

## Dy 箔を用いた高ガンマ線環境下での中性子ラジオグラフィ法

The neutron radiography method under the high gamma-ray environment using the Dy foil

(株)東芝	中山 幸一	Kohichi NAKAYAMA	Non member
(株)東芝	山本 修治	Shuji YAMAMOTO	Non member
東芝原子力エンジニアリングサービス(株)	日塔 光一	Koichi Nitto	Non member

As the neutron radiography method under the high gamma-ray environment, we inspected experimentally imaging methods which take the place of the indirect method of the film transcription. By the method of transcription from radioactivated Dy foil to imaging plate and the method of multiplication photography of the light from the scintillator which adhere to radioactivated Dy foil with a high sensitivity camera, we confirmed that we were able to observe the distribution of the neutron absorber with the conventional direct method at a same level in a short time.

**Keywords:** Neutron, Radiography, Nondestructive inspection, high gamma-ray environment, Indirect method, Dy foil, Imaging Plate, Scintillator, transcription, Neutron absorber

### 1. 諸言

中性子は、物質を構成する元素の原子核と相互作用して減衰する。一方、X線は、物質内の核外電子との相互作用で減衰される。よって、中性子ラジオグラフィでは、X線の減衰が小さい物質の減衰像が得られると共に、重金属で構成された物体の内部を検査することができる。

中性子ラジオグラフィは、大きく分けて直接法と間接法の2種類がある[1]。図1に直接法と間接法の概要を示す。直接法では、中性子と反応するコンバータ(Gd箔など)と銀塩フィルムを組み合わせて、被写体内部を撮像する。一方、間接法では金属箔(Dy, In, Auなど)を中性子で一旦放射化させ、その放射化した金属箔を別の場所で銀塩フィルムに転写させる。

ここで、原子力プラント内機器の検査に中性子ラジオグラフィを応用する場合を考えると、被写体が放射化しているため、環境中のガンマ線で銀塩フィルムが感光してしまう直接法は適用できない。よって、高ガンマ線環境下での中性子ラジオグラフィ法は、被写体と共に中性子を照射し、内部の透過画像を記録した金属箔を低ガンマ線環境下で銀塩フィルムに転写する必要がある。しかし、現在では、銀塩フィルムや現像液が入手し難くなっているだけでなく、アナログ撮影からデジタル撮影に移行が進んでいる。

そこで、従来の銀塩フィルムに代わる、新たな撮像媒体、および手法の開発を試みた。本報告では、金属箔を放射化させた後のイメージング方法として、①イメージングプレートへ転写する手法、および②シンチレータの発光を高感度カメラで積算撮影する手法の2種類について実験的に評価した結果を示す。

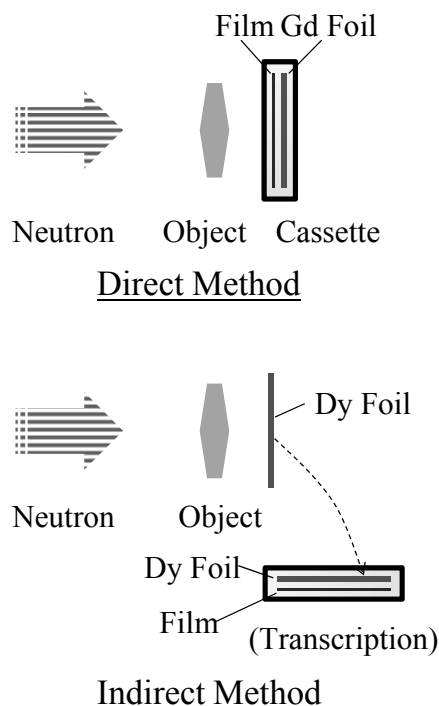


Fig.1 The methods of neutron radiography

連絡先:中山幸一,〒235-8523 横浜市磯子区新杉田町8,  
株式会社東芝 電力・社会システム技術開発センター  
E-mail: kohichi.nakayama@toshiba.co.jp

## 2. 測定原理

イメージングプレートは、通常の X 線フィルムに対し、約 1,000 倍の高い感度を有する 2 次元放射線検出器である。有機フィルム上に輝尽性蛍光体が塗布されており、放射線が入射すると、輝尽性蛍光体中の電子が励起し、準安定状態に留まる。その後、可視領域のレーザ光を照射することで、準安定状態から基底状態に緩和し、その過程で発光を伴う。この発光を光電子増倍管で読み取り、デジタル画像として記録することで、2 次元の放射線検出が可能となる[2]。

