

JAERI-Tech
2003-035



JP0350218



着色酸化アルミニウム被膜線量計の開発

2003年3月

小原 建治郎・八木 敏明・横尾 典子*・柴沼 清

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

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

着色酸化アルミニウム被膜線量計の開発

日本原子力研究所那珂研究所 ITER 開発室

小原 建治郎・八木 敏明⁺・横尾 典子^{*}・柴沼 清

(2003年1月31日受理)

国際熱核融合実験炉（ITER : international thermonuclear experimental reactor）の真空容器内部に取り付けられるブランケット、ダイバータなどの容器内構造物は、遠隔保守装置によって定期的に点検・保守・交換される。

作業時の容器内環境は、高温（50～100°C）、高放射線（ガンマ線：～1 kGy/h）、大気、不活性ガスあるいは真空雰囲気となるため、保守装置には、特に強度のガンマ線照射下で長時間作業が可能な高度の耐放射線性（10～100 MGy）が求められる。このため、保守装置を構成する主要な機器・部品の耐放射線性を高めるための試験・開発を進めてきたが、一方で、保守装置の放射線損傷による信頼性の低下を未然に防ぐため、高ガンマ線量率下で保守装置各部の照射量をモニターできる「安価で丈夫、取扱と測定の容易」な線量計が必要とされている。

着色酸化アルミニウム被膜線量計（カラー線量計）は上記背景を基に開発を進めている「アゾ染料の光退色を応用した色素線量計」の一種で、アルミニウム合金製薄板表面の酸化被膜中に染料を含浸させた構造となっている。ガンマ線照射によるアゾ染料の退色変化は、分光式色差計によってマンセルの色立体に基づく色相及び明度の変化として測定される。

試験では、各種の着色酸化アルミニウム試料を作製し、色種、酸化膜厚、染料種の違いによる退色特性や温度と紫外線による影響についても調べた。その結果、概略以下のことがわかった。

- ・赤色の試料は、青色、緑色の試料に比べ顕著な退色変化を示す。
- ・退色は照射線量率に依存する。

那珂研究所：〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

+ 高崎研究所材料開発部

* (財) 放射線利用振興協会

- ・酸化被膜の厚い試料は、薄い試料に比べ退色の程度が低い。
- ・75°C以上の高温環境下では退色は促進される。
- ・紫外線（310～410 nm）による影響はほとんどないと考えて良い。

全体としては、赤色の試料は高線量率下での測定に、青色の試料は低線量率下での測定に適することがわかった。例えば、染料種に TAC- RED 105 を使用した酸化膜厚 25 μm の赤色試料は 10 kGy/h で約 70 MGy まで、また染料種に TAC- BLUE RCD を使用した酸化膜厚 10 μm の青色試料は 2 Gy/h で約 10 kGy までの測定ができる。

本報告書では、カラー線量計の概要をはじめ、測定法、酸化被膜厚、染料種による依存性や温度、紫外線による影響についての試験結果をまとめた。

Development of Colored Alumilite Dosimeter

Kenjiro OBARA, Toshiaki YAGI[†], Noriko YOKOO^{*}
and Kiyoshi SHIBANUMA

Development of ITER Project
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 31, 2003)

In the ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), in-vessel components such as blanket and divertor, which are installed in the vacuum vessel of the ITER, are maintained by remote handling equipment (RH equipment). The RH equipment for maintenance is operated under sever environmental conditions, such as high temperature (50~100°C), high gamma-ray radiation (~1 kGy/h) in an atmosphere of inert gas or vacuum; therefore many components of the RH equipment must have a suitable radiation resistance efficiency for long time operation (10~100 MGy). Typical components of the RH equipment have been extensively tested under an intensive gamma-ray radiation. Monitoring of the radiation dose of the components of the RH equipment is essential to control the operation period of the RH equipment considering radiation resistance. However, the maximum measurable radiation dose of the conventional dosimeters, such as ionization chamber, liquid, glass and plastic dosimeters are limited to be approximately 1MGy which is too low to monitor the RH equipment for the ITER. In addition, these conventional dosimeters do not involve sufficient radiation resistance against the high gamma-ray radiation as well as are not easy handling and low cost.

Based on the above backgrounds, a new dosimeter with bleaching of an

[†] Department of Material Development, Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment

^{*} Radiation Application Development Association

azo group dye to be applied to a radiation monitor has been developed for high gamma-ray radiation use. The colored alumilite dosimeter is composed of the azo group dye (-N=N-) in an anodic oxidation layer of aluminum alloy (Al_2O_3). It can monitor the radiation dose by measuring the change of the bleaching of azo dye in the Al_2O_3 layer due to gamma-ray irradiation. The degree of bleaching is measured as the change of hue (color) and brightness based on the Munsell's colors with a three dimensional universe using spectrophotometer.

In the tests, the dependencies such as colors, anodized layer thickness, type of azo dye, influence of temperature and ultraviolet radiation were investigated using the various colored alumilite samples. The followings were clarified from the test results;

- a red colored alumilite sample has shown remarkable bleaching change compared with blue and green colored alumilite samples,
- the characteristic of bleaching depends on dose rate,
- the degree of bleaching of thick-anodized layer sample is lower than that of thin- anodized layer,
- the bleaching is activated under high temperature (over 75°C) ,
- there is no effect of ultraviolet radiation (310~410 nm).

As a whole, a red colored and a blue colored alumilite samples are suitable to measure under high dose rate and low dose rate conditions, respectively. For example, a red colored alumilite sample made of TAC-RED 105 dye with layer thickness of $25\mu\text{m}$ is measurable up to 70 MGy under high dose rate of 10 kGy/h. On the other hand, a blue colored alumilite sample made of TAC-BLUE RCD dye with layer thickness of $10\mu\text{m}$ is measurable up to 10 kGy under low dose rate of 2 Gy/h.

In this paper, the outline of the colored alumilite dosimeter, bleaching mechanism, measurement method and details of the various test results are described.

Keyword : ITER, Remote Handling, Maintenance, Radiation Resistance, Dosimeter, Alumilite, Azo Dye

目 次

| | |
|-------------------------------------|----|
| 1. 着色酸化アルミニウム被膜線量計（カラー線量計）の概要 | 1 |
| 1.1 背景と目的..... | 1 |
| 1.2 カラー線量計の退色機構..... | 2 |
| 1.3 試験用試料の作製 | 2 |
| 1.4 試験施設 | 4 |
| 1.5 照射量測定方法 | 4 |
| 2. 高線量率対応カラー線量計開発のための予備試験..... | 11 |
| 2.1 目 的 | 11 |
| 2.2 試験用試料..... | 11 |
| 2.3 試験条件 | 11 |
| 2.4 測定項目 | 11 |
| 2.5 試験結果と考察 | 12 |
| 2.6 まとめ | 13 |
| 3. 高線量率対応赤色カラー線量計の特性試験 | 23 |
| 3.1 酸化アルミニウム被膜厚の違いによる退色変化 | 23 |
| 3.1.1 目 的 | 23 |
| 3.1.2 試験用試料..... | 23 |
| 3.1.3 試験条件 | 23 |
| 3.1.4 測定項目 | 23 |
| 3.1.5 試験結果と考察 | 23 |
| 3.1.6 まとめ | 25 |
| 3.2 高温下での照射による退色変化への影響 | 27 |
| 3.2.1 目 的 | 27 |
| 3.2.2 試験用試料..... | 27 |
| 3.2.3 試験条件 | 27 |
| 3.2.4 測定項目 | 27 |
| 3.2.5 試験結果と考察 | 28 |
| 3.2.6 まとめ | 30 |
| 3.3 高温、無照射時の退色変化 | 31 |
| 3.3.1 目 的 | 31 |
| 3.3.2 試験用試料..... | 31 |
| 3.3.3 試験条件 | 31 |
| 3.3.4 測定項目 | 32 |

| | |
|---|----|
| 3.3.5 試験結果と考察 | 32 |
| 3.3.6 まとめ | 32 |
| 3.4 紫外線による退色変化（ガンマ線照射なし） | 33 |
| 3.4.1 目 的 | 33 |
| 3.4.2 試験用試料..... | 33 |
| 3.4.3 試験条件 | 33 |
| 3.4.4 測定項目 | 33 |
| 3.4.5 試験結果と考察 | 33 |
| 3.4.6 まとめ | 34 |
| 3.5 染料種の違いによる退色変化 | 34 |
| 3.5.1 目 的 | 34 |
| 3.5.2 試験用試料..... | 34 |
| 3.5.3 試験条件 | 35 |
| 3.5.4 測定項目 | 35 |
| 3.5.5 試験結果と考察 | 35 |
| 3.5.6 まとめ | 37 |
| 3.6 染料種 105 試験用試料の高温照射による退色変化への影響 | 38 |
| 3.6.1 目 的 | 38 |
| 3.6.2 試験用試料..... | 38 |
| 3.6.3 試験条件 | 38 |
| 3.6.4 測定項目 | 38 |
| 3.6.5 試験結果と考察 | 39 |
| 3.6.6 まとめ | 40 |
| 3.7 染料種 105 試験用試料の高温、無照射時の退色変化 | 41 |
| 3.7.1 目 的 | 41 |
| 3.7.2 試験用試料..... | 41 |
| 3.7.3 試験条件 | 41 |
| 3.7.4 測定項目 | 42 |
| 3.7.5 試験結果と考察 | 42 |
| 3.7.6 まとめ | 42 |
| 3.8 染料種 105 試験用試料の紫外線による退色変化（ガンマ線照射なし） | 43 |
| 3.8.1 目 的 | 43 |
| 3.8.2 試験用試料..... | 43 |
| 3.8.3 試験条件 | 43 |
| 3.8.4 測定項目 | 44 |

| | |
|---|-----|
| 3.8.5 試験結果と考察 | 44 |
| 3.8.6 まとめ | 44 |
| 3.9 高線量率対応カラー線量計試験用試料のまとめ | 44 |
| 4. 低線量率対応カラー線量計開発のための予備試験 | 81 |
| 4.1 目 的 | 81 |
| 4.2 試験用試料 | 81 |
| 4.3 試験条件 | 81 |
| 4.4 測定項目 | 82 |
| 4.5 試験結果と考察 | 82 |
| 4.6 まとめ | 83 |
| 5. 低線量率対応青色カラー線量計の特性試験 | 88 |
| 5.1 低線量率対応青色試料の高温下での照射による退色変化への影響 | 88 |
| 5.1.1 目 的 | 88 |
| 5.1.2 試験用試料 | 88 |
| 5.1.3 試験条件 | 88 |
| 5.1.4 測定項目 | 88 |
| 5.1.5 試験結果と考察 | 89 |
| 5.1.6 まとめ | 89 |
| 5.2 低線量率対応青色試料の高温、無照射時の退色変化 | 90 |
| 5.2.1 目 的 | 90 |
| 5.2.2 試験用試料 | 90 |
| 5.2.3 試験条件 | 91 |
| 5.2.4 測定項目 | 91 |
| 5.2.5 試験結果と考察 | 91 |
| 5.2.6 まとめ | 91 |
| 5.3 低線量率対応青色試料の紫外線による退色変化（ガンマ線照射なし） | 92 |
| 5.3.1 目 的 | 92 |
| 5.3.2 試験用試料 | 93 |
| 5.3.3 試験条件 | 93 |
| 5.3.4 測定項目 | 93 |
| 5.3.5 試験結果と考察 | 93 |
| 5.3.6 まとめ | 94 |
| 5.4 低線量率対応カラー線量計試験用試料のまとめ | 94 |
| 6. 高線量率対応試料による AC サーボモータ各部の照射量測定 | 101 |
| 6.1 目 的 | 101 |

| | |
|-------------------------|-----|
| 6.2 A C サーボモータ概略仕様..... | 101 |
| 6.3 カラー線量計仕様..... | 101 |
| 6.4 試験条件 | 101 |
| 6.5 測定法 | 101 |
| 6.6 試験結果と考察 | 101 |
| 7.まとめ..... | 105 |
| 謝　　辞 | 106 |
| 参考文献 | 106 |

Contents

| | |
|---|-----------|
| 1. Outline of the Colored Alumilite Dosimeter | 1 |
| 1.1 Background and Objective | 1 |
| 1.2 Mechanisms of Color Bleaching | 2 |
| 1.3 Fabrication of Test Samples | 2 |
| 1.4 Irradiation Test Facility | 4 |
| 1.5 Exposure Dose Measurement Method | 4 |
| 2. Preliminary Test of Colored Alumilite Dosimeter for High Radiation Use | 11 |
| 2.1 Objective | 11 |
| 2.2 Specification of Test Samples..... | 11 |
| 2.3 Test Conditions | 11 |
| 2.4 Measurement Items..... | 11 |
| 2.5 Results and Consideration | 12 |
| 2.6 Summary..... | 13 |
| 3. Characteristic Tests of Red Colored Alumilite Dosimeter for High Radiation Use | 23 |
| 3.1 Change of the Color Bleaching Depends on Various Anodized Layer Thickness of the Red Colored Alumilite Dosimeter | 23 |
| 3.1.1 Objective | 23 |
| 3.1.2 Specification of Test Samples..... | 23 |
| 3.1.3 Test Conditions | 23 |
| 3.1.4 Measurement Items | 23 |
| 3.1.5 Results and Consideration | 23 |
| 3.1.6 Summary..... | 25 |
| 3.2 Influence of High Temperature Irradiation in the Color Bleaching of the Red Colored Alumilite Dosimeter | 27 |
| 3.2.1 Objective | 27 |
| 3.2.2 Specification of Test Samples..... | 27 |
| 3.2.3 Test Conditions | 27 |
| 3.2.4 Measurement Items | 27 |
| 3.2.5 Results and Consideration | 28 |
| 3.2.6 Summary..... | 30 |
| 3.3 Influence of High Temperature in the Color Bleaching of the Red Colored Alumilite Dosimeter | 31 |

| | |
|---|----|
| 3.3.1 Objective | 31 |
| 3.3.2 Specification of Test Samples..... | 31 |
| 3.3.3 Test Conditions | 31 |
| 3.3.4 Measurement Items..... | 32 |
| 3.3.5 Results and Consideration | 32 |
| 3.3.6 Summary..... | 32 |
| 3.4 Influence of Ultraviolet Radiation Lamp in the Color Bleaching of the Red Colored Alumilite Dosimeter | 33 |
| 3.4.1 Objective | 33 |
| 3.4.2 Specification of Test Samples..... | 33 |
| 3.4.3 Test Conditions | 33 |
| 3.4.4 Measurement Items..... | 33 |
| 3.4.5 Results and Consideration | 33 |
| 3.4.6 Summary..... | 34 |
| 3.5 Change of the Color Bleaching Depends on Various Red Color Dye Dosimeters..... | 34 |
| 3.5.1 Objective | 34 |
| 3.5.2 Specification of Test Samples..... | 34 |
| 3.5.3 Test Conditions | 35 |
| 3.5.4 Measurement Items..... | 35 |
| 3.5.5 Results and Consideration | 35 |
| 3.5.6 Summary..... | 37 |
| 3.6 Influence of High Temperature Irradiation in the Color Bleaching of 105 Type Azo Dye Colored Dosimeter | 38 |
| 3.6.1 Objective | 38 |
| 3.6.2 Specification of Test Samples..... | 38 |
| 3.6.3 Test Conditions | 38 |
| 3.6.4 Measurement Items..... | 38 |
| 3.6.5 Results and Consideration | 39 |
| 3.6.6 Summary..... | 40 |
| 3.7 Influence of High Temperature in the Color Bleaching of 105 Type Azo Dye Colored Dosimeter | 41 |
| 3.7.1 Objective | 41 |
| 3.7.2 Specification of Test Samples..... | 41 |
| 3.7.3 Test Conditions | 41 |

| | |
|---|-----------|
| 3.7.4 Measurement Items | 42 |
| 3.7.5 Results and Consideration | 42 |
| 3.7.6 Summary..... | 42 |
| 3.8 Influence of Ultraviolet Radiation Lamp in the Color Bleaching of 105 Type Azo Dye Colored Dosimeter | 43 |
| 3.8.1 Objective | 43 |
| 3.8.2 Specification of Test Samples..... | 43 |
| 3.8.3 Test Conditions | 43 |
| 3.8.4 Measurement Items | 44 |
| 3.8.5 Results and Consideration | 44 |
| 3.8.6 Summary..... | 44 |
| 3.9 Summary of Characteristic Tests for the High Radiation Use Red Colored Dosimeter | 44 |
| 4. Preliminary Test of Colored Alumilite Dosimeter for Low Radiation Use..... | 81 |
| 4.1 Objective | 81 |
| 4.2 Specification of Test Samples..... | 81 |
| 4.3 Test Conditions | 81 |
| 4.4 Measurement Items..... | 82 |
| 4.5 Results and Consideration | 82 |
| 4.6 Summary..... | 83 |
| 5. Characteristic Tests of Blue Colored Alumilite Dosimeter for Low Radiation Use..... | 88 |
| 5.1 Influence of High Temperature Irradiation in the Color Bleaching of Blue Colored Alumilite Dosimeter..... | 88 |
| 5.1.1 Objective | 88 |
| 5.1.2 Specification of Test Samples..... | 88 |
| 5.1.3 Test Conditions | 88 |
| 5.1.4 Measurement Items | 88 |
| 5.1.5 Results and Consideration | 89 |
| 5.1.6 Summary..... | 89 |
| 5.2 Influence of High Temperature in the Color Bleaching of the Blue Colored Alumilite Dosimeter..... | 90 |
| 5.2.1 Objective | 90 |
| 5.2.2 Specification of Test Samples..... | 90 |
| 5.2.3 Test Conditions | 91 |

| | |
|---|-----|
| 5.2.4 Measurement Items | 91 |
| 5.2.5 Results and Consideration | 91 |
| 5.2.6 Summary | 91 |
| 5.3 Influence of Ultraviolet Radiation Lamp in the Color Bleaching of the Blue Colored Alumilite Dosimeter | 92 |
| 5.3.1 Objective | 92 |
| 5.3.2 Specification of Test Samples | 93 |
| 5.3.3 Test Conditions | 93 |
| 5.3.4 Measurement Items | 93 |
| 5.3.5 Results and Consideration | 93 |
| 5.3.6 Summary | 94 |
| 5.4 Summary of Characteristic Tests for the Low Radiation Use Blue Colored Dosimeter | 94 |
| 6. Exposure Dose Measurement of Various Points of AC Servo Motor by the High Radiation Use Colored Dosimeter | 101 |
| 6.1 Objective | 101 |
| 6.2 Specification of AC Servo Motor | 101 |
| 6.3 Test Conditions | 101 |
| 6.4 Measurement Method | 101 |
| 6.5 Results and Consideration | 101 |
| 6.6 Summary | 101 |
| 7. Conclusions | 105 |
| Acknowledgements | 106 |
| References | 106 |

図表リスト

| | |
|---|----|
| 表 1.1 分光式色差計主要仕様 | 5 |
| 表 31.1 照射線量率別にみた膜厚毎の退色傾向のグループ分け | 26 |
| 表 32.1 照射温度別による色相変化（膜厚：5 μm、線量率：1.0kGy/h） | 30 |
| 表 32.2 照射温度別による色相変化（膜厚：5 μm、線量率：10kGy/h） | 31 |
| 表 33.1 室温照射、100°C照射、100°C無照射時の色相値の比較 (膜厚：5 μm、照射線量率：1 kGy/h) | 32 |
| 表 36.1 染料種 Tac Fiery Red- GBM（通称 105）試料の色相値変化の温度影響 | 40 |
| 表 37.1 100°C照射、100°C無照射時の色相値の比較 | 43 |
| 表 51.1 試料 No.2 の室温及び 100°C照射時の色相値変化 (膜厚：10 μm、線量率：2 Gy/h) | 89 |
| 表 51.2 試料 No.5 の室温及び 100°C照射時の色相値変化 (膜厚：10 μm、線量率：2 Gy/h) | 90 |
| 表 52.1 試料 No.2、4、5 の 100°C照射及び 100°C無照射時の 退色の違い（色相値による） | 92 |
| 表 54.1 低線量率対応試験用試料 No.5 の線量率毎の測定限界（色相値） | 95 |
| 図 1.1 ITER ブランケット用遠隔保守装置実機モデル | 7 |
| 図 1.2 モノアゾ染料の光退色機構 | 9 |
| 図 1.3 マンセルの色立体 | 9 |
| 図 1.4 分光式色差計（日本電色工業（株）製 SE-2000） | 9 |
| 図 2.1 赤、青、緑色試験用試料の退色変化 | 15 |
| 図 2.1.5 赤色試験用試料の退色変化／予備試験 (染料種：Aluminum Fiery Red ML) | 15 |
| 図 2.1.1 赤色試験用試料の大気、室温下での色相（a 軸）による退色変化／予備試験 (線量率：0.1、1、10 kGy/h、試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML、 膜厚 20 μm) | 17 |
| 図 2.1.2 赤色試験用試料の大気、室温下での明度による退色変化／予備試験 (線量率：0.1、1、10 kGy/h、試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML、 膜厚 20 μm) | 17 |
| 図 2.1.3 赤色試験用試料の大気、室温下での色相（a 軸）による退色変化／予備試験 (線量率：10 kGy/h、試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML、 膜厚 20 μm) | 18 |

| | |
|--|----|
| 図 2.1.4 赤色試験用試料の大気、室温下での明度による退色変化／予備試験 (線量率：10 kGy/ h、試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML、 膜厚 20 μm) | 18 |
| 図 2.2.1 青色試験用試料の大気、室温下での色相（b 軸）による退色変化／予備試験 (線量率：0.1、1、10 kGy/ h、試料：染料種 Tac Blue 502、膜厚 20 μm) | 19 |
| 図 2.2.2 青色試験用試料の大気、室温下での色相（a 軸）による退色変化／予備試験 (線量率：0.1、1、10 kGy/ h、試料：染料種 Tac Blue 502、膜厚 20 μm) | 19 |
| 図 2.2.3 青色試験用試料の大気、室温下での明度による退色変化／予備試験 (線量率：0.1、1、10 kGy/ h、試料：染料種 Tac Blue 502、膜厚 20 μm) | 20 |
| 図 2.3.1 緑色試験用試料の大気、室温下での色相（a 軸）による退色変化／予備試験 (線量率：0.1、1、10 kGy/ h、試料：染料種 Tac Green N5002Au20、 膜厚 20 μm) | 21 |
| 図 2.3.2 緑色試験用試料の大気、室温下での色相（b 軸）による退色変化／予備試験 (線量率：0.1、1、10 kGy/ h、試料：染料種 Tac Green N5002Au20、 膜厚 20 μm) | 21 |
| 図 2.3.3 緑色試験用試料の大気、室温下での明度による退色変化／予備試験 (線量率：0.1、1、10 kGy/ h、試料：染料種 Tac Green N5002Au20、 膜厚 20 μm) | 22 |
| 図 31.1.1 酸化膜厚の異なる 5 種類の試料の線量率 0.1kGy/ h 下での 退色変化（色相値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML、膜厚 5、10、15、25、30 μm、 大気、室温) | 46 |
| 図 31.1.2 酸化膜厚の異なる 5 種類の試料の線量率 0.1kGy/ h 下での 退色変化（明度値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML、膜厚 5、10、15、25、30 μm、 大気、室温) | 46 |
| 図 31.2.1 酸化膜厚の異なる 5 種類の試料の線量率 1.0kGy/ h 下での 退色変化（色相値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML、膜厚 5、10、15、25、30 μm、 大気、室温) | 47 |
| 図 31.2.2 酸化膜厚の異なる 5 種類の試料の線量率 1.0kGy/ h 下での 退色変化（明度値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML、膜厚 5、10、15、25、30 μm、 大気、室温) | 47 |

| | |
|---|----|
| 図 31.3.1 酸化膜厚の異なる 5 種類の試料の線量率 10kGy/ h 下での 退色変化（色相値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML、膜厚 5、10、15、25、30 μm、 大気、室温) | 48 |
| 図 31.3.2 酸化膜厚の異なる 5 種類の試料の線量率 10kGy/ h 下での 退色変化（明度値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML、膜厚 5、10、15、25、30 μm、 大気、室温) | 48 |
| 図 32.1.1 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の線量率 1.0kGy/ h、大気、室温下での 退色変化（色相値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 49 |
| 図 32.1.2 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の線量率 1.0kGy/ h、大気、室温下での 退色変化（明度値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 49 |
| 図 32.2.1 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の線量率 1.0kGy/ h、大気、50°C下での 退色変化（色相値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 50 |
| 図 32.2.2 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の線量率 1.0kGy/ h、大気、50°C下での 退色変化（明度値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 50 |
| 図 32.3.1 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の線量率 1.0kGy/ h、大気、75°C下での 退色変化（色相値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 51 |
| 図 32.3.2 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の線量率 1.0kGy/ h、大気、75°C下での 退色変化（明度値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 51 |
| 図 32.4.1 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の線量率 1.0kGy/ h、大気、100°C下での 退色変化（色相値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 52 |
| 図 32.4.2 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の線量率 1.0kGy/ h、大気、100°C下での 退色変化（明度値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 52 |
| 図 32.5.1 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の線量率 10kGy/ h、大気、室温下での 退色変化（色相値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 53 |

| | |
|--|----|
| 図 32.5.2 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の線量率 10kGy/h、大気、室温下での 退色変化（明度値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 53 |
| 図 32.6.1 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の線量率 10kGy/h、大気、50°C下での 退色変化（色相値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 54 |
| 図 32.6.2 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の線量率 10kGy/h、大気、50°C下での 退色変化（明度値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 54 |
| 図 32.7.1 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の線量率 10kGy/h、大気、75°C下での 退色変化（色相値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 55 |
| 図 32.7.2 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の線量率 10kGy/h、大気、75°C下での 退色変化（明度値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 55 |
| 図 32.8.1 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の線量率 10kGy/h、大気、100°C下での 退色変化（色相値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 56 |
| 図 32.8.2 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の線量率 10kGy/h、大気、100°C下での 退色変化（明度値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 56 |
| 図 33.1.1 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の無照射、大気、100°C下での退色変化 (色相値による)／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 57 |
| 図 33.1.2 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の無照射、大気、100°C下での退色変化 (明度値による)／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 57 |
| 図 34.1.1 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の無照射、大気、紫外線ランプ下での 退色変化（色相値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 58 |
| 図 34.1.2 酸化膜厚 5、15、25 μm 試料の無照射、大気、紫外線ランプ下での 退色変化（明度値による）／特性試験 (試料：染料種 Aluminum Fiery Red ML) | 58 |

| | |
|---|----|
| 図 35.1.1 膜厚 5 μm で染料種の異なる 3 種類の試料の線量率 0.1kGy/ h 下での 退色変化（色相値による）／特性試験 (試料：染料種 Tac Red- GD (通称 101)、Tac Red- BLH (通称 102)、 Tac Fiery Red- GBM (通称 105)、大気、室温) | 59 |
| 図 35.1.2 膜厚 5 μm で染料種の異なる 3 種類の試料の線量率 0.1kGy/ h 下での 退色変化（明度値による）／特性試験 (試料：染料種 Tac Red- GD (通称 101)、Tac Red- BLH (通称 102)、 Tac Fiery Red- GBM (通称 105)、大気、室温) | 59 |
| 図 35.2.1 膜厚 15 μm で染料種の異なる 3 種類の試料の線量率 0.1kGy/ h 下での 退色変化（色相値による）／特性試験 (試料：染料種 Tac Red- GD (通称 101)、Tac Red- BLH (通称 102)、 Tac Fiery Red- GBM (通称 105)、大気、室温) | 60 |
| 図 35.2.2 膜厚 15 μm で染料種の異なる 3 種類の試料の線量率 0.1kGy/ h 下での 退色変化（明度値による）／特性試験 (試料：染料種 Tac Red- GD (通称 101)、Tac Red- BLH (通称 102)、 Tac Fiery Red- GBM (通称 105)、大気、室温) | 60 |
| 図 35.3.1 膜厚 25 μm で染料種の異なる 3 種類の試料の線量率 0.1kGy/ h 下での 退色変化（色相値による）／特性試験 (試料：染料種 Tac Red- GD (通称 101)、Tac Red- BLH (通称 102)、 Tac Fiery Red- GBM (通称 105)、大気、室温) | 61 |
| 図 35.3.2 膜厚 25 μm で染料種の異なる 3 種類の試料の線量率 0.1kGy/ h 下での 退色変化（明度値による）／特性試験 (試料：染料種 Tac Red- GD (通称 101)、Tac Red- BLH (通称 102)、 Tac Fiery Red- GBM (通称 105)、大気、室温) | 61 |
| 図 35.4.1 膜厚 5 μm で染料種の異なる 3 種類の試料の線量率 1.0kGy/ h 下での 退色変化（色相値による）／特性試験 (試料：染料種 Tac Red- GD (通称 101)、Tac Red- BLH (通称 102)、 Tac Fiery Red- GBM (通称 105)、大気、室温) | 62 |
| 図 35.4.2 膜厚 5 μm で染料種の異なる 3 種類の試料の線量率 1.0kGy/ h 下での 退色変化（明度値による）／特性試験 (試料：染料種 Tac Red- GD (通称 101)、Tac Red- BLH (通称 102)、 Tac Fiery Red- GBM (通称 105)、大気、室温) | 62 |

- 図 35.5.1 膜厚 $15\mu\text{m}$ で染料種の異なる 3 種類の試料の線量率 $1.0\text{kGy}/\text{h}$ 下での
退色変化（色相値による）／特性試験
(試料：染料種 Tac Red- GD（通称 101）、Tac Red- BLH（通称 102）、
Tac Fiery Red- GBM（通称 105）、大気、室温) 63
- 図 35.5.2 膜厚 $15\mu\text{m}$ で染料種の異なる 3 種類の試料の線量率 $1.0\text{kGy}/\text{h}$ 下での
退色変化（明度値による）／特性試験
(試料：染料種 Tac Red- GD（通称 101）、Tac Red- BLH（通称 102）、
Tac Fiery Red- GBM（通称 105）、大気、室温) 63
- 図 35.6.1 膜厚 $25\mu\text{m}$ で染料種の異なる 3 種類の試料の線量率 $1.0\text{kGy}/\text{h}$ 下での
退色変化（色相値による）／特性試験
(試料：染料種 Tac Red- GD（通称 101）、Tac Red- BLH（通称 102）、
Tac Fiery Red- GBM（通称 105）、大気、室温) 64
- 図 35.6.2 膜厚 $25\mu\text{m}$ で染料種の異なる 3 種類の試料の線量率 $1.0\text{kGy}/\text{h}$ 下での
退色変化（明度値による）／特性試験
(試料：染料種 Tac Red- GD（通称 101）、Tac Red- BLH（通称 102）、
Tac Fiery Red- GBM（通称 105）、大気、室温) 64
- 図 35.7.1 膜厚 $5\mu\text{m}$ で染料種の異なる 3 種類の試料の線量率 $10\text{kGy}/\text{h}$ 下での
退色変化（色相値による）／特性試験
(試料：染料種 Tac Red- GD（通称 101）、Tac Red- BLH（通称 102）、
Tac Fiery Red- GBM（通称 105）、大気、室温) 65
- 図 35.7.2 膜厚 $5\mu\text{m}$ で染料種の異なる 3 種類の試料の線量率 $10\text{kGy}/\text{h}$ 下での
退色変化（明度値による）／特性試験
(試料：染料種 Tac Red- GD（通称 101）、Tac Red- BLH（通称 102）、
Tac Fiery Red- GBM（通称 105）、大気、室温) 65
- 図 35.8.1 膜厚 $15\mu\text{m}$ で染料種の異なる 3 種類の試料の線量率 $10\text{kGy}/\text{h}$ 下での
退色変化（色相値による）／特性試験
(試料：染料種 Tac Red- GD（通称 101）、Tac Red- BLH（通称 102）、
Tac Fiery Red- GBM（通称 105）、大気、室温) 66
- 図 35.8.2 膜厚 $15\mu\text{m}$ で染料種の異なる 3 種類の試料の線量率 $10\text{kGy}/\text{h}$ 下での
退色変化（明度値による）／特性試験
(試料：染料種 Tac Red- GD（通称 101）、Tac Red- BLH（通称 102）、
Tac Fiery Red- GBM（通称 105）、大気、室温) 66

| | |
|---|----|
| 図 35.9.1 膜厚 25 μm で染料種の異なる 3 種類の試料の線量率 10kGy/ h 下での 退色変化（色相値による）／特性試験 (試料：染料種 Tac Red- GD (通称 101)、Tac Red- BLH (通称 102)、 Tac Fiery Red- GBM (通称 105)、大気、室温) | 67 |
| 図 35.9.2 膜厚 25 μm で染料種の異なる 3 種類の試料の線量率 10kGy/ h 下での 退色変化（明度値による）／特性試験 (試料：染料種 Tac Red- GD (通称 101)、Tac Red- BLH (通称 102)、 Tac Fiery Red- GBM (通称 105)、大気、室温) | 67 |
| 図 35.1 膜厚 25 μm、染料種 105 試料の線量率 10kGy/ h 下での高照射量退色試験 (色相値による)／特性試験 (大気、室温) | 68 |
| 図 35.2 膜厚 25 μm、染料種 105 試料の線量率 10kGy/ h 下での高照射量退色試験 (明度値による)／特性試験 (大気、室温) | 68 |
| 図 34.1 紫外線源用ランプのスペクトル／特性試験 (ナショナル製パルックボール (FED14ED)) | 69 |
| 図 35.3 赤色試験用試料の退色変化／特性試験 (染料種：Tac Fiery Red- GBM) | 69 |
| 図 36.1.1 膜厚 5 μm、染料種 Tac Fiery Red- GBM (通称 105) 試料の線量率 1.0kGy/ h、 大気、室温下での退色変化（色相及び明度値による）／特性試験 | 71 |
| 図 36.1.2 膜厚 15 μm、染料種 Tac Fiery Red- GBM (通称 105) 試料の線量率 1.0kGy/ h、 大気、室温下での退色変化（色相及び明度値による）／特性試験 | 71 |
| 図 36.1.3 膜厚 25 μm、染料種 Tac Fiery Red- GBM (通称 105) 試料の線量率 1.0kGy/ h、 大気、室温下での退色変化（色相及び明度値による）／特性試験 | 72 |
| 図 36.2.1 膜厚 5 μm、染料種 Tac Fiery Red- GBM (通称 105) 試料の線量率 1.0kGy/ h、 大気、50°C下での退色変化（色相及び明度値による）／特性試験 | 73 |
| 図 36.2.2 膜厚 15 μm、染料種 Tac Fiery Red- GBM (通称 105) 試料の線量率 1.0kGy/ h、 大気、50°C下での退色変化（色相及び明度値による）／特性試験 | 73 |
| 図 36.2.3 膜厚 25 μm、染料種 Tac Fiery Red- GBM (通称 105) 試料の線量率 1.0kGy/ h、 大気、50°C下での退色変化（色相及び明度値による）／特性試験 | 74 |
| 図 36.3.1 膜厚 5 μm、染料種 Tac Fiery Red- GBM (通称 105) 試料の 線量率 1.0kGy/ h、大気、75°C下での退色変化（色相及び明度値による） ／特性試験 | 75 |
| 図 36.3.2 膜厚 15 μm、染料種 Tac Fiery Red- GBM (通称 105) 試料の線量率 1.0kGy/ h、 大気、75°C下での退色変化（色相及び明度値による）／特性試験 | 75 |
| 図 36.3.3 膜厚 25 μm、染料種 Tac Fiery Red- GBM (通称 105) 試料の線量率 1.0kGy/ h、 大気、75°C下での退色変化（色相及び明度値による）／特性試験 | 76 |

| | |
|--|----|
| 図 36.4.1 膜厚 5 μm 、染料種 Tac Fiery Red- GBM（通称 105）試料の線量率 1.0kGy/ h、 大気、100°C下での退色変化（色相及び明度値による）／特性試験..... | 77 |
| 図 36.4.2 膜厚 15 μm 、染料種 Tac Fiery Red- GBM（通称 105）試料の線量率 1.0kGy/ h、 大気、100°C下での退色変化（色相及び明度値による）／特性試験..... | 77 |
| 図 36.4.3 膜厚 25 μm 、染料種 Tac Fiery Red- GBM（通称 105）試料の線量率 1.0kGy/ h、 大気、100°C下での退色変化（色相及び明度値による）／特性試験..... | 78 |
| 図 37.1.1 酸化膜厚 5、15、25 μm 、染料種 Tac Fiery Red- GBM（通称 105）試料の 無照射、大気、100°C下での退色変化（色相値による）／特性試験..... | 79 |
| 図 37.1.2 酸化膜厚 5、15、25 μm 、染料種 Tac Fiery Red- GBM（通称 105）試料の 無照射、大気、100°C下での退色変化（明度値による）／特性試験..... | 79 |
| 図 38.1.1 酸化膜厚 5、15、25 μm 、染料種 Tac Fiery Red- GBM（通称 105）試料の 無照射、大気、紫外線ランプ下での退色変化（色相値による）／特性試験..... | 80 |
| 図 38.1.2 酸化膜厚 5、15、25 μm 、染料種 Tac Fiery Red- GBM（通称 105）試料の 無照射、大気、紫外線ランプ下での退色変化（明度値による）／特性試験..... | 80 |
| 図 4.1.1 染色条件の異なる 6 種類の試料の線量率 20Gy/ h、大気、室温下での 退色変化（色相値による）／予備試験 (試料：染料種 Tac Blue RCD（通称：Blue 501）、膜厚 10 μm 、 試料番号 1～6) | 85 |
| 図 4.1.2 染色条件の異なる 6 種類の試料の線量率 20Gy/ h、大気、室温下での 退色変化（明度値による）／予備試験 (試料：染料種 Tac Blue RCD（通称：Blue 501）、膜厚 10 μm 、 試料番号 1～6) | 85 |
| 図 4.2.1 染色条件の異なる 6 種類の試料の線量率 200Gy/ h、大気、室温下での 退色変化（色相値による）／予備試験 (試料：染料種 Tac Blue RCD（通称：Blue 501）、膜厚 10 μm 、 試料番号 1～6) | 86 |
| 図 4.2.2 染色条件の異なる 6 種類の試料の線量率 200Gy/ h、大気、室温下での 退色変化（明度値による）／予備試験 (試料：染料種 Tac Blue RCD（通称：Blue 501）、膜厚 10 μm 、 試料番号 1～6) | 86 |
| 図 4.3.1 染色条件の異なる 6 種類の試料の線量率 1000Gy/ h、大気、室温下での 退色変化（色相値による）／予備試験 (試料：染料種 Tac Blue RCD（通称：Blue 501）、膜厚 10 μm 、 試料番号 1～6) | 87 |

| | |
|---|-----|
| 図 4.3.2 染色条件の異なる 6 種類の試料の線量率 1000Gy/ h、大気、室温下での 退色変化（明度値による）／予備試験 | |
| （試料：染料種 Tac Blue RCD（通称：Blue 501）、膜厚 10 μm、 試料番号 1～6） | 87 |
| 図 51.1.1 試料番号 2、4、5 試料の線量率 2 Gy/ h、大気、室温下での退色変化 (色相値による)／特性試験 | |
| （試料：染料種 Tac Blue RCD（通称：Blue 501）、膜厚 10 μm） | 96 |
| 図 51.1.2 試料番号 2、4、5 試料の線量率 2 Gy/ h、大気、室温下での退色変化 (明度値による)／特性試験 | |
| （試料：染料種 Tac Blue RCD（通称：Blue 501）、膜厚 10 μm） | 96 |
| 図 51.2.1 試料番号 2、4、5 試料の線量率 2 Gy/ h、大気、100°C 下での退色変化 (色相値による)／特性試験 | |
| （試料：染料種 Tac Blue RCD（通称：Blue 501）、膜厚 10 μm） | 97 |
| 図 51.2.2 試料番号 2、4、5 試料の線量率 2 Gy/ h、大気、100°C 下での退色変化 (明度値による)／特性試験 | |
| （試料：染料種 Tac Blue RCD（通称：Blue 501）、膜厚 10 μm） | 97 |
| 図 52.1.1 試料番号 2、4、5 試料の無照射、大気、100°C 下での退色変化 (色相値による)／特性試験 | |
| （試料：染料種 Tac Blue RCD（通称：Blue 501）、膜厚 10 μm） | 98 |
| 図 52.1.2 試料番号 2、4、5 試料の無照射、大気、100°C 下での退色変化 (明度値による)／特性試験 | |
| （試料：染料種 Tac Blue RCD（通称：Blue 501）、膜厚 10 μm） | 98 |
| 図 53.1.1 試料番号 2、4 試料の無照射、大気、紫外線ランプ下での退色変化 (色相値による)／特性試験 | |
| （試料：染料種 Tac Blue RCD（通称：Blue 501）、膜厚 10 μm） | 99 |
| 図 53.1.2 試料番号 2、4 試料の無照射、大気、紫外線ランプ下での退色変化 (明度値による)／特性試験 | |
| （試料：染料種 Tac Blue RCD（通称：Blue 501）、膜厚 10 μm） | 99 |
| 図 54.1.1 試料番号 5 試料の大気、室温、異なる線量率下での退色変化 (b 軸上の色相値による)／特性試験 | |
| （試料：染料種 Tac Blue RCD（通称：Blue 501）、膜厚 10 μm、 線量率：2、20、200、1000 Gy/ h） | 100 |

図 54.1.2 試料番号 5 試料の大気、室温、異なる線量率下での退色変化

(a 軸上の色相値による) / 特性試験

(試料 : 染料種 Tac Blue RCD (通称 : Blue 501)、膜厚 10 μm、
線量率 : 2、20、200、1000 Gy/h) 100

図 4.1.3 低線量率対応青色線量計 (試料 No. 1 ~ 6) の退色変化

(染料種 : Tac Blue RCD) 103

図 6.1 A C サーボモータ内表面の照射量測定時のカラー線量計の配置

(染料種 : Aluminum Fiery Red ML) 103

1. 着色酸化アルミニウム被膜線量計（カラー線量計）の概要

1.1 背景と目的

国際熱核融合実験炉（ITER : International Thermonuclear Experimental Reactor）の真空容器内に取り付けられるブランケットやダイバータなどの容器内構造物は、遠隔操作による専用の保守装置を使用し定期的に点検・交換される¹⁾。作業時の真空容器内環境は、高温（50～100°C）、高放射線（ガンマ線：1 kGy/h～10 kGy/h）、大気、1気圧不活性ガスあるいは真空雰囲気となるため保守装置には高度の耐久性が求められる（図1.1にITER工学R & Dで試作、開発された実機大ブランケット保守装置の外形写真を示す）。特に耐放射線性については、強度のガンマ線照射下で最長1年間程度の作業が計画されていることから、照射量にして10～100 MGyの耐久性が要求されている。

このため、保守装置を構成する主要な機器・部品の耐放射線性の向上を目的とした試験・開発²⁾を進めてきたが、一方で、保守装置の放射線損傷による機能の低下を未然に防止するためには、高ガンマ線照射下で保守装置各部の照射量を細部にわたってモニタできる線量計が必要である。しかしながら、高線量率下で大線量測定が可能な従来の物理的、あるいは化学的線量計にはそれぞれに課題がある。例えば、電離箱は構造、取扱が複雑で高価。液体線量計は溶液の調整と線量判定が複雑。ガラス線量計は製造工程が複雑で、線量判定に専用の装置と時間が必要。プラスチック線量計は再現性や取扱に問題が多い。また、吸収線量や線量分布が色の変化で読みとれる線量計^{3)、4)、5)}として、塩化ビニル／メチルバイオレット／クロロベンゼン系、セロハン色素系、塩化ビニル／コンゴーレッド／パラフイン系、放射線感応ペイント、塩化ビニル／酸感受性色素などの組み合わせによる色素線量計が開発されているが、先述した既存線量計同様の課題を有している。

着色酸化アルミニウム被膜線量計（カラー線量計）は、酸化アルミニウム被膜中に含浸させたアゾ染料の光退色を応用した色素線量計の一種で、上記背景の基に、

- ・大線量測定が可能であること
- ・機器、部品細部の線量測定が可能であること
- ・測定が簡単であること（簡便な測定器を使用し、短時間で高精度な測定が可能であること）
- ・安価で丈夫、取扱が容易なこと

などの要件を開発の目的としたガンマ線対応の線量計である。

なお、本報告書はこれまでの試験・開発の途中、途中において発表した幾つかの報告書^{6)、7)、8)}を基に、それ以降の試験結果を加えてまとめたものである。

1.2 カラー線量計の退色機構

染料の光退色は、染料の化学構造の他、染着状態、共存物質や基質の性質など多くの因子によって決定される極めて複雑な機構と考えられている。ここでは松岡等が仮定したモノアゾ染料の光退色⁹⁾を例に取り、その機構について簡単に述べる。

図1.2にモノアゾ染料の光退色機構の模式図を示す。退色は概略5段階に進行する。

第1段階

- ・大気中での光照射によりアゾキシ化合物が生成される。

第2段階

- ・アゾキシ化合物は、ワラッハ転位によりオルト-オキシアゾ化合物になる。

第3段階

- ・オルト-オキシアゾ化合物と互変異性体であるケトイドラゾン体が得られるが、ケトイドラゾン体はキノン系構造をとる。

第4段階

- ・キノン系構造は加水分解を受けやすく、ヒドラジンとオルト-キノンに光分解される。

第5段階

- ・最終的には、原色団であるアゾ基 (-N=N-) がヒドラジンとオルト-キノンに分解され色を失う。

ガンマ線照射では、ガンマ線が自然光に比べより強力に作用すると共に、大気中の酸素や水分が退色を促進すると考えられる。

1.3 試験用試料の作製

カラー線量計の開発では試験用として各種の試料（試験用試料）を作製した。試験用試料の基本構造は、アルミニウム合金製薄板表面に生成させた酸化被膜 (Al_2O_3) 中にアゾ系の染料を含浸させたもので、試験の目的に応じて酸化膜の厚さ、染料種、染色条件の異なる試料を作製した。

以下に試験用試料の材質、形状寸法及び作製工程と作業項目（あるいは作業要因）の概略を示す。

1) 材質、形状寸法

- ・材 質 : アルミニウム合金 (A5052)
- ・形状寸法 : 45 mm × 30 mm × 1 mm (厚さ*)

* 染料種特性試験（後述）用は 0.3mm、低線量率対応試験（後述）用は 1 mm。

2) 作製工程

工程 1 前処理：基材の表面清浄

- ・脱脂
- ・エッチング
- ・中和

工程 2 電 解：酸化膜の生成

- ・印加電圧
- ・電解液組成
- ・電解液温度
- ・処理時間

工程 3 染 色：酸化膜中に染料を含浸させる

- ・染料種
- ・溶液濃度
- ・溶液温度
- ・浸漬時間

工程 4 封 孔：酸化膜表面のミクロな孔を封じる

- ・処理液組成
- ・処理液温度
- ・処理時間

工程 5 水 洗：表面に付着する異物の除去

- ・水質（純水）
- ・洗浄時間

工程 6 乾 燥：表面に付着する水分の除去

- ・温風温度
- ・処理時間

試験の主要パラメータとなる酸化膜の厚さと色相は、それぞれ電解時の処理時間、染色時の溶液濃度と浸漬時間によって調整される。

1.4 試験施設

ガンマ線照射には、原研高崎研究所コバルト1棟内の2号セルを使用した。本セル内の線源はコバルト60(Co-60)で板状に構成されている。従って、線源長手方向の強度分布は比較的均一で、線源からの距離の調整によって約0.1 kGy/h～10 kGy/hの線量率を確保することが出来る。また、セル内の温度、湿度については特に制御・管理されておらず、オゾンの蓄積を低減するため常時大気を吸排気している。

以下に照射セルの仕様、試験時の環境条件、線量率校正について述べる。

1) 照射セル仕様

- ・線源及び強度：Co-60、7.80 PBq(211 kCi)
- ・線源収納法：スイミングプール
- ・線源形状寸法：板状（長さ2m、高さ45cm）
- ・線量率：381～5.8 C/kg-h (15 kGy/h～0.22 kGy/h)
- ・照射台：北側 幅2.6m、長さ3.5m
南側 幅2.6m、長さ1.5m

2) 試験条件

- ・雰囲気：大気
- ・温度：雰囲気（高温試験時は恒温槽を使用）
- ・湿度：雰囲気

3) 線量率校正

- ・アラニン線量計による

1.5 照射量測定方法

照射量は、ガンマ線照射によって退色したカラー線量計（試験用試料）の色相あるいは明度変化を測定し、あらかじめ作成してある校正曲線を使用して求める。

退色した試験用試料の色相と明度は、マンセルの色立体に基づいて校正されてある分光式色差計を使用し、色座標として短時間で同時に測定することができる。これらの測定結果を基に、まずは色相値と照射量、あるいは明度値と照射量に関する校正曲線を作成する。以後、同一ロットのカラー線量計であれば基本的には、色相あるいは明度の測定値からこれらの校正曲線を使用し照射量を読みとることができる。また、校正曲線が二次式等で近似される場合は、色相あるいは明度の測定値をそれぞれの近似式に代入し、計算によって求めることもできる。

校正曲線の作成に不可欠な線量率校正には、本試験ではESR(Electron Spin

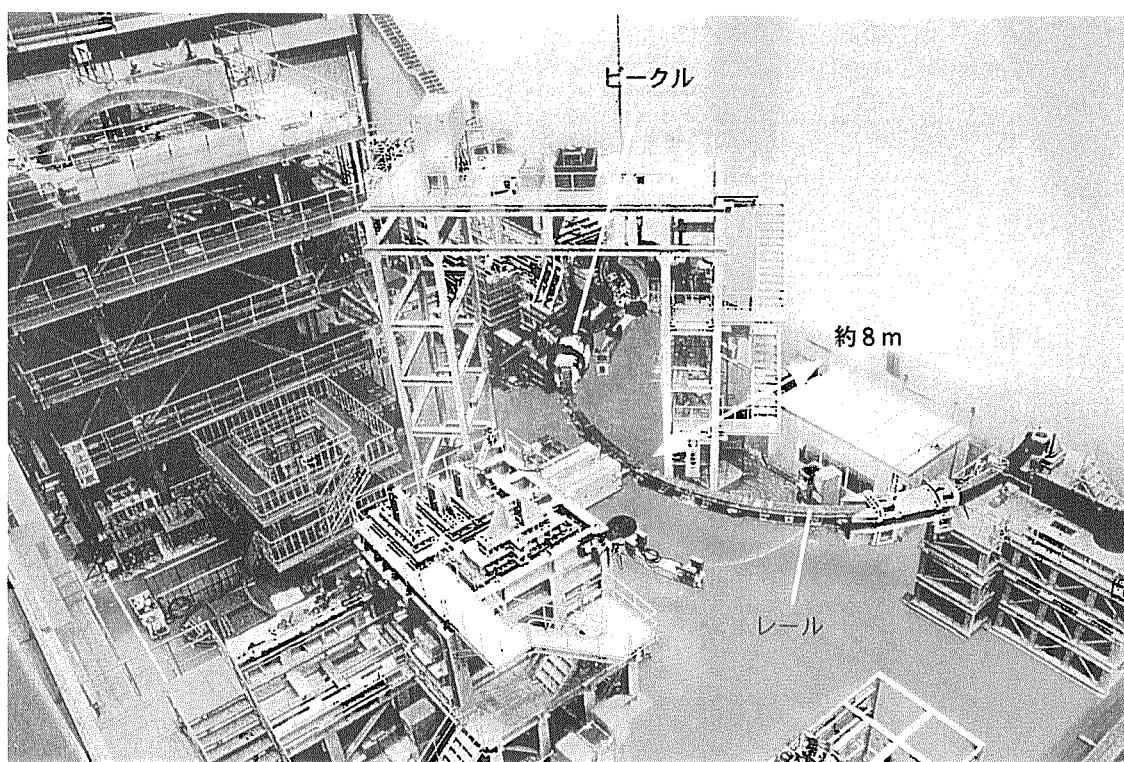
Resonance : 電子スピン共鳴) 線量計の一種であるアラニン線量計を使用した。アラニン線量計は、アミノ酸の一種であるアラニンとポリスチレンから構成され、ガンマ線照射によって結晶中に生じるラジカルの相対濃度を ESR スペクトロメータで測定し吸収線量を求めるようにしたものである。他の線量計に比べ、高精度で測定範囲が広く、照射後の安定性に優れ、測定が容易であるなどの特徴を持っている¹⁰⁾。

図 1.3 にマンセルの色立体¹¹⁾、図 1.4 に今回の試験で使用した分光式色差計（日本電色工業（株）製、SE-2000）¹²⁾、表 1.1 には分光式色差計の主な仕様を示す。

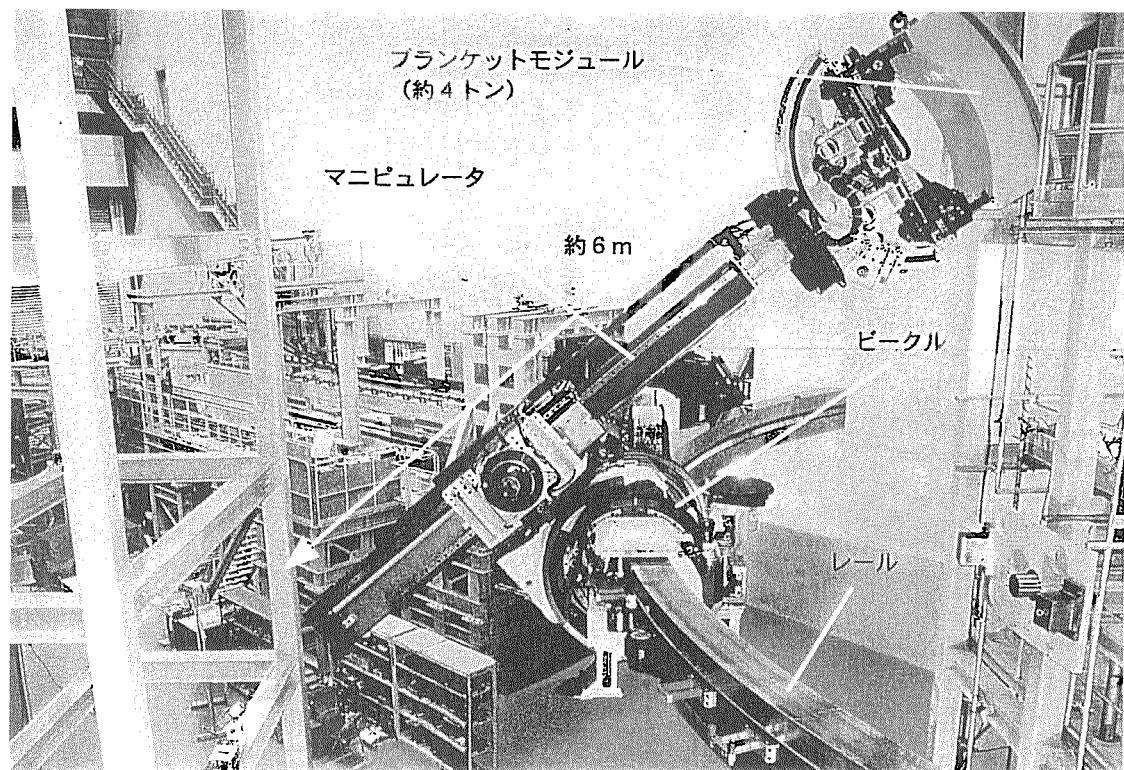
表 1.1 分光式色差計主要仕様

| | |
|----------|--|
| 形状寸法 | 幅 : 400 mm、奥行 : 390 mm、高さ : 190 mm |
| 重 量 | 14 kg |
| 電 源 | AC 100 V、50/60 Hz |
| 消費電力 | 150 W |
| 光 源 | ハロゲンランプ 12V4 A |
| 測定項目 | 分光反射率、分光カーブ、偏色判定図、色差推移図 |
| 測定範囲 | 380 nm～780 nm、10 nm 間隔 |
| 測定面積 | 外径 : 6 mm、10 mm、30 mm |
| 照明、受光条件 | 0°～45°（円周）後分光方式 |
| 規 格 | JIS Z8722、ASTM E308、ASTM E313、ASTM D1925 |
| 精 度（再現性） | 色差 : 0.06 以内、分光反射率 : 0.5 以内 |

This is a blank page.



(装置全景)



(ビークルとマニピュレータ部の拡大)

図1.1 ITERプランケット用遠隔保守装置実機モデル

(半円弧のレール上をビークルが走行し、ビークルに取り付けられた伸縮性のマニピュレータが
プランケットモジュール（約4トン）を把持する）

This is a blank page.

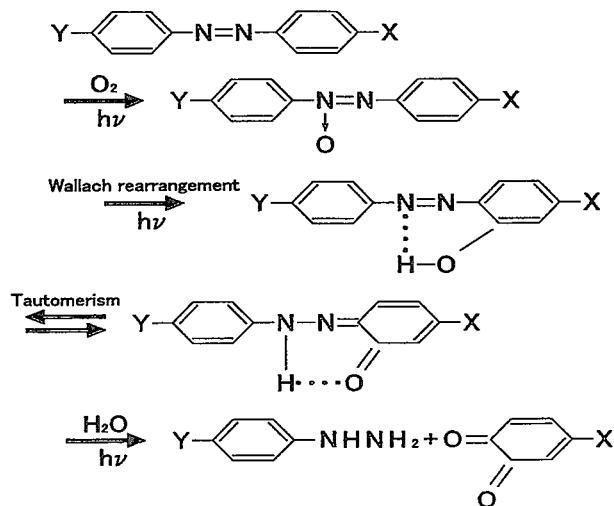


図1.2 モノアゾ染料の光退色機構



図1.4 分光式色差計（日本電色工業（株）製 SE-2000）

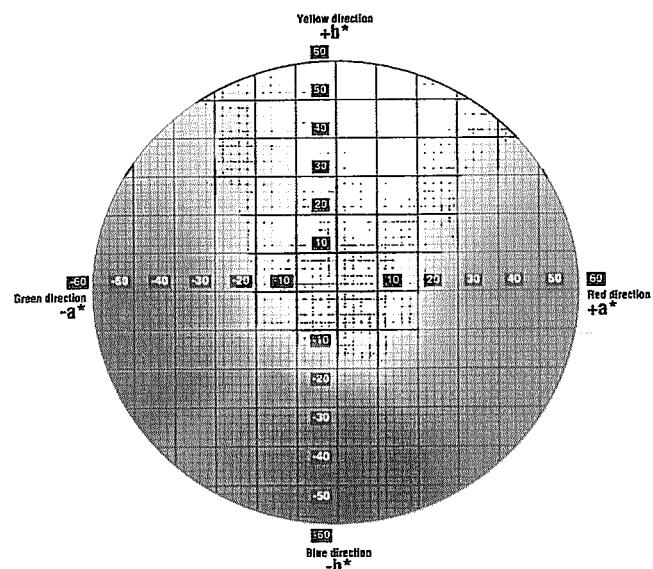
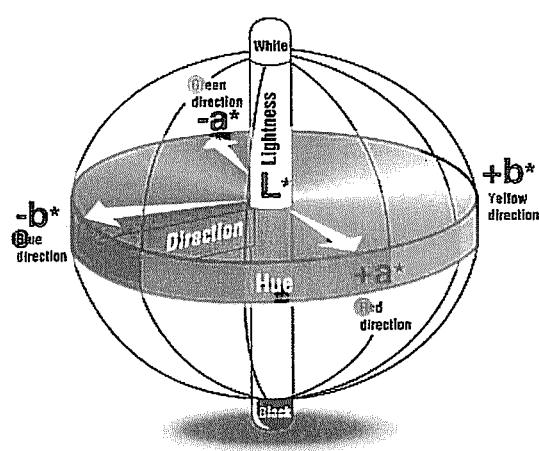


図1.3 マンセルの色立体

左：立体の縦軸は明るさ、半径方向は色相を表す。右：立体中心を水平方向にカットし、2次元的に展開。

This is a blank page.

2. 高線量率対応カラー線量計開発のための予備試験

2.1 目的

退色傾向は染料種と色種によって異なると考えられる。例えば、芳香環がN=Nで結合された側鎖形の構造を有するアゾ系染料は耐光性は低いが、亀甲形の構造を持つフタルシアニン系やアントラキニン系染料は耐光性は高いとされている。また色種では、一般に赤色は黒色に比べ退色の進行が早い。

予備試験では単色あるいは混色の少ない色種として赤、青、緑の三色を選び、それぞれの色について照射量の増加、及び照射線量率の違いによる退色傾向について試験し、カラー線量計に最適と思われる染料種と色種を選定する。

2.2 試験用試料

1) 色と染料種

- ・赤色：商品名 Aluminum Fiery Red ML
(含金属染料と非含金属染料の二種類のアゾ系染料の配合物)
- ・青色：商品名 TAC Blue 502
(フタルシアニン系染料)
- ・緑色：商品名 TAC Green N5002Au20
(アントラキニン系染料とアゾ系染料の配合物)

2) 酸化アルミニウム被膜厚 : 20 μm

2.3 試験条件

1) 線量率 (kGy/h) : 0.1、1.0、10

2) 雰囲気 : 大気、室温

3) 試料の履歴と試験数

- ・履歴 : 予備試験用として作製
- ・試験数
 - 0.1 kGy/h : 各色 3試料／1試験回 × 1回
 - 1.0 kGy/h : 各色 3試料／1試験回 × 1回
 - 10 kGy/h : 各色 3試料／1試験回 × 2回

2.4 測定項目

1) 色相 (() 内はマンセル色立体上の座標軸を示す。図 1.3 参照)

- ・赤色試料 : +a (赤) ~ -a (緑) 軸上
- ・青色試料 : (-b (青) ~ +b (黄) 軸上)、(+a (赤) ~ -a (緑) 軸上)
- ・緑色試料 : (-a (緑) ~ +a (赤) 軸上)、(-b (青) ~ +b (黄) 軸上)

2) 明度

- ・-100 ~ 0 ~ +100

2.5 試験結果と考察

図 2.1 に赤、青、緑各色試験用試料の退色変化を示す。

1) 赤色試料

- ・色相は照射量の増加に伴い、a 軸上をプラスからマイナス方向へと規則的に退色する（図 2.1.1）。
- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 2.1.2）。
- ・退色変化は明度より色相の方が規則的である。
- ・図 2.1.3 及び図 2.1.4 に線量率 10 kGy/h で 16MGy まで照射したときの色相と明度の変化について整理した結果を、また図 2.1.5 には照射前から 10MGy までの試験用試料の退色変化を示す。

色相、明度各変化とも下記に示す二次式で近似出来るため、それぞれの測定値から計算によって照射量を求めることが出来る。

色相値 (h) と照射量 (d)

$$h = 0.20 d^2 - 5.59 d + 37.67 \quad (\text{式 2.1.3})$$

明度 (v) と照射量 (d)

$$v = -0.16 d^2 + 4.68 d + 25.34 \quad (\text{式 2.1.4})$$

- ・退色の程度は、同一照射量でも低線量率照射 (0.1 kGy/h) の方が高線量率照射 (10 kGy/h) に比べ高い。低線量率照射の場合、高線量率照射に比べ同一照射量に達するまでに要する時間が長く、結果として、大気中の酸素に長時間曝されることが原因と考えられる。

2) 青色試料

- ・色相は照射量の増加に伴い、b 軸上をマイナスからプラス方向へと変化した後、再度マイナス方向に不規則に変化する（図 2.2.1）。視覚的には初期の青色が一度濃い青色に変化した後、退色しているように見える。
- ・この不規則な変化を裏付けるように、a 軸上では照射量の増加に伴い赤味成分（青色染料の作製時に調合されると推定）が強くなる。これが濃い紫に変化する原因のひとつと考えられる（図 2.2.2）。

- ・上記変化は、高線量率照射より低線量率照射の場合に明確に現れるが、これは赤色試料同様、大気中の酸素の影響によるものと考えられる。
- ・明度は b 軸上の色相変化と同様の傾向を示す。すなわち、照射量の増加に伴い一度暗くなり、その後次第に明るくなる（図 2.2.3）。
- ・色相、明度ともに複雑な変化を示すため、二次式等による近似はできない。

3) 緑色試料

- ・色相は照射量の増加に伴い、 a 軸上をマイナスからプラス方向へとほぼ規則的に変化する。しかしながら、視覚的には初期の緑色が一度濃い緑色に変化した後、退色しているように見える（図 2.3.1）。
- ・この変化を裏付けるように、 b 軸上では照射量の増加に伴い青味成分（緑色染料の作製時に調合されると推定）が強くなる。これが濃い緑色に変化する原因のひとつと考えられる（図 2.3.2）。
- ・青色試料の場合、 a 、 b 各軸上の色相は不規則な変化であるが、緑色試料の場合は、 a 軸上では比較的規則的であるが b 軸上では不規則な色相変化を示す。
- ・上記変化は、高線量率照射より低線量率照射の場合に明確に現れるが、これは赤色試料同様、大気中の酸素の影響によるものと考えられる。
- ・明度は b 軸上の色相変化と同様の傾向を示す。すなわち、照射量の増加に伴い一時暗くなり、その後次第に明るくなる（図 2.3.3）。
- ・ b 軸上の色相変化は二次式での近似が可能と考えられるが、 a 軸上の色相変化と明度変化はともに複雑であるため二次式等による近似はできない。

2.6 まとめ

1) 赤色試料の色相、明度変化

- ・色相変化
a 軸上での測定では赤味成分が次第に減少、単純な変化を示す。
- ・明度変化
次第に上昇。色相変化に比べやや複雑。
- ・近似式
色相、明度各変化とも 2 次式で近似できる。

2) 青色試料の色相、明度変化

- ・色相変化
a 軸上での測定では、初めに赤味成分が増加した後減少する。 b 軸

上の測定では、初めに青味成分が減少した後増加に転じ再度減少する。いずれの曲線とも複雑な形を示す。

- ・明度変化

- b 軸上の色相変化と同様の傾向を示す。

- ・近似式

- 色相、明度各変化とも複雑であるため近似できない。

3) 緑色試料の色相、明度変化

- ・色相変化

- a 軸上での測定では緑味成分が次第に減少、比較的単純な変化を示す。

- b 軸上での測定では、初めに青味成分が次第に増加し、その後減少する。a 軸上の曲線は単純、b 軸上の曲線は複雑な形を示す。

- ・明度変化

- b 軸上の色相変化と同様の傾向を示す。

- ・近似式

- a 軸上の色相変化については近似出来ると考えられるが、b 軸上の色相変化と明度変化については複雑であるため近似できない。

4) 退色の線量率依存性

- ・赤、青、緑各色試料共に依存性がある。

- ・依存性は色相変化、明度変化のいずれにもみられる。

- ・同一照射量における退色の程度は、低線量率照射の方が高線量率照射に比べ高い。低線量率照射の方が高線量率照射に比べ、同一照射量に達するまでの時間が長く、結果として大気中の酸素に長時間曝されることが原因と考えられる。

- ・線量率毎に校正曲線を作成することが必要である。

5) 以上の結果、赤色試料の退色変化は青、緑色試料の退色変化に比べ単純であることから、以後の各種特性試験は基本的に赤色試料を使用して実施することとした。

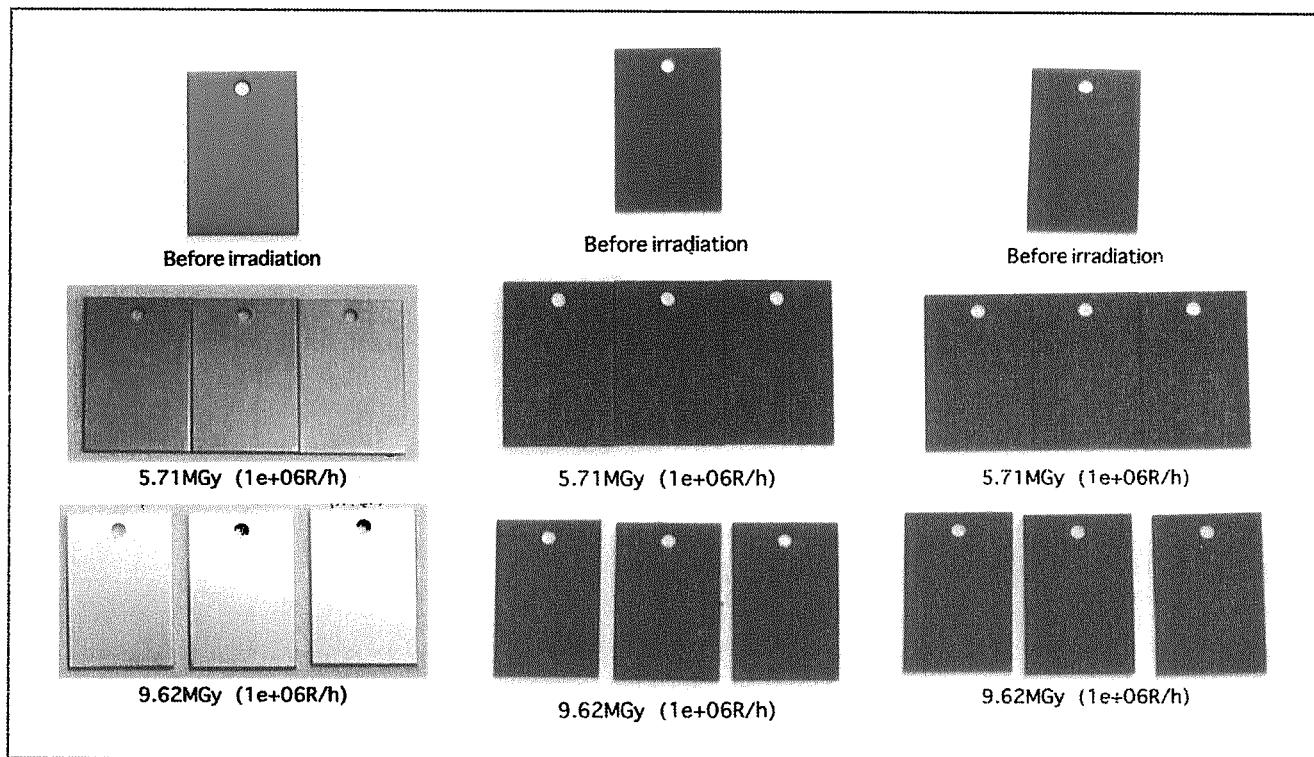


図2.1 赤、青、緑色試験用試料の退色変化

(線量率 : 10kGy/h、各色共 上: 照射前、中: 5.7MGy、下: 9.6MGy、左(赤)、中(青)、右(緑))

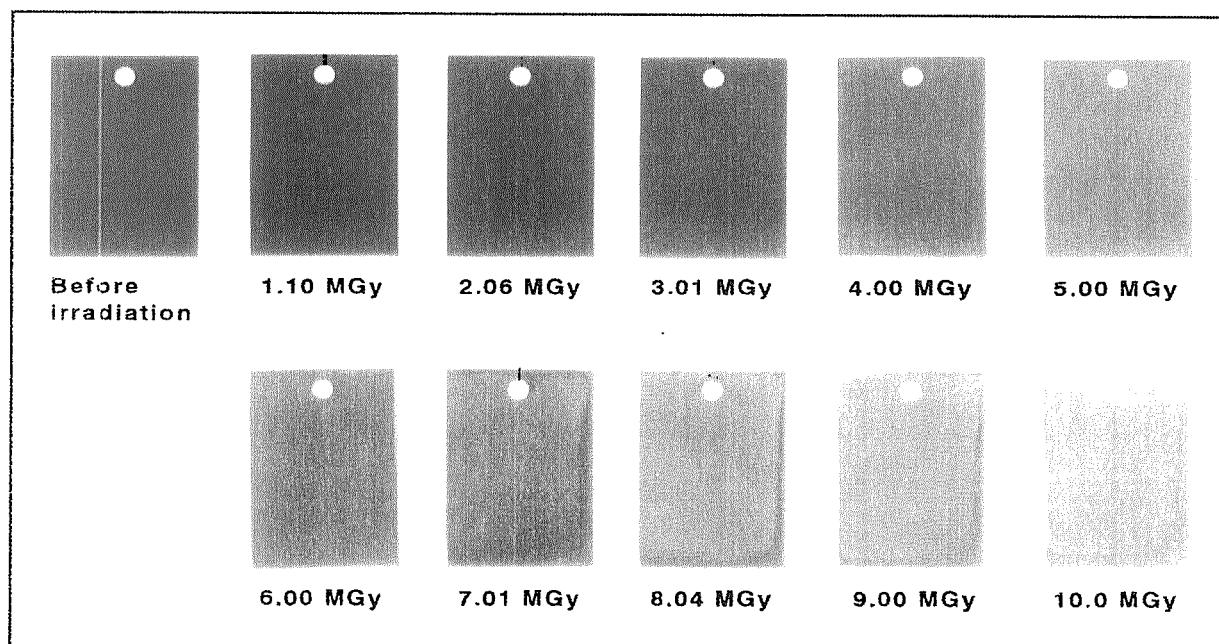


図2.1.5 赤色試験用試料の退色変化/予備試験

(大気、室温、線量率 : 10kGy/h、染料種 : Aluminum Fiery Red ML)

This is a blank page.

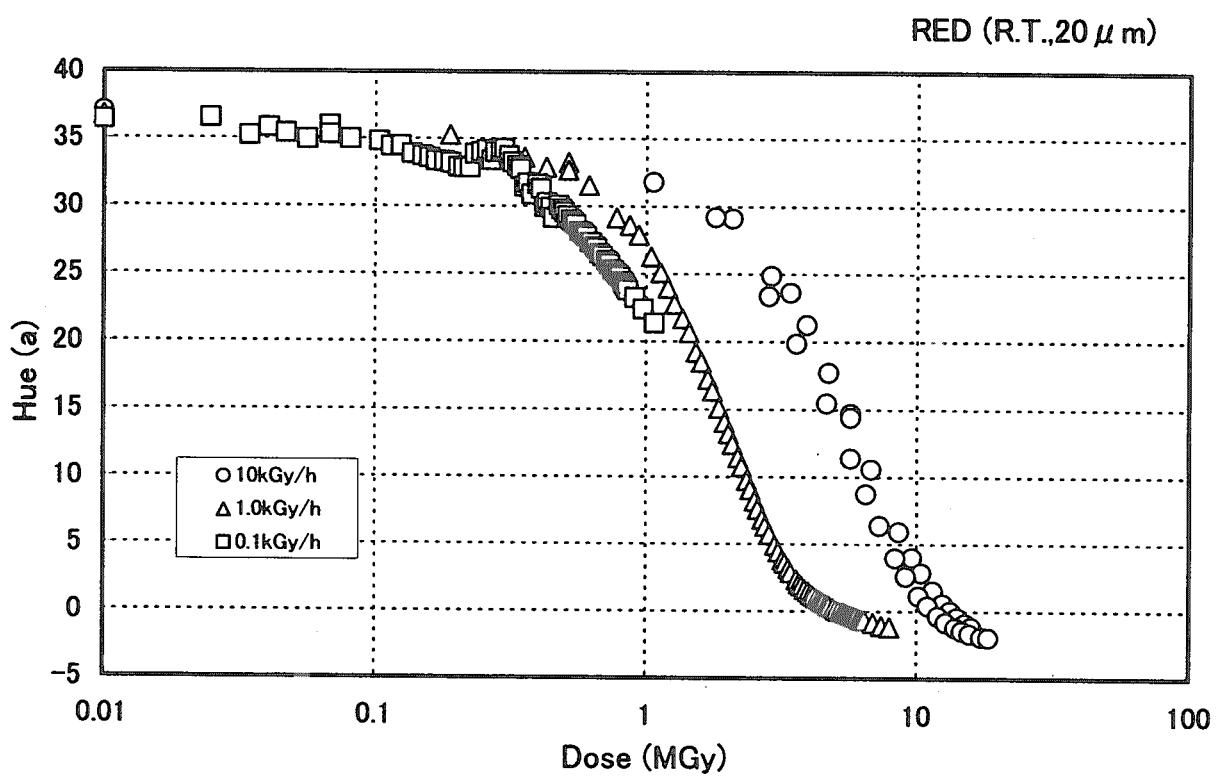


図2.1.1 赤色試験用試料の大気、室温下での色相(a軸)による退色変化／予備試験
(線量率:0.1、1、10 kGy/h、試料:染料種Aluminum Fiery Red ML、膜厚20 μm)

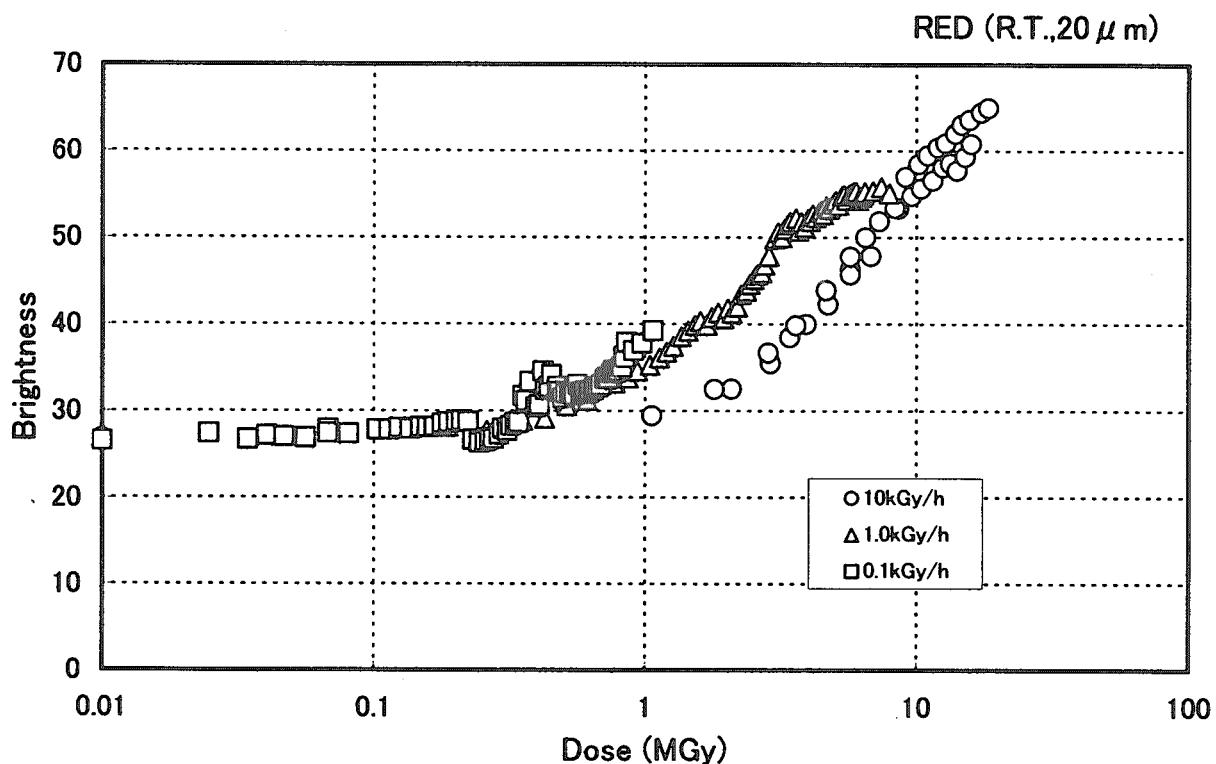


図2.1.2 赤色試験用試料の大気、室温下での明度による退色変化／予備試験
(線量率:0.1、1、10 kGy/h、試料:染料種Aluminum Fiery Red ML、膜厚20 μm)

RED (10kGy/h,R.T.,20 μ m)

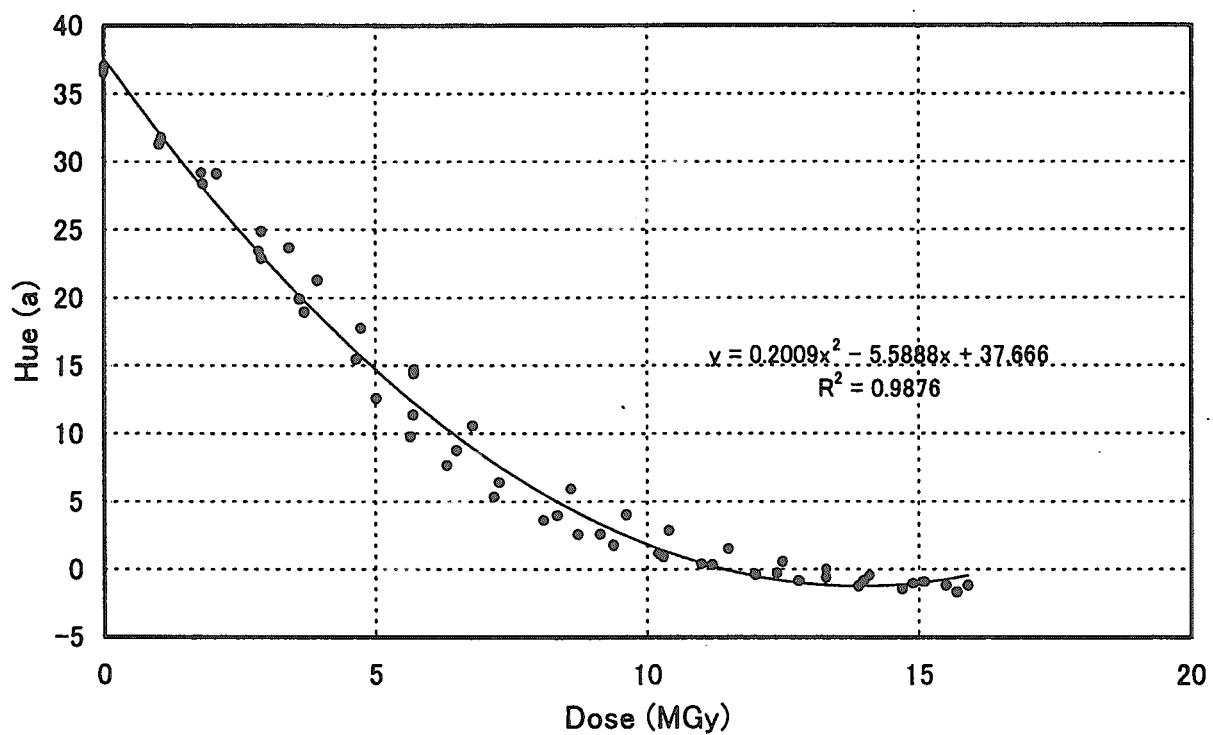


図2.1.3赤色試験用試料の大気、室温下での色相(a軸)による退色変化／予備試験
(線量率:10 kGy/h、試料:染料種Aluminum Fiery Red ML、膜厚20 μ m)

RED (10kGy/h,R.T.,20 μ m)

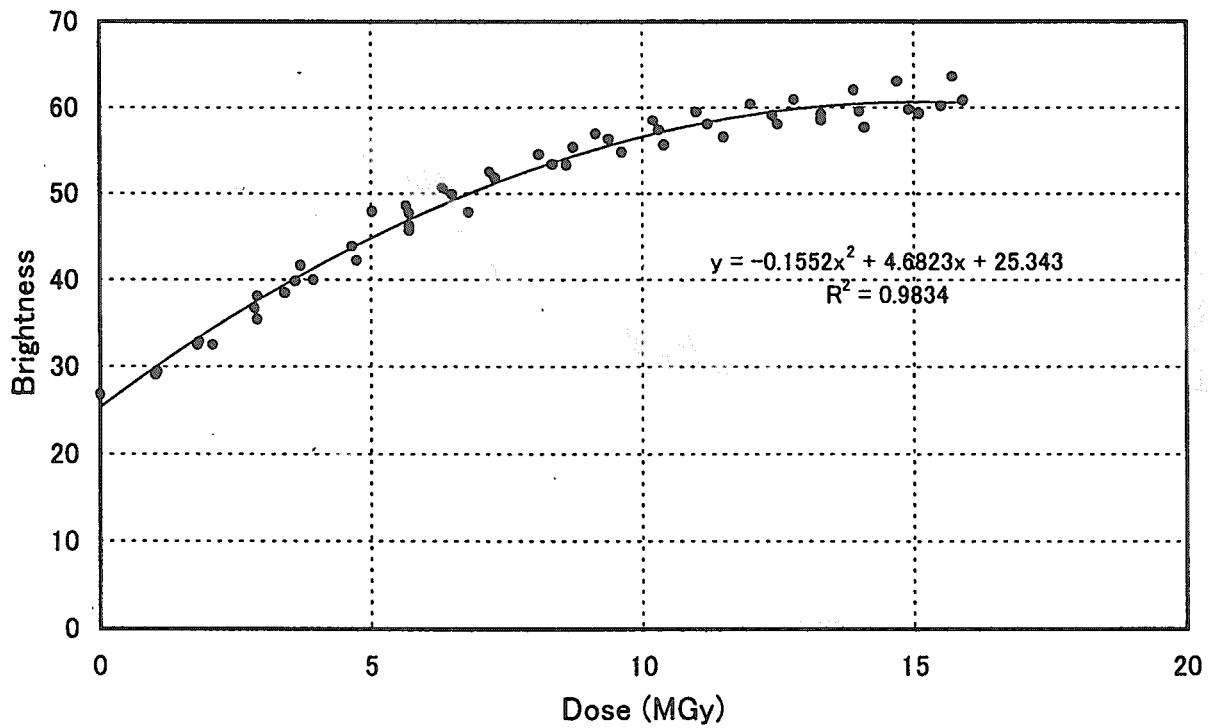


図2.1.4赤色試験用試料の大気、室温下での明度による退色変化／予備試験
(線量率:10 kGy/h、試料:染料種Aluminum Fiery Red ML、膜厚20 μ m)

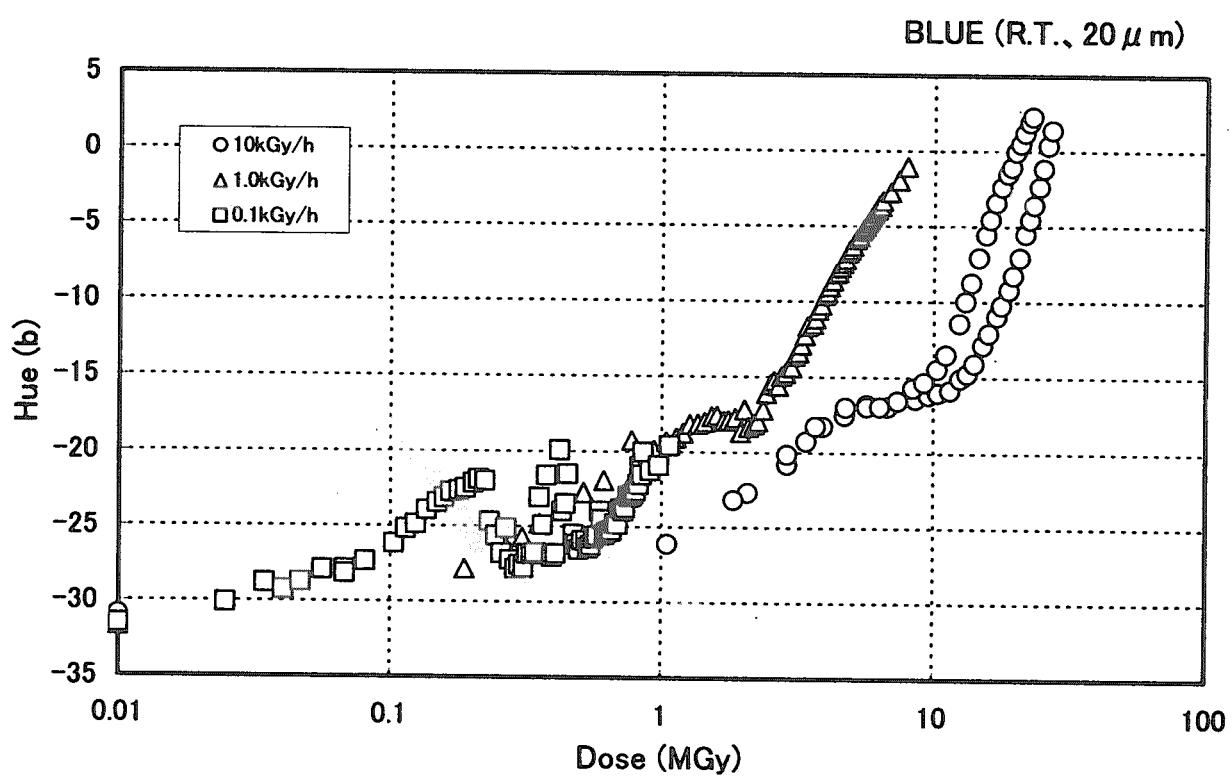


図2.2.1 青色試験用試料の大気、室温下での色相(b軸)による退色変化／予備試験
(線量率:0.1、1、10 kGy/h、試料:染料種Tac Blue 502、膜厚20 μm)

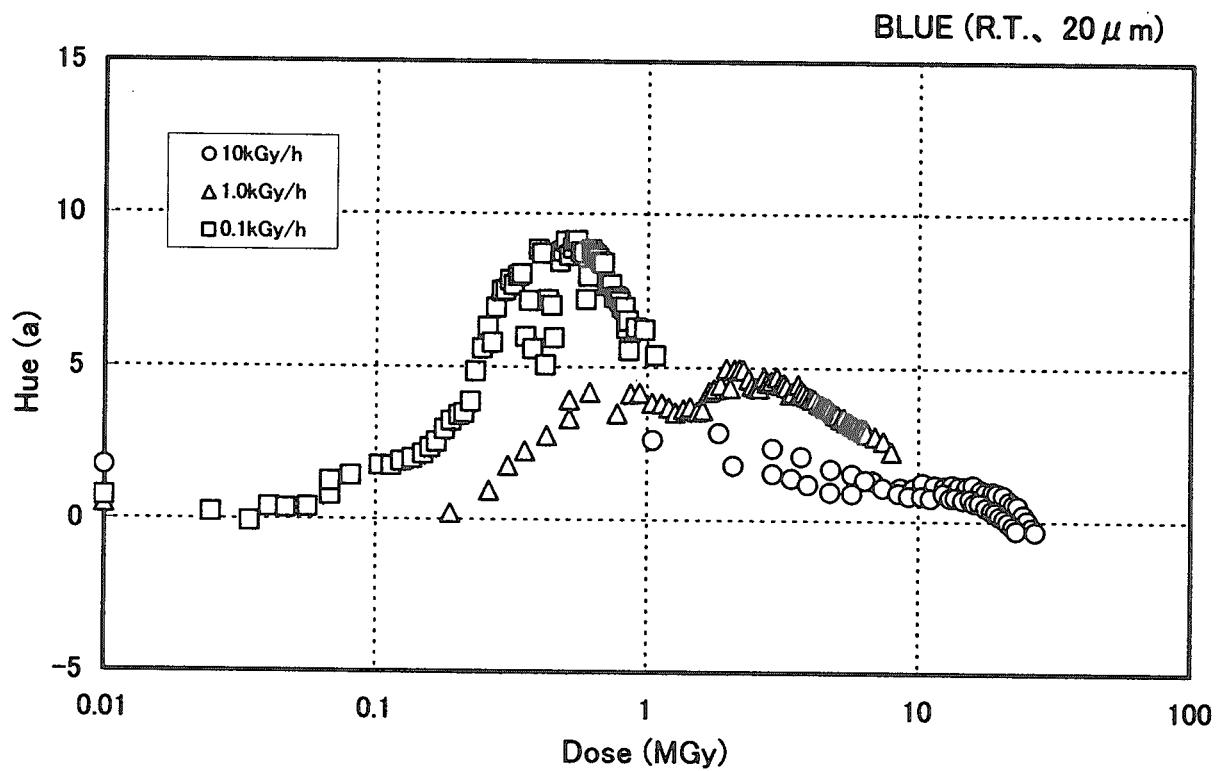


図2.2.2 青色試験用試料の大気、室温下での色相(a軸)による退色変化／予備試験
(線量率:0.1、1、10 kGy/h、試料:染料種Tac Blue 502、膜厚20 μm)

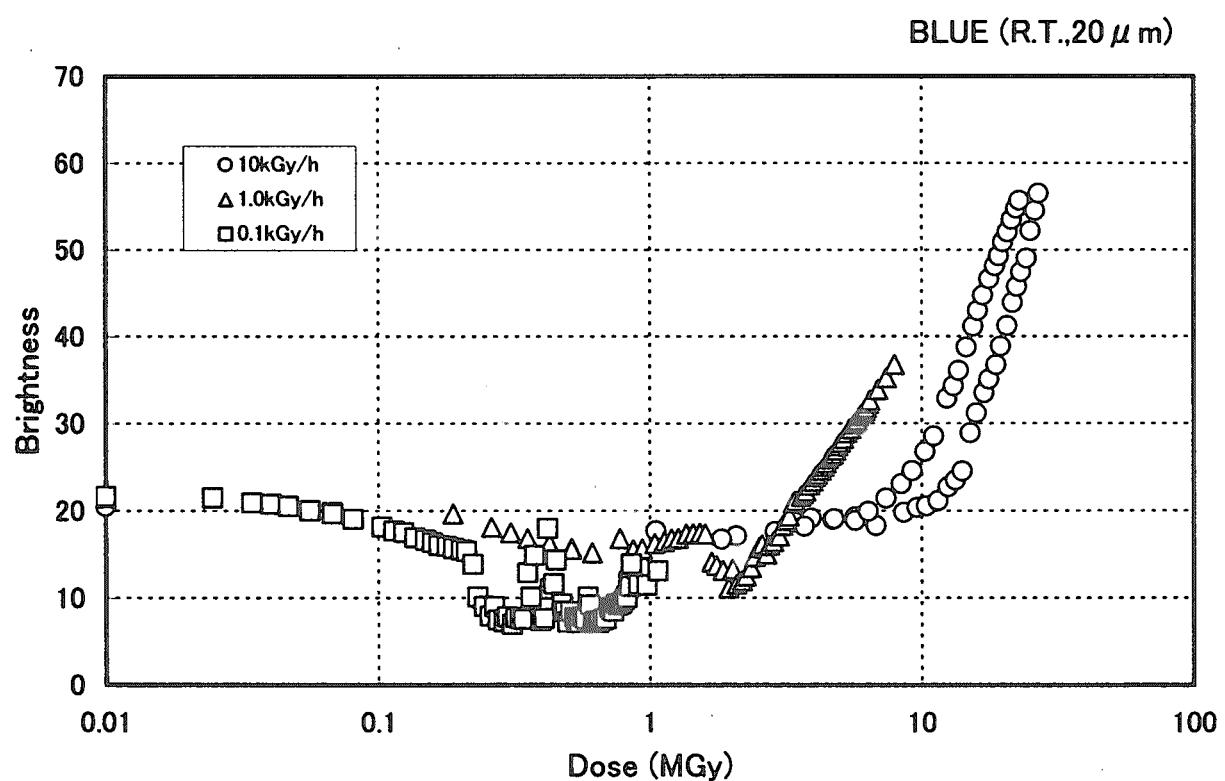


図2.2.3 青色試験用試料の大気、室温下での明度による退色変化／予備試験
(線量率:0.1、1、10 kGy/h、試料:染料種Tac Blue 502、膜厚 $20\mu\text{m}$)

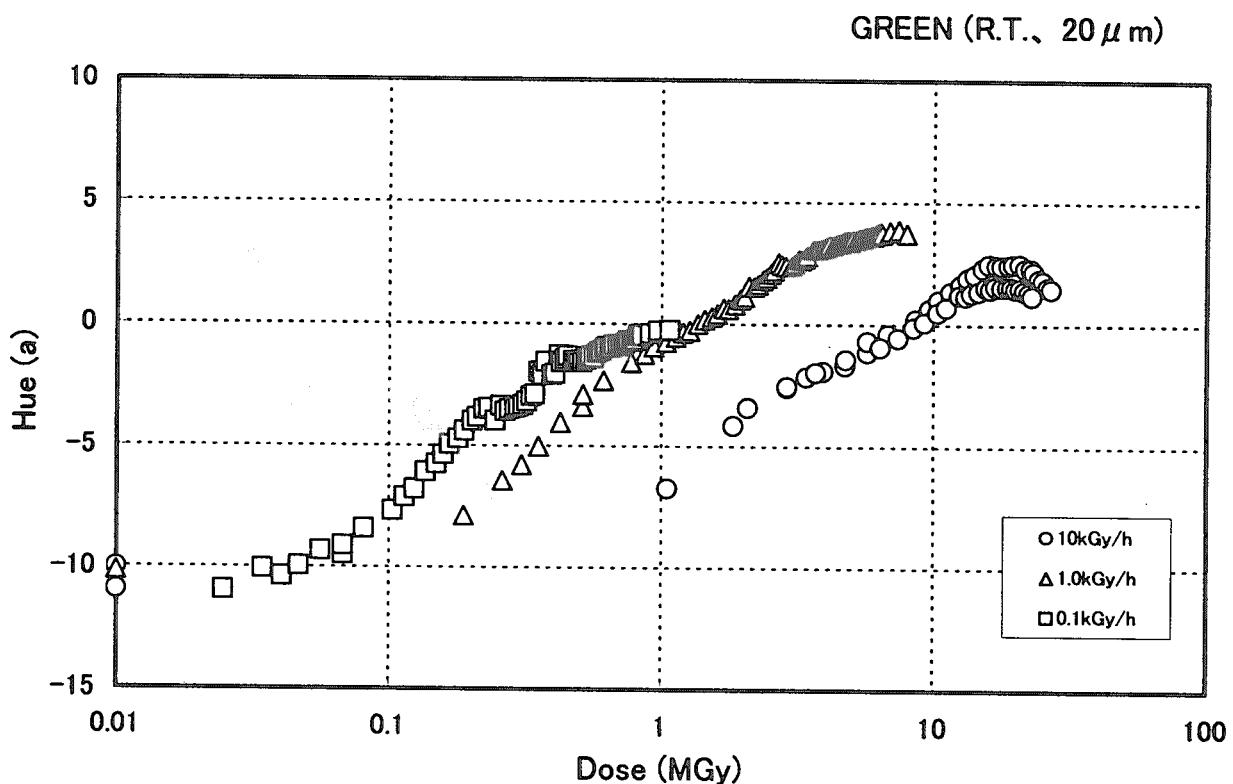


図2.3.1 緑色試験用試料の大気、室温下での色相(a軸)による退色変化／予備試験
(線量率:0.1、1、10 kGy/h、試料:染料種Tac Green N5002Au20、膜厚 20 μm)

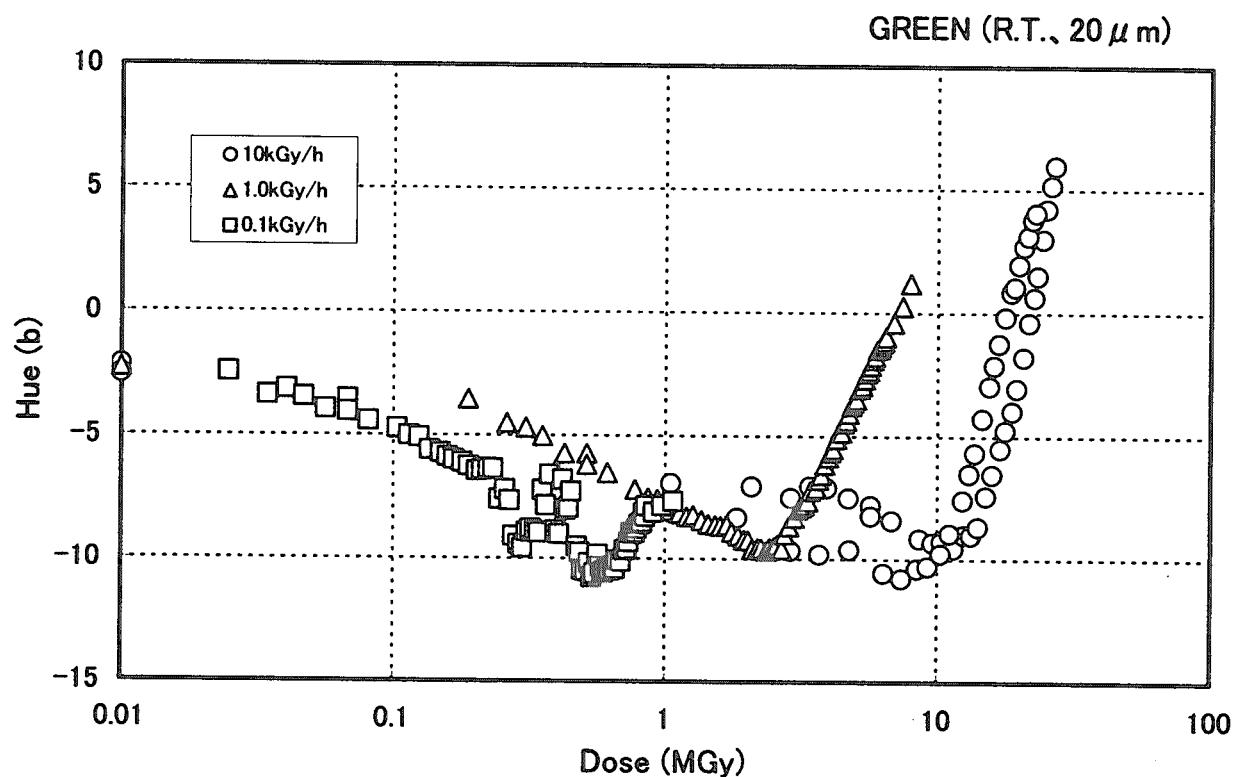


図2.3.2 緑色試験用試料の大気、室温下での色相(b軸)による退色変化／予備試験
(線量率:0.1、1、10 kGy/h、試料:染料種Tac Green N5002Au20、膜厚 20 μm)

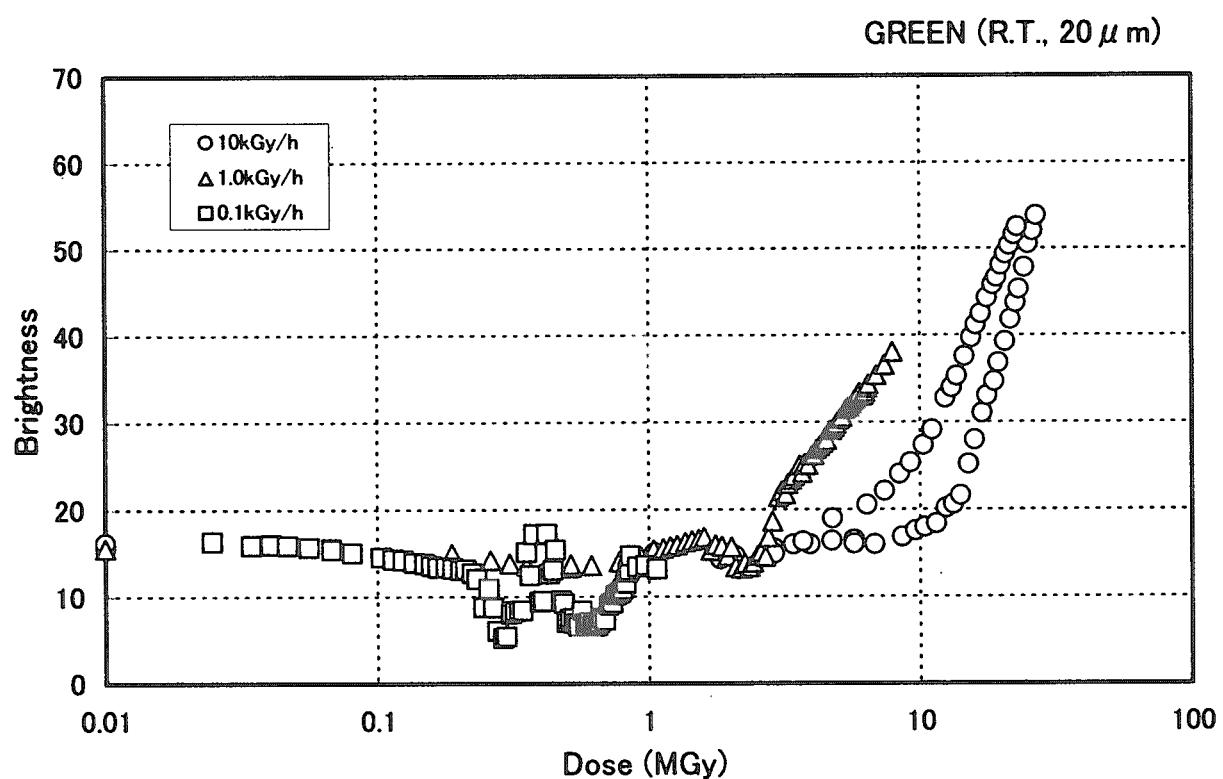


図2.3.3 緑色試験用試料の大気、室温下での明度による退色変化／予備試験
(線量率:0.1、1、10 kGy/h、試料:染料種Tac Green N5002Au20、膜厚 20 μ m)

3. 高線量率対応赤色カラー線量計の特性試験

3.1 酸化アルミニウム被膜厚の違いによる退色変化

3.1.1 目的

染料は染色時の浸漬時間を同じにした場合、酸化アルミニウム被膜の厚さに関わらず表面から約1/2の深さまで浸透すると考えられている。

本試験では、5～30μmの範囲の中から5種類の膜厚の異なる試験用試料を作製し、それぞれの試験用試料の退色傾向を調べる。

3.1.2 試験用試料

1) 色と染料種

・赤色：商品名 Aluminum Fiery Red ML

(含金属染料と非含金属染料の二種類のアゾ染料の配合物)

2) 酸化アルミニウム被膜厚：5種(5、10、15、25、30μm)

3.1.3 試験条件

1) 線量率(kGy/h)：0.1、1.0、10

2) 雰囲気：大気、室温

3) 試料の履歴と試験数

・履歴：膜厚試験用として作製

・試験数

0.1 kGy/h：各膜厚 2試料／1試験回 × 1回

1.0 kGy/h：各膜厚 2試料／1試験回 × 1回

10 kGy/h：各膜厚 2試料／1試験回 × 1回

3.1.4 測定項目

1) 色相((()内はマンセル色立体上の座標軸を示す。図1.3参照)

・赤色試料： $+a$ (赤)～ $-a$ (緑)軸上

2) 明度

・-100～0～+100

3.1.5 試験結果と考察

1) 線量率：0.1 kGy/hの場合

・色相は照射量の増加に伴い、 a 軸上をプラスからマイナス方向へほぼ規則的に退色する(図3.1.1)。

- ・照射量 0.5MGy 近辺までは膜厚間に大きな差異はみられないが、それ以降は違いが顕著になる。傾向として次の 3 グループに分類される。

グループ 41 : 5 μm

グループ 42 : 10、15 μm

グループ 43 : 25、30 μm

- ・退色の進行は早い方から順にグループ 41、グループ 42、グループ 43 となる。
- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 31.1.2）。
- ・色相変化とは異なり、照射初期から膜厚間に違いが現れ、傾向として次の 3 グループに分類される。

グループ 411 : 5 μm

グループ 422 : 10、15 μm

グループ 433 : 25、30 μm

- ・退色の進行は早いほうから順にグループ 411、グループ 422、グループ 433 となる。
- ・膜厚毎の退色の違いは、色相変化より明度変化の方に明確に現れる。

2) 線量率 : 1 kGy/h の場合

- ・色相は照射量の増加に伴い、a 軸上をプラスからマイナス方向へとほぼ規則的に退色する（図 31.2.1）。
- ・照射量 1 MGy 近辺までは膜厚間に大きな差異はみられないが、それ以降は膜厚間の違いが顕著になる。傾向としては、次の 2 グループに分類される。

グループ 51 : 5、10、15 μm

グループ 52 : -

グループ 53 : 25、30 μm

- ・グループ 51 は照射直後から次第に退色、グループ 53 は 3 MGy までは緩やかに退色するが、それ以降 8 MGy までの退色は急となる。
- ・退色の進行は早い方から順にグループ 51、グループ 53 となる。
- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 31.2.2）。
- ・色相の変化とは異なり照射初期から膜厚間に違いが現れる。しかしながら、2 MGy 以降は互いに近接するため明確なグループ化は難しいがおおよそ次の 3 グループに分類される。

グループ 511 : 5 μm

グループ 522 : 10、15 μm

グループ 533 : 25、30 μm

- ・退色の進行は早い方から順にグループ 511、グループ 522、グループ 533 となる。
- ・膜厚毎の退色の違いは、色相変化では 2 グループ、明度変化では 3 グループに分類したことから、強いて云えば明度変化の方により明確に現れている。

3) 線量率 : 10 kGy/h の場合

- ・色相は照射量の増加に伴い、a 軸上をプラスからマイナス方向へとほぼ規則的に退色する（図 31.3.1）。
- ・線量率 0.1、1 kGy/h 照射時に比べ、照射開始直後から膜厚毎に退色傾向が異なり次の 2 グループに分類される。

グループ 61 : 5、10、15 μm

グループ 62 : -

グループ 63 : 25、30 μm

- ・グループ 61 は照射直後から退色するが、10 MGy 以降は変化は緩やかになる。グループ 63 は 5 MGy までは緩やかに退色するが、それ以降の変化は急となる。
- ・退色の進行は早い方から順にグループ 61、グループ 63 となる。
- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 31.3.2）。
- ・色相の変化と同様、照射初期から膜厚間に違いが現れるが、10 MGy 以降は明度値が互いに近接する。傾向として次の 3 グループに分類される。

グループ 611 : 5 μm

グループ 622 : 10、15 μm

グループ 633 : 25、30 μm

- ・明度は大きい方から順にグループ 611、グループ 622、グループ 633 となる。
- ・膜厚毎の退色の違いは、色相変化では 2 グループ、明度変化では 3 グループに分類したことから、強いて云えば明度変化の方により明確に現れている。

3.1.6 まとめ

- 1) 退色の進行（程度）は膜厚毎に異なるが、薄い膜厚ほど早い（高い）。

傾向としては下表に示すように、線量率毎に2～3グループに分けることができる。

表 31.1 照射線量率別にみた膜厚毎の退色傾向のグループ分け

| 照射線量率 (kGy/h) | グループ分け（色相 変化）と退色の進行 | グループ分け（明度 変化）と退色の進行 |
|------------------|---|---|
| 0.1 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 5 μm (早い) ・ 10、15 μm (中位) ・ 25、30 μm (遅い) | <ul style="list-style-type: none"> ・ 5 μm (早い) ・ 10、15 μm (中位) ・ 25、30 μm (遅い) |
| 1 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 5、10、15 μm (早い) ・ - ・ 25、30 μm (遅い) | <ul style="list-style-type: none"> ・ 5 μm (早い) ・ 10、15 μm (中位) ・ 25、30 μm (遅い) |
| 10 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 5、10、15 μm (早い) ・ - ・ 25、30 μm (遅い) | <ul style="list-style-type: none"> ・ 5 μm (早い) ・ 10、15 μm (中位) ・ 25、30 μm (遅い) |

- 2) 低線量率照射 (0.1 kGy/h) の方が高線量率照射 (1、10 kGy/h) に比べ、色相変化、明度変化のいずれにおいても膜厚の違いが明確に現れる。低線量率照射では、高線量率照射に比べ退色反応が緩やかに進行するためと考えられる。
- 3) 膜厚の違いによる退色傾向の違いは、色相変化に比べ明度変化の方により現れる。
- 4) 膜厚毎の退色傾向は照射線量率、色相変化、明度変化によって異なるが、全体としては、次の3グループに分けることができる。
 - ・ 5 μm グループ
 - ・ 10、15 μm グループ
 - ・ 25、30 μm グループ
- 5) 膜厚 20 μm 試験用試料については、製作ロットが異なることから本試験の結果と同様の考察はできないが、予備試験の結果からみて、10、15 μm グループに属すると考えられる。
- 6) 以上の結果、20 μm 試験用試料を含む6種類の膜厚毎の退色傾向は3グループにまとめられるが、それぞれのグループを代表する膜厚として、以下に示す3種の試料を選び、温度と紫外線による影響試験の試料に供することとした。
 - ・薄い膜厚の試験用試料として : 5 μm
 - ・中程度の膜厚の試験用試料として : 15 μm
 - ・厚い膜厚の試験用試料として : 25 μm

3.2 高温下での照射による退色変化への影響

3.2.1 目的

アゾ染料の退色には大気中の酸素や水分の他、温度による影響も考えられる。本試験では、保守装置使用時の想定温度範囲（50～100°C）から50、75、100°Cの3点を選び、高温環境での照射が退色に与える影響について膜厚毎（5、15、25μm）に調べる。

3.2.2 試験用試料

1) 色と染料種

- ・赤色：商品名 Aluminum Fiery Red ML
(含金属染料と非含金属染料の二種類のアゾ染料の配合物)

2) 酸化アルミニウム被膜厚：3種（5、15、25μm）

3.2.3 試験条件

1) 線量率 (kGy/h) : 1.0、10

(0.1 kGy/hについては、線源と恒温槽との配置が確保できず実施を見送った)

2) 霧囲気 : 大気／室温、50°C、75°C、100°C

3) 試料の履歴と試験数

・履歴：膜厚試験用として作製

・試験数

室温／1.0 kGy/h : 膜厚の違いによる試験時のデータによる

50°C／1.0 kGy/h : 各膜厚 1試料／1試験回 × 1回

75°C／1.0 kGy/h : 各膜厚 1試料／1試験回 × 1回

100°C／1.0 kGy/h : 各膜厚 1試料／1試験回 × 1回

室温／10 kGy/h : 膜厚の違いによる試験時のデータによる

50°C／10 kGy/h : 各膜厚 1試料／1試験回 × 1回

75°C／10 kGy/h : 各膜厚 1試料／1試験回 × 1回

100°C／10 kGy/h : 各膜厚 1試料／1試験回 × 1回

3.2.4 測定項目

1) 色相 (() 内はマンセル色立体上の座標軸を示す。図1.3参照)

・赤色試料：+a（赤）～-a（緑）軸上

2) 明度

• -100 ~ 0 ~ +100

3.2.5 試験結果と考察

1) 室温／1.0 kGy/h の場合

- ・色相は照射量の増加に伴い、a軸上をプラスからマイナス方向へとほぼ規則的に退色する（図 32.1.1）。
- ・退色の進行は、膜厚の薄い試料の方が厚い試料に比べ早い。5 μm と 15 μm とでは大きな違いは見られないが、これらの試料と 25 μm の試料では、特に照射量 1 MGy から 7 MGy の範囲においてはっきりとした違いが見られる。
- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 32.1.2）。
- ・膜厚間の退色の違いは、色相変化に比べ明度変化の方に明確に現れ、進行は早い方から順に 5 μm、15 μm、25 μm となっている。

2) 50°C／1.0 kGy/h の場合

- ・色相は照射量の増加に伴い、a軸上をプラスからマイナス方向へとほぼ規則的に退色する（図 32.2.1）。
- ・膜厚間の退色の違いは照射初期から明確に現れており、進行は早い方から順に 5 μm、15 μm、25 μm となっている。
- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 32.2.2）。
- ・膜厚間の退色の違いは色相変化、明度変化共に明確であり、進行は早い方から順に 5 μm、15 μm、25 μm となっている。
- ・退色の進行については、室温照射の結果に比べ違いは見られない。

3) 75°C／1.0 kGy/h の場合

- ・色相は照射量の増加に伴い、a軸上をプラスからマイナス方向へとほぼ規則的に退色する（図 32.3.1）。
- ・50°C 照射時同様、膜厚間の違いは照射初期から明確に現れており、退色の進行は早い方から順に 5 μm、15 μm、25 μm となっている。
- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 32.3.2）。
- ・50°C 照射時の結果と比べ、色相、明度各変化にほとんど違いは見られない。

4) 100°C／1.0 kGy/h の場合

- ・色相は照射量の増加に伴い、a軸上をプラスからマイナス方向へとほ

ほぼ規則的に退色する（図 32.4.1）。

- ・膜厚間の退色の違いは 50°C、75°C 照射時同様、照射初期から明確に現れており、退色の進行は早い方から順に 5 μm、15 μm、25 μm となっている。
- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 32.4.2）。
- ・膜厚間の退色の違いは、色相変化、明度変化共に明確に現れており、その進行は 50°C、75°C 照射時に比べ明らかに早くなっている。

5) 室温／10 kGy/h の場合

- ・色相は照射量の増加に伴い、a 軸上をプラスからマイナス方向へとほぼ規則的に退色する（図 32.5.1）。
- ・退色の進行は、膜厚の薄い試料の方が厚い試料に比べ早い。5 μm と 15 μm とでは大きな違いは見られないが、これらの試料と 25 μm の試料間では、特に照射量 1 MGy から 10 MGy の範囲においてはっきりとした違いが見られる。
- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 32.5.2）。
- ・膜厚間の退色の違いは、色相変化、明度変化共に明確に現れており、その進行は早い方から順に 5 μm、15 μm、25 μm となっている。

6) 50°C／10 kGy/h の場合

- ・色相は照射量の増加に伴い、a 軸上をプラスからマイナス方向へとほぼ規則的に退色する（図 32.6.1）。
- ・膜厚間の違いは照射初期から明確に現れており、その進行は早い方から順に 5 μm、15 μm、25 μm となっている。
- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 32.6.2）。
- ・室温照射時の結果に比べ大きな違いは見られないが、膜厚 5 μm については室温時の結果に比べ退色の進行はいくらか早い。

7) 75°C／10 kGy/h の場合

- ・色相は照射量の増加に伴い、a 軸上をプラスからマイナス方向へとほぼ規則的に退色する（図 32.7.1）。
- ・膜厚間の違いは照射初期から明確に現れており、その進行は早い方から順に 5 μm、15 μm、25 μm となっている。
- ・退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため、明度は高くなる（図 32.7.2）。

- ・照射線量率が 1.0 kGy/h の場合では、75°Cの方が 50°Cに比べ退色の進行は早かったが、10 kGy/h 照射では 50°C照射に比べ、その進行は色相、明度変化共に若干遅い結果となった。原因については不明である。

8) 100°C / 10 kGy/h の場合

- ・色相は照射量の増加に伴い、a 軸上をプラスからマイナス方向へとほぼ規則的に退色する（図 32.8.1）。
- ・膜厚間の違いは照射初期から明確に現れているが、膜厚 5 μm と 15 μm では退色の進行にほとんど違いは見られない。退色は早い方から順に 5 μm ≈ 15 μm、25 μm となっている。
- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 32.8.2）。
- ・明度の進行は早い方から順に 5 μm、15 μm、25 μm となるが、照射量 3 MGy 以降、膜厚 5 μm と 15 μm ではほとんど同じ退色傾向を示す。
- ・50°C、75°C 照射時に比べ退色の進行は早い。
- ・なお本試験では、退色傾向が照射量 10MGy 以前に把握できたため照射は 7.5MGy 近辺までとした。

3.2.6 まとめ

- 1) 膜厚 5 μm 試料を 1.0 kGy/h の線量率で照射したときの色相（値）変化の結果を下表に示す。

表 32.1 照射温度別による色相（値）変化（膜厚：5 μm、線量率：1.0 kGy/h）

| 照射温度 (°C) | 照射量 (MGy) | | | |
|--------------|-----------|----|----|---|
| | 0 | 2 | 4 | 6 |
| R.T. | 35 | 23 | 13 | 7 |
| 50 | 35 | 18 | 12 | 7 |
| 75 | 35 | 18 | 12 | 7 |
| 100 | 35 | 13 | 5 | 3 |

退色は、50°C、75°C 照射では室温照射に比べわずかに進行しているが、測定誤差等を考慮すると実質的には温度による影響はないと考えられる。しかしながら 100°C 照射では、室温照射に比べ退色は明らかに促進されている。

- 2) 膜厚 5 μm 試料を 10 kGy/h の線量率で照射したときの色相（値）変化

の結果を下表に示す。

表 32.2 照射温度別による色相（値）変化（膜厚：5 μm、線量率：10 kGy/h）

| 照射温度 (°C) | 照射量 (MGy) | | | | | |
|--------------|-----------|----|----|----|----|----|
| | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| R.T. | 37 | 26 | 18 | 14 | 10 | 7 |
| 50 | 37 | 22 | 13 | 7 | 4 | 2 |
| 75 | 36 | 22 | 13 | 8 | 5 | 3 |
| 100 | 36 | 14 | 4 | 2 | - | - |

退色は、室温照射に比べ 50°C、75°C 照射では 2 倍程度、100°C 照射では 4 倍以上促進している。

3) 以上の結果、温度による影響は照射線量率によって異なり、

- ・線量率 1.0 kGy/h の場合、影響を与える温度は 100°C 近辺からで、退色は照射量によって異なるが、室温時に比べ約 2.2 倍促進される。
- ・線量率 10 kGy/h の場合、退色は、室温照射に比べ 50°C、75°C、100°C 照射でそれぞれ約 2.1 倍、1.7 倍、4.5 倍促進されることがわかった。

3.3 高温、無照射時の退色変化

3.3.1 目的

3.2 節では、高温下での照射が退色を促進することを確認した。本試験では、試験用試料をガンマ線照射なしで大気、高温（100°C）下に曝露し、退色への影響を調べる。

3.3.2 試験用試料

1) 色と染料種

- ・赤色：商品名 Aluminum Fiery Red ML
(含金属染料と非含金属染料の二種類のアゾ染料の配合物)

2) 酸化アルミニウム被膜厚：3 種（5、15、25 μm）

3.3.3 試験条件

- 1) 線量率 (kGy/h) : ガンマ線照射は無し
- 2) 霧囲気 : 大気、100°C
- 3) 試料の履歴と試験数
 - ・履歴 : 膜厚試験用として作製
 - ・試験数 : 各膜厚 1 試料／1 試験回 × 1 回

3.3.4 測定項目

- 1) 色相 (() 内はマンセル色立体上の座標軸を示す。図 1.3 参照)
 - ・赤色試料 : +a (赤) ~ -a (緑) 軸上
- 2) 明度
 - ・-100 ~ 0 ~ +100

3.3.5 試験結果と考察

- 1) 色相は曝露時間の増加に伴い、a 軸上をプラスからマイナス方向へと規則的に退色する (図 33.1.1)。
- 2) 退色の進行は膜厚が薄い程早いが、25 μm の場合は 2 万時間曝露後でも変化はほとんど見られない。
- 3) 明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる (図 33.1.2)。
- 4) 膜厚 25 μm の場合、退色の進行は色相より明度変化の方に明確に現れる。

3.3.6 まとめ

- 1) 本結果と 3.2 節の照射時の温度影響試験の結果から、温度 (100°C) と照射それぞれの退色促進効果について調べる。

表 33.1 は、膜厚 5 μm の試料について、照射線量率 1 kGy/h で室温照射、100°C 照射によってそれぞれ 5 MGy 照射したときの色相 (値) 変化と 100°C 無照射で 5,000 時間照射したときの色相変化の結果を比較したものである。5,000 時間は照射線量率 1 kGy/h で 5 MGy 照射に要する時間である。

表 33.1 室温照射、100°C 照射、100°C 無照射時の色相値の比較
(膜厚 : 5 μm、照射線量率 : 1 kGy/h)

| 照射条件 | 照射前 色相値 : H ₀ | 5 MGy 照射後 または 5,000 時間曝露後 色相値 : H ₅ | △H = H ₀ - H ₅ | 退色率 : △H / H ₀ |
|-------------------|--------------------------------|---|---|------------------------------|
| ケース 1 : 室温照射 | 35 | 10 | 25 | 0.71 |
| ケース 2 : 100°C 照射 | 35 | 4 | 31 | 0.89 |
| ケース 3 : 100°C 無照射 | 35 | 27 | 8 | 0.23 |

ケース 1 : 図 32.1.1、ケース 2 : 図 32.4.1、ケース 3 : 図 33.1.1

- 2) ケース 1 とケース 2 の結果から温度 100°C による退色への影響分を、ケース 2 とケース 3 の結果から照射による退色の促進効果を求める。単純には 100°C 照射では室温照射に比べ 1.25 倍、また照射による退色は無照射時の 3.87 倍となり、温度に比べ照射による効果の方が大きいことがわかった。

3.4 紫外線による退色変化（ガンマ線照射なし）

3.4.1 目的

室内紫外線による退色を調べるために、蛍光灯を紫外線源とする退色試験を実施する。

3.4.2 試験用試料

1) 色と染料種

- ・赤色：商品名 Aluminum Fiery Red ML
(含金属染料と非含金属染料の二種類のアゾ染料の配合物)

2) 酸化アルミニウム被膜厚：3種（5、15、25 μm）

3.4.3 試験条件

- 1) 線量率 (kGy/h) : ガンマ線照射は無し
- 2) 紫外線源 : パルックボール (EFD14ED) × 6 灯
- 3) 雰囲気 : 大気、室温
- 4) 試料の履歴と試験数
 - ・履歴 : 膜厚試験用として作製
 - ・試験数 : 各膜厚 1 試料／1 試験回 × 1 回

3.4.4 測定項目

- 1) 色相 (() 内はマンセル色立体上の座標軸を示す。図 1.3 参照)
 - ・赤色試料 : +a (赤) ~ -a (緑) 軸上
- 2) 明度
 - ・-100 ~ 0 ~ +100

3.4.5 試験結果と考察

- 1) 試験に使用したランプのスペクトルを図 34.1 に示す。横軸は波長、縦軸は強度で単位は カウント／μW/cm² である。本ランプの場合、波

長のピークは 310、360、410、440、490、550、580、610nm にあり、近紫外線が主な成分となっている。

- 2) 色相は曝露時間の増加に伴い、a 軸上をプラスからマイナス方向へと規則的に退色するが、膜厚 25 μm の場合、曝露後 5,000 時間まではわずかに濃くなるような傾向を示す（図 34.1.1）。
- 3) 明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる。膜厚 25 μm の場合、明度は色相の場合とは異なり、曝露開始後から次第に高くなる。（図 34.1.2）。

3.4.6 まとめ

- 1) 退色は紫外線照射（曝露）直後から進行し、膜厚が薄いほどその影響は大きい。これは照射時の試料表面照度が、通常の室内照度の約 9 倍にも相当する極めて強い光源で照射したことによると考えられる*。

*紫外線源として試料の左右にそれぞれ 3 個のランプを配置した。ランプ 1 個の出力は白熱灯換算で 60W（総ワット数：360W）に相当し、照射時の試料表面の照度は約 5,500lx である。

- 2) 膜厚 5 μm の試料の場合、前述の光源による 2,500 時間曝露後の退色の減少分は色相値で 5 であるが、これは通常の室内光源では 22,500 時間曝露後（約 2 年半）の値に等しい。従って、仮に試料を数日間室内照明下に放置・保管していたとしてもそれによる退色への影響は無視できると考えられる。

3.5 染料種の違いによる退色変化

3.5.1 目 的

3.1 節から 3.4 節までの試験用試料に使用した赤色染料の種類（商品名）は Aluminum Fiery Red ML である。本試験では、Aluminum Fiery Red ML 以外の 3 種の赤色アゾ系染料の退色変化を測定し、カラー線量計としてより最適な赤色染料を選択する。

3.5.2 試験用試料

1) 色と染料種

- ・赤色：商品名 Tac Red-GD (略称 101)
- Tac Red-BLH (略称 102)
- Tac Fiery Red-GBM (略称 105)

(含金属染料と非含金属染料の二種類のアゾ系染料の配合物)

2) 酸化アルミニウム被膜厚 : 各色 3 種 (5、15、25 μm)

3.5.3 試験条件

1) 線量率 (kGy/h) : 0.1、1.0、10

2) 露囲気 : 大気、室温

3) 試料の履歴と試験数

- ・履歴 : 染料種の違いによる退色変化試験用として作製
- ・試験数

| | | | |
|-----------|-------|------------|-------|
| 0.1 kGy/h | : 各膜厚 | 3 試料／1 試験回 | × 1 回 |
|-----------|-------|------------|-------|

| | | | |
|-----------|-------|------------|-------|
| 1.0 kGy/h | : 各膜厚 | 2 試料／1 試験回 | × 2 回 |
|-----------|-------|------------|-------|

| | | | |
|----------|-------|------------|-------|
| 10 kGy/h | : 各膜厚 | 2 試料／1 試験回 | × 1 回 |
|----------|-------|------------|-------|

| | | | |
|--|-------|------------|-------|
| | : 各膜厚 | 3 試料／1 試験回 | × 1 回 |
|--|-------|------------|-------|

3.5.4 測定項目

1) 色相 (() 内はマンセル色立体上の座標軸を示す。図 1.3 参照)

- ・赤色試料 : +a (赤) ~ -a (緑) 軸上

2) 明度

- ・-100 ~ 0 ~ +100

3.5.5 試験結果と考察

1) 線量率 : 0.1 kGy/h の場合

- ・色相は照射量の増加に伴い、a 軸上をプラスからマイナス方向へとほぼ規則的に退色する (図 35.1.1、図 35.2.1、図 35.3.1)。

- ・退色の進行は、101 と 102 では膜厚の違いにかかわらずほぼ同じ。105 は 101、102 に比べすべての膜厚において遅く、この傾向は膜厚 25 μm に比較的明確に現れる。具体的には、

膜厚 5、15 μm の場合 : 照射量 1.5 MGy までは 105 の進行は遅いがそれ以降は 101、102 と同一線上で変化する。

膜厚 25 μm の場合 : 照射量 2 MGy 以降も 105 の進行は 101、102 に比べ遅い。

- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる。しかしながら色相変化に比べ不規則な変化を示す (図 35.1.2、図 35.2.2、図 35.3.2)。

- ・染料種の違いは、明度変化より色相変化の方に明確に現れる。101 と

102 ではさしたる違いは見られない。105 は今回試験した照射量範囲（0～2.7 MGy）において、すべての膜厚試料共 101、102 に比べ感度が高い（退色勾配が明確である）といえるが、膜厚 25 μm の場合、照射開始から 0.5 MGy の範囲では 101 に比べ感度は鈍る。

2) 線量率 : 1.0 kGy/h の場合

- ・色相は照射量の増加に伴い、a 軸上をプラスからマイナス方向へとほぼ規則的に退色する（図 35.4.1、図 35.5.1、図 35.6.1）。
- ・膜厚 5 μm の結果は、線量率 1.0 kGy/h の場合と同様の傾向を示すが、15、25 μm では染料種間の違いが現れる。具体的には、
 - 膜厚 5 μm の場合：105 の退色は、照射量 3 MGy までは急激に進行するが、それ以降は 101、102 と同一線上で変化する。
 - 膜厚 15 μm の場合：退色は、照射初期から 3 種間に違いが現れる。
退色の進行の早い順から、102、105、101。
 - 膜厚 25 μm の場合：退色は、照射初期から 3 種間に違いが現れる。
退色の進行の早い順から、102、101、105 となっている。
- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる。しかしながら色相変化に比べ不規則な変化を示す（図 35.4.2、図 35.5.2、図 35.6.2）。
- ・線量率 0.1 kGy/h とは異なり、いづれの膜厚においても色相の変化を反映した傾向を示す。
- ・染料種の違いは、明度変化より色相変化の方に明確に現れる。105 は今回試験した照射量範囲（0～11 MGy）において、すべての膜厚試料共 101、102 に比べ比較的感度が高い（退色勾配が明確である）といえるが、膜厚 25 μm の場合、照射開始から 3 MGy の範囲では 101、102 に比べ感度は鈍る。

3) 線量率 : 10 kGy/h の場合

- ・色相は照射量の増加に伴い、a 軸上をプラスからマイナス方向へとほぼ規則的に退色する（図 35.7.1、図 35.8.1、図 35.9.1）。
- ・すべての膜厚において、退色の進行は 0.1 kGy/h、1.0 kGy/h での照射に比べ早くなる。具体的には、
 - 膜厚 5 μm の場合：105 の退色は、5 MGy までは急激に進行するが、それ以降は 101、102 とほぼ同一線上での変化となる。
 - 膜厚 15 μm の場合：退色は、照射初期から 3 種間に違いが現れる。
進行の早い順から、102、105、101。
 - 膜厚 25 μm の場合：退色は、照射初期から 3 種間に違いが現れる。

進行の早い順から、102、101、105 となっている。

- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 35.7.2、図 35.8.2、図 35.9.2）。
- いづれの膜厚においても色相の変化を反映した傾向を示す。退色は、膜厚 5、 $10\mu\text{m}$ の場合は 3 種共にほぼ同一線上にあり、 $25\mu\text{m}$ の場合は染料種間の違いが比較的明確に現れている。
- ・染料種の違いは、明度変化より色相変化の方に明確に現れる。
- 膜厚 5、 $15\mu\text{m}$ の場合、105 の退色感度は 5 MGy までは他に比べ高い結果となっている。

3.5.6 まとめ

- 1) 染料種による退色変化の違いは、明度変化より色相変化に明確に現れる。
- 2) 退色変化は、膜厚、照射線量率によって異なるが、以下のような傾向を示す。
 - ・膜厚が厚くなるにつれて染料種間の違いが明確になる。
 - ・照射線量率が高くなるにつれて染料種間の違いが明確に現れるが、膜厚の違いに見られるほど顕著ではない。
- 3) 染料種間の違いは以下の通り。
 - ・101 と 102 では退色傾向に大きな違いは見られないが、102の方が 101 に比べいくらか退色しやすい。
 - ・105 は他の 2 種に比べ初期の色相値が高く、照射初期の退色が激しい。この傾向は膜厚 5、 $15\mu\text{m}$ に顕著に現れる。
- 4) 以上の結果、今回試験した 3 種の染料（101、102、105）のうち、105 が他に比べて線量率に対する感度が高く測定範囲も広いことがわかった。この結果を基に、染料種 105 の膜厚 $25\mu\text{m}$ 試料について、大気、室温、照射線量率 10 kGy/h の条件下で最大 70 MGy まで照射し色相と明度を測定した。図 35.1、図 35.2 にそれぞれの結果を示す。また、図 35.3 には 5 MGy 毎の照射後試料の外観写真を示す。
- 外観写真上での目視による測定限界は 40 MGy と判断されるが、分光式色差計では、図 35.1、図 35.2 からわかるように 5 MGy 以降 70 MGy までそれぞれ色相値、明度値として測定されていることがわかる。
- 5) 一方、3.1 節から 3.4 節までの試験用試料に使用した染料種：Aluminum Fiery Red ML、膜厚： 25 、 $30\mu\text{m}$ 試料の測定限界は約 25 MGy（照射線量率 10 kGy/h）程度と評価されることから、染料種 105 の膜厚 $25\mu\text{m}$ 試料は高線量率下での高照射量測定に適していると考えられる。しかし

ながら、同条件下での低照射量測定には染料種 : Aluminum Fiery Red ML、膜厚 : 25、30 μm 試料の方が染料種 105 の膜厚 25 μm 試料に比べ高精度の測定ができる。

3.6 染料種 105 試験用試料の高温照射による退色変化への影響

3.6.1 目的

3.5 節での試験の結果、Tac Fiery Red-GBM（通称 105）が Tac Red-GD（通称 101）、Tac Red-BLH（通称 102）に比べ大気、室温中での測定感度が高く、測定範囲も広いことがわかった。この結果を基に、本試験では、保守装置使用時の想定温度範囲（50～100°C）から 50、75、100°C の 3 点を選び、高温環境での照射が 105 試料の退色に与える影響について膜厚毎（5、15、25 μm ）に調べる。

3.6.2 試験用試料

1) 色と染料種

- ・赤色 : Tac Fiery Red-GBM （通称 105）
(含金属染料と非含金属染料の二種類のアゾ系染料の配合物)

2) 酸化アルミニウム被膜厚 : 3 種（5、15、25 μm ）

3.6.3 試験条件

1) 線量率 (kGy/h) : 1.0

2) 霧囲気 : 大気、室温、50°C、75°C、100°C

3) 試料の履歴と試験数

- ・履歴 : 染料種の違いによる試験用として作製
- ・試験数

室温／1.0 kGy/h : 染料種の違いによる試験時のデータによる

50°C／1.0 kGy/h : 各膜厚 1 試料／1 試験回 × 1 回

75°C／1.0 kGy/h : 各膜厚 1 試料／1 試験回 × 1 回

100°C／1.0 kGy/h : 各膜厚 1 試料／1 試験回 × 1 回

3.6.4 測定項目

1) 色相 (() 内はマンセル色立体上の座標軸を示す。図 1.3 参照)

- ・赤色試料 : +a (赤) ~ -a (緑) 軸上

2) 明度

・-100 ~ 0 ~ +100

3.6.5 試験結果と考察

1) 室温／1.0 kGy/h の場合

- ・色相は照射量の増加に伴い、a軸上をプラスからマイナス方向へほぼ規則的に退色する（図 36.1.1、図 36.1.2、図 36.1.3）。
- ・膜厚の薄い試料は厚い試料に比べ退色の進行は早い。5 μm と 15 μm とではさほどの違いは見られないが、これらの試料と 25 μm の試料間には明確な違いが見られる。しかしながら、照射量 2 MGyあたりまでの感度は他に比べ低い。
退色の進行は早い方から順に 5 μm、15 μm、25 μm となっている。
- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 36.1.1、図 36.1.2、図 36.1.3）。
- 明度上ででの退色の進行順は色相上の退色と同順である。

2) 50°C／1.0 kGy/h の場合

- ・色相は照射量の増加に伴い、a軸上をプラスからマイナス方向へほぼ規則的に退色する（図 36.2.1、図 36.2.2、図 36.2.3）。
- 退色の進行は早い方から順に 5 μm、15 μm、25 μm となっている。
- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 36.2.1、図 36.2.2、図 36.2.3）。
- 明度上ででの退色の進行順は色相上の退色と同順である。
- ・3.2 節で試験した染料種 Aluminum Fiery Red ML の結果とは異なり、室温照射時に比べ退色の進行が遅い結果となったが、この原因については不明である。

3) 75°C／1.0 kGy/h の場合

- ・色相は照射量の増加に伴い、a軸上をプラスからマイナス方向へほぼ規則的に退色する（図 36.3.1、図 36.3.2、図 36.3.3）。
- 退色の進行は早い方から順に 5 μm、15 μm、25 μm となっている。
- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 36.3.1、図 36.3.2、図 36.3.3）。
- 明度上ででの退色の進行順は色相上の退色と同順である。
- ・50°C照射時の結果に比べ、すべての膜厚においてわずかではあるが退色の進行は早い。しかしながら、50°Cでの結果と同様、室温照射時に比べ退色の進行が遅い結果となっている。

4) 100°C / 1.0 kGy/h の場合

- ・色相は照射量の増加に伴い、a 軸上をプラスからマイナス方向へとほぼ規則的に退色する（図 36.4.1、図 36.4.2、図 36.4.3）。
- 退色の進行は、膜厚 5 μm と 15 μm では照射量 3 MGy までは 5 μm の方がわずかに早いが、3 MGy 以降は違いは見られない。15 μm と 25 μm では明らかに 25 μm の方が進行は遅い。
- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 36.4.1、図 36.4.2、図 36.4.3）。
- 明度変化は色相変化の結果を反映しているが、膜厚 15 μm と 25 μm 間には色相変化ほどの違いは見られない。
- ・膜厚 5 μm と 15 μm の場合、75°C の結果と大差はない。25 μm の場合は、75°C の結果に比べ 3 MGy 以降進行が早くなる。

3.6.6 まとめ

- 1) 色相値による退色変化の温度影響の結果を膜厚毎に下表にまとめる。

表 36.1 染料種 Tac Fiery Red-GBM (通称 105) 試料の色相値変化の温度影響

・膜厚 : 5 μm

| 照射温度 (°C) | 照射量 (MGy) | | | |
|--------------|-----------|----|----|----|
| | 0 | 3 | 6 | 9 |
| R.T. | 40 | 12 | 4 | 1 |
| 50 | 40 | 29 | 21 | 15 |
| 75 | 40 | 25 | 18 | 12 |
| 100 | 40 | 22 | 13 | — |

・膜厚 : 15 μm

| 照射温度 (°C) | 照射量 (MGy) | | | |
|--------------|-----------|----|----|----|
| | 0 | 3 | 6 | 9 |
| R.T. | 41 | 18 | 8 | 3 |
| 50 | 42 | 34 | 25 | 18 |
| 75 | 42 | 30 | 21 | 15 |
| 100 | 41 | 25 | 14 | — |

・膜厚 : 25 μm

| 照射温度 (°C) | 照射量 (MGy) | | | |
|--------------|-----------|----|----|----|
| | 0 | 3 | 6 | 9 |
| R.T. | 40 | 35 | 18 | 10 |
| 50 | 40 | 39 | 34 | 29 |
| 75 | 40 | 37 | 30 | 20 |
| 100 | 40 | 33 | 18 | — |

2) いずれの膜厚においても、室温照射が高温照射に比べ退色の進行が極度に早い結果となっている。しかしながら、50°C、75°C、100°C間の比較では、温度が高くなるにつれて退色が促進される傾向がある。具体的には、

膜厚 5 μm の場合：50°C、75°C間では色相値で 3～4、75°C～100°C間で 3～5。

膜厚 15 μm の場合：50°C、75°C間では 3～4、75°C～100°C間で 5～7。100°C照射では 3 MGy 以降、退色の進行が早くなる。

膜厚 25 μm の場合：50°C、75°C間では 2～9、75°C～100°C間で 4～12。75°C照射では 6 MGy 以降、100°C照射では 3 MGy 以降退色が促進されている。

3) 室温照射の方が高温照射に比べ退色の進行が早くなる原因については特定できないが、以下の 3 点が推測される。

- ・染料種 Tac Fiery Red-GBM（通称 105）の特性。
- ・使用した染料は基本的にアゾ染料であるが、種類とメーカーが異なる。
- ・試験用試料の製作ロットが異なる（メーカーは同じ）。

いずれにしろ原因の特定については、同一ロットによる試験用試料を準備し再度試験を実施、再現性等について確認する必要がある。

3.7 染料種 105 試験用試料の高温、無照射時の退色変化

3.7.1 目 的

3.6 節では高温下での照射が退色に与える影響について試験した。本試験ではガンマ線照射なしで試験用試料を大気、100°C下に曝露した場合の退色を測定し、高温が退色にあたえる影響について調べる。

3.7.2 試験用試料

1) 色と染料種

- ・赤色：Tac Fiery Red-GBM （通称 105）
(含金属染料と非含金属染料の二種類のアゾ系染料の配合物)

2) 酸化アルミニウム被膜厚 : 3 種 (5、15、25 μm)

3.7.3 試験条件

- 1) 線量率 (kGy/h) : ガンマ線照射は無し
- 2) 雰囲気 : 大気、100°C

3) 試料の履歴と試験数

- ・履歴 : 染料種の違いによる試験用として作製
- ・試験数 : 各膜厚 1試料／1試験回 × 1回

3.7.4 測定項目

1) 色相

- ・赤色試料 : +a (赤) ~ -a (緑) 軸上

2) 明度

- ・-100 ~ 0 ~ +100

3.7.5 試験結果と考察

- 1) 曝露時間の進行に伴い色相変化は膜厚毎に異なる。5 μm の場合、a軸上をプラスからマイナス方向へとわずかに退色するが、15 μm 、25 μm の場合はa軸上を濃くなる方向へと変化する(図37.1.1)。
- 2) 明度は、いずれの膜厚においても曝露時間の増加に伴い高くなる。しかしながら、この結果は膜厚 15 μm 、25 μm の色相変化の結果を反映していない(図37.1.2)。
- 3) 染色処理後の試料の色相値は、染料は膜厚の 1/2 まで浸透すると云われていることから考えると基本的に膜厚が厚いほど高くなるはずであり、これまでの測定でもそのような結果を示している(明度値はこれとは反対となる)。しかしながら今回の測定では、照射前の色相値は 5、15、25 μm のいずれの膜厚においてもほぼ同じ値を示した。一方、明度値は膜厚の薄い方から順に高い値を示している。この不整合の原因については不明である。

3.7.6 まとめ

- 1) 本結果と先の高温照射時の結果から、100°C下での照射による退色促進効果について調べる。

下表は、膜厚 5 μm の試料について、100°C、照射線量率 1.0 kGy/h で 6 MGy 照射したときの色相変化と 100°C無照射で 5,000 時間照射したときの色相変化の結果を比較したものである。

なお、5,000 時間は照射線量率 1.0 kGy/h で 5 MGy 照射に要する時間である。

表 37.1 100°C 照射、100°C 無照射時の色相値の比較

(膜厚 : 5 μm、照射線量率 : 1 kGy/h)

| 照射条件 | 照射前 色相値 : H0 | 5 MGy 照射後 または 5,000 時間曝露後 色相値 : H5 | $\Delta H =$ $H0 - H5$ | 退色率 : $\Delta H / H0$ |
|-------------------|--------------------|---|---------------------------|--------------------------|
| ケース 1 : 100°C 照射 | 40 | 13 | 27 | 0.68 |
| ケース 2 : 100°C 無照射 | 42 | 39 | 3 | 0.07 |

ケース 1 : 図 36.4.1、ケース 2 : 図 37.1.1

- 2) ケース 1 とケース 2 の結果から照射による退色の促進効果を求めるとき、照射による退色は無照射時の約 10 倍となり、温度に比べ照射による効果の方が大きいことがわかった。
- これは染料種 Aluminum Fiery Red ML 試料の同様のケースでの 3.8 倍に比べ約 2.6 倍の値であり、この結果、Tac Fiery Red-GBM (通称 105) による試料は熱影響を受けにくいと判断される。

3.8 染料種 105 試験用試料の紫外線による退色変化 (ガンマ線照射なし)

3.8.1 目的

室内紫外線による退色を調べるために、蛍光灯を紫外線源とする退色試験を実施する。

3.8.2 試験用試料

1) 色と染料種

・赤色 : Tac Fiery Red-GBM (通称 105)

(含金属染料と非含金属染料の二種類のアゾ染料の配合物)

2) 酸化アルミニウム被膜厚 : 3 種 (5、15、25 μm)

3.8.3 試験条件

1) 線量率 (kGy/h) : ガンマ線照射は無し

2) 紫外線源 : パルックボール (EFD14ED) × 6 灯

3) 霧囲気 : 大気、室温

4) 試料の履歴と試験数

・履歴 : 膜厚試験用として作製

・試験数 : 各膜厚 1 試料 / 1 試験回 × 1 回

3.8.4 測定項目

- 1) 色相 (()) 内はマンセル色立体上の座標軸を示す。図 1.3 参照)
 - ・赤色試料 : +a (赤) ~ -a (緑) 軸上
- 2) 明度
 - ・ -100 ~ 0 ~ +100

3.8.5 試験結果と考察

- 1) 紫外線源には 3.4 節の試験で使用したランプを使用した。
- 2) 曝露時間の進行に伴い色相変化は膜厚毎に異なる。5 μm の場合、a 軸上をプラスからマイナス方向へと退色するが、15 μm の場合、曝露開始から 3,000 時間近辺までは、わずかにプラス方向へと変化（濃くなる）し、その後わずかではあるがマイナス方向に退色する。25 μm の場合は、曝露開始後 10,000 時間まで、わずかではあるがプラス方向へと変化する（図 38.1.1）。
- 3) 明度は、いずれの膜厚においても曝露時間の増加に伴い高くなる。しかしながら、この結果は膜厚 15 μm 、25 μm の色相変化の結果を反映していない（図 38.1.2）。

本試験では、照射前の色相値は 5、15、25 μm のいずれの膜厚共にほぼ同じ値を示し、その後の変化も退色する試料と増色する試料とに分かれた。一方、明度値は膜厚の薄い方から順に高い値を示し、その後の変化は照射量の増加に伴いいずれの試料とも退色する傾向を示した。この不整合の原因については 3.7 節の試験結果同様不明である。

3.8.6 まとめ

- 1) 色相変化では、膜厚 5 μm の試料が他に比べ退色の程度が大きい結果となっているが、明度変化ではその程度は小さい。
- 2) いずれにしても紫外線照射による退色への影響は膜厚が薄いほど大きい。これは、これまでにも述べてきたように、薄い膜厚の試料ほど初期の色相が薄いことに加え、照射時の試料表面の照度が、通常の室内照度の約 9 倍にも相当する極めて強い光源で照射したことに起因する。
- 3) Aluminum Fiery Red ML との比較では Tac Fiery Red-GBM の方がいずれの膜厚においても紫外線の影響は少ないと云える。

3.9 高線量率対応カラー線量計試験用試料のまとめ

1) 3.1 節から 3.8 節までの試験結果から、

- ・染料の種類 : Tac Fiery Red-GBM
- ・酸化アルミニウム被膜厚 : $25 \mu\text{m}$

の試験用試料が

- ・線量率 : 10 kGy/h
- ・照射量（最大） : 70 MGy

の測定に対応可能なカラー線量計として、他の試験用試料に比べ優れた特性を有していると判断される。

2) 一方、染料種を Aluminum Fiery Red ML とした試験用試料（酸化アルミニウム被膜厚 $25 \mu\text{m}$ ）は、前記試験用試料に比べ測定できる最大照射量は小さいが低照射量測定では感度が高いことがわかった。
目的毎に使い分けることでより効率的な測定が可能と考える。

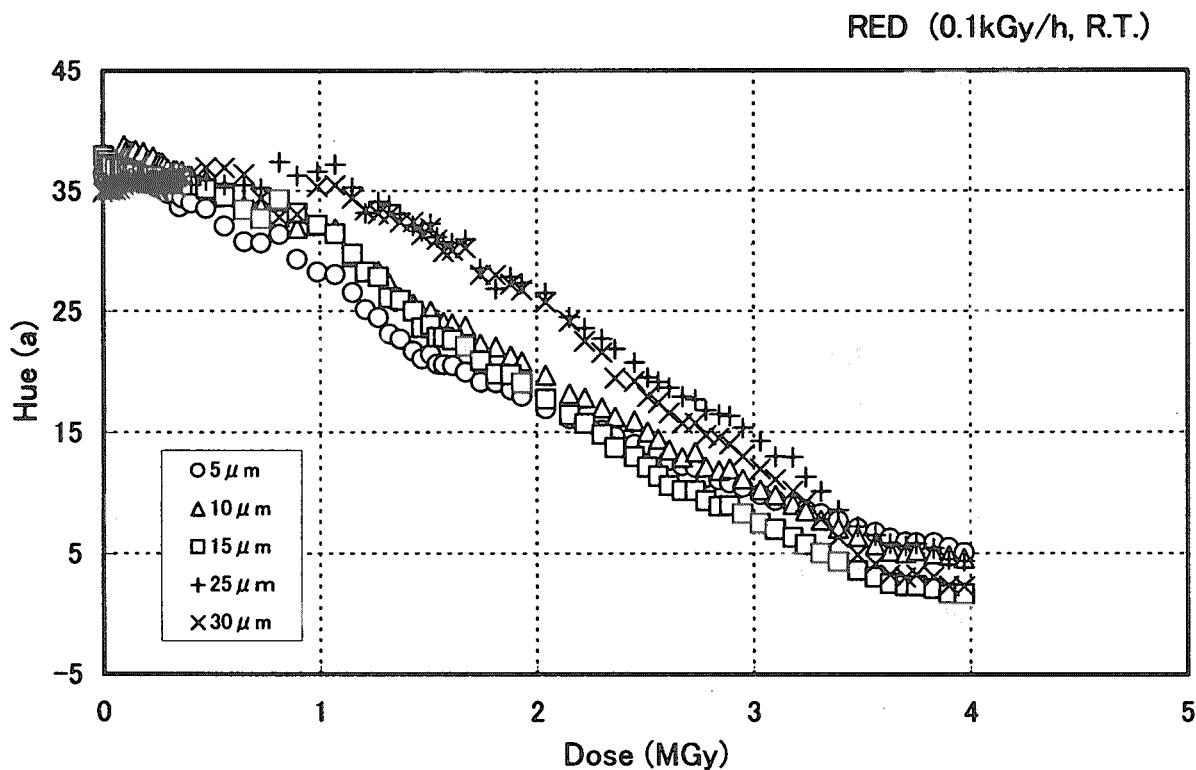


図31.1.1酸化膜厚の異なる5種類の試料の線量率0.1 kGy/h下での退色変化(色相値による)/特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML、膜厚5、10、15、25、30 μm、大気、室温)

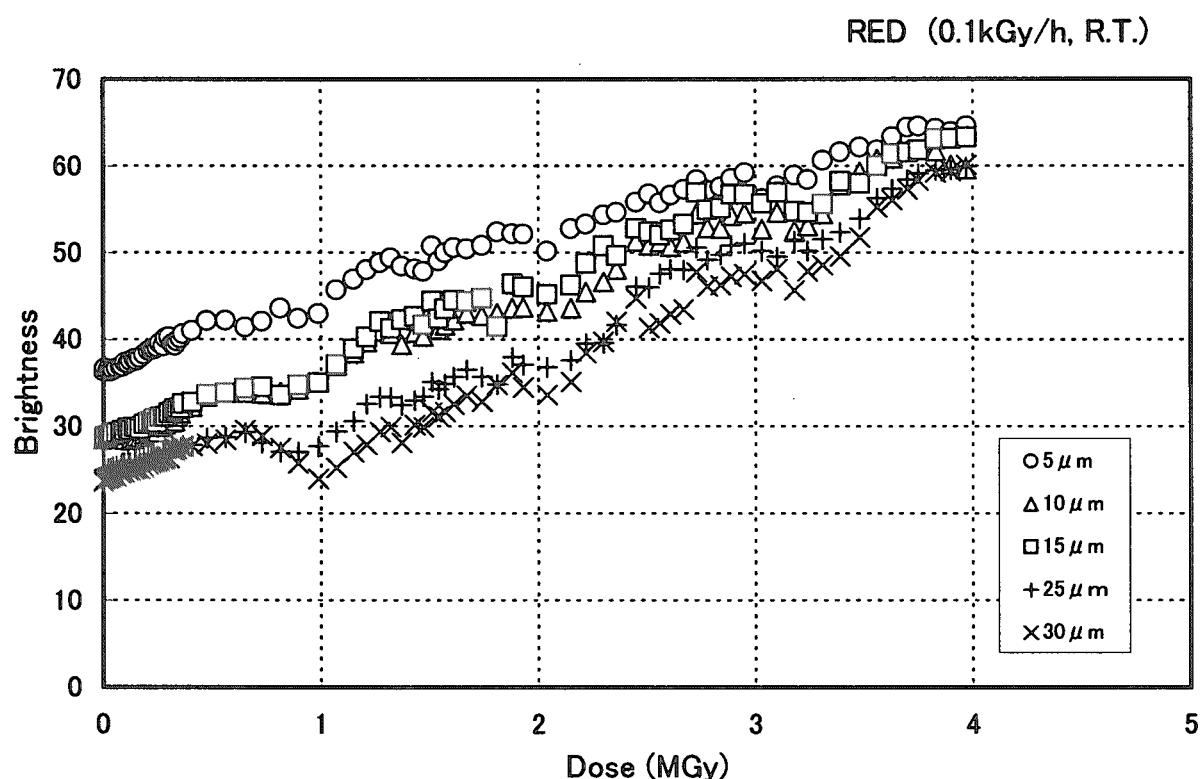


図31.1.2酸化膜厚の異なる5種類の試料の線量率0.1 kGy/h下での退色変化(明度値による)/特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML、膜厚5、10、15、25、30 μm、大気、室温)

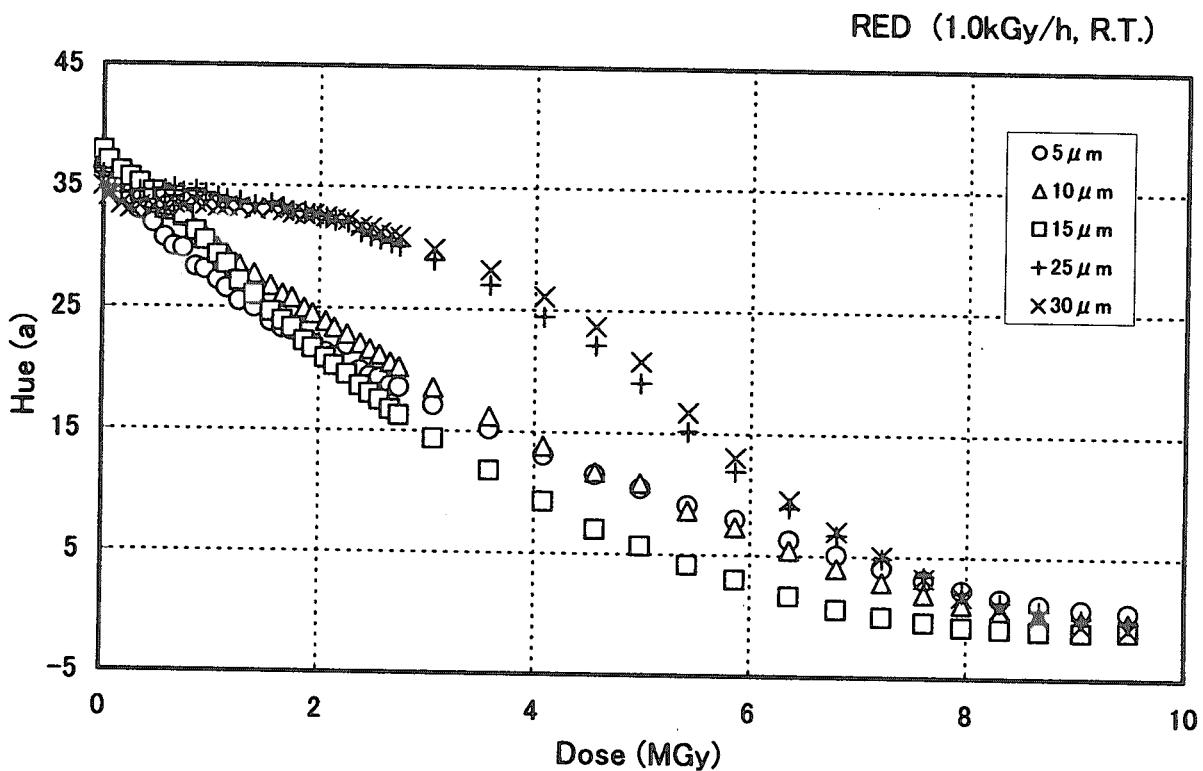


図31.2.1 酸化膜厚の異なる5種類の試料の線量率1.0 kGy/h下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML、膜厚5、10、15、25、30 μm、大気、室温)

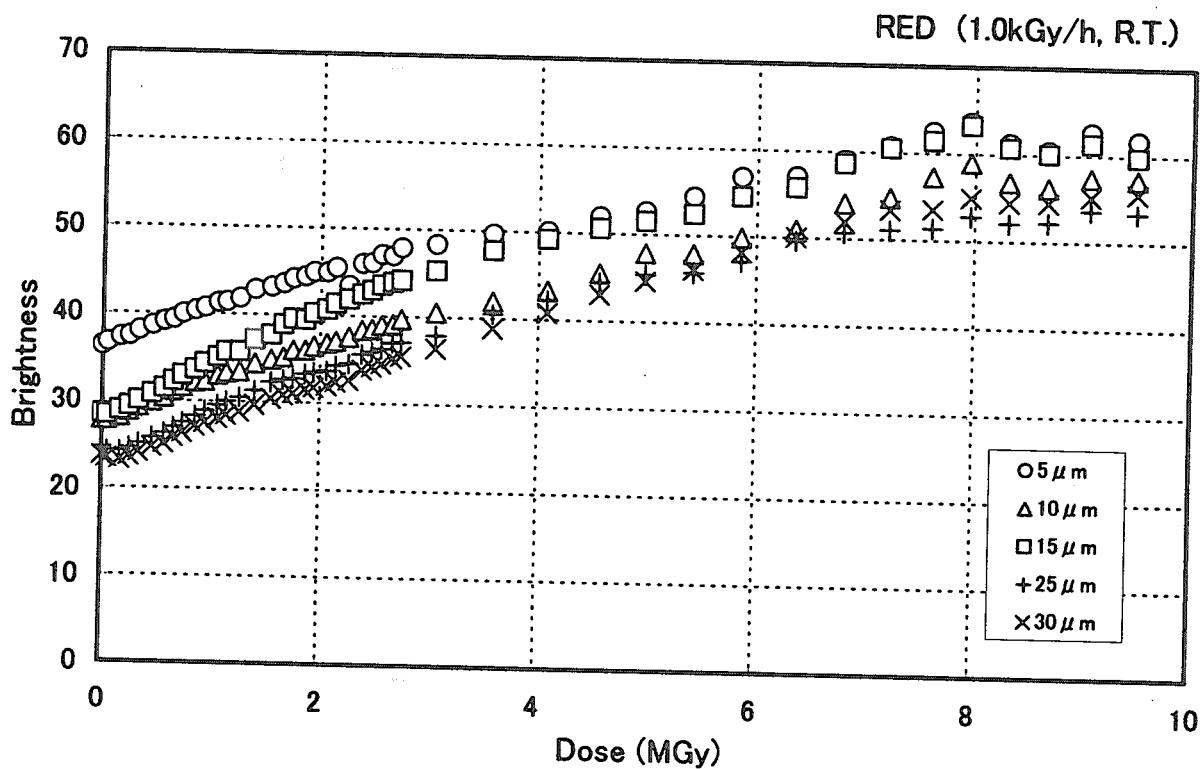


図31.2.2 酸化膜厚の異なる5種類の試料の線量率1.0 kGy/h下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML、膜厚5、10、15、25、30 μm、大気、室温)

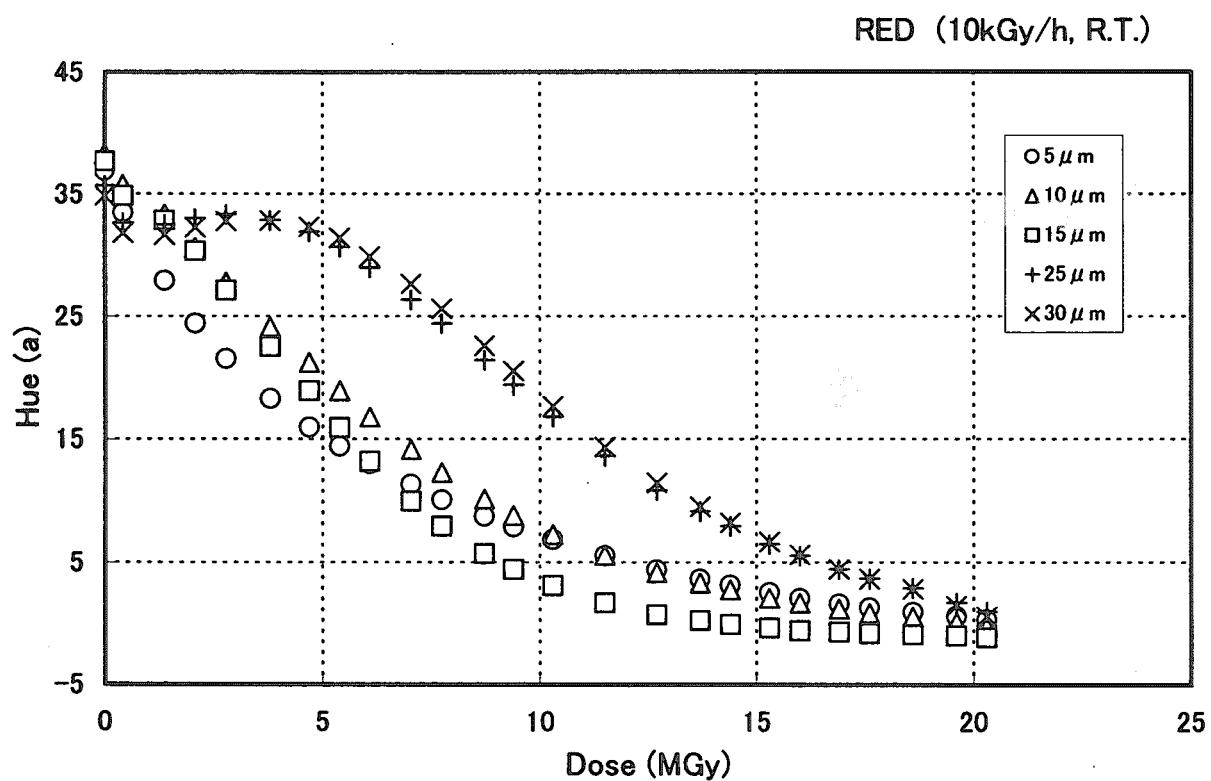


図31.3.1酸化膜厚の異なる5種類の試料の線量率10 kGy/h下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML、膜厚5、10、15、25、30 μm 、大気、室温)

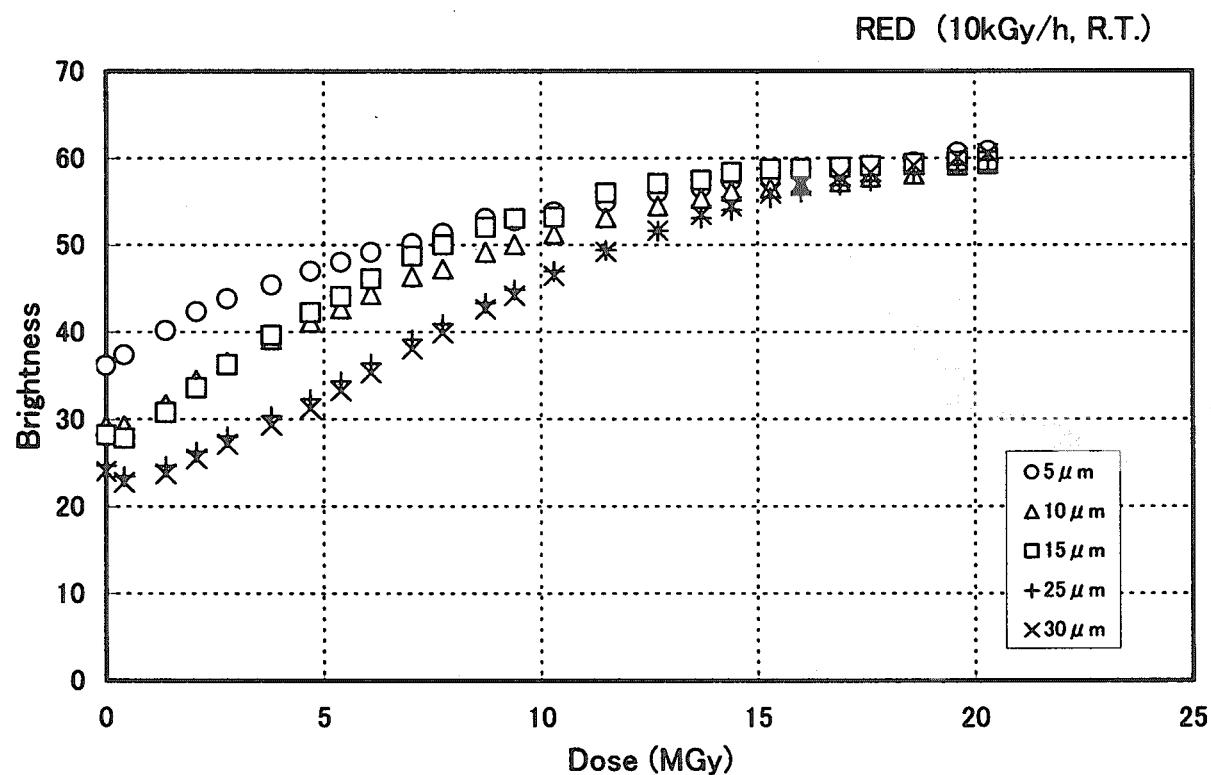


図31.3.2酸化膜厚の異なる5種類の試料の線量率10 kGy/h下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML、膜厚5、10、15、25、30 μm 、大気、室温)

