



Title	高エネルギーX線発生装置(10-30MV)の遮蔽について
Author(s)	野田, 博治; 白貝, 彰宏
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1970, 29(11), p. 1381-1388
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/15915
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

高エネルギー X 線発生装置 (10-30 MV) の遮蔽について

放射線医学総合研究所物理研究部

野田 博治*, 白 貝 彰 宏

(昭和44年6月5日受付)

Shielding of High Energy (10-30 MeV) Accelerator

by

Hiroji Noda and Akihiro Shiragai

Division of Physics, National Institute of Radiological Sciences, Chiba-Shi, Japan

Attenuation of 10-30 MV primary X-rays from the betatron in materials (Al, Fe, Pb) was measured for narrow and broad beam geometries. Energy of leakage radiation from the betatron was decided by the attenuation measurements using aluminum and iron. These results showed that the attenuation curves of primary X-rays in materials and the tenth-value thicknesses were different about 10% from other reports and in Pb about 20%. The energy of leakage radiation from the betatron operated at 30 MV was about 10-20 MeV.

The calculation of attenuation of primary X-rays in concrete was attempted by using exponential formula. The calculated attenuation curves were a little different from the measured and the other data, but agreement of the calculation with NBS data was fairly good. The calculated tenth-value thicknesses corresponded within 10% with the measured and the other values.

I 緒 言

高エネルギー (超高压) 放射線発生装置の遮蔽を考えるときに問題となるものは、大きく二つに分けられる。それは primary radiation と stray radiation, つまり利用線とそれ以外の放射線である。

stray radiation は leakage radiation (装置から出る「ろうえい」線) と照射された物からの secondary radiation とからなる。散乱線はこの secondary radiation の一部分である。

ここではベータトロンにより生じる primary X線 (1次X線) および「ろうえい」線について、

種々の物質による減弱を測定した。さらに primary X線の減弱を計算によつて求め、実測値およびその他の報告¹⁾⁷⁾された値との比較を行なつた。

II 実験方法

1. 1次X線の減弱

使用した放射線発生装置は放射線医学総合研究所のベータトロン (東芝製 BMW-31) である。このベータトロンより生じるエネルギー10~30MVのX線の物質による減弱の測定は、第1図に示すような narrow beam と broad beam の geometry について行なつた。

使用した測定器は自製の空気電離箱に振動容量型電位計を接続したものである。電離箱は2種類で、共に円筒形、ポリエチレン製壁厚1mm容積約1cm³のものとアクリル製壁厚2mm容積約50cm³

* 現勤務先: 久留米大学医学部放射線医学教室
Department of Radiology, Kurume
University School of Medicine,
Kurume, Japan.

Fig. 1. Experimental arrangements for attenuation measurements of primary X-rays.

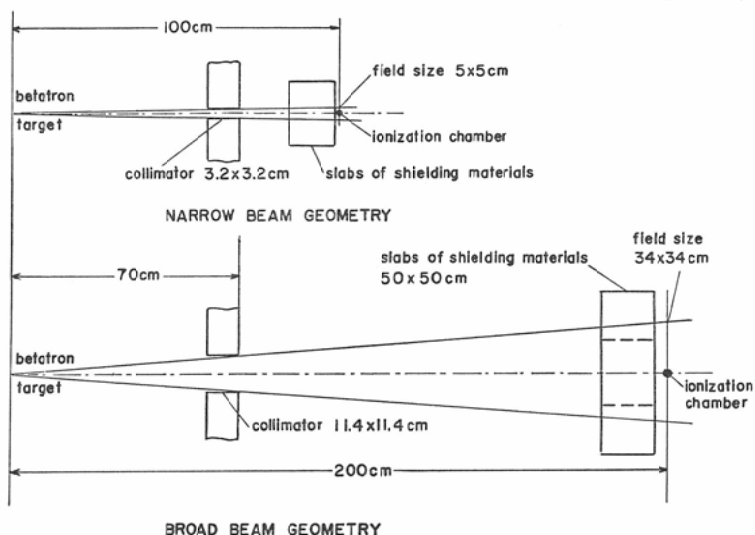
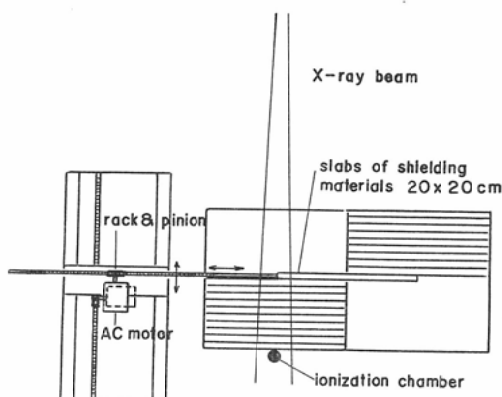


Fig. 2. Equipment of attenuation measurements by thick slab. (Narrow beam geometry)

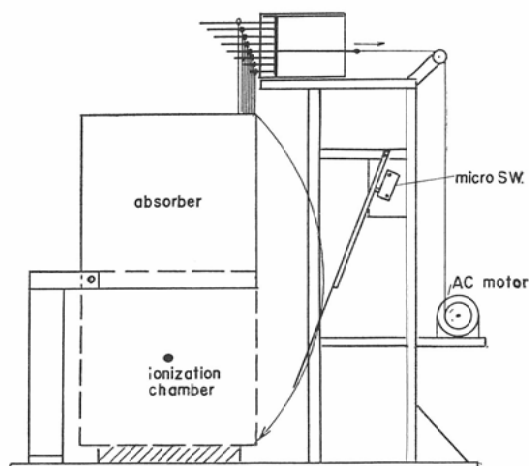


のものである。

減弱の測定に用いた物質はアルミニウム、鉄、鉛で、narrow beam の測定には20×20cmの大きさの板を、broad beam の測定には50×50cmの大きさの板を用いた。鉛板は両方の geometry に対して20×20cmの大きさのものをを用いた。

narrow beam に対する測定はすべて監視用テレビジョンを見ながらベータトロンの操作室より遠隔操作によって行なつた。板の厚さが5 mm以上のものについては、第2図に示すようにラック・ピニオンを電動機で動かして板を1枚ずつ減ら

Fig. 3. Equipment of attenuation measurements by thin slab. (Narrow beam geometry).

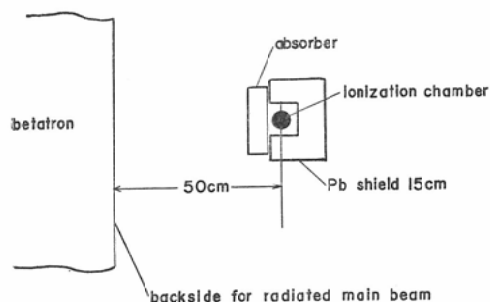


していくことによつて減弱させる物質の厚みを変えた。減弱させる物質の厚さが小さいところ、即ち build-up 領域の測定では、第3図に示すように、板を上方のピンに糸で吊しておき、電動機でこのピンを動かしてピンから糸を落していくことにより厚みを変えた。broad beam に対する測定では遠隔操作を行なわなかつた。

2. ろうえい線の減弱

ベータトロンを運転しているときに主ビーム以

Fig. 4. Experimental arrangement for attenuation measurements of leakage radiation.



外に装置の周りにろうえいする放射線を生じるが、そのろうえいX線の物質による減弱の測定を第4図に示すような geometry で行なった。容積 50cm^3 の電離箱を放射口と反対側の本体より 50cm の位置におき、その周りを 15cm 厚さの鉛ブロックで囲み、ベータトロン本体の方向だけを開けてそこにアルミニウム、鉄の板をおいた。このときベータトロンは 30MV で運転され、またビームの放射口の絞りは最小にし、それより出るビームは 20cm 厚さの鉛ブロックに吸収させるようにした。

III 実験結果と考察

1. 1次X線の減弱

build-up 領域での測定を容積 1cm^3 の電離箱を用いて narrow beam geometry で行なったが、その結果をそれぞれ Al, Acrylate および Pb, Fe について第5, 第6図に示す。またその build-up max. になる物質の厚みを第1表に示す。

さらに厚いアルミニウム、鉄、鉛板によるX線の減弱を容積 50cm^3 の電離箱で測定した結果をそれぞれ第7, 第8, 第9図に示す。これによると減弱率はアルミニウムではX線のエネルギーが大きいほど小さいが、鉄では 20MV が 10MV , 30MV に比べて小さい。鉛の場合はエネルギーによってあまり変わらないが、 10MV のX線の減弱率が 20MV , 30MV より小さい。

2. ろうえい線の減弱

ろうえい線のアルミニウム、鉄による build-up 領域での測定結果を第5, 第6図に○印で示す。この場合ろうえい線の測定の geometry は broad

Fig. 5. Transition curves in Al and Acrylate.

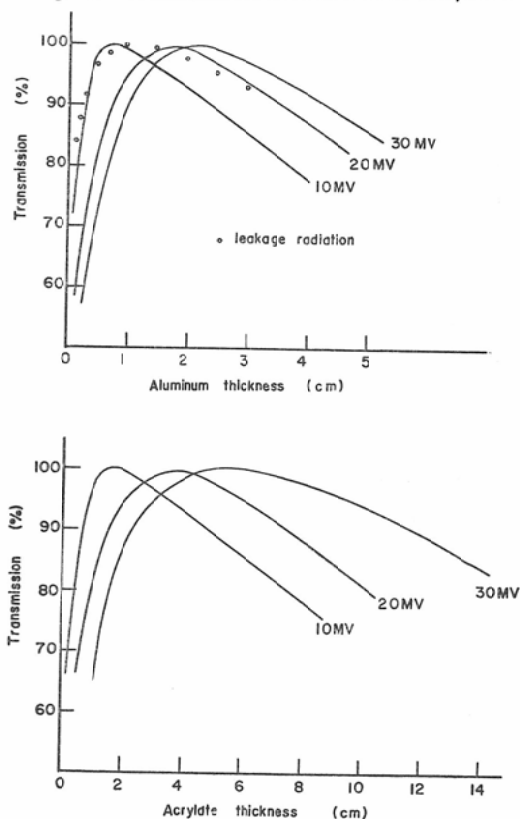


Table 1. Thickness of build-up maximum in cm. (Narrow beam geometry)

materials	density $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$	energy of X-rays		
		10MV	20MV	30MV
Acrylate	1.19	2.0	3.5	5.0
Aluminum	2.7	0.8	1.6	2.3
Iron	7.86	0.25	0.55	0.7
Lead	11.34	0.12	0.25	0.35

beam で、1次X線の測定では narrow beam であるが、build-up max. の位置はほとんど 10MV のX線と同じになっている。また厚いアルミニウムによる減弱を、1次X線の broad beam の減弱と比較して、第10図に示す。これによつてもろうえい線は 10MV のX線の broad beam に近い減弱を示していることがわかる。第10図において Al 板の厚みが大いところで減弱曲線が曲が

Fig. 6. Transition curves in Pb and Fe.

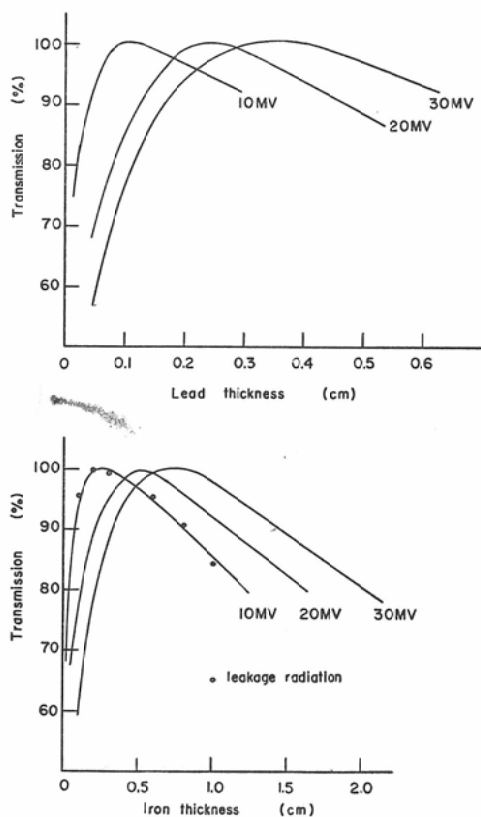


Fig. 7. Attenuation curves in aluminum.

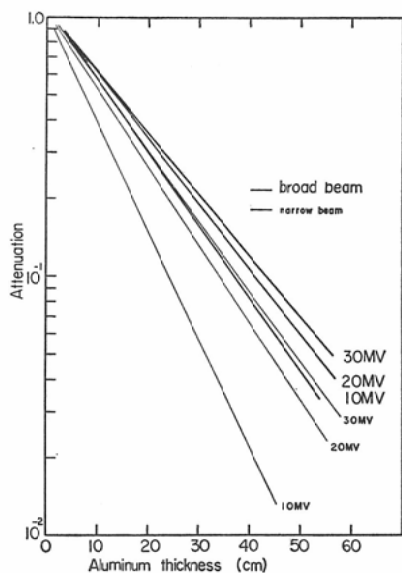


Fig. 8. Attenuation curves in iron.

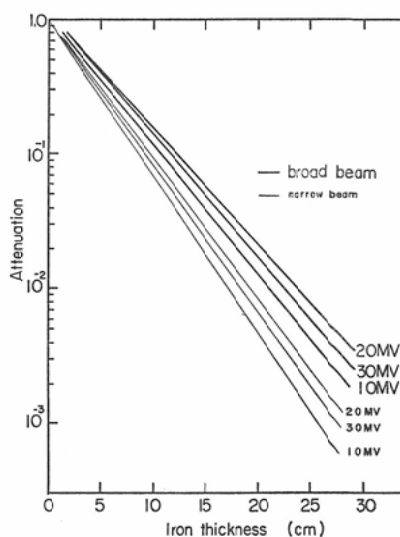
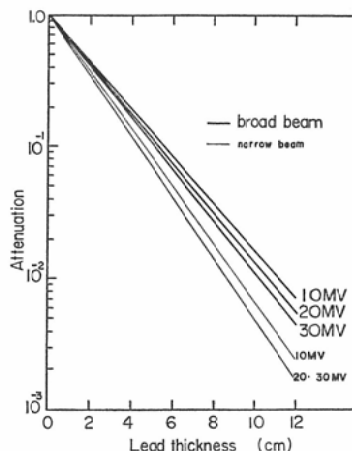


Fig. 9. Attenuation curves in lead.

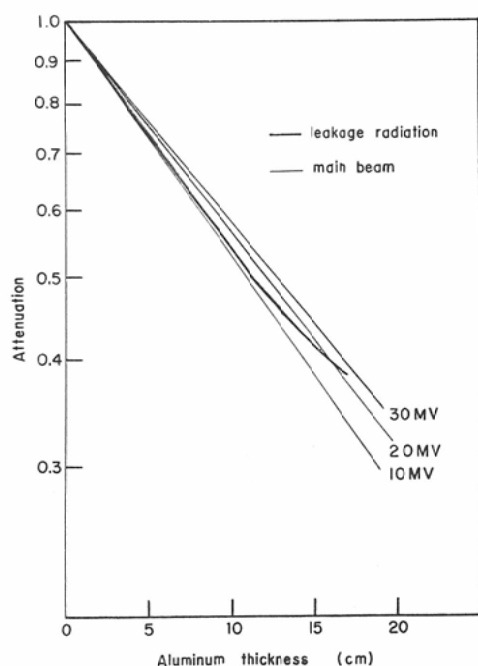


るのは電離箱の鉛シールド間隙等を通してきた散乱線（バックグラウンド）が測定にかかるためであろう。

3. 1次X線の $1/10$ 価層

1次X線の物質による減弱の測定結果からその減弱率が $1/10$ になる厚さを求めたものを第2, 第3表に示す。第3表に示すNBSの値はKirn, Kenedyの論文⁷⁾の中の第2表から平均値を求め、そのインチで表わされる厚みをcmに換算したものである。DIN¹⁾の値はBild 2から直接よんだ値をそれぞれの物質の密度で割つたものである。

Fig. 10. Attenuation curves of leakage radiation in aluminum. Main beam is broad beam.



また測定値はアルミニウム板によるものをコンクリートに換算したものである。

これより測定値とNBS, DINの値との間には、測定器および測定 geometry が幾らか異なっていると思われるが、アルミニウム、鉄に対して10%程度の相異がみられる。鉛に対しては、この測定には照射野に対して小さい大きさの板を用いたのでDINの値との間には20%程度の相異があらわれている。

第2, 第3表の $1/10$ 価層は第7, 第8, 第9図の直線部分から求めたものであつて、実際の遮蔽の計算では最初の $1/10$ 価層も考慮しなければならない。したがつて第2表の $1/10$ 価層の値に第1表の Build-up max. になる値を加えたものも問題となる。

IV 1次X線の減弱の計算

broad beam の1次X線の物質（ここではコンクリート）による減弱を計算によつて求めることを試みた。X線は連続したエネルギー分布をもっているのでその減弱の様子を知ることは簡単でない。単一エネルギーの γ 線の物質による減弱においても、物質の中をある程度通過するとその photon のエネルギーは単一ではなくなり、連続したスペクトル分布を示すようになる⁴⁾。これは

Table 2. Tenth-value thickness in cm.

energy of X-rays	narrow beam			broad beam		
	Aluminum	Iron	Lead	Aluminum	Iron	Lead
10 MV	24.0	8.6	4.5	35.4	10.4	5.6
20 MV	33.0	9.5	4.2	39.5	11.8	5.2
30 MV	36.7	9.2	4.2	42.0	10.8	5.1

Table 3. Comparison of tenth-value thickness in cm.

energy of X-rays	concrete			Iron		Lead	
	measur.*	NBS	DIN	measur.	DIN	measur.	DIN
10 MV	38.9	38.1	36.6	10.4	9.7	5.6	6.95
20 MV	43.5	43.2	45.2	11.8	10.7	5.2	6.95
30 MV	46.2	45.7	47.3	10.8	10.1	5.1	5.35

* Thickness of concrete is calculated from thickness of aluminum (Table 2) multiplied by $\rho(\text{Al})/\rho(\text{concrete}) = 1.1$ ρ is density. Measurements were made at broad beam geometry.

散乱された photon が1次の γ 線に加わるためである。この散乱線を含めたものと、1次線だけのものとの比である build-up 係数を用いると減弱の計算が便利になる。

ある深さ x での γ 線 (photon) の強度 (intensity) I_x は、入射線の強度を I_0 とすると、

$$I_x = B \cdot I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

という形で表わされる。B は build-up 係数、 μ は線減弱係数である。これを連続スペクトルをもつX線に適用させるために、1次X線 (これは計算によつて求められたもの) を適当なエネルギー間隔にわけて、各エネルギー区分のX線の減弱を単一エネルギーの γ 線の場合と同様に考え、全体のX線の減弱はそれらの和として表わされるとした。そこで、ある深さ x でのX線の強度 I_x を

$$I_x = B_1 I_1 e^{-\mu_1 x} + B_2 I_2 e^{-\mu_2 x} + B_3 I_3 e^{-\mu_3 x} + \dots + \sum_i B_i I_i e^{-\mu_i x}$$

と表わす。ここで I_i , B_i , μ_i はそれぞれエネルギー E_i の1次X線の強度、build-up 係数、線減弱係数である。

1. 1次X線のエネルギー・スペクトル

X線のエネルギー・スペクトルは NBS hand

Table 4. Linear attenuation coefficients μ for concrete (NBS circular 583) and value of "a" in build-up factor $B = 1 + a \cdot \mu x$.

Photon energy (MeV)	μ for concrete (cm ⁻¹)	value of a
2	0.1055	—
4	0.0745	0.465
6	0.0630	0.357
8	0.0571	0.311
10	0.0538	0.258
12	0.0520	0.216
14	0.0508	0.190
16	0.0500	0.166
18	0.0495	0.150
20	0.0491	0.135
22	0.0490	0.122
24	0.0489	0.112
26	0.0489	0.103
28	0.0490	0.095
30	0.0491	0.0915

book 55⁹⁾より Shift によつて求められたものを用いた。これより強度 I_i は 6, 10, 20 MeV のX線については、スペクトル分布を 2 MeV のエネルギー間隔に分けて、それらの合計が 100 になるように定めた。例えば 10 MeV のX線については

$$\begin{aligned} I_0 &= I_1 (2 \text{ MeV}) + I_2 (4 \text{ MeV}) + I_3 (6 \text{ MeV}) \\ &\quad + I_4 (8 \text{ MeV}) + I_5 (10 \text{ MeV}) \\ &= 33.0 + 27.3 + 22.1 + 15.9 + 1.7 \\ &= 100 \end{aligned}$$

となる。30 MeV のX線については 4 MeV のエネルギー間隔にわけた。

2. 線減弱 (吸収) 係数

種々のエネルギーの γ 線に対するコンクリートの線減弱係数についてはいろいろなデータがある³⁾⁵⁾⁶⁾¹³⁾。ここでは NBS circular 583³⁾の値を用い、10~20 MeV と 20~30 MeV の間の値はグラフから内挿して求めた。またコンクリートの密度は 2.35 g/cm³ とした。第4表にコンクリートの線減弱係数の値を示す。

3. Build-up 係数

10 MeV までの γ 線の build-up 係数については多くの計算や実験がなされている²⁾⁴⁾⁵⁾。しかし実験値については ⁶⁰Co, ¹³⁷Cs などの R I 線源を用いたものが主で、10 MeV 程度のエネルギーでの実験値はあまりみられない。

計算によつて build-up 係数を求める方法はいろいろあるが、その中の一つである指数関数近似法¹²⁾によると build-up 係数 $B(\mu x)$ は

$$B(\mu x) = A e^{-\alpha_1 \mu x} + (1-A) e^{-\alpha_2 \mu x}$$

Table 5. Values of parameters in exponential approximation to dose build-up factor in concrete (from Tayler)

energy (MeV)	parameter		
	A	$-\alpha_1$	α_2
2	6.3	0.069	0.058
4	3.9	0.059	0.083
6	3.1	0.059	0.083
8	2.8	0.057	0.086
10	2.6	0.050	0.084

と表わされる。ここでパラメーター A , α_1 , α_2 の値はコンクリートに対しては第5表に示すように与えられる。しかしながらこの式は近似的に次のような簡単な形におくことができる。

$$B(\mu x) = 1 + a \cdot \mu x$$

ここで、 a はエネルギーによつてきまる比例常数である。

そこで、10 MeV 以下のエネルギーに対しては指数関数近似法によつて得られた Build-up 係数をそのまま用い、10 MeV 以上のエネルギーに対しては、10 MeV の build-up 係数に対応する a の値 0.258 に 10 MeV とそのエネルギーの Compton 散乱断面積の 90° 方向の値¹⁰⁾ の比を乗じて a を求め、build-up 係数を決めた。

$$a = \frac{\sigma_{90^\circ}(E \text{ MeV})}{\sigma_{90^\circ}(10 \text{ MeV})} \times 0.258, \\ 10 \text{ MeV} < E < 30 \text{ MeV}$$

第4表にこの比例常数 a の値を示す。

Fig. 11. Calculated attenuation curves in concrete. The measurements were made at broad beam geometry.

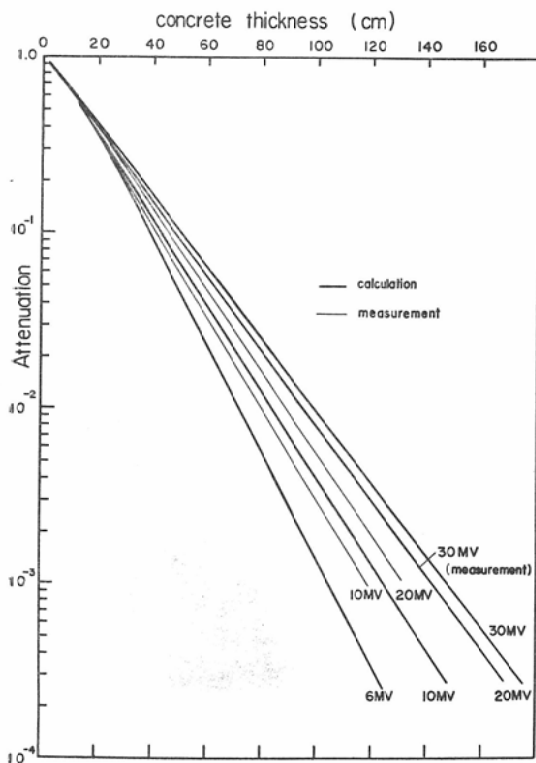
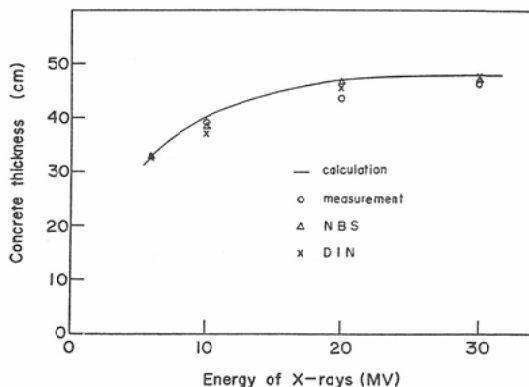


Fig. 12. Tenth-value thickness in concrete. The measurements were made at broad beam geometry.



4. 計算と測定結果の比較

上に述べた方法で 6, 10, 20, 30 MV の X 線のコンクリートによる減弱について計算した結果を第11図に、またこれから求められる $^{1/10}$ 価層とエネルギーとの関係を第12図にそれぞれ示す。第11図によると計算による減弱のカーブは broad beam による測定との間に大きくて 20% 程度の相異がみられる。この図では示していないが計算と NBS によるカーブは大体一致した。

計算による $^{1/10}$ 価層の値は第12図にみられるように broad beam による測定や他のデータ^{17) 8)} との間に大きくて 10% 程度の違いがみられた。この程度の相違は発生装置や測定法が異なるので当然考えられることであろう。

V 結 語

1. 放医研に設置されている東芝製 31 MeV ベータトロンにより発生される 10~30 MV X 線のアルミニウム、鉄、鉛による減弱の測定を broad beam と narrow beam の場合について行なつた。

2. この装置を 30 MV で運転したときのろうえい線のエネルギーは減弱の測定により 10~20 MV 程度の X 線であるという結果を得た。これは他のエネルギーで運転しても変わらないと考えられる¹¹⁾。しかしながら正確にろうえい線を決定することは装置により異なる(構造、遮蔽体の違いなど)可能性もあり今後さらに検討すべき問題であろう。

3. X線のコンクリートによる減弱について6～30MVの範囲で計算を行なつた。減弱のカーブは計算と実測とで少し相異がみられた。また $1/10$ 価層は計算と測定やその他のデータとの間に10%程度の相異があつた。しかしながらこの10%前後の違いであれば、遮蔽のための設計に対しては十分に使用できるものと考えられる。

文 献

- 1) DIN 6847 (1965).
- 2) Goldstein, H.: Fundamental Aspects of Reactor Shielding, Addison-Wesley (1959).
- 3) Goldstein, G.W.: NBS Circular 583 (1957).
- 4) Goldstein, H. and Wilkins, J.E.: NYO-3075 (1954).
- 5) Garrett, C. and Whyte, G.N.: Phys. Rev. 95 (1954), 889.
- 6) Hubbell, J.H. and Berger, M.J.: NBS Report 8681 (1965).
- 7) Kirn, F.S. and Kenedy, R.J.: Nucleonics, Vol. 12, No. 6, (1954), 44.
- 8) Karzmark, C.J. and Capone, T.: Brit. J. Radiol. 41 (1968), 33.
- 9) NBS hand book 55 (1954).
- 10) Nelms, A.T.: NBS Circular 542 (1953).
- 11) 野田: 日本医放会誌, 24 (1964), 387.
- 12) Taylor, J.J.: WAPD-RM- 217 (1954).
- 13) Wyckoff, J.M. and Koch, H.W.: Phys. Rev. 117 (1960), 1261.