JAEA-Technology
2020-025
DOI:10.11484/jaea-technology-2020-025

グローブボックス窓板用火災対策シートの開発

Development of Fireproof Sheet on Glove Box Panels

川﨑 浩平　品田 健太　岡本 成利　影山 十三男
江田 考志　岡﨑 日路　鈴木 弘道　山本 和也
小田部 隼

Kohei KAWASAKI, Kenta SHINADA, Naritoshi OKAMOTO, Tomio KAGEYAMA
Takashi EDA, Hiro OKAZAKI, Hiromichi SUZUKI, Kazuya YAMAMOTO
and Jun OTABE

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
プルトニウム燃料技術開発センター
プルトニウム燃料施設整備室

Plutonium Fuel Facility Program Office
Plutonium Fuel Development Center
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories
Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

March 2021
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（https://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒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.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
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

© Japan Atomic Energy Agency, 2021

JAEA-Technology 2020-025

グローブボックス窓板用火災対策シートの開発

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
プルトニウム燃料技術開発センター　プルトニウム燃料施設整備室

川﨑　浩平、品田　健太、岡本　成利、影山　十三男[+1]、江田　考志[+1]
岡﨑　日路[+1]、鈴木　弘道[+1]、山本　和也[+2]、小田部　隼[+2]

（2020 年 12 月 23 日受理）

プルトニウム燃料第三開発室は、高速実験炉「常陽」及び高速増殖原型炉「もんじゅ」の MOX 燃料製造を目的に昭和 63 年に運転を開始した施設であり、非密封の核燃料物質を大量に取り扱う大型のグローブボックスが設置された。これらのグローブボックス窓板には「使用施設等の位置、構造及び設備の基準に関する規則」の施行（平成 25 年 12 月）以降に設置するものを除き、アクリル（可燃性）が用いられている。グローブボックス内の火災に対しては、建設当初からハロゲン化物消火設備による自動消火システムを導入しているが、グローブボックスの外側からの火災に対して、アクリルの直接的な対策が課題であった。そのため、可能な限りグローブボックスの外側からの火災に対するグローブボックス窓板への影響を軽減する火災対策シートを開発、最終的には難燃性のシートを実装した。

開発の着眼点は、不燃又は難燃シートに粘着材を塗布した複合材で不燃又は難燃性を有していること。また、使用環境（核燃料物質からのガンマ線、蛍光灯からの紫外線）で劣化が著しくないこと、グローブ作業での作業員の視認性を確保できる透明なシートであること等とした。

これらの火災対策シートを貼り付けたアクリル板の火災損傷防止試験及び火災対策シートを用いた使用環境影響試験を行い、良好な結果を得た。

一方、火災対策シートの貼り付け作業等における外部被ばくを低減する観点から、プルトニウム燃料技術開発センター内にワーキンググループを立ち上げ、施工試験等で効率的な施工を実現する方法を検討・試行し、作業の標準化を図り、基本手順書にまとめた。

本報告書は、グローブボックス窓板用火災対策シートに係る火災損傷防止試験及び使用環境影響試験と、施工性試験等を通じて得られた知見を取りまとめたものである。

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
＋1　プルトニウム燃料技術開発センター　技術部
＋2　プルトニウム燃料技術開発センター　燃料技術部

JAEA-Technology 2020-025

Development of Fireproof Sheet on Glove Box Panels

Kohei KAWASAKI, Kenta SHINADA, Naritoshi OKAMOTO
Tomio KAGEYAMA[+1], Takashi EDA[+1], Hiro OKAZAKI[+1], Hiromichi SUZUKI[+1]
Kazuya YAMAMOTO[+2] and Jun OTABE[+2]

Plutonium Fuel Facility Program Office
Plutonium Fuel Development 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 December 23, 2020)

Plutonium Fuel Production Facility was built in 1988 for the purpose of mainly producing MOX fuel of the prototype fast breeder reactor MONJU, and large glove boxes were installed for handling unsealed nuclear fuel material remotely. The panels of these glove boxes are made of acrylic, except for those installed after December 2013.

For fires inside the glove box, automatic fire extinguishing systems using halides have been introduced since the beginning of construction, but for fires outside the glove box, there have been issues with direct measures for acrylic. Therefore, we have developed a fireproof sheet that mitigates the effect of fire outside the glove box on the panels as much as possible. As a result, fire-retardant sheets have been selected and attached to the glove box panels.

We conducted a flammability test of the acrylic plate attached with these fireproof sheets and a usage environment influence test of fireproof sheets, and obtained good results. In addition, we set up a working group in the Plutonium Fuel Development Center in view of reducing external exposure during the work of attaching fireproof sheets, in which we discussed and examined the work procedure, and summarized it in the basic procedure manual.

Keywords: Plutonium, Glove Box Panel, Acrylic Panel, Non-flammable Sheet,
Fire-retardant Sheet, Adhesive Agent, Flammability Test,
Usage Environment Influence Test

＋1 Technical Administration Department, Plutonium Fuel Development Center
＋2 Fuel Technology Department, Plutonium Fuel Development Center

目次

1. はじめに ---------- 1
2. 火災対策シート及び粘着材の調査・選定 ---------- 3
2.1 不燃シート ---------- 3
2.2 難燃シート ---------- 4
2.3 粘着材 ---------- 4
2.4 アクリル板 ---------- 5
2.5 ポリカーボネート板 ---------- 5
3. 火災損傷防止試験 ---------- 6
3.1 燃焼試験 ---------- 6
3.1.1 試験方法の検討 ---------- 6
3.1.2 UL94 5V 相当試験 ---------- 7
3.1.3 強制燃焼試験 ---------- 8
3.1.4 考察 ---------- 9
3.2 火災想定試験 ---------- 10
3.2.1 試験方法の検討 ---------- 10
3.2.2 考察 ---------- 11
3.3 火災損傷防止試験のまとめ ---------- 12
4. 使用環境影響試験 ---------- 13
4.1 ガンマ線影響試験 ---------- 13
4.1.1 ガンマ線照射 ---------- 13
4.1.2 ガンマ線照射量 ---------- 14
4.1.3 不燃性能試験 ---------- 14
4.1.4 難燃性能試験（UL94 V 試験） ---------- 15
4.1.5 引張試験 ---------- 16
4.1.6 視認性確認及び取外し性確認 ---------- 17
4.2 紫外線影響試験 ---------- 19
4.2.1 紫外線照射量の検討 ---------- 19
4.2.2 紫外線照射 ---------- 19
4.2.3 不燃性能試験 ---------- 20
4.2.4 難燃性能試験（UL94 V 試験） ---------- 21
4.2.5 視認性試験 ---------- 22
4.3 使用環境影響試験のまとめ ---------- 23
5. シートの施工性試験 ---------- 24
5.1 寸法測定方法の検討 ---------- 24
5.1.1 寸法測定試験における気づき点 ---------- 25
5.2 加工方法の検討 ---------- 25

5.2.1 加工試験における気づき点 25
5.3 施工方法の検討 26
5.3.1 施工試験における気づき点 26
6. グローブボックス窓板に貼り付けるシートの選定 27
6.1 視認性試験① 27
6.2 視認性試験② 28
6.3 シートの選定 29
7. シートの貼付け 30
7.1 シート貼付けに係る手順 30
8. まとめ 31
謝辞 31
参考文献 31

Contents

1. Introduction ---- 1
2. Consideration and selection of fireproof sheets and adhesive agent ---- 3
2.1 Non-flammable sheet ---- 3
2.2 Fire-retardant sheet ---- 4
2.3 Adhesive agent ---- 4
2.4 Acrylic plate ---- 5
2.5 Polycarbonate plate ---- 5
3. Flammability test ---- 6
3.1 Combustion test ---- 6
3.1.1 Consideration of test method ---- 6
3.1.2 UL 94-5V test ---- 7
3.1.3 Forced combustion test ---- 8
3.1.4 Discussion ---- 9
3.2 Fire assumed test ---- 10
3.2.1 Consideration of test method ---- 10
3.2.2 Discussion ---- 11
3.3 Conclusion ---- 12
4. Usage environment influence test ---- 13
4.1 Gamma rays influence test ---- 13
4.1.1 Gamma rays irradiation ---- 13
4.1.2 Dose of gamma rays ---- 14
4.1.3 Non-flammable test ---- 14
4.1.4 Fire-retardant test (UL 94-V) ---- 15
4.1.5 Tension test ---- 16
4.1.6 Confirmation of visibility and removability ---- 17
4.2 Ultraviolet influence test ---- 19
4.2.1 Consideration of ultraviolet irradiation dose ---- 19
4.2.2 Ultraviolet irradiation ---- 19
4.2.3 Non-flammable test ---- 20
4.2.4 Fire-retardant test (UL 94-V) ---- 21
4.2.5 Visibility test ---- 22
4.3 Conclusion ---- 23
5. Workability tests of sheets ---- 24
5.1 Consideration of dimensional measurement method ---- 24
5.1.1 Noticeable point of dimensional measurement test ---- 25
5.2 Consideration of working method ---- 25

5.2.1 Noticeable point of working test ---------- 25
5.3 Consideration of construction method ---------- 26
5.3.1 Noticeable point of construction test ---------- 26
6. Selection of sheet to be attached to glove box panels ---------- 27
6.1 Visibility test 1 ---------- 27
6.2 Visibility test 2 ---------- 28
6.3 Selection of sheet ---------- 29
7. Sealing the sheet ---------- 30
7.1 Procedure of sealing the sheet ---------- 30
8. Summary ---------- 31
Acknowledgement ---------- 31
References ---------- 31

表リスト

Table 1　調査したシートの特徴 ---------- 32
Table 2　5V 相当試験の試料寸法及び個数 ---------- 35
Table 3　5V 相当試験の試験条件及び確認項目 ---------- 35
Table 4　5V 相当試験の結果 ---------- 36
Table 5　強制燃焼試験の試料寸法及び個数 ---------- 38
Table 6　強制燃焼試験の試験条件及び確認項目 ---------- 38
Table 7　強制燃焼試験の結果 ---------- 39
Table 8　想定火源の総発熱量 ---------- 42
Table 9　火災想定試験の試料寸法及び個数 ---------- 42
Table 10　火災想定試験の試験条件及び確認項目 ---------- 43
Table 11　火災想定試験の結果 ---------- 44
Table 12　燃焼試験及び火災想定試験の結果 ---------- 47
Table 13　不燃性能試験の試料寸法及び個数（ガンマ線照射） ---------- 49
Table 14　不燃性能試験（発熱性試験）の判定基準 ---------- 49
Table 15　不燃性能試験の結果（ガンマ線照射） ---------- 49
Table 16　難燃性能試験の試料寸法及び個数（ガンマ線照射） ---------- 51
Table 17　難燃性能試験の判定基準（ガンマ線照射） ---------- 52
Table 18　難燃性能試験の結果（ガンマ線照射） ---------- 53
Table 19　引張試験の試料寸法及び個数（ガンマ線照射） ---------- 56
Table 20　不燃シートの引張試験の結果 ---------- 58
Table 21　難燃シートの引張試験の結果 ---------- 61
Table 22　視認性確認及び取外し性確認の試料寸法及び個数 ---------- 69
Table 23　視認性確認及び取外し性確認試験の結果 ---------- 70
Table 24　紫外線照射の試料寸法及び個数 ---------- 71
Table 25　不燃性能試験の結果（紫外線照射） ---------- 71
Table 26　難燃性能試験の結果（紫外線照射） ---------- 73
Table 27　紫外線照射後の可視光線透過率測定結果 ---------- 74
Table 28　視認性確認の組合せ ---------- 76
Table 29　各シートの試験結果（まとめ） ---------- 79

図リスト

Fig.1　火災損傷防止対策の概略図 ---------- 32
Fig.2　粘着材の概略図 ---------- 33
Fig.3　V 試験方法の概略図 ---------- 34
Fig.4　5V 試験方法の概略図 ---------- 34
Fig.5　強制燃焼試験方法の概略図 ---------- 35
Fig.6　縦隙間及び横隙間の概略図 ---------- 43
Fig.7　ガンマ線照射試料の固定概略図 ---------- 48
Fig.8　吸収線量と総発熱量の関係図 ---------- 51
Fig.9　吸収線量と超過時間の関係図 ---------- 51
Fig.10　難燃性能試験の概略図 ---------- 52
Fig.11　吸収線量と燃焼時間（t1+t2）の関係図 ---------- 55
Fig.12　吸収線量と最大燃焼時間の関係図 ---------- 55
Fig.13　引張試験の試料形状 ---------- 57
Fig.14　引張試料の採取概略図 ---------- 57
Fig.15　不燃シートの応力-ひずみ曲線 ---------- 66
Fig.16　難燃シートの応力-ひずみ曲線 ---------- 67
Fig.17　不燃シートの吸収線量と引張破壊応力の関係図 ---------- 68
Fig.18　不燃シートの吸収線量と引張弾性率の関係図 ---------- 68
Fig.19　難燃シートの吸収線量と引張応力の関係図 ---------- 68
Fig.20　難燃シートの吸収線量と引張弾性率の関係図 ---------- 69
Fig.21　グローブボックス窓板と蛍光灯の配置概略図 ---------- 71
Fig.22　グローブボックス窓板の基本形状の寸法測定箇所 ---------- 75

写真リスト

Photo 1　不燃シート ---------- 33
Photo 2　難燃シート ---------- 33
Photo 3　5V 相当試験の試験中の写真 ---------- 37
Photo 4　5V 相当試験後の写真 ---------- 37
Photo 5　強制燃焼試験の試験中の写真 ---------- 39
Photo 6　強制燃焼試験の試験後の写真 ---------- 40
Photo 7　強制燃焼試験の赤外線サーモグラフィ画像 ---------- 41
Photo 8　火災想定試験の概略写真 ---------- 42
Photo 9　火災想定試験の試験中の写真 ---------- 44
Photo 10　火災想定試験の試験後の写真 ---------- 45
Photo 11　火災想定試験の赤外線サーモグラフィ画像 ---------- 46
Photo 12　ガンマ線照射試料の固定写真 ---------- 48
Photo 13　不燃性能試験の試験中の写真（ガンマ線照射） ---------- 50
Photo 14　不燃性能試験後の写真（ガンマ線照射） ---------- 50
Photo 15　難燃性能試験の試験中の写真 ---------- 54
Photo 16　引張試験の試験中の写真 ---------- 57
Photo 17　引張試験後の不燃シートの写真 ---------- 64
Photo 18　引張試験後の難燃シートの写真 ---------- 65
Photo 19　可視光線透過率の測定写真 ---------- 70
Photo 20　不燃性能試験後の写真（紫外線照射） ---------- 72
Photo 21　紫外線照射前後の写真 ---------- 74
Photo 22　不燃シートの視認性検証写真 ---------- 76
Photo 23　難燃シートの視認性検証写真 ---------- 76
Photo 24　組合せ①（窓板：不燃シート、遮蔽体：なし） ---------- 77
Photo 25　組合せ②（窓板：不燃シート、遮蔽体：不燃シート） ---------- 77
Photo 26　組合せ③（窓板：なし、遮蔽体：不燃シート） ---------- 78
Photo 27　組合せ④（窓板：不燃シート、遮蔽体：難燃シート） ---------- 78
Photo 28　組合せ⑤（窓板：難燃シート、遮蔽体：難燃シート） ---------- 78
Photo 29　シート貼付け作業 ---------- 80

This is a blank page.

1. はじめに

プルトニウム燃料第三開発室（以下、「Pu3」という。）は、高速実験炉「常陽」及び高速増殖炉「もんじゅ」の MOX 燃料製造を目的に昭和 63 年に運転を開始した施設であり、非密封の核燃料物質を大量に取り扱う大型のグローブボックス（以下、「GB」という。）が多数設置された。

Pu3 に設置されている GB 窓板は「使用施設等の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（平成 25 年 12 月施行）（以下、「新規制基準」という。）以降に設置するものを除き、アクリル（可燃性）を使用していることから、既設 GB が設置されている工程室で、火災が発生した際の、GB 窓板への影響を軽減する目的から、自主保安として可能な限り、窓板を不燃性又は難燃性材料にする対策を検討した。

Pu3 は、建設当初から GB 内の万一の火災に対して、ハロゲン化物消火設備による自動消火システムが導入され、即座に消火できる設計となっている。GB の外側からの火災に対しては、これまで運用上の火災対策をしてきたが、GB 窓板のアクリルに対する直接的な対策が課題であった。一方、新規制基準施行以降に設置する GB 窓板は、難燃性のポリカーボネートを採用しており、直接的火災対策はなされているが、既設のアクリルを難燃性のポリカーボネートに交換するには、GB 内部がプルトニウム-ウラン雰囲気であることから、交換作業に伴う汚染のリスクや作業期間、コストを考慮すると非現実的であった。また、交換以外に厚みのある難燃性の板等を GB 窓板の外側に取り付けることも検討したが、取り付ける枠等も含め、GB 本体に負荷が増すことによる耐震上の問題や視認性の問題があると考えられた。この課題を解決する方法として、GB 窓板の外側に薄い透明な不燃又は難燃シート（以下、「火災対策シート」という。）を貼り付ける火災損傷防止対策について検討した。火災損傷防止対策の概略図を Fig.1 に示す。

火災対策シートの選定にあたっては、1）不燃又は難燃性を有していること　2）グローブ作業での作業員の視認性を確保できる透明なシートであることに重点を置き、市販品から数種類のサンプル品を取り寄せ、その中から不燃及び難燃シートのそれぞれについて 1 種類選定した。粘着材は、スマートフォンの画面保護フィルムを参考に交換が容易な粘着材を選定した。これらの、選定した不燃及び難燃シートに粘着材を塗布したサンプル品を用いて、管理区域内の GB 窓板に貼り付け、高線量下に一定期間曝露し、透明性、弾力性、劣化度合等の使用感を評価し、使用の可能性の見通しを得た。

これらの火災対策シートを貼り付けたアクリル板の燃焼性及び火災対策シートの使用環境での劣化等を確認するため、次の試験を実施した。

(1) 火災損傷防止試験（火災対策シートを貼り付けたアクリル板）
　① アメリカ保険業者安全試験所が定めた燃焼性試験 [1)]（以下、「UL94」という。）の 5V 試験を参考にした燃焼試験
　② 小規模火災を模擬した火災想定試験

(2) 使用環境影響試験（ガンマ線又は紫外線を照射した火災対策シート）
　① ガンマ線影響試験

② 紫外線影響試験

一方、本火災対策の対象となる GB 窓板の面積は合計、約 2,300m^2（1 m^2×1 m^2 のシート換算で約 2,300 枚）となり、シートの GB 窓板への貼り付け作業等における作業員の外部被ばくを可能な限り低減する必要がある。そのため、プルトニウム燃料技術開発センター（以下、「Pu センター」という。）内にワーキンググループ（以下、「WG」という。）を立ち上げ、短時間で効率的な GB 窓板の寸法測定方法とシートの加工・施工方法を検討し、作業の標準化を図った。

本報告書は、GB 窓板用火災対策シートに係る火災損傷防止試験及び使用環境影響試験と、WG によるシートの施工試験等を通じて得られた知見を取りまとめたものである。

2. 火災対策シート及び粘着材の調査・選定

火災対策シートの選定は、広く市場調査を実施し、まず市販品の中から不燃又は難燃性を有しているシート材及び透明なシート材を数種類に絞った。その、数種類の不燃及び難燃シートについてサンプルを取り寄せ、透明性、貼り付けに関わる弾力性及び厚みについて確認した。取り寄せたシートは、僅かにぼやけて見える、難燃性は高いが着色がある、シートが薄く施工が困難なシートが多く、市販品の中で要求を満足するシートは少なかった。これらのサンプルの中から不燃性で無色透明なシート及び難燃性が高い無色透明なシートをそれぞれについて 1 種類選定した。調査したシートの特徴を Table 1 に示す。

粘着材の選定は、スマートフォンの画面保護フィルムを参考に、施工時の貼り直しや使用中の傷等が発生した際に取り外しが容易で長期間の貼り付けに対応可能な粘着材を調査し、1 つの粘着材を選定した。

選定した火災対策シートに粘着材を塗布した小サイズのサンプルを用いて、管理区域内の GB 窓板に貼り付け、高線量下に一定期間曝露し、透明性、弾力性、劣化度合等を評価し、高線量下において影響がなかったことから使用の見通しを得た。

これらの不燃シート、難燃シート、粘着材、アクリル板及び新規制基準施行以降に設置する GB 窓板に用いるポリカーボネートも比較対象として、火災損傷防止試験及び使用環境影響試験を実施した。各種試験に用いた試料の仕様等を以下に示す。

2.1　不燃シート

本試験で用いた不燃シートは、建築基準法第 2 条第 9 号 [2] 及び建築基準法施行令第 108 条の 2 第 1 号から第 3 号 [3] の規定に適合した国土交通大臣の不燃材料の不燃認定を取得している。一般的な使用例としては、防煙垂れ壁がある。不燃シートを Photo 1 に示す。

(1) 構造　　ポリエステル樹脂系塗装ポリエチレンテレフタレート樹脂系フィルム張／アクリル樹脂系塗装ガラスクロス

(2) 厚さ　　0.19mm

(3) 不燃規格　　建築基準法第 2 条第 9 号及び建築基準法施行令第 108 条の 2 第 1 号から第 3 号の不燃材料の規定に適合

(4) 全光線透過率　　90%

2.2　難燃シート

本試験で用いた難燃シートは、透明なポリカーボネート樹脂であり、UL94 V 試験において高い難燃性分類である V-0 に適合している。この難燃性分類は、近年設置される GB 窓板に用いられているポリカーボネート板と同じである。難燃シートを Photo 2 に示す。

(1) メーカー　AGC 株式会社
(2) 品名　カーボグラス
(3) 型式　CFR110C
(4) 材質　ポリカーボネート樹脂
(5) 厚さ　0.38mm
(6) 難燃規格　UL94 V-0
(7) 全光線透過率　89.6%（厚さ 0.25mm の値）

2.3　粘着材

火災対策シートを窓板に貼り付けるため、シート片側に可燃性の粘着材を塗布している。粘着材は、ポリエステルフィルムを光学強粘着層と PX 粘着層で挟んだ 3 層構造となっており、シートと接着する面は高い粘着性の光学強粘着層とし、窓板とシートを接着する面はシートの施工及び交換を考慮し剥離が容易な PX 粘着層とした。粘着材の概略図を Fig.2 に示す。

(1) メーカー　パナック株式会社
(2) 品名　パナプロテクト
(3) 型式　PX38T02G50／PDS1
(4) 光学強粘着層
　材質　メタアクリル酸アルキルエステル系共重合体
　厚さ　25μm
　粘着力　初期　：5.64N/cm（JIS Z 0237 準拠）
　　RT×24hrs 後：6.71N/cm（JIS Z 0237 準拠）
　（粘着力は、対ガラスの接着力を示す。測定条件は、剥離速度 300mm/分、剥離角度 180°）
(5) ポリエステルフィルム
　材質　ポリエチレンテレフタレート
　厚さ　38μm
(6) PX 粘着層
　材質　シリコン系共重合体
　厚さ　50μm
　粘着力　初期　：0.04N/cm（JIS Z 0237 準拠）
　　RT×24hrs 後：0.04N/cm（JIS Z 0237 準拠）
（粘着力は、対 PET の接着力を示す。測定条件は、剥離速度 300mm/分、剥離角度 180°）

2.4　アクリル板

本試験で用いたアクリル樹脂は Pu3 のグローブボックスの窓板に用いられている製品と同質材とした。

(1) 材質　　アクリル樹脂
(2) 厚さ　　10mm

2.5　ポリカーボネート板

本試験で用いたポリカーボネート樹脂は、近年設置されている GB 窓板に用いる製品と同質材とした。

(1) 材質　　ポリカーボネート樹脂
(2) 厚さ　　10mm
(3) 難燃規格　　UL94 V-0

3. 火災損傷防止試験

2.章に記したとおり、火災対策シートは、それぞれの規格等に基づいた試験によって、不燃認定又は難燃規格に適合しているが、それら火災対策シートに粘着材を塗布し、これをアクリル板に貼り付けた複合材としての燃焼性は未確認である。

そこで、これら不燃・難燃性材料と可燃性材料の複合材としての燃焼性を確認するため、アクリル板にシートを貼り付けた状態での燃焼試験及び火災想定試験を実施した。試験の内容と結果を以下に示す。

3.1　燃焼試験

高分子材料の複合材を対象とした燃焼性に関する規格がないことから、今回の燃焼試験は、高分子材料の燃焼性に関する試験として、広く採用されている UL94 を参考として、次に示す内容で外部の試験機関に依頼して実施した。

(1) バーナーにより断続的に接炎する UL94 の垂直燃焼試験（500W 125mm）　5V 相当試験

(2) バーナーを連続的に接炎するバーナー強制燃焼試験

これらの試験を通して、自己消火性、火炎による損傷範囲、貫通を伴う開孔の有無及びシートの剥離等を確認した。また、比較のために火災対策シートを貼り付けていないアクリル板及びポリカーボネート板についても同様の試験を実施した。

3.1.1　試験方法の検討

当初は、難燃シート及びポリカーボネート板が適合している UL94 の V 試験（垂直燃焼試験（50W 20mm））を実施することを検討した。V 試験の方法は垂直に固定した試料に対して下方からバーナーにて断続的に 10 秒間接炎（約 0.12kcal）を 2 回行うもので、本試験の概略図を Fig.3 に示す。しかし、本対策で検討しているアクリル板に火災対策シートを貼り付けた試料では、アクリル板に炎が接してしまい、火災対策シートの燃焼性を評価できなかった。そのため、UL94 に基づいた試験に近似させた代替試験として、UL94 の 5V 試験（垂直燃焼試験（500W 125mm））の内、プラーク試料を用いて実施した（UL94 5V 相当試験）。本試験の方法は、水平に固定した試料に対して下方からバーナーにて断続的に 5 秒間接炎（約 0.6 kcal）を 5 回繰り返すもので、本試験の概略図を Fig.4 に示す。なお、5V 試験は V 試験と同様に垂直固定した試料（バー試料）と水平固定した試料（プラーク試料）の両者に対して実施するものであるが、前述のとおり、垂直固定では、アクリル板に炎が接してしまうことから、5V の垂直固定の接炎は除き、水平固定した試料のみ実施したことから、代替試験の 5V 相当試験としている。また、5V 相当試験は、V 試験と比較して試験炎が大きく、接炎合計時間も長いため、保守側の試験である。

また、5V 相当試験は、試料に対して合計 25 秒間の断続接炎の短時間試験のため、各試料に熱影響の差が生じない可能性が懸念されたこと及び、GB 窓板の設置に近い垂直状態での影響を模擬するため、さらに過酷な 5V 試験のバーナー炎（500W 125mm）を用いて、垂直に固定した試料に対して、側方からバーナーにて 90 秒間連続接炎（約 11kcal）する

強制燃焼試験を加えて実施した。本試験の概略図を Fig.5 に示す。強制燃焼試験は、5V 試験と比較して接炎を継続するため、保守側の試験である。なお、接炎時間 90 秒間の設定に際しては、アクリル板を用いて予備試験を実施した結果、接炎約 120 秒後（約 14kcal）にアクリル板に着火し、炎がアクリル板の裏面に回り込んだことを踏まえ、その手前の 90 秒間に設定した。

3.1.2　UL94 5V 相当試験

(1)試料

試料の寸法及び個数は、「UL94 の 5V のプラーク試料の試験」を参考とした。

試料の寸法及び個数を Table 2 に示す。

(2)試験方法

水平に設置した試料の中心に 125mm のバーナー炎を垂直に対して 20°の角度で下方から 5 秒間接炎を 5 回繰り返す。確認項目は UL94 の 5V 試験の項目に加え、試料の損傷範囲の測定やシートの接着状態を確認した。試験条件及び確認項目を Table 3 に示す。

(3)試験結果

試験結果を Table 4、試験中の状況を Photo 3、試験後の写真（接炎側）を Photo 4 に示す。

本試験の結果、以下のことが確認できた。

① 離炎後の燃焼時間（残炎時間）が全ての試料で 1～2 秒間であり、今回の試験では自己消火性を有していた。

② 難燃シート貼付けアクリル板は、接炎箇所にシートの開孔はあったが、アクリル板を貫通する開孔はなかった。一方、不燃シート貼付けアクリル板はシート及びアクリル板の開孔はなかった。

③ 溶融落下物による脱脂綿着火は、全ての試料で確認されなかった。

④ 火炎による損傷範囲は、アクリル板で最大 φ103mm、不燃シート貼付けアクリル板で最大 φ90mm、難燃シート貼付けアクリル板で最大 φ73mm であり、火災対策シートを貼り付けた試料の方がアクリル板よりも損傷範囲が小さかった。なお、ポリカーボネート板は最大 φ63mm であった。

⑤ シート剥離は、接炎近傍の部分的な剥離を確認したがシート全体に及ぶことはなかった。

3.1.3　強制燃焼試験

(1)試料

試料は、UL94 5V 相当試験と同じ寸法及び個数とした。

Table 5 に試料の寸法及び個数を示す。

(2)試験方法

垂直に設置した試料の中心に 125mm のバーナー炎を垂直に対して 20°の角度で側方から 90 秒間接炎する。確認項目は、バーナー離炎後の自己消火性、試料の火炎による損傷範囲の測定及びシートの接着状態とした。また、試験中の試料近傍の温度を赤外線サーモグラフィカメラにより確認した。試験条件及び確認項目を Table 6 に示す。

(3)試験結果

試験結果を Table 7、試験中の状況を Photo 5、試験後の写真（接炎側）を Photo 6 に示す。

本試験の結果、以下のことが確認できた。

① 離炎後の燃焼時間（残炎時間）は、ポリカーボネートが 3～7 秒、不燃シート貼付けアクリル板が 9～20 秒、難燃シート貼付けアクリル板が 0～1 秒であり、自己消火性を有していた。アクリル板は、着火して判定基準の 60 秒を超えたため消火した。

② 難燃シート貼付けアクリル板の難燃シートは開孔したが、アクリル板又はポリカーボネート板を貫通する開孔は全ての試料で確認されなかった。

③ 火炎による損傷範囲は、アクリル板で最大幅が 53mm、不燃シート貼付けアクリル板で最大幅 20mm、難燃シート貼付けアクリル板で最大幅 50mm であり、シートを貼り付けた試料の方が損傷範囲は小さかった。なお、ポリカーボネート板で最大幅 62mm であった。

④ シート剥離は、接炎近傍の部分的な剥離を確認したが、シート全体に及ぶことはなかった。

⑤ 接炎した試料の表面は、アクリル板及び不燃シート貼付けアクリル板について軽いざらつきが確認できた。一方、ポリカーボネート板は、それよりも深い凹みを確認した。また、難燃シート貼付けアクリル板には、シートの溶融物が固着した。

⑥ 赤外線サーモグラフィカメラを用いて試験中の試料近傍の最高温度を測定した結果、アクリル板が約 411℃、その他は、カメラの最大測定温度の 500℃を示した。

3.1.4　考察

(1)自己消火性について

火災対策シートを貼り付けたアクリル板は、不燃シート、難燃シートともに UL94 5V 相当試験及び強制燃焼試験の判定基準（燃焼時間が離炎後 60 秒以下）を満足していた。特に、強制燃焼試験における難燃シート貼付けアクリル板の離炎後の燃焼時間は 0～1 秒と短時間であり、ポリカーボネート板の燃焼時間 3～7 秒より短いことから難燃性は高いと考える。

(2)火炎による損傷範囲について

各試験の火炎によるアクリル板の損傷範囲は、火災対策シートを貼り付けていないアクリル板の試料と比較して火災対策シートを貼り付けた試料の方が小さく、火炎による影響を軽減できることが確認できた。

また、強制燃焼試験で難燃シート貼付けアクリル板に固着した溶融物を除去し、損傷範囲を確認した結果、損傷幅は 20mm であり、不燃シート貼付けアクリル板と同等の損傷範囲であった。

さらに､不燃シート貼付けアクリル板と難燃シート貼付けアクリル板の表面を比較すると、不燃シート貼付けアクリル板は、接炎部に僅かな凹みを確認した。一方、難燃シート貼付けアクリル板は、全体的に平滑であり、損傷が少ないことを確認した。これは、難燃シートの溶融物が形成され僅かに盛り上がったことで、アクリル板に直接、炎が接しなかったため、損傷が軽減されたと考える。

(3)シートの剥離について

燃焼試験において、不燃及び難燃シートの剥離が接炎近傍に留まり、全体に至らず貼り付けは維持された。これは、接炎部以外の表面温度が約 20℃～30℃と粘着材の融点温度約 265℃を下回ったためと考えられる。各シートの赤外線サーモグラフィ画像を Photo 7 に示す。

3.2　火災想定試験

火災想定試験は、GB 外の火災を想定した場合の火災対策シートへの影響を確認することを目的とし、金属容器内に充填した希釈エタノールに着火した炎を試料に接炎し、自己消火性、火炎による損傷範囲、貫通を伴う開孔の有無及びシート剥離について確認した。

本試験は、外部の試験機関に依頼して実施した。本試験の条件は、旧（独）原子力安全基盤機構が実施した火災試験の調査報告書[4),5)] を参考とした。

3.2.1　試験方法の検討

GB 外火災は、3.1 節で実施した燃焼試験に比べ、炎の大きさや燃焼時間が長くなる等、GB 窓板に与える影響は大きい。試験で使用する火源は定常作業として GB でのバッグイン・バッグアウト作業で使用する備品から、総発熱量が最も大きい紙類（ペーパータオル 1,500g）とし、このペーパータオルが紙製の放射性可燃物収納容器（カートンボックス）に収納された状態を想定した。想定火源の総発熱量を Table 8 に示す。

旧、（独）原子力安全基盤機構が実施した火災試験の調査報告書から、紙類を火源とする場合、油類の浸透の仕方、紙類の丸め方、着火位置等の違いにより燃焼形態が異なること及び最大発熱速度がばらつき、再現性に難点があることがわかった。また、ペーパータオル 1 枚とエタノール（質量濃度 62%）の総発熱量が同じであること、エタノールの炎は容器幅の 2～3 倍の高さになり、燃焼時間はエタノール 1,000g で約 30 分であることがわかった。これらを踏まえ、以下の試験条件で実施した。

① 火源は再現性を考慮しエタノールとし、ペーパータオル 1,500g の総発熱量に相当するエタノール質量濃度 62%　総重量 1,500g とする。
② エタノールは、ペーパータオルを収納する放射性可燃物収納容器（カートンボックス）の φ270mm と近似する φ300mm の金属製容器に収納。
③ 試料は、GB 窓板の固定と類似させ、一般構造材で製作した固定治具で固定。
④ 試料の固定位置は容器幅の 2～3 倍となる 600～900mm の炎高さになることを想定して、試料の中心が収納容器上面から約 500mm の位置に固定。
⑤ 試料の大きさは、GB 窓板の 1／4 の大きさを使用。

火災想定試験の概略写真を Photo 8 に示す。

(1)試料

Table 9 に試料の寸法及び個数を示す。また、実際の GB 窓板への火災対策シートの貼り付け作業は手作業で行うため、貼り付け時の施工誤差により発生する窓板枠とシートの間の隙間から燃焼することが考えられることから、縦及び横の隙間を 10mm 設けた試料も実施した。縦隙間及び横隙間の試料の概略を Fig.6 に示す。

(2)試験方法

外部の試験機関において、垂直に固定した試料の下部に設置した φ300mm の金属製容器内のエタノール（質量濃度 62% 総重量 1,500g）に着火し、30 分間接炎後の試料への着火有無、自己消火性、損傷範囲、シート剥離の有無を確認する。また、試験中における試料の近傍温度を赤外線サーモグラフィカメラ及び熱電対にて確認する。試験条件及び確認事項を Table 10 に示す。

(3)試験結果

試験結果を Table 11、試験中の状況を Photo 9、試験後の写真を Photo 10、各シートの赤外線サーモグラフィ画像を Photo 11 に示す。

本試験の結果、以下のことが確認できた。

① アクリル板、ポリカーボネート板、不燃シート貼付けアクリル板、難燃シート貼付けアクリル板、縦又は横の隙間のある難燃シート貼付けアクリル板の全ての試料で着火しなかった。

② 全ての試料のアクリル板又はポリカーボネート板に火炎による損傷が認められたが、板及びシートの開孔はなかった。なお、難燃シートは部分的なシートのよれを確認した。

③ 損傷範囲は、アクリル板の縦 270mm×横 130mm に対し、不燃シート貼付けアクリル板は縦 130mm×横 115mm、ポリカーボネート板は、縦 25mm×横 25mm でアクリル板より損傷範囲は小さかった。なお、難燃シート貼付けアクリル板は縦 210mm×横 190mm であり、アクリル板とほぼ同等であった。

④ シートの剥離については、接炎近傍の中央下部に部分的な剥離を確認したが、シート全体の剥離は確認されなかった。

3.2.2　考察

各試料の損傷範囲を比較した結果、アクリル板が約 350cm² に対し、不燃シート貼付けアクリル板では、約 150cm² と損傷範囲が小さく、軽減効果があった。難燃シート貼付けアクリル板では約 260～400cm² と損傷範囲を軽減する傾向が見られた。なお、ポリカーボネート板は、約 6cm² で損傷範囲は最も小さい。隙間を設けた難燃シート貼付けアクリル板においては、隙間の有無にかかわらずアクリル板の損傷範囲に大きな差はないことから、隙間は影響しない。

火源の大きさは 600mm～900mm と想定していたが、試験室の換気に伴う風の影響から炎の位置が安定せず、実際には約 500mm の高さに留まった。この状態での、赤外線サーモグラフィ画像から接炎中における試料の近傍温度は 200℃、火源を挟んで反対側に設置した熱電対（上段・中段・下段）の最高温度は、下段で約 70℃であり、この温度では各試料に大きな差が生じなかったと考える。

本試験において想定した、放射線可燃物収納容器（カートンボックス）に収納された紙類の火災では、火災対策シートの貼り付けの有無にかかわらず、アクリル窓板へ大きな影響を与えないと考える。

3.3　火災損傷防止試験のまとめ

不燃シート及び難燃シートの性能評価として実施した燃焼試験及び火災想定試験のまとめをTable 12 に示す。

UL94 5V 相当試験の結果、離炎後の燃焼時間は全ての試料で 1～2 秒であり判定基準の 60 秒以下を満足した。また、火炎による損傷範囲は、火災対策シートを貼り付けた試料の方がアクリル板よりも損傷範囲が軽減されていた。これらのことから、断続的なバーナー接炎では離炎後、短時間で自己消火し、火災対策シートを貼り付けたアクリル板は難燃性があると考える。

強制燃焼試験の結果、アクリル板の離炎後の燃焼時間は、着火したことで 60 秒間燃焼が継続したのに対し、火災対策シートを貼り付けたアクリル板の離炎後の燃焼時間は判定基準の 60 秒以下を満足した。特に、難燃シート貼付けアクリル板の燃焼時間は 1 秒以下でポリカーボネート板の燃焼時間の 7 秒よりも短い。また、火炎による損傷範囲は、アクリル板と比較して火災対策シートを貼り付けたアクリル板の方が小さく、火炎による影響を軽減できることを確認した。なお、不燃シートは連続接炎してもシート表面に開孔はなかった。一方、難燃シートは連続接炎により、シート表面は開孔し、シートの溶融物が固着するが、アクリル板表面の損傷はいずれの試料よりも小さいことを確認した。これらのことから、連続接炎した場合においても、火災対策シートの貼り付けに効果があると考える。

火災想定試験の結果、試験室の換気に伴い火炎が安定しない等の試験条件の設定に課題はあったものの、管理区域内作業で想定した可燃物の火災では、いずれの試料においても大きな影響を与えることはなかった。しかし、アクリル板の損傷範囲に対して、不燃シート貼付けアクリル板の損傷範囲は軽減されていることから、一定の効果はあることが確認できた。難燃シート貼付けアクリル板については、アクリル板の損傷範囲と大きく変わらなかったが、軽減傾向があることが確認できた。また、縦隙間及び横隙間の難燃シート貼付けアクリル板については、隙間なしの難燃シート貼付けアクリル板と損傷範囲は大きな差はなかったことから、本試験の結果では、隙間は 10mm 以下の範囲内であれば、影響しないと考える。

これらの火災損傷防止試験の結果から不燃又は難燃シートをアクリル板に貼り付けることによって接炎しても自己消火し、難燃性を複合材として持つことができる。また、不燃又は難燃シートを貼り付けることで、アクリル板の損傷を軽減できることから火災損傷防止対策として有効である。

4. 使用環境影響試験

GB 窓板は、GB 内で取り扱う核燃料物質からのガンマ線、グローブ作業に必要な照明器具（蛍光灯）からの紫外線の環境下に暴露されることになる。

本件の火災対策シートは、窓板に長期間貼り付けることを前提としていることから、ガンマ線と紫外線による影響の有無を確認するため、以下に示す加速試験を実施した。

(1) ガンマ線影響試験

① 照射後の不燃シートに係る建築基準法に基づく不燃材料の不燃性能試験 [8)]

② 照射後の難燃シートに係る UL94 V 試験による難燃性能試験

③ 照射後の不燃及び難燃シートに係る JIS K 7127（プラスチックー引張特性の試験方法ー，第 3 部 フィルム及びシートの試験条件）[9)] に基づく引張試験

④ 照射後の不燃及び難燃シートに係る視認性確認及び取外し性確認

(2) 紫外線影響試験

① 照射後の不燃シートに係る建築基準法に基づく不燃材料の不燃性能試験

② 照射後の難燃シートに係る UL94 V 試験による難燃性能試験

③ 照射後の不燃及び難燃シートに係る視認性確認試験

4.1 ガンマ線影響試験

火災対策シートに対するガンマ線の影響を確認するため、外部の照射施設において ^{60}Co 線源により 0.2～2.8kGy のガンマ線を照射した試料を用いて、試験項目①～④について実施した。

4.1.1 ガンマ線照射

(1)各種試験の試料

ガンマ線照射試料の固定方法を Fig.7、固定写真を Photo 12 に示す。各種試験の試料は、試験規格に基づいた形状・寸法に加工し、GB 窓板に貼り付ける状態を模擬するため、これら試料をアクリル板に挟み照射した。各種試験に使用する試料を以下に示す。

① 不燃材料の不燃性試験

・粘着材を塗布していない不燃シート

② UL94 V 試験による難燃性能試験

・粘着材を塗布していない難燃シート

③ JIS K 7127 に基づく引張試験

・粘着材を塗布していない不燃又は難燃シート

④ 視認性確認及び取外し性確認

・不燃又は難燃シートを貼り付けたアクリル板

4.1.2　ガンマ線照射量

照射したガンマ線量は、Pu3 施設の GB 窓板の表面線量率に対し、大幅に裕度を持たせた以下の吸収線量とした。

① 約 0.2kGy（使用年数約 5 年）
② 約 0.5kGy（使用年数約 10 年）
③ 約 1kGy（使用年数約 20 年）
④ 約 2.8kGy（使用年数約 60 年）

4.1.3　不燃性能試験

ガンマ線照射後の不燃シートについて建築基準法第 2 条第 9 号及び建築基準法施行令第 108 条の 2 第 1 号から第 3 号に基づく不燃材料の不燃性能試験（発熱性試験）を外部の試験機関に依頼し、不燃性能が維持されているか確認した。

(1)試料

試料は、不燃性能試験（発熱性試験）と同じ寸法及び個数とした。なお、試料は温度 23℃±2℃、相対湿度 50%±5%で前処理した。Table 13 に試料の寸法及び個数を示す。

(2)試験方法

建築基準法に基づく不燃材料の不燃性能試験（発熱性試験）の方法に基づき、コーンカロリーメータ試験機を用いて、試料を電気ヒーターの輻射熱 50kW/m^2 で 20 分間加熱したときの発熱速度、総発熱量を測定する。

(3)判定基準

不燃性能試験の判定基準を Table 14 に示す。

(4)試験結果

試験結果を Table 15、試験中の状況を Photo 13、試験後の試料を Photo 14、吸収線量と総発熱量の関係図を Fig.8、吸収線量と超過時間の関係図を Fig.9 に示す。

本試験の結果、全ての不燃シートについて、判定基準を満たしたことを確認した。

ガンマ線照射量の 0.2～2.8kGy（5 年～60 年相当）の範囲において、総発熱量及び 200kW/m^2 超過継続時間に大きな差はなかった。試験後の不燃シートの外観は、貫通する亀裂及び穴は確認されなかった。

(5)考察

ガンマ線照射後の試料は、全て判定基準を満たした。また、ガンマ線照射量を 0.2～2.8kGy（5 年～60 年相当）と増加させても総発熱量及び 200kW/m² 超過継続時間には大きな差が見られなかった。このことから、ガンマ線の影響による不燃性能の低下は無く、照射前と同等の不燃性能が維持されていることを確認した。また、試験後の試料には、網目状のものだけが残った。これは、2.章 2.1 節で記した、アクリル樹脂系塗装ガラスクロスであると推測でき、ガラスは不燃材であることから、これが不燃性を維持している材料であると考える。

4.1.4　難燃性能試験（UL94 V 試験）

ガンマ線照射後の難燃シートについて、UL94 V 試験に基づく燃焼試験を外部の試験機関に依頼し、難燃性能 V-0 が維持されているか確認した。

(1)試料

試料は、UL94 V 試験と同じ寸法及び個数とした。なお、試料は、試験前に温度 23±2℃及び相対湿度 50±5%で 48 時間前処理した常態試料と温度 70±2℃で 168 時間前処理した乾燥試料を準備した。試料の寸法及び個数を Table 16 に示す。

(2)試験方法

UL94 V 試験に基づき、保持クランプに垂直固定した試料に 50W の炎高さ 20mm のバーナーにて 10 秒間接炎を 2 回実施する。試験方法の概略図を Fig.10 に示す。

(3)判定基準

難燃性能試験の判定基準を Table 17 に示す。

(4)試験結果

試験結果を Table 18、試験中の状況を Photo 15、吸収線量と燃焼時間の関係を Fig.11、吸収線量と最大燃焼時間を Fig.12 に示す。

本試験の結果、全ての難燃シートについて、V-0 の判定基準を満たすことを確認した。

ガンマ線照射量の 0.2～2.8kGy（5 年～60 年相当）の範囲において、常態試料及び乾燥試料ともに合計の残炎時間（t1+t2）及び最大燃残炎時間（t1 又は t2）に大きな差はなかった。

(5)考察

ガンマ線照射後の試料は、全て V-0 の判定基準を満たした。また、ガンマ線照射量が 0.2～2.8kGy（5 年～60 年相当）と増加させても常態試料及び乾燥試料ともに合計の残炎時間（t1+t2）及び最大残炎時間（t1 又は t2）に大きな差はなかった。このことから、ガンマ線の影響による難燃性能の低下は無く、照射前と同等の難燃性能が維持されていると考える。

4.1.5　引張試験

ガンマ線照射前後の試料について、ガンマ線照射に伴い火災対策シートの構造的欠陥が生ずる可能性を確認するため、JIS K 7127 に基づく引張試験を外部の試験機関に依頼し、機械的強度への影響を確認した。

(1)試料

試料の寸法及び数量を Table 19 に示す。試験試料をシートから切り抜きするにあたっては、異方性による強度への影響も考慮し、未照射の不燃及び難燃シートは MD 方向と TD 方向のそれぞれの試料を準備した。照射した試料については、異方性を考慮せず採取したことから、試験結果より方向を推定する。試料の形状を Fig.13、試料採取の概略図を Fig.14 に示す。

(2)試験方法

JIS K 7127 に基づき、引張試験を行い、応力-ひずみ曲線を記録するとともに、引張弾性率、破断点試験力、引張破壊応力、破断点変位、破断点ひずみ、降伏点、降伏点試験力、降伏点応力、降伏点ひずみを算出する。試験の状況を Photo 16 に示す。

(3)試験結果

ガンマ線照射後の平均値（未照射～60 年相当）の比較において、不燃シートの引張破壊応力は、未照射（MD 方向）の 131MPa に対して、最も低下したのは、1kGy 照射（20 年相当）で 127MPa、3%低下である。また、引張弾性率は、未照射（MD 方向）の 5,840MPa に対して、最も低下したのは、0.2kGy 照射（5 年相当）で 5,710MPa、2%低下である。

ガンマ線照射後の平均値（未照射～60 年相当）の比較において、難燃シートの引張破壊応力は、未照射（TD 方向）の 63.6MPa に対して、最も低下したのは 0.2kGy 照射（5 年相当）で 60.4MPa、5%低下である。引張降伏点応力は未照射（TD 方向）の 76.0MPa に対して、最も低下したのは、0.5kGy 照射（10 年相当）で 74.0MPa、3%低下である。また、引張弾性率は未照射（TD 方向）の 2,200MPa に対して、最も低下したのは、0.5kGy 照射（10 年相当）及び 1kGy 照射（20 年相当）で 2,150MPa、3%低下である。

不燃シートの試験結果を Table 20、難燃シートの試験結果を Table 21、試験後の不燃シートの試料を Photo 17、試験後の難燃シートの試料を Photo 18、不燃シートの応力-ひずみ曲線を Fig.15、難燃シートの応力-ひずみ曲線を Fig.16 に示す。

(4)考察

試験結果から、0.2～2.8kGy（5 年～60 年相当）のガンマ線照射量において、不燃及び難燃シートの機械的強度に大きな低下は無く、誤差の範囲内と考える。

異方性については、不燃シートは引張弾性率の結果から、照射した試料は MD 方向であることがわかった。しかし、異方性で破断点応力に大きな差はないことから、異方性は機械的強度に影響しないと考える。

難燃シートは、引張破壊応力及び引張弾性率の結果から TD 方向であることがわかった。しかし、異方性で破断点応力及び降伏点応力に大きな差はないことから、異方性は機械的強度に影響しないと考える。

