

JAERI-Tech
2002-036



JP0250170



ネプツニウム混在アルファ廃棄物中の
非破壊計量技術の開発

2002年3月

黒澤 誠・大内 正市・阿部 治郎・岡根 章五・薄井 洸

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。

入手の問合わせは、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

ネプツニウム混在アルファ廃棄物中の非破壊計量技術の開発

日本原子力研究所大洗研究所管理部
黒澤 誠・大内 正市・阿部 治郎
岡根 章五・薄井 洸

(2002年1月31日受理)

大洗研究所燃料研究棟では、アルファ廃棄物中におけるプルトニウムの計量のために、パッシブガンマ線測定法を採用してきた。近年、ネプツニウムを使用した研究の進展により、プルトニウムとネプツニウムが混在するアルファ廃棄物が発生するようになり、パッシブガンマ線測定法では、 ^{239}Pu から放出されるガンマ線と ^{237}Np の娘核種である ^{233}Pa から放出されるガンマ線のエネルギーが近似するために、プルトニウムの計量に困難を生じ、計量方法についての検討が必要となった。

本試験では、アルファ廃棄物非破壊計量試験装置を使用した場合の混在核種による複合スペクトルについて、差引法及び分割法の解析方法を用いてプルトニウムの比較計量を行った。その結果、差引法では廃棄物中のプルトニウム量が100mg 以上の場合、約10～15%の誤差となり、また、10mg 以下で且つ、プルトニウムとネプツニウムの混在比が1以下の場合、約50%以上の誤差になることが分かった。一方、分割法では100mg 以上の場合、約数%～15%の誤差となり、また、10mg 以下の場合、混在比の変化に係らず、約30～50%の誤差になることが分かった。

以上のことから、アルファ廃棄物中のプルトニウムの計量には、分割法が優れていることが分かり、実廃棄物について応用している。

Development of Nondestructive Measurement Technique in α -waste including Neptunium

Makoto KUROSAWA, Shoichi OHUCHI, Jiro ABE,
Shogo OKANE and Takeshi USUI

Department of Administrative Services
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 31, 2002)

Method for measurement of plutonium in α -waste using passive gamma ray has been adopted at Plutonium Fuel Research Facility. Recently, research of neptunium has been started. It is necessary to evaluate the passive gamma ray method for measurement of plutonium in α -waste including plutonium and neptunium together.

This report describes the results of comparing the two methods, deduction method and division method. The error of deduction method is about 10 to 15% when the quantity of plutonium is larger than 100mg in the waste. But the error reaches more than 50% when the quantity of plutonium is less than 10mg and the ratio of plutonium and neptunium is less than one. On the other hand, the error of division method is about a few to 15% when the quantity of plutonium is larger than 100mg in the waste. The error is about 30 to 50% when the quantity of plutonium is less than 10mg, but the error is not affected by the ratio of plutonium and neptunium.

By reason of this results, the division method is adopted for measurement of plutonium in α -waste including neptunium.

Keywords : Passive Gamma Ray, α -waste, Plutonium Fuel Research Facility, Neptunium,
Plutonium, Deduction Method, Division Method

目 次

1. 序論	1
2. 試験装置の構成	2
2.1 ガンマ線スペクトル分析装置	2
2.2 廃棄物駆動装置	2
3. 試験に供した試料及び廃棄物	2
3.1 試験用試料	2
3.2 試験用廃棄物	3
4. 試験の方法	3
4.1 Pu、Np 検量線の作成	3
4.2 充填物による遮へい効果の確認	4
4.3 標準試料を用いた差引法及び分割法による Pu の計量	4
4.4 実廃棄物を用いた差引法及び分割法による Pu の計量	5
5. 試験結果	6
5.1 検量線の評価	6
5.2 遮へい効果	6
5.3 標準試料を用いた差引法及び分割法による Pu の計量	7
5.4 実廃棄物を用いた差引法及び分割法による Pu の計量	7
6. 結論	7
6.1 差引法による Pu の計量誤差	8
6.2 分割法による Pu の計量誤差	8
6.3 実廃棄物における Pu の計量	8
謝辞	8
参考文献	8