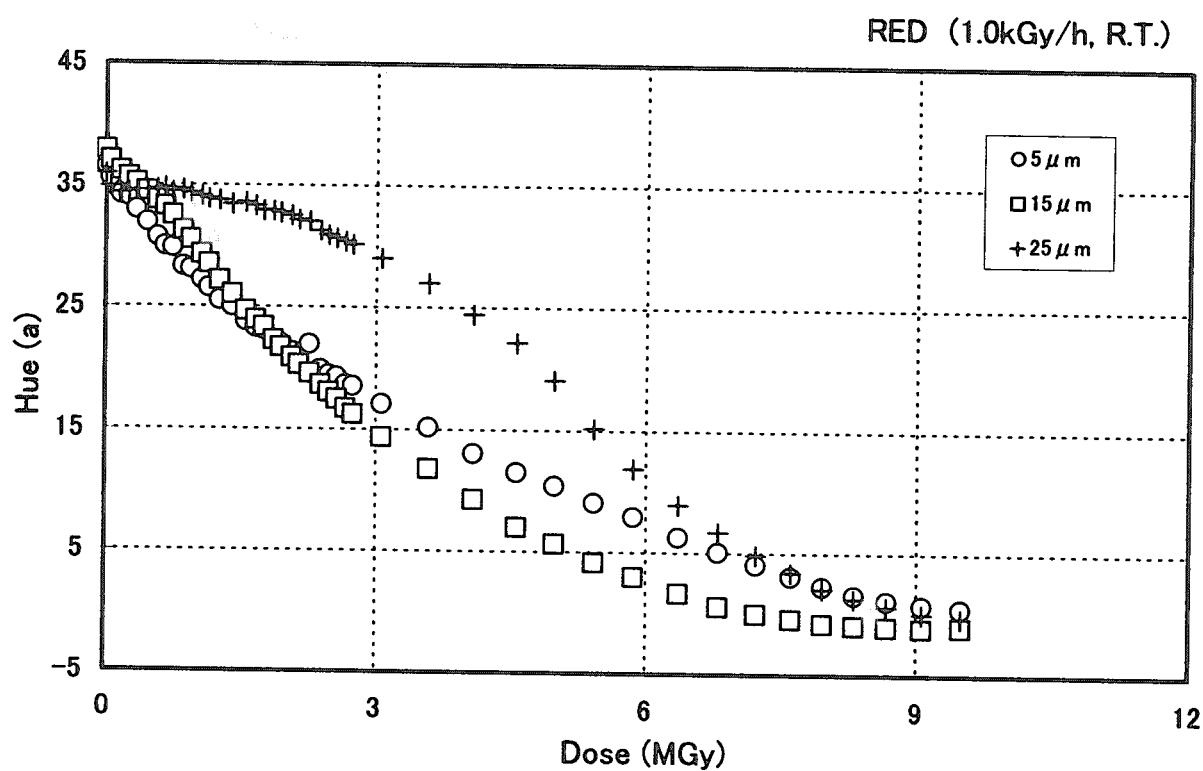


図32.1.1 酸化膜厚5、15、25 μm試料の線量率1.0 kGy/h、大気、室温下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

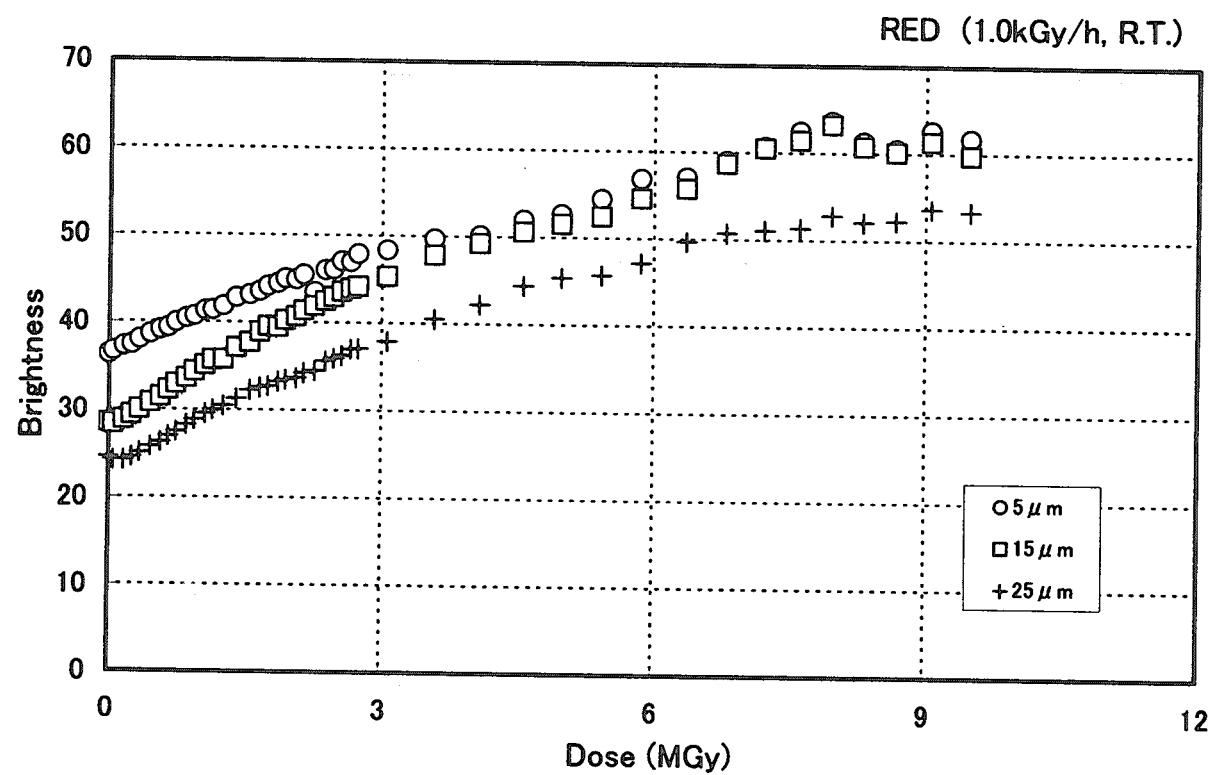


図32.1.2 酸化膜厚5、15、25 μm試料の線量率1.0 kGy/h、大気、室温下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

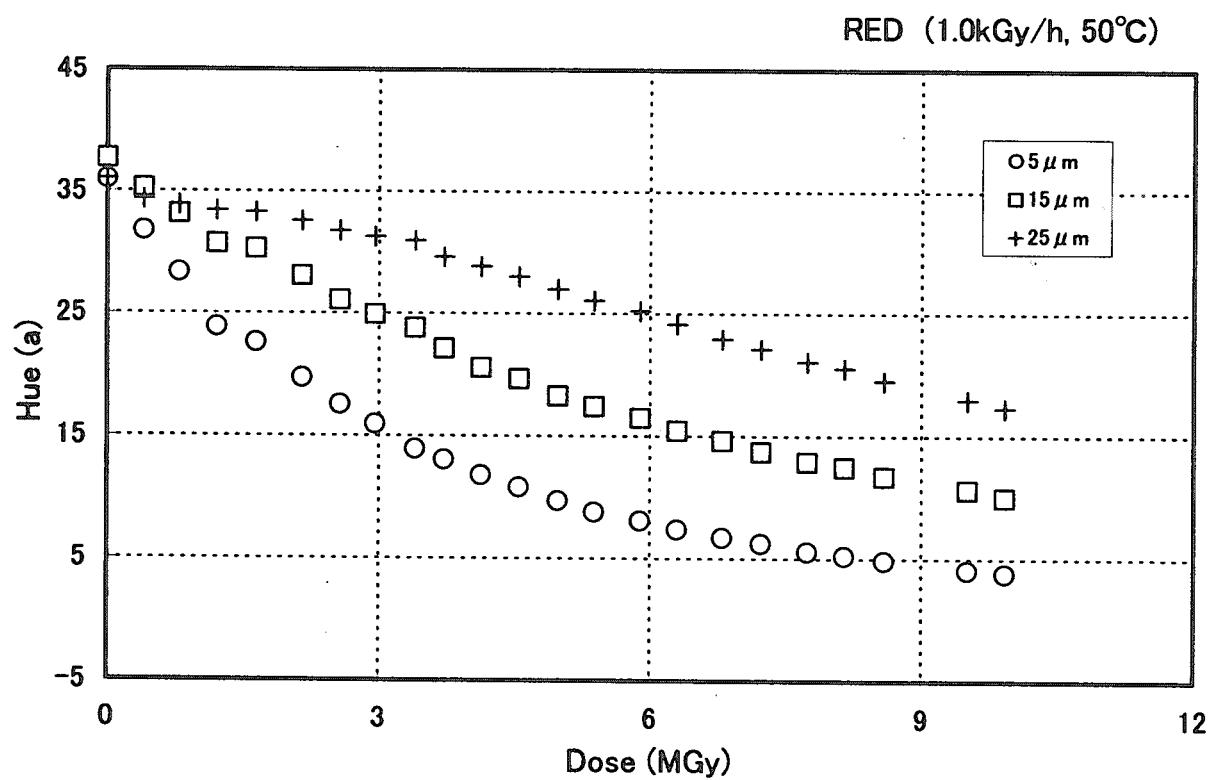


図32.2.1 酸化膜厚5、15、25 μm試料の線量率1.0 kGy/h、大気、50°C下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

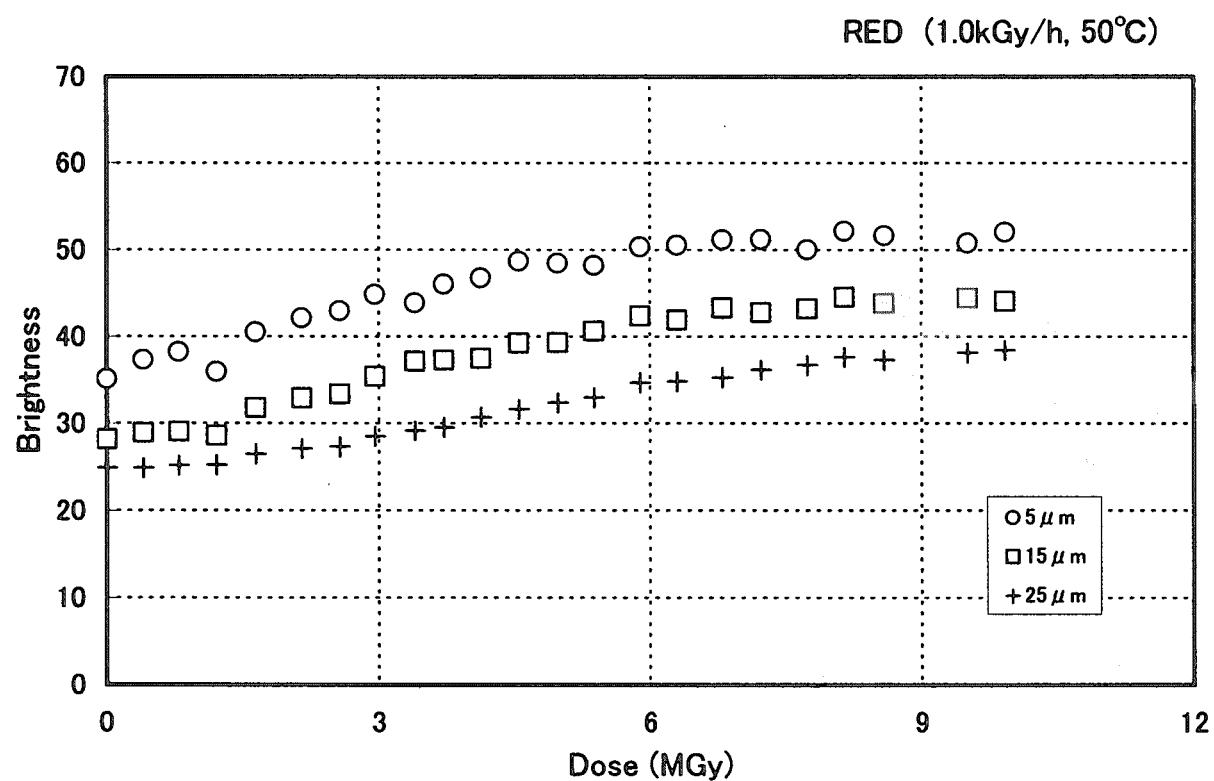


図32.2.2 酸化膜厚5、15、25 μm試料の線量率1.0 kGy/h、大気、50°C下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

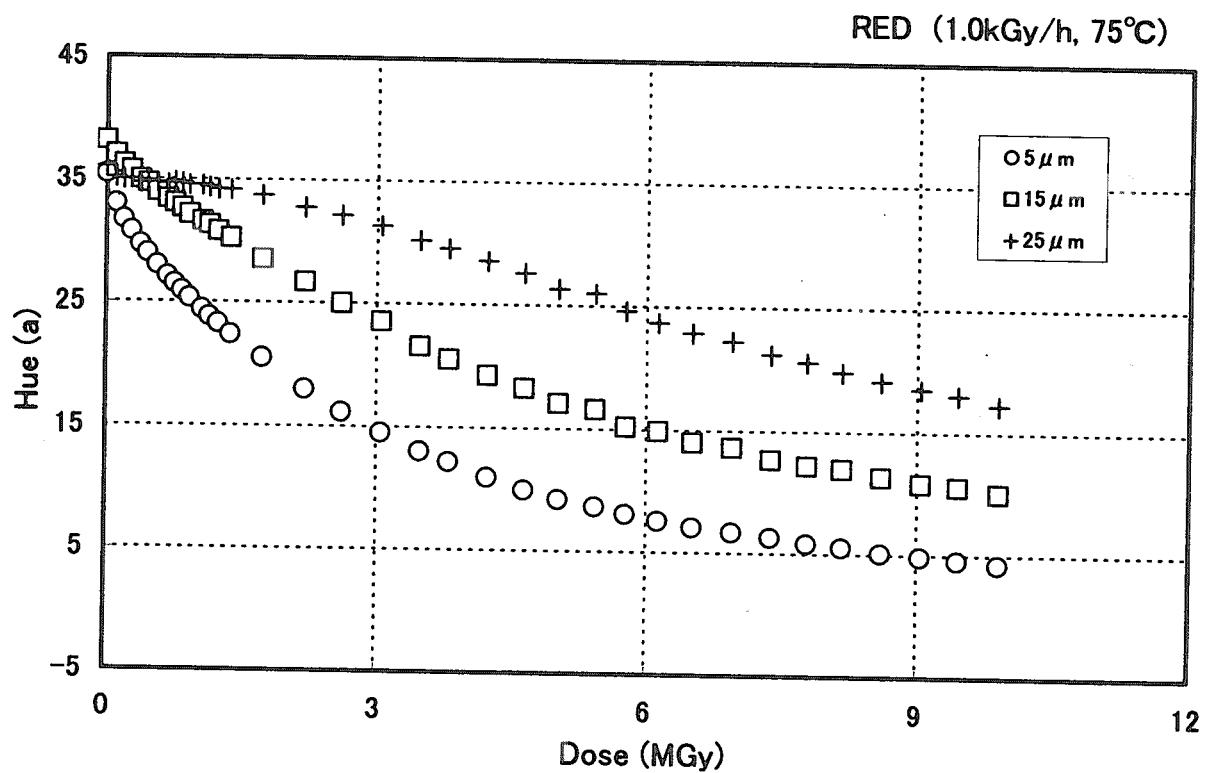


図32.3.1 酸化膜厚5、15、25 μm試料の線量率1.0 kGy/h、大気、75°C下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

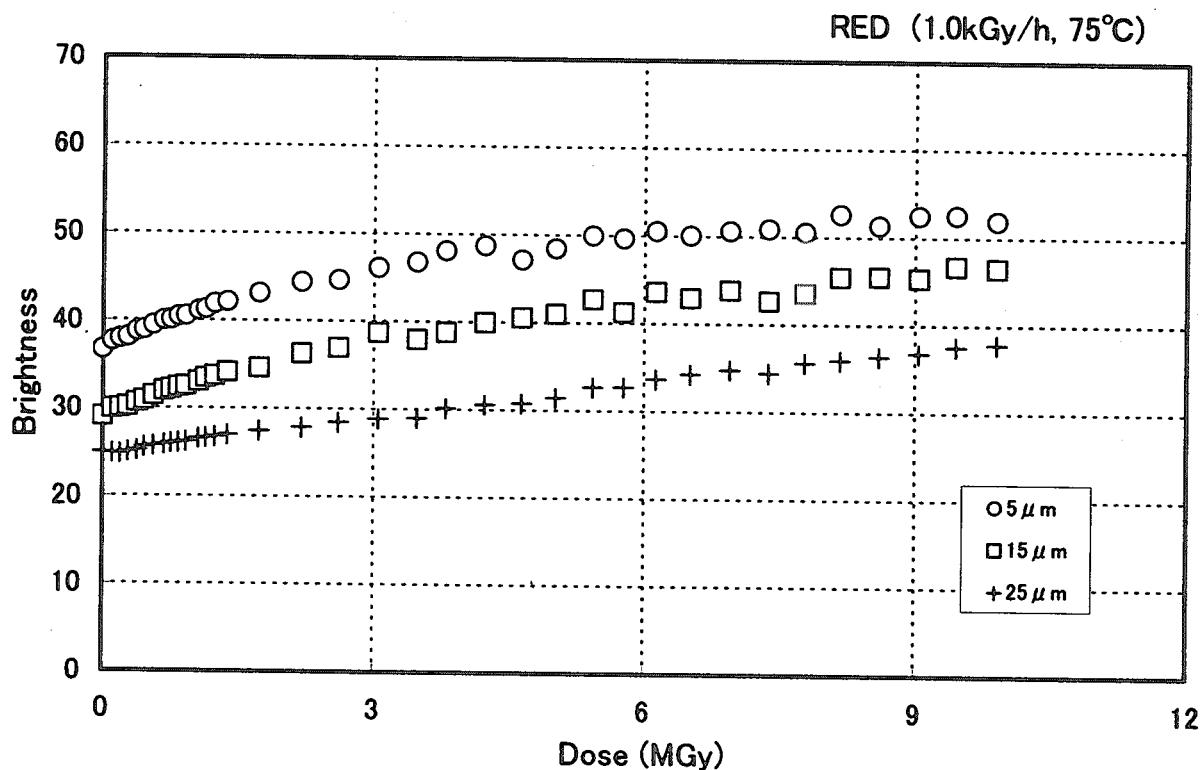


図32.3.2 酸化膜厚5、15、25 μm試料の線量率1.0 kGy/h、大気、75°C下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

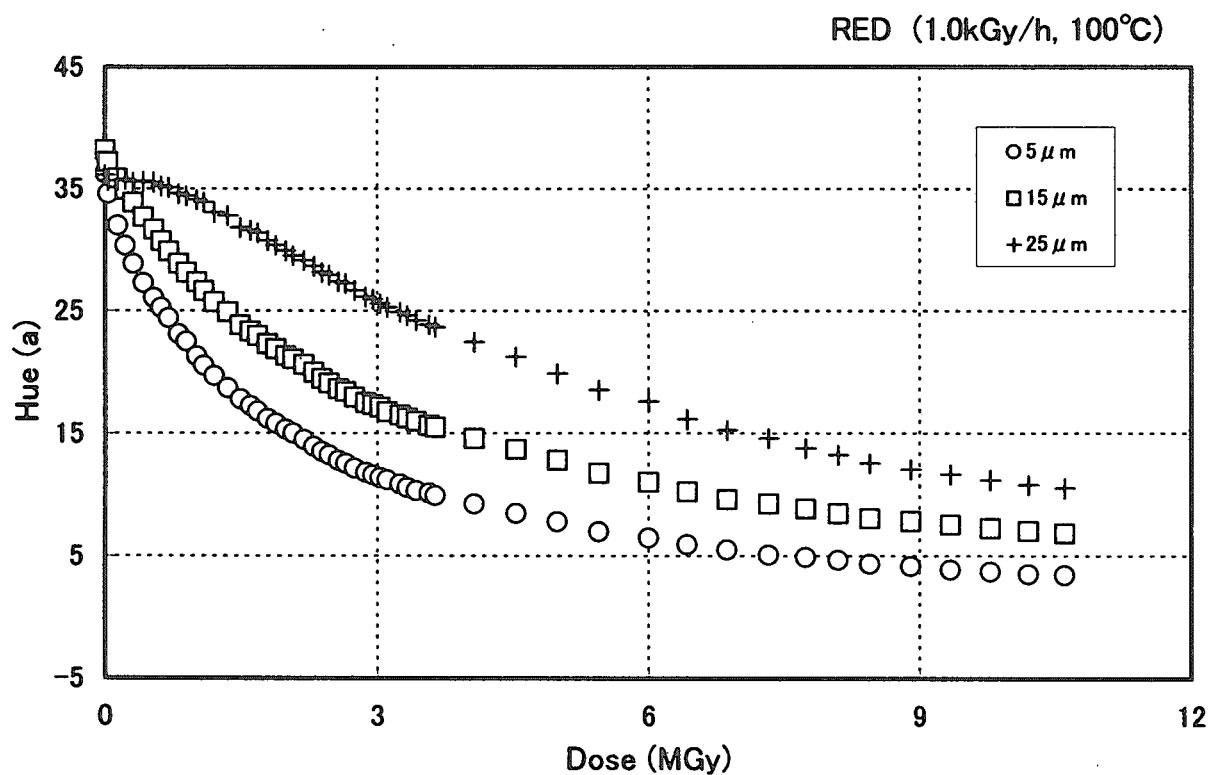


図32.4.1 酸化膜厚5、15、25 μm試料の線量率1.0 kGy/h、大気、100°C下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

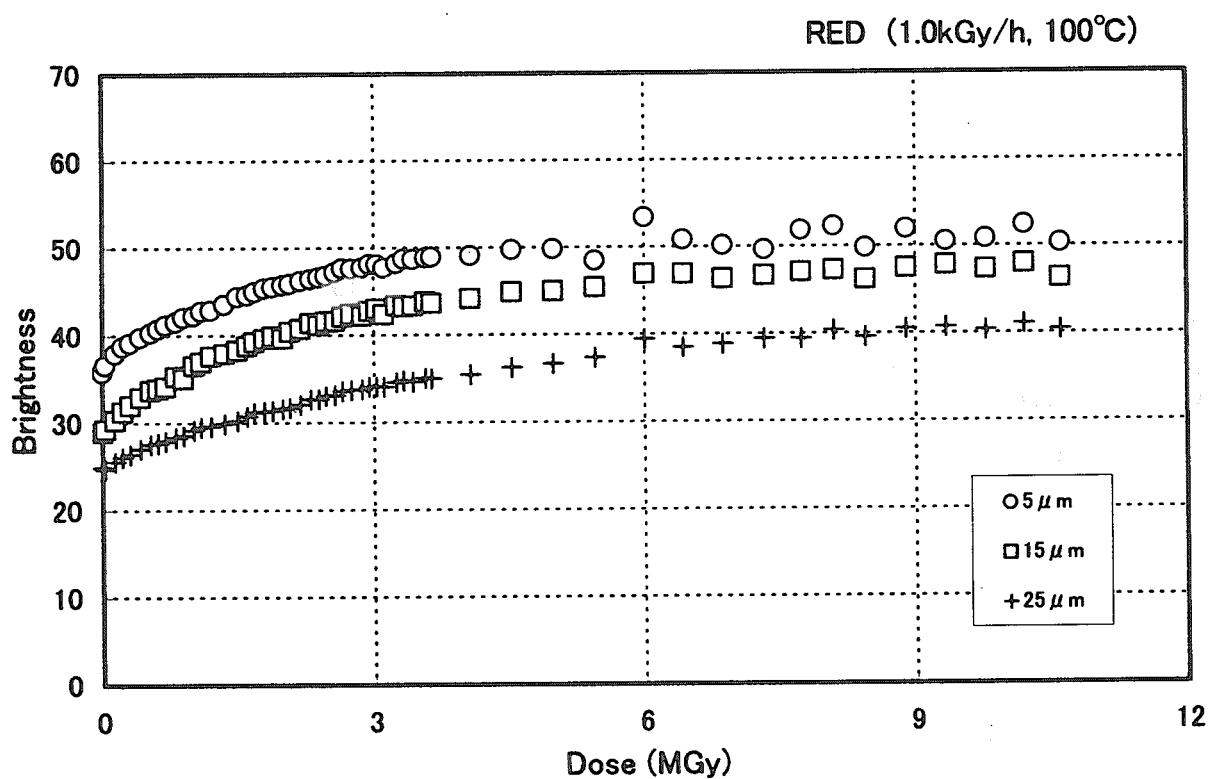


図32.4.2 酸化膜厚5、15、25 μm試料の線量率1.0 kGy/h、大気、100°C下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

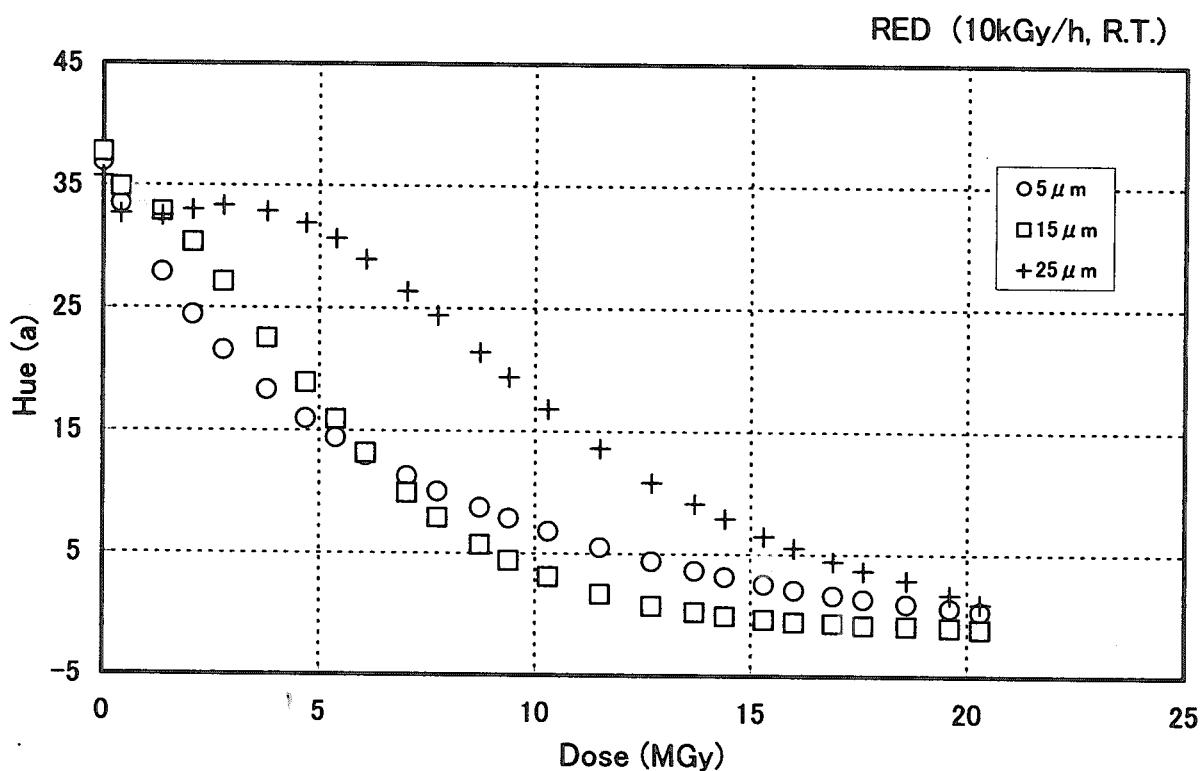


図32.5.1酸化膜厚5、15、25 μm試料の線量率10 kGy/h、大気、室温下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

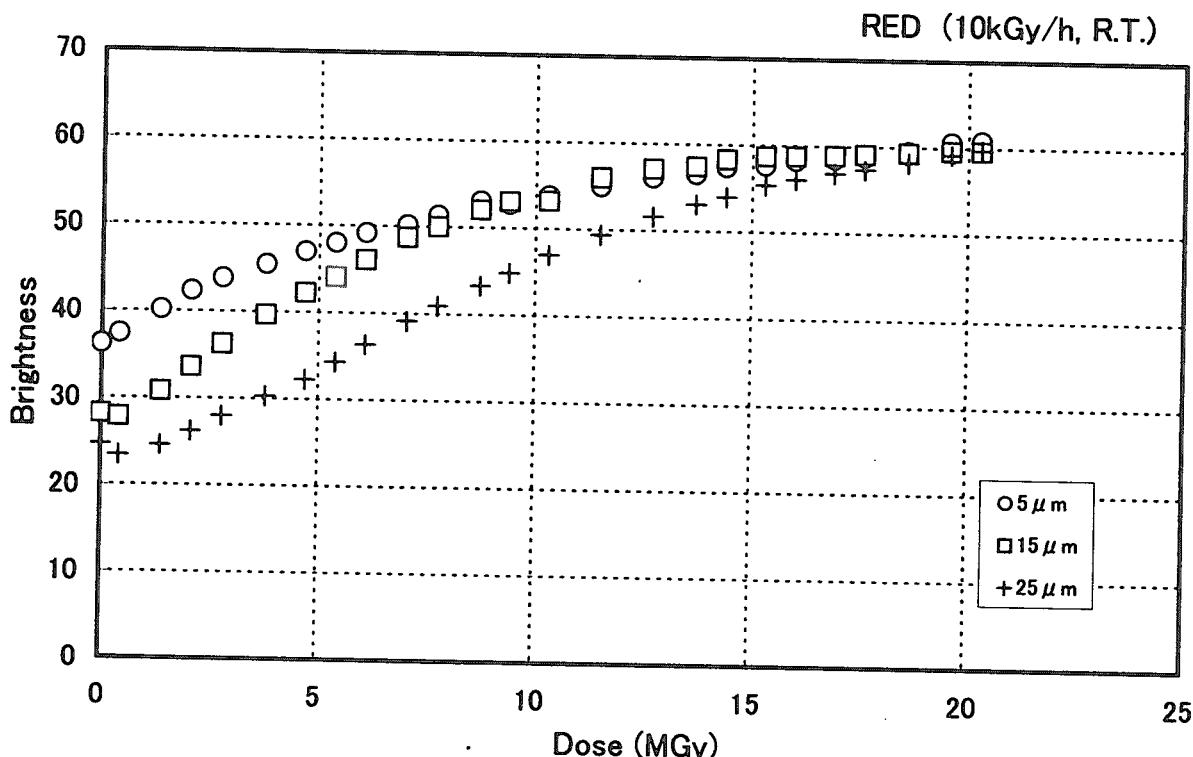


図32.5.2酸化膜厚5、15、25 μm試料の線量率10 kGy/h、大気、室温下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

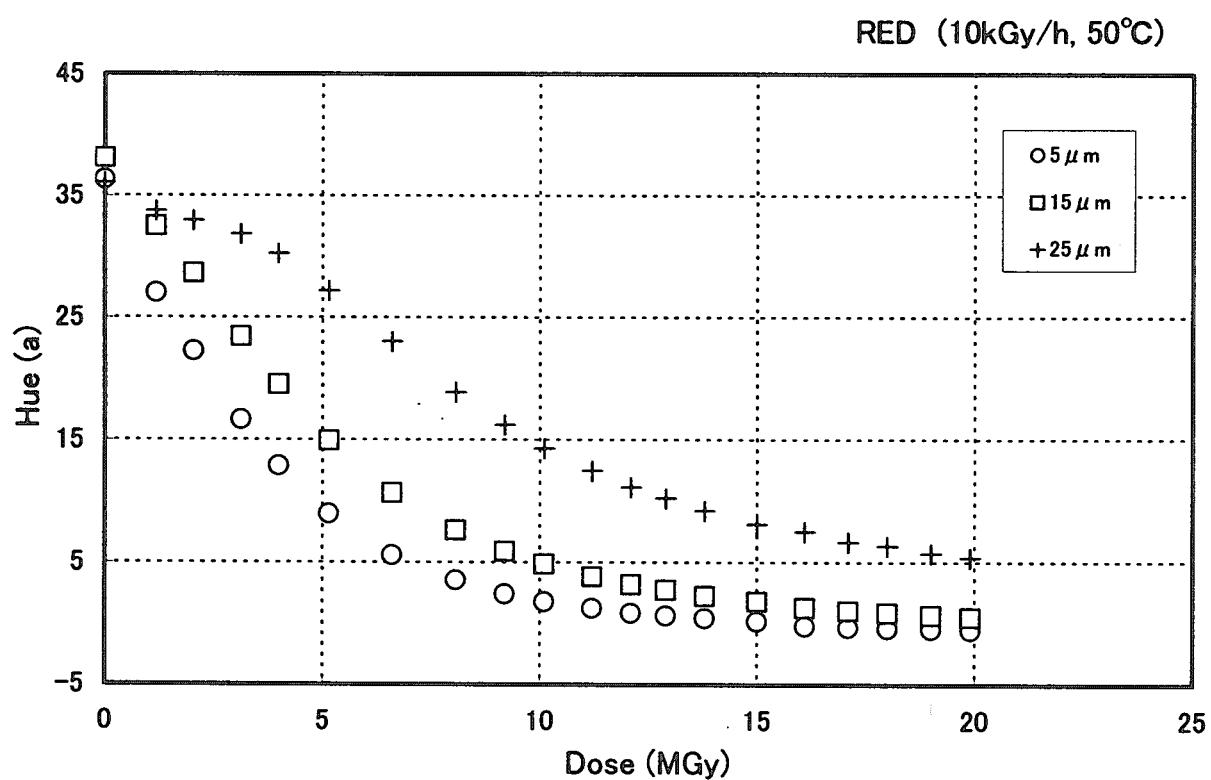


図32.6.1酸化膜厚5、15、25 μm試料の線量率10 kGy/h、大気、50°C下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

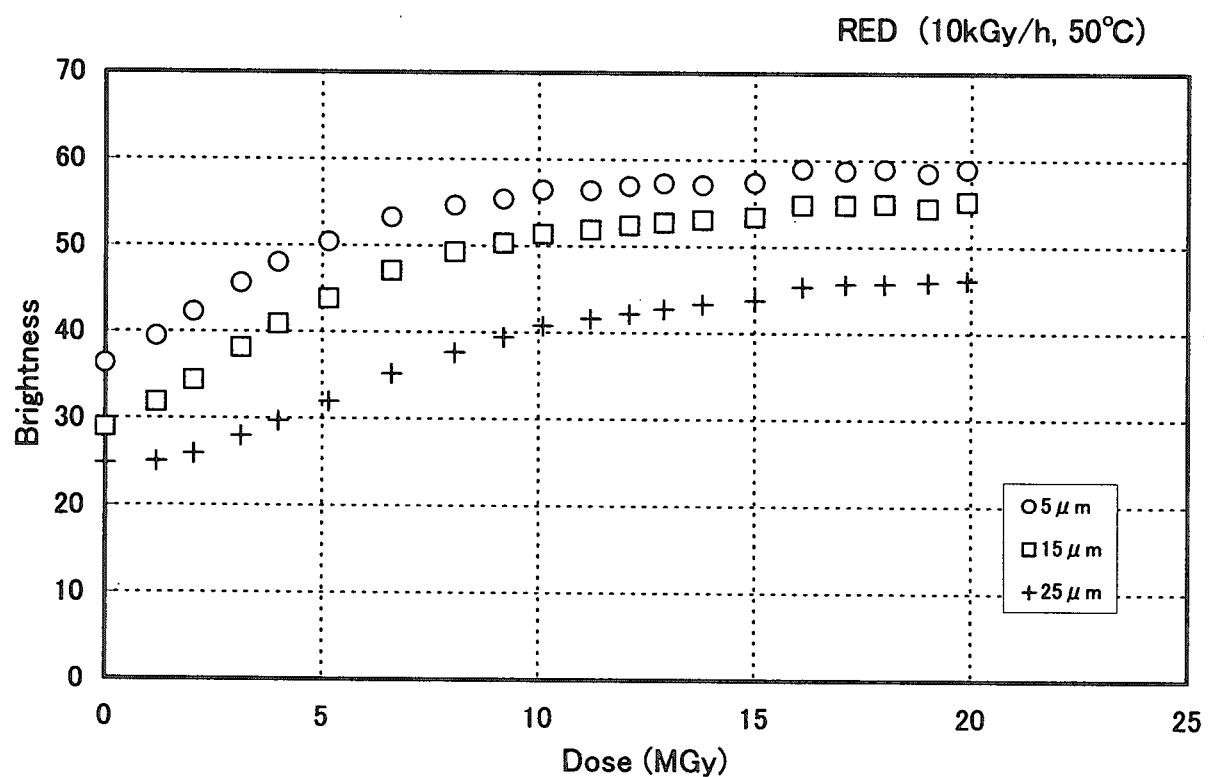


図32.6.2酸化膜厚5、15、25 μm試料の線量率10 kGy/h、大気、50°C下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

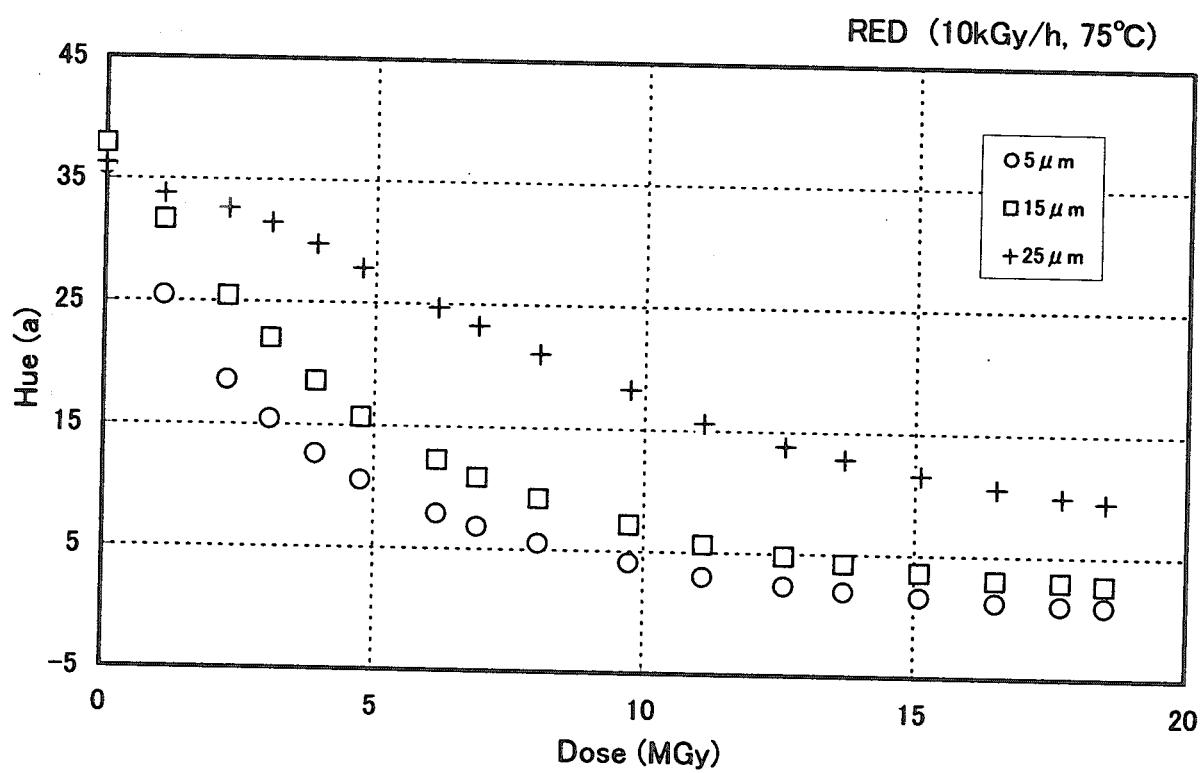


図32.7.1酸化膜厚5、15、25 μm試料の線量率10 kGy/h、大気、75°C下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

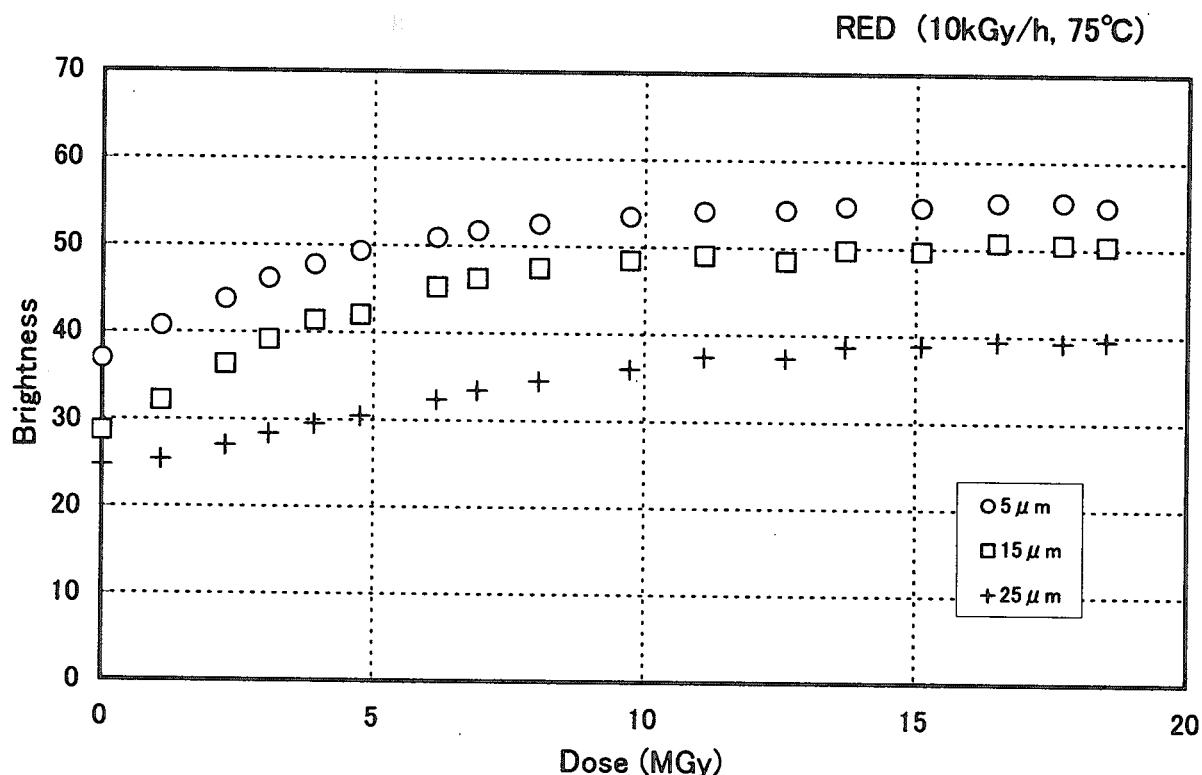


図32.7.2酸化膜厚5、15、25 μm試料の線量率10 kGy/h、大気、75°C下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

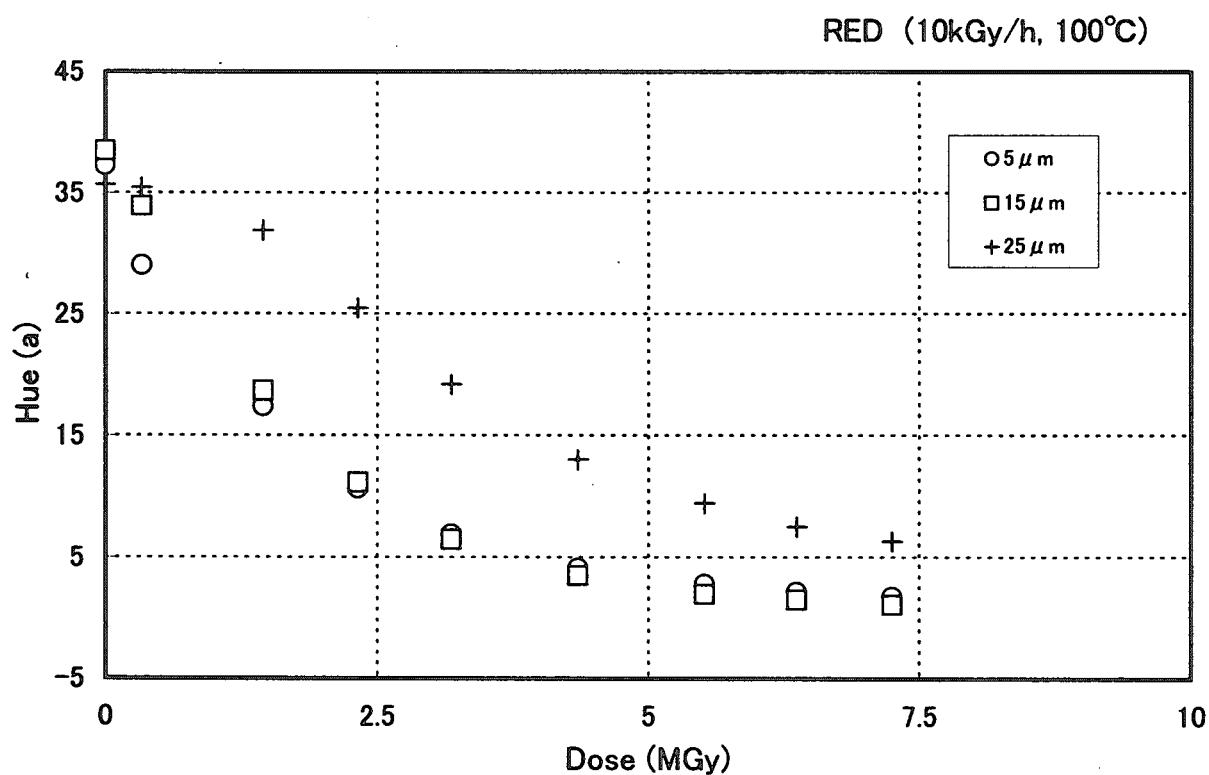


図32.8.1 酸化膜厚5、15、25 μm試料の線量率10 kGy/h、大気、100°C下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

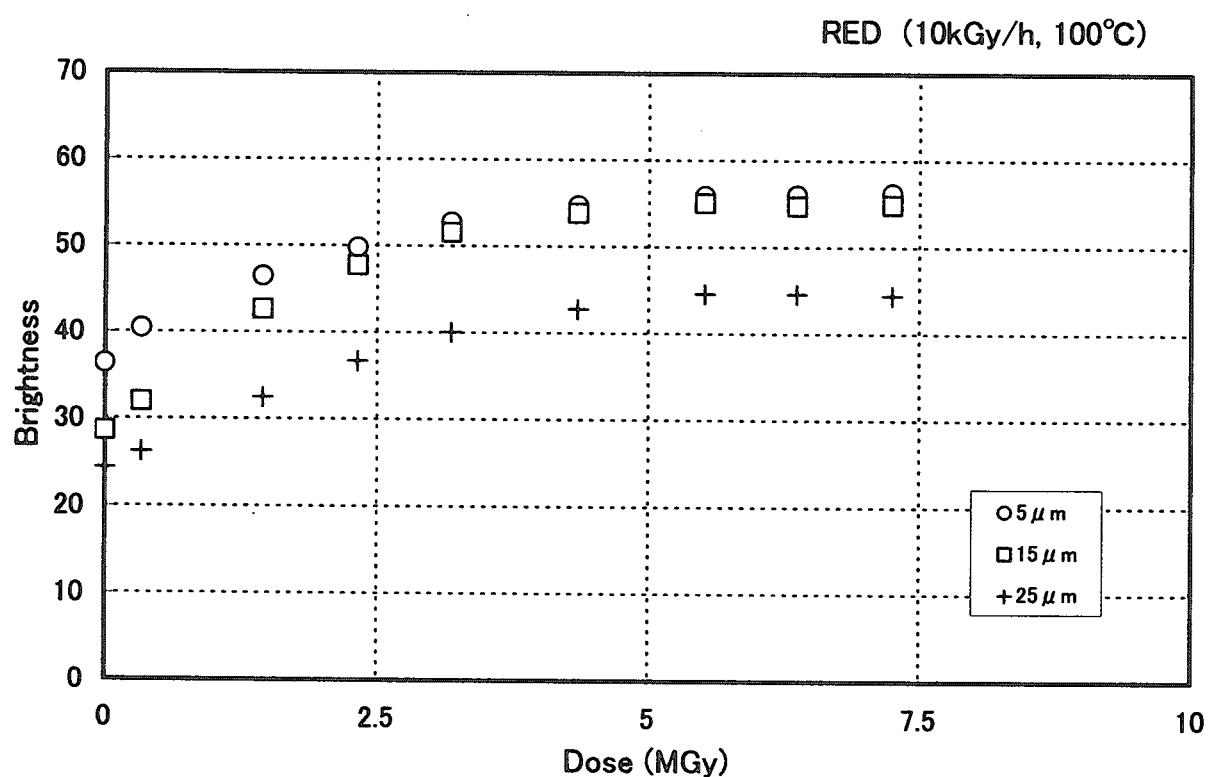


図32.8.2 酸化膜厚5、15、25 μm試料の線量率10 kGy/h、大気、100°C下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

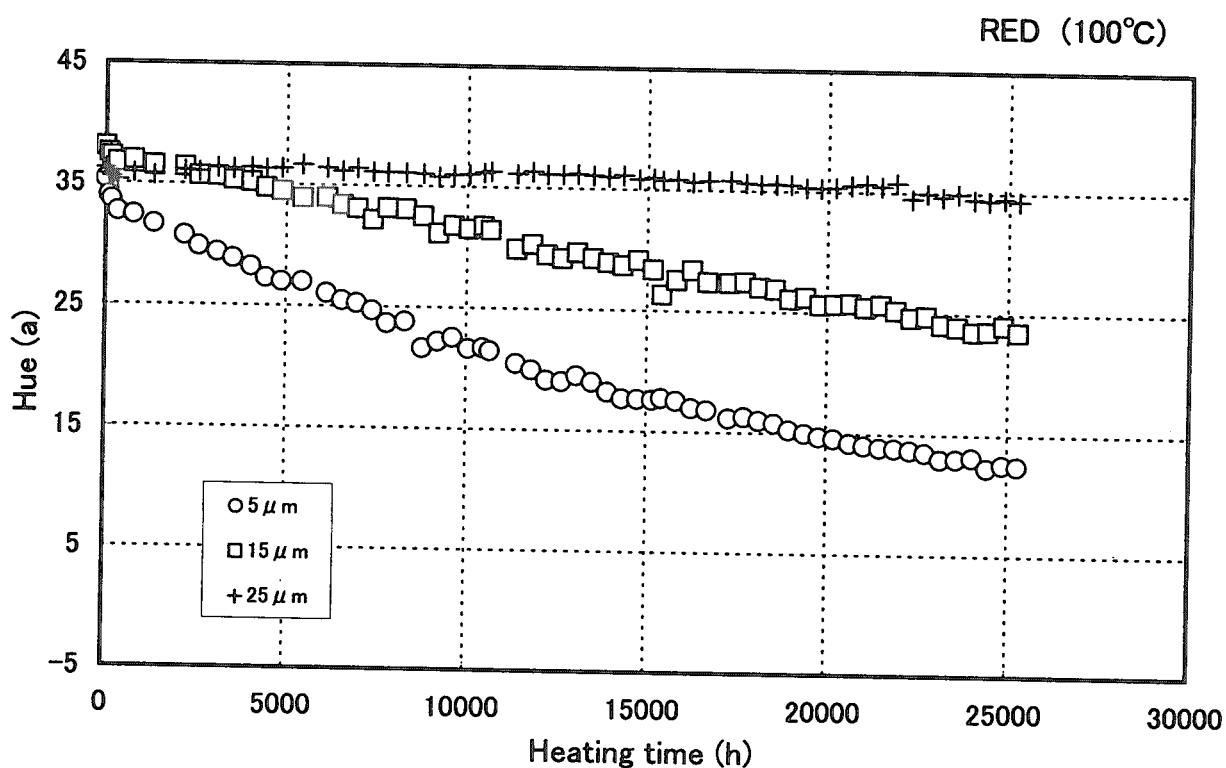


図33.1.1 酸化膜厚5、15、25 μm試料の無照射、大気、100°C下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

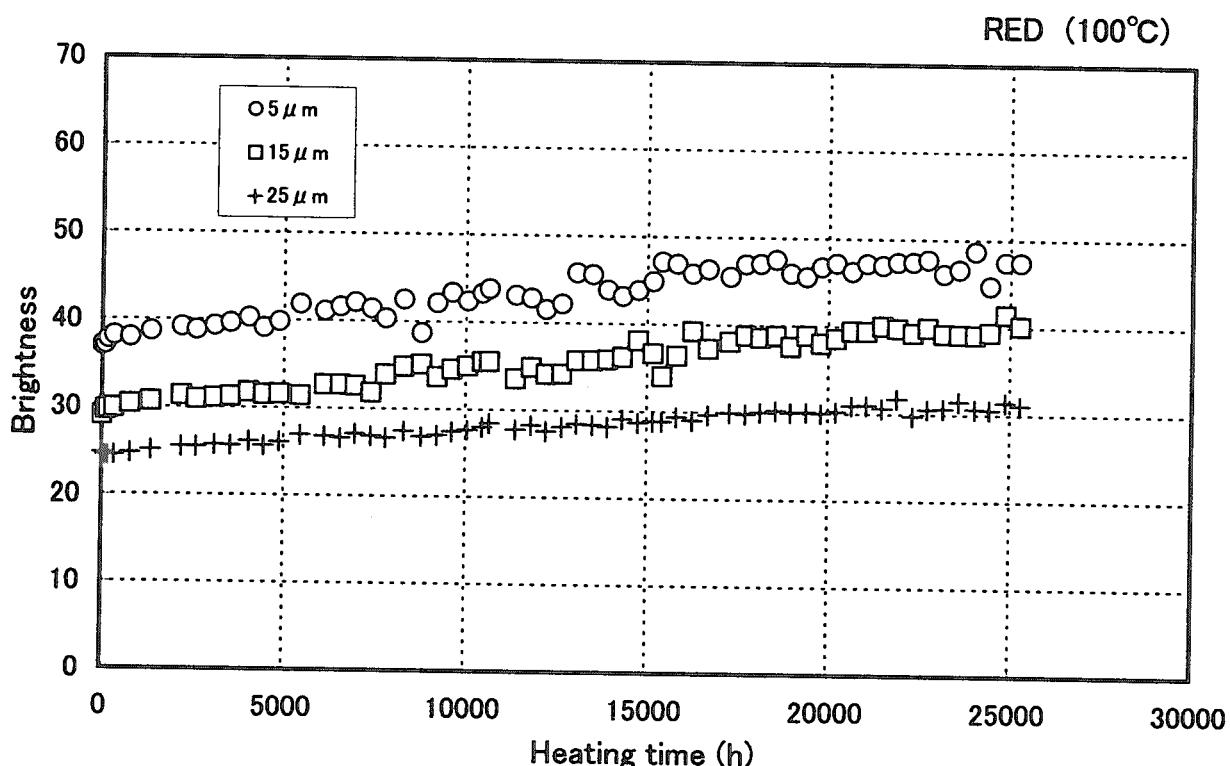


図33.1.2 酸化膜厚5、15、25 μm試料の無照射、大気、100°C下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

