616. γ 線照射装置における エネルギー利用効率の近似計算法

星 龍 夫*

(1974年 9月11日 受理)

(1975年 4月9日 再受理)

*An Approximate Calculation Method of Energy Utilization
Efficiency in Gamma-Irradiator*

By Tatsuo HOSHI

In order to facilitate the calculation of energy utilization efficiency in gamma-irradiators a method for approximate calculation was established considering that: (1) The energy utilization efficiency is defined by the product of geometrical and absorption efficiencies; (2) The geometrical efficiency depends on the shape of both the γ -ray source and the surface of the irradiated material and their relative positions; (3) The absorption efficiency mainly depends on the maximum and the minimum penetration lengths of γ -rays in the irradiated material when the irradiator is designed so that energy of γ -rays is effectively absorbed in the irradiated material. In this approximation the geometrical efficiency is easily determined by combining the geometrical efficiencies for a case where the shapes of both γ -ray source and surface of the irradiated material are simulated by simplified approximations, and the absorption efficiency is easily determined by an approximate formula which does not depend on the shape of either γ -ray source or surface of the irradiated material. In a cylindrical material with line source at the center, the energy utilization efficiency obtained by this method agrees with the exact value to within $\pm 4\%$.

KEYWORDS: gamma radiation, irradiators, design, energy utilization efficiency, approximate calculation method, gamma ray source, accuracy

I. はじめに

γ 線照射装置の設計に当って、 γ 線のエネルギー利用効率⁽¹⁾⁽²⁾(線源から放出された γ 線の全エネルギーが被照射体内に吸収される割合)を大きくするように線源および被照射体の形状と配置を考慮しなければならない。しかし、この効率は線源および被照射体の形状と配置、被照射体の密度と組成ならびに γ 線光子のエネルギーなど多くの因子と複雑に関係しているため、一般にその値を求めることは容易ではなく、また、これを容易にするための試みもこれまで全くなされてい

なかった。著者は、エネルギー利用効率を容易に求めることを目的として、次の3点に着目して、その近似計算法を導き出した。

- (1) エネルギー利用効率を幾何学的効率と吸収効率とに分離する。

エネルギー利用効率は、線源から放出される γ 線の全エネルギーが被照射体内に入射する割合(以下これを幾何学的効率とする)と、入射した γ 線のエネルギー

* 日本原子力研究所高崎研究所 (Takasaki Radiat. Chem. Res. Establ., Japan At. Energy Res. Inst.)

が被照射体内で吸収される割合(以下これを吸収効率とする)との積によって表わされる。したがって、エネルギー利用効率を容易に求めるためには、幾何学的効率と吸収効率を容易に求める方法を見出せばよい。

(2) 幾何学的効率の計算を容易にする。

幾何学的効率は線源および γ 線が入射する被照射体の表面(以下これを入射面という)の幾何学的形状と配置だけに依存する。線源および入射面は種々の基本的形状をもつおのおのの要素によって構成されている。したがって、種々の基本的形状をもつ線源要素と、入射面要素で構成される系における幾何学的効率とをあらかじめ求めておけば、これらを用いて線源および入射面の形状が複雑な場合の幾何学的効率を容易に求めることができる。

(3) 吸収効率の計算を容易にする。

被照射体に入射した γ 線エネルギーが被照射体内で十分に吸収されるように設計された照射装置では、吸収効率は線源および被照射体の形状と配置にあまり依存せず、主として被照射体内における γ 線透過距離の最大、最小値に依存する。したがって、吸収効率は γ 線透過距離の最大、最小値だけに関係する近似式から容易に求めることができる。

II. 幾何学的効率

種々の基本的形状の線源および入射面についての幾何学的効率を用いて、これらによって合成されるすべての形状の線源および入射面についての幾何学的効率を求める方法を検討する。ここで、線源は自己吸収がない点状等方線源の集合体であると仮定する。通常の照射装置に用いる線源では、この仮定によって生ずる幾何学的効率の誤差は少ない。誤差が大きい場合には自己吸収によるエネルギー損失を考慮に入れて補正すればよい。

