センター
施設管理部

Facility Management Department
TRP Decommissioning Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

June 2023

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは国立研究開発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。
本レポートはクリエイティブ・コモンズ表示 4.0 国際ライセンスの下に提供されています。
本レポートの成果（データを含む）に著作権が発生しない場合でも、同ライセンスと同様の
条件で利用してください。（<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ja>）
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ウェブサイト（<https://www.jaea.go.jp>）
より発信されています。本レポートに関しては下記までお問合せください。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 JAEA イノベーションハブ 研究成果利活用課
〒 319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 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.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).

Even if the results of this report (including data) are not copyrighted, they must be used under the
same terms and conditions as CC-BY.

For inquiries regarding this report, please contact Institutional Repository and Utilization Section,
JAEA Innovation Hub, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, 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

核燃料再処理施設におけるグローブボックス用グローブの物性調査
-定期交換したグローブの物性と使用可能年数の推測-

日本原子力研究開発機構 核燃料・バックエンド研究開発部門
核燃料サイクル工学研究所
再処理廃止措置技術開発センター 施設管理部

山本 昌彦、西田 直樹、小林 大輔、根本 良*
林 宏幸*、北尾 貴彦+、久野 剛彦

(2023 年 2 月 28 日受理)

日本原子力研究開発機構の東海再処理施設において核燃料物質の取り扱いに使用するグローブボックス用グローブ（以下、「グローブ」という。）は、内部規則にて使用期限が定められており、グローブボックスに取り付け後、異常の有無に係わらず最長 4 年で交換している。一方、グローブの材質は合成ゴムであることから、使用環境（使用頻度、薬品、放射線量等）によってその劣化度合は異なる。そこで、本件では使用環境毎にグローブを分類し、その物性値を測定すること等により、グローブの劣化状況に応じた使用可能年数の技術的評価手法を確立するとともに、グローブの使用可能な年数を推測した。

外観上の異常もなく定期交換したグローブについて、測定した物性値は、新品のグローブの納品時に確認している受入基準値を満足し、新品のグローブと同等の物理的特性を有していることが分かった。このため、使用期限を迎えたこれらグローブは、新品のグローブの最長使用年数である 4 年を追加した合計 8 年間の使用が可能であると考えられた。また、グローブの物性値と使用年数をプロットして外挿線を作成した結果、使用年数 8 年における物性値は、過去にグローブの破損等が報告されている物性値よりも安全側の値を示し、非管理区域の倉庫にて 8 年及び 23 年間保管した長期保管グローブの物性値と有意な差は見られなかった。

これらより、東海再処理施設におけるグローブの最長使用年数は 8 年と設定した。なお、グローブの点検頻度、項目は従来の実施内容から変更せず、異常が確認されれば使用年数に関係なく速やかに交換される管理であることから、使用年数を 8 年に延長した場合でもグローブ使用に伴う安全性の低下（リスクの上昇）は生じない。また、使用年数の延長に伴い、グローブの購入費、グローブ交換等の作業労力、廃棄物発生量を従来よりもそれぞれ約 4 割低減させることができ、定期のグローブ交換に伴う汚染発生リスク、作業員の被ばくリスクも低減され、グローブ管理の効率化・合理化が図られた。

核燃料サイクル工学研究所：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

+ 再処理廃止措置技術開発センター 技術部

* 株式会社 E&E テクノサービス

**Physical Property Investigation of Gloves for Glove Boxes
in Nuclear Fuel Reprocessing Plants
-Physical Properties of Used Gloves and Estimation of Its Life-time-**

Masahiko YAMAMOTO, Naoki NISHIDA, Daisuke KOBAYASHI, Ryo NEMOTO*,
Hiroyuki HAYASHI*, Takahiko KITAO⁺ and Takehiko KUNO

Facility Management Department,
TRP Decommissioning Center, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories,
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received February 28, 2023)

Glove-box gloves, that are used for handling nuclear fuel materials at the Tokai Reprocessing Plant (TRP) of the Japan Atomic Energy Agency, have an expiration date by internal rules. All gloves are replaced at a maximum of every 4-year. However, degrees of glove deterioration varies depending on its usage environment such as frequency, chemicals, and radiation dose. Therefore, physical properties such as tensile strength, elongation, hardness of gloves are measured and technical evaluation method for the glove life-time is established.

It was found that gloves without any defects in its appearance have enough physical properties and satisfies the acceptance criteria values of new gloves. Thus, it was considered that the expired gloves could be used for total of 8-year, by adding 4-year of new glove life-time. In addition, the results of extrapolation by plotting the glove's physical properties versus the used years showed that the physical properties at 8-year is on the safer side than the reported physical properties of broken glove. Also, the data are not significantly different from the physical properties of the long-term storage glove (8 and 23 years).

Based on these results, life-time of gloves at TRP is set to be 8-year. The frequency of glove inspections are not changed, and if any defects is found, the glove is promptly replaced. Thus, the risk related to glove usage is not increased. The cost of purchasing gloves, labor for glove replacement, and the amount of generated waste can be reduced by approximately 40%, respectively, resulting in more efficient and rationalized glove management.

Keywords: Gloves, Physical Property, Reprocessing Plant

⁺ Technology Development Department, TRP Decommissioning Center

^{*} E&E Techno Service Co., Ltd.

目 次

1. はじめに	1
2. 使用可能年数の評価方法の考案	2
3. グローブの物性調査	4
3.1 グローブの使用環境（劣化要因）	4
3.2 物性値の測定対象グローブの選定	4
3.3 物性値（引張強さ、伸び率、硬さ）の測定方法	5
4. グローブの物性値の測定結果	6
4.1 「使用頻度」の影響	6
4.2 「硝酸」の影響	6
4.3 「放射線量（ $\beta\gamma$ 線）」の影響	6
4.4 補足の劣化要因「湿式・乾式」、「蛍光灯（紫外線）」の影響	7
4.5 使用年数 3 年、長期保管グローブの物性値	8
5. グローブの使用可能年数の推測	9
6. 使用年数の延長化による効果	10
7. まとめ	11
謝 辞	11
参考文献	12
付録 1	24
付録 2	30

Contents

1. Introduction	1
2. Development of a method for life-time evaluation	2
3. Investigation of physical properties	4
3.1 Environment of glove-box gloves (Deterioration factors)	4
3.2 Selection of surveyed gloves	4
3.3 Methods for measuring physical properties	5
4. Physical properties of used gloves	6
4.1 Effect of frequency of use	6
4.2 Effect of nitric acid	6
4.3 Effect of radiation	6
4.4 Effect of supplementary deterioration factors (wet/dry, fluorescent light (UV))	7
4.5 Physical properties for 3-year used gloves and long-term stored gloves	8
5. Life-time estimation for glove-box gloves	9
6. Effects of extending life-time for glove-box gloves	10
7. Conclusion	11
Acknowledgments	11
References	12
Appendix 1	24
Appendix 2	30

表リスト

Table 1	劣化要因の指標と測定対象グローブ	15
Table 2	使用頻度の異なるハイパロン®製グローブの物性値測定結果	17
Table 3	硝酸の使用環境が異なるハイパロン®製グローブの物性値測定結果	17
Table 4	放射線量 ($\beta\gamma$ 線) が異なるハイパロン®製グローブの物性値測定結果	18
Table 5	放射線量 ($\beta\gamma$ 線) が異なるネオプレン®製グローブの物性値測定結果	18
Table 6	湿式又は乾式環境で使用したハイパロン®製グローブの物性値測定結果	19
Table 7	蛍光灯の点灯状況が異なるハイパロン®製グローブの物性値測定結果	19
Table 8	使用年数 3、4 年で定期交換したハイパロン®製グローブの物性値測定結果	20
Table 9	長期保管グローブの物性値測定結果	20

図リスト

Fig. 1	グローブの納品検査、交換の判定に係るフロー	13
Fig. 2	グローブ使用可能年数の評価のための外挿線の例	14
Fig. 3	引張強さ、伸び率、硬さの測定方法と試験片の外観	16
Fig. 4	ハイパロン®製グローブの物性値と外挿線	21
Fig. 5	ネオプレン®製グローブの物性値と外挿線	22
Fig. 6	使用年数の延長化に伴うコストの削減効果	23

This is a blank page.

1. はじめに

核燃料再処理施設におけるプルトニウム (Pu)、ウラン (U) 等の核燃料物質の取り扱いにあたっては、内部被ばくを防止するため、閉じ込め機能を有するグローブボックス (GB) と呼ばれる気密性の箱型設備を使用している。GB は、内部で Pu 等を取り扱うため、耐薬品性と耐放射線性に優れた合成ゴムであるハイパロン® (クロロスルホン化ポリエチレン)、又はネオプレン® (クロロプレン) を材質とした作業用グローブが取り付けられている¹⁾。核燃料物質の取り扱い用 GB のグローブについては、日本原子力研究開発機構の前身である旧動力炉・核燃料開発事業団にて、点検・交換に係る基準化検討が行われている。そこでは、約 7,000 本のグローブに係る管理実績を踏まえ、ハイパロン®、ネオプレン®といったグローブの材質ごとに、納品に係る受入検査の基準となる物性値である引張強さと伸び率の値 (以下、「受入基準値」)、及び GB に取付けたグローブの点検頻度、点検方法とその判定基準、並びに使用年数を定めている²⁾。この検討結果は、グローブの管理方法として、東海再処理施設 (TRP) の内部規則へ反映されており、TRP ではグローブ納品時に物性値が受入基準値を満足していることを確認するとともに、GB に取付けた後は定期的な外観検査 (裂傷、肌荒れ、ひび割れ等の有無) と汚染検査 (ダイレクトサーベイ法による汚染の有無) を実施している。また、ハイパロン®製グローブは 4 年、ネオプレン®製グローブは 3 年の使用年数で一律に定期交換を実施している。

一方、グローブの材質である合成ゴムは、その使用頻度、GB 内部で取り扱う試薬、Pu 等からの放射線等の使用環境により性能低下となる劣化度合は異なることが知られている^{3)・5)}。TRP では、 α 線を放出する核種を多く含む硝酸 Pu 溶液や硝酸 U 溶液、U・Pu 混合酸化物 (MOX) 粉末、核分裂性核種を含む高放射性廃液、比較的低濃度の放射性物質を含む低放射性廃液といった様々な形態の放射性物質を GB 内で取り扱うことから、グローブの劣化度合も使用環境によって大きく異なることが推測される。特に、Pu を多量に取り扱う場合、 α 線により空気中の酸素が電離することでオゾンを生じ、これがゴム中の高分子鎖である炭素結合を開裂させるため、グローブの表面に傷等を発生させ、物性値も低下させる^{5)・6)}。実際、過去には TRP のプルトニウム転換技術開発施設 (PCDF) では、100 g/L 以上の高濃度硝酸 Pu 溶液や 1 kg 以上の MOX 粉末を取り扱う高濃度 Pu 環境の GB において、ひび割れが見られたグローブの物性を測定した結果、その物性値 (引張強さ、伸び率) は受入基準値を大きく下回り、劣化が確認されている。しかし、廃止措置のステージに入っている現在の TRP では高濃度 Pu 環境となる GB はほとんどなく、定期交換時にグローブの外観検査で異常が確認されることもほとんどない。このため、外観上の異常がなく使用期限を迎えたグローブについては、最長 4 年での一律定期交換ではなく、使用環境を踏まえたグローブの使用可能年数の技術的評価手法の確立が求められていた。

そこで本件では、これまで物性等の調査が行われていない外観上の異常がないグローブについて、使用可能年数の評価方法を考案するとともに、劣化の指標となる物性値を測定して各使用環境における劣化度合を定量的に評価した。また、使用年数と物性値の関係から、グローブの使用可能年数を推測・評価した。なお、本件は TRP 内にて展開している廃止措置への移行及び維持管理の合理化に係る取組事項の一つとして実施した。

2. 使用可能年数の評価方法の考案

TRP では、Fig. 1 に示すように、新品のグローブを納品する際に、物性値である引張強さと伸び率が内部規則で定めた受入基準値（ハイパロン®製グローブ：引張強さ ≥ 16 MPa、伸び率 $\geq 400\%$ 、ネオプレン®製グローブ：引張強さ ≥ 20 MPa、伸び率 $\geq 700\%$ ）以上であることを確認するとともに、外観目視検査でも異常がなければ最長 4 年間使用している。すなわち、従来からの使用期限を迎えて定期交換した外観上の異常がないグローブについて、測定した物性値が受入基準値以上であるならば、当該グローブは新品のグローブと同等の性能を有しているとみなして現状の最長使用年数である 4 年間に、さらに 4 年の延長（合計使用年数 8 年）が可能と考えられた。

以上を踏まえ、グローブの材質である合成ゴムに関する一般論から使用可能年数を推測することとした。合成ゴムの物性値は、ゴム中の高分子の酸化、分解等の化学反応により、劣化が起る。このため、化学反応速度論から物性値と使用年数は、以下の式(1)の関係を持つことが知られている⁷⁾。

$$\ln t = \ln \left(\frac{1}{A} \ln \frac{p_0}{p} \right) + \frac{E}{RT} \quad (1)$$

t	使用年数（時間）	E	活性化エネルギー
p_0	物性値（初期値）	T	温度
p	物性値（時間 t 経過後）	A	頻度因子（定数）

式(1)より、使用年数である時間の経過に伴い、物性値は指数関数的に減少する。そこで、新品のグローブと使用期限を迎えて定期交換したグローブの物性値を使用年数毎にプロットし、指数関数（ $y = a \cdot e^{bx}$ ： a 、 b は係数、 e はネイピア数）を用いて外挿線を作成した。なお、旧日本原子力研究所で過去に発生した GB 用グローブの破損事例では、破損したグローブの物性値が新品のグローブの受入基準値よりも約 25%低下していた⁸⁾。また、PCDF にて高濃度 Pu 環境の GB に取り付けたグローブについて、過去に物性値を測定した結果、伸び率が新品のグローブの受入基準値から約 25%低下した値である伸び率 300%を下回ると多くのグローブでひび割れ等が発生していた。そこで、これらグローブ破損事例で確認した物性値よりも保守的な値として、作成した外挿線が受入基準値から 20%減少した値（受入基準値 20% 減の値、ハイパロン®製グローブ：引張強さ ≥ 13 MPa、伸び率 $\geq 320\%$ 、ネオプレン®製グローブ：引張強さ ≥ 16 MPa、伸び率 $\geq 560\%$ ）になるまでの年数を求め、グローブの使用可能年数を推測した。また、Fig. 2 に示すように、複数回測定した物性値のバラつきを考慮した場合であっても保守的な評価ができるように、外挿線は複数作成して使用可能年数を見積もることとした。

これらより、外観上の異常がなく定期交換したグローブの物性値を測定し、以下の評価 A、B の両方を満たす年数を新たに設定するグローブの使用年数とした。

評価 A：外観上の異常がなく定期交換したグローブの物性値が、新品のグローブ納品時の受入基準値以上ならば、さらに 4 年の追加使用（合計使用年数 8 年）が可能と評価（絶対的評価）

評価 B：グローブの物性値の性能低下は、受入基準値 20%減の値付近から起こると推測し、外挿線により使用可能年数を見積もる（相対的評価）

3. グローブの物性調査

外観上の異常がなく定期交換したグローブについて、使用環境を確認して物性測定の対象となるグローブを選定し、引張強さと伸び率を測定した。また、グローブの硬さについても物性調査の参考として測定を行った。なお、GB に取付けた後、又は定期交換時に外観上に異常が見られたグローブは、TRP でのこれまでの経験より、物性値も相当程度低下していることが考えられたことから、本調査では対象外とした。以下に、物性調査の詳細を示す。

3.1 グローブの使用環境（劣化要因）

TRP では、再処理施設の主工程であるせん断、抽出、精製を行う分離精製工場、U、Pu を混合転換して MOX 粉末とする PCDF、硝酸 U 溶液を脱硝して三酸化 U 粉末とする脱硝施設、放射性廃液及び放射性固体廃棄物を処理する施設、また各施設にてサンプリングした試料を分析する分析所などの様々な施設に GB が設置されている。これら施設において、GB 用グローブの使用頻度は異なることからグローブの劣化状況も異なることが推測される。また、使用済核燃料の溶解には硝酸、抽出工程では有機溶媒、放射線劣化した溶媒の再生にはアルカリ溶液を取り扱うため、これら試薬によるグローブへの影響も考慮する必要がある。特に、有機溶媒やアルカリ溶液による影響は、これまでのグローブの使用経験より、表面に変色やひび割れが起こるため、外観目視検査にて容易に識別可能であるものの、硝酸の影響については外観目視検査での判別が難しい。このため、硝酸の取り扱い状況に応じて物性値を測定する必要がある。そこで、今回の試験では外観目視検査にてその影響を識別可能な有機溶媒、アルカリ溶液は対象外とし、硝酸による影響を調査の対象とした。さらに、TRP では α 線放出核種以外に、 β 線や γ 線を放出する核種を含む放射性廃液等も取り扱っており、PCDF にて過去に測定した GB 用グローブについては、 α 線による物性値への影響を調査しているものの、 β 線や γ 線を放出する核種による物性値への影響は調査されていない。 α 線については、過去の報告より、ゴム中の高分子鎖を開裂させることで物性値に影響を及ぼすことが知られていることから^{5),6)}、今回の試験では放射線のうち、 α 線の影響は調査対象外とし、 $\beta\gamma$ 線の影響を調査対象とした。以上を踏まえ、「使用頻度」、「硝酸」、「放射線量（ $\beta\gamma$ 線）」を主要な劣化要因として物性値を測定することとした。

なお、上記の要因に加え、TRP では溶液系試料を取り扱う湿式系 GB、粉末系試料を取り扱う乾式系 GB、蛍光灯を常時点灯している GB がある。これら GB についても「湿式・乾式」、「蛍光灯（紫外線）」を補足の劣化要因として物性値を測定することとした。

3.2 物性値の測定対象グローブの選定

TRP にて GB を所掌する関係各課へ聞き取り調査を行い、主要な劣化要因、補足の劣化要因にそれぞれ指標を設けて分類した。その後、全ての指標におけるグローブの物性を調査できるように、TRP の分析所、ガラス固化技術開発施設（TVF）、PCDF において、外観上の異常がなく定期交換した合計 23 本のグローブを物性測定の対象とした。Table 1 に各劣化要因の指標とサンプリングした測定対象のグローブの詳細を示す。なお、測定対象とした 23 本のグロー

ブには、参考データとして使用年数の違いによる物性値への影響を調べるため、使用年数 3 年で定期交換したハイパロン®製グローブを含んでいる。また、ネオプレン®製グローブは、現在、硝酸雰囲気下にて使用しておらず、使用頻度も僅かであり、TVF の GB にのみ取り付けられていたことから、主要な劣化要因である「放射線量 (βγ線)」の影響のみを評価した。さらに、グローブの使用可能年数の推測のための参考データとして、非管理区域の倉庫において空調管理なし、遮光有りの条件で約 8 年間保管したハイパロン®製グローブと約 23 年間保管したネオプレン®製グローブについても物性値を測定した。

3.3 物性値（引張強さ、伸び率、硬さ）の測定方法

グローブの材質である合成ゴムの物性値としては、引張強さ、伸び率、硬さが知られている。引張強さはグローブが有する機械的強度を示し、引張強さが低下すると強度が不足してグローブが千切れ易くなる。伸び率はグローブのしなやかさを示し、伸び率が低下すると伸縮性がなくなりグローブが裂けやすくなる。また、硬さはグローブの変形量を示し、硬さが低下すると変形が起こりにくくなりグローブが破れやすくなる。合成ゴムの引張強さ、伸び率、硬さの測定方法については、日本産業規格 (JIS) にて規格化されており、サンプルから所定の試験片を調製して測定を行う^{9)・11)}。本調査でも JIS に準じてグローブから試験片を調製して引張強さ、伸び率、硬さを測定した。なお、JIS の要求事項とグローブ物性値の測定方法の関係については付録 1、引張強さと伸び率の測定に使用した測定装置の健全性は付録 2 に詳細を示す。また、Fig. 3 に引張強さ、伸び率、硬さの測定方法を示す。

(1) 引張強さ、伸び率の測定

引張強さ、伸び率の測定に使用する試験片は JIS K6251 に準じて¹⁰⁾、ダンベル状 3 号形の試験片型抜き器 (ASKER 製レバー式) を用いてグローブの掌又は腕部から採取した。その後、試験片をデジタルフォースゲージ (イマダ製 DS2) とスタンド (イマダ製 MX2-500N) から構成される引張試験機に取り付け、試験片破断時の最大引張強さと伸び率を測定した。なお、試験片は各グローブから 5 個調製し、各試験片の測定データを数値順に並べた時の中央の値である中央値を当該グローブの引張強さ及び伸び率として採用した。

(2) 硬さの測定

引張強さと伸び率の測定後の破断した試験片 2 枚を重ねたのち、JIS K6253 に準じて¹¹⁾、硬さ計 (TECLOCK 製 CS779G) を用いて硬さを測定した。なお、引張強さ、伸び率の測定と同様に、硬さの測定は各試験片について合計 5 回実施し、各試験片の測定データを数値順に並べた時の中央の値である中央値をグローブの硬さとして採用した。

4. グローブの物性値の測定結果

主要な劣化要因と補足の劣化要因の各指標について、グローブの物性値である引張強さ、伸び率、硬さを測定した。測定した物性値は、新品のグローブの物性値、新品のグローブ納品時の受入基準値と比較して使用年数の追加延長が可能か確認した。以下、物性値の測定結果の詳細を示す。

4.1 「使用頻度」の影響

使用頻度の異なるハイパロン®製グローブについて、引張強さ、伸び率、硬さを測定した結果を Table 2 に示す。使用年数 4 年で定期交換したグローブの引張強さと伸び率は、それぞれ 26～36 MPa、415～495%であり、新品のグローブの引張強さ（27～36 MPa）、伸び率（440～490%）と比べてもほぼ同じ値であった。また、使用頻度の高低に比例してグローブの引張強さ、伸び率が変化するような規則性は見られず、各物性値に有意な差異も確認されなかった。一方、測定したグローブの硬さは 64°～70°であり、新品のグローブの硬さである 57°と比べて 10～20%程度の硬化が確認された。グローブの材質である合成ゴムは、経年変化により硬化することが知られており^{9),12)}、定期交換したグローブが新品のグローブより硬化している要因は、グローブの使用に伴う経年変化によるものと考えられる。

なお、測定した引張強さと伸び率は、全て新品のグローブの受入基準値（引張強さ $\geq$ 16 MPa、伸び率 $\geq$ 400%）を上回っており、評価 A を満足していた。これらの結果より、外観上の異常がなく定期交換したグローブにおいて、「使用頻度」が物性値へ影響を及ぼすことはなく、物性上の劣化は確認されなかった。このため、これらグローブでは、現状の最長使用年数（4 年）に、さらに 4 年を追加することは可能と考えられた。

4.2 「硝酸」の影響

硝酸の使用環境が異なるハイパロン®製グローブについて、引張強さ、伸び率、硬さを測定した結果を Table 3 に示す。硝酸の使用環境の変化に伴うグローブの引張強さと伸び率の値の変化は見られず、物性値は新品のグローブとほぼ同じ値であり、各物性値に有意な差異は確認されなかった。また、硬さでは新品のグローブよりも 10～20%の硬化が確認された。

なお、前節で示した「使用頻度」の場合と同様に、測定した引張強さと伸び率は、全て新品のグローブの受入基準値（引張強さ $\geq$ 16 MPa、伸び率 $\geq$ 400%）を上回っており、評価 A を満足していた。これらの結果より、外観上の異常がなく定期交換したグローブにおいて、「硝酸」が物性値へ影響を及ぼすことはなく、「使用頻度」の時と同様に物性上の劣化も見られないことから、現状の最長使用年数（4 年）に、さらに 4 年を追加することは可能と考えられた。

4.3 「放射線量（ $\beta\gamma$ 線）」の影響

グローブが受けた放射線量として、各グローブが取り付けられた GB の放射線量（ $\beta\gamma$ 線）を求め、それぞれ放射線量の異なるハイパロン®製グローブとネオプレン®製グローブについて、引張強さ、伸び率、硬さを測定した結果を Table 4、Table 5 に示す。ハイパロン®製グローブ

の引張強さと伸び率は 21～35 MPa、415～481%であり、新品のグローブの引張強さ 27～36 MPa、伸び率 440～490%と比較して一部のグローブで物性値は低下していた。また、硬さは新品のグローブよりも 10～20%程度の硬化が確認された。ネオプレン®製グローブでは、今回使用した測定装置では試験片を破断させることはできなかったため、当該測定装置で確認した最大引張強さと最大伸び率を記録した。その結果、引張強さは 20～22 MPa 以上、伸び率は 700% 以上であり、新品のグローブの引張強さ 24～29 MPa、伸び率 790～860%よりも 15～20%以下で物性値が低下している可能性が考えられた。また、硬さも新品のグローブから 10～20%程度硬化していた。

放射線によるグローブの材質である合成ゴムの劣化は、線量が $10^4 \sim 10^5$ Gy から始まることが知られている^{13),14)}。今回、測定したグローブの最大線量率は 1 mSv/h 程度であり、累積線量は最大でも約 40 Gy 程度である。このため、新品のグローブからの物性値の変化が放射線に起因する劣化によるものとは考えにくく、経年変化や GB 内の硝酸ヒュームによる複合的な要因によるものではないかと考えられた。さらに、ハイパロン®製グローブ、ネオプレン®製グローブともに、放射線量に比例して物性値が低下するといった規則性は確認されず、「使用頻度」、「硝酸」の影響と同様に、測定した各物性値に有意な差異は確認されなかった。また、グローブの外観に異常は見られず、物性値の低下も一部のグローブのみに見られたものであり、その程度も 10～20%程度と僅かであった。これら結果より、今回調査した放射線量の範囲では、「放射線量 ($\beta\gamma$ 線)」は、グローブの物理的特性に大きく影響を及ぼすものではないと判断した。

なお、ハイパロン®製グローブ、ネオプレン®製グローブともに、測定した引張強さと伸び率は、全て新品のグローブの受入基準値（ハイパロン®製グローブ：引張強さ ≥ 16 MPa、伸び率 $\geq 400\%$ 、ネオプレン®製グローブ：引張強さ ≥ 20 MPa、伸び率 $\geq 700\%$ ）を上回っており、評価 A を満足していた。このため、これらグローブにおいても現状の最長使用年数（4 年）に、さらに 4 年を追加することは可能と考えられた。また、「使用頻度」、「硝酸」、「放射線量 ($\beta\gamma$ 線)」の影響について測定したグローブの物性値より、グローブに影響を及ぼす要因の度合いは、「放射線量 ($\beta\gamma$ 線)」>「使用頻度」、「硝酸」の順と考えられた。

4.4 補足の劣化要因「湿式・乾式」、「蛍光灯（紫外線）」の影響

湿式・乾式の環境で使用したハイパロン®製グローブ、及び蛍光灯（紫外線）の点灯状況が異なる環境におけるハイパロン®製グローブについて、測定した引張強さ、伸び率、硬さをそれぞれ Table 6、Table 7 に示す。その結果、補足の劣化要因である「湿式・乾式」、「蛍光灯（紫外線）」に対し、引張強さと伸び率は新品のグローブとほぼ同じ値であり、硬さは新品のグローブよりも 10～20%程度の硬化が見られた。

また、測定した引張強さと伸び率は、全てのグローブで新品のグローブの受入基準値（引張強さ ≥ 16 MPa、伸び率 $\geq 400\%$ ）以上であり、評価 A を満足していた。これらの結果より、他の使用環境のグローブと同様に、補足の劣化要因である「湿式・乾式」、「蛍光灯（紫外線）」におけるグローブについても、現状の最長使用年数（4 年）に、さらに 4 年を追加することは可能と考えられた。また、これまでの測定結果より、グローブの物性値に影響を及ぼす要因の度合いは、「放射線量 ($\beta\gamma$ 線)」>「使用頻度」、「硝酸」>「湿式・乾式」、「蛍光灯（紫外線）」の

順と考えられた。

4.5 使用年数 3 年、長期保管グローブの物性値

使用年数 3 年で定期交換したハイパロン®製グローブ、及び長期保管（8 年、23 年）したハイパロン®製グローブ、ネオプレン®製グローブの物性値を測定した結果をそれぞれ Table 8、Table 9 に示す。使用年数 3 年で定期交換したグローブの引張強さと伸び率は、新品のグローブと比べて物性値の低下は見られず、ほぼ同じ値であり、硬さは、64°～69°と他の劣化要因と同様に新品のグローブから 10～20%程度の硬化が見られた。また、使用年数 3 年と 4 年のグローブ間で物性値に有意な差異は見られなかった。長期保管したグローブでは、Table 9 に示すように、ハイパロン®製グローブ、ネオプレン®製グローブともに、引張強さ、伸び率、硬さは新品のグローブとほぼ同じ値を示していた。「使用頻度」、「硝酸」、「放射線量（ $\beta\gamma$ 線）」の要因で見られた新品のグローブと比べた硬さの硬化は、長期保管したグローブでは見られなかった。これは、GB に取り付け後のグローブの使用環境が硬さに影響を与えているためと考えられた。

なお、使用年数 3 年で定期交換したグローブ、長期保管したグローブの引張強さと伸び率は、いずれも新品のグローブの受入基準値以上であり、評価 A を満足していた。

5. グローブの使用可能年数の推測

外観上の異常がなく定期交換したグローブについては、前章までに示したように、主要な劣化要因である「使用頻度」、「硝酸」、「放射線量（ $\beta\gamma$ 線）」、補足の劣化要因である「湿式・乾式」、「蛍光灯（紫外線）」において、引張強さ、伸び率は全て新品のグローブの受入基準値以上を示し、評価 A を満足していることが分かった。また、「使用頻度」の高低、「硝酸」の使用環境の変化、「放射線量（ $\beta\gamma$ 線）」の高低に比例した物性値の規則的な変化は確認されず、「乾式・湿式」の違い、「蛍光灯（紫外線）」の点灯状況の有無、使用年数 3 年～4 年の違いによる物性値の有意な差異も見られず、測定した各物性値は長期保管したグローブの引張強さと伸び率とも有意な差異はなかった。これらの結果より、現状の TRP でのグローブ使用環境において、外観上の異常がなく定期交換したグローブに物性上の劣化はなく、新品のグローブと同等の性能を有したことから、現状の最長使用年数（4 年）に、さらに 4 年を追加した合計 8 年間の使用が可能と考えられた。

そこで、新品のグローブ（使用年数：0 年）、定期交換したグローブ（使用年数：3 年、4 年）について、グローブの物性値と使用年数をプロットし、式(1)を踏まえて指数関数による外挿線を作成するとともに、長期保管したグローブの物性値と比較した。Fig. 4、Fig. 5 にプロット図と作成した外挿線を示す。なお、使用年数 3 年におけるネオプレン®製グローブでは、引張強さと伸び率の測定時に試験片が破断せず、正確な物性値の評価が難しかったことから、長期保管（23 年）したグローブも含めて外挿線を作成した。その結果、ハイパロン®製グローブ、ネオプレン®製グローブともに、作成した複数の外挿線の全てにおいて、使用年数を 8 年とした場合の物性値は、受入基準値の 20 % 減の値（ハイパロン®製グローブ：引張強さ ≥ 13 MPa、伸び率 ≥ 320 %、ネオプレン製グローブ：引張強さ ≥ 16 MPa、伸び率 ≥ 560 %）以上を示しており、評価 B を満足していた。また、ハイパロン®製グローブ、ネオプレン®製グローブともに、長期保管したグローブの物性値は外挿線よりも安全側である上側にプロットされており、保守的な評価ができており、グローブの使用可能年数 8 年は妥当であった。

これらの結果より、評価 A、B を満足する条件として、TRP にて GB に取り付けた後に外観上の異常がないグローブについては、最長使用年数を 8 年に設定した。なお、グローブの点検頻度、項目は従来から変更せず、異常が確認されれば使用年数に関係なく速やかに交換して管理することとした。このため、グローブの最長使用年数を延長したことによる安全性の低下（リスクの上昇）は起こらない。また、本調査結果及び推測した使用可能年数は、令和 4 年 1 月に TRP 内の関係各課へ報告して情報共有を図るとともに、内部規則を改訂し、令和 4 年 3 月 31 日までにグローブの使用年数の延長化を達成した。

6. 使用年数の延長化による効果

TRP における過去 4 年間（2018 年～2021 年）のグローブの定期交換実績を踏まえ、最長使用年数を 8 年にした場合に予定されるグローブの定期交換数から、グローブの使用年数を 4 年から 8 年に延長した際の効果を評価した。なお、評価にあたっては、1 年あたりのグローブの購入に係る費用（購入費）、交換に要する作業労力、交換に伴い発生する廃棄物発生量を試算した。その結果、Fig. 6 に示すように、購入費、作業労力、廃棄物発生量については、最長使用年数を 8 年に延長することで、それぞれ約 4 割低減化されるとともに、汚染や被ばくのリスクも低減され、TRP におけるグローブ管理の効率化・合理化が期待できる効果があることを確認した。以下、各効果の詳細を示す。

(1) 購入費

従来は交換用グローブの購入費として約 660 万円/年を要していたが、最長使用年数を 8 年に延長することで、グローブ購入費は約 365 万円/年にまで低減することができる（約 44 %の低減化）。

(2) 作業労力

従来はグローブの交換作業に、約 840 人・時/年の作業労力を要していたが、最長使用年数を 8 年に延長することで、作業労力は約 536 人・時/年にまで低減することができる（約 36 %の低減化）。

(3) 放射性廃棄物の発生量

従来はグローブの交換作業において、容量 15 L の放射性廃棄物容器が約 82 個/年発生していたが、最長使用年数を 8 年に延長することで、放射性廃棄物の発生量は約 46 個/年に低減することができる（約 44 %の低減化）。