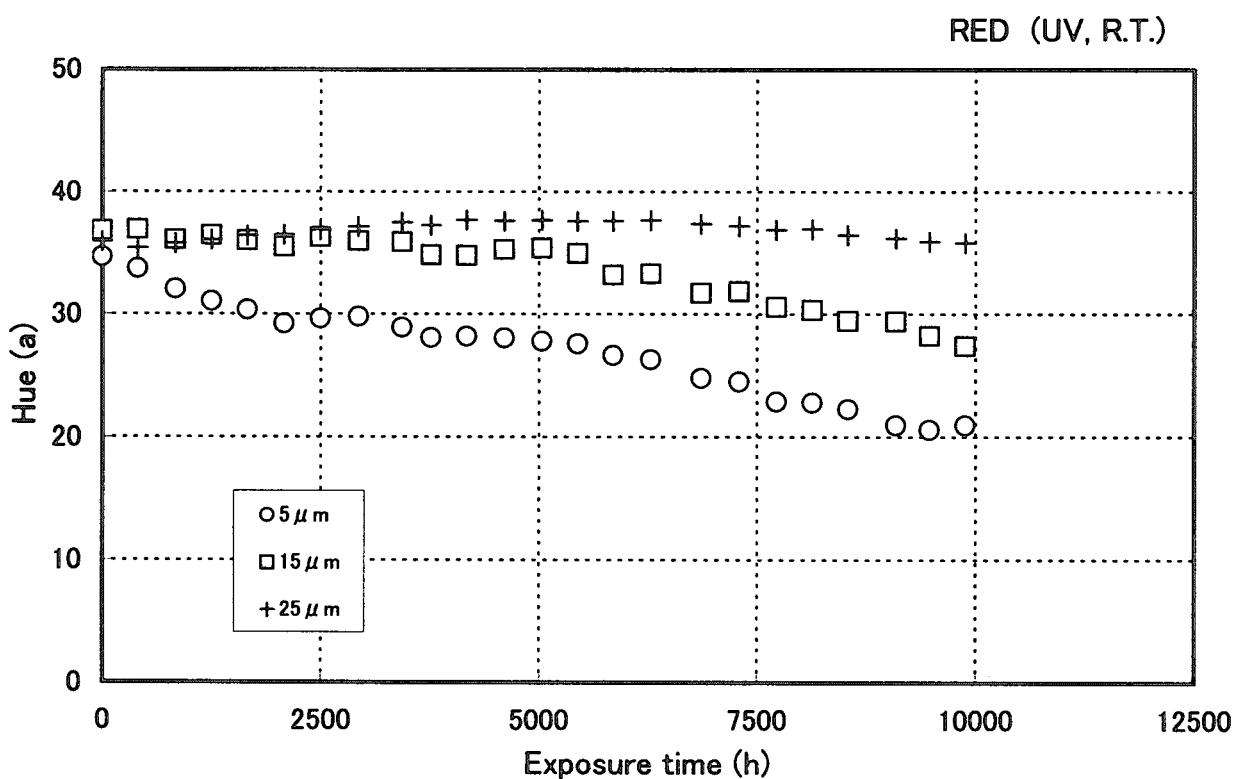


図34.1.1 酸化膜厚5、15、25 μm試料の無照射、大気、紫外線ランプ下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

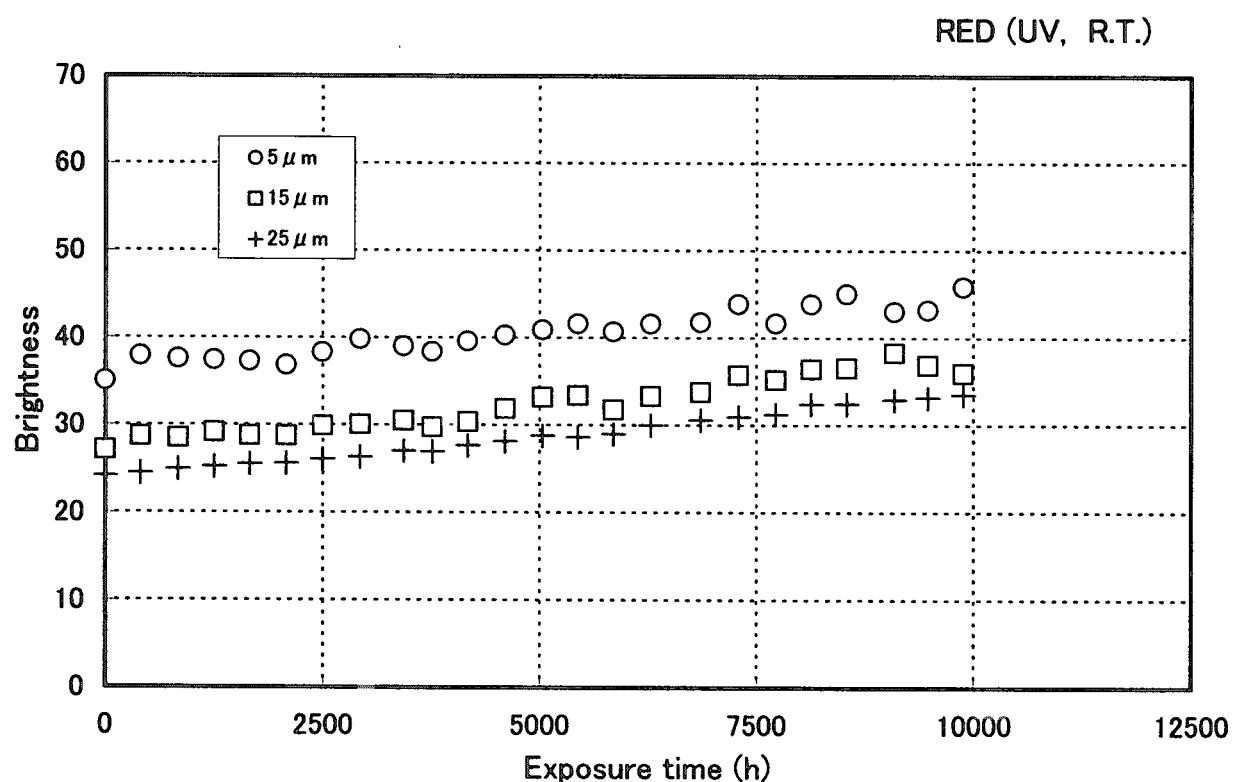


図34.1.2 酸化膜厚5、15、25 μm試料の無照射、大気、紫外線ランプ下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料:染料種Aluminum Fiery Red ML)

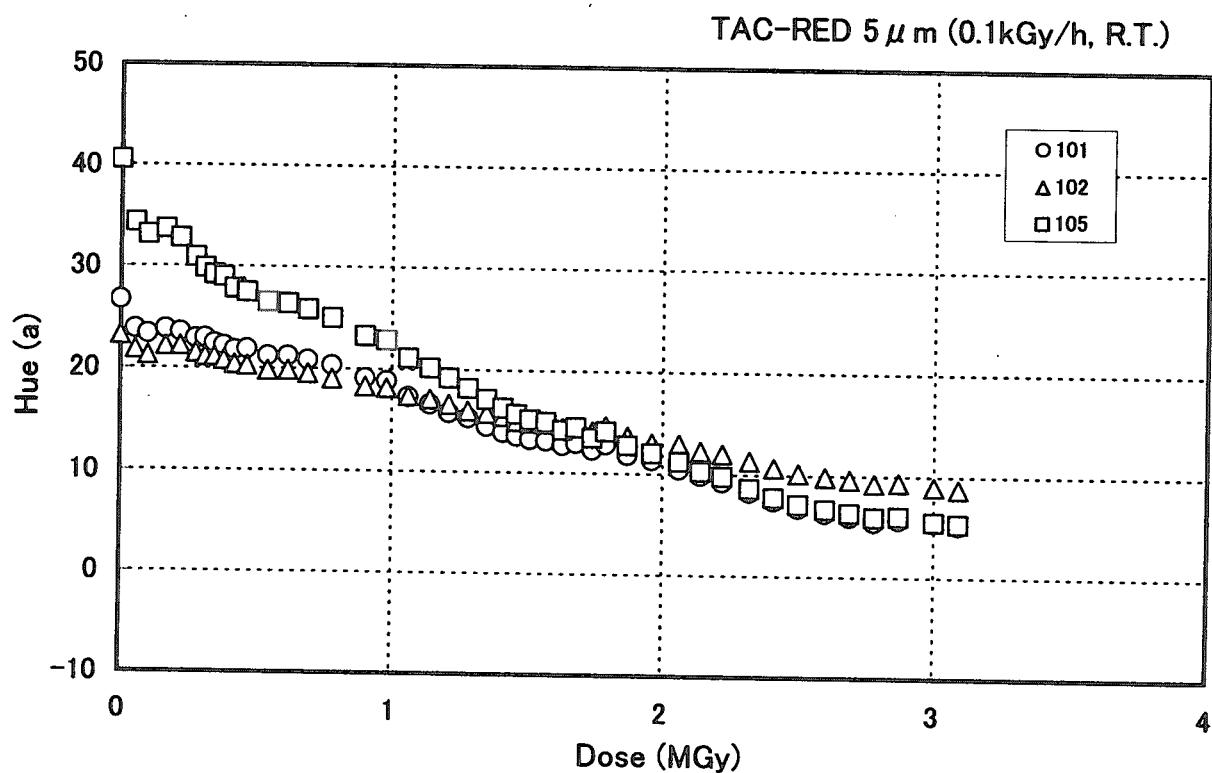


図35.1.1 膜厚5 μm で染料種の異なる3種類の試料の線量率0.1 kGy/h下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料: 染料種 Tac Red-GD(通称101)、Tac Red-BLH(通称102)、Tac FieryRed-GBM(通称105)、大気、室温)

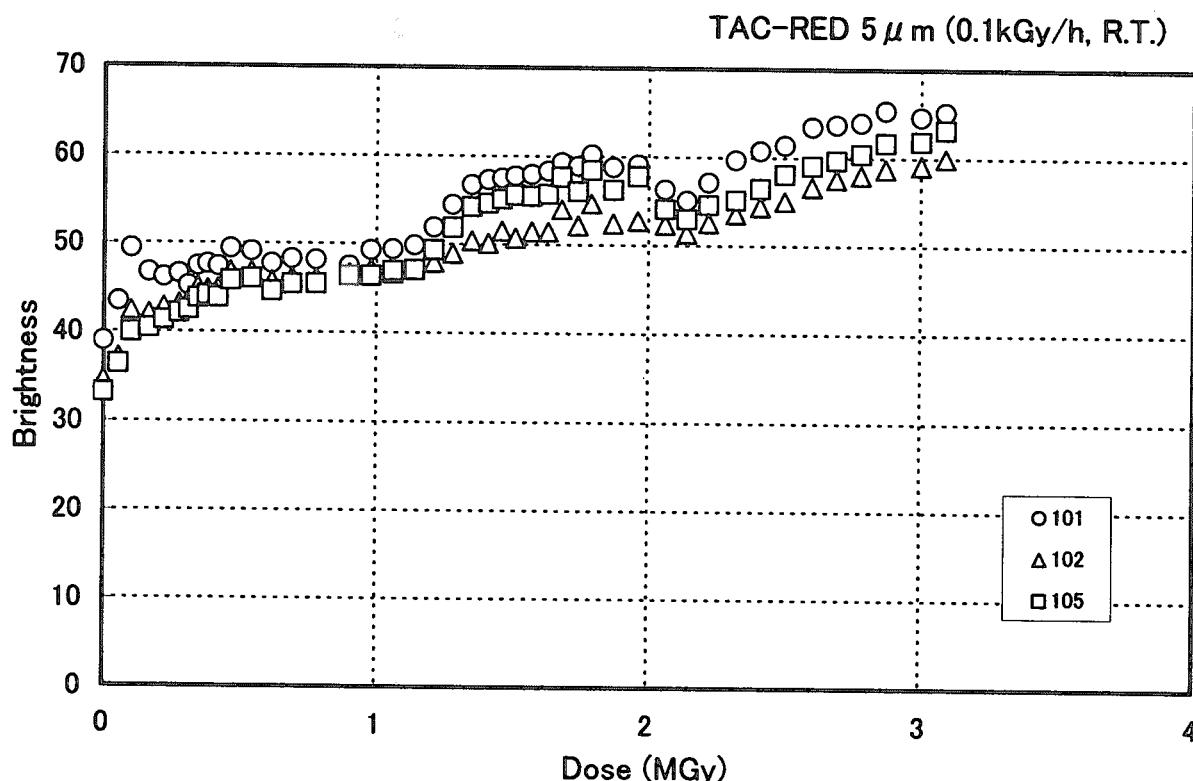


図35.1.2 膜厚5 μm で染料種の異なる3種類の試料の線量率0.1 kGy/h下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料: 染料種 Tac Red-GD(通称101)、Tac Red-BLH(通称102)、Tac FieryRed-GBM(通称105)、大気、室温)

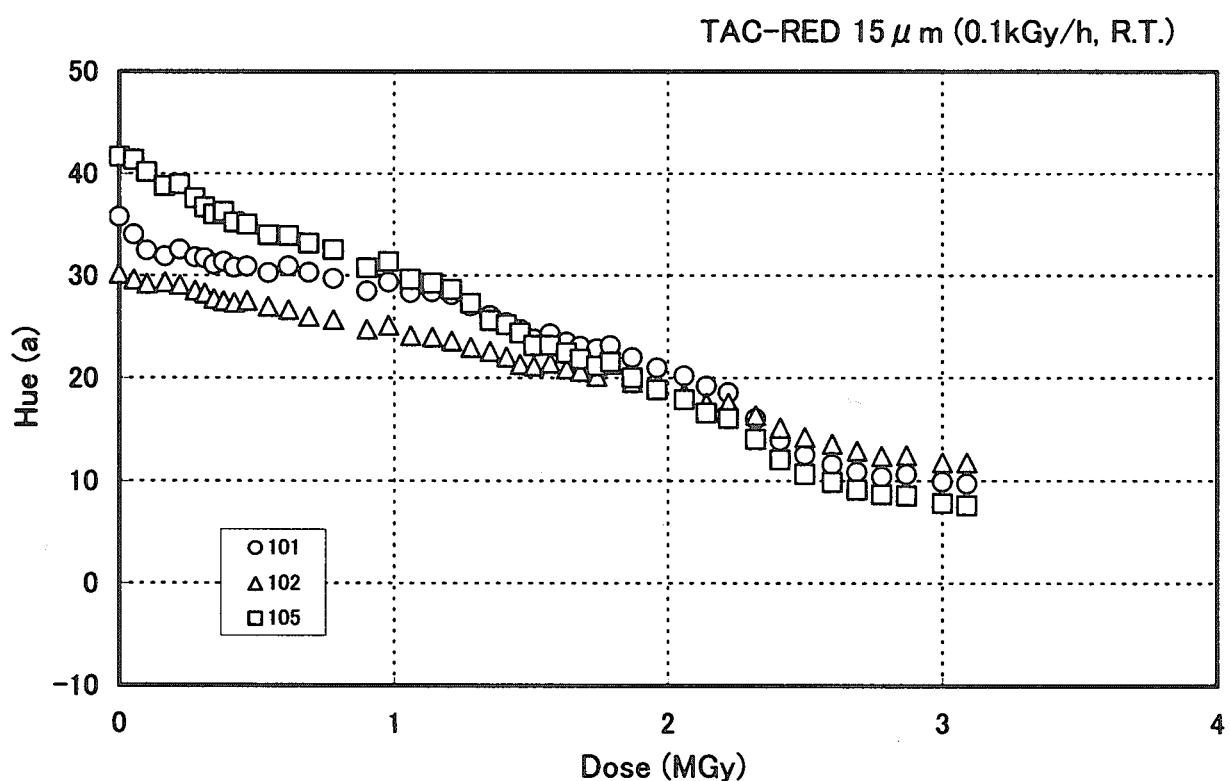


図35.2.1 膜厚15 μm で染料種の異なる3種類の試料の線量率0.1 kGy/h下での退色変化(色相値による)/特性試験
(試料:染料種Tac Red-GD(通称101)、Tac Red-BLH(通称102)、Tac FieryRed-GBM(通称105)、大気、室温)

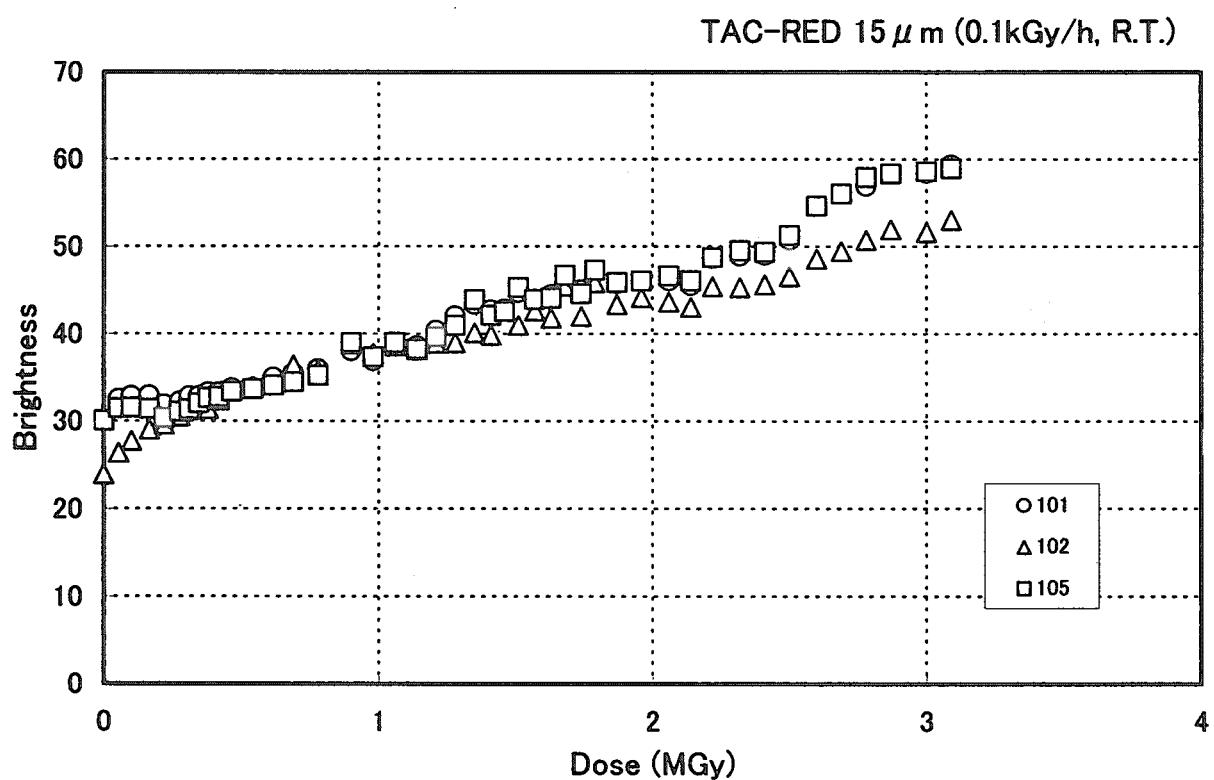


図35.2.2 膜厚15 μm で染料種の異なる3種類の試料の線量率0.1 kGy/h下での退色変化(明度値による)/特性試験
(試料:染料種Tac Red-GD(通称101)、Tac Red-BLH(通称102)、Tac FieryRed-GBM(通称105)、大気、室温)

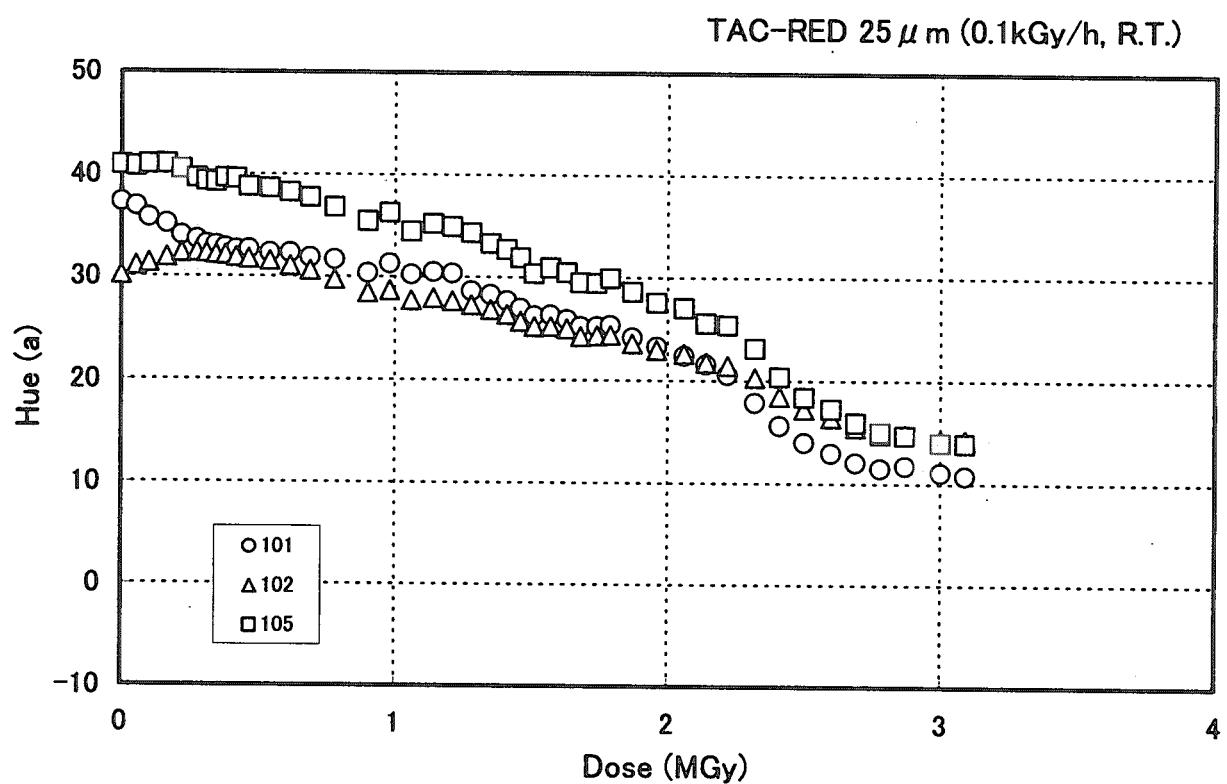


図35.3.1 膜厚25 μm で染料種の異なる3種類の試料の線量率0.1 kGy/h下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料: 染料種Tac Red-GD(通称101)、Tac Red-BLH(通称102)、Tac FieryRed-GBM(通称105)、大気、室温)

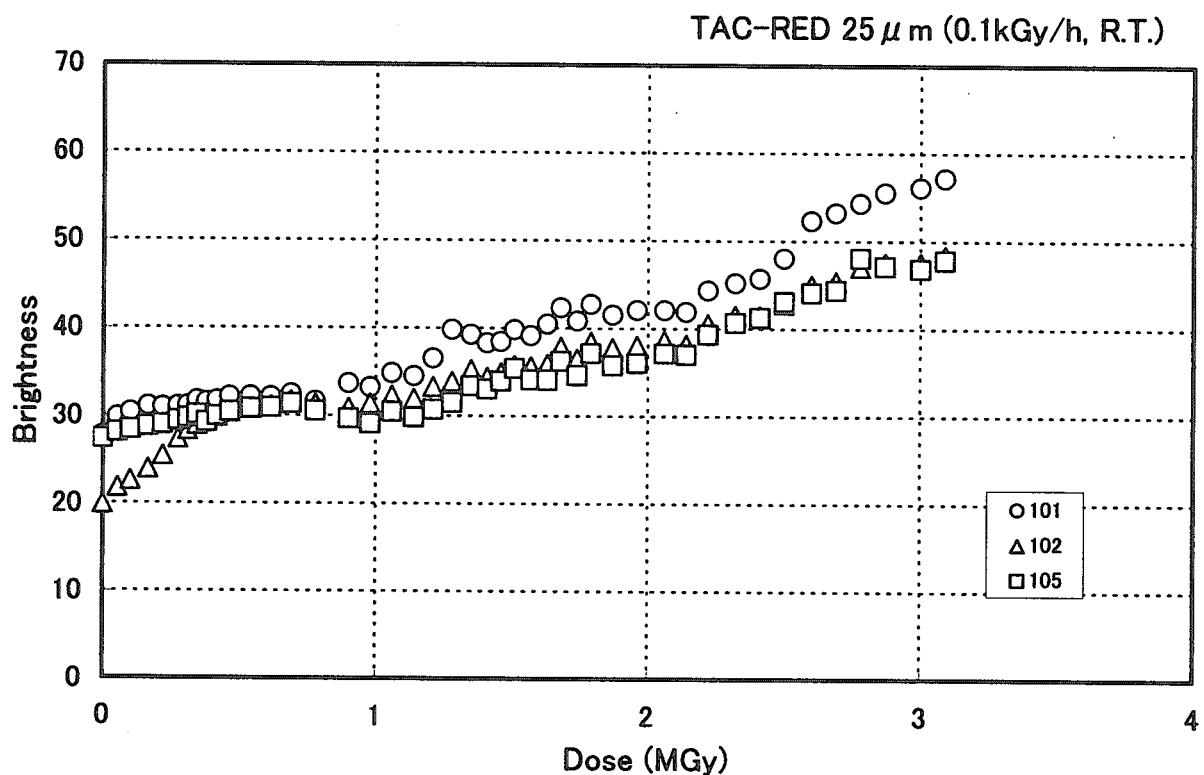


図35.3.2 膜厚25 μm で染料種の異なる3種類の試料の線量率0.1 kGy/h下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料: 染料種Tac Red-GD(通称101)、Tac Red-BLH(通称102)、Tac FieryRed-GBM(通称105)、大気、室温)

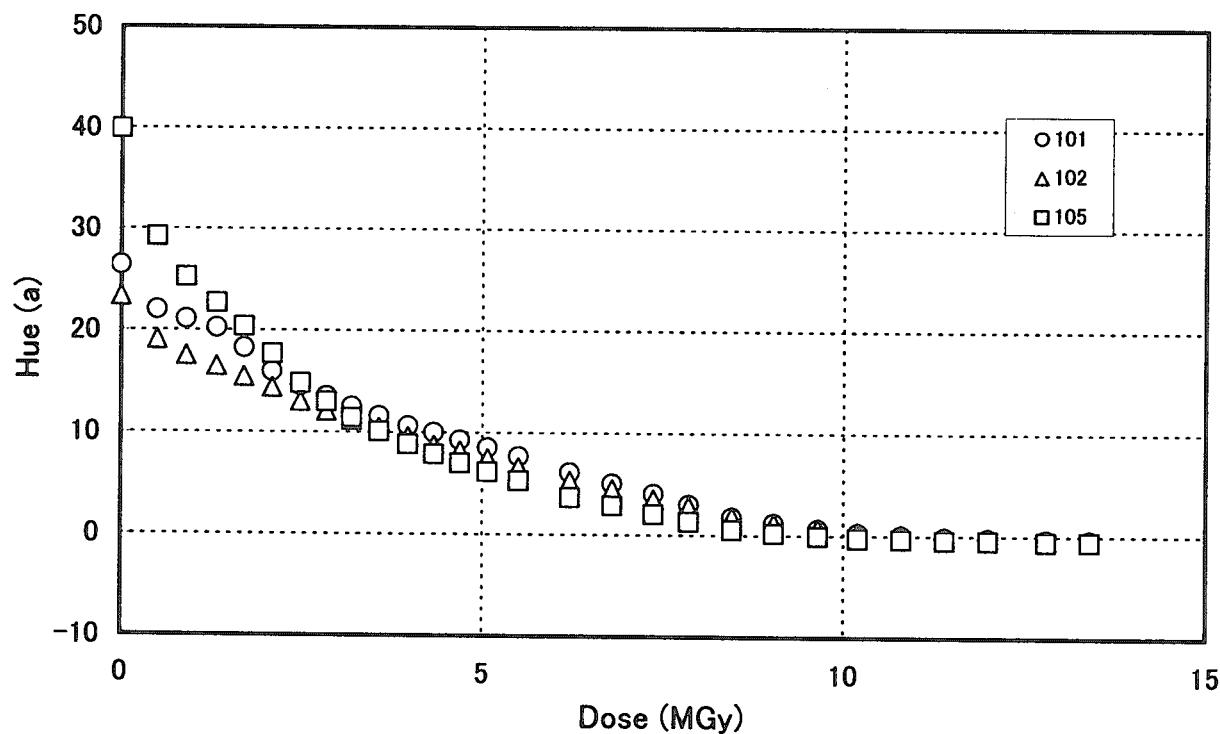
TAC-RED 5 μ m (1.0kGy/h, R.T.)

図35.4.1 膜厚5 μ mで染料種の異なる3種類の試料の線量率1.0 kGy/h下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料: 染料種Tac Red-GD(通称101)、Tac Red-BLH(通称102)、Tac FieryRed-GBM(通称105)、大気、室温)

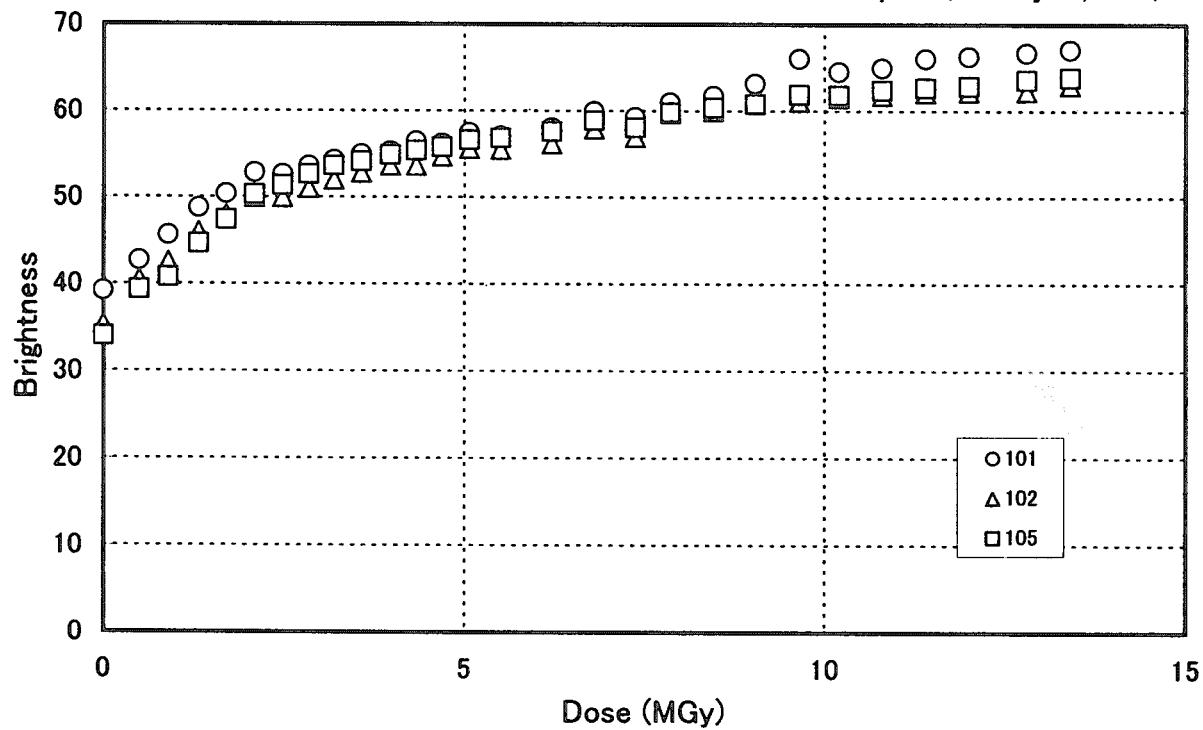
TAC-RED 5 μ m (1.0kGy/h, R.T.)

図35.4.2 膜厚5 μ mで染料種の異なる3種類の試料の線量率1.0 kGy/h下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料: 染料種Tac Red-GD(通称101)、Tac Red-BLH(通称102)、Tac FieryRed-GBM(通称105)、大気、室温)

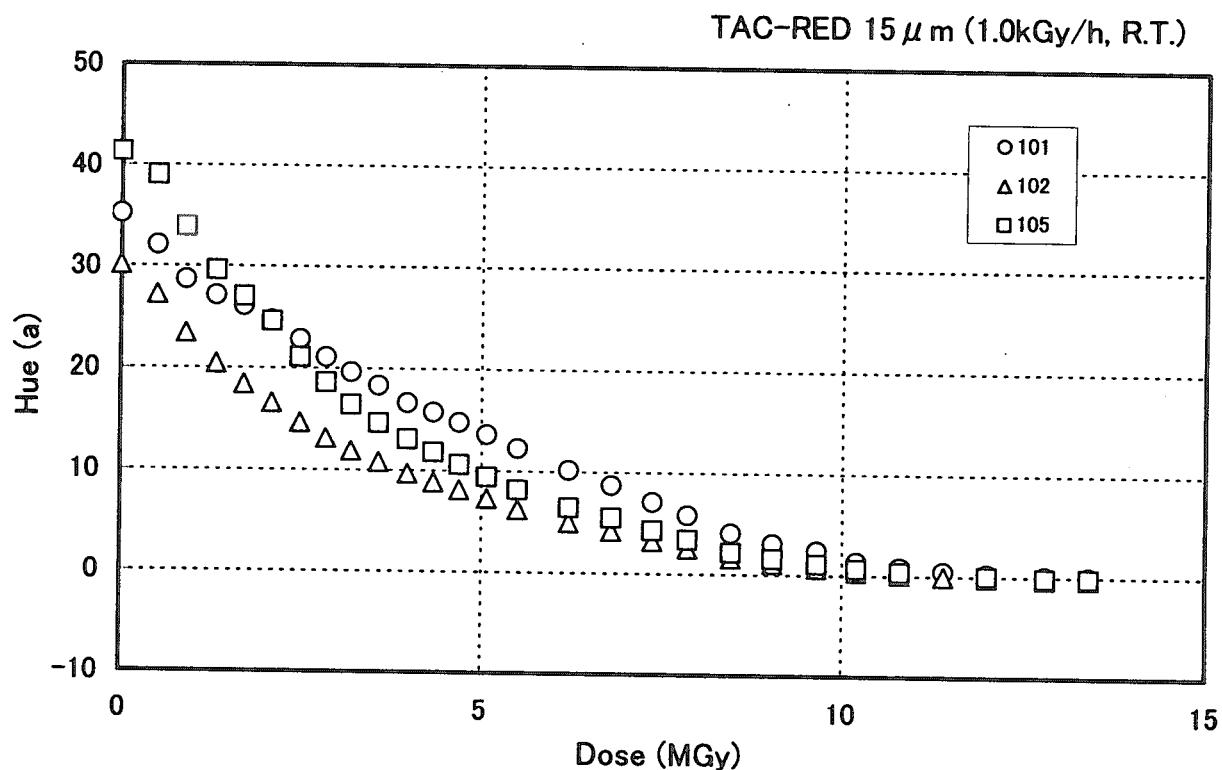


図35.5.1 膜厚15 μm で染料種の異なる3種類の試料の線量率1.0 kGy/h下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料: 染料種 Tac Red-GD(通称101)、Tac Red-BLH(通称102)、Tac FieryRed-GBM(通称105)、大気、室温)

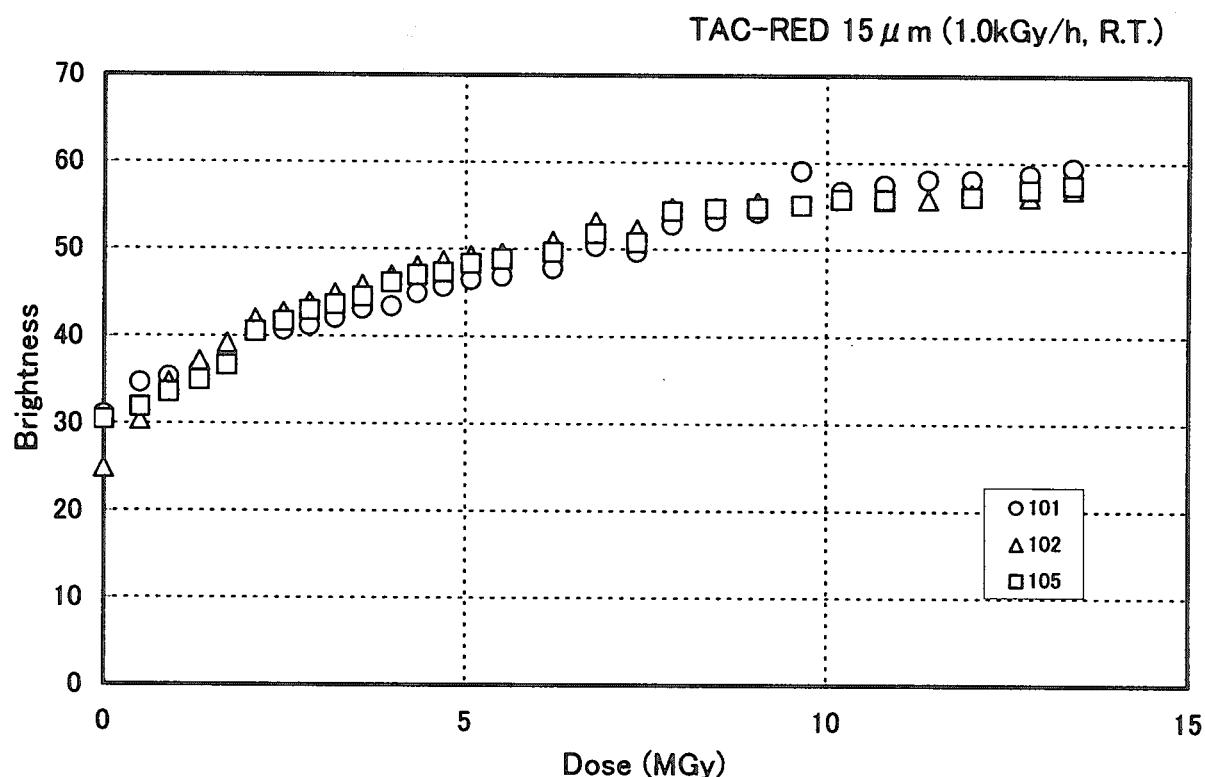


図35.5.2 膜厚15 μm で染料種の異なる3種類の試料の線量率1.0 kGy/h下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料: 染料種 Tac Red-GD(通称101)、Tac Red-BLH(通称102)、Tac FieryRed-GBM(通称105)、大気、室温)

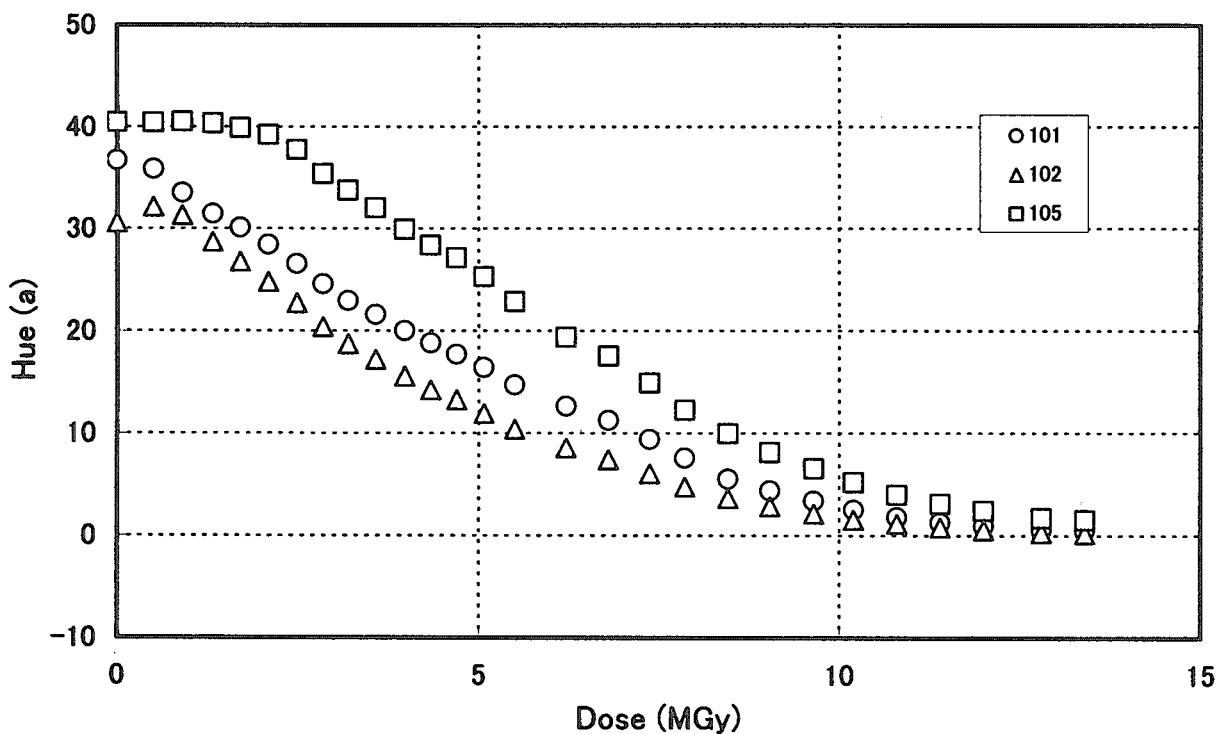
TAC-RED 25 μm (1.0kGy/h, R.T.)

図35.6.1 膜厚25 μm で染料種の異なる3種類の試料の線量率1.0 kGy/h下での退色変化(色相値による)/特性試験
(試料:染料種Tac Red-GD(通称101)、Tac Red-BLH(通称102)、Tac FieryRed-GBM(通称105)、大気、室温)

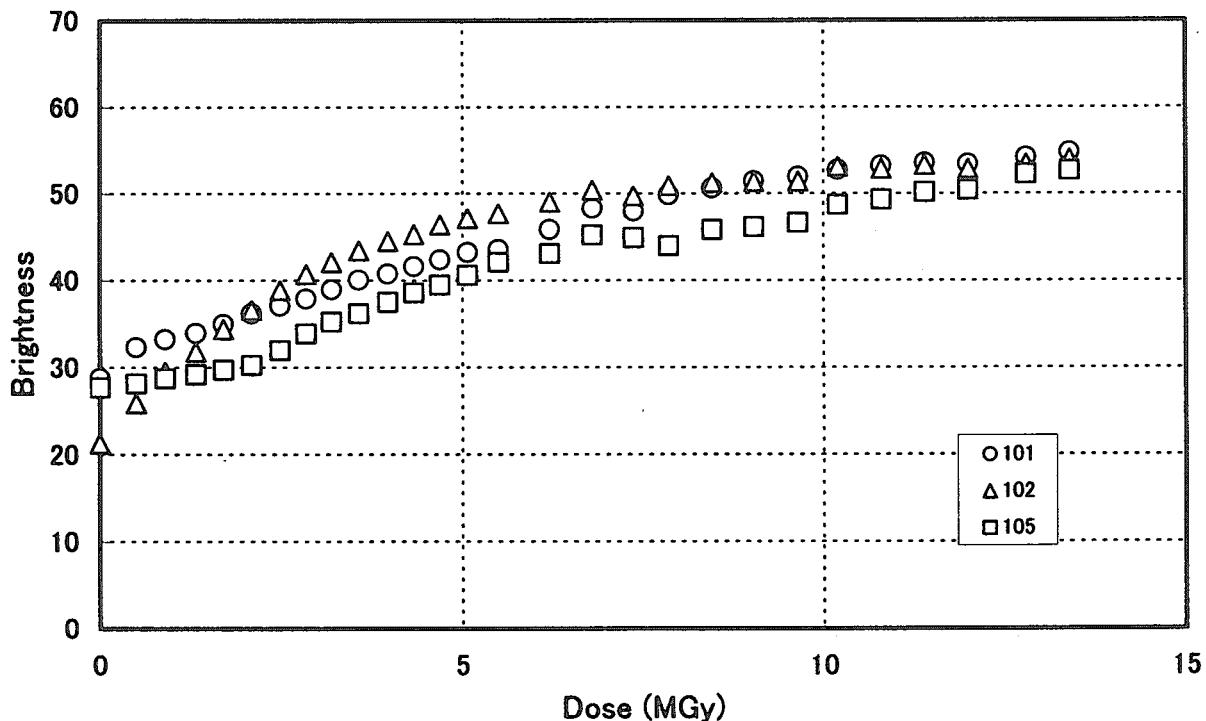
TAC-RED 25 μm (1.0kGy/h, R.T.)

図35.6.2 膜厚25 μm で染料種の異なる3種類の試料の線量率1.0 kGy/h下での退色変化(明度値による)/特性試験
(試料:染料種Tac Red-GD(通称101)、Tac Red-BLH(通称102)、Tac FieryRed-GBM(通称105)、大気、室温)

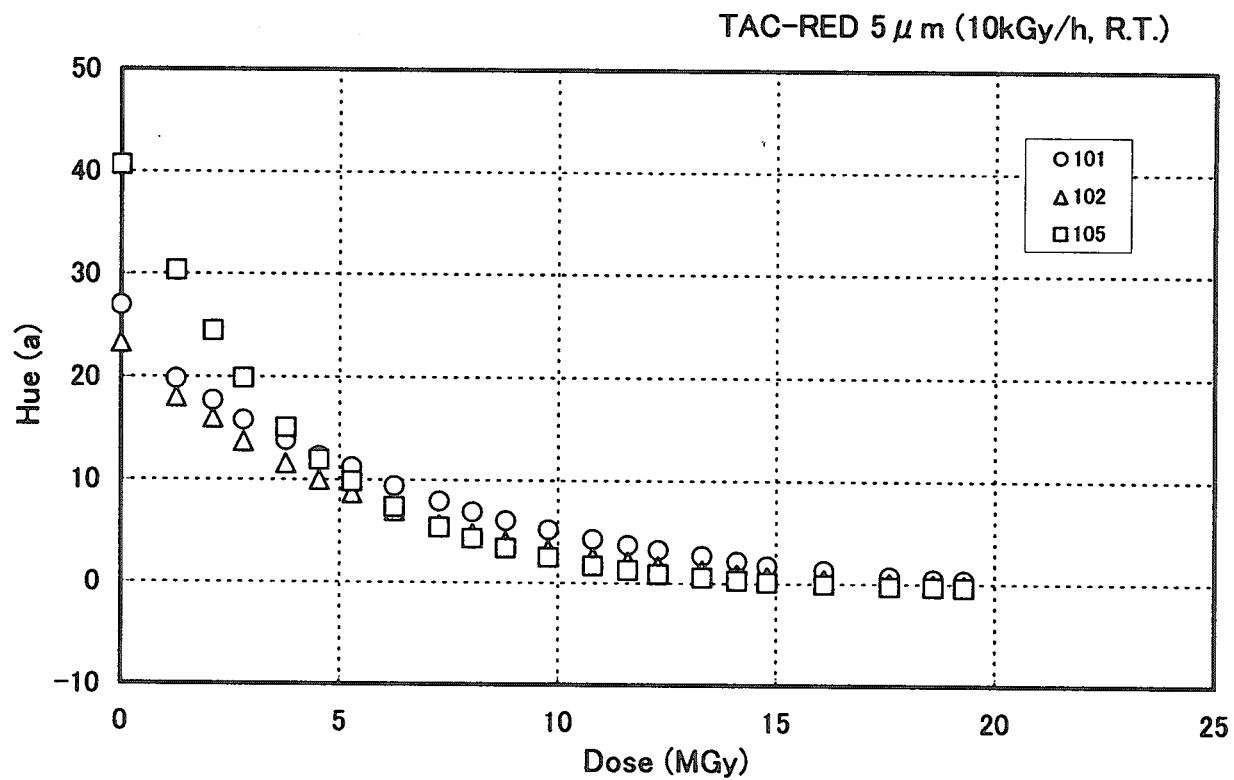


図35.7.1 膜厚5 μm で染料種の異なる3種類の試料の線量率10 kGy/h下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料: 染料種Tac Red-GD(通称101)、Tac Red-BLH(通称102)、Tac FieryRed-GBM(通称105)、大気、室温)

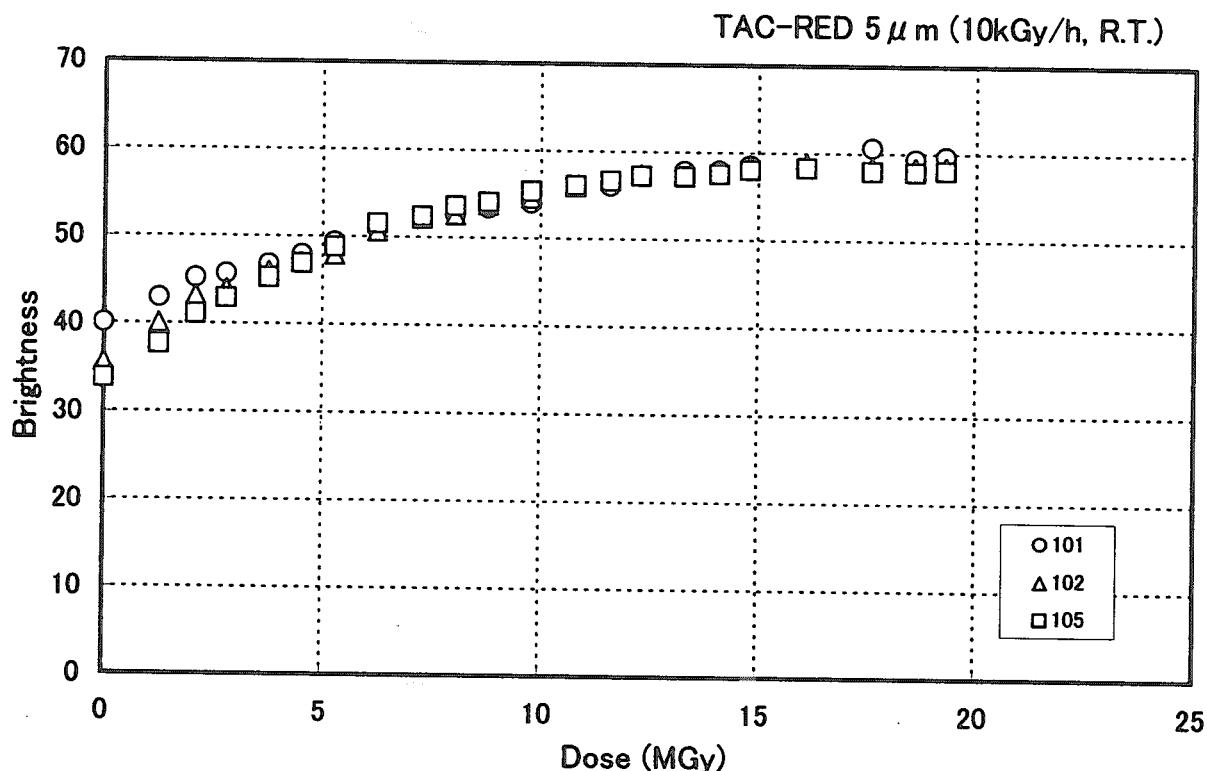


図35.7.2 膜厚5 μm で染料種の異なる3種類の試料の線量率10 kGy/h下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料: 染料種Tac Red-GD(通称101)、Tac Red-BLH(通称102)、Tac FieryRed-GBM(通称105)、大気、室温)

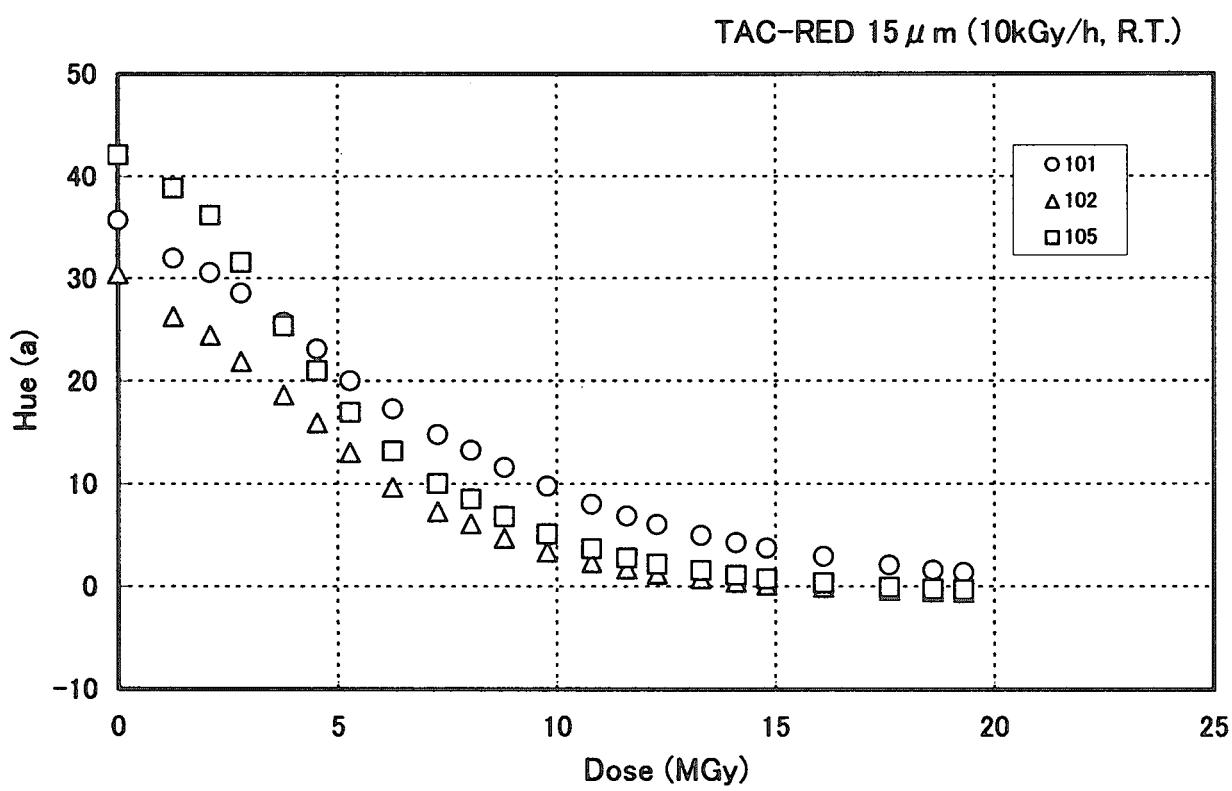


図35.8.1 膜厚15 μm で染料種の異なる3種類の試料の線量率10 kGy/h下での退色変化(色相値による)/特性試験
(試料: 染料種Tac Red-GD(通称101)、Tac Red-BLH(通称102)、Tac FieryRed-GBM(通称105)、大気、室温)

