The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	ベータートロンのX線スペクトル
Author(s)	稲田, 哲雄; 佐方, 周防; 松沢, 秀夫
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1967, 27(6), p. 671-676
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/15673
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

ベータートロンのX線スペクトル

放射線医学総合研究所　物理研究部
稲田　哲雄，佐方　周防，松沢　秀夫

（昭和42年1月19日受付）

Experimental Determination of Energy Spectrum of Megavoltage X-Rays

by

Tetsuo Inada, Suoh Sakata and Hideo Matsuzawa
Physics Division, National Institute of Radiological Science

A scintillation spectrometer consisting of a 5 inch (diameter) by 4 inch (length) NaI (T1) crystal, two photomultipliers and the rest has been prepared for studying the X-ray spectra from a betatron.

Scince thce response function of the detector is needed to relate the measured pulse height distributions to the true energy spectrum, measurements of the pulse height distributions have been made with this spectrometer for monoenergetic gamma-rays with known energies from 1.28 to 20.3 MeV. Thus, the response function (matrix) and its inverse matrix have been calculated for photon energies from 1.5 to 30.0 MeV.

X-rays from the betatron have been measured with this spectrometer, being corrected by means of the inverse matrix method. The energy spectra are presented for 15 and 25 MV X-ray beams with and without absorbers (water and aluminum).

1. 緒言

一般に，制動輻射X線の線質を規定する最も基本的な量はそのエネルギー分布（X線スペクトル）であり，これは被照射体中での二次電子分布や吸収線量などを計算するのに役立つ．

われわれは，直径5インチ，長さ4インチのNaI (Tl) シンチレーターを用いてベータートロンから発生するX線のスペクトル測定を試みた．しかし，高エネルギーX線では光子のエネルギー分布が広範に亘るので，シンチレーターの応答もこのエネルギー域で著るしく変化する．したがって，真のX線スペクトルを得るために各光子エネルギーに対する検出系の応答（レスポンス関数）を知る必要がある[1]．本研究では，検出系のレスポンス関数を求めた後，ベータートロンから発生するX線のスペクトルおよび水・アルミニウムファントム通過後のX線スペクトルなどを測定した．

2. レスポンス関数

真の光子エネルギー分布を N (Eγ) とすれば，検出器よりえられるパルス波高分布 P(k) は変換関数 R(Eγ, k)（これを使用する検出器のレスポンス関数という）を用いて次式で与えられる．

$$P(k)=\int_0^{E\gamma} R(E\gamma, k)N(E\gamma)d\,E\gamma \qquad (1)$$

k はパルス波高で，ある Eγ に対応する最高波高 k から0まで分布する．(1)式をマトリックス表示に書き改めれば

$$Pj=\sum_{i=1}^{i\,max} Rij\ Ni \qquad (2)$$

となり，真のスペクトル Ni を求めるためには(2)式に Rij の逆マトリックスを乗ずればよい．

Table 1. Mono-energetic γ-ray sources

γ-ray source	Target	Ep (keV)	Eγ (MeV)	Impurity
Na^{22}			1.28	0.51 MeV
Tl^{208}			2.62	1.94, 0.86 other
Be^{9} (α, nγ) C^{12}	(RaD-Be)		4.43	Brem., other
N^{15} (p, $\alpha\gamma$) C^{12}	KNO_3	1000	4.43	
F^{19} (p, $\alpha\gamma$) O^{16}	CaF_2	800	6.14	6.92, 7.12 MeV
Be^{9} (p, γ) B^{10}	Be	991	7.48	
B^{11} (p, γ) C^{12}	B	680	12.14	16.57, 4.43 MeV
Li^{7} (p, γ) Be^{8}	LiF	441	17.64	14.74, 2.90 MeV
T (p, γ) He^{4}	Ti-T	950	20.3	

すなわち，

$$Ni=\sum_{j=1}^{j\,max}[Rij]^{-1}\,Pj \qquad (3)$$

われわれの検出系について，Table I に示すような単色のガンマ線源を用いて種々の光子エネルギーに対するシンチレーションの応答分布（レスポンス）を求めた．これより内挿および外挿を行なつて，1.5 MeV～30 MeV のエネルギー範囲に亘り 1.5 MeV 間隔のレスポンスマトリックスを作つた．更にＩＢＭ7044によりその逆マトリックスを計算し（Table II）以下の実験に用いた．