(4) 汚染や被ばくのリスク

グローブの交換作業では、作業中に誤って GB 内部の放射性物質が漏洩して、作業場所及び周辺が汚染するリスクや作業者が被ばくするリスクがあったが、最長使用年数を 8 年に延長することで、グローブの交換作業頻度が約半分に減少するため、これらのリスクも低減できる。

7. まとめ

本件では、これまで詳細な物性調査が行われていなかった TRP の GB 用グローブについて、外観上の異常がなく定期交換したグローブを対象に、主要な劣化要因である「使用頻度」、「硝酸」、「放射線量（ $\beta\gamma$ 線）」、補足の劣化要因である「湿式・乾式」、「蛍光灯（紫外線）」の使用環境に分類し、各使用環境におけるグローブの物性値を測定した。その後、測定結果を新品のグローブの物性値及び新品のグローブ納品時の受入基準値と比較するとともに、測定した物性値と使用年数をプロットして外挿線を作成した。その結果、以下が明らかとなった。

- 全ての劣化要因に対し、定期交換したグローブの硬さは、新品のグローブよりも 10～20% 程度の硬化が見られたものの、引張強さと伸び率は新品のグローブとほぼ同じ値であった。
- 全ての劣化要因に対し、定期交換したグローブの引張強さと伸び率は、新品のグローブ納品時の受入基準値を満足しており、従来からの最長使用年数である 4 年に、さらに 4 年の使用（合計 8 年間の使用年数）が可能なスペックであった。
- グローブの物性値に影響を及ぼす要因の度合いは、以下の順であった。

「放射線量（ $\beta\gamma$ 線）」 > 「使用頻度」、「硝酸」 > 「湿式・乾式」「紫外線」

- 作成した外挿線より、最長使用年数 8 年における物性値は、受入基準値の 20%減の値以上を示しており、8 年間のグローブの使用は妥当であることが分かった。

上記結果より、TRP にて GB に取り付けた後に外観上の異常がないグローブについては、最長使用年数を 8 年に設定した。今後、当該調査結果については、類似の GB 用グローブを取扱う日本原燃株式会社等への展開も期待される。また、GB に取り付けて使用年数 8 年で定期交換する実際のグローブについても引き続き物性調査（5～8 年の 1 年毎）を継続することで、本件で設定した使用年数の検証を進めたい。

謝 辞

本件の実施にあたっては、再処理廃止措置技術開発センター 施設管理部の栗田勉 部長、北川修 技術主席、施設管理課の磯崎尚彦 主査、前処理施設課の西野紗樹 氏、化学処理施設課の鈴木翔平 氏、転換施設課の渡邊伸久 マネージャー、三好竜太 主査、加藤圭将 氏、分析課の田口茂郎 課長、後藤雄一 技術副主幹、堀籠和志 主査、環境保全部 環境管理課の鬼澤寿和 主査、ガラス固化部 ガラス固化処理課 山内祥 氏、株式会社アセンドの橋本祐之 氏、小西弘晃 氏、検査開発株式会社の間宮芳広 氏、川又幸成 氏、黒澤太輝 氏に多大なるご協力を頂きましたことを深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 核燃料教材作成タスクフォース: “核燃料物質取扱いのための基礎(第2版)”, JAEA-Review 2020-007, 2020, 165p.
- 2) グローブ基準化検討専門部会: “グローブ点検・交換等に関する基準化検討結果報告書”, PNC TN8410 86-006, 1986, 175p.
- 3) 横瀬恭平: “ゴム材料の劣化について”, 材料試験, **9**, 1960, pp.646-657.
- 4) 桑山力次, 日下義治: “ゴム材料の環境劣化と対策 (2)クロロスルホン化ポリエチレン”, 日本ゴム協会誌, **58**, 1985, pp.781-788.
- 5) 中内秀雄: “ゴム複合体の劣化”, 日本ゴム協会誌, **64**, 1991, pp.566-578.
- 6) 齋藤浩介, 野上嘉能, 古田土和雄, 松山一富, 遠藤秀男: “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, 118p.
- 7) 一色節也: “耐熱老化性”, 日本ゴム協会誌, **38**, 1965, pp.884-897.
- 8) グローブ破損調査グループ, バックエンド技術部: “第1廃棄物処理棟地下灰取出室グローブ破損調査報告書”, JAERI-Review 2002-017, 2002, 121p.
- 9) 後藤雄一, 山本昌彦, 久野剛彦, 駿河谷直樹: “再処理施設におけるグローブボックスパネル用ガスケットの物性評価”, 日本保全学会第13回学術講演会要旨集, 2016, pp.31-34.
- 10) 日本産業規格, JIS K6251:2010, 加硫ゴム及び熱可塑性ゴム ー引張特性の求め方ー.
- 11) 日本産業規格, JIS K6253:2012, 加硫ゴム及び熱可塑性ゴム ー硬さの求め方ー.
- 12) L.S.V.-Delinder, J.R.Calloway, 佐藤靖 (訳): “クロロスルホン化ポリエチレン(Hypalon)”, 防触技術, **11**, 1961, pp.64-72.
- 13) 斉藤孝臣: “各種ゴムの劣化機構”, 日本ゴム協会誌, **5**, 1995, pp.284-296.
- 14) 小出武城, 栗林愿: “ゴムに対する放射線の効果”, 高分子, **12**, 1959, pp.681-687.

