

プルトニウムの取扱いに関する放射
線外部被ばく線量の計算法の指針

1973年5月

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松4-33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 技術開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to:Technology
Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation, 4-33 O-aza-Muramatsu, Tokai-mura, Naka, Ibaraki-ken, 319-11, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development
Corporation)

安全専門委員会

委員長 天 沼 倧 殿

安全専門委員会へ過去に提出された核燃料使用計画書に記載されるプルトニウムによる放射線外部被ばく線量の評価法が統一を欠いていたため、同委員会にこの問題の検討小委員会をもうけ、調査・検討を行なった結果、ここに本指針を作成しました。小委員会の活動は昭和47年10月27日に開始され、昭和48年4月28日に終了しました。

今後のプルトニウムを含む燃料の使用計画に対する外部放射線被ばく線量の評価、ならびに新たなプルトニウム取扱い施設および機器の設計のための外部被ばく線量の計算等への適用を考えていただければ幸いです。

なお、本指針は今後の多くの経験の積重ねによって、よりよいものに改良されることも合わせて希望いたします。

昭和48年4月28日

検討小委員会

湯 本 録 三

五十嵐 孝 行

増 田 純 男

三 島 毅

要 旨

プルトニウム燃料の取扱いに伴うガンマ線および中性子による作業者の外部被ばく線量の評価に関して、その計算方法がRoeschの基本式および高次化プルトニウムの取扱対策委員会報告書等に基づいてまとめられた。また、これらの計算手法のFACOM-230/35による計算プログラムの利用についてもまとめられた。

利用できるデータとして、プルトニウム燃料部所有プルトニウムの実効精製日およびアメリカン現蓄積量などが計算されている。また、プルトニウムの放射線特性データ、放射線遮蔽に関する基礎データ、およびプルトニウム燃料部における作業工程条件等が付表に示されている。

目 次

要 旨

1. まえがき	1
2. 計算式	6
2.1 エックス線およびガンマ線	6
2.2 中性子	7
2.3 酸化物および密度による希釈効果	8
2.4 被ばく線量	10
3. 遮蔽効果	12
3.1 基本概念	12
3.2 遮蔽材と遮蔽効果	13
3.3 実用的な遮蔽効果	15
4. 被ばく線量の計算方法	17
4.1 基本的考え方	17
4.2 被ばく線量計算法	17
4.3 作業解析および計算例	19
5. 計算プログラム	21
5.1 DANIEL	21
5.2 VIDAL	25
5.3 TSERCH	27
6. プルトニウム燃料部所有プルトニウムの基礎定数	35
6.1 納入プルトニウムの実効精製日	35
6.2 ^{241}Am の蓄積量および基本ガンマ線量率	35
7. あとがき	37
8. 参考文献	40

付 録

A	プルトニウムおよびウランの放射線特性	43
B	放射線束と線量率との変換表	48
C	物質の放射線吸収係数等および遮蔽効果	52
D	プルトニウム燃料部における工程の作業解析	67
E	被ばく線量の計算例	75
F	有限形状線源による計算式	78

1. まえがき

熱中性子炉におけるプルトニウムの利用という観点から、プルトニウムとウランの混合酸化物燃料の開発を目的として、1965年にプルトニウム燃料開発室が開設され、プルトニウム燃料の製造加工が開始された。初期のプルトニウムは ^{239}Pu の同位元素に占める比率が高かったため、プルトニウムのガンマ線および中性子による外部被ばくは、プルトニウムの取扱い、すなわち燃料の製造、加工、輸送、貯蔵等において、それほど重要な問題でなかった。

しかし、新しい型の動力炉燃料の開発という観点から、1972年に第2開発室が開設され、プルトニウムが多量に使われるようになり、一方商業用熱中性子動力炉の運転実績と共に利用できるプルトニウムは徐々に高燃焼度のものとなってきた。これらのプルトニウムの利用がそれに従事する者の放射線外部被ばくを潜在的に高めるようになったことが認識されてきた。

高燃焼度プルトニウムはTable 1.1^{1,2)}に見られるように、 ^{239}Pu が50%代になり、 ^{239}Pu 以外の同位元素が約40%を占めることになる。これらの同位元素の濃度増加はプルトニウムを扱う施設のガンマ線および中性子線量はいずれも増加することになり、被ばく管理上の問題となる。

プルトニウムのガンマ線エネルギー・スペクトルはプルトニウム・エネルギーの関数である、すなわち原子炉型、炉内の位置、および全照射量等に依存する。燃焼度に対応するプルトニウム同位元素組成は、代表的な軽水動力炉について計算例が図 1.1 および図 1.2¹⁹⁾に、また表 1.1 には代表的な燃焼後の実測値例が示されている。高燃焼度プルトニウムからのガンマ線量率は主に ^{238}Pu によるもので、比ガンマ線量率は ^{239}Pu からのものより約100倍、 ^{240}Pu からのものよりも約70倍も高い。また、 ^{241}Pu の壊変に伴う娘核種(^{241}Am , ^{237}Np)のガンマ線がプルトニウムの化学分離後の時間に関係して増加することになる。さらに、高燃焼度のプルトニウムになると ^{238}Pu の娘核種の寄与を考慮する必要がでてくるかも知れない。特に ^{208}Tl は2.6 MeVのガンマ線があるため、厚い遮蔽が要求されるであろう。

高燃焼度プルトニウムからの中性子線量率はガンマ線と同様にプルトニウムの同位元素組成に大きく依存する。自発性核分裂からの中性子発生収率は ^{238}Pu が最も高く、 ^{242}Pu , ^{240}Pu がそれに続く。その上、中性子収率はプルトニウムおよびその不純物の化学形態に影響される。プルトニウムからのアルファ粒子がBe, C, O, F, Mg, Al等の軽元素と反応して中性子収率が増加する。酸化プルトニウムは酸素(PuO_2 中の ^{18}O)との(α, n)反応で、金属系のプルトニウム量に比べて50~100%ほど、線量率が増加することになる。 PuO_2 における自発性核分裂および(α, n)反応による全中性子収率は ^{238}Pu が ^{242}Pu によるものよりも約10倍、 ^{240}Pu によるものよりも15倍ほど高い。しかし、幸いにして商業的に産られる UO_2 燃焼燃料のプルトニウム組成中の ^{238}Pu 濃度は低くおさまっている。

高燃焼度プルトニウムからのガンマ線量率は前述のように ^{241}Am の衰変に従い高くなるが、実質的な遮蔽技術の適用によって、プルトニウム取扱い時の放射線量率を容認されるレベルに下げることが可能である。

第2開発室のグローブボックスにおいてはガンマ線に対する遮蔽が施されているため、被ばく線量率に占めるガンマ線と中性子線量との割合は半々程度になっていて、中性子線量率の比重がかなり高くなってきた。中性子に対しては実質的な遮蔽技術の適用が困難なため、その線量率の低減にはやっかいな問題が含まれている。

上述のプルトニウムの取扱いに関する放射線外部被ばく線量率の計算法は早くから海外において研究され、Roesch³⁾によってプルトニウムの表面線量率について半実験的な基本式が提唱された。その後、いくつかの実験および解析が他の研究者によって追従され、その基本式の適用性が確認された。^{4,5,6)}

当東海事業所のプルトニウム燃料部においても、1969年以来、主として $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2$ の混合酸化物の製造、加工という観点から、プルトニウムによる放射線量率に関する実験がいくつか実施されてきた。^{7,8,9,10)}また1970年2月には“高次化プルトニウムの取扱対策委員会”が発足し、^{11,12)}第2開発室のATRラインおよびFBRラインの被ばく対策が講じられた。これらの実験はプルトニウム燃料部で所有する代表的なプルトニウムについて実施されたもので、いずれもRoeschの基本式で十分説明がついたので、同施設の被ばく線量率の計算に適用できることが確認された。

第2章には、Roeschの基本式に基づき、それに付随する線量率の計算式が、第3章には、実際的な被ばく線量率の評価および被ばく線量の減少対策に必要な遮蔽効果について記述されている。第4章は、具体的な作業現場での被ばく線量の計算法について、第5章には、この種の計算に適用できる電子計算機を使用しての計算プログラムについて記述されている。第6章は、現在プルトニウムの月別の ^{241}Am 蓄積量等が示されている。

付録Aには計算基本式の導出の基礎となるプルトニウムの放射線特性表を、付録Bには放射線と線量率の変換表を、付録Cには遮蔽効果の基礎となる物質の放射線吸収係数等がまとめられている。また、付録Dにはプルトニウム燃料部の被ばく線量の計算に必要な工程の作業条件が、付録Eには同部における被ばく計算の1例が示されている。付録Fには有限形状線源による計算式が示されている。

表 1.1 代表的なブルトニウムの同位元素組成^{1,2)}

原子炉	燃焼度 (MWD/MTU)	同位元素組成 a/o					
		²³⁸ Pu	²³⁸ Pu	²³⁹ Pu	²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Pu	²⁴² Pu
Yankee	8,000	4.0×10 ⁻⁷	0.144	87.0	9.56	3.06	0.208
Yankee	13,000	1.0×10 ⁻⁶	0.34	80.7	12.7	5.59	0.669
Yankee	24,000	3.0×10 ⁻⁶	1.00	67.7	18.9	10.0	2.51
Yankee	38,000	8.0×10 ⁻⁶	21.5	56.4	21.9	13.8	5.77
Dresden	20,000	1.4×10 ⁻⁶	0.403	69.55	21.46	6.862	1.719
Shippingport	20,000	1.4×10 ⁻⁶	1.06	51.2	28.9	11.0	7.78
Saxton CoreIII	30,000	-	0.355	60.322	30.760	7.171	1.392
Saxton CoreIII	35,000	-	0.474	56.882	31.925	8.797	1.922
Saxton CoreIII	40,000	-	0.585	52.343	33.762	10.579	2.730
Saxton CoreIII	43,000	-	0.689	54.565	28.889	12.649	3.207
Saxton CoreIII	53,000	-	0.770	56.655	24.523	14.248	3.804

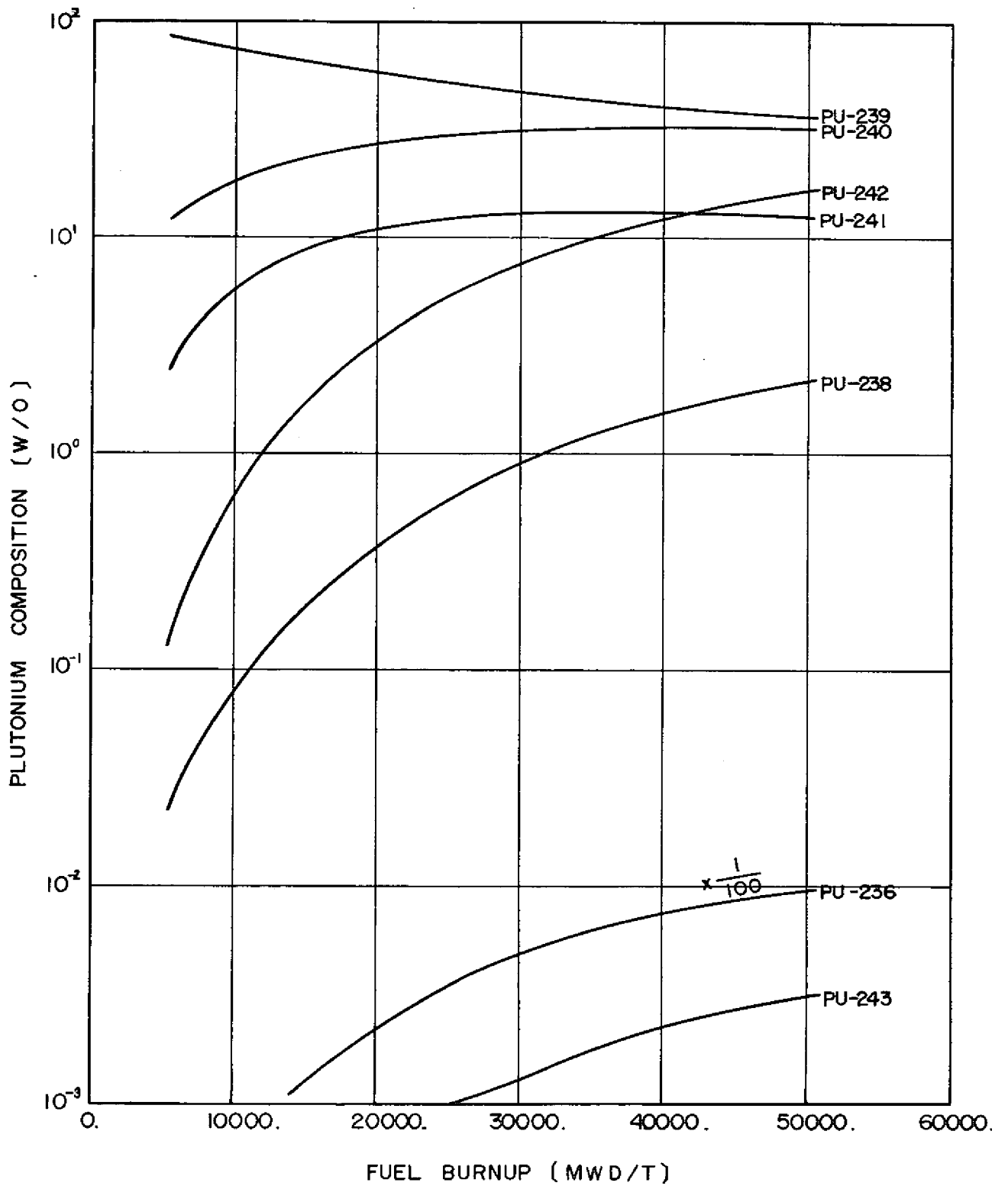


図 1.1 BWR燃料のプルトニウム同位元素組成¹⁹⁾

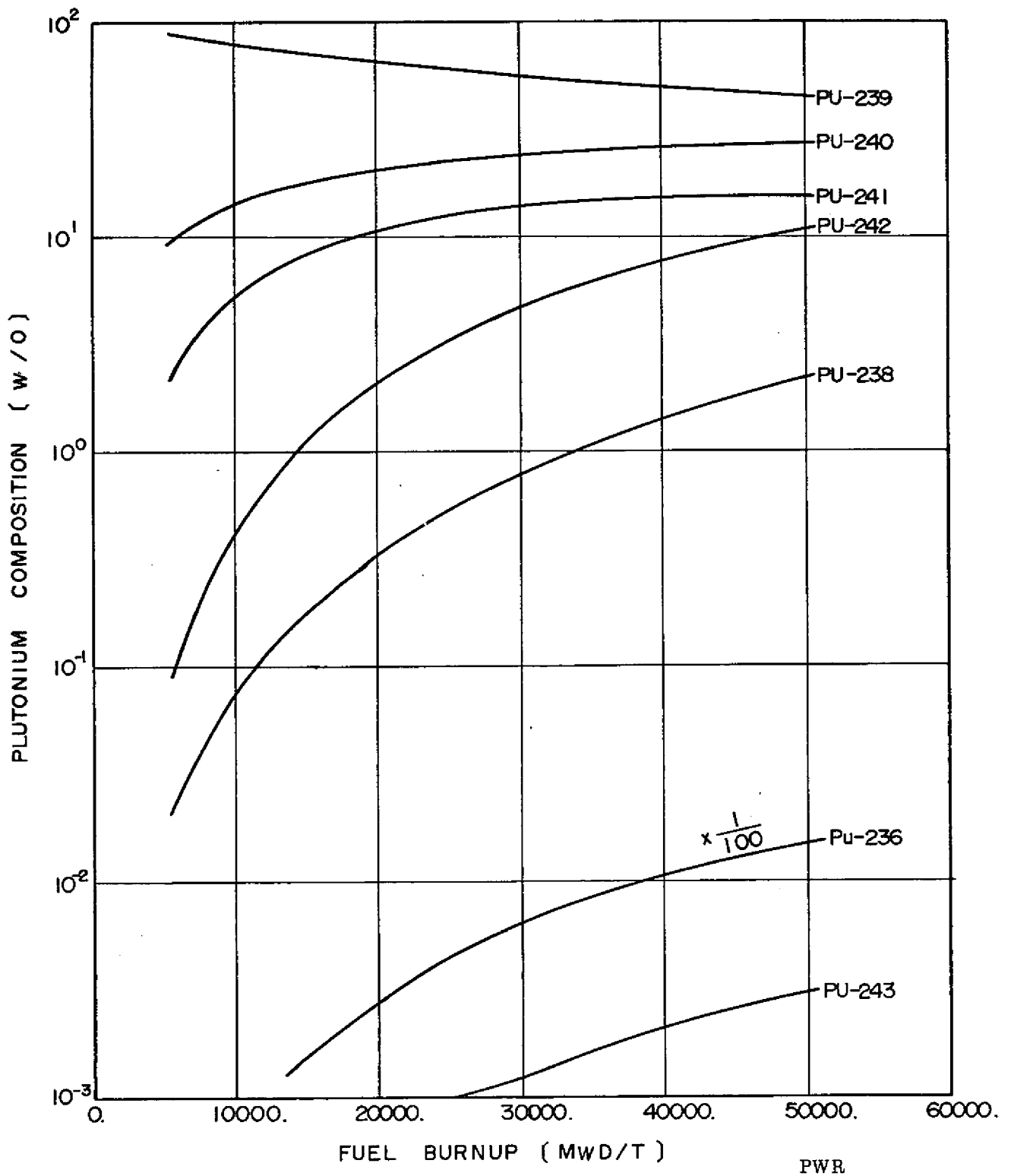


図 1.2 PWR燃料のプルトニウム同位元素組成¹⁹⁾

2. 計 算 式

プルトニウムの取扱い，すなわち，燃料製造，加工，輸送，貯蔵等のガンマ線および中性子による外部被ばく線量の計算は，これから述べるように，当面 Roesch らの^{3,4,5,6)}基本式に基づくことが，最も簡便でかつ实际的であるようだ。従って，以下の計算式はその基本式を中心にして記述される。ただ留意すべきことは，この種の計算式が万能でないことで，適用限界を十分把握しておくことにある。

2.1 エックス線およびガンマ線

1) 線源強度および表面線量率

次の計算式は無限厚のプルトニウムからの表面線量率として導かれている。無限厚とはプルトニウム金属で 0.10 cm，PuO₂ 酸化物で 0.95 cm 程度である。¹³⁾

イ. エックス線 プラスガンマ線

$$D_{X+\gamma} = 960 P_{48} + 0.98 P_{49} + 4.7 P_{40} + [0.19t + 17(1 - e^{-0.102t})] \times P_{41} + 0.30 P_{42} \quad (2-1)$$

ただし， $t \leq 14$ 年

ロ. ガンマ線 ($E > 20$ KeV)

$$D_{\gamma} = 7.8 P_{48} + 0.075 P_{49} + 0.069 P_{40} + [0.01 + 0.10t + 16(1 - e^{-0.102t})] \times P_{41} + 0.11 P_{42} \quad (2-2)$$

ただし， $t \leq 14$ 年

ここに，

$D_{X+\gamma}$: プルトニウムのエックス線およびガンマ線表面線量率 (Rad/hr)

D_{γ} : プルトニウムのガンマ線表面線量率 (Rad/hr)

t : プルトニウムの化学分離後の経過日数 (days)

P : プルトニウムの同位元素比率

添数字

1 桁目：同位元素の質量数の下 1 桁目の数字を示す。

2 桁目：元素番号の下 1 桁目の数字を示す。

2) 空間線量率

次の計算式は，プルトニウム線源の表面からの距離 (R) に対して線源の断面積 (A) が小さいものとして導かれている。

$$D_{X+\gamma}(R) = \frac{A}{2\pi R^2} \times D_{X+\gamma} \quad (2-3)$$

$$D_{\gamma}(R) = \frac{A}{2\pi R^2} \times D_{\gamma} = \left[1.24 P_{235} + 0.02 P_{237} + 0.011 P_{240} + 0.018 P_{242} + 0.016 P_{254} \cdot t + 2.55(1 - e^{-0.102t}) P_{241} \right] \frac{S}{r^2} \quad (2-4)$$

ただし、Rは線源の幾何学的寸法よりも十分な距離があること。

ここに、

- $D_{X+\gamma}(R)$: プルトニウムからのエックス線およびガンマ線の空間線量率 (Rad/hr)
- $D_{\gamma}(R)$: プルトニウムからのガンマ線空間線量率 (Rad/hr)
- R : 線源表面から作業員までの距離 (cm)
- A : 作業員から見た線源の投影断面積 (cm^2)

プルトニウム燃料部における実験から、実際のガンマ線量率は式(2-3)よりも式(2-4)で表現されることが確認された。^{8,9)}

以上の計算式の導出に基本となるプルトニウムの放射線特性の基礎定数を付録Aに示す。また、プルトニウム線源の幾何学的形状が十分大きくなっていく場合(燃料集合体等)は付録Fに示すような有限形状線源の計算式の適用を考える必要が生じるかも知れない。

2.2 中性子

1) 線源強度

1. プルトニウムの自発性核分裂による中性子

$$S_n = 3400 P_{48} + 0.03 P_{49} + 1020 P_{40} + 1700 P_{42}, \quad (2-4)$$

ロ. PuO_2 中の ^{18}O との (α, n) 反応による中性子

$$S_{\alpha n} = 14000 P_{48} + 45 P_{49} + 170 P_{40} + 2.7 P_{42}, \quad (2-5)$$

ここに、

S_{sn} : プルトニウムの自発性核分裂により発生する中性子数 (n/sec·g of Pu)

$S_{\alpha n}$: PuO_2 中の (α, n) 反応により発生する中性子数 (n/sec·g of Pu)

2) 表面線量率

線源形状を球形と考え、かつ中性子のエネルギーを1~2MeVとして、次式が得られる。

$$D_n = 3.06 \times 10^{-4} (S_{sn} + S_{\alpha n}) \times M^{1/3}, \quad (2-6)$$

ここに、

D_n : PuO_2 の中性子表面線量率 (Rem/hr)

M : プルトニウムの重量 (g)

3) 空間線量率

点線源の考え方から、空間線量率の次式が得られる。

$$D_n(R) = 1.39 \times 10^{-4} (S_{sn} + S_{\alpha n}) \times M / 4\pi R^2, \quad (2-7)$$

ただし、Rは線源の幾何学的寸法よりも十分な距離があること。ここに、 $D_n(R)$ は PuO_2 の中

$$= (0.193 P_{235} + 0.0575 P_{237} + 0.0172 P_{240} + 0.0186 P_{241}) \frac{M}{r^2}$$

性子の空間線量率 (Rem/hr)。

上述の計算式の導出の基礎となったプルトニウムからの中性子収率等の定数は付録 A にまとめられている。また、プルトニウムの形態が十分大きい場合は、ガンマ線と同様に付録 F に示す有限形状線源の計算式の適用が考えられる。

2.3 混合酸化物および密度低下によるプルトニウムの希釈効果

この効果は自己吸収の大きいガンマ線についてのみ考えられる。

1) プルトニウム金属系と PuO_2 酸化物

上述の計算式は主として、金属系の実験が基礎となっているようで、酸化物の場合はその計算式の修正を必要とするかどうか。前述のように、金属系の無限厚は 0.1 cm であり、 PuO_2 のそれは 0.95 cm であると報告されている¹³⁾。金属系は線源の厚さはほとんど無視されるが、酸化物になると自己吸収の減少分が線量率の増加となる。しかし、線源の断面積に占めるプルトニウムが少なくなるので、それだけ線量率の減少となる。したがって、プルトニウムの同位元素組成、線源の形状、および被ばく量観測点に依存して線量率の大小が変動するものと考えられる。Faust⁴⁾の実験では酸化物の方がいくらか線量率は高くなると報告されているが定量的に示されるほどの差はないようである。また、プルトニウム燃料部における実験ではすべて^{7, 8, 9, 10)} PuO_2 について、前述の計算式が確認されている。したがって、金属系と酸化物との線量率の差は実験誤差内にあるようなので、酸化物への適用は差支えないものと考えられる。

2) $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2$ の UO_2 によるプルトニウムの希釈

UO_2 は PuO_2 に較べて線量率がそれほど高くないので、 $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2$ の混合酸化物は UO_2 によるプルトニウムの希釈効果が当然考えられる。その効果は、増田らの実験によると UO_2 の含有率に従って線量率は直線的に減少するとされている。一方、Faust⁵⁾の実験によると、次式で示されるように減少率はゆるやかである。

$$D_{\text{MS}} = D_{\text{SF}} [0.13 (1-x)^{0.75} + x^{0.75}] \quad (2-8)$$

ここに、 D_{MS} : $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2$ のガンマ線の表面線量率 (Rad/hr)

D_{SF} : PuO_2 のガンマ線の表面線量率 (Rad/hr)

x : $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2$ 中の PuO_2 の比率 (w/o)

両者の比較を図 2.1 に示す。後者の実験結果には UO_2 のバックグラウンドと自己吸収の影響が出ているようである。被ばく線量の評価で安全側を考えるならば、後者の実験式が控目となる。

3) プルトニウムの密度低下によるガンマ線量率

プルトニウムの金属系は、純金属か Pu-Al 等の合金かによって、また PuO_2 でも粉末かペレットかによって、単位体積中に含まれるプルトニウム量が異ってくる。一般に密度が下がれば、ガンマ線の自己吸収が少なくなるので、その分だけ線量率は増えることになる。しかし、

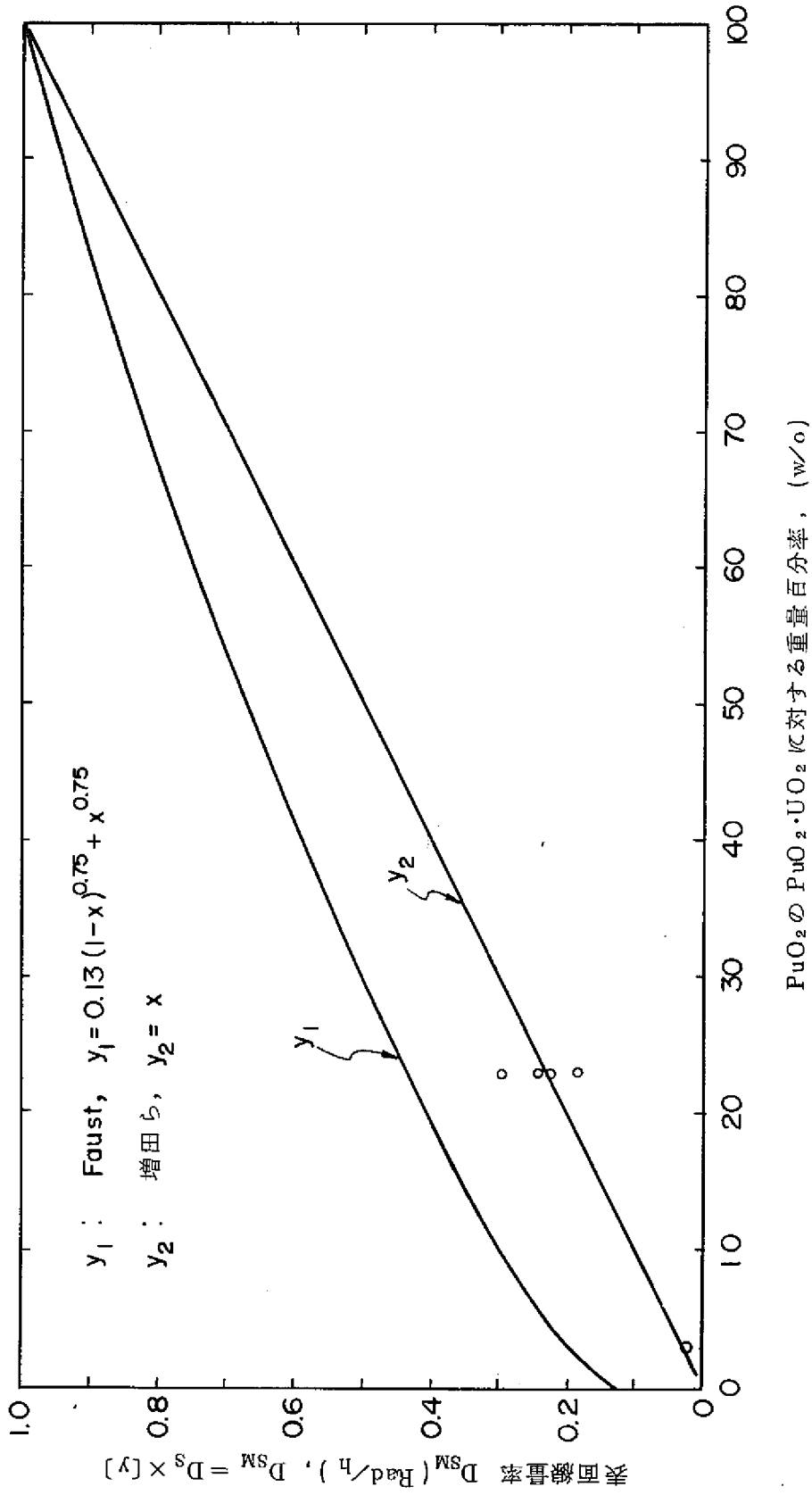


図 2.1 混合酸化物 ($PuO_2 \cdot UO_2$) の表面 r 線量率の UO_2 による減少効果

7~10) プルトニウム燃料部における実験で見られるように、 PuO_2 粉末から $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2$ ペレットまでの種々の形態では式(2-4)でよく表現できるものと報告されている。これは次のように解釈される。すなわち、密度の減少は、自己吸収の減少によって線量率を増加させる。一方、線源表面積(投影断面積)に占めるプルトニウムが少なくなり、その分だけ線量率が減少する。この両者が実験上相殺されて、式(2-4)は事実上 PuO_2 等の酸化物系にも適用できるようである。

しかし、プルトニウム溶液系は上述の計算式ではその適用性が十分確認されていない。プルトニウム燃料部の経験によると、 PuO_2 酸化物系に較べてガンマ線量率は高くなるようである。これは線源の自己吸収効果が少なくなるためと考えられ、それはプルトニウムの濃度によって変わるものと考えられる。これらの現象(線源の自己吸収と形状効果)を厳密に取扱うためには付録Fに示す Rockwell¹⁴⁾の有限形状線源の計算式、GAMBIA¹⁵⁾およびその他の計算プログラムを適用しなければならない。なお、上述の計算式を使用するならば十分な安全係数を考える必要があるであろう。

2.4 被ばく線量

上述の計算式は主としてプルトニウム線源の基本式について述べられてきた。ここで、放射線環境場で作業に従事する作業者の外部被ばく線量を考える場合、その線量は線源と作業者に存在する遮蔽材の種類、厚さならびに作業時間に依存する。したがって式(2-4)および式(2-7)から、外部被ばく線量は単純に次式で表わされるものとする。

$$E_{\gamma} = D_{\gamma}(R) \cdot C \cdot K \cdot T = \frac{A \cdot D_{\gamma}}{2\pi R^2} \cdot C \cdot K \cdot T \quad (2-9)$$

$$\begin{aligned} E_n &= D_n(R) \cdot T \cdot K = \frac{1.39 \times 10^{-4} (S_{sn} + S_{an}) M}{4\pi R^2} \cdot K \cdot T \\ &= 1.11 \times 10^{-5} \frac{(S_{sn} + S_{an}) M}{R^2} \cdot K \cdot T \end{aligned} \quad (2-10)$$

また、加工工程の燃料棒および集合体のような線源形状が細長いものについては次のような三島⁹⁾らによる修正式が提案された。

$$E'_{\gamma} = \frac{D_{\gamma} \cdot d}{2\pi R} \tan^{-1} \left(\frac{L}{R} \right) \cdot C \cdot K \cdot T \quad (2-11)$$

$$E'_n = 1.11 \times 10^{-5} \frac{(S_{sn} + S_{an}) \rho \cdot d}{R} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{L}{R} \right) \cdot K \cdot T \quad (2-12)$$

ここに、

E_{γ}, E'_{γ} : 作業者のガンマ線による単一被ばく線量 (rem)

E_n, E'_n : 作業者の中性子による単一被ばく線量 (rem)

- \bar{W} : $\text{PuO}_2 \cdot \text{UO}_2$ 中の PuO_2 含有率 式 (2-8)
- K : 遮蔽効果に伴うガンマ線または中性子の減衰率 (第3章に詳述)
- T : 作業時間 (hr)
- d : 線源の幅 (cm)
- L : 線源の長さ (cm)
- ρ : 線源中のPuのスミア-密度 (g/cc)

なお、プルトニウムの取扱いで考えられる遮蔽材および遮蔽効果については第3章に詳述される。また、作業者の実際的な外部被ばく線量の計算方法は、式(2-9)から式(2-11)に基づいて、プルトニウム取扱いに関する作業解析の結果と共に第4章に具体的に記述される。

実際の被ばく線量の計算にあたっては、作業環境に応じたプルトニウム同位体元素組成および量、Pu含有量、遮蔽効果、線源の形、線源と作業者との距離等を考えて評価されなければならない。また、同一作業者からみてプルトニウムの線源がいくつかに分離される場合は、その被ばく線量はそれらの集積として評価する必要がある。

3. 遮蔽効果

3.1 基本的概念

プルトニウム取扱い作業に伴う外部被ばく線量の低減を問題とする場合、まず第1に遮蔽対策が掲げられる。しかし遮蔽対策には、被ばく線量の基準、被ばくのコントロールや対象となる放射線種、遮蔽限界、遮蔽方式等種々な問題が含まれており、遮蔽材の選定・設置だけでは問題の解決を意味しない。

ここでは特に遮蔽効果に問題をしぼって話しを進めることにする。プルトニウム加工施設における遮蔽対策は、取扱うプルトニウムの同位体組成比、分離後の経過日数、線源の形状、拡がり、富化度、密度および遮蔽度合等によりその線量率や実効エネルギーが著しく変動するので非常に複雑である。それ故、遮蔽効果は各グローブボックスの作業環境および作業内容に固有な値と考え、実測値を主に使用することが現段階では好ましいと云えよう。(理論的計算値の使用を全面的に放棄したのではなく、現在不明な点を正し、実測値に合致するよう今後努めるべきである。また実測値も固定されたものではなく作業内容、作業環境、取扱うプルトニウムの組成および遮蔽方式の変更等が生じた場合には常にチェックされたものでなくてはならない。)次に遮蔽対象となるガンマ線および中性子について述べる。

(1) ガンマ線

通常取扱われるプルトニウムの組成は、中程度の重さの同位体でまた、これらのプルトニウムより放出されるガンマ線のエネルギー範囲は20~900KeVで比較的 low、しかも100KeV以下のものがその大半を占めている。プルトニウム取扱い作業に伴う外部被ばくに寄与するガンマ線は、主としてPu-241のベータ崩壊生成物であるAm-241の59.6 KeV(発生率37%)とPu-241のアルファ崩壊生成物であるU-237の59KeV(発生率39%)、207KeV(発生率21%)であり、これは時間と共に変化する。従ってプルトニウムより放出されるガンマ線のエネルギーより考えると比較的薄い遮蔽材でかなりの割合のガンマ線をカットすることが可能であるが遮蔽材を透過した後のガンマ線は高エネルギー成分の割合が増加し、それ以上遮蔽材を増しても比較的その効果が薄くなってくる。

(2) 中性子

取扱うプルトニウム(PuO₂)より放出される中性子には自発性核分裂(Pu-238, Pu-240, Pu-242)と酸素元素との(α, n)反応に伴う(Pu-238, Pu-239, Pu-240)ものがあり、そのエネルギーは約2MeV程度にピークをもって分布している高速中性子である。前述のようにガンマ線は比較的容易に遮蔽できるのに対し、中性子はかなりの厚さの減速材を必要とし、実際にグローブ・ボックス内およびボックス窓板面で遮蔽を施すことは大がかりとなり、作業性が著しく低下するのでその実施は困難となるケースが多い。

3.2 遮蔽材と遮蔽効果

(1) ガンマ線

遮蔽対策を講ずる場合、減衰を必要とする放射線種の実効エネルギーをまず決定することが必要となる。過去において安全管理課で行なったガンマ線の実効エネルギー測定結果を表 3.1 に示す。

原子番号の大きい遮蔽材を使用すると遮蔽効果が增大するが、その結果実効エネルギーが高くなることが明白である。例えば鉛板 1mm 厚では約 140KeV、3mm 厚では約 190KeV の実効エネルギーが算出される。現在のプル燃における作業環境を考えるとグローブボックス窓板（ホモライト）外では実効エネルギー約 100KeV、プルトニウム線源を直接遮蔽する場合は約 60KeV と仮定することは安全サイドとみなせよう。表 3.2, 3.3 に各種遮蔽材のガンマ線遮蔽効果を示す。

(2) 中性子

ガンマ線関係に比べ所有しているデータは少ないが表 3.4 に各種遮蔽材と中性子遮蔽効果を示す。

表 3.1 プルトニウムと実効エネルギー

測定法		フィルムバッジ	T L D	電離箱型サーベイメータ			
線源		酸化プルトニウム粉末 500g	酸化プルトニウム粉末 400g				
		アルミニウム缶(0.5mm肉厚)	ポリエチレンビン(0.8mm肉厚)		SUS27製ビン(1.0mm肉厚)		
		(R ₁)	(S)	(R ₂)	(S)	(R ₂)	
遮蔽	なし	65~80KeV	74KeV	-	-	-	-
	ホモライト板 (10mm厚)	74~75KeV	80KeV	-	-	-	-
	ホモライト板(10mm厚) + アルミニウム板	-	-	54~63KeV	54~70KeV	-	380~445KeV
	グローブ (0.4mm厚)	71~80KeV	90KeV	-	-	-	-
	鉛板 (1mm厚)	>130KeV	-	-	-	-	-
	ホモライト板(10mm厚) + 鉛板(1mm厚)	>130KeV	>320KeV	-	-	-	-
	ホモライト板(10mm厚) + 鉛板	-	-	-	-	289~295KeV	258~277KeV

同位体組成比	R ₁	S	R ₂
Pu-238	0.494%	0.038%	0.83%
Pu-239	68.18	90.142	75.13
Pu-240	22.02	8.533	14.18
Pu-241	7.268	1.189	8.50
Pu-242	2.037	0.093	1.36

表 3.2 各種遮蔽材とガンマ線の遮蔽効果

	遮蔽材	厚さ (mm)					備 考
		0.33	1	15	2	3	
計 算 値	鉛 板	0.91	0.0025	0.012	0.061	0.015	実効エネルギーを 100 KeV と仮定
		-	0.0086	-	0.0055	0.0038	B NWL-1259 に基づく計算値, 線源: R ₃
		-	0.056	-	-	0.018	線源: R ₂ * PuO ₂ 400g ポリビン+ビニール袋
鉛ガラス (鉛相当厚)	-	-	0.026	-	-		
ホモライト (10 mm) + ホモライト	-	0.91	-	0.91	0.91		
ホモライト (10 mm) + 鉛 板	-	0.1	-	0.076	0.063		
実 測 値	ホモライト (10 mm) + 鉛ガラス (鉛相当厚)	-	-	*1 0.1(R ₂)	(1) 0.033 (R ₃) (2) 0.047	-	線源: R ₃ PuO ₂ 1Kg バット面積(1)1400 cm ² (2)720cm ²
	プロテクター (鉛相当厚)	0.13 / 0.5	-	-	-	-	F B R ペレット製造作業 F C A (0.1~0.7)

R₃
同位体組成比 Pu-238 0.67
Pu-239 75.27
Pu-240 14.38
Pu-241 8.31
Pu-242 1.39

表 3.3 被覆管のガンマ線遮蔽効果 (計算値)*²

ライン	条 件	被 覆 管		線吸収係数 (cm ⁻¹)	遮蔽効果
		材 質	肉厚 (cm)		
F B R	常 陽	316 stainless	0.035	10.13	0.70
	文 珠		0.045		0.63
A T R	D C A	Zircaloy-2	0.08	23.86	0.15
	普 賢				

*² 実効エネルギーを 60KeV と仮定した。

表 3.4 各種遮蔽材と中性子遮蔽効果

遮蔽材	厚さ (mm)	50	70	80	100	150	備 考
パラフィン	計算値 ^{*3}	0.75	0.60	0.52	0.42	0.23	*3 HW-21169 (0.5MeV) *4 ホモライト(10mm)も遮蔽材として付加 線源: R ₂ PuO ₂ 400g *5 FCA(Pu-Al)燃料にて測定 *6 Catalog Number 201, 202, 260, 261 使用
	実測値 ^{*4}	0.76	-	-	0.35	0.19	
水	計算値 ^{*3}	0.87	0.70	0.60	0.47	0.27	
	実測値 ^{*5}	-	-	0.50	-	0.21	
ホモライト	実測値 ^{*4}	-	0.80	-	-	-	
5% Boron-Polyethylene 1% Boron-80% Lead Poly Clay-Boron Clay-Lead	実測値 ^{*6}	0.6	0.5	0.45	0.37	0.22	
鉛 板 鉛 ガラス アルミニウム	実測値 ^{*4}	1(27mm) 1(45mm) 1(36mm)					

3.3 実用的な遮蔽効果

被ばく線量を推定する場合、各作業位置による単位線量率を求めることが必要である。ガンマ線の単位線量率を算出する際には、Pu富化度、密度、断面積と遮蔽効果を、また中性子の単位線量率においては、重量と共に遮蔽効果を考慮しなくてはならない。遮蔽効果を考える場合には、取扱うプルトニウムの状態、取扱い装置およびグローブ・ボックスの遮蔽状況を念頭におき、その条件に見合う値を採用することが必要である。表 3.5 に現在プル燃の作業環境で使用している遮蔽材および被覆管等に関する実測および計算による実用的遮蔽効果を示す。

表 3.5 各種遮蔽材と実用的遮蔽効果

放射線種	遮 蔽 材		遮蔽係数
ガンマ線	単 体	貯蔵容器 (ステンレス 2 mm + 鉛 3 mm)	0.01
		取扱い装置 (ステンレス (3 mm))	0.07
		鉄	0.06
		316 stainless (常陽・文珠)	0.7
		被覆管 (Zircaloy-2 (DCA・普賢))	0.2
		グローブ・ボックス窓板 (ホモライト 10 mm) ^{*7}	0.5
ガンマ線	複合体	取扱い装置 ^{*8} (ステンレス 3 mm) + 窓板 ^{*7}	0.07
		鉛板 (2 mm) 窓板 ^{*7} + (鉛ガラス (鉛 2 mm 相当厚))	0.04
		鉛板 (2 mm) 取扱い装置 ^{*8} + 窓板 ^{*7} + (鉛ガラス (鉛 2 mm 相当厚))	0.01
中性子	単 体	5% Boron-Polyethylene 10% Boron-80% Lead Polyethylene (50 mm) Clay-Boron Clay-Lead	0.6
	複合体	窓板 ^{*7} + (パラフィン (50 mm) 水)	0.8

4. 外部被ばく線量の計算方法

4.1 基本的考え方

被ばく線量の計算に必要な情報は計算の対象となる作業を行なう環境の空間線量率とその作業を行なう人間の行動のパターンを何らかの数字で適格に表した1組のデータとから成る。前述の計算式の考え方に基づく被ばく線量の求め方によると、計算過程そのものは卓上計算機の処理で十分なものであるが、この考え方によっても計算単位をどのように取るかによって計算処理量の大きさは変わることになる。例えば、ある個人の1日の被ばく線量を求める場合と、ある製造キャンペーンを1単位として計算する場合とでは計算処理量の大きさが大分異ることになり、計算による線量と実際の被ばく線量との比較において差がでてくるかも知れない。特に、手計算による場合は種々の条件を平均化するため、計算単位はできるだけ大きく取ることが、実際の線量の評価上望ましい。

被ばく線量の計算に必要なデータは、1つは空間線量に関して前述の Roesch の式³⁾に適用できる主として線源の性質にかかわるデータと、他はそこで作業する人間と線源との相関性を示すところの作業解析によって得られるデータである。しかしながら線源の状態は作業中に一定とはなり得ないし、まして人間の作業するパターンはさらに複雑であることから、これらのデータを計算に使用する際は、適用するデータのその計算単位で平均値としての妥当性が考えられなければならない。手計算で処理する場合は、その結果にある程度の信頼度を与えるために具体的にはロット毎あるいは月単位の仕事量より大きな計算単位を取ることが望ましい。それ以外の大きさの対象（日毎、個人別など）を実際の被ばく線量の評価として計算する場合には電子計算機によるシミュレーションに委ねられることになろう。

4.2 計算方法

(2-2) 式及び (2-7) 式から MO を扱う場合の表面線量率は、 2π および 4π で除して次のように表わされる。

$$D_{\gamma} = [1.24 \cdot P_{238} + 0.012 \cdot P_{239} + 0.011 \cdot P_{240} + 0.018 \cdot P_{242} + 0.016 \cdot P_{241} \cdot t + 2.55 (1 - e^{-0.102t}) \cdot P_{241}] \quad (4-1)$$

$$D_n = [0.193 \cdot P_{238} + 0.0005 \cdot P_{239} + 0.0132 \cdot P_{240} + 0.0188 \cdot P_{242}] \quad (4-2)$$

D_{γ} : ガンマ線表面線量率

D_n : 中性子線量率の基本項

P_i : プルトニウム同位体比 (w/o)

t : Am^{241} , U^{237} 分離精製後の経過日数 (day)

(4-1), (4-2) 式に線源の状態、作業条件の相関性を変数として組み合わせて、次式のような被ばく線量計算の基本式を導く。

$$E_{\gamma} = D_{\gamma} \cdot \frac{A}{R^2} \cdot C \cdot K \cdot T \quad (4-3)$$

$$E_n = D_n \cdot \frac{A}{R^2} \cdot T \quad (4-4)$$

E_{γ} : ガンマ線による被ばく線量 (rem)

E_n : 中性子による // (rem)

A : 線源の表面積 (cm^2)

R : 線源からの距離 (cm)

C : PuO_2 混合比

K : 遮蔽物による減衰率

M : Pu 金属の質量 (g)

T : A, R, C, K, M 一定条件下での作業時間 (hr)

(4-3), (4-4) 式は線源の最大径に比べて距離が大きい時に適用しうる ($R/L > 1$) 式で, 標準の作業を行なう乾式工程, 品質管理工程, 計量作業及び加工工程, 湿式工程の作業にあてはめることができる。線源の大きさが, 線源迄の距離よりも大きくなるような場合 (燃料ビン, 集合体の取扱いあるいは長いカラムの前での湿式作業) には, 若干の誤差を含んでくるので, インプットデータに何らかのファクターを含ませるか, あるいは次式を用いた方がよい。

$$E_{\gamma} = D_{\gamma} \cdot \frac{d}{R} \tan^{-1} \left(\frac{L}{R} \right) \cdot C \cdot K \cdot T \quad (4-5)$$

$$E_n = D_n \cdot \frac{\rho \cdot d}{R} \tan^{-1} \left(\frac{L}{R} \right) \cdot T \quad (4-6)$$

$$\left(\begin{array}{l} d : \text{線源の幅 (cm)} \\ L : \text{線源の長さ (cm)} \\ \rho : \text{線源中の Pu のスミア密度 (g/cc : } M/\frac{\pi}{4} d^2 L) \end{array} \right)$$

(4-3) ~ (4-6) 式は, 各変数を一定とみなした単位時間あたりの被ばく線量である。従って, 各変数のうち, 1つが変わった条件では, その変数を経時変化で代入して計算し, それらの計算値をすべて集計した値が, ある計算単位 (例えばロット毎, キャンペーン毎) を通しての被ばく線量となる。

従って, 式 (4-3), (4-4) の各変数を時間の関数として一定期間の被ばく線量を計算するよりに表わせれば次式のようになる。

$$E_{\gamma} = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_{\ell} D_{\gamma} \cdot \frac{A_i}{R_j^2} \cdot C_k \cdot K_{\ell} \cdot T_{ijk\ell} \quad (4-7)$$

$$E_n = \sum_j \sum_m D_n \cdot \frac{M_m}{R_j^2} \cdot T_{jm} \quad (4-8)$$

あるいは (4-5), (4-6) 式より

$$E_r = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_\ell D_r \cdot \frac{d_i}{R_j} \tan^{-1} \left(\frac{L_i}{R_j} \right) \cdot C_k \cdot K_\ell \cdot T_{ijkl} \quad (4-9)$$

$$E_n = \sum_j \sum_{\ell m} \sum_n D_n \cdot \frac{\rho_m \cdot d_m}{R_j} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{L_m}{R_j} \right) \cdot K_\ell \cdot T_{j\ell m} \quad (4-10)$$

各変数の考え方を表 4.1 に示した。これらの変数のうち、溶液状態の線源の稀釈効果に関しては、粉末の場合のように $\text{PuO}_2 / (\text{PuO}_2 + \text{UO}_2)$ 比として表わすようなファクタは明らかでない。粉末の稀釈効果はプルトニウムおよびウランの質量吸収によるものであるり、線源の密度分布に依存する。この考えを溶液に適用すると線源中のプルトニウム、ウランの密度は粉末にくらべて明らかに小さいため、粉末の場合のように大きな稀釈効果は期待できないばかりか線源の厚さの効果の寄与によって計算値が低めになる可能性もあるので、前もって実測しておくかあるいは密度効果を考慮して計算することが必要である。

また、各種遮蔽材の遮蔽係数は第 3 章に詳述されているように表 3.2 から表 3.5 のデータが使用できる。他の大きな計算条件として、工程の作業条件が必要である。これについては次節に述べる。

4.3 作業解析および計算例

プルトニウム燃料部における工程の作業条件を、ペレット製造工程、ピン加工・集合体組立工程、湿式回収工程、品質管理工程に分類して調査し、付録 D にまとめた。ペレット製造工程およびピン加工・集合体組立工程については第 1 開発室と第 2 開発室とで作業条件が異なるため別々に示されている。同付表中の処理時間ないし作業時間の項で T_1 , T_2 とあるのは遮蔽効果に関して、鉛ガラスなどによる効果的な遮蔽の期待できる作業に関する時間を T_1 、遮蔽効果の期待できない作業に要する時間を T_2 とした。作業条件に応じた線源の遮蔽効果は前述の表 3.2 から表 3.5 にて得られる。

以上の考え方で手計算によって外部被ばく線量の評価を実施する 1 例として、昭和 47 年度に安全専門委員会に提出された“常陽燃料製造時の被ばく線量”の資料を付録 E に示す。またこの種の計算手法を電子計算機へのプログラムとして組込み、広範囲な外部被ばく線量の計算が行なえる VIDAL コードが作成されている。VIDAL については 5.2 節に詳述される。

表 4.1 被ばく線量に寄与する因子

工程 (物質形状)	変数	計算単位	Pu 同位体比	$A \text{ m}^{2.41}$ 分離精製後の経過日数	取扱い量	表面積	距離	希釈効果	遮蔽効果
原料取扱 ($\text{PuO}_2, \text{UO}_2, \text{MO}_3$ 粉末)		ロット	取扱いロットの分析値	取扱い開始日と終了日の中間の日の経過日数	ロット中のPu量	保管容器の投影面積	物質からの距離	$\text{PuO}_2/\text{PuO}_2+\text{UO}_2$	保管容器
ベレット製造 ($\text{PuO}_2, \text{UO}_2, \text{MO}_3$ 粉末, ベレット)		"	"	"	"	$\frac{\text{物質質量}}{\text{密度} \times \text{厚さ}}$	"	"	鉛ガラス ホモライト
ピン加工 集合体組立 (MO_2 ベレット) (ピン, 集合体)		1日の処理量	"	"	1日に扱うPIN, S/A中のPu量	ピンの長さ ピンの外径	ピンからの距離	"	CCADDING ホモライト 鉛ガラス
回収 ($\text{PuO}_2, \text{UO}_2, \text{MO}_2$ 溶液)		ロット	"	"	ロット中のPu量	カラムの長さ カラムの外径	カラムからの距離	Roesch 式より算出される線量率と当該条件による実測値の比をファクターとして用いる。	SUS管 鉛ガラス ホモライト
品質管理 ($\text{PuO}_2, \text{UO}_2, \text{MO}_2$ 粉末, ベレット, 溶液)		1日の処理量	"	"	サンプル中のPu量	試料の表面積	物質からの距離	$\text{PuO}_2/\text{PuO}_2+\text{UO}_2$ ・溶液の減衰効果	鉛ガラス ホモライト
データの FORMAT.		-	CONST.	CONST.	$\sum_m M_m \cdot T_m$ m: 計算単位で扱う物質の数	$\sum_i A_i \cdot T_i \dots$ i = 計算単位での変化数	$\sum_j \frac{1}{R_j^2} \cdot T_j \dots$ j = 計算単位での変化数	$\sum_k C_k \cdot T_k \dots$ k = 計算単位での変化数	$K = e^{-\mu_m \text{dim}}$ $\sum \mu \cdot T \dots \mu$ μ : 遮材の数
						加工回数 $d \sum_j \frac{1}{R_j} \tan^{-1} \left(\frac{L_j}{R_j} \right) \cdot T_j \dots$		加工 CONST.	

5. 計算プログラム

第2章から第4章にかけて記述されてきた計算式は、この種の被ばく線量計算の利用者の目的に応じて、電子計算機用として、現在 DANIEL¹⁶⁾ および VIDAL¹⁷⁾ の2種類の計算プログラムが整備されている。

DANIELコードは主に式(2-1)から式(2-7)までの計算式が組込まれていて、 ^{241}Am の生成量、プルトニウムの表面および空間線量率が比較的簡単に計算される。プルトニウムの種類による空間線量率の大きさ、代表的な作業工程の被ばく線量率の目安をパラメトリックサーベイして、被ばく管理に伴う作業計画および遮蔽対策を講ずるために、このコードの使用が考えられる。

VIDALコードは主に式(4-1)から式(4-10)までの計算式が組込まれていて、特にプルトニウム燃料部におけるプルトニウム取扱いに伴う各作業工程での実際的な被ばく線量が詳細に計算される。作業キャンペーン毎の開始前および終了後の被ばく線量管理に伴う作業計画、検討および評価のために、このコードの使用が考えられる。

前2者の計算コードのインプットとして必要な入荷プルトニウムの実効精製日を計算するプログラムとして TSEARCH¹⁸⁾がある。このコードは入荷されたプルトニウムの受入分析値(プルトニウム同位元素、 ^{241}Am)と分析日から逆算して、実効的なプルトニウム精製日を計算する。また、その実効精製日からの ^{241}Am の生成量も計算される。

以上、3つの計算コードについて使用に関する概要を次に記述する。

5.1 DANIEL¹⁶⁾

1) プログラムの概要

Puの精製後、それが使用される経過時間までに生成される ^{241}Am 量を、Pu同位元素比の入力によって計算する。また、 ^{241}Am の生成に伴う ^{241}Am を含むPuのガンマ線および自発性核分裂と酸素原子との(α, n)反応に伴う中性子の表面、空間線量率を計算する。

整備計算機種はFACOM-230-35であり、計算時間約2分/ケースである。

2) 入力形式

DANIELの入力形式を表5.1に、またサンプル入力を表5.2に示す。計算結果の1例は表5.3に示される。

表 5.1 DANIEL の入力形式

Card No.	FÖRTRAN Symbol	Data Form	Description	Unit
1		1X, 50H	タイトル欄	
2	IR JN N	I5 I5 I5	ケースの連続性。 1:連続ケース, 0:単ケース 線源表面からの距離間隔数。 1:表面, 空間につき全部計算 2:表面線量全部計算 3:空間 " 4:空間エックス+ガンマ線量計算 5: " ガンマ線量計算 6: " 中性子線量計算	
3	RNTI XMAI P38 P39 P40 P41 P42	F10.3 F10.3 F10.3 F10.3 F10.3 F10.3 F10.3	Pu 精製後経過期日の間隔値 " 最大値 各同位体の中の Pu-238 の重量比 各同位体の中の Pu-239 の重量比 各同位体の中の Pu-240 の重量比 各同位体の中の Pu-241 の重量比 各同位体の中の Pu-242 の重量比	日 日
4	R A W	8F10.3 F10.3 F10.3	線源表面からの距離 線源より R 離れた地点での線源の投影面積 PuO ₂ の重量	cm cm ² g
5 N=2	W	F10.3	PuO ₂ の重量	g
6 N=4, 5	R A	8F10.3 F10.3	線源表面からの距離 線源より R 離れた地点での線源の投影面積	cm cm ²
7 N=6	R W	8F10.3 F10.3	線源表面からの距離 PuO ₂ の重量	cm g

* Card No. 4~7については以下の通りである。

* 2枚目のカードのNの値が1, 3の時 CardNo. 4 が必要

" 2 " 5 "

" 4, 5 " 6 "

" 6 " 7 "

INPUT DATA FORM

表 5.2 DANIEL サンプル入力

JOB NUMBER	MAIN PROGRAM LABEL	KEYPUNCH RECORD	DATE	MODIFICATION													
				BY	DATE	BY	DATE	BY	DATE	BY	DATE						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8
SAMPLE INPUT																	
0	0	12															
100.0	800.0	0.0	04007	0.6944	0.2152	0.01738	0.06908										
1000.0																	

表 5.3 DANIEL サンプル出力

SAMPLE INPUT

MASS BALANCE (G/G OF PU)

TIME(DAY)	PU-238	PU-239	PU-240	PU-242	PU-241	AM-241	TOTAL
0.00	0.004007	0.694400	0.215200	0.069080	0.017380	0.000000	1.000067
100.00	0.004007	0.694400	0.215200	0.069080	0.017128	0.000000	1.000067
200.00	0.004007	0.694400	0.215200	0.069080	0.016880	0.000500	1.000066
300.00	0.004007	0.694400	0.215200	0.069080	0.016635	0.000745	1.000066
400.00	0.004007	0.694400	0.215200	0.069080	0.016394	0.000986	1.000066
500.00	0.004007	0.694400	0.215200	0.069080	0.016156	0.001223	1.000065
600.00	0.004007	0.694400	0.215200	0.069080	0.015922	0.001457	1.000065
700.00	0.004007	0.694400	0.215200	0.069080	0.015691	0.001687	1.000064
800.00	0.004007	0.694400	0.215200	0.069080	0.015463	0.001914	1.000063

GAMMA + X-RAY SURFACE DOSE RATE (RAUS/HR)

TIME(DAY)	PU-238	PU-239	PU-240	PU-242	U-237	AM-241	TOTAL
0.00	3.846717	0.680512	1.011439	0.020724	0.000000	0.000000	5.559391
100.00	3.846717	0.680512	1.011439	0.020724	0.295460	0.330220	6.185060
200.00	3.846717	0.680512	1.011439	0.020724	0.295460	0.860440	6.515290
300.00	3.846717	0.680512	1.011439	0.020724	0.295460	0.990660	6.845510
400.00	3.846717	0.680512	1.011439	0.020724	0.295460	1.320879	7.175730
500.00	3.846717	0.680512	1.011439	0.020724	0.295460	1.651099	7.505950
600.00	3.846717	0.680512	1.011439	0.020724	0.295460	1.981319	7.836170
700.00	3.846717	0.680512	1.011439	0.020724	0.295460	2.311540	8.166390
800.00	3.846717	0.680512	1.011439	0.020724	0.295460	2.641759	8.496610

GAMMA RAY SURFACE DOSE RATE (RADSV/HR)

TIME(DAY)	PU-238	PU-239	PU-240	PU-242	U-237	AM-241	TOTAL
0.00	0.031255	0.032080	0.014849	0.007599	0.000000	0.000000	0.105782
100.00	0.031255	0.032080	0.014849	0.007599	0.278070	0.173800	0.557652
200.00	0.031255	0.032080	0.014849	0.007599	0.278080	0.347600	0.731462
300.00	0.031255	0.032080	0.014849	0.007599	0.278080	0.521400	0.905282
400.00	0.031255	0.032080	0.014849	0.007599	0.278080	0.695200	1.079062
500.00	0.031255	0.032080	0.014849	0.007599	0.278080	0.869000	1.252861
600.00	0.031255	0.032080	0.014849	0.007599	0.278080	1.042799	1.426661
700.00	0.031255	0.032080	0.014849	0.007599	0.278080	1.216599	1.600461
800.00	0.031255	0.032080	0.014849	0.007599	0.278080	1.390399	1.774261

NEUTRON DOSE RATE ON SURFACE OF PU SPHERE (REM/HR)

TIME(DAY)	PU-238	PU-239	PU-240	PU-242	AM-241	TOTAL
0.00	0.195037	0.091690	0.687169	0.357041	0.000000	1.331138
100.00	0.195037	0.091690	0.687169	0.357041	0.000001	1.331138
200.00	0.195037	0.091690	0.687169	0.357041	0.000001	1.331139
300.00	0.195037	0.091690	0.687169	0.357041	0.000002	1.331139
400.00	0.195037	0.091690	0.687169	0.357041	0.000003	1.331140
500.00	0.195037	0.091690	0.687169	0.357041	0.000004	1.331141
600.00	0.195037	0.091690	0.687169	0.357041	0.000004	1.331141
700.00	0.195037	0.091690	0.687169	0.357041	0.000004	1.331141
800.00	0.195037	0.091690	0.687169	0.357041	0.000005	1.331142

5.2 VIDAL

1) プログラムの概要

プルトニウムの作業をする場合の作業員の外部被ばく線量（ガンマ線，中性子及びトータル）をグローブ・ボックス単位，工程単位で計算し，キャンペーンを通して，合計する。

整備計算機はFACOM-230-35であり，計算時間は約5分/ケースである。

2) 入力形式

変 数	
P(i)	プルトニウム同位体比
T	精製後日数（キャンペーン中間時点）
KOTEI(i)	キャンペーンを通じての工程単位名
MA(i)	単位工程での線源表面積の平均値
SA(i)	" " の標準偏差
MPU	Puの質量
SHAHEI(i)	単位工程での遮蔽体
DB	一日に処理するバッチ量
DP	" " ピン本数
PIND	ピン直径
PINL	ピン長さ
MR(i)	単位工程での作業距離平均値
SR(i)	" " 標準偏差
C	Pu富化度
DAY(i)	単位工程処理日数

表5.4に入力FORMATを示す。

3) アルゴリズム

プルトニウム線源を対象に，ある作業をする場合，その作業員が受ける被ばく線量は，時々刻々と変わっている。なぜなら，一般的な作業の場合，作業員と線源の距離は作業員と線源が相互に動くことによって絶えず変り，また作業員から見込む線源の投影断面積も同じ理由で絶えず変わっているからである。

ところで計算に使う基本式は，(4-1)(4-2)(4-3)(4-4)であるが，この式におけるA.Rを前述の理由から，ある分布を持った変数と考える。被ばく線量とは，被ばく線量率を時間で積分したものであるから，ある時間毎にその分布に従う，A.Rをランダムに与えて，全キャンペーンを通じての時間で積分すれば被ばく線量の推定ができることになる。

PAGE OF

INPUT DATA FORM

表5.4 VIDAL入力FORMAT

NO	NUMBER	MAIN PROGRAM LABEL	MODIFICATION	KEYPUNCH RECORD DATE	NO OF CARDS
1	2	3	4	5	6
1	157890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890
2	PLUTONIUM ISOTOPIO	RATIO	P238=0. P239=0. P240=0. P241=0.		
3	**DAYS ELAPSED SINCE PURIFICATION**	PURIFICATION	**	DAYS	
4	**SEQUENTIAL PROCESS MANAGING**	MANAGING	**		
5	BOX NAME OR WORKINGPu CONT.SHILD	SOURCE AREA		DISTANCE	WORK TIME
6	NO PROCESS NAME	DAYS (%)	COEF. MEAN SIGMA	MEAN SIGMA	MEAN SIGMA
7	G11 POWDER MIX	27.5 18.5 0.023230	10.3 28	5 4	0.5
8	**OTHER DATA**				
9	DIA OF PIN	(MM)			
10	LENGTH OF PIN	(MM)			
11	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890

別表 ()
で計算

(CM²)

(CM)

(HR)

表 5.5 グローブ・ボックス毎の被ばく線量

*** E X P O S U R E (B O X W I S E) ***													
PAGE 1 - 1													
BOX NO.	J	BOX NAME	***										
IN TIME	LOT NO.	VOLUME (KG)	WORKING TIME (MIN.)	SURFACE AREA (CM**2)	DISTANCE SOURCE (CM)	ATTENUA FACTOR	EXPOSURE (TOTAL)	EXPOSURE (MEAN)	EXPOSURE (SIGMA)	OPE-1	OPE-2	OPE-3	OPE-4
1.8.0.0	100	2.655	30	299.27	38.86	0.7192	28.01	28.01	2.80	26.37			
			GAMMA-RAY				25.43	25.43	2.54	23.84			
			NEUTRON				2.58	2.58	0.26	2.53			
1.11.0.0	200	2.655	30	282.17	40.13	0.6986	25.78	25.78	2.57	23.42			
			GAMMA-RAY				23.23	23.23	2.32	20.68			
			NEUTRON				2.55	2.55	0.25	2.74			
1.17.0.0	300	2.655	30	210.32	40.76	0.7128	27.01	27.01	2.70	31.14			
			GAMMA-RAY				24.67	24.67	2.47	28.93			
			NEUTRON				2.34	2.34	0.23	2.21			
1.22.0.0	400	2.655	30	287.65	37.78	0.7149	29.93	29.93	3.00	26.28			
			GAMMA-RAY				27.16	27.16	2.72	23.56			
			NEUTRON				2.77	2.77	0.28	2.72			
1.25.0.0	500	2.655	30	21.75	39.53	0.7016	28.50	28.50	2.85	25.91			
			GAMMA-RAY				26.03	26.03	2.60	23.62			
			NEUTRON				2.47	2.47	0.25	2.29			
1.30.0.0	600	2.655	30	201.46	39.12	0.6714	26.29	26.29	2.63	25.38			
			GAMMA-RAY				23.75	23.75	2.38	22.34			
			NEUTRON				2.54	2.54	0.25	3.04			
*** TOTAL ***		15.930	180				165.52	165.52		158.50			
			GAMMA-RAY				150.27	150.27		142.97			
			NEUTRON				15.25	15.25		15.53			

表 5.6 工程フローに従った被ばく線量

BOX NO.	BOX NAME	FROM 73/ 1/22 --- TO 73/ 1/26		EXPOSURE : (MREM/H)		WORKING TIME : (MINUTES)		(WEEK)	
		(MON)	(TUE)	(WED)	(THU)	(FRI)	(SAT)	(SUN)	(GAMMA NUTRN EXPO.)
1	INPUT	27.2 (30 MIN)	2.8 (30 MIN)	30.0	26.0 (50 MIN)	28.5	53.2 (60 MIN)	5.3	58.5
2	POWDER ADJUST	49.2 (60 MIN)	5.0 (60 MIN)	54.2	5.2 (60 MIN)	59.4	103.4 (120 MIN)	10.2	113.6
3	MIXING	3.3 (185 MIN)	14.9 (185 MIN)	18.2	3.4 (190 MIN)	18.7	3.7 (191 MIN)	15.6	19.3
4	CROSS BLENDING	1.7 (95 MIN)	7.7 (95 MIN)	9.4	3.6 (205 MIN)	20.3	1.7 (94 MIN)	7.8	9.5
5	GRANULATION	7.4 (400 MIN)	32.9 (400 MIN)	40.3	1.5 (80 MIN)	6.6	7.4 (400 MIN)	33.0	40.4
6	DRING	3.0 (150 MIN)	12.3 (150 MIN)	15.3	2.6 (150 MIN)	14.8	5.6 (300 MIN)	24.5	30.1
7	PRESSING	2.3 (130 MIN)	10.5 (130 MIN)	12.8	4.3 (230 MIN)	23.0	2.4 (129 MIN)	10.5	12.9
8	PRESINTER	3.6 (257 MIN)	20.7 (257 MIN)	24.3	14.2 (1013 MIN)	81.7	95.9	17.8	102.4
9	SINTER-1	17.6 (1260 MIN)	100.0 (1260 MIN)	117.6	17.6 (1260 MIN)	100.0	117.6	1260	117.6
10	SINTER-2								
11	DIA. INSP.	3.6 (242 MIN)	20.0 (242 MIN)	23.6	3.0 (201 MIN)	19.6	6.6 (443 MIN)	36.6	43.2
12	GRINDING	0.5 (84 MIN)	0.7 (84 MIN)	1.2	0.9 (146 MIN)	1.8	1.4 (230 MIN)	1.6	3.0
13	DENS. INSP.	1.2 (84 MIN)	0.7 (84 MIN)	1.9	1.5 (182 MIN)	4.2	3.9 (266 MIN)	2.2	6.1
14	STORAGE	0.9 (60 MIN)	3.7 (60 MIN)	4.6	0.2 (15 MIN)	0.3	1.1 (75 MIN)	3.8	4.9
15	RECOVERY	0.1 (12 MIN)	0.1 (12 MIN)	0.2	0.0 (4 MIN)	0.0	0.1 (16 MIN)	0.1	0.2
16	OUTPUT	4.4 (14 MIN)	0.8 (14 MIN)	5.2	4.4 (14 MIN)	4.8	8.8 (28 MIN)	1.2	10.0
*** TOTAL ***		89.4 (805 MIN)	66.1 (805 MIN)	155.5	29.3 (1952 MIN)	185.3	16.2 (796 MIN)	54.7	65.2
					103.6 (1259 MIN)	192.5	38.5 (1259 MIN)	4.93	7.493
					170.9 (1770 MIN)	27.2	16.2 (796 MIN)	54.7	65.2
					103.6 (1259 MIN)	192.5	38.5 (1259 MIN)	4.93	7.493
					170.9 (1770 MIN)	27.2	16.2 (796 MIN)	54.7	65.2

4) 出力形式

出力はラインプリンタに打つ、打ち出される表は、

イ. グローブボックス毎のガンマ線および中性子による被ばく線量

ロ. 工程の流れに従って、週単位でまとめた被ばく線量の二通りの表が出てくる。その例を表 5.5 および表 5.6 に示す。

5.3 TSERCH

1) プログラムの概要

このコードは、プルトニウムの受入れ分析値からプルトニウムの精製後の経過期日を求め、プルトニウム精製時の組成を明らかにする。また、プルトニウム精製時のプルトニウム組成が明らかになったら、それを基に精製日からの経過日数をパラメータとして、①プルトニウムの組成変化、および②Pu-241のDecayによって生成するAm-241, U-237, Np-237の生成量を計算する。

整備計算機種はFACOM-230-35であり、計算時間は約2分/ケースである。

2) 入力形式

TSERCHのインプット形式を表 5.7 に示す。また、サンプル入力を表 5.8 に示す。その計算結果の1例は表 5.9 に示される。

表 5.7 T S E A R C H コード

入力形式

カードNo.	FORTRAN Symbol	Data form	Description	Unit
1	(TITLEC), I=1,20)	(20A4)	タイトルカード(80 columnまで)	
2	(KA, IWH, HALF41	(I5, I5, F10.2	K ≤ 0 ; 最終JOB K > 0 ; 連続JOB IWH ≤ 0 ; Pu 精製日から分析日までの経過時間およびPu 精製時, Pu 分析時, Am 分析時の組成の計算をする。 IWH > 0 ; 上記以外に各核種の組成変化を時間をパラメータとして計算する。 Pu-241 の半減期 1) 13年 (BNL-325, 2nd) 2) 13.2年 (Table of ISO, 6th) デ 3) 13.6年 (WCAP-6086, 1969) ー 4) 14.5年 (PL-447/43, 1970) タ 例	Year
	DELT	F10.3	Pu と Am の分析日が異なる場合, その日数の差 ΔT を入れる。分析日が同一日であれば 0.0 [例] -25.0...Pu が Am より後に分析された (Pu 分析日を中心に考える)	day
	TITLEA TITLEB)	2X, A8, 2X, A8)	Pu 分析年月日 } [例] ..47.01.20 Am 分析年月日	
3	IYEAR, IMON, IDAY, JWEEK		Pu が分析された年月日 (カード2と重複する) →改良予定 • 分析された年 (西暦) ... [例] ..1972 • " 月 ... [例] ..00004 • " 日 ... [例] ..00007 • " 曜日 ... [例] ..00004 JWEEK = 1 ... 日 " = 2 ... 月 " = 3 ... 火 " = 4 ... 水 " = 5 ... 木 " = 6 ... 金 " = 7 ... 土	
4	(PU(I), I=1,5),	(5F10.3	プルトニウム同位元素組成 (分析値) PU(1); Pu-238 PU(2); Pu-239 PU(3); Pu-240 PU(4); Pu-241 PU(5); Pu-242	w/o
	AM	F10.1)	Am 分析値	w/o

IWH ≤ 0 ; カード5は不要, IWH > 0 ; カード5を読む

5	MINI MDAY MDEL	(3I10)	Pu 精製日からの経過時間をパラメータとして計算する場合の 初期値 最終値 ステップの間隔日数	day " "
---	----------------------	--------	--	---------------

PNC - PU

表 5.8 TSEROH サンプル入力

INPUT DATA FORM

PAGE _____ OF _____

JOB NUMBER	PROBLEM	CODED BY	MAIN PROGRAM LABEL								KEYPUNCH RECORD DATE	KEYPUNCHED BY	VERIFIED BY	NO. OF CARDS	
			1	2	3	4	5	6	7	8					
01	SAMPLE	BACH	NO.	8257	48.6.26										
02	0	1		13.2	-20.0	48.06.09	48.05.21								
03	1973	6	9	7											
04	0.85			64.76	21.87	9.49	3.03	730.0							
05		1		750	30										
06															
07															
08															
09															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															
18															
19															
20															

表 5.9 TSEARCH シンプル出力

BAT CH N O. 8 257 48. 6.26

(CALCULATION OF TIME TO PU ANALYSIS FROM PURIFICATION AND PU COMPOSITION)

* INPUT DATA *

```

DELT ----- PU ANALYSIS 48.06.09
AM ANALYSIS 48.05.21
HALF41 --- PU-241 HALF LIFE
HALF51 --- AM-241 HALF LIFE
ISOTOPE COMPOSITION(W/O)
    PU-238(PU(1))
    PU-239(PU(2))
    PU-240(PU(3))
    PU-241(PU(5))
    PU-242(PU(4))
    AM-241(AM)

-20.0 DAY
13.200YEAR
458.000YEAR
0.850
64.760
21.870
9.490
3.030
730.000 PPM

***** ALPHA (0.0023)
*****
*
***** PU-241 *
*****
* BETA
V
V
V
*****
* NP-237 * ALPHA
*****
*
*****
***** AM-241 *
*****

```

* RESULT *

1) TIME TO PU CHEMICAL ANALYSIS FROM PURIFICATION TT(2)= 73.151 DAYS THAT IS 1973- 3-27 (TUESDAY)
 2) MASS BALANCE(G/G FUEL)

	TIME(DAY)	PU-238	PU-239	PU-240	PU-241	PU-242	TOTAL
* INITIAL *	0.000	0.8505E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.9581E-01	0.3027E-01	0.1000E 01
* PU C.A. *	73.151	0.8491E-02	0.6470E 00	0.2185E 00	0.9480E-01	0.3027E-01	0.9990E 00
* AM C.A. *	53.151	0.8495E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.9508E-01	0.3027E-01	0.9993E 00

- MATERIAL GENERATED FROM PU-241 DECAY- (PPM/G FUEL)

	TIME(DAY)	AM-241	U-237	(AM-241)	INP. TOTAL
* INITIAL *	0.000	0.0000E 00	0.0000E 00	0.0000E 00	0.0000E 00
* PU C.A. *	73.151	0.1001E 04	0.3007E 00	0.1172E 00	0.1003E 04
* AM C.A. *	53.151	0.7281E 03	0.3004E 00	0.1172E 00	0.7298E 03

3) PLUTONIUM COMPOSITION(W/O)

	TIME(DAY)	PU-238	PU-239	PU-240	PU-241	PU-242
* INITIAL *	0.000	0.851	64.694	21.848	9.581	3.027
* PU C.A. *	73.151	0.850	64.760	21.870	9.490	3.090
* AM C.A. *	53.151	0.850	64.742	21.864	9.515	3.029

表 5.9 TSBRCH サンプル出力 (つづき)

MASS BALANCE OF PLUTONIUM AND MATERIAL GENERATED FROM PU-241 DECAY (G/G FUEL)

TIME(DAY)	PU-238	PU-239	PU-240	PU-241	PU-242	AM-241	U-237	NP-237(U)	NP-237(AM)	TOTAL
0.00	0.8505E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.9581E-01	0.3027E-01	0.0000E 00	0.0000E 00	0.0000E 00	0.0000E 00	0.1000E 01
30.00	0.8499E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.9539E-01	0.3027E-01	0.4116E-03	0.2887E-06	0.6445E-06	0.5861E-07	0.1000E 01
60.00	0.8494E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.9498E-01	0.3027E-01	0.8214E-03	0.3008E-06	0.1562E-05	0.1758E-06	0.1000E 01
90.00	0.8488E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.9457E-01	0.3027E-01	0.1229E-02	0.3001E-06	0.2488E-05	0.2345E-06	0.1000E 01
120.00	0.8483E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.9417E-01	0.3027E-01	0.1636E-02	0.2988E-06	0.3410E-05	0.4103E-06	0.1000E 01
150.00	0.8477E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.9376E-01	0.3027E-01	0.2040E-02	0.2975E-06	0.4329E-05	0.6447E-06	0.1000E 01
180.00	0.8471E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.9336E-01	0.3027E-01	0.2443E-02	0.2962E-06	0.5243E-05	0.9378E-06	0.1000E 01
210.00	0.8466E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.9296E-01	0.3027E-01	0.2843E-02	0.2950E-06	0.6154E-05	0.1289E-05	0.1000E 01
240.00	0.8460E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.9255E-01	0.3027E-01	0.3242E-02	0.2937E-06	0.7061E-05	0.1641E-05	0.1000E 01
270.00	0.8455E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.9216E-01	0.3027E-01	0.3640E-02	0.2924E-06	0.7963E-05	0.2051E-05	0.9999E 00
300.00	0.8449E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.9176E-01	0.3027E-01	0.4035E-02	0.2912E-06	0.8862E-05	0.2520E-05	0.9999E 00
330.00	0.8444E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.9136E-01	0.3027E-01	0.4423E-02	0.2899E-06	0.9757E-05	0.2989E-05	0.9999E 00
360.00	0.8438E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.9097E-01	0.3027E-01	0.4821E-02	0.2887E-06	0.1065E-04	0.3575E-05	0.9999E 00
390.00	0.8432E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.9058E-01	0.3027E-01	0.5211E-02	0.2874E-06	0.1154E-04	0.4220E-05	0.9999E 00
420.00	0.8427E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.9019E-01	0.3027E-01	0.5600E-02	0.2862E-06	0.1242E-04	0.4865E-05	0.9999E 00
450.00	0.8421E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.8980E-01	0.3027E-01	0.5987E-02	0.2850E-06	0.1330E-04	0.5568E-05	0.9999E 00
480.00	0.8416E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.8941E-01	0.3027E-01	0.6372E-02	0.2837E-06	0.1418E-04	0.6330E-05	0.9999E 00
510.00	0.8410E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.8903E-01	0.3027E-01	0.6753E-02	0.2825E-06	0.1505E-04	0.7092E-05	0.9999E 00
540.00	0.8405E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.8865E-01	0.3027E-01	0.7137E-02	0.2813E-06	0.1592E-04	0.8030E-05	0.9999E 00
570.00	0.8399E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.8826E-01	0.3027E-01	0.7517E-02	0.2801E-06	0.1678E-04	0.8909E-05	0.9999E 00
600.00	0.8394E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.8788E-01	0.3027E-01	0.7895E-02	0.2789E-06	0.1764E-04	0.9847E-05	0.9999E 00
630.00	0.8388E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.8750E-01	0.3027E-01	0.8272E-02	0.2777E-06	0.1850E-04	0.1084E-04	0.9999E 00
660.00	0.8383E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.8713E-01	0.3027E-01	0.8646E-02	0.2765E-06	0.1935E-04	0.1184E-04	0.9999E 00
690.00	0.8377E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.8675E-01	0.3027E-01	0.9020E-02	0.2753E-06	0.2020E-04	0.1295E-04	0.9999E 00
720.00	0.8371E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.8638E-01	0.3027E-01	0.9391E-02	0.2741E-06	0.2105E-04	0.1413E-04	0.9999E 00
750.00	0.8366E-02	0.6469E 00	0.2185E 00	0.8601E-01	0.3027E-01	0.9761E-02	0.2729E-06	0.2189E-04	0.1524E-04	0.9999E 00

表 5.9 TSEARCH サンプル出力 (つづき)

PLUTONIUM COMPOSITION(W/O)

TIME(DAY)	PU-238	PU-239	PU-240	PU-241	PU-242
0.00	0.851	64.694	21.848	9.581	3.027
30.00	0.850	64.721	21.857	9.543	3.028
60.00	0.850	64.748	21.866	9.506	3.029
90.00	0.850	64.775	21.875	9.469	3.031
120.00	0.850	64.802	21.884	9.432	3.032
150.00	0.849	64.829	21.893	9.396	3.033
180.00	0.849	64.855	21.902	9.359	3.034
210.00	0.849	64.882	21.911	9.322	3.036
240.00	0.849	64.908	21.920	9.286	3.037
270.00	0.849	64.934	21.929	9.250	3.038
300.00	0.848	64.961	21.938	9.214	3.039
330.00	0.848	64.987	21.947	9.178	3.041
360.00	0.848	65.013	21.955	9.142	3.042
390.00	0.848	65.039	21.964	9.106	3.043
420.00	0.848	65.065	21.973	9.071	3.044
450.00	0.847	65.091	21.982	9.035	3.045
480.00	0.847	65.116	21.990	9.000	3.047
510.00	0.847	65.142	21.999	8.964	3.048
540.00	0.847	65.167	22.008	8.929	3.049
570.00	0.846	65.193	22.016	8.894	3.050
600.00	0.846	65.218	22.025	8.860	3.051
630.00	0.846	65.243	22.033	8.825	3.053
660.00	0.846	65.269	22.042	8.790	3.054
690.00	0.845	65.294	22.050	8.756	3.055
720.00	0.845	65.319	22.059	8.721	3.056
750.00	0.845	65.344	22.067	8.687	3.057

6. プルトニウム燃料部所有プルトニウムの計算基礎定数

6.1 納入プルトニウムの実効精製日

昭和41年以来、現在までにプルトニウム燃料部に入荷されたプルトニウムは、同位元素毎にまたは作業単位毎の分類として、表6.1のようにまとめられる。それぞれの入荷プルトニウムに対する受入れ分析値も同表にまとめられている。このプルトニウム同位元素およびアメリカシウム（Am）の分析値と分析日から、実効プルトニウムの分離精製日がTSERCHコードにより計算され、その結果は同じく表6.1に示されている。

6.2 アメリカシウムの生成量および基本ガンマ線量率

表6.1に示されているプルトニウム燃料部所有のプルトニウムのアメリカシウムの生成量が昭和47年10月から昭和50年8月までにわたって、図6.1に示されている。これは表6.1に示される実効Pu精製日から出発して計算されている。これによると、ロットNo.008のプルトニウムは49年3月にはアメリカシウムが20,000ppmを越えることになる。

同様に、これらのプルトニウムのガンマ線の空間線量率の目安をつけるのに便利なようにプルトニウムのロット毎に年月を関数として、基本線量率が図6.2に示されている。基本線量率とは式(2-4)の $D_{\gamma}(R) = A D_{\gamma} / 2\pi R^2$ で $A = 1 \text{ cm}^2$ 、 $R = 1 \text{ cm}$ が使用されているということである。 D_{γ} はプルトニウム同位元素およびアメリカシウムの生成量に依存するもので、図6.2の結果はDANIELによって計算された。

表 6.1 プルトニウム燃料部入荷プルトニウムの主要分析値および実効Pu精製日

プルトニウム燃料部 ロットNo. Job	Pu-001	Pu-004	Pu-008	Pu-501	Pu-102	Pu-601		Pu-401	
	4001 標準級Pu	6012 高次化Pu 取扱	6012 50% fissile Pu	5201 DCA	4111 TCA	6202 JOYO		4970 JPDR	
試料 Batch No.				8226	8227	8230	8231	8232	8245
分析場所				BNFL PNC	PNC	BNFL PNC	BNFL PNC	BNFL PNC	BNFL PNC
分析日									
Pu	70'11.13	72'1.21	72'7.8		71'8.18	72'3.23	72'6.9	72'3.23	72'9.19
Am	71'3.4	72'7.21	(72'2.26)	(72'2.26)	71'8.16	72'3.23	72'6.9	72'3.23	72'11.10
分析値									
Pu-238, w/o	-	0.18	0.101	0.02	0.016	0.09	0.094	0.09	0.11
-239, "	91.301	39.10	38.408	90.50	90.538	77.91	77.705	77.68	76.51
-240, "	7.884	44.90	45.624	8.56	8.537	18.36	18.572	18.50	19.45
-241, "	0.780	10.80	10.702	0.87	0.843	3.15	3.182	3.22	3.36
-242, "	0.035	5.02	5.165	0.05	0.066	0.49	0.519	0.51	0.57
Am-241, ppm	-	4800	12,000	210	270	350	860	290	740
Pu 分析日までの推 定経過日数(日)									
実効Pu精製日 (年月日)		70'1.20	70'9.4	71'3.11	71'7.25	72'1.7	71'12.9	72'1.20	72'4.23
参考									
購入先	NUMEC	CEA		BNFL	BNFL			BNFL	BNFL
納入日	1966.1.7	1972.2.29		1971.7.30, 1972.1.11	1971.7.30			1972.4.25	1972.10.16
納入量Kgfiss.Pu	4.6	0.47		33.6	4.9			55	3 Kg JOYO 51Kg 同時入荷

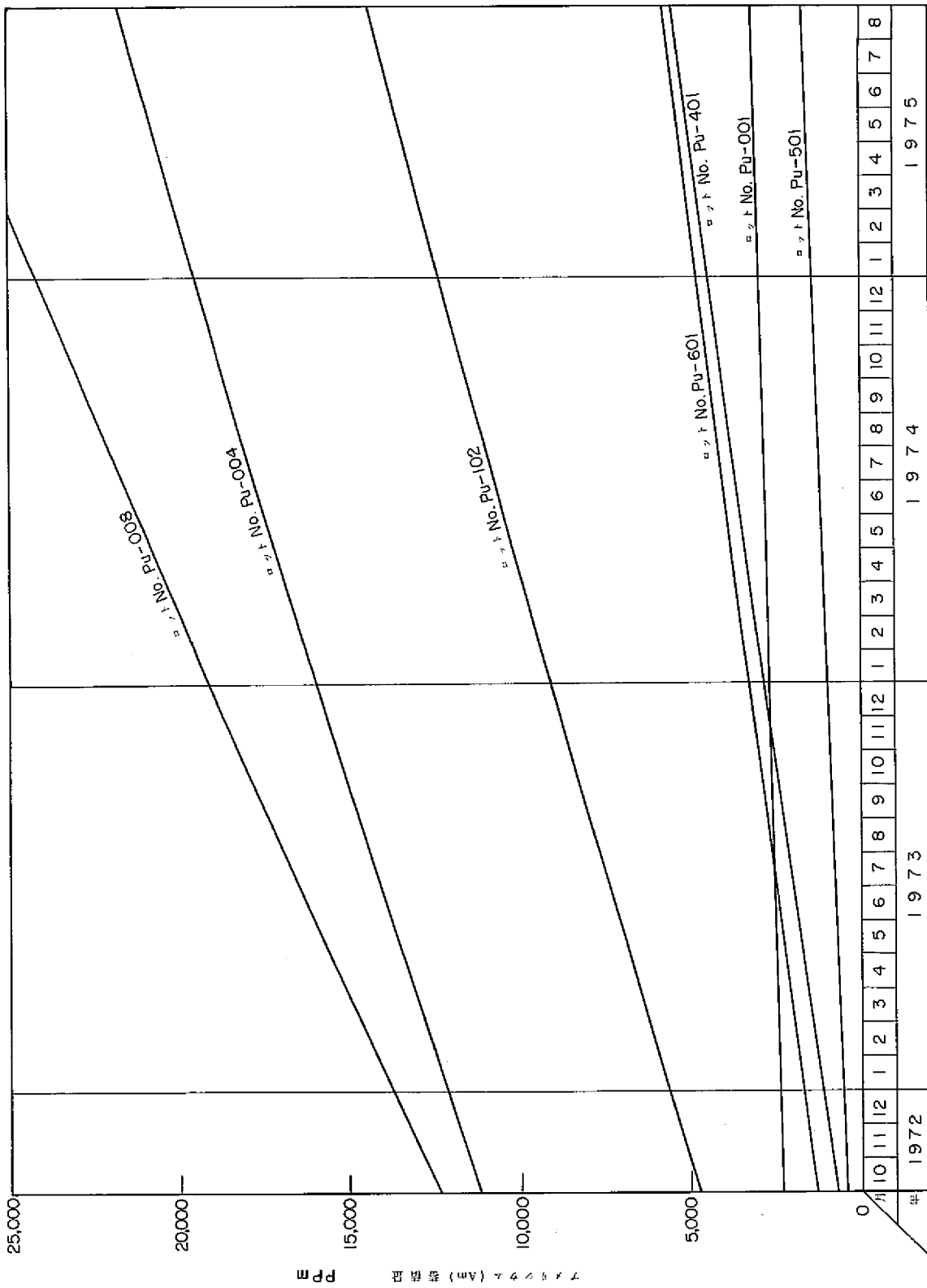


図 6.1 プルトニウム燃料部の現有プルトニウムのAm蓄積量

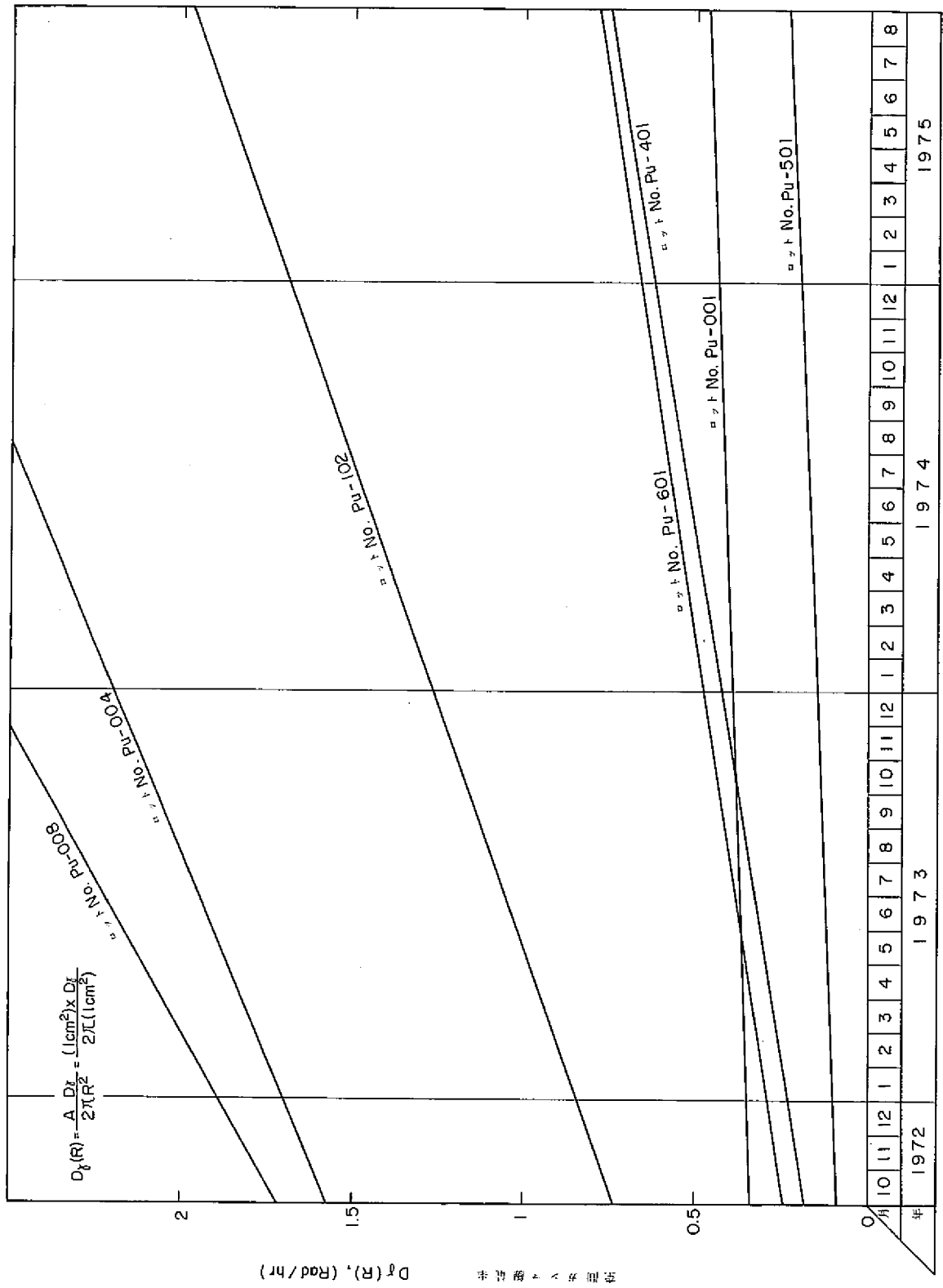


図 6.2 プルトニウム燃料部の現有プルトニウムの空間線量率

7. あとがき

プルトニウムの取扱いの施設設計および作業計画に際し、その取扱いに従事する作業者の放射線外部被ばく線量の評価が必要になる。その評価にあたって実際の外部被ばく線量が計算による推定値を越えるようになってはならない。すなわち、評価は常に安全側になければならない。評価をより正しく行なうには放射線源および作業形態を十分に知る必要がある。それらに本指針は役立つものと考えられる。計算による評価で多くの誤差を含むところは第4章で述べられたように工程の作業条件にある。プルトニウム燃料部では経験による実績と計算との比較によって作業工程解析がされているので、外部被ばく線量の評価はより実際的なものとなっている。

外部被ばく線量の管理にあたっては、評価された線量を越えないよう努力する必要がある。施設設計の段階では、十分なガンマ線および中性子線の遮蔽を施すこと、それも可能な限り線源を小さくして行なうこと。作業計画の段階では、極力無駄な被ばくを受けないよう留意する。取扱うプルトニウムの同位元素組成の選定が許されるならば ^{238}Pu および ^{241}Am の少ないもの。いったん入手したプルトニウムは ^{241}Am の蓄積が大きくなならない早期に作業を終了すること。プルトニウムの混合物およびそれに触れる材料は (α, n) 反応を起す軽元素が含まれないか少ないものを使用すること。取扱い上の段階では、作業計画に従い、可能な限り汚染の広がりおよびMUFを少なくすること、作業時間を効果的に必要以上に線源に近づくかないことのような注意等が、必要となろう。

プルトニウム燃料部の経験によると、プルトニウムのガンマ線に対する外部被ばく線量の低減対策が後記の参考文献に見られるように講じられ、管理できるレベルに十分押えることができるようになった。それに対して、それらの対策の裏にかくれていた中性子被ばくが問題視されるようになり、これは高燃焼度プルトニウムの取扱い計画に伴って問題が大きくなってきた。従って、それに対処すべき低レベル中性子線量の測定技術および中性子の遮蔽技術の開発がこの分野に残された大きな課題である。同様にこれらの計算手法についても未解決な面が残されている。

終りにあたり、放射線遮蔽関係のデータを提供下さいました安全管理課の大内新一氏、プルトニウム燃料部各工程の作業条件を調査して下さいました照沼確夫、小山兼二、岡本弘信各氏、第6章の計算に協力いただいた笹島秀吉氏、およびVIDALコードの整備に協力いただいた電子計算機室の方々等に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) H.H. Van Tuyl, "Calculation of Gamma Dose Rates at Surface of Plutonium Oxide Sources" BNWL-1259 (1970)
- 2) T.E. Caye, "Westinghouse and PNC Saxton Plutonium Project QPR for the period ending March 31, 1972 (1973)
- 3) W.G. Roesch, "Surface Dose Rates from Plutonium" HW-51317 (1957)
- 4) L.G. Faust, "Measured and Calculated Surface Dose Rates from Plutonium and Plutonium Oxides" BNWL-SA-22 (1965)
- 5) L.G. Faust, "Neutron and Photon Spectra, Dose Rates, and Its Changes with Time Since Chemical Separation for High Exposure Plutonium" BNWL-SA-1644 (1968)
- 6) L.G. Faust, & L.W. Brackenbush, "FFTF Fuel Suppliers Meeting" BNWL-SA-1388, Chap.12 (1967)
- 7) 中野, 笹尾, 大西, 宮脇, "高次化プルトニウムの取扱い" SN841-71-12 (1971.4)
- 8) 増田, 松本, 五十嵐, 武藤, "高次化プルトニウムによる燃料製造試験(I)ペレット製造工程" SN841-71-29, (1971.10)
- 9) 三島, 堤, 五十嵐, 武藤, "高次化プルトニウム燃料製造試験(II), 燃料棒加工および集合体工程" SN841-72-03, (1972.2)
- 10) 岡本, "高次化プルトニウム取扱いの際の放射線量および被ばく量推定"印刷中
- 11) 武藤, 甲野, 他 "高次化プルトニウムの取扱対策委員会, 中間報告" (1971.3)
- 12) 武藤, 甲野, 他 "高次化プルトニウムの取扱対策委員会報告書" (1972.3)
- 13) L.G. Faust, L.W. Brackenbush & et al, "Radiation Dose Rates from UO_2 - PuO_2 Thermal Reactor Fuels" Nucl. Tech. Vol.15 Aug. 1972. pp249~256
- 14) T.H. Rockwell, "Reactor Shielding Design Manual" D. Van Nostrand Co., (1956)
- 15) 岸本, "GAMBIA, 低エネルギーガンマ線しゃへい計算コード" SN551-71-02, (1971)
- 16) 笹島, 湯本 "DANIEL, 燃料設計コード集(III)" SN841-72-16, pp57-1~57-5 (1972.6)

- 17) 三島, 増田, “ VIDAL, プルトニウム燃料の製造, 加工における被ばく線量の計算コード ”原稿作成中
- 18) 梶山, 湯本 “ 燃料設計コード集(Ⅲ), T SERCH ”
SN 841-72-16, pp52-1~52-13 (1972.6)
- 19) 梶山, 湯本 “ 軽水動力炉(80万KW級)燃料の燃焼計算 ”原稿作成中

付 録

A	プルトニウムおよびウランの放射線特性	43
A-1	アルファ線およびベータ線	43
A-2	エックス線およびガンマ線	44
A-3	中性子	47
B	放射線束と線量率との変換表	48
B-1	ガンマ線束 ($r/cm \cdot sec$) - 線量率 (R/hr or rad/hr)	48
B-2	中性子線束 ($n/cm \cdot sec$) - 線量率 ($mrem/hr$)	50
C	物質の放射線吸収係数等および遮へい効果	52
C-1	エックス線 (24 KeV ~ 131 KeV)	52
C-2	ガンマ線 (100 KeV ~ 10 MeV)	54
C-3	低ガンマ線 (60 KeV ~ 200 KeV)	56
C-4	ガンマ線遮へいと遮へい効果	58
C-5	プルトニウムの物質 (鉛, 鋼, 鉛ガラス, 鉛グローブ, PCV, ルサイト) による遮へい効果	60
C-6	中性子除去断面積	66
D	プルトニウム燃料部における工程の作業解析	67
D-1	ペレット製造工程標準作業条件	67
a	第1開発室	67
b	第2開発室	68
D-2	燃料棒加工工程標準作業条件	69
a	第1開発室	69
b	第2開発室	70
D-3	湿式回収工程標準作業条件	71
a	A-104	71
b	F-104	72
D-4	品質管理課検査・試験工程標準作業条件	73
E	計算例, 常陽燃料製造時の被ばく線量評価	75
F	ガンマ線, 中性子線束の有限形状線源による計算式	78

A プルトニウムおよびウランの放射線特性

A-1 アルファ線およびベータ線¹⁾

CHARGED PARTICLE RADIATIONS FROM ISOTOPES AND SELECTED DAUGHTERS OF PLUTONIUM.

Isotope	Half-life		Specific Activity, curies/g Isotope	Alpha Radiation, Mev Rel.Int., %		Beta Radiation, Mev Rel.Int., %		Isotope	Daughter Half-life	
Pu ²³²	36	min	2.3×10^7	6.58	100			U ²²⁸	9.3	min
Pu ²³³	20	min	4.0×10^7	6.30	100			U ²²⁹	58	min
Pu ²³⁴	9.0	hr	1.5×10^6	6.19	100			U ²³⁰	20.8	days
Pu ²³⁵	26	min	9.3×10^2	5.85	100			U ²³¹	4.3	days
Pu ²³⁶	2.87	yr	5.32×10^2	5.763	69			U ²³²	74	yr
				5.716	31					
Pu ²³⁷	45.6	days	4.0×10^{-1}	5.610	0.18					
				5.65	21					
Pu ²³⁸	8.64×10^1	yr	1.74×10^1	5.36	79			U ²³⁴	2.48×10^5	yr
				5.495	72					
Pu ²³⁹	2.436×10^4	yr	6.147×10^{-2}	5.452	28			U ²³⁵	7.1×10^8	yr
				5.352	0.09					
Pu ²⁴⁰	6.58×10^3	yr	2.27×10^{-1}	5.208	5×10^{-3}			U ²³⁶	2.39×10^7	yr
				5.147	72.5					
Pu ²⁴¹	1.30×10^{-1}	yr	4.56×10^{-3}	5.134	16.8			U ²³⁷	6.75	days
				5.096	10.7					
Pu ²⁴²	3.79×10^5	yr	3.90×10^{-3}	5.064	3.7×10^{-2}			Am ²⁴¹	458	yr
				4.999	1.3×10^{-2}					
Pu ²⁴³	4.98	hr	2.59×10^6	4.917	5×10^{-3}			U ²³⁸	4.51×10^9	yr
				5.162	76					
Pu ²⁴⁴	7.6×10^7	yr	1.9×10^{-5}	5.118	24			Am ²⁴³	7.95×10^3	yr
				5.014	0.1					
Pu ²⁴⁵	10.1	hr	1.27×10^6	4.833	75	0.021	100	U ²⁴⁰	14.1	hr
				4.848	25					
Pu ²⁴⁶	11	days	4.9×10^4	4.898	76			Am ²⁴⁵	1.98	hr
				4.658	24					
Am ²⁴¹	4.58×10^2	yr	3.24	0.579	62			Am ²⁴⁶	25	min
				0.490	38					
U ²³⁷	6.75	days	8.16×10^4	0.15	73			Np ²³⁷	2.20×10^6	yr
				0.33	27					
U ²³⁸	4.5	yr	4.55	5.534	0.35			Np ²³⁷	2.20×10^6	yr
				5.500	0.23					
U ²³⁹	4.5	yr	4.55	5.477	85			Np ²³⁷	2.20×10^6	yr
				5.435	12.6					
U ²⁴⁰	4.5	yr	4.55	5.378	1.7			Np ²³⁷	2.20×10^6	yr
				5.311	1.2×10^{-2}					
U ²⁴¹	4.5	yr	4.55	0.249	74			Np ²³⁷	2.20×10^6	yr
				0.084	26					

* For Am²⁴¹ and U²³⁷ the units of specific activity are curies/g Pu²⁴¹.

1) Plutonium Handbook, Vol. II, H.V. Larson "Factors in controlling personnel exposure to radiation from external sources. P. 848

A-2 エックス線およびガンマ線²⁾

Gamma and X-Radiations from Selected Isotopes of the Actinides

Isotope	Half Life	Gamma Ray		X-ray		e/r
		Energy keV	Yield %	Energy keV	Yield %	
Pu ²³⁶	2.85 y	47	.031	17	12.8	1000
		110	.012	17	.067	14
		165	6.6×10^{-4}			
Pu ^{237m}	0.18 s	145	5.38×10^{-9}	17	38.5	39
Pu ²³⁷	45.6 d	33.2				
		43.5				
		55.6				
		59.6				
		76.4				
		96.0				
		43.8	.038	17	11	740
Pu ²³⁸	86.4 y	99	8×10^{-3}	17	.035	11
		150	1×10^{-3}			
		203	4×10^{-6}			
		760	5×10^{-5}			
		810				
		875				
Pu ²³⁹	2.436×10^4 y	37	1.6×10^{-3}	13.6	1.2	
		52	6.4×10^{-3}	17.4	1.4	
		120	9.6×10^{-4}	20.5	3.3	
		207	3.2×10^{-4}			
		340	4.9×10^{-4}			
		380	9.6×10^{-4}			
Pu ²⁴⁰	6.58×10^3 y	420	6.4×10^{-4}			
		45.3	.009	17	4	
		145	2.8×10^{-4}			
		45	.01	17	4.1	
		12.2				
Pu ²⁴¹	13.0 y	29.7				
		36.7				
		42.2	1	17	7.3	16
		54				
		84	21	17	16.6	0.2
		96				
		134				
Pu ²⁴²	3.79×10^5 y	381	.7			
		84	1.6			16
		137	0.26			1
		169	0.09			1.2
		205	0.03			
Pu ²⁴³	49.8 h	212	0.27			
		68	0.59			
		110	1×10^{-4}			1
		142	0.07			
		184	0.014			
		206	5×10^{-6}			
		235	5×10^{-6}			
		253	0.017			
Th ²²⁸	1.91 y	84	1.6			16
		137	0.26			1
		169	0.09			1.2
		205	0.03			
		212	0.27			
Th ²³⁰	8×10^4 y	68	0.59			
		110	1×10^{-4}			
		142	0.07			
		184	0.014			
		206	5×10^{-6}			
		235	5×10^{-6}			
		253	0.017			

2) BNWL-SA-22, L.G. Faust, "Measured and calculated surface dose rates of plutonium and plutonium oxides"

(continued)

Isotope	Half Life	Gamma Ray		X-ray		e/r
		Energy keV	Yield	Energy	Yield	
Th ²³¹	25.64 h	26	13			
		89.8	11			
		99.3	2			
		136				
		146	0.2			
		163	0.2			
		180	0.06			
		218	0.05			
		310	0.004			
		Th ²³²	1.42 × 10 ¹⁰ y			
Th ²³³	22.12 m	29.2	2.1			2.8
		56.7				
		86.9	2.7			0.9
		171	0.7			
		195	0.3			
		253				
		359				
		453	1			
		590				
		670	0.25			
U ²³²	73.6 y	751				
		895	0.14			
		57.9	0.21			150
		131	0.075(1.75) ⁵			
		268	4 × 10 ⁻³			
U ²³³	1.62 × 10 ⁵ y	326	4 × 10 ⁻³			
		29				
		42.8	0.05			
		56.1	0.01			
		310	0.1			
U ²³⁴	2.48 × 10 ⁵ y	53	1 × 10 ⁻⁵			
U ²³⁵	7.13 × 10 ⁸ y	118				
		95	9			
		110	5			
		144	12			
		165	> 4			
		185	55			
U ²³⁶	2.39 × 10 ⁷ y	205	4			
		163	0.5			
U ²³⁷	6.75 d	26.4				
		33.2				
		43.5				
		59.6	36			
		65	2.3			
		114				
		165	3.6	17	0.19	0.13
		208	24	17	22	2.3
		267	0.9	17	0.22	0.63
		332	1.4	17	0.22	0.04
		335	0.2	17	0.016	0.2
		368	0			

(continued)

Isotope	Half Life	Gamma Ray		X-ray		
		Energy keV	Yield %	Energy keV	Yield %	e/T
U ²³⁸	4.5 × 10 ⁹ y	48				
Np ²³⁷	2.2 × 10 ⁶ y	29.7	14			
		56.8				
		87	14			
		145	0.8			
		175	0.1			
		200	0.3			
Am ²⁴¹	4.58 × 10 ² y	26.4	2.5	17	6.5	7
		33.2	.15	17	14.3	>240
		43.5	0.073			
		59.6	36	17	21.1	<1.5
		99	0.023			
		103	0.019			
		113	2.5 × 10 ⁻³			
		130	3.8 × 10 ⁻³			
		159	2.9 × 10 ⁻⁴			
		210	5.8 × 10 ⁻⁴			
		270	7.6 × 10 ⁻⁵			
		330	2.5 × 10 ⁻⁴			
		370	1.5 × 10 ⁻⁴			
Am ^{242m}	152 y	42.28				
		44.5 _{EC}				
Am ²⁴²	16.01 h					
Am ²⁴³	7.95 × 10 ³ y	75				0.3
Cm ²⁴²	1625 d	44.03	0.039			520
		100	6 × 10 ⁻³			
		157	2.7 × 10 ⁻³			
		210	2 × 10 ⁻⁵			
		562	1.8 × 10 ⁻⁴			
		605	1.4 × 10 ⁻⁴			
		890	9 × 10 ⁻⁵			
		935				
		1010	10 ⁻⁵			≥ 0.5
Cm ²⁴³	32 y	106				
		210				2.1
		228				2.6
		278				1.2
Cm ²⁴⁴	17.6 y	43	0.021			760
		100	1.5 × 10 ⁻³			11
		150	1.3 × 10 ⁻³			
Cm ²⁴⁵	8 × 10 ³ to	~130	5			
	1.4 × 10 ⁴ y	173	14			
Cf ²⁴⁶	35.7 h	42	0.014			
		96	0.012			
		146	3.5 × 10 ⁻³			
Cf ²⁵²	2 to 2.6 y	42	0.014			
		100	0.01			
		Others				

A - 3 中性子²⁾

Neutron Radiations from Selected Isotopes and Compounds

Isotope	Spontaneous Fission Half Life	ν n/fission	Yield n/gm-sec	(α, n) Reactor Rate n/gm-sec isotope
Pu ²³⁶	3.5×10^9 y	2.3	3.7×10^4	
Pu ²³⁸	3.8×10^{10} y	2.33	3.38×10^3	
Pu ²³⁸ F ₄				2.1×10^6
Pu ²³⁸ O ₂				1.4×10^4
Pu ²³⁹	5.5×10^{15} y	3.0	3×10^{-2}	
Pu ²³⁹ F ₄				4.3×10^3
Pu ²³⁹ O ₂				4.5×10^1
Pu ²⁴⁰	1.22×10^{11} y	2.25	1.02×10^3	
Pu ²⁴⁰ F ₄				1.6×10^4
Pu ²⁴⁰ O ₂				1.7×10^2
Pu ²⁴²	7.1×10^{10} y	2.18	1.7×10^3	
Pu ²⁴² F ₄				1.7×10^2
Pu ²⁴² O ₂				2.7
Pu ²⁴⁴	2.5×10^{10} y	2.3*	5.1×10^3	
Cm ²⁴⁰	7.9×10^5 y	2.4*	1.67×10^9	
Cm ²⁴²	7.2×10^6 y	2.3 - 3.0	2.28×10^7 max.	
Cm ²⁴⁴	1.4×10^7 y	2.6 - 2.8	1.1×10^7 max.	$2.0 \times 10^{7**}$ (Cm ²⁴⁴ O ₂)
Bk ²⁴⁹	2×10^8 to 1.5×10^9 y	3.67	9.8×10^6 max.	
Cf ²⁴⁶	2.1×10^3 y	2.88	7.37×10^{10}	
Cf ²⁵²	82 + 6 y	3.5 - 3.8	2.43×10^{12} max.	
Cf ²⁵⁴	55 to 85 d	3.9	1.35×10^{15} max.	
Fm ²⁵⁴	200 to 246 d	4.0	3.82×10^{14} max.	

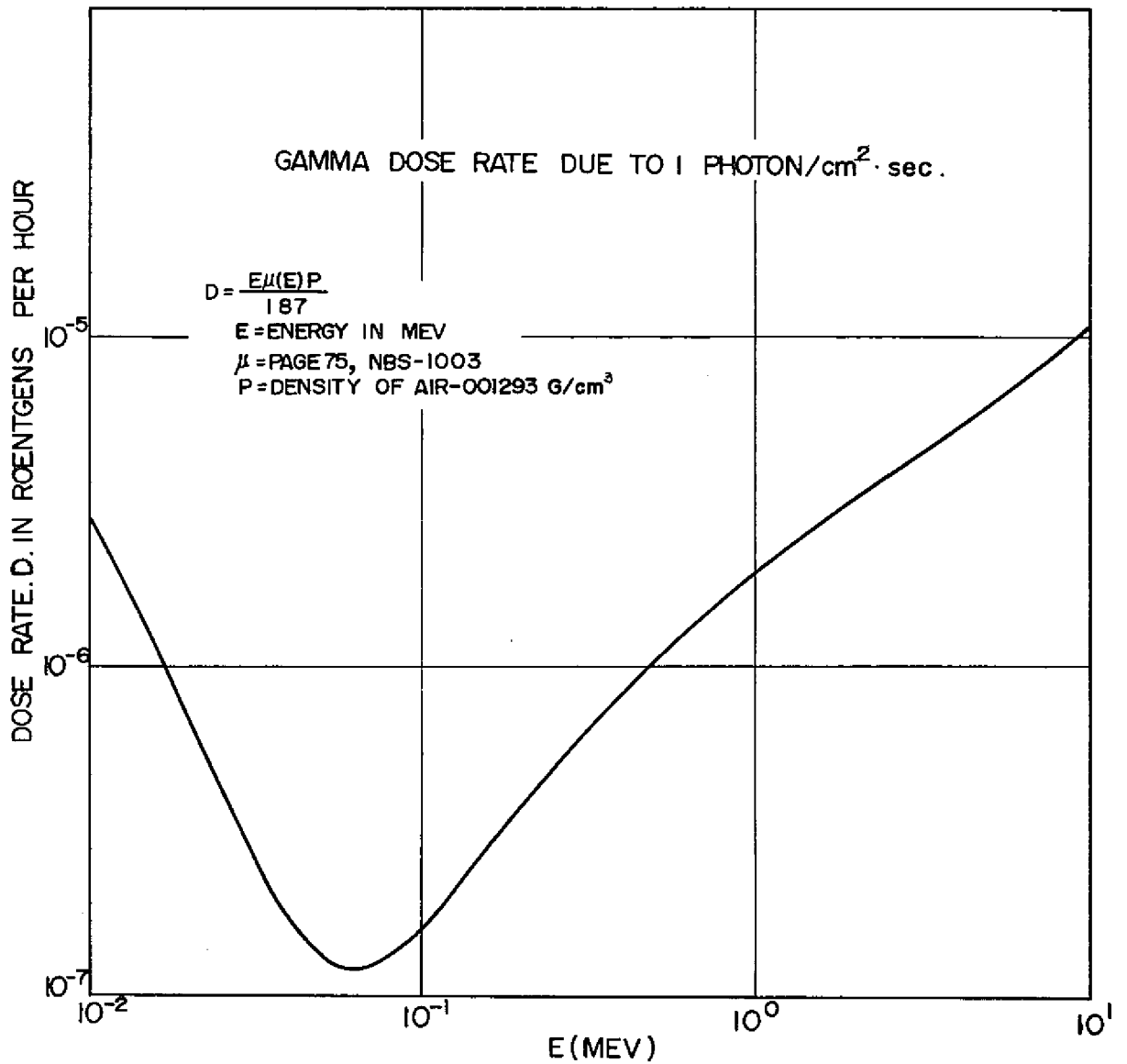
* Estimated

** ORNL 4357

2) BNWL-SA-22, L.G. Faust, "Measured and calculated surface dose rates of plutonium and plutonium oxides"

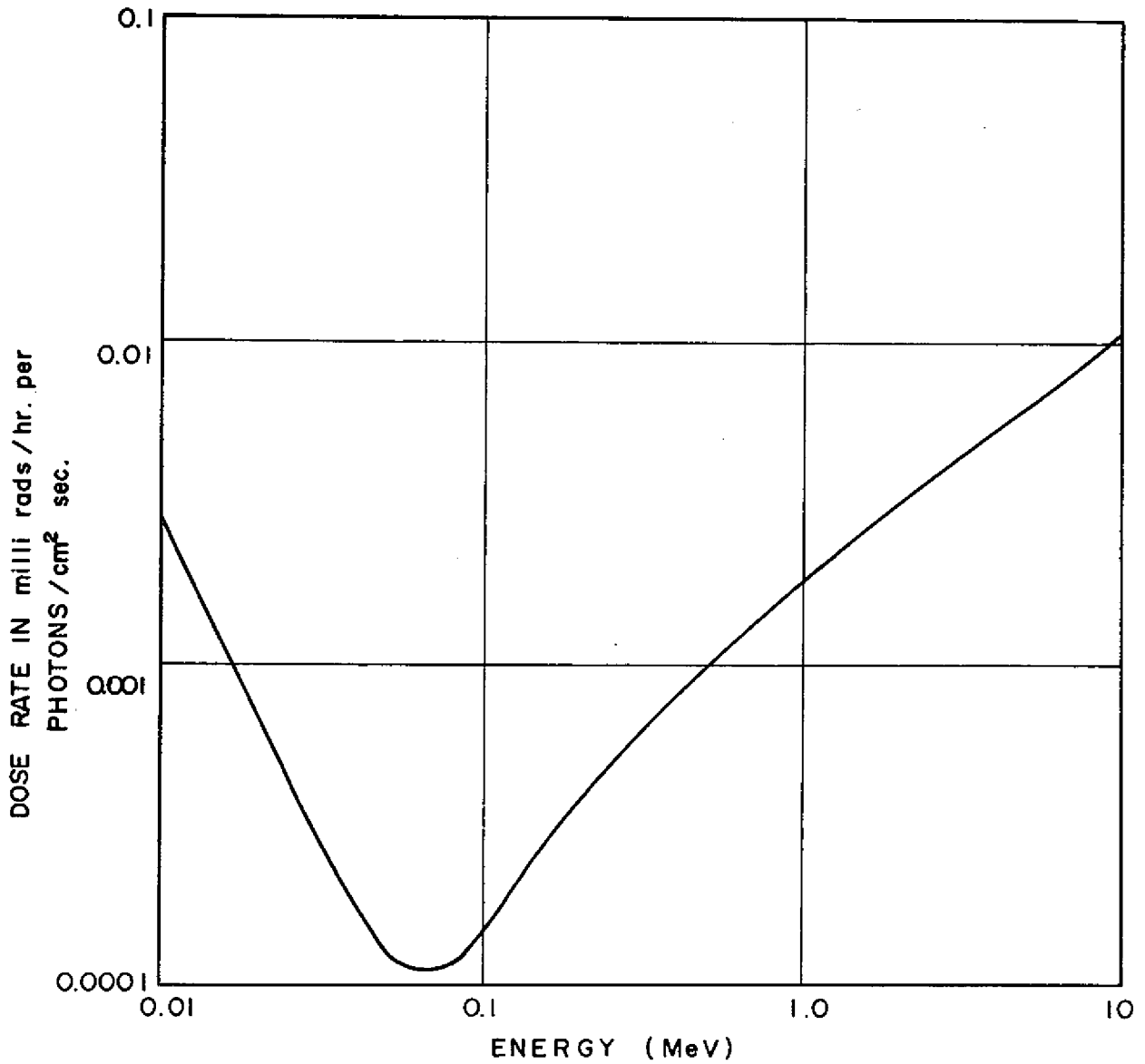
B 放射線束と線量率との変換表...

B-1 ガンマ線束 ($\gamma/cm^2 \cdot sec$) - 線量率 (R/hr. or rad/hr)



CONVERSION CURVE FOR GAMMA FLUX AND DOSE RATE ¹⁾

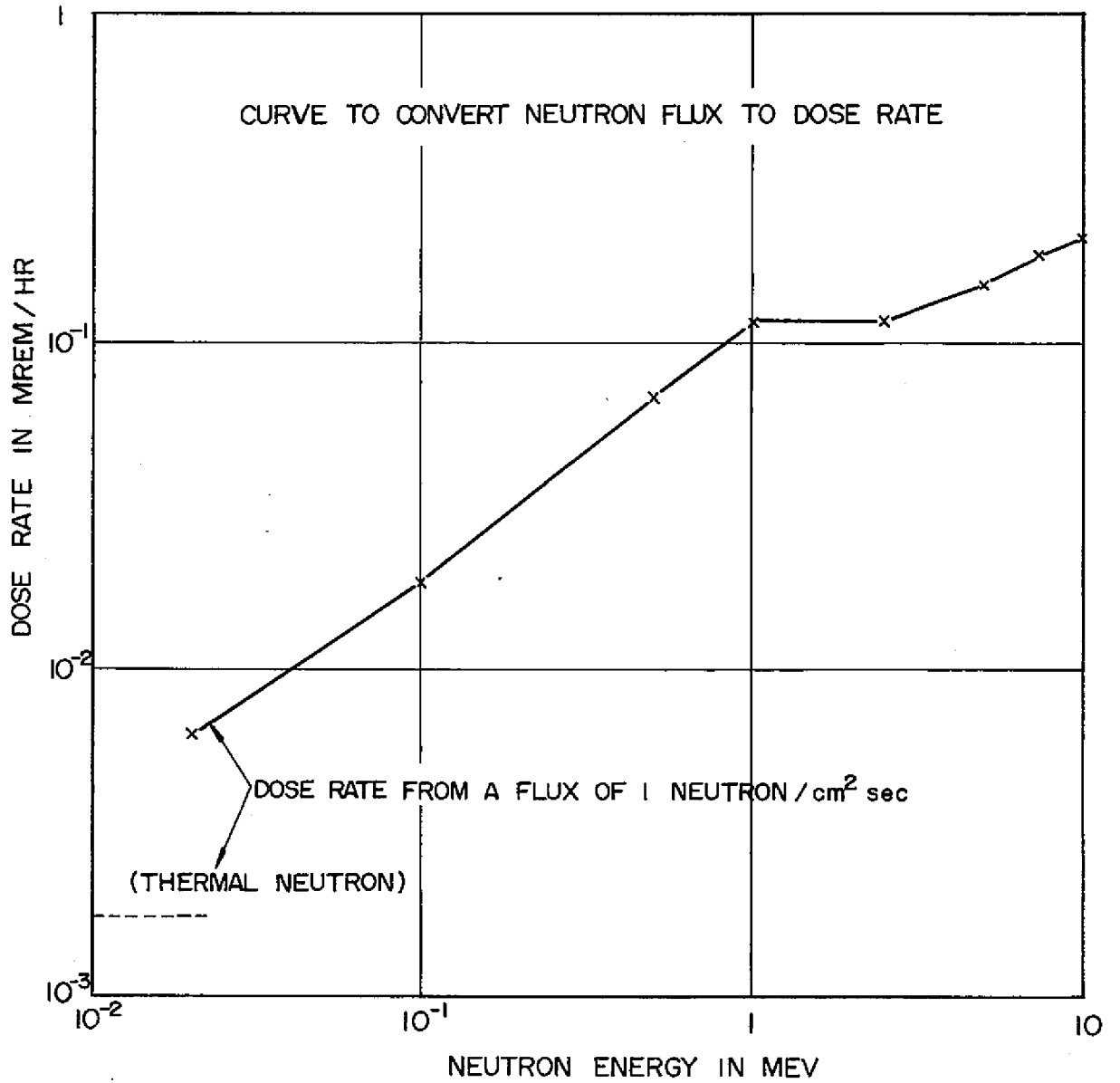
¹⁾ Reactor Shielding Design Manual, T.H. Rockwell



CONVERSION BETWEEN GAMMA NUMBER
FLUX AND DOSE RATE ²⁾

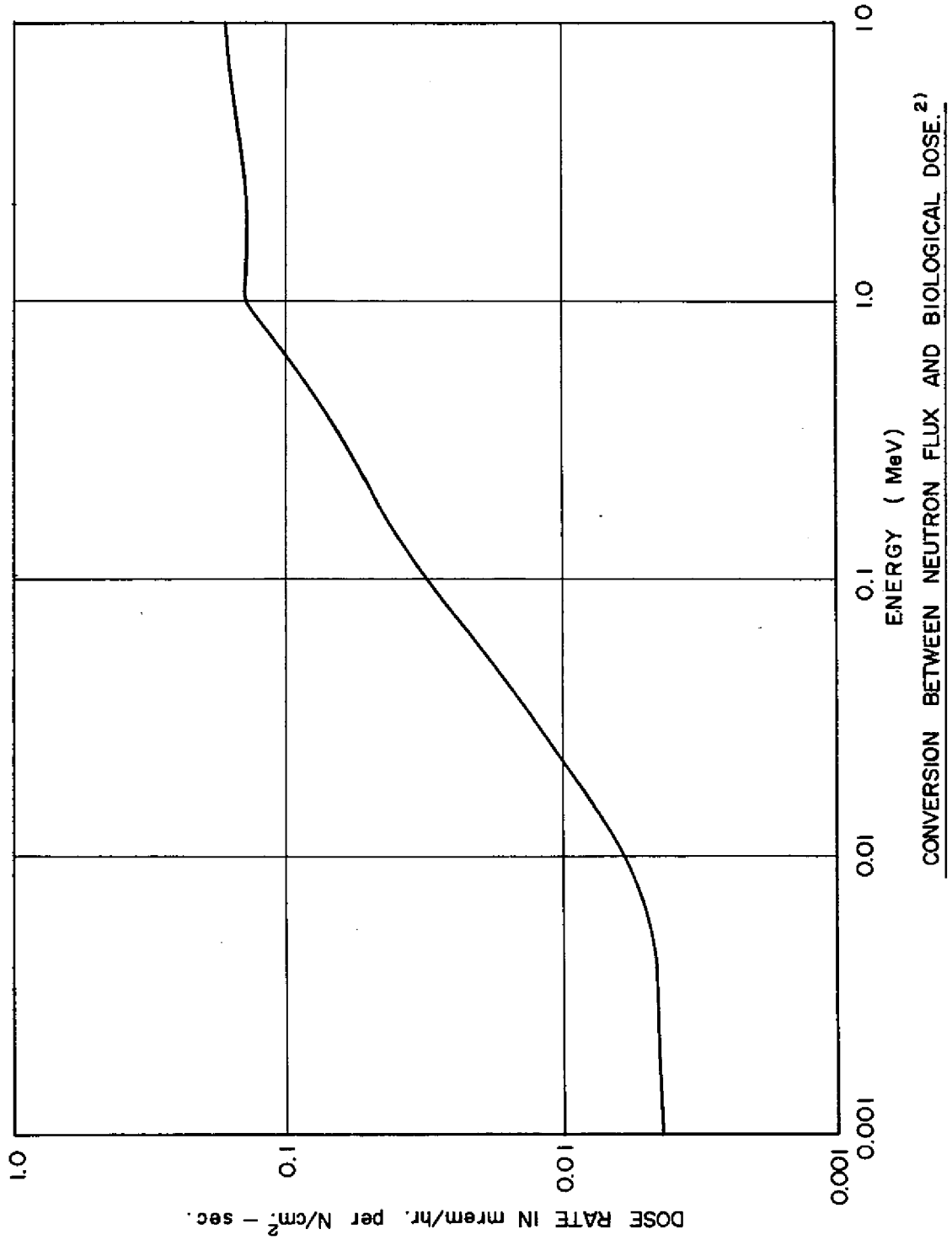
2) AERE, R-3216

B-2 中性子線束 ($n/cm^2 \cdot sec$) - 線量率 (mrem/hr)



CONVERSION CURVE FOR NEUTRON FLUX AND DOSE RATE ¹⁾

1) Reactor Shielding Design Manual, T.H. Rockwell



2) AERE, R-3216

C 物質の放射線吸収係数等および遮蔽効果

C-1 エックス線 (24 KeV ~ 131 KeV)

Table 1. Experimentally determined values of x-ray attenuation coefficients¹⁾

X-ray energy (keV)	Beryllium (cm ² /gm)	Carbon (cm ² /gm)	Magnesium (cm ² /gm)	Aluminum (cm ² /gm)	Sulfur (cm ² /gm)	Titanium (cm ² /gm)
24.00±0.02						
25.00±0.02	0.1780±0.0028	0.2968±0.0018	1.450 ± 0.011	1.811 ± 0.012	3.109 ± 0.045	8.541 ± 0.041
26.01±0.02						
28.00±0.02						
30.04±0.03	0.1697±0.0017	0.2466±0.0017	0.8966±0.0056	1.085 ± 0.006	2.035 ± 0.016	4.992 ± 0.016
35.05±0.04						
35.06±0.04						3.246 ± 0.015
40.04±0.05	0.1572±0.0010	0.2032±0.0006	0.4734±0.0015	0.5561±0.0044	0.9764±0.0099	2.239 ± 0.006
45.01±0.06						
50.08±0.08	0.1520±0.0008	0.1841±0.0006	0.3200±0.0036	0.3517±0.0014	0.5711±0.0031	1.199 ± 0.004
55.05±0.10						
60.03±0.12	0.1467±0.0007	0.1715±0.0005	0.2519±0.0021	0.2748±0.0020	0.3975±0.0044	0.7515±0.0020
61.82±0.12						
70.04±0.16	0.1421±0.0008	0.1649±0.0008	0.2139±0.0014	0.2219±0.0014	0.3085±0.0011	0.5252±0.0016
70.20±0.16						
79.96±0.21				0.1970±0.0008	0.2544±0.0013	0.3997±0.0024
80.16±0.22						
84.99±0.23	0.1366±0.0005	0.1549±0.0006	0.1864±0.0012			
89.92±0.26				0.1812±0.0016	0.2253±0.0011	0.3187±0.0019
90.18±0.26						
94.00±0.28						
100.06±0.32	0.1306±0.0007	0.1512±0.0007	0.1658±0.0011	0.1665±0.0008	0.2012±0.0010	0.2670±0.0007
100.38±0.33						
109.99±0.39						0.2297±0.0008
110.39±0.39						
114.87±0.43			0.1567±0.0006	0.1565±0.0010	0.1773±0.0013	
120.21±0.47						0.2050±0.0016
120.67±0.47						
123.09±0.49						
127.11±0.53						
130.31±0.55	0.1229±0.0011	0.1414±0.0010	0.1439±0.0014	0.1463±0.0012	0.1653±0.0022	0.1910±0.0020
131.41±0.55						

X-ray energy (keV)	Iron (cm ² /gm)	Nickel (cm ² /gm)	Copper (cm ² /gm)	Zinc (cm ² /gm)	Zirconium (cm ² /gm)	Niobium (cm ² /gm)
24.00±0.02						
25.00±0.02	17.72 ± 00.08	16.93 ± 0.10	18.01 ± 0.13	19.79 ± 0.09	40.83 ± 0.21	43.17 ± 00.20
26.01±0.02						
28.00±0.02						
30.04±0.03	8.167 ± 0.030	10.21 ± 0.05	10.84 ± 00.05	11.95 ± 0.06	25.00 ± 0.15	25.92 ± 0.10
35.05±0.04						
35.06±0.04						
40.04±0.05	3.637 ± 0.011	3.597 ± 0.019	4.857 ± 0.025	5.326 ± 0.020	11.40 ± 0.07	12.13 ± 0.06
45.01±0.06						
50.08±0.08	1.967 ± 00.005	2.469 ± 0.012	2.592 ± 0.012	2.880 ± 0.012	6.156 ± 0.030	6.551 ± 0.040
55.04±0.10						
60.03±0.12	1.207 ± 0.003	1.534 ± 0.003	1.580 ± 0.002	1.761 ± 0.008	3.779 ± 0.011	4.072 ± 0.013
61.82±0.12						
70.04±0.16	0.8110±0.0023	1.004 ± 0.004	1.055 ± 0.003	1.163 ± 0.006	2.447 ± 0.004	2.688 ± 0.015
70.20±0.16						
79.96±0.21	0.5920±0.0018					
80.16±0.22						
84.99±0.23		0.6319±0.0027	0.6604±0.0033	0.7057±0.0034	1.442 ± 0.006	1.582 ± 0.004
89.92±0.26	0.4542±0.0015					
90.18±0.26						
94.00±0.28						
100.06±0.32	0.3674±0.0018	0.4304±0.0066	0.4550±0.0020	0.4852±0.0026	0.9456±0.0054	1.042 ± 0.004
100.38±0.33						
109.99±0.39	0.3085±0.0010					
110.39±0.39						
114.87±0.43		0.3244±0.0026	0.3410±0.0020	0.3716±0.0022	0.6798±0.0043	0.7454±0.0038
120.21±0.47	0.2661±0.0020					
120.67±0.47						
123.09±0.49						
127.11±0.53						
130.31±0.55	0.2374±0.0016	0.2658±0.0018	0.2802±0.0023	0.2963±0.0027	0.5179±0.0028	0.5762±0.0045
131.41±0.55						

1) X-Ray attenuation coefficient measurements, J.H. McCrary, et al., Physical Review, Vol. 153, No. 2, Jan., 1967

Table 1 (continued)

X-ray energy (keV)	Molybdenum (cm ² /gm)	Silver (cm ² /gm)	Tin (cm ² /gm)	Lanthanum (cm ² /gm)	Cadolinium (cm ² /gm)	Hafnium (cm ² /gm)
24.00±0.02		10.94 ±0.08				
25.00±0.02	44.35 ±0.24	9.818 ±0.042	11.49 ±0.07	17.25 ±0.09	23.83 ±0.16	34.51 ±0.21
26.01±0.02		53.95 ±0.37				
28.00±0.02			8.251 ±0.080			
30.04±0.03	27.30 ±0.15	36.36 ±0.18	41.71 ±0.22	10.25 ±0.05	15.35 ±0.08	21.37 ±0.18
35.05±0.04						
35.06±0.04				6.835±0.038	9.926±0.106	13.96 ±0.15
40.04±0.05	12.91 ±0.06	17.09 ±0.06	19.13 ±0.08	27.06 ±0.18	6.949±0.027	9.85 ±0.10
45.01±0.06					5.107±0.027	
50.03±0.08	7.03 ±0.036	9.231 ±0.036	10.53 ±0.03	14.44 ±0.06		5.378±0.036
55.04±0.10					15.43 ±0.10	
60.03±0.12	4.320 ±0.012	5.708 ±0.026	6.622 ±0.030	8.963±0.055	12.41 ±0.07	3.341±0.014
61.82±0.12						
70.04±0.16	2.804 ±0.044	3.786 ±0.025	4.271 ±0.026	5.961±0.027	8.180±0.039	10.45 ±0.07
70.20±0.16						
79.96±0.21		2.636 ±0.016		4.161±0.022	5.687±0.046	7.449±0.049
80.16±0.22						
84.99±0.23	1.666 ±0.009		2.525 ±0.010			
89.92±0.26		1.934 ±0.008		3.071±0.014	4.165±0.030	5.424±0.058
90.18±0.26						
94.00±0.28						
100.06±0.32	1.097 ±0.008	1.454 ±0.004	1.676 ±0.012	2.319±0.011	3.127±0.022	4.203±0.029
100.38±0.33						
109.99±0.39						3.271±0.034
110.39±0.39						
114.87±0.43	0.7840±0.0027	1.036 ±0.008	1.172 ±0.003	1.638±0.007	2.229±0.009	
120.21±0.47						2.557±0.042
120.67±0.47						
123.09±0.49						
127.11±0.53						
130.31±0.55	0.6299±0.0023	0.7524±0.0032	0.8476±0.0057	1.184±0.009	1.575±0.016	2.176±0.035
131.41±0.55						

X-ray energy (keV)	Tungsten (cm ² /gm)	Gold (cm ² /gm)	Lead (cm ² /gm)	Thorium (cm ² /gm)	Uranium (cm ² /gm)	Plutonium (cm ² /gm)
24.00±0.02						
25.00±0.02	35.96 ±0.25	43.48 ±0.18	50.78 ±0.58	60.62 ±0.32	63.75 ±0.48	67.5 ±1.3
26.01±0.02						
28.00±0.02						
30.04±0.03	22.61 ±0.27	26.86 ±0.08	31.60 ±0.21	38.04 ±0.30	41.08 ±0.27	42.98 ±0.64
35.05±0.04					28.32 ±0.16	
35.06±0.04						
40.04±0.05	10.45 ±0.12	12.79 ±0.09	14.90 ±0.14	18.03 ±0.07	19.60 ±0.11	21.77 ±0.20
45.01±0.06						
50.08±0.08	5.746±0.036	6.996±0.024	7.948±0.031	10.12 ±0.05	11.15 ±0.05	11.70 ±0.15
55.04±0.10						
60.03±0.12	3.623±0.023	4.365±0.020	4.875±0.020	6.487±0.019		7.40 ±0.10
61.82±0.12					6.476±0.022	
70.04±0.16		2.892±0.018	3.251±0.016	4.298±0.025	4.670±0.035	4.953±0.081
70.20±0.16						
79.96±0.21	7.729±0.028		2.318±0.009	3.101±0.014	3.397±0.028	3.543±0.024
80.16±0.22						
84.99±0.23		7.602±0.061				
89.92±0.26	5.816±0.035	6.590±0.040		2.284±0.009		2.594±0.016
90.18±0.26					2.446±0.026	
94.00±0.28			6.462±0.025			
100.06±0.32	4.362±0.037	5.032±0.016		1.761±0.008		1.956±0.014
100.38±0.33					1.918±0.011	
109.99±0.39			4.327±0.020			1.553±0.012
110.39±0.39					1.507±0.015	
114.87±0.43	3.166±0.018	3.588±0.016		4.725±0.027		
120.21±0.47				4.266±0.033		
120.67±0.47					4.277±0.041	
123.09±0.49					4.245±0.002	
127.11±0.53					3.870±0.024	
130.31±0.55	2.322±0.021	2.635±0.024	2.878±0.018	3.516±0.018	3.84 ±0.12	3.718±0.035
131.41±0.55					3.618±0.036	

C-2 ガンマ線 (100KeV~10MeV)²⁾

Table 8-9 TOTAL MASS ATTENUATION COEFFICIENTS (μ/ρ)
(in cm^2/gm)

Data from Ref. 53.

Material	Gamma-Ray Energy, Mev																	
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.25	1.5	2	3	4	5	6	8	10.0
H	.295	.265	.243	.212	.189	.173	.160	1.40	.126	.113	.103	.0976	.0691	.0579	.0502	.0446	.0371	.0321
He	.132	.119	.109	.0945	.0847	.0723	.0715	.0628	.0565	.0504	.0459	.0394	.0313	.0266	.0234	.0211	.0180	.0161
C	.149	.134	.122	.106	.0953	.0870	.0805	.0707	.0636	.0568	.0517	.0445	.0357	.0306	.0273	.0249	.0218	.0200
N	.150	.134	.123	.107	.0953	.0869	.0805	.0708	.0636	.0568	.0518	.0445	.0359	.0306	.0276	.0254	.0224	.0206
O	.151	.134	.123	.107	.0953	.0870	.0806	.0708	.0636	.0568	.0518	.0445	.0359	.0306	.0276	.0254	.0224	.0206
Na	.151	.130	.118	.102	.0912	.0833	.0770	.0676	.0608	.0546	.0496	.0427	.0348	.0303	.0274	.0254	.0229	.0215
Mg	.160	.135	.123	.106	.0944	.0860	.0795	.0699	.0627	.0560	.0512	.0442	.0360	.0315	.0286	.0266	.0242	.0228
Al	.161	.134	.120	.103	.0922	.0840	.0777	.0683	.0614	.0548	.0500	.0432	.0353	.0310	.0282	.0264	.0241	.0229
Si	.172	.139	.125	.107	.0954	.0869	.0802	.0706	.0635	.0567	.0517	.0447	.0367	.0323	.0296	.0277	.0254	.0243
P	.174	.137	.122	.104	.0928	.0846	.0780	.0685	.0617	.0551	.0502	.0436	.0358	.0316	.0290	.0273	.0252	.0242
S	.188	.144	.127	.108	.0958	.0874	.0806	.0707	.0635	.0568	.0519	.0448	.0371	.0328	.0302	.0284	.0266	.0255
A	.188	.135	.117	.0977	.0867	.0790	.0730	.0638	.0573	.0512	.0468	.0407	.0338	.0302	.0279	.0266	.0246	.0241
K	.215	.149	.127	.106	.0938	.0852	.0786	.0689	.0618	.0552	.0505	.0438	.0365	.0327	.0305	.0289	.0274	.0267
Ca	.238	.158	.132	.109	.0965	.0876	.0809	.0708	.0634	.0566	.0518	.0451	.0376	.0338	.0316	.0302	.0285	.0280
Fe	.344	.183	.138	.106	.0919	.0828	.0762	.0664	.0595	.0531	.0485	.0424	.0361	.0330	.0313	.0304	.0295	.0294
Cu	.427	.206	.147	.108	.0916	.0820	.0751	.0654	.0585	.0521	.0476	.0418	.0357	.0330	.0316	.0309	.0303	.0305
Mo	1.03	.389	.225	.130	.0998	.0891	.0761	.0648	.0575	.0510	.0467	.0414	.0365	.0349	.0344	.0344	.0349	.0359
Sn	1.58	.563	.303	.153	.109	.0886	.0776	.0647	.0568	.0501	.0459	.0408	.0367	.0355	.0355	.0358	.0368	.0383
I	1.83	.648	.339	.165	.114	.0913	.0792	.0653	.0571	.0502	.0460	.0409	.0370	.0360	.0361	.0365	.0377	.0394
W	4.21	1.44	.708	.293	.174	.125	.101	.0763	.0660	.0544	.0492	.0437	.0405	.0402	.0409	.0418	.0438	.0465
Pt	4.75	1.64	.795	.324	.191	.135	.107	.0800	.0659	.0554	.0501	.0445	.0414	.0411	.0418	.0427	.0448	.0477
Tl	5.16	1.80	.866	.346	.204	.143	.112	.0824	.0675	.0563	.0508	.0452	.0420	.0416	.0423	.0433	.0454	.0484
Pb	5.29	1.84	.896	.356	.208	.145	.114	.0836	.0684	.0569	.0512	.0457	.0421	.0420	.0426	.0436	.0459	.0489
U	1.06	2.42	1.17	.452	.259	.176	.136	.0952	.0757	.0615	.0548	.0484	.0445	.0440	.0446	.0455	.0479	.0511
Air	.151	.134	.123	.106	.0953	.0868	.0804	.0706	.0635	.0567	.0517	.0445	.0357	.0307	.0274	.0250	.0220	.0202
NaI	1.57	.568	.305	.155	.111	.0901	.0789	.0657	.0577	.0508	.0465	.0412	.0367	.0351	.0347	.0347	.0354	.0366
H ₂ O	.167	.149	.136	.118	.106	.0966	.0896	.0786	.0706	.0630	.0575	.0493	.0396	.0339	.0301	.0275	.0240	.0219
Concrete ^a	.169	.139	.124	.107	.0954	.0870	.0804	.0706	.0635	.0567	.0517	.0445	.0353	.0317	.0287	.0268	.0243	.0229
Tissue	.163	.144	.132	.115	.100	.0936	.0867	.0761	.0683	.0600	.0556	.0478	.0384	.0329	.0292	.0267	.0233	.0212

a Type O4.

2) ANL-5800 2nd ed. "Reactor physics constant" P. 652

Table 8-10 TOTAL GAMMA-RAY ATTENUATIONS CROSS SECTIONS (μ_t)
(in cm^{-1})

Material	Density, gm/cm^3	Gamma-Ray Energy, Mev																	
		0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.25	1.5	2	3	4	5	6	8	10.0
Be	1.85	.244	.220	.202	.1748	.1567	.1430	.1323	.1162	.1045	.0932	.0849	.0729	.0579	.0392	.0433	.0390	.0333	.0296
C	2.25	.335	.302	.275	.239	.2144	.1958	.1811	.1591	.1431	.1278	.1166	.0999	.0801	.0684	.0608	.0551	.0479	.0437
Na	1.741	.147	.126	.115	.099	.0886	.0809	.0748	.0657	.0590	.0538	.0482	.0415	.0338	.0294	.0266	.0247	.0222	.0209
Mg	1.741	.279	.235	.212	.185	.1643	.1497	.1394	.1217	.1092	.1015	.0891	.0770	.0627	.0548	.0498	.0463	.0421	.0397
Al	2.70	.435	.362	.324	.278	.2489	.2268	.2098	.1844	.1658	.1480	.1350	.1166	.0953	.0837	.0761	.0713	.0651	.0618
Si	2.42	.416	.336	.303	.259	.2309	.2103	.1941	.1709	.1537	.1372	.1251	.1082	.0888	.0782	.0716	.0670	.0615	.0588
P	1.83	.318	.251	.223	.190	.1698	.1548	.1427	.1254	.1129	.1008	.0919	.0798	.0655	.0578	.0531	.0500	.0461	.0443
S	2.07	.389	.298	.263	.224	.1983	.1809	.1668	.1463	.1314	.1176	.1074	.0927	.0768	.0679	.0625	.0588	.0551	.0528
K	0.87	.187	.130	.110	.092	.0816	.0741	.0684	.0599	.0538	.0480	.0439	.0381	.0318	.0284	.0265	.0251	.0238	.0232
Ca	1.55	.369	.245	.205	.169	.1496	.1358	.1254	.1097	.0983	.0877	.0803	.0699	.0583	.0524	.0490	.0468	.0442	.0434
Fe	7.86	2.704	1.438	1.085	.833	.7223	.6508	.5989	.5219	.4677	.4174	.3812	.3333	.2837	.2594	.2460	.2389	.2319	.2311
Cu	8.933	3.814	1.840	1.313	.965	.8183	.7325	.6709	.5842	.5226	.4694	.4252	.3734	.3189	.2948	.2823	.2760	.2707	.2725
Mo	9.01	9.280	3.505	2.027	1.171	.8991	.7668	.6857	.5838	.5181	.4595	.4208	.3730	.3289	.3144	.3099	.3099	.3144	.3190
Sn	7.298	11.53	4.109	2.211	1.117	.795	.6466	.5663	.4722	.4145	.3656	.3350	.2978	.2678	.2591	.2591	.2613	.2686	.2795
I	4.94	9.040	3.201	1.675	.815	.563	.4510	.3912	.3226	.2821	.2480	.2222	.2080	.1823	.1778	.1783	.1803	.1862	.1946
W	19.3	81.25	27.79	13.66	5.655	3.358	2.413	1.949	1.473	1.235	1.050	.9496	.8434	.7817	.7759	.7894	.8067	.8453	.8975
Pt	21.37	101.51	35.05	16.99	6.924	4.082	2.885	2.287	1.710	1.408	1.184	1.071	.9510	.8847	.8783	.8933	.9125	.9574	1.019
Tl	11.86	61.20	21.35	10.27	4.104	2.419	1.696	1.328	.9773	.8005	.6677	.6025	.5361	.4981	.4934	.5017	.5135	.5384	.5740
Pb	11.34	59.99	20.87	10.16	4.037	2.359	1.644	1.293	.9480	.7757	.6452	.5806	.5182	.4774	.4763	.4831	.4944	.5205	.5545
U	18.7	19.82	45.25	21.88	8.452	4.843	3.291	2.543	1.780	1.416	1.150	1.025	.9051	.8322	.8228	.8340	.8509	.8937	.9556
NaI	3.667	5.757	2.083	1.118	.568	.407	.3304	.2893	.2409	.2116	.1863	.1705	.1511	.1346	.1287	.1272	.1272	.1298	1.342
H ₂ O	1.00	.167	.149	.136	.118	.106	.0960	.0896	.0786	.0706	.0630	.0575	.0493	.0396	.0339	.0301	.0275	.0240	.0219
Concrete ^a	2.35	.327	.291	.251	.211	.2242	.2045	.1889	.1659	.149	.1332	.1215	.1046	.0853	.0745	.0674	.0630	.0571	.0538

^a Type 04.

C-3 低ガンマ線 (60KeV~200KeV)

Total Gamma-Ray Attenuation Cross Section (μt)

Material	Density (g/cm^3)	Gamma-Ray Energy, MeV		
		0.06	0.10	0.20
^{12}C	2.25	0.386	0.335	0.275
^{13}Al	2.70	0.742	0.435	0.324
^{14}Si	2.42	0.765*	0.416	0.303
^{15}P	1.83	0.628*	0.318	0.223
^{16}S	2.07	0.823	0.389	0.263
^{24}Cr	7.14	6.876*	2.263*	0.978*
^{25}Mn	7.40	7.844*	2.486*	1.029*
^{26}Fe	7.86	9.487	2.704	1.085
^{27}Co	8.71	11.41*	3.449*	1.280*
^{28}Ni	8.80	13.50	3.788	1.390*
^{40}Zr	6.44	24.34	6.090	1.443*
^{42}Mo	9.01	38.92	9.280	2.027
^{50}Sn	7.298	47.60	11.53	2.211
^{82}Pb	11.34	55.28	59.99	10.16

* LA-2237 (1958)

Total Gamma-Ray Attenuation Cross Section (μt)

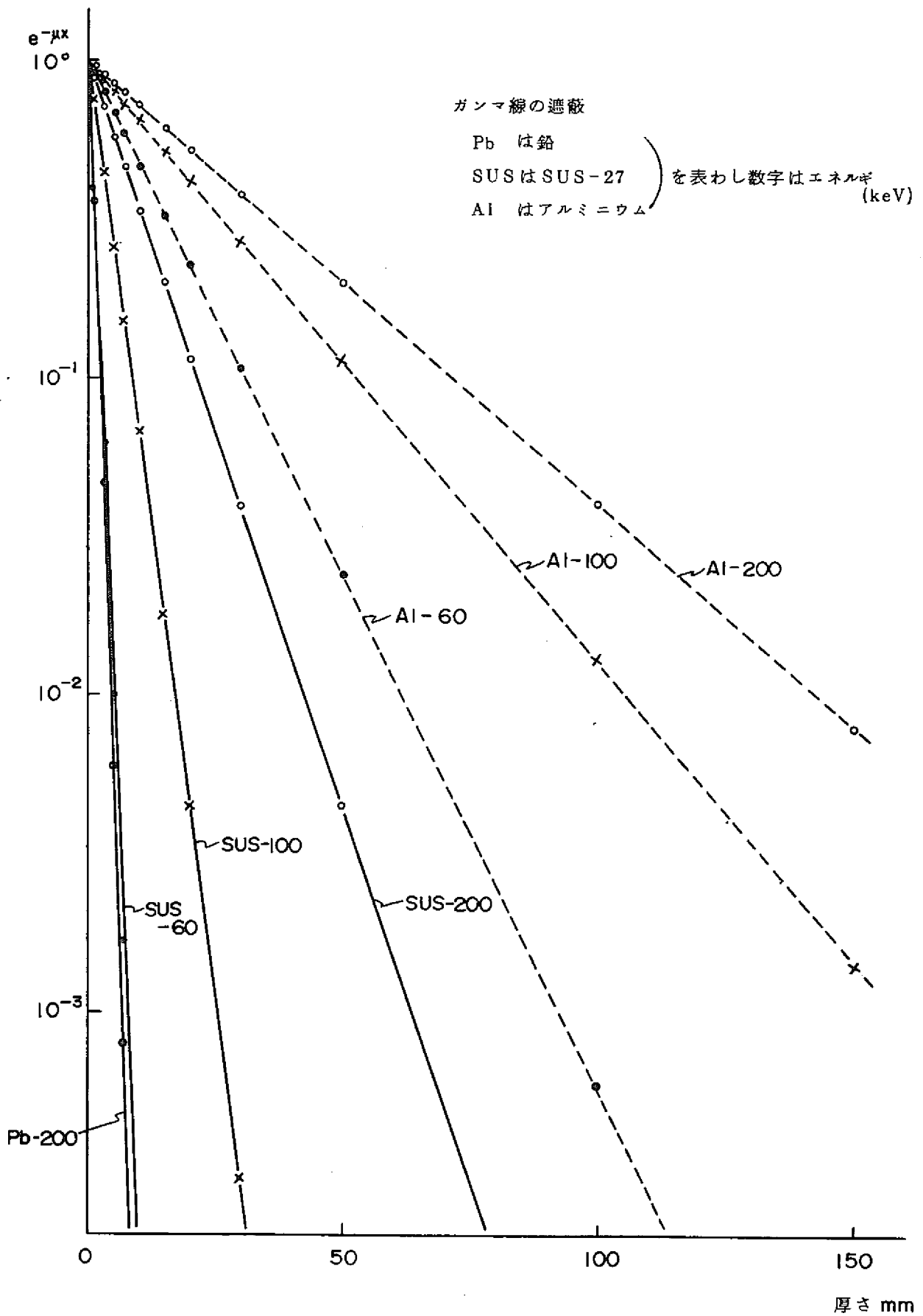
Material *1	Density (g/cm^3)	Gamma-Ray Energy, MeV		
		0.06	0.10	0.20
Zircaloy-2		24.65	6.163	1.454
304 Stainless steel		9.373	2.385	0.969
316 Stainless steel		10.13	2.893	1.117
SUS-21		9.021	2.615	1.061
SUS-27		9.219	2.687	1.082
SUS-41		9.275	2.713	1.090

*1 物質組成 w/o

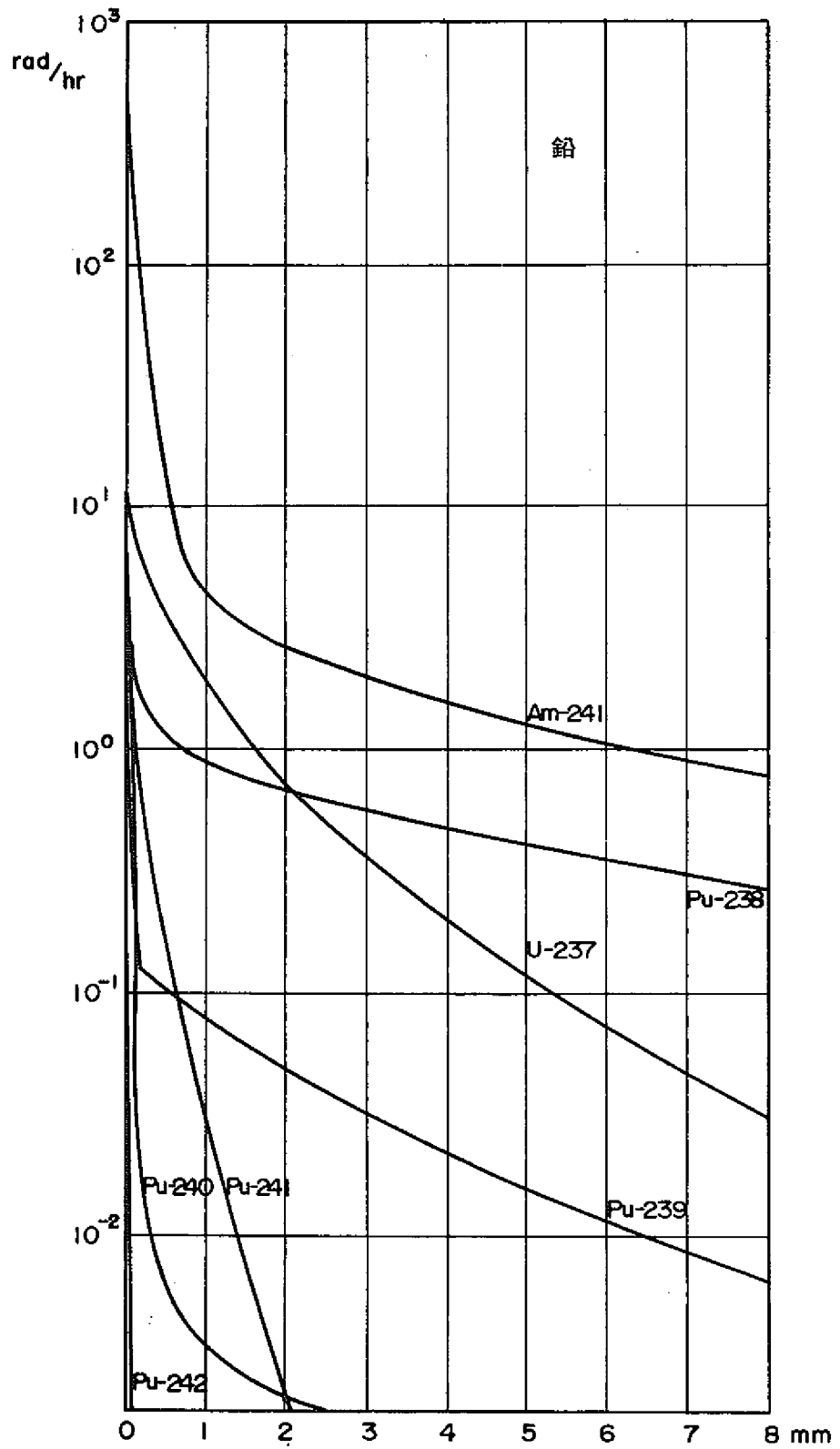
Material	C	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Zr	Mo	Sn
Zircaloy-2					0.10		0.10		0.05	98.25		1.5
304 Stainless steel	0.06	0.03	0.03	0.03	18.00	2.00	69.80	0.05	10.00			
316 Stainless steel	0.08	1.00	0.04	0.03	17.00 (16.00) (18.00)	2.00	65.35		12.00 (10.00) (14.00)		2.50 (2.00) (3.00)	
SUS-21	0.15	1.00	0.04	0.03	12.50	2.00	84.28					
SUS-27	0.08	1.00	0.04	0.03	19.00	2.00	68.85		9.00			
SUS-41	0.08	1.00	0.04	0.03	23.00	2.00	60.85		13.00			

0-4 ガンマ線遮蔽と遮蔽効果

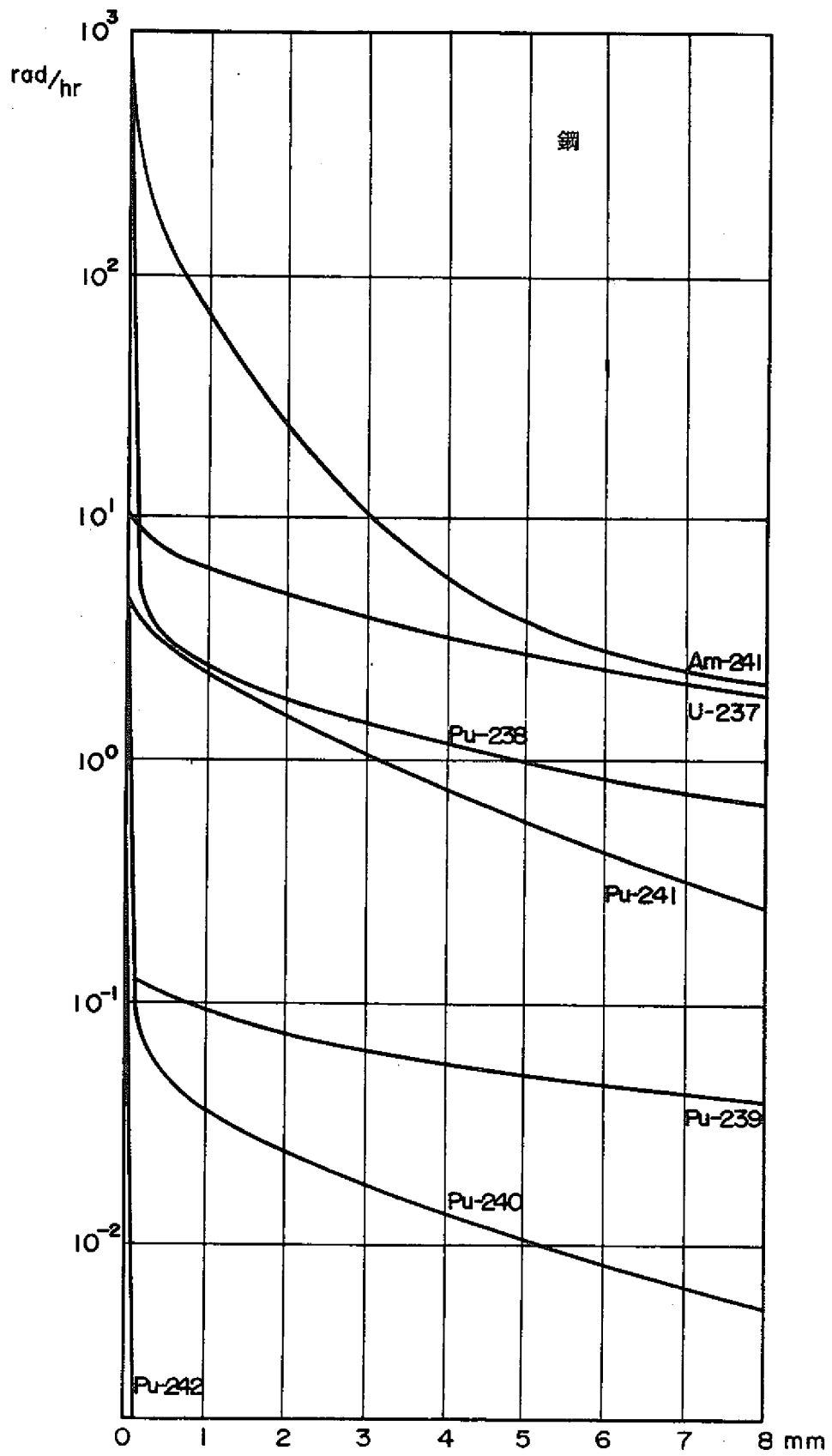
遮蔽材	エネルギー (keV)	厚さ (mm)	1	3	5	7	10	15	20	30	50	100	150
鉛	60	5	0.004	0.001									
		6	0.003	0.001									
		2	0.362	0.047	0.006	0.008							
アルミニウム	60		0.929	0.800	0.691	0.595	0.476	0.329	0.227	0.108	0.024	0.006	0.002
			0.957	0.878	0.804	0.737	0.647	0.520	0.419	0.271	0.114	0.013	0.001
			0.968	0.907	0.850	0.797	0.723	0.615	0.523	0.378	0.198	0.039	0.008
SUS-27	60		0.398	0.063	0.010	0.002	0.001						
			0.764	0.447	0.261	0.153	0.068	0.018	0.005	0.003			
			0.897	0.723	0.582	0.469	0.339	0.198	0.115	0.039	0.005	0.002	

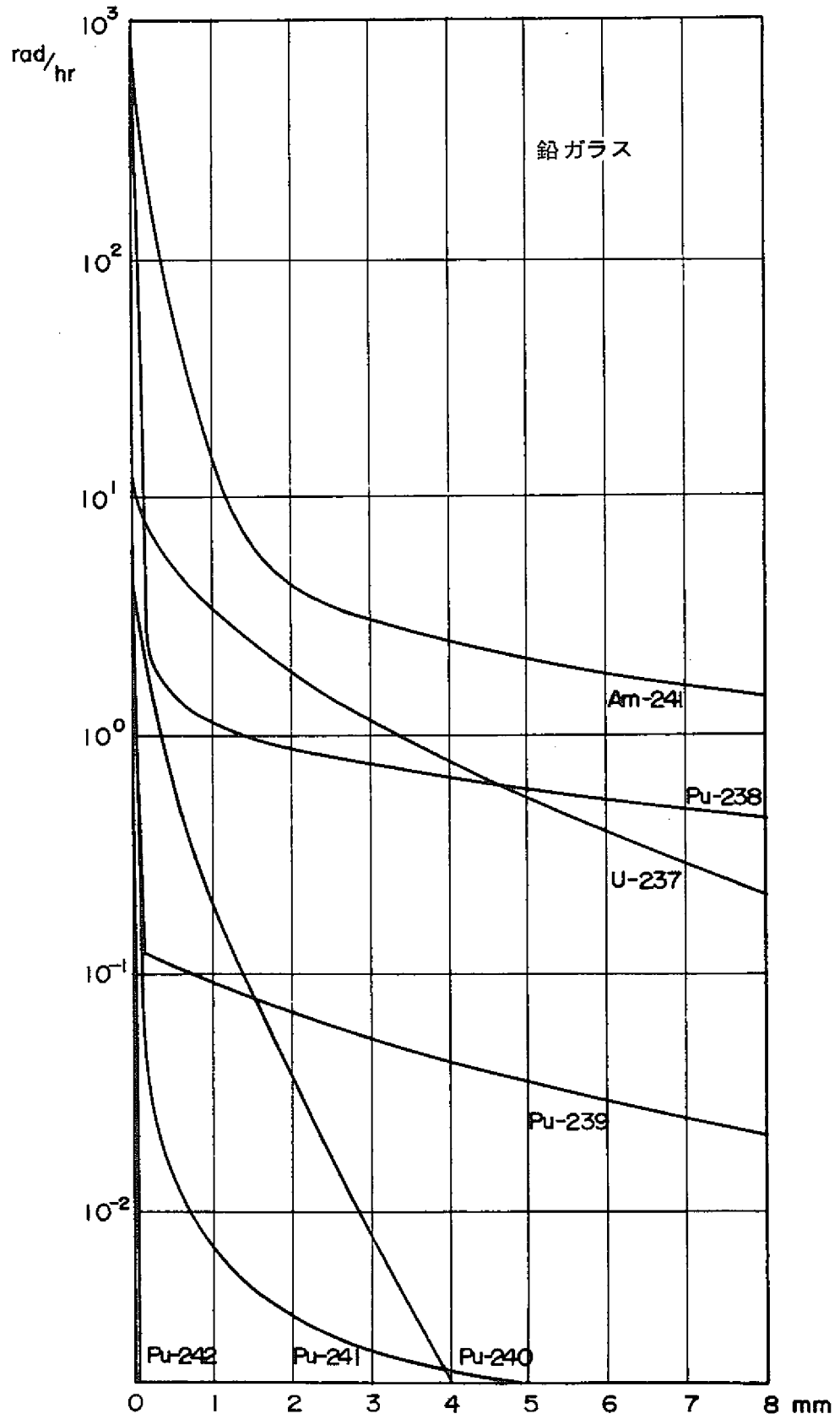


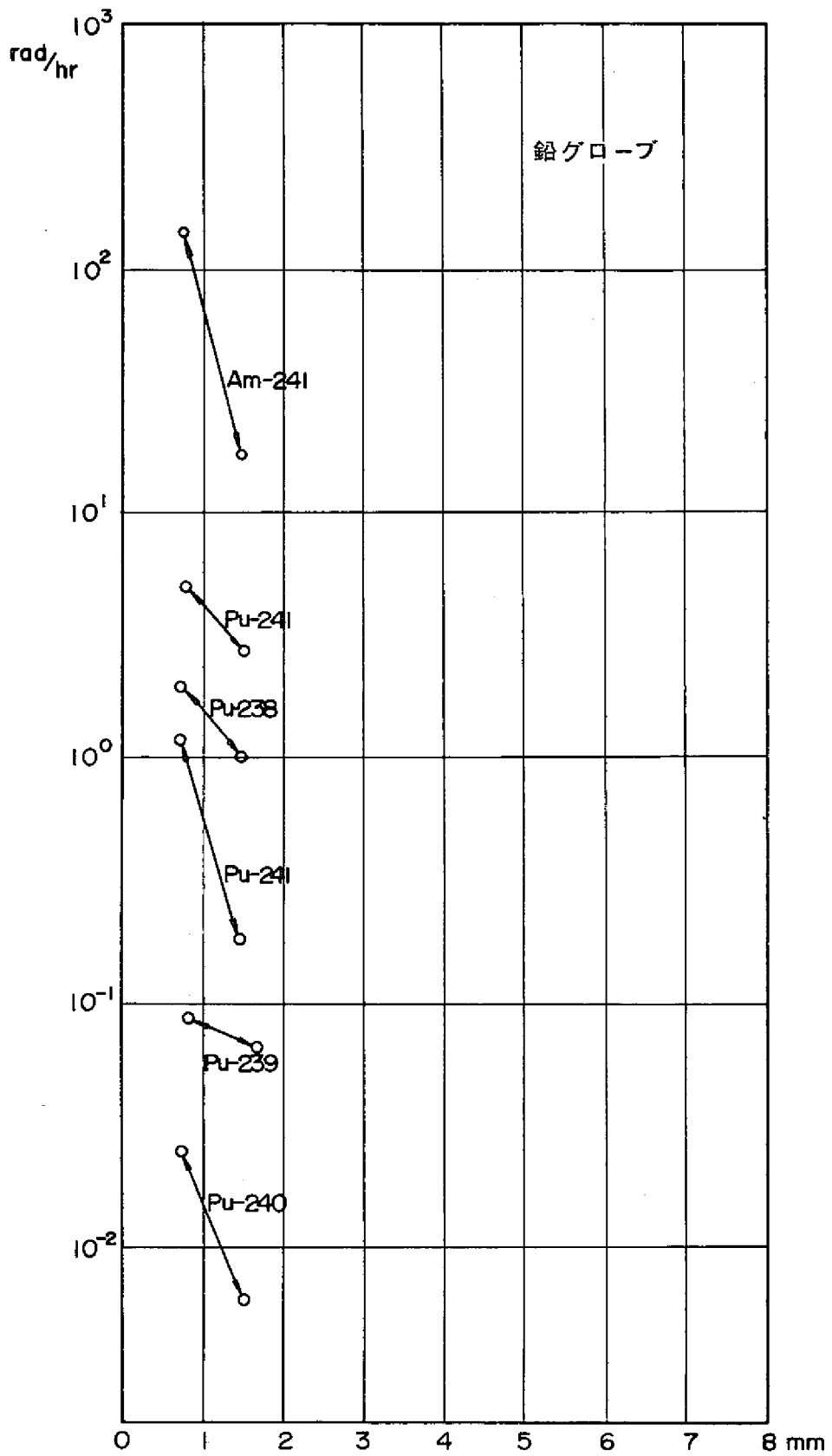
C-5 プルトニウム物質 (鉛, 鋼, 鉛ガラス, 鉛グローブ, PCV, ルサイト) による遮へい効果³⁾

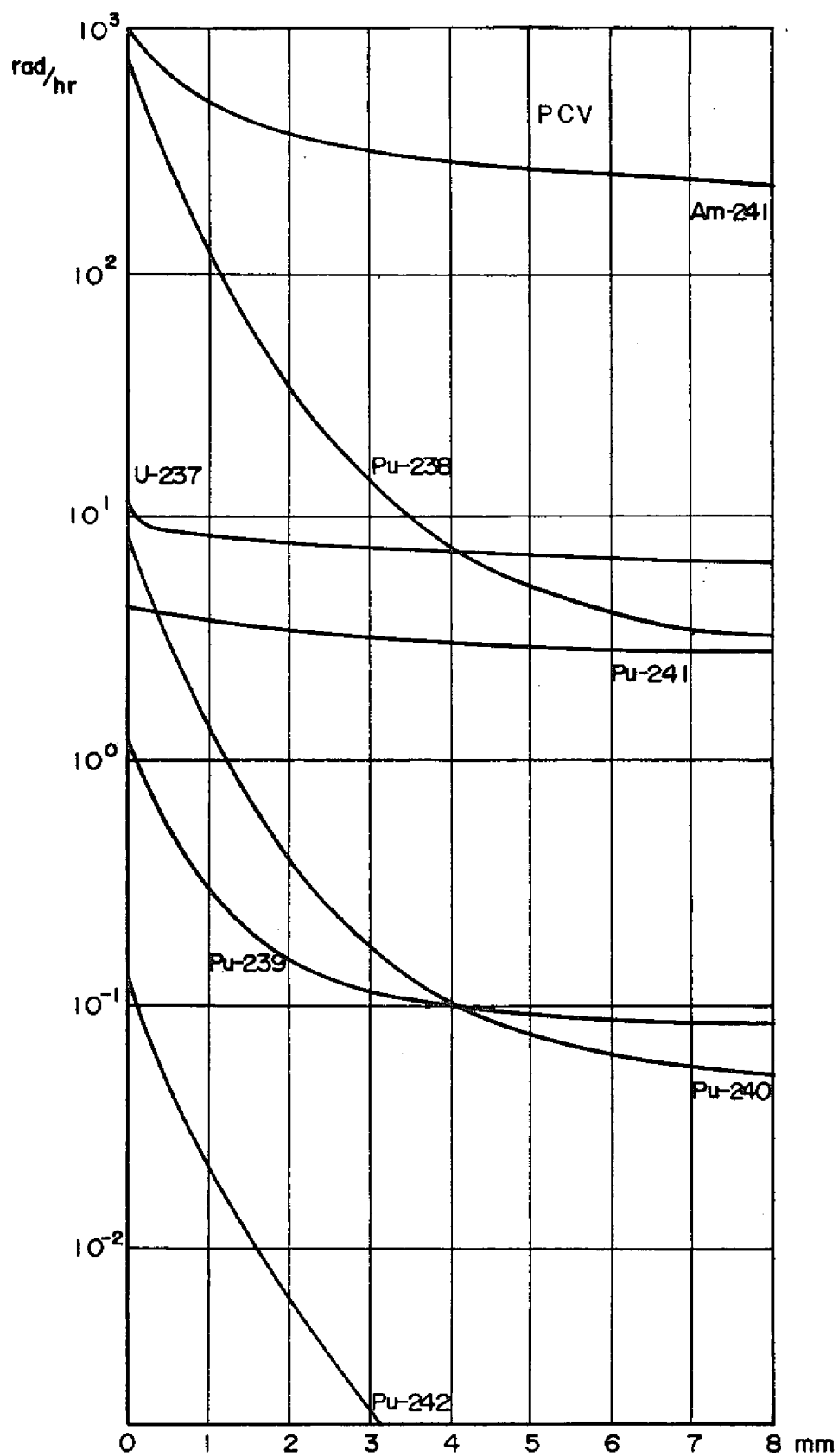


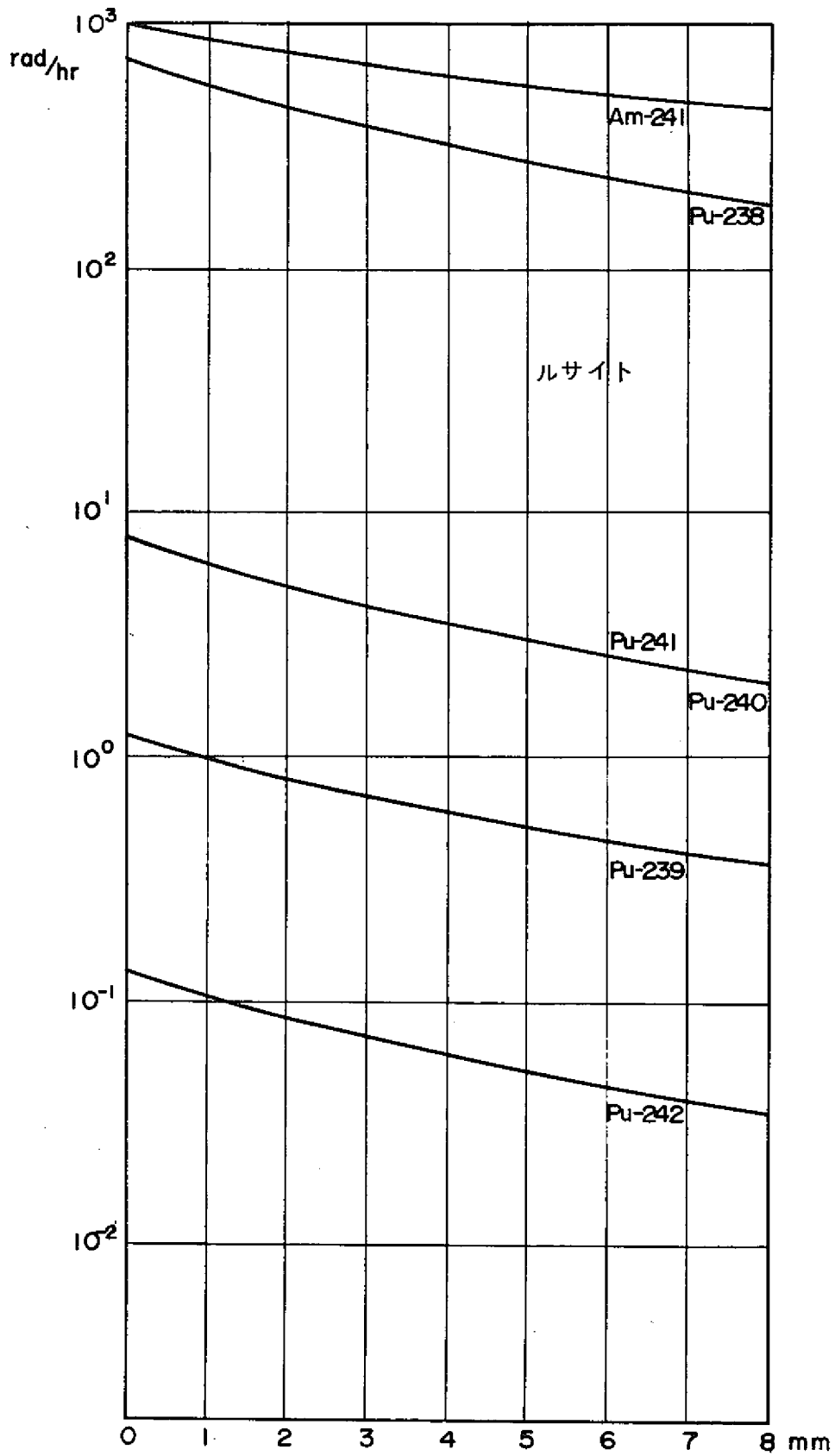
3) BNWL-1259











C-6 中性子除去断面積²⁾...

Table 8.7 REMOVAL CROSS SECTION FOR VARIOUS MATERIALS

Material	σ_R , barn	N_0 at 20°C, atom/cm ³	Σ_R , cm ⁻¹
Hydrogen	1.00 ± 0.05	—	—
Deuterium	0.92 ± 0.10 ^a	—	—
Lithium	1.01 ± 0.04	0.0460 × 10 ²⁴	0.046
Beryllium	1.07 ± 0.06	0.120	0.128
Boron	0.97 ± 0.10	0.139	0.135
Carbon (Graphite)	0.72 ± 0.05	0.113	0.081
Oxygen	0.92 ± 0.05	—	—
Fluorine	1.29 ± 0.06	—	—
Aluminum	1.31 ± 0.05	0.0603	0.079
Chlorine	1.2 ± 0.8	—	—
Iron	1.98 ± 0.08	0.0848	0.168
Nickel	1.89 ± 0.10	0.0913	0.173
Copper	2.04 ± 0.11	0.0846	0.173
Zirconium	2.36 ± 0.12	0.0423	0.10 ^b
Tungsten	3.13 ± 0.25	0.0631	0.198 ^c
Lead	3.53 ± 0.30	0.0330	0.116
Bismuth	3.49 ± 0.35	0.0282	0.098
Uranium	3.6 ± 0.4	0.0473	0.17
Boric Oxide (B ₂ O ₃)	4.30 ± 0.41	—	—
Boron Carbide (B ₄ C)	5.1 ± 0.4	—	—
Fluorothene (C ₂ F ₃ Cl)	6.66 ± 0.8	—	—
Heavy Water (D ₂ O)	2.76 ± 0.11	—	—
Lithium Fluoride (LiF)	2.43 ± 0.34	—	—
Oil (CH ₂)	2.84 ± 0.11	—	—
Paraffin (C ₃₀ H ₆₂)	80.5 ± 5.2	—	—
Perfluoroheptane (C ₂ F ₁₆)	26.3 ± 0.8	—	—

a Calculated; $\sigma_R(D_2O) \approx 2.76$ b. b Value given by Miller. c Value given Miller.

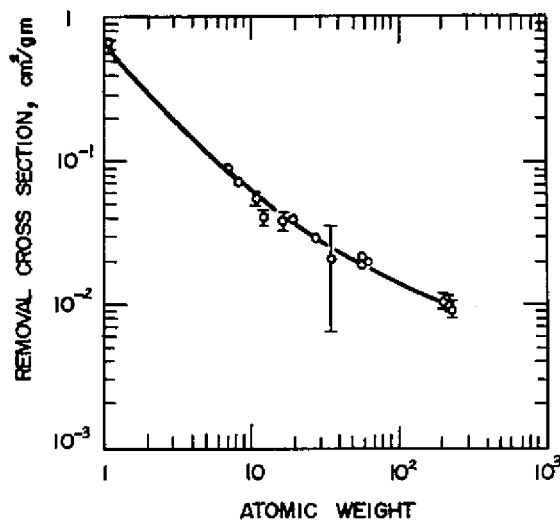


Fig. 8.9

Experimental removal cross section as a function of atomic weight for various elements.

2) ANL-5800 2nd ed. "Reactor physics constant" P. 652

D プルトニウム燃料部における工程の作業解析

D-1 ベレット製造工程標準作業条件

a 第1開発

工程	作業	距離 (cm)	処理時間		備考
			T ₁	T ₂	
受け入れ秤量	粉末BAG IN	30	15分/1回	5	
	秤量	40	5分/500g	10分/500g	
焙焼	ルツボ charge	40	10分/500g	0	焙焼炉監視作業 100分 (距離 150cm)
	炉へ "	50	5分	0	
	取り出し	40	10分	0	
粉碎 分級	ボールミル charge → 取出し	40	0	40分	
	分級	20	0	15分/100g	
混合	BAG IN OUT	30	15分/1回	5	GP47で混合する場合のみ
	Vブレンダー混合	40	20 0	10 30	GP07の場合 GP47 "
	B.M. 混合	40	0	60	
造粒	造粒	30 40	10分/500g 0	15分/100g 100	GP07 GP47
	分級	20	0	15分/100g	
成型	成型	20	30分	1分/5ヶ	
	ベレット測定	30	20分	1.5分/1ヶ	
予焼 焼結	BAG IN OUT	30	15分/1回	5	
	焼結皿へ ベレット charge	30	0	15分/皿	
	炉への出し入れ	40	0	30分	炉監視作業 200分 (at 150cm)
研マ	ベレット取り出し	40	0	30分	
	調整	30	10分	60分	
	研マ	40	0	2分/10ヶ	
検査	乾燥	40	0	30分	
	BAG IN OUT	30	15分/1回	5	
	サンプリング	30	0	10分/1サンプル	
	寸法重量測定	30	0	1.5分/1ヶ	

b 第2開発室

工 程	作 業	距 離 (cm)	処 理 時 間		備 考
			T ₁	T ₂	
受け入れ秤量	粉末 BAG IN	30	15分/1回	5	
	秤 量	40	10		
焙 焼	ルツボ charge	40	10分/500g	10分/500g	炉監視作業 100分 (距離 150cm)
	炉 charge	50	0	5分	
	取り出し	40	10分	10分	
粉 碎	振 動 ミ ル	40	15分	45分	
分 級	振 動 ふ る い	40	0	60分	
混 合	V 混 合	40	0	60分	
	B.M 混 合	40	0	120分	
造 粒	ニーダー操作	30	0	100分	
	乾 燥	40	0	30分	
	分 級	40	10分	50分	
成 型	成 型	40	10分	1分/20ヶ	
	焼結皿取り扱い	40	1分/1皿	1分/1皿	
	ペレット測定	30	0	1.5分/1ヶ	
予焼焼結	焼結皿セット	40	10分	20分	炉監視作業 200分 (at 150cm)
	炉への出し入れ	40	20分	40分	
	サンプリング	40	0	30分	
径選別	調 整	50	10分	10分	監視作業 50分 (at 100cm)
	仕 分 け	40	15分	15分	
研 削	調 整	30	0	30分	
	研 削	40	0	1分/30分	
	乾 燥	40	0	60分	
寸法重量測定	調 整	50	0	30分	監視 100分 (at 100cm)
	仕 分 け	40	10分	40分	
整 列	整送機セット	40	10分	10分	監視 100分 (at 100cm)
脱ガス	炉出し入れ	40	20分	20分	// //
移 動	BAG OUT	30	15分/1回	0	

D-2 燃料棒加工工程，標準作業条件

a 第1開発室

工 程	項 目	作業距離	作業時間	備 考
スタック調整, 充填	弁当箱 Bag in	30 cm	15分	
	スタック調整 (60 cmまで)	40	5 / 1本	
	シール及びバック交換	30	1 / 1本	
	ペレット径 Go-No選別	40	0.2 / ペレット1ヶ	
管口除染	管口マスクが有る場合	5~10*		*は体と被覆管の最端距離, 線源との距離は燃料棒により異なる
	管口マスクが無い場合	5~10*	12 / 1本	
	スマヤー測定	-	1~2 / 1本	
Z.E.P. 溶接	燃料棒挿入	20	1 / 1本	
	溶 接	30	6 / 1本	作業ファクタとして, チャンバによる遮蔽効果No.1
	燃料棒取出	20	2 / 1本	
表面除染		20	8 / 1本	
Heリーク試験	測 定	80	4 / 1本	作業ファクタとして, チャンバによる遮蔽効果No.1
X線検査	ピンセット, 脱着	30	1 / 1本	
寸法検査	ビード径測定	40	0.5 / 1本	
	全長測定	40	1 / 1本	
バンドル組上げ		30	8 / 1本挿入	

b 第2開発室

工 程	項 目	作業距離	作業時間	備 考
スタック調整,充填	ベレット皿 Bag in	30 cm	15分	
	スタック調整,充填	100	7分/1本	
	調整ベレット・カートリッジ挿入*	30	10分/50本	*線源形状としてはベレット
管口除染		40	5/1本	
部材圧入		40	5/1本	
端栓溶接		80	40/20本*	*20本まとめてバッチ処理する
表面除染	溶接部除染	80	5/1本	
	スミヤー採集	30	20/20本*	*20本まとめてバッチ処理する
	Box 取り出し	30	0.5/1本	
寸法検査	ビード部外径測定	80	0.5/1本	
Heリーク試験	チャンバー 挿入 取出	40	5/10本	
	測 定	80	4/1本	作業ファクタとしてチャンバによる遮蔽効果 0.1
X線検査	ピンセット脱着	60	10/20本	
ワイヤラッピング		60	3/1本	
ピン洗浄	ベレットセット脱着	60	5/20本	
集合体組立		60	180/1体	
集合体検査		100	240/1体	
集合体洗浄	集合体・セット・引抜	50	30/1体	

D-3 湿式回収工程標準作業条件

a 湿式回収工程 (A-104) 1 キャンペーンあたり

工 程	作 業 名	距 離 cm	処 理 時 間 T ₂	準備, 修理 その他 T ₂	備 考
粉 末 受 入 れ W-8	受 入 れ	40	15		
	秤 量	40	30		
	Bag out	30	15		
溶 解 W-2-3	Bag in	30	15		
	原料仕込	40	40	30	
	加熱溶解	40	60		
	液移送	40	30		
	溶液調整	40	60		
	サンプリング	40	60		
	濃度測定 後処理			60	監視 180
溶媒抽出 W-2-2	液受入れ	40	40		
	抽出 1	40	70		
	抽出 2	40	70		
	逆 抽	40	70		
	サンプリング	40	60		
	溶媒移送等	40	60		
沈 殿 W-2-1	液 張 り	40	20		
	中 和	30			
	ろ 過				
	取 出 ケース移動	30	20		
蒸発濃縮 W-2-4	液 張	40	180		
	蒸発濃縮	40			
	留 出 } 濃 縮 } 液移送	40	60		4~5 キャンペーンで1回 処理することになっている為
		40			
濃 縮 液 中和処理 W-2-2	液 張	40	20		
	中 和				
	ろ 過	40			
	取 出 ケース移動	30	20		
乾 燥 焙 焼 還 元 W-2-2	乾 燥	40	60		
	焙焼還元				
	秤 量				
	Charge	40	60		12h/1回 9:00~17:00 (炉1 サイクル)
	取 出 サンプリング				

1ヶ月4~5キャンペーンと考える。

b. 湿式回収工程 (F-104) 1 キャンペーンあたり

工程	作業名	距離 cm (線源より)	処理時間		準備, 修理その他		
			T ₁	T ₂	T ₁	T ₂	
粉末受入	粉末 BAG・IN	30	15分/1回				
W-7	秤量, 小分け	40	30	30	10	20	
溶 解	原料移送	40		15分/1回			
	原料仕込み	40	40		20		
	加熱・溶解	40	30				監視 10 時間 (2m)
	液 移 送	40	20	20			監視 3 時間 (2m)
	ストレーナー取出し	40		60			
	ストレーナー移送	40		30			
W-1-2	後 処 理	40	60				
イオン交換	液受入れ	40		5			
	溶液調整	40		5			
W-1-3	イオン交換処理	40	10	10	10	60	監視 13 時間 1.0m
蒸発濃縮	バルブ操作	40		10			監視 10 時間 1.0m
	濃縮液移送	40		10			
	後 処 理	40		10			
廃液中和	中和沈殿	40		60			監視 30 時間 1.0m
	フィルター取出し	40		60			
沈 殿	液受入れ	40	10	5			
	沈殿生成	40	2.5時間	1.5時間			監視 20 時間 1.0m
	フィルター取出し	40	3時間				
	フィルター移送	40		20分			
	乾燥 W-7	40		75分		2時間	
	フィルター取出し	40		60			
W-7	乾燥体取出し, 秤量	40	75	40		60	
廃液処理 1日平均	受 入 れ	40		10			監視 20 分 1.0m
	フロキュレーション	40		1時間			監視 2.5 時間 1.0m
	スラッジ戸過	40		2.5時間			
	スラッジ乾燥	40		1時間			
	W-5	フローテーション	40		1.5時間		
サンプ リング	粉末受入れ, 溶解, 乾燥	40	40			20	
	イオン交換 蒸発濃縮 30本	40		10分/1本		10分/1本	
	廃液処理 (1日平均)	40		60分			監視 3 時間 1.5m

廃液処理工程を除いて1ヶ月4~5キャンペーン

D-4 品質管理課検査・試験工程標準作業条件

試験項目	作業	距離 (cm)	処理時間(分)		備考
			T ₁	T ₂	
Pu含有率	分取・秤量	30	10	0	
	溶解・原子価調整	50	20	0	監視作業(100cm, 40分)
	滴 定	50	10	0	" (100cm, 40分)
O/M	分取 秤量	30	10	0	
	炉への出し入れ	30	10	0	電気炉監視作業(100cm,120分)
	秤 量	30	5	0	
蒸発性 不純物	秤 量	30	5	0	
	試料とりつけ	30	10	0	
	脱ガス・ガス量測定	30	30	0	脱ガス炉管監視作業 (100cm, 60分)
	試料とりだし	30	30	0	
水 分	分取・秤量	30	10	0	
	水分量測定	100	0	10	
	試料とりだし	30	5	0	
不 純 物 (発光分析)	分所・秤量 ウラン燃料	30	20	0	
	溶解・蒸発乾固	30	30	0	電熱器監視作業(100cm,150分)
	炉への出し入れ	30	10	0	電気炉監視作業(100cm,180分)
	Ga秤量・混合	30	10	10	
	秤量・成型	30	20	0	
	発 光	30	5	0	
窒 素	分取・秤量	30	10	0	
	溶 解	50	0	60	
	蒸 留	30	20	0	
	試料とりはずし	30	5	0	
フッ素・塩素	分取・秤量	30	10	0	
	炉への出し入れ	30	10	0	
	比 色	30	5	0	
炭 素	分取・秤量	30	10	0	
	炉への出し入れ	30	10	0	
	炭素量測定	50	0	10	
Am	分取・秤量	30	10	0	
	溶解・調整	30	30	0	
	イオン交換	50	0	30	
	濃縮・試料作成	30	20	0	
	Am量測定	100	0	3	

(つづき)

試験項目	作業	距離 (cm)	処理時間(分)		備考
			T ₁	T ₂	
比表面積	分取・秤量	30	10	0	測定器監視作業 (100 cm, 150分)
	試料とりつけ・とりはずし	30	5	0	
	脱ガス・測定	60	0	30	
粒 径	分取・秤量	30	10	0	
	充 填	30	5	0	
	測 定	30	30	0	
	試料とり出し	30	5	0	
走査型電顕 写 真	試料処理	30	10	0	
	試料移動	100	0	10	
	試料の出し入れ	30	10	0	
	測 定	40	0	10~120	A製装置による遮蔽がある
結 晶 性 X線回折	分 取	30	10	0	
	試料とりつけ	30	5	0	
	X線回折	200	0	60	散乱ガンマ線(0.2~0.5mR/hr)
	試料とりはずし	30	5	0	
PuO ₂ スポット	試料作成	30	10	0	
	露 出	100	0	2~50	
	試料とりはずし	30	5	0	
金 相	試料とりつけ	30	5	0	
	研 磨	50	30	120	8試料まで同時研磨可能
	写真撮影	50	0	15	
	エッチング	30	10	0	
	試料とりはずし	30	5	0	
X線透過検査	ピン移動	50	2/本	0	ピン25本単位で作業をおこなう
	検 査	30	0	3/本	
Heリーク検査	ピン移動	50	0	2	" "
	検 査	50	0	3	
外観・ビード部 検 査	ピン移動	50	0	2	ワイヤ・ラッピング前後2回 行なり
	検 査	10	0	6	
表面汚染	ピン出し入れ	30	0	5	
	測 定	100	0	3	
γ-scanning	ピン出し入れ	30	0	5	燃料要素の曲り, 全長, 重量 および燃料ペレットの分布
	測 定	100	0	10	
溶接部探傷	検 査	30	0	60	集合体1体当たり
集合体検査	検 査	50	0	240	集合体1体当たり

E 計算例，常陽燃料製造時の被ばく線量評価

(1) ペレット製造工程

式(4-3)，式(4-4)の各ファクタとして， PuO_2 3Kg (M)， $r=40\text{cm}$ ， $K_1=0.03$ (鉛ガラスのある作業)， $K_2=1.00$ (鉛ガラスのない作業)を入れ，さらに表面積(A)， PuO_2 含有量(C)，作業時間を以下のように仮定し1ロットあたりの被ばく線量を求めた。

工 程	作 業 時 間		表面積 (cm^2)	PuO_2 含有量 (%)	被ばく線量(mrem)	
	T_1	T_2			r	n
粉末調整	160	10	700	100	27	16
混合	120	20	700	18	9	13
造粒	180	20	700	18	10	18
成型	100	30	500	18	12	12
焼結	100	20	500	18	8	11
検査	100	60	500	18	16	15
					167	

T_1 は鉛ガラスのある場所での作業の時間， T_2 はない場所での作業時間とし，各工程の作業分析を鉛ガラスの配置状態と比較して決定した。製造スケジュールでは平均6ロット/月であるので，被ばく線量は，総計3rem/3ヶ月，製造時の作業員数は平均17名とすると，1人あたりの被ばく線量は180mrem/3ヶ月と推定される。

(2) 回収工程

$r=40\text{cm}$ ， $K_1=0.03$ ， $K_2=1.00$ 1ロット(3.4Kg)あたりとする。

工 程	作 業 時 間(分)		表 面 積 (cm^2)	濃 度 (g/l)	処 理 量 (l)	被ばく線量(mrem)	
	T_1	T_2				r	n
溶 解	60	0	3000	30	24	15	3
溶液調整	30	0	2200	20	45	5	2
イオン交換	240	15	2200	30	20	100	10
蒸発濃縮	0	60	2200 (SUS)	0.1	50	40	0.1
沈 殿	300	0	3800	15	10	90	3
戸 廻	120	0	3000	-	Pu 500g	30	4
廃液中和処理	240	0	2000	1	25	40	0.1
					340		

- SUS管による遮蔽係数は0.1とした。
- ガラス管による遮蔽効果は無視した。

月間5ロット処理として5rem/3ヶ月となり、製造時の作業員20名が平均して作業すると仮定すると1人あたりの被ばく線量は250mrem/3ヶ月と推定される。

(3) 燃料棒加工，集合体組立工程

燃料棒からのガンマ線量率計算式

$$1) S_r = \sum_j \sum_L \sum_m x \cdot y [1.24 P_{238} + 0.012 P_{239} + 0.11 P_{240} + 0.018 P_{242} + 0.016 P_{241} t + 2.55 (1 - e^{-0.102t}) P_{241}] \times \frac{d}{r_j} \tan^{-1} \left(\frac{L}{r_j} \right) \times k_L \times T_m$$

x ; 被覆管遮蔽係数 0.4

y ; UO₂による希釈係数 0.18

d ; 燃料棒の直径 5.4 mm

L ; 燃料棒の長さ 600 mm

ロ) 燃料棒からの中性子線量率

$$S_n = \frac{S_r}{20}$$

ハ) 集合体からのガンマ線量率

$$S_{ri} = S_r \times \frac{A_i}{\alpha}$$

A_i ; i本からなる集合体の2π方向表面積

ニ) 集合体からの中性子線量率

$$S_{ni} = \sum_j \sum_m 1.4 (0.193 P_{238} + 0.013 P_{240} + 0.319 P_{242}) \times M^{0.82} / r_j^2 \times T_m$$

イ), ロ), ハ), ニ) 式に作業ファクターとして, k₁=0.03 (鉛ガラスのある作業), k₂=1.00 (鉛ガラスのない作業), r_j=40 cm, A_i=75, M=1934 g とし, さらに作業時間を以下のように一体製造するための所要時間とする。

工 程	作 業 時 間 (hr)		被ばく線量 (mrem)	
	T ₁	T ₂	r	n
スタック調整, 充填	10 hr	2 hr	2.7	0.6
管口除染	10 hr	0	0.5	0.5
部材圧入	10 hr	2	2.7	0.6
2.E.P 溶接	10 hr	2	2.7	0.6
溶接部除染	10 hr	2	2.7	0.6
Heリークテスト	0	3	0.5	0.2
X線検査	0	3	0.5	0.2
寸法検査	0	5	0.6	0.3
ワイヤ巻付	0	10	1.2	0.5
燃料部洗浄	0	1	0.2	0.1
集合体組立	0	1	1.7	1.2
集合体洗浄	0	0.5	0.9	0.1
集合体検査	0	0.5	0.9	0.1
			23mrem	

平均12体/月であるので, 被ばく線量は 832mr/3ヶ月, 製造時の作業員は平均15名であるので, 1人あたりの被ばく線量は, 約56mr/3ヶ月と推定される。

F ガンマ線，中性子線束の有限形状線源による計算式¹⁾

Equations for the Flux

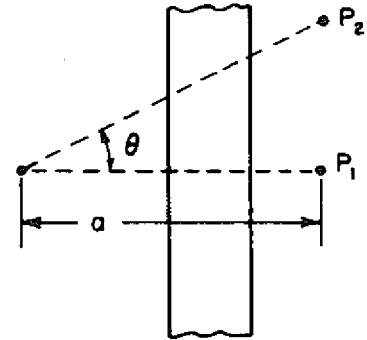
I-1 POINT SOURCE

At P₁

$$\phi = B \frac{S_0}{4\pi a^2} e^{-b_1}$$

At P₂

$$\phi = B \frac{S_0}{4\pi(a \sec \theta)^2} e^{-b_1 \sec \theta}$$



Nomenclature

ϕ	Scalar flux (cm ⁻² sec ⁻¹)
S_0	Source strength of point source (sec ⁻¹)
S_L	Source strength of line source (cm ⁻¹ sec ⁻¹)
S_A	Source strength of plane source (cm ⁻² sec ⁻¹)
S_V	Source strength of volume source (cm ⁻³ sec ⁻¹)
μ_s	Macroscopic cross section of source material (cm ⁻¹)
$\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$	Macroscopic cross sections of shields 1, 2, ... n (cm ⁻¹)
t_i	Thickness of <i>i</i> th shield (cm)
b_1	$\sum_1^n \mu_i t_i$
b_2	$b_1 + \mu_s Z$
b_s	$b_1 + \mu_s h$
Z	Effective self-attenuation distance (cm)
R_0	Radius of disk, cylinder, or sphere (cm)
B	Symbolic build-up factor
$E_n(b)$	$b^{n-1} \int_b^\infty \frac{e^{-t}}{t^n} dt \quad n \geq 0 \quad E_0(b) = \frac{e^{-b}}{b}$
$F(\theta, b)$	$\int_0^\theta e^{-b \sec \theta'} d\theta'$
$G(a, b)$	$\int_0^b F\left(\tan^{-1} \frac{a}{b'}, b'\right) db' \quad \text{where } F \text{ is the function defined above}$
$F_n(t, a)$	$\int_0^t e^{ab} E_n(b) db$

1) T.H. Rockwell, "Reactor Shielding Design Manual"

I-2 LINE SOURCE

At P_1

$$\phi = B \frac{S_L}{4\pi a} [F(\theta_2, b_1) - F(\theta_1, b_1)]$$

At P_2

$$\phi = B \frac{S_L}{4\pi a} [F(\theta_2, b_1) + F(\theta_1, b_1)]$$

At P_2 , when $\theta_1 = \theta_2$,

$$\phi = B \frac{S_L}{2\pi a} F(\theta_1, b_1)$$

At P_2 , when $l = \infty$ and $\theta_1 = \theta_2 = \pi/2$,

$$\phi = B \frac{S_L}{2\pi a} F\left(\frac{\pi}{2}, b_1\right)$$

At P_3 , when $\theta_2 = 0$,

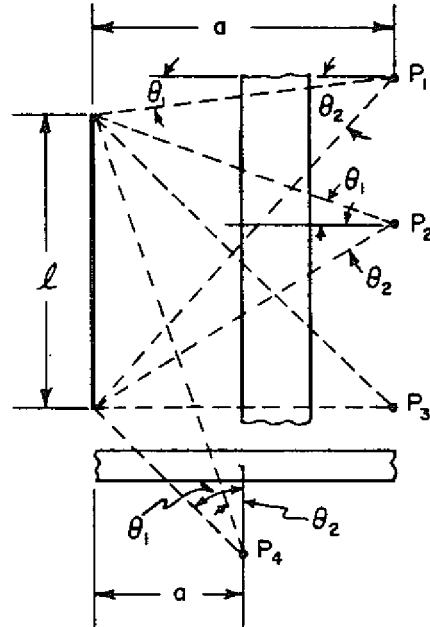
$$\phi = B \frac{S_L}{4\pi a} F(\theta_1, b_1)$$

At P_3 , when $\theta_2 = 0$ and $l = \infty$,

$$\phi = B \frac{S_L}{4\pi a} F\left(\frac{\pi}{2}, b_1\right)$$

At P_4

$$\phi = B \frac{S_L}{4\pi a} [F(\theta_1, b_1) - F(\theta_2, b_1)]$$



I-3 DISK SOURCE (K CURVES)

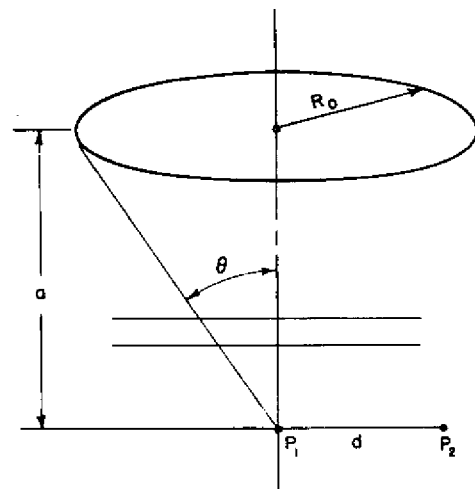
At P_1

$$\phi = \frac{BSA}{2} [E_1(b_1) - E_1(b_1 \sec \theta)]$$

At P_2

$$\phi = \frac{BSA}{2} [E_1(b_1) - E_1(b_1 \sec \theta)] \times K\left(\frac{d}{R_0}, \frac{a}{R_0}, \bar{\mu}R_0\right)$$

where $\bar{\mu} \equiv \frac{\sum_i \mu_i t_i}{\sum_i t_i}$



I-4 INFINITE-SLAB SOURCE

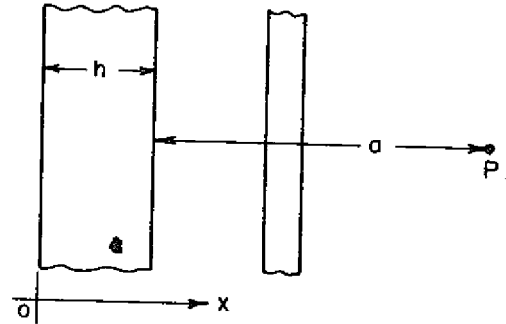
I-4.1 Exterior

At P, a distance a from the slab, if $S_V(x) =$ constant,

$$\phi = \frac{BS_V}{2\mu_S} [E_2(b_1) - E_2(b_2)]$$

If $S_V(x) = \sum_i S_i e^{k_i x}$,

$$\phi = \frac{B}{2\mu_S} \sum_i S_i e^{k_i b_2 / \mu_S} \left[F_1\left(b_2, \frac{-k_i}{\mu_S}\right) - F_1\left(b_1, \frac{-k_i}{\mu_S}\right) \right]$$



If $S_V(x) = \sum_{n=0}^N S_n (x+c)^n$,

$$\phi = \frac{B}{2\mu_S} \sum_{n=0}^N S_n \sum_{i=0}^n \frac{(-1)^i n!}{(\mu_S)^i (n-i)!} [(h+c)^{n-i} E_{2+i}(b_1) - c^{n-i} E_{2+i}(b_2)]$$

If $h = 0$, the infinite-plane source obtains, in which case

$$\phi = \frac{BS_A}{2} E_1(b_1)$$

I-4.2 Interior (F_1 Curves)

At P, a distance d from the origin plane, if $S_V(x) =$ constant,

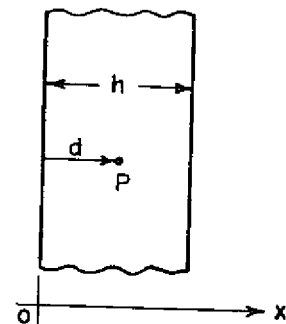
$$\phi = \frac{BS_V}{2\mu_S} \{2 - E_2(\mu_S d) - E_2[\mu_S(h-d)]\}$$

If $S_V(x) = \sum_i S_i e^{k_i x}$,

$$\phi = \frac{B}{2\mu_S} \sum_i S_i e^{k_i d} \left\{ F_1\left(\mu_S d, \frac{-k_i}{\mu_S}\right) + F_1\left[\mu_S(h-d), \frac{k_i}{\mu_S}\right] \right\}$$

If $S_V(x) = \sum_{n=0}^N S_n (x+c)^n$,

$$\phi = \frac{B}{2\mu_S} \sum_{n=0}^N \frac{S_n}{\mu_S^n} \sum_{p=0}^n \frac{n!}{(n-p)!} \left\{ [1 + (-1)^p] \frac{[\mu_S(d+c)]^{n-p}}{1+p} - [\mu_S(h+c)]^{n-p} E_{2+p}[\mu_S(h-d)] - (-1)^p (\mu_S c)^{n-p} E_{2+p}(\mu_S d) \right\}$$



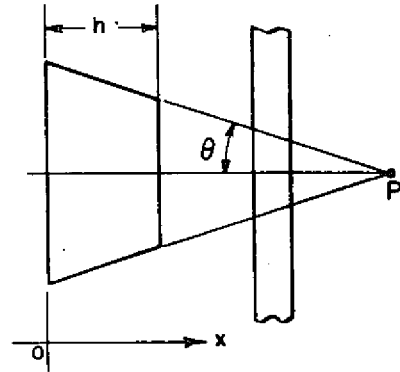
I-5 TRUNCATED RIGHT-CIRCULAR CONE SOURCE

At P, the apex of the cone, if $S_V(x) = \text{constant}$,

$$\phi = \frac{BS_V}{2\mu_S} \left[E_2(b_1) - E_2(b_3) + \frac{E_2(b_3 \sec \theta)}{\sec \theta} - \frac{E_2(b_1 \sec \theta)}{\sec \theta} \right]$$

If $S_V(x) = \sum_i S_i e^{k_i x}$, $k_i \neq 0$,

$$\begin{aligned} \phi = B \sum_i \frac{S_i}{k_i} & \left\{ e^{k_i h} [E_1(b_1) - E_1(b_1 \sec \theta)] - e^{k_i b_3 / \mu_S} \right. \\ & \times \left[E_1\left(b_1 \frac{\mu_S + k_i}{\mu_S}\right) - E_1\left(b_3 \frac{\mu_S + k_i}{\mu_S}\right) \right] - [E_1(b_3) \\ & - E_1(b_3 \sec \theta)] + e^{k_i b_3 / \mu_S} \left[E_1\left(b_1 \frac{\mu_S \sec \theta + k_i}{\mu_S}\right) \right. \\ & \left. \left. - E_1\left(b_3 \frac{\mu_S \sec \theta + k_i}{\mu_S}\right) \right] \right\} \end{aligned}$$

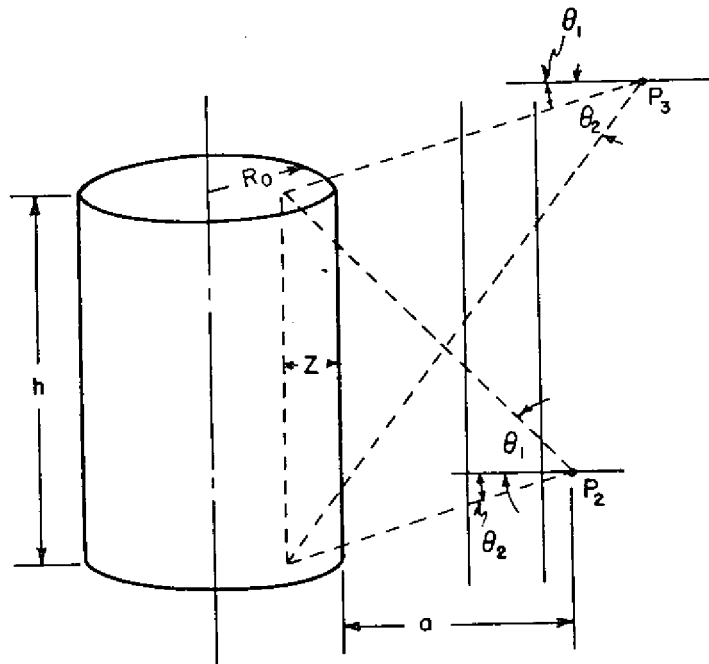


If $S_V(x) = \sum_{n=0}^N S_n (x + c)^n$,

$$\begin{aligned} \phi = \frac{B}{2\mu_S} \sum_{n=0}^N S_n \sum_{i=0}^n \frac{(-1)^i n!}{(\mu_S)^i (n-i)!} & \left\{ (h+c)^{n-i} \left[E_{2+i}(b_1) - \frac{E_{2+i}(b_1 \sec \theta)}{(\sec \theta)^{i+1}} \right] \right. \\ & \left. - c^{n-i} \left[E_{2+i}(b_3) - \frac{E_{2+i}(b_3 \sec \theta)}{(\sec \theta)^{i+1}} \right] \right\} \end{aligned}$$

I-6 CYLINDRICAL SOURCE

I-6.1 Exterior on Side ($\mu_s Z$ Curves)



At P_2

$$\phi = \frac{BS_V R_0^2}{4(a+z)} [F(\theta_1, b_2) + F(\theta_2, b_2)] \quad \theta_1 \neq \theta_2$$

At P_2

$$\phi = \frac{BS_V R_0^2}{2(a+z)} F(\theta, b_2) \quad \theta_1 = \theta_2 = \theta \quad \text{if } h = \infty, \theta = \pi/2$$

At P_3

$$\phi = \frac{BS_V R_0^2}{4(a+z)} [F(\theta_2, b_2) - F(\theta_1, b_2)]$$

I-6.2 Exterior on End ($h < 3/\mu_s$)

1. Upper limit

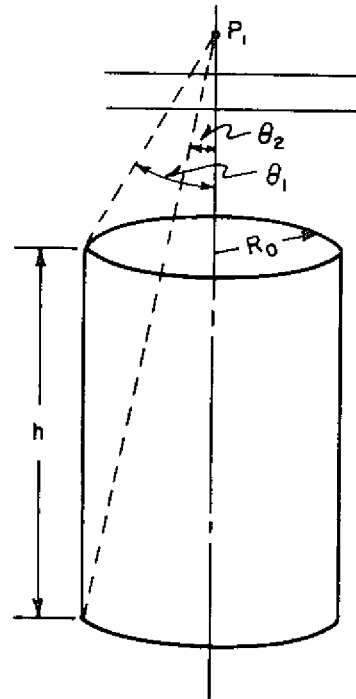
At P_1

$$\phi = \frac{BSv}{2\mu_s} \left[E_2(b_1) - E_2(b_2) + \frac{E_2(b_3 \sec \theta_1)}{\sec \theta_1} - \frac{E_2(b_1 \sec \theta_1)}{\sec \theta_1} \right]$$

2. Lower limit

At P_1

$$\phi = \frac{BSv}{2\mu_s} \left[E_2(b_1) - E_2(b_2) + \frac{E_2(b_3 \sec \theta_2)}{\sec \theta_2} - \frac{E_2(b_1 \sec \theta_2)}{\sec \theta_2} \right]$$



I-6.3 Exterior on End ($h \geq 3/\mu_s$)

1. Upper limit

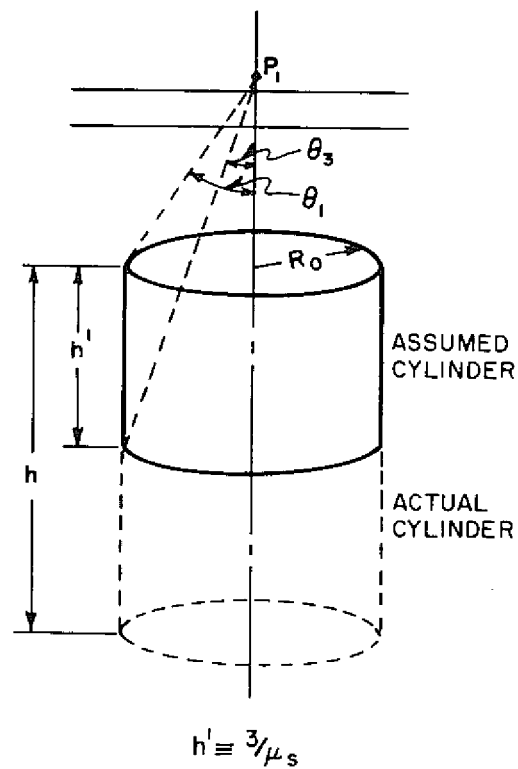
At P_1

$$\phi = \frac{BSv}{2\mu_s} \left[E_2(b_1) - \frac{E_2(b_1 \sec \theta_1)}{\sec \theta_1} \right]$$

2. Lower limit

At P_1

$$\phi = \frac{BSv}{2\mu_s} \left[E_2(b_1) - \frac{E_2(b_1 \sec \theta_3)}{\sec \theta_3} \right]$$



I-6.4 Interior (G Curves)

P_1 and P_2 are on axial center line

At P_1

$$\phi = \frac{BSv}{2\mu_B} [G(\mu_B h_1, b) + G(\mu_B h_2, b)]$$

where $b \equiv \mu_B R_0$.

At P_2

$$\phi = \frac{BSv}{2\mu_B} G(\mu_B h, b)$$

where $b \equiv \mu_B R_0$.

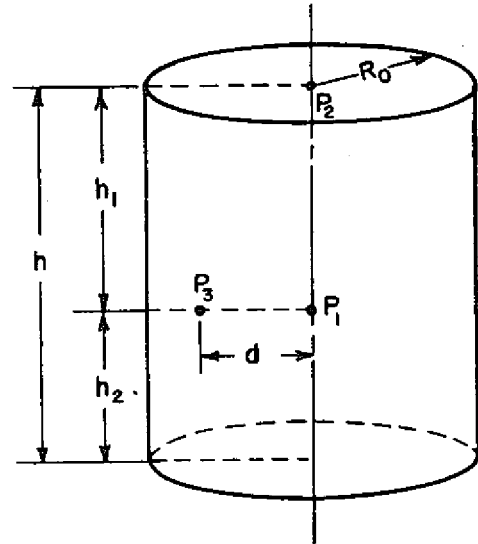
At P_3 , upper limit,

$$\phi = \frac{BSv}{4\mu_B} [G(\mu_B h_1, b_5) + G(\mu_B h_2, b_5) + G(\mu_B h_1, b_4) + G(\mu_B h_2, b_4)]$$

At P_3 , lower limit,

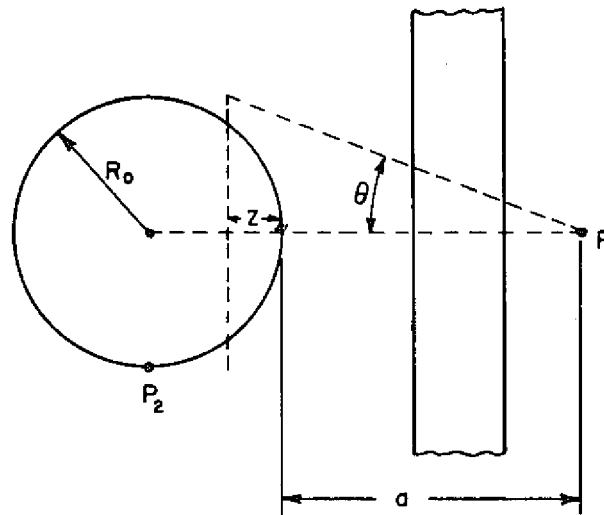
$$\phi = \frac{BSv}{4\mu_B} [G(\mu_B h_1, b_6) + G(\mu_B h_2, b_6) + G(\mu_B h_1, b_4) + G(\mu_B h_2, b_4)]$$

where $b_4 \equiv \mu_B (R_0 - d)$, $b_5 \equiv \mu_B (R_0 + d)$, and $b_6 \equiv \mu_B \sqrt{R_0^2 - d^2}$



I-7 SPHERICAL SOURCE

I-7.1 Exterior (Z Curves)



At P_1

$$\phi = \frac{1}{2}BS_V R_0 [E_1(b_2) - E_1(b_2 \sec \theta)]$$

At P_2 , if $b_1 = 0$,

$$\phi = \frac{BS_V}{2\mu_S} \left(1 - \frac{1}{2\mu_S R_0} + \frac{e^{-2\mu_S R_0}}{2\mu_S R_0} \right)$$

I-7.2 Interior

At P_1

$$\phi = \frac{BS_V}{\mu_B} (1 - e^{-\mu_s R_0})$$

At P_2

$$\phi = \frac{BS_V}{2\mu_B} \left(1 - \frac{1}{2\mu_B R_0} + \frac{e^{-2\mu_s R_0}}{2\mu_B R_0} \right)$$

At P_3

$$\phi = \frac{BS_V}{\mu_B} \left\{ 1 - \frac{e^{-b_4}}{2} - \frac{e^{-b_5}}{2} - \frac{1}{4\mu_B d} [e^{-b_4}(1 + b_4) - e^{-b_5}(1 + b_5)] + \frac{b_4 b_5}{4\mu_B d} [E_1(b_4) - E_1(b_5)] \right\}$$

where $b_4 \equiv \mu_B(R_0 - d)$ and $b_5 \equiv \mu_B(R_0 + d)$.

