

再処理工場運転員のための線量計算演習

TEXT BOOK OF DOSE CALCULATION FOR OPERATORS

July 1979

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

TOKAI WORKS

POWER REACTOR & NUCLEAR FUEL DEVELOPMENT CORPORATION

複製あるいは入手については、下記にお問い合わせください。

茨城県那珂郡東海村 〒319-11

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所技術部研究管理課 ☎東海(02928)2-1111 内線 238

Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

Enquiries about copyright and reproduction should be addressed to ;

Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development  
Corporation,

Tokai, Ibaraki, Post No.319-11, Japan.

## 再処理工場運転員のための線量計算演習

## TEXT BOOK OF DOSE CALCULATION FOR OPERATORS

実施責任者 権田 浩三\*

報告者 青柳 春樹\*

権田 浩三\*

## 要旨

本資料は、再処理工場運転員のための教育用及び実務用に作成したものである。小型試験設備ではホット化以来セル内機器の保守及び除染、さらに廃棄物の処理等で、個人被曝管理の上から、必要に応じて作業前後の線量評価を行ってきた。本資料はこれらの経験をもとに、より使いやすく、現場での実務に即応できる線量計算マニュアルとして、整理しまとめたものである。従って対象としている放射線は再処理工場での外部被曝で問題となる $\beta$ 線及び $\gamma$ 線であり、線源核種も使用済燃料中に含まれるものを中心に例題中で取扱っている。本資料が有効に活用され、現場作業員の被曝線量が可能な限り削減されることを願ってやまない。

## 目 次

1	まえがき .....	1
2	$r$ 線についての線量計算 .....	3
2.1	$r$ 線の照射線量計算法 .....	3
2.2	計算式の説明 .....	26
2.3	計算例 .....	50
3	$\beta$ 線についての線量計算 .....	69
3.1	$\beta$ 線の吸収線量計算法 .....	69
3.2	計算式の説明 .....	77
3.3	計算例 .....	87
4	電卓による線量計算 .....	101
4.1	使用方法 .....	102
4.2	プログラムリスト .....	112
5	参考文献 .....	122

## 1. ま え が き

本資料は再処理工場運転員の放射線被曝管理の一助とすることを念頭におき、 $\gamma$ 線及び $\beta$ 線の線量計算法を使い易いかたちに整理し、まとめたものである。計算手法は遮蔽計算法としてもっとも簡単で、また基礎となる点減衰核積分法である。これは線源を点線源の集合とみなし、個々の点線源について計算された線量を、線源全体にわたって加算（積分）する方法である。減衰の取り扱い、線源から直接放出される一次放射線については距離による減衰と、遮蔽体による吸収のみが考慮される。一方遮蔽体による散乱 $\gamma$ 線（二次放射線）については、一次 $\gamma$ 線を再生係数で補正することにより取り扱う。この再生係数は全放射線と一次放射線との比で定義され、代表的な遮蔽体については実験値及び計算値が表でまとめられている。

以下本資料の作成にあたっての方針、及び利用方法を記す。

### 方 針

本資料は $\gamma$ 線、 $\beta$ 線の線量計算法及びプログラム電卓による計算法の3部より構成されている。作成にあたって留意した点は以下の4点である。

- (1) 手計算で $\gamma$ 線及び $\beta$ 線に関する線量計算が容易に行なえること。

従って計算の過程で生じる積分計算は図表で与え、しかもそのパラメータはできるだけ簡便なものとする。これにより従来の計算法と若干異なる計算法を採用したところもある。

- (2) 各計算式について、式の誘導方法を明確にすること。

これにより点減衰核積分法の式の展開になれ親しむことができれば、本書で取り扱っている以外の形状についても対処できると思われる。

- (3) 線量計算を行う際、計算式以外に必要な事項及び知識はできるだけ例題に盛り込むこと。

例えば再処理工場でよく問題となる線源核種の特性や、同じく遮蔽体の遮蔽効果についてのデータを記載する。

- (4)  $\gamma$ 線及び $\beta$ 線についての線量計算をプログラム電卓 YHP 97 (67) で直ちに実行できるマニュアル及びプログラムを整備すること。

## 利用方法

前記の方針からわかるように、利用方法として次の3つの場合を想定して本資料を作成した。

利 用 方 法	本資料の該当箇所
遮蔽計算に経験のある運転員が、本資料の計算式や積分図表のまとめを、公式集及び数値表として利用する場合。	2-1 2-2 3-1 3-2
遮蔽計算や核計算の経験が充分でない運転員が一通りの線量計算を習得したい場合。	2-3 2-1 3-3 3-1
電卓で事務的に線量計算を行う場合。 機種：YHP Model 97, 67（横河ヒューレットパッカード製）	4-1

## 2. $\gamma$ 線についての線量計算

### 2.1 $\gamma$ 線の照射線量計算法

ここで取りあげた線源形状は、表 2-1 で図示した 16 種類である。本章の目的は前記 16 種類の形状についての  $\gamma$  線照射線量を手計算で求めることである。計算手順を以下に記す。

(1) 単一エネルギー線源の場合

(i) 図 2-1 から  $\gamma$  線のエネルギー  $E$  に相当する変換係数  $fE$  [ $\frac{Rsec\ cm^2}{hr}$ ] を読み取る。

$fE$  は  $\gamma$  線粒子束  $\phi$  [ $1/sec\ cm^2$ ] を照射線量率  $D$  [ $R/hr$ ] に変換する係数である。

(ii) 対象としている計算体系に近い線源形状を表 2-1 の中からえらぶ。

(iii) 同表の必要な定数欄に記された定数を決める。遮蔽体がある場合の吸収係数  $\mu$  及び再生係数  $B$  は図 2-2 ~ 図 2-4, 表 2-2 から求める。これ以外の場合(他の文献 2), 3) から調べる。

(iv) 上記 (iii) で決定された定数系を,  $\gamma$  線粒子束計算式に代入し,  $\gamma$  線粒子束  $\phi$  を求める。

その際積分計算値は表 2-1 の図表欄の指示に従い, 図 2-5 ~ 図 2-8, 表 2-3 ~ 表 2-6 の中から読み取る。

(v) 以上の  $fE$  と  $\phi$  から照射線量率  $D$  は次式で得られる。

$$D = fE \cdot \phi \quad [R/hr]$$

(2) 複合エネルギー線源の場合

各エネルギーの  $\gamma$  線ごとに単一エネルギーの計算方法で照射線量率を求め, それらを合計したものが複合エネルギー線源の線量率である。その際計算式に代入する線源強度は, 全放射能 [ $C_i$ ] に各エネルギーの  $\gamma$  線の放出割合を掛け合わせたものである。また変換係数  $fE$  や遮蔽体の吸収係数や再生係数は,  $\gamma$  線のエネルギーにより異なることに注意しなければならない。

放射性核種は一般に多くの  $\gamma$  線を放出するので, 上記のように全部のエネルギーについて計算するのは非常に大変なので,  $\gamma$  線のエネルギーの種類を減らす簡便法を以下に示す。

ある核種から放出される  $\gamma$  線のエネルギーとその放出割合が右表で与えられているものとする。これをエネルギーについて放出割合により加重平均をとり  $\gamma$  線のエネルギーを 1 種類に削減する。そのエネルギー及び放出割合を  $\bar{E}$ ,  $\bar{\gamma}$  とすると

$\gamma$ 線のエネルギー	放出割合
$E_1$	$\gamma_1$
$E_2$	$\gamma_2$
$E_3$	$\gamma_3$

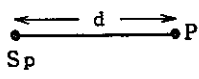
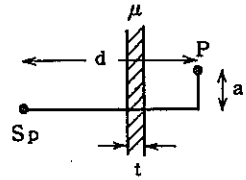
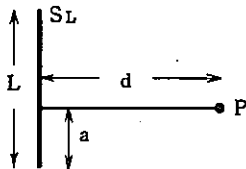
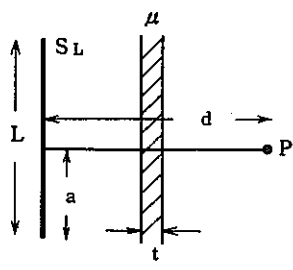
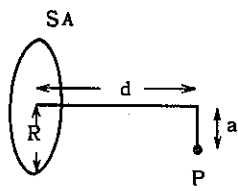
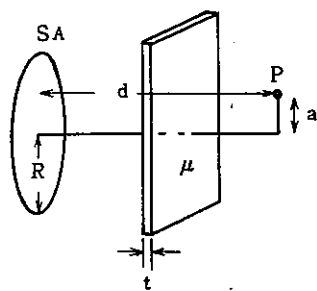
$$\bar{E} = \frac{E_1 \eta_1 + E_2 \eta_2 + E_3 \eta_3}{\eta_1 + \eta_2 + \eta_3}$$

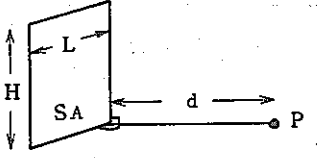
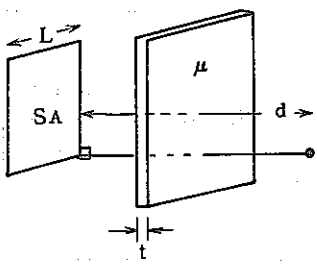
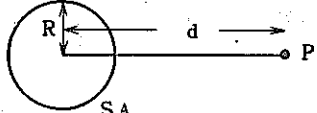
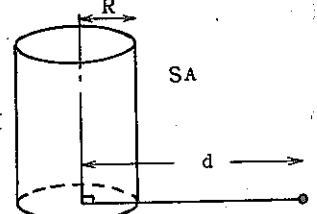
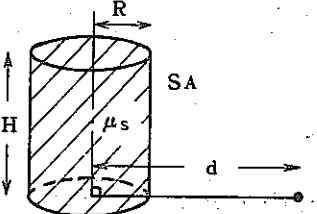
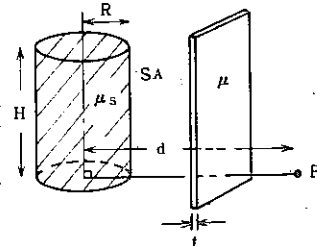
$$\bar{\eta} = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3$$

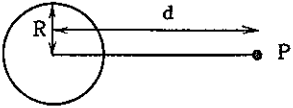
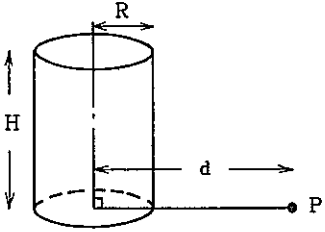
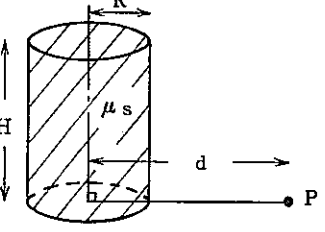
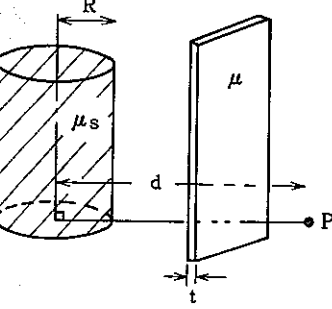
この簡便法はエネルギーが近い $r$ 線の場合にのみ使用すべきであり、乱用すると誤差が大きくなるのは当然である。



表 2-1  $\gamma$  線粒子束の計算式

No	線源形状 (Pは測定点)	必要な定数	$\gamma$ 線粒子束: $\phi$ [1/sec cm <sup>2</sup> ] ( $C=3.7 \times 10^{10}$ )	図表
1	点線源 	$S_P$ [Ci] $d$ [cm]	$\phi = \frac{S_P C}{4 \pi d^2}$	-
2	点線源+遮蔽 	$S_P$ [Ci] $d$ [cm] $a$ [cm] $t$ [cm] $\mu$ [cm <sup>-1</sup> ] $B$ [-]	$\phi = \frac{S_P C}{4 \pi (d^2 + a^2)} B \exp \left\{ -\mu t \frac{\sqrt{d^2 + a^2}}{d} \right\}$	-
3	線線源 	$S_L$ [Ci] $L$ [cm] $d$ [cm] $a$ [cm]	$\phi = \frac{S_L C}{4 \pi L d} \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{a}{d} \right) + \tan^{-1} \frac{L-a}{d} \right\}$	-
4	線線源+遮蔽 	$S_L$ [Ci] $L$ [cm] $d$ [cm] $a$ [cm] $t$ [cm] $\mu$ [cm <sup>-1</sup> ] $B$ [-]	$\phi = \frac{S_L C}{4 \pi L d} B \{ F(\theta_2, b_1) - F(\theta_1, b_1) \}$ $\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{-a}{b} \right), \quad b_1 = \mu t$ $\theta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{L-a}{d} \right)$ (注) $\theta < 0$ の場合 $F(\theta, b_1) = -F( \theta , b_1)$	図 2-5
5	円板線源 	$S_A$ [Ci] $R$ [cm] $d$ [cm] $a$ [cm]	$\phi = \frac{S_A C}{4 \pi R^2} \times \ln \frac{d^2 + R^2 - a^2 + \sqrt{R^4 + 2R^2(d^2 + a^2) + (d^2 + a^2)^2}}{2d^2}$	-
6	円板線源+遮蔽 	$S_A$ [Ci] $R$ [cm] $d$ [cm] $a$ [cm] $t$ [cm] $\mu$ [cm <sup>-1</sup> ] $B$ [-]	$\phi = \frac{S_A C}{4 \pi^2 R^2} B G_1(\ell, p, \mu t)$ $\ell = \frac{a}{R}$ $p = \frac{a}{R}$	表 2-3

7	<p>長方平板線源</p> 	<p><math>S_A</math> [Ci]  <math>L</math> [cm]  <math>H</math> [cm]  <math>d</math> [cm]</p>	$\phi = \frac{S_A C}{4 \pi L H} G_2(m, n)$ $m = \frac{L}{d} \quad n = \frac{H}{L}$	<p>☒ 2-6</p>
8	<p>長方平板線源+遮蔽</p> 	<p><math>S_A</math> [Ci]  <math>L</math> [cm]  <math>H</math> [cm]  <math>d</math> [cm]  <math>t</math> [cm]  <math>\mu</math> [cm<sup>-1</sup>]  <math>B</math> [ - ]</p>	$\phi = \frac{S_A C}{4 \pi L H} B G_3(m, n, \mu t)$ $m = \frac{L}{d} \quad n = \frac{H}{L}$	<p>表 2-4</p>
9	<p>球表面線源</p> 	<p><math>S_A</math> [Ci]  <math>R</math> [cm]  <math>d</math> [cm]</p>	$\phi = \frac{S_A C}{8 \pi R d} \ell n \frac{d + R}{d - R}$	<p>-</p>
10	<p>円筒表面線源</p> 	<p><math>S_A</math> [Ci]  <math>H</math> [cm]  <math>R</math> [cm]  <math>d</math> [cm]</p>	$\phi = \frac{S_A C}{4 \pi^2 H^2} G_4(k, p)$ $k = \frac{H}{R} \quad p = \frac{d}{R}$	<p>☒ 2-7</p>
11	<p>円筒表面線源+内部吸収</p> 	<p><math>S_A</math> [Ci]  <math>H</math> [cm]  <math>R</math> [cm]  <math>\mu_s</math> [cm<sup>-1</sup>]  <math>d</math> [cm]</p>	$\phi = \frac{S_A C}{4 \pi^2 R H} W(k, p, \mu_s R, 0)$ $k = \frac{H}{R} \quad p = \frac{d}{R}$	<p>表 2-5</p>
12	<p>円筒表面線源+内部吸収+遮蔽</p> 	<p><math>S_A</math> [Ci]  <math>H</math> [cm]  <math>R</math> [cm]  <math>\mu_s</math> [cm<sup>-1</sup>]  <math>d</math> [cm]  <math>t</math> [cm]  <math>\mu</math> [cm<sup>-1</sup>]  <math>B</math> [ - ]</p>	$\phi = \frac{S_A C}{4 \pi^2 R H} B \cdot W(k, p, \mu_s R, b_1)$ $k = \frac{H}{R} \quad p = \frac{d}{R}$ $b_1 = \mu t$	<p>表 2-5</p>

13	<p>球体積線源</p> 	<p><math>S_V</math> [Ci]  <math>R</math> [cm]  <math>d</math> [cm]</p>	$\phi = \frac{3S_V C}{8\pi R^3 d} \left[ dR + \frac{R^2 - d^2}{2} \ln \frac{d+R}{d-R} \right]$	-
14	<p>円柱体積線源</p> 	<p><math>S_V</math> [Ci]  <math>H</math> [cm]  <math>R</math> [cm]  <math>d</math> [cm]</p>	$\phi = \frac{S_V C}{4\pi R^2} G_3(k, p)$ $k = \frac{H}{R} \quad p = \frac{d}{R}$	<p>図 2-8</p>
15	<p>円柱体積線源+内部吸収</p> 	<p><math>S_V</math> [Ci]  <math>H</math> [cm]  <math>R</math> [cm]  <math>\mu_S</math> [cm<sup>-1</sup>]  <math>d</math> [cm]</p>	$\phi = \frac{S_V C}{2\pi^2 R H} G(k, p, \mu_S R, 0)$ $k = \frac{H}{R} \quad p = \frac{d}{R}$	<p>表 2-6</p>
16	<p>円柱体積線源+内部吸収+遮蔽</p> 	<p><math>S_V</math> [Ci]  <math>H</math> [cm]  <math>R</math> [cm]  <math>\mu_S</math> [cm<sup>-1</sup>]  <math>d</math> [cm]  <math>t</math> [cm]  <math>\mu</math> [cm<sup>-1</sup>]  <math>B</math> [-]</p>	$\phi = \frac{S_V C}{2\pi^2 R H} B \cdot G(k, p, \mu_S R, b_1)$ $k = \frac{H}{R} \quad p = \frac{d}{R}$ $b_1 = \mu t$	<p>表 2-6</p>

記号

$S_P$ [Ci]	点線源の放射能	$t$ [cm]	遮蔽体の厚さ
$S_L$ [Ci]	線線源の放射能	$B$ [-]	再生係数
$S_A$ [Ci]	面線源の放射能	$\mu$ [cm <sup>-1</sup> ]	遮蔽体の線吸収係数
$S_V$ [Ci]	体積線源の放射能	$\mu_S$ [cm <sup>-1</sup> ]	線源の線吸収係数
$d$ [cm]	距離	$b_1$ [-]	$= \mu t$
$a$ [cm]	距離	$\ell$ [-]	$= a/R$
$R$ [cm]	半径	$p$ [-]	$= d/R$
$L$ [cm]	線線源の長さ	$m$ [-]	$= L/d$
	長方平面線源の一辺	$n$ [-]	$= H/L$
$H$ [cm]	長方平面線源の一辺	$k$ [-]	$= H/R$
	円柱状線源の高さ	$D$ [R/hr]	照射線量率

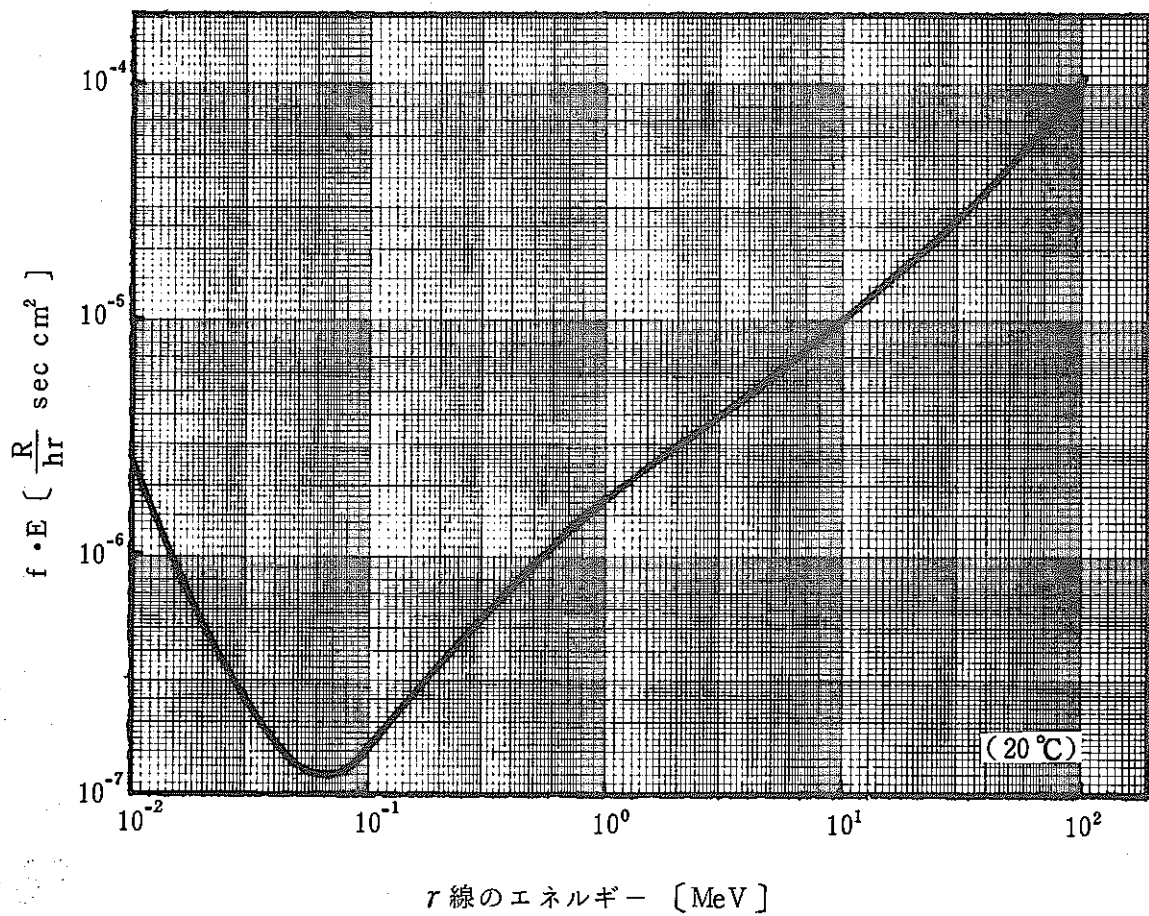
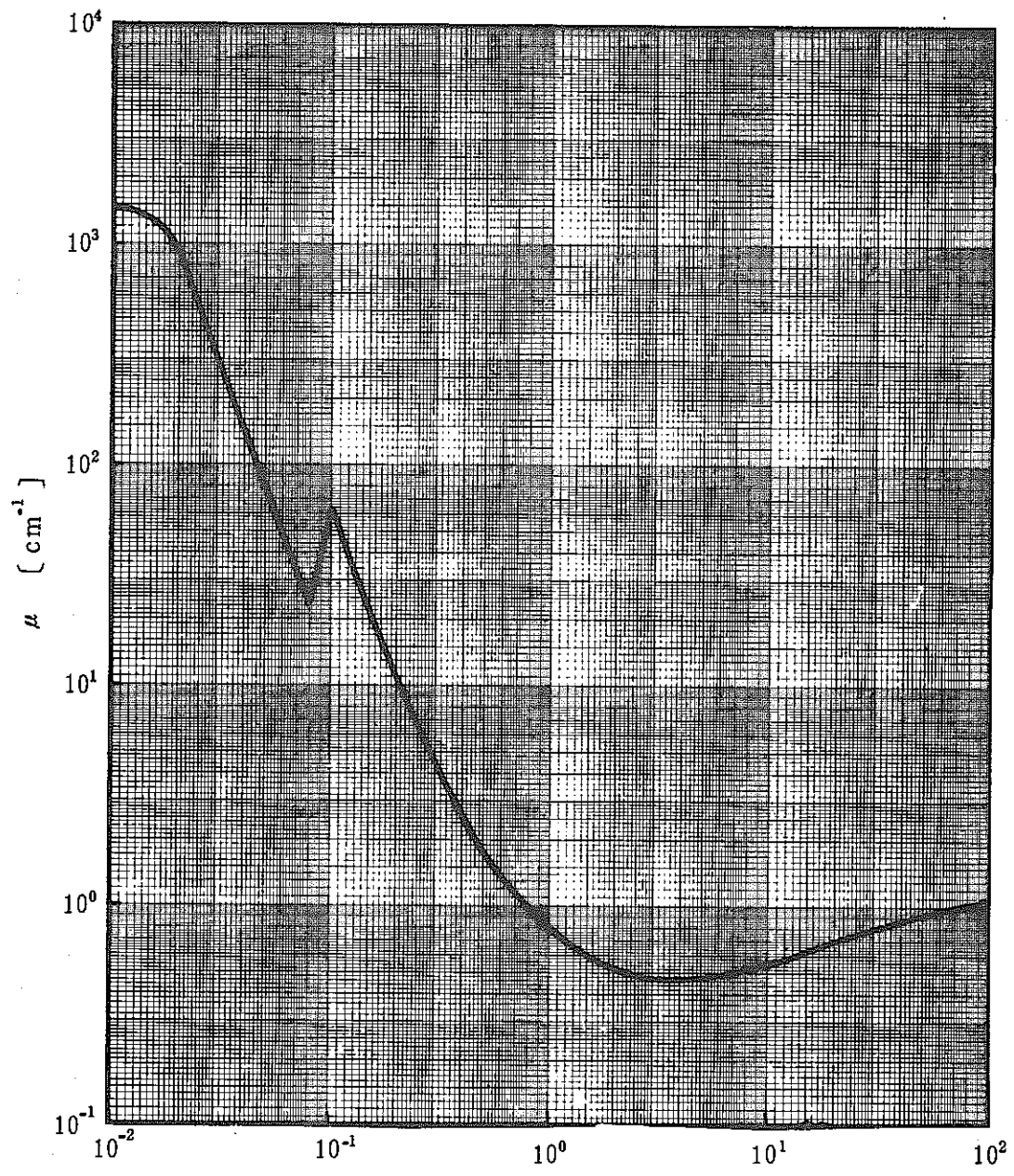


図 2 - 1 照射線量率変換係数  $fE$



$\gamma$  線のエネルギー [MeV]

図 2-2 鉛の線吸収係数  $\mu$

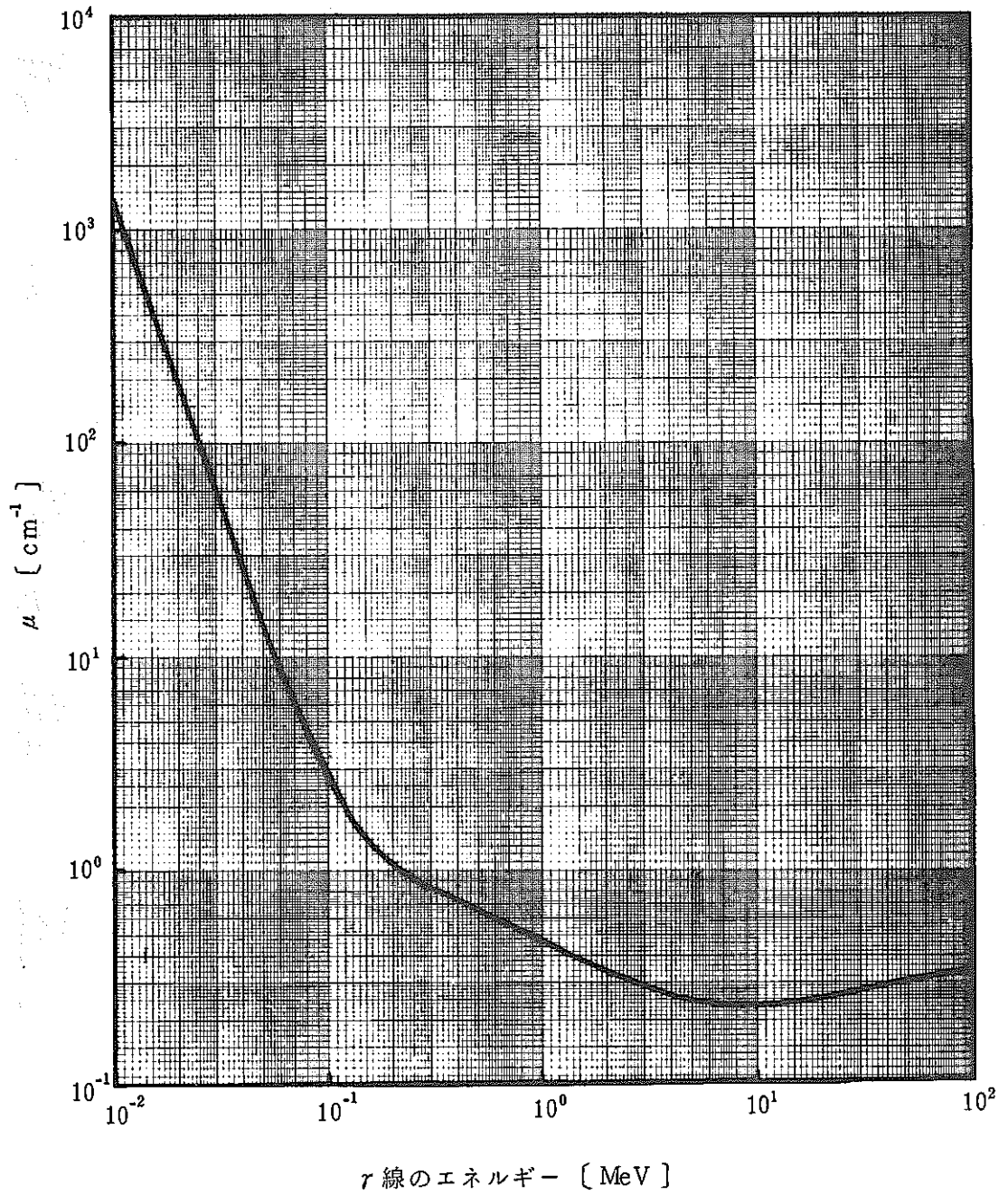


図 2 - 3 鉄の線吸収係数  $\mu$

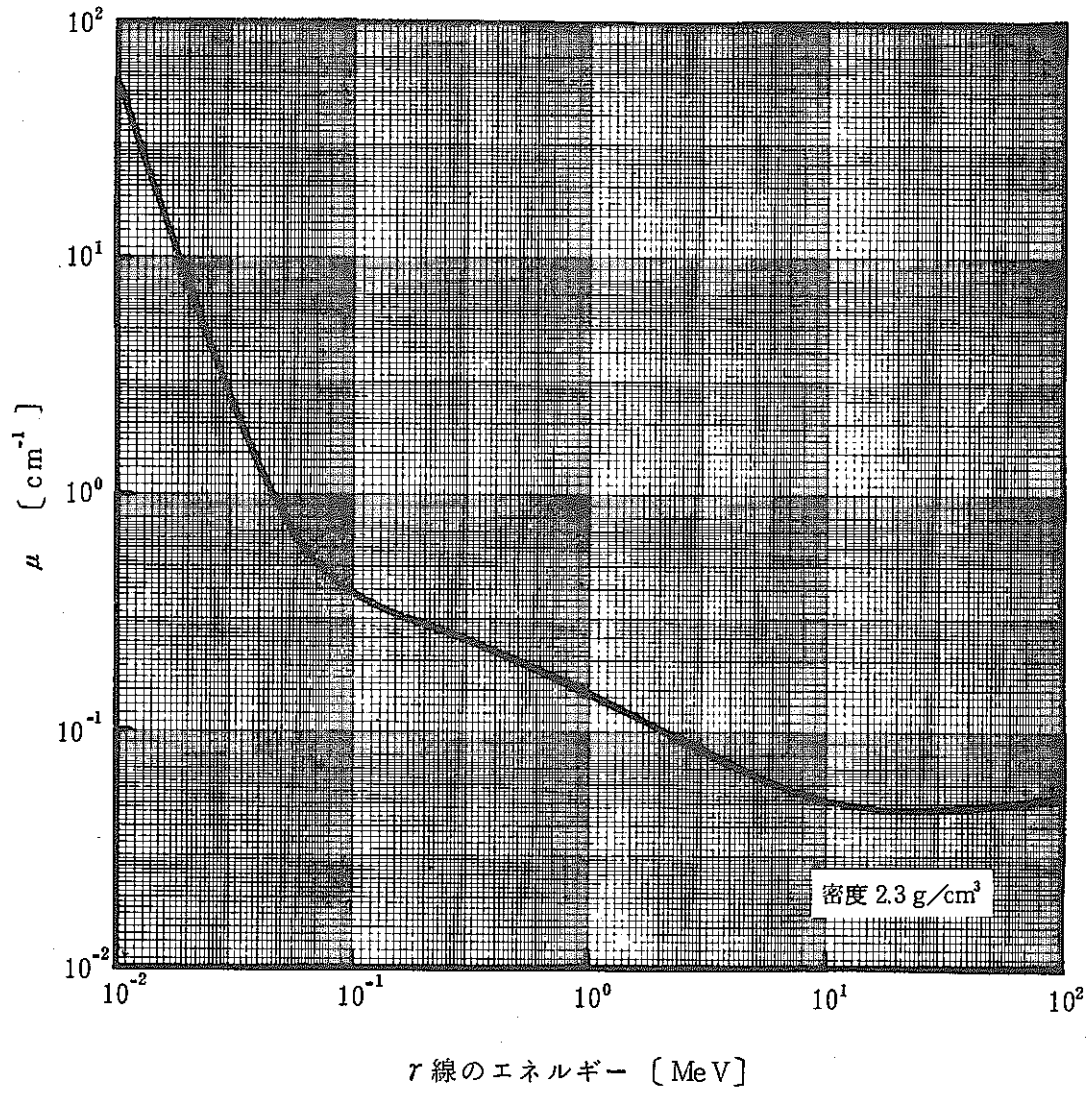


図 2-4 コンクリートの線吸収係数  $\mu$

表 2-2 再生係数 (点等方線源)

## 鉛

E (MeV)	$\mu t$ [ - ]						
	1	2	4	7	10	15	20
0.5	1.24	1.42	1.69	2.00	2.27	2.65	(2.73)
1.0	1.37	1.69	2.26	3.02	3.74	4.81	5.86
2.0	1.39	1.76	2.51	3.66	4.84	6.87	9.00
3.0	1.34	1.68	2.43	3.75	5.30	8.44	12.3
4.0	1.27	1.56	2.25	3.61	5.44	9.80	16.3
5.1097	1.21	1.46	2.08	3.44	5.55	11.7	23.6
6.0	1.18	1.40	1.97	3.34	5.69	13.8	32.7
8.0	1.14	1.30	1.74	2.89	5.07	14.1	44.6
10.0	1.11	1.23	1.58	2.52	4.34	12.5	39.2

## 鉄

E (MeV)	$\mu t$ [ - ]						
	1	2	4	7	10	15	20
0.0	1.98	3.09	5.98	11.7	19.2	35.4	55.6
1.0	1.87	2.89	5.39	10.2	16.2	28.3	42.7
2.0	1.76	2.43	4.13	7.25	10.9	17.6	25.1
3.0	1.55	2.15	3.51	5.85	8.51	13.5	19.1
4.0	1.45	1.94	3.03	4.91	7.11	11.2	16.0
6.0	1.34	1.72	2.58	4.14	6.02	9.89	14.7
8.0	1.27	1.56	2.23	3.49	5.07	8.50	13.0
10.0	1.20	1.42	1.95	2.99	4.35	7.54	12.4

## 水

E (MeV)	$\mu t$ [ - ]						
	1	2	4	7	10	15	20
0.225	3.09	7.14	23.0	72.9	166	456	982
0.0	2.52	5.14	14.3	88.8	77.6	178	334
1.0	2.13	3.71	7.68	16.2	27.1	50.4	82.2
2.0	1.83	2.77	4.88	8.46	12.4	19.5	27.7
3.0	1.69	2.42	3.91	6.23	8.63	12.8	17.0
4.0	1.58	2.17	3.34	5.13	6.94	9.97	12.9
6.0	1.46	1.91	2.76	3.99	5.18	7.09	8.85
8.0	1.38	1.74	2.40	3.34	4.25	5.66	6.95
10.0	1.33	1.63	2.19	2.97	3.72	4.90	5.98



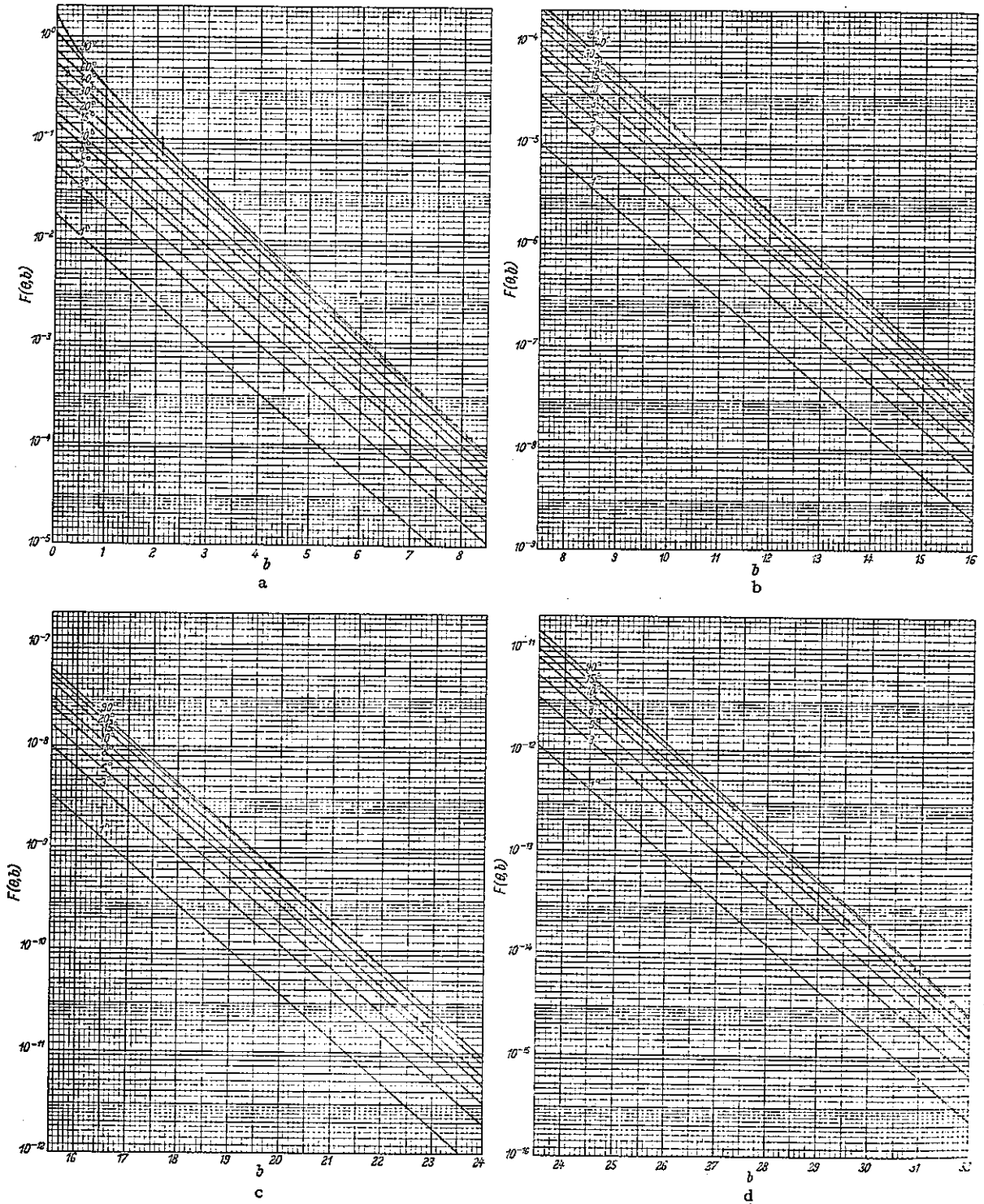


图 2-5  $F(\theta, b)$  线图

表 2-3  $G_1 (\ell, P, \mu t)$

		P										
$\mu t$	$\ell$	0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	5.0	7.0	10.0
0.	0	8.90	5.06	3.21	2.18	1.16	$7.01 \cdot 10^{-1}$	$4.56 \cdot 10^{-1}$	$3.31 \cdot 10^{-1}$	$1.23 \cdot 10^{-1}$	$6.35 \cdot 10^{-2}$	$3.13 \cdot 10^{-2}$
	0.2	8.79	4.98	3.16	2.15	1.14	$6.96 \cdot 10^{-1}$	$4.64 \cdot 10^{-1}$	$3.30 \cdot 10^{-1}$	$1.23 \cdot 10^{-1}$	$6.34 \cdot 10^{-2}$	$3.12 \cdot 10^{-2}$
	0.4	8.43	4.73	3.00	2.05	1.11	$6.81 \cdot 10^{-1}$	$4.57 \cdot 10^{-1}$	$3.26 \cdot 10^{-1}$	$1.22 \cdot 10^{-1}$	$6.33 \cdot 10^{-2}$	$3.12 \cdot 10^{-2}$
	0.6	7.74	4.30	2.76	1.91	1.05	$6.58 \cdot 10^{-1}$	$4.46 \cdot 10^{-1}$	$3.20 \cdot 10^{-1}$	$1.22 \cdot 10^{-1}$	$6.30 \cdot 10^{-2}$	$3.11 \cdot 10^{-2}$
	0.8	6.55	3.69	2.43	1.72	$9.84 \cdot 10^{-2}$	$6.27 \cdot 10^{-2}$	$4.31 \cdot 10^{-2}$	$3.12 \cdot 10^{-2}$	$1.20 \cdot 10^{-1}$	$6.27 \cdot 10^{-2}$	$3.11 \cdot 10^{-2}$
	1.0	4.75	2.95	2.06	1.51	$9.04 \cdot 10^{-2}$	$5.91 \cdot 10^{-2}$	$4.12 \cdot 10^{-2}$	$3.02 \cdot 10^{-2}$	$1.19 \cdot 10^{-1}$	$6.22 \cdot 10^{-2}$	$3.10 \cdot 10^{-2}$
	1.2	3.06	2.25	1.69	1.30	$8.19 \cdot 10^{-2}$	$5.52 \cdot 10^{-2}$	$3.92 \cdot 10^{-2}$	$2.91 \cdot 10^{-2}$	$1.17 \cdot 10^{-1}$	$6.17 \cdot 10^{-2}$	$3.08 \cdot 10^{-2}$
	1.4	2.06	1.70	1.37	1.10	$7.34 \cdot 10^{-2}$	$5.11 \cdot 10^{-2}$	$3.70 \cdot 10^{-2}$	$2.78 \cdot 10^{-2}$	$1.15 \cdot 10^{-1}$	$6.11 \cdot 10^{-2}$	$3.07 \cdot 10^{-2}$
	1.6	1.48	1.31	1.11	$9.30 \cdot 10^{-2}$	$6.53 \cdot 10^{-2}$	$4.69 \cdot 10^{-2}$	$3.48 \cdot 10^{-2}$	$2.65 \cdot 10^{-2}$	$1.12 \cdot 10^{-1}$	$6.04 \cdot 10^{-2}$	$3.05 \cdot 10^{-2}$
	1.8	1.12	1.03	$9.06 \cdot 10^{-2}$	$7.85 \cdot 10^{-2}$	$5.79 \cdot 10^{-2}$	$4.29 \cdot 10^{-2}$	$3.25 \cdot 10^{-2}$	$2.52 \cdot 10^{-2}$	$1.10 \cdot 10^{-1}$	$5.96 \cdot 10^{-2}$	$3.03 \cdot 10^{-2}$
	2.0	$8.83 \cdot 10^{-1}$	$8.26 \cdot 10^{-1}$	$7.49 \cdot 10^{-1}$	$6.66 \cdot 10^{-1}$	$5.12 \cdot 10^{-1}$	$3.92 \cdot 10^{-1}$	$3.03 \cdot 10^{-1}$	$2.38 \cdot 10^{-1}$	$1.07 \cdot 10^{-1}$	$5.88 \cdot 10^{-2}$	$3.01 \cdot 10^{-2}$
0.5	0	3.23	2.38	1.68	1.20	$6.68 \cdot 10^{-1}$	$4.13 \cdot 10^{-1}$	$2.77 \cdot 10^{-1}$	$1.98 \cdot 10^{-1}$	$7.44 \cdot 10^{-2}$	$3.84 \cdot 10^{-2}$	$1.89 \cdot 10^{-2}$
	0.2	3.20	2.34	1.65	1.18	$6.59 \cdot 10^{-1}$	$4.09 \cdot 10^{-1}$	$2.76 \cdot 10^{-1}$	$1.97 \cdot 10^{-1}$	$7.42 \cdot 10^{-2}$	$3.84 \cdot 10^{-2}$	$1.89 \cdot 10^{-2}$
	0.4	3.10	2.21	1.55	1.12	$6.35 \cdot 10^{-1}$	$3.99 \cdot 10^{-1}$	$2.71 \cdot 10^{-1}$	$1.94 \cdot 10^{-1}$	$7.38 \cdot 10^{-2}$	$3.82 \cdot 10^{-2}$	$1.89 \cdot 10^{-2}$
	0.6	2.87	1.98	1.40	1.02	$5.96 \cdot 10^{-1}$	$3.82 \cdot 10^{-1}$	$2.62 \cdot 10^{-1}$	$1.90 \cdot 10^{-1}$	$7.31 \cdot 10^{-2}$	$3.81 \cdot 10^{-2}$	$1.89 \cdot 10^{-2}$
	0.8	2.38	1.63	1.19	$8.96 \cdot 10^{-2}$	$5.46 \cdot 10^{-2}$	$3.60 \cdot 10^{-2}$	$2.51 \cdot 10^{-2}$	$1.84 \cdot 10^{-1}$	$7.22 \cdot 10^{-2}$	$3.78 \cdot 10^{-2}$	$1.88 \cdot 10^{-2}$
	1.0	1.49	1.21	$9.54 \cdot 10^{-2}$	$7.56 \cdot 10^{-2}$	$4.90 \cdot 10^{-2}$	$3.34 \cdot 10^{-2}$	$2.38 \cdot 10^{-2}$	$1.77 \cdot 10^{-1}$	$7.10 \cdot 10^{-2}$	$3.75 \cdot 10^{-2}$	$1.87 \cdot 10^{-2}$
	1.2	$6.81 \cdot 10^{-1}$	$8.07 \cdot 10^{-1}$	$7.28 \cdot 10^{-1}$	$6.18 \cdot 10^{-1}$	$4.31 \cdot 10^{-1}$	$3.05 \cdot 10^{-1}$	$2.23 \cdot 10^{-1}$	$1.68 \cdot 10^{-1}$	$6.96 \cdot 10^{-2}$	$3.71 \cdot 10^{-2}$	$1.86 \cdot 10^{-2}$
	1.4	$2.96 \cdot 10^{-1}$	$5.15 \cdot 10^{-1}$	$5.37 \cdot 10^{-1}$	$4.92 \cdot 10^{-1}$	$3.73 \cdot 10^{-1}$	$2.76 \cdot 10^{-1}$	$2.07 \cdot 10^{-1}$	$1.59 \cdot 10^{-1}$	$6.80 \cdot 10^{-2}$	$3.66 \cdot 10^{-2}$	$1.85 \cdot 10^{-2}$
	1.6	$1.37 \cdot 10^{-1}$	$3.27 \cdot 10^{-1}$	$3.90 \cdot 10^{-1}$	$3.86 \cdot 10^{-1}$	$3.19 \cdot 10^{-1}$	$2.48 \cdot 10^{-1}$	$1.91 \cdot 10^{-1}$	$1.50 \cdot 10^{-1}$	$6.62 \cdot 10^{-2}$	$3.61 \cdot 10^{-2}$	$1.84 \cdot 10^{-2}$
	1.8	$6.70 \cdot 10^{-2}$	$2.10 \cdot 10^{-1}$	$2.83 \cdot 10^{-1}$	$3.01 \cdot 10^{-1}$	$2.71 \cdot 10^{-1}$	$2.20 \cdot 10^{-1}$	$1.75 \cdot 10^{-1}$	$1.40 \cdot 10^{-1}$	$6.43 \cdot 10^{-2}$	$3.55 \cdot 10^{-2}$	$1.82 \cdot 10^{-2}$
	2.0	$3.43 \cdot 10^{-2}$	$1.38 \cdot 10^{-1}$	$2.07 \cdot 10^{-1}$	$2.35 \cdot 10^{-1}$	$2.28 \cdot 10^{-1}$	$1.95 \cdot 10^{-1}$	$1.60 \cdot 10^{-1}$	$1.30 \cdot 10^{-1}$	$6.23 \cdot 10^{-2}$	$3.49 \cdot 10^{-2}$	$1.80 \cdot 10^{-2}$
1.0	0	1.36	1.16	$8.86 \cdot 10^{-1}$	$6.64 \cdot 10^{-1}$	$3.86 \cdot 10^{-1}$	$2.44 \cdot 10^{-1}$	$1.65 \cdot 10^{-1}$	$1.19 \cdot 10^{-1}$	$4.49 \cdot 10^{-2}$	$2.32 \cdot 10^{-2}$	$1.15 \cdot 10^{-2}$
	0.2	1.35	1.14	$8.68 \cdot 10^{-1}$	$6.51 \cdot 10^{-1}$	$3.90 \cdot 10^{-1}$	$2.41 \cdot 10^{-1}$	$1.64 \cdot 10^{-1}$	$1.18 \cdot 10^{-1}$	$4.48 \cdot 10^{-2}$	$2.32 \cdot 10^{-2}$	$1.15 \cdot 10^{-2}$
	0.4	1.33	1.08	$8.14 \cdot 10^{-1}$	$6.12 \cdot 10^{-1}$	$3.64 \cdot 10^{-1}$	$2.34 \cdot 10^{-1}$	$1.60 \cdot 10^{-1}$	$1.16 \cdot 10^{-1}$	$4.45 \cdot 10^{-2}$	$2.31 \cdot 10^{-2}$	$1.14 \cdot 10^{-2}$
	0.6	1.26	$9.61 \cdot 10^{-1}$	$7.23 \cdot 10^{-1}$	$5.51 \cdot 10^{-1}$	$3.38 \cdot 10^{-1}$	$2.22 \cdot 10^{-1}$	$1.54 \cdot 10^{-1}$	$1.13 \cdot 10^{-1}$	$4.40 \cdot 10^{-2}$	$2.30 \cdot 10^{-2}$	$1.14 \cdot 10^{-2}$
	0.8	1.06	$7.78 \cdot 10^{-1}$	$6.01 \cdot 10^{-1}$	$4.73 \cdot 10^{-1}$	$3.05 \cdot 10^{-1}$	$2.06 \cdot 10^{-1}$	$1.47 \cdot 10^{-1}$	$1.08 \cdot 10^{-1}$	$4.33 \cdot 10^{-2}$	$2.28 \cdot 10^{-2}$	$1.14 \cdot 10^{-2}$
	1.0	$6.20 \cdot 10^{-1}$	$5.43 \cdot 10^{-1}$	$4.62 \cdot 10^{-1}$	$3.87 \cdot 10^{-1}$	$2.67 \cdot 10^{-1}$	$1.89 \cdot 10^{-1}$	$1.37 \cdot 10^{-1}$	$1.03 \cdot 10^{-1}$	$4.25 \cdot 10^{-2}$	$2.26 \cdot 10^{-2}$	$1.13 \cdot 10^{-2}$
	1.2	$2.15 \cdot 10^{-1}$	$3.26 \cdot 10^{-1}$	$3.30 \cdot 10^{-1}$	$3.02 \cdot 10^{-1}$	$2.29 \cdot 10^{-1}$	$1.70 \cdot 10^{-1}$	$1.27 \cdot 10^{-1}$	$9.75 \cdot 10^{-2}$	$4.14 \cdot 10^{-2}$	$2.23 \cdot 10^{-2}$	$1.12 \cdot 10^{-2}$
	1.4	$6.42 \cdot 10^{-2}$	$1.79 \cdot 10^{-1}$	$2.24 \cdot 10^{-1}$	$2.27 \cdot 10^{-1}$	$1.92 \cdot 10^{-1}$	$1.50 \cdot 10^{-1}$	$1.16 \cdot 10^{-1}$	$9.12 \cdot 10^{-2}$	$4.03 \cdot 10^{-2}$	$2.19 \cdot 10^{-2}$	$1.11 \cdot 10^{-2}$
	1.6	$1.98 \cdot 10^{-2}$	$9.51 \cdot 10^{-2}$	$1.47 \cdot 10^{-1}$	$1.66 \cdot 10^{-1}$	$1.58 \cdot 10^{-1}$	$1.31 \cdot 10^{-1}$	$1.06 \cdot 10^{-1}$	$8.47 \cdot 10^{-2}$	$3.90 \cdot 10^{-2}$	$2.16 \cdot 10^{-2}$	$1.10 \cdot 10^{-2}$
	1.8	$6.43 \cdot 10^{-3}$	$5.07 \cdot 10^{-2}$	$9.52 \cdot 10^{-2}$	$1.20 \cdot 10^{-1}$	$1.28 \cdot 10^{-1}$	$1.14 \cdot 10^{-1}$	$9.48 \cdot 10^{-2}$	$7.80 \cdot 10^{-2}$	$3.77 \cdot 10^{-2}$	$2.12 \cdot 10^{-2}$	$1.09 \cdot 10^{-2}$
	2.0	$2.18 \cdot 10^{-3}$	$2.74 \cdot 10^{-2}$	$6.17 \cdot 10^{-2}$	$8.65 \cdot 10^{-2}$	$1.03 \cdot 10^{-1}$	$9.76 \cdot 10^{-2}$	$8.46 \cdot 10^{-2}$	$7.14 \cdot 10^{-2}$	$3.62 \cdot 10^{-2}$	$2.07 \cdot 10^{-2}$	$1.08 \cdot 10^{-2}$