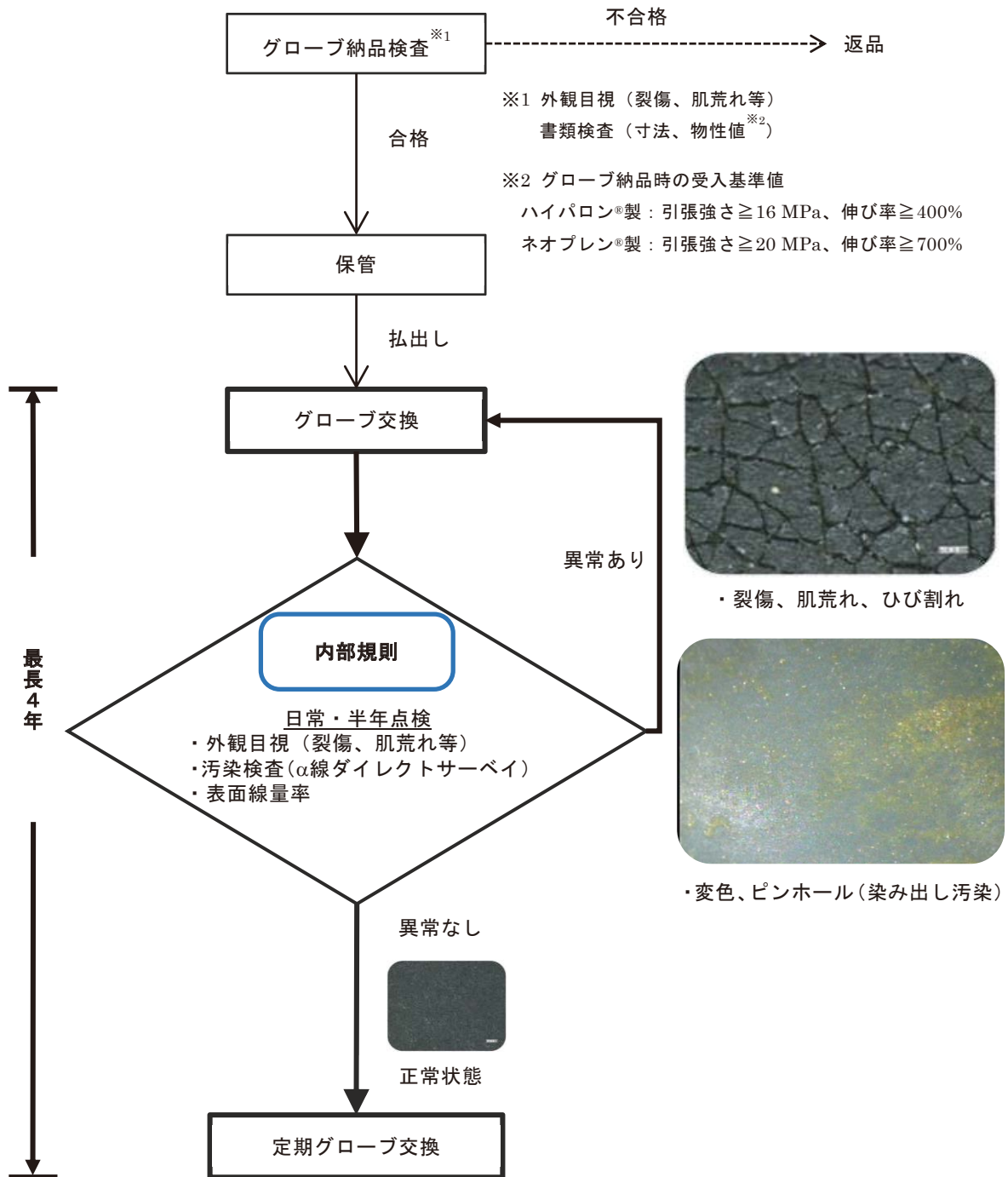


Fig. 1 グローブの納品検査、交換の判定に係るフロー

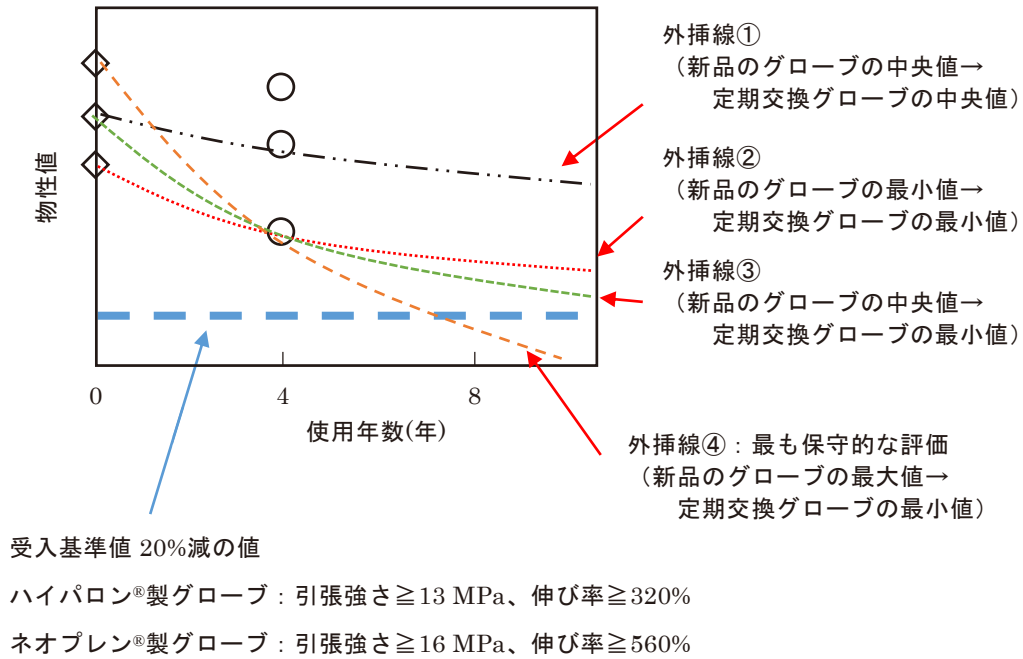


Fig. 2 グローブ使用可能年数の評価のための外挿線の例

Table 1 劣化要因の指標と測定対象グローブ

グローブ No.	材質	施設	主要な劣化要因※1			補足の劣化要因		使用 年数
			使用 頻度	硝酸	放射線量 ($\beta\gamma$)	湿式・乾式	蛍光灯 (紫外線)	
グローブ①	ハイパロン®	分析所	×	×	×	湿式	作業中のみ点灯	4
グローブ②	ハイパロン®	分析所	△	○	×	湿式	常時点灯	4
グローブ③	ハイパロン®	分析所	◎	△	×	湿式	常時点灯	4
グローブ④	ハイパロン®	PCDF	×	×	×	乾式	常時点灯	4
グローブ⑤	ハイパロン®	PCDF	○	×	×	乾式	常時点灯	4
グローブ⑥	ハイパロン®	PCDF	○	×	×	乾式	常時点灯	4
グローブ⑦	ハイパロン®	PCDF	△	○	△	湿式	常時点灯	4
グローブ⑧	ハイパロン®	分析所	○	◎	×	湿式	常時点灯	4
グローブ⑨	ハイパロン®	PCDF	×	×	×	湿式	作業中のみ点灯	4
グローブ⑩	ハイパロン®	PCDF	△	○	△	湿式	常時点灯	4
グローブ⑪	ハイパロン®	PCDF	×	×	○	湿式	作業中のみ点灯	4
グローブ⑫	ハイパロン®	PCDF	△	×	◎	湿式	作業中のみ点灯	4
グローブ⑬	ハイパロン®	PCDF	×	×	△	乾式	常時点灯	4
グローブ⑭	ハイパロン®	PCDF	○	×	△	乾式	常時点灯	4
グローブ⑮	ネオプレン®	TVF	△	×	×	湿式	作業中のみ点灯	3
グローブ⑯	ネオプレン®	TVF	△	×	◎	湿式	作業中のみ点灯	3
グローブ⑰	ハイパロン®	PCDF	△	×	×	湿式	常時点灯	4
グローブ⑱	ハイパロン®	PCDF	×	×	×	乾式	常時点灯	4
グローブ⑲	ハイパロン®	PCDF	△	○	△	湿式	作業中のみ点灯	3
グローブ⑳	ハイパロン®	PCDF	○	×	×	湿式	作業中のみ点灯	3
グローブ㉑	ハイパロン®	PCDF	○	×	×	湿式	作業中のみ点灯	3
グローブ㉒	ハイパロン®	PCDF	×	×	×	湿式	作業中のみ点灯	3
グローブ㉓	ハイパロン®	PCDF	×	×	×	湿式	作業中のみ点灯	4

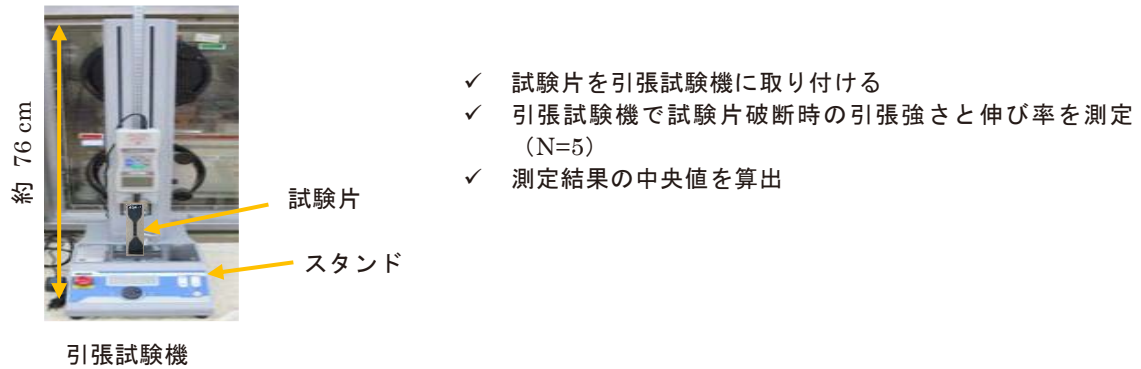
※1 劣化因子の指標

記号	使用頻度	硝酸	放射線量 ($\beta\gamma$ 線)
◎	ほぼ毎日	使用あり、硝酸ヒューム (ヒーター)	1 mSv/h 以上
○	週に 1 回程度	使用あり	100 ~ 1000 μ Sv/h
△	月に 1 回程度	少量使用	10 ~ 100 μ Sv/h
×	半年に 1 回程度	使用無し	10 μ Sv/h 以下

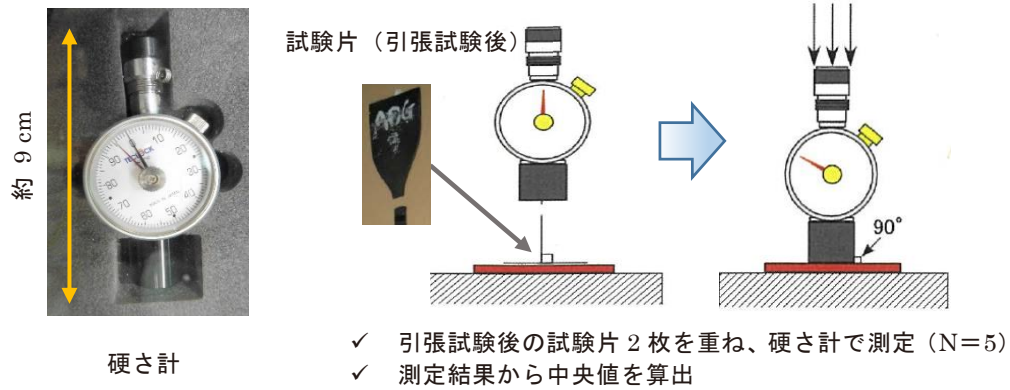
① 試験片の採取



② 引張強さ・伸び率測定



③ 硬さ測定



④ 試験片の外観（グローブ①のサンプル群の写真）

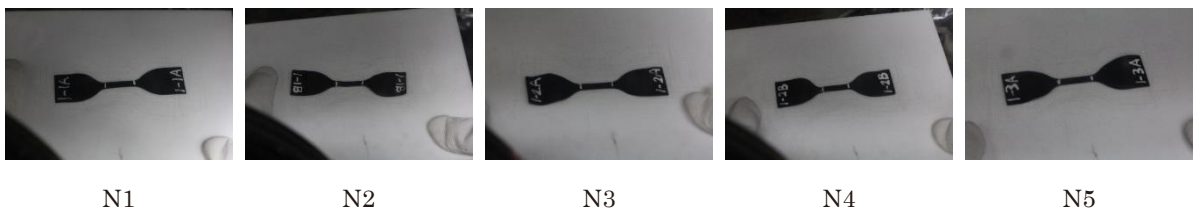


Fig. 3 引張強さ、伸び率、硬さの測定方法と試験片の外観

Table 2 使用頻度の異なるハイパロン®製グローブの物性値測定結果

新品のグローブの引張強さと伸び率には 2016 年に納品時の検査成績書に記載されたデータ (N=17) の最大値と最小値を記載、硬さは新品のグローブについて、本件で測定したデータ (N=5) を記載

グローブ No.	環境	使用頻度	引張強さ (MPa)	伸び率 (%)	硬さ (°)
ハイパロン®製グローブの受入基準値	—	—	16 以上	400 以上	—
新品のグローブ	—	—	27~36	440~490	57
グローブ①	湿式	× (半年に 1 回程度)	32	495	66
グローブ②		△ (月に 1 回程度)	36	480	68
グローブ③		◎ (ほぼ毎日)	32	494	64
グローブ④	乾式	× (半年に 1 回程度)	26	415	70
グローブ⑤		○ (週に 1 回程度)	32	455	67
グローブ⑥		○ (週に 1 回程度)	26	461	66

Table 3 硝酸の使用環境が異なるハイパロン®製グローブの物性値測定結果

新品のグローブの引張強さと伸び率には 2016 年に納品時の検査成績書に記載されたデータ (N=17) の最大値と最小値を記載、硬さは新品のグローブについて、本件で測定したデータ (N=5) を記載

グローブ No.	環境	硝酸の使用環境	引張強さ (MPa)	伸び率 (%)	硬さ (°)
ハイパロン®製グローブの受入基準値	—	—	16 以上	400 以上	—
新品のグローブ	—	—	27~36	440~490	57
グローブ①	湿式	× (使用なし)	32	495	66
グローブ⑦		○ (使用あり)	25	436	70
グローブ⑧		◎ (ヒーターで加熱し 硝酸ヒュームあり)	34	505	64

Table 4 放射線量（ $\beta\gamma$ 線）が異なるハイパロン®製グローブの物性値測定結果

新品のグローブの引張強さと伸び率には2016年に納品時の検査成績書に記載されたデータ（N=17）の最大値と最小値を記載、硬さは新品のグローブについて、本件で測定したデータ（N=5）を記載

グローブ No.	環境	GB 内の $\beta\gamma$ 線量率	引張強さ (MPa)	伸び率 (%)	硬さ (°)
ハイパロン®製グローブの受入基準値	—	—	16 以上	400 以上	—
新品のグローブ	—	—	27～36	440～490	57
グローブ⑨	湿式	× (10 μ Sv/h 以下)	35	455	66
グローブ⑩		△ (10～100 μ Sv/h)	26	474	63
グローブ⑪		○ (100～1000 μ Sv/h)	22	475	66
グローブ⑫		◎ (1 mSv/h 以上)	23	481	65
グローブ④	乾式	× (10 μ Sv/h 以下)	26	415	70
グローブ⑬		△ (10～100 μ Sv/h)	25	451	68
グローブ⑭		△ (10～100 μ Sv/h)	21	457	66

Table 5 放射線量（ $\beta\gamma$ 線）が異なるネオプレン®製グローブの物性値測定結果

新品のグローブの引張強さと伸び率には2016年に納品時の検査成績書に記載されたデータ（N=5）の最大値と最小値を記載、硬さは新品のグローブについて、本件で測定したデータ（N=5）を記載

グローブ No.	環境	GB 内の $\beta\gamma$ 線量率	引張強さ (MPa)	伸び率 (%)	硬さ (°)
ネオプレン®製グローブの受入基準値	—	—	20 以上	700 以上	—
新品のグローブ	—	—	24～29	790～860	38
グローブ⑮※1	湿式	× (10 μ Sv/h 以下)	22 以上	700 以上	51
グローブ⑯※1		◎ (1 mSv/h 以上)	20 以上	750 以上	50

※1 引張強さと伸び率の測定において、試験片が破断されなかったため、最大伸び時の引張強さと伸び率を記載

Table 6 湿式又は乾式環境で使用したハイパロン®製グローブの物性値測定結果

新品のグローブの引張強さと伸び率には 2016 年に納品時の検査成績書に記載されたデータ (N=17) の最大値と最小値を記載、硬さは新品のグローブについて、本件で測定したデータ (N=5) を記載

グローブ No.	使用環境	引張強さ (MPa)	伸び率 (%)	硬さ (°)
ハイパロン®製グローブの受入基準値	—	16 以上	400 以上	—
新品のグローブ	—	27～36	440～490	57
グローブ⑰	湿式	38	468	68
グローブ⑱	乾式	27	451	66