1. 一般式

線源と被照射体と位置との関係をFig. 1に示す。ここで、Sは線源、Mは被照射体、 S_m は線源要素 $s(x, y, z)$ から放出された γ 線が入射する被照射体の入射面、Qは s を光源とした場合のX-Z平面上における S_m の投影である。 s は微小体積 dV をもち単位体積、単位立体角当りに ϕ のエネルギー束を放出するものとする。 s から S_m への幾何学的効率はMの吸収を受けずに s から直接Qに入射する γ 線の幾何学的効率と等しい。微小面積 dA をもつ投影Qの要素 q から s までの距離を r とすれば、 q が s に対して張る立体角は ydA/r^3 であり、 s から単位立体角当りに放出される

S: γ -ray source, M: Irradiated material, s: Element of S, Q: Projection of M on the X-Z plane formed by light from s, q: Element of Q, S_m : Incident surface of γ -rays emitted from s upon irradiated material, dV : Differential volume of s, dA : Differential area of q, l : Penetration length of γ -rays emitted from s toward q in M, r : Distance between s and q

Fig. 1 Configuration of source and irradiated material

γ 線の全エネルギーは ϕdV である。このため q に入射するエネルギー de_i は

$$de_i = \frac{\phi y dA dV}{r^3} \quad (1)$$

である。したがって、 s からQへ入射するエネルギー e_i は、(1)式で与えられる de_i を q の全領域Qにわたって面積積分した

$$e_i = \phi dV \oint_Q \frac{y dA}{r^3} \quad (2)$$

で与えられる。この式は s の位置 x, y, z に関係なく成り立つので、線源SからQへの入射エネルギー E_i は(2)式で与えられる e_i を s の全領域Sにわたって体積分した

$$E_i = \oint_S \phi \oint_Q \frac{y}{r^3} dA dV \quad (3)$$

で与えられる。 s から全立体角 4π にわたって放出される全エネルギー e_s は $4\pi\phi dV$ となるので、Sから放出される全エネルギー E_s は s の全領域Sにわたって e_s を体積分した

$$E_s = 4\pi \oint_S \phi dV \quad (4)$$

で与えられる。(3),(4)式から幾何学的効率 $\zeta(=E_i/E_s)$ は次式となる。

$$\zeta = \frac{\oint_S \phi \oint_Q \frac{y}{r^3} dA dV}{4\pi \oint_S \phi dV} \quad (5)$$

2. 線源および γ 線の入射面の形状と配置とを 同じ割合で変化させた場合の幾何学的効率

Fig. 1 に示した線源および γ 線の入射面の形状と配置と任意定数(c)倍に大きくした場合の幾何学的効率 ζ' は(5)式の変数 y, r を cy, cr に積分変数 A, V を c^2A, c^3V に置換した

$$\zeta' = \frac{\oint_s \phi \oint_Q \frac{cy}{(cr)^3} d(c^2A) d(c^3V)}{4\pi \oint \phi d(c^3V)} \quad (6)$$

で表わされる。この式において、 c は分母と分子で相殺されるので(6)式は(5)式と等しくなる。すなわち、線源および γ 線の入射面の形状と配置とを同じ割合で変化しても幾何学的効率は変わらない。

3. 基本的形状の線源と入射面で形成される 系の幾何学的効率を用いて形状が複雑な 場合の幾何学的効率を求める方法

線源および入射面の形状と配置が複雑なため幾何学的効率を求めることが容易でない場合には、線源と入射面をそれぞれ K, J 個の基本的形状の線源および入射面要素に分割する。線源要素 k から入射面要素 j に入射するエネルギーを I_{kj} 、線源要素 k から放出される全エネルギーを E_k とすれば、幾何学的効率 ζ は定義に基いて

$$\zeta = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J I_{kj}}{\sum_{k=1}^K E_k} \quad (7)$$

と表わされる。線源要素 k と入射面要素 j で構成される系の幾何学的効率を ζ_{kj} とすれば、 I_{kj} は $\zeta_{kj}E_k$ と表わされるから、(7)式は

$$\zeta = \frac{\sum_{k=1}^K (E_k \sum_{j=1}^J \zeta_{kj})}{\sum_{k=1}^K E_k} \quad (8)$$

となる。したがって、種々の基本的形状をもつ線源および入射面要素で構成される系の幾何学的効率 ζ_{kj} が明らかであれば、これらの要素によって合成されるすべての系における幾何学的効率 ζ は、(8)式から容易に求めることができる。

Ⅲ. 吸収効率

1. 一般式

γ 線エネルギーが被照射体中を距離 l だけ透過するまでに吸収される割合 $F(l)$ は

$$F(l) = 1 - \frac{\int_{E_1}^{E_2} \phi_n B e^{-\mu l} dE}{\int_{E_1}^{E_2} \phi_n dE} \quad (9)$$