$\mu t$	$\ell$	P										
		0.25	0.50	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	5.0	7.0	10.0
2.0	0	$3.07 \cdot 10^{-1}$	$2.94 \cdot 10^{-1}$	$2.53 \cdot 10^{-1}$	$2.05 \cdot 10^{-1}$	$1.29 \cdot 10^{-1}$	$8.47 \cdot 10^{-2}$	$5.85 \cdot 10^{-2}$	$4.25 \cdot 10^{-2}$	$1.64 \cdot 10^{-2}$	$8.50 \cdot 10^{-3}$	$4.21 \cdot 10^{-3}$
	0.2	$3.07 \cdot 10^{-1}$	$2.91 \cdot 10^{-1}$	$2.48 \cdot 10^{-1}$	$2.01 \cdot 10^{-1}$	$1.27 \cdot 10^{-1}$	$8.36 \cdot 10^{-2}$	$5.80 \cdot 10^{-2}$	$4.22 \cdot 10^{-2}$	$1.63 \cdot 10^{-2}$	$8.49 \cdot 10^{-3}$	$4.21 \cdot 10^{-3}$
	0.4	$3.06 \cdot 10^{-1}$	$2.79 \cdot 10^{-1}$	$2.33 \cdot 10^{-1}$	$1.87 \cdot 10^{-1}$	$1.20 \cdot 10^{-1}$	$8.03 \cdot 10^{-2}$	$5.63 \cdot 10^{-2}$	$4.12 \cdot 10^{-2}$	$1.62 \cdot 10^{-2}$	$8.45 \cdot 10^{-3}$	$4.20 \cdot 10^{-3}$
	0.6	$2.99 \cdot 10^{-1}$	$2.53 \cdot 10^{-1}$	$2.05 \cdot 10^{-1}$	$1.66 \cdot 10^{-1}$	$1.10 \cdot 10^{-1}$	$7.51 \cdot 10^{-2}$	$5.36 \cdot 10^{-2}$	$3.98 \cdot 10^{-2}$	$1.59 \cdot 10^{-2}$	$8.38 \cdot 10^{-3}$	$4.18 \cdot 10^{-3}$
	0.8	$2.64 \cdot 10^{-1}$	$2.03 \cdot 10^{-1}$	$1.66 \cdot 10^{-1}$	$1.38 \cdot 10^{-1}$	$9.61 \cdot 10^{-2}$	$6.85 \cdot 10^{-2}$	$5.01 \cdot 10^{-2}$	$3.78 \cdot 10^{-2}$	$1.56 \cdot 10^{-2}$	$8.29 \cdot 10^{-3}$	$4.16 \cdot 10^{-3}$
	1.0	$1.43 \cdot 10^{-1}$	$1.32 \cdot 10^{-1}$	$1.20 \cdot 10^{-1}$	$1.07 \cdot 10^{-1}$	$8.12 \cdot 10^{-2}$	$6.09 \cdot 10^{-2}$	$4.60 \cdot 10^{-2}$	$3.55 \cdot 10^{-2}$	$1.52 \cdot 10^{-2}$	$8.18 \cdot 10^{-3}$	$4.13 \cdot 10^{-3}$
	1.2	$3.17 \cdot 10^{-2}$	$6.62 \cdot 10^{-2}$	$7.67 \cdot 10^{-2}$	$7.69 \cdot 10^{-2}$	$6.62 \cdot 10^{-2}$	$5.29 \cdot 10^{-2}$	$4.16 \cdot 10^{-2}$	$3.28 \cdot 10^{-2}$	$1.47 \cdot 10^{-2}$	$8.04 \cdot 10^{-3}$	$4.09 \cdot 10^{-3}$
	1.4	$4.73 \cdot 10^{-3}$	$2.77 \cdot 10^{-2}$	$4.45 \cdot 10^{-2}$	$5.22 \cdot 10^{-2}$	$5.22 \cdot 10^{-2}$	$4.50 \cdot 10^{-2}$	$3.69 \cdot 10^{-2}$	$3.00 \cdot 10^{-2}$	$1.42 \cdot 10^{-2}$	$7.88 \cdot 10^{-3}$	$4.05 \cdot 10^{-3}$
	1.6	$6.80 \cdot 10^{-4}$	$1.06 \cdot 10^{-2}$	$2.42 \cdot 10^{-2}$	$3.38 \cdot 10^{-2}$	$4.61 \cdot 10^{-2}$	$3.75 \cdot 10^{-2}$	$3.24 \cdot 10^{-2}$	$2.72 \cdot 10^{-2}$	$1.36 \cdot 10^{-2}$	$7.70 \cdot 10^{-3}$	$4.00 \cdot 10^{-3}$
	1.8	$1.01 \cdot 10^{-4}$	$3.96 \cdot 10^{-3}$	$1.27 \cdot 10^{-2}$	$2.12 \cdot 10^{-2}$	$3.01 \cdot 10^{-2}$	$3.05 \cdot 10^{-2}$	$2.80 \cdot 10^{-2}$	$2.43 \cdot 10^{-2}$	$1.30 \cdot 10^{-2}$	$7.50 \cdot 10^{-3}$	$3.95 \cdot 10^{-3}$
2.0	$1.54 \cdot 10^{-5}$	$1.47 \cdot 10^{-3}$	$6.56 \cdot 10^{-3}$	$1.30 \cdot 10^{-2}$	$2.22 \cdot 10^{-2}$	$2.49 \cdot 10^{-2}$	$2.40 \cdot 10^{-2}$	$2.16 \cdot 10^{-2}$	$1.23 \cdot 10^{-2}$	$7.29 \cdot 10^{-3}$	$3.90 \cdot 10^{-3}$	
3.0	0	$8.20 \cdot 10^{-2}$	$8.10 \cdot 10^{-2}$	$7.48 \cdot 10^{-2}$	$6.43 \cdot 10^{-2}$	$4.35 \cdot 10^{-2}$	$2.95 \cdot 10^{-2}$	$2.08 \cdot 10^{-2}$	$1.52 \cdot 10^{-2}$	$5.96 \cdot 10^{-3}$	$3.11 \cdot 10^{-3}$	$1.54 \cdot 10^{-3}$
	0.2	$8.20 \cdot 10^{-2}$	$8.05 \cdot 10^{-2}$	$7.35 \cdot 10^{-2}$	$6.28 \cdot 10^{-2}$	$4.26 \cdot 10^{-2}$	$2.90 \cdot 10^{-2}$	$2.05 \cdot 10^{-2}$	$1.51 \cdot 10^{-2}$	$5.93 \cdot 10^{-3}$	$3.11 \cdot 10^{-3}$	$1.54 \cdot 10^{-3}$
	0.4	$8.19 \cdot 10^{-2}$	$7.85 \cdot 10^{-2}$	$6.94 \cdot 10^{-2}$	$5.85 \cdot 10^{-2}$	$4.00 \cdot 10^{-2}$	$2.77 \cdot 10^{-2}$	$1.98 \cdot 10^{-2}$	$1.47 \cdot 10^{-2}$	$5.87 \cdot 10^{-3}$	$3.09 \cdot 10^{-3}$	$1.54 \cdot 10^{-3}$
	0.6	$8.13 \cdot 10^{-2}$	$7.26 \cdot 10^{-2}$	$6.14 \cdot 10^{-2}$	$5.14 \cdot 10^{-2}$	$3.59 \cdot 10^{-2}$	$2.55 \cdot 10^{-2}$	$1.67 \cdot 10^{-2}$	$1.40 \cdot 10^{-2}$	$5.76 \cdot 10^{-3}$	$3.06 \cdot 10^{-3}$	$1.53 \cdot 10^{-3}$
	0.8	$7.44 \cdot 10^{-2}$	$5.88 \cdot 10^{-2}$	$4.89 \cdot 10^{-2}$	$4.18 \cdot 10^{-2}$	$3.03 \cdot 10^{-2}$	$2.29 \cdot 10^{-2}$	$1.72 \cdot 10^{-2}$	$1.32 \cdot 10^{-2}$	$5.62 \cdot 10^{-3}$	$3.02 \cdot 10^{-3}$	$1.52 \cdot 10^{-3}$
	1.0	$3.86 \cdot 10^{-2}$	$3.63 \cdot 10^{-2}$	$3.38 \cdot 10^{-2}$	$3.10 \cdot 10^{-2}$	$2.52 \cdot 10^{-2}$	$1.98 \cdot 10^{-2}$	$1.55 \cdot 10^{-2}$	$1.22 \cdot 10^{-2}$	$5.44 \cdot 10^{-3}$	$2.96 \cdot 10^{-3}$	$1.51 \cdot 10^{-3}$
	1.2	$5.76 \cdot 10^{-3}$	$1.57 \cdot 10^{-2}$	$1.98 \cdot 10^{-2}$	$2.10 \cdot 10^{-2}$	$1.97 \cdot 10^{-2}$	$1.67 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$	$1.11 \cdot 10^{-2}$	$5.22 \cdot 10^{-3}$	$2.90 \cdot 10^{-3}$	$1.49 \cdot 10^{-3}$
	1.4	$4.47 \cdot 10^{-4}$	$5.11 \cdot 10^{-3}$	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$1.30 \cdot 10^{-2}$	$1.47 \cdot 10^{-2}$	$1.37 \cdot 10^{-2}$	$1.18 \cdot 10^{-2}$	$9.94 \cdot 10^{-3}$	$4.99 \cdot 10^{-3}$	$2.83 \cdot 10^{-3}$	$1.47 \cdot 10^{-3}$
	1.6	$3.07 \cdot 10^{-5}$	$1.44 \cdot 10^{-3}$	$4.58 \cdot 10^{-3}$	$7.50 \cdot 10^{-3}$	$1.06 \cdot 10^{-2}$	$1.09 \cdot 10^{-2}$	$1.00 \cdot 10^{-2}$	$8.77 \cdot 10^{-3}$	$4.73 \cdot 10^{-3}$	$2.75 \cdot 10^{-3}$	$1.45 \cdot 10^{-3}$
	1.8	$2.10 \cdot 10^{-6}$	$3.80 \cdot 10^{-4}$	$1.96 \cdot 10^{-3}$	$4.11 \cdot 10^{-3}$	$7.36 \cdot 10^{-3}$	$8.52 \cdot 10^{-3}$	$8.37 \cdot 10^{-3}$	$7.65 \cdot 10^{-3}$	$4.46 \cdot 10^{-3}$	$2.66 \cdot 10^{-3}$	$1.43 \cdot 10^{-3}$
2.0	$1.48 \cdot 10^{-7}$	$9.82 \cdot 10^{-5}$	$8.13 \cdot 10^{-4}$	$2.18 \cdot 10^{-3}$	$4.99 \cdot 10^{-3}$	$6.52 \cdot 10^{-3}$	$6.88 \cdot 10^{-3}$	$6.58 \cdot 10^{-3}$	$4.18 \cdot 10^{-3}$	$2.57 \cdot 10^{-3}$	$1.40 \cdot 10^{-3}$	
5.0	0	$7.21 \cdot 10^{-3}$	$7.21 \cdot 10^{-3}$	$7.05 \cdot 10^{-3}$	$6.55 \cdot 10^{-3}$	$4.98 \cdot 10^{-3}$	$3.59 \cdot 10^{-3}$	$2.61 \cdot 10^{-3}$	$1.96 \cdot 10^{-3}$	$7.91 \cdot 10^{-4}$	$4.17 \cdot 10^{-4}$	$2.08 \cdot 10^{-4}$
	0.2	$7.21 \cdot 10^{-3}$	$7.20 \cdot 10^{-3}$	$6.98 \cdot 10^{-3}$	$6.42 \cdot 10^{-3}$	$4.86 \cdot 10^{-3}$	$3.52 \cdot 10^{-3}$	$2.57 \cdot 10^{-3}$	$1.93 \cdot 10^{-3}$	$7.87 \cdot 10^{-4}$	$4.16 \cdot 10^{-4}$	$2.08 \cdot 10^{-4}$
	0.4	$7.21 \cdot 10^{-3}$	$7.14 \cdot 10^{-3}$	$6.71 \cdot 10^{-3}$	$6.02 \cdot 10^{-3}$	$4.52 \cdot 10^{-3}$	$3.31 \cdot 10^{-3}$	$2.46 \cdot 10^{-3}$	$1.86 \cdot 10^{-3}$	$7.75 \cdot 10^{-4}$	$4.12 \cdot 10^{-4}$	$2.07 \cdot 10^{-4}$
	0.6	$7.21 \cdot 10^{-3}$	$6.83 \cdot 10^{-3}$	$6.06 \cdot 10^{-3}$	$5.28 \cdot 10^{-3}$	$3.98 \cdot 10^{-3}$	$2.99 \cdot 10^{-3}$	$2.27 \cdot 10^{-3}$	$1.76 \cdot 10^{-3}$	$7.55 \cdot 10^{-4}$	$4.07 \cdot 10^{-4}$	$2.05 \cdot 10^{-4}$
	0.8	$6.89 \cdot 10^{-3}$	$5.69 \cdot 10^{-3}$	$4.82 \cdot 10^{-3}$	$4.21 \cdot 10^{-3}$	$3.30 \cdot 10^{-3}$	$2.60 \cdot 10^{-3}$	$2.04 \cdot 10^{-3}$	$1.62 \cdot 10^{-3}$	$7.29 \cdot 10^{-4}$	$3.99 \cdot 10^{-4}$	$2.04 \cdot 10^{-4}$
	1.0	$3.42 \cdot 10^{-3}$	$3.29 \cdot 10^{-3}$	$3.12 \cdot 10^{-3}$	$2.95 \cdot 10^{-3}$	$2.57 \cdot 10^{-3}$	$2.16 \cdot 10^{-3}$	$1.78 \cdot 10^{-3}$	$1.45 \cdot 10^{-3}$	$6.97 \cdot 10^{-4}$	$3.90 \cdot 10^{-4}$	$2.01 \cdot 10^{-4}$
	1.2	$2.47 \cdot 10^{-4}$	$1.09 \cdot 10^{-3}$	$1.57 \cdot 10^{-3}$	$1.79 \cdot 10^{-3}$	$1.87 \cdot 10^{-3}$	$1.72 \cdot 10^{-3}$	$1.50 \cdot 10^{-3}$	$1.28 \cdot 10^{-3}$	$6.60 \cdot 10^{-4}$	$3.78 \cdot 10^{-4}$	$1.98 \cdot 10^{-4}$
	1.4	$5.42 \cdot 10^{-6}$	$2.23 \cdot 10^{-4}$	$6.19 \cdot 10^{-4}$	$9.40 \cdot 10^{-4}$	$1.27 \cdot 10^{-3}$	$1.32 \cdot 10^{-3}$	$1.24 \cdot 10^{-3}$	$1.10 \cdot 10^{-3}$	$6.19 \cdot 10^{-4}$	$3.65 \cdot 10^{-4}$	$1.95 \cdot 10^{-4}$
	1.6	$8.70 \cdot 10^{-8}$	$3.46 \cdot 10^{-6}$	$2.03 \cdot 10^{-4}$	$4.38 \cdot 10^{-4}$	$8.10 \cdot 10^{-4}$	$9.72 \cdot 10^{-4}$	$9.88 \cdot 10^{-4}$	$9.29 \cdot 10^{-4}$	$5.75 \cdot 10^{-4}$	$3.51 \cdot 10^{-4}$	$1.91 \cdot 10^{-4}$
	1.8	$1.30 \cdot 10^{-9}$	$4.67 \cdot 10^{-8}$	$5.92 \cdot 10^{-5}$	$1.86 \cdot 10^{-4}$	$4.90 \cdot 10^{-4}$	$6.92 \cdot 10^{-4}$	$7.71 \cdot 10^{-4}$	$7.68 \cdot 10^{-4}$	$5.30 \cdot 10^{-4}$	$3.36 \cdot 10^{-4}$	$1.86 \cdot 10^{-4}$
2.0	$1.93 \cdot 10^{-11}$	$5.90 \cdot 10^{-7}$	$1.60 \cdot 10^{-5}$	$7.40 \cdot 10^{-5}$	$2.84 \cdot 10^{-4}$	$4.77 \cdot 10^{-4}$	$5.88 \cdot 10^{-4}$	$6.24 \cdot 10^{-4}$	$4.84 \cdot 10^{-4}$	$3.20 \cdot 10^{-4}$	$1.82 \cdot 10^{-4}$	

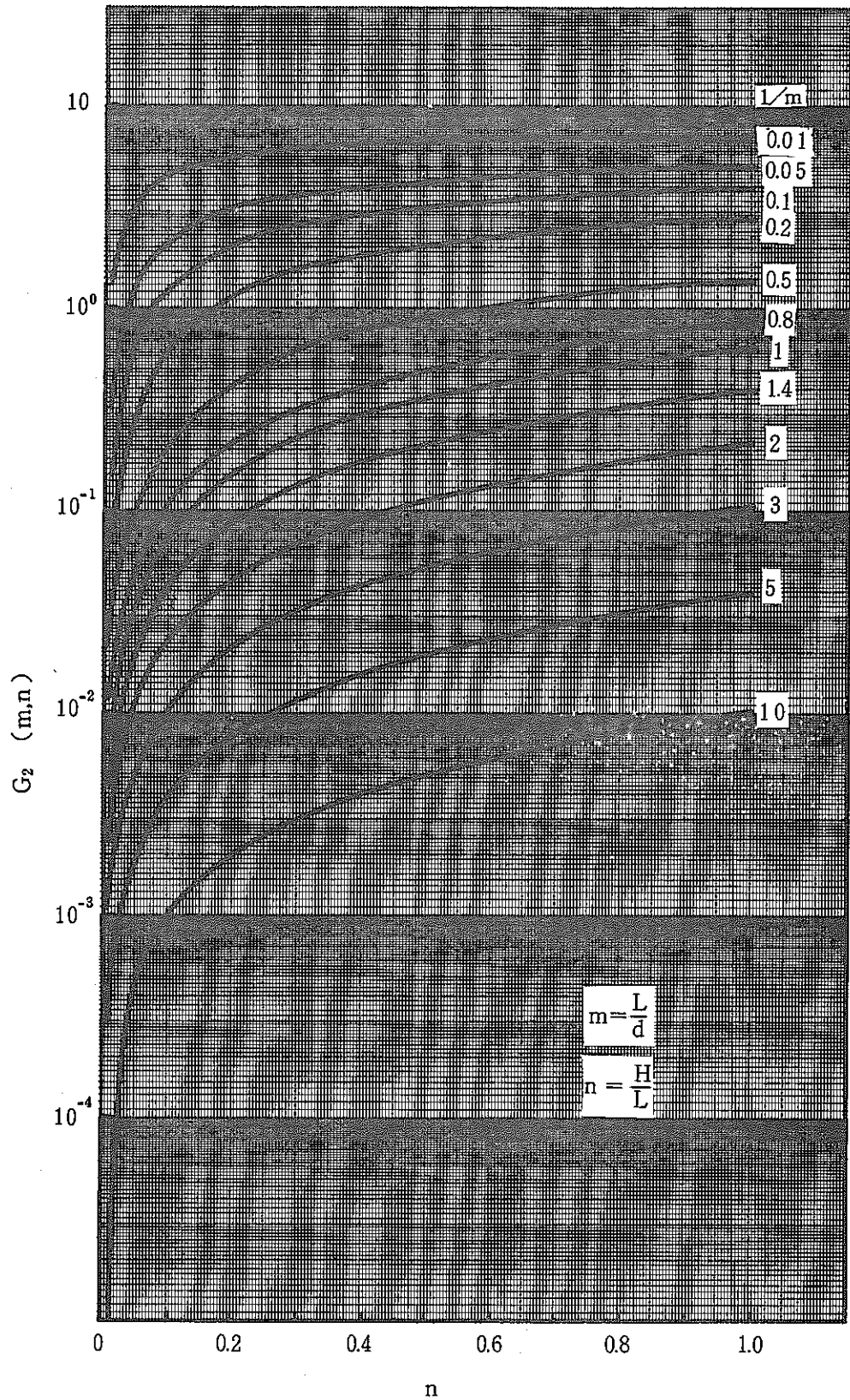


图 2-6  $G_2(m, n)$  线图

表 2 - 4  $G_3(m, n, \mu t)$ 

$\mu t$	1/m	n						
		0.01	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0.5	0.05	$1.27 \cdot 10^{-1}$	$7.34 \cdot 10^{-1}$	$8.50 \cdot 10^{-1}$	$8.77 \cdot 10^{-1}$	$8.79 \cdot 10^{-1}$	$8.79 \cdot 10^{-1}$	$8.79 \cdot 10^{-1}$
	0.1	$6.42 \cdot 10^{-2}$	$5.18 \cdot 10^{-1}$	$7.34 \cdot 10^{-1}$	$8.50 \cdot 10^{-1}$	$8.72 \cdot 10^{-1}$	$8.77 \cdot 10^{-1}$	$8.78 \cdot 10^{-1}$
	0.2	$3.20 \cdot 10^{-2}$	$2.99 \cdot 10^{-1}$	$5.14 \cdot 10^{-1}$	$7.27 \cdot 10^{-1}$	$8.07 \cdot 10^{-1}$	$8.39 \cdot 10^{-1}$	$8.53 \cdot 10^{-1}$
	0.5	$1.17 \cdot 10^{-2}$	$1.15 \cdot 10^{-1}$	$2.23 \cdot 10^{-1}$	$3.97 \cdot 10^{-1}$	$5.14 \cdot 10^{-1}$	$5.90 \cdot 10^{-1}$	$6.38 \cdot 10^{-1}$
	1.0	$4.49 \cdot 10^{-3}$	$4.47 \cdot 10^{-2}$	$8.85 \cdot 10^{-2}$	$1.70 \cdot 10^{-1}$	$2.41 \cdot 10^{-1}$	$2.99 \cdot 10^{-1}$	$3.45 \cdot 10^{-1}$
	2.0	$1.38 \cdot 10^{-3}$	$1.38 \cdot 10^{-2}$	$2.75 \cdot 10^{-2}$	$5.44 \cdot 10^{-2}$	$8.00 \cdot 10^{-2}$	$1.04 \cdot 10^{-1}$	$1.26 \cdot 10^{-1}$
	5.0	$2.39 \cdot 10^{-4}$	$2.39 \cdot 10^{-3}$	$4.77 \cdot 10^{-3}$	$9.52 \cdot 10^{-3}$	$1.42 \cdot 10^{-2}$	$1.89 \cdot 10^{-2}$	$2.35 \cdot 10^{-2}$
1.0	0.05	$6.47 \cdot 10^{-2}$	$3.21 \cdot 10^{-1}$	$3.43 \cdot 10^{-1}$	$3.45 \cdot 10^{-1}$	$3.45 \cdot 10^{-1}$	$3.45 \cdot 10^{-1}$	$3.45 \cdot 10^{-1}$
	0.1	$3.27 \cdot 10^{-2}$	$2.47 \cdot 10^{-1}$	$3.21 \cdot 10^{-1}$	$3.43 \cdot 10^{-1}$	$3.44 \cdot 10^{-1}$	$3.45 \cdot 10^{-1}$	$3.45 \cdot 10^{-1}$
	0.2	$1.64 \cdot 10^{-2}$	$1.50 \cdot 10^{-1}$	$2.47 \cdot 10^{-1}$	$3.20 \cdot 10^{-1}$	$3.38 \cdot 10^{-1}$	$3.42 \cdot 10^{-1}$	$3.44 \cdot 10^{-1}$
	0.5	$6.30 \cdot 10^{-3}$	$6.20 \cdot 10^{-2}$	$1.19 \cdot 10^{-1}$	$2.05 \cdot 10^{-1}$	$2.57 \cdot 10^{-1}$	$2.86 \cdot 10^{-1}$	$3.02 \cdot 10^{-1}$
	1.0	$2.57 \cdot 10^{-3}$	$2.56 \cdot 10^{-2}$	$5.06 \cdot 10^{-2}$	$9.65 \cdot 10^{-2}$	$1.35 \cdot 10^{-1}$	$1.65 \cdot 10^{-1}$	$1.87 \cdot 10^{-1}$
	2.0	$8.22 \cdot 10^{-4}$	$8.21 \cdot 10^{-3}$	$1.64 \cdot 10^{-2}$	$3.23 \cdot 10^{-2}$	$4.73 \cdot 10^{-2}$	$6.12 \cdot 10^{-2}$	$7.38 \cdot 10^{-2}$
	5.0	$1.44 \cdot 10^{-4}$	$1.44 \cdot 10^{-3}$	$2.88 \cdot 10^{-3}$	$5.75 \cdot 10^{-3}$	$8.60 \cdot 10^{-3}$	$1.14 \cdot 10^{-2}$	$1.42 \cdot 10^{-2}$
2.0	0.05	$1.90 \cdot 10^{-2}$	$7.57 \cdot 10^{-2}$	$7.68 \cdot 10^{-2}$	$7.68 \cdot 10^{-2}$	$7.68 \cdot 10^{-2}$	$7.68 \cdot 10^{-2}$	$7.68 \cdot 10^{-2}$
	0.1	$9.66 \cdot 10^{-3}$	$6.50 \cdot 10^{-2}$	$7.57 \cdot 10^{-2}$	$7.68 \cdot 10^{-2}$	$7.68 \cdot 10^{-2}$	$7.68 \cdot 10^{-2}$	$7.68 \cdot 10^{-2}$
	0.2	$4.85 \cdot 10^{-3}$	$4.28 \cdot 10^{-2}$	$6.50 \cdot 10^{-2}$	$7.57 \cdot 10^{-2}$	$7.67 \cdot 10^{-2}$	$7.68 \cdot 10^{-2}$	$7.68 \cdot 10^{-2}$
	0.5	$1.92 \cdot 10^{-3}$	$1.88 \cdot 10^{-2}$	$3.54 \cdot 10^{-2}$	$5.79 \cdot 10^{-2}$	$6.85 \cdot 10^{-2}$	$7.29 \cdot 10^{-2}$	$7.46 \cdot 10^{-2}$
	1.0	$8.54 \cdot 10^{-4}$	$8.49 \cdot 10^{-3}$	$1.67 \cdot 10^{-2}$	$3.13 \cdot 10^{-2}$	$4.26 \cdot 10^{-2}$	$5.07 \cdot 10^{-2}$	$5.61 \cdot 10^{-2}$
	2.0	$2.92 \cdot 10^{-4}$	$2.91 \cdot 10^{-3}$	$5.79 \cdot 10^{-3}$	$1.14 \cdot 10^{-2}$	$1.66 \cdot 10^{-2}$	$2.12 \cdot 10^{-2}$	$2.53 \cdot 10^{-2}$
	5.0	$5.27 \cdot 10^{-5}$	$5.27 \cdot 10^{-4}$	$1.05 \cdot 10^{-3}$	$2.10 \cdot 10^{-3}$	$3.13 \cdot 10^{-3}$	$4.15 \cdot 10^{-3}$	$5.14 \cdot 10^{-3}$
4.0	0.05	$1.96 \cdot 10^{-3}$	$5.93 \cdot 10^{-3}$	$5.94 \cdot 10^{-3}$	$5.94 \cdot 10^{-3}$	$5.94 \cdot 10^{-3}$	$5.94 \cdot 10^{-3}$	$5.94 \cdot 10^{-3}$
	0.1	$1.01 \cdot 10^{-3}$	$5.62 \cdot 10^{-3}$	$5.93 \cdot 10^{-3}$	$5.94 \cdot 10^{-3}$	$5.94 \cdot 10^{-3}$	$5.94 \cdot 10^{-3}$	$5.94 \cdot 10^{-3}$
	0.2	$5.06 \cdot 10^{-4}$	$4.16 \cdot 10^{-3}$	$5.62 \cdot 10^{-3}$	$5.93 \cdot 10^{-3}$	$5.94 \cdot 10^{-3}$	$5.94 \cdot 10^{-3}$	$5.94 \cdot 10^{-3}$
	0.5	$2.03 \cdot 10^{-4}$	$1.96 \cdot 10^{-3}$	$3.55 \cdot 10^{-3}$	$5.28 \cdot 10^{-3}$	$5.79 \cdot 10^{-3}$	$5.90 \cdot 10^{-3}$	$5.93 \cdot 10^{-3}$
	1.0	$9.71 \cdot 10^{-5}$	$9.63 \cdot 10^{-4}$	$1.87 \cdot 10^{-3}$	$3.40 \cdot 10^{-3}$	$4.42 \cdot 10^{-3}$	$5.03 \cdot 10^{-3}$	$5.34 \cdot 10^{-3}$
	2.0	$3.68 \cdot 10^{-5}$	$3.67 \cdot 10^{-4}$	$7.30 \cdot 10^{-4}$	$1.42 \cdot 10^{-3}$	$2.04 \cdot 10^{-3}$	$2.56 \cdot 10^{-3}$	$2.99 \cdot 10^{-3}$
	5.0	$7.05 \cdot 10^{-6}$	$7.04 \cdot 10^{-5}$	$1.41 \cdot 10^{-4}$	$2.80 \cdot 10^{-4}$	$4.17 \cdot 10^{-4}$	$5.50 \cdot 10^{-4}$	$6.78 \cdot 10^{-4}$
8.0	0.05	$2.61 \cdot 10^{-5}$	$5.92 \cdot 10^{-5}$	$5.92 \cdot 10^{-5}$	$5.92 \cdot 10^{-5}$	$5.92 \cdot 10^{-5}$	$5.92 \cdot 10^{-5}$	$5.92 \cdot 10^{-5}$
	0.1	$1.37 \cdot 10^{-5}$	$5.87 \cdot 10^{-5}$	$5.92 \cdot 10^{-5}$	$5.92 \cdot 10^{-5}$	$5.92 \cdot 10^{-5}$	$5.92 \cdot 10^{-5}$	$5.92 \cdot 10^{-5}$
	0.2	$6.91 \cdot 10^{-6}$	$5.01 \cdot 10^{-5}$	$5.87 \cdot 10^{-5}$	$5.92 \cdot 10^{-5}$	$5.92 \cdot 10^{-5}$	$5.92 \cdot 10^{-5}$	$5.92 \cdot 10^{-5}$
	0.5	$2.78 \cdot 10^{-6}$	$2.61 \cdot 10^{-5}$	$4.44 \cdot 10^{-5}$	$5.75 \cdot 10^{-5}$	$5.91 \cdot 10^{-5}$	$5.92 \cdot 10^{-5}$	$5.92 \cdot 10^{-5}$
	1.0	$1.38 \cdot 10^{-6}$	$1.36 \cdot 10^{-5}$	$2.60 \cdot 10^{-5}$	$4.41 \cdot 10^{-5}$	$5.34 \cdot 10^{-5}$	$5.71 \cdot 10^{-5}$	$5.83 \cdot 10^{-5}$
	2.0	$5.95 \cdot 10^{-7}$	$5.93 \cdot 10^{-6}$	$1.17 \cdot 10^{-5}$	$2.24 \cdot 10^{-5}$	$3.12 \cdot 10^{-5}$	$3.79 \cdot 10^{-5}$	$4.27 \cdot 10^{-5}$
	5.0	$1.26 \cdot 10^{-7}$	$1.26 \cdot 10^{-6}$	$2.51 \cdot 10^{-6}$	$4.98 \cdot 10^{-6}$	$7.37 \cdot 10^{-6}$	$9.66 \cdot 10^{-6}$	$1.18 \cdot 10^{-5}$

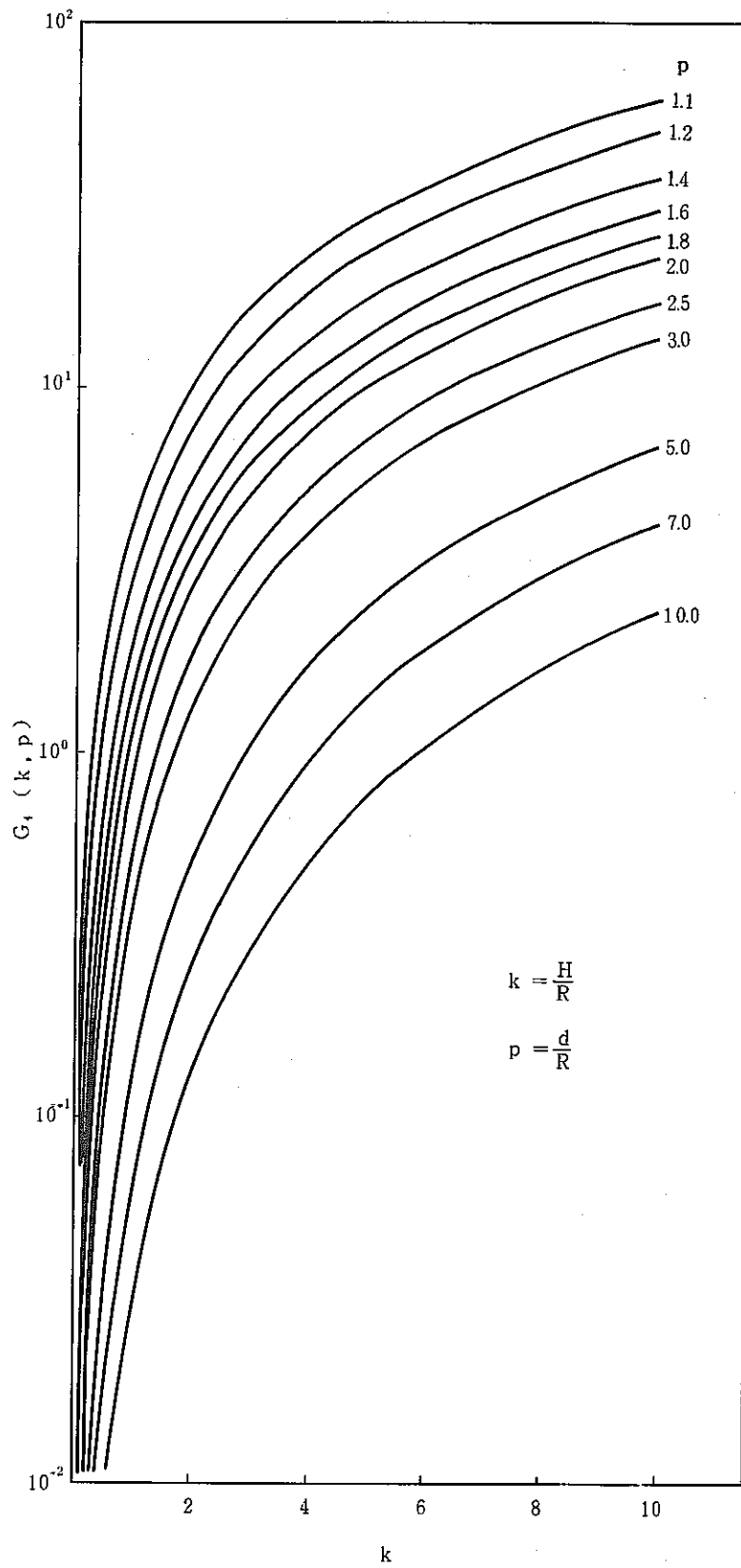


图 2-7  $G_s(k, p)$  线图

表 2-5  $W(k, p, \mu_s R, b_1)$

k	$\mu_s R$	$b_1$	p				
			1.25	1.5	3	5	10
1	0	0	2.868	1.778	$3.742 \cdot 10^{-1}$	$1.290 \cdot 10^{-1}$	$3.162 \cdot 10^{-2}$
		1.0	$5.953 \cdot 10^{-1}$	$4.734 \cdot 10^{-1}$	$1.304 \cdot 10^{-1}$	$4.662 \cdot 10^{-2}$	$1.159 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$1.472 \cdot 10^{-1}$	$1.327 \cdot 10^{-1}$	$4.551 \cdot 10^{-2}$	$1.685 \cdot 10^{-2}$	$4.244 \cdot 10^{-3}$
		4.0	$1.182 \cdot 10^{-2}$	$1.167 \cdot 10^{-2}$	$5.557 \cdot 10^{-3}$	$2.203 \cdot 10^{-3}$	$5.695 \cdot 10^{-4}$
		7.0	$3.725 \cdot 10^{-4}$	$3.667 \cdot 10^{-4}$	$2.388 \cdot 10^{-4}$	$1.042 \cdot 10^{-4}$	$2.880 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$1.377 \cdot 10^{-5}$	$1.321 \cdot 10^{-5}$	$1.035 \cdot 10^{-5}$	$4.932 \cdot 10^{-6}$	$1.377 \cdot 10^{-6}$
2	0	0	3.669	2.484	$6.685 \cdot 10^{-1}$	$2.476 \cdot 10^{-1}$	$6.262 \cdot 10^{-2}$
		1.0	$6.881 \cdot 10^{-1}$	$5.847 \cdot 10^{-1}$	$2.206 \cdot 10^{-1}$	$8.771 \cdot 10^{-2}$	$2.282 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$1.673 \cdot 10^{-1}$	$1.562 \cdot 10^{-1}$	$7.333 \cdot 10^{-2}$	$3.109 \cdot 10^{-2}$	$8.319 \cdot 10^{-3}$
		4.0	$1.316 \cdot 10^{-2}$	$1.323 \cdot 10^{-2}$	$8.258 \cdot 10^{-3}$	$3.915 \cdot 10^{-3}$	$1.105 \cdot 10^{-3}$
		7.0	$4.028 \cdot 10^{-4}$	$4.036 \cdot 10^{-4}$	$3.243 \cdot 10^{-4}$	$1.758 \cdot 10^{-4}$	$5.356 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$1.454 \cdot 10^{-5}$	$1.423 \cdot 10^{-5}$	$1.318 \cdot 10^{-5}$	$7.944 \cdot 10^{-6}$	$2.596 \cdot 10^{-6}$
3	0	0	4.049	2.840	$8.776 \cdot 10^{-1}$	$3.501 \cdot 10^{-1}$	$9.241 \cdot 10^{-2}$
		1.0	7.205	$6.228 \cdot 10^{-1}$	$2.728 \cdot 10^{-1}$	$1.205 \cdot 10^{-1}$	$3.341 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$1.728 \cdot 10^{-1}$	$1.631 \cdot 10^{-1}$	$8.668 \cdot 10^{-2}$	$4.158 \cdot 10^{-2}$	$1.208 \cdot 10^{-2}$
		4.0	$1.338 \cdot 10^{-2}$	$1.353 \cdot 10^{-2}$	$9.194 \cdot 10^{-3}$	$4.998 \cdot 10^{-3}$	$1.581 \cdot 10^{-3}$
		7.0	$4.050 \cdot 10^{-4}$	$4.074 \cdot 10^{-4}$	$3.442 \cdot 10^{-4}$	$2.123 \cdot 10^{-4}$	$7.493 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$1.457 \cdot 10^{-5}$	$1.428 \cdot 10^{-5}$	$1.366 \cdot 10^{-5}$	$9.189 \cdot 10^{-6}$	$3.557 \cdot 10^{-6}$
5	0	0	4.408	3.337	1.132	$5.049 \cdot 10^{-1}$	$1.468 \cdot 10^{-1}$
		1.0	$7.382 \cdot 10^{-1}$	$6.448 \cdot 10^{-1}$	$3.178 \cdot 10^{-1}$	$1.625 \cdot 10^{-1}$	$5.186 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$1.748 \cdot 10^{-1}$	$1.658 \cdot 10^{-1}$	$9.538 \cdot 10^{-2}$	$5.312 \cdot 10^{-2}$	$1.834 \cdot 10^{-2}$
		4.0	$1.342 \cdot 10^{-2}$	$1.380 \cdot 10^{-2}$	$9.586 \cdot 10^{-3}$	$5.893 \cdot 10^{-3}$	$2.302 \cdot 10^{-3}$
		7.0	$4.052 \cdot 10^{-4}$	$4.078 \cdot 10^{-4}$	$3.492 \cdot 10^{-4}$	$2.328 \cdot 10^{-4}$	$1.032 \cdot 10^{-4}$
		10.0	$1.457 \cdot 10^{-5}$	$1.428 \cdot 10^{-5}$	$1.373 \cdot 10^{-5}$	$9.693 \cdot 10^{-6}$	$4.676 \cdot 10^{-6}$
7	0	0	4.575	3.350	1.272	$6.084 \cdot 10^{-1}$	$1.932 \cdot 10^{-1}$
		1.0	$7.414 \cdot 10^{-1}$	$6.492 \cdot 10^{-1}$	$3.323 \cdot 10^{-1}$	$1.837 \cdot 10^{-1}$	$6.623 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$1.750 \cdot 10^{-1}$	$1.660 \cdot 10^{-1}$	$9.719 \cdot 10^{-2}$	$5.758 \cdot 10^{-2}$	$2.280 \cdot 10^{-2}$
		4.0	$1.342 \cdot 10^{-2}$	$1.360 \cdot 10^{-2}$	$9.625 \cdot 10^{-3}$	$6.103 \cdot 10^{-3}$	$2.733 \cdot 10^{-3}$
		7.0	$4.052 \cdot 10^{-4}$	$4.087 \cdot 10^{-4}$	$3.493 \cdot 10^{-4}$	$2.353 \cdot 10^{-4}$	$1.163 \cdot 10^{-4}$
		10.0	$1.457 \cdot 10^{-5}$	$1.428 \cdot 10^{-5}$	$1.374 \cdot 10^{-5}$	$9.726 \cdot 10^{-6}$	$5.078 \cdot 10^{-6}$
10	0	0	4.705	3.479	1.389	$7.063 \cdot 10^{-1}$	$2.481 \cdot 10^{-1}$
		1.0	$7.423 \cdot 10^{-1}$	$6.503 \cdot 10^{-1}$	$3.386 \cdot 10^{-1}$	$1.973 \cdot 10^{-1}$	$8.097 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$1.750 \cdot 10^{-1}$	$1.661 \cdot 10^{-1}$	$9.766 \cdot 10^{-2}$	$4.154 \cdot 10^{-2}$	$2.677 \cdot 10^{-2}$
		4.0	$1.342 \cdot 10^{-2}$	$1.360 \cdot 10^{-2}$	$9.623 \cdot 10^{-3}$	$6.154 \cdot 10^{-3}$	$3.026 \cdot 10^{-3}$
		7.0	$4.052 \cdot 10^{-4}$	$4.087 \cdot 10^{-4}$	$3.493 \cdot 10^{-4}$	$2.356 \cdot 10^{-4}$	$1.224 \cdot 10^{-4}$
		10.0	$1.457 \cdot 10^{-5}$	$1.428 \cdot 10^{-5}$	$1.374 \cdot 10^{-5}$	$9.728 \cdot 10^{-6}$	$5.207 \cdot 10^{-6}$
1	1	0	2.296	1.417	$2.786 \cdot 10^{-1}$	$9.244 \cdot 10^{-2}$	$2.195 \cdot 10^{-2}$
		1.0	$4.462 \cdot 10^{-1}$	$3.630 \cdot 10^{-1}$	$9.658 \cdot 10^{-2}$	$3.336 \cdot 10^{-2}$	$8.038 \cdot 10^{-3}$
		2.0	$1.053 \cdot 10^{-1}$	$9.823 \cdot 10^{-2}$	$3.352 \cdot 10^{-2}$	$1.204 \cdot 10^{-2}$	$2.944 \cdot 10^{-3}$
		4.0	$7.963 \cdot 10^{-3}$	$8.139 \cdot 10^{-3}$	$4.046 \cdot 10^{-3}$	$1.568 \cdot 10^{-3}$	$3.949 \cdot 10^{-4}$
		7.0	$2.411 \cdot 10^{-4}$	$2.397 \cdot 10^{-4}$	$1.711 \cdot 10^{-4}$	$7.382 \cdot 10^{-5}$	$1.939 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$8.742 \cdot 10^{-6}$	$8.846 \cdot 10^{-6}$	$7.297 \cdot 10^{-6}$	$3.478 \cdot 10^{-6}$	$9.523 \cdot 10^{-7}$
3	1	0	2.858	2.031	$6.240 \cdot 10^{-1}$	$2.465 \cdot 10^{-1}$	$6.389 \cdot 10^{-2}$
		1.0	$4.688 \cdot 10^{-1}$	$4.160 \cdot 10^{-1}$	$1.898 \cdot 10^{-1}$	$8.425 \cdot 10^{-2}$	$2.307 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$1.086 \cdot 10^{-1}$	$1.056 \cdot 10^{-1}$	$5.931 \cdot 10^{-2}$	$2.890 \cdot 10^{-2}$	$8.334 \cdot 10^{-3}$
		4.0	$8.140 \cdot 10^{-3}$	$8.434 \cdot 10^{-3}$	$6.144 \cdot 10^{-3}$	$3.434 \cdot 10^{-3}$	$1.088 \cdot 10^{-3}$
		7.0	$2.447 \cdot 10^{-4}$	$2.449 \cdot 10^{-4}$	$2.254 \cdot 10^{-4}$	$1.439 \cdot 10^{-4}$	$5.140 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$8.830 \cdot 10^{-6}$	$8.425 \cdot 10^{-6}$	$8.831 \cdot 10^{-6}$	$6.662 \cdot 10^{-6}$	$2.433 \cdot 10^{-6}$
5	1	0	2.960	2.169	$7.736 \cdot 10^{-1}$	$3.476 \cdot 10^{-1}$	$1.008 \cdot 10^{-1}$
		1.0	$4.693 \cdot 10^{-1}$	$4.177 \cdot 10^{-1}$	$2.117 \cdot 10^{-1}$	$1.106 \cdot 10^{-1}$	$3.552 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$1.087 \cdot 10^{-1}$	$1.057 \cdot 10^{-1}$	$6.279 \cdot 10^{-2}$	$3.583 \cdot 10^{-2}$	$1.235 \cdot 10^{-2}$
		4.0	$8.141 \cdot 10^{-3}$	$8.436 \cdot 10^{-3}$	$6.252 \cdot 10^{-3}$	$3.929 \cdot 10^{-3}$	$1.566 \cdot 10^{-3}$
		7.0	$2.447 \cdot 10^{-4}$	$2.449 \cdot 10^{-4}$	$2.262 \cdot 10^{-4}$	$1.539 \cdot 10^{-4}$	$6.989 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$8.830 \cdot 10^{-6}$	$8.426 \cdot 10^{-6}$	$8.841 \cdot 10^{-6}$	$6.378 \cdot 10^{-6}$	$3.150 \cdot 10^{-6}$

k	$\mu_{sR}$	$b_1$	P				
			1. 25	1. 5	3	5	10
10	1	0	3.025	2.263	$9.027 \cdot 10^{-1}$	$4.657 \cdot 10^{-1}$	$1.666 \cdot 10^{-1}$
		1.0	$4.693 \cdot 10^{-1}$	$4.178 \cdot 10^{-1}$	$2.182 \cdot 10^{-1}$	$1.289 \cdot 10^{-1}$	$5.413 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$1.087 \cdot 10^{-1}$	$1.057 \cdot 10^{-1}$	$6.325 \cdot 10^{-2}$	$3.891 \cdot 10^{-2}$	$1.784 \cdot 10^{-2}$
		4.0	$8.141 \cdot 10^{-3}$	$8.436 \cdot 10^{-3}$	$6.256 \cdot 10^{-3}$	$4.031 \cdot 10^{-3}$	$2.009 \cdot 10^{-3}$
		7.0	$2.447 \cdot 10^{-4}$	$2.449 \cdot 10^{-4}$	$2.262 \cdot 10^{-4}$	$1.547 \cdot 10^{-4}$	$8.113 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$8.830 \cdot 10^{-6}$	$4.426 \cdot 10^{-6}$	$8.841 \cdot 10^{-6}$	$6.387 \cdot 10^{-6}$	$3.459 \cdot 10^{-6}$
1	2	0	2.108	1.311	$2.520 \cdot 10^{-1}$	$8.251 \cdot 10^{-2}$	$1.933 \cdot 10^{-2}$
		1.0	$4.047 \cdot 10^{-1}$	$3.330 \cdot 10^{-1}$	$8.728 \cdot 10^{-2}$	$2.977 \cdot 10^{-2}$	$7.081 \cdot 10^{-3}$
		2.0	$9.520 \cdot 10^{-2}$	$8.951 \cdot 10^{-2}$	$3.025 \cdot 10^{-2}$	$1.079 \cdot 10^{-2}$	$2.592 \cdot 10^{-3}$
		4.0	$7.216 \cdot 10^{-3}$	$7.366 \cdot 10^{-3}$	$3.646 \cdot 10^{-3}$	$1.399 \cdot 10^{-3}$	$3.477 \cdot 10^{-4}$
		7.0	$2.195 \cdot 10^{-4}$	$2.155 \cdot 10^{-4}$	$1.538 \cdot 10^{-4}$	$6.581 \cdot 10^{-5}$	$1.707 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$7.976 \cdot 10^{-6}$	$7.448 \cdot 10^{-6}$	$6.546 \cdot 10^{-6}$	$3.099 \cdot 10^{-6}$	$8.387 \cdot 10^{-7}$
3	2	0	2.549	1.835	$5.592 \cdot 10^{-1}$	$2.195 \cdot 10^{-1}$	$5.627 \cdot 10^{-2}$
		1.0	$4.131 \cdot 10^{-1}$	$3.697 \cdot 10^{-1}$	$1.690 \cdot 10^{-1}$	$7.485 \cdot 10^{-2}$	$2.031 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$9.537 \cdot 10^{-2}$	$9.340 \cdot 10^{-2}$	$5.253 \cdot 10^{-2}$	$2.562 \cdot 10^{-2}$	$7.335 \cdot 10^{-3}$
		4.0	$7.239 \cdot 10^{-3}$	$7.440 \cdot 10^{-3}$	$5.406 \cdot 10^{-3}$	$3.034 \cdot 10^{-3}$	$9.572 \cdot 10^{-4}$
		7.0	$2.199 \cdot 10^{-4}$	$2.163 \cdot 10^{-4}$	$1.874 \cdot 10^{-4}$	$1.266 \cdot 10^{-4}$	$4.517 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$7.986 \cdot 10^{-6}$	$7.465 \cdot 10^{-6}$	$7.724 \cdot 10^{-6}$	$5.406 \cdot 10^{-6}$	$2.136 \cdot 10^{-6}$
5	2	0	2.632	1.952	$6.909 \cdot 10^{-1}$	$3.090 \cdot 10^{-1}$	$8.878 \cdot 10^{-2}$
		1.0	$4.131 \cdot 10^{-1}$	$3.704 \cdot 10^{-1}$	$1.872 \cdot 10^{-1}$	$9.791 \cdot 10^{-2}$	$3.125 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$9.588 \cdot 10^{-2}$	$9.341 \cdot 10^{-2}$	$5.522 \cdot 10^{-2}$	$3.160 \cdot 10^{-2}$	$1.101 \cdot 10^{-2}$
		4.0	$7.239 \cdot 10^{-3}$	$7.440 \cdot 10^{-3}$	$5.475 \cdot 10^{-3}$	$3.448 \cdot 10^{-3}$	$1.375 \cdot 10^{-3}$
		7.0	$2.199 \cdot 10^{-4}$	$2.163 \cdot 10^{-4}$	$1.978 \cdot 10^{-4}$	$1.346 \cdot 10^{-4}$	$6.122 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$7.986 \cdot 10^{-6}$	$7.465 \cdot 10^{-6}$	$7.727 \cdot 10^{-6}$	$5.570 \cdot 10^{-6}$	$2.756 \cdot 10^{-6}$
10	2	0	$2.690 \cdot 10^{-1}$	2.038	$8.070 \cdot 10^{-1}$	$4.147 \cdot 10^{-1}$	$1.469 \cdot 10^{-1}$
		1.0	$4.131 \cdot 10^{-1}$	$3.703 \cdot 10^{-1}$	$1.925 \cdot 10^{-1}$	$1.138 \cdot 10^{-1}$	$4.795 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$9.588 \cdot 10^{-2}$	$9.341 \cdot 10^{-2}$	$5.550 \cdot 10^{-2}$	$3.419 \cdot 10^{-2}$	$1.565 \cdot 10^{-2}$
		4.0	$7.239 \cdot 10^{-3}$	$7.440 \cdot 10^{-3}$	$5.477 \cdot 10^{-3}$	$3.529 \cdot 10^{-3}$	$1.757 \cdot 10^{-3}$
		7.0	$2.199 \cdot 10^{-4}$	$2.163 \cdot 10^{-4}$	$1.978 \cdot 10^{-4}$	$1.351 \cdot 10^{-4}$	$7.079 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$7.986 \cdot 10^{-6}$	$7.465 \cdot 10^{-6}$	$7.727 \cdot 10^{-6}$	$5.575 \cdot 10^{-6}$	$3.008 \cdot 10^{-6}$
1	3	0	2.021	1.266	$2.416 \cdot 10^{-1}$	$7.879 \cdot 10^{-2}$	$1.832 \cdot 10^{-2}$
		1.0	$3.883 \cdot 10^{-1}$	$3.212 \cdot 10^{-1}$	$8.367 \cdot 10^{-2}$	$2.843 \cdot 10^{-2}$	$6.710 \cdot 10^{-3}$
		2.0	$9.177 \cdot 10^{-2}$	$8.637 \cdot 10^{-2}$	$2.901 \cdot 10^{-2}$	$1.026 \cdot 10^{-2}$	$2.457 \cdot 10^{-3}$
		4.0	$7.027 \cdot 10^{-3}$	$7.116 \cdot 10^{-3}$	$3.497 \cdot 10^{-3}$	$1.336 \cdot 10^{-3}$	$3.296 \cdot 10^{-4}$
		7.0	$2.155 \cdot 10^{-4}$	$2.095 \cdot 10^{-4}$	$1.475 \cdot 10^{-4}$	$6.289 \cdot 10^{-5}$	$1.619 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$7.852 \cdot 10^{-6}$	$7.274 \cdot 10^{-6}$	$6.286 \cdot 10^{-6}$	$2.962 \cdot 10^{-6}$	$7.952 \cdot 10^{-6}$
3	3	0	2.422	1.763	$5.348 \cdot 10^{-1}$	$2.096 \cdot 10^{-1}$	$5.333 \cdot 10^{-2}$
		1.0	$3.935 \cdot 10^{-1}$	$3.535 \cdot 10^{-1}$	$1.511 \cdot 10^{-1}$	$7.080 \cdot 10^{-2}$	$1.893 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$9.202 \cdot 10^{-2}$	$8.946 \cdot 10^{-2}$	$4.692 \cdot 10^{-2}$	$2.422 \cdot 10^{-2}$	$6.836 \cdot 10^{-3}$
		4.0	$7.031 \cdot 10^{-3}$	$7.663 \cdot 10^{-3}$	$4.832 \cdot 10^{-3}$	$2.864 \cdot 10^{-3}$	$8.917 \cdot 10^{-4}$
		7.0	$2.155 \cdot 10^{-4}$	$2.097 \cdot 10^{-4}$	$1.773 \cdot 10^{-4}$	$1.193 \cdot 10^{-4}$	$4.208 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$7.848 \cdot 10^{-6}$	$7.277 \cdot 10^{-6}$	$6.982 \cdot 10^{-6}$	$5.093 \cdot 10^{-6}$	$1.989 \cdot 10^{-6}$
5	3	0	2.501	1.870	$6.604 \cdot 10^{-1}$	$2.952 \cdot 10^{-1}$	$8.418 \cdot 10^{-2}$
		1.0	$3.935 \cdot 10^{-1}$	$3.539 \cdot 10^{-1}$	$1.783 \cdot 10^{-1}$	$9.336 \cdot 10^{-2}$	$2.962 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$9.202 \cdot 10^{-2}$	$8.946 \cdot 10^{-2}$	$5.253 \cdot 10^{-2}$	$3.010 \cdot 10^{-2}$	$1.044 \cdot 10^{-2}$
		4.0	$7.030 \cdot 10^{-3}$	$7.163 \cdot 10^{-3}$	$5.204 \cdot 10^{-3}$	$3.279 \cdot 10^{-3}$	$1.302 \cdot 10^{-3}$
		7.0	$2.155 \cdot 10^{-4}$	$2.097 \cdot 10^{-4}$	$1.882 \cdot 10^{-4}$	$1.279 \cdot 10^{-4}$	$5.975 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$7.853 \cdot 10^{-6}$	$7.277 \cdot 10^{-6}$	$7.363 \cdot 10^{-6}$	$5.291 \cdot 10^{-6}$	$2.607 \cdot 10^{-6}$
10	3	0	2.555	1.953	$7.719 \cdot 10^{-1}$	$3.972 \cdot 10^{-1}$	$1.394 \cdot 10^{-1}$
		1.0	$3.935 \cdot 10^{-1}$	$3.540 \cdot 10^{-1}$	$1.833 \cdot 10^{-1}$	$1.078 \cdot 10^{-1}$	$4.448 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$9.203 \cdot 10^{-2}$	$8.947 \cdot 10^{-2}$	$5.282 \cdot 10^{-2}$	$3.229 \cdot 10^{-2}$	$1.461 \cdot 10^{-2}$
		4.0	$7.030 \cdot 10^{-3}$	$7.163 \cdot 10^{-3}$	$5.206 \cdot 10^{-3}$	$3.323 \cdot 10^{-3}$	$1.637 \cdot 10^{-3}$
		7.0	$2.155 \cdot 10^{-4}$	$2.097 \cdot 10^{-4}$	$1.882 \cdot 10^{-4}$	$1.271 \cdot 10^{-4}$	$6.584 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$7.853 \cdot 10^{-6}$	$7.277 \cdot 10^{-6}$	$7.363 \cdot 10^{-6}$	$5.243 \cdot 10^{-6}$	$2.795 \cdot 10^{-6}$



k	$\mu_s R$	$b_1$	p				
			1.25	1.5	3	5	10
1	5	0	1.938	1.223	$2.325 \cdot 10^{-1}$	$7.594 \cdot 10^{-2}$	$1.743 \cdot 10^{-2}$
		1.0	$3.740 \cdot 10^{-1}$	$3.107 \cdot 10^{-1}$	$8.056 \cdot 10^{-2}$	$2.740 \cdot 10^{-2}$	$6.386 \cdot 10^{-3}$
		2.0	$8.919 \cdot 10^{-2}$	$8.376 \cdot 10^{-2}$	$2.799 \cdot 10^{-2}$	$9.894 \cdot 10^{-3}$	$2.338 \cdot 10^{-3}$
		4.0	$6.925 \cdot 10^{-3}$	$6.946 \cdot 10^{-3}$	$3.372 \cdot 10^{-3}$	$1.289 \cdot 10^{-3}$	$3.137 \cdot 10^{-4}$
		7.0	$2.142 \cdot 10^{-4}$	$2.063 \cdot 10^{-4}$	$1.425 \cdot 10^{-4}$	$6.070 \cdot 10^{-5}$	$1.541 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$7.823 \cdot 10^{-6}$	$7.204 \cdot 10^{-6}$	$6.083 \cdot 10^{-6}$	$2.860 \cdot 10^{-6}$	$7.573 \cdot 10^{-7}$
3	5	0	2.311	1.689	$5.135 \cdot 10^{-1}$	$2.021 \cdot 10^{-1}$	$5.075 \cdot 10^{-2}$
		1.0	$3.777 \cdot 10^{-1}$	$3.399 \cdot 10^{-1}$	$1.546 \cdot 10^{-1}$	$6.884 \cdot 10^{-2}$	$1.832 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$8.929 \cdot 10^{-2}$	$8.639 \cdot 10^{-2}$	$4.798 \cdot 10^{-2}$	$2.354 \cdot 10^{-2}$	$6.615 \cdot 10^{-3}$
		4.0	$6.925 \cdot 10^{-3}$	$6.979 \cdot 10^{-3}$	$4.932 \cdot 10^{-3}$	$2.784 \cdot 10^{-3}$	$8.629 \cdot 10^{-4}$
		7.0	$2.142 \cdot 10^{-4}$	$2.064 \cdot 10^{-4}$	$1.800 \cdot 10^{-4}$	$1.160 \cdot 10^{-4}$	$4.072 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$7.823 \cdot 10^{-6}$	$7.204 \cdot 10^{-6}$	$7.085 \cdot 10^{-6}$	$4.950 \cdot 10^{-6}$	$1.925 \cdot 10^{-6}$
5	5	0	2.387	1.797	$6.337 \cdot 10^{-1}$	$2.850 \cdot 10^{-1}$	$8.012 \cdot 10^{-5}$
		1.0	$3.777 \cdot 10^{-1}$	$3.402 \cdot 10^{-1}$	$1.708 \cdot 10^{-1}$	$9.002 \cdot 10^{-5}$	$2.819 \cdot 10^{-5}$
		2.0	$8.929 \cdot 10^{-2}$	$8.640 \cdot 10^{-2}$	$5.028 \cdot 10^{-2}$	$2.900 \cdot 10^{-5}$	$9.934 \cdot 10^{-3}$
		4.0	$2.925 \cdot 10^{-3}$	$6.979 \cdot 10^{-3}$	$4.981 \cdot 10^{-3}$	$3.156 \cdot 10^{-3}$	$1.238 \cdot 10^{-3}$
		7.0	$2.142 \cdot 10^{-4}$	$2.064 \cdot 10^{-4}$	$1.807 \cdot 10^{-4}$	$1.230 \cdot 10^{-4}$	$5.510 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$7.823 \cdot 10^{-6}$	$7.204 \cdot 10^{-6}$	$7.089 \cdot 10^{-6}$	$5.089 \cdot 10^{-6}$	$2.479 \cdot 10^{-6}$
10	5	0	2.445	1.878	$7.405 \cdot 10^{-1}$	$3.847 \cdot 10^{-1}$	$1.328 \cdot 10^{-1}$
		1.0	$3.777 \cdot 10^{-1}$	$3.403 \cdot 10^{-1}$	$1.754 \cdot 10^{-1}$	$1.048 \cdot 10^{-1}$	$4.296 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$8.979 \cdot 10^{-2}$	$8.640 \cdot 10^{-2}$	$5.054 \cdot 10^{-2}$	$3.137 \cdot 10^{-2}$	$1.411 \cdot 10^{-2}$
		4.0	$6.925 \cdot 10^{-3}$	$6.979 \cdot 10^{-3}$	$4.987 \cdot 10^{-3}$	$3.226 \cdot 10^{-3}$	$1.581 \cdot 10^{-3}$
		7.0	$2.142 \cdot 10^{-4}$	$2.064 \cdot 10^{-4}$	$1.807 \cdot 10^{-4}$	$1.234 \cdot 10^{-4}$	$6.358 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$7.823 \cdot 10^{-6}$	$7.204 \cdot 10^{-6}$	$7.089 \cdot 10^{-6}$	$5.092 \cdot 10^{-6}$	$2.700 \cdot 10^{-6}$
1	10	0	1.868	1.181	$2.232 \cdot 10^{-1}$	$7.434 \cdot 10^{-2}$	$1.661 \cdot 10^{-2}$
		1.0	$3.627 \cdot 10^{-1}$	$3.007 \cdot 10^{-1}$	$7.740 \cdot 10^{-2}$	$2.683 \cdot 10^{-2}$	$6.085 \cdot 10^{-3}$
		2.0	$8.779 \cdot 10^{-2}$	$8.134 \cdot 10^{-2}$	$2.686 \cdot 10^{-2}$	$4.961 \cdot 10^{-3}$	$2.229 \cdot 10^{-3}$
		4.0	$6.865 \cdot 10^{-3}$	$6.802 \cdot 10^{-3}$	$3.247 \cdot 10^{-3}$	$1.267 \cdot 10^{-3}$	$2.991 \cdot 10^{-4}$
		7.0	$2.138 \cdot 10^{-4}$	$2.041 \cdot 10^{-4}$	$1.376 \cdot 10^{-4}$	$5.947 \cdot 10^{-5}$	$1.470 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$7.820 \cdot 10^{-6}$	$7.168 \cdot 10^{-6}$	$5.887 \cdot 10^{-6}$	$2.804 \cdot 10^{-6}$	$7.224 \cdot 10^{-6}$
3	10	0	2.225	1.626	$4.914 \cdot 10^{-1}$	$1.980 \cdot 10^{-1}$	$4.837 \cdot 10^{-2}$
		1.0	$3.657 \cdot 10^{-1}$	$3.274 \cdot 10^{-1}$	$1.479 \cdot 10^{-1}$	$6.744 \cdot 10^{-2}$	$1.746 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$8.734 \cdot 10^{-2}$	$8.366 \cdot 10^{-2}$	$4.088 \cdot 10^{-2}$	$2.306 \cdot 10^{-2}$	$6.304 \cdot 10^{-3}$
		4.0	$6.865 \cdot 10^{-3}$	$6.829 \cdot 10^{-3}$	$4.721 \cdot 10^{-3}$	$2.726 \cdot 10^{-3}$	$8.224 \cdot 10^{-4}$
		7.0	$2.138 \cdot 10^{-4}$	$2.041 \cdot 10^{-4}$	$1.733 \cdot 10^{-4}$	$1.135 \cdot 10^{-4}$	$3.881 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$7.820 \cdot 10^{-6}$	$7.168 \cdot 10^{-6}$	$6.831 \cdot 10^{-6}$	$4.846 \cdot 10^{-6}$	$1.835 \cdot 10^{-6}$
5	10	0	2.301	1.732	$6.056 \cdot 10^{-1}$	$2.796 \cdot 10^{-1}$	$7.638 \cdot 10^{-2}$
		1.0	$3.657 \cdot 10^{-1}$	$3.277 \cdot 10^{-1}$	$1.630 \cdot 10^{-1}$	$8.826 \cdot 10^{-2}$	$2.687 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$8.734 \cdot 10^{-2}$	$8.366 \cdot 10^{-2}$	$4.800 \cdot 10^{-2}$	$2.841 \cdot 10^{-2}$	$4.880 \cdot 10^{-4}$
		4.0	$6.865 \cdot 10^{-3}$	$6.829 \cdot 10^{-3}$	$4.769 \cdot 10^{-3}$	$3.089 \cdot 10^{-3}$	$1.180 \cdot 10^{-3}$
		7.0	$2.138 \cdot 10^{-4}$	$2.041 \cdot 10^{-4}$	$1.735 \cdot 10^{-4}$	$1.203 \cdot 10^{-4}$	$5.249 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$7.820 \cdot 10^{-6}$	$7.168 \cdot 10^{-6}$	$6.832 \cdot 10^{-6}$	$4.980 \cdot 10^{-6}$	$2.361 \cdot 10^{-6}$
10	10	0	2.359	1.812	$7.077 \cdot 10^{-1}$	$3.786 \cdot 10^{-1}$	$1.269 \cdot 10^{-1}$
		1.0	$3.657 \cdot 10^{-1}$	$3.277 \cdot 10^{-1}$	$1.673 \cdot 10^{-1}$	$5.213 \cdot 10^{-2}$	$4.099 \cdot 10^{-2}$
		2.0	$8.734 \cdot 10^{-2}$	$8.366 \cdot 10^{-2}$	$4.823 \cdot 10^{-2}$	$3.075 \cdot 10^{-2}$	$1.345 \cdot 10^{-2}$
		4.0	$6.865 \cdot 10^{-3}$	$6.879 \cdot 10^{-3}$	$4.770 \cdot 10^{-3}$	$3.159 \cdot 10^{-3}$	$1.506 \cdot 10^{-3}$
		7.0	$2.138 \cdot 10^{-4}$	$2.041 \cdot 10^{-4}$	$1.735 \cdot 10^{-4}$	$1.208 \cdot 10^{-4}$	$6.053 \cdot 10^{-5}$
		10.0	$7.820 \cdot 10^{-6}$	$7.168 \cdot 10^{-6}$	$6.832 \cdot 10^{-6}$	$4.984 \cdot 10^{-6}$	$2.570 \cdot 10^{-6}$

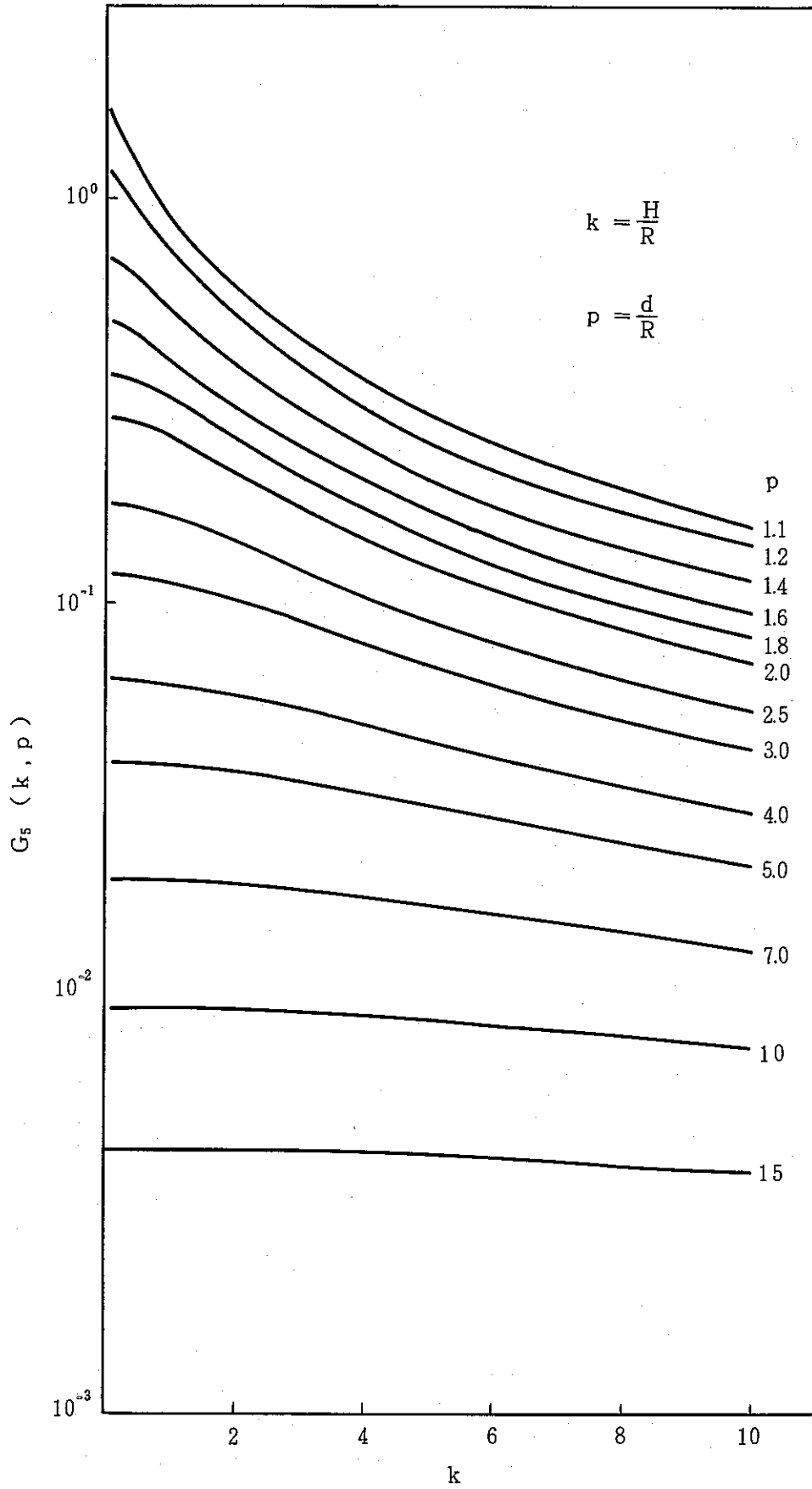


图 2-8  $G_5(k, p)$  线图

表 2-6 G(k, p,  $\mu_s R, b_1$ )

$b_1$	p				
	1.25	1.5	3	5	10
$\mu_s R = 0, k = 1$					
0	1.084	7.366	$1.777 \cdot 10^{-1}$	$6.323 \cdot 10^{-2}$	$1.573 \cdot 10^{-2}$
1	$2.972 \cdot 10^{-1}$	$2.265 \cdot 10^{-1}$	$6.301 \cdot 10^{-2}$	$2.298 \cdot 10^{-2}$	$5.571 \cdot 10^{-3}$
2	$8.707 \cdot 10^{-2}$	$7.130 \cdot 10^{-2}$	$2.239 \cdot 10^{-2}$	$8.355 \cdot 10^{-3}$	$2.117 \cdot 10^{-3}$
4	$8.331 \cdot 10^{-3}$	$7.434 \cdot 10^{-3}$	$2.831 \cdot 10^{-3}$	$1.104 \cdot 10^{-3}$	$2.848 \cdot 10^{-4}$
7	$2.850 \cdot 10^{-4}$	$2.724 \cdot 10^{-4}$	$1.279 \cdot 10^{-4}$	$5.307 \cdot 10^{-5}$	$1.406 \cdot 10^{-5}$
10	$1.701 \cdot 10^{-5}$	$1.064 \cdot 10^{-5}$	$5.809 \cdot 10^{-6}$	$2.552 \cdot 10^{-6}$	$6.937 \cdot 10^{-7}$
20	$2.608 \cdot 10^{-10}$	$2.738 \cdot 10^{-10}$	$2.007 \cdot 10^{-10}$	$1.037 \cdot 10^{-10}$	$3.060 \cdot 10^{-11}$
$\mu_s R = 0, k = 3$					
0	1.693	1.275	$4.247 \cdot 10^{-1}$	$1.724 \cdot 10^{-1}$	$4.599 \cdot 10^{-2}$
1	$3.842 \cdot 10^{-1}$	$3.222 \cdot 10^{-1}$	$1.356 \cdot 10^{-1}$	$5.978 \cdot 10^{-2}$	$1.665 \cdot 10^{-2}$
2	$1.041 \cdot 10^{-1}$	$9.171 \cdot 10^{-2}$	$4.406 \cdot 10^{-2}$	$2.078 \cdot 10^{-2}$	$6.031 \cdot 10^{-3}$
4	$9.244 \cdot 10^{-3}$	$8.635 \cdot 10^{-3}$	$4.842 \cdot 10^{-3}$	$2.532 \cdot 10^{-3}$	$7.915 \cdot 10^{-4}$
7	$3.012 \cdot 10^{-4}$	$2.958 \cdot 10^{-4}$	$1.893 \cdot 10^{-4}$	$1.095 \cdot 10^{-4}$	$3.767 \cdot 10^{-5}$
10	$1.107 \cdot 10^{-5}$	$1.119 \cdot 10^{-5}$	$7.809 \cdot 10^{-6}$	$4.820 \cdot 10^{-6}$	$1.796 \cdot 10^{-6}$
20	$2.628 \cdot 10^{-10}$	$2.775 \cdot 10^{-10}$	$2.298 \cdot 10^{-10}$	$1.589 \cdot 10^{-10}$	$7.128 \cdot 10^{-11}$
$\mu_s R = 0, k = 5$					
0	1.75	1.37	$5.672 \cdot 10^{-1}$	$2.470 \cdot 10^{-1}$	$7.320 \cdot 10^{-2}$
1	$3.927 \cdot 10^{-1}$	$3.336 \cdot 10^{-1}$	$1.594 \cdot 10^{-1}$	$8.107 \cdot 10^{-2}$	$2.587 \cdot 10^{-2}$
2	$1.049 \cdot 10^{-1}$	$9.286 \cdot 10^{-2}$	$4.874 \cdot 10^{-2}$	$2.670 \cdot 10^{-2}$	$9.165 \cdot 10^{-3}$
4	$9.254 \cdot 10^{-3}$	$8.654 \cdot 10^{-3}$	$5.046 \cdot 10^{-3}$	$2.999 \cdot 10^{-3}$	$1.154 \cdot 10^{-3}$
7	$3.012 \cdot 10^{-4}$	$2.959 \cdot 10^{-4}$	$1.916 \cdot 10^{-4}$	$1.204 \cdot 10^{-4}$	$5.200 \cdot 10^{-5}$
10	$1.107 \cdot 10^{-5}$	$1.119 \cdot 10^{-5}$	$7.840 \cdot 10^{-6}$	$5.086 \cdot 10^{-6}$	$2.365 \cdot 10^{-6}$
20	$2.628 \cdot 10^{-10}$	$2.775 \cdot 10^{-10}$	$2.299 \cdot 10^{-10}$	$1.604 \cdot 10^{-10}$	$8.379 \cdot 10^{-11}$
$\mu_s R = 0, k = 10$					
0	1.700	1.420	$6.842 \cdot 10^{-1}$	$3.504 \cdot 10^{-1}$	$1.237 \cdot 10^{-1}$
1	$3.942 \cdot 10^{-1}$	$3.359 \cdot 10^{-1}$	$1.702 \cdot 10^{-1}$	$9.881 \cdot 10^{-2}$	$4.046 \cdot 10^{-2}$
2	$1.049 \cdot 10^{-1}$	$9.296 \cdot 10^{-2}$	$4.985 \cdot 10^{-2}$	$3.001 \cdot 10^{-2}$	$1.340 \cdot 10^{-2}$
4	$9.254 \cdot 10^{-3}$	$8.654 \cdot 10^{-3}$	$5.063 \cdot 10^{-3}$	$3.132 \cdot 10^{-3}$	$1.519 \cdot 10^{-3}$
7	$3.012 \cdot 10^{-4}$	$2.959 \cdot 10^{-4}$	$1.916 \cdot 10^{-4}$	$1.217 \cdot 10^{-4}$	$6.170 \cdot 10^{-5}$
10	$1.107 \cdot 10^{-5}$	$1.119 \cdot 10^{-5}$	$7.840 \cdot 10^{-6}$	$5.101 \cdot 10^{-6}$	$2.635 \cdot 10^{-6}$
20	$2.628 \cdot 10^{-10}$	$2.775 \cdot 10^{-10}$	$2.299 \cdot 10^{-10}$	$1.604 \cdot 10^{-10}$	$8.601 \cdot 10^{-11}$
$\mu_s R = 1, k = 1$					
0	$5.600 \cdot 10^{-1}$	$4.000 \cdot 10^{-1}$	$9.400 \cdot 10^{-2}$	$3.250 \cdot 10^{-2}$	$8.000 \cdot 10^{-3}$
1	$1.494 \cdot 10^{-1}$	$1.173 \cdot 10^{-1}$	$3.262 \cdot 10^{-2}$	$1.166 \cdot 10^{-2}$	$2.873 \cdot 10^{-3}$
2	$4.210 \cdot 10^{-2}$	$3.597 \cdot 10^{-2}$	$1.154 \cdot 10^{-2}$	$4.233 \cdot 10^{-3}$	$1.054 \cdot 10^{-3}$
4	$3.813 \cdot 10^{-3}$	$3.607 \cdot 10^{-3}$	$1.446 \cdot 10^{-3}$	$5.580 \cdot 10^{-4}$	$1.417 \cdot 10^{-4}$
7	$1.234 \cdot 10^{-4}$	$1.270 \cdot 10^{-4}$	$6.456 \cdot 10^{-5}$	$2.673 \cdot 10^{-5}$	$6.989 \cdot 10^{-6}$
10	$4.467 \cdot 10^{-6}$	$4.826 \cdot 10^{-6}$	$2.899 \cdot 10^{-6}$	$1.281 \cdot 10^{-6}$	$3.447 \cdot 10^{-7}$
20	$1.010 \cdot 10^{-10}$	$1.171 \cdot 10^{-10}$	$9.706 \cdot 10^{-11}$	$5.147 \cdot 10^{-11}$	$1.517 \cdot 10^{-11}$
$\mu_s R = 1, k = 3$					
0	$6.800 \cdot 10^{-1}$	$5.400 \cdot 10^{-1}$	$2.030 \cdot 10^{-1}$	$8.400 \cdot 10^{-2}$	$2.280 \cdot 10^{-2}$
1	$1.668 \cdot 10^{-1}$	$1.431 \cdot 10^{-1}$	$6.457 \cdot 10^{-2}$	$2.297 \cdot 10^{-2}$	$8.219 \cdot 10^{-3}$
2	$4.522 \cdot 10^{-2}$	$4.098 \cdot 10^{-2}$	$2.085 \cdot 10^{-2}$	$1.014 \cdot 10^{-2}$	$2.974 \cdot 10^{-3}$
4	$3.966 \cdot 10^{-3}$	$3.864 \cdot 10^{-3}$	$2.277 \cdot 10^{-3}$	$1.229 \cdot 10^{-3}$	$3.898 \cdot 10^{-4}$
7	$1.260 \cdot 10^{-4}$	$1.315 \cdot 10^{-4}$	$8.869 \cdot 10^{-5}$	$5.281 \cdot 10^{-5}$	$1.852 \cdot 10^{-5}$
10	$4.521 \cdot 10^{-6}$	$4.926 \cdot 10^{-6}$	$3.653 \cdot 10^{-6}$	$2.313 \cdot 10^{-6}$	$8.812 \cdot 10^{-7}$
20	$1.013 \cdot 10^{-10}$	$1.177 \cdot 10^{-10}$	$1.068 \cdot 10^{-10}$	$7.564 \cdot 10^{-11}$	$3.479 \cdot 10^{-11}$
$\mu_s R = 1, k = 5$					
0	$6.800 \cdot 10^{-1}$	$5.600 \cdot 10^{-1}$	$2.400 \cdot 10^{-1}$	$1.170 \cdot 10^{-1}$	$3.550 \cdot 10^{-2}$
1	$1.671 \cdot 10^{-1}$	$1.438 \cdot 10^{-1}$	$7.161 \cdot 10^{-2}$	$3.802 \cdot 10^{-2}$	$1.257 \cdot 10^{-2}$
2	$4.525 \cdot 10^{-2}$	$4.099 \cdot 10^{-2}$	$2.210 \cdot 10^{-2}$	$1.252 \cdot 10^{-2}$	$4.449 \cdot 10^{-3}$
4	$3.967 \cdot 10^{-3}$	$3.865 \cdot 10^{-3}$	$2.322 \cdot 10^{-3}$	$1.407 \cdot 10^{-3}$	$5.593 \cdot 10^{-4}$
7	$1.260 \cdot 10^{-4}$	$1.315 \cdot 10^{-4}$	$8.911 \cdot 10^{-5}$	$5.669 \cdot 10^{-5}$	$2.515 \cdot 10^{-5}$
10	$4.521 \cdot 10^{-6}$	$4.926 \cdot 10^{-6}$	$3.658 \cdot 10^{-6}$	$2.403 \cdot 10^{-6}$	$1.142 \cdot 10^{-6}$
20	$1.013 \cdot 10^{-10}$	$1.177 \cdot 10^{-10}$	$1.068 \cdot 10^{-10}$	$7.605 \cdot 10^{-11}$	$4.035 \cdot 10^{-11}$
$\mu_s R = 1, k = 10$					
0	$6.900 \cdot 10^{-1}$	$5.700 \cdot 10^{-1}$	$2.630 \cdot 10^{-1}$	$1.400 \cdot 10^{-1}$	$5.700 \cdot 10^{-2}$
1	$1.671 \cdot 10^{-1}$	$1.439 \cdot 10^{-1}$	$7.335 \cdot 10^{-2}$	$4.343 \cdot 10^{-2}$	$1.877 \cdot 10^{-2}$
2	$4.525 \cdot 10^{-2}$	$4.099 \cdot 10^{-2}$	$2.225 \cdot 10^{-2}$	$1.348 \cdot 10^{-2}$	$6.237 \cdot 10^{-3}$
4	$3.967 \cdot 10^{-3}$	$3.865 \cdot 10^{-3}$	$2.324 \cdot 10^{-3}$	$1.443 \cdot 10^{-3}$	$7.115 \cdot 10^{-4}$
7	$1.260 \cdot 10^{-4}$	$1.315 \cdot 10^{-4}$	$8.912 \cdot 10^{-5}$	$5.701 \cdot 10^{-5}$	$2.912 \cdot 10^{-5}$
10	$4.521 \cdot 10^{-6}$	$4.926 \cdot 10^{-6}$	$3.658 \cdot 10^{-6}$	$2.406 \cdot 10^{-6}$	$1.251 \cdot 10^{-6}$
20	$1.013 \cdot 10^{-10}$	$1.177 \cdot 10^{-10}$	$1.068 \cdot 10^{-10}$	$7.606 \cdot 10^{-11}$	$4.120 \cdot 10^{-11}$

b <sub>i</sub>	p				
	1.25	1.5	3	5	10
$\mu_s R = 2, k = 1$					
0	$3.550 \cdot 10^{-1}$	$2.541 \cdot 10^{-1}$	$5.780 \cdot 10^{-2}$	$2.008 \cdot 10^{-2}$	$4.832 \cdot 10^{-3}$
1	$9.157 \cdot 10^{-2}$	$7.382 \cdot 10^{-2}$	$2.060 \cdot 10^{-2}$	$7.239 \cdot 10^{-3}$	$1.760 \cdot 10^{-3}$
2	$2.512 \cdot 10^{-2}$	$2.225 \cdot 10^{-2}$	$7.265 \cdot 10^{-3}$	$2.626 \cdot 10^{-3}$	$6.452 \cdot 10^{-4}$
4	$2.183 \cdot 10^{-3}$	$2.174 \cdot 10^{-3}$	$9.055 \cdot 10^{-4}$	$3.457 \cdot 10^{-4}$	$8.674 \cdot 10^{-5}$
7	$7.501 \cdot 10^{-5}$	$7.458 \cdot 10^{-5}$	$4.008 \cdot 10^{-5}$	$1.652 \cdot 10^{-5}$	$4.276 \cdot 10^{-6}$
10	$2.661 \cdot 10^{-6}$	$2.779 \cdot 10^{-6}$	$1.786 \cdot 10^{-6}$	$7.901 \cdot 10^{-7}$	$2.108 \cdot 10^{-7}$
20	$5.704 \cdot 10^{-11}$	$6.421 \cdot 10^{-11}$	$5.859 \cdot 10^{-11}$	$3.153 \cdot 10^{-11}$	$9.264 \cdot 10^{-12}$
$\mu_s R = 2, k = 3$					
0	$4.000 \cdot 10^{-1}$	$3.349 \cdot 10^{-1}$	$1.256 \cdot 10^{-1}$	$5.207 \cdot 10^{-2}$	$1.395 \cdot 10^{-2}$
1	$9.600 \cdot 10^{-2}$	$8.281 \cdot 10^{-2}$	$3.888 \cdot 10^{-2}$	$1.781 \cdot 10^{-2}$	$5.010 \cdot 10^{-3}$
2	$2.584 \cdot 10^{-2}$	$2.391 \cdot 10^{-2}$	$1.250 \cdot 10^{-2}$	$6.160 \cdot 10^{-3}$	$1.812 \cdot 10^{-3}$
4	$2.214 \cdot 10^{-3}$	$2.245 \cdot 10^{-3}$	$1.357 \cdot 10^{-3}$	$7.432 \cdot 10^{-4}$	$2.373 \cdot 10^{-4}$
7	$7.548 \cdot 10^{-5}$	$7.563 \cdot 10^{-5}$	$5.269 \cdot 10^{-5}$	$3.178 \cdot 10^{-5}$	$1.126 \cdot 10^{-5}$
10	$2.670 \cdot 10^{-6}$	$2.800 \cdot 10^{-6}$	$2.166 \cdot 10^{-6}$	$1.388 \cdot 10^{-6}$	$5.350 \cdot 10^{-7}$
20	$5.707 \cdot 10^{-11}$	$6.431 \cdot 10^{-11}$	$6.292 \cdot 10^{-11}$	$4.511 \cdot 10^{-11}$	$2.105 \cdot 10^{-11}$
$\mu_s R = 2, k = 5$					
0	$4.000 \cdot 10^{-1}$	$3.200 \cdot 10^{-1}$	$1.420 \cdot 10^{-1}$	$7.000 \cdot 10^{-2}$	$2.140 \cdot 10^{-2}$
1	$9.627 \cdot 10^{-2}$	$8.380 \cdot 10^{-2}$	$4.215 \cdot 10^{-2}$	$2.267 \cdot 10^{-2}$	$7.605 \cdot 10^{-3}$
2	$2.584 \cdot 10^{-2}$	$2.391 \cdot 10^{-2}$	$1.303 \cdot 10^{-2}$	$7.452 \cdot 10^{-3}$	$2.689 \cdot 10^{-3}$
4	$2.214 \cdot 10^{-3}$	$2.245 \cdot 10^{-3}$	$1.374 \cdot 10^{-3}$	$8.370 \cdot 10^{-4}$	$3.376 \cdot 10^{-4}$
7	$7.548 \cdot 10^{-5}$	$7.563 \cdot 10^{-5}$	$5.281 \cdot 10^{-5}$	$3.372 \cdot 10^{-5}$	$1.515 \cdot 10^{-5}$
10	$2.670 \cdot 10^{-6}$	$2.800 \cdot 10^{-6}$	$2.167 \cdot 10^{-6}$	$1.430 \cdot 10^{-6}$	$6.870 \cdot 10^{-7}$
20	$5.707 \cdot 10^{-11}$	$6.431 \cdot 10^{-11}$	$6.292 \cdot 10^{-11}$	$4.527 \cdot 10^{-11}$	$2.422 \cdot 10^{-11}$
$\mu_s R = 2, k = 10$					
0	$4.000 \cdot 10^{-1}$	$3.200 \cdot 10^{-1}$	$1.460 \cdot 10^{-1}$	$8.762 \cdot 10^{-2}$	$3.422 \cdot 10^{-2}$
1	$9.627 \cdot 10^{-2}$	$8.380 \cdot 10^{-2}$	$4.280 \cdot 10^{-2}$	$2.534 \cdot 10^{-2}$	$1.113 \cdot 10^{-2}$
2	$2.584 \cdot 10^{-2}$	$2.391 \cdot 10^{-2}$	$1.308 \cdot 10^{-2}$	$7.910 \cdot 10^{-3}$	$3.701 \cdot 10^{-3}$
4	$2.214 \cdot 10^{-3}$	$2.245 \cdot 10^{-3}$	$1.374 \cdot 10^{-3}$	$8.526 \cdot 10^{-4}$	$4.228 \cdot 10^{-4}$
7	$7.548 \cdot 10^{-5}$	$7.563 \cdot 10^{-5}$	$5.281 \cdot 10^{-5}$	$3.385 \cdot 10^{-5}$	$1.734 \cdot 10^{-5}$
10	$2.670 \cdot 10^{-6}$	$2.800 \cdot 10^{-6}$	$2.167 \cdot 10^{-6}$	$1.431 \cdot 10^{-6}$	$7.462 \cdot 10^{-7}$
20	$5.707 \cdot 10^{-11}$	$6.431 \cdot 10^{-11}$	$6.292 \cdot 10^{-11}$	$4.527 \cdot 10^{-11}$	$2.466 \cdot 10^{-11}$
$\mu_s R = 3, k = 1$					
0	$2.600 \cdot 10^{-1}$	$1.800 \cdot 10^{-1}$	$3.200 \cdot 10^{-2}$	$1.420 \cdot 10^{-2}$	$3.400 \cdot 10^{-3}$
1	$6.386 \cdot 10^{-2}$	$5.263 \cdot 10^{-2}$	$1.476 \cdot 10^{-2}$	$5.154 \cdot 10^{-3}$	$1.240 \cdot 10^{-3}$
2	$1.808 \cdot 10^{-2}$	$1.570 \cdot 10^{-2}$	$5.195 \cdot 10^{-3}$	$1.869 \cdot 10^{-3}$	$4.548 \cdot 10^{-4}$
4	$1.577 \cdot 10^{-3}$	$1.510 \cdot 10^{-3}$	$6.452 \cdot 10^{-4}$	$2.457 \cdot 10^{-4}$	$6.113 \cdot 10^{-5}$
7	$4.902 \cdot 10^{-5}$	$5.098 \cdot 10^{-5}$	$2.842 \cdot 10^{-5}$	$1.173 \cdot 10^{-5}$	$3.013 \cdot 10^{-6}$
10	$1.710 \cdot 10^{-6}$	$1.972 \cdot 10^{-6}$	$1.261 \cdot 10^{-6}$	$5.599 \cdot 10^{-7}$	$1.485 \cdot 10^{-7}$
20	$3.450 \cdot 10^{-11}$	$4.657 \cdot 10^{-11}$	$4.085 \cdot 10^{-11}$	$2.224 \cdot 10^{-11}$	$6.519 \cdot 10^{-12}$
$\mu_s R = 3, k = 3$					
0	$2.600 \cdot 10^{-1}$	$2.200 \cdot 10^{-1}$	$8.500 \cdot 10^{-2}$	$3.600 \cdot 10^{-2}$	$9.800 \cdot 10^{-3}$
1	$6.549 \cdot 10^{-2}$	$5.761 \cdot 10^{-2}$	$2.711 \cdot 10^{-2}$	$1.255 \cdot 10^{-2}$	$3.524 \cdot 10^{-3}$
2	$1.831 \cdot 10^{-2}$	$1.643 \cdot 10^{-2}$	$8.690 \cdot 10^{-3}$	$4.332 \cdot 10^{-3}$	$1.274 \cdot 10^{-3}$
4	$1.585 \cdot 10^{-3}$	$1.535 \cdot 10^{-3}$	$9.405 \cdot 10^{-4}$	$5.212 \cdot 10^{-4}$	$1.667 \cdot 10^{-4}$
7	$4.912 \cdot 10^{-5}$	$5.127 \cdot 10^{-5}$	$3.643 \cdot 10^{-5}$	$2.222 \cdot 10^{-5}$	$7.903 \cdot 10^{-6}$
10	$1.711 \cdot 10^{-6}$	$1.978 \cdot 10^{-6}$	$1.495 \cdot 10^{-6}$	$9.678 \cdot 10^{-7}$	$3.753 \cdot 10^{-7}$
20	$3.451 \cdot 10^{-11}$	$4.659 \cdot 10^{-11}$	$4.329 \cdot 10^{-11}$	$3.132 \cdot 10^{-11}$	$1.473 \cdot 10^{-11}$
$\mu_s R = 3, k = 5$					
0	$2.700 \cdot 10^{-1}$	$2.200 \cdot 10^{-1}$	$9.800 \cdot 10^{-2}$	$4.850 \cdot 10^{-2}$	$1.520 \cdot 10^{-2}$
1	$6.549 \cdot 10^{-2}$	$5.764 \cdot 10^{-2}$	$2.910 \cdot 10^{-2}$	$1.582 \cdot 10^{-2}$	$5.331 \cdot 10^{-3}$
2	$1.831 \cdot 10^{-2}$	$1.643 \cdot 10^{-2}$	$8.987 \cdot 10^{-3}$	$5.193 \cdot 10^{-3}$	$1.884 \cdot 10^{-3}$
4	$1.585 \cdot 10^{-3}$	$1.535 \cdot 10^{-3}$	$9.490 \cdot 10^{-4}$	$5.823 \cdot 10^{-4}$	$2.362 \cdot 10^{-4}$
7	$4.912 \cdot 10^{-5}$	$5.127 \cdot 10^{-5}$	$3.648 \cdot 10^{-5}$	$2.344 \cdot 10^{-5}$	$1.059 \cdot 10^{-5}$
10	$1.711 \cdot 10^{-6}$	$1.978 \cdot 10^{-6}$	$1.496 \cdot 10^{-6}$	$9.935 \cdot 10^{-7}$	$4.767 \cdot 10^{-7}$
20	$3.451 \cdot 10^{-11}$	$4.659 \cdot 10^{-11}$	$4.329 \cdot 10^{-11}$	$3.141 \cdot 10^{-11}$	$1.687 \cdot 10^{-11}$
$\mu_s R = 3, k = 10$					
0	$2.700 \cdot 10^{-1}$	$2.200 \cdot 10^{-1}$	$1.030 \cdot 10^{-1}$	$5.800 \cdot 10^{-2}$	$2.350 \cdot 10^{-2}$
1	$6.549 \cdot 10^{-2}$	$5.764 \cdot 10^{-2}$	$2.947 \cdot 10^{-2}$	$1.755 \cdot 10^{-2}$	$7.741 \cdot 10^{-3}$
2	$1.731 \cdot 10^{-2}$	$1.643 \cdot 10^{-2}$	$9.021 \cdot 10^{-3}$	$5.482 \cdot 10^{-3}$	$2.573 \cdot 10^{-3}$
4	$1.585 \cdot 10^{-3}$	$1.535 \cdot 10^{-3}$	$9.491 \cdot 10^{-4}$	$5.917 \cdot 10^{-4}$	$2.938 \cdot 10^{-4}$
7	$4.912 \cdot 10^{-5}$	$5.127 \cdot 10^{-5}$	$3.648 \cdot 10^{-5}$	$2.351 \cdot 10^{-5}$	$1.206 \cdot 10^{-5}$
10	$1.711 \cdot 10^{-6}$	$1.978 \cdot 10^{-6}$	$1.496 \cdot 10^{-6}$	$9.941 \cdot 10^{-7}$	$5.189 \cdot 10^{-7}$
20	$3.451 \cdot 10^{-11}$	$4.659 \cdot 10^{-11}$	$4.329 \cdot 10^{-11}$	$3.141 \cdot 10^{-11}$	$1.716 \cdot 10^{-11}$

b <sub>1</sub>	p				
	1.25	1.5	3	5	10
$\mu_s R = 5, k = 1$					
0	$1.500 \cdot 10^{-1}$	$1.150 \cdot 10^{-1}$	$2.620 \cdot 10^{-2}$	$8.700 \cdot 10^{-3}$	$2.100 \cdot 10^{-3}$
1	$4.024 \cdot 10^{-2}$	$3.282 \cdot 10^{-2}$	$9.295 \cdot 10^{-3}$	$3.213 \cdot 10^{-3}$	$7.645 \cdot 10^{-4}$
2	$1.084 \cdot 10^{-2}$	$9.686 \cdot 10^{-3}$	$3.265 \cdot 10^{-3}$	$1.164 \cdot 10^{-3}$	$2.803 \cdot 10^{-4}$
4	$9.219 \cdot 10^{-4}$	$9.181 \cdot 10^{-4}$	$4.041 \cdot 10^{-4}$	$1.530 \cdot 10^{-4}$	$3.767 \cdot 10^{-5}$
7	$2.765 \cdot 10^{-5}$	$3.160 \cdot 10^{-5}$	$1.771 \cdot 10^{-5}$	$7.292 \cdot 10^{-6}$	$1.856 \cdot 10^{-6}$
10	$9.292 \cdot 10^{-7}$	$1.172 \cdot 10^{-6}$	$7.825 \cdot 10^{-7}$	$3.478 \cdot 10^{-7}$	$9.147 \cdot 10^{-8}$
20	$1.667 \cdot 10^{-11}$	$2.694 \cdot 10^{-11}$	$2.507 \cdot 10^{-11}$	$1.376 \cdot 10^{-11}$	$4.013 \cdot 10^{-12}$
$\mu_s R = 5, k = 3$					
0	$1.550 \cdot 10^{-1}$	$1.300 \cdot 10^{-1}$	$5.300 \cdot 10^{-2}$	$2.250 \cdot 10^{-2}$	$6.000 \cdot 10^{-3}$
1	$4.062 \cdot 10^{-2}$	$3.488 \cdot 10^{-2}$	$1.660 \cdot 10^{-2}$	$7.741 \cdot 10^{-3}$	$2.167 \cdot 10^{-3}$
2	$1.087 \cdot 10^{-2}$	$9.935 \cdot 10^{-3}$	$5.307 \cdot 10^{-3}$	$2.667 \cdot 10^{-3}$	$7.835 \cdot 10^{-4}$
4	$9.225 \cdot 10^{-4}$	$9.238 \cdot 10^{-4}$	$5.727 \cdot 10^{-4}$	$3.200 \cdot 10^{-4}$	$1.024 \cdot 10^{-4}$
7	$2.766 \cdot 10^{-5}$	$3.164 \cdot 10^{-5}$	$2.215 \cdot 10^{-5}$	$1.360 \cdot 10^{-5}$	$4.852 \cdot 10^{-6}$
10	$9.293 \cdot 10^{-7}$	$1.172 \cdot 10^{-6}$	$9.086 \cdot 10^{-7}$	$5.911 \cdot 10^{-7}$	$2.302 \cdot 10^{-7}$
20	$1.667 \cdot 10^{-11}$	$2.694 \cdot 10^{-11}$	$2.625 \cdot 10^{-11}$	$1.907 \cdot 10^{-11}$	$9.014 \cdot 10^{-12}$
$\mu_s R = 5, k = 5$					
0	$1.550 \cdot 10^{-1}$	$1.320 \cdot 10^{-1}$	$5.900 \cdot 10^{-2}$	$3.000 \cdot 10^{-2}$	$9.400 \cdot 10^{-3}$
1	$4.062 \cdot 10^{-2}$	$3.488 \cdot 10^{-2}$	$1.767 \cdot 10^{-2}$	$9.667 \cdot 10^{-3}$	$3.268 \cdot 10^{-3}$
2	$1.087 \cdot 10^{-2}$	$9.935 \cdot 10^{-3}$	$5.463 \cdot 10^{-3}$	$3.169 \cdot 10^{-3}$	$1.154 \cdot 10^{-3}$
4	$9.225 \cdot 10^{-4}$	$9.238 \cdot 10^{-4}$	$5.766 \cdot 10^{-4}$	$3.548 \cdot 10^{-4}$	$1.446 \cdot 10^{-4}$
7	$2.766 \cdot 10^{-5}$	$3.164 \cdot 10^{-5}$	$2.217 \cdot 10^{-5}$	$1.427 \cdot 10^{-5}$	$6.473 \cdot 10^{-6}$
10	$9.293 \cdot 10^{-7}$	$1.172 \cdot 10^{-6}$	$9.087 \cdot 10^{-7}$	$6.047 \cdot 10^{-7}$	$2.929 \cdot 10^{-7}$
20	$1.667 \cdot 10^{-11}$	$2.694 \cdot 10^{-11}$	$2.625 \cdot 10^{-11}$	$1.911 \cdot 10^{-11}$	$1.028 \cdot 10^{-11}$
$\mu_s R = 5, k = 10$					
0	$1.550 \cdot 10^{-1}$	$1.320 \cdot 10^{-1}$	$6.600 \cdot 10^{-2}$	$3.550 \cdot 10^{-2}$	$1.460 \cdot 10^{-2}$
1	$4.062 \cdot 10^{-2}$	$3.488 \cdot 10^{-2}$	$1.785 \cdot 10^{-2}$	$1.065 \cdot 10^{-2}$	$4.712 \cdot 10^{-3}$
2	$1.087 \cdot 10^{-2}$	$9.935 \cdot 10^{-3}$	$5.474 \cdot 10^{-3}$	$3.329 \cdot 10^{-3}$	$1.565 \cdot 10^{-3}$
4	$9.225 \cdot 10^{-4}$	$9.238 \cdot 10^{-4}$	$5.766 \cdot 10^{-4}$	$3.598 \cdot 10^{-4}$	$1.787 \cdot 10^{-4}$
7	$2.767 \cdot 10^{-5}$	$3.164 \cdot 10^{-5}$	$2.217 \cdot 10^{-5}$	$1.430 \cdot 10^{-5}$	$7.333 \cdot 10^{-6}$
10	$9.293 \cdot 10^{-7}$	$1.172 \cdot 10^{-6}$	$9.087 \cdot 10^{-7}$	$6.050 \cdot 10^{-7}$	$3.157 \cdot 10^{-7}$
20	$1.667 \cdot 10^{-11}$	$2.694 \cdot 10^{-11}$	$2.625 \cdot 10^{-11}$	$1.911 \cdot 10^{-11}$	$1.044 \cdot 10^{-11}$
$\mu_s R = 10, k = 1$					
0	$8.000 \cdot 10^{-2}$	$6.000 \cdot 10^{-2}$	$1.450 \cdot 10^{-2}$	$4.500 \cdot 10^{-3}$	$1.060 \cdot 10^{-3}$
1	$1.982 \cdot 10^{-2}$	$1.675 \cdot 10^{-2}$	$4.711 \cdot 10^{-3}$	$1.620 \cdot 10^{-3}$	$3.816 \cdot 10^{-4}$
2	$5.272 \cdot 10^{-3}$	$4.921 \cdot 10^{-3}$	$1.653 \cdot 10^{-3}$	$5.872 \cdot 10^{-4}$	$1.399 \cdot 10^{-4}$
4	$4.342 \cdot 10^{-4}$	$4.665 \cdot 10^{-4}$	$2.042 \cdot 10^{-4}$	$7.713 \cdot 10^{-5}$	$1.880 \cdot 10^{-5}$
7	$1.222 \cdot 10^{-5}$	$1.565 \cdot 10^{-5}$	$8.930 \cdot 10^{-6}$	$3.674 \cdot 10^{-6}$	$9.265 \cdot 10^{-7}$
10	$3.816 \cdot 10^{-7}$	$5.755 \cdot 10^{-7}$	$3.937 \cdot 10^{-7}$	$1.751 \cdot 10^{-7}$	$4.566 \cdot 10^{-8}$
20	$5.302 \cdot 10^{-12}$	$1.262 \cdot 10^{-11}$	$1.256 \cdot 10^{-11}$	$6.920 \cdot 10^{-12}$	$2.003 \cdot 10^{-12}$
$\mu_s R = 10, k = 3$					
0	$8.400 \cdot 10^{-2}$	$6.600 \cdot 10^{-2}$	$2.650 \cdot 10^{-2}$	$1.120 \cdot 10^{-2}$	$3.000 \cdot 10^{-3}$
1	$1.988 \cdot 10^{-2}$	$1.745 \cdot 10^{-2}$	$8.157 \cdot 10^{-3}$	$3.858 \cdot 10^{-3}$	$1.079 \cdot 10^{-3}$
2	$5.274 \cdot 10^{-3}$	$4.900 \cdot 10^{-3}$	$2.607 \cdot 10^{-3}$	$1.328 \cdot 10^{-3}$	$3.902 \cdot 10^{-4}$
4	$4.342 \cdot 10^{-4}$	$4.674 \cdot 10^{-4}$	$2.816 \cdot 10^{-4}$	$1.590 \cdot 10^{-4}$	$5.099 \cdot 10^{-5}$
7	$1.222 \cdot 10^{-5}$	$1.565 \cdot 10^{-5}$	$1.091 \cdot 10^{-5}$	$6.745 \cdot 10^{-6}$	$2.414 \cdot 10^{-6}$
10	$3.816 \cdot 10^{-7}$	$5.755 \cdot 10^{-7}$	$4.488 \cdot 10^{-7}$	$2.929 \cdot 10^{-7}$	$1.145 \cdot 10^{-7}$
20	$5.302 \cdot 10^{-12}$	$1.262 \cdot 10^{-11}$	$1.303 \cdot 10^{-11}$	$9.450 \cdot 10^{-12}$	$4.475 \cdot 10^{-12}$
$\mu_s R = 10, k = 5$					
0	$8.400 \cdot 10^{-2}$	$6.600 \cdot 10^{-2}$	$3.200 \cdot 10^{-2}$	$1.450 \cdot 10^{-2}$	$4.600 \cdot 10^{-3}$
1	$1.988 \cdot 10^{-2}$	$1.746 \cdot 10^{-2}$	$8.825 \cdot 10^{-3}$	$4.767 \cdot 10^{-3}$	$1.622 \cdot 10^{-3}$
2	$5.274 \cdot 10^{-3}$	$4.990 \cdot 10^{-3}$	$2.668 \cdot 10^{-3}$	$1.562 \cdot 10^{-3}$	$5.727 \cdot 10^{-4}$
4	$4.342 \cdot 10^{-4}$	$4.674 \cdot 10^{-4}$	$2.830 \cdot 10^{-4}$	$1.749 \cdot 10^{-4}$	$7.168 \cdot 10^{-5}$
7	$1.222 \cdot 10^{-5}$	$1.565 \cdot 10^{-5}$	$1.092 \cdot 10^{-5}$	$7.044 \cdot 10^{-6}$	$3.206 \cdot 10^{-6}$
10	$3.816 \cdot 10^{-7}$	$5.755 \cdot 10^{-7}$	$4.488 \cdot 10^{-7}$	$2.988 \cdot 10^{-7}$	$1.499 \cdot 10^{-7}$
20	$5.302 \cdot 10^{-12}$	$1.262 \cdot 10^{-11}$	$1.303 \cdot 10^{-11}$	$9.466 \cdot 10^{-12}$	$5.083 \cdot 10^{-12}$
$\mu_s R = 10, k = 10$					
0	$8.400 \cdot 10^{-2}$	$6.600 \cdot 10^{-2}$	$3.400 \cdot 10^{-2}$	$1.860 \cdot 10^{-2}$	$7.100 \cdot 10^{-3}$
1	$1.988 \cdot 10^{-2}$	$1.746 \cdot 10^{-2}$	$8.905 \cdot 10^{-3}$	$5.197 \cdot 10^{-3}$	$2.320 \cdot 10^{-3}$
2	$5.274 \cdot 10^{-3}$	$4.990 \cdot 10^{-3}$	$2.672 \cdot 10^{-3}$	$1.632 \cdot 10^{-3}$	$7.706 \cdot 10^{-4}$
4	$4.342 \cdot 10^{-4}$	$4.674 \cdot 10^{-4}$	$2.830 \cdot 10^{-4}$	$1.771 \cdot 10^{-4}$	$8.801 \cdot 10^{-5}$
7	$1.222 \cdot 10^{-5}$	$1.565 \cdot 10^{-5}$	$1.092 \cdot 10^{-5}$	$7.058 \cdot 10^{-6}$	$3.614 \cdot 10^{-6}$
10	$3.816 \cdot 10^{-7}$	$5.755 \cdot 10^{-7}$	$4.488 \cdot 10^{-7}$	$2.990 \cdot 10^{-7}$	$1.557 \cdot 10^{-7}$
20	$5.302 \cdot 10^{-12}$	$1.262 \cdot 10^{-11}$	$1.303 \cdot 10^{-11}$	$9.466 \cdot 10^{-12}$	$5.157 \cdot 10^{-12}$

## 2.2 計算式の説明

## (1) 変換係数 fE について

fE は  $\gamma$  線粒子 (光子) 束  $\phi$  [1/sec cm<sup>2</sup>] を照射線量率 D [R/hr] に変換する係数である。照射線量の定義「1 R とは標準状態 (0°C, 1 atm) の空気 1 cm<sup>3</sup> (0.001293 g) に、1 esu のイオン対を生成させる電磁放射線量である」に従って  $\gamma$  線粒子束を照射線量に変換すればよい。

(i) 粒子束  $\phi$  のもつ全エネルギー、即ちエネルギー粒子束は、 $\gamma$  線のエネルギーを E とすると  $\phi E$  [MeV/sec cm<sup>2</sup>] である。

(ii) 1 esu はイオン対の数で表わすと

$$\frac{1 \text{ [esu]}}{4.803 \times 10^{-10} \text{ [esu/ion pair]}} = 2.08 \times 10^9 \text{ [ion pair]}$$

(iii) 空気中で 1 イオン対を生成するに必要なエネルギー (W 値) は 33.9 eV なので、1 R とは空気 1 cm<sup>3</sup> に

$$2.08 \times 10^9 \text{ [ion pair]} \times 33.9 \text{ [eV/ion pair]} = 7.05 \times 10^{10} \text{ [eV]}$$

のエネルギーを付与する線量に相当する。

(iv)  $\gamma$  線の全エネルギー  $\phi E$  のうち空気 1 cm<sup>3</sup> に吸収されるのは、空気の線エネルギー吸収係数を  $\mu_a$  [cm<sup>-1</sup>] とすれば

$$\mu_a \phi E \text{ [MeV/sec cm}^3\text{]}$$

である。

(v) 従って粒子束  $\phi$  を照射線量率 D に変換すると

$$\begin{aligned} D \text{ [R/hr]} &= \mu_a \phi E \left[ \frac{\text{MeV}}{\text{sec cm}^3} \right] \frac{60^2 \text{ [sec hr}^{-1}\text{]}}{7.05 \times 10^{10} \text{ [MeV cm}^{-3}\text{ R}^{-1}\text{]}} \\ &= \frac{(5.11 \times 10^{-2} \mu_a E) \phi}{\text{J}} \end{aligned}$$

上記の ( ) 内を本資料では変換係数 fE と定義する。(図 2-1)

(2)  $\gamma$ 線粒子束計算式の証明

ここでは前節で用いた $\gamma$ 線粒子束 $\phi$ の計算式の証明を取扱う。線量計算を行う過程で疑問を  
持ったり、得られた結果に疑義が生じた時は、この節が参考になる。また点減衰核積分法の式  
の発展の仕方、例えば点から線、線から面、面から体積などについて逐次理解できるよう、式  
の誘導に留意した。

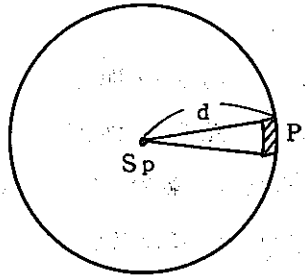
点線源 → 線線源 : No. 1 → No. 3

線線源 → 面線源 : No. 3 → No. 7, No. 3 → No. 10

面線源 → 体積線源: No. 9 → No. 13, No. 5 → No. 14

これに関連して、本資料に与えた計算式 No. 6, No. 7, No. 8, No. 10, No. 14は従来より用いられ  
ている計算式が不便で使いにくいとため、今回新たに作成したものである。他の計算式は主に参  
考文献 1) から借用したものであるが、同文献中で式の誘導に数ヶ所誤りがあるため、これら  
についての式の証明も記載した。

1	点線源	$\phi = \frac{S_P C}{4 \pi d^2}$
---	-----	----------------------------------



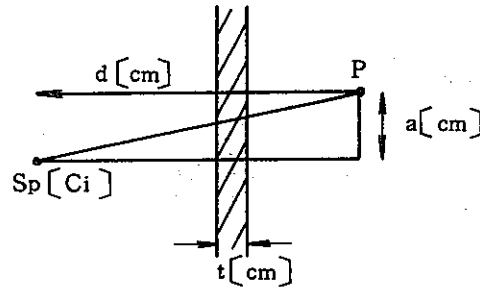
点線源  $S_P$  [Ci] から等方的に放出される  $\gamma$  線粒子数は  $S_P C$  [ $\text{sec}^{-1}$ ] である。ただし  $C$  は  $3.7 \times 10^{10}$  [ $1/\text{Ci sec}$ ] であり本資料でよく使用する定数である。

$\gamma$  線粒子束  $\phi$  は測定点  $P$  で  $1 \text{ cm}^2$  当たりを通過する粒子の数である。線源までの距離  $d$  を半径とする球を考えると、点線源より等方的に放出された粒子のうち  $P$  点での  $1 \text{ cm}^2$  を通過するものは、球の表面積  $4 \pi d^2$  で割ったものとなる。即ち

$$\phi = \frac{S_P C}{4 \pi d^2} \tag{2-1-1}$$



2	点線源+遮蔽	$\phi = \frac{S_P C}{4\pi (d^2 + a^2)} B \exp \left\{ -\mu t \frac{\sqrt{d^2 + a^2}}{d} \right\}$
---	--------	---------------------------------------------------------------------------------------------------



$S_P - P$  間の距離 :  $\sqrt{d^2 + a^2}$

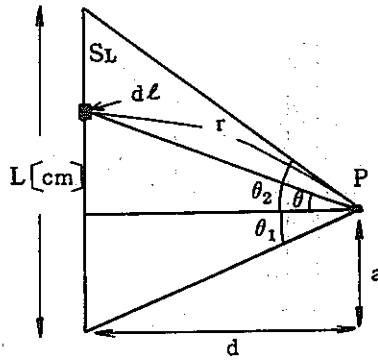
遮蔽が無い場合の  $\phi$  :  $\frac{S_P C}{4\pi (d^2 + a^2)}$

貫通する遮蔽内の距離 :  $\frac{\sqrt{d^2 + a^2}}{d} t$

遮蔽体による効果 :  $B \exp \left\{ -\mu \frac{\sqrt{d^2 + a^2}}{d} t \right\}$

$\therefore \phi = \frac{S_P C}{4\pi (d^2 + a^2)} B \exp \left\{ -\mu t \frac{\sqrt{d^2 + a^2}}{d} \right\}$  (2-2-1)

3	線線源	$\phi = \frac{S_L C}{4\pi L d} \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{a}{d} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{L-d}{d} \right) \right\}$
---	-----	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



線線源上で、P から距離 \$r\$ はなれた長さ \$dL\$ の微小線源 (\$dS\_L\$) を考える。

\$dL\$ を \$r\$ と \$\theta\$ で表わすと :  $r d\theta \sec \theta$

従って強度 \$dS\_L\$ は:  $dS_L = \frac{S_L C}{L} r \sec \theta \cdot d\theta$

\$dS\_L\$ による P 点での粒子束 \$d\phi\$ は式 (2-1-1) より

$$d\phi = \frac{\frac{S_L C}{L} r \sec \theta \cdot d\theta}{4\pi r^2} = \frac{S_L C}{4\pi L} \cdot \frac{\sec \theta}{r} d\theta \quad (2-3-1)$$

これを \$-\theta\_1 (= -\tan^{-1} \frac{a}{d})\$ から \$\theta\_2 (= \tan^{-1} \frac{L-a}{d})\$ まで積分すればよい。

\$r = d \sec \theta\$ なので

$$\phi = \frac{S_L C}{4\pi L d} \int_{-\theta_1}^{\theta_2} d\theta = \frac{S_L C}{4\pi L d} \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{a}{d} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{L-a}{d} \right) \right\} \quad (2-3-2)$$

4	線線源+遮蔽	$\phi = \frac{S_L C}{4 \pi L d} B \{ F(\theta_1, b_1) + F(\theta_2, b_1) \}$
---	--------	------------------------------------------------------------------------------

No. 3 の証明により、遮蔽体のない場合の  $d\phi$  は式 (2-3-2) より

$$d\phi = \frac{S_L C}{4 \pi L d} d\theta$$

$dS_L$  と P を結ぶ線分のうち遮蔽体内の長さは :  $t \sec \theta$

この遮蔽体による効果は :  $\exp(-\mu t \sec \theta)$

従って遮蔽体の有る場合の  $d\phi$  は :  $d\phi = \frac{S_L C}{4 \pi L d} \cdot \exp(-\mu t \sec \theta)$

これを No. 3 同様  $\theta_1$  から  $\theta_2$  まで積分すればよい

$$\phi = \frac{S_L C}{4 \pi L d} B \int_{\theta_1}^{\theta_2} e^{-\mu t \sec \theta} d\theta \quad (2-4-1)$$

ここで  $\mu t = b_1$

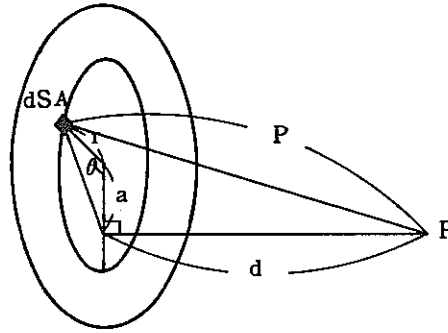
$$F(\theta, b_1) = \int_0^{\theta} e^{-b_1 \sec \theta'} d\theta' \quad \text{とすれば}$$

$$\phi = \frac{S_L C}{4 \pi L d} B \{ F(\theta_2, b_1) - F(\theta_1, b_1) \} \quad (2-4-2)$$

ただし図 2-5 は  $\theta$  の正についてのみ記載してある。 $\theta$  が負の場合は、 $F(\theta, b_1)$  の被積分関数が偶関数なので、次のようにすればよい。

$$\begin{aligned} F(-\theta, b_1) &= \int_0^{-\theta} e^{-b_1 \sec \theta'} d\theta' \\ &= -\int_0^{\theta} e^{-b_1 \sec \theta'} d\theta' \\ &= -F(\theta, b_1) \end{aligned}$$

5	円板線源	$\phi = \frac{S_{AC}}{4\pi R^2} \ell n \frac{d^2 + R^2 - a^2 + \sqrt{R^4 + 2R^2(d^2 - a^2) + (d^2 + a^2)^2}}{2d^2}$
---	------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



円板上の微小線源 ( $dS_A$ ) による P 点における粒子束 ( $d\phi$ ) を考える。

強度  $dS_A$  は：
$$dS_A = \frac{S_{AC}}{\pi R^2} r d\theta dr$$

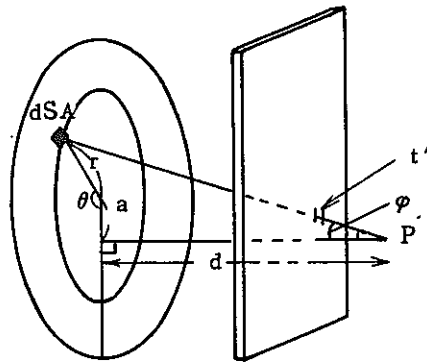
$dS_A - P$  間の距離  $\rho$  は：
$$\rho^2 = r^2 + a^2 - 2ar \cos \theta + d^2$$

$$d\phi = \frac{dS_A}{4\pi \rho^2} = \frac{S_{AC}}{4\pi^2 R^2} \frac{r d\theta dr}{(r^2 + a^2 - 2ar \cos \theta + d^2)}$$

これを  $r$  が  $0 \rightarrow R$ ,  $\theta$  が  $0 \rightarrow 2\pi$  まで積分すればよい

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{S_{AC}}{4\pi^2 R^2} \int_0^R dr \int_0^{2\pi} d\theta \frac{r}{r^2 + a^2 - 2ar \cos \theta + d^2} \\ &= \frac{S_{AC}}{2\pi R^2} \int_0^R \frac{r dr}{\sqrt{r^4 + 2r^2(d^2 - a^2) + (d^2 + a^2)^2}} \\ &= \frac{S_{AC}}{4\pi R^2} \ell n \frac{d^2 + R^2 - a^2 + \sqrt{R^4 + 2R^2(d^2 - a^2) + (d^2 + a^2)^2}}{2d^2} \end{aligned}$$

6	円板線源+遮蔽	$\phi = \frac{S_A C}{4\pi^2 R^2} G_1(l, p, \mu t)$
---	---------	----------------------------------------------------



No 5 の証明により、微少線源 ( $dS_A$ ) による P 点での粒子束は、遮蔽がない場合は式 (2-5-2) より

$$d\phi = \frac{S_A C}{4\pi^2 R^2} \frac{r d\theta dr}{(r^2 + a^2 - 2ar \cos \theta + d^2)} \quad (2-6-1)$$

線分  $dS_P - P$  のうち遮蔽体内の長さ  $t'$  は、この線分と P から円板への垂線とのなす角を  $\varphi$  とすると

$$\begin{aligned} t' &= t \sec \varphi \\ &= t (\sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \cos \theta + d^2} / d) \end{aligned} \quad (2-6-2)$$

従って遮蔽体による減衰効果は次のようになる

$$\exp \left\{ -\mu t \sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \cos \theta + d^2} / d \right\}$$

これを式 (2-6-1) に掛けると遮蔽を考慮した場合の  $d\phi$  がもとまる。

$$d\phi = \frac{S_A C}{4\pi^2 R^2} \frac{r \exp \left\{ -\mu t \sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \cos \theta + d^2} / d \right\}}{(r^2 + a^2 - 2ar \cos \theta + d^2)} d\theta dr \quad (2-6-3)$$

これを  $r$  が  $0 \rightarrow R$ ,  $\theta$  が  $0 \rightarrow 2\pi$  まで積分すればよいのだが、初歩的には積分できないので、積分項を無次元化し、数値的に求め表にまとめる。

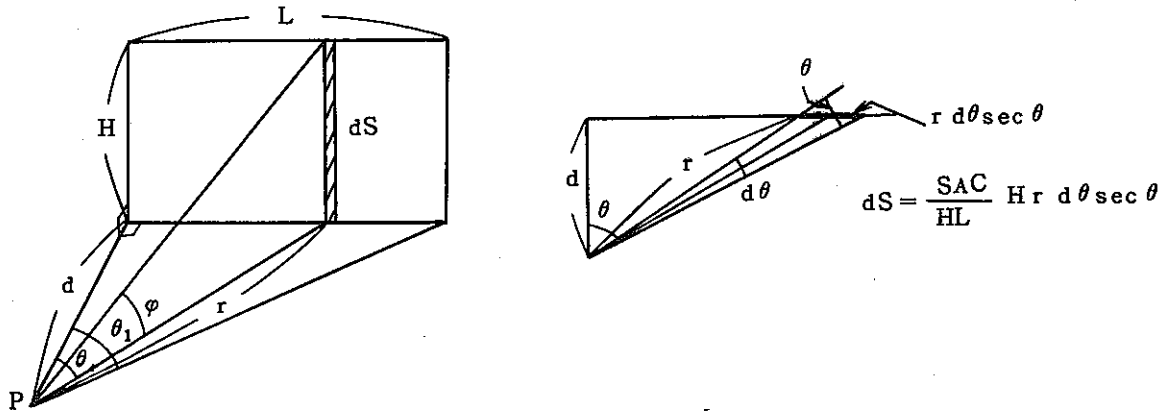
$$x = \frac{r}{R} \text{ で変数変換を行い, } l = \frac{a}{R}, \quad p = \frac{d}{R} \text{ で無次元化すると}$$

$$\phi = \frac{S_{AC}}{4\pi^2 R^2} G_1(\ell, p, \mu t) \quad (2-6-4)$$

ただし,

$$G_1(\ell, p, \mu t) = \int_0^{2\pi} \int_0^1 \frac{x \exp\{-\mu t \sqrt{x^2 + \ell^2 - 2x\ell \cos \theta + p^2} / p\}}{x^2 + \ell^2 - 2x\ell \cos \theta + p^2} dx d\theta \quad (2-6-5)$$

7	長方平板線源	$\phi = \frac{S_{AC}}{4\pi LH} G_2(m, n)$
---	--------	-------------------------------------------



$$dS = \frac{S_{AC}}{LH} Hr d\theta \sec \theta \quad (2-7-1)$$

長方平板を上図のように微小線源  $dS$  の集合とみなす。その強度  $dS$  は同図より式 (2-7-1) のようになる。

従ってこの微小線源による P 点での粒子束  $d\phi$  は, Na 3 の線源の公式で  $d \rightarrow r, L \rightarrow H, a \rightarrow 0, S_{LC} \rightarrow dS$  とすることにより次のようになる。

$$\begin{aligned} d\phi &= \frac{dSC}{4\pi Hr} \tan^{-1} \left( \frac{H}{r} \right) \\ &= \frac{S_{AC}}{4\pi LH} \tan^{-1} \left( \frac{H}{r} \right) \sec \theta d\theta \end{aligned} \quad (2-7-2)$$

これを  $\theta$  につき 0 から  $\theta_1 = \tan^{-1} \frac{L}{d}$  まで積分すればよい。

$r = d \sec \theta$  なので

$$\phi = \frac{S_{AC}}{4\pi LH} \int_0^{\tan^{-1} \left( \frac{L}{d} \right)} \tan^{-1} \left( \frac{H}{d \sec \theta} \right) \sec \theta d\theta \quad (2-7-3)$$

ここで積分項を無次元化して  $G_2(m, n)$  とし、グラフ化しておく。

ただし

$$m = \frac{L}{d} \quad n = \frac{H}{L}$$

すなわち

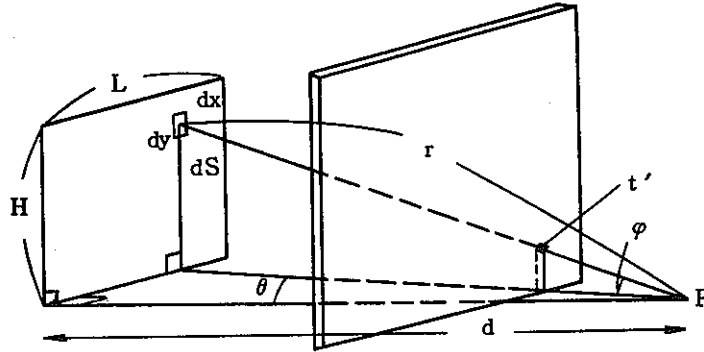
$$\phi = \frac{SAC}{4\pi LH} G_2(m, n) \quad (2-7-4)$$

---

注)  $G_2(m, n)$  のグラフは文献(1)p. 369 の  $\phi(m, n)$  と数値的には全く同じものであるが、同頁の Fig. 3-5 の  $\phi$  の値が間違っているため、別な方法で導びいた上の式で、別途数値計算したものである。



8	長方平板線源+遮蔽	$\phi = \frac{S_{AC}}{4\pi LH} G_3(m, n, \mu t)$
---	-----------	--------------------------------------------------



微小線源 dS と P 間の距離を r, このうち遮蔽体内の長さを t' とし, これらを  $\theta$  と  $\varphi$  で表わすと,

$$r = d \sec \theta \cdot \sec \varphi$$

$$t' = \frac{r}{d} t$$

$$= t \sec \theta \cdot \sec \varphi$$

微小線源の強度 dS を r,  $\theta$ ,  $\varphi$  で表わすと

$$dS = \frac{S_{AC}}{LH} dx dy \tag{2-8-1}$$

ただし

$$dx = (r \cos \varphi) d\theta \sec \theta$$

$$dy = r \cdot d\varphi \cdot \sec \varphi$$

従って dS による P 点での粒子束 d $\phi$  は

$$d\phi = \frac{dS}{4\pi r^2} e^{-\mu t'}$$

$$= \frac{S_{AC}}{4\pi LH} \sec \theta e^{-\mu t \sec \theta \sec \varphi} d\theta d\varphi \tag{2-8-2}$$

これを  $\theta$  に関して  $0 \rightarrow \tan^{-1}\left(\frac{L}{d}\right)$ ,  $\varphi$  に関して  $0 \rightarrow \tan^{-1}\left(\frac{H}{d \sec \theta}\right)$  の区間で二重積分すればよいわけだが、 $\varphi$  の上限は  $\theta$  の関数となっていることに注意すべきである。これはもちろん解析解はないので No 7 と同様無次元変数  $m, n$  により  $G_3(m, n, \mu t)$  とし表で求めておく。

即ち

$$\phi = \frac{S_{AC}}{4\pi LH} B G_3(m, n, \mu t) \quad (2-8-3)$$

ただし

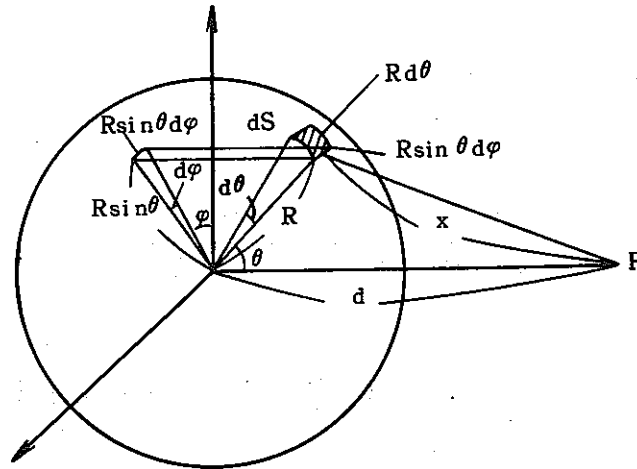
$$G_3(m, n, \mu t) = \int_0^{\tan^{-1} m} d\theta \int_0^{\tan^{-1}(m n \cos \theta)} d\varphi [\sec \theta \cdot e^{-\mu t \sec \theta \sec \varphi}] \quad (2-8-4)$$

$$m = \frac{L}{d} \quad n = \frac{H}{L}$$

注)。 $\mu t = 0$  とすれば当然 No 7 の  $G_2$  と等しくなる。

。長方平板線源+遮蔽は文献(1)では別の表現となっているが、使用方法が煩雑なので、ここでは独自の方法で導いた。

9	球表面線源	$\phi = \frac{S_{AC}}{8\pi R d} \ln \frac{d+R}{d-R}$
---	-------	------------------------------------------------------



上図のように球上の微小線源  $dS$  を考える。

微小線源の面積は  $(R d \theta)(R \sin \theta d \varphi)$  なので、強度  $dS$  は

$$dS = S_{AC} \frac{R^2 \sin \theta d \theta d \varphi}{4 \pi R^2} \tag{2-9-1}$$

微小線源  $dS$  による  $P$  点の粒子束  $d\phi$  は：
$$d\phi = \frac{dS}{4 \pi x^2}$$

$dS - P$  間の距離は：
$$x^2 = R^2 + d^2 - 2 R d \cos \theta$$

これを微分すると、
$$x dx = R d \sin \theta d \theta$$

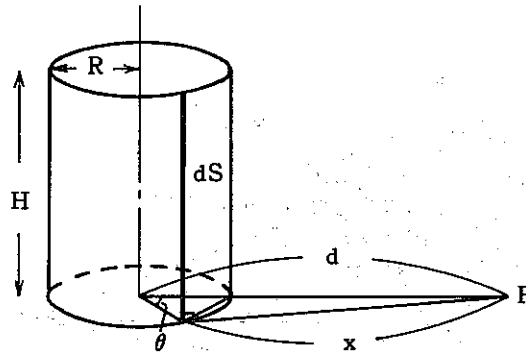
従って  $dS$  の  $\theta$  を  $x$  に変数変換すると

$$dS = \frac{S_{AC}}{4 \pi R d} dx d \varphi \tag{2-9-2}$$

積分区間は  $x$  が  $(d-R)$  から  $(d+R)$ 、 $\varphi$  が  $0$  から  $2\pi$  なので

$$\phi = \int_{d-R}^{d+R} dx \int_0^{2\pi} d\varphi \left[ \frac{S_{AC}}{16 \pi^2 R d} - \frac{1}{x} \right] = \frac{S_{AC}}{8 \pi R d} \ln \frac{d+R}{d-R} \tag{2-9-3}$$

10	円筒表面線源	$\phi = \frac{S_A C}{4\pi^2 H^2} G_4(k, p)$
----	--------	---------------------------------------------



上図のように円筒表面を軸に平行な微小線源  $dS$  の集合とみなし、 $p$  との距離を  $x$  とすると、 $dS$  による  $p$  点での粒子束  $d\phi$  は、式 (2-3-2) より

$$d\phi = \frac{dS}{4\pi Hx} \tan^{-1} \frac{H}{x} \tag{2-10-1}$$

微小線源強度  $dS$  は：
$$dS = \frac{S_A C}{2\pi R H} R d\theta H$$

$x$  を  $\theta$  で表わすと：
$$x = \sqrt{R^2 + d^2 - 2Rd \cos \theta}$$

従って  $\phi$  は  $\theta$  を 0 から  $2\pi$  まで積分すればよいので

$$\phi = \frac{S_A C}{8\pi^2 H^2} \int_0^{2\pi} \frac{H \tan^{-1} \left( \frac{H}{\sqrt{R^2 + d^2 - 2Rd \cos \theta}} \right)}{\sqrt{R^2 + d^2 - 2Rd \cos \theta}} d\theta \tag{2-10-2}$$

ここで  $k = \frac{H}{R}$ ,  $p = \frac{d}{R}$  とし積分を無次元化し  $G_4(k, p)$  とすると

$$\phi = \frac{S_A C}{4\pi^2 H^2} G_4(k, p) \tag{2-10-3}$$

$$G_4(k, p) = \int_0^\pi \frac{k}{\sqrt{p^2 + 1 - 2p \cos \theta}} \tan^{-1} \left( \frac{k}{\sqrt{p^2 + 1 - 2p \cos \theta}} \right) d\theta \tag{2-10-4}$$

注) この円筒表面線源については、第1種楕円積分で  $\phi$  を表わす方法が、多くのテキストに記載されているが、その変数 ( $\phi, k$ ) の取扱いがめんどろなので、より簡単な変数 ( $k, p$ ) による計算方法を導き、 $G_4(k, p)$  としてグラフ化した。

11	円筒表面線源 (内部吸収)	$\phi = \frac{S_A C}{4 \pi^2 R H} W(k, p, \mu_s R, 0)$
----	------------------	--------------------------------------------------------

説明が前後するが、この内部吸収を考慮した円筒表面線源については外部遮蔽を含めた場合について次のNo12で記述してある。

このNo11はNo12の  $b_1 = \mu t = 0$  に相当するので式(2-12-7)より

$$\phi = \frac{S_A C}{4 \pi^2 R H} W(k, p, \mu_s R, 0) \tag{2-11-1}$$

ただし

$$W(k, p, \mu_s R, 0) = \int_0^\pi d\varphi \int_0^k dx \left[ \frac{\exp\left\{-2\mu_s R \frac{(1-p\cos\varphi)\sqrt{1+p^2-2p\cos\varphi+x^2}}{1+p^2-2p\cos\varphi}\right\}}{1+p^2-2p\cos\varphi+x^2} \right] \tag{2-11-2}$$



一方 AP のうち遮蔽体内の長さ  $t'$  は次のようになる。

$$t' = \frac{AP}{EP} t = \frac{\sqrt{R^2 + d^2 - 2 R d \cos \varphi + h^2}}{d - R \cos \varphi} t \quad (2-12-3)$$

微小線源の強度  $dS$  は

$$dS = \frac{S_{AC}}{2\pi RH} R d\varphi dh$$

従って  $d\phi$  は次式となる。

$$d\phi = \frac{\frac{S_{AC}}{2\pi RH} R d\varphi dh e^{-\mu_s y} e^{-\mu t'}}{4\pi (R^2 + d^2 - 2 R d \cos \varphi + h^2)} \quad (2-12-5)$$

これを  $\varphi$  が 0 から  $2\pi$ ,  $h$  が 0 から  $H$  の区間で積分すればよい。

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{S_{AC}}{8\pi^2 H} B \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^H dh \left[ \exp\left\{-\mu_s 2R \frac{(R-d \cos \varphi) \sqrt{R^2 + d^2 - 2 R d \cos \varphi + h^2}}{R^2 + d^2 - 2 R d \cos \varphi}\right\} \right. \\ &\quad \left. \times \exp\left\{-\mu t \frac{\sqrt{R^2 + d^2 - 2 R d \cos \varphi + h^2}}{d - R \cos \varphi}\right\} \right] \quad (2-12-6) \end{aligned}$$

ここで  $x = \frac{h}{R}$ ,  $k = \frac{H}{R}$ ,  $p = \frac{d}{R}$  として無次元化すると

$$\phi = \frac{S_{AC}}{4\pi^2 RH} BW(k, p, \mu_s R, b_1) \quad (2-12-7)$$

ただし  $b_1 = \mu t$

$$\begin{aligned} W(k, p, \mu_s R, b_1) &= \int_0^\pi d\varphi \int_0^k dx \left[ \exp\left\{-2\mu_s R \frac{(1-p \cos \varphi) \sqrt{1+p^2 - 2p \cos \varphi + x^2}}{1+p^2 - 2p \cos \varphi}\right\} \right. \\ &\quad \left. \times \exp\left\{-b_1 \frac{\sqrt{1+p^2 - 2p \cos \varphi + x^2}}{p - \cos \varphi}\right\} \right] \quad (2-12-8) \end{aligned}$$

注) この場合の再生係数  $B$  は内部吸収と遮蔽体による複合されたもので、その値を決めるのは非常に難しい。

13	球体積線源	$\phi = \frac{3S_V C}{8\pi R^3 d} \left( dR + \frac{R^2 - d^2}{2} \ell n \frac{d+R}{d-R} \right)$
----	-------	---------------------------------------------------------------------------------------------------

球を薄い球殻の集合と見なすと、No 9の球表面線源の式(2-9-3)を半径0からRまで積分すれば球体積線源の粒子束を与える式が得られる。

半径rの球殻の線源強度(dS)は、

$$dS = \frac{S_V C}{\frac{4}{3}\pi R^3} 4\pi r^2 dr = \frac{3S_V C}{R^3} r^2 dr \quad (2-13-1)$$

これを式(2-9-3)の $S_{AC}$ に代入し、Rをr(変数)に書き換えるとdφは、

$$d\phi = \frac{3S_V C}{8\pi R^3 d} r \ell n \frac{d+r}{d-r} dr \quad (2-13-2)$$

これをrについて0からRの区間で積分すると次式が得られる。

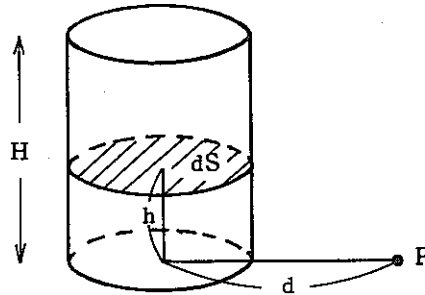
$$\phi = \int_0^R d\phi = \frac{3S_V C}{8\pi R^3 d} \left( dR + \frac{R^2 - d^2}{2} \ell n \frac{d+R}{d-R} \right) \quad (2-13-3)$$

(補足) 上記の積分の詳細を以下に記す。

$$\begin{aligned} & \int_0^R r \ell n \frac{d+r}{d-r} dr \\ &= \left\{ \frac{r^2}{2} \ell n (d+r) \Big|_0^R - \int_0^R \frac{r^2}{2} \frac{dr}{d+r} \right\} - \left\{ \frac{r^2}{2} \ell n (d-r) \Big|_0^R + \int_0^R \frac{r^2}{2} \frac{dr}{d-r} \right\} \\ &= \frac{R^2}{2} \ell n \frac{d+R}{d-R} - \frac{1}{2} \int_0^R \left( r-d + \frac{d^2}{r+d} \right) dr + \frac{1}{2} \int_0^R \left( r+d + \frac{d^2}{r-d} \right) dr \\ &= \frac{R^2}{2} \ell n \frac{d+R}{d-R} + \frac{1}{2} \int_0^R 2d dr + \frac{d^2}{2} \int_0^R \left( \frac{1}{r-d} - \frac{1}{r+d} \right) dr \\ &= \frac{R^2}{2} \ell n \frac{d+R}{d-R} + dR + \frac{d^2}{2} \ell n \left| \frac{r-d}{r+d} \right|_0^R \\ &= dR + \frac{R^2 - d^2}{2} \ell n \frac{d+R}{d-R} \end{aligned}$$



14	円柱体積線源	$\phi = \frac{S_V C}{4 \pi R^2} G_5(k, p)$
----	--------	--------------------------------------------



円柱線源を円板線源の重なりと見なすと、No 5 の式を円柱の軸方向に積分すれば円柱体線源の粒子束  $\phi$  を求めることができる。

上図の斜線で示した円板線源  $dS$  による  $P$  点での粒子束  $d\phi$  は式 (2-5-3) より

$$d\phi = \frac{S_V C}{4 \pi R^2} \ell n \frac{h^2 + R^2 - d^2 + \sqrt{R^4 + 2 R^2 (h^2 - d^2) + (h^2 + d^2)^2}}{2 h^2} \quad (2-14-1)$$

これを 0 から  $H$  まで積分すればよい。ここで積分の部分が無次元化するために  $x = h/H$  で変数変換し、 $k = \frac{H}{R}$   $p = \frac{d}{R}$  とすると、

$$\phi = \frac{S_V C}{4 \pi R^2} G_5(k, p) \quad (2-14-2)$$

$$G_5(k, p) = \int_0^1 dx \ell n \left[ \frac{x^2 + \left(\frac{1}{k}\right)^2 - \left(\frac{p}{k}\right)^2 + \sqrt{\left(\frac{1}{k}\right)^4 + 2 \left(\frac{1}{k}\right)^2 \left\{x^2 - \left(\frac{p}{k}\right)^2\right\} + \left\{x^2 \left(\frac{p}{k}\right)^2\right\}}}{2 x^2} \right] \quad (2-14-3)$$

15	円柱体積線源 (内部吸収)	$\phi = \frac{S_V C}{2\pi^2 R H} G(k, p, \mu_s R, 0)$
----	------------------	-------------------------------------------------------

この証明については Na16 に外部遮蔽を考慮した場合が詳述されているので参照されたい。

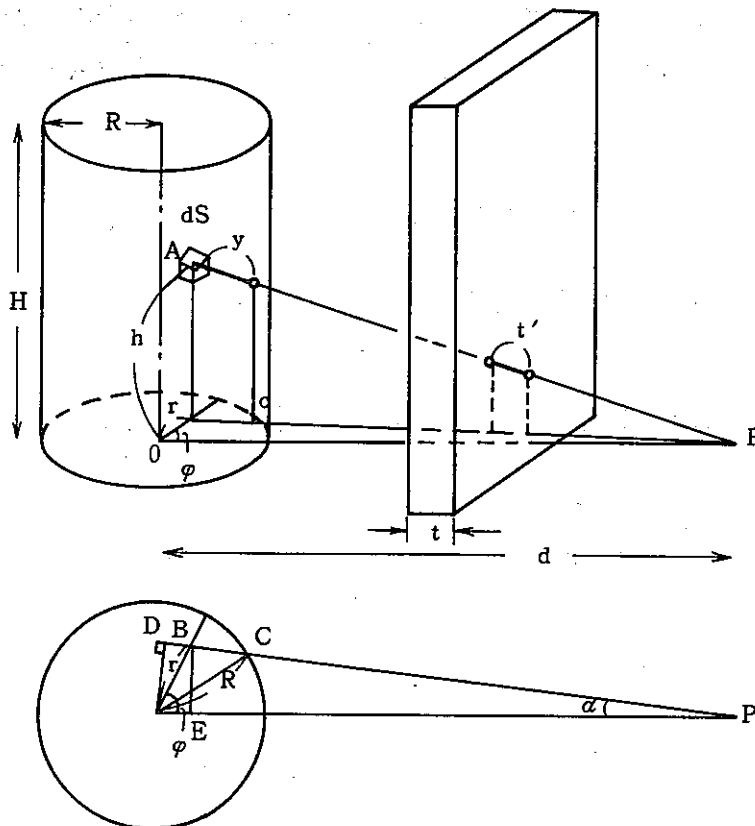
Na16 で  $b_1 = 0$  とすればよい

$$\phi = \frac{S_V C}{2\pi^2 R H} G(k, p, \mu_s R, 0) \quad (2-15-1)$$

ただし

$$G(k, p, \mu_s R, 0) = \int_0^1 dx \int_0^k dz \int_0^\pi \frac{x dx d\varphi dz}{x^2 + p^2 - 2px \cos \varphi + z^2} \\ \times \exp \left[ -\mu_s R \left\{ \frac{x^2 - px \cos \varphi + \sqrt{(x^2 + p^2 - 2px \cos \varphi) - p^2 x^2 \sin^2 \varphi}}{x^2 + p^2 - 2px \cos \varphi} \right\} \right] \quad (2-15-2)$$

16	円柱体積線源 + 内部吸収 + 遮蔽	$\phi = \frac{SvC}{2\pi^2 RH} BG(k, p, \mu_s R, b_1)$
----	--------------------------	-------------------------------------------------------



上図のように円柱内のA点にある微小線源 \$dS\$ を考える。

まずA点とP点を結ぶ線分のうち円柱内に含まれる長さ \$y\$ を求める。

$$\frac{y}{BC} = \frac{AP}{BP} \tag{2-16-1}$$

$$BP = \sqrt{r^2 + d^2 - 2rd \cos \varphi}$$

$$AP = \sqrt{r^2 + d^2 - 2rd \cos \varphi + h^2}$$

$$BC = BP - PC$$

$$= BP - (DP - DC)$$

$$= \sqrt{r^2 + d^2 - 2rd \cos \varphi} - (d \cos \alpha - \sqrt{R^2 - d^2 \sin^2 \alpha}) \tag{2-16-2}$$

$$\cos \alpha = \frac{EP}{BP} = \frac{d - r \cos \varphi}{\sqrt{r^2 + d^2 - 2rd \cos \varphi}}$$

以上の式により  $y$  を変数  $r, \varphi$  で表わすと

$$y = \frac{r^2 - dr \cos \varphi + \sqrt{(r^2 + d^2 - 2rd \cos \varphi)R^2 - d^2 r^2 \sin^2 \varphi}}{\sqrt{r^2 + d^2 - 2rd \cos \varphi}} \frac{\sqrt{r^2 + d^2 - 2rd \cos \varphi + h^2}}{\sqrt{r^2 + d^2 - 2rd \cos \varphi}} \quad (2-16-3)$$

一方遮蔽体内の長さ  $t'$  は次の式で得られる。

$$t' = t \frac{AP}{EP} = t \frac{\sqrt{r^2 + d^2 - 2rd \cos \varphi + h^2}}{d - r \cos \varphi} \quad (2-16-4)$$

$dS$  による  $P$  点での粒子束  $d\phi$  は  $y, t'$  を用いると次のようになる。

$$d\phi = \frac{dS}{4\pi} \frac{e^{-\mu_s y} e^{-\mu t'}}{(r^2 + d^2 - 2rd \cos \varphi + h^2)}$$

ただし

$$dS = \frac{SVC}{\pi R^2 H} r d\varphi dr dh$$

これを  $\left. \begin{array}{l} r : 0 \rightarrow R \\ \varphi : 0 \rightarrow 2\pi \\ h : 0 \rightarrow H \end{array} \right\}$  の区間で積分すればよい。

ここで  $r = Rx, h = Rz$  で変数変換を行い、従来通り  $k = \frac{H}{R}, p = \frac{d}{R}$  として

積分内を無次元化し、これを  $G(k, p, \mu_s R, b_1)$  とすると、

$$\phi = \frac{SVC}{2\pi^2 RH} B G(k, p, \mu_s R, b_1) \quad (2-16-5)$$

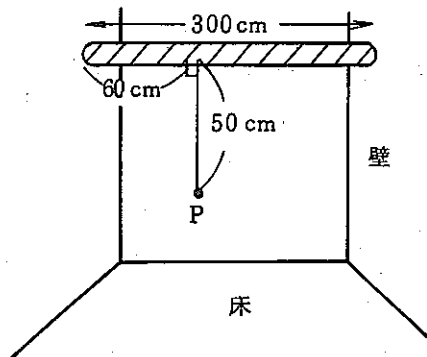
ただし

$$b_1 = \mu t$$

$$\begin{aligned}
 G(k, p, \mu_s R, b_1) &= \int_0^1 dx \int_0^k dz \int_0^\pi d\varphi \frac{x dx d\varphi dz}{x^2 + p^2 - 2 px \cos \varphi + z^2} \\
 &\times \exp \left[ -\mu_s R \left\{ \frac{x^2 - px \cos \varphi + \sqrt{(x^2 + p^2 - 2 px \cos \varphi) - p^2 x^2 \sin^2 \varphi}}{x^2 + p^2 - 2 px \cos \varphi} \right\} \right] \\
 &\times \exp \left[ -b_1 \left\{ \frac{\sqrt{x^2 + p^2 - 2 px \cos \varphi + z^2}}{p - x \cos \varphi} \right\} \right] \quad (2-16-6)
 \end{aligned}$$

2.3 計算例

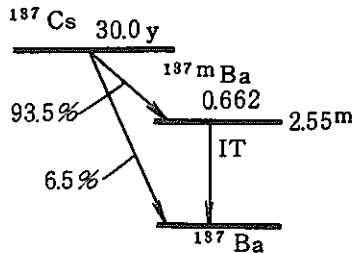
例題 2-1



左図のように、ある実験室の隅の上部にサンプルビン輸送用の気送管が通っている。長期間の使用で管内が汚染され、これによる室内での線量が図のP点で測定したところ 50 [mR/hr] もあった。これを交換するために管内の汚染の単位長さ当りの強度 [Ci/cm] を知りたい。汚染核種が明確でないので  $^{137}\text{Cs}$  によるものとし、管内は均等に汚染されているものとする。

セシウム 137 からは 0.662 MeV の  $\gamma$  線が放出率 85% で放出される。

図 2-1 から変換係数を読み取ると



$$f E = 1.2 \times 10^{-6} \left[ \frac{R \text{ sec cm}^2}{h} \right]$$

気送管を線線源とみなすと、No 3 より

$$\phi = \frac{S_L C}{4 \pi L d} \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{a}{d} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{L-a}{d} \right) \right\}$$

ここで未知数は  $S_L$  [Ci] である。D [R/hr] は  $f E$  と  $\phi$  の積なので、求める単位長さ当りの強度は次の様になる。

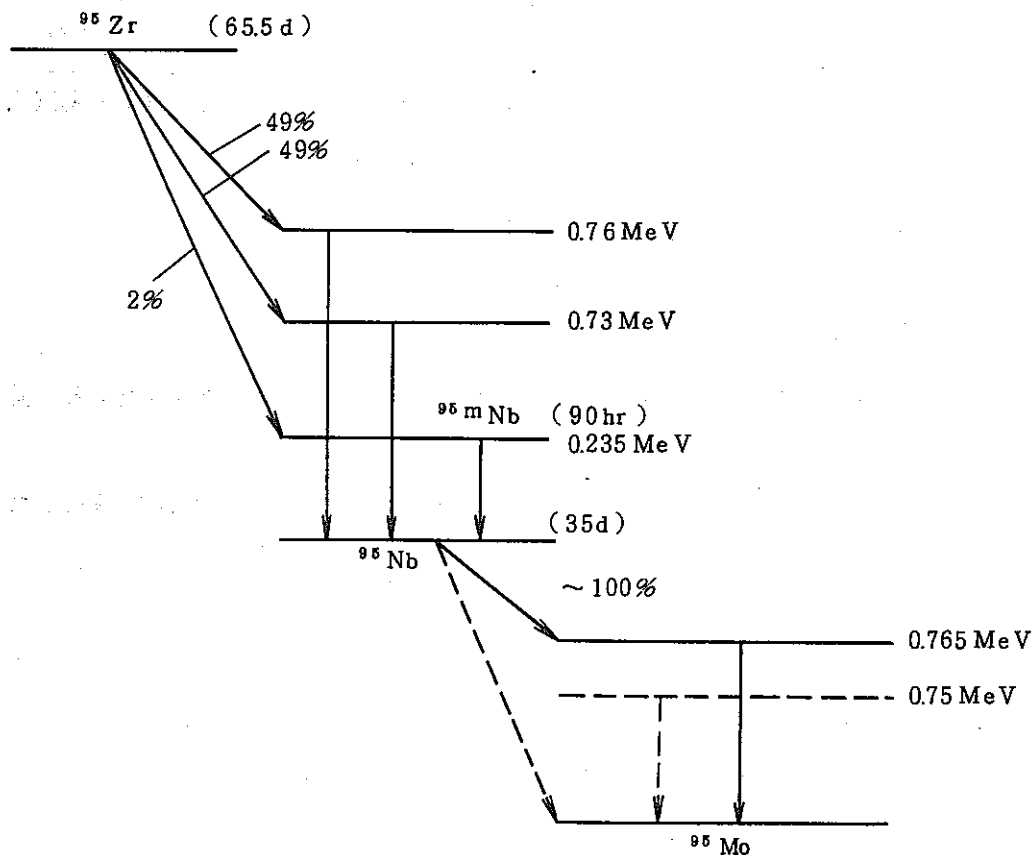
$$\begin{aligned} \frac{S_L}{L} [\text{Ci/cm}] &= 4 \pi d D / f E \cdot C \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{a}{d} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{L-a}{d} \right) \right\} \\ &= \frac{4 \pi (50) (50 \times 10^{-3})}{(1.2 \times 10^{-6}) (3.7 \times 10^{10}) \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{60}{50} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{300-60}{50} \right) \right\}} \\ &= 3.2 \times 10^{-4} \end{aligned}$$

従って 1 cm 当たり 320  $\mu\text{Ci}$  である。

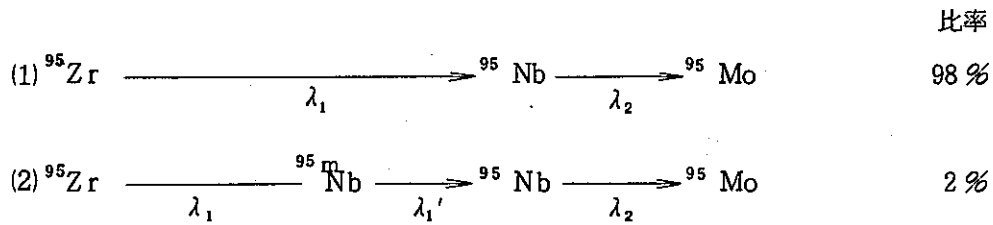
例題 2-2

OTL の MA セルには、外部に左図のようなグローブボックスが付設されている。セル内で抽出実験を行うに、フィード液の供給ポンプは、保守の必要性から左図のようにグローブボックス内に設置することとした。配管は塩ビ製で 0.5 cm  $\phi$  のものを用いた。フィード液中の主たる  $\gamma$  放出核種は  $^{95}\text{Zr}$  で、その濃度は  $10 [\mu\text{g}/\ell]$  である。左図の P 点での線量を求める。ただし同グローブボックス前面には遮蔽体として鉛 0.5 cm 当量の鉛ガラスパネルが設置されている。

ジルコニウム 95 の崩壊図を下に示す。同図からわかるようにその取扱いは相当に複雑なものとなる。



崩壊系列は同図から2種類のルートが考えられる。



上図で $\lambda$ は崩壊定数であり、 $\lambda_1$ と $\lambda_2$ 、 $\lambda_1$ と $\lambda_1'$ は過渡平衡の関係にある。

$^{95}\text{Zr}$ からの $r$ 線には、 $^{95}\text{Nb}$ からの $r$ 線も考慮しなければならない。ここではまず $^{95}\text{Zr}$ と $^{95}\text{Nb}$ の原子数の比を調べて、放射平衡時の $^{95}\text{Nb}$ の濃度を求める。

上図の系列(1)による $^{95}\text{Nb}$ の原子数を $N_2'$ 、系列(2)による原子数を $N_2''$ とし、その和を $N_2$ とする。 $^{95}\text{Zr}$ の原子数を $N_1$ としその初期値を $N_1^0$ とする。 $^{95}\text{Nb}$ はすべて $^{95}\text{Zr}$ の壊変により生成し、その初期値を0とすると、時刻 $t$  [d]での原子数は次式で表わされる。

$$N_1 = N_1^0 e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2' = 0.98 N_1^0 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

$$N_2'' = 0.02 N_1^0 \lambda_1 \lambda_1' \left\{ \frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_1' - \lambda_1)(\lambda_2 - \lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_1' t}}{(\lambda_1 - \lambda_1')(\lambda_2 - \lambda_1')} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_1' - \lambda_2)} \right\}$$

ここで  $\lambda_1 = \ln 2 / (65.5) = 0.01058 \text{ [d}^{-1}\text{]}$

$\lambda_1' = \ln 2 / (90/24) = 0.18484 \text{ [d}^{-1}\text{]}$

$\lambda_2 = \ln 2 / (35) = 0.01980 \text{ [d}^{-1}\text{]}$

を代入し、 $N_1$ と $N_2 (=N_2' + N_2'')$ の比を $t$ の関数として求めたものをグラフ化すると図2-9のようになる。

同図より $t$ が大きくなると $N_2/N_1$ は1.149と一定になる。これは系列(2)を無視した場合の、良く知られている過渡平衡の関係

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = 1.148$$

とほぼ等しく、系列(2)を考慮しなくてもよいことがわかる。

従って $^{95}\text{Nb}$ の濃度は $^{95}\text{Zr}$ が $10 \mu\text{g}/\ell$ なので



$$10 \frac{95}{95} 1.15 = 11.5 \text{ } [\mu\text{g}/\ell]$$

である。問題にもどって、遮蔽パネルに平行な部分の配管のみを考えると、その中に含まれる<sup>95</sup>Zrの量は次のようになる。

$${}^{95}\text{Zr} \quad (10 \times 10^{-6} \times 10^{-3}) \pi \left(\frac{0.5}{2}\right)^2 (100) = 1.96 \times 10^{-7} \text{ } [\text{g}]$$

従って<sup>95</sup>Zrからのγ線放射能[Ci]は次のようになる。

$${}^{95}\text{Zr} \quad \frac{(0.0106) (1.96 \times 10^{-7}) (6.02 \times 10^{23})}{(24)(60^2) (95) (3.7 \times 10^{10})} = 4.12 \times 10^{-3} \text{ } [\text{Ci}]$$

<sup>95</sup>Zrからは0.756 MeVと0.724 MeVのγ線がそれぞれ49%の放出率ででていいる。一方<sup>95</sup>Nbからは、<sup>95</sup>Zrの一崩壊当たり0.756MeVのγ線が1ヶ放出されている。従って考慮すべきγ線をまとめると、

エネルギー	放射能強度
0.756 MeV	$4.12 \times 10^{-3} \times 0.49 = 2.02 \times 10^{-3} \text{ } [\text{Ci}]$
0.724 MeV	$4.12 \times 10^{-3} \times 0.49 = 2.02 \times 10^{-3} \text{ } [\text{Ci}]$
0.765 MeV	$4.12 \times 10^{-3} \text{ } [\text{Ci}]$

0.235 MeVのγ線は放出率も小さいので無視した。

上記3種類のγ線についてそれぞれ照射線量を求めてもよいが、エネルギーが近いので、放射能で加重平均した1種類のエネルギーを用いてもよい。即ち

$$\frac{(0.756) (2.02 \times 10^{-3}) + (0.724) (2.02 \times 10^{-3}) + (0.765) (4.12 \times 10^{-3})}{(2.02 \times 10^{-3}) + (2.02 \times 10^{-3}) + (4.12 \times 10^{-3})}$$

$$= 0.753 \text{ } [\text{MeV}]$$

一方放射能強度は和をとればよいので

$$(2.02 \times 10^{-3}) + (2.02 \times 10^{-3}) + (4.12 \times 10^{-3})$$

$$= 8.16 \times 10^{-3} \text{ } [\text{Ci}]$$

従ってこの問題は

$$E = 0.753 \text{ } [\text{MeV}]$$

$$S_L = 8.16 \times 10^{-3} \quad [\text{Ci}]$$

$$L = 100 \quad [\text{cm}]$$

の線線源に、鉛 0.5 cm 当量の遮蔽体を付加する問題に帰着する。図 2-1 から変換係数  $fE$ 、図 2-2 から鉛の吸収係数  $\mu$  を求める。再生係数は鉛ガラスについてのデータはないので表 2-2 の鉛の再生係数で代表させることにする。

$$fE = 1.4 \times 10^{-6}$$

$$\mu = 1.1$$

$$B = 1.2$$

No. 4 の式が使えるので

$$D = fE \cdot \frac{S_L C}{4 \pi L d} B \{ -F(\theta_1, b_1) + F(\theta_2, b_1) \}$$

$$-\theta_1 = \theta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{50}{50} \right) = 45^\circ$$

$$b_1 = \mu_1 t = (1.1)(0.5) = 0.55$$

なので、図 2-5 から  $F(\theta, b_1)$  を読みとり、 $D$  を求めると、

$$D = (1.4 \times 10^{-6}) \frac{(8.2 \times 10^{-3})(3.7 \times 10^{10})}{4 \pi (100)(50)} (1.2)(0.44 + 0.44)$$

$$= 0.007 \quad [\text{R/hr}]$$

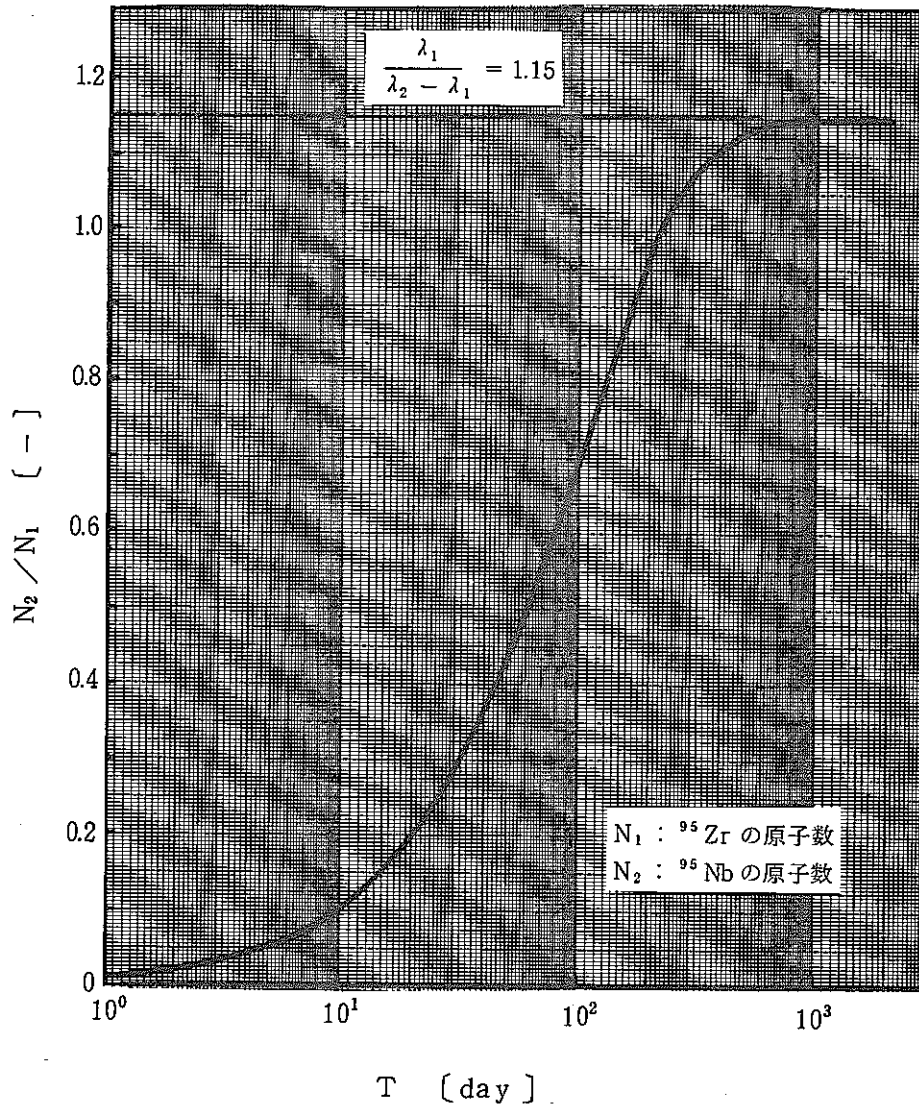
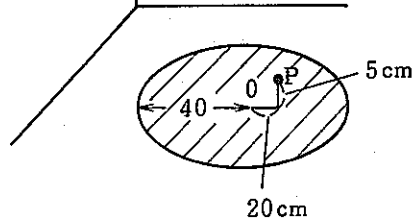


図 2 - 9  $^{95}\text{Zr} - ^{95}\text{Nb}$  原子数密度比の経時変化

例題 2-3



ウラン溶液を運搬中、誤って左図のように半径約 40 cm の円形状の床汚染を引き起した。同図の P 点で  $\gamma$  線を測定したら 0.1 [mR/hr] であった。この値からウランの損失量を推定したい。

ただしこの溶液中のウランの濃縮度は 3% である。

濃縮度が 3% なので、同ウラン中に含まれる同位体は  $^{238}\text{U}$  97%,  $^{235}\text{U}$  が 3% である。 $\gamma$  線については  $^{235}\text{U}$  のみを考えればよい。同位元素表によると  $^{235}\text{U}$  から放出される主な  $\gamma$  線は以下のものである。その放出率と変換数をまとめると、

エネルギー [MeV]	放出率 (%)	変換係数 fE
0.185	54	$3.1 \times 10^{-7}$
0.143	11	$2.3 \times 10^{-7}$
0.204	5	$3.5 \times 10^{-7}$
0.163	5	$2.7 \times 10^{-7}$

全  $\gamma$  線強度を  $S_A$  [Ci] とすると、線量率は No. 5 の式を用いて次のように表わされる。

$$D = (3.1 \times 0.54 + 2.3 \times 0.11 + 3.5 \times 0.05 + 2.7 \times 0.05) 10^{-7} \frac{S_A C}{4\pi R^2} \ln \frac{d^2 + R^2 - a^2 + \sqrt{R^4 + 2R^2(d^2 - a^2) + (d^2 + a^2)^2}}{2d^2}$$

$a = 20$      $d = 5$      $R = 40$      $D = 0.0001$     を代入すると

$$S_A C = 2.3 \times 10^6 \text{ [cps]}$$

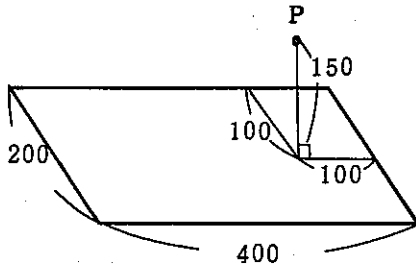
従って崩壊率は  $\frac{2.3 \times 10^6}{0.54 + 0.11 + 0.05 + 0.05} = 3.1 \times 10^6 \text{ [dps]}$

$^{235}\text{U}$  の半減期は  $7.1 \times 10^8$  年なので、崩壊定数は  $3.1 \times 10^{-17} \text{ [sec}^{-1}\text{]}$ 。

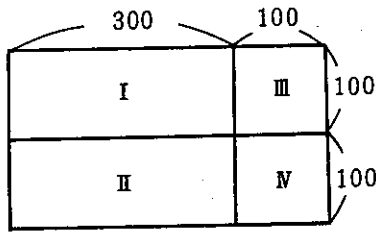
従ってウランの損失量は

$$\frac{(3.1 \times 10^6) (235)}{(3.1 \times 10^{-17}) (6.02 \times 10^{23}) (0.03)} = 1300 \text{ [g]}$$

例題 2-4



OTL の MA セルは床面が左図のように約 200 × 400 である。左図の P 点に TLD 線量計を固定して空間線量を測定したところ、<sup>137</sup>Cs (0.662 MeV) 換算で 100 [mR/hr] であった。床面の汚染が均等であるとし、その汚染の程度を推定し、保守のため人が立った場合の最大被曝線量率を求める。但し壁面による散乱及び反射は無視する。



床面を左図のように 4 分割すると No. 7 の長方平面線源の式が使える。それぞれの平面を I, II, III, IV とすると I と II, III と IV は形状が等しいので、P 点での線量は、I と III の平面からの線量の 2 倍とすればよい。

変換係数 fE は図 2-1 から 0.662 MeV について読みとると

$$fE = 1.2 \times 10^{-6} \left[ \frac{\text{Rsec cm}^2}{\text{hr}} \right]$$

No. 7 から r 粒子束の式は

$$\phi = \frac{S_A C}{4 \pi L H} G_2(m, n)$$

G<sub>2</sub>(m, n) は図 2-6 から読みとる。

平面 I について

$$L = 300 \quad m = \frac{L}{d} = \frac{300}{150} = 2$$

$$\therefore G_2(m, n) = 0.68$$

$$H = 100 \quad n = \frac{H}{L} = \frac{100}{300} = 0.33$$

平面 III について

$$L = 100 \quad m = \frac{L}{d} = \frac{100}{150} = 0.67$$

$$\therefore G_2(m, n) = 0.35$$

$$H = 100 \quad n = \frac{H}{L} = \frac{100}{100} = 1.0$$

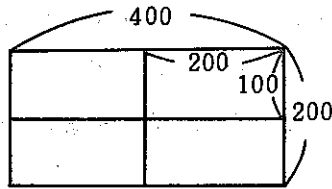
従って照射線量率 100 [mR/hr] については次式がなり立つ

$$0.1 = (1.2 \times 10^{-6}) \frac{C}{4\pi} \cdot 2 \left( \frac{\frac{3}{8} S_A (0.68)}{(300)(100)} + \frac{\frac{1}{8} S_A (0.35)}{(100)(100)} \right)$$

これより床面全体の放射能  $S_A$  を求めると

$$S_A = 1.1 \text{ [Ci]}$$

床面よりの被曝線量を求める場合は、床面より約 1m の高さの線量を用いる。又同セル内での最大値を示す地点は、汚染が均一の場合は当然セルの中心となるので、床面を左図のように 4 分割して、その 1 平面による線量の 4 倍を被曝線量とすればよい。



$$m = \frac{L}{d} = \frac{200}{100} = 2$$

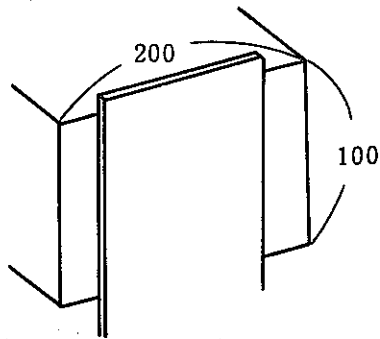
$$n = \frac{H}{L} = \frac{100}{200} = 0.5$$

$$\therefore G_2(m, n) = 0.93$$

従って最大被曝線量率の予想値は次のようになる。

$$4 (1.2 \times 10^{-6}) \frac{(\frac{1.1}{4}) C}{4\pi (200)(100)} (0.93) = 0.18 \text{ [R/hr]}$$

例題 2-5



例題 2-2 グローブボックス表面の寸法は左図のように 100 cm × 200 cm である。長期の作業で内部の汚染がひどくなり、表面の中心から 20 cm はなれて線量を測定したら、10 [mR/hr] であった。前述の遮蔽パネル（鉛 0.5 cm 当量）を設置した場合、線量はどのくらいに減るかを試算する。 $\gamma$ 線のエネルギーは  $^{137}\text{Cs}$  の 0.662 MeV で代表させるものとする。

グローブボックス表面を平面等方線源と見なすと No. 7 の式より

$$D' = f E \frac{S_A C}{4 \pi L H} G_2(m, n)$$

一方遮蔽体を考慮する場合は No. 8 の式より

$$D = f E \frac{S_A C}{4 \pi L H} B G_3(m, n, \mu t)$$

上の二式で未知数は D と  $S_A$  なので、これから D を求めると、

$$D = \frac{D'}{G_2(m, n)} B G_3(m, n, \mu t)$$

測定点はグローブボックス表面の中心から 20 cm なので

$$m = \frac{L}{d} = \frac{100}{20} = 5$$

$$n = \frac{H}{L} = \frac{50}{100} = 0.5$$

鉛の吸収係数、及び再生係数は例題 2-2 と同様にして

$$\mu = 1.1 \text{ [cm}^{-1}\text{]} \quad \therefore \mu t = (1.1)(0.5) = 0.55$$

$$B = 1.2$$

次に図 2-6 及び表 2-4 より  $G_2, G_3$  を決めると、D は

$$D = \frac{(0.01)}{(2.1)} (1.2) (0.71) = 4.0 \times 10^{-3} \text{ [R/hr]}$$

例題 2-6 以下にあげた線源で測定点からの距離と得られる結果に関して、その近似性について調べる。

- No. 1 点線源  
 No. 5 円板線源  
 No. 9 球表面線源  
 No. 13 球体積線源

各線源の強度を  $S$  [Ci]、半径を  $R$  [cm] とし、しかも単一エネルギー線源と仮定すると、各々の中心から  $d$  [cm] はなれた点での線量率 ( $D_1, D_5, D_9, D_{13}$ ) は、表 2-1 から次の様になる。

$$\text{No. 1 点線源} \quad : \quad D_1 = f E \frac{SC}{4\pi d^2}$$

$$\text{No. 5 円板線源} \quad : \quad D_5 = f E \frac{SC}{4\pi R^2} \ell n \frac{d^2 + R^2}{d^2}$$

$$\text{No. 9 球表面線源} \quad : \quad D_9 = f E \frac{SC}{8\pi R d} \ell n \frac{d+R}{d-R}$$

$$\text{No. 13 球体積線源} \quad : \quad D_{13} = f E \frac{3SC}{8\pi R^3 d} \left( dR + \frac{R^2 - d^2}{2} \ell n \frac{d+R}{d-R} \right)$$

ここで  $\frac{d}{R} = x$  とし、上の各式を書き換えると (但し  $x > 1$ )

$$\text{No. 1} \quad D_1 = \left( f E \frac{SC}{4\pi R^2} \right) \left\{ \frac{1}{x^2} \right\}$$

$$\text{No. 5} \quad D_5 = \left( f E \frac{SC}{4\pi R^2} \right) \left\{ \ell n \left( 1 + \frac{1}{x^2} \right) \right\}$$

$$\text{No. 9} \quad D_9 = \left( f E \frac{SC}{4\pi R^2} \right) \left\{ \frac{1}{2x} \ell n \left( \frac{x+1}{x-1} \right) \right\}$$

$$\text{No. 13} \quad D_{13} = \left( f E \frac{SC}{4\pi R^2} \right) \left\{ \frac{3}{2} + \frac{3}{4} \left( \frac{1}{x} - x \right) \ell n \left( \frac{x+1}{x-1} \right) \right\}$$

これらの式で { } 内を  $f(x)$  とすると、これらは無次元数  $x$  のみの関数となる。( ) 内の



係数はすべて等しいので、各々の線量率の大小関係は、 $f(x)$  を比較すればわかる。これを図示したものが図2-10である。

同図より、半径  $R$  と中心から測定点までの距離  $d$  の比  $x$  が約3以上の場合、どの体系でもほぼ同じ線量となることがわかる。従ってこのような場合は、もっとも簡単な点線源の式を用いても、ほぼ満足のゆく値が得られる。

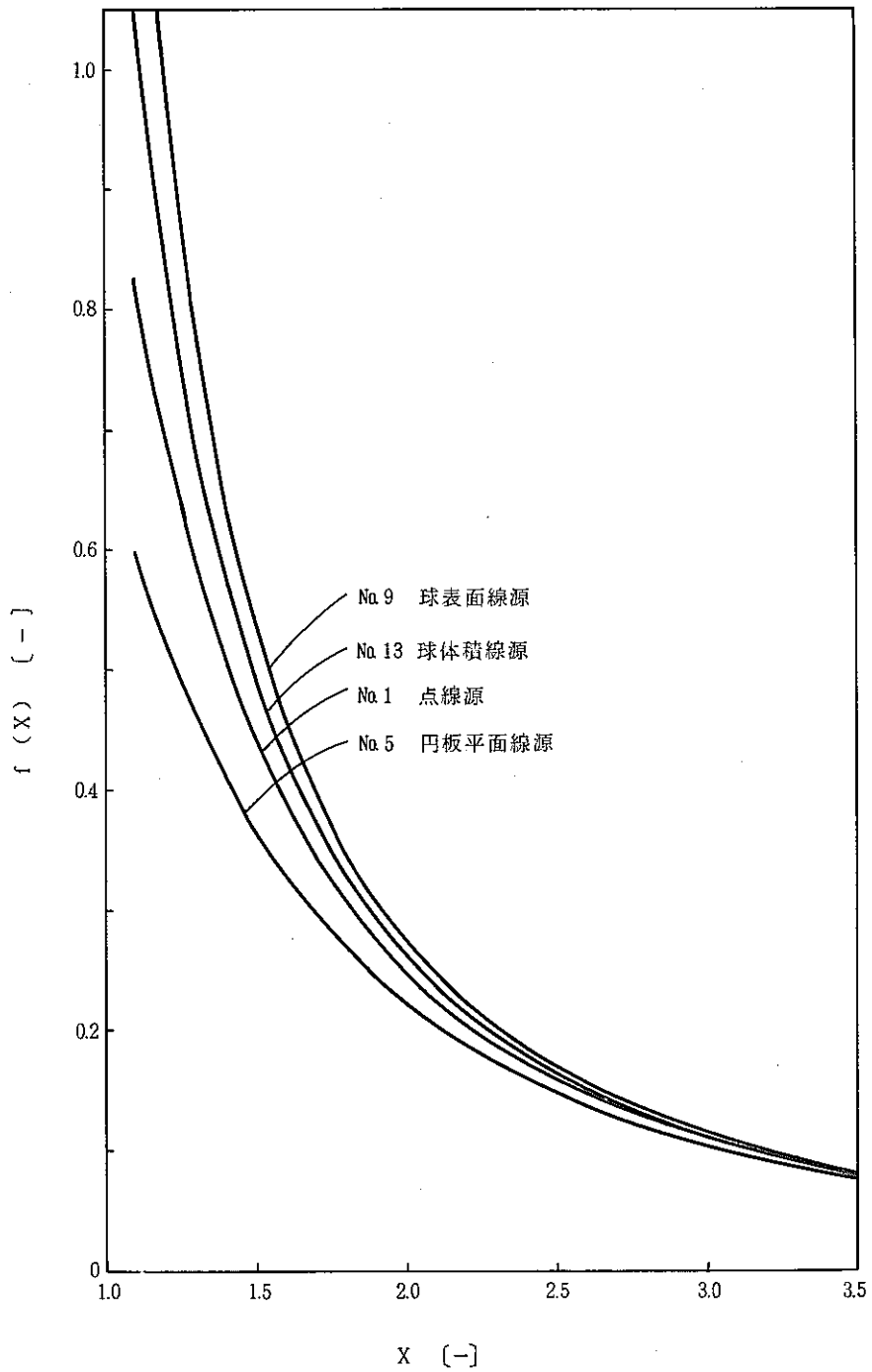
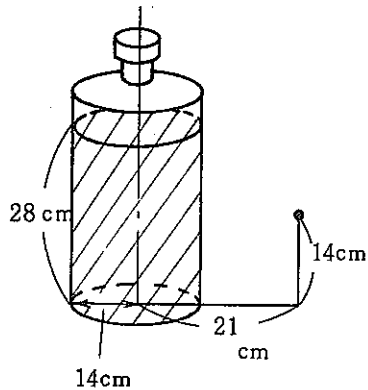


図2-10 X-f(X)線図

例題 2-7



図のように 20 ℓ 入り容器に廃液が下から 28 cm 入っている。この中に含まれている主な放射性核種は  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{106}\text{Ru}$  であることが分っている。この 2 つの核種の濃度 [g/ℓ] を、以下のデータを用いて推定したい。

左図の P 点での  $\gamma$  線照射線量率を測定したら 50 [mR/hr] であった。次に中間に 0.5 cm の鉛板を置いて測定したら 30 [mR/hr] であった。

$^{137}\text{Cs}$  からは娘核種  $^{137\text{m}}\text{Ba}$  をへて、放出率 85% で 0.662 MeV の  $\gamma$  線が放出される。  
 一方  $^{106}\text{Ru}$  は 100% 0.0392 MeV の  $\beta^-$  粒子を放出し (368 d)  $^{106}\text{Rh}$  になる。 $^{106}\text{Rh}$  は 30 sec の半減期で数種類の  $\beta^-$  粒子を放出し、安定核種  $^{106}\text{Pd}$  になる。その際多くの  $\gamma$  線を放出する。 $^{106}\text{Ru}$  と  $^{106}\text{Rh}$  は半減期から充分放射平衡の関係が成り立っていると見なしてよいので、 $^{106}\text{Ru}$  の 1 崩壊当りにする  $\gamma$  線の放出率は  $^{106}\text{Rh}$  の  $\gamma$  線放出率をそのまま使用して良いことがわかる。 $^{106}\text{Rh}$  の主要な  $\gamma$  線は以下のとおりである。

エネルギー [MeV]	放出率 [%]
0.512	21
0.622	11
1.05	1.5 } 2.2
1.13	
1.55	

この表の中で下の 3 本の  $\gamma$  線については、エネルギーを放出率で加重平均したもので代表させ、全部で 3 本の  $\gamma$  線が放出されるものとし、計算を簡略化する。

粒子束の計算式は No.16 を使用し、内部吸収  $\mu_s R = 0$  とする。P 点は線源の高さ 28 cm の中間であるので、半分の体系で計算する。

$$D = f E \frac{S_V C}{2 \pi^2 R H} B G(k, p, \mu_s R, b_1)$$

$$k = \frac{H}{R} = \frac{14}{14} = 1.0$$

$$p = \frac{d}{R} = \frac{21}{14} = 1.5$$

遮蔽体がない場合のGの値は表1-6より

$$G(1, 1.5, 0, 0) = 0.737$$

遮蔽体がある場合はエネルギーによりB, Gの値が異なるので, 計算に必要な定数を図2-1, 図2-2, 表2-2から求め以下にまとめる。

核種	$\gamma$ 線の エネルギー [MeV]	放出率 [%]	f · E [Rsec cm <sup>2</sup> /hr]	鉛の吸収係数 [cm <sup>-1</sup> ]	G(1, 1.5, 0, h <sub>1</sub> ) [-]	再生係数 [-]
<sup>137</sup> Cs	0.662	85	1.24 × 10 <sup>-6</sup>	1.26	0.374	1.20
<sup>106</sup> Ru	0.512	21	0.973 × 10 <sup>-6</sup>	1.79	0.263	1.22
	0.622	11	1.17 × 10 <sup>-6</sup>	1.36	0.351	1.20
	1.11	2.2	1.93 × 10 <sup>-6</sup>	0.725	0.511	1.16

線源強度を<sup>137</sup>CsをS<sub>1</sub> [Ci], <sup>106</sup>RuをS<sub>2</sub> [Ci]とすると遮蔽体がない場合は, 照射線量率について次式が成り立つ。

$$0.05 \text{ [R/hr]} = 2 \frac{(3.7 \times 10^{10}) (0.737)}{2 \pi^2 (14) (14)} \left[ (1.24 \times 10^{-6}) (0.85) S_1 + \{ (0.973 \times 10^{-6}) (0.21) + (1.17 \times 10^{-6}) (0.11) + (1.93 \times 10^{-6}) (0.022) \} S_2 \right]$$

$$= 14.9 S_1 + 5.29 S_2$$

一方遮蔽体がある場合は

$$0.03 \text{ [R/hr]} = 2 \frac{(3.7 \times 10^{10})}{2 \pi^2 (14) (14)} \left[ (1.24 \times 10^{-6}) (0.85) S_1 (0.374) (1.20) + \{ (0.973 \times 10^{-6}) (0.21) (0.263) (1.22) + (1.17 \times 10^{-6}) (0.11) (0.351) (1.20) + (1.93 \times 10^{-6}) (0.022) (0.511) (1.16) \} S_2 \right]$$

$$= 9.05 S_1 + 2.77 S_2$$

上の2式よりS<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>を求める。

$$S_1 = 3.06 \times 10^{-3} \text{ [Ci]}$$

$$S_2 = 8.22 \times 10^{-4} \text{ [Ci]}$$

これらの強度は  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  の崩壊数, 即ち  $\beta$  崩壊の割合であり,  $r$  線の放出数ではないことに注意。半減期より各々の崩壊定数  $\lambda_1$  ( $^{137}\text{Cs}$ ),  $\lambda_2$  ( $^{106}\text{Ru}$ ) は,

$$\lambda_1 = \frac{\ln 2}{(30.0)(365)(24)(60^2)} = 7.33 \times 10^{-10} \quad [\text{sec}^{-1}]$$

$$\lambda_2 = \frac{\ln 2}{(368)(24)(60^2)} = 2.18 \times 10^{-8} \quad [\text{sec}^{-1}]$$

従ってこれらの溶液中に含まれる  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{106}\text{Ru}$  の質量は

$$^{137}\text{Cs} \quad \frac{(3.06 \times 10^{-3})(3.7 \times 10^{10})}{(7.33 \times 10^{-10})(6.02 \times 10^{23})} (137) = 35.2 \times 10^{-6} \quad [\text{g}]$$

$$^{106}\text{Ru} \quad \frac{(8.22 \times 10^{-4})(3.7 \times 10^{10})}{(2.18 \times 10^{-8})(6.02 \times 10^{23})} (106) = 0.246 \times 10^{-6} \quad [\text{g}]$$

溶液の体積は  $\pi(14)^2(28) = 17,200 \text{ [cm}^3\text{]}$  なので求める濃度は次のようになる。

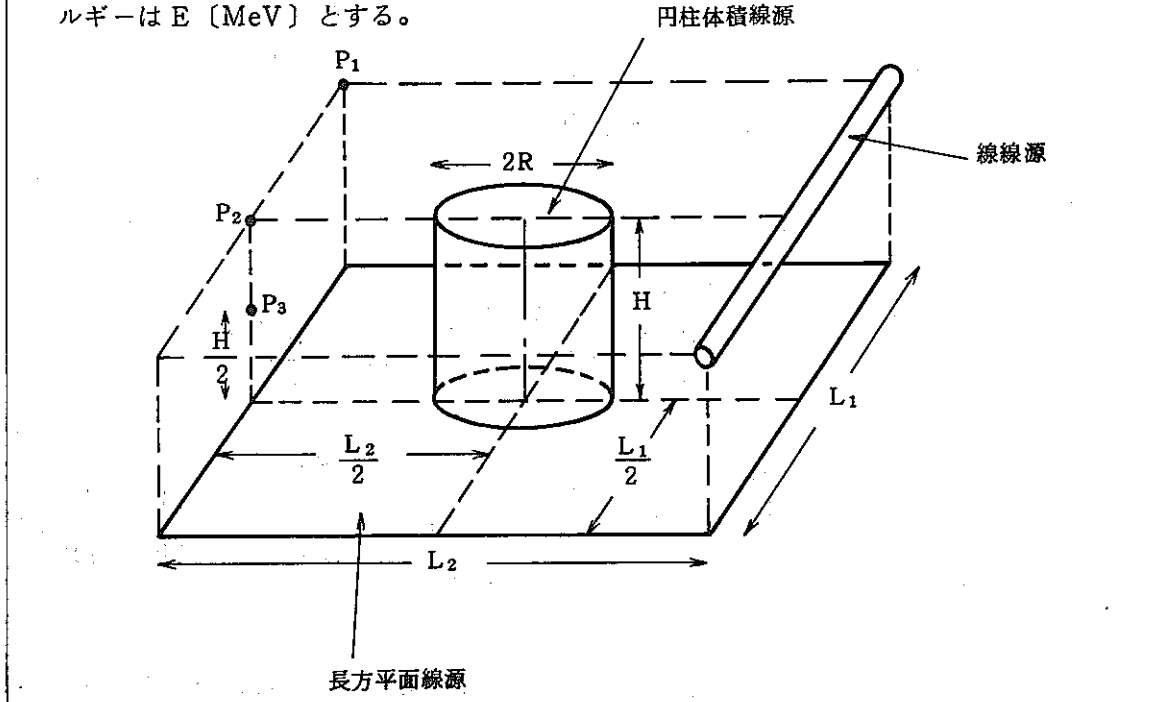
$$^{137}\text{Cs} \quad 2.0 \quad \mu\text{g}/\ell$$

$$^{106}\text{Ru} \quad 0.014 \quad \mu\text{g}/\ell$$

例題 2-8

下記の複合線源の放射能強度を推定する。

$P_1, P_2, P_3$  での照射線量率を測定したら  $D_1, D_2, D_3$  [R/hr] であり  $r$  線のエネルギーは  $E$  [MeV] とする。



粒子束計算式は、No.3 線線源、No.7 長方形平面線源、No.14 円柱体積線源の式を用いる。即ち、

$$\text{No.3} : \phi = \frac{S_L C}{4\pi L d} \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{a}{d} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{L-a}{d} \right) \right\}$$

$$\text{No.7} : \phi = \frac{S_A C}{4\pi L H} G_2(m, n) \quad \text{但し} \quad m = \frac{L}{d}, \quad n = \frac{H}{L}$$

$$\text{No.14} : \phi = \frac{S_V C}{4\pi R^2} G_3(k, p) \quad \text{但し} \quad k = \frac{H}{R}, \quad p = \frac{d}{R}$$

各測定点での粒子束は、上記3種類の線源からの粒子束の和をとればよい。変換係数を  $fE$  とすると各点での線量率  $D$  は次のようになる。

$P_1$  点では

$$D_1 = fE \cdot C \cdot \left\{ \frac{S_L}{4\pi L_1 L_2} \tan^{-1} \left( \frac{L_1}{L_2} \right) + \frac{S_A}{4\pi L_1 L_2} G_2 \left( \frac{L_2}{H}, \frac{L_1}{L_2} \right) + \frac{S_V}{4\pi R^2} G_3 \left( \frac{H}{R}, \frac{\sqrt{\left(\frac{L_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{L_2}{2}\right)^2}}{R} \right) \right\}$$

P<sub>2</sub> 点では

$$D_2 = fE \cdot C \cdot \left\{ \frac{S_L}{4\pi L_1 L_2} 2 \tan^{-1} \left( \frac{L_1}{2L_2} \right) + 2 \frac{\left(\frac{S_A}{2}\right)}{4\pi \left(\frac{L_1}{2}\right) L_2} G_2 \left( \frac{L_2}{H}, \frac{L_1}{2L_2} \right) \right. \\ \left. + \frac{S_V}{4\pi R^2} G_5 \left( \frac{H}{R}, \frac{L_2}{2R} \right) \right\}$$

P<sub>3</sub> 点では

$$D_3 = fE \cdot C \cdot \left\{ \frac{S_L}{4\pi L_1 \sqrt{\left(\frac{H}{2}\right)^2 + L_2^2}} 2 \tan^{-1} \left( \frac{L_1}{2\sqrt{L_2^2 + \left(\frac{H}{2}\right)^2}} \right) \right. \\ \left. + 2 \frac{\left(\frac{S_A}{2}\right)}{4\pi \left(\frac{L_1}{2}\right) L_2} G_2 \left( \frac{L_2}{\left(\frac{H}{2}\right)}, \frac{L_1}{2L_2} \right) + 2 \frac{\left(\frac{S_V}{2}\right)}{4\pi R^2} G_5 \left( \frac{H}{2R}, \frac{L_2}{2R} \right) \right\}$$

上記の3式は、未知数  $S_L$ ,  $S_A$ ,  $S_V$  を独立変数とする3元連立一次方程式となる。従って線源が  $n$  ケ考えられる場合は、 $n$  ケ所での測定値により、同様にして  $n$  元連立方程式系を作ることができる。但しこれから解を得ることが数学的にできても、必ずしも物理的意味を持った答が常には得られないことに注意しなければならない。

実測値  $D$  を用いて、同連立方程式より  $S$  を計算すると、往々にして負の結果が得られる。この原因は明らかに対象としている測定体系が仮定した計算体系でカバーしきれなかったためである。この問題で床面（長方平面線源）に、例えばスポット的な強い汚染がある場合などが考えられる。

例題 2-9

前問(例題 2-8)で,  $D_1, D_2, D_3, E$  が以下の値のときそれぞれの放射能を求める。

$D_1 = 0.11$ [ R/hr ]	$L_1 = 400$ [ cm ]
$D_2 = 0.23$ [ " ]	$L_2 = 200$ [ " ]
$D_3 = 0.35$ [ " ]	$R = 50$ [ " ]
$E = 0.67$ [ MeV ]	$H = 100$ [ " ]

図 2-1 より 0.67 MeV に相当する変換係数を読み取る。

$$fE = 1.2 \times 10^{-6} \left[ \frac{\text{Rsec cm}^2}{\text{hr}} \right]$$

$D_1$  について

$$\frac{S_L}{4\pi L_1 L_2} \tan^{-1} \left( \frac{L_1}{L_2} \right) = \frac{S_L}{4\pi (400)(200)} \tan^{-1} \left( \frac{400}{200} \right) = 1.1 \times 10^{-6} S_L$$

$$\frac{S_A}{4\pi L_1 L_2} G_2 \left( \frac{L_2}{H}, \frac{L_1}{L_2} \right) = \frac{S_A}{4\pi (400)(200)} G_2 \left( \frac{200}{100}, \frac{400}{200} \right) = 1.8 \times 10^{-6} S_A$$

$$\frac{S_V}{4\pi R^2} G_5 \left( \frac{H}{R}, \frac{\sqrt{\left(\frac{L_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{L_2}{2}\right)^2}}{R} \right) = \frac{S_V}{4\pi (50)^2} G_5 \left( \frac{100}{50}, \frac{\sqrt{200^2 + 100^2}}{50} \right) = 5.5 \times 10^{-6} S_V$$

$D_2$  について

$$\frac{S_L}{4\pi L_1 L_2} 2 \tan^{-1} \left( \frac{L_1}{2L_2} \right) = \frac{S_L}{4\pi (400)(200)} 2 \tan^{-1} \left( \frac{400}{400} \right) = 1.6 \times 10^{-6} S_L$$

$$2 \frac{\left(\frac{S_A}{2}\right)}{4\pi \left(\frac{L_1}{2}\right) L_2} G_2 \left( \frac{L_2}{H}, \frac{L_1}{2L_2} \right) = \frac{S_A}{4\pi (200)(200)} G_2 \left( \frac{200}{100}, \frac{400}{400} \right) = 2.8 \times 10^{-6} S_A$$

$$\frac{S_V}{4\pi R^2} G_5 \left( \frac{H}{R}, \frac{L_1}{2R} \right) = \frac{S_V}{4\pi (50)^2} G_5 \left( \frac{100}{50}, \frac{200}{100} \right) = 2.0 \times 10^{-5} S_V$$

D<sub>3</sub> について

$$\frac{S_L}{4\pi L_1 \sqrt{\left(\frac{H}{2}\right)^2 + L_2^2}} 2 \tan^{-1} \left( \frac{L_1}{2\sqrt{L_2^2 + \left(\frac{H}{2}\right)^2}} \right) = \frac{S_L}{4\pi (400) \sqrt{50^2 + 200^2}} 2 \tan^{-1} \left( \frac{400}{2\sqrt{200^2 + 50^2}} \right)$$

$$= 1.5 \times 10^{-6} S_L$$

$$2 \frac{\left(\frac{S_A}{2}\right)}{4\pi \left(\frac{L_1}{2}\right) L_2} G_2 \left( \frac{L_2}{\left(\frac{H}{2}\right)}, \frac{L_1}{2L_2} \right) = \frac{S_A}{4\pi (200) (200)} G_2 \left( \frac{200}{50}, \frac{400}{2(200)} \right)$$

$$= 4.8 \times 10^{-6} S_A$$

$$2 \frac{\left(\frac{S_A}{2}\right)}{4\pi R^2} G_5 \left( \frac{H}{2R}, \frac{L_2}{2R} \right) = \frac{S_A}{4\pi (50)^2} G_5 \left( \frac{100}{2(50)}, \frac{200}{2(50)} \right)$$

$$= 2.9 \times 10^{-5} S_V$$

これらに  $f E \cdot C = (1.2 \times 10^{-6})(3.7 \times 10^{10}) = 4.4 \times 10^4$  を掛け、行列表示すると、

$$\begin{bmatrix} 0.048, & 0.079, & 0.242 \\ 0.070, & 0.123, & 0.880 \\ 0.066, & 0.211, & 1.276 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_L \\ S_A \\ S_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.11 \\ 0.23 \\ 0.35 \end{bmatrix}$$

これより  $S_L, S_A, S_V$  を求めると、

$$S_L = 0.31 \quad [Ci]$$

$$S_A = 0.84 \quad [Ci]$$

$$S_V = 0.12 \quad [Ci]$$



### 3. $\beta$ 線についての線量計算

#### 3.1 $\beta$ 線の吸収線量計算法

##### (1) $\beta$ 線源

再処理工場では核分裂生成物（FP）として多くの $\beta$ 線放出核種を取扱う。代表的なものを表3-1に示す。これらの核種は燃料溶解工程及び抽出工程はもちろんのこと廃液処理工程に至るまで残留し、これらの工程液のサンプリングや分析等の現場作業で、手足の局部被曝の大きな原因となる。なかでも $^{106}\text{Ru}$ — $^{106}\text{Rh}$ は精製工程でもかなり残っており、しかも最大エネルギーが非常に大きいため、その線量評価を確実に行わないと思わぬ被曝を引き起こすおそれがある。

表3-1 主な $\beta$ 放出核種

核種	崩壊形式	最大エネルギー 〔MeV〕	平均エネルギー 〔MeV〕	放出割合 〔-〕
$^{90}\text{Sr}$	$\beta^-$	0.544	0.21	1.0
$^{90}\text{Y}$	$\beta^-$	2.25	0.93	1.0
$^{95}\text{Zr}$	$\beta^-$	0.360		0.43
		0.396		0.55
		0.89		0.02
$^{95}\text{Nb}$	$\beta^-, \gamma$	0.160		1.0
$^{106}\text{Ru}$	$\beta^-$	0.039	1.47	1.0
$^{106}\text{Rh}$	$\beta^-, \gamma$	3.5		0.7
		3.1		0.1
		2.4	0.95	0.1
$^{137}\text{Cs}$	$\beta^-$	1.18	0.421	0.08
		0.52	0.172	0.92
$^{144}\text{Ce}$	$\beta^-, \gamma$	0.320	0.102	0.72
		0.240	0.077	0.08
		0.186	0.057	0.2
$^{144}\text{Pr}$	$\beta^-, \gamma$	3.15	1.27	0.95
		2.45	0.95	0.03
		0.90	0.31	0.02

(2)  $\beta$ 線の吸収係数

$\beta$ 線の吸収係数は、その実験的検証が非常に難しく、現在までに用いられてきた経験式を表3-2に示す。図3-1は表3-2中の式の計算結果をプロットしたものであり、0.1～3.0 MeVの範囲でおよそ30%以内の誤差で一致している。

$r$ 線に関しては、主要な遮蔽体構成物質について、その質量吸収係数がそれぞれ精度よく求められている。一方 $\beta$ 線については下記経験式に、対象している物質の密度を掛けて、吸収係数を算出しているのが現状であり、被曝評価には充分使用可能である。本資料では表3-2の式No②を用いる。

$$\mu = 17 E_m^{-1.43} \quad [\text{cm}^2/\text{g}]$$

ただし、 $E_m$ は $\beta$ 線の最大エネルギーである。

(3)  $\beta$ 線線量計算式

$\beta$ 線は $r$ 線と比較すると、その作用範囲は非常に小さく、薄い物質でも十分阻止することができる。従って線量評価を行う際には、線源の形状に忠実に線量計算を行う必要はなく、 $\beta$ 線の飛程内で線源をより簡単な形状に近似して、評価する方法がとられる。具体的には、ある程度の広がりを持つ床汚染は無限平面線源と仮定しても大きな誤差は生じない、といったことである。

従って、ここで取り扱う形状は、表3-3で示した5種類であり、他の形状はこれで近似するものとする。この近似による誤差は $\beta$ 線のエネルギーが大きくなるにしたがって、当然増大する。

$r$ 線の場合と同様、以下に計算手順を列記する。

- (i) 図3-2から最大エネルギーに相当する変換係数 $f$ を読み取る。
- (ii) 対象としている計算体系を表3-3のいずれかで近似し、 $\beta$ 粒子束 $\phi$ を計算する。
- (iii)  $\beta$ 線の平均エネルギーを表3-1より求める。これ以外の核種で平均エネルギーが不明の場合は、最大エネルギーの $1/3$ を平均エネルギーと仮定する方法が一般的である。
- (iv) 以上の値より吸収線量率は次式で求まる。

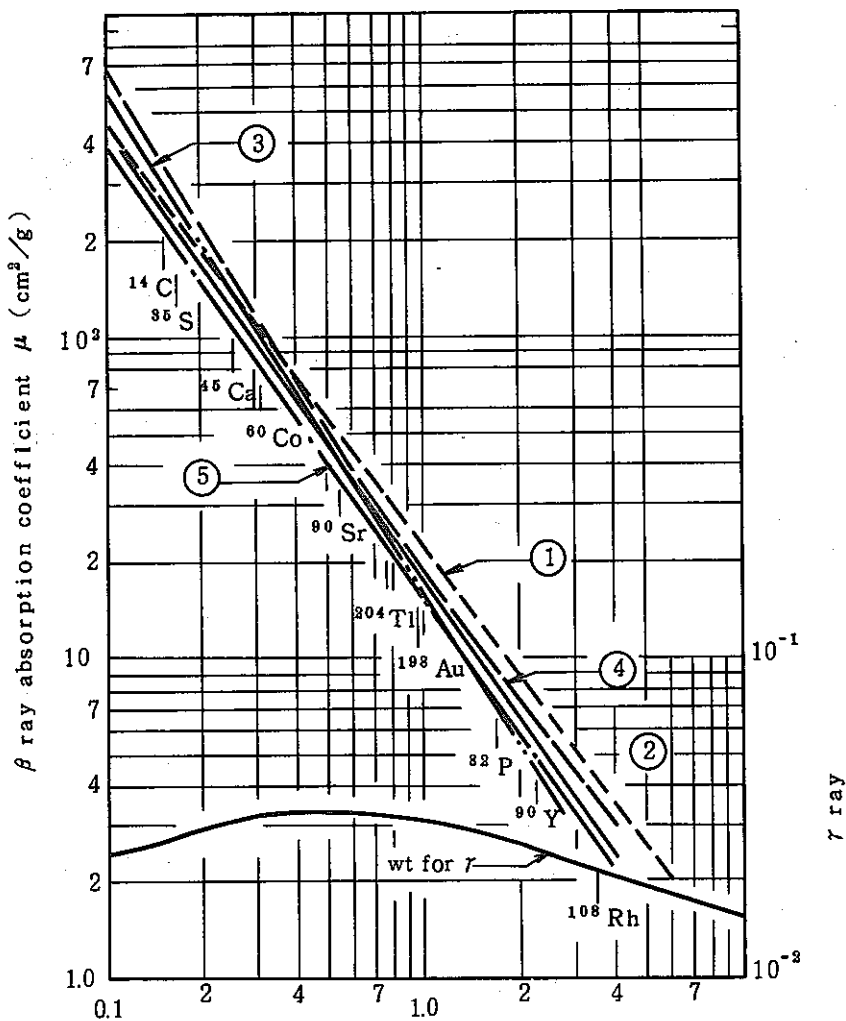
$$D = f \cdot E \cdot \phi \quad [\text{rad/hr}]$$

尚、本章の記述は文献4)にその多くを依存する。

表 3-2  $\beta$ 線の質量吸収係数計算式<sup>4)</sup>

No.	Absorption coefficient $\mu$	Application
1	$22 E_m^{-1.33}$	0.5~6.0 MeV
2	$17 E_m^{-1.43}$	0.15~3.5 MeV for Al
3	$16 E_m^{-1.6}$	0.1~2.0 MeV for soft tissue
4	$\frac{16.0}{(E_m-0.036)^{1.37}} \left(2 - \frac{E}{E^*}\right)$	0.1~3.0 MeV for tissue
5	$\frac{16.0}{(E_m-0.036)^{1.40}} \left(2 - \frac{E}{E^*}\right)$	0.1~3.0 MeV for air

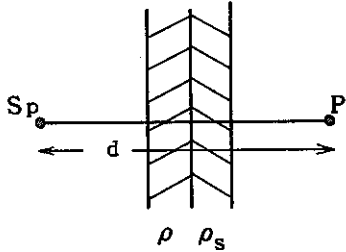
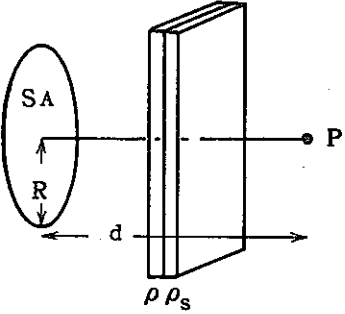
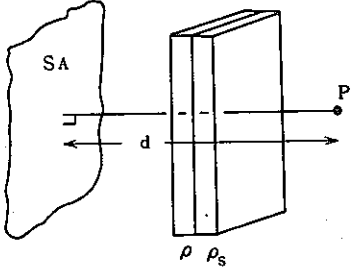
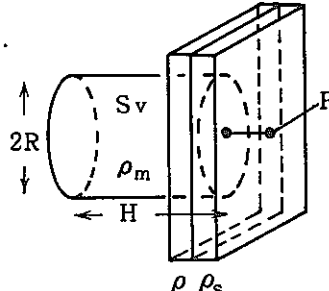
E : Average  $\beta$  ray energy determined by experiment.  
 E\* : Average  $\beta$  ray energy of a hypothetical allowed spectrum of the same  $E_m$  which is computed from the Fermi theory<sup>1)</sup>

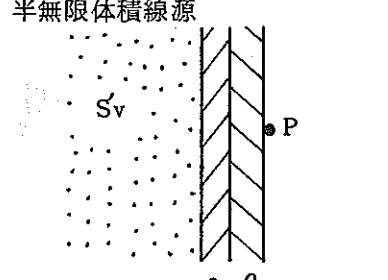


Maximum  $\beta$  ray energy and  $\gamma$  ray energy (MeV)

図 3-1  $\beta$ 線及び $\gamma$ 線の質量吸収係数<sup>4)</sup>

表 3-3 β線粒子束の計算式

No.	線源形状 (P は測定点)	必要な定数	β線粒子束: $\phi$ [1/sec cm <sup>2</sup> ] ( $C = 3.7 \times 10^{10}$ )	図表
1	点線源+遮蔽 	$E_m$ [MeV] $\rho$ [g/cm <sup>2</sup> ] $\rho_s$ [g/cm <sup>2</sup> ] $\rho_a$ [g/cm <sup>3</sup> ] $S_p$ [Ci] $d$ [cm]	$\phi = \frac{S_p C}{4\pi d^2} e^{-\mu(\rho_s + \rho + \rho_a d)}$ $\mu = 17 E_m^{-1.43}$ $\rho_a = 0.00129 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ 空気の数密度 $\rho_s$ : 皮膚の不感層の面密度	-
2	平面線源+遮蔽 (円板) 	$E_m$ [MeV] $\rho$ [g/cm <sup>2</sup> ] $\rho_s$ [g/cm <sup>2</sup> ] $\rho_a$ [g/cm <sup>3</sup> ] $S_A$ [Ci] $d$ [cm] $R$ [cm]	$\phi = \frac{S'_A C}{2} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} \{E_1(h_1) - E_1(h_2)\}$ $S'_A = S_A / \pi R^2$ $h_1 = \mu \rho_a d$ $h_2 = (\mu \rho_a d) \sqrt{\left(\frac{R}{d}\right)^2 + 1}$ $\mu = 17 E_m^{-1.43}$	☒ 3-3
3	無限平板線源+遮蔽 	$E_m$ [MeV] $\rho$ [g/cm <sup>2</sup> ] $\rho_s$ [g/cm <sup>2</sup> ] $\rho_a$ [g/cm <sup>3</sup> ] $S'_A$ [Ci/cm <sup>2</sup> ] $d$ [cm]	$\phi = \frac{S'_A C}{2} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} \cdot E_1(h)$ $h = \mu \rho_a d$ $\mu = 17 E_m^{-1.43}$	☒ 3-3
4	体積線源+遮蔽 (円柱) 	$E_m$ [MeV] $\rho$ [g/cm <sup>2</sup> ] $\rho_s$ [g/cm <sup>2</sup> ] $\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ] $S_V$ [Ci] $R$ [cm] $H$ [cm]	$\phi = \frac{S'_V C}{2\mu \rho_m} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} \cdot E_2(h)$ $S'_V = S_V / \pi R^2 H$ $h = \mu \rho_m H$ $\mu = 17 E_m^{-1.43}$	☒ 3-4

5	<p>半無限体積線源</p> 	$E_m$ [MeV] $\rho$ [g/cm <sup>2</sup> ] $\rho_s$ [g/cm <sup>2</sup> ] $\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ] $S'_V$ [Ci/cm <sup>3</sup> ]	$\phi = \frac{S'_V C}{2 \mu \rho_m} e^{-\mu(\rho_s + \rho)}$ $\mu = 17 E_m^{-1.43}$	-
---	--------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------	---

記号

$S_p$ [Ci]	点線源の放射能	$E_m$ [MeV]	$\beta$ 線の最大エネルギー
$S_A$ [Ci]	面線源の放射能	$E$ [MeV]	$\beta$ 線の平均エネルギー
$S'_A$ [Ci/cm <sup>2</sup> ]	面線源の放射能密度	$\rho_a$ [g/cm <sup>3</sup> ]	空気の密度
$S_V$ [Ci]	体積線源の放射能	$\rho_s$ [g/cm <sup>2</sup> ]	皮膚の不感層の面密度
$S'_V$ [Ci/cm <sup>3</sup> ]	体積線源の放射能密度	$\rho$ [g/cm <sup>2</sup> ]	遮蔽体の面密度
$d$ [cm]	距離	$\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	線源の密度
$R$ [cm]	半径	$\mu$ [cm <sup>2</sup> /g]	$\beta$ 線の質量吸収係数
$H$ [cm]	円柱の高さ	$D$ [rad/hr]	吸収線量率

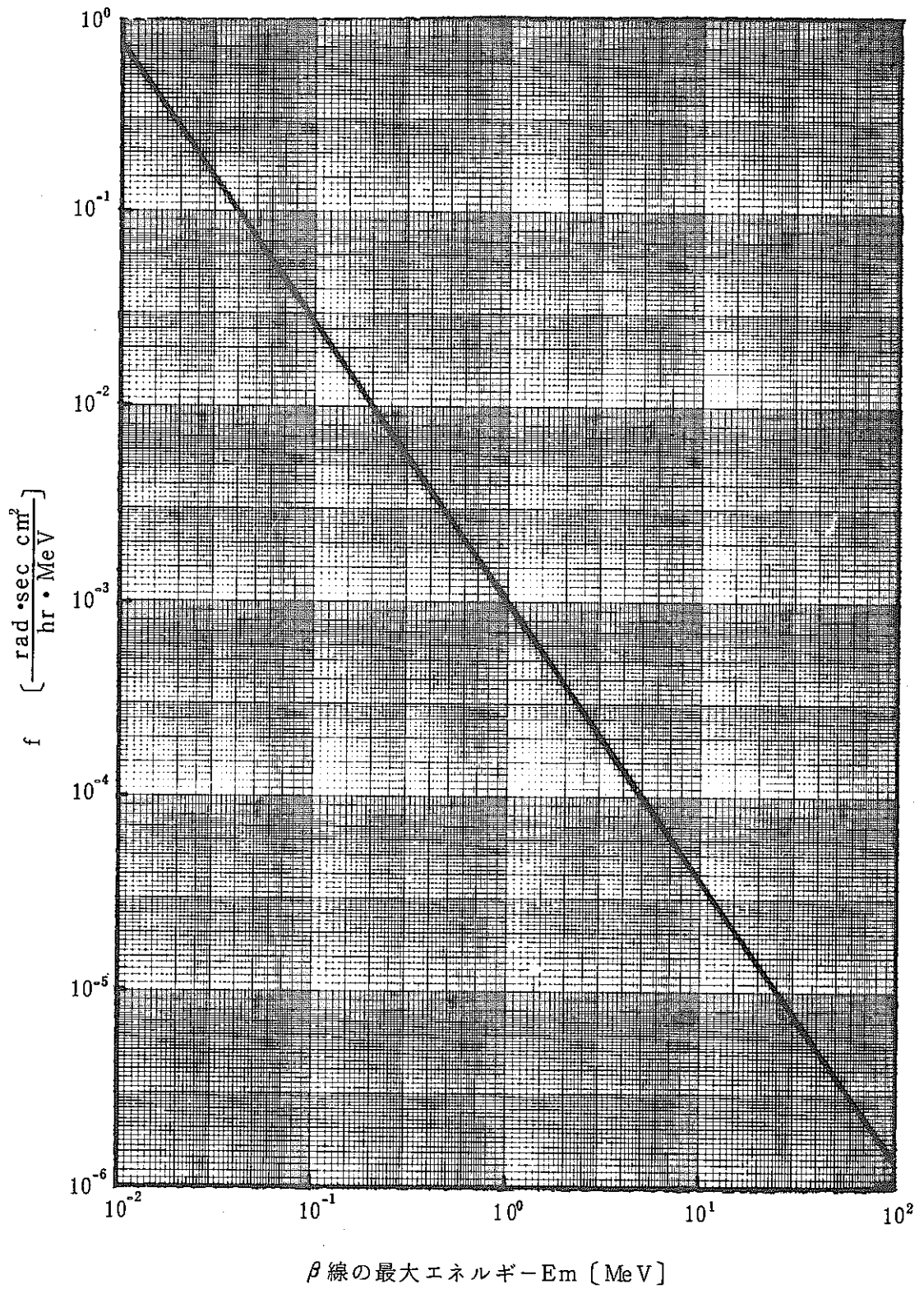


図3-2 吸収線量率変換係数 f

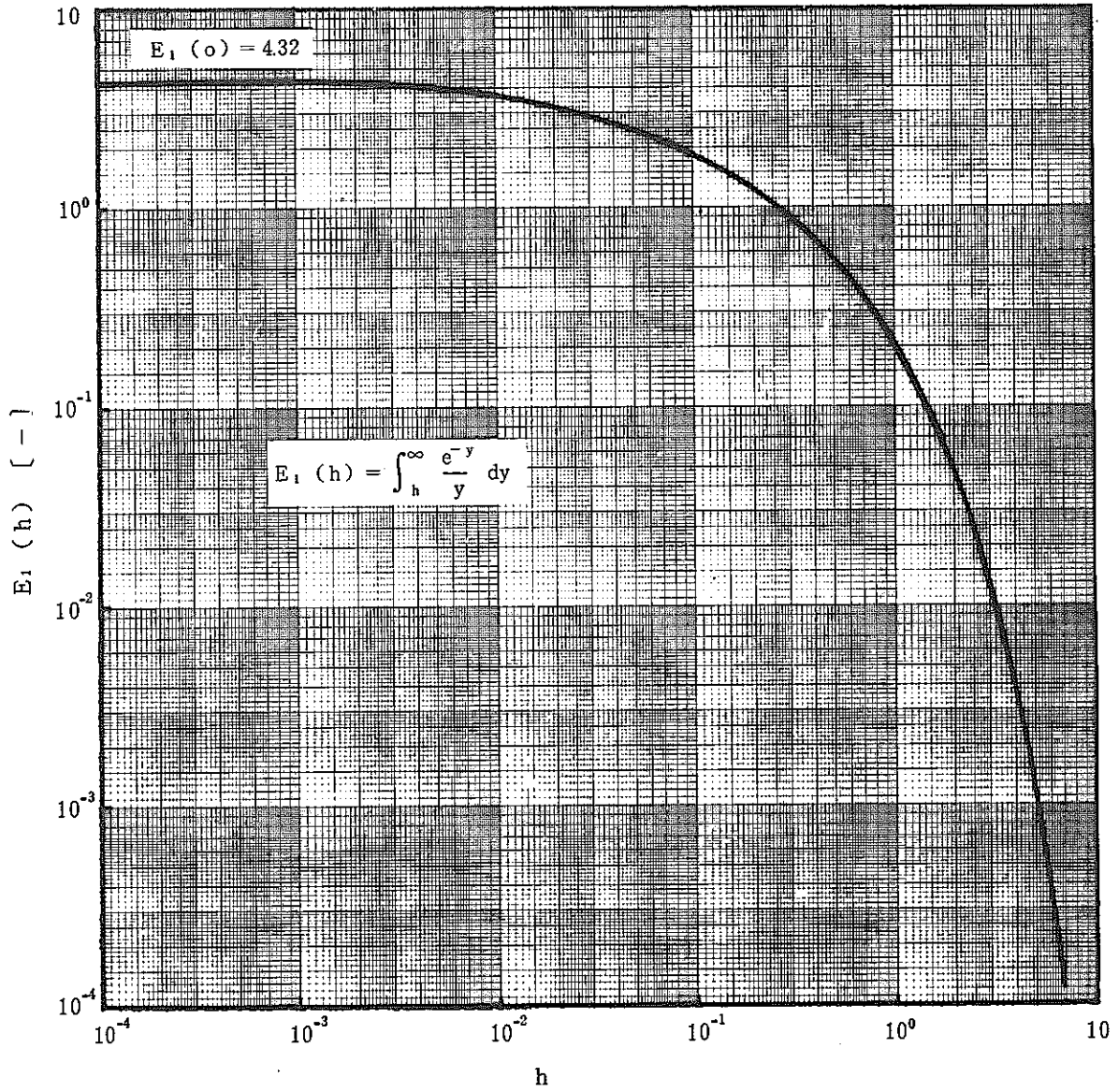


图 3-3 h - E<sub>1</sub> 线图

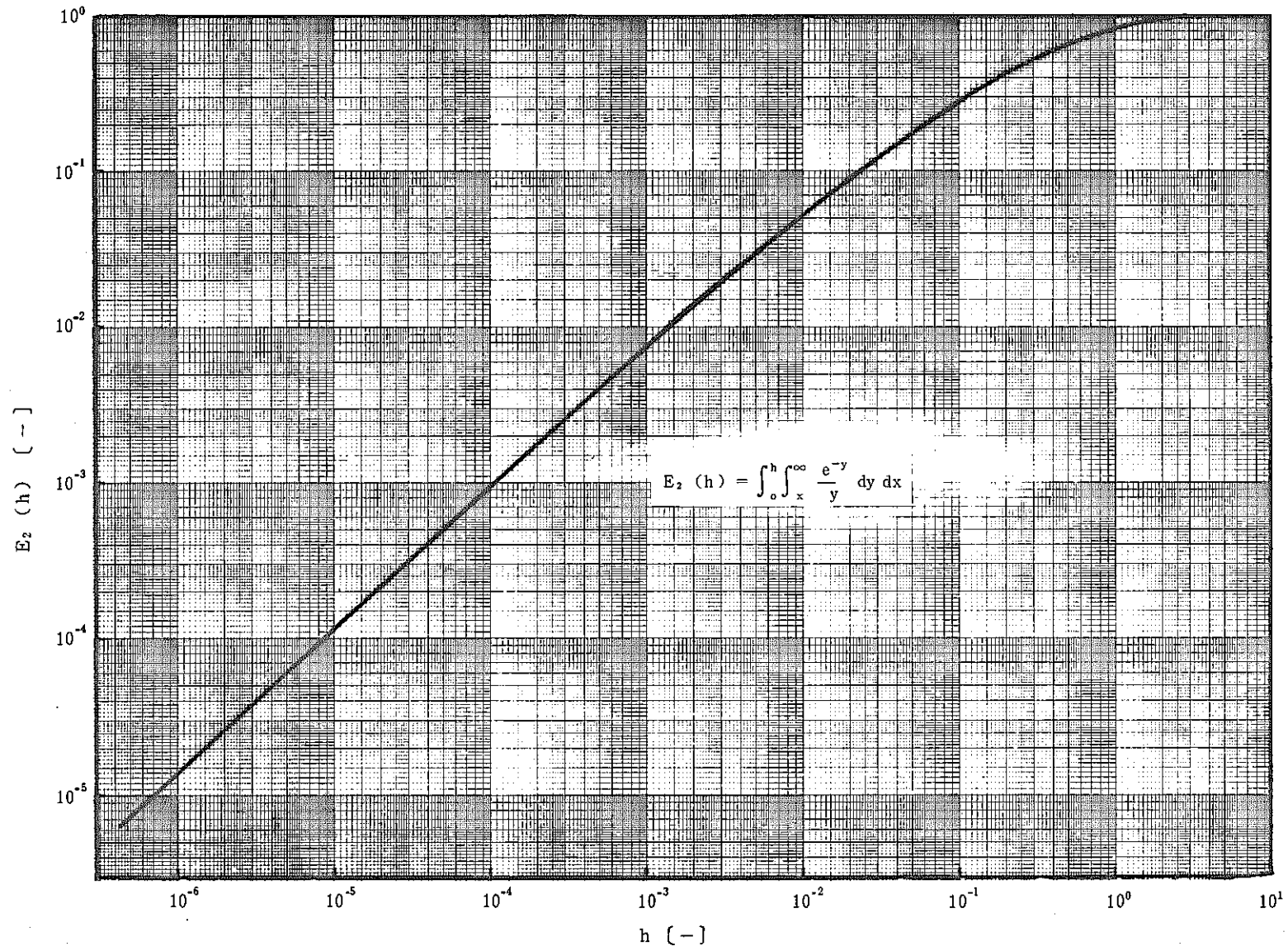


图 3-4 h - E<sub>2</sub> 线图



### 3.2 計算式の説明

(1) 変換係数  $f$  について

$f$  はエネルギー粒子束  $E \cdot \phi$  [MeV/sec  $\cdot$  cm<sup>2</sup>] を吸収線量率  $D$  [rad/hr] に変換する係数である。これを例をあげて説明する。

平均エネルギー  $E$  MeV, 最大エネルギー  $E_m$  MeV の  $\beta$  線粒子が単位面積, 時間当り  $\phi$  ケ [1/sec cm<sup>2</sup>] 入射した場合の吸収線量率を求める。

(i) 吸収係数  $\mu$  [cm<sup>2</sup>/g] は最大エネルギー  $E_m$  から

$$\mu = 17 E_m^{-1.43} \quad [\text{cm}^2/\text{g}]$$

(ii) 入射するエネルギー束は, 平均エネルギー  $E$  と粒子数  $\phi$  の積なので

$$\phi E = \phi \cdot E \quad [\text{MeV}/\text{sec cm}^2]$$

(iii) 従って吸収されるエネルギーは

$$\mu \phi E = 17 E_m^{-1.43} \phi E \quad [\text{MeV}/\text{secg}]$$

(iv) 単位を変換すると

$$\begin{aligned} \mu \phi E \left[ \frac{\text{MeV}}{\text{secg}} \right] &= \mu \phi E \left[ \frac{\text{MeV}}{\text{secg}} \right] 1.60 \times 10^{-6} \left[ \frac{\text{erg}}{\text{MeV}} \right] 60^2 \left[ \frac{\text{sec}}{\text{hr}} \right] \\ &= 5.76 \times 10^{-3} \mu \phi E \left[ \frac{\text{erg}}{\text{hr} \cdot \text{g}} \right] \\ &= 9.80 \times 10^{-2} E_m^{-1.43} \phi E \left[ \frac{\text{erg}}{\text{hr} \cdot \text{g}} \right] \end{aligned}$$

(v) 吸収線量率の定義は「1gの物質に単位時間に100 ergのエネルギー吸収を引き起こす放射線量」なので

$$\begin{aligned} 9.80 \times 10^{-2} E_m^{-1.43} \cdot \phi \cdot E \left[ \frac{\text{erg}}{\text{hr} \cdot \text{g}} \right] \frac{1}{100} \left[ \frac{\text{rad}}{\text{erg}} \text{g} \right] \\ = (9.80 \times 10^{-4} E_m^{-1.43}) E \cdot \phi \left[ \frac{\text{rad}}{\text{hr}} \right] \end{aligned}$$

上記の ( ) 内を変換係数として定義し,  $\beta$  線の最大エネルギー  $E_m$  について図示したものが図3-2である。

(2)  $\beta$ 線粒子束計算式の証明

計算式作成の基本的考え方を下に列記する。

- (i) 粒子束の減衰は、 $\gamma$ 線と同様減衰核積分法で取扱う。
- (ii) 遮蔽効果の取扱いは、厚い遮蔽体は $\beta$ 線をほとんど阻止するため、薄い遮蔽体に注目し、その面積密度  $[\text{g}/\text{cm}^2]$  と $\beta$ 線の最大エネルギーで決まる吸収係数で計算される減衰項  $e^{-\mu\rho}$  を、単純に(i)の粒子束に掛けるものとする。再処理施設でよく使用する器具及び物質の遮蔽効果を $\beta$ 線の最大エネルギーについて示したのが図3-5である。また表3-3の減衰項の $\rho$ には皮膚の面密度 $\rho_s$ を加えてある。これは弱いエネルギーの $\beta$ 線に対して皮膚は遮蔽効果があるためである。
- (iii)  $\beta$ 線は物質中での減衰が大きいので、積分計算で遠距離からの効果を見捨てることにより計算式の簡略化を図る。

表 3-4 遮蔽体の特性

遮蔽体	面密度 $\rho$ [g/cm <sup>2</sup> ]	厚さ [cm]	
ポリエチレンフィルム	0.00354		$\eta = e^{-\mu \rho}$ ただし $\mu = 17 E_m^{-1.43}$ $\mu$ [cm <sup>2</sup> /g] 質量吸収係数 $E_m$ [MeV] $\beta$ 線の最大エネルギー
皮膚	0.007		
チオックス	0.0210		
塩ビブーツ	0.0378	0.03	
ネオプレングローブ (薄)	0.0604	0.04	
" (厚)	0.121	0.08	
" (鉛入)	0.220	0.10	
アクリルパネル	1.17	1.0	

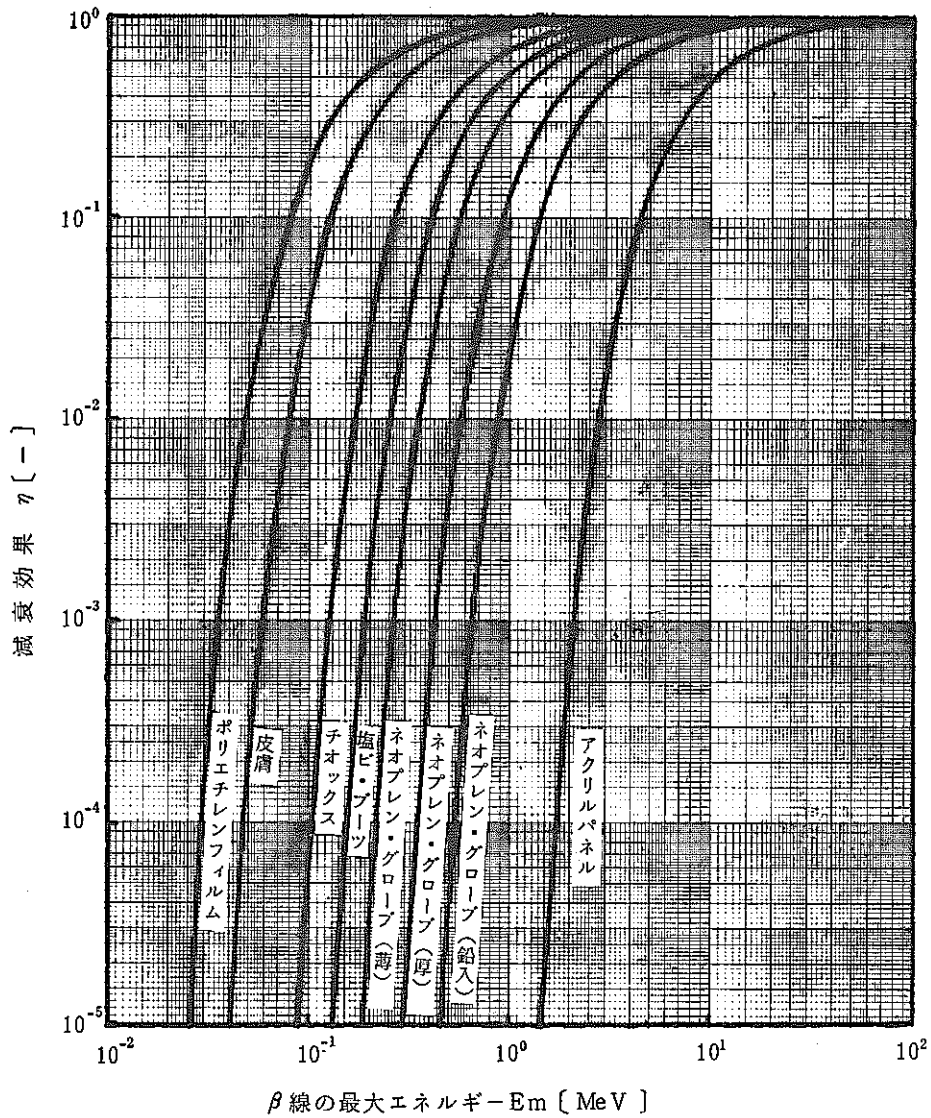
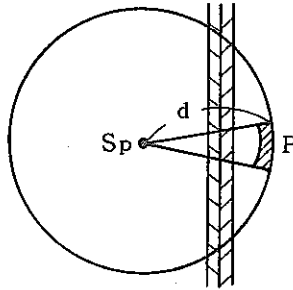


図 3-5 各物質の減衰効果

1	点線源+遮蔽	$\phi = \frac{S_P C}{4 \pi d^2} e^{-\mu (\rho_s + \rho + \rho_a d)}$
---	--------	----------------------------------------------------------------------



点線源  $S_P$  から放出された粒子のうち、測定点  $P$  での  $1 \text{ cm}^2$  あたりの粒子束  $\phi$  は  $r$  線の点線源の場合と同じなので、式 (2-1-1) から

$$\phi = \frac{S_P C}{4 \pi d^2} \quad (3-1-1)$$

$\beta$  線の場合は遮蔽体がある場合はもちろん、空気や皮膚の不感層による減衰も無視しえないことが多い。

空気による減衰 :  $e^{-\mu \rho_a d}$

$\rho_a = 0.001293 \text{ [g/cm}^3\text{]}$  : 空気の標準状態の密度

$d \text{ [cm]}$  : 空気層の厚さ

皮膚の不感層による減衰 :  $e^{-\mu \rho_s}$

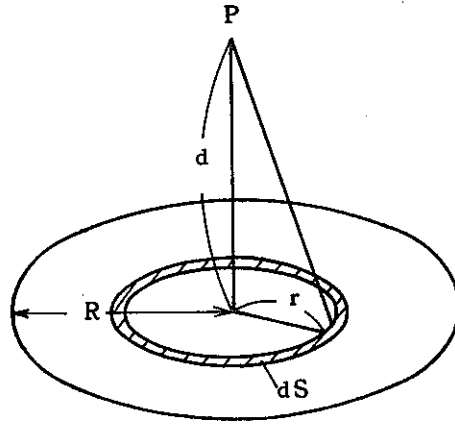
$\rho_s = 0.007 \text{ [g/cm}^2\text{]}$  : 不感層の面密度

(手のひらでは  $0.04 \text{ [g/cm}^2\text{]}$  とされている)

従って、その他の遮蔽体 (面密度  $\rho$ ) も含めた減衰効果を考慮すると、 $\beta$  粒子束は次式で与えられる。

$$\phi = \frac{S_P C}{4 \pi d^2} e^{-\mu (\rho_s + \rho + \rho_a d)} \quad (3-1-2)$$

2	平面線源+遮蔽 (円板)	$\phi = \frac{S'_A C}{2} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} \{E_1(h_1) - E_2(h_2)\}$
---	-----------------	---------------------------------------------------------------------------



円板内で上図のように半径  $r$  の円周に沿った微小線源  $dS$  を考える。全放射能が  $S_A$  なので

$$dS = S'_A 2\pi r dr \quad (3-2-1)$$

ただし

$$S'_A = S_A / \pi R^2$$

この微小線源のいずれの点からも  $P$  点への距離は等しいので、 $P$  点での微小粒子束  $\phi$  は空気による減衰も考慮すると No.1 から

$$d\phi = \frac{S'_A 2\pi r dr C}{4\pi(r^2 + d^2)} e^{-\mu \rho_a \sqrt{r^2 + d^2}} \quad (3-2-2)$$

これを  $r$  について 0 から  $R$  まで積分すればよい。そこでまず  $r$  を変数変換し積分し易い形に変型する。

$$y = \mu \rho_a \sqrt{r^2 + d^2}$$

$$dy = \mu \rho_a (r^2 + d^2)^{-\frac{1}{2}} r dr$$

$$\therefore d\phi = \frac{S'_A C}{2} \cdot \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (3-2-3)$$

積分区間は  $r$  が 0 から  $R$  なので,  $y$  は  $\mu \rho_a d$  から  $\mu \rho_a \sqrt{R^2 + d^2}$  である。従って粒子束  $\phi$  は

$$\begin{aligned} \phi &= \int_{\mu \rho_a d}^{\mu \rho_a \sqrt{R^2 + d^2}} \frac{S'_{AC}}{2} \cdot \frac{e^{-y}}{y} dy \\ &= \frac{S'_{AC}}{2} \{ E_1(h_1) - E_1(h_2) \} \end{aligned} \quad (3-2-4)$$

ただし

$$E_1(h) = \int_h^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (3-2-5)$$

$$h_1 = \mu \rho_a d$$

$$h_2 = \mu \rho_a \sqrt{R^2 + d^2}$$

遮蔽体 (面密度  $\rho_s + \rho$ ) による減衰効果は

$$e^{-\mu(\rho_s + \rho)}$$

なので, 粒子束  $\phi$  は次のようになる。

$$\phi = \frac{S'_{AC}}{2} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} \{ E_1(h_1) - E_1(h_2) \} \quad (3-2-6)$$

3	無限平板線源+遮蔽	$\phi = \frac{S'_A C}{2} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} E_1(h)$
---	-----------	----------------------------------------------------------

No.2 の平面線源の式 (3-2-6)

$$\phi = \frac{S'_A C}{2} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} \int_{\mu \rho_a d}^{\mu \rho_a \sqrt{d^2 + R^2}} \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (3-2-6)$$

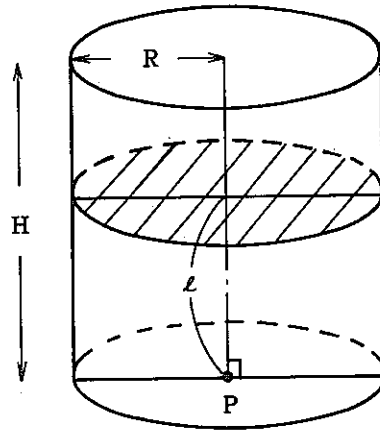
において  $R \rightarrow \infty$  とすればよいので

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{S'_A C}{2} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} \int_{\mu \rho_a d}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy \\ &= \frac{S'_A C}{2} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} E_1(h) \end{aligned} \quad (3-3-1)$$

ただし

$$h = \mu \rho_a d$$

4	体積線源+遮蔽 (円柱)	$\phi = \frac{S'_A C}{2\mu\rho_m} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} E_2(h)$
---	-----------------	-------------------------------------------------------------------



上図のように円柱の底部の中心P点での $\beta$ 粒子束 $\phi$ を求める。円柱を円板線源の積み重ねとみなすことによりNo.2の式(3-2-6)が使える。

円柱底部から $l$ 離れた円板線源による粒子束 $d\phi$ は次式で表わされる。

$$d\phi = \frac{dS \cdot C}{2} \int_{\mu\rho_m l}^{\mu\rho_m \sqrt{R^2 + l^2}} \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (3-4-1)$$

ただし

$$dS = \frac{S_V}{\pi R^2} \cdot \frac{dl}{H}$$

$$= S'_V dl$$

$$\therefore d\phi = \frac{S'_V C}{2} dl \int_{\mu\rho_m l}^{\mu\rho_m \sqrt{R^2 + l^2}} \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (3-4-2)$$

これを $l$ について0からHまで積分すればよい

$$\phi = \frac{S'_V C}{2} \int_0^H dl \int_{\mu\rho_m l}^{\mu\rho_m \sqrt{R^2 + l^2}} \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (3-4-3)$$



ここで  $\ell$  を次式で定義する  $x$  で変数変換する。

$$x = \mu \rho_m \ell$$

$$\therefore d\ell = dx / \mu \rho_m$$

積分区間は、 $\ell$  が 0 から  $H$  なので  $x$  は 0 から  $\mu \rho_m H$  である。

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{S'_V C}{2 \mu \rho_m} \int_0^{\mu \rho_m H} dx \int_x^{\sqrt{(\mu \rho_m R)^2 + x^2}} \frac{e^{-y}}{y} dy \\ &= \frac{S'_V C}{2 \mu \rho_m} \int_0^{\mu \rho_m H} \{ E_1(x) - E_1(\sqrt{(\mu \rho_m R)^2 + x^2}) \} dx \quad (3-4-4) \end{aligned}$$

一般に  $E_1(x) \gg E_1(\sqrt{(\mu \rho_m R)^2 + x^2})$  なので第二項は無視する。

従って

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{S'_V C}{2 \mu \rho_m} \int_0^{\mu \rho_m H} E_1(x) dx \\ &= \frac{S'_V C}{2 \mu \rho_m} E_2(h) \quad (3-4-5) \end{aligned}$$

ただし

$$E_2(h) = \int_0^h E_1(x) dx \quad (3-4-6)$$

$$h = \mu \rho_m H$$

遮蔽体による減衰を付け加えると

$$\phi = \frac{S'_V C}{2 \mu \rho_m} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} E_2(h) \quad (3-4-7)$$

5	半無限体積線源+遮蔽	$\phi = \frac{S'V C}{2\mu\rho_m} e^{-\mu(\rho_s + \rho)}$
---	------------	-----------------------------------------------------------

No. 4 の体積線源で  $H \rightarrow \infty$  とすればよい。図 3-4 より

$$\lim_{H \rightarrow \infty} E_2(\mu\rho_m H) = 1 \quad (3-5-1)$$

従って

$$\phi = \frac{S'V C}{2\mu\rho_m} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} \quad (3-5-2)$$

3.3 計算例

例題 3-1 有限平面汚染が無限平面線源と仮定できる場合の汚染面の広がり、円板線源の半径を例にとり説明する。

円板平面線源と無限平面線源のβ粒子束を比較すればよい。

表 3-3 の No. 2, No. 3 より

円板平面線源 
$$\phi = \frac{S'_A C}{2} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} \{ E_1(h_1) - E_1(h_2) \}$$

無限平面線源 
$$\phi_\infty = \frac{S'_A C}{2} e^{-\mu(\rho_s + \rho)} E_1(h_1)$$

ただし 
$$h_1 = \mu \rho_a d$$

$$h_2 = (\mu \rho_a d) \sqrt{\left(\frac{R}{d}\right)^2 + 1}$$

φがφ<sub>∞</sub>の99%である場合の円板線源の半径Rを求める。

$$\frac{\phi}{\phi_\infty} = \frac{E_1(h_1) - E_1(h_2)}{E_1(h_1)} = 0.99$$

$$\therefore \frac{E_1(h_2)}{E_1(h_1)} = \frac{E_1\left(\mu \rho_a d \sqrt{\left(\frac{R}{d}\right)^2 + 1}\right)}{E_1(\mu \rho_a d)} = 0.01$$

$$\mu = 17 E_m^{-1.43}$$

上記の関係を、dをパラメータとして最大エネルギーE<sub>m</sub>について示したものが図3-6である。

同図より例えば、<sup>106</sup>Ru - <sup>106</sup>Rh (E<sub>m</sub> = 3.5 MeV) の皮膚汚染は、その半径が7 mm以上、又 <sup>137</sup>Cs (E<sub>m</sub> = 1.18 MeV) の場合は2.5 mm以上の広がりがある場合は無限平面線源と見なすことができ、吸収線量はNo.3の式で計算できることがわかる。

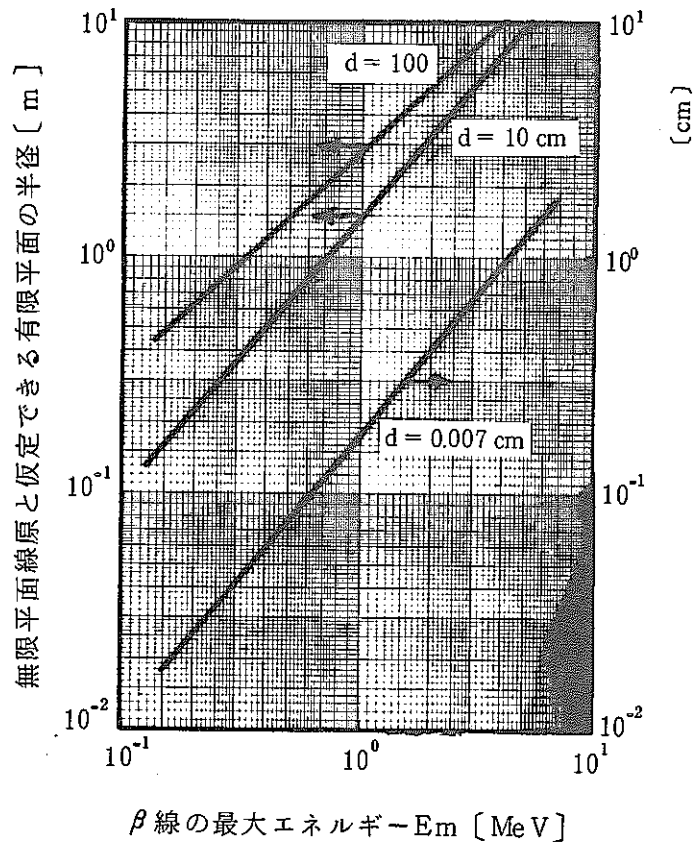


図 3 - 6 無限平面線源への近似

## 例題 3-2

半無限体積線源とみなせる有限体積線源の厚さを求める。

表 3-3 よりそれぞれの  $\beta$  粒子束を比較する。

$$\text{有限体積線源} \quad \phi = \frac{S'vC}{2\mu\rho_m} e^{-\mu(\rho+\rho_s)} E_2(h)$$

$$\text{半無限体積線源} \quad \phi_\infty = \frac{S'vC}{2\mu\rho_m} e^{-\mu(\rho+\rho_s)}$$

従って  $E_2(h) = 1$  となる厚さを求めればよい。図 3-4 より  $h$  は 3 以上で  $E_2$  はほぼ 1 であることがわかる。

$$h = \mu\rho_m H_0 = 3$$

$$\therefore H_0 = \frac{3}{\mu\rho_m} = \frac{3}{17 E_m^{-1.43} \rho_m}$$

上記関係を線源の密度  $\rho_m$  をパラメータとし、最大エネルギー  $E_m$  について図示したものが図 3-7 である。

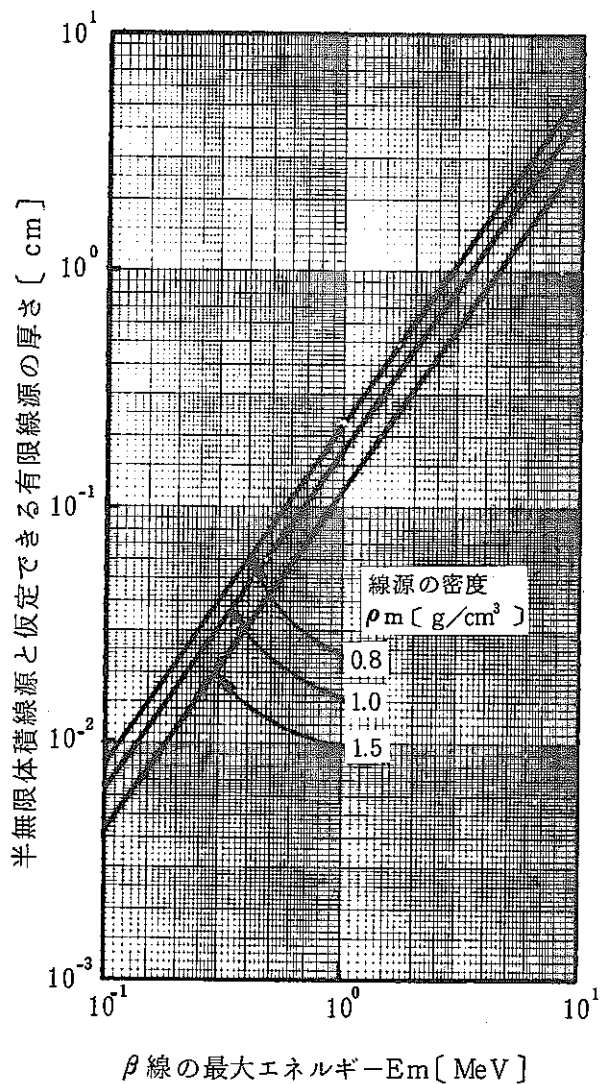
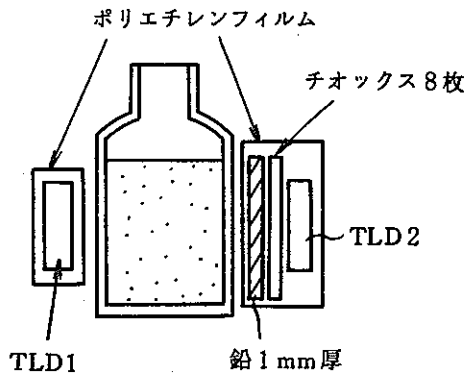


図 3 - 7 半無限体積線源への近似

例題 3-3



遮蔽体	面密度(g/cm <sup>2</sup> )
サンプルビン	0.125
ポリエチレンフィルム	0.004
鉛板(1mm厚)	1.134
チオックス(8枚)	0.168

上図の如く、約5mlをサンプルビンに取り実測した結果を以下に記す。

TLD 1	9.4 rad/hr
TLD 2	0.05 rad/hr

OTLでMA酸性廃液を使用しての実験を行うにあたって、β線による被曝線量を評価しておきたい。廃液の分析結果は以下の通りである。

核種	濃度	
U	0.21	g/l
Pu	1.40	mg/l
<sup>241</sup> Am	0.84	mCi/l
<sup>144</sup> Ce	2.7	mCi/l
<sup>137</sup> Cs	11	mCi/l
<sup>106</sup> Ru	24	mCi/l
<sup>95</sup> Zr	<10 <sup>-3</sup>	mCi/l
<sup>95</sup> Nb	<10 <sup>-3</sup>	mCi/l
gross $\gamma$	45	mCi/l
Fe	340	mg/l
Co	42	mg/l
Ni	44	mg/l

廃液の密度 1.24 g/cm<sup>3</sup>

分析結果から、考慮すべきβ線源は<sup>144</sup>Ce、<sup>137</sup>Cs、<sup>106</sup>Ruの3種類である。これらはそれぞれの娘核種からのβ線も評価しなければならない。それぞれの核種からのβ線について表にまとめる。

核種	E <sub>m</sub> (MeV)	E (MeV)	放出の割合	E <sub>m</sub> <sup>*</sup>	E <sup>*</sup>	放出の割合 <sup>*</sup>
<sup>144</sup> Ce	0.320	0.102	0.72	0.287	0.091	1.0
	0.240	0.077	0.08			
	0.186	0.057	0.20			
<sup>144</sup> Pr	3.15	1.27	0.95	3.08	1.24	1.0
	2.45	0.95	0.03			
	0.90	0.31	0.02			
<sup>137</sup> Cs	1.18	0.421	0.08	0.573	0.192	1.0
	0.52	0.172	0.92			
<sup>106</sup> Ru	0.039	0	1.00	0.039	0.013	1.0
	3.5	1.47	0.68			
<sup>106</sup> Rh	3.1	1.29	0.11	3.00	1.25	0.91
	2.4	0.95	0.12			

\*は計算を簡単化するため、最大エネルギー $E_m$ 、平均エネルギー $E$ を放出の割合で加重平均したものである。

放射平衡が成り立っているので、例えば $^{144}\text{Ce}$  1崩壊あたり  $E_m = 0.287 \text{ MeV}$  の $\beta$ 粒子1ケと  $E_m = 3.08$  の $\beta$ 粒子1ケが放出されることになる。従って各エネルギーの $\beta$ 線の強度  $[\text{Ci}/\text{cm}^3]$ を含め、計算に必要なデータをまとめると次のようになる。

核種	$E_m$ [MeV]	$E$ [MeV]	$S'_v$ [Ci/cm <sup>3</sup> ]	$\mu$ [cm <sup>2</sup> /g]	$f$ [rad sec cm <sup>2</sup> /hr MeV]
$^{144}\text{Ce}$	0.287	0.091	$2.7 \times 10^{-6}$	101	$5.84 \times 10^{-3}$
$^{144}\text{Pr}$	3.08	1.24	$2.7 \times 10^{-6}$	3.40	$1.96 \times 10^{-4}$
$^{137}\text{Cs}$	0.573	0.192	$1.1 \times 10^{-5}$	37.7	$2.17 \times 10^{-3}$
$^{106}\text{Ru}$	0.039	0.013	$2.4 \times 10^{-5}$	1760	$1.01 \times 10^{-1}$
$^{106}\text{Rh}$	3.00	1.25	$2.2 \times 10^{-5}$	3.53	$2.04 \times 10^{-4}$

Na 5 の半無限体積線源の式を用いる。

$$D = f \cdot E \cdot \frac{S'_v C}{2 \mu \rho_m} e^{-\mu \rho}$$

$$C = 3.7 \times 10^{10} \text{ [1/Ci]}$$

$$\rho_m = 1.24 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

$$\rho_1 = (\text{サンプルビン}) + (\text{ポリエチレンフィルム})$$

$$= 0.125 + 0.004$$

$$= 0.129 \text{ [g/cm}^2\text{]}$$

$$\rho_2 = 0.129 + (\text{鉛板}) + (\text{チオックス 8枚})$$

$$= 0.129 + 1.134 + 0.168$$

$$= 1.43 \text{ [g/cm}^2\text{]}$$

計算結果

核種	吸収線量率 [rad/hr]	
	$\rho_1$ の場合	$\rho_2$ の場合
$^{144}\text{Ce}$	0	0
$^{144}\text{Pr}$	1.86	0.022
$^{137}\text{Cs}$	0.01	0
$^{106}\text{Ru}$	0	0
$^{106}\text{Rh}$	15.04	0.152
計	16.9 [rad/hr]	0.174 [rad/hr]



例題 3-4

核種	分析値
<sup>241</sup> Am	7.5 μCi/ml
<sup>137</sup> Cs	0.011 μCi/ml
<sup>106</sup> Ru	0.032 μCi/ml
<sup>144</sup> Ce	< 10 <sup>-5</sup> μCi/ml
<sup>95</sup> Zr	< 10 <sup>-5</sup> μCi/ml

OTLでPWR燃料の抽出試験を行った。その際、分配工程からの抽出液 3.3 ℓをMAセルよりバックアウトして、精製用グローブボックスへ運搬する必要性が生じた。運搬には5 ℓ用ポリビン(20φ20h)を用い、塩ビブーツでシールする。液の分析結果は左記に示す。以上よりβ及びγ線の表面線量率を推定したい。

分析値からみると、β線源としては<sup>106</sup>Ruと放射平衡の<sup>106</sup>Rhであり、γ線源としては<sup>241</sup>Amと<sup>137</sup>Csが主なものである。各々の核種のβ線、γ線のエネルギー及び放出率を表にすると以下ようになる。

核種	β線			γ線	
	最大エネルギー E <sub>m</sub>	平均エネルギー E	放出の割合 η	エネルギー E	放出の割合 η
<sup>241</sup> Am				0.026 MeV	0.031
				0.0595	0.384
<sup>137</sup> Cs	1.18 MeV	0.421 MeV	0.08	0.662	0.85
	0.52	0.172	0.92		
<sup>106</sup> Ru <sup>106</sup> Rh	0.039	(0.013)	1.00	0.512	0.21
	3.5	1.47	0.68		
	3.1	1.29	0.11		
	2.4	0.95	0.12		
			1.05	0.015	
			1.13	0.005	
			1.55	0.002	

(1) β線について

計算を簡単化するため、平均化してβ線の本数を減らす。

$$(j) \text{ } ^{137}\text{Cs} \quad E_m = \frac{(1.18)(0.08) + (0.52)(0.92)}{(0.08) + (0.92)} = 0.573 \quad [\text{MeV}]$$

$$E = \frac{(0.421)(0.08) + (0.172)(0.92)}{(0.08) + (0.92)} = 0.192 \quad [\text{MeV}]$$

$$\eta = 0.08 + 0.92 = 1.0 \quad [-]$$

(ii)  $^{106}\text{Ru} - ^{107}\text{Rh}$

$^{106}\text{Ru}$  からの  $\beta$  線はエネルギーが小さいので無視する。

$$E_m = \frac{(3.5)(0.68) + (3.1)(0.11) + (2.4)(0.12)}{(0.68) + (0.11) + (0.12)} = 3.31 \quad [\text{MeV}]$$

$$E = \frac{(1.47)(0.68) + (1.29)(0.11) + (0.95)(0.12)}{(0.68) + (0.11) + (0.12)} = 1.38 \quad [\text{MeV}]$$

$$\eta = (0.68) + (0.11) + (0.12) = 0.91 \quad [-]$$

上記2種類の  $\beta$  線について求める。計算式は半無限体積線源の式 No.5 を用いる。

$$D = f \cdot E \cdot \frac{S'_v C}{2\mu\rho_m} e^{-\mu\rho} \quad [\text{rad/hr}]$$

$\rho_m$  は溶液の密度であるが、ここでは不明なので、1.0 とする。

f は図 3-2 より読みとり、 $\mu$  は次の式で計算する。

$$\mu = 17 E_m^{-1.43} \quad [\text{cm}^2/\text{g}]$$

遮蔽体となるものはポリビン ( $0.125 \text{ g/cm}^2$ ) と塩ビブーツ ( $0.038 \text{ g/l}$ ) なので

$$\rho = 0.125 + 0.038 = 0.163 \quad [\text{g/cm}^2]$$

以上得られた値を表にして、線量率を求める。

線源 核種	$E_m$ [MeV]	E [MeV]	f [ $\frac{\text{rad cm}^2 \text{ sec}}{\text{MeV hr}}$ ]	放出の 割合 $\eta$ [-]	$S'_v$ [Ci/ml]	$\mu$ [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]	$e^{-\mu\rho}$	吸収 線量率 D [rad/hr]
$^{137}\text{Cs}$	0.573	0.192	$2.17 \times 10^{-3}$	1.0	$1.1 \times 10^{-8}$	37.7	0.00214	$4.8 \times 10^{-6}$
$^{106}\text{Rh}$	3.31	1.38	$1.77 \times 10^{-4}$	0.91	$2.9 \times 10^{-8}$	3.07	0.606	0.026
計								0.026

(2)  $r$  線について

$\beta$  線の場合と同様、平均化して  $r$  線の本数を減らす。

(i)  $^{241}\text{Am}$

$$E = \frac{(0.026)(0.031) + (0.0595)(0.384)}{(0.031) + (0.384)} = 0.0570 \quad [\text{MeV}]$$

$$\eta = (0.031) + (0.384) = 0.415 \quad [-]$$

$$S_V = (7.5 \times 10^{-6} \text{ Ci/ml}) (3300 \text{ ml}) (0.415) = 1.03 \times 10^{-2} \text{ [Ci]}$$

(ii)  $^{137}\text{Cs}$

$$E = 0.662 \text{ [MeV]}$$

$$\eta = 0.85 \text{ [-]}$$

$$S_V = (0.011 \times 10^{-6}) (3300) (0.85) = 3.09 \times 10^{-5} \text{ [Ci]}$$

(iii)  $^{106}\text{Rh}$

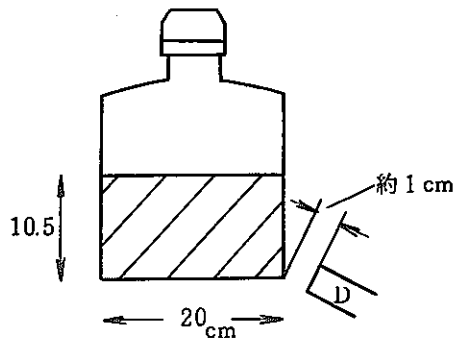
$$E = \frac{(0.512)(0.21) + (0.622)(0.11) + (1.05)(0.015)}{(0.21) + (0.11) + (0.015)} = 0.572 \text{ [MeV]}$$

$$\eta = (0.21) + (0.11) + (0.015) = 0.335 \text{ [-]}$$

$$S_V = (0.032 \times 10^{-6}) (3300) (0.335) = 3.54 \times 10^{-5} \text{ [Ci]}$$

$\gamma$ 線による照射線量は、形状に大きく依存する。この例題はOTLでの実際例であり、実測値が得られている。従って比較するために下に図示した測定位置での計算を行う。

使用する計算式はNo. 14の円柱体積線源とする。



$$\phi = \frac{S_V C}{4 \pi R^2} G_s(k, p)$$

ここで

$$k = \frac{H}{R} = \frac{10.5}{10} = 1.05$$

$$p = \frac{d}{R} = \frac{11}{10} = 1.1$$

図2-8より

$$G_s(1.05, 1.1) = 0.909$$

従って各粒子束は次のようになる。

$$(i) \text{ } ^{241}\text{Am} \quad \phi = \frac{(1.03 \times 10^{-2})(3.7 \times 10^{10})}{4 \pi (10)^2} (0.909) = 2.76 \times 10^5 \text{ [1/sec cm}^2\text{]}$$

$$(ii) \text{ } ^{137}\text{Cs} \quad \phi = \frac{(3.09 \times 10^{-5})(3.7 \times 10^{10})}{4 \pi (10)^2} (0.909) = 8.27 \times 10^2 \text{ [1/sec cm}^2\text{]}$$

$$(iii) \text{ } ^{106}\text{Rh} \quad \phi = \frac{(3.54 \times 10^{-5}) (3.7 \times 10^{10})}{4 \pi (10)^2} (0.909) = 9.47 \times 10^2 \quad [1/\text{sec cm}^2]$$

線量変換係数 fE は図 2-1 から読み取ると、各照射線量率は次のように求まる。

$$(i) \text{ } ^{241}\text{Am} \quad (1.23 \times 10^{-7}) (2.76 \times 10^5) = 0.0339 \quad [\text{R/hr}]$$

$$(ii) \text{ } ^{137}\text{Cs} \quad (1.24 \times 10^{-6}) (8.27 \times 10^2) = 0.0010 \quad [\text{R/hr}]$$

$$(iii) \text{ } ^{106}\text{Rh} \quad (1.08 \times 10^{-6}) (9.47 \times 10^2) = 0.0010 \quad [\text{R/hr}]$$

$$\text{合計} \quad 0.036 \quad [\text{R/hr}]$$

(3) 実測値との比較

	実 測 値	計 算 値
$\beta$ 線	41 [mrad/hr]	26 [mrad/hr]
$\gamma$ 線	26 [mR/hr]	36 [mR/hr]

例題 3-5

OTL で用いている GMサーベイメータの測定限界は 30 Kcpm である。このサーベイメータが振り切れた場合 (30 Kcpm とする) の被曝線量を求めたい。線源は  $^{95}\text{Zr}$  -  $^{95}\text{Nb}$  で、点線源とする。また線源とサーベイメータの距離は 10, 50, 100 cm の 3 種類を考慮するものとする。

GM 計数管は、その構造から放射線のエネルギーには無関係に一定のパルス信号を発生し、それをカウントする。従ってこの 30 Kcpm の中には  $\gamma$  線 (間接電離放射線),  $\beta$  線 (直接電離放射線) が含まれ、エネルギーの大小に係わりなく、サーベイメータに到達した放射線は 1 パルスとして計数される。この中で弱い  $\beta$  線はサーベイメータに達する前に減衰する確率が高いため、計数値の  $\beta : \gamma$  比は線源とサーベイメータとの距離によって大きく異なる。そこでまずこの  $\beta : \gamma$  比を求める。遮蔽体はなく、空気による減衰のみを考える。放射平衡にある  $^{95}\text{Zr}$ - $^{95}\text{Nb}$  は 1 崩壊あたり 2 倍の  $\beta$  線及び  $\gamma$  線を放出するので、 $\beta : \gamma$  放出比は 1 : 1 である。

線源強度を  $S_{PC}$  [dps] とすると各粒子束は次のようになる。

$$\gamma \dots\dots\dots \gamma \phi_i = \frac{\eta_i S_{PC}}{4\pi d^2}$$

$$\beta \dots\dots\dots \beta \phi_j = \frac{\eta_j S_{PC}}{4\pi d^2} e^{-\mu_j \rho_a d} \quad \text{ただし} \quad \rho_a = 0.00129 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

従って  $\beta : \gamma$  比は次のようになる。

$$\begin{aligned} \beta : \gamma &= \left( \sum_{j=1}^n \beta \phi_j \right) : \left( \sum_{i=1}^m \gamma \phi_i \right) \\ &= \left\{ \frac{S_{PC}}{4\pi d^2} \sum_{j=1}^n \eta_j e^{-\mu_j \rho_a d} \right\} : \left\{ \frac{S_{PC}}{4\pi d^2} \sum_{i=1}^m \eta_i \right\} \\ &= \left( \sum_{j=1}^n \eta_j e^{-\mu_j \rho_a d} \right) : \left( \sum_{i=1}^m \eta_i \right) \end{aligned}$$

	$\gamma$ 線			$\beta$ 線			
	$E_i$ [MeV]	$\eta_i$ [ - ]	$(fE)_i$ [ $\frac{Rsec\ cm^2}{hr}$ ]	$E_{mj}$ [MeV]	$\mu_j$ [ $cm^2/g$ ]	$\eta_j$ [ - ]	$f_j$ [ $\frac{rad\ sec\ cm^2}{hr\ MeV}$ ]
$^{95}Zr$	0.724	0.49	$1.28 \times 10^{-6}$	0.360	73.3	0.43	$4.22 \times 10^{-3}$
	0.756	0.49	$1.33 \times 10^{-6}$	0.396	63.9	0.55	$3.69 \times 10^{-3}$
	0.23	0.02	$3.90 \times 10^{-7}$	0.89	20.1	0.02	$1.16 \times 10^{-3}$
$^{95}Nb$	0.765	1.0	$1.34 \times 10^{-6}$	0.160	234	1.0	$1.35 \times 10^{-2}$

$\gamma$  線については空気による減衰は無視する。 $\beta$  線及び  $\gamma$  線の各エネルギー別粒子放出比も含めて表にまとめる。

		$^{95}Zr$			$^{95}Nb$	
$\gamma$	$E_i$ [MeV]	0.724	0.756	0.23	0.765	
	$\eta_i$ [ - ]	0.49	0.49	0.02	1.0	
	$\Sigma \eta_i$ [ - ]	2.0				
$\beta$	$E_{mj}$ [MeV]	0.360	0.396	0.89	0.160	
	d = 10 [cm]	$\eta_j e^{-\mu_j \rho_{ad}}$	0.167	0.241	0.015	0.049
		$\Sigma \eta_j e^{-\mu_j \rho_{ad}}$	0.472			
	d = 50 [cm]	$\eta_j e^{-\mu_j \rho_{ad}}$	0.00380	0.00892	0.00547	~ 0.0
		$\Sigma \eta_j e^{-\mu_j \rho_{ad}}$	0.0182			
	d = 100 [cm]	$\eta_j e^{-\mu_j \rho_{ad}}$	0.000034	0.000145	0.001496	~ 0.0
$\Sigma \eta_j e^{-\mu_j \rho_{ad}}$		0.00167				

従って  $\beta$  と  $\gamma$  の計数比は

$$d = 10\ cm\ での\ \beta : \gamma = 0.472 : 2.0$$

$$d = 50\ cm\ での\ \beta : \gamma = 0.0182 : 2.0$$

$$d = 100\ cm\ での\ \beta : \gamma = 0.00167 : 2.0$$

$\beta$  線及び  $\gamma$  線の線量はそれぞれエネルギーにより変換係数が異なることに注意しなければならない。

問題に戻って、全計数率が 30Kcpm (= 500cps) なので

$$500 = \sum_{j=1}^4 \beta \phi_j + \sum_{i=1}^4 r \phi_i$$

$$= \frac{S_p C}{4 \pi d^2} \left\{ \sum_{j=1}^4 \eta_j e^{-\mu_j \rho_a d} + \sum_{i=1}^4 \eta_i \right\}$$

上式に前表の値を代入することにより、各距離 d に対応する線源強度  $S_p C$  [dps] が求まる。

d [cm]	$S_p C$ [dps]
10	$2.54 \times 10^5$
50	$7.78 \times 10^6$
100	$3.14 \times 10^7$

一方  $\beta$  線による吸収線量、及び  $r$  線による照射線量は次式で計算される。

$$\beta \text{ 線} \quad D = \frac{S_p C}{4 \pi d^2} \sum_{j=1}^4 f_j E_j \eta_j e^{-\mu_j \rho_a d} \quad [\text{rad/hr}]$$

$$r \text{ 線} \quad D = \frac{S_p C}{4 \pi d^2} \sum_{i=1}^4 (fE)_i \eta_i \quad [\text{R/hr}]$$

以上で計算式及び必要な定数がすべて確定したので線量を計算すると次のようになる。

d [cm]	$\beta$ 吸収線量率 [mrad/hr]	$r$ 照射線量率 [mR/hr]
10	49.0	0.53
50	2.02	0.65
100	0.15	0.66

従って GMサーベイメータでの計数値が同じ 30 Kcpm でも、それを測定した位値で被曝線量が非常に異なってくることがわかる。もちろん上記の結果で  $d = 50$  cm で 30 Kcpm の場合は、測定点での  $\beta$  吸収線量は 2.02 mrad/hr であるが、その時 10 cm での線量は  $d = 10$  cm での計算値 49 mrad/hr より大きい。なぜならばこの時の線源強度  $S_p C$  は  $7.78 \times 10^6$  dps であるのに対して 49 mrad/hr の場合  $S_p C$  は  $2.54 \times 10^5$  dps であるからである。従って  $d = 50$  cm で 30 Kcpm の場合、10 cm での吸収線量を求めるには、上記の結果より次のようにすればよい。

$$D = \frac{(7.78 \times 10^6)}{(2.54 \times 10^5)} \times 49.0$$

$$= 1500 \quad [\text{mrad/hr}]$$

表3-5に計数率10Kcpmに相当する線量率を核種別に示した。

使用例  $^{106}\text{Ru}-^{106}\text{Rh}$  のみを含んだ溶液を入れたサンプルビンから70cmはなれた所での計数率が1Kcpmの場合の線量率を推定する。

表3-5の $^{106}\text{Ru}-^{106}\text{Rh}$ の欄から50cmと100cmの値から内挿すると $\beta$ が27[mrad/hr],  $r$ が20[ $\mu\text{R/hr}$ ]となる。計数率が1Kcpmなので10で割ると、推定値が次のように得られる。

吸収線量率      2.7 [mrad/hr]  
 照射線量率      2.0 [ $\mu\text{R/hr}$ ]

表3-5 計数率10Kcpmに相当する線量率

	点線源と 測定点との 距離[cm]	$\beta$ 線 吸収線量率 [mrad/hr]	$r$ 線 照射線量率 [mR/hr]	計数率の $\beta r$ 比 $\beta : r$
$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$	10	61	no $r$	1 : 0
	50	51		
	100	48		
$^{95}\text{Zr}-^{95}\text{Nb}$	10	16	0.18	0.19 : 0.81
	50	0.67	0.22	0.0090 : 0.9910
	100	0.05	0.22	0.0008 : 0.9992
$^{106}\text{Ru}-^{106}\text{Rh}$	10	29	0.050	0.72 : 0.28
	50	28	0.056	0.68 : 0.32
	100	26	0.063	0.64 : 0.36
$^{137}\text{Ce}-^{137}\text{mBa}$	10	29	0.12	0.41 : 0.59
	50	6.2	0.18	0.096 : 0.904
	100	1.2	0.19	0.02 : 0.98
$^{144}\text{Ce}-^{144}\text{Pr}$	10	45	0.009	0.89 : 0.11
	50	34	0.013	0.84 : 0.16
	100	32	0.015	0.80 : 0.20

- 注1. 本表は線源を点線源として計算したものである。
- 注2. 計算方法は例題3-5参照のこと。
- 注3. 本表はあくまで計算値であり、実測値で検証してないので参考値として見てもらいたい。
- 注4. 核種が複数の場合、その組成が判らなると使用できない。



#### 4. 電卓による線量計算

対象機種：プログラム電卓 YHP - 97 (YHP - 67)

横河ヒューレットパッカー製

プログラムステップ数 224

定数レジスタ数 26

本章の目的は、現場においてある程度の精度での線量計算の必要性が生じた場合、これに即応できる簡易計算プログラムを提供することにより、現場作業の円滑化をねらったものである。

本計算機 (YHP - 97) を採用した理由は、再処理工場で数台が使用されていることと、同機の使用言語が分かり易く、しかもプログラムステップ数が点積分核法の線量計算に適した規模であるためである。

用意したプログラムは $r$ 線の線量計算式 No 1 ~ 16 のうち、積分項  $W$ ,  $G$  を含む No 11, 12, 15, 16 を除いたものと、 $\beta$ 線用 No 2, 3, 5 である。

上記  $W$ ,  $G$  の積分計算は本計算機にはステップ数の関係でプログラム化が困難であった。これを行うためには上位機種又は大型計算機が必要である。しかしこれらの計算は、アルゴリズムが点積分核法である限り、得られる結果の精度に比べ、計算時間と労力がかかりすぎ、しかも内部吸収がある場合の再生係数の選択が非常に難しく、実用的とはいえない。

用意したプログラムで積分計算を含んでいるものについては、その計算方法がシンプソン法又はガウス求積法の簡易型を用いているため、有効桁数は3桁以内とする。特に No 6, 8 の二重積分は、分割数を計算時間及びレジスタの制限から  $6 \times 6$  としたため、結果の有効桁数を2桁以内とするのが安全である。

4.1 使用方法

変換係数 fE の計算				
使用する磁気カード		1. 吸収係数ラグランジュ補間コード      サイド1      サイド2 2. 空気のエネルギー吸収係数データ      サイド1      サイド2		
操作番号	入力定数名及び説明	単 位	操作キー	出力表示の説明
1	E : $\gamma$ 線のエネルギー	MeV	<input type="button" value="A"/>	$\mu_a$ [ $\text{cm}^{-1}$ ] : 空気の線エネルギー 吸収係数 (20 °C)
2	$\mu_a$ : 空気の線エネルギー 吸収係数	$\text{cm}^{-1}$	<input type="button" value="E"/>	$f \cdot E$ [ R/hr·sec $\text{cm}^2$ ] : 変換係数
(注) 上記の操作で fE を求める時は、操作 1 を行うと $\mu_a$ の値が表示されるので、次に <input type="button" value="E"/> を押せばよい。				

鉛, 鉄, コンクリートの線吸収係数の計算				
使用する磁気カード		1. 吸収係数ラグランジュ補間コード      サイド1      サイド2 2. 鉛の場合……鉛の線吸収係数データ      サイド1      サイド2 鉄の場合……鉛の線吸収係数データ      サイド1      サイド2 コンクリートの場合 ……コンクリートの線吸収 係数データ                              サイド1      サイド2		
操作番号	入力定数名及び説明	単 位	操作キー	出力表示の説明
1	E : $\gamma$ 線のエネルギー	MeV	<input type="button" value="A"/>	$\mu$ [ $\text{cm}^{-1}$ ] : 線吸収係数 (20 °C)

鉛の再生係数の計算				
使用する磁気カード		1. 再生係数用二次元補間コード                      サイド1   サイド2 2. Pb 再生係数データ No.1~No.6                      サイド1   サイド2 (注) 2.のデータカードはEと $\mu t$ の値によりNo.1~No.6のうちから1枚を選ぶ。(付記)の説明を参照。		
操作番号	入力定数名と説明	単位	操作キー	出力表示の説明
1	E: $r$ 線のエネルギー $\mu t$ : (鉛の線吸収係数) × (遮蔽体の厚さ) (注) 使用したデータカード外のE, $\mu t$ を入力するとErrorrが表示される。	MeV —	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">ENTER</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">A</div>	B [-]: 鉛の再生係数
<p>(付記) 再生係数は本来、対象としている測定体系に依存するものであり、一般化することは不可能である。しかも実測データ及びモンテカルロ法による計算データにも限りがあるため、ここでは<math>\mu t</math>が20 mfp程度までは使用に耐えうるといわれる無限媒質中の点等方線源の再生係数を採用することにした。</p> <p>再生係数の数式化については、Tayler や Berger 等により、簡単な計算式が提案されている。しかしそれぞれの数式中に含まれている定数が、媒質, E, <math>\mu t</math>により異なるため記憶すべき定数が多くなり、限ぎられたレジスタの電卓で計算する場合そのメリットがなくなる。従ってここでは再生係数をE, <math>\mu t</math>により分類し、データカードに記憶し、そのデータ間の値を二次元補間する方法をとった。</p> <p>使用するデータカードのNoはE, <math>\mu t</math>により下の図により決める。</p>				

No 1 点線源					
使用する磁気カード		r	No 1	No 2	サイド1
操作番号	入力定数名及び説明	単 位	操作キー	出力表示の説明	
1	fE: 変換係数	$\frac{R \cdot \text{sec} \cdot \text{cm}^2}{\text{hr}}$	[A]	D (R/hr): 照射線量率	
2	Sp: 点線源の強度 :	Ci	[B]		
3	d: 点線源からの距離	cm	[D]		
距離 d を変化させて計算したい場合は操作番号 3 を繰り返す。					

No 2 点線源+遮蔽					
使用する磁気カード		r	No 1	No 2	サイド1
操作番号	入力定数名及び説明	単 位	操作キー	出力表示の説明	
1	fE: 変換係数	$\frac{R \cdot \text{sec} \cdot \text{cm}^2}{\text{hr}}$	[A]	D (R/hr): 照射線量率	
2	Sp: 点線源の強度	Ci	[B]		
3	$\mu$ : 遮蔽体の吸収係数	$\text{cm}^{-1}$	[ENTER]		
	t: " の厚さ	cm	[ENTER]		
4	B: 再生係数	-	[C]		
	d: 点線源からの距離 (遮蔽体に垂直な成分)	cm	[ENTER]		
	a: 点線源からの距離 (遮蔽体に平行な成分)	cm	[E]		
距離 d 又は a を変化させたい場合は操作番号 4 のみをくり返す。					

No 3 線線源				
使用する磁気カード		r No 3 No 4	サイド1, サイド2	
操作番号	入力定数名及び説明	単 位	操作キー	出力表示の説明
1	fE: 変換係数	$\frac{Rsec\ cm^2}{hr}$	[A]	D (R/hr): 照射線量率
2	S <sub>L</sub> : 線源強度	Ci	[ENTER]	
3	L: 線線源の長さ	cm	[B]	
	d: 線源からの垂直距離	cm	[ENTER]	
	a: 線源の一端からの平行距離	cm	[C]	

No 4 線線源+遮蔽				
使断する磁気カード		r No 3 No 4	サイド1, サイド2	
操作番号	入力定数名及び説明	単 位	操作キー	出力表示の説明
1	fE: 変換係数	$\frac{Rsec\ cm^2}{hr}$	[A]	D (R/hr): 照射線量率
2	S <sub>L</sub> : 線源強度	Ci	[ENTER]	
3	L: 線線源の長さ	cm	[B]	
	t: 遮蔽体の吸収係数	cm <sup>-1</sup>	[ENTER]	
4	μ: " の厚さ	cm	[ENTER]	
	β: 再生係数	-	[f] [b]	
	d: 線線源からの垂直距離	cm	[ENTER]	
	a: 線線源の一端からの平行距離	cm	[D]	
F(θ, b <sub>1</sub> ) の計算				
1	θ	deg	[ENTER]	F(θ, b <sub>1</sub> ) [-]
	b <sub>1</sub>	-	[f] [d]	

No. 5 円板線源				
使用する磁気カード		r No. 5 No. 9 No. 13	サイド1 サイド2	
操作番号	入力定数名及び説明	単位	操作キー	出力表示の説明
1	fE : 変換係数	$\frac{\text{Rsec cm}^2}{\text{hr}}$	[A]	D (R/hr) : 照射線量率
2	SA : 線源強度	Ci	[ENTER]	
	R : 円板の半径	cm	[B]	
3	d : 円板面からの距離	cm	[ENTER]	
	a : 円板の中心から面に平行な距離	cm	[C]	

No. 6 円板線源+遮蔽					
使用する磁気カード		r No. 6	サイド1, サイド2		
操作番号	入力定数名及び説明	単位	操作キー	出力表示の説明	
1	fE : 変換係数	$\frac{\text{Rsec} \cdot \text{cm}^2}{\text{hr}}$	[ENTER]	D (R/hr) : 照射線量率	
	SA : 線源強度	Ci	[A]		
2	t : 遮蔽体の厚さ	cm	[ENTER]		
	$\mu$ : " の吸収係数	$\text{cm}^{-1}$	[ENTER]		
	B : 再生係数	—	[B]		
3	R : 円板の半径	cm	[ENTER]		
	d : 円板面からの垂直距離	cm	[ENTER]		
	a : 円板の中心から面に平行な距離	cm	[C]		
G <sub>1</sub> (k, P, $\mu t$ ) の計算					
1	t : 遮蔽体の厚さ	cm	[ENTER]		(注) この場合のBは計算に関係ないので任意の数でよいが、ここでは1とし、統一する。 G <sub>1</sub> (k, p, $\mu t$ ) [-]
	$\mu$ : " の吸収係数	$\text{cm}^{-1}$	[ENTER]		
	B = 1	—	[B]		
2	k	—	[ENTER]		
	p	—	[D]		

No.7 長方平面線源				
使用する磁気カード		r No.7 サイド1 サイド2		
操作番号	入力定数名及び説明	単位	操作キー	出力表示の説明
1	fE: 変換係数	$\frac{R \cdot \text{sec} \cdot \text{cm}^2}{\text{hr}}$	A	
2	SA: 線源強度	Ci	ENTER	
	L: 平面線源の一辺の長さ	cm	ENTER	
	H: 平面線源の別の辺の長さ	cm	B	
3	d: 一頂点からの垂直距離	cm	C	D (R/hr): 照射線量率
G <sub>2</sub> (m, n) の計算				
1	1/m n	— —	ENTER D	G <sub>2</sub> (m, n) [ - ]

No.8 長方平面線源+遮蔽				
使用する磁気カード		r No.8 サイド1 サイド2		
操作番号	入力定数名及び説明	単位	操作キー	出力表示の説明
1	fE: 変換係数	$\frac{R \cdot \text{sec} \cdot \text{cm}^2}{\text{hr}}$	ENTER	
	SA: 線源強度	Ci	A	
2	t: 遮蔽体の厚さ	cm	ENTER	
	$\mu$ : 遮蔽体の吸収係数	cm <sup>-1</sup>	ENTER	
	B: 再生係数	—	B	
3	H: 平面線源の一辺の長さ	cm	ENTER	D (R/hr): 照射線量率
	L: 平面線源の他の長さ	cm	C	
4	d: 一頂点からの垂直距離	cm	D	
G <sub>3</sub> (m, n, $\mu t$ ) の計算				
1	t: 遮蔽体の厚さ	cm	ENTER	注) この場合のBは任意の数でよいが、ここでは1とする。
	$\mu$ : " の吸収係数	cm <sup>-1</sup>	ENTER	
	B = 1	—	B	G <sub>3</sub> (m, n, $\mu t$ )
2	1/m n	— —	ENTER E	

No. 9 球表面線源							
使用する磁気カード		r	No. 5	No. 9	No. 13	サイド1	サイド2
操作番号	入力定数及び説明	単位	操作キー	出力表示の説明			
1	fE: 変換定数	$\frac{R \text{ sec cm}^2}{\text{hr}}$	[A]	D [R/hr]: 照射線量率			
2	S <sub>A</sub> : 線源強度	Ci	[ENTER]				
	R: 球の半径	cm	[B]				
3	d: 球中心からの距離	cm	[D]				

No. 10 円筒表面線源					
使用する磁気カード		1. r	No. 10	No. 14	サイド1, サイド2
		2. データカード (ガウス球積法)	サイド1, サイド2		
操作番号	入力定数及び説明	単位	操作キー	出力表示の説明	
1	fE: 変換係数	$\frac{R \text{ sec cm}^2}{\text{hr}}$	[A]	D [R/hr]: 照射線量率	
2	S <sub>A</sub> : 線源強度	Ci	[ENTER]		
	R: 円筒半径	cm	[B]		
3	H: 円筒の高さ	cm	[ENTER]		
	d: 円筒底面中心からの水平距離	cm	[C]		
G <sub>4</sub> (k, P) の計算					
1	k	-	[ENTER]	G <sub>4</sub> (k, P)	
	P	-	[f] [C]		
<p>(付記) この計算では、2枚の磁気カードを演算の前に読み込ませることに注意。          これは G<sub>4</sub> (k, P) の被積分関数の性質がすなおでないため、積分をシンプソン法で行うと誤差が大きくなるためである。          No. 14 の円柱体積線源の場合も同様である。</p>					



No 13 球体積線源				
使用する磁気カード		r No 5 No 9 No 13	サイド1 サイド2	
操作番号	入力定数及び説明	単位	操作キー	出力表示の説明
1	fE: 変換係数	$\frac{R \text{ sec cm}^2}{\text{hr}}$	A	D (R/hr): 照射線量率
2	S <sub>v</sub> : 線源強度 R: 球の半径	Ci cm	ENTER B	
3	d: 球中心からの距離	cm	E	

No 14 円柱体積線源				
使用する磁気カード		1. r No 10 No 14	サイド1, サイド2	
		2. データカード (ガウス球積法)	サイド1, サイド2	
操作番号	入力定数及び説明	単位	操作キー	出力表示の説明
1	fE: 変換係数	$\frac{R \text{ sec cm}^2}{\text{hr}}$	A	D (R/hr): 照射線量率
2	S <sub>v</sub> : 線源強度 R: 円柱の半径	Ci cm	ENTER B	
3	H: 円柱の高さ d: 円柱底面中心からの水平距離	cm cm	ENTER D	
G <sub>s</sub> (k, P) の計算				
1	k p	- -	ENTER f d	G <sub>s</sub> (k, p)

No. 2 平面線源 (円板) + 遮蔽				
使用する磁気カード		1. $\beta$ No. 2 No. 3 No. 5	サイド1	サイド2
		2. データカード (ガウス球積法)	サイド1	サイド2
操作番号	入力定数及び説明	単位	操作キー	出力表示の説明
1	$E_m$ : $\beta$ 線の最大エネルギー $E$ : $\beta$ 線の平均エネルギー $\rho$ : 遮蔽体の面積密度 $\rho_s$ : 皮膚の不感層の面積密度	MeV MeV $mg/cm^2$ $mg/cm^2$	ENTER ENTER ENTER A	
2	$S_A$ : 線源強度 R: 円の半径	Ci cm	ENTER B	
3	d: 線源からの垂直距離	cm	D	D (rad/hr): 吸収線量率
$\int_{h_1}^{h_2} \frac{e^{-y}}{y} dy = E_1(h_1) - E_1(h_2) \text{ の計算}$				
1	$h_1$ $h_2$	- -	ENTER f d	$E_1(h_1) - E_1(h_2)$

No. 3 無限平面線源 + 遮蔽				
使用する磁気カード		1. $\beta$ No. 2 No. 3 No. 5	サイド1	サイド2
		2. データカード (ガウス求積法)	サイド1	サイド2
操作番号	入力定数及び説明	単位	操作キー	出力表示の説明
1	$E_m$ : $\beta$ 線の最大エネルギー $E$ : $\beta$ 線の平均エネルギー $\rho$ : 遮蔽体の面積密度 $\rho_s$ : 皮膚の不感層の面積密度	MeV MeV $mg/cm^2$ $mg/cm^2$	ENTER ENTER ENTER A	
2	$S'_A$ : 単位面積当たりの線源強度	Ci/cm <sup>2</sup>	C	
3	d: 線源からの距離	cm	E	D (rad/hr): 吸収線量率
$\int_{h_1}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy = E_1(h_1) \text{ の計算}$				
1	$h_1$	-	f e	$E_1(h_1)$

No. 5 半無限体積線源+遮蔽							
使用する磁気カード		$\beta$	No. 2	No. 3	No. 5	サイド1	サイド2
操作番号	入力定数及び説明	単位	操作キー		出力表示の説明		
1	$E_m$ : $\beta$ 線の最大エネルギー	MeV	ENTER				
	$E$ : $\beta$ 線の平均エネルギー	MeV	ENTER				
	$\rho$ : 遮蔽体の面積密度	mg/cm <sup>2</sup>	ENTER				
2	$\rho_s$ : 皮膚の不感層の面積密度	mg/cm <sup>2</sup>	A				
	$S'_V$ : 単位体積当たりの線源強度	Ci/cm <sup>2</sup>	C				
3	$\rho_m$ : 線源の密度		f	a	D (rad/hr): 吸収線量率		

4.2 プログラムリスト

吸収係数数ラグランジュ補間コード

001	*LBLA	039	RCLD	077	-	115	0
002	LOG	040	X $\neq$ Y	078	×	116	8
003	STOE	041	STOD	079	RCLE	117	6
004	0	042	X $\neq$ Y	080	+	118	×
005	STOI	043	RCLA	081	STOE	119	RCLD
006	*LBLB	044	RCLB	082	RCLI	120	10 <sup>x</sup>
007	ISZI	045	-	083	RCLC	121	×
008	RCLI	046	RCLA	084	RCLA	122	PRTX
009	RCLE	047	RCLB	085	-	123	RTN
010	X>Y?	048	-	086	RCLC		
011	GTOB	049	×	087	RCLB		
012	RCLI	050	÷	088	-		
013	1	051	RCLD	089	×		
014	-	052	RCLB	090	÷		
015	STOI	053	-	091	RCLD		
016	RCLi	054	×	092	RCLA		
017	STOA	055	RCLD	093	-		
018	ISZI	056	RCLC	094	×		
019	RCLi	057	-	095	RCLD		
020	STOB	058	×	096	RCLB		
021	ISZI	059	RCLE	097	-		
022	RCLi	060	X $\neq$ Y	098	×		
023	STOC	061	STOE	099	RCLE		
024	8	062	X $\neq$ Y	100	+		
025	RCLI	063	RCLB	101	RCLD		
026	+	064	RCLC	102	10 <sup>x</sup>		
027	STOI	065	-	103	DSP 4		
028	RCLi	066	RCLB	104	PRTX		
029	STOD	067	RCLA	105	X $\neq$ Y		
030	RCLE	068	-	106	10 <sup>x</sup>		
031	ISZI	069	×	107	PRTX		
032	RCLi	070	÷	108	DSP 2		
033	STOE	071	RCLD	109	RTN		
034	ISZI	072	RCLC	110	R/S		
035	RCLi	073	-	111	*LBLE		
036	STOI	074	×	112	•		
037	R↓	075	RCLD	113	0		
038	R↓	076	RCLA	114	5		

レジスタ

A	$\mu_i$
B	$\mu_{i+1}$
C	$\mu_{i+2}$
D	使用
E	使用
I	使用

レジスタ

0	$E_0$
1	$E_1$
2	$E_2$
3	$E_3$
4	$E_4$
5	$E_5$
6	$E_6$
7	$E_7$
8	$E_8$
9	$E_9$

レジスタ

S 0	$\mu_0$
S 1	$\mu_1$
S 2	$\mu_2$
S 3	$\mu_3$
S 4	$\mu_4$
S 5	$\mu_5$
S 6	$\mu_6$
S 7	$\mu_7$
S 8	$\mu_8$
S 9	$\mu_9$

ラベル

A	$E \rightarrow \mu$
B	使用
C	
D	
E	$\mu_a \rightarrow fE$
a	
b	
c	
d	
e	

再生係数用二次元補間コード

001	*LBLA	039	3	077	ISZI	115	RCL 8	153	RTN
002	STOA	040	STOI	078	RCLi	116	-		
003	X≠Y	041	GSBc	079	STO 7	117	RCL 7		
004	STOB	042	GSBd	080	ISZI	118	RCL 6		
005	SPC	043	P≠S	081	RCLi	119	-		
006	DSP 4	044	STO 9	082	STO 8	120	×		
007	PRTX	045	P≠S	083	RTN	121	÷		
008	X≠Y	046	1	084	*LBLc	122	RCL 9		
009	PRTX	047	6	085	RCLi	123	RCL 8		
010	RCLA	048	STOI	086	STOC	124	-		
011	RCL 0	049	GSBc	087	ISZI	125	RCL 9		
012	X>Y?	050	GSBd	088	RCLi	126	RCL 6		
013	GTOa	051	STOE	089	STOD	127	-		
014	RCL 2	052	P≠S	090	ISZI	128	×		
015	RCLA	053	RCL 9	091	RCLi	129	×		
016	X>Y?	054	P≠S	092	STOE	130	STOD		
017	GTOa	055	STOD	093	RTN	131	RCLE		
018	RCLB	056	RCLA	094	*LBLd	132	RCL 8		
019	RCL 3	057	STOC	095	RCLC	133	RCL 6		
020	X>Y?	058	RCL 9	096	RCL 6	134	-		
021	GTOa	059	STOA	097	RCL 7	135	RCL 8		
022	RCL 5	060	3	098	-	136	RCL 7		
023	RCLB	061	STOI	099	RCL 6	137	-		
024	X>Y?	062	GSBb	100	RCL 8	138	×		
025	GTOa	063	RCLB	101	-	139	÷		
026	*LBL E	064	STO 9	102	×	140	RCL 9		
027	0	065	GSBd	103	÷	141	RCL 6		
028	STOI	066	DSP 2	104	RCL 9	142	-		
029	GSBb	067	PRTX	105	RCL 7	143	RCL 9		
030	1	068	RTN	106	-	144	RCL 7		
031	0	069	*LBLa	107	RCL 9	145	-		
032	STOI	070	1	108	RCL 8	146	×		
033	GSBc	071	CHS	109	-	147	×		
034	RCLA	072	$\sqrt{x}$	110	×	148	RCLC		
035	STO 9	073	R/S	111	×	149	RCLD		
036	GSBd	074	*LBLb	112	STOC	150	+		
037	STOA	075	RCLi	113	RCLD	151	+		
038	1	076	STO 6	114	RCL 7	152	STOE		

レジスタ

A	使用
B	E
C	使用
D	使用
E	使用
I	使用

レジスタ

0	$\mu t_1$
1	$\mu t_2$
2	$\mu t_3$
3	E <sub>1</sub>
4	E <sub>2</sub>
5	E <sub>3</sub>
6	使用
7	使用
8	使用
9	使用

レジスタ

S 0	B <sub>11</sub>
S 1	B <sub>12</sub>
S 2	B <sub>13</sub>
S 3	B <sub>21</sub>
S 4	B <sub>22</sub>
S 5	B <sub>23</sub>
S 6	B <sub>31</sub>
S 7	B <sub>32</sub>
S 8	B <sub>33</sub>
S 9	使用

ラベル

A	E, $\mu t \rightarrow B$
B	
C	
D	
E	使用
a	使用
b	使用
c	使用
d	使用
e	

7 No.1 No.2

001	*LELA	039	RCL 1				
002	STOA	040	÷				
003	RTN	041	*LBL 0				
004	*LBLB	042	4				
005	STOB	043	÷				
006	RTN	044	Pi				
007	*LBLC	045	÷				
008	STOD	046	RCLA				
009	R↓	047	RCLB				
010	×	048	×				
011	CHS	049	×				
012	STOC	050	3				
013	RTN	051	7				
014	*LBLD	052	EEX				
015	DSP 3	053	9				
016	PRTX	054	×				
017	X <sup>2</sup>	055	DSP9				
018	1/X	056	PRTX				
019	GTO 0	057	DSP2				
020	*LBL E	058	RTN				
021	X≠Y						
022	DSP 3						
023	PRTX						
024	STO 0						
025	X <sup>2</sup>						
026	X≠Y						
027	PRTX						
028	X <sup>2</sup>						
029	+						
030	STO 1						
031	√X						
032	RCL 0						
033	÷						
034	RCLC						
035	×						
036	e <sup>x</sup>						
037	RCLD						
038	×						

レジスタ

A	fE
B	Sp
C	-μt
D	B
E	
I	

レジスタ

0	d
1	d <sup>2</sup> + a <sup>2</sup>
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	

レジスタ

S 0	
S 1	
S 2	
S 3	
S 4	
S 5	
S 6	
S 7	
S 8	
S 9	

ラベル

A	fE ↑
B	Sp ↑
C	μt, B ↑
D	d → D
E	d, a → D
a	
b	
c	
d	
e	

001	*LBL <sub>e</sub>	039	GTO9	077	RTN	115	RCL 3
002	STOE	040	RCL9	078	*LBLC	116	÷
003	X≠Y	041	RCL <sub>E</sub>	079	GSB <sub>c</sub>	117	TAN <sup>-1</sup>
004	STOD	042	×	080	X≠Y	118	RTN
005	GSBE	043	3	081	-	119	LBL <sub>d</sub>
006	STO9	044	÷	082	GTO0	120	X≠Y
007	RCL <sub>E</sub>	045	RTN	083	*LBLD	121	DSP 3
008	GSBE	046	*LBL <sub>E</sub>	084	GSB <sub>c</sub>	122	PRTX
009	ST+9	047	RAD	085	GSB <sub>e</sub>	123	D-R
010	RCL <sub>E</sub>	048	COS	086	RCL 1	124	X≠Y
011	RCLD	049	RCL 2	087	×	125	PRTX
012	-	050	X≠Y	088	*LBL 0	126	CHS
013	1	051	÷	089	RCL 3	127	STO 2
014	2	052	e <sup>x</sup>	090	÷	128	X≠Y
015	STOI	053	RTN	091	RCLA	129	0
016	÷	054	*LBLA	092	RCLB	130	X≠Y
017	STOE	055	STOA	093	×	131	GSB <sub>e</sub>
018	DSZI	056	RTN	094	×	132	DSP 9
019	*LBL 9	057	*LBLB	095	DSP 9	133	PRTX
020	RCLI	058	STO 0	096	PRTX	134	DSP 2
021	RCL <sub>E</sub>	059	÷	097	DSP 2	135	RTN
022	×	060	3	098	RTN		
023	RCLD	061	7	099	*LBL <sub>c</sub>		
024	+	062	EEX	100	RAD		
025	GSBE	063	9	101	DSP 3		
026	2	064	×	102	X≠Y		
027	×	065	4	103	PRTX		
028	0	066	÷	104	STO 3		
029	X≠Y	067	Pi	105	X≠Y		
030	RCLI	068	÷	106	STO 4		
031	2	069	STOB	107	PRTX		
032	÷	070	RTN	108	X≠Y		
033	FRC	071	*LBL <sub>b</sub>	109	÷		
034	X≠0?	072	STO 1	110	TAN <sup>-1</sup>		
035	÷	073	R↓	111	CHS		
036	+	074	×	112	RCL 0		
037	ST+9	075	CHS	113	RCL 4		
038	DSZI	076	STO 2	114	-		

レジスタ

A	fE
B	$\frac{S_L C}{4 \pi L}$
C	
D	使用
E	使用
I	使用

レジスタ

0	L
1	B
2	-μt
3	d
4	a
5	
6	
7	
8	
9	使用

レジスタ

S0	
S1	
S2	
S3	
S4	
S5	
S6	
S7	
S8	
S9	

ラベル

A	fE ↑
B	S <sub>L</sub> , L ↑
C	d, a → D
D	d, a → D
E	使用
a	
b	t, μ, B ↑
c	使用
d	使用
e	使用

r No 5 No 9 No 13

001 *LBLA	039 +	077 *LBLB	115 ×
002 STOA	040 X <sup>2</sup>	078 DSP 3	116 DSP 9
003 RTN	041 +	079 PRTX	117 PRTX
004 *LBLB	042 $\sqrt{X}$	080 STO1	118 DSP 2
005 STO0	043 RCL 3	081 RCL 0	119 RTN
006 X <sup>2</sup> Y	044 +	082 +	
007 Fi	045 RCL 0	083 RCL 1	
008 ÷	046 X <sup>2</sup>	084 RCL 0	
009 3	047 +	085 -	
010 7	048 RCL 1	086 ÷	
011 EEX	049 ÷	087 LN	
012 9	050 2	088 RCL 0	
013 ×	051 ÷	089 X <sup>2</sup>	
014 STOB	052 LN	090 RCL 1	
015 RTN	053 4	091 X <sup>2</sup>	
016 *LBLE	054 ÷	092 -	
017 X <sup>2</sup> Y	055 RCL 0	093 2	
018 DSP 3	056 X <sup>2</sup>	094 ÷	
019 PRTX	057 ÷	095 ×	
020 X <sup>2</sup>	058 GTO0	096 RCL 0	
021 STO1	059 *LBLD	097 RCL 1	
022 X <sup>2</sup> Y	060 DSP 3	098 ×	
023 PRTX	061 PRTX	099 +	
024 X <sup>2</sup>	062 STO1	100 3	
025 STO2	063 RCL 0	101 ×	
026 -	064 +	102 8	
027 STO3	065 RCL 1	103 ÷	
028 RCL 0	066 RCL 0	104 RCL 0	
029 X <sup>2</sup>	067 -	105 RCL 0	
030 2	068 ÷	106 X <sup>2</sup>	
031 ×	069 LN	107 ×	
032 ×	070 8	108 ÷	
033 RCL 0	071 ÷	109 RCL 1	
034 X <sup>2</sup>	072 RCL 0	110 ÷	
035 X <sup>2</sup>	073 RCL 1	111 *LBL 0	
036 +	074 ×	112 RCLB	
037 RCL 1	075 ÷	113 ×	
038 RCL 2	076 GTO0	114 RCLA	

レジスタ

A	fE
B	$\frac{SC}{\pi}$
C	
D	
E	
I	

レジスタ

0	R
1	d <sup>2</sup> , d
2	a <sup>2</sup>
3	d <sup>2</sup> - a <sup>2</sup>
4	
5	
6	
7	
8	
9	

レジスタ

S 0	
S 1	
S 2	
S 3	
S 4	
S 5	
S 6	
S 7	
S 8	
S 9	

ラベル

A	fE↑
B	S, R↑
C	d, a→D
D	d →D
E	d →D
a	
b	
c	
d	
e	



001 *LBLe	039 ×	077 +	115 ×	153 DSP 3	191 CF 0
002 X≠Y	040 9	078 RCL 2	116 e <sup>x</sup>	154 X≠Y	192 RTN
003 STOO	041 ÷	079 RCL 4	117 ×	155 PRTX	193 *LBLD
004 -	042 RTN	080 RCL 6	118 RCL 0	156 X≠Y	194 SF 0
005 6	043 *LBLa	081 +	119 ÷	157 PRTX	195 GTOC
006 ÷	044 STOO	082 +	120 P≠S	158 F 0?	196 *LBL 4
007 STO 8	045 RCLI	083 4	121 RTN	159 GTO 4	197 X <sup>2</sup>
008 7	046 STOE	084 ×	122 *LBLo	160 R↓	198 STO 9
009 STO 1	047 7	085 ÷	123 0	161 X≠Y	199 X≠Y
010 *LBL 0	048 STO I	086 RTN	124 RTN	162 STOO	200 X <sup>2</sup>
011 RCLI	049 *LBL 1	087 LBLE	125 *LBLd	163 ÷	201 STO 8
012 1	050 RCLI	088 P≠S	126 1	164 X <sup>2</sup>	202 GTO 2
013 -	051 1	089 RAD	127 RTN	165 STO 9	
014 ROL 8	052 -	090 COS	128 *LELA	166 R↑	
015 ×	053 RCL 9	091 X≠Y	129 ×	167 RCL 0	
016 RCLC	054 ×	092 STOO	130 3	168 ÷	
017 +	055 RCLD	093 ×	131 7	169 X <sup>2</sup>	
018 STOE	056 +	094 RCL 8	132 EEX	170 STO 8	
019 GSB o	057 RCL 0	095 $\sqrt{x}$	133 9	171 RCLA	
020 STOO	058 GSBE	096 ×	134 ×	172 RCL 0	
021 RCLE	059 STO i	097 2	135 4	173 X <sup>2</sup>	
022 GSB d	060 DSZ I	098 ×	136 ÷	174 ÷	
023 RCLD	061 GTO 1	099 CHS	137 Pi	175 STOA	
024 -	062 RCLE	100 RCL 9	138 X <sup>2</sup>	176 LBL 2	
025 6	063 STO I	101 +	139 ÷	177 0	
026 ÷	064 GSB b	102 RCL 8	140 STOA	178 Pi	
027 STO 9	065 RCL 9	103 +	141 RTN	179 P≠S	
028 RCLE	066 ×	104 RCL 0	142 *LBLB	180 GSB e	
029 GSB a	067 RTN	105 X <sup>2</sup>	143 RCLA	181 2	
030 P≠S	068 *LBL b	106 +	144 ×	182 ×	
031 STO i	069 RCL 1	107 RCL 0	145 STOA	183 F 0?	
032 P≠S	070 RCL 7	108 X≠Y	146 R↓	184 GTO 3	
033 DSZ I	071 +	109 STOO	147 ×	185 RCLA	
034 GTO 0	072 RCL 3	110 $\sqrt{x}$	148 CHS	186 ×	
035 P≠S	073 RCL 5	111 RCL 9	149 STOB	187 *LBL 3	
036 GSB b	074 +	112 $\sqrt{x}$	150 RTN	188 DSP 9	
037 P≠S	075 2	113 ÷	151 *LBLC	189 PRTX	
038 RCL 8	076 ×	114 RCLB	152 P≠S	190 DSP 2	

レジスタ

A	f E $\frac{SAC}{4\pi^2 R^2}$
B	- μt
C	a
D	使用
E	使用
I	使用

レジスタ

0	使用
1	"
2	"
3	"
4	"
5	"
6	"
7	"
8	"
9	"

レジスタ

S 0	使用
S 1	"
S 2	"
S 3	"
S 4	"
S 5	"
S 6	"
S 7	"
S 8	k <sup>2</sup>
S 9	p <sup>2</sup>

ラベル

A	f E, S <sub>A</sub> ↑
B	t, μ, B ↑
C	R, d, a → D
D	k, p, → G <sub>1</sub>
E	使用
a	使用
b	使用
c	使用
d	使用
e	使用

r No.7

001	*LBL <sub>e</sub>	039	GTO9	077	RCL 2	115	X <sub>≠</sub> Y
002	STOE	040	RCL9	078	RCL 3	116	PRTX
003	X <sub>≠</sub> Y	041	RCLE	079	×	117	SF 2
004	STOD	042	×	080	÷	118	GTO <sub>a</sub>
005	GSBE	043	3	081	STOB		
006	STO9	044	÷	082	RTN		
007	RCLE	045	RTN	083	*LBL <sub>C</sub>		
008	GSBE	046	*LBL <sub>E</sub>	084	STOC		
009	ST+9	047	RAD	085	DSP 3		
010	RCLE	048	COS	086	PRTX		
011	RCLD	049	STO8	087	RCL 3		
012	-	050	RCL 0	088	X <sub>≠</sub> Y		
013	1	051	RCL 1	089	÷		
014	2	052	×	090	STO0		
015	STOI	053	×	091	*LBL <sub>a</sub>		
016	÷	054	TAN <sup>-1</sup>	092	RAD		
017	STOE	055	RCL 8	093	0		
018	DSZI	056	÷	094	RCL 0		
019	*LBL 9	057	RTN	095	TAN <sup>-1</sup>		
020	RCLI	058	*LBL <sub>A</sub>	096	GSB <sub>e</sub>		
021	RCLE	059	STOA	097	F 2 ?		
022	×	060	RTN	098	GTO0		
023	RCLD	061	*LBL <sub>B</sub>	099	RCL <sub>B</sub>		
024	+	062	STO2	100	RCL <sub>A</sub>		
025	GSBE	063	X <sub>≠</sub> Y	101	×		
026	2	064	STO3	102	×		
027	×	065	÷	103	*LBL <sub>0</sub>		
028	0	066	STO1	104	DSP 9		
029	X <sub>≠</sub> Y	067	X <sub>≠</sub> Y	105	PRTX		
030	RCL I	068	3	106	DSP 2		
031	2	069	7	107	RTN		
032	÷	070	EEX	108	*LBL <sub>D</sub>		
033	FRC	071	9	109	STO1		
034	X <sub>≠</sub> 0 ?	072	×	110	X <sub>≠</sub> Y		
035	÷	073	4	111	DSP 3		
036	+	074	÷	112	PRTX		
037	ST+9	075	Pi	113	1/X		
038	DSZI	076	÷	114	STO0		

レジスタ

A	fE
B	$\frac{SAC}{4\pi LH}$
C	d
D	使用
E	使用
I	使用

レジスタ

0	m
1	n
2	H
3	L
4	
5	
6	
7	
8	使用
9	使用

レジスタ

S0	
S1	
S2	
S3	
S4	
S5	
S6	
S7	
S8	
S9	

ラベル

A	fE ↑
B	S <sub>A</sub> , L, H ↑
C	d → D
D	1/m, n → G <sub>2</sub>
E	使用
a	使用
b	
c	
d	
e	使用

001	*LBL <sub>e</sub>	039	×	077	+	115	×	153	X <sub>z</sub> Y	191	STO9
002	X <sub>z</sub> Y	040	9	078	RCL 2	116	TAN <sup>-1</sup>	154	÷	192	SF 2
003	STOC	041	÷	079	RCL 4	117	RTN	155	STOA	193	GTO 2
004	-	042	RTN	080	RCL 6	118	*LBLA	156	P <sub>z</sub> S		
005	6	043	*LBL <sub>a</sub>	081	+	119	×	157	RTN		
006	÷	044	STO 0	082	+	120	3	158	*LBLD		
007	STO8	045	RCLI	083	4	121	7	159	DSP 3		
008	7	046	STOE	084	×	122	EEX	160	PRTX		
009	STOI	047	7	085	+	123	9	161	P <sub>z</sub> S		
010	*LBL 0	048	STOI	086	RTN	124	×	162	RCL 0		
011	RCLI	049	*LBL 1	087	*LBL 4	125	4	163	X <sub>z</sub> Y		
012	1	050	RCLI	088	RAD	126	÷	164	÷		
013	-	051	1	089	COS	127	Pi	165	STO8		
014	RCL 8	052	-	090	ENT ↑	128	÷	166	*LBL 2		
015	×	053	RCL 9	091	R ↓	129	STOA	167	0		
016	RCLC	054	×	092	X <sub>z</sub> Y	130	RTN	168	RCL 8		
017	+	055	RCLD	093	COS	131	*LBLB	169	RAD		
018	STOE	056	÷	094	×	132	RCLA	170	TAN <sup>-1</sup>		
019	GSB <sub>c</sub>	057	RCL 0	095	R ↑	133	×	171	P <sub>z</sub> S		
020	STOD	058	GSB 4	096	X <sub>z</sub> Y	134	STOA	172	GSB <sub>e</sub>		
021	RCLE	059	STOI	097	RCLB	135	R ↓	173	F 2?		
022	GSB <sub>d</sub>	060	DSZI	098	X <sub>z</sub> Y	136	×	174	GTO 3		
023	RCLD	061	GTO 1	099	÷	137	CHS	175	RCLA		
024	-	062	RCLE	100	e <sup>x</sup>	138	STOB	176	×		
025	6	063	STOI	101	X <sub>z</sub> Y	139	RTN	177	*LBL 3		
026	÷	064	GSB <sub>b</sub>	102	÷	140	*LBLC	178	DSP 9		
027	STO9	065	RCL 9	103	RTN	141	P <sub>z</sub> S	179	PRTX		
028	RCLE	066	×	104	*LBL <sub>c</sub>	142	STO 0	180	DSP 2		
029	GSB <sub>a</sub>	067	RTN	105	0	143	X <sub>z</sub> Y	181	RTN		
030	P <sub>z</sub> S	068	*LBL <sub>b</sub>	106	RTN	144	ENT ↑	182	*LBL <sub>E</sub>		
031	STOI	069	RCL 1	107	*LBL <sub>d</sub>	145	R ↓	183	P <sub>z</sub> S		
032	P <sub>z</sub> S	070	RCL 7	108	RAD	146	X <sub>z</sub> Y	184	X <sub>z</sub> Y		
033	DSZI	071	+	109	COS	147	÷	185	DSP 3		
034	GTO 0	072	RCL 3	110	P <sub>z</sub> S	148	STO 9	186	PRTX		
035	P <sub>z</sub> S	073	RCL 5	111	RCL 8	159	R ↑	187	1/X		
036	GSB <sub>b</sub>	074	+	112	RCL 9	150	RCL 0	188	STO 8		
037	P <sub>z</sub> S	075	2	113	P <sub>z</sub> S	151	×	189	X <sub>z</sub> Y		
038	RCL 8	076	×	114	×	152	RCLA	190	PRTX		

レジスタ

A	fE $\frac{SAC}{4\pi LH}$
B	-μt
C	使用
D	"
E	"
I	"

レジスタ

0	使用
1	"
2	"
3	"
4	"
5	"
6	"
7	"
8	"
9	"

レジスタ

S 0	L
S 1	使用
S 2	"
S 3	"
S 4	"
S 5	"
S 6	"
S 7	"
S 8	m
S 9	n

ラベル

A	fE, S <sub>A</sub> ↑
B	t, μ, B ↑
C	H, L ↑
D	d → D
E	1/m, n → G <sub>3</sub>
a	使用
b	"
c	"
d	"
e	"

7 No.10 No.14

001	*LBL1	039	×	077	X <sup>2</sup>	115	9	153	÷	191	GTO3
002	STOE	040	ST+S	078	STO7	116	×	154	GTO5	192	*LBLd
003	X≠Y	041	RCL8	079	RCL5	117	4	155	*LBLD	193	GSB7
004	STOD	042	RCLD	080	+	118	÷	156	GSB0	194	GTO6
005	-	043	×	081	X <sup>2</sup>	119	Pi	157	*LBL6	195	*LBL7
006	2	044	RCLE	082	RCL7	120	÷	158	RCL0	196	SF2
007	÷	045	+	083	RCL5	121	STOB	159	X <sup>2</sup>	197	STO1
008	RCLD	046	GSBe	084	-	122	RTN	160	1/X	198	X≠Y
009	RCLE	047	RCLi	085	RCL4	123	*LBL0	161	STO4	199	DSP3
010	+	048	×	086	×	124	STOC	162	RCL1	200	PRTX
011	2	049	ST+9	087	2	125	X≠Y	163	X <sup>2</sup>	201	STO0
012	÷	050	ISZI	088	×	126	DSPZ	164	×	202	X≠Y
013	STOE	051	RTN	089	+	127	PRTX	165	STO5	203	PRTX
014	X≠Y	052	*LBLe	090	RCL4	128	STO2	166	EEX	204	RTN
015	STOD	053	F0?	091	X <sup>2</sup>	129	X≠Y	167	9		
016	0	054	GTOb	092	+	130	PRTX	168	CHS		
017	STO9	055	*LBLa	093	√X	131	RCL3	169	ENT↑		
018	1	056	RAD	094	RCL5	132	÷	170	1		
019	0	057	COS	095	-	133	STO1	171	SF0		
020	STO1	058	RCL1	096	RCL4	134	RCL2	172	GSB1		
021	GSB9	059	×	097	+	135	RCL3	173	F2?		
022	GSB9	060	2	098	RCL7	136	÷	174	GTO4		
023	GSB9	061	×	099	+	137	STO0	175	RCL3		
024	RCL9	062	CHS	100	RCL7	138	RIN	176	X <sup>2</sup>		
025	RCLD	063	1	101	÷	139	*LBLC	177	÷		
026	×	064	+	102	2	140	*GSB0	178	*LBL5		
027	RTN	065	RCL1	103	÷	141	*LBL3	179	RCLA		
028	*LBL9	066	X <sup>2</sup>	104	LN	142	EEX	180	RCLB		
029	RCLi	067	+	105	RTN	143	9	181	×		
030	ISZI	068	√X	106	*LBLA	144	CHS	182	×		
031	STO8	069	RCL0	107	STOA	145	Pi	183	*LBL4		
032	CHS	070	X≠Y	108	RTN	146	GSB1	184	DSP9		
033	RCLD	071	÷	109	*LBLB	147	F2?	185	PRTX		
034	×	072	TAN <sup>-1</sup>	110	STO3	148	GTO4	186	DSP2		
035	RCLE	073	LSTX	111	X≠Y	159	RCL2	187	CF0		
036	+	074	×	112	3	150	X <sup>2</sup>	188	RTN		
037	GSBe	075	RTN	113	7	151	÷	189	*LBLc		
038	RCLi	076	*LBLb	114	EEX	152	Pi	190	GSB7		

レジスタ

A	fE
B	SC 4π
C	d
D	使用
E	使用
I	使用

レジスタ

0	k
1	P
2	H
3	R
4	( $\frac{1}{k}$ ) <sup>2</sup>
5	( $\frac{P}{k}$ ) <sup>2</sup>
6	
7	使用
8	使用
9	使用

レジスタ

S0	使用
S1	使用
S2	使用
S3	使用
S4	使用
S5	使用
S6	
S7	
S8	
S9	

ラベル

A	fE↑
B	S, R↑
C	H, d→D
D	H, d→D
E	
a	使用
b	使用
c	使用
d	使用
e	使用

$\beta$  No 2 No 3 No 5

001	*LBL 1	039	ST+0	077	ISZI	115	R↓	153	*LBLa	191	×
002	STOB	040	RCLC	078	RTN	116	1	154	GSB 6	192	GSB 1
003	X≠Y	041	RCLA	079	*LBL 9	117	•	155	1/X	193	*LBL 5
004	STOC	042	×	080	1	118	4	156	RCL 3	194	RCL 2
005	-	043	RCLB	081	+	119	3	157	÷	195	×
006	2	044	+	082	STOB	120	CHS	158	GTO 5	196	*LBL 3
007	÷	045	GSB 0	083	2	121	Y*	159	*LBL 6	197	DSP 9
008	STOA	046	RCLi	084	X≠Y	122	1	160	DSP 3	198	PRTX
009	RCLC	047	×	085	÷	123	7	161	PRTX	199	RTN
010	RCLB	048	ST+0	086	RCLA	124	×	162	RTN	200	*LBLd
011	+	049	ISZI	087	+	125	STO 3	163	*LBLD	201	X≠Y
012	2	050	RTN	088	1	126	ST×6	164	SF 2	202	GSB 6
013	÷	051	*LBL 2	089	-	127	RIN	165	*LBL E	203	X≠Y
014	STOB	052	STOA	090	RTN	128	*LBLB	166	GSB 6	204	PRTX
015	0	053	0	091	*LBL 8	129	GSB 6	167	STO 5	205	GSB 1
016	STO 0	054	STO 0	092	RCLi	130	STO 4	168	RCL 3	206	GTO 3
017	1	055	1	093	X	131	X <sup>2</sup>	169	×	207	*LBL e
018	0	056	0	094	RCLB	132	Pi	170	1	208	GSB 6
019	STOI	057	STOI	095	X <sup>2</sup>	133	×	171	2	209	GSB 2
020	GSBb	058	GSBc	096	÷	134	÷	172	9	210	GTO 3
021	GSBb	059	GSBc	097	ST+0	135	*LBLC	173	EEX	211	R/S
022	GSBb	060	GSBc	098	RTN	136	RCL 3	174	5		
023	RCL 0	061	RCL 0	099	*LBL 0	137	×	175	CHS		
024	RCLA	062	2	100	CHS	138	RCL 1	176	×		
025	×	063	×	101	e <sup>x</sup>	139	×	177	STO 7		
026	RTN	064	RTN	102	LSTX	140	RCL 6	178	F 2?		
027	*LBLb	065	*LBLc	103	CHS	141	e <sup>x</sup>	179	GTO 4		
028	RCLi	066	RCLi	104	÷	142	×	180	GSB 2		
029	ISZI	067	ISZI	105	RTN	143	1	181	GTO 5		
030	STOC	068	STOC	106	*LBLA	144	0	182	*LBL 4		
031	CHS	069	CHS	107	+	145	7	183	RCL 4		
032	RCLA	070	GSB 9	108	EEX	146	EEX	184	RCL 5		
033	×	071	GSB 0	109	3	147	4	185	÷		
034	RCLB	072	GSB 8	110	÷	148	×	186	X <sup>2</sup>		
035	+	073	RCLC	111	CHS	149	STO 2	187	1		
036	GSB 0	074	GSB 9	112	STO 6	150	F 0?	188	+		
037	RCLi	075	GSB 0	113	R↓	151	GSB 3	189	$\sqrt{X}$		
038	×	076	GSB 8	114	STO 1	152	RTN	190	RCL 7		

レジスタ

A	使用
B	使用
C	使用
D	
E	
I	使用

レジスタ

0	使用
1	E
2	E <sub>m</sub>
3	$\mu$
4	R
5	d
6	$-\mu \frac{(\rho + \rho_s)}{10^3}$
7	$\mu \rho_a d$
8	
9	

レジスタ

S 0	使用
S 1	使用
S 2	使用
S 3	使用
S 4	使用
S 5	使用
S 6	
S 7	
S 8	
S 9	

ラベル

A	E <sub>mp</sub> E, $\rho$ , $\rho_s$ ↑
B	S <sub>A</sub> , R ↑
C	S <sub>A</sub> ' or S <sub>V</sub> ' ↑
D	d → D
E	d → D
a	$\rho_m$ → D
b	使用
c	使用
d	$h_1, h_2 \rightarrow E(h_1) - E(h_2)$
e	$h_1 \rightarrow E(h_1)$

## 5. 参 考 文 献

- 1) R.G. Jaeger : Engineering Compendium on Radiation Shielding , Vol. I ~ III,  
Springer Verlag 1968 ~ 1970
- 2) 兵藤知典 : 放射線遮蔽入門, 産業図書 1966
- 3) 日本アイソトープ協会 : アイソトープ便覧, 丸善 1970
- 4) 福田整司 他 : 外部被曝による $\beta$ 線吸収線量の評価, JAERI 1065, 1964