

JAERI-M
85-011

放射性同位体製造資料—1284

非破壊検査用小型¹⁹²Ir線源の開発

1985年2月

加藤 久・佐藤 彰・木暮 広人・和田 延夫

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, 1985

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

非破壊検査用小型 Ir-192 線源の開発

日本原子力研究所アイソトープ事業部製造部
加藤 久・佐藤 彰・木暮広人・和田延夫⁺

(1985年1月18日受理)

小型の非破壊検査用組み立て Ir-192 線源の開発のために、形状の異なる数種のターゲットによる中性子自己遮蔽効果及び比放射能を測定した。その結果、直径 1.6 mm, 厚さ 0.4 mm の寸法のターゲットを選定した。このターゲットによる組み立て線源は J M T R 照射によって 1 単位当たり 3 個のターゲットで 370 GBq (10 Ci) が確保でき、1 単位当たり最高 5 個まで組み合わせて放射能を調整することができる。

組み立て線源によるラジオグラフのコントラスト・透過度計識別度及び不鮮鋭度の測定を行った。その結果、Ir-192 線源の形状差によるラジオグラフへの影響は現われないことが判明した。小型ターゲットによる組み立て Ir-192 線源は非破壊検査用線源としての適用性を備えるとともに、安定供給への寄与も十分期待できる。

+ 利用開発室

JAERI-M 85-011

Development of Small Sized ^{192}Ir Sources for Non-Destructive Testing

Hisashi KATO, Akira SATO, Hiroto KOGURE and Nobuo WADA⁺

Department of Radioisotope Production,
Radioisotope Center, JAERI

(Received January 18, 1985)

A method of obtaining a compact ^{192}Ir source with a high gamma-ray output is described, which is based on assembling of thin targets after neutron irradiation. To determine the optimum size of targets, neutron self-shielding factor and specific activity were measured for several iridium targets with different size. Then we found that the target of 1.6mm in diameter and 0.4mm thick was suitable. A 370 GBq(10 Ci) source consisting of the three targets was obtained by neutron irradiation at JMTR. For adjustment in source strength, it is possible to assemble up to five targets for each source within $1.6\text{mm}^\phi \times 2.0\text{mm}^t$ in size.

The parameter affecting on the image quality of radiographs, namely; contrast, penetrometer sensitivity and unsharpness were measured by the use of assembly sources with different size. The effects due to the source size were not recognized within the experiment. The assembly sources have excellent performance characteristics for gamma-ray radiography, contribute to stabilize those supply for users even if the specific activity of the irradiated targets is lower than a predetermined value.

Keywords : ^{192}Ir Source, Gamma-ray Source, Source for Non-destructive Testing,
Neutron Irradiation, Neutron Self-shielding, Radiography

+ Application and Development Division

目 次

1. まえがき	1
2. ターゲットの選定	1
3. JMTR における試験照射	3
4. ラジオグラフィ性能試験	4
4.1 実験方法	4
4.2 コントラスト	5
4.3 分解能	5
4.4 不鮮鋭度	5
5. 結論	6
参考文献	7

Contents

1. Introduction	1
2. Selection of target	1
3. Test irradiation at JMTR	3
4. Radiography capability testing	4
4.1 Method	4
4.2 Contrast	5
4.3 Resolution	5
4.4 Unsharpness	5
5. Conclusion	6
Reference	7

1. まえがき

非破壊検査用 Ir-192 線源は、原子力発電所における配管の定期検査、さらに各種の溶接部の欠陥検査などに広く利用されている。日本原子力研究所では年間約 2500 個（放射能にして 1.4 P Bq [38 kCi]）の Ir-192 線源を定常的に製造し、国内における需要を賄っている。¹⁾ Ir-192 線源の頒布にたいしては、需要時期にあった安定供給システムの確立、また非破壊検査用 Ir-192 線源としてラジオグラフィに適した品質の線源の確保などにたいする期待が高い。

Ir-192 線源は 1 個当たりの放射能が使用時においておよそ 370 G Bq (約 10 Ci) となる条件を求めて原子炉で熱中性子照射されるが、照射条件に変動を生じた場合すなわち照射時間、熱中性子束密度が当初の予定量まで得られないと、その放射能は保証されなくなる。これは年間の製造頒布計画の変更を余儀なくされ、利用者にたいして大きな影響を与える事になる。このように原子炉の稼働状況が直ちに製造計画を損なうことがないよう、複数個の小型ターゲットの組み合わせによって放射能を調整する方法を検討した。この方法は製造ロットごとの放射能のばらつき、製造ロット内における各 Ir-192 線源の放射能のばらつきを揃えることなどにも有効と考えられる。非破壊検査における Ir-192 線源は、その形状によってラジオグラフの像質に影響を及ぼす。特に被検査物の欠陥が小さく細部を見易くするため拡大撮影を行う場合、Ir-192 線源の寸法が大きいと像質が低下し拡大効果は相殺されることになるので、Ir-192 線源の寸法は出来るだけ小さいほうが望ましい。したがって組み立て Ir-192 線源の個数調整によって生ずる寸法差は、利用効果の面から重要な要素となる。

小型ターゲットによる組み立て Ir-192 線源の可能性とその効果を製造・利用の両面から検討した。

2. ターゲットの選定

中性子照射によって実際に生成する Ir-192 線源の放射能は、ターゲットの原子核の燃焼率の影響を入れても計算値に対して大幅に低い値となる。この生成量に影響する要因は、

- 1) ターゲットの近傍における中性子束密度の局部的低下²⁾
 - 2) イリジウムの中性子吸収断面積が大きいため中性子がターゲット表面の原子核で吸収され深層まで到達せず、したがって全体に均一に放射化されない²⁾
 - 3) ガンマ線出力が Ir-192 線源自身によって吸収され、放射能が見掛け上低下する³⁾
- などの現象があげられる。これらの要因のうち 2) は中性子自己遮蔽と呼ばれ、他の要因と比較して際立って影響が大きく、生成放射能の低下を引き起こす支配的な因子となっている。その程度を表す中性子自己遮蔽係数は、実際に得られた Ir-192 線源の放射能実測値と中性子自己遮蔽が全く無いと仮定して得た計算値との比として表される。ここで計算値は中性子束密度の局部的低下が無く、またガンマ線の自己吸収が無視できると仮定した場合である。中性子

1. まえがき

非破壊検査用 Ir-192 線源は、原子力発電所における配管の定期検査、さらに各種の溶接部の欠陥検査などに広く利用されている。日本原子力研究所では年間約 2500 個（放射能にして 1.4 P Bq [38 kCi]）の Ir-192 線源を定常的に製造し、国内における需要を賄っている。¹⁾ Ir-192 線源の頒布にたいしては、需要時期にあった安定供給システムの確立、また非破壊検査用 Ir-192 線源としてラジオグラフィに適した品質の線源の確保などにたいする期待が高い。

Ir-192 線源は 1 個当たりの放射能が使用時においておよそ 370 G Bq (約 10 Ci) となる条件を求めて原子炉で熱中性子照射されるが、照射条件に変動を生じた場合すなわち照射時間、熱中性子束密度が当初の予定量まで得られないと、その放射能は保証されなくなる。これは年間の製造頒布計画の変更を余儀なくされ、利用者にたいして大きな影響を与える事になる。このように原子炉の稼働状況が直ちに製造計画を損なうことがないよう、複数個の小型ターゲットの組み合わせによって放射能を調整する方法を検討した。この方法は製造ロットごとの放射能のばらつき、製造ロット内における各 Ir-192 線源の放射能のばらつきを揃えることなどにも有効と考えられる。非破壊検査における Ir-192 線源は、その形状によってラジオグラフの像質に影響を及ぼす。特に被検査物の欠陥が小さく細部を見易くするため拡大撮影を行う場合、Ir-192 線源の寸法が大きいと像質が低下し拡大効果は相殺されることになるので、Ir-192 線源の寸法は出来るだけ小さいほうが望ましい。したがって組み立て Ir-192 線源の個数調整によって生ずる寸法差は、利用効果の面から重要な要素となる。

小型ターゲットによる組み立て Ir-192 線源の可能性とその効果を製造・利用の両面から検討した。

2. ターゲットの選定

中性子照射によって実際に生成する Ir-192 線源の放射能は、ターゲットの原子核の燃焼率の影響を入れても計算値に対して大幅に低い値となる。この生成量に影響する要因は、

- 1) ターゲットの近傍における中性子束密度の局部的低下²⁾
- 2) イリジウムの中性子吸収断面積が大きいため中性子がターゲット表面の原子核で吸収され深層まで到達せず、したがって全体に均一に放射化されない²⁾
- 3) ガンマ線出力が Ir-192 線源自身によって吸収され、放射能が見掛け上低下する³⁾

などの現象があげられる。これらの要因のうち 2) は中性子自己遮蔽と呼ばれ、他の要因と比較して際立って影響が大きく、生成放射能の低下を引き起こす支配的な因子となっている。その程度を表す中性子自己遮蔽係数は、実際に得られた Ir-192 線源の放射能実測値と中性子自己遮蔽が全く無いと仮定して得た計算値との比として表される。ここで計算値は中性子束密度の局部的低下が無く、またガンマ線の自己吸収が無視できると仮定した場合である。中性子

自己遮蔽効果は、その現象からみてターゲットの形状や寸法の違いによって変わる。

一般に任意の形状についての中性子自己遮蔽係数は、次に示す Nisle の近似式⁴⁾によって凡そ値を求める事ができる。

$$F = \frac{1}{2\xi} (1 - e^{-2\xi})$$

$$\xi = 2 \sum_a \cdot \frac{V}{S}$$

ここで F は中性子自己遮蔽係数、 \sum_a はマクロ吸収断面積、 V と S はターゲットの体積と表面積である。この近似式を用いて形状の異なるイリジウムターゲットの中性子自己遮蔽係数を求め実測値と比較した。イリジウムターゲットは西独の W.C. HERAEUS 社によって製作されたものを用い、現在使用しているターゲット（直径 2.0 mm, 厚さ 2.0 mm）と比較した。中性子照射に当たっては照射キャップセル内のターゲット相互間における中性子局部低下の影響がないように、各ターゲット間を十分離した状態で行った。計算及び実測によって得られた自己遮蔽係数を Table 1 及び Fig. 1 に示す。これらの結果から、中性子自己遮蔽の影響を小さくして効果的に放射能を得るには出来るだけ薄いターゲットであることが望ましい。しかし小型化したターゲットは原子核の減少によって生成放射能が低下するという相反する効果を引き起す。

本実験で中性子自己遮蔽効果の測定のために使用した各ターゲットは、前述したようにその効果が現在のターゲットに比べて小さく、小型化に有利な条件を備えている。これらのターゲットを J M T R で 1 サイクル（520 時間）照射した時の生成放射能の推定値を計算し、その結果から組み立て Ir-192 線源 1 単位当たり 370 GBq (10 Ci) 以上の放射能を得るために必要な小型ターゲット数を求めた。これらの結果を Table 2 に示す。

中性子自己遮蔽効果及び J M T R 照射の推定結果から比放射能が高く、放射能の値に応じて 1 単位当たりの組み立て個数の調整範囲が広いターゲットは直径 2.0 mm, 厚さ 0.1 mm と直径 1.6 mm, 厚さ 0.4 mm の 2 種類のターゲットである。これらのターゲットを用いて現在の Ir-192 線源の寸法（直径 2.0 mm, 厚さ 2.0 mm）を越えない範囲で組み立て Ir-192 線源を調整すると、1 単位当たり最低 5 個（直径 1.6 mm, 厚さ 0.4 mm）から最高 20 個（直径 2.0 mm, 厚さ 0.1 mm）までの範囲で可能であり、自由度の高いターゲットである。しかし 1 単位に要するターゲットの個数は、材料・加工費等から考慮するとできるだけ少ないほうが望ましい。以上の条件を満足するターゲットとして最も適した形状は直径 1.6 mm, 厚さ 0.4 mm であると判断し、組み立て Ir-192 線源用の小型ターゲットとして選定することにした。

3. J M T Rにおける試験照射

現在定常に製造されている非破壊検査用 Ir-192 線源の個数は、1 製造当たり 360 個である。小型ターゲットによる相当数は、組み立て Ir-192 線源 1 単位当たり 3 個の場合で 1080 個になる。日本原子力研究所では、このように多量かつ小型の Ir-192 線源の遠隔操作が安全かつ能率的に行うことができるような自動遠隔装置⁵⁾を開発し、小型ターゲットの中性子照射後の取り扱いは全て本装置によることを前提として進めた。

J M T R による試験照射では、定常時と同じ照射条件になるよう 1 本の照射キャップセル内に 456 個のターゲットを 6 個の照射用コアに均等配分して収容し、同仕様のキャップセルを 2 体製作してターゲット総数を 912 個とした。照射は Ir-192 線源の比放射能を出来るだけ高くするため高熱中性子束密度が得られるベリリウム反射体領域 1 層目の照射孔で行い、さらに照射孔内の熱中性子束密度の垂直分布がピークに達する照射位置を選んだ。照射時間は 1 サイクル（約 520 時間）行った。

J M T R における試験照射の実際の照射条件と結果を Table 3 に示す。試験照射では予定されていた照射時間が約 10% 下回ったので、通常の 1 サイクル照射によって得られる放射能の値をあわせて示した。試験照射による放射能は Table 2 に示した推定値に対し、20ないし 26% 低い値である。これは多数のイリジウムターゲットを詰め合せたための中性子束密度の局部的低下の影響によるものである。これらの結果から、組み立て Ir-192 線源 1 単位当たり 370 GBq (10 Ci) 以上を確保するために必要な小型ターゲット数は、J M T R において正常な照射量が得られた場合には 3 個が標準となる。また熱中性子束密度の空間分布から生ずる放射能のばらつき及び照射直後から使用時までの経過時間による減衰の補正などが必要なときには、現在の Ir-192 線源の寸法（直径 2.0 mm, 厚さ 2.0 mm）範囲内で 5 個までの小型ターゲットを組み合わせることが可能である。

Ir-192 から放出されるガンマ線のエネルギーは 400 keV 程度で比較的低く、一方金属イリジウムの密度は高いため、放射化後に複数個のターゲットを積み重ねて製作する組み立て Ir-192 線源はガンマ線の自己吸収を無視する事ができない。すなわち、組み立て Ir-192 線源の放射能はガンマ線の自己吸収効果によって見かけ上低下することになる。非破壊検査時における Ir-192 線源の出力はこの影響を受けた状態で線量評価が行われ、ラジオグラフィの撮影条件が算出される。そこで組み立て Ir-192 線源によるガンマ線の自己吸収効果を求めるために、小型ターゲットを最大 5 個まで 1 個づつ積み重ねていく時に得られるガンマ線出力を測定し、小型ターゲット各個からのガンマ線出力の加算値と比較した。実際の撮影時には単一方向照射、パノラマ照射などの方法が採用されるため、ガンマ線出力は線源面に対して垂直方向及び水平方向について測定した。これらの測定結果を Fig. 2 に示す。組み立て線源面に対して垂直方向におけるガンマ線出力の低下率は、3ないし 4 個のターゲットの積み重ねで 17ないし 20% 程度になる。したがって組み立て Ir-192 線源を使用する場合の放射能は、このガンマ線出力の減弱分を補正した値を用いなければならない。この結果から、1 単位当たり 370 GBq (10 Ci)

相当のガンマ線出力を得るために必要な組み立て Ir-192 線源の放射能及びその時の小型ターゲット 1 個当たりの放射能を、ガンマ線出力の吸収率とともに Table 4 に示す。ガンマ線出力の自己吸収を考慮して 1 単位当たり 3 個の小型ターゲットを組み立てる場合、小型ターゲット 1 個当たりの放射能は最低 148 GBq (4 Ci) が必要である。この値は前述の J M T R による試験照射から得られた最低放射能 167 GBq (4.5 Ci) と比較して十分確保し得るものである。

以上から、J M T R 照射による直径 1.6 mm , 厚さ 0.4 mm の小型ターゲットを組み立て Ir-192 線源として製造した場合、1 単位当たり 3 個を標準とした時 370 GBr (10 Ci) 相当のガンマ線出力を確保することは可能であり、本実験によって開発した小型 Ir-192 線源が、非破壊検査用線源として十分その能力を備えていることが確認できた。

4. ラジオグラフィ性能試験

一般に Ir-192 線源によるラジオグラフィは、狭隘部における被検査物の微細な欠陥の検出に利用される。ラジオグラフの像質はコントラストと分解能で決まるが、とりわけラジオグラフの分解能すなわち不鮮鋭度は線源の大きさによって影響を受けやすい。特に被検査物の微細な欠陥を検出する場合は拡大撮影を行うが、その拡大率と使用線源の大きさが分解能の良否を決定する。そこで組み立て小型 Ir-192 線源（直径 1.6 mm , 厚さ 0.4 mm ）の個数差による像質を比較するため、各 Ir-192 線源によって得られたラジオグラフのコントラスト、透過度計識別度及び不鮮鋭度を定量的に評価した。また同時に現在利用されている Ir-192 線源との比較測定を行った。

4.1 実験方法

小型ターゲットによる組み立て Ir-192 線源は、寸法が著しく異なる小型ターゲット 1 個の場合と実際の利用に近い小型ターゲット 3 個または 4 個の場合について、形状差による効果が判定しやすいように選んだ。各 Ir-192 線源の仕様を Table 5 に示す。各 Ir-192 線源は取り扱いを容易にするため外径 8 mm , 長さ 20 mm のアクリル樹脂製の容器に入れ、上部から同樹脂製のプラグで封入して固定した。照射撮影は Ir-192 線源からの放射線が 4π 方向に放射されるいわゆるパノラマ照射の状態で行った。この際散乱線による影響を避けるため Ir-192 線源、フィルム等は周囲の壁面及び床面から十分離して配置した。Ir-192 線源とフィルムの距離は 1 m とし、ラジオグラフの露出時間はあらかじめ行った予備撮影をもとに所定の濃度が得られるように設定した。撮影には中感度微粒子の X 線フィルム（富士写真フィルム KK 製、# 100），増感紙には鉛箔増感紙（前方 0.1 mm , 後方 0.2 mm ）を用いた。撮影試験片には 40 mm , 30 mm , 20 mm 及び 10 mm の 4 段階から成る鋼製階段状試験片を用いた。写真的現像条件は現像液温度 20°C , 皿現像法で行った。

相当のガンマ線出力を得るために必要な組み立て Ir-192 線源の放射能及びその時の小型ターゲット 1 個当たりの放射能を、ガンマ線出力の吸収率とともに Table 4 に示す。ガンマ線出力の自己吸収を考慮して 1 単位当たり 3 個の小型ターゲットを組み立てる場合、小型ターゲット 1 個当たりの放射能は最低 148 GBq (4 Ci) が必要である。この値は前述の J M T R による試験照射から得られた最低放射能 167 GBq (4.5 Ci) と比較して十分確保し得るものである。

以上から、J M T R 照射による直径 1.6 mm , 厚さ 0.4 mm の小型ターゲットを組み立て Ir-192 線源として製造した場合、1 単位当たり 3 個を標準とした時 370 GBr (10 Ci) 相当のガンマ線出力を確保することは可能であり、本実験によって開発した小型 Ir-192 線源が、非破壊検査用線源として十分その能力を備えていることが確認できた。

4. ラジオグラフィ性能試験

一般に Ir-192 線源によるラジオグラフィは、狭隘部における被検査物の微細な欠陥の検出に利用される。ラジオグラフの像質はコントラストと分解能で決まるが、とりわけラジオグラフの分解能すなわち不鮮鋭度は線源の大きさによって影響を受けやすい。特に被検査物の微細な欠陥を検出する場合は拡大撮影を行うが、その拡大率と使用線源の大きさが分解能の良否を決定する。そこで組み立て小型 Ir-192 線源（直径 1.6 mm , 厚さ 0.4 mm ）の個数差による像質を比較するため、各 Ir-192 線源によって得られたラジオグラフのコントラスト、透過度計識別度及び不鮮鋭度を定量的に評価した。また同時に現在利用されている Ir-192 線源との比較測定を行った。

4.1 実験方法

小型ターゲットによる組み立て Ir-192 線源は、寸法が著しく異なる小型ターゲット 1 個の場合と実際の利用に近い小型ターゲット 3 個または 4 個の場合について、形状差による効果が判定しやすいように選んだ。各 Ir-192 線源の仕様を Table 5 に示す。各 Ir-192 線源は取り扱いを容易にするため外径 8 mm , 長さ 20 mm のアクリル樹脂製の容器に入れ、上部から同樹脂製のプラグで封入して固定した。照射撮影は Ir-192 線源からの放射線が 4π 方向に放射されるいわゆるパノラマ照射の状態で行った。この際散乱線による影響を避けるため Ir-192 線源、フィルム等は周囲の壁面及び床面から十分離して配置した。Ir-192 線源とフィルムの距離は 1 m とし、ラジオグラフの露出時間はあらかじめ行った予備撮影をもとに所定の濃度が得られるように設定した。撮影には中感度微粒子の X 線フィルム（富士写真フィルム KK 製、# 100 ），増感紙には鉛箔増感紙（前方 0.1 mm , 後方 0.2 mm ）を用いた。撮影試験片には 40 mm , 30 mm , 20 mm 及び 10 mm の 4 段階から成る鋼製階段状試験片を用いた。写真的現像条件は現像液温度 20°C , 皿現像法で行った。

4.2 コントラスト

一般にラジオグラフのコントラスト (ΔD) は、線源の実効エネルギー及びフィルムコントラスト(r)によって決まり次式で与えられる。⁶⁾

$$\Delta D = 0.434 r \mu \Delta t$$

ここで r はフィルムコントラスト、 μ は試験片のガンマ線吸収係数 (cm^{-1})、 Δt は欠陥の厚さ (cm) である。実際に得られたラジオグラフから露出量とフィルム濃度との関係を示す特性曲線を求めフィルムの r 値を算出した結果、フィルム濃度 2.0において平均 1.5 の r 値が得られた。一方、Ir-192 からのガンマ線の鋼に対する吸収係数を 0.54 cm^{-1} と仮定して、⁷⁾ 上式より鋼の各厚さに対して得られるラジオグラフのコントラストを求めた。その結果を Fig. 3 に示す。さらに形状の異なる各 Ir-192 線源について実測で得られたコントラストを Fig. 3 に同時に示す。線源の形状によって Ir-192 のガンマ線の実効エネルギーが変わり、結果的にコントラストの実測値に形状差による影響が現われるかどうか検討したが有意差は認められず、たとえターゲットの組み立て個数が変わっても、本実験の範囲内では Ir-192 線源の実効エネルギーは等しく取り扱い得ることが分かった。

4.3 分解能

分解能を定量的に求めるため透過度計識別度及び鋭い端面を持つ試験片のフィルム濃度変化の切れ味を表す不鮮鋭度を測定し、Ir-192 線源の形状差による影響を調べた。識別度の測定は、最も一般的に使用されている針金型透過度計によって行った。各 Ir-192 線源の試験片の厚さに対する識別度の測定結果を Fig. 4 に示す。各測定値の誤差は、透過度計読み取り時の個人差を示している。Ir-192 線源の場合、JIS 型透過度計識別度が 2% 以下になるのは鋼板の厚さが 12 ないし 15 mm 以上であると言われているが、⁸⁾ 本実験に用いたいずれの Ir-192 線源についても誤差を考慮すればこれらの値は良く一致している。また組み立て Ir-192 線源のターゲット個数の差、さらに現在の Ir-192 線源との識別度には有意な差は認められない。この結果、透過度計識別度から見た分解能はいずれの Ir-192 線源を比較しても優劣の判定はしがたく、ラジオグラフィに必要な識別度を備えていると考えられる。

4.4 不鮮鋭度

ラジオグラフィにおける像の不鮮鋭度としては Ir-192 線源の幾何学的条件、散乱線の影響さらにガンマ線のエネルギーに依存する固有の不鮮鋭度等のいくつかが挙げられる。本実験では Ir-192 線源の形状を除く他の条件を一定にしてトータルの不鮮鋭度を測定し、Ir-192 線源の形状差による影響を調べた。不鮮鋭度の測定は Fig. 5 に示すように、マイクロコンピュータによりプログラム化されている Klasen 法⁹⁾ によって行った。測定条件はマイクロフォトデンシトメータの光束寸法 : $10 \mu\text{m}$ 、高さ $100 \mu\text{m}$ 、ラジオグラフのスキャニング速度 : 0.04 mm

/S, スキャンニング距離: 8 mm, ラジオグラフ上の 1 点の測定幅: 8 μm である。ラジオグラフ上のスキャンニング位置は階段状試験片がない部分(濃度が最大)と, フィルム面からの距離が最短で幾何学的条件による不鮮鋭度が最も小さいと考えられる階段状試験片厚 10 mm のステップ間で行った。同時にフィルム——階段状試験片間の距離による幾何学的不鮮鋭度の確認のため, 階段状試験片厚 10 mm と 40 mm のステップについても比較測定を行った。

各 Ir-192 線源について不鮮鋭度を測定した結果を Table 6 に, マイクロコンピュータによる Klasen 法の出力データの一例を Fig. 6 に示す。同図は階段状試験片厚 10 mm と 40 mm における出力データを示している。ラジオグラフ上の測定点は各試料について 5 点で行った。Ir-192 線源の形状差による不鮮鋭度は, 形状が最も大きく異なる直径 1.6 mm の Ir-192 線源が 1 個の場合と, 直径 2.0 mm の場合を比較してもその差は全く認められなかった。これは対象にした Ir-192 線源の形状差による不鮮鋭度がトータルの不鮮鋭度に比べて極めて小さく, 観測できるほどの影響がなかったことを示している。結局, 不鮮鋭度については Ir-192 線源の形状差による差は認められず, 組み立て Ir-192 線源 1 単位に要するターゲットの個数がたとえ異なった場合でも, 不鮮鋭度への影響を受けることなく使用できることが確認された。

5. 結論

非破壊検査用 Ir-192 線源のターゲットの小型化は, 中性子自己遮蔽効果による比放射能への影響などを判断基準として製造面から最も条件に合った直径 1.6 mm, 厚さ 0.4 mm の形状のターゲットを選定し, さらに利用面での効果を検討した上で決定した。

製造面から見た場合, この小型ターゲットは JMTR 1 サイクル照射によって組み立て Ir-192 線源 1 単位当たり 3 個の小型ターゲットで 370 GBq (10 Ci) 以上の放射能が確保でき, さらに現在の線源寸法を勘案すると最高 5 個までの組み立て調整が可能となり製造条件は大幅に改善される。組み立て Ir-192 線源による放射能調整は現在の単一線源では不可能な次のような場合に有効である。

- 1) 照射条件の変動で必要な照射量が得られなかった場合
- 2) 線源各個のばらつきが大きく, 1 単位の放射能を揃える場合
- 3) 照射終了後から需要時期までの放射能の減衰を補正して供給する場合

利用面については, ラジオグラフの像質に関してコントラスト, 透過度計識別度及び不鮮鋭度を測定した結果, ターゲットの個数差による像質への影響はなく, ラジオグラフィ用線源として十分利用できることが分かった。

以上から小型ターゲットによる組み立て Ir-192 線源は, 非破壊検査用線源として適用性を備えたものであることが確認できた。

/S, スキャンニング距離: 8 mm, ラジオグラフ上の 1 点の測定幅: 8 μm である。ラジオグラフ上のスキャンニング位置は階段状試験片がない部分(濃度が最大)と、フィルム面からの距離が最短で幾何学的条件による不鮮銳度が最も小さいと考えられる階段状試験片厚 10 mm のステップ間で行った。同時にフィルム——階段状試験片間の距離による幾何学的不鮮銳度の確認のため、階段状試験片厚 10 mm と 40 mm のステップについても比較測定を行った。

各 Ir-192 線源について不鮮銳度を測定した結果を Table 6 に、マイクロコンピュータによる Klasen 法の出力データの一例を Fig. 6 に示す。同図は階段状試験片厚 10 mm と 40 mm における出力データを示している。ラジオグラフ上の測定点は各試料について 5 点で行った。Ir-192 線源の形状差による不鮮銳度は、形状が最も大きく異なる直径 1.6 mm の Ir-192 線源が 1 個の場合と、直径 2.0 mm の場合を比較してもその差は全く認められなかった。これは対象にした Ir-192 線源の形状差による不鮮銳度がトータルの不鮮銳度に比べて極めて小さく、観測できるほどの影響がなかったことを示している。結局、不鮮銳度については Ir-192 線源の形状差による差は認められず、組み立て Ir-192 線源 1 単位に要するターゲットの個数がたとえ異なった場合でも、不鮮銳度への影響を受けることなく使用できることが確認された。

5. 結 論

非破壊検査用 Ir-192 線源のターゲットの小型化は、中性子自己遮蔽効果による比放射能への影響などを判断基準として製造面から最も条件に合った直径 1.6 mm, 厚さ 0.4 mm の形状のターゲットを選定し、さらに利用面での効果を検討した上で決定した。

製造面から見た場合、この小型ターゲットは JMTR 1 サイクル照射によって組み立て Ir-192 線源 1 単位当たり 3 個の小型ターゲットで 370 GBq (10 Ci) 以上の放射能が確保でき、さらに現在の線源寸法を勘案すると最高 5 個までの組み立て調整が可能となり製造条件は大幅に改善される。組み立て Ir-192 線源による放射能調整は現在の単一線源では不可能な次のような場合に有効である。

- 1) 照射条件の変動で必要な照射量が得られなかった場合
- 2) 線源各個のばらつきが大きく、1 単位の放射能を揃える場合
- 3) 照射終了後から需要時期までの放射能の減衰を補正して供給する場合

利用面については、ラジオグラフの像質に関してコントラスト、透過度計識別度及び不鮮銳度を測定した結果、ターゲットの個数差による像質への影響はなく、ラジオグラフィ用線源として十分利用できることが分かった。

以上から小型ターゲットによる組み立て Ir-192 線源は、非破壊検査用線源として適用性を備えたものであることが確認できた。

参考文献

- 1) H. Kato, H. Kogure, K. Suzuki : JAERI-M 8810
- 2) 榎本茂正 : 原子力工業, 17, (12), 68 (1971)
- 3) 榎本茂正, 小野寺敏美, 加藤 久 : 日本原子力学会誌, 12, 4, 174 (1970)
- 4) R. G. Nisley : Nucleonics, 18, (3), 86 (1960)
- 5) 木暮広人, 加藤 久, 佐藤 彰, 石川 勇 : 第21回理工学における同位元素研究発表会, 3P-II-3, 東京 (1984)
- 6) 日本非破壊検査協会編 : 非破壊検査便覧(新版), 313, 日刊工業新聞社, 東京 (1978)
- 7) R. Halmshaw : Industrial Radiology — Theory and Practice —, 30, Applied Science Publishers, London and New Jersey (1982)
- 8) 日本放射性同位元素協会編 : ガンマ線透過撮影法 3, 日本アイソトープ協会, 東京 (1970)
- 9) H. A. Klasen : Phillips Research Report, 1, 4 (1946)

Table 1 Neutron self-shielding factor for iridium targets

Target dimension Diameter x Thickness (mm)	Neutron self-shielding factor	
	Calculated (F)	Observed (f)
2.0 x 2.0	0.17	0.18
2.0 x 0.5	0.37	0.42
2.0 x 0.1	0.92	0.74
1.6 x 0.8	0.29	0.36
1.6 x 0.4	0.43	0.48

Table 2 Estimation of radioactivity of ^{192}Ir assembly sources for the irradiation by JMTR and number of target for 10 Ci

Target dimension Diameter x Thickness (mm)	Target mass (mg)	Radioactivity (Ci/piece)	Specific activity (Ci/g)	Number of target to be contained (piece/unit)	
				1	2
2.0 x 2.0	140	25	179	1	1
2.0 x 0.5	35	10	286	1 ~ 2	
2.0 x 0.1	7	4.2	600	3 ~ 4	
1.6 x 0.8	36	9.3	258	2 ~ 3	
1.6 x 0.4	18	6.6	367	2 ~ 3	

Table 3 Irradiation results of ^{192}Ir sources in JMTR

Sample No.	Irradiation hole	Irradiation time (hour)	Thermal neutron flux ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Radioactivity			Radioactivity corrected to 520 hour (Ci)		
				Avg.	Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.
82M-16R-3	6-11	458	2.5×10^{14}	4.7	5.2	4.2	5.3	5.9	4.8
82M-16R-4	6-11	458		4.3	5.0	4.0	4.9	5.7	4.5

Table 4 Required radioactivity of ^{192}Ir assembly source to obtain the effective radioactivity of 10Ci taking account of self-absorption

Number of contained target (piece/unit)	Absorption coefficient	Effective radioactivity of assembly source (Ci)	Effective radioactivity per target (Ci/piece)		
			5	4	3
		0.78	12.8	2.6	
		0.80	12.5	3.1	
		0.83	12.0	4.0	

Table 5 ^{192}Ir assembly sources used for radiography

Source (mm)	Number of contained target (piece/unit)	Radioactivity (Ci/unit)
$1.6^\phi \times 0.4^t$	1	2.9
"	3	7.8
"	4	10.3
$2.0^\phi \times 2.0^t$	1	14.6

Table 6 Measurement of unsharpness

Assembly source (mm)	Film density		Unsharpness
	Step : 0mm	Step : 10mm	(μm)
$1.6^\phi \times 0.4^t$ 1 piece	2.4	1.6	583
$1.6^\phi \times 0.4^t$ 3 pieces	2.7	1.9	596
$1.6^\phi \times 0.4^t$ 4 pieces	2.0	1.4	583
$2.0^\phi \times 2.0^t$ 1 piece	2.2	1.6	577

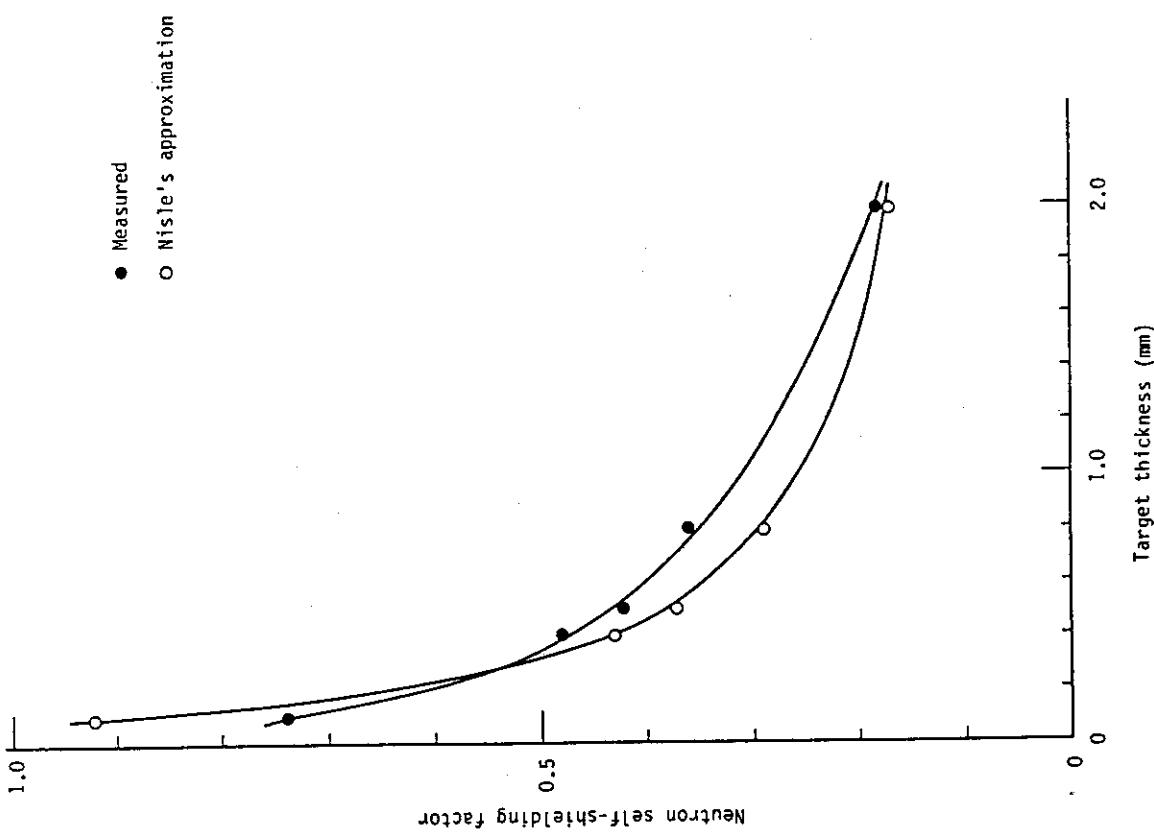
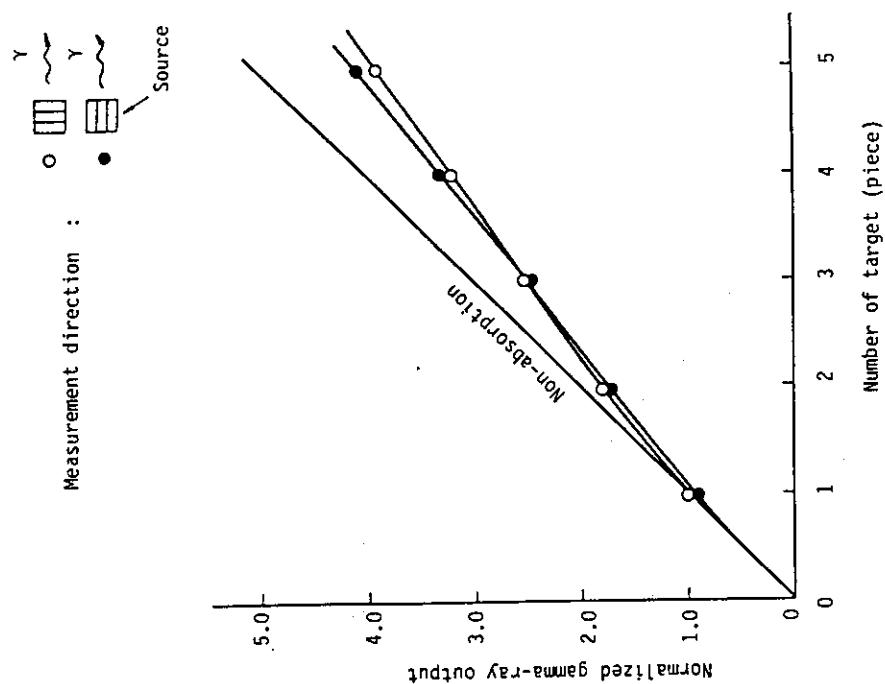


Fig. 1 Neutron self-shielding factor for iridium target

Fig. 2 Gamma-ray self-absorption effect for ^{192}Ir assembly sources

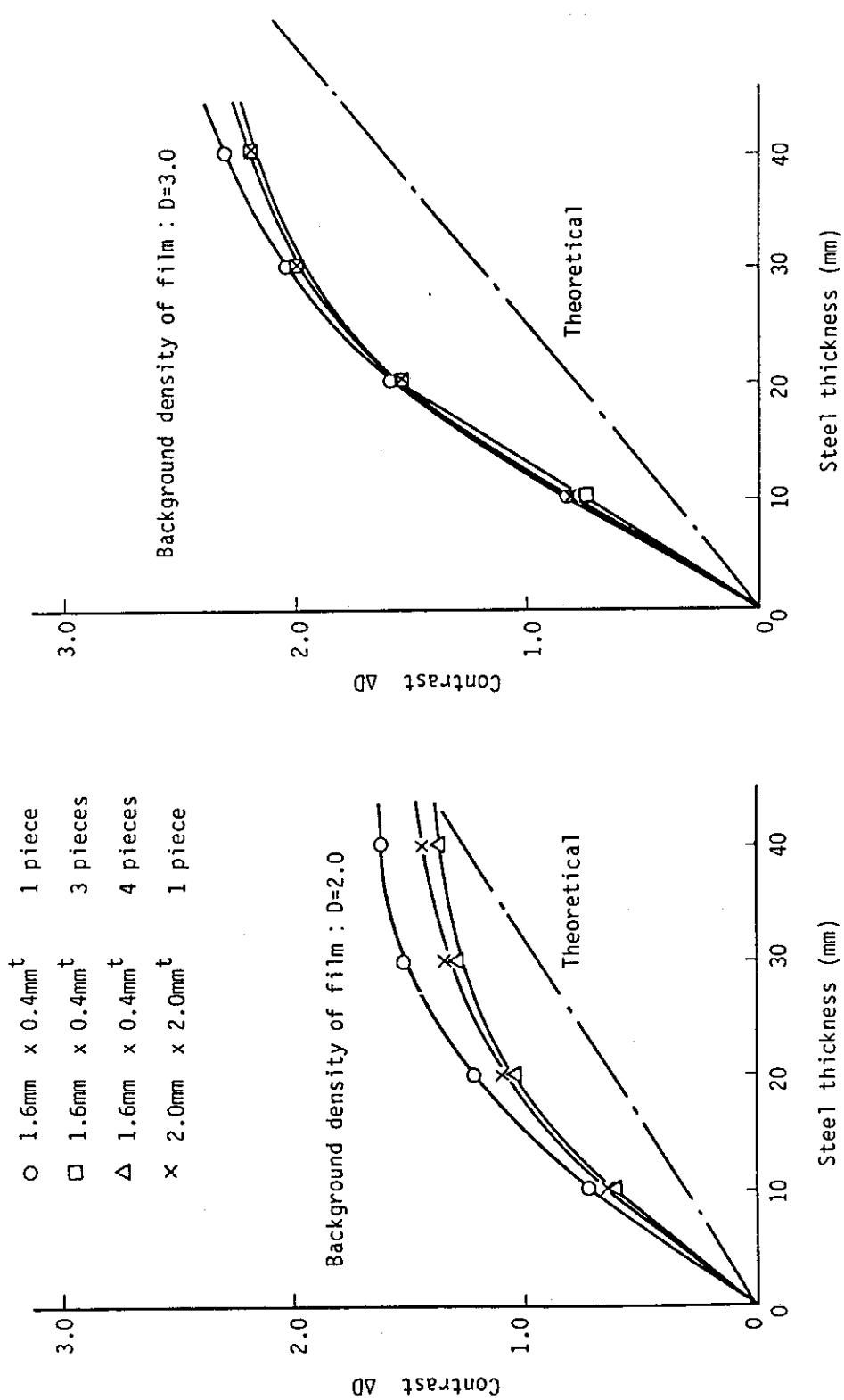


Fig. 3 Measurement of contrast

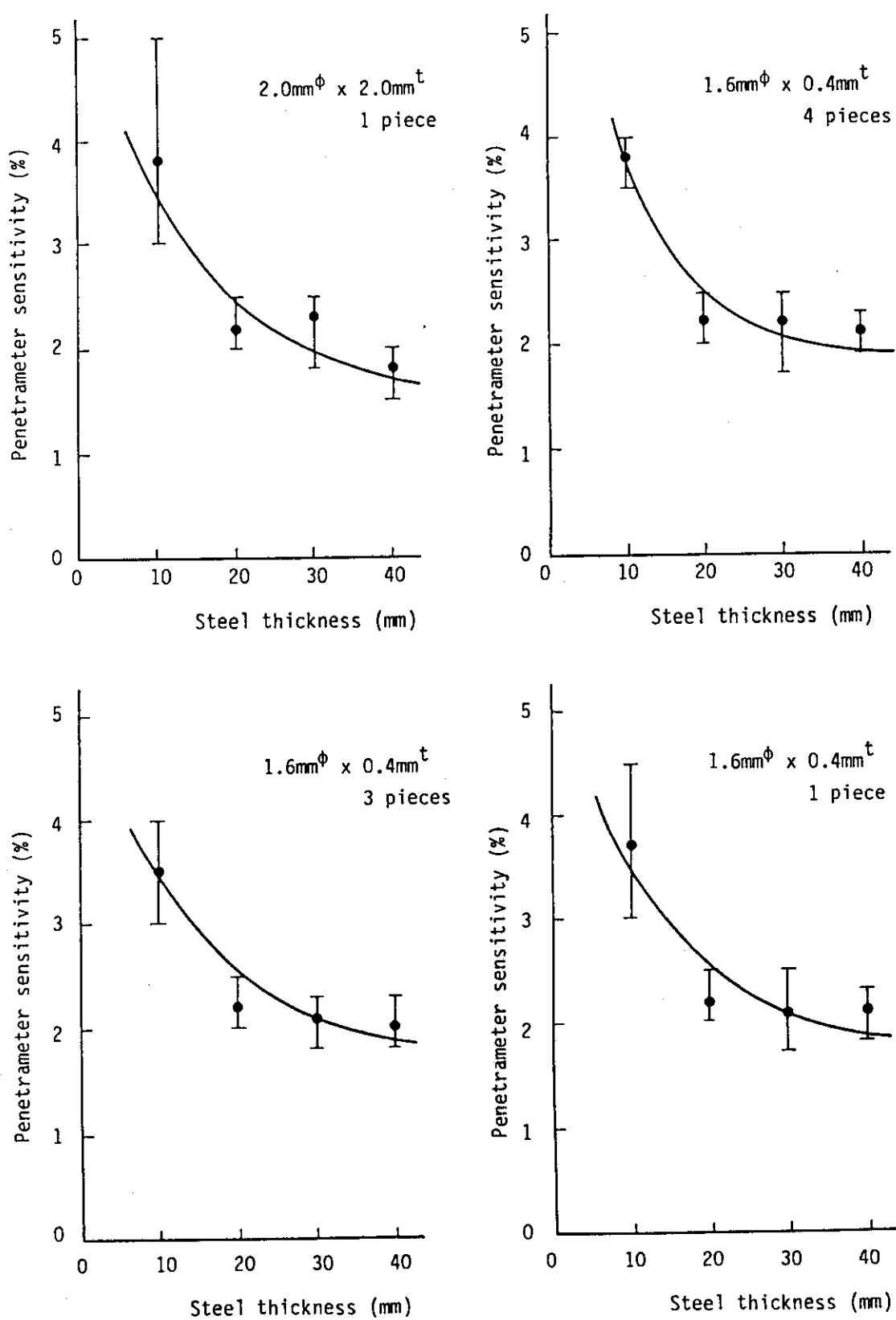


Fig. 4 Measurement of penetrometer sensitivity

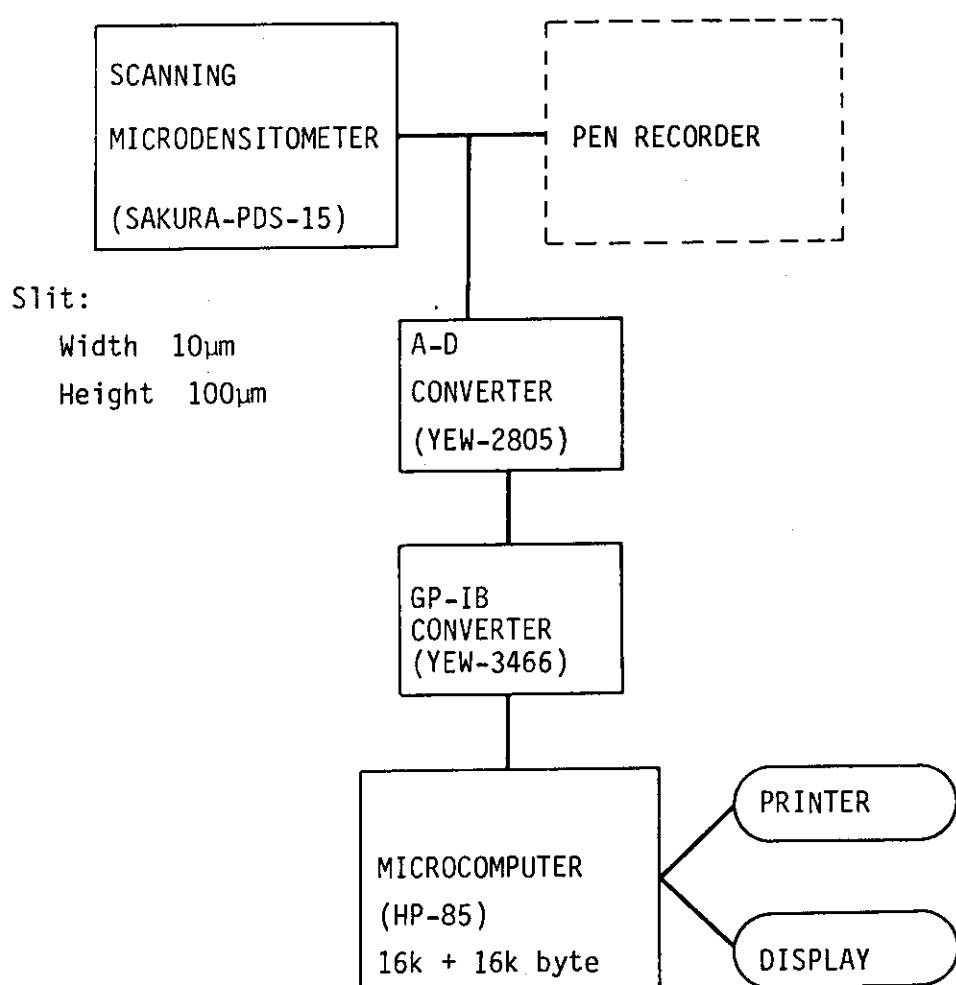


Fig. 5. Computer controlled scanning microdensitometer
for measurement of unsharpness

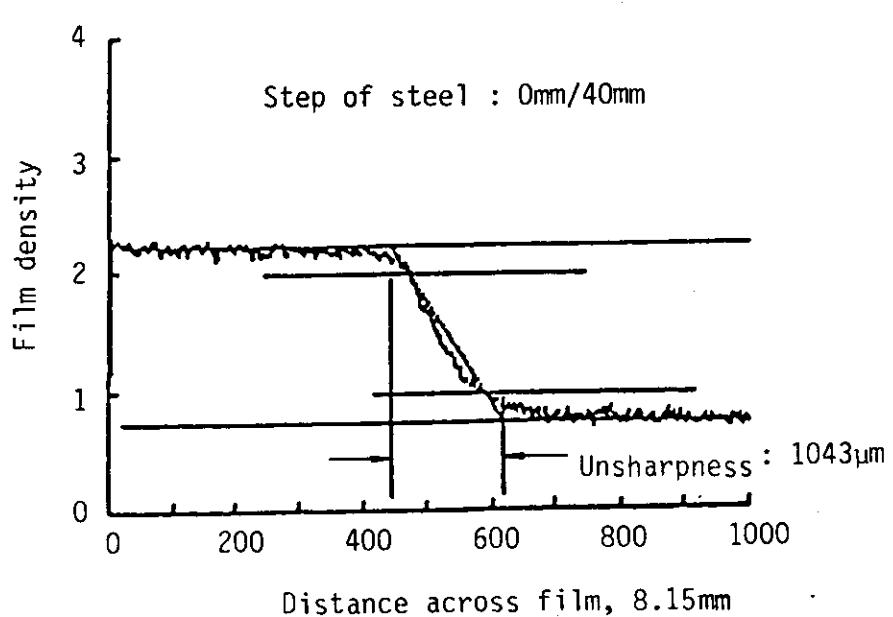
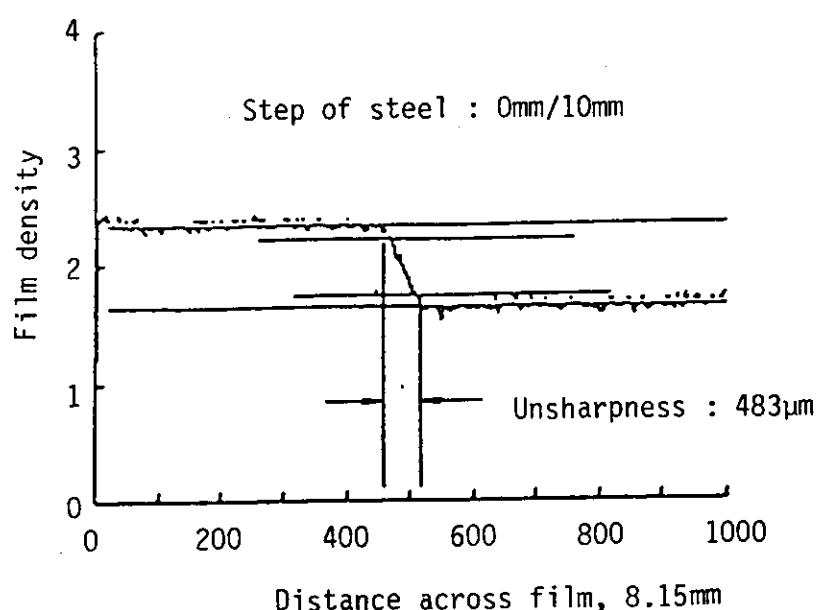


Fig. 6 Measurement of unsharpness by Klasen's method