

JAERI - M
86 - 157

Co-60線源の分離による照射効率と
線量均一度の向上

1986年11月

星 龍夫

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1986

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 (株)原子力資料サービス

Co-60線源の分離による照射効率と線量均一度の向上

日本原子力研究所高崎研究所管理部

星 龍 夫

(1986年10月6日受理)

線源を2分割し、適当な間隔をおいて配置すると効率的で均一な照射を行えることを実例をもっ
て示した。またCo-60線状線源を内蔵する円筒型照射装置およびCo-60平板状線源によって照
射するコンベヤ照射装置の照射性能を高めるため線源間隔の最適値を求めた。

Improvement of efficiency and dose uniformity of
irradiation by separation of Co-60 sources

Tatsuo HOSHI

Department of Administrative Services
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received October 6, 1986)

It was explained with examples that both of efficiency and uniformity of irradiation is improved by putting interval between the two source elements.

The optimum value of the source interval was derived for improvement of irradiation performance of cylindrical type irradiator with line sources of Co-60 located at the center and conveyor type irradiator with plane source of Co-60.

Keywords: Effective Irradiation, Uniform Irradiation, Radiation Source Separation, Cylindrical Irradiator, Gamma-ray, Cobalt 60

目 次

1. まえがき	1
2. 線源の分割による線量率分布の変化	1
2.1 線量率計算式	1
2.2 線源分割による線量率分布の変化	3
3. 最適線源間隔における最低線量率と線量均一度	4
4. あとがき	5
参考文献	5

Contents

1. Preface	1
2. Change of dose distribution by separation of gamma-source	1
2.1 Calculation formula of dose rate	1
2.2 Change of dose distribution by separation of gamma-source	3
3. Minimum dose rate and dose uniformity of irradiated material by separated gamma-source with optimum interval	4
4. Postface	5
References	5

1. ま え が き

食品照射や放射線滅菌にあたって過剰照射による材質の劣化や過少照射による不完全な滅菌などを避けるため、できるかぎり均一に所定の線量を照射するとともに利用効率をあげて照射するように線源と被照射体を配置しなければならない。 γ 線エネルギーを効率よく被照射体内に入射させるため被照射体を線源に近づけると被照射体内における最低線量率（線源に対峙する被照射体の裏面末端部の線量率）は高くなる。しかし、それ以上に被照射体内における最高線量率（線源と対面する被照射体表面の中心部における線量率）は著しく高くなるので均一に照射できなくなる。均一に照射するため被照射体を線源から遠ざけた位置で照射すると線源から放射された大半の γ 線エネルギーは被照射体内に入射することなく外部に散逸してしまい利用効率が悪くなる。

被照射体を線源に近づけたまま均一に照射するには、線源を2つの線源要素に分割し、それぞれを被照射体の両末端に近づける。これによって被照射体裏面末端の線量率つまり最低線量率を高めるとともに被照射体表面の中心部における線量率の高まりを平坦化し最高線量率を低くすることができる。これによって最低線量率が高まるので効率的に照射を行うことができるとともに最高線量率が低くなるので均一な照射も行うことができる。

すなわち線量均一度（最高線量率に対する最低線量率の比）が小さくて最低線量率が高くなるような間隔（最適線源間隔）をあけて線源要素を配置すれば効率的で均一な照射を行うことができる。

本報告では、流動体の照射装置⁽¹⁾のような二重円筒容器内に原子番号が水等価の被照射体を入れ、その中心に棒状 $Co-60$ 線源を配置して照射する場合と、コンベヤ照射装置とほぼ同一の線量分布を与える線源・被照射体配置すなわち半無限平板 $Co-60$ 線源で水等価の箱状被照射体を照射する2つの場合における最適線源間隔の値を求めた結果を報告する。

2. 線源の分割による線量率分布の変化

2.1 線量率計算式

線源の分割による線量率分布の変化を検討するため互に隔離された2つの線源要素で構成された線源（分割線源）によって照射を受けた被照射体内の線量率を求める計算式を導き出す。

(1) 線状線源を内蔵する被照射体の線量率

Fig.1(a)に示すように距離 d_s を隔てて配置された線状の線源要素 Se を中心軸とする二重円筒容器 B に入れられた被照射体 I 内の点 $P(x_p, y_p)$ の線量率 $R_l(x_p, y_p, d_s)$ は(1)式を用いて求めることができる。

1. ま え が き

食品照射や放射線滅菌にあたって過剰照射による材質の劣化や過少照射による不完全な滅菌などを避けるため、できるかぎり均一に所定の線量を照射するとともに利用効率をあげて照射するように線源と被照射体を配置しなければならない。 γ 線エネルギーを効率よく被照射体内に入射させるため被照射体を線源に近づけると被照射体内における最低線量率（線源に対峙する被照射体の裏面末端部の線量率）は高くなる。しかし、それ以上に被照射体内における最高線量率（線源と対面する被照射体表面の中心部における線量率）は著しく高くなるので均一に照射できなくなる。均一に照射するため被照射体を線源から遠ざけた位置で照射すると線源から放射された大半の γ 線エネルギーは被照射体内に入射することなく外部に散逸してしまい利用効率が悪くなる。

被照射体を線源に近づけたまま均一に照射するには、線源を2つの線源要素に分割し、それぞれを被照射体の両末端に近づける。これによって被照射体裏面末端の線量率つまり最低線量率を高めるとともに被照射体表面の中心部における線量率の高まりを平坦化し最高線量率を低くすることができる。これによって最低線量率が高まるので効率的に照射を行うことができるとともに最高線量率が低くなるので均一な照射も行うことができる。

すなわち線量均一度（最高線量率に対する最低線量率の比）が小さくて最低線量率が高くなるような間隔（最適線源間隔）をあけて線源要素を配置すれば効率的で均一な照射を行うことができる。

本報告では、流動体の照射装置⁽¹⁾のような二重円筒容器内に原子番号が水等価の被照射体を入れ、その中心に棒状 $\text{Co}-60$ 線源を配置して照射する場合と、コンベヤ照射装置とほぼ同一の線量分布を与える線源・被照射体配置すなわち半無限平板 $\text{Co}-60$ 線源で水等価の箱状被照射体を照射する2つの場合における最適線源間隔の値を求めた結果を報告する。

2. 線源の分割による線量率分布の変化

2.1 線量率計算式

線源の分割による線量率分布の変化を検討するため互に隔離された2つの線源要素で構成された線源（分割線源）によって照射を受けた被照射体内の線量率を求める計算式を導き出す。

(1) 線状線源を内蔵する被照射体の線量率

Fig.1(a)に示すように距離 d_s を隔てて配置された線状の線源要素 S_e を中心軸とする二重円筒容器 B に入れられた被照射体 I 内の点 $P(x_p, y_p)$ の線量率 $R_l(x_p, y_p, d_s)$ は(1)式を用いて求めることができる。

$$R_l(x_p, y_p, d_s) \doteq \frac{K \mu_e \phi_e}{4 \pi} \sum_{m=1}^{40} \left\{ \frac{f(\mu l r_1 / x_p)}{r_1^2} + \frac{f(\mu l r_2 / x_p)}{r_2^2} \right\} \Delta l_s \quad (1)$$

$$r_1 = \sqrt{(\alpha - y_s)^2 + x_p^2} \quad (2)$$

$$r_2 = \sqrt{(\beta - y_s)^2 + x_p^2} \quad (3)$$

$$y_s = (m - 0.5) \Delta l_s - 0.5 l_s \quad (4)$$

$$\Delta l_s = 0.025 l_s \quad (5)$$

$$\mu l = \mu_b t_b + \mu_i (x_p - g_a - t_b) \quad (6)$$

$$\alpha = y_p - \frac{1}{2} (l_s + d_s) \quad (7)$$

$$\beta = y_p + \frac{1}{2} (l_s + d_s) \quad (8)$$

$$f(x) \equiv B_a(x) e^{-x} \quad (9)$$

ここで

K : エネルギー・線量変換係数 ($= 5.767 \times 10^{-7}$ Gy/h/MeV)

μ_e : 被照射体のエネルギー吸収係数

ϕ_e : 線源から単位長さ当たり単位時間内に放射されるエネルギー

l_s : 線源要素の軸長

g_a : 線源と容器間の水平距離

μ_b, μ_i : 被照射体を入れた容器および被照射体の線減衰係数

t_b : 容器の肉厚

x_p, y_p : 線源と点P間の水平および垂直距離

である。 $B_a(x)$ はエネルギー吸収ビルドアップ係数で(10)式⁽²⁾で与えられる。

$$B_a(x) \doteq g_1 (0.072 Z) g_2 + 1 \quad (10)$$

$$g_1 = x \left\{ (0.1343 E^{-1.448} - 0.01125) (x-5) + 1.693 E^{-0.851} + 0.01781 \right\} \quad (11)$$

$$g_2 = E \left(0.1986 E^{-1.997} - 0.0144 \right) \exp \left\{ -0.6057 (x-1) \exp(0.3856 E) \right\} \\ + (0.0431 - 0.05235 E^{-0.6996}) (x-10) - 0.2749 E^{-1.244} + 0.0573 \quad (12)$$

Z : 被照射体の原子番号

E : 1次 γ 線のエネルギー (MeV)

x : 線源と点P間の relaxation length

(2) 半無限平板線源によって照射される箱状被照射体の線量率

Fig. 1(b)に示すように距離 d_s を隔てて配置された高さ l_s , 長さ無限の平板線源要素と水平距離 g_a を隔てて配置された厚さ t_b の箱Bの中に収められた被照射体I内の点P (x_p, y_p) 線量率 $R_p(x_p, y_p, d_s)$ は(1)式で与えられる。

$$R_P(x_P, y_P, d_s) \doteq \frac{K \mu_c \phi_e}{2 \pi} \sum_{j=1}^{20} \sum_{m=1}^{40} \left\{ \frac{f(\mu l r_1 / x_P)}{r_1^2} + \frac{f(\mu l r_2 / x_P)}{r_2^2} \right\} \cdot \Delta l_s \cdot \Delta Z_s \quad (13)$$

$$r_1 = \sqrt{(\alpha - y_s)^2 + x_P^2 + Z_s^2} \quad (14)$$

$$r_2 = \sqrt{(\beta - y_s)^2 + x_P^2 + Z_s^2} \quad (15)$$

$$y_s = (m - 0.5) \Delta l_s - 0.5 l_s \quad (16)$$

$$Z_s = \frac{x_P}{2} \{ \tan(0.07353 j) + \tan(0.07353(j-1)) \} \quad (17)$$

$$\Delta l_s = 0.025 l_s \quad (18)$$

$$\Delta Z_s = x_P \{ \tan(0.07353 j) - \tan(0.07353(j-1)) \} \quad (19)$$

なお μl , α , β , $f(x)$ は(6)~(9)式で与えられる。

2.2 線源分割による線量分布の変化

線源の分割によって被照射体内における最低線量率，最高線量率および線量均一度がどのように変化するかを実施例をもって検討した。

Fig. 2 に被照射体（高さ 122.8 cm，厚さ 30 cm，密度 0.5 g/cm^3 ，原子番号 7.24（水等価））が水平距離 5 cm を隔てて配置された半無限板状線源（高さ 15 cm， ^{60}Co ）で照射された場合における最低線量率，最高線量率，線量均一度をそれぞれ実線，点線，一点鎖線で示した。なお最低線量率は線源と対峙した被照射体の裏面における線量率の最低値で，最高線量率は線源に對面する被照射体の表面における線量率の最高値で与えられる。

(1) 最低線量率の変化

Fig. 2 の実線で示すように線源間隔の増加に伴って最低線量率は山なりに変化する。線源を分割しない場合，被照射体の裏面では，裏面中心の線量率は最高となり，裏面末端の線量率は最低となるが，線源要素間の間隔（線源間隔）が広がるにつれて中心線量率は低下し，末端の線量率すなわち最低線量率は上昇する。中心と末端の線量率が相等しくなる間隔 3.74 cm（最適線源間隔）以上に線源要素が離れると末端よりも中心の線量率が低くなり線源間隔が広がるとともに中心線量率すなわち最低線量率は低下する。このことから裏面の末端と中心の線量率が相等しくなるように線源を分割すれば最低線量率は最も高くなり，これに逆比例する必要線源量は最も少なくなるので効率的な照射を行うことができる。

(2) 最高線量率および線量均一度の変化

Fig. 2 の点線で示すように，最高線量率は線源間隔が小さいうちは線源間隔の増加に伴って急激に減少するが線源間隔がある程度大きくなると，あまり変らなくなる。これは線源間隔が小さいうちは 2 個の線源要素によって照射されるが線源間隔が増加すると最寄りの線源要素によって主として照射され，離れた位置にある線源要素による照射の影響は距離の逆自乗に比例して急激に少なくなることによる。

線量均一度は Fig. 2 の一点鎖線で示すように線源間隔の増加とともに減少し，線源間隔が

最適線源間隔を超えると増加する。これは線源間隔が最適線源間隔に近い値になると最低線量率は高くなるが最高線量率は、線源間隔が大きいためあまり変わらないことによる。したがって最適線源間隔をとるように線源を分割すれば、必要線源量が少なくて均一な照射を行うことができる。

