

論	文
---	---

核分裂片飛跡の放電計数法による医療用ライナック 照射室の中性子束密度の測定

古賀 妙子, 森嶋 彌重, 丹羽 健夫,
河合 廣, 村野 喜彦*, 竹田 照夫*,
井上 雄二*, 辰巳 奇男**

Neutron Flux Monitoring around a Medical LINAC using Fission Track Spark Counting Method

Taeko. KOGA, Hiroshige. MORISHIMA, Takeo. NIWA, Hiroshi. KAWAI,
Yoshihiko. MURANO*, Teruo. TAKEDA*, Yuji. INOUE* and Kusu. TATSUMI**

(Received September 30, 1987)

Neutron flux produced from a LINAC made by Toshiba company was measured using fission track spark counting method. This LINAC is used for X or electron irradiation for medical use. The detectors were Makrofol KG polycarbonate films 10 μ m thick, which were attached with thorium or uranium targets and were kept in the neutron field.

Fast neutron flux in the room were distributed up to 6 \times 10⁶ n/cm²·sec. The mean value of that at the irradiation area on the patient was 4 \times 10⁷ n/cm²·sec. Thermal neutron flux at the surrounding wall was larger than that at the centre of the room. Thermal neutron was not detected near the irradiated area.

KEYWORDS

fission track, spark counting method, neutron flux monitoring, LINAC, Makrofol KG.

1. はじめに

加速器の利用は炉物理, 炉工学, 遮蔽などの中性子

工学など多くの分野の研究, 放射線治療, 診療および核医学用ラジオアイソトープの生成などの医療に至る広範囲に, 急速に進展している。その中でも電子ライナックなど医療用加速器が多く病院に設置され, X線

近畿大学原子力研究所; 東大阪市小若江3-4-1
(〒577)

Atomic Energy Research Institute, Kinki Univ.; 3-4-1, Kowakae, Higashi-osaka-shi, Osaka 577

*近畿大学医学部附属病院中央放射線部; 大阪府南河内郡狭山町西山380 (〒589)
Division of Central Radiology, Kinki Univ.

Hospital; 380, Nishiyama, Sayama-cho, Minami-kawachi-gun, Osaka 589

**近畿大学ライフサイエンス研究所; 大阪府南河内郡狭山町西山380 (〒589)

Life Science Institute, Kinki Univ.; 380, Nishiyama, Sayama-cho, Minami-kawachi-gun, Osaka 589

古賀他：核分裂片飛跡の放電計数法による医療用ライナック照射室の中性子束密度の測定

および電子線治療を目的に利用されている。

加速した電子をターゲットにあてた場合、大量の中性子和γ線が発生するが、設置当時、病院内では中性子に対する遮蔽は多くは考えられていないので、漏洩中性子が問題となり最近測定が広く行われており¹¹⁻¹⁰、また中性子の計測についても、微弱中性子測定の標準化に関する報告書¹¹ および総説¹² などに解説されている。本大学附属病院においても東芝製医療用ライナック LMR-15を使用しており、発生する高エネルギー

のX線による光核反応から中性子の生成が予想される。そこで照射室内外の漏洩している低レベルの中性子束密度を、当研究所において開発、研究を続けているポリカーボネートフィルムを検出器とした核分裂片飛跡の放電計数法により測定し、その適用の有効性について報告した。

2. 材料および方法

2.1 材料

核分裂片飛跡検出用薄膜としては、西独バイエル社製 Makrofol KG, 10 μm 厚ポリカーボネートフィルムを、核分裂性物質ターゲットとしてステンレス板に電着した天然ウランおよびトリウム薄膜を用いた¹³。

2.2 方法

中性子線量測定のため、放電計数による核分裂片飛跡検出法について Fig. 1 に示した。

Makrofol KG フィルムを電着ウランおよびトリウムに密着した検出器ユニットを、Fig. 2 に示した医学部附属病院医療用ライナック LMR-15 照射室内外の15点に設置した。測定位置(1)は床面より 2.5 m, (2)(8)は床面、他は床面より 1.5 m であった。ライナック装置周辺(16)~(20) 5点、および患者位置に長径30×短径20×長さ 30 cm のアクリル製ファントムを照射装置のヘッドより 30 cm の位置におき、(21)~(26) 6点について測定を行った (Fig. 3)。総計26点の中性子線場に検出器ユニットをおき、照射後フィルムは60℃、30%水

