

再 録

〔日本原子力学会誌, 29, 904-912〕

近畿大学原子炉中性子ラジオグラフィ
設備の概要と特性丹羽 健夫, 古賀 妙子,
森嶋 彌重, 鶴田 隆雄, 河合 廣Characteristics of Neutron Radiography Facility Constructed
at Kinki University ReactorBy Takeo NIWA, Taeko KOGA,
Hiroshige MORISHIMA, Takao TSURUTA and Hiroshi KAWAI

A neutron radiography facility was constructed at the Research Reactor of Kinki University (Advanced Argonaut Type, 1 Wt). The facility has a Bi filter, divergent collimators ($L/D=22.2$ or 10.2) and drawers which can be loaded with samples, converters and films. Neutron fluence rate on one of the drawers is $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, which deposits grade 2 in density to a Fuji FG film contacted with an NE-426 converter during 40 min irradiation. Neutron radiograph of ASTM beam purity and sensitivity indicator shows that thermal neutron content is 60, scattered neutron contribution 4.1, γ contribution 1.8, pair production contribution 0.5, the number of detectable holes 3 and the number of detectable gaps 7. The characteristics have been proved that the facility will be fully useful for the research of neutron radiography.

KEYWORDS

neutron radiography, performance, sensitivity, specifications, specificity, UTR-Kinki reactor.

I はじめに

ロケット, 航空機用部品など高度の信頼性が必要な製品の非破壊検査には従来X線または γ 線画像を広く利用しているが, 最近はさらに中性子ラジオグラフィ画像も利用し始めている⁽¹⁾。X, γ 線画像では被写体のうち原子番号の大きい元素で構成した部分が蔭になるのに対し, 中性子ラジオグラフィ画像では中性子核反応断面積の大きい軽元素などで構成した部分が蔭になるため, X, γ 線画像には現れなかった部分の欠陥等が識別できる特徴がある⁽²⁾。

近畿大学原子炉(UTR-KINKI)の熱出力は1Wと低出力であるので, ビーム状に熱中性子を引き出したときのフラックスも低く, 当初は中性子ラジオグラフィ設備を設置する意義について若干危惧があった。しかし kW, MW オーダの原子炉による中性子ラジオ

グラフィだけでなく, 可搬性のある RI や加速器を中性子源とする低い中性子フラックス条件の下で, 鮮明な中性子ラジオグラフィ画像を得ることが今後の研究課題になると考えられる。われわれは予備的な実験によって, 低フラックス中性子ラジオグラフィ実験設備としてのある程度の利用の可能性を確認したので, 本設備の設置に踏み切った。

本報では, 新設した中性子ラジオグラフィ設備の概要, その特性およびこの設備で撮った ASTM 標準体画像の解析結果について報告する。

II 設備の概要

UTR-KINKI は大学における教育・訓練および研究に適するように設計した低出力の軽水減速黒鉛反射非均質型熱中性子炉で, 最大熱出力は 1W である。炉心部を上方から見た様子を Fig. 1 に示す。90%濃