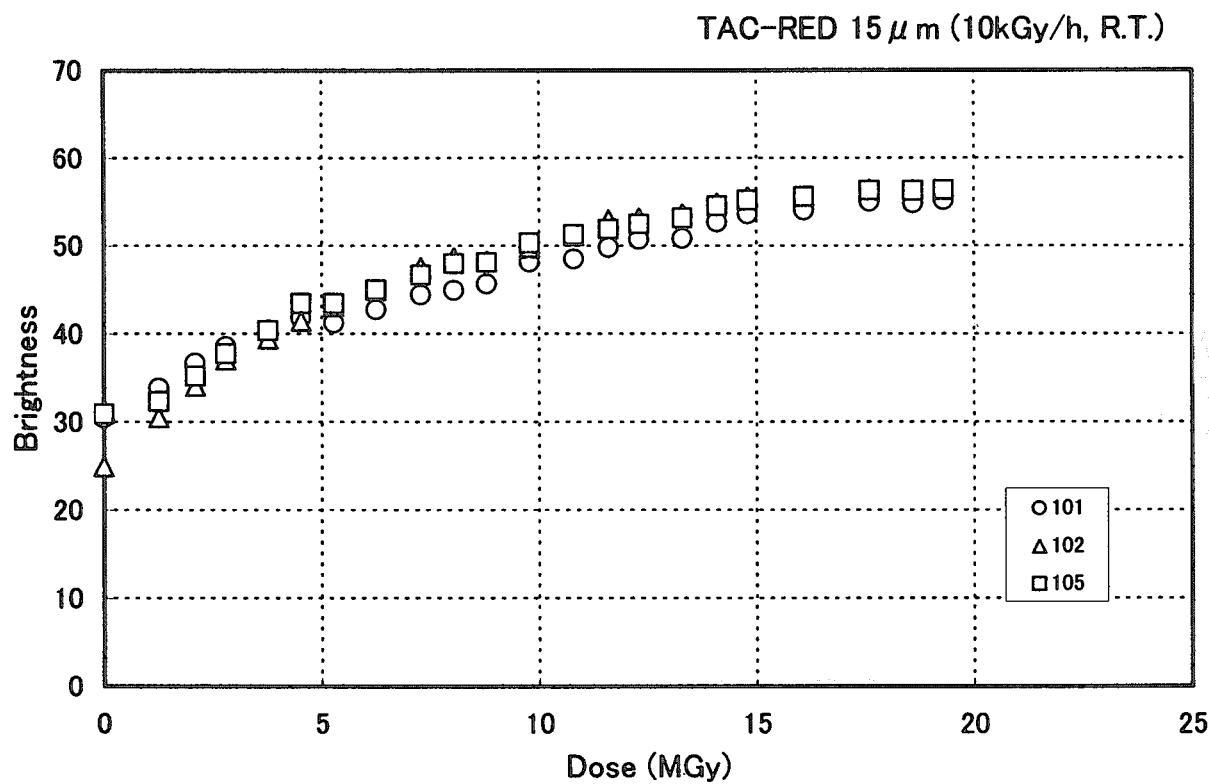


図35.8.2 膜厚15 μm で染料種の異なる3種類の試料の線量率10 kGy/h下での退色変化(明度値による)/特性試験
(試料: 染料種Tac Red-GD(通称101)、Tac Red-BLH(通称102)、Tac FieryRed-GBM(通称105)、大気、室温)

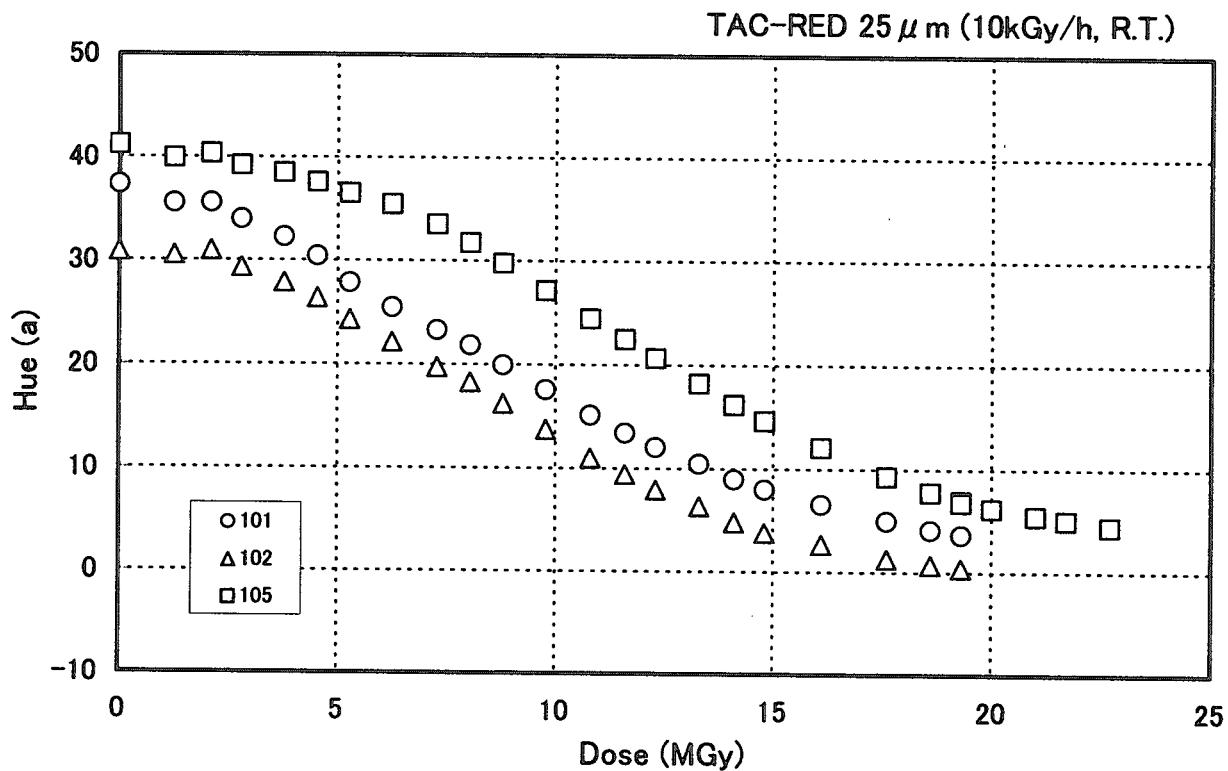


図35.9.1 膜厚25 μm で染料種の異なる3種類の試料の線量率10 kGy/h下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料: 染料種Tac Red-GD(通称101)、Tac Red-BLH(通称102)、Tac FieryRed-GBM(通称105)、大気、室温)

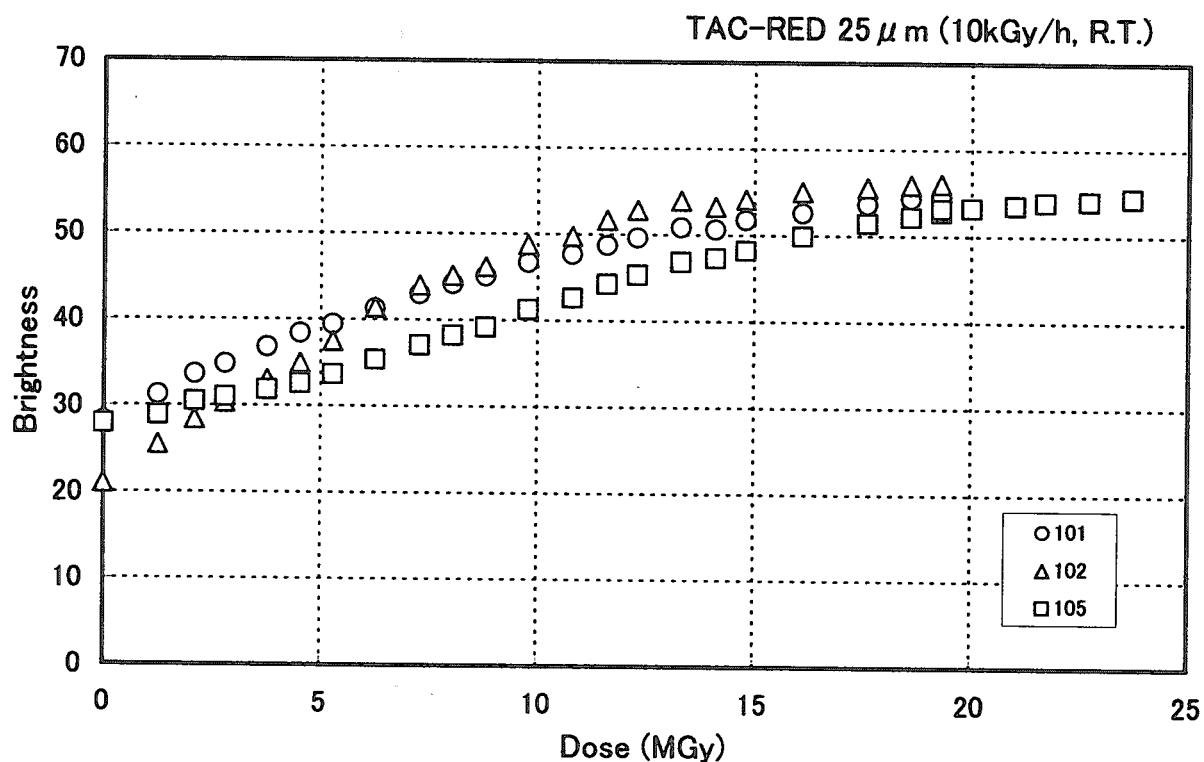
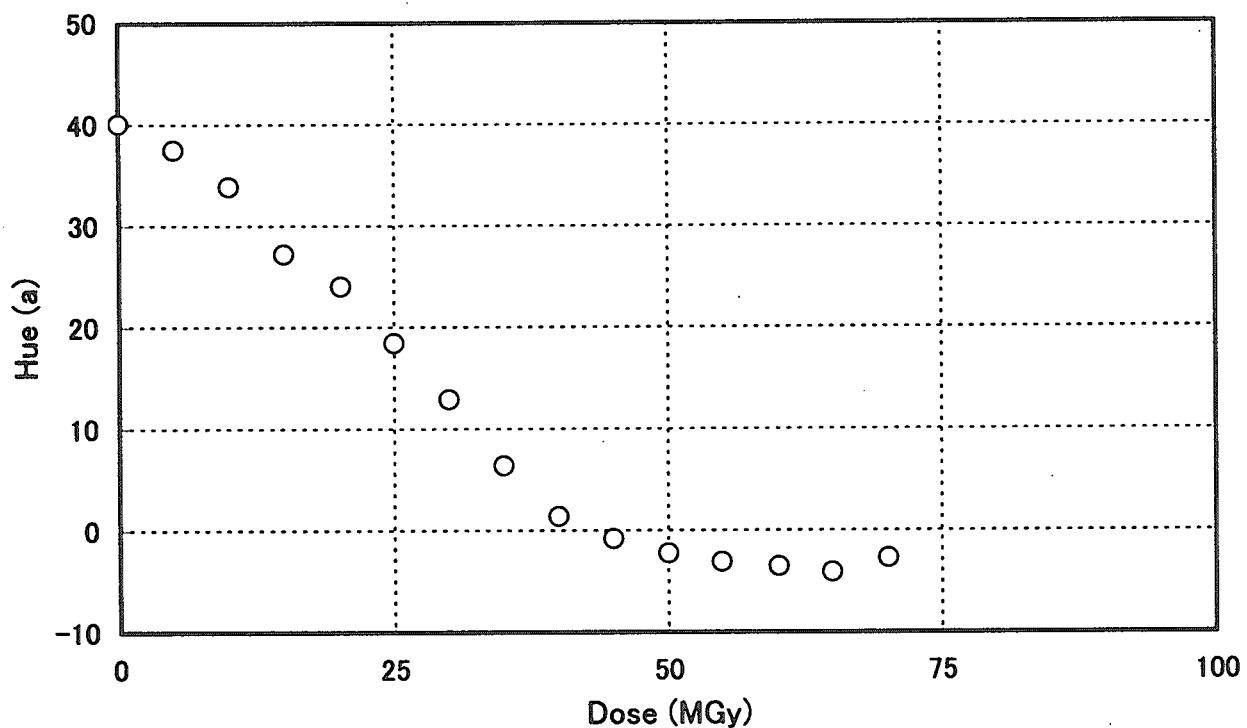
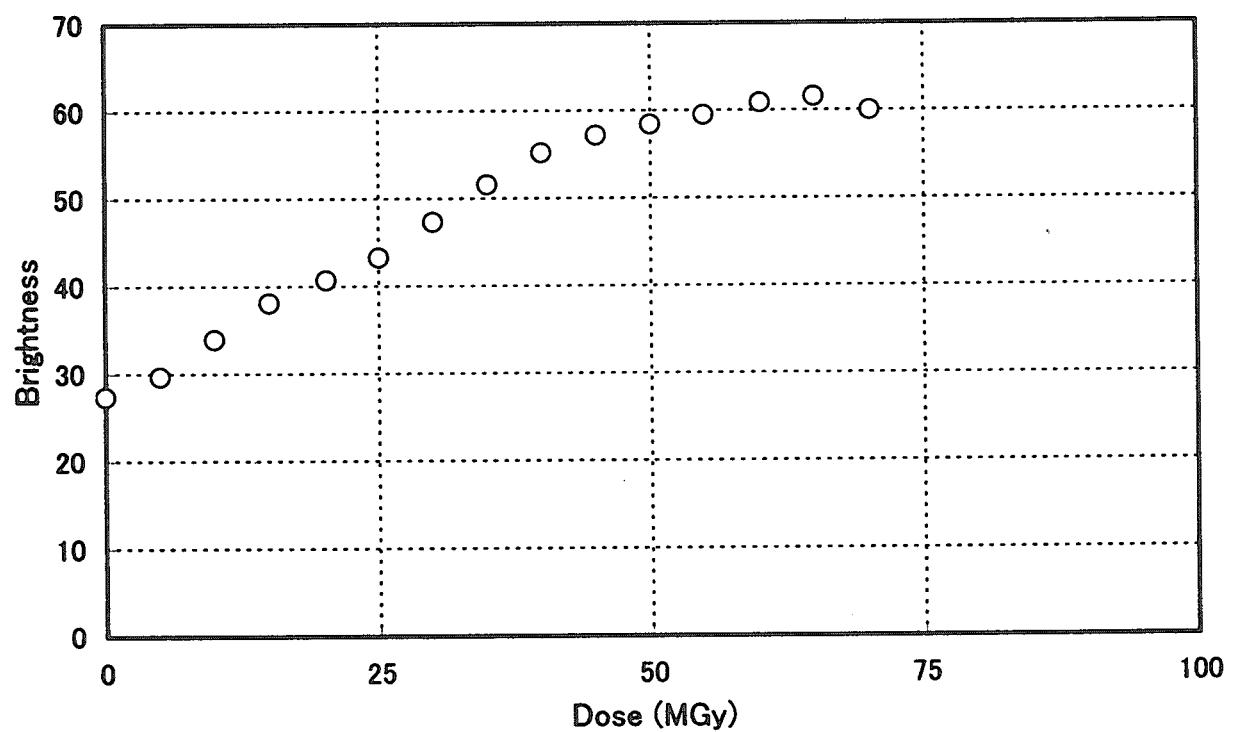


図35.9.2 膜厚25 μm で染料種の異なる3種類の試料の線量率10 kGy/h下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料: 染料種Tac Red-GD(通称101)、Tac Red-BLH(通称102)、Tac FieryRed-GBM(通称105)、大気、室温)

TAC-RED105 25 μ m (10kGy/h, R.T.)図35.1 膜厚25 μ m、染料種105試料の線量率10 kGy/h下での高照射量退色試験(色相値による)／特性試験
(大気、室温)TAC-RED105 25 μ m (10kGy/h, R.T.)図35.2 膜厚25 μ m、染料種105試料の線量率10 kGy/h下での高照射量退色試験(明度値による)／特性試験
(大気、室温)

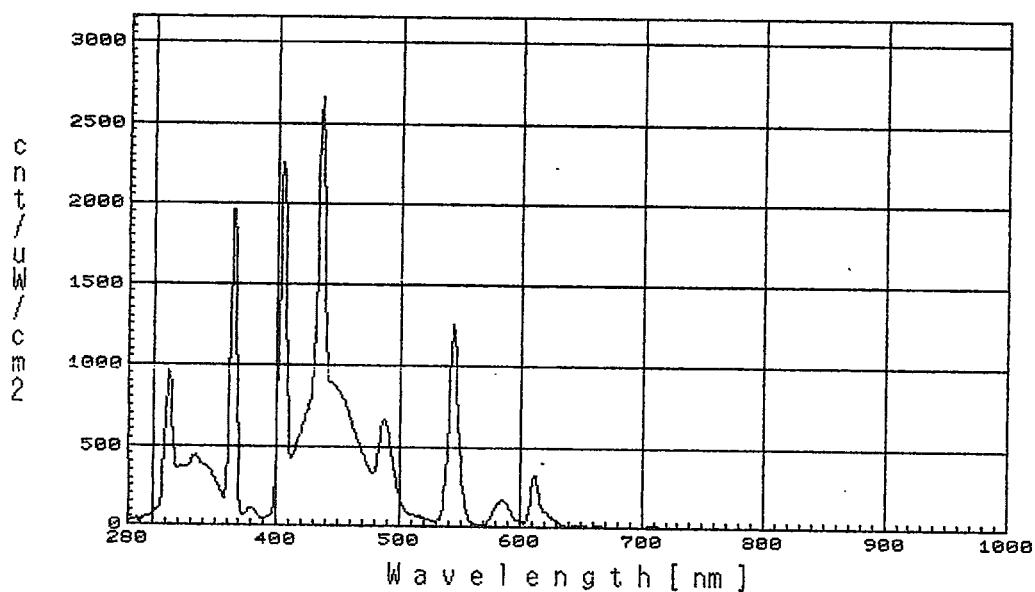


図34.1 紫外線源用ランプのスペクトル/特性試験
(ナショナル製 パルックボール (FED14ED))

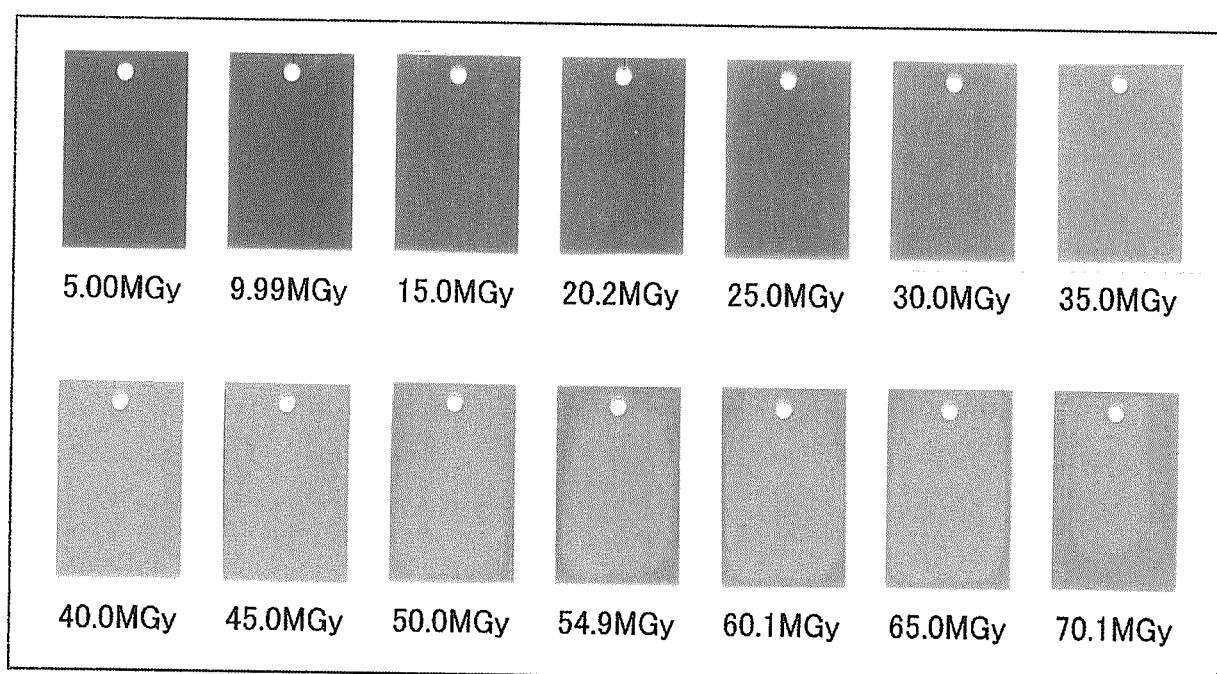


図35.3 赤色試験用試料の退色変化/特性試験
(大気、室温、線量率：10kGy/h、染料種：Tac Fiery Red-GBM)

This is a blank page.

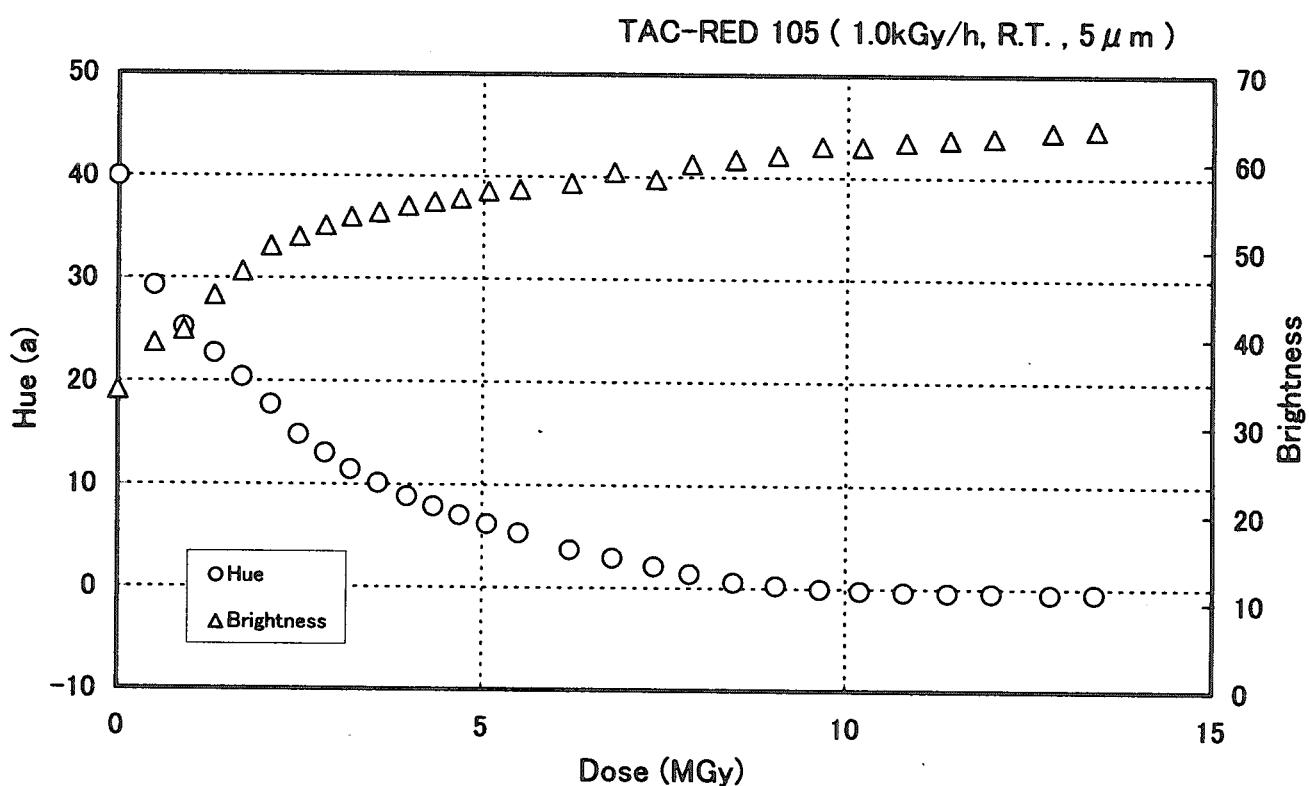


図36.1.1 膜厚5 μ m、染料種Tac Fiery Red-GBM(通称105)試料の線量率1.0 kGy/h、大気、室温下での退色変化(色相及び明度値による)/特性試験

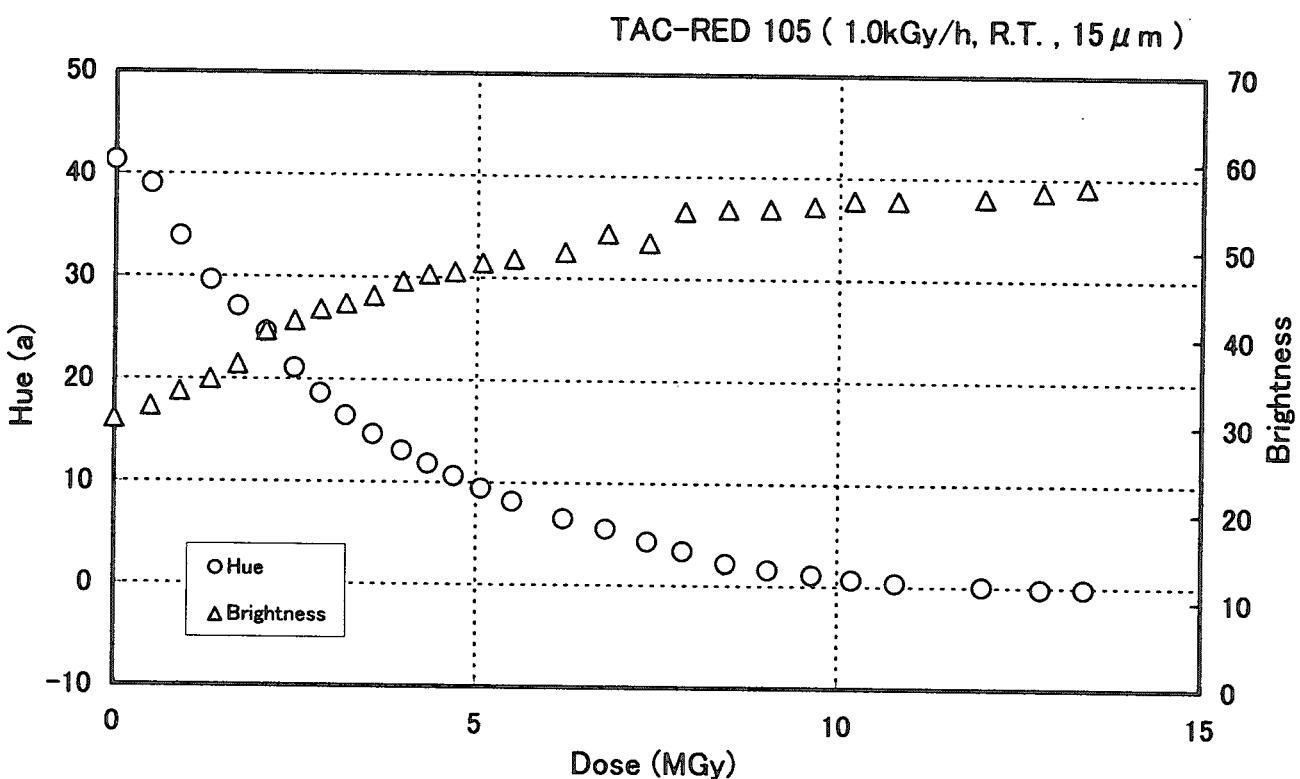


図36.1.2 膜厚15 μ m、染料種Tac Fiery Red-GBM(通称105)試料の線量率1.0 kGy/h、大気、室温下での退色変化(色相及び明度値による)/特性試験

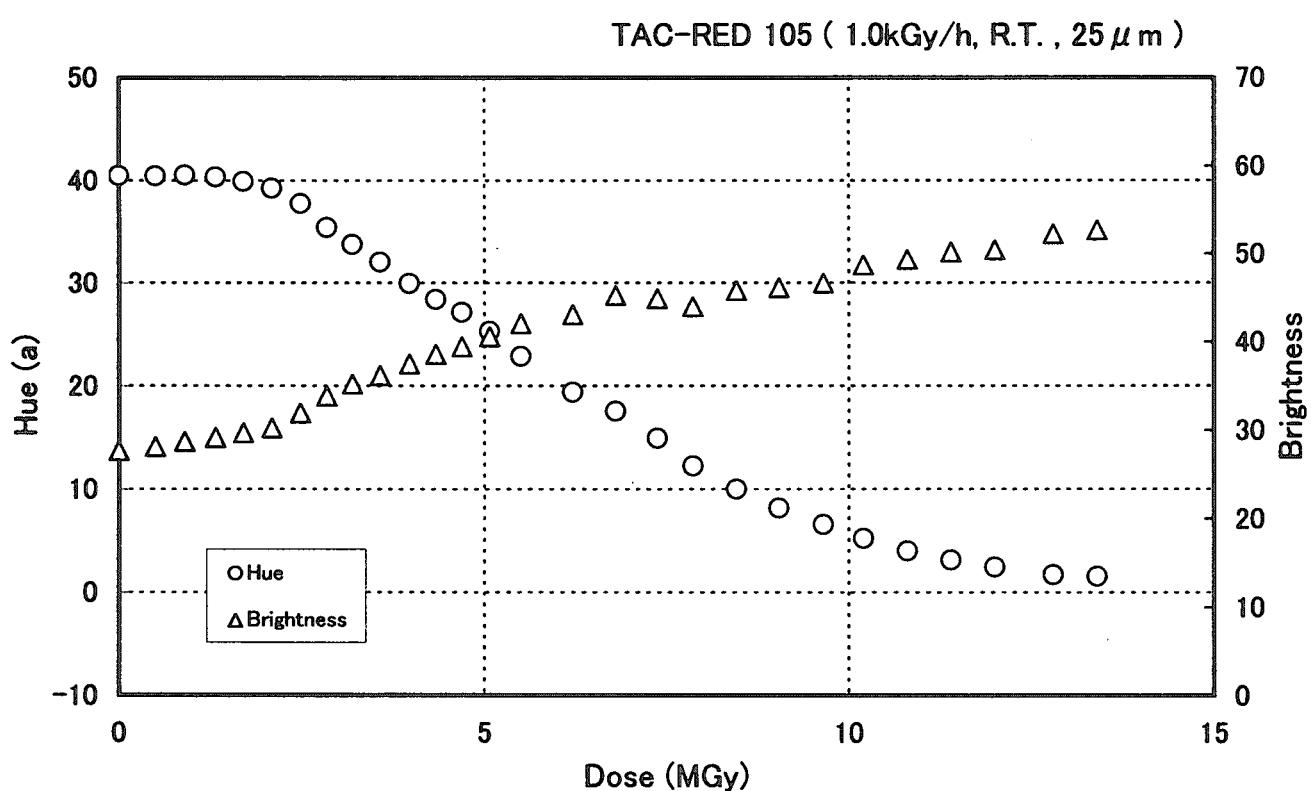


図36.1.3 膜厚25 μ m、染料種Tac Fiery Red-GBM(通称105)試料の線量率1.0 kGy/h、大気、室温下での退色変化(色相及び明度値による)／特性試験

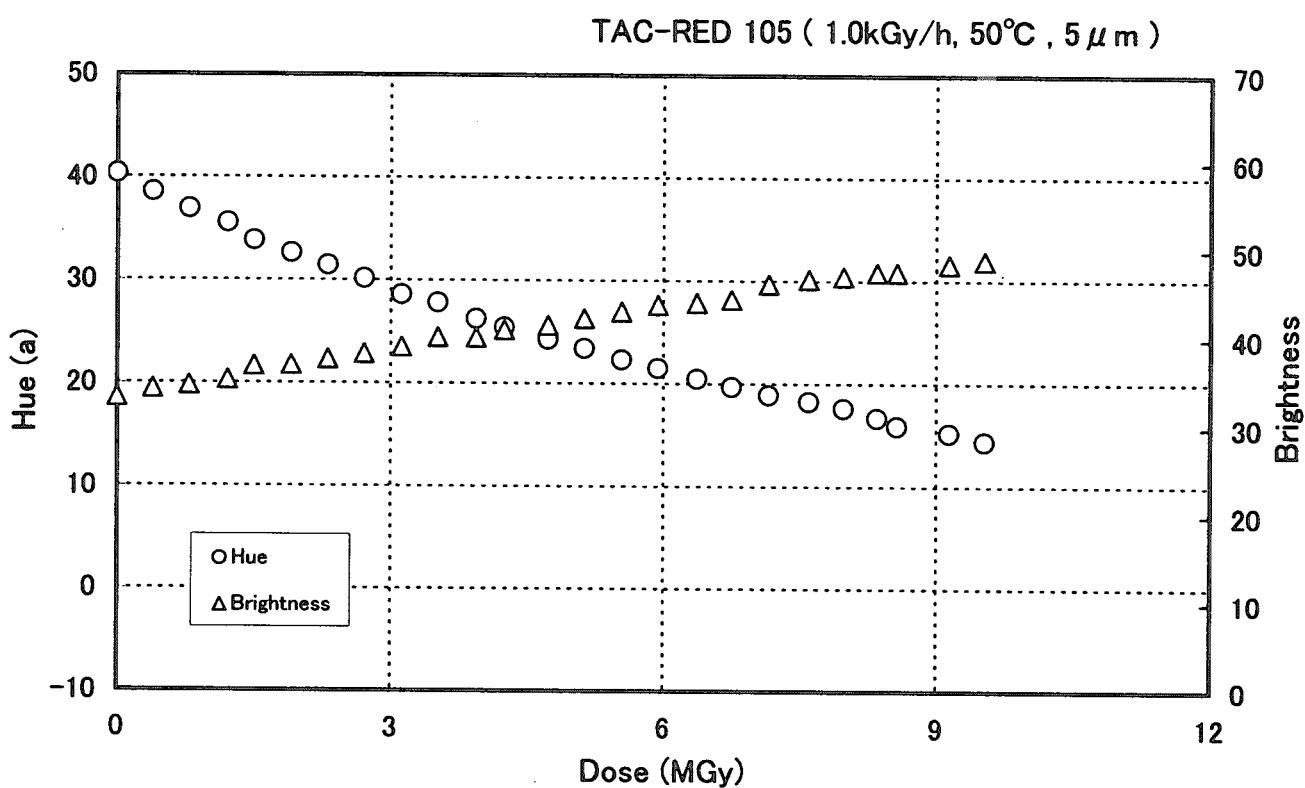


図36.2.1 膜厚5 μm、染料種Tac Fiery Red-GBM(通称105)試料の線量率1.0 kGy/h、大気、50°C下での退色変化(色相及び明度値による)/特性試験

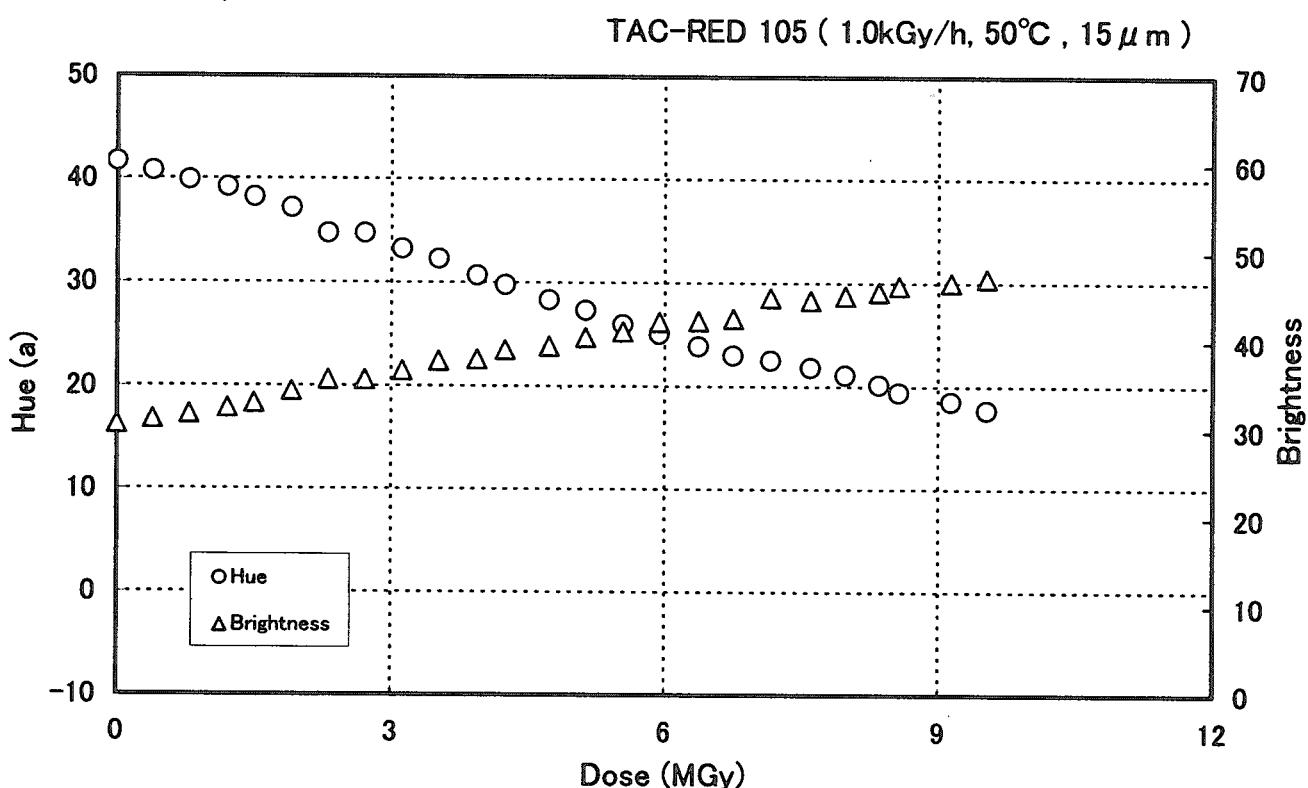


図36.2.2 膜厚15 μm、染料種Tac Fiery Red-GBM(通称105)試料の線量率1.0 kGy/h、大気、50°C下での退色変化(色相及び明度値による)/特性試験

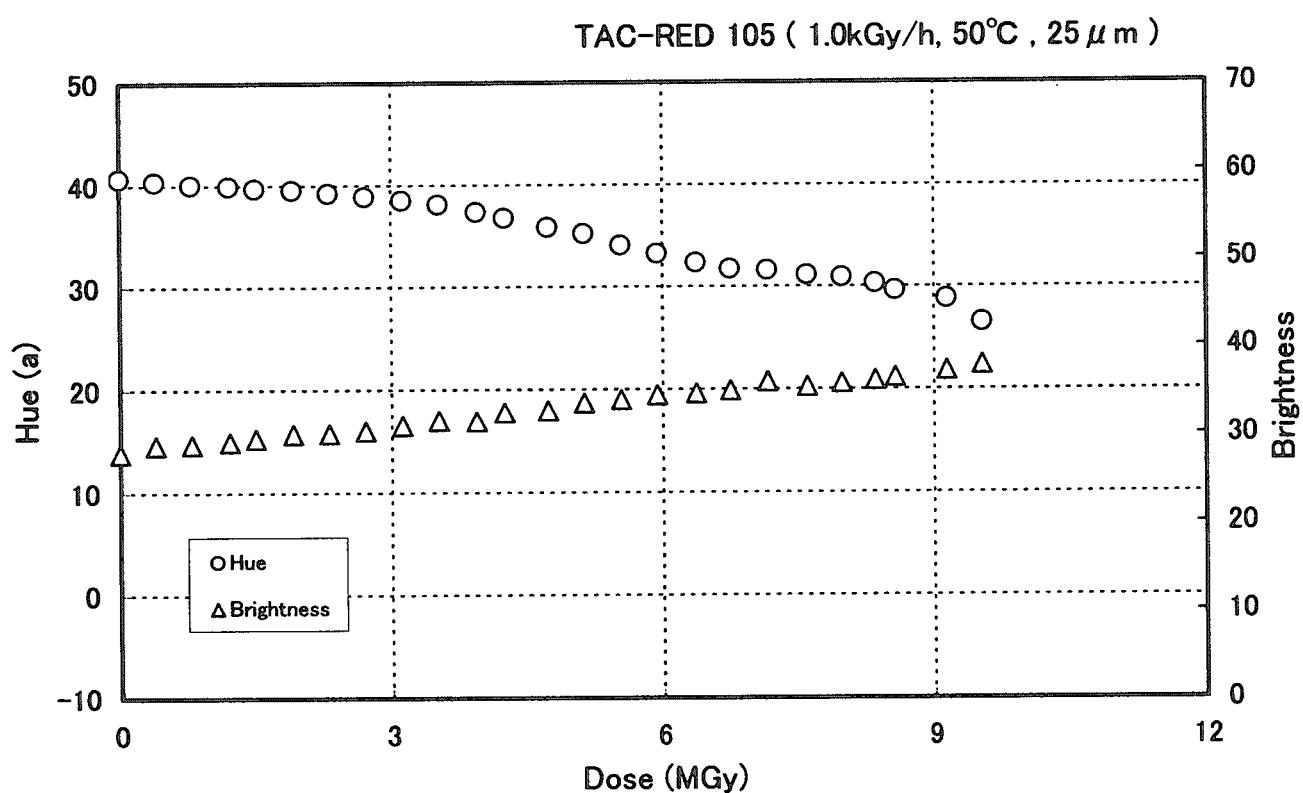


図36.2.3 膜厚25 μm、染料種Tac Fiery Red-GBM(通称105)試料の線量率1.0 kGy/h、
大気、50°C下での退色変化(色相及び明度値による)／特性試験

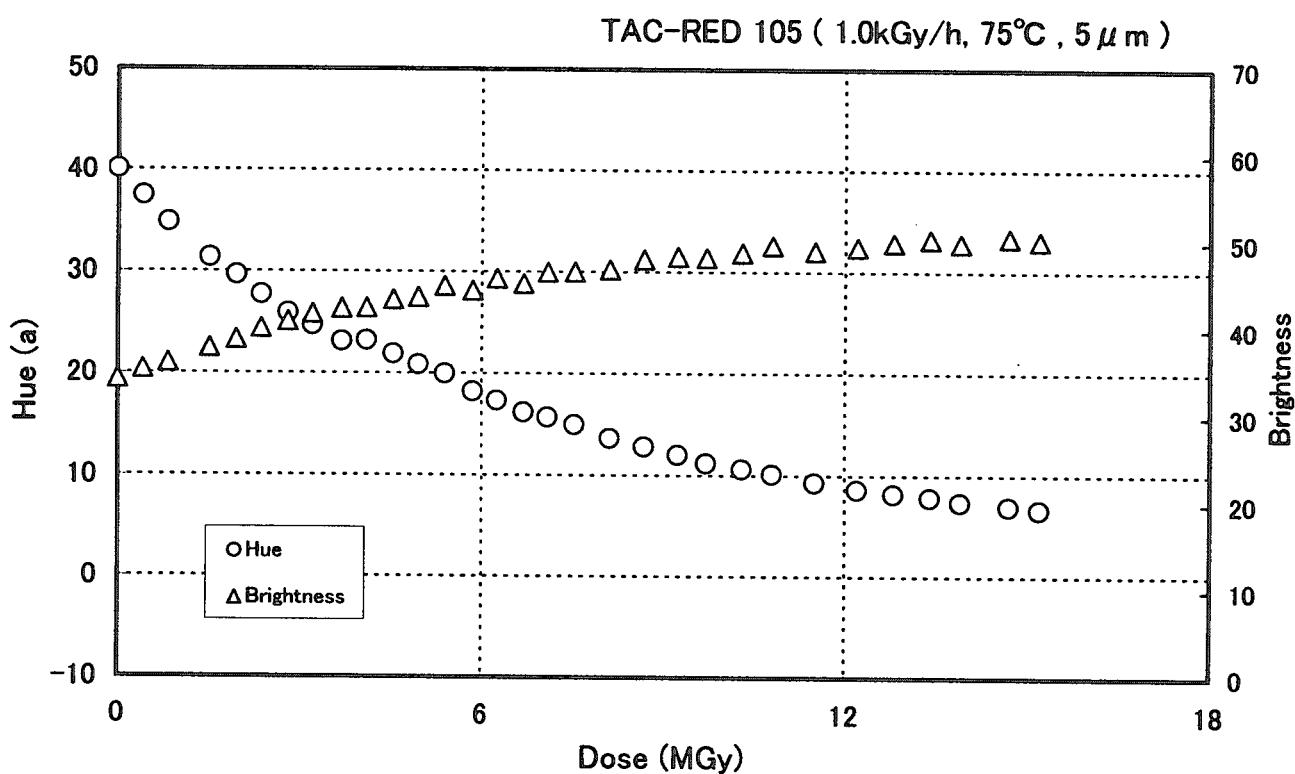


図36.3.1 膜厚5μm、染料種Tac Fiery Red-GBM(通称105)試料の線量率1.0 kGy/h、大気、75°C下での退色変化(色相及び明度値による)／特性試験

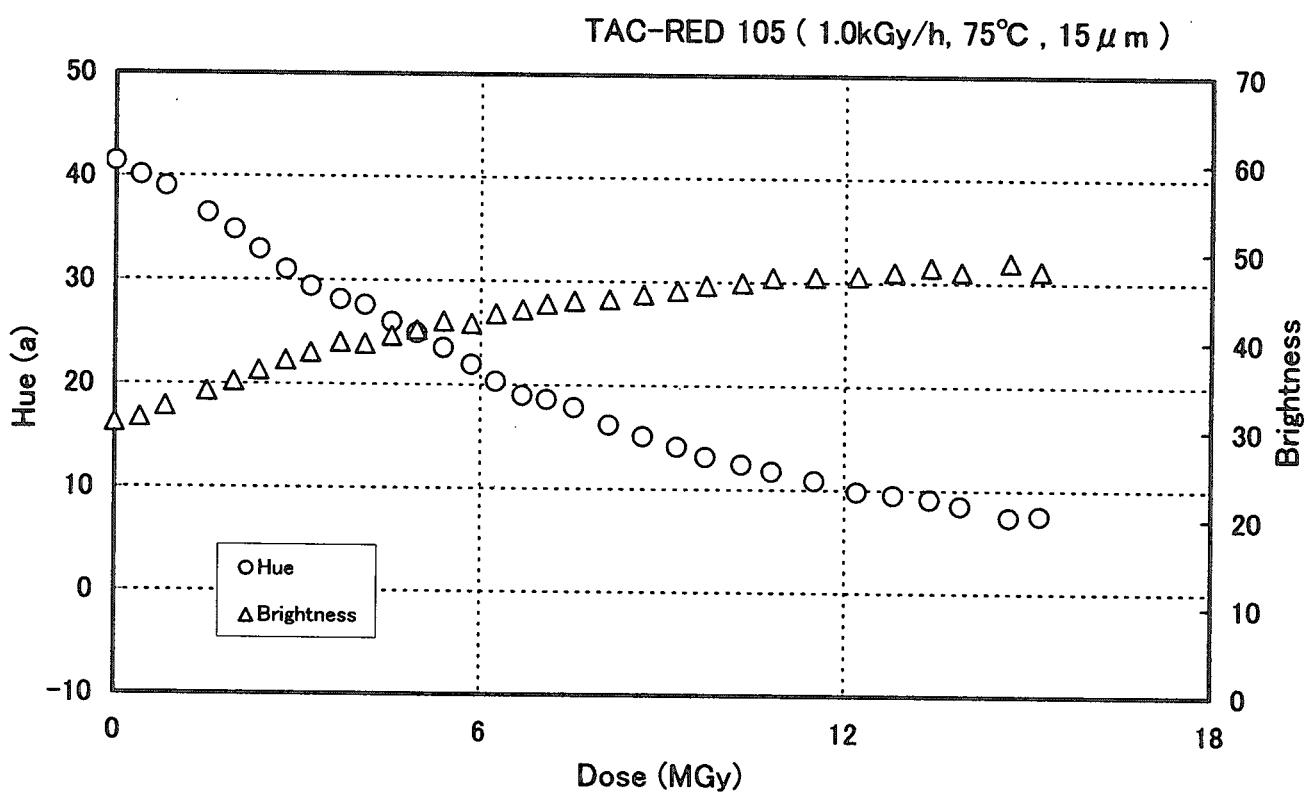


図36.3.2 膜厚15μm、染料種Tac Fiery Red-GBM(通称105)試料の線量率1.0 kGy/h、大気、75°C下での退色変化(色相及び明度値による)／特性試験

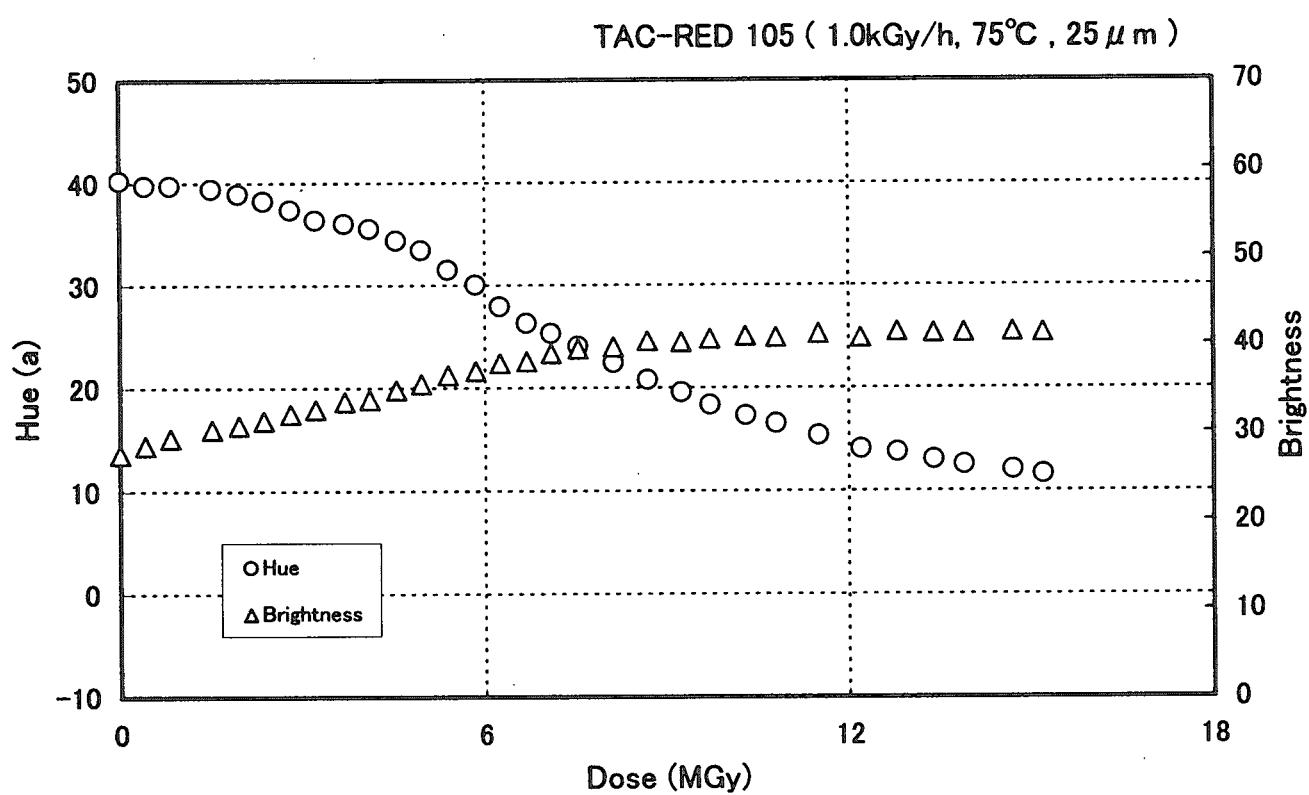


図36.3.3 膜厚25 μm、染料種Tac Fiery Red-GBM(通称105)試料の線量率1.0 kGy/h、
大気、75°C下での退色変化(色相及び明度値による)/特性試験

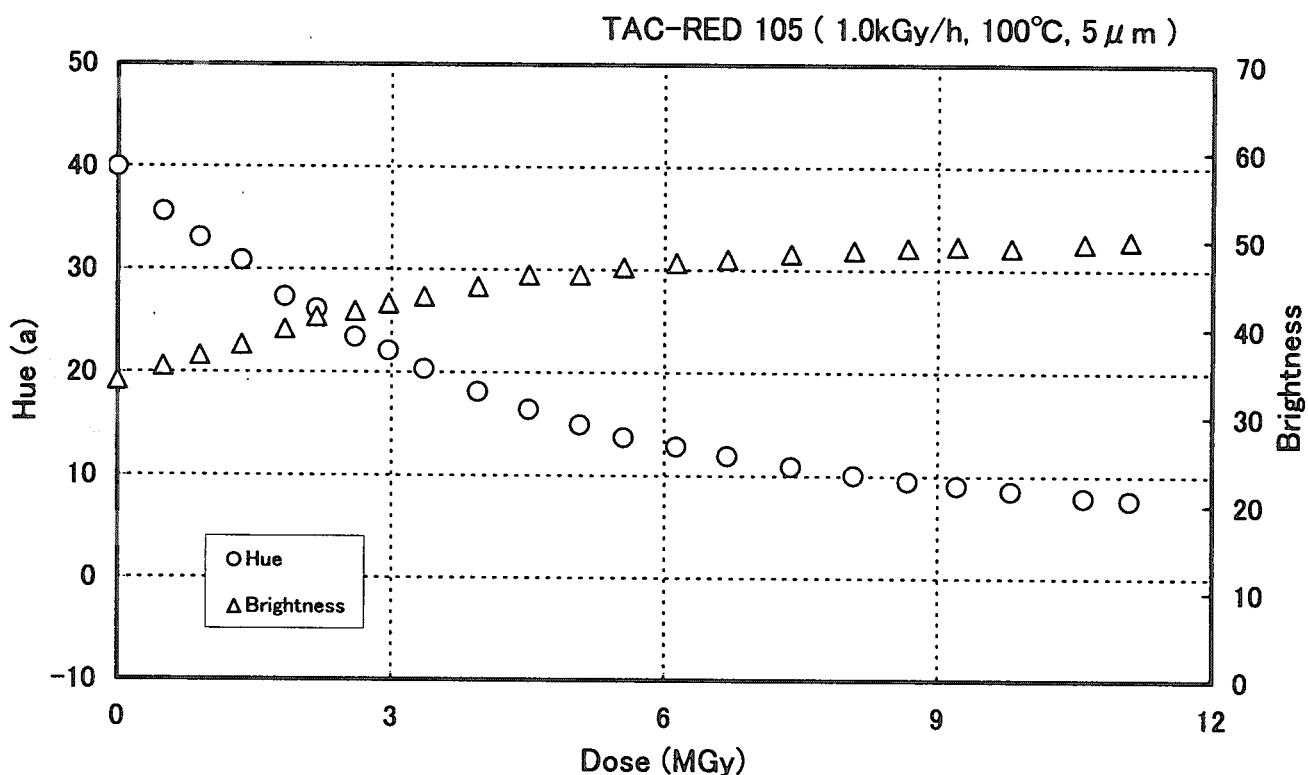


図36.4.1 膜厚5 μm、染料種Tac Fiery Red-GBM(通称105)試料の線量率1.0 kGy/h、大気、100°C下での退色変化(色相及び明度値による)／特性試験

