

JAERI-Tech
2002-051



JP0250275



クリアランスレベル以下の模擬解体金属再利用製品に
起因する空間線量率評価手法の検討
(受託研究)

2002年 6月

岡本 亜紀子・北見 康雄*・安藤 佳明*
中村 寿・斎藤 公明・中島 幹雄

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

本レポートは、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、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2002

編集兼発行 日本原子力研究所

クリアランスレベル以下の模擬解体金属再利用製品に起因する空間線量率評価手法の検討
(受託研究)

日本原子力研究所東海研究所バックエンド技術部

岡本 亜紀子・北見 康雄*・安藤 佳明**・中村 寿+・斎藤 公明++・中島 幹雄

(2002年4月15日受理)

クリアランスレベル以下の解体金属廃棄物を用いた再利用製品の安全性確認に資するため、微量の放射性核種を含む模擬再利用製品(試験体)を作成し、これに起因する空間線量率を測定とシミュレーション計算により求めた。測定においては γ 線スペクトルからストリッピング操作等により空間線量率を導出した。シミュレーション計算においては、モンテカルロ法による計算コードと、点減衰核積分法による計算コードを用いて空間線量率の算出を行った。バックグラウンドに極めて近い微弱な放射線であること、検出器と試験体の幾何学的条件が点線源等に比べて複雑であることなどに起因する測定および計算における誤差要因を抽出し、これらに対して適当な補正を行うことにより、測定および計算における結果はよく一致した。

本報告は、試験体の製作から空間線量率の測定法とシミュレーション計算、および両手法により得られた結果の比較評価についてまとめたものである。

本研究は、特別会計による文部科学省からの受託研究(平成11~12年度)として実施したものである。

東海研究所 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

+安全試験部 ++計算科学技術推進センター

*(株)日立エンジニアリングサービス **(株)日本環境調査研究所

Study on Measurement of Spatial Dose Rates from Simulated Products Made from Recycled Metal
below Clearance Levels Arising from Dismantling of Nuclear Facilities
(Contract Research)

Akiko OKAMOTO, Yasuo KITAMI*, Yoshiaki ANDO**, Hisashi NAKAMURA[†]
Kimiaki SAITO⁺⁺ and Mikio NAKASHIMA

Department of Decommissioning and Waste Management
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 15, 2002)

In order to contribute to safety assessment of recycling products made from dismantling metal wastes, metal ingots containing ^{60}Co were produced and spatial dose rates from the ingots were evaluated by gamma-ray measurement and calculation. Stripping operations were made using detector response functions calculated by Monte Carlo program to derive spatial dose rates from measured gamma-ray spectra. In the computer simulation, Monte Carlo and point kernel calculation codes were used. Agreement between measured and calculated values was satisfactory in spite of an extremely low concentration of ^{60}Co in the ingots and a complicated geometric condition between detector and samples.

Keywords : Clearance Level, Recycling Product, Spatial Dose Rate, Dismantling Metal Waste

This study was conducted under contract with Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of Japan from 1999 to 2001

*Dept. of Safety Research Technical Support

**Center for Promotion of Computational Science and Engineering

^{*}Hitachi Engineering & Services, Co., Ltd ^{**}Japan Environment Research Corporation

目 次

1. はじめに	1
2. 試験方法	2
2.1 模擬再利用製品の製作	2
2.1.1 溶融装置	2
2.1.2 材料	2
2.1.3 製作	2
2.1.4 試験体の性状確認	3
2.2 空間線量率の測定	3
2.2.1 Ge検出器による測定	3
2.2.2 NaI検出器による測定	5
2.3 シミュレーション計算による空間線量率の算出	5
2.3.1 YURI3による計算	6
2.3.2 QADによる計算	6
3. 結果と考察	6
3.1 γ 線スペクトル測定に基づく空間線量率	6
3.1.1 Ge検出器による測定	6
3.1.2 NaI検出器による測定	8
3.2 シミュレーション計算による空間線量率	9
3.3 比較評価	9
3.3.1 Ge検出器による測定値と計算値との比較	9
3.3.2 NaI検出器による測定値と計算値との比較	10
3.3.3 総合評価	10
4. まとめ	11
謝辞	11
参考文献	12

Contents

1. Introduction	1
2. Procedures	2
2.1 Simulated Recycling Product	2
2.1.1 Melting System	2
2.1.2 Materials	2
2.1.3 Sample Production	2
2.1.4 Specification of Samples	3
2.2 Measurement of Spatial Dose Rate	3
2.2.1 Measurement by Ge Detector	3
2.2.2 Measurement by NaI Detector	5
2.3 Calculation of Spatial Dose Rate	5
2.3.1 Calculation by YURI3	6
2.3.2 Calculation by QAD	6
3. Results and Discussion	6
3.1 Measured Values of Spatial Dose Rate	6
3.1.1 Measurement by Ge Detector	6
3.1.2 Measurement by NaI Detector	8
3.2 Calculated Values of Spatial Dose Rate	9
3.3 Comparison and Evaluation	9
3.3.1 Comparison between Measured Values by Ge Detector and Calculated Ones	9
3.3.2 Comparison between Measured Values by NaI Detector and Calculated Ones	10
3.3.3 Comprehensive Evaluation	10
4. Conclusion	11
Acknowledgement	11
References	12

Tables and Figures

Table 1	Weight of Materials and Radioactivity of ^{60}Co	13
Table 2	Size and Weight of Samples	13
Table 3	Gravity and ^{60}Co Concentration of Samples	13
Table 4	Measurement Time (Ge detector)	14
Table 5	Measurement Time (NaI detector)	14
Table 6(a)	Measured Absorbed Dose Rate (Ge detector)	15
Table 6(b)	Measured Dose Equivalent Rate (Ge detector)	15
Table 7(a)	Measured Absorbed Dose Rate (NaI detector)	16
Table 7(b)	Measured Dose Equivalent Rate (NaI detector)	17
Fig.1	Schematic Diagram of Melting System	18
Fig.2	Flow Scheme for Sample Production	19
Fig.3	Dimension of Crucible	20
Fig.4	Sectional Drawing of Sample	21
Fig.5	Illustration of Measurement System	22
Fig.6	Flow Scheme for Deriving Spatial Dose Rate	23
Fig.7	Conceptual Expression of Stripping Operation	24
Fig.8	Shape of Sample and Approximated Curve	25
Fig.9	Partition of Sample	26
Fig.10	Variation of Counting Efficiency with Thickness of Dead Layer of Ge detector	27
Fig.11	Ratio of Calculated Peak Counting Efficiencies to Measured Ones	27
Fig.12	Counting Efficiency of Ge detector and Its Ratio to That at an Incident Angle of 0° as a Function of Incident Angle of Gamma-ray	28
Fig.13	Correction Coefficient and Ratio of Counting Efficiency to That at an Incident Angle of 0° vs. Distance Between Surface of Sample and Ge Detector	28
Fig.14	Result of Stripping Operation and Spatial Dose Rate (Ge detector)	29
Fig.15	Variation of Spatial Dose Rate with Distance between Surface of Ge detector and Sample and ^{60}Co Concentration	30
Fig.16	Arrangement of Detector, Shield and Source for Shadow Shield Method	31
Fig.17	η and Normalized Spectrum of Direct Incident Gamma-ray	32
Fig.18	Result of Stripping Operation and Spatial Dose Rate (NaI detector)	33
Fig.19	Variation of Dose Equivalent Rate with Distance between Surface of Sample and NaI detector and ^{60}Co Concentration	34
Fig.20	Schematic Diagram of Position Relation between NaI detector and Sample and Variation of δ with Distance between Surface of NaI detector and Sample	35
Fig.21	Dose Equivalent Rate Calculated with YURI3 or QAD and Ratio of QAD Values to YURI3	36
Fig.22	Ratio of Measured Values by Ge detector to Calculated Ones as a Function of Distance between Center of Ge detector and Surface of Sample	37
Fig.23	Percentage Distribution of Dose Equivalent Rate	38
Fig.24	Ratio of Dose Equivalent Rates of TP-4 to Those of TP-2	38
Fig.25	Ratio of Measured Values by NaI detector to Calculated Ones as a Function of Distance between Center of NaI detector and Surface of Sample	39

This is a blank page.

1. はじめに

我が国で原子力による発電が開始されてから30年以上が経過し、1999年12月31日現在、52基の商業用原子炉が稼働中である¹⁾。原子力発電施設の寿命は30年～40年といわれており、1998年に運転を停止した日本原子力発電㈱東海発電所をはじめとし、今後、寿命や採算性の面から運転終了をせまられる原子炉は多数発生することが予想される。運転を終了した原子力発電施設に対する廃止措置として、世界的にいくつかの方式が選択され、実施されている。具体的には、原子炉運転終了後、使用済燃料等の搬出、系統除染(機器・配管等に付着した放射性物質の除去)の後、原子力発電施設全体を閉鎖して適切に管理する「密閉管理方式」、使用済燃料の搬出、系統除染の後、原子炉建家内の放射能の高い部分を遮蔽隔離して管理し、他の部分は解体撤去する「遮蔽隔離方式」、および使用済燃料等の搬出、系統除染の後、原子力発電施設の全てを解体撤去する「解体撤去方式」などである。我が国では跡地利用の有効性から、密閉管理方式と解体撤去方式を組み合わせ、使用済燃料の搬出、系統除染を行った後、施設を5～10年間密閉管理して放射能の減衰を待ち、できるだけ早い時期に施設全体を解体撤去することが原則とされている²⁾。

原子炉解体において発生する廃棄物量は、炉型や出力規模により異なるが、110万kW級の軽水炉では約50～55万トンであり、このうち95%以上が放射性廃棄物として扱う必要がないものであると推算されている³⁾。これら大量の放射性廃棄物として扱う必要のない廃棄物を放射性廃棄物と混在して処分すると、放射性廃棄物量を必要以上に増大させ、さらに再利用可能ななものまで処分されてしまうことから、処分コストや環境負荷の増大につながる。そこで、原子力施設で発生した廃棄物の合理的な再利用・処分のために、放射性物質と「放射性物質として取り扱う必要はないもの」を区分する基準となるクリアランスレベルが、IAEAをはじめとするいくつかの国際機関により検討され、国際的な勧告値も提案されている⁴⁾。すでに、イギリス、ドイツなどでは、クリアランスレベルが制度化され、これまでに原子炉等の解体によって生じた数万トンの金属廃棄物とコンクリート廃棄物に適用された実績がある⁵⁾。このような国際的動向の中で、我が国でも原子力安全委員会放射性廃棄物安全基準専門部会により、1997年5月からクリアランスレベルについて調査・審議が始められ、1999年3月に報告書「主な原子炉施設におけるクリアランスレベルについて」が原子力安全委員会で了承され、クリアランスレベルの制度化がすすめられている⁶⁾。

原子力安全委員会によるクリアランスレベルの調査・審議においては、金属とコンクリートが評価対象物とされている。具体的なクリアランスレベルの数値の算出は、評価対象物が再利用・埋設処分される場合に、被曝を生じると考えられる様々なケースについて、シミュレーション計算によって評価した被曝線量に基づいて行われている。金属の再利用の場合には、スクラップとして市場に放出された金属が、溶融等の処理により家電製品や乗り物、建築資材等に製品化され、一般に広く使用されるという想定で、製品製作時・製品使用時における被曝線量が評価されている⁶⁾。

本試験では、解体金属廃棄物を用いた再利用製品の安全性評価に資するため、微量の放射性核種を含む模擬再利用製品(試験体)を製作し、これに起因する空間線量率を、測定で得られたγ線スペクトルから導出する手法と計算コードを用いたシミュレーション計算により求め、比較評価を行った。測定値とシミュレーション計算値を比較評価する場合、点線源等、形状が単純で充分な放射能強度をもつ線源を用いることが多いが、本試験では、再利用製品の使用時を想定し、形状が複雑で放射能濃度の低い試験体に起因する空間線量率について、測定に基づく導出およびシミュレーション計算による算出を行った。両手法において、バックグラウンドレベルの微弱な放射線であること、検出器と試験体の幾何学的条件が点線源に比べて複雑であること等に起因する誤差に着目し、これらの誤差要因に対して適当な補正を行った結果、両手法による空間線量率はよく一致した。

本報告は、試験体の製作から γ 線スペクトル測定に基づく空間線量率の導出法とシミュレーション計算による空間線量率の算出、および両手法による結果の比較評価についてまとめたものである。

2. 試験方法

2.1 模擬再利用製品の製作

高周波誘導炉を備えた溶融装置を用いて直径300mm×厚さ150mmの金属インゴット(以下、試験体)を5体製作し、模擬再利用製品とした。また、添加する放射性核種は、代表的なクリアランスレベル評価核種のなかで、金属溶融においてほぼ100%が金属中に残留することが確認されている ^{60}Co を選定した⁷⁾。

2.1.1 溶融装置

試験体の製作に使用した溶融装置の概略を図1に示す。溶融装置は高周波誘導炉を主体とした溶融部と、溶融時に発生する有害ガスや放射性核種の大気環境中への放出を抑制するための排ガス処理部から構成される。誘導炉はチャンバ内に設置されており、チャンバ排気系により常時排気される。高周波誘導炉の定格出力は350kWであり、炉容積は70Lである。また、傾動による出湯が可能である。本試験では、スタンプ材を用いてルツボを炉内に設置し、ルツボ内にて溶融・固化を行う方式とし、また、有害ガスが発生する恐れがないことから、排ガス処理部の二次燃焼装置-排ガス洗浄装置系統は使用しなかった。

2.1.2 材料

(1) 金属材料と添加剤

試験体は大きさを統一するために切断を行うので、充分な加工性が必要とされる。そこで、白銑化(硬化)が起こることなく、スラグの巻き込みや巣の発生等も抑制できる組成を検討し、主材料である純鉄、銑鉄にFe-Si、カーボン粉を加えて成分調整を行った。使用した金属材料と添加剤の重量を表1に示す。

(2) ^{60}Co

^{60}Co 添加には、(社)日本アイソトープ協会から購入した ^{60}Co 標準溶液(放射能濃度0.01～4.2MBq/g、化学形 $\text{CoCl}_2\text{-}0.1\text{NHCl}$)を、0.1NHClにより1～1000倍に希釀して使用した。添加は、希釀液の適量を滴下・乾燥した金属チップを入れた容器(以下、RI容器)を鉄材が溶融した後に溶湯に投入する方式で行った。また、添加量は、原子力安全委員会によって算出された ^{60}Co のクリアランスレベルが0.4Bq/gであることから、試験体中の ^{60}Co 濃度が0.04、0.4、4、40Bq/gとなるように調整した。 ^{60}Co 添加量を表1に示す。

2.1.3 製作

高周波誘導炉内に設置した高アルミナルツボに、金属材料と添加剤を装荷し、高周波誘導により1460℃程度まで昇温した。材料の溶融を目視により確認した後、比重測定に用いる小形サンプル(直径40mm×厚さ20mm)の採取を行った。その後RI容器を投入し、充分に攪拌されるように約1時間温度を保持してから、 ^{60}Co 濃度確認に用いる小形サンプルの採取を行った。小形サンプルは異なるポイントからそれぞれ3個ずつ採取した。また、必要に応じてスラグの除去を行った。

溶融後ルツボ内で徐冷固化し、固化後ルツボを解体して試験体を取り出した。試験体の厚さが150mmとなるように試験体上部を切断し、グラインダーを用いて表面研磨を行い、防錆剤を塗布した。試験体製作のフローを図2に、使用したルツボの形状を図3にそれぞれ示す。

2.1.4 試験体の性状確認

本試験では、測定により得られた空間線量率とシミュレーション計算による値の比較・評価を行うため、試験体の形状や試験体中の⁶⁰Co濃度などを把握する必要がある。また、シミュレーション計算における入力条件の簡易化の観点から、試験体の形状が統一されていることや、⁶⁰Coや各成分が試験体中に均一に分布していることが望ましい。そこで以下の測定を行い、試験体性状の確認を行った。

(1) 形状

試験体は製作に用いたルツボの形状により底部に曲率をもった形状となった。このため、試験体の底面から厚さ10mmごとに直径の測定を行った。試験体は、最大直径306～307mm、厚さ146～152mm、重量66.9～70.2kgであり、ほぼ統一された形状であった。試験体のサイズと重量を表2に、試験体の形状の一例を図4に示す。

(2) 比重

試験体中における成分の均一性を確認するため、試験体製作時に採取した小形サンプルの比重の測定を行った。小形サンプルの比重は、7.21～7.59であった。いずれの試験体においても小形サンプル3個の測定結果の標準偏差を平均値で除した変動係数が0.22～0.41%と小さかったことから、試験体が均質であることが確認できた。小形サンプルの平均値を試験体の比重とする。小形サンプルの比重の測定結果を表3に示す。

(3) ⁶⁰Co濃度

試験体製作時に採取した小形サンプルを塩酸で溶解して、ゲルマニウム半導体検出器(SEIKO EG&G社製、Ge結晶寸法直径58.9mm×長さ74.1mm 以下、Ge検出器)を用いて溶解液中の⁶⁰Co濃度の測定を行った。いずれの試験体においても、小形サンプル3個の測定結果の変動係数が1.7～2.2%と小さかったことから、⁶⁰Coが均一に分布していることが確認できた。また、3個の小形サンプルの平均値は、目的の⁶⁰Co濃度と3%以内で一致していることが確認できた。小形サンプルの⁶⁰Co濃度の平均値を試験体の⁶⁰Co濃度とする。小形サンプルの⁶⁰Co濃度の測定結果を表3に示す。

2.2 空間線量率の測定

試験体に起因する空間線量率はバックグラウンドに極めて近いため、サーベイメータなどで空間線量率を直接測定することは困難である。そこで、 γ 線スペクトルを測定し、得られた γ 線スペクトルから導出した空間線量率を測定値とした。

まず、バックグラウンドの低減を重視し、優れたエネルギー分解能をもち、検出限界が低いGe検出器を用いて遮蔽体内における γ 線スペクトルの測定を行った。次に、遮蔽体内における測定では測定範囲が限られていることから、運搬・設置が容易で、計数効率の優れたNaIシンチレーション検出器(SEIKO EG&G社製、結晶寸法直径76.2mm×長さ76.2mm以下、NaI検出器)を用いて遮蔽体外における γ 線スペクトルの測定を行った。

2.2.1 Ge検出器による測定

(1) 測定条件

厚さ100mmの鉛を厚さ5mmのアクリル板で内張した遮蔽体内において、試験体上面方向について、試験体表面から検出器表面までの距離(以下、測定距離)を10～350mmとして γ 線スペクトルの測定を行った。ただし、⁶⁰Co濃度の高いTP-4については、測定距離150mmにおいてデッドタイムが60%を超えたため、それより短い測定距離では測定を行わなかった。また、全ての測定距離において測定時間を10⁵秒としてバックグラウンドの測定を行った。