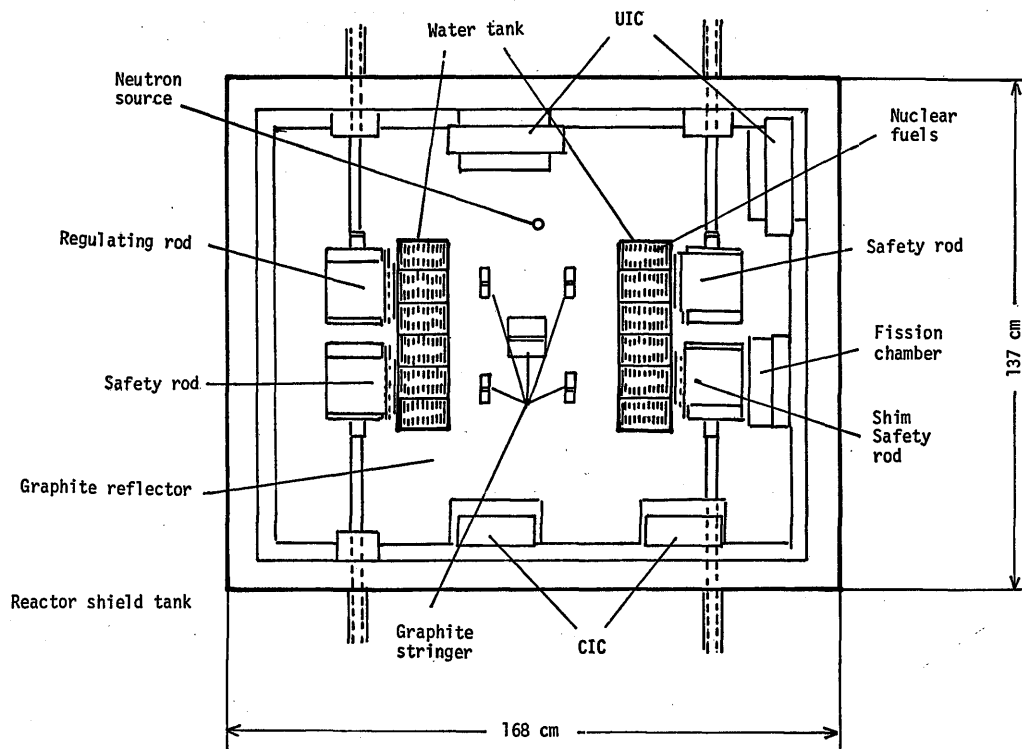


Fig. 1 Plan of Kinki University Reactor

縮 U-Al 合金板状燃料と軽水減速材の入った2基の炉心タンクが2分割炉心を構成し、その間およびその周囲に黒鉛反射体を密に詰めてある。反射体には垂直方向に容易に抜き差し可能な何本かの黒鉛柱（ストリンガ）がある。中央ストリンガの燃料板中央の高さに相当する場所で最大の熱中性子束($1.2 \times 10^7 \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)が得られる。

新設の中性子ラジオグラフィ設備は、Fig. 2 に示すように、中央ストリンガの真上に位置し、組付けおよび撤去が容易にできるように設計した。（この位置を選んだ理由は次の通りである。

- (1) 熱中性子束の最大の場所から中性子ビームを引き出せる。
- (2) 炉心を直視しないので γ 線量率を比較的低く抑えられる。
- (3) 垂直上方に中性子ビームを引き出せるので検査しようとする被写体、フィルム等を水平に置けるのでセッティングが容易である。
- (4) 既設の原子炉上蓋に新設の設備を乗せるだけでなく、原子炉遮蔽タンク等に改造を加える必要がない。

組付けの順序は次の通りである。まず、中央ストリンガの下半分に黒鉛を残し、上半分をボイドとする。このボイドの部分にコリメータ比 L/D (L : コリメータの長さ, D : コリメータ入口の直径) を大きくするためのコーン状 Al 板に B 入り Si ゴムを内張りしたコリメータを挿入できる。また、その真上には γ 線量率を抑制するための Bi 板を置くことができる。

次に、中央の開口部を残して既設の原子炉上蓋を設置する。この中央開口部に Fig. 3 に示すように4分割したフッ化リチウム入りモルタル製コリメータ d, e, f, g を収納した缶体 c を組み込む。さらに、その上を普通コンクリート製の下部遮蔽体 b および上部遮蔽体 a で覆う。下部遮蔽体には被写体、フィルム等を収納でき、原子炉運転中に抜き差し可能な引出し（カセットホルダ）を備えた。引出しは高さの異なる4個所に装着できる。引出し ①, ② はコリメータ d とともに使用し、引出し ③, ④ を使用するときはコリメータ d は撤去する。被写体、フィルム等は引出し ① ~ ④ のみでなく、コリメータ d ~ g の上・下またはその間に薄い Al 板等の支持具を置くことによって Fig. 2 に ① ~ ⑤ で示す位置にもセットできる。

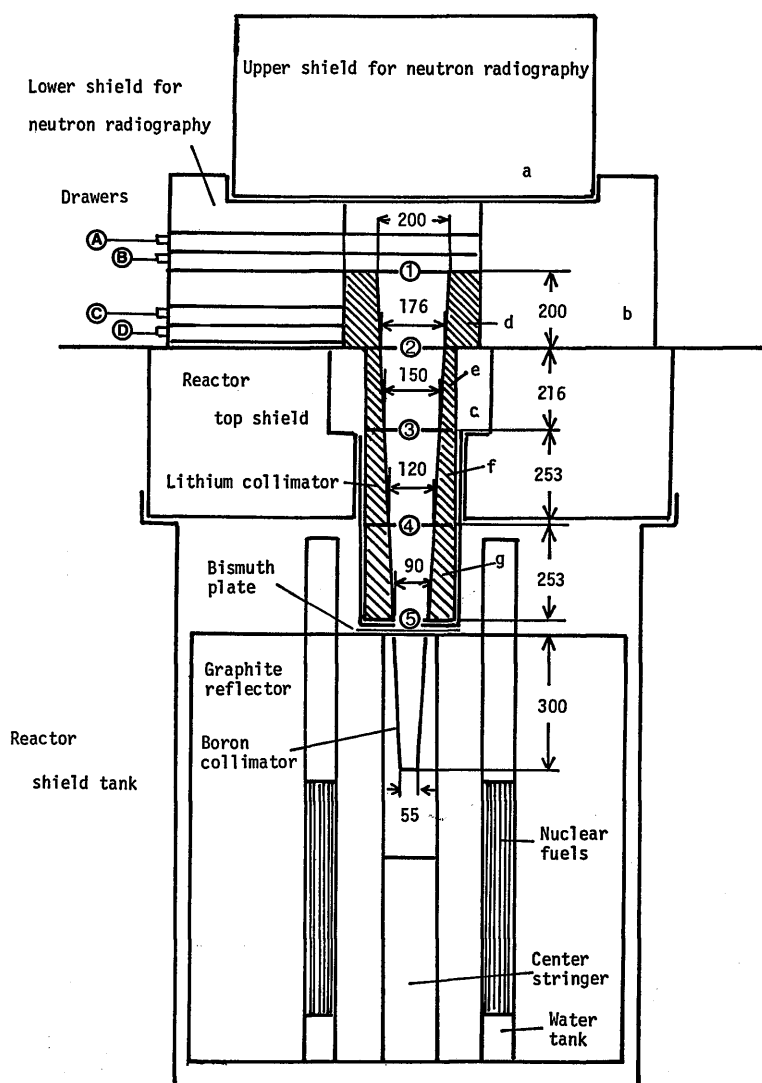


Fig. 2 Side view of neutron radiography facility (Unit: mm)

本設備のコリメータに関する幾何学的条件は Table 1 に示す通りである。コリメータ比 L/D は少なくとも10以上できれば100以上が望ましい。B入りコリメ

ータを使用しない場合はその下限に近い。本設備の組付けまたは撤去に要する時間は 20min 程度である。

Ⅲ 中性子線の特性

1. 熱中性子および速中性子の垂直分布

UTR-KINKI の 1W 運転時における本設備内の熱中性子束の垂直分布を Au 箔の放射化法で測定した。箔の放射化量は β - γ 同時計数法で絶対測定するか、またはこれにより校正した 2π ガスフローカウンタで測定した。熱中性子束は裸の Au 箔の放射化量と 1 mm 厚の Cd ケース中の Au 箔の放射化量の差から

Table 1 Collimator measures

	With B collimator	Without B collimator
Collimator total length L (cm)	125	92
Collimator entrance diameter D (cm)	5.5	9
Collimation ratio L/D	22.2	10.2

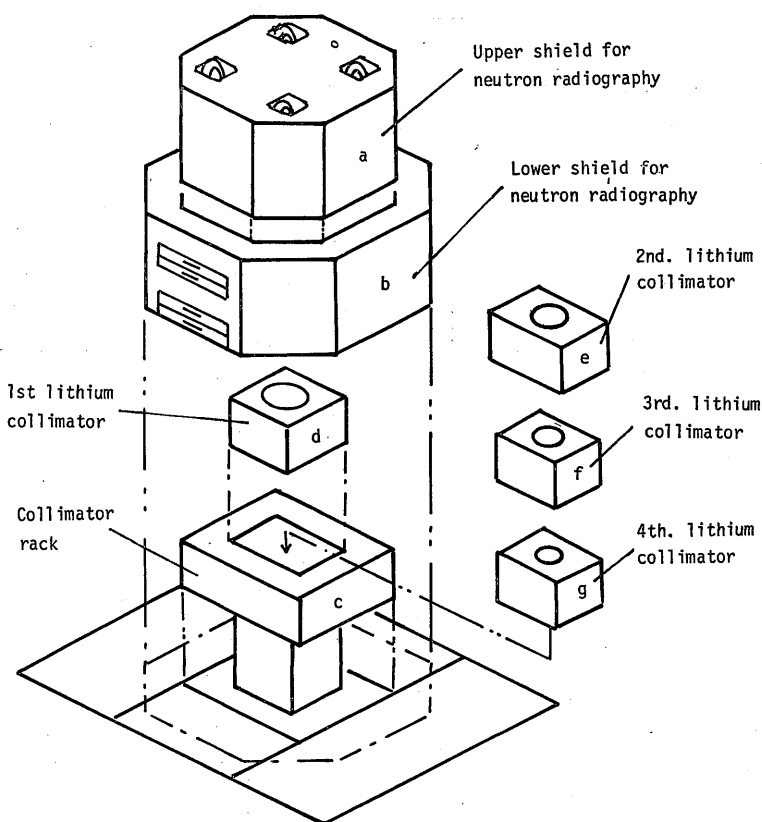


Fig. 3 Bird's-eye view of neutron radiography facility

評価した。本設備中の熱中性子束の垂直分布を Fig. 4 に示す。これによると⑤～④の各照射野において、B 入りコリメータを挿入した場合の熱中性子束は挿入しない場合の約 1/6 となっている。Bi 板は γ 線量率を抑制するために挿入するものであるが、B 入りコリメータの有・無の両条件とも熱中性子にはあまり大きな影響を与えないことがわかった。

