

コンクリートダクトからの γ 線ストリーミングの評価計算法の開発(その1)

—実験計画および実験結果—

齊藤 鉄夫

篠田 雅夫
(原子力部)C. E. クリフォード
(RRA)

§ 1. はじめに

第5回原子炉遮蔽国際会議報告¹⁾のなかで、遮蔽設計手法におけるダクトストリーミング(貫通孔からの放射線漏洩)の問題に関して次のような記述がある。

「……、初めて原子の火がともってからおよそ1/4世紀が過ぎ、この間に約100基の原子炉が建設された。しかし、現在でもなお遮蔽設計上の最も大きな困難な問題は、放射線ストリーミングの問題であろう。過去における失敗を細かく分析し、将来の問題について考えるならば、ストリーミングはこれらの大部分に関連していることがわかる。……」

同じ報告のなかで、「遮蔽解析手法に関しては、かなり熟してきたという感じである。」と述べられていることを考えるとストリーミングの遮蔽設計上の重要性とともに、解析上の困難さがよく理解できる。

原子力施設や放射線利用施設、放射性物質を扱う各種の施設の放射線遮蔽コンクリート壁には、配管孔・入排気孔などの種々の貫通孔が存在する。しかし、上述のようにその貫通孔からの中性子線・ γ 線の透過・漏洩(ストリーミング)量の評価手法は必ずしも確立されているとは言えず、遮蔽設計上または作業被曝を評価する際の最も困難な問題のひとつとなっている。

現在、ストリーミング量を評価する計算法として考えられるのは、直円柱ないし円環ダクトについては2次元輸送コードが、その他の形状(四角形ダクトあるいは屈曲のある場合など)については3次元モンテカルロコードがある。直円柱ないし円環ダクトの場合でも、線源が中心軸に対して軸対称でない場合には3次元モンテカルロコードしか利用できない。種々の形状のダクトを多数取り扱う実際の設計では、これらの超大型計算コードを用いて中性子線・ γ 線のストリーミングの評価をすることは現実的ではない。そこで、簡便で信頼性の高いストリーミング評価手法の確立が急務とされている。

本研究は、ダクトによる γ 線のストリーミング現象の

性質を実験により明らかにし、その結果を利用して γ 線のダクトストリーミング量の予測の評価を比較的単純な工学的計算で可能にする新たな手法の開発を行なうことを目的とするものである。

実験は、直円柱ダクト・円環ダクトおよび矩形ダクトを対象とし、線源には ^{60}Co を、検出器として高圧電離箱を用いた。任意の線源位置・検出器位置で線量率を測定し、その実験結果および補助的に2次元輸送コード、モンテカルロコードによる計算結果を利用して、コンクリート遮蔽壁を貫通するダクトからの γ 線のストリーミング量を計算する簡便な工学的手法の開発を行なった。本報告は、そのうち実験計画および実験結果について述べるものである。

なお、実験は米国カンザス州立大学の原子核工学教室の施設を利用して行なった。

§ 2. 実験計画

2.1 実験配置

実験施設全体の配置を図-1に示す。ダクトを有するコンクリート壁を中心に、一方にコリメータに納められた ^{60}Co の点線源が、他方に検出器が配置される。遮蔽壁および線源保持装置は、屋外のコンクリート床版の上に設置される。

検出器移動領域およびデータ処理室は屋内である。ダクト入口に線源からの γ 線が斜めに入射したときの、遮蔽壁外側での線量率分布を計測する。

2.2 遮蔽コンクリート壁およびダクト

遮蔽壁は、17.8cm×50.8cm×25.4cmの普通コンクリートブロックを積み重ねて模擬する。

遮蔽壁の大きさは、図-2に示すように幅459cm、高さ306.9cmで、厚さは50.8cm、101.6cm、152.4cmの3水準とする。101.6cm厚および152.4cm厚の場合は、ブ

ロック間の間隙が遮蔽壁を貫通しないように、間隙を交互にずらして設置する。また、50.8cm厚の場合はブロック1層であるが、ブロック間の間隙を漏洩した成分をバックグラウンドとして相殺するように、ダクトを有さないバルク壁での測定を行なう。

ダクトを有する小ブロックは図-2の斜線部に挿入される。ダクトの形状を、表-1（直円柱ダクト）、表-2（円環ダクト）、表-3（矩形ダクト）に示す。円環ダクトとは、円柱ダクトの中心に水の入ったパイプを有するものである。その他、バックグラウンドを計測する意味でダクトが存在しない場合（バルク壁）についても実験を行なった（表-4）。ブロックを積み重ねてダクトを有する遮蔽壁を模擬した一例を写真-1に示す。

2.3 線源

γ 線線源には、 $8 \times 10^{-5} (Ci)$ から $8 (Ci)$ までの数種類の ^{60}Co 線源を用いた。コリメータは、台車の上に設置されており、線源はダクト中心軸を含む水平面上の任意の点に位置することができるようになっている。線源保持装置の全体を写真-2に示す。

実験時の、線源位置を図-3に示す。ダクト入口と線

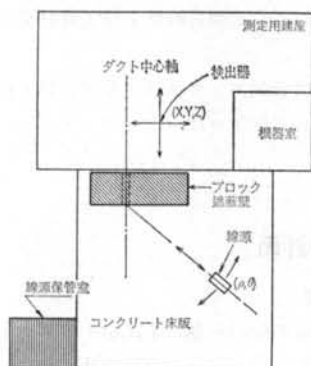


図-1 実験の全体配置

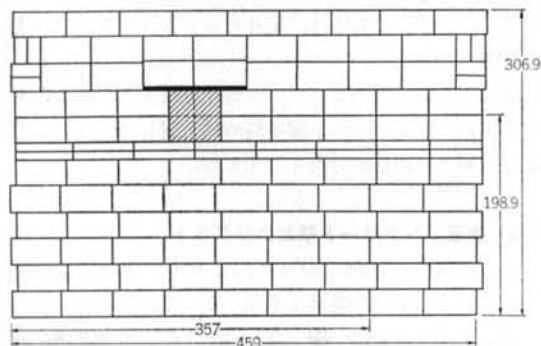


図-2 ブロックを積み重ねて遮蔽壁を模擬（図中の斜線部にダクトブロックが挿入される）

源位置を結ぶ直線が、ダクト中心軸を含む直線と 33° 、 45° 、 60° となるような位置に線源を設置する。この角度を入射角 θ_s と呼ぶ。また、線源とダクト入口中心との距離 ρ は、 $\rho = 200\text{cm}$ 、 300cm 、 400cm の3水準とする。

線源強度測定は、米国連邦基準局（NBS）の基準線源を用いて行なう。用いた線源のうち最も強度の大きな線源は、1979年6月1日の時点で $8.12 \pm 0.39 (Ci)$ であった。

2.4 γ 線検出器

γ 線の検出は、高圧電離箱型の検出器（Reuter-Stokes RSS-111 Area Monitor System, Serial Number 1-3575）で行なった。これは、約25気圧のArガスを封じた直径25.4cmのステンレス製（厚さ0.3cm）の球形の検

形状番号	直径D(cm)	長さL(cm)	備考
1	21.1	50.8	遮蔽壁ダクト
2	41.9	50.8	"
3	4.76	101.6	"
4	10.3	101.6	"
5	21.1	101.6	"
6	41.9	152.4	"
7	10.3	152.4	"
8	21.1	152.4	"
9	41.9	152.4	"
10	10.3	101.6	反射壁実験用
11	21.1	101.6	反射壁実験用
12	10.3	152.4	スチールライナーあり



表-1 直円柱ダクトの形状

形状番号	外径D(cm)	内径d(cm)	長さL(cm)
13	21.1	6.03	101.6
14	21.1	10.16	101.6
15	41.9	27.62	101.6
16	41.9	32.39	101.6
17	21.1	6.03	152.4
18	21.1	10.16	152.4
19	41.9	27.62	152.4
20	41.9	32.39	152.4

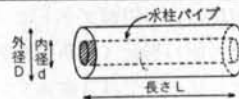


表-2 直円環ダクトの形状

形状番号	高さH(cm)	幅W(cm)	長さL(cm)
21	15.2	30.5	101.6
22	30.5	30.5	101.6

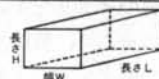
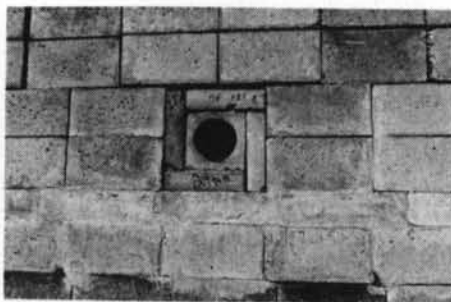


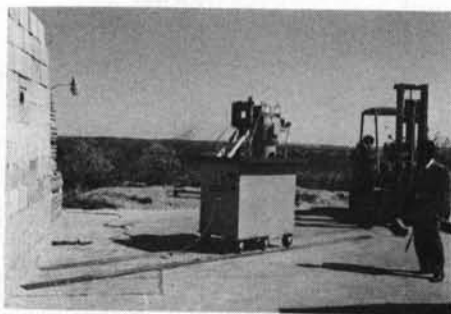
表-3 矩形ダクトの形状

形状番号	壁厚 L (cm)
23	50.8
24	101.6
25	152.4

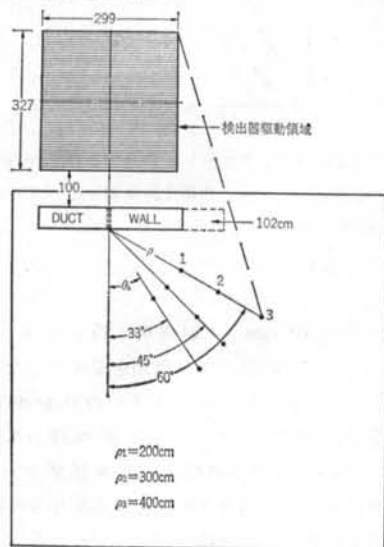
表一4 パルク壁実験の形状



写真—1 ブロックによる模擬遮蔽壁とダクト



写真—2 線源保持装置



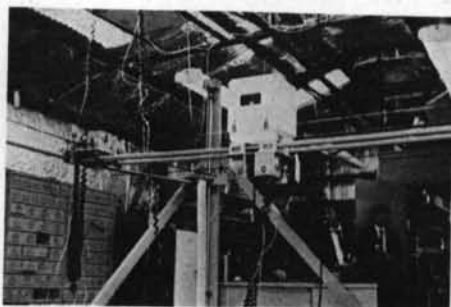
図一3 線源の設置位置と検出器駆動領域

出器である。

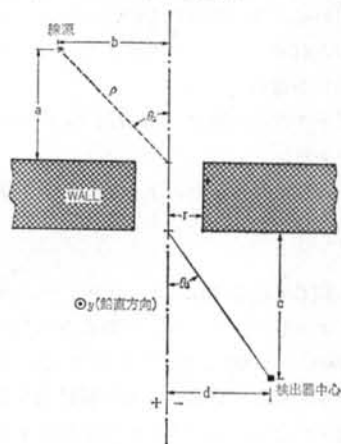
検出器は、平面的には図-3に示されるように、遮蔽壁から100cm離れた299 cm×327 cmの領域を、鉛直方向にはダクト中心軸の高さから100cm下までの範囲を自動的に移動できるようになっている。その様子を写真-3に示す。

図-4に、検出器・遮蔽壁・ダクトおよび線源の配置と、今後データ整理に用いる変数名を示す。線源の高さ198.9 cm (ダクト中心の高さ; $y=0$ とする) は固定し、その平面的な位置を ρ , θ_s で表現する。ダクトの大きさを r , 検出器の位置を c (検出器と遮蔽壁との距離), d (検出器とダクト中心軸との水平距離), y (検出器とダクト中心軸との鉛直距離) で表現する。円形ダクトの場合、ダクト中心軸に関する対称性を考えれば、これらの実験配置ですべての空間分布をカバーしていることになる。

線量率分布の計測は、 $y=0\text{cm}$ 、 -38cm 、 -76cm の3水準について、 c を固定しての d 方向の線量率分布、 d を固定しての c 方向の線量率分布、および c - d 平面内における等線量率曲線の分布、の3種類を行なった。



写真—3 γ 線検出器(高压電離箱)



図—4 線源および検出器位置の表示方法

§ 3. 実験結果

3.1 d 方向の空間線量率分布

実験は、壁厚 3 種類に対してダクト形状 22 種類、線源位置 9 ケースと非常に多岐にわたるので、ここではその代表例を示す。また、データ整理にあたって、計測された空間線量率 $\dot{X}(\mu R/hr)$ を次式で規格化した。

$$(\text{規格化線量率}) = \frac{\rho^2 \dot{X}}{S} (\text{m}^2 \cdot \mu R/hr \cdot Ci) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 ρ : 線源とダクト入口中心との距離
 S : 線源強度 (Ci)

これは、線源の強さ S や、線源とダクトまでの距離 ρ を補正すればデータの比較が容易であるからである。ここでの空間線量率 $\dot{X}(\mu R/hr)$ は、ダクトのないバルク壁の場合の計測値をバックグラウンド値として差し引いた値である。したがって、 $\dot{X}$ はダクトストリーミングの寄与による空間線量率と考えてよい。

図-5 は、 y (鉛直方向) = 0, 入射角 $\theta_s = 45^\circ$, 壁厚 101.6cm, ダクト径 20cm の場合の d 方向 (遮蔽壁面と平行方向) の線量分布である。 c (遮蔽壁面からの距離) = 100cm, 150cm, 250cm の 3 つの場合を示している。ここで特徴的な事柄は、

- ① いずれの場合でも 2 つのピークを形成している。つまり、ダクトをストリーミングする γ 線には 2 成分があると考えられる、
 - ② 2 つのピーク間の距離は、遮蔽壁からの距離にほぼ比例して大きくなる、
- である。

図-6 は、同じく壁厚 101.6cm, ダクト径 20cm, $y = 0$ cm, $c = 150$ cm の場合で、ダクトへの入射角 θ_s を、 $\theta_s = 33^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ と変化させたときの d 方向の空間線量率分布を示している。特徴的なことは、

- ③ いずれの入射角でも、ダクトストリーミングする γ 線には 2 成分が認められる、
 - ④ 2 つのピーク間の距離は、入射角 θ_s が変化してもほぼ同一である、
 - ⑤ 入射角が大きくなるほど、ストリーミング量は小さくなる、
- である。

図-7 は、同じく壁厚 101.6cm, ダクト径 20cm, 入射角 $\theta_s = 33^\circ$, $c = 150$ cm の場合で、鉛直方向の位置 y を $y = 0$ cm, -38cm, -76cm と変化させたときの d 方向の空間線量率分布を示している。ここで特徴的なことは、

- ⑥ γ 線線量率の分布が 2 つのピークを形成するのは、 $y = 0$ の場合のみである。 $y = -38$ cm, -76cm では単

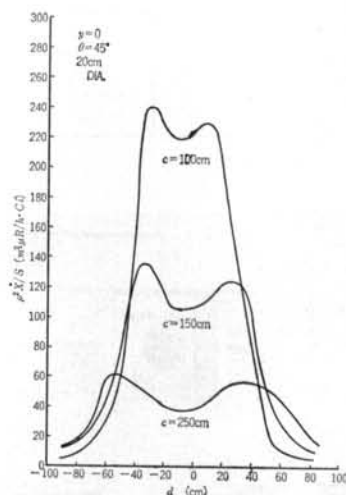


図-5 厚さ 1 m のコンクリートを貫通する直径 20 cm のダクトを透過した γ 線の規格化線量率分布 ($\theta_s = 45^\circ$, $y = 0$ で c をパラメータとした場合)

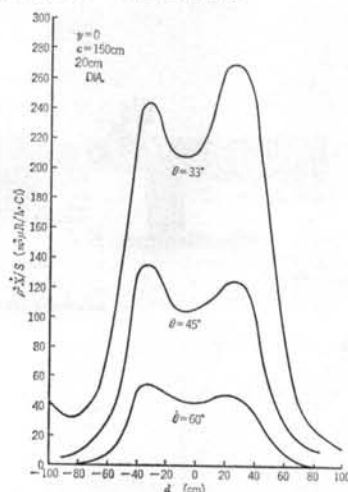
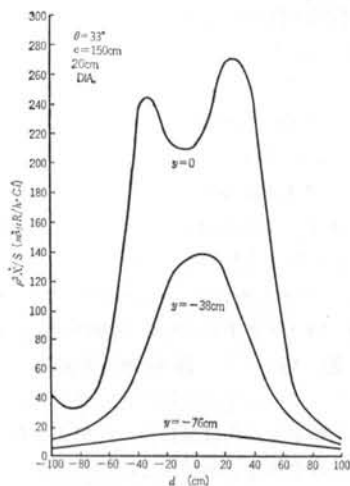


図-6 厚さ 1 m のコンクリートを貫通する直径 20 cm のダクトを透過した γ 線の規格化線量率分布 ($y = 0$, $c = 150$ cm で θ_s をパラメータとした場合)

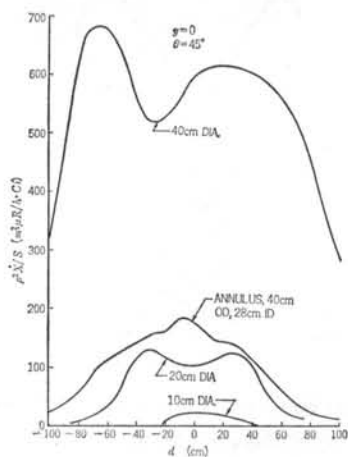
一ピークを示す、
 である。

図-8 は壁厚 101.6cm, 入射角 $\theta_s = 45^\circ$, $y = 0$, $c = 150$ cm の場合で、ダクトの径および種類を変化させた場合である。最もストリーミング量の大きいのが 40 cm 径のダクトの場合で、以下、ダクト中心に 28 cm 径の水柱パイプを有する 40 cm 径ダクトの場合、20 cm 径ダクトの場合、10 cm 径のダクトの場合と順に線量率が小さくなっていく。ここで特徴的なことは、

- ⑦ 円環ダクトの場合、2 つのピークを形成せず、やや複雑な線量率分布となっている、



図—7 厚さ1 mのコンクリートを貫通する直径20 cmのダクトを透過した γ 線の規格化線量率分布 ($\theta_s=33^\circ$, $c=150\text{cm}$ で y をパラメータとした場合)



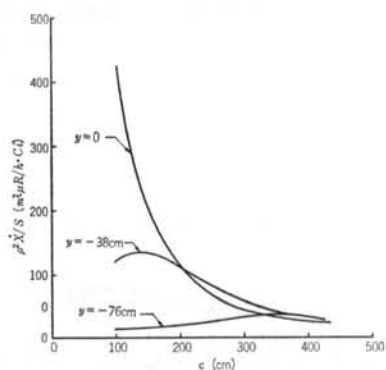
図—8 厚さ1 mのコンクリートを貫通するダクトから透過する γ 線の規格化線量率分布 ($y=0$, $\theta_s=45^\circ$, $c=150\text{cm}$ でダクト形状をパラメータとした場合)

⑧ダクト径が大きくなるほど、2成分に分かれる傾向が大きくなる。ダクト径が10cmの場合は2つのピークは形成されない、ということである。

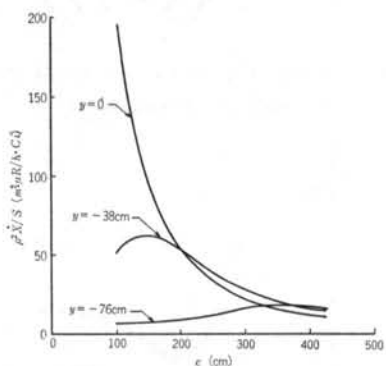
ここでは、多岐にわたる実験例のうち代表的なものを示したが、上記した特徴①～⑧はすべてのケースにあてはまるものである。

3.2 c方向の空間線量率分布

c方向の空間線量率分布を図—9, 10に示す。これらはいずれも壁厚が101.6cmで、ダクト径が20cm、 $d < d$



図—9 厚さ1 mのコンクリートを貫通する直径20 cmのダクトを透過する γ 線の規格化線量率分布 ($d=0$, $\theta_s=33^\circ$ で y をパラメータとした場合)



図—10 厚さ1 mのコンクリートを貫通する直径20 cmのダクトを透過した γ 線の規格化線量率分布 ($d=0$, $\theta_s=45^\circ$ で y をパラメータとした場合)

クト中心軸と検出器の水平距離) $=0\text{cm}$ である。図—9は入射角 $\theta_s=45^\circ$ の場合、図—10は $\theta_s=33^\circ$ の場合で、それぞれ鉛直方向の位置 $y=0\text{cm}$, -38cm , -76cm の3ケースについてのc方向の空間線量率分布を示している。ここで特徴的なことは、

- ⑨ $y=0$ の場合、ほぼ c^2 に逆比例して線量率が減少している、
 - ⑩ダクト中心軸からの鉛直距離が大きくなるに従い、ピーク値を与えるcが大きくなる、
- である。

3.3 等線量率曲線図

図—11～図—15は、壁厚101.6cmで種々のパラメータを変化させた場合の等線量率曲線図である。等線量率曲線の測定(Isodose Measurement)は、あらかじめ設定された空間線量率を与える点を検出器が自動的に移動し、その検出器の軌跡を記録するものである。ただし、

この測定ではバックグラウンド線量率を差し引くようになっていないので、等線量率曲線図が示す線量率はダクトストリーミング γ 線の寄与によるもののみではない。したがって、このデータは空間線量率分布を定性的

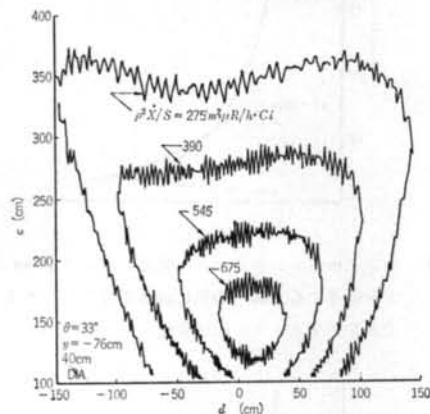


図-11 壁厚1 m, ダクト直径40 cmで $\theta_s=33^\circ$ の場合の $y=-76$ cm平面における等線量率曲線分布

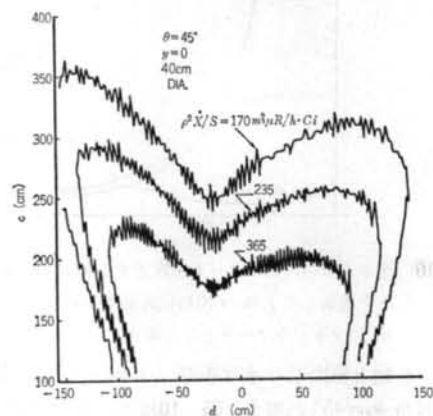


図-12 壁厚1 m, ダクト直径40 cmで $\theta_s=45^\circ$ の場合の $y=0$ 平面における等線量率曲線分布

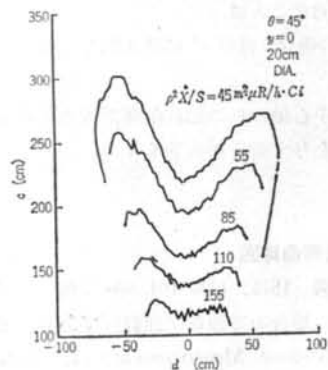


図-13 壁厚1 m, ダクト直径20 cmで $\theta_s=45^\circ$ の場合の $y=0$ 平面での等線量率曲線分布

に把握する目的で作成したもので、工学的評価手法の開発には利用していない。

図-11は、ダクト径40 cm, 入射角 $\theta_s=33^\circ$ で、 $y=-76$ cmの場合の等線量率曲線図である。 $y=-76$ cmの場合、 c が大きいたとこで2つのピークを形成している。

図-12は、ダクト径40 cm, 入射角 $\theta_s=45^\circ$ で、 $y=0$ cmの場合である。ここでは、ストリーミング γ 線に2成分あることが明瞭に表われている。

図-13は、ダクト径20 cm, 入射角 $\theta_s=45^\circ$, $y=0$ cmの場合、図-14はダクト径20 cm, 入射角 $\theta_s=33^\circ$, $y=0$ cmの場合、図-15はダクト径40 cm, 入射角 $\theta_s=33^\circ$, $y=0$ cmの場合である。いずれの場合も、ダクトをストリーミングする γ 線が2つの成分によって形成されていることを明瞭に読み取ることができる。

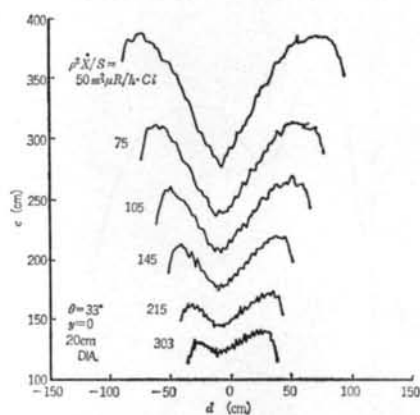


図-14 壁厚1 m, ダクト直径20 cmで $\theta_s=33^\circ$ の場合の $y=0$ 平面での等線量率曲線分布

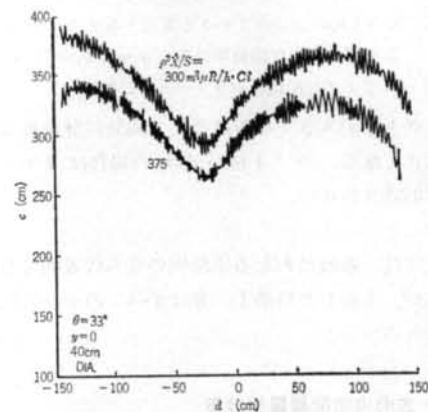


図-15 壁厚1 m, ダクト直径40 cmで $\theta_s=33^\circ$ の場合の $y=0$ 平面における等線量率曲線分布

§ 4. 考察

4.1 実験誤差

(1)ダクト入口の照射野の影響

本実験では、実験に用いる遮蔽壁周辺の空気によるスカイシャインの影響を除去するために、コリメータを用いてダクト入口周辺のみを照射するようにしている。このとき、照射野は γ 線のダクトストリーミングの種々の成分をすべて含むように十分広くなければならない。照射野の確認は、GM管を用いて遮蔽壁面上をサーベイして行なった。

その結果、遮蔽壁が厚く(152.4 cm)、ダクト径が大き(40 cm)、入射角が大き(60°)、ダクト入口—線源距離が小さい(200 cm)場合を除いて、照射野はダクト出口をも含むほど十分であることが確認された(図—16)。

照射野が十分でない場合については、ダクトが存在しないバルク遮蔽壁の場合の測定値を、バルク部貫通寄与分として加算し補正を行なった。

(2)実験建屋の影響

図—1の全体配置図で示すように、検出領域は屋内に、線源領域・遮蔽ブロックは屋外となっている。この塔屋は、検出器やデータ処理機器を保護するためのものである。したがって、コンクリートダクトの出口と検出器の間に、厚さ0.17 cmの建屋壁としての鉄板が存在する。この鉄板の影響を調べるために、同じ鉄板をダクト出口にもう一枚設置して、 d 方向分布を2つのダクト径に関して測定した。その結果、原実験の測定値より全体的に4%減少した数値を示した。

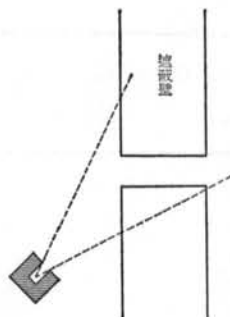
建屋の鉄板も、この付加した鉄板の影響と同等の影響があるものと考えられる。この建屋板による影響の補正を計測値に対して行なった。

(3)測定誤差

検出器の位置の測定誤差として、 c 方向が ± 1 cm、 d 方向が ± 0.5 cmと考えられる。 y 方向に関しては、検出器移動機構の“たわみ”の影響で ± 5 cm程度の誤差があった。

線源の位置の誤差は、入射角 θ_s で $\pm 0.3^\circ$ 、線源位置とダクト入口を結ぶ距離 ρ の誤差として ± 1 cm程度であった。この範囲で、線量率測定に有意な差は認められなかった。

次に、線量率の測定誤差について述べる。本実験に使った検出器の測定誤差は、 $\pm 2 \mu R/hr$ 程度とされている。これは、ポアソン分布事象のもつ統計的誤差からくるものである。また、電離箱に生じた電圧 E (mV)と実際の線量率 $\dot{X}(\mu R/hr)$ の関係は、



図—16 γ 線照射野

$$E = E_0 + b\dot{X} \quad \dots\dots(2)$$

であらわされ、 $b = 3.98 \pm 0.02$ (mV $\cdot$ hr/ μR)である。その直線性は、相関係数 $r^2 = 0.99998$ であるので、測定範囲($< 500 \mu R/hr$)内では統計誤差 $2(\mu R/hr)$ に比較して十分な精度と考えられる。

ダクトストリーミングの寄与による検出器側の空間の線量率を求めるためには、コリメータ等の線源条件を同一にして、次の2つの測定が必要である。

i)ダクトが存在する場合の線量率

ii)ダクトが存在しないバルク遮蔽壁の場合の線量率

前者の場合、観測される値はダクトが存在するための寄与 E_a (高圧電離箱による検出電圧の読み)、遮蔽壁周辺の空気によるスカイシャインによる寄与 E_s 、および自然バックグラウンド値 E_b (バルク壁透過分を含む)の総和である。後者では、スカイシャインによる寄与 E_s' 、および自然バックグラウンド値 E_b' の和である。

ここで、規格化線量率 $\frac{\rho^2 \dot{X}}{S}$ は、

$$\frac{\rho^2 \dot{X}}{S} = \frac{w\bar{f}}{b} \frac{\rho^2}{S} (E_a + E_s + E_b - E_s' - E_b') \quad \dots\dots(3)$$

b : 式(2)で定義される電圧—線量率換算係数

w : 鉄板の存在による誤差の補正(前項参照)

s : 線源の強さ(Ci)

$\bar{f}$: 検出効率補正

で表わされる。

ここで、 $(E_a + E_s + E_b)$ のもつ統計誤差は $(E_s' + E_b')$ のもつ統計誤差 $2 \mu R/hr$ と同等であると考えられる。

補正係数 $\frac{w\bar{f}}{b}$ は 0.25 ± 0.01 (4%)であるが、その誤差のほとんどは、検出器の検出効率 $\bar{f}$ によるものである。

ρ の誤差を $\pm 0.5\%$ 、線源 s の誤差(統計誤差)を4.8% (8.12 Ciの線源の場合)とすると式(3)は、

$\dot{X} = \frac{1}{b}(E_d + E_s + E_b - E_s' - E_b')$ ($\mu R/h$)	% error in $\frac{\rho^2 \dot{X}}{S}$
10	29.1
25	13.3
50	8.9
100	7.9
300	7.0
500	6.9

表—5 観測された線量率の誤差の評価

$$\frac{\rho^2 \dot{X}}{S} = \left\{ \frac{\rho^2}{4S} \pm 6.9\% \right\} \left\{ (E_d + E_s + E_b) - (E_s' + E_b') \pm 11.3 \right\} \quad \dots\dots(4)$$

ここで、11.3は線量率の統計誤差 $2(\mu R/hr)$ の $\sqrt{2}$ 倍に相当する検出器の読みの誤差である。この式より、測定値の誤差の大部分は補正係数の誤差6.9%によるものであり、それは線源強度測定誤差と検出効率の誤差とによっていることが分かる。

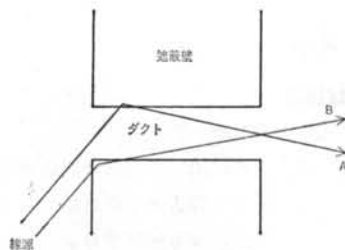
表—5は、代表的な線量率(ダクトによる寄与分)に対しての誤差を式(4)によって導いたもので、線量率が大きい程その誤差が小さいことが分かる。

4.2 考察

実験結果から明らかなことは、ダクトをストリーミングする γ 線には主に2つの成分が存在するということである。線量率分布の詳細な観察から、この2成分はダクト内壁散乱成分(図—17のA; wall scattering)および開口部周辺散乱成分(図—17のB; lip scattering)であると考えられる。

その根拠は、

- ①図—7で明らかなように、 γ が0に近いほど(ダクト中心軸を含む水平面に近いほど)2成分岐が顕著であること、



図—17 ダクトストリーミングの2つの成分

②d方向の線量率分布において明らかなように、2つのピーク間の距離はcにほぼ比例して大きくなる。各々の山のピークを直線で結ぶと $c=0$ 近傍で交点を結ぶこと(図—12および図—17参照)。

③入射角 θ_s が小さくなれば、図—17のAの成分がBに卓越してくる。これは、 θ_s が小さいほど線源が内壁を直視する面積が大きくなるためと考えられること、等である。この2成分は当然 γ 方向にもある程度分布している。それは図—9、図—10から、ダクト入口の任意の点がダクト出口を直視した視野に相当する範囲に分布するものと考えられる。

§ 5. まとめ

今回の実験から、ダクトに斜めに γ 線が入射した場合のストリーミングは、内壁散乱成分と開口部周辺散乱成分(図—17のA、B)の2つであると結論づけられる。

今後、所期の目的である γ 線のダクトストリーミング量を評価できる工学的手法の開発に当っては、この2成分に着目する必要があることが分かった。基本的には、この2成分を独立させてそれぞれの過程を再現できるモデルを作成し、今回の実験をベンチマークとしてとらえ、逆に実験値を定量的に説明し得るようにしなければならない。

<参考文献>

- 1) 近藤, 宮坂: 日本原子力学会誌 Vol. 19 (1977) p. 35