各シートの吸収線量と引張試験データの関係図を Fig.17～20 に示す。

4.1.6　視認性確認及び取外し性確認

ガンマ線照射前後のシートについて、視認性の低下、シートの取り外し性及び目視による材質変化（変色、変形、気泡有無、剥れ）について確認した。

(1)試料

試料の寸法及び数量を Table 22 に示す。視認性確認の試料は、ガンマ線照射後のアクリル板に不燃又は難燃シートを貼り付けたものと、未照射の試料を用いて比較した。シートの取り外し性及び材質変化はガンマ線照射後のアクリル板に不燃又は難燃シートを貼り付けたものとした。

(2)試験方法

① 視認性確認

ガンマ線照射前後の試料について、可視光線透過率・反射率計（スガ試験機 HA-TR）を用いて、照射前後の可視光線透過率を測定する。可視光線透過率の測定状況を Photo 19 に示す。

② シートの取り外し性

ガンマ線照射後の試料について、アクリル板からシートを剥がした際の剥がしやすさ及び剥がした後の粘着材の付着について確認する。

③ 材質変化

ガンマ線照射後の試料について、目視により変色、変形、気泡の有無、剥れについて確認する。

(3)試験結果

本試験の結果を Table 23 に示す。また、本試験の結果、以下の事項を確認した。

① ガンマ線照射前における可視光線透過率は不燃シートが 89.3%～91.8%に対し、ガンマ線照射後が 89.7%～92.0%であり、著しい変化はない。また、難燃シートのガンマ線照射前における可視光線透過率は 89.4%～90.5%に対して、ガンマ線照射後が 88.8%～90.7%であり、著しい変化はない。

② ガンマ線照射後における、アクリル板からのシート取り外しは、容易に取り外すことができ、粘着材の付着や粘着材のべた付きもない。

③ ガンマ線照射後における、シートの変色、変形、気泡、剥れはいずれも確認されなかった。

(4)考察

本試験の結果、ガンマ線照射後の不燃又は難燃シートの視認性への影響、シートの取り外しへの影響及び材質変化はなく、0.2～2.8kGy（5 年～60 年相当）のガンマ線量の範囲においては、GB 窓板に貼り付けたシートへの影響はないと考える。

4.2　紫外線影響試験

火災対策シートに対する GB 近傍に設置された蛍光灯からの紫外線の影響を確認するため、外部の試験機関の促進耐候性試験機で使用年数 10 年に相当する紫外線を照射した試料を用いて、試験項目①～③について確認した。

4.2.1　紫外線照射量の検討

紫外線照射量は、GB 外に設置されている蛍光灯が GB 窓板から約 10cm 離れた位置にあることを踏まえ、紫外線強度計（カスタム UV340C）を用いて 10cm 離れた位置の紫外線強度を測定し、その測定値 30μW/cm² に裕度を加えた 40μW/cm² を基準に約 10 年分の照射量に相当する 2,765J/cm² の紫外線とした。GB と蛍光灯の配置概略図を Fig.21 に、紫外線照射量の算出根拠を以下に示す。

① 紫外線強度実測値（測定範囲 250nm～390nm）

30μW/cm²

② 基準紫外線強度

40μW/cm²

③ 積算時間（10 年相当）

8 時間/日　×　20 日/月　×　12 月/年　×　10 年　＝　19,200 時間

④ 積算紫外線量

40μW/cm²　×　19,200 時間　×　3,600 秒　＝　2,765J/cm²

4.2.2　紫外線照射

(1)紫外線照射装置

促進耐候性試験機（スガ試験機製　スーパーキセノンウェーザーメータ　SX2D-75）

(2)試料

紫外線を照射した試料の寸法及び数量を Table 24 に示す。試料は粘着材が塗布されていない不燃又は難燃シートについて、予め試験規格の寸法及び形状に加工したものを使用した。

4.2.3　不燃性能試験

紫外線照射後の不燃シートについて、建築基準法第 2 条第 9 号及び建築基準法施行令第 108 条の 2 第 1 号から第 3 号に基づく不燃材料の不燃性能試験（発熱性試験）を外部の試験機関に依頼し、不燃性能が維持されているか確認した。

(1)試料

試料は、紫外線照射した 4.2.2 節（2）で示す、不燃性能試験の試料とした。なお、試料は温度 23℃±2℃、相対湿度 50%±5%で前処理した。

(2)試験方法

4.1.3 節（2）と同様。

(3)判定基準

4.1.3 節（3）と同様。

(4)試験結果

試験結果を Table 25 に、試験後の試料の写真を Photo 20 に示す。

本試験の結果、全ての不燃シートについて、判定基準を満たすことを確認した。

蛍光灯からの紫外線を模擬した積算 10 年の紫外線量では、総発熱量及び 200kW/m^2 超過継続時間に差はない。試験後の不燃シートの外観は、貫通する亀裂及び穴は確認されなかった。

(5)考察

紫外線照射後の試料は、全て判定基準を満たした。このことから、GB 近傍に設置された蛍光灯からの紫外線による積算約 10 年の紫外線量では、不燃性能の低下は無く、照射前と同等の不燃性能が維持されていることを確認した。一方、4.1.3 節のガンマ線照射後の 0.2～2.8kGy（5 年～60 年相当）の不燃性能試験の結果と比較すると、ガンマ線照射後の総発熱量の最大が 5.7MJ/m^2、ガンマ線照射後の 200kW/m^2 超過継続時間の最大が 9.1 秒に対して、紫外線照射後の総発熱量の最大が 4.0 MJ/m^2、紫外線照射後の 200kW/m^2 超過継続時間の最大が 6.3 秒で減少傾向にある。このような結果となったメカニズムは不明であるが、紫外線照射後の試料は、燃焼しにくくなっている可能性があると考える。

4.2.4　難燃性能試験（UL94 V 試験）

紫外線照射後の難燃シートについて、UL94 に基づく V 試験を外部の試験機関で実施し、難燃性能 V-0 が維持されているか確認した。

(1)試料

試料は、紫外線照射した 4.2.2 節（2）で示す、難燃性能試験の試料で評価する。なお、試料は試験前に温度 23±2℃及び相対湿度 50±5%で 48 時間前処理した常態試料と温度 70±2℃で 168 時間前処理した乾燥試料を準備した。

(2)試験方法

4.1.4 節（2）と同様。

(3)判定基準

4.1.4 節（3）と同様。

(4)試験結果

試験結果を Table 26 に示す。

本試験の結果、全ての難燃シートについて判定基準を満たすことを確認した。

蛍光灯からの紫外線を模擬した積算 10 年の紫外線量では、常態試料及び乾燥試料ともに全ての接炎において着火しなかった。

(5)考察

紫外線照射後の試料は、全て判定基準を満たした。このことから、GB 近傍に設置された蛍光灯からの紫外線による積算約 10 年の紫外線量では、難燃性能の低下は無く、照射前と同等の難燃性能が維持されていることを確認した。一方、4.1.4 節のガンマ線照射後の 0.2～2.8kGy（5 年～60 年相当）の難燃性能試験の結果と比較すると、ガンマ線照射後の試料は、常態試料及び乾燥試料ともに合計の残炎時間（t1+t2）及び最大残炎時間（t1 又は t2）は、いずれも数秒間着火しているが、紫外線照射後の常態試料及び乾燥試料ともに合計の残炎時間（t1+t2）及び最大残炎時間（t1 又は t2）は 0 秒であり、着火していない。このような結果となったメカニズムは不明であるが、紫外線が燃焼性に影響している可能性があると考える。

4.2.5　視認性試験

紫外線照射後のシートについて、可視光線透過率の測定及び変色等の視認性への影響を確認した。

(1)試料

試料は、紫外線照射した 4.2.2 節（2）に示す、可視光線透過率の試料で評価する。なお、比較用の紫外線照射前の試料は、同じ難燃シートのロットから切り出した。

(2)試験方法

紫外線照射前後の試料について、可視光線透過率を可視光線透過率・反射率計（スガ試験機 HA-TR）により測定し、変化の有無を確認する。

(3)試験結果

試験結果を Table 27、試験後の試料を Photo 21 に示す。

本試験の結果、以下の事項を確認した。

① 紫外線照射前における可視光線透過率は、不燃シートが 90.7%、難燃シートが 90.8%に対し、紫外線照射後は、不燃シートが 90.2～90.3%、難燃シートが 90.4～90.5%と何れも照射前と大きな差はない。

② 紫外線照射後のシートは僅かに黄色に変色した。その他、気泡の発生等、目視により確認できる範囲では変化はない。

(4)考察

本試験の結果、紫外線照射後の不燃又は難燃シートに僅かな黄色への変色を確認したがグローブ作業に影響する変色ではない。また、可視光線透過率は、紫外線照射前後での測定値に変化はなかったことから、透明なシートが維持されていると考える。

4.3　使用環境影響試験のまとめ

ガンマ線影響試験は、5～60 年間のガンマ線吸収線量を模擬した 0.2kGy～2.8kGy のガンマ線照射試験において、不燃シート、難燃シートともに不燃性能又は難燃性能の低下、機械的強度の低下、可視光線透過率の低下、シートの変形及び変色はなかったことから、高線量の環境においても GB 窓板への使用に適応できると考える。

紫外線影響試験は、使用年数 10 年の 2,765J/cm^2 の紫外線照射を行ったが、不燃シート、難燃シートともに不燃性能又は難燃性能の低下、可視光線透過率の低下は無かった。一方、紫外線照射後の不燃性能試験及び難燃性能試験の結果からは、不燃シートが燃焼しにくい又は難燃シートが着火しなかったことから、メカニズムは不明であるが、紫外線照射が燃焼性に何らかの影響を及ぼしている可能性があると考える。

以上より、使用環境影響試験として実施した試験結果により、現状の GB 設置環境下で想定されるガンマ線量及び紫外線量においては、不燃及び難燃シートの性能に影響はなく、GB 窓板への使用に適応できることを確認した。

5. シートの施工性試験

本火災損傷防止対策の対象となる Pu3 の GB 窓板の面積は、合計約 2,300m² ある。各 GB 窓板へのシートの貼り付けまでの工程は、①GB 窓板の寸法を測定、②測定した寸法にシートを加工、③シートのグローブポート部分をくり抜き、④GB 窓板にシートを貼り付けるという手順になる。

GB 窓板へのシート貼り付け作業は、GB 近接作業となる。一部の GB には、外部被ばく低減のために設置している含鉛アクリル遮蔽体を外した後、シートを貼り付けることになるため、可能な限り外部被ばくを低減するべく、短時間且つ正確にシートを貼り付けることが求められる。また、GB 窓板に配置されるグローブポートは、規格化された大きさであるが、窓板の大きさ及びグローブポートの位置は様々であることから、窓板の寸法測定をしなければならず、本作業も外部被ばく低減のため短時間且つ正確に行う必要がある。

これらのことから、一連の貼り付け作業を一般安全及び放射線安全の観点から安全に行うため、Pu センター内に WG を立ち上げ、寸法測定方法の検討、加工方法の検討及び施工方法の検討を実施した。

5.1　寸法測定方法の検討

寸法測定は、作業者の外部被ばく低減の観点から短時間で且つ、精度良く測定できる手法について検討した。まず寸法測定を自動で行うことが可能と考えられる測定機を選定し、模擬 GB の窓板を用いて試験測定を行った。

その結果、GB 窓板と窓板を押える枠の境界を判別できない装置が多く測定値は大きくバラつき、結果的に GB 窓板に接近した作業も発生すること、装置の測定準備を含めた測定時間は、手作業による測定時間と大差なく、外部被ばく低減には効果が低いことが分かった。また、これらの装置は、1 台あたり数百万～数千万円と高価であり、コストの観点からも GB 窓板の寸法測定には適さないと判断した。そのため、手作業で行う測定器具の中から、巻尺、直尺及び長ジョウ型ノギスを用いて測定試験を行った結果、これらが正確に測れ、バラつきも少なかったことから、最終的に手作業でノギス等を用いて寸法測定を実施することにした。

具体的な測定手順に関しては、WG で試験を実施し、内作実施の測定方法の標準化を図った。また、これらを Pu センターの基本手順書としてまとめた。

5.1.1　寸法測定試験における気づき点

① GB 窓板の基本形状を前提とする場合、シート加工に必要な寸法測定箇所は、Fig.22 に示す、13 点の測定点である。GB 窓板は、窓板を押えるパッキン、グローブポートを押えるパッキンがはみ出ている箇所がある。そのため、正確に窓板に当て、パッキンのはみ出しを除いて正確に測定できた測定器が、測定値がデジタル表示される長ジョウ型ノギス（ミツトヨ CDN-50C）であった。

② 長ジョウ型ノギスを使用できない場所においては、巻尺、直尺を用いて測定する。

③ 基本形状を前提とする場合、測定点が 13 点であることから、測定場所の指定・記録者と測定者の 2 名もしくは 3 名で実施した方が測定値の読み間違い等が起きず二度手間を省けて効率的である。

④ グローブ近傍及び窓板を測定することから、グローブ等を傷付ける恐れのあるノギスの鋭利部は必要に応じて R を付ける等の対応が必要である。

5.2　加工方法の検討

シートは、合計 2,300 m²（約 2,300 枚）分について加工する必要があるため、短時間で精度良く加工できる方法について検討した。自動でシートが加工可能な加工機を選定し、試験加工を実施したが、指定した寸法及びグローブポート部の加工は可能であったものの、加工機の価格は、数百万円と高額であること、寸法測定値から加工図を作成し、加工機に取り込む必要があり、時間も掛かることから、最終的に加工機の導入は見送り、外注することにした。ただし、施工時の失敗やシート施工後の汚れによりシートを数枚交換する際に内作で加工できるようにするため、WG で試験を実施し、内作実施の加工方法の標準化を図った。また、これらを Pu センターの基本手順書としてまとめた。

5.2.1　加工試験における気づき点

① 原寸大の図面を用意することが可能であればシート下に敷いて罫書くと誤差を低減することができる。

② 窓板寸法に加工する際は、裁断機、カッター、サークルカッターを用いてシートを加工するが、その際は加工誤差を可能な限り少なくするため、それら器具の特性を理解し、シートがズレないように注意し、必要以上の力を加えずに加工する。特に、裁断機による加工は、シートが保持されていれば精度よく加工できるため、直線部分は有効である。

③ ポート部の円の切り抜きはサークルカッターを用いて行うが、サークルカッターの針を円の中心位置に差し込みやすくするため、罫書き針で印をつけることでズレを防ぐことができる。また、サークルカッターは、コンパスのように円を描くようにして加工するが、加工による力によりシートが歪み始点と終点が合わず見栄えにも影響することから、周囲をよく保持する必要がある。

5.3　施工方法の検討

シートの施工については、スマートフォンの画面保護フィルムようにシートが小さければ、貼り付けは比較的容易であるが、大きさが 1m² となると気泡や微細な埃等の付着が避けられない。また、GB 窓板の基本形状には、4 つのグローブポートが配置されていることが基本となるため、適切にグローブポートに合わせて貼り付けなければならない。気泡や埃等が混入すると、シートが剥がれ易くなる、視認性が悪くなり GB 内が見えにくくなる等の問題が発生する可能性もあるため、被ばく低減の観点からも短時間で施工可能な貼り付け方法について検討した。

GB 窓板への貼り付けは内作で行うことから、シート施工方法について WG で試験を実施し、内作実施の施工方法の標準化を図った。また、これらを Pu センターの基本手順書としてまとめた。

5.3.1　施工試験における気づき点

① GB 窓板には、汚れや微細な埃等の付着物があることから、これが影響してシートを貼り付けた際に気泡となった。そのため、貼り付ける前には、希釈アルコールを湿らせたタオル等で除去することで付着物による気泡を防ぐことができる。

② シートは 1 枚を一気に貼り付けると気泡が多く入り込んでしまうことから、シート上半分の保護フィルムを剥がし、位置決めすることで空気の入り込みを軽減できる。

③ 空気抜きには、圧着ローラーやプラスチック製のスクレーパを用いて空気を抜くことが有効であった。なお、不燃シートよりも難燃シートの方が容易に空気を抜くことができた。

④ 施工の際は、RI 用ゴム手袋を着用して行うが、RI 用ゴム手袋には付着防止用の粉がまぶされているため、これが粘着面に付くことで粘着力低下の要因となる。そのため可能な限り粘着面に触れないように施工する必要がある。

⑤ 窓板への貼り付け作業にあたっては、二分割（横分割）の形状のものが、施工時間が短く、外部被ばく低減の観点から有効であった。一方、火災損傷防止の観点からは、隙間は少ない方が望ましく、1 枚ものでも施工は可能であることから、GB よってどちらを選択するか決めることになる。

6. グローブボックス窓板に貼り付けるシートの選定

火災損傷防止試験、使用環境影響試験、施工性試験を通して不燃シート及び難燃シートの GB 窓板への火災損傷防止対策の有効性について確認してきた。火災損傷防止試験及び使用環境影響試験の結果、両シートともに有効な損傷防止効果が得られたが、WG が実施した施工性試験において、不燃シート越しでは GB 内部が僅かに「歪んでいる」ように見え、グローブ作業を行う上での視認性に問題が生じるのではないかとの意見が出された。

しかし、GB 内部が歪んで見えにくくなることにより、作業の操作性、安全性にどの程度影響するのか、想定される作業を幾つか選定し、不燃シート越しでの視認性試験を実施した。

6.1　視認性試験①

(1)試験方法

非管理区域の GB 窓板に不燃シートを貼り付けて以下の作業を行い、作業性について確認した。加えて、GB には窓板前面に含鉛アクリル遮蔽体が設置されていることから、窓板に加え含鉛アクリル遮蔽体にもシートを貼り付けることを模擬し、2 枚の不燃シートを貼った状態でのアクリル板越しのシートの視認性についても確認した。

① 精密ドライバーを用いて、M2.5 のボルトを締める又は緩める作業を行う。
② グローブの点検作業を行う（ピンホールの確認）。
③ もんじゅ型模擬ペレット（直径約 5.4mm、高さ約 8mm）をピンセットで掴み取る作業を行う。

(2)試験結果

① 窓板のみに不燃シートを貼り付けた状態での場合、M2.5 の精密ドライバーを用いた作業では、ドライバーのプラス／マイナスの判別に時間を要した。もんじゅ型模擬ペレットをピンセットで掴む作業及びグローブの点検作業（ピンホールの確認）は可能であった。
② 窓板と含鉛アクリル遮蔽体を模擬したアクリル板の両方に不燃シートを貼り付けた状態での場合、M2.5 の精密ドライバーのプラス／マイナスの判別が困難であった。もんじゅ型模擬ペレットをピンセットで掴む作業は、掴むこと自体は可能であるが、遠近感が取りにくかった。また、グローブの点検作業（ピンホールの確認）では、窓板に近づけて見ることで確認することは可能であるが時間を要した。さらに、不燃シートが 2 重になると全体的に歪んで見えてしまい、目の疲れ、不快感等により 30 分以上のグローブ作業は難しいことが分かった。

GB 窓板 1 枚越しの不燃シートの視認性検証写真を Photo 22、難燃シートの視認性検証写真を Photo 23 に示す。

6.2　視認性試験②

(1)試験方法

管理区域の GB を対象に、その窓板と含鉛アクリル遮蔽体の設置されている GB については遮蔽体にも不燃シートを貼り付け、シート越しに視認性確認を行った。また、比較のため同様に難燃シートの場合の視認性確認も実施した。視認性確認を実施した組み合わせについて Table 28 に示す。

(2)試験結果

① 組合せ①（窓板：不燃シート、遮蔽体：なし）

分析作業等の極めて緻密な作業では、遠近感の低下により作業が困難となった。その他、グローブ作業は一通り可能であることを確認したが、僅かに歪んで見えた。組合せ①を Photo 24 に示す。

② 組合せ②（窓板：不燃シート、遮蔽体：不燃シート）

GB 内部の視認性は、著しく低下し、グローブの傷の見逃しや GB 内設備等の鋭利な部分を見逃す可能性が高まり、安全性の低下が懸念された。組合せ②を Photo 25 に示す。

③ 組合せ③（窓板：なし、遮蔽体：不燃シート）

貼り付け対象となる一部の GB には、遮蔽体越しに核燃料物質が収納される粉末搬送容器の番号をカメラで確認する場所がある。遮蔽体のみに貼り付けた結果、粉末搬送容器の番号を確認することができなかった。組合せ③を Photo 26 に示す。

④ 組合せ④（窓板：不燃シート、遮蔽体：難燃シート）

不燃シートを 2 重に貼り付ける組み合わせ②に比べ視認性は良いが、歪んで見えた。組合せ④を Photo 27 に示す。

⑤ 組合せ⑤（窓板：難燃シート、遮蔽体：難燃シート）

視認性は難燃シートを貼り付けることで低下することなく、貼り付ける前と変わらず、グローブ作業に影響はなかった。組合せ⑤を Photo 28 に示す。

6.3　シート選定

不燃シートについては、1 枚貼り付けの場合、緻密な作業を除き、ほとんどの作業は可能であるが、歪んで見え、視認性が低下することにより安全上の問題が懸念された。また、不燃シートを 2 枚貼り付けた場合は、視認性が大きく低下し、GB 内設備へのグローブの接触やグローブ点検時の傷を見逃す等の可能性が増加し、視認性低下による安全上の問題が発生した。一方、難燃シートについては、2 枚貼り付けた場合でも、貼り付ける前と変わらない視認性を維持することができ、貼り付けによる視認性の低下は無かった。

これらの視認性試験、火災損傷防止試験、使用影響試験、施工性試験の結果を踏まえ、総合的に判断して、難燃シートを選定した。また、コスト面では、外注で約 2,300m^2 を窓板の形状に加工したシートを購入すると難燃シートは不燃シートの約 1／2 であり安価である。各シートの試験結果（まとめ）を Table 29 に示す。

不燃シートの歪みは施工性試験で発見することができた。この歪みは、不燃シートの構造が影響していると考える。その中でも、特にアクリル樹脂系塗装ガラスクロスが影響していると考えられ、細かい網目が無数に存在し、これが、GB 窓板サイズ 1m^2×1m^2 とした際に、多くの光が入射して屈折したことで歪んで見えたと考える。これまで、火災損傷防止試験や使用環境影響試験では、各種試験に応じた比較的小さな試料を用いていたことから、歪みが発見できなかった。

7. シートの貼付け

火災損傷防止対策が必要となる約 2,300m² の難燃シートの貼り付けは、GB を所掌している Pu センター　試験第 1 課（ペレット製造工程）、試験第 2 課（加工組立工程）、品質管理課（品質管理工程）の各課において内作で実施した。また、貼り付け手順については、WG 員が施工性試験等で得られた結果から標準化した基本手順書を基に作業計画を立案した。

7.1　シート貼付けに係る手順

難燃シート貼り付けの一連の流れを以下に示す。貼り付け作業を Photo 29 に示す。

① 貼り付ける GB 窓板の汚染検査を行う。

② 貼り付ける GB 窓板の汚れ、埃等を、希釈アルコールを湿らせたキムタオル等で拭き取る（Photo 29（a））。

③ 難燃シートを GB 窓板に合わせ、窓板押え板及び窓板からはみ出したゴムパッキンに干渉しないことを確認する（Photo 29（b））。

④ 難燃シートから粘着面の保護フィルムを上半分だけ剥がし、位置を確認しながら上半分の難燃シートを窓板にスクレーパ等を用いて気泡が入らないようにしながら貼り付ける（Photo 29（c）（d））。

⑤ 難燃シートから残り下半分の保護フィルムを剥がし、スクレーパ等を用いて気泡が入らないように貼り付ける（Photo 29（c）（d））。

⑥ 難燃シートの表面の保護フィルムを全て剥がす（Photo 29（e））。

8. まとめ

火災損傷防止試験においては、不燃又は難燃シートを貼り付けたアクリル板は、短時間で自己消火すること及びアクリル板の損傷を軽減する効果があることを確認した。また、使用環境影響試験においては、不燃又は難燃シートにガンマ線及び紫外線を照射しても不燃性能及び難燃性能は照射前と同等の性能を維持していた。また、機械的強度及び可視光線透過率についても照射前と比較し低下は見られず、使用環境の影響はなかった。このことから、不燃又は難燃シートをアクリル板に貼り付ける対策は有効であることが分かった。

WG を設置し、GB 窓板の寸法測定から加工方法・施工方法の検討を行い、各作業における手順の標準化を図り、基本手順書へ反映させることができた。また、本 WG での施工性試験において、不燃シートの視認性に問題があることが判明し、これまでの各試験結果及びコストの観点から総合的に判断し、GB 窓板への貼り付けは難燃シートを選定した。

これらの、試験結果を踏まえ、貼り付け対象とする全 GB 窓板への貼り付けを終えることができ、火災損傷防止対策を施すことができた。

謝辞

火災損傷防止対策において、難燃シートをグローブボックス窓板に貼り付ける作業を実施いただいたプルトニウム燃料技術開発センター 試験第 1 課、試験第 2 課、品質管理課へお礼申し上げます。

参考文献

1) アメリカ保険業者安全試験所, 機器及び部品に使用されるプラスチック材料の燃焼性試験, UL94： 2013（邦訳）, 2013.
2) 建築基準法第 2 条第 9 号.
3) 建築基準法施行令第 108 条の 2 第 1 号～第 3 号.
4) 原子力安全基盤機構, 平成 18 年度 MOX 燃料加工施設閉じ込め性能等調査・試験 グローブボックスの閉じ込め性能に係る調査報告書, 2007.
5) 原子力安全基盤機構, 平成 19 年度 MOX 燃料加工施設閉じ込め性能等調査・試験 グローブボックスの閉じ込め性能に係る調査報告書, 2008.
6) 日本火災学会, 火災便覧 第 3 版, 1997, p.77.
7) Philip J. DiNenno（ed.）, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 3rd Edition, 2002, pp.A40-A41.
8) 一般財団法人建材試験センター, 防耐火性能試験・評価業務方法書, 2020.
9) JIS K 7127, プラスチック 引張特性の試験方法, 第 3 部 フィルム及びシートの試験条件, 2019.