設備内の Cd 比の測定結果を Fig. 5 に示す。これによると B 入りコリメータを挿入しない場合、照射野⑤の位置での Cd 比は約 6、引出し④上においては 2.5 と上部に行くほど低下している。B 入りコリメータを挿入した場合は、照射野⑤の位置から引出し④上まで高さの変化によらず Cd 比はほぼ 2 と一定であった。コリメータにより垂直上方へ向う以外の熱中性子が吸収され、中性子スペクトルが硬くなっていることがわかる。Cd 比が小さいことは熱外中性子成分が大であることを示し、厚みのある被写体の撮影には有利になる可能性がある。

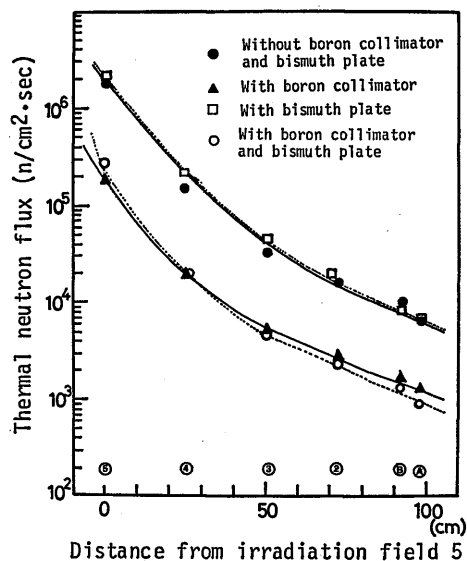


Fig. 4 Vertical distribution of thermal neutron flux

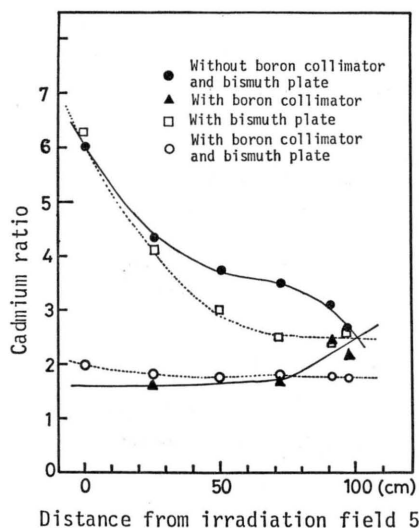


Fig. 5 Vertical distribution of Cd ratios

本設備内の各部における速中性子束をリン（第1リン酸カルシウム）の放射化量を 2π ガスフローカウンタで測定することにより評価した。結果を Fig. 6 に示す。これによると照射野⑤から引出し④まで、速中性子束は $10^3 \sim 10^5 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ に分布し、B入りコリメータおよび Bi 板の有無の諸条件の違いに対してはあまり大きな変動はなかった。

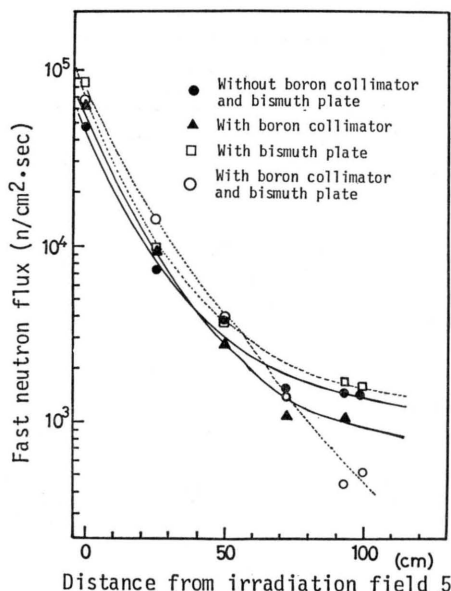


Fig. 6 Vertical distribution of fast neutron flux

2. 照射野における熱中性子束の均一性

コリメータ e, f, g の上部水平面②, ③, ④およびコリメータ d のすぐ上に位置する引出し⑤上の中性子束分布を固体飛跡検出器を用いて調べた。用いた検出器は Kodak-Pathé 社製のホウ酸リチウム塗布硝酸セルロースフィルム CA-80 Type B のホウ酸リチウム塗布面に、ソーラオプティカル・ジャパン社製の CR-39 プラスチック板を密着したものである。CA-80 Type B のみでも、照射後ホウ酸リチウム層を洗い流し、硝酸セルロースフィルムを NaOH 水溶液でエッチングすればエッチピットの計数が可能であるが、CR-39 板を用いることによってほぼ同じ感度でより明瞭で計数しやすいエッチピット像が得られる⁽³⁾。

この検出系の熱中性子に対する感度、すなわちエッチピット表面密度 (cm^{-2}) / 熱中性子フルエンス (cm^{-2}) は 1.9×10^{-3} である。これまで CR-39 プラスチックの難点としてエッチング時間が10数 h と長くなることの指摘があるが、この問題は溶液温度を高めること

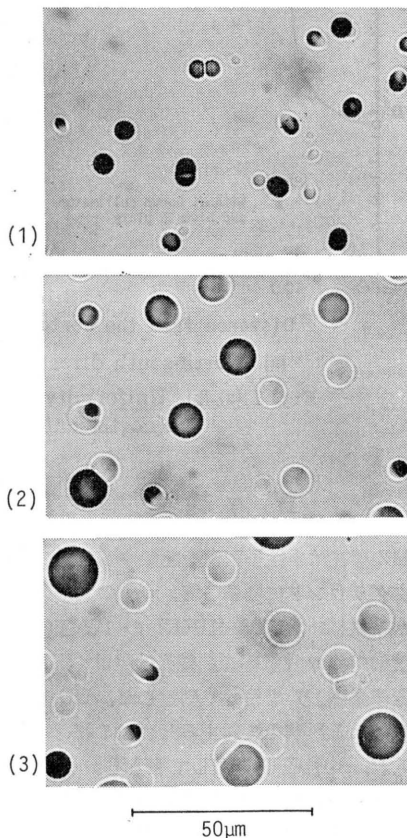


Photo. 1 Etch-pits on plastics CR-39

によって解決できる⁽⁴⁾。

CR-39 板を30% KOH, 90℃の条件でエッチングしたとき $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応および $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ 反応に基づき生ずるエッチピット像を **Photo. 1** に示す。エッチング時間が 15min 未満ではエッチピットが小さく、45min を超えるとエッチピットのコントラストが弱くなる。したがって、15~45min の間が計数しやすい。本測定ではエッチング時間を 30min に設定した。すなわち、Photo. 1 (2) に見られるようなエッチピッ

トを100~200倍の光学顕微鏡を用いて計数し、その密度分布を求め、中性子フルエンス分布に換算した。南北方向と東西方向の測定結果をおのおの **Fig. 7** (a), (b)に示す。これらの図から明らかなようにコリメータ内の同一水平面上および引出し⑥上の直径 20cm の円形の照射野内の熱中性子束の均一性は良好であった。被写体の入るこの円形内の熱中性子束の均一性は黒化度を均一にし良好な画像を得るために極めて重要である。

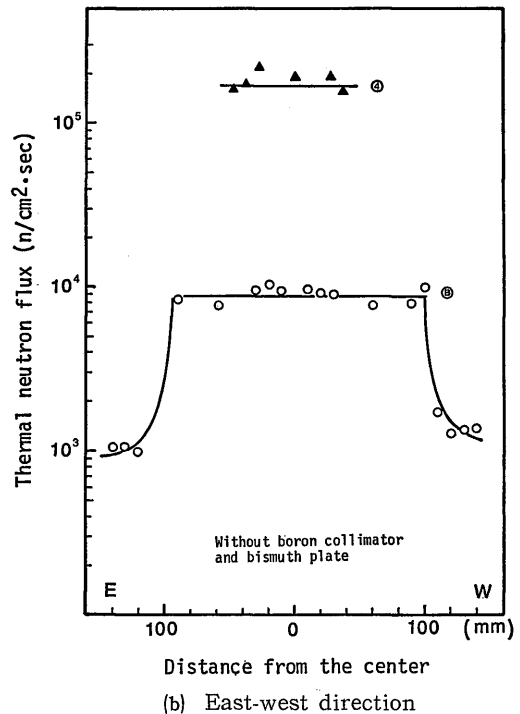
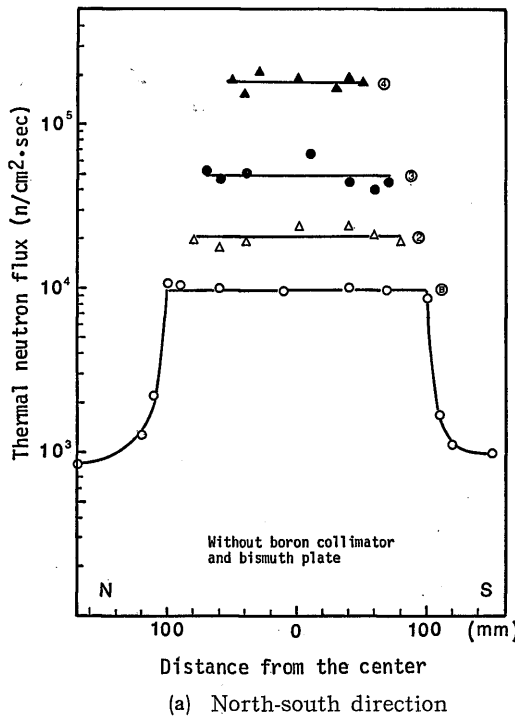


