

C - 4 EVALUATION OF MIXED RADIATION FIELD OF X-RAYS AND NEUTRONS  
BY ACTIVATION METHOD

J. Ohkuma, T. Nakamura\*, K. Oda, T. Yamamoto and M. Kawanishi

The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

\* The Institute for Nuclear Study, Tokyo University

ABSTRACT

From a stand point of view of radiation protection at the electron linac facility, the energy spectrum and the intensity of bremsstrahlung and neutron generated by it in maximum power output must be measured at first. By the activation method with C, Al, Mn and Au, the neutron energy spectrum and the ratio of flux of bremsstrahlung to that of neutron from a thick W-target were roughly estimated. The air and dust activated in the target room are also measured.

はじめに

ライナック施設における放射線安全管理上の立場から、微量線量測定の高精度化が要望されるが、阪大35 MeVライナック設置にあたっては、遮蔽、誘導放射能有害ガスなどに対する評価と安全対策を十分検討した後、建設、試運転に入った。その後の日常運転のデータから上記放射線安全性の再検討を行った。ライナックの出力エネルギーが光核反応の巨大共鳴領域を含む以上、制動放射X線と中性子に対する遮蔽と、夫々による放射化を考慮する必要がある。これらに関するデータは豊富にあり<sup>1, 2)</sup>、ライナックの最大出力運転時に対する放射線安全管理上の概算は容易である。しかし多種多様な照射実験時に関する正確で信頼性のあるデータを得ようとするとき、幾つかの問題が生じてくる。

遮蔽については、制動放射X線、中性子線、環境への漏洩を完全に防ぐため、35 MeVライナック本体室照射実験室等は地下に建設されている。しかし各種配線用あるいは換気用ダクト、出入用迷路については、応計測されているが、運転時に突測を必要とする箇所である。したがって、放射線遮蔽の安全性評価の出発点となる発生源の制動X線、中性子の強度およびスペクトルの突測が最も必要かつ基本的である。さらに、本ライナックの特長とする短パルス高線量率出力のX線と中性子の混成場に対する一般計測器の応答の確度は不明である。この大線量率混成場の照射線量、吸収線量などは電離箱を用いてその生成電荷量の絶対測定法<sup>3)</sup>によりそれぞれ評価できるが、X線、中性子の完全分離測定を現在行っている。そこで放射化法を用いて中性子、X線の分離評価を行なった。そして照射室内のダスト、空気中の放射化を検討し、その排気系とRIモニタリングシステムのチェックを行なった。

2. 放射化検出器法の基礎

種々の放射化検出器を用いて熱中性子から高速中性子まで中性子スペクトルを求め方法は広く普及し規格化されようとしている。<sup>4)</sup> さらに中材が報告しているように<sup>5)</sup> X線と中性子線との混成場での測定には、Table 1, に示すような反応を含めて100種以上の反応があり、これらの選択組合せによりターゲットからのX線、中性子の発生率だけでなく、本体室および照射室内の散乱線についても解析出来る。これら放射化された試料からのγ線をGe半導体検出器で測定する場合の計数率は次式であらえらる。

$$C_i(t) = \frac{\epsilon(\lambda_i) \tau_{ji} N_{0j}}{\lambda_j T_c} (1 - e^{-\lambda_j T_f}) e^{-\lambda_j T_w} (1 - e^{-\lambda_j T_c}) \int_0^\infty \sigma_{jk}(E) \phi_k(E) dE \quad (1)$$

ここで

$\phi_k(E) dE$ : エネルギーが  $E, E+dE$  の間にある X 線又は中性子束

$\sigma_{jk}(E)$ :  $j$  反応をおこす中性子又は X 線の断面積  
エネルギー依存反応断面積

$N_{0j}$ :  $j$  反応をおこす核種の数

$\lambda_j$ :  $j$  反応生成核の崩壊係数

$\tau_{ji}$ : 反応生成核からの  $\lambda_i$  ガンマ線放出効率

$\epsilon(\lambda_i)$ :  $\lambda_i$  ガンマ線検出効率

$T_f$ : 照射時間

$T_w$ : 照射後から測定開始までの経過時間

$T_c$ : 計測時間

したがって放射化検出器として望ましい条件を示す。

- (1) 反応断面積が大きく、かつその数値の信頼度が高いこと。
- (2) 放射化される核種存在比が大きいこと。
- (3) 半減期が待ち時間 ( $T_w$ ) にくらべて長く、かつ数日を越えないこと。
- (4) 崩壊形式が明らかで、ガンマ線放出分岐比が大きいこと。
- (5) Table 1 の中に示される (n, n'), (n, 2n) 反応のような競合を含めないこと。
- (6) 近接したエネルギーの線放出の少ないこと。
- (7) 試料調整が容易であること。

これらの条件を考慮すると X 線と中性子との混成場を利用しうる反応核種は数少ないものとなる。今回の測定には単一同位体核種のうちから  $^{12}C, ^{27}Al, ^{56}Mn, ^{197}Au$  を用いた。放射線源ターゲットにはタンガステンを用い、X 線束、中性子束は夫々 Fig. 1, Fig. 2 を参照した。

中性子による放射化断面積は ENDF/B-IV を用い、

unfolding により中性子束を求め Fig. 2 と比較した。

一方光核反応断面積は Fulton の文献を参照した。

(Rev. Mod. Phys. 1973)

### 3. ライナック混成場における放射化と解析

ライナックは定常モード 25 MeV, 1.5  $\mu$ sec, 210 mA, 30pps 運転で、約 10 mm 中ビームを 25 mm 中、6 mm 厚の空冷 W-target に照射して X 線と中性子の混成場をつくらせた。放射化検出器用試料は角度分布も同時に求めた。ビームに対し前方 0°, 10°, 20°, 45°, 70° の位置で 距離 30 cm の円周上に並べた。

Table 1 Competing photonuclear and neutron reactions producing the same isotopes

Produced nucleus	Target nucleus				
	$\begin{smallmatrix} m-2 \\ Z^A \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} m-1 \\ Z^A \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} m \\ Z^A \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} m+1 \\ Z^A \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} m+2 \\ Z^A \end{smallmatrix}$
$\begin{smallmatrix} m-1 \\ Z^A \end{smallmatrix}$		( $\gamma, \gamma'$ ) — ( $\gamma, n$ ) — ( $\gamma, 2n$ ) — ( $\gamma, 3n$ ) (n, $\gamma$ ) — (n, n') — (n, 2n) — (n, 3n)			
$\begin{smallmatrix} m-1 \\ Z-1^A \end{smallmatrix}$			( $\gamma, p$ ) — ( $\gamma, np$ ) — ( $\gamma, t$ ) (n, p) — (n, np) — (n, nd) — (n, nt)		
$\begin{smallmatrix} m-4 \\ Z-2^A \end{smallmatrix}$	( $\gamma, 2p$ ) — ( $\gamma, ^3He$ ) — ( $\gamma, \alpha$ ) (n, $^3He$ ) — (n, $\alpha$ ) — (n, n $\alpha$ )				

m: mass number; Z: atomic number

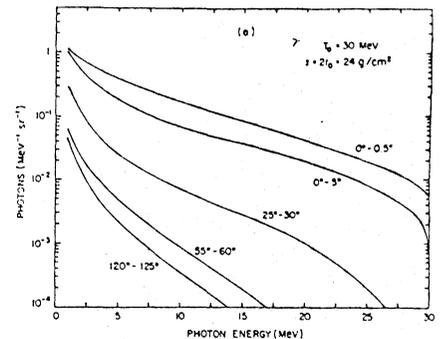


Fig. 1. Spectra of brems. photon. By M.J. Berger

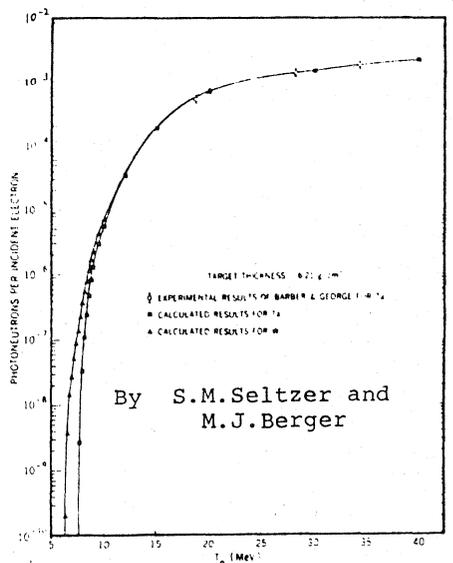


FIG. 2. Photon-neutron yields from tantalum and tungsten as functions of the incident electron energy.

[<sup>12</sup>C] 炭素の場合の生成放射能は <sup>12</sup>C(γ,n)<sup>11</sup>C のみで陽電子放出には 0.511 MeV のみであるから解析しやすい。反応しきい値は 18.6 MeV と高く、高エネルギー X 線束の概算が出来る。

[<sup>27</sup>Al] Al は Fig. 3 に示すように (γ,n), (n,γ), (n,p), (n,α) 反応を同時に検出することが出来る。しかも放出 γ 線エネルギーが互に離れているので解析しやすい。但し光核反応による <sup>26</sup>Al の半減期は 6.4 sec と短いので高速気送装置を利用した測定系が必要である。中性子反応については、Fig. 4 にみられるように断面積がエネルギーによって大きく変るので、低速中性子、3 MeV から 6 MeV と 6 MeV 以上の高速中性子の 3 群にわけて解析が可能である。放出 γ-spectrum の一例を Fig. 5 に示す。

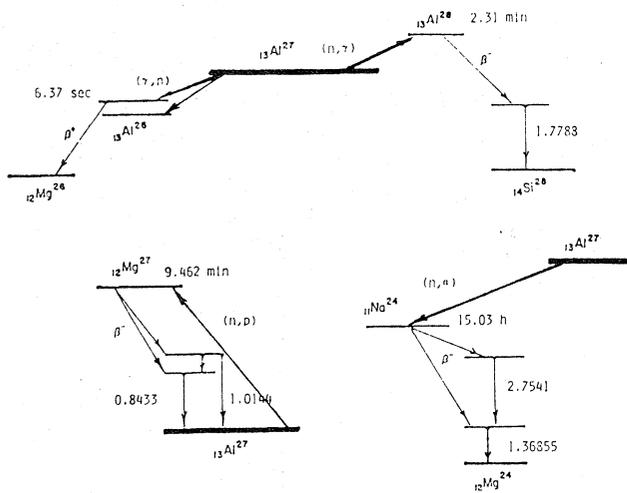


Fig.3. Reaction and decay scheme.

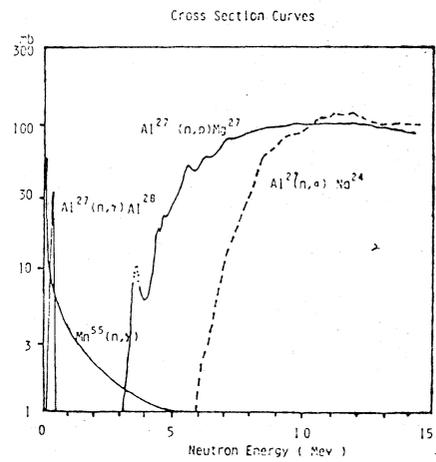


Fig.4. Neutron cross section.

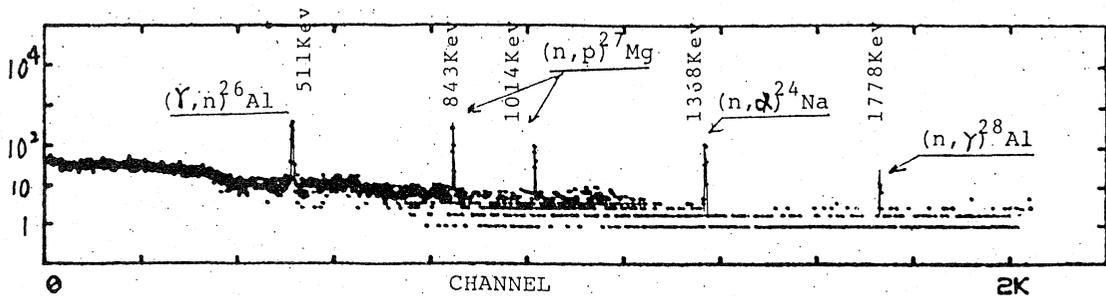


Fig.5. Gamma-spectrum of activated Al.

[<sup>55</sup>Mn] マンガンはアルミニウムに比べ光核反応断面積が 5 倍程大きく、X 線束分布を精度よく求められるので角分布解析を行った。<sup>55</sup>Mn(γ,n)<sup>54</sup>Mn 反応で得られる放出 γ 線は 835 KeV で Mn(n,γ)<sup>56</sup>Mn の <sup>56</sup>Mn から 847 KeV と近接するから <sup>54</sup>Mn の半減期が 3/2.2 d. と大きいので <sup>56</sup>Mn の崩壊減衰を待つて計測することが出来る。

[ $^{197}\text{Au}$ ] 熱中性子吸収断面積が  $98.5 \text{ barn}$  と大きい。又、Au箔をポリエチレン等減速材の中に入れて高速中性子群を熱化して効率よく検出できる。

$^{198}\text{Au}$  からの  $\beta, \gamma$  を  $4\pi \beta\text{-}\gamma$  カウンタを用い同時計数することにより、次式から絶対崩壊率  $N_0$  が求められる。

$$N_0 = \xi \frac{N_\beta \cdot N_\gamma}{N_{\beta\gamma}}$$

$N_\beta$ :  $\beta$ -counter 計数率  
 $N_\gamma$ :  $\gamma$ -counter 計数率  
 $N_{\beta\gamma}$ :  $\beta\text{-}\gamma$  同時計数率

$\xi$ : 箔の厚さ,  $\beta\gamma$  分岐比, 内部転換係数などを含めた補正係数。

この絶対崩壊率を (1) 式に併用して絶対熱中性子束が得られる。

しかし、制動X線がある場合、光核反応が重なり  $^{196}\text{Au}$  からの多数と線とまざって解析精度が悪くなる。そこでターゲット入射ビーム方向に対し、後方角度で制動X線が少なくなる位置に減速材と共に Au 箔を置くことにより絶対発生率を求めた。

以上の Al, Mn, Au の測定値から中性子発生率を Fig. 7 にまとめたが文献よりは小さい値となった。

#### 4. ライナック室における誘導放射能

ライナックからの出力ビームだけでなくトランスポート系での散乱線、周辺の Fe, Cu, Al, Ni, コンクリートなどの構造物や空気が放射化される。したがって照射室内の放射化ダスト、残留放射能に対する安全性を常にモニタする必要がある。阪大ライナック建屋では加速器室、照射室などの排気系には排気モニタ、ダストモニタが取り付けられ常時測定を行っている。空気の放射化はビーム出力に比例するから定常モード連続運転では特に注意が必要である。

又照射室内で半減期がながく集積効果を考慮する必要があるのはコンクリート中の  $^{23}\text{Na}(\gamma, n)^{22}\text{Na}$ , 銅製器中の  $^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Co}$  等で、散乱線による放射化を出来るだけ少なくすることが大切で、そのため照射室では (Al+Fe) 製のビームストツパの使用を義務づけている。

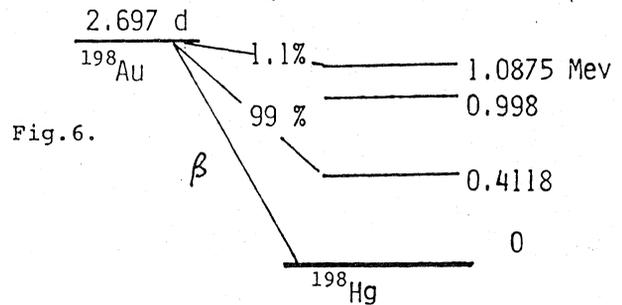


Fig. 6.

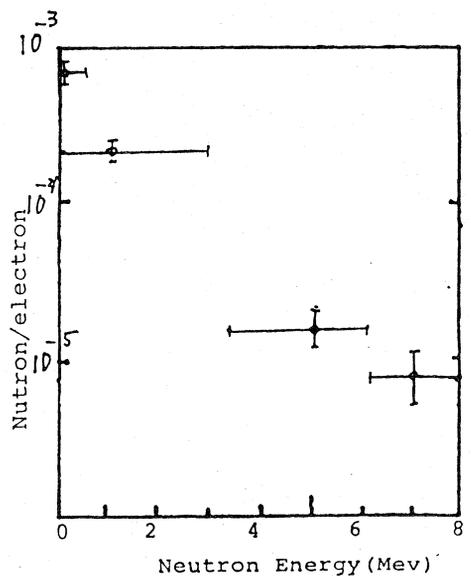


Fig. 7. Neutron yield

- 1) W.P.Swanson, Radiological Safety Aspects of the Operation of Electron Linear Accelerators (IAEA, Vienna, 1975).
- 2) A. Brynjolfsson, Bremsstrahlung production and shielding of static and linear electron accelerators below 50 Mev. (Inter.J. App. Rad. and Isotop 22, 29, 1971).
- 3) T. Yamamoto, K. Oda, H. Kobayashi and M. Kawanishi, Nucl. Instr. Methods, 172, 447 (1980).
- 4) ANSI/ASTM-E
- 5) 中村尚司, 平山要夫, 日本原子力学会誌, 14(12)18, (1972) 他