

放射線 診斷 및 治療裝置室 設計와 防禦壁

Room Planning and Shielding Barriers for the Diagnostic, Therapeutic Apparatus

韓國에너지研究所 原子力病院

鄭寅溶·金振鏞

I. 緒 論

近間 國民所得의 增加 그리고 醫療保險의 擴大로 國內에는 數 많은 病院이 新設되고 各種 醫療施設이 擴充됨에 따라 放射線發生裝置의 數도 增加하여 이를 利用 診療하는 患者의 數와 함께 이를 取扱하는 醫療放射線 從事者의 數도 增加하게 되었다.

따라서 現在 確認되지 않고 있는 全國民에 對한 放射線의 被曝線量도 날로 增加될 것으로 豫想된다.

그러므로 우리는 醫療的 目的에 따라 不可避하게 被曝되는 患者의 被曝線量은 除外하더라도 醫療放射線 分野에서 從事하는 모든 職業人, 即 數 많은 放射線專門醫 그리고 約 3,000名에 達하는 醫療放射線士를 비롯한 各種 從事者에게 不意의 事故 또는 不確實한 理由 등으로 發生 可能한 放射線 災害로부터 保護되어야 함은 勿論, 一般人 또는 隣近住民까지도 不必要하게 放射線에 被曝되지 않도록 萬全을 期함으로서 當世代는 勿論 後孫에게 放射線의 影響으로 어떠한 不幸이라도 發生하지 않도록 最善을 다하여야 할 것이다.

故로 此際에 本 論題를 通하여 放射線 施設에서 從事하는 모든 從事者와 이를 許可, 監督하는 監督者를 包含하여 우리가 特別히 警戒하여야 할 各種 診療 放射線發生裝置에 對한 防禦施設에 關하여 例와 함께 檢討코저 한다.

II. X線診斷, 治療 및 γ 線遠隔治療裝置 設計를 爲한 防禦壁

(Shielding Barriers for XRay Diagnostic, Conventional X Ray Therapy and γ Ray Teletherapy)

우리는 一般的으로 放射線防禦壁이라면 우선 防禦壁의 物質과 두께를 생각하게 된다.

그러나 여기에서 附加되어 考慮되어야 할 點은 防禦

壁이 어떻게 作用 되는나에 따라 區分되어야 한다.

即, 우리는 放射線의 有効線束이 照射될 수 있는 모든 方向으로 照射될때 그의 有効線束을 完全히 遮蔽할 수 있는 遮蔽壁을 一次壁(The Primary Barrier)이라고 하고, 任意의 方向에서의 散亂線과 그리고 線源을 內包하고 있는 Source Housing으로부터 漏出되는 漏出 放射線을 充分히 遮蔽하는 壁을 二次壁(The Secondary Barrier)이라 區分하여 定義한다.

그리고 防禦壁의 두께를 算出하려면 다음 各項을 考慮하여야 한다.

1) 負荷量(Work-Load:W)

放射線發生裝置로부터 放出되는 放射線이 萬一 X線의 境遇라면 便宜上 線量을 mA. min/week의 單位로 表示하고 γ -線의 境遇는 線源으로부터 1m 距離에서 適當線量 R/week라 表示한다.

2) 使用因子(Use factor:U)

適當 利用 線量 即 負荷量(W)中 有効線束이 直接 防禦壁을 向하여 照射되는 時間的 比率이다.

3) 占有因子(Occupancy factor: T)

放射線에 被曝 可能한 該當 區域內에서 勤務를 하거나 遲滯하였을때 使用因子(U)에 對한 時間的 比率이다

4) X線의 에너지는 X線管에 負荷되는 最大 管電壓(Kvp)으로 表示하고 γ 線인 境遇 光量子의 에너지(Mev)로 表示한다.

5) 線源容器(Source Housing)로부터의 漏出量.

6) 散亂線의 強度.

7) 線源으로부터의 距離(d).

8) 防禦壁에 依한 被防禦者의 最大許容線量(Maximum Permissible Dose: P).

III. X線攝影室의 防禦

X線攝影室의 防禦施設은 Fig. 1과 同一하다고 假定

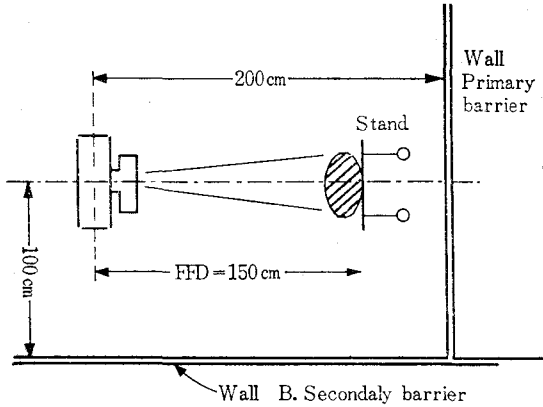


Fig. 1. Section of X-Ray Laboratory.

할때 放射線源인 X線管으로부터 放出되는 X線의 有效線束은 恒常 一次壁인 防禦壁A (Wall, A)를 向하여 撮影하고 防禦壁B (Wall, B)는 二次壁으로 作用하며 線源으로부터 重要な 位置點까지의 距離는 Fig. 1에서 表示된 바와 같다.

이때 壁A와 壁B에서 遮蔽壁두께에 必要한 資料는 ICRP. Publication-21에 依據 다음과 같이 算出할 수 있다.

X線의 撮影條件 ;

Chest PA.....100kv, 10mAs

Chest Lat.....100kv, 20mAs

撮影距離(F.F.D.).....150cm

萬一 上記條件으로 모든 患者를 撮影 한다면 患者 各人의 放射線量은 10mAs+20mAs에 該當하는 放射線量이 X線管으로부터 放出하게 되고 그 裝置로 週間 2,000名의 患者를 檢査하려면 그의 負荷量(W)은 다음과 같다.

$$W = 30 \cdot 2,000 = 60,000 \text{ mAs/week} \\ = 1,000 \text{ mA} \cdot \text{min/week}$$

防禦壁 Wall, A의 두께

Fig 1의 施設로 計劃된 業務量을 100% 利用하였다면 放射線은 放出量으로 보아 使用因子(U)는 1.0이고 防禦壁을 中心으로 線源 反對側에 從事者가 常時 있다면 占有因子(T)는 1.0이라 假定한다.

이때 X線管으로부터 放出되는 放射線量 中 任意의 點에서의 實際 適當 放射線量은 負荷量(W), 使用因子(U), 占有因子(T)를 相乘한 量이다.

$$W \cdot U \cdot T = 1,000 \text{ mA} \cdot \text{min/week}$$

이때 ICRP. Publication-21의 Fig. 40과 Fig. 41에서 100kv에 該當하는 曲線中 線源間의 距離 1m에서 空氣中 線量率에 表示된 값으로 콘크리트와 鉛 遮物蔽의 透過線量을 두께에 따라 R/mA·min의 單位로 表

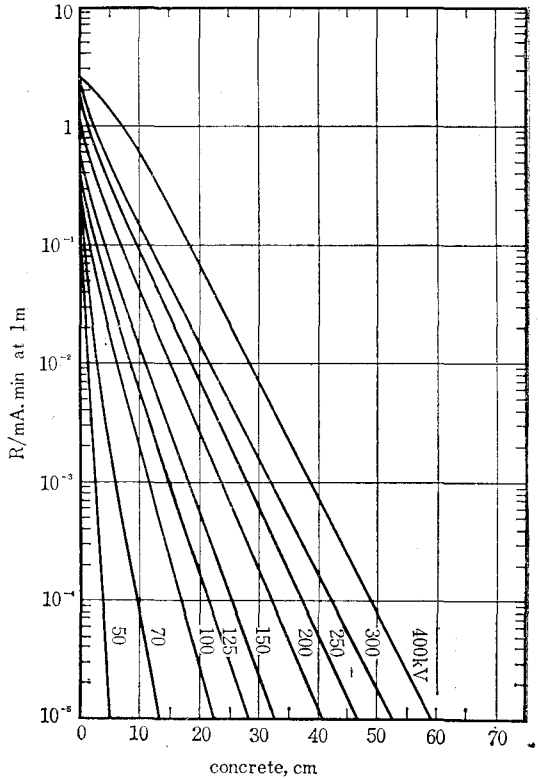


Fig. 40. Broad-beam transmission of x rays through concrete, density 2.35g/cm₃. 50 to 300kV; half-wave generator; tungsten reflection target; total beam filtration 1mm aluminium at 50kV, 1.5 at 70, 2 at 100, and 3 at 125 to 300. 400kV: constant potential generator; gold reflection target; 3mm copper total beam filtration. Ordinate intercepts are 2.7 at 400kV, 2.4 at 300, 1.6 at 250, 1.02 at 200, 0.6 at 150, 0.45 at 125, 0.32 at 100, 0.24 at 70, 0.19 at 50.

示하였고 이를 B라 한다.

한편 適當 最大許容線量을 P라 하였을때 放射線從事者의 P의 값은 0.1R/week. 그리고 隣近住民 또는 非從事者는 0.01R/week이라하면 그의 關係式은 다음과 같다.

$$\frac{B}{d^2} \cdot WUT = P \\ B = \frac{P \cdot d^2}{WUT}$$

Fig. 1에서 d=2m이면 B=0.004·P이다.

그러면 P의 값의 選擇에 따라 다음과 같이 B의 값을 얻는다.

放射線從事者 ; P=0.1R/week.....B=4·10⁻⁴

非 從事者 ; P=0.01R/week.....B=4·10⁻⁵

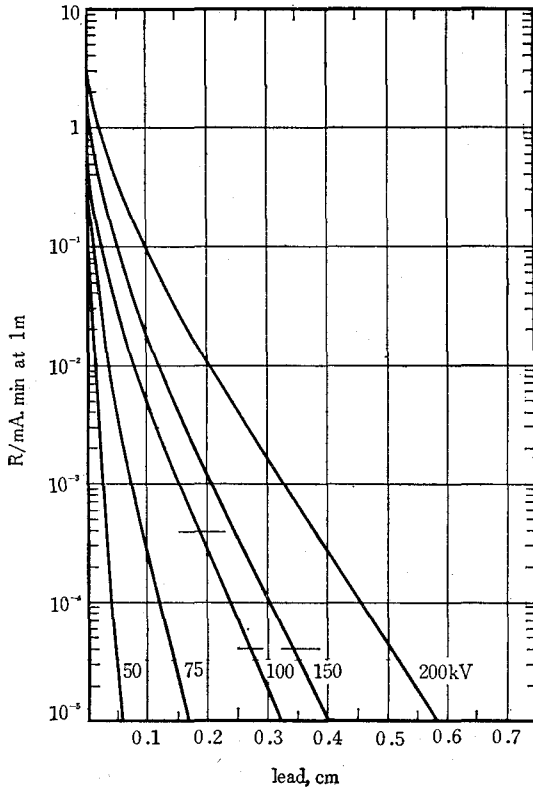


Fig. 41. Broad-beam transmission of x rays through lead, density 11.35g cm³. Constant potential generator; tungsten reflection target; 2mm aluminium total beam filtration. Ordinate intercepts are 3.3 at 200kV, 2.1 at 150, 1.1 at 100, 0.7 at 75, 0.3 at 50.

이때 必要한 콘크리트 壁두께는 ICRP Publication-21, Fig. 40에서 100kv曲線에서 다음 값을 얻는다.

- P=0.1 ; 콘크리트 壁두께14cm
- P=0.01 ; " "19cm

한편 鉛(Lead)의 遮蔽두께는 Fig. 41에서 다음과 같음을 알 수 있다.

- P=0.1 ; 鉛두께1.9mm
- P=0.01 ; 鉛두께2.7mm

防禦壁 Wall. B의 두께

Wall. B는 二次防禦壁으로 Wall. A와는 달리 漏出放射線과 散亂線을 各各 區分하여 檢討코져 한다.

1) 漏出放射線(Leakage Radiation)

ICRP. Publication-15(75)에 依하면 X線攝影裝置를 製作할 때는 X線管이 稼動 하는 모든 條件에서 焦點과의 距離 1m에서의 漏出線량은 時間當 100mR을 超

過하지 않도록 製作할 것을 勸告하고 있고 이를 充足하는 裝置라면 最大 管電流가 6mA로 連續 稼動한다고 假定할 때 最大 漏出線량은 360mA·min/hour 이다. 이를 負荷量 1,000mA·min/week에 比하면 週當 2.8 hours를 連續 照射한 量과 同一하므로 照射時間은 週當 3hours이라 假定한다.

이때 焦點間的 距離 1m에서 漏出線량은 100mR/hour 以下로서 週當 3hours의 照射時의 漏出線량은 0.3R/week를 超過하지 못할 것이다.

특히 漏出放射線은 X線의 連續波長分布 中 高度로 濾過된 狀態의 放射線이므로 防禦壁의 두께에 對한 透過曲線 中 下部에 該當될 것이며 이는 다음 方法으로 算出한다.

例컨데 漏出線량의 最大値는 0.3R/week이고, 放射線從事者의 最大 許容被曝線량은 P=0.1 R/week이다 한편 吸收體의 두께는 放射線의 吸收가 指數的 減少로 이루어 지므로 線량이 半로 減少되는 吸收體의 두께 即 HVT(Half Value Thicktness)에 對하여 半로 減少시키는 吸收體의 두께 만으로 充分하므로 다음과 같이 計算한다.

放射線從事者 P=0.1 ; 鉛遮蔽두께

$$= \frac{\log 3}{\log 2} \cdot \text{HVT}$$

$$= 1.6 \times 0.25 = 0.4 \text{ mm Lead}$$

非 從事者 P=0.01 ; 鉛遮蔽두께

$$= \frac{\log 30}{\log 2} \cdot \text{HVT}$$

이는 P=0.1에 比하여 $\frac{1}{10}$ 을 追加 減少시킬 수 있는 두께가 되므로 放射線의 強度를 $\frac{1}{10}$ 로 減少시키는 吸收體의 두께 即 TVT(Tenth Value Thicktness)를 追加 하는 結果가 된다.

故로 P=0.01 ; 鉛遮蔽두께

$$= \text{TVT} + 0.4 = 0.84 + 0.4 = 1.2 \text{ mm Lead}$$

2) 散亂線(Scattered Radiation)

實驗的으로 有效線束이 患者를 向하고 線束의 方向에서 90°로 散亂되고 照射物인 皮膚로부터 距離 1m에서의 散亂線량은 有效線束 線량의 $\frac{1}{1,000}$ 을 超過하지 않을 것이므로 線源-患者間的 距離 1.5m에서의 B의 값(R/mA·min)은 앞에서 利用되었던 WUP=1,000mA·min/week을 適用하면 다음과 같다.

$$\frac{B \cdot 1,000}{1.5^2} \cdot \frac{1}{1,000} = P$$

$$B = 2.25 \cdot P$$

$$P = 0.1 ; B = 0.225 \text{ 壁두께} = 0.2 \text{ mm Lead}$$

$$P = 0.01 ; B = 0.0225 \text{ " } = 0.6 \text{ mm Lead}$$

3) 防禦壁 Wall. B의 結論

現在까지 P=0.1의 防禦壁 두께는 漏出放射線의 防

禦壁이나 遮蔽幕으로서 0.4 mm Lead이라 알고 있고
散亂線에 對한 값은 0.2 mm Lead 임을 알고 있다.