各測定距離における測定時間を表4に示す。

(2) 測定方法

試験体が重量物であるため、遮蔽体内に昇降装置を設置し、測定距離の調整を行った。測定装置の概略を図5に示す。

(3) 空間線量率の導出

測定で得られた γ 線スペクトルから以下に示す方法で空間線量率を求めた。空間線量率導出のフローを図6に示す。

①バックグラウンドの補正

エネルギー区間幅を10keVとし、10keV～3.0MeVまで300個のエネルギー区間に分割し、エネルギー区間別にバックグラウンドの計数率を減算した。

②ストリッピング操作⁸⁾

測定によって得られた γ 線スペクトルは、入射 γ 線のエネルギーを完全に吸収した分布と、一部のみを吸収した分布、および宇宙線の荷電粒子の通過や地殻等に含まれる天然放射性核種からの γ 線に起因する分布で構成される。 γ 線スペクトルから空間線量率を求めるには、 γ 線の全エネルギー吸収のみによる計数率を求める必要がある。宇宙線等の影響は①バックグラウンドの補正により除去したので、部分的エネルギー吸収による計数率を差し引くため、下式を用いてストリッピング操作を行った。ストリッピング操作の概念を図7に示す。

$$N'_i = N_i - \sum_{j=i+1}^L f_{ij}(r_j-1)N_j \quad \cdots (1)$$

ただし、

N'_i ：入射 γ 線の全エネルギー吸収によるエネルギー区間 i の正味計数率

N_i ：入射 γ 線の全エネルギー吸収および部分的エネルギー吸収によるエネルギー区間 i の正味計数率

L ：最大エネルギー γ 線を含むエネルギー区間

f_{ij} ：エネルギー区間 j に入射した γ 線の部分的エネルギー吸収によるエネルギー区間 i でのコンプトン連続分布中の計数率の割合

r_j ：エネルギー区間 j に入射した γ 線の全エネルギー吸収ピークの計数率に対する全体の計数率の比

である。

また、式①の $f_{ij}(r_j-1)$ は、以下に示すように各エネルギー区間における全エネルギー吸収ピークの計数率に対するコンプトン連続分布の計数率の比に置換できる。

$$\begin{aligned} r_j &= N_{tj}/N_{pj} \\ f_{ij}(r_j-1) &= N_{co_{ij}}/N_{co_{tj}} \times (N_{tj}/N_{pj}-1) \\ &= N_{co_{ij}}/N_{co_{tj}} \times (N_{co_{tj}}/N_{pj}) \\ &= N_{co_{ij}}/N_{pj} \end{aligned} \quad \cdots (2)$$

ただし、

$N_{co_{ij}}$ ：エネルギー区間 j に入射した γ 線の部分的エネルギー吸収によるコンプトン連続分布中のエネルギー区間 i における計数率

$N_{co_{tj}}$ ：エネルギー区間 j に入射した γ 線によるコンプトン連続分布の計数率の合計

N_{tj} ：エネルギー区間 j に入射した γ 線によるコンプトン連続分布の計数率と全エネルギー吸収ピークの計数率の合計

N_{pj} : エネルギー区間 j に入射した γ 線の全エネルギー吸収ピークの計数率である。

そこで、 γ 線検出器応答関数計算コードMARTHA⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾を用いて、「検出器軸方向からの平行ビーム γ 線の入射」の条件で算出したレスポンスマトリックスから、エネルギー区間別の全エネルギー吸収ピークの計数率に対するコンプトン連続分布の計数率の比を求め、ストリッピング操作に用いた。

③ 計数効率の補正

ストリッピング操作によって得られたエネルギー区間別の計数率を、MARTHAで求めたエネルギー区間別の計数効率で除算し、単位時間当たりに検出器に入射したエネルギー区間別の γ 線数を求めた。

④ 線束密度の算出

単位時間当たりのエネルギー区間別入射 γ 線数を検出器の窓面積27.2cm²で除算し、エネルギー区間別の入射 γ 線の線束密度を算出した。

⑤ 空間線量率の算出

エネルギー区間別の線束密度に空気吸収線量率に換算するための変換係数¹²⁾を乗じて、エネルギー区間別の空気吸収線量率を求めて合計し、試験体に起因する空気吸収線量率とした。同様に、1cm線量当量率に換算するための変換係数¹²⁾を用いてエネルギー区間別の1cm線量当量率を求めて合計し、試験体に起因する1cm線量当量率とした。

2.2.2 NaI検出器による測定

(1) 測定条件

NaI検出器を用いて、試験体軸方向と試験体半径方向の空間線量率の測定を行った。試験体軸方向については、上面方向と下面方向について測定距離10mm～2mにおける測定を行った。また半径方向については、測定距離0.1～2mにおける測定を行った。ただし、⁶⁰Co濃度が低い試験体については、空間線量率がバックグラウンドに極めて近くなる測定距離における測定は行わなかった。各測定距離における測定時間を表5に示す。

(2) 測定方法

測定時における床や壁などからの散乱線を低減するため、試験体中心が床面から0.75m、壁から1m以上となる位置に、吊り具を用いて試験体を固定した。なお、天井面は試験体から3m以上離れているので、天井からの散乱線の影響は無視できるものと考えられる。

また、検出器の支持には、散乱線の原因とならないように、金属部の少ない三脚を使用した。

(3) 空間線量率の導出

測定により得られた γ 線スペクトルから、Ge検出器による測定と同様にして空間線量率を導出した。

2.3 シミュレーション計算による空間線量率の算出

モンテカルロ法による環境 γ 線輸送計算コードYURI3¹³⁾と点減衰核積分法による遮蔽計算コードQAD-CGGP2¹⁴⁾(以下、QAD)を用いて空間線量率の算出を行った。⁶⁰Co濃度は1Bq/gとし、線源表面からの距離はYURI3では10～3000mm、QADでは10～2000mmの範囲とした。また、線源の比重は試験体の比重の最小値である7.23とした。

2.3.1 YURI3による計算

プログラムで使用できる線源形状は限られているため、試験体形状の測定結果から、試験体側面の曲線を5分割して近似式を求め、線源形状が最も近い円柱をベースに、①円柱と曲線(試験体)との隙間空間で発生した γ 線は追跡しない(γ 線は発生しない)、②円柱と試験体との隙間空間では散乱等の相互作用が起こらない、という2つの条件を附加した。試験体形状の近似式を試験体形状とあわせて図8に示す。

2.3.2 QADによる計算

YURI3と同様に、使用できる線源形状が限られているため、試験体に内接する8つの円柱を組み合わせて試験体形状を近似した。近似方法を図9に示す。1つの円柱を ^{60}Co が均一分布する線源とし、他の円柱は鉄の遮蔽体として、1回の計算を行った。それぞれの円柱を線源として8回計算を行い、結果を合計した。

また、QADは線源のメッシュ数が計算結果に大きな影響を及ぼすことが知られており、一般にメッシュ数が多いほど計算精度は高くなるが、入力時間と計算時間が負担となる。そこでメッシュを1~10mmまで変化させて予備計算を行い、メッシュ数と計算結果の関係を調べ、その結果から試験体表面から50mmまでは2mm間隔、それより内側では5mm間隔とした。予備試験において、メッシュ数の違いによる計算結果の差は最大で5%程度であった。

3. 結果と考察

3.1 γ 線スペクトル測定に基づく空間線量率

3.1.1 Ge検出器による測定

予備試験により、 γ 線スペクトルから空間線量率を導出する過程で生じる誤差を小さくするためには、①MARTHAによるレスポンスマトリックスと計数効率の算出において、不感層(Ge結晶の表面にある γ 線が入射してエネルギー付与が起こってもレスポンスに寄与しない部分)を考慮する必要があること、②測定距離の変化に伴い、Ge検出器に対する γ 線の入射角度が変化するため、測定距離ごとに計数効率の補正を行う必要があることが分かった。そこで、以下に示す方法により、不感層厚さの推定と各測定距離における計数効率の補正を行った。

(1) 不感層厚さの推定

不感層厚さは、検出器の計数効率に影響することが知られているので、MARTHAを用いて数種類の不感層厚さについて計数効率を求め、これを実際のGe検出器の計数効率と比較することにより不感層厚さの推定を行った。

まず、 ^{133}Ba (0.356MeV)、 ^{137}Cs (0.662MeV)、 ^{60}Co (1.17、1.33MeV)の3核種混合点線源を、遮蔽体内でGe検出器から最も離れた位置(Ge結晶表面から571mm)に設置して測定を行い、計数効率を求めた。次に、Ge検出器の成績書に記載されていた不感層厚さが0.7mmであることから、この値を基準とし、不感層厚さを0、0.3、0.7、1.4、2.1mmとして、MARTHAによるピーク計数効率の算出を行った。不感層厚さの変化に伴う計数効率の変化を図10に、計数効率の実験値に対する計算値の比を図11に示す。得られた結果から、実験値と計算値の比の平均値が最も1に近い0.7mmをGe検出器の不感層厚さとした。

(2) 各測定距離における計数効率の補正

試験体の直径がGe検出器の直径より大きいため、測定距離の変化に伴い、検出器と試験体のなす角度 θ_L (ここでは検出器中心軸と、検出器の中心と試験体円周上的一点を通る直線がなす角度)は、測定距離を10~350mmと変化させると、73~22°と変化する。そのため、

各測定距離におけるGe検出器に対する γ 線入射角度は、検出器軸方向を 0° とすると、 $0 \sim \theta_L$ の分布をもつことになる。本試験では、MARTHAによる計数効率の算出において、「検出器軸方向からの平行ビーム γ 線(すなわち入射角度 0°)の入射」として計算を行っているため、 γ 線入射角度と計数効率の関係を求め、各測定距離における計数効率の補正を行う必要がある。そこで、 $0 \sim \theta_L$ 間を 5° ごとに区分し、各角度区間における γ 線入射角度と計数効率の関係を調べ、各測定距離における計数効率の補正係数を求めた。

まず、MARTHAを用いて $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で 5° ごとにGe検出器の γ 線入射角度別のピーク計数効率を算出した。得られた計数効率を各角度区間ににおける計数効率とし、入射角度 0° における計数効率で除して、角度区間別の軸方向の平行ビームに対する計数効率の比を求めた。 γ 線入射角度の変化に伴う計数効率の変化を、 0° に対する比の変化とあわせて図12に示す。

次に、Ge検出器への入射 γ 線数は、線源の強度に比例し、線源-検出器間の距離の2乗に逆比例するので、角度区間別の計数効率に重みを加える必要がある。そこで、角度区間別に γ 線放出面積、試験体表面-検出器中心間の距離の2乗の逆数、試験体表面における線源強度について、それぞれ軸方向の平行ビームに対する比を求め、下式により、角度区間 θ_i における重み係数 W_{θ_i} を求めた。

$$W_{\theta_i} = S_{\theta_i} D_{\theta_i} I_{\theta_i} / \sum_{i=0}^L (S_{\theta_i} D_{\theta_i} I_{\theta_i}) \quad \cdots (3)$$

ただし、

S_{θ_i} : 角度区間 θ_i における軸方向の入射に対する γ 線放出面積の比

D_{θ_i} : 角度区間 θ_i における軸方向の入射に対する試験体表面-検出器中心間距離の2乗の逆数の比

I_{θ_i} : 角度区間 θ_i における軸方向の入射に対する試験体表面における線源強度の比である。

S_{θ_i} は試験体表面における角度区間 θ_i にある入射角度をもつ γ 線が放出される面積について、 D_{θ_i} は試験体表面から放出された γ 線が検出器に入射するまでに空気中を通過する距離について、 I_{θ_i} は試験体中で発生した γ 線が、試験体表面に達するまでに試験体中を通過する距離について、角度区間ごとの変化を考慮したものである。

得られた角度区間別の軸方向の平行ビームに対する計数効率の比と重み係数を乗じた値を、 $0 \sim \theta_L$ まで合計し、各測定距離における軸方向の平行ビームに対する計数効率の比とした。比の逆数を補正係数とし、得られた空間線量率に乗じて、空間線量率の測定値とした。ただし、本試験では ^{60}Co の γ 線のエネルギー(1.17 、 1.33MeV)における補正係数の平均値を用いて全エネルギー区間における補正を行った。測定距離の変化に伴う計数効率の比と補正係数の変化をあわせて図13に示す。

(3) 結果

測定で得られた γ 線スペクトルとストリッピング操作を行った結果の一例を図14(a)に、空間線量率の導出結果の一例を図14(b)に示す。 γ 線スペクトルにおいて、 ^{60}Co のピーク(1.17 、 1.33MeV)の他に 0.08MeV 付近にピークが見られた。これは鉛遮蔽体からの特性X線によるものである。しかし、このエネルギー区間の線束密度-空間線量率の換算係数が小さいため、この散乱線に起因する空間線量率が全体の空間線量率に占める割合は1%未満であり、結果に与える影響は無視できると考えられる。また、2本の γ 線を同時計測することによるサムピーク(2.50MeV)付近のエネルギー区間における空間線量率が全体の空間線量率に占める割合は、濃度が高い試験体ほど大きい傾向を示したが、いずれの測定結果においても0.4%以下であった。全エネルギー吸収ピークのエネルギー区間における空間線量率が全体の空間線量率に占める割合は、 1.17MeV では $25 \sim 26\%$ 程度、 1.33MeV では $29 \sim 32\%$ 程度であった。ただし、TP-4については、 1.17MeV では $22 \sim 24\%$ 、 1.33MeV では $26 \sim 30\%$ と他

の試験体に比べてやや小さい割合であった。この原因は、3.3比較評価にて考察する。

測定距離の変化に伴う空間線量率の変化を図15(a)に、測定距離350mmにおける⁶⁰Co濃度と空間線量率の関係を図15(b)にそれぞれ示す。点線源の場合、空間線量率は距離の2乗に逆比例することが知られているが、本試験における測定距離の増加に伴う空間線量率の減衰は点線源に比べて緩やかであり、測定距離の増大に伴い減衰の傾きが大きくなる傾向が見られた。これについては、NaI検出器による測定結果とあわせて考察する。

また、得られた空間線量率は、⁶⁰Co濃度と比例関係にあることが確認できた。Ge検出器による測定結果を表6に示す。

3.1.2 NaI検出器による測定

予備試験により、誤差を小さくするには、①測定距離の変化に伴い、NaI検出器に対する γ 線の入射角度が変化するため、測定距離ごとに計数効率の補正を行う必要があること、②散乱線の影響を除去する必要があることが分かった。そこで、①についてはGe検出器と同様に補正を行い、②については、以下に示す方法により補正を行った。

(1) 散乱線の影響の除去

まず散乱線による計数率の增加分を調べるために、⁶⁰Coの点線源を用いてシャドーシールド法¹⁵⁾により、距離0.5、1、2mにおける散乱線の測定を行った。シャドーシールド法とは、線源と検出器の間に鉛ブロック等の遮蔽体を設置し、壁などで散乱されることなく線源から直接検出器に入射する γ 線(以下、直接線)を遮って、周囲からの散乱 γ 線を測定する方法である。シャドーシールド法の配置を図16に示す。このとき、直接線に対する散乱線の寄与率 η は下式で表される。

$$\eta = I_s / (I_d - I_s) \quad \cdots (4)$$

ただし、

I_d : 遮蔽体を設置しないときの正味計数率

I_s : 遮蔽体を設置したときの正味計数率

である。

測定結果から式④を用いて、エネルギー区間別の散乱線の寄与率 η と直接線のスペクトルを求めた。得られた η と1.33MeVのピーク計数率を1として規格化した直接線のスペクトルを図17に示す。散乱線の寄与率 η は、測定距離が大きく γ 線エネルギーが低い領域において大きいことが分かった。また、直接線のスペクトルは、1.33MeVのピーク計数率を1として規格化すると、距離を変化させても形状がほとんど変化しないことが分かった。そこで、TP-4の測定距離2mにおける直接線のスペクトルについて、1.33MeVのピーク計数率に対する各エネルギー区間の計数率の比を求め、この比を1.33MeVの計数率に乘じた値を各エネルギー区間の計数率とする方法で、全試験体の全測定距離における補正を行った。

(2) 結果

測定で得られた γ 線スペクトルとストリッピング操作を行った結果の一例を図18(a)に、空間線量率の導出結果の一例を図18(b)に示す。遮蔽体がないため、全計数率に占めるバックグラウンドの割合が高くなつた。また、Ge検出器による測定結果ではほとんど見られなかつた1.5MeV以上のエネルギー区間における空間線量率への寄与が見られた。これは、同時計測に起因する成分やバックグラウンドが高いために測定誤差が大きくなっていることが原因と考えられる。

測定距離の変化に伴う空間線量率の変化を図19(a)に、測定距離300mmにおける⁶⁰Co濃度と空間線量率の関係を図19(b)にそれぞれ示す。測定距離の増大に伴う空間線量率の減衰に

については、Ge検出器による測定結果と同様に、測定距離の増大に伴い減衰の傾きが大きくなり、測定距離300mm以上では、点線源の場合と同様に距離の2乗に逆比例する傾向が見られた。このように測定距離により減衰傾向が変化するのは、試験体と検出器の幾何学的条件が点線源と異なるためと考えられる。そこで、試験体と検出器の中心軸と試験体と検出器の円周上的一点を結んだ線がなす角を検出器と試験体のなす角 δ とし、測定距離の変化に伴う δ の変化を調べた。検出器と試験体の位置関係と測定距離の変化に伴う δ の変化を図20に示す。 δ は、測定距離の増大に伴い指数関数的に 0° に近づき、測定距離300mm付近で曲線の傾きが緩やかになることが分かった。測定距離300mmにおける δ の値は 21° であったが、検出器と試験体の幾何学的条件はこの付近から点線源の条件にほぼ一致し始めると考えられる。

また、測定方向で比較してみると、測定距離が同じである場合、試験体上面、下面、側面方向の順に空間線量率が小さくなる傾向が見られた。下面方向の空間線量当量率は平均で上面方向の90%程度であり、側面方向の空間線量率は平均で上面方向の60%程度であった。これは、上面・下面方向では、検出器に面する試験体の表面積が $7 \times 10^4 \text{ mm}^2$ 程度であるのに対し、側面方向では、およそ半分の $3 \times 10^4 \text{ mm}^2$ 程度であるためと考えられる。

また、得られた空間線量率は、Ge検出器による測定と同様に、 ^{60}Co 濃度と比例関係にあることが確認できた。NaI検出器による測定結果を表7に示す。

3.2 シミュレーション計算による空間線量率

YURI3とQADを用いて得られた空間線量率を、YURI3による値に対するQADによる値の比とあわせて図21に示す。距離の変化に伴う空間線量率の変化曲線は、測定で得られた結果と同様に、距離の小さいところでは減衰の傾きが緩やかであり、距離300mm付近から距離の2乗に逆比例する傾向が見られた。YURI3による結果において、距離の大きい領域で曲線の揺らぎが大きくなるが、これは検出される γ 線数が減少したことにより、充分な統計精度が得られなかつたためと考えられる。また、QADによる結果において、下面方向で曲線の揺らぎが他の方向に比べて大きくなるのは、試験体形状の近似において側面が階段状になっているためと考えられる。

空間線量率の比については、試験体上面と側面方向では、1を超える点が多かったのに対し、試験体下面方向では、他の方向に比べて1以下の点が多かった。本来、YURI3は精度よく計算するための計算コードであるのに対し、QADは遮蔽計算として簡易迅速に保守的な値を出すための計算コードであることから、線源の条件が同じであるならQADによる値の方がYURI3による値より大きくなるはずである。直径300mm×厚さ150mmの円柱線源について行った予備計算においても、QADによる値はYURI3による値の1.2~1.5倍程度であった。しかし、本試験では、試験体形状の近似方法がYURI3とQADにおいて異なっており、YURI3における線源体積がQADにおける線源体積より大きいことによる影響が、試験体下面において顕著に現れたと考えられる。

3.3 比較評価

測定した γ 線スペクトルから導出した空間線量率(以下、測定値)とシミュレーション計算により得られた空間線量率(以下、計算値)を比較・評価した。なお、測定値と計算値の条件をそろえるため、検出器の体積中心から試験体表面までの距離(以下、評価距離)を検出器-試験体間の距離とした。

3.3.1 Ge検出器による測定値と計算値との比較

計算値に対するGe検出器による測定値の比を図22に示す。TP-1~3の試験体については、測定値と計算値の比は0.97~1.15であり、測定値と計算値は15%以内で一致している。しか

し、TP-4の試験体については、他の試験体に比べて計算値に対する測定値の比が高くなっている。そこで、TP-4の測定値について、エネルギー区間別に全体の空間線量率に占める割合(以下、寄与率)を調べ、計算値とよく一致しているTP-2の結果と比較した。エネルギー区間別の寄与率を図23に示す。1.33MeVまでのエネルギー区間では、TP-2とTP-4の寄与率は同じような傾向を示すが、1.33~2.50MeVのエネルギー区間では、TP-4の寄与率がTP-2に比べて大きくなっている。これは2本の γ 線を同時計測したことによる成分によると思われる。また、計算値と測定値の隔たりが最も大きい評価距離187mmにおけるTP-2とTP-4の測定値について、エネルギー区間別に空間線量率を比較した結果を図24に示す。TP-4の ^{60}Co 濃度はTP-2の100倍であるので、空間線量率も100倍となるはずであるが、0.5MeV以上のエネルギー区間において、TP-4の空間線量率はTP-2の空間線量率の100倍を超えることが分かった。このことから、TP-4において計算値に対する測定値の比が他の試験体に比べて大きくなっているのは、低エネルギー領域での散乱線の寄与や、高エネルギー領域での同時計測に起因する成分が大きいためであることが分かった。

一般にこのように同時計測が高い確率で起きる測定条件は好ましくなく、TP-4の測定値は他の試験体の測定値に比べて信頼性が低いと考えられる。

3.3.2 NaI検出器による測定値と計算値との比較

計算値に対するNaI検出器による測定値の比を図25に示す。計算値に対する測定値の比は、試験体上面方向では0.7~1.5程度であるのに対し、試験体下面方向、側面方向ではそれぞれ、0.8~2.5程度、1.0~2.4程度であり、試験体上面方向に比べてばらつきが大きくなっている。これは、測定値の誤差に加えて、試験体下面・側面方向では、試験体上面方向に比べてシミュレーション計算における試験体形状の近似の誤差の影響が大きいことによると考えられる。また、評価距離の大きな点において特に計算値に対する測定値の比が大きくなっているのは、空間線量率がバックグラウンドに極めて近いことにより測定誤差が大きくなっているのに加えて、計算値においても統計精度が不充分なことによる誤差が大きくなっているためと考えられる。

^{60}Co 濃度の比較的低い試験体(TP-1、-2)と比較的高い試験体(TP-3、-4)を比較すると、 ^{60}Co 濃度の高い試験体の方が測定値と計算値の一一致性が高かった。これは ^{60}Co 濃度の低い試験体では、全ての評価距離において空間線量率がバックグラウンドに近いので、全体的に測定誤差が大きくなっているためと考えられる。

3.3.3 総合評価

本試験で得られた計算値に対する測定値の比を指標として、測定値と計算値の一致性について評価した。

試験体別の平均比は1.04~1.24であった。これにより個々の結果については著しく測定値が計算値より大きくなかった点もあるが、平均すると25%以内で測定値と計算値は一致していると評価できる。また、本試験において、 γ 線スペクトルから空間線量率を導出する際に行った補正等の妥当性を評価するため、明らかに測定や計算において誤差の大きくなっている条件(ここでは測定値が10nGy/hまたは10nSv/h未満)を除いて評価すると、散乱線の影響の大きいTP-4の平均比は1.15であったが、他の試験体においては1.01~1.08であり、測定値と計算値は10%以内で一致していた。充分な統計精度がある場合、YURI3による計算結果と測定値は10%以内で一致することが確認されている¹³⁾ことから、測定値と計算値は充分に一致していると評価することができる。これにより、本試験において行った補正等の妥当性が確認できた。

また、検出器の種類の違いによる影響を評価すると、Ge検出器による測定値については、

平均比1.11、変動係数7.5%であり、NaI検出器による測定値については、平均比1.21、変動係数18%であり、Ge検出器による測定値の方がNaI検出器による測定値に比べて、計算値との一致性も高く、比のばらつきも小さかった。これは、一般にGe検出器のエネルギー分解能が、NaI検出器より数十倍優れていることに加え、Ge検出器による測定においては、NaI検出器による測定に比べて遮蔽によりバックグラウンドが低くなっていること、また散乱線の影響も小さいことなどから、測定誤差がNaI検出器による測定値より小さくなっていることによると考えられる。

本試験ではYURI3、QADとともに計算値に対する測定値の比が1を超える点が多かった。この原因として、両計算コードにおいて周囲からの散乱線が考慮されていないこと、計算コードの性質上、計算結果が実際の線量率よりやや高くなる傾向があるQADについても、散乱線の影響が無視できない条件では、計算値の方が小さくなり得るという報告¹⁴⁾があることから、測定値における散乱線の補正が充分でないことが挙げられる。このほかに、影響は小さいと考えられるが、①各測定距離における計数効率の補正において、本試験では1.17、1.33MeVにおける値の平均値を用いているが、低エネルギー領域における計数効率の補正係数は用いた値より小さいこと、②QADにおいては計算における体積が実際の試験体より小さいこと等が挙げられる。

以上より、再利用製品に起因する空間線量率の測定において、以下のことが重要であることが分かった。

- ①検出器と再利用製品の幾何的条件に応じた計数効率の補正
- ②長時間測定と遮蔽体の使用によるバックグラウンドの低減
- ③散乱線の影響低減とその補正

4. まとめ

⁶⁰Coを添加してクリアランスレベル以下の解体金属廃棄物の再利用製品を模擬した試験体を製作し、それに起因する空間線量率をγ線スペクトル測定に基づく手法と、シミュレーション計算により求めた。

γ線測定から得られた空間線量率は試験体の⁶⁰Co濃度に比例した。測定距離の増加に伴う空間線量率の減衰は、測定距離の近いところでは、点線源と比べて緩やかであり、測定距離300mm付近からは、点線源の減衰と同様に、距離の2乗に逆比例することが分かった。

本試験で得られた測定値と計算値は良く一致していた。これにより、本試験の測定方法にてクリアランスペル以下の解体金属廃棄物の再利用製品を模擬した試験体に起因する空間線量率を精度よく測定できることが確認できた。しかし、散乱線や同時計測の影響が無視できない測定条件においては、測定値が過大評価される傾向が示された。

実際の再利用製品は、多種多様の形状であり、また、含まれる放射性核種濃度は極めて低い。そのため、これに起因する空間線量率を精度よく測定するには、検出器と再利用製品の幾何学的条件を考慮した計数効率の補正と、遮蔽や長時間測定によるバックグラウンドの低減、および散乱線の低減とその補正が重要であることが分かった。

謝辞

本報告をまとめるにあたって、ご協力を頂きました廃棄物処理技術試験室の各氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本原子力学会誌, 42(6), 482 (2000)
- 2) 岩本晃一:火力原子力発電, 36(9), 885 (1985)
- 3) 総合エネルギー調査会原子力部会報告書「商業用原子力発電施設の廃止措置に向けて」(1997)
- 4) 大越実、他:保健物理, 34(2), 187 (1999)
- 5) 原環セントラルピックス, 41 (1997)
- 6) 大越実、他:保健物理, 34(4), 353 (1999)
- 7) 中村寿、他:デコミッショニング技報, 9, 41 (1993)
- 8) 科学技術庁:“空間 γ 線スペクトル測定法”(1990)
- 9) 斎藤公明、他:JAERI-M9741 “モンテカルロ法を用いたNaI(Tl)検出器応答関数の高精度計算とスペクトル形成過程の解明”(1981)
- 10) Saito, K. at al : Nucl. Instr. Meth., 185, 299 (1981)
- 11) Saito, K. at al : Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., 226, 449 (1984)
- 12) ICRU REPORT 47 “Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations” (1992)
- 13) Saito, K. at al : Radiat. Prot. Dosim., 12(1), 21 (1985)
- 14) 坂本幸夫、他:JAERI-M90-110 “QAD-CGGP2 and G33-GP2 : Revised Versions of QAD-CGGP and G33-GP” (1990)
- 15) 科学技術庁:“連続モニタによる環境 γ 線測定法”(1996)
- 16) Miura,T. at al : Proc. 10th Int. Symp. Packag. Transp. Radioact. Mater. 1992 vol.3, 1501 (1992)

Table 1 Weight of Materials and Radioactivity of ^{60}Co

Sample No.	^{60}Co (MBq)	Metal (kg)	Additives (kg)	Total (kg)
TP-1	4.4×10^{-3}	Pure Iron : 65.5 Pig Iron : 34.5 Other* : 0.65	Fe-Si : 2.79 Carbon : 2.40	105.84
TP-2	4.4×10^{-2}	Pure Iron : 65.5 Pig Iron : 34.5 Other* : 0.65	Fe-Si : 2.79 Carbon : 2.40 Other** : 0.23	106.07
TP-3	0.44	Pure Iron : 68.1 Pig Iron : 35.9 Other* : 0.65	Fe-Si : 2.90 Carbon : 2.50	110.05
TP-4	4.0	Pure Iron : 61.9 Pig Iron : 32.6 Other* : 0.65	Fe-Si : 2.64 Carbon : 2.27	100.06
TP-5	None	Pure Iron : 65.5 Pig Iron : 34.5 Other* : 0.65	Fe-Si : 2.79 Carbon : 2.40	105.84

*Container for ^{60}Co

**Slag Inhibitor

Table 2 Size and Weight of Samples

Sample No.	Diameter (mm)	Thickness (mm)		Weight (kg)
		Maximum	Minimum	
TP-1	306	152	148	66.9
TP-2	306	151	147	70.2
TP-3	307	152	146	66.9
TP-4	307	152	150	68.3
TP-5	307	151	149	69.6

Table 3 Gravity and ^{60}Co Concentration of Samples

Sample No.	Gravity (-)	C.V* (%)	^{60}Co Concentration (Bq/g)	C.V* (%)
TP-1	7.35 ± 0.02	0.29	$(4.12 \pm 0.08) \times 10^{-2}$	2.0
TP-2	7.23 ± 0.02	0.30	$(4.04 \pm 0.09) \times 10^{-1}$	2.2
TP-3	7.57 ± 0.02	0.22	3.92 ± 0.07	1.7
TP-4	7.46 ± 0.03	0.41	39.4 ± 0.8	2.0

*Coefficient of Variation

Table 4 Measurement Time (Ge detector)

Sample No.	Distance* (mm)								(sec)
	10	50	100	150	200	250	300	350	
TP-1	10000	50000	50000	-	-	-	-	50000	
TP-2	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	
TP-3	5000	-	5000	-	5000	-	-	10000	
TP-4	-	-	-	3000	-	3000	-	3000	

*Distance between Surface of Ge detector and Sample

Table 5 Measurement Time (NaI detector)

Sample No.	Distance* (mm)								(sec)
	10	50	100	200	300	500	1000	2000	
TP-1	-	5000	5000	10000	10000	-	-	-	
TP-2	1000	1000	1000	1000	2000	2000	10000	20000	
TP-3	-	-	-	600	600	600	1000	-	
TP-4	-	-	-	300	300	600	600	1000	

Radial (sec)

Sample No.	Distance* (mm)				
	100	300	500	1000	2000
TP-1	5000	-	-	-	-
TP-2	1000	2000	2000	10000	20000
TP-3	-	600	-	-	-
TP-4	-	300	600	600	1000

*Distance between Surface of NaI detector and Sample

Table 6(a) Measured Absorbed Dose Rate (Ge detector)

Sample No.	^{60}Co Concentration (Bq/g)	Distance* (mm)						(nGy/h)
		10	50	100	150	200	250	
TP-1	0.034	1.48×10^1	1.03×10^1	6.75×10^0	-	-	-	1.55×10^0
TP-2	0.341	1.50×10^2	1.04×10^2	6.70×10^1	4.65×10^1	3.29×10^1	2.50×10^1	1.94×10^1
TP-3	3.27	1.40×10^3	-	6.18×10^2	-	2.99×10^2	-	1.39×10^2
TP-4	32.9	-	-	-	5.36×10^3	-	2.63×10^3	-
								1.56×10^3

*Distance between Surface of Ge detector and Sample

Table 6(b) Measured Dose Equivalent Rate (Ge detector)

Sample No.	^{60}Co Concentration (Bq/g)	Distance* (mm)						(nSv/h)
		10	50	100	150	200	250	
TP-1	0.034	1.75×10^1	1.22×10^1	7.99×10^0	-	-	-	1.85×10^0
TP-2	0.341	1.77×10^2	1.23×10^2	7.94×10^1	5.51×10^1	3.91×10^1	2.97×10^1	2.31×10^1
TP-3	3.27	1.66×10^3	-	7.32×10^2	-	3.55×10^2	-	1.65×10^2
TP-4	32.9	-	-	-	6.33×10^3	-	3.12×10^3	-
								1.85×10^3

*Distance between Surface of Ge detector and Sample

Table 7(a) Measured Absorbed Dose Rate (NaI detector)

Top Surface of Sample

Sample No.	^{60}Co Concentration (Bq/g)	Distance* (mm)						(nGy/h)
		10	50	100	200	300	500	
TP-1	0.034	-	9.81×10^0	6.67×10^0	4.15×10^0	2.74×10^0	-	-
TP-2	0.341	1.44×10^2	9.48×10^1	7.12×10^1	3.14×10^1	2.05×10^1	8.68×10^0	2.23×10^0
TP-3	3.27	-	-	-	2.04×10^2	1.78×10^2	7.73×10^1	2.06×10^1
TP-4	32.9	-	-	-	-	1.79×10^3	7.97×10^2	2.36×10^2
								6.22×10^1

Bottom Surface of Sample

Sample No.	^{60}Co Concentration (Bq/g)	Distance* (mm)						(nGy/h)
		10	50	100	200	300	500	
TP-1	0.034	-	8.96×10^0	5.53×10^0	3.42×10^0	1.39×10^0	-	-
TP-2	0.341	1.26×10^2	8.04×10^1	5.04×10^1	2.71×10^1	1.53×10^1	5.44×10^0	2.98×10^0
TP-3	3.27	-	-	-	2.05×10^2	1.23×10^2	5.81×10^1	1.80×10^1
TP-4	32.9	-	-	-	-	1.44×10^3	5.81×10^2	2.02×10^2
								5.84×10^1

Side Surface of Sample

Sample No.	^{60}Co Concentration (Bq/g)	Distance* (mm)						(nGy/h)
		10	50	100	200	300	500	
TP-1	0.034	-	-	3.76×10^0	-	-	-	-
TP-2	0.341	-	-	2.66×10^1	-	9.04×10^0	3.75×10^0	1.74×10^0
TP-3	3.27	-	-	-	-	7.40×10^1	-	-
TP-4	32.9	-	-	-	-	8.04×10^2	3.70×10^2	1.15×10^2
								3.31×10^1

*Distance between Surface of NaI detector and Sample

Table 7(b) Measured Dose Equivalent Rate (NaI detector)

Top Surface of Sample		Distance* (mm)						(nSv/h)	
Sample No.	^{60}Co Concentration (Bq/g)	10	50	100	200	300	500	1000	2000
TP-1	0.034	-	1.10×10^1	7.84×10^0	4.85×10^0	3.19×10^0	-	-	-
TP-2	0.341	1.70×10^2	1.12×10^2	8.38×10^1	3.70×10^1	2.41×10^1	1.02×10^1	2.61×10^0	6.53×10^{-1}
TP-3	3.27	-	-	-	2.41×10^2	2.10×10^2	9.10×10^1	2.42×10^1	-
TP-4	32.9	-	-	-	-	2.11×10^3	9.38×10^2	2.77×10^2	7.33×10^1

Bottom Surface of Sample		Distance* (mm)						(nSv/h)	
Sample No.	^{60}Co Concentration (Bq/g)	10	50	100	200	300	500	1000	2000
TP-1	0.034	-	1.05×10^1	6.47×10^0	3.98×10^0	1.60×10^0	-	-	-
TP-2	0.341	1.48×10^2	9.47×10^1	5.93×10^1	3.18×10^1	1.80×10^1	6.39×10^0	3.47×10^0	1.67×10^0
TP-3	3.27	-	-	-	2.41×10^2	1.45×10^2	6.84×10^1	2.12×10^1	-
TP-4	32.9	-	-	-	-	1.70×10^3	6.84×10^2	2.38×10^2	6.87×10^1

Side Surface of Sample		Distance* (mm)						(nSv/h)	
Sample No.	^{60}Co Concentration (Bq/g)	10	50	100	200	300	500	1000	2000
TP-1	0.034	-	-	4.40×10^0	-	-	-	-	-
TP-2	0.341	-	-	3.13×10^1	-	1.06×10^1	4.37×10^0	2.04×10^0	9.20×10^{-1}
TP-3	3.27	-	-	-	-	8.71×10^1	-	-	-
TP-4	32.9	-	-	-	-	9.47×10^2	4.36×10^2	1.35×10^2	3.90×10^1

*Distance between Surface of NaI detector and Sample

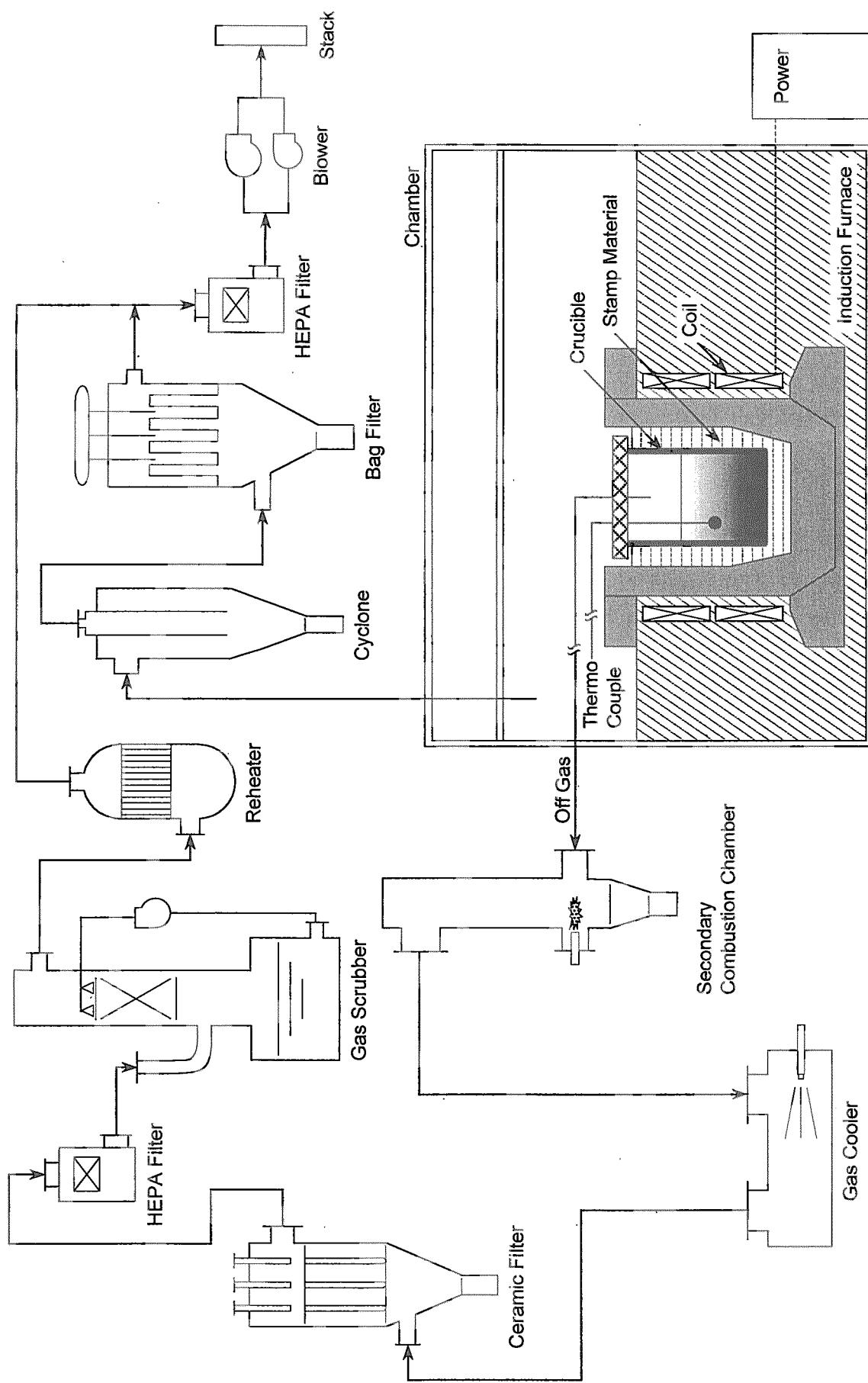


Fig.1 Schematic Diagram of Melting System

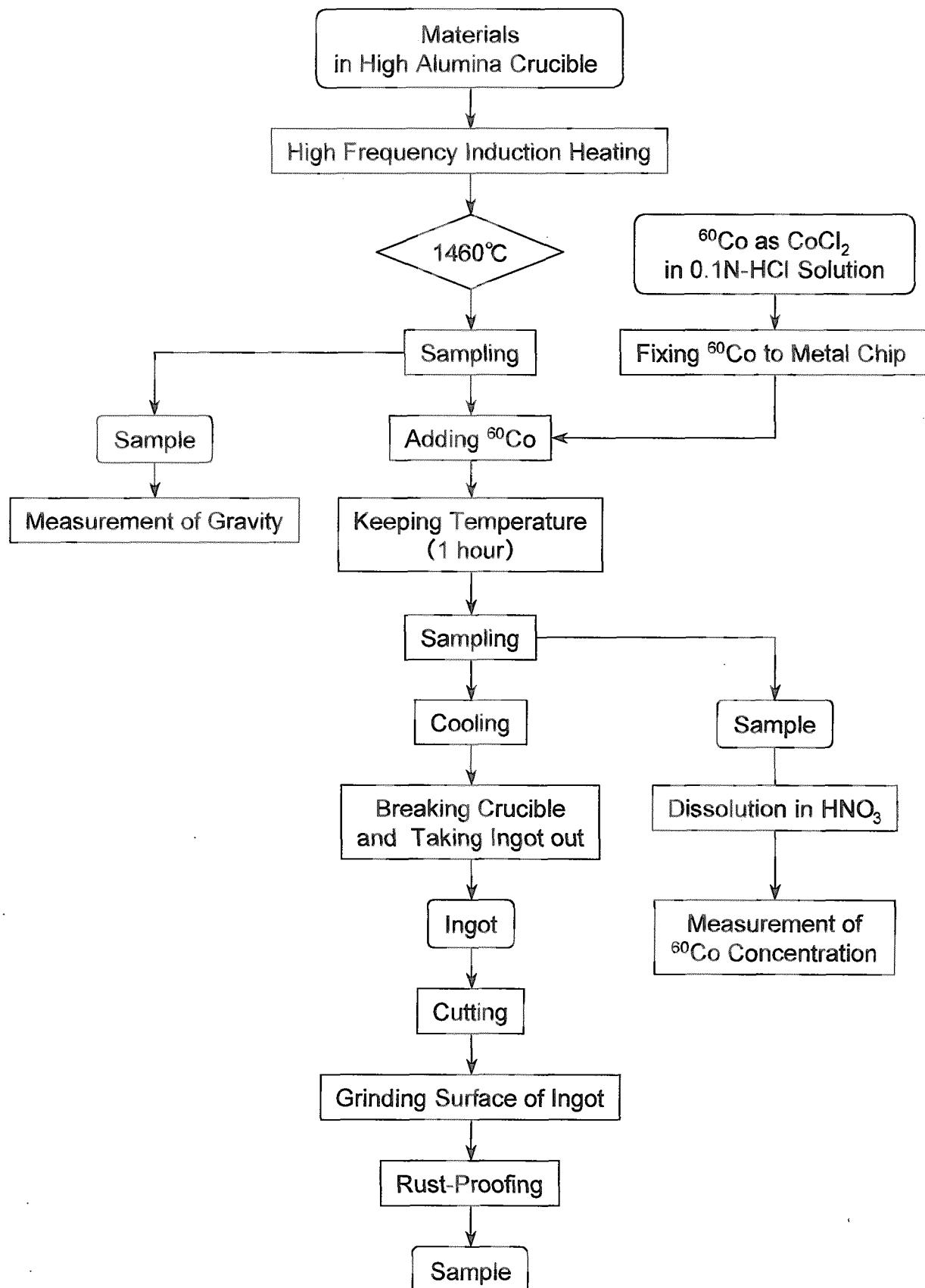


Fig.2 Flow Scheme for Sample Production

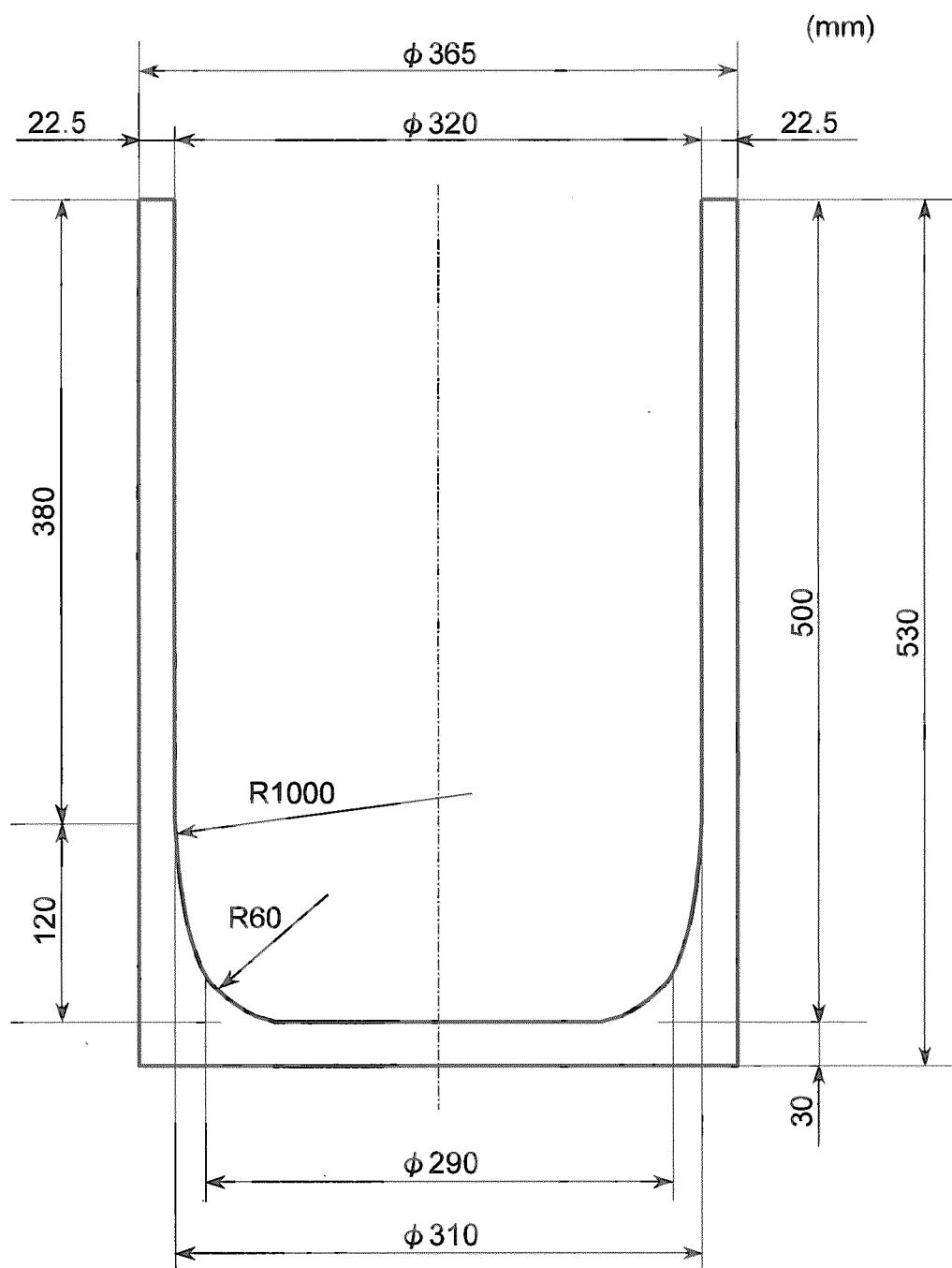


Fig.3 Dimension of Crucible

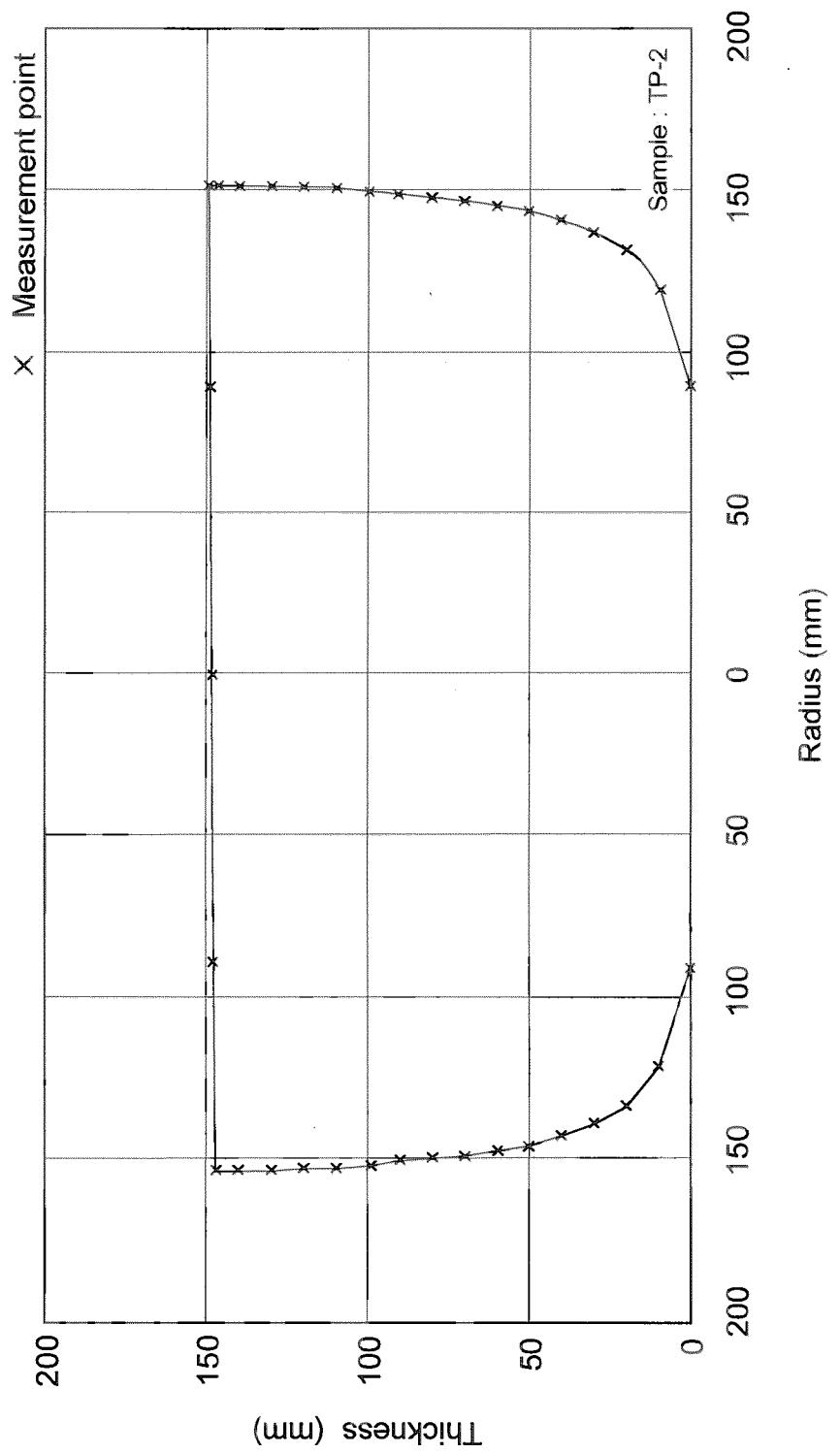


Fig.4 Sectional Drawing of Sample

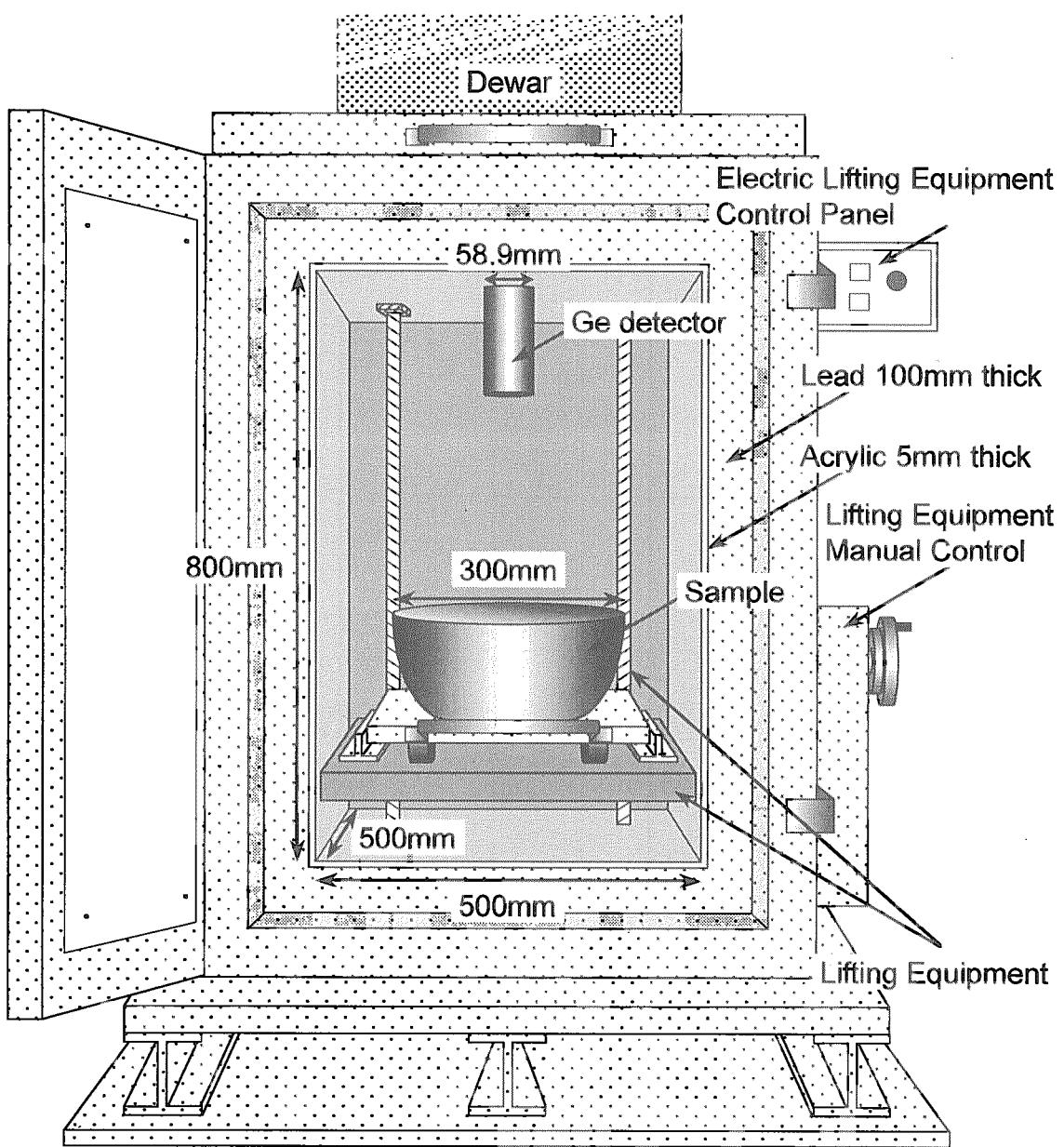


Fig.5 Illustration of Measurement System

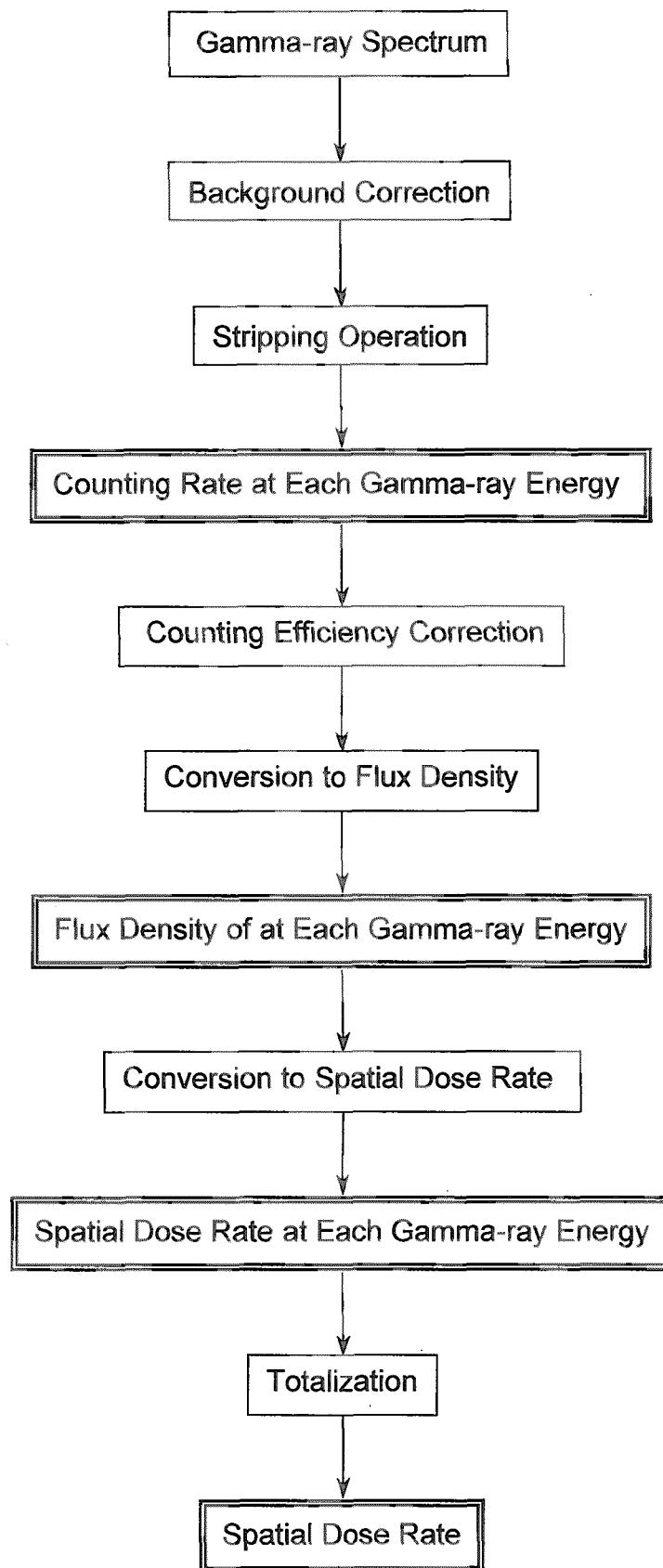


Fig.6 Flow Scheme for Deriving Spatial Dose Rate

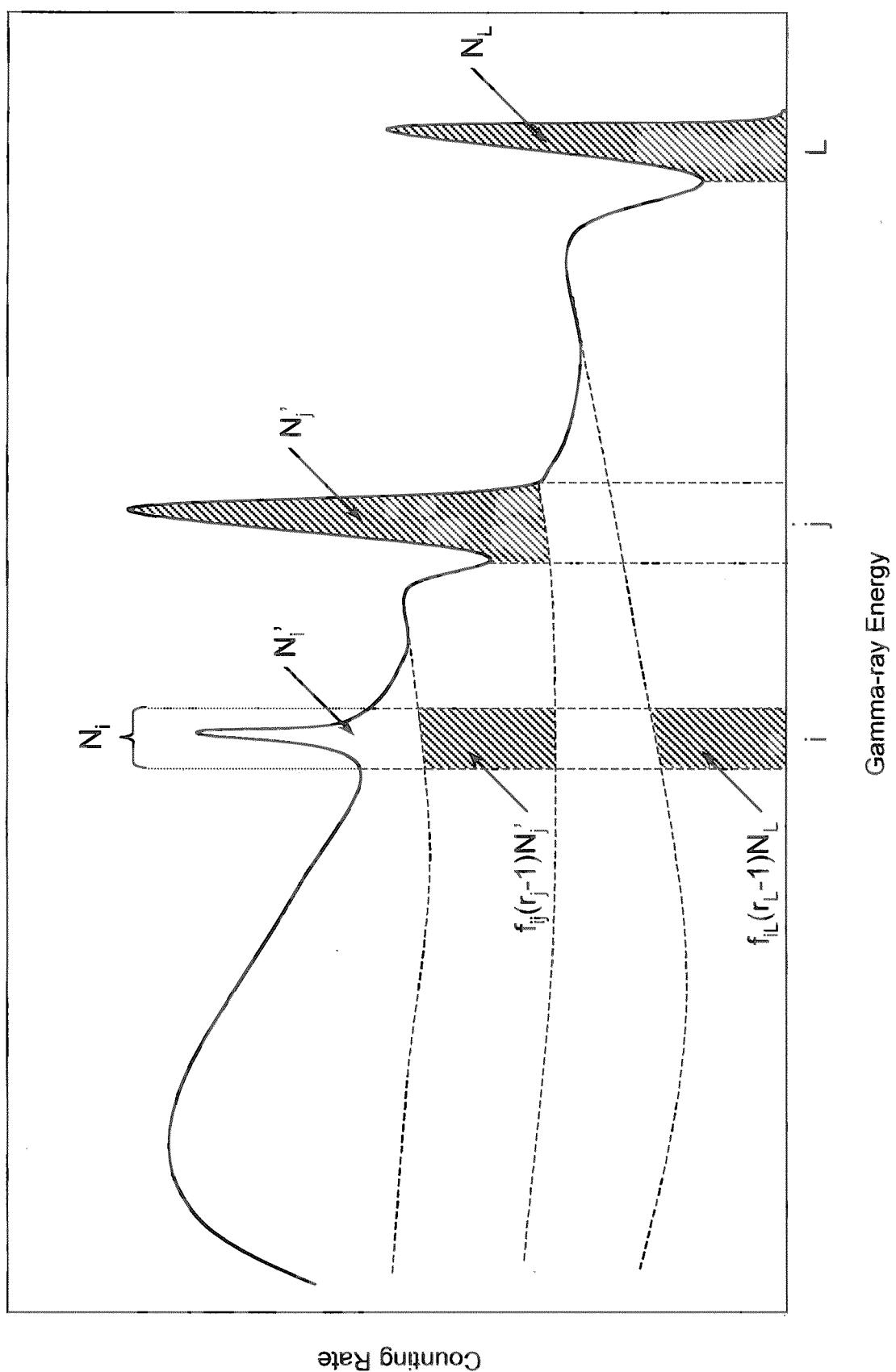


Fig. 7 Conceptual Expression of Stripping Operation

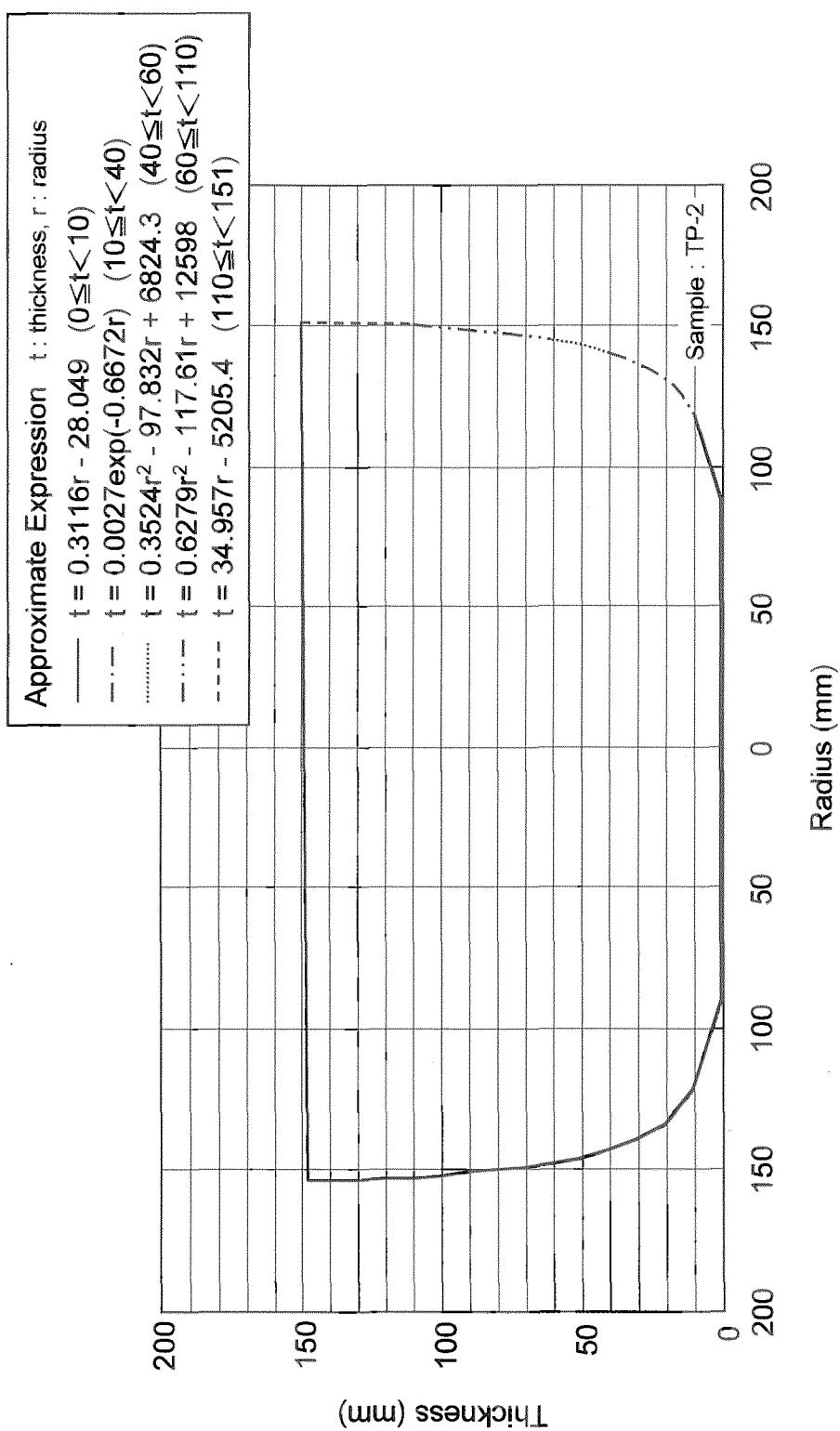


Fig.8 Shape of Sample and Approximated Curve

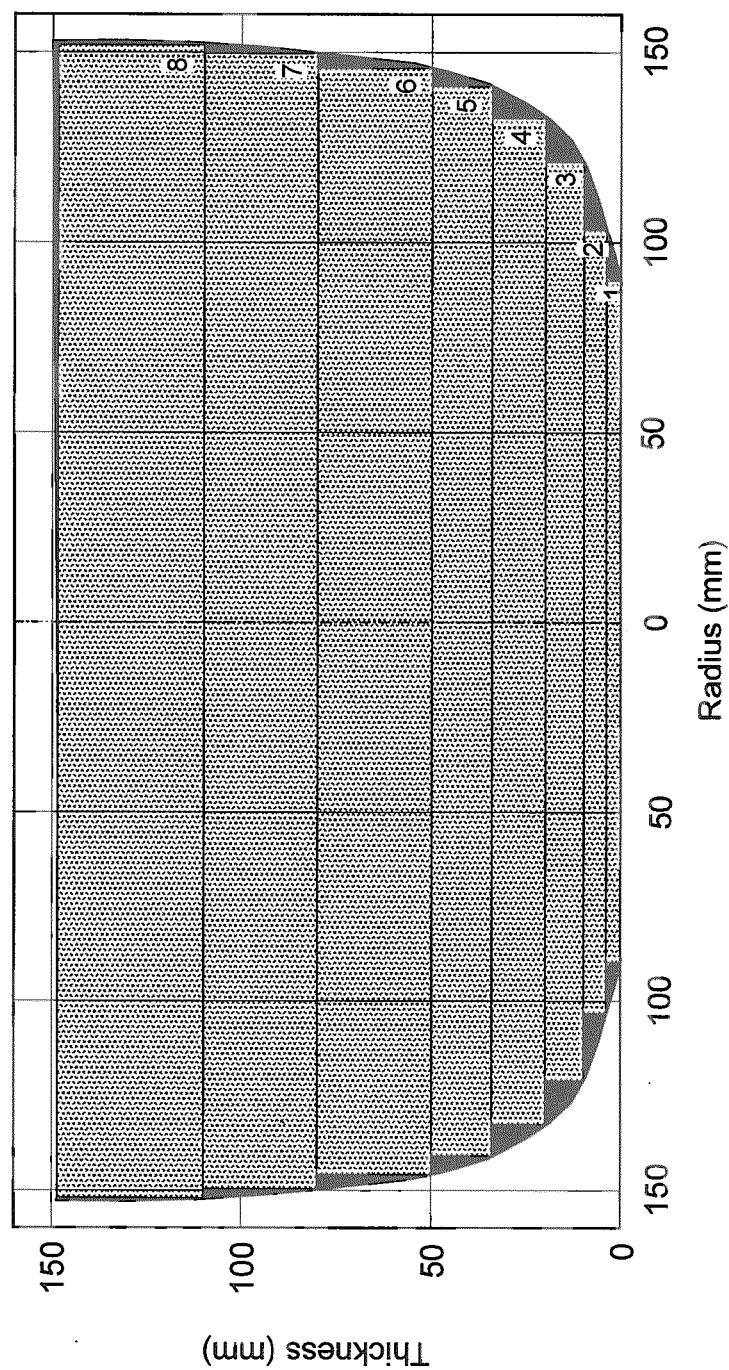


Fig.9 Partition of Sample

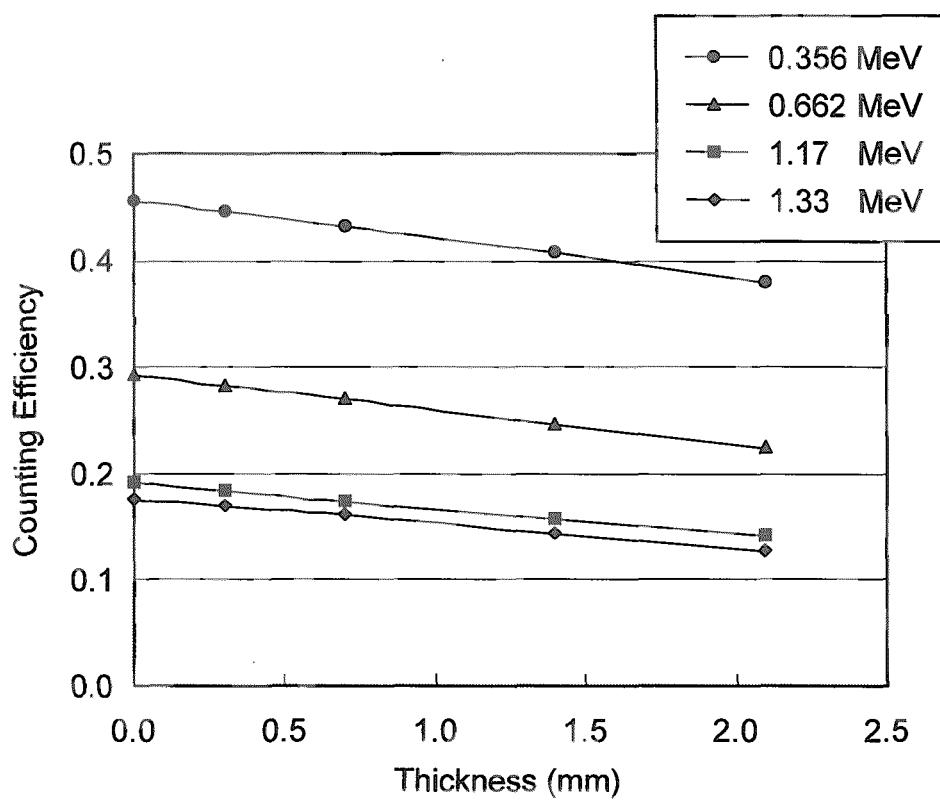


Fig.10 Variation of Counting Efficiency with Thickness of Dead Layer of Ge detector

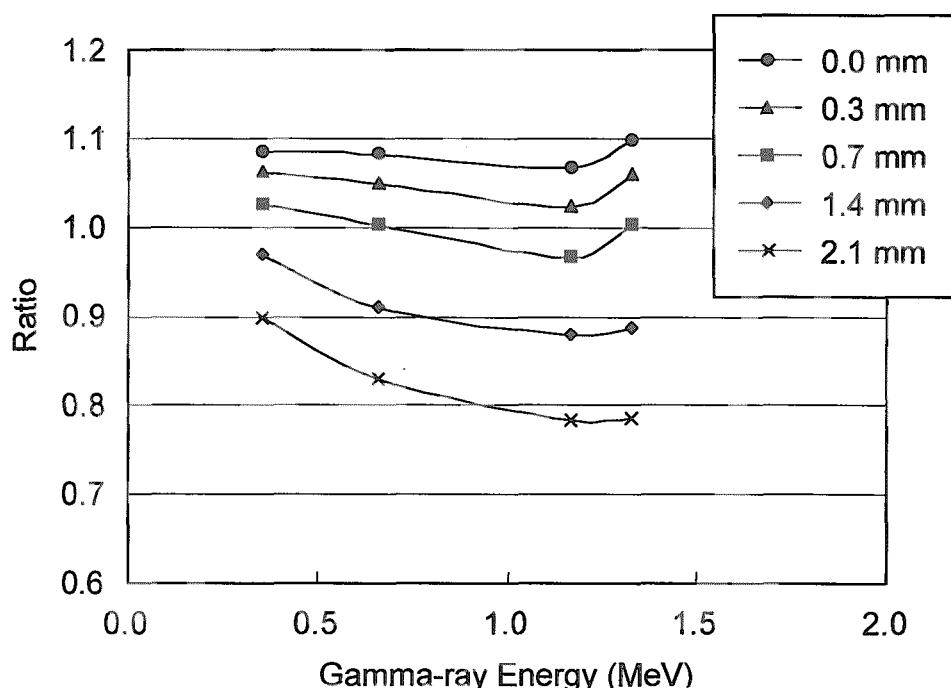


Fig.11 Ratio of Calculated Peak Counting Efficiencies to Measured Ones

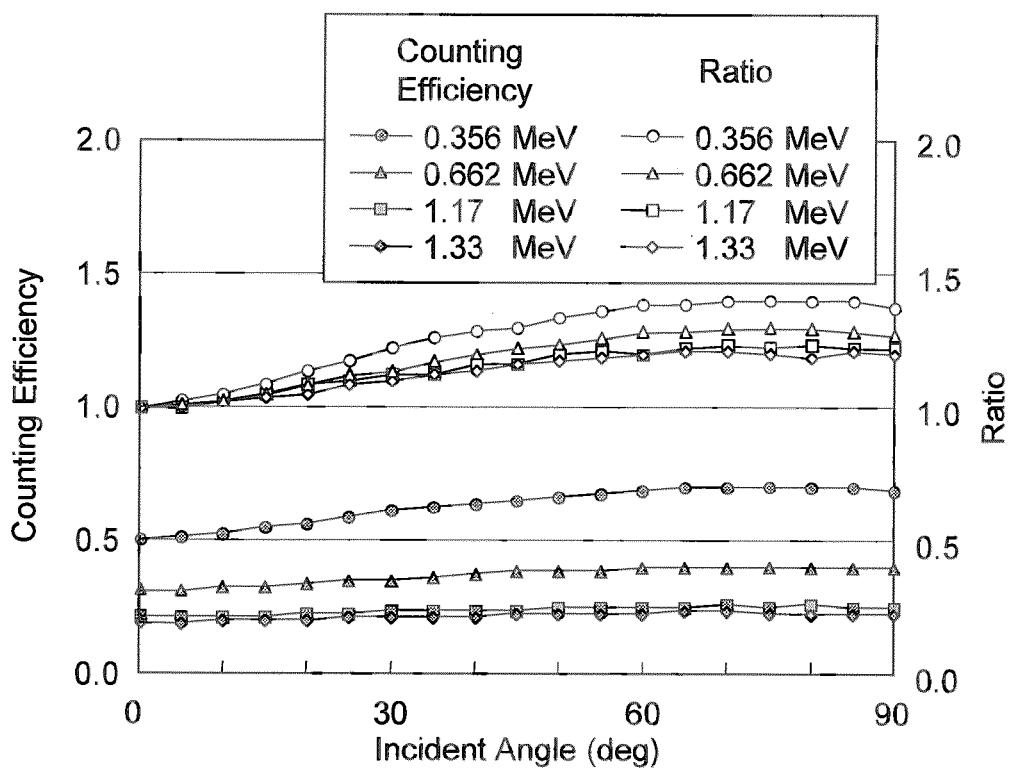


Fig.12 Counting Efficiency of Ge Detector and Its Ratio to That at an Incident Angle of 0° as a Function of Incident Angle of Gamma-ray

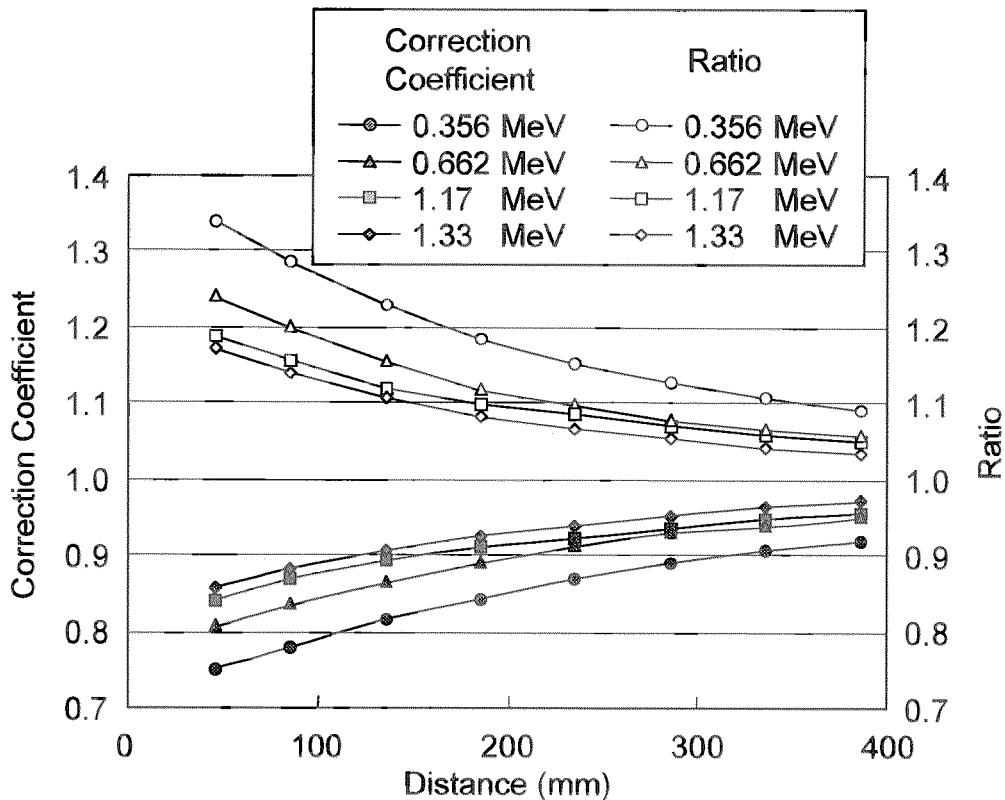
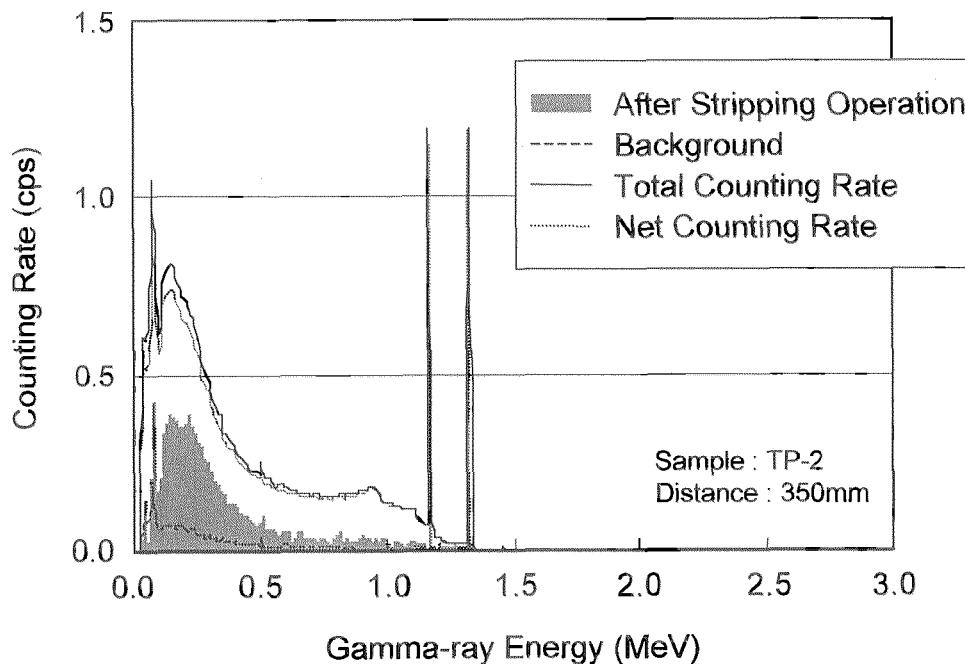


Fig.13 Correction Coefficient and Ratio of Counting Efficiency to That at an Incident Angle of 0° vs. Distance between Surface of Sample and Ge detector

(a)



(b)

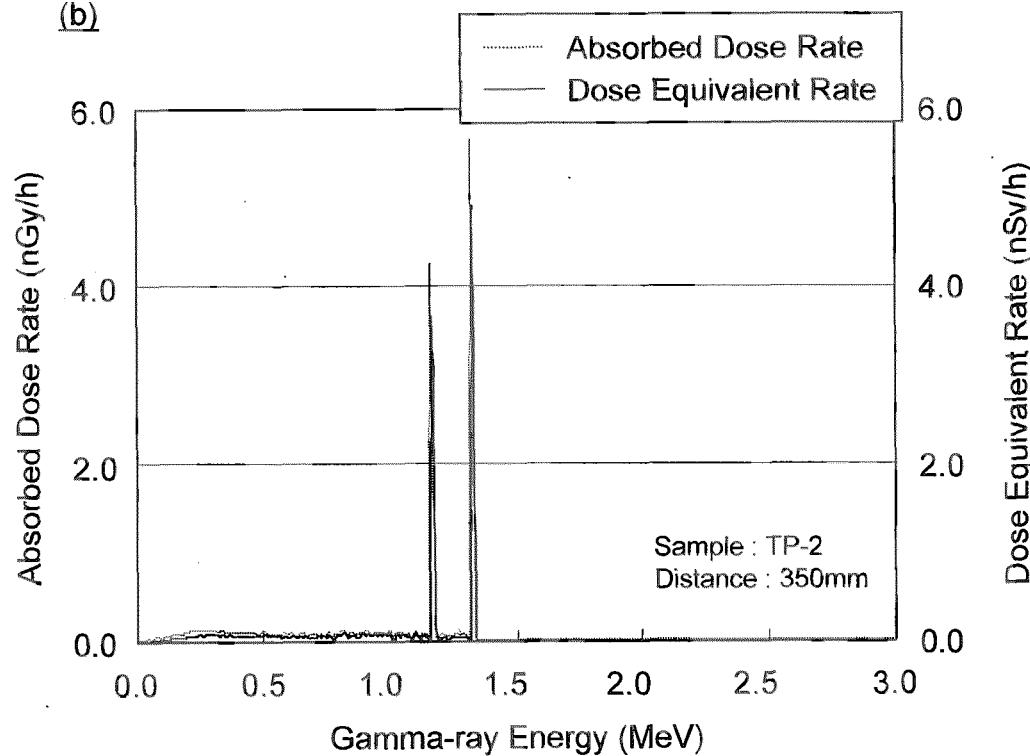


Fig.14 Result of Stripping Operation and Spatial Dose Rate (Ge detector)

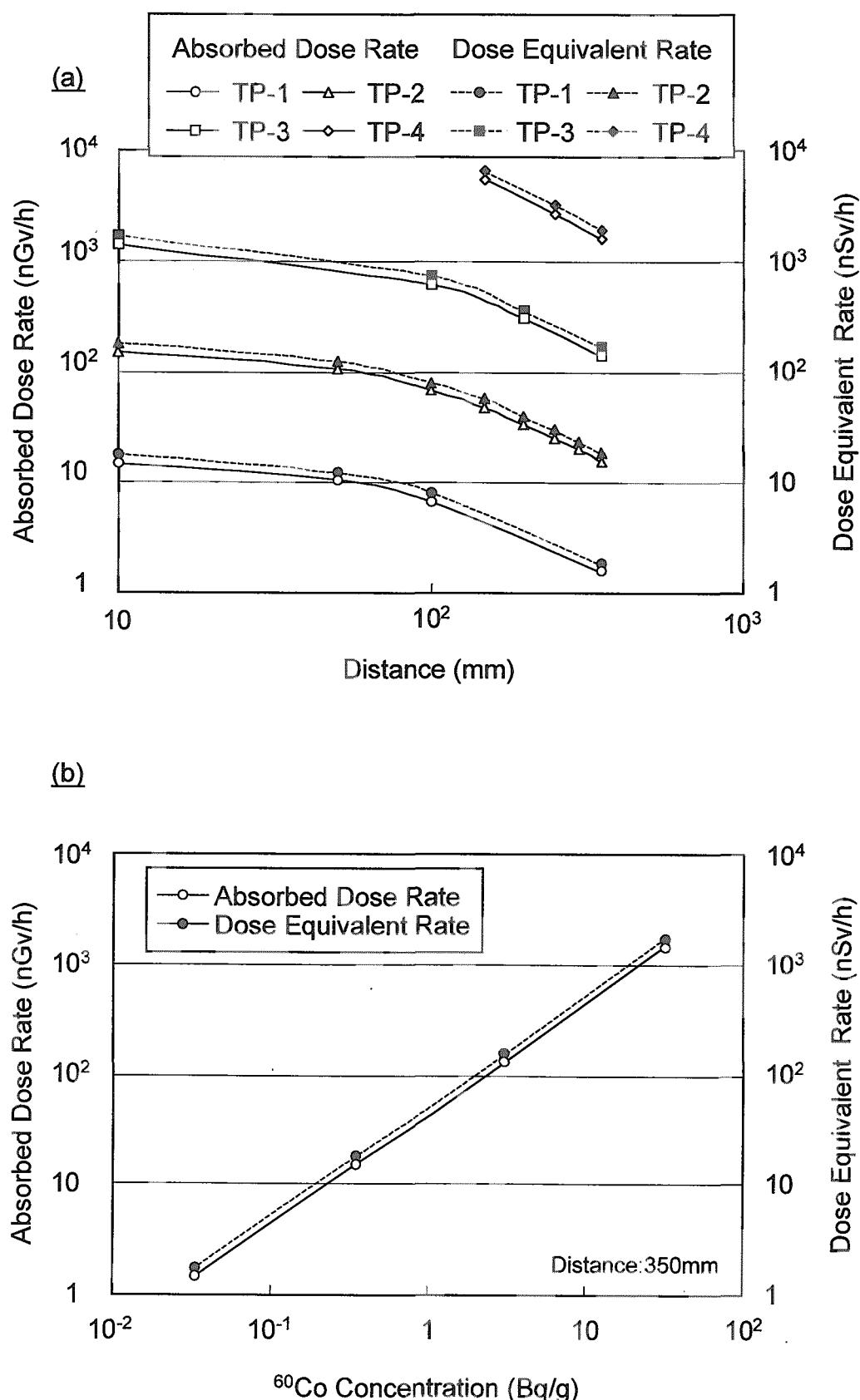


Fig.15 Variation of Spatial Dose Rate with Distance between Surface of Ge detector and Sample and ^{60}Co Concentration

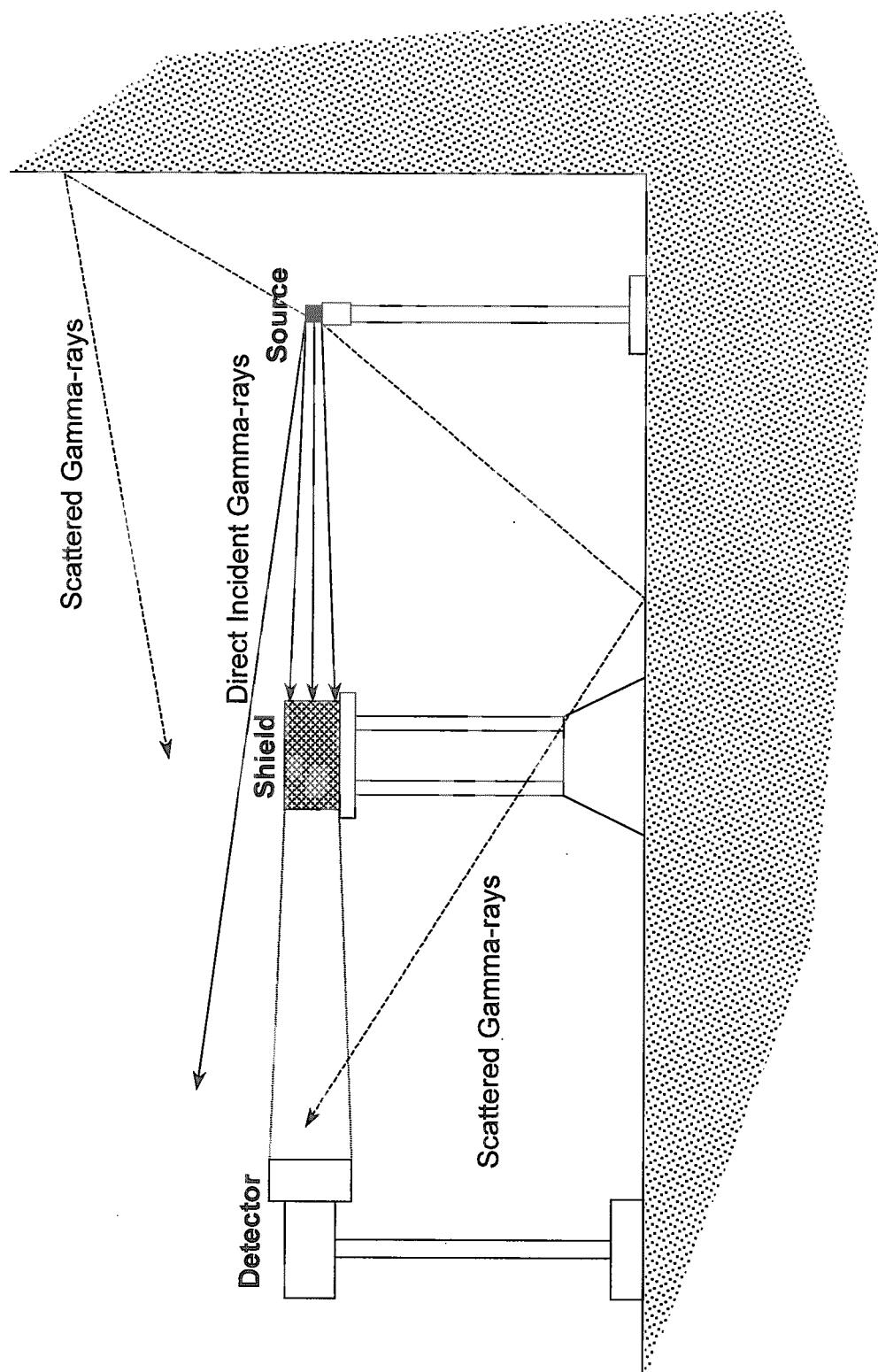


Fig.16 Arrangement of Detector, Shield and Source for Shadow Shield Method

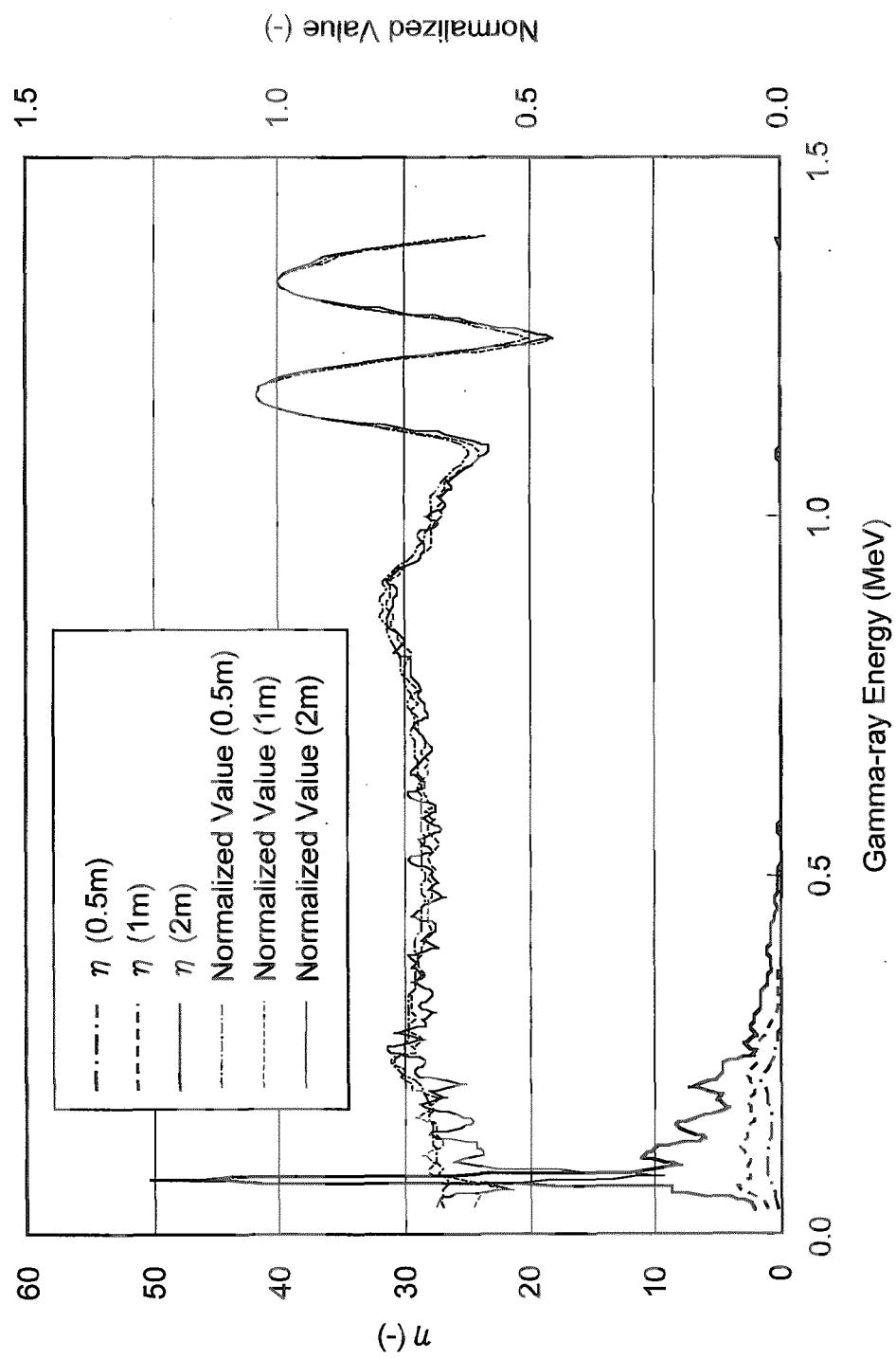
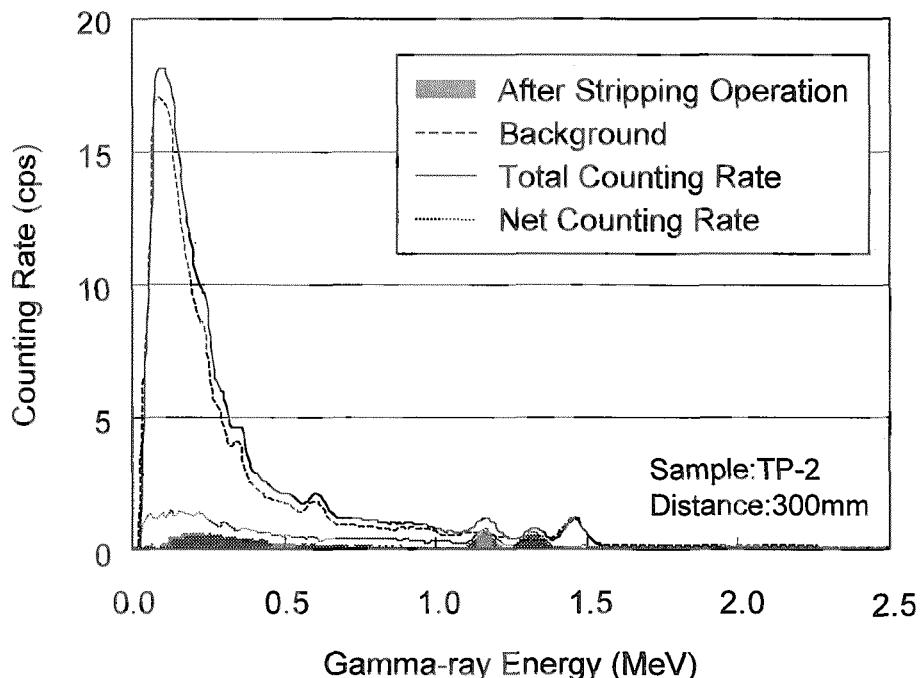


Fig.17 η and Normalized Spectrum of Direct Incident Gamma-ray

(a)



(b)

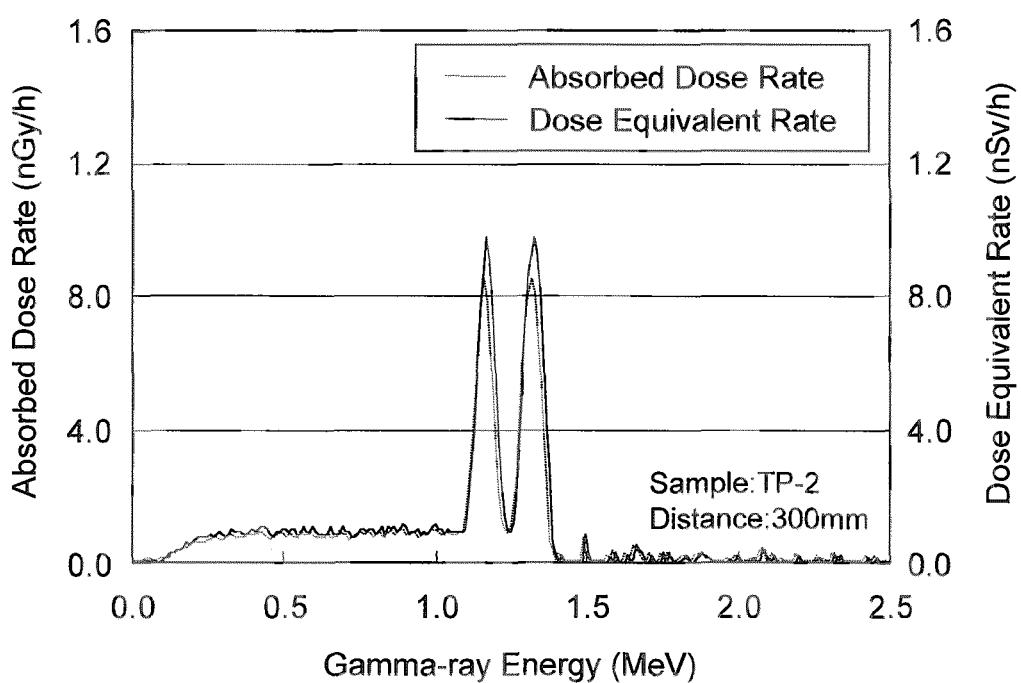


Fig.18 Result of Stripping Operation and Spatial Dose Rate (NaI detector)

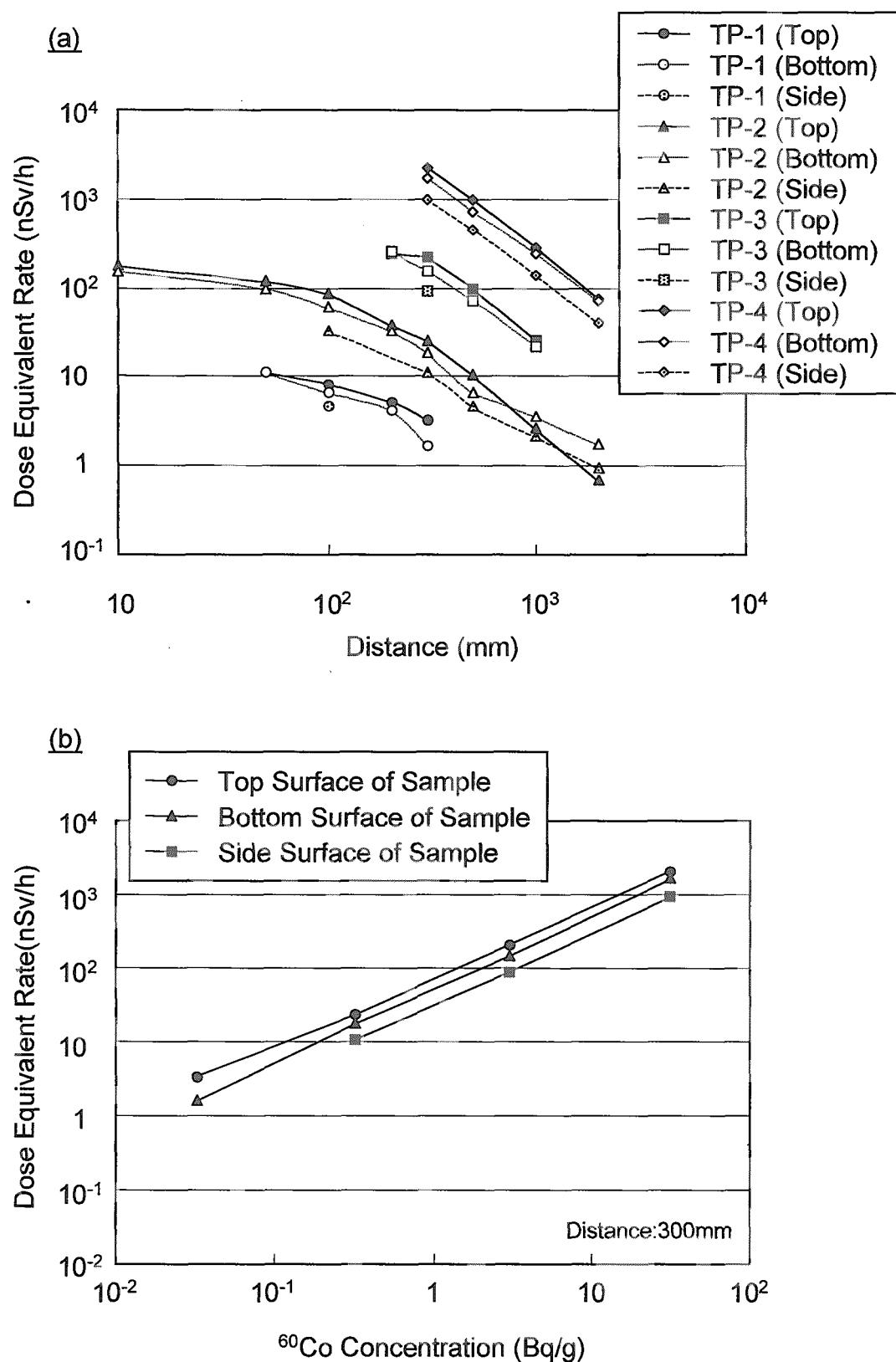


Fig.19 Variation of Dose Equivalent Rate with Distance between Surface of Sample and Nal detector and ^{60}Co Concentration

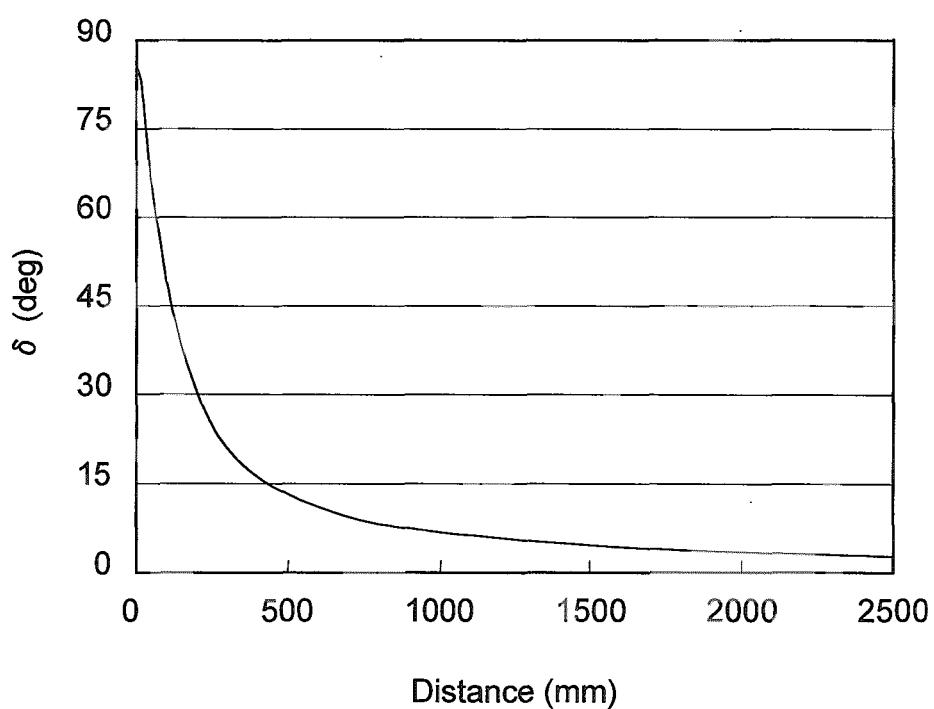
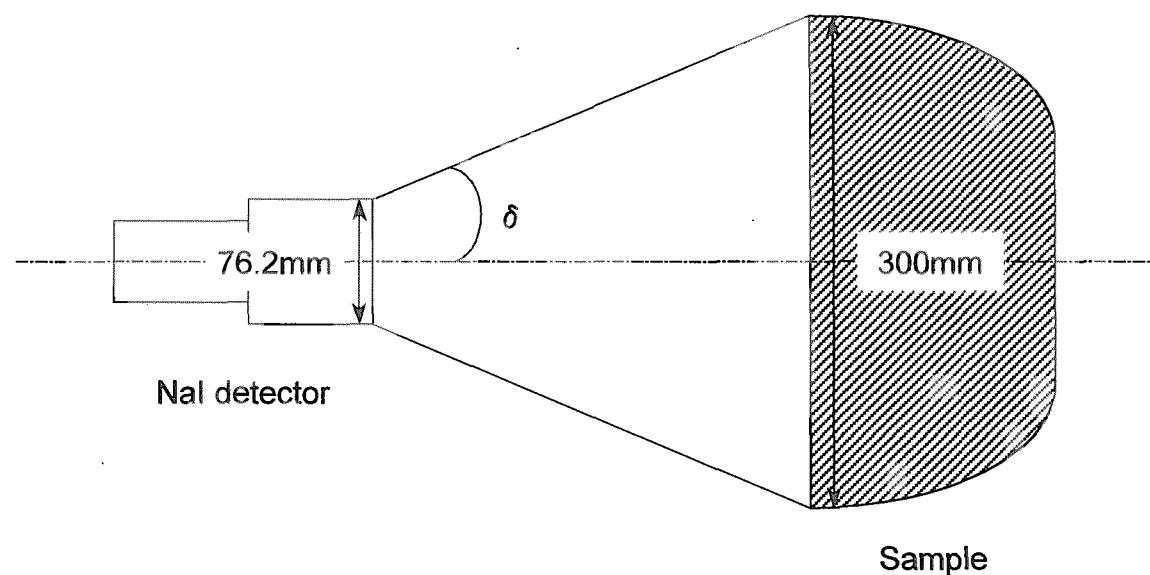


Fig.20 Schematic Diagram of Position Relation between Nal detector and Sample and Variation of δ with Distance between Surface of Nal detector and Sample

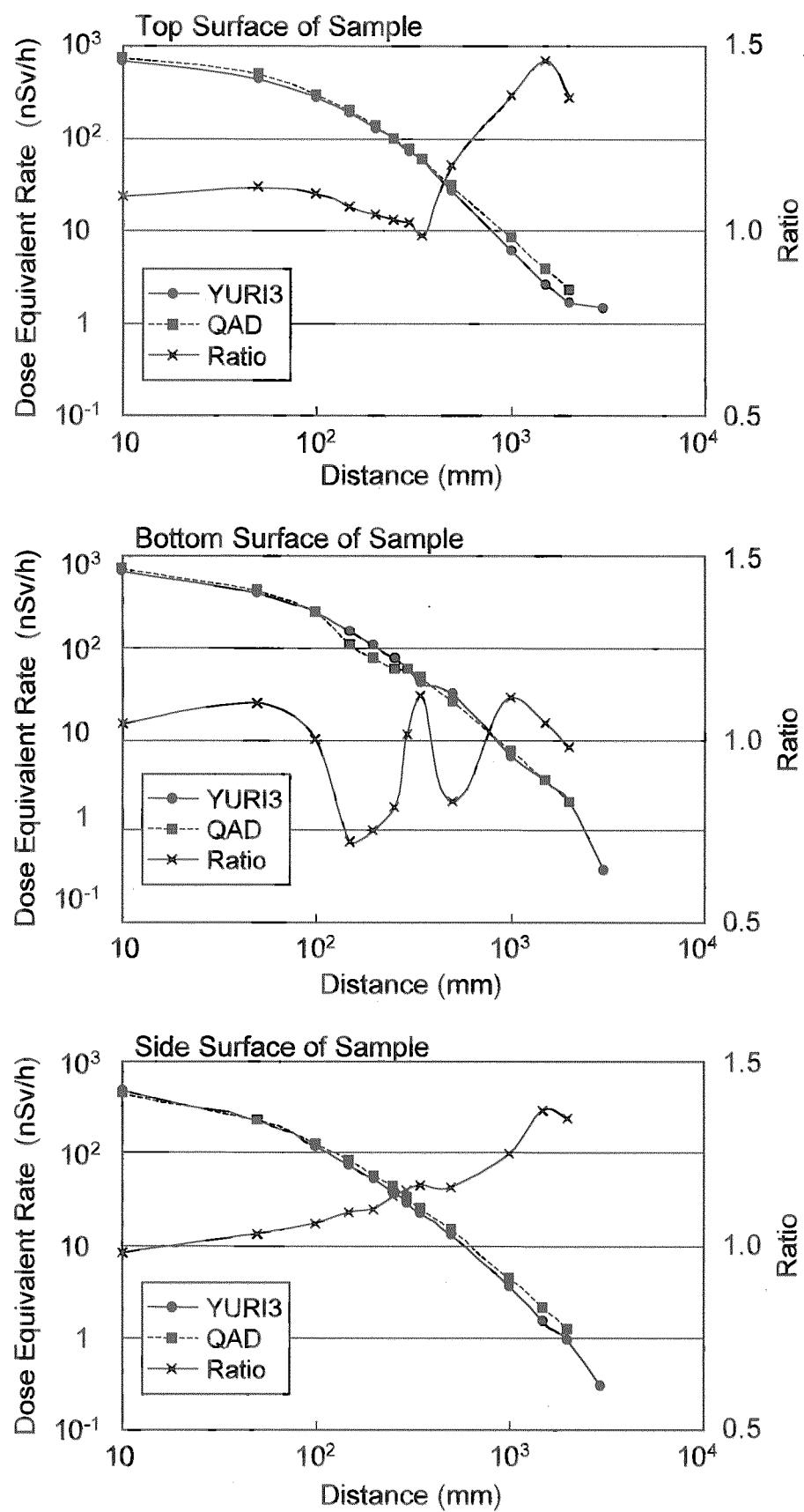


Fig.21 Dose Equivalent Rate Calculated with YURI3 or QAD and Ratio of QAD Values to YURI3

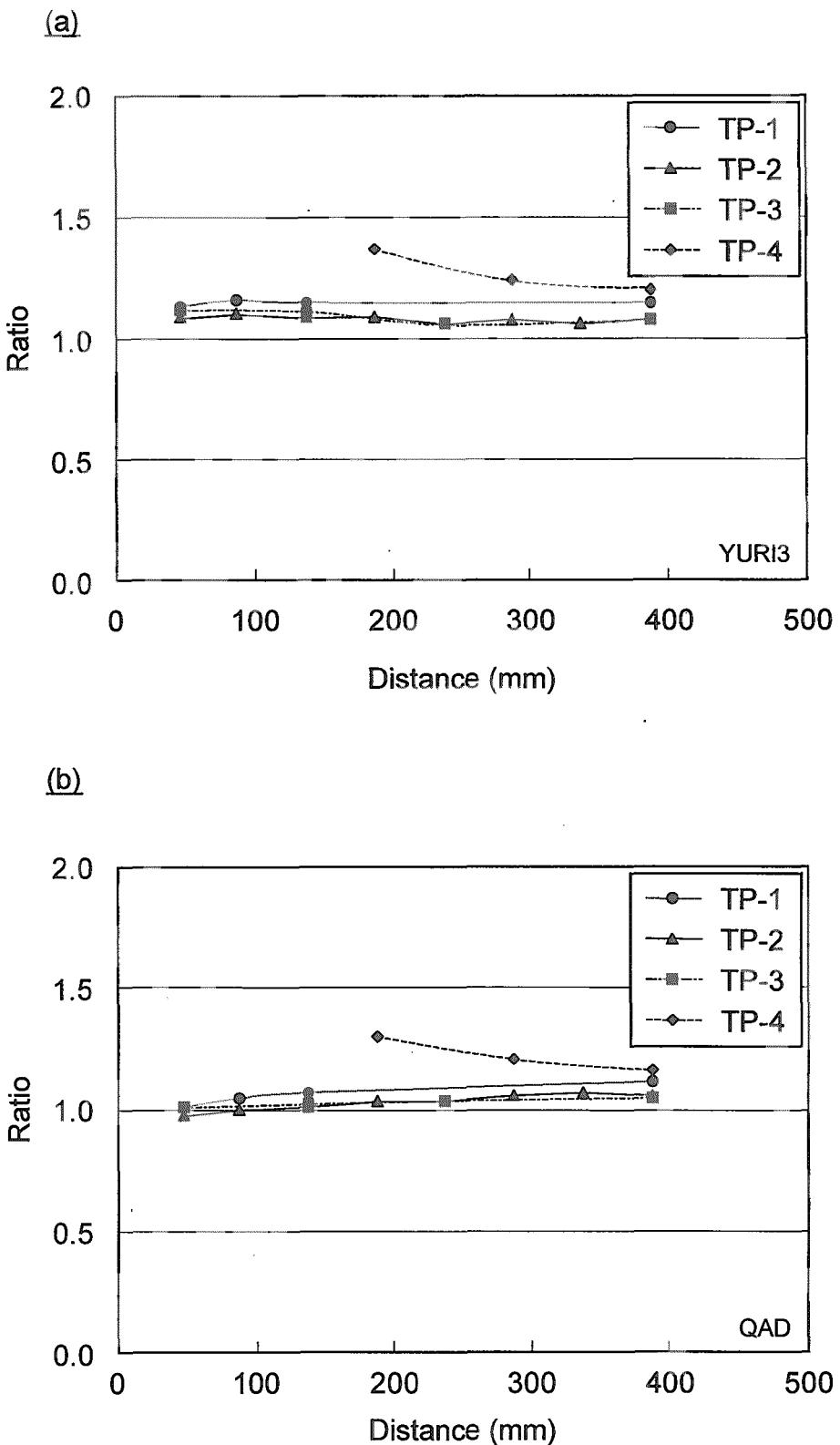


Fig.22 Ratio of Measured Values by Ge detector to Calculated Ones as a Function of Distance between Center of Ge detector and Surface of Sample

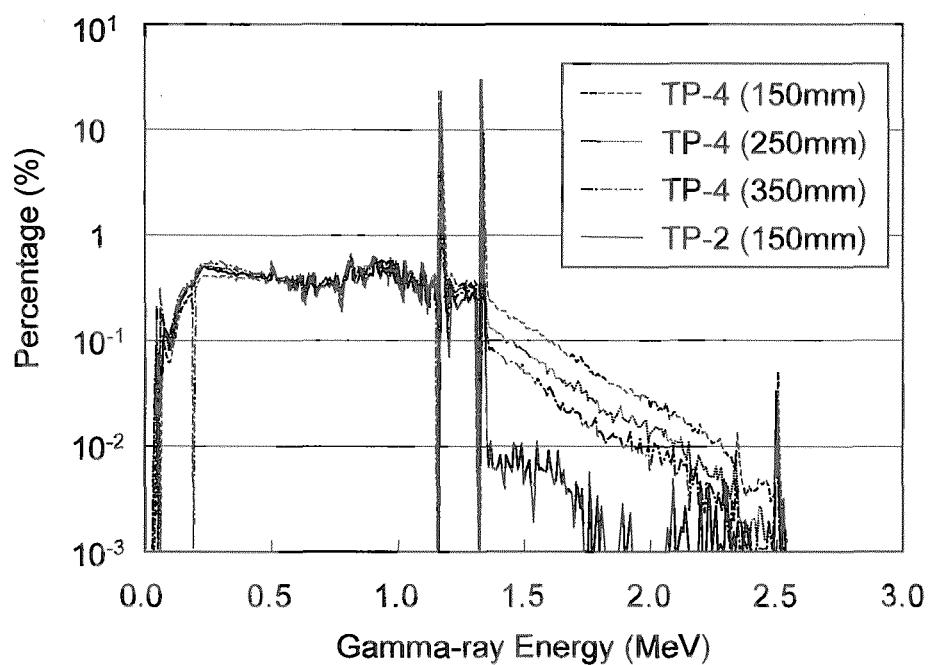


Fig.23 Percentage Distribution of Dose Equivalent Rate

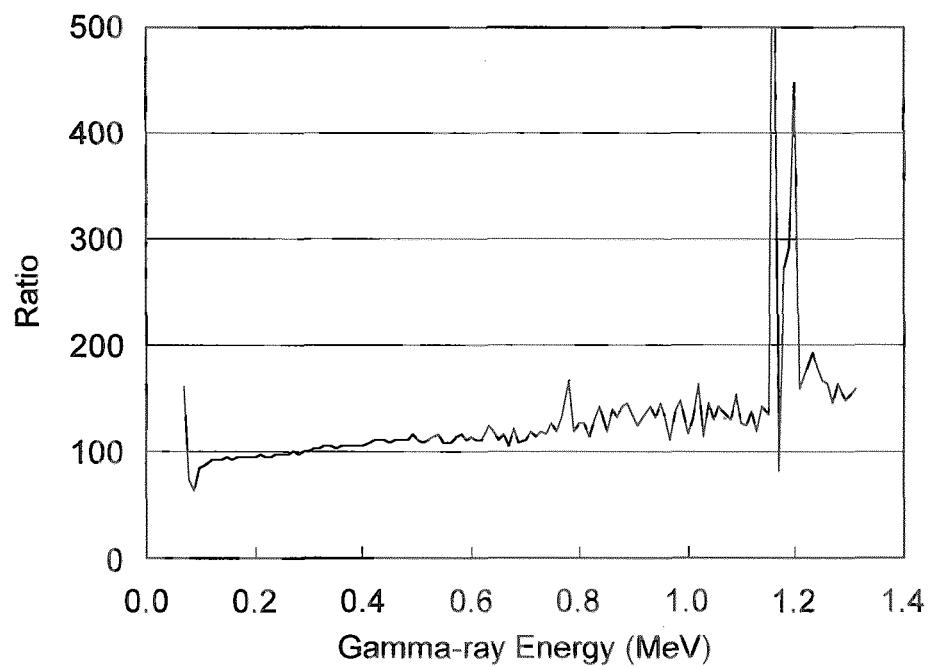


Fig.24 Ratio of Dose Equivalent Rates of TP-4 to Those of TP-2

(a)

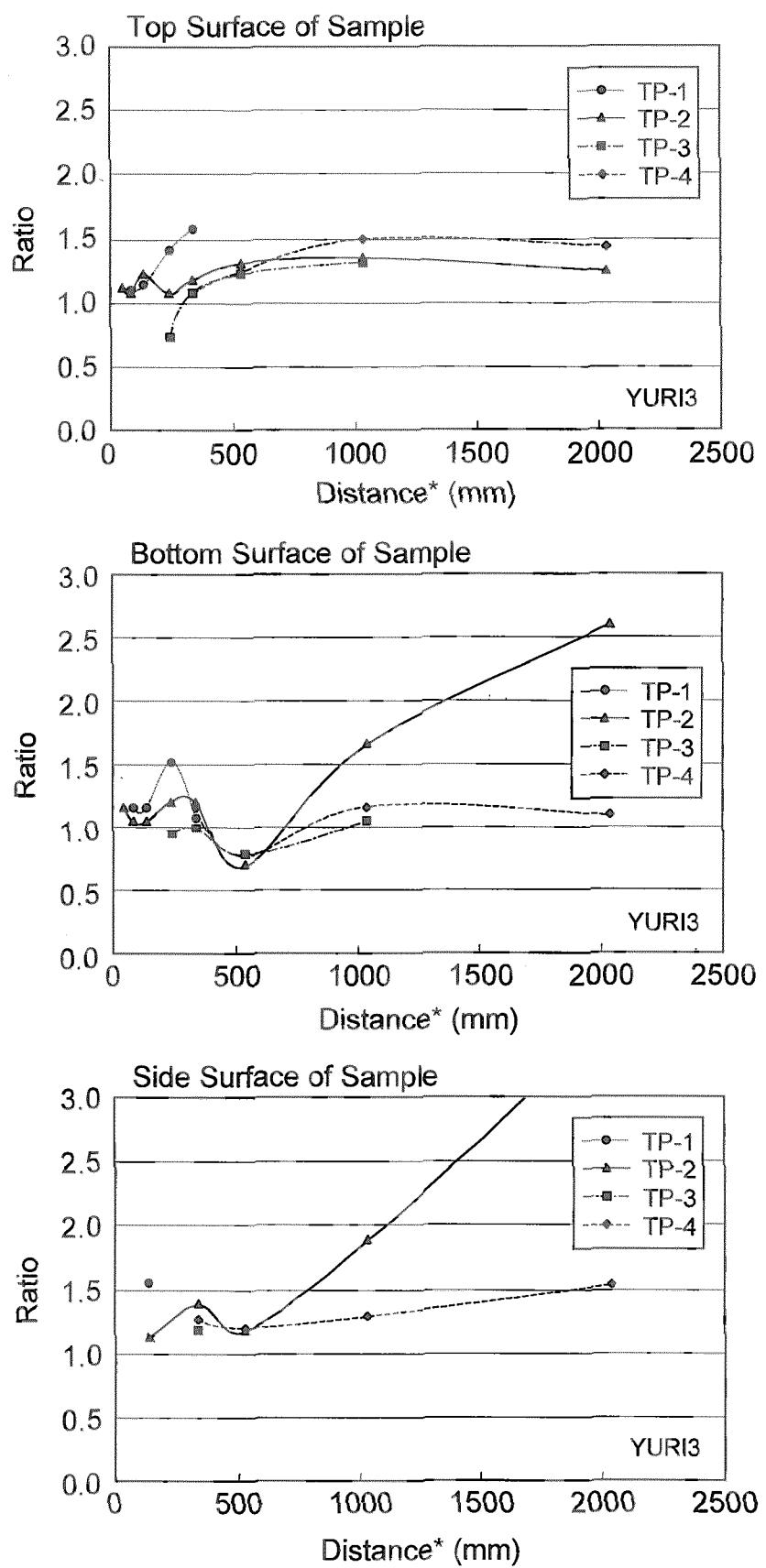


Fig.25 Ratio of Measured Values by Nal detector to Calculated Ones
as a Function of Distance between Center of Nal detector and Surface of Sample

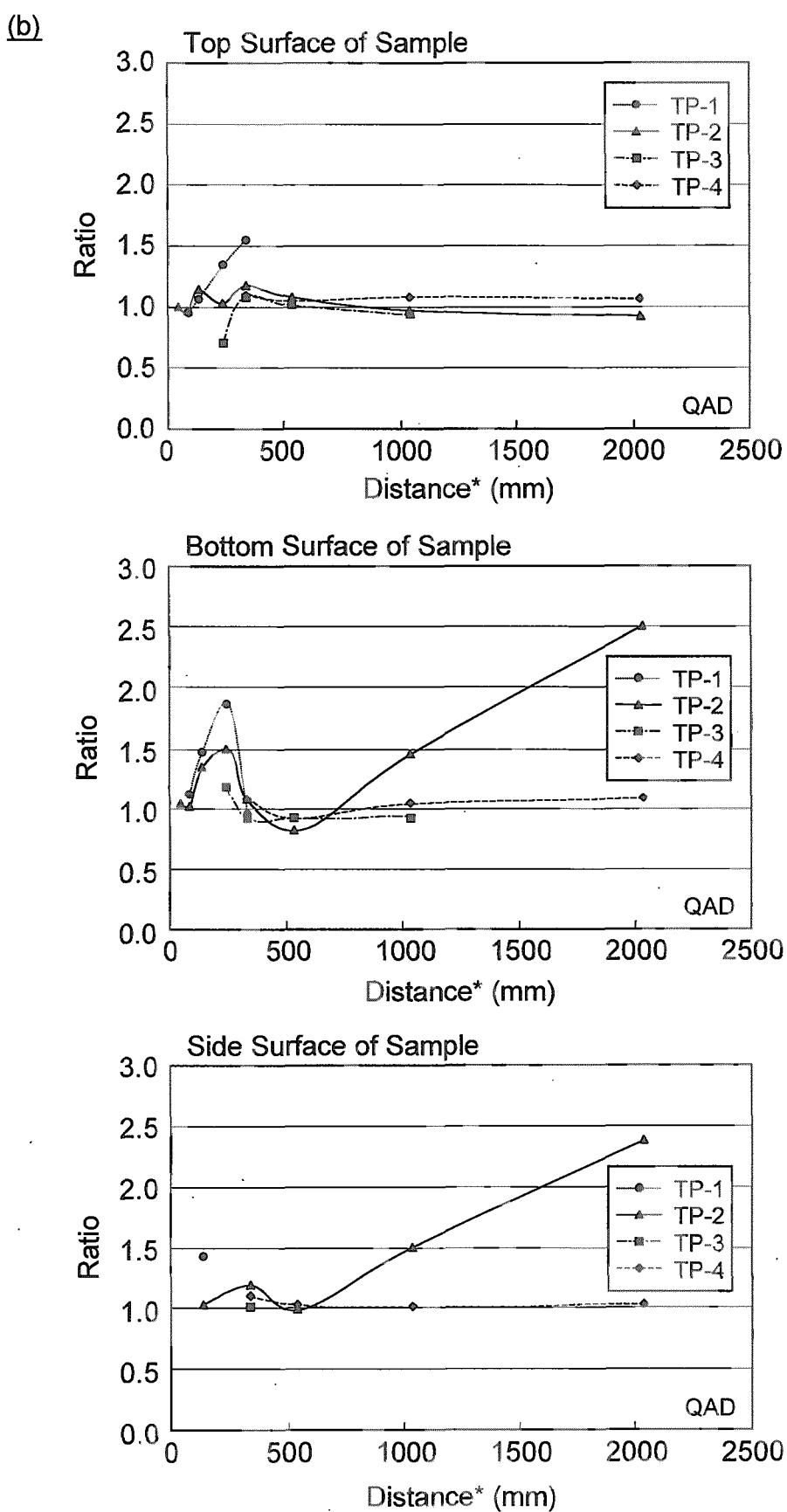


Fig.25 Ratio of Measured Values by Nal detector to Calculated Ones
as a Function of Distance between Center of Nal detector and Surface of Sample

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
工率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束密度	ウェーバ	Wb	V·s
磁束度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここで省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 10 \text{ P(ポアズ)} (\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)} (\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233	
0.101325	1.03323	1	760	14.6959	
1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²	
6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1	

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	= 4.184 J(熱化学)	
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J(15 °C)	
3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	= 4.1868 J(国際蒸気表)	
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)	
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s	
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W	
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
1	2.70270 × 10 ⁻¹¹	1	100	1	100
3.7 × 10 ¹⁰	1		0.01	1	

照射線量	C/kg	R
1	3876	
2.58 × 10 ⁻⁴	1	

線量当量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

クリアランスレベル以下の模擬解体金属再利用製品に起因する空間線量率評価手法の検討(受託研究)



古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています