

平成18年度厚生労働科学研究費補助金  
分担研究報告書

医療放射線分野における法令整備等  
含めた管理体制に関する研究

国際免除レベル取り入れに伴う医療機関への影響  
の評価に関する研究

平成19年3月

分担研究者 渡辺 浩

## 目 次

研究要旨	1
A 背景と目的	2
B 研究方法	3
C 研究結果	3
D 考察	10
I Report No. 147の概要	10
II Report No. 147によるしゃへいパラメータの近似関数式の取り入れ	11
III 鉛とコンクリート以外のしゃへい体の透過率の取り入れ	12
IV 総括	12
E 結論	13
F 参考文献	13
表1～表10	15
別添資料1 NCRP Report No. 147におけるエックス線診療施設の しゃへい設計方法に関する概要と主な改正点	25
別添資料2 NCRP Report No. 147抄訳	31
別添資料3 B. R. Archer and J. E. Gray, Important changes in medical x-ray imaging facility shielding design methodology. A brief summary of recommendations in NCRP Report No. 147, Med. Phys. 32, 3559-3661 (2005)	53

平成18年度厚生労働科学研究費補助金（医療安全・医療技術評価総合研究事業）  
「医療放射線分野における法令整備等含めた管理体制に関する研究」

### 分担研究報告書

「国際免除レベル取り入れに伴う医療機関への影響の評価に関する研究」

分担研究者 渡辺 浩 独立行政法人 労働者健康福祉機構 横浜労災病院

研究要旨 平成13年4月に医療法施行規則の改正がなされ、International Commission on Radiological Protection (国際放射線防護委員会、以下ICRP) の1990年勧告 (Pub. 60) の取り入れの他に、エックス線装置等の防護基準の見直し (International Electrotechnical Commission (国際電気標準会議、以下IEC) の国際基準との整合性を図ること) 等がなされた。この結果、ICRP 1990年勧告 (Pub. 60) のわが国への適用に伴い管理区域境界の実効線量限度が3倍強化されると共に、エックス線装置等に関する国際基準との整合性を図るため、当時国際的な評価を受けていたNational Council on Radiation Protection and Measurements (米国放射線防護測定審議会、以下NCRP) Report No. 49 (1976) (以下、Report No. 49) を、施行規則改正に伴い発出された厚生労働省医薬局長通知「医療法施行規則の一部を改正する省令の施行について」(平成13年3月12日付) (以下、医薬発第188号通知) において、わが国の医療に適用されるエックス線装置からの漏えい線量のしゃへい算定評価方法として取り入れた。

一方、NCRPは2004年11月にReport No. 49を改訂しNCRP Report No. 147 (Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities) (以下、Report No. 147) を発刊したため、このReport No. 147をわが国に取り入れる有用性についてReport No. 49等と比較検討した。

検討の結果、Report No. 147の主な改正点の内、① Simpkinらによるしゃへい計算パラメータの近似関数式の採用、② 新たなしゃへい体の追加 (鉄、石膏、ガラスと木材) をわが国の法令に取り入れることにより、現行のエックス線しゃへい算定評価の課題が解決されることが明らかになった。即ち、第1に、しゃへい計算パラメータの近似関数式の採用により、透過率等のデータが離散的な管電圧としゃへい体の厚さに基づく値であるため補間法で算定することによる安全側での過大評価の是正、そして、第2に、しゃへい体の透過率の算定に鉄、石膏、ガラスと木材が新たに追加されることにより、これまでの鉛、コンクリートに限定されていたしゃへい体を用いた透過率に基づく値と実測値を近づける、という課題が解決されることが示された。なお、小林分担研究者の実測報告により、Simpkinらの近似関数式による算定が妥当であるとの結果を得ている。

以上の結果、Report No. 49の改訂版であるReport No. 147の内容を医薬発第188号通知に取り入れることにより、放射線安全を満たした上で、適切なしゃへい量による合理的・経済的なエックス線施設の設計が可能となり、国民により幅広く適切な医療を提供することに資することができると考えられた。

研究協力者	大場 久照	弘前大学
	泉對 則男	横浜労災病院
	木村 文治	横浜労災病院
	佐野美也子	横浜労災病院
	伊藤 照生	癌研究会附属病院
	並木 宣雄	日本メジフィジックス (株)
	堀越亜希子	日本メジフィジックス (株)
	岩永 哲雄	(社) 日本アイソトープ協会
	高橋美保子	(社) 日本アイソトープ協会
	草間 経二	(社) 日本アイソトープ協会
	池淵 秀治	(社) 日本アイソトープ協会

## A 背景と目的

平成 13 年 4 月に医療法施行規則が改正され、ICRP の 1990 年勧告 (Pub. 60) の取り入れ及びエックス線装置等の防護基準の見直し (IEC の国際基準との整合性を図ること) 等がなされた。ICRP の 1990 年勧告の取り入れに伴い、放射線診療従事者の実効線量限度が 1 年間 50 mSv から 5 年間 100 mSv (但し、いかなる 1 年間においても 50 mSv を超えないこと) に変更、管理区域の境界での線量限度が  $300 \mu\text{Sv}/\text{週}$  から  $1.3\text{mSv}/3$  月間に 3 倍強化、その他用語変更等の改正がなされている。エックス線装置等の防護基準の見直しにおいては、医業発第 188 号通知では ICRP Pub. 33<sup>2)</sup> を取り入れた 1999 年 7 月 17 日付健政発第 383 号からの考え方を変更し、当時国際的な評価を受けていた NCRP Report No. 49 (1976) (以下、Report No. 49)<sup>2)</sup> を取り入れた。具体的には、施設・設備に係る線量基準を担保するために必要なしゃへい体厚を求める方法から、線量評価点における線量あるいは線量率を求める方法に改めている。この通知は、上記の変更だけでなく、しゃへい計算方法等を詳述したことにより、地方医療行政機関および医療機関等のしゃへい計算方法の理解と普及に貢献している。このように、医業発第 188 号通知において線量評価の考え方が精査されたが、算定評価の基本となる透過率や散乱係数などの値付けに関するエックス線管電圧が離散的で、かつしゃへい体の種類が鉛とコンクリートに限定されていた。

このため、医療機関で使用されるエックス線装置の管電圧は、装置の使用目的・使用状況が様々であることにより、Report No. 49 の内容を取り入れた後も次のような課題が残された。即ち、① 透過率のデータが鉛とコンクリートに限定されているが、エックス線診療室の使用実態に照らして正当に線量評価するためには、鉄を含めた付加的なしゃへい体に係る透過率のデータが必要であること、② 透過率等のデータが離散的な管電圧 (及びしゃへい体の厚さ) に基づく値では、エックス線の線量評価を補間によって求める必要があり、安全側で過大評価される傾向にあるとともに、複雑な評価作業が必要になること、である。

Report No. 49 の発刊以降、しゃへい計算に用いられるパラメータに関するデータが順次公表されるとともに、Simpkin ら<sup>3-5)</sup> は、他の公表されたデータや自らのデータに基づいて、コンクリートや鉛以外の鉄、ガラス、石膏及び木材のしゃへい体を適用する場合のしゃへい計算パラメータの近似関数式を提案し、それぞれのしゃへい体によ

る透過率を提示した。これらの Simpkin らが提示しているエックス線管電圧及びしゃへい体に起因するパラメータに基づく近似関数式を用いることにより、離散的な管電圧を基にした補間法によらず、実態に即したろえい線量を直接求めることが可能となった。一方、NCRP は 2004 年 11 月に Report No. 49 の発刊以降の新しい知見を取り入れた Report No. 147「エックス線診療施設の遮へい構造設計」<sup>6)</sup> (2005) (以下、Report No. 147) を、Report No. 49 の改訂版として発刊した。

Report No. 147 は、新しい勧告と技術情報を盛り込んでおり、Simpkin らによるしゃへい計算パラメータの近似関数式等を取り入れている。このため、我々は、Report No. 147 の線量評価算定方法をわが国に取り入れることの妥当性について、現在わが国のエックス線装置の漏えい線量の算定評価方法を規定している医薬発第 188 号通知で採用している Report No. 49 との比較検討を行い、適切なしゃへい量によるエックス線施設設計費用の抑制により、適切な医療を幅広く提供することに資することを目的とする。

## B 研究方法

Report No. 49 (1976)、102<sup>7)</sup> (1989)、147 (2004) を主な資料とし、関連する参考文献を収集し、それぞれについて翻訳・分析等の検討を行った。また、わが国における施設及びしゃへい体の材質等を用いた基礎的検討、並びに合理的な線量の算定評価法に寄与する検討を行った。

## C 研究結果

### I Report No. 147 のエックス線しゃへい評価に係る概要と主要改正点

Report No. 147 は、冒頭の目的と適用範囲において、「放射線しゃへいの目的は、作業従事者と一般公衆への放射線被ばくを許容可能なレベルにまで制限する事である。この報告書はエックス線診療施設に対するしゃへい設計としゃへい設備に関わる勧告と技術情報を提示する。」としている。Report No. 49 の改訂版である Report No. 147 には、新しい勧告と技術情報が盛り込まれているため、その主要な改正点<sup>8)</sup>を以下に列挙した。なお、詳細については資料 1 に別添している。

- ① Report No. 147 は Report No. 49 の改訂版
- ② Report No. 49 で考慮されなかった CT 装置、乳房撮影装置、デジタル撮影装置等の近年のモダリティに対応
- ③ しゃへいパラメータの近似関数式の取り入れ
- ④ コンクリートと鉛以外のしゃへい透過率の取り入れ
- ⑤ 一次線に対する使用係数 (use factor)、占有係数 (occupancy factor)、施設稼働負荷 (workload) の見直し
- ⑥ しゃへい評価に使用する線量単位系の変更  
照射線量 (R) ⇒ 空気カーマ (Gy)
- ⑦ 管理区域におけるしゃへい設計目標値の設定： 0.1 mGy/週 (5 mGy/年)
  - a. 放射線作業者の実効線量限度 (Report No. 116) 50 mSv/年
  - b. 新規での放射線施設設計のための実効線量限度 (Report No. 116) 10 mSv/年
  - c. 妊婦の放射線作業者に対する等価線量限度 (Report No. 116) 0.5 mSv/月

- Report No. 147 では b、c の両基準を満たすために 5 mSv/年に設定（より安全側）
- ⑧管理区域外の区域におけるしゃへい設計目標値の設定：0.02 mGy/週（1 mGy/年）  
一般公衆の実効線量限度は ICRP Pub. 60、Report No. 116 では 1 mSv/年であるが、Report No. 147 ではいかなる 1 年間においても 1 mSv に設定（より安全側）
  - ⑨ 使用係数 U (use factor) の変更
  - ⑩ 線量評価点の明確化
  - ⑪ 占有係数 T (occupancy factor) の一部変更
  - ⑫ プレしゃへい体の採用  
一次しゃへい体厚の計算では受像器等の撮像構成機器をしゃへい体として考慮できる。
  - ⑬ 管電圧ごとの患者当たりの稼働負荷 (mA・min/patient) の提示  
American Association of Physicists in Medicine (AAPM) による米国内医療施設の実態調査のデータに基づくものである。また、患者数には、1 週間に検査を受けた実患者数を適用する（撮影数を考慮した延べ患者数は適用しない）。
  - ⑭ 実稼働負荷が不明な場合に使用する一般的な稼働負荷値の見直し
  - ⑮ 患者当たりの一次空気カーマ (mGy/patient at 1m) の提示  
ただし、受像器や撮影台による減弱は考慮していない。また、血管撮影装置、CT 装置、乳房撮影装置については、受像器、検出器、支持台で一次線をカットする構造となっているため、一次線を見捨てることとしている。
  - ⑯ 散乱線、漏えい線に関する患者当たりの二次空気カーマ (mGy/patient at 1m) 漏えい線評価のための使用条件を提示
  - ⑰ 有資格者によるしゃへい設計段階での関与及び施設施工後の施設検査等の実施の明確化

Report No. 147 の重要なポイントは、Report No. 49 で考慮されなかった CT 装置、乳房撮影装置、デジタル撮影装置などの近年のモダリティに対応したこと、しゃへいパラメータの近似関数式の取り入れたこと、コンクリートと鉛以外のしゃへい透過率の取り入れたこと、ICRP が Pub. 60 で勧告した線量限度の概念を取り入れた管理区域及び管理区域外のしゃへい設計目標値を明示していること、X 線診療室のタイプ別に稼働負荷及び患者あたりの一次空気カーマ等を明示し、X 線診療室のタイプ別のしゃへい計算方法を示したこと及び有資格者によるしゃへい設計段階での関与及び施設施工後の施設検査等の実施の明確化したことにある。

ただし、上記 Report No. 147 のエックス線しゃへい評価に係る主要改正点において、⑥、⑦、⑧、⑩及び⑪は、ICRP 1990 年勧告等の取り入れの際にそれらを踏まえ、かつ、わが国独自の体系が整備されている。また、②、⑤、⑨及び⑫～⑰については、今後、わが国の現状と取り入れによる影響評価等に基づいた検討の後に、整備あるいはその是非について検討が必要であると考えられた。従って、近々の課題は、③しゃへいパラメータの近似関数式の取り入れと④コンクリートと鉛以外のしゃへい透過率の取り入れであると考えられた。

## II 空気カーマ、透過率、半価層、散乱係数等の漏えい線量評価因子の算定法

上記 I の検討を踏まえ、医薬発第 188 号通知への取り入れが急務であると考えられた、しゃへいパラメータの近似関数式の取り入れとコンクリートと鉛以外のしゃへい透過率の取り入れについて検討した。

### (1) 医薬発第 188 号通知における算定法

医薬発第 188 号通知では、空気カーマ、透過率、半価層、散乱係数等の漏えい線量評価因子を、Report No. 49 及び Report No. 102 のデータから取り入れている。

#### ① エックス線装置の管電圧と利用線錐方向に 1 メートルの距離における空気カーマ

管電圧 (kVp)	空気カーマ(X) ( $\mu$ Gy/mAs)
40	16( 9)
50	30( 18)
60	46( 27)
70	62( 36)
80	80( 47)
90	100( 59)
100	110( 65)
110	130( 76)
120	160( 94)
130	190( 110)
140	210( 120)
150	230( 140)

- ・空気カーマの値は、三相全波整流回路の値、括弧内の値は、単相半波整流回路の値。
- ・Report No. 102 では、定格管電圧について 40～150kVp の範囲で 10kVp ごとの空気カーマを表で示している。

#### ② 空気カーマ透過率 (鉛およびコンクリート)

- ・鉛中におけるエックス線の空気カーマ透過率

鉛厚 (mm)	定格管電圧 (kVp)					
	50	70	100	125	150	200
0	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
0.1	2.70E-02	5.30E-02	2.10E-01	2.40E-01	2.70E-01	7.10E-01
0.2	2.60E-03	1.50E-02	7.60E-02	1.40E-01	1.40E-01	5.00E-01
0.3	5.80E-04	6.10E-03	4.10E-02	8.50E-02	8.60E-02	3.60E-01
0.4	1.50E-04	2.80E-03	2.60E-02	5.50E-02	5.60E-02	2.50E-01
0.5	3.70E-05	1.40E-03	1.70E-02	3.70E-02	3.70E-02	1.80E-01
0.6	9.50E-06	7.80E-04	1.20E-02	2.60E-02	2.60E-02	1.30E-01
0.7	2.40E-06	4.60E-04	8.50E-03	1.90E-02	1.90E-02	9.50E-02
0.8	6.10E-07	2.80E-04	6.20E-03	1.40E-02	1.40E-02	6.90E-02
0.9	1.60E-07	1.70E-04	4.50E-03	1.00E-02	1.00E-02	5.00E-02
1	4.00E-08	1.10E-04	3.40E-03	7.50E-03	7.80E-03	3.70E-02
1.2	2.60E-09	4.30E-05	1.90E-03	4.40E-03	4.60E-03	2.10E-02
1.4		1.80E-05	1.10E-03	2.60E-03	2.80E-03	1.20E-02
1.5		1.10E-05	8.10E-04	2.00E-03	2.20E-03	9.30E-03
1.6		7.10E-06	6.20E-04	1.50E-03	1.70E-03	7.20E-03
1.8		2.90E-06	3.50E-04	9.30E-04	1.10E-03	4.50E-03
2		1.20E-06	2.00E-04	5.60E-04	6.50E-04	2.90E-03
2.2		4.70E-07	1.20E-04	3.40E-04	4.00E-04	1.90E-03
2.4		1.90E-07	6.70E-05	2.10E-04	2.50E-04	1.30E-03
2.6		7.70E-08	3.80E-05	1.30E-04	1.50E-04	9.00E-04
2.8		3.10E-08	2.20E-05	7.60E-05	9.60E-05	6.30E-04
3		1.30E-08	1.30E-05	4.60E-05	5.90E-05	4.40E-04
3.2		5.10E-09	7.30E-06	2.80E-05	3.70E-05	3.10E-04
3.4		2.10E-09	4.20E-06	1.70E-05	2.30E-05	2.20E-04
3.6			2.10E-06	1.00E-05	1.40E-05	1.60E-04
3.8			1.40E-06	6.20E-06	8.70E-06	1.10E-04
4			8.00E-07	3.70E-06	5.40E-06	8.20E-05

- ・コンクリート中におけるエックス線の空気カーマ透過率

コンクリート厚 (cm)	定格管電圧 (kVp)					
	50	70	100	125	150	200
0	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00
1	4.60E-02	2.50E-01	2.30E-01	5.00E-01	5.70E-01	6.90E-01
2	6.00E-03	9.20E-02	1.50E-01	2.90E-01	3.50E-01	4.80E-01
3	1.20E-03	3.90E-02	9.60E-02	1.80E-01	2.20E-01	3.40E-01
4	3.00E-04	1.80E-02	6.30E-02	1.10E-01	1.40E-01	2.40E-01
5	7.50E-05	9.20E-03	4.10E-02	7.50E-02	9.70E-02	1.70E-01
6	1.90E-05	4.70E-03	2.70E-02	5.00E-02	6.70E-02	1.20E-01
7	5.00E-06	2.50E-03	1.80E-02	3.40E-02	4.70E-02	9.00E-02
8	1.30E-06	1.30E-03	1.20E-02	2.40E-02	3.40E-02	6.70E-02
9	3.30E-07	7.20E-04	7.70E-03	1.60E-02	2.40E-02	4.90E-02
10	8.50E-08	3.90E-04	5.10E-03	1.10E-02	1.80E-02	3.70E-02
12	5.60E-09	1.10E-04	2.20E-03	5.50E-03	9.30E-03	2.10E-02
14	3.70E-10	3.30E-05	9.50E-04	2.70E-03	5.00E-03	1.20E-02
16	2.50E-11	9.70E-06	4.10E-04	1.40E-03	2.70E-03	7.00E-03
18	1.70E-12	2.80E-06	1.80E-04	6.80E-04	1.40E-03	4.10E-03
20	1.10E-13	8.40E-07	7.70E-05	3.40E-04	7.80E-04	2.40E-03
22			3.30E-05	1.70E-04	4.20E-04	1.40E-03
24			1.40E-05	8.50E-05	2.30E-04	8.40E-04
26			6.20E-06	4.30E-05	1.20E-04	5.00E-04
28			2.70E-06	2.10E-05	6.60E-05	3.00E-04
30			1.20E-06	1.10E-05	3.60E-05	1.80E-04
32				5.30E-06	1.90E-05	1.00E-04
34				2.70E-06	1.00E-05	6.20E-05
36				1.30E-06	5.60E-06	3.70E-05
38				6.70E-07	3.00E-06	2.20E-05
40				3.40E-07	1.60E-06	1.30E-05

照射野 組織類似	定格管電圧 (kVp)	50	70	100	125	150	200
	90°		0.035	0.05	0.13	0.15	0.16

③  
400 cm<sup>2</sup> の  
ファントムか

ら 1 m の距離による空気カーマ率の百分率

・ Report No. 49 は、Table B-2 において角度ごと (30、45、90、120、135 度) の  
定格管電圧 50、70、100、125、150、200kVp の散乱係数を数値のみで示している。

④空気カーマから実効線量への換算係数 ( $E/K_a$ ) (Sv/Gy)

光子エネルギー (keV)	換算係数 ( $E/K_a$ )
10	0.00653
15	0.0402
20	0.122
30	0.416
40	0.788
50	1.106
60	1.308
70	1.407
80	1.433
100	1.394 (1.433) 注1)
150	1.256 (1.433) 注1)
200	1.173 (1.433) 注1)



注 1) 定格管電圧が 80kV を超える場合には、換算係数の最大値 1.433 を用いること。⑤  
大幅に減衰したエックス線の広いビームに対する半価層 (t 1/2) 及び 1/10  
価層 (t 1/10)

管電圧 (kVp)	鉛 (mm)		コンクリート (cm)	
	半価層	1/10価層	半価層	1/10価層
50	0.06	0.17	0.43	1.5
70	0.17	0.52	0.84	2.8
100	0.27	0.88	1.6	5.3
125	0.28	0.93	2	6.6
150	0.3	0.99	2.24	7.4
200	0.52	1.7	2.5	8.4

⑥エックス線の線量評価の計算式

(イ) 利用線錐方向の漏えい実効線量

$$E_p = \frac{X \times W \times D_1 \times (E/Ka) \times U \times T}{d_1^2} \times \left( \frac{1}{2} \right)^{(1/t_{1/2})}$$

(ロ) 散乱線による漏えい実効線量

$$E_s = \frac{X \times W \times D_1 \times (E/Ka) \times U \times T}{d_2^2 \times d_3^2} \times \frac{a \times F}{400 \times 100}$$

(ハ) エックス線管容器からの漏えい実効線量

$$E_L = \frac{X_L \times t_w \times (E/Ka) \times U \times T}{d_4^2} \times \left( \frac{1}{2} \right)^{(1/t_{1/2})}$$

[計算に用いるパラメータ等]

$E_p$  : 利用線錐方向の漏えい実効線量 ( $\mu\text{Sv}$  /3月間)

$E_s$  : 散乱線による漏えい実効線量 ( $\mu\text{Sv}$  /3月間)

$E_L$  : エックス線管容器からの漏えい実効線量 ( $\mu\text{Sv}$  /3月間)

$X$  : エックス線装置のエックス線管焦点から利用線錐方向に 1m 離れた地点での単位実効稼働負荷あたりの空気カーマ ( $\mu\text{Gy}/\text{mA}\cdot\text{s}$ )

$X_L$  : エックス線装置からの漏えい線量 ( $\mu\text{Gy}/\text{h}$ )。エックス線装置の利用線錐方向以外の漏えいエックス線の空気カーマ率。

$W$  : 3月間実効稼働負荷 ( $\text{mA}\cdot\text{s}/3月間$ )

$(E/Ka)$  : 空気カーマから実効線量への換算係数 ( $\text{Sv}/\text{Gy}$ )

$D_1$  : 遮へい体による空気カーマ透過率

$(1/2)^{1/t_{1/2}}$  : 2 番目の遮へい体の透過率

$t$  : 2 番目の遮へい体の厚さ

$t_{1/2}$  : 2 番目の遮へい体の大幅に減衰したエックス線の広いビームに対する半価層

$t_w$  : 3月間実効稼働負荷 ( $\text{mA}\cdot\text{s}/3月間$ ) / 定格管電流 ( $\text{mA}$ ) / 3600 ( $\text{s}/\text{h}$ )

$U$  : 使用係数

T : 居住係数

a : 照射野400cm<sup>2</sup>の組織類似ファントムから1mの距離における空気カーマ率のXに対する百分率

F : 照射野の大きさ (cm<sup>2</sup>)

d<sub>1</sub> : エックス線管焦点から画壁外側等の利用線錐方向の評価点までの距離 (m)

d<sub>2</sub> : 利用線錐方向に直交し、被写体中心から遮へい壁等の外側の評価点までの距離 (m)

d<sub>3</sub> : エックス線管焦点から被写体 (実際には天板) までの距離 (m)

d<sub>4</sub> : エックス線管焦点から画壁外側等の評価点までの距離 (m)

⑦ 上記⑥のエックス線の線量評価の計算式では、空気カーマ等の値として①～⑤の表の値を使用するが、いずれも離散的な値であり、該当する値が無い場合には補間法により求める、こととしている。また、しゃへい体としては、鉛とコンクリートのみが示されている。

## (2) Report No. 147 における算定法

NCRP は Report No. 147 において、Legare ら<sup>9)</sup>、Archer ら<sup>10)</sup>、Dixon<sup>11)</sup>、Trout と Kelly<sup>12)</sup> 及び Simpkin ら<sup>13) 14)</sup> の実測データに基づいて提唱された、管電圧としゃへい厚による透過率等から導かれたパラメータ ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) を用いる近似多項式による算定方式を採用した。これによって、Report No. 147 のしゃへい評価に用いる透過率等は、近似多項式による連続性のあるエックス線管電圧 25kVp から 150kVp までの値で得られる。また、しゃへい体の諸因子が従来のコンクリートと鉛に限定されていたのに加えて、医療施設のしゃへい実態に即して、評価の対象となりうる鉄板、ガラス板を含めて幅広い材質のデータについても提示している。

### (イ) 空気カーマ

Simpkin ら<sup>15)</sup> が構築した、材質の異なる陽極管への管電圧における空気カーマを求める近似関数式を式 (1) 及び式 (2) に示す。また、それぞれの式に管電圧 (kVp) を代入して得られた空気カーマを表 1 に示す。

#### 1) タングステン陽極管にアルミニウムフィルタを付加したエックス線管の場合

$$K_w (\text{kVp}) = 1.222 - 0.05664\text{kVp} + 0.001227\text{kVp}^2 - 3.136 \times 10^{-6}\text{kVp}^3 \quad (\text{mGy}/\text{mA} \cdot \text{min}) \quad \text{--- (1)}$$

#### 2) モリブデン陽極管にモリブデンフィルタを付加したマンモグラフィ用エックス線管の場合

$$K_{Mo} (\text{kVp}) = -1.335 + 4.385 \times 10^{-3}\text{kVp}^2 \quad (\text{mGy}/\text{mA} \cdot \text{min}) \quad \text{----- (2)}$$

K<sub>w</sub> (kVp) : タングステン陽極管の管電圧 (kVp) による空気カーマ (mGy/mA・min)

K<sub>Mo</sub> (kVp) : モリブデン陽極管の管電圧 (kVp) による空気カーマ (mGy/mA・min)

kVp : エックス線管の定格管電圧

空気カーマを定格管電圧による近似関数式で表すことにより、補間する必要がなく、補間による誤差をなくすとともに、市販の PC 用表計算ソフトを使って平易に計算する

ことを可能にした。

(ロ) 空気カーマ透過率

Simpkin は、Legare ら、Archer らおよび Simpkin 自らが公表した鉛、コンクリート、石膏、鉄、ガラスおよび木材の透過率曲線を基に、3つのパラメータモデル ( $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ) を作成し、式 (3) に示す近似関数式に適用することにより、実測された透過率曲線にフィットすることを示した。

3つのパラメータを用いた透過率を求める近似式を以下に示す。

$$B = \left[ \left( 1 + \frac{\beta}{\alpha} \right) e^{\alpha \gamma x} - \frac{\beta}{\alpha} \right]^{-\frac{1}{\gamma}} \quad \text{---- (3)}$$

ここで、B は透過率、x はしゃへい値の厚さ (mm) を示している。

空気カーマ透過率をしゃへい体厚と3つのパラメータモデルの近似関数式とすることによって、補間による誤差をなくすとともに、市販の PC 用表計算ソフトを使って平易に計算することを可能にした。

コンクリート、鉄、石膏、ガラス及び木材におけるエックス線管電圧ビームに対する近似パラメータを表 2 に示す。

また、しゃへい体として、従来の鉛とコンクリートの他に、新たに追加された鉄、石膏、ガラス及び木材について、式 (3) を用いて計算した透過率を表 3~8 に示す。これらの追加されたしゃへい体を用いることにより、計算された線量を実測した線量により近づけることができる。

(ハ) 散乱係数

Simpkin らは、照射野  $400\text{cm}^2$  の組織近似ファントムから 1m の距離における空気カーマ率を求めるための散乱係数 (a) を、定格管電圧と散乱角 ( $\theta$ ) の関数による近似関数式を示した<sup>16)</sup>。前記同様、この近似関数式を用いることにより補間による誤差をなくすとともに、市販の PC 用表計算ソフトを使って平易に計算することを可能にした。

$$a = 0.016 (\text{kVp} - 125) + 8.434 - 0.1105 \theta + 9.828 \times 10^{-4} \theta^2 - 1.741 \times 10^{-6} \theta^3 \quad (10^{-6}/\text{cm}^2) \quad \text{----- (4)}$$

ここで、

a : 散乱角における照射野  $400\text{cm}^2$  の組織類似ファントムから 1m の距離の散乱係数

kVp : 管電圧

式 (4) から求めた散乱角 90 度における空気カーマ率の百分率を表 10 に示す。

(ニ) 大幅に減衰したエックス線の広いビームに対する半価層 ( $t_{1/2}$ ) 及び 1/10 価層 ( $t_{1/10}$ )

大幅に減衰したエックス線の広いビームに対する半価層 ( $t_{1/2}$ ) 及び 1/10 価層 ( $t_{1/10}$ ) について、式 (3) の近似関数式により求めた値を表 9 に示す。

## D 考察

### I Report No. 147 の概要

我々は、エックス線診療施設に対するしゃへい設計としゃへい設備に関わる勧告と技術情報を提示している Report No. 49 と Report No. 147 の比較検討を行うために、Report No. 147 の和訳を行った。NCRP は、Report No. 147 の中で、特に「1. 緒言と勧告」において、しゃへい設計・しゃへい計算を行う上での放射線防護上の基本的な考え方を明示しているため、その要点を示す。なお、別添資料 2 として Report No. 147 の抄訳を添付した。

Report No. 147 は、以下の構成になっている。

1. 緒言と勧告
2. X線診療施設に対するしゃへい設計の基本
3. しゃへい設計の基本
4. X線診療施設のしゃへい計算
5. しゃへい計算例
6. 放射線防護に関する施設検査

#### 「1. 緒言と勧告」の要点

##### (1) 目的と適用範囲

「放射線しゃへいの目的は、作業従事者と一般公衆への放射線被ばくを許容可能なレベルにまで制限する事である。この報告書はエックス線診療施設に対するしゃへい設計としゃへい設備に関わる勧告と技術情報を提示する。本報告は、エックス線診療施設に関する Report No. 49 の勧告に取って代わる。」としている。

##### (2) エックス線診療施設に対するしゃへい設計目標値と実効線量

管理区域と管理区域外の各々について、しゃへい設計目標値を設定している。

- ・管理区域 空気カーマ 0.1 mGy/週 (5 mGy/年)
- ・管理区域外 空気カーマ 0.02 mGy/週 (1 mGy/年)

##### (3) しゃへい設計条件

本報告書で勧告されるしゃへい設計方法は安全側に立った考えを示すものであるとして、以下の安全側の考え方を示している。

- ① 患者による一次線の顕著な減弱を考慮しないこと。
- ② しゃへい体の厚さは、しゃへい体にエックス線が直角に入射することとして評価すること。
- ③ しゃへい能力が明確になっていない物質については減弱を見込まないこと。
- ④ 散乱線の計算に用いられる照射野とファントムは、安全側にたった高い値を使用すること。
- ⑤ 線量を減弱させるために用いるしゃへい体の厚さは、必要な厚さと同じ厚さが市販されていない場合には、それよりも厚いしゃへい体を用いること。
- ⑥ その他、時間、距離あるいはしゃへい等の線量の評価を行うために用いる様々

なパラメータの選択を行う場合には、安全側の評価にたって行うこと。

「この安全側の要素は、本報告書で提示される方法で設計されたしゃへい体を透過した実際の空気カーマが適切なしゃへい設計目標を満たすことを、しゃへい設計者に対し保証する。新規の施設は、以前に要求されたようなしゃへい量や費用の顕著な増加を伴わないで、本報告書で勧告される方法を用いて設計することができる。」としている。

#### (4) 一般的な概念

「この文書におけるしゃへい設計目標（P 値）は、新規の施設や建築物にのみ適用し、新基準に伴う既存施設の改修は要求しない。この報告書は新規施設の計画・設計および既存施設の改築に適用される。本報告書の刊行前に設計された施設において、NCRP Report No. 49 の基準を満たしている場合には再評価の必要はない（NCRP, 1993）。本報告書での勧告は、本刊行物の発刊日以降に設計された施設のみに適用される。」としている。

## II Report No. 147 によるしゃへいパラメータの近似関数式の取り入れ

Report No. 49 は、しゃへい体透過率を図だけで示しており、また、管電圧は、50、70、100、125、150、200kVp と大まかにしか示していない。そのため、しゃへい計算の作業に時間を要する上に、読み取り方によってばらつきが生じ誤差を生む可能性がある。そのため、NCRP は、Simpkin らの空気カーマ、空気カーマ透過率および散乱係数を近似関数式とする提案を取り入れた。成田ら<sup>17)</sup>が述べているように、Simpkin のしゃへい計算に用いられるパラメータが近似関数式で表されることによって、Microsoft 社の表計算ソフト「エクセル」に代表されるパーソナルコンピュータ上の汎用の表計算ソフトを使って線量評価を行うことが可能になる。これによって、エックス線装置の届出を行う医療機関の作業が大幅に軽減されるとともに、医療行政機関においても医療機関から届出と共に付されたしゃへい計算書の確認作業や立入検査等の際の現場での確認が容易になると考えられた。近似関数式を用いることによる精度あるいは安全性の担保については、実測値にフィッティングさせたものであり妥当であると考えられるが、同班の分担研究者である小林らが、一部のしゃへい体（コンクリートと鉛以外も含む）について実測値と近似関数式を用いた計算値の比較評価を行い、Simpkin らの近似関数式による算定が妥当であるとの結果を得ている。能登ら<sup>18)</sup>は、Simpkin らのデータが三相全波方式のエックス線高電圧装置を用いており、わが国ではより実効エネルギーを高めることができるインバータ方式が普及しつつあることから、過小評価の可能性があることを指摘している。しかし、CT 装置を除いたエックス線装置の漏えい線量は、能登らの計算による評価、飯田ら<sup>19)</sup>の実測および計算による評価並びに成田らの計算による評価のいずれにおいても最大点であっても 50  $\mu$  Sv/3 ヶ月以下であり、エックス線診療室の設計・施工状況、エックス線装置の使用状況（実効稼動負荷）及びエックス線装置のエックス線発生量が、現在と大きな変化がない限り、エックス線診療室の外側（管理区域の境界）での実効線量は医療法施行規則に定める線量限度を超える可能性は少ないと考えられた。

また、医薬発第 188 号通知、Report No. 49 並びに Simpkin (Report No. 147) による漏えい線量評価データの比較を行った能登らは、漏えい実効線量の比較では、どのデータを用いても有意な差はなかったと述べている。また、成田らも、NCRP と Simpkin (Report No. 147) を比較について、データに差異は認めるものの有為ではないとしており、飯田らも同調している。

したがって、Report No. 147 に取り入れられた空気カーマ、散乱係数およびしゃへい体透過率の近似関数をわが国のエックス線診療室の漏えい線量評価に用いることに安全上の問題はないと考えられた。

なお、エックス線の漏えい線量の算定に用いるデータは、空気カーマから実効線量への換算係数を除いて、最終的な漏えい線量としては Report No. 49 と Report No. 147 に有意な差は生じないものの個々にはデータのばらつきが生じているため、データを混在して用いることは避けるべきであると考えられた。

### Ⅲ 鉛とコンクリート以外のしゃへい体の透過率の取り入れ

Report No. 49 は、しゃへい体透過率データとして、コンクリートと鉛の図のみしか明示していない。しかし、CT 装置において Multi Detector CT (MDCT) の普及に伴って実効稼動負荷が急激に増加しており、コンクリートと鉛以外のしゃへい体の透過率データの使用が求められていた。医薬発第 188 号通知は、「ただし、適切な方法により測定されたエックス線管容器等の漏えいエックス線量に関する根拠資料等を有している場合には、その値を用いてもよい。」と記しており、有用なデータの活用に道を開いていた。そのため、2002 年には、Simpkin らの提案するコンクリートと鉛以外のしゃへい体透過率データを掲載した書籍<sup>20)</sup>が発刊されるにいたっている。

また、この書籍には Report No. 147 が取り入れたしゃへい体パラメータの近似関数式も同時に掲載されている。

CT 装置であっても、壁等のコンクリートをしゃへい体として評価できる場合は線量限度を超えることは考えにくいだが、鉄製扉の場合等、コンクリートと鉛のしゃへい体がない評価面においては、鉄等のしゃへい体のしゃへい効果を見込むことが求められる。Report No. 147 が示した鉄、ガラス、石膏及び木材のしゃへい体透過率が利用できるようなることによって、より実際に近い線量評価ができると考えられた。また、Report No. 147 が示した鉄、ガラス、石膏および木材のしゃへい体透過率は実測に基づくものである。なお、すでに述べたように、同班の分担研究者である小林らが、一部のしゃへい体（コンクリートと鉛以外も含む）について実測値と近似関数式を用いた計算値の比較評価を行い、コンクリートと鉛以外のしゃへい体の近似関数式による算定が妥当であるとの結果を得ている。従って、Report No. 147 に取り入れられた鉄、石膏、ガラスと木材のしゃへい体透過率をエックス線診療室の漏えい線量評価に用いることに安全上の問題はないと考えられた。

### Ⅳ 総括

我々は、本報告書で検討した Report No. 147 に取り入れられたしゃへい計算パラメータの近似関数式を利用し、パーソナルコンピュータ用の市販表計算ソフトを用いてしゃへい計算を行うプログラムを作成した。これによって、一次線、散乱エッ

クス線及びエックス線管容器からの漏えい線量を短時間に計算することができた。また、医療行政機関による立入検査時において簡便に評価することも可能であることを確認した。更に、Report No. 147 には本報告書が示した 2 点以外に、近年のモダリティに対応して、Report No. 49 で考慮されなかった CT 装置、乳房撮影装置、デジタル撮影装置などのしゃへい計算方法、また、有資格者によるしゃへい設計への関与及び施工後の施設検査の実施等が示されており、更なる検討が必要であると考えられた。

## E 結論

Report No. 49 の改訂版である Report No. 147 は新しい勧告と技術情報を盛り込んでおり、その中で、Simpkin らにより提案されている空気カーマ、散乱係数及びしゃへい体透過率を近似関数式で表すことや、しゃへい体として新たに鉄、石膏、ガラスと木材を追加する等が取り入れられている。我々は、内外の文献等を総合的に検討した結果、これらの近似関数式をエックス線診療室の漏えい線量評価に用いることは妥当であり、この考えを取り入れることによって、医薬発第 188 号通知に基づくエックス線の漏えい線量評価が平易に行え、しゃへい計算作業の大幅な軽減を図ることができると考えられた。また、新たに追加された鉄、石膏、ガラス及び木材のしゃへい体透過率をエックス線診療室の漏えい線量評価に用いることは妥当であり、これによって医薬発第 188 号通知に基づき計算された値と実測値とをより近づけることが可能になったと考えられた。従って、医療機関ならびに医療行政機関の負担を軽減するため、早急に医療法施行規則に取り入れるべきであると考えられた。

なお、エックス線の漏えい線量の算定に用いるデータは、空気カーマから実効線量への換算係数を除いて、Report No. 49 と Report No. 147 のデータを混在して用いることは避けるべきであると考えられた。

## F 参考文献

- 1) International Commission on Radiological Protection. Protection against ionizing radiation from external sources used in medicine. Oxford, Pergamon Press; ICRP Publication 33; Ann ICRP, 9, 1-69, (1982).
- 2) National Council on Radiation Protection and Measurements. Structural shielding design and evaluation for medical x rays and gamma rays of energies up to 10MeV. Bethesda, MD: NCRP; NCRP Report, 49, (1976).
- 3) Dixon RL and Simpkin DJ: Primary shielding barriers for diagnostic x-ray facilities: a new model. Health Phys, 74 (2), 181-189, (1998).
- 4) Simpkin DJ: Transmission data for shielding diagnostic x-ray facilities. Health Phys, 68, 704-709, (1995).
- 5) Simpkin DJ: Shielding a spectrum of workloads in diagnostic radiology. Health Phys, 61, 259-265, (1991).
- 6) National Council on Radiation Protection and Measurements. Structural shielding design and medical x-ray imaging facilities, MD: NCRP; NCRP Report, 147, (2004).

- 7) National Council on Radiation Protection and Measurements. Medical x-ray, electron beam and gamma ray protection for energies up to 50MeV. Bethesda, MD: NCRP; NCRP Report No. 102, (1989).
- 8) B. R. Archer and J. E. Gray, "Important changes in medical x-ray imaging facility shielding design methodology. A brief summary of recommendations in NCRP Report No. 147", Med. Phys. 32, 3559-3661 (2005)
- 9) Legare JM, Carrieres PE, Manseau A, et al: Blindage contre les grands champs de rayons X primaires et diffusés des appareils triphasés au moyen de panneaux de verre, de gypse et de plomb acoustique. Radioprotection, 13, 79-95, (1977).
- 10) Archer BR, Fewell TR, Conway BJ, et al: Attenuation properties of diagnostic x-ray shielding materials. Med Phys, 21, 1499-1507, (1994).
- 11) Dixon RL: On the primary barrier in diagnostic x-ray shielding. Med. Phys. 21: 1785-1794, (1994).
- 12) Trout ED and Kelly JP: Scattered radiation from a tissue-equivalent phantom for x rays from 50 to 300 kVp, Radiology 104: 161-169, (1972).
- 13) Simpkin DJ: Shielding requirements for mammography. Health Phys, 53, 267-279, (1987).
- 14) Simpkin DJ: Fitting parameters for medical diagnostic x-ray transmission data. Health Phys, 54, 345-347, (1988)
- 15) Dixon RL and Simpkin DJ: Primary shielding barriers for diagnostic x-ray facilities: a new model. Health Phys, 74 (2), 181-189, (1998).
- 16) Simpkin DJ and Dixon RL: Secondary shielding barriers for diagnostic x-ray facilities: Scatter and leakage revisited. Health Phys, 74 (2), 350-365, (1998).
- 17) 成田雄一郎、石垣秀世、秋山芳久、他：医療用エックス線装置の遮蔽評価に関する新提案、日本放射線技術学会雑誌、Vol. 56、No. 8、1058-1068、(2000)。
- 18) 能登公也、曾田卓実、越田吉郎、他：診断用エックス線装置において遮へい計算に用いる各種パラメータの比較検討、日本放射線技術学会雑誌、Vol. 59、No. 8、976-983、(2003)
- 19) 飯田泰治、堀井純清、茶島光浩、他：積算型個人線量計を用いたエックス線診療室の環境線量の測定、日本放射線技術学会雑誌、Vol. 61、No. 5、709-717、(2005)。
- 20) 日本アイソトープ協会：医療放射線管理実践マニュアル、丸善、東京、(2004)。
- 21) 別添資料 3

B. R. Archer and J. E. Gray, Important changes in medical x-ray imaging facility shielding design methodology. A brief summary of recommendations in NCRP Report No. 147, Med. Phys. 32, 3559-3661 (2005)



表 1 X線装置の管電圧と利用線錐方向の1メートルの距離における  
空気カーマ及び換算係数を考慮した実効線量

管電圧 (kVp)	空気カーマ (X) ( $\mu$ Gy/mAs)	換算係数 <sup>1)</sup> (E/Ka)	実効線量 <sup>2)</sup> ( $\mu$ Sv/mAs)
25	23.5	0.295 <sup>3)</sup>	6.9
30	43.6	0.416	18.1
35	67.3	0.624 <sup>3)</sup>	42.0
50	17.5	1.106	19.4
55	21.3	1.220 <sup>3)</sup>	26.0
60	25.7	1.308	33.6
65	30.6	1.367 <sup>3)</sup>	41.8
70	36.0	1.407	50.7
75	41.9	1.424 <sup>3)</sup>	59.7
80	48.3	1.433	69.2
85	55.0	1.433	78.8
90	62.1	1.433	88.9
95	69.4	1.433	99.5
100	77.1	1.433	110.5
105	85.0	1.433	121.8
110	93.1	1.433	133.4
115	101.3	1.433	145.2
120	109.6	1.433	157.1
125	118.1	1.433	169.2
130	126.5	1.433	181.3
135	135.0	1.433	193.4
140	143.4	1.433	205.5
145	151.8	1.433	217.5
150	160.0	1.433	229.2

- 1) X線装置の管電圧によるエネルギースペクトルが光子エネルギーに対応するとして、該当する換算係数を用いる。また、X線のエネルギースペクトルは、発生時のものと吸収又は散乱後とは異なっているが、漏えい線量の算定に当たって、発生時のエネルギーの換算係数を用いる。なお、管電圧が80kVpを超える場合は、換算係数の最大値1.433を用いる。
- 2) 実効線量＝空気カーマ×換算係数
- 3) ラグランジェ補間して求めた値。

表 2 遮蔽体ごとのX線の減衰曲線を求めるためのフィッティング定数 ( $\alpha$ (mm<sup>-1</sup>),  $\beta$ (mm<sup>-1</sup>),  $\gamma$ )  
 管電圧25-35kVpのデータはモリブデン陽極×線管、他のデータはタンゲステン陽極管

管電圧 (kVp)	鉛			コンクリート			石膏			鉄			ガラス			木(0.55gcm <sup>-3</sup> )		
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
25	49.520	194.000	0.3037	0.39040	1.6450	0.2757	0.15760	0.71750	0.3048	9.3640	41.250	0.3202	0.38040	1.54300	0.2369	0.0223	0.043400	0.1937
30	38.800	178.000	0.3473	0.31730	1.6980	0.3593	0.12080	0.70430	0.3613	7.4080	41.930	0.3959	0.30610	1.59900	0.3893	0.021660	0.039660	0.2843
35	29.550	164.700	0.3948	0.25280	1.8070	0.4648	0.08878	0.69880	0.4245	5.7160	43.410	0.4857	0.23960	1.69400	0.4683	0.019010	0.038730	0.3732
40				0.12970	0.1780	0.2189												
45				0.10950	0.1741	0.2269												
50	8.801	27.280	0.2957	0.09032	0.1712	0.2324	0.03883	0.08730	0.5105	1.8170	4.840	0.4021	0.09721	0.17990	0.4912	0.010760	0.001862	1.1700
55	7.839	25.920	0.3499	0.07422	0.1697	0.2454	0.03419	0.08315	0.5606	1.4930	4.515	0.4293	0.08552	0.16610	0.5112	0.010120	0.001404	1.2690
60	6.951	24.890	0.4198	0.06251	0.1692	0.2733	0.02985	0.07961	0.6169	1.1830	4.219	0.4571	0.07452	0.15390	0.5304	0.009512	0.000967	1.3330
65	6.130	24.090	0.5019	0.05528	0.1696	0.3217	0.02609	0.07597	0.6756	0.9172	3.982	0.4922	0.06514	0.14430	0.5582	0.008990	0.000647	1.3530
70	5.369	23.490	0.5881	0.05087	0.1696	0.3847	0.02302	0.07163	0.7299	0.7149	3.798	0.5378	0.05791	0.13570	0.5967	0.008550	0.000539	1.1940
75	4.666	22.590	0.6618	0.04797	0.1663	0.4492	0.02066	0.06649	0.7750	0.5793	3.629	0.5908	0.05291	0.12800	0.6478	0.008203	0.000642	1.0620
80	4.040	21.690	0.7187	0.04583	0.1549	0.4926	0.01886	0.06093	0.8103	0.4921	3.428	0.6427	0.04955	0.12080	0.7097	0.007903	0.000864	0.9703
85	3.504	20.370	0.7550	0.04398	0.1348	0.4943	0.01746	0.05558	0.8392	0.4355	3.178	0.6861	0.04721	0.11400	0.7786	0.007686	0.001056	1.0150
90	3.067	18.830	0.7726	0.04228	0.1137	0.4690	0.01633	0.05039	0.8585	0.3971	2.913	0.7204	0.04550	0.10770	0.8522	0.007511	0.001159	1.0810
95	2.731	17.070	0.7714	0.04068	0.0971	0.4406	0.01543	0.04571	0.8763	0.3681	2.654	0.7461	0.04410	0.10130	0.9222	0.007345	0.001133	1.1160
100	2.500	15.280	0.7557	0.03925	0.0857	0.4273	0.01466	0.04171	0.8939	0.3415	2.420	0.7645	0.04278	0.09466	0.9791	0.007230	0.000934	1.3090
105	2.364	13.410	0.7239	0.03808	0.0786	0.4394	0.01397	0.03815	0.9080	0.3135	2.227	0.7788	0.04143	0.08751	1.0140	0.007050	0.000620	1.3650
110	2.296	11.700	0.6827	0.03715	0.0744	0.4752	0.01336	0.03521	0.9244	0.2849	2.061	0.7897	0.04008	0.08047	1.0300	0.006921	0.000198	3.3090
115	2.265	10.210	0.6363	0.03636	0.0720	0.5319	0.01283	0.03271	0.9423	0.2579	1.922	0.8008	0.03878	0.07394	1.0330	0.006864	-0.000391	0.6469
120	2.246	8.950	0.5873	0.03566	0.0711	0.6073	0.01235	0.03047	0.9566	0.2336	1.797	0.8116	0.03758	0.06808	1.0310	0.006726	-0.000831	1.0060
125	2.219	7.923	0.5386	0.03502	0.0711	0.6974	0.01192	0.02863	0.9684	0.2130	1.677	0.8217	0.03652	0.06304	1.0310	0.006584	-0.001214	1.1920
130	2.170	7.094	0.4909	0.03445	0.0716	0.7969	0.01155	0.02702	0.9802	0.1969	1.557	0.8309	0.03561	0.05874	1.0370	0.006472	-0.001539	1.2850
135	2.102	6.450	0.4469	0.03394	0.0726	0.9099	0.01122	0.02561	0.9901	0.1838	1.440	0.8391	0.03481	0.05519	1.0490	0.006306	-0.001731	1.4650
140	2.009	5.916	0.4018	0.03345	0.0748	1.0470	0.01088	0.02436	0.9964	0.1724	1.328	0.8458	0.03407	0.05145	1.0570	0.006191	-0.001849	1.5300
145	1.895	5.498	0.3580	0.03296	0.0788	1.2240	0.01056	0.02313	0.9987	0.1616	1.225	0.8519	0.03336	0.04795	1.0630	0.006115	-0.001869	1.4980
150	1.757	5.177	0.3156	0.03243	0.0860	1.4670	0.01030	0.02198	1.0130	0.1501	1.132	0.8566	0.03266	0.04491	1.0730	0.006020	-0.001752	1.4830

表3 鉛の透過率(表2のパラメータを用いて求めた。)

遮蔽厚 (mm)	X線装置の管電圧(kVp)																								
	25	30	35	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150	
0.0	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00	1.0E+00
0.1	7.1E-05	2.9E-04	9.6E-04	6.8E-02	8.6E-02	1.1E-01	1.3E-01	1.5E-01	1.8E-01	2.0E-01	2.3E-01	2.5E-01	2.8E-01	3.0E-01	3.3E-01	3.5E-01	3.8E-01	4.0E-01	4.3E-01	4.5E-01	4.7E-01	4.9E-01	5.1E-01	5.3E-01	5.5E-01
0.2	3.0E-07	3.5E-06	2.9E-05	1.1E-02	1.7E-02	2.6E-02	3.8E-02	5.1E-02	6.7E-02	8.2E-02	9.9E-02	1.1E-01	1.3E-01	1.5E-01	1.6E-01	1.8E-01	1.9E-01	2.1E-01	2.2E-01	2.4E-01	2.6E-01	2.7E-01	2.9E-01	3.0E-01	3.0E-01
0.3	1.9E-09	6.5E-08	1.3E-06	2.5E-03	4.8E-03	8.5E-03	3.2E-03	6.1E-03	1.0E-02	1.6E-02	2.3E-02	3.1E-02	4.7E-02	8.5E-02	9.9E-02	1.0E-01	1.1E-01	1.2E-01	1.3E-01	1.4E-01	1.5E-01	1.6E-01	1.7E-01	1.8E-01	1.8E-01
0.4	1.3E-11	1.3E-09	6.4E-08	7.2E-04	1.6E-03	3.2E-03	1.6E-03	3.1E-03	5.3E-03	8.4E-03	1.2E-02	1.9E-02	3.1E-02	4.7E-02	6.1E-02	7.3E-02	7.8E-02	8.4E-02	9.0E-02	9.6E-02	1.0E-01	1.1E-01	1.2E-01	1.3E-01	1.3E-01
0.5	9.3E-14	2.7E-11	3.3E-09	2.3E-04	5.7E-04	1.3E-03	2.8E-03	5.3E-03	9.0E-03	1.4E-02	1.9E-02	2.5E-02	3.1E-02	3.7E-02	4.1E-02	4.5E-02	4.9E-02	5.2E-02	5.6E-02	5.9E-02	6.3E-02	6.7E-02	7.1E-02	7.5E-02	7.5E-02
0.6	6.6E-16	5.5E-13	1.7E-10	7.7E-05	2.2E-04	5.8E-04	1.2E-03	2.9E-03	5.2E-03	8.4E-03	1.2E-02	1.7E-02	2.1E-02	2.9E-02	3.2E-02	3.4E-02	3.6E-02	3.8E-02	4.1E-02	4.3E-02	4.6E-02	4.8E-02	4.9E-02	5.1E-02	5.1E-02
0.7	4.7E-18	1.1E-14	8.8E-12	2.8E-05	9.0E-05	2.6E-04	6.9E-04	1.6E-03	3.1E-03	5.3E-03	8.2E-03	1.2E-02	1.5E-02	1.8E-02	2.1E-02	2.3E-02	2.4E-02	2.6E-02	2.7E-02	2.9E-02	3.0E-02	3.2E-02	3.4E-02	3.5E-02	3.5E-02
0.8	3.3E-20	2.3E-16	4.6E-13	1.0E-05	3.8E-05	1.2E-04	3.8E-04	8.8E-04	1.8E-03	3.4E-03	5.5E-03	8.1E-03	1.1E-02	1.3E-02	1.5E-02	1.7E-02	1.8E-02	1.9E-02	2.0E-02	2.1E-02	2.2E-02	2.3E-02	2.4E-02	2.5E-02	2.5E-02
0.9	2.3E-22	4.8E-18	2.4E-14	4.0E-06	1.6E-05	5.9E-05	1.9E-04	5.0E-04	1.1E-03	2.2E-03	3.7E-03	5.7E-03	7.9E-03	9.9E-03	1.1E-02	1.3E-02	1.4E-02	1.5E-02	1.6E-02	1.7E-02	1.8E-02	1.9E-02	2.0E-02	2.1E-02	2.1E-02
1.0	1.6E-24	1.0E-19	1.2E-15	1.5E-06	7.0E-06	2.8E-05	9.8E-05	2.8E-04	6.9E-04	1.4E-03	2.6E-03	4.1E-03	5.8E-03	7.4E-03	8.6E-03	9.4E-03	1.0E-02	1.1E-02	1.2E-02	1.3E-02	1.4E-02	1.5E-02	1.6E-02	1.7E-02	1.8E-02
1.1						3.1E-06	1.4E-05	5.2E-05	1.6E-04	4.3E-04	9.4E-04	1.8E-03	2.9E-03	4.3E-03	5.5E-03	7.2E-03	7.6E-03	8.0E-03	8.3E-03	8.6E-03	8.9E-03	9.2E-03	9.3E-03	9.7E-03	9.7E-03
1.2						1.4E-06	6.7E-06	2.8E-05	9.4E-05	2.6E-04	6.2E-04	1.2E-03	2.1E-03	3.2E-03	4.2E-03	5.0E-03	5.5E-03	5.9E-03	6.1E-03	6.3E-03	6.5E-03	6.8E-03	7.0E-03	7.3E-03	7.3E-03
1.3						6.2E-07	3.3E-06	1.5E-05	5.5E-05	1.6E-04	4.1E-04	8.6E-04	1.5E-03	2.4E-03	3.2E-03	3.8E-03	4.2E-03	4.5E-03	4.6E-03	4.8E-03	4.9E-03	5.1E-03	5.3E-03	5.5E-03	5.5E-03
1.4						2.8E-07	1.6E-06	8.0E-06	3.2E-05	1.0E-04	2.7E-04	6.0E-04	1.1E-03	1.8E-03	2.4E-03	3.3E-03	3.4E-03	3.5E-03	3.6E-03	3.7E-03	3.8E-03	3.9E-03	4.1E-03	4.2E-03	4.2E-03
1.5						1.2E-07	8.1E-07	4.3E-06	1.8E-05	6.4E-05	1.8E-04	4.2E-04	8.1E-04	1.3E-03	1.9E-03	2.3E-03	2.7E-03	2.7E-03	2.8E-03	2.8E-03	2.9E-03	3.0E-03	3.1E-03	3.2E-03	3.2E-03
1.6								2.3E-06	1.1E-05	4.0E-05	1.2E-04	2.9E-04	6.0E-04	1.0E-03	1.4E-03	1.8E-03	2.0E-03	2.1E-03	2.1E-03	2.2E-03	2.3E-03	2.3E-03	2.4E-03	2.5E-03	2.5E-03
1.7								1.3E-06	6.3E-06	2.5E-05	8.0E-05	2.1E-04	4.4E-04	7.6E-04	1.1E-03	1.4E-03	1.6E-03	1.7E-03	1.7E-03	1.7E-03	1.8E-03	1.8E-03	1.9E-03	1.9E-03	1.9E-03
1.8								6.8E-07	3.7E-06	1.6E-05	5.3E-05	1.4E-04	3.2E-04	5.8E-04	8.6E-04	1.2E-03	1.3E-03	1.3E-03	1.3E-03	1.3E-03	1.4E-03	1.4E-03	1.5E-03	1.5E-03	1.5E-03
1.9								3.7E-07	2.1E-06	9.8E-06	3.5E-05	1.0E-04	2.3E-04	4.4E-04	7.6E-04	1.1E-03	1.2E-03	1.2E-03	1.2E-03	1.2E-03	1.3E-03	1.3E-03	1.4E-03	1.4E-03	1.4E-03
2.0								2.0E-07	1.2E-06	6.1E-06	2.4E-05	7.2E-05	1.7E-04	3.3E-04	5.2E-04	7.6E-04	7.9E-04	8.0E-04	8.1E-04	8.2E-04	8.5E-04	8.8E-04	9.1E-04	9.4E-04	9.4E-04
2.1								7.3E-07	3.8E-06	1.6E-05	5.0E-05	1.3E-04	2.5E-04	4.0E-04	5.2E-04	6.0E-04	6.3E-04	6.4E-04	6.4E-04	6.5E-04	6.7E-04	7.0E-04	7.5E-04	7.5E-04	7.5E-04
2.2								4.3E-07	2.4E-06	1.1E-05	3.5E-05	9.3E-05	1.9E-04	3.1E-04	4.1E-04	4.7E-04	5.0E-04	5.0E-04	5.1E-04	5.1E-04	5.3E-04	5.5E-04	5.8E-04	6.0E-04	6.0E-04
2.3								2.5E-07	1.5E-06	7.0E-06	2.5E-05	6.8E-05	1.4E-04	2.4E-04	3.2E-04	3.7E-04	3.9E-04	4.0E-04	4.0E-04	4.1E-04	4.2E-04	4.4E-04	4.6E-04	4.8E-04	4.8E-04
2.4								1.5E-07	9.5E-07	4.7E-06	1.8E-05	5.0E-05	1.1E-04	1.9E-04	2.5E-04	2.9E-04	3.1E-04	3.1E-04	3.2E-04	3.2E-04	3.4E-04	3.5E-04	3.7E-04	3.8E-04	3.8E-04
2.5									5.9E-07	3.1E-06	1.2E-05	3.7E-05	8.4E-05	1.5E-04	2.0E-04	2.3E-04	2.5E-04	2.5E-04	2.6E-04	2.6E-04	2.7E-04	2.8E-04	2.9E-04	3.1E-04	3.1E-04
2.6										2.1E-06	8.7E-06	2.7E-05	6.4E-05	1.1E-04	1.6E-04	1.8E-04	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04	2.0E-04	2.1E-04	2.2E-04	2.4E-04	2.5E-04	2.5E-04
2.7									1.4E-06	6.1E-06	2.0E-05	4.8E-05	8.8E-05	1.2E-04	1.5E-04	1.6E-04	1.6E-04	1.6E-04	1.6E-04	1.6E-04	1.7E-04	1.8E-04	1.9E-04	2.0E-04	2.0E-04
2.8									9.3E-07	4.3E-06	1.5E-05	3.7E-05	6.8E-05	9.8E-05	1.2E-04	1.3E-04	1.3E-04	1.3E-04	1.3E-04	1.3E-04	1.4E-04	1.4E-04	1.5E-04	1.5E-04	1.5E-04
2.9									6.2E-07	3.0E-06	1.1E-05	2.8E-05	5.3E-05	7.7E-05	9.2E-05	9.8E-05	9.8E-05	9.9E-05	1.0E-04	1.0E-04	1.1E-04	1.2E-04	1.2E-04	1.3E-04	1.3E-04
3.0									4.1E-07	2.1E-06	7.9E-06	2.1E-05	4.1E-05	6.1E-05	7.3E-05	7.8E-05	7.9E-05	8.0E-05	8.0E-05	8.3E-05	8.8E-05	9.4E-05	1.0E-04	1.1E-04	1.1E-04
3.5										3.7E-07	1.7E-06	5.4E-06	1.2E-05	1.9E-05	2.3E-05	2.5E-05	2.6E-05	2.6E-05	2.7E-05	2.8E-05	2.9E-05	3.2E-05	3.6E-05	3.9E-05	3.9E-05
4.0										6.4E-08	3.7E-07	1.4E-06	3.4E-06	5.7E-06	7.3E-06	8.0E-06	8.2E-06	8.2E-06	8.4E-06	9.0E-06	1.0E-05	1.1E-05	1.3E-05	1.5E-05	1.5E-05

単位:mm

半価層	0.012	0.015	0.021	0.067	0.079	0.094	0.11	0.13	0.15	0.17	0.20	0.23	0.25	0.28	0.29	0.30	0.30	0.30	0.31	0.31	0.32	0.32	0.33	0.34
1/10価層	0.040	0.053	0.071	0.23	0.27	0.32	0.37	0.42	0.49	0.57	0.66	0.75	0.84	0.92	0.97	1.00	1.01	1.02	1.02	1.04	1.06	1.09	1.13	1.18

表 4 コンクリートの透過率(表2のパラメータを用いて求めた。)

逆蔽厚 (mm)	X線装置の管電圧(kVp)																							
	25	30	35	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140	145	150
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1.6E-04	5.8E-04	1.7E-03	1.1E-01	1.3E-01	1.5E-01	1.6E-01	1.8E-01	2.0E-01	2.2E-01	2.5E-01	2.8E-01	3.1E-01	3.4E-01	3.6E-01	3.8E-01	4.0E-01	4.1E-01	4.2E-01	4.3E-01	4.3E-01	4.4E-01	4.4E-01	4.5E-01
20	1.5E-06	1.3E-05	8.4E-05	1.9E-02	2.6E-02	3.4E-02	4.4E-02	5.4E-02	6.5E-02	7.9E-02	9.4E-02	1.1E-01	1.3E-01	1.5E-01	1.6E-01	1.8E-01	1.9E-01	2.0E-01	2.2E-01	2.3E-01	2.4E-01	2.4E-01	2.5E-01	2.6E-01
30	2.3E-08	4.6E-07	5.9E-06	4.3E-03	6.9E-03	1.0E-02	1.5E-02	2.0E-02	2.7E-02	3.5E-02	4.5E-02	5.2E-02	6.2E-02	7.2E-02	8.2E-02	9.3E-02	1.0E-01	1.1E-01	1.2E-01	1.3E-01	1.3E-01	1.5E-01	1.6E-01	1.7E-01
40	4.3E-10	1.8E-08	7.6E-07	1.2E-03	2.1E-03	3.7E-03	5.9E-03	8.9E-03	1.3E-02	1.7E-02	2.2E-02	2.7E-02	3.2E-02	3.8E-02	4.5E-02	5.2E-02	6.0E-02	6.8E-02	7.6E-02	8.5E-02	9.3E-02	1.0E-01	1.1E-01	1.2E-01
50	8.5E-12	7.6E-10	3.6E-08	3.5E-04	7.3E-04	1.4E-03	2.5E-03	4.2E-03	6.4E-03	9.0E-03	1.2E-02	1.5E-02	1.8E-02	2.1E-02	2.6E-02	3.0E-02	3.6E-02	4.2E-02	4.9E-02	5.5E-02	6.2E-02	6.9E-02	7.7E-02	8.6E-02
60	1.7E-13	3.2E-11	2.8E-09	1.1E-04	2.7E-04	5.9E-04	1.2E-03	2.1E-03	3.4E-03	5.0E-03	6.7E-03	8.4E-03	1.0E-02	1.2E-02	1.5E-02	1.9E-02	2.2E-02	2.7E-02	3.2E-02	3.7E-02	4.2E-02	4.8E-02	5.4E-02	6.1E-02
70	6.8E-17	5.5E-12	2.3E-10	3.7E-05	1.0E-04	2.6E-04	5.7E-04	1.1E-03	1.9E-03	2.9E-03	3.9E-03	4.9E-03	6.1E-03	7.5E-03	9.3E-03	1.2E-02	1.4E-02	1.8E-02	2.1E-02	2.5E-02	2.9E-02	3.3E-02	3.8E-02	4.3E-02
80	1.4E-18	2.3E-15	1.4E-12	4.8E-06	1.8E-05	5.6E-05	1.5E-04	3.3E-04	6.2E-04	1.0E-03	1.4E-03	1.8E-03	2.3E-03	2.9E-03	3.7E-03	4.8E-03	6.1E-03	7.8E-03	9.7E-03	1.2E-02	1.4E-02	1.7E-02	1.9E-02	2.2E-02
90	2.8E-20	9.7E-17	1.2E-13	1.8E-06	7.6E-06	2.7E-05	7.7E-05	1.8E-04	3.6E-04	6.0E-04	1.1E-03	1.7E-03	2.3E-03	3.0E-03	3.7E-03	4.6E-03	5.8E-03	7.4E-03	9.3E-03	1.2E-02	1.5E-02	1.9E-02	2.3E-02	2.7E-02
100				6.7E-07	3.3E-06	1.3E-05	4.1E-05	1.0E-04	2.2E-04	3.7E-04	5.4E-04	7.1E-04	9.0E-04	1.2E-03	1.5E-03	1.9E-03	2.5E-03	3.1E-03	3.6E-03	4.6E-03	5.8E-03	7.0E-03	8.3E-03	9.9E-03
110				2.6E-07	1.5E-06	6.6E-06	2.2E-05	6.0E-05	1.3E-04	2.3E-04	3.4E-04	4.5E-04	5.8E-04	7.5E-04	1.0E-03	1.4E-03	1.9E-03	2.5E-03	3.2E-03	4.0E-03	4.9E-03	5.9E-03	7.1E-03	8.5E-03
120				9.9E-08	6.7E-07	3.3E-06	1.2E-05	3.5E-05	7.8E-05	1.4E-04	2.1E-04	2.9E-04	3.7E-04	4.4E-04	5.6E-04	6.2E-04	7.8E-04	9.2E-04	1.1E-03	1.3E-03	1.6E-03	1.9E-03	2.3E-03	2.8E-03
130				3.9E-08	3.0E-07	1.7E-06	6.8E-06	2.0E-05	4.7E-05	8.7E-05	1.3E-04	1.8E-04	2.4E-04	3.2E-04	4.4E-04	6.2E-04	8.6E-04	1.2E-03	1.6E-03	2.0E-03	2.5E-03	3.0E-03	3.7E-03	4.4E-03
140				1.5E-08	1.4E-07	8.7E-07	3.8E-06	1.2E-05	2.9E-05	5.4E-05	8.5E-05	1.2E-04	1.6E-04	2.1E-04	2.9E-04	4.2E-04	5.9E-04	8.2E-04	1.1E-03	1.4E-03	1.8E-03	2.2E-03	2.6E-03	3.2E-03
150							2.1E-06	7.1E-06	1.8E-05	3.4E-05	5.4E-05	7.6E-05	1.0E-04	1.4E-04	2.0E-04	2.8E-04	4.0E-04	5.7E-04	7.7E-04	1.0E-03	1.3E-03	1.8E-03	2.2E-03	2.6E-03
160							1.2E-06	4.2E-06	1.1E-05	2.1E-05	3.4E-05	4.9E-05	6.7E-05	9.3E-05	1.3E-04	1.9E-04	2.8E-04	4.0E-04	5.7E-04	7.7E-04	1.0E-03	1.3E-03	1.5E-03	1.9E-03
170							6.7E-07	2.5E-06	6.6E-06	1.3E-05	2.2E-05	3.2E-05	4.4E-05	6.2E-05	8.9E-05	1.3E-04	1.9E-04	2.7E-04	3.9E-04	5.0E-04	6.3E-04	7.9E-04	9.8E-04	1.2E-03
180							3.8E-07	1.5E-06	4.0E-06	8.0E-06	1.4E-05	2.1E-05	2.9E-05	4.1E-05	6.0E-05	8.9E-05	1.3E-04	1.9E-04	2.7E-04	3.9E-04	5.0E-04	6.3E-04	7.9E-04	9.8E-04
190							2.2E-07	8.8E-07	2.5E-06	5.3E-06	1.0E-05	1.4E-05	1.9E-05	2.7E-05	4.1E-05	6.1E-05	9.2E-05	1.3E-04	1.9E-04	2.5E-04	3.2E-04	4.1E-04	5.1E-04	6.3E-04
200							1.5E-06	3.3E-06	5.8E-06	1.3E-05	1.8E-05	2.8E-05	4.2E-05	6.3E-05	9.3E-05	1.3E-04	1.9E-04	2.7E-04	3.9E-04	5.0E-04	6.3E-04	7.9E-04	9.8E-04	1.2E-03
210							9.5E-07	2.1E-06	3.7E-06	5.8E-06	8.4E-06	1.2E-05	1.9E-05	2.9E-05	4.4E-05	6.5E-05	9.2E-05	1.3E-04	1.9E-04	2.5E-04	3.2E-04	4.1E-04	5.1E-04	6.3E-04
220							5.8E-07	1.3E-06	2.4E-06	3.8E-06	5.6E-06	8.3E-06	1.3E-05	2.0E-05	3.0E-05	4.5E-05	6.6E-05	9.2E-05	1.3E-04	1.9E-04	2.5E-04	3.2E-04	4.1E-04	5.1E-04
230							3.6E-07	8.4E-07	1.5E-06	2.5E-06	3.7E-06	5.6E-06	8.3E-06	1.3E-05	2.0E-05	3.0E-05	4.5E-05	6.6E-05	9.2E-05	1.3E-04	1.9E-04	2.5E-04	3.2E-04	4.1E-04
240							2.2E-07	5.3E-07	9.9E-07	1.6E-06	2.4E-06	3.7E-06	5.6E-06	8.3E-06	1.3E-05	2.0E-05	3.0E-05	4.5E-05	6.6E-05	9.2E-05	1.3E-04	1.9E-04	2.5E-04	3.2E-04
250																								
260																								
270																								
280																								
290																								
300																								
350																								
400																								

単位:mm

半面層	1.36	1.86	2.53	6.36	7.66	9.25	11.0	12.6	13.8	14.7	15.3	15.9	16.5	17.0	17.7	18.3	18.8	19.3	19.7	20.1	20.4	20.7	21.0	21.4
1/10面層	4.74	6.41	8.59	21.8	26.3	31.7	37.5	42.6	46.4	49.2	51.4	53.3	55.2	57.1	59.1	61.0	62.8	64.3	65.6	66.8	67.8	68.8	69.9	71.0