3. X線スペクトルの測定

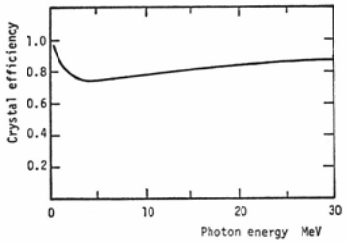
3.1 実験方法

X線源は東芝製ＢＭＨ—31型ベータトロンを使用し，そのX線ターゲットは厚さ 0.6㎜の白金で 0.21radiation length に相当する．検出器は直径５インチ，長さ４インチの両面窓型 NaI (Tl) シンチレーターで，発光は直径５インチの光電子増倍管（ＥＭＩ9579 b）によつて測定された．シンチレーター内部に広く分布する発光を均一に測定するために，２本の光電子増倍管でシンチレーターを挟んだ．この検出器に入射するX線の検出される効率εは次式で近似される．

$$\varepsilon(E\gamma)=1\text{-}\exp[-\mu(E\gamma)L] \qquad (4)$$

μ(Er) は NaI の線吸収係数，Lはシンチレーターのx線束方向の長さで今の場合４インチである．光子エネルギー Eγに対するこの検出効率を Fig. 1に示す．検出器は厚さ20㎝の鉛製円筒遮蔽容器内に格納され，そのシンチレーター前面はX線ターゲットより10m の位置におかれた．測定系全体の配置を Fig. 2に示す．目的とするX線発生時以外でのバックグラウンドを除くため，ベータトロンの加速電子流を入射させる信号“インジェクションパルス”を取りだし，これを基準にして任意の時間後，任意の巾に検出された信号のみ計数するようにした．

Fig. 1, Detection efficiency of 5 inch diameter ×4 inch length NaI (Tl) scintillation crystal.



X線束の軸に対してコリメーター（Fig. 2の９および11）を平行に設定するには次のような方法に拠つた．充分広い平滑な面をもつ銅板およびルサイト板を 0.1㎜厚のケント紙を挟んで交互に積重ね格子を作り，これを通過するX線の影像を撮影した．Fig. 3にコリメーター11を通過した位置での１例を示す．最も鮮明な通過像が得られた細隙位置（図中矢印）がX線束に平行である．

3.2 結果

ベータトロンからのX線主ビームの発生はパルス状に数マイクロ秒の間に集中するのでX線の光子密度が高すぎる．したがつて，NaI 中の発光信号が重畳し主ビームのスペクトル測定は実際上極めて困難となる．われわれの実験では加速開始時（injection time）から 1.8ミリ秒および 3.2

Table II. Inverse response function matrix of the 5″×4″ NaI (Tl) crystal of two windows. E represents the center of the photon interval (MeV), E′ the energy corresponding to the center of the pulse-height interval (MeV). To yield the matrix elements the numbers in the table should be multiplied by factor 10^{-3}

E E,	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0	10.5	12.0	13.5	15.0	16.5	18.0	19.5	21.0	22.5	24.0	25.5	27.0	28.5	30.0
1.5	1770	−819	15	−103	−24	−43	−33	−23	−8	−14	−3	−9	−8	−11	−3	−6	2	−7	−9	0
3.0		2123	−919	19	−129	−28	−54	−36	−21	−23	−5	−10	1	−20	−7	2	−29	23	−31	14
4.5			2364	−1067	66	−140	−55	−56	−47	−23	−3	−8	−16	−16	12	−34	13	−28	16	−24
6.0				2551	−1290	137	−158	−56	−68	−42	−19	−11	8	−23	−20	−5	−1	−13	−7	0
7.5					2752	−1544	218	−196	−43	−82	−26	−14	2	−1	−33	11	−15	11	−59	74
9.0					−8	2970	−1711	277	−226	−63	−73	−8	12	−20	−2	−53	48	−78	112	−160
10.5						−28	3129	−1840	266	−212	−72	−36	11	−22	−28	36	−54	45	−113	119
12.0							−31	3271	−1965	258	−255	8	15	−63	30	−59	48	−83	84	−96
13.5							1	−67	3467	−2105	292	−339	134	−70	−24	−7	−9	21	−78	68
15.0								2	−125	3696	−2336	364	−248	127	−31	−91	67	−101	192	−296
16.5									6	−171	3964	−2731	394	−106	118	−107	−43	36	−72	78
18.0										13	−301	4425	−4042	1367	−523	695	−886	901	−1196	1357
19.5										−1	33	−489	5251	−5274	2465	−1676	2108	−2848	3825	−4331
21.0											−2	33	−355	5556	−6903	5029	−4787	6437	−9430	10568
22.5												−2	19	−301	6387	−10322	10936	−13367	19608	−22437
24.0													−1	15	−328	7867	−14524	18502	−26262	30276
25.5															8	−198	8763	−18358	26979	−30513
27.0																13	−595	10944	−24334	28453
28.5																−1	57	−1039	12864	−21951
30.0																	−5	83	−1029	9756

Fig. 2, Experimental geometry for β-tron X-ray measurement using NaI scintillation detector and the block diagram of the following electronics. (1) X-ray target, (2) β-tron donut, (3) flattening filter, (4) lead cover of β-tron, (5) adjustable collimator to determine the field size, (6) stray electron absorber, (7) transmission chamber, (8) bulk phantom of Al and water, (9) 1 cm dia. lead collimator, (10) cylinder phantom of Al and water, (11) 20 cm lead shield, (12) 5 in. dia. × 4 in. NaI (Tl) scintillation crystal, (13) EMI photo-tubes 9579 b.

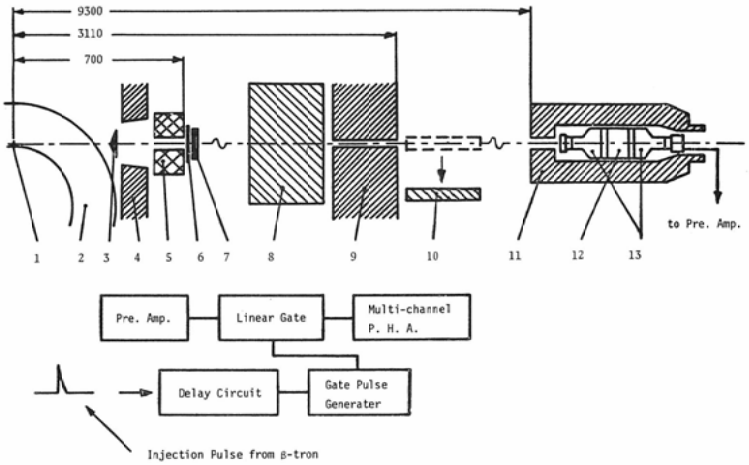


Fig. 3, Prarllel X-ray beam position indication transmitted through copper and lucitepile.

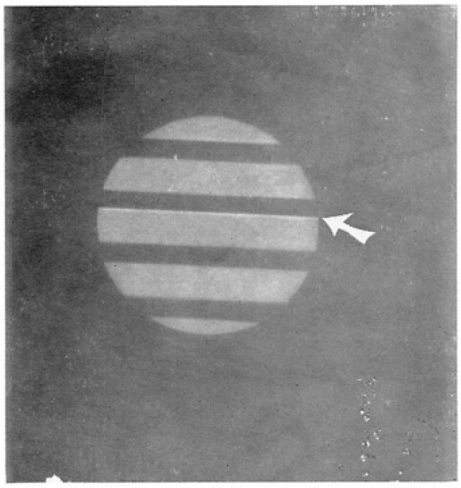
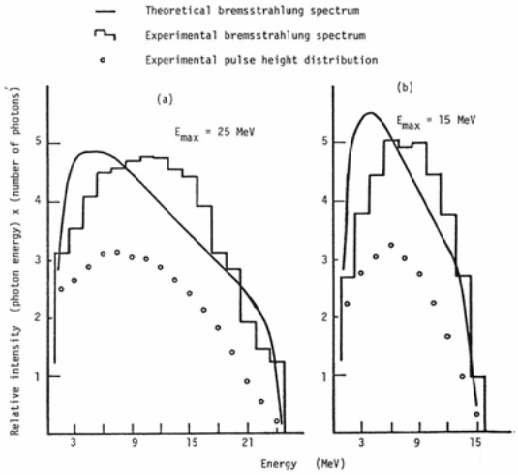


Fig. 4, Primay energy intensity spectra for (a) 25 MV and (b) 15 MV X-ray.

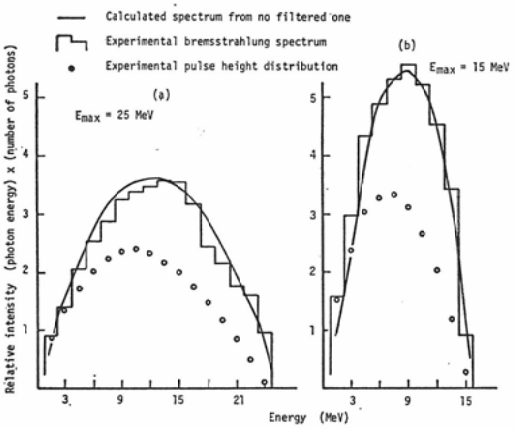


ミリ秒に，主ビーム発生時の約1/1000以下の強度でX線の発生が観測されこれを測定した．（この現象（self contraction）は以前から諸処のベータートロンについて知られている[2]．）電子の加速開始時からX線発生までの時間は1.8ミリ秒，3.2ミリ秒であるから，X線はそれぞれ15MVおよび25MVX線である．Fig. 4の(a)および(b)にこれらX線の波高分布の測定値を○印で示す．同図のヒストグラムはこの測定値に Table II の逆マトリックスを用いて(3)式から得ら

れた真のスペクトルである．このベータートロンではX線出力を増加させるために厚いX線ターゲットが用いられているので制動輻射の計算[3]が複雑である．ここでは計算を省いたが，比較のために非常に薄いターゲットについて計算されたHansen, Fultz[4]の結果を曲線で示す．

次に15MVおよび25MVX線の主ビームが，アルミニウムおよび水を通過した場合のスペクトルを測定した．アルミニウムは直径5cm，長さ26cmの円柱，水は直径5cm，長さ31cmの円柱である．これをFig. 2の10に破線で示す位置においた．Fig. 5，6に結果を示す．図中の○印は測定された波高分布，ヒストグラムは測定値に逆マトリックスの補正を施した真のスペクトルである．また曲線は，吸収体のない場合のスペクトル（Fig. 4のヒストグラム）に上記物質による減弱（$e^{-\mu x}$）を考慮して計算したものである．測定から得られた結果（Fig. 5，6のヒストグラム）がこの計算値と良く一致することは，この測定条件では吸収体中でX線の多重散乱が無視できることを示している．

Fig. 5, Energy intensity spectra transmitted through 26cm alminum cylinder. (a) 25 MV X-rays, (b) 15 MV X-rays.



また，大きなフアントムをFig. 2の8に置いた場合，コリメーター9を通過するX線のスペクトルを測定した．フアントムは縦，横それぞれ25cm，厚さ31cmの水槽，および縦，横それぞれ50cm，厚さ26cmのアルミニウムブロックである．フアントム表面での照射野は14.3cm×12cmである．15MVおよび25MVX線について得られた結果をFig. 7，8に示す．○印は測定値，ヒストグラムは逆マトリックスによる補正を施こした真のスペクトルである．また曲線はFig. 5，6のそれと同じもので，測定値から得られたヒストグラムがこれと良く一致していることは，入射線方向への散乱線の寄与がこの実験条件でも無視されることを示す．他方，入射X線に対し45°および90°方向で散乱線のスペクトル測定を試みたが，1.5 MeV

Fig. 6, Energy intensity spectra transmitted through 31cm water cylinder. (a) 25 MV X-rays, (b) 12 MV X-rays.

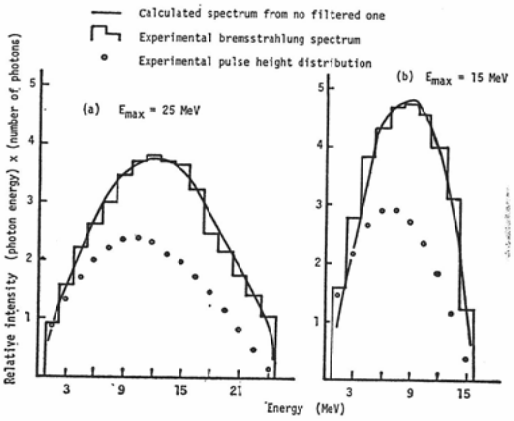


Fig. 7, Energy intensity spectra transmitted through bulk aluminum phantom. (a) 25 MV X-rays, (b) 15 MV X-rays.

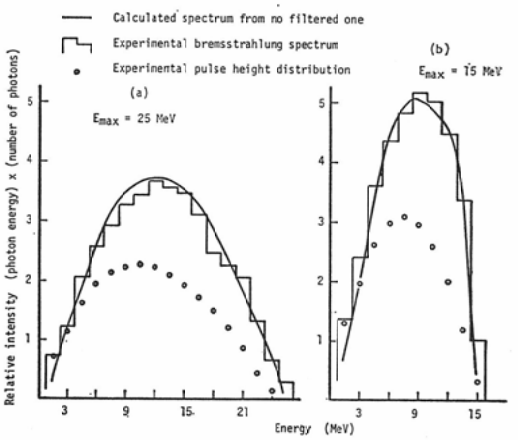
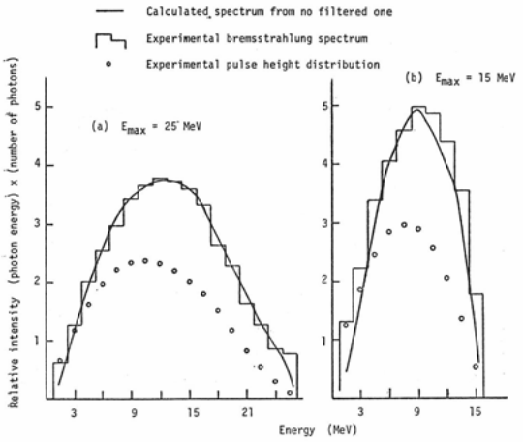


Fig. 8, Energy intensity spectra transmitted through bulk water phantom. (a) 25 MV X-rays, (b) 15 MV X-rays.



以上のエネルギーを持つ光子は殆んど観測されなかつた．

4. 考按

(1) X線の小角散乱については次の如く考えられる．光子 $\hbar\nu$ ($\gamma\hbar\nu/mc^2$) が小さい角 θ に散乱される場合，散乱後のエネルギー γ' は

$$\frac{1}{\gamma'}=\frac{1}{\gamma}+\frac{1}{2}\theta^2$$

で与えられる[5]．Fig. 2 のコリメーター9から検出器直前のコリメーター11を見る角は 0.003ラジアンで，この角度以内の小角散乱による光子のエネルギー変化は0.01%以下である．また，コリメーター11の立体角 1×10^{-4}ステラジアン中にフアントムより生じる散乱線量の計算値は，フアントムを通過する線量に較べ0.01%以下になり，結局，前方方向の小角散乱が透過スペクトルに与える影響は無視できる．(2) Fig. 5～8に示すように，実線で表わされる透過後スペクトルの半計算値とヒストグラムで表わされる測定スペクトルが良く一致していることは，用いた検出系が高エネルギー連続X線のスペクトル測定に適合していることを示す．これは亦，低原子番号の吸収体を透過したX線スペクトルを測定して線吸収係数の補正を施こせば，入射X線のスペクトルが求められることを示唆する．ただし，20MeV以上にみられる大きな共鳴反応[6]には注意すべきである．また高原子番号の吸収体では2次電子の制動輻射，光核反応からの光子の発生の推定が複雑であろう．

5. 結論

直径5インチ，長さ4インチの沃化ナトリウム結晶を主体とする検出器を用いて，ベータートロンから発生する高エネルギーX線のスペクトルを測定した．この検出器で得られる波高分布から真のX線エネルギー分布を知るためには検出系のレスポンス関数が必要であるので，まず1.28 MeVないし20.3MeV の既知エネルギー単色ガンマー線についてその波高分布を測定し，マトリックス表示のレスポンス関数とその逆マトリックスを計算した．

この検出器でベータートロンからのX線の波高分布を測定し，前記の逆マトリックスを用いて補正した．15MVおよび25MVX線について，吸収体のない場合ならびに水（31cm），アルミニウム（26cm）フアントムを通過した場合のエネルギースペクトルが求められた．

文　献

1) R.S. Foote and H.W. Koch : Rev. Sci. Instr. 25, (1954), 746.
2) 例えば鳥山，服部，金森，佐々江：日本物理学会予稿集，(65), 3, 110.
3) J.W. Motz, W. Miller and H.O. Wyckoff: Phys. Rev. 89, (1955), 968.
4) N.E. Hansen and S.C. Fultz : UCRL (1960).
5) W. Heitler : The quantum theory of radiation, 3rd. ed. 366.
6) J.M. Wyckoff : Proc. of the total absorption Gamma ray spectrometer symposium, TID-7954, 13, Gatlinburg, Tenn. May, 1960,