그러나 漏出放射線이 防禦幕(Leakage Barrier)을 透

Table 20. Primary X-ray Beam Shielding Requirements for 0.1 rem per Week^a

Potential, kV	Effective workload, mA. min per week ^b	cm lead required at source distances of				cm concrete required at source distances of			
		1m	2m	4m	8m	1m	2m	4m	8m
50	500	0.04	0.03	0.02	0.01	3.4	2.5	1.6	0.9
	125	0.03	0.02	0.01	0.01	2.5	1.6	0.9	0.4
	30	0.02	0.01	0.01	0.01 ^c	1.6	0.9	0.4	0 ^{c,d}
	8	0.01	0.01	0.01 ^c	0 ^d	0.9	0.4	0 ^{c,d}	0 ^d
75	500	0.10	0.08	0.05	0.03	9.7	7.4	5.0	3.0
	125	0.08	0.05	0.03	0.02	7.4	5.0	3.0	1.2
	30	0.05	0.03	0.02	0.01	5.0	3.0	1.2	0.2
	8	0.03	0.02	0.01	0 ^d	3.0	1.2	0.2	0 ^d
100	1,000	0.24	0.19	0.14	0.09	17.0	13.6	10.4	7.1
	250	0.19	0.14	0.09	0.05	13.6	10.4	7.1	4.1
	60	0.14	0.09	0.05	0.03	10.4	7.1	4.1	1.5
	16	0.09	0.05	0.03	0.01 ^c	7.1	4.1	1.5	0 ^{c,d}
150	1,000	0.30	0.25	0.19	0.14	25.5	21.1	16.8	12.3
	250	0.25	0.19	0.14	0.09	21.1	16.8	12.3	8.0
	60	0.19	0.14	0.09	0.05	16.8	12.3	8.0	4.0
	16	0.14	0.09	0.05	0.02	12.3	8.0	4.0	0.8
200	40,000	0.66	0.58	0.51	0.43	46.3	41.0	35.9	30.6
	10,000	0.58	0.51	0.43	0.35	41.0	35.9	30.6	25.4
	2,500	0.51	0.43	0.35	0.28	35.9	30.6	25.4	20.1
	625	0.43	0.35	0.28	0.20	30.6	25.4	20.1	15.0
250	40,000	1.26	1.09	0.91	0.74	51.8	46.5	41.0	35.4
	10,000	1.09	0.91	0.74	0.59	46.5	41.0	35.4	29.8
	2,500	0.91	0.74	0.59	0.44	41.0	35.4	29.8	24.1
	625	0.74	0.59	0.44	0.31	35.4	29.8	24.1	18.6
300	40,000	2.38	2.04	1.70	1.36	58.4	52.5	46.3	40.2
	10,000	2.04	1.70	1.36	1.04	52.5	46.3	40.2	34.0
	2,500	1.70	1.36	1.04	0.76	46.3	40.2	34.0	27.8
	625	1.36	1.04	0.76	0.52	40.2	34.0	27.8	21.9
400	40,000	4.05	3.49	3.02	2.50	65.0	59.0	53.0	46.8
	10,000	3.49	3.02	2.50	2.02	59.0	53.0	46.8	40.6
	2,500	3.02	2.50	2.02	1.54	53.0	46.8	40.6	34.4
	625	2.50	2.02	1.54	1.12	46.8	40.6	34.4	28.5

^a This table is constructed from the transmission data in Figs. 40-42. Air attenuation is not taken into account.

^b Shielding is calculated for the exact fraction of the initial workload required by the layout of each section of the table.

^c The apparent inconsistency between the lead and concrete requirements is due to the use of transmission data for a constant potential generator in the case of lead and a half-wave generator in the case of concrete.

^d May not apply if the total beam filtration is less than that specified for the transmission data in Fig. 40 or 41.

Table 21. Scatter and Leakage X-ray Shielding Requirements for 0.1 rem per Week^a

Potential kV	Effective workload, mA, min per week ^b	cm lead required at source distances of				cm concrete required at source distances of			
		1m	2m	4m	8m	1m	2m	4m	8m
50	500	0.02	0.01	0	0	1.0	0.3	0	0
	125	0.01	0	0	0	0.3	0	0	0
75	500	0.06	0.02	0.01	0	3.1	1.1	0.1	0
	125	0.02	0.01	0	0	1.1	0.1	0	0
	30	0.01	0	0	0	0.1	0	0	0
100	1,000	0.08	0.04	0.02	0	5.5	2.7	0.3	0
	250	0.04	0.02	0	0	2.7	0.3	0	0
	60	0.02	0	0	0	0.3	0	0	0
150	1,000	0.11	0.06	0.03	0	8.9	4.9	1.3	0
	250	0.06	0.03	0	0	4.9	1.3	0	0
	60	0.03	0	0	0	1.3	0	0	0
200	40,000	0.40	0.32	0.24	0.16	26.9	21.6	16.4	11.3
	10,000	0.32	0.24	0.16	0.09	21.6	16.4	11.3	6.4
	2,500	0.24	0.16	0.09	0.04	16.4	11.3	6.4	2.0
	625	0.16	0.09	0.04	0	11.3	6.4	2.0	0
250	40,000	0.78	0.61	0.45	0.28	30.6	25.1	19.4	13.9
	10,000	0.61	0.45	0.28	0.14	25.1	19.4	13.9	8.5
	2,500	0.45	0.28	0.14	0.05	19.4	13.9	8.5	3.4
	625	0.28	0.14	0.05	0	13.9	8.5	3.4	0
300	40,000	1.51	1.18	0.84	0.52	34.8	28.7	22.6	16.3
	10,000	1.18	0.84	0.52	0.25	28.7	22.6	16.3	10.2
	2,500	0.84	0.52	0.25	0.07	22.6	16.3	10.2	4.6
	625	0.52	0.25	0.07	0	16.3	10.2	4.6	0
400	40,000	2.33	1.85	1.37	0.91	40.8	34.7	28.7	22.5
	10,000	1.85	1.37	0.91	0.54	34.7	28.7	22.5	16.2
	2,500	1.37	0.91	0.54	0.23	28.7	22.5	16.2	9.6
	625	0.91	0.54	0.23	0.02	22.5	16.2	9.6	1.5

^a This table is based on the irradiation characteristic given in the text and is constructed from the transmission data in Figs. 40—42 and from Table 16. Air attenuation is not taken into account.

^b Shielding is calculated for the exact fraction of the initial workload required by the layout of each section of the table.

過한 境遇라면 이들은 連續波長의 X線中 長波長의 軟線만이 吸收되고 高度의 透過性인 X線이므로 單純히 計算된 壁이나 幕에는 追加로 1 HVT를 한 面에 附加하고 安全을 기하여 線量을 0.1 R/week 以下로 한다.

그러면 線質 HVT=0.25mm Lead, TVT=0.84 mm Lead인 X線은 二次壁 Wall. B의 두께는 다음과 같다.

P=0.1인 放射線從事者에 對한 遮蔽壁의 두께는 0.7mm Lead이고 非 從事者 P=0.01에 對한 漏出放射線에 對한 값은 1.2 mm Lead, 散亂線에 對한 값은 0.6 mm Lead이다.