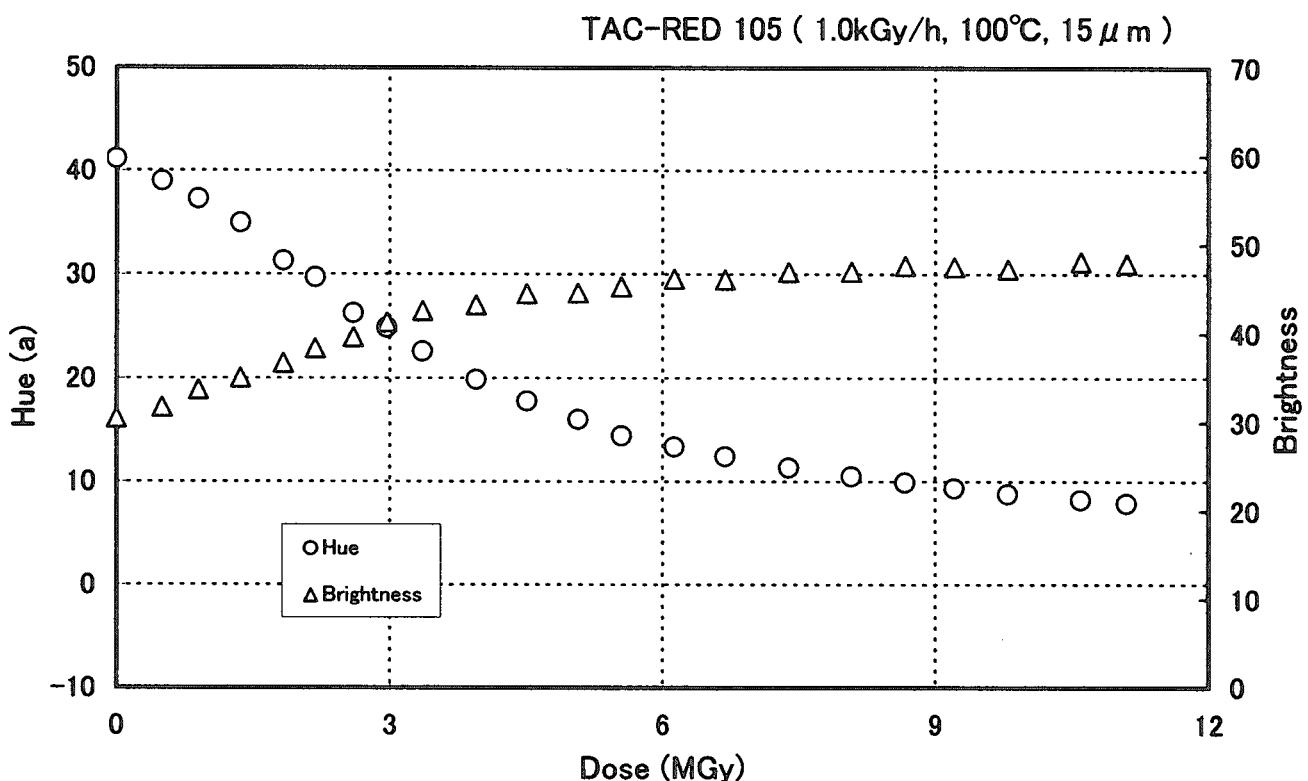


図36.4.2 膜厚15 μm、染料種Tac Fiery Red-GBM(通称105)試料の線量率1.0 kGy/h、大気、100°C下での退色変化(色相及び明度値による)／特性試験

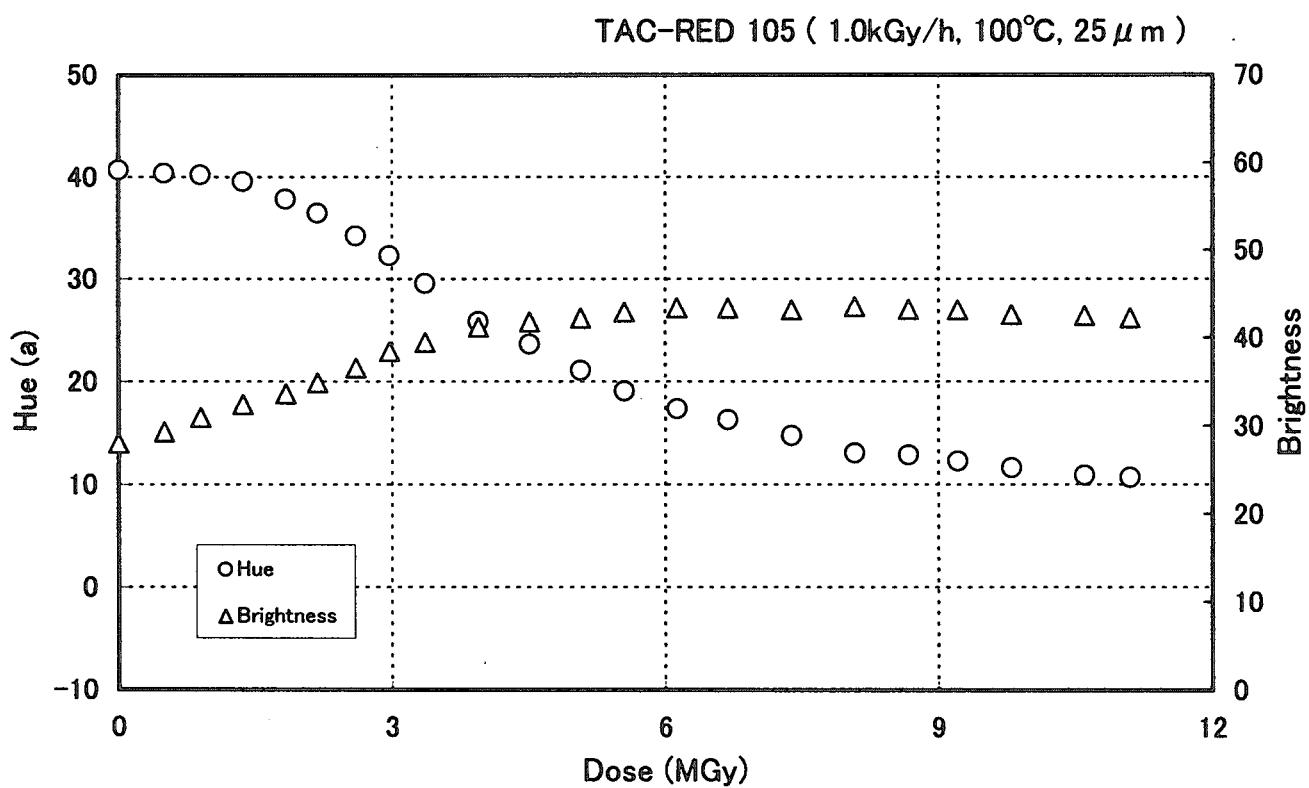


図36.4.3 膜厚25 μm、染料種Tac Fiery Red-GBM(通称105)試料の線量率1.0 kGy/h、
大気、100°C下での退色変化(色相及び明度値による)／特性試験

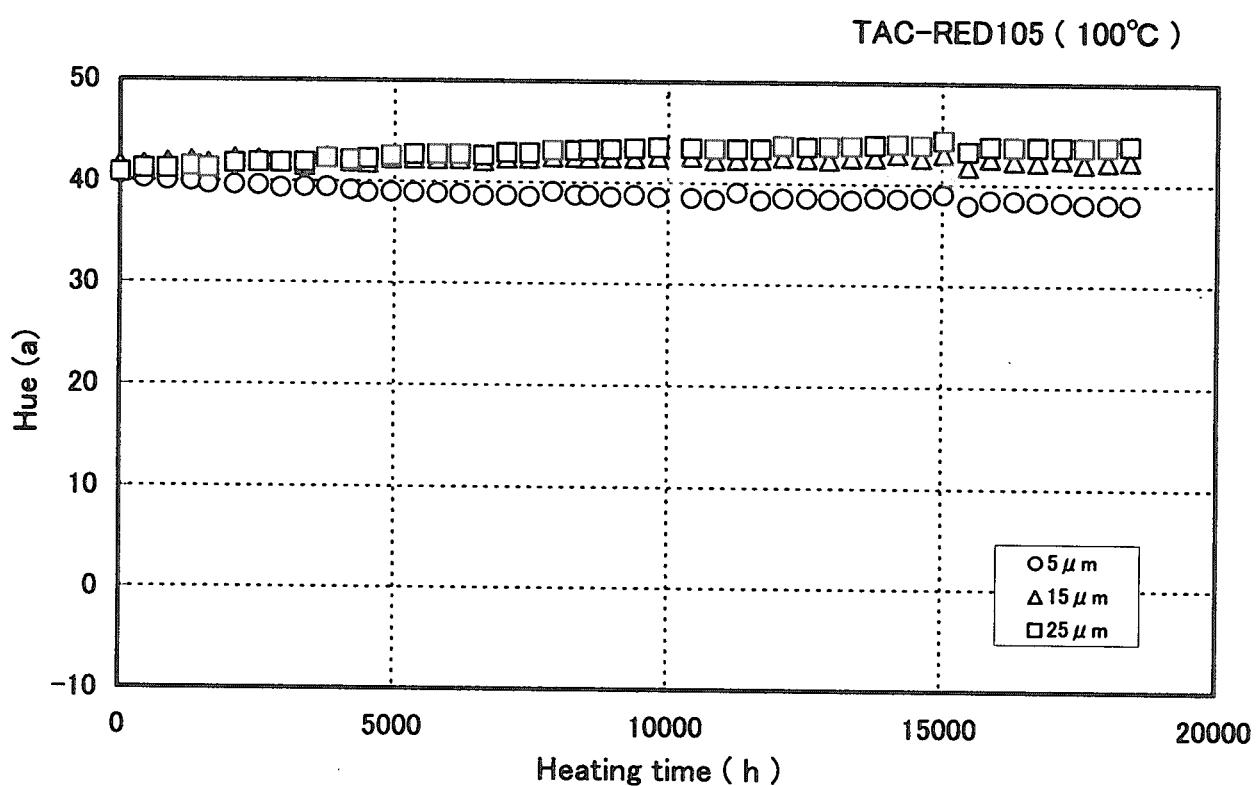


図37.1.1 酸化膜厚5、15、25 μm、染料種Tac Fiery Red-GBM(通称105)試料の無照射、大気、100°C下での退色変化(色相値による)/特性試験

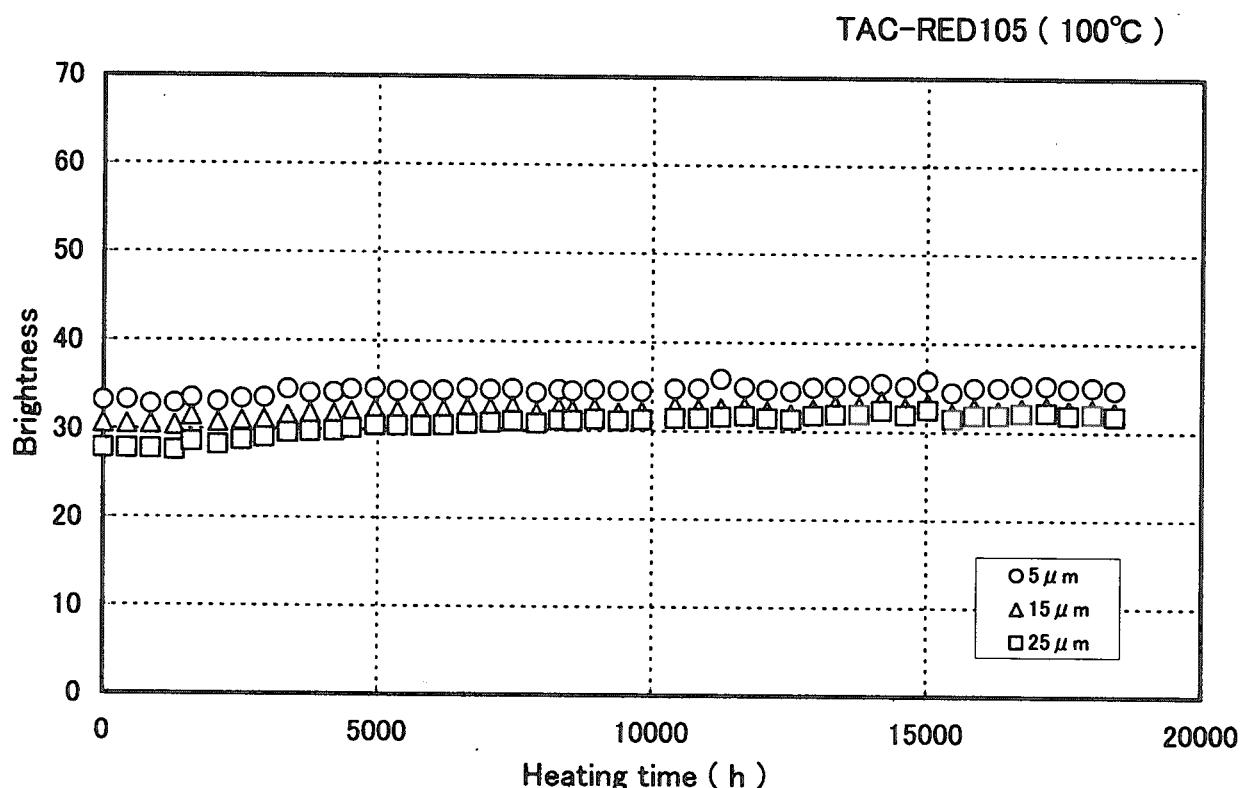


図37.1.2 酸化膜厚5、15、25 μm、染料種Tac Fiery Red-GBM(通称105)試料の無照射、大気、100°C下での退色変化(明度値による)/特性試験

TAC-RED 105 (UV, R.T.)

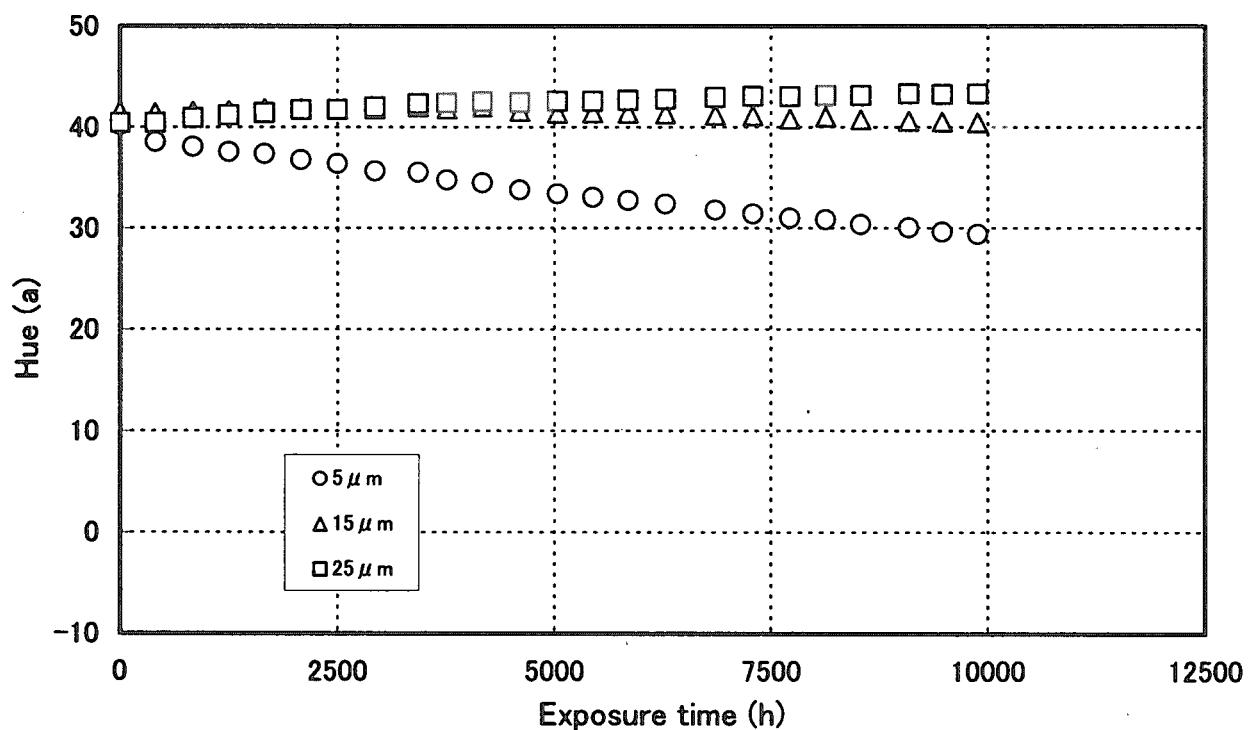


図38.1.1 酸化膜厚5、15、25 μm、染料種Tac Fiery Red-GBM(通称105)試料の無照射、大気、紫外線ランプ下での退色変化(色相値による)/特性試験

TAC-RED 105 (UV, R.T.)

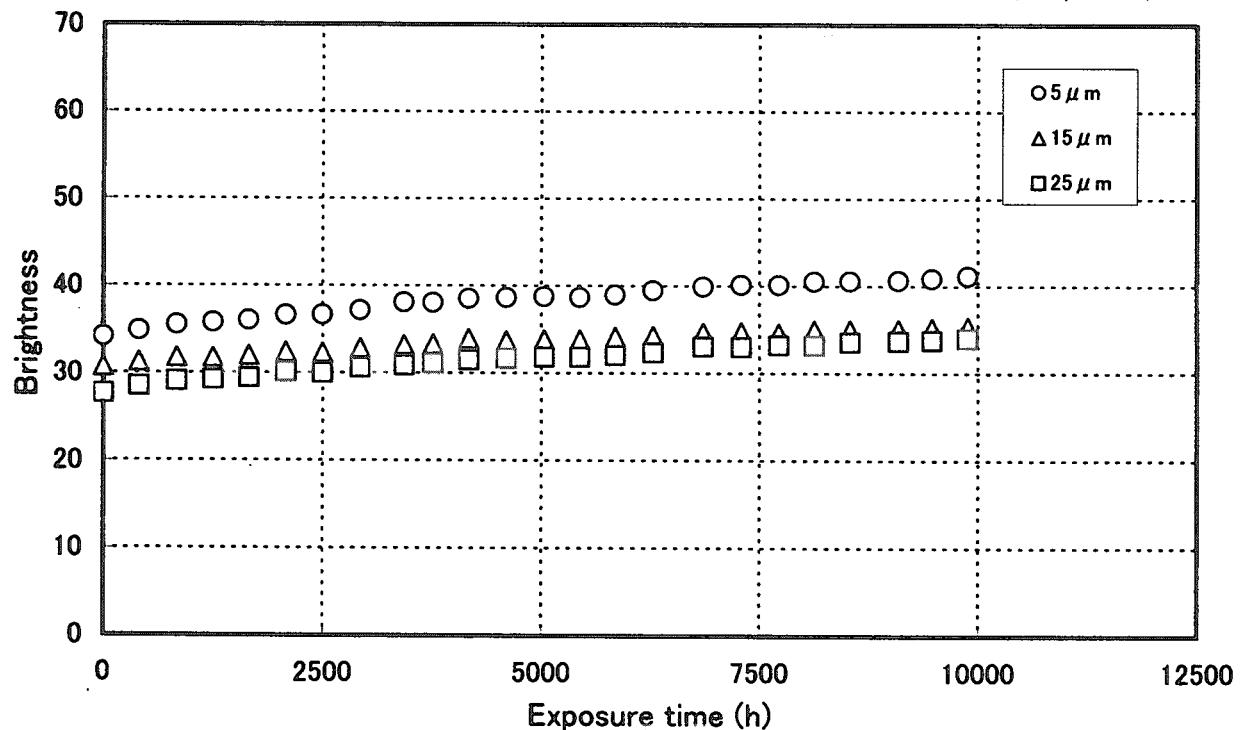


図38.1.2 酸化膜厚5、15、25 μm、染料種Tac Fiery Red-GBM(通称105)試料の無照射、大気、紫外線ランプ下での退色変化(明度値による)/特性試験

4. 低線量率対応カラー線量計開発のための予備試験

4.1 目的

第3章では、高線量率（1 kGy/h 程度）下で高照射量（数十 MGy）測定が可能なカラー線量計の開発を目的とした試験の結果について述べた。本章では、線量率数 Gy/h～数 kGy/h の範囲で低照射量（0.1 kGy～100 kGy 程度）測定が可能なカラー線量計の開発を目的とする。予備試験では、JIS 規格（H 8685-1、H 8685-2）を参考に耐光性の弱いと判断される染料種の中から 1 種を選び、染色条件の異なる 6 種の試験用試料を作製し退色傾向を調べる。その結果に基づき、以後の特性試験（高温、紫外線影響試験）用として 3 種程度の試験用試料を選ぶ。

4.2 試験用試料

1) 色と染料種

- ・青色：商品名 Tac Blue RCD（通称：Blue 501）

（含金属染料と非含金属染料の二種類のアゾ系染料の配合物）

- 2) 酸化アルミニウム被膜厚 : 10 μm

3) 試料番号と染色条件

| 試料番号 | 染料濃度 (g/l) | 処理時間 (sec) |
|-------|------------|------------|
| No. 1 | 2 | 15 |
| No. 2 | 2 | 60 |
| No. 3 | 2 | 120 |
| No. 4 | 5 | 60 |
| No. 5 | 5 | 180 |
| No. 6 | 5 | 360 |

4.3 試験条件

- 1) 線量率 (Gy/h) : 20、200、1000

- 2) 雰囲気 : 大気、室温

3) 試料の履歴と試験数

- ・履歴 : 低線量率対応試験用として作製

- ・試験数

20 Gy/h : 各試料 1 試料／1 試験回 × 1 回

200 Gy/h : 各試料 1 試料／1 試験回 × 1 回

1000 Gy/h : 各試料 1 試料／1 試験回 × 1 回

4.4 測定項目

1) 色相 (() 内はマンセル色立体上の座標軸を示す。図 1.3 参照)

- 各試料 : -b (青) ~ +b (黄) 軸上

2) 明度

- 100 ~ 0 ~ +100

4.5 試験結果と考察

1) 線量率 : 20 Gy/h の場合

- 色相は照射量の増加に伴い、b 軸上をマイナスからプラス方向へと規則的に退色、青味が失われていく (図 4.1.1)。

いずれの試料とも照射開始から 10kGyまでの変化が激しく、それ以降 30kGyまでは緩やかな変化を示す。試料番号 5、6 は似たような傾向を示すが、全体としては試料間の違いが明確に現れている。

- 明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる (図 4.1.2)。

色相変化とは異なり、照射開始から 20kGyまでの変化は緩やかであるが、20kGyから 30kGyにかけて急激な変化を示す他、試料番号 5、6 の変化に差異がみられる。

- 図 4.1.3 に照射後試料を示す。退色変化は赤色試料に比べればいさか不明瞭ではあるが、各試料とも照射前に比べ確実に進行していることがわかる。

2) 線量率 : 200 Gy/h の場合

- 色相は照射量の増加に伴い、b 軸上をマイナスからプラス方向へと規則的に退色、青味が失われていく (図 4.2.1)。

いずれの試料とも照射開始から 50kGy 近辺までやや激しい変化を示す。20 Gy/h の場合と同様、試料番号 5、6 は同様の傾向を示す。全体的には試料間の違いが明確に現れている。

- 明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる (図 4.2.2)。

全体的には色相変化を裏付ける変化を示すが勾配は緩やかであり、色相変化に比べ、試料番号 5、6 を含め試料間の差異も明確に現れている。

3) 線量率 : 1000 Gy/h の場合

- 色相は照射量の増加に伴い、b 軸上をマイナスからプラス方向へと規則的に退色、青味が失われていく (図 4.3.1)。

全体的には、照射開始から 600kGy 近辺までは試料間に差異がみられるが、それ以降 1000kGy にかけては差異が縮小していく。但し、試料番号 5、6 間には 200kGy 近辺まで差異はみられない。

- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 4.3.2）。

全体的には色相変化を裏付ける変化を示すが勾配は緩やかである。また、色相変化に比べ、試料番号 5、6 を含め試料間の差異は明確に現れている。

4.6 まとめ

- 1) 退色は、いずれの線量率においても色相の薄くなる条件で調整した試料（試料番号が小さい）は、濃くなる条件で調整した試料（試料番号が大きい）に比べ進行が早い。また、同一照射量でも低線量率の方が退色が大きい。これは既に述べたように、低線量率の方が同一照射量に達するまでに大気中の酸素に曝露されている時間が長いことに起因すると考えられる。
 - 2) いずれの線量率においても、試料間の違いは色相変化より明度変化の方に明確に現れる。しかしながら、退色変化は緩やかである（照射量間の差が小さい）ため、本試験用試料においては、色相変化での測定の方が高い精度が得られるものと考えられる。
 - 3) 低線量率、低照射量測定の観点では、図 4.1.1 に示す通り、いずれの試料とも線量率 20 Gy/h で 30 kGy 近辺までの測定が可能なことがわかる。特に、10 kGy までの照射では 10 kGy 以後に比べ退色変化が急激であることから、この範囲では高精度の測定が可能と考えられる。
 - 4) 以上の結果を基に、以後の特性試験（温度影響試験、紫外線影響試験）には、各試料の残数等を考慮し、以下の試料を使用して実施することとした。
 - ・温度 (100°C) 影響試験

| | | |
|---------|---------|---------|
| No. 2 : | 2 g / ℥ | 60 sec |
| No. 4 : | 5 g / ℥ | 60 sec |
| No. 5 : | 5 g / ℥ | 180 sec |
 - ・紫外線影響試験

| | | |
|---------|---------|--------|
| No. 2 : | 2 g / ℥ | 60 sec |
| No. 4 : | 5 g / ℥ | 60 sec |
- また、No. 2、4、5 については線量率 2 Gy/h での低線量測定も試験し、

その可能性を検証することとした。

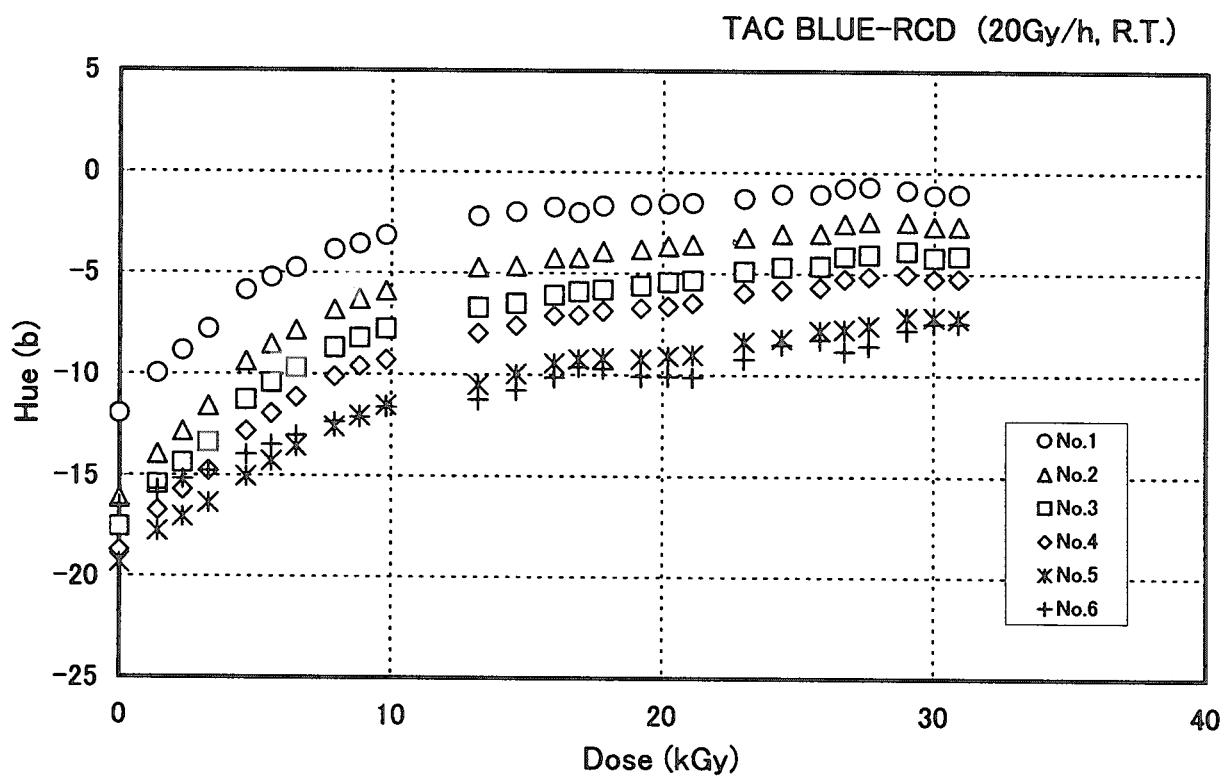


図4.1.1 染色条件の異なる6種類の試料の線量率20 Gy/h、大気、室温下での退色変化(色相値による)／予備試験
(試料: 染料種Tac Blue RCD(通称:Blue 501)、膜厚10 μm、試料番号1～6)

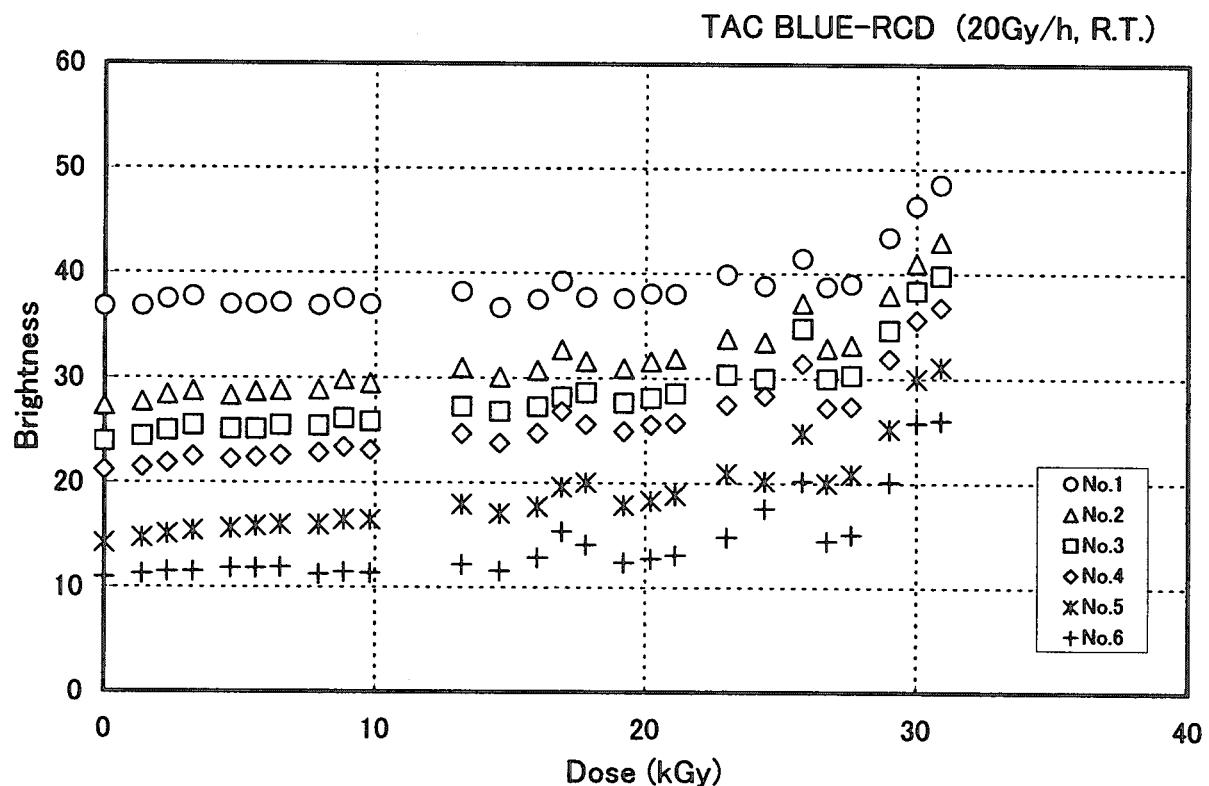


図4.1.2 染色条件の異なる6種類の試料の線量率20 Gy/h、大気、室温下での退色変化(明度値による)／予備試験
(試料: 染料種Tac Blue RCD(通称:Blue 501)、膜厚10 μm、試料番号1～6)

TAC BLUE-RCD (200Gy/h, R.T.)

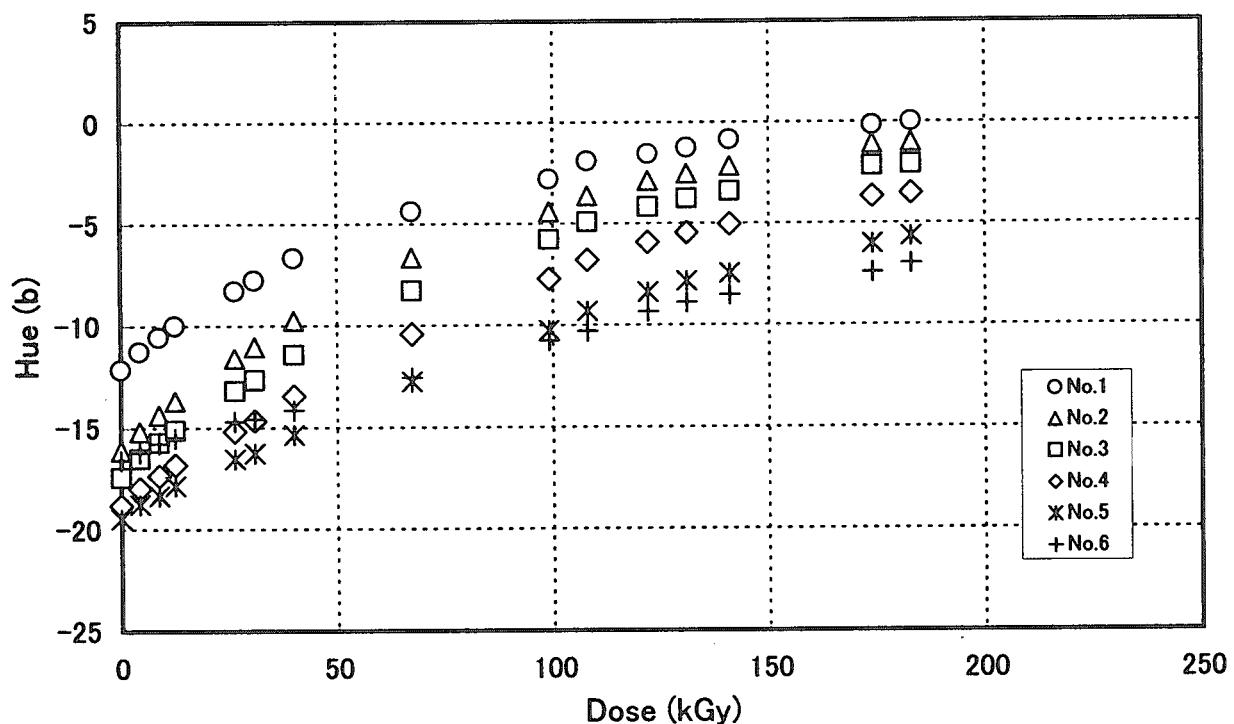


図4.2.1 染色条件の異なる6種類の試料の線量率200 Gy/h、大気、室温下での退色変化(色相値による)／予備試験
(試料:染料種Tac Blue RCD(通称:Blue 501)、膜厚10 μm、試料番号1～6)

TAC BLUE-RCD (200Gy/h, R.T.)

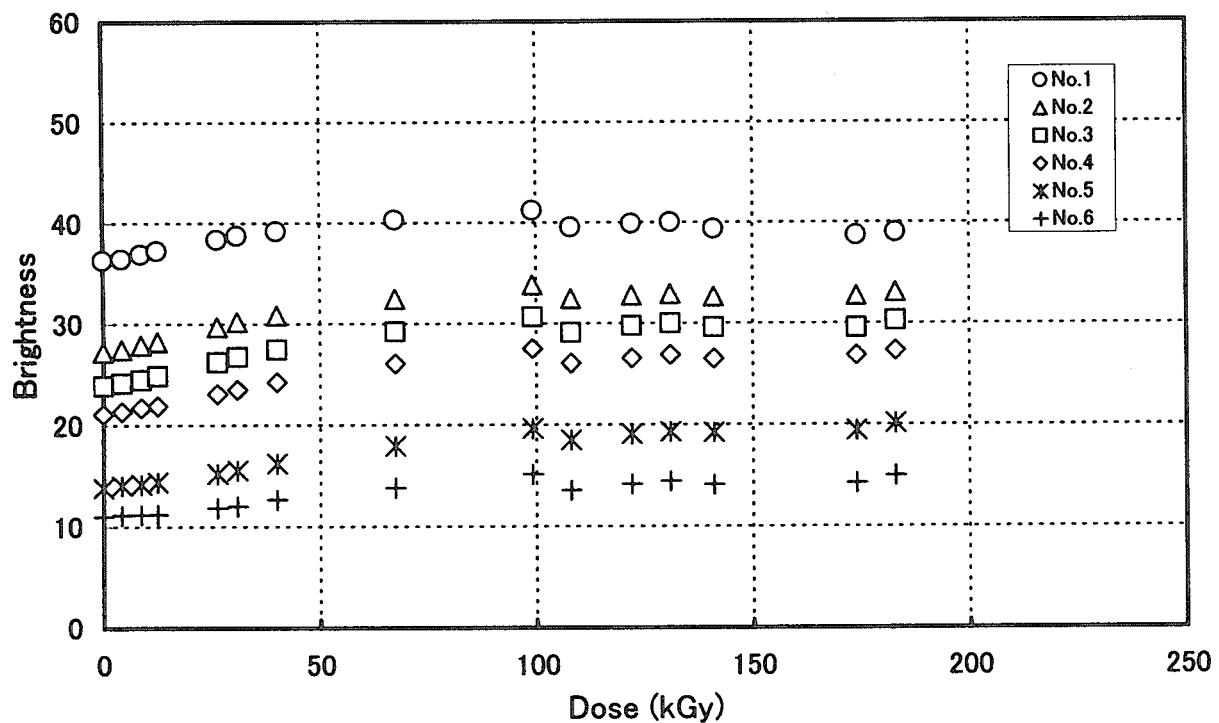


図4.2.2 染色条件の異なる6種類の試料の線量率200 Gy/h、大気、室温下での退色変化(明度値による)／予備試験
(試料:染料種Tac Blue RCD(通称:Blue 501)、膜厚10 μm、試料番号1～6)

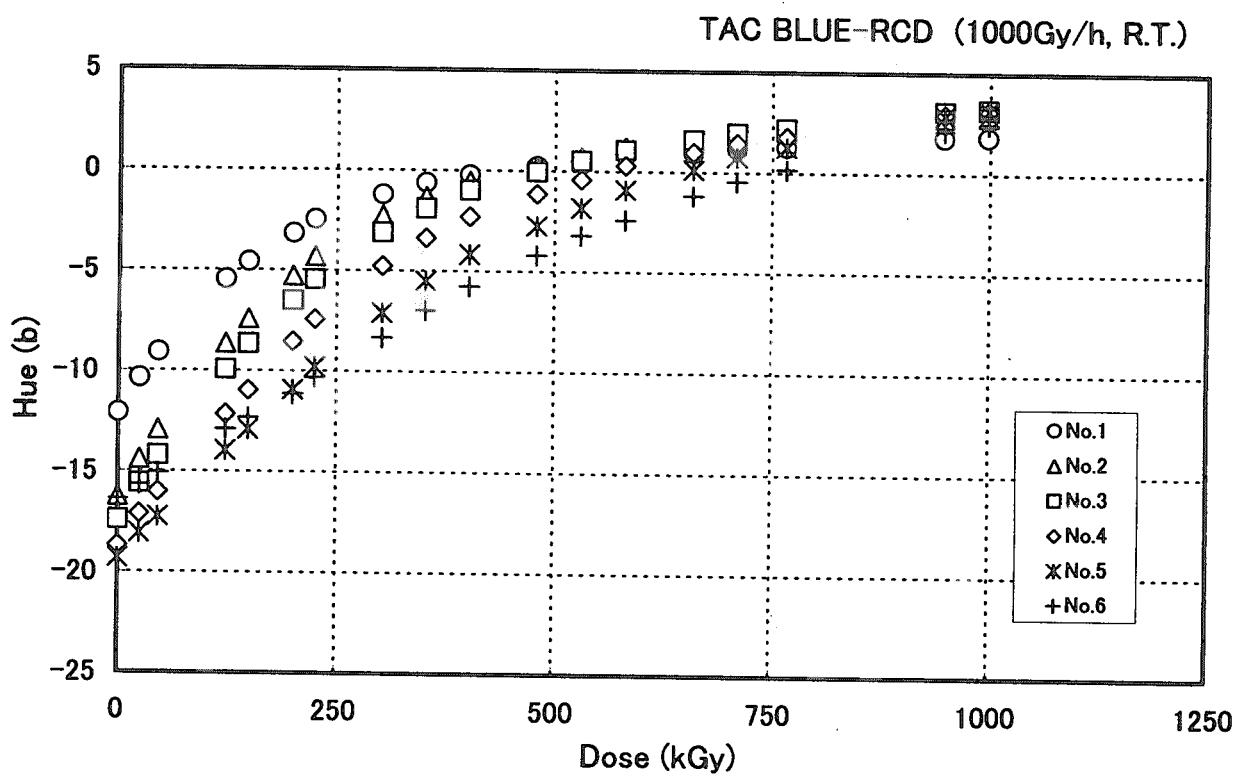


図4.3.1 染色条件の異なる6種類の試料の線量率1000 Gy/h、大気、室温下での退色変化(色相値による)／予備試験
(試料:染料種Tac Blue RCD(通称:Blue 501)、膜厚10 μ m、試料番号1～6)

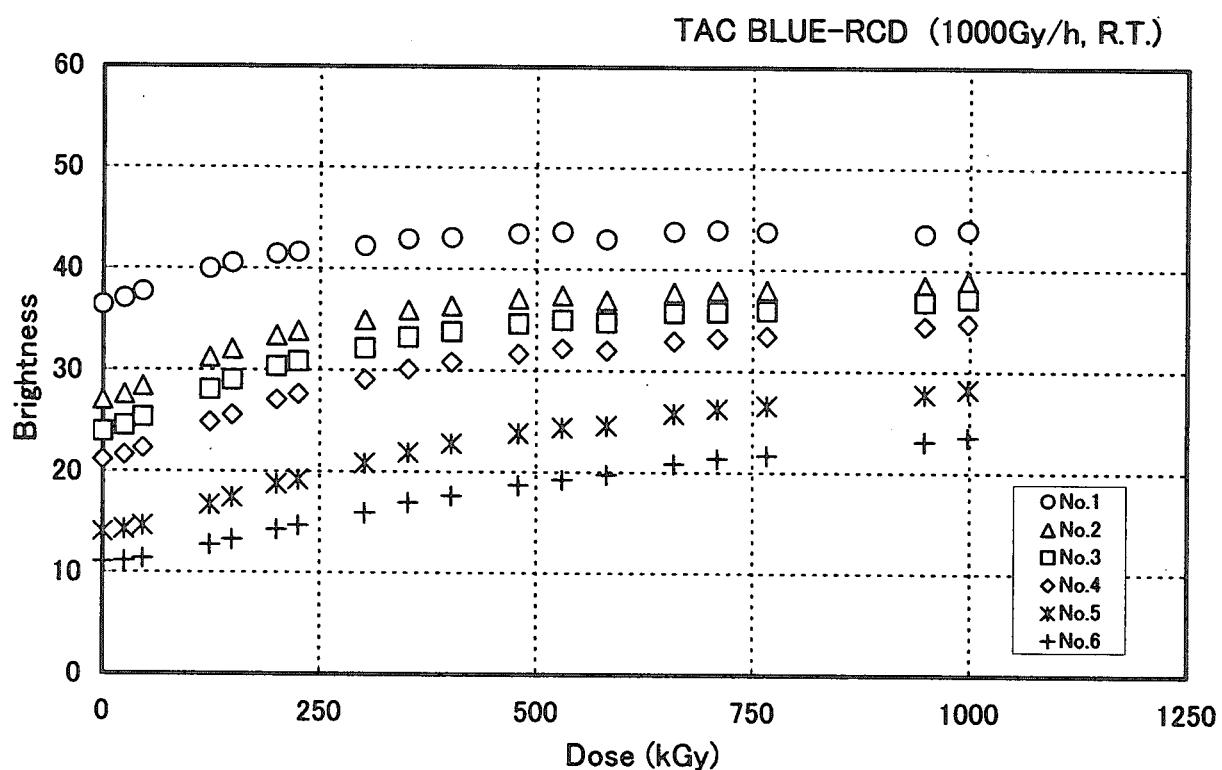


図4.3.2 染色条件の異なる6種類の試料の線量率1000 Gy/h、大気、室温下での退色変化(明度値による)／予備試験
(試料:染料種Tac Blue RCD(通称:Blue 501)、膜厚10 μ m、試料番号1～6)

5. 低線量率対応青色カラー線量計の特性試験

5.1 低線量率対応青色試料の高温下での照射による退色変化への影響

5.1.1 目的

赤色アゾ染料同様、青色アゾ染料の退色にも大気中の酸素や水分の他、温度による影響も考えられる。本試験では、保守装置使用時の想定温度範囲(50~100°C)から、影響が顕著に現れると考えられる温度として100°Cを選び、高温環境での照射が退色に与える影響について調べる。

5.1.2 試験用試料

1) 色と染料種

・青色：商品名 Tac Blue RCD (通称:Blue 501)

(含金属染料と非含金属染料の二種類のアゾ系染料の配合物)

2) 酸化アルミニウム被膜厚 : 10 μm

3) 試料番号と染色条件

| 試料番号 | 染料濃度 (g/l) | 処理時間 (sec) |
|-------|------------|------------|
| No. 2 | 2 | 60 |
| No. 4 | 5 | 60 |
| No. 5 | 5 | 180 |

5.1.3 試験条件

1) 線量率 (Gy/h) : 2

2) 霧囲気 : 大気、室温

3) 試料の履歴と試験数

・履歴 : 低線量率対応試験用として作製

・試験数

室温 : 各試料 3試料／1試験回 × 1回

100°C : 各試料 1試料／1試験回 × 1回

5.1.4 測定項目

1) 色相

・-b(青) ~ +b(黄) 軸上

2) 明度

・-100 ~ 0 ~ +100

5.1.5 試験結果と考察

1) 室温／2 Gy/h の場合

- ・色相は照射量の増加に伴い、b 軸上をマイナスからプラス方向へとほぼ規則的に退色する（図 51.1.1）。
- ・退色は、色相の薄くなる条件で調整した試料（No. 2）は、濃くなる条件で調整した試料（No. 4、5）に比べ程度が高い。
No. 4 と 5 では、1 MGyあたりまでは共に同様の退色傾向を示すが、それ以降は No. 4 の方が退色の進行が早くなる。
- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 51.1.2）。
色相変化とは異なり、照射開始から 6 kGyまでの変化はきわめて緩やかであるが、6 kGyから 9 kGyにかけては急な変化を示す。また、試料間には照射初期から明確な差異がみられる。

2) 100°C／2 Gy/h の場合

- ・色相は照射量の増加に伴い、b 軸上をマイナスからプラス方向へとほぼ規則的に退色するが、試料間の差異は極めて小さく、また 3 kGy 以後はいずれの試料ともほとんど変化しない（退色しない）（図 51.2.1）。
- ・照射開始から 3 kGyまでの退色の進行は、いずれの試料とも室温照射に比べ急激である。No. 2 と 4 の試料は、3 kGy 以後は同様の傾向を示すが、No. 5 の退色の進行は 2、4 に比べやや遅くなる。
- ・明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 51.2.2）。
- ・色相変化とほぼ同様の傾向を示すが、照射開始から 9 kGyまで、試料間の差異は明確に現れている。

5.1.6 まとめ

1) 試料 No.2 の室温照射と 100°C 照射の色相変化の結果を下表にまとめる。

表 51.1 試料 No.2 の室温及び 100°C 照射時の色相値変化

（膜厚：10 μm、線量率：2 Gy/h）

| 温度 (°C) | 照射量 (kGy) | | | | | |
|------------|-----------|-----|------|------|------|------|
| | 0 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 |
| R.T. | -15.5 | -12 | -9.5 | -8 | -7 | -6 |
| 100 | -15 | -8 | -6.5 | -6.5 | -6.5 | -6.5 |

退色は、室温照射に比べ 100°Cでは明らかに促進されている。その差を絶対値で示すと、1 kGy : 4、3 kGy : 3、5 kGy : 1.5、7 kGy : 0.5 と

なり低照射量領域での差が大きい。

2) 試料 No.5 の室温照射と 100°C 照射の色相変化の結果を下表にまとめる。

表 51.2 試料 No. 5 の室温及び 100°C 照射時の色相値変化

(膜厚 : 10 μm、線量率 : 2 Gy/h)

| 温度 (°C) | 照射量 (kGy) | | | | | |
|------------|-----------|-----|-----|-------|-----|-----|
| | 0 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 |
| R.T. | -18 | -16 | -14 | -12.5 | -12 | -11 |
| 100 | -17.5 | -11 | -6 | -5.5 | -5 | -5 |

試料 No. 2 と同様、室温照射に比べ 100°C では退色は明らかに促進されているが、その差を絶対値で示すと、1 kGy : 5、3 kGy : 8、5 kGy : 7、7 kGy : 7 となり、試料 No.2 に比べ照射量全域にわたって差が大きい。これは、試料 No. 5 の初期色相値が試料 No. 2 の初期色相値に比べ高いことに起因すると考えられる。

- 3) 本試験の結果では、室温照射、100°C 照射のいずれにおいても試料間の退色変化の相違は色相変化より明度変化の方に顕著に現れることがわかった。
- 4) 温度による影響は、試料の初期色相値によって異なり、初期色相値の高い試料（試料 No. 5）の方が、低い試料（試料 No. 2）に比べ大きい。また室温照射の場合、いずれの試料とも照射量が 9 kGy を越えても色相値、明度値に飽和する傾向はみられないが、100°C 照射では各試料毎に一定の照射量（明度値で示す。試料番号 No. 2 : 2.4 kGy、試料番号 No. 4 : 3 kGy、試料番号 No. 5 : 7 kGy）以降、色相値、明度値とも飽和する。

5.2 低線量率対応青色試料の高温、無照射時の退色変化

5.2.1 目 的

5.1 節では、高温下での照射が退色を促進することを確認した。本試験では、試験用試料をガンマ線照射なしで大気、高温（100°C）下に曝露し、退色への影響を調べる。

5.2.2 試験用試料

1) 色と染料種

- ・青色：商品名 Tac Blue RCD（通称：Blue 501）

(含金属染料と非含金属染料の二種類のアゾ系染料の配合物)

2) 酸化アルミニウム被膜厚 : $10\mu\text{m}$

3) 試料番号と染色条件

| 試料番号 | 染料濃度 (g/l) | 処理時間 (sec) |
|-------|------------|------------|
| No. 2 | 2 | 60 |
| No. 4 | 5 | 60 |
| No. 5 | 5 | 180 |

5.2.3 試験条件

1) 線量率 (Gy/h) : ガンマ線照射は無し

2) 霧囲気 : 大気、 100°C

3) 試料の履歴と試験数

・履歴 : 低線量率対応試験用として作製

・試験数

 100°C : 各試料 1試料／1試験回 \times 1回

5.2.4 測定項目

1) 色相

・ $-b$ (青) ~ $+b$ (黄) 軸上

2) 明度

・ $-100 \sim 0 \sim +100$

5.2.5 試験結果と考察

1) 色相は照射量の増加に伴い、 b 軸上をマイナスからプラス方向へとほぼ規則的に退色するが、試料間の差異は極めて小さく、また曝露時間 3500 時間以降 9000 時間まではいずれの試料ともほとんど変化しない（退色しない）（図 52.1.1）。

2) 明度は、退色の進行と共に基材である酸化アルミニウムの地膜が露出するため高くなる（図 52.1.2）。

色相変化とほぼ同様の傾向を示すが、曝露開始以降 9000 時間まで試料間の差異は明確に現れている（色相の薄くなる条件で調整した試料（No. 2）は、濃くなる条件で調整した試料（No. 4、5）に比べ退色の程度が高い）。

5.2.6 まとめ

1) 本結果と 5.1 節の 100°C 照射の結果から、温度による退色促進効果につ

いて調べる。下表は試料 No. 2、4、5について、100°C下、線量率 2 Gy/h で 2 kGy 照射したときの色相変化と 100°C下、無照射で 1,000 時間曝露したときの色相変化の結果を比較したものである。

なお、1,000 時間は線量率 2 Gy/h で 2 kGy 照射するために要する時間である。

表 52.1 試料 No. 2、4、5 の 100°C 照射及び 100°C 無照射時の
退色の違い（色相値による）

試料 No. 2

| 照射条件 | 照射前 色相値 : H0 | 2 kGy 照射後 または 1,000 時間曝露後 色相値 : H1 | $\Delta H = H0 - H1$ | 退色率 : $\Delta H / H0$ |
|-------------------|--------------------|---|----------------------|--------------------------|
| ケース 1 : 100°C 照射 | -15.0 | -7.0 | -8.0 | 0.53 |
| ケース 2 : 100°C 無照射 | -15.5 | -10.0 | -5.5 | 0.35 |

試料 No. 4

| | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|------|
| ケース 1 : 100°C 照射 | -18.0 | -7.5 | -10.5 | 0.58 |
| ケース 2 : 100°C 無照射 | -17.5 | -10.5 | -7.0 | 0.40 |

試料 No. 5

| | | | | |
|-------------------|-------|------|------|------|
| ケース 1 : 100°C 照射 | -17.5 | -7.5 | -10 | 0.57 |
| ケース 2 : 100°C 無照射 | -17.5 | -11 | -6.5 | 0.37 |

ケース 1 : 図 51.2.1、ケース 2 : 図 51.1.1

- 2) ケース 1 とケース 2 それぞれの退色率の結果から、温度 100°C 曝露のみによる退色分をもとめると、試料 No. 2 : 66%、試料 No. 4 : 69%、試料 No. 5 : 65% となり、いずれの試料でもガンマ線照射による退色より高温による退色分の大きいことがわかった。
- 3) また高温 (100°C) による影響も、これまでに試験した赤色の試験用試料 (染料種 : Aluminum Fiery Red ML、Tac Fiery Red-GBM) に比べてかなり受けやすく、耐光性が弱い染料は熱にも弱いことを示していることがわかった。

5.3 低線量率対応青色試料の紫外線による退色変化（ガンマ線照射なし）

5.3.1 目 的

室内紫外線による退色を調べるために、蛍光灯を紫外線源とする退色試験を実施する。

5.3.2 試験用試料

1) 色と染料種

- ・青色：商品名 Tac Blue RCD（通称：Blue 501）

（含金属染料と非含金属染料の二種類のアゾ系染料の配合物）

- 2) 酸化アルミニウム被膜厚 : 10 μm

3) 試料番号と染色条件

| 試料番号 | 染料濃度 (g/l) | 処理時間 (sec) |
|-------|------------|------------|
| No. 2 | 2 | 60 |
| No. 4 | 5 | 60 |

No.5については試料の準備が整わなかったため実施せず。

5.3.3 試験条件

- 1) 線量率 (kGy/h) : ガンマ線照射は無し
- 2) 紫外線源 : パルックボール (EFD14ED) × 6 灯
- 3) 霧囲気 : 大気、室温
- 4) 試料の履歴と試験数
 - ・履歴 : 低線量率対応試験用として作製
 - ・試験数 : 各試料 1 試料／1 試験回 × 1 回

5.3.4 測定項目

- 1) 色相 (() 内はマンセル色立体上の座標軸を示す。図 1.3 参照)
 - ・-b (青) ~ +b (黄) 軸上
- 2) 明度
 - ・-100 ~ 0 ~ +100

5.3.5 試験結果と考察

- 1) 色相は、曝露開始から終了までの約 3200 時間の間、曝露開始前の互い (試料 No. 2、4) の色相差 (絶対値で約 3) を維持しながら b 軸上をプラス方向へと緩やかに退色する (図 53.1.1)。
- 2) 明度は、色相変化とほぼ同様の退色傾向を示し、曝露開始前の明度差 (約 10) を維持しながら緩やかに退色する (図 53.1.2)。
- 3) 曝露後の色相値は、初期色相の薄い試料 (No. 2) の方が濃い試料 (No. 4) に比べ低くなるが、各試料の退色勾配がほぼ等しいことから、紫外線から受ける影響の程度に違いはないと考えられる。

5.3.6 まとめ

- 1) 本試料の退色に、紫外線が与える影響は温度（100°C）による影響に比べ極めて小さい。例えば、試料 No. 2 について本結果と 100°C 無照射の結果を色相値で比べると以下の通りとなる（() 内は曝露時間）。
 - ・紫外線／ガンマ線無照射
-15.5 (0)、-13.5 (1,000)、-12.0 (2,000)、-11.0 (3,000)
 - ・100°C／ガンマ線無照射
-15.5 (0)、-10.0 (1,000)、-8.5 (2,000)、-7.5 (3,000)
 - ・照射 1,000 および 3,000 時間後の退色分（絶対値）
 - 紫外線／ガンマ線無照射 : 2.0 (1,000 時間後)、4.5 (3,000 時間後)
 - 100°C／ガンマ線無照射 : 5.5 (1,000 時間後)、8.0 (3,000 時間後)
- 2) また紫外線照射時の試料表面の照度が、通常の室内照度の約 9 倍にも相当する極めて強い光源で照射したことを考慮すると、例えば本試験での 2,000 時間は通常の室内光源では 18,000 時間曝露後（約 2 年）の値に等しい。従って、試料を室内照明（蛍光灯）下に長時間放置・保管していた場合でもそれによる退色の影響は無視できる程度のものであることがわかる。
- 3) 試料 No. 5 については、試料の準備が出来なかったため試験は実施しなかったが、5.2 節（100°C／ガンマ線無照射）の結果での試料 No. 2、4 との比較から考えても紫外線による影響は極めて小さいものと推測される。

5.4 低線量率対応カラー線量計試験用試料のまとめ

- 1) 5.1 節から 5.3 節までの試験結果から、
 - ・染料の種類 : Tac Blue RCD (通称 : Blue 501)
 - ・酸化アルミニウム被膜厚 : 10 μm
 - ・試料番号 : No. 5
(染料濃度 5 g/l、処理時間 : 180 sec)

の試験用試料が

 - ・線量率 : 2 Gy/h
 - ・照射量 (最大) : 10 kGy

の測定に対応可能なカラー線量計として、試料 No. 2、4 の試験用試料に比べ優れた特性を有している判断される。
- 2) 図 54.1.1、図 54.1.2 に、試料 No. 5 のカラー線量計の試験結果をまとめ

た。線量率は 2 Gy/h、20 Gy/h、200 Gy/h、1000 Gy/h、照射時の雰囲気は、大気、室温である。

図 54.1.1 は b 軸上、図 54.1.2 は a 軸上での色相変化を示している。a 軸と b 軸では変化の傾向が逆向きで、a 軸上での変化は b 軸上での変化に比べやや急峻である。また a 軸上では、一定照射量を過ぎると色相値が再び上昇をはじめるところから b 軸上での測定に比べ測定範囲が狭くなる結果となっている（下表参照）。

表 54.1 低線量率対応試験用試料 No.5 の線量率毎の測定限界（色相値）

| 線量率 (Gy/h) | a 軸上での測定上限値 (kGy) | b 軸上での測定上限値 (kGy) |
|------------|-------------------|-------------------|
| 2 | 7 | 10 以上 |
| 20 | 15 | 20 以上 |
| 200 | 100 | 150 以上 |
| 1000 | 500 | 1000 以上 |

線量率毎の退色傾向では、2、20 Gy/h の方が 200、1000 Gy/h に比べ低照射量でも変化が現れる。これは低線量率の場合は、高線量率に比べ同一照射量に達するまでに要する時間が長くなるため、その間の大気中の酸素による影響をより多く受けることに原因すると考えられる。

TAC BLUE-RCD (2Gy/h, R.T.)

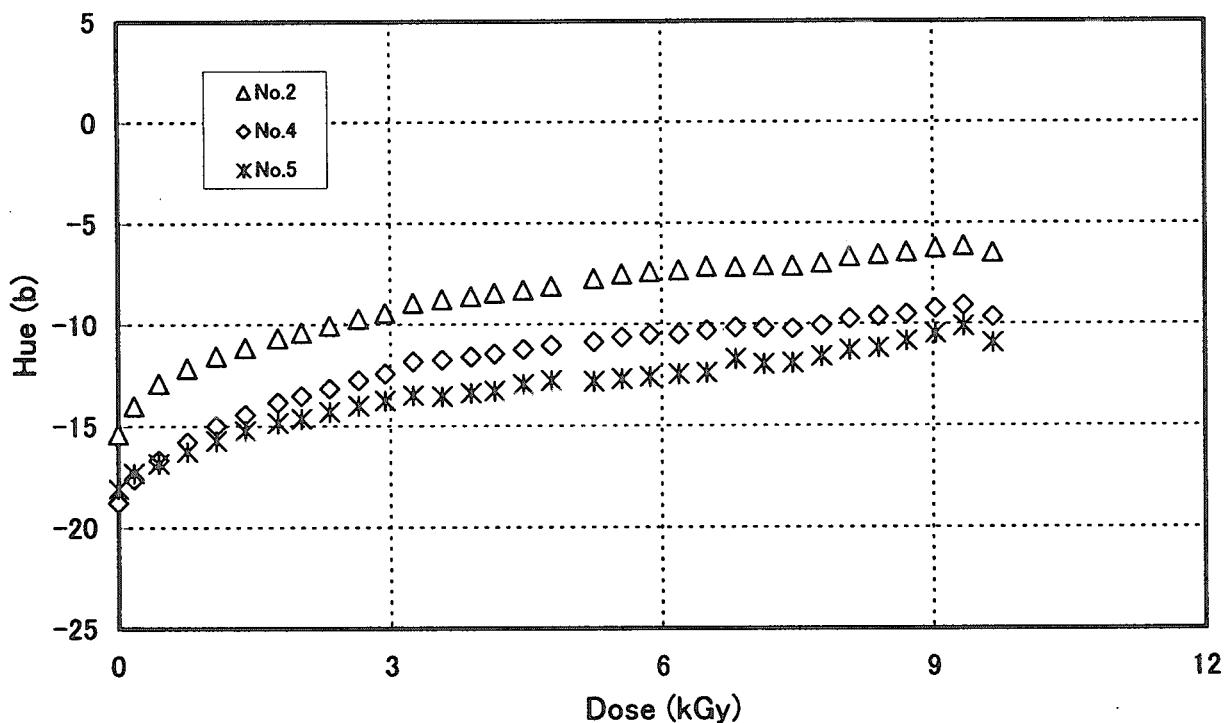


図51.1.1 試料番号2、4、5試料の線量率2Gy/h、大気、室温下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料:染料種Tac Blue RCD(通称:Blue 501)、膜厚10μm)

TAC BLUE-RCD (2Gy/h, R.T.)

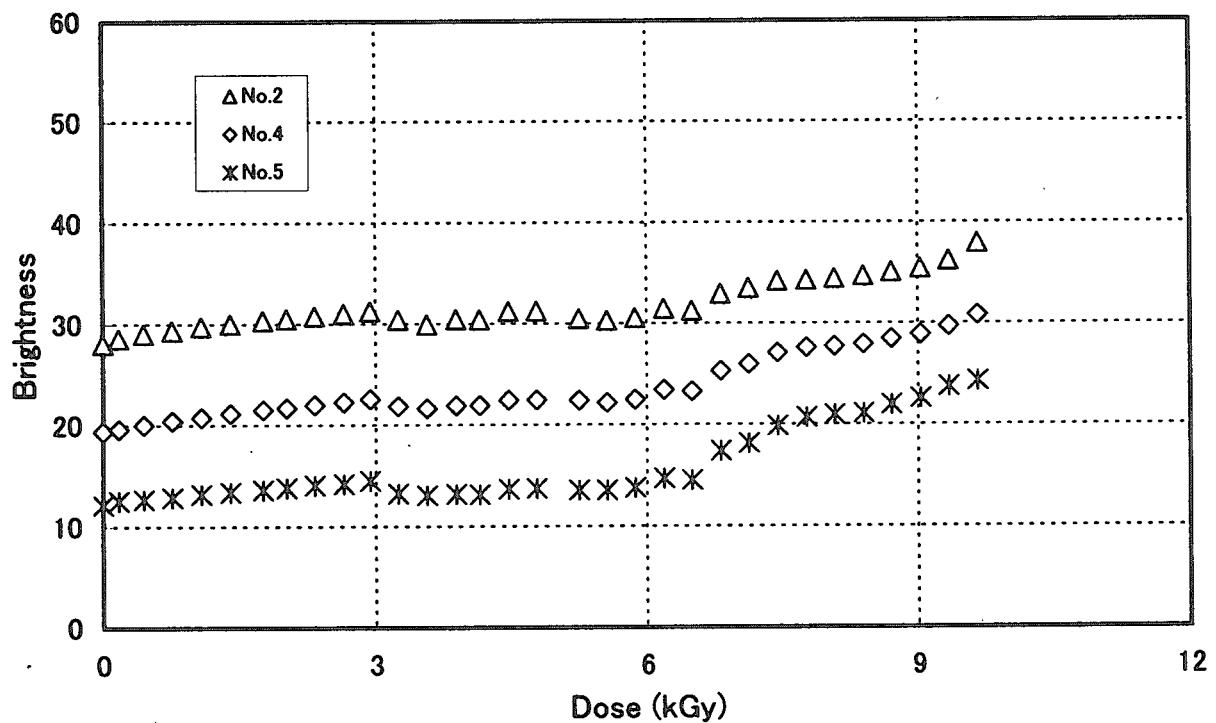


図51.1.2 試料番号2、4、5試料の線量率2Gy/h、大気、室温下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料:染料種Tac Blue RCD(通称:Blue 501)、膜厚10μm)

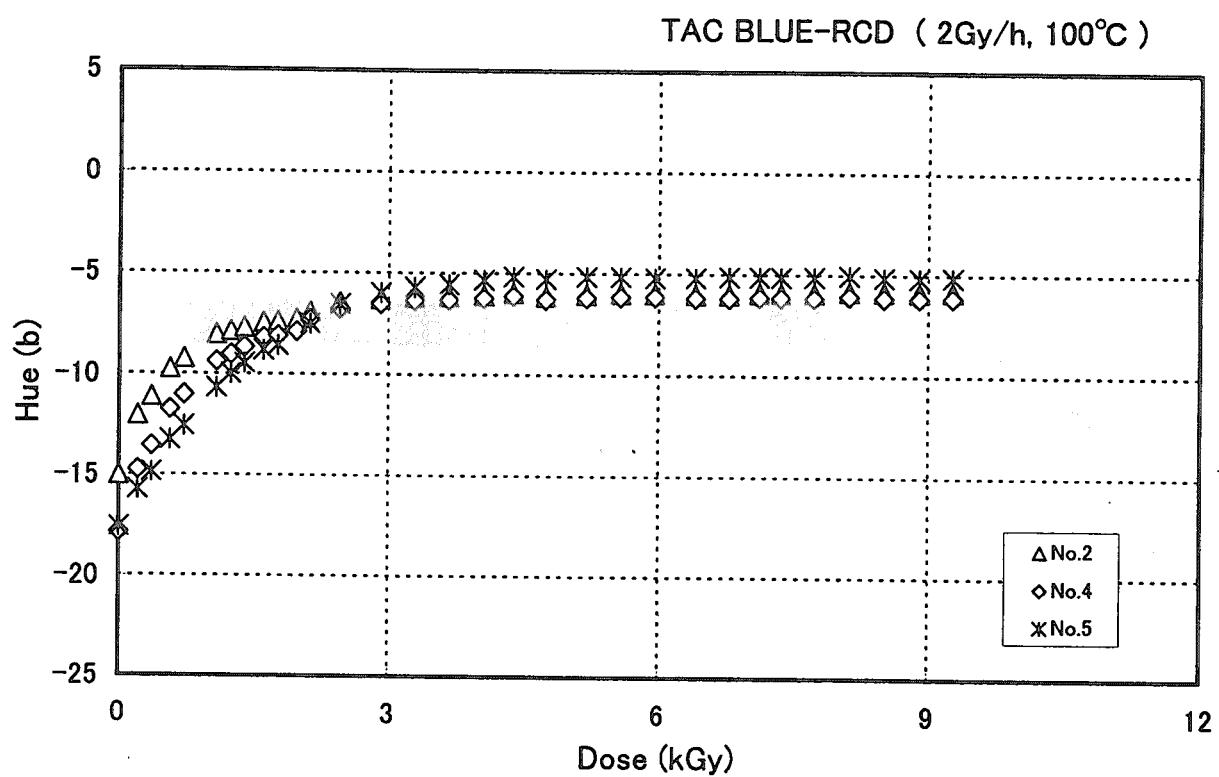


図51.2.1 試料番号2、4、5試料の線量率2Gy/h、大気、100°C下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料:染料種Tac Blue RCD(通称:Blue 501)、膜厚10μm)

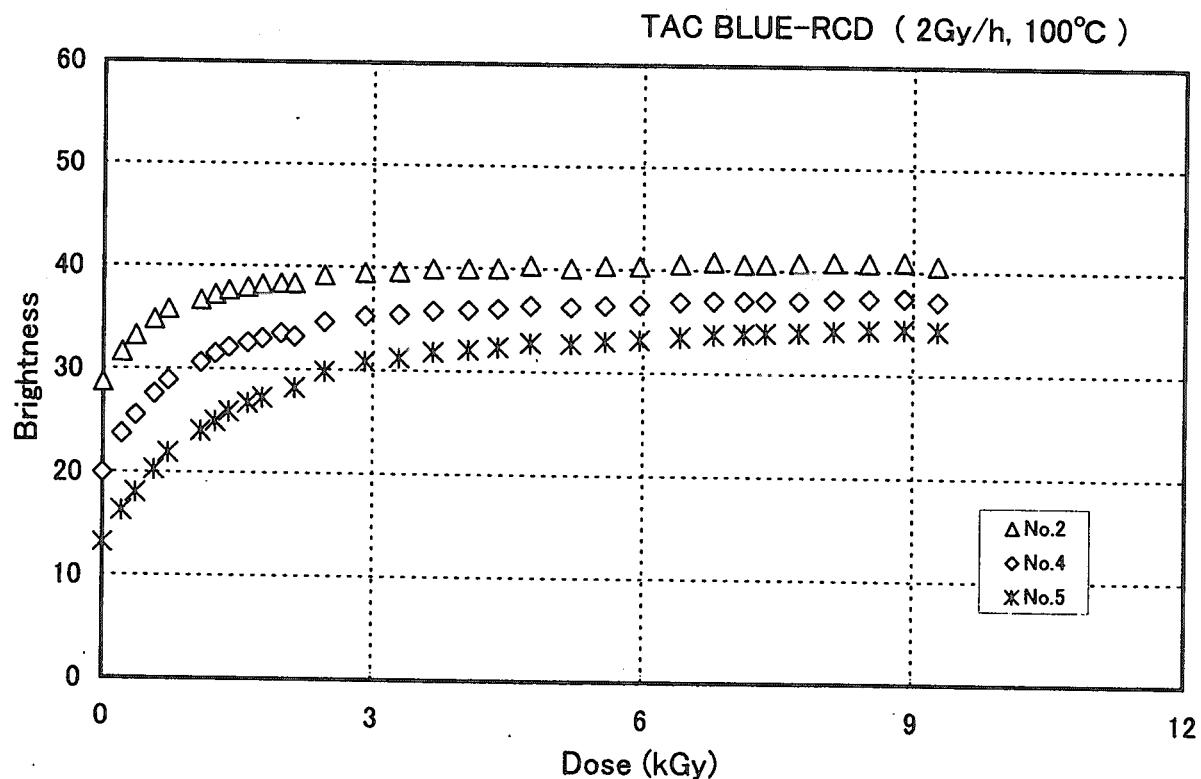


図51.2.2 試料番号2、4、5試料の線量率2Gy/h、大気、100°C下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料:染料種Tac Blue RCD(通称:Blue 501)、膜厚10μm)

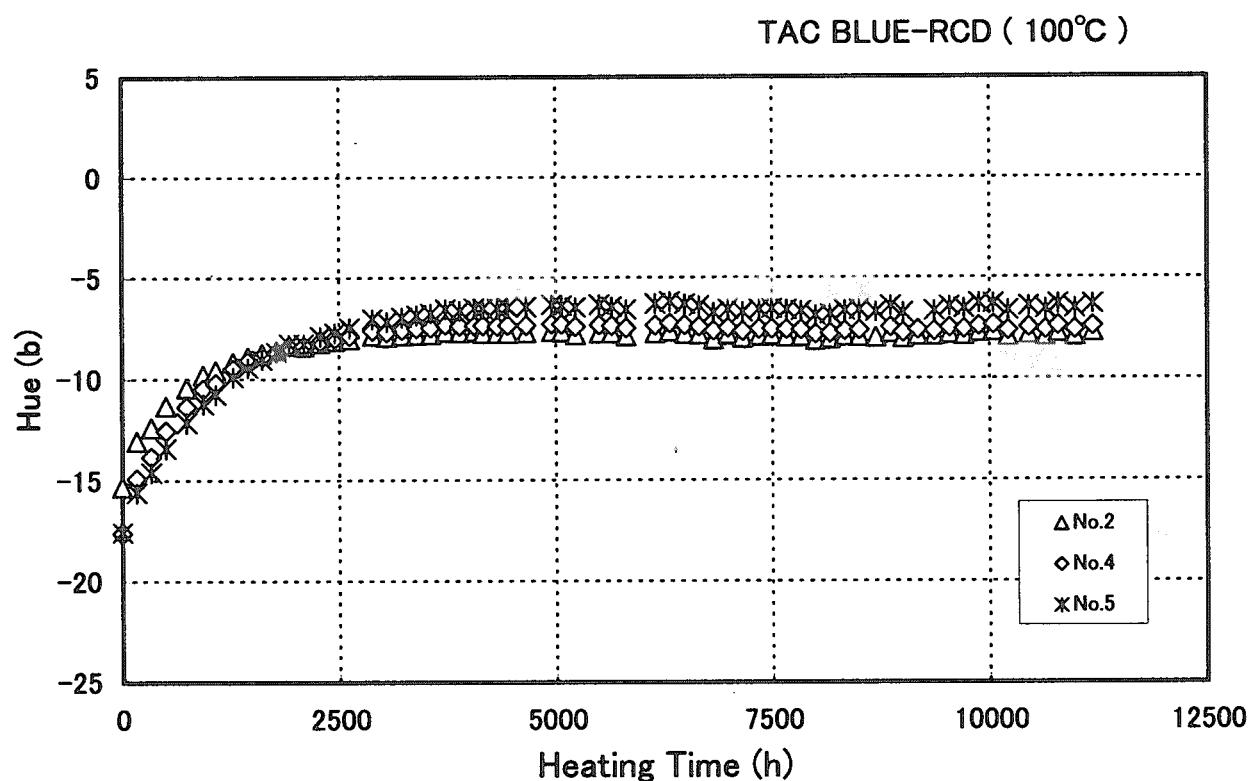


図52.1.1 試料番号2、4、5試料の無照射、大気、100°C下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料:染料種Tac Blue RCD(通称:Blue 501)、膜厚10μm)

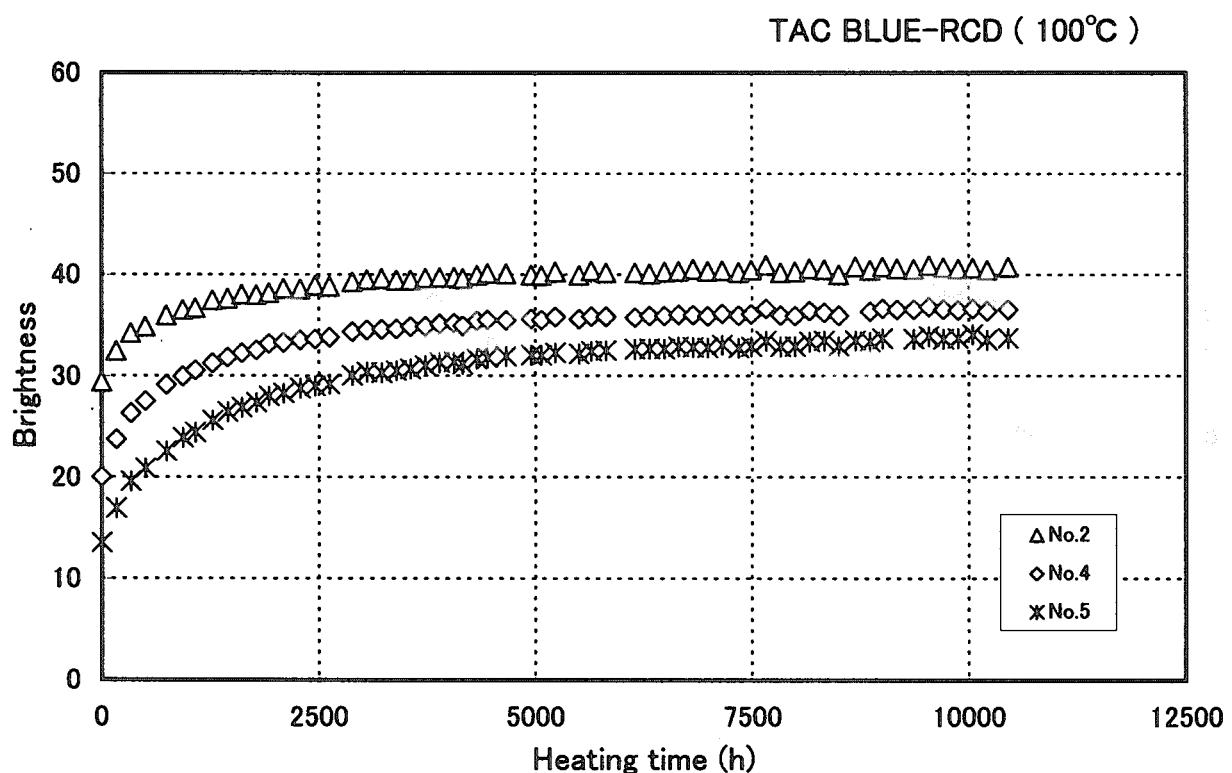


図52.1.2 試料番号2、4、5試料の無照射、大気、100°C下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料:染料種Tac Blue RCD(通称:Blue 501)、膜厚10μm)

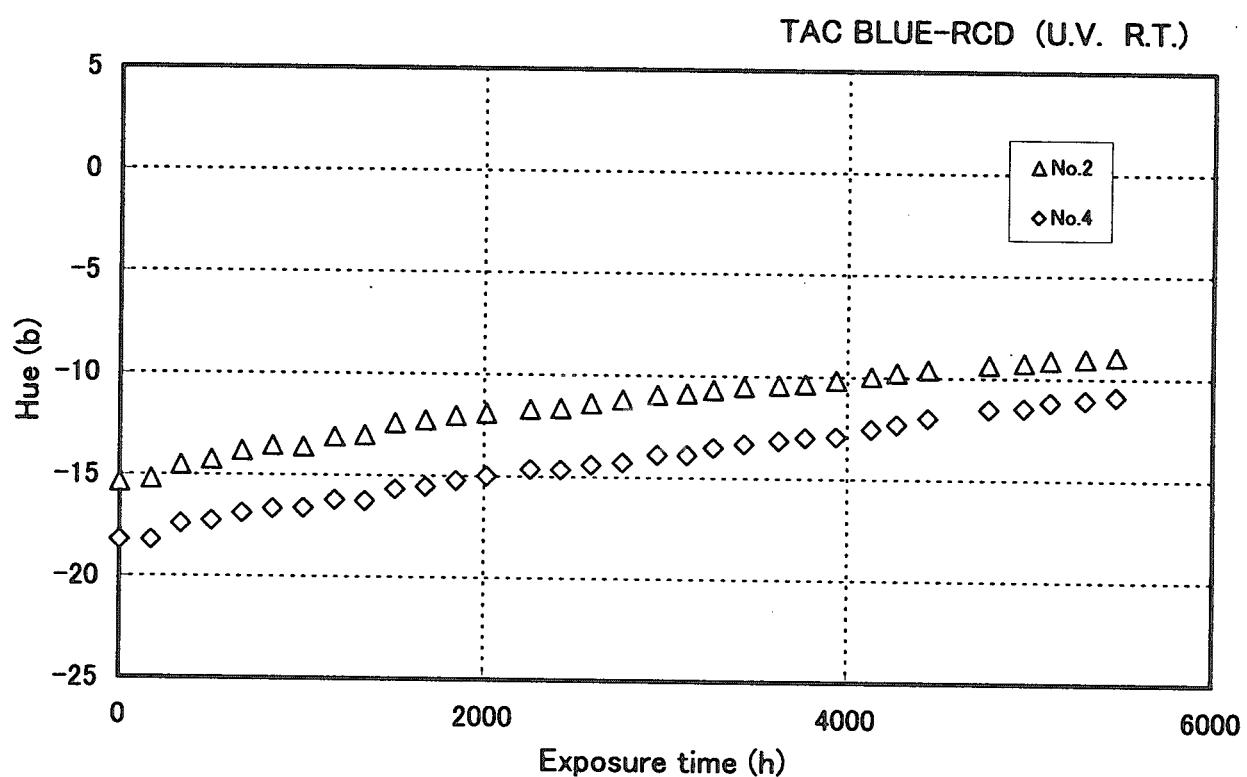


図53.1.1 試料番号2、4試料の無照射、大気、紫外線ランプ下での退色変化(色相値による)／特性試験
(試料:染料種Tac Blue RCD(通称:Blue 501)、膜厚10μm)

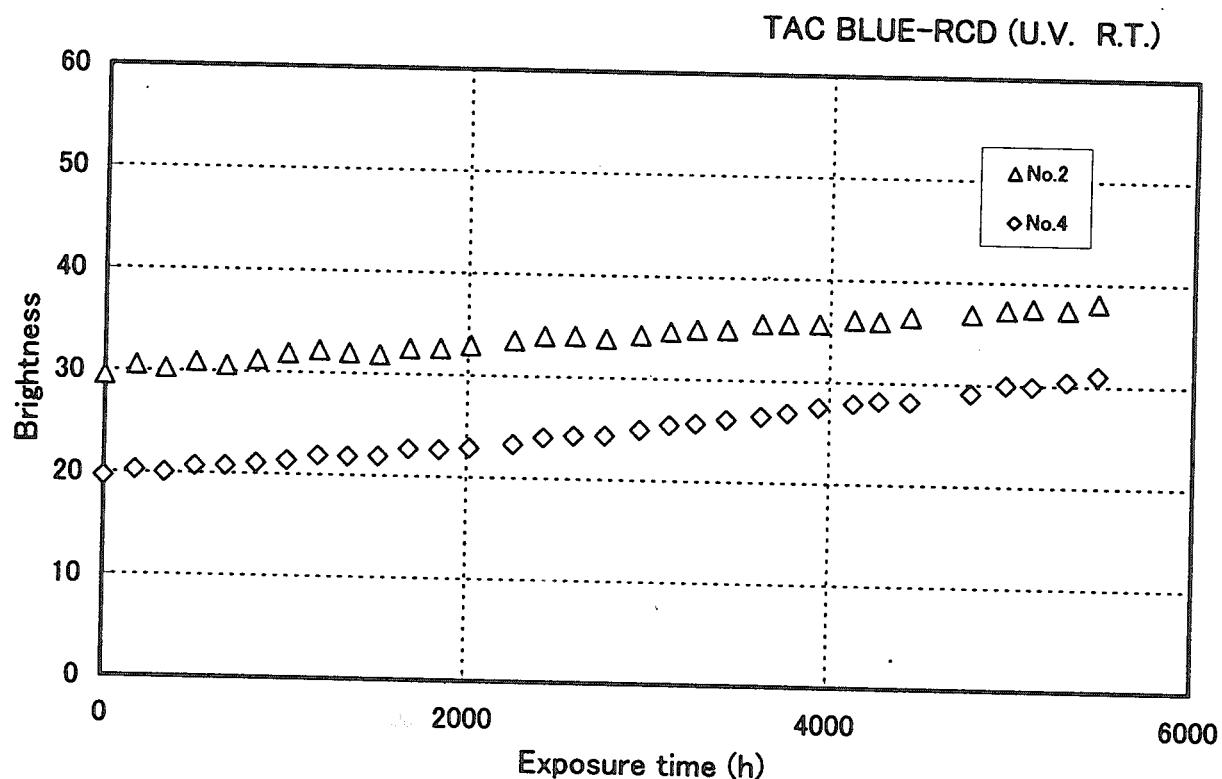


図53.1.2 試料番号2、4試料の無照射、大気、紫外線ランプ下での退色変化(明度値による)／特性試験
(試料:染料種Tac Blue RCD(通称:Blue 501)、膜厚10μm)

TAC BLUE-RCD No.5

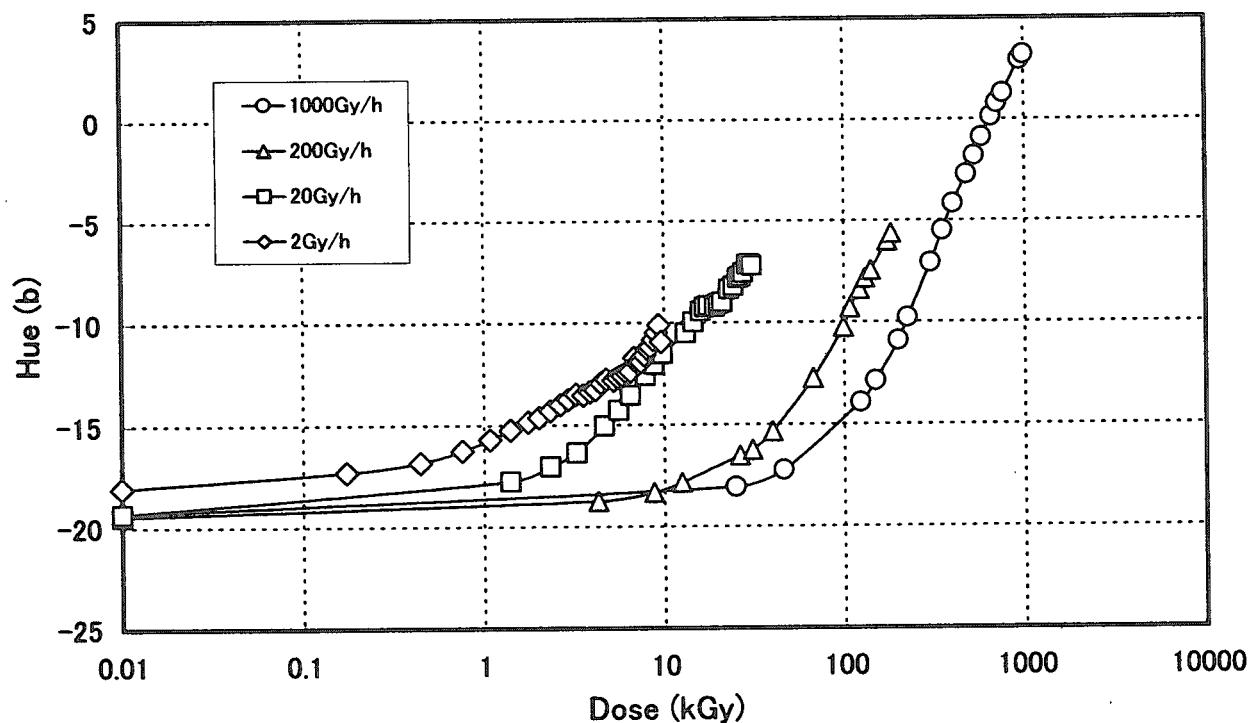


図54.1.1 試料番号5試料の大気、室温、異なる線量率下での退色変化(b軸上の色相値による)／特性試験
(試料:染料種Tac Blue RCD(通称:Blue 501)、膜厚10μm、線量率:2, 20, 200, 1000 Gy/h)

TAC BLUE-RCD No.5

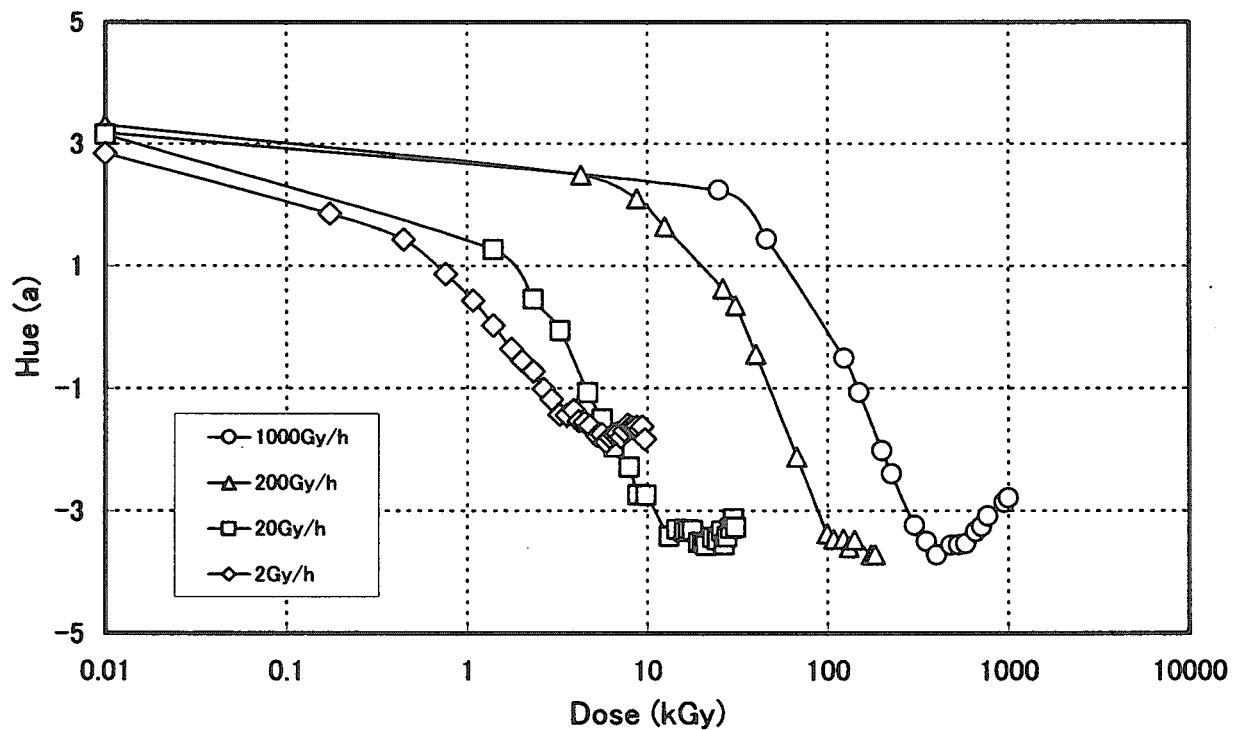


図54.1.2 試料番号5試料の大気、室温、異なる線量率下での退色変化(a軸上の色相値による)／特性試験
(試料:染料種Tac Blue RCD(通称:Blue 501)、膜厚10μm、線量率:2, 20, 200, 1000 Gy/h)

6. 高線量率対応試料による AC サーボモータ各部の照射量測定

6.1 目的

耐放射線性 AC サーボモータ内表面の照射量を高線量率対応カラー線量計で測定し、モータ各部の照射量分布を調べる。

6.2 AC サーボモータ概略仕様

- ・極 数 : 4
- ・出 力 : 30 W
- ・回転速度 : 1000 rpm
- ・電圧／電流 : 30 V／1.8 A
- ・励 磁 : 永久磁石
- ・本体形状寸法 : 外径 80 mm、長さ 110 mm (角度検出器は含まず)

6.3 カラー線量計仕様

- ・色と染料種

赤色：商品名 Aluminum Fiery Red ML

(含金属染料と非含金属染料の二種類のアゾ染料の配合物)

- ・酸化アルミニウム被膜厚 : 20 μm
- ・形状寸法 : 45 mm × 30 mm × 1 mm t

6.4 試験条件

- ・線量率 (kGy/h) : 10
- ・雰囲気 : 大気、室温
- ・線量校正 : アラニン線量計

6.5 測定法

- ・一定時間照射後のカラー線量計の色相値を分光式色差計にて測定する。
- ・色相値を 2.1.3 式に代入し、計算によって照射量を求める。

6.6 試験結果と考察

- ・図 6.1 に示すように、カラー線量計をモータの表面 2箇所*と内部 2箇所**の計 4箇所に貼り付けた。

* ガンマ線源側 (線量計 No.1) とその 180° 対向側 (線量計 No.2)

**ベアリング部 (線量計 No.3)、回転子部 (線量計 No.4)

また、校正用としてアラニン線量計 1 個を線量計 No.1 の隣に貼り付けた。

- ・以下に測定結果を示す。

アラニン線量計 : 5.42 MGy

線量計 No.1 : 5.43 MGy

| | |
|----------|------------|
| 線量計 No.2 | : 1.64 MGy |
| 線量計 No.3 | : 3.64 MGy |
| 線量計 No.4 | : 3.51 MGy |

線量計 No.1 の測定結果は、同位置に取り付けたアラニン線量計とほぼ同じ値を示した。また、線量計 No.1 の値を 1 としたときの線量計 No.2、3、4 の相対値は、それぞれ 0.3、0.67、0.65 となり、モータの耐放射線性を決定すると考えられているペアリング部（線量計 No.3）は、耐放射線性の最も高いハウジング（線量計 No.1）に比べ約 70 % の照射量であることがわかる。これは、通常ならハウジング部で照射管理されるモータの健全性をペアリング部に置き換えて管理した場合、交換・保修までの運転時間を従来の約 1.5 倍まで延長可能であることを示している。

また、同じハウジング部でも線源側の照射量（線量計 No.1）に比べ、180° 対向側の照射量（線量計 No.2）は約 1/3 であり、モータ自体にも相当の遮蔽効果のあることがわかった。

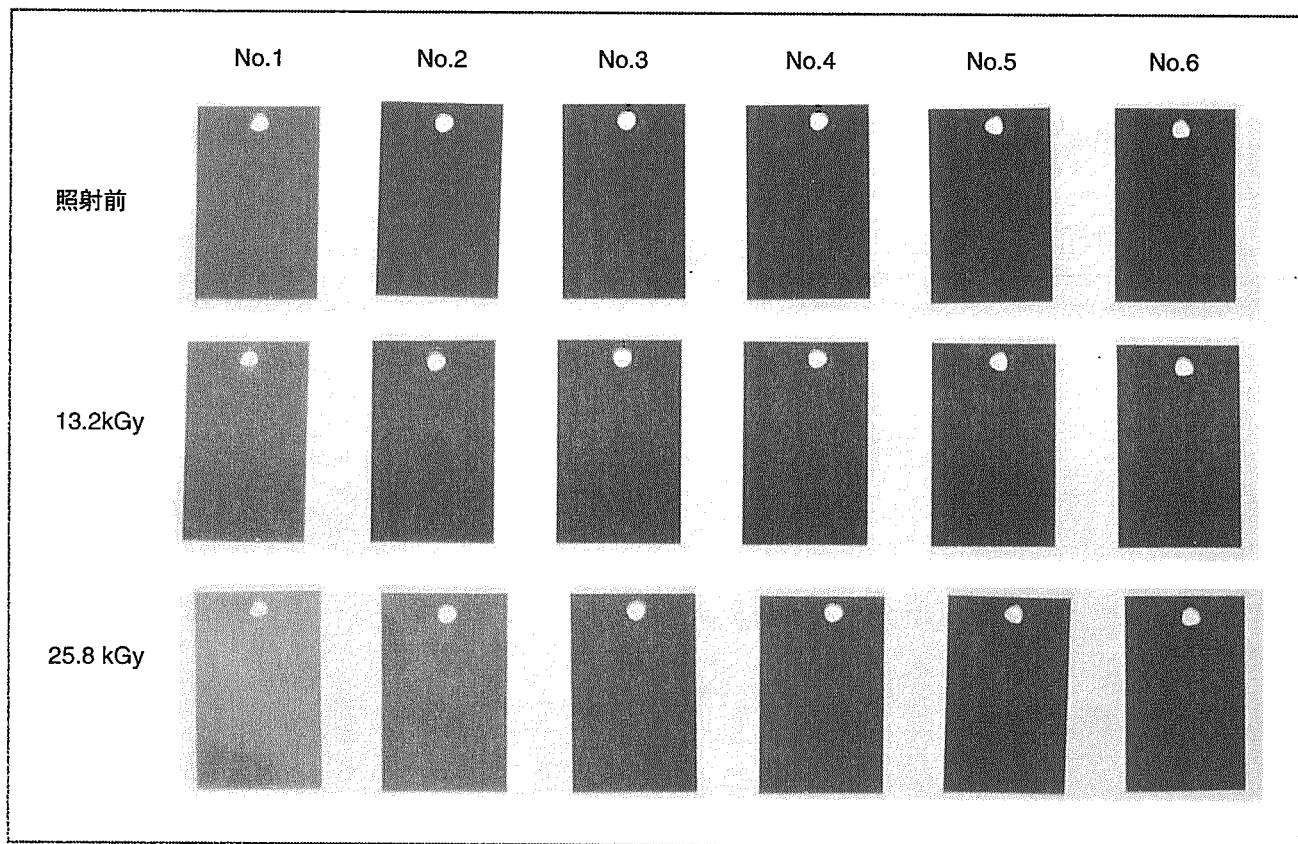


図4.1.3 低線量率対応青色線量計（試料No. 1～6）の退色変化
(大気、室温、線量率：20Gy/h、染料種：Tac Blue RCD)

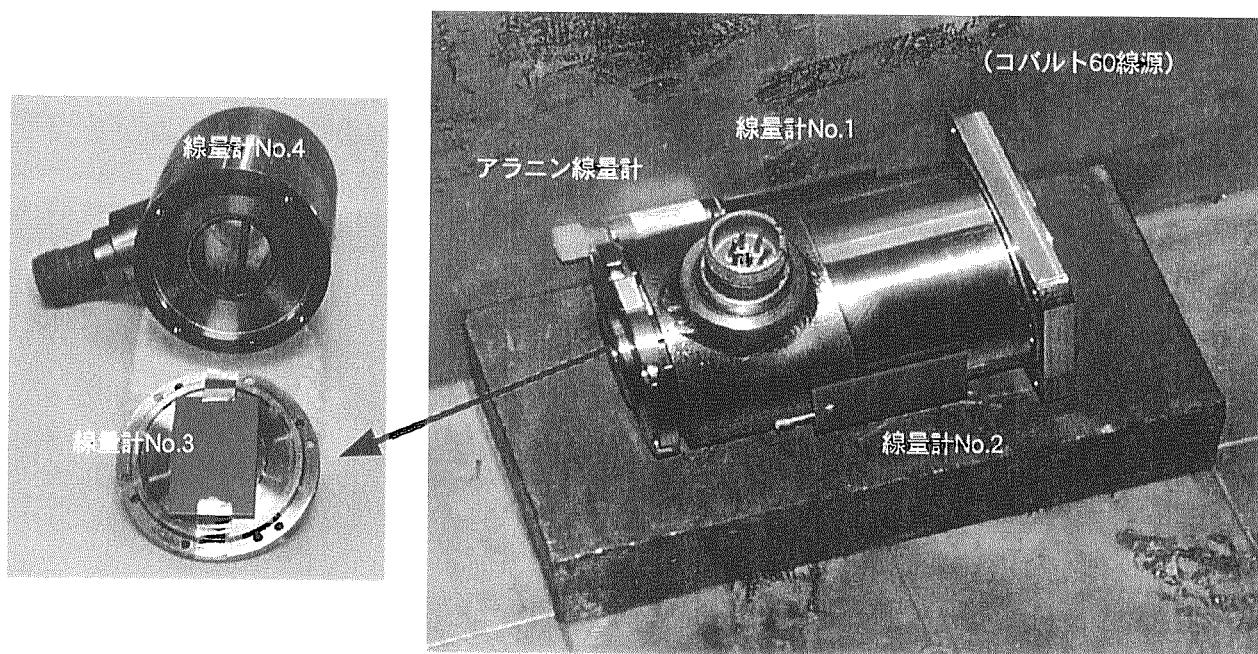


図6.1 ACサーボモータ内表面の照射量測定時のカラー線量計の配置
(大気、室温、線量率：10kGy/h、染料種：Aluminum Fiery Red ML)

This is a blank page.

7. まとめ

着色酸化アルミニウム被膜線量計（カラー線量計）は、既に述べたように全くの新規性を持った線量計ではない。しかしながら、今回の一連の試験によって幾つかの試験用試料は、従来の線量計では不可能であった高線量率下での高照射量測定が可能であることを示した。更に試料数を増やし、より詳細な試験を実施することで実用化できるものと考えている。

以下に本試験、開発結果の要点、カラー線量計の応用例、今後の課題について述べる。

- 1) カラー線量計は、アルミニウム合金の薄板表面に形成した陽極酸化被膜中にアゾ系染料を含浸させた構造であるため、安価で丈夫、取扱が容易で機器細部の測定が出来るなどの特徴を持っている。
- 2) 照射量は、カラー線量計の退色を分光式色差計によって、色相又は明度として測定し、あらかじめ作成してある校正曲線から読みとるか、あるいは校正曲線の近似式から算出する。また退色サンプルを使用し、比色法によってもおおよその値を知ることができる。
- 3) 試験した試料のうち、
染料種 Tac Fiery Red-GBM、酸化アルミニウム被膜厚 $25\text{ }\mu\text{m}$ の試験用試料（高線量率対応カラー線量計）が線量率 10 kGy/h 、照射量（最大） 70 MGy の測定に
また、染料種 Tac Blue RCD（通称：Blue 501）、酸化アルミニウム被膜厚 $10\text{ }\mu\text{m}$ で染色条件の染料濃度を 5 g/l とし、処理時間を 180 秒で調整した試料（低線量率対応カラー線量計）が線量率 2 Gy/h 、照射量（最大） 10 kGy の測定に
それぞれ対応可能なカラー線量計として、他の試験用試料に比べ優れた特性を有していることがわかった。
しかしながら、これらのカラー線量計を異なる線量率下で使用する場合は、同一照射量に達するまでの照射時間が異なるため退色変化にも違いが生じる。あらかじめ、線量率毎の校正曲線を作成しなければならない。
- 4) カラー線量計の特性に影響を与える温度としては、高線量率対応カラー線量計の場合は 75°C 以上と考えられるが、低線量率対応カラー線量計の場合は、今後 100°C 以下の試験結果を得た上で判断しなければならないと考えている。一方、室内紫外線、いわゆる蛍光灯による影

響は両カラー線量計共に無視できる程度のものであることがわかった。

- 5) 1.3 節で述べたように、カラー線量計の作製には多くの要因が関与するため、測定条件に最適なカラー線量計を選択し作製するためには種々の検討が必要である。しかしながら、これは一方でカラー線量計が多様な要求に対し、対応可能であることを示している。
- 6) 本試験は、ITER 用遠隔保守装置の健全性を管理するための線量計の開発を目的としたものである。しかしながら、その使用は他の目的、例えば、放射線ビームラインのアライメント調整、放射線照射野の観察、放射線防護器材用マーカー、食品や医療機器のための照射マーカーとしても利用できると考えられる。
- 7) 今後の課題としては、3) 項で示したカラー線量計について更にデータを蓄積し基本特性を確立することの他、温度影響や酸素の介在についてのより詳細な試験を実施しそれぞれについての補正係数を導くと共に、実用化に向けてより簡便な使用形態の考案などがあげられる。

謝　　辞

本試験・開発では、多くのご支援を賜った原研那珂研究所 ITER 開発室・常松室長をはじめ、核融合工学部・関部長、高崎研極限環境材料研究室・神谷室長他室員諸氏ならびに有益なご助言を頂いた高崎研究所環境保全プロセス研究室・小嶋室長に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) E.Tada, et. al., : "Remote maintenance System Development for ITER Blankets," Proc. 99 ICONE-7, Tokyo, ICONE-7033, April 19-23, (1999).
- 2) K. Obara, et. al., : "High Gamma Rays Irradiation Test of Critical Components for ITER In-Vessel Remote Handling System," JAERI-Tech 99-003, February, (1999).
- 3) Niels W. Holm and Roger J. Berry, : "MANUAL ON RADIATION DOSIMETRY," MARCEL DEKKER, INC. New York, p. 130-177 (1970).
- 4) M. E. Browning and T. L. Burks, : "THE DEVELOPMENT OF A PHOTOTROPIC ANODIZED ALUMINUM FINISH RESPONSIVE TO

GAMMA RADIATION (U)," Final Rep., U. S. Army Eng. Res. Dev. Labs.,
Fort Belvoir, Va. (1969).

- 5) 下村健文、吉川信治：“ニットー ラドカラー フィルム”. 日東技報、Vol. 11 No.2, p. 1-6 (1969).
- 6) K. Obara, et. al., “Development Colored Alumilite Dosimeter for High Radiation Use,” Proc. RADECS 2000 Workshop, Louvain-la-Neuve, September 11-13, p. 214-218 (1999).
- 7) 小原建治郎：“照射量を色で知る 着色酸化アルミニウム被膜線量計の開発”. 放射線と産業 92, p. 56-60 (2001).
- 8) 小原建治郎：“色の変化で照射量がわかります-カラー線量計の開発”. 原子力 eye, Vol. 48 No.2, p. 46-48 (2002).
- 9) 松岡 賢：“分散アゾ染料の光退色”. 工業化学, 74 (8), p. 1665-1660 (1971).
- 10) 小嶋拓治、田中隆一：“電子スピン共鳴 (ESR) 法を用いた大線量測定”. DADIOISOTOPE, 41, p. 320-330 (1971).
- 11) 日本電色工業（株） カタログ.
- 12) 日本電色工業（株） カタログ.

This is a blank page.

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

| 量 | 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 |
| 光强度 | カンデラ | cd |
| 平面角 | ラジアン | rad |
| 立体角 | ステラジアン | sr |

表3 固有の名称をもつSI組立単位

| 量 | 名称 | 記号 | 他のSI単位による表現 |
|-------------|--------|----------|------------------|
| 周波数 | ヘルツ | Hz | s^{-1} |
| 力 | ニュートン | N | $m \cdot kg/s^2$ |
| 圧力、応力 | パスカル | Pa | N/m^2 |
| エネルギー、仕事、熱量 | ジュール | J | $N \cdot m$ |
| 功率、放射束 | ワット | W | J/s |
| 電気量、電荷 | クーロン | C | $A \cdot s$ |
| 電位、電圧、起電力 | ボルト | V | W/A |
| 静電容量 | ファラード | F | C/V |
| 電気抵抗 | オーム | Ω | V/A |
| コンダクタンス | ジーメンス | S | A/V |
| 磁束 | ウェーバ | Wb | $V \cdot s$ |
| 磁束密度 | テスラ | T | Wb/m^2 |
| インダクタンス | ヘンリー | H | Wb/A |
| セルシウス温度 | セルシウス度 | °C | |
| 光束度 | ルーメン | lm | $cd \cdot sr$ |
| 照度 | ルクス | lx | lm/m^2 |
| 放射能 | ベクレル | Bq | s^{-1} |
| 吸収線量 | グレイ | Gy | J/kg |
| 線量等量 | シーベルト | Sv | J/kg |

表2 SIと併用される単位

| 名称 | 記号 |
|--------|-----------|
| 分、時、日 | min, h, d |
| 度、分、秒 | °, ', " |
| リットル | L |
| トン | t |
| 電子ボルト | eV |
| 原子質量単位 | u |

1 eV=1.60218×10⁻¹⁹J

1 u=1.66054×10⁻²⁷kg

表5 SI接頭語

| 倍数 | 接頭語 | 記号 |
|-------------------|------|----|
| 10 ¹⁸ | エクサ | E |
| 10 ¹⁵ | ペタ | P |
| 10 ¹² | テラ | T |
| 10 ⁹ | ギガ | G |
| 10 ⁶ | メガ | M |
| 10 ³ | キロ | k |
| 10 ² | ヘクト | h |
| 10 ¹ | デカ | da |
| 10 ⁻¹ | デシ | d |
| 10 ⁻² | センチ | c |
| 10 ⁻³ | ミリ | m |
| 10 ⁻⁶ | マイクロ | μ |
| 10 ⁻⁹ | ナノ | n |
| 10 ⁻¹² | ピコ | p |
| 10 ⁻¹⁵ | フェムト | f |
| 10 ⁻¹⁸ | アト | a |

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- E C閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

| 力 | N(=10 ⁵ dyn) | kgf | lbf |
|---------|-------------------------|----------|-----|
| 1 | 0.101972 | 0.224809 | |
| 9.80665 | 1 | 2.20462 | |
| 4.44822 | 0.453592 | 1 | |

粘度 1 Pa·s(N·s/m²)=10 P(ボアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s=10⁴St(ストークス)(cm²/s)

| 圧力 | MPa(=10bar) | kgf/cm ² | atm | mmHg(Torr) | lbf/in ² (psi) |
|----|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 力 | 1 | 10.1972 | 9.86923 | 7.50062×10 ³ | 145.038 |
| | 0.0980665 | 1 | 0.967841 | 735.559 | 14.2233 |
| | 0.101325 | 1.03323 | 1 | 760 | 14.6959 |
| | 1.33322×10 ⁻⁴ | 1.35951×10 ⁻³ | 1.31579×10 ⁻³ | 1 | 1.93368×10 ⁻² |
| | 6.89476×10 ⁻³ | 7.03070×10 ⁻² | 6.80460×10 ⁻² | 51.7149 | 1 |

| エネルギー・仕事・熱量 | J(=10 ⁷ erg) | kgf·m | kW·h | cal(計量法) | Btu | ft·lbf | eV | 1 cal= 4.18605J (計量法) |
|-------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|
| | 1 | 0.101972 | 2.77778×10 ⁻⁷ | 0.238889 | 9.47813×10 ⁻⁴ | 0.737562 | 6.24150×10 ¹⁸ | = 4.184J (熱化学) |
| | 9.80665 | 1 | 2.72407×10 ⁻⁶ | 2.34270 | 9.29487×10 ⁻³ | 7.23301 | 6.12082×10 ¹⁹ | = 4.1855J (15°C) |
| | 3.6×10 ⁶ | 3.67098×10 ⁵ | 1 | 8.59999×10 ⁵ | 3412.13 | 2.65522×10 ⁶ | 2.24694×10 ²⁵ | = 4.1868J (国際蒸気表) |
| | 4.18605 | 0.426858 | 1.16279×10 ⁻⁶ | 1 | 3.96759×10 ⁻³ | 3.08747 | 2.61272×10 ¹⁹ | 仕事率 1 PS(仮馬力) |
| | 1055.06 | 107.586 | 2.93072×10 ⁻⁴ | 252.042 | 1 | 778.172 | 6.58515×10 ²¹ | = 75 kgf·m/s |
| | 1.35582 | 0.138255 | 3.76616×10 ⁻⁷ | 0.323890 | 1.28506×10 ⁻³ | 1 | 8.46233×10 ¹⁸ | = 735.499W |
| | 1.60218×10 ⁻¹⁹ | 1.63377×10 ⁻²⁰ | 4.45050×10 ⁻²⁵ | 3.82743×10 ⁻²⁰ | 1.51857×10 ⁻²² | 1.18171×10 ⁻¹⁹ | 1 | |

| 放射能 | Bq | Ci | 吸収線量 | Gy | rad |
|-----|----------------------|---------------------------|------|------|-----|
| | 1 | 2.70270×10 ⁻¹¹ | | 1 | 100 |
| | 3.7×10 ¹⁰ | 1 | | 0.01 | 1 |

| 照射線量 | C/kg | R |
|------|-----------------------|------|
| | 1 | 3876 |
| | 2.58×10 ⁻⁴ | 1 |

| 線量当量 | Sv | rem |
|------|------|-----|
| | 1 | 100 |
| | 0.01 | 1 |

(86年12月26日現在)

着色酸化アルミニウム被膜線量計の開発

R100
古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています