

JAERI-Research  
2004-019



JP0550011



輝尽性蛍光体SrBPO<sub>5</sub>:Eu<sup>2+</sup>を用いた中性子  
イメージングプレートの中性子イメージ特性

2004年12月

坂佐井 馨・片桐 政樹・中村 龍也

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。  
入手の間合わせは、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、お申し越してください。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）で複写による実費頒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, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

輝尽性蛍光体  $\text{SrBPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  を用いた中性子イメージングプレートの中性子イメージ特性

日本原子力研究所東海研究所中性子利用研究センター

坂佐井 馨・片桐 政樹・中村 龍也

(2004年10月18日受理)

新しい中性子イメージングプレートの材料として、比較的軽元素から構成され、中性子コンバータであるホウ素 (B) を母体を含む  $\text{SrBPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  輝尽性蛍光体の中性子イメージ特性について調べた。本蛍光体は中性子照射に対して赤色レーザーを照射することによって約 390nm の輝尽性蛍光を発生し、市販のイメージングプレートと同じ励起波長及び蛍光波長を有するという大きな特徴を持つ。このため、本蛍光体を Al プレートに塗布したイメージングプレートを作成した。本イメージングプレートに中性子を照射し、市販のイメージングプレート用リーダを利用して、リチウムブロックで製作した被写体の中性子イメージを読み取る実験を行った。塗布するのに使用した接着剤は、ラッカー系、合成樹脂系、及びガラス系の 3 種類である。実験の結果、輝尽性蛍光強度は小さいものの、中性子イメージが取得できることが確認できた。また、位置分解能はリーダの読み取り精度を 50 $\mu\text{m}$  とした場合、0.2mm であった。さらに位置分解能性能を向上させるためには、蛍光体粉末粒度の制御が肝要である。

Neutron Image Characteristics of Imaging Plates Using SrBPO<sub>5</sub>:Eu<sup>2+</sup> Photostimulable  
Phosphors

Kaoru SAKASAI, Masaki KATAGIRI and Tatsuya NAKAMURA

Neutron Science Research Center  
Tokai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 18, 2004)

As a new candidate for raw materials of a neutron imaging plate, characteristics of a SrBPO<sub>5</sub>:Eu<sup>2+</sup> phosphor that has boron (B) in the base matrix as a neutron converter have been investigated. The phosphor has a strong merit that it generates photostimulated luminescence of 390 nm by illumination of red laser light after neutron irradiation. The emission and excitation wavelengths were the same as those of commercially available neutron imaging plate. Therefore, the authors have fabricated neutron imaging plates by painting the phosphor on Al plates. Neutron imaging experiments using the fabricated imaging plates were carried out with a commercially available image reader. A Li block was used as a camera subject in the experiments. Three kinds of glues such as lacquer-based, resin-based, glass-based glues were used for painting the phosphor on Al plates. As a result of the experiments, it was confirmed that the neutron image was clearly obtained, though the intensity of the image was not so high. The position resolution of 0.2 mm was obtained when the readout resolution of 50 μm in the reader was used. It is necessary to optimize the diameter of the phosphor grains to increase the position resolution.

Keywords: Neutron Imaging Plates, SrBPO<sub>5</sub>:Eu<sup>2+</sup>, Neutron Sensitivity, Gamma-ray Sensitivity, Position Resolution

## 目 次

1.	はじめに	1
2.	試料の作成及び実験方法	2
3.	SrBPO <sub>5</sub> :Eu <sup>2+</sup> の基本特性	5
3. 1	スペクトル特性	5
3. 2	中性子に対する特性	5
4.	中性子イメージ特性	11
4. 1	サンプルプレートの作成	11
4. 2	中性子イメージ実験	16
5.	まとめ	33
	謝辞	33
	参考文献	33

## Contents

1.	Introduction	1
2.	Sample Preparation and Experiments	2
3.	Fundamental Characteristics of SrBPO <sub>5</sub> :Eu <sup>2+</sup> Phosphors	5
3. 1	Spectral Characteristics	5
3. 2	Characteristics by Neutron Irradiation	5
4.	Neutron Image Characteristics	11
4. 1	Preparation of Sample Plates	11
4. 2	Neutron Imaging Experiments	16
5.	Conclusions	33
	Acknowledgements	33
	References	33

This is a blank page.

## 1. はじめに

輝尽性蛍光体をフィルム状に成型したイメージングプレート (IP) は、当初医療用画像取得のための 2 次元 X 線検出器として導入されたものであるが<sup>1)</sup>、将来はこれまでの 2 次元放射線検出器にとって代わるものとして期待を集めている<sup>2)</sup>。IP の特徴は、①非常に広い (5 桁以上) ダイナミックレンジ、②高い空間分解能 (200 $\mu\text{m}$ )、③広い検出面積、④高い検出効率、等である。これらはこれまでの 2 次元放射線検出器では達成することが極めて困難な性能である。IP はこのような非常に優れた特徴を有するため、医療用だけでなく、X 線回折実験にも使用されている<sup>3)</sup>。さらに、X 線やガンマ線だけでなく、中性子にも有感な中性子イメージングプレート (NIP) も開発された<sup>4)</sup>。

この NIP は中性子有感物質として中性子反応断面積の非常に大きな Gd を含有するものである。NIP は中性子粉末回折実験やたんぱく質結晶構造解析、中性子単結晶散乱実験、中性子ラジオグラフィに非常に有効であることが確認されている。しかし、NIP を中性子及びガンマ線の混在場で使用する場合には問題が生ずる。すなわち、NIP はもともと X 線・ガンマ線にも有感な輝尽性蛍光体 ( $\text{BaFBr:Eu}^{2+}$ ) に中性子有感物質として  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  を混合したものであるので、中性子とガンマ線が混在する場で使用すると、両方の信号の和が出力として得られ、しかもその弁別は原理的に不可能である。中性子検出器として使用するためには、この高いガンマ線感度を低減する必要がある。

このため、著者らはガンマ線感度の低い新輝尽性蛍光体の探索を続け、活性化物質として IP と同じ  $\text{Eu}^{2+}$  を用いた  $\text{SrBPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  蛍光体<sup>5)</sup> について調べた。この蛍光体は X 線照射後赤色レーザー励起により  $\text{Eu}^{2+}$  の遷移に起因する 390nm の輝尽性蛍光を発生し、また、 $\text{BaFBr:Eu}^{2+}$  と比較して小さな密度を有する。小さな密度を有することは、ガンマ線感度を低減するには非常に好都合である。さらに、母体に中性子有感物質となるホウ素を含んでおり、このことは、 $\text{SrBPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  蛍光体が中性子照射によって輝尽性蛍光を発生することを意味する。

一方、 $\text{B}_2\text{O}_3$  やホウ素化合物を輝尽性蛍光体に添加することによって中性子用輝尽性蛍光体を開発した例はこれまで報告されていない。その理由の 1 つは、 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  によって生ずる荷電粒子の飛程が非常に短いことである。たとえば、 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  によるアルファ粒子の飛程は数ミクロン以下であり、リチウム粒子はもっと短い。さらに、輝尽性蛍光体として使用するためには、有機バインダー等を使用する必要があり、蛍光体の体積充填率は 100% 以下となるため、これらの荷電粒子によって放射線イメージを記憶させるための電子・正孔対を形成するのはほとんど不可能である。

しかし、母体にホウ素を含む SrBPO<sub>5</sub>:Eu<sup>2+</sup>蛍光体の場合では状況が異なる。母体中にホウ素を含んでいれば、中性子反応により生じた高エネルギーのアルファ粒子及びリチウム粒子のエネルギーのほとんどが母体中に付与され、放射線イメージを記憶させるための電子・正孔対を形成するのに十分なエネルギーが与えられる。さらに、市販の NIP に利用される Gd の転換電子の飛程よりこれらアルファ粒子及びリチウム粒子の飛程が短いため、本蛍光体の位置分解能性能は本質的に高い。このため、SrBPO<sub>5</sub>:Eu<sup>2+</sup>蛍光体のように母体にホウ素を含み、そのホウ素と中性子の核反応 <sup>10</sup>B(n, α)<sup>7</sup>Li を利用した輝尽性蛍光体は、それが開発できれば非常に有効である。

本報告では、これまでに得られた SrBPO<sub>5</sub>:Eu<sup>2+</sup> の基本特性に加え、実際にサンプルプレートを作り、そのイメージ特性を市販のイメージリーダーで取得した結果を報告する。

## 2. 試料の作成及び実験方法

SrBPO<sub>5</sub>:Eu<sup>2+</sup>粉末サンプルは以下の手順で作成した。

- ① SrCO<sub>3</sub>, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, EuCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O を適切な量だけ秤量し、乳鉢で約 20 分混合粉碎。
- ② 電気炉にて 600℃で 2 時間焼成 (窒素雰囲気)。
- ③ 電気炉にて 800℃で 2 時間焼成 (窒素雰囲気)。
- ④ 常温まで自然冷却。
- ⑤ 焼成物を乳鉢で混合粉碎(20 分)。
- ⑥ 電気炉にて 600℃で 2 時間焼成 (窒素雰囲気)。
- ⑦ 電気炉にて 800℃で 2 時間焼成 (窒素雰囲気)。
- ⑧ 常温まで自然冷却。
- ⑨ 焼成物を乳鉢で混合粉碎(20 分)。

本過程で得られる粉末は白色である。輝尽性蛍光測定のため、簡易的な照射サンプルを作成した。なお、粉末作成に使用した原料の純度はすべて 99.5%以上である。図 1 に作成した試料及び簡易照射サンプルを示す。



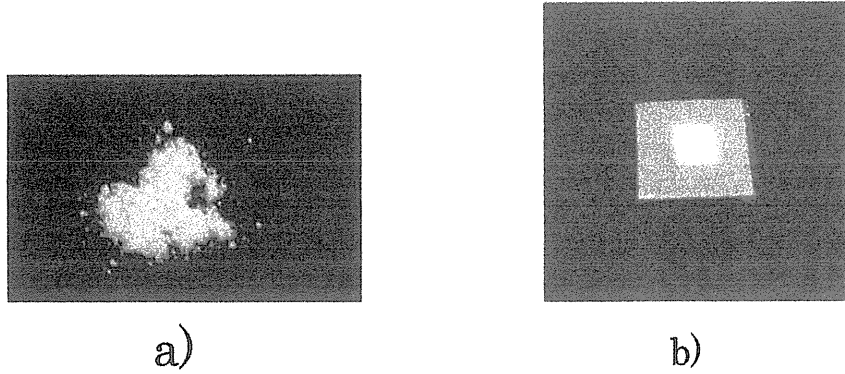


図1 a)作成した試料、b)簡易照射サンプル

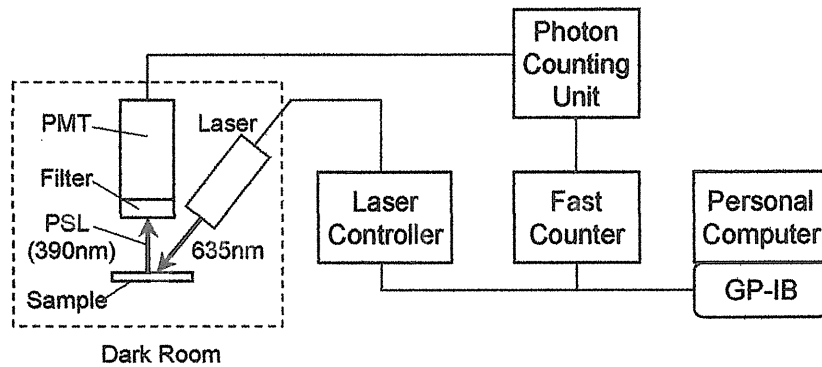


図2 輝尽性蛍光特性測定図

サンプルの蛍光スペクトルは日立製 F-2500 蛍光光度計を用いて測定した。サンプルの輝尽性蛍光の減衰特性は図 2 に示す測定装置で測定した。まず、サンプルを放射線で照射した後、He-Ne レーザー（オーディオテクニカ製、SU-31E、6mW）で照射することにより、輝尽性蛍光を発生させる。輝尽性蛍光は光電子増倍管（浜松ホトニクス製、R647P）で測定されるが、レーザー光その他のバックグラウンド光を取り除くため、光電子増倍管の受光面に 400nm 干渉フィルター（メスグリオ製）をセットした。光電子増倍管からの信号はフォトンカウンティングユニット（浜松ホトニクス製、C3866）にて増幅され、NIM 信号に変換される。この出力パルスを高速カウンタ（ヒューレットパッカード製、HP53131A）で測定した。なお、この測定システムは GP-IB を通じて全てコンピュータ制御されている。また、測定系の一部（図中で点線で囲まれた部分）は簡易暗室に置かれている。

This is a blank page.

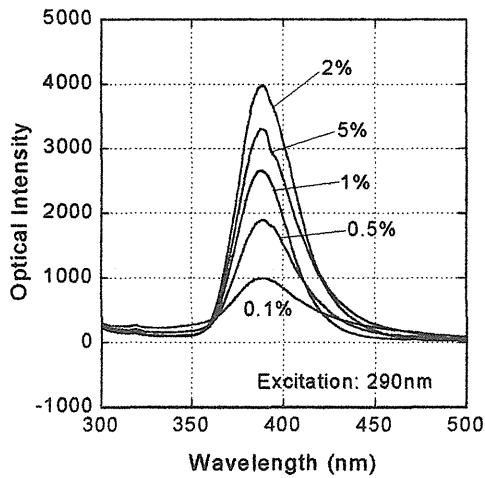


図3 SrBPO<sub>5</sub>:Eu<sup>2+</sup>蛍光体の  
発光スペクトル

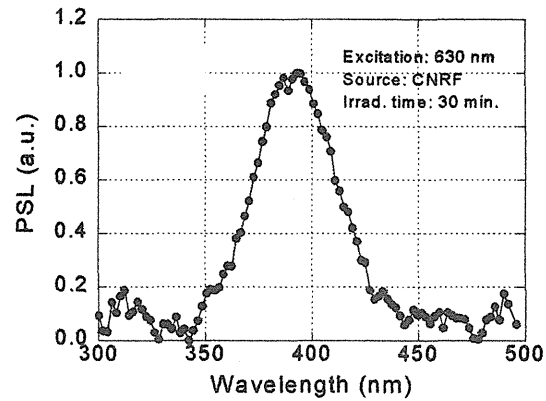


図4 SrBPO<sub>5</sub>:Eu<sup>2+</sup>蛍光体の  
励起スペクトル

### 3. SrBPO<sub>5</sub>:Eu<sup>2+</sup>の基本特性

#### 3. 1 スペクトル特性

活性化物質である Eu<sup>2+</sup>の濃度を 0.1%、0.2%、0.5%、1%、2%及び 5% (mol%)にした場合の 290nm の紫外線による SrBPO<sub>5</sub>:Eu<sup>2+</sup>の発光スペクトルを図 3 に示す。390nm 付近に Eu<sup>2+</sup>の 5d - 4f遷移であるやや幅広いピークが認められる。また、この発光の寿命は約 0.75 $\mu$ s であった。これと同じ条件で市販の IP の発光寿命を測定すると、約 0.80 $\mu$ s であり、文献値と一致<sup>6)</sup>する。即発発光に対する Eu 濃度の最適値は Karthikeyani ら<sup>5)</sup>の測定では 1%であったが、我々の実験では、それより幾分高めの 2%と 5%の間に存在することがわかった。

また、中性子照射後、赤色レーザー(630nm)で励起したときに生じる輝尽性蛍光の発光スペクトルを図 4 に示す。輝尽性蛍光スペクトルは、紫外線照射と同じく 390nm にピークを有することが確認できる。これは市販の NIP と同じ蛍光波長及び励起波長であるため、SrBPO<sub>5</sub>:Eu<sup>2+</sup>輝尽性蛍光体を用いて NIP を製作した場合、市販のリーダーでイメージを読み取ることが可能となる。

#### 3. 2 中性子に対する特性

SrBPO<sub>5</sub>:Eu<sup>2+</sup>蛍光体が中性子照射に対して輝尽性蛍光応答を示すことを確認するため、SrBPO<sub>5</sub>:Eu<sup>2+</sup>(2%)蛍光体を日本原子力研究所 JRR-3M の冷中性子ビームポート (CNRF:

Cold Neutron Radiography Facility)

で中性子照射を行った。  
 $\text{SrBPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  蛍光体に中性子を照射後、赤色レーザー光 (633nm) をあてて、放出される 390nm の輝尽性蛍光の強度を測定した結果を図 5 に示す。レーザー強度が一定の場合、輝尽性蛍光強度は残存する放射線量の情報 (具体的には残存する電子・正孔対の数) にほぼ比例するので、単位時間あたりの輝尽性蛍光強度は最初に非常に大きな発光があり、その後は指数関数的に減少していく (図中の黒丸)。レーザーを

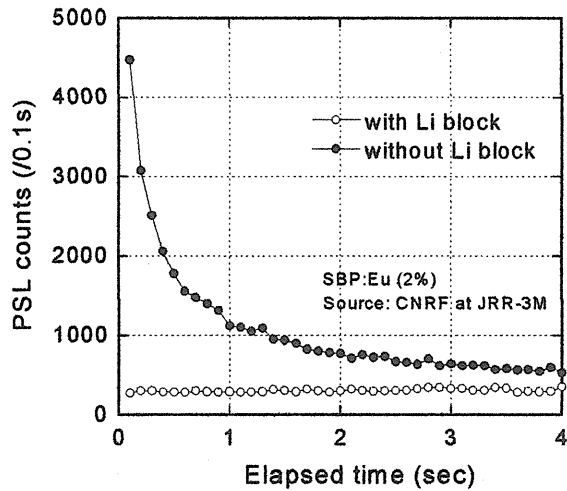


図 5 中性子照射した  $\text{SrBPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  蛍光体の輝尽性蛍光の減衰特性。照射サンプルの前面にリチウムブロックを置いた場合とおかない場合の比較。

あてても輝尽性蛍光を発しなくなったときにすべての放射線情報を読み出したことになり、蛍光体に照射された中性子の量は輝尽性蛍光強度の積分値に対応する。一方、中性子遮蔽体を本蛍光体の前面において中性子を遮蔽したときは、全く輝尽性蛍光応答を示さない (図中の白丸) ことがわかる。このように、 $\text{SrBPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  蛍光体は市販の NIP のように中性子有感物質を混合しなくても、母体にホウ素を含んでいるため、中性子照射に対して輝尽性蛍光応答を示すことがわかる。

さて、 $\text{SrBPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  蛍光体が中性子照射に対して輝尽性応答を示すことがわかったので、輝尽性蛍光出力を増大させるため  $\text{SrBPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  蛍光体母体中の天然ホウ素を  $^{10}\text{B}$  ホウ素に濃縮することを試み、 $\text{SrBPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  蛍光体の中性子照射による輝尽性蛍光応答の入射中性子エネルギー依存性を調べた。照射施設は日本原子力研究所 JRR-3M の小角中性子散乱装置 (SANS-J) である。その実験結果を図 6 に示す。図の縦軸は単位中性子照

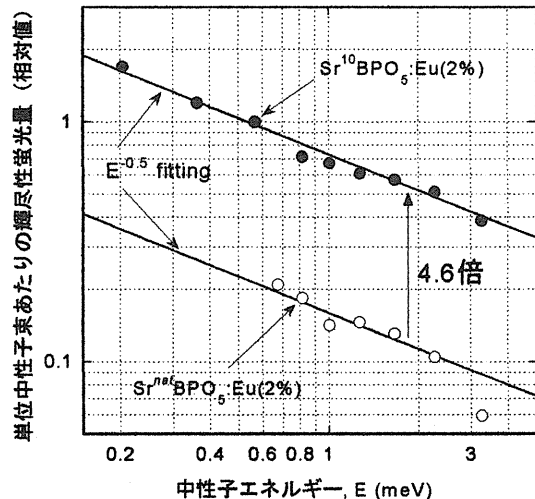


図 6  $\text{SrBPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  の輝尽性蛍光出力の中性子エネルギー依存性

射量あたりの輝尽性発光量（相対値）である。図からわかるように、天然ホウ素を用いた  $\text{Sr}^{nat}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  の単位中性子照射量あたりの輝尽性発光量（図中の下側のグラフ）は中性子エネルギーの -0.5 乗に比例しているものと考えられるが、中性子エネルギーの低い領域では中性子束が低くてデータを取得するのが困難であったが、一方、濃縮ホウ素を使用した  $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}$ （図の上側のグラフ）は輝尽性蛍光出力が増大し、単位中性子照射量あたりの輝尽性発光量は、中性子エネルギーが 0.2meV から 3.27meV（中性子波長が 0.5nm から 2.0nm）の範囲で中性子エネルギーの -0.5 乗に比例することが確認された。さらに、 $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  の信号の増大量は約 4.6 倍であり、これは  $^{10}\text{B}$  の濃縮比（濃縮度 96%、天然の存在比 20%、濃縮比 = 96%/20% = 4.8）にほぼ一致する。このことは、濃縮ホウ素を使用した  $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  蛍光体が中性子照射に対して確かに輝尽性蛍光を示すと共に、その出力が  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  反応によるものであることの確実な証拠である。なぜなら、本実験のエネルギー範囲では、 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$  反応の反応断面積は正確に中性子エネルギーの -0.5 乗に比例する（いわゆる  $1/v$  則）からである。

図 7 は、Eu の濃度を変えたときの、中性子照射時間に対する  $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  蛍光体の輝尽性蛍光総量を示す。各濃度において、中性子照射時間と輝尽性蛍光総量は良い比例関係にあり、照射線量が測定可能であることを示している。なお、この直線の傾きが各濃度の  $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  蛍光体の中性子感度に相当する。これを最小 2 乗法でフィッティングすると、

$$1\% : y=0.020244x$$

$$2\% : y=0.029418x$$

$$5\% : y=0.015871x$$

となった。ここに、 $y$  は輝尽性蛍光総量、 $x$  は中性子照射時間である。この直線の傾きの比が各濃度の  $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  蛍光体の中性子感度の比となる。すなわち、 $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  (2%) 蛍光体の中性子感度を 1 とすると、 $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  (1%) 蛍光体及び  $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  (5%) 蛍光体の中性子感度は、それぞれ、0.69 及び 0.54 となる。

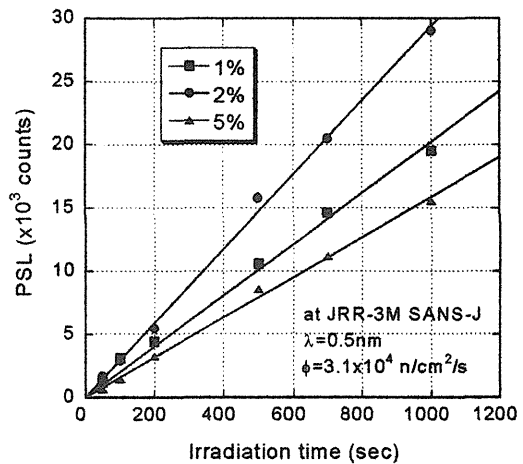


図 7 Eu の濃度を変えたときの、中性子照射時間に対する  $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  蛍光体の輝尽性蛍光総量

次に、中性子感度をより正確に求めるために、照射サンプルの前面に、中央に黒紙でできた直径1mmの穴のあいたフィルタシートを貼り付け、輝尽性蛍光総量を測定した。この実験では、レーザー光は直径1mmの穴より大きく照射した。こうすることによって、直径1mmの領域のみから発生する輝尽性蛍光を測定することができる。照射条件は中性子波長0.5nm、中性子束中性子束  $3.1 \times 10^4 \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 、照射時間100秒である。測定結果を表1に示す。中性子感度の比は、 $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}(2\%)$  蛍光体の中性子感度を1とすると、 $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}(1\%)$  蛍光体及び  $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}(5\%)$  蛍光体の中性子感度は、それぞれ、0.69及び0.45となり、前述の中性子照射量に対する輝尽性蛍光の直線性測定結果から得られた結果とほぼ一致する。

さらに、本  $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  蛍光体は市販の NIP に比較して、密度が低いと、ガンマ線感度はより低いことが予想される。このため、ガンマ線源として、 $^{137}\text{Cs}$  (662keV) を用い、上述した方法でガンマ線感度を測定した。また、比較のため、同じ条件で市販の NIP (富士フィルム製、BAS-ND) の中性子感度及びガンマ線感度を測定した。その結果を表2に示す。 $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}(2\%)$  蛍光体の中性子感度は市販の BAS-ND に比べて2桁低いが、そのガンマ線感度はさらに3桁低いことがわかる。これは  $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  蛍光体は比較的軽元素から構成され、密度が低いことが原因と考えられる。 $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  蛍光体の中性子感度は BAS-ND に比較して小さいものの、ガンマ線感度/中性子感度を比較すると、BAS-ND より1桁優れている(1桁低い)ことがわかる。すなわち、 $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  蛍光体の方が BAS-ND よりガンマ線の影響をより低減できるものと考えられる。

表1  $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  蛍光体の中性子感度

	PSL 総量	感度 (PSL/mm <sup>2</sup> /n)	比
$\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}(1\%)$	831	$1.14 \times 10^{-2}$	0.69
$\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}(2\%)$	1208	$1.66 \times 10^{-2}$	1
$\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}(5\%)$	537	$7.37 \times 10^{-3}$	0.45

表2  $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}(2\%)$  蛍光体と市販の NIP の中性子感度及びガンマ線感度

	$\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:$ $\text{Eu}^{2+}$ 蛍光体(2%)	BAS-ND
中性子感度 ( $S_n$ )	$1.66 \times 10^{-2}$	1.24
ガンマ線感度 ( $S_\gamma$ )	$3.47 \times 10^{-5}$	$2.19 \times 10^{-2}$
$S_\gamma/S_n$	$2.09 \times 10^{-3}$	$1.77 \times 10^{-2}$

単位:  $S_n$  (PSL/mm<sup>2</sup>/neutrons),  
 $S_\gamma$  (PSL/mm<sup>2</sup>/ $\gamma$ )

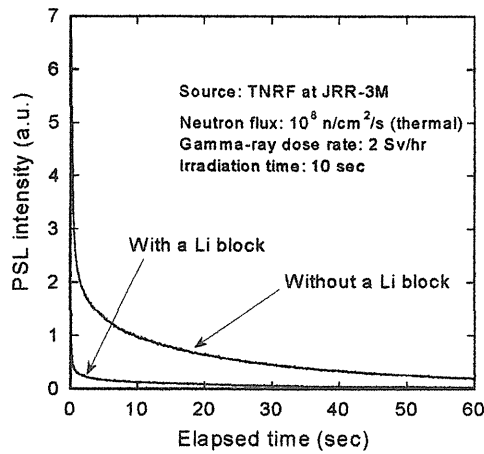


図 8 TNRF での特性

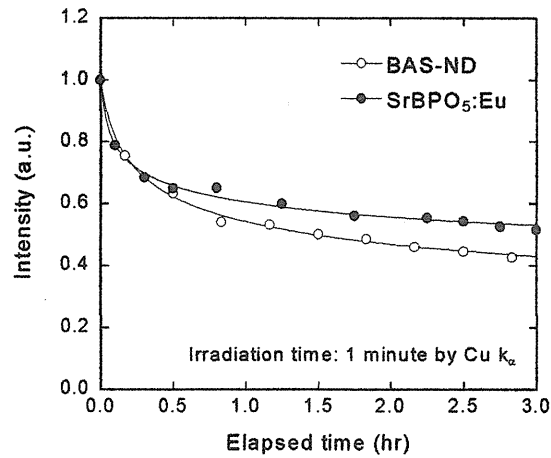


図 9 フェーディング特性

図 8 は図 3 と同じ実験を原研 JRR-3 の熱中性子ラジオグラフィ施設で行った結果である。ここでの熱中性子束密度とガンマ線線量率は、それぞれ  $10^8 \text{ n/cm}^2/\text{s}$  及び  $2 \text{ Sv/hr}$  である。リチウムブロックがある場合とない場合の輝尽性蛍光総量の比は 0.12 であった。リチウムブロックによって 97% の入射中性子が吸収されるので、このような高いガンマ線場でも、ガンマ線の影響は 10% 以下である。また、中性子照射ではないが、X 線照射後の  $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  のフェーディング特性である。フェーディング特性とは、中性子照射後、時間がたつにつれて読みだされる光の量が減少していく減少で、IP の欠陥の 1 つでもある。これは図 2 と同じ測定装置を用いたものであるが、この場合、励起レーザーの強度を極めて弱くして、この励起によって蓄積された放射線線量の量に影響を与えないようにした。 $\text{Sr}^{10}\text{BPO}_5:\text{Eu}^{2+}$  のフェーディング特性は市販の IP とほぼ同じかそれ以上である。

This is a blank page.



#### 4. 中性子イメージ特性

3. の基本特性の項で明らかにしたように、 $\text{SrBPO}_5:\text{Eu}^{2+}$ 蛍光体は、中性子照射に対して、その母体中のホウ素と中性子の核反応の結果、赤色レーザーを照射することによって  $390\text{nm}$  に輝尽性蛍光を発生し、その輝尽性蛍光総量は中性子照射線量に比例する。また、ガンマ線除去性能を示す中性子感度とガンマ線感度の比は市販の NIP より一桁優れている。このことは、 $\text{SrBPO}_5:\text{Eu}^{2+}$ 蛍光体がガンマ線感度の低い NIP の材料になるだけでなく、これを用いて NIP を製作した場合、市販の IP 用イメージリーダでイメージを読み取ることが可能であることを示す。また、核反応の結果生ずる荷電粒子の飛程が短いため、高い位置分解能性能が得られる可能性がある。このため、実際に  $\text{SrBPO}_5:\text{Eu}^{2+}$ 蛍光体を Al プレートに塗布し、市販のイメージリーダでイメージを取得する実験を行った。

##### 4. 1 サンプルプレートの作成

サンプル作成に使用した Al プレートは厚さが  $0.3\text{mm}$ 、一辺が  $5\text{cm}$  の正方形でこの上に  $\text{SrBPO}_5:\text{Eu}^{2+}$ 蛍光体を塗布した。塗布に使用した接着剤は 3 種類で、ラッカー系、ガラス系及び合成樹脂系である。 $\text{SrBPO}_5:\text{Eu}^{2+}$ 蛍光体を接着剤と混合し、Al プレートに塗布した後、自然乾燥させた。自然乾燥の時間は接着剤によって異なるが、大体数時間である。実際に Al プレート塗布して製作したサンプルプレートの外観写真を図 10 に示す。このうち、ガラス系で製作したものは、接着剤の母体の性質を反映してやや黄色みを帯びたものになった。塗布厚さはどのサンプルプレートも  $0.4\text{mm}$  から  $0.45\text{mm}$  の範囲である。また、このサンプルプレートを市販のイメージリーダで読み取るため、これを、ガンマ線用 IP の中央部を切り取ったものに嵌め込んだ。例としてガラス系接着剤で製作したサンプルプレートを嵌め込んだものを図 11 に示す。被写体に用いたのは図 12 に示すような  $^6\text{LiF}$  製の厚さ  $10\text{mm}$  のブロックで、その 1 つの面には径の異なる貫通穴が設けられている。これをサンプルプレートの面に固定し、原研 JRR-3 の冷中性子ラジオグラフィ施設で被写体側から中

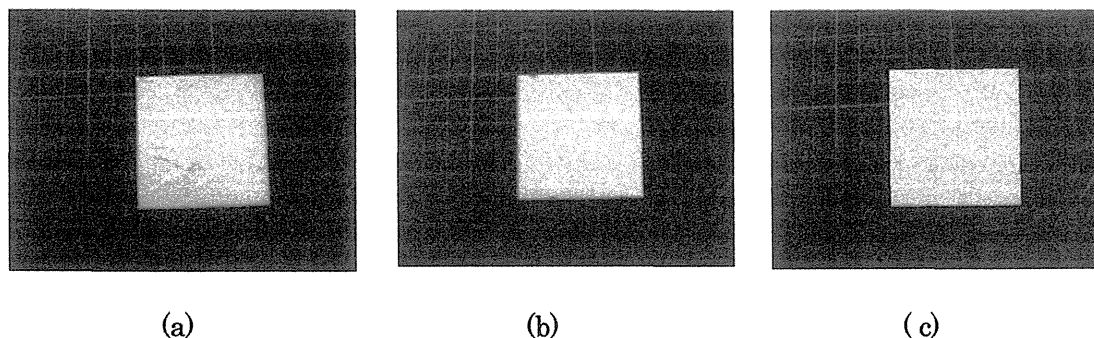


図 10 製作したサンプルプレートの外観図。(a),(b),(c)それぞれラッカー系、合成樹脂系、ガラス系接着剤で製作したもの。

This is a blank page.

性を照射した。測定体系を図 13 に示す。

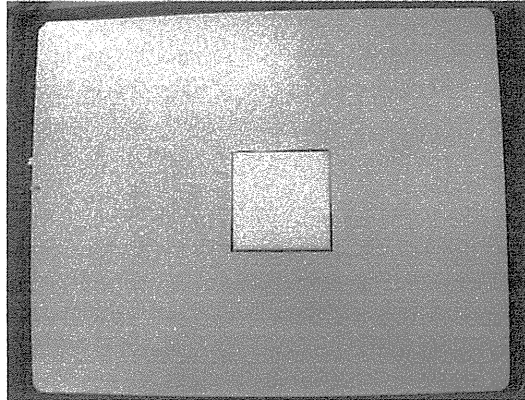


図 11 製作したサンプルプレートを市販のガンマ線用 IP に嵌め込んだ写真。嵌め込んだのは、ガラス系接着剤で製作したサンプルプレート。

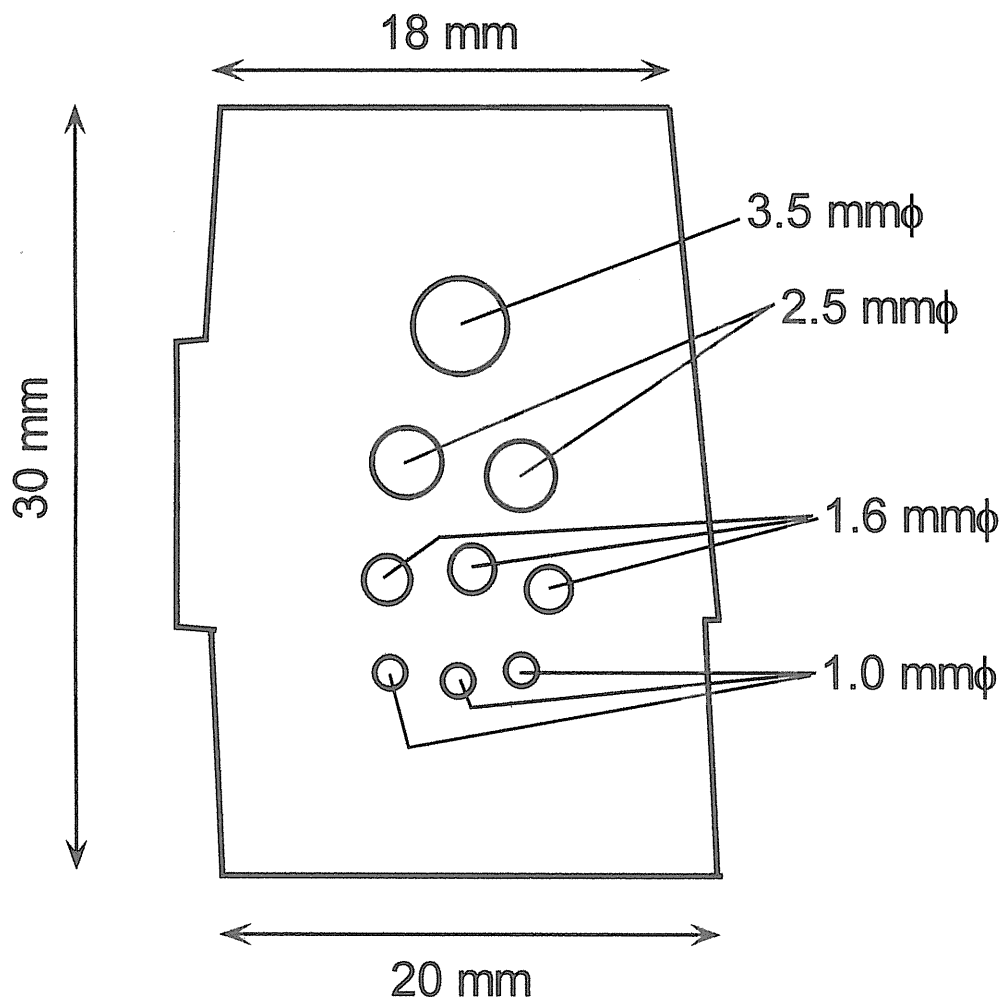


図 12 製作した  ${}^6\text{LiF}$  ブロック製被写体。厚さは 10mm である。

This is a blank page.

