

JAERI-M
92-062

電子線照射容器の製作とその特性

1992年5月

金沢 孝夫・春山 保幸・四本 圭一

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

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1992

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

電子線照射容器の製作とその特性

日本原子力研究所高崎研究所材料開発部

金沢 孝夫・春山 保幸・四本 圭一

(1992年4月7日受理)

被照射体の雰囲気を制御して、真空中やガス気流中で電子線を照射するための照射容器を設計製作した。本照射容器は、水冷却スリット板、照射容器本体、差込み式試料支持台から構成される。

差込み式試料支持台は材質を変えて4台製作し、その材質はアルミニウム、ステンレス鋼(SUS-304)、銅の3種類である。

このうちSUS-304製の試料支持台は、冷却パイプ内に加熱用ヒーターを埋め込む一体型構造としたことにより、冷媒による冷却とヒーターを用いた加熱の切り替えを簡単に行なうことができる。これにより照射後の試料を外気に接触させることなく、加熱冷却処理することが可能となった。

このような試料支持台を有する照射容器の、温度特性と材質の異なる試料支持台を用いたときの線量特性(線量分布・後方散乱の影響)を調べた。また測定値と計算値との比較検討を行った。

Manufacture of Electron Beam Irradiation Vessel
and Its Characteristics

Takao KANAZAWA, Yasuyuki HARUYAMA and Keiichi YOTSUMOTO

Department of Material Development
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received April 7, 1992)

Electron beam irradiation vessel, which is used for the irradiation of samples under an inert or a vacuum atmosphere, is made by considering the temperature control during or after irradiation. The vessel was composed of the temperature controllable samples supporting plate, beam slit with water cooling plate and the insert of thermosensor. The four samples supporting plate was produced with the materials made up of aluminium, stainless steel (SUS304), and copper. The stainless steel supporting plate has a heater inside the cooling pipes for the high temperature treatment of samples without exposure to atmosphere after the irradiation.

In this report, the temperature distribution and dose characteristics such as dose distribution and effects of backscattered electron were studied by using several supporting plate and the comparison of the experimental results with the simulated results was also carried out.

Keywords: Electron Beam, Irradiation Vessel, Heating, CTA Film, Depth Dose, Back Scattering

目 次

1.はじめに	1
2.照射容器の構造.....	1
2.1 概要.....	1
2.2 装置の構成.....	2
2.3 各種性能.....	3
3.照射容器の温度特性.....	4
3.1 電子線照射時の温度上昇	4
3.2 温度制御特性	5
4.照射容器の線量特性	5
4.1 線量分布特性	5
4.2 後方散乱の影響	7
4.3 応用例及び計算結果との比較	8
5.あとがき	10
謝辞.....	10
参考文献.....	11

Contents

1.	Introduction	1
2.	Structure of Irradiation Vessel	1
2.1	Outline of Vessel	1
2.2	Composition of System	2
2.3	Characteristics of System	3
3.	Thermal Properties of Irradiation Vessel	4
3.1	Temperature Rise for Electron Beam Irradiation	4
3.2	Special Properties on Heating Control	5
4.	Dose Evaluation in Vessel	5
4.1	Dose Rate Distribution in Vessel	5
4.2	Effect of Back Scattering	7
4.3	Example of Using Vessel and Comparison with Calculation	8
5.	Summary	10
	Acknowledgement	10
	References	11

1. はじめに

電子加速器を用いて繊維の架橋や有機材料の耐放射線性試験を行うため、また無機材料に格子欠陥を導入するためなどの場合に、真空中照射やガス気流中照射等の雰囲気制御、低温照射や高温照射等の温度制御など、条件を変えて照射する必要性が増してきた。

これまで真空照射容器やガス気流中照射用容器¹⁾を単品として製作し、適用してきたが、そのような照射容器は、冷却系と加熱系が独立の設備であるため、要求される条件を設定できないという不満があった。

今回、試料を真空または不活性ガス中で冷却状態で照射後、外気に接触させずに加熱処理するという新しい照射実験が計画された。具体的には、繊維の架橋、不融化実験において、無酸素状態で大線量を照射した後、空気に曝露されない状態を保持して、試料内のラジカルを加熱消滅処理するものである。この実験計画に対応するため、従来の真空照射容器やガス気流中照射容器を組み合わせた新しい照射容器の設計を行った。冷却と加熱の切り替えを行うために、冷媒用の通路内に加熱用のヒーター線をそのまま埋め込む構造の試料支持台を組み込んだ新照射容器を製作した。

この新照射容器では加熱・冷却の系統を一体化したことにより次のような特長を付与できた。
 ①加熱と冷却の切り替えに時間がかかるない、②試料入り容器を真空のまま、あるいは不活性ガス雰囲気から空気にさらすことなく加熱と冷却を反復してできる、③一体化構造の試料支持台なので加熱と冷却どちらの場合も効率的な熱伝達が確保できる、ことである。

本報告では新照射容器の構造、試料支持台の温度特性について述べるとともに、SUS-304、アルミニウム及び銅の試料支持台を用いたときの、照射容器内の線量分布や後方散乱の影響などの線量特性及び深部線量分布計算用プログラム“EDMULT”²⁾の計算値との比較検討結果について報告する。

2. 照射容器の構造

2.1 概 要

本照射容器は、種々の雰囲気における有機材料の耐放射線性試験や、無機材料を真空中及び、ガス気流中で照射するために設計製作されたものであり、水冷却スリット板1台、照射容器本体1台、差込み式試料支持台で構成される。差込み式試料支持台は中空の角パイプで作られ、その材質は、SUS-304、アルミニウム、銅の3種類である。

試料支持台の寸法は全て同一で、冷却が可能な構造である。このうちSUS-304製の試料支持台2台は、冷却部・ヒーター加熱部が一体の構造となっており、冷媒による冷却とヒーターを用いた加熱とにより、試料を任意の温度で照射することや、照射後に試料の温度を広範囲に制

1. はじめに

電子加速器を用いて繊維の架橋や有機材料の耐放射線性試験を行うため、また無機材料に格子欠陥を導入するためなどの場合に、真空中照射やガス気流中照射等の雰囲気制御、低温照射や高温照射等の温度制御など、条件を変えて照射する必要性が増してきた。

これまで真空照射容器やガス気流中照射用容器¹⁾を単品として製作し、適用してきたが、そのような照射容器は、冷却系と加熱系が独立の設備であるため、要求される条件を設定できないという不満があった。

今回、試料を真空または不活性ガス中で冷却状態で照射後、外気に接触させずに加熱処理するという新しい照射実験が計画された。具体的には、繊維の架橋、不融化実験において、無酸素状態で大線量を照射した後、空気に曝露されない状態を保持して、試料内のラジカルを加熱消滅処理するものである。この実験計画に対応するため、従来の真空照射容器やガス気流中照射容器を組み合わせた新しい照射容器の設計を行った。冷却と加熱の切り替えを行うために、冷媒用の通路内に加熱用のヒーター線をそのまま埋め込む構造の試料支持台を組み込んだ新照射容器を製作した。

この新照射容器では加熱・冷却の系統を一体化したことにより次のような特長を付与できた。
①加熱と冷却の切り替えに時間がかかるない、②試料入り容器を真空のまま、あるいは不活性ガス雰囲気から空気にさらすことなく加熱と冷却を反復してできる、③一体化構造の試料支持台なので加熱と冷却どちらの場合も効率的な熱伝達が確保できる、ことである。

本報告では新照射容器の構造、試料支持台の温度特性について述べるとともに、SUS-304、アルミニウム及び銅の試料支持台を用いたときの、照射容器内の線量分布や後方散乱の影響などの線量特性及び深部線量分布計算用プログラム“EDMULT”²⁾の計算値との比較検討結果について報告する。

2. 照射容器の構造

2.1 概要

本照射容器は、種々の雰囲気における有機材料の耐放射線性試験や、無機材料を真空中及び、ガス気流中で照射するために設計製作されたものであり、水冷却スリット板1台、照射容器本体1台、差込み式試料支持台で構成される。差込み式試料支持台は中空の角パイプで作られ、その材質は、SUS-304、アルミニウム、銅の3種類である。

試料支持台の寸法は全て同一で、冷却が可能な構造である。このうちSUS-304製の試料支持台2台は、冷却部・ヒーター加熱部が一体の構造となっており、冷媒による冷却とヒーターを用いた加熱とにより、試料を任意の温度で照射することや、照射後に試料の温度を広範囲に制

御することが可能である。試料支持台以外の、容器そのほか各種構造材の材質は、電子線照射により発生するオゾン対策のため、SUS-304を用いている。

Photo.1に本照射容器を用いた電子加速器照射実験の配置を示す。また、Photo.2にアルミニウム製の試料支持台を示す。

2.2 装置の構成

(1) 水冷却スリット板

本器は照射容器本体の上部に設置し、電子線入射窓以外は電子線が当たらないようにするために用いる。電子加速器の出力が加速電圧2MV、ビーム電流20mAのときでも、冷却スリット板表面の温度を100°C（水温20°Cで流速20l/minの場合）以下に抑えることが出来るように設計されており、実際にこの出力のときの表面測定温度は、87°Cであった。

冷却スリット板はSUS-304の角パイプ（19×10×1.5）を溶接によりつなぎあわせた構造であり、全体の寸法は長さ1000mm、幅500mmで厚さは30mmである。中央に開口部があり、その大きさは、長さ580mm、幅70mmである。この水冷却スリット板を用いて大電流で長時間照射した場合、側壁や支持台からの散乱電子線の影響で、容器の電子線入射部が高温になるので、冷却スリット板の下側にアルミニウム製の過熱防止枠を設けることとした。その開口部の大きさは、長さ520mm、幅60mmである。これにより大電流・長時間照射の場合の窓部過熱を抑制することができた。しかし後述のように試料位置での線量分布の不均一性が増大するので、1~3mAの低電流の場合は、窓枠部の過熱が少ないので過熱防止枠をはずし、大電流の場合と使い分けを行っている。

冷却スリット板の下部には、照射容器の中心に再現性良くスリット板を固定するためのガイドを設けている。給排水配管の接続部は1/2インチのワンタッチカップリングの雌ネジ止（バルブ付き）となっている。

(2) 照射容器

Fig.1に照射容器の構造（Fig.1-a：平面図、Fig.1-b：側面図）を示す。図に示されているように本照射容器には、温度や電子流などの計測用ポートが2個、真空排気及びガス導入孔が各1個設けられている。容器の片方の短側面は、O-リングを用いて気密を保つ構造で、試料支持台を差し込んで迅速・簡便に固定できる。

容器の内面の寸法は、長さ720mm、幅120mm、深さは100mmである。

電子入射窓の材質はチタン箔（厚さ50μ）であり、窓の寸法は、長さ600mm、幅80mmである。

入射窓のチタン箔の固定は放射線劣化対策、高真空度の保持性能を考慮してアルミニウムのパッキンを使用した。本容器の到達真空度の仕様性能は 6.5×10^{-3} Pa (5×10^{-5} Torr) である。

(3) 差込み式試料支持台

同じ寸法のものが計4台あり、SUS-304製の試料支持台は前述のように加熱と冷却兼用で

ある。

SUS-304 製	2 台
アルミニウム製	1 台
銅製	1 台

Fig.1-c に SUS-304 製の試料支持台の平面図を示す。この試料支持台は長さ 700mm, 幅 110mm で、SUS-304 の角パイプで構成されている。Fig.1-c の A-A 断面図に示すように、支持台の内部は冷媒用の通路が設けられるとともに、その通路内部に加熱用ヒーターが埋め込まれ、支持台試料面の均一な加熱と冷却が可能な構造となっている。また試料支持台の下端は、容器の床面から 10mm の高さに位置し、試料支持台差込み部と容器の間は断熱された構造である。この差込み式試料支持台には、温度を計測するための温度センサーを差込む孔が設けられている。

冷却温度は冷媒に液体窒素を用いれば液体窒素温度に近い温度まで下げることが可能であるが、通常は水冷却による水温 20℃ 程度である。ヒーター加熱については、1kW のヒーターを温度センサーで制御することにより、40℃ から 300℃ の温度範囲で制御可能である。

試料支持台の材質の違いによる後方散乱電子の影響比較のためにアルミニウム製、銅製の試料支持台を製作した。これらの試料支持台は SUS-304 の場合と同様に、それぞれの材質の角パイプで構成されており、同じ寸法である。但しこの 2 台の場合は加熱用ヒーターの埋め込みは無く、冷却のみが可能となっている。

給排水配管接続部は 1/2 インチのワンタッチカップリングの雄ネジ側（バルブなし）である。

2.3 各種性能

Fig.2-a に試料支持台における特性試験の際の測定ポイントの配置図を示す。Fig.2-b は測定の標準的な設定をしたときの、電子加速器と照射容器との幾何学的関係を示す。

(1) 真空度測定

到達真空度	3.9×10^{-3} Pa (3 × 10 ⁻⁵ Torr)
保持真空度	1.3×10^{-2} Pa (1 × 10 ⁻⁴ Torr) (12 時間後の値)

真空ポンプは大亜製 DS-A212-U 型排気装置を使用した。真空度は大亜製デジタルピラニゲージで計測した。

(2) 試料支持台水冷試験

電子線照射は高崎研 1 号加速器³⁾ を用いて行った。加速電圧 2MV、ビーム電流 20mA (照射窓下 30cm における電子流密度 $9.2 \mu A/cm^2$)、冷却水流速 61/min のとき、SUS-304 製試料支持台の中心部 (Fig.2-a の Bc 点) の上昇飽和温度は 61℃ であった。これは約 40℃ の温度上昇 (水温 20.5℃) になる。

(3) 加熱制御特性

Table 1 に、1kW ヒーターで加熱したときの試料支持台表面の温度分布を示す。

Fig.3 は設定温度を 300℃ にしたときの試料支持台表面 Bc, BR の各点における加熱時間と測

定温度の関係を示す。図でわかるように支持台の試料面温度はヒーターのON-OFFにより設定値付近に制御されている。

3. 照射容器の温度特性

3.1 電子線照射時の温度上昇

Fig.2-bに示す幾何学的条件、すなわち試料支持台表面が電子加速器の照射窓下30cmの位置にくる配置で、電子線照射時におけるSUS-304、アルミニウム及び銅製の支持台を使用したときの、照射容器各部の温度上昇特性を求めた。

Fig.4にSUS-304製支持台を装着して、加速電圧2MVで照射したときの、ビーム電流と照射容器各部の飽和上昇温度の関係を示す。

Fig.5及び6にアルミニウム製支持台を使用した場合の、加速電圧2MV、ビーム電流10mA及び20mAの照射条件における照射容器各部の温度上昇を示す。同様にFig.7に銅製支持台を使用した場合の、加速電圧2MV、ビーム電流10mA照射時の照射容器各部の温度上昇を示す。

Fig.5とFig.7を比較すると、同じ水量の冷却水を用いた場合において、同じ電子線の入力であっても試料支持台の飽和温度、照射容器側壁及び上部フレーム部の温度上昇速度及び飽和温度は、図に見られるように支持台の材質により大きく異なっている。すなわち加速電圧2MV、ビーム電流10mAの照射条件における銅製支持台の表面温度飽和値は冷却水温度が18°Cの場合で、52°C（上昇温度34°C）、アルミニウム製支持台の場合は、46°C（上昇温度28°C）である。また、2MV、20mAの場合の表面温度飽和値は、銅製が81°C（上昇温度約63°C）、アルミニウム製が72°C（上昇温度54°C）となっている。このような支持台表面温度飽和値の違いは、支持台を構成する角パイプの熱伝達特性と肉厚の違いによるものと考えられる。

照射容器側壁及び上部フレーム部の温度上昇速度及び飽和温度の支持台材質による差は、支持台からの熱伝達効果によるものではなく、主に、支持台材料の原子番号の大きさに依存する後方散乱電子の寄与の違いに基づくものと解釈できる。上部フレーム部は比較的早めに飽和する傾向を示すが、SUS-304製の照射容器側壁の温度は、照射時間と共に増大してなかなか飽和しない。これは照射容器側壁の材質が熱伝導の小さいSUS-304であること、側壁の肉厚が大きいことに原因があると考えられる。

照射容器の各部の温度特性がこのような傾向を示すので、ビーム電流が20mAを越えるような大電流で長時間照射しようとする場合は、試料と接する支持台の温度上昇から、ビーム電流値を設定するのではなく、照射試料の厚さや、照射雰囲気にも注意を払う必要がある。

特に真空中照射で、試料の熱伝導度が悪いような場合などは、試料の過熱防止のため、低いビーム電流で照射することが望ましい。また、試料の温度上昇をある程度の範囲に抑えて、かつ大線量を照射する場合には、試料冷却用のガスを流すなどの照射条件を工夫することが必要である。

定温度の関係を示す。図でわかるように支持台の試料面温度はヒーターのON-OFFにより設定値付近に制御されている。

3. 照射容器の温度特性

3.1 電子線照射時の温度上昇

Fig.2-bに示す幾何学的条件、すなわち試料支持台表面が電子加速器の照射窓下30cmの位置にくる配置で、電子線照射時におけるSUS-304、アルミニウム及び銅製の支持台を使用したときの、照射容器各部の温度上昇特性を求めた。

Fig.4にSUS-304製支持台を装着して、加速電圧2MVで照射したときの、ビーム電流と照射容器各部の飽和上昇温度の関係を示す。

Fig.5及び6にアルミニウム製支持台を使用した場合の、加速電圧2MV、ビーム電流10mA及び20mAの照射条件における照射容器各部の温度上昇を示す。同様にFig.7に銅製支持台を使用した場合の、加速電圧2MV、ビーム電流10mA照射時の照射容器各部の温度上昇を示す。

Fig.5とFig.7を比較すると、同じ水量の冷却水を用いた場合において、同じ電子線の入力であっても試料支持台の飽和温度、照射容器側壁及び上部フレーム部の温度上昇速度及び飽和温度は、図に見られるように支持台の材質により大きく異なっている。すなわち加速電圧2MV、ビーム電流10mAの照射条件における銅製支持台の表面温度飽和値は冷却水温度が18°Cの場合で、52°C（上昇温度34°C）、アルミニウム製支持台の場合は、46°C（上昇温度28°C）である。また、2MV、20mAの場合の表面温度飽和値は、銅製が81°C（上昇温度約63°C）、アルミニウム製が72°C（上昇温度54°C）となっている。このような支持台表面温度飽和値の違いは、支持台を構成する角パイプの熱伝達特性と肉厚の違いによるものと考えられる。

照射容器側壁及び上部フレーム部の温度上昇速度及び飽和温度の支持台材質による差は、支持台からの熱伝達効果によるものではなく、主に、支持台材料の原子番号の大きさに依存する後方散乱電子の寄与の違いに基づくものと解釈できる。上部フレーム部は比較的早めに飽和する傾向を示すが、SUS-304製の照射容器側壁の温度は、照射時間と共に増大してなかなか飽和しない。これは照射容器側壁の材質が熱伝導の小さいSUS-304であること、側壁の肉厚が大きいことに原因があると考えられる。

照射容器の各部の温度特性がこのような傾向を示すので、ビーム電流が20mAを越えるような大電流で長時間照射しようとする場合は、試料と接する支持台の温度上昇から、ビーム電流値を設定するのではなく、照射試料の厚さや、照射雰囲気にも注意を払う必要がある。

特に真空中照射で、試料の熱伝導度が悪いような場合などは、試料の過熱防止のため、低いビーム電流で照射することが望ましい。また、試料の温度上昇をある程度の範囲に抑えて、かつ大線量を照射する場合には、試料冷却用のガスを流すなどの照射条件を工夫することが必要である。

3.2 温度制御特性

前節で示したTable 1の100℃～300℃の温度制御を行うとき、温度分布の測定値からわかるように、加熱時のSUS-304製試料支持台表面の中心部と端部との温度の差はわずかであり、ほぼ均一と見なせる。また、Fig.3に示すように実験温度を300℃に設定した場合の支持台の温度変化特性から、比較的短い時間内に設定温度に達することがわかる。

冷却下で照射を行った後、加熱処理する場合は、試料支持台内部の冷却水を開放用バルブで排出した後、その開放用バルブを付けたままで、ヒーターによる加熱を開始する。支持台が加熱されると、内部に残っていた水分は蒸気となって排出される。ヒーター加熱時にも照射容器側壁の温度は支持台からの熱伝導および輻射により上昇するが、300℃の設定時で上昇飽和約70℃程度であった。

4. 照射容器の線量特性

4.1 線量分布特性

照射容器内の線量分布を求めるに際し、照射容器を配置する場における電子流密度分布及びCTAフィルム線量計⁴⁾による深部線量分布を測定した。電子流密度分布測定には、高崎研において開発されたチャージコレクター⁵⁾を用いた。

データの比較測定実験には主にSUS-304製の試料支持台を用い、照射条件は加速電圧2MV、ビーム電流1mAで、照射窓下30cmの値を用いた。

Fig.8に加速電圧2MV、ビーム電流1mAのときの、照射窓下20cm, 30cm, 50cmにおける照射場のY軸方向（スキャンホールの短軸方向、垂直ビーム照射の場合コンベヤの進行方向、以下同様）の電子流密度分布を示す。Fig.8の電子流密度分布が窓下距離の増加とともに平滑化され、ピーク電子流密度が減少するのは、加速管内で加速された電子が照射窓（材質はチタンで厚さ50μ）及び空気層で散乱、拡散されるためである。

Fig.9は標準的な照射条件における、CTAフィルム線量計で測定した、容器内外の深部線量分布の比較を示す。実線は照射容器を用いない場合の深部線量分布であり、黒い四角印は照射容器内の深部線量分布を示す。容器内の深部線量分布の方が面積が小さいのは、容器の入射窓（チタン厚50μ）によるエネルギー吸収及び散乱の効果によると思われる。また照射容器内では、試料の厚さが薄い部分（表面部分）の線量は、容器の入射窓や容器側壁からの散乱電子線の影響で、容器外の線量よりも高い値となっているが、0.2g/cm²を境とした厚い部分になると、低めの傾向となる。この原因是、主に入射窓によるエネルギー損失によるものと考えられる。

Fig.10に容器内の各測定点における深部線量分布を示す。Fig.11に冷却スリット板に窓枠過熱防止のアルミニウム枠を付けない状態での、X軸方向（スキャンホールの長手方向、走査方向、以下同様）線量分布を示す。Fig.10において、Y軸方向に3.5cmずれた位置の深部線量分布は

3.2 温度制御特性

前節で示したTable 1の100℃～300℃の温度制御を行うとき、温度分布の測定値からわかるように、加熱時のSUS-304製試料支持台表面の中心部と端部との温度の差はわずかであり、ほぼ均一と見なせる。また、Fig.3に示すように実験温度を300℃に設定した場合の支持台の温度変化特性から、比較的短い時間内に設定温度に達することがわかる。

冷却下で照射を行った後、加熱処理する場合は、試料支持台内部の冷却水を開放用バルブで排出した後、その開放用バルブを付けたままで、ヒーターによる加熱を開始する。支持台が加熱されると、内部に残っていた水分は蒸気となって排出される。ヒーター加熱時にも照射容器側壁の温度は支持台からの熱伝導および輻射により上昇するが、300℃の設定時で上昇飽和約70℃程度であった。

4. 照射容器の線量特性

4.1 線量分布特性

照射容器内の線量分布を求めるに際し、照射容器を配置する場における電子流密度分布及びCTAフィルム線量計⁴⁾による深部線量分布を測定した。電子流密度分布測定には、高崎研において開発されたチャージコレクター⁵⁾を用いた。

データの比較測定実験には主にSUS-304製の試料支持台を用い、照射条件は加速電圧2MV、ビーム電流1mAで、照射窓下30cmの値を用いた。

Fig.8に加速電圧2MV、ビーム電流1mAのときの、照射窓下20cm, 30cm, 50cmにおける照射場のY軸方向（スキャンホールの短軸方向、垂直ビーム照射の場合コンベヤの進行方向、以下同様）の電子流密度分布を示す。Fig.8の電子流密度分布が窓下距離の増加とともに平滑化され、ピーク電子流密度が減少するのは、加速管内で加速された電子が照射窓（材質はチタンで厚さ50μ）及び空気層で散乱、拡散されるためである。

Fig.9は標準的な照射条件における、CTAフィルム線量計で測定した、容器内外の深部線量分布の比較を示す。実線は照射容器を用いない場合の深部線量分布であり、黒い四角印は照射容器内の深部線量分布を示す。容器内の深部線量分布の方が面積が小さいのは、容器の入射窓（チタン厚50μ）によるエネルギー吸収及び散乱の効果によると思われる。また照射容器内では、試料の厚さが薄い部分（表面部分）の線量は、容器の入射窓や容器側壁からの散乱電子線の影響で、容器外の線量よりも高い値となっているが、0.2g/cm²を境とした厚い部分になると、低めの傾向となる。この原因是、主に入射窓によるエネルギー損失によるものと考えられる。

Fig.10に容器内の各測定点における深部線量分布を示す。Fig.11に冷却スリット板に窓枠過熱防止のアルミニウム枠を付けない状態での、X軸方向（スキャンホールの長手方向、走査方向、以下同様）線量分布を示す。Fig.10において、Y軸方向に3.5cmずれた位置の深部線量分布は

中心の位置におけるそれと比較して、大きく低下している。この両者の面積の差はFig.11における中心位置の線量とY軸方向に3cmずれた位置の線量の差よりも格段に大きくなっている。X軸方向に25cmずれた位置における深部線量もY軸方向にずれた場合ほどではないが、低下傾向を示している。中心の位置の線量率が、Fig.9の結果のように容器外の線量率よりも低い値となっていることから、ここに示した照射容器を用いた場合の照射線量は、通常は空間線量に比べて低くなると考えなければならない。また端部の線量の低下傾向が中心部より大きいのは、前述の斜め入射成分の減少、チタンの入射窓による損失に加えて、照射容器上部の冷却スリット板の開口部が狭いための、入射電子の減少効果が現れているためではないかと思われる。

以上のように容器内の深部線量分布（この分布曲線で囲まれる面積が実質的な試料への流入エネルギー量）は、場所により異なるわけであるが、薄い試料の場合は厚い試料と異なり、散乱電子線などエネルギーの低い電子の、吸収線量に対する寄与が大きくなってくる。

Fig.12はFig.11と同一条件における、CTAフィルムを用いて測定した容器内の試料支持台表面のY軸方向線量分布を示す。Fig.11のX軸方向の線量分布は約50cmの範囲内ではほぼ均一であるが、Y軸方向は均一の範囲が少ない。これは、もともとY軸方向線量分布は、Fig.8の電子流密度分布に見られるように均一部分が少ない分布であることに加え、冷却スリット板や容器の入射窓の開口部が狭いことによるものと考えられる。容器外の照射実験であれば、Fig.8の窓下50cmの分布に見られるように、窓下距離を増すことにより均一なY軸方向分布を確保できるが、容器内においては、冷却スリット板及び入射窓で斜め入射成分がカットされるため、距離を増してもY軸分布の均一性は改善されない。

また、この照射容器のX軸方向の分布はFig.11のように、Fig.2-aに示す測定ポイントの広い範囲にわたって均一な表面線量分布を示すが、試料の厚さ方向の分布（深部線量分布）を考慮にいれた全吸収線量で比較すると、端部は中心部よりも大きく落ち込む結果となる。これは雰囲気を制御して照射実験条件を整えるために、照射効率や均一度をある程度犠牲にせざるを得ないということを意味している。

そのため、例えば4~5cm幅よりも大きい試料を、雰囲気制御を行いながら均一に照射したいという場合は、本容器よりも大きな入射窓部を持つ照射容器を用意するか、何らかの別の工夫（試料のスライドや回転）を講ずる必要がある。

Fig.13に入射窓部過熱防止用のアルミニウム枠を、冷却スリット板に取り付けた場合のX軸方向線量分布を示す。Fig.14に同一条件におけるY軸方向線量分布を示す。過熱防止用のアルミニウム枠がある場合（Fig.13, 14）とない場合（Fig.11, 12）を比較するとX軸およびY軸とともに、アルミニウム枠を装着した場合の端部の低下が大きくなっている。特にY軸方向分布は、Fig.14のBR地点（South25cm）の分布からわかるように落ち込みが大きい。この過熱防止用アルミニウム枠があるときとないときの、容器中心部のY軸方向分布比較例をFig.15（標準位置、窓下30cm）及びFig.16（窓下50cm）に示す。この図からわかるように、アルミニウム枠を装着したときは、容器中心部も含めて全体的に線量が低下する。このように冷却スリット板の開口部が少し狭くなっただけで容器中心部の線量まで低下するのは、容器がない状態での空間線量測定の場合に中心部線量に寄与するところが大きい空気散乱による斜め入射成分がカットされる効果が大きいことを示している。

以上の測定結果から、大電流で長時間照射を行う場合以外は、均一な照射野の確保のため、過熱防止用アルミニウム枠は取り付けないほうが望ましい。

以上のデータは、はじめに製作した加熱冷却兼用の、SUS-304製支持台を用いた測定結果であるが、次に熱伝導性改良及び後方散乱電子の効果比較用として製作した、アルミニウム製と銅製の試料支持台の線量分布測定結果について述べる。

アルミニウム製および銅製の支持台の場合の照射と測定の条件はSUS-304製の場合と同様に、加速電圧は2MV、ビーム電流は1mAで、照射窓下30cmを標準的な位置とした。また、窓枠過熱防止用のアルミニウム枠は取り外して測定した。

Fig.17とFig.18はそれぞれアルミニウム製試料支持台を用いた場合のX軸方向線量分布曲線と、Y軸方向線量分布曲線である。同様にFig.19、20は銅製試料支持台を用いたときのX軸方向線量分布曲線及びY軸方向線量分布曲線の結果である。

Y軸方向の線量分布はSUS-304製の場合のFig.12と同様に、どちらの場合も分布の形状と均一度は相似であるが、よく見ると線量分布のピーク位置におけるビーム電流1mAのときの線量率は、アルミニウム製支持台で1.13kGy/s、SUS-304で1.40kGy/s、銅で1.43kGy/sと材質により大きく異なっている。この線量率の値が、特にアルミニウム製の場合に他の二者と大きく異なる原因は、原子番号が小さいために後方散乱電子の寄与の割合が小さいことによるものと思われる。

4.2 後方散乱の影響

試料支持台の材質による後方散乱の影響の効果、すなわち線量率の材質による違いは表面だけでなく、当然、深部線量分布にも影響を及ぼしていると考えられる。そこで、CTAフィルムの枚数（厚さ）を変えて比較測定を行った。この実験では、横方向からの散乱電子線は遮断して、上下方向の電子線（入射線及び後方散乱線）のみが当たるようにする必要があり、アクリル製のCTAフィルムホルダーを作成した。このホルダーはCTAフィルムの測定用片（寸法は幅8mmで長さ約50mm）と同じ長方形で、枠の高さをフィルムの厚さと同じにするために、CTAの枚数に応じて数種類用意した。

Fig.21はSUS-304製の支持台を用いたときのCTAフィルム線量計の厚さと吸収線量の関係を示す。この図において、黒塗り三角印で途中までのデータが示されているCTAフィルム70枚の場合、その厚さは約1.1g/cm²であり、加速電圧2MVの電子の飛程以上となるので、後方散乱の影響を受けていないと考えて良い。これと比較して、丸や四角で示されるCTAフィルム10枚、20枚の場合は、表面の線量まで後方散乱の影響を受けて高くなることがわかる。この変化の度合いは後方散乱が影響する範囲（後方散乱電子のエネルギーの大きさ）の関係で、薄い試料の場合ほど大きくなる傾向があると考えられる。CTAフィルム30枚の場合は、厚さが0.3g/cm²を越えるあたりから後方散乱の影響が現れ始める。

同様の測定をアルミニウム及び銅製支持台を用いて、CTAフィルムの枚数を4枚から30枚まで変化させて行った。Fig.22はアルミニウム製支持台、Fig.23は銅製支持台の場合の結果を示す。CTAの吸収線量はCTAの枚数によって異なる値を示している。これは、枚数が少ない場

合は枚数の多い場合に比べ、支持台からの後方散乱の影響が著しいためと考えられる。またFig.22のアルミニウム製支持台の場合の各厚さにおける吸収線量と、Fig.23の銅製支持台の場合の線量とを、それぞれ比較するといずれの場合も銅製支持台上の線量が2割ほど高い値を示している。これは後方散乱の割合が原子番号が大きくなるほど増すためである。

これらの後方散乱電子の効果は、大電流照射時の温度上昇の項でも考察したように、照射容器測壁の温度上昇にもその影響が現れていることからも理解できる。

原子番号の違いによる後方散乱の度合いを、アルミニウム製支持台と銅製支持台の場合で比較すると薄い試料の場合は支持台の材質によりその吸収線量が大きく変わることがわかる。これらの測定結果に基づいて、CTA フィルムの各厚さ（枚数）毎に平均線量率を算出した。Table 2 に照射容器内の平均線量率と CTA フィルムの厚さとの関係を試料支持台の材質別に示す。

Fig.24 と Fig.25 に、銅製支持台を用いて測定した容器内深部線量分布データと、同じ銅製支持台上の容器外の深部線量分布データとの比較例を示す。Fig.24 は CTA の枚数が少ない（薄い）場合、Fig.25 は CTA の枚数が多い（ある程度厚い）場合を示す。薄い場合は図から明らかのように容器内深部線量分布のほうが容器外標準データよりも高い傾向にあるが、ある程度厚いサンプルになると逆転してくる。これは容器内の深部線量分布測定においては、側壁からの散乱電子などによる斜め入射成分が表面付近線量に影響するためと考えている。

4.3 応用例及び計算結果との比較

(1) 応用例

本照射容器を用いて CTA フィルム線量計の光学的濃度変化（照射後と照射前の分光光度計の吸光度の差、以下 ΔOD とする）の線量率依存性の確認実験を行った。既に CTA フィルム線量計の線量応答は、高線量率である電子線の場合と X 線や Y 線の場合とでは異なっていることがわかっており、またその着色機構も解明されている⁶⁾。今回は、1号加速器の垂直ビームを用いて、電子線の線量率を低下させたときの、CTA フィルム線量計の ΔOD を空気中と真空中で比較した。

垂直照射室の加速器の照射窓は床面から約 140cm の高さにある。照射窓からの距離が大きくなるほど低い線量率が得られるので照射容器を床面に設置した。このとき、アルミニウム製試料支持台及びその上に張り付けられた CTA フィルム線量計と照射窓との距離は約 130cm である。この位置における、加速電圧 2MV、ビーム電流 1mA のときの照射容器内支持台上の線量率は約 3.5×10^2 kGy/h（照射窓下 30cm における、同一条件の場合の線量率は約 4.0×10^3 kGy/h : 1.1 kGy/s）である。

Fig.26 は加速電圧 2MV でビーム電流を 0.05mA から 10mA まで変化させて、約 30kGy を照射したときの、CTA の ΔOD の空気中と真空中の測定値の違いを示す。横軸はビーム電流をその場の線量率に換算した値で、縦軸は真空中での ΔOD の平均値と各測定条件における ΔOD の比率である。丸印が照射容器内を真空度 2.6Pa 以下に保って照射したときの測定結果であり、四角印が照射容器内への空気の出入が自由な条件での値である。丸印で示される真空中の ΔOD 比はほぼ一定であるが、四角印で示される空気中の値は 2.0×10^2 kGy/h 以下の線量率で大きく変化している。

この結果により、電子線の場合でも低い線量率における線量測定の場合には、CTA フィルム線量計の線量率依存性に注意を払わねばならないことがわかる。

(2) 計算結果との比較

照射容器を用いて、耐放射線性フィルムなどを真空中照射する場合、試料支持台を冷却していても、積層したフィルムの厚さをある程度以上増すと、冷却効果が上部のフィルムに及ばないため、過熱などの悪影響が現れる。そのため耐放射線性フィルムを真空中照射するときは、低いビーム電流を選ぶとともに積層するフィルムの厚さを薄くして照射を行っている。しかしこのような薄い試料の照射のとき、前項で述べたように試料支持台からの後方散乱の影響で、試料の吸収線量は厚い試料のときよりも高くなることがわかっている。実際の照射においては、試料の厚さが変わる度に線量測定を行うことは難しいので、この線量の高くなる度合いと試料の厚さとの関係を計算で求め実測値と比較することとした。

照射容器内の試料の厚さを変えたとき、試料の受ける線量の平均値及び均一度がどのように変化するかを、銅の試料支持台、CTA フィルムの試料の場合をモデルとして、多幡等の開発した計算コード “EDMULT” を用いて計算した。

EDMULT で計算できるのは 3 成分条件までなので、今回の計算においては、加速管の照射窓（チタン：厚さ 50μ ）と照射容器の入射窓（チタン：厚さ 50μ ）及び空気層 30cm を合わせて第 1 層とし、CTA フィルムを第 2 層、銅の試料支持台を第 3 層とした。そして電子の初期エネルギーは 2MV とした。

Fig.27 にこの条件で行った EDMULT の計算結果の例を示す。図の横軸は試料の厚さ、縦軸は試料の受ける線量を示す。図に示されるように CTA フィルムの厚さが 0.2 g/cm^2 から 0.4, 0.6 と増すに従って、フィルム表面付近への後方散乱電子の影響が小さくなり、浅い部分の線量が低下している。Fig.28 に、CTA の試料片 20 枚と 30 枚をそれぞれ積層して照射したときの測定結果と EDMULT で同じ厚さの CTA を第 2 層として計算した結果の比較を示す。また Fig.29 に CTA の試料片を 50 枚としたときの、同様な測定と計算の比較を示す。図の横軸は試料の厚さで、縦軸は実測値と計算値を表面の値が一致するように換算した線量を示す。Fig.28 における実測値と計算値の曲線の傾きは似ており、試料の表面付近の浅い部分は良く一致している。しかし銅製の試料支持台に接する部分になると一致度は悪くなる。この不一致の原因は試料支持台への CTA 試料の密着度、照射容器側壁からの散乱電子線の影響などが考えられるが、CTA 20 枚と 30 枚とで計算結果とのズレの傾向が異なっているのでなんとも言えない。しかしそれほど大幅にずれているわけでもないと、Fig.29 に見るように、厚い試料の場合は全体に一致度が良い点を考え合わせると、実際の照射において各々の試料が照射される平均線量を計算で推定することについて、それほど問題ないと考えられる。Fig.30 に試料の厚さを変えたときの試料の照射線量の平均値が、試料を支持する台の材質によりどのように変化するかを計算した結果を示す。図において四角印で示されるのが CTA そのものを第 3 層として計算した結果、そして丸印が銅を第 3 層として計算した結果である。図の横軸は試料の厚さであり、縦軸は試料の厚さが 0.7 g/cm^2 のときの線量の平均値を 1 として各々の厚さの試料の線量平均値を示したものである。このように、照射容器を用いて薄い試料を銅製の試料支持台上で照射する場合は、それぞれの厚さに応じて、図に示されるように 1~2 割の補正を加える必要があることがわかる。

5. あとがき

真空中やガス気流中で電子線照射するための照射容器を製作し、その照射容器内の各種支持台の線量特性を重点的に測定した。この実験の結果、照射容器内の線量特性は、通常の大気中開放状態の照射の場合と大きく異なっていることがわかった。

照射容器内の線量は、今回の測定で明らかになったように、試料の種類、厚さなどのほかに、支持台の材質により大きく変化した。本照射容器のように、チタンの入射窓があり、周囲は壁で囲まれているという条件では、入射窓と壁からの散乱や支持台からの後方散乱が複雑に影響するために、試料の表面、内部、下部の線量分布の予測は、考慮すべき因子が多すぎて正確な線量の計算は困難と思われる。しかし深部線量分布簡易計算用プログラム“EDMULT”の照射容器内深部線量分布計算結果と実測値が比較的良く一致していたことから、概略の傾向をつかんだり分布をシミュレートするうえで計算用プログラムも有効に活用できることがわかった。

今回示した基礎的な線量特性は、実際の照射に当って線量測定を行う際に、線量率の見当をつけるために応用できるものと思われる。今後も、試料の厚さ、支持台の材質、加速電圧と電流、照射窓下距離など実際の照射条件に合わせて、その都度測定を行い、その場の線量率を求めて、データを蓄積していく予定である。

現在、この照射容器は、製作目的であった炭素繊維の架橋実験ばかりでなく、ポリイミド、PEEKなどの各種フィルム・シートの耐放射線性試験やSiCなど無機物への放射線損傷導入などの照射実験に頻繁に用いられている。

今後は、真空条件とガス雰囲気の線量特性の比較、試験試料の照射時の加熱制御の問題など、今までの使用経験の中で懸案として残っている事項について測定を行うとともに、チタン入射窓部の真空引きとガス気流加圧の繰り返しにともなう疲労劣化対策や支持台と容器の気密用Oーリング部の温度上昇対策など、本照射容器の改良についても検討を加えていく予定である。

謝　　辞

本報告書のまとめに際してご指導頂いた高崎研究所照射施設課長岡本次郎氏に深く感謝します。

本照射容器の設計製作に際して有益なご助言を頂いた高崎研究所極限材料研究室長瀬口忠男氏に深く感謝します。

本照射容器の特性測定実験に御協力頂いた東京ニュークリア一株山田力造氏に深く感謝します。

5. あとがき

真空中やガス気流中で電子線照射するための照射容器を製作し、その照射容器内の各種支持台の線量特性を重点的に測定した。この実験の結果、照射容器内の線量特性は、通常の大気中開放状態の照射の場合と大きく異なっていることがわかった。

照射容器内の線量は、今回の測定で明らかになったように、試料の種類、厚さなどのほかに、支持台の材質により大きく変化した。本照射容器のように、チタンの入射窓があり、周囲は壁で囲まれているという条件では、入射窓と壁からの散乱や支持台からの後方散乱が複雑に影響するために、試料の表面、内部、下部の線量分布の予測は、考慮すべき因子が多すぎて正確な線量の計算は困難と思われる。しかし深部線量分布簡易計算用プログラム“EDMULT”の照射容器内深部線量分布計算結果と実測値が比較的良好く一致していたことから、概略の傾向をつかんだり分布をシミュレートするうえで計算用プログラムも有効に活用できることがわかった。

今回示した基礎的な線量特性は、実際の照射に当って線量測定を行う際に、線量率の見当をつけるために応用できるものと思われる。今後も、試料の厚さ、支持台の材質、加速電圧と電流、照射窓下距離など実際の照射条件に合わせて、その都度測定を行い、その場の線量率を求めて、データを蓄積していく予定である。

現在、この照射容器は、製作目的であった炭素繊維の架橋実験ばかりでなく、ポリイミド、PEEKなどの各種フィルム・シートの耐放射線性試験やSiCなど無機物への放射線損傷導入などの照射実験に頻繁に用いられている。

今後は、真空条件とガス雰囲気の線量特性の比較、試験試料の照射時の加熱制御の問題など、今までの使用経験の中で懸案として残っている事項について測定を行うとともに、チタン入射窓部の真空引きとガス気流加圧の繰り返しにともなう疲労劣化対策や支持台と容器の気密用Oーリング部の温度上昇対策など、本照射容器の改良についても検討を加えていく予定である。

謝　　辞

本報告書のまとめに際してご指導頂いた高崎研究所照射施設課長岡本次郎氏に深く感謝します。

本照射容器の設計製作に際して有益なご助言を頂いた高崎研究所極限材料研究室長瀬口忠男氏に深く感謝します。

本照射容器の特性測定実験に御協力頂いた東京ニュークリア一株山田力造氏に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) 春山, 森田, 瀬口, 田中, 金沢, 四本, 吉田:JAERI-M 88-197, “高分子絶縁材料の γ 線と電子線の照射効果の比較”, 日本原子力研究所 (1988)
- 2) T. Tabata, et al: Radiat. Phys. Chem., 35, 821 (1990)
- 3) 金沢, 春山, 宇野, 四本, 田中, 鷺野, 吉田:JAERI-M 86-005, “高崎研一号加速器(デュアルビーム型, 2MeV, 60kW)の電子線出力特性”, 日本原子力研究所 (1986)
- 4) 田中, 三友, 須永, 松田, 田村:JAERI-M 82-033 “CTA線量計マニュアル”, 日本原子力研究所 (1982)
- 5) R. Tanaka, et al: Nucl. Instr. Methods, 174, 201 (1980)
- 6) K. Matsuda, S. Nagai: Appl. Radiat. Isot. 42, 12, 1215 (1991)

Table 1 Temperature at each position on plate
for sample support (Fig. 2-a) by
electric heating.

1) Setting Temperature: 100°C

	L : NORTH	C : CENTER	R : SOUTH
A : EAST	AL: 97 °C	AC: 117 °C	AR: 87 °C
B : CENTER	BL: 111 °C	BC: 110 °C	BR: 101 °C
C : WEST	CL: 98 °C	CC: 108 °C	CR: 94 °C

2) Setting Temperature: 200°C

	L : NORTH	C : CENTER	R : SOUTH
A : EAST	AL: 184 °C	AC: 188 °C	AR: 180 °C
B : CENTER	BL: 198 °C	BC: 205 °C	BR: 191 °C
C : WEST	CL: 187 °C	CC: 202 °C	CR: 186 °C

JAERI-M 92-062

Table 2 Change of CTA dose rate by support plate material. 2MeV, 1mA, d=30cm

CTA	AQ	plate	Cu
Thick. (g/cm ²)	(kGy/s)	(kGy/s)	(kGy/s)
0. 03	1. 14	1. 41	

	L : NORTH	C : CENTER	R : SOUTH
A : EAST	AL: 282 °C	AC: 294 °C	AR: 272 °C
B : CENTER	BL: 289 °C	BC: 302 °C	BR: 284 °C
C : WEST	CL: 282 °C	CC: 292 °C	CR: 277 °C

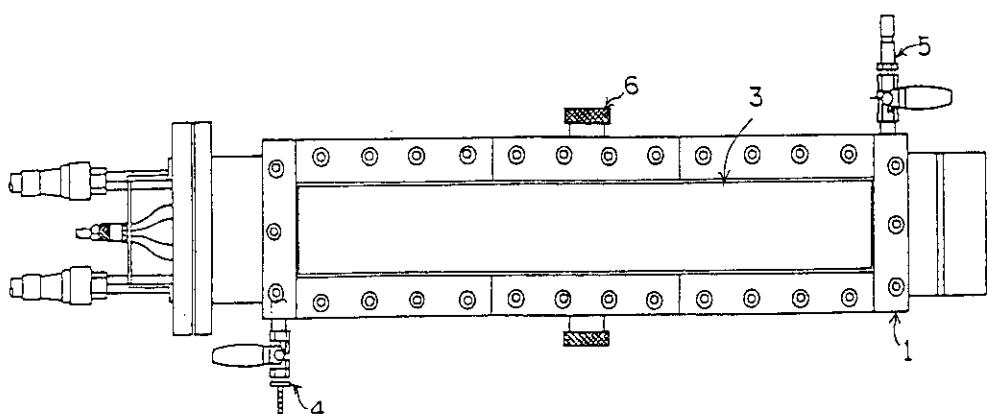


Fig. 1-a Plane view

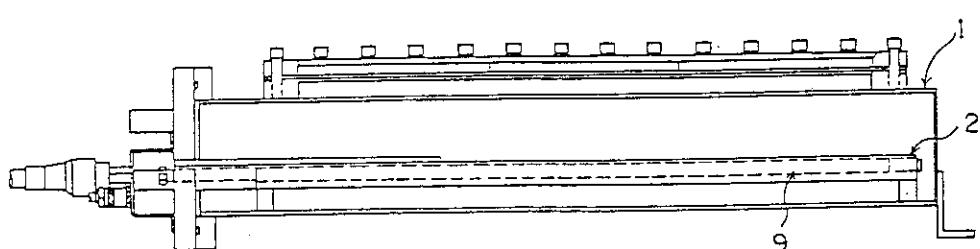
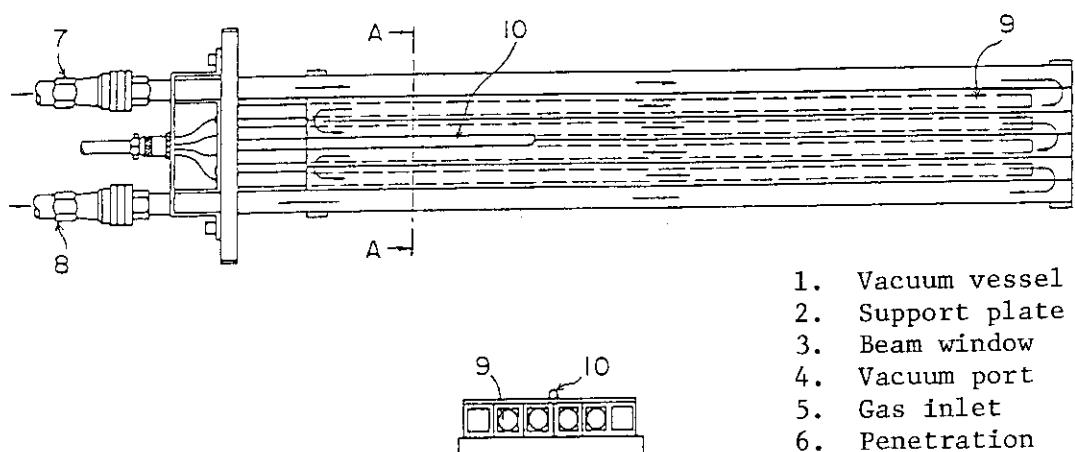


Fig. 1-b Side view



- 1. Vacuum vessel
- 2. Support plate
- 3. Beam window
- 4. Vacuum port
- 5. Gas inlet
- 6. Penetration
- 7.) Coolant pipe
- 8.
- 9. Electric heater
- 10. Thermo-sensor

Fig. 1-c Plate for sample support

Fig. 1 Structure of irradiation vessel.

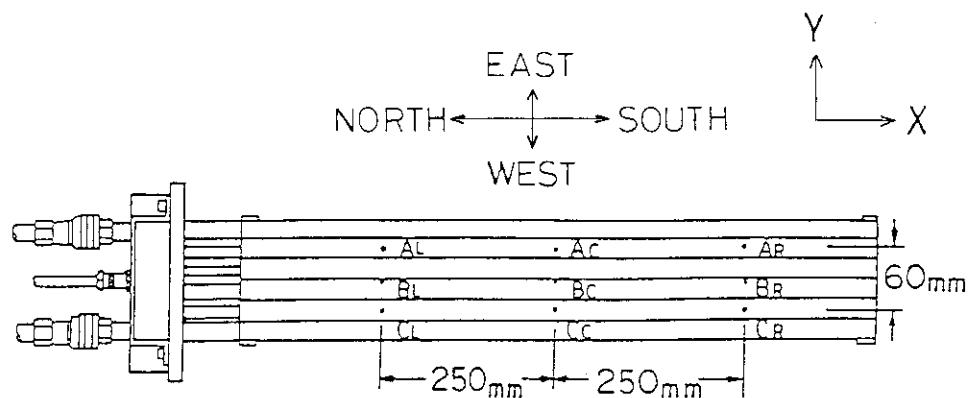


Fig. 2-a Detector position of temperature and dose on plate for sample support

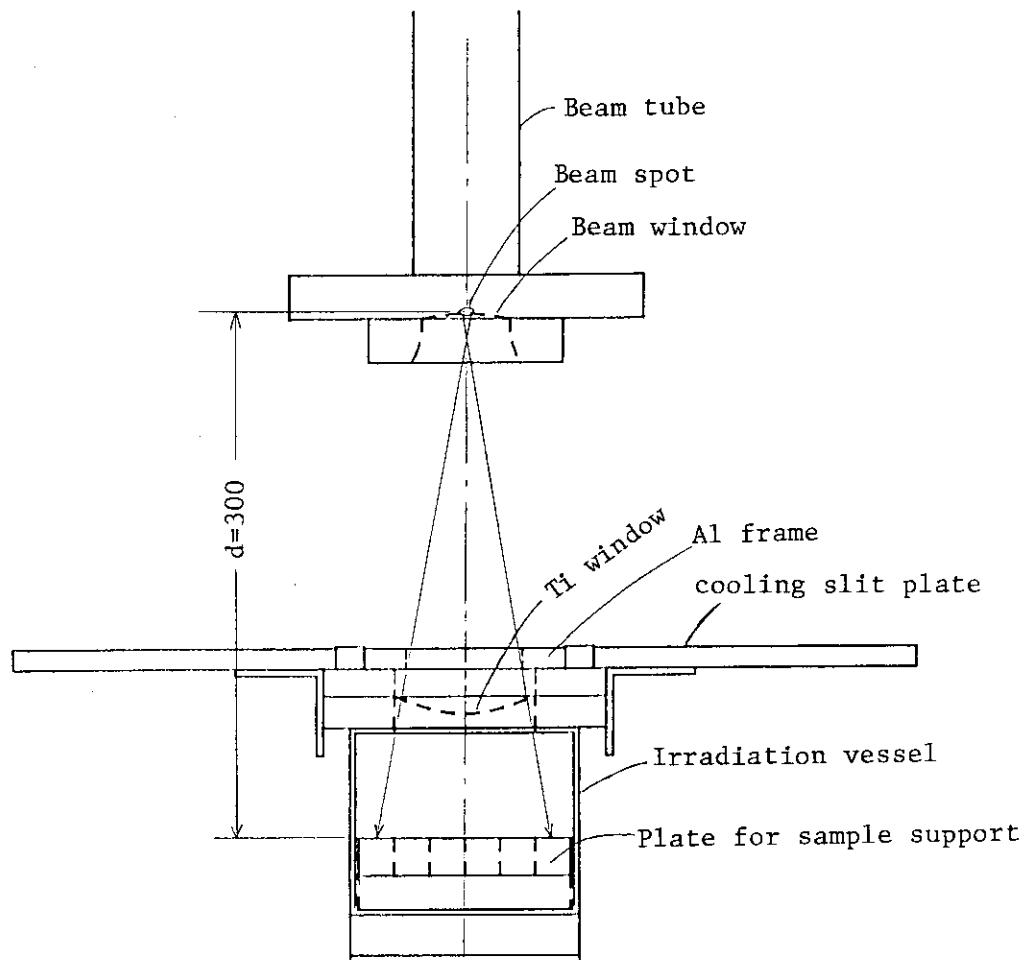


Fig. 2-b Setting of irradiation vessel under electron accelerator

Fig. 2 Experimental condition

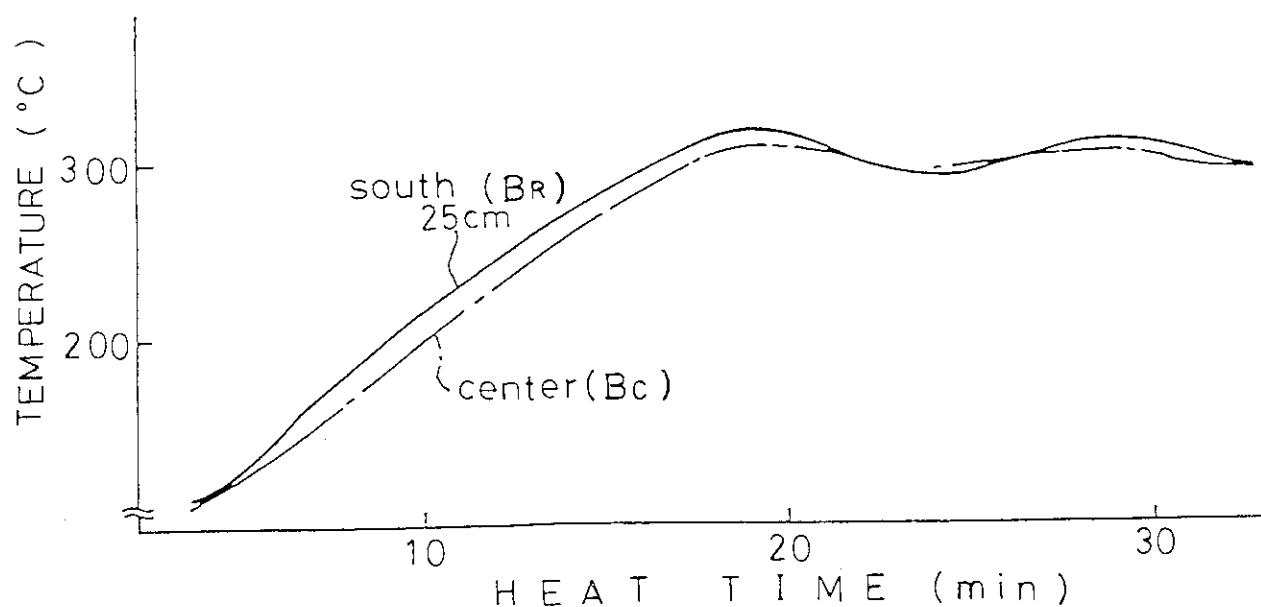


Fig. 3 Temperature-heat time relation on plate for sample support (Setting temperature 300°C)

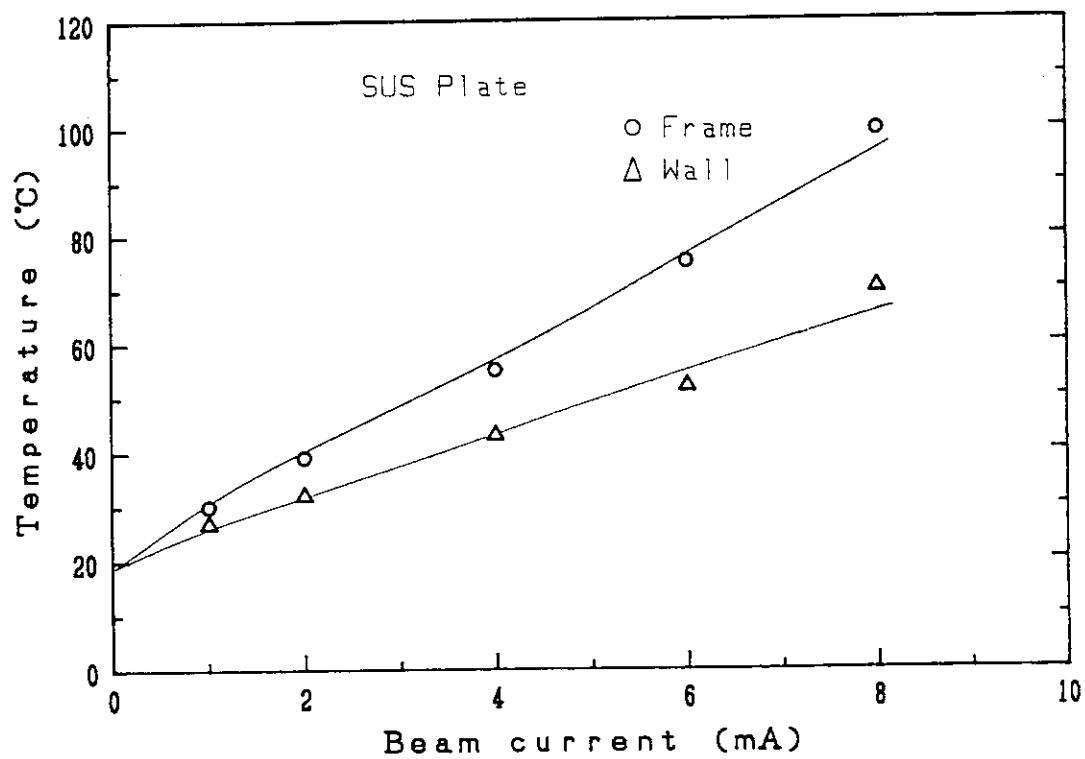


Fig. 4 Relation between beam current and saturation temperature at frame and wall of irradiation vessel

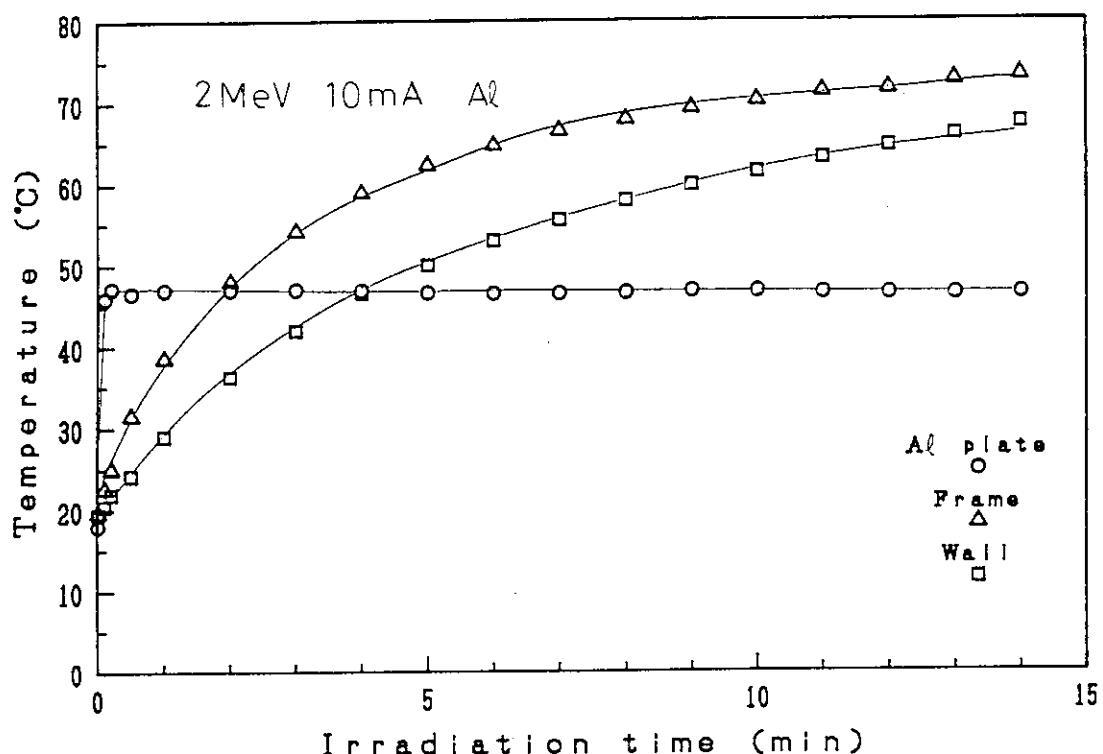


Fig. 5 Temperature change on Al plate (2MeV, 10mA)

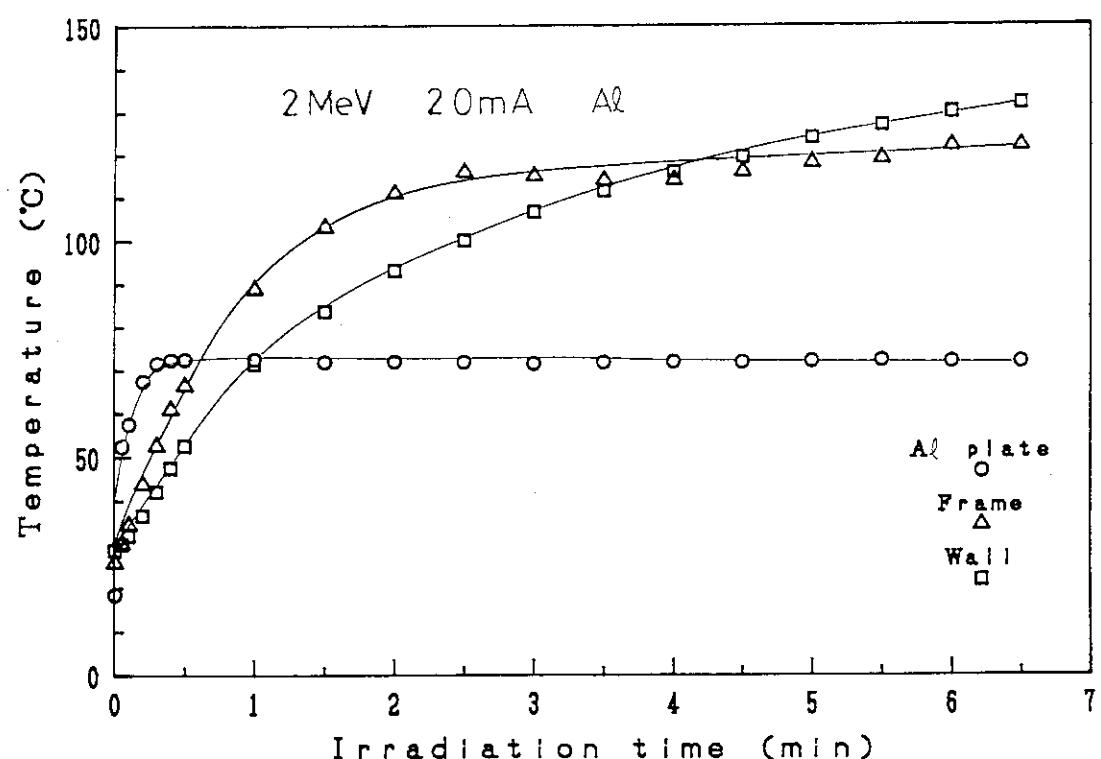


Fig. 6 Temperature change on Al plate (2MeV, 20mA)

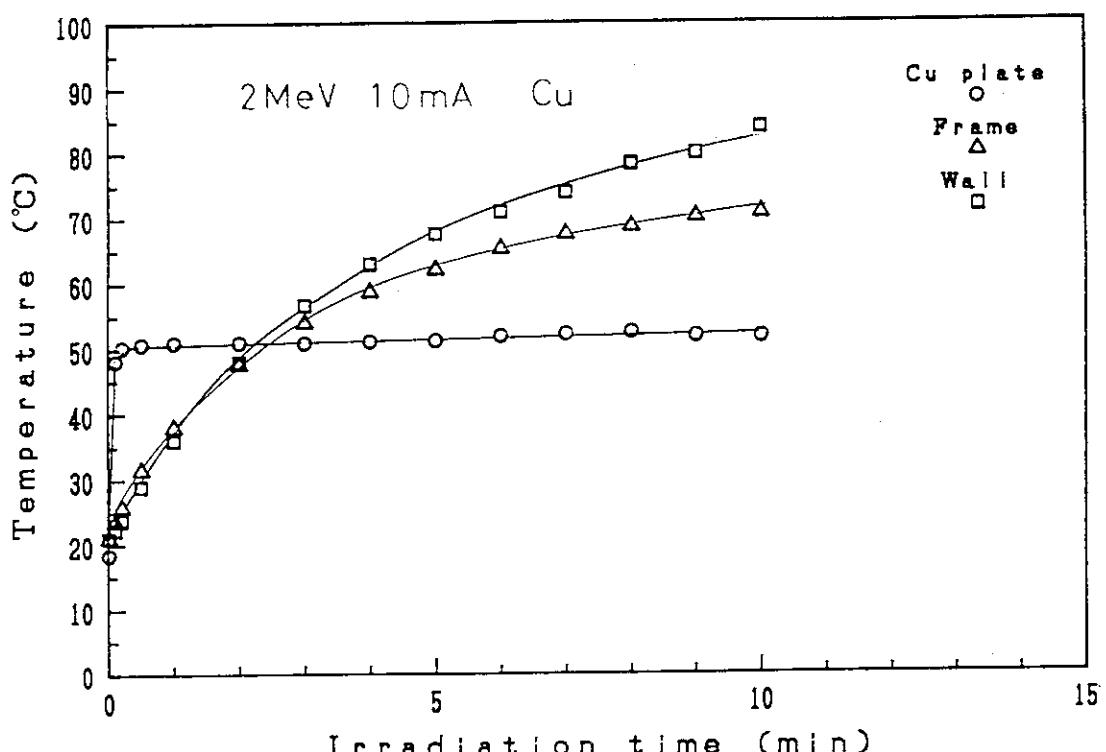


Fig. 7 Temperature change on Cu plate (2MeV, 10mA)

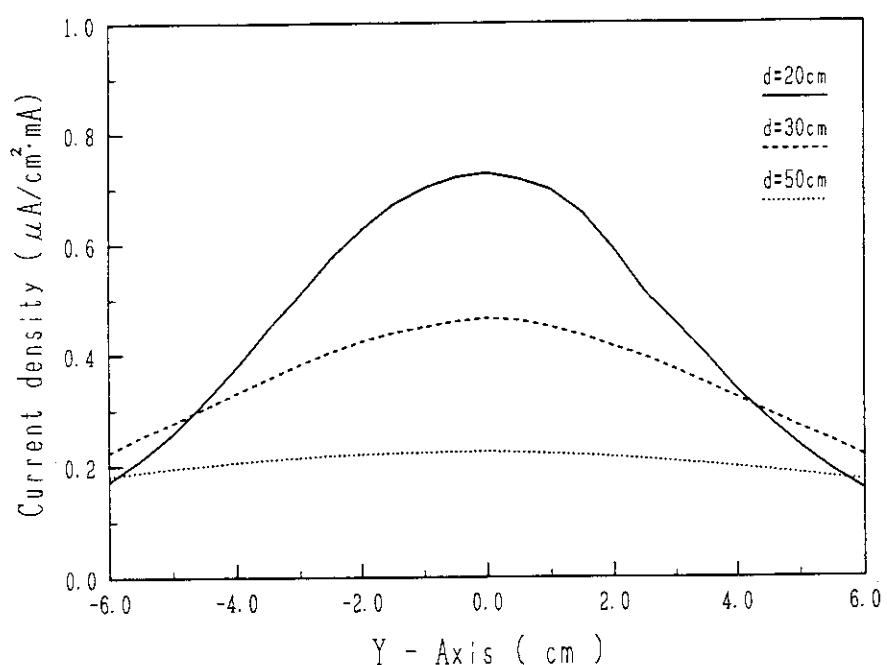


Fig. 8 Beam current density distribution in the direction of Y-axis. beam energy; 2MeV, beam current; 1mA

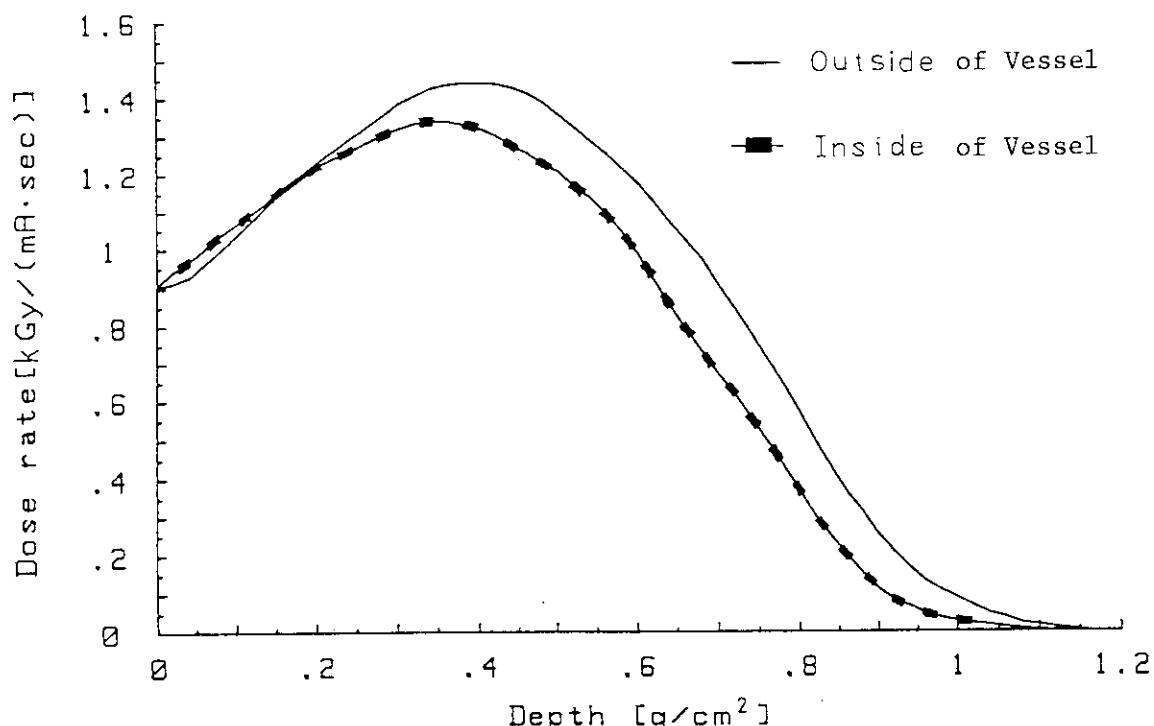


Fig. 9 Comparison of the depth dose distribution inside with outside of the vessel (PE holder use) (beam energy; 2MeV, beam current; 1mA, distance; 30cm)

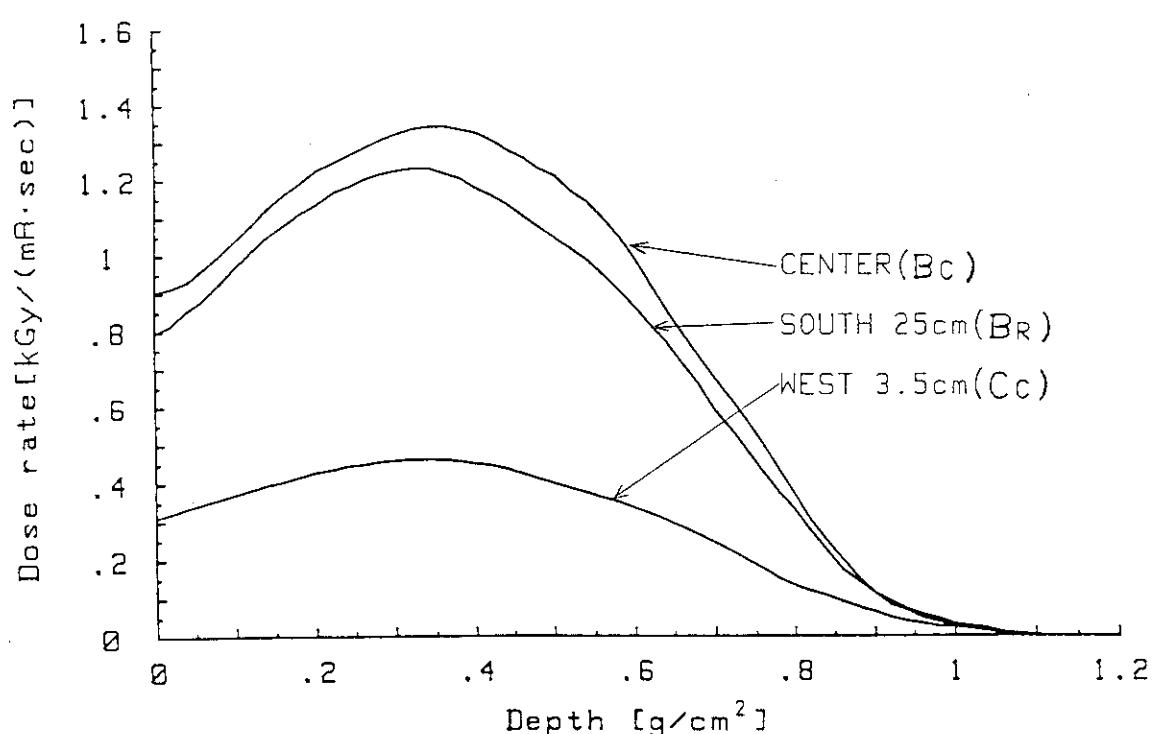


Fig. 10 Depth dose distribution in the vessel at various position (PE holder use, 2MeV, 1mA, 30cm)

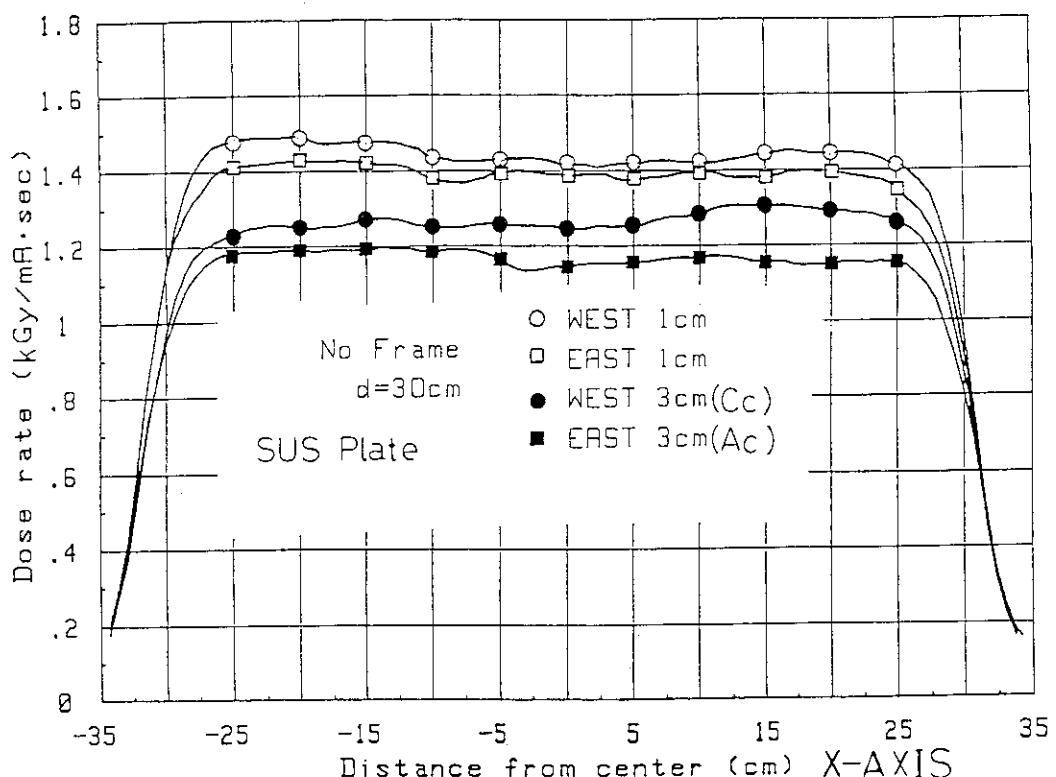


Fig. 11 X-axis dose rate distribution on SUS plate in the vessel
(without Al frame), (2MeV, 1mA, $d=30\text{cm}$)

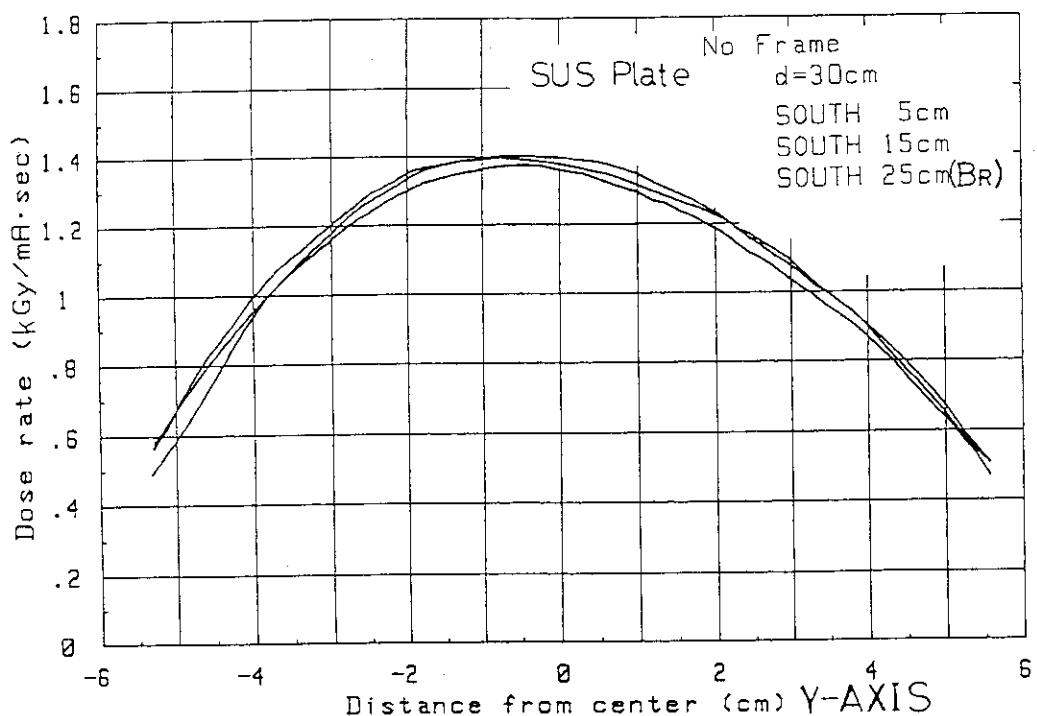


Fig. 12 Y-axis dose rate distribution on SUS plate in the vessel
(without Al frame), (2MeV, 1mA, $d=30\text{cm}$)

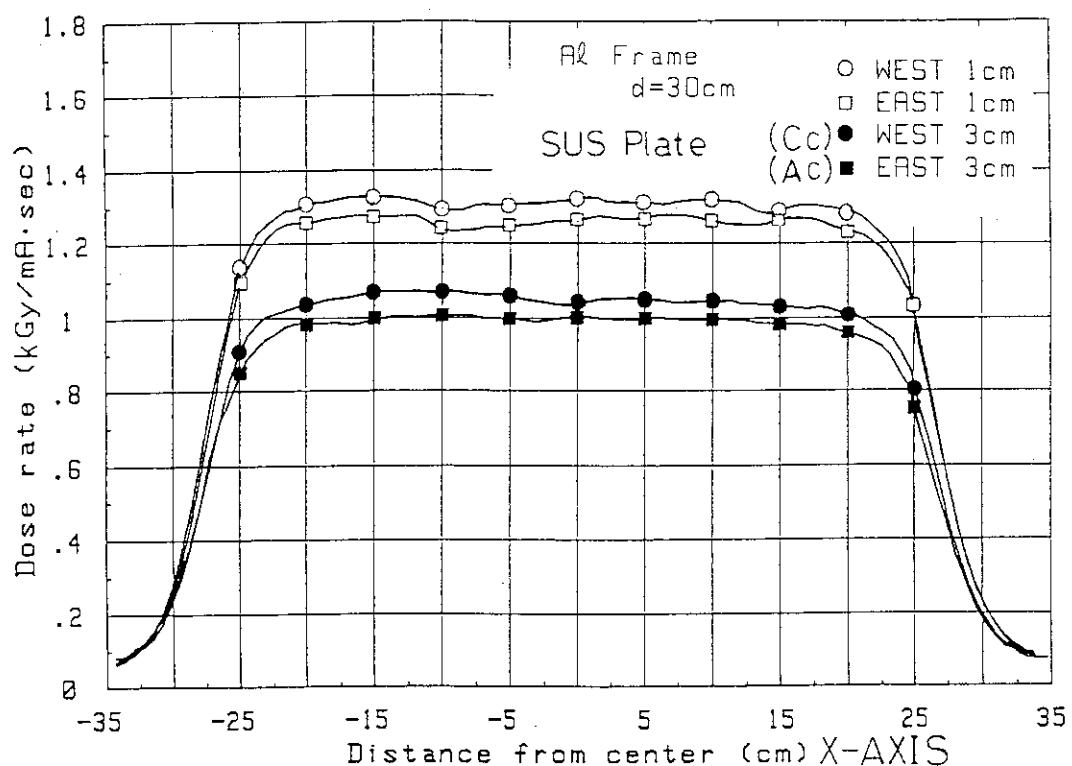


Fig. 13 X-axis dose rate distribution on SUS plate in the vessel
(use Al frame), (2MeV, 1mA, d=30cm)

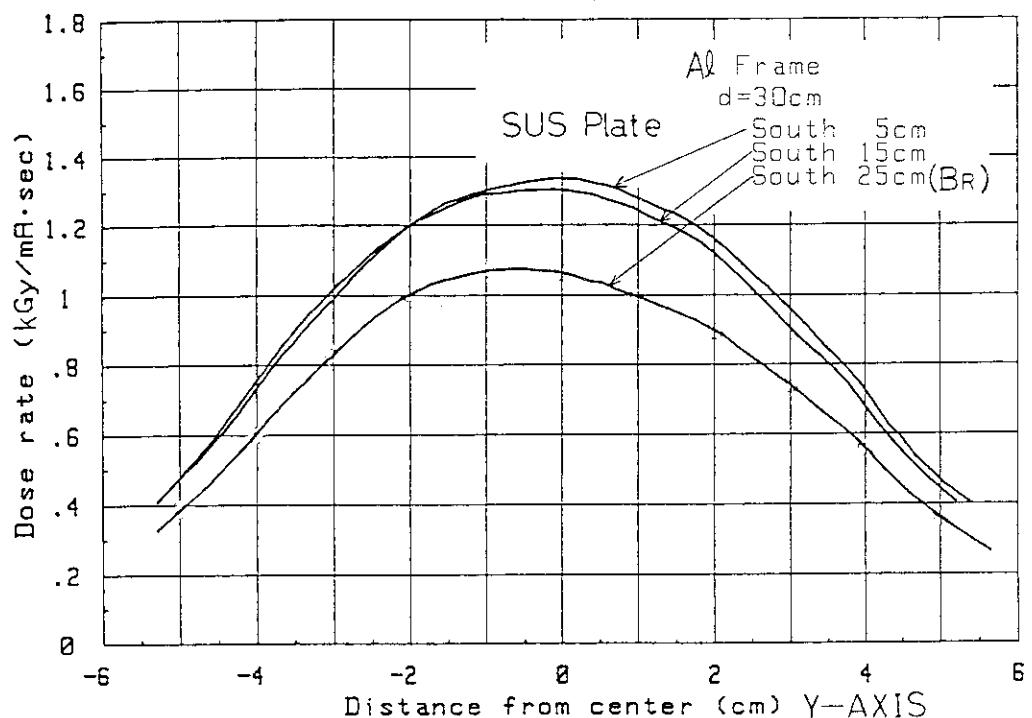


Fig. 14 Y-axis dose rate distribution on SUS plate in the vessel
(use Al frame), (2MeV, 1mA, d=30cm)

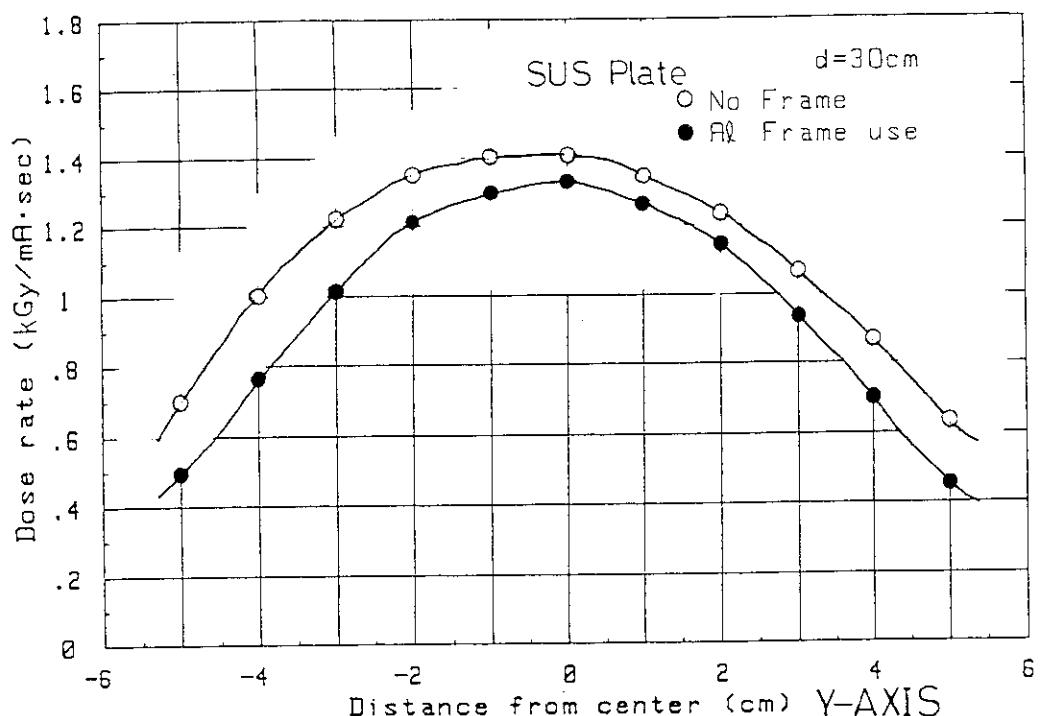


Fig. 15 Comparison of Y-axis dose rate distribution on SUS plate with using Al frame and without frame (2MeV, 1mA, $d=30\text{cm}$)

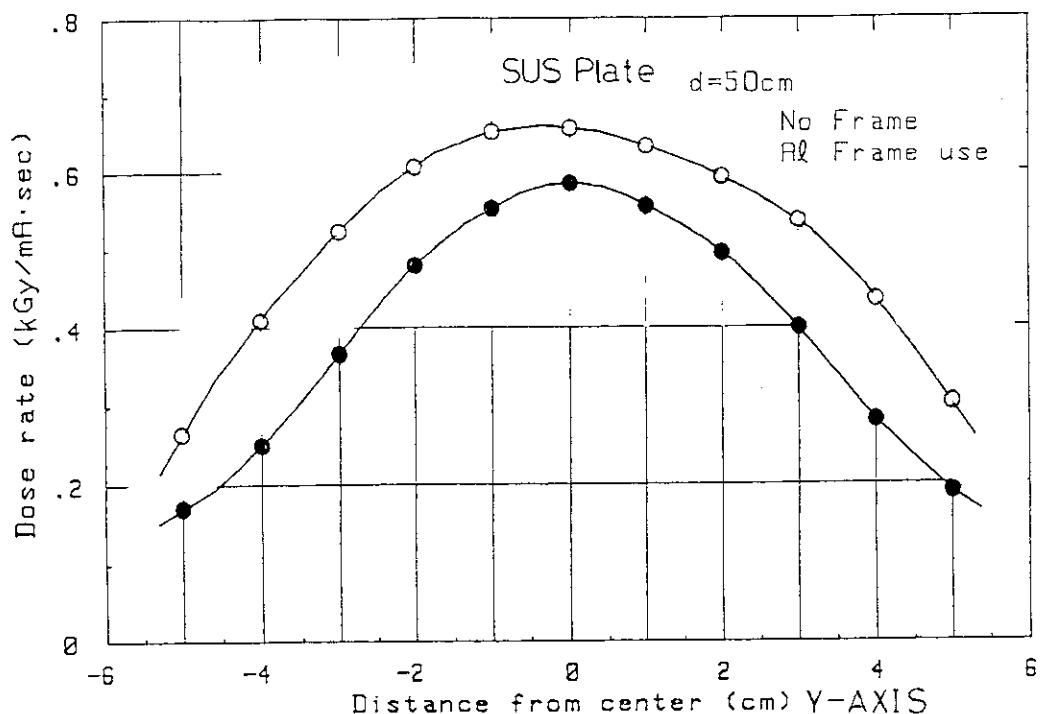


Fig. 16 Comparison of Y-axis dose rate distribution on SUS plate with using Al frame and without frame (2MeV, 1mA, $d=50\text{cm}$)

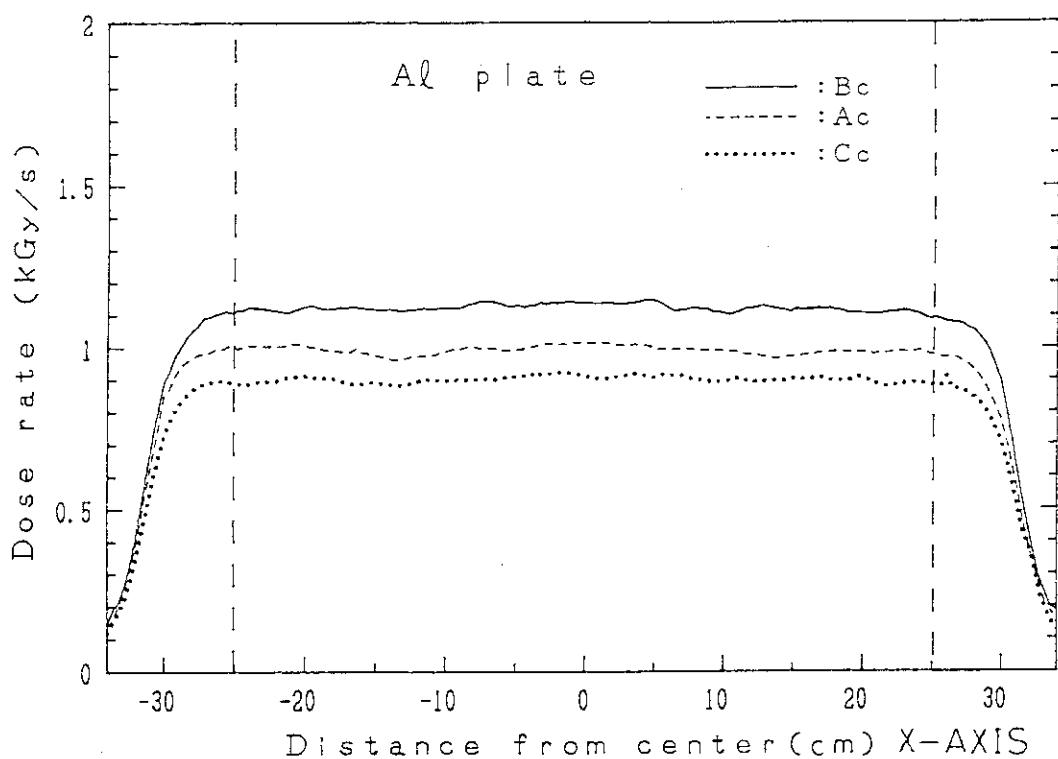


Fig. 17 X-axis dose rate distribution on Al plate in the vessel (without Al frame), (2MeV, 1mA, d=30cm)

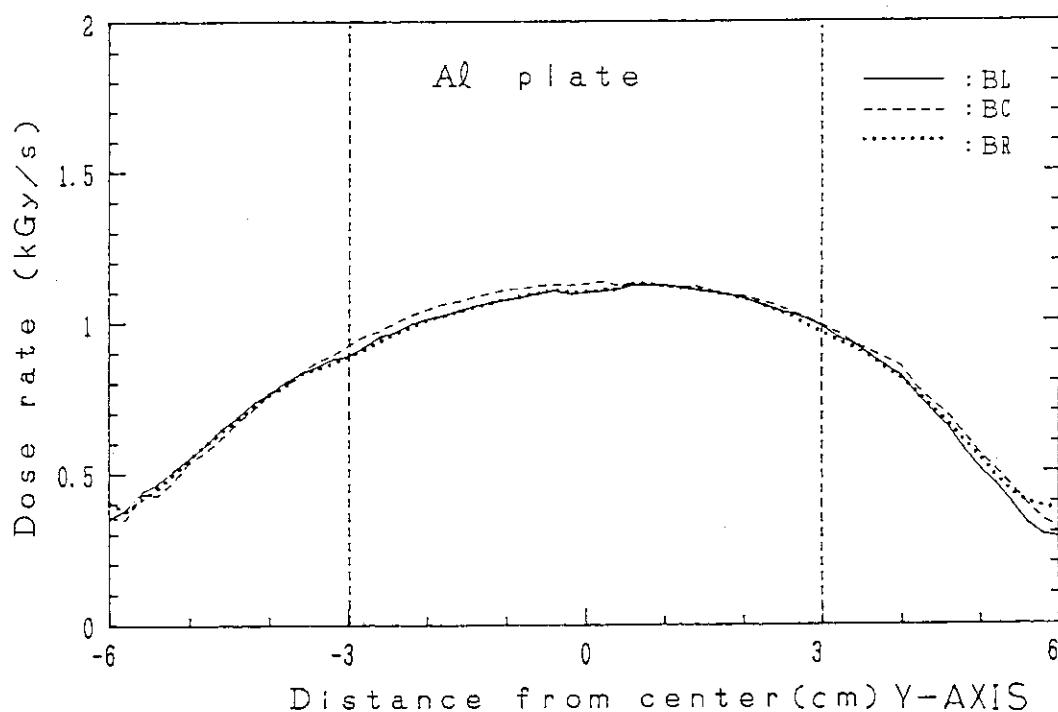


Fig. 18 Y-axis dose rate distribution on Al plate in the vessel (without Al frame), (2MeV, 1mA, d=30cm)

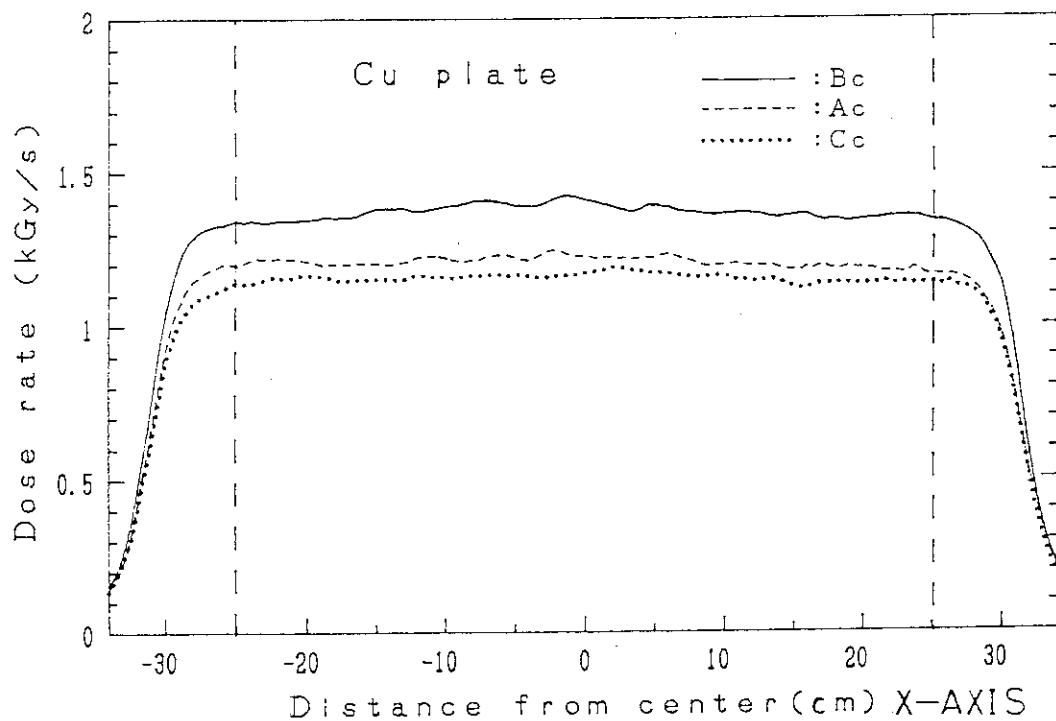


Fig. 19 X-axis dose rate distribution on Cu plate in the vessel
(without Al frame), (2MeV, 1mA, d=30cm)

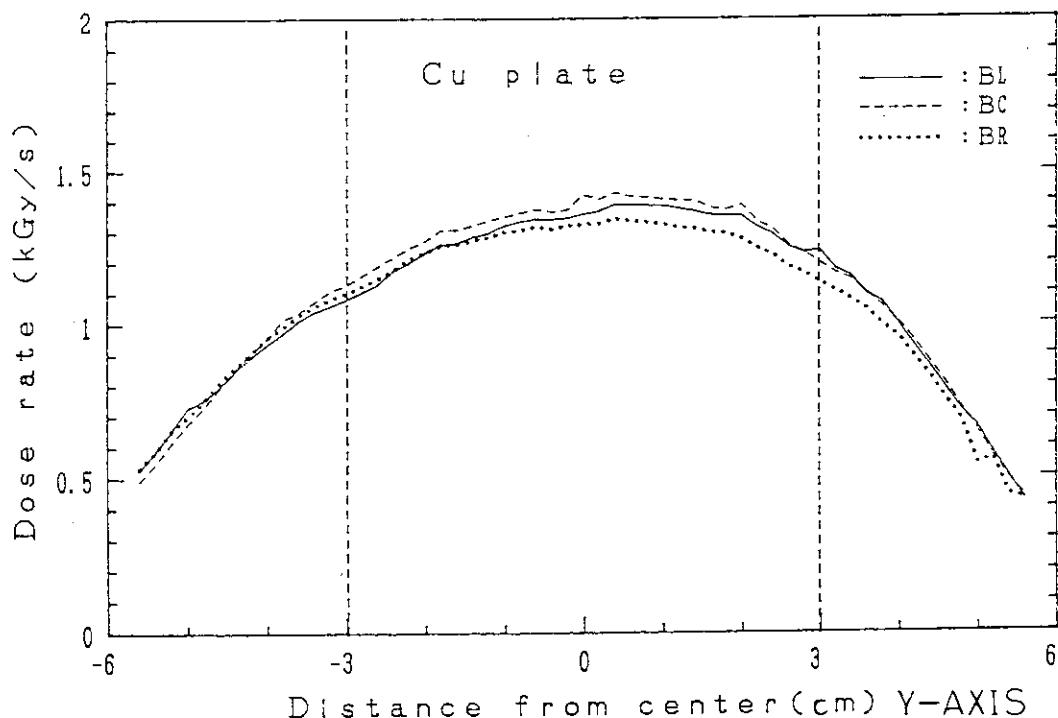


Fig. 20 Y-axis dose rate distribution on Cu plate in the vessel
(without Al frame), (2MeV, 1mA, d=30cm)

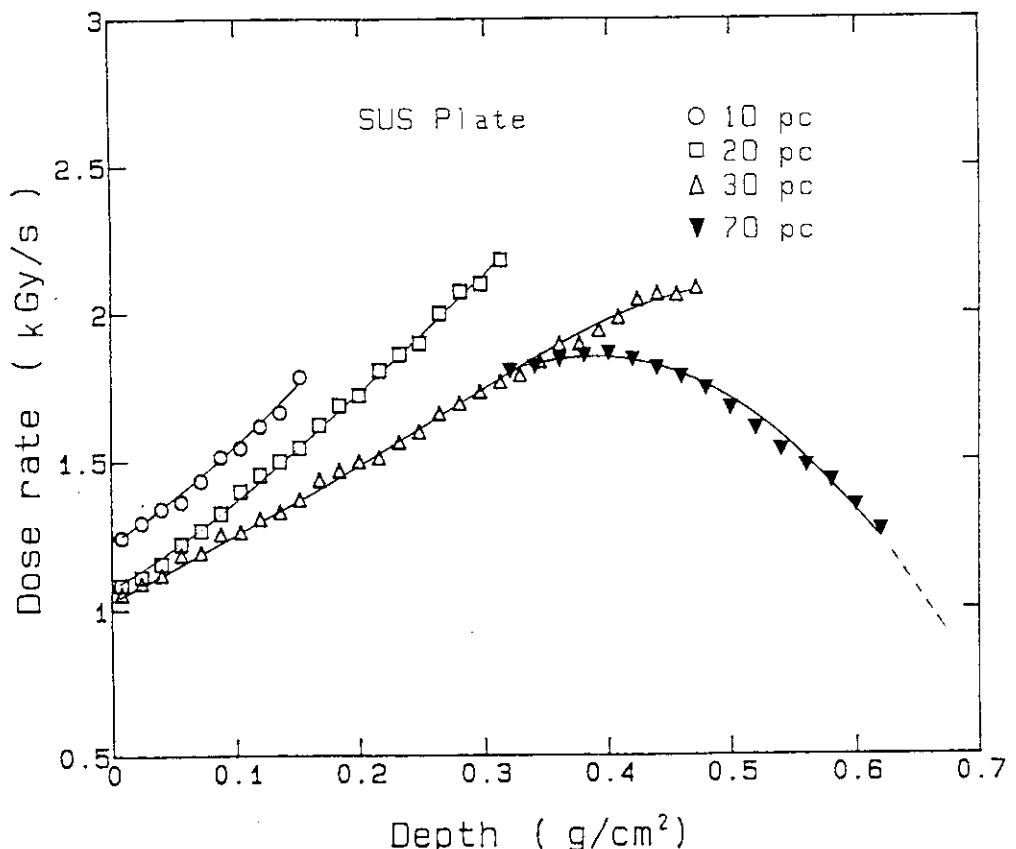


Fig. 21 Depth dose distribution on SUS plate at different thickness of CTA film (2MeV, 1mA, d=30cm)

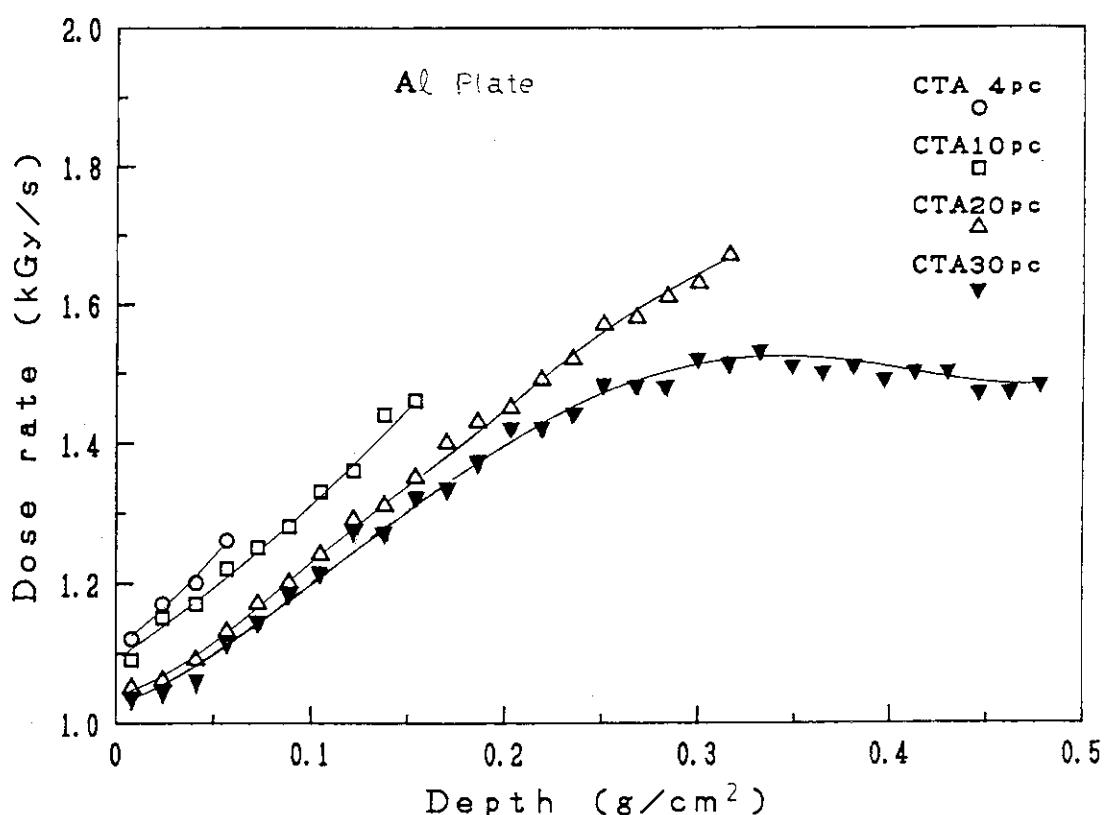


Fig. 22 Depth dose distribution on Al plate at different thickness of CTA film (2MeV, 1mA, d=30cm)

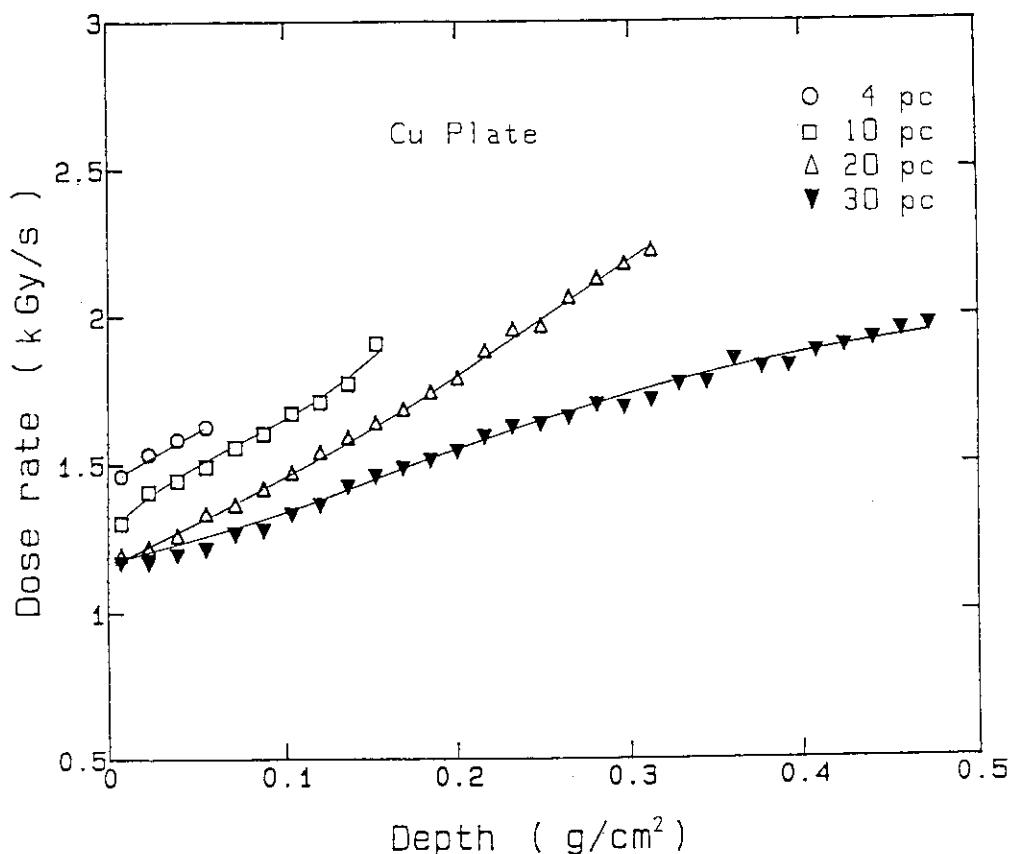


Fig. 23 Depth dose distribution on Cu plate at different thickness of CTA film (2MeV, 1mA, d=30cm)

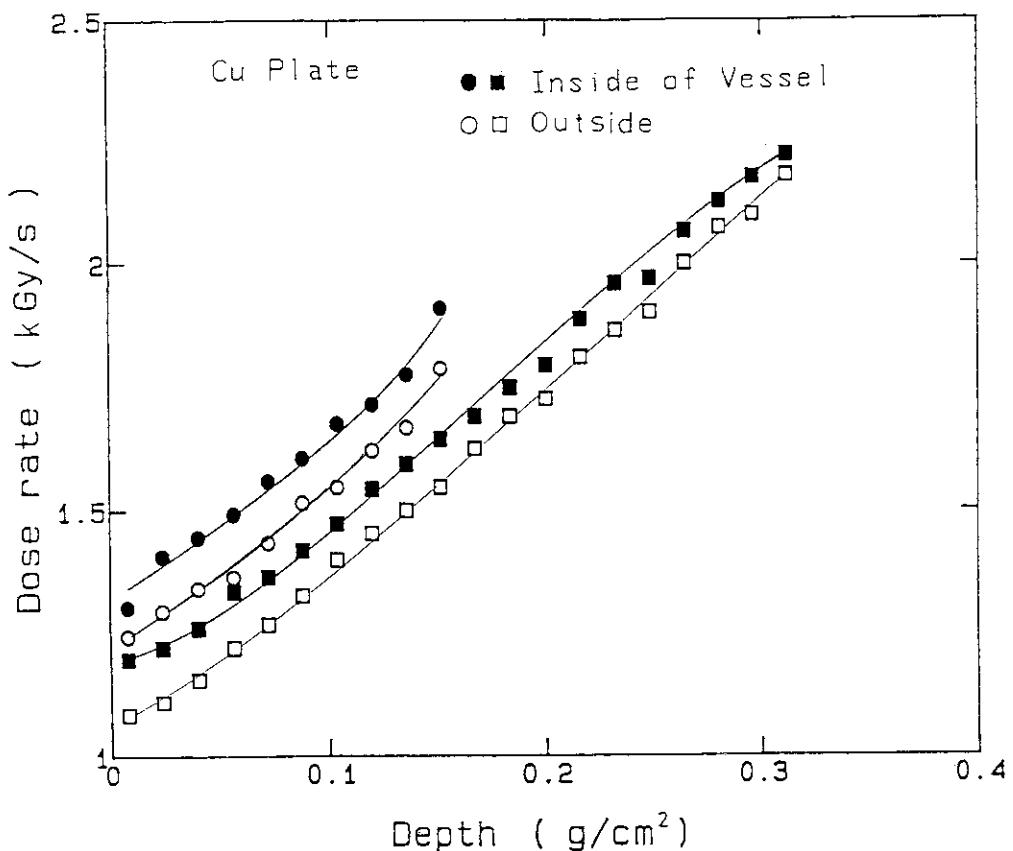


Fig. 24 Comparison of the depth dose distribution change inside with outside of the vessel on Cu plate (2MeV, 1mA, d=30cm, CTA film: 10 & 20 pieces)

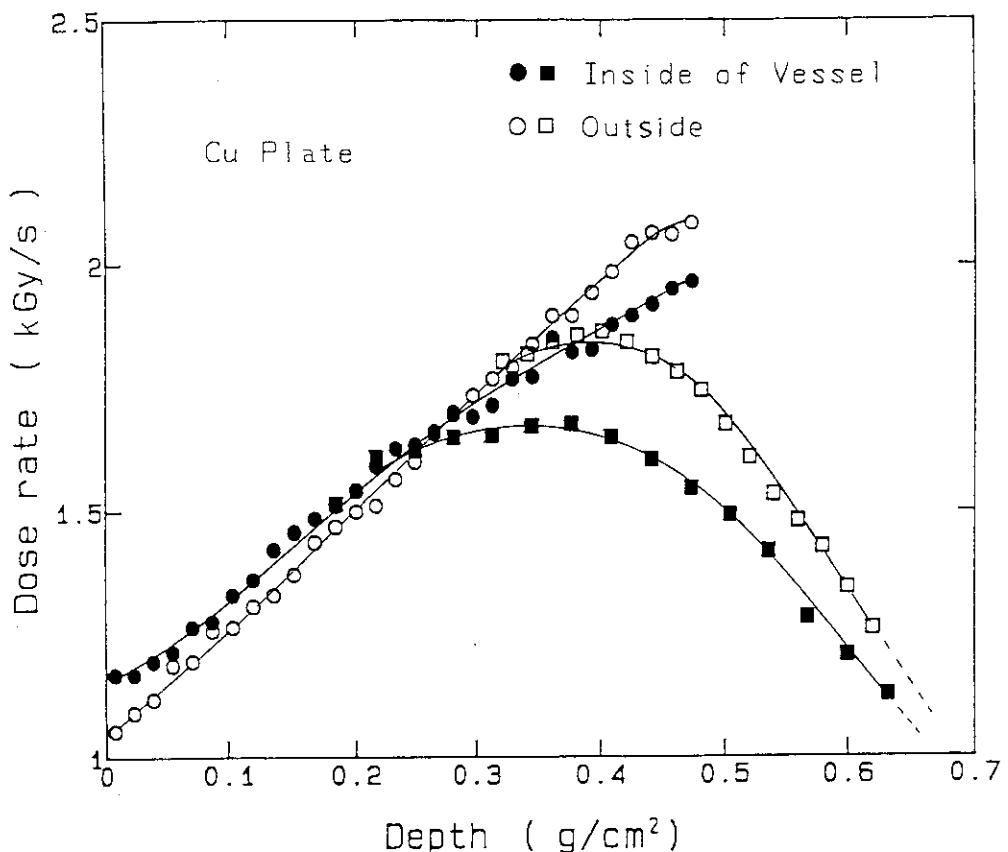


Fig. 25 Comparison of the depth dose distribution change in side with outside of the vessel on Cu plate (2MeV, 1mA, d=30cm, CTA film: 30 & 70 pieces)

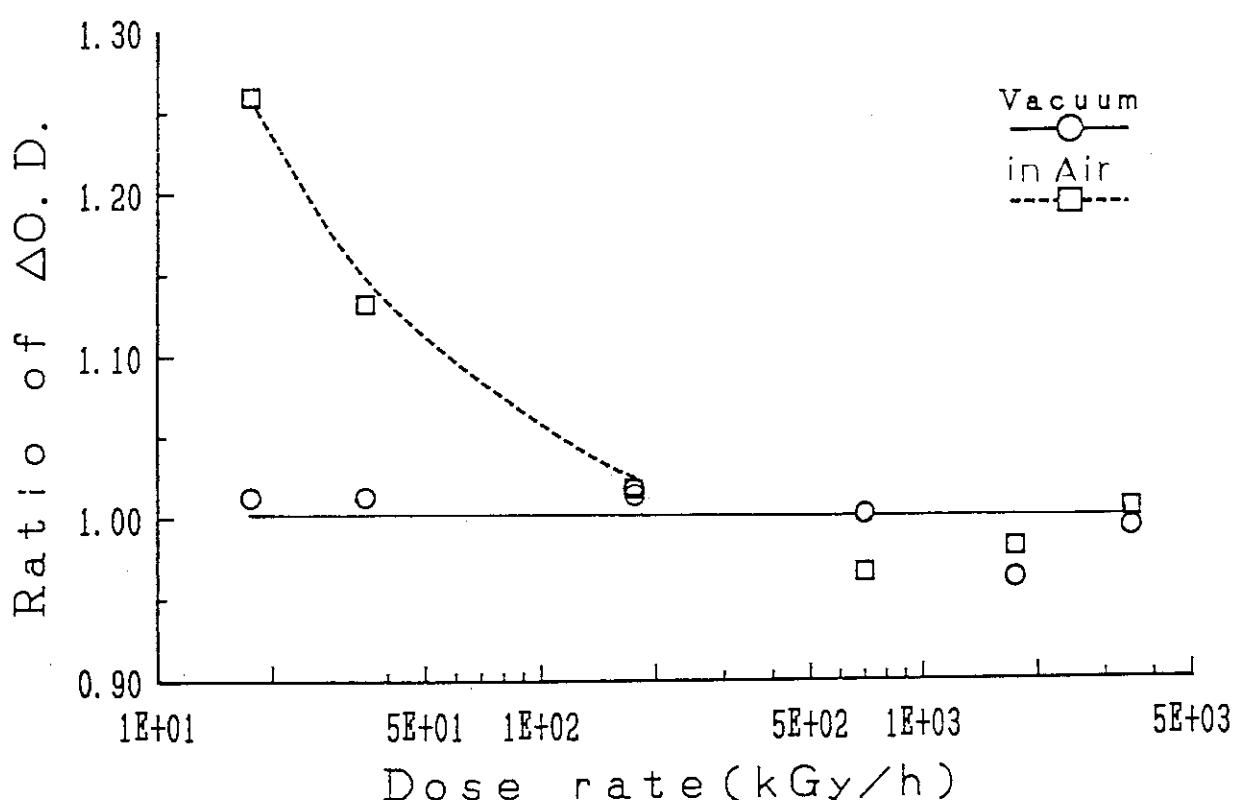


Fig. 26 Relation between the $\Delta O.D.$ and dose rate by electron irradiation

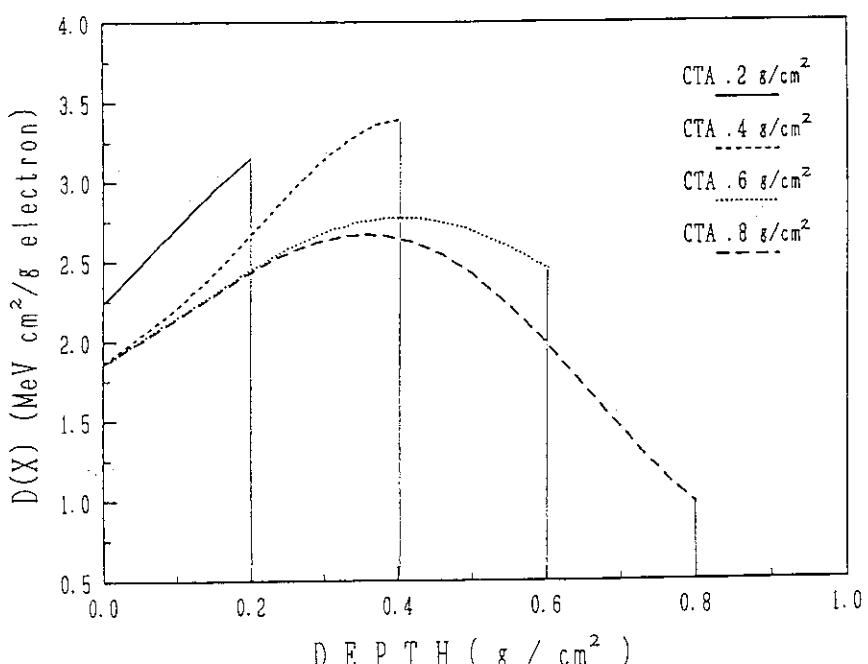


Fig. 27 Calculation result of depth dose by "EDMULT" CTA
thickness: $0.2 \sim 0.8 \text{ g}/\text{cm}^2$, support plate: Cu

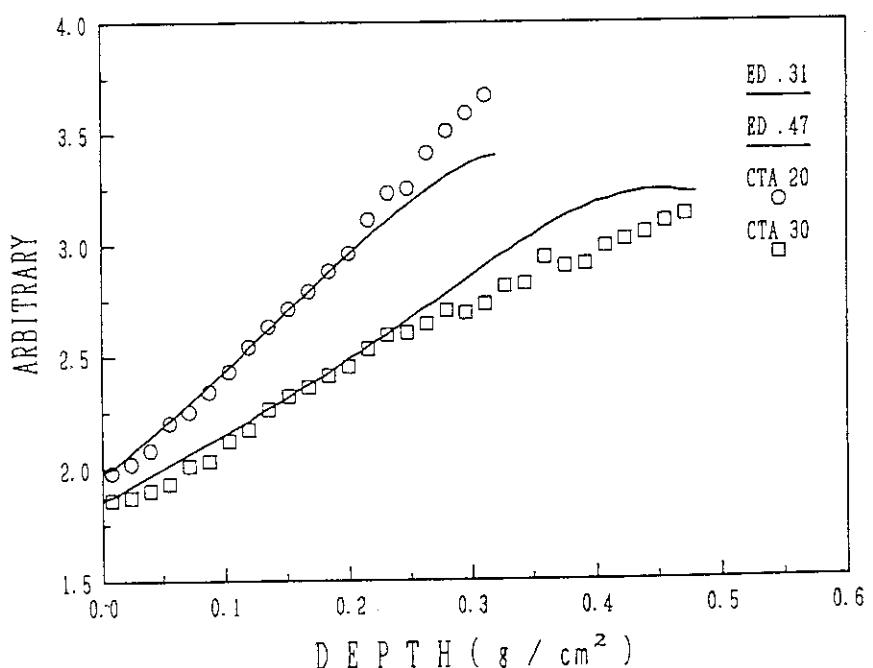


Fig. 28 Comparison of the depth dose data with Calculation
result on Cu plate (I) CTA thickness: $0.31, 0.47 \text{ g}/\text{cm}^2$

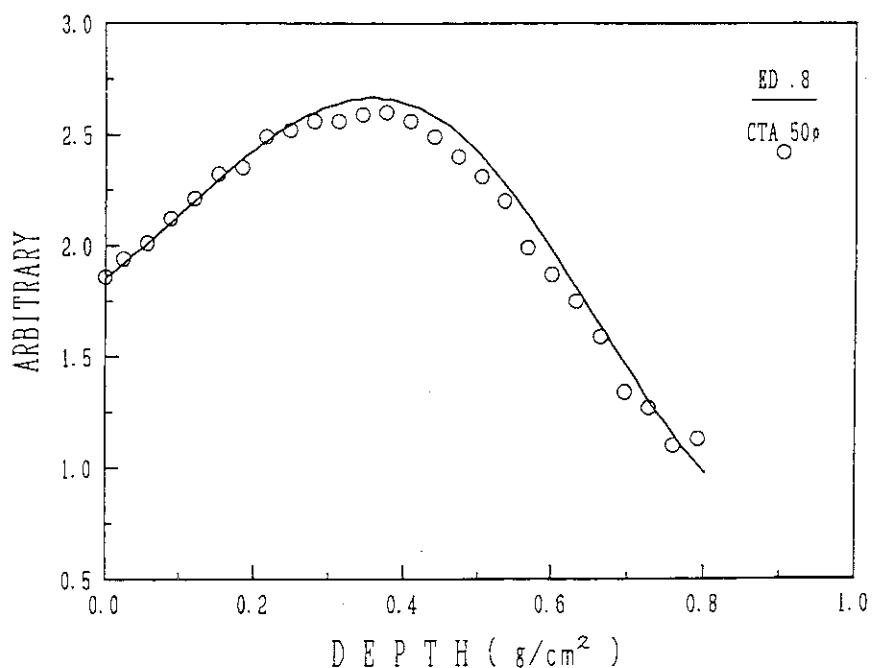


Fig. 29 Comparison of the depth dose data with calculation result on Cu plate (II) CTA thickness: 0.8 g/cm²

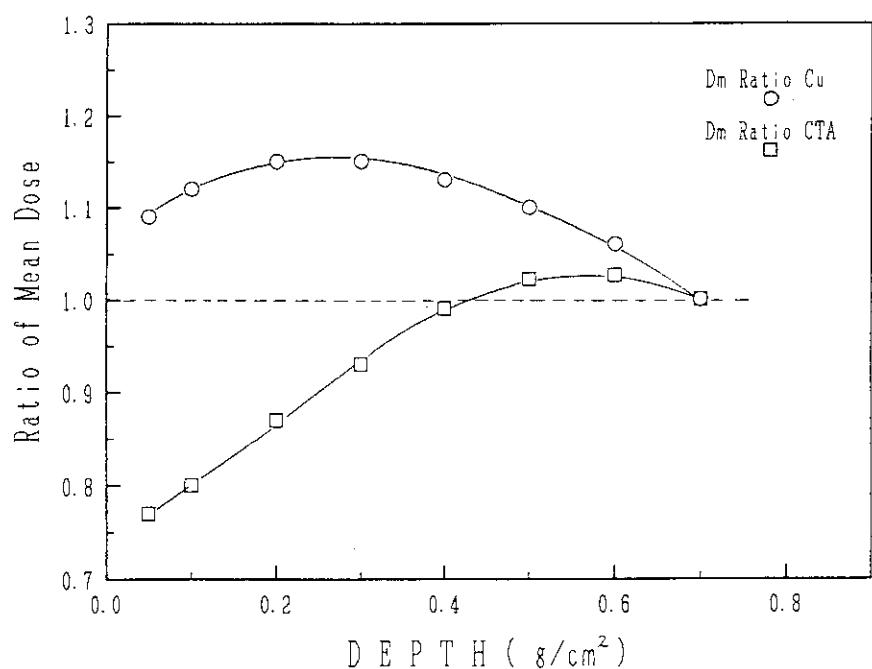


Fig. 30 Comparison of the mean dose ratio on Cu plate with CTA stack

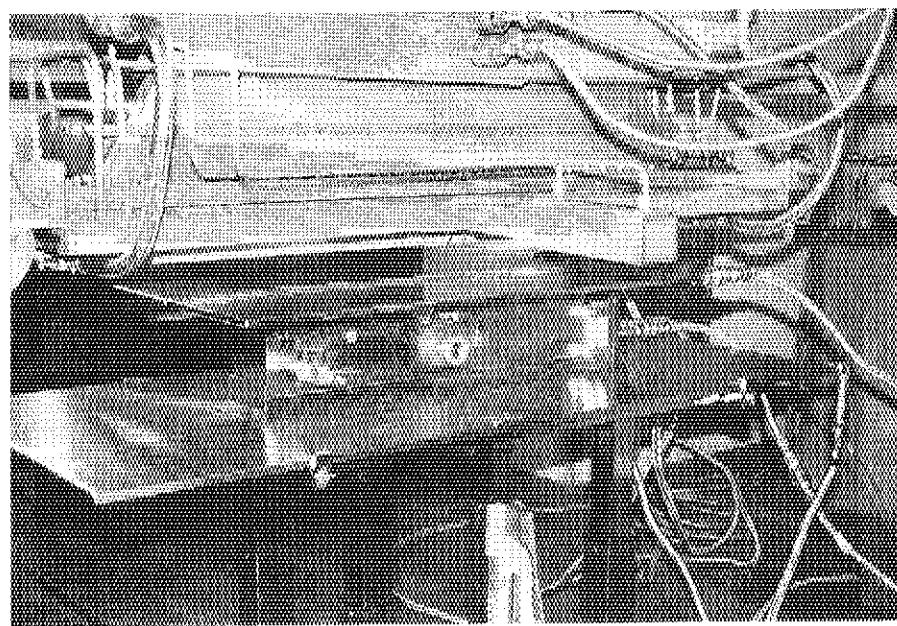


Photo 1 Irradiation vessel settled under electron beam accelerator

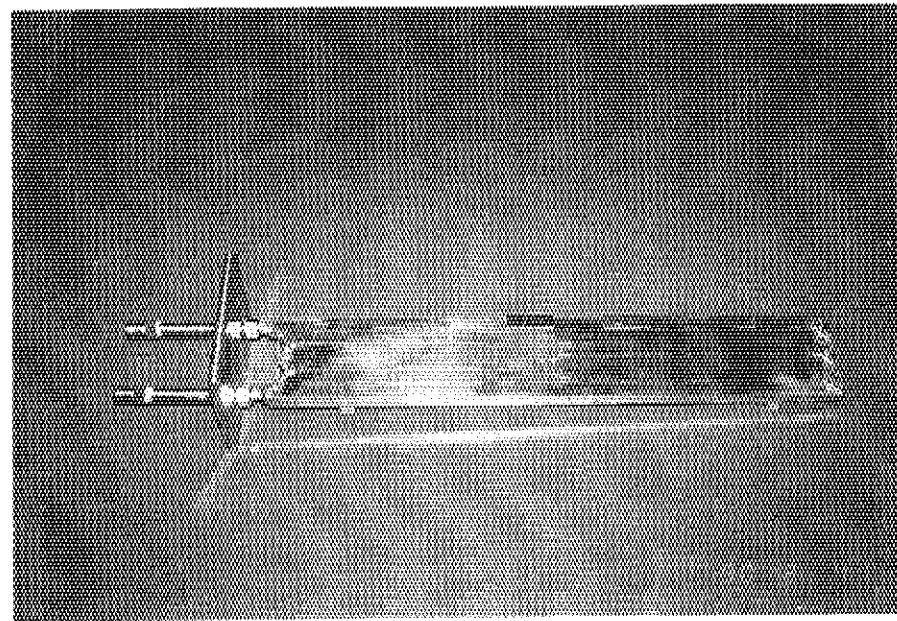


Photo 2 Al plate for sample support in irradiation vessel