

光硬化型樹脂を用いた止水に関する予備検討 (共同研究)

Preliminary Examination about Leakage Sealing
Using the Photo-curable Resin
(Joint Research)

大岡 誠 前川 康成 富塚 千昭 村上 知行
片桐 源一 尾崎 博 河村 弘

Makoto OOKA, Yasunari MAEKAWA, Chiaki TOMIZUKA, Tomoyuki MURAKAMI
Genichi KATAGIRI, Hiroshi OZAKI and Hiroshi KAWAMURA

福島研究開発部門
福島廃炉技術安全研究所
研究計画部

Research Planning Department
Nuclear Plant Decommissioning Safety Research Establishment
Sector of Fukushima Research and Development

March 2015

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

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2 番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2015

光硬化型樹脂を用いた止水に関する予備検討 (共同研究)

日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門
福島廃炉技術安全研究所 研究計画部
大岡 誠、前川 康成⁺¹、富塚 千昭^{*}
村上 知行^{*}、片桐 源一^{*}、尾崎 博^{*}、河村 弘⁺²

(2015年1月15日 受理)

東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃炉に向けた取組みが現在進められている。廃炉には、燃料デブリの取出しを行う必要があり、その取り出し方法では、燃料デブリを冠水させた状態で行うことが検討されている。

一方で、いくつかの号機では冷却水の漏えいが発生し、また、地下水が建家内に流入する状況と合わせ、汚染水増加を抑止し、汚染拡大を防止する観点からも、早急に漏えいを止めることが最重要課題になっている。

国で検討されている止水方法はサプレッションチャンバー等格納容器の一部にグラウト等を充填するものであるが、内部で固化したグラウトが将来の解体撤去工事に支障をきたす可能性が有る。また注入したグラウトは全て廃棄物となり、処理処分の対象を増やすことになる。これに対し、日本原子力研究開発機構では格納容器内部では固まらず漏えい箇所出口だけで固まる工法を検討している。これは紫外線照射によって硬化する材料(光硬化型樹脂)を冷却水に混ぜ冷却水の漏えい箇所に到達させ、漏えい箇所の外側から紫外線を照射して光硬化型樹脂を硬化させ損傷部を閉塞するものである。しかしながら光硬化型樹脂は元々コーティング、または塗装剤として使用されるものであり、漏えい箇所止水への適用性は未知である。本予備検討は、光硬化型樹脂の水中での基本的な硬化性能を把握し、漏えい箇所止水への適用性を検討したものである。

本研究は日本原子力研究開発機構と富士電機との共同研究に基づいて実施したものである。

東京事務所：〒100-8577 東京都千代田区内幸町2丁目2番2号 富国生命ビル17階

+1 原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター 環境・産業応用量子ビーム技術研究ユニット

+2 福島研究開発部門 福島廃炉技術安全研究所

※ 特定課題推進員

* 富士電機株式会社

**Preliminary Examination about Leakage Sealing
Using the Photo-curable Resin
(Joint Research)**

Makoto OOKA, Yasunari MAEKAWA⁺¹, Chiaki TOMIZUKA[※],
Tomoyuki MURAKAMI^{*}, Genichi KATAGIRI^{*}, Hiroshi OZAKI^{*} and Hiroshi KAWAMURA⁺²

Research Planning Department
Nuclear Plant Decommissioning Safety Research Establishment
Sector of Fukushima Research and Development
Japan Atomic Energy Agency
Uchisaiwai-cho, Chiyoda-ku, Tokyo

(Received, January 15, 2015)

Actions for the decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (Tokyo Electric Power Company) are being pushed forward now. For fuel debris removal, it is necessary to fill the Primary Containment Vessel (PCV) with water. Because coolant (water) leak out from the PCV, it becomes the most important problem to seal leakage of the coolant.

Japan Atomic Energy Agency has examined the method of leakage sealing using the photo-curable resin.

However, the photo-curable resin is originally used as coating or the painting, and the applicability to leakage sealing of water is unknown. This report describes the result that examined the applicability to seal leakage using photo-curable resin.

Keywords: Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, Leakage Sealing, Photo-curable Resin

This work has been performed in JAEA as a joint research with Fuji Electric Co. Ltd.

+1 Environment and Industrial Materials Research Unit, Quantum Beam Science Center, Sector of Nuclear Science Research

+2 Nuclear Plant Decommissioning Safety Research Establishment, Sector of Fukushima Research and Development

※ Special Topic Engineer

* Fuji Electric Co. Ltd.

目 次

1. 背景及び目的	1
2. 候補材料の検討	1
2.1 止水材料の要件	1
2.2 光硬化樹脂の調査	2
2.3 試験対象の選定	6
3. 基礎試験	7
3.1 水分散性確認試験	7
3.2 膜状液硬化試験	7
3.3 溶液硬化試験	8
3.4 溶液滴下試験	9
3.5 考察	9
4. 結論	10
謝辞	11
参考文献	11
付録	27

Contents

1. Background and Purpose	1
2. Examination of Materials	1
2.1 Requirements of Materials	1
2.2 Specific Example of the Photocoagulation Reaction	2
2.3 Select of Materials for the Test	6
3. Fundamental Test	7
3.1 Water-dispersable Test	7
3.2 Filmy Liquid Hardening Test	7
3.3 Solution Hardening Test	8
3.4 Dropped Solution Hardening Test	9
3.5 Discussion	9
4. Conclusion	10
Acknowledgment	11
References	11
Appendix	27

表リスト

Table 1	格納容器 (PCV) 内の環境条件	12
Table 2	光硬化型樹脂の調査結果	12
Table 3	光硬化型樹脂の仕様	13
Table 4	試験条件	13
Table 5	試験結果 膜状液硬化試験 (試料A 1)	14
Table 6	試験結果 膜状液硬化試験 (試料B 1)	14
Table 7	試験結果 溶液硬化試験 (試料A 1)	14
Table 8	試験結果 溶液硬化試験 (試料B 1)	14
Table 9	試験結果 溶液滴下試験	15

図リスト

Fig. 1	冷却水循環系統概略図及び漏えい箇所	16
Fig. 2	格納容器補修工法の候補 【グラウト硬化による閉塞】	17
Fig. 3	格納容器補修工法 【光硬化型樹脂硬化による閉塞】	17
Fig. 4	試験方法 (水分散性確認試験)	18
Fig. 5	試験方法 (膜状液硬化試験)	18
Fig. 6	紫外線ランプの特性	19
Fig. 7	試験方法 (溶液硬化試験)	20
Fig. 8	試験方法 (溶液滴下試験)	20
Fig. 9	試験状況 (溶液滴下試験)	21
Fig. 10	試験結果	21
Fig. 11	損傷箇所の閉塞イメージ	22
Fig. 12	樹脂改善策 1 : 光開始剤を水分散体に入れる	22
Fig. 13	樹脂改善策 2 : 結合部を増やす	22
Fig. 14	樹脂改善策 3 : 光硬化樹脂の透明度を上げる	23

写真リスト

Photo 1	試験結果 水分散性確認試験	24
Photo 2	試験結果 溶液硬化試験 (試料 : A1)	25
Photo 3	試験結果 溶液硬化試験 (試料 : B1)	26

This is a blank page.

1. 背景及び目的

東京電力(株)福島第一原子力発電所の廃炉に向けた取組みが現在進められている。廃炉には、燃料デブリの取出しを行う必要があり、その取り出し方法では、燃料デブリを冠水させた状態で行うことが検討されている。

一方で、いくつかの号機では冷却水の漏えいが発生し (Fig. 1)、また、地下水が建家内に流入する状況と合わせ、汚染水増加を抑止し、汚染拡大を防止する観点からも、早急に漏えいを止めることが最重要課題になっている。

格納容器の漏えい箇所の止水は Fig. 2 に示す、グラウトをサプレッションチャンバー等に注入する方法[1]がメイン工法の候補として選定され、その止水に関する技術開発が現在、国を中心に進められている一方で、代替工法が求められている。

そこで、日本原子力研究開発機構では漏えい水の止水に向けた取組みを加速するべく既存技術のサーベイ、必要な技術開発の抽出、技術の実証ならびに現地での施工に向けた検討を進めている。

グラウト注入工法は、サプレッションチャンバーまたはトーラス室にグラウトを充填して漏えいが生じている格納容器損傷部を閉塞するものであり、サプレッションチャンバー等内部で固化したグラウトが将来の解体撤去工事に支障をきたす可能性が有る。また注入したグラウトは全て廃棄物となり、処理処分の対象を増やすことになる。

これを避けるために、日本原子力研究開発機構では格納容器内部では固まらず漏えい箇所出口だけで固まる工法 (Fig. 3) を検討している。これは紫外線照射によって硬化する材料 (光硬化型樹脂) を冷却水に混ぜ冷却水の漏えい箇所に到達させ、漏えい箇所の外側から紫外線を照射して光硬化型樹脂を硬化させ損傷箇所を閉塞するものである。

しかしながら光硬化型樹脂は元々コーティング、または塗装剤として使用されるものであり、漏えい箇所止水への適用性は未知である。本予備検討は、光硬化型樹脂の水中での基本的な硬化性能を把握し、漏えい箇所止水への適用性を検討したものである。

2. 候補材料の検討

2.1 止水材料の要件

(1) 格納容器からの漏えい

格納容器の損傷箇所、損傷程度の全貌は現場調査では明らかになっておらず、1号機の格納容器損傷部等価直径 8cm、漏水流量 1.4l/s との推定がある[2]。これより算出される破断断面積 50 cm²からの漏えい平均流速 28cm/s に対して硬化性能を有することが止水材料としての要件になる。

また疎水性の樹脂は損傷箇所から相当距離離れた上流から循環冷却水に混入させても損傷箇所に至る前に沈降すると考えられ、止水の用途には不適切である。従って水と分離せず水中に分散する樹脂であること (水分散系光硬化樹脂) が止水材料の要件となる。

(2) 格納容器内の条件

原子炉格納容器からトールラス室までの冷却水の温度及び放射線量を公開資料[3]から整理した結果を Table 1 に示す。各号機の環境条件を包絡する以下の各事項が止水材料の要件となる。

- ・ PCV 内冷却水温度 : 35.8 °C
- ・ 放射線量 (PCV 内) : 73 Sv/h 以下
- ・ 放射線量 (トールラス室) : 920 mSv/h 以下
- ・ 塩分濃度 : 29 ppm

光硬化型樹脂は 10^4 Gy オーダーの放射線照射によっても硬化する可能性が有る。放射線量が高い PCV 内の滞在時間は短いものと考えられることから放射線照射によって硬化することはないといえる。

2.2 光硬化性樹脂の調査

(1) 光硬化性樹脂が紫外線照射によって硬化する原理

a. 光硬化性樹脂とは

光硬化性樹脂は、室温で高速に硬化することで種々の材料表面をコーティング、改質できることから、インキ、塗料、粘着剤、印刷や各種レジスト材料による電子材料分野で実用化されている。最近では、高速硬化や無溶剤製造によるコーティング、成型分野、および、パターン形成性を利用したエレクトロニクス分野への2つの応用が特徴となっている。今回は、前者のコーティング、成型分野を目的に開発された光硬化性樹脂を対象とする[4]。

b. 光硬化性樹脂の分類とその組成

一般的な光硬化性樹脂は、重合性オリゴマー、重合性モノマー、光重合開始剤を構成成分とする。それぞれの役割は以下の通りである[4]。

○ **重合性オリゴマー**：原料を予めある程度重合させたモノマー（オリゴマー）を用いることで、最終的な硬化への時間を短くする（高感度化）ために用いる。

○ **重合性モノマー**：塗布性など光硬化性樹脂が取り扱いやすいように粘度を低下させるとともに、自身も重合することで樹脂の一部となる溶剤とモノマーを兼ねた成分である。

○ **光重合開始剤**：紫外線を吸収すると分解し、ラジカルや酸（カチオン）を生成する物質で、生成したラジカルやカチオンが上記オリゴマーとモノマーの重合を開始する。光重合開始剤の吸光度が利用する光の波長領域で低い場合、その領域での吸光度が高く、光重合開始剤に励起エネルギーが移動できる**増感剤**を併用することで、硬化感度を上げることもできる。

○ **添加剤**：上記3主要構成成分に加え、保存安定性、強度、塗布性などを向上させるため、重合禁止剤、フィラー、レベリング剤、顔料などが加えられている。

また、光重合開始剤から発生するラジカルとカチオンにより硬化メカニズムが異なることから、それぞれ、ラジカル重合型、カチオン重合型に分類される。本実験で候補材料としたサンプルはそれぞれ以下の通りである。

○ **ラジカル重合型**：光を吸収することで、2つのラジカル活性種に分解する光重合開始剤を含む。樹脂成分としては、アクリル系、ウレタン系などがある（DIC（ユニデック）、スリーボンド）。

○ **カチオン重合型**：光を吸収することで、カチオン（酸）を生成する光開始剤を含む。樹脂成分として、エポキシ系、オキセタン系などがある（東亜合成（アロニックス M-240））。

c. 光硬化反応

各種プラスチック、紙、木材などの基板上に塗布された光硬化性樹脂膜に紫外線を照射すると硬化過程を経て、液状の樹脂は固体に変化する。以下、ラジカル重合型について各光硬化過程を説明する。

過程1) 開始剤の反応：光重合開始剤は、直接光を吸収することにより、または、光を吸収することにより励起状態になった増感剤からのエネルギー移動により、励起状態となる。不安定な励起状態は、一部失活により元の重合開始剤に戻るが、多くは分解反応により、重合を開始するラジカル（活性種）が生成する。

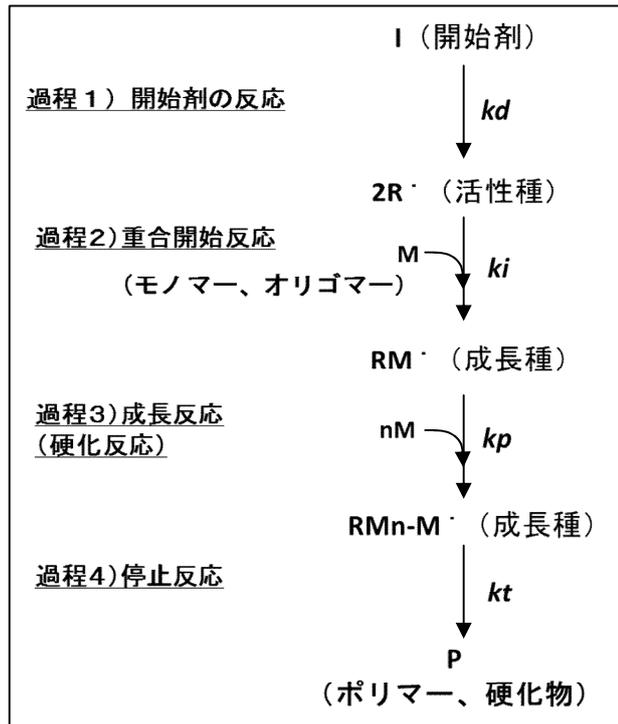
過程2) 重合開始反応：生成したラジカルは、樹脂成分である重合性オリゴマー、重合性モノマーと反応する。

過程3) 成長反応（硬化反応）：反応したオリゴマー、モノマーの末端にラジカルが再生することから、この重合は連鎖的に進行し、3次元的な架橋構造が生成する。その結果、樹脂成分の流動性が低下し徐々に硬化していく。

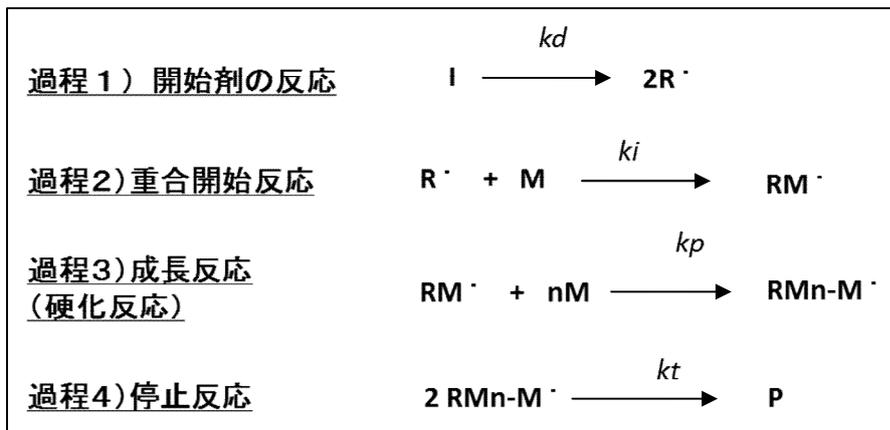
過程4) 停止反応：成長末端の2つのラジカル同志は、直接結合（再結合）したり、両者間でヒドリド（水素ラジカル）が移動することでラジカルが消失し、重合反応は終了する。

d. 光硬化速度について

光照射された光硬化性樹脂は、以下の過程で、重合性オリゴマー、重合性モノマー、光重合開始剤がそれぞれ反応して硬化物（ポリマー）となり硬化する[5]。



その各硬化反応過程は、以下の化学スキームで表すことができる。



各硬化過程の速度定数 k によって重合速度（硬化速度） R_p を表す。

k_i : 開始反応（分解反応）の速度定数

k_p : 成長反応（硬化反応）の速度定数

k_t : 停止反応の速度定数

\cdot : 光重合開始剤のモル吸光係数

f : 活性種発生の量子収率

とすると、硬化速度（重合速度） R_p は以下のようにあらわすことができる。

$$R_p = k_p \times \sqrt{2 k_d [I] / k_t} \times [M] = k_p \times \sqrt{\epsilon f [I] / k_t} \times [M] \quad (1)$$

この反応式より、硬化速度を高くする因子として、構成成分の下記の因子があげられる。

光源：

- ・ 光の強度が高い（ルートに比例）

開始剤：

- ・ 光の吸収領域の吸光度が高い（ルートに比例）
- ・ 活性種（ラジカル）の生成収率が高い（ルートに比例）
- ・ 生成したラジカルのモノマーとの反応性が高い（多くの場合、 $k_i = k_p$ ）
- ・ 樹脂中の開始剤濃度が高い（ルートに比例）

重合性モノマー、オリゴマー：

- ・ モノマー、オリゴマー濃度が高い（比例）
- ・ 粘度が低い（拡散係数が高くなると k_p も高くなる。一方、停止反応 kt も高くなるため、バランスが重要）

その他（阻害要因）：

- ・ 酸素
- ・ 水（水分）

短時間で硬化させるためには、上記硬化速度を支配する各因子について、それぞれ R_p を高くするように調整すればよい。しかし、多くの因子において、その反応性が高い方向に働くため、光硬化性樹脂の安定性（長期保存性）を考慮して調整する必要がある。硬化速度を高くするため、モノマー、オリゴマー濃度を高くすると、塗布性などが低下することも懸念される。また、光重合開始剤濃度を高くすると塗布膜への光の透過性が低下するために、内部の硬化速度が低下するなどの問題が生じる。このような硬化速度以外の因子とのバランスを考慮したうえで、硬化速度を高くする条件を検討することが重要である。

(2) 光硬化反応の具体例

光硬化型樹脂が硬化するための照射エネルギー E (J/cm^2) は照射強度 I (W/cm^2) と照射時間 t (s) との積で表される。

$$E = I * t \quad (W*s/cm^2=J/cm^2)$$

光硬化性樹脂は、照射エネルギー E (露光量) がある一定の露光量 E_c (臨界露光量: Critical exposure) に達するまでは、光重合反応を起こさない [6]。そのため、露光量が E_c 未満では硬化せずに液状のまま、 E_c 以上になると固体状態になり硬化という現象が現れる。このような硬化反応を発現する露光量を得るには、強度と、時間の積が E_c 以上となる条件の照射を行う必要がある。

ウレタンアクリレートを主成分とする紫外線硬化型樹脂（以下 試料 A）について、光反応熱量計を用いて硬化反応時間に影響するいくつかの因子に関する特性評価を行った

結果が報告されている[7]。この中から、照射強度依存性、温度依存性、硬化度について以下にまとめる。

(a) 照射強度依存性

試料 A に、強度が 1, 5, 10, 20, 30mW/cm² の光をそれぞれ照射すると、照射強度が増加するほど反応速度が速く、また、発熱量も大きくなる傾向にあり、10mW/cm² を境に、それらの値はほぼ一定となったことが報告されている。

この報告から、樹脂の高速硬化性を最大に引き出すには、一定以上の照射強度が必要となることが推測される。

(b) 温度依存性

光照射前の試料温度を-50~80°C間にした試料 A に、波長 365nm、強度 10mW/cm² の光を照射。試験の 4 つの温度条件範囲では、25°C が最も反応が早く、-50°C や 80°C では反応が進行しにくい結果となったことが報告されている。

この報告から、硬化速度を最大に引き出すには光硬化樹脂の特性にあった温度域で使用する必要があることが推測される。

(c) 硬化度

試料 A に 0.2、0.5、1.0 秒間の光照射を行い（硬化途中で光照射を停止）、硬化不足試料の硬化度を求めた例が紹介されている。その結果、事前の照射時間が短時間であるほど、残存硬化発熱量が増加していると報告されている。また、次式を用いて各硬化不足モデル試料の硬化度を算出している。

$$\text{硬化度} = 1 - (\text{残存未硬化物の発熱量}) / (\text{未硬化物の発熱量})$$

照射処理時間と硬化度の関係をプロットし、照射時間が長くなるほど、完全硬化時の値（硬化度 1）に近づく傾向を示すことが報告されている。

この報告から、一時的に光照射不足となった場合でも、後から十分な光照射を行うことによって本来の硬化性能が得られることが推測される。

光硬化型樹脂を水中で使用する場合、樹脂の硬化に適切な波長と強度を持った光が材料に到達することで、原料レベルの樹脂粒が水中で硬化を発現すると推測される。ここで、樹脂濃度が非常に高い場合、硬化が開始することで硬化に必要な光が内部に到達しなくなり、硬化が進展しなくなる状況も考えられる。水中における樹脂濃度の影響については情報が見当たらない。そこで、上述の照射強度や照射時間影響を踏まえて、水中で硬化した場合の硬化物発現調査や、流れがある場合の硬化物発現後の挙動調査を実施し、濃度に係る現象を新たな情報として収集、把握する必要がある。

2.3 試験対象の選定

Table 2 に示す国内メーカーを対象に市販の光硬化型樹脂について前項の要件に合致する樹脂材料を調査し、試験対象を選定した。調査対象 8 社のうち水分散系樹脂を有するメー

カーは4社（A社、B社、C社、D社）であった。このうちD社の製品は塗装、コーティング用途に特化した製品であり、他の用途へ使用するための仕様変更の自由度が無いとのことから対象から除外し、A、B、C社の樹脂を試験対象とすることとした。

A社、B社、C社各社の試料番号をそれぞれA1、B1、C1とし、各試料の仕様をTable 3に示す。

3. 基礎試験

光硬化型樹脂は主にコーティング、塗装に用いられる材料である。通常は光硬化型樹脂を定着させる対象面に数100 μ m程度の膜厚で塗付し、水分を除去してから紫外線照射によって光硬化型樹脂を硬化させ定着させる。一方、止水の用途では水中で光硬化型樹脂を使用する点が本来の使用方法与異なる。

本試験では水分散系樹脂が水とどのように混ざるのか、水中でも紫外線照射によって硬化するか、基本的な性状を調査することを目的に実施した。

3.1 水分散性確認試験

光硬化型樹脂が水中に一様に分散し、漏えい箇所に至るまでの間に樹脂成分が沈降することなく輸送されることが求められる。水への分散性を確認する試験を行った。

(1) 試験方法、試験条件

(a) 試験対象

試料No. : A1、B1、C1

(b) 試験条件 (Table 4)

混合割合 : 10、1、0.1wt%

(c) 試験方法

水を入れたビーカーに試験対象の試料原液を段階的に所定の希釈濃度まで滴下して、攪拌棒で攪拌し、水への分散性を目視で観察する (Fig. 4)。

(2) 試験結果

Photo 1に各試料の状態を示す。試料A1, A2は水に均質に分散した。A3は水と分離して沈降し、攪拌しても一様に分散することはなく、小さな粒となって水中に広がり約45秒後に樹脂同士がかたまりとなって沈降した。

3.2 膜状液硬化試験

本来の製品の使い方に近い膜状の光硬化型樹脂に紫外線を照射し、硬化のし方を調査した。

(1) 試験方法、試験条件

(a) 試験対象

水分散性確認試験の結果、水への分散性が認められた試料A1, B1を対象に試験を行った。

(b) 試験条件 (Table 4)

- ・混合割合 : 100wt% (原液)、10wt%、1wt%、0.1wt%
- ・紫外線照度 : 120 mW/cm²
- ・紫外線照射時間 : 2s、10s (累積時間)

(c) 試験方法

試験状態を Fig. 5 に示す。

- ① ガラス板に所定の混合割合に希釈した試料を薄く塗付する。
- ② ガラス板と紫外線ランプとの距離を 80mm に保ち、紫外線を照射する。
- ③ 紫外線照射累積時間が 2s , 10s となるよう段階的に紫外線を照射し、試料の変化を目視で観察する。

(2) 試験装置

(a) 紫外線ランプ

- ・メーカー、形式 : オーク製作所株式会社、UV-300
- ・紫外線強度 : 20 - 130 mW/cm²(光源からの距離 130 - 70 mm) (Fig. 6)

(3) 試験結果

Table 5,6 に各試料の結果を示す。試料 A1 は混合割合 100, 10wt%、累積紫外線照射量 240mJ/cm² で硬化を開始し、1200 mJ/cm² で全体が硬化した。試料 B1 は混合割合 100, 10wt% の混合液が 600 mJ/cm² で硬化を開始したが、1200 mJ/cm² でも全体が硬化するには至らなかった。試料 A1 は混合割合 1wt%、累積紫外線照射量 1200mJ/cm² で硬化を開始したが、試料 B1 は同じ条件でも硬化を開始しなかった。

3.3 溶液硬化試験

樹脂は乳白色で内部に紫外線が透過しづらいため、硬化開始を遅らせる要因になると考えられる。樹脂溶液に紫外線を照射して固形分 (硬化した成分) の生成状態を調査する。

(1) 試験方法、試験条件

(a) 試験対象

水分散性確認試験の結果、水への分散性が認められた試料 A1, B1 を対象に試験を行った。

(b) 試験条件 (Table 4)

- ・混合割合 : 10wt%、1wt%、0.1wt%
- ・紫外線照度 : 120 mW/cm²
- ・紫外線照射時間 : 10s、60s (累積時間)

(c) 試験方法

試験状態を Fig. 7 に示す。

- ① ビーカーに所定の混合割合に希釈した試料を入れる。
- ② 試料表面と紫外線ランプとの距離を 80mm に保ち、紫外線を照射する。
- ③ 紫外線照射累積時間が 10s , 60s となるよう段階的にビーカーの上方から紫外線を照射し、試料の変化を観察する。

(2) 試験装置

(a) 紫外線ランプ

- ・メーカー、形式 : オーク製作所株式会社、UV-300
- ・紫外線強度 : 20 - 130 mW/cm²(光源からの距離 130 - 70 mm) (Fig. 6)

(3) 試験結果

Table 7, 8 及び Photo 2, 3 に各試料の試験結果を示す。試料 A1 は混合割合 10, 1wt%、累積紫外線照射量 1200mJ/cm² で固形分が硬化析出し始めた。試料 B1 は混合割合 10wt%、累積紫外線照射量 1200mJ/cm² で固形分が硬化析出し始めたが、混合割合 1wt%の混合液では同じ条件でも硬化を開始しなかった。混合割合 0.1wt%の試料 A1、B1 はともに累積紫外線照射量 7200mJ/cm² までに固形分が析出せず、硬化を開始しなかった。

3.4 溶液滴下試験

流動状態の樹脂が硬化する可能性有無について、予備調査する。

(1) 試験方法、試験条件

(a) 試験対象

溶液硬化試験の結果、低濃度、低照射量で硬化を開始する試料 A1 を対象に試験を行った。

(b) 試験条件 (Table 4)

- ・混合割合 : 10wt%
- ・紫外線照度 : 25 mW/cm²
- ・紫外線照射時間 : 硬化するまで照射する。

(c) 試験方法

試験状態を Fig. 8, 9 に示す。

- ① 底部に直径 0.8mm の穴を開けた遮光容器に混合液を 50ml 入れ、容器底部の穴から滴下させる。遮光容器内混合液の液面が下がらないように混合液を補給する。
- ② 遮光容器底部側から紫外線を連続照射し、流出部の様子を観察する。滴下状況をビデオ撮影し、滴下する間隔 (時間) を計測する。
- ③ 混合液が滴下しなくなったら穴が閉塞されたものと判断する。

(2) 試験結果

溶液硬化試験の結果から低濃度、低紫外線照射量で硬化を開始する試料 A1 を用いて漏えいが生じている欠陥 (穴) を閉塞することができるか予備的な試験を行った。

混合割合 10wt%の混合液を溜めた容器から混合液を滴下させ、滴下部に紫外線を照射した結果、紫外線照射開始から 30 分後に欠陥を閉塞して漏えいが停止した (Table 9)。

3.5 考察

(1) 樹脂の硬化性

2 種類の試料 (A1, B1) について光硬化型樹脂が水に均質に分散し、水との混合液において固形分が硬化することが分かった。また、濃度と硬化開始紫外線照射量の関係を Fig.

10 に示すように、試料 A1 の方がより低濃度で硬化を開始しており実用上試料 A1 の方が有利である。

溶液滴下試験の結果から、漏えいを生じている亀裂の周辺で光硬化型樹脂が硬化して付着し始め、更に光硬化型樹脂が硬化、堆積することによって徐々に亀裂を閉塞していき、止水に至るものと考えられる (Fig. 11)。

(2) 樹脂の改善

硬化する時間を短縮する方策として以下の材料の改善策が考えられる。

(a) 光開始剤を水分散体に入れる

現在水分散体と別に添加されている光開始剤を水分散体内部に取り込むことによりラジカルが光硬化樹脂 (アクリレートモノマー) と遭遇する確率 (衝突確率) を上げる (Fig. 12)。

(b) 結合部を増やす

硬化体が早く形成されるよう多官能アクリレートの官能数 (重合結合部) を増やし、かつ立体障害による硬化速度低下を防ぐよう官能数を調整する (Fig. 13)。

(c) 光硬化樹脂の透明度を上げる

水分散系樹脂は乳白色であり紫外線が内部まで透過しづらく、硬化速度を遅くしていることが考えられる。水溶性の高い原料を用いて透明な光硬化型樹脂とし、光透過率を向上させる (Fig. 14)。

4. 結論

水が漏えいしている損傷箇所閉塞への光硬化樹脂の適用性を検討するために、水分散系光硬化樹脂の水中への分散性、硬化性について調査した結果、水分散系光硬化樹脂が水中に均質に分散し (Photo 1)、水との混合割合 10wt% の溶液の固形分が累積紫外線照射量 $1200\text{mJ}/\text{cm}^2$ で硬化することを確認した (Photo 2,3)。一例として模擬亀裂 (直径 0.8mm) から滴下する水と光硬化樹脂の混合溶液に紫外線を照射した結果、混合溶液が亀裂部で硬化する可能性が得られた。

また、漏えい箇所の止水へ適用する上での光硬化樹脂の改善策として、光開始剤を水分散体に入れる、結合部を増やす、光硬化樹脂の透明度を上げるといった方策を整理することができた。

実際の損傷箇所の亀裂形状、位置、寸法等が未確認であるため、今後継続して行われる格納容器損傷箇所調査を注視するとともに、改善を図った樹脂を用いて光硬化型樹脂の止水への適用範囲を確認していく予定である。

謝 辞

本共同研究の実施にあたり、原子力科学研究部門 量子ビーム応用研究センター 伊藤久義センター長に有意義なご指導及びご助言を頂きました。また、福島工業高等専門学校 機械工学科 篠木政利准教授に有意義なご指導及びご助言を頂きました。さらに、試験においては原子力科学研究部門 原子力科学研究所 工務技術部 野村俊文部長、工作技術課 兼子修一課長、工作技術課諸氏には多大なご協力を頂きましたことを深く感謝いたします。

参考文献

- 1) IRID, 国プロ「原子炉格納容器の水張りに向けた調査・補修（止水）技術の開発」（調査）等の成果活用について, http://www.tepco.co.jp/decommission/principles/technology/robot/robot_under/pdf/rc_rov_03.pdf, accessed 2014. 4. 21.
- 2) 圓山重直, 1号機格納容器の破損箇所・大きさ・形状の推定と原子炉収束方法, HTC Rep. 25. 1, <http://www.ifs.tohoku.ac.jp/maru/atom/HTCRep/HTCRep.25.1.pdf>, accessed 2013. 8. 20.
- 3) 廃炉・汚染水対策チーム会合, 東京電力（株）福島第一原子力発電所1～4号機の廃止措置等に向けた中長期ロードマップ進捗状況（概要版）（廃炉・汚染水対策チーム会合第4回事務局会議資料）2014. 3. 27, http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/roadmap/images/d140327_05-j.pdf, accessed 2014. 4. 21.
- 4) 新 UV・EB 硬化技術と応用展開、田畑米穂監修、ラドテック研究会編集、シーエムシー（1997）.
- 5) 新高分子文庫 21、UV 硬化技術入門、加藤清視、中原正二著、高分子刊行会（1984）.
- 6) 中島 他 光造形法における硬化物余剰成長の理論的解析および実験による評価, 精密工学会誌, Vol. 66, No. 7, (2000) pp. 1053-1058.
- 7) 大田他, 光硬化型樹脂の硬化反応解析, 東レリサーチセンター The TRC News No. 108. 2009.

Table 1 格納容器 (PCV) 内の環境条件

	1号機	2号機	3号機
PCV 内雰囲気線量	約 11Sv/h (最大)	約 73Sv/h (最大)	未確認
PCV 内冷却水温度	約 24.4℃	約 35.8℃	未確認
滞留水塩分濃度	29ppm	2.8	未確認
トーラス室雰囲気線量	約 180~920 mSv/h	約 6~134 mSv/h	約 100~360 mSv/h
トーラス室滞留水温度	約 20~23℃	未確認	未確認

Table 2 光硬化型樹脂の調査結果

調査対象	水分散系又は水溶性光硬化型樹脂の製品の有無	止水への適用の可能性、 または知見があるか	選定結果 (試料番号)
A社	製品有り	適用性は不明である。 ユーザーが行った評価試験に基づき改造提案することが可能である。	○ (A1)
B社	製品有り	適用性は不明である。	○ (B1)
C社	水分散系樹脂は無いが水との親和性の高い製品がある。	適用性は不明である。	○ (C1)
D社	水分散系無し 水溶性有り	塗装、コーティング用途に特化した製品であり、他の用途へ変更する自由度が無い。	—
E社	無し	—	—
F社	無し	—	—
G社	無し	—	—
H社	無し	—	—

Table 3 光硬化型樹脂の仕様

メーカー	A社	B社	C社
試料番号	A1	B1	C1
分類	ウレタン アクリレート	ポリウレタン 水分散体	特殊アクリレート
外観	乳白色液体	乳白色液体	透明液体
固形分濃度 (wt%)	39.6	39.5	非公開
粘度 (mPa·s)	34	非公開	13~24
pH	8.4	5.0~7.0	非公開
その他	付録参照	付録参照	付録参照

Table 4 試験条件

(1) 水分散性確認試験

混合割合 (wt%)	備考
10 , 1 , 0.1	—

(2) 膜状液硬化試験

混合割合 (wt%)	紫外線照射距離 (mm)	紫外線照度 (mW/cm ²)	紫外線照射累積時間 (s)	備考
100	80	120	2 , 10	—
10				
1				
0.1				

(3) 溶液硬化試験

混合割合 (wt%)	紫外線照射距離 (mm)	紫外線照度 (mW/cm ²)	紫外線照射累積時間 (s)	備考
10	80	120	10 , 60	—
1				
0.1				

(4) 溶液滴下試験

混合割合 (wt%)	紫外線照射距離 (mm)	紫外線照度 (mW/cm ²)	紫外線照射累積時間 (s)	備考
10	100	24	硬化するまで	—

Table 5 試験結果 膜状液硬化試験（試料A 1）

紫外線照射量 (mJ/cm ²)	希釈濃度 (wt%)			
	100	10	1	0.1
240	△	△	×	×
1200	○	○	△	×

○全体が硬化した △表面が硬化した ×全く硬化しなかった

Table 6 試験結果 膜状液硬化試験（試料B 1）

紫外線照射量 (mJ/cm ²)	希釈濃度 (wt%)			
	100	10	1	0.1
240	×	×	×	×
600	△	△	×	×
1200	△	△	×	×

○全体が硬化した △表面が硬化した ×全く硬化しなかった

Table 7 試験結果 溶液硬化試験（試料A 1）

紫外線照射量 (mJ/cm ²)	希釈濃度 (wt%)		
	10	1	0.1
1200	△	△	×
7200	○	○	×

○硬化、析出した △わずかに硬化、析出した ×硬化無し

Table 8 試験結果 膜状液硬化試験（試料B 1）

紫外線照射量 (mJ/cm ²)	希釈濃度 (wt%)		
	10	1	0.1
1200	△	×	×
7200	○	×	×

○硬化、析出した △わずかに硬化、析出した ×硬化無し

Table 9 試験結果 溶液滴下試験

試料No.	混合割合	累積照射時間 (min)	滴下間隔 (s)
A1	10wt%	0	0.4
		2	0.5
		5	0.6
		10	1.4
		15	2.5
		20	12
		30	漏えい停止

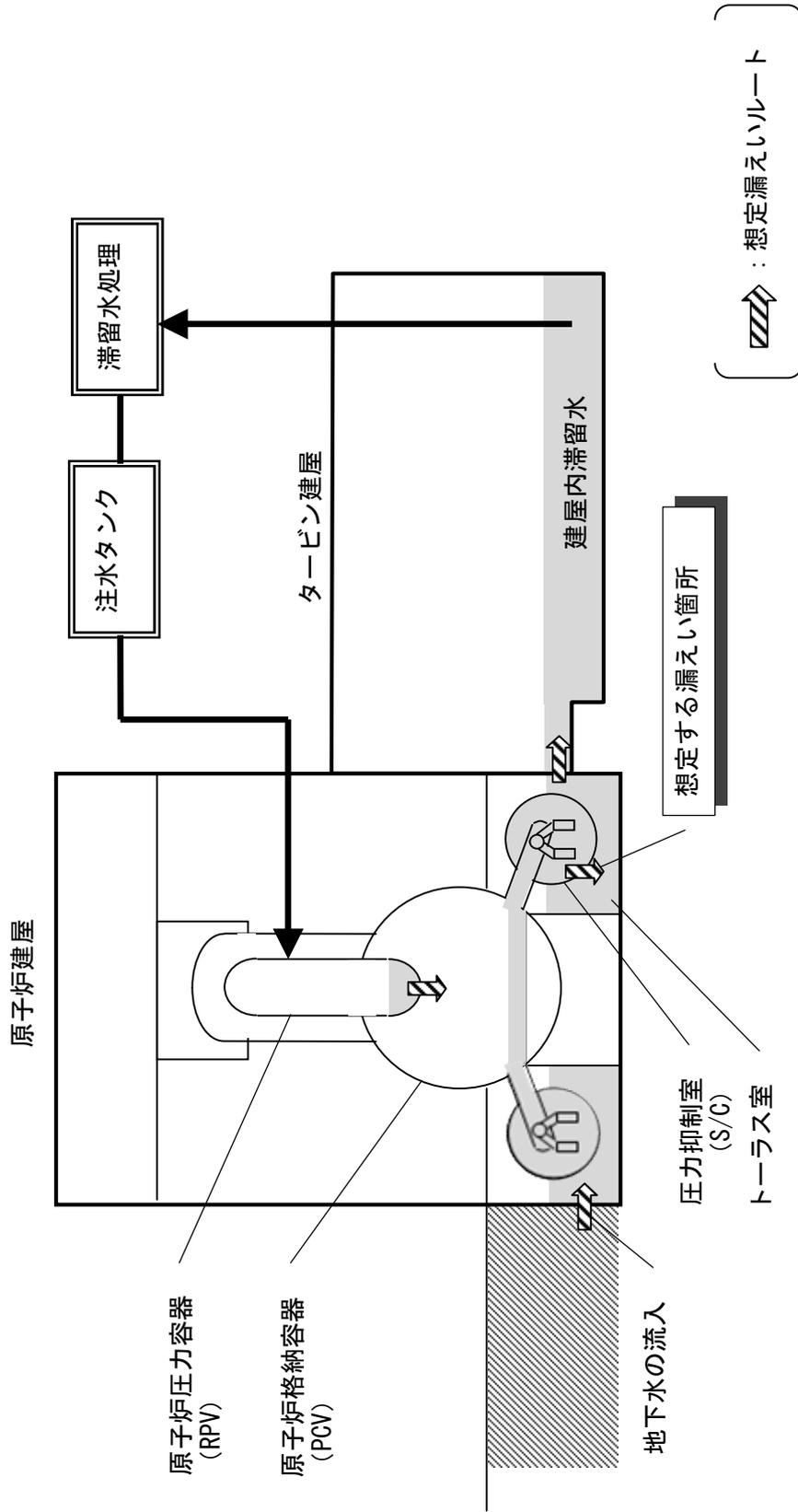


Fig. 1 冷却水循環系統概略図及び漏えい箇所

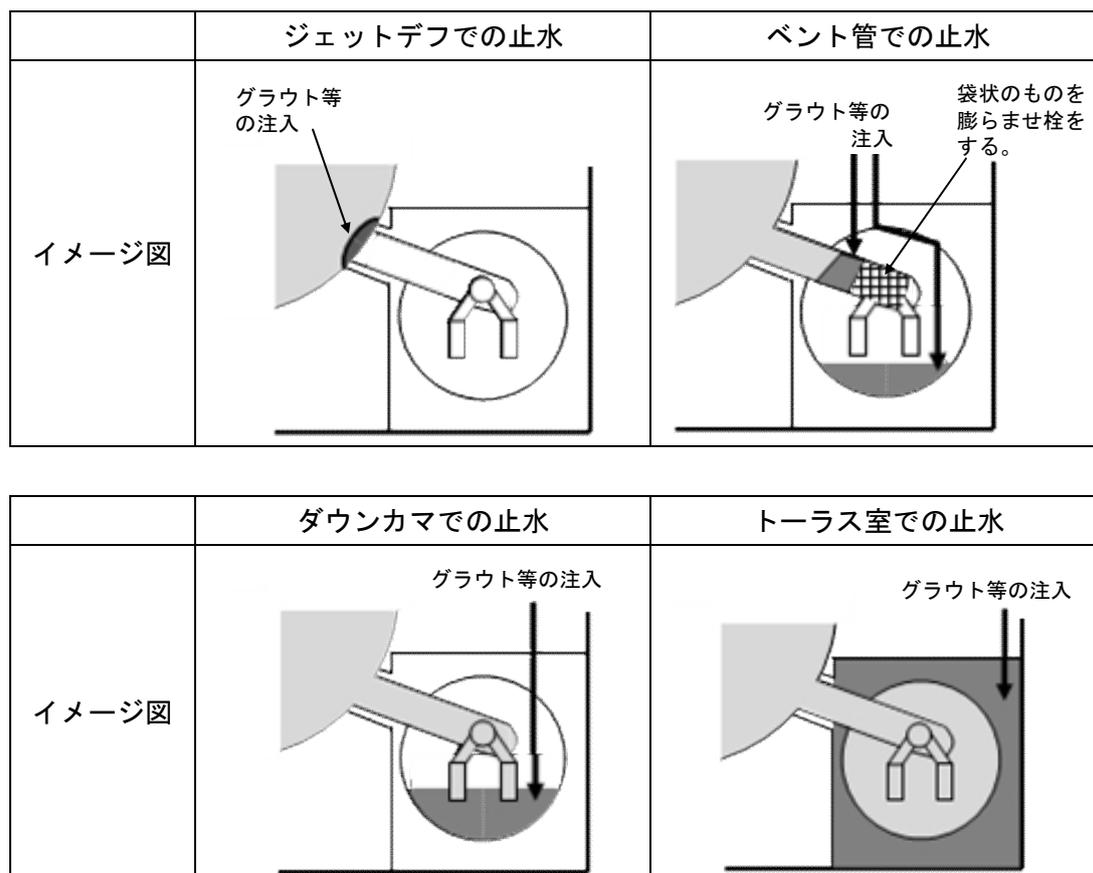


Fig. 2 格納容器補修工法の候補 【グラウト硬化による閉塞】

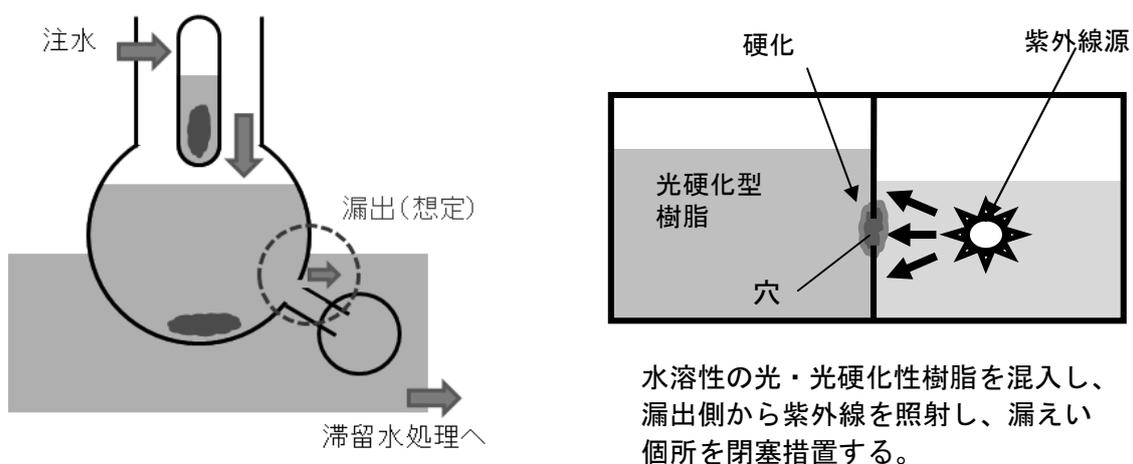


Fig. 3 格納容器補修工法 【光硬化型樹脂硬化による閉塞】

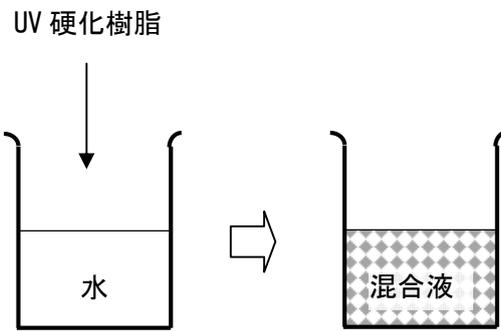


Fig. 4 試験方法（水分散性確認試験）

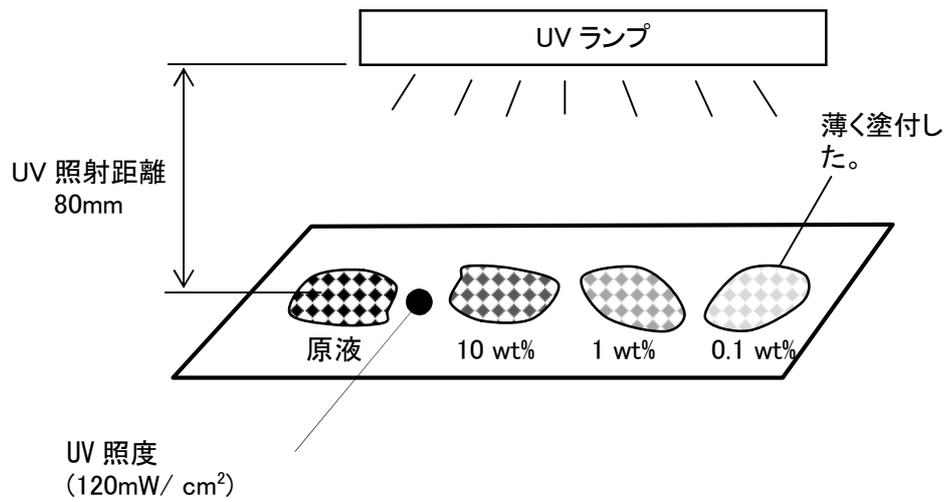
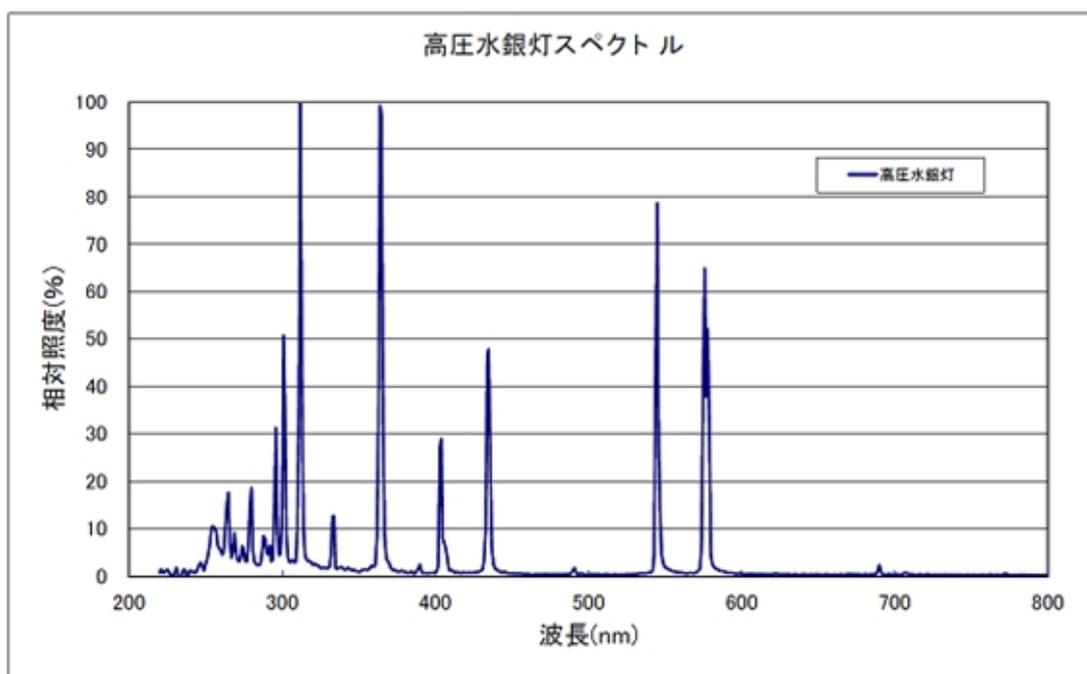
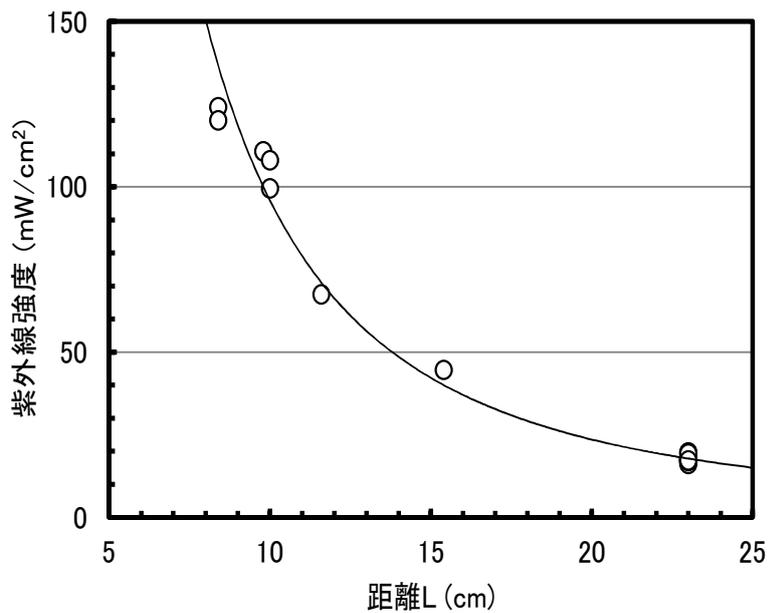


Fig. 5 試験方法（膜状液硬化試験）



メーカー	オーク製作所株式会社
本体型番	UV-300
高圧水銀灯型番	HSL-300/B-FM

Fig. 6 紫外線ランプの特性

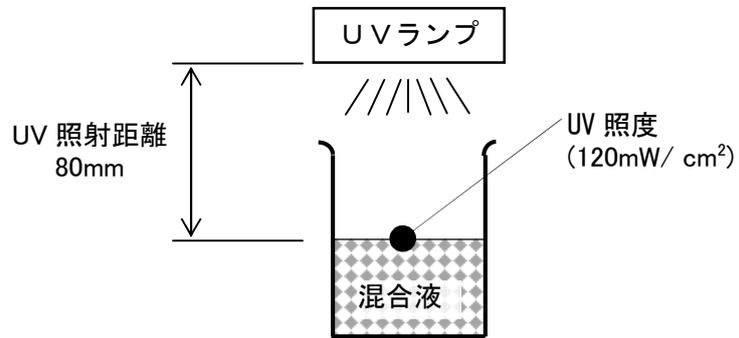


Fig. 7 試験方法（溶液硬化試験）

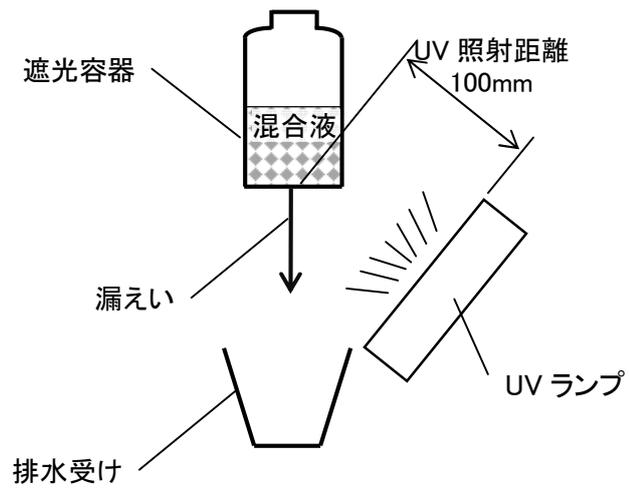


Fig. 8 試験方法（溶液滴下試験）

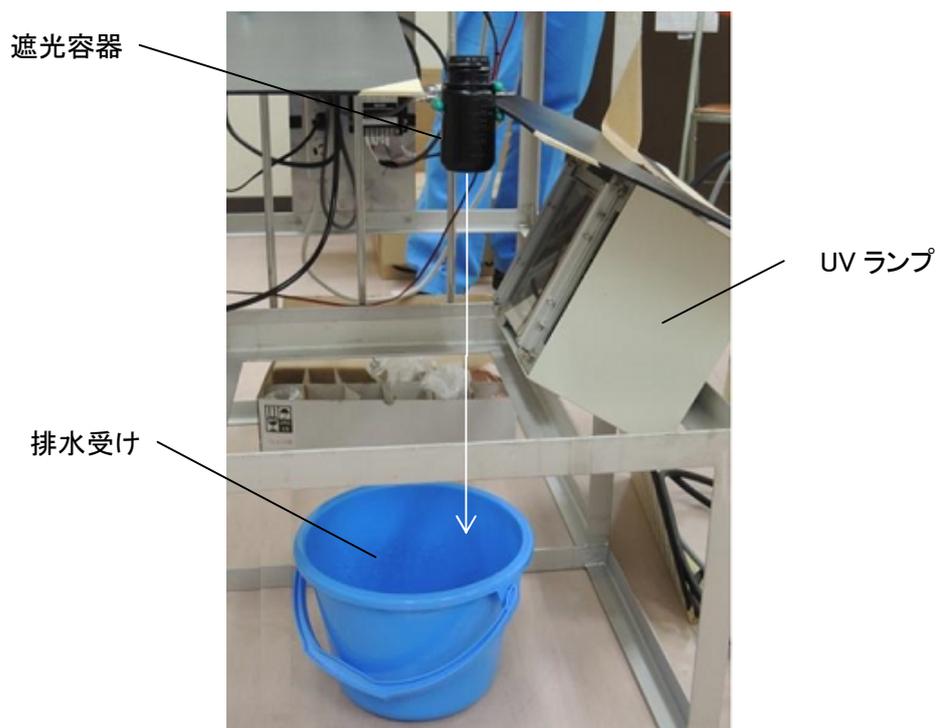


Fig. 9 試験状況 (溶液滴下試験)

光硬化を開始する濃度、紫外線照射量の関係

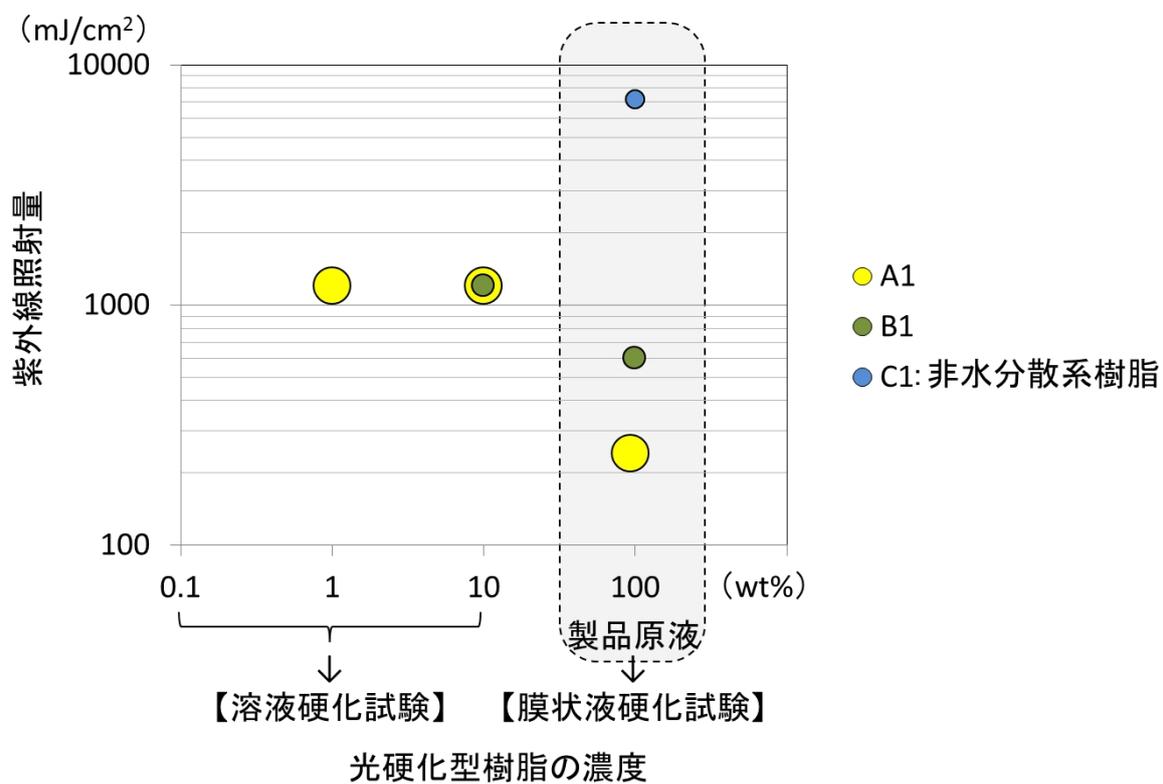


Fig. 10 試験結果

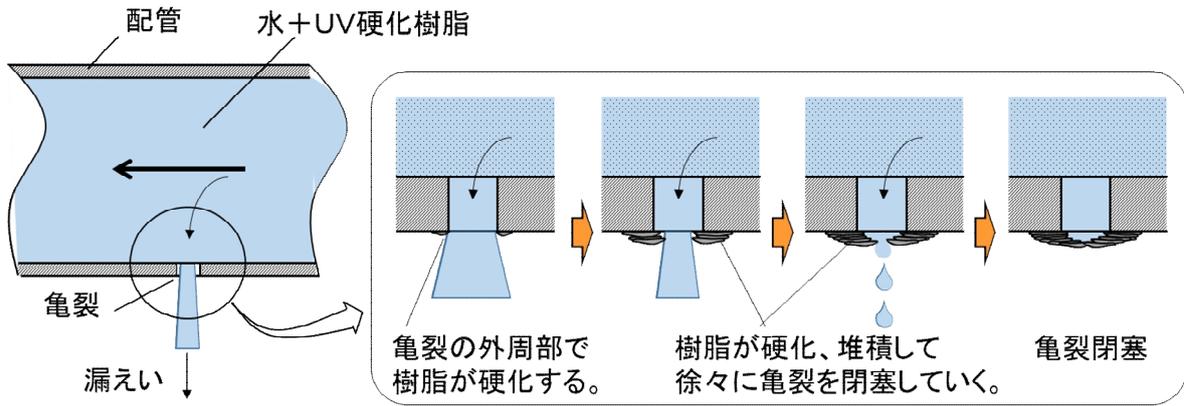


Fig. 11 損傷箇所の閉塞イメージ

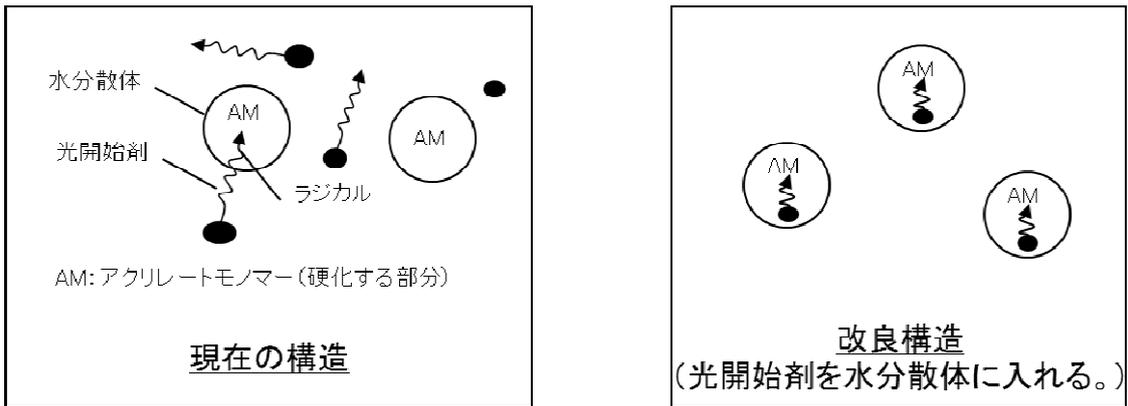


Fig. 12 樹脂改善策1：光開始剤を水分散体に入れる

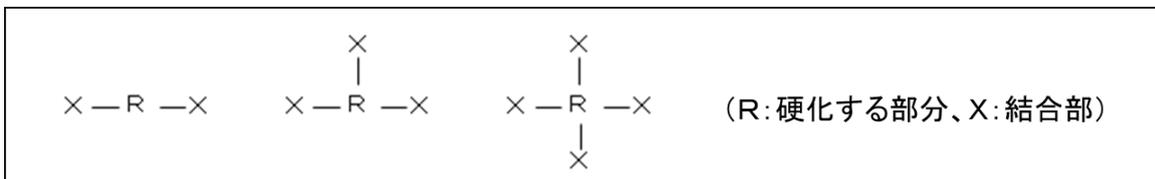


Fig. 13 樹脂改善策2：結合部を増やす

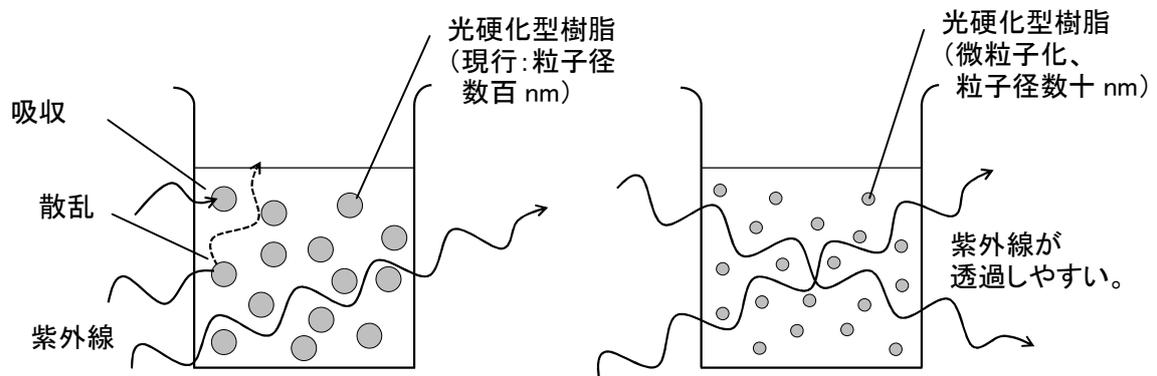


Fig. 14 樹脂改善策3：光硬化樹脂の透明度を上げる



10wt%

1 wt%

0.1 wt%

a 試料 A 1

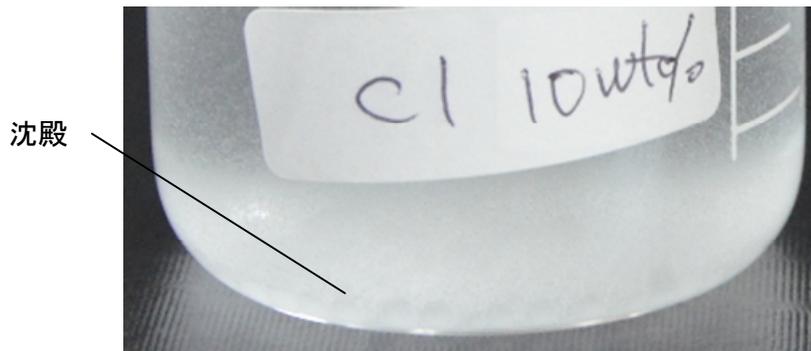


10wt%

1 wt%

0.1 wt%

b 試料 B 1



沈殿

c 試料 C 1 (10 wt%)

Photo 1 試験結果 水分散性確認試験

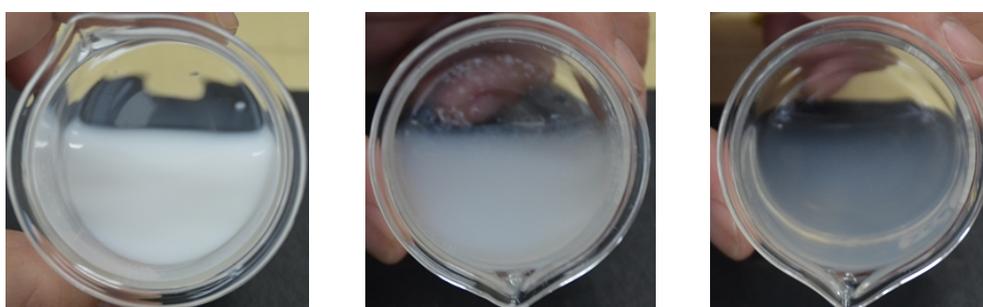


a 10 wt%

b 1 wt%

c 0.1 wt%

紫外線照射前

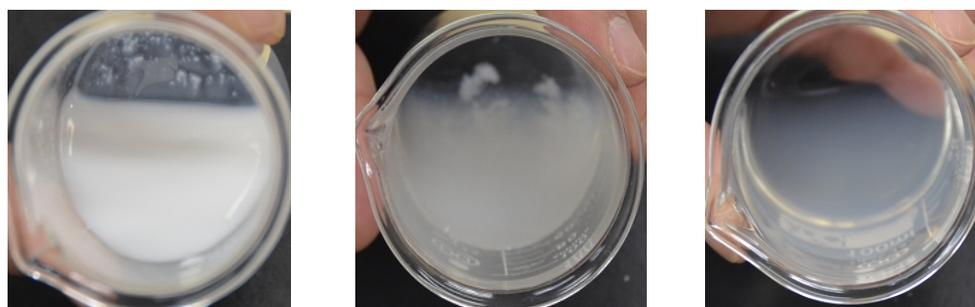


d 10 wt%

e 1 wt%

f 0.1 wt%

紫外線照射 10s 後 (紫外線照射量 1200 mJ/cm²)



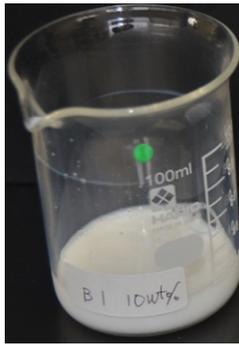
g 10 wt%

h 1 wt%

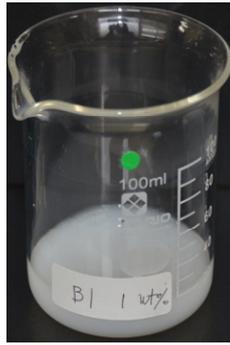
i 0.1 wt%

紫外線照射 60s 後 (紫外線照射量 7200 mJ/cm²)

Photo 2 試驗結果 溶液硬化試驗 (試料 : A1)



a 10 wt%



b 1 wt%



c 0.1 wt%

紫外線照射前



d 10 wt%



e 1 wt%



f 0.1 wt%

紫外線照射 10s 後 (紫外線照射量 1200 mJ/cm²)



g 10 wt%



h 1 wt%



i 0.1 wt%

紫外線照射 60s 後 (紫外線照射量 7200 mJ/cm²)

Photo 3 試驗結果 溶液硬化試驗 (試料 : B1)

付録 試料の性状等

1. 基本的性状

試料No.	A1	B1	C1
種類	ウレタン アクリレート	ポリウレタン 水分散体	特殊アクリレート
外観	乳白色液体	乳白色液体	黄淡色液体
固形分濃度 (wt%)	39.6	39.5	—
粘度 (mPa・s)	34	—	13~24 (25°C)
pH	8.4	5.0~7.0	—

2. 推奨用途及び使用上の制限

A1	塗料
A2	工業用（塗料、接着剤、繊維加工剤 等）
A3	紫外線硬化材料として表示材料、工学材料、電子材料、記録材料の構成部材、接着剤、封止材等およびそれらの原料、インキ、塗料の原材料であるほか、反応性希釈剤、共重合用モノマー、添加剤等である。 業務用（工業用）に限定使用する。 体内に埋植、注入したりまたは体内に残留する用途へは使用しない。

3. 危険有害性（GHS 分類）

試料No.	A1	B1	C1
物理化学的危険性	情報なし	「分類できない」又は「分類対象外」	「分類できない」又は「分類対象外」
健康に対する有害性	皮膚感作性：区分1 上記以外は「分類できない」又は「分類対象外」	「分類できない」又は「分類対象外」	急性毒性（経口）：区分4 皮膚腐食性・刺激性：区分2 上記以外は「分類できない」
環境に対する有害性	情報なし	分類できない	分類できない

4. 組成、成分

(1) 試料No. A1

化学名又は一般名	含有率	化学特性
水	50～60%	H2O
UV 樹脂	35～45%	—
ジプロピレングリコールジメチルエーテル	5～10%	—
その他	1%未満	—

(2) 試料No. B1

化学名又は一般名	含有率	化学特性
水、その他	約 40%	—
ウレタン樹脂	約 60%	—

(3) 試料No. C1

化学名又は一般名	含有率	化学特性
ポリエチレングリコールジアクリレートを主成分とするポリエチレングリコール (PEG #200) とアクリル酸の反応生成物	99.9%以上	—

5. 物理的・化学的性質

(1) 試料No. A1

物理的状態	形状	: 液体
	色	: 乳白色
	臭い	: 特異臭
物理的状態が変化する特定の温度	データなし	
引火点	引火せず	
密度	データなし	
粘度	34 mPa・s	

(2) 試料No. B1

物理的状態	形状	: 液体
	色	: 乳白色
	臭い	: わずかに固有の臭気あり
物理的状態が変化する特定の温度	データなし	
引火点	データなし	
密度	約 1.05 (20°C)	
粘度	データなし	

(3) 試料No. C1

物理的状態	形状	: 液体
	色	: 黄淡色
	臭い	: 弱いエステル臭
物理的状態が変化する特定の温度	データなし	
引火点	引火前に重合	
密度	1.11 (25°C)	
粘度	13~24 mPa・s (25°C)	

6. 安定性及び反応性

(1) 試料No. A1

安定性	冷暗所で密閉状態では安定である。
反応性	熱、光により、また金属粉や過酸化物混入により重合反応を起こし、発熱することがある。
避けるべき条件	光、過酸化物の混入。 金属粉等の混入。 50°C以上の高温
危険有害な分解生成物	情報なし。

(2) 試料No. B1

安定性	通常の使用条件で安定。一般的な貯蔵、取扱いにおいて安定。
反応性	自己反応性なし。
避けるべき条件	40℃以上の長期保管、0℃以下での貯蔵。
危険有害な分解生成物	情報なし。

(3) 試料No. C1

安定性	通常の手扱いにおいては安定。
反応性	混合危険物質との混合、嫌気条件下や不活性ガスでシールすることで重合・爆発を起こす危険性がある。
避けるべき条件	熱、光、強酸や混合危険物質との混合、嫌気条件下や不活性ガスによるシール。
危険有害な分解生成物	情報なし。

7. 廃棄上の注意

試料 A1、B1、C1 共通

残余廃棄物	排水溝中に廃棄してはならない。
内部処理の場合	法令に従って、残余廃棄物、製品の包装材を廃棄処理する。 焼却条件によっては有毒ガスが発生する可能性があるため、除害装置のある焼却炉の使用を推奨する。
外部委託処理の場合	産業廃棄物処理業者と委託契約を結び、廃棄物の内容を明確にして、処理を委託する。

8. 適用法令

(1) 試料No. A1

労働安全衛生法	通知対象物質： 該当しない
毒物及び劇物取締法	該当しない
消防法	該当しない
化学物質排出把握管理促進法 (PRTR法)	該当しない

(2) 試料No. B1

労働安全衛生法	通知対象物質： プロピルアルコール 1%未満
毒物及び劇物取締法	該当しない
消防法	該当しない
化学物質排出把握管理促進法 (PRTR法)	該当しない

(3) 試料No. C1

労働安全衛生法	通知対象物質： 該当しない
毒物及び劇物取締法	該当しない
消防法	該当しない
化学物質排出把握管理促進法 (PRTR法)	該当しない

This is a blank page.

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

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

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

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

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

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

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

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

表5. SI 接頭語

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

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

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

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

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

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St=1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π)A m ⁻¹

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

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット=0.2 g=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858J (「15°C」カロリ), 4.1868J (「IT」カロリ), 4.184J (「熱化学」カロリ)
マイクロ	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