図 2 は、イメージングプレートへ転写する方法の原理図である。まず、被写体と共に金属箔を中性子照射場に設置し、金属箔を放射化させる。放射化させる金属箔として複数の候補があるが、検査の容易さを考慮し、適度な中性子吸収断面積(800barn)と半減期(2.3 時間)を有する Dy 箔を選定した[3]。次に、放射化させた Dy 箔をイメージングプレートに密着させ、Dy 箔から放出される  $\beta$  線をイメージングプレートに記録する。最後に、専用のイメージングプレート読み取り装置で転写された Dy 箔の放射化像を読み取る。

図 3 は、シンチレータの発光を高感度カメラで積算撮影する方法の原理図である。放射化させた Dy 箔をシンチレータに密着させ、Dy 箔から放出される  $\beta$  線でシンチレータを発光させる。このシンチレーション光を暗箱内にて高感度のカメラを用いて積算撮影することで Dy 箔の放射化像を得る。

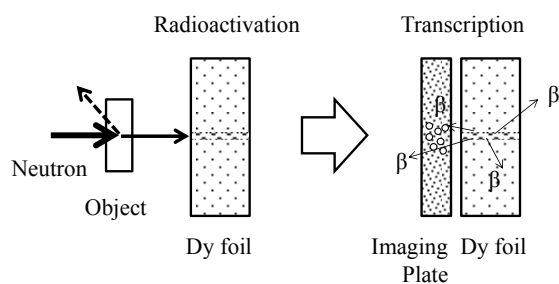


Fig.2 The method of imaging plate transcription

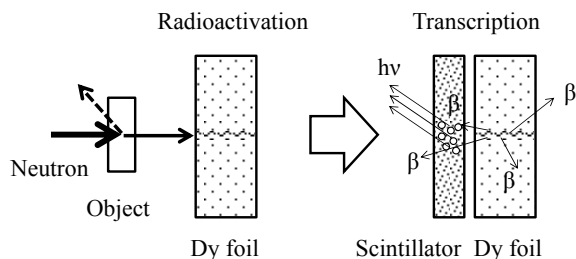


Fig.3 The method of scintillator transcription

## 3. 試験方法

新たに提案した撮像手法の検証として、中性子照射試験を実施した。中性子源としては、住重試験検査株式会社の中性子照射施設を利用した。この中性子照射施設では、サイクロトロン加速器で 18MeV まで陽子を加速し、最大  $20 \mu A$  のビーム電流で Be ターゲットに陽子を衝突させて中性子を発生させる。Be ターゲットの周囲には、ポリエチレン製のモデレータが設置されており、中性子を減速させて熱中性子が生成される。このモデレータ近傍にコリメータが設置されており、コリメータの性能を示す L/D の値は 44 である。ここで、L はコリメータ入口から被写体までの距離、D はコリメータ入口の径である。図 4 に照射室の概観を示す。今回撮像する試験体として、内部に中性子吸収材( $B_4C$ )を充填した SUS 製の板を用意した。この試験体を直接法と今回提案の手法で撮像し、比較評価を実施した。

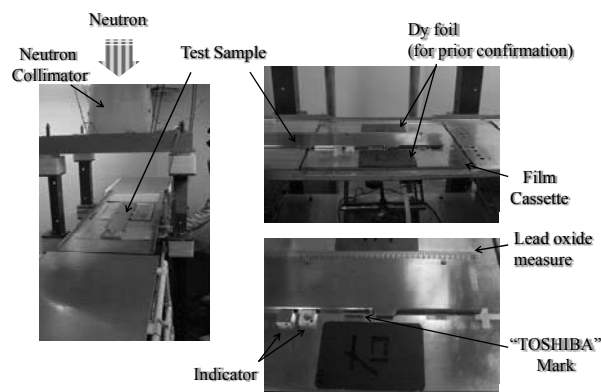


Fig.4 radiation chamber

イメージングプレートは、GE Healthcare Life Sciences 社の BAS IP SR 2040 を使い、専用のカセットに入れて Dy 箔と密着させて転写を行った。一定時間転写を行った後、イメージングプレートを取り出し、専用の読み取り装置 (Typhoon FLA 7000) で転写像の読み取りを実施した。

図 5 にシンチレータの発光を積算撮影するカメラシステムの構成を示す。高感度かつノイズの少ないデジタル一眼レフカメラを選定した。シンチレータは、高輝度で残光時間の長いものを選択し、 $Gd_2O_3:Eu$  を選定した。ここに示すカメラシステム全体を暗箱で覆い、5 分間露光撮影を連続で実施し、転写像を取得した。

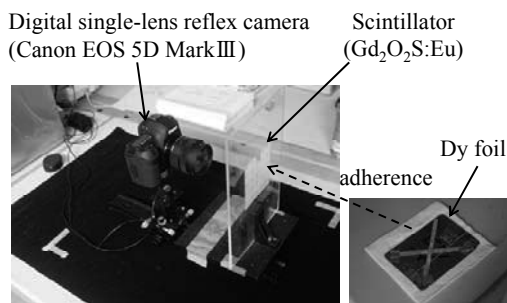


Fig. The configuration of the camera system

#### 4. 試験結果

図6は、試験体の透過画像であり、それぞれ X 線および中性子を用いた撮像結果である。中性子の撮像結果は直接法によるものであり、SUS 製の試験体内部に充填されている中性子吸収材(B<sub>4</sub>C)の分布が確認できる。ここで、画像の白く見える部分が B<sub>4</sub>C の存在している領域である。この時、サイクロトロン のビーム電流は 16 μA であり、金箔の放射化量から算出した中性子フラックスは、全中性子が 1.99 × 10<sup>5</sup> n/cm<sup>2</sup>/s、高速中性子が 2.62 × 10<sup>4</sup> n/cm<sup>2</sup>/s、カドミウム比が 7.6 である。中性子照射時間は 2 時間である。この直接法の撮像結果を比較用のリファレンスとし、同様の照射条件で提案手法との比較を実施した。

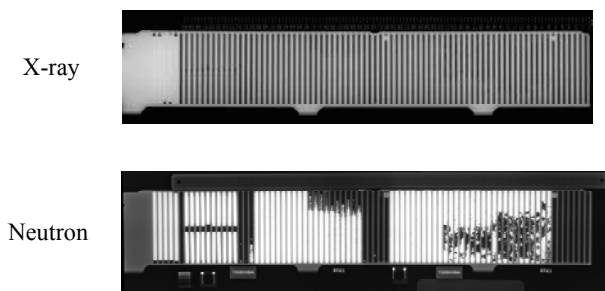


Fig. Comparison of the photography result

図7は、イメージングプレートの転写結果をリファレンスと比較したものである。ここでは、中性子を 2 時間照射後、15 分の冷却時間を置いてから Dy 箔を取り出し、イメージングプレートへの転写を実施した。始めに 5 分転写した後、別のイメージングプレートに 60 分転写を実施した結果を並べている。5 分転写の場合でも、B<sub>4</sub>C 間の 2mm の隙間や B<sub>4</sub>C の抜けが確認できる。60 分転写の場合もほぼ同様の結果となっているが、これは放射化量が低下しているためである。よって、放射化量が低い場合でも、転写時間を増加させることで放射化量の低さを補う

ことができると考えられる。

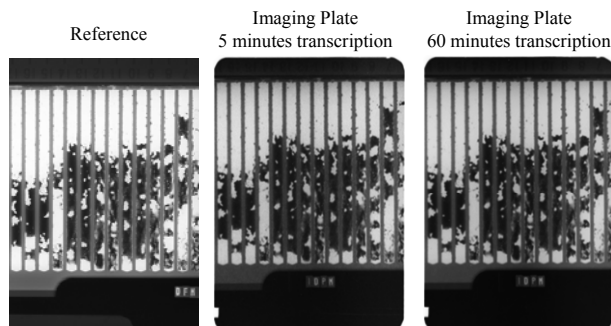


Fig. Comparison with the imaging Plate transcription

図8は、シンチレータの積算撮影結果をリファレンスと比較したものである。イメージングプレートの場合と同様に、中性子を 2 時間照射した後、15 分間の冷却時間を置いてから Dy 箔を取り出し、シンチレータに密着させてカメラで発光を撮影した。ここで、カメラの ISO 感度は 6,400、絞り F1.4 で設定し、5 分間露光撮影を連続で実施した。試験終了後、撮影された画像を足し合わせた積算画像を作成すると共に、同一時間分だけ積算したバックグラウンド画像を差し引き、最後に R 成分画像を反転させて明るさ・コントラストの調整を行い、図8の画像を得た。5 分積算撮影の場合でも、B<sub>4</sub>C 間の 2mm の隙間や B<sub>4</sub>C の抜けを確認することができる。また、60 分積算撮影の場合では、ASTM 規格の感度インジケータ[4]内にある幅 250 μm の Al スペーサを確認することができる。全体として、積算時間が長くなるほど統計精度が良くなり、画像が鮮明になっていることも確認できる。