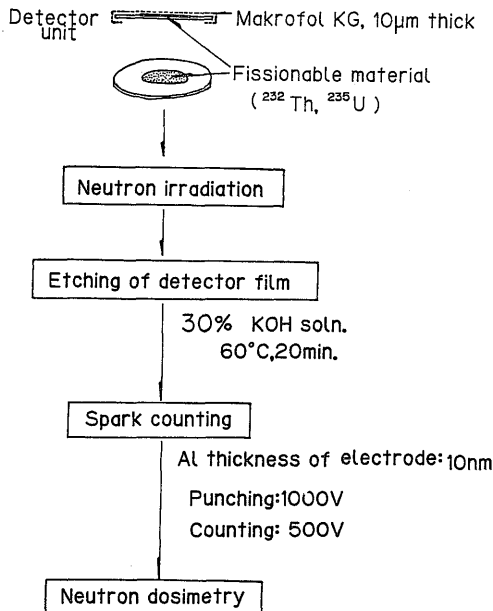


Fig. 1 Sparking technique of etched fission track for neutron dosimetry.

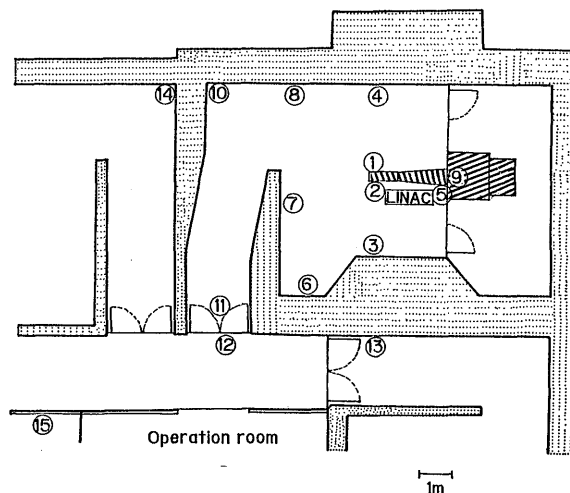


Fig. 2 Monitoring points around LINAC irradiation system.

酸化カリウム溶液中に20分間浸してマグネチック・スタラーでゆっくり攪拌しながらエッチング、水洗および60°C 1時間乾燥後デシケータ中に保存し放電計数用試料とした。

2.3 放電計数法¹⁴⁻¹⁶⁾

エッチングした検出用フィルムは Fig. 4 に示した銅陽電極と Al 蒸着ポリカーボネイト陰電極 (Al 厚: 10 nm) との間におき、電極間に 1,000 V の電圧をかけフィルム上のエッチピット部分に貫通したエッチホールとし (パンチング)、新しい Al 蒸着電極シートに交換して電圧 500 V をかけ (カウンティング)、その放電パルスを計数装置で計数した。

2.4 放電機構について

放電計数装置は Fig. 4 に示した基本回路から成る。絶縁破壊放電は一応次のように起ると考えられる。すなわち、0.1~1 μF のコンデンサー C' に蓄えられた約 1,000 V の電圧によりフィルム上の 1 エッチピット点で絶縁破壊が起り C' の電気量は放電され電圧は下がる。抵抗 R' を通って C' は徐々に充電されて電圧は上がり、再び別のエッチピット点で絶縁破壊が

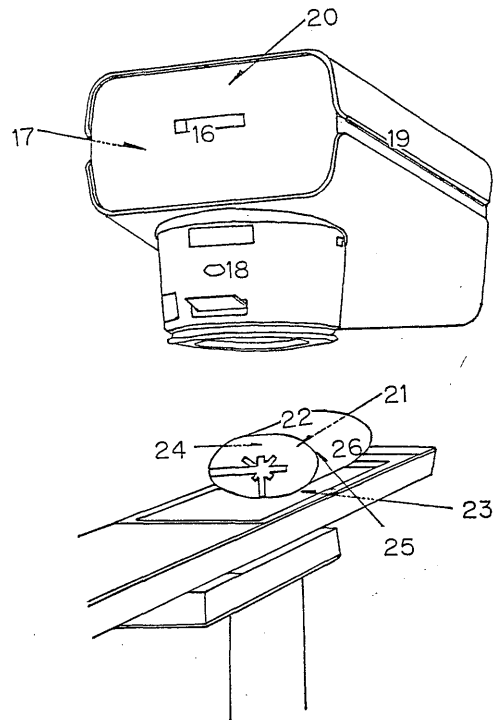


Fig. 3 Monitoring points around LINAC irradiation system.

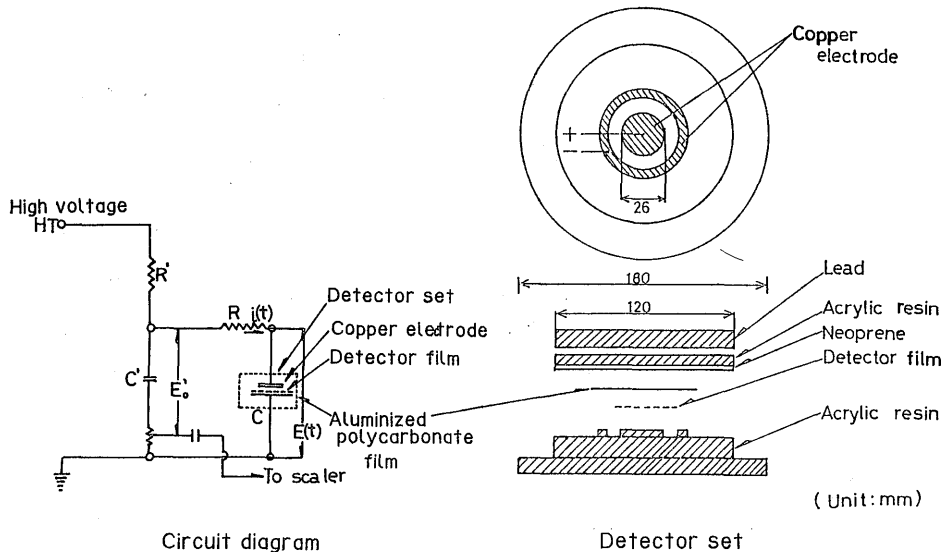


Fig. 4 Circuit diagram and detector set of electrical spark counting system.

起る。このようにして全エッチピット点で絶縁破壊放電は終了する。1回の放電に費やされる電気量はほとんどCに蓄えられた分によることは次の2点から確かめられる。

(1) 検出器の陰電極に使われるアルミニウムの放電による気化飛散した直径 (r) : $\sim 200 \mu\text{m}$, アルミニウム蒸着膜厚 (d) : $\sim 10 \text{ nm}$, アルミニウム密度 (ρ) : 2.69 g/cm^3 , 気化飛散したアルミニウム質量 (M) : $\pi(r/2)^2 d \rho = 8.45 \times 10^{-10} \text{ g}$, アルミニウム気化熱 (C)¹⁷⁾ : $2,820 \text{ cal/g}$, 放電に必要なエネルギー : $4.18 \text{ CMJ/cal} = 1.0 \times 10^{-5} \text{ joule}$

一方, 放電直前の電圧 $E(t) = 500 \text{ V}$ とすれば, Cに蓄えられたエネルギー : $1/2CE^2 = 1.25 \times 10^{-5} \text{ joule}$ となり両者はほぼ一致し, C'の容量より桁ちがいに小さいことが分る。

(2) 3.1に示すようにアルミニウムの気化飛散面積は, ほぼ電極面積に比例することがわかった¹⁸⁾。また, 固体誘電体が電圧を印加されてから絶縁破壊を完成するまでに一定時間を必要とするが, これを破壊の時間遅れと言う。

これは一般的に 10^{-9} 秒から数時間におよび, 遅れ時間に統計的なばらつきすなわち統計遅れがあるが, これにより考察し¹⁹⁾, 重荷電粒子でプラスチックフィルム上に記録された飛跡のエッチピットを放電計数法で自動計数する場合, 放電計数率は概ね, 時間の指数関数的に減少する。