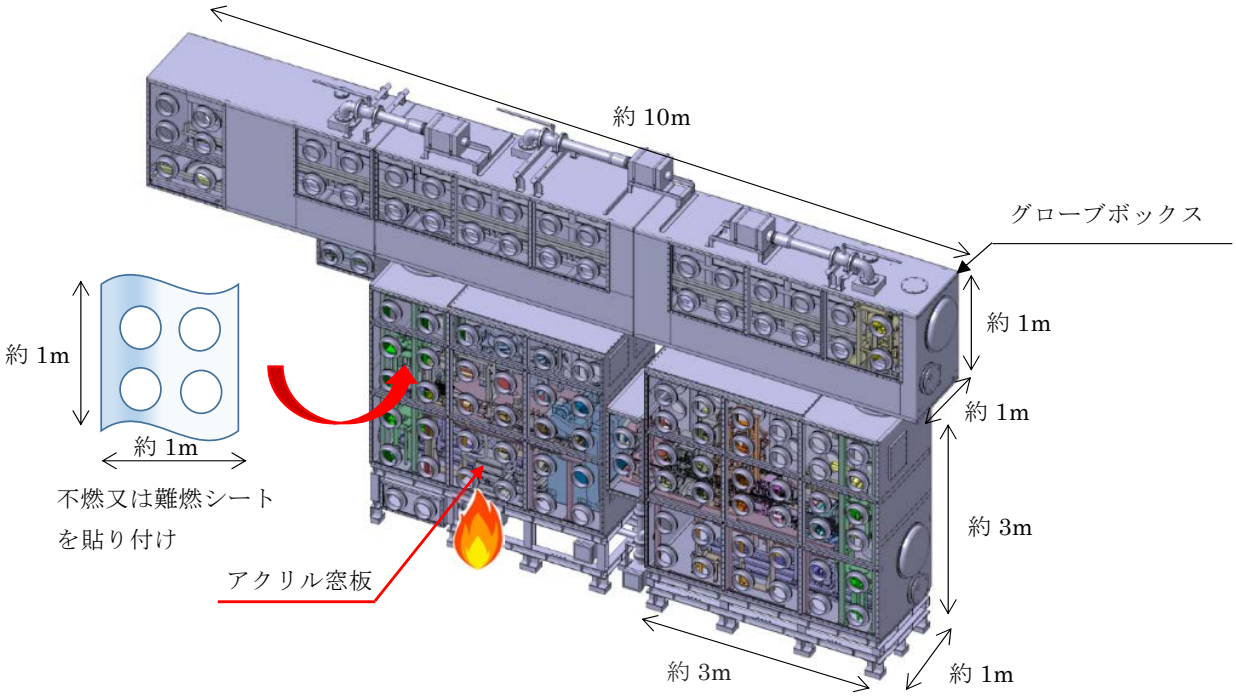


Fig.1　火災損傷防止対策の概略図

Table 1　調査したシートの特徴

調査シート	不燃シート		難燃シート			難燃板
	A	B	C	D	E	F
不燃性 難燃性	建築基準法に基づく不燃材	建築基準法に基づく不燃材	UL-94 V-0	UL-94 V-0 相当	UL-94 VTM-0	UL-94 V-0
透明性	・透明 ・着色なし	無色透明だが、僅かにぼやけて見える	・透明 ・着色なし	・透明 ・黄色又は赤色に着色	・透明 ・黄色に着色	・透明 ・着色なし
厚み	0.19mm	0.24mm	0.38mm	25μm （薄い）	25μm （薄い）	10mm （厚い）
評価	【○】 試験に用いたシート	【×】 ・視認性が悪い	【○】 試験に用いたシート	【×】 ・着色あり ・薄い	【×】 ・難燃性が低い ・着色あり ・薄い	【×】 ・厚い

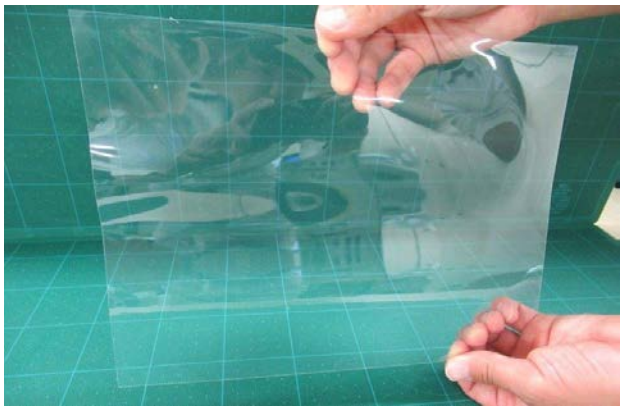


Photo 1　不燃シート

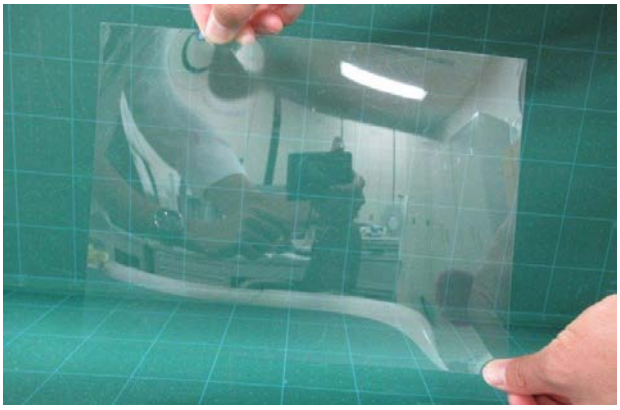


Photo 2　難燃シート

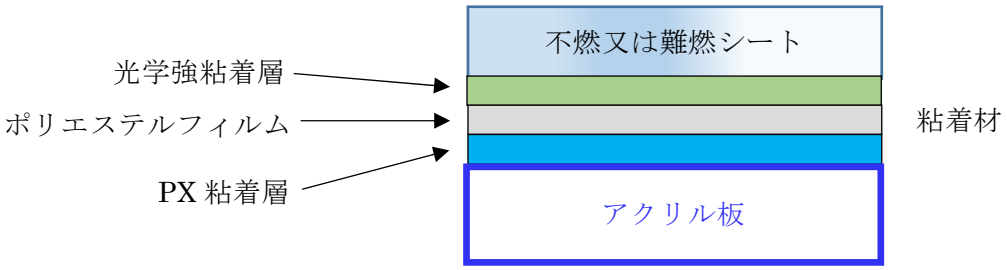


Fig.2　粘着材の概略図

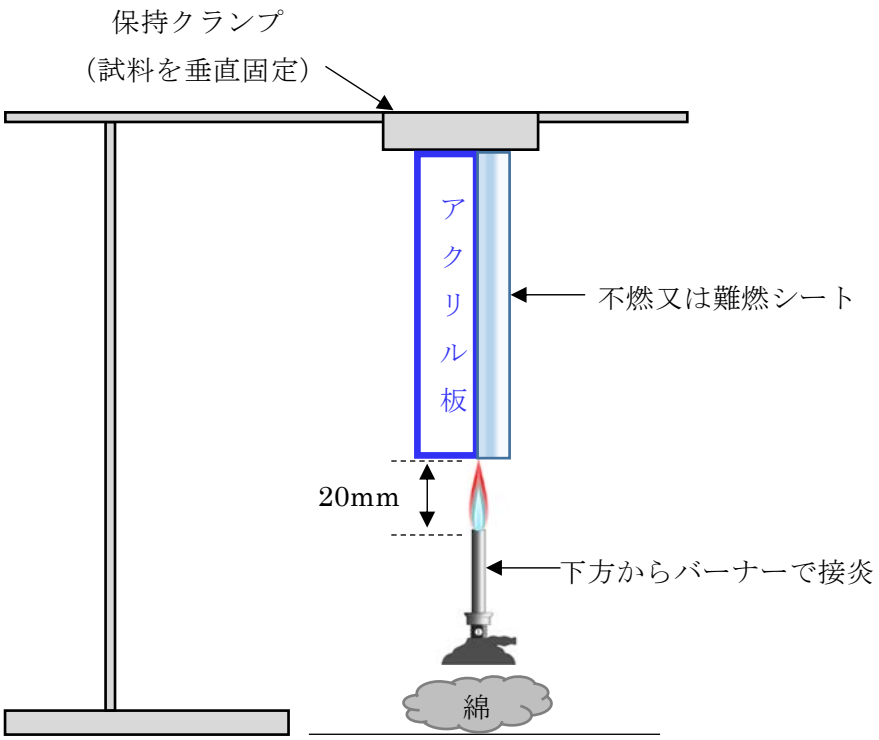


Fig.3　V 試験方法の概略図

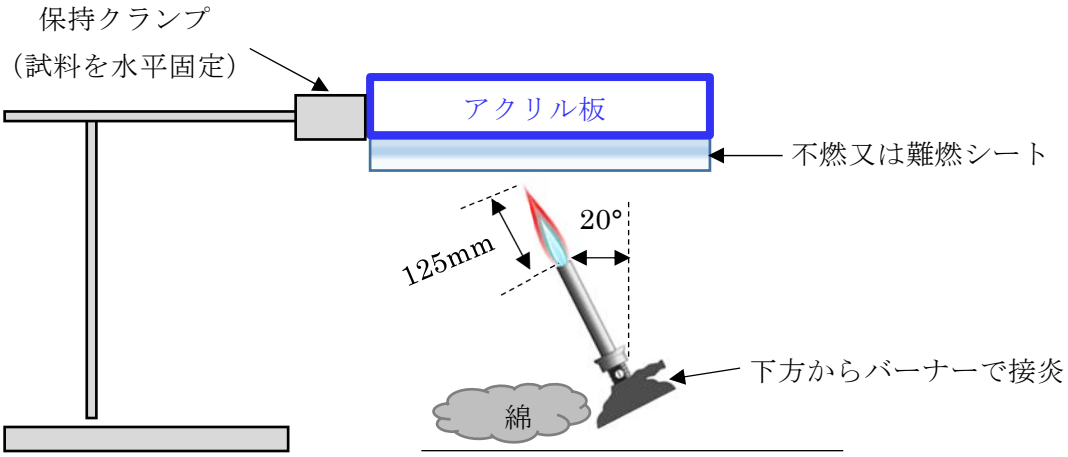


Fig.4　5V 試験方法の概略図

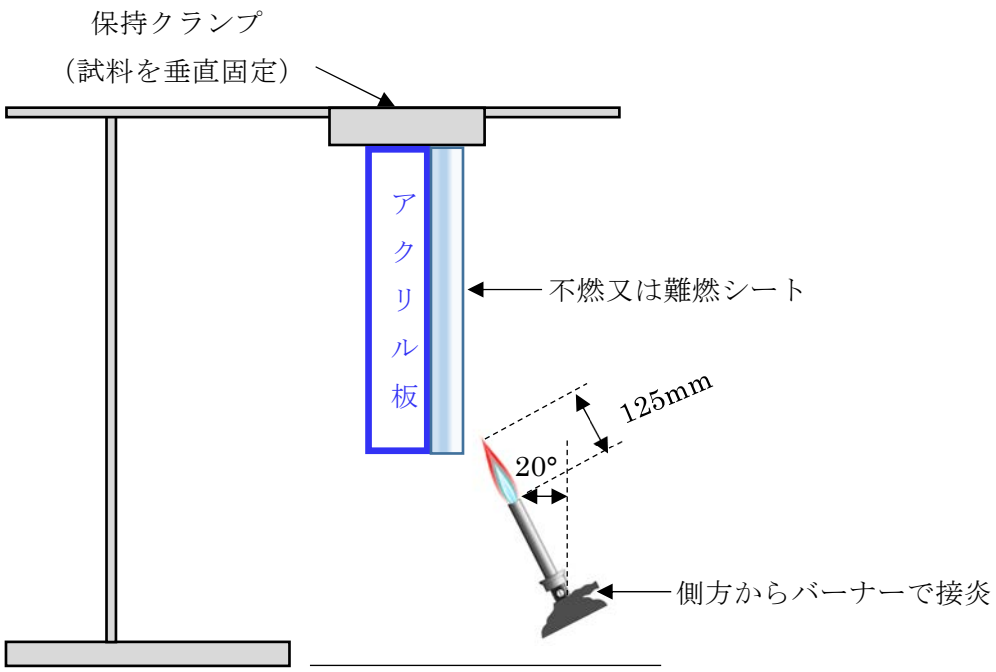


Fig.5　強制燃焼試験方法の概略図

Table 2　5V 相当試験の試料寸法及び個数

試料の種類	寸法（mm）	個数	試料 No.
アクリル板	150×150×t10	3	A-BU-1～3
ポリカーボネート板	150×150×t10	3	P-BU-1～3
不燃シート貼付けアクリル板	150×150×t10+シート厚	3	FA-BU-1～3
難燃シート貼付けアクリル板	150×150×t10+シート厚	3	NA-BU-1～3

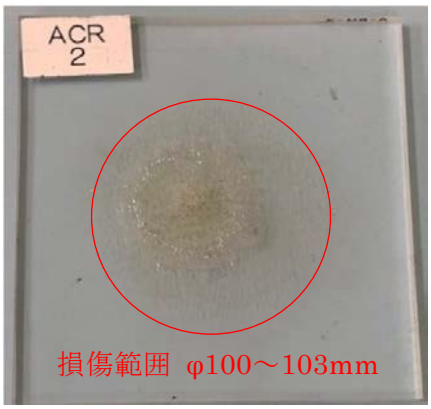
Table 3　5V 相当試験の試験条件及び確認項目

項　目		試験条件及び確認内容
試験条件	試験方法	・試料を水平に設置 ・試料中央に内炎先端が接するよう接炎 ・5 秒接炎、5 秒離炎を 5 回繰り返し、5 回目離炎後に試料の様子を確認
	炎の大きさ	125mm 炎（内炎：40mm 青炎）　ASTM D5207 準拠
	試料コンディショニング	23℃/50%RH　24 時間以上放置
確認内容	自己消火性	5 回目の離炎後の燃焼時間（残炎時間）が 60 秒以下であること
	燃焼性	試料に開孔部がないこと
		溶融落下物による綿着火がないこと
		熱影響による変化（表面形状、焦げ、変色等）範囲（寸法測定）
	難燃性能維持	シートの剥離の有無（シート接着状態の確認）

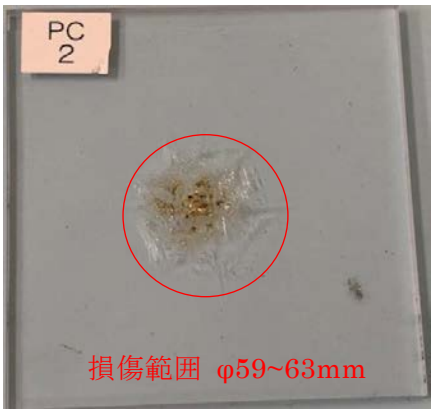
Table 4　5V 相当試験の結果

試料の種類	試料 No.	離炎後燃焼時間	板材開孔	シート開孔	綿着火	板材損傷範囲	シート全体剥離
アクリル板	A-BU-1	2 秒	無	－	無	φ100 mm	－
	A-BU-2	2 秒	無	－	無	φ100 mm	－
	A-BU-3	2 秒	無	－	無	φ103 mm	－
ポリカーボネート板	P-BU-1	1 秒	無	－	無	φ63 mm	－
	P-BU-2	1 秒	無	－	無	φ63 mm	－
	P-BU-3	1 秒	無	－	無	φ59 mm	－
不燃シート貼付けアクリル板	FA-BU-1	2 秒	無	無	無	φ90 mm	無
	FA-BU-2	1 秒	無	無	無	φ89 mm	無
	FA-BU-3	2 秒	無	無	無	φ90 mm	無
難燃シート貼付けアクリル板	NA-BU-1	1 秒	無	有	無	φ69 mm	無
	NA-BU-2	1 秒	無	有	無	φ73 mm	無
	NA-BU-3	1 秒	無	有	無	φ72 mm	無

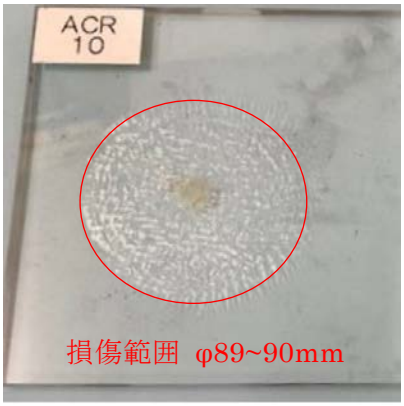
Photo 3　5V 相当試験の試験中の写真



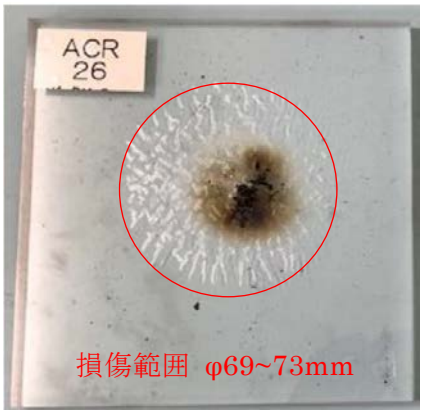
(a) アクリル板



(b) ポリカーボネート板



(c) 不燃シート貼付けアクリル板
（不燃シート取外し後）



(d) 難燃シート貼付けアクリル板
（難燃シート取外し後）

Photo 4　5V 相当試験後の写真

Table 5　強制燃焼試験の試料寸法及び個数

試料の種類	寸法（mm）	個数	試料 No.
アクリル板	150×150×t10	3	A-BB-1～3
ポリカーボネート板	150×150×t10	3	P-BB-1～3
不燃シート貼付けアクリル板	150×150×t10+シート厚	3	FA-BB-1～3
難燃シート貼付けアクリル板	150×150×t10+シート厚	3	NA-BB-1～3

Table 6　強制燃焼試験の試験条件及び確認項目

項　目		試験条件及び確認内容
試験条件	試験方法	・試料を垂直に設置 ・試料中央に内炎先端が接するよう接炎 ・90 秒間連続接炎を行い、離炎後に試料の様子を確認
	炎の大きさ	125mm 炎（内炎：40mm 青炎）　ASTM D5207 準拠
	試料コンディショニング	23℃/50%RH　24 時間以上放置
	温度測定	赤外線サーモグラフィカメラにより火源温度を測定 （最高測定温度 500℃）
確認内容	自己消火性	離炎後の燃焼時間（残炎時間）が 60 秒以下であること
	燃焼性	試料に開孔部がないこと
		熱影響による変化（表面形状、焦げ、変色等）範囲（寸法測定）
	難燃性能維持	シートの剥離の有無（シート接着状態の確認）

Table 7　強制燃焼試験の結果

試料の種類	試料 No.	離炎後 燃焼時間	板材 開孔	シート 開孔	板材 損傷幅	シート 全体剥離	試料近傍 最高温度
アクリル板	A-BB-1	60 秒超	無	－	50 mm	－	－
	A-BB-2	60 秒超	無	－	48 mm	－	411℃
	A-BB-3	60 秒超	無	－	53 mm	－	－
ポリカーボネート板	P-BB-1	4 秒	無	－	60 mm	－	－
	P-BB-2	7 秒	無	－	52 mm	－	500℃
	P-BB-3	3 秒	無	－	62 mm	－	－
不燃シート貼付けアクリル板	FA-BB-1	20 秒	無	無	20 mm	無	－
	FA-BB-2	18 秒	無	無	20 mm	無	500℃
	FA-BB-3	9 秒	無	無	19 mm	無	－
難燃シート貼付けアクリル板	NA-BB-1	1 秒	無	有	50 mm	無	－
	NA-BB-2	0 秒	無	有	48 mm	無	500℃
	NA-BB-3	0 秒	無	有	42 mm	無	－

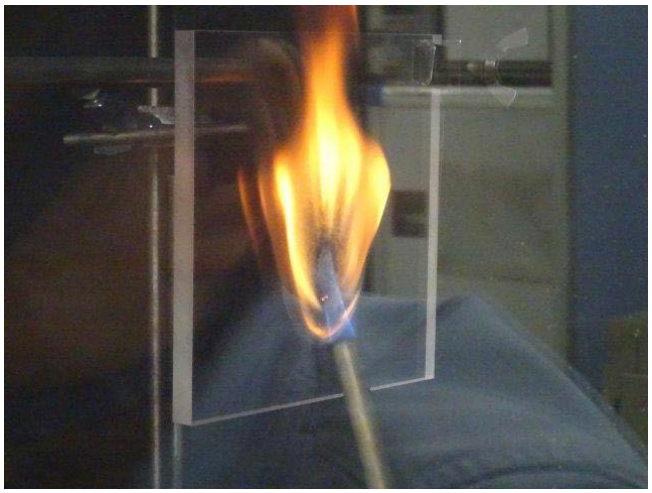
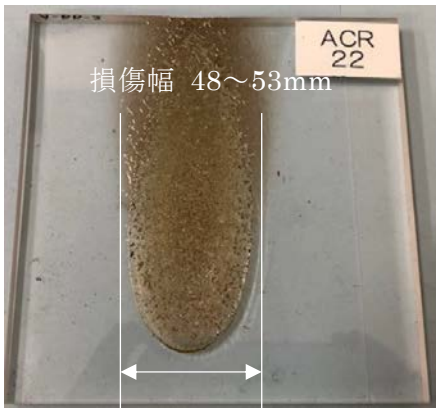
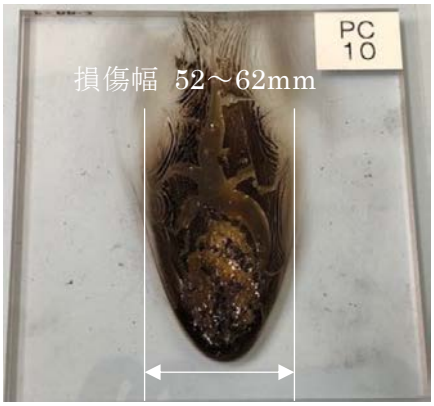


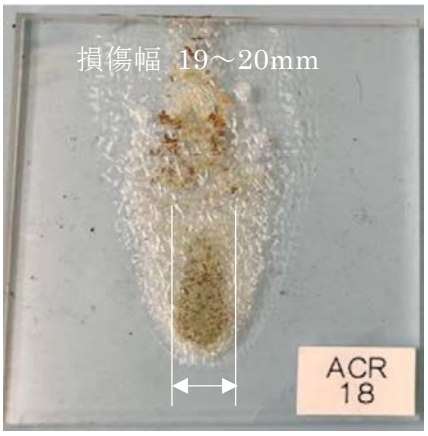
Photo 5　強制燃焼試験の試験中の写真



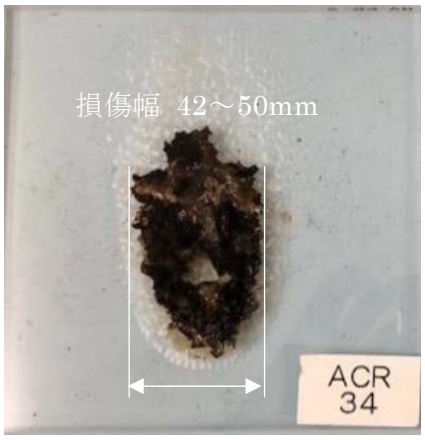
(a) アクリル板



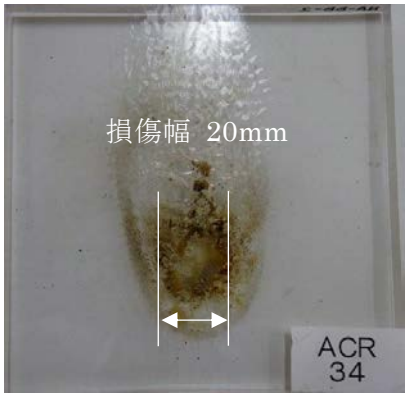
(b) ポリカーボネート板



(c) 不燃シート貼付けアクリル板
（シート取外し後）

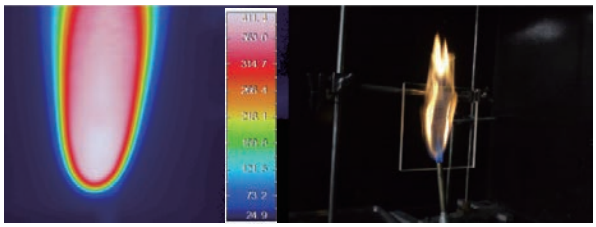


(d) 難燃シート貼付けアクリル板
（シート取外し後）



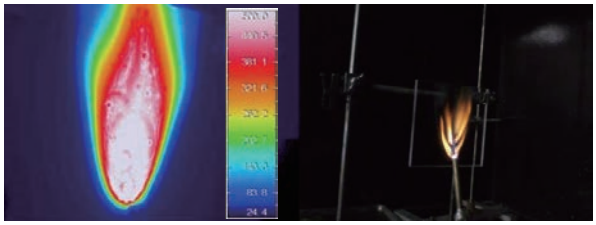
(e) 難燃シート貼付けアクリル板
（溶融固着物除去後）

Photo 6　強制燃焼試験の試験後の写真

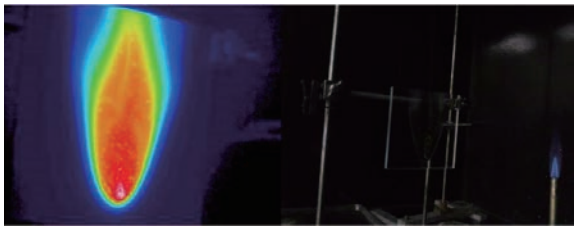


（a）アクリル板
（No.A-BB-2 接炎 90 秒後）

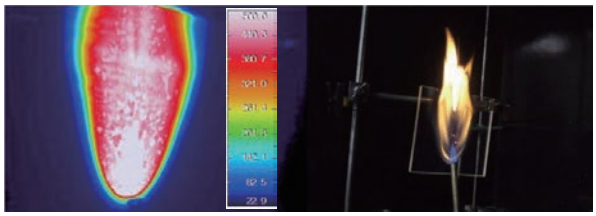
（b）アクリル板
（No.A-BB-2 離炎 60 秒後）



（c）ポリカーボネート板
（No.P-BB-2 接炎 90 秒後）

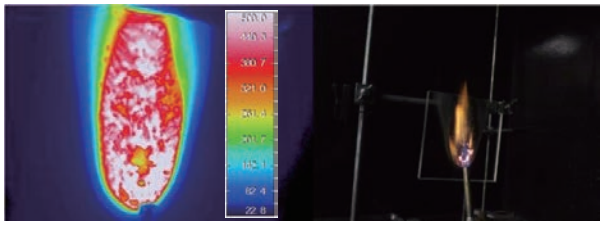


（d）ポリカーボネート板
（No.P-BB-2 離炎 7 秒後）

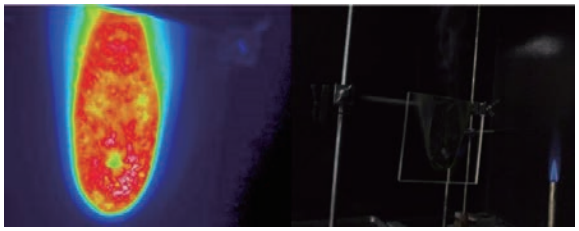


（e）不燃シート貼付けアクリル板
（No.FA-BB-2 接炎 90 秒後）

（f）不燃シート貼付けアクリル板
（No.FA-BB-2 離炎 18 秒後）



（g）難燃シート貼付けアクリル板
（No.NA-BB-2 接炎 90 秒後）



（h）難燃シート貼付けアクリル板
（No.NA-BB-2 離炎 0 秒後）

Photo 7　強制燃焼試験の赤外線サーモグラフィ画像

Table 8　想定火源の総発熱量

可燃物	可燃物重量	燃焼熱	総発熱量
ペーパータオル （紙類：3 束）	1,500 g	新聞紙：18.40 kJ/g[6]	27,600 kJ
ポリ袋（3 枚）	300 g	ポリエチレン：43.40 kJ/g[7]	13,020 kJ
酢酸ビニルシート （1m×1.5m×0.3mm:1 枚）	1,000 g	ビニルアセタート：21.51 kJ/g[7]	21,510 kJ

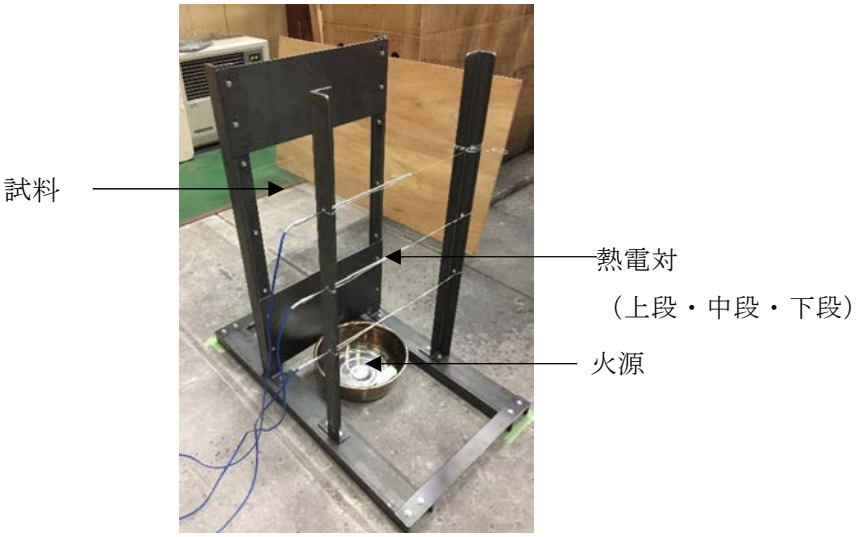


Photo 8　火災想定試験の概略写真

Table 9　火災想定試験の試料寸法及び個数

試料の種類		試料 No.	寸法（mm）	個数
アクリル板		A-F-1	500×500×t10	1
ポリカーボネート板		P-F-1	500×500×t10	1
不燃シート貼付けアクリル板		AF-F-1	500×500×t10+シート厚	1
難燃シート貼付けアクリル板		AN-F-1	500×500×t10+シート厚	1
10mm の隙間のある難燃シートを貼り付けたアクリル板	縦方向隙間	AN-ST-1	500×500×t10+シート厚	1
	横方向隙間	AN-SY-1	500×500×t10+シート厚	1

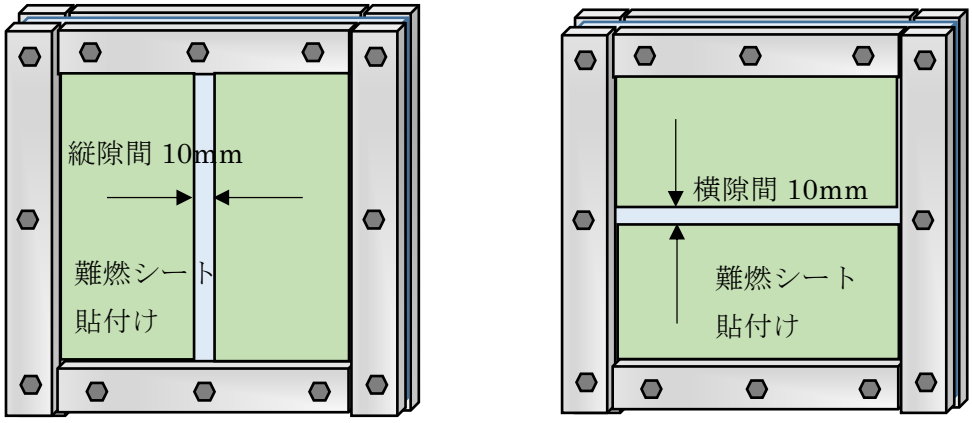


Fig.6　縦隙間及び横隙間の概略図

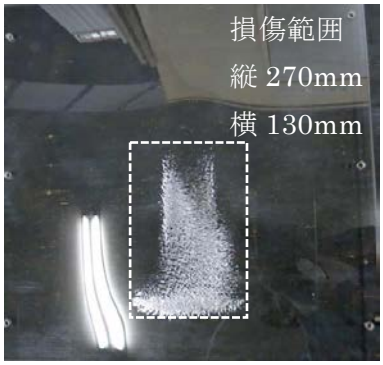
Table 10　火災想定試験の試験条件及び確認項目

項　目		試験及び確認事項
試験条件	試験方法	・試料を固定治具に設置（床面に対し垂直） ・希釈エタノール質量濃度 62%・1,500g（エタノール量：930g（1,500g ×0.62=930g）+水：570g） ・希釈エタノールが入った金属製容器（直径約 300mm、高さ約 120mm）に点火し、炎が試料に接炎するように試料固定治具に寄せる ・燃焼時間は 30 分
確認内容	温度測定	・赤外線サーモグラフィカメラにより火源温度を測定（最高測定温度 500℃） ・熱電対により火源温度（上段・中段・下段）を測定
	自己消火性	・試料に着火した場合の燃焼時間
	燃焼性	・熱影響による変化（表面形状、焦げ、変色等）範囲（寸法測定）
	難燃性能維持	・シート剥離の有無（シート接着状態の確認）

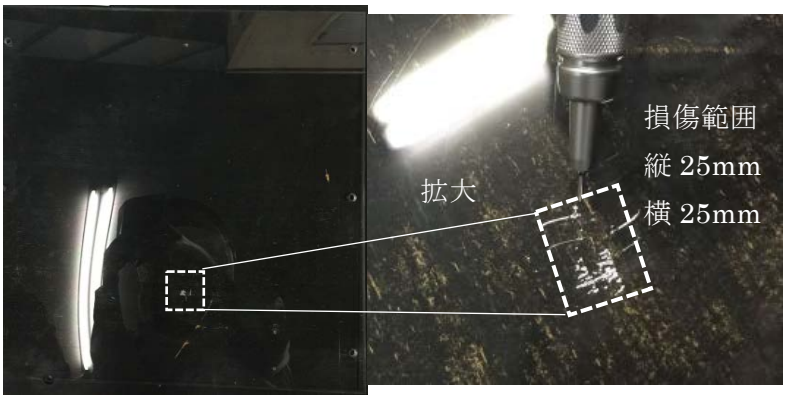
Table 11　火災想定試験の結果

試料の種類		試料 No.	試料への着火	板材損傷範囲	シート全体剥離	シート開孔	シートのよれ
アクリル板		A-F-1	無	縦 270mm 横 130mm	—	—	—
ポリカーボネート板		P-F-1	無	縦 25mm 横 25mm	—	—	—
不燃シート貼付けアクリル板		AF-F-1	無	縦 130mm 横 115mm	無	無	無
難燃シート貼付けアクリル板		AN-F-1	無	縦 210mm 横 190mm	無	無	縦 320mm 横 210mm
10mm の隙間のある難燃シートを貼付けたアクリル板	縦方向	AN-ST-1	無	縦 260mm 横 135mm	無	無	（右側） 縦 320mm 横 95mm （左側） 縦 240mm 横 65mm
	横方向	AN-SY-1	無	縦 20mm 横 60mm 縦 190mm 横 130mm	無	無	（上側） 縦 60mm 横 185mm （下側） 縦 245mm 横 200mm

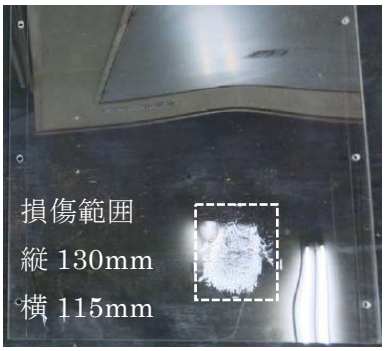
Photo 9　火災想定試験の試験中の写真



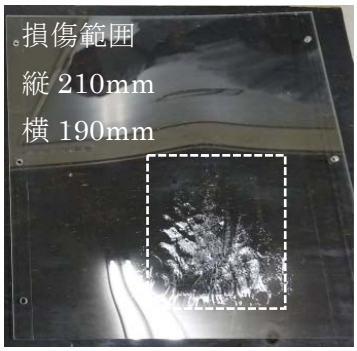
(a) アクリル板



(b) ポリカーボネート板

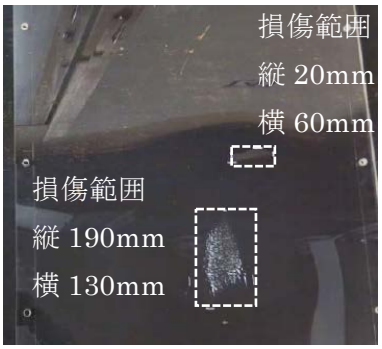


(c) 不燃シート貼付けアクリル板
（不燃シート取外し後）



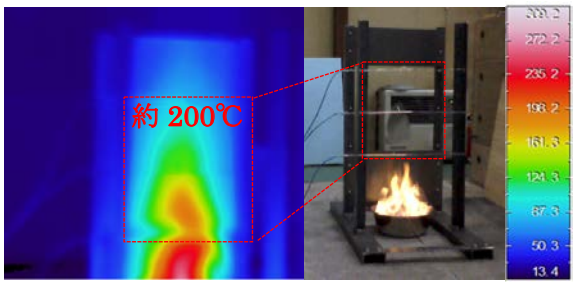
(d) 難燃シート貼付けアクリル板
（難燃シート取外し後）

(e) 縦隙間難燃シート貼付けアクリル板
（難燃シート取外し後）

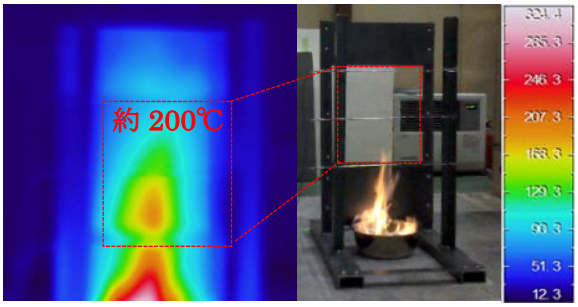


(f) 横隙間難燃シート貼付けアクリル板
（難燃シート取外し後）

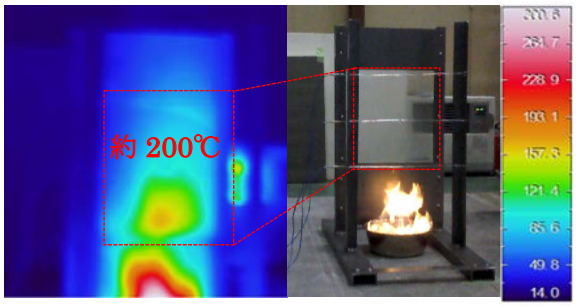
Photo 10　火災想定試験の試験後の写真



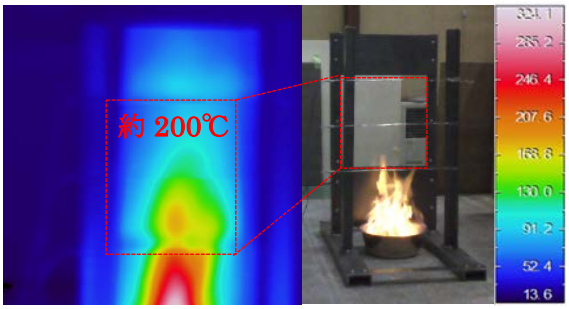
（a）アクリル板（火源着火 16 分後）



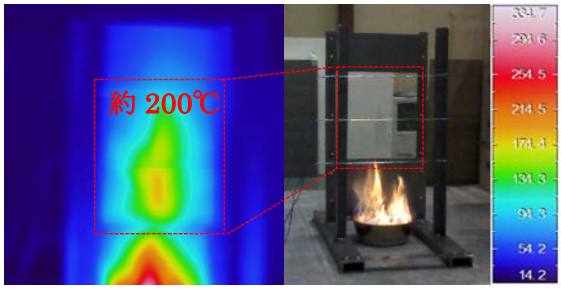
（b）ポリカーボネート板（火源着火 17 分後）



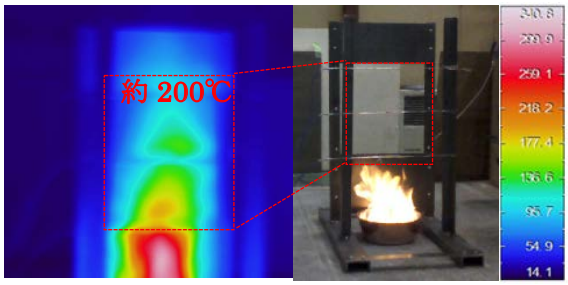
（c）不燃シート貼付け
アクリル板（火源着火 11 分後）



（d）難燃シート貼付け
アクリル板（火源着火 15 分後）



（e）縦方向隙間の難燃シート
貼付けアクリル板（火源着火 16 分後）



（f）横方向隙間の難燃シート
貼付けアクリル板（火源着火 16 分後）

Photo 11　火災想定試験の赤外線サーモグラフィ画像

Table 12　燃焼試験及び火災想定試験の結果

試験項目			アクリル板	ポリカーボネート板	不燃シート貼付けアクリル板	難燃シート貼付けアクリル板
燃焼試験	UL94-5V相当試験（5秒5回断続接炎）	自己消火性（燃焼時間）	有（最大2秒）	有（最大1秒）	有（最大2秒）	有（最大1秒）
		板材開孔	無	無	無	無
		滴下物による綿着火	無	無	無	無
		板材損傷範囲	φ100～103mm	φ59～63mm	φ89～90mm	φ69～73mm
		シート全体剥離	—	—	無	無
	強制燃焼試験（90秒連続接炎）	自己消火性（燃焼時間）	無（60秒超）	有（3～7秒）	有（9～20秒）	有（0～1秒）
		板材開孔	無	無	無	無
		滴下物による綿着火	無	無	無	無
		板材損傷範囲	幅48～53mm	幅52～62mm	幅19～20mm	幅42～50mm
		シート全体剥離	—	—	無	無
火災想定試験		自己消火性（着火の有無）	有（着火無）	有（着火無）	有（着火無）	有（着火無）
		板材開孔	無	無	無	無
		板材損傷範囲	縦：270mm 横：130mm	縦：25mm 横：25mm	縦：130mm 横：115mm	縦：210mm 横：190mm
		シート全体剥離	—	—	無	無

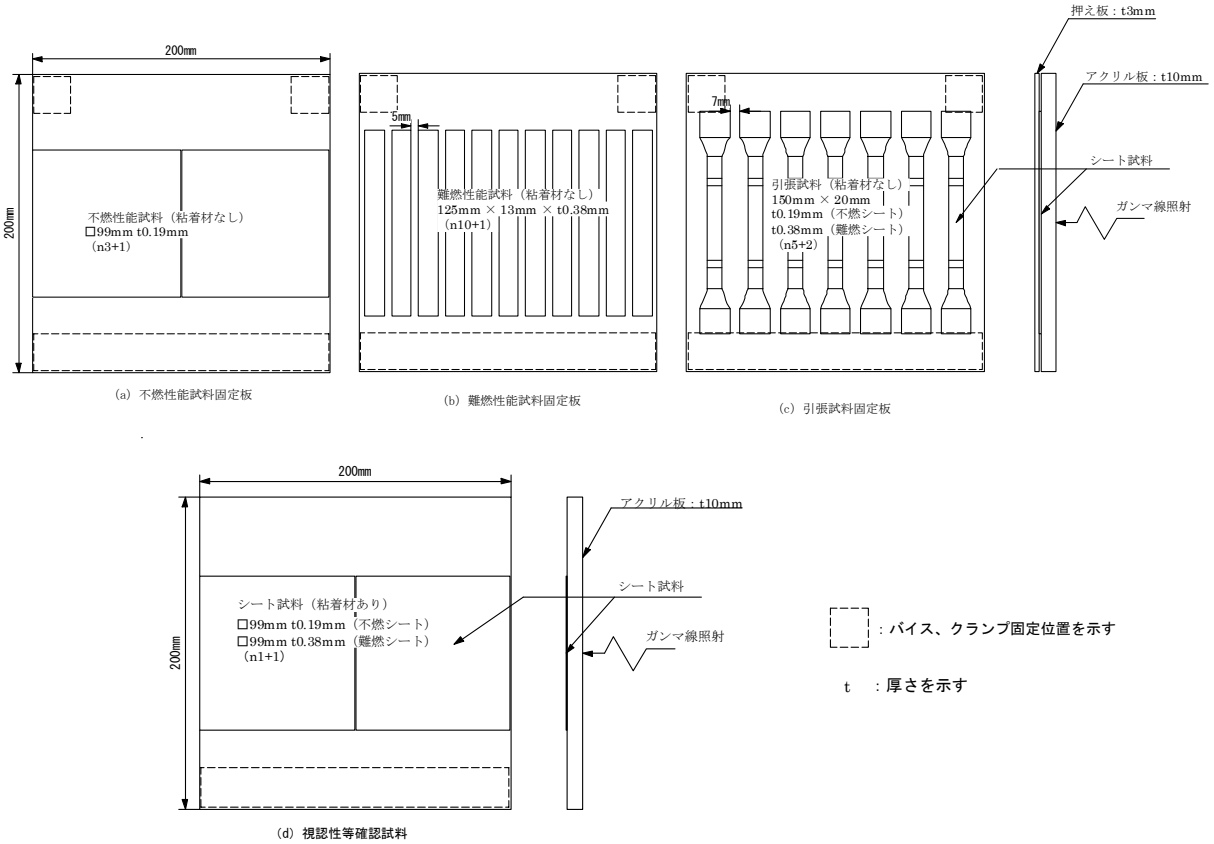


Fig.7　ガンマ線照射試料の固定概略図

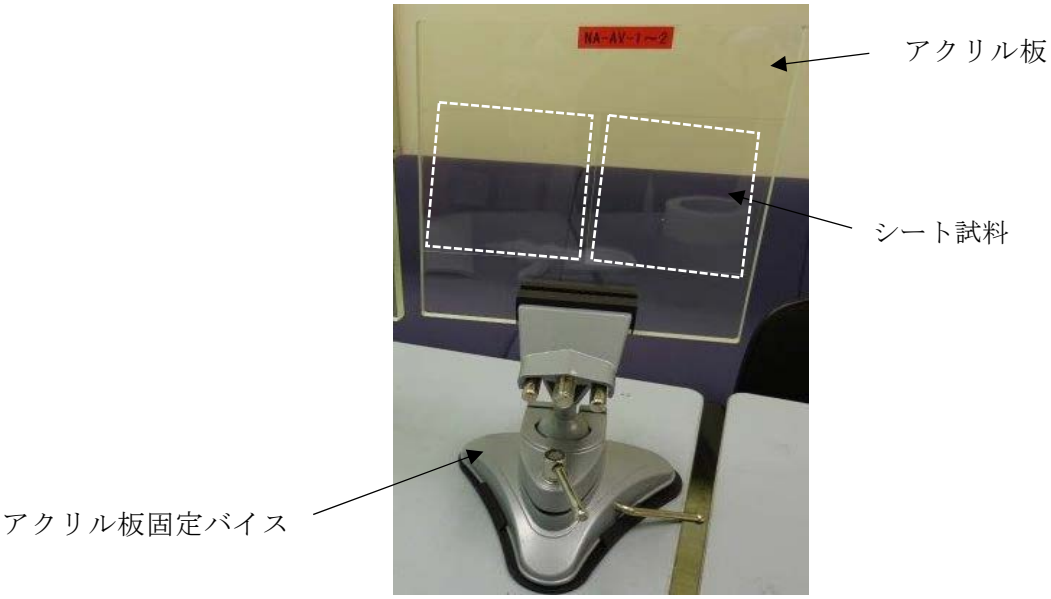


Photo 12　ガンマ線照射試料の固定写真

Table 13　不燃性能試験の試料寸法及び個数（ガンマ線照射）

試料の種類		試料 No.	寸法(mm)	個数
不燃シート	2.8kGy（60 年相当）	F-AF-1～3	99×99	3
	1.0kGy（20 年相当）	F-AF-5～7		3
	0.5kGy（10 年相当）	F-AF-9～11		3
	0.2kGy（ 5 年相当）	F-AF-13～15		3

Table 14　不燃性能試験（発熱性試験）の判定基準

	加熱開始後 20 分間の確認項目	判定基準
①	総発熱量	8MJ/m^2 以下であること
②	最高発熱速度	10 秒以上継続して 200kW/m^2 を超えないこと
③	外観	防火上有害な裏面まで貫通する亀裂及び穴がないこと

Table 15　不燃性能試験の結果（ガンマ線照射）

試験条件（ガンマ線照射）	試料 No.	総発熱量（MJ/m^2）	200kW/m^2 超過時間（秒）	亀裂、穴の有無	判定（不燃性能）
2.8kGy（60 年相当）	F-AF-1	5.7	7.5	無	有
	F-AF-2	4.6	7.8	無	有
	F-AF-3	4.9	8.2	無	有
1.0kGy（20 年相当）	F-AF-5	4.1	8.0	無	有
	F-AF-6	3.9	7.2	無	有
	F-AF-7	3.9	6.9	無	有
0.5kGy（10 年相当）	F-AF-9	4.0	8.4	無	有
	F-AF-10	4.2	8.4	無	有
	F-AF-11	4.8	8.4	無	有
0.2kGy（5 年相当）	F-AF-13	4.5	8.4	無	有
	F-AF-14	4.7	8.3	無	有
	F-AF-15	4.8	9.1	無	有