Fig. 7 (a), (b) Uniformity of thermal neutron flux on irradiation fields (north-south and east-west direction)

IV γ 線量率

γ 線の存在は中性子画像を記録する X 線フィルムのバックグラウンドになるので、 n/γ の大きい中性子照射野が望ましい。UTR-KINKI の 1W 運転時における本設備内の γ 線量率を熱蛍光線量計 (UD-110S, 松下電器産業(株)製) を用いて測定した。UD-110S の中性子線による影響を検討するため、これを LiF ケースに入れ、中性子を遮蔽して照射し、測定した値と LiF カバーなしで照射・測定した値を比較した。これらの差から UD-110S の中性子線に対する感度はほとんどないことがわかったので、裸の UD-110S による

測定値をもって γ 線量率とすることにした。

本設備内の γ 線量率の垂直分布を測定しその結果を **Fig. 8** に示す。B 入りコリメータのみを用いた場合、 γ 線量率は設備の底部、すなわち原子炉グラファイト上付近の照射場⑤における 3.5R/h から、引出し④上における 32mR/h までの範囲に変動することがわかった。Bi 板および B 入りコリメータの双方を使用した場合、1.7R/h~26mR/h の範囲で変わり、照射場①~④においては、B 入りコリメータを入れた場合は入れてない場合の約 16% 減となっている。すなわち、Bi 板のみを挿入した場合は炉心からの γ 線は遮蔽するが、 $^{209}\text{Bi}(n, \gamma)$ 反応による γ 線の影響を受けて

設備内の γ 線量率が上昇するので Bi 板のみを挿入して照射場の γ 線量率を抑制する効果はほとんど認められなかった。

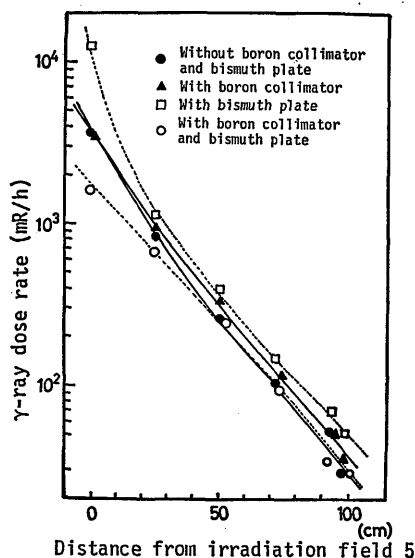


Fig. 8 Vertical distribution of γ -ray dose rate

Bi 板および B 入りコリメータを使用した場合は $^{209}\text{Bi}(n, \gamma)$ 反応に要する熱中性子の B による吸収の効果が大きいために γ 線量率が下る。引出し⑧上における γ 線量率の水平分布を Fig. 9 に示す。これによると照射野の $20\text{cm}\phi$ の範囲において、Bi 板および B 入りコリメータの双方を使用した条件において、 γ 線量率はほぼ 31mR/h と均一であることを示している。

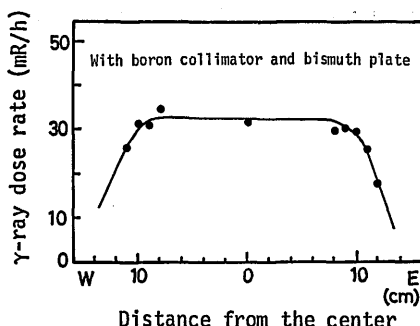


Fig. 9 Uniformity of γ -ray dose rate at irradiation field on drawer B (east-west direction)

Table 2 n/γ ratios at drawer (cassette holder) A and B positions

Drawer	Without B collimator and Bi plate	With B collimator	With Bi plate	With B collimator and Bi plate
A	233	40.5	163	35.2
B	217	72.6	184	38.5

(Unit: $n/\text{cm}^2 \cdot \text{s}/\text{mR/h}$)

引出し④, ⑧上における n/γ 比は Table 2 に示すように Bi 板および B 入りコリメータを使用した条件においては、それぞれ 35.2 , $38.5\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}/\text{mR/h}$ であった。 n/γ 比は一種の S/N 比に相当する。同一熱中性子フルエンスの場合、 n/γ 比は大きいほど良質の画像が期待できる。

V 本設備による写真撮影

コンバータとして $\text{NE-426}({}^6\text{LiF} + \text{ZnS}(\text{Ag}))$, $120 \times 165\text{mm}^2$ または $\text{Gd}(25\mu\text{m 厚}, 200 \times 250\text{mm}^2)$ を用