3. 結果と考察

3.1 放電計数特性

ルチンの放電計数法の検出器の銅陽電極の直径は25 mm を用い, Fig. 4 に示すように検出用フィルムをはさむ2電極間にコンデンサーが入っている。放電のエネルギーはこのコンデンサーに蓄えられた電荷の放電によると一見考えられるが, これをたとえば 500 pF から $0.05 \mu\text{F}$ に変えてもポリカーボネイト上のエッチホ

ール孔径と蒸発した電極のアルミニウム孔径は殆んど変化しない。そこで, 電極径 $10 \text{ mm}\phi$ および $25 \text{ mm}\phi$ について, 飛跡検出器用フィルムとして Makrofol KG, $10 \mu\text{m}$ 厚を用いた核分裂片飛跡の放電計数値と核分裂片飛跡数との関係を Fig. 5 に示した。

これにより $10 \text{ mm}\phi$ の電極による飛跡の放電計数可能な上限は $2,200 \sim 3,300/\text{cm}^2$ と, $25 \text{ mm}\phi$ 電極に比べて約 $3 \sim 4$ 倍に計数範囲は拡大された。電極 $50 \text{ mm}\phi$ を加え, Table 1 に比較した結果, 放電計数法により生じた検出フィルム上の飛跡の貫通孔およびアルミニウム蒸発孔径は電極面積に比例して大きくなる。

放電に費されるエネルギーはほとんど電極間容量 ($\sim 100 \text{ pF}$) に蓄えられた電荷によることを示唆している。すなわち並列コンデンサーから電荷が同軸ケーブル

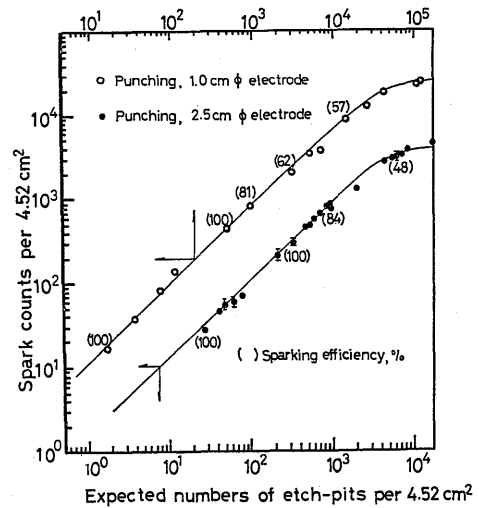


Fig. 5 Relation between spark counts and expected numbers of etch-pits. (Makrofol KG, $10 \mu\text{m}$ thick.)

Table 1 Spark counting characteristics using different size of positive electrode.

Diameter of positive electrode (mm)	Diameter of punched hole (μm)	Diameter of aluminum evaporated hole (μm)	Maximum detectable limit (n/cm^2)
10	5.3 ± 1.2	130 ± 9.6	$2200 \sim 3300$
25	9.0 ± 1.9	203 ± 6.1	$700 \sim 1000$
50	31.4 ± 6.2	352 ± 28.0	—

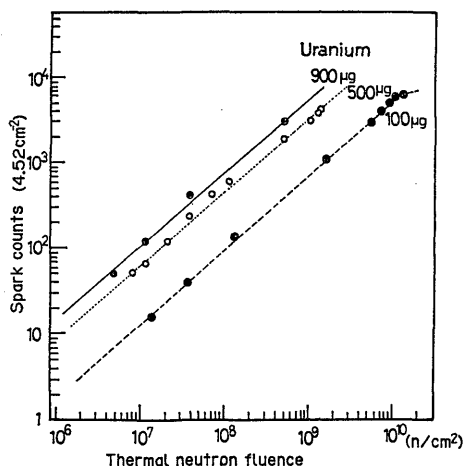


Fig. 6 Relation between spark counts and thermal neutron fluence. (Makrofol KG, 10 μ m thick.)