그러나 結果的인 防禦壁 Wall. B의 두께는 1.5 mm. Lead가 된다.

萬一 建築資材가 콘크리트 라면 ICRP Publication-21, Fig. 40 透過曲線에 따라 上記 方法으로 算出된다.

4) 撮影室(X-Ray Room) 防禦施設

Wall. A; 放射線從事者……2 mm Lead

非 從事者……3 mm Lead

Wall. B; 放射線從事者……1 mm Lead

非 從事者……1.5 mm Lead.

이것은 ICRP. Publication-21. Table 20과 21을 이용한 결과로서 그의條件은 kv, 負荷量, WUT의 값, 그리고距離 등에 따라表示되고 있고 이는防禦施設物設計에 有益하게 利用될 것이다.

한편 우리는 X線攝影室 遮蔽幕의 두께는 普通 3mm Lead이라 알고 있었으나 上記 理論에 依한다면 鉛當量 1~2mm로서 充分함을 알 수 있다.

특히 X線攝影室은 窓門에 留意하여야 하며 또 그의 近處에 其他 室이 있다면 距離를 考慮하여 設置하고 其他 建物에까지 注意를 要하게 된다.

萬一 X線 有効線束이 窓門側을 向하여 照射하여야 할 境遇라면 그 窓은 完全히 遮蔽되어 있나를 確認하고 X線 發生裝置의 位置 選定時에 照射方向에 對하여 充分한 配濾가 있어야 한다.

攝影裝置와 操盤臺間에는 防禦用 出入門을 利用하는 境遇도 있겠으나 出入門의 重量으로 開閉의 不便이 있을 것이므로 可扱的 裝置 排列時 適當한 距離를 確保하는 것이 가장 좋을 것이다.

X線攝影室內에 設置하는 從事者들의 防禦用 遮蔽壁이나 幕은 最少한 鉛當量 1mm의 物質이어야 한다.

IV. X線治療室의 防禦

X線治療室 防禦 역시 可能한 限 一次防禦壁으로 防禦의 效果를 높이도록 設計하는 것이 좋다.

또 有効線束의 方向은 恒常 壁과 바닥 한 面으로 制限토록 治療裝置를 機械的으로 固定하는 것이 좋다.

防禦에 必要한 計劃設定은 近似的인 算이긴 하나 ICRP에 依한 透過曲線을 利用하는것이 간편하고 이를 爲하여 ICRP Publication-15(124)에 밝힌 最大許容 漏出線量, 即 焦點間의 距離 1m에서 1R/hour, 그리고 Housing 表面부터 5cm 距離에서 30R/hour를 超過하지 않도록 勸告하고 있다.

故로 治療裝置는 診斷用 X線管 Housing에 比하여 漏出量의 比는 10以上 이므로 이를 考慮하고 管電壓 200kv以上の 裝置에 對하여는 ICRP Publication-21. Table 20과 21을 利用하여 遮蔽物 製作時 重要한 資料로 利用된다.

특히 防禦用 鉛板壁은 結合部分에서 完全히 接合하거나 重複되도록 連結하고 觀察用 鉛유리(Lead glass)에 依한 窓은 鉛유리와 콘크리트壁 사이에 缺陷이 없도록 注意하여야 한다.

한편 出入門은 可扱的 門들과 門턱까지 防禦하고 門 枠은 全面을 鉛板으로 덮으며 門들은 壁과 重複되어 門 枠, 門들, 壁과 連結部分이 서로 重複되도록 設計되

어야 한다.

그러므로 普通 밀어닫는門(Sliding Door)을 利用하는 하나 이는 遮蔽效果는 높을 지라도 門의 重量으로 開閉가 곤란하므로 모-터에 依하도록 設計함으로써 便利하게 利用된다.

그러나 이것 역시 防禦用門과 門턱 下部에는 콘크리트 바닥을 通하여 微量이나마 放射線이 漏出되는 境遇가 있으므로 그의 바닥에는 門턱을 中心으로 兩側에 50cm의 幅으로 2~4mm 두께의 鉛板을 묻어 두는 것이 좋을 것이다.

觀察窓은 診斷室에 比하여 格別히 留意되 有効線束은 絶對로 直接 觀察窓을 向하지 않도록 注意하여야 한다.

특히 治療室에서는 建物과 空氣에 依하여 散亂線이 發生 可能하므로 隣近 建物에 散亂線이 到達하지 않도록 注意를 要한다.

이는 散亂線이 豫想外의 線量으로 其他 建物에 到達하는 境遇를 間或 發見할 수 있기 때문이다.

萬一 其他 建物이 近距離에 있을 境遇라면 治療室에 屬한 窓門은 廢止되거나 室壁 上端部에 特別히 1~2個의 窓을 마련하고 線束의 方向을 制限하여 間或 外部壁이 包含되더라도 建物外側에서는 占有因子(T)를 無視할 수 있도록 設計되어 管理區域에 限하여 占有因子가 T=1이 되도록 安全을 期하여야 한다.

V. 코발트 遠隔治療裝置 (Isotope⁶⁰Co Teletherapy Unit)

防禦에 關한 計算은 X線의 境遇와 同一하나 一般的으로 高에너지 放射線은 底에너지放射線에 比하여 散亂線의 強度와 透過力이 높기 때문에 一次線의 透過曲線과 散亂角에 依한 散亂線의 比에 關한 透過曲線을 要하게 된다.

一般的으로 放射線의 吸收가 大略 指數的 이라면 一次線과 散亂線을 HVT와 TVT의 概念을 利用하면 便利하다.

萬一 放射線이 防禦壁으로 因하여 因子 B의 값으로 減少한다면 前과 同一하게 $B = \frac{P \cdot d^2}{WUT}$ 의 값이 $B = a \cdot 10^{-n}$ 의 形式으로 表示될때 防禦壁 두께는 다음과 같다.

$$\text{防禦壁 두께} = (n - \log a) \cdot TVT$$

$$TVT = \frac{\log 10}{\log 2} \cdot HVT = 3.3 \cdot HVT$$

예컨대 7000 Ci의 Co⁶⁰ 遠隔治療裝置를 保有하여 週當 5日勤務, 線源-皮膚間의 距離 1m로서 患者에게 一日治療線量을 300R씩 50名에게 照射한다면 負荷量(W)

는 다음과 같다.

$$W = 50 \cdot 300 \cdot 5 = 75,000R/week$$

一次防禦壁

코발트遠隔治療裝置에 對한 防禦壁의 두께를 計算하
려면 一日 8時間 勤務인 境遇 使用因子는 $U = \frac{1}{3}$ 이다.
그리고 線源과의 距離 4m에서 非從事者에 對한 最
大許容線量 : $P = 0.01 R/week$ 에 B의 값은 ;

$$\frac{75,000}{3 \cdot 4^2} \cdot B = 0.01$$

$$B = 6.4 \times 10^{-6}$$

이때, B의 값은 $B = a \cdot 10^{-n}$ 의 形式이다.

$$\begin{aligned} \text{防禦壁의 두께} &= (6 - \log 6.4) \cdot TVT \\ &= 5.2TVT \end{aligned}$$

만일 防禦壁이 콘크리트 라면 코발트 γ 線의 線質은
 $TVT = 22cm$ 이므로 一次壁의 두께는 115cm가 된다.

二次防禦壁

漏出線과 散亂線은 $U = 1.0$ 이고 占有地點까지의 距離
는 2m일때 必要한 壁의 두께는 ICRP-15(140)에 따라
二次線은 一次線의 $\frac{1}{1,000}$ 이고 $P = 0.01 R/week$ 에
對한 壁두께는 다음과 같다.

1) 漏出線에 對한 壁두께

$$\frac{75}{4} \cdot B = 0.01$$

$$B = 5.3 \cdot 10^{-4}$$

$$\begin{aligned} \text{壁두께} &= (4 - \log 5.3) TVT \\ &= 3.3 TVT \\ &= 73 \text{ cm 콘크리트} \end{aligned}$$

2) 散亂線에 對한 壁두께

有效線束方向의 90° 角度로 1 m 距離에서의 散亂線量
은 ICRP-21, Table 19에 依하면 一次線의 約 0.07%
이다.

$B = 5.3 \cdot 10^{-3}$ 일때 ICRP-21, Fig. 57에서 90° 散亂
에 對한 曲線에 依하면

$$\text{壁두께} = 44 \text{ cm 콘크리트}$$

上記 二種의 壁두께를 比較할때 散亂線의 壁은 漏出
線에 對한 防禦壁두께 만으로도 充分하고 散亂線은
 $0.01R/week$ 以下가 된다.

萬一 二次線의 防禦壁은 安全性을 考慮하여 餘裕있
게 80 cm 콘크리트로 한다면 더욱 좋을 것이다.

治療室의 出入口은 防禦를 爲하여 室內側에 延長壁
(MAZE)을 施設하여 放射線이 적어도 2회이상 散亂된
後 門까지 到達하여 散亂線이 適當 負荷量에 對하여 10^{-6}
單位까지 減少되어야 한다. 그리하면 治療室 出入口
外側에서는 適當 $0.1R/week$ 를 超過하지 않을 것이다.

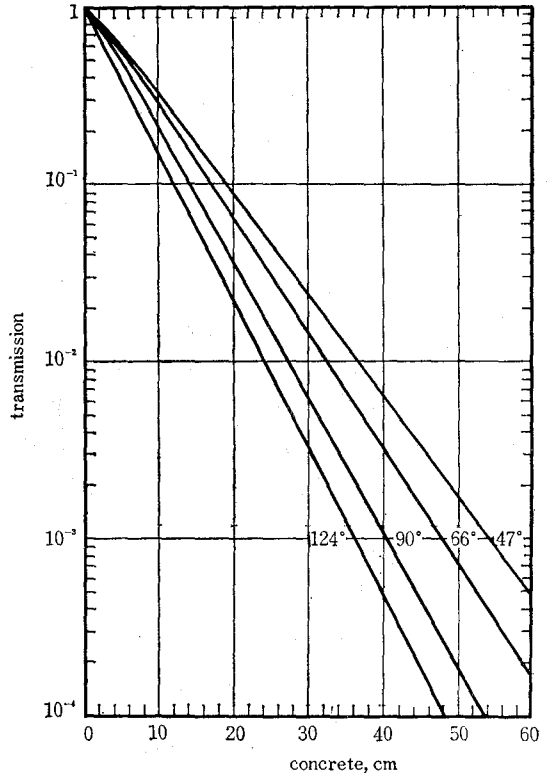


Fig. 57. Broad-beam transmission of ^{60}Co gamma rays scattered at various angles from a patientsimulating phantom through concrete, density $2.35g/cm^3$.

한편 散亂方向이 90° , 30° 인 境遇 그 에너지는 約
 $320KeV$ 程度가 되고 鉛에 對한 吸收係數는 $0.25cm^2/gm$ 이다.

만일 出入口에서 MAZE가 없고 이들의 放射線을 遮
蔽하려면 build-up factor는 2.0이고 $B = 0.1$ 일때 出入
門 防禦物質로서는 10mm의 鉛이 必要하게 된다.

그러면 門작의 重量으로 開閉에 大端한 不便이 있게
될 것이므로 언제나 MAZETV를 堅속히 延長하여 利
用하는 것이 便利하다.

한편 治療室은 窓門이 있어서는 안되며 治療室內 患
者의 狀態를 觀察하려면 TV를 利用하는 것이 좋다.

그러므로 코발트治療室을 設計하려면 放射線遮蔽物
로 因하여 重量의 構造物을 要하기 때문에 病院建物 內
設置時는 可及의 地下層을 利用하거나 其他建物과 分
離된 場所를 擇하는 것이 좋다.

만일 그 周邊에 比較的 낮은 線量을 利用하는 放射
線 計測室이나 또는 計測裝置가 있다면 環境放射線으
로 因한 影響이 없도록 治療室 位置選定에 細心한 配
慮가 있어야 한다.

VI. 高에너지 加速裝置 治療室 防禦

近來 國內에도 보다 高에너지의 放射線을 放出할 수 있는 線型加速裝置가 續續 導入 稼動中에 있으며, 이로부터 일어지는 X線 또는 電子線을 利用한 放射線治療 効果의 優秀性이 알려지므로서 그數도 漸次增加될 것으로 思料되므로 이에 따른 放射線防禦도 多樣하게 考慮되어야 하겠기에 다음과 같은 觀點에서 Fig. 2를 例로 檢討코져 한다.

1. 20MeV 線型加速裝置 設置時 考慮 點點

- a) 有效 X線束에 對한 防禦
- b) 裝置 Head部의 漏出線에 對한 防禦
- c) 散亂線에 對한 防禦
- d) 中性子에 對한 防禦
- e) 放射核種의 生成
- f) 毒性 氣體의 生成

2. 20MeV 線型加速裝置 放射線防禦

加速裝置의 最大에너지가 20MeV인 X線이 線源인 標의物로부터 1m 距離에 있는 Isocenter에서의 出力이 400Rad/min이다. 萬一 Isocenter 位置에 있는 照射面에 300 Rads씩 一日 70回 照射하고 適當 6日을 稼動한다면 適當 負荷量은 ;

$$W = 70 \cdot 300 \cdot 6 \text{ Rad/week}$$

$$\approx 1.25 \times 10^6 \text{ Rad/week}$$

이때 同一位置에서 Head로부터 漏出된 線量의 許容置는 ICRP Publication 15(135)에 依하면 有效線束 B

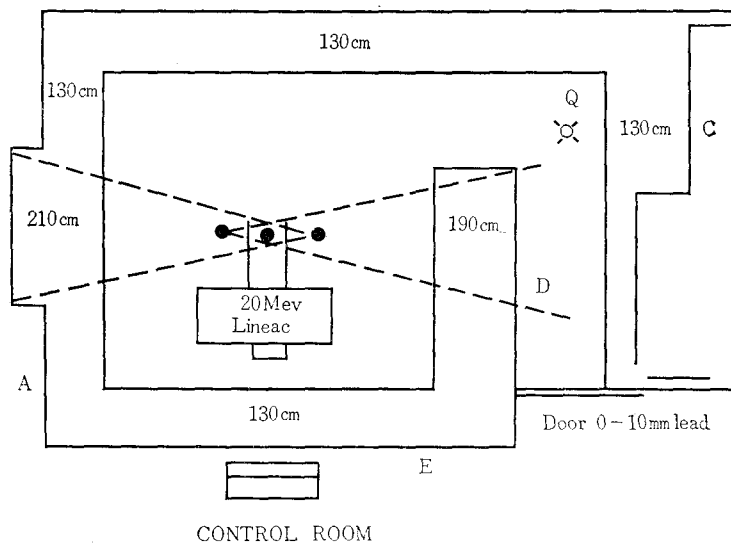


Fig. 2. Lay-out for a 20MeV accelerator installation. concrete density 2.35.

의 0.1이다.

萬一 治療室이 病院 最下層에 位置한다면 固定照射이진 振子照射이건 放射線束의 方向은 Fig. 2에서 바닥과 防禦壁中 A와 B 그리고 天井을 向하게 될 것이므로 一次壁은 壁 A의 一部과 天井일 것이다. 그러므로 그의 一部에는 追加壁(Radiation Butter)을 마련하여 MAZE 內 一部를 除外하고는 最少의 線量이 되도록 設計 되어야 한다. 이때 使用因子는 다음과 같다.

防禦壁 A ; U=0.1

防禦壁 D ; U=0.1

天井 ; U=0.1

바닥 ; U=0.7

防禦壁두께를 各各 算出 하려면 ICRP Publication-21에 의거 다음 基本式을 利用한다.

$$\frac{W \cdot U \cdot T}{d^2} \cdot B = P$$

여기서 d는 線源으로부터의 距離(m), T는 點有因子, P는 適當 最大許容線量으로 하고 T=1.0인 境遇에서 檢討코져 한다.

3. 一次防禦壁(Primary Barriers)

1) 壁A의 두께

壁A는 線源으로부터 距離 d=6m에 있고 使用因子 U=0.1 이므로 基本式에 代入하면 B의 값이 얻어진다

$$\frac{W \cdot U \cdot T}{d^2} = \frac{1.25 \times 10^6}{10 \times 36} = 0.35 \times 10^3 \text{ Rad/week}$$

이는 壁이 없을때의 값이므로 最大許容置(P)의 값에 따라 B를 求하고 前과 同一하게 透過曲線에 依하여 다음과 같이 壁의 두께를 求한다.

放射線從事者; P=0.1Rad/week, B=2.9×10⁻⁴

壁두께=165 cm, 콘크리트

非 從事者; P=0.01Rad/week, B=2.9×10⁻⁵

壁두께=210 cm, 콘크리트

20MeV X線의 放射線량을 1/10로 減少시키는 吸收體 두께(TVT)는 45cm 콘크리트이다.

한편 透過曲線을 利用하지 않을 境遇라면 壁의 두께를 X라 할때 다음式으로 算出된다.

$$X = TVT \cdot \log\left(\frac{1}{B}\right)$$

萬一, P=10mRad/week라면

$$X = 4.5 \times \log\left(\frac{10^5}{2.9}\right)$$

$$= 4.5 \times 4.54 = 205 \text{ cm 콘크리트}$$

우리는 P의 값을 特殊條件에 따라 選擇되는 境遇가 있으나 一次防禦壁에서의 P의 값은 一般的으로 P=10mRad/week를 擇하고 콘크리트의 密度는 2.35로서 壁두께는 210 cm가 適當함을 알았다.

2) 壁, MAZE D,의 두께

$$U=0.1, d=6m$$

$$P=30mRad/week \text{ (管理區域內 許容值)}$$

$$B=8.6 \times 10^{-5}$$

$$X=190 \text{ cm}$$

3) 天井과 바닥의 두께

天井에 對한 Radiation Buffer는 前과 同一한 方法으로 算出하나 콘크리트 두께로 因하여 線源으로부터 距離가 短縮된다면 計算된 두께에 若干 追加되어야 한다.

한편 바닥에서의 防禦壁은 別 問題될 것이 없겠으나 天井만은 Piping 또는 ducts 등에 依하여 放射線의 吸收樣相이 다를 것을 考慮하여 慎重히 補正되어야 한다

4. 二次防禦壁(Secondary Barriers)

다음은 20MeV X線照射裝置中 Head로 부터 漏出되는 放射線과 照射線束에 依하여 發生되는 散亂線을 分離하여 檢토코져 한다.

1) 散亂線(Scattered Radiation)

光粒子의 에너지가 散亂에 依한 吸收中 가장 代表的으로 適用되는 것은 잘 알려진 Compton effect로서 다음式에 依하여 吸收된다.

$$h\nu_s = \frac{h\nu_0}{1 + \frac{h\nu_0}{m_0c^2}(1 - \cos\theta)}$$

여기에서 $h\nu_0$ 는 一次線인 光粒子의 에너지, θ 는 散亂角이다.

散亂線이 90°로 散亂되었거나 $h\nu_0$ 가 無限대로 增加되면 散亂된 光粒子의 에너지($h\nu_s$)는 $h\nu_s = m_0c^2$ 에 接近

된다.

그러나 數 MeV의 $h\nu_0$ 는 이미 限界點에 到達한 狀態이므로 散亂線의 에너지는 限界內의 값으로 있다.

이것은 一次線이 萬一 3MeV 以上の 에너지 라면 完全히 消滅되기前에 多數의 90° 散亂으로 되고 大部分의 散亂線은 單一한 0.5MeV의 放射線으로 된다.

이와같이 散亂線이 되기 爲한 에너지의 限界는 $\frac{1}{2}m_0c^2$ 이고 그의 最少 限界 에너지는 250KeV이다.

그러므로 MAZE 入口와 같은 곳에서는 250KeV 以上の 放射線이 2回 以上 散亂(2×90°散亂의 境遇)된 後 이므로 一次線의 高에너지에 比하여 極히 低에너지로 나타나게 된다.

예컨대 20MeV X線의 90°散亂線의 에너지는 Cs¹³⁷ 또는 1MeV X線에 該當되는 에너지 이고 180° 後方散亂의 에너지는 0.5MeV X線의 透過曲線에 該當된다.

一般的으로 高에너지의 散亂線은 患者, Filter, diaphragm, Couch, Floor, Wall 등에 依하여 前方散亂이 두드러지게 많고 그의 散亂線에는 創生帶(Pair Production)에 依한 陽電子(0.5MeV)가 存在하게 된다.

한편 患者의 皮膚面에서 90° 散亂으로 發生된 散亂

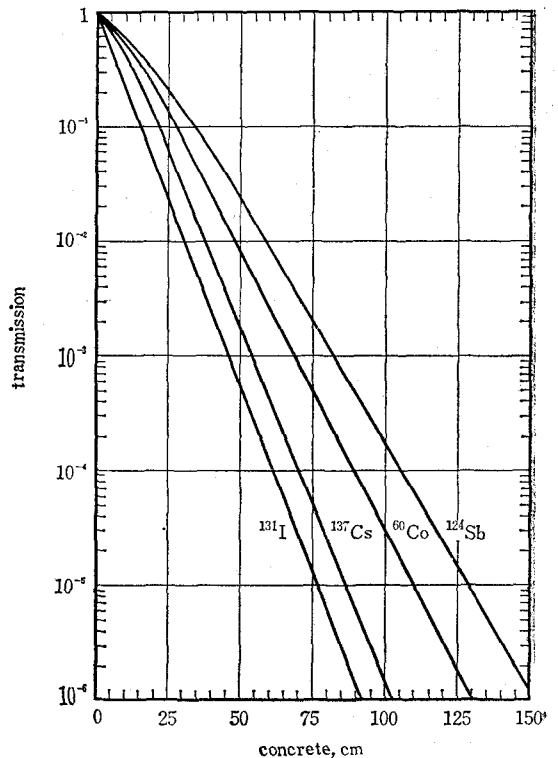


Fig. 47. Broad-beam transmission of gamma rays from various radionuclides through concrete, density 2.35 g/cm³

線이 1m 距離에서는 有効線束의 線量의 0.1%以下이므로 0.1%의 數値를 利用하면 安全하고 適切한 餘裕를 주는 結果가 된다.

2) 散亂線에 對한 壁E의 두께

Fig. 2와 前과 同一한 값을 擇하면 $d=5m, W=1.25 \times 10^5, U=0.1\%$

$$\frac{1.25 \times 10^5}{10^3 \times 25} = 5 \text{Rad/week}$$

$P=0.1 ; B=2 \times 10^{-2} X=35 \text{ cm}$ 콘크리트

$P=0.01 ; B=2 \times 10^{-3} X=50 \text{ cm}$ 콘크리트

참조 ; ICRP Publication-21, Fig. 47, Cs^{137} 透過曲線

3) 漏出放射線에 對한 壁E의 두께

一次線에 對한 0.1%의 量이 漏出되는 것으로 假定하면 一次線의 透過曲線이 適用하다.

Fig. 2로부터 $d=5m$ 일때 同一한 方法에 依하면 壁이 없을 때의 값은 5Rad/week의 線量이다.

이때 必要한 콘크리트 壁의 두께는 ;

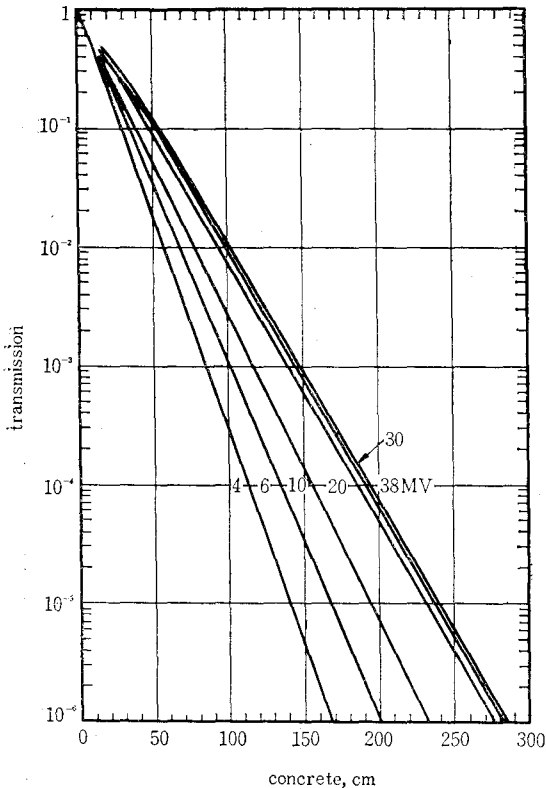


Fig. 45. Broad-beam transmission of x rays through concrete, density $2.35g/cm^3$. 4MV:linear accelerator; 1mm gold target followed by 20mm aluminium beam flattener. 6-38MV: Betatron; target and filtration not stated. The 38 MV curve may be used up to 200 MV (Miller and Kennedy, 1956).

$P=0.1 ; B=2 \times 10^{-2}, X=80cm$

$P=0.01 ; B=2 \times 10^{-3} X=125cm$

참조 ; ICRP Publication-21, Fig. 45

4) 壁E 두께의 結論

二次防禦壁의 두께는 散亂線에 對한 防禦壁이 아니라 漏出放射線에 對한 防禦壁의 두께로 決定되어야 適合하며 그의 두께는 130cm程度의 콘크리트 임을 알게 되었다.

5) The Maze

治療室 出入口와 出入門에서 放射線의 에너지는 Maze로 因하여 다음과 같이 區分된다.

(1) 患者로부터 2回散亂($90^\circ \times 2$)된 放射線의 에너지.....250KeV

(2) 漏出로 因한 散亂은 一回散亂(90°)된 放射線의 에너지.....500KeV

(3) 壁D를 透過한 散亂線.....500KeV

Maze의 設置는 有効線束이 壁D를 透過한 後 出入門에 到達되지 않도록 設計되므로 出入口의 位置에서 的 線量은 計算이 若干 複雜한 것으로 正確할 수 없다 그러나 實驗上 Maze 1m下部에서 的 線量은 Maze 끝 (Fig. 2. 點 Q) 部分線量에 比하여 約 10% 程度가 된다.

그리고 點 Q에서 的 線量은($d=7m$) 다음과 같다.

散亂線量 ; 2.5Rad/week

漏出線量 ; 2.5Rad/week

6) 出入口의 二次線量

Fig. 2에서 出入口는 點 Q로부터 6m에 位置하고 있다. 本項에서는 線量의 算出方法은 앞서와 同一 함으로 結果만을 記術한다.

(1) 一回散亂(90°)線量 ; 7mRad/week

(2) 漏出線量 ; 7mRad/week

(3) 有効線束으로부터 散亂된 放射線과 Maze를 透過한 線量의 合은 許容置 30mRad/week 以下이고 Maze로 向한 有効線束의 照射範圍로부터 出入口까지 的 距離는 約 2m이므로 1~2mRad/week이고 Maze 的 始點에서는 約 15mRad/week가 된다. 그러므로 出入口에서 的 出入門은 防禦用일 必要가 없을지 모르겠으나 上記 線量들은 推定線量에 不過하며 正確한 線量보다 若干 多量 또는 少量일 수도 있으므로 實際 放射線을 測定 確認한 후에 決定할 問題이며 特別히 Maze가 깊숙히 施設 되었다면 防禦用 門과 없이 利用 하는 것도 더욱 便利할지 모르겠다.

한편 本例(Fig. 2)에서 萬一, Maze가 없다면 出入口에는 1cm의 鉛으로 遮蔽되어야 當然할 것이다.

그러나 出入口은 防禦用이건 아니건 間에 잠글 수

있는 裝置를 要하며(ICRP Publication-16, (34), (123)) 出入門이 있다면 그의 荷重線(Border Line)에 放射線 區域(Radiation Zone)이라 標示하고 出入口에는 門이 잠긴 狀態에서 信號燈를 設置하고 其他 警戒探知 裝置가 마련되어야 한다.

5. 其他 建築資材(Other Building Materials)

放射線防禦用 建築資材는 그 物質의 原子番號와 密度가 높을 수록 防禦의 效果가 높기 때문에 벽의 두께를 減少시킬 수 있다.

즉 20MeV 以下の 에너지를 갖는 X線의 防禦에 있어서 原子番號가 比較的 낮은 物質인 境遇 그 物質 單位 面積當 質量(g/cm², kg/m²)에 따라 防禦效果에 差異가 있다.

특히 吸收過程에서 創生帶(Pair Production)에 依한 吸收는 주로 原子番號가 25 以上の 物質에서 나타나므로 原子番號의 增加로 吸收效果를 높일 수 있고 또 單位 面積當의 質量 역시 減少시킬 수 있다. 例를 들면 우리는 白灰라고 불리는 重晶石을 콘크리트에 混合하여 그의 密度를 3.2로 增加 시키면 防禦壁의 두께를 73%로 減少시킬 수 있으므로 Fig. 2, 壁A(Radiation Buffer)를 210 cm로부터 153 cm로 減少시킬 수 있으며 鐵을 混合하여 密度를 더욱 높이면 壁두께를 더욱 減少시킬 수 있다.

이때 콘크리트보다 單位 面積當 質量을 높이기 爲한 補整置는 다음과 같다(W. Winder).

	Peak Energy in MeV			
	00	20	30	40
Barytes Concrete (density 3.2)	0.98	0.93	0.82	0.75
Iron (density 7.9)	0.91	0.86	0.75	0.67

특히 barytes concrete는 15~20MeV에서 吸收效果가 높다.

6. 中性子 生成(Neutron Production)

고에너지 γ 線에 依한 中性子の 生成 即(r·n) 反應은 10MeV 以上, 즉 극히 制限된 原子에서 生成되나 그 以上の 에너지는 여러가지 原子에서 中性子를 生成하여 各種 放射能을 誘發한다.

患者 體內에서 發生되는 中性子는 光粒子 線束中 約 1% 程度이고 M. Brenner는 32MeV Betatron에서 1Rad當 6 m Rem 임을 밝힌바 있다.

勿論 粒子加速裝置에 依하여 放出되는 速中性子束은 그裝置의 構造와 裝置를 可動하는 에너지에 따라 그의 量이 決定되겠으나 醫療用 電子加速裝置에서 誘

發되는 中性子는 大略 電子加速裝置로부터 1 m 距離에서 有效線束中 10⁶~10⁸n/cm²으로 밝혀진다.

한편 電子加速裝置에 依한 20MeV X線의 TVT는 콘크리트에서 45 cm 이고 ICRP Publication-16, Fig. 28에 의하면 中性子の TVT는 約 20~30cm(例, 5MeV 中性子는 TVT=22 cm)이다.

有效線束의 等價線量 線中에는 約 1%가 中性子임이 알려져 있으며 中性子の TVT는 X線보다 매우 낮으므로 50MeV 以下の 中性子는 X線의 防禦壁만으로 充分히 遮蔽될 것이다.

더욱이 原子番號가 큰 物質로서 製作된 Head는 그 自體에서 中性子が 大部分 吸收될 것이므로 出入門에 中性子 遮蔽物인 Paraffin이나 Polyethylene+Cadmium 등을 別途로 利用할 必要는 없다.

7. 生體內 放射性核種의 生成

(Production of Radionuclide)

고에너지의 放射線은 X線의 Target, 患者, 遮蔽壁等 各種物質에서(r·n) 또는 (r·p)反應으로 放射核種을 誘發하고 그로 因하여 熱 또는 速中性子를 生成하여 二次的으로 放射化 過程을 일으킨다.

특히 X線이 10~15MeV 以上일때 患者體內에서 放射化 作用으로 放射核種(主로 C¹¹ N¹³ O¹⁵ 등)이 發生된다.

그러나 이들의 量은 中性子 自體의 量보다 매우 적기 때문에 X線에 比하면 0.1 또는 1.0의 約 1/1000 程度이고 生成된 放射核種의 半減期는 매우 짧아서 普通數秒로부터 數分에 이른다.

그러나 實際 問題가 되는것은 加速裝置를 管理하거나 修理時에 간혹 半減期가 12.8 時間의 ⁶⁴Cu가 發見될 때가 있으므로 事前에 放射能의 有無를 檢査하여야 한다.

한편 매우 興味있는 것은 空氣中에서 放射能 生成可能性이 있다는 것이다. 이는 주로 다음 反應으로 나타난다.

Reaction	Threshhold	Half-life
¹⁴ N(r·n) ¹³ N	10.5MeV	10.1min
¹⁶ O(r·n) ¹⁵ O	15.6MeV	2.05min

室內에서 發生된 ¹³N과 ¹⁵O의 濃度는 X線의 幾何學的 分布에 따라 자기 다른 反應으로 나타나고 特別 原子衝突斷面積(Cross Section), 半減期 그리고 空氣의 還風準(Ventilation Rate)에 따라 그의 濃度를 計算한다(International Journal of applied Radiation and Isotope, Vol. 22, 1971 pp.29~40. Brynjolfsson and T. G. Martin).

空氣中 20MeV 加速裝置로부터 發生된 X線에 의하여 生成된 放射性核種은 매우 적은 量이나 ^{15}O 보다 ^{13}N 이 많이 發生되며 還風하지 않는 停止狀態의 空氣에서 崩壞와 生成이 平衡狀態라면 그의 濃度는 大略 $5 \times 10^6 \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 에 달한다.

空氣中 ^{13}N 의 最大許容濃度(MPC)는 $10^{-4} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 이므로 患者의 治療時間이 1~2分 이라면 그의 濃度는 許容量의 約 10% 程度가 되고 治療開始前에 還風이 繼續되면 放射能을 無視할 수 있기 때문에 特別히 注意할 必要는 없다.

8. 有毒氣體(Toxic Gases)

고에너지 放射線은 治療室內 空氣와의 相互作用으로 空氣中에 窒素를 含有한 有毒氣體分子를 發生시켜 그의 濃度가 높게 된다(British Standard 4094 ; Part 2 ; 1971 p. 44).

이때 治療裝置가 있는 治療室의 크기가 150 m^3 정도이고 裝置의 出力이 線源으로부터 1 m 距離에서 $400 \text{ Rad}/\text{min}$ 이라면 室內 空氣中 有毒氣體는 10^7 分子/ $\text{sec} \cdot \text{cm}^3$ 에 이르고 萬一 治療時間이 100秒라면 10^9 分子/ cm^3 이므로 大略 10^{-4} (PPM)이다.

한편 許容限界値는 1 PPM이므로 一般的 還風裝置를 利用 한다면 結果적으로 別 問題가 될 것이 없다.

9. 線量計測(Dosimetry)

放射線의 出力과 線東內 線量의 分布는 加速裝置 特性에 따라 差異가 있다(ICRP Publication-15 (128) (138)).

그러므로 ICRP는 1 m에서 $100\text{R}/\text{min}$ 以上の 線量을 放出하는 裝置들은 그 裝置內에 이미 放出線量을 알 수 있는 線量計測器 2個를 分離된 位置에 設置하도록 권고하고 있으며 그 裝置는 普通 放射線이 透過할 수 있는 電離曹를 利用하고 治療時 連續적으로 線量을 記錄할 수 있도록 設計되어야 한다고 勸告하고 있다.

10. 其他 加速裝置의 에너지

우리는 지금까지 20MeV 加速裝置를 中心으로 全般의인 內容을 檢討 하였다. 그러나 其他 에너지의 加速裝置도 ICRP Publication-21의 透過曲線을 利用하면 各己 適切한 遮蔽施設을 마련할 수 있다. 한편 40MeV 加速裝置의 遮蔽施設도 20MeV에서의 施設과 洽似 하

겠으나 그 以下에 對한 防禦壁의 두께는 各己의 最大 에너지에 따라 漸次 減少될 것이다(ICRP Publication-21 Fig. 40).

VII. 結 言

緒論에서 言及한 바 近來 國內 여러 病院에서는 數 없이 많은 各種 放射線發生裝置를 導入 稼動中에 있으며 앞으로 續續 새로운 放射線發生裝置가 導入設置 될 것이다.

한편 放射線防禦施設에 關하여는 各 病院 研究所 그리고 製作會社 나름대로 防禦施設을 設計하고 있으나 實際 放射線防禦施設이 얼마나 完壁한가 또 施設을 위한 空間의 또는 經費에 있어서 必要 以上の 浪費는 없는지의 與否에 關하여 再檢討 하였다. 本 綜說이 既存 施設이나 또 새로 設計中에 있는 施設計劃에 多少나마 도움이 된다면 實로 多幸이겠다.

References

1. ICRP Publication 15 (1969). Protection against Ionization Radiation from External Sources.
2. ICRP Publication 21 (1971). Data for Protection against Ionizing Radiation from External Sources.
3. NCRP Report No. 33 (1968). Medical X-ray and Gamma-ray Protection for Energies up to 10 MeV.
4. NCRP Report No. 34 (1970). Medical x-ray and Gamma-ray Protection for Energies up to 10 MeV.
5. NBS Handbook 97 (1964). Shielding for High-Energy Electron Accelerator Installations.
6. British Standards 4094. Part I (1966). Data on Shielding from Ionizing Radiation.
7. British Standard 4094. Part II (1971). Data on Shielding from Ionizing Radiation.
8. NEA (1974). Radiation Protection Considerations on the Design and Operation of Particle Accelerators.
9. Engineering Compendium on Radiation Shielding, Volume III, Springer-Verlag (1970).