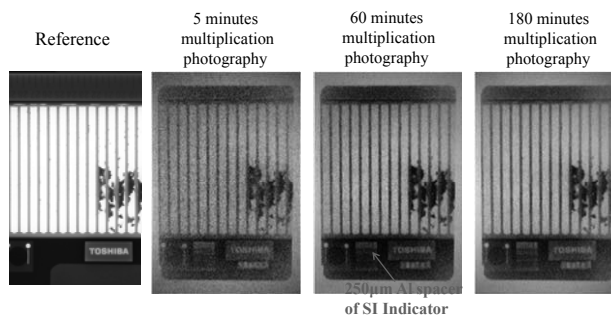


Fig. Comparison with scintillator multiplication photography

ここまでは、典型的な中性子ラジオグラフィの中性子フラックス  $10^5 \text{ n/cm}^2/\text{s}$  程度の撮影結果で評価した。一方で、実際に検査を実施する現場で、十分な中性子フラックスが得られない可能性が考えられる。そこで、高感度で鮮明な画像が得られるイメージングプレートへ転写する方法で、どの程度低いフラックスまで撮影可能かを考察した。

図9は、サイクロトロン加速器のビーム電流を  $1 \mu\text{A}$  とした状態で、30分間照射し、照射終了後から35分間経過後に1時間転写した結果である。3枚の画像は、試験体の異なる位置を同時に撮影したものであり、いずれも十分に  $B_4C$  の分布を観察することができる。ビーム電流と中性子フラックスは、比例関係にあると仮定すると、この時の中性子フラックスは  $1.25 \times 10^4 \text{ n/cm}^2/\text{s}$  であると考えられる。

ここで、Dy箔の放射化量と転写時間からイメージングプレートへ転写される $\beta$ 線の個数を見積もる。Dy箔の厚み  $0.1\text{mm}$  に対し、中性子フラックス  $1.25 \times 10^4 \text{ n/cm}^2/\text{s}$  で30分間照射した場合、照射終了直後の放射化量は、 $163\text{Bq/cm}^2$  と計算できる。35分経過後の転写開始前では、 $137\text{Bq/cm}^2$  となり、ここから1時間転写されると、転写 $\beta$ 線量は、 $4.26 \times 10^5 \text{ 個/cm}^2$  と計算できる。実際に検査を実施する場合には転写時間を1時間に限定する必要は無く、さらに長い時間転写をすることも可能と考えられる。よって、放射化量が転写開始時から5%以下まで減衰する10時間転写の場合を例として考えると、同じ転写 $\beta$ 線量となるためには、転写開始前の放射化量は  $38\text{Bq/cm}^2$  となる必要がある。この時、中性子を1時間照射した後にDy箔を取り出し、30分経過した後に転写を開始すると仮定すると、中性子フラックスは  $1.8 \times 10^3 \text{ n/cm}^2/\text{s}$  と計算できる。

以上より、放射化させたDy箔をイメージングプレートに転写する方法では、銀塩フィルムに転写する中性子ラジオグラフィの中性子フラックスよりも2桁程度低いフラックスでも被写体の撮影が可能になると考えられる。



Fig. The result of maging Plate transcription  
in a lo flux condition

## 5. 結言

高ガンマ線環境下での中性子ラジオグラフィ法として、フィルム転写の間接法に代わるイメージング方法を実験的に検証した。

Dy箔を放射化させた後のイメージング方法として、イメージングプレートへの転写、およびシンチレータの発光を高感度カメラで積算撮影の2種類の手法は、いずれも短時間で直接法の画像と同様に、中性子吸収材の分布を観察できることを確認した。

また、実用上の観点から低フラックス条件での撮像可能性を検討し、放射化させたDy箔をイメージングプレートへ転写する手法で、典型的な中性子ラジオグラフィのフラックスよりも2桁低い  $10^3 \text{ n/cm}^2/\text{s}$  程度で十分にイメージングができる可能性を示した。

実用化に向けては、実際に使用する中性子源の形状や強度を考慮し、モデレータやコリメータを含めた装置の最適化を行うことが重要である。

## 参考文献

- [1] 日本アイソトープ協会 理工学部会 中性子イメージング専門研究会、“中性子イメージング技術の基礎と応用”、2009、pp333
- [2] Glenn F.Knoll、“放射線計測ハンドブック(第4版)”、2013、pp791
- [3] 日本アイソトープ協会、“アイソトープ手帳(11版)”、2011、pp112-123
- [4] ASTM E545-91(1991)、“Standard Method for Determining Image Quality in Direct Neutron Radiographic Examination”、1991