Table 7 蛍光灯の点灯状況が異なるハイパロン®製グローブの物性値測定結果

新品のグローブの引張強さと伸び率には 2016 年に納品時の検査成績書に記載されたデータ (N=17) の最大値と最小値を記載、硬さは新品のグローブについて、本件で測定したデータ (N=5) を記載

グローブ No.	環境	蛍光灯の 点灯状況	引張強さ (MPa)	伸び率 (%)	硬さ (°)
ハイパロン®製グローブの受入基準値	—	—	16 以上	400 以上	—
新品のグローブ	—	—	27～36	440～490	57
グローブ①	湿式	作業時のみ点灯 (1 回/1 月程度)	32	495	66
グローブ②		常時点灯	36	480	68

Table 8 使用年数 3、4 年で定期交換したハイパロン®製グローブの物性値測定結果

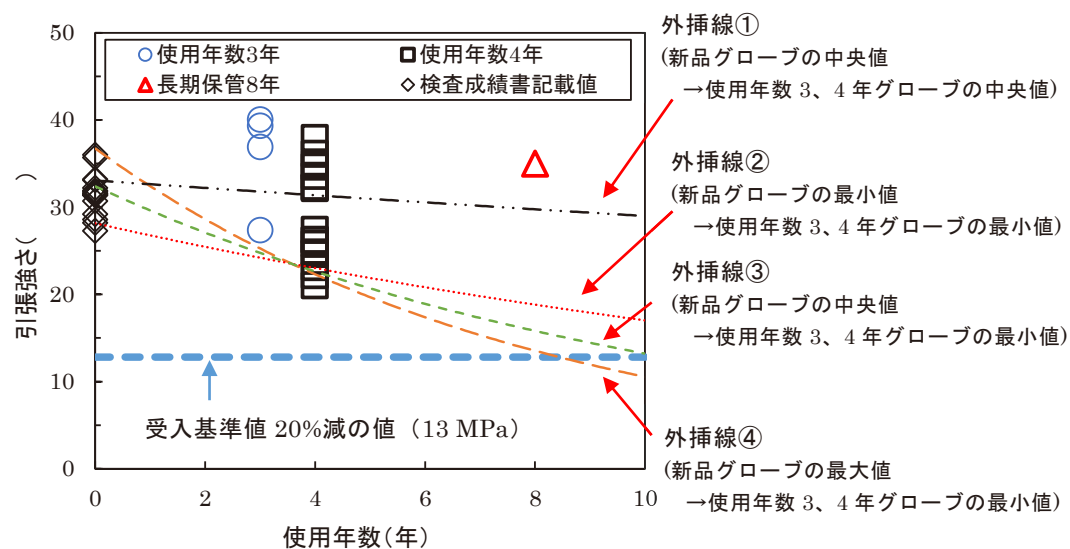
新品のグローブの引張強さと伸び率には 2016 年に納品時の検査成績書に記載されたデータ (N=17) の最大値と最小値を記載、硬さは新品のグローブについて、本件で測定したデータ (N=5) を記載

グローブ No.	環境	使用年数	引張強さ (MPa)	伸び率 (%)	硬さ (°)
ハイパロン®製グローブの受入基準値	—	—	16 以上	400 以上	—
新品のグローブ	—	—	27～36	440～490	57
グローブ⑩	湿式	3	27	462	66
グローブ⑪		3	37	464	67
グローブ⑫		3	39	507	69
グローブ⑬		3	40	491	64
グローブ⑭		4	32	495	66
グローブ⑮		4	35	455	66
グローブ⑯		4	35	455	67

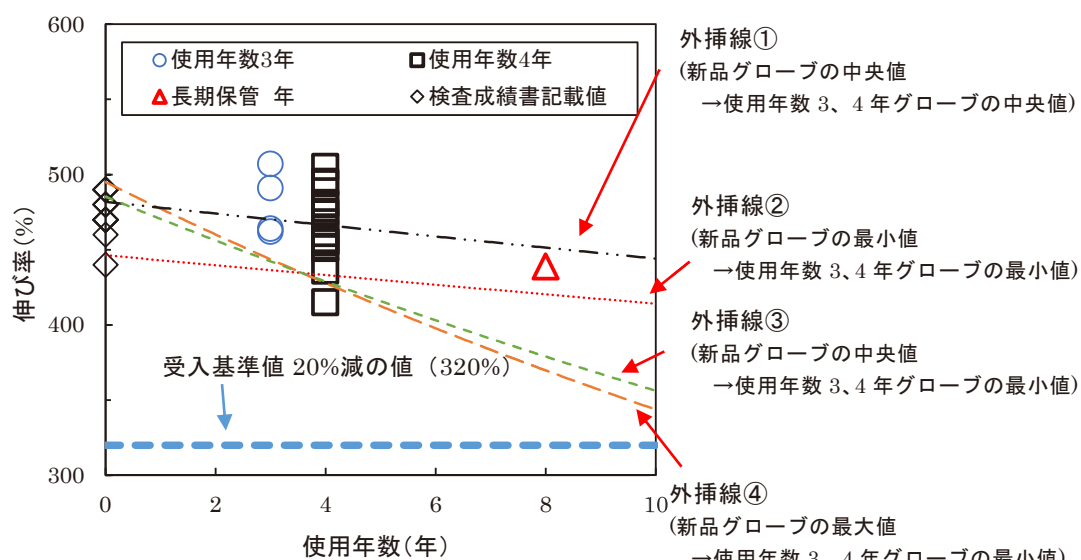
Table 9 長期保管グローブの物性値測定結果

新品のグローブの引張強さと伸び率には 2016 年に納品時の検査成績書に記載されたデータ (ハイパロン®製グローブ : N=17、ネオプレン®製グローブ : N=5) の最大値と最小値を記載、硬さは新品のグローブについて、本件で測定したデータ (ハイパロン®製とネオプレン®製グローブともに N=5) を記載

材質	グローブ	使用環境	保管年数 (年)	引張強さ (MPa)	伸び率 (%)	硬さ (°)
ハイパロン®	ハイパロン®製グローブの 受入基準値	—	—	16 以上	400 以上	—
	新品のグローブ	—	—	27～36	440～490	57
	長期保管したグローブ	空調管理：無し 遮光：有り	8	35	439	59
ネオプレン®	ネオプレン®製グローブの 受入基準値	—	—	20 以上	700 以上	—
	新品のグローブ	—	—	24～29	790～860	38
	長期保管したグローブ	空調管理：無し 遮光：有り	23	21	726	56



(a) 引張強さ



(b) 伸び率

Fig. 4 ハイパロン®製グローブの物性値と外挿線 (a)引張強さ、(b)伸び率

外挿線は指数関数（近似式： $y=ae^{bx}$ 、 a 、 b ：係数、 e ：ネイピア数）を用いて作成

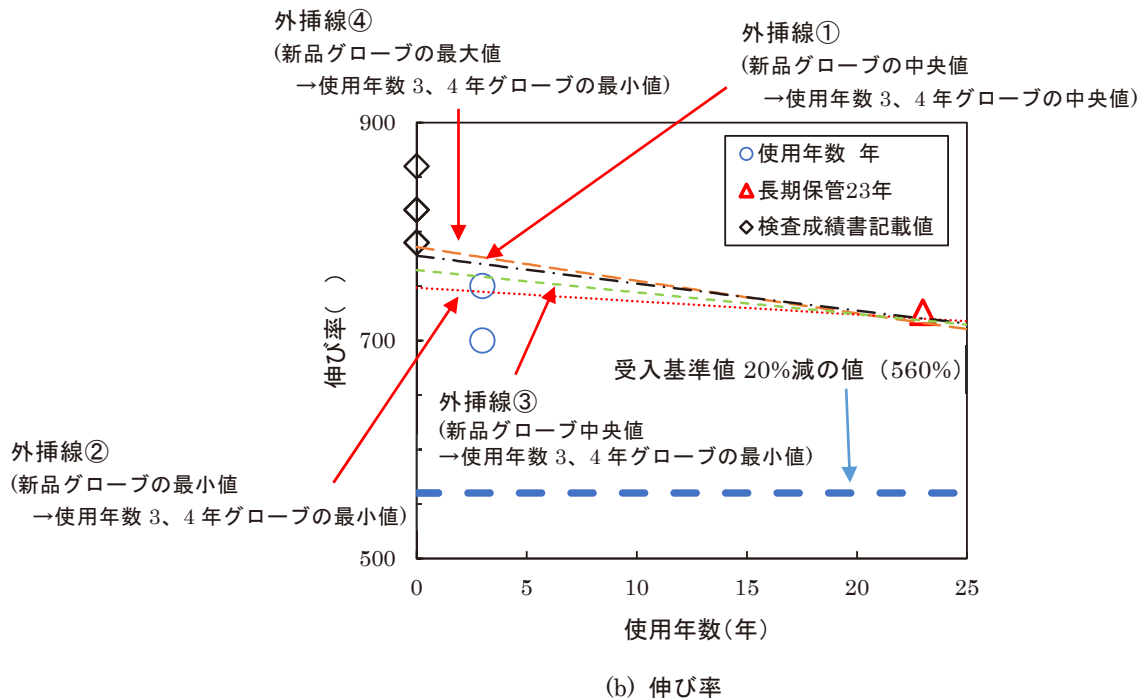
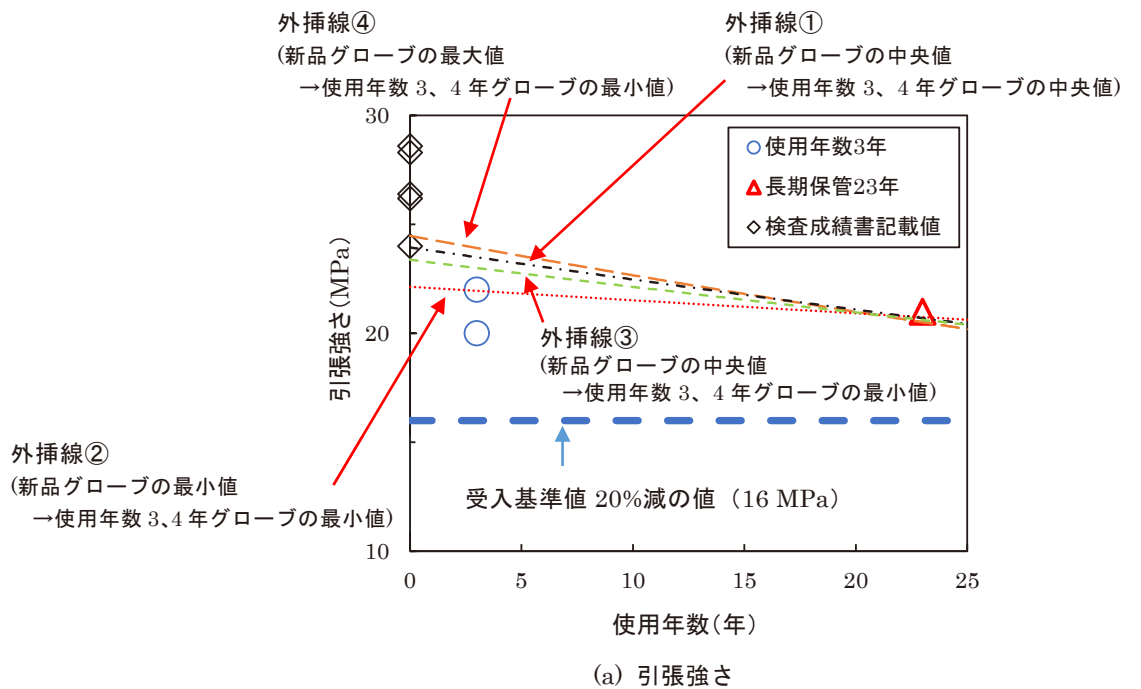