ルを通して運ばれてくる以前に放電は終了してしまうので並列コンデンサー容量を数桁変えても影響しない。この事実から電極は小さいほど電気容量が小さく、放電計数可能な上限が大きくなり、測定範囲が広がると思われる。核分裂性物質として天然ウランおよびトリウムを用いた場合、中性子フルエンスと飛跡の放電計数値との関係を Fig. 6, 7 に示した。これにより天然ウラン 199 μ g/cm² (900 μ gU) を検出器ユニットとした場合 $4 \times 10^4 \sim 10^9$ n/cm² の範囲の熱中性子フルエンス、トリウム 199 μ g/cm² を使用して $5 \times 10^6 \sim 4 \times 10^{10}$ n/cm² の速中性子フルエンスの測定が可能である (Table 2)。当所の原子炉内の中央ストリンガーのように速中性子の割合が熱中性子の約 1/10 の時には ²³⁸U の速中性子により生じる核分裂片飛跡数の

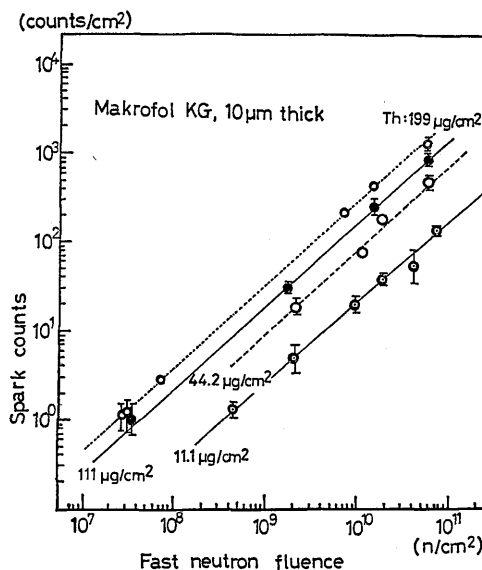


Fig. 7 Relation between spark counts and fast neutron fluence. (The parameter is the amount of thorium on the target disk)

影響は 2~3% にすぎないが中性子場のエネルギー分布において速中性子の割合が多い場合、熱中性子の測定には核分裂性物質として天然ウラン中の ²³⁵U を用いているが、天然ウラン中の ²³⁸U の速中性子線の照射によって生じるエッチピットの影響の補正を行ってから熱中性子フルエンスを計算した。

3.2 医療用ライナック照射室周辺の中性子束密度の測定

核分裂片飛跡の放電計数法によるライナック照射室内外における速中性子および熱中性子束密度分布を Table 3 および Fig. 8, 9 に示した。ライナックによる治療はその 90% が X 線によるもので、そのほとん

Table 2 Neutron flux monitoring by fission track spark counting method. (Detector film : Makrofol KG, 10 μ m thick)

Neutron	Target	Detectable fluence range (n/cm ²)	Sensitivity* (counts/n)
Thermal	Uranium (199 μ g/cm ²)	$4 \times 10^4 \sim 10^9$	1.7×10^{-6}
Fast	Thorium (199 μ g/cm ²)	$5 \times 10^6 \sim 4 \times 10^{10}$	3.8×10^{-8}

* Sensitivity = spark counts/neutron fluence

Table 3 Neutron flux distribution around LINAC irradiation system by fission track spark counting.

Monitoring point (No)	Fast neutron flux (n/cm ² ·sec)		Thermal neutron flux (n/cm ² ·sec)	
	Mean value	Range	Mean value	Range
1	1.3×10 ⁵	(1.0~ 1.5) ×10 ⁵	2.5×10 ⁴	(1.0~49) ×10 ³
2	10.0×10 ⁵	(3.0~17.6) ×10 ⁵	3.4×10 ⁴	(4.5~64) ×10 ³
3	8.2×10 ⁴	(0.5~22.8) ×10 ⁴	5.7×10 ³	(5.3~ 6.0) ×10 ³
4	1.2×10 ⁴	(0.5~43.5) ×10 ⁴	7.2×10 ³	(6.3~ 8.1) ×10 ³
5	1.4×10 ²	(~ 2.7) ×10 ²	5.5×10 ³	(3.9~ 8.6) ×10 ³
6	9.5×10	(9.0~10.0) ×10	4.0×10 ³	(2.3~ 5.6) ×10 ³
7	1.4×10 ²	(~ 2.7) ×10 ²	4.8×10 ³	(4.1~ 5.5) ×10 ³
8		n.d.	3.2×10 ³	(1.5~ 2.2) ×10 ³
9	0.9×10 ²	(~ 1.8) ×10 ³	4.1×10 ³	(3.1~ 5.1) ×10 ³
10		n.d.	3.6×10 ³	(2.5~ 4.3) ×10 ³
11		n.d.	1.5×10 ²	(1.2~ 2.0) ×10 ²
12		n.d.	1.2×10 ²	(0.7~ 1.8) ×10 ²
13		n.d.		n.d.
14		n.d.		n.d.
15		n.d.		n.d.

n.d. : non-detectable

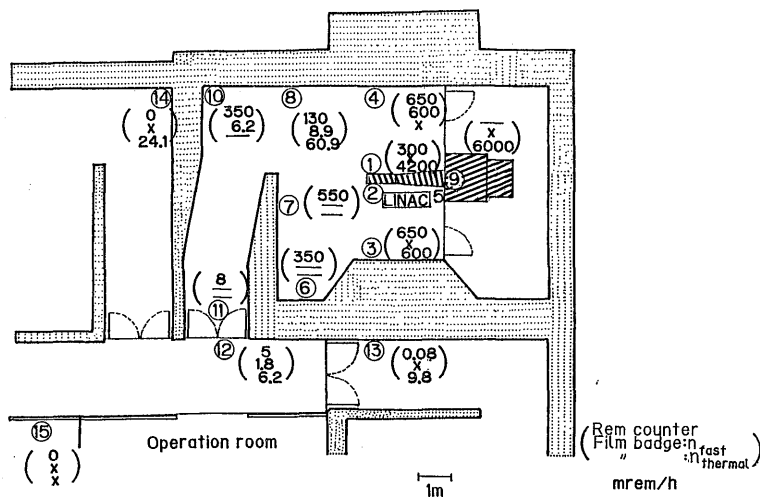


Fig. 8 Neutron flux distribution around LINAC irradiation room.

どは 1 m の位置で 300 rad/min (3 Gy/min) で下向きに照射している。中性子線の測定にはライナック運転時間 1 分より積算 30 時間まで、すなわち検出器ユニットの露出時間として最高 55 日間設置し、集積線量より平均中性子束密度を求めた。計 5 回測定を行ったが、その期間の治療による照射方法、条件などの違いによって変動するが、平均値で示した。照射室内にお

ける速中性子束密度の最高値は照射位置(2)でライナック装置よりビーム中心のベッド下の床面で 1.8×10^6 n/cm²·sec を示しており、検出限界以下まで分布している。

X線治療などにおいてはビーム中心であるため患者の治療条件により大きく、速中性子束密度は 10^4 桁位変動する。また熱中性子束密度はライナック周辺より

も照射室の側壁付近(5)~(12)では速中性子束密度より熱中性子束密度の寄与が上廻り全体の占める割合が大きくなる。また装置のヘッド周辺部においては、速中性子束密度は平均 $4.4 \times 10^4 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ に対して熱中性

子束密度は $1.2 \times 10^4 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ と、1/3 の熱中性子の寄与が見られ、ヘッド内の遮蔽物質により減速されたものが検出されていると推測される。X線治療時の患者を仮想したアクリル樹脂製ファントムを用い、飛跡検出用ユニットをセットし、照射は照射野 $30 \times 30 \text{ cm}$ 、1 m の位置で 300 rad/min (3 Gy/min) で1分あるいは10分間ヘッドより 30 cm の位置での速中性子束密度は $(6.1 \sim 19.5) \times 10^6 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{sec}$ で、照射野境界の位置(2)では1桁低下し、熱中性子束密度は速中性子束密度の 1/100~1/5 となり、ファントムの底部では熱中性子束密度の占める割合は高くなっている。照射室扉外側など速中性子束密度が検出限界以下のところでも 漏洩熱中性子として検出されている。障害防止法、告示別表第 5²⁰⁾ により計算すると 0.5 mrem/h となった。

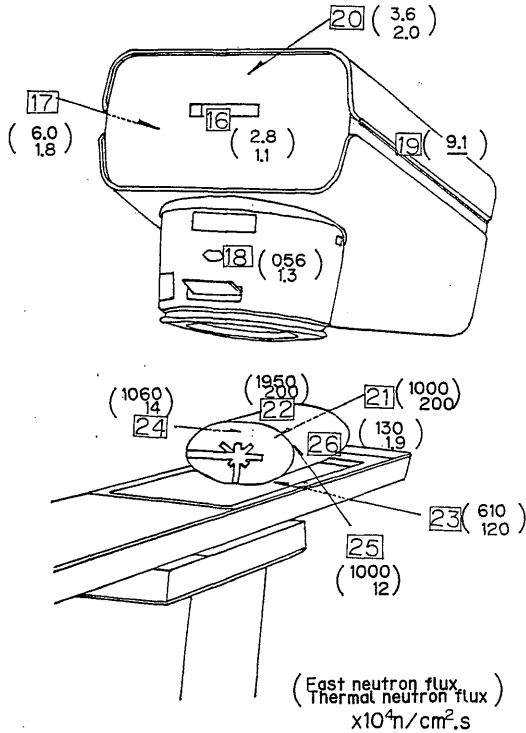


Fig. 9 Neutron flux distribution around LINAC irradiation system.

3.3 他の測定法による中性子線量測定

照射室内の中性子線量をレムカウンター (LFE co. NP-2) およびフィルムバッジ (日本保安用品協会) により測定した結果を Fig. 10 に示した。固体飛跡検出法と若干測定条件に差があるが、レムカウンターはモニターテレビを用いて読みとったので比較はむづかしいが、(3)(4)地点においてレムカウンターで測定した中性子線量当量率はフィルムバッジの結果と略一致している。X線による光核反応から中性子は発生するが、その中性子エネルギーはライナック装置に使用されているターゲットフィルターおよびコリメータなどの材質により変化する。当装置ではタングステンを使

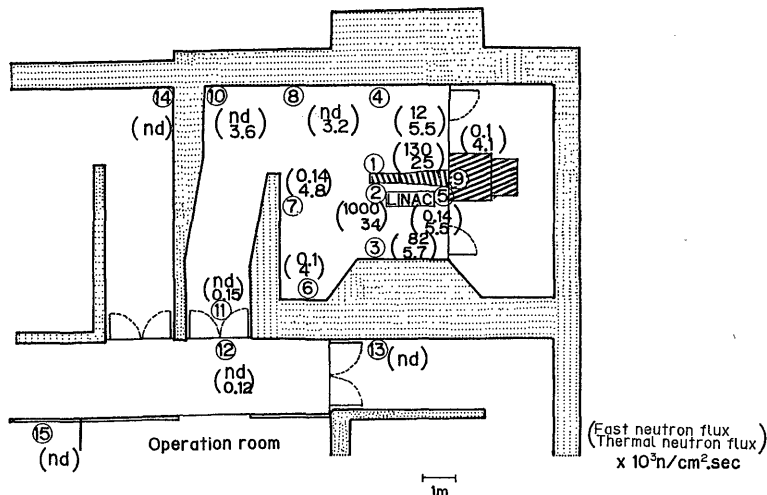


Fig. 10 Neutron monitoring using film badge and rem counter.

Table 4 Neutron monitoring using the spark counting method.

Neutron	Detector film	Target		Detectable fluence range (n/cm ²)	Sensitivity* (counts/n)
		Fissile material	Weight (μg/4.52cm ²)		
Thermal	Panlite (18 μm)	nat. uranium	100	2×10 ⁶ –4×10 ⁹	1.0×10 ⁻⁷
	Makrofol KG (10 μm)	nat. uranium	100	5×10 ⁵ – 10 ¹⁰	1.2×10 ⁻⁷
			500	8×10 ⁴ –2×10 ⁹	7.2×10 ⁻⁷
	Al ₂ O ₃ (1 μm)	nat. uranium	500	10 ⁸ – 10 ¹⁰	8.0×10 ⁻⁷
Fast	Makrofol KG (10 μm)	nat. thorium	500	9×10 ⁶ – 10 ¹¹	2.5×10 ⁻⁷

* Sensitivity=Spark counts/Neutron fluence

用した場合中性子エネルギーのしきい値は約 6 MeV と推定される。ライナックの周辺では速中性子線の寄与が大きく、迷路および照射室周辺部では熱中性子による寄与が大きくなる。レムカウンターによる中性子線量をもとに放電計数法により測定した中性子のエネルギーを推定すると(3)(4)の位置において 100 keV 以下の中速中性子と推定される。

4. ま と め

X線, 電子線 治療を目的とした 東芝製ライナック (LMR-15) 照射室周辺における 中性子束密度の測定において, ポリカーボネートフィルム飛跡検出器に生じた核分裂片飛跡の放電計数法による中性子モニタリング特性について Table 4 にまとめ, 利用の可能性を検討し, 実際に漏洩中性子束密度分布を測定した。

検出器として Makrofol KG, 10 μm 厚を用い, 核分裂性物質として熱および速中性子用に天然ウランおよびトリウムを, 500 μg/4.52 cm² を使用した時の測定可能なフルエンスの下限はそれぞれ, 8×10⁴ および 9×10⁶ n/cm² と速中性子は 2 桁高く, 感度はほぼ熱中性子の 1/30 であった。照射室入口の放電計数法による測定で熱 および 速中性子束密度は 120 n/cm² ·sec および検出限界以下であり, 線量を推定すると 0.50 mrem/h (5.0×10⁻⁶ Sv) になった。

参 考 文 献

- 1) 中村尚司：フィルムバジニュース, No. 99, 1～9 (1981).
- 2) 小野喜太平, 林 政雄, 伊藤 武, 和久井 聖：

- 日本放射線技術学会要旨, 106p (1979).
- 3) 阿部勝彦, 山口成厚：日本放射線技術学会要旨, 107p (1979).
- 4) 山口 恵, 五十嵐公彦, 渡辺良晴, 山口成厚：日本放射線技術学会要旨, 108p (1979).
- 5) 平田良昭, 山口成厚, 染川和毅：日本放射線技術学会要旨, 109p (1979).
- 6) 出井 充, 中根義典, 菊池 透：日本放射線技術学会要旨, 128～129 (1980).
- 7) 山口成厚, 花田博之, 五十嵐公彦, 入江五朗：日本医学放射線学会物理部会.
- 8) 尾内能夫：医用電子加速器周辺の中性子, 理研シンポジウム講演集「環境中中性子の諸問題」, 106p (1980).
- 9) 伊藤 彬：医療用加速器の漏洩中中性子の測定, フィルムバジニュース, No. 98 1p (1981).
- 10) 長町 信治, 石松健二, 西村正俊, 森川賀根雄：RADIOISOTOPES, **34**, 262～265 (1985).
- 11) 関口 晃編：微弱線量中性子測定の標準化に関する実験的研究, 昭和54年度科学研究費補助金研究成果報告書 (1981).
- 12) 中沢正治：中性子測定における標準化の現状：RADIOISOTOPES, **34**, 37～45 (1985).
- 13) 古賀妙子, 森嶋彌重, 丹羽健夫, 河合 廣：保健物理, **20**, 2, 131～137 (1985).
- 14) 森嶋彌重, 古賀妙子, 丹羽健夫, 本田嘉秀, 河合 廣, 他 2：保健物理, **10**, 141～146 (1975).
- 15) 古賀妙子, 森嶋彌重, 丹羽健夫, 河合 廣, 西脇安：保健物理, **14**, 81～88 (1979).
- 16) 丹羽健夫, 古賀妙子, 森嶋彌重, 河合 廣, 西脇安：保健物理, **14**, 89～93 (1979).
- 17) 芝 亀吉：物理定数表, 165～166 (1947).

- 18) 古賀妙子, 森嶋彌重, 丹羽健夫, 河合 廣, 他 6
名: 近畿大学原子力研究所年報, **16**, 24 (1979).
- 19) 森嶋彌重, 古賀妙子, 丹羽健夫, 河合 廣: 放射
線, **13** (2), 4~9 (1987)
- 20) 科学技術庁: 放射線を放出する同位元素の数量等
を定める件, 科学技術庁告示22号 別表第5, 141
(1981), 日本アイソトープ協会, 東京.