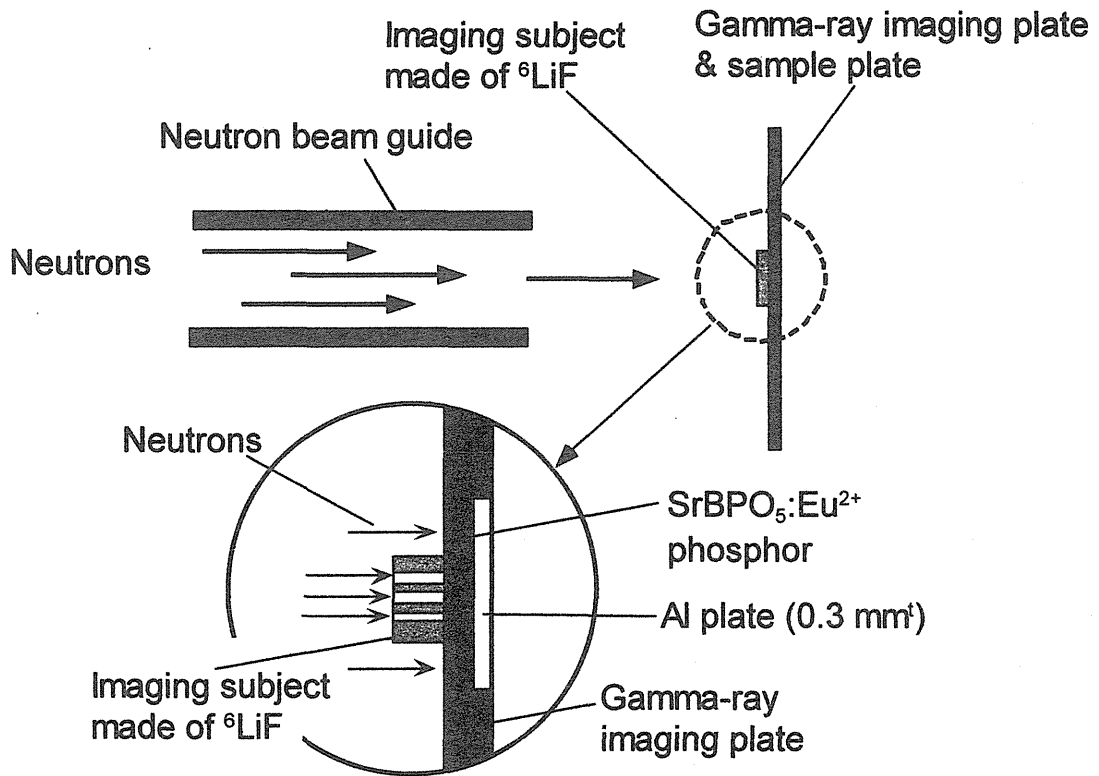


図 13 JRR-3 冷中性子ラジオグラフィ施設での実験体系

#### 4. 2 中性子イメージ実験

測定に先立ち、使用した冷中性子ラジオグラフィ施設の中性子ビームのプロファイルを市販のNIPで測定した。その結果を図14に示す。図14からはわかりにくいですが中性子ラジオグラフィ施設の中性子ビームは一様な平行ビームではなく、中央付近に最大強度をもつビームである。その縦方向及び横方向のビームのプロファイルを図15及び図16に示す。これからもわかるように、冷中性子ラジオグラフィのビームは半値幅で横2cm、縦3cm程度の縦長のビーム形状をしている。

最大のビーム位置付近に被写体がくるように位置を調整して、リチウムブロック被写体を固定したサンプルプレートに中性子ビームを照射した後、そのイメージをイメージリーダー(BAS1800)で取得した。なお、冷中性子ラジオグラフィ施設の中性子束密度及び特性中性子波長はそれぞれ $10^5 \text{n/cm}^2/\text{s}$ 及び0.6nmである。

図17から図20にサンプルプレート及びBAS-NDで取得したイメージを示す。サンプルプレートを用いた場合は、BAS-NDを用いた場合に比べて輝尽性蛍光強度が弱いものの、いずれの場合でも被写体であるリチウムブロックのイメージが取得できていることがわかる。イメージの濃淡が異なるのは照射時間が異なるためである。また、イメージが最もよく得られるのは合成樹脂系接着剤であった。

また、ラッカー系接着剤及び合成樹脂系接着剤を用いて製作したプレートを用いて得られたイメージにおいて、3.5mm穴のエッジ部分のプロファイルを図21及び図22に示す。このイメージの読み取りにはイメージリーダーで最大の分解能である $50\mu\text{m}$ を用いたため、輝尽性蛍光強度が小さく、取得したプロファイルを図や測定値にばらつきが見られるが、中性子照射部分とそうでない部分がはっきり区別できる。同様にBAS-NDで取得したプロファイルを図23に示す。中性子が照射された部分とそうでない部分の平均の強度比、すなわち、中性子感度とガンマ線感度の比を評価した結果を表3に示す。この結果、BAS-ND

表3 ガンマ線/中性子感度比

	ガンマ線感度/中性子感度比	比
BAS-ND	0.00928	1
ラッカー系接着剤で製作したプレート	0.006582	0.93
合成樹脂系接着剤で製作したプレート	0.008657	0.71

のガンマ線感度/中性子感度の比を1とすると、ラッカー系接着剤で製作したサンプルプレートで0.93、合成樹脂系接着剤で製作したサンプルプレートで0.71となり、 $\text{SrBPO}_5\text{:Eu}^{2+}$ 蛍光体で作成したサンプルプレートの中性子感度/ガンマ線感度比の方が優れていることがわかった。こののエッジの部分について、位置分解能を評価するとサンプルプレートでは約0.2 mmとなり、立ち上がり部分についてはBAS-NDのものより鋭く立ち上がっていることがわかる。また、サンプルプレート及びBAS-NDの表面を顕微鏡で観察した結果を図24から図27に示す。サンプルプレートに使用した $\text{SrBPO}_5\text{:Eu}^{2+}$ 蛍光体の粒度の制御は全く行っていないため、BAS-NDに比べて粒度が大きく、またばらつきがあることがわかる。このため、蛍光体粒度の制御及び最適化を行うことにより $\text{SrBPO}_5\text{:Eu}^{2+}$ 蛍光体で作成したサンプルプレートの位置分解能性能を向上させることが可能である。また、前述したように、中性子とホウ素の核反応によって生成したアルファ粒子とリチウム粒子の飛程が短いため $\text{SrBPO}_5\text{:Eu}^{2+}$ 蛍光体は本質的に高い位置分解能性能を有している。したがって、蛍光体粒度の制御及び最適化を行うと共に、励起用レーザーのビーム径をもっと絞ることができれば、位置分解能性能はさらに改善されることが予想される。

This is a blank page.



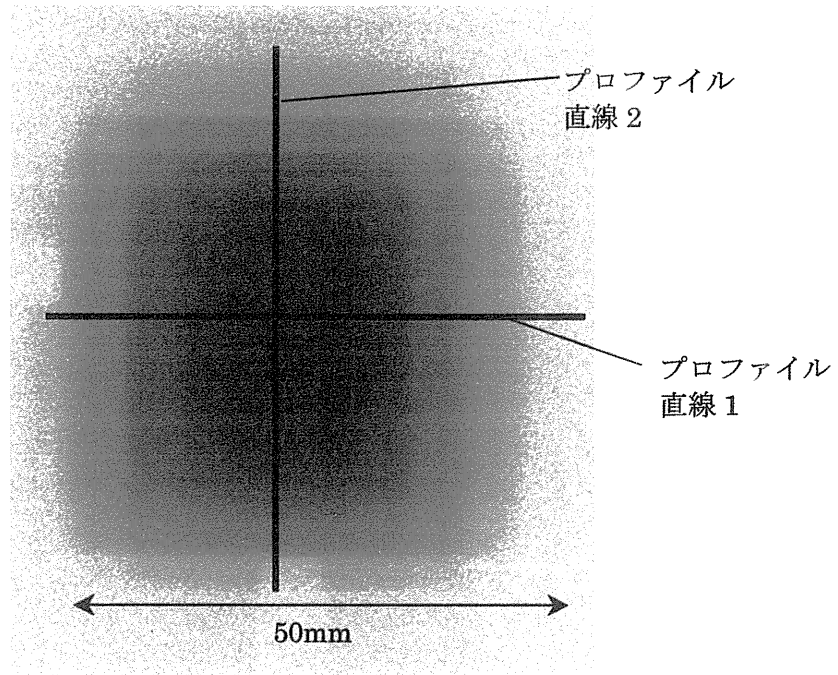


図 14 冷中性子ラジオグラフィのビームイメージ

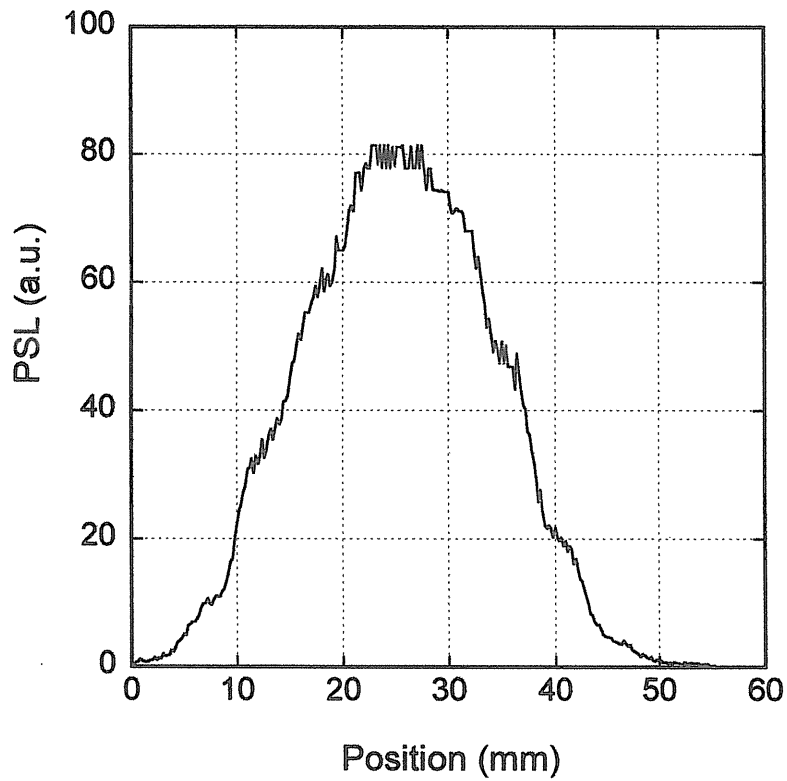


図 15 冷中性子ラジオグラフィのビームのプロファイル  
(図 14 におけるプロファイル直線 1)

This is a blank page.

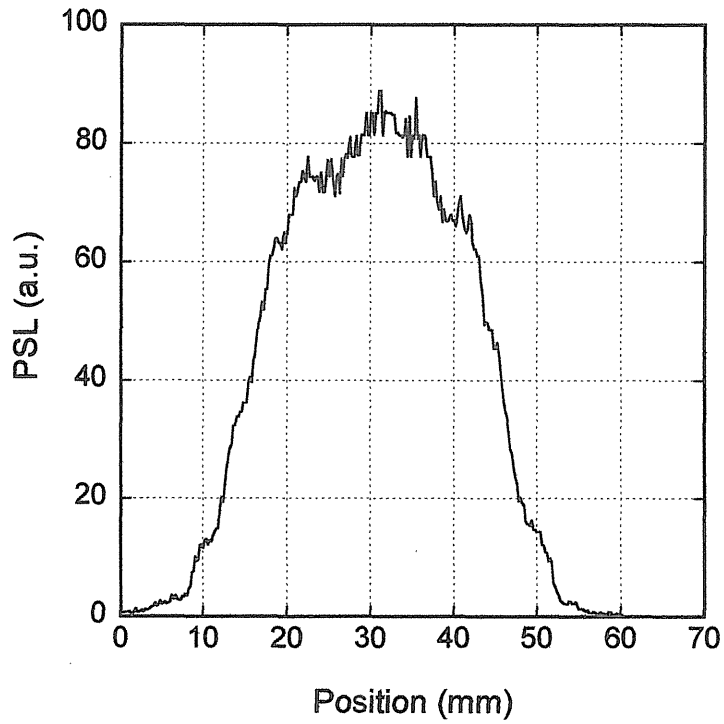


図 16 冷中性子ラジオグラフィのビームのプロファイル  
(図 14 におけるプロファイル直線 2)

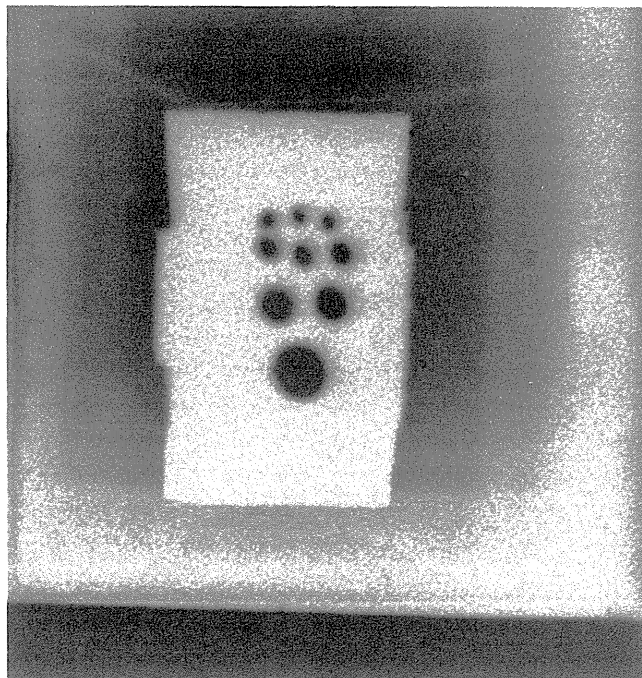


図 17 ラッカー系接着剤で製作したサンプルプレートによるイメージ

This is a blank page.

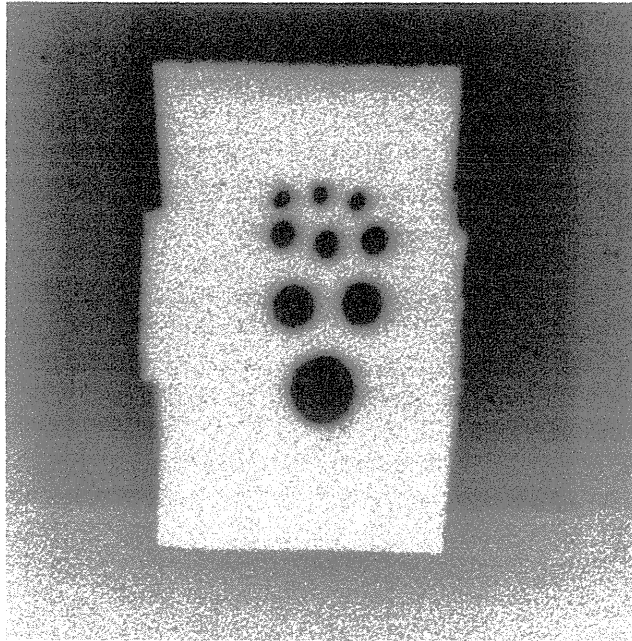


図 18 合成樹脂系接着剤で製作したサンプルプレートによるイメージ

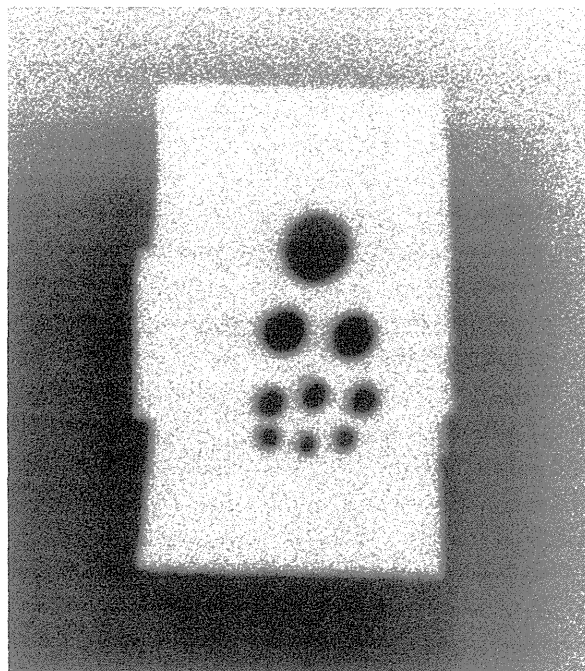


図 19 ガラス系接着剤で製作したサンプルプレートによるイメージ

This is a blank page.

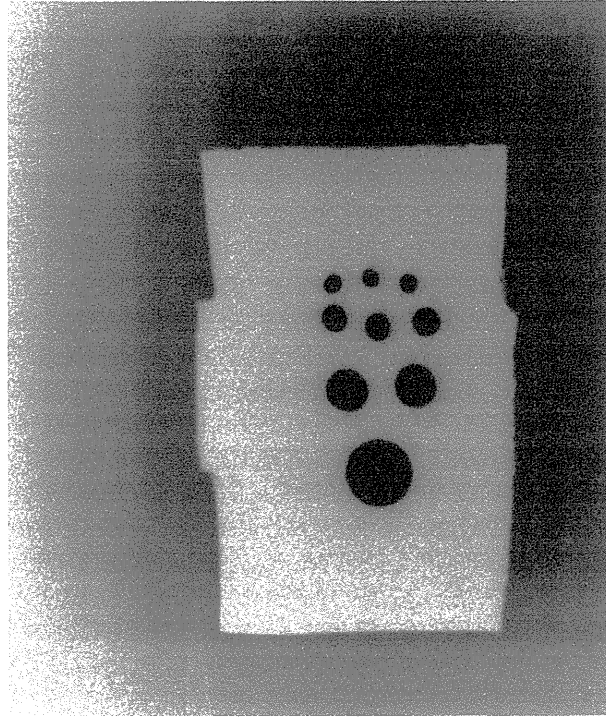


図 20 BAS-ND によるイメージ

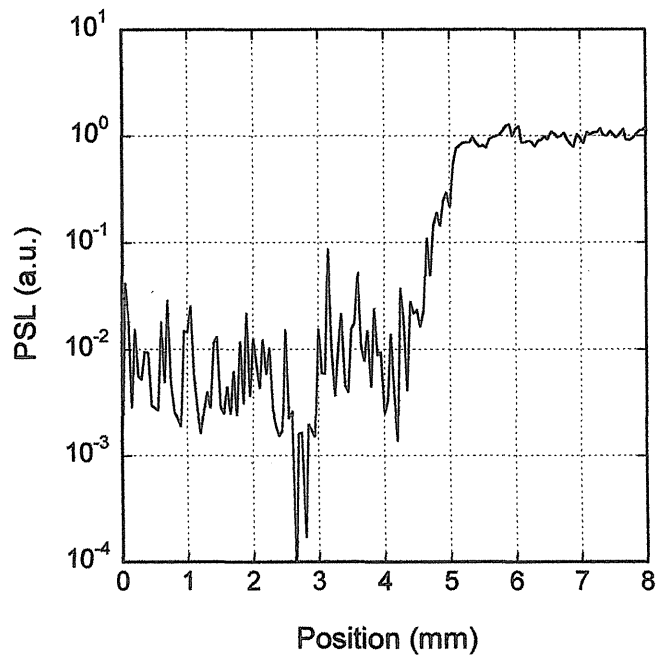


図 21 ラッカー系接着剤で製作したプレートのイメージにおける  
3.5mm 穴のエッジ部のプロファイル

This is a blank page.



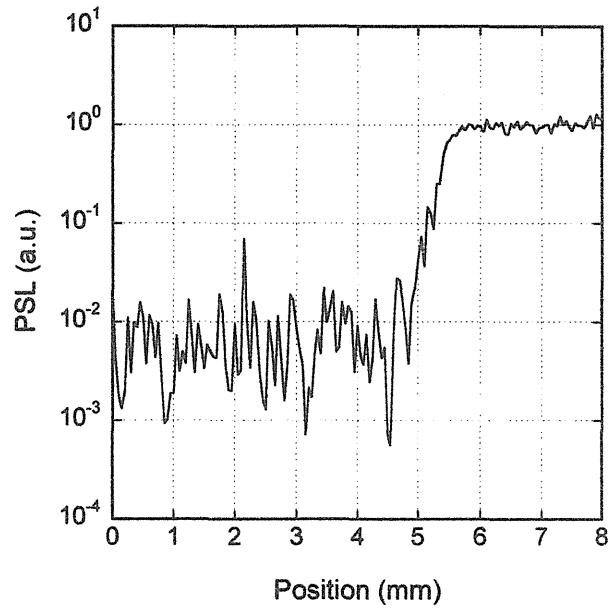


図 22 合成系接着剤で製作したプレートのイメージにおける  
3.5mm 穴のエッジ部のプロファイル

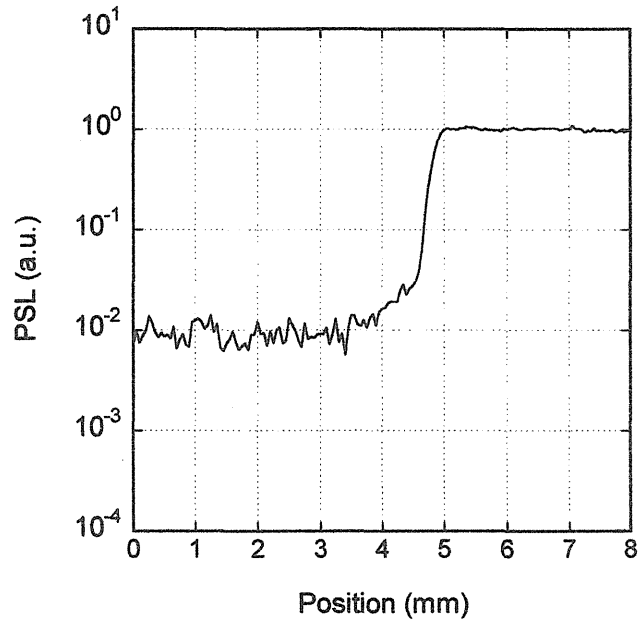


図 23 BAS-ND のイメージにおける 3.5mm 穴のエッジ部のプロファイル

This is a blank page.

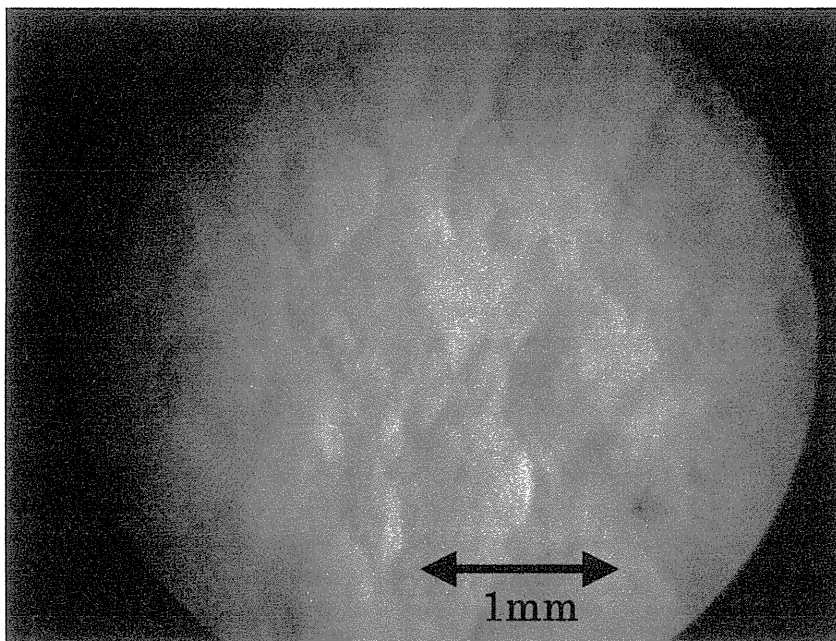


図 24 ラッカー系接着剤で製作したサンプルプレートの顕微鏡写真

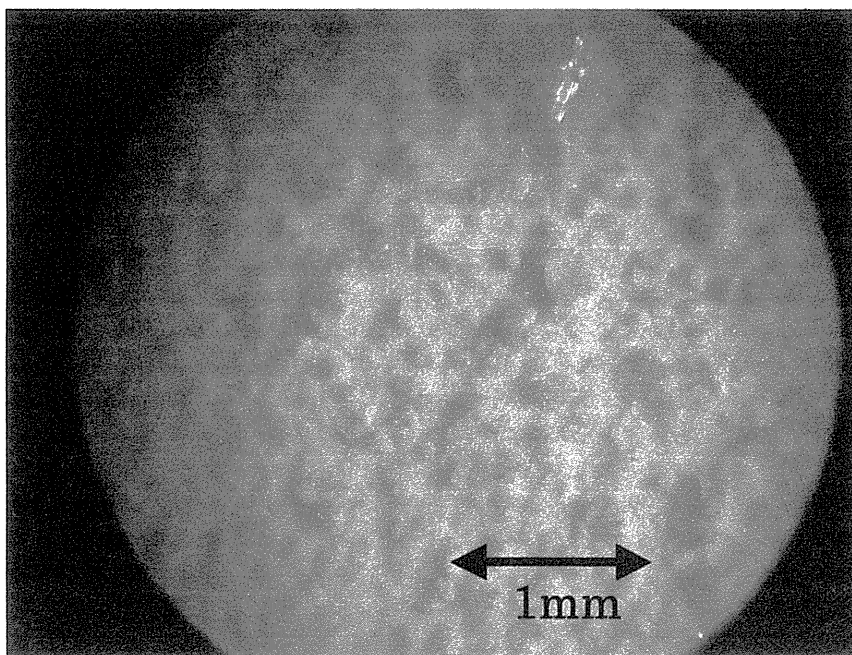


図 25 合成樹脂接着剤で製作したサンプルプレートの顕微鏡写真

This is a blank page.

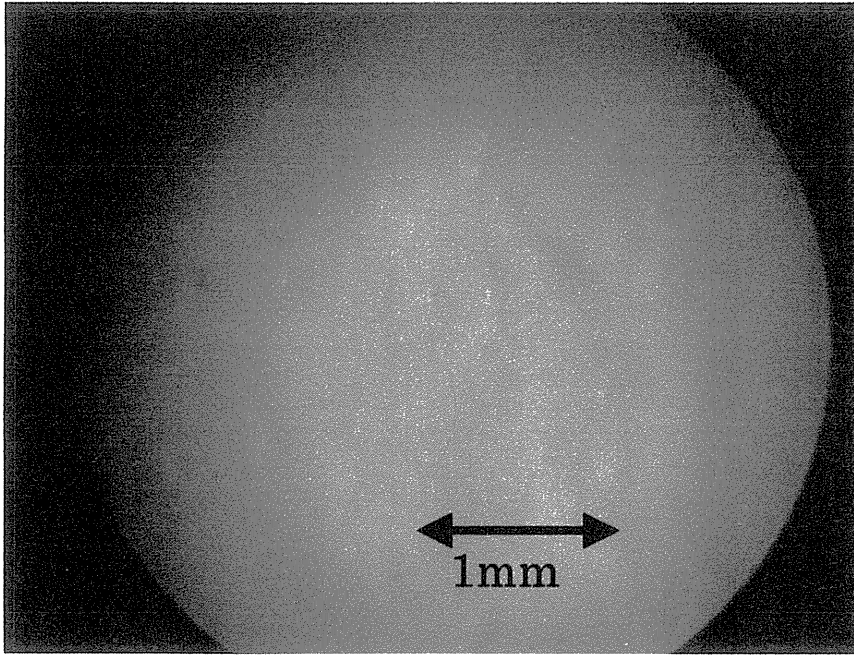


図 26 ガラス系接着剤で製作したサンプルプレートの顕微鏡写真

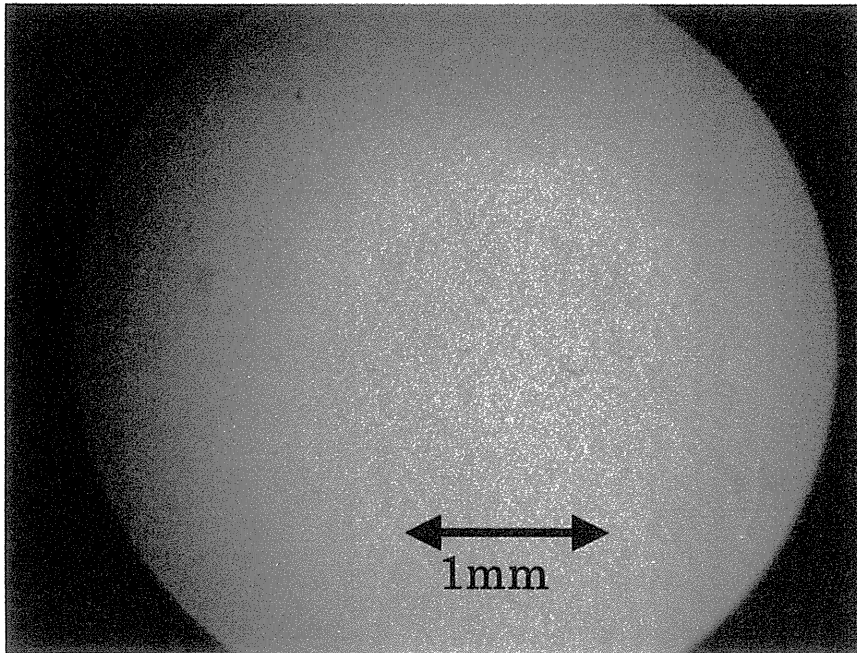


図 27 IP の顕微鏡写真

This is a blank page.

## 5. まとめ

新しい NIP の材料として、比較的系元素から構成される SrBPO<sup>5</sup>:Eu<sup>2+</sup> の蛍光体の中性子照射による輝尽性蛍光特性について調べた。この結果、SrBPO<sup>5</sup>:Eu<sup>2+</sup> 蛍光体は中性子感度/ガンマ線感度の比が市販の NIP より一桁優れていることがわかった。さらに、SrBPO<sup>5</sup>:Eu<sup>2+</sup> 蛍光体は BaFBr:Eu<sup>2+</sup> と同じ蛍光波長及び励起波長を有するため、市販の NIP と置き換えて使用することが可能である。このため、本蛍光体を Al プレートに塗布した NIP を試作し、市販のイメージリーダを用いてリチウムブロックを被写体とする中性子イメージ取得実験を行った。実験の結果、被写体のイメージが明瞭に取得できることがわかった。蛍光体を塗布するのに 3 種類の接着剤を使用した。この中で合成樹脂系は接着剤によるイメージが最も優れていた。また、中性子感度/ガンマ線感度の比は市販の NIP より優れていることを確認した。位置分解能性能はイメージリーダの分解能を 50 $\mu$ m とした場合、0.2 mm であった。粒度の制御及び接着剤の最適化を行えば、これを向上させることが可能である。

## 謝辞

本研究に対して適切な助言とご支援を頂いた中性子利用研究センター 中性子制御・検出系開発研究グループリーダー曾山和彦氏に感謝致します。

## 参考文献

- 1) M. Sonoda, M. Takano, J. Miyahara, and K. Kato, *Radiology* **148**, 833 (1983).
- 2) J. Miyahara, Y. Amemiya, and T. Matsushita, *日本物理学会誌* **45** 巻, 398 (1990).
- 3) J. Miyahara, K. Takahashi, Y. Amemiya, N. Kamiya, and Y. Satow, *Nucl. Instr. Meth. A* **246**, 572 (1986).
- 4) Y. Karasawa, N. Niimura, I. Tanaka, J. Miyahara, K. Takahashi, *Physica B* **213**, 978 (1995).
- 5) A. Karthikeyani and R. Jagannathan, *J. Lumin.* **86**, 79 (2000).
- 6) S. Shionoya and W. M. Yen, *PHOSPHOR HANDBOOK* (CRC Press, New York 1998) 554.

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
物質質量	モル	mol
光度	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 <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N	m·kg/s <sup>2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N·m
工率, 放射束	ワット	W	J/s
電気量, 電荷	クーロン	C	A·s
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>
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	ルーメン	lm	cd·sr
照射	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>
放射能	ベクレル	Bq	s <sup>-1</sup>
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	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, L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10<sup>-19</sup> J  
1 u = 1.66054 × 10<sup>-27</sup> kg

表 4 SI と共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10<sup>-10</sup> m  
1 b = 100 fm<sup>2</sup> = 10<sup>-28</sup> m<sup>2</sup>  
1 bar = 0.1 MPa = 10<sup>5</sup> Pa  
1 Gal = 1 cm/s<sup>2</sup> = 10<sup>-2</sup> m/s<sup>2</sup>  
1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> Bq  
1 R = 2.58 × 10<sup>-4</sup> C/kg  
1 rad = 1 cGy = 10<sup>-2</sup> Gy  
1 rem = 1 cSv = 10<sup>-2</sup> Sv

表 5 SI 接頭語

倍数	接頭語	記号
10 <sup>18</sup>	エクサ	E
10 <sup>15</sup>	ペタ	P
10 <sup>12</sup>	テラ	T
10 <sup>9</sup>	ギガ	G
10 <sup>6</sup>	メガ	M
10 <sup>3</sup>	キロ	k
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h
10 <sup>1</sup>	デカ	da
10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>-18</sup>	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, 1 eV および 1 u 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。
- EC 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 <sup>5</sup> 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/m<sup>2</sup>) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup> St (ストークス) (cm<sup>2</sup>/s)

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

エネルギー・仕事・熱量	J (=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal = 4.18605 J (計量法) = 4.184 J (熱化学) = 4.1855 J (15 °C) = 4.1868 J (国際蒸気表)
	1	0.101972	2.77778 × 10 <sup>-7</sup>	0.238889	9.47813 × 10 <sup>-4</sup>	0.737562	6.24150 × 10 <sup>18</sup>	
	9.80665	1	2.72407 × 10 <sup>-6</sup>	2.34270	9.29487 × 10 <sup>-3</sup>	7.23301	6.12082 × 10 <sup>19</sup>	
	3.6 × 10 <sup>6</sup>	3.67098 × 10 <sup>5</sup>	1	8.59999 × 10 <sup>5</sup>	3412.13	2.65522 × 10 <sup>6</sup>	2.24694 × 10 <sup>25</sup>	
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 <sup>-6</sup>	1	3.96759 × 10 <sup>-3</sup>	3.08747	2.61272 × 10 <sup>19</sup>	仕事率 1 PS (仏馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 <sup>-4</sup>	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 <sup>21</sup>	= 75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 <sup>-7</sup>	0.323890	1.28506 × 10 <sup>-3</sup>	1	8.46233 × 10 <sup>18</sup>	= 735.499 W
	1.60218 × 10 <sup>-19</sup>	1.63377 × 10 <sup>-20</sup>	4.45050 × 10 <sup>-26</sup>	3.82743 × 10 <sup>-20</sup>	1.51857 × 10 <sup>-22</sup>	1.18171 × 10 <sup>-19</sup>	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 <sup>-11</sup>
	3.7 × 10 <sup>10</sup>	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 <sup>-4</sup>	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

輝度性蛍光体SFBPO<sub>6</sub> : Eu<sup>2+</sup>を用いた中性子イメージングプレートの中性子イメージ特性

**R100**

古紙配合率100%  
白色度70%再生紙を使用しています。