Fig. 5 ネオプレン®製グローブの物性値と外挿線 (a)引張強さ、(b)伸び率

外挿線は指数関数 (近似式: $y=ae^{bx}$ 、 a 、 b : 係数、 e : ネイピア数) を用いて作成

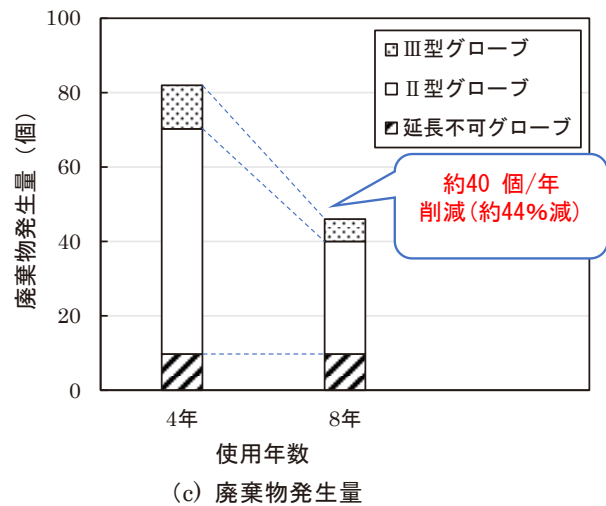
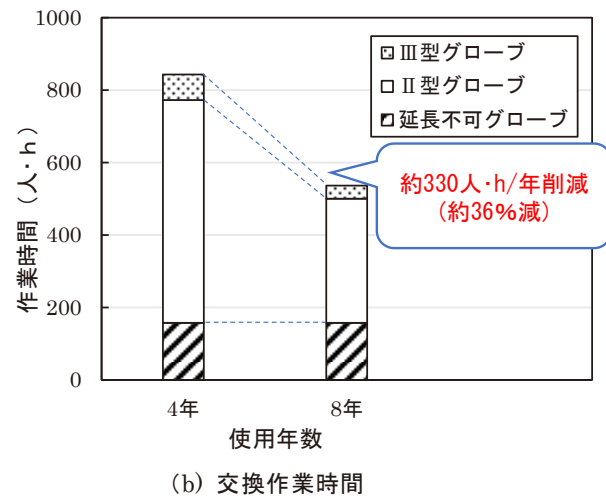
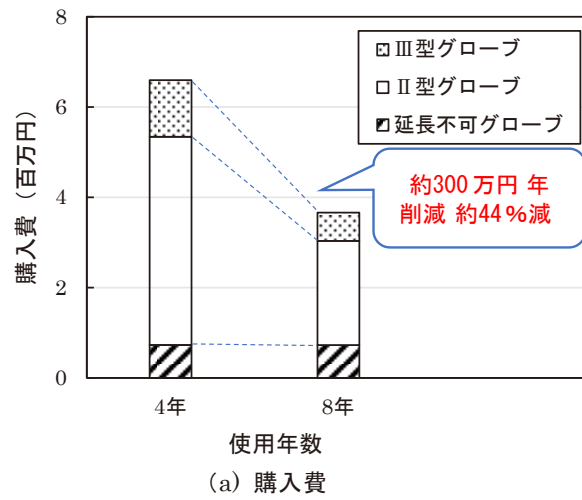


Fig. 6 使用年数の延長化に伴うコストの削減効果

II 型グローブ：GB のグローブポートに直接装着したグローブ

III 型グローブ：押し込み方式グローブポートに装着したグローブ

延長不可グローブ：本件で調査対象外とした高濃度 Pu 環境におけるグローブ

付録 1

グローブの物性値の測定方法と JIS の関係について

1. JIS の要求事項とグローブの物性値測定への課題

グローブの材質である合成ゴムの硬さ、引張強さ、伸び率測定については、JIS にて規格化されている。本件でも JIS に従いグローブの物性値を測定したものの、JIS は工業用製品を対象として作成されたものであり、GB に取り付けて既に使用されたグローブの物性値への適用にあたっては、全ての要求事項を満足することは困難であった。Table A1-1 に JIS の要求事項とグローブの物性値測定における課題を整理したものを示す。

Table A1-1 JIS の要求事項、グローブの物性値測定への適用時の課題

項目		JIS の要求事項 ^{1), 2)}	グローブの物性値測定への課題 ^{※1}	
試験片の採取		試験片の採取箇所に係る記載はない	×	グローブから試験片の採取箇所を決める必要が有る
		測定時は、試験片にゆがみ、掴み具切れ等を生じないようにしなければならない	×	グローブの各部から採取した試験片にゆがみ等の発生が有るか確認が必要
		異物の混入、傷等のある試験片を測定に用いてはならない	○	特になし
引張強さ・伸び率の測定	試験片	▶ ダンベル状 3 号形 ▶ 試験片の厚み：2 mm	×	グローブ等の厚みは 0.4～0.6 mm 硬さ測定と試験片が異なる
		3 個以上の試験片を使用して繰り返し測定を実施	○	特になし
	測定方法	① 試験片の中央部に標線を設ける ② 引張機にセット ③ 試験片を破断するまで引張操作を実施 ④ 試験片破断時の引張強さ、伸び率を記録（標線内で破断したデータのみを記録し、標線外で破断したデータは棄却する） ⑤ 記録データ（N=3 以上）の中央値を算出	×	グローブの測定モックアップで多くの標線外破断が確認され、標線内破断のデータは少ない。
硬さの測定	試験片	試験片の厚み：6 mm 以上（厚みがない場合は 3 枚まで重ね合わせ可能）	×	グローブ等の厚みは 0.4～0.6 mm
		端部から 12 mm 離れた位置で測定すること	○	特になし
	測定方法	① 測定器押針を試験片表面と直角にする ② 加圧板を試験片に接触 ③ 5 回測定 of 中央値を算出	○	特になし

※1 ×：JIS 要求事項を満足しない（課題あり）、○：JIS 要求事項を満足（課題なし）

2. 各課題への対応について

(1) 試験片の採取

工業製品を対象とした JIS では、グローブの引張強さ、伸び率、硬さ測定で使用する試験片について、グローブのどの場所から採取すべきか記載はなく、測定にあたっては試験片の採取

箇所を決める必要があった。また、JIS では測定にあたり、試験片にゆがみ、掴み具切れ等を生じないようにする必要があった。そこで、Fig. A1-1 に示すように、TRP の GB にて使用し、定期交換したグローブについて、グローブの指、掌、腕、カフ部からそれぞれ試験片を採取して、試験片の採取の簡便さ等を比較するとともに、引張強さと伸び率を測定して各部から採取した試験片の物性値を比較した。

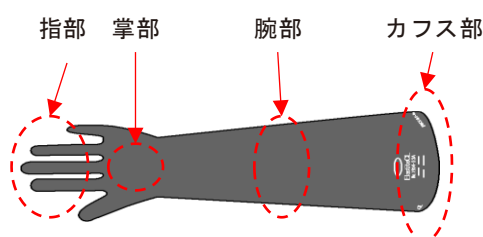


Fig. A1-1 グローブからの試験片採取箇所

採取した試験片を目視で確認すると Fig. A1-2 に示すように、指部から採取した試験片ではゆがみが見られたものの、掌、腕、カフス部から採取した試験片はゆがみ等の発生はなかった。また、ゆがみの見られた指部から採取した試験片では、他の試験片よりも物性値（引張強さ）に大きなバラツキが見られた。このため、指部からの試験片は物性値の測定には使用しないこととした。

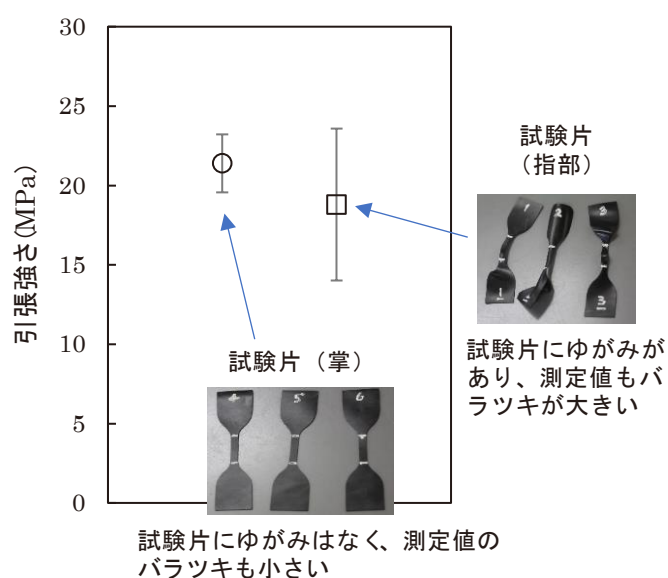


Fig. A1-2 グローブ（ネオプレン®製）の指部及び掌部から採取した試験片の引張強さ

Table A1-2 に指部以外のグローブの掌、腕、カフス部から採取した試験片について測定した引張強さと伸び率の結果を示す。その結果、試験片の採取箇所物性値に有意な差異は見られないことが分かった。なお、試験片の採取においては、Fig. A1-3 に示すように掌または腕部の

周辺はグローブが平坦でスペースもあることから、試験片型抜き器を容易に取り扱うことができた。さらに、掌、腕部では型抜き器を用いてグローブをそのまま打ち抜くことで1回の操作で2個の試験片を採取可能であり、効率的に試験片の採取ができた。このため、今回のグローブの物性値の測定には、掌部、腕部から採取した試験片を使用することとした。

Table A1-2 グローブ（ハイパロン®製）の掌、腕、カフス部から採取した試験片の物性値

採取箇所	引張強さ(MPa)	伸び率(%)
掌部	38	389
腕部	36	388
カフス部	39	400



- 指部はスペースがなく作業が難しく、GB内では型抜き器で試験片を打ち抜く際に作業用グローブを損傷する可能性有り
- 掌部、腕部の周辺はスペースが広く、型抜き器で安全且つ容易に試験片を採取可能
- グローブをそのまま抜き打つことで1回の抜き打ちで2個の試験片を採取可能



型抜き器で掌、腕から試験片を抜き打ち、1回の操作で試験片2個を採取

Fig. A1-3 グローブからの試験片採取方法

(2)引張強さ、伸び率測定

①試験片の厚み

JIS では、試験片が破断したときに記録される力について試験片の標線部における断面積で除した値を引張強さ、試験片が破断したときに記録される標線間の長さについて標線間の初期長さに対する比率(%)で表した値を伸び率と定義している。このため、測定にあたり、試験片の厚みは2 mm 以上とすることがJIS では要求されている。一方、今回の試験で使用したグローブの厚みは0.4~0.6 mm 以上であり、JIS で要求される厚みを満足できないものであった。また、過去のグローブ等に係る引張強さ、伸び率の測定例について文献調査を実施した結果、JIS の厚みを満足はできないものの、グローブからダンベル状3号形で採取した試験片1枚を用いて引張強さと伸び率を測定していた^{3),4)}。そこで、今回の試験でも過去の報告と同様に、試験片1枚を用いて引張強さと伸び率を測定することとした。

②引張強さ、伸び率と硬さ測定で使用する試験片について

JIS は工業用製品を対象としていることから、同じ試験片を用いて引張強さ、伸び率、硬さを測定することを想定していない。既に使用されたグローブの場合、試験片が異なると物性値も異なる可能性があり、可能な限り同一の試験片を用いて物性値を測定することが望ましい。

そこで、硬さ測定の前後に引張強さを測定し、同一の試験片で測定を行った場合に物性値へ影響を及ぼすか確認した。

その結果、Fig. A1-4 に示すように、硬さ測定前にそのまま引張強さを測定した場合と硬さ測定後に引張強さを測定した場合において、測定値に有意な差異は見られなかった。また、伸び率についても同様の結果であった。そこで、今回の試験では、硬さ測定前に引張強さと伸び率を測定することとし、硬さ測定は引張強さと伸び率測定後の破断した試験片を使用することとした。

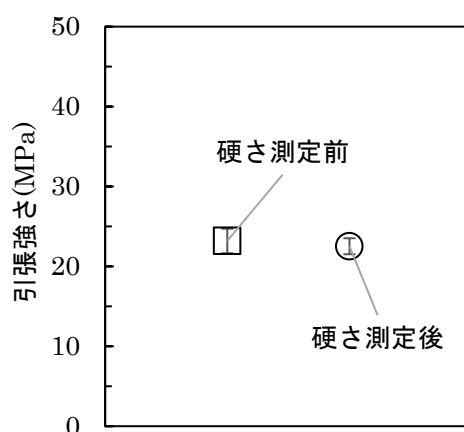


Fig. A1-4 硬さ測定前後における引張強さ

③標線外破断について

JIS では Fig. A1-5 に示すように、引張強さと伸び率測定ではダンベル状 3 号形に標線を設け、標線内で破断したデータのみを採用することとし、標線外で破断したデータは棄却することが記載されている。一方、グローブの測定においては、事前モックアップの結果、多くの試験片で標線外破断が起ることが確認された (Fig. A1-6)。

そこで、過去のグローブ等に係る引張強さ、伸び率の測定例について文献調査をした結果、事前モックアップと同様に標線外破断が多く見られたことが報告されており、標線外破断については棄却せずにデータとして採用していることが分かった⁴⁾。また、標線外破断のデータを棄却する JIS の要求事項を厳格に適用するとデータ数が極端に少なくなり、グローブの劣化度合の評価が難しくなることが考えられた。このため、今回の測定では、文献にて確認した過去の測定例と同様に、標線外破断のデータであっても棄却せずに採用することとした。

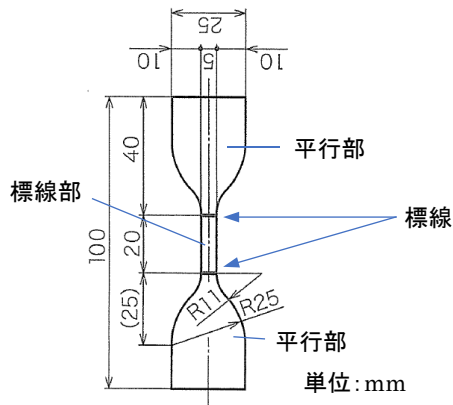


Fig. A1-5 ダンベル状 3 号形と標線

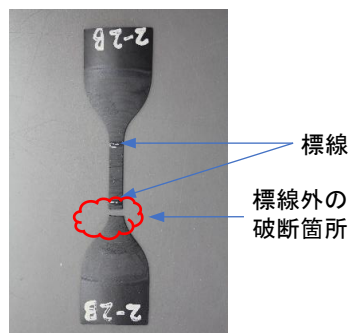


Fig. A1-6 標線外で破断した試験片

(3)硬さの測定

本試験では JIS K6253 に準じ、デュロメータ硬さを測定した²⁾。JIS では、規定した条件下で試験片に規定の押針を押し込んだときの押針の押込み深さから得られる値をデュロメータ硬さと定義しており、測定される硬さは試験片の厚さ等の影響を受けることが記載されている。このため、JIS では硬さ測定にあたり、試験片の厚みを 6 mm 以上とすることが要求されており、厚みが足りない場合は、3 枚まで試験片を重ね合わせることが許容されている。一方、今回の試験で使用したグローブの厚みは 0.4～0.6 mm であり、JIS で要求される試験片の厚みを担保するためには、10 枚以上の試験片を重ね合わせる必要がある。そこで、試験片を 1～10 枚の範囲で重ね合わせて硬さの測定結果を比較した。

Fig. A1-7 に示すように、試験片が 1 枚の場合は他の場合よりも若干高い硬さを示したものの、試験片が 2～10 枚では硬さの測定値に大きな差異は確認されなかった。また、試験片を 5 枚以上重ね合わせると設置状態が不安定となり、硬さの測定が困難になることが分かった。そこで、硬さ測定にあたっては試験片 2 枚を重ね合わせて実施することとした。

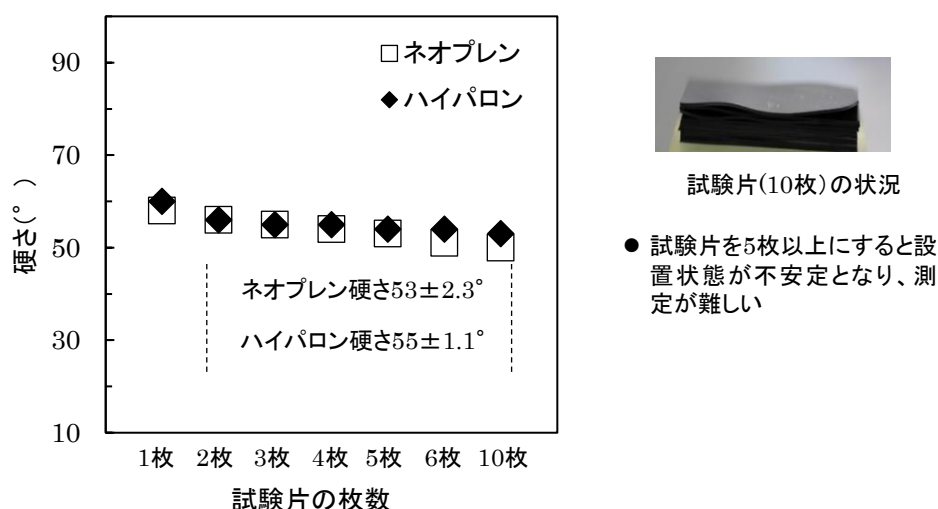


Fig. A1-7 試験片を 1～10 枚に重ね合わせた際の硬さ測定結果

3. 引張強さ、伸び率、硬さの測定方法

以上を踏まえたグローブの引張強さ、伸び率、硬さの測定方法を示す。

(1)引張強さ、伸び率

グローブの掌部、腕部からダンベル状 3 号形に試験片を採取・調製し、各試験片を 1 枚ずつ引張試験機に取り付けて引っ張り操作を行い、標線外で破断した測定データも含めて、試験片破断時の引張強さと伸び率を測定した。

(2)硬さ

引張強さと伸び率を測定後の破断した試験片を 2 枚重ねたのち、硬さ計を用いて硬さを測定した。

参考文献

- 1) 日本産業規格, JIS K6251:2010, 加硫ゴム及び熱可塑性ゴム ー引張特性の求め方ー.
- 2) 日本産業規格, JIS K6253:2012, 加硫ゴム及び熱可塑性ゴム ー硬さの求め方ー.
- 3) グローブ基準化検討専門部会: グローブ点検・交換等に関する基準化検討結果報告書, PNC TN8410 86-006, 1986, 175p.
- 4) 齋藤浩介, 野上嘉能, 古田土和雄, 松山一富, 遠藤秀男: “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, 118p.

付録 2

測定装置の健全性について

グローブの引張強さと伸び率の測定に先立ち、使用する測定装置であるデジタルフォースゲージ（イマダ製 DS2）とスタンド（イマダ製 MX2-500N）の健全性を確認した。健全性確認にあたっては、新品のハイパロン®製グローブを用いて引張強さと伸び率を測定し、グローブ納品時に確認した検査成績書の記載値と比較した。なお、合成ゴムに係る引張強さと伸び率の測定データは、二重指数分布に従うため、JIS ではデータのまとめ方として中央値が採用されており¹⁾、88.8%のデータが中央値 $\pm 3\sigma$ （ σ ：測定データの標準偏差）の範囲内に入ることが知られている²⁾。そこで、測定したグローブの引張強さと伸び率が検査成績書の記載値（N=8）から 3σ の範囲以内であれば、測定装置は健全であると判断した。

Fig. A2-1 に測定した新品のグローブの引張強さ、伸び率の値とグローブ納品時の検査成績書の記載値を示す。その結果、測定値は検査成績書の記載値の範囲内であることが確認され、測定装置は健全であることが分かった。

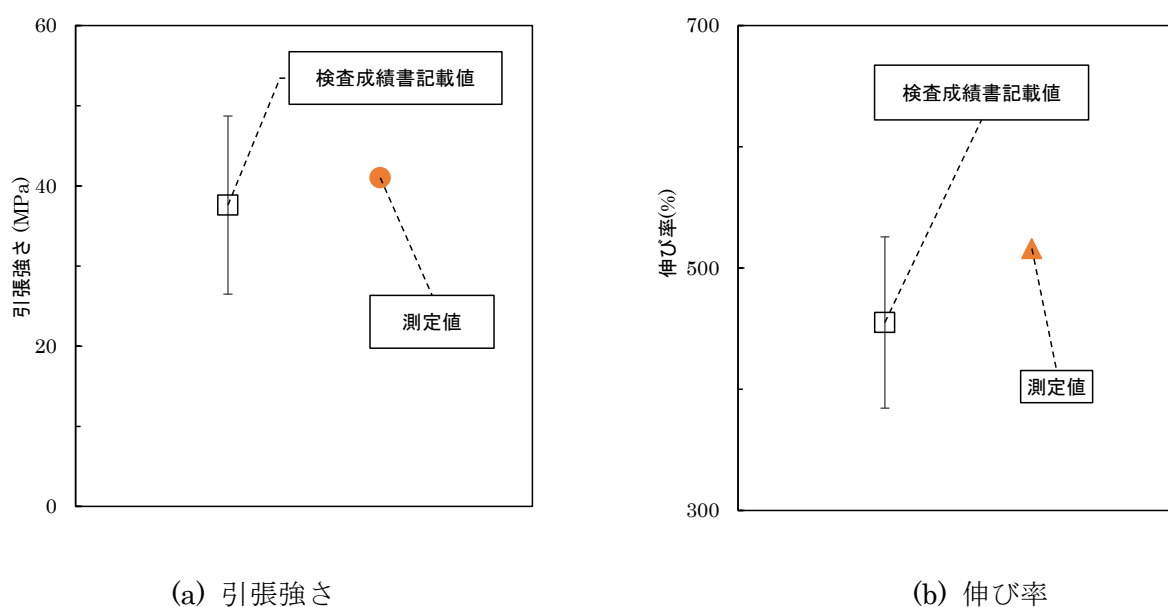


Fig. A2-1 新品のグローブの検査成績書記載値と測定値の比較 (a)引張強さ、(b)伸び率

参考文献

- 1) 和田法明: “ゴムの引張試験ダンベルについて”, 日本ゴム協会誌, **82**, 2009, pp.42-43.
- 2) 北原知就, 水野眞治, 中田和秀: “一般化チェビシェフ不等式とその最適化への応用”, 数理解析研究所講究録, **1584**, 2008, pp.21-24.