ここで、 ϕ_n : エネルギー E をもつ γ 線光子の粒子束

E_1, E_2 : γ 線光子のエネルギー範囲の
下限と上限値

B : Energy build up factor

μ : Linear attenuation coefficient

と表わされる。なお、エネルギー束 ϕ は

$$\phi = \int_{E_1}^{E_2} \phi_n dE \quad (10)$$

と表わされる。

Fig. 1 に示す s から q に向けて放出される γ 線のエネルギー束 de_i は(1)式によって与えられるので、これが M の中を距離 l だけ透過するまでに吸収されるエネルギー de_a は、(9), (10)式に従って

$$de_a = \frac{F(l) \phi y dA dV}{r^3} \quad (11)$$

と表わされる。 s から放出されたエネルギーのうち M によって吸収されるエネルギー e_a は、(11)式で与えられる de_a を q の全領域 Q にわたって面積積分した

$$e_a = dV \oint_Q \frac{F(l) \phi y dA}{r^3} \quad (12)$$

で表わされる。(12)式は s の位置 (x, y, z) に関係なく成り立つので、 S から放出されたエネルギーのうち M によって吸収されるエネルギー E_a は、(12)式で与えられる e_a を s の全領域 S にわたって体積分した

$$E_a = \oint_S \oint_Q \frac{\phi F(l) y}{r^3} dA dV \quad (13)$$

で表わされる。また、 S から M に入射するエネルギー E_i は(3)式で与えられるので、吸収効率 ξ ($\equiv E_a/E_i$)は(3), (13)式に基いて、次式となる。

$$\xi = \frac{\oint_S \oint_Q \frac{\phi F(l) y}{r^3} dA dV}{\oint_S \oint_Q \frac{\phi y}{r^3} dA dV} \quad (14)$$

2. 近似式

(14)式中の $F(l)$ は1を越えない正の値をもち、 l に関する単調増加関数であるから、積分領域 S, Q 内で l がとりうる最大値を $l_{\max}$ 、最小値を $l_{\min}$ とすれば、

$$F(l_{\max}) \geq F(l) \geq F(l_{\min}) \quad (15)$$

の関係が成り立つ。したがって、(14)式の右辺の分子 f は

$$\begin{aligned} F(l_{\max}) \oint_S \oint_Q \frac{\phi y}{r^3} dA dV \\ \geq f \geq F(l_{\min}) \oint_S \oint_Q \frac{\phi y}{r^3} dA dV \end{aligned} \quad (16)$$

の関係を満足する。(16)式を(14)式の右辺の分母で除せば、

$$F(l_{\max}) \geq \xi \geq F(l_{\min}) \quad (17)$$

になる。ここで、

$$\bar{\xi} = \frac{1}{2} \{F(l_{\max}) + F(l_{\min})\} \quad (18)$$

$$\varepsilon = \frac{F(l_{\max}) - F(l_{\min})}{F(l_{\max}) + F(l_{\min})} \quad (19)$$

とおけば、(17)式は

$$\bar{\xi}(1+\varepsilon) \geq \xi \geq \bar{\xi}(1-\varepsilon) \quad (20)$$

となる。したがって ξ は(18)式で与えられる $\bar{\xi}$ で近似され、その相対誤差は $\pm \varepsilon$ となる。

3. 透過距離の最大および最小値と近似式の精度

被照射体内における γ 線の透過距離の最大値 $l_{\max}$ および最小値 $l_{\min}$ が大きければ大きいほど $F(l_{\max})$, $F(l_{\min})$ の値は 1 に近づき、(19)式で与えられる ε の値は小さくなるので、(18)式で示す吸収効率の近似式の精度は高くなる。線源から見た被照射体の縁の部分のように $l_{\min}$ の値がゼロである部分を被照射体もっている場合には $F(l_{\min})$ の値はゼロとなるため、(19)式で与えられる近似式の相対誤差は 1 となる。この場合、相対誤差が大きすぎて吸収効率の近似式として(18)式を用いることができないことになる。ところで通常の照射装置では、被照射体内における γ 線透過距離、入射エネルギーおよび吸収エネルギーが共に大きい領域 A と、線源から見た被照射体の縁の部分のようにそれらが極めて小さい領域 B との 2 領域によって被照射体が構成されている。この場合には、B 領域内に入射するエネルギーとそこで吸収されるエネルギーは、A 領域内におけるそれらに比較して無視できる。このため吸収率は A 領域だけで被照射体が構成されていると見なして得られた吸収率に近似できる。この A 領域における吸収率は、透過距離の最小値 $l_{\min}$ が十分に大きいため(18)式で良く近似できる。したがって、通常の照射装置における吸収率は A 領域内における γ 線の透過距離の最大、最小値を $l_{\max}$, $l_{\min}$ とした(18)式によって容易に精度良く求められる。

