

アルベド法による屈曲ダクト放射線 ストリーミング線量計算コード DUCT79 とその精度

伊藤 泰義*

DUCT79: A Code for Estimating Radiation Doses Streaming through Bent Ducts Based on Albedo Method and Its Calculational Accuracy

By

Yasuyoshi ITOH

Abstract

A calculation code DUCT79 has been developed based on the albedo method to estimate radiation doses streaming through one- and two-bent ducts. The code calculates several components which mainly contribute to streaming doses, arising from such effects as multiple scattering, corner lip and shine by applying the differential dose albedos. The calculational accuracy is confirmed by comparison with experimental results. The difference is less than 30% at the exit of ducts for both γ -ray and neutron doses, which is an adequate for practical conceptual design calculations.

In addition, informations on input specification are given for users with sample problems and output lists.

目次

	頁		
1. はじめに	18	3.1	2回屈曲ダクトの計算ルーチン TDUCT について
2. 計算手法の概要	18	3.2	1回屈曲ダクトの計算ルーチン LGDUCT と LNDUCT について
2.1 アルベド法を用いた計算手法	18	3.3	結果の一考察
2.2 各成分の計算式について	18	3.3.1	エネルギーと減衰係数の関係
2.2.1 直接線	18	3.3.2	Z型およびU型3脚コンクリートダクトについて
2.2.2 1回散乱線	18	3.3.3	鉄内張内筒ダクトについて
2.2.3 2回散乱線	18	3.3.4	鉛ダクトと鉛シート内張ダクトについて
2.2.4 コーナー部分の評価	18		
2.2.5 3回(以上)散乱線の評価	19	3.3.5	中性子の計算例
2.2.6 Lateral Dimension の補正	19	4.	入力について
2.2.7 アルベド表示式	20	4.1	TDUCT ルーチンの入力型式について
3. コードの説明	22	4.2	LGDUCT ルーチンの入力型式について
		4.3	LNDUCT ルーチンの入力型式について
		5.	出力型式

* 原子力技術部

原稿受付：昭和62年2月24日

1. はじめに

原子炉施設には、人間のアクセス用通路、換気、冷却、計装用の配管等、種々の目的のために、大小の貫通孔（ダクト）が遮蔽体を貫通している。これらのダクトを漏洩してきた放射線の量（ストリーミング量）を適正に評価する事は遮蔽設計上、非常に重要である。

通常、このストリーミング量を減少させるため、ダクト部分は1回又は2回屈曲させる事が多い。この形状の正確な計算には3次元解析が必要となる。3次元解析の手法は現在のところモンテカルロ法、3次元discrete ordinates法が有効である。しかしこれらの計算には今日でも膨大な計算時間を要し、設計の立場からは実用的でない場合が多い。したがって、この種のダクト形状の放射線漏洩量のある程度の精度をもち、かつ簡単な評価方法で求めることが設計の立場から望まれる。その手法の一つとしてアルベド法があり、適用の仕方によっては短時間でかつ必要とされる精度でストリーミング量を評価出来る。

このアルベド法を用いてコードを作成し、ダクトストリーミングの実験データや他の計算手法の結果と比較を行った。結果はかなりの精度で、評価できることがわかった。これについては既に報告¹⁾されているが、本報はこのコードの広範な使用を願ってコードの使用法について述べるとともに種々の実験との比較を行いコードの精度の検証、コードの適用範囲について若干の知見を得たので報告する。

2. 計算手法の概要

2.1 アルベド法を用いた計算手法

線源に対する線量評価点の位置がベクトル ℓ によって与えられる場合、ダクトストリーミング量は次式で与えられる。

$$D(\ell) = \sum_{k=0}^m D^{(k)}(\ell)$$

ここで、

$D(\ell)$: 全線量

$D^{(k)}(\ell)$: ダクト内で k 回散乱した後、線量評価点に達する粒子の線量

実際の計算では、 m に大きな値を与えると計算は複雑になる。計算精度を考え、 $m=2$ までを考慮したコードを作成した。 $m \geq 3$ 以上の成分の全線量に対する寄与と、 $m=0, 1, 2$ までで計算を打切った時の計算誤差を考えると、設計の観点からは、これで充分と考えら

(298)

れる。

この考え方をを用いて、1回屈曲L型ダクトと2回屈曲Z型又はU型ダクトの入口に線源が置かれた場合の出口での γ 線又は中性子の線量率が計算出来るコードを開発した。

2.2 各成分の計算式²⁾について

2.2.1 直接線

線源と評価点を結ぶ直接線はLine of Sight法によって計算を行う。

2.2.2 1回散乱線

1回散乱線は次式によって計算する。

$$D_i^{(1)}(\bar{I}) = \frac{D_{0i} \alpha(E_i, \theta_0, \theta, \varphi) \cdot A \cdot \cos \theta_0}{r_1^2 \cdot r_2^2}$$

ここで、 $D_i^{(1)}(\bar{I})$: エネルギー群 i に対して1回散乱の後、評価点に到達する線量

D_{0i} : エネルギー群 i の線源強度、空气中において、単位距離離れた点における線量

$\alpha(E_i, \theta_0, \theta, \varphi)$: 線量微分アルベド、入射エネルギー E_i 、入射角の極角 θ_0 、反射角の極角 θ 、方位角 φ

A : 散乱面の面積

r_1 : 線源と散乱面との距離

r_2 : 散乱面と線量評価点までの距離

2.2.3 2回散乱線

2回散乱線は次式による。

$$D^{(2)}(\bar{I}) = \frac{D_{0i} \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot A_1 \cdot A_2 \cos \theta_{01} \cos \theta_{02}}{r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot r_{32}}$$

ここで、 $D^{(2)}(\bar{I})$: エネルギー群 i に対し、2回散乱後評価点に到達する線量

D_{0i} : エネルギー群 i の線源強度単位距離離れた点における線量

α_1 : 第1回散乱面における微分線量アルベド

α_2 : 第2回散乱面における微分線量アルベド

r_1 : 線源と第一散乱面との距離

r_2 : 第1散乱面と第2散乱面との距離

r_3 : 第2散乱面と線量評価点との距離

A_1 : 第1散乱面の面積

A_2 : 第2散乱面の面積

θ_{01}, θ_{02} : 各散乱面の入射極角

2.2.4 コーナー部分の評価

屈曲部のコーナー部分で透過又は散乱する放射線量

D_c の評価³⁾は次式で行う。

(i) γ 線に対して

$$D_c = \frac{ZN \cdot K(\theta_s) \cdot H \cdot RL^2 \cdot \cos\theta_0 \cos\theta}{r_1^2 \cdot r_2^2 \sin\alpha}$$

ここで ZN : 単位体積当りの電子数

H : ダクトの高さ

RL : コーナー部分への入射エネルギーに対する平均自由行程(又は減弱距離)

r_1 : 線源, 又は散乱点からコーナー部分までの距離

r_2 : コーナー部分から測定点又は次の散乱点までの距離

$K(\theta_s)$: クライン-仁科の微分散乱断面積

α : 第1脚と第2脚, 又は第2脚と第3脚とのなす角

ここで述べた, RL と ZN はダクトの壁の物質に依存する値である。コードでは普通コンクリート, 鉄, 鉛に対して計算出来るようになっている。 RL の単位は [インチ] である。

普通コンクリート²⁾に対しては

$$RL = 4.65E^{-0.240} \quad E < 0.3 \text{ MeV}$$

$$RL = 5.98 \quad 0.3 \leq E \leq 1.0 \text{ MeV}$$

$$RL = 5.98RL^{-0.269} \quad E \geq 1.0 \text{ MeV}$$

鉄⁴⁾に対して

$$RL = \exp[-0.676 - 2.25 \ln E - 1.13 (\ln E)^2] \quad 0.1 \leq E \leq 0.336 \text{ MeV}$$

$$RL = 1.95E^{0.205} \quad 0.336 \leq E \leq 4.0 \text{ MeV}$$

鉛に対して

$$RL = 6.59 \times 10^{-3} E^{-4} - 0.106 E^{-3} + 0.658 E^{-2} - 1.88 E^{-1} + 2.26 \quad 0.2 \leq E \leq 2.0 \text{ MeV}$$

$$RL = 1.45 \quad 2.0 \leq E \leq 4.0 \text{ MeV}$$

$$RL = 2.02 E^{-0.257} \quad E \geq 4.0 \text{ MeV}$$

ZN は以下のように普通コンクリートの実効原子番号を Z として $Z_{\text{eff}} = 8.96$, 実効質量として $A_{\text{eff}} = 17.8$ を用いた。

	$ZN (\text{e}/\text{cm}^3)$
普通コンクリート	0.07033×10^{25}
鉄	0.2204×10^{25}
鉛	0.2703×10^{25}

(ii) 高速中性子⁵⁾に対して

$$D_c = \frac{H \cdot \cos\theta_0 \cdot \cos\theta}{4\pi r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot \Sigma(E_0) \cdot \sin\alpha} = \frac{H \cdot \cos\theta_0 \cdot \cos\theta \cdot RL}{4\pi r_1^2 \cdot r_2^2 \sin\alpha}$$

ここで,

$\Sigma(E_0)$: コーナー部に入射する高速中性子の全断面積

その他は γ 線と同じ

高速中性子に対して取扱える壁の物質としては普通コンクリートと鉄である。

普通コンクリートに対しては,

$$RL = -0.35E + 2.23 \quad E < 1.0 \text{ MeV}$$

$$RL = 33.457/E^4 + 90.245/E^3 - 77.48/E^2 + 15.507/E + 7.27 \quad 1.0 \leq E < 6.0 \text{ MeV}$$

$$RL = 0.01625E + 7.98 \quad 6.0 \leq E \leq 14.0 \text{ MeV}$$

鉄に対しては,

$$RL = 0.822E + 1.118 \quad E < 1.0 \text{ MeV}$$

$$RL = -0.44E + 2.38 \quad 1.0 \leq E < 2.0 \text{ MeV}$$

$$RL = -0.08E + 1.66 \quad 2.0 \leq E < 5.0 \text{ MeV}$$

$$RL = 0.064E + 0.938 \quad 5.0 \leq E \leq 14.0 \text{ MeV}$$

高速中性子に対する RL の単位は [cm] である。

2.2.5 3回(以上)散乱線の評価

ダクトを円筒で近似し, ダクトの長さ方向に分割した各領域からの散乱成分を計算し, 非散乱成分との比を求め, これを補正係数として用いる「Shine 効果」⁶⁾と呼ぶ方法で評価する。

2.2.6 Lateral Dimension の補正

放射線の実際の散乱はダクトの内壁の表面で起るのではなく, ダクトの内面のある深さで起ると仮定し, 散乱計算をこの深さ分考慮して行うものである。

(i) γ 線²⁾に対して,

$$\delta = \cos\theta_0 \ln 2 / (\mu_0 + \mu)$$

ここで δ : Lateral dimension の補正長さ

μ_0 : 入射エネルギーに対する線吸収係数

μ : 散乱エネルギーに対する線吸収係数

コードでは, 普通コンクリート, 鉄, 鉛の3種類の物質について取扱えるようになっている。

(ii) 高速中性子⁵⁾に対して

$$\delta = \ln 2 / (\Sigma(E_0) + \Sigma(E))$$

$\Sigma(E_0), \Sigma(E)$: 入射, 散乱の各エネルギーに対する全断面積

普通コンクリート，鉄が計算可能である。

2.2.7 アルベド表示法

壁からの散乱成分を評価するアルベド値は次のようである。

(i) γ 線微分線量アルベド²⁾

アルベドの表示式として次式を用いた。

$$\alpha(E_0, \theta_0, \theta, \varphi) = \frac{C \cdot K(\theta_s) + C'}{1 + \cos\theta_0 / \cos\theta}$$

ここで $\cos\theta_s = \sin\theta_0 \cdot \sin\theta \cdot \cos\varphi - \cos\theta_0 \cdot \cos\theta$

C, C' : 壁の物質によって異なる定数

本コードで計算出来る，コンクリート，鉄，鉛に対するCとC'の値は以下のものである。

(イ) 普通コンクリート²⁾

$$\begin{aligned} C &= 0.0561E^{0.574} & 0.2 < E \leq 4.0 \text{ MeV} \\ C &= 0.0785E^{0.327} & 4.0 \leq E \leq 10.0 \text{ MeV} \\ C' &= 0.0122E^{-0.683} & 0.2 \leq E \leq 1.76 \text{ MeV} \\ C' &= 0.00862E^{-0.0795} & 1.76 \leq E \leq 10.0 \text{ MeV} \end{aligned}$$

(ロ) 鉄⁴⁾

$$\begin{aligned} C &= 0.0590E^{0.586} & 0.175 \leq E \leq 2.0 \text{ MeV} \\ C &= 0.088 & 2.0 \leq E \leq 4.0 \text{ MeV} \\ C' &= \exp[-5.32 - 1.39 \ln E - 1.06 (\ln E)^2] & 0.175 \leq E \leq 0.412 \text{ MeV} \\ C' &= 0.0073 & 0.412 \leq E \leq 4.0 \text{ MeV} \end{aligned}$$

(ハ) 鉛

鉛に対しては Table 1⁷⁾の値を内挿で求めるようになっている。しかしこの値による内挿値はエネルギーが0.662MeVから1.5MeVの範囲で負になってしまうので，実験値⁸⁾を用いてC'の値を訂正してコードに組み込んでいる。

Table 1 Parameters C and C' for Lead

source energy (MeV)	c	c'	c' of correction
0.2	0.0044 [±] 0.002	-0.0050 [±] 0.0004	0.0050 [±] 0.004
0.412	-	-	-0.0065
0.662	0.0308 [±] 0.0015	-0.0100 [±] 0.0007	-0.0046
1.00	0.0452 [±] 0.0013	-0.0083 [±] 0.0004	-
1.25	-	-	-0.00215
2.50	0.0882 [±] 0.0014	0.0001 [±] 0.0002	0.0001 [±] 0.0002
6.13	0.1126 [±] 0.0048	0.0063 [±] 0.0003	0.0063 [±] 0.003

(ii) 高速中性子微分線量アルベド

高速中性子の場合には，コンクリートに対して2組の異ったアルベド表示式がある。

Song の表示式と Maerker 等の表示式である。それぞれ8個と6個のエネルギー群に対して，fitting 式の係数が与えられている。

(イ) Song の式⁵⁾

$$\alpha(E_0, \theta_0, \theta, \varphi) = A(E_0) \cdot \cos\theta + \frac{B(E_0) + C(E_0) \cdot \cos\theta_s}{1 + K(E_0) \cos\theta_0 / \cos\theta}$$

α : 高速中性子微分線量アルベド

E_0 : 0.1, 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 14.0 MeV

A(E_0), B(E_0), C(E_0), K(E_0) : それぞれの E_0 に対する定数，普通コンクリートと鉄に対しての値が求められている。

これらを Table 2 に示す。

(ロ) Maerker 等の式⁹⁾

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha}{d\Omega}(\Delta E_0, \theta_0, \theta, \varphi) &= \left\{ \frac{|\cos\theta|}{|\cos\theta| + K_1(\Delta E_0) \cos\theta_0} \sum_{l=0}^L G_l(\Delta E_0) \cdot P_l(\cos\theta_s) \right\} + \left\{ \frac{|\cos\theta|}{|\cos\theta| + K_2(\Delta E_0, \theta_0, \theta)} \cdot \sum_{k=0}^K B_k(\Delta E_0) \cdot P_k(\cos\theta_s) \right\} \end{aligned}$$

ここで ΔE_0 : 入射エネルギー巾

0.2~8MeV の間を6ヶに分割

$$K_2(\Delta E_0, \theta_0, \theta) = \sum_{i=0}^I (|\cos\theta|)^i \cdot \sum_{j=0}^J a_{ij}(\Delta E_0) \cos^j \theta_0$$

P_l, P_k : l 次, k 次のルジャンドル多項式

$G_l(\Delta E_0), B_k(\Delta E_0), K_1(\Delta E_0), a_{ij}(\Delta E_0)$

: ΔE_0 における定数，

これらの値を Table 3 に示す。その他の記号については Song の式と同じである。

Table 2 Energy-dependent parameters for the Four-parameter Formula of Differential Dose Albedo for Fast Neutrons

Material	E_0 (MeV)								
	0.10	0.25	0.50	1.0	2.0	3.0	5.0	14.0	
$A(E_0)$	Fe ^a	0.1401	0.1385	0.1817	0.0797	0.0904	0.1147	0.0756	0.0657
	Al ^b	0.1528	0.1491	0.1523	0.0940	0.1287	0.1020	0.0689	0.0584
	S1 ^c	0.0648	0.0687	0.0813	0.0583	0.0547	0.0617	0.0431	0.0269
	S2 ^d	0.0746	0.0820	0.0659	0.0505	0.0641	0.0389	0.0311	0.0187
	S3 ^e	0.0873	0.0661	0.0693	0.0477	0.0488	0.0407	0.0218	0.0287
	Ct ^f	0.0706	0.0710	0.0834	0.0727	0.0691	0.0810	0.0442	0.0288
$B(E_0)$	Fe	0.0776	0.0672	0.0796	0.0643	0.0863	0.0858	0.0710	0.0575
	Al	0.0488	0.0874	0.0649	0.1008	0.0966	0.1129	0.1017	0.0770
	S1	0.0711	0.0727	0.0793	0.0740	0.0971	0.0835	0.0787	0.0812
	S2	0.0561	0.0514	0.0982	0.0838	0.0972	0.1154	0.1132	0.0758
	S3	0.0615	0.0556	0.1051	0.0633	0.1259	0.1010	0.1042	0.0567
	Ct	0.0819	0.0628	0.0703	0.0676	0.0921	0.0991	0.1214	0.0697
$C(E_0)$	Fe	0.0093	-0.0095	0.0684	-0.0067	-0.0118	0.0140	0.0293	0.0195
	Al	-0.0014	0.0329	0.0112	-0.0391	-0.0101	-0.0122	0.0172	0.0147
	S1	0.0343	0.0292	0.0611	-0.0166	-0.0016	0.0154	0.0177	0.0444
	S2	0.0517	0.0294	0.0671	-0.0295	0.0149	0.0133	0.0289	0.0240
	S3	0.0555	0.0345	0.0964	-0.0118	0.0393	0.0279	0.0212	0.0408
	Ct	0.0406	0.0278	0.0585	-0.0228	0.0189	0.0546	0.0047	0.0235
$K(E_0)$	Fe	1.1654	1.0115	0.5708	0.9052	0.8566	1.2569	0.8325	1.9877
	Al	0.4868	2.9778	1.2733	1.4044	1.2834	1.4061	1.9478	2.6380
	S1	1.1660	1.1058	1.2315	0.5448	1.1314	1.4523	1.3720	1.8531
	S2	1.0278	0.2818	1.3826	0.7913	1.4744	1.5615	1.8382	1.6692
	S3	1.4170	1.2278	2.5801	0.6001	2.0462	1.7238	1.7486	1.4914
	Ct	1.5033	0.6763	0.8982	0.6403	1.0692	2.3264	2.6435	1.6450

^aIron.
^bAluminum.
^cDry NTS soil.

^dSoil 50% saturated with water.
^eSoil 100% saturated with water.
^fConcrete.

Table 3 Constants for the Expression Fitting the Maerker-Muckenthaler Differential Dose Albedo Data for Fast Neutrons Incident on Concrete

Constant	Value of Constant for ΔE_0 of					
	0.2 - 0.75 MeV	0.75 - 1.5 MeV	1.5 - 3 MeV	3 - 4 MeV	4 - 6 MeV	6 - 8 MeV
G_0	6.585-2 ^{a)}	7.045-2	7.211-2	7.024-2	6.856-2	5.899-2
G_1	5.048-2	4.393-2	5.845-2	7.452-2	8.294-2	6.039-2
G_2	3.710-2	7.088-2	5.968-2	1.000-1	9.517-2	7.524-2
G_3	1.544-2	1.898-2	2.729-2	5.591-2	7.761-2	8.140-2
G_4	7.837-3	2.408-3	1.190-2	2.646-2	4.292-2	6.622-2
G_5	0	-3.589-3	1.000-3	-6.908-4	1.824-2	3.056-2
G_6	0	0	4.637-3	-8.087-4	5.599-3	1.595-2
G_7	0	0	6.490-3	-1.459-3	5.288-3	1.277-2
G_8	0	0	0	-1.809-3	1.046-2	9.380-3
B_0	6.27-2	9.00-2	8.80-2	9.05-2	8.744-2	6.374-2
B_1	1.50-2	8.5-3	1.30-2	2.15-2	2.817-2	1.382-2
B_2	5.3-3	9.7-3	6.0-3	2.30-2	2.344-2	1.178-2
B_3	0	0	0	0	1.779-2	1.084-2
B_4	0	0	0	0	8.517-3	6.801-3
K_1	1.0	1.0	1.1	0.9	1.1	1.06
a_{00}	0.36	0.51	0.56	0.60	0.43	0.35
a_{01}	1.29	0.32	0.18	0.15	2.02	0.95
a_{02}	0	1.00	1.32	0.48	-0.38	0
a_{10}	0.06	-0.04	-0.14	-0.61	0.05	0.10
a_{11}	-3.06	-2.46	-2.76	-1.08	-9.13	-2.28
a_{12}	0	0	0	0	5.93	1.11
a_{20}	-0.20	0.05	0.05	0.32	0.04	0
a_{21}	1.68	0.95	1.14	0.30	5.97	0
a_{22}	0	0	0	0	-4.39	0

a) 6.585×10^{-2} , etc.

3. コードの説明

DUCT79 コードは次の3つのルーチンからなる。それは2回屈曲ダクトが取扱える TDUCT, L型ダクトで γ 線用 LGDUCT, およびL型で中性子線量を計算する LNDUCT である。

3.1 2回屈曲ダクトの計算ルーチン TDUCT について

TDUCT ルーチンは Fig.1 に示すような3脚ダク

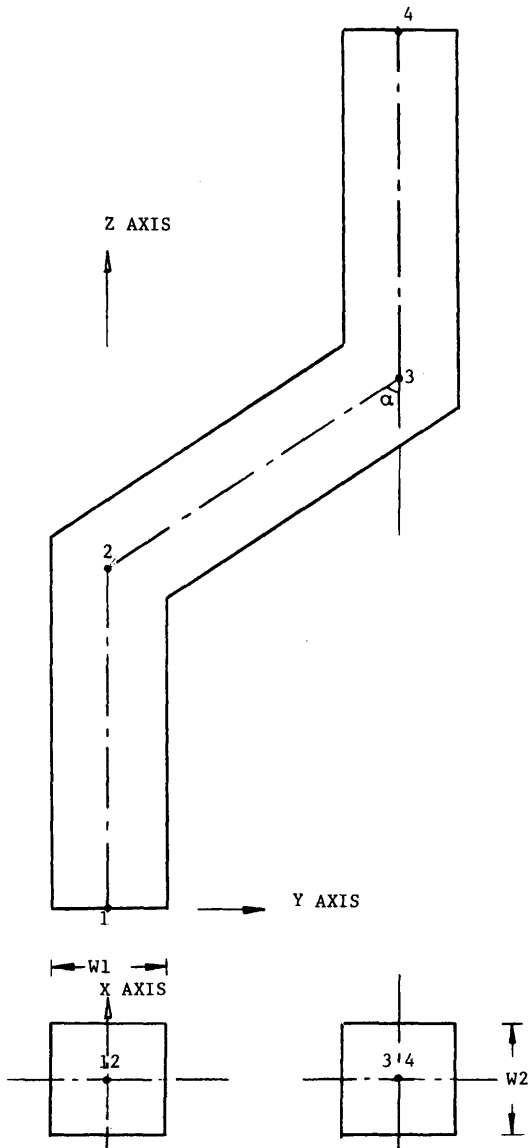


Fig.1 TDUCT Duct Model

(302)

トで, Z型, 又はU型形状のダクトについて計算が可能である。形状の制限として, Z型については第1脚と第3脚は互に平行であることが必要であるが, 第2脚は必ずしも他の脚と直交している必要はない。但し, U型ダクトは2脚目は第1脚と第3脚に直交していなければならない。放射線の種類として γ 線と中性子の両方が同時に取扱える。結果は両方の合計の線量率, 又は中性子, γ 線の単独での各コーナー部および出口での線量率が求められる。1回屈曲ダクトについても仮想的な第3脚を仮定すれば計算可能である。

線源強度は放射線の放出個数で与えるようになっている。又線源の角度分布は等方およびcos分布が取り扱える。

コーナー部に入射した放射線の取扱いはオプションとして, 放射線はコーナー部の物質厚さが1平均自由行程(又は, 1減弱距離)以下は減衰せずに透過するとした LeDoux-Chilton⁹⁾の仮定に従って, 入射エネルギーに対するRLを計算するルーチンと, コンクリートの場合は再生係数を考慮した線吸収係数を用いてRLの値を求めるルーチンの2つがある。RLの値として両者はほとんど差はない。

3.2 1回屈曲ダクトの計算ルーチン

LGDUCTとLNDUCTについて

LGDUCTは γ 線用のルーチンでLNDUCTは高速中性子用のルーチンである。形状としてはL型で第1脚と第2脚が直交したダクトを取扱う。このLGDUCTとLNDUCTはTDUCTとは多少異なった考え方でコード化されているので, L型ダクトについては計算コード間で精度の検証を行う事が出来る。

LGDUCTとLNDUCTは第1脚および第2脚部の任意の位置での線量率を求める事が出来る。

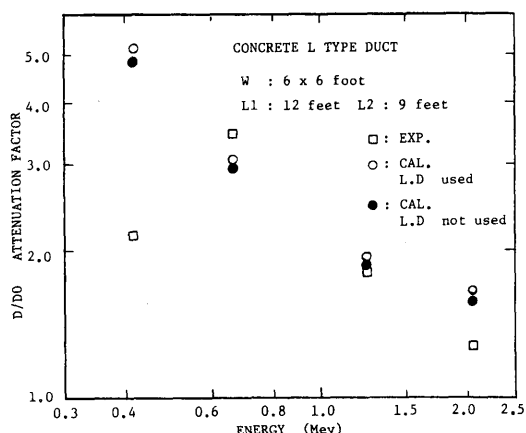
線源形状は点線源で, 線源強度は線量率 D_0 (mR/hr at 1 inch) で与えるようになっている。

3.3 結果の一考察

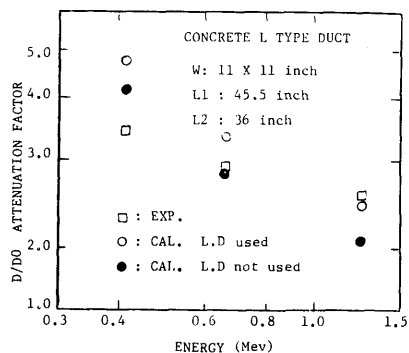
コードの精度の検証を種々の実験結果と比較して行った。以下にその例をあげて若干の考察を示す。

3.3.1 エネルギーと減衰係数の関係

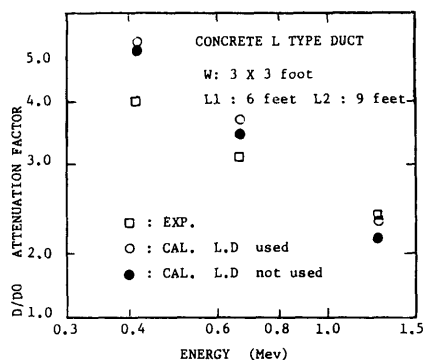
ダクトの口径が11インチ, 3フィート, 6フィートのL型矩形コンクリートおよびダクトの媒質が鉄で口径11インチの場合のエネルギーと出口位置での D/D_0 (減衰比)の実験値^{4),10)}と計算値との関係を Fig. 2(a)~(d)に示す。計算値の D/D_0 についてはLateral Dimension(以下L.Dという)による口径の増加分を考慮した場合と, 考慮しない場合の両方について求めた。実験値はAu-198 (0.412MeV), Cs-137 (0.662



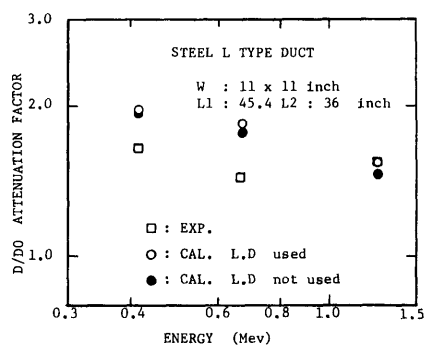
(a) Dose Attenuation in a 6-Foot-Square Concrete Duct



(c) Dose Attenuation in a 11-inch-Square Concrete Duct



(b) Dose Attenuation in a 3-Foot-Square Concrete Duct



(d) Dose Attenuation in a 11-inch-Square Steel Duct

Fig.2 Variation of Dose Attenuation with Energy on Concrete and Steel Duct

MeV), Co-60 (1.25MeV), Na-22 (2.06MeV : 6 フィートダクトのみ) の各線源について測定されている。これによると口径6 フィートでエネルギーが0.412 MeV の Au-198 の実験値を除き、計算値と実験値は± 30%以内で一致し、計算値の減衰傾向も前に報告⁴⁾されたものに比べて実験値に近い傾向である。6 フィートの Au-198 の実験値と計算値には大きな差がみられるが、その後行われた口径が3 フィートと11インチと変化した実験値は計算値との大きな不一致の傾向は見られない。これは Fig. 2(b)と(c)をみても明らかである。しかし概して金の実験値と計算値の差は大きい。また L.D の使用についてはコンクリートのような比

較的密度の小さいものでダクトの口径が1 フィート以下、かつ入射エネルギーが1 MeV 以上のダクトについては L.D を用いると有効であろう。口径が大きい場合には L.D を用いた場合と用いない場合では Fig. 2 (a)をみてもわかるように、計算結果にあまり大きな差はみられない。又、鉄の場合実験値は Cs-137 の0.662 MeV で極小となる、下に凸の傾向を示しているが、計算値はゆるやかな右下りの傾向を示している。以上から壁の材質がコンクリートでも鉄でも計算精度は設計上充分であると考えられる。

3.3.2 Z型およびU型3脚コンクリートダクトについて

TDUCT コードは当初Z型ダクト形状のみ計算可能であったものをU型形状のダクトも計算できるように改良した。この検証を以下のように行った。口径が6×6フィートの矩形でダクト形状がZ字型とU字型のコンクリートダクトにおける線量率の測定結果¹¹⁾と計算結果について、実験配置図を Fig. 3-4、実験と計算を比較した結果を Fig. 5-6 に示す。線源は Co-60 と Cs-137 であり、各ダクトの中心線上に沿って線量率を測定している。このダクト形状での計算値は、U型ダクトの値は若干Z型ダクトの値より小さめであるが、実験と計算は非常によく一致している。両者の差

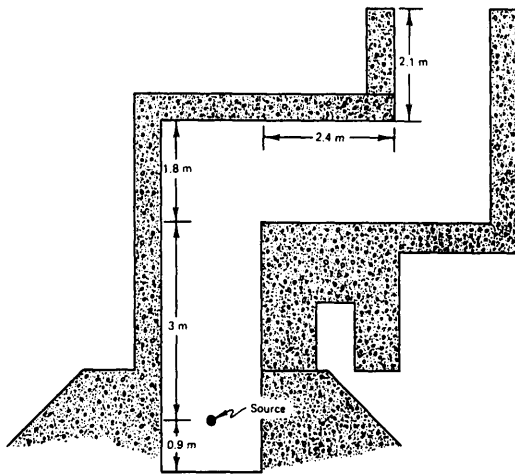


Fig.3 Geometry of Z-Shaped Duct

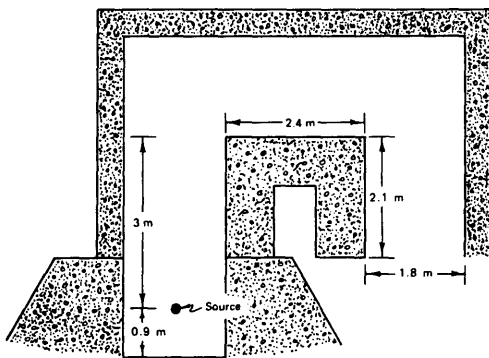


Fig.4 Geometry of U-Shaped Duct

は最大でも約30%以内である。従ってこの計算ルーチンはU型ダクトにも適用出来ることがわかった。又、ダクトが同一平面上ではなく上下方向に屈曲している場合にも適用可能である。

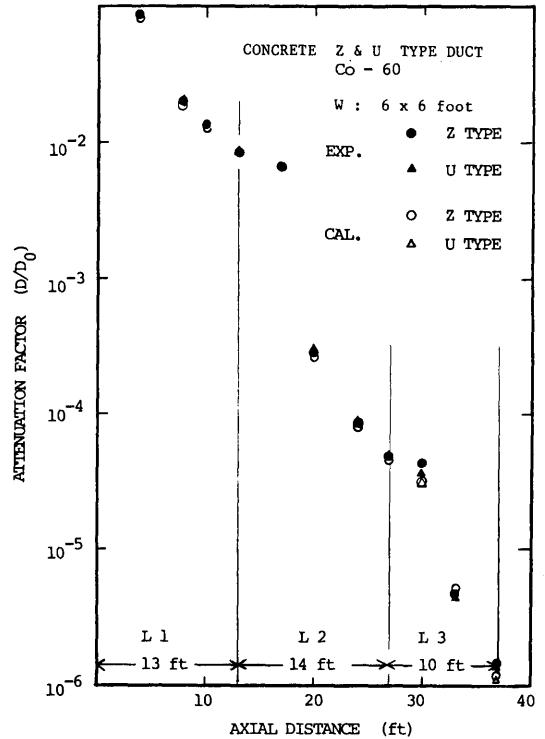


Fig.5 Comparison of Albedo Calculations with Measurements of γ -Ray Dose Rates along Axis of Three-Legged Z & U Shaped Concrete Duct (Co-60)

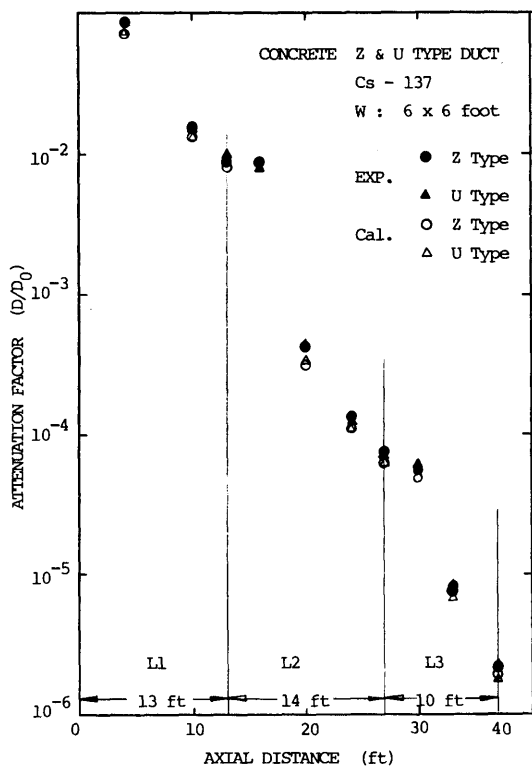


Fig.6 Comparison of Albedo Calculations with Measurements of γ -Ray Dose Rates along Axis of Three-Legged Z & U Shaped Concrete Duct (Cs-137)

3.3.3 鉄内張円筒ダクトについて

次にコンクリート壁を貫通したダクトで内側が鋼で内張された2回屈曲円筒ダクトの実験値¹²⁾との比較を行った。実験配置図を Fig. 7 に示す。図より明らかなように屈曲部が互に直交していない実験例である。実験の線源位置はダクトの入口面上にないが、計算ではダクト入口に点線源があるように補正を行った。

又、円筒ダクトは等価な面積の矩形ダクトで模擬した。アルベドの値としてコンクリートのアルベドデータを用いた場合と鉄のアルベドデータを用いた場合の計算を行った。実験値と比較した結果を Fig. 8 に示す。結果はコンクリートのアルベドデータを用いたものは実験値に比べてやや過大評価のみである。

鉄のアルベドデータを用いたものはわずかに少めであるが、実験値との一致は非常によい。

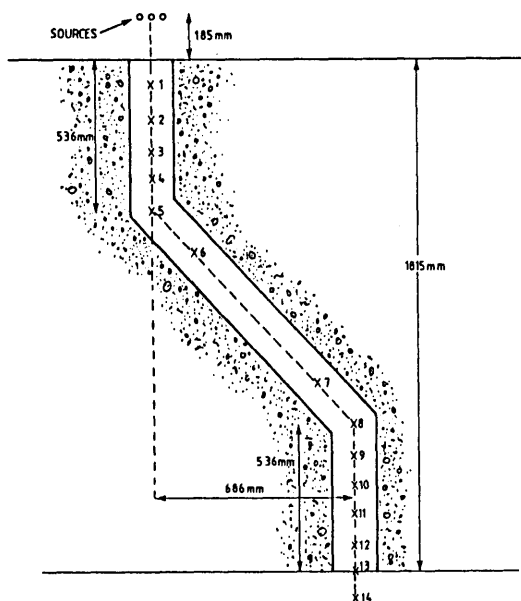


Fig.7 Single Diagonal Duct

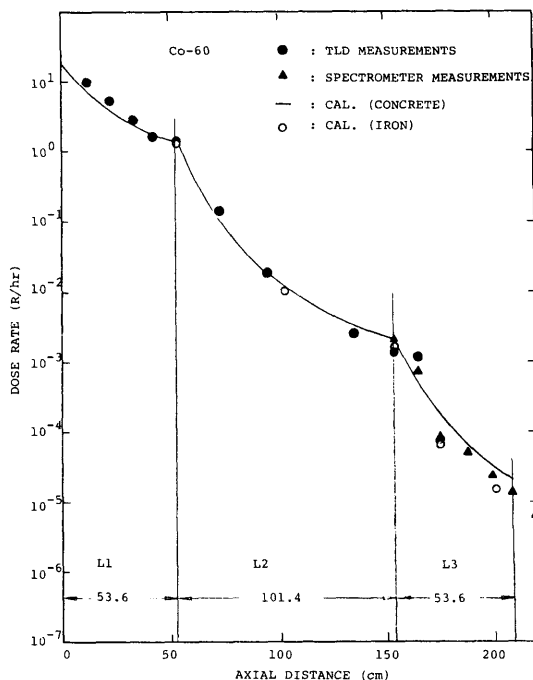


Fig.8 Comparison of Albedo Calculations with Measurements of γ -Ray Dose Rates along Axis in the Single Diagonal Duct

3.3.4 鉛ダクトと鉛シート内張ダクトについて

前に述べたように鉛のアルベドデータを求める数値を修正したが、修正したデータが適当かどうかの検証のため、鉛ダクトの実験値¹³⁾とこの修正アルベドデータを用いた計算値との比較を行った。用いた実験は8×8インチ口径で、第1脚、第2脚長さが共に20インチであるL型ダクトで、線源としてCo-60、Cs-137をダクト入口に置いて出口での線量率を測定しているものである。計算はLGDUCTとTDUCTの両ルーチンを用いた。実験値と両ルーチンの計算結果を比較したものをTable 4に示す。結果はTDUCTルーチンの値は実験値より若干低めであり、LGDUCTの結果は安全側になっているが両者とも実験値と26%以内で一致している。従って鉛のアルベドデータの修正値はかなり信頼出来るものと考えられる。

更に、このアルベドデータを用いてダクト内の天井、床、壁の一部に鉛の薄いシート(厚さ3.2mm)を張った実験¹⁴⁾での測定値と計算値との比較を試みた。実験配置図をFig. 9に示す。このL型ダクトのコーナの散

乱部分に鉛シートが内張されている。このダクトの入口にCo-60とCs-137の線源を置き、鉛シートのある場合とない場合について出口線量の変化を測定している。実験結果と計算結果とを比較したものをTable-5に示す。これによると鉛シートを張った場合の実験値は張らない場合の出口線量をCo-60の時、最大で54%、Cs-137の時は63%程度減少させる。実験値は第2脚の長さが増加するにつれて、減少の程度も増している。計算値の場合は鉛シートのある、なしが出口線量をCo-60の時最大で34%、Cs-137で53%程度減少させる。また、第2脚が長くなっても減少の程度は実験値と異なり一定である。Table 5よりわかるように計算と実験値と一致の程度はあまりよくない。この理由として考えられるのは実験配置図、Fig. 9に示されたようにコンクリートに内張された鉛シートの大きさを計算コードでは正確に模擬していないためである。実験では第2脚の長さが短い時は、線源から出たγ線が鉛よりアルベド値の大きいコンクリート部分で散乱し、測定点に達する量も測定していると考えられるが、

Table 4 Comparison of Albedo Calculations with Measurements of γ -Ray Dose Rates at Exit of Two-Legged Duct

Source	Energy (MeV)	Experimental Geometry of Lead Duct (inch)				Measured D/D_0	Calculated by LDUCT D/D_0	Calculated by TDUCT D/D_0
		Width of Duct	Height of Duct	Length of 1st Leg	Length of 2nd Leg			
Co-60	1.25	8	8	20	20	9.58×10^{-7}	9.67×10^{-7}	7.06×10^{-7}
Cs-137	0.662	8	8	20	20	5.97×10^{-7}	6.45×10^{-7}	4.55×10^{-7}

* D_0 : The Dose Rate at 1 cm from Source

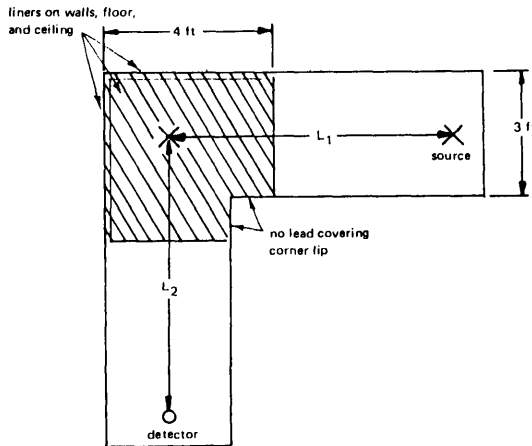


Fig.9 Location of Lead Sheets in the Duct

計算では散乱のアルベドデータはすべて鉛のデータを用いるため、実験値に比較して減衰の程度が大きくなる。減衰の傾向がダクト長さには依存しないのも同じ理由と考えられる。

3.3.5 中性子の計算例

次に中性子の計算例を示す。実験⁹⁾はコンクリートのL型ダクトで線源エネルギーとしてD(d, n)He³の2.5MeVを用いた。線源は角度分布を用いている。実験と計算を比較したものをFig. 10に示す。計算はLNDUCTルーチンとTDUCTルーチンの両方で行った。計算値双方はほとんど同じ値で、実験値との一致の程度は第2脚の出口付近で多少減衰傾向が異なるものの誤差30%以内で一致している。

Table 5 Comparison of Albedo Calculations with Measurements of γ -Ray Dose Rates in 3-Foot-Square Duct with and without Lead Sheets

Source	Length of 1st Leg (ft)	Length of 2nd Leg (ft)	$D/D_0 (\times 10^4)$				Ratio	
			without Pb Sheet		with Pb Sheet		Measured	Calculated
			Measured	Calculated	Measured	Calculated		
Co-60 (1.25 MeV)	7-1/2	3	15.3	12.45	13.2	8.2	0.86	0.66
		5	3.44	3.00	1.88	2.0	0.55	0.67
		7-1/2	1.11	0.97	0.51	0.65	0.46	0.67
Cs-137 (0.662 MeV)	7-1/2	3	14.88	19.4	7.46	9.38	0.50	0.48
		5	4.00	4.71	1.46	2.32	0.37	0.49
		7-1/2	1.51	1.51	0.59	0.71	0.39	0.47

Ratio : D/D_0 with Sheets / D/D_0 without Sheets (D/D_0 : Measured or Calculated)

D_0 : Dose Rate at 1 cm from Source in Air

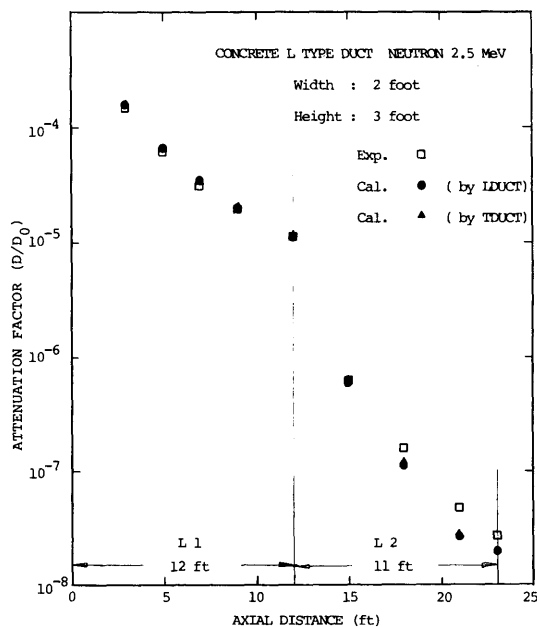
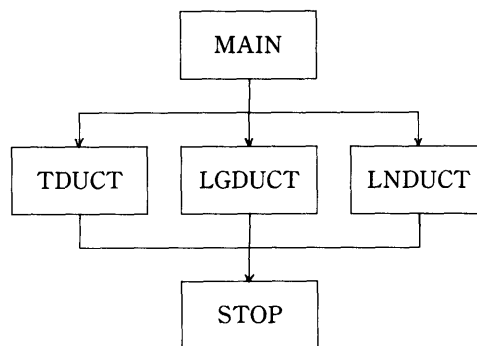


Fig.10 Comparison of Albedo Calculations with Measurements of Neutron Dose Rates along Axis of Two-Legged Concrete Duct

4. 入力について

計算の流れは、簡単に書けば下図のようである。



メインでどのルーチンの計算を行うかの選択の入力を行う。詳細入力は各計算ルーチンで独立に行う。メインでの入力は以下の2枚である。

カード1 : ルーチンの選択 ICORD(I10)

ICORD= 1 : TDUCT ルーチンを選択

ICORD= 2 : LGDUCT ルーチンを選択

ICORD= 3 : LNDUCT ルーチンを選択

カード2 : 問題のタイトル等の入力

TITLE(20A4)

他の入力は各ルーチンで独立に行うので、以下に各ルーチンでの入力の説明を行う。

4.1 TDUCT ルーチンの入力型式について

カード 3 : ダクトの物質名とその番号およびダクトの形の指定

MEDIA, KMEDUM, ITYPE(6X, A4, 2I10)
ダクトの物質名は普通コンクリートと鉄と鉛である。次のように入力する。物質名とその番号は次のように対応している。

コンクリート	CONC	1
鉄	IRON	2
鉛	LEAD	3

ダクトの形状指定は、
Z型の場合 ITYPE = 0
U型の場合 ITYPE > 0

カード 4 : 線源関係の制御

IN, NN, IG, NG, NSEG, NSOUR, ICONV
(5X, 9I3)

IN : 中性子の計算を実施する場合、IN > 0 とする。IN の値が計算したい異なった中性子エネルギーに対する回数を示す。中性子の計算を行わない場合は IN = 0 とする。

NN : 中性子源の角度分布の展開項数の最大値。等方分布の場合 NN = 0

IG : γ 線の計算を実施する場合は IG > 0 とする。IG の値が異なった γ 線エネルギーに対する回数を示す。

NG : γ 線源の角度分布の展開項数の最大値。等方分布の場合 NG = 0

NSEG : shine 補正効果計算のための各脚部での細分化分割数

(注) 通常 NSEG = 20 ぐらいが適当、これ以上大きくても結果にはあまり影響しない。

NSOUR : 線源形状の入力

NSOUR > 0 面線源

NSOUR ≤ 0 点線源

ICONV : 線量率変換係数の入力コントロール

ICONV ≥ 0 コードの組み込み変換係数を用いる (γ 線のみ)

ICONV < 0 ユーザーが各自入力する

カード 5 : ダクトの基本座標とダクトの中、高さおよび入射最大エネルギー

Z(2), Y(3), Z(4), W1, W2, EL1

(5X, 7E10.4)

座標はダクトの中心線上の位置で与え

る。座標位置は Fig. 1 を参照、線源位置は座標位置 1 (原点 0, 0, 0) に置くようになっている。

Z(2) : 第 1 脚と第 2 脚の交点、座標位置 2 での Z の座標 (cm)

Y(3), Z(3) : 第 2 脚と第 3 脚の交点、座標位置 3 での Y, Z 座標 (cm)

Z(4) : 第 3 脚の出口の位置、座標位置 4 での Z 座標 (cm)

W1, W2 : ダクトの中と高さ (cm)

EL1 : 入射エネルギー (MeV)

これは Lateral Dimension の補正を行う場合に入力する。EL1 = 0.0 とすると、Lateral Dimension の補正は行わない

カード 6 : コーナー効果の補正

CN, CG (5X, 6E10.4)

CN : 中性子に対する補正係数

CG : γ 線に対する補正係数

コンクリートダクトの時、CG ≤ 0 とするとコンクリートの線吸収係数とビルドアップ補正した値で計算を行う。

(注) 通常 CN = 1.0 又は CG = 1.0 としてコード内で平均自由行程を求めるサブルーチン REL(E) を用いると便利である。

中性子 : コンクリートと鉄

γ 線 : コンクリートと鉄と鉛

が計算できる。

カード 7 : 線源エネルギーの入力

EZERO(I) I=1, IN 又は IG

(5X, 6E10.4) (MeV)

(注) 結果は入力された EZERO に対する各々の線量率およびそれらの合計が得られる。

カード 8 : 線源から放出される粒子数の入力

S(I), I=1, IN 又は IG (5X, 6E10.4)

点線源に対しての S(I) の単位 : 1/sec

面線源に対しての S(I) の単位 : 1/cm² · sec で入力する。

カード 9 : 線量率変換係数の入力

CONV(I) I=1, IN 又は IG (5X, 6E10.4)

ICONV ≥ 0 : コードに組込まれた値を用いるためどんな値でもよい。

ICONV < 0 : ユーザーの入力

(mR/hr / 1/cm² · sec)

カード10：線源の角度分布の入力，角度分布は \cos 係数の展開で表す。

SN(N) N=1, NN+1又は NG+1
(5X, 6E10.4)

注意

入力にあたってカード7～カード9は中性子についてまず入力し，続いて γ 線について入力する。 γ 線のみの場合には γ 線のデータのみを入力する。

Table. 6 に TDUCT の入力例を示す。

Table 6 Sample Input for TDUCT Routine

```

1
AVERY ET AL. PROBLEM
IRON 0 1 1 20 1 1 1 0
0 72.1 68.60 146.40 200.0 13.29 13.29 1.25
0.0 1.0
9.3645E07
1.25
1.0
1.0
0.0 0.0
0.0 1.0

```

4.2 LGDUCT ルーチンの入力型式について

続いて LGDUCT ルーチンのデータ入力について述べる。

カード3：計算制御の定数入力

NDUCT, IDEL, MEDIA, ISYS (10I5)

NDUCT：各脚部での線量率を計算するかどうかの判定

NDUCT = 1：第1脚部内で線量率を計算する

NDUCT = 2：第2脚部内で線量率を計算する。

NDUCT = 3：第1脚，第2脚部内で線量率を計算する。

IDEL：Lateral Dimension の補正を行うかどうかの指定

IDEL > 0：Lateral Dimension の計算を行う。

IDEL = 0：Lateral Dimension の計算を行わない

MEDIA：ダクト壁の材質の指定

MEDIA = 1：コンクリート壁ダクトの場合

MEDIA = 2：鉄壁ダクトの場合

MEDIA = 3：鉛壁ダクトの場合

ISYS：各サブルーチンでの詳細情報の出力を行うかどうかの指定

ISYS > 0：各サブルーチンで詳細情報の出力を行う。

ISYS = 0：入力データおよび最終結果の

みの出力を行う。

(注) ISYS=0の時，詳細情報は File 8 へ出力されるので，File 8 を用意しておく必要がある。

カード4：線源エネルギー，ダクトの幾何学形状の入力

E_0 , D_0 , EL1, W1, W2, H (6F12.6)

E_0 ：ガンマ線の線源エネルギー (MeV)

D_0 ：線源エネルギーに対する単位距離あたりでの線量率 (1インチでの mR/hr)

EL1：ダクトの第1脚部の長さ (インチ)

W1：第1脚部のダクト巾 (インチ)

W2：第2脚部のダクト巾 (インチ)

H：第1脚，第2脚部のダクト高さ(インチ)

カード5：第1脚に対する制御

LIST, M1ST, N1ST (10I5)

LIST：第1脚ダクト内における巾，高さ方向の細分化分割数

M1ST：第1脚ダクト内における長さ方向の細分化分割数

N1ST：第1脚内での線量評価点の数の指定

カード6：第1脚部における線量評価点の位置の入力

(線源から線量評価点までの距離)

ELD1(I), I=1, N1ST (インチ)

(注) カード5とカード6は NDUCT=2の時はいりません。

カード7：第2脚部に対する制御

MVIS, N2ND (10I5)

MVIS：コーナ部の1回散乱面積の分割数

N2ND：第2脚内での線量評価点の数

カード8：第2脚内での線量評価点位置の入力 (コーナ中心部から線量評価点までの距離)

ELD2(I), I=1, N2ND (インチ)

(注) カード7とカード8は NDUCT=1の時はいりません。

特記 LGDUCT ルーチンには実験値との比較表作成のため OUTPUT というサブルーチンが組み込まれている。通常の使用には不必要なので LGDUCT ルーチンの CALL OUTPUT の命令文をコメント文に修正の事。又使用する場合には，OUTPUT ルーチンで実験値を入力するようになっている。

DEXP(I), I=1, N2ND (DEXP は $D/D_0 \times 10^4$ の値である)

Table 7 に LGDUCT ルーチンの入力例を示す。

Table 7 Sample Input for LGDUCT Routine

```

TERRELL 2 1.52 CI CS-137 CONCRETE LDUCT 6 X 6 FOOT EXP.
2 0 1 0 144.0 72.0 72.0 72.0
0.662
10 1
228.0
0.344
TERRELL 2 3.67 CI CO-60 CONCRETE LDUCT 6 X 6 FOOT EXP.
2 0 1 0 144.0 72.0 72.0 72.0
1.25
10 1
228.0
0.180
TERRELL 2 4.2 CI MA-24 CONCRETE LDUCT 6 X 6 FOOT EXP.
2 0 1 0 144.0 72.0 72.0 72.0
2.06
10 1
228.0
0.128

```

4.3 LNDUCT ルーチンの入力型式について

続いてLNDUCTの入力型式について述べる。

入力型式はLGDUCTとほとんど同じで中性子のための入力データが加わる。

カード3：計算制御定数の入力

NDUCT, IGROUP, IDEL, IALB,
MEDIA, ISYS (10I5)

NDUCT：各脚部での線量率を求めるかどうかの指定

NDUCT = 1：第1脚部内で線量率を計算する。

NDUCT = 2：第2脚部内で線量率を計算する。

NDUCT = 3：第1脚, 第2脚部内で線量率を計算する。

IGROUP：中性子のエネルギー群数

IDEL：Lateral Dimensionの補正を行うかどうかの指定

IDEL > 0：Lateral Dimensionの補正は行わない。

IDEL ≤ 0：Lateral Dimensionの補正を行う。

IALB：アルベドデータの選択

IALB ≥ 0：Y. T. Songのアルベド表示式による計算

IALB < 0：Maerker and Muckenthaler等のアルベド表示式による計算

(注) 両者による結果はSongの式での値がわずかに大きい、ほとんど差はない。どちらを用いても結果はほとんど同じである。

MEDIA：ダクト壁の材質の指定

MEDIA = 1：コンクリート壁のダクト

MEDIA = 2：鉄壁ダクト

ISYS：各サブルーチンでの詳細な出力を行うかどうかの指定

ISYS > 0：各サブルーチンで詳細情報を出力

する。

ISYS = 0：入力データおよび最終結果のみを出力する。

(注) ISYS = 0の時詳細情報はFile 8に出力されるので、ユーザーはFile 8を準備しておく事。

カード4：ダクト形状の入力

EL1, W1, W2, H (インチ) (6E12.6)

EL1：ダクトの第1脚部の長さ

W1：ダクトの第1脚部ね巾

W2：ダクトの第2脚部の巾

H：第1脚, 第2脚部の高さ

カード5：中性子の各エネルギーに対する単位距離あたりの線量率

D(I) I=1, IGROUP (6E12.6)

カード6：中性子の各エネルギー群に対するエネルギー (MeV)

EN(I) I=1, IGROUP+1 (6E12.6)

(注) 計算は入力値の平均エネルギーで行う

カード7：第1脚部に対する制御

L1ST, M1ST, N1ST (10I5)

L1ST：第1脚ダクト内における巾, 高さの細分化分割数の指定

M1ST：第1脚ダクト内における長さ方向の細分化分割数の指定

N1ST：第1脚内での線量評価点の数の指定

カード8：第1脚内で線量評価を行う位置の入力 (線源から線量評価点までの距離)

ELD1(I) I=1, N1ST (6E12.6)

(注) カード7, カード8はNDUCT = 2のときは不要である。

カード9：第2脚部に対する制御

MVIS, N2ND (10I5)

MVIS：コーナ部の1回散乱面積の分割数

N2ND：第2脚内での線量評価点の数

カード10：第2脚内で線量評価を行う位置の入力 (コーナ中心点から線量評価点までの距離)

ELD2, I=1, N2ND (6E12.6)

(注) カード9, カード10はNDUCT = 1の場合は不要である。

Table 8に実際の入力例を示す。

Table 8 Sample Input for LNDUCT Routine

```

2 X 3 FOOT TWO-LEGGED CONCRETE DUCT : 2.5 MEV NEUTRON
  3 1 0 0 1 0
365.76 60.96 60.96 91.44
  1.0E10
  2.5 2.5
  5 5 5
91.44 152.40 213.36 274.32 365.76
  5 4
91.44 182.88 274.32 335.28

```

5. 出力型式

Table 6 で示された入力に対する計算の出力結果を Table 9 に示す。これは Fig. 8 の鉄媒質の計算結果に相当する。次に Table 7 に示された入力に対する計算の出力結果 (但し ISYS = 0 で詳細出力ではない) を Table 10 に示す。これは Fig. 2(a) の結果に相当する。Table 7 の入力ルーチンは実験値との比較のために OUTPUT ルーチンを用いたので各ケースの最後の行は実験値の入力である。さらに L 型のコンクリートダクトおよび鉄ダクトを用いた数多くの実験が種々の線

源エネルギー、ダクト口径に対して行われている。参考のためにコードの精度検証の一助として、計算値、半経験式¹⁵⁾による値(但し、コンクリートダクトのみ)、および実験値の三者の比較表を Table 11 に示す。エネルギーは Na-22 (2.75MeV), Co-60 (1.25MeV), Cs-137 (0.662MeV), Au-198 (0.412MeV) で、ダクト口径は11インチ, 1フィート, 3フィート, 6フィートの4種類である。これより概して Au-198 の計算値は実験値との差が大きい。多分に安全側である。Fig. 2(a) の Au-198 の実験値と計算値との差は大体100%ぐらいである。

最後に Table 8 で示された入力に対する中性子の計算結果を Table 12 (但し、詳細出力ではない) に示す。これは Fig. 10 の結果に相当する。

Table 9 Sample Output from TDUCT Routine

```

ONE-BEND OR TWO-BEND RECTANGULAR DUCT ANALYSIS FOR Z TYPE DUCT
AVERY ET AL. PROBLEM
COORDINATES OF EACH POINT (CM)
Z(2)= 7.2100E+01 Y(3)= 6.8600E+01 Z(3)= 1.4640E+02 Z(4)= 2.0000E+02
DUCT WIDTH W1 = 1.3290E+01 DUCT HEIGHT W2 = 1.3290E+01
LATERAL DIMENSION CORRECTION, WIDTH INCREMENT FOR AVERAGE ENERGY 0.2190 CM MEDIUM=IRON
INITIAL ENERGY FOR LATERAL DIMENSION CORRECTION 1.250 MEV
AVERAGE ENERGY 0.547 MEV
DUCT WIDTH = 5.398E+00 INCHES
DUCT HEIGHT = 5.398E+00 INCHES
FIRST LEG LENGTH = 2.839E+01 INCHES
SECOND LEG LENGTH = 3.981E+01 INCHES
THIRD LEG LENGTH = 2.110E+01 INCHES
ALFA = 0.7455313 RADIAN 42.71579 DEGREES
IN= 0 NN= 0 IG= 1 NG= 1 NSE= 20 NSOUR= 1 ICONF= 1
CN= 0.0 CG= 1.0000E+00
NO. OF ENERGY GROUP 1 EZERO= 1.2500E+00 MEV S= 9.3645E+07 N/(CM**2/SEC) CONV= 1.0000E+00
SN( 1)= 1.0000E+00 SN( 2)= 0.0 SN(
SCALE(1) SCALE(2) SCALE(3) SCALE(4)
2.9237E-01 2.7055E-01 3.1895E-01 2.7055E-01
ENERGY GROUP 1
DO= 6.1519E-06 MR/H AT 1CM CONVERSION FACTOR = 2.1960E-03 (MR/H / PARTICLES/CM**2/SEC)
PATH ENERGY(MEV) FLUX(N/S) D/DO
12
9.8356E-01 8.3600E+05 2.4861E-04
6.8164E-01 2.8013E+02 6.0211E-08
5.9390E-01 1.0194E+02 1.9209E-08
7.0432E-01 1.9996E+02 4.4292E-08
2163
6.1105E-01 7.2274E+01 1.4059E-08
173
7.4550E-01 2.9205E+02 6.8171E-08
2173
6.4181E-01 1.0527E+02 2.1414E-08
163
8.9490E-01 2.1139E+01 5.7942E-09
2173
7.4953E-01 7.2271E+00 1.8127E-09
12123
2.4809E-01 1.0565E+01 8.6447E-10
22123
5.1571E-01 7.5777E-01 1.1466E-10
12223
8.9835E-01 2.8509E-01 7.8402E-09
8.4925E-01 7.7597E+00 2.0747E-09
5.1571E-01 5.1112E-00 2.9966E-10
8.9835E-01 1.7186E+00 2.5755E-10
5.6759E-01 1.3596E+01 2.3921E-09
5.0542E-01 1.6460E+01 2.4103E-09
4.5944E-01 3.1148E-01 4.2755E-11
4.1784E-01 1.0665E-01 1.3918E-11
4.3525E-01 8.5744E-01 1.1688E-10
4.1455E-01 2.9414E-01 3.8219E-11
4.9549E-01 6.6708E-01 9.5475E-11
4.4744E-01 2.2755E-01 3.0791E-11
1594
4.3657E-01 6.4905E-01 8.6479E-11
21594
3.9884E-01 2.2372E-01 2.8458E-11
4.5953E-01 4.2960E-01 5.8026E-11
2164
4.0664E-01 1.4785E-01 1.9025E-11
5.0609E-01 5.5190E-01 6.6314E-11
2164
4.5607E-01 4.0866E-01 2.4151E-11
1794
4.8480E-01 3.4689E-01 4.9051E-11
21794
4.3877E-01 1.1869E-01 1.5895E-11
17104
4.2587E-01 4.0599E-01 1.3646E-10
21744
4.3795E-01 2.7536E-01 3.6833E-11
17124
5.1534E-01 1.3338E+00 2.0159E-10
21724
4.6357E-01 4.6906E-01 2.7675E-11
31594
4.7319E-01 1.0902E-01 1.5209E-11
31544
4.4778E-01 3.0964E-01 4.1915E-11
3154
4.8725E-01 2.4086E-01 3.4151E-11
31694
4.4466E-01 2.2849E-01 3.0815E-11
31644
4.2802E-01 1.5899E-01 2.1011E-11
3164
4.8634E-01 1.6790E-01 2.3780E-11
31794
4.4710E-01 1.2649E-01 1.7401E-11
31744
4.4831E-01 3.0584E-01 4.1428E-11
4.8062E-01 5.1448E-01 7.2675E-11
164
7.9621E-01 1.9009E-02 4.7159E-12
264
7.9308E-01 5.9165E-03 1.4625E-12
364
5.8296E-01 8.3411E-03 1.5284E-12
12104
5.7050E-01 1.2264E+00 2.1758E-10
20104
5.0757E-01 4.8067E-01 7.0874E-11
30104
4.6757E-01 6.0752E-01 8.4174E-11
10124
5.9923E-01 5.6126E-01 1.0718E-10
20124
5.3055E-01 2.1881E-01 3.4630E-11
30124
4.8662E-01 2.8869E-01 4.0874E-11
15164
3.4252E-01 9.7089E-01 1.0463E-10
25164
3.1885E-01 3.4305E-01 3.6156E-11
35164
3.5827E-01 5.8271E-01 5.9361E-11
17144
2.2793E-01 1.4850E-01 1.0031E-11
27144
2.1720E-01 5.1879E-02 3.3124E-12
37164
3.2928E-01 2.5349E-02 2.6159E-12
GAMMA DOSE RATE (MR/H)
1 POINT 2 POINT 3 POINT 4
1 1.5294E+03 1.5449E+00 1.3270E-02 1.3270E-02
***** TOTAL DOSE RATE (MR/H) *****
DOSE RATE AT POINT 2 = 1.5294E+03
DOSE RATE AT POINT 3 = 1.5449E+00
DOSE RATE AT POINT 4 = 1.3270E-02

```

Table 10 Sample Output from LGDUCT Routine

```

*****
*****  TERRELL 1.52 CI CS-137 CONCRETE LDUCT  6 X 6 FOOT EXP.  *****
***** INPUT DATA LIST *****
NDUCT= 2      IDEL= 0      MEDIA= 1
ENERGY= 0.662 (MEV)      DO= 0.1000E+01 (MR/HR)

      *** GEOMETRY *** (INCH)
EL1= 0.14400E+03      W1= 0.72000E+02      W2= 0.72000E+02      H= 0.72000E+02

      *** SECOND LEG ***
N2ND= 1      MVIS= 10

      *** LOCATION OF DETECTOR *** (INCH)
ELD2( 1)= 0.22800E+03      ELD2(

LATERAL DIMENSION USED
DEL1= 0.44457E+00 INCH      DEL2= 0.36280E+00 INCH      AVERAGE ENERGY EE= 0.356 MEV
TOTAL DOSE BY EACH DETECTOR,SECOND LEG

      *** DETECTOR NO. 1 ***      DETECTOR LOCATION =228.000
ENERGY = 0.662(MEV)      TOTAL DOSE OF DETECTOR      0.21131E-06
*****
*****  TERRELL 3.67 CI CO-60 CONCRETE LDUCT  6 X 6 FOOT EXP.  *****
***** INPUT DATA LIST *****
NDUCT= 2      IDEL= 0      MEDIA= 1
ENERGY= 1.250 (MEV)      DO= 0.1000E+01 (MR/HR)

      *** GEOMETRY *** (INCH)
EL1= 0.14400E+03      W1= 0.72000E+02      W2= 0.72000E+02      H= 0.72000E+02

      *** SECOND LEG ***
N2ND= 1      MVIS= 10

      *** LOCATION OF DETECTOR *** (INCH)
ELD2( 1)= 0.22800E+03      ELD2(

LATERAL DIMENSION USED
DEL1= 0.53496E+00 INCH      DEL2= 0.41734E+00 INCH      AVERAGE ENERGY EE= 0.547 MEV
TOTAL DOSE BY EACH DETECTOR,SECOND LEG

      *** DETECTOR NO. 1 ***      DETECTOR LOCATION =228.000
ENERGY = 1.250(MEV)      TOTAL DOSE OF DETECTOR      0.13437E-06
*****
*****  TERRELL 4.2 CI NA-24 CONCRETE LDUCT  6 X 6 FOOT EXP.  *****
***** INPUT DATA LIST *****
NDUCT= 2      IDEL= 0      MEDIA= 1
ENERGY= 2.060 (MEV)      DO= 0.1000E+01 (MR/HR)

      *** GEOMETRY *** (INCH)
EL1= 0.14400E+03      W1= 0.72000E+02      W2= 0.72000E+02      H= 0.72000E+02

      *** SECOND LEG ***
N2ND= 1      MVIS= 10

      *** LOCATION OF DETECTOR *** (INCH)
ELD2( 1)= 0.22800E+03      ELD2(

LATERAL DIMENSION USED
DEL1= 0.58661E+00 INCH      DEL2= 0.46803E+00 INCH      AVERAGE ENERGY EE= 0.777 MEV
TOTAL DOSE BY EACH DETECTOR,SECOND LEG
      *** DETECTOR NO. 1 ***      DETECTOR LOCATION =228.000
ENERGY = 2.060(MEV)      TOTAL DOSE OF DETECTOR      0.11429E-06

```


Table 11 Table of Dose Attenuation with Energy and Various Duct Geometry

*** CONCRETE ***		EL1	EL2	W1	W2	H	CAL(D/D ₀)	EMP(D/D ₀)	EXP(D/D ₀)	RATIO
ED	DEL									
0.1250E+01	0.0	0.4550E+02	0.1800E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1506E+02	0.1648E+02	0.1948E+02	22.68
0.1250E+01	0.0	0.4550E+02	0.2700E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.4771E+01	0.5589E+01	0.5860E+01	18.58
0.1250E+01	0.0	0.4550E+02	0.3600E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.2070E+01	0.2595E+01	0.2590E+01	20.06
*** CONCRETE ***										
ED	DEL									
0.6620E+00	0.0	0.4550E+02	0.1800E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.2208E+02	0.2588E+02	0.1822E+02	-21.20
0.6620E+00	0.0	0.4550E+02	0.2700E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.6681E+01	0.8777E+01	0.4170E+01	-8.28
0.6620E+00	0.0	0.4550E+02	0.3600E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.2840E+01	0.4075E+01	0.2900E+01	2.07
*** CONCRETE ***										
ED	DEL									
0.4120E+00	0.0	0.4550E+02	0.1800E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.3094E+02	0.3624E+02	0.2168E+02	-42.71
0.4120E+00	0.0	0.4550E+02	0.2700E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.9563E+01	0.1229E+02	0.7440E+01	-28.19
0.4120E+00	0.0	0.4550E+02	0.3600E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.4113E+01	0.5707E+01	0.3440E+01	-19.56
*** CONCRETE ***										
ED	DEL									
0.1250E+01	0.0	0.4200E+02	0.2400E+02	0.1200E+02	0.1200E+02	0.1200E+02	0.1211E+02	0.1203E+02	0.1080E+02	-3.34
0.1250E+01	0.0	0.4200E+02	0.3600E+02	0.1200E+02	0.1200E+02	0.1200E+02	0.3671E+01	0.4078E+01	0.3200E+01	-8.48
0.1250E+01	0.0	0.4200E+02	0.4800E+02	0.1200E+02	0.1200E+02	0.1200E+02	0.1495E+01	0.1893E+01	0.1450E+01	-3.09
*** CONCRETE ***										
ED	DEL									
0.6620E+00	0.0	0.4200E+02	0.2400E+02	0.1200E+02	0.1200E+02	0.1200E+02	0.1632E+02	0.1888E+02	0.1560E+02	-4.45
0.6620E+00	0.0	0.4200E+02	0.3600E+02	0.1200E+02	0.1200E+02	0.1200E+02	0.4894E+01	0.6404E+01	0.4780E+01	-2.39
0.6620E+00	0.0	0.4200E+02	0.4800E+02	0.1200E+02	0.1200E+02	0.1200E+02	0.2076E+01	0.2973E+01	0.2320E+01	10.51
*** CONCRETE ***										
ED	DEL									
0.1250E+01	0.0	0.9000E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.1243E+02	0.1375E+02	0.1529E+02	18.57
0.1250E+01	0.0	0.9000E+02	0.6000E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.2969E+01	0.3520E+01	0.3440E+01	13.70
0.1250E+01	0.0	0.9000E+02	0.9000E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.9718E+00	0.1194E+01	0.1110E+01	12.45
*** CONCRETE ***										
ED	DEL									
0.6620E+00	0.0	0.9000E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.1938E+02	0.2195E+02	0.1486E+02	-30.42
0.6620E+00	0.0	0.9000E+02	0.6000E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.4713E+01	0.5527E+01	0.4040E+01	-16.66
0.6620E+00	0.0	0.9000E+02	0.9000E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.1510E+01	0.1875E+01	0.1510E+01	0.00
*** CONCRETE ***										
ED	DEL									
0.4120E+00	0.0	0.9000E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.2626E+02	0.3023E+02	0.1878E+02	-39.81
0.4120E+00	0.0	0.9000E+02	0.6000E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.4827E+01	0.7740E+01	0.5200E+01	-31.29
0.4120E+00	0.0	0.9000E+02	0.9000E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.3600E+02	0.2256E+01	0.2625E+01	0.1770E+01	-27.46
*** CONCRETE ***										
ED	DEL									
0.1250E+01	0.0	0.1200E+03	0.8400E+02	0.7200E+02	0.7200E+02	0.7200E+02	0.4411E+01	0.5039E+01	0.4214E+01	-4.66
0.1250E+01	0.0	0.1200E+03	0.1320E+03	0.7200E+02	0.7200E+02	0.7200E+02	0.1335E+01	0.1510E+01	0.1400E+01	4.66
0.1250E+01	0.0	0.1200E+03	0.1800E+03	0.7200E+02	0.7200E+02	0.7200E+02	0.5729E+00	0.6601E+00	0.5239E+00	-9.36
0.1250E+01	0.0	0.1200E+03	0.2280E+03	0.7200E+02	0.7200E+02	0.7200E+02	0.2980E+00	0.3514E+00	0.2648E+00	-12.54
*** CONCRETE ***										
ED	DEL									
0.6620E+00	0.0	0.1440E+03	0.8400E+02	0.7200E+02	0.7200E+02	0.7200E+02	0.4495E+01	0.4985E+01	0.4600E+01	2.29
0.6620E+00	0.0	0.1440E+03	0.1320E+03	0.7200E+02	0.7200E+02	0.7200E+02	0.1332E+01	0.1493E+01	0.1360E+01	2.07
0.6620E+00	0.0	0.1440E+03	0.2280E+03	0.7200E+02	0.7200E+02	0.7200E+02	0.2946E+00	0.3477E+00	0.3440E+00	14.35
*** CONCRETE ***										
ED	DEL									
0.4120E+00	0.0	0.1200E+03	0.7200E+02	0.7200E+02	0.7200E+02	0.7200E+02	0.1463E+02	0.1672E+02	0.7320E+01	-99.81
0.4120E+00	0.0	0.1200E+03	0.1800E+03	0.7200E+02	0.7200E+02	0.7200E+02	0.1384E+01	0.1452E+01	0.6690E+00	-106.89
0.4120E+00	0.0	0.1200E+03	0.2280E+03	0.7200E+02	0.7200E+02	0.7200E+02	0.7208E+00	0.7727E+00	0.3560E+00	-102.48
*** CONCRETE ***										
ED	DEL									
0.2060E+01	0.0	0.1560E+03	0.7200E+02	0.7200E+02	0.7200E+02	0.7200E+02	0.2511E+01	0.2742E+01	0.2380E+01	-5.52
0.2060E+01	0.0	0.1560E+03	0.1800E+03	0.7200E+02	0.7200E+02	0.7200E+02	0.2407E+00	0.2381E+00	0.2000E+00	-20.37
0.2060E+01	0.0	0.1560E+03	0.2280E+03	0.7200E+02	0.7200E+02	0.7200E+02	0.1297E+00	0.1268E+00	0.1100E+00	-17.90
*** STEEL ***										
ED	DEL									
0.1250E+01	0.1636E+00	0.4540E+02	0.1800E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.9133E+01	0.1110E+02	0.1110E+02	17.72
0.1250E+01	0.1636E+00	0.4540E+02	0.2250E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.5204E+01	0.6270E+01	0.4270E+01	17.01
0.1250E+01	0.1636E+00	0.4540E+02	0.3150E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.2191E+01	0.2290E+01	0.2290E+01	4.32
0.1250E+01	0.1636E+00	0.4540E+02	0.3600E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1540E+01	0.1540E+01	0.1540E+01	0.01
*** STEEL ***										
ED	DEL									
0.6620E+00	0.1047E+00	0.4540E+02	0.1800E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1233E+02	0.8250E+01	0.8250E+01	-37.37
0.6620E+00	0.1047E+00	0.4540E+02	0.2250E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.6362E+01	0.4590E+01	0.4590E+01	-38.60
0.6620E+00	0.1047E+00	0.4540E+02	0.3150E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.2634E+01	0.1930E+01	0.1930E+01	-36.46
0.6620E+00	0.1047E+00	0.4540E+02	0.3600E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1843E+01	0.1420E+01	0.1420E+01	-29.76
*** STEEL ***										
ED	DEL									
0.4120E+00	0.4997E-01	0.4540E+02	0.1800E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1233E+02	0.8250E+01	0.8250E+01	-32.92
0.4120E+00	0.4997E-01	0.4540E+02	0.2250E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.6832E+01	0.5280E+01	0.5280E+01	-19.40
0.4120E+00	0.4997E-01	0.4540E+02	0.3150E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.2814E+01	0.2390E+01	0.2390E+01	-17.74
0.4120E+00	0.4997E-01	0.4540E+02	0.3600E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1100E+02	0.1966E+01	0.1640E+01	0.1640E+01	-19.88

Del : Value of Lateral Dimension inch unit

EL1,EL2,W1,W2,H : inch unit

CAL(D/D₀),EMP(D/D₀),EXP(D/D₀) : D/D₀ × 10⁴

RATIO : % (measured-calculated)/measured × 100

Table 12 Sample Output from LNDUCT Routine

```

*****
***** 2 X 3 FOOT TWO-LEGGED CONCRETE DUCT : 2.5 MEV NEUTRON *****
*****
****INPUT DATA LIST****
NDUCT= 3   IGROUP= 1   IDEL = 0   IALB = 0   MEDIA= 1
                **** GEOMETRY ****   (INCH)
EL1= 0.36576E+03   W1= 0.60960E+02   W2= 0.60960E+02   H= 0.91440E+02

    *** DOSE RATE AT UNIT DISTANCE IN OPEN AIR ***
D1( 1)= 0.10000E+11   D1(

    *** INCIDENT ENERGY AT EACH GROUP ***
EN( 1)= 0.25000E+01   EN( 2)= 0.25000E+01   EN(

    ***FIRST LEG***
M1ST= 5   L1ST = 5   M1ST= 5
                *** LOCATION OF DETECTOR ***   (INCH)
ELD1( 1)= 0.91440E+02   ELD1( 2)= 0.15240E+03   ELD1( 3)= 0.21336E+03   ELD1( 4)= 0.27432E+03
ELD1( 5)= 0.36576E+03   ELD1(

    ***SECOND LEG***
M2ND= 4   MVIS= 5
                *** LOCATION OF DETECTOR ***   (INCH)
ELD2( 1)= 0.91440E+02   ELD2( 2)= 0.18288E+03   ELD2( 3)= 0.27432E+03   ELD2( 4)= 0.33528E+03
                ENERGY GROUP NO. 1

LATERAL DIMENSION USED
DELW1= 0.12144E+01( INCH)   DELW2= 0.11148E+01( INCH)   DELH= 0.11644E+01( INCH)   AVERAGE ENERGY= 0.25000E+01( MEV)

TOTAL DOSE BY EACH DETECTOR, FIRST LEG
    *** DETECTOR NO. 1 ***   DETECTOR LOCATION = 91.440
ENERGY GROUP 1   ENERGY = 2.500 MEV   DOSE= 0.20749E+07
                TOTAL DOSE OF DETECTOR 1   0.20749E+07
    *** DETECTOR NO. 2 ***   DETECTOR LOCATION =152.400
ENERGY GROUP 1   ENERGY = 2.500 MEV   DOSE= 0.72144E+06
                TOTAL DOSE OF DETECTOR 2   0.72144E+06
    *** DETECTOR NO. 3 ***   DETECTOR LOCATION =213.360
ENERGY GROUP 1   ENERGY = 2.500 MEV   DOSE= 0.34705E+06
                TOTAL DOSE OF DETECTOR 3   0.34705E+06
    *** DETECTOR NO. 4 ***   DETECTOR LOCATION =274.320
ENERGY GROUP 1   ENERGY = 2.500 MEV   DOSE= 0.19794E+06
                TOTAL DOSE OF DETECTOR 4   0.19794E+06
    *** DETECTOR NO. 5 ***   DETECTOR LOCATION =365.760
ENERGY GROUP 1   ENERGY = 2.500 MEV   DOSE= 0.11439E+06

TOTAL DOSE BY EACH DETECTOR, SECOND LEG
    *** DETECTOR NO. 1 ***   DETECTOR LOCATION = 91.440
ENERGY GROUP 1   ENERGY = 2.500 MEV   DOSE= 0.61875E+04
                TOTAL DOSE OF DETECTOR 1   0.61875E+04
    *** DETECTOR NO. 2 ***   DETECTOR LOCATION =182.880
ENERGY GROUP 1   ENERGY = 2.500 MEV   DOSE= 0.10568E+04
                TOTAL DOSE OF DETECTOR 2   0.10568E+04
    *** DETECTOR NO. 3 ***   DETECTOR LOCATION =274.320
ENERGY GROUP 1   ENERGY = 2.500 MEV   DOSE= 0.35062E+03
                TOTAL DOSE OF DETECTOR 3   0.35062E+03
    *** DETECTOR NO. 4 ***   DETECTOR LOCATION =335.280
ENERGY GROUP 1   ENERGY = 2.500 MEV   DOSE= 0.20495E+03
                TOTAL DOSE OF DETECTOR 4   0.20495E+03

```

6. ま と め

1 回および 2 回屈曲したダクトからの漏洩放射線量を計算する DUCT79 コードは十分に少ない時間で実用的な精度の計算結果を与えることが出来ることが確 (314)

かめられた。Lateral Dimension の補正はコンクリートのように比較的密度の低い物質でダクト口径が小さく、かつ入射エネルギーが高い場合は有効である。さらに鉛のアルベドデータの修正により、鉛を用いたダクトでの計算が可能になった。設計上、Fig. 9 で示した

ように局部的に鉛を使用することはよく行われるので有用であろう。今後鉛のアルベドデータの測定値、又は計算値等によって一層精度のよいものが発表されれば鉛のアルベド値のC, C'のパラメータ値は差し変えられるべきである。

参 考 文 献

- 1) 伊藤泰義, 西原善明, 金野正晴: “屈曲ダクトにおける放射線ストリーミングの評価”, 日本原子力学会誌, Vol. 24, No. 7, (1982)
- 2) J. M. Chapman and C. M. Huddleston: “Dose Attenuation in Two-Legged Concrete Ducts for Various Gamma-Ray Energies” Nucl. Sci. Eng. 25. 66~74 (1966)
- 3) J. C. LeDoux, A. B. Chilton: “Attenuation of Gamma Radiation through Two-Legged Rectangular Ducts and Shelter Entranceways” NCEL-TN-383 (1961)
- 4) J. M. Chapman: “Dose-Attenuation Variation with Incident Gamma-Ray Energy in Two-Legged Concrete and Steel Ducts” NCEL-R-442 (1966)
- 5) Y. T. Song: “Fast-Neutron Streaming through Concrete Ducts” NCEL-R-565 (1968)
- 6) W. E. Edwards, W. B. Henderson: “Two-Bend Rectangular Duct Radiation Leakage Analysis” GESP-295 (1968)
- 7) A. B. Chilton: “Parameters for C-H Albedo Formula for Gamma Rays Reflection from Water, Concrete, Iron and Lead” Trans. Am. Nuc. Soc. 8. 656 (1965)
- 8) J. J. Steyn and D. G. Andrews: “Experimental Differential Number, Energy and Exposure Albedos for Semi-Infinite Media, for Normally Incident Gamma Photons” Nucl. Sci. Eng. Vol. 27, 318~327 (1967)
- 9) R. E. Maerker and F. J. Muckentcler: “Calculation and Measurements of the Fast-Neutron Differential Dose Albedo for Concrete” Nucl. Sci. Eng. Vol. 22, 455~462 (1965)
- 10) C. W. Terrell and A. J. Jerri: “Radiation Streaming in Shelter Entranceways” ARF1158A01-5 (1961)
- 11) idem ARF-1158A02-7 (1962)
- 12) A. F. Avery and V. G. Small: “The Treatment of Gamma-Ray Scattering in Shield Design for Reprocessing Plant” Proc. 6. Int. Conf. Radiation Shielding Vol II (1983)
- 13) C. W. Terrell and A. J. Jerri: “Radiation Streaming in Shelter Entranceways” ARF-1158-12 (1960)
- 14) J. M. Chapman and T. R. Tree: “Dose Measurements of Gamma Radiation Streaming through Concrete Ducts with and without Lead Liners and through Corrugated Steel Ducts” NCEL-R-590 (1968)
- 15) W. C. Ingold and C. M. Huddleston: “An Empirical Formula for Calculation Gamma-Ray Dose Attenuation in Concrete Ducts” NCEL-R-349 (1964)