3. 最適線源間隔における最低線量率と線量均一度

(1) 最適線源間隔

分割線源の高さが被照射体の高さを超えて、はみ出る場合、線源から放射された大半の γ 線エネルギーは被照射体内に入射せず外部に散逸してしまい効率的な照射⁽³⁾はできなくなる。このため分割線源の高さが被照射体の高さを超えないことを条件として線源を分割することとした。被照射体の高さが小さい場合には、線源要素を被照射体の末端一杯に寄せても被照射体裏面末端の線量率が中心の線量率よりも低い場合がある。この場合には、線源要素を被照射体の末端一杯に寄せた配置が「分割線源が被照射体の高さを超えない」という条件下で最も効率的でかつ均一な照射を行なえる配置となる。線源要素を被照射体の末端一杯に寄せた配置で被照射体裏面末端と中心の線量率が相等しい場合の被照射体の高さ（最小限界高さ） l_1 とすれば、被照射体の高さ l_i が最小限界高さよりも小さい場合には最適線源間隔 d_s^{**} は

$$d_s^{**} = l_i - 2l_s, \quad l_i \leq l_1 \quad (20)$$

で与えられる。

(1)または(20)式を用いて線源間隔の各値に対する被照射体裏面中心および末端の線量率の値を求めた。この値を用いて中心と末端の線量率が相等しくなる最適線源間隔を内挿して求めた。Table 1に中空円筒状被照射体の中心軸上に線状線源を配置した場合、Table 2に半無限平板線源に對面して箱状被照射体を配置した場合の最適線源間隔 d_s^{**} を示す。ここで線源はCo-60線源で被照射体は水等価の原子番号(7.24)をもつ物体とした。なお被照射体の最小限界高さ l_1 は、Table 2に示した $l_i = l_1$ の場合の最適線源間隔 d_s^{**} を用いて(21)式により求められる。

$$l_1 = 2l_s + d_s^{**} \quad (21)$$

(2) 最低線量率

線源を分割することによって最低線量率がどの程度高くなるか知るため、線源を分割しない場合の最低線量率 R_0 と最適線源間隔 d_s^{**} をもつように分割した場合の最低線量率 R^* の比 η ($\equiv R^*/R_0$)を求めた。Table 3に線状線源の場合、Table 4に半無限平板線源の場合の最低線量率の増加率 η を示す。この結果によれば η は線源と被照射体裏面間の距離 x_0 が近いほど大きく、線源要素の高さ l_s 、被照射体の高さ l_i および厚さ μl が大きいほど大きい。これは線源を分割しない場合には x_0 が小さく、 l_i 、 μl が大きいほど被照射体裏面末端の線量率（最低線量

最適線源間隔を超えると増加する。これは線源間隔が最適線源間隔に近い値になると最低線量率は高くなるが最高線量率は、線源間隔が大きいためあまり変わらないことによる。したがって最適線源間隔をとるように線源を分割すれば、必要線源量が少なくて均一な照射を行うことができる。

3. 最適線源間隔における最低線量率と線量均一度

(1) 最適線源間隔

分割線源の高さが被照射体の高さを超えて、はみ出る場合、線源から放射された大半の γ 線エネルギーは被照射体内に入射せず外部に散逸してしまい効率的な照射⁽³⁾はできなくなる。このため分割線源の高さが被照射体の高さを超えないことを条件として線源を分割することとした。被照射体の高さが小さい場合には、線源要素を被照射体の末端一杯に寄せても被照射体裏面末端の線量率が中心の線量率よりも低い場合がある。この場合には、線源要素を被照射体の末端一杯に寄せた配置が「分割線源が被照射体の高さを超えない」という条件下で最も効率的でかつ均一な照射を行なえる配置となる。線源要素を被照射体の末端一杯に寄せた配置で被照射体裏面末端と中心の線量率が相等しい場合の被照射体の高さ（最小限界高さ） l_1 とすれば、被照射体の高さ l_i が最小限界高さよりも小さい場合には最適線源間隔 d_s^{**} は

$$d_s^{**} = l_i - 2l_s, \quad l_i \leq l_1 \quad (20)$$

で与えられる。

(1)または(20)式を用いて線源間隔の各値に対する被照射体裏面中心および末端の線量率の値を求めた。この値を用いて中心と末端の線量率が相等しくなる最適線源間隔を内挿して求めた。Table 1に中空円筒状被照射体の中心軸上に線状線源を配置した場合、Table 2に半無限平板線源に對面して箱状被照射体を配置した場合の最適線源間隔 d_s^{**} を示す。ここで線源はCo-60線源で被照射体は水等価の原子番号(7.24)をもつ物体とした。なお被照射体の最小限界高さ l_1 は、Table 2に示した $l_i = l_1$ の場合の最適線源間隔 d_s^{**} を用いて(21)式により求められる。

$$l_1 = 2l_s + d_s^{**} \quad (21)$$

(2) 最低線量率

線源を分割することによって最低線量率がどの程度高くなるか知るため、線源を分割しない場合の最低線量率 R_0 と最適線源間隔 d_s^{**} をもつように分割した場合の最低線量率 R^* の比 η ($\equiv R^*/R_0$)を求めた。Table 3に線状線源の場合、Table 4に半無限平板線源の場合の最低線量率の増加率 η を示す。この結果によれば η は線源と被照射体裏面間の距離 x_0 が近いほど大きく、線源要素の高さ l_s 、被照射体の高さ l_i および厚さ μl が大きいほど大きい。これは線源を分割しない場合には x_0 が小さく、 l_i 、 μl が大きいほど被照射体裏面末端の線量率（最低線量

率)は裏面中心の線量率に比べて低くなるので、それだけ線源を分割することによって最低線量率を高くすることができるからである。

(3) 線量均一度

2.2に述べたように最高線量率は線源間隔の変化に対してあまり変わらないので、線量均一度が最小となる線源間隔は、最低線量率が最高になる最適線源間隔とほぼ一致すると考えられる。最適線源間隔をもつ分割線源で照射した場合の線量均一度 U^* と線源間隔の変化に対して線量均一度がとりうる最小値 U_{min} との差異を知るため U_{min} に対する U^* の偏差 $\epsilon_U\%$ ($\equiv 100(1 - U_{min}/U^*)$)を求めた。線源要素の高さ l_s 、被照射体の高さ l_i 、線源・被照射体間距離 g_a が実用範囲内の値($5 \leq l_s$ (cm) ≤ 50 , $l_1 \leq l_i$ (cm) $\leq 2l_1$, $0.2x_0 \leq g_a$ (cm) $\leq 0.8x_0 \dots x_0$ (cm):線源・被照射体裏面間距離)に対する偏差 ϵ_U の最大値と被照射体の厚さ μl と x_0 との関係をTable 5に示した。この結果から μl , x_0 の実用範囲($0.05 \leq \mu l \leq 5$, $5 \leq x_0$ (cm) ≤ 200)をも含む全範囲内において最適線源間隔をもつ分割線源による線量均一度は線状線源および無限平板状線源に関し、それぞれ4%, 2%以内で線量均一度の最小値と良く一致する。すなわち最適線源間隔をあけて線源要素を配置すれば最低線量率は最高値になるばかりでなく線量均一度も最小値に近い値となり効率的で均一な照射を行うことができる。

4. あ と が き

線源の分割数を多くすればするほど線量率分布は均一化するが、線源を分割するための諸費用が高くなり、また線源の取扱も容易でなくなるので、2分割がより実際的であろう。ここでは最適線源間隔に関しての数値計算結果を報告したが、この結果を利用しやすくするために、この結果に基づく近似式を導き出す必要がある。

本報告は筆者が高崎研究所開発部照射施設課において「照射技術の開発」研究として行い、その後検討を加えてまとめたものであることを付記する。

REFERENCES

- (1) Tatsuo Hoshi and Susumu Tanaka:Radioisotopes 30, 437-442 (1981)
- (2) Tatsuo Hoshi:Radioisotopes 30, 67-72 (1981)
- (3) Tatsuo Hoshi:Jr. of the Atomic Energy Society of Japan 17, 432-438 (1975)

率)は裏面中心の線量率に比べて低くなるので、それだけ線源を分割することによって最低線量率を高くすることができるからである。

(3) 線量均一度

2.2に述べたように最高線量率は線源間隔の変化に対してあまり変わらないので、線量均一度が最小となる線源間隔は、最低線量率が最高になる最適線源間隔とほぼ一致すると考えられる。最適線源間隔をもつ分割線源で照射した場合の線量均一度 U^* と線源間隔の変化に対して線量均一度がとりうる最小値 U_{min} との差異を知るため U_{min} に対する U^* の偏差 $\epsilon_U\%$ ($\equiv 100(1 - U_{min}/U^*)$)を求めた。線源要素の高さ l_s 、被照射体の高さ l_i 、線源・被照射体間距離 g_a が実用範囲内の値($5 \leq l_s$ (cm) ≤ 50 , $l_1 \leq l_i$ (cm) $\leq 2l_1$, $0.2x_0 \leq g_a$ (cm) $\leq 0.8x_0 \dots x_0$ (cm):線源・被照射体裏面間距離)に対する偏差 ϵ_U の最大値と被照射体の厚さ μl と x_0 との関係をTable 5に示した。この結果から μl , x_0 の実用範囲($0.05 \leq \mu l \leq 5$, $5 \leq x_0$ (cm) ≤ 200)をも含む全範囲内において最適線源間隔をもつ分割線源による線量均一度は線状線源および無限平板状線源に関し、それぞれ4%, 2%以内で線量均一度の最小値と良く一致する。すなわち最適線源間隔をあけて線源要素を配置すれば最低線量率は最高値になるばかりでなく線量均一度も最小値に近い値となり効率的で均一な照射を行うことができる。

4. あ と が き

線源の分割数を多くすればするほど線量率分布は均一化するが、線源を分割するための諸費用が高くなり、また線源の取扱も容易でなくなるので、2分割がより実際的であろう。ここでは最適線源間隔に関しての数値計算結果を報告したが、この結果を利用しやすくするために、この結果に基づく近似式を導き出す必要がある。

本報告は筆者が高崎研究所開発部照射施設課において「照射技術の開発」研究として行い、その後検討を加えてまとめたものであることを付記する。

REFERENCES

- (1) Tatsuo Hoshi and Susumu Tanaka:Radioisotopes 30, 437-442 (1981)
- (2) Tatsuo Hoshi:Radioisotopes 30, 67-72 (1981)
- (3) Tatsuo Hoshi:Jr. of the Atomic Energy Society of Japan 17, 432-438 (1975)

率)は裏面中心の線量率に比べて低くなるので、それだけ線源を分割することによって最低線量率を高くすることができるからである。

(3) 線量均一度

2.2に述べたように最高線量率は線源間隔の変化に対してあまり変わらないので、線量均一度が最小となる線源間隔は、最低線量率が最高になる最適線源間隔とほぼ一致すると考えられる。最適線源間隔をもつ分割線源で照射した場合の線量均一度 U^* と線源間隔の変化に対して線量均一度がとりうる最小値 U_{min} との差異を知るため U_{min} に対する U^* の偏差 $\epsilon_U\%$ ($\equiv 100(1 - U_{min}/U^*)$)を求めた。線源要素の高さ l_s 、被照射体の高さ l_i 、線源・被照射体間距離 g_a が実用範囲内の値($5 \leq l_s$ (cm) ≤ 50 , $l_1 \leq l_i$ (cm) $\leq 2l_1$, $0.2x_0 \leq g_a$ (cm) $\leq 0.8x_0 \dots x_0$ (cm):線源・被照射体裏面間距離)に対する偏差 ϵ_U の最大値と被照射体の厚さ μl と x_0 との関係をTable 5に示した。この結果から μl , x_0 の実用範囲($0.05 \leq \mu l \leq 5$, $5 \leq x_0$ (cm) ≤ 200)をも含む全範囲内において最適線源間隔をもつ分割線源による線量均一度は線状線源および無限平板状線源に関し、それぞれ4%, 2%以内で線量均一度の最小値と良く一致する。すなわち最適線源間隔をあけて線源要素を配置すれば最低線量率は最高値になるばかりでなく線量均一度も最小値に近い値となり効率的で均一な照射を行うことができる。

4. あ と が き

線源の分割数を多くすればするほど線量率分布は均一化するが、線源を分割するための諸費用が高くなり、また線源の取扱も容易でなくなるので、2分割がより実的であろう。ここでは最適線源間隔に関しての数値計算結果を報告したが、この結果を利用しやすくするために、この結果に基づく近似式を導き出す必要がある。

本報告は筆者が高崎研究所開発部照射施設課において「照射技術の開発」研究として行い、その後検討を加えてまとめたものであることを付記する。

REFERENCES

- (1) Tatsuo Hoshi and Susumu Tanaka:Radioisotopes 30, 437-442 (1981)
- (2) Tatsuo Hoshi:Radioisotopes 30, 67-72 (1981)
- (3) Tatsuo Hoshi:Jr. of the Atomic Energy Society of Japan
17, 432-438 (1975)

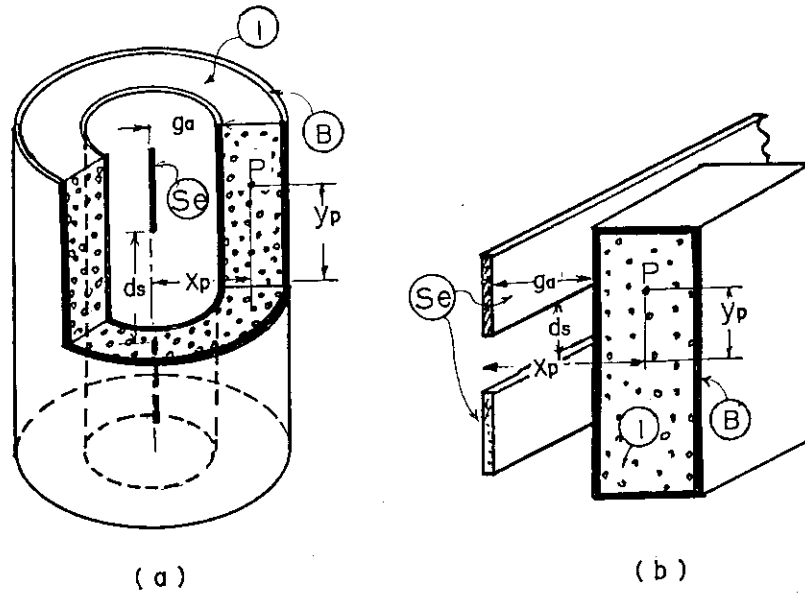


Fig.1 Configuration of source and irradiated material

I : irradiated material B : box or vessel
 Se : source element

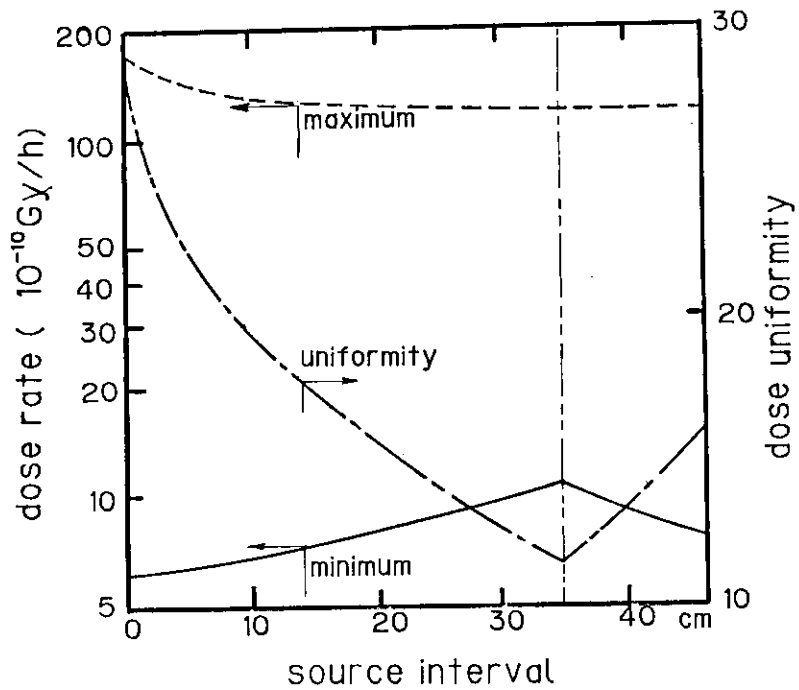


Fig.2 Relation between source interval, dose uniformity, maximum and minimum dose

Table 1-1 Optimum source interval of line sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

ls: source height

li: height of irradiated material

xo: horizontal distance between source and back surface of irradiated material

ds**: optimum source interval

xo=5.0cm

μl	ls	ds**				
		li=l ₁	li=l ₂	li=l ₃	li=l ₄	li=l ₅
0.0	5.0	6.47	8.39	10.46	12.62	14.84
	10.0	7.01	10.30	13.88	17.60	21.40
	15.0	7.48	12.18	17.32	22.63	28.00
	30.0	8.32	17.40	27.29	37.31	47.33
	50.0	8.82	24.00	40.22	56.42	72.54
0.05	5.0	6.47	8.39	10.46	12.62	14.84
	10.0	7.00	10.29	13.87	17.59	21.38
	15.0	7.47	12.17	17.30	22.60	27.97
	30.0	8.30	17.37	27.24	37.23	47.21
	50.0	8.78	23.93	40.08	56.16	72.11
0.10	5.0	6.46	8.38	10.45	12.60	14.82
	10.0	6.99	10.28	13.85	17.56	21.35
	15.0	7.45	12.14	17.27	22.55	27.89
	30.0	8.25	17.29	27.10	36.99	46.84
	50.0	8.69	23.73	39.65	55.42	70.95
0.50	5.0	6.28	8.14	10.14	12.22	14.34
	10.0	6.63	9.78	13.18	16.69	20.23
	15.0	6.90	11.34	16.14	21.04	25.95
	30.0	7.18	15.55	24.47	33.34	42.11
	50.0	7.22	20.91	35.07	49.00	62.76
1.00	5.0	5.78	7.51	9.36	11.29	13.27
	10.0	5.85	8.77	11.93	15.18	18.47
	15.0	5.92	10.04	14.52	19.08	23.66
	30.0	5.95	13.80	22.18	30.58	38.93
	50.0	5.93	18.87	32.35	45.74	59.08
2.50	5.0	4.33	5.81	7.41	9.08	10.80
	10.0	4.20	6.81	9.65	12.59	15.58
	15.0	4.18	7.96	12.07	16.28	20.54
	30.0	4.17	11.55	19.49	27.50	35.52
	50.0	4.15	16.46	29.46	42.48	55.51
5.00	5.0	3.10	4.45	5.91	7.43	8.99
	10.0	3.04	5.51	8.20	10.99	13.82
	15.0	3.04	6.66	10.62	14.68	18.78
	30.0	3.03	10.24	18.01	25.86	33.73
	50.0	2.99	15.13	27.96	40.82	53.69

l₁=2*ls +ds** l₂=1.25*l₁ l₃=1.5*l₁ l₄=1.75*l₁
 l₅=2*l₁

Table 1-2 Optimum source interval of line sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source height

l_i : height of irradiated material

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

ds^{**} : optimum source interval

$x_0=10.0\text{cm}$

μl	l_s	ds^{**}				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	12.83	15.33	18.04	20.88	23.83
	10.0	12.94	16.79	20.92	25.24	29.69
	15.0	13.45	18.67	24.30	30.17	36.17
	30.0	14.96	24.36	34.64	45.25	56.00
	50.0	16.21	31.42	48.02	64.93	81.89
0.05	5.0	12.83	15.33	18.03	20.87	23.82
	10.0	12.93	16.78	20.91	25.23	29.67
	15.0	13.44	18.65	24.28	30.15	36.15
	30.0	14.94	24.34	34.61	45.21	55.94
	50.0	16.18	31.37	47.94	64.81	81.73
0.10	5.0	12.82	15.32	18.02	20.86	23.80
	10.0	12.92	16.76	20.89	25.21	29.64
	15.0	13.43	18.63	24.25	30.11	36.10
	30.0	14.91	24.29	34.53	45.10	55.78
	50.0	16.12	31.25	47.75	64.50	81.25
0.50	5.0	12.59	15.02	17.65	20.41	23.26
	10.0	12.56	16.28	20.27	24.43	28.69
	15.0	12.90	17.91	23.30	28.89	34.57
	30.0	13.80	22.68	32.29	42.09	51.90
	50.0	14.27	28.38	43.50	58.65	73.67
1.00	5.0	11.87	14.13	16.58	19.14	21.79
	10.0	11.56	15.02	18.73	22.59	26.53
	15.0	11.60	16.26	21.26	26.45	31.71
	30.0	11.83	20.09	29.03	38.16	47.31
	50.0	11.90	25.09	39.27	53.52	67.73
2.50	5.0	9.37	11.21	13.23	15.36	17.59
	10.0	8.66	11.62	14.82	18.17	21.61
	15.0	8.45	12.54	16.97	21.58	26.28
	30.0	8.37	15.91	24.13	32.57	41.08
	50.0	8.35	20.67	34.00	47.51	61.05
5.00	5.0	6.83	8.40	10.13	11.97	13.89
	10.0	6.21	8.89	11.81	14.86	17.99
	15.0	6.10	9.90	14.04	18.35	22.74
	30.0	6.08	13.31	21.23	29.36	37.55
	50.0	6.06	18.06	31.07	44.25	57.48

$l_1=2 \cdot l_s + ds^{**}$ $l_2=1.25 \cdot l_1$ $l_3=1.5 \cdot l_1$ $l_4=1.75 \cdot l_1$
 $l_5=2 \cdot l_1$

Table 1-3 Optimum source interval of line sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

ls: source height

li: height of irradiated material

xo: horizontal distance between source and back surface of irradiated material

ds**: optimum source interval

xo=30.0cm

μl	ls	ds**				
		li=l ₁	li=l ₂	li=l ₃	li=l ₄	li=l ₅
0.0	5.0	40.37	45.33	50.79	56.63	62.75
	10.0	39.12	45.32	52.08	59.23	66.67
	15.0	38.50	46.00	54.11	62.65	71.49
	30.0	38.82	50.36	62.77	75.73	89.06
	50.0	40.92	57.94	76.35	95.53	115.13
0.05	5.0	40.36	45.31	50.77	56.61	62.72
	10.0	39.11	45.30	52.05	59.20	66.64
	15.0	38.48	45.98	54.09	62.62	71.46
	30.0	38.79	50.33	62.73	75.69	89.01
	50.0	40.89	57.90	76.30	95.46	115.05
0.10	5.0	40.34	45.29	50.75	56.58	62.69
	10.0	39.09	45.28	52.03	59.17	66.60
	15.0	38.46	45.95	54.06	62.58	71.41
	30.0	38.76	50.29	62.68	75.62	88.93
	50.0	40.84	57.83	76.20	95.34	114.89
0.50	5.0	39.82	44.65	49.97	55.65	61.60
	10.0	38.49	44.52	51.10	58.05	65.27
	15.0	37.76	45.06	52.94	61.23	69.78
	30.0	37.67	48.84	60.82	73.30	86.06
	50.0	39.07	55.40	72.98	91.18	109.63
1.00	5.0	38.13	42.60	47.54	52.81	58.33
	10.0	36.58	42.18	48.30	54.76	61.47
	15.0	35.61	42.39	49.73	57.43	65.38
	30.0	34.67	45.05	56.18	67.76	79.60
	50.0	34.91	50.07	66.39	83.26	100.36
2.50	5.0	31.56	35.00	38.86	43.04	47.46
	10.0	29.54	33.99	38.92	44.19	49.70
	15.0	28.11	33.63	39.68	46.09	52.76
	30.0	25.99	34.85	44.46	54.51	64.82
	50.0	25.27	38.66	53.20	68.29	83.66
5.00	5.0	24.17	26.81	29.82	33.13	36.66
	10.0	21.99	25.62	29.69	34.07	38.69
	15.0	20.50	25.20	30.39	35.92	41.68
	30.0	18.62	26.68	35.43	44.58	53.97
	50.0	18.26	30.80	44.46	58.65	73.10
$l_1=2*ls + ds^{**}$		$l_2=1.25*l_1$	$l_3=1.5*l_1$	$l_4=1.75*l_1$		
$l_5=2*l_1$						

Table 1-4 Optimum source interval of line sources

μ l: thickness of irradiated material of mean free path unit

ls: source height

li: height of irradiated material

xo: horizontal distance between source and back surface of irradiated material

ds**: optimum source interval

xo=60.0cm

μ l	ls	ds**				
		li=l ₁	li=l ₂	li=l ₃	li=l ₄	li=l ₅
0.0	5.0	82.58	91.31	101.01	111.44	122.42
	10.0	80.75	90.66	101.58	113.26	125.50
	15.0	79.32	90.45	102.65	115.62	129.16
	30.0	77.00	92.00	108.22	125.30	142.98
	50.0	76.95	97.32	119.22	142.13	165.72
0.05	5.0	82.56	91.28	100.98	111.40	122.37
	10.0	80.72	90.62	101.55	113.22	125.45
	15.0	79.29	90.42	102.61	115.58	129.11
	30.0	76.96	91.96	108.18	125.25	142.92
	50.0	76.91	97.27	119.16	142.06	165.64
0.10	5.0	82.52	91.24	100.93	111.35	122.31
	10.0	80.69	90.58	101.50	113.16	125.38
	15.0	79.25	90.37	102.56	115.51	129.03
	30.0	76.92	91.90	108.11	125.17	142.82
	50.0	76.85	97.20	119.06	141.94	165.50
0.50	5.0	81.55	90.05	99.50	109.65	120.33
	10.0	79.65	89.30	99.94	111.30	123.20
	15.0	78.13	88.98	100.86	113.48	126.62
	30.0	75.52	90.12	105.89	122.45	139.56
	50.0	74.96	94.72	115.91	138.02	160.70
1.00	5.0	78.36	86.21	94.96	104.37	114.28
	10.0	76.26	85.20	95.07	105.63	116.67
	15.0	74.54	84.60	95.64	107.37	119.58
	30.0	71.21	84.78	99.46	114.87	130.77
	50.0	69.54	87.91	107.62	128.16	149.21
2.50	5.0	65.67	71.60	78.31	85.64	93.43
	10.0	63.12	70.00	77.72	86.08	94.91
	15.0	60.93	68.81	77.58	87.01	96.92
	30.0	56.21	67.25	79.36	92.19	105.52
	50.0	52.88	68.36	85.16	102.79	120.94
5.00	5.0	51.13	55.50	60.55	66.15	72.19
	10.0	48.35	53.62	59.64	66.25	73.31
	15.0	45.98	52.21	59.26	66.94	75.06
	30.0	41.01	50.40	60.79	71.85	83.35
	50.0	37.92	51.79	66.88	82.72	99.02
l ₁ =2*ls +ds**		l ₂ =1.25*l ₁		l ₃ =1.5*l ₁		l ₄ =1.75*l ₁
l ₅ =2*l ₁						

Table 1-5 Optimum source interval of line sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source height

l_i : height of irradiated material

x_o : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

ds^{**} : optimum source interval

$x_o=100.0\text{cm}$

μl	l_s	ds^{**}				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	139.06	152.85	168.23	184.80	202.28
	10.0	136.97	151.91	168.48	186.27	204.97
	15.0	135.14	151.25	169.05	188.09	208.05
	30.0	131.05	150.87	172.51	195.45	219.35
	50.0	128.33	153.33	180.37	208.84	238.30
0.05	5.0	139.02	152.80	168.17	184.73	202.21
	10.0	136.93	151.85	168.42	186.20	204.90
	15.0	135.09	151.20	168.99	188.02	207.97
	30.0	131.00	150.81	172.44	195.37	219.26
	50.0	128.27	153.26	180.29	208.74	238.19
0.10	5.0	138.96	152.74	168.10	184.65	202.11
	10.0	136.87	151.79	168.34	186.11	204.79
	15.0	135.03	151.13	168.90	187.92	207.86
	30.0	130.94	150.73	172.34	195.26	219.13
	50.0	128.20	153.17	180.18	208.61	238.03
0.50	5.0	137.39	150.82	165.79	181.92	198.92
	10.0	135.23	149.78	165.91	183.23	201.42
	15.0	133.33	149.02	166.35	184.88	204.29
	30.0	129.00	148.29	169.36	191.67	214.87
	50.0	125.87	150.20	176.48	204.09	232.61
1.00	5.0	132.18	144.58	158.43	173.37	189.13
	10.0	129.84	143.29	158.24	174.30	191.18
	15.0	127.75	142.28	158.36	175.56	193.58
	30.0	122.79	140.70	160.28	181.03	202.59
	50.0	118.69	141.30	165.76	191.44	217.94
2.50	5.0	111.32	120.61	131.15	142.68	154.99
	10.0	108.54	118.74	130.26	142.80	156.13
	15.0	105.99	117.14	129.67	143.24	157.61
	30.0	99.64	113.78	129.48	146.30	163.93
	50.0	93.68	112.09	132.26	153.65	175.87
5.00	5.0	87.27	94.00	101.80	110.48	119.88
	10.0	84.23	91.81	100.54	110.20	120.59
	15.0	81.45	89.92	99.63	110.30	121.72
	30.0	74.57	85.96	98.79	112.67	127.31
	50.0	68.35	84.00	101.31	119.75	138.92
$l_1=2 \cdot l_s + ds^{**}$		$l_2=1.25 \cdot l_1$	$l_3=1.5 \cdot l_1$	$l_4=1.75 \cdot l_1$	$l_5=2 \cdot l_1$	

Table 1-6 Optimum source interval of line sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source height

l_i : height of irradiated material

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

ds^{**} : optimum source interval

$x_0=150.0\text{cm}$

μl	l_s	ds^{**}				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	209.72	229.86	252.33	276.59	302.21
	10.0	207.50	228.76	252.41	277.87	304.70
	15.0	205.45	227.86	252.71	279.40	307.46
	30.0	200.32	226.31	254.89	285.36	317.24
	50.0	195.61	226.60	260.38	296.15	333.35
0.05	5.0	209.66	229.78	252.25	276.49	302.10
	10.0	207.44	228.68	252.32	277.77	304.59
	15.0	205.39	227.78	252.62	279.30	307.34
	30.0	200.26	226.23	254.79	285.25	317.11
	50.0	195.53	226.51	260.27	296.02	333.21
0.10	5.0	209.58	229.69	252.13	276.36	301.95
	10.0	207.35	228.58	252.21	277.64	304.43
	15.0	205.30	227.68	252.51	279.16	307.18
	30.0	200.17	226.12	254.66	285.10	316.93
	50.0	195.44	226.39	260.13	295.85	333.01
0.50	5.0	207.25	226.84	248.73	272.34	297.26
	10.0	204.96	225.66	248.69	273.47	299.57
	15.0	202.84	224.66	248.87	274.84	302.13
	30.0	197.49	222.80	250.63	280.28	311.26
	50.0	192.43	222.61	255.49	290.25	326.35
1.00	5.0	199.52	217.60	237.84	259.70	282.80
	10.0	197.06	216.18	237.50	260.47	284.66
	15.0	194.76	214.94	237.37	261.45	286.77
	30.0	188.83	212.29	238.12	265.67	294.44
	50.0	182.89	210.92	241.49	273.82	307.37
2.50	5.0	168.46	181.94	197.27	214.08	232.04
	10.0	165.56	179.93	196.23	214.03	232.99
	15.0	162.81	178.11	195.39	214.20	234.19
	30.0	155.50	173.69	194.03	215.98	239.14
	50.0	147.69	169.96	194.59	220.94	248.51
5.00	5.0	132.51	142.19	153.44	166.00	179.60
	10.0	129.34	139.85	152.01	165.52	180.10
	15.0	126.34	137.71	150.81	165.30	180.89
	30.0	118.37	132.49	148.57	166.15	184.85
	50.0	109.97	128.09	148.43	170.36	193.43
$l_1=2 \cdot l_s$ + ds^{**}		$l_2=1.25 \cdot l_1$	$l_3=1.5 \cdot l_1$	$l_4=1.75 \cdot l_1$	$l_5=2 \cdot l_1$	

Table 1-7 Optimum source interval of line sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit
 l_s : source height
 l_i : height of irradiated material
 x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material
 ds^{**} : optimum source interval
 $x_0=200.0\text{cm}$

μl	l_s	ds^{**}				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	280.41	306.88	336.47	368.41	402.18
	10.0	278.12	305.71	336.46	369.60	404.57
	15.0	275.96	304.68	336.62	370.98	407.16
	30.0	270.27	302.50	338.10	376.17	416.10
	50.0	264.39	301.50	342.17	385.41	430.53
0.05	5.0	280.33	306.79	336.35	368.28	402.03
	10.0	278.04	305.61	336.34	369.47	404.41
	15.0	275.88	304.58	336.50	370.84	407.00
	30.0	270.18	302.40	337.97	376.03	415.94
	50.0	264.29	301.39	342.04	385.25	430.35
0.10	5.0	280.22	306.66	336.20	368.11	401.83
	10.0	277.93	305.48	336.19	369.29	404.21
	15.0	275.77	304.45	336.35	370.66	406.80
	30.0	270.07	302.26	337.81	375.84	415.72
	50.0	264.17	301.24	341.86	385.04	430.11
0.50	5.0	277.13	302.90	331.70	362.79	395.63
	10.0	274.77	301.63	331.57	363.83	397.84
	15.0	272.55	300.52	331.62	365.06	400.25
	30.0	266.65	298.04	332.71	369.76	408.58
	50.0	260.45	296.60	336.20	378.25	422.08
1.00	5.0	266.88	290.65	317.28	346.07	376.49
	10.0	264.35	289.16	316.86	346.74	378.27
	15.0	261.96	287.80	316.59	347.59	380.23
	30.0	255.50	284.56	316.71	351.11	387.16
	50.0	248.47	282.01	318.80	357.89	398.61
2.50	5.0	225.61	243.29	263.42	285.50	309.11
	10.0	222.65	241.22	262.30	285.37	309.98
	15.0	219.81	239.28	261.33	285.40	311.03
	30.0	211.99	234.28	259.33	286.49	315.23
	50.0	203.10	229.35	258.59	290.03	323.08
5.00	5.0	177.78	190.42	205.12	221.54	239.36
	10.0	174.54	187.99	203.59	220.96	239.75
	15.0	171.43	185.73	202.25	220.59	240.37
	30.0	162.89	179.84	199.26	220.61	243.44
	50.0	153.25	174.02	197.55	223.13	250.21

$l_1=2 \cdot l_s + ds^{**}$ $l_2=1.25 \cdot l_1$ $l_3=1.5 \cdot l_1$ $l_4=1.75 \cdot l_1$
 $l_5=2 \cdot l_1$

Table 2-1 Optimum source interval of semi-infinite slab sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source height

l_i : height of irradiated material

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

ds^{**} : optimum source interval

$x_0=5.0\text{cm}$

μl	l_s	ds^{**}				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	9.06	11.49	14.07	16.75	19.49
	10.0	10.39	14.43	18.74	23.17	27.65
	15.0	11.68	17.35	23.39	29.55	35.73
	30.0	14.55	25.16	36.26	47.32	58.27
	50.0	16.90	34.09	51.59	68.80	85.81
0.05	5.0	9.05	11.47	14.05	16.73	19.46
	10.0	10.37	14.40	18.70	23.12	27.59
	15.0	11.64	17.30	23.33	29.47	35.62
	30.0	14.46	25.03	36.07	47.05	57.92
	50.0	16.71	33.78	51.11	68.10	84.85
0.10	5.0	9.03	11.44	14.01	16.68	19.40
	10.0	10.32	14.34	18.61	23.00	27.44
	15.0	11.55	17.18	23.15	29.23	35.32
	30.0	14.20	24.63	35.49	46.26	56.86
	50.0	16.15	32.86	49.73	66.18	82.30
0.50	5.0	8.34	10.53	12.85	15.24	17.67
	10.0	8.99	12.53	16.27	20.09	23.93
	15.0	9.49	14.33	19.47	24.66	29.83
	30.0	10.10	18.84	27.98	37.07	46.07
	50.0	10.24	24.19	38.47	52.57	66.55
1.00	5.0	7.11	9.01	11.02	13.10	15.23
	10.0	7.20	10.28	13.57	16.95	20.36
	15.0	7.27	11.55	16.13	20.80	25.49
	30.0	7.32	15.27	23.71	32.18	40.65
	50.0	7.31	20.26	33.77	47.25	60.71
2.50	5.0	4.80	6.32	7.95	9.67	11.43
	10.0	4.61	7.26	10.13	13.10	16.12
	15.0	4.59	8.39	12.52	16.77	21.05
	30.0	4.58	11.96	19.90	27.94	36.00
	50.0	4.56	16.85	29.85	42.90	55.97
5.00	5.0	3.27	4.62	6.10	7.63	9.21
	10.0	3.19	5.67	8.37	11.17	14.01
	15.0	3.19	6.81	10.78	14.85	18.96
	30.0	3.18	10.38	18.16	26.02	33.90
	50.0	3.14	15.27	28.09	40.97	53.86
$l_1=2 \cdot l_s + ds^{**}$		$l_2=1.25 \cdot l_1$	$l_3=1.5 \cdot l_1$	$l_4=1.75 \cdot l_1$		
$l_5=2 \cdot l_1$						

Table 2-2 Optimum source interval of semi-infinite slab sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source height

l_i : height of irradiated material

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

ds^{**} : optimum source interval

$x_0=10.0\text{cm}$

μl	l_s	ds^{**}				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	17.32	20.60	24.12	27.80	31.60
	10.0	18.13	22.98	28.14	33.50	38.98
	15.0	19.42	25.88	32.75	39.85	47.08
	30.0	23.35	34.70	46.79	59.10	71.46
	50.0	27.46	45.40	64.29	83.22	102.02
0.05	5.0	17.51	20.58	24.10	27.77	31.56
	10.0	18.10	22.95	28.11	33.46	38.93
	15.0	19.38	25.83	32.70	39.79	47.00
	30.0	23.28	34.60	46.66	58.94	71.25
	50.0	27.32	45.19	64.00	82.83	101.51
0.10	5.0	17.28	20.55	24.05	27.72	31.49
	10.0	18.06	22.89	28.03	33.36	38.80
	15.0	19.32	25.74	32.57	39.63	46.79
	30.0	23.11	34.35	46.31	58.47	70.64
	50.0	26.94	44.61	63.16	81.68	99.99
0.50	5.0	16.37	19.37	22.59	25.94	29.37
	10.0	16.67	21.06	25.70	30.49	35.35
	15.0	17.33	23.07	29.15	35.37	41.65
	30.0	18.97	28.67	38.94	49.32	59.66
	50.0	19.98	34.87	50.52	66.13	81.61
1.00	5.0	14.52	17.10	19.88	22.77	25.75
	10.0	14.23	18.01	22.04	26.21	30.45
	15.0	14.28	19.26	24.56	30.02	35.56
	30.0	14.55	23.09	32.26	41.60	50.99
	50.0	14.64	28.06	42.37	56.81	71.23
2.50	5.0	10.41	12.34	14.44	16.68	19.00
	10.0	9.60	12.63	15.91	19.34	22.87
	15.0	9.32	13.48	17.97	22.65	27.43
	30.0	9.18	16.78	25.04	33.53	42.11
	50.0	9.17	21.51	34.86	48.42	62.02
5.00	5.0	7.24	8.82	10.58	12.46	14.42
	10.0	6.54	9.25	12.19	15.27	18.43
	15.0	6.40	10.23	14.39	18.72	23.14
	30.0	6.38	13.62	21.55	29.70	37.92
	50.0	6.36	18.35	31.37	44.57	57.83

$l_1=2 \cdot l_s + ds^{**}$ $l_2=1.25 \cdot l_1$ $l_3=1.5 \cdot l_1$ $l_4=1.75 \cdot l_1$
 $l_5=2 \cdot l_1$

Table 2-3 Optimum source interval of semi-infinite slab sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source height

l_i : height of irradiated material

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

ds^{**} : optimum source interval

$x_0=30.0\text{cm}$

μl	l_s	ds^{**}				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	52.58	59.46	66.97	74.94	83.22
	10.0	51.95	60.28	69.28	78.74	88.54
	15.0	51.97	61.81	72.37	83.41	94.79
	30.0	54.38	68.94	84.43	100.51	116.95
	50.0	59.62	80.62	102.97	126.04	149.46
0.05	5.0	52.54	59.41	66.92	74.87	83.14
	10.0	51.91	60.23	69.21	78.66	88.44
	15.0	51.92	61.75	72.29	83.32	94.68
	30.0	54.31	68.85	84.32	100.37	116.78
	50.0	59.52	80.47	102.79	125.81	149.18
0.10	5.0	52.47	59.33	66.82	74.75	83.00
	10.0	51.83	60.13	69.10	78.52	88.27
	15.0	51.83	61.64	72.15	83.15	94.48
	30.0	54.18	68.67	84.08	100.07	116.41
	50.0	59.29	80.15	102.36	125.26	148.47
0.50	5.0	50.41	56.75	63.66	70.97	78.55
	10.0	49.46	57.13	65.38	74.04	82.96
	15.0	49.10	58.12	67.77	77.82	88.13
	30.0	50.01	63.17	77.11	91.47	106.04
	50.0	52.65	71.22	90.87	110.98	131.22
1.00	5.0	45.90	51.30	57.20	63.46	69.97
	10.0	44.47	51.03	58.12	65.57	73.27
	15.0	43.56	51.31	59.63	68.32	77.24
	30.0	42.68	54.04	66.13	78.63	91.36
	50.0	42.96	59.07	76.26	93.95	111.85
2.50	5.0	34.83	38.54	42.70	47.19	51.93
	10.0	32.76	37.47	42.68	48.25	54.08
	15.0	31.24	37.00	43.33	50.03	57.00
	30.0	28.81	37.89	47.73	58.02	68.60
	50.0	27.84	41.43	56.16	71.46	87.05
5.00	5.0	25.50	28.22	31.33	34.75	38.40
	10.0	23.27	26.97	31.13	35.63	40.36
	15.0	21.71	26.47	31.75	37.38	43.25
	30.0	19.63	27.75	36.57	45.80	55.28
	50.0	19.18	31.78	45.50	59.75	74.27
$l_1=2 \cdot l_s + ds^{**}$		$l_2=1.25 \cdot l_1$	$l_3=1.5 \cdot l_1$	$l_4=1.75 \cdot l_1$		
$l_5=2 \cdot l_1$						

Table 2-4 Optimum source interval of semi-infinite slab sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source height

l_i : height of irradiated material

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

ds^{**} : optimum source interval

$x_0=60.0\text{cm}$

μl	l_s	ds^{**}				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	106.38	118.76	132.37	146.86	162.01
	10.0	105.16	118.93	133.95	149.87	166.45
	15.0	104.35	119.54	136.03	153.44	171.49
	30.0	103.94	123.63	144.74	166.82	189.58
	50.0	106.63	132.56	160.19	188.92	218.35
0.05	5.0	106.30	118.67	132.26	146.73	161.85
	10.0	105.07	118.83	133.83	149.73	166.28
	15.0	104.26	119.44	135.91	153.29	171.32
	30.0	103.84	123.50	144.59	166.64	189.37
	50.0	106.50	132.40	159.99	188.67	218.06
0.10	5.0	106.18	118.52	132.08	146.51	161.60
	10.0	104.95	118.67	133.63	149.49	166.00
	15.0	104.12	119.26	135.69	153.02	171.01
	30.0	103.67	123.28	144.31	166.30	188.95
	50.0	106.27	132.09	159.60	188.18	217.45
0.50	5.0	102.32	113.73	126.25	139.56	153.43
	10.0	100.83	113.51	127.32	141.94	157.10
	15.0	99.71	113.70	128.85	144.80	161.28
	30.0	98.20	116.25	135.55	155.65	176.25
	50.0	98.99	122.56	147.55	173.38	199.67
1.00	5.0	93.73	103.40	114.05	125.42	137.29
	10.0	91.81	102.59	114.40	126.92	139.94
	15.0	90.22	102.16	115.14	128.85	143.04
	30.0	87.13	102.63	119.27	136.64	154.48
	50.0	85.56	105.87	127.57	149.95	172.84
2.50	5.0	72.23	78.70	86.01	93.97	102.42
	10.0	69.66	77.08	85.39	94.38	103.87
	15.0	67.44	75.84	85.19	95.24	105.80
	30.0	62.48	74.01	86.65	100.06	114.00
	50.0	58.73	74.65	91.93	110.09	128.79
5.00	5.0	53.80	58.36	63.61	69.44	75.73
	10.0	51.00	56.44	62.67	69.50	76.81
	15.0	48.58	54.98	62.23	70.13	78.49
	30.0	43.42	52.95	63.51	74.77	86.50
	50.0	40.04	54.03	69.28	85.29	101.78
$l_1=2 \cdot l_s + ds^{**}$		$l_2=1.25 \cdot l_1$	$l_3=1.5 \cdot l_1$	$l_4=1.75 \cdot l_1$		
$l_5=2 \cdot l_1$						

Table 2-5 Optimum source interval of semi-infinite slab sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source height

l_i : height of irradiated material

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

ds^{**} : optimum source interval

$x_0=100.0\text{cm}$

μl	l_s	ds^{**}				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	178.30	198.06	219.82	243.04	267.34
	10.0	176.82	197.93	221.07	245.69	271.40
	15.0	175.61	198.09	222.65	248.70	275.84
	30.0	173.39	200.18	229.16	259.68	291.30
	50.0	173.24	206.04	241.23	278.04	315.97
0.05	5.0	178.18	197.91	219.64	242.83	267.10
	10.0	176.70	197.77	220.88	245.47	271.15
	15.0	175.48	197.93	222.46	248.48	275.58
	30.0	173.25	200.00	228.95	259.43	291.00
	50.0	173.07	205.83	240.97	277.73	315.61
0.10	5.0	177.98	197.67	219.34	242.47	266.69
	10.0	176.49	197.52	220.57	245.10	270.71
	15.0	175.26	197.66	222.13	248.09	275.12
	30.0	173.01	199.70	228.57	258.97	290.45
	50.0	172.78	205.46	240.51	277.16	314.91
0.50	5.0	171.72	189.90	209.92	231.26	253.54
	10.0	169.98	189.41	210.71	233.32	256.87
	15.0	168.49	189.19	211.79	235.70	260.54
	30.0	165.34	189.98	216.59	244.53	273.35
	50.0	163.66	193.74	225.91	259.41	293.75
1.00	5.0	157.68	173.06	190.06	208.25	227.30
	10.0	155.54	172.01	190.14	209.47	229.64
	15.0	153.61	171.20	190.49	210.97	232.29
	30.0	149.03	170.09	192.93	216.97	241.82
	50.0	145.21	171.05	198.78	227.73	257.46
2.50	5.0	122.25	132.44	143.97	156.57	169.99
	10.0	119.47	130.58	143.08	156.68	171.11
	15.0	116.92	128.96	142.47	157.09	172.57
	30.0	110.42	125.43	142.08	159.92	178.62
	50.0	104.13	123.35	144.42	166.77	190.00
5.00	5.0	91.74	98.77	106.91	115.98	125.80
	10.0	88.68	96.56	105.64	115.68	126.49
	15.0	85.88	94.64	104.69	115.74	127.57
	30.0	78.86	90.52	103.67	117.91	132.94
	50.0	72.36	88.24	105.85	124.62	144.16
$l_1=2*l_s + ds^{**}$		$l_2=1.25*l_1$	$l_3=1.5*l_1$	$l_4=1.75*l_1$		
$l_5=2*l_1$						

Table 2-6 Optimum source interval of semi-infinite slab sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source height

l_i : height of irradiated material

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

ds^{**} : optimum source interval

$x_0=150.0\text{cm}$

μl	l_s	ds^{**}					
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$	
0.0	5.0	268.28	297.26	329.21	363.35	399.13	
	10.0	266.67	296.97	330.29	365.82	402.98	
	15.0	265.24	296.89	331.60	368.54	407.10	
	30.0	261.96	297.80	336.81	378.09	420.99	
	50.0	259.75	301.41	346.40	393.72	442.68	
0.05	5.0	268.10	297.04	328.95	363.05	398.77	
	10.0	266.48	296.75	330.02	365.51	402.61	
	15.0	265.05	296.66	331.33	368.21	406.73	
	30.0	261.75	297.55	336.51	377.73	420.58	
	50.0	259.53	301.13	346.07	393.32	442.22	
0.10	5.0	267.81	296.68	328.51	362.52	398.16	
	10.0	266.18	296.37	329.57	364.96	401.98	
	15.0	264.73	296.27	330.86	367.65	406.06	
	30.0	261.42	297.13	335.99	377.11	419.84	
	50.0	259.15	300.66	345.48	392.60	441.36	
0.50	5.0	258.51	285.19	314.59	345.96	378.76	
	10.0	256.66	284.56	315.23	347.86	381.91	
	15.0	254.97	284.12	316.06	349.98	385.30	
	30.0	250.84	283.84	319.71	357.56	396.78	
	50.0	247.32	285.63	326.91	370.19	414.78	
1.00	5.0	237.67	260.20	285.14	311.86	339.87	
	10.0	235.41	259.02	285.09	312.94	342.06	
	15.0	233.30	258.01	285.21	314.21	344.46	
	30.0	227.84	255.94	286.62	319.10	352.83	
	50.0	222.34	255.12	290.59	327.86	366.34	
2.50	5.0	184.86	199.68	216.51	234.91	254.54	
	10.0	181.95	197.69	215.47	234.86	255.49	
	15.0	179.21	195.87	214.63	235.03	256.67	
	30.0	171.83	191.35	213.16	236.67	261.46	
	50.0	163.79	187.35	213.40	241.26	270.42	
5.00	5.0	139.22	149.36	161.13	174.26	188.49	
	10.0	136.04	147.00	159.68	173.76	188.97	
	15.0	133.03	144.84	158.46	173.52	189.73	
	30.0	124.97	139.51	156.08	174.22	193.53	
	50.0	116.34	134.85	155.66	178.13	201.78	
$l_1=2 \cdot l_s + ds^{**}$		$l_2=1.25 \cdot l_1$		$l_3=1.5 \cdot l_1$		$l_4=1.75 \cdot l_1$	
$l_5=2 \cdot l_1$							

Table 2-7 Optimum source interval of semi-infinite slab sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source height

l_i : height of irradiated material

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

ds^{**} : optimum source interval

$x_0=200.0\text{cm}$

μl	l_s	ds^{**}				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	358.28	396.49	438.64	483.70	530.94
	10.0	356.60	396.12	439.64	486.08	534.69
	15.0	355.06	395.92	440.81	488.64	538.65
	30.0	351.22	396.18	445.30	497.41	551.69
	50.0	347.81	398.47	453.44	511.45	571.64
0.05	5.0	358.04	396.19	438.29	483.30	530.47
	10.0	356.35	395.83	439.28	485.66	534.21
	15.0	354.80	395.60	440.44	488.21	538.15
	30.0	350.95	395.86	444.92	496.96	551.17
	50.0	347.54	398.13	453.02	510.96	571.07
0.10	5.0	357.64	395.71	437.70	482.59	529.65
	10.0	355.95	395.34	438.68	484.95	533.37
	15.0	354.40	395.11	439.83	487.48	537.29
	30.0	350.52	395.32	444.27	496.17	550.24
	50.0	347.07	397.54	452.30	510.08	570.03
0.50	5.0	345.36	380.51	419.30	460.72	504.03
	10.0	343.43	379.81	419.85	462.52	507.09
	15.0	341.64	379.25	420.56	464.51	510.33
	30.0	336.98	378.39	423.57	471.40	521.08
	50.0	332.37	378.99	429.50	482.66	537.61
1.00	5.0	317.69	347.35	380.26	415.52	452.49
	10.0	315.37	346.12	380.13	416.51	454.60
	15.0	313.17	345.01	380.14	417.66	456.87
	30.0	307.22	342.41	380.98	421.94	464.58
	50.0	300.73	340.52	383.81	429.49	476.80
2.50	5.0	247.46	266.94	289.06	313.26	339.10
	10.0	244.51	264.88	287.95	313.14	339.98
	15.0	241.67	262.96	286.99	313.18	341.02
	30.0	233.83	257.91	284.93	314.18	345.12
	50.0	224.79	252.80	283.96	317.46	352.67
5.00	5.0	186.72	199.97	215.37	232.56	251.21
	10.0	183.48	197.54	213.83	231.97	251.60
	15.0	180.35	195.25	212.46	231.57	252.18
	30.0	171.75	189.28	209.38	231.49	255.14
	50.0	161.95	183.27	207.44	233.76	261.64
$l_1=2 \cdot l_s + ds^{**}$		$l_2=1.25 \cdot l_1$		$l_3=1.5 \cdot l_1$		$l_4=1.75 \cdot l_1$
$l_5=2 \cdot l_1$						

Table 3-1 Increase ratio of minimum dose rate by separation of line sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source length

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

η : increase ratio of minimum dose by source separation

$x_0=5.0\text{cm}$

μl	l_s	η				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	1.42	1.70	1.95	2.15	2.31
	10.0	1.61	2.03	2.33	2.52	2.64
	15.0	1.71	2.24	2.53	2.69	2.78
	30.0	1.83	2.56	2.79	2.88	2.92
	50.0	1.89	2.75	2.90	2.95	2.97
0.05	5.0	1.42	1.70	1.95	2.16	2.32
	10.0	1.62	2.04	2.35	2.55	2.68
	15.0	1.71	2.26	2.57	2.75	2.86
	30.0	1.84	2.62	2.90	3.04	3.14
	50.0	1.91	2.86	3.12	3.28	3.43
0.10	5.0	1.42	1.71	1.97	2.18	2.36
	10.0	1.62	2.06	2.39	2.61	2.77
	15.0	1.73	2.30	2.65	2.87	3.03
	30.0	1.86	2.72	3.11	3.37	3.60
	50.0	1.93	3.07	3.55	3.96	4.41
0.50	5.0	1.49	1.87	2.27	2.66	3.06
	10.0	1.74	2.43	3.14	3.86	4.63
	15.0	1.86	2.89	3.96	5.11	6.44
	30.0	1.98	4.03	6.45	9.78	14.65
	50.0	2.00	5.47	10.78	20.58	39.22
1.00	5.0	1.59	2.15	2.84	3.67	4.65
	10.0	1.86	2.99	4.55	6.61	9.34
	15.0	1.96	3.73	6.43	10.45	16.56
	30.0	2.00	6.06	14.68	33.59	75.74
	50.0	2.00	10.48	39.94	146.95	538.45
2.50	5.0	1.82	2.92	4.85	8.07	13.31
	10.0	1.98	4.42	10.33	23.64	52.86
	15.0	2.00	6.31	20.59	64.10	193.49
	30.0	2.00	17.85	147.68	1133.04	8463.96
	50.0	2.00	67.30	1854.61	48004.5	1226700
5.00	5.0	1.96	3.78	8.31	19.47	46.63
	10.0	2.00	6.84	30.44	141.82	653.58
	15.0	2.00	12.90	115.74	1032.06	8863.28
	30.0	2.00	94.52	5965.96	338719.	18302000
	50.0	2.00	1326.71	984541.	6.52005x10 ⁸	4.17691x10 ¹¹

$l_1=2 \cdot l_s + d_s^{**}$ $l_2=1.25 \cdot l_1$ $l_3=1.5 \cdot l_1$ $l_4=1.75 \cdot l_1$
 $l_5=2 \cdot l_1$

Table 3- 2 Increase ratio of minimum dose rate by separation of line sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

ls: source length

xo: horizontal distance between source and back surface of irradiated material

η : increase ratio of minimum dose by source separation

xo=10.0cm

μl	ls	η				
		li=l ₁	li=l ₂	li=l ₃	li=l ₄	li=l ₅
0.0	5.0	1.24	1.44	1.64	1.82	1.98
	10.0	1.42	1.70	1.95	2.15	2.31
	15.0	1.54	1.89	2.17	2.37	2.51
	30.0	1.71	2.24	2.53	2.69	2.78
	50.0	1.80	2.48	2.74	2.84	2.90
0.05	5.0	1.24	1.44	1.64	1.82	1.99
	10.0	1.42	1.70	1.95	2.16	2.32
	15.0	1.54	1.90	2.18	2.39	2.54
	30.0	1.71	2.26	2.57	2.75	2.86
	50.0	1.81	2.52	2.82	2.96	3.06
0.10	5.0	1.24	1.45	1.65	1.84	2.00
	10.0	1.42	1.71	1.97	2.18	2.36
	15.0	1.54	1.91	2.21	2.43	2.60
	30.0	1.73	2.30	2.65	2.87	3.03
	50.0	1.83	2.61	2.98	3.22	3.41
0.50	5.0	1.27	1.52	1.78	2.05	2.32
	10.0	1.49	1.87	2.27	2.66	3.06
	15.0	1.64	2.17	2.72	3.26	3.82
	30.0	1.86	2.89	3.96	5.11	6.44
	50.0	1.96	3.67	5.58	8.01	11.31
1.00	5.0	1.32	1.65	2.04	2.49	2.99
	10.0	1.59	2.15	2.84	3.67	4.65
	15.0	1.76	2.59	3.68	5.05	6.75
	30.0	1.96	3.73	6.43	10.45	16.56
	50.0	2.00	5.22	11.32	23.07	46.17
2.50	5.0	1.49	2.07	2.95	4.20	5.98
	10.0	1.82	2.92	4.85	8.07	13.31
	15.0	1.95	3.66	7.20	14.06	27.02
	30.0	2.00	6.31	20.59	64.10	193.49
	50.0	2.00	12.68	77.44	439.83	2424.44
5.00	5.0	1.68	2.61	4.31	7.36	12.83
	10.0	1.96	3.78	8.31	19.47	46.63
	15.0	2.00	5.06	15.74	52.17	174.20
	30.0	2.00	12.90	115.74	1032.09	8863.45
	50.0	2.00	48.44	1625.73	50039.8	1463120

l₁=2*ls +ds** l₂=1.25*l₁ l₃=1.5*l₁ l₄=1.75*l₁
 l₅=2*l₁

Table 3-3 Increase ratio of minimum dose rate by separation of line sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source length

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

η : increase ratio of minimum dose by source separation

$x_0=30.0\text{cm}$

μl	l_s	η				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	1.08	1.23	1.38	1.53	1.67
	10.0	1.16	1.34	1.51	1.68	1.83
	15.0	1.24	1.44	1.64	1.82	1.98
	30.0	1.42	1.70	1.95	2.15	2.31
	50.0	1.56	1.94	2.23	2.42	2.56
0.05	5.0	1.08	1.23	1.38	1.53	1.68
	10.0	1.16	1.34	1.52	1.69	1.84
	15.0	1.24	1.44	1.64	1.82	1.99
	30.0	1.42	1.70	1.95	2.16	2.32
	50.0	1.57	1.95	2.24	2.45	2.59
0.10	5.0	1.08	1.23	1.39	1.54	1.68
	10.0	1.16	1.34	1.52	1.69	1.85
	15.0	1.24	1.45	1.65	1.84	2.00
	30.0	1.42	1.71	1.97	2.18	2.36
	50.0	1.57	1.97	2.27	2.50	2.66
0.50	5.0	1.09	1.26	1.44	1.63	1.83
	10.0	1.18	1.39	1.61	1.84	2.07
	15.0	1.27	1.52	1.78	2.05	2.32
	30.0	1.49	1.87	2.27	2.66	3.06
	50.0	1.67	2.26	2.86	3.46	4.08
1.00	5.0	1.11	1.31	1.55	1.82	2.12
	10.0	1.22	1.48	1.79	2.14	2.53
	15.0	1.32	1.65	2.04	2.49	2.99
	30.0	1.59	2.15	2.84	3.67	4.65
	50.0	1.80	2.73	3.97	5.54	7.55
2.50	5.0	1.15	1.47	1.89	2.45	3.19
	10.0	1.32	1.77	2.39	3.25	4.42
	15.0	1.49	2.07	2.95	4.20	5.98
	30.0	1.82	2.92	4.85	8.07	13.31
	50.0	1.96	3.91	8.14	16.77	33.88
5.00	5.0	1.23	1.66	2.33	3.35	4.89
	10.0	1.47	2.15	3.27	5.11	8.12
	15.0	1.68	2.61	4.31	7.36	12.83
	30.0	1.96	3.78	8.31	19.47	46.63
	50.0	2.00	5.59	19.58	72.79	270.94

$$l_1=2 \cdot l_s + d_s^{**} \quad l_2=1.25 \cdot l_1 \quad l_3=1.5 \cdot l_1 \quad l_4=1.75 \cdot l_1$$

$$l_5=2 \cdot l_1$$

Table 3-4 Increase ratio of minimum dose rate by separation of line sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source length

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

η : increase ratio of minimum dose by source separation

$x_0=60.0\text{cm}$

μl	l_s	η				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	1.04	1.17	1.31	1.45	1.59
	10.0	1.08	1.23	1.38	1.53	1.67
	15.0	1.12	1.28	1.45	1.61	1.76
	30.0	1.24	1.44	1.64	1.82	1.98
	50.0	1.37	1.62	1.86	2.05	2.21
0.05	5.0	1.04	1.17	1.31	1.45	1.59
	10.0	1.08	1.23	1.38	1.53	1.68
	15.0	1.12	1.29	1.45	1.61	1.76
	30.0	1.24	1.44	1.64	1.82	1.99
	50.0	1.37	1.63	1.86	2.06	2.23
0.10	5.0	1.04	1.17	1.32	1.46	1.60
	10.0	1.08	1.23	1.39	1.54	1.68
	15.0	1.12	1.29	1.45	1.62	1.77
	30.0	1.24	1.45	1.65	1.84	2.00
	50.0	1.37	1.63	1.87	2.08	2.25
0.50	5.0	1.04	1.19	1.36	1.53	1.71
	10.0	1.09	1.26	1.44	1.63	1.83
	15.0	1.14	1.32	1.53	1.74	1.95
	30.0	1.27	1.52	1.78	2.05	2.32
	50.0	1.42	1.76	2.11	2.46	2.81
1.00	5.0	1.05	1.23	1.44	1.67	1.93
	10.0	1.11	1.31	1.55	1.82	2.12
	15.0	1.16	1.39	1.67	1.98	2.32
	30.0	1.32	1.65	2.04	2.49	2.99
	50.0	1.51	1.99	2.57	3.26	4.05
2.50	5.0	1.07	1.33	1.67	2.12	2.69
	10.0	1.15	1.47	1.89	2.45	3.19
	15.0	1.24	1.61	2.13	2.83	3.76
	30.0	1.49	2.07	2.95	4.20	5.98
	50.0	1.74	2.66	4.18	6.60	10.34
5.00	5.0	1.11	1.44	1.94	2.66	3.71
	10.0	1.23	1.66	2.33	3.35	4.89
	15.0	1.35	1.90	2.78	4.17	6.35
	30.0	1.68	2.61	4.31	7.36	12.83
	50.0	1.91	3.41	6.75	14.12	30.30

$$l_1=2 \cdot l_s + d_s^{**} \quad l_2=1.25 \cdot l_1 \quad l_3=1.5 \cdot l_1 \quad l_4=1.75 \cdot l_1$$

$$l_5=2 \cdot l_1$$

Table 3-5 Increase ratio of minimum dose rate by separation of line sources

μ l:thickness of irradiated material of mean free path unit

ls:source length

xo:horizontal distance between source and back surface of irradiated material

η :increase ratio of minimum dose by source separation

xo=100.0cm

μ l	ls	η				
		li=l ₁	li=l ₂	li=l ₃	li=l ₄	li=l ₅
0.0	5.0	1.02	1.15	1.28	1.42	1.55
	10.0	1.05	1.18	1.33	1.47	1.60
	15.0	1.07	1.22	1.37	1.52	1.66
	30.0	1.15	1.32	1.49	1.65	1.80
	50.0	1.24	1.44	1.64	1.82	1.98
0.05	5.0	1.02	1.15	1.29	1.42	1.56
	10.0	1.05	1.18	1.33	1.47	1.61
	15.0	1.07	1.22	1.37	1.52	1.66
	30.0	1.15	1.32	1.49	1.66	1.81
	50.0	1.24	1.44	1.64	1.82	1.99
0.10	5.0	1.02	1.15	1.29	1.43	1.56
	10.0	1.05	1.19	1.33	1.47	1.61
	15.0	1.07	1.22	1.37	1.52	1.67
	30.0	1.15	1.32	1.49	1.66	1.82
	50.0	1.24	1.45	1.65	1.84	2.00
0.50	5.0	1.03	1.17	1.32	1.49	1.66
	10.0	1.05	1.21	1.37	1.55	1.73
	15.0	1.08	1.24	1.42	1.61	1.80
	30.0	1.16	1.36	1.58	1.80	2.02
	50.0	1.27	1.52	1.78	2.05	2.32
1.00	5.0	1.03	1.20	1.39	1.62	1.86
	10.0	1.06	1.24	1.46	1.70	1.97
	15.0	1.09	1.29	1.53	1.79	2.08
	30.0	1.19	1.44	1.74	2.08	2.45
	50.0	1.32	1.65	2.04	2.49	2.99
2.50	5.0	1.04	1.28	1.59	1.99	2.51
	10.0	1.09	1.36	1.71	2.18	2.78
	15.0	1.14	1.44	1.84	2.38	3.08
	30.0	1.29	1.70	2.28	3.08	4.14
	50.0	1.49	2.07	2.95	4.20	5.98
5.00	5.0	1.06	1.36	1.79	2.42	3.31
	10.0	1.13	1.48	2.01	2.79	3.92
	15.0	1.20	1.62	2.25	3.20	4.63
	30.0	1.43	2.05	3.07	4.72	7.37
	50.0	1.68	2.61	4.31	7.36	12.83

$$l_1=2*ls + ds^{**} \quad l_2=1.25*l_1 \quad l_3=1.5*l_1 \quad l_4=1.75*l_1$$

$$l_5=2*l_1$$

Table 3-6 Increase ratio of minimum dose rate by separation of line sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit
 l_s : source length
 x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material
 η : increase ratio of minimum dose by source separation
 $x_0=150.0\text{cm}$

μl	l_s	η				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	1.02	1.14	1.27	1.40	1.54
	10.0	1.03	1.16	1.30	1.44	1.57
	15.0	1.05	1.18	1.33	1.47	1.60
	30.0	1.10	1.25	1.41	1.56	1.71
	50.0	1.16	1.34	1.51	1.68	1.83
0.05	5.0	1.02	1.14	1.27	1.41	1.54
	10.0	1.03	1.16	1.30	1.44	1.57
	15.0	1.05	1.18	1.33	1.47	1.61
	30.0	1.10	1.25	1.41	1.56	1.71
	50.0	1.16	1.34	1.52	1.69	1.84
0.10	5.0	1.02	1.14	1.27	1.41	1.54
	10.0	1.03	1.16	1.30	1.44	1.58
	15.0	1.05	1.19	1.33	1.47	1.61
	30.0	1.10	1.25	1.41	1.57	1.72
	50.0	1.16	1.34	1.52	1.69	1.85
0.50	5.0	1.02	1.16	1.31	1.47	1.64
	10.0	1.04	1.18	1.34	1.51	1.68
	15.0	1.05	1.21	1.37	1.55	1.73
	30.0	1.11	1.28	1.47	1.67	1.88
	50.0	1.18	1.39	1.61	1.84	2.07
1.00	5.0	1.02	1.18	1.37	1.59	1.83
	10.0	1.04	1.21	1.41	1.64	1.90
	15.0	1.06	1.24	1.46	1.70	1.97
	30.0	1.13	1.34	1.60	1.88	2.20
	50.0	1.22	1.48	1.79	2.14	2.53
2.50	5.0	1.03	1.25	1.55	1.93	2.42
	10.0	1.06	1.30	1.63	2.05	2.60
	15.0	1.09	1.36	1.71	2.18	2.78
	30.0	1.19	1.52	1.98	2.60	3.41
	50.0	1.32	1.77	2.39	3.25	4.42
5.00	5.0	1.04	1.32	1.73	2.31	3.13
	10.0	1.08	1.40	1.86	2.54	3.51
	15.0	1.13	1.48	2.01	2.79	3.92
	30.0	1.28	1.76	2.51	3.66	5.43
	50.0	1.47	2.15	3.27	5.11	8.12

$l_1=2 \cdot l_s + d_s^{**}$ $l_2=1.25 \cdot l_1$ $l_3=1.5 \cdot l_1$ $l_4=1.75 \cdot l_1$
 $l_5=2 \cdot l_1$

Table 3-7 Increase ratio of minimum dose rate by separation of line sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source length

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

η : increase ratio of minimum dose by source separation

$x_0=200.0\text{cm}$

μl	l_s	η				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	1.01	1.13	1.26	1.40	1.53
	10.0	1.02	1.15	1.28	1.42	1.55
	15.0	1.04	1.17	1.31	1.44	1.58
	30.0	1.07	1.22	1.37	1.52	1.66
	50.0	1.12	1.28	1.45	1.61	1.76
0.05	5.0	1.01	1.13	1.27	1.40	1.53
	10.0	1.02	1.15	1.29	1.42	1.56
	15.0	1.04	1.17	1.31	1.45	1.58
	30.0	1.07	1.22	1.37	1.52	1.66
	50.0	1.12	1.29	1.45	1.61	1.76
0.10	5.0	1.01	1.14	1.27	1.40	1.53
	10.0	1.02	1.15	1.29	1.43	1.56
	15.0	1.04	1.17	1.31	1.45	1.59
	30.0	1.07	1.22	1.37	1.52	1.67
	50.0	1.12	1.29	1.45	1.62	1.77
0.50	5.0	1.01	1.15	1.30	1.46	1.63
	10.0	1.03	1.17	1.32	1.49	1.66
	15.0	1.04	1.19	1.35	1.52	1.70
	30.0	1.08	1.24	1.42	1.61	1.80
	50.0	1.14	1.32	1.53	1.74	1.95
1.00	5.0	1.02	1.17	1.36	1.57	1.81
	10.0	1.03	1.20	1.39	1.62	1.86
	15.0	1.05	1.22	1.43	1.66	1.91
	30.0	1.09	1.29	1.53	1.79	2.08
	50.0	1.16	1.39	1.67	1.98	2.32
2.50	5.0	1.02	1.24	1.53	1.90	2.38
	10.0	1.04	1.23	1.59	1.99	2.51
	15.0	1.07	1.32	1.65	2.08	2.64
	30.0	1.14	1.44	1.84	2.38	3.08
	50.0	1.24	1.61	2.13	2.83	3.76
5.00	5.0	1.03	1.30	1.69	2.25	3.04
	10.0	1.06	1.36	1.79	2.42	3.31
	15.0	1.10	1.42	1.90	2.60	3.61
	30.0	1.20	1.62	2.25	3.20	4.63
	50.0	1.35	1.90	2.78	4.17	6.35

$$l_1=2 \cdot l_s + d_s^{**} \quad l_2=1.25 \cdot l_1 \quad l_3=1.5 \cdot l_1 \quad l_4=1.75 \cdot l_1$$

$$l_5=2 \cdot l_1$$

Table 4-1 Increase ratio of minimum dose rate by separation of semi-infinite slab sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source height

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

η : increase ratio of minimum dose by source separation

$x_0=5.0\text{cm}$

μl	l_s	η				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	1.24	1.36	1.46	1.54	1.61
	10.0	1.37	1.53	1.65	1.73	1.81
	15.0	1.45	1.65	1.77	1.87	1.95
	30.0	1.60	1.87	2.03	2.16	2.26
	50.0	1.71	2.06	2.26	2.40	2.51
0.05	5.0	1.24	1.37	1.47	1.56	1.63
	10.0	1.38	1.54	1.67	1.77	1.85
	15.0	1.46	1.67	1.81	1.92	2.02
	30.0	1.62	1.93	2.13	2.30	2.46
	50.0	1.75	2.17	2.46	2.71	2.95
0.10	5.0	1.25	1.38	1.49	1.59	1.67
	10.0	1.39	1.58	1.72	1.83	1.93
	15.0	1.49	1.72	1.89	2.03	2.17
	30.0	1.67	2.04	2.32	2.59	2.87
	50.0	1.81	2.38	2.85	3.34	3.89
0.50	5.0	1.35	1.60	1.86	2.13	2.41
	10.0	1.59	2.04	2.52	3.05	3.65
	15.0	1.75	2.43	3.19	4.09	5.20
	30.0	1.95	3.38	5.30	8.14	12.47
	50.0	1.99	4.52	8.96	17.57	34.54
1.00	5.0	1.50	1.94	2.49	3.16	3.98
	10.0	1.79	2.69	3.93	5.61	7.93
	15.0	1.92	3.33	5.50	8.86	14.09
	30.0	2.00	5.21	12.28	28.18	64.19
	50.0	2.00	8.73	32.94	122.22	453.59
2.50	5.0	1.78	2.79	4.51	7.36	12.00
	10.0	1.98	4.15	9.25	20.62	45.50
	15.0	2.00	5.77	17.83	54.20	162.25
	30.0	2.00	15.36	121.25	921.15	6894.09
	50.0	2.00	55.46	1485.17	38441.2	989862
5.00	5.0	1.95	3.67	7.86	17.94	42.12
	10.0	2.00	6.47	27.22	122.21	551.13
	15.0	2.00	11.83	99.28	855.48	7234.39
	30.0	2.00	80.77	4798.17	267859	1443200
	50.0	2.00	1076.70	768976	5.06636x10 ⁸	3.255x10 ¹¹

$l_1=2 \cdot l_s + d_s^{**}$ $l_2=1.25 \cdot l_1$ $l_3=1.5 \cdot l_1$ $l_4=1.75 \cdot l_1$
 $l_5=2 \cdot l_1$

Table 4-2 Increase ratio of minimum dose rate by separation of semi-infinite slab sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source height

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

η : increase ratio of minimum dose by source separation

$x_0=10.0\text{cm}$

μl	l_s	η				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	1.13	1.24	1.33	1.40	1.47
	10.0	1.24	1.36	1.46	1.54	1.61
	15.0	1.31	1.46	1.56	1.65	1.72
	30.0	1.45	1.65	1.77	1.87	1.95
	50.0	1.56	1.81	1.96	2.08	2.18
0.05	5.0	1.13	1.24	1.33	1.41	1.48
	10.0	1.24	1.37	1.47	1.56	1.63
	15.0	1.32	1.47	1.58	1.67	1.75
	30.0	1.46	1.67	1.81	1.92	2.02
	50.0	1.58	1.85	2.03	2.18	2.32
0.10	5.0	1.14	1.25	1.34	1.43	1.50
	10.0	1.25	1.38	1.49	1.59	1.67
	15.0	1.33	1.49	1.62	1.72	1.81
	30.0	1.49	1.72	1.89	2.03	2.17
	50.0	1.62	1.95	2.18	2.41	2.63
0.50	5.0	1.19	1.36	1.54	1.71	1.90
	10.0	1.35	1.60	1.86	2.13	2.41
	15.0	1.49	1.83	2.19	2.58	2.99
	30.0	1.75	2.43	3.19	4.09	5.20
	50.0	1.91	3.08	4.56	6.60	9.50
1.00	5.0	1.26	1.53	1.85	2.21	2.63
	10.0	1.50	1.94	2.49	3.16	3.98
	15.0	1.67	2.33	3.19	4.30	5.73
	30.0	1.92	3.33	5.50	8.86	14.09
	50.0	1.99	4.54	9.53	19.42	39.21
2.50	5.0	1.44	1.99	2.79	3.94	5.57
	10.0	1.78	2.79	4.51	7.36	12.00
	15.0	1.93	3.47	6.58	12.53	23.74
	30.0	2.00	5.77	17.83	54.20	162.25
	50.0	2.00	11.09	64.35	360.48	1985.84
5.00	5.0	1.66	2.55	4.16	7.03	12.14
	10.0	1.95	3.67	7.86	17.94	42.11
	15.0	1.99	4.86	14.46	46.29	151.03
	30.0	2.00	11.83	99.28	855.47	7234.34
	50.0	2.00	42.22	1326.50	399437.	1161100

$$l_1=2 \cdot l_s + d_s^{**} \quad l_2=1.25 \cdot l_1 \quad l_3=1.5 \cdot l_1 \quad l_4=1.75 \cdot l_1$$

$$l_5=2 \cdot l_1$$

Table 4-3 Increase ratio of minimum dose rate by separation of semi-infinite slab sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source height

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

η : increase ratio of minimum dose by source separation

$x_0=30.0\text{cm}$

μl	l_s	η				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	1.05	1.13	1.21	1.29	1.35
	10.0	1.09	1.19	1.27	1.35	1.41
	15.0	1.13	1.24	1.33	1.40	1.47
	30.0	1.24	1.36	1.46	1.54	1.61
	50.0	1.33	1.48	1.59	1.68	1.75
0.05	5.0	1.05	1.13	1.22	1.29	1.36
	10.0	1.09	1.19	1.28	1.35	1.42
	15.0	1.13	1.24	1.33	1.41	1.48
	30.0	1.24	1.37	1.47	1.56	1.63
	50.0	1.34	1.49	1.61	1.70	1.78
0.10	5.0	1.05	1.14	1.22	1.30	1.37
	10.0	1.09	1.19	1.29	1.37	1.44
	15.0	1.14	1.25	1.34	1.43	1.50
	30.0	1.25	1.38	1.49	1.59	1.67
	50.0	1.35	1.52	1.65	1.76	1.85
0.50	5.0	1.06	1.19	1.32	1.45	1.59
	10.0	1.13	1.27	1.43	1.58	1.74
	15.0	1.19	1.36	1.54	1.71	1.90
	30.0	1.35	1.60	1.86	2.13	2.41
	50.0	1.53	1.90	2.30	2.73	3.20
1.00	5.0	1.08	1.26	1.46	1.70	1.95
	10.0	1.17	1.39	1.65	1.94	2.27
	15.0	1.26	1.53	1.85	2.21	2.63
	30.0	1.50	1.94	2.49	3.16	3.98
	50.0	1.72	2.45	3.43	4.72	6.41
2.50	5.0	1.14	1.44	1.84	2.38	3.08
	10.0	1.29	1.71	2.29	3.09	4.18
	15.0	1.44	1.99	2.79	3.94	5.57
	30.0	1.78	2.79	4.51	7.36	12.00
	50.0	1.95	3.70	7.39	14.82	29.55
5.00	5.0	1.21	1.64	2.29	3.28	4.77
	10.0	1.45	2.10	3.17	4.93	7.79
	15.0	1.66	2.55	4.16	7.03	12.14
	30.0	1.95	3.67	7.86	17.94	42.12
	50.0	2.00	5.34	17.82	63.91	232.43

$l_1=2 \cdot l_s + d_s^{**}$

$l_2=1.25 \cdot l_1$

$l_3=1.5 \cdot l_1$

$l_4=1.75 \cdot l_1$

$l_5=2 \cdot l_1$

Table 4-4 Increase ratio of minimum dose rate by separation of semi-infinite slab sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source height

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

η : increase ratio of minimum dose by source separation

$x_0=60.0\text{cm}$

μl	l_s	η				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	1.02	1.10	1.18	1.25	1.32
	10.0	1.05	1.13	1.21	1.29	1.35
	15.0	1.07	1.16	1.24	1.32	1.38
	30.0	1.13	1.24	1.33	1.40	1.47
	50.0	1.20	1.32	1.42	1.50	1.57
0.05	5.0	1.02	1.11	1.18	1.26	1.32
	10.0	1.05	1.13	1.22	1.29	1.36
	15.0	1.07	1.16	1.25	1.32	1.39
	30.0	1.13	1.24	1.33	1.41	1.48
	50.0	1.21	1.33	1.43	1.51	1.59
0.10	5.0	1.02	1.11	1.19	1.26	1.33
	10.0	1.05	1.14	1.22	1.30	1.37
	15.0	1.07	1.17	1.25	1.33	1.41
	30.0	1.14	1.25	1.34	1.43	1.50
	50.0	1.21	1.34	1.45	1.54	1.62
0.50	5.0	1.03	1.15	1.27	1.39	1.51
	10.0	1.06	1.19	1.32	1.45	1.59
	15.0	1.09	1.23	1.37	1.52	1.66
	30.0	1.19	1.36	1.54	1.71	1.90
	50.0	1.30	1.52	1.75	1.99	2.23
1.00	5.0	1.04	1.20	1.38	1.58	1.81
	10.0	1.08	1.26	1.46	1.70	1.95
	15.0	1.13	1.33	1.56	1.82	2.11
	30.0	1.26	1.53	1.85	2.21	2.63
	50.0	1.42	1.80	2.27	2.83	3.48
2.50	5.0	1.07	1.31	1.64	2.08	2.63
	10.0	1.14	1.44	1.84	2.38	3.08
	15.0	1.22	1.57	2.06	2.72	3.59
	30.0	1.44	1.99	2.79	3.94	5.57
	50.0	1.69	2.54	3.91	6.07	9.42
5.00	5.0	1.10	1.43	1.92	2.63	3.66
	10.0	1.21	1.64	2.29	3.28	4.77
	15.0	1.33	1.87	2.72	4.05	6.14
	30.0	1.66	2.55	4.16	7.03	12.14
	50.0	1.90	3.32	6.44	13.19	27.81

$$l_1=2 \cdot l_s + d_s^{**} \quad l_2=1.25 \cdot l_1 \quad l_3=1.5 \cdot l_1 \quad l_4=1.75 \cdot l_1$$

$$l_5=2 \cdot l_1$$

Table 4-5 Increase ratio of minimum dose rate by separation of semi-infinite slab sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source height

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

η : increase ratio of minimum dose by source separation

$x_0=100.0\text{cm}$

μl	l_s	η				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	1.01	1.09	1.17	1.24	1.30
	10.0	1.03	1.11	1.19	1.26	1.32
	15.0	1.04	1.13	1.21	1.28	1.34
	30.0	1.08	1.18	1.26	1.34	1.40
	50.0	1.13	1.24	1.33	1.40	1.47
0.05	5.0	1.01	1.09	1.17	1.24	1.31
	10.0	1.03	1.11	1.19	1.26	1.33
	15.0	1.04	1.13	1.21	1.28	1.35
	30.0	1.08	1.18	1.26	1.34	1.41
	50.0	1.13	1.24	1.33	1.41	1.48
0.10	5.0	1.01	1.10	1.18	1.25	1.32
	10.0	1.03	1.11	1.20	1.27	1.34
	15.0	1.04	1.13	1.22	1.29	1.36
	30.0	1.08	1.18	1.27	1.35	1.43
	50.0	1.14	1.25	1.34	1.43	1.50
0.50	5.0	1.02	1.13	1.25	1.36	1.49
	10.0	1.04	1.15	1.28	1.40	1.53
	15.0	1.06	1.18	1.31	1.44	1.57
	30.0	1.11	1.26	1.40	1.56	1.71
	50.0	1.19	1.36	1.54	1.71	1.90
1.00	5.0	1.02	1.17	1.35	1.54	1.75
	10.0	1.05	1.21	1.40	1.60	1.84
	15.0	1.07	1.25	1.45	1.67	1.92
	30.0	1.15	1.37	1.61	1.89	2.20
	50.0	1.26	1.53	1.85	2.21	2.63
2.50	5.0	1.04	1.27	1.57	1.96	2.47
	10.0	1.08	1.34	1.68	2.13	2.71
	15.0	1.12	1.41	1.80	2.31	2.98
	30.0	1.26	1.65	2.19	2.94	3.94
	50.0	1.44	1.99	2.79	3.94	5.57
5.00	5.0	1.06	1.35	1.78	2.40	3.29
	10.0	1.12	1.47	1.99	2.75	3.86
	15.0	1.19	1.60	2.21	3.14	4.53
	30.0	1.41	2.01	2.99	4.56	7.10
	50.0	1.66	2.55	4.16	7.03	12.15

$l_1=2 \cdot l_s + d_s^{**}$

$l_2=1.25 \cdot l_1$

$l_3=1.5 \cdot l_1$

$l_4=1.75 \cdot l_1$

$l_5=2 \cdot l_1$

Table 4-6 Increase ratio of minimum dose rate by separation of semi-infinite slab sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source height

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

η : increase ratio of minimum dose by source separation

$x_0=150.0\text{cm}$

μl	l_s	η				
		$l_1=l_1$	$l_2=l_2$	$l_3=l_3$	$l_4=l_4$	$l_5=l_5$
0.0	5.0	1.01	1.09	1.16	1.23	1.30
	10.0	1.02	1.10	1.18	1.25	1.31
	15.0	1.03	1.11	1.19	1.26	1.32
	30.0	1.05	1.14	1.23	1.30	1.36
	50.0	1.09	1.19	1.27	1.35	1.41
0.05	5.0	1.01	1.09	1.16	1.24	1.30
	10.0	1.02	1.10	1.18	1.25	1.31
	15.0	1.03	1.11	1.19	1.26	1.33
	30.0	1.06	1.14	1.23	1.30	1.37
	50.0	1.09	1.19	1.28	1.35	1.42
0.10	5.0	1.01	1.09	1.17	1.24	1.31
	10.0	1.02	1.10	1.18	1.26	1.33
	15.0	1.03	1.11	1.20	1.27	1.34
	30.0	1.06	1.15	1.24	1.31	1.38
	50.0	1.09	1.19	1.29	1.37	1.44
0.50	5.0	1.01	1.12	1.24	1.35	1.47
	10.0	1.02	1.14	1.26	1.38	1.50
	15.0	1.04	1.15	1.28	1.40	1.53
	30.0	1.07	1.20	1.34	1.48	1.62
	50.0	1.13	1.27	1.43	1.58	1.74
1.00	5.0	1.02	1.16	1.33	1.52	1.73
	10.0	1.03	1.19	1.36	1.56	1.78
	15.0	1.05	1.21	1.40	1.60	1.84
	30.0	1.10	1.29	1.50	1.74	2.01
	50.0	1.17	1.39	1.65	1.94	2.27
2.50	5.0	1.03	1.25	1.54	1.91	2.39
	10.0	1.05	1.29	1.61	2.02	2.55
	15.0	1.08	1.34	1.68	2.13	2.71
	30.0	1.17	1.49	1.93	2.51	3.28
	50.0	1.29	1.71	2.29	3.09	4.18
5.00	5.0	1.04	1.32	1.72	2.30	3.11
	10.0	1.08	1.39	1.85	2.51	3.47
	15.0	1.12	1.47	1.99	2.75	3.86
	30.0	1.26	1.73	2.46	3.58	5.28
	50.0	1.45	2.10	3.17	4.93	7.80

$l_1=2 \cdot l_s + d_s^{**}$

$l_2=1.25 \cdot l_1$

$l_3=1.5 \cdot l_1$

$l_4=1.75 \cdot l_1$

$l_5=2 \cdot l_1$

Table 4-7 Increase ratio of minimum dose rate by separation of semi-infinite slab sources

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

l_s : source height

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material

η : increase ratio of minimum dose by source separation

$x_0=200.0\text{cm}$

μl	l_s	η				
		$l_i=l_1$	$l_i=l_2$	$l_i=l_3$	$l_i=l_4$	$l_i=l_5$
0.0	5.0	1.01	1.08	1.16	1.23	1.29
	10.0	1.01	1.09	1.17	1.24	1.30
	15.0	1.02	1.10	1.18	1.25	1.31
	30.0	1.04	1.13	1.21	1.28	1.34
	50.0	1.07	1.16	1.24	1.32	1.38
0.05	5.0	1.01	1.09	1.16	1.23	1.30
	10.0	1.01	1.09	1.17	1.24	1.31
	15.0	1.02	1.10	1.18	1.25	1.32
	30.0	1.04	1.13	1.21	1.28	1.35
	50.0	1.07	1.16	1.25	1.32	1.39
0.10	5.0	1.01	1.09	1.17	1.24	1.31
	10.0	1.01	1.10	1.18	1.25	1.32
	15.0	1.02	1.11	1.19	1.26	1.33
	30.0	1.04	1.13	1.22	1.29	1.36
	50.0	1.07	1.17	1.25	1.33	1.41
0.50	5.0	1.01	1.12	1.23	1.35	1.46
	10.0	1.02	1.13	1.25	1.36	1.49
	15.0	1.03	1.14	1.26	1.38	1.51
	30.0	1.06	1.18	1.31	1.44	1.57
	50.0	1.09	1.23	1.37	1.52	1.66
1.00	5.0	1.01	1.16	1.32	1.51	1.71
	10.0	1.02	1.17	1.35	1.54	1.75
	15.0	1.04	1.19	1.37	1.57	1.79
	30.0	1.07	1.25	1.45	1.67	1.92
	50.0	1.13	1.33	1.56	1.82	2.11
2.50	5.0	1.02	1.23	1.52	1.89	2.35
	10.0	1.04	1.27	1.57	1.96	2.47
	15.0	1.06	1.30	1.63	2.05	2.59
	30.0	1.12	1.41	1.80	2.31	2.98
	50.0	1.22	1.57	2.06	2.72	3.59
5.00	5.0	1.03	1.30	1.69	2.24	3.03
	10.0	1.06	1.35	1.78	2.40	3.29
	15.0	1.09	1.41	1.88	2.57	3.56
	30.0	1.19	1.60	2.21	3.14	4.53
	50.0	1.33	1.87	2.72	4.05	6.14

$$l_1=2 \cdot l_s + d_s^{**} \quad l_2=1.25 \cdot l_1 \quad l_3=1.5 \cdot l_1 \quad l_4=1.75 \cdot l_1$$

$$l_5=2 \cdot l_1$$

Table 5 Relative deviation (ξ_0) of dose uniformity in irradiated material

μl : thickness of irradiated material of mean free path unit

x_0 : horizontal distance between source and back surface of irradiated material (cm)

l_s : source length or height $5 \leq l_s(\text{cm}) \leq 50$

l_i : irradiated material height $l_i \leq l_i(\text{cm}) \leq 2 \cdot l_1$

l_1 : minimum height of irradiated material

g_a : horizontal distance between source and irradiated material

$0.2 \cdot x_0 \leq g_a(\text{cm}) \leq 0.8 \cdot x_0$

(line source)

μl	x_0							
	5	10	30	60	100	150	200	5-200
0.05	2.73%	1.91%	1.39%	1.50%	1.53%	1.52%	1.53%	2.73%
0.1	3.87	1.95	1.40	1.51	1.54	1.53	1.54	3.87
0.5	3.87	1.49	1.51	1.63	1.68	1.68	1.67	3.87
1.0	1.01	1.40	1.67	1.78	1.85	1.87	1.88	1.88
2.5	1.19	1.60	2.04	2.13	2.22	2.31	2.33	2.33
5.0	2.78	1.60	2.15	2.34	2.39	2.41	2.43	2.76
0.05- 5.0	3.87	1.95	2.15	2.34	2.39	2.41	2.43	3.87

(semi-infinite slab source)

μl	x_0							
	5	10	30	60	100	150	200	5-200
0.05	1.49%	1.31%	1.14%	1.13%	1.15%	1.14%	1.13%	1.49%
0.1	1.62	1.36	1.17	1.16	1.17	1.17	1.16	1.62
0.5	1.36	1.36	1.44	1.45	1.45	1.44	1.45	1.45
1.0	1.23	1.20	1.63	1.63	1.62	1.64	1.62	1.64
2.5	0.89	1.33	1.72	1.83	1.82	1.87	1.89	1.89
5.0	1.22	1.22	1.74	1.90	1.94	1.97	1.99	1.99
0.05- 5.0	1.62	1.36	1.74	1.90	1.94	1.97	1.99	1.99