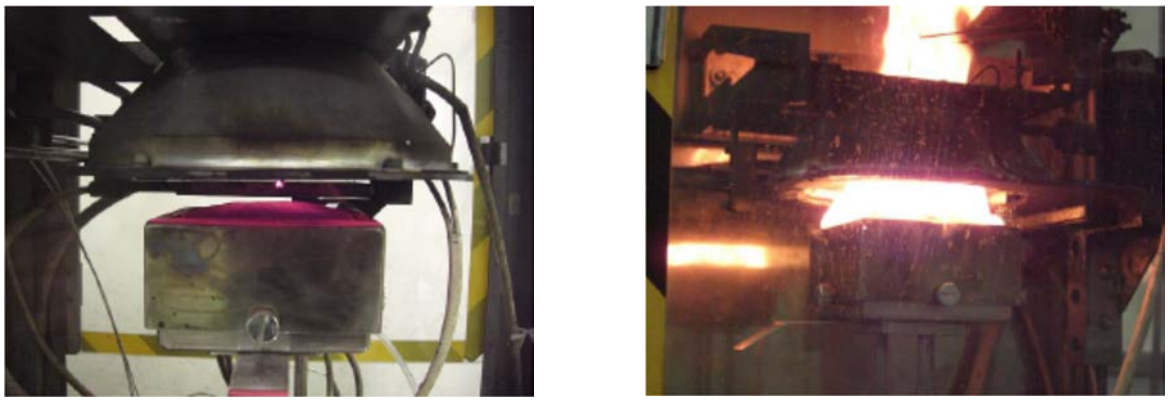


Photo 13　不燃性能試験の試験中の写真（ガンマ線照射）

Photo 14　不燃性能試験後の写真（ガンマ線照射）

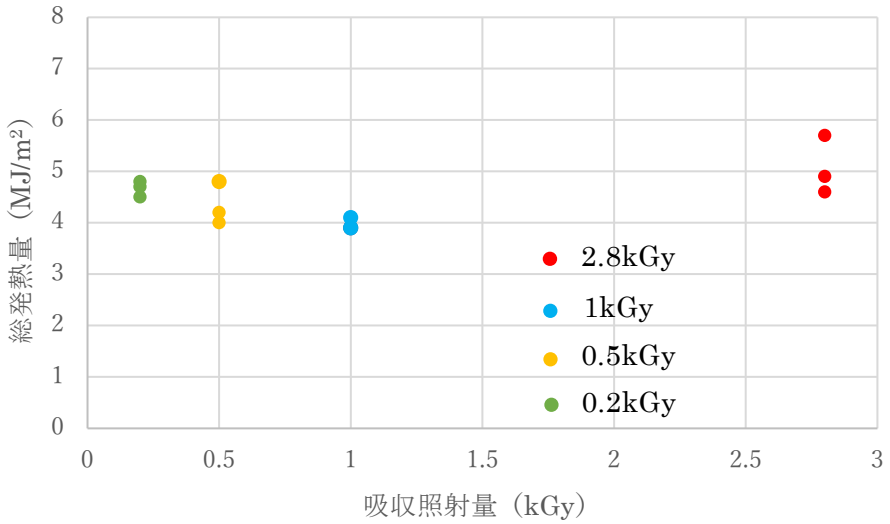


Fig.8　吸収線量と総発熱量の関係図

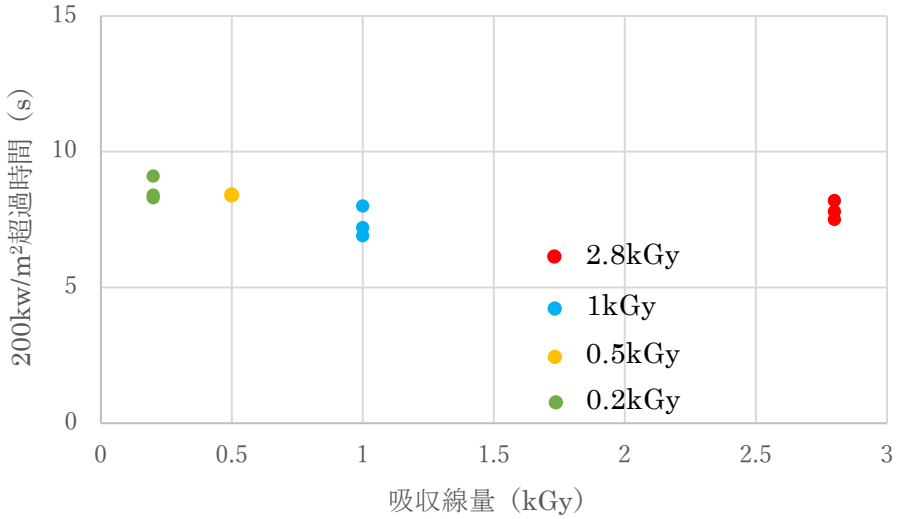


Fig.9　吸収線量と超過時間の関係図

Table 16　難燃性能試験の試料寸法及び個数（ガンマ線照射）

試料の種類		試料 No.	寸法(mm)	個数	
				常態	乾燥
難燃シート（ガンマ線照射）	2.8kGy（60 年相当）	N-AF-1～10	125×13	5	5
	1.0kGy（20 年相当）	N-AF-12～21		5	5
	0.5kGy（10 年相当）	N-AF-23～32		5	5
	0.2kGy（ 5 年相当）	N-AF-34～43		5	5

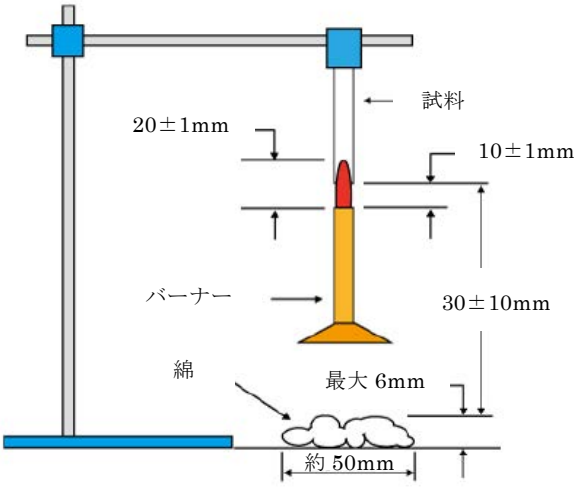


Fig.10　難燃性能試験の概略図

Table 17　難燃性能試験の判定基準（ガンマ線照射）

判定基準条件	V-0	V-1	V-2
1 回目（t1）又は 2 回目（t2）の残炎時間	10 秒以下	30 秒以下	30 秒以下
試験片 5 本の t1 と t2 の合計残炎時間	50 秒以下	250 秒以下	250 秒以下
試験片 5 本の 2 回目の接炎後の残炎時間(t2)とアフターグロー時間（t3）の合計	30 秒以下	60 秒以下	60 秒以下
試験片 5 本の保持クランプまでの残炎又はアフターグロー有無	なし	なし	なし
燃焼滴下物による綿の着火有無	なし	なし	あり

Table 18　難燃性能試験の結果（ガンマ線照射）

試料（厚み）	前処理	試験結果（秒）															合計（t1+t2）	最大（t2+t3）	最大（t1ort2）	判定
		①			②			③			④			⑤						
		t1	t2	t2+t3	t1	t2	t2+t3	t1	t2	t2+t3	t1	t2	t2+t3	t1	t2	t2+t3				
ガンマ線照射 60 年相当（0.38mm）	常態	0.7	0.8	0.8	0.7	0.0	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6#	0.6	0.8	0.0#	0.0	5.8	0.8	0.8	V-0
		試料 No. N-AF-1			試料 No. N-AF-2			試料 No. N-AF-3			試料 No. N-AF-4			試料 No. N-AF-5						
	乾燥	1.2	0.0#	0.0	0.6	0.7	0.7	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	7.3	0.8	1.2	V-0
		試料 No. N-AF-6			試料 No. N-AF-7			試料 No. N-AF-8			試料 No. N-AF-9			試料 No. N-AF-10						
ガンマ線照射 20 年相当（0.38mm）	常態	0.6	0.7	0.7	0.0	0.7	0.7	0.0	0.7	0.7	0.8	0.3	0.3	0.9	0.7	0.7	5.4	0.7	0.9	V-0
		試料 No. N-AF-12			試料 No. N-AF-13			試料 No. N-AF-14			試料 No. N-AF-15			試料 No. N-AF-16						
	乾燥	0.9	0.9#	0.9	0.7	0.0	0.0	0.7	0.2#	0.2	0.7	0.7#	0.7	0.7	0.4#	0.4	5.9	0.9	0.9	V-0
		試料 No. N-AF-17			試料 No. N-AF-18			試料 No. N-AF-19			試料 No. N-AF-20			試料 No. N-AF-21						
ガンマ線照射 10 年相当（0.38mm）	常態	0.9	0.5	0.5	0.8	0.6	0.6	0.8	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	1.0#	1.0	6.8	1.0	1.0	V-0
		試料 No. N-AF-23			試料 No. N-AF-24			試料 No. N-AF-25			試料 No. N-AF-26			試料 No. N-AF-27						
	乾燥	0.8	0.6	0.6	0.6	0.4#	0.4	0.8	0.7	0.7	0.6	0.7#	0.7	0.6	0.8#	0.8	6.6	0.8	0.8	V-0
		試料 No. N-AF-28			試料 No. N-AF-29			試料 No. N-AF-30			試料 No. N-AF-31			試料 No. N-AF-32						
ガンマ線照射 5 年相当（0.38mm）	常態	0.7	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.6	1.0	1.0	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8#	0.8	7.7	1.0	1.0	V-0
		試料 No. N-AF-34			試料 No. N-AF-35			試料 No. N-AF-36			試料 No. N-AF-37			試料 No. N-AF-38						
	乾燥	0.8	0.0	0.0	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	6.3	0.8	0.8	V-0
		試料 No. N-AF-39			試料 No. N-AF-40			試料 No. N-AF-41			試料 No. N-AF-42			試料 No. N-AF-43						

・t1 は 1 回目着火後の燃焼時間を、t2 は 2 回目着火後の時間を、t2+t3 は 2 回目着火後の燃焼時間+アフターグロー時間を示す。

・結果中の「#」は、滴下はあったが、綿に着火することはなかったことを示す。

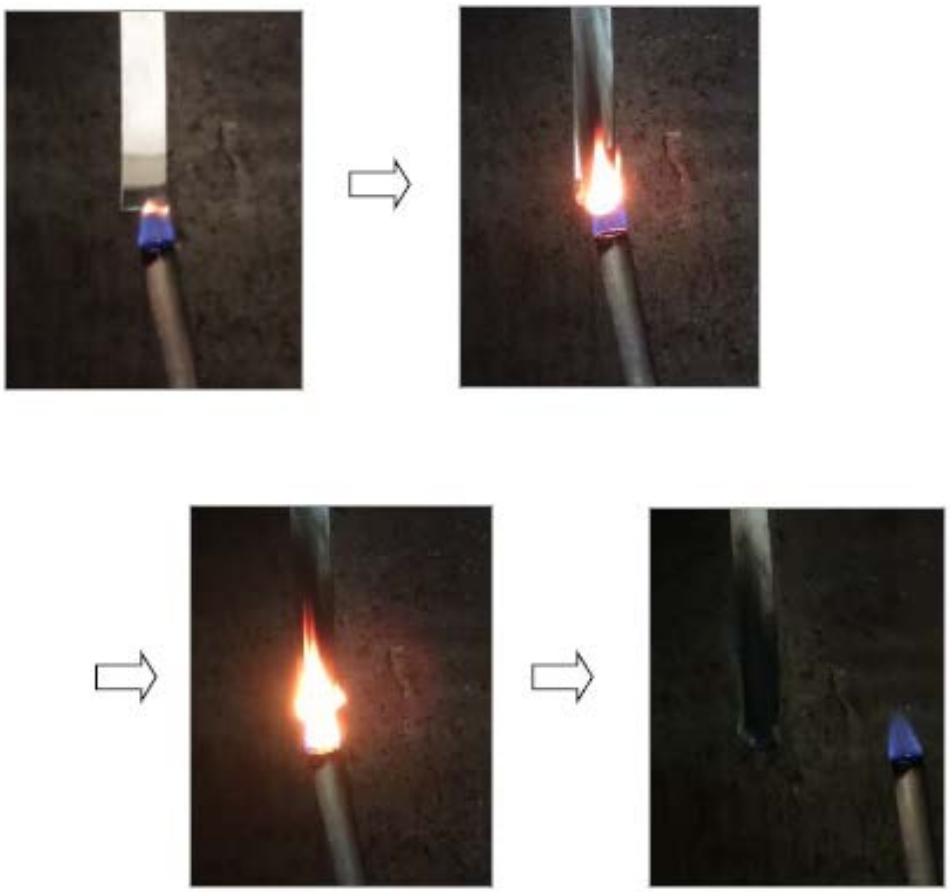


Photo 15　難燃性能試験の試験中の写真

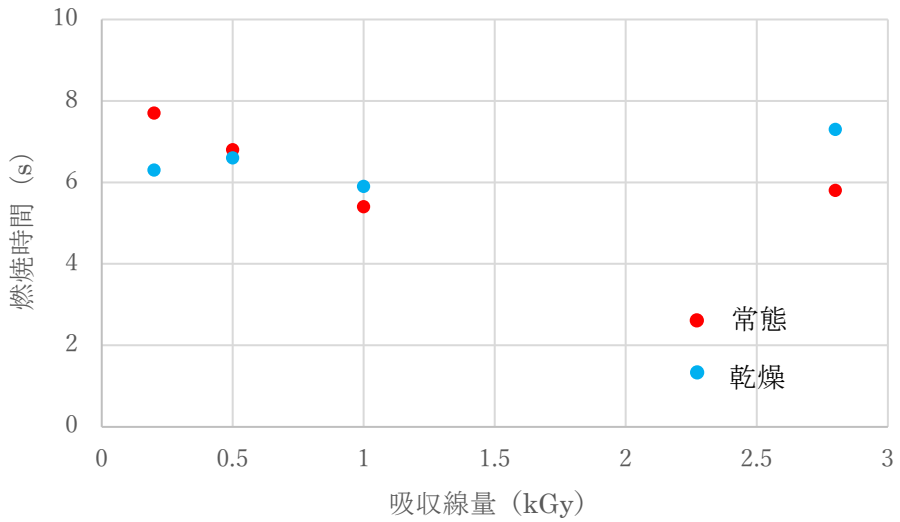


Fig.11　吸収線量と燃焼時間（t1+t2）の関係図

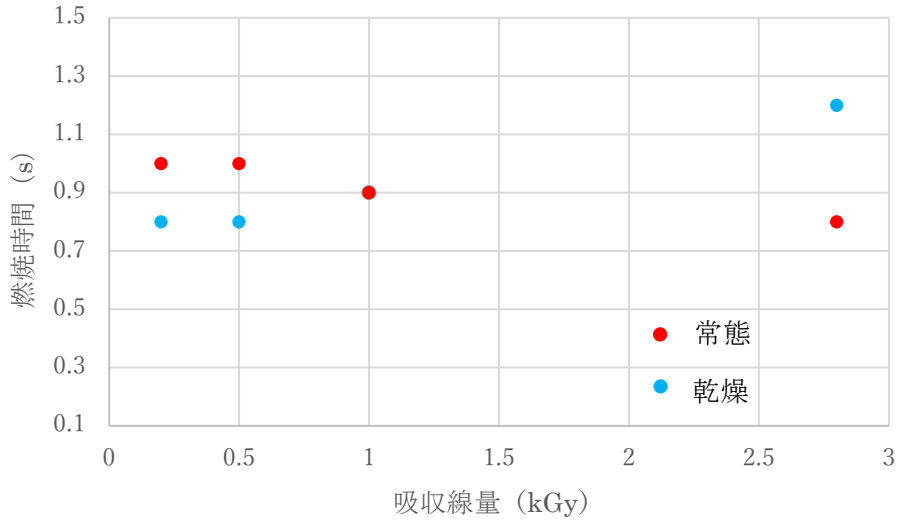
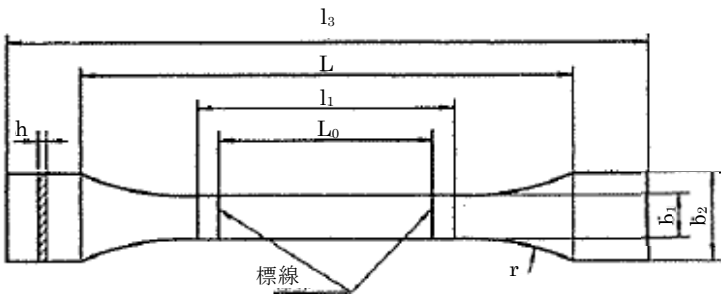


Fig.12　吸収線量と最大燃焼時間の関係図

Table 19　引張試験の試料寸法及び個数（ガンマ線照射）

試料の種類		試料 No.	寸法(mm)	個数
不燃シート	ガンマ線照射 2.8kGy（60 年）	F-AT-1～4、6	150×20×t0.19 (JIS K 7127) 試料形状 タイプ 1B	5
	ガンマ線照射 1.0kGy（20 年）	F-AT-9～11、13、14		5
	ガンマ線照射 0.5kGy（10 年）	F-AT-15、17～19、21		5
	ガンマ線照射 0.2kGy（5 年）	F-AT-22、23、25～27		5
	ガンマ線未照射：MD	F-BT-1、2、4、6、7		5
	ガンマ線未照射：TD	F-BT-8～11、14		5
難燃シート	ガンマ線照射 2.8kGy（60 年）	N-AT-1～5	150×20×t0.38 (JIS K 7127) 試料形状 タイプ 1B	5
	ガンマ線照射 1.0kGy（20 年）	N-AT-10～14		5
	ガンマ線照射 0.5kGy（10 年）	N-AT-16、17、19～21		5
	ガンマ線照射 0.2kGy（5 年）	N-AT-22、23、25～27		5
	ガンマ線未照射：MD	N-BT-1～3、5、6		5
	ガンマ線未照射：TD	N-BT-8、10～12、14		5



試料形状タイプ 1B

b_1 狭い平行部の幅：10mm±0.2mm

b_2 両端の幅：20mm±0.5mm

h 厚さ：≦1mm

L_0 標線間距離：50mm±0.5mm

l_1 狭い平行部の長さ：60mm±0.5mm

L チャック間の初期距離：115mm±5mm

l_3 全長：≧150mm

r 半径：≧60mm

Fig.13　引張試験の試料形状

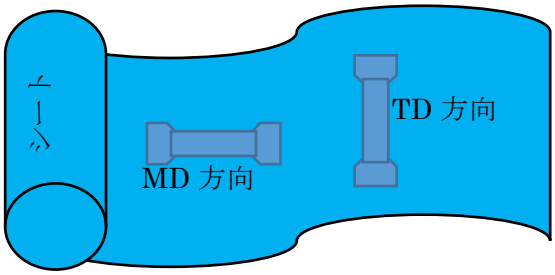


Fig.14　引張試料の採取概略図

Photo 16　引張試験の試験中の写真

Table 20　不燃シートの引張試験の結果（1/3）

試料 No. / 試験項目		ガンマ線照射 2.8kGy（60 年相当）					ガンマ線照射 1.0kGy（20 年相当）				
		FAT1	FAT2*	FAT3*	FAT4	FAT6	FAT9*	FAT10*	FAT11	FAT13	FAT14
引張弾性率(MPa) 0.3-0.9%	測定値	5,820	5,790	5,750	5,810	5,750	5,710	5,710	5,780	5,830	5,810
	平均	平均値：5,780　標準偏差：30 最大値：5,820　最小値：5,750					平均値：5,770　標準偏差：50 最大値：5,830　最小値：5,710				
破断点試験力 (N)	測定値	250.00	230.66	255.69	240.97	256.94	236.16	247.19	209.53	257.66	254.00
	平均	平均値：246.85　標準偏差：9.87 最大値：256.94　最小値　：230.66					平均値：240.91　標準偏差：17.31 最大値：257.66　最小値　：209.53				
引張破壊応力 (MPa)	測定値	132	121	135	127	135	124	130	110	136	134
	平均	平均値：130　標準偏差：5 最大値：135　最小値　：121					平均値：127　標準偏差：9 最大値：136　最小値　：110				
破断点変位 (mm)	測定値	3.42	3.02	3.53	3.36	3.54	3.37	3.37	2.69	3.54	3.55
	平均	平均値：3.37　標準偏差：0.19 最大値：3.54　最小値　：3.02					平均値：3.30　標準偏差：0.32 最大値：3.55　最小値　：2.69				
破断点ひずみ (%)	測定値	3.0	2.6	3.1	2.9	3.1	2.9	2.9	2.3	3.1	3.1
	平均	平均値：2.9　標準偏差：0.2 最大値：3.1　最小値　：2.6					平均値：2.9　標準偏差：0.3 最大値：3.1　最小値　：2.3				
降伏点試験力 (N)	測定値	—	—	—	241.09	—	237.81	—	—	—	—
降伏点応力 (MPa)	測定値	—	—	—	127	—	125	—	—	—	—
降伏点ひずみ (%)	測定値	—	—	—	2.8	—	2.8	—	—	—	—

* FAT2、3、9、10 はダンベル試料の肩部で破断

Table 20　不燃シートの引張試験の結果（2/3）

試料 No. / 試験項目		ガンマ線照射 0.5kGy（10 年相当）					ガンマ線照射 0.2kGy（5 年相当）				
		FAT15	FAT17	FAT18	FAT19	FAT21	FAT22	FAT23	FAT25	FAT26	FAT27
引張弾性率(MPa) 0.3-0.9%	測定値	5,770	5,730	5,730	5,790	5,730	5,750	5,740	5,630	5.680	5,750
	平均	平均値：5,750　標準偏差：25 最大値：5,790　最小値：5,730					平均値：5,710　標準偏差：50 最大値：5,750　最小値：5,630				
破断点試験力 (N)	測定値	246.03	255.22	246.94	256.53	261.03	236.81	255.47	250.63	225.28	245.75
	平均	平均値：253.15　標準偏差：5.78 最大値：261.03　最小値　：246.03					平均値：242.79　標準偏差：10.71 最大値：255.47　最小値　：225.28				
引張破壊応力 (MPa)	測定値	129	134	130	135	137	125	134	132	119	129
	平均	平均値：133　標準偏差：3 最大値：137　最小値　：129					平均値：128　標準偏差：5 最大値：134　最小値　：119				
破断点変位 (mm)	測定値	3.55	3.53	3.38	3.59	3.68	3.56	3.57	3.54	3.02	3.58
	平均	平均値：3.55　標準偏差：0.10 最大値：3.68　最小値　：3.38					平均値：3.45　標準偏差：0.22 最大値：3.58　最小値　：3.02				
破断点ひずみ (%)	測定値	3.1	3.1	2.9	3.1	3.2	3.1	3.1	3.1	2.6	3.1
	平均	平均値：3.1　標準偏差：0.1 最大値：3.2　最小値　：2.9					平均値：3.0　標準偏差：0.2 最大値：3.1　最小値　：2.6				
降伏点試験力 (N)	測定値	249.56	—	—	—	—	246.56	—	—	—	246.44
降伏点応力 (MPa)	測定値	131	—	—	—	—	130	—	—	—	130
降伏点ひずみ (%)	測定値	2.9	—	—	—	—	2.9	—	—	—	3.0

Table 20　不燃シートの引張試験の結果（3/3）

試験項目 ＼ 試料 No.		ガンマ線未照射 MD					ガンマ線未照射 TD				
		FBT1	FBT2	FBT4	FBT6	FBT7	FBT8	FBT9*	FBT10*	FBT11	FBT14
引張弾性率(MPa) 0.3-0.9%	測定値	5,880	5,830	5,880	5,790	5,840	6,510	6,420	6,280	6,350	6,350
	平均	平均値：5,840　標準偏差：30 最大値：5,880　最小値：5,790					平均値：6,380　標準偏差：80 最大値：6,510　最小値：6,280				
破断点試験力 (N)	測定値	248.81	250.53	248.91	247.47	253.63	242.75	258.50	241.25	249.47	255.94
	平均	平均値：249.87　標準偏差：2.11 最大値：253.63　最小値　：247.47					平均値：249.58　標準偏差：6.87 最大値：258.50　最小値　：241.25				
引張破壊応力 (MPa)	測定値	131	132	131	130	133	128	136	127	131	135
	平均	平均値：131　標準偏差：1 最大値：133　最小値　：130					平均値：131　標準偏差：4 最大値：136　最小値　：127				
破断点変位 (mm)	測定値	3.57	3.37	3.55	3.55	3.48	3.55	3.55	3.19	3.37	3.70
	平均	平均値：3.51　標準偏差：0.07 最大値：3.57　最小値　：3.37					平均値：3.47　標準偏差：0.18 最大値：3.70　最小値　：3.19				
破断点ひずみ (%)	測定値	3.1	2.9	3.1	3.1	3.0	3.1	3.1	2.8	2.9	3.2
	平均	平均値：3.0　標準偏差：0.1 最大値：3.1　最小値　：2.9					平均値：3.0　標準偏差：0.2 最大値：3.2　最小値　：2.8				
降伏点試験力 (N)	測定値	254.47	—	249.88	—	—	251.72	—	—	—	257.03
降伏点応力 (MPa)	測定値	134	—	132	—	—	132	—	—	—	135
降伏点ひずみ (%)	測定値	3.0	—	2.9	—	—	2.9	—	—	—	3.1

* FBT9、10 はダンベル試料の肩部で破断

Table 21　難燃シートの引張試験の結果（1/3）

試験項目 ＼ 試料 No.		ガンマ線照射 2.8kGy（60 年相当）					ガンマ線照射 1.0kGy（20 年相当）				
		NAT1	NAT2	NAT3	NAT4	NAT5	NAT10	NAT11	NAT12*	NAT13	NAT14
引張弾性率(MPa) 0.8-2%	測定値	2,150	2,190	2,140	2,200	2,130	2,130	2,140	2,120	2,180	2,170
	平均	平均値：2,160　標準偏差：30 最大値：2,200　最小値：2,130					平均値：2,150　標準偏差：20 最大値：2,180　最小値：2,120				
破断点試験力 (N)	測定値	236.69	243.59	226.50	222.06	246.47	240.41	245.81	256.44	236.72	244.31
	平均	平均値：235.06　標準偏差：9.46 最大値：246.47　最小値　：222.06					平均値：244.74　標準偏差：6.65 最大値：256.44　最小値　：236.72				
引張破壊応力 (MPa)	測定値	62.3	64.1	59.6	58.4	64.9	63.3	64.7	67.5	62.3	64.3
	平均	平均値：61.9　標準偏差：2.5 最大値：64.9　最小値　：58.4					平均値：64.4　標準偏差：1.8 最大値：67.5　最小値　：62.3				
破断点変位 (mm)	測定値	24.75	41.73	30.60	56.76	62.70	61.36	73.45	77.69	58.85	61.41
	平均	平均値：43.30　標準偏差：14.60 最大値：62.70　最小値　：24.75					平均値：66.60　標準偏差：7.54 最大値：77.69　最小値　：58.85				
破断点ひずみ (%)	測定値	21	36	27	49	54	53	64	67	51	53
	平均	平均値：38　標準偏差：13 最大値：54　最小値　：21					平均値：58　標準偏差：7 最大値：67　最小値　：51				
降伏点試験力 (N)	測定値	284.56	285.00	283.91	286.75	282.03	279.22	278.00	284.53	286.00	288.00
	平均	平均値：284.45　標準偏差：1.53 最大値：286.75　最小値：282.03					平均値：283.15　標準偏差：3.89 最大値：288.00　最小値　：278.00				
降伏点応力 (MPa)	測定値	74.9	75.0	74.7	75.5	74.2	73.5	73.2	74.9	75.3	75.8
	平均	平均値：74.9　標準偏差：0.4 最大値：75.5　最小値：74.2					平均値：74.5　標準偏差：1.0 最大値：75.8　最小値　：73.2				
降伏点ひずみ (%)	測定値	6.7	6.9	6.7	7.0	7.0	6.6	6.6	7.0	7.0	7.0
	平均	平均値：6.9　標準偏差：0.1 最大値：7.0　最小値　：6.7					平均値：6.8　標準偏差：0.2 最大値：7.0　最小値　：6.6				

* NAT12 はダンベル試料の肩部で破断

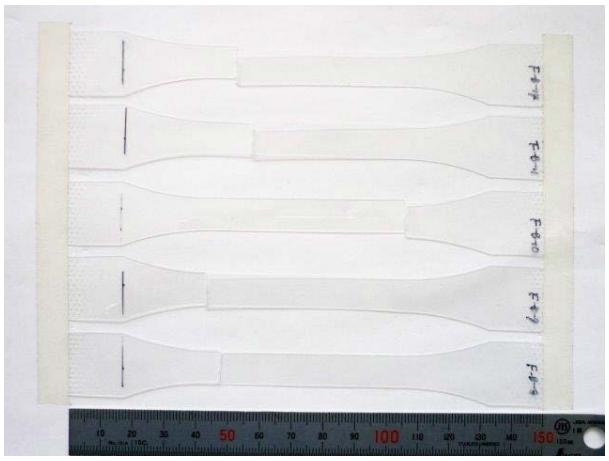
Table 21　難燃シートの引張試験の結果（2/3）

試験項目 ＼ 試料 No.		ガンマ線照射 0.5kGy（10 年相当）					ガンマ線照射 0.2kGy（5 年相当）				
		NAT16	NAT17	NAT19	NAT20	NAT21	NAT22	NAT23	NAT25	NAT26	NAT27
引張弾性率(MPa) 0.8-2%	測定値	2,200	2,150	2,140	2,120	2,120	2,160	2,180	2,180	2,180	2,160
	平均	平均値：2,150　標準偏差：30 最大値：2,200　最小値：2,120					平均値：2,170　標準偏差：10 最大値：2,180　最小値：2,160				
破断点試験力 (N)	測定値	240.22	255.09	245.44	245.94	218.88	231.03	239.59	231.56	232.34	213.66
	平均	平均値：241.11　標準偏差：12.11 最大値：255.09　最小値　：218.88					平均値：229.64　標準偏差：8.57 最大値：239.59　最小値　：213.66				
引張破壊応力 (MPa)	測定値	63.2	67.1	64.6	64.7	57.6	60.8	63.1	60.9	61.1	56.2
	平均	平均値：63.4　標準偏差：3.2 最大値：67.1　最小値　：57.6					平均値：60.4　標準偏差：2.3 最大値：63.1　最小値　：56.2				
破断点変位 (mm)	測定値	18.90	75.58	66.86	70.59	54.79	20.60	51.78	40.13	22.99	28.04
	平均	平均値：57.30　標準偏差：20.41 最大値：75.58　最小値　：18.90					平均値：32.70　標準偏差：11.67 最大値：51.78　最小値　：20.60				
破断点ひずみ (%)	測定値	16	66	58	61	48	18	45	35	20	24
	平均	平均値：50　標準偏差：18 最大値：66　最小値　：16					平均値：28　標準偏差：10 最大値：45　最小値　：18				
降伏点試験力 (N)	測定値	289.22	280.28	281.72	278.22	277.19	285.13	285.75	284.41	285.50	283.78
	平均	平均値：281.33　標準偏差：4.25 最大値：289.22　最小値：277.19					平均値：284.91　標準偏差：0.73 最大値：285.75　最小値　：283.78				
降伏点応力 (MPa)	測定値	76.1	73.8	74.1	73.2	72.9	75.0	75.2	74.8	75.1	74.7
	平均	平均値：74.0　標準偏差：1.1 最大値：76.1　最小値：72.9					平均値：75.0　標準偏差：0.2 最大値：75.2　最小値　：74.7				
降伏点ひずみ (%)	測定値	6.6	6.6	6.9	7.0	6.7	6.7	7.0	6.6	6.9	7.0
	平均	平均値：6.8　標準偏差：0.2 最大値：7.0　最小値　：6.6					平均値：6.8　標準偏差：0.2 最大値：7.0　最小値　：6.6				

Table 21　難燃シートの引張試験の結果（3/3）

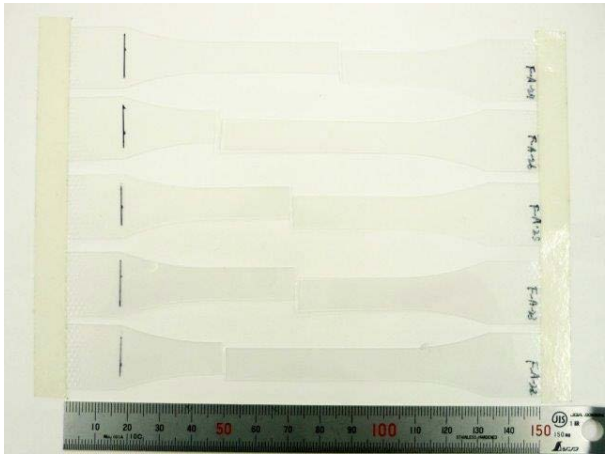
試験項目 ＼ 試料 No.		ガンマ線未照射 MD					ガンマ線未照射 TD				
		NBT1	NBT2	NBT3	NBT5	NBT6	NBT8 *	NBT10	NBT11	NBT12	NBT14
引張弾性率(MPa) 0.8-2%	測定値	2,270	2,230	2,260	2,290	2,290	2,260	2,200	2,190	2,160	2,200
	平均	平均値：2,270　標準偏差：20 最大値：2,290　最小値：2,230					平均値：2,200　標準偏差：30 最大値：2,260　最小値：2,160				
破断点試験力 (N)	測定値	252.28	263.34	242.41	268.66	266.72	254.16	240.75	239.16	233.56	240.44
	平均	平均値：258.68　標準偏差：9.92 最大値：268.66　最小値　：242.41					平均値：241.61　標準偏差：6.79 最大値：254.16　最小値　：233.56				
引張破壊応力 (MPa)	測定値	66.4	69.3	63.8	70.7	70.2	66.9	63.4	63.0	61.5	63.3
	平均	平均値：68.1　標準偏差：2.6 最大値：70.7　最小値　：63.8					平均値：63.6　標準偏差：1.8 最大値：66.9　最小値　：61.5				
破断点変位 (mm)	測定値	63.13	69.30	42.69	66.41	62.33	68.58	48.03	43.96	37.63	42.19
	平均	平均値：60.80　標準偏差：9.38 最大値：69.30　最小値　：42.69					平均値：48.10　標準偏差：10.78 最大値：68.58　最小値　：37.63				
破断点ひずみ (%)	測定値	55	60	37	58	54	60	42	38	33	37
	平均	平均値：53　標準偏差：　8 最大値：60　最小値　：37					平均値：42　標準偏差：9 最大値：60　最小値　：33				
降伏点試験力 (N)	測定値	298.34	294.53	296.41	299.44	299.06	289.84	287.94	288.56	286.16	291.59
	平均	平均値：297.56　標準偏差：1.84 最大値：299.44　最小値：294.53					平均値：288.82　標準偏差：1.83 最大値：291.59　最小値　：286.16				
降伏点応力 (MPa)	測定値	78.5	77.5	78.0	78.8	78.7	76.3	75.8	75.9	75.3	76.7
	平均	平均値：78.3　標準偏差：0.5 最大値：78.8　最小値：77.5					平均値：76.0　標準偏差：0.5 最大値：76.7　最小値　：75.3				
降伏点ひずみ (%)	測定値	6.7	6.7	6.7	7.0	6.7	6.7	7.0	6.7	7.0	7.0
	平均	平均値：6.8　標準偏差：0.1 最大値：7.0　最小値　：6.7					平均値：6.9　標準偏差：0.1 最大値：7.0　最小値　：6.7				

* NBT8 はダンベル試料の肩部で破断

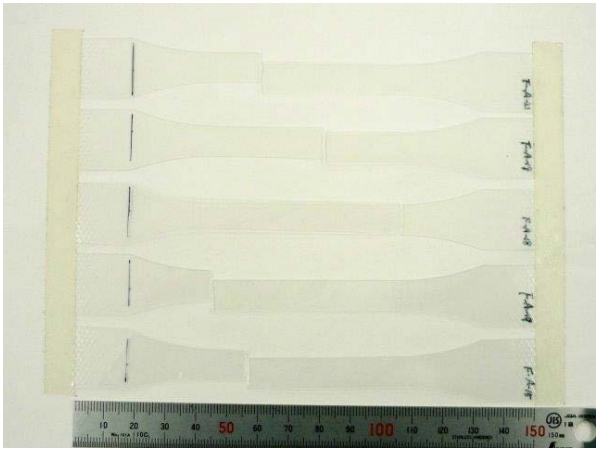


（a）不燃シート　ガンマ線未照射 TD

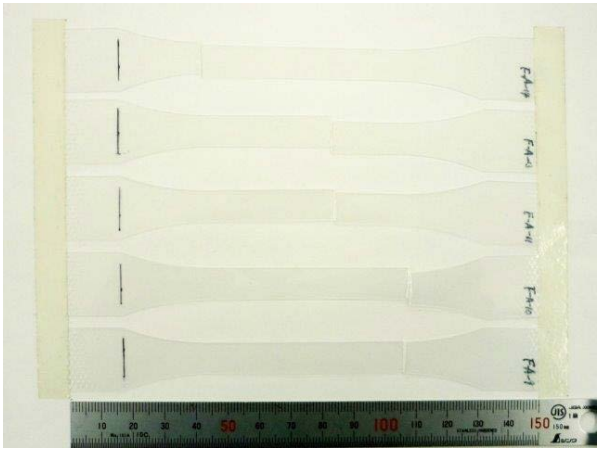
（b）不燃シート　ガンマ線未照射 MD



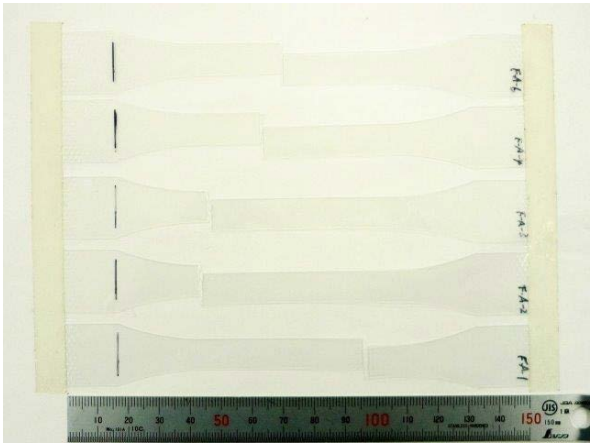
（c）不燃シート　ガンマ線照射 0.2kGy



（d）不燃シート　ガンマ線照射 0.5kGy

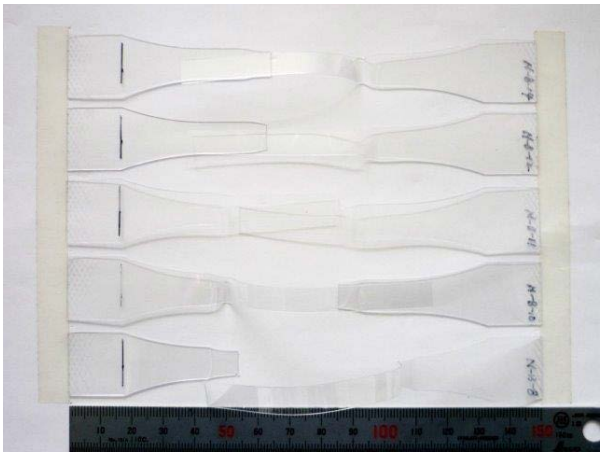


（e）不燃シート　ガンマ線照射 1kGy

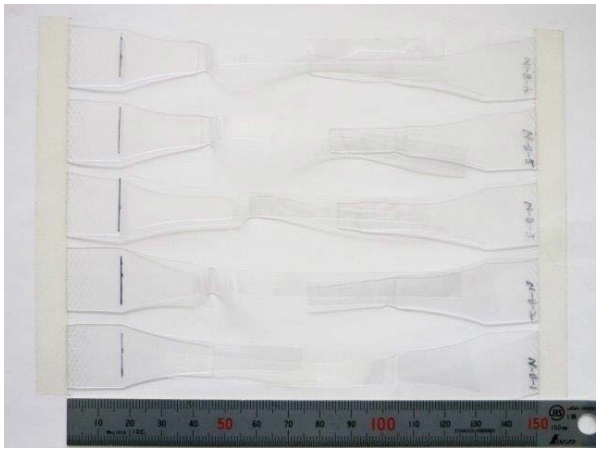


（f）不燃シート　ガンマ線照射 2.8kGy

Photo 17　引張試験後の不燃シートの写真



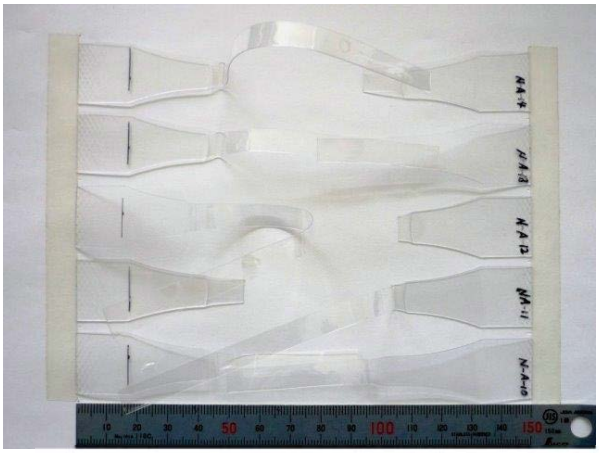
（a）難燃シート　ガンマ線未照射 TD



（b）難燃シート　ガンマ線未照射 MD

（c）難燃シート　ガンマ線照射 0.2kGy

（d）難燃シート　ガンマ線照射 0.5kGy



（e）難燃シート　ガンマ線照射 1kGy

（f）難燃シート　ガンマ線照射 2.8kGy

Photo 18　引張試験後の難燃シートの写真

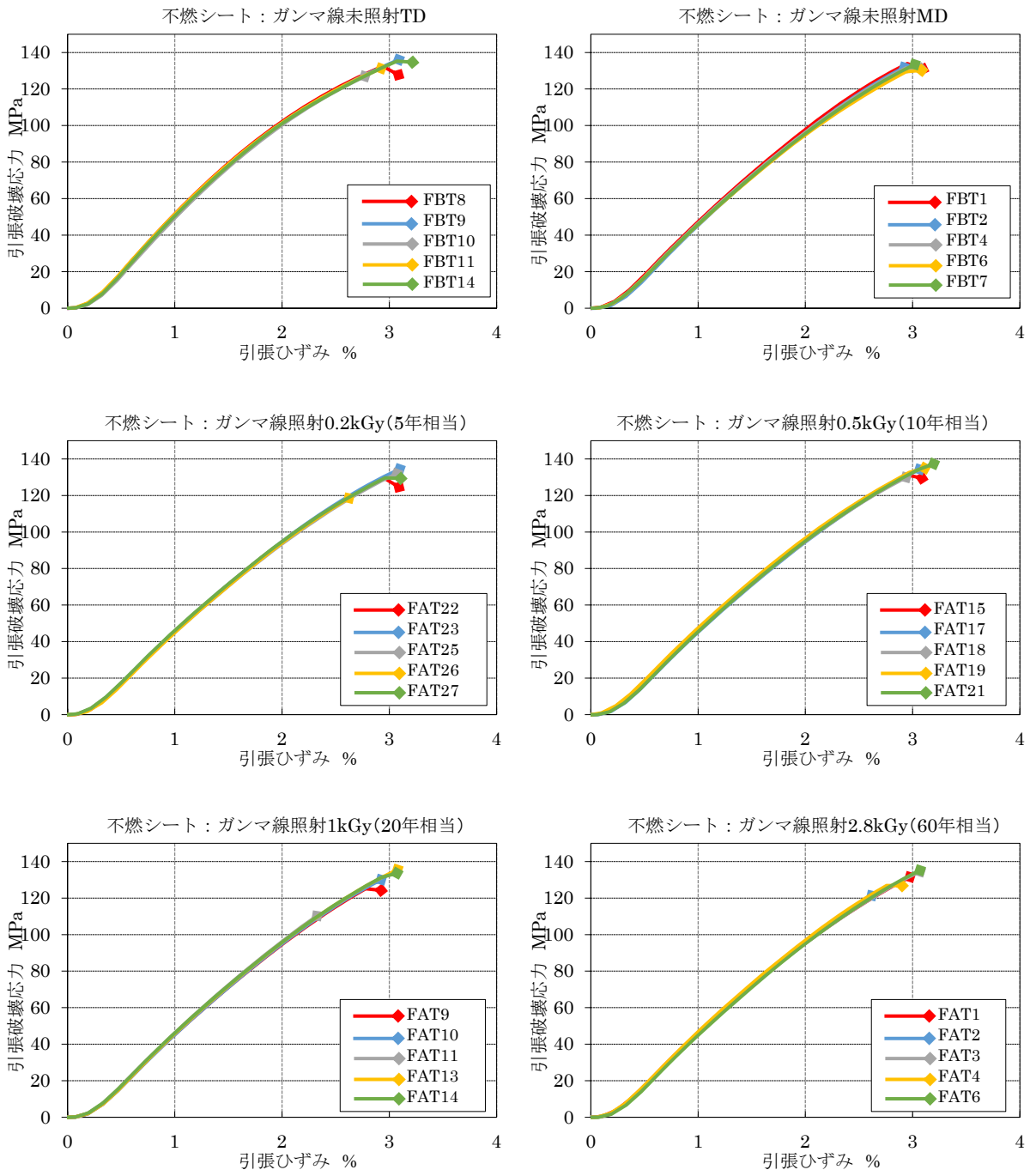


Fig.15　不燃シートの応力-ひずみ曲線

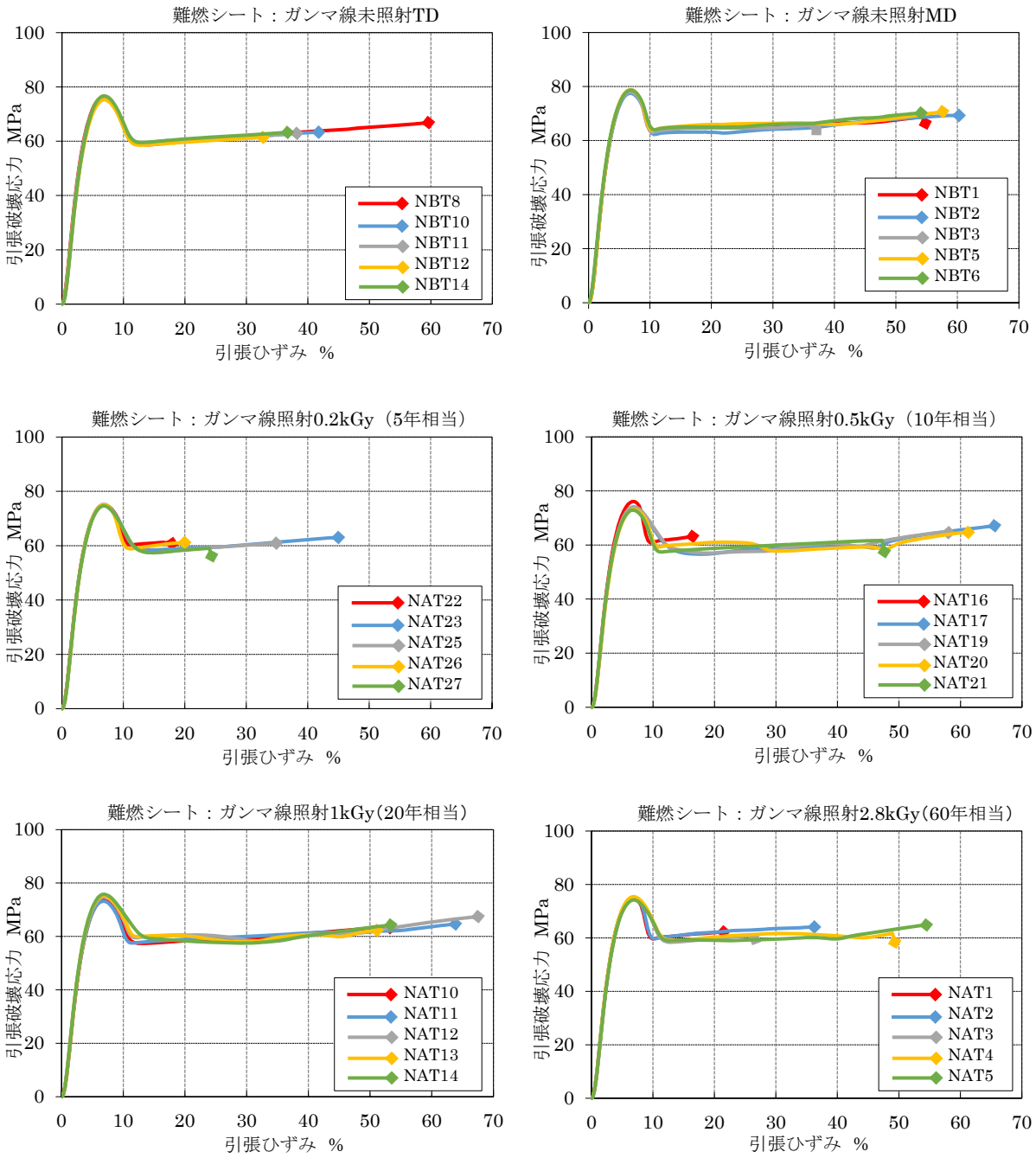


Fig.16　難燃シートの応力-ひずみ曲線

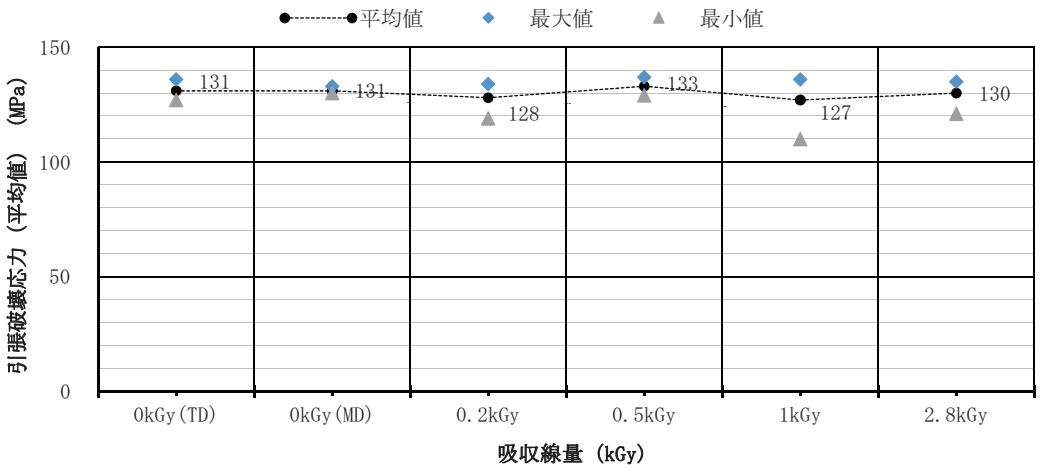


Fig.17　不燃シートの吸収線量と引張破壊応力の関係図

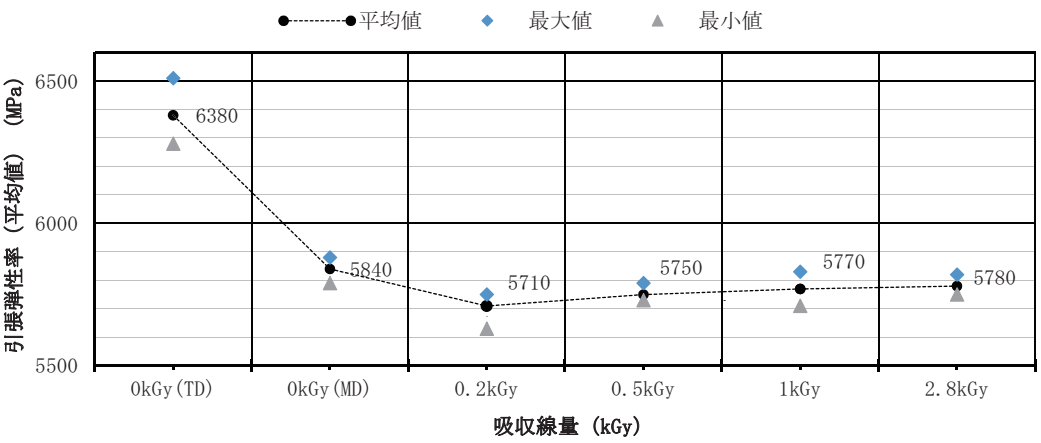


Fig.18　不燃シートの吸収線量と引張弾性率の関係図

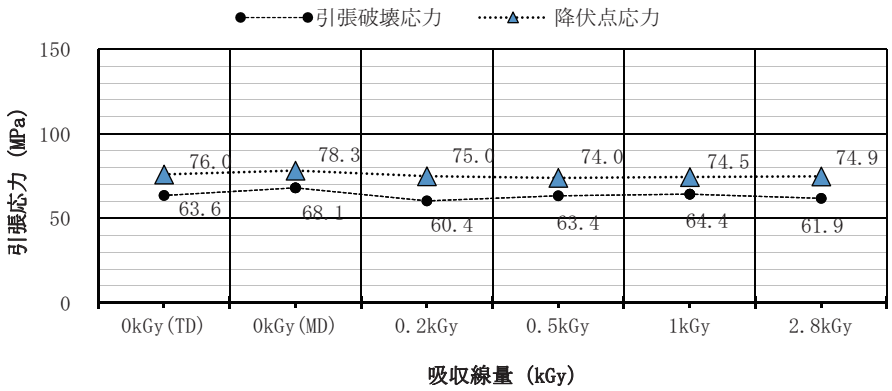


Fig.19　難燃シートの吸収線量と引張応力の関係図

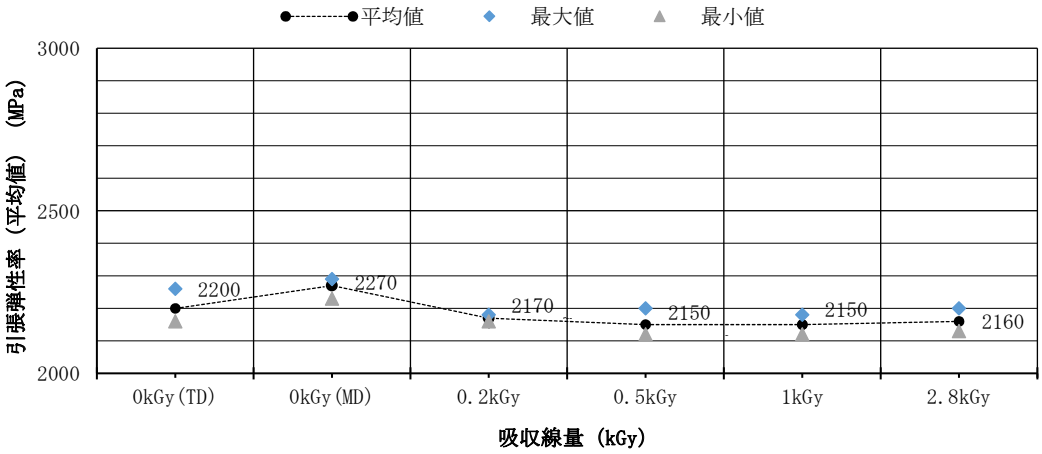


Fig.20　難燃シートの吸収線量と引張弾性率の関係図

Table 22　視認性確認及び取外し性確認の試料寸法及び個数

試料の種類		試料 No.	寸法(mm)	個数
不燃シート貼付けアクリル板	ガンマ線照射 2.8kGy（60 年）	FA-AV-1～2	99×99	2
	ガンマ線照射 1.0kGy（20 年）	FA-AV-3～4		2
	ガンマ線照射 0.5kGy（10 年）	FA-AV-5～6		2
	ガンマ線照射 0.2kGy（5 年）	FA-AV-7～8		2
難燃シート貼付けアクリル板	ガンマ線照射 2.8kGy（60 年）	NA-AV-1～2	99×99	2
	ガンマ線照射 1.0kGy（20 年）	NA-AV-1～2		2
	ガンマ線照射 0.5kGy（10 年）	NA-AV-1～2		2
	ガンマ線照射 0.2kGy（5 年）	NA-AV-1～2		2

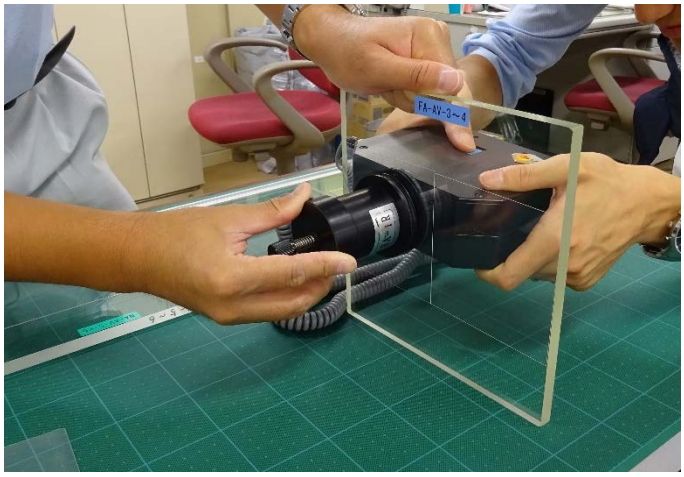


Photo 19　可視光線透過率の測定写真

Table 23　視認性確認及び取外し性確認試験の結果

試料の種類		試料 No.	可視光線透過率(%)		材質変化	取外し性
			ガンマ線照射前	ガンマ線照射後		
不燃シート貼付けアクリル板	2.8kGy（60 年相当）	FA-AV-1	89.3	89.7	無	良
		FA-AV-2	89.7	90.5	無	良
	1.0kGy（20 年相当）	FA-AV-3	89.5	90.3	無	良
		FA-AV-4	89.9	91.9	無	良
	0.5kGy（10 年相当）	FA-AV-5	90.6	91.3	無	良
		FA-AV-6	91.8	92.0	無	良
	0.2kGy（5 年相当）	FA-AV-7	90.3	91. 6	無	良
		FA-AV-8	90.4	91.7	無	良
難燃シート貼付けアクリル板	2.8kGy（60 年相当）	NA-AV-1	90.1	89.7	無	良
		NA-AV-2	89.7	89.1	無	良
	1.0kGy（20 年相当）	NA-AV-3	89.8	88.8	無	良
		NA-AV-4	89.4	90.1	無	良
	0.5kGy（10 年相当）	NA-AV-5	89.7	90.2	無	良
		NA-AV-6	90.1	90.4	無	良
	0.2kGy（5 年相当）	NA-AV-7	89.9	90.4	無	良
		NA-AV-8	90.5	90.7	無	良

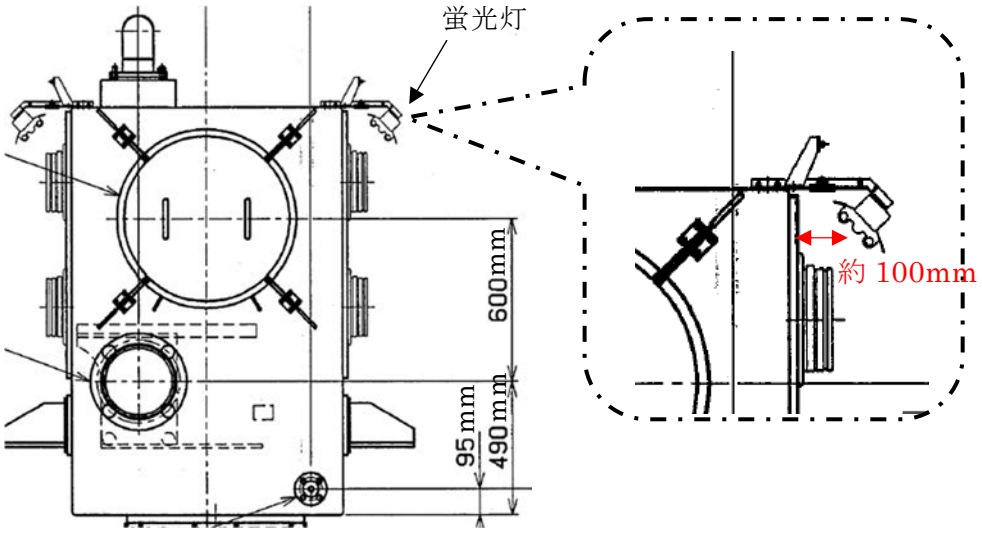


Fig.21　グローブボックス窓板と蛍光灯の配置概略図

Table 24　紫外線照射の試料寸法及び個数

試料の種類	試料 No.	試験項目	寸法(mm)	個数
不燃シート	F-UVAF-1～3	不燃性能試験	99×99	3
	F-UVAV-1～2	可視光線透過率	100×100	2
難燃シート	N-UVAF-1～10	難燃性能試験	125×13	10
	N-UVAV-1～2	可視光線透過率	100×100	2

Table 25　不燃性能試験の結果（紫外線照射）

試験条件（紫外線照射）	試料 No.	総発熱量（MJ/m²）	200kW/m² 超過時間（秒）	亀裂、穴の有無	判定（不燃性能）
2,765J/cm²（10 年相当）	F-UVAF-1	4.0	4.0	無	有
	F-UVAF-2	3.6	6.3	無	有
	F-UVAF-3	3.6	5.8	無	有

Photo 20　不燃性能試験後の写真（紫外線照射）

Table 26　難燃性能試験の結果（紫外線照射）

試料（厚み）	前処理	試験結果（秒）															合計（t1+t2）	最大（t2+t3）	最大（t1ort2）	判定
		①			②			③			④			⑤						
		t1	t2	t2+t3	t1	t2	t2+t3	t1	t2	t2+t3	t1	t2	t2+t3	t1	t2	t2+t3				
紫外線照射 10 年相当（0.38mm）	常態	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	V-0
		試料 No. N-UVAF-1			試料 No. N-UVAF-2			試料 No. N-UVAF-3			試料 No. N-UVAF-4			試料 No. N-UVAF-5						
	乾燥	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	V-0
		試料 No. N-UVAF-6			試料 No. N-UVAF-7			試料 No. N-UVAF-8			試料 No. N-UVAF-9			試料 No. N-UVAF-10						

・t1 は 1 回目着火後の燃焼時間を、t2 は 2 回目着火後の時間を、t2+t3 は 2 回目着火後の燃焼時間+アフターグロー時間を示す。

Table 27　紫外線照射後の可視光線透過率測定結果

試料の種類	試料 No.	可視光線透過率(%)		シート材変化
		紫外線照射前	紫外線照射後	
不燃シート	F-UVAV-1	—	90.2	黄色に変色
	F-UVAV-2	—	90.3	黄色に変色
	F-UVAV-3	90.7	—	—
難燃シート	N-UVAV-1	—	90.5	黄色に変色
	N-UVAV-2	—	90.4	黄色に変色
	N-UVAV-3	90.8	—	—

（a）照射前　不燃シート

（b）照射前　難燃シート

（c）照射後　不燃シート

（d）照射後　難燃シート

Photo 21　紫外線照射前後の写真

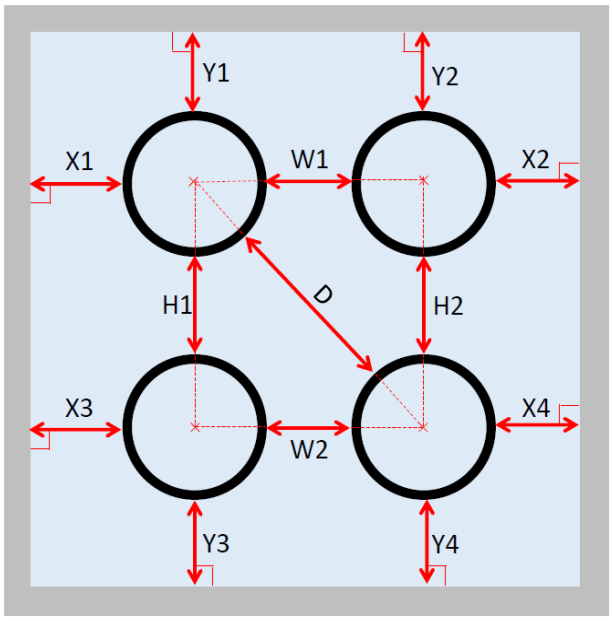


Fig.22　グローブボックス窓板の基本形状の寸法測定箇所

Photo 22　不燃シートの視認性検証写真

Photo 23　難燃シートの視認性検証写真

Table 28　視認性確認の組合せ

組合せ No.	貼付けシート	
	窓板	遮蔽体
①	不燃	なし
②	不燃	不燃
③	なし	不燃
④	不燃	難燃
⑤	難燃	難燃

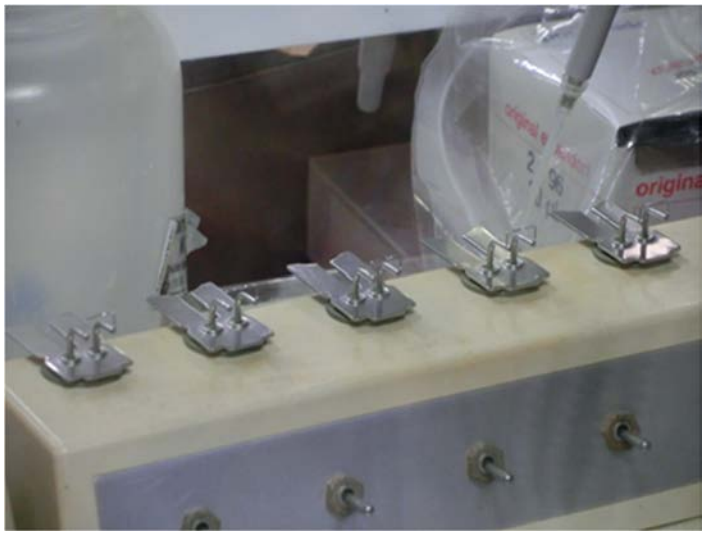
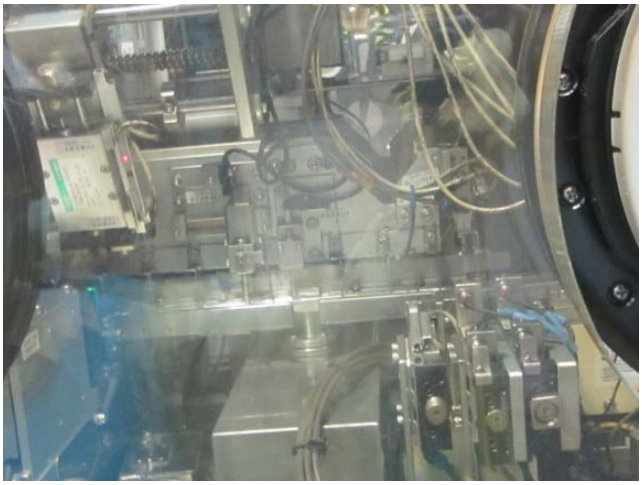
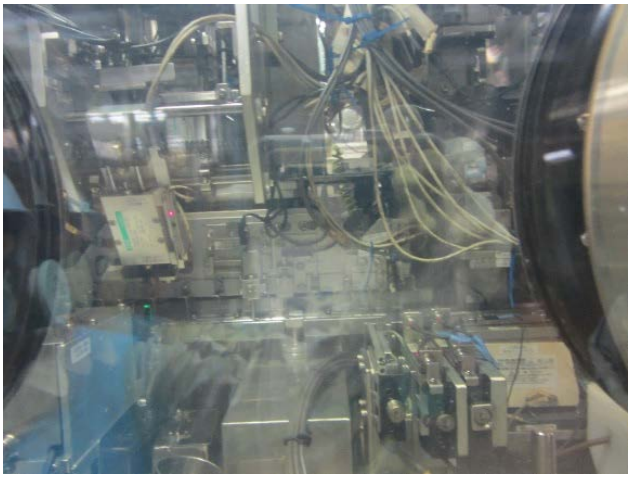


Photo 24　組合せ①（窓板：不燃シート、遮蔽体：なし）



（a）不燃シート貼付け前



（b）不燃シート貼付け後

Photo 25　組合せ②（窓板：不燃シート、遮蔽体：不燃シート）

Photo 26　組合せ③（窓板：なし、遮蔽体：不燃シート）

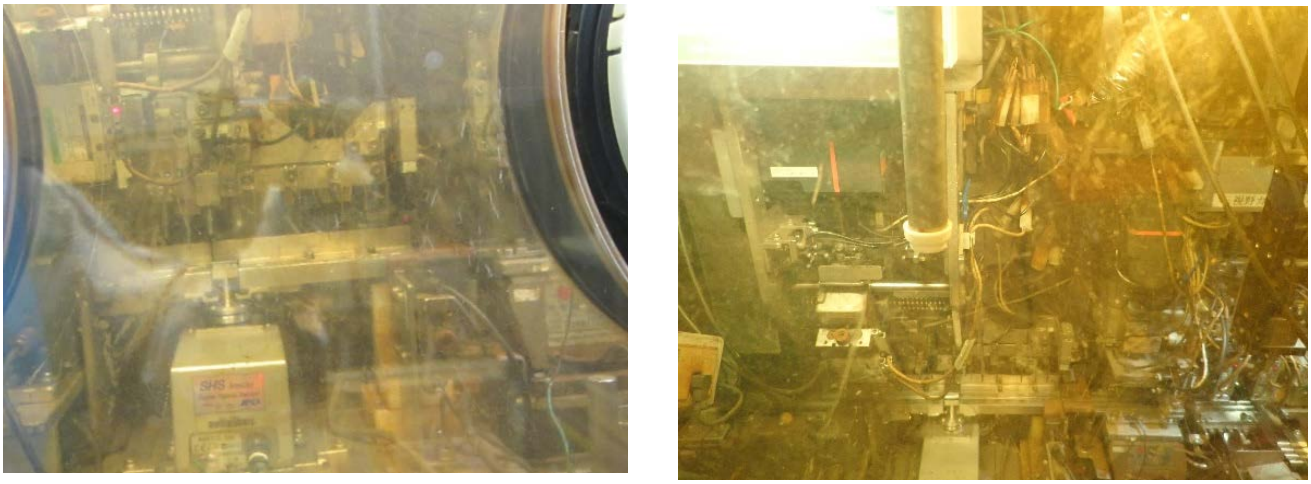
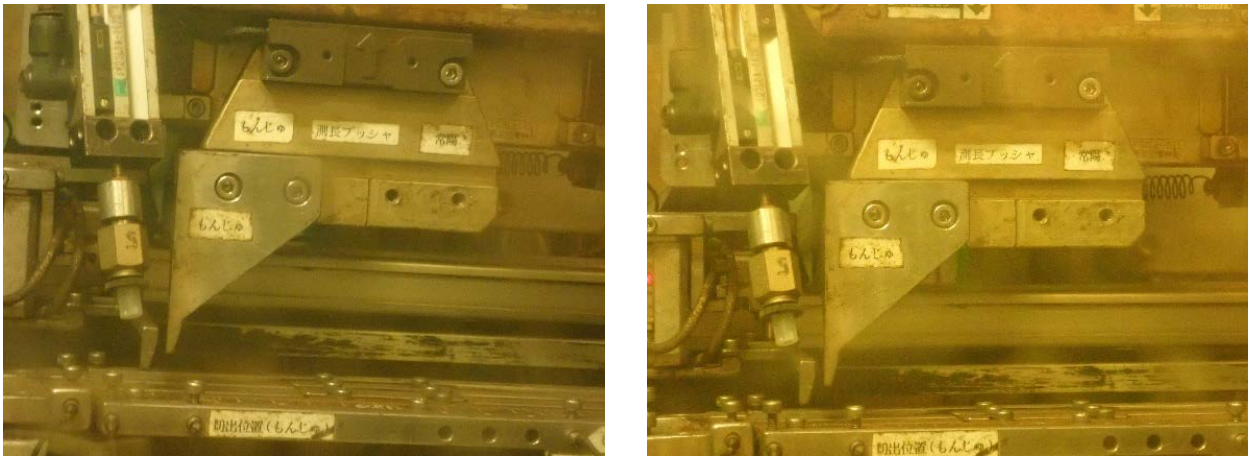


Photo 27　組合せ④（窓板：不燃シート、遮蔽体：難燃シート）



（a）難燃シート貼付け前　　（b）難燃シート貼付け後

Photo 28　組合せ⑤（窓板：難燃シート、遮蔽体：難燃シート）

Table 29　各シートの試験結果（まとめ）

試験	項目	不燃シート	難燃シート
火災損傷防止試験	自己消火性	【○】 自己消火性有	【○】 自己消火性有
	アクリル板損傷軽減効果	【○】 アクリル板試料と比較して軽減効果有	【○】 アクリル板試料と比較して軽減効果有
使用環境影響試験	ガンマ線の影響	【○】 影響なし	【○】 影響なし
	紫外線の影響	【○】 影響なし	【○】 影響なし
施工性試験	加工のし易さ	【○】	【○】
	貼り易さ	【△】 柔らかく貼り難い	【○】 厚さがあることから貼り易い
	空気の抜け具合	【△】 圧着ローラーで空気が抜けにくい	【○】 圧着ローラーで空気が抜け易い
視認性試験	視認性	【×】 内部が歪んで見える	【○】 良好 貼り付け前と変わらない
コスト		【△】 高い	【○】 安い 不燃シートの 1/2
総合評価		×	○

（a）窓板の拭き取り

（b）シート干渉有無の確認

（c）粘着面の保護フィルムを剥がし貼り付け

（d）気泡を抜きながら貼り付け

（e）シート表面の保護フィルムを剥がす

（f）シート貼り付け後

Photo 29　シート貼付け作業

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 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	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	キログラム毎立方メートル	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	$m^{-3}\ s\ A$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ s\ A$
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	$kg^{-1}\ s\ A$
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	名称	記号	乗数	名称	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=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 $hm^2=10^4m^2$
リットル	L, l	1 L=1 l=1 $dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	1 t=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	1 eV=1.602 176 53(14)×10^{-19}J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10^{-27}kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10^{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=100 kPa=10^5Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈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	
デシベル	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}=$10^{-2}ms^{-2}$
マクスウエル	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[a]	Oe	1 Oe ≙ $(10^3/4\pi)$A m^{-1}

(a) 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=3.7×10^{10}Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10^{-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^{-9}T
フェルミ		1 フェルミ=1 fm=10^{-15}m
メートル系カラット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10^{-4}kg
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	1 cal=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 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年）