

JAERI-M
84-057

高線量率加速器棟の放射線遮蔽と
線量分布

1984年3月

松田 光司・高垣 虎雄・中瀬 吉昭・中井 洋太

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

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 Section, Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1984

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

高線量率加速器棟の放射線遮蔽と線量分布

日本原子力研究所高崎研究所大阪支所

松田 光司・高垣 虎雄・中瀬 吉昭・中井 洋太⁺

(1984年2月6日受理)

高崎研究所大阪支所では、昭和50年（1975年）5月に高線量率加速器を設置した。本報告書には、加速器を収納する建屋の設計段階における最も重要な放射線遮蔽について、その基本的な考え方、およびそれに基づく遮蔽計算の結果をまとめた。また計算結果については、モデル実験を行い、その妥当性を評価した。さらに加速器建屋完成後には、建屋周辺の放射線量の測定を行うとともに、遮蔽計算の結果と比較検討した。

遮蔽計算の根拠となる照射室内的制動輻射X線について、その線量率分布を、迷路を含む照射室内の全域にわたって測定した。

⁺ 東海研究所物理部

Radiation shielding and dose rate
distribution for the building of the high
dose rate accelerator

Koji MATSUDA, Toraoo TAKAGAKI,
Yoshiaki NAKASE and Yohta NAKAI[†]

Osaka Laboratory for Radiation Chemistry, JAERI

(Received February 6, 1984)

A high dose rate electron accelerator was established at Osaka Laboratory for Radiation Chemistry, Takasaki Establishment, JAERI in the fiscal year of 1975.

This report shows the fundamental concept for the radiation shielding of the accelerator building and the results of their calculations which were evaluated through the model experiments.

After the construction of the building, the leak radiation was measured in order to evaluate the calculating method of radiation shielding.

Dose rate distribution of X-rays was also measured in the whole area of the irradiation room as a data base.

Keywords: Radiation Shielding, Dose Rate Distribution, Accelerator Building, Model Experiments

[†] Department of Physics, Tokai, JAERI

目 次

1.はじめに	1
2.高線量率加速器照射室の遮蔽計算	1
2.1 基本的な考え方	1
2.2 加速器の仕様	1
2.3 照射室の概略	4
2.4 遮蔽の基礎となる基本的数値	4
2.5 遮蔽計算	4
2.5.1 制動輻射X線の発生量	7
2.5.2 遮蔽用コンクリートの厚さの決定	8
2.5.3 迷路での散乱線量	15
2.5.4 コンベアピットの遮蔽	17
3.放射線量の測定	19
3.1 照射室遮蔽壁外側における放射線量	19
3.2 照射室入口扉外側における放射線量	19
3.3 モックアップ室床上の放射線量	20
3.4 照射室内X線線量分布の測定	20
3.4.1 X線発生用ターゲット	20
3.4.2 放射線量測定器	21
3.4.3 後方散乱の影響について	22
3.4.4 照射室内X線線量率分布	22
3.4.5 迷路における放射線量率	23
4.あとがき	71
謝 辞	71
文 献	72

Contents

1. Introduction	1
2. Calculation of the shielding of the accelerator room	1
2.1 Basic concept of the shielding design	1
2.2 Specifications of the accelerator	1
2.3 Accelerator room	4
2.4 Fundamental numerals for the radiation shielding calculation	4
2.5 Calculation of the shielding	4
2.5.1 Dose of Bremsstrahlung X-rays	7
2.5.2 Determination of the thickness of concrete sheild	8
2.5.3 Dose of scattered X-rays in maze	15
2.5.4 Shielding of the conveyer pit	17
3. Measurement of radiation dose	19
3.1 Dose at the outside of the shielding wall of the accelerator room	19
3.2 Dose at the outside of the door to the accelerator room	19
3.3 Dose on the floor of the mock-up room	20
3.4 Measurement of X-ray dose distribution in the accelerator room	20
3.4.1 X-ray generator target	20
3.4.2 Equipments for radiation dosimetry	21
3.4.3 Effect of backscattering	22
3.4.4 X-ray dose distribution in the accelerator room	22
3.4.5 Radiation dose rate in the duct	23
4. Concluding remarks	71
Acknowledgements	71
References	72

1. はじめに

昭和50年に高崎研究所大阪支所に設置された高線量率加速器は、変圧器整流型であり、最大定格は加速電圧 800 keV、電子電流 25 mA である。加速された電子は巾 45 cm に走査されて空気中に取り出されるが、この窓には厚さ 25 μ のチタニウム箔が使用されている。

加速器設置の当初の目的は、高線量率下における放射線化学反応の研究、塗料の硬化等の表面処理技術の開発であったが、昭和56年、これらの研究がほど終了したので現在では気体の放射線化学反応の研究に主として用いている。

本加速器は、研究を効率よく進めるために照射室内の数箇所に実験装置を設置したまゝ、左右に移動して放射線照射ができるようにした。このために天井走りクレーンに加速器本体を固定し、定められた範囲の任意の位置に移動して照射ができるようになっている。また加速器棟は、民家に近いため放射線遮蔽には特別の考慮を払い、事業所境界での放射線量が自然計数と同程度になるよう遮蔽計算を行った。

この報告書は、遮蔽計算の基礎となったモデル実験と建家完成後の放射線遮蔽についての測定データを対比検討した結果を述べたものである。また照射室内の制動輻射 X 線の線量率分布を今後の照射実験あるいは照射施設の遮蔽設計に役立てるためにデータ集としてまとめた。

2. 高線量率加速器照射室の遮蔽計算

2.1 基本的な考え方

高線量率加速器を収納する照射室の照射線遮蔽については、建屋の立地条件を考慮して、とくに次の点に留意して行った。

建屋の配置を Fig. 1 および Fig. 2 に示すが、照射室は隣接人家と 20 m 位の距離のところにあり、また照射室の高さも人家の高さとほど同じくらいである。Fig. 2A, B はそれぞれ Fig. 1 における AA' 面を南方向より、BB' 面を西方向より見たものである。したがって遮蔽計算の安全に対する基礎として、照射室のすぐ外では一般居住人に対する法規制である最大許容線量 (10 mrem/¹⁾ week) を 1 衍下まわる程度になるようにした。この結果、事業所境界では自然計数とほど同程度になることが予想できる。

2.2 加速器の仕様

加速電圧 最低 300 keV より最高 800 keV まで連続可変

電子電流 最低 10 μ A より最高 25 mA まで連続可変

走査巾 最大 45 cm

1. はじめに

昭和50年に高崎研究所大阪支所に設置された高線量率加速器は、変圧器整流型であり、最大定格は加速電圧 800 keV、電子電流 25 mA である。加速された電子は幅 45 cm に走査されて空気中に取り出されるが、この窓には厚さ 25 μ m のチタニウム箔が使用されている。

加速器設置の当初の目的は、高線量率下における放射線化学反応の研究、塗料の硬化等の表面処理技術の開発であったが、昭和56年、これらの研究がほぼ終了したので現在では気体の放射線化学反応の研究に主として用いている。

本加速器は、研究を効率よく進めるために照射室内の数箇所に実験装置を設置したまゝ、左右に移動して放射線照射ができるようにした。このために天井走りクレーンに加速器本体を固定し、定められた範囲の任意の位置に移動して照射ができるようになっている。また加速器棟は、民家に近いため放射線遮蔽には特別の考慮を払い、事業所境界での放射線量が自然計数と同程度になるよう遮蔽計算を行った。

この報告書は、遮蔽計算の基礎となったモデル実験と建家完成後の放射線遮蔽についての測定データを対比検討した結果を述べたものである。また照射室内の制動輻射 X 線の線量率分布を今後の照射実験あるいは照射施設の遮蔽設計に役立てるためにデータ集としてまとめた。

2. 高線量率加速器照射室の遮蔽計算

2.1 基本的な考え方

高線量率加速器を収納する照射室の照射線遮蔽については、建屋の立地条件を考慮して、とくに次の点に留意して行った。

建屋の配置を Fig. 1 および Fig. 2 に示すが、照射室は隣接人家と 20 m 位の距離のところにあり、また照射室の高さも人家の高さとはほぼ同じくらいである。Fig. 2A, B はそれぞれ Fig. 1 における AA' 面を南方向より、BB' 面を西方向より見たものである。したがって遮蔽計算の安全に対する基礎として、照射室のすぐ外では一般居住人に対する法規制である最大許容線量 (10 mrem/week)¹⁾ を 1 衍下まわる程度になるようにした。この結果、事業所境界では自然計数とほゞ同程度になることが予想できる。

2.2 加速器の仕様

加速電圧 最低 300 keV より最高 800 keV まで連続可変

電子電流 最低 10 μ A より最高 25 mA まで連続可変

走査幅 最大 45 cm

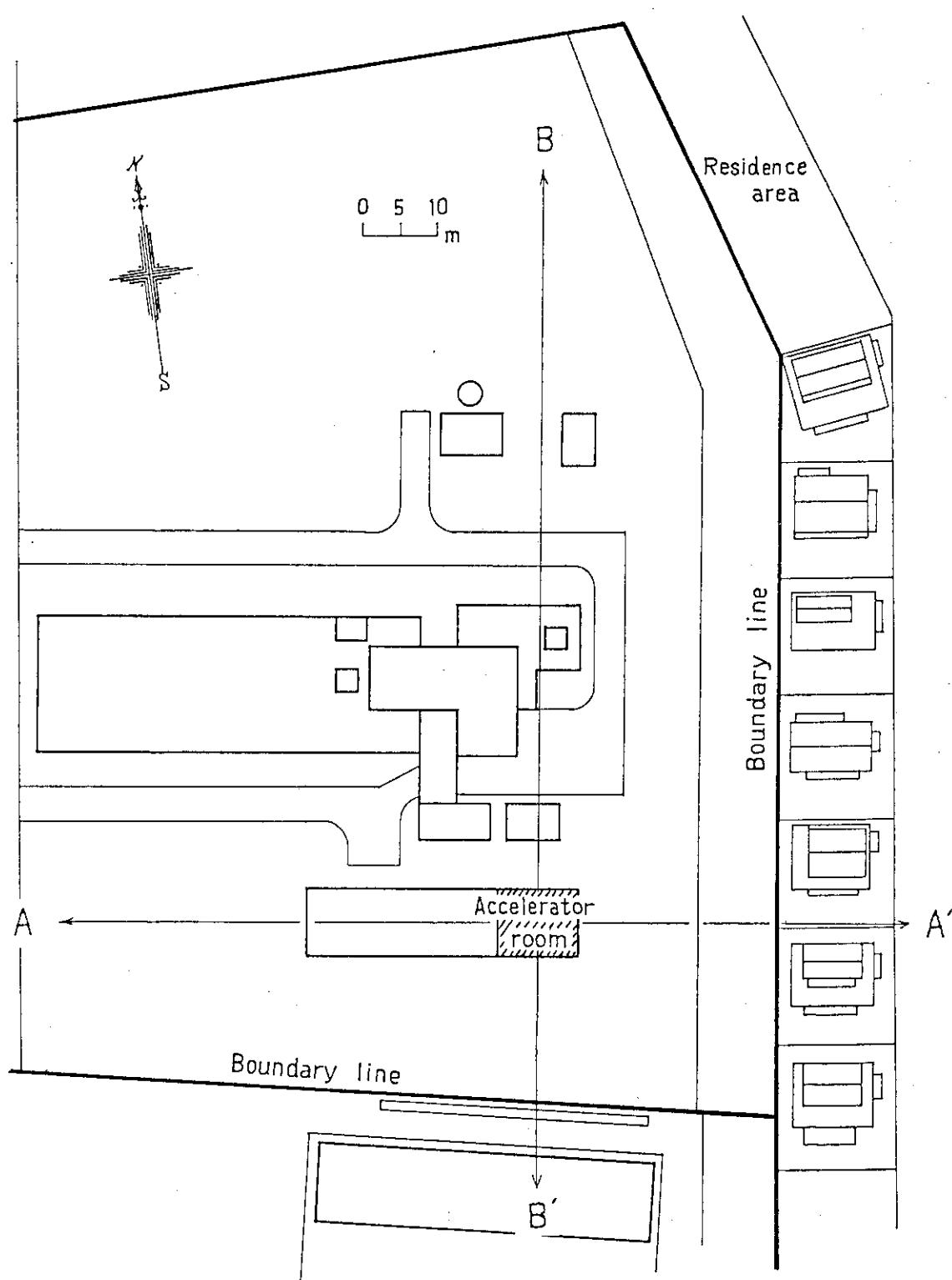


Fig. 1 The laboratory site showing the location of the accelerator building.

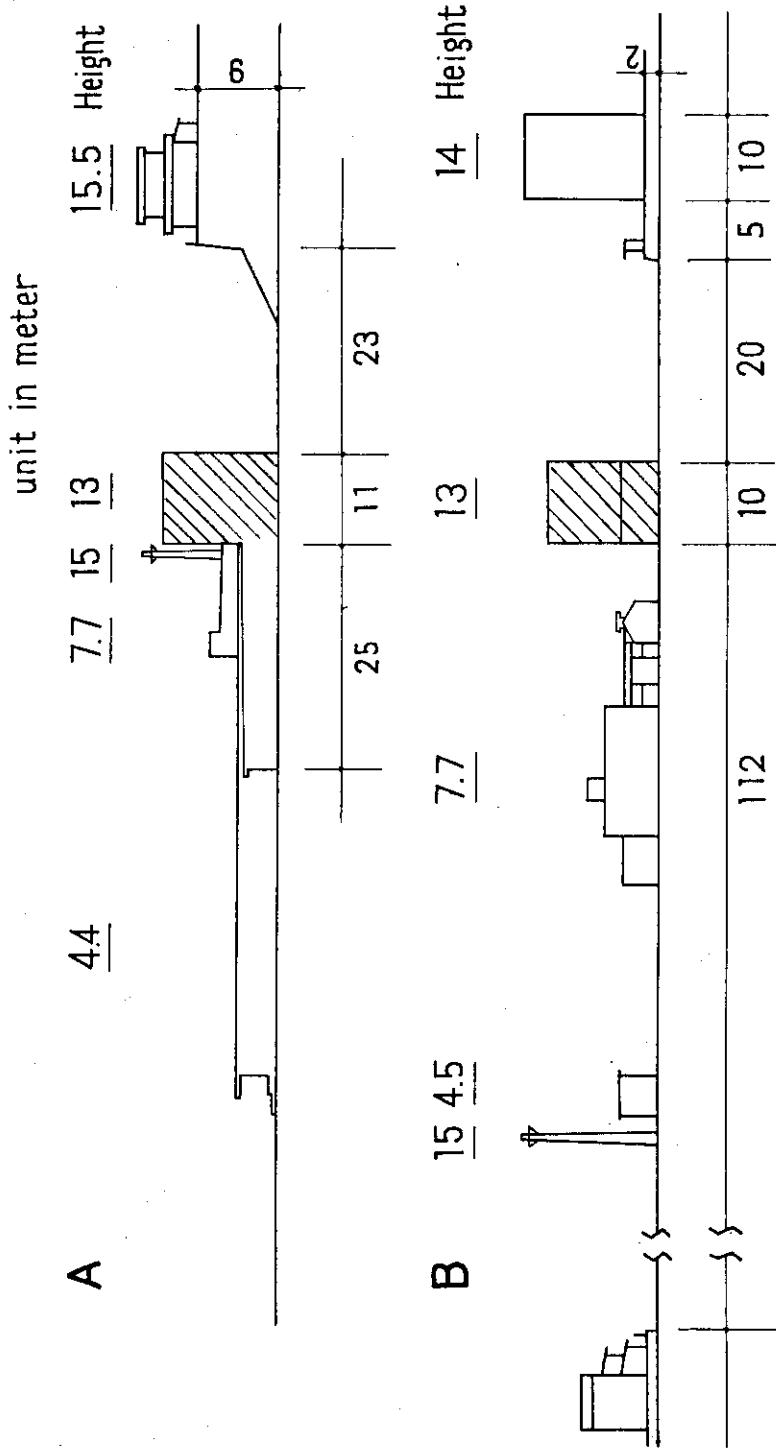


Fig. 2 Cross sectional views of the accelerator building
with adjacent residential area.
(A) : along the line A - A', and (B) : B - B' in Fig.1.

電子加速用高電圧発生部と加速管部はケーブル接続であり、加速管部と照射窓は所定の範囲内（Fig.3 (C)の斜線部参照）で任意に移動させることができる。電子線照射方向は垂直下向きとする。

2.3 照射室の概略

照射室の概略を Fig.3 (A, B, C) に示す。Fig.3 A は照射室の平面図、Fig.3 B は照射室の北側からの断面図、Fig.3 C は照射室内における照射窓の可動範囲を示す。照射室内の面積は $8\text{m} \times 9\text{m}$ であり、Fig.3 C に示すように斜線の範囲 ($4.5\text{m} \times 3\text{m} \times 1.4\text{mH}$) 内で照射窓を任意に動かすことができる。また照射室内の高さは、加速管本体垂直移動部分 (5m), 高電圧ケーブル端末部および高電圧ケーブルの曲率半径部分 (5m), 加速管本体移動クレーン部分 (2m)，合計 12m となっている。

2.4 遮蔽の基礎となる基本的数値

加速器：最大電子エネルギー	800 KeV
最大電子電流	25 mA
最大稼動時間	48 h/W
遮蔽材：普通コンクリート	密度 2.3 g/cm^3
遮蔽の外側での漏洩線量：	10 mrem/W 以下
X 線発生用ターゲット：	鉄 (Z = 26)

なお、遮蔽の外側での漏洩線量を $10\text{ mrem}/\text{W}$ 以下としたのは 2.1.1 の記述と矛盾するようであるが、3 章で述べるように制動輻射 X 線は、ターゲット位置で電子線の進行方向に強く放射される特性をもっている。また X 線束のすべてが最高エネルギー (800 KeV) をもつではなくて 0 eV まで分布をもっている。この角度分布とエネルギースペクトルを詳細に解析することは困難であるが、経験的に水平方向の X 線量は、X 線束がすべて最高エネルギーをもち等方的に放射されたとする計算値より 1 衍程度下まわるものと予測することができる。

また、ターゲットを鉄としたのはビームシャッターに SUS304 (実効原子番号 25.56) を使用するからであるが、照射試料は C, H, O, N 等の鉄より低原子番号から成る物質が対象であり、Fe より高い原子番号の物質は照射の対象としていない。

2.5 遮蔽計算

電子加速器照射室の遮蔽を考える場合、電子線自体のもれに関しては殆んど問題はないが、電子線が物質に照射された際に発生する制動輻射 X 線は透過力が大きく、十分な遮蔽を考えなければならない。²⁾

制動輻射 X 線の発生効率は、ターゲット物質の原子番号が高い程大であるが、前に述べた理由によりこゝでは鉄 (Fe) を対象に遮蔽計算を行うことにした。

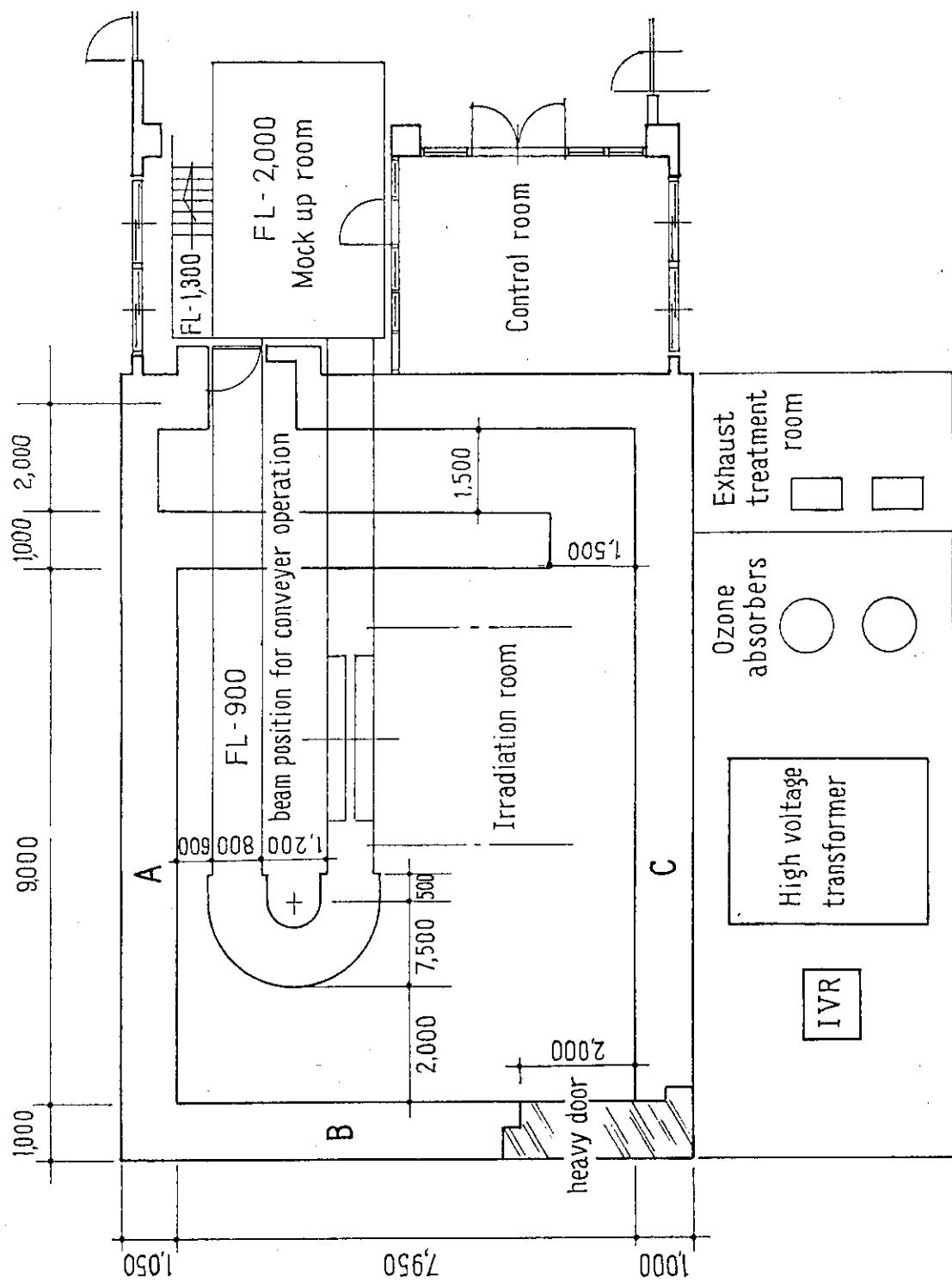


Fig. 3A Layout of building for the accelerator.

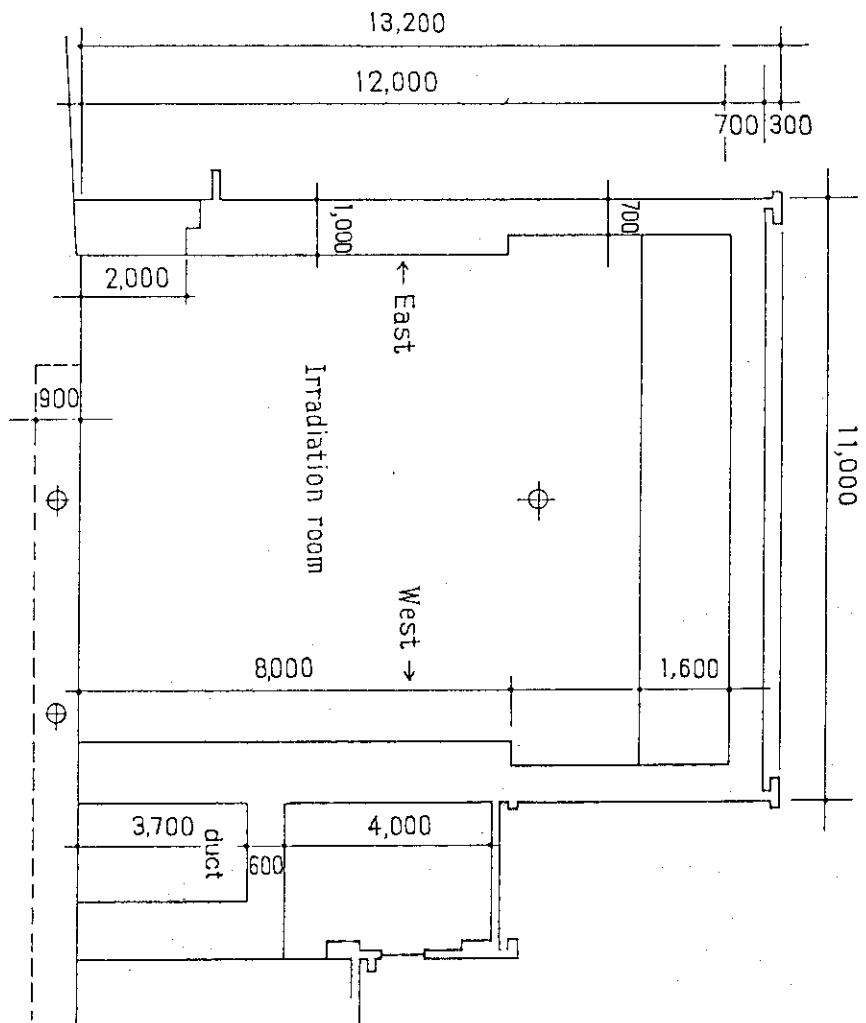


Fig. 3B Cross sectional view of the accelerator building from north.

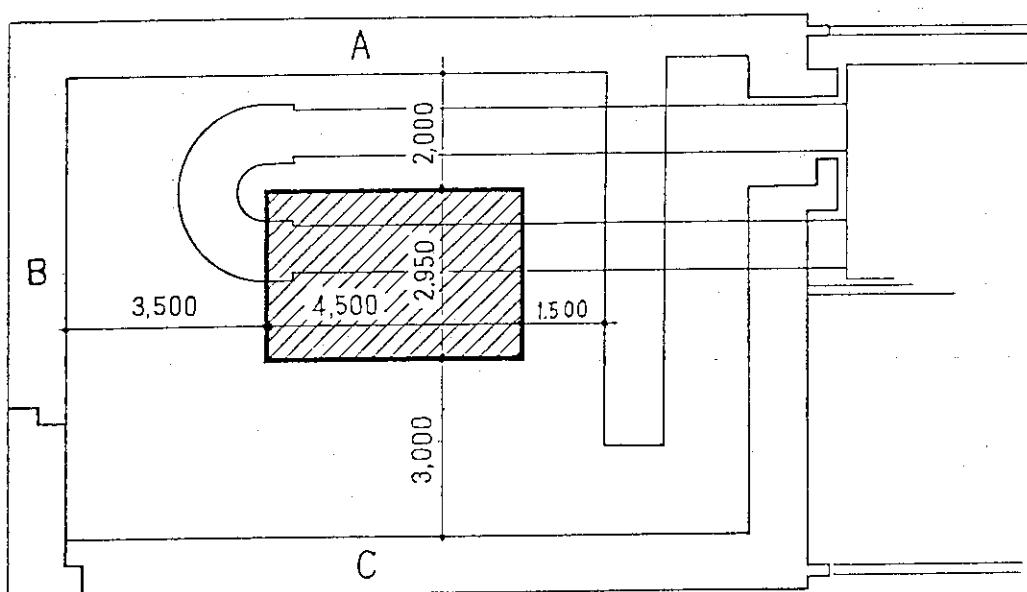


Fig. 3C Travelling zone of the accelerator in the irradiation room.

2.5.1 制動輻射 X 線の発生量

電子線照射によって発生する制動輻射 X 線の発生効率は、設計当時最も信頼のおける報告書 NASA-SP 3012 (1964)³⁾ の Table の値を採用した。それによると Fe に対する 800 KeV の電子線の制動輻射 X 線の発生効率 Y_{Fe} は

$$Y_{Fe} = 1.941 \times 10^{-2} \quad (1)$$

である。⁴⁾

一方、加速器の全出力 W は、

$$W = 800 \text{ KeV} \times 25 \text{ mA} = 2 \times 10^4 \text{ [joule/sec]} \quad (2)$$

となり、したがって発生する X 線のエネルギー量 I_0 は

$$\begin{aligned} I_0 &= WY = 2 \times 10^4 \text{ [joule/sec]} \times 1.94 \times 10^{-2} \\ &= 3.88 \times 10^9 \text{ [erg/sec]} \end{aligned} \quad (3)$$

となる。

ここで、X 線の発生強度の角度分布は等方的であると仮定する。800 KeV では、X 線強度は電子線がターゲットに入射する方向 (0° 方向) にやや強いが、実際の遮蔽では 90° 以上の方角での X 線量が問題になるので、計算の便宜上、等方分布と仮定して差支えない。そうすると、ターゲットから 100 cm のところの X 線のエネルギー束 I ($x = 100 \text{ cm}$) は、

$$\begin{aligned} I(x = 100 \text{ cm}) &= \frac{I_0}{4\pi x^2} = 3.09 \times 10^4 \text{ [erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}] \\ I_0 &= 3.88 \times 10^9 \text{ [erg} \cdot \text{sec}^{-1}] \\ x &= 100 \text{ [cm]} \end{aligned} \quad (4)$$

となる。

ここで、エネルギー束と X 線の線量単位、レントゲン(R)との関係は、800 KeV の X 線に対する空気のエネルギー吸収係数 $\mu_{en}/\rho = 0.0289 \text{ cm}^2/\text{g}$ ⁵⁾ を用いて計算すると、

$$\begin{aligned} 1 \text{ erg/cm}^2 \cdot \text{sec} &= 3.30 \times 10^{-4} \text{ [R/sec]} \\ &= 1.19 \text{ [R/hr]} \end{aligned} \quad (5)$$

となる。したがって、ターゲットから 100 cm のところの線量率は、以下エネルギー量の代りに線量であらわし、同じ記号を用いると

*) 最近発表された同じ著者らの改良された報告書 (ref. 4) によると 800 KeV における Y_{Fe} は $Y_{Fe}=1.42 \times 10^{-2}$ である。したがって設計当時は制動輻射 X 線の発生効率は多めに見積っていることになるが、これは結果としてより安全サイドに計算を進めたことになる。

$$I(x=100 \text{ cm}) = 3.68 \times 10^4 \text{ [R/hr]} \quad (6)$$

となる。これを基準にした等方分布、すなわち距離の逆2乗則がなり立つ場合の線量率の空間分布はFig.4のようになる。

一方、実際に Van de Graaff 加速器室の中央に Fe ターゲットを設置し、Van de Graaff 加速器により 800 KeV の電子線を垂直下向きにその Fe に照射した。Fig.5 に示すような方向 A, B, C, D についてターゲットからの距離と線量率との関係を求めた。測定には米国ピクトリーン社製の X 線線量計「Radocon 575 型」を使用した。結果を Fig.6 に示す。これらの値は、すべてビーム電流 $50 \mu\text{A}$ で測定し、 25 mA に換算してある。いずれの方向の線量率も計算値 (Fig.4) の $1/2$ 以下の値になっているが、これは X 線ターゲットの幾何学的な形状にもとづく自己吸収によるものである。また、計算値と同じ勾配の直線で示されており、逆2乗則にもよくのっている。

実際の遮蔽は側壁および天井に関して考えればよいのでこれらの測定値の最大値は遮蔽計算の際の基本的数値として取扱うことができる。したがって以後の計算では、理論計算値の $1/2$ の値を採用し

$$I(x=100 \text{ cm}) = 1.8 \times 10^4 \text{ [R/h]} \quad (7)$$

とする。

2.5.2 遮蔽用コンクリートの厚さの決定

a) 遮蔽に関する基礎データ

いま Fig.7 のような配置を考え、遮蔽壁の外側での X 線量を I として計算すると、

$$I = \frac{I_1 B e^{-\mu_0 \rho x}}{(x_0 + x)^2} \times 10^4 \quad (8)$$

であらわされる。ここで I_1 は、遮蔽材のない場合の線源から 100 cm のところでの線量率である。 (8) 式の μ_0 はコンクリートに対する X 線の質量吸収係数であり、 B は build up factor である。物質を通る放射線の吸収をあらわす指数法則は、遮蔽体に狭い平行な放射線束を通した場合に成立する。つまり物質の中で光子が 1 回衝突して散乱されるとそれは平行線束から取り除かれ検出器には到達しないと考えるのである。同じ理由で放射線が狭い平行線束ではない場合でも薄い遮蔽体では指数法則の式がよい近似を示す。しかし、今考えている遮蔽は平行線束についてではなく、また遮蔽体もかなり厚くなることが考えられる。このことは物質中で散乱された放射線は平行線束から取り除かれたことにはならないので指数法則から計算した照射線量率は実際の値より低い値を示すことになる。これを補正するのが build up factor B である。⁶⁾ B は放射線のエネルギー、線束の広がり、通過した物質の厚さなどに関係する。 B を理論的に求めることはきわめて困難であるが、だいたい、

$$\begin{aligned} \mu x < 1 \text{ のときは } B &\approx 1 \\ \mu x > 1 \text{ のときは } B &\approx \mu x \end{aligned} \quad (9)$$

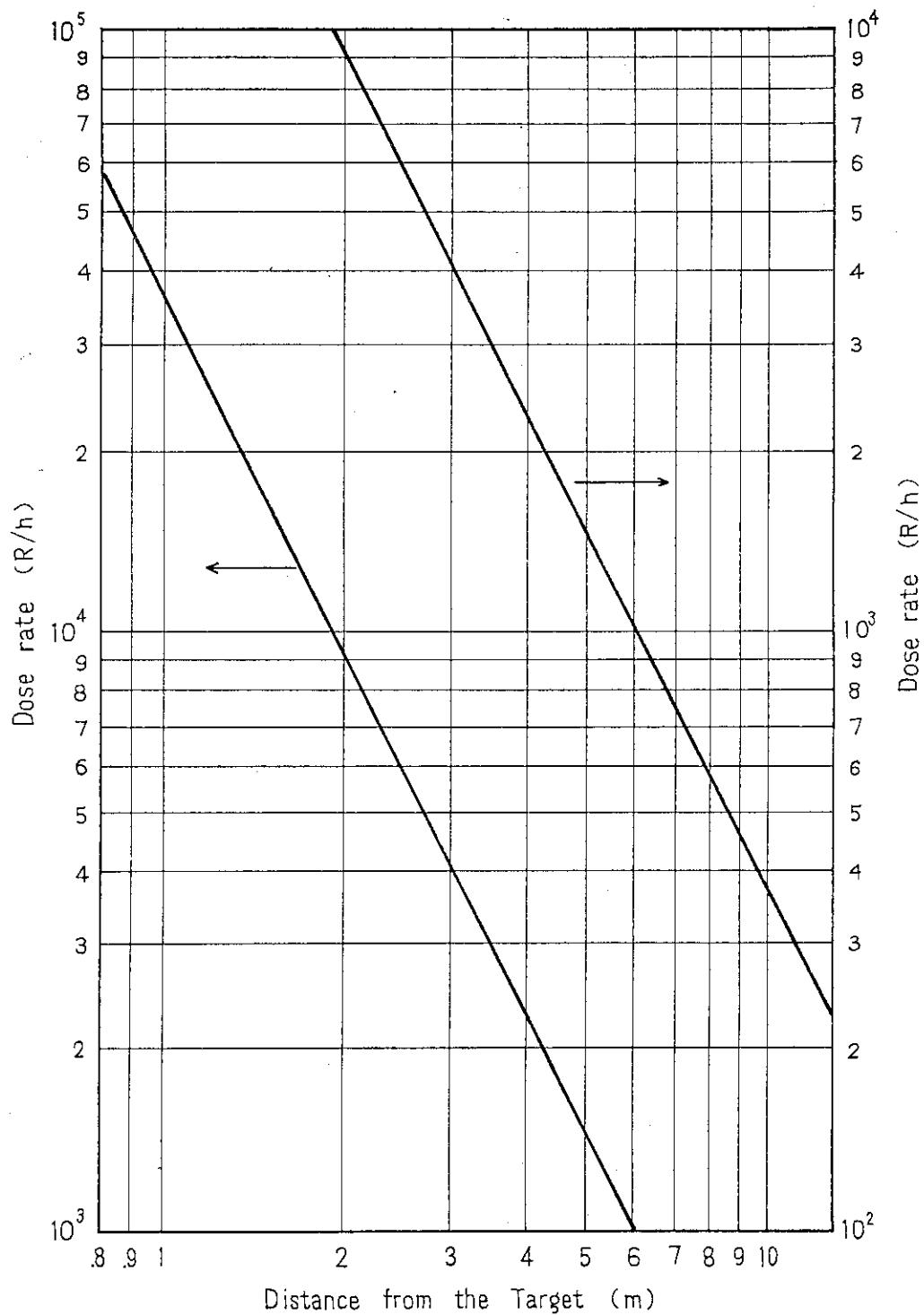


Fig. 4 Aerial dose rate in the irradiation room vs. distance from Fe-target (the calculated value for the accelerator operated at 800 keV and 25 mA).

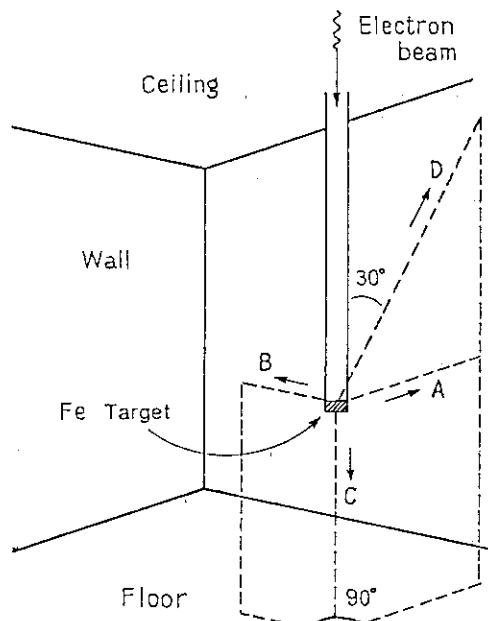


Fig. 5 Geometrical configuration of the dose rate measurements.

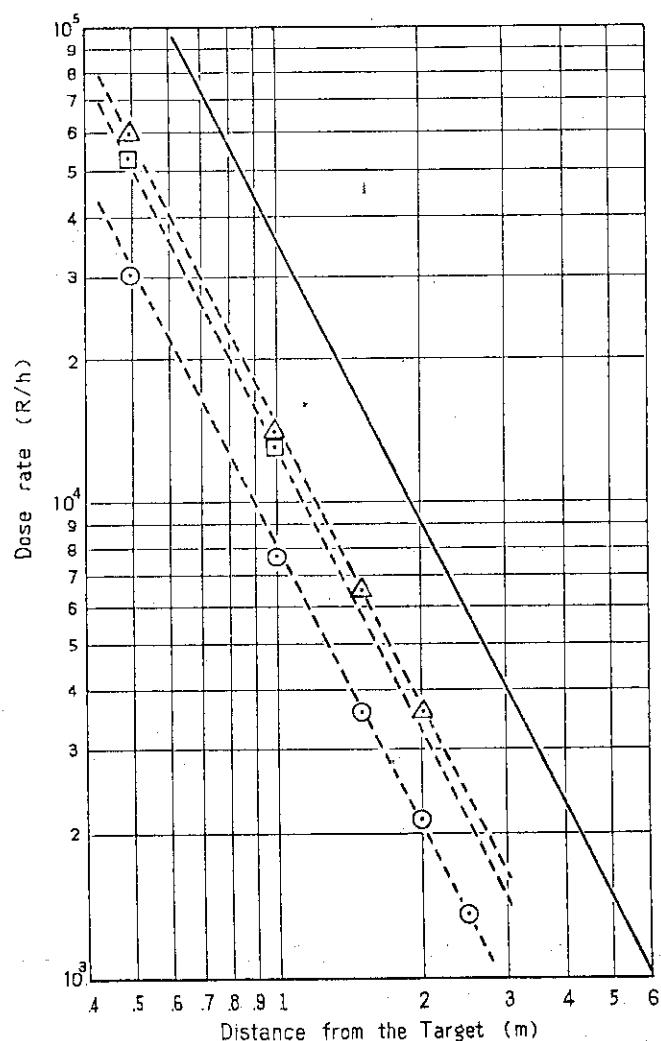


Fig. 6 Aerial dose rate vs. distance from Fe-target. The dose rates were reduced to 25 mA from the measured ones at 800 keV and 50 μ A. Δ : direction A and B, \square : direction C, and \circ : direction D. Solid line is taken from Fig.4.

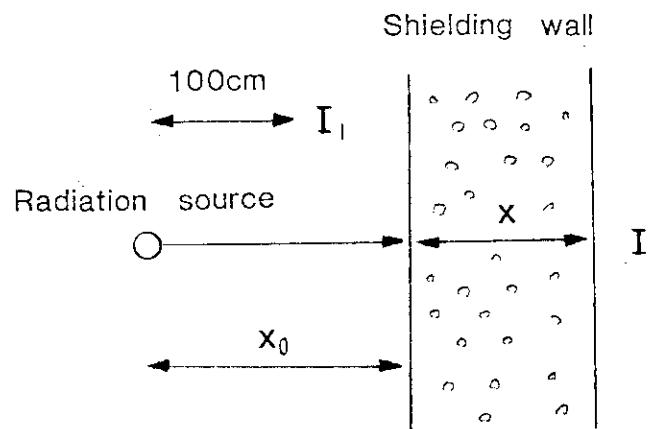


Fig. 7 Geometrical configuration of the radiation source and shielding wall for the calculation.

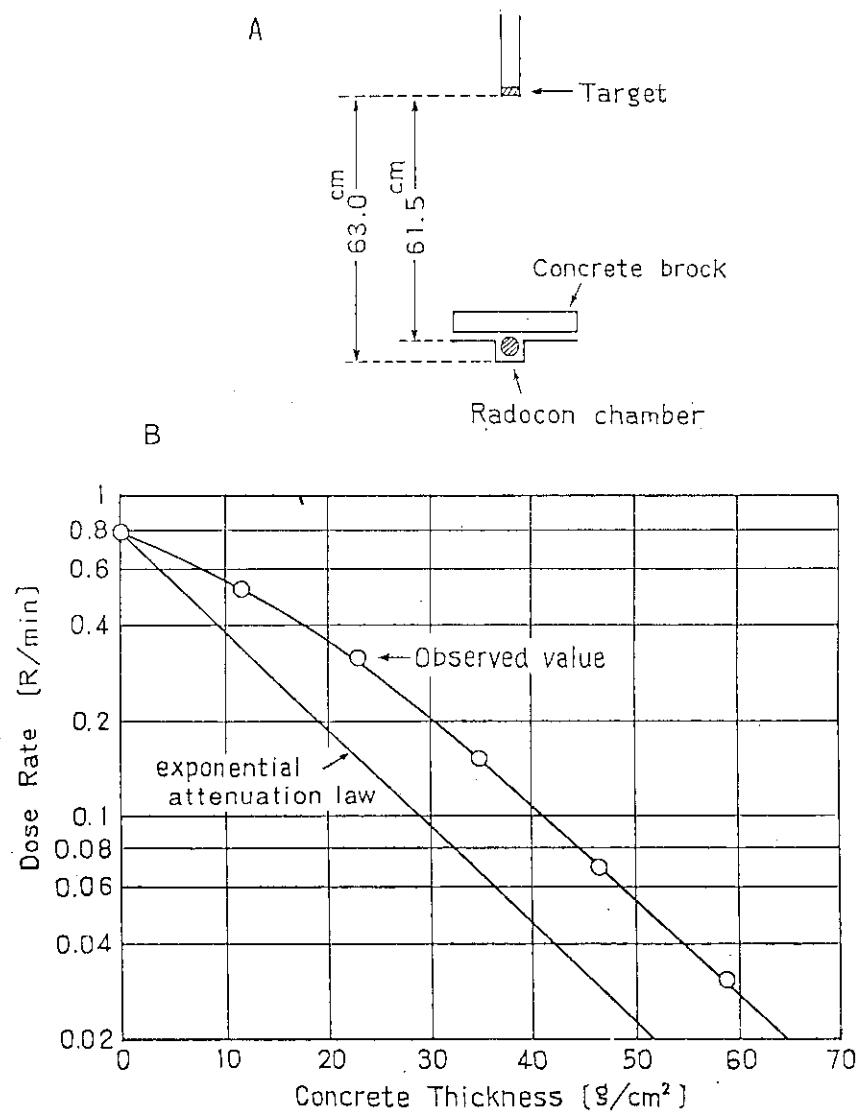


Fig. 8 Measuring configuration (A) and dose rate vs. concrete thickness observed and calculated by the exponential decay law (B).

とされているが具体的なデータはない。

こゝでは実験により、Bの値を決定することにした。そこでまずBを決定するために Fig. 8Aのような配置で、30 cm × 30 cm × 5.4 cm のコンクリート板^{*}での 800 KeV の制動輻射 X 線の透過実験を行った。この試料の平均密度は 2.18 g/cm³ であるが、厚さの単位を ρ_x (g/cm²) と規格化してあらわすので一般化して差支えない。実験結果を Fig. 8B に示す。図で指數減衰則は 800 KeV の X 線に対する μ_0 の値⁷⁾

$$\mu_0 = 7.1 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g} \quad (10)$$

を用いて計算した。 μ_0 については、発生する X 線が最大エネルギー 800 KeV のある分布をもった形をしているので 800 KeV のそれをそのまま用いるのは問題がある。しかし、計算を行うにあたり、X 線のエネルギーについてはスペクトルの各エネルギー成分について減衰係数を用いて計算することが必要であるが非常に複雑になるのと、遮蔽の観点からはこのまゝでも安全サイドに効いてくるので(10)式を用いることにした。

(8)式から明らかなように測定値と指數則値との比が build up factor B を与える。そして、これは、800 KeV の制動輻射 X 線に対して

$$B = 1.8 (1 - e^{-0.0328\rho_x}) + 1 \quad (11)$$

の形であらわされることがわかった。こゝで B の飽和値は 2.8 となる。

ついで μ_0 および B の値の妥当性をチェックする意味で配置の異なった場合の透過実験を行った。すなわち、前の実験では、(8)式の $x_0 + x$ が一定であったが Fig. 9A に示すように x_0 を一定にした。この結果を Fig. 9B に示す。図に示すように測定値と(8)に(10), (11)を代入した式を用いた計算値はよく合っている。したがって、以下の遮蔽計算は、この(8)式をもとに進めることにした。

b) ターゲットから水平方向の側壁コンクリート厚さの計算 (Fig. 3 A の壁 A, B, C 参照)

1) 側壁 A の厚さ

漏洩線量率を $0.2 [\text{mR}/\text{h}] = 2 \times 10^{-4} [\text{R}/\text{h}]$ に抑える。この線量率は、加速器を週 48 時間、定格運転した場合、 $10 [\text{mR}/\text{W}]$ となる値である。また X 線の場合は rem 単位=Röntgen 単位と考えて差支えない⁸⁾ので、この値は一般居住人に対する最大許容線量 10 mrem/W に等しい。しかし、後に述べる理由により、実際にはこの線量率より 1 衡位低い値にする予定である。また研究を目的として加速器を運転する場合、週 48 時間の定格運転を行うことはまず考えられず、稼動時間の減少、出力 800 KeV で常時運転するとは限らない点からも、放射線量は更に 1 衡程度少くなることが予想できるが、安全のため上の値で計算する。すなわち、

$$I_1 = 1.8 \times 10^4 [\text{R}/\text{h}]$$

$$x_0 = 200 [\text{cm}]$$

* 普通コンクリートの組成: ($\text{O}_2 = 0.49$, $\text{Si} = 0.31$, $\text{Ca} = 0.08$, $\text{Al} = 0.045$, $\text{Na} = 0.017$, $\text{K} = 0.019$, $\text{Fe} = 0.01$, H_2 , Mg , $\text{S} < 0.01$)

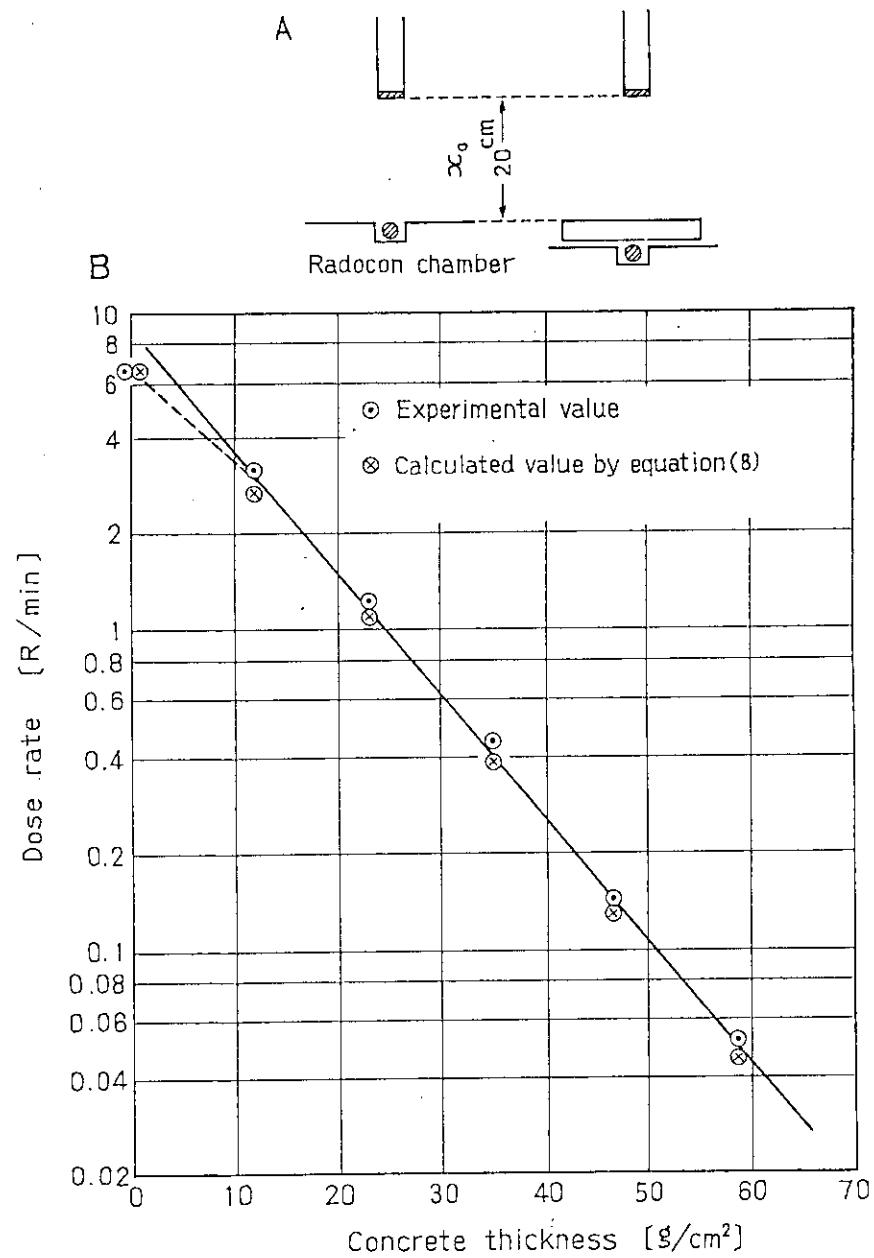


Fig. 9 Measuring configuration (A) and dose rate vs. concrete thickness observed and calculated by eq. (8) (B).

$$B = 2.8$$

を用いる。

この場合、(8)式は、

$$2 \times 10^{-4} = \frac{1.8 \times 10^4}{(x + 200)^2} \times 2.8 \times e^{-7.1 \times 10^{-2} \times 2.3 \times x} \times 10^4$$

となり、これより

$$x = 105 \text{ cm}$$

が得られる。したがって A 側での壁厚は 105 cm とする。

2) 側壁 B の厚さ

$$I_1 = 1.8 \times 10^4 \text{ [R/h]}$$

$$x_0 = 350 \text{ [cm]}$$

$$B = 2.8$$

であるから、1)の場合と同様にして

$$2 \times 10^{-4} = \frac{1.8 \times 10^4}{(x + 350)^2} \times 2.8 \times e^{-7.1 \times 10^{-2} \times 2.3 \times x} \times 10^4$$

これより $x = 100 \text{ cm}$ が得られる。

3) 側壁 C の厚さ

$$I_1 = 1.8 \times 10^4 \text{ [R/h]}$$

$$x_0 = 300 \text{ [cm]}$$

$$B = 2.8$$

ここで $x = 100 \text{ cm}$ として 1)の場合と同様の計算をすると、 $I = 2.6 \times 10^{-4} \text{ [R/h]}$ となり許容線量をわずかに越えるが、Fig. 3 A に示すようにこの区域には直流高圧電源用トランスが置いてあり周囲をフェンスで囲い、常時立入禁止区域にしている。このフェンスの位置での放射線量は、距離 (5m) の逆 2 乗則から単純計算しても約 $6 \times 10^{-5} \text{ R/h}$ (0.06 mR/h) となるので、人が常時立入る場所としての許容線量をはるかに下まわっている。

c) 照射室天井のコンクリート壁厚

一般的には X 線が建屋の天井を透過しても大気中であるのでこの位置での被曝の心配がないため、天井の遮蔽はおろそかにされ易い。しかし、X 線が空中で散乱され地表上に達する、いわゆるスカイシャインによる放射線量の問題があり、今回設置の加速器は、比較的人々に近く、またその人々も加速器棟の天井の高さとほど同程度であるのでスカイシャインの問題を論ずる以前に放射線を屋上外へ出さないという姿勢で天井の壁厚を考えた。

ビーム窓の位置に Fe 製ターゲットを置いた場合、こゝで発生する X 線のうち電子線の進行方向に対して 180° 方向に放出されるものは加速管内を逆に進み、加速管上部より放出されるが、

高線量率加速器の加速管上部は、高電圧供給用の高圧ケーブルの端末部ブッシングでカバーされているので、これの遮蔽効果が大きい。この端末部ブッシングは直径が 80 cm あり、ターゲットとの幾何学的配置から考えて、天井部全域に対して遮蔽効果が期待できる。このブッシング部分は、鉄製フランジ、絶縁油、エポキシ樹脂等で構成されているが、コンクリートの厚さに換算すると約 25 cm に相当する。またターゲットの位置は、床上 1.3 m まで移動可能であるので天井までの距離は 10.7 m となる。今、天井コンクリートの厚さを 70 cm とすると、(8)式において

$$I_1 = 1.8 \times 10^4 \text{ [R/h]}$$

$$x = 70 + 25 \text{ [cm]}$$

$$x_0 = 1070 \text{ [cm]}$$

$$B = 2.8$$

となり、屋上外側の放射線量 I [mR/h] は

$$I = \frac{1.8 \times 10^4}{(70 + 25 + 1070)^2} \times 2.8 \times e^{-7.1 \times 10^{-2} \times 2.3 \times (70+25)} \times 10^4$$

$$= 7 \times 10^{-5} \text{ [R/h]} = 0.07 \text{ [mR/h]}$$

となる。この値は 0.2 [mR/h] の $1/3$ で小さすぎる値であるが、前に述べたように加速器本体部分に多少の遮蔽に対する不確定要素を含んでいるので十分に安全を見込んで天井コンクリートの厚さを 70 cm とすることにした。

2.5.3 迷路での散乱線量

迷路については、制動輻射 X 線の散乱線量の数値計算が困難なので実際の測定を基礎にして遮蔽設計を行うことにした。さいわいなことに、大阪支所のバンデグラーフ加速器照射室の迷路が、今回計画したものと類似しているので、そこで散乱線量の測定を行い設計のための参考とした。Fig.10 にその測定結果を示す。図中の線量はビーム電流 25 mA に換算した値である。

この迷路中の線量分布を Fig.10 の A, B の方向についてプロットするとそれぞれ Fig.11A, B のようになる。バンデグラーフ加速器照射室と同じ迷路であると、ドアの入口では約 100 mR/h になるが、高線量率加速器の照射室の迷路は、A 方向には入口のところまでが 7 m であり、その点まで Fig.11A を外挿すると、そこでの線量は 0.4 R/h となる(●)。また B 方向では同様にドアの位置までが 3 m となっているので、その位置での線量は Fig.11B により推定すると 0.007 R/h である(○)。ここで Fig.11A で外挿した 7 m の位置で同じ傾向の分布を示すと仮定すると、0.007 に対する係数は 0.4 となるから、ドアの入口では約 2.8 mR/h となる。しかしこの値は、入口の約 2 mm の厚さの鉄扉を開けた状態であって、これを閉じると、その位置では約 $1/3$ に減少することが別の実験からわかった。そこで、鉄扉の厚さを 6 mm とすると $(1/3)^3$ に減少し、入口扉の外側では 0.1 mR/h となる。また新しい試みとして Fig.3 A に示されているように扉の横壁に凹みを設け、散乱線をトラップさせる工夫を施した。

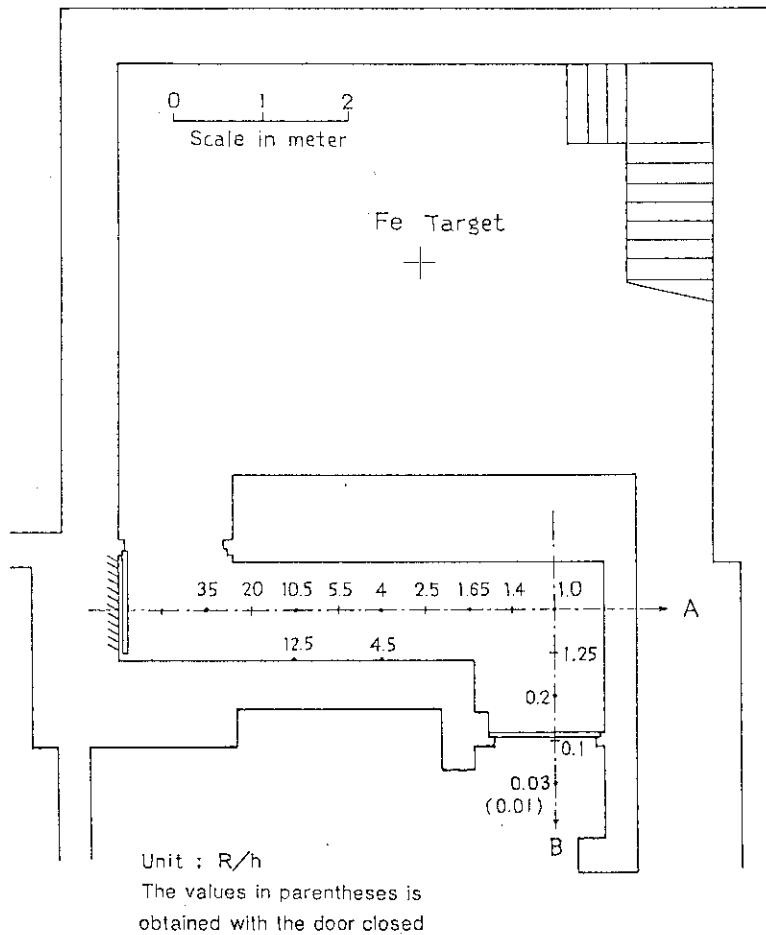


Fig.10 Dose ratedistribution of scattered X-rays in the maze.

Accelarator was operated at 800 keV and $50\mu\text{A}$. The dose rates were reduced to the values at 25 mA.

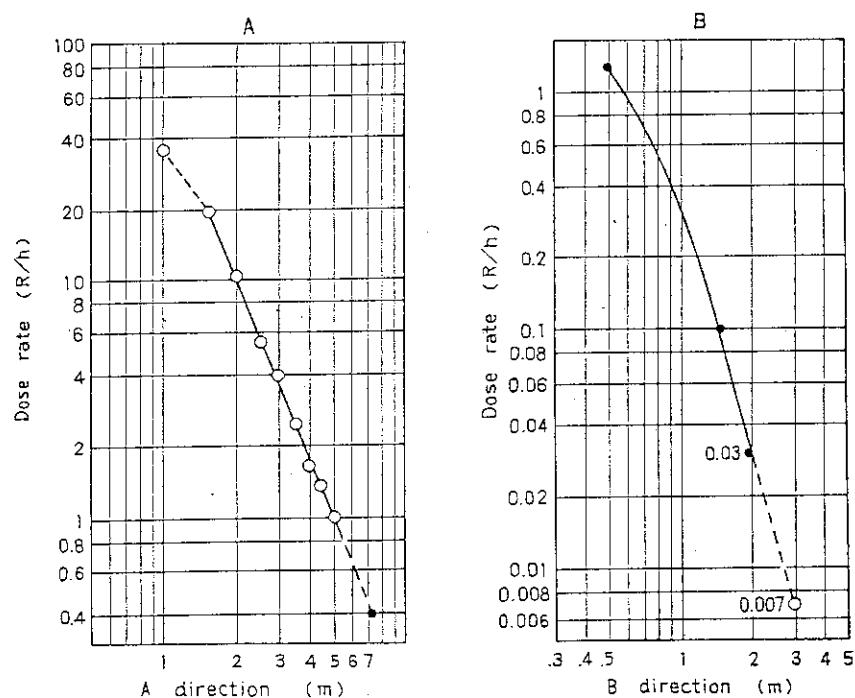


Fig.11 Dose rates of scattered X-rays vs. distance from the wall hatched in Fig.10. (A): direction A, and (B): direction B.

2.5.4 コンベアピットの遮蔽

Fig.3Aに示されるようにコンベアピットは、照射室からモックアップ室へ通じているが、このピットは照射位置を除いては、約7cmのコンクリートの蓋がしてある。この断面をFig.12 A, Bに示すが、ピット内はレールおよびキャリッジの走行用ダクトとしてモックアップ室に通じている。このキャリッジの走行に差支えない場所に固定した遮蔽材を設置し、完璧な遮蔽を期待することは構造上困難であるので、モックアップ室の地下にコンクリートで穴ぐら式のビームキャッチャーをつくり、モックアップ室床上では0.2mR/h以下となるようにする。過去にこのような事例がないと単純な遮蔽計算では推定がむつかしいため、加速器設置後、実際に放射線量を測定しつゝ十分な遮蔽を行うこととした。

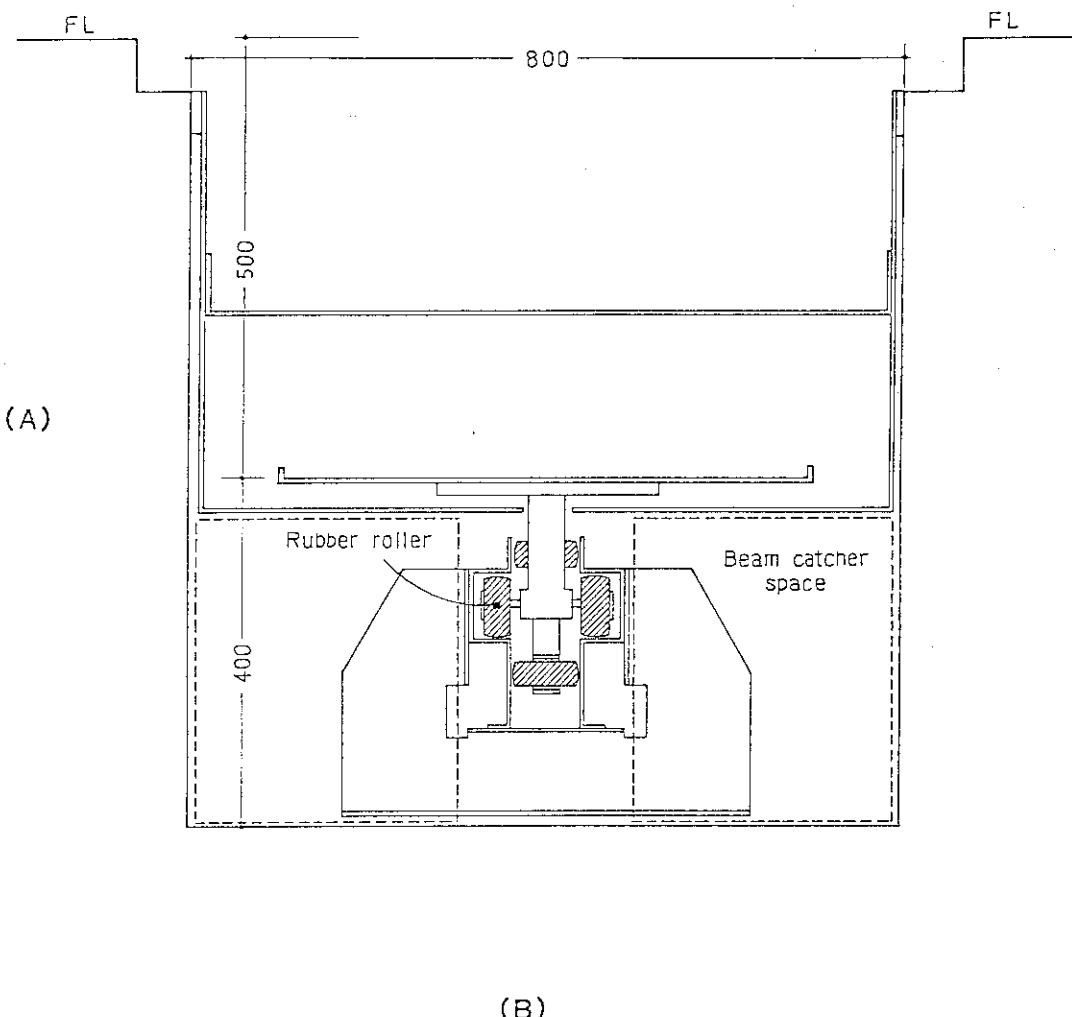


Fig.12 Cross sectional view of the conveyer duct.

- (A): conveyer travelling direction, and
- (B): at the beam position.

3. 放射線量の測定

3.1 照射室遮蔽壁外側における放射線量

加速器照射室の遮蔽壁は、普通コンクリート ($\rho = 2.3 \text{ g/cm}^3$) により 2.5.2 の計算結果に基づいて Fig. 3 A, B に示すような厚さで完成した。加速器を設置した後、定格運転を行い、2 章で述べた各遮蔽計算の対象とした位置での放射線量を実測した。定格出力 800 KeV, 25mA, 走査巾 45 cm で、鉄製ターゲットにより X 線を発生させた。測定器はアロカ製 TGS-113 型 GM 計数管を用いた。

加速器照射室の東西南北の外壁と屋上の全面にわたり 1 m 間隔で測定を行ったが自然計数 (0.02 mR/h) と有意な差は認められなかった。Fig. 13 にターゲットと同レベルの側壁外側 (×印) での放射線量を示す。結果的に見て遮蔽壁はわれわれの遮蔽計算を十分に上まわる遮蔽効果が得られたわけである。予定数値よりさらに一桁小さくなつたが、これは次の理由によるものと考えられる。

1) 制動輻射 X 線の変換効率を鉄について、X 線束をすべて発生 X 線の最高エネルギーとして計算したことによる。Fig. 14 は、W. Miller 達⁹⁾がタンクスチルターゲットに 1.4 MeV の電子線を照射したときの X 線のエネルギーと強度の関係であるが、制動輻射 X 線はエネルギースペクトルをもち 1.4 MeV 以下の X 線である。

そこで、鉄ターゲットに 800 KeV 電子線を照射した際のエネルギースペクトルの正確なデータがなく、たとえ計算できたとしても、その値を正しく遮蔽計算に反映させることは困難であるため、X 線束はすべて最高エネルギー 800 KeV とし、安全サイドの計算を行った。

2) 点状等方線源としたことによる。制動輻射 X 線は、放射性同位元素のような点状等方線源ではなく、衝撃電子線の進行方向に最大値をもつ分布をしている。これを示す 1 例として W. Buechner 達が Beryllium と Gold について行った測定結果 (1.25 ~ 2.35 MeV 電子線)¹⁰⁾ を Fig. 15 にあげた。今回設置の加速器の電子線は垂直下向きに進行するため横方向および上向きの線量は、点状等方線源とした場合よりかなり少くなつた。計算は点状等方線源について行ったので安全サイドに見積られたことになる。実測の結果からは少くとも 1 枝は下まわっていることがわかった。

3.2 照射室入口扉外側における放射線量

遮蔽計算の結果に従い、入口扉は 3 mm の鉄板 2 枚による袋扉としたが、その後、定格運転で鉄ターゲットに電子線を当てた場合、床上 30 cm の位置で最高値 0.2 mR/h を示した。これは少し高すぎるので散乱 X 線に対して 2 半価層程度の鉛板 6 mm 厚を扉全面に内張りして、同じ位置で最高 0.04 [mR/h] に抑えた。

3.3 モックアップ室床上の放射線量

モックアップ室床下には、コンベアピットをとり囲むように普通コンクリート 15 cm 厚のビームキャッチャーを設置したが、モックアップ室床上の放射線量は 2 [mR/h] を示した。このコンクリートの厚さの不足が原因と考えられるがこれ以上の構造上の改良は困難なので、散乱 X 線の 4 半価層程度と考えられる 10 mm 厚さの鉛板を床に敷きつめたところ同じ測定点での放射線量は 0.08 [mR/h] となった。この測定結果は、10 mm 厚の鉛板により放射線量が 1/25 に減少したことを示す。

800 KeV の X 線に対する鉛の半価層が 6.8 mm⁵⁾であることから考えると床下附近の X 線はかなり低エネルギーのスペクトル分布をもっていることがわかる。これは床下のコンクリートの構造が迷路のようになっており、多重散乱の効果が大きくあらわれた結果である。

3.4 照射室内 X 線線量分布の測定

電子加速器の遮蔽の問題は、電子線自体については比較的簡単であるので、ほとんどが制動輻射による X 線の遮蔽の問題に帰せられる。高線量率加速器棟の遮蔽は、照射室外側の放射線量の実測によりほど完璧に近い形で完成した。しかし、この種の低エネルギー電子加速器の遮蔽の問題を取扱う際、本加速器のように加速器自体をかなり広範囲に移動して使用するといった例は殆んどないと考えられる。多様化している研究を効率よく処理することを目的に試作した加速器であるため、前章で示した遮蔽計算も、固定された加速器の場合に比し、かなり細かい部分に十分な配慮がはらわれている。

照射室内の X 線線量分布の測定に対し、さいわい本加速器棟の照射室は、加速器本体を移動するため通常の場合よりもかなり広くとった。そこで、壁の後方散乱の影響をできるだけ少くした照射室内の X 線線量分布図を得るのに適した構造になっている。これらの分布図を得ることは、低エネルギー電子加速器の遮蔽の問題、あるいは X 線の照射を行う際の参考資料として役立つと思われる所以詳細な測定を行うとともに若干の解析を試みた。

3.4.1 X 線発生用ターゲット

本来、X 線の線量分布の測定あるいは遮蔽の問題等を取扱う場合は、線源は点状等方線源であることが望ましく、モデル実験として他の実験との比較や計算値との比較がやり易いといった利点もある。しかしながら、制動輻射 X 線の場合は電子の進行方向に強く放射されるのとターゲットの形状による自己吸収の問題等を含んでいるので遮蔽設計の理想的なモデルにはなりにくい。また本加速器の場合、電子線取出し窓（チタン箔 25 μ 厚）の冷却条件による制約のためスポット照射をしたい場合は、電子電流は 100 μA 以下におさえなければならない。この条件では今回用いる固体電離箱や TLD 線量計の最適測定範囲を下まわることになる。そこで、線量測定のためには少くとも電子電流 1 mA ~ 5 mA での照射が必要になるので電子線を走査することにした。走査巾は 16 cm とするが、この走査巾は現在の加速器の使用条件が殆どこの値に限られているのと、照射室全体の X 線線量分布や遮蔽を考えた場合、ほど点状線源と考え

て差支えない巾である。また、X線発生用ターゲットとしては、電子ビーム用シャッターとして常時用いているステンレス板（SUS 304、重量組成比 Fe 70 %, Ni 10 %, Cr 19 %, C 0.08 %, 実効原子番号 = 25.56）を使用した。形状は Fig.16 に示すような箱型で、電子線スキャナ一窓下 30 mm に位置している。ステンレス板の厚さは 1 mm であるため 800 KeV の電子線の飛程（Fe で約 $0.3 \text{ g/cm}^2 \approx 0.4 \text{ mm}$ ）を十分にカバーしている。このビームシャッターは、電子線照射の際の発熱を防ぐため、ステンレス板で箱型に組立てられた内部に冷却水が流れるようになっている。このため前方方向の X 線は水 20 mm およびステンレス裏板 0.8 mm により若干吸収される。

3.4.2 放射線量測定器

1) N-P 型シリコン半導体線量計（応用技研社製）¹¹⁾

加速器中心から 1 m 以内の高線量率領域での測定に使用した。シリコン半導体（太陽電池の照射による短絡電流を利用したもの）に X, γ 線を照射すると、イオン対が生成される。このイオン対の生成量と線量とは比例関係にあることを利用したもので、ラドコンなどの空洞電離箱（気体）に比べ、感度が高く、しかも小型である。又温度依存性が $0.3\%/\text{ }^\circ\text{C}$ と小さく、1 個のプローブで $10^3 \sim 10^7 \text{ R/h}$ の範囲をカバー出来る特徴がある。Fig.17 にシリコン線量計プローブとその測定回路を示す。検出素子は、約 1 cm^2 の太陽電池であり、アルミ製のキャップで保護されている。出力電流は、反転増巾型の FET 演算増巾器(a)を用いて、電圧に変換してさらに線量率に換算した数値で読取る。

2) 热蛍光線量計（BeO, UD-170A, 松下電器社製）

低線量率領域での測定に使用した。多くの無機固体は放射線に曝された後に加熱すると熱ルミネッセンスを発生する。この熱ルミネッセンスが、放射線照射線量に比例する事を利用したもので感度が非常に高い。

BeO は実効原子番号が 7.6 と生体組織（7.4）に近いので生体等価型素子として利用されている。これは $10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \phi$ のガラス管に、BeO 粉末を封入したものであり、アニール（加熱）することにより何回でも測定に使用できる。

3) 加速管下部のターゲット（ビームシャッター）の中心から、1 m 以内の高線量率領域における測定では、Fig.18 に示すように、半導体線量計プローブをコンベアに取付けて移動させながら連続的に線量を記録した。Fig.19 に測定範囲を模式的に示す。Y 方向は 10 cm 間隔でコンベアを移動させた。Z 方向はコンベアを床上において加速器を 10 cm 間隔で移動した。Fig.19 より外側の低線量領域では、まず床面の線量は、前もって $450\text{ }^\circ\text{C}$ で焼成した TLD 素子を床面に接着テープで固定して、また床面より 1 m より 2 m の高さの空間の線量は、壁から壁に張った針金に接着テープでそれぞれ 1 m 間隔で取付けた TLD 素子の熱ルミネッセンスから測定した。

Photo 1 (a),(b),(c),(d) は加速器電子線走査部を東、西、南、北より見た場合の写真である。

3.4.3 後方散乱の影響について

照射室内でX線の線量分布を測定する際、注意しなければならないのは壁や床からの散乱線の影響である。今までに報告されているデータや計算値は、殆んど理想的な無限大媒質中でのものであったり、線源から放出される一次線が放射性同位元素のような単一エネルギーのものであったりするので、壁や床のある照射室内での、しかもエネルギースペクトルをもったX線の線量率分布を推定する場合には参考にならない。

そこでまず、制動輻射X線に関して照射室内のコンクリート境界面での後方散乱の特性を調べた。一般にX、 γ 線の後方散乱率のことをアルベドと呼んでいる。Fig.20にアルベド測定のための概念図を示す。電子線は垂直下向きにターゲットに照射される。ここで、ターゲットと測定器間の距離yを一定(30 cm)とし、測定器とコンクリート床面の距離x(cm)を変化させて線量率の測定を行った結果をFig.21に示す。図から明らかなように測定器を床に密着させた場合は、30 cm以上離した場合に比べ約25%程度高い値を示すことがわかる。30 cm以上の距離の所では、ほど一定値に落着くが、これは⁶⁰Co(平均1.25 MeV)や¹⁹²Ir(0.4 MeV)ガンマ線のコンクリートに対するアルベドの値の測定結果³⁾ともほぼ一致妥当な結果であると考えられる。このような成果から、今後の実験では、ターゲットは床から1.4 mの位置に設置する。

3.4.4 照射室内X線線量率分布

Fig.22～Fig.32はFig.19に示す各測定位置(Z=5～100, Y=0～100)における線量率をビーム中心からの距離(X)の関数として示したもので、レコーダーチャートを片対数グラフに写しかえたものである。加速器条件は、加速電圧600 KeV、電子電流1 mAである。これらの図から10 cm毎の線量率を読み取り、線量率分布図を得るための電子計算機への入力値とした。

Table 1に各測定位置(ターゲットからZ=5～100 cm下)における線量率(R/h)をまとめ示す。

Fig.33(A),(B)～Fig.43(A),(B)はターゲットからの各垂直距離(Z)における水平面上(X-Y)の、ターゲットを中心とした等線量分布図(A)とその鳥かん図である。これらの図は電子計算機FACOM-380によりComputer code ARGUS-V4を用いて作図させたものである。

Fig.44(A),(B)およびFig.45(A),(B)は、それぞれターゲットを通る垂直軸を中心とした垂直平面内の等線量分布曲線をビーム走査方向(X-Z)とこれに直角方向(Y-Z)について示したものであり、(A)は平面上、(B)は鳥かん図である。

Fig.44, Fig.45より角度分布を求めた。

角度分布に関しては、田中等がMonte Carlo Program ETRAN 15 Computer Codeによる計算結果を報告している¹²⁾のでそれらとの比較検討を行ったが、その結果は別報¹³⁾にゆずりたい。

Fig.46(A),(B),(C)は、TLD法により測定した照射室内全体の等線量率分布曲線である。照射条件は加速電圧600 KeV、電子電流1 mA、照射時間5 minである。図に示した線量率は電子電流25 mAに換算したものでR/h単位で表示した。ターゲットは照射室の中心、床上1 mの位置に固定した。ターゲットに照射される電子ビームの面積は、約3×16 cmでスキャニングは南北方向である。Fig.46(A)は床面における等線量率分布曲線である。ターゲット真下1 mの位置での線量率は 3.07×10^4 R/hであり分布は同心円状になっている。Fig.46(B)は床上1 mの平

面上、すなわちターゲットと同レベル、電子線の入射方向に対して 90° 方向の分布を示している。この結果からX線は、電子線スキャニング方向に対して直角の向きに強く分布していることがわかる。すなわち、(A)の同心円状に対し、橢円状になっている。

Fig.46(C)は床上2mの平面上の分布を示す。

等線量分布曲線は非常に乱れた形を示しているが、これは加速器付属の金属枠、排気処理用ダクト、イオンポンプ等によるX線の散乱、吸収が原因してあらわれたものである。

3.4.5 迷路における放射線量率

照射室への出入りをするための入口扉は、遮蔽の働きを持たせる必要があるが開閉ができるだけ簡便に行えるよう重量を軽くしたい。そのためには入口扉の部分に大量のX線がこないよう迷路を設ける必要がある。迷路の設計に関しては、前章で述べたようにバンデグラーフ加速器照射室の例を参考に計算を行った。計画通りの遮蔽効果が得られているかどうかを放射線量の測定結果から検討してみた。Fig.47(A)に800KeV, 25mA, Fig.47(B)に600KeV, 25mAでの運転時における迷路内のX線線量率分布を示す。測定には熱蛍光線量計素子UD-170Aを用い、照射条件は各電圧時とも電子電流1mA, 5minの積算線量を25mA, での線量率(R/h)に換算して示してある。迷路内の東側と西側について測定し、両対数グラフに示したのがFig.48である。迷路内に入ってくる散乱線には北壁での一回散乱線以外に、照射室内や、迷路内の二回散乱線、三回散乱線も含まれているが、X線は通常一回の散乱で3桁程度減弱するので、実用上は北壁での一回散乱線のみを考えればよい。Fig.48で明らかなように、東側、西側とともに減衰の傾向としてはよく一致しており、距離の逆二乗則にも合致している。迷路設計の際に実測したバンデグラーフ加速器棟迷路の線量分布を加速器条件800KeV, 25mA換算の値として鎖線で示したが、放射線量、減衰の傾向などは非常によく一致している。また照射室入口扉の外側では0.04mR/hになっており、設計時の放射線量を下まわっている。バンデグラーフ加速器の迷路の方がやゝ放射線量が高いのは、ターゲットが迷路に近いためである。さらに高線量率加速器が改善されている点はFig.47(A), (B)に示すように入口扉の横に散乱X線用のトラップを設けたことである。このトラップは、バンデグラーフ加速器の迷路にはなかったが、測定数値から明らかなように入口扉の位置の放射線量を著しく減少させる役目を果している。

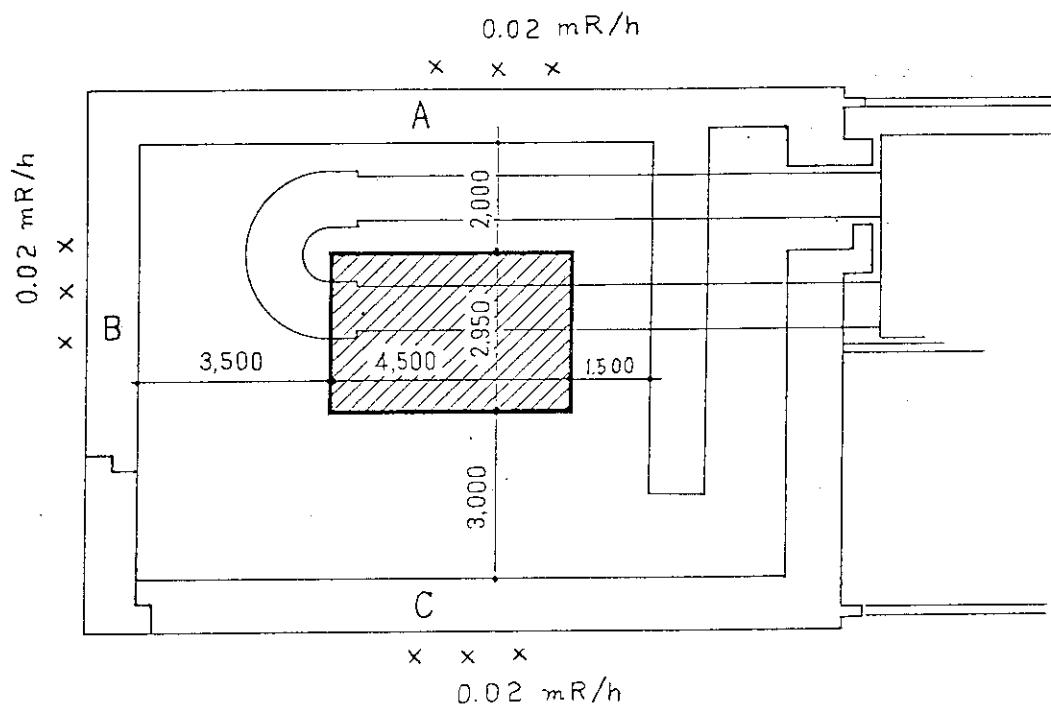


Fig.13 Dose rate at the outside of the accelerator building.
Position of Fe target is 1 m above floor level and the
measurement at 1 m above ground level.

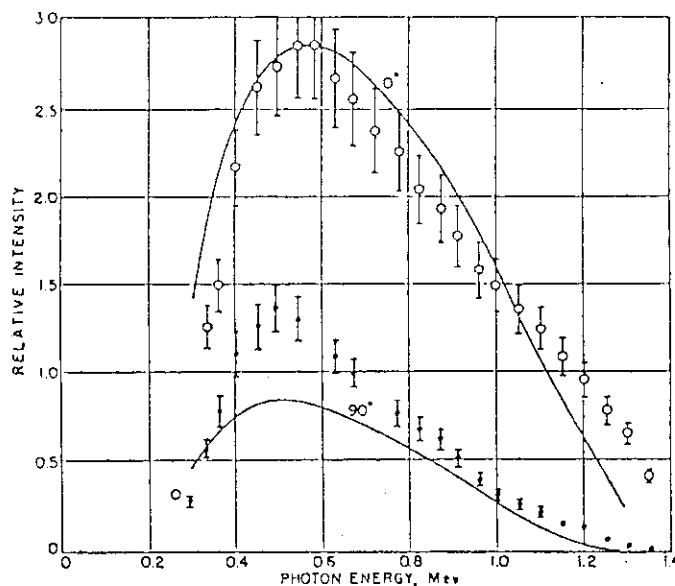


FIG. 14 Relative spectral intensities at 0° and 90° for 1.4-Mev electrons incident on a thick-tungsten target. The solid curves are obtained from theoretical estimates that include electron scattering effects and photon absorption in the materials surrounding the target. The experimental values have been normalized and are shown by the open (zero degrees) and closed (90 degrees) circles. To obtain absolute spectral intensities in Mev per steradian per Mev per incident electron, the ordinate should be multiplied by 10^{-3} for the theoretical curves and by 2.1×10^{-3} for the experimental points. (ref.9)

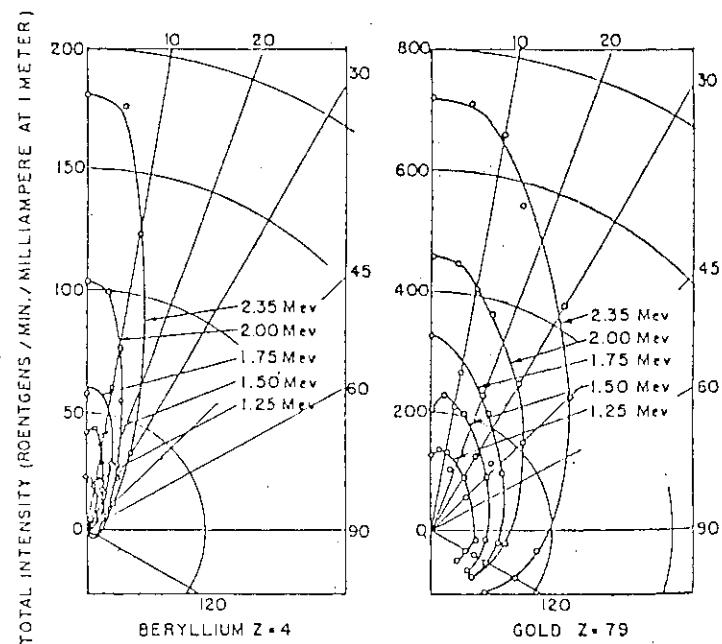


FIG. 15 Angular dependence of the thick-target bremsstrahlung intensity integrated over photon energy for 1.25- to 2.35-Mev electrons. (ref.10)

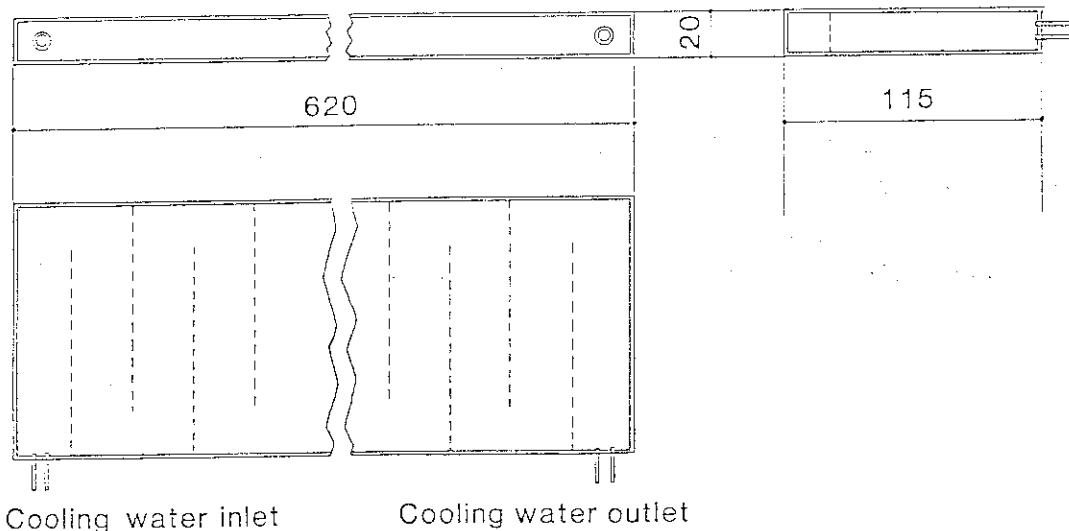


Fig.16 Construction of Fe target (X-ray generator -SUS 304)

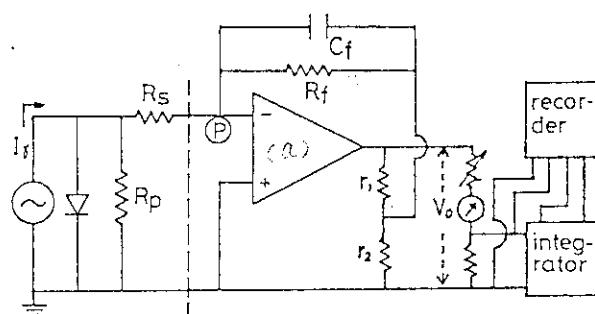
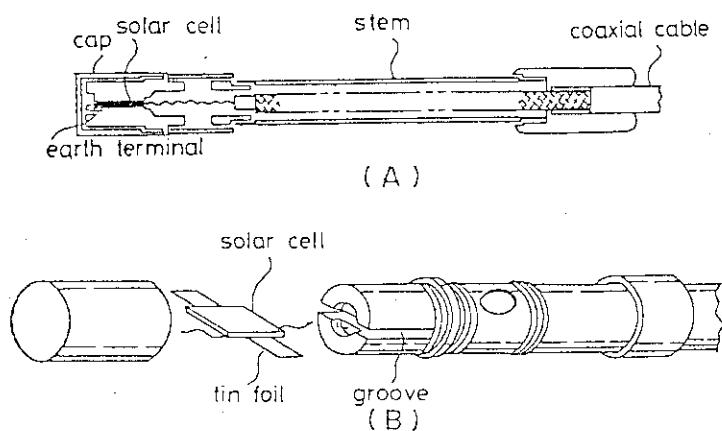


Fig.17 Probe of the silicon solid state dose meter and measuring circuit. (A): cross sectional view of the probe, (B): details of the cell part.

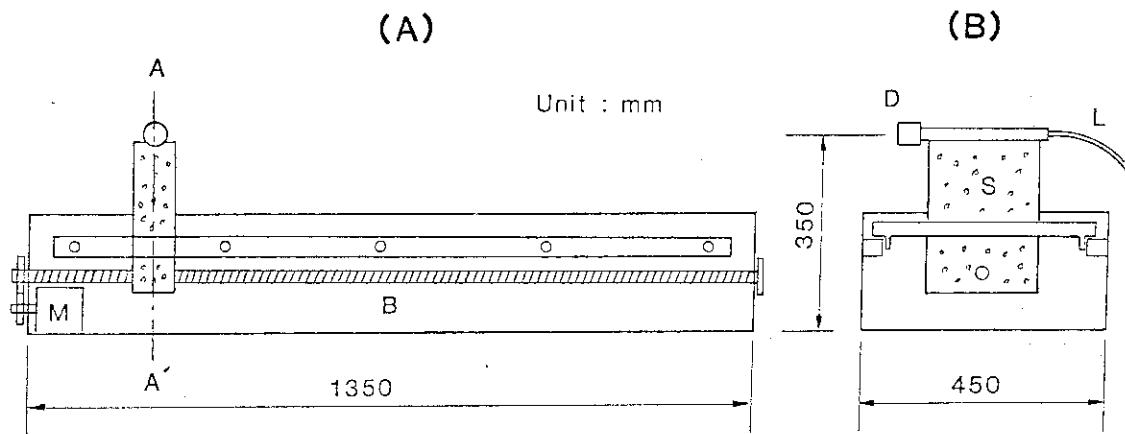


Fig.18 Conveyer for the dose distribution measurements using silicon solid state detector. (A): side view, and (B): cross section at A - A'. D: probe of the detector, L: lead wire, S: form styrol insulator, M: drive motor, and B: gear rod.

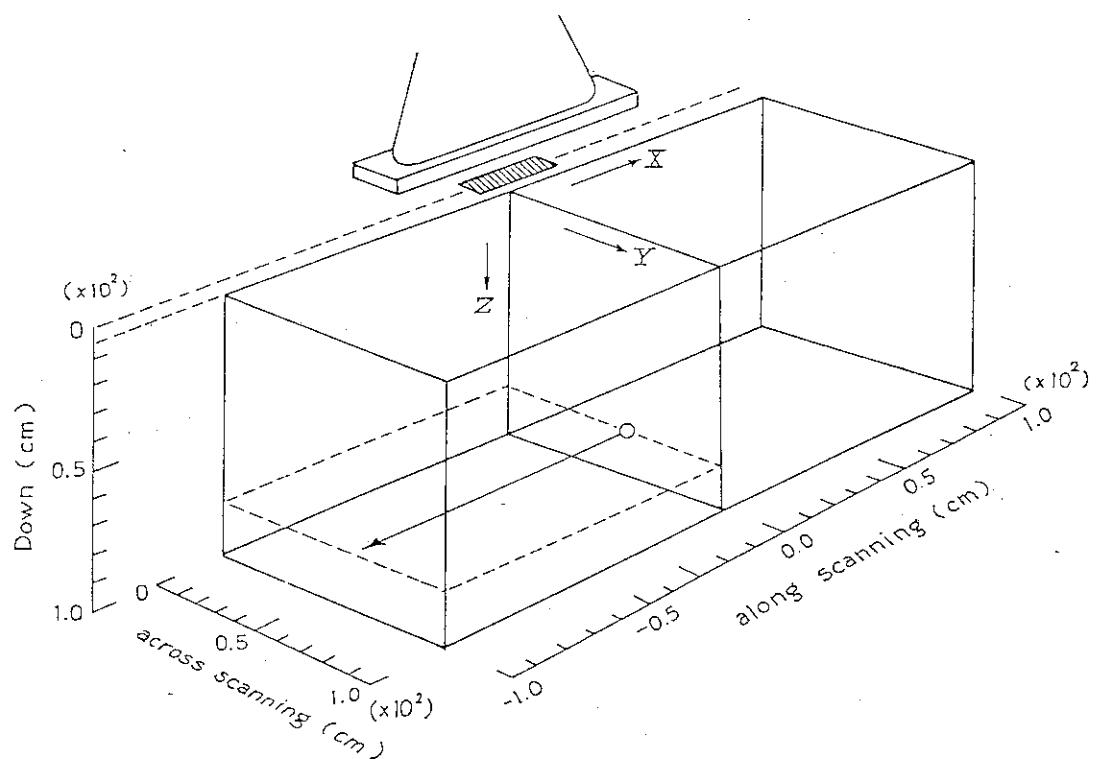


Fig.19 Coordinate system for dose measurement using the detector.

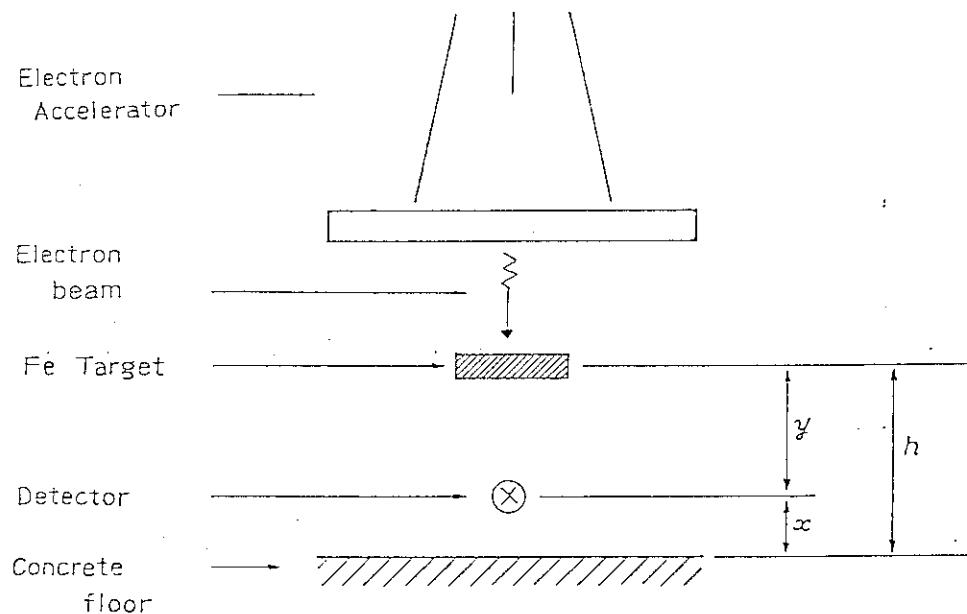


Fig.20 Geometrical configuration for albedo measurements.

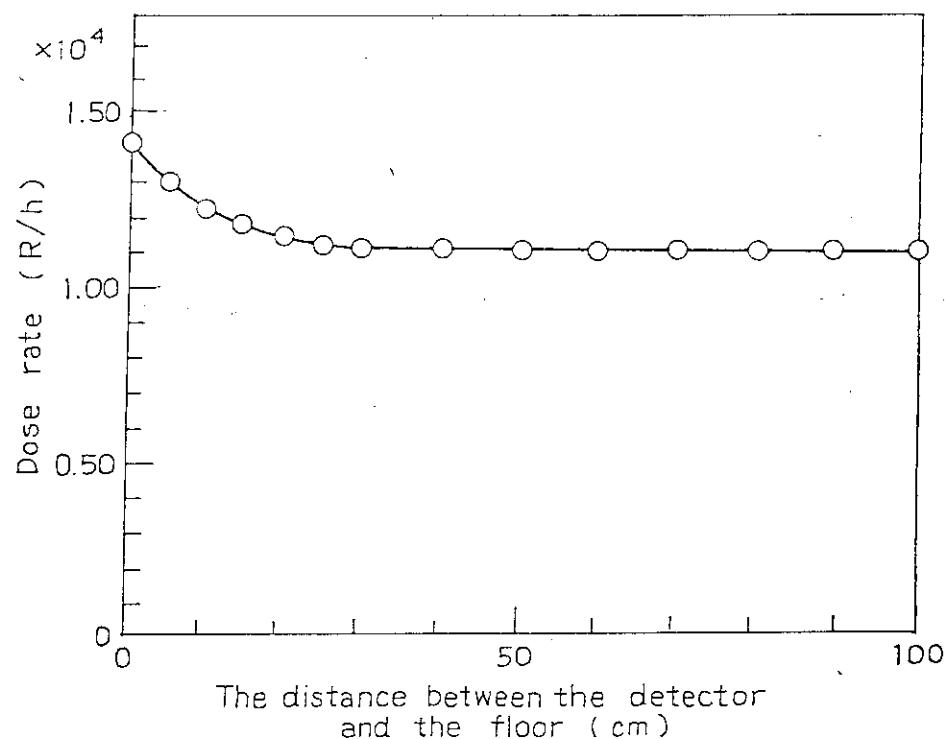
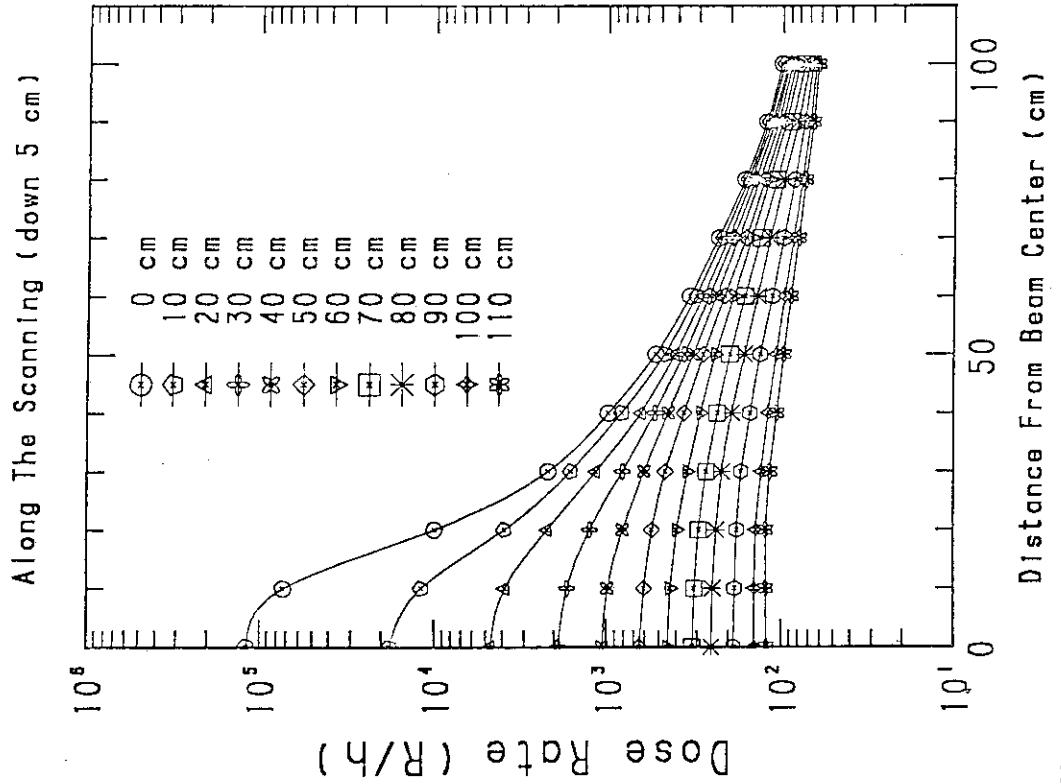


Fig.21 Dose rate vs. distance from the floor.

Graph No. 1



Graph No. 2

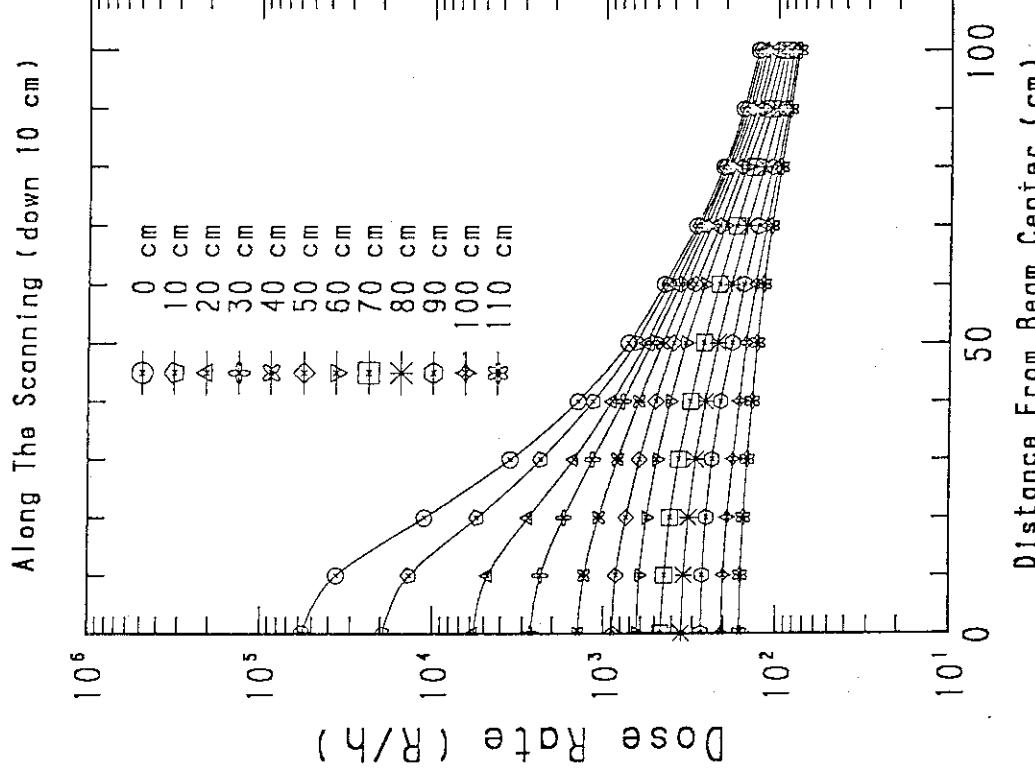
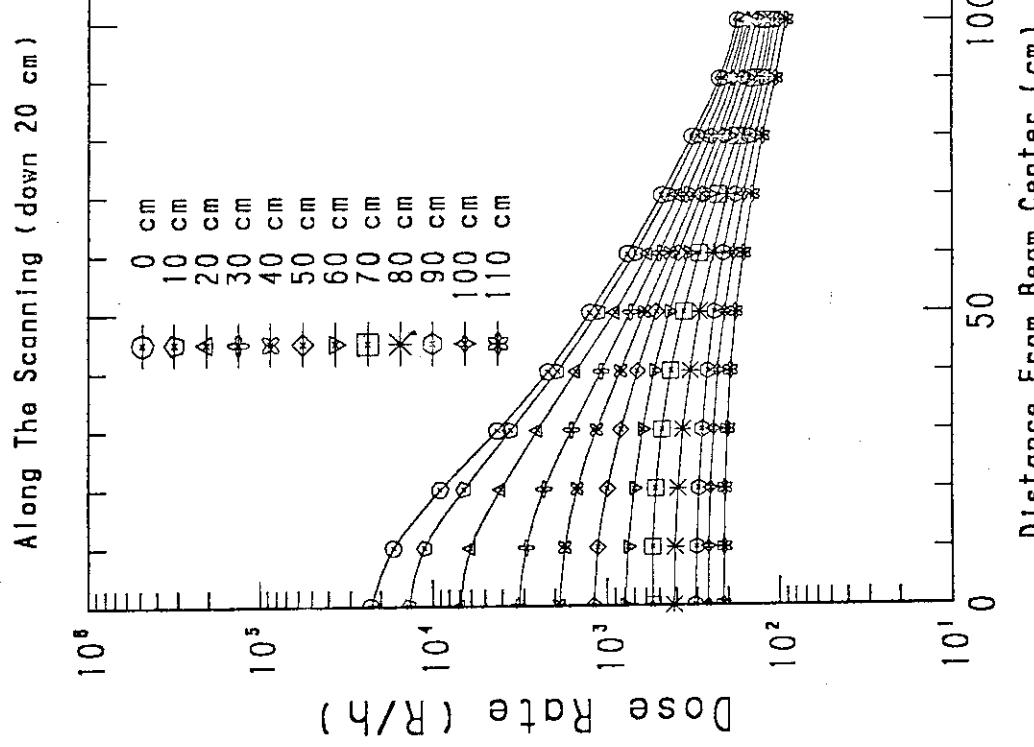


Fig. 22 Dose rate distribution curves of vertical plane along the beam direction (X). Symbols correspond to the distance of direction Y from beam axis (Accelerator: 600keV, 1mA).
No.1: 5 cm under the target ($z = 5$)

Fig. 23

Dose rate distribution curves of vertical plane along the beam direction (X). Symbols correspond to the distance of direction Y from beam axis.
No.2: 10 cm under the target ($z = 10$)

Graph No. 3



Graph No. 4

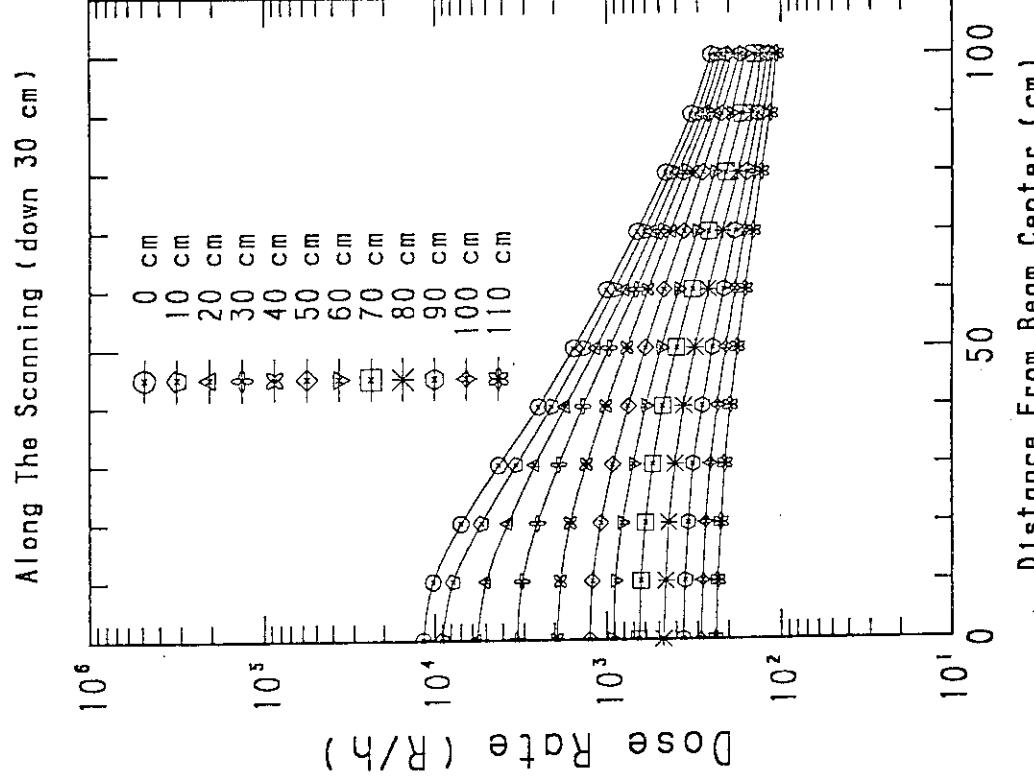


Fig.25 Dose rate distribution curves of vertical plane along the beam direction (y). Symbols correspond to the distance of direction y from beam axis.
No.4: 30 cm under the target ($z = 30$)

Fig.24 Dose rate distribution curves of vertical plane along the beam direction (x). Symbols correspond to the distance of direction x from beam axis.
No.3: 20 cm under the target ($z = 20$)

Graph No. 5

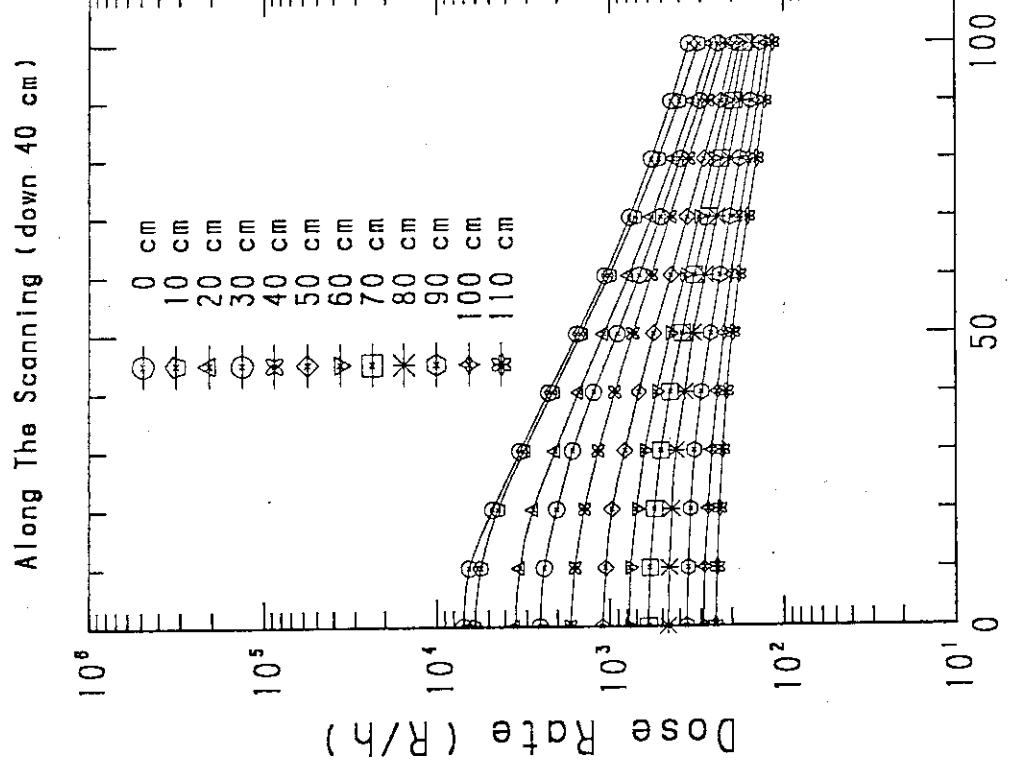


Fig. 26 Dose rate distribution curves of vertical plane along the beam direction (x). Symbols correspond to the distance of direction Y from beam axis.
No. 5: 40 cm under the target ($z = 40$)

Graph No. 6

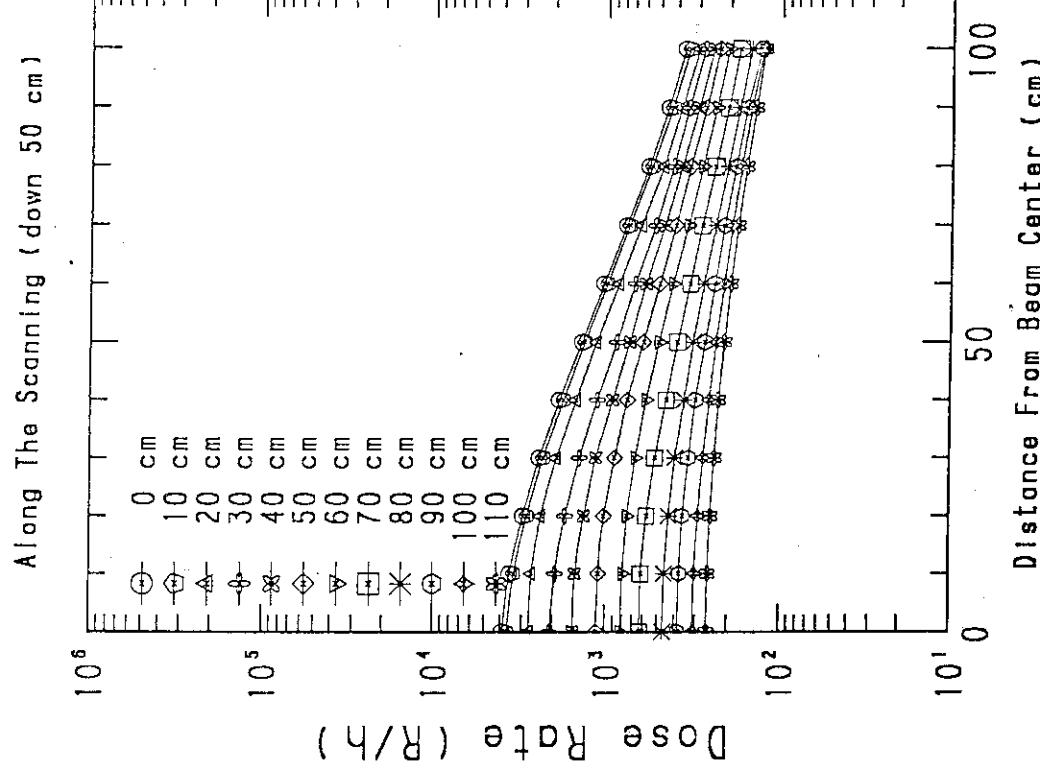
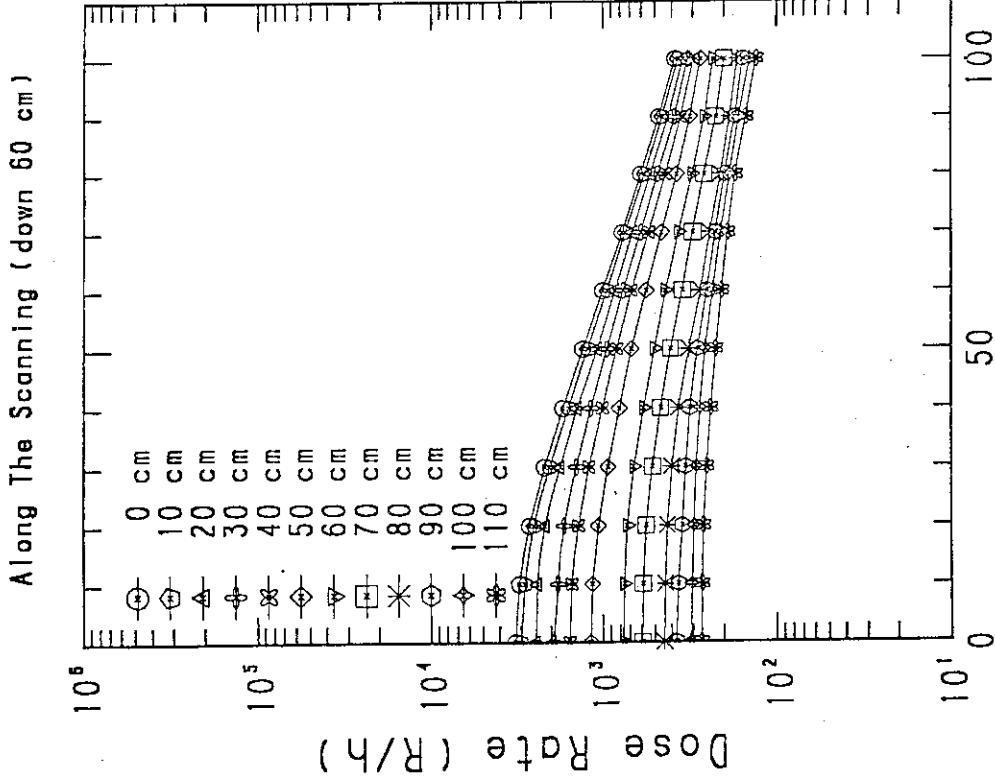


Fig. 27 Dose rate distribution curves of vertical plane along the beam direction (x). Symbols correspond to the distance of direction Y from beam axis.
No. 6: 50 cm under the target ($z = 50$)

Graph No. 7



Graph No. 8

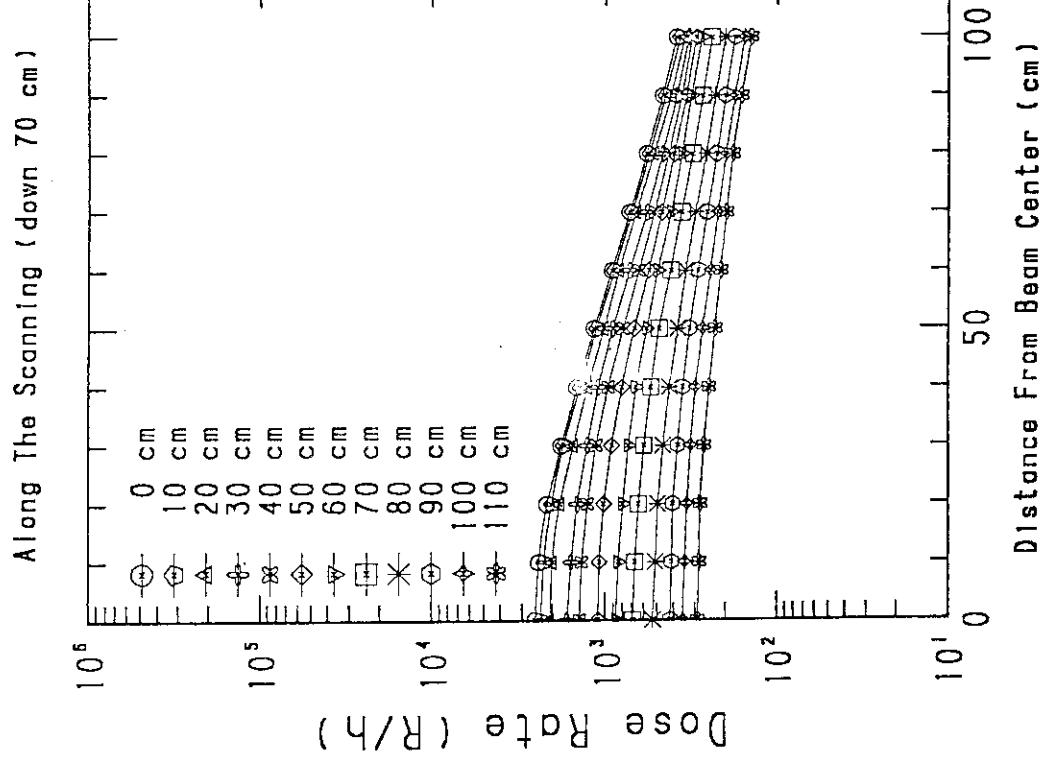


Fig.28 Dose rate distribution curves of vertical plane along the beam direction (X). Symbols correspond to the distance of direction Y from beam axis.

No.7: 60 cm under the target ($z = 60$)

Fig.29

Dose rate distribution curves of vertical plane along the beam direction (X). Symbols correspond to the distance of direction Y from beam axis.
No.8: 70 cm under the target ($z = 70$)

Graph No. 9

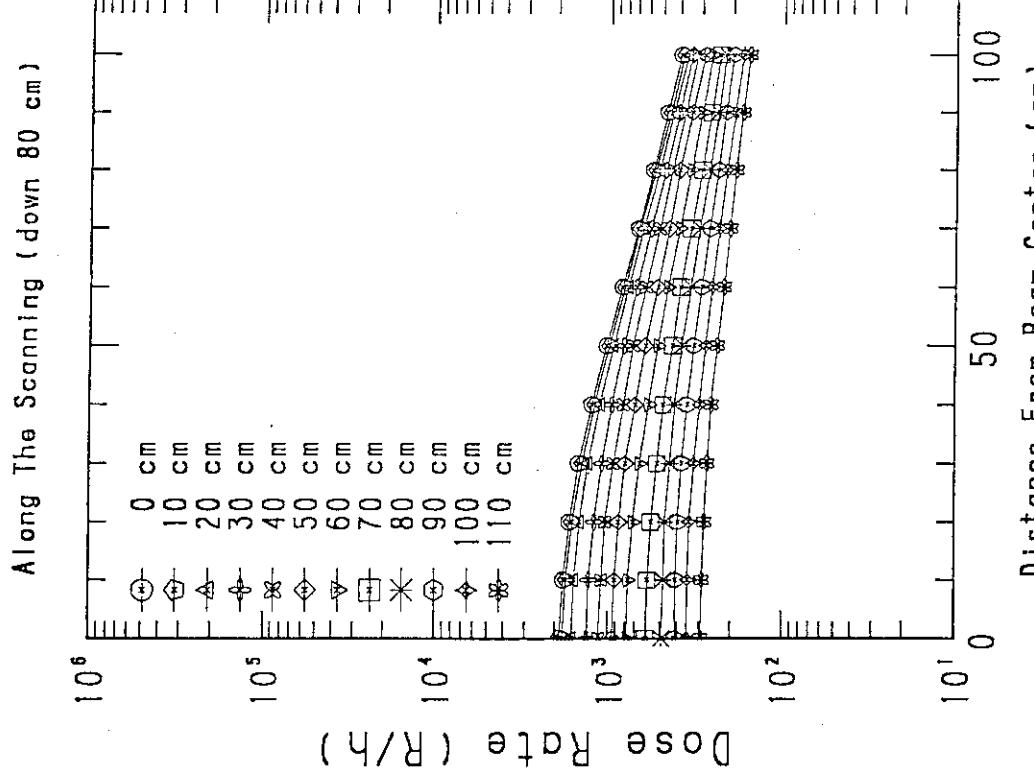


Fig. 30 Dose rate distribution curves of vertical plane along the beam direction (Y). Symbols correspond to the distance of direction Y from beam axis.
No. 9: 80 cm under the target ($Z = 80$)

Graph No. 10

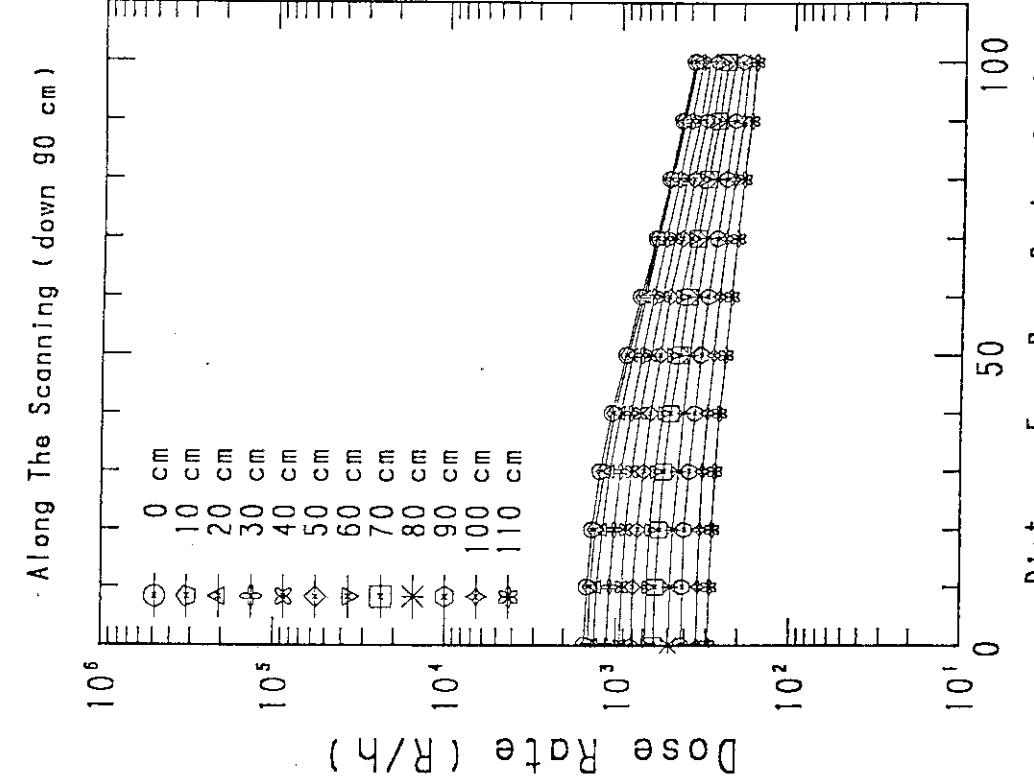


Fig. 31 Dose rate distribution curves of vertical plane along the beam direction (Y). Symbols correspond to the distance of direction Y from beam axis.
No. 10: 90 cm under the target ($Z = 90$)

Graph No. 11

Along The Scanning (down 100 cm)

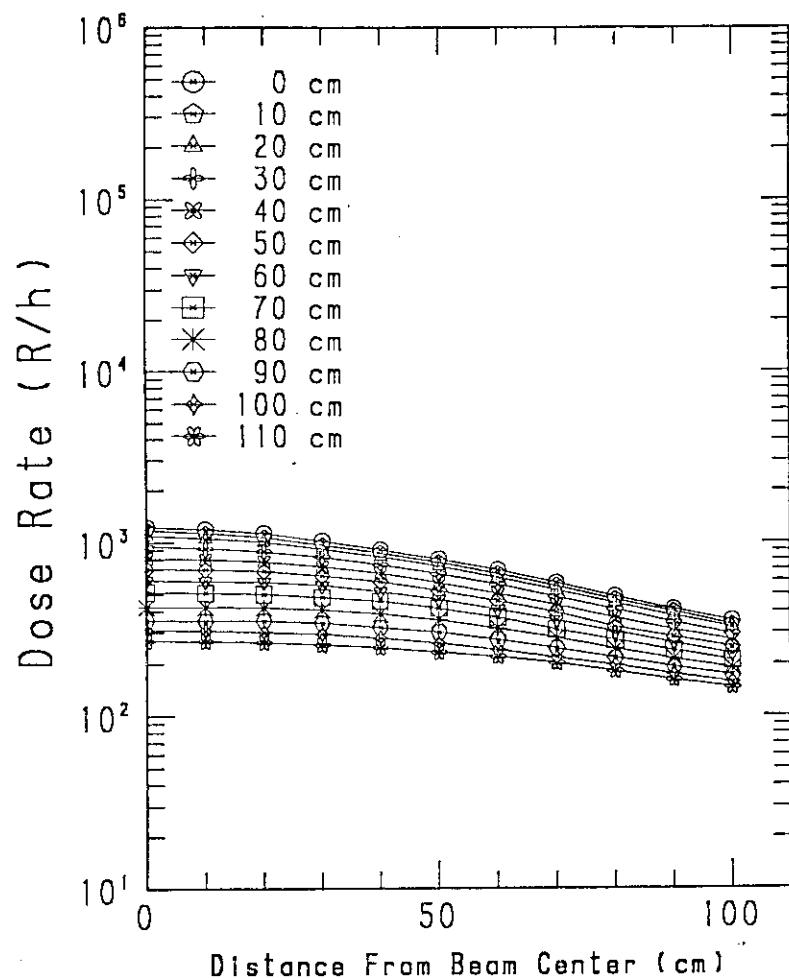
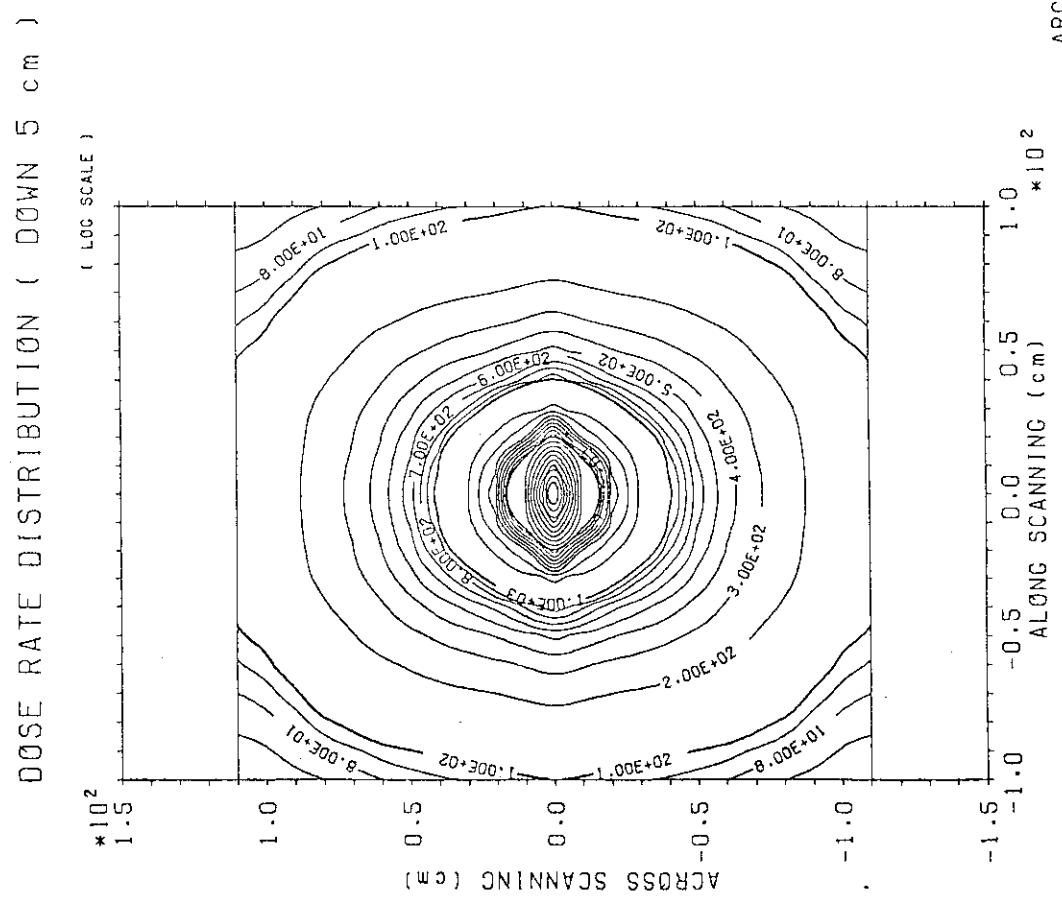


Fig.32 Dose rate distribution curves of vertical plane along the beam direction (X). Symbols correspond to the distance of direction Y from beam axis.
No.11: 100 cm under the target ($Z = 100$)

(A)



ARGUS-V4 1D=CONTOUR 83-03-04 1 PAGE

(B)

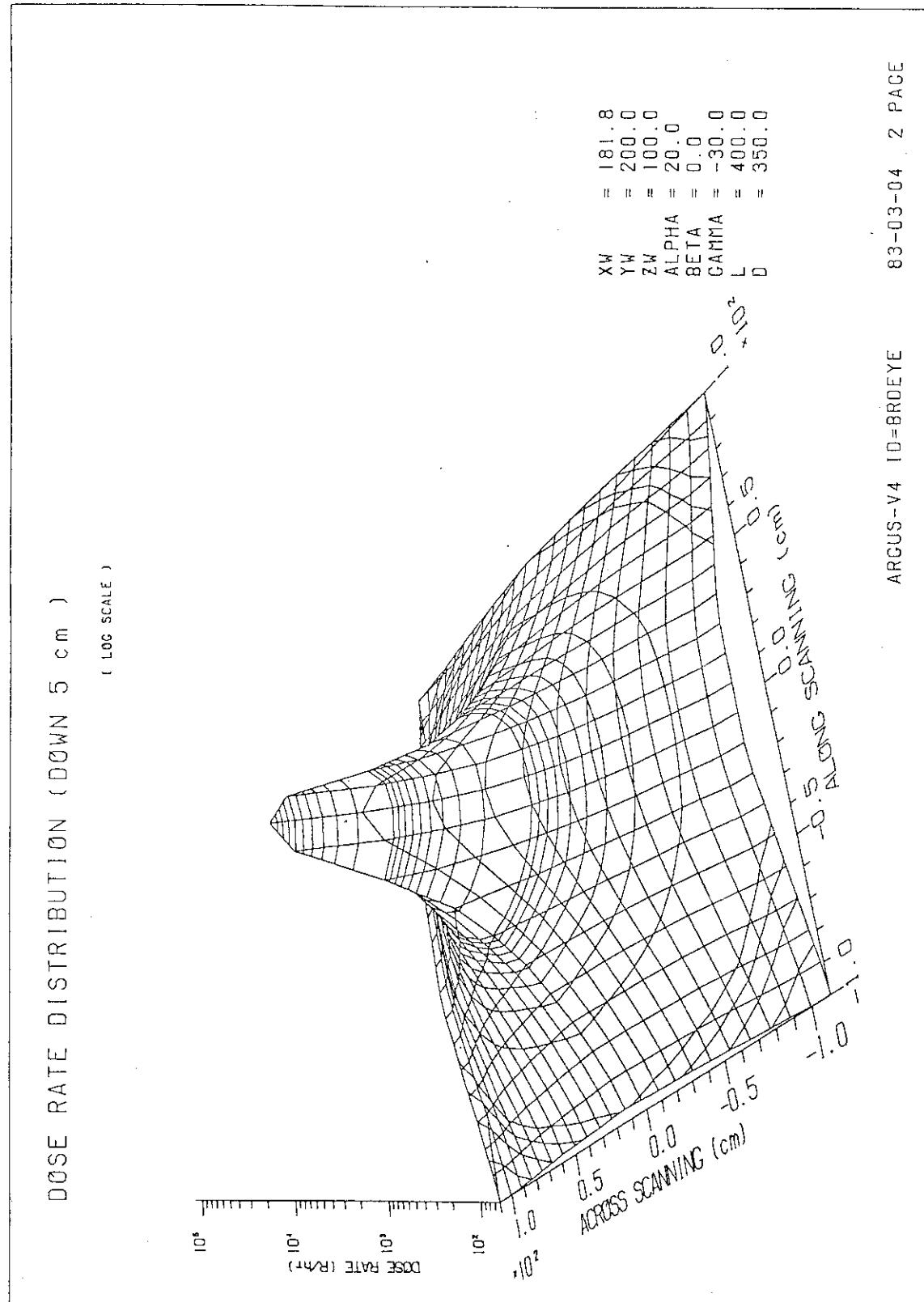
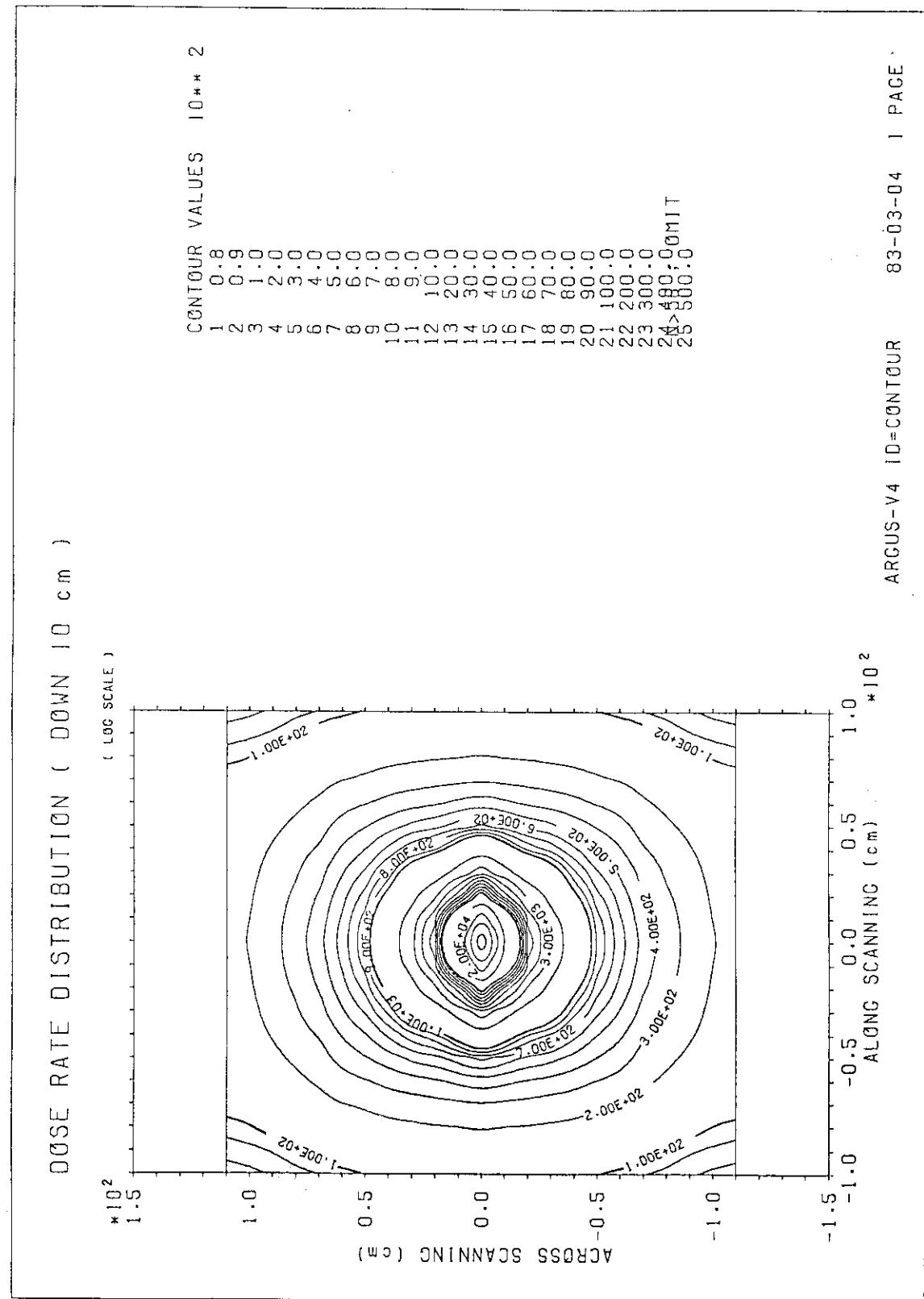


Fig.33 Dose rate distribution of horizontal plane (A) and
bird eye view (B) (Accelerator:600keV,1mA).
 $Z = 5$ (5 cm under the target)

(A)



(B)

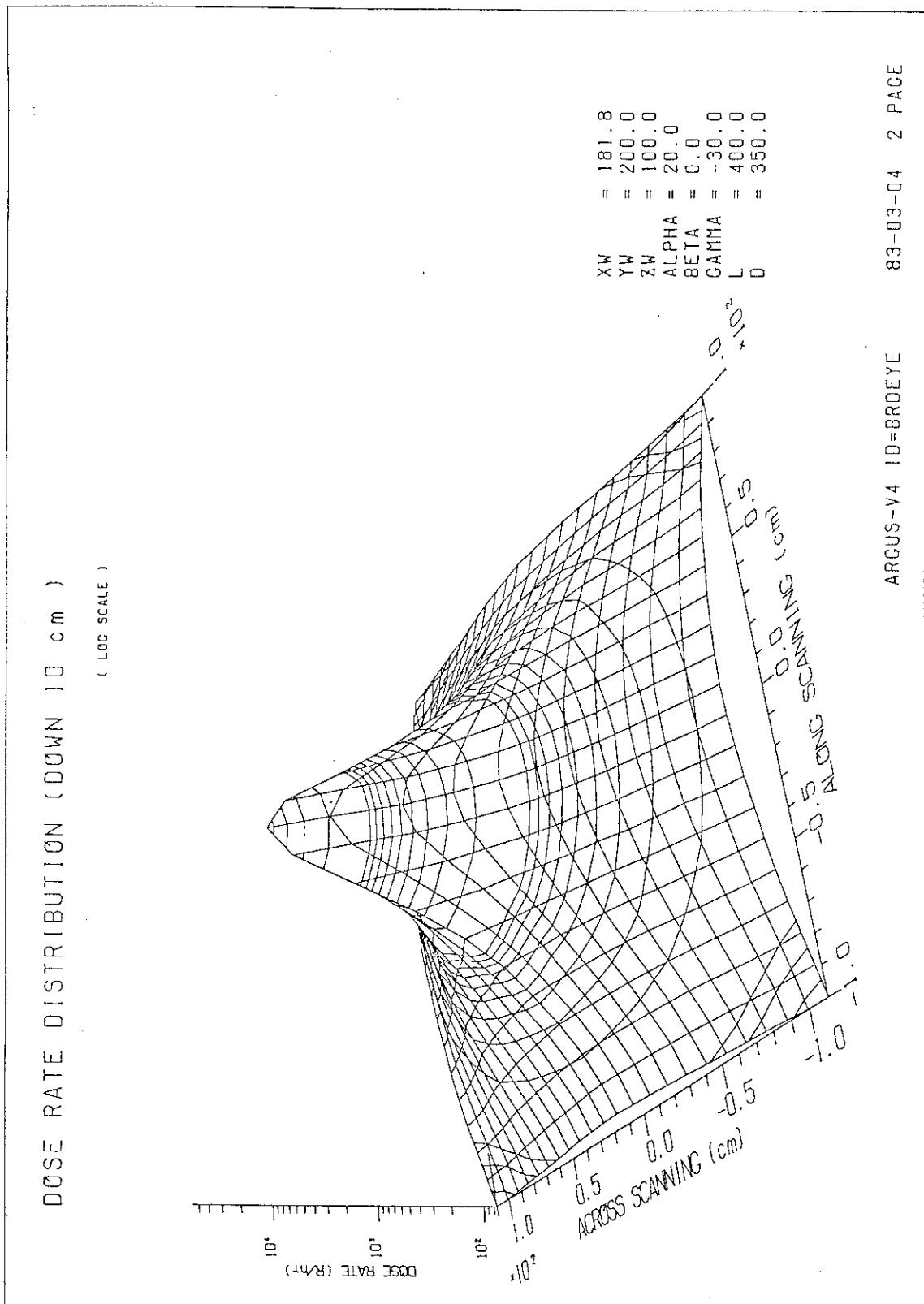
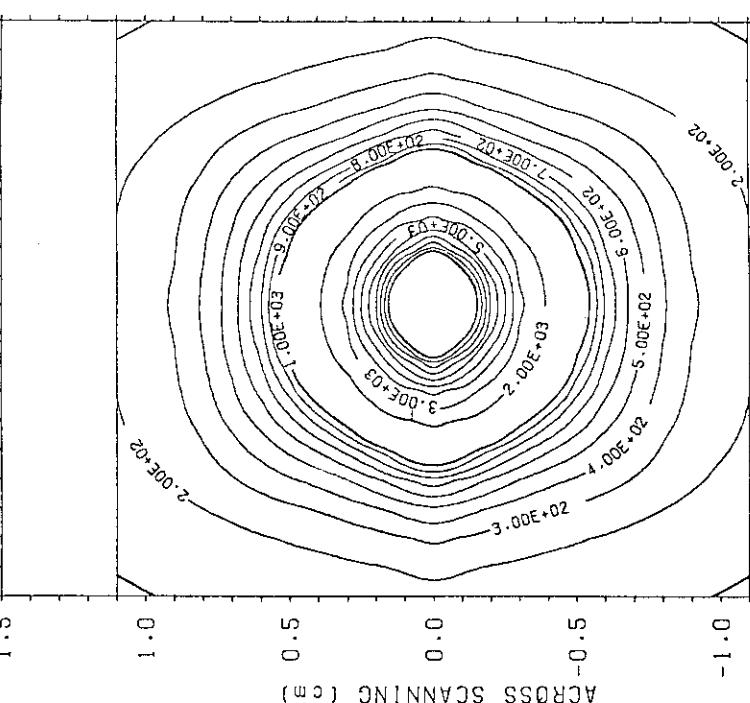


Fig. 34 Dose rate distribution of horizontal plane (A) and bird eye view (B).

$Z = 10$ (10 cm under the target)

(A)

DOSE RATE DISTRIBUTION (DOWN 20 cm)

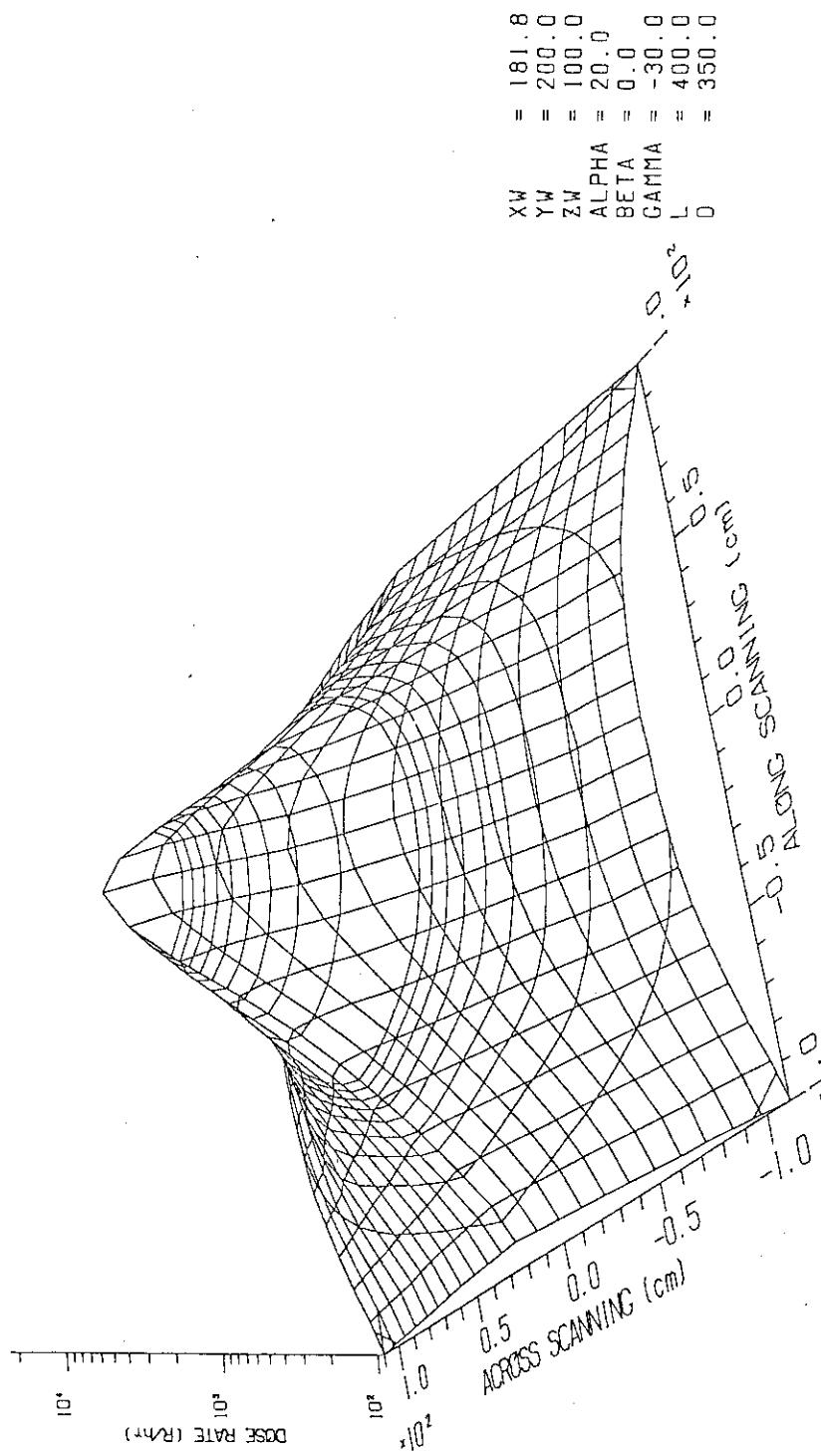
* 10²
(LOG SCALE)* 10²
ALONG SCANNING (cm)

ARGUS-V4 ID=CONTOUR 83-03-18 1 PAGE

(B)

DOSE RATE DISTRIBUTION (DOWN 20 cm)

(LOG SCALE)

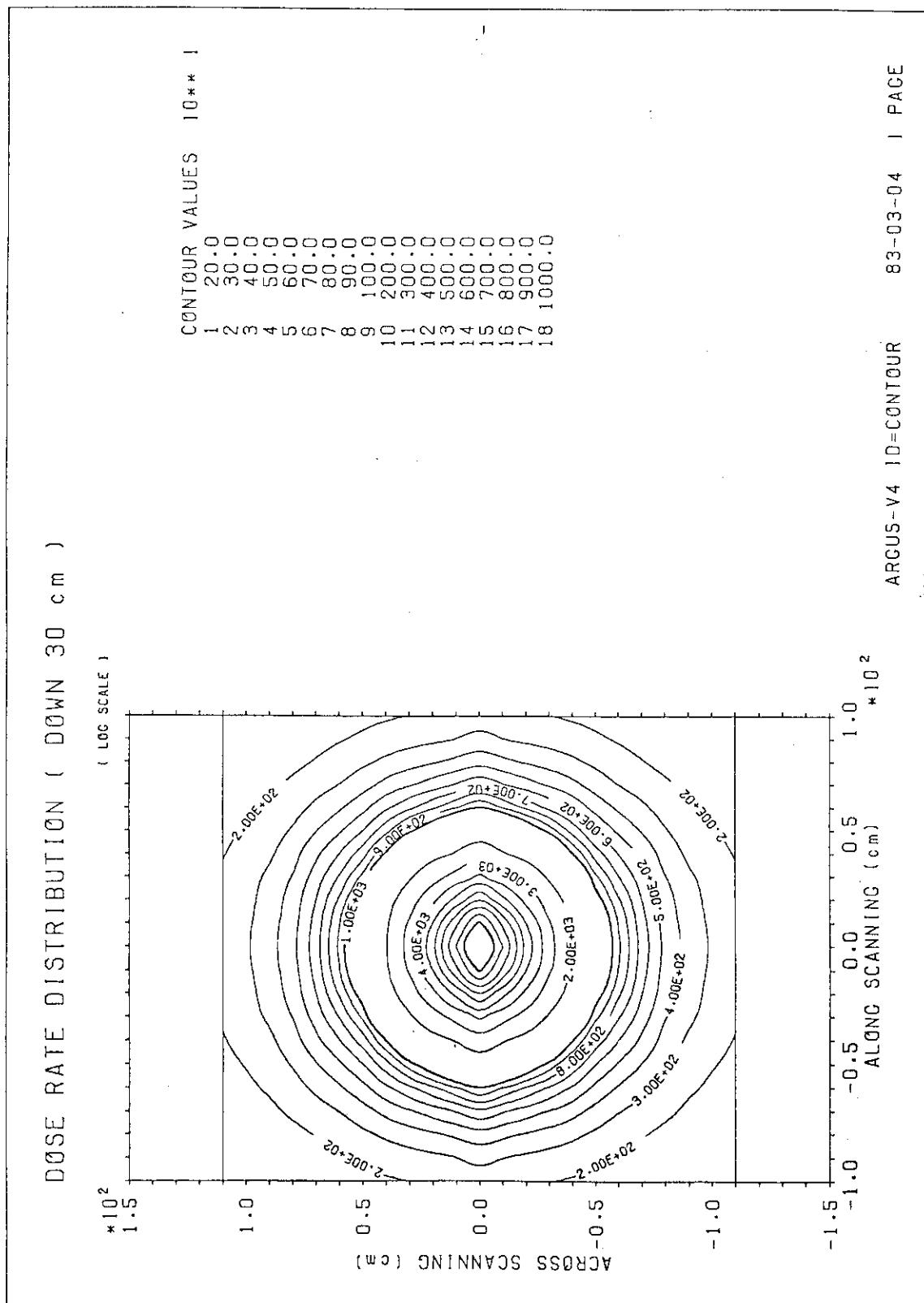


ARGUS-V4 ID=BROEYE 83-03-18 2 PAGE

Fig. 35 Dose rate distribution of horizontal plane (A) and bird eye view (B).

z = 20 (20 cm under the target)

(A)



(B)

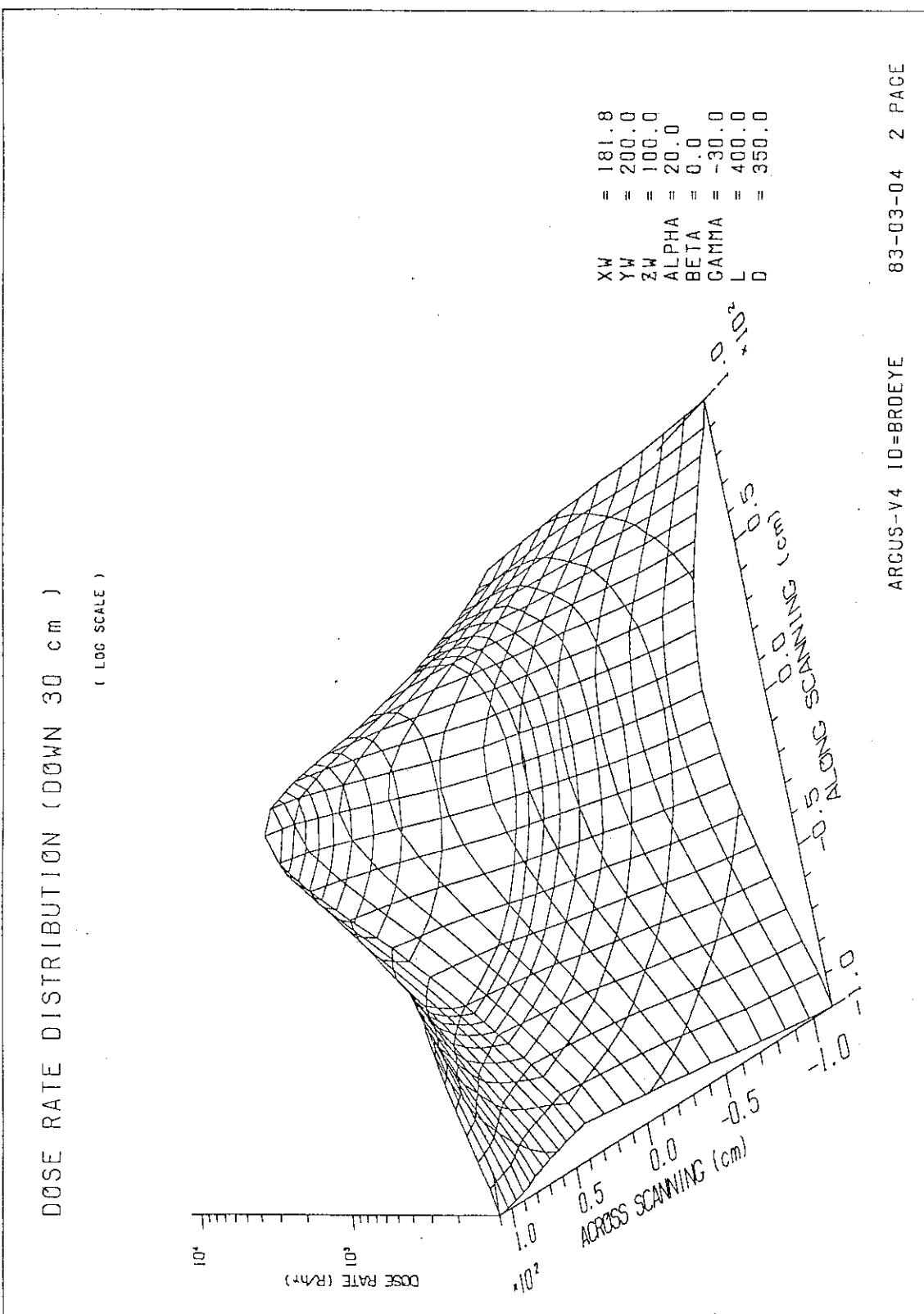
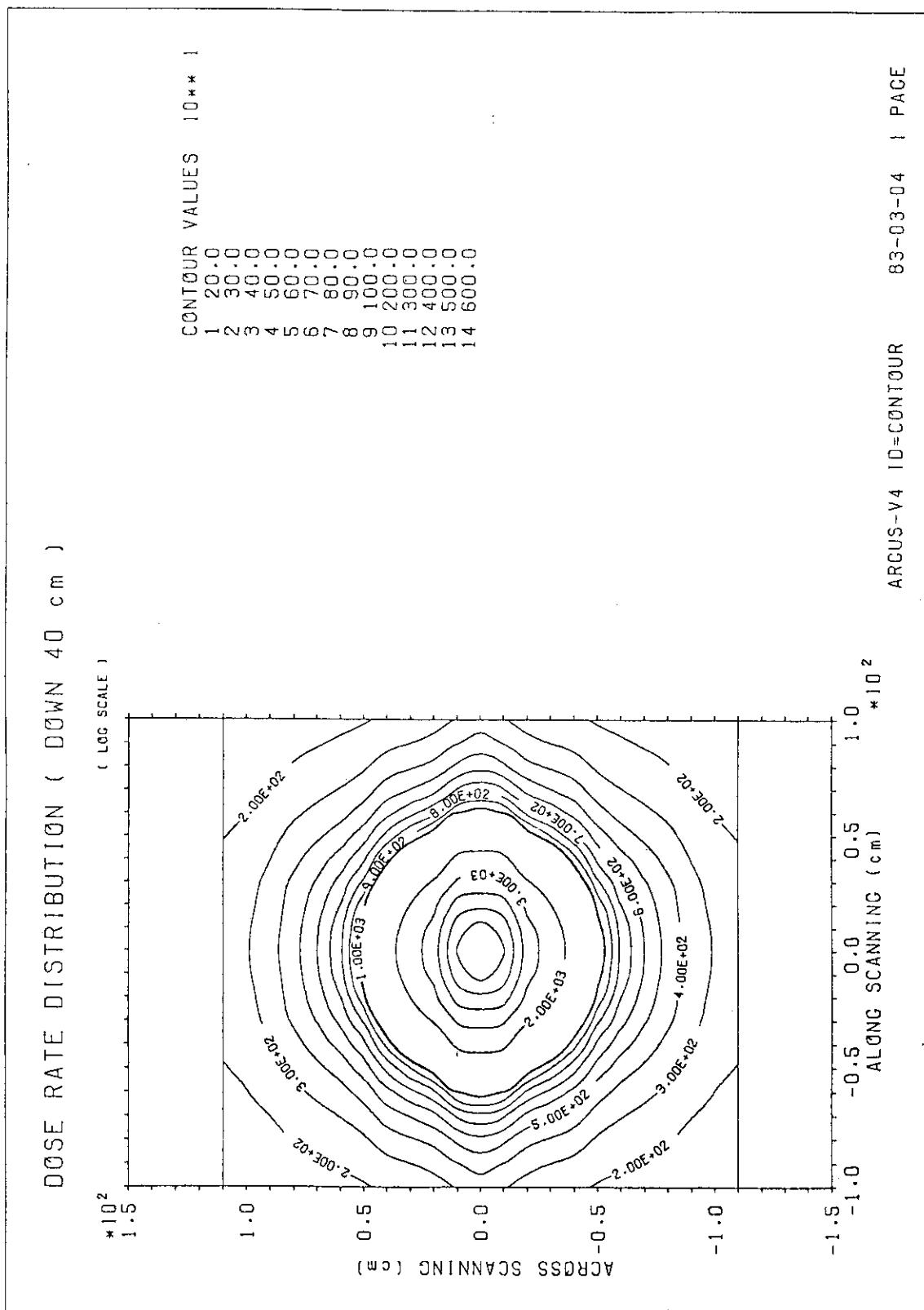


Fig. 36 Dose rate distribution of horizontal plane (A) and bird eye view (B).

$Z = 30$ (30 cm under the target)

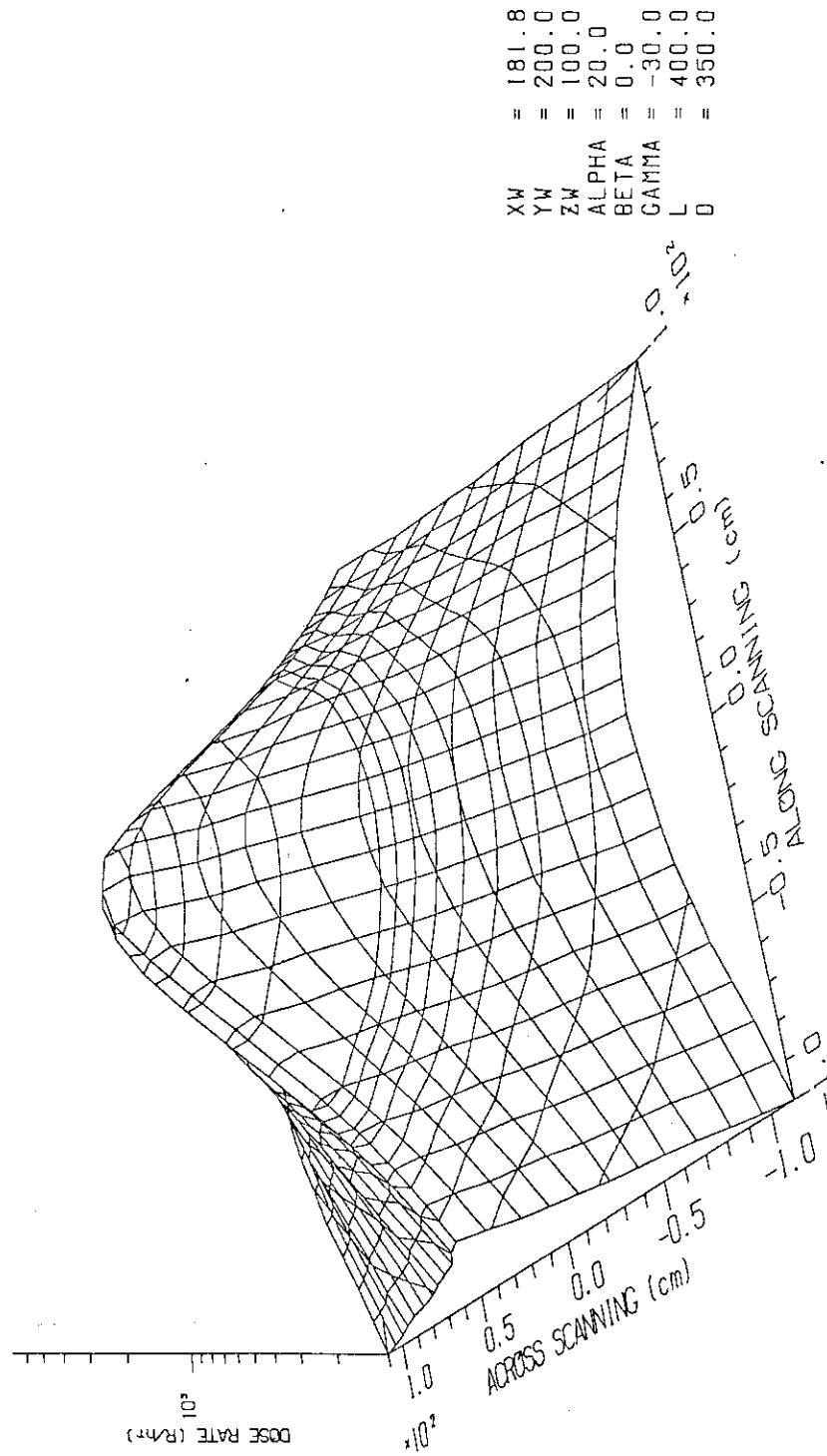
(A)



(B)

DOSE RATE DISTRIBUTION (DOWN 40 cm)

(LOG SCALE)

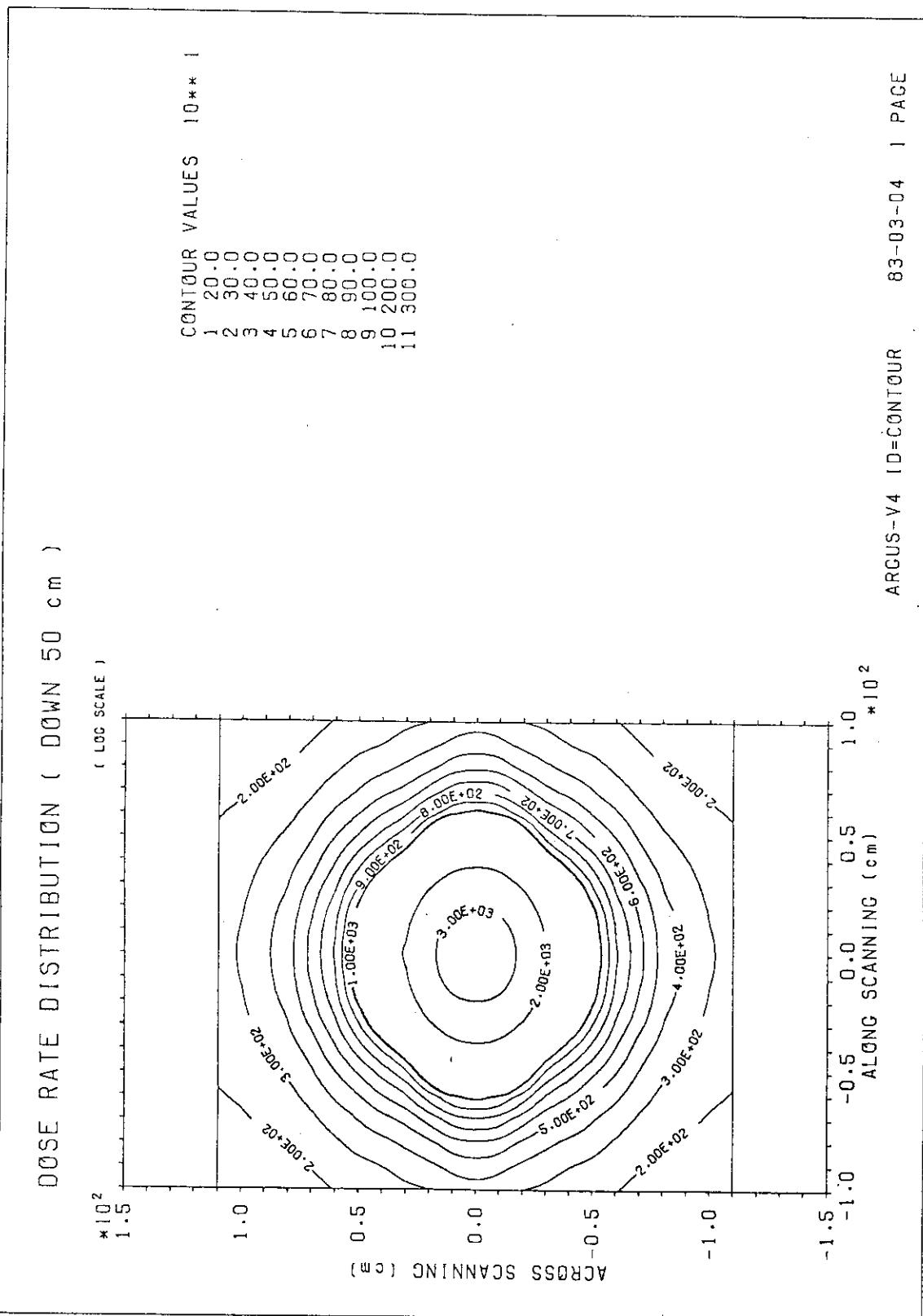


ARGUS-V4 10=BRDEYE 83-03-04 2 PAGE

Fig. 37 Dose rate distribution of horizontal plane (A) and bird eye view (B).

$z = 40$ (40 cm under the target)
 (B)

(A)



(B)

DOSE RATE DISTRIBUTION (DOWN 50 cm)

(LOG SCALE)

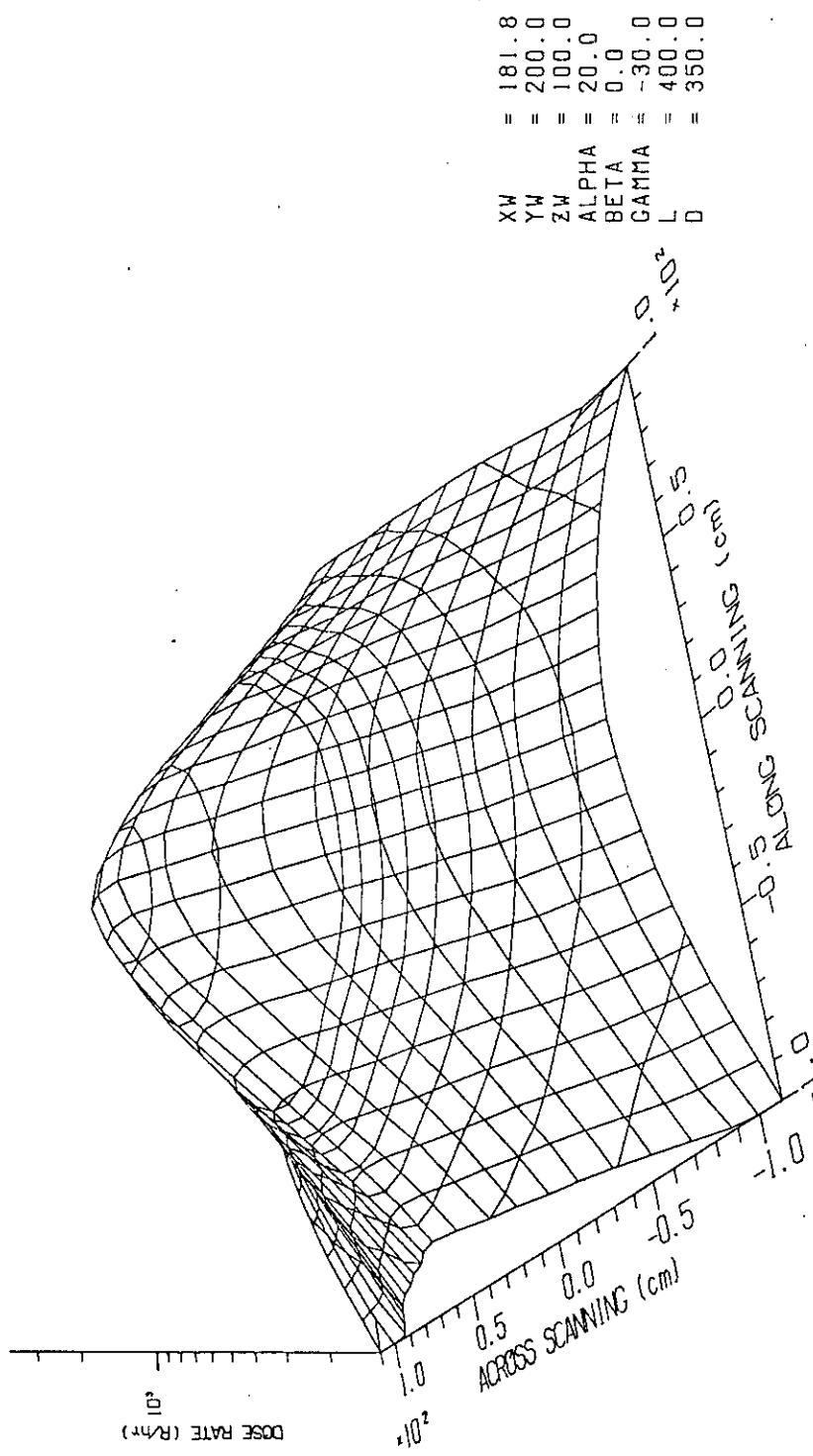
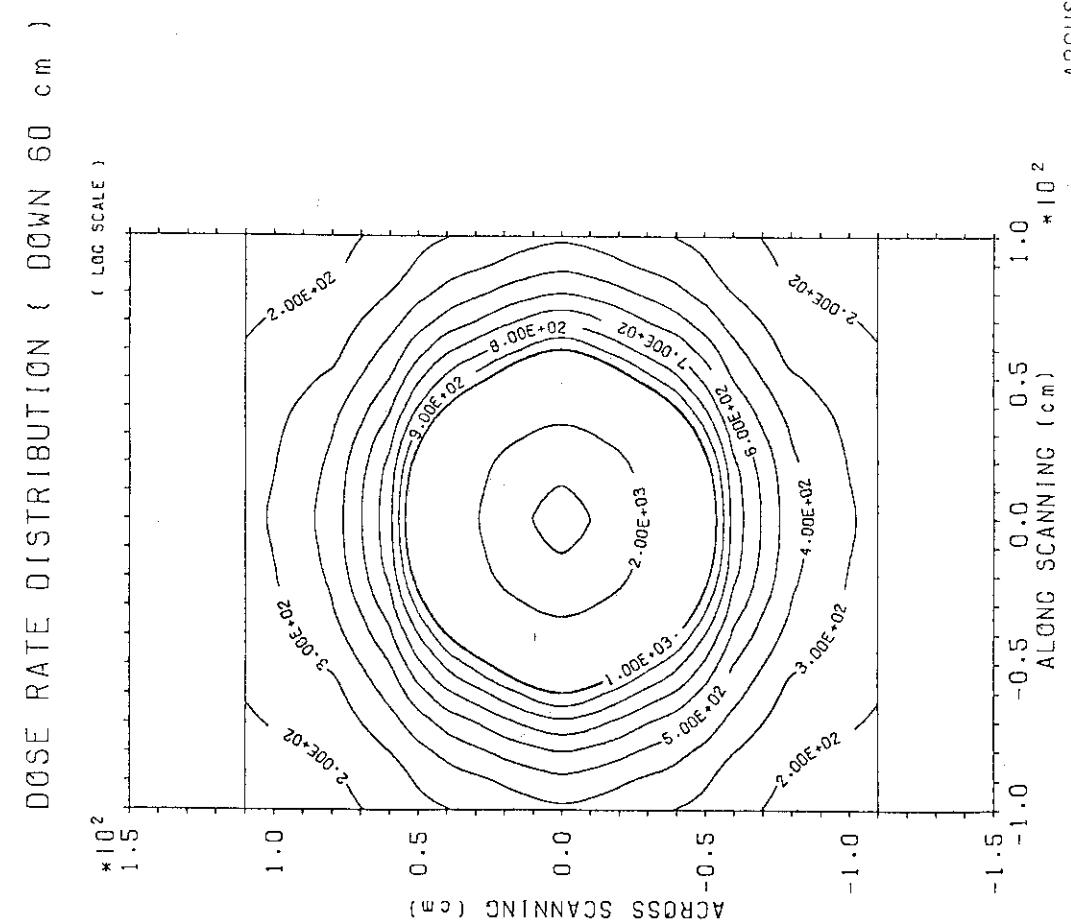


Fig. 38 Dose rate distribution of horizontal plane (A) and bird eye view (B).

 $z = 50$ (50 cm under the target)

(A)



ARCUS-V4 ID=CONTOUR 83-03-04 1 PAGE

(B)

DOSE RATE DISTRIBUTION (DOWN 60 cm)

(LOG SCALE)

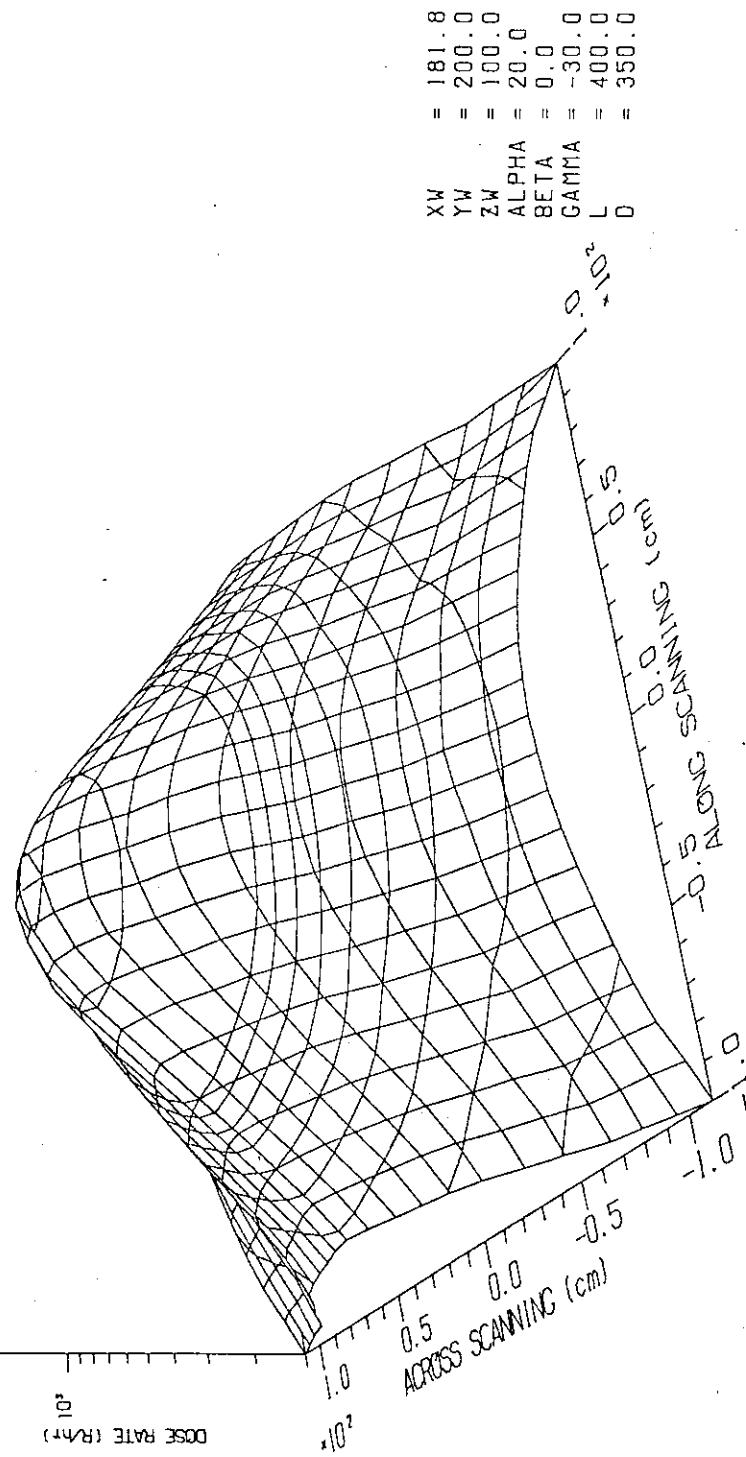


Fig. 39 Dose rate distribution of horizontal plane (A) and bird eye view (B).

$z = 60$ (60 cm under the target)

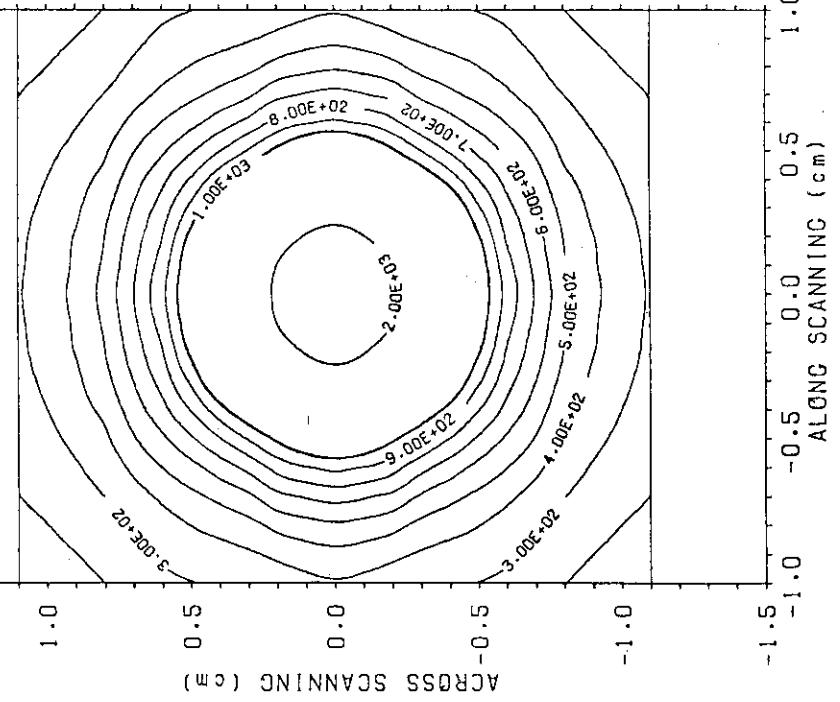
(A)

DOSE RATE DISTRIBUTION (DOWN 70 cm)

(LOG SCALE)
 $\star 10^2$

CONTOUR VALUES $\star 10^2$

1	20.0
2	30.0
3	40.0
4	50.0
5	60.0
6	70.0
7	80.0
8	90.0
9	100.0
10	200.0



ARCUS-V4 ID=CONTOUR 83-03-04 1 PAGE

(B)

DOSE RATE DISTRIBUTION (DOWN 70 cm)

(LOG SCALE)

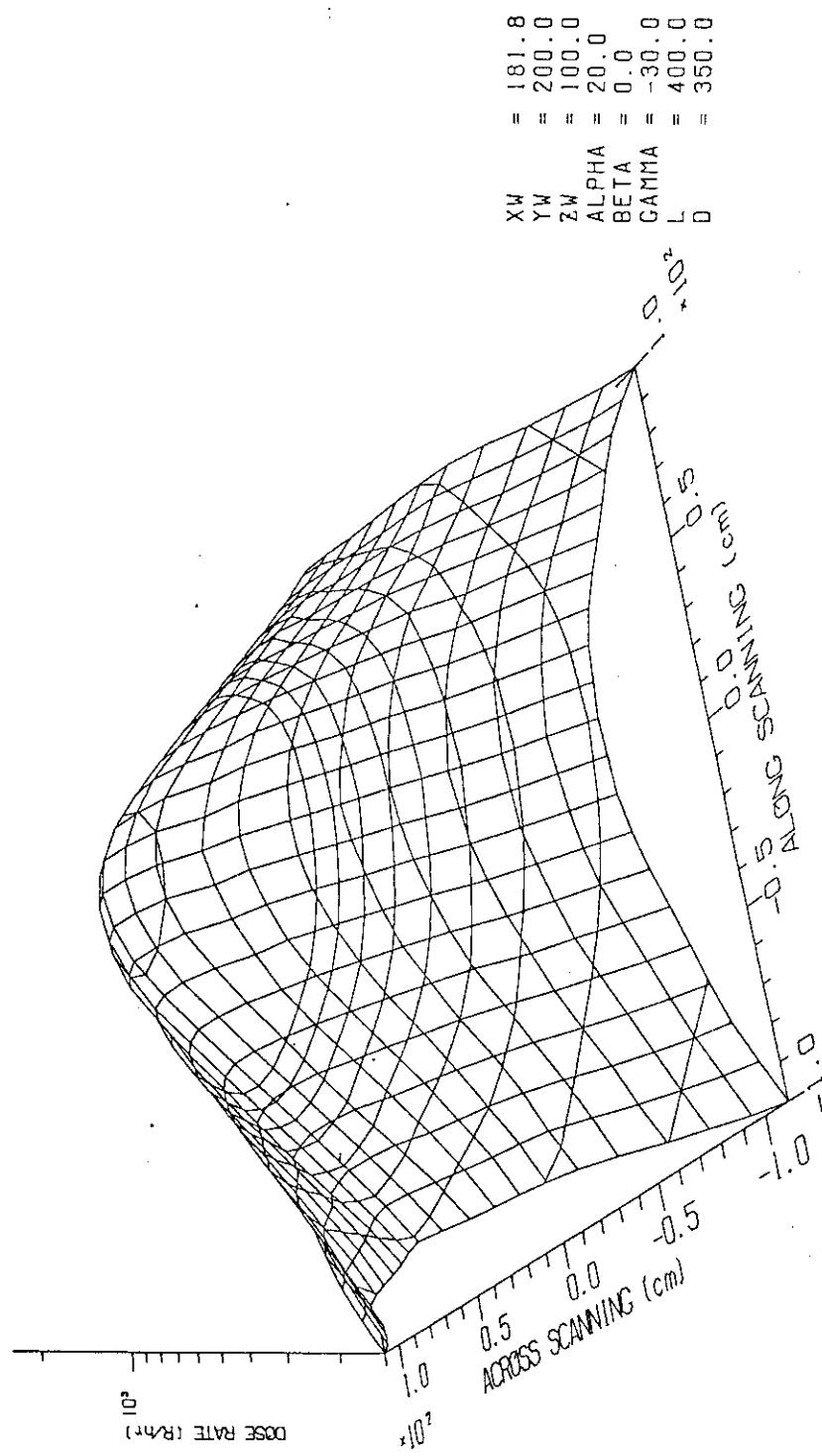
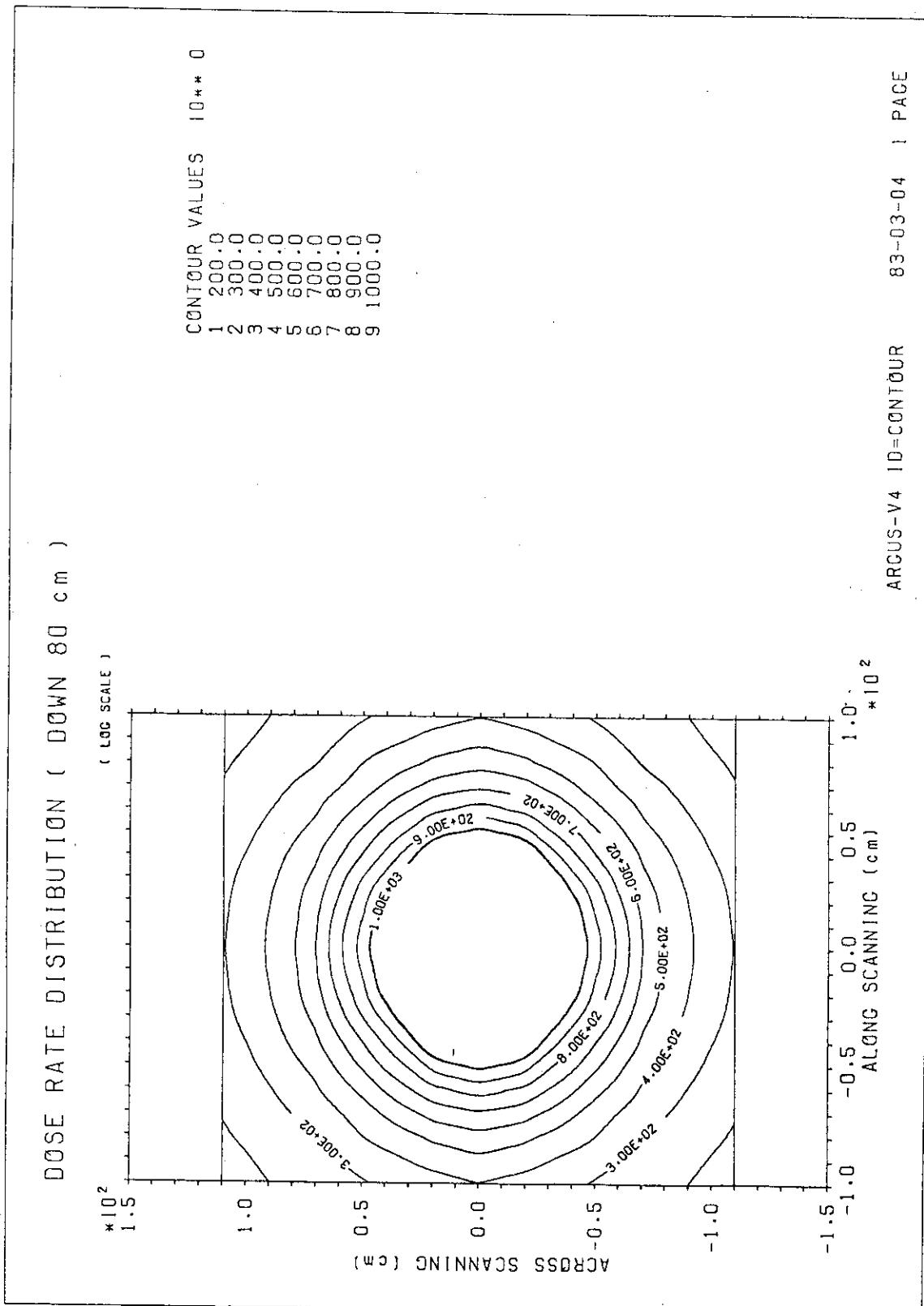


Fig.40 Dose rate distribution of horizontal plane (A) and bird eye view (B).

$Z = 70$ (70 cm under the target)

(A)



(B)

DOSE RATE DISTRIBUTION (DOWN 80 cm)

(LOG SCALE)

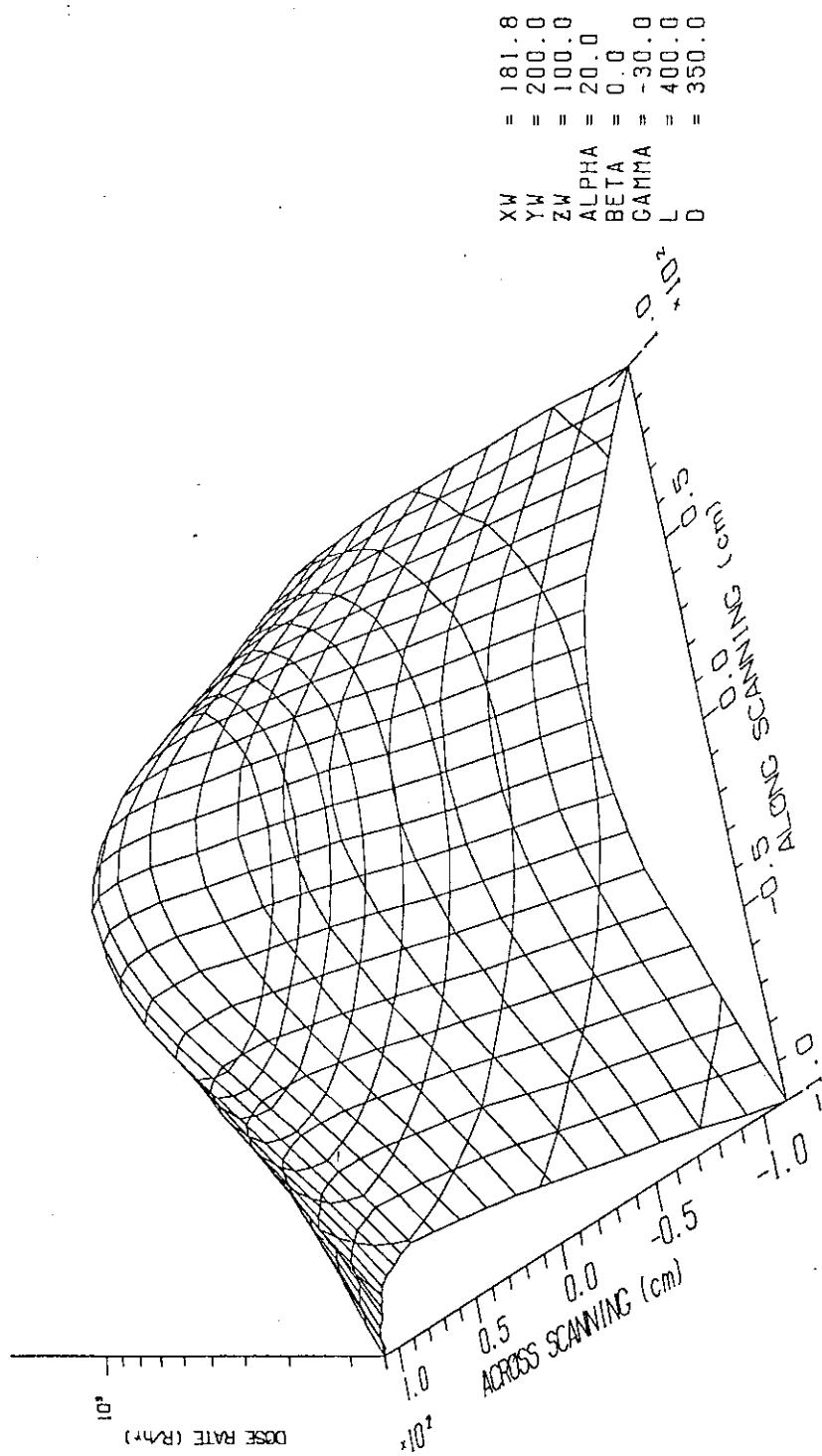


Fig. 41 Dose rate distribution of horizontal plane (A) and bird eye view (B).

$z = 80$ (80 cm under the target)

(A)

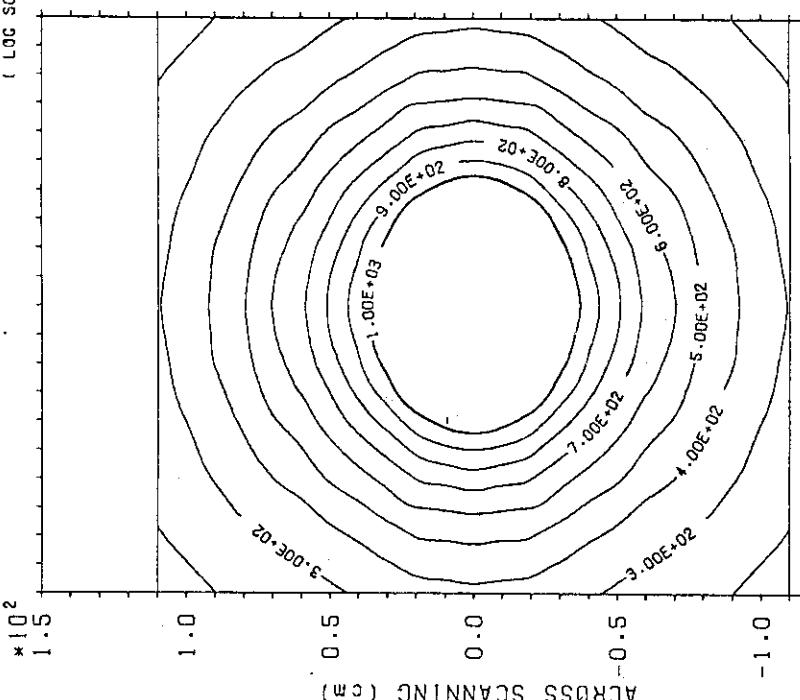
DOSE RATE DISTRIBUTION (DOWN 90 cm)

(LOG SCALE)

 $\times 10^2$

CONTOUR VALUES $10^{**} 0$

1	200.0
2	300.0
3	400.0
4	500.0
5	600.0
6	700.0
7	800.0
8	900.0
9	1000.0



ARGUS-V4 ID=CONTOUR 83-03-04 1 PAGE
 $\times 10^2$

(B)

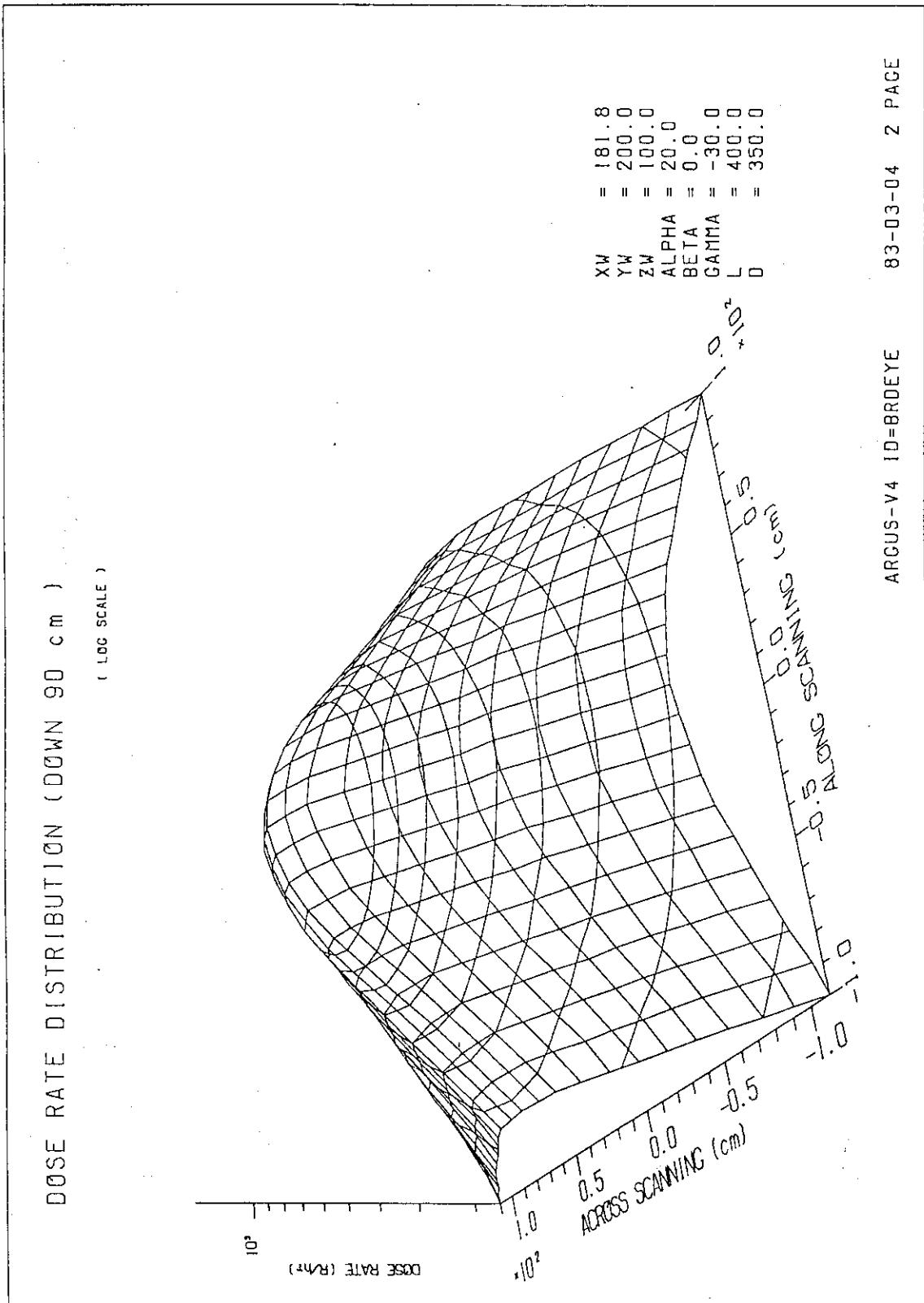
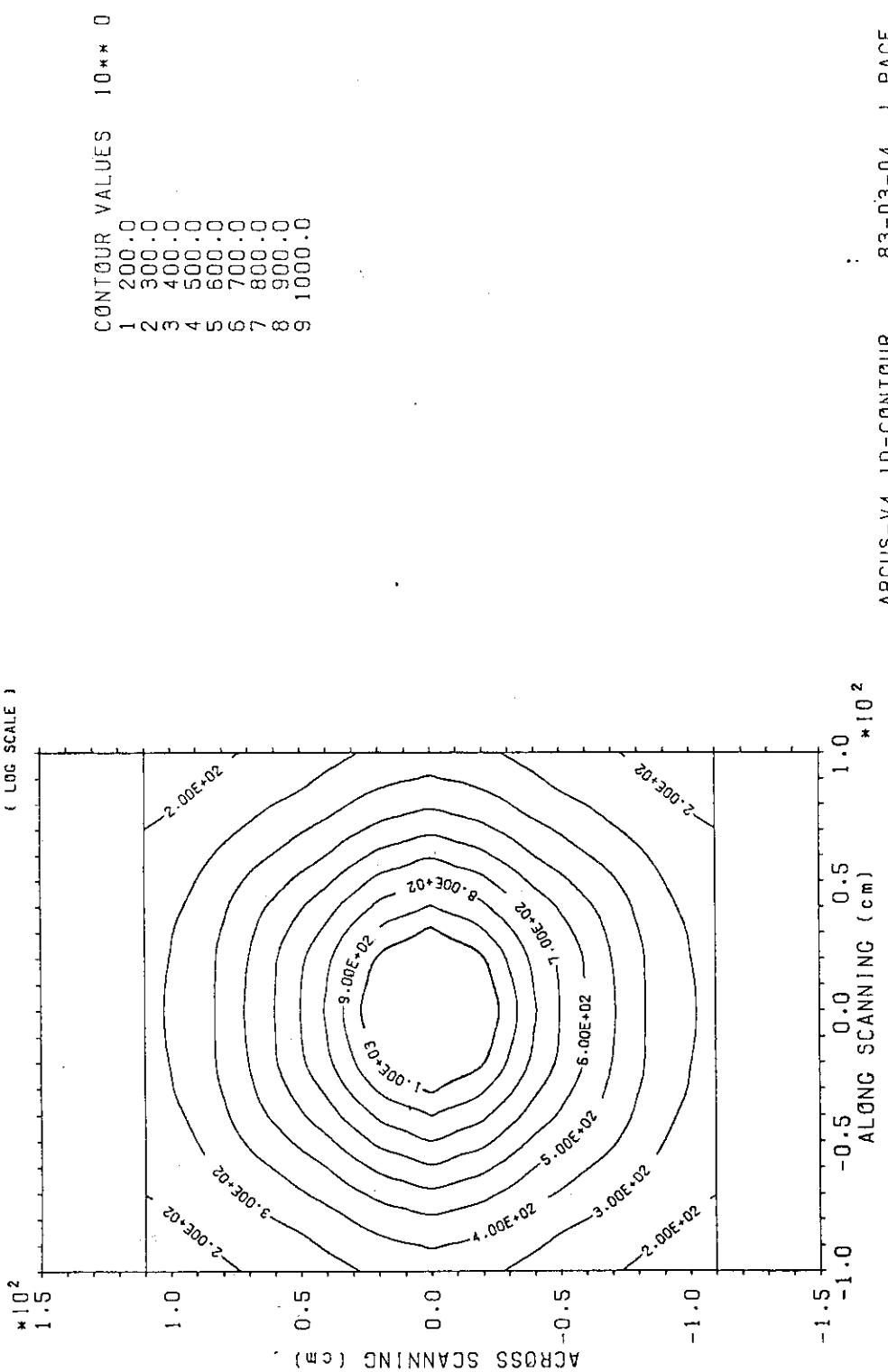


Fig.42 Dose rate distribution of horizontal plane (A) and
bird eye view (B).
 $z = 90$ (90 cm under the target)

(A)

DOSE RATE DISTRIBUTION (DOWN 100 cm)

(LOG SCALE)

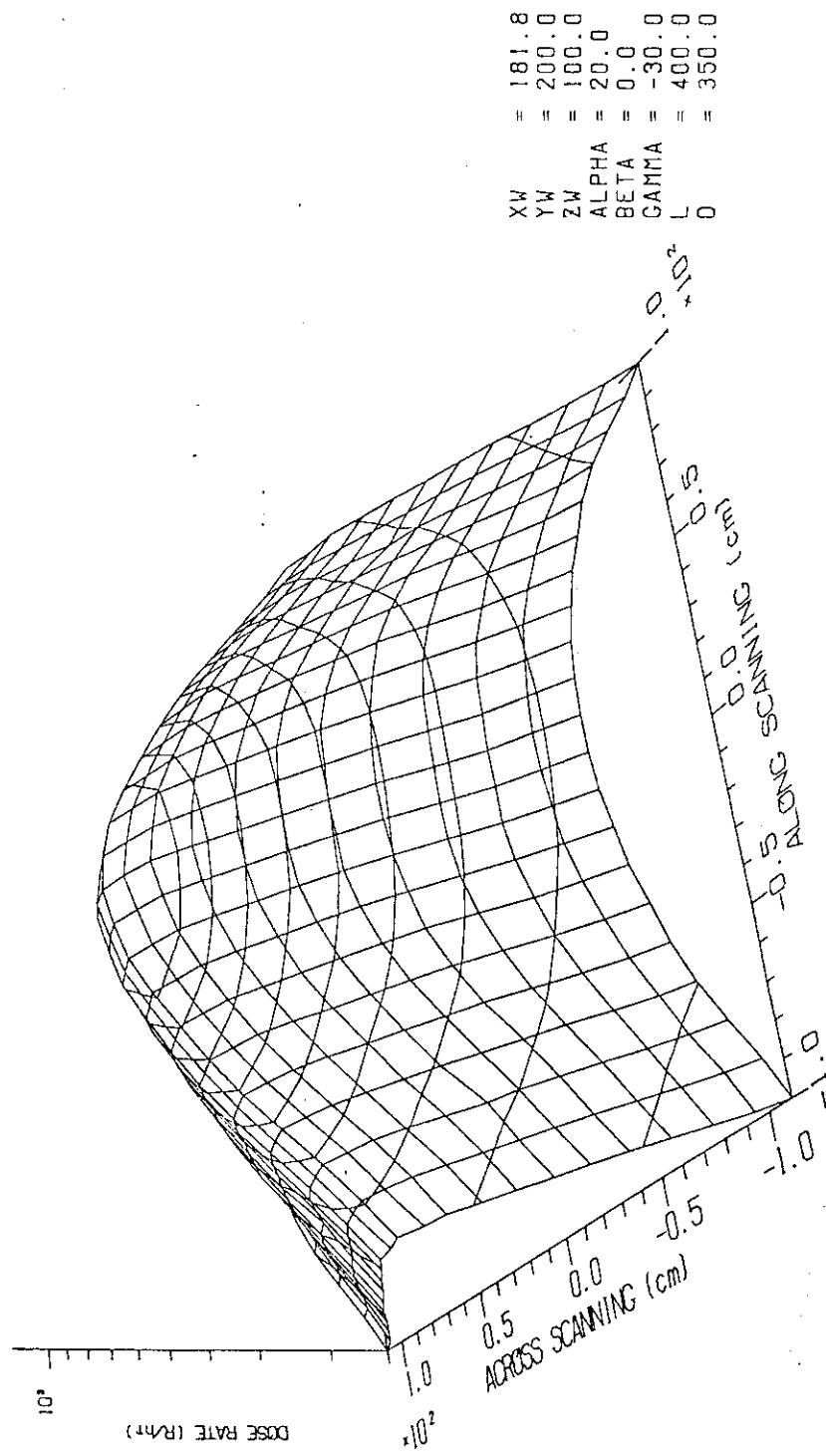


ARGUS-V4 ID=CONTOUR 83-03-04 PAGE

(B)

DOSE RATE DISTRIBUTION (DOWN 100 cm)

(LOG SCALE)



ARGUS-V4 ID=BRDEYE 83-03-04 2 PAGE

Fig.43 Dose rate distribution of horizontal plane (A) and bird eye view (B).

 $Z = 100$ (100 cm under the target)

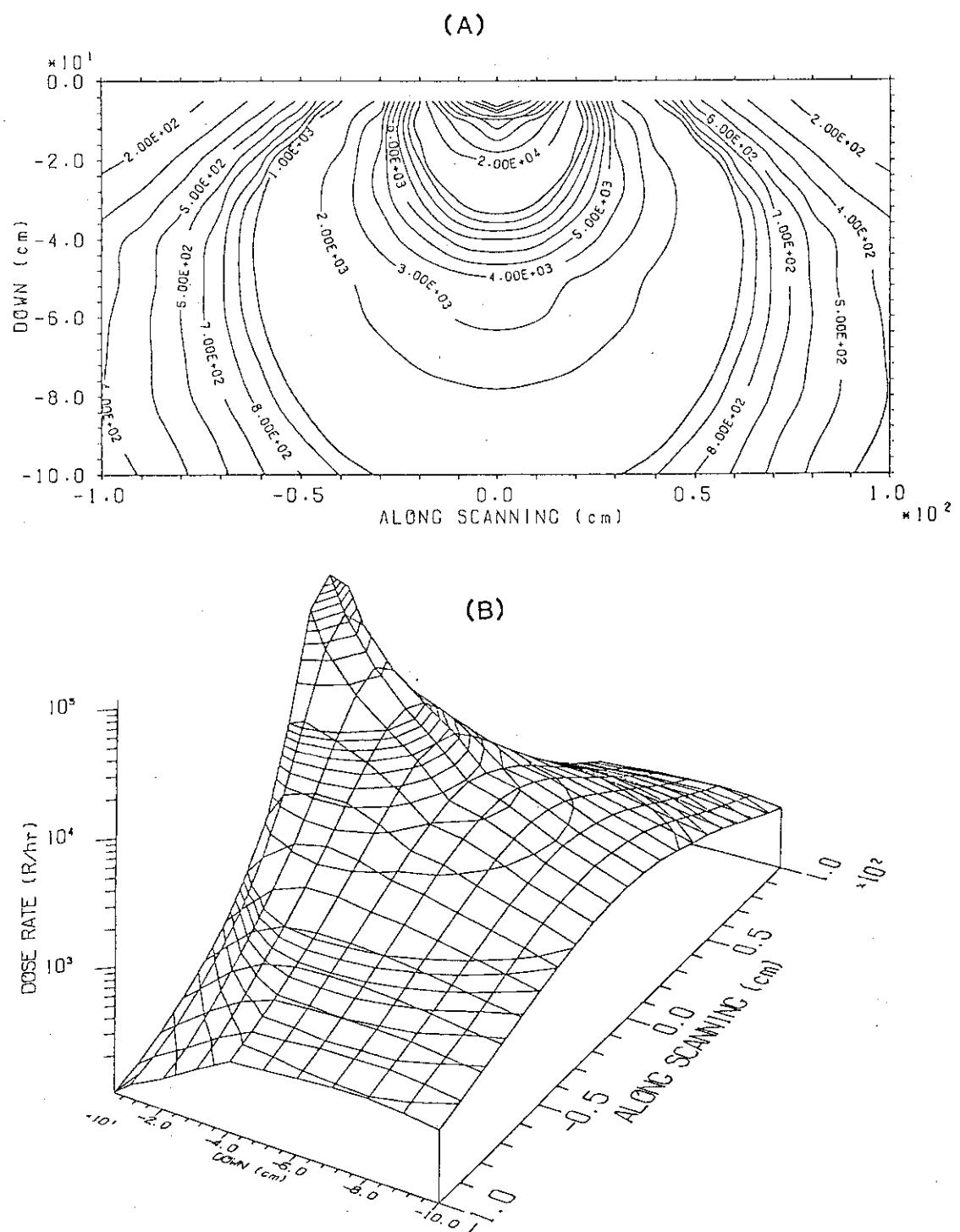


Fig.44 Isodose curves in the plane of beam scanning direction (X - Z) (A) and bird eye view (B).

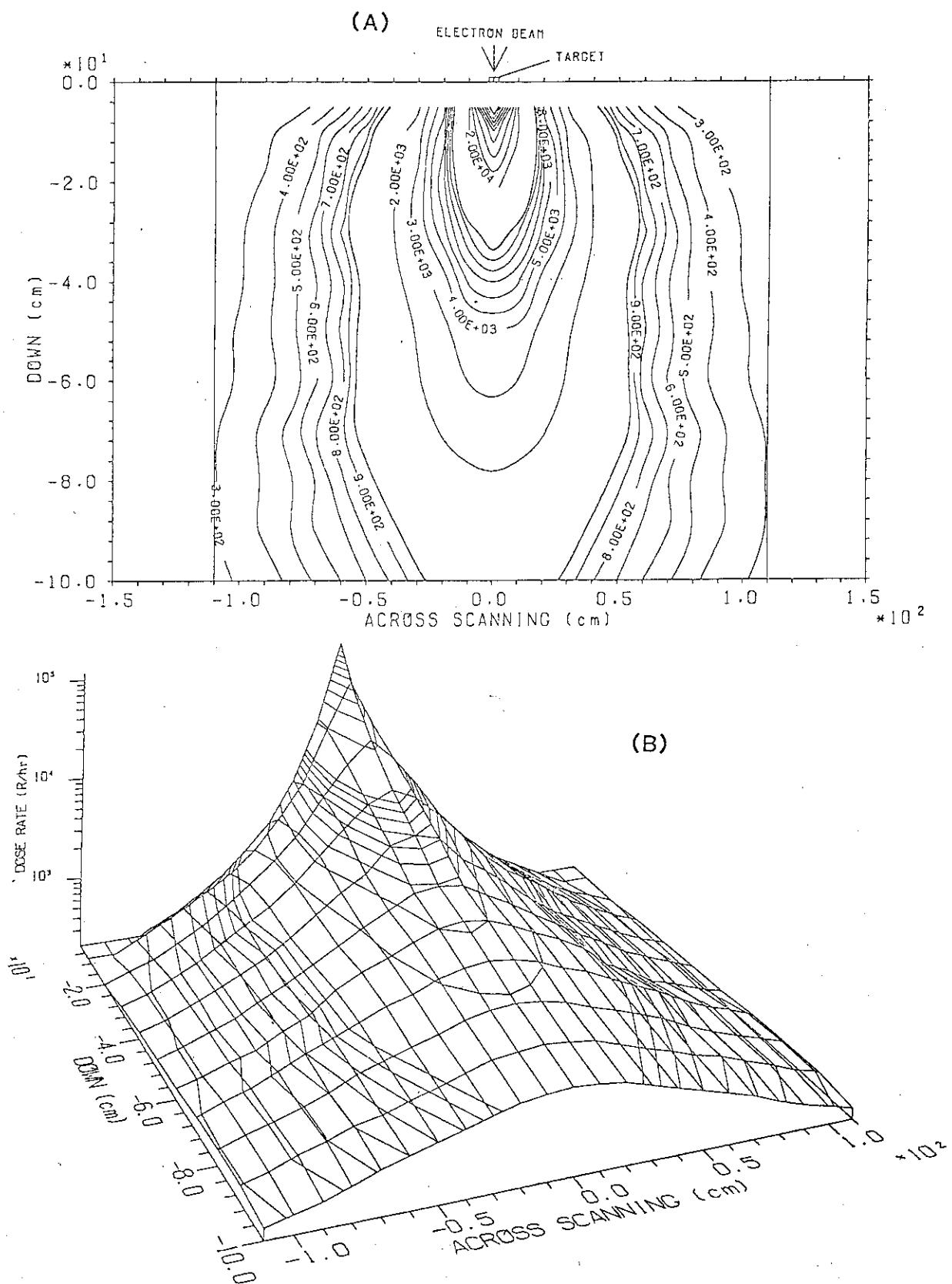
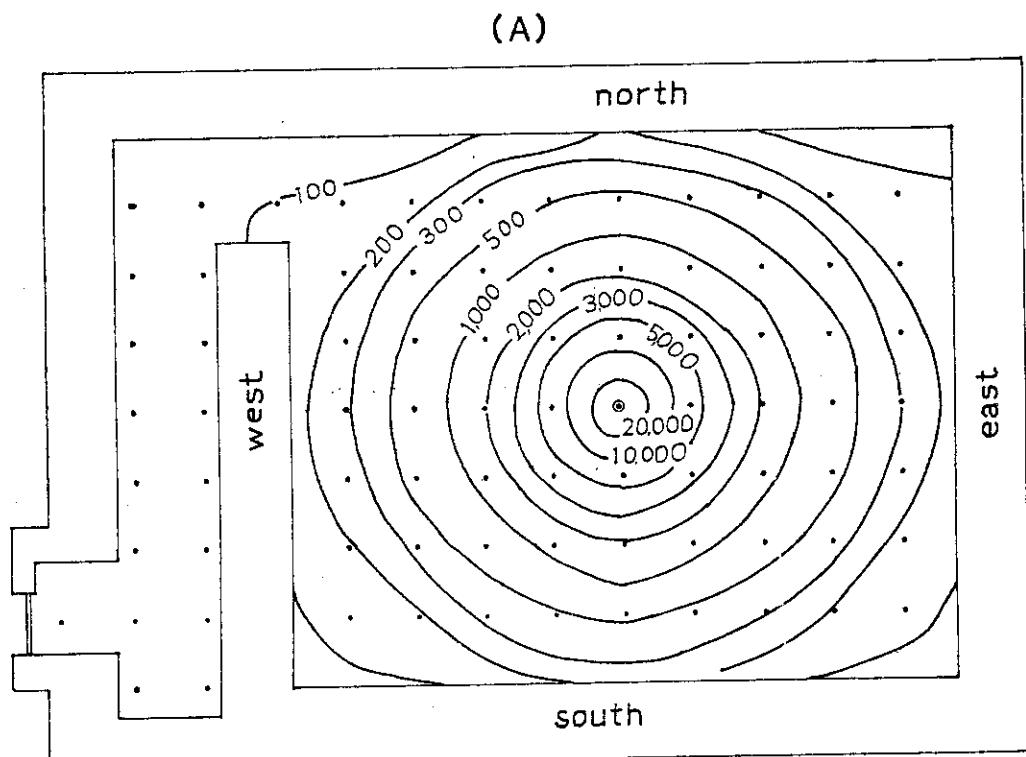


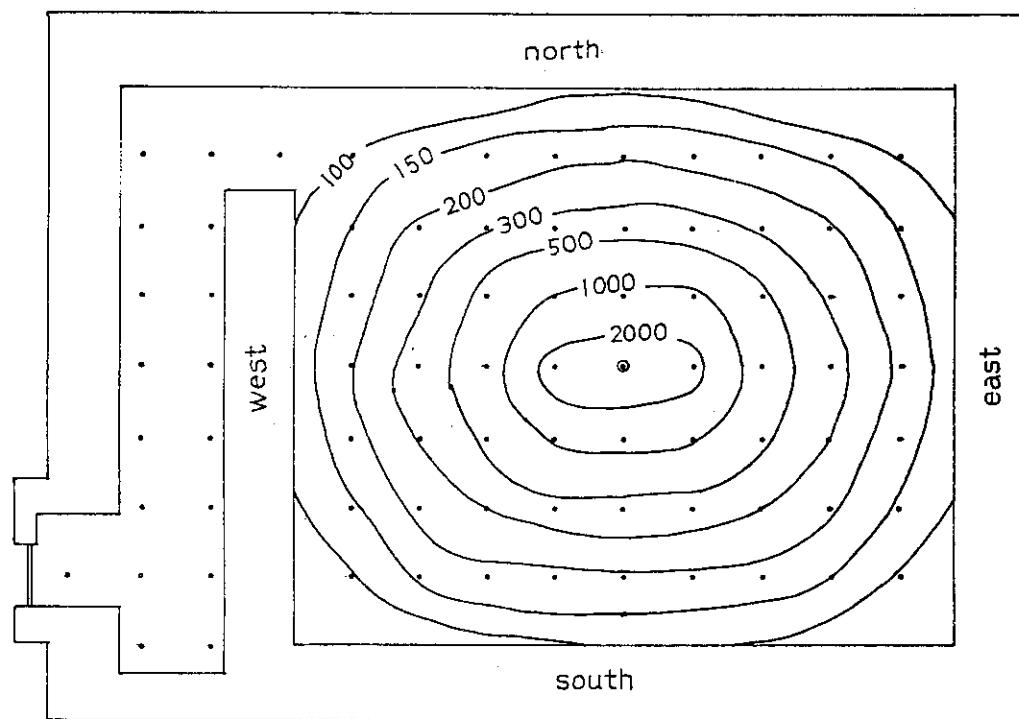
Fig.45 Isodose curves in the plane perpendicular to the beam scanning direction (Y - Z) (A) and bird eye view (B).



Dose rate in R/hr unit: Distance between
adjacent dots: 1 meter

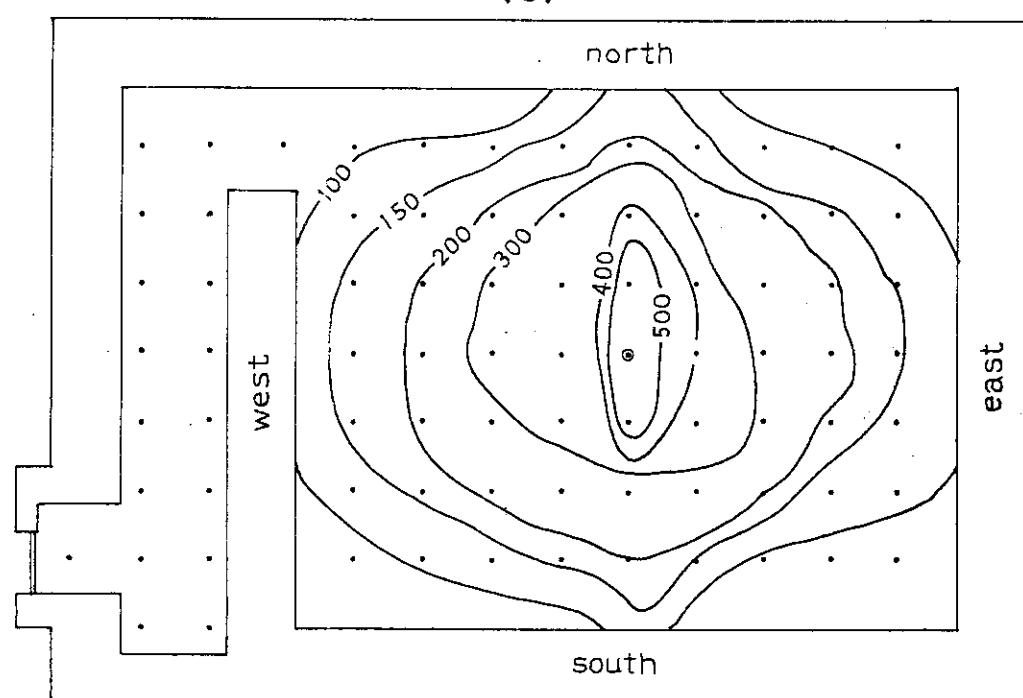
Fig. 46 Isodose rate map in the irradiation room. The target position is at the center of the room and 1 m above the floor. Accelerator was operated at 600 keV and 25 mA.
(A): on the floor, (B): 1 m above the floor, and
(C): 2 m above the floor.

(B)



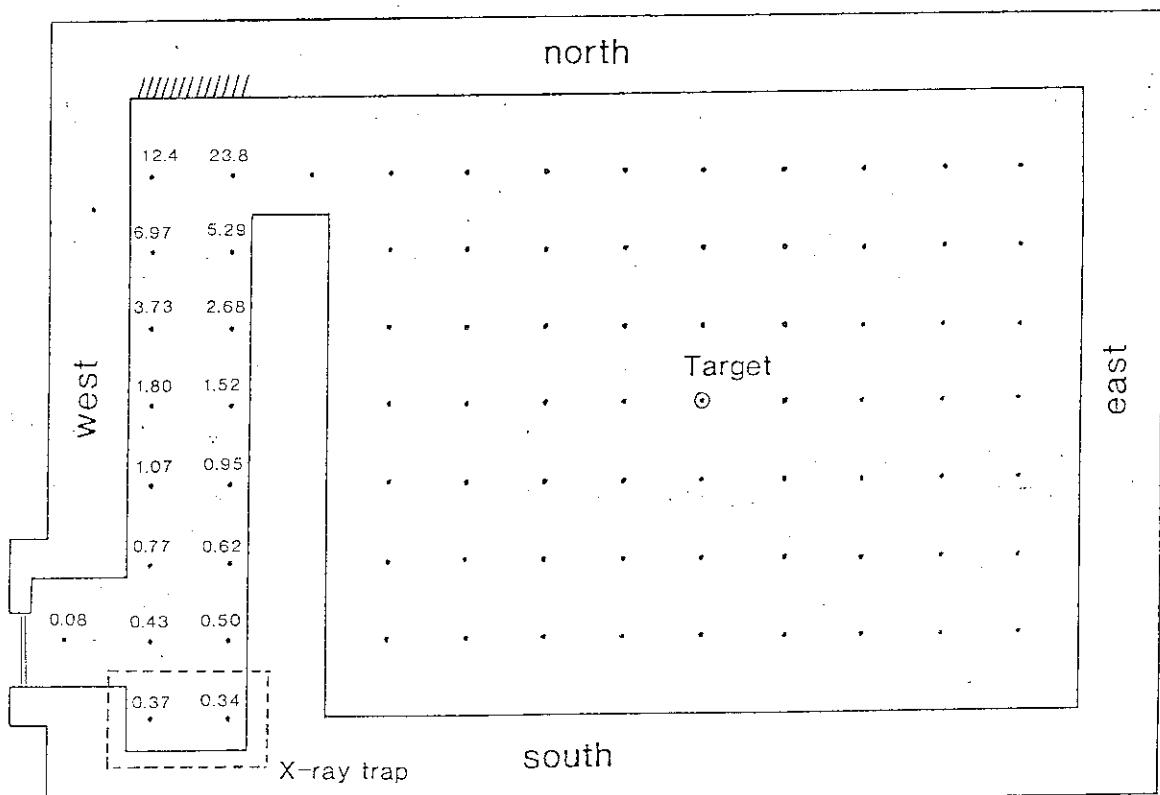
Dose rate in R/hr unit : Distance
between adjacent dots : 1 meter

(C)



Dose rate in R/hr unit : Distance
between adjacent dots : 1 meter

(A)



(B)

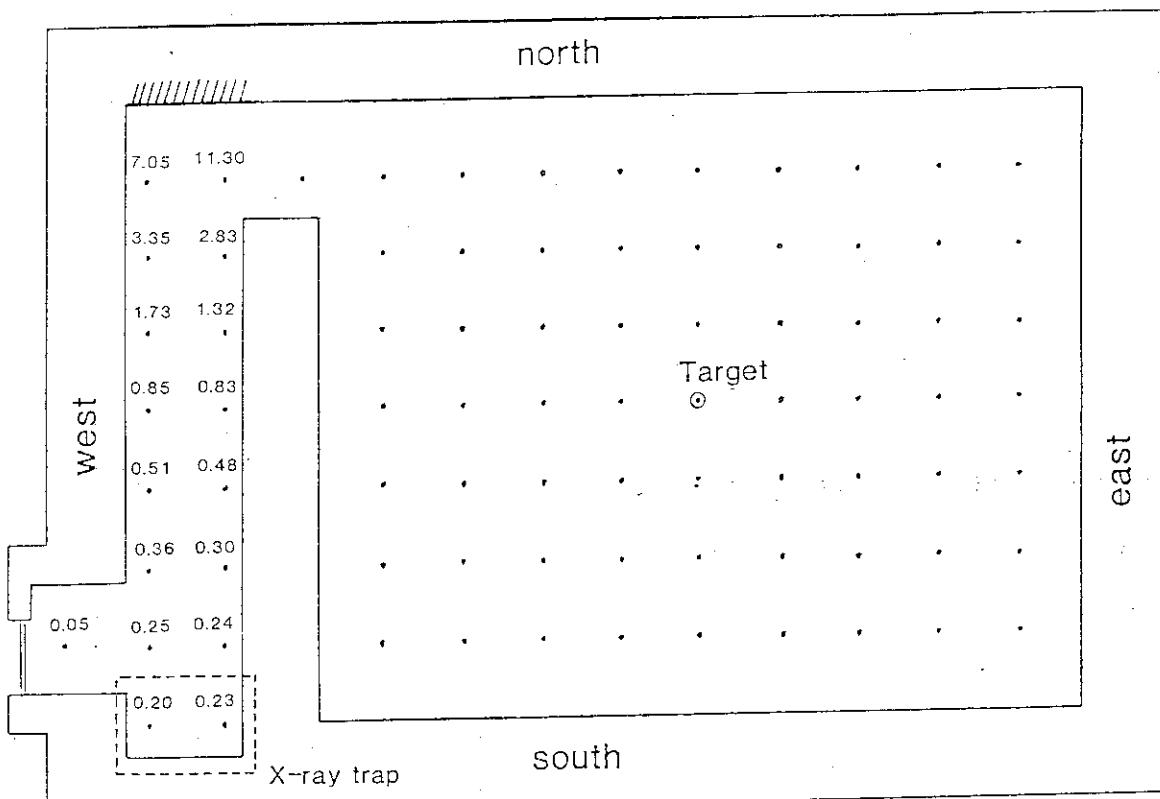


Fig. 47 Dose rate of the scattered X-rays in the maze.
Accelerator was operated at 800 keV, 25 mA (A), and
at 600 keV, 25 mA (B), scanning width of 16 cm.
Unit was in R/h.

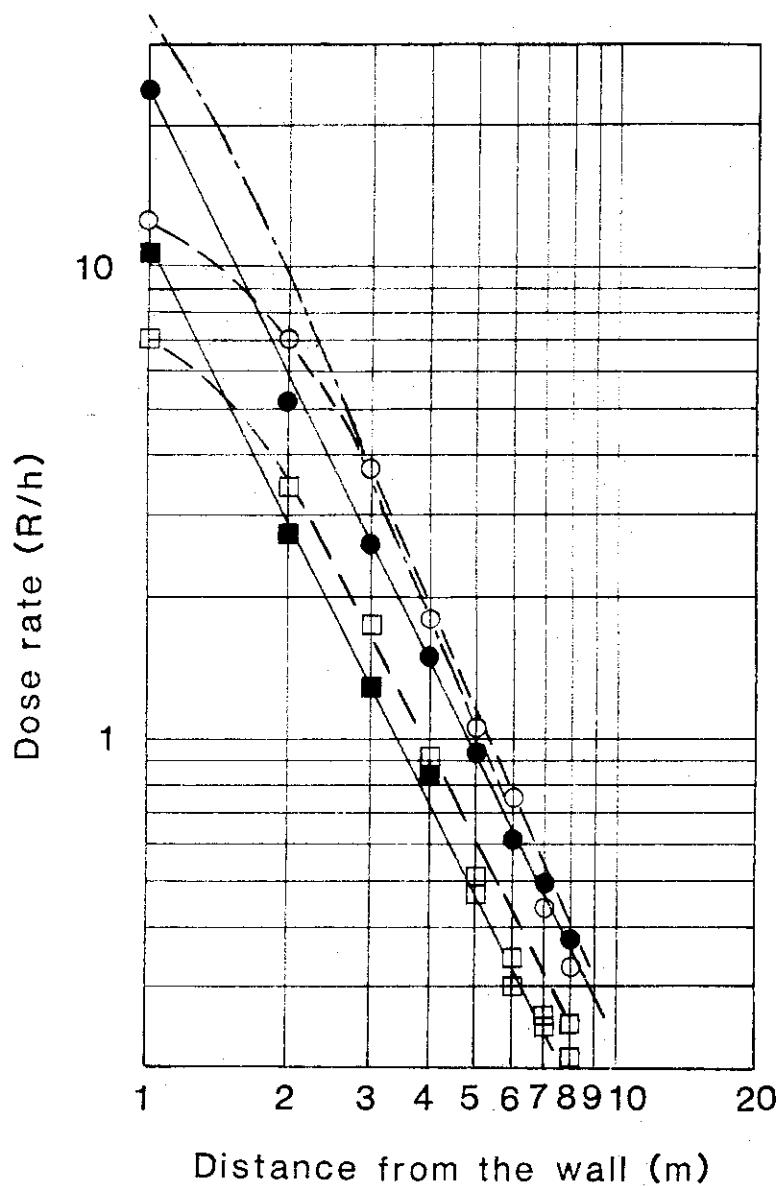
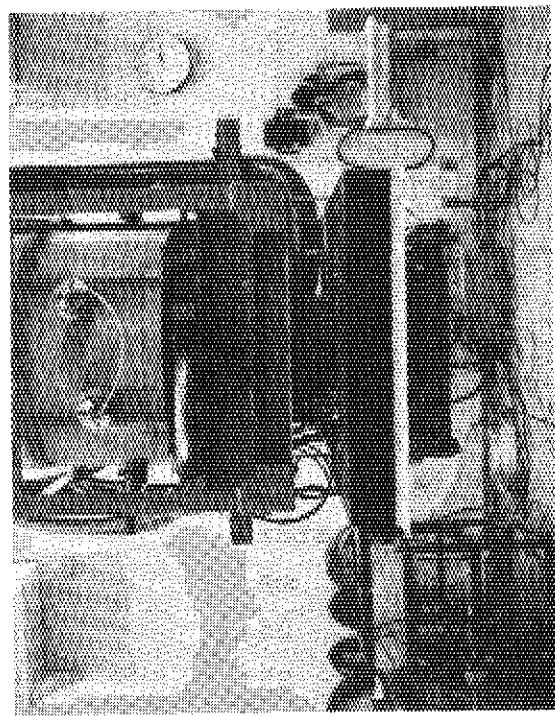
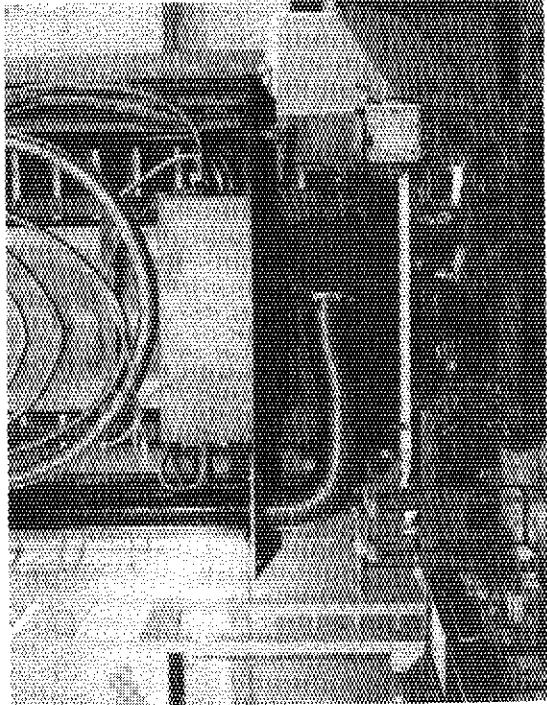


Fig.48 Dose rate of the scattered X-rays in the maze vs. distance from the wall hatched in Fig.47. Measured positions were 1 m high from the floor level.

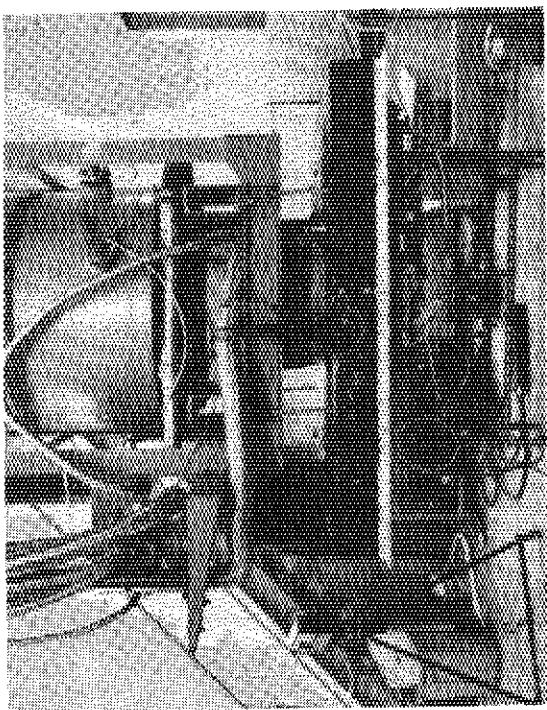
Side in the maze		Accelerator	
East	West	keV	mA
●	○	: 800	25
■	□	: 600	25



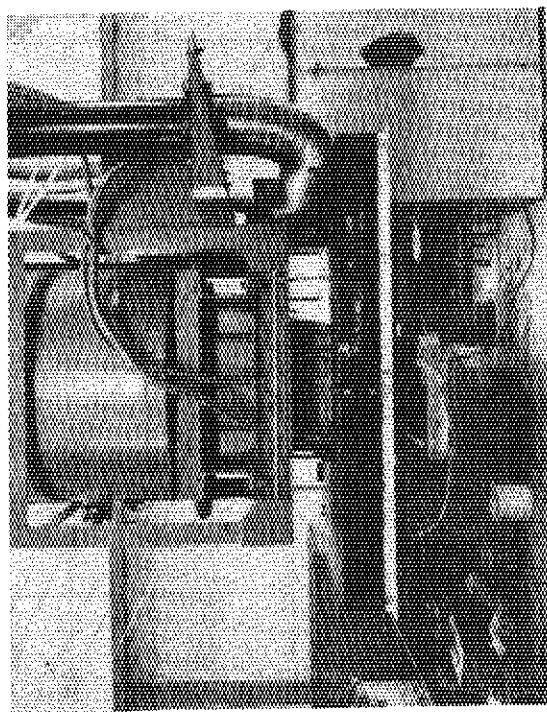
(a)



(b)



(c)



(d)

Photo 1 Photographs of the accelerator beam scanner.

(a) : view from the East, (b) : from the West, (c) : from the South, and (d) : from the North.

Table 1 Dose rate in the irradiation room at various distance
from the target (Z) in the horizontal plane (X - Y).

Along the Scanning (Down 5 cm)		Y (cm)											
Distance	X (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
0	1.18E+05	1.80E+04	4.72E+03	1.90E+03	1.06E+03	6.50E+03	4.47E+02	3.21E+02	2.49E+02	1.86E+02	1.42E+02	1.21E+02	
10	7.30E+04	1.19E+04	3.87E+03	1.69E+03	9.90E+02	6.12E+02	4.32E+02	3.13E+02	2.45E+02	1.84E+02	1.42E+02	1.22E+02	
20	9.95E+03	3.90E+03	2.20E+03	1.25E+03	8.11E+02	5.51E+02	3.97E+02	2.96E+02	2.34E+02	1.79E+02	1.39E+02	1.22E+02	
30	2.18E+03	1.62E+03	1.16E+03	8.15E+02	6.15E+02	4.63E+02	3.46E+02	2.69E+02	2.19E+02	1.70E+02	1.30E+02	1.16E+02	
40	9.83E+02	8.28E+02	6.40E+02	5.32E+02	4.46E+02	3.62E+02	2.90E+02	2.32E+02	1.92E+02	1.51E+02	1.19E+02	1.06E+02	
50	5.27E+02	4.68E+02	4.09E+02	3.62E+02	3.21E+02	2.79E+02	1.97E+02	1.63E+02	1.32E+02	1.07E+02	9.70E+01		
60	3.36E+02	3.10E+02	2.80E+02	2.58E+02	2.36E+02	2.12E+02	1.87E+02	1.62E+02	1.37E+02	1.13E+02	9.60E+01	8.85E+01	
70	2.29E+02	2.16E+02	2.01E+02	1.89E+02	1.76E+02	1.60E+02	1.48E+02	1.32E+02	1.16E+02	9.75E+01	8.55E+01	8.00E+01	
80	1.63E+02	1.56E+02	1.50E+02	1.42E+02	1.34E+02	1.25E+02	1.18E+02	1.07E+02	9.75E+01	8.45E+01	7.63E+01	7.30E+01	
90	1.23E+02	1.19E+02	1.14E+02	1.10E+02	1.05E+02	9.99E+01	9.50E+01	8.82E+01	8.15E+01	7.45E+01	6.91E+01	6.62E+01	
100	1.01E+02	9.75E+01	9.35E+01	9.10E+01	8.80E+01	8.45E+01	7.99E+01	7.45E+01	7.01E+01	6.70E+01	6.40E+01	6.21E+01	

Unit : R/h

Along the Scanning (Down 10 cm)

Distance X (cm)	Y (cm)											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
0	5.70E+04	1.94E+04	5.75E+03	2.67E+03	1.42E+03	8.83E+02	6.40E+02	4.65E+02	3.51E+02	2.69E+02	2.06E+02	1.61E+02
10	3.61E+04	1.37E+04	4.75E+03	2.36E+03	1.30E+03	8.45E+02	6.15E+02	4.42E+02	3.40E+02	2.65E+02	2.00E+02	1.59E+02
20	1.12E+04	5.49E+03	2.78E+03	1.72E+03	1.07E+03	7.39E+02	5.61E+02	4.10E+02	3.19E+02	2.52E+02	1.97E+02	1.53E+02
30	3.55E+03	2.36E+03	1.51E+03	1.17E+03	8.34E+02	6.19E+02	4.90E+02	3.66E+02	2.91E+02	2.34E+02	1.77E+02	1.46E+02
40	1.43E+03	1.16E+03	9.00E+02	7.75E+02	6.25E+02	5.00E+02	4.12E+02	3.13E+02	2.56E+02	2.09E+02	1.63E+02	1.37E+02
50	7.25E+02	6.55E+02	5.71E+02	5.27E+02	4.58E+02	3.95E+02	3.36E+02	2.63E+02	2.18E+02	1.80E+02	1.49E+02	1.29E+02
60	4.50E+02	4.25E+02	3.90E+02	3.63E+02	3.32E+02	2.96E+02	2.61E+02	2.15E+02	1.82E+02	1.54E+02	1.32E+02	1.19E+02
70	2.93E+02	2.81E+02	2.69E+02	2.54E+02	2.39E+02	2.16E+02	1.99E+02	1.72E+02	1.49E+02	1.29E+02	1.15E+02	1.08E+02
80	2.05E+02	2.00E+02	1.94E+02	1.85E+02	1.75E+02	1.62E+02	1.51E+02	1.36E+02	1.20E+02	1.08E+02	9.95E+01	9.55E+01
90	1.57E+02	1.52E+02	1.46E+02	1.40E+02	1.32E+02	1.25E+02	1.16E+02	1.08E+02	9.90E+01	9.15E+01	8.72E+01	8.45E+01
100	1.29E+02	1.25E+02	1.21E+02	1.16E+02	1.09E+02	1.01E+02	9.53E+01	9.05E+01	8.60E+01	8.15E+01	7.75E+01	7.51E+01

Unit : R/h

Along the Scanning (Down 20 cm)

Distance X (cm)	Y (cm)											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
0	2.28E+04	1.38E+04	6.94E+03	3.25E+03	1.89E+03	1.19E+03	7.91E+02	5.50E+02	4.13E+02	3.12E+02	2.62E+02	2.13E+02
10	1.69E+04	1.12E+04	6.05E+03	2.92E+03	1.75E+03	1.13E+03	7.60E+02	5.48E+02	4.07E+02	3.04E+02	2.59E+02	2.10E+02
20	9.00E+03	6.59E+03	4.06E+03	2.30E+03	1.48E+03	9.96E+02	7.00E+02	5.25E+02	3.91E+02	2.95E+02	2.52E+02	2.08E+02
30	4.26E+03	3.60E+03	2.51E+03	1.60E+03	1.15E+03	8.34E+02	6.25E+02	4.85E+02	3.66E+02	2.82E+02	2.42E+02	2.01E+02
40	2.18E+03	1.93E+03	1.51E+03	1.08E+03	8.40E+02	6.70E+02	5.35E+02	4.30E+02	3.31E+02	2.62E+02	2.29E+02	1.93E+02
50	1.25E+03	1.12E+03	8.99E+02	7.32E+02	6.10E+02	5.20E+02	4.36E+02	3.60E+02	2.90E+02	2.39E+02	2.08E+02	1.80E+02
60	7.64E+02	6.90E+02	5.85E+02	5.00E+02	4.33E+02	3.87E+02	3.38E+02	2.92E+02	2.42E+02	2.12E+02	1.85E+02	1.61E+02
70	4.83E+02	4.45E+02	3.91E+02	3.47E+02	3.09E+02	2.81E+02	2.55E+02	2.27E+02	2.01E+02	1.80E+02	1.60E+02	1.43E+02
80	3.21E+02	2.98E+02	2.70E+02	2.46E+02	2.25E+02	2.10E+02	1.93E+02	1.74E+02	1.61E+02	1.48E+02	1.35E+02	1.24E+02
90	2.21E+02	2.10E+02	1.96E+02	1.85E+02	1.74E+02	1.62E+02	1.49E+02	1.36E+02	1.27E+02	1.21E+02	1.135E+02	1.04E+02
100	1.75E+02	1.66E+02	1.58E+02	1.51E+02	1.44E+02	1.35E+02	1.26E+02	1.18E+02	1.12E+02	1.05E+02	9.80E+01	9.10E+01

Unit : R/h

Along the Scanning (Down 30 cm)

Distance X (cm)	Y (cm)											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
0	1.17E+04	9.05E+03	5.65E+03	3.32E+03	1.94E+03	1.25E+03	9.20E+02	6.55E+02	4.70E+02	3.64E+02	2.87E+02	2.36E+02
10	1.02E+04	7.75E+03	5.00E+03	3.10E+03	1.85E+03	1.21E+03	8.93E+02	6.38E+02	4.58E+02	3.55E+02	2.80E+02	2.30E+02
20	6.95E+03	5.30E+03	3.72E+03	2.51E+03	1.62E+03	1.08E+03	8.15E+02	6.00E+02	4.40E+02	3.40E+02	2.70E+02	2.21E+02
30	4.20E+03	3.34E+03	2.60E+03	1.89E+03	1.31E+03	9.25E+02	7.06E+02	5.45E+02	4.05E+02	3.20E+02	2.54E+02	2.10E+02
40	2.47E+03	2.07E+03	1.72E+03	1.37E+03	1.01E+03	7.52E+02	5.99E+02	4.76E+02	3.60E+02	2.82E+02	2.30E+02	1.95E+02
50	1.55E+03	1.35E+03	1.15E+03	9.65E+02	7.67E+02	6.00E+02	4.85E+02	3.95E+02	3.11E+02	2.46E+02	2.06E+02	1.78E+02
60	1.00E+03	8.99E+02	7.85E+02	6.80E+02	5.80E+02	4.68E+02	3.85E+02	3.22E+02	2.61E+02	2.12E+02	1.84E+02	1.61E+02
70	6.74E+02	6.09E+02	5.48E+02	4.90E+02	4.32E+02	3.60E+02	3.02E+02	2.59E+02	2.16E+02	1.83E+02	1.63E+02	1.45E+02
80	4.60E+02	4.25E+02	3.90E+02	3.56E+02	3.21E+02	2.80E+02	2.39E+02	2.06E+02	1.77E+02	1.57E+02	1.42E+02	1.30E+02
90	3.27E+02	3.02E+02	2.80E+02	2.61E+02	2.40E+02	2.17E+02	1.92E+02	1.67E+02	1.46E+02	1.35E+02	1.25E+02	1.15E+02
100	2.51E+02	2.35E+02	2.20E+02	2.02E+02	1.89E+02	1.72E+02	1.60E+02	1.41E+02	1.30E+02	1.20E+02	1.12E+02	1.06E+02

Unit : R/h

Along the Scanning (Down 40 cm)

Distance X (cm)	Y (cm)											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
0	6.99E+03	6.10E+03	5.50E+03	2.52E+03	1.69E+03	1.11E+03	7.80E+02	6.00E+02	4.65E+02	3.65E+02	2.91E+02	2.49E+02
10	6.49E+03	5.55E+03	3.30E+03	2.38E+03	1.59E+03	1.06E+03	7.65E+02	5.89E+02	4.56E+02	3.56E+02	2.87E+02	2.43E+02
20	4.75E+03	4.42E+03	2.75E+03	2.02E+03	1.40E+03	9.75E+02	7.02E+02	5.54E+02	4.40E+02	3.45E+02	2.73E+02	2.35E+02
30	3.30E+03	3.12E+03	2.06E+03	1.64E+03	1.17E+03	8.20E+02	6.30E+02	5.09E+02	4.19E+02	3.28E+02	2.60E+02	2.26E+02
40	2.24E+03	2.13E+03	1.51E+03	1.24E+03	9.39E+02	6.79E+02	5.38E+02	4.50E+02	3.70E+02	2.97E+02	2.42E+02	2.14E+02
50	1.54E+03	1.46E+03	1.08E+03	9.01E+02	7.33E+02	5.55E+02	4.46E+02	3.82E+02	3.31E+02	2.62E+02	2.20E+02	1.96E+02
60	1.06E+03	9.99E+02	7.76E+02	6.71E+02	5.70E+02	4.41E+02	3.67E+02	3.24E+02	2.81E+02	2.31E+02	1.99E+02	1.80E+02
70	7.65E+02	7.11E+02	5.68E+02	5.05E+02	4.46E+02	3.57E+02	3.05E+02	2.69E+02	2.41E+02	2.02E+02	1.78E+02	1.60E+02
80	5.71E+02	5.20E+02	4.30E+02	3.89E+02	3.50E+02	2.86E+02	2.52E+02	2.27E+02	2.05E+02	1.78E+02	1.58E+02	1.42E+02
90	4.41E+02	3.97E+02	3.31E+02	3.00E+02	2.72E+02	2.31E+02	2.10E+02	1.93E+02	1.78E+02	1.54E+02	1.39E+02	1.28E+02
100	3.50E+02	3.08E+02	2.59E+02	2.36E+02	2.15E+02	1.92E+02	1.78E+02	1.67E+02	1.52E+02	1.36E+02	1.25E+02	1.15E+02

Unit : R/h

Along the Scanning (Down 50 cm)

Distance	Y (cm)											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
0	3.89E+03	3.66E+03	2.73E+03	2.08E+03	1.52E+03	1.12E+03	8.15E+03	6.30E+02	4.63E+02	3.81E+02	3.12E+02	2.60E+02
10	3.54E+03	3.35E+03	2.64E+03	1.93E+03	1.48E+03	1.09E+03	7.94E+02	6.20E+02	4.55E+02	3.73E+02	3.05E+02	2.56E+02
20	2.97E+03	2.82E+03	2.35E+03	1.70E+03	1.32E+03	1.02E+03	7.49E+02	5.78E+02	4.29E+02	3.58E+02	2.92E+02	2.48E+02
30	2.40E+03	2.28E+03	1.91E+03	1.41E+03	1.14E+03	9.18E+02	8.89E+02	6.76E+02	5.20E+02	3.99E+02	3.33E+02	2.75E+02
40	1.85E+03	1.75E+03	1.48E+03	1.12E+03	9.18E+02	7.54E+02	5.89E+02	4.50E+02	3.54E+02	3.05E+02	2.55E+02	2.37E+02
50	1.38E+03	1.33E+03	1.14E+03	8.76E+02	7.38E+02	6.15E+02	5.00E+02	3.91E+02	3.17E+02	2.71E+02	2.35E+02	2.11E+02
60	1.04E+03	9.95E+02	8.55E+02	6.90E+02	5.98E+02	4.99E+02	4.18E+02	3.33E+02	2.77E+02	2.40E+02	2.12E+02	1.95E+02
70	7.80E+02	7.50E+02	6.40E+02	5.30E+02	4.68E+02	4.06E+02	3.42E+02	2.85E+02	2.40E+02	2.14E+02	1.92E+02	1.78E+02
80	5.85E+02	5.59E+02	4.79E+02	4.20E+02	3.75E+02	3.36E+02	2.86E+02	2.42E+02	2.05E+02	1.85E+02	1.71E+02	1.60E+02
90	4.50E+02	4.27E+02	3.79E+02	3.42E+02	3.02E+02	2.73E+02	2.39E+02	2.05E+02	1.76E+02	1.60E+02	1.51E+02	1.42E+02
100	3.62E+02	3.40E+02	3.00E+02	2.79E+02	2.49E+02	2.30E+02	2.04E+02	1.76E+02	1.52E+02	1.32E+02	1.28E+02	1.26E+02

Unit : R/h

Along the Scanning (Down 60 cm)

Distance	Y (cm)											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
0	3.24E+03	3.01E+03	2.46E+03	1.93E+03	1.56E+03	1.18E+03	7.60E+03	5.91E+02	4.39E+02	3.74E+02	3.10E+02	2.69E+02
10	3.07E+03	2.85E+03	2.41E+03	1.82E+03	1.51E+03	1.15E+03	7.49E+02	5.86E+02	4.34E+02	3.63E+02	3.04E+02	2.66E+02
20	2.67E+03	2.51E+03	2.17E+03	1.67E+03	1.38E+03	1.06E+03	7.20E+02	5.60E+02	4.21E+02	3.45E+02	2.96E+02	2.61E+02
30	2.18E+03	2.04E+03	1.76E+03	1.42E+03	1.20E+03	9.35E+02	6.60E+02	5.15E+02	3.97E+02	3.31E+02	2.87E+02	2.50E+02
40	1.70E+03	1.57E+03	1.40E+03	1.17E+03	1.00E+03	8.00E+02	5.80E+02	4.60E+02	3.61E+02	3.11E+02	2.73E+02	2.36E+02
50	1.30E+03	1.22E+03	1.07E+03	9.40E+02	8.26E+02	6.80E+02	5.00E+02	4.02E+02	3.15E+02	2.82E+02	2.54E+02	2.21E+02
60	1.00E+03	9.40E+02	8.51E+02	7.60E+02	6.81E+02	5.60E+02	4.32E+02	3.44E+02	2.71E+02	2.49E+02	2.30E+02	2.05E+02
70	7.70E+02	7.38E+02	6.71E+02	6.01E+02	5.40E+02	4.55E+02	3.61E+02	3.00E+02	2.39E+02	2.22E+02	2.07E+02	1.89E+02
80	6.00E+02	5.70E+02	5.30E+02	4.80E+02	4.30E+02	3.70E+02	3.01E+02	2.58E+02	2.07E+02	1.96E+02	1.84E+02	1.71E+02
90	4.70E+02	4.50E+02	4.15E+02	3.80E+02	3.50E+02	3.10E+02	2.56E+02	2.20E+02	1.84E+02	1.62E+02	1.48E+02	1.30E+02
100	3.80E+02	3.65E+02	3.40E+02	3.19E+02	2.97E+02	2.70E+02	2.28E+02	1.98E+02	1.66E+02	1.55E+02	1.42E+02	1.30E+02

Unit : R/h

Along the Scanning (Down 70 cm)

Distance X (cm)	Y (cm)	Y (cm)										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	2.51E+03	2.34E+03	2.07E+03	1.65E+03	1.40E+03	1.10E+03	8.69E+02	6.95E+02	5.31E+02	4.20E+02	3.55E+02	2.89E+02
10	2.40E+03	2.25E+03	2.00E+03	1.56E+03	1.36E+03	1.08E+03	8.40E+02	6.75E+02	5.13E+02	4.12E+02	3.45E+02	2.84E+02
20	2.15E+03	2.02E+03	1.81E+03	1.44E+03	1.26E+03	1.02E+03	7.92E+02	6.45E+02	4.97E+02	4.05E+02	3.35E+02	2.80E+02
30	1.79E+03	1.73E+03	1.52E+03	1.27E+03	1.13E+03	9.20E+02	7.39E+02	6.02E+02	4.65E+02	3.81E+02	3.20E+02	2.67E+02
40	1.45E+03	1.39E+03	1.26E+03	1.10E+03	9.63E+02	8.05E+02	6.72E+02	5.50E+02	4.26E+02	3.56E+02	3.00E+02	2.49E+02
50	1.16E+03	1.12E+03	1.02E+03	9.06E+02	7.93E+02	6.84E+02	5.81E+02	4.92E+02	3.81E+02	3.26E+02	2.73E+02	2.30E+02
60	9.20E+02	8.90E+02	8.33E+02	7.26E+02	6.45E+02	5.66E+02	5.00E+02	4.20E+02	3.43E+02	2.90E+02	2.45E+02	2.13E+02
70	7.30E+02	7.07E+02	6.70E+02	5.80E+02	5.24E+02	4.75E+02	4.17E+02	3.63E+02	3.01E+02	2.57E+02	2.22E+02	1.98E+02
80	5.83E+02	5.62E+02	5.29E+02	4.70E+02	4.35E+02	4.02E+02	3.60E+02	3.13E+02	2.61E+02	2.26E+02	1.99E+02	1.82E+02
90	4.71E+02	4.53E+02	4.20E+02	3.88E+02	3.62E+02	3.41E+02	3.19E+02	2.73E+02	2.30E+02	2.00E+02	1.76E+02	1.62E+02
100	3.90E+02	3.71E+02	3.47E+02	3.30E+02	3.15E+02	2.98E+02	2.76E+02	2.42E+02	2.01E+02	1.76E+02	1.55E+02	1.42E+02

Unit : R/h

Along the Scanning (Down 80 cm)

Distance X (cm)	Y (cm)	Y (cm)										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	1.88E+03	1.80E+03	1.61E+03	1.32E+03	1.13E+03	9.40E+02	7.79E+02	6.05E+02	4.90E+02	4.12E+02	3.53E+02	2.95E+02
10	1.80E+03	1.73E+03	1.56E+03	1.29E+03	1.09E+03	9.15E+02	7.66E+02	5.95E+02	4.79E+02	4.09E+02	3.50E+02	2.90E+02
20	1.66E+03	1.60E+03	1.46E+03	1.20E+03	1.04E+03	8.70E+02	7.20E+02	5.68E+02	4.70E+02	3.98E+02	3.43E+02	2.83E+02
30	1.48E+03	1.41E+03	1.31E+03	1.09E+03	9.39E+02	8.01E+02	6.64E+02	5.27E+02	4.45E+02	3.80E+02	3.25E+02	2.73E+02
40	1.25E+03	1.20E+03	1.12E+03	9.58E+02	8.25E+02	7.06E+02	5.91E+02	4.87E+02	4.18E+02	3.55E+02	3.03E+02	2.60E+02
50	1.03E+03	9.94E+02	9.35E+02	8.18E+02	7.26E+02	6.20E+02	5.25E+02	4.32E+02	3.80E+02	3.27E+02	2.80E+02	2.40E+02
60	8.40E+02	8.11E+02	7.72E+02	6.95E+02	6.16E+02	5.28E+02	4.60E+02	3.90E+02	3.40E+02	2.96E+02	2.58E+02	2.21E+02
70	6.85E+02	6.68E+02	6.38E+02	5.16E+02	4.55E+02	3.97E+02	3.41E+02	3.05E+02	2.68E+02	2.35E+02	2.05E+02	1.70E+02
80	5.67E+02	5.49E+02	5.21E+02	4.79E+02	4.40E+02	4.00E+02	3.43E+02	2.98E+02	2.42E+02	2.70E+02	2.15E+02	1.90E+02
90	4.72E+02	4.52E+02	4.35E+02	4.03E+02	3.73E+02	3.40E+02	3.00E+02	2.66E+02	2.42E+02	2.20E+02	1.94E+02	1.75E+02
100	3.95E+02	3.80E+02	3.60E+02	3.42E+02	3.19E+02	2.90E+02	2.64E+02	2.38E+02	2.20E+02	2.00E+02	1.75E+02	1.60E+02

Unit : R/h

Along the Scanning (Down 90 cm)

Distance X (cm)	Y (cm)											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
0	1.52E+03	1.44E+03	1.34E+03	1.13E+03	9.50E+02	8.14E+02	6.80E+02	6.05E+02	4.95E+02	4.19E+02	3.40E+02	2.95E+02
10	1.47E+03	1.40E+03	1.29E+03	1.09E+03	9.25E+02	8.00E+02	6.65E+02	5.93E+02	4.85E+02	4.12E+02	3.47E+02	2.89E+02
20	1.38E+03	1.32E+03	1.20E+03	1.03E+03	9.05E+02	8.85E+02	7.56E+02	6.43E+02	5.66E+02	4.70E+02	4.04E+02	3.30E+02
30	1.25E+03	1.18E+03	1.10E+03	9.50E+02	8.20E+02	7.00E+02	6.04E+02	5.36E+02	4.42E+02	3.80E+02	3.20E+02	2.71E+02
40	1.08E+03	1.04E+03	9.60E+02	8.38E+02	7.39E+02	6.45E+02	5.51E+02	4.92E+02	4.15E+02	3.57E+02	3.02E+02	2.58E+02
50	9.00E+02	8.75E+02	8.22E+02	7.27E+02	6.50E+02	5.72E+02	4.95E+02	4.40E+02	3.85E+02	3.32E+02	2.81E+02	2.40E+02
60	7.52E+02	7.25E+02	7.01E+02	6.30E+02	5.62E+02	5.10E+02	4.42E+02	3.99E+02	3.50E+02	3.06E+02	2.64E+02	2.25E+02
70	6.20E+02	6.10E+02	5.99E+02	5.39E+02	4.82E+02	4.35E+02	3.82E+02	3.55E+02	3.17E+02	2.75E+02	2.44E+02	2.10E+02
80	5.22E+02	5.12E+02	5.03E+02	4.56E+02	4.13E+02	3.75E+02	3.36E+02	3.12E+02	2.79E+02	2.46E+02	2.20E+02	1.95E+02
90	4.44E+02	4.35E+02	4.25E+02	3.92E+02	3.50E+02	3.25E+02	2.95E+02	2.73E+02	2.50E+02	2.22E+02	1.98E+02	1.78E+02
100	3.78E+02	3.70E+02	3.63E+02	3.39E+02	3.10E+02	2.85E+02	2.64E+02	2.44E+02	2.22E+02	2.00E+02	1.85E+02	1.67E+02

Unit : R/h

Along the Scanning (Down 100 cm)

Distance X (cm)	Y (cm)											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
0	1.23E+03	1.18E+03	1.10E+03	9.50E+02	8.11E+02	7.00E+02	6.00E+02	5.15E+02	4.20E+02	3.52E+02	3.10E+02	2.70E+02
10	1.19E+03	1.13E+03	1.06E+03	9.28E+02	7.98E+02	6.96E+02	5.95E+02	5.10E+02	4.20E+02	3.50E+02	3.08E+02	2.69E+02
20	1.13E+03	1.07E+03	1.01E+03	8.90E+02	7.75E+02	6.82E+02	5.90E+02	5.00E+02	4.17E+02	3.50E+02	3.02E+02	2.65E+02
30	1.02E+03	9.65E+02	9.15E+02	8.25E+02	7.20E+02	6.41E+02	5.60E+02	4.80E+02	4.05E+02	3.40E+02	2.95E+02	2.56E+02
40	9.05E+02	8.65E+02	8.20E+02	7.40E+02	6.60E+02	5.89E+02	5.18E+02	4.55E+02	3.83E+02	3.20E+02	2.79E+02	2.47E+02
50	7.98E+02	7.60E+02	7.25E+02	6.54E+02	5.80E+02	5.20E+02	4.65E+02	4.12E+02	3.52E+02	3.00E+02	2.60E+02	2.32E+02
60	6.88E+02	6.55E+02	6.21E+02	5.65E+02	5.00E+02	4.54E+02	4.05E+02	3.65E+02	3.16E+02	2.72E+02	2.40E+02	2.19E+02
70	5.79E+02	5.55E+02	5.26E+02	4.80E+02	4.31E+02	3.91E+02	3.50E+02	3.11E+02	2.78E+02	2.43E+02	2.16E+02	2.01E+02
80	4.82E+02	4.62E+02	4.40E+02	4.05E+02	3.61E+02	3.20E+02	3.00E+02	2.70E+02	2.41E+02	2.15E+02	1.95E+02	1.80E+02
90	4.06E+02	3.92E+02	3.71E+02	3.40E+02	3.09E+02	2.82E+02	2.60E+02	2.36E+02	2.12E+02	1.90E+02	1.72E+02	1.60E+02
100	3.48E+02	3.30E+02	3.21E+02	2.93E+02	2.70E+02	2.46E+02	2.26E+02	2.07E+02	1.87E+02	1.70E+02	1.55E+02	1.45E+02

Unit : R/h

4. あとがき

近年、学会、産業界における電子加速器の利用は目ざましく、それに伴って加速器の発生するX線に対する遮蔽の問題が重要になってきている。最近では特に1MeV以下の低エネルギー加速器が産業界で普及するようになり、建屋による遮蔽を考えない自己シールド型のものもできている。一般に放射線遮蔽を行う場合、必要最小限の材料を用い、しかもある程度の安全率を見込んでおくことが望ましい。不必要に過大な遮蔽を行うのは経済的にも、空間的にも無駄である。この遮蔽を設計する場合に参考にできる基礎データは非常に少い。多くは、特殊な条件下におけるモデル実験によってデータをとったものであり、理論計算値との対比などを行っている学術的報告が殆んどである。さらに実験の容易な単一エネルギーのアイソトープ(⁶⁰Coなど)に関するものが多く、複雑なエネルギースペクトルをもつ制動輻射X線に関するデータは乏しい。

実際の施設では個々の場合に応じた特殊な設計を必要とするのが常で、上述の実験データはほとんど利用できない。

大阪支所には昭和33年に設置されたバンデグラーフ加速器(定格2MeV, 250μA)があり、この建屋をモデル実験の対象として新しい加速器棟の設計のために大いに役立てることができたことは幸いであった。大阪支所の高線量率加速器は設置以来順調に稼動し今日に至っている。放射線遮蔽に関しては十分な予備実験のもとに遮蔽設計を行った。特に加速器棟は住宅地に接近した土地環境にあるので、そのことを念頭に建物の配置を考えた。放射線遮蔽に関する出来上りは非常に良好で設計値以下の漏えい値であり、照射室内で多少の手直しはあったものの外部に対する放射線遮蔽に関してはほど完璧な形で仕上げることができた。

照射室内の放射線量率は今後も必要に応じて測定を続けていく予定である。本報告後半のデータ集は実際の測定値をそのまま収録したものであり、数多くの照射条件のごく1例にすぎないがX線の遮蔽計算あるいはX線照射を行う際に十分参考になると確信する。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、栗山将大阪支所長、畠田主任研究員から終始有益な御助言をいたさいた。高線量率加速器設置後、建屋外の放射線量の測定を行ったが、その際は大阪支所の研究系職員全員の御協力を得、すみやかに多くのデータを短時間でまとめあげることができた。照射室内X線量の測定には近畿大学学生末永泰敬君の協力を得た。またデータの計算機処理には大阪支所の来島利幸氏の援助を頂いた。これら諸氏に謝意を表する。

4. あとがき

近年、学会、産業界における電子加速器の利用は目ざましく、それに伴って加速器の発生するX線に対する遮蔽の問題が重要になってきている。最近では特に1MeV以下の低エネルギー加速器が産業界で普及するようになり、建屋による遮蔽を考えない自己シールド型のものもできている。一般に放射線遮蔽を行う場合、必要最小限の材料を用い、しかもある程度の安全率を見込んでおくことが望ましい。不必要に過大な遮蔽を行うのは経済的にも、空間的にも無駄である。この遮蔽を設計する場合に参考にできる基礎データは非常に少い。多くは、特殊な条件下におけるモデル実験によってデータをとったものであり、理論計算値との対比などを行っている学術的報告が殆んどである。さらに実験の容易な単一エネルギーのアイソトープ(⁶⁰Coなど)に関するものが多く、複雑なエネルギースペクトルをもつ制動輻射X線に関するデータは乏しい。

実際の施設では個々の場合に応じた特殊な設計を必要とするのが常で、上述の実験データはほとんど利用できない。

大阪支所には昭和33年に設置されたパンデグラーフ加速器(定格2MeV, 250μA)があり、この建屋をモデル実験の対象として新しい加速器棟の設計のために大いに役立つことができたことは幸いであった。大阪支所の高線量率加速器は設置以来順調に稼動し今日に至っている。放射線遮蔽に関しては十分な予備実験のもとに遮蔽設計を行った。特に加速器棟は住宅地に接近した土地環境にあるので、そのことを念頭に建物の配置を考えた。放射線遮蔽に関する出来上りは非常に良好で設計値以下の漏えい値であり、照射室内で多少の手直しあつたものの外部に対する放射線遮蔽に関してはほど完璧な形で仕上げることができた。

照射室の放射線量率は今後も必要に応じて測定を続けていく予定である。本報告後半のデータ集は実際の測定値をそのまま収録したものであり、数多くの照射条件のごく1例にすぎないがX線の遮蔽計算あるいはX線照射を行う際に十分参考になると確信する。

謝　　辞

本報告をまとめるにあたり、栗山将大阪支所長、畠田主任研究員から終始有益な御助言をいたさういた。高線量率加速器設置後、建屋外の放射線量の測定を行ったが、その際は大阪支所の研究系職員全員の御協力を得、すみやかに多くのデータを短時間でまとめあげることができた。照射室内X線量の測定には近畿大学学生末永泰敬君の協力を得た。またデータの計算機処理には大阪支所の来島利幸氏の援助を頂いた。これら諸氏に謝意を表する。

文 献

- 1) 放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（1950）
- 2) 四本, 須永, 水橋, 田中, 田村; JAER I-M 9345 "3 MeV, 75 KW, 電子加速器設置報告"
- 3) M. J. Berger and S.M. Seltzer; Table of Energy Losses and Ranges of Electrons and Positrons, NASA SP-3012, NASA (1964)
- 4) M. J. Berger and S.M. Seltzer; Stopping Powers and Ranges of Electrons and Positrons (2nd Ed.), NBSIR 82-2550-A (1982)
- 5) J.H. Hubbell; Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients and Energy Absorption Coefficients from 10 KeV to 100 GeV; NSRDS-NBS 29 NBS (1969)
- 6) 兵藤知典; 放射線遮蔽入門, 産業図書 (1966)
- 7) T. Rockwell III ed, Reactor Shielding Design Manual McGraw Hill (1956)
- 8) 江藤他, 放射線の防護 丸善 (1972)
- 9) W. Miller, J. W. Motz and C. Cialella, Phys. Rev., 96, 1344 (1954)
- 10) W. Buechner et al., Phys. Rev., 74, 1348 (1948)
- 11) 大放射線量実用測定法, 放射線照射振興協会 (1978)
- 12) S. Tanaka, R. Tanaka, T. Tabata, R. Ito, Y. Nakai, K. Ozawa; JAER I-M 83-019 (1983)
- 13) K. Matsuda et al., JAER I-M 83-199, P. 49 (1983)