IV. エネルギー利用効率

Fig. 1 に示す線源 S と被照射体 M とで構成される系のエネルギー利用効率 η は

$$\eta = \frac{\oint_S \oint_Q \frac{\phi F(l) y}{r^3} dA dV}{4\pi \oint_S \phi dV} \quad (21)$$

と表わされる。線源および被照射体の形状と配置が極

めて簡単な場合を除いて、一般に(21)式を用いてエネルギー利用効率を求めることは容易でない。この場合には、(8), (18)式に基づき導き出されるエネルギー利用効率の近似式 $\bar{\eta}$

$$\bar{\eta} = \frac{\{F(l_{\max}) + F(l_{\min})\} \sum_{k=1}^K (E_k \sum_{j=1}^J \zeta_{kj})}{2 \sum_{k=1}^K E_k} \quad (22)$$

ここで、 ζ_{kj} : 線源および入射面を構成する基本的形状の線源要素から入射面要素に γ 線が入射する場合の幾何学的効率

E_k : 各線源要素から放出されるエネルギーを用いて η の近似値 $\bar{\eta}$ を容易に求めることができる。

また、 $\bar{\eta}$ の相対誤差 ε_{η} は(19)式に示す吸収率の近似式の相対誤差 ε と等しいので、

$$\varepsilon_{\eta} = \frac{F(l_{\max}) - F(l_{\min})}{F(l_{\max}) + F(l_{\min})} \quad (23)$$

と表わされる。

V. 応用例

線状線源内蔵型照射装置におけるエネルギー利用効率の一般式と、本計算法による近似式とを導き出した。

S: γ -ray source, M: Irradiated material, R_o : Outside radius of M, R_i : Inside radius of M, l_i : Length of S, l_m : Length of M, S_i : Inside surface of M, S_o : Outside surface of M, H: Round hole, S_u : Surface of top and bottom of M

Fig. 2 Geometry of line source and irradiated material of cylindrical form

また、これらの式を用いて線源が ^{60}Co 、被照射体が水である場合のエネルギー利用効率の精密値と近似値を求めて相互比較した。Fig. 2は、この線状線源内蔵型照射装置の線源と被照射体の配置図である。ここで、Mは外径 $2R_0$ 、内径 $2R_i$ 、軸長 l_m の中空円筒形被照射体であり、SはMの中心軸上に長さ l_s の単一エネルギーの γ 線光子を放出する線状線源である。また S_i は円筒形被照射体Mの内壁面である。

1. 近似式

Fig. 3は線源Sから放出される γ 線が円筒形被照射体Mの内壁面 S_i に入射する場合と等しい幾何学的効率をもつ線源Sと γ 線の入射面 A_1, A_2 の配置図である。ここで、Sは軸長 l_s の線状線源であり、 A_1, A_2 はSの中心軸に直交し互いにSを挟んで距離 l_m だけ離れた無限平板である。この平板はSの中心軸との交点を中心とする半径 R_i の穴Hをもっている。また S_i はFig. 2に示す S_i と同じ形状の γ 線入射面である。Sから S_i に入射するすべての γ 線は A_1, A_2 のいずれかに入射し、 S_i に入射しない γ 線は A_1, A_2 のいずれにも入射しない。このため γ 線が S_i に入射する代わりに A_1 と A_2 に入射すると見なすことができる。したがって、Sから S_i に γ 線が入射する場合の幾何学的効率 ζ は、Sから A_1 と A_2 に入射する場合の幾何学的効率と等しい。Sから放出された γ 線の全エネルギー E_t が A_1 および A_2 に入射する場合の幾何学的効率を ζ_1, ζ_2 とすると、 ζ は(8)式に従って

$$\zeta = \frac{E_t(\zeta_1 + \zeta_2)}{E_t} = \zeta_1 + \zeta_2 \quad (24)$$

と表わされる。Sと A_1 の形状および配置はSと A_2

A_1, A_2 : Incident surfaces (infinite plane with round hole H), S: γ -ray source, s: Element of S, S_i : Incident surface of inside wall of M shown in Fig. 2

Fig. 3 Geometry of incident surfaces of γ -rays and line source

のそれらと幾何学的に合同である。このため $\zeta_1 = \zeta_2$ とおけるので、(24)式は

$$\zeta = 2\zeta_1 \quad (25)$$

と表わすことができる。

Fig. 3に示すように、線状線源の中心Oから距離 y_s の位置にある長さ dy_s の微小線源要素sが線源の単位長さ、単位立体角当りに ϕ のエネルギー束を放出するものとする。半径 R_i の円形穴Hがsに対して張る立体角 Ω は

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{l_m/2 - y_s}{\sqrt{R_i^2 + (l_m/2 - y_s)^2}} \right) \quad (26)$$

と表わされる。また A_1 がsに対して張る立体角は $2\pi - \Omega$ であり、sから A_1 に入射するエネルギー束 $d\phi_1$ は $\phi dy_s (2\pi - \Omega)$ であるので、

$$d\phi_1 = 2\pi \phi \left(\frac{l_m/2 - y_s}{\sqrt{R_i^2 + (l_m/2 - y_s)^2}} \right) dy_s \quad (27)$$

となる。(27)式はsの位置 y_s に関係なく成り立つので、線状線源Sから A_1 に入射するエネルギー束 ϕ_1 は、(27)式をsの全領域Sにわたって積分した

$$\phi_1 = 2\pi \phi \left\{ \sqrt{R_i^2 + (l_m/2 + l_s/2)^2} - \sqrt{R_i^2 + (l_m/2 - l_s/2)^2} \right\} \quad (28)$$

と表わされる。また、Sから放出される全エネルギー束は $4\pi \phi l_s$ であるので、幾何学的効率 ζ_1 は $\phi_1 / 4\pi \phi l_s$ で与えられ、これは(28)式に基いて

$$\zeta_1 = \frac{1}{2l_s} \left\{ \sqrt{R_i^2 + (l_m/2 + l_s/2)^2} - \sqrt{R_i^2 + (l_m/2 - l_s/2)^2} \right\} \quad (29)$$

となる。したがって、Sから A_1 と A_2 (または被照射体)に γ 線が入射する場合の幾何学的効率 ζ は(25), (29)式に基いて

$$\zeta = \frac{1}{l_s} \left\{ \sqrt{R_i^2 + (l_m/2 + l_s/2)^2} - \sqrt{R_i^2 + (l_m/2 - l_s/2)^2} \right\} \quad (30)$$

と表わされる。

被照射体内における γ 線透過距離の最大値 $l_{\max}$ はFig. 2に示すBD間の距離であり、

$$l_{\max} = (1 - R_i/R_0) \sqrt{R_0^2 + (l_m/2 + l_s/2)^2} \quad (31)$$

と表わされる。一般にこの型の照射装置では、エネルギー利用効率が大きくなるように、 l_s の値に比較して l_m の値を十分に大きくして設計される。このため、Fig. 2に示すMの頂上部および底部の円環平面 S_u を通る γ 線の透過距離および入射エネルギーは、Mの外壁面 S_0 を通るそれらに比較して無視しうる。したがって、 γ 線透過距離の最小値 $l_{\min}$ は、 S_0 を通る γ 線の透過距離の

最小値, すなわち被照射体の肉厚の値とすることができるので,

$$l_{\min} = R_o - R_i \quad (32)$$

と表わされる。被照射体中を γ 線が距離 l だけ透過する間にそのエネルギーが吸収される割合 $F(l)$ は, γ 線光子のエネルギーが単一であるので, (9)式に従って

$$F(l) = 1 - B e^{-\mu l} \quad (33)$$

と表わされる。したがって, 吸収効率の近似式 $\bar{\xi}$ は (33), (18)式に基いて

$$\bar{\xi} = 1 - \frac{1}{2} (B_{\max} e^{-\mu l_{\max}} + B_{\min} e^{-\mu l_{\min}}) \quad (34)$$

となる。ここで, $B_{\max}, B_{\min}$ は γ 線透過距離が (31), (32)式で与えられる $l_{\max}, l_{\min}$ である場合の Energy buildup factor である。したがって, エネルギー吸収効率の近似式 $\bar{\eta}$ は (30)と (34)式で与えられる $\bar{\xi}$ の積で

$$\begin{aligned} \bar{\eta} = \frac{1}{l_s} \{ & \sqrt{R_i^2 + (l_m/2 + l_s/2)^2} \\ & - \sqrt{R_i^2 + (l_m/2 - l_s/2)^2} \} \\ & \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{2} (B_{\max} e^{-\mu l_{\max}} + B_{\min} e^{-\mu l_{\min}}) \right\} \end{aligned} \quad (35)$$

と表わされる。

2. 一般式

エネルギー利用効率 η は, (21)式から

$$\begin{aligned} \eta = 1 - \frac{1}{l_s} \left[\int_0^{l_s/2} \left\{ \int_{-\tan^{-1} \frac{l_m/2 - y_s}{R_o}}^{\tan^{-1} \frac{l_m/2 - y_s}{R_i}} B_1 e^{-\mu l_1} \cos^2 \theta d\theta \right. \right. \\ + \int_{\tan^{-1} \frac{l_m/2 - y_s}{R_o}}^{\tan^{-1} \frac{l_m/2 - y_s}{R_i}} B_2 e^{-\mu l_2} \cos^2 \theta d\theta \\ \left. \left. + \int_{\tan^{-1} \frac{l_m/2 + y_s}{R_o}}^{\tan^{-1} \frac{l_m/2 + y_s}{R_i}} B_3 e^{-\mu l_3} \cos^2 \theta d\theta \right\} dy_s \right] \quad (36) \end{aligned}$$

と表わされる。ここで, B_1, B_2, B_3 は γ 線の透過距離が次式で与えられる l_1, l_2, l_3 である場合の Energy buildup factor である。

$$\begin{aligned} l_1 &= \frac{R_o - R_i}{\cos \theta}, \quad l_2 = \frac{l_s - 2y_s}{2 \sin \theta} - \frac{R_i}{\cos \theta}, \\ l_3 &= \frac{l_s + 2y_s}{2 \sin \theta} - \frac{R_i}{\cos \theta} \end{aligned} \quad (37)$$

3. 近似式と一般式との比較

線源が ^{60}Co , 被照射体が水の場合に, $l_m (=120, 180, 240\text{cm})$, $R_i (=5, 10, 15\text{cm})$, $R_o (=45, 85, 125\text{cm})$ の各値に対応するエネルギー利用効率の近似値 $\bar{\eta}$ と精密値 η とを (35), (36) 式を用いて求めた。その結果を Table 1 に示した。ここで, (34)式の積分はChebyshev

の数値積分式(積分点数9)を用いて行なった。この計算で用いた各係数³⁾⁽⁴⁾は次のとおりである。

$$\begin{aligned} \mu &= 0.0634 \text{ cm}^{-1}, \quad l_s = 60 \text{ cm}, \\ B &= 9.68 e^{0.0837 \mu l} - 8.68 e^{0.04 \mu l} \end{aligned}$$

ここで, l : γ 線の透過距離

Table 1 Comparison between exact and approximate values of energy utilization efficiency for geometry of source and irradiated material shown Fig. 2

l_m	R_i	R_o	$\bar{\eta}$	η	ε
120.0	5.0	45.0	0.818	0.791	3.5
	5.0	85.0	0.968	0.943	2.6
	5.0	125.0	0.992	0.960	3.3
	10.0	50.0	0.801	0.779	2.8
	10.0	90.0	0.954	0.928	2.8
	10.0	130.0	0.979	0.945	3.6
	15.0	55.0	0.777	0.767	1.3
	15.0	95.0	0.934	0.913	2.3
180.0	15.0	135.0	0.958	0.929	3.1
	5.0	45.0	0.831	0.808	2.9
	5.0	85.0	0.973	0.972	0.1
	5.0	125.0	0.995	0.992	0.3
	10.0	50.0	0.824	0.804	2.5
	10.0	90.0	0.968	0.968	0.0
	10.0	130.0	0.990	0.987	0.3
	15.0	55.0	0.814	0.800	1.7
240.0	15.0	95.0	0.959	0.962	-0.3
	15.0	135.0	0.982	0.981	0.0
	5.0	45.0	0.835	0.810	3.1
	5.0	85.0	0.975	0.977	-0.2
	5.0	125.0	0.996	0.997	-0.1
	10.0	50.0	0.832	0.809	2.8
	10.0	90.0	0.972	0.975	-0.4
	10.0	130.0	0.993	0.995	-0.2
	15.0	55.0	0.826	0.807	2.3
	15.0	95.0	0.967	0.974	-0.6
	15.0	135.0	0.989	0.994	-0.5

Length of source (60 cm)

l_m : Length of irradiated material (cm)

R_i : Inside radius of irradiated material (cm)

R_o : Outside radius of irradiated material (cm)

$\bar{\eta}$: Approximate value of energy utilization efficiency

η : Exact value of energy utilization efficiency

ε : Relative error $(\bar{\eta} - \eta)/\eta$ (%)

この結果によれば, 近似式は一般式より計算が容易であり, かつ近似値は精密値と $\pm 4\%$ 以内とで良く一致することが明らかである。

Ⅶ. おわりに

特殊な照射装置を除けば、一般に照射装置は被照射体に入射した γ 線エネルギーが被照射体内で十分に吸収されるように設計されている。この場合には、吸収効率は線源および被照射体の幾何学的形状と配置に強く依存しないため、エネルギー利用効率は本近似計算法で容易かつ精度良く求めることができる。また、この場合には、エネルギー利用効率と線源および被照射体の幾何学的形状と配置との関係は、本近似計算法によれば比較的簡単となるので、エネルギー利用効率が大きい線源および被照射体の幾何学的形状と配置を決定することも容易になると考えられる。

本研究を行うにあたって有益なご助言と絶えざる激励を賜った日本原子力研究所重松友道開発試験場長ならびに田村直幸照射施設課長に深く感謝の意を表します。

—参考文献—

- (1) MANOWITZ, B., BRETTON, R.H., GALANTER, L., *et al.*: Computation method of gamma irradiator design, *BNL-889 (T-361)*, (1964).
- (2) ARMEL, J., MANOWITZ, B.: Cobalt-60 bulk grain irradiator, *BNL-810 (T-312)*, (1963).
- (3) GOLDSTEIN, H., WILKINS, J.: Calculation of the penetration of gamma rays, *NYO-3075*, (1954).
- (4) ROCKWELL, T.: "Reactor Shielding Design Manual", (1956), McGraw-Hill, Co.

投 稿 歓 迎!

(1975.5 一部改正)

本誌「投稿欄」の内容は、次のとおりです。(())は無料ページで、超過分の掲載料は10,000円/頁)

- ① 研究論文(5頁) 研究の対象・方法あるいは結果に獨創性・創造性があり、かつ明確で価値ある結論や事実を含み、未公開のもの。
(欧文は「欧文誌」に掲載)
- ② 技術報告(5頁) 材料の製作・施設・設備・装置等の設計・試験・運転などの新しい経験やその結論をまとめた実用価値のある論文で、未公開のもの。(欧文は「欧文誌」に掲載)
- ③ ショート・ノート(2頁) 研究・技術上の獨創的かつ重要な発見または結論を含む論文の速報。(欧文は「欧文誌」に掲載)
- ④ レター(2頁)(新設) 掲載論文に対する質疑応答および意見。(欧文は「欧文誌」に掲載)
- ⑤ 資料(5頁) 研究・技術に関する参考資料および調査集計報告など。
- ⑥ 私のノートから(2頁) 各専門分野の研究または技術上の経験、斬新なアイディア、珍しい実験結果など。
- ⑦ 談話室(2頁) 内外の会議・学会などの見聞記、あるいは科学・技術上の提言など。
- ⑧ 新刊紹介(800字程度) 内外の出版物の書評および紹介。
- ⑨ 会員のこえ(600字程度) 本会および本誌などに対する批判的ご意見・ご希望・ご提案などの自由投書。(用紙自由、誌上匿名可)

巻頭言、特別寄稿、解説、総説、講演、特集等は編集委員会で立案・企画して執筆依頼する。
ご投稿には、「投稿規程」、「投稿の手引」に従って、所定の原稿用紙(30枚綴り1冊150円 千70円。欧文は市販のタイプ用紙)により、「投稿票」(付チェックリスト)(1部50円、千25円)を添付して事務局宛ご送付下さい。

レターの新設のほか、「投稿規定」「投稿票」も一部が変更になりましたので、特にご留意願います。