

JAERI-M
89-102

大型放射光施設設計報告書-8

8 GeV 大型放射光施設のバルク
遮蔽計算の検討 (I)

1989年8月

笹本 宣雄・黒坂 範雄*・原田 康典・鈴木 康夫

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1989

編集兼発行	日本原子力研究所
印刷	日立高速印刷株式会社

8 GeV 大型放射光施設のバルク遮蔽計算の検討(I)

日本原子力研究所大型放射光施設計画チーム

笹本 宣雄・黒坂 範雄*・原田 康典・鈴木 康夫

(1989年7月14日受理)

大型放射光施設の建屋設計に資する目的で、本施設に対するバルク遮蔽計算を実施した。計算は前方計算と側方計算に分けて考え、前者は Swanson の式に基づき光子と μ 粒子の計算を、後者は Jenkins の式により光子と中性子の計算を行った。遮蔽体構成は、普通コンクリート、重コンクリート、鉄、鉛、土を用いた単層あるいは二重層を想定した。計算の結果、本施設のほとんどすべての遮蔽の厚みを 2 m 以内に収められることが分かった。

Investigation on Bulk Shielding Calculations for
the 8 GeV Synchrotron Radiation Facility (I)

Nobuo SASAMOTO, Norio KUROSAKA^{*}
Yasunori HARADA and Yasuo SUZUKI

Synchrotron Radiation Facility Project Team
Japan Atomic Energy Research Institute
Honkomagome, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received July 14, 1989)

Bulk shielding calculations for the 8 GeV Synchrotron Radiation Facility in Japan are carried out for its building design. Forward and lateral calculations are performed separately. The former is based on Swanson's formulae for radiation sources of photon and muon and the latter based on Jenkins' formulae for photon and neutron. Ordinary and heavy concretes, iron, lead and earth are supposed to be applied to shields in forms of single-and/or double-layers. Calculations show almost all shields of the facility can be less than 2.0 m in depth.

Keywords: Bulk Shield Calculation, Synchrotron Radiation Facility, 8 GeV, Linac, Synchrotron, Storage Ring, Swanson, Jenkins

* on leave from GCG Corporation

目 次

1. はじめに	1
2. 遮蔽評価式	2
2.1 前方計算	2
2.2 側方計算	3
2.3 遮蔽計算用定数	5
3. 電子ビーム損失率の評価	5
4. バルク遮蔽計算	6
4.1 リニアック	6
4.2 シンクロトロン	7
4.3 ストレージリング	10
5. まとめ	13
文 献	14

Contents

1. Introduction	1
2. Formulae Used in Shielding Calculation	2
2.1 Forward Calculation	2
2.2 Lateral Calculation	3
2.3 Nuclear Constants for Shielding Calculation	5
3. Estimation of Electron Beam Loss Rate	5
4. Bulk Shielding Calculations	6
4.1 Linac	6
4.2 Synchrotron	7
4.3 Storage Ring	10
5. Summary	13
References	14

1. はじめに

日本原子力研究所（原研）・理化学研究所（理研）大型放射光施設研究開発共同チーム（「共同チーム」）が現在計画を進めている大型放射光施設は、周長が約1.5kmにおよぶストレージリングを中核とし、それへの入射器としてのシンクロトロン、リニアックから構成される巨大な電子・陽電子加速器システムである。これらの加速器群全体を取り囲む、普通コンクリートを主体とした遮蔽体の、総建設費に占める割合は非常に大きいものである。そのため、施設設計の初期段階から遮蔽特性を定量的に把握しておくことが、本施設の建設を合理的かつ効率良く進めていく上での一つの重要なポイントであると考えられる。

そこで、現時点で想定される本施設の基本レイアウト図をもとにしてバルク遮蔽計算を実施し、実現可能性のある遮蔽体の組合せに対してその厚さを決定した。遮蔽材としては主として普通コンクリートを考え、部分的にはその他に重コンクリート、土、鉄、鉛の単一層あるいは多重層を考慮した。遮蔽厚算出のための目標線量当量率は、管理区域の基準線量当量率の1/2の $3\mu\text{Sv/h}$ を目安とした。遮蔽計算は、電子ビームラインを基準にして、電子の進行方向（前方方向）とその直角方向（側壁、天井方向）に分けて行い、放射線源として、前方方向計算では光子と μ 粒子を、側壁、天井方向計算では光子と中性子をそれぞれ考慮した。ここで、ビーム損失により放出される光子は前方方向への指向性が極めて強く、空間的な拡がりを見捨てるため、光子の前方方向計算では距離の逆2乗による放射線束の減衰は期待できないとした¹⁾。前方方向計算には、光子、 μ 粒子ともSwansonの評価式²⁾を用い、側壁、天井方向では、中性子と光子計算の整合性をとるため、中性子、光子ともJenkinsの評価式³⁾を採用した。放射線源強度の推定に用いられる電子ビームの損失割合には多くの不確定要素が含まれ合理的な評価が難しいため、今回の計算では十分安全側の仮定を行った。さらに、ビーム損失は常に一点で起こるといふ、これも安全側の仮定を行った。

本報告書の第2章では、前方計算、側方計算に分けて、今回の計算に用いた評価式を放射線源毎に示した。第3章では、線源評価上最も重要なパラメータであるビーム損失率の評価に言及している。第4章で計算結果を扱っており、遮蔽計算箇所毎に、ビーム条件、幾何条件を含む計算条件、遮蔽体構成、目標線量当量率（ $3\mu\text{Sv/h}$ ）を満足するために必要な遮蔽厚の計算結果を与えると共に、遮蔽体内の線量当量率分布を、光子、中性子、 μ 粒子、全線量当量率に分けて図示し、各々の放射線の遮蔽体内減衰挙動を視覚的に把握できるよう配慮した。

2. 遮蔽評価式

2.1 前方計算

前方方向の計算では、極端に前方指向性の強い光子（制動放射線）と透過力の大きい μ 粒子を考慮の対象とする。光子の計算では、放出光子が前方方向にほとんどひろがらないことから、距離の逆2乗による減衰項を無視した光子に対するSwansonの式を使用し、また μ 粒子に対しては、 μ 粒子に対するSwansonの式を適用した。なお、シンクロトロン及びストレージリングの直線部の前方方向遮蔽計算では、加速電子と残留ガスの相互作用によるガス制動放射の寄与の補正を行った。

(1) 光子（Swansonの式）

$$\dot{H} = 1.6 \times 10^{-13} \cdot J \cdot E_e \cdot \dot{H}_1 \cdot \exp\left(-\frac{d}{\lambda \cdot \sin \phi}\right) \quad (\text{Sv/h}) \quad (2.1)$$

ここで

$$\dot{H}_1 = 3.5 \times 10^5 \cdot E_e$$

である。

(2) μ 粒子（Swansonの式）

$$\dot{H} = \left[\frac{25}{25 + X/X_0} \right] \cdot \left[\frac{X(E_e) - X}{X(E_e)} \right] \cdot \dot{H}_0 \quad (\text{Sv/h})$$

$$(X(E_e) > X) \quad (2.2)$$

$$\dot{H} = 0.0 \quad (X(E_e) \leq X)$$

ここで \dot{H}_0 は遮蔽体の無い時の線量当量率であり次式で与えられる。

$$\dot{H}_0 = 8.0 \times 10^{-15} \cdot J \cdot E_e \cdot \frac{1}{r^2} \quad (\text{Sv/h}) \quad (2.3)$$

(2.1), (2.2)式は単層遮蔽体に対する式であるが、次に示すパラメータの置換えによりそのまま多重層遮蔽体に適用することができる。

光子に対するSwansonの式の場合、単層減衰カーネル

$$\exp\left(-\frac{d}{\lambda \cdot \sin \phi}\right)$$

を、多重減衰カーネル

$$\prod_{i=1}^{\text{MAX}} \exp\left(-\frac{d_i}{\lambda_i \cdot \sin \phi}\right)$$

に置換え、また、 μ 粒子に対する Swanson の式を、

$$\begin{aligned} \dot{H} &= \left[\frac{25}{25 + X/X_0} \right] \cdot \left[\frac{X(E_e) - X}{X(E_e)} \right] \cdot \dot{H}_0 \\ &= \left[\frac{25}{25 + X/X_0} \right] \cdot \left[1 - X/X(E_e) \right] \cdot \dot{H}_0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

のように変形し、上式の X/X_0 、 $X/X(E_e)$ を各々 $\sum_{i=1}^{\text{MAX}} X^i/X_0^i$ 、 $\sum_{i=1}^{\text{MAX}} X^i/X(E_e)^i$ に置換える。ここで

- J : 点状のビーム損失 (electron/s)
- E_e : 入射電子エネルギー (GeV)
- r : ビーム損失点から評価点までの距離 (m)
- d : 遮蔽体厚さ (cm)
- λ : 光子の減弱距離 (cm)
- X_0 : 放射長 (Table 1 を参照)
- $X(E_e)$: μ 粒子の最大飛程 (Table 2 を参照)

(3) ガス制動放射線

加速電子と残留ガスとの相互作用の結果発生するガス制動放射線は前方指向性が非常に強い
ため、エネルギー E の電子が遮蔽体内壁に入射し、以下の式で表わされるビーム損失をおこす
として遮蔽計算を行った。

$$\begin{aligned} J &= 5.12 \times 10^{18} Z \cdot (Z+1) \cdot p \cdot \frac{273}{T} \cdot \ell \cdot I \\ &\times [\ln(183 Z^{-1/3} + 1/18)] \quad (\text{electron/s}) \end{aligned} \quad (2.5)$$

ここで

- Z : 残留ガスの実効原子番号 (CO が主成分なので $Z = 10$ を使用)
- p : 残留ガス圧 (torr)
- T : 残留ガスの絶対温度 (K)
- ℓ : 直線部の長さ (cm)
- I : 蓄積電流 (A)

である。

2.2 側方計算

側壁・天井方向 (側方) 計算では線源として光子と中性子を考慮するが、計算式は両者を整合性のとれた形式で表示している Jenkins の式を使用した。

(1) 光子 (Jenkinsの式)

光子に対する Jenkinsの式は、線量当量をターゲットで発生した光子の減衰成分と、高エネルギー中性子と遮蔽体との相互作用により生成する二次光子成分の和として表現し、次式で与えられる。

$$\dot{H} = 3.6 \times 10^{-14} \cdot J \cdot E_e \cdot \frac{1}{r^2} \times \left[\frac{133 \cdot \exp\left(-\frac{d}{\lambda \sin \phi}\right)}{(1 - 0.98 \cos \theta)^{1.2}} + \frac{f_1 \cdot 0.267 \cdot \exp\left(-\frac{d}{\lambda_1 \sin \phi}\right)}{(1 - 0.72 \cos \theta)^2} \right]$$

(30° < θ < 130°) (Sv/h) (2.6)

(2) 中性子 (Jenkinsの式)

中性子に対する Jenkinsの式は、生成中性子として、巨大共鳴中性子 ($\bar{E}_n \sim 1 \text{ MeV}$)、中間エネルギー中性子 ($\bar{E}_n \sim 10 \text{ MeV}$)、高エネルギー中性子 ($\bar{E}_n \sim 100 \text{ MeV}$) の3成分の中性子を考慮したものであり、次式で与えられる。

$$\dot{H} = 3.6 \times 10^{-14} \cdot J \cdot E_e \cdot \frac{1}{r^2} \times \left[\frac{f_1 \cdot \exp\left(-\frac{d}{\lambda_1 \sin \phi}\right)}{(1 - 0.72 \cos \theta)^2} + \frac{f_2 \cdot 10 \cdot \exp\left(-\frac{d}{\lambda_3 \sin \phi}\right)}{(1 - 0.75 \cos \theta)} + 3.79 Z^{0.73} \cdot \exp\left(-\frac{d}{\lambda_2 \sin \phi}\right) \right] \times 2^{(*)}$$

(30° < θ < 130°) (Sv/h) (2.7)

(*) 中性子の線質係数を従来の2倍とする。

ここで

- J : 点状のビーム損失 (electron/s)
- E_e : 入射電子エネルギー (GeV)
- r : ビーム損失点から評価点までの距離 (m)
- d : 遮蔽体厚さ (cm)
- θ : ビーム方向からの角度 (度)
- φ : 遮蔽体の傾き (度)
- λ_1 : 高エネルギー中性子の減弱距離 (cm)
- λ_2 : 巨大共鳴中性子の減弱距離 (cm)
- λ_3 : 中間エネルギー中性子の減弱距離 (cm)
- λ : 光子の減弱距離 (cm)

Z : ターゲット物質の原子番号

f_1 : 高エネルギー中性子に対する線源低減補正係数 (Fig.1 を参照)

f_2 : 中間エネルギー中性子に対する線源低減補正係数 (Fig.1 を参照)

上述の Jenkins の式は単層遮蔽体に対する表記であるが, Swanson の式 (光子) の場合と同様に,

$$\begin{aligned} \text{単層減衰カーネル} & \quad \exp\left(-\frac{d}{\lambda \sin \phi}\right) \\ \text{を,} & \\ \text{多重層減衰カーネル} & \quad \prod_{i=1}^{\text{MAX}} \left[\exp\left(-\frac{d_i}{\lambda_i \sin \phi}\right) \right] \end{aligned}$$

に置換えることにより, 多重層遮蔽体に適用することができる。

2.3 遮蔽計算用定数

光子に対する Swanson の式, 光子, 中性子に対する Jenkins の式における減衰カーネルはすべて減弱距離を用いて表現される。光子に対する減弱距離はコンプトン・ミニマムにはほぼ等しい値で代表される一群の取扱い, 中性子に対する減弱距離は, Jenkins の分類に対応して 3 群の取扱いとする。Table 3 にこれらの減弱距離の一覧表を示す。Table 4 には, コンバータでの最大電子エネルギー 0.25 GeV, リニアック, シンクロトロン入射部での 1.5 GeV 及びそれより下流における 8.0 GeV に対応した, 高エネルギー中性子及び中間エネルギー中性子に対する線源低減補正係数 f_1 , f_2 の値を示す。

3. 電子ビーム損失率の評価

現時点で想定される本施設の基本レイアウトは Fig.2 に示す通りである。本施設の遮蔽設計を実施するにあたり, ビームエネルギー, ビーム損失割合等の諸条件の違いから本施設を, 1) 電子・陽電子コンバータ, 2) メインリニアック, 3) シンクロトロン, 4) ストレージリングに分けた。シンクロトロンとストレージリングについてはさらに入射部と入射部以外に, また, ストレージリングではその上にビーム入射時と蓄積時に分類した。それぞれの遮蔽評価点において仮定したビーム損失割合(%)を Table 5 に示す。Table 5 の仮定に基づいてそれぞれのビームパラメータを用いて算出したビーム損失率 (毎秒あたりの電子損失数) をビームパラメータ条件とともに評価点毎に Table 6 ~ 9 に示す。入射部以外のシンクロトロン及びストレージリングにおける直線部前方方向の遮蔽計算では, 通常のビーム損失率に対して, Table 10 に与えたパラメータを用いてガス制動放射の寄与の補正を行った。

メインリニアック, シンクロトロン入射部, ストレージリング入射部については加速, 蓄積ビームとして電子と陽電子の使用を考えているが, それぞれについてビーム損失率を計算した結果, どの評価点においても電子の損失率の方が大きいことがわかったため, 遮蔽計算上は電

Z : ターゲット物質の原子番号

f_1 : 高エネルギー中性子に対する線源低減補正係数 (Fig.1 を参照)

f_2 : 中間エネルギー中性子に対する線源低減補正係数 (Fig.1 を参照)

上述の Jenkins の式は単層遮蔽体に対する表記であるが, Swanson の式 (光子) の場合と同様に,

$$\begin{aligned} \text{単層減衰カーネル} & \quad \exp \left(- \frac{d}{\lambda \sin \phi} \right) \\ \text{を,} & \\ \text{多重層減衰カーネル} & \quad \prod_{i=1}^{\text{MAX}} \left[\exp \left(- \frac{d_i}{\lambda_i \sin \phi} \right) \right] \end{aligned}$$

に置換えることにより, 多重層遮蔽体に適用することができる。

2.3 遮蔽計算用定数

光子に対する Swanson の式, 光子, 中性子に対する Jenkins の式における減衰カーネルはすべて減弱距離を用いて表現される。光子に対する減弱距離はコンプトン・ミニマムにはほぼ等しい値で代表される一群の取扱い, 中性子に対する減弱距離は, Jenkins の分類に対応して 3 群の取扱いとする。Table 3 にこれらの減弱距離の一覧表を示す。Table 4 には, コンバータでの最大電子エネルギー 0.25 GeV, リニアック, シンクロトロン入射部での 1.5 GeV 及びそれより下流における 8.0 GeV に対応した, 高エネルギー中性子及び中間エネルギー中性子に対する線源低減補正係数 f_1 , f_2 の値を示す。

3. 電子ビーム損失率の評価

現時点で想定される本施設の基本レイアウトは Fig.2 に示す通りである。本施設の遮蔽設計を実施するにあたり, ビームエネルギー, ビーム損失割合等の諸条件の違いから本施設を, 1) 電子・陽電子コンバータ, 2) メインリニアック, 3) シンクロトロン, 4) ストレージリングに分けた。シンクロトロンとストレージリングについてはさらに入射部と入射部以外に, また, ストレージリングではその上にビーム入射時と蓄積時に分類した。それぞれの遮蔽評価点において仮定したビーム損失割合(%)を Table 5 に示す。Table 5 の仮定に基づいてそれぞれのビームパラメータを用いて算出したビーム損失率 (毎秒あたりの電子損失数) をビームパラメータ条件とともに評価点毎に Table 6 ~ 9 に示す。入射部以外のシンクロトロン及びストレージリングにおける直線部前方方向の遮蔽計算では, 通常のビーム損失率に対して, Table 10 に与えたパラメータを用いてガス制動放射の寄与の補正を行った。

メインリニアック, シンクロトロン入射部, ストレージリング入射部については加速, 蓄積ビームとして電子と陽電子の使用を考えているが, それぞれについてビーム損失率を計算した結果, どの評価点においても電子の損失率の方が大きいことがわかったため, 遮蔽計算上は電

子ビームのケースで代表させた。また、ストレージリングにおいては、蓄積時よりも入射時の方がビーム損失率は大きいので、遮蔽厚は入射時の条件にもとづいて行った。ガス制動放射による線源強度補正の効果は通常のビーム損失量の $1/100 \sim 1/1000$ であり無視し得る量である。

一方、シンクロトロンからストレージリングへのビームの入射頻度は、想定されるストレージリングのビーム寿命から考えて10時間に1回とし、1回当りの入射に要する時間を最大1時間とした。すなわち10時間に1時間の運転時間を仮定した。このことから、シンクロトロン、ストレージリングに対しては、上述の時間平均のための補正を考慮し、それぞれのビーム損失率を一律に $1/10$ とした。

4. バルク遮蔽計算

4.1 リニアック

(1) 電子・陽電子コンバータ側壁一側方計算

(a) 計算条件

電子ビームエネルギー：0.25 GeV
 電子ビーム損失率： 3.75×10^{13} e/s
 線源/遮蔽体間の距離：4.0 m
 遮蔽体の向き：ビーム方向と平行

(b) 計算結果

遮蔽材を

普通コンクリート使用時

- 1) 普通コンクリート (X cm)
- 2) 普通コンクリート (200 cm) + 鉄 (X cm)
- 3) 普通コンクリート (180 cm) + 鉄 (X cm)

重コンクリート使用時

- 4) 重コンクリート (X cm)
- 5) 重コンクリート (160 cm) + 鉄 (X cm)
- 6) 重コンクリート (140 cm) + 鉄 (X cm)

とした場合の線量当量率の分布をFig. 3～8に示す。コンクリート遮蔽材としては、原則的には普通コンクリートの使用を考え、このコンバータのような限定された領域においては重コンクリートの使用も考える。これらの図から必要な遮蔽厚は以下のようになる。

普通コンクリート使用時

- | | |
|----------------------------------|------------|
| 1) 普通コンクリート (296 cm) | [Fig. 3] |
| 2) 普通コンクリート (200 cm) + 鉄 (32 cm) | [Fig. 4] |
| 3) 普通コンクリート (180 cm) + 鉄 (39 cm) | [Fig. 5] |

子ビームのケースで代表させた。また、ストレージリングにおいては、蓄積時よりも入射時の方がビーム損失率は大きいので、遮蔽厚は入射時の条件にもとづいて行った。ガス制動放射による線源強度補正の効果は通常のビーム損失量の $1/100 \sim 1/1000$ であり無視し得る量である。

一方、シンクロトロンからストレージリングへのビームの入射頻度は、想定されるストレージリングのビーム寿命から考えて10時間に1回とし、1回当りの入射に要する時間を最大1時間とした。すなわち10時間に1時間の運転時間を仮定した。このことから、シンクロトロン、ストレージリングに対しては、上述の時間平均のための補正を考慮し、それぞれのビーム損失率を一律に $1/10$ とした。

4. バルク遮蔽計算

4.1 リニアック

(1) 電子・陽電子コンバータ側壁一側方計算

(a) 計算条件

電子ビームエネルギー	: 0.25	GeV
電子ビーム損失率	: 3.75×10^{13}	e/s
線源/遮蔽体間の距離	: 4.0	m
遮蔽体の向き	: ビーム方向と平行	

(b) 計算結果

遮蔽材を

普通コンクリート使用時

- 1) 普通コンクリート (X cm)
- 2) 普通コンクリート (200 cm) + 鉄 (X cm)
- 3) 普通コンクリート (180 cm) + 鉄 (X cm)

重コンクリート使用時

- 4) 重コンクリート (X cm)
- 5) 重コンクリート (160 cm) + 鉄 (X cm)
- 6) 重コンクリート (140 cm) + 鉄 (X cm)

とした場合の線量当量率の分布をFig. 3 ~ 8に示す。コンクリート遮蔽材としては、原則的には普通コンクリートの使用を考え、このコンバータのような限定された領域においては重コンクリートの使用も考える。これらの図から必要な遮蔽厚は以下のようになる。

普通コンクリート使用時

- | | |
|----------------------------------|------------|
| 1) 普通コンクリート (296 cm) | [Fig. 3] |
| 2) 普通コンクリート (200 cm) + 鉄 (32 cm) | [Fig. 4] |
| 3) 普通コンクリート (180 cm) + 鉄 (39 cm) | [Fig. 5] |

重コンクリート使用時

- | | |
|--------------------------------|------------|
| 4) 重コンクリート (206 cm) | [Fig. 6] |
| 5) 重コンクリート (160 cm) + 鉄(22 cm) | [Fig. 7] |
| 6) 重コンクリート (140 cm) + 鉄(31 cm) | [Fig. 8] |

(2) メインリニアック側壁－側方計算

(a) 計算条件

- 電子ビームエネルギー : 1.5 GeV
 電子ビーム損失率 : 1.6×10^{11} e/s
 線源/遮蔽体間の距離 : 2.5 m
 遮蔽体の向き : ビーム方向と平行

(b) 計算結果

遮蔽材を

- 1) 普通コンクリート (X cm)
- 2) 普通コンクリート (200 cm) + 土(X cm)
- 3) 普通コンクリート (180 cm) + 土(X cm)
- 4) 普通コンクリート (160 cm) + 土(X cm)

とした場合の線量当量率の分布を Fig. 9 ~ 12 に示す。これらの図から必要な遮蔽厚は以下のようなになる。

- | | |
|----------------------------------|-------------|
| 1) 普通コンクリート (266 cm) | [Fig. 9] |
| 2) 普通コンクリート (200 cm) + 土(104 cm) | [Fig. 10] |
| 3) 普通コンクリート (180 cm) + 土(135 cm) | [Fig. 11] |
| 4) 普通コンクリート (160 cm) + 土(168 cm) | [Fig. 12] |

4.2 シンクロトロン

(1) シンクロトロン (入射部) 内側壁－前方計算

(a) 計算条件

- 電子ビームエネルギー : 1.5 GeV
 電子ビーム損失率 : 3.2×10^{10} e/s
 線源/遮蔽体間の距離 : 2.5 m
 遮蔽体の向き : ビーム方向に対して 15°

(b) 計算結果

遮蔽材を

普通コンクリート使用時

- 1) 普通コンクリート (X cm)
- 2) 普通コンクリート (140 cm) + 鉄(X cm)
- 3) 普通コンクリート (120 cm) + 鉄(X cm)

4) 普通コンクリート (140 cm) + 鉛 (X cm)

5) 普通コンクリート (120 cm) + 鉛 (X cm)

重コンクリート使用時

6) 重コンクリート (X cm)

とした場合の線量当量率の分布を Fig.13~18に示す。これらの図から必要な遮蔽厚は以下のようになる。

普通コンクリート使用時

1) 普通コンクリート (166 cm) [Fig.13]

2) 普通コンクリート (140 cm) + 鉄 (14 cm) [Fig.14]

3) 普通コンクリート (120 cm) + 鉄 (21 cm) [Fig.15]

4) 普通コンクリート (140 cm) + 鉛 (8 cm) [Fig.16]

5) 普通コンクリート (120 cm) + 鉛 (11 cm) [Fig.17]

重コンクリート使用時

6) 重コンクリート (150 cm) [Fig.18]

(2) シンクロトロン (入射部) 内側壁一側方計算

(a) 計算条件

電子ビームエネルギー : 1.5 GeV

電子ビーム損失率 : 3.2×10^{10} e/s

線源/遮蔽体間の距離 : 2.5 m

遮蔽体の向き : ビーム方向と平行

(b) 計算結果

遮蔽材を

普通コンクリート使用時

1) 普通コンクリート (X cm)

2) 普通コンクリート (140 cm) + 鉄 (X cm)

3) 普通コンクリート (120 cm) + 鉄 (X cm)

4) 普通コンクリート (140 cm) + 鉛 (X cm)

5) 普通コンクリート (120 cm) + 鉛 (X cm)

重コンクリート使用時

6) 重コンクリート (X cm)

とした場合の線量当量率の分布を Fig.19~24に示す。これらの図から必要な遮蔽厚は以下のようになる。

普通コンクリート使用時

1) 普通コンクリート (216 cm) [Fig.19]

2) 普通コンクリート (140 cm) + 鉄 (27 cm) [Fig.20]

3) 普通コンクリート (120 cm) + 鉄 (35 cm) [Fig.21]

4) 普通コンクリート (140 cm) + 鉛 (40 cm) [Fig.22]

5) 普通コンクリート (120 cm) + 鉛(50 cm) [Fig.23]

重コンクリート使用時

6) 重コンクリート (150 cm) [Fig.24]

(3) シンクロトロン (入射部以外) 外側壁 - 前方計算

(a) 計算条件

電子ビームエネルギー : 8.0 GeV

電子ビーム損失率 : 6.28×10^8 e/s

線源 / 遮蔽体間の距離 : 31 m

遮蔽体の向き : ビーム方向に対して 15°

(b) 計算結果

遮蔽材を

1) 普通コンクリート (X cm)

とした場合の線量当量率の分布を Fig.25に示す。この図から必要な遮蔽厚は以下のようになる。

1) 普通コンクリート (95 cm) [Fig.25]

(4) シンクロトロン (入射部以外) 側壁 - 側方計算

(a) 計算条件

電子ビームエネルギー : 8.0 GeV

電子ビーム損失率 : 6.25×10^8 e/s

線源 / 遮蔽体間の距離 : 2.5 m

遮蔽体の向き : ビーム方向と平行

(b) 計算結果

遮蔽材を

1) 普通コンクリート (X cm)

2) 普通コンクリート (120 cm) + 土(X cm)

3) 普通コンクリート (100 cm) + 土(X cm)

4) 普通コンクリート (80 cm) + 土(X cm)

とした場合の線量当量率の分布を Fig.26~29に示す。これらの図から必要な遮蔽厚は以下のようになる。

1) 普通コンクリート (142 cm) [Fig.26]

2) 普通コンクリート (120 cm) + 土(38 cm) [Fig.27]

3) 普通コンクリート (100 cm) + 土(73 cm) [Fig.28]

4) 普通コンクリート (80 cm) + 土(108 cm) [Fig.29]

4.3 ストレージリング

(1) ストレージリング (入射部) beam port end wall - 前方計算

(a) 計算条件

電子ビームエネルギー : 8.0 GeV
 電子ビーム損失率 : 9.4×10^9 e/s
 線源/遮蔽体間の距離 : 30 m
 遮蔽体の向き : ビーム方向に垂直

(b) 計算結果

遮蔽材を

普通コンクリート使用時

1) 普通コンクリート (X cm)

鉄, 鉛使用時

2) 鉄 (X cm)

3) 鉄 (80 cm) + 鉛 (X cm)

4) 鉄 (60 cm) + 鉛 (X cm)

5) 鉛 (X cm)

とした場合の線量当量率の分布を Fig.30~34に示す。これらの図から必要な遮蔽厚は以下のようになる。

普通コンクリート使用時

1) 普通コンクリート (430 cm) [Fig.30]

鉄, 鉛使用時

2) 鉄 (102 cm) [Fig.31]

3) 鉄 (80 cm) + 鉛 (10 cm) [Fig.32]

4) 鉄 (60 cm) + 鉛 (20 cm) [Fig.33]

5) 鉛 (50 cm) [Fig.34]

(2) ストレージリング (入射部) 内側壁 - 側方計算

(a) 計算条件

電子ビームエネルギー : 8.0 GeV
 電子ビーム損失率 : 9.4×10^9 e/s
 線源/遮蔽体間の距離 : 3.0 m
 遮蔽体の向き : ビーム方向と平行

(b) 計算結果

遮蔽材を

普通コンクリート使用時

1) 普通コンクリート (X cm)

2) 普通コンクリート (200 cm) + 土 (X cm)

3) 普通コンクリート (180 cm) + 土(X cm)

4) 普通コンクリート (160 cm) + 土(X cm)

重コンクリート使用時

5) 重コンクリート (X cm)

とした場合の線量当量率の分布を Fig.35~39に示す。これらの図から必要な遮蔽厚は以下のようになる。

普通コンクリート使用時

1) 普通コンクリート (228 cm) [Fig.35]

2) 普通コンクリート (200 cm) + 土(45 cm) [Fig.36]

3) 普通コンクリート (180 cm) + 土(76 cm) [Fig.37]

4) 普通コンクリート (160 cm) + 土(108 cm) [Fig.38]

重コンクリート使用時

5) 重コンクリート (160 cm) [Fig.39]

(3) ストレージリング (入射部) 外側壁一側方計算

(a) 計算条件

電子ビームエネルギー : 8.0 GeV

電子ビーム損失率 : 9.4×10^9 e/s

線源/遮蔽体間の距離 : 5.0 m

遮蔽体の向き : ビーム方向と平行

(b) 計算結果

遮蔽材を

普通コンクリート使用時

1) 普通コンクリート (X cm)

2) 普通コンクリート (180 cm) + 土(X cm)

3) 普通コンクリート (160 cm) + 土(X cm)

重コンクリート使用時

4) 重コンクリート (X cm)

とした場合の線量当量率の分布を Fig.40~43に示す。これらの図から必要な遮蔽厚は以下のようになる。

普通コンクリート使用時

1) 普通コンクリート (195 cm) [Fig.40]

2) 普通コンクリート (180 cm) + 土(35 cm) [Fig.41]

3) 普通コンクリート (160 cm) + 土(68 cm) [Fig.42]

重コンクリート使用時

4) 重コンクリート (140 cm) [Fig.43]

(4) ストレージリング（入射部以外）beam port end wall - 前方計算

(a) 計算条件

電子ビームエネルギー：8.0 GeV
 電子ビーム損失率： 9.4×10^8 e/s
 線源／遮蔽体間の距離：30 m
 遮蔽体の向き：ビーム方向に垂直

(b) 計算結果

遮蔽材を

普通コンクリート使用時

1) 普通コンクリート (X cm)

鉄, 鉛使用時

2) 鉄 (X cm)

3) 鉄 (80 cm) + 鉛 (X cm)

4) 鉄 (60 cm) + 鉛 (X cm)

5) 鉛 (X cm)

とした場合の線量当量率の分布を Fig.44~48に示す。これらの図から必要な遮蔽厚は以下のようなになる。

普通コンクリート使用時

1) 普通コンクリート (376 cm) [Fig.44]

鉄, 鉛使用時

2) 鉄 (90 cm) [Fig.45]

3) 鉄 (80 cm) + 鉛 (4 cm) [Fig.46]

4) 鉄 (60 cm) + 鉛 (14 cm) [Fig.47]

5) 鉛 (44 cm) [Fig.48]

(5) ストレージリング（入射部以外）内側壁 - 側方計算

(a) 計算条件

電子ビームエネルギー：8.0 GeV
 電子ビーム損失率： 9.4×10^8 e/s
 線源／遮蔽体間の距離：3.0 m
 遮蔽体の向き：ビーム方向と平行

(b) 計算結果

遮蔽材を

1) 普通コンクリート (X cm)

2) 普通コンクリート (120 cm) + 土 (X cm)

3) 普通コンクリート (100 cm) + 土 (X cm)

とした場合の線量当量率の分布を Fig.49~51に示す。これらの図から必要な遮蔽厚は以下のようなになる。

- | | |
|---------------------------------|-----------|
| 1) 普通コンクリート (147 cm) | { Fig.49} |
| 2) 普通コンクリート (120 cm) + 土(45 cm) | { Fig.50} |
| 3) 普通コンクリート (100 cm) + 土(80 cm) | { Fig.51} |

(6) ストレージリング (入射部以外) 外側壁-側方計算

(a) 計算条件

電子ビームエネルギー : 8.0 GeV
 電子ビーム損失率 : 9.4×10^8 e/s
 線源/遮蔽体間の距離 : 5.0 m
 遮蔽体の向き : ビーム方向と平行

(b) 計算結果

遮蔽材を

- 1) 普通コンクリート (X cm)
- 2) 普通コンクリート (110 cm) + 土(X cm)
- 3) 普通コンクリート (100 cm) + 土(X cm)

とした場合の線量当量率の分布を Fig.52~54に示す。これらの図から必要な遮蔽厚は以下ようになる。

- | | |
|---------------------------------|-----------|
| 1) 普通コンクリート (126 cm) | { Fig.52} |
| 2) 普通コンクリート (110 cm) + 土(30 cm) | { Fig.53} |
| 3) 普通コンクリート (100 cm) + 土(47 cm) | { Fig.54} |

5. ま と め

遮蔽厚算出のための目標線量率を $3 \mu\text{Sv/h}$ に設定し、大型放射光施設に対するバルク遮蔽計算を実施した。電子ビームと同一方向の前方計算では、光子と μ 粒子を線源として Swanson の式により、また、 90° 方向の側方計算では、光子と中性子を線源として Jenkins の式を用いてそれぞれ透過計算を行った。遮蔽体の構成としては、普通コンクリート、重コンクリート、鉄、鉛、土による単層あるいはこれらの物質の組み合わせによる二重層を想定した。線源評価上、保守的なビーム損失割合を仮定し、さらにビーム損失は常に加速管内の1点で発生するとして、十分に安全側の計算を行った。計算の結果、一部の箇所を除いて、本施設の遮蔽体は土盛り部分を除く遮蔽体全体の厚さをほぼ 2 m 以内に設定できることが分かった。

今回の計算を通して、本施設の遮蔽設計に関するいくつかの新たな知見が得られたので、以下にこれらをまとめて列記する。

- 一。ビーム損失点となる加速管と遮蔽内表面間の距離の変化に対する線量当量率計算値の変化は大きく、そのため、施設及び機器類の適性配置が遮蔽設計上重要な要因となることがわかった。
- 一。遮蔽の補強のためにコンクリート遮蔽体の外側を土盛りすることは既存の加速器施設ではしばしば見られる例である。今回の計算結果から、土の遮蔽材としての有効性は明らかであり、

- | | |
|---------------------------------|-----------|
| 1) 普通コンクリート (147 cm) | { Fig.49} |
| 2) 普通コンクリート (120 cm) + 土(45 cm) | { Fig.50} |
| 3) 普通コンクリート (100 cm) + 土(80 cm) | { Fig.51} |

(6) ストレージリング (入射部以外) 外側壁側方計算

(a) 計算条件

電子ビームエネルギー : 8.0 GeV
 電子ビーム損失率 : 9.4×10^8 e/s
 線源/遮蔽体間の距離 : 5.0 m
 遮蔽体の向き : ビーム方向と平行

(b) 計算結果

遮蔽材を

- 1) 普通コンクリート (X cm)
- 2) 普通コンクリート (110 cm) + 土(X cm)
- 3) 普通コンクリート (100 cm) + 土(X cm)

とした場合の線量当量率の分布を Fig.52~54に示す。これらの図から必要な遮蔽厚は以下ようになる。

- | | |
|---------------------------------|-----------|
| 1) 普通コンクリート (126 cm) | { Fig.52} |
| 2) 普通コンクリート (110 cm) + 土(30 cm) | { Fig.53} |
| 3) 普通コンクリート (100 cm) + 土(47 cm) | { Fig.54} |

5. ま と め

遮蔽厚算出のための目標線量率を $3 \mu\text{Sv/h}$ に設定し、大型放射光施設に対するバルク遮蔽計算を実施した。電子ビームと同一方向の前方計算では、光子と μ 粒子を線源としてSwansonの式により、また、 90° 方向の側方計算では、光子と中性子を線源としてJenkinsの式を用いてそれぞれ透過計算を行った。遮蔽体の構成としては、普通コンクリート、重コンクリート、鉄、鉛、土による単層あるいはこれらの物質の組み合わせによる二重層を想定した。線源評価上、保守的なビーム損失割合を仮定し、さらにビーム損失は常に加速管内の1点で発生するとして、十分に安全側の計算を行った。計算の結果、一部の箇所を除いて、本施設の遮蔽体は土盛り部分を除く遮蔽体全体の厚さをほぼ2 m以内に設定できることが分かった。

今回の計算を通して、本施設の遮蔽設計に関するいくつかの新たな知見が得られたので、以下にこれらをまとめて列記する。

- 一。ビーム損失点となる加速管と遮蔽内表面間の距離の変化に対する線量当量率計算値の変化は大きく、そのため、施設及び機器類の適性配置が遮蔽設計上重要な要因となることがわかった。
- 一。遮蔽の補強のためにコンクリート遮蔽体の外側を土盛りすることは既存の加速器施設ではしばしば見られる例である。今回の計算結果から、土の遮蔽材としての有効性は明らかであり、

しかも経済的であることから土の使用は望ましいと考えられるが、一方、施工後の、含水率の変化や土砂流出等による遮蔽性能の劣化に対する保証の点から難点があり、土の使用はこれら両面から総合的に判断しなければならない。

一。普通コンクリートに比べて、重コンクリートは密度にはほぼ比例した遮蔽性能を有することが計算結果から示された。一方、コストが普通コンクリートに比べて約一桁高いこと、重コンクリートに混ぜる大量の骨材の安定的確保が難しい等の問題点があり⁷⁾、重コンクリートの使用は、原則としてスペースの余裕が少ない箇所所定の遮蔽性能を確保する必要のある場合に限定すべきである。

一。シンクロトロン入射部の内壁計算においては、前方計算と側方計算の両法を実施し、いずれか安全側の結果にもとづいて遮蔽厚を決定する必要がある。リニアックで加速された電子ビームはシンクロトロン軌道に約15度の角度で入射される。そのため、遮蔽体内透過距離が実効的に3.9倍(=1/sin 15°)となり、前方方向の光子の線源強度が側壁方向の強度に比べて4~5桁大きいにもかかわらず、側壁計算の方が安全側の評価を与える結果となった。当該箇所の遮蔽体構成として、普通コンクリートに鉄または鉛の補強を考える場合、前方計算では光子と μ 粒子のみを考慮し、中性子は考慮しておらず、側方計算では光子と中性子を考慮するため、前方計算では、必要な遮蔽厚は鉄よりも鉛の方が薄くてすみ、逆に、側方計算では、鉛よりも鉄の方が薄くできるという結果が得られた。

文 献

- 1) E. Bräuer : "Radiation Shielding for the 6 GeV ESRF", ESRF/SHIELD/88-04 (revised), Oct., (1988).
- 2) W. P. Swanson : "Radiological Safety Aspects of Operation of Electron Linear Accelerators", Technical Report Series No.188, IAEA (1979).
- 3) T.M. Jenkins : "Neutron and Photon Measurements through Concrete from a 15 GeV Electron Beam on a Target - Comparison with Models and Calculations", Nucl. Instrum. Meth., 159, 265 (1979).
- 4) E. Bräuer, K. Tesch : "Data on Muon Doses Behind Thick Shielding at Electron Accelerators", DESY D3-62, Dec. (1987).
- 5) 財団法人、放射線安全技術センター：昭和60年度、科学技術調査資料作成委託調査報告書「高エネルギー加速器施設の安全管理に関する基礎的調査」(1986)。
- 6) H. Hirayama S. Ban : "Neutron Dose Equivalent Outside the Lateral Shielding of an Electron Linear Accelerator", to be submitted to Health Physics (1988).
- 7) 北見 俊幸氏：私信

しかも経済的であることから土の使用は望ましいと考えられるが、一方、施工後の、含水率の変化や土砂流出等による遮蔽性能の劣化に対する保証の点から難点があり、土の使用はこれら両面から総合的に判断しなければならない。

一。普通コンクリートに比べて、重コンクリートは密度にはほぼ比例した遮蔽性能を有することが計算結果から示された。一方、コストが普通コンクリートに比べて約一桁高いこと、重コンクリートに混ぜる大量の骨材の安定的確保が難しい等の問題点があり⁷⁾、重コンクリートの使用は、原則としてスペースの余裕が少ない箇所所定の遮蔽性能を確保する必要のある場合に限定すべきである。

一。シンクロトロン入射部の内壁計算においては、前方計算と側方計算の両法を実施し、いずれか安全側の結果にもとづいて遮蔽厚を決定する必要がある。リニアックで加速された電子ビームはシンクロトロン軌道に約15度の角度で入射される。そのため、遮蔽体内透過距離が実効的に3.9倍(=1/sin 15°)となり、前方方向の光子の線源強度が側壁方向の強度に比べて4~5桁大きいにもかかわらず、側壁計算の方が安全側の評価を与える結果となった。当該箇所の遮蔽体構成として、普通コンクリートに鉄または鉛の補強を考える場合、前方計算では光子と μ 粒子のみを考慮し、中性子は考慮しておらず、側方計算では光子と中性子を考慮するため、前方計算では、必要な遮蔽厚は鉄よりも鉛の方が薄くてすみ、逆に、側方計算では、鉛よりも鉄の方が薄くできるという結果が得られた。

文 献

- 1) E. Bräuer : "Radiation Shielding for the 6 GeV ESRF", ESRF/SHIELD/88-04 (revised), Oct., (1988).
- 2) W. P. Swanson : "Radiological Safety Aspects of Operation of Electron Linear Accelerators", Technical Report Series No.188, IAEA (1979).
- 3) T.M. Jenkins : "Neutron and Photon Measurements through Concrete from a 15 GeV Electron Beam on a Target - Comparison with Models and Calculations", Nucl. Instrum. Meth., 159, 265 (1979).
- 4) E. Bräuer, K. Tesch : "Data on Muon Doses Behind Thick Shielding at Electron Accelerators", DESY D3-62, Dec. (1987).
- 5) 財団法人、放射線安全技術センター：昭和60年度、科学技術調査資料作成委託調査報告書「高エネルギー加速器施設の安全管理に関する基礎的調査」(1986)。
- 6) H. Hirayama S. Ban : "Neutron Dose Equivalent Outside the Lateral Shielding of an Electron Linear Accelerator", to be submitted to Health Physics (1988).
- 7) 北見 俊幸氏：私信

Table 1 Muon Range at 7 and 10 GeV for Accelerator Shielding Materials⁴⁾

Material	R (g/cm ²)		R (cm)	
	7 GeV	10 GeV	7 GeV	10 GeV
Lead	4857	6696	428	590
Iron	3968	5522	508	708
Aluminum	3679	5182	1363	1919
H. Conc.	3650	5085	986	1374
O. Conc.	3324	4624	1445	2010
Soil	3409	4751	2622	3655

Table 2 Radiation Length for Accelerator Shielding Materials⁴⁾

Material	Radiation length		Density
	g/cm ²	cm	g/cm ³
Lead	6.3688	0.56	11.350
Iron	13.8389	1.76	7.874
Aluminum	24.0111	8.90	2.699
H. Concrete	25.71	7.35	3.5
O. Concrete	25.71	10.9	2.35

(Heavy concrete scaled by density)

Table 3 Attenuation Length of Photon and Neutron for Accelerator Shielding Materials

Material	A(eff)	ρ (g/cm ³)	Attenuation length $\frac{[g/cm^2]}{[cm]}$			
			λ (photon)	λ_1	λ_2	λ_3
Lead	207.2	11.3	$\frac{24}{2.1}$	$\frac{257}{22.7}$	$\frac{113}{10.0}$	$\frac{207}{18.3}$
Iron	55.9	7.8	$\frac{34}{4.4}$	$\frac{114}{14.6}$	$\frac{53}{6.8}$	$\frac{97}{12.3}$
H. Conc.	25.5	3.7	$\frac{46}{12.3}$	$\frac{128}{34.6}$	$\frac{34}{9.2}$	$\frac{62}{16.8}$
O. Conc.	21.0	2.4	$\frac{44}{18.3}$	$\frac{120}{50.0}$	$\frac{30}{12.5}$	$\frac{55}{22.9}$
Soil	20.4	1.3	$\frac{52}{40.0}$	$\frac{119}{90.0}$	$\frac{30}{22.3}$	$\frac{54}{40.8}$

Table 4 Lists of Fall-off Correction Factors f_1 and f_2

Beam energy (GeV)	f_1	f_2
8	1.0	1.0
1.5	0.64	0.76
0.25	0.052	0.17

Table 5 Beam Loss Assumptions

評価点	損失割合
[リアニック] 電子・陽電子コンバータ ビーム取り出し部	100% 50%
[シンクロトロン] 入射部 (入射時) 入射部以外 (加速時)	100% 20%
[ストレージリング] 入射部 (入射時) 入射部以外 (入射時) 入射部以外 (蓄積時)	100% 10% 100%

Table 6 Beam Parameters for the Electron/Positron Converter

パラメータ	値
ビーム損失割合	100 %
最大エネルギー	0.25 GeV
最大尖頭電流	10000 mA
パルス幅	0.01 μ s
繰返し周波数	60 Hz
電子ビーム損失率	3.75×10^{13} e/s
ビーム出力損失	1500 W

Table 7 Beam Parameters for the Main Linac

パラメータ	電子の場合の値	陽電子の場合の値
ビーム損失割合	50 %	50 %
最大エネルギー	1.5 GeV	1.5 GeV
最大尖頭電流	100 mA	10 mA
パルス幅	1 μ s	0.01 μ s
繰返し周波数	0.5 Hz	60 Hz
電子ビーム損失率	1.6×10^{11} e/s	1.9×10^{10} e/s
ビーム出力損失	37.5 W	4.5 W

Table 8 Beam Parameters for the Synchrotron

パラメータ		電子の場合の値	陽電子の場合の値
入射部 (入射時)	ビーム損失割合	100 %	100 %
	最大エネルギー	1.5 GeV	1.5 GeV
	最大尖頭電流	100 mA	10 mA
	パルス幅	1 μ s	0.01 μ s
	繰返し周波数	0.5 Hz	60 Hz
	電子ビーム損失率	3.2×10^{11} e/s	3.8×10^{10} e/s
	ビーム出力損失	75 W	9 W
入射部以外 (加速時)	ビーム損失割合	20 %	
	最大エネルギー	8 GeV	
	最大尖頭電流	10 mA	
	周回時間	1 μ s	
	繰返し周波数	0.5 Hz	
	電子ビーム損失率	6.25×10^9 e/s	
	ビーム出力損失	8 W	

Table 9 Beam Parameters for the Storage Ring

パラメータ		電子の場合の値	陽電子の場合の値
入射部 (入射時)	ビーム損失割合	100 %	100 %
	最大エネルギー	8 GeV	8 GeV
	最大尖頭電流	30 mA	1 mA
	パルス幅	1 μ s	0.01 μ s
	線返し周波数	0.5 Hz	8 パルス/10秒毎
	電子ビーム損失率	9.4×10^{10} e/s	5×10^7 e/s
	ビーム出力損失	120 W	6.4×10^{-2} W
	入射部以外 (入射時)	ビーム損失割合	10 %
最大エネルギー		8 GeV	
最大尖頭電流		30 mA	
パルス幅		1 μ s	
線返し周波数		0.5 Hz	
電子ビーム損失率		9.4×10^9 e/s	
ビーム出力損失		12 W	
蓄積時		ビーム損失割合	100 %
	最大エネルギー	8 GeV	
	蓄積電流	100 mA	
	周回時間	5 μ s	
	ビーム寿命 ^(*)	10 hr	
	電子ビーム損失率	8.7×10^7 e/s	
	ビーム出力損失	0.11 W	

(*) $1/e$ に減少する時間

Table 10 Parameters Used for Gas Bremsstrahlung Calculation

	シンクロトロン	ストレージリング
Z	10	10
p (Torr)	10^{-6}	10^{-9}
T ($^{\circ}$ K)	293	239
l (cm)	1200	1500
I (A)	0.01	0.1

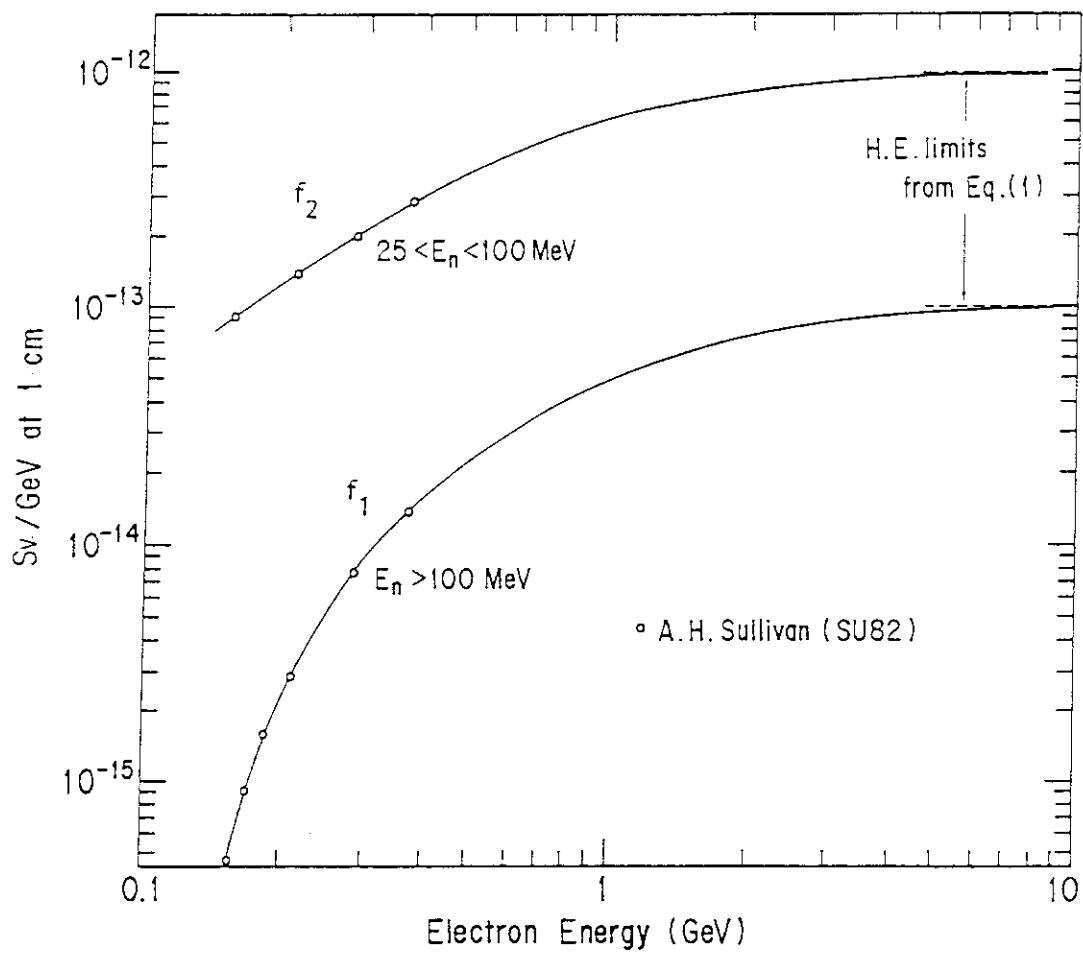


Fig.1 Effective source terms for thick copper target.⁶⁾

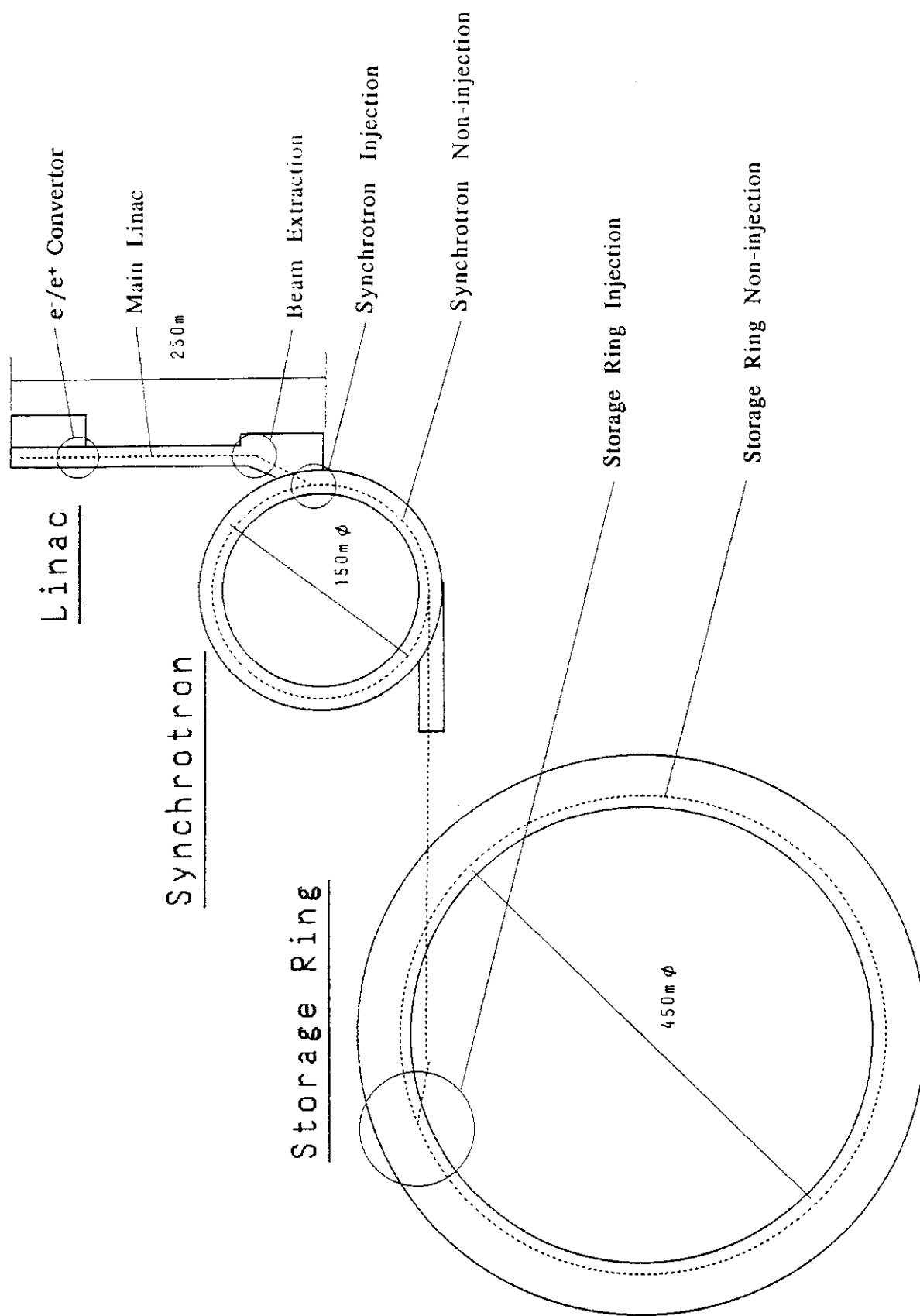


Fig.2 Schematic Layout of the 8GeV Synchrotron Radiation Facility

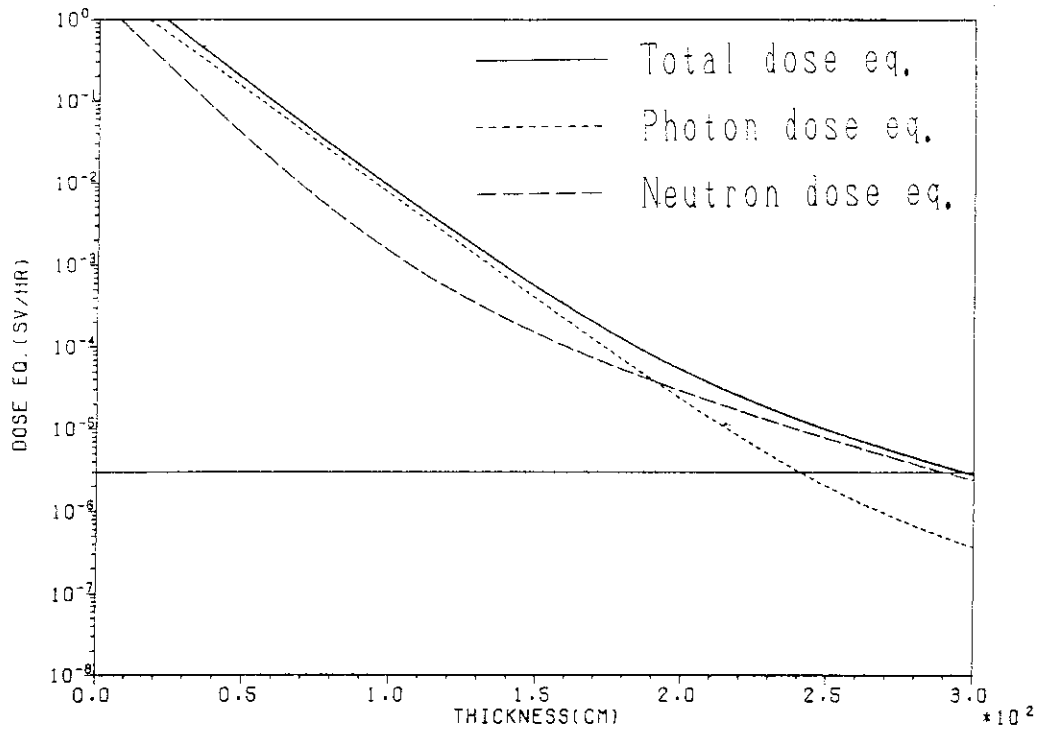


Fig. 3 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete at converter region (lateral)

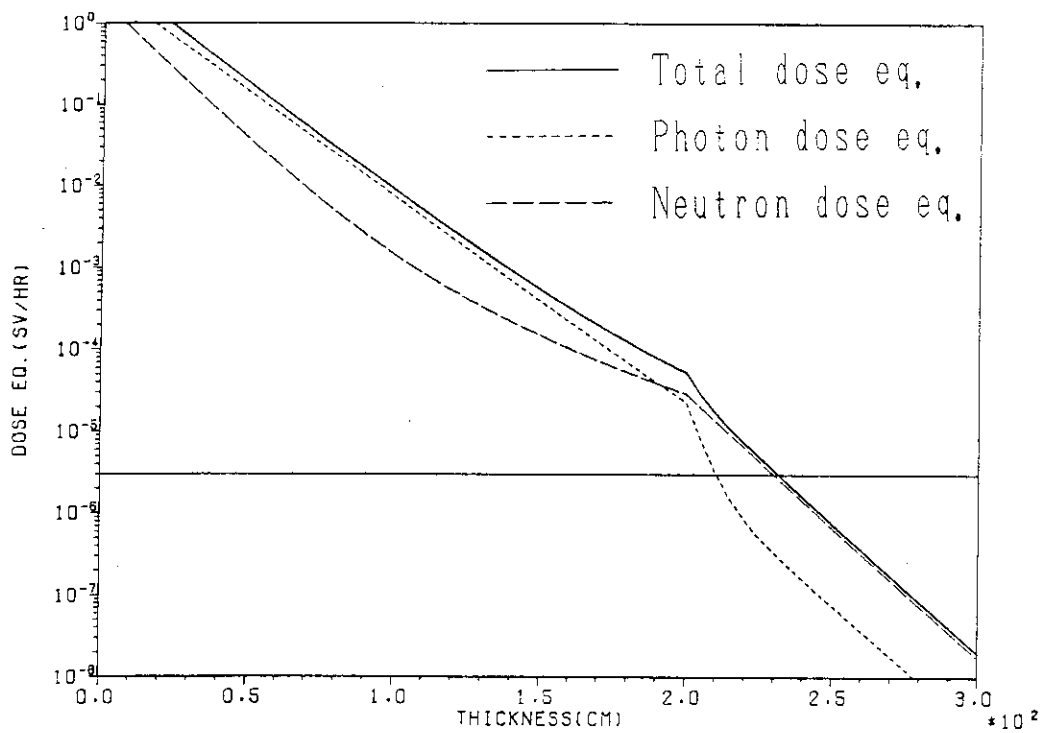


Fig. 4 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with iron at converter region (lateral)

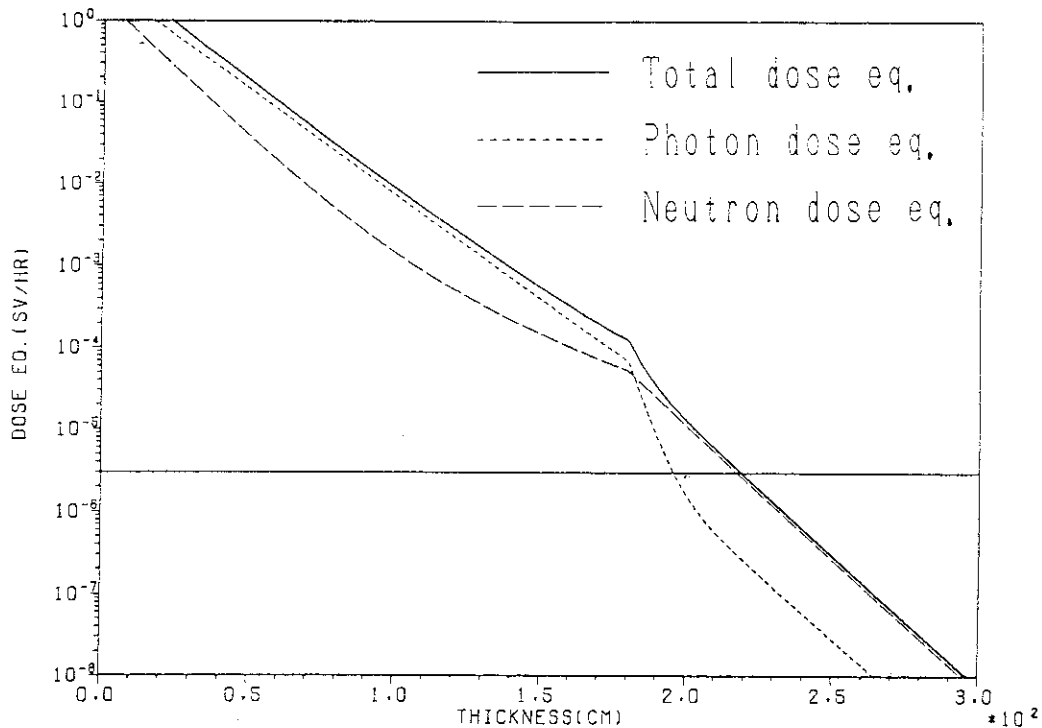


Fig. 5 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with iron at converter region (lateral)

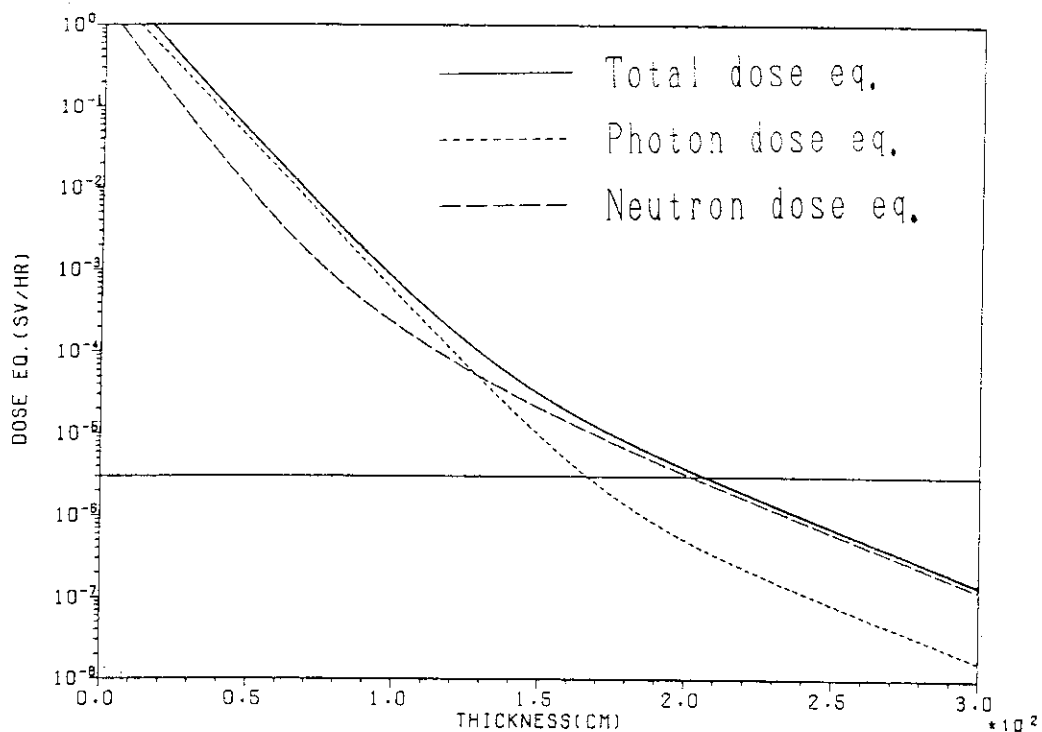


Fig. 6 Dose equivalent distribution within a shield of heavy concrete at converter region (lateral)

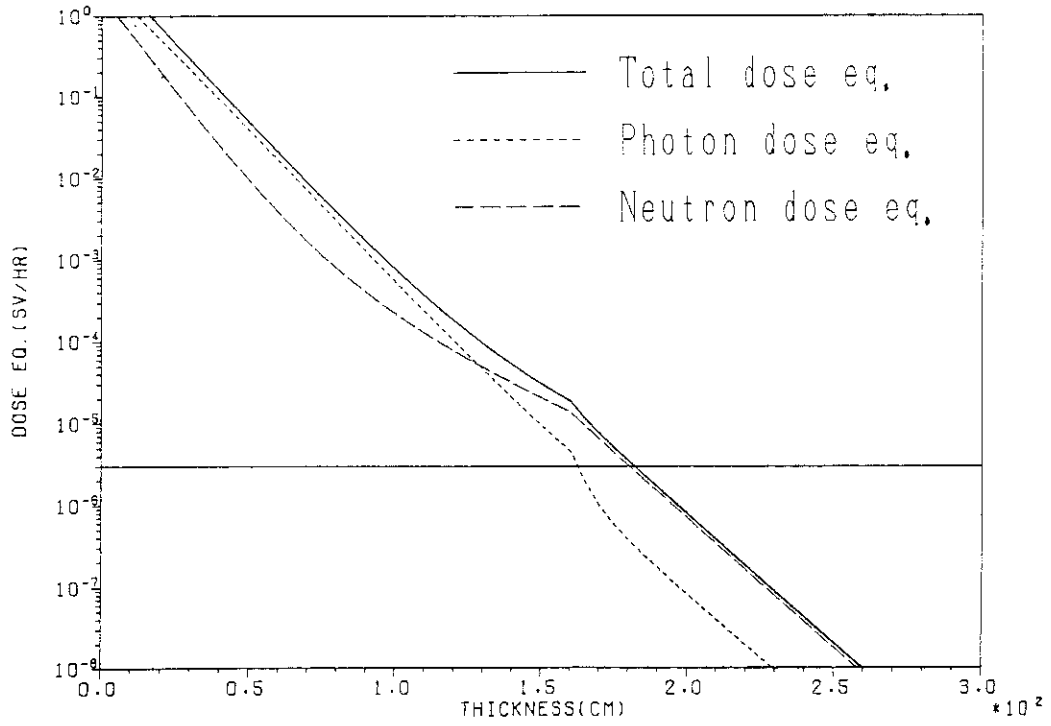


Fig.7 Dose equivalent distribution within a shield of heavy concrete with iron at converter region (lateral)

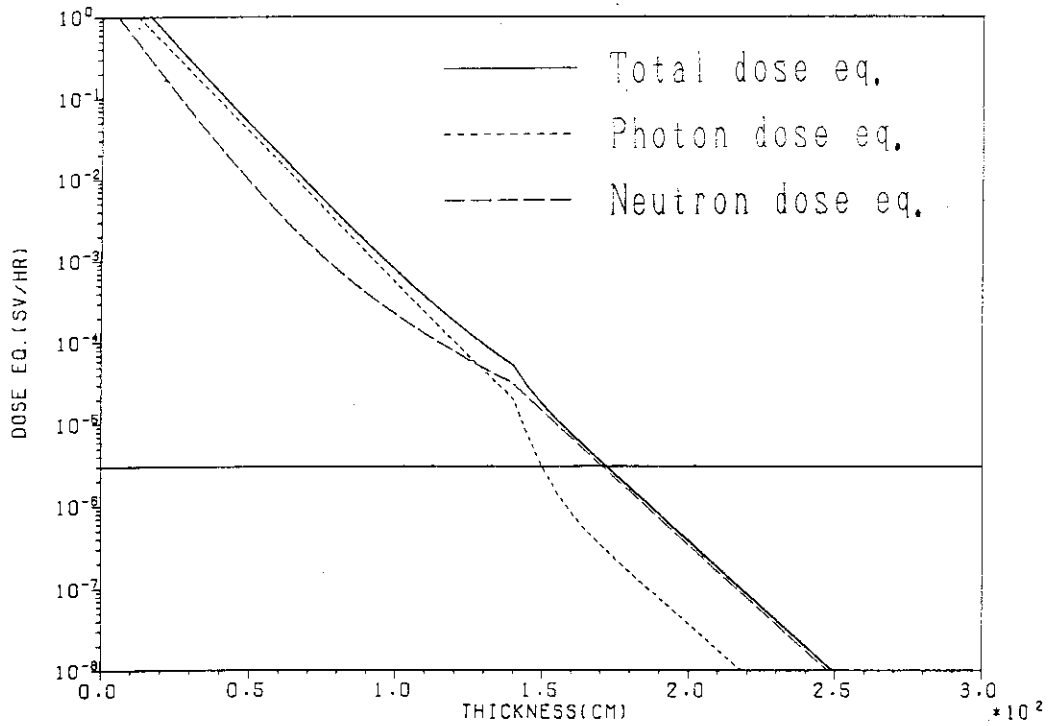


Fig.8 Dose equivalent distribution within a shield of heavy concrete with iron at converter region (lateral)

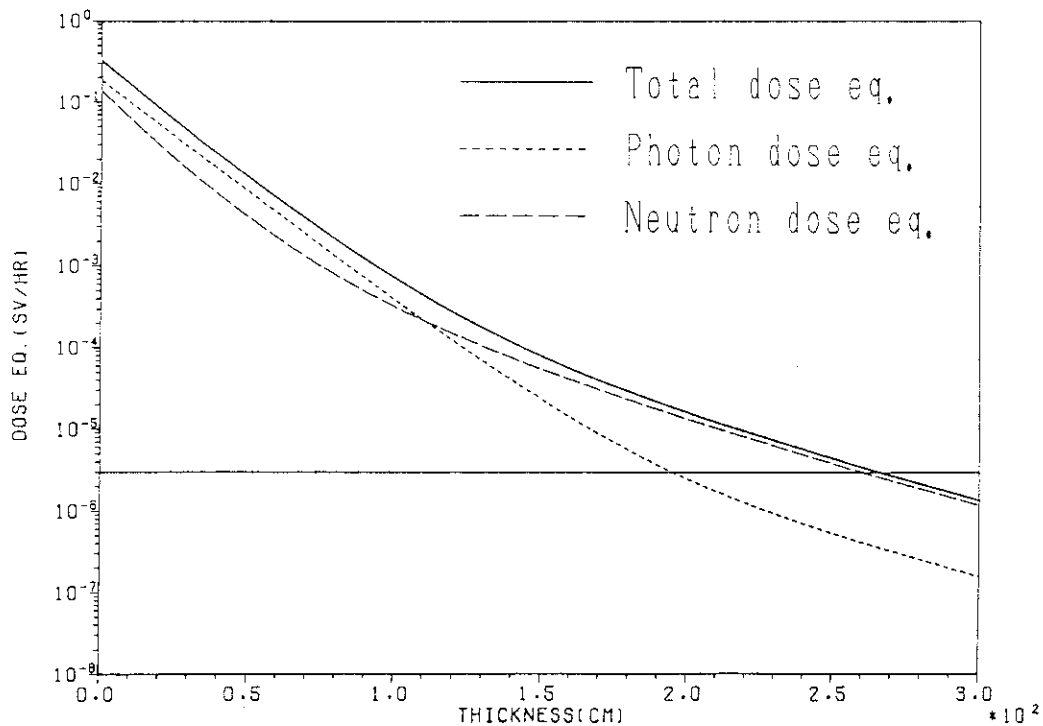


Fig. 9 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete at main linac region (lateral)

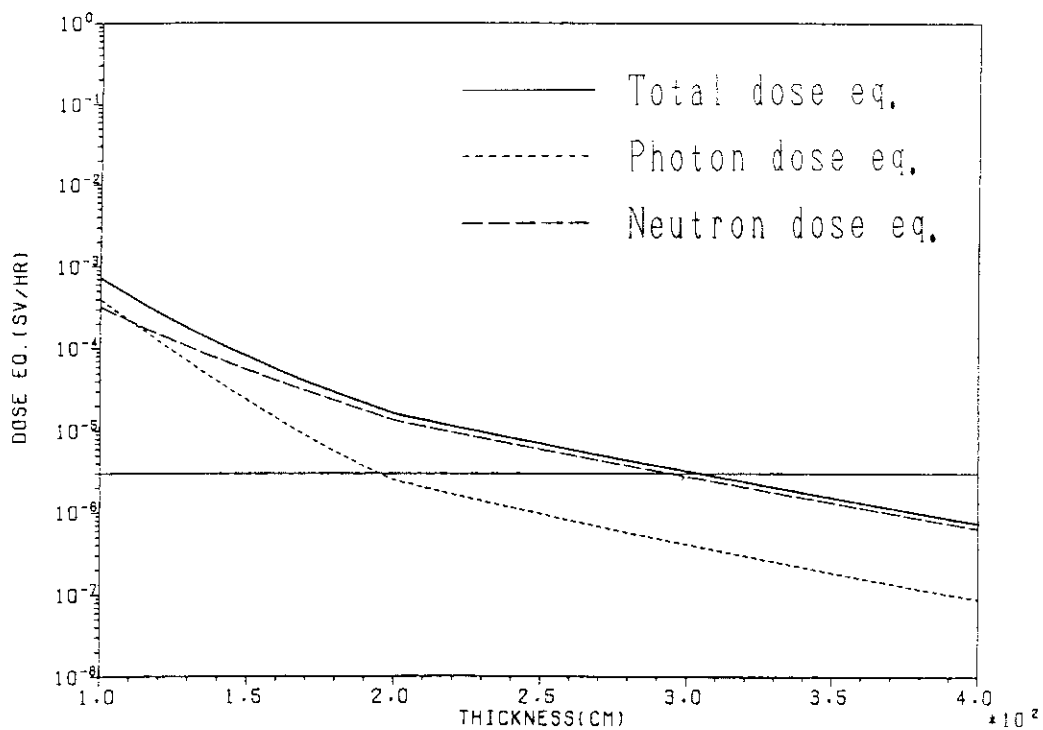


Fig.10 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with earth at main linac region (lateral)

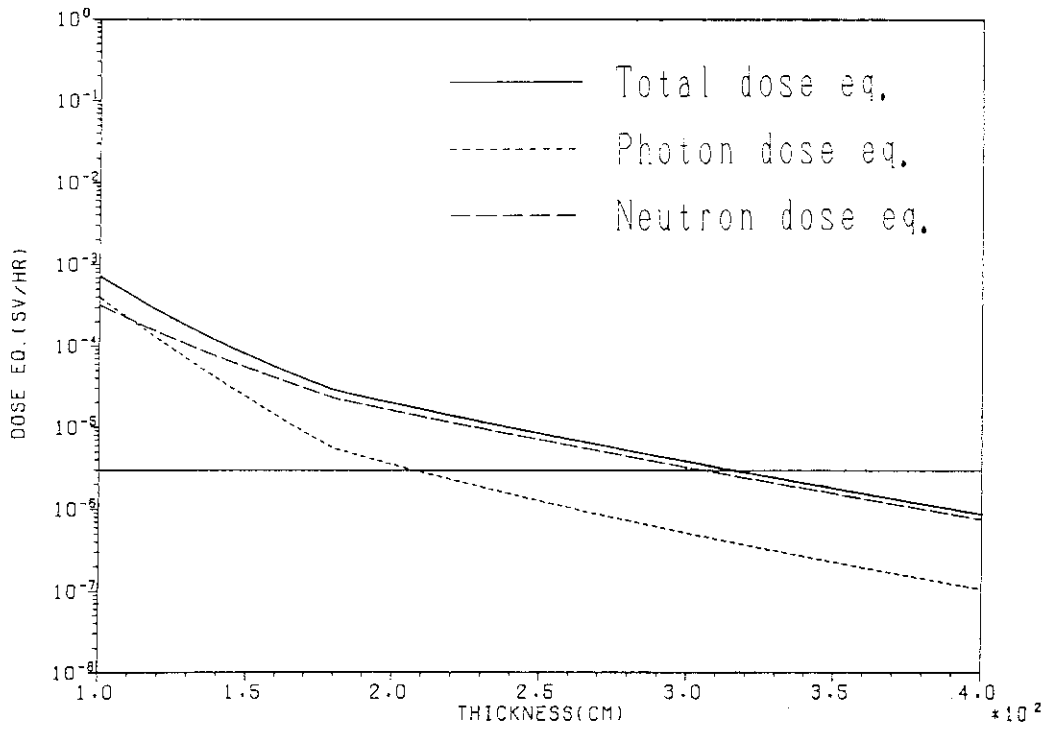


Fig.11 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with earth at main linac region (lateral)

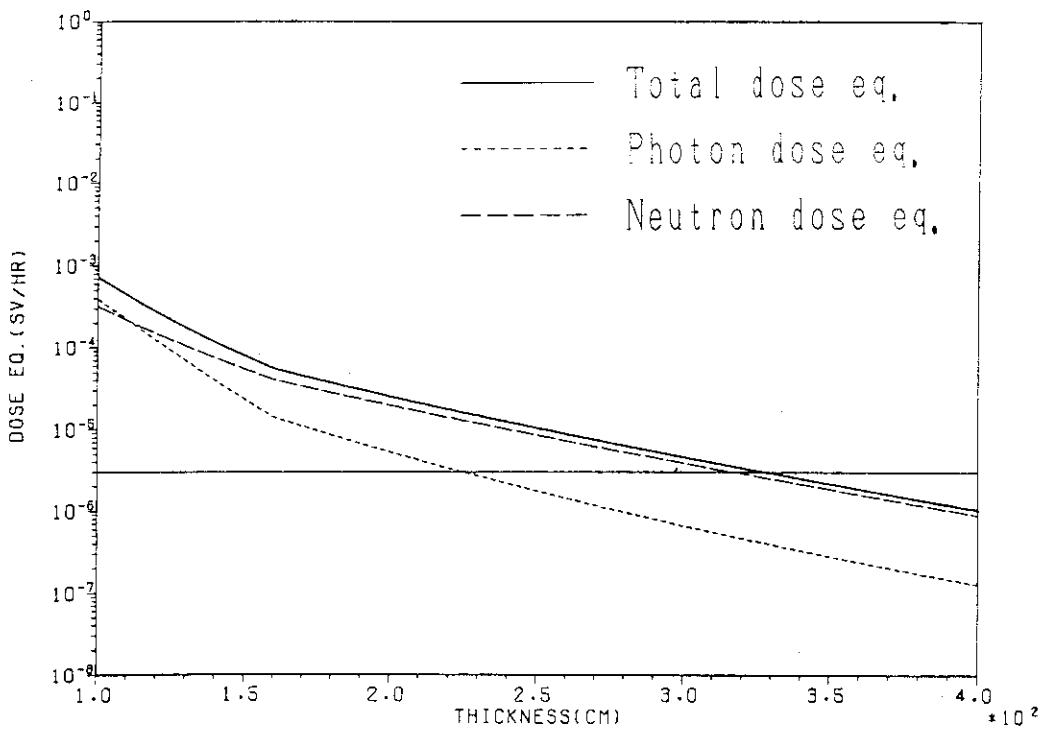


Fig.12 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with earth at main linac region (lateral)

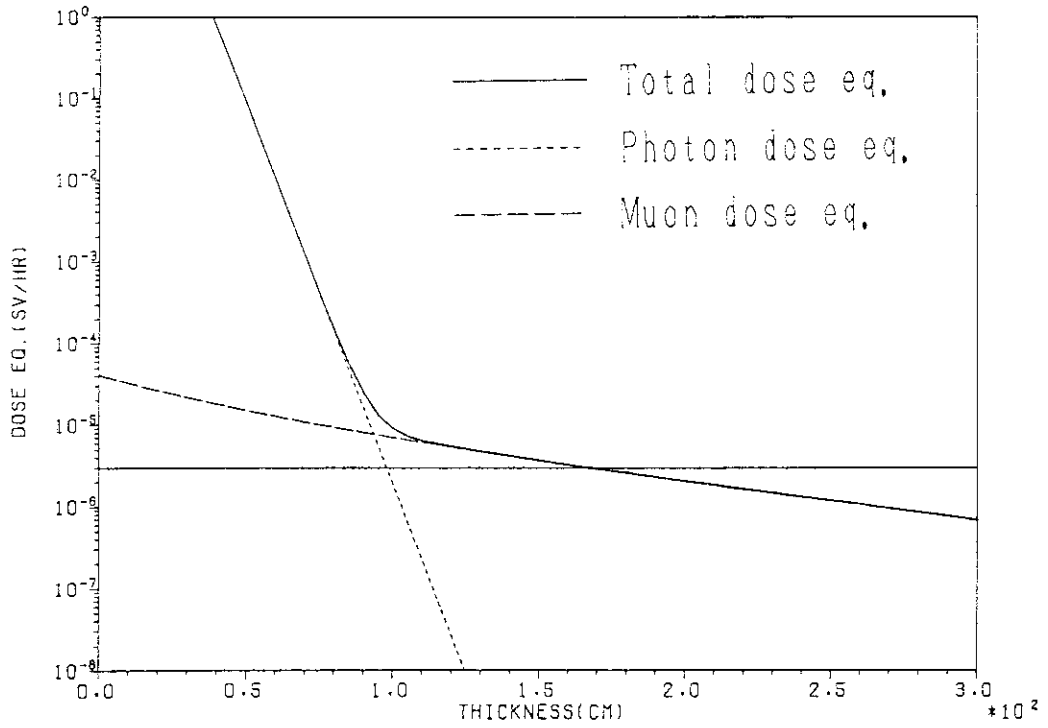


Fig.13 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete at synchrotron injection region, inside wall (forward)

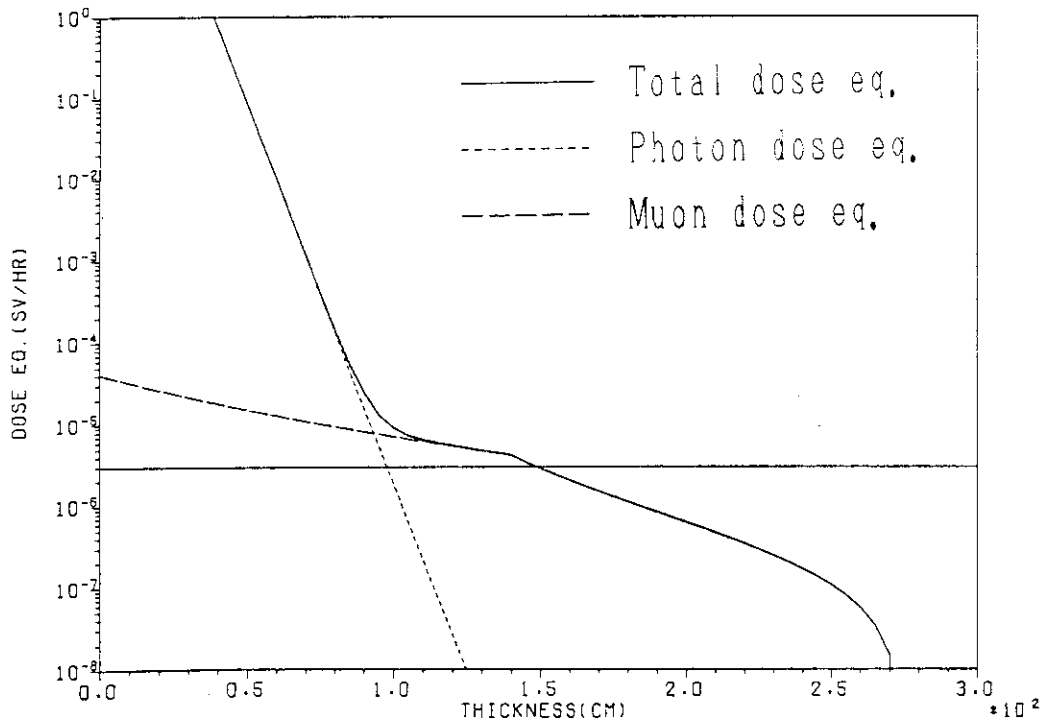


Fig.14 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with iron at synchrotron injection region, inside wall (forward)

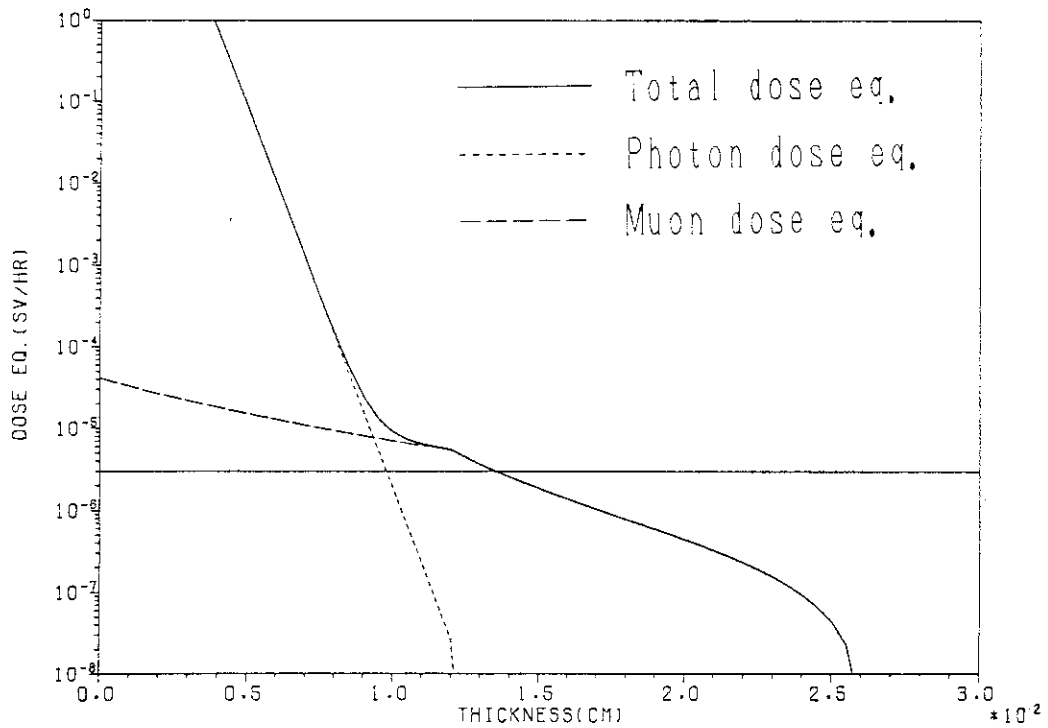


Fig.15 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with iron at synchrotron injection region, inside wall (forward)

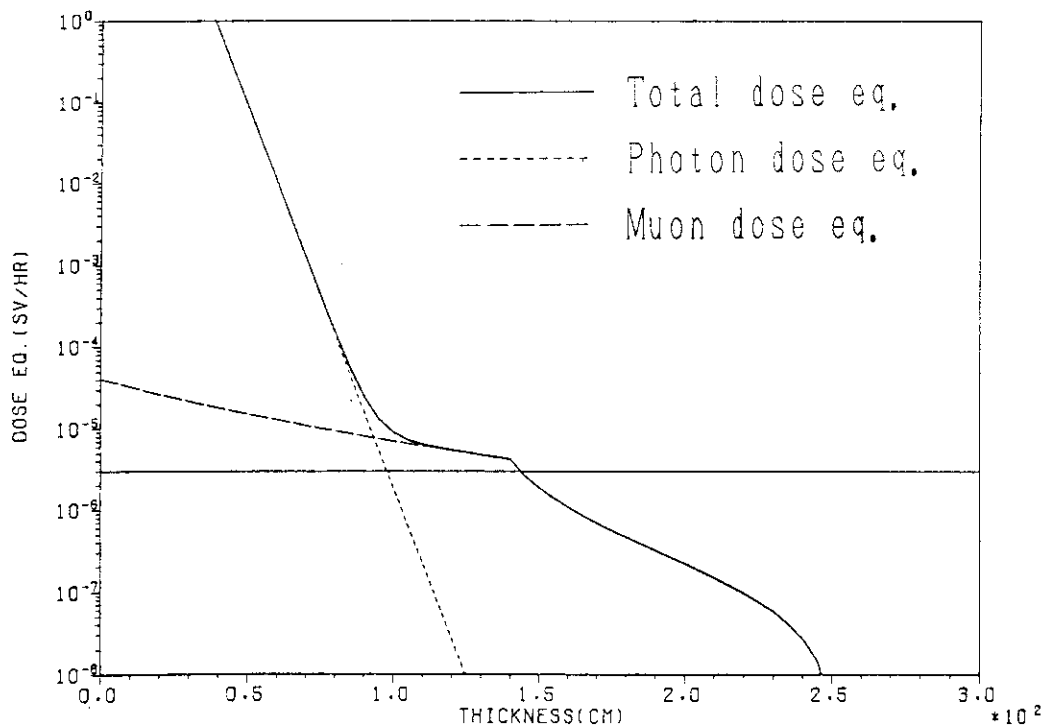


Fig.16 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with lead at synchrotron injection region, inside wall (forward)

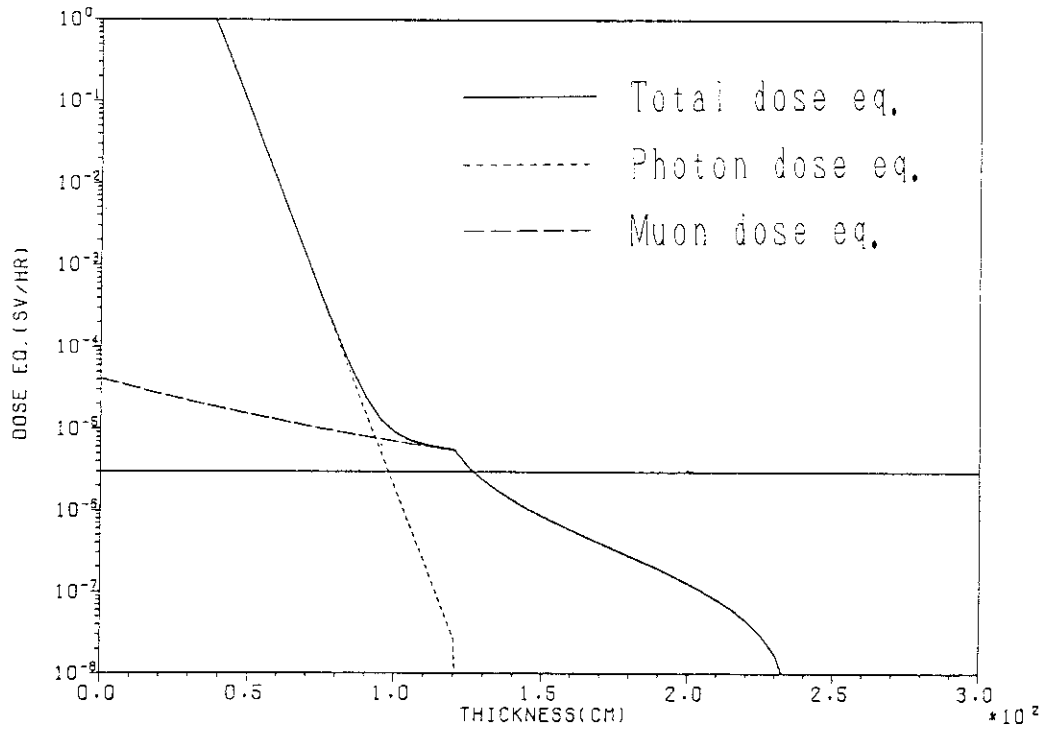


Fig.17 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with lead at synchrotron injection region, inside wall (forward)

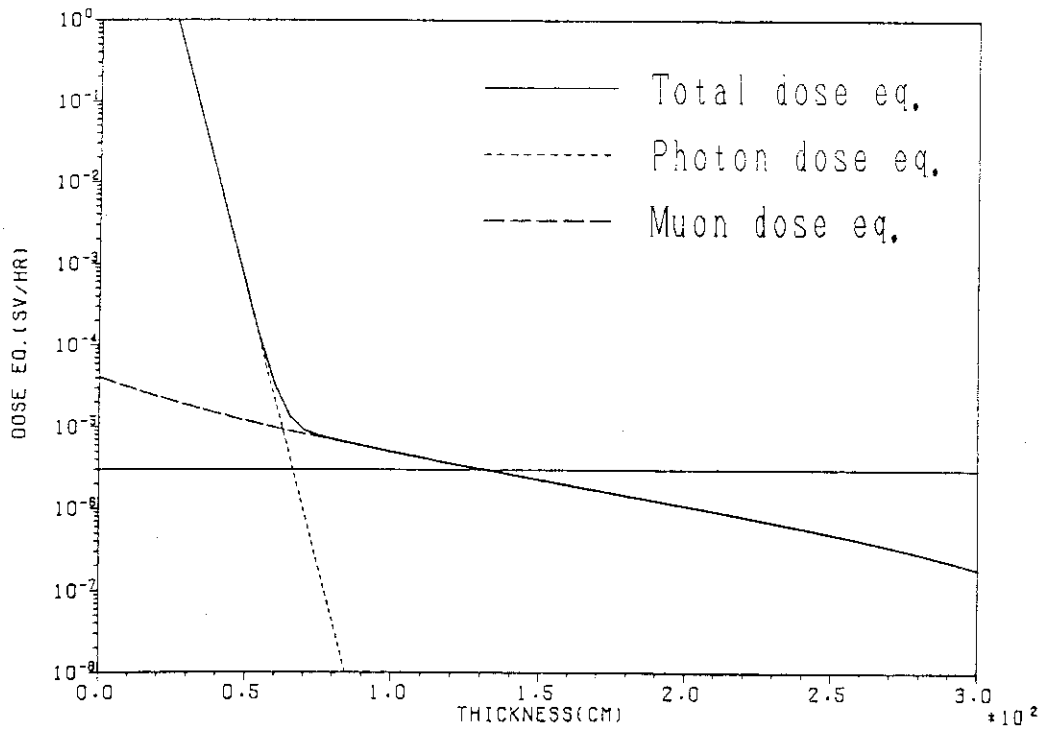


Fig.18 Dose equivalent distribution within a shield of heavy concrete at synchrotron injection region, inside wall (forward)

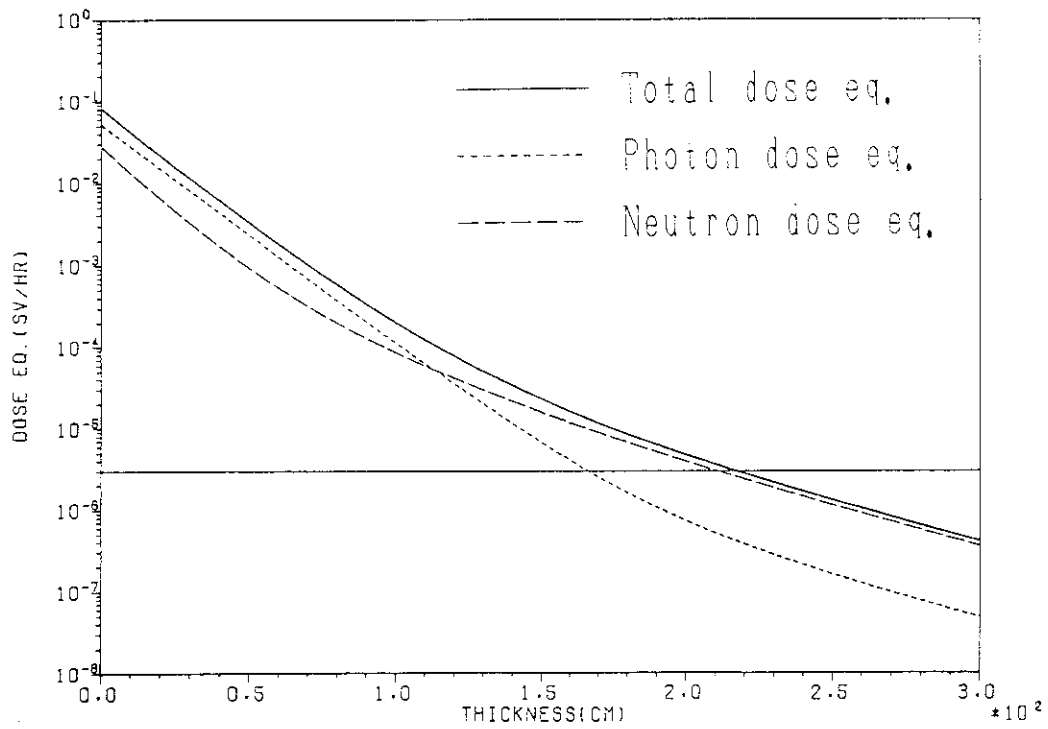


Fig.19 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete at synchrotron injection region, inside wall (lateral)

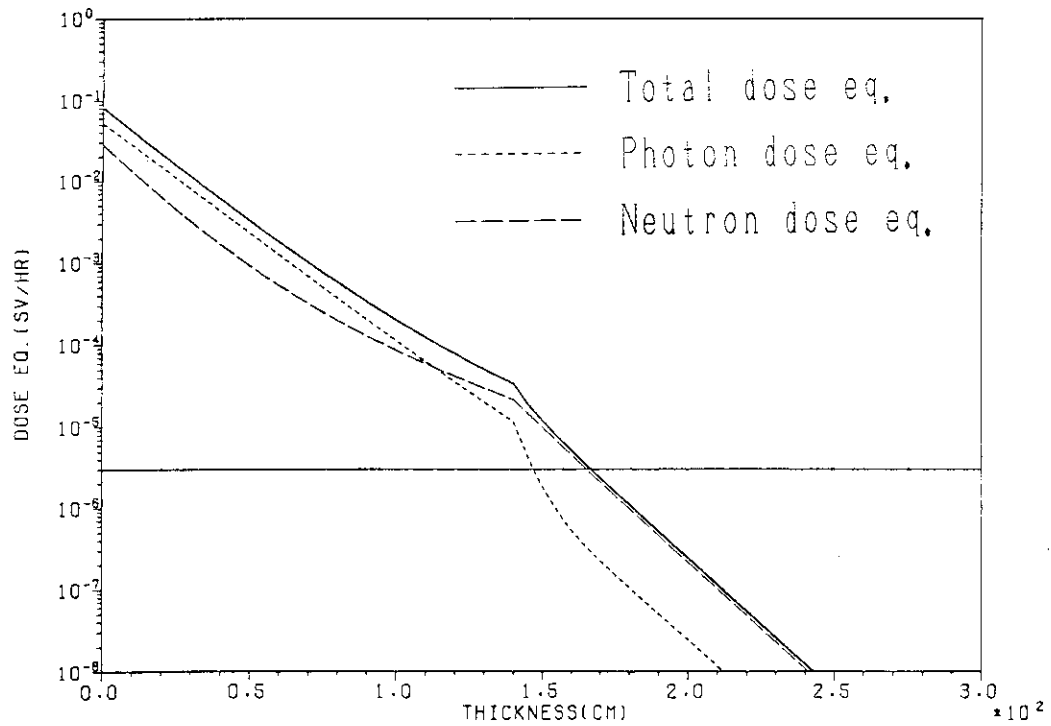


Fig.20 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with iron at synchrotron injection region, inside wall (lateral)

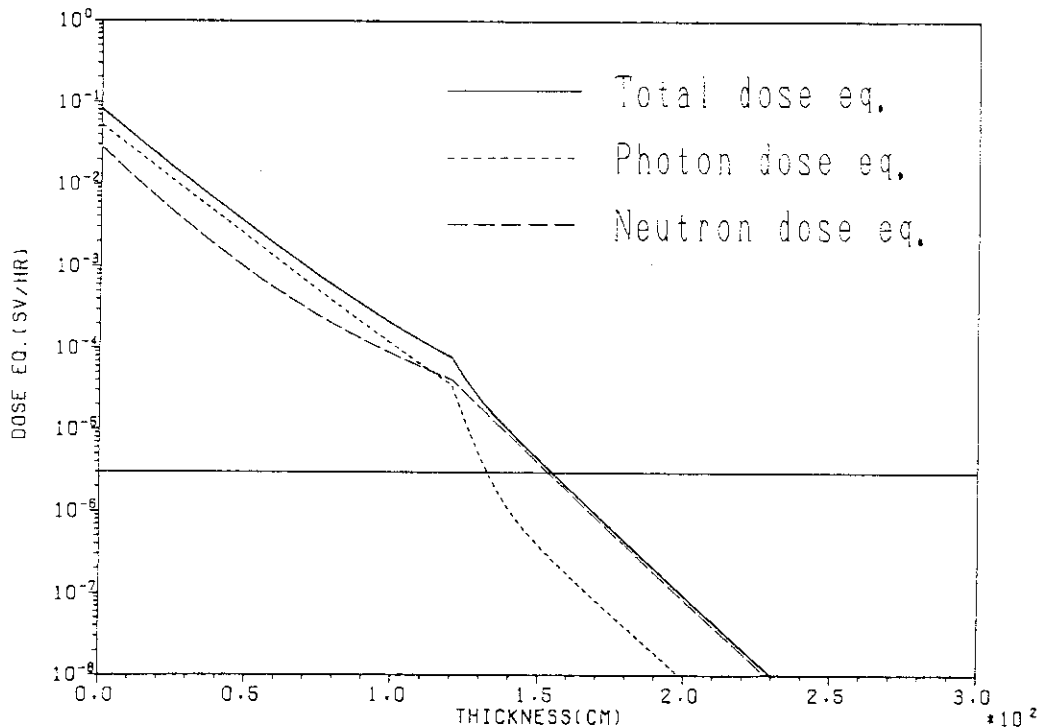


Fig.21 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with iron at synchrotron injection region, inside wall (lateral)

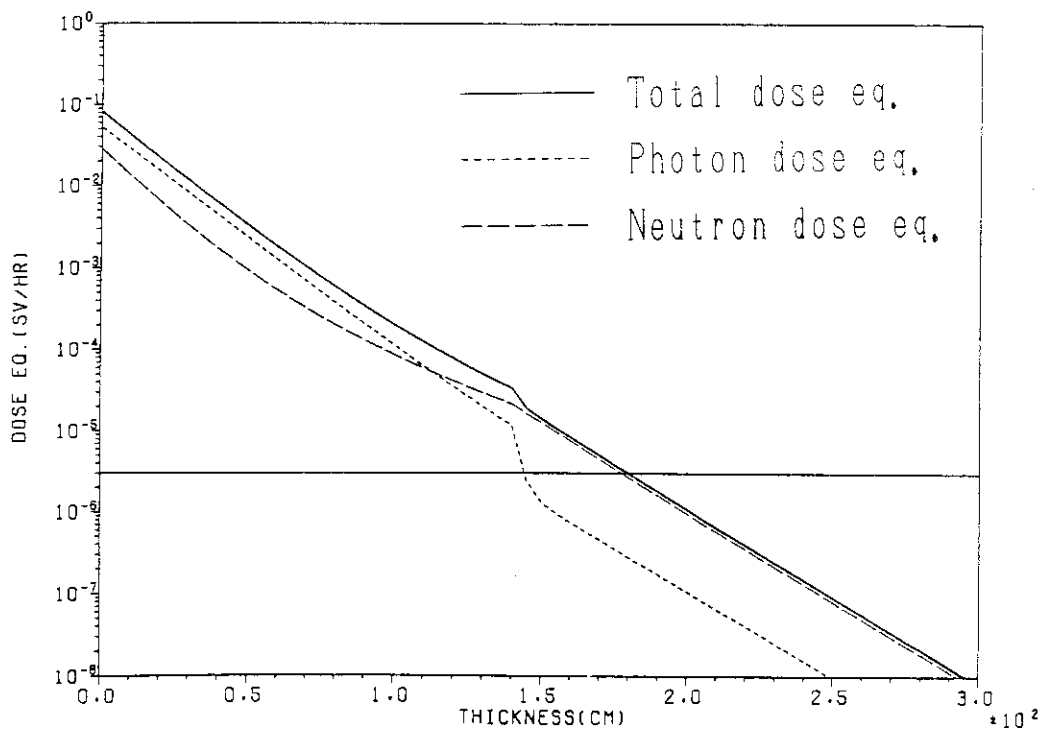


Fig.22 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with lead at synchrotron injection region, inside wall (lateral)

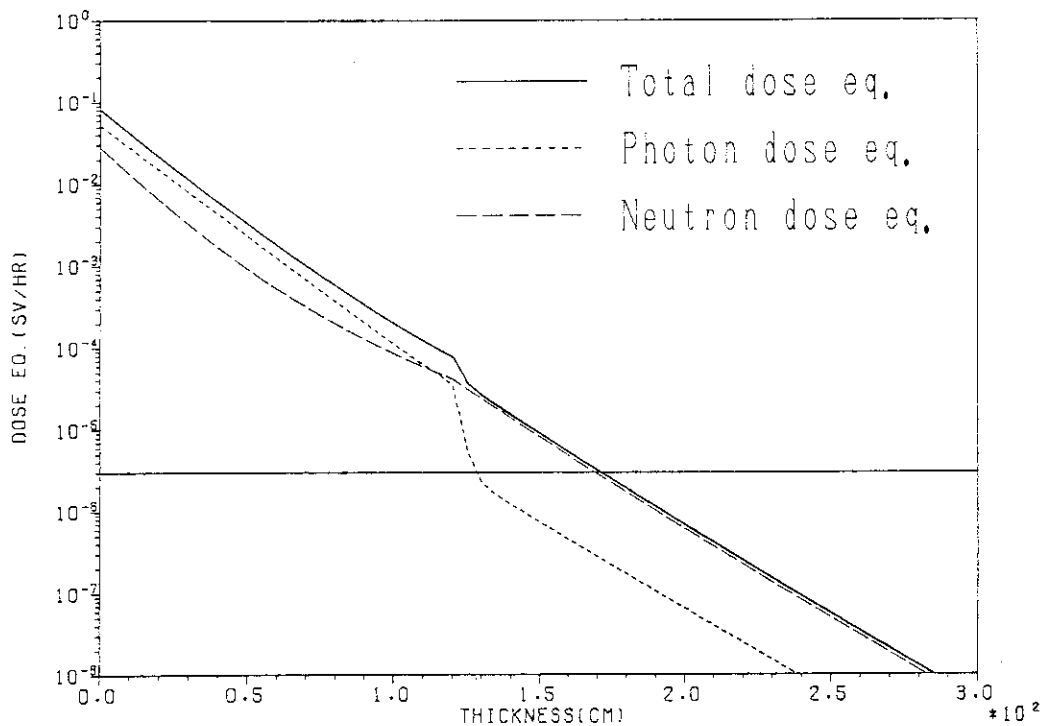


Fig.23 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with lead at synchrotron injection region, inside wall (lateral)

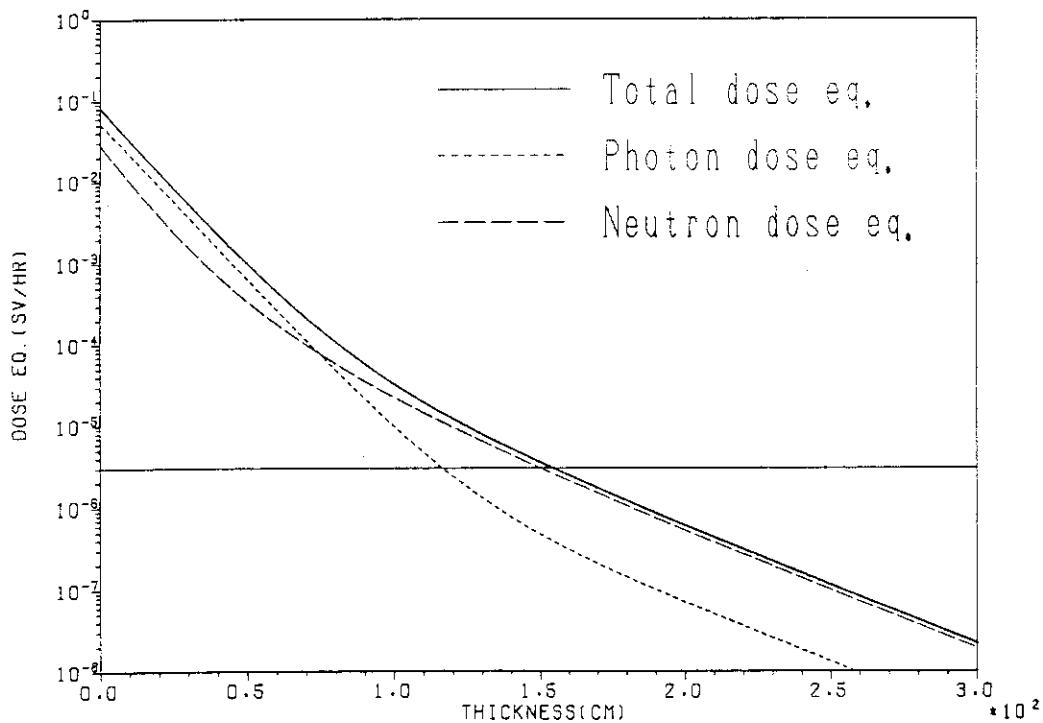


Fig.24 Dose equivalent distribution within a shield of heavy concrete at synchrotron injection region, inside wall (lateral)

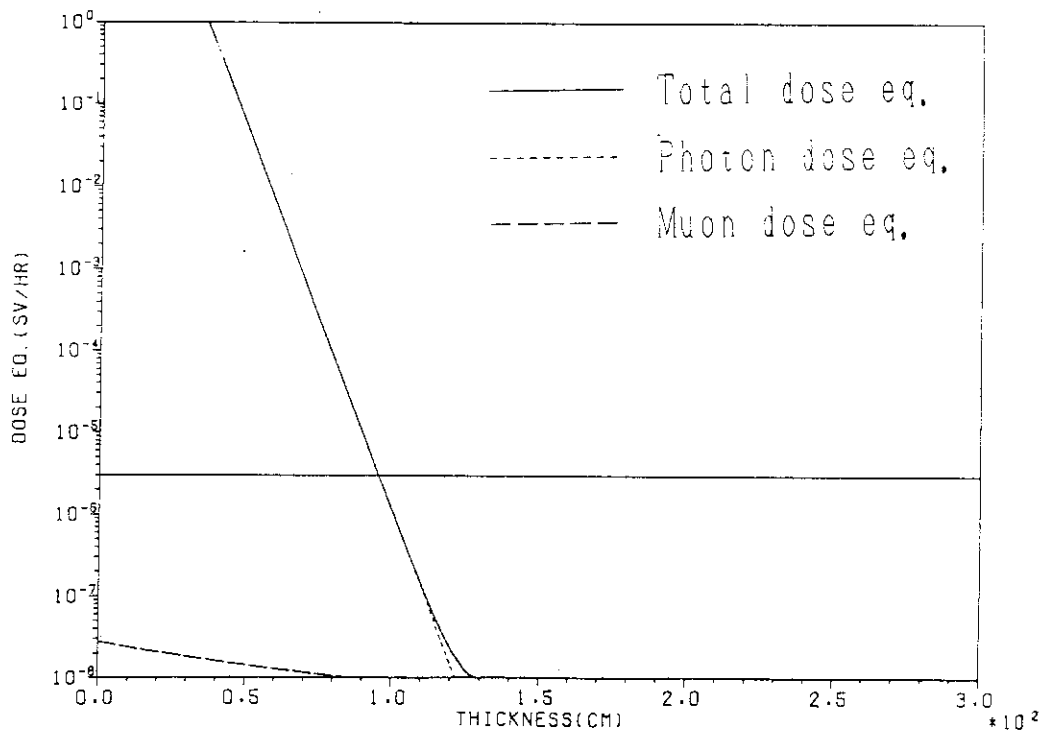


Fig.25 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete at synchrotron non-injection region, inside wall (forward)

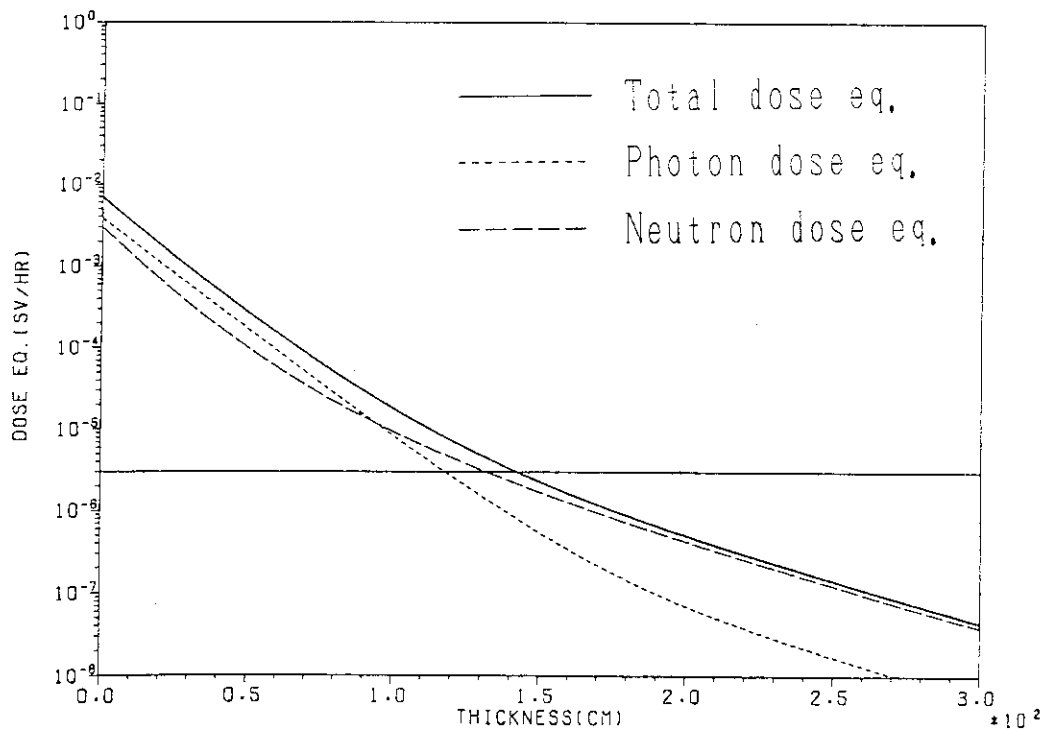


Fig.26 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete at synchrotron non-injection region, inside wall (lateral)

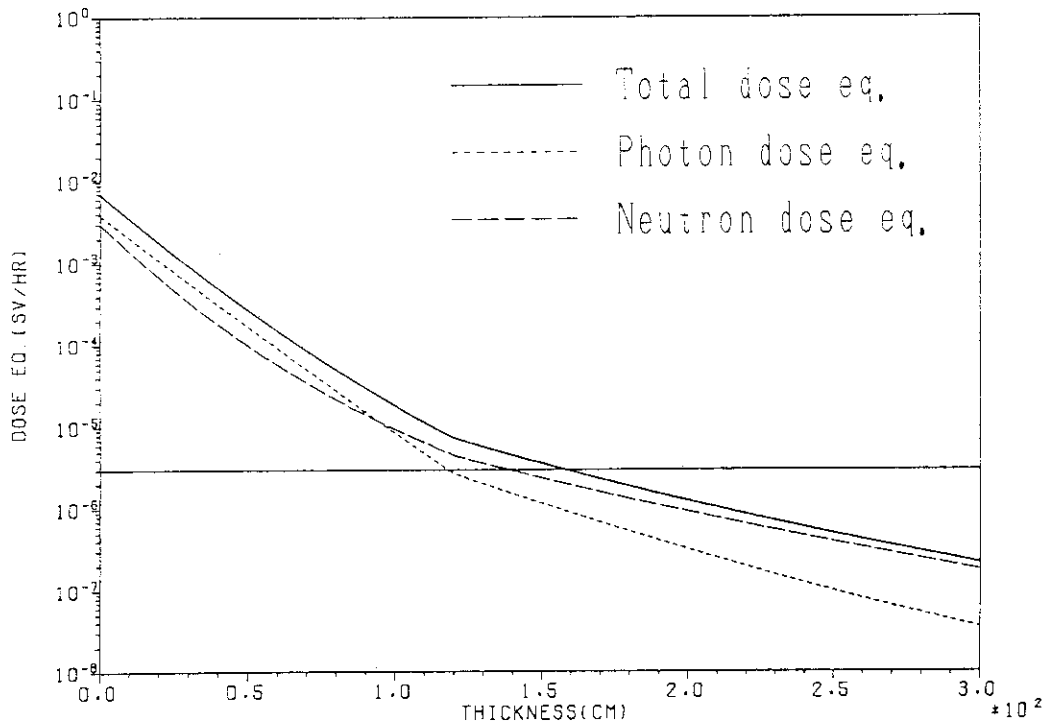


Fig.27 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with earth at synchrotron non-injection region, inside wall (lateral)

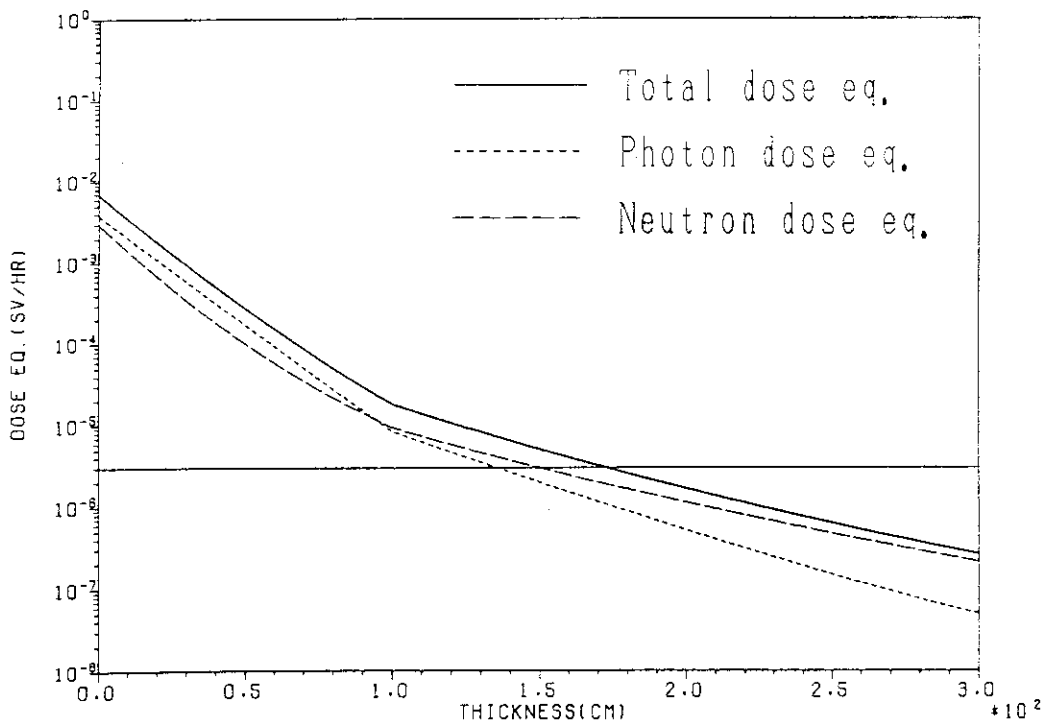


Fig.28 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with earth at synchrotron non-injection region, inside wall (lateral)

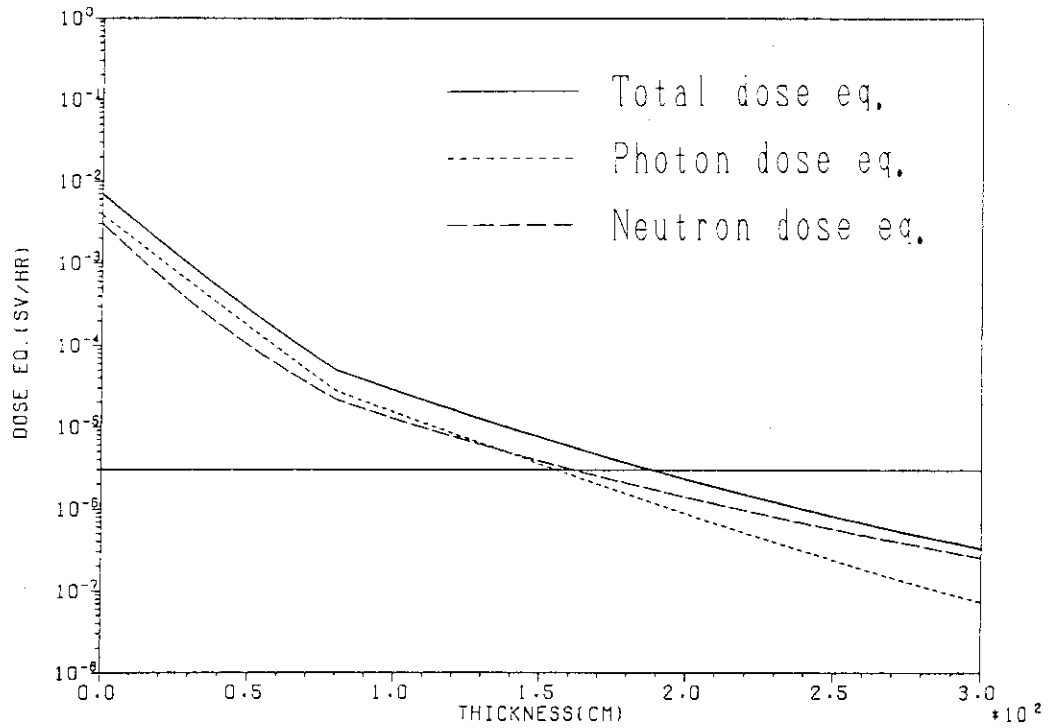


Fig.29 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with earth at synchrotron non-injection region, inside wall (lateral)

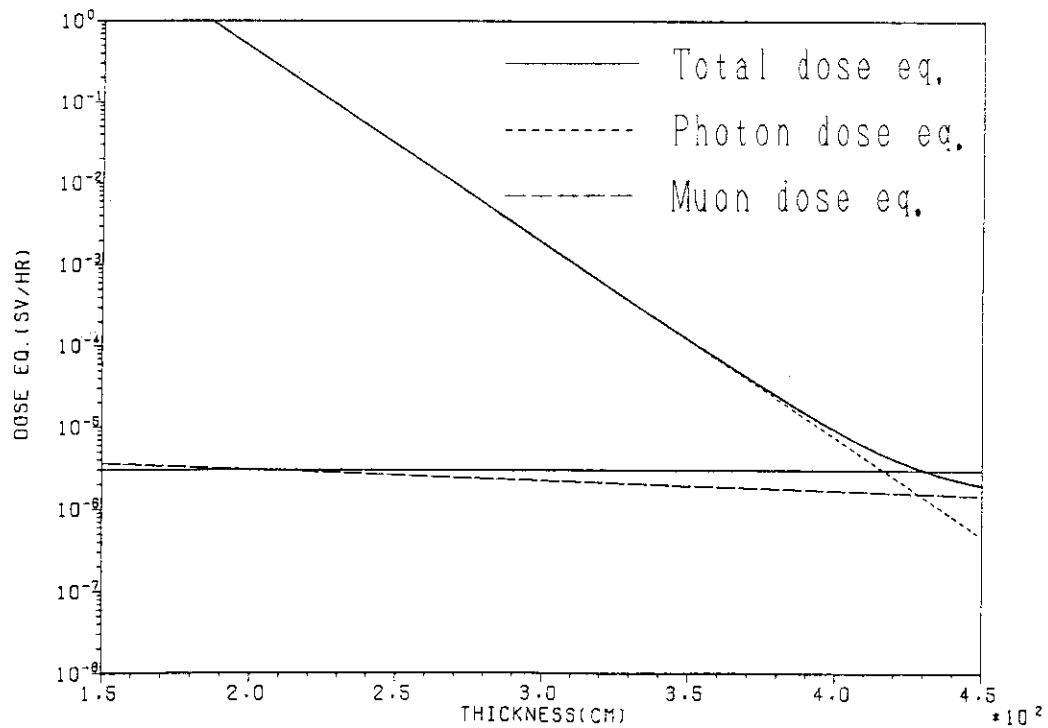


Fig.30 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete at storage ring injection region, beam port end wall (forward)

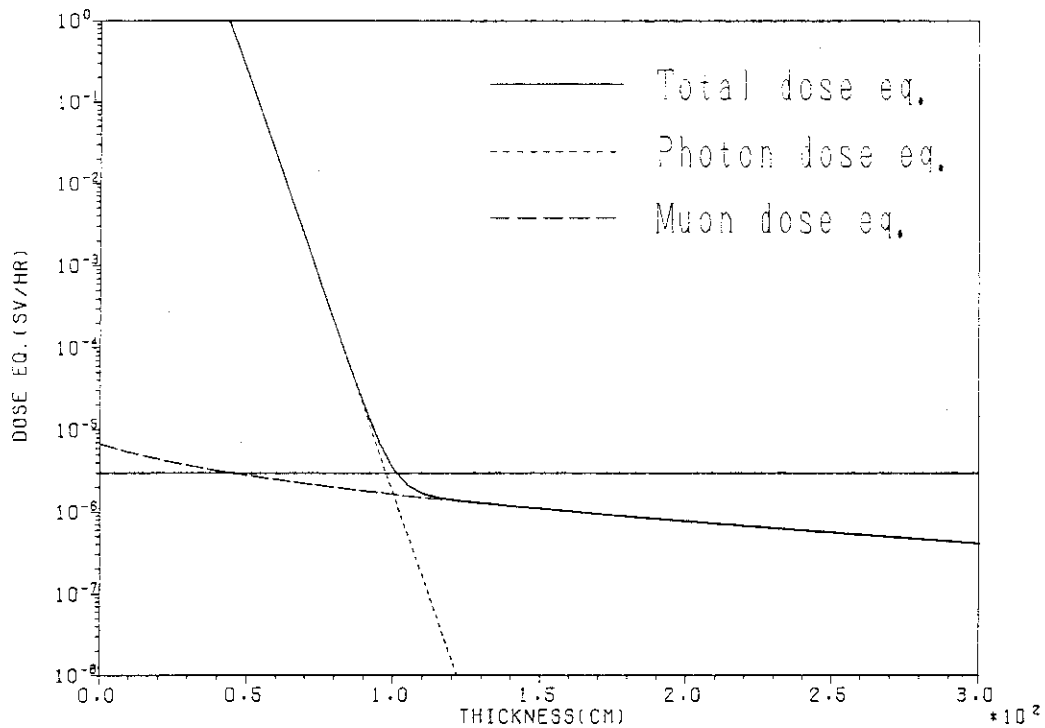


Fig.31 Dose equivalent distribution within a shield of iron with lead at storage ring injection region, beam port end wall (forward)

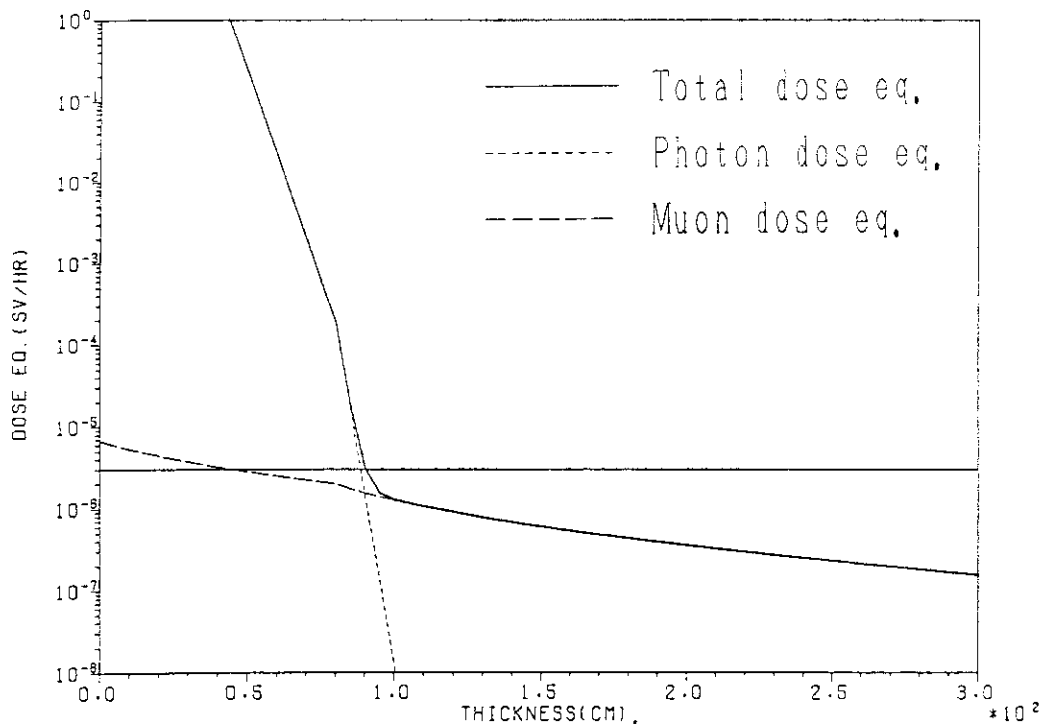


Fig.32 Dose equivalent distribution within a shield of iron with lead at storage ring injection region, beam port end wall (forward)

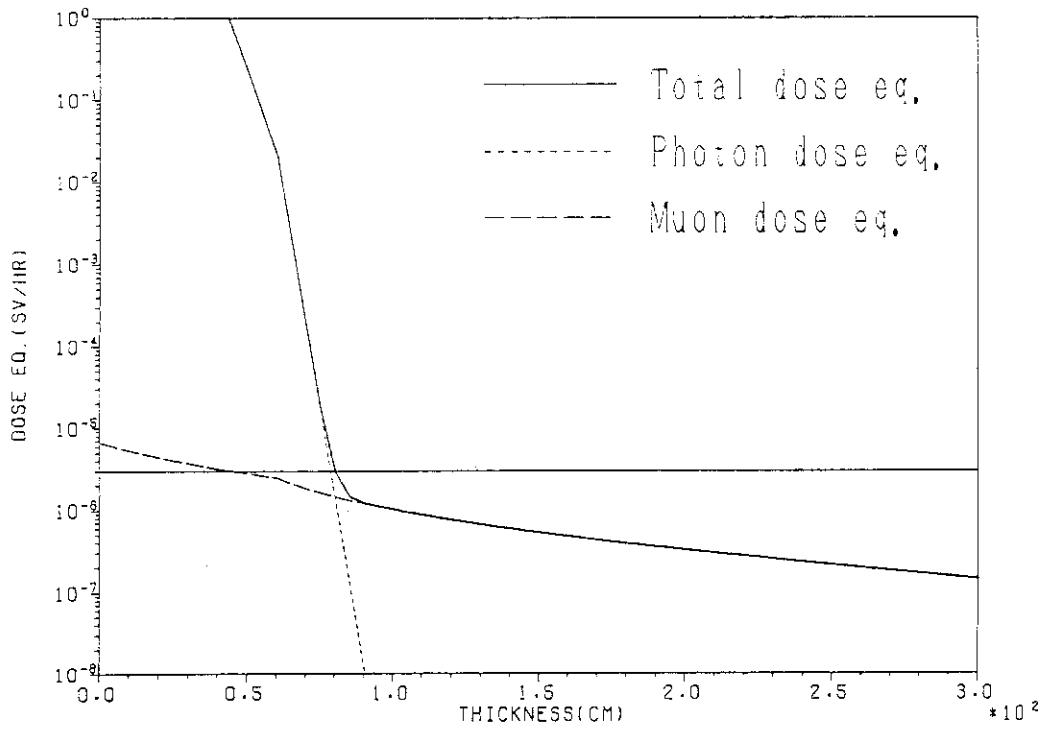


Fig.33 Dose equivalent distribution within a shield of iron with lead at storage ring injection region, beam port end wall (forward)

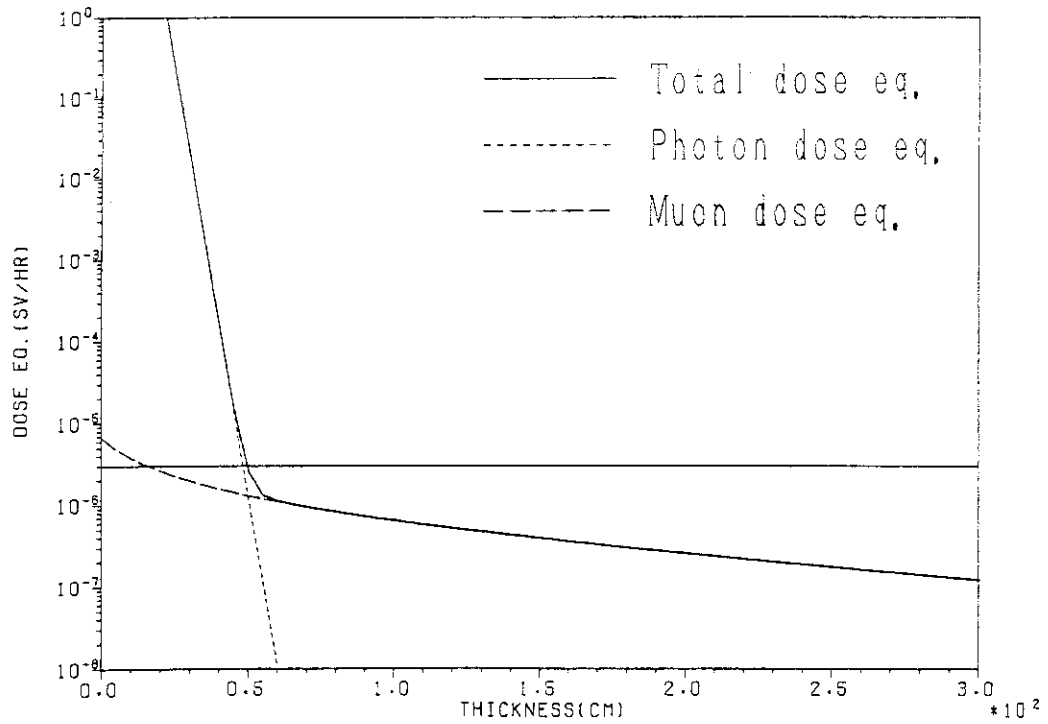


Fig.34 Dose equivalent distribution within a shield of lead at storage ring injection region, beam port end wall (forward)

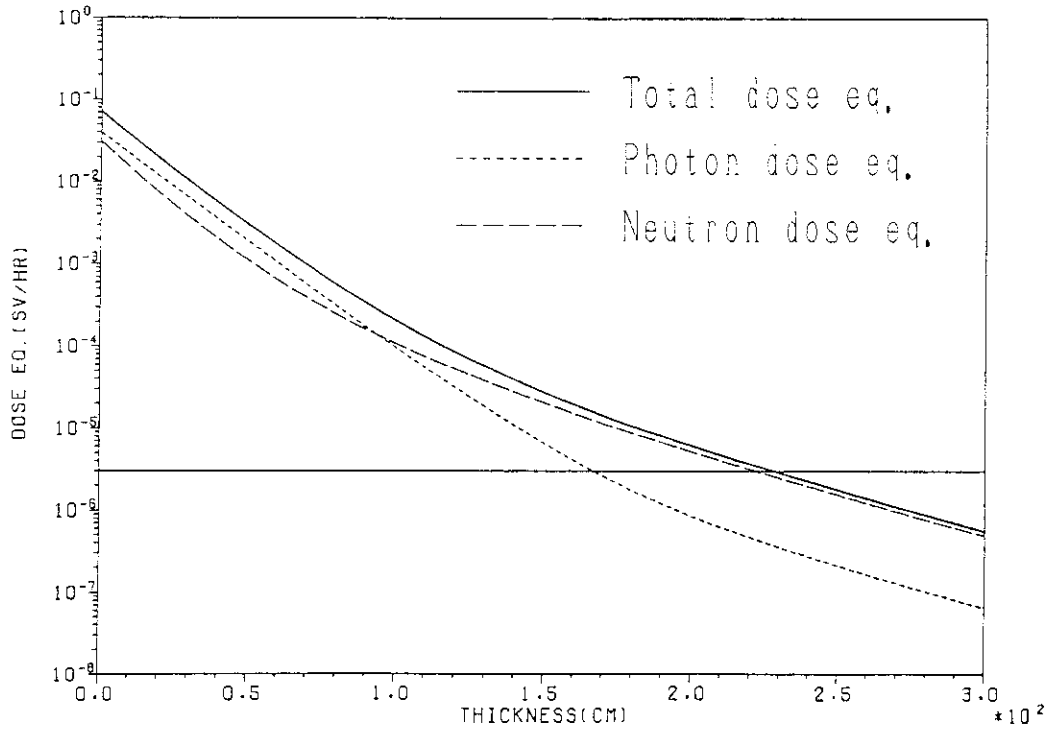


Fig.35 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete at storage ring injection region, inside wall (lateral)

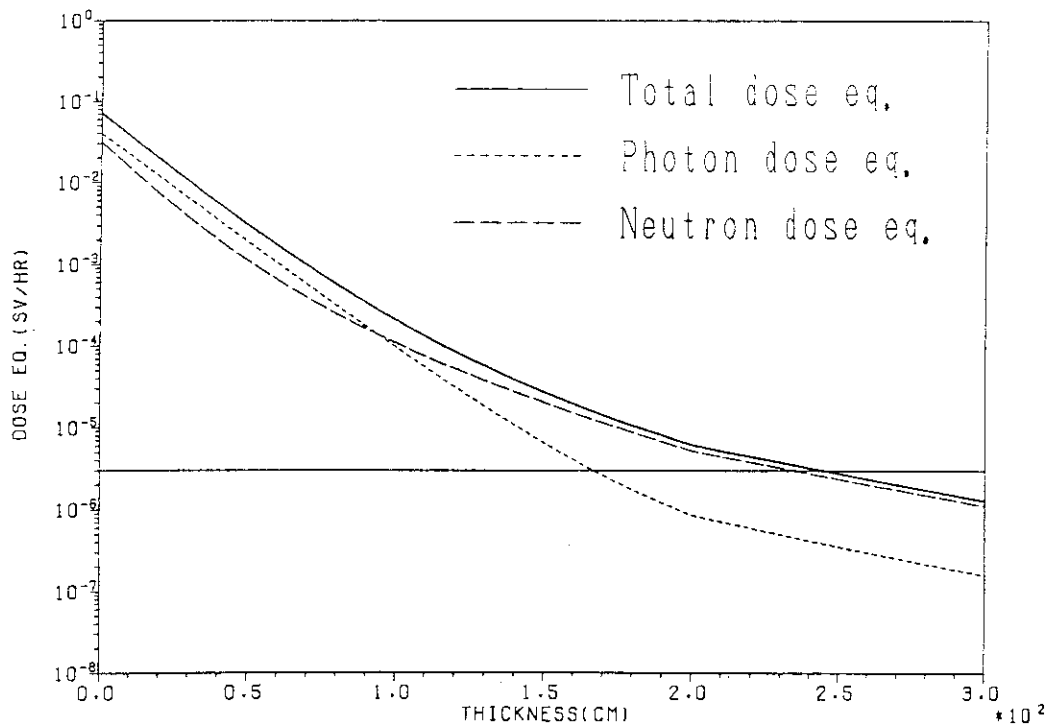


Fig.36 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with earth at storage ring injection region, inside wall (lateral)

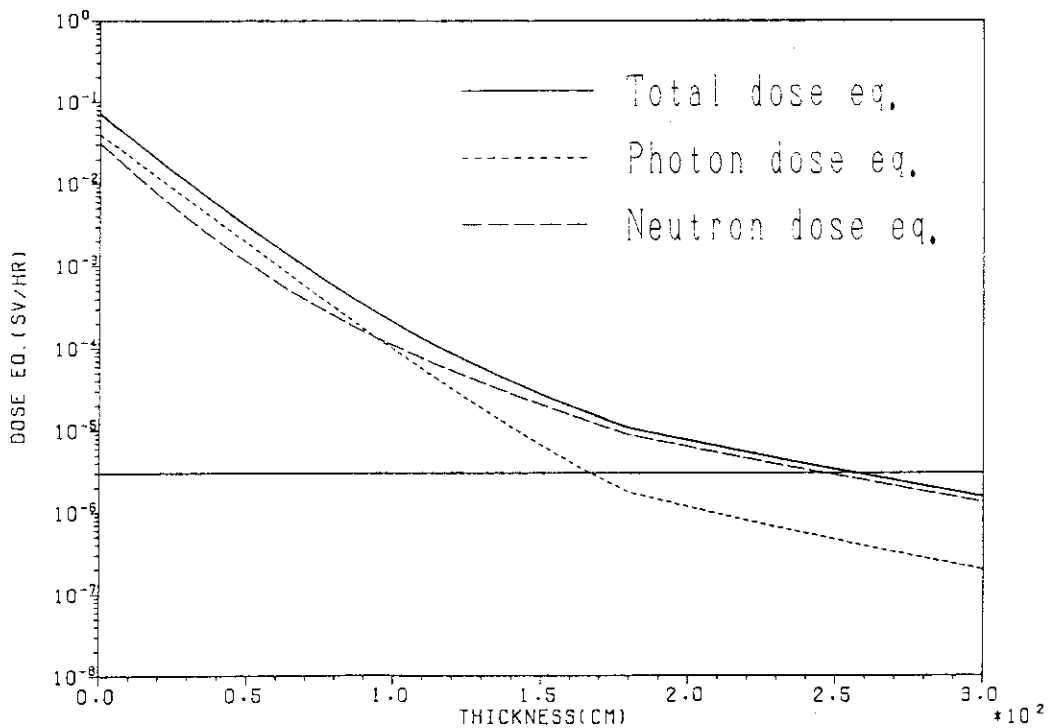


Fig.37 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with earth at storage ring injection region, inside wall (lateral)

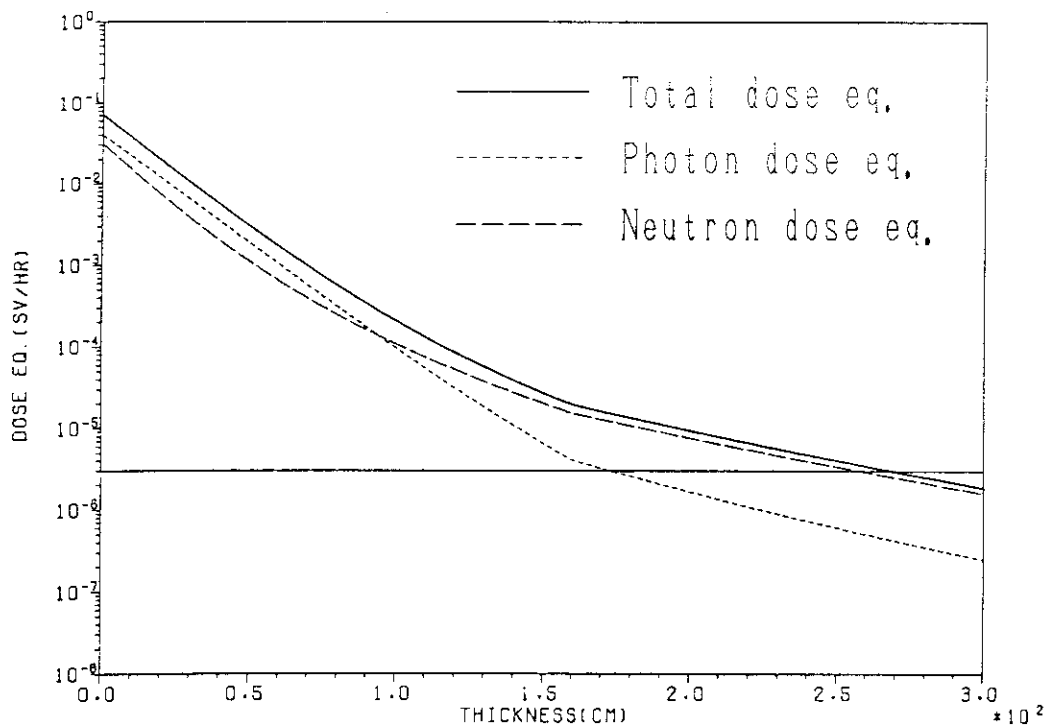


Fig.38 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with earth at storage ring injection region, inside wall (lateral)

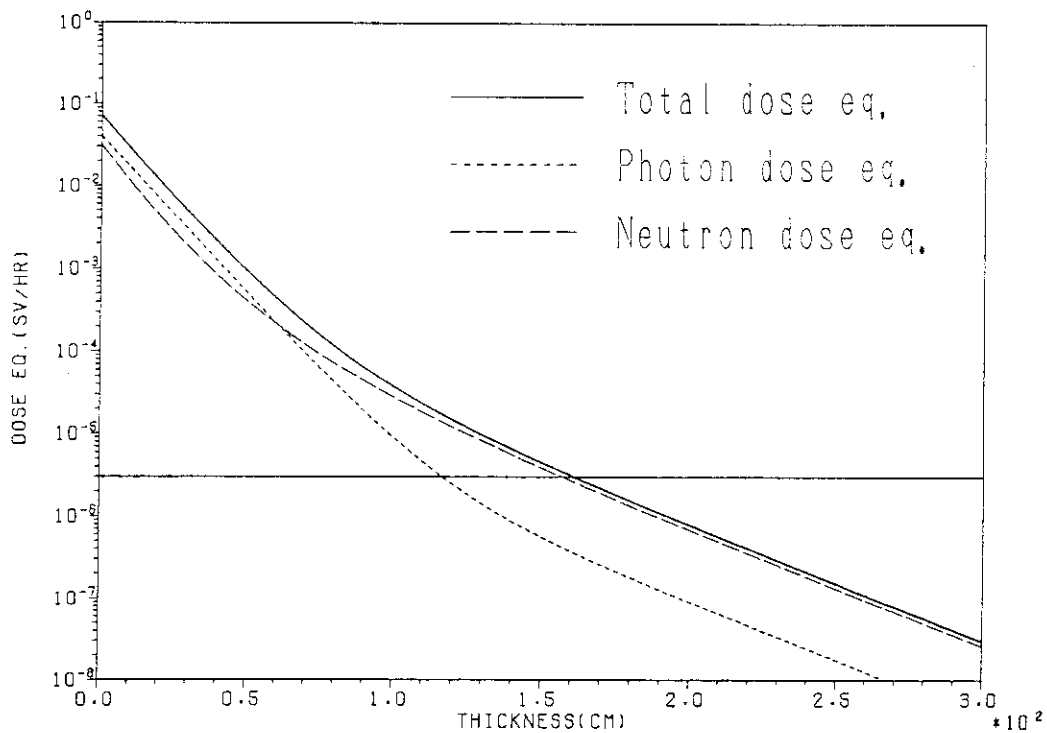


Fig. 39 Dose equivalent distribution within a shield of heavy concrete at storage ring injection region, inside wall (lateral)

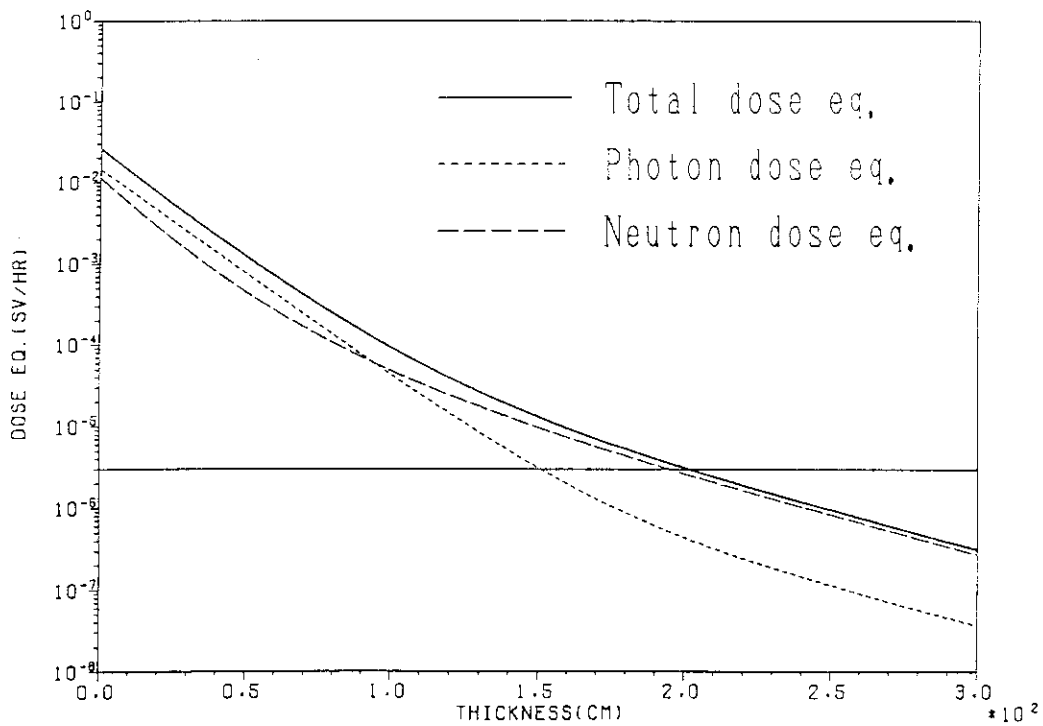


Fig. 40 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete at storage ring injection region, outside wall (lateral)

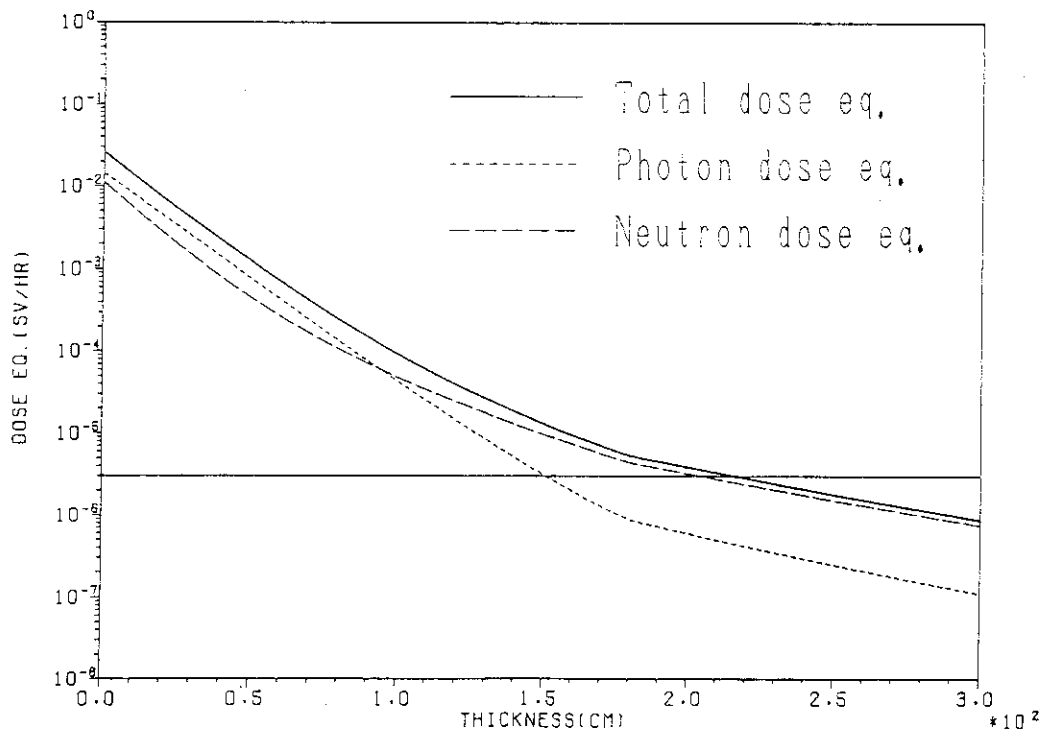


Fig.41 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with earth at storage ring injection region, outside wall (lateral)

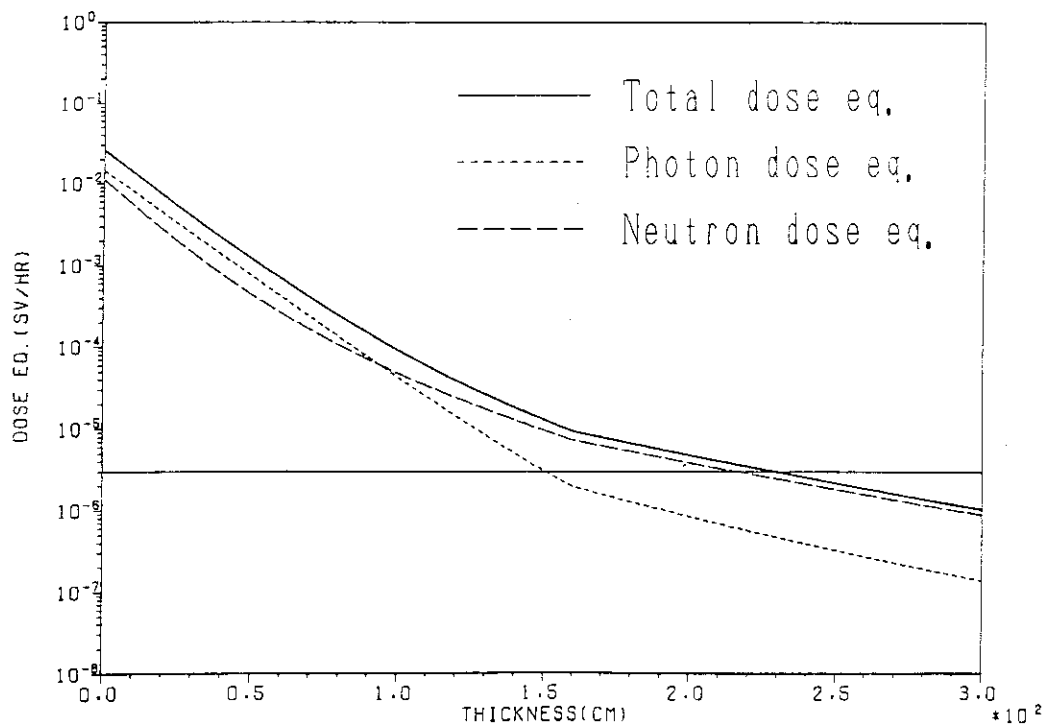


Fig.42 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with earth at storage ring injection, outside wall (lateral)

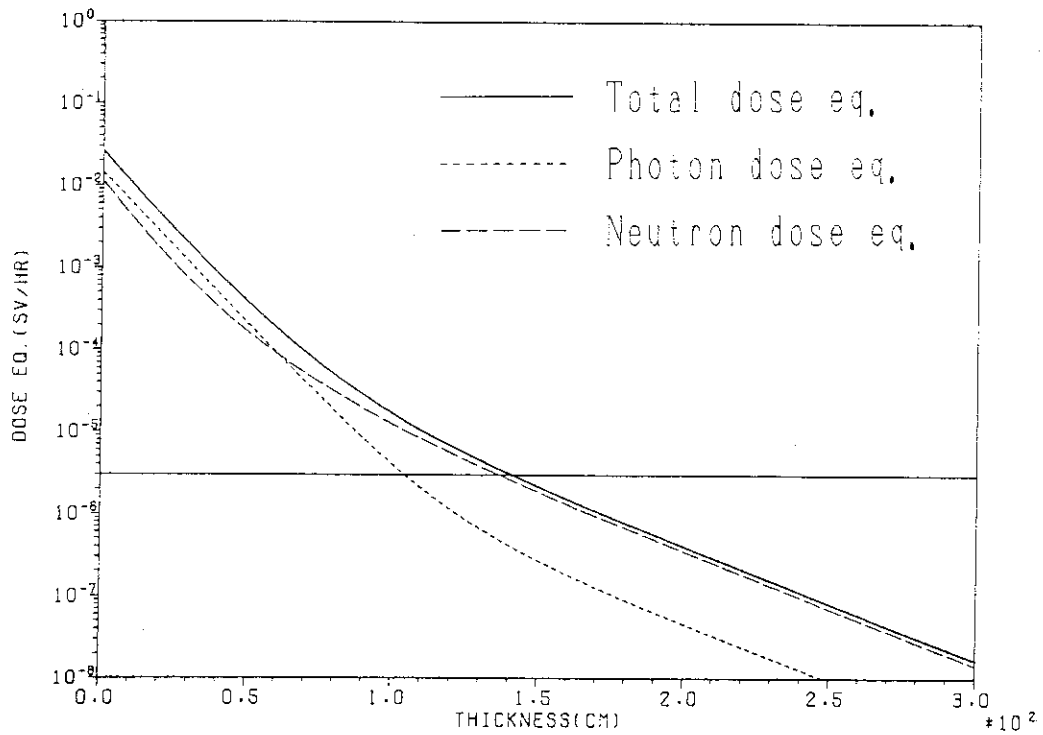


Fig. 43 Dose equivalent distribution within a shield of heavy concrete at storage ring injection region, outside wall (lateral)

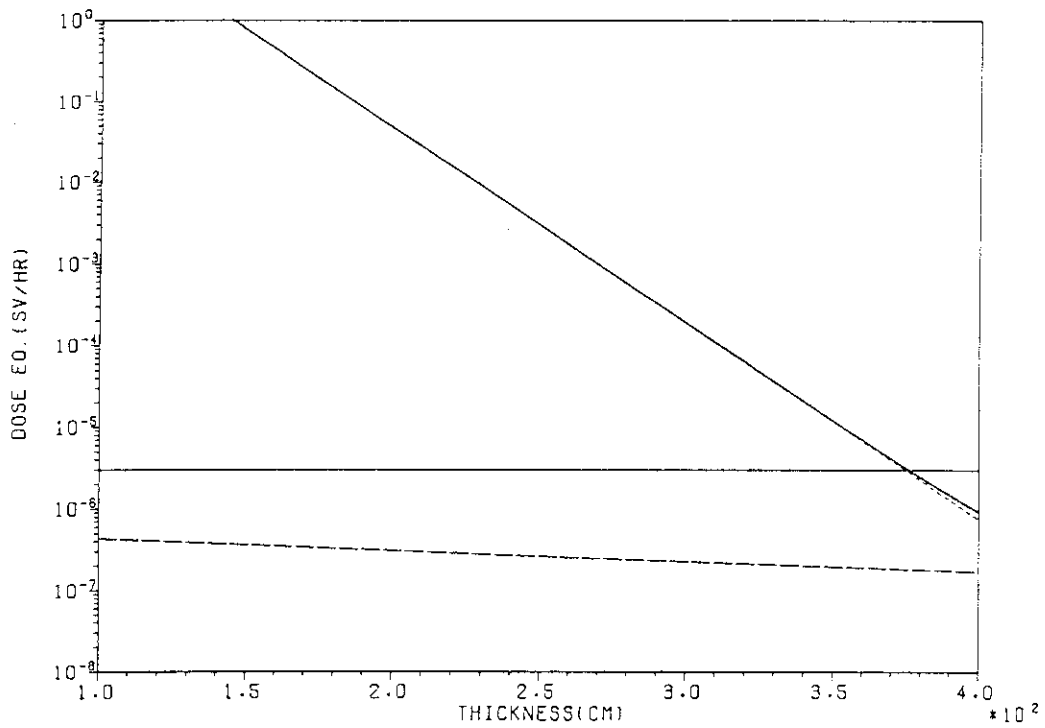


Fig. 44 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete at storage ring non-injection region, beam port end wall (forward)

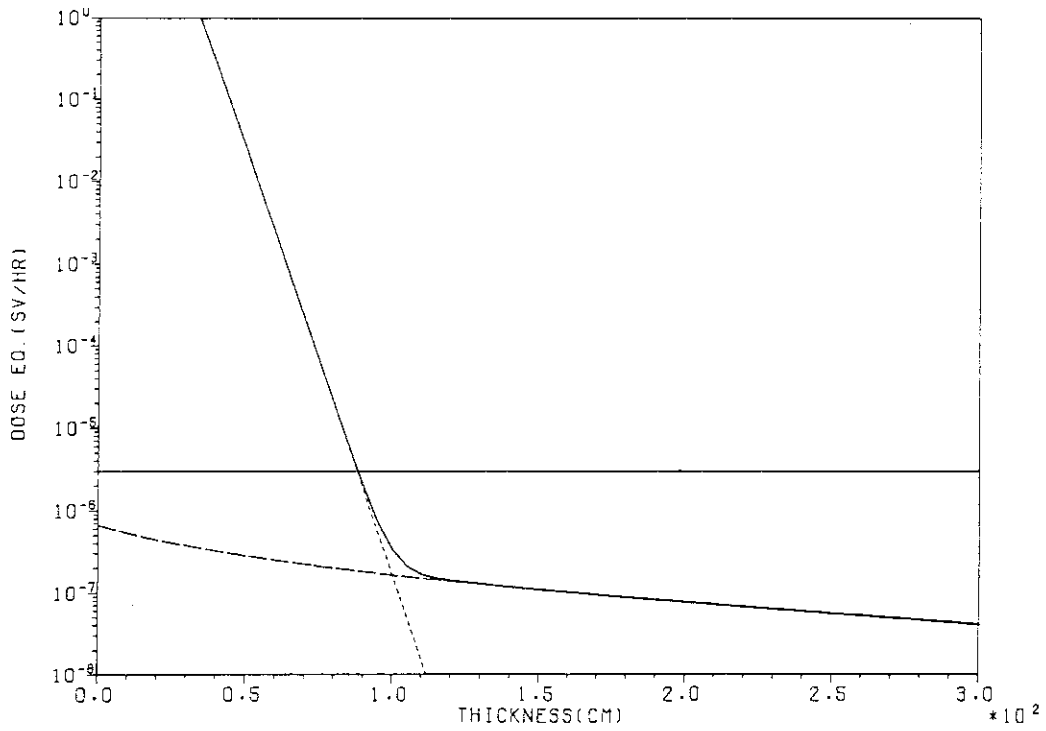


Fig.45 Dose equivalent distribution within a shield of iron at storage ring non-injection region, beam port end wall (forward)

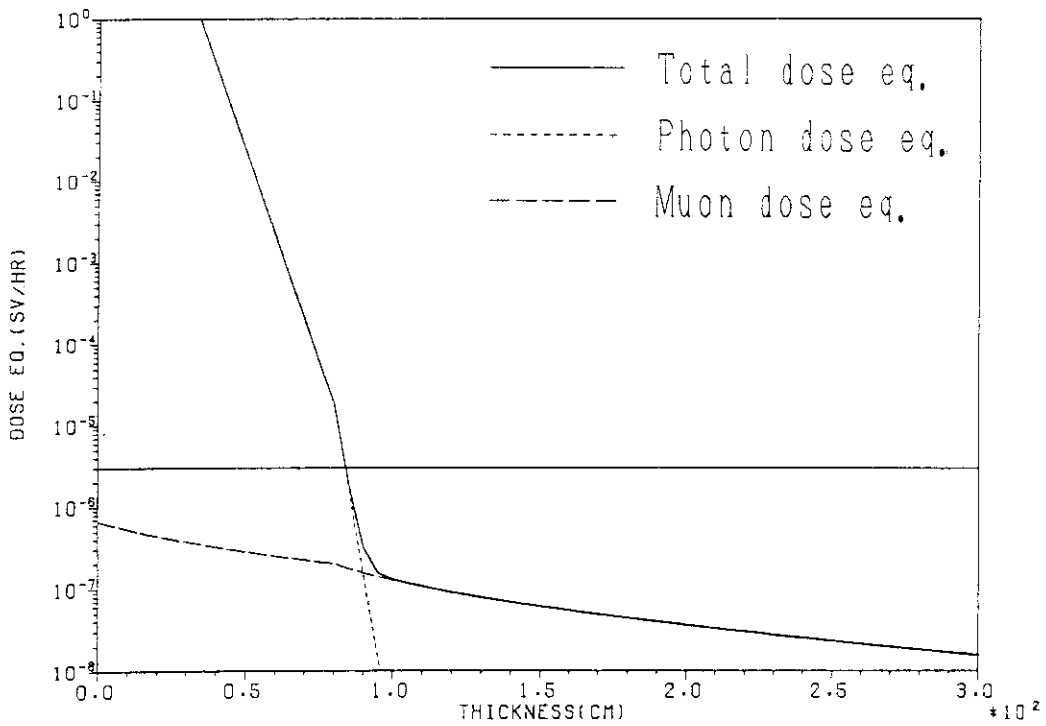


Fig.46 Dose equivalent distribution within a shield of iron with lead at storage ring non-injection region, beam port end wall (forward)

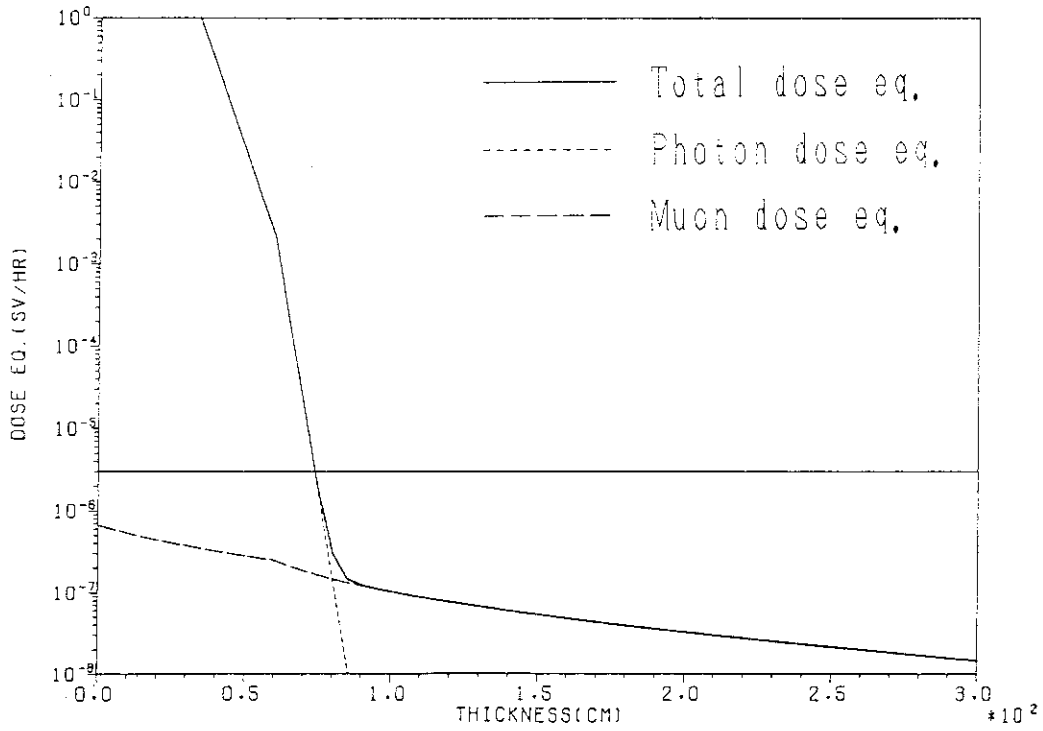


Fig. 47 Dose equivalent distribution within a shield of iron with lead at storage ring non-injection region, beam port end wall (forward)

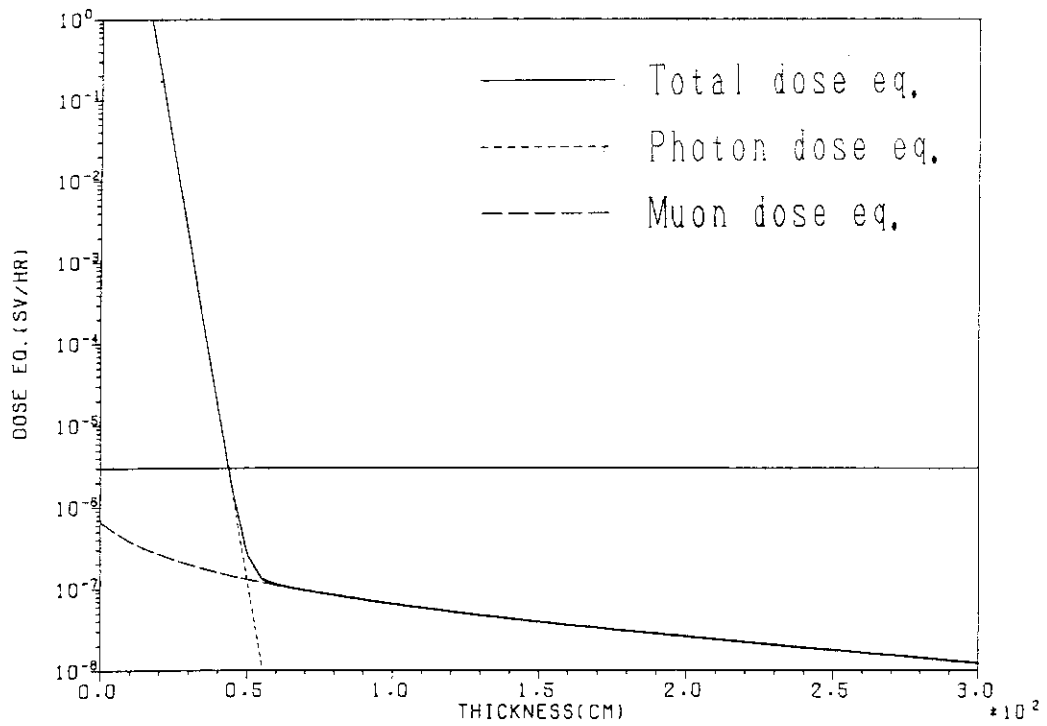


Fig. 48 Dose equivalent distribution within a shield of lead at storage ring non-injection region, beam port end wall (forward)

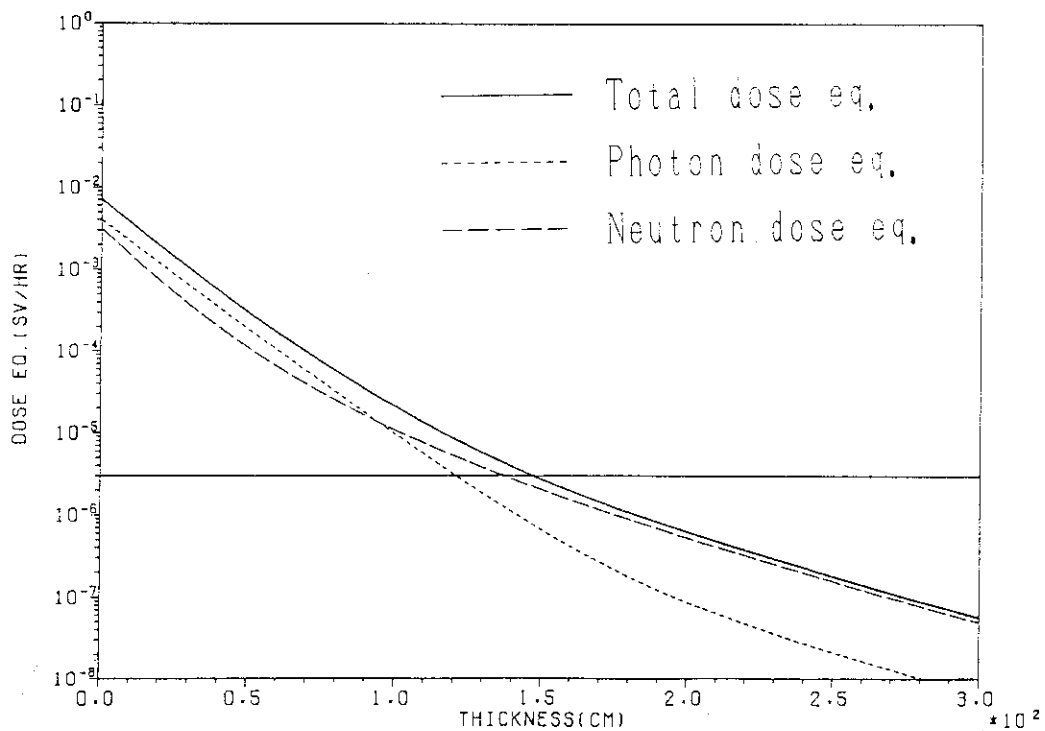


Fig.49 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete at storage ring non-injection region, inside wall (lateral)

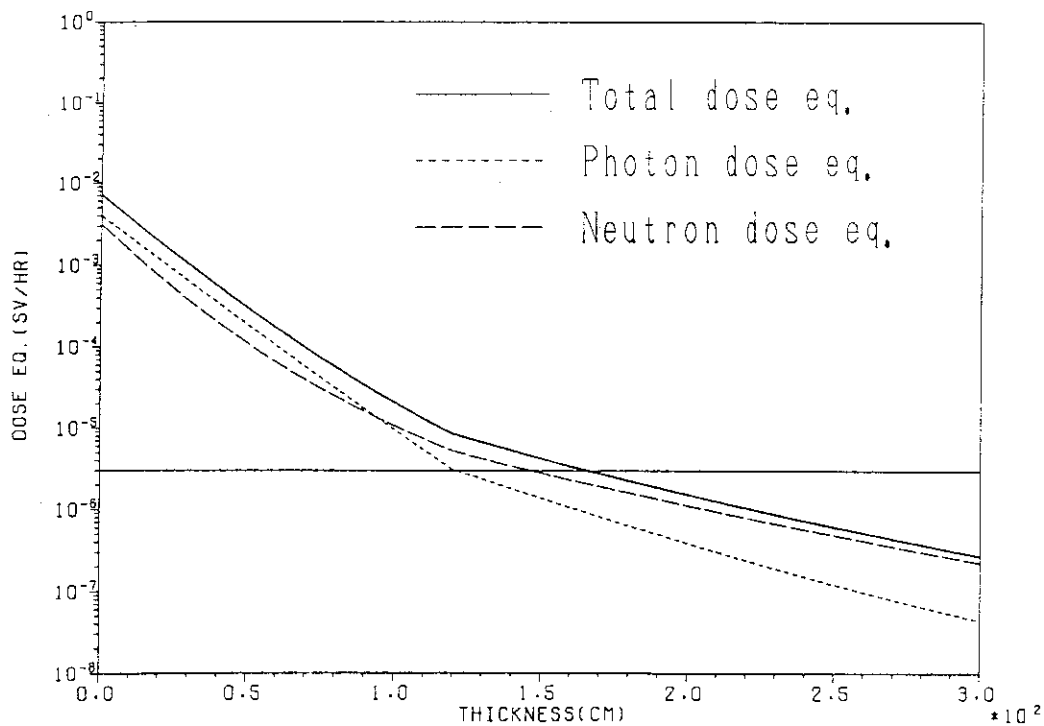


Fig.50 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with earth at storage ring non-injection region, inside wall (lateral)

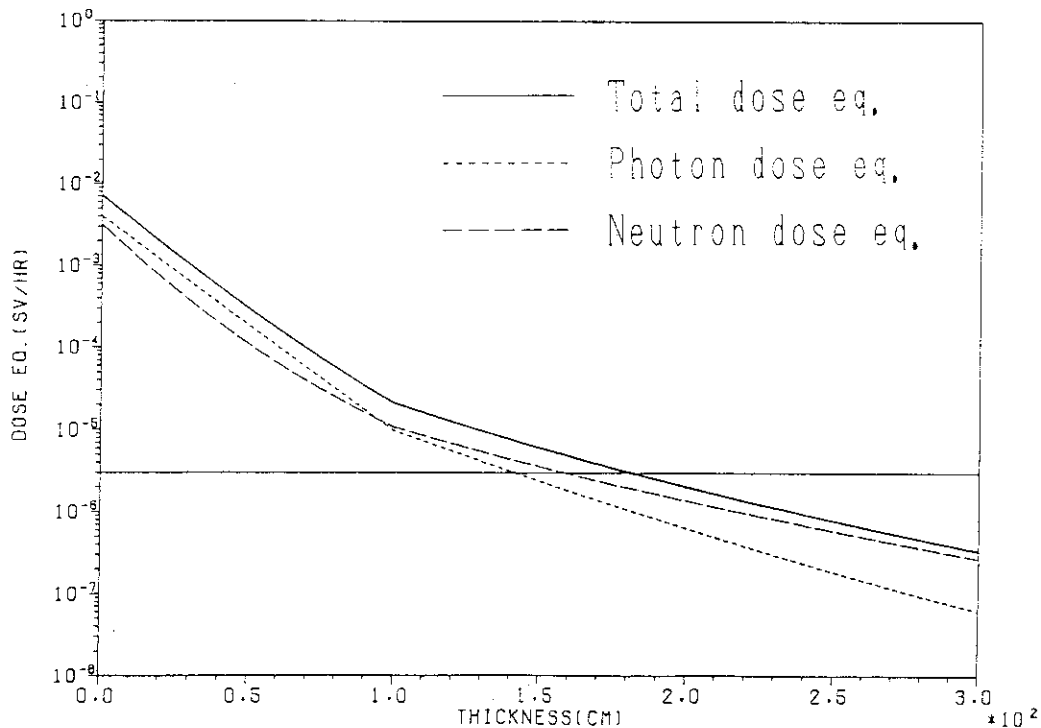


Fig.51 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with earth at storage ring non-injection region, inside wall (lateral)

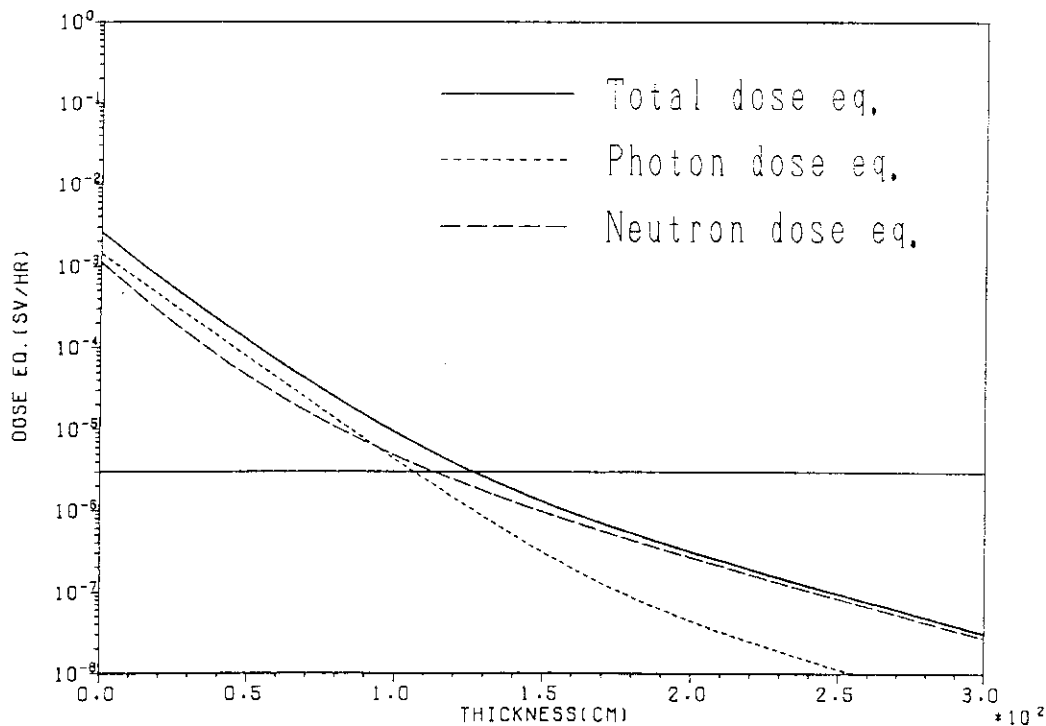


Fig.52 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete at storage ring non-injection region, outside wall (lateral)

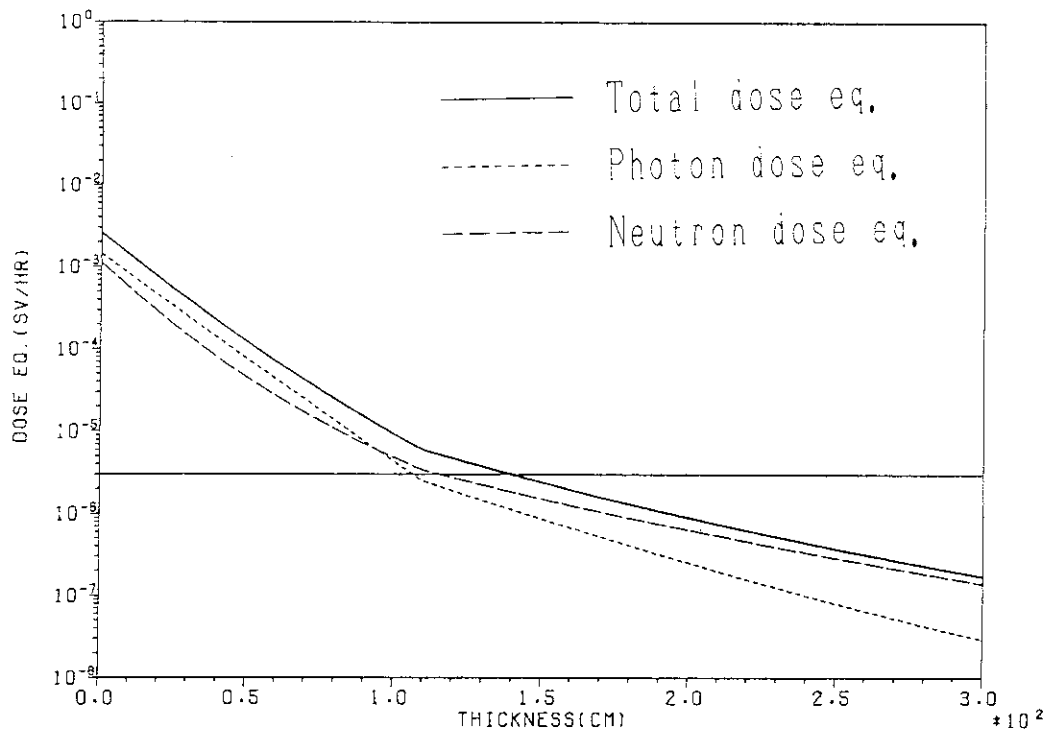


Fig.53 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with earth at storage ring non-injection region, outside wall (lateral)

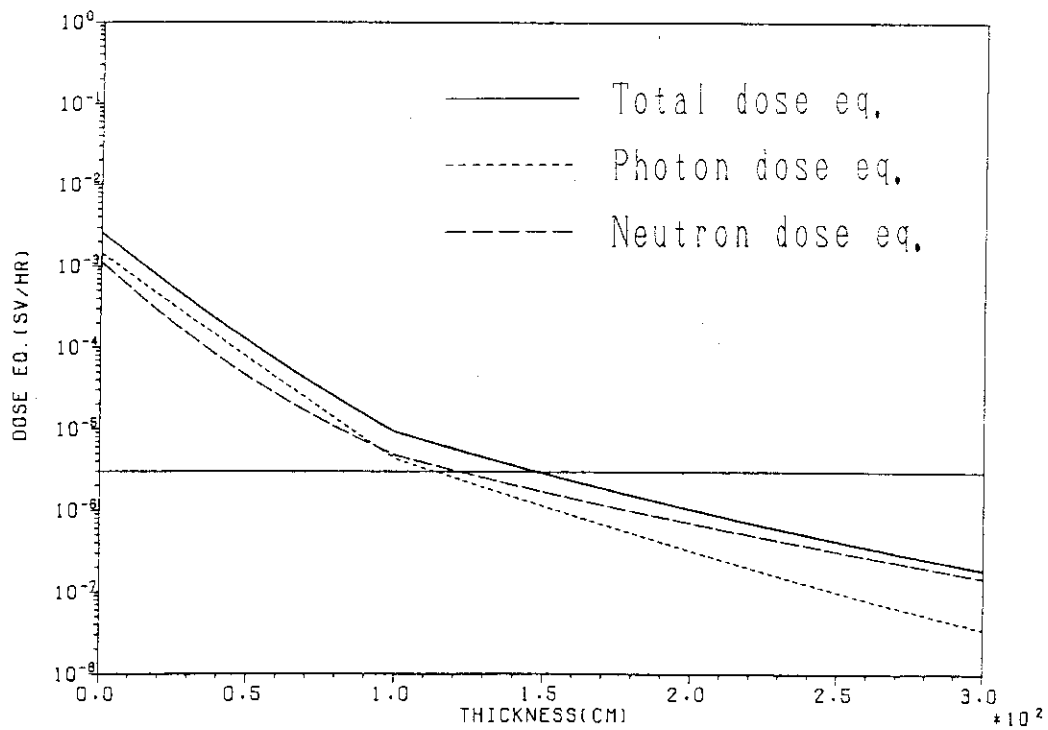


Fig.54 Dose equivalent distribution within a shield of ordinary concrete with earth at storage ring non-injection region, outside wall (lateral)