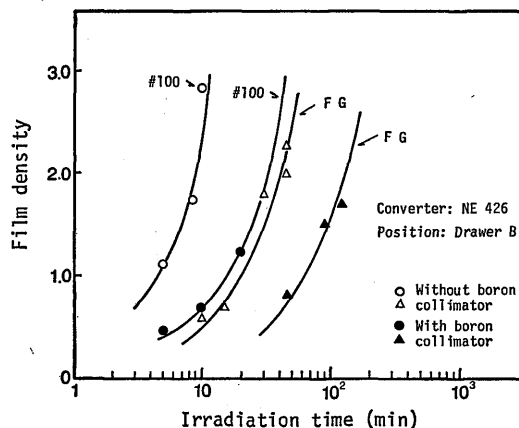


Fig. 10 Relation between irradiation time and film density

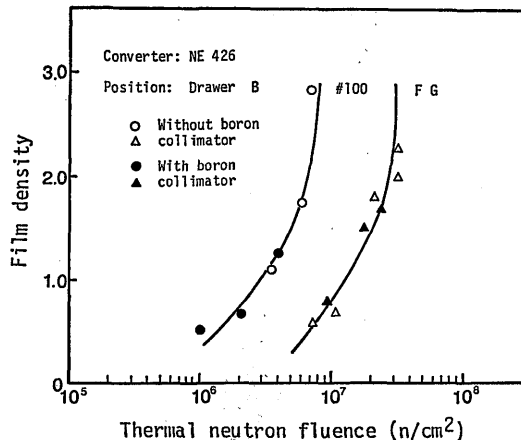


Fig. 11 Relation between thermal neutron fluence and film density

い、フィルムとして工業用X線フィルム、富士 FG、 $\#100$ 等を使用して照射時間と黒化度の関係を求めた。これらの照射は原子炉を出力 1W で運転して行った。NE-426 を用い、引出し⑧の位置で照射した写真から照射時間とフィルム濃度（黒化度）の関係を求め、Fig. 10 に示す。この横軸の照射時間を熱中性子フルエンスで表わした図が Fig. 11 である。これらの図から照射に要する時間がわかる。すなわち、フィルム濃度が 2～3 の画像が望ましいとされているので、例えば B コリメータなしで FG フィルムを用いて撮影する場合は 40min 程度（熱中性子フルエンス $= 3 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ ）の照射が適切である。

次に、熱中性子フルエンスおよび照射位置を変えて ASTM 規格標準体の像質を調べた。Photo. 2 は、NE-426 と FG フィルムを組み合わせたものを上部より 2 番目の引出し⑧の位置で B 入りコリメータを入れて 1W 運転時 120min 照射（熱中性子フルエンス $1.3 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ ）で得られたものである。

Photo. 3 は、Gd と $\#100$ フィルムを組み合わせたものを上部より 4 番目の引出し⑩の位置で B コリメータなしで 1W 運転時 6h 照射（熱中性子フルエンス

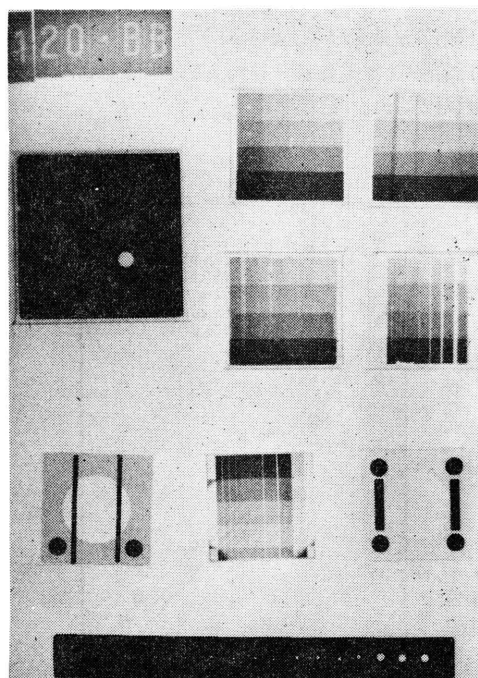


Photo. 2 Neutron radiograph of ASTM indicator using NE 426 and FG film with B collimator

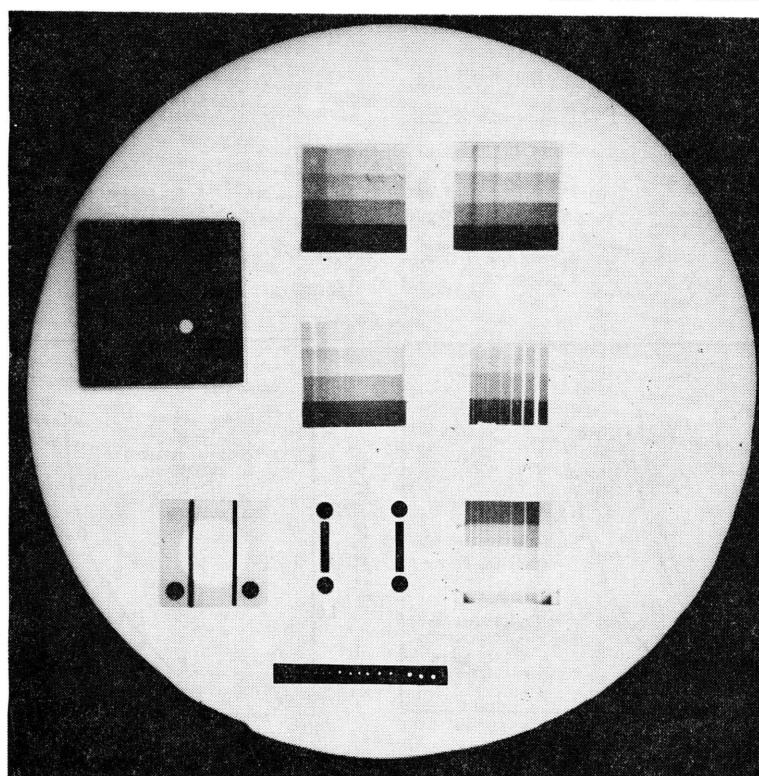


Photo. 3 Neutron radiograph of ASTM indicator using Gd-25 μm and $\#100$ without B collimator

$4.3 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$) で得られたものである。

Table 3 は、撮影したフィルムより像質を調べた結果を示す。被写体は1981年 ASTM 規格標準体 (RISO)⁽²⁾ を用いた。表中の SI (Sensitivity Indicator) は解像度の目安を、BPI (Beam Purity Indicator) および BPI-F は線質を与える。表中の記号は H: 識別可能な穴の数 (穴番号の大きいほど小さい点が見え

る), G: 識別可能な隙間の数 (番号の大きいほど細かいスリットが見える), C: 熱中性子成分, S: 散乱中性子成分, γ : γ 線成分, P: 電子対成分である。BPI-F は核燃料検査に使用されるインディケータで、記号は TN: 熱中性子成分, EN: 熱外中性子成分, SN: 散乱中性子成分である。本設備を用いて得られたこれらの指数を ASTM-E545-81 が許容する数値と比較した。

Table 3 Evaluation of ASTM indicator pictures

Converter	Film	Irrad. time	Neutron fluence (cm ⁻²)	L/D	Irrad. field	SI		BPI (%)				PBPI-F (%)		
						H	G	C	S	γ	P	TN	EN	SN
Gd-25 μm	# 100	6 h	4.3×10 ⁸	8.0	②	4	7	42.8	0.5	5.8	5.3	42.3	0	0.5
NE 426	FG	45 min	4.9×10 ⁶	22.2	⑧	3	7	67.1	1.4	2.7	2.7	69.4	1.4	4.2
		45 min	2.7×10 ⁷	10.2	⑧	3	7	59.9	4.1	1.8	0.5	58.3	2.8	4.3

ASTM-E545-81 ではカテゴリ I ~ V の 5 段階のランク付けを行なっているが、特に指定がなければカテゴリ III を適用することを定めている。一般に C は大きいほど, S, γ , P は小さいほど良質な画像が得られる。カテゴリ III では SI について $H > 5$, $G > 5$, BPI について $C > 55$, $S < 7$, $\gamma < 5$, $P < 5$ と定めている。NE-426 とフィルム FG を使用した場合, H の値を除いて上記許容値を満足している。H の値 3 は, カテゴリ V ($H > 3$) をかろうじて満足する値である。

UTR-KINKI はわずか 1W の低出力であるが、ここに新設された中性子ラジオグラフィ設備を使用し、NE-426 と FG 等感度の良いコンバータとフィルムを用いれば、かなり良質な画像が得られることがわかった。本設備を利用して低い熱中性子束場における中性子ラジオグラフィ法の開発等の研究を進めて行きたいと考えている。

UTR-KINKI は共同利用研究施設として全国の大学等の研究者の利用に供されている。ここに報告した設備を利用した中性子ラジオグラフィ研究の発展を期

待するものである。

近畿大学原子炉 (UTR-KINKI) に中性ラジオグラフィ設備を設置することに理解を示され、これを推進された前嶋俊壽所長、設備の設計の指針を示された三木良太教授、設備の設計に有益な示唆を賜った京都大学原子炉実験所米田憲司氏および製作を担当された日立造船エンジニアリング㈱の技術陣の方々に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- (1) Barton, J. P., von der Hardt, P.: "Neutron Radiography", (1983), D. Reidel Publ.
- (2) von der Hardt, P., Röttger, H.: "Neutron Radiography Handbook", p. 108 (1981), D. Reidel Publ.
- (3) 鶴田隆雄: 近大原研年報, **21**, 79 (1984).
- (4) 鶴田隆雄, 福本善己: 保健物理, **20**, 25 (1985).