

しゃへい貫通部の 放射線漏えいに関する実験解析

Experiments and Calculations for Gamma Rays Streaming
through Penetration in Shielding Structure

八 卷 秀 雄* 福 島 穰**
Hideo Yamaki Yutaka Fukushima

内 田 俊 介** 北 爪 光 幸***
Shunsuke Uchida Mitsuyuki Kitazume

要 旨

水中中空直円筒からの γ 線のストリーミング効果について、幾何学的形状を系統的に変えた一連の実験を行ない、レイアナリシス法による計算コードで解析を行なった。

実験は日立教育訓練用原子炉(HTR)の実験プール中で、アクリル樹脂製の中空ダクトを用いて行なった。実験パラメータとしては、(1)ダクトの直径、(2)ダクトの長さ、(3)オフセットの位置、(4)オフセットの幅、の四つをとった。小形電離箱を用いてダクト出口面での γ 線線量率分布を測定した。

レイアナリシス法による計算はしゃへい体を透過する部分には線量再生係数を考慮し、線源としては炉心線源のみでなく、中性子捕獲 γ 線も考慮した。

実験値と計算値の比較の結果、両者がファクタ2以内で一致することが示された。

1. 緒 言

原子炉における放射線しゃへいの目的は、(1)原子炉の運転保守にたずさわる運転員の放射線被ばくを防止し、運転保守作業を安全かつ容易にすること、(2)各種機器設備などの放射線損傷あるいは放射線吸収による熱発生を防止することなどにある。

目的の(1)は保健物理的な問題と密接に関連し、直接人体に影響するため、運転保守の面からもあわせて検討しなければならない重要な問題である。一方、目的の(2)は機器の構造や強度、あるいは冷却といった問題に触れるので、これもじゅうぶんに検討されねばならない。(1)および(2)のいずれの目的を満たすためにも、あらかじめ原子炉内部およびその周辺での中性子束と γ 線束をできるだけ精度よく求めておくことが必要である。

現在、 γ 線および中性子に関して、しゃへい体を透過する際の減衰計算を行なうためには、数多くの計算コードが用意されており、実際のしゃへい計算においてもこれらの計算コードの中から、適当なものが選択され使用されている⁽¹⁾。計算コードを使用してしゃへい計算を行なう場合、しゃへい体の形状によって大きく2種の場合に分けて取り扱われるのが普通である。その1は線源と観測点の間に存在するしゃへい体形状が単純で、一次元の多重層として取り扱える場合である。この場合に用いる計算コードとしては、除去拡散法、輸送理論その他の方法による計算コードで信頼性の高いものが多く発表されており⁽¹⁾、実際にかんがりの精度が期待できる。一次元モデルからはずれるものも、混合物を仮定するなどの操作によって、第1の形状に帰することができる場合が多い。第2の場合は、しゃへい体が複雑な形状を呈している場合であり、このうち本論文で取り上げるストリーミング効果が特に重要である^{(2)~(6)}。

すなわち、原子炉の一次しゃへい体には配管、その他の貫通孔や、熱膨張のためのすき間などが設けられるため、このすき間や貫通孔から漏えいする放射線が問題となる。このようなストリーミング線はスポット状に高い線量率をもたらすことがあり、しゃへい設計上じゅうぶんな考慮が必要となる。普通、貫通孔やすき間は屈曲や段

を設けて、ストリーミング効果をできるだけ小さくするための工夫がこらされているが、このため、かえってその解析がむずかしいものになっている。

従来、こういったストリーミング効果を計算する適当な計算コードが見当たらず、経験式によって計算するのが普通であった⁽⁷⁾⁽⁸⁾。モンテカルロ法による計算コード⁽⁹⁾などが発表されているが、計算時間や計算機容量の問題で、実際にはじゅうぶんに使用することはできなかった。また、系統的に行なわれた実験データもあまり見られず、ストリーミング効果そのものについても不明な点が多かった。

沸騰水形原子炉では豊富に存在する炉心まわりの軽水が中性子のよいしゃへい体であるので、生体しゃへい外部に漏えいする放射線のうち、中性子束は低く、 γ 線の効果が問題となる。

筆者らは、日立教育訓練用原子炉(HTR)の実験プール中において、ストリーミング実験装置を用いて、水中中空段違い直円筒からの中性子と γ 線のストリーミング効果の測定を行なった⁽²⁾⁽³⁾。段違い直円筒の幾何学的条件を系統的に変えて一連の実験を行なうことにより、ストリーミング現象の形状に対する依存性を明らかにすることができた。

また、本実験のデータをもとに、レイアナリシス法による新しいストリーミングコードの計算結果の評価を行なった⁽⁷⁾。レイアナリシス法によるストリーミング計算コード^{(5)~(7)}は、モンテカルロ法などに比べて、はるかに短い時間で計算することが可能であり、かつ精度もじゅうぶんに高いものであることが判明した。

2. 実 験

2.1 実験のパラメータ

しゃへい体中に設けられた中空段違い直円筒(オフセットダクト)から漏えいする γ 線線量率は、一般に次に示す六つのパラメータに依存するものと考えられる。すなわち、

- (1) 線源(線源の形状、エネルギースペクトル、線源の角度分布などを含む)
- (2) しゃへい体の物質
- (3) ダクトの直径
- (4) ダクトの全長
- (5) オフセットの位置(段違いを設ける位置)

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所日立研究所

*** 日立製作所日立工場 工学博士

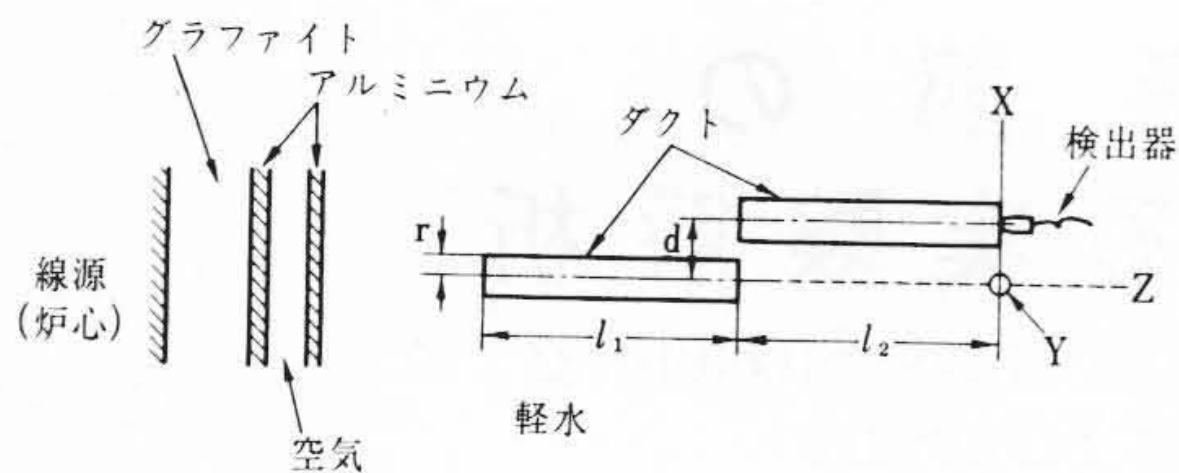


図1 線源とダクトの配置および実験パラメータ

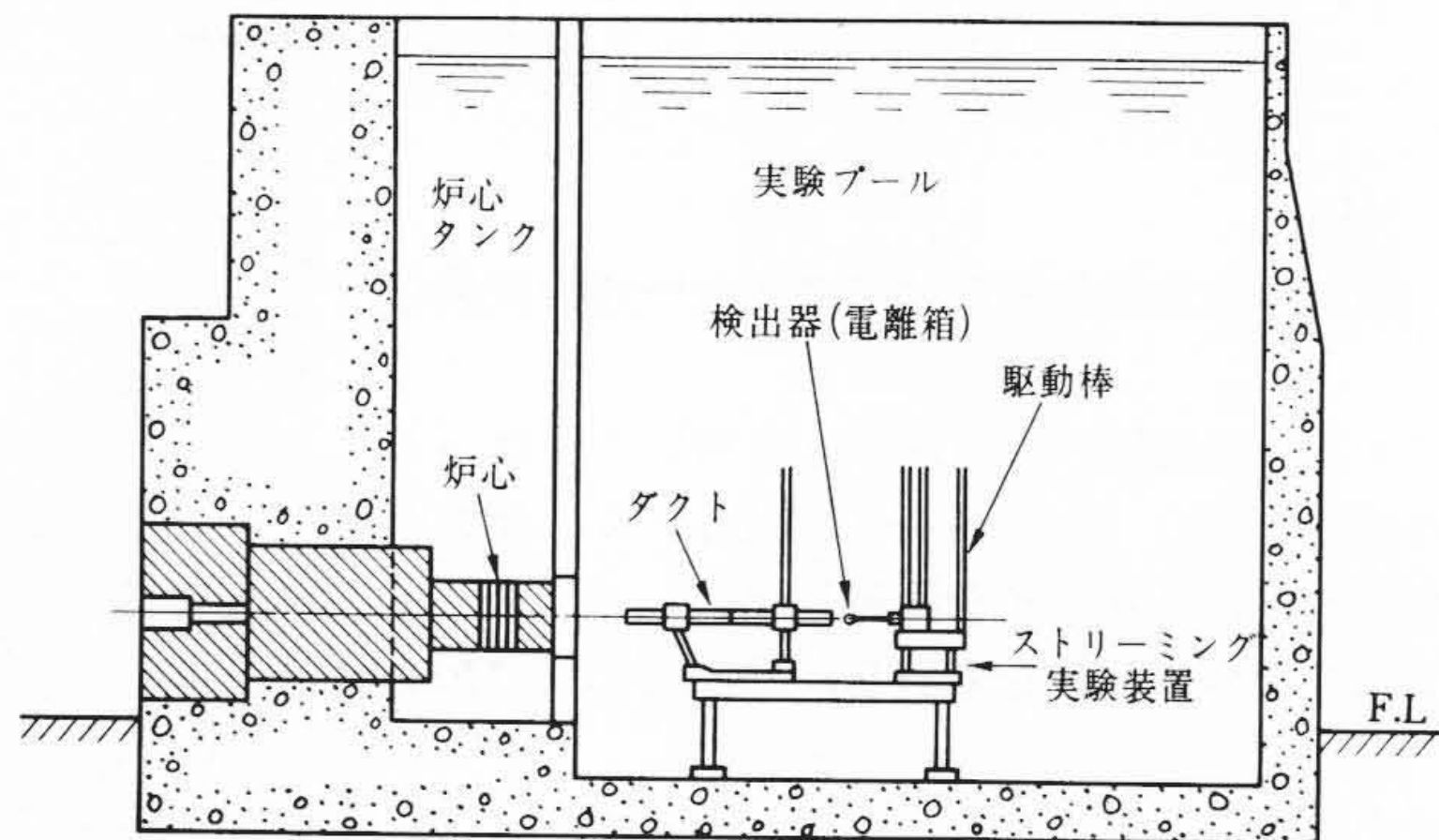


図2 実験装置の概要 (HTR)

表1 実験の幾何学的条件

	ダクト半径 (r)	ダクト全長 (l)	オフセットの位置 (l_1/l)	オフセットの幅 (d/r)
A	5.0 cm	200 cm	1/8, 2/8, 3/8 4/8, 5/8, 6/8 7/8	0~5
B	5.0 cm	100, 150, 200 250, 300 cm	1/2	0~5
C	2.5, 5.0, 7.5 10.0 cm	200 cm	1/2	0~5

(6) オフセットの幅 (段違いに置かれた2本のダクトの中心軸のずれの大きさ)

本実験では上記六つのパラメータのうち、(3)~(6)の段違い直円筒の幾何学的形状にかかわるパラメータを系統的に変え、漏えいする γ 線線量率の測定を行なった。すなわち、パラメータ(1)の線源についてはHTRの炉心を線源とすることで、パラメータ(2)のしゃへい体物質についてはHTRの実験プール中において軽水をしゃへい体とすることで、おのおの固定させた。

図1はHTR実験プール中における本実験の線源、ダクトおよび検出器の関係を示したものである。パラメータを示す量としては、図1の記号に従って、次のように表わすことにする。

(3) ダクトの半径 r (cm)

(4) ダクトの全長 $l=l_1+l_2$ (cm)

(5) オフセットの位置 l_1/l

(6) オフセット幅 d/r

ここに、 l_1 は炉心側ダクトの長さ、 l_2 は検出器側ダクトの長さ、 d は二つのダクトの中心軸間の距離である。

γ 線線量率の測定は図1のX軸に沿って行なわれたが、パラメータによるストリーミング効果の変化を検討するためには、しゃへい設計上最も重要であると考えられる最大線量率に注目することが得策であると考え、これとパラメータとの関係を中心に実験データの整理を行なった。

本実験において変えられたパラメータの変化範囲を表1に示す。ダクトの半径 $r=5.0$ cm, 全長 $l=200$ cm, オフセットの位置 $l_1/l=1/2$ の場合を標準とし、標準の場合に対してオフセットの位置だけを変えたものをA-シリーズ, ダクトの全長だけを変えたものをB-

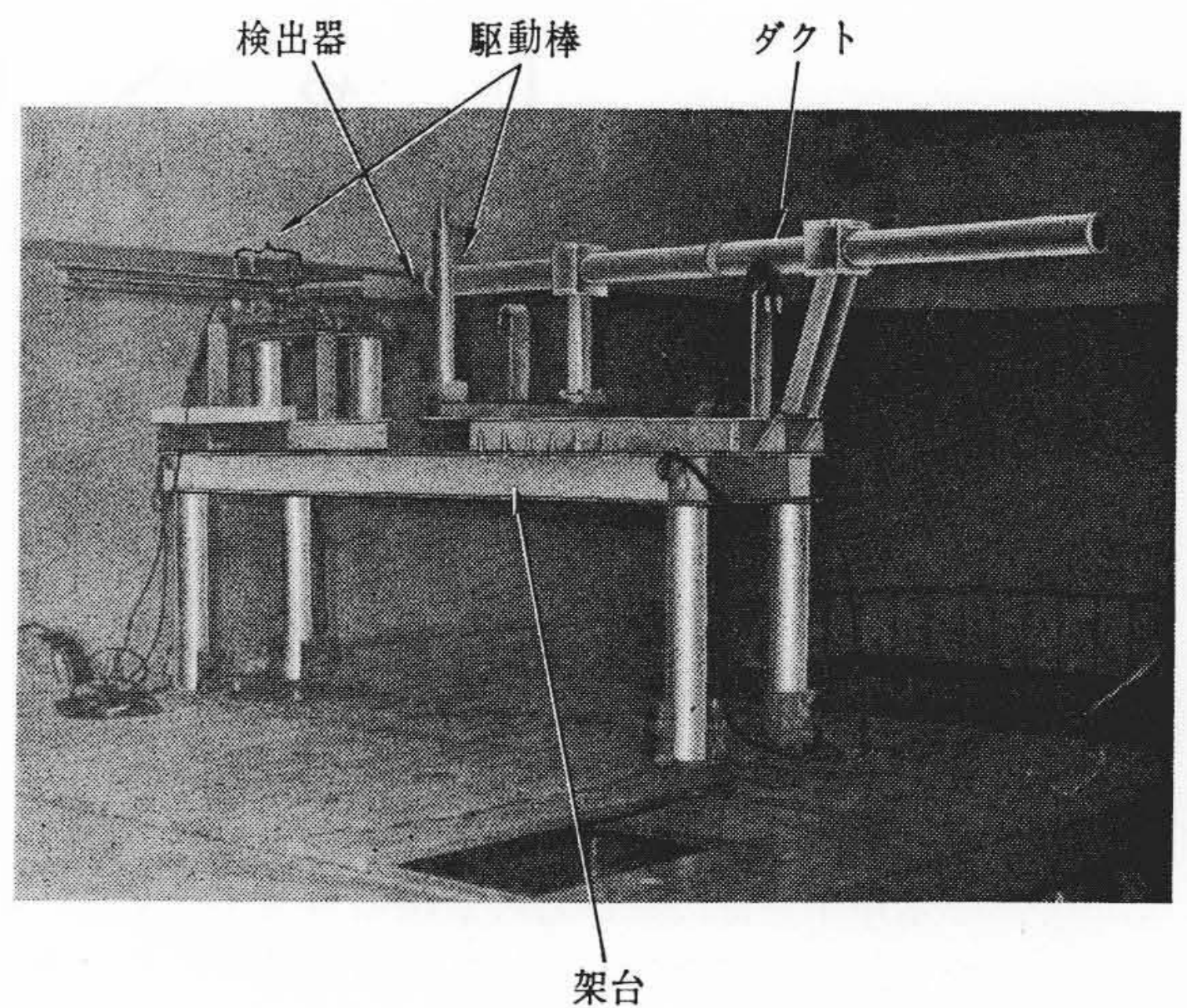


図3 ストリーミング実験装置

シリーズ, さらにダクトの半径だけを変えたものをC-シリーズと分けて実験した。A, B, C三つのシリーズとも、オフセット幅については0~5.0の範囲で変えて実験した。

2.2 実験装置

本実験は川崎市王禅寺の東京原子力産業研究所にある日立教育訓練用原子炉HTR(Hitachi Training Reactor)で行なわれた。HTRは最大熱出力100 kWのスィミングプール形原子炉である⁽¹⁰⁾。

HTRでは炉心のある炉心タンクとしゃへい実験用の実験プールが隣接しており、両者の間のアルミニウム製隔壁には断面が500×600 mmで厚さが200 mmのコリメータが設けられ、実験プールで炉心線源が利用できるようになっている。

図2はHTR実験プール内における実験装置、線源および検出器の配置の概要を示したものである。

実験の再現性と能率化のため、本実験では図2に示すようなストリーミング実験装置を使用した。本装置ではダクトと検出器を駆動棒によって動かすことにより、プール上からの遠隔操作でオフセットの幅を変えてダクト出口での線量率分布を測定することができた。

図3はストリーミング実験装置の概観である。

実験に使用したダクトはアクリル樹脂製で壁厚0.5 cmの中空円筒状のものである。

2.3 検出器

γ 線線量率の測定には、本実験用に作られた水封形の電離箱を使用した。電離箱の特性は次のとおりである。

形	式	防水式シリンダ形
壁	材	グラファイト 厚さ 9 mm
容	積	約 50 cc
測	定 範 囲	$10^{-2} \sim 10^2$ R/h

電離箱からの微小電流信号は約10 mのケーブルでプール上に取り出され、振動容量形微小電流電圧計によって読み取られた。

電離箱からの電流信号は γ 線線量率に比例している。同条件下でのガラス線量計の測定値をもとにして、電流から γ 線線量率への変換係数を決定し、絶対値を求めた。

3. 計 算

3.1 計算原理

ダクトの長さがその直径に比べてじゅうぶんに長い場合、ダクトからストリーミングする γ 線のうちアルベド散乱による成分は無視できるほど小さいことが知られている。本実験の場合、ダクト形状

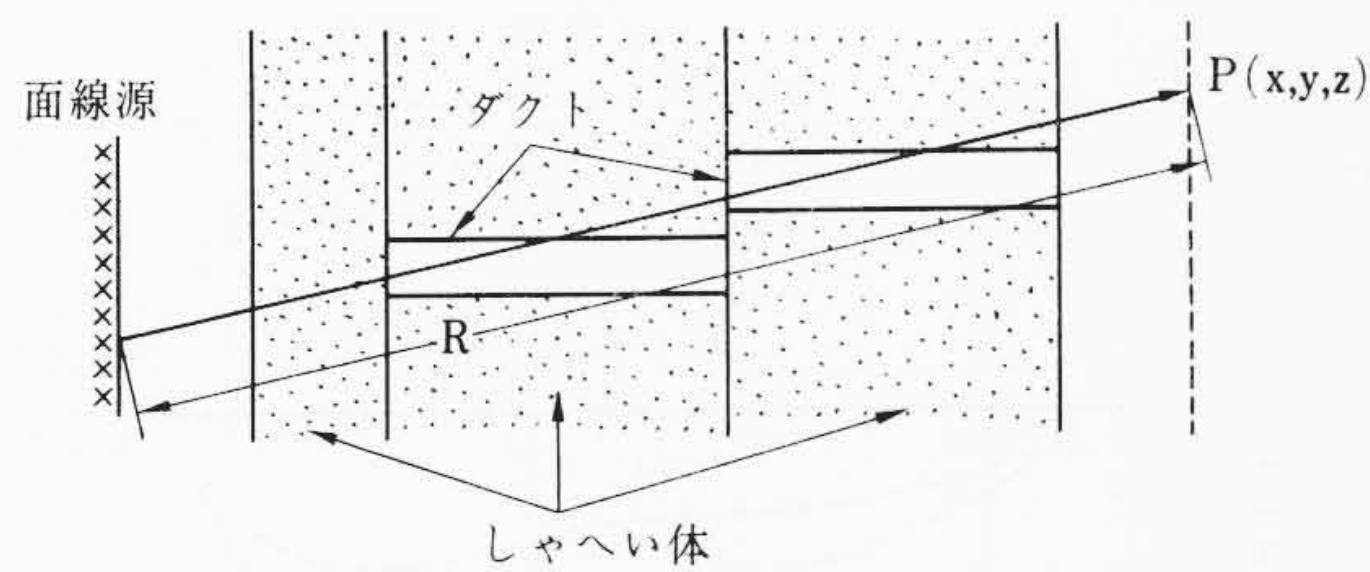


図4 計算モデル

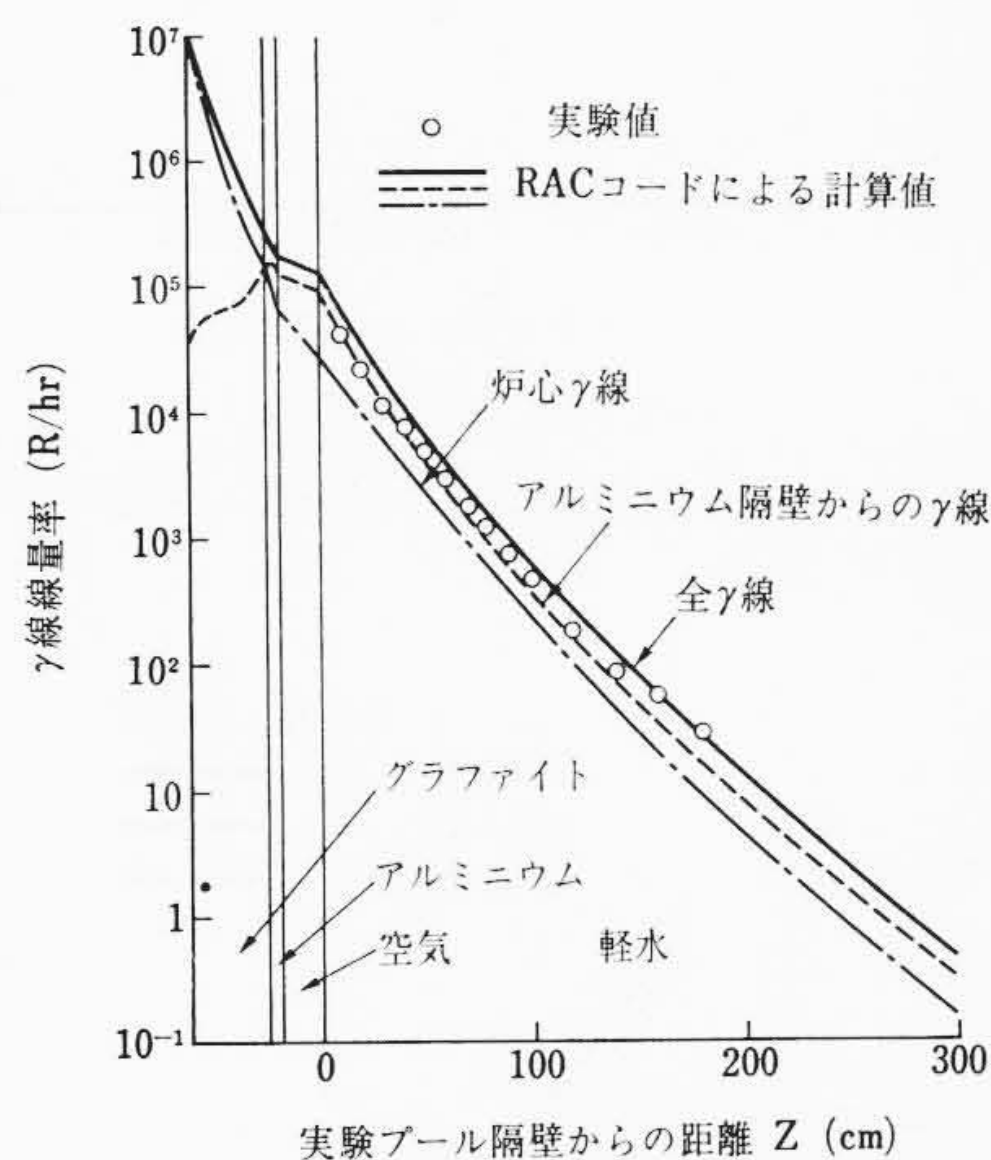


図5 HTR 実験プール内のγ線線量率分布

がほぼこの条件を満たしているため、ストリーミングγ線線量率の計算はアルベド散乱を考慮しないレイアナリシス法を用いて行なうことができると考えられる。

本計算では図4に示すような計算モデルを考えた。線源としては矩形(くけい)の平板線源を仮定し、しゃへい体中に含まれる中空直円筒の位置と形状は任意に変えられる。

レイアナリシス法によって与えられる線源面上の微小面積要素から検出点 $P(x, y, z)$ までの点減衰核を線源面について積分すれば、 $P(x, y, z)$ 点での線量率が得られる。本計算では、しゃへい体を透過する成分について、その透過距離に応じて、線量再生係数を乗じ、しゃへい体中での散乱効果を考慮してある。線量再生係数としてティラー形の指数関数近似を用いると、 $P(x, y, z)$ 点での線量率は次式で表わされる⁽¹¹⁾。

$$D(x, y, z) = \sum_i \iint_{\text{plane}} dA S_i \left(\frac{n+1}{2} \cos^n \theta \right) \cdot K_i E_i \mu_i^{\text{air}} \cdot \frac{1}{R^2} \cdot [A_i \exp \{-(1+\alpha_i) \mu_i R'\} + (1-A_i) \exp \{-(1+\beta_i) \mu_i R'\}] \quad (1)$$

ここに、

$D(x, y, z)$: $P(x, y, z)$ 点の線量率

dA : 線源の微小面積要素

S_i : エネルギー群 i の線源強度 ($\gamma/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)

$\left(\frac{n+1}{2} \cos^n \theta \right)$: 線源の角度分布

θ : 線分 $dA \cdot P$ と線源面法線のなす角

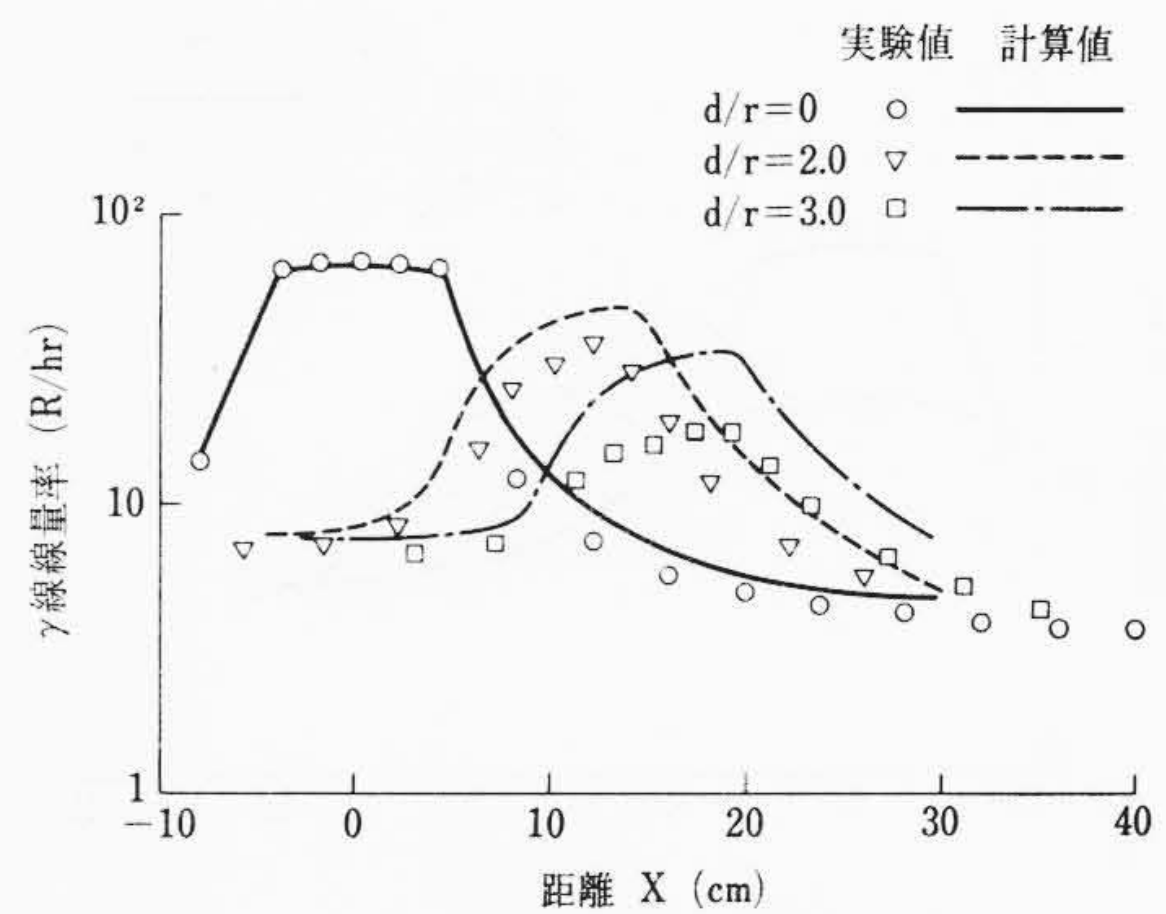
n : 角度分布の係数

K_i : 線量変換係数 ($\text{R/h}/\text{MeV}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)

E_i : エネルギー群 i の平均エネルギー (MeV)

R : dA と P の間の距離 (cm)

R' : R のうちしゃへい体を透過する距離 (cm)



($r=5.0 \text{ cm}$, $l=200 \text{ cm}$, $l_1/l=1/2$)

図6 ダクト出口面でのγ線線量率分布

μ_i : しゃへい体の全吸収係数 (cm^{-1})

A_i, α_i, β_i : ティラー形線量再生係数の係数⁽¹²⁾

(1)式を HITAC 5020F 用にコード化したものが RAST-1 および RAST-2 である。RAST-1 は LGH コード⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾を改良したもので、オフセットのない場合に使用できる。RAST-2 は図3のようなオフセットダクトストリーミングの計算に使用できる。

本計算では線源条件の検討の際、RAST-1 を用いた以外、RAST-2 を使用した。

3.2 計算条件

計算においては実験条件をできるだけ忠実に再現しておく必要がある。本計算では、ダクトの条件だけでなく、線源条件についても同様が必要である。本実験では、HTR の炉心を線源としたため、最初 RAST-2 の計算でも炉心の核分裂γ線、炉心構造材の中性子捕獲γ線などを炉心表面に位置する板状線源と仮定して計算した。

図5は RAC コード⁽¹⁵⁾を用いて計算された HTR 実験プール内のγ線線量率分布を示したものである。炉心γ線による寄与とアルミニウム隔壁の中性子捕獲γ線による寄与およびその和を示している。ほかの寄与は無視できる程度である。アルミニウム隔壁からのγ線はダクト入口では炉心からのγ線の約2倍であるが、これは炉心とアルミニウム隔壁の間が厚さ約35 cm のグラファイト層であるという HTR の特異な形状によるものである。

以下の RAST-2 の計算では、(1)炉心、(2)アルミニウム隔壁の二つの線源について計算し、その結果を加え合わせた。

(1)式の角度分布の係数 n は、線源はすべて等方的にγ線を放出するという考えから、ゼロとした。γ線線源のエネルギースペクトルは4群に分けて計算された。

4. 実験結果の検討

4.1 ダクト出口でのγ線線量率分布

本実験では表1に示したすべてのシリーズについて、ダクト出口でダクト軸に垂直な面上の水平方向(すなわち、図1のX軸上)のγ線線量率分布を測定した。このうち、標準になるものと一つの典型的な場合をここに示すことにする。

図6は本実験の標準とした、ダクト半径5.0 cm、全長200 cm、オフセットの位置1/2の場合のX軸上のγ線線量率分布を示したものである。X軸は炉心側ダクトの中心軸上を原点にとってある。オフセット幅 d/r を変えると、線量率のピークの位値が動かされた検出器側ダクトとともに移動する。

RAST-2 で計算された線量率分布は実験値と同様の減衰傾向を示している。絶対値での両者の差も最大でファクタ2であり、この種の計算の精度としてはかなり良いと思われる。

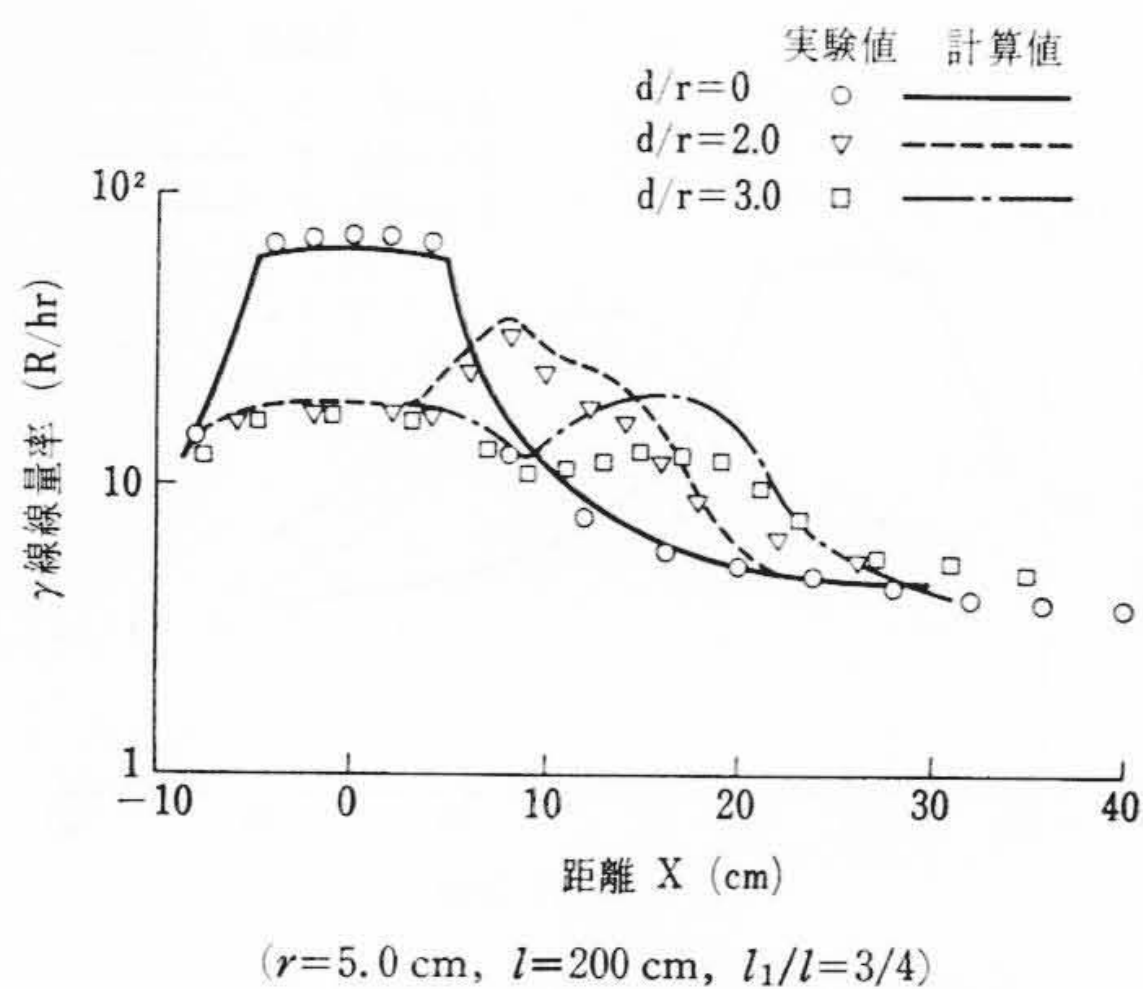
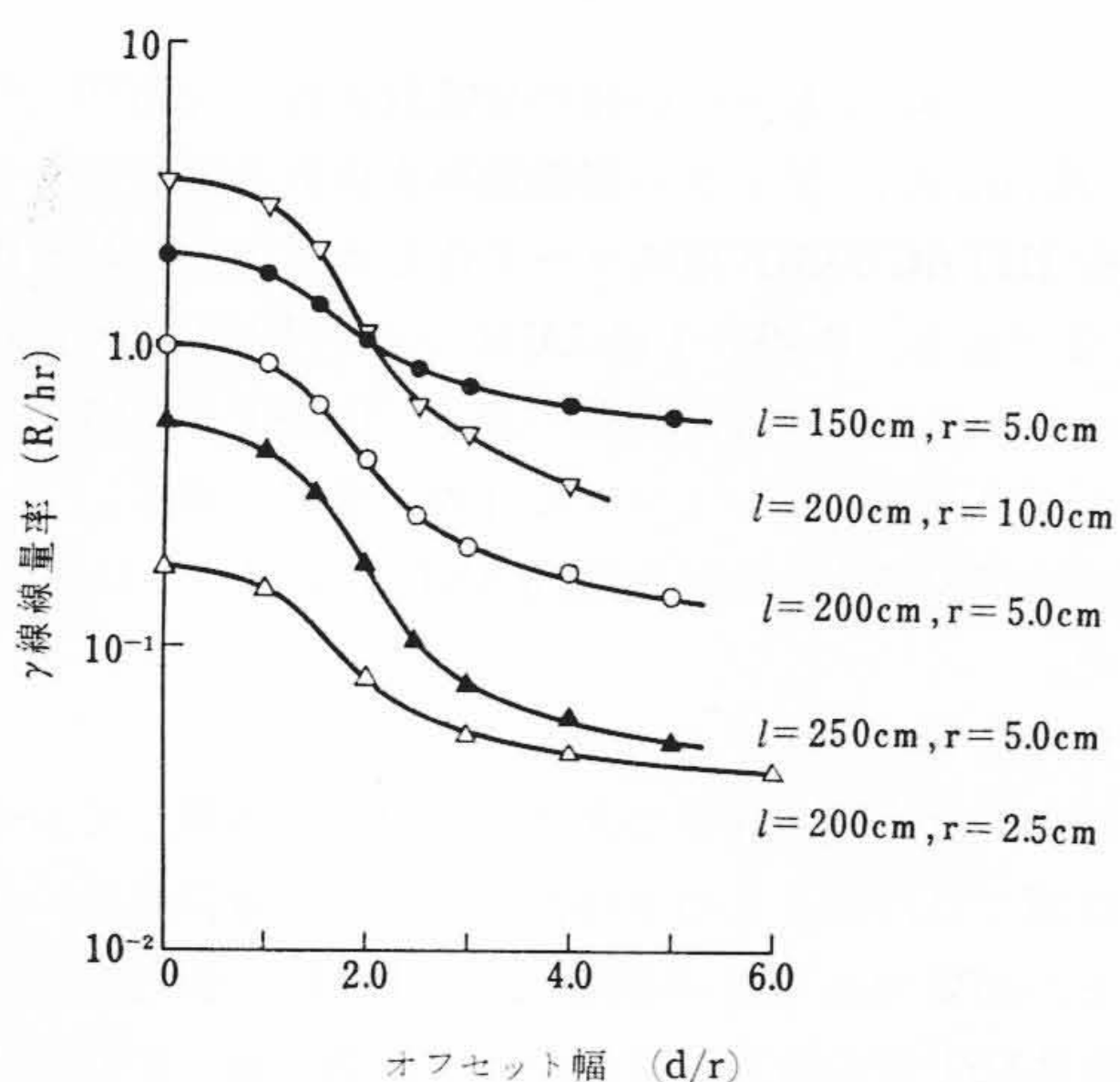
図7 ダクト出口面での γ 線線量率分布

図8 オフセット幅と最大漏えい線量率の関係

図7には、ダクト半径5.0 cm、全長200 cm、オフセットの位置3/4の場合の線量率分布を示している。オフセットの位置が3/4になるとオフセット幅 d/r を変えた場合、炉心側のダクトがかなり長いので、その背後の線量率が図6の場合ほど減少せず、 d/r が3.0の場合にはピークが両ダクトの背後にできる。

RAST-2の計算結果は実験値と非常によく似た傾向を示し、 $dr=3.0$ では二つのピークが現われる点も同じである。絶対値でのずれも最大でファクタ2である。

4.2 パラメータ量と最大漏えい線量率

γ 線のストリーミング効果を検討するうえで、最も重要な量は最大漏えい線量率（すなわち、4.2節の分布でのピーク値に相当する）であると考えられる。本節では、この量がパラメータによっていかに変化するかを検討する。

4.2.1 オフセット幅の効果

オフセットの幅を大きくとることによって、漏えい線量率を小さくすることができることはじゅうぶんに知られている。ここでは実験値から、定量的にその効果の確認を行なった。

図8はオフセット幅と最大漏えい線量率の関係を示したものである。図に示されたものはいずれもオフセットの位置が1/2のもので、図のパラメータとして全長をとったものはダクト半径が5.0 cmであり、半径をとったものは全長が200 cmである。

ダクト半径あるいは全長によって若干の差異はあるが、いずれもオフセット幅 $d/r=5.0$ では、ほぼ一定値を示している。 $d/r=2.0$ 付近で最大漏えい率の変化が最も急である。ここでは、二つのダクト（炉心側ダクトと検出器側ダクト）がお互に重なりはじめる。オフセットダクトによってストリーミング効果を抑制するためには、二つのダクトを重ねないようにすることが必要であ

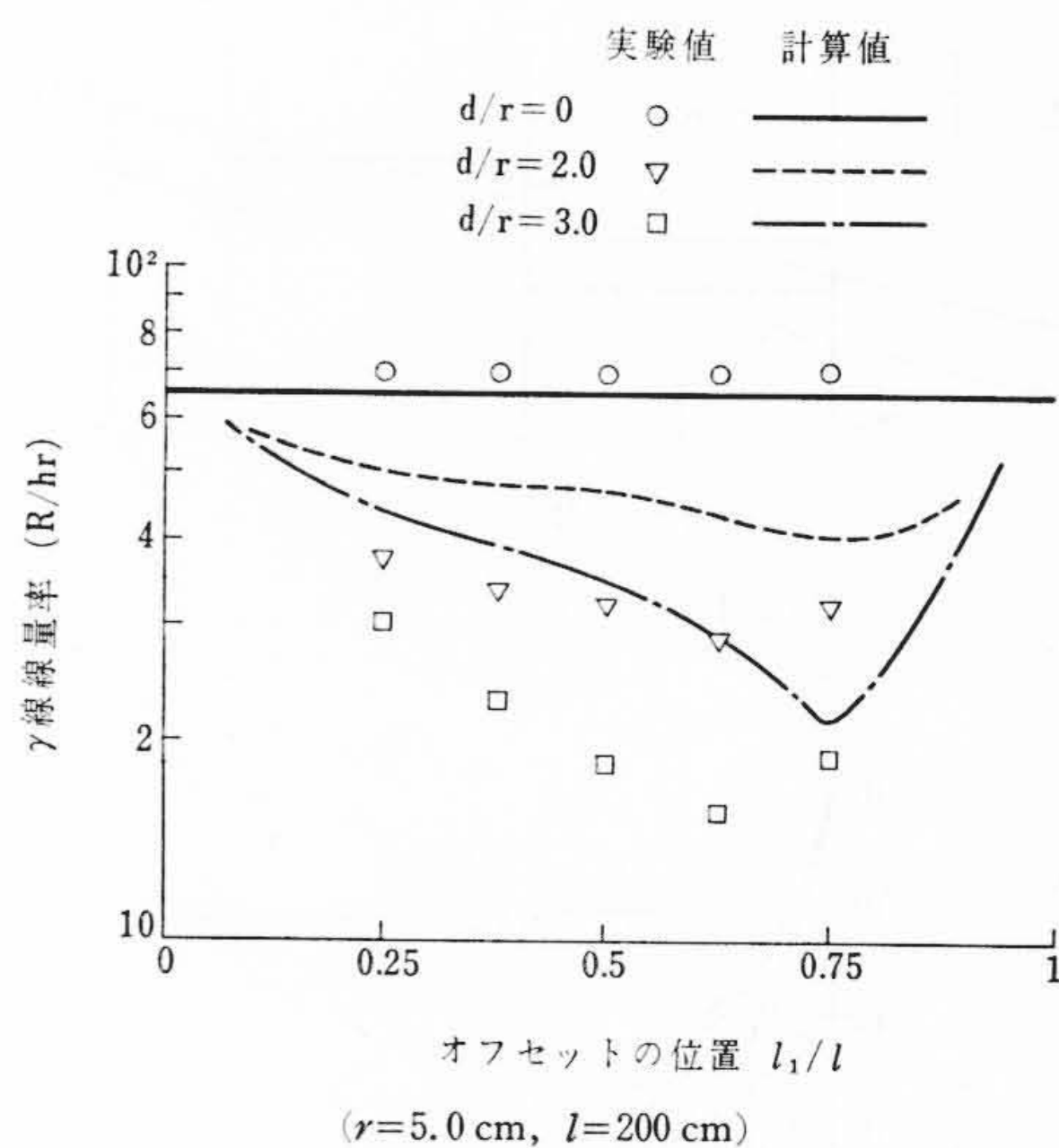


図9 オフセットの位置と最大漏えい線量率の関係

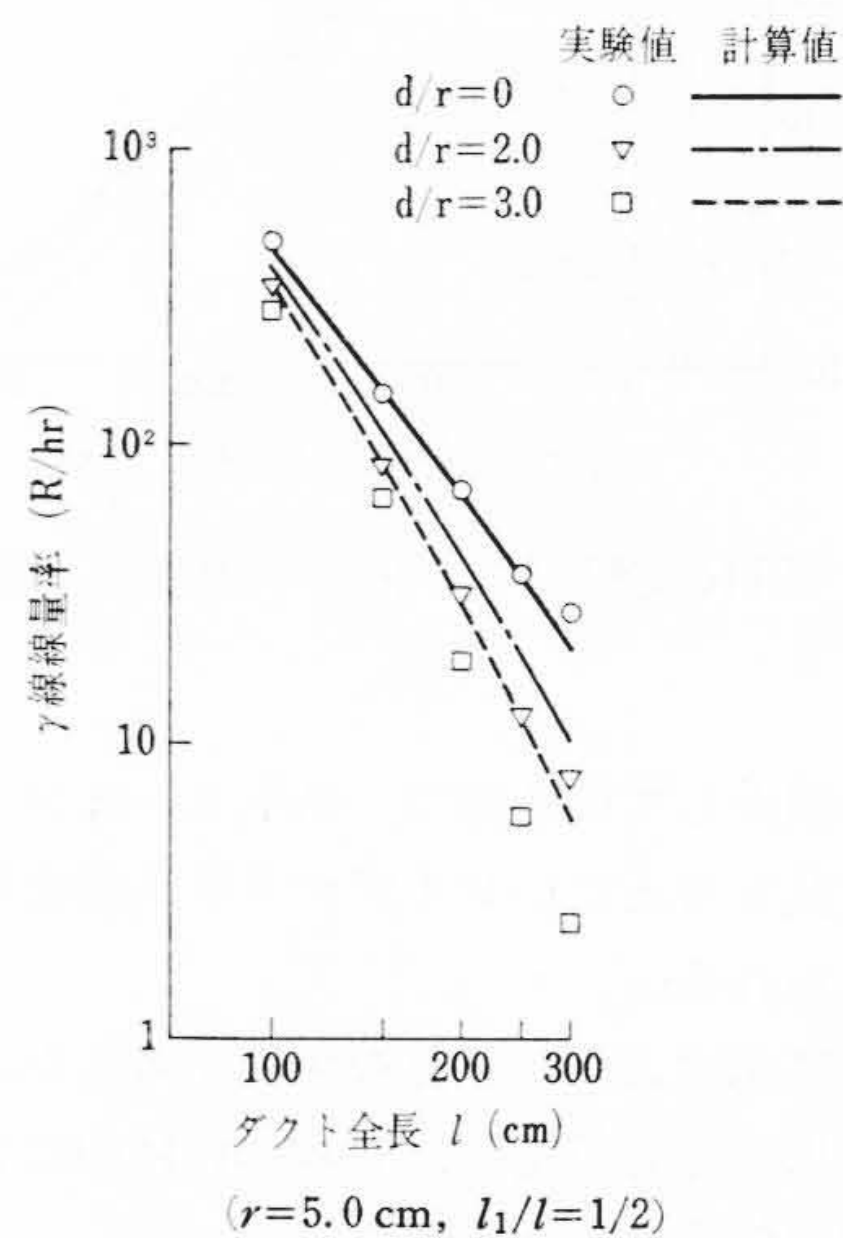


図10 ダクト全長と最大漏えい量の関係

る。また、あまりオフセット幅 d/r を大きくしても、しゃへい効果はあがらない。 $d/r=3.0$ では、一定値の2倍以内になっている。

4.2.2 オフセット位置の効果

オフセットを設ける位置もオフセット幅と同様にストリーミング効果を抑制する重要なパラメータである。

図9はオフセットの位置と最大漏えい線量率の関係を示したものである。ここでは、ダクト半径は5.0 cm、長さ200 cm（表1のケースA）である。

実験値では、オフセットの位置 l_1/l が0.625の場合、最大漏えい線量率が最小になっている。オフセットをダクト中央に設けるより、むしろいくぶん後方に設けたほうがしゃへい効果が大きくなることがわかる。しかし、オフセットの位置 d/r が大きくなりすぎると前節の図7に示したような二つのピークが現われ、最大漏えい線量率は l_1/l とともに増大する。実験値では $l_1/l=0.625$ が本条件での最適値である。

RAST-2で計算した結果も図9に示している。オフセットの幅がゼロの場合、実験値と計算値の一致は非常によい。オフセットの幅 $d/r=2.0$ および $d/r=3.0$ では計算値が実験値より大きい。しかし、その差は2倍を越えることはない。計算値では最小値がオフセットの位置 $l_1/l=0.75$ にある点が計算値と少し異なる。

4.2.3 ダクト長さの効果

ダクトの長さが増せば最大漏えい線量率は減少する。図10は、

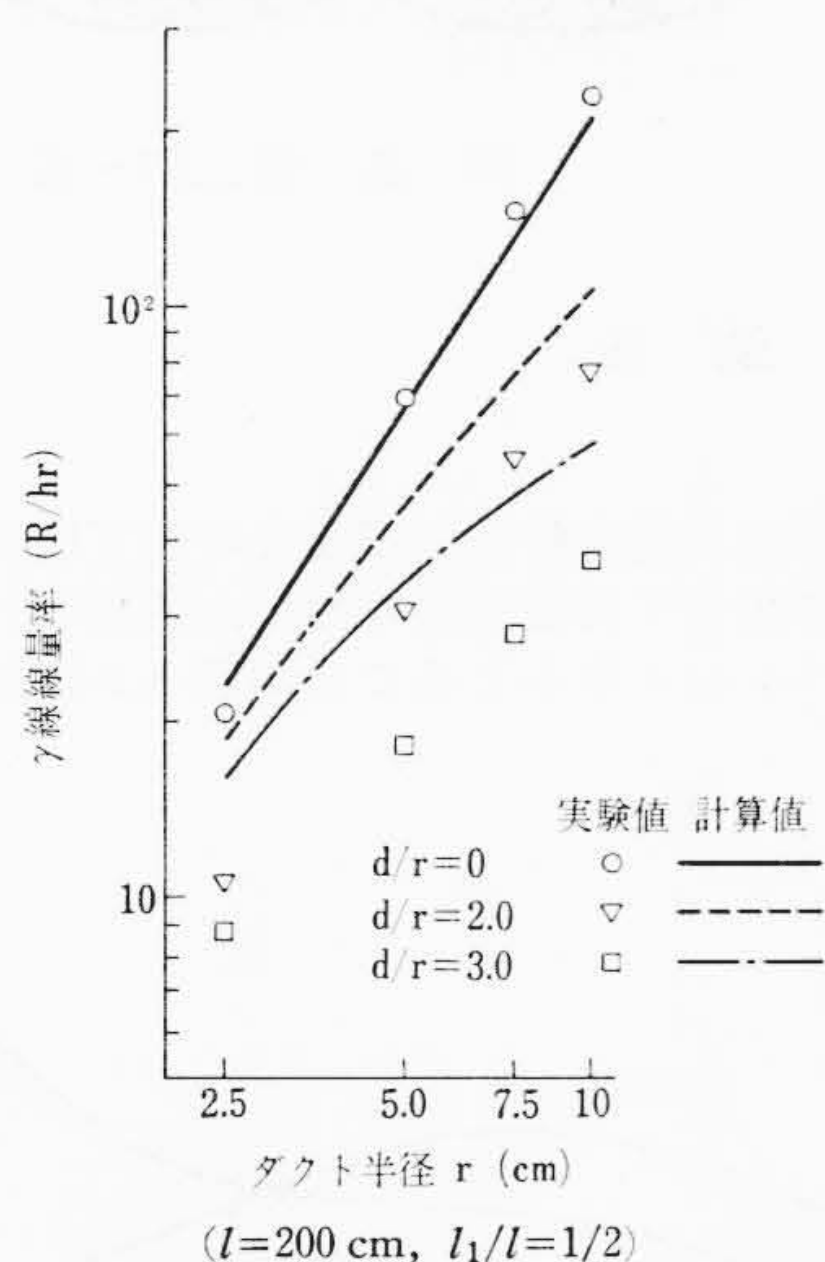


図11 ダクト半径と最大漏えい線量率の関係

ダクトの半径5.0 cm, オフセットの位置 $l_1/l=1/2$ の場合のダクト全長と最大漏えい線量率の関係を示している。

オフセットのない場合, 実験値はほぼ $l^{-2.6}$ に比例して減衰する。ライン・オブ・サイト法ではダクトからストリーミングする成分は $l^{-2.0}$ に比例するが, ダクトまわりの軽水から漏れ込む線量率の効果によって, $l^{-2.0}$ から $l^{-2.6}$ へずれるものと思われる。漏れの効果はダクトの短い場合ほど大きい。

オフセット幅 $d/r=2.0$ および $d/r=3.0$ の場合は, オフセットのない場合より, さらに減衰が大きい。

RAST-2 で計算された結果は, いずれも実験値より大きな値を示すが, ファクタ2以内では一致する。オフセットのない場合の一致はとくによい。

4.2.4 ダクト半径の効果

図11はダクトの半径と最大漏えい線量率の関係を示したものである。これらは, ダクト全長200 cm, オフセットの位置 $l_1/l=1/2$ の場合の実験値である。

オフセット幅がゼロの場合, 最大漏えい線量率は $r^{1.9}$ に比例する。これはライン・オブ・サイト法によって得られる $r^{2.0}$ にかなり近い。オフセット幅 $d/r=2.0$ および $d/r=3.0$ の場合には, それぞれ $r^{1.3}$ および $r^{1.0}$ に比例する。

RAST-2 の計算結果では, $d/r=0$ の場合に実験値との一致が最もよい。 $d/r=2.0$ および $d/r=3.0$ では計算値は実験より大きくなるが, その差はファクタ2を越えない。

5. 結 言

軽水中の中空直円筒による γ 線ストリーミングの実験を, ダクトの幾何条件を系統的に変えて行ない, 実験結果を最大漏えい線量率について, 各パラメータによって整理した。また, レイアナリシス法を用いたストリーミング計算コード RAST-2 を用いて, その計算結果を実験値と比較した。

これらの比較および検討の結果 RAST-2 を用いて計算した結果は若干過大評価気味であるが, 大体ファクタ2以内の精度は得られることが明らかになった。

実際にしゃへい計算を行なう場合には, 本報に述べたように, まず多重層透過計算コード(RACあるいはMAC-RAD)で計算し, 線源の分布およびその絶対値を明らかにし, その後 RAST-2 を用いればよい。

最後に, 本実験にあたり, 原子炉の使用にご便宜を図っていただいた東京原子力産業研究所所長西堀博博士, RAST-2 の開発にご尽力いただいた日立製作所中央研究所大串明氏, 本実験の全般にわたりご指導いただいた日立研究所河原誠二氏および実験の遂行にご協力くださった日立研究所佐藤主税氏に感謝する。

参 考 文 献

- (1) 八巻, 布施, 豊田: 日本原子力学会誌, 10, 249 (1968)
- (2) H. Yamaki, Y. Fukushima, S. Uchida: Pro. Conf. on the Physics Problems of Reactor Shielding, AERE-R-5773, 738 (1968)
- (3) H. Yamaki, Y. Fukushima, S. Uchida: J. Nucl. Sci. Technol., 6, 424 (1969)
- (4) A. Chilton, G. Hudleston: Nucl. Sci. Eng., 17, 3 (1963)
- (5) V. P. Mashkovich, V. A. Klimanov: At. Eng., 20, 127, (1966)
- (6) V. P. Mashkovich, et al: ibid, 20, 416 (1966)
- (7) T. Rockwell: Radiation Shielding Design Manual: TID 7004 (1959)
- (8) J. G. Yevick: Fast Reactor Technology-Plant Design, 452, M.I.T. Press (1966)
- (9) R. E. Maerker, F. J. Muckenthaler: Nucl. Sci. Eng., 27, 423 (1967)
- (10) K. Kiryu, S. Terasawa: Hitachi Review, 12, 5 (1963)
- (11) A. Ohgushi, M. Kitazume: J. Nucl. Sci., Technol., 5, 564, (1968)
- (12) E. P. Blizard, et al: Reactor Handbook, Vol. III, Part B, Shielding, 114, Interscience Publishers (1962)
- (13) M. Sindo, et al: Nucl. Sci. Eng., 27, 450 (1967)
- (14) M. Kitazume, et al: J. Nucl. Sci. Technol. 4, 11 (1967)
- (15) 日本原子力船研究協会 原船協 45 (1963)