Contents

1. Introduction.....	1
2. Structure of Test Device.....	2
2.1 Device of γ Ray Spectral Analysis.....	2
2.2 Device for Up and Down with Rotation to Carton Box.....	2
3. Offered for Test Sample and Waste.....	2
3.1 Sample for Test.....	2
3.2 Waste for Test.....	3
4. Method of Test.....	3
4.1 Calibration Curve of Pu,Np.....	3
4.2 Verification of Shield Effect of Filling.....	4
4.3 Measurement of Pu by Deduction Method and Division Method.....	4
Used Standard Sample	
4.4 Measurement of Pu by Deduction Method and Division Method.....	5
Used Actual Waste	
5. Result of Test.....	6
5.1 Evaluation of Calibration Curve.....	6
5.2 Shield Effect.....	6
5.3 Measurement of Pu by Deduction Method and Division Method.....	7
Used Standard Sample	
5.4 Measurement of Pu by Deduction Method and Division Method.....	7
Used Actual Waste	
6. Conclusion.....	7
6.1 Error in Measurement of Pu by Deduction Method.....	8
6.2 Error in Measurement of Pu by Division Method.....	8
6.3 Measurement of Pu in Actual Waste.....	8
Acknowledgement.....	8
References.....	8

表・図リスト

表 1	高純度 Ge 半導体検出器の仕様	9
表 2	MCA の仕様	9
表 3	廃棄物駆動装置の仕様	9
表 4	差引法による Pu の計量結果	10
表 5	分割法による Pu の計量結果	10
図 1	アルファ廃棄物非破壊計量試験装置構成図	11
図 2	カートンボックス内における試料の測定位置	12
図 3	Pu、Np 混合試料のガンマ線スペクトル	13
図 4	Np 単独試料のガンマ線スペクトル	14
図 5	Np 検量線	15
図 6	Pu 検量線	16
図 7	Pu、Np 混合試料のガンマ線スペクトル	17
図 8	各試料位置における Pu 検量線	18
図 9	各試料位置における Np 検量線	19
図 10	模擬廃棄物の種類及び重量の変化による遮へい効果	20
図 11	最小二乗法による遮へい係数	21
図 12	Pu(414KeV)計量用の検量線	22
図 13	Np(416KeV)計量用の検量線	23
図 14	実廃棄物のガンマ線スペクトル	24

List of Tables and Figures

Table 1	Specification of High Purity Ge Semiconductor Detector	9
Table 2	Specification of MCA	9
Table 3	Specification of Device for Up and Down with Rotation to Carton Box	9
Table 4	Measure Result of Pu by Deduction Method	10
Table 5	Measure Result of Pu by Division Method	10
Fig.1	Structure Chart of α -waste Nondestructive Measure Test Device	11
Fig.2	Measurement Position of Sample in inside of Carton Box	12
Fig.3	γ Ray Spectral of Pu and Np Mixture Sample	13
Fig.4	γ Ray Spectral of Np Single Sample	14
Fig.5	Calibration Curve of Np	15
Fig.6	Calibration Curve of Pu	16
Fig.7	γ Ray Spectral of Pu and Np Mixture Sample	17
Fig.8	Calibration of Pu in Each Sample Position	18
Fig.9	Calibration of Np in Each Sample Position	19
Fig.10	Shield Effect in Variety of Mimic Waste and Change of Weight	20
Fig.11	Shield Factor by Minimum Square Method	21
Fig.12	Calibration Curve for Measure of Pu(414KeV)	22
Fig.13	Calibration Curve for Measure of Np(416KeV)	23
Fig.14	γ Ray Spectral of Actual Waste	24

1. 序 論

核燃料物質使用施設においてアルファ廃棄物中のプルトニウム量を計量することは、核燃料物質の計量管理及びアルファ廃棄物管理の面から極めて重要である。従来、燃料研究棟では炭化物及び窒化物燃料の研究等に伴い、グローブボックスより発生したアルファ廃棄物を放射性廃棄物管理施設へ搬出する前に、パッシブガンマ線測定法により ^{239}Pu の単一スペクトルを解析して、廃棄物収納容器内に含まれるプルトニウムの計量を行ってきた。すなわち、 ^{239}Pu から放出されるエネルギー414KeVのガンマ線（放出率： $1.51 \times 10^{-3}\%$ ）¹⁾を高純度Ge半導体検出器により測定し、得られた ^{239}Pu の量から ^{239}Pu の同位体組成（約75%）を考慮して全プルトニウム量を算出してきた。近年、研究の進展に伴い、マイナーアクチノイド元素である ^{237}Np 含有プルトニウム燃料の研究が開始され、アルファ廃棄物中にはウラン、プルトニウムのほかにネプツニウムが混在するようになった。これに伴い、 ^{237}Np のアルファ崩壊によって生成される娘核種の ^{233}Pa は ^{239}Pu のガンマ線エネルギーと近似するために、従来の方法では、複合スペクトルの形成によりプルトニウムの計量精度が大きく損なわれ、核燃料物質の計量管理に使用できないことが判明した。

本試験では、プルトニウムとネプツニウムの複合スペクトルの解析方法（差引法及び分割法）に着目してプルトニウムの非破壊計量試験を行い、実廃棄物中におけるプルトニウムの計量について精度の向上を図った。

2. 試験装置の構成

本試験において使用したアルファ廃棄物非破壊計量試験装置の主な構成は、下記のとおりである。なお、装置の構成については図1示す。

2. 1 ガンマ線スペクトル分析装置

ガンマ線スペクトルの測定、解析には、米国 ORTEC 社製の低エネルギー用高純度 Ge 半導体検出器及び SEIKO EG&G 社製 7700 スーパーインテリジェント MCA を使用した。また、プルトニウム試料の測定の際、 ^{241}Am から放出されるガンマ線の影響を低減させるために、厚さ 4 mm の銅板を検出器の表面に装着した。なお、高純度 Ge 半導体検出器の仕様については表 1 に、MCA の仕様については表 2 に示す。

2. 2 廃棄物駆動装置

廃棄物収納容器（以下、「カートンボックス」と略す。）内の核燃料物質の分布状態による幾何学的影響を考慮して、容器を上下及び回転駆動させることが可能である廃棄物駆動装置²⁾を使用した。なお、廃棄物駆動装置の仕様については表 3 に示す。

3. 試験に供した試料及び廃棄物

本試験において供した試料及び廃棄物は、下記のとおりである。

3. 1 試験用試料

3.1.1 試料の調製

一定量の PuO_2 及び NpO_2 粉末をそれぞれ 14N- HNO_3 +5%-HF により溶解し、HF を除去するために蒸発乾固した後、再び 1N- HNO_3 中で溶解後、溶液の調製を行った。また、下記に示す Pu 及び Np 換算量となるように小分けし、これらをステンレス製試料皿で蒸発乾固して試料の調製を行った。

(1)Pu 試料：10mg、50mg、100mg、200mg、500mg、1000mg

(2)Np 試料：1mg、10mg、100mg

3.1.2 試料容器

試料の調製に使用した二重容器は次のとおりである。内容器にはステンレス製試料皿（50mmφ×6mm×0.3mm）を使用し、試料の飛散防止のために試料皿表面をパラフィン紙により包装した。

外容器にはプラスチック製容器 (60mmφ×20mmh×0.5mmt) を使用し、アルファ放射性物質の密封のために容器表面を塩化ビニールにより二重包装した。

3. 2 試験用廃棄物

3.2.1 模擬廃棄物

試験に供する模擬廃棄物については、グローブボックス内より発生する主な廃棄物の形態を選定した。また、重量については、カートンボックス1個あたりに通常の実廃棄物を収納する際の量を模擬した。

- (1)紙 : 1.5kg~2.5kg
- (2)塩化ビニール : 3.5kg
- (3)ネオプレンゴム (プルトニウム取扱用グローブ) : 2.0kg~4.5kg
- (4)金属 (金属バンド) : 5.0kg

3.2.2 実廃棄物

実廃棄物については、グローブボックス内の清掃及び除染作業等により発生する主な廃棄物の中で最も割合の多い紙を選定した。

紙 : 2.5kg (グローブボックスより搬出されたアルファ廃棄物)

4. 試験の方法

4. 1 Pu、Np 検量線の作成

パッシブガンマ線法による測定の際、カートンボックス内の核燃料物質の分布状態による幾何学的影響により計数値に差異が生じる。また、計量の際、過小評価とならないためには、同一試料による測定において最小の計数値が得られる試料の位置を決定する必要がある。以上のことから下記の条件に基づき試験を行い、Pu 及び Np の検量線を作成した。

4.1.1 試料

試料は、Pu (10mg、50mg、100mg、200mg、500mg、1000mg) 及び Np (1mg、10mg、100mg) を使用した。

4.1.2 測定条件

上記の試料のうち Pu10mg 及び Np1mg 試料の放射エネルギーは微量であるため、測定感度等を考慮して測定時間は 1200sec に設定し、検出器からカートンボックス表面までの距離を 10cm とした。なお、その他の試料についても、同一条件で実施した。

4.1.3 試験方法

図2に示すとおり試料位置は、カートンボックス内の中心部、壁面中部、壁面下部の3通りとした。なお、カートンボックスは、廃棄物駆動装置により上下及び回転駆動させて、Pu(414KeV)及びNp(416KeV)における計数値を測定し、Pu及びNpの検量線を作成した。

4.2 充填物による遮へい効果の確認

カートンボックス内における収納物は、その種類(金属、紙等)及び重量の違いにより、核燃料物質等への遮へい効果が異なるため、3.2.1に示す模擬廃棄物を使用してPu(414KeV)の計数値を測定し、上述した検量線に対する遮へい係数を求めた。

4.2.1 試料

模擬廃棄物の種類は様々であり、特に金属収納物に関しては試料に対する遮へい効果が大きいために、十分な計数値を得るための試料としてPu1000mgを使用した。

4.2.2 測定条件

4.1.2と同様、測定時間は1200secに設定し、検出器からカートンボックス表面までの距離を10cmとした。

4.2.3 試験方法

カートンボックス内での試料の位置は、計量の際、4.1で決めた壁面下部位置とした。また、模擬廃棄物を種類毎にカートンボックスへ充填し、廃棄物駆動装置により上下及び回転駆動させて、各模擬廃棄物の種類及び重量の変化に応じたPu(414KeV)の計数値を測定し、最小二乗法により遮へい係数を求めた。

4.3 標準試料を用いた差引法及び分割法によるPuの計量

4.3.1 試料

試料は、Pu(10mg、100mg、1000mg)及びNp(1mg、10mg、100mg)を使用した。

4.3.2 測定条件

測定時間は3600secに設定し、検出器からカートンボックス表面までの距離を10cmとした。

4.3.3 試験方法

模擬廃棄物が充填されていない状態(カートンボックス内には試料のみ)において、PuとNp試料を各々組み合わせ、PuとNpの複合スペクトルを測定し、以下に示す解析方法によりPuの計量を行った。また、上記の測定時間におけるPu及びNpの検量線を作成した。

4.3.4 差引法によるPuの計量

Pu (414KeV)、Np (312KeV)、Np (416KeV) における計数値を測定した。なお、Pu、Np 混合試料における Np (312KeV) S_1 と Np 単独試料における Np (312KeV) の計数値 S_3 が $S_1 = S_3$ となることを条件として、Np 単独試料における Np (416KeV) の計数値 S_4 を Pu、Np 混合試料における複合スペクトル Pu(414KeV)+Np(416KeV) の計数値 S_2 から差し引いて Pu の計数値を算出した (図3、図4、図5参照)。また、上記で求めた計数値により Pu の検量線 (図6参照) を用いて計量を行った。

4.3.5 分割法によるPuの計量

Pu (414KeV) と Np (416KeV) のスペクトルが複合する領域の境界 (複合スペクトルの計数値が最小になるチャンネル) において分割し、Pu (414KeV) 側の領域における計数値を求め、Pu の検量線を用いて計量を行った (図6、図7参照)。

4.4 実廃棄物を用いた差引法及び分割法によるPuの計量

4.4.1 試料

試料は、通常発生する実廃棄物中に含有する核燃料物質の量に近似した Pu (100mg) 及び Np (10mg) を使用した。

4.4.2 模擬廃棄物及び実廃棄物

模擬廃棄物 (紙 : 2.5kg) 及び 3.2.2 に示す実廃棄物を使用した。

4.4.3 測定条件

4.1.2 と同様、測定時間は 1200sec に設定し、検出器からカートンボックス表面までの距離を 10cm とした。

4.4.4 試験方法

実廃棄物とほぼ同一の形態及び重量とした模擬廃棄物及び実廃棄物における Pu と Np の複合スペクトルを測定し、以下に示す解析方法により Pu の計量を行い、実用性について検討した。

4.4.5 差引法によるPuの計量

4.3.4 の方法により Pu の計数値を算出した (図3、図4、図13参照)。また、求めた計数値より Pu の検量線 (図12参照) を用いて計量を行った。

4.4.6 分割法によるPuの計量

4.3.5 の方法により Pu の計数値を算出した (図7参照)。また、4.4.5 と同様、求めた計数値より Pu の検量線 (図12参照) を用いて計量を行った。

5. 試験結果

5.1 検量線の評価

同一試料を用いて各試料位置毎の計数値を測定した結果、カートンボックス内の壁面中部及び中心部については、壁面下部より高い計数値となり、壁面下部に試料を設置した場合において計数値が最小となることが分かった。従って、Pu 及び Np の計量の際は、壁面下部に試料を設置して計数値の測定を行い、検量線を作成することが最良である。なお、各試料位置における Pu 検量線を図 8 に、Np 検量線を図 9 に示す。

5.2 遮へい効果

模擬廃棄物の重量の増加に伴い遮へい効果が大きくなる傾向が見られた。また、模擬廃棄物の重量が同一の場合、模擬廃棄物の内容物の形態の違いにより、計数値に最大約 200counts の差が見られた。なお、この差については、形態の違いによる遮へい効果が影響しているためである。なお、模擬廃棄物の種類及び重量の変化による遮へい効果については図 10 に示す。また、上述の遮へい効果をもとに最小二乗法を用いて作成した廃棄物重量毎の遮へい係数を図 11 に示す。

以上のことから 5.1 に示すカートンボックス内壁面下部における検量線を Pu 及び Np の計量に使用する際は、図 11 における遮へい係数を考慮して算出する。なお、算出式は以下のとおりであり、Pu (414KeV) 計量用の検量線を図 12 に、Np (416KeV) 計量用の検量線を図 13 に示す。

5.2.1 Pu 含有量の算出例

カートンボックス内の Pu 含有量は、下記の式により算出する。

$$X_p = X * A / B$$

$$X_p = (Y - 9) / 2.0541 * 0.882 / (-0.0351Z + 1)$$

$$X_p = 0.429 * (Y - 9) / (-0.0351Z + 1)$$

X_p : カートンボックス内の Pu 含有量 (mg)

A : Pu 量換算係数 [Pu の分子数 / PuO₂ の分子数]

B : 図 11 に示す遮へい係数 [-0.0351Z+1]

X : 図 12 に示す検量線の算出式 [(Y-9)/2.0541]

Y : 計数値 (counts)

Z : 廃棄物重量 (kg)

5.2.2 Np 含有量の算出例

カートンボックス内の Np 含有量は、下記の式により算出する。

$$X_n = X * A / B$$

$$X_n = (Y - 7) / 40.341 * 0.881 / (-0.0351Z + 1)$$

$$X_n = 0.022 * (Y - 7) / (-0.0351Z + 1)$$

X_p : カートンボックス内の Np 含有量 (mg)

A : Np 量換算係数 [Np の分子数 / NpO_2 の分子数]

B : 図 11 に示す遮へい係数 $[-0.0351Z + 1]$

X : 図 13 に示す検量線の算出式 $[(Y - 7) / 40.341]$

Y : 計数值 (counts)

Z : 廃棄物重量 (kg)

5.3 標準試料を用いた差引法及び分割法による Pu の計量

差引法においては、Pu が 10mg の場合、Pu/Np 混在比の低下に伴い、Pu の計量誤差が著しく増加する傾向が見られ、特に、Pu/Np の混在比が 1 以下になると約 50% 以上になることが分かった。また、Pu が 100mg 及び 1000mg の場合についての Pu の計量誤差は、約 10~15% であった。なお、試験結果については、表 4 に示す。一方、分割法においては、Pu が 10mg の場合、Pu/Np 混在比の変化による Pu の計量誤差の著しい増加は見られなかった。また、Pu が 100mg 及び 1000mg の場合についての Pu の計量誤差は、約 10~15% であった。なお、試験結果については、表 5 に示す。

5.4 実廃棄物を用いた差引法及び分割法による Pu の計量

実廃棄物のガンマ線スペクトルを図 14 に示す。実廃棄物のスペクトルを差引法と分割法で解析した結果、分割法において Pu 104mg、Np は 16mg と計量され、模擬廃棄物における Pu 及び Np の重量とほぼ同様の値を示した。差引法については、分割法と比較して計量誤差が約 1 割程度大きな値を示した。

6. 結 論

パッシブガンマ線法による Np 混在アルファ廃棄物中の Pu の非破壊計量試験について次のような結論を得た。

6. 1 差引法による Pu の計量誤差

差引法による Pu の計量誤差は、 $Pu \leq 10\text{mg}$ においては Pu/Np 混在比が 1 以下の場合は約 50% 以上であり、 $Pu \geq 100\text{mg}$ においては約 10~15% 以下であった。

6. 2 分割法による Pu の計量誤差

分割法による Pu の計量誤差は、 $Pu \leq 10\text{mg}$ においては Pu/Np 混在比の変化による影響は殆どなく約 30~50% 以下であり、 $Pu \geq 100\text{mg}$ においては約 10~15% 以下であった。

6. 3 実廃棄物における Pu の計量

6. 1 及び 6. 2 より Np 混在アルファ廃棄物中の Pu の計量方法は、差引法よりも計量誤差の少ない分割法が有効であることが分かった。また、模擬廃棄物と実廃棄物のガンマ線スペクトルを比較した結果、Pu 及び Np の計量値がほぼ同様であることも確認された。以上のことから実廃棄物においては、迅速且つ簡便で精度が保持できる分割法による Pu の計量が最適であることが分かった。なお、現在、放射性廃棄物管理施設へ廃棄物を搬出する際、分割法による Pu の計量方法を採用し、実績を上げている。

謝 辞

本試験に使用した試料の調製等について御指導を頂きました新型燃料燃焼研究グループの皆様
に深く感謝致します。

参考文献

- 1) E. Browne and R. B. Firestone : Table of Radioactive Isotopes (ed. V. S. Shirley),
J. Wiley & Sons, Inc., New York (1986).
- 2) 日本原子力学会 1980 年秋の分科会 (H1) : 阿部、栗原 (1980).

表1 高純度 Ge 半導体検出器の仕様

Detector Model	LOAX-36300/15-P
Detector Dimensions	36.0mm Active Diameters 14.6mm Active Depth
Polarity	Negative
Time Constant	6 μ sec
Bias	2000V
Gain	4K
Fe-55 at 5.89KeV (Mn-k α)	266eV, FWHM
Co-57 at 122KeV (γ)	562eV, FWHM

表2 MCA の仕様

MCA Model	7700-010
BIN	7700-300
AMP Board	7700-400
HV Board	7700-500

表3 廃棄物駆動装置の仕様

上下駆動速度	10mm/s
上下駆動範囲	検出器中心部より ± 200 mm
回転駆動速度	12rpm

表4 差引法によるPuの計量結果

条 件			試験結果
試 料 (mg)		混在比	Pu 計量誤差 (%)
Pu	Np	Pu/Np	
10	1	10	-37~40
10	10	1	-65~62
10	100	0.1	-347~272
100	1	100	7~16
100	10	10	-11~17
100	100	1	-17~13
1000	1	1000	-11~8
1000	10	100	-14~7
1000	100	10	-16~-6

表5 分割法によるPuの計量結果

条 件			試験結果
試 料 (mg)		混在比	Pu 計量誤差 (%)
Pu	Np	Pu/Np	
10	1	10	-25~45
10	10	1	-29~53
10	100	0.1	34~56
100	1	100	-1~10
100	10	10	-5~8
100	100	1	6~16
1000	1	1000	-2~3
1000	10	100	-2~7
1000	100	10	-3~3

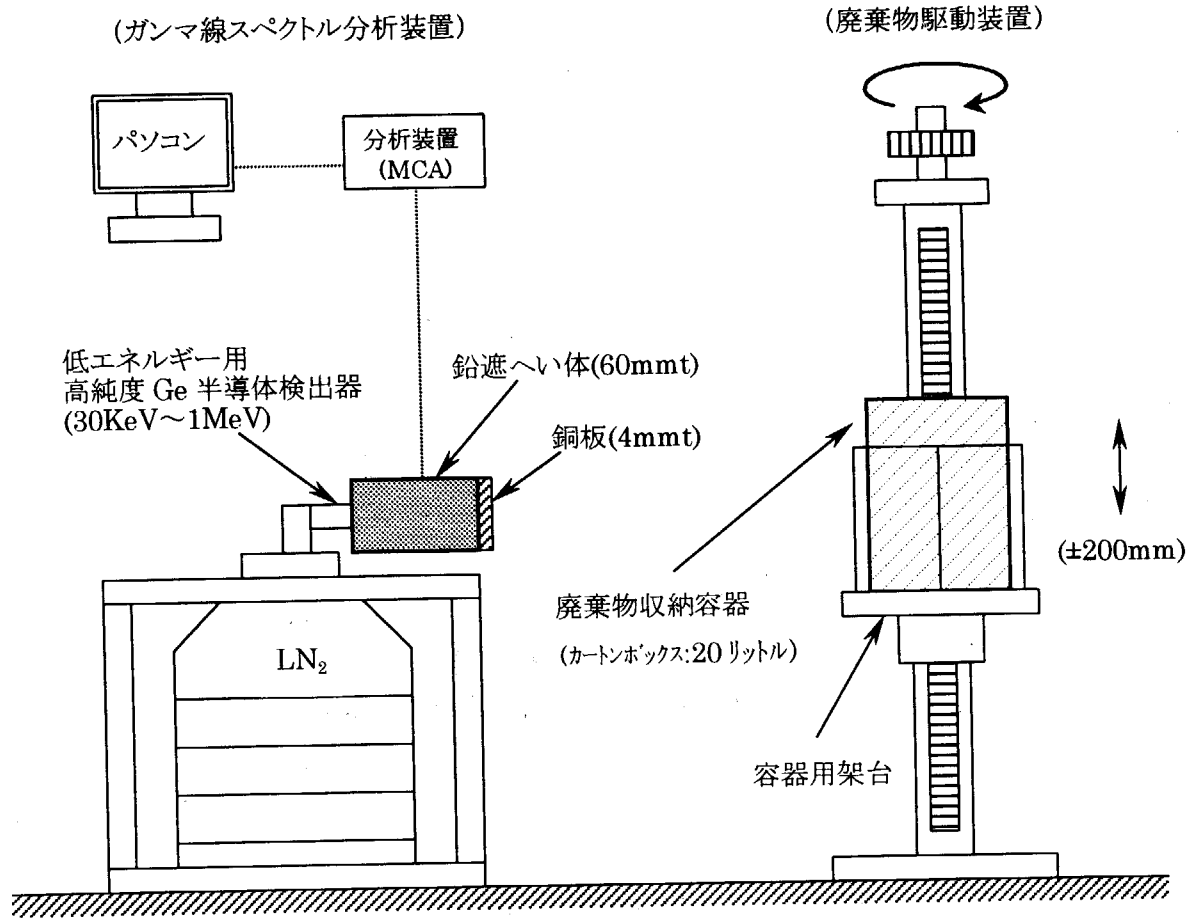


図1 アルファ廃棄物非破壊計量試験装置構成図

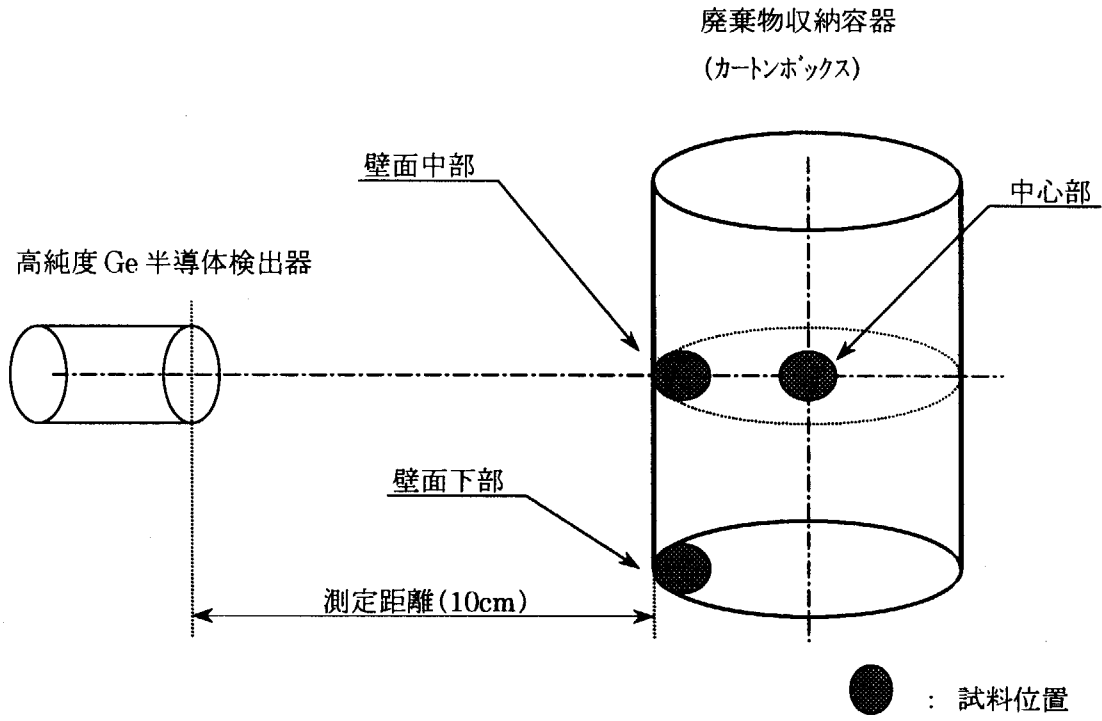


図 2 カートンボックス内における試料の測定位置

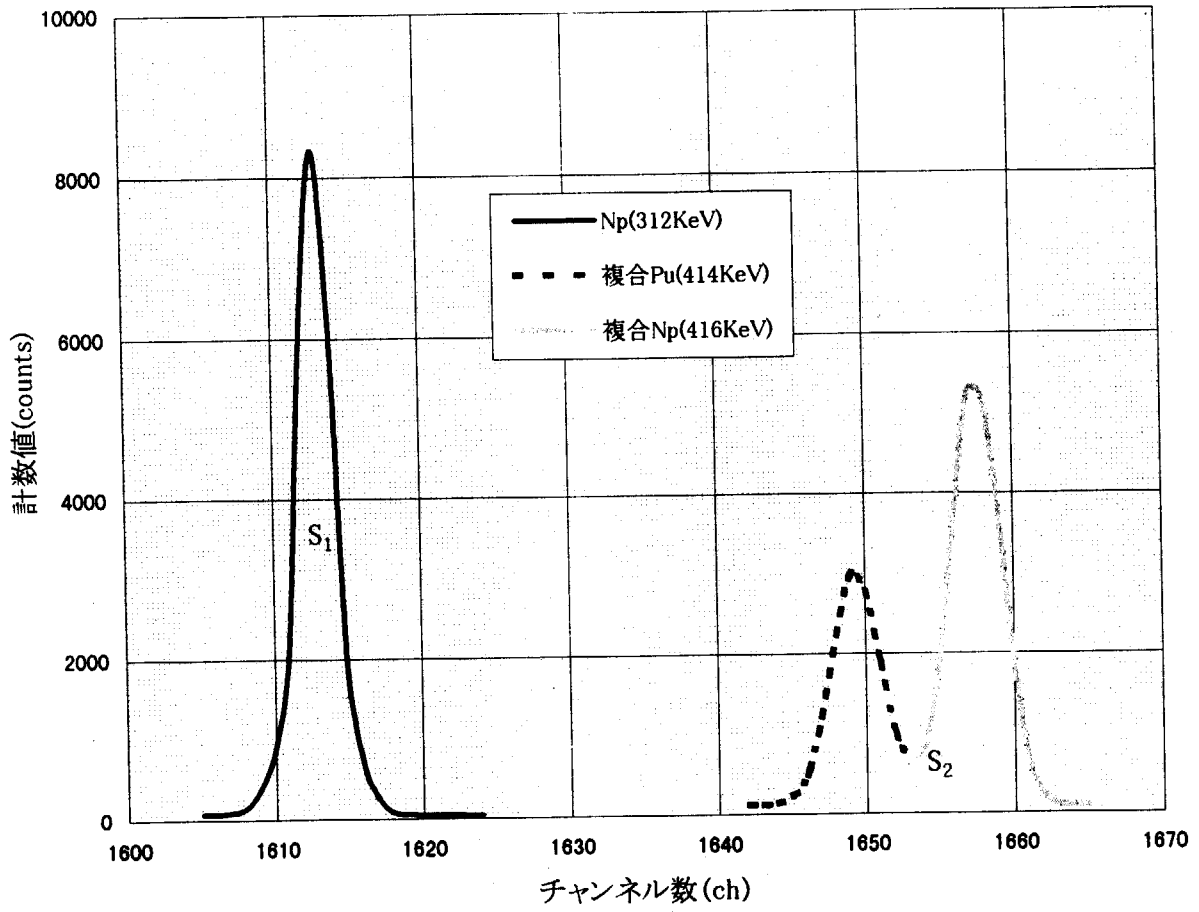


図3 Pu、Np混合試料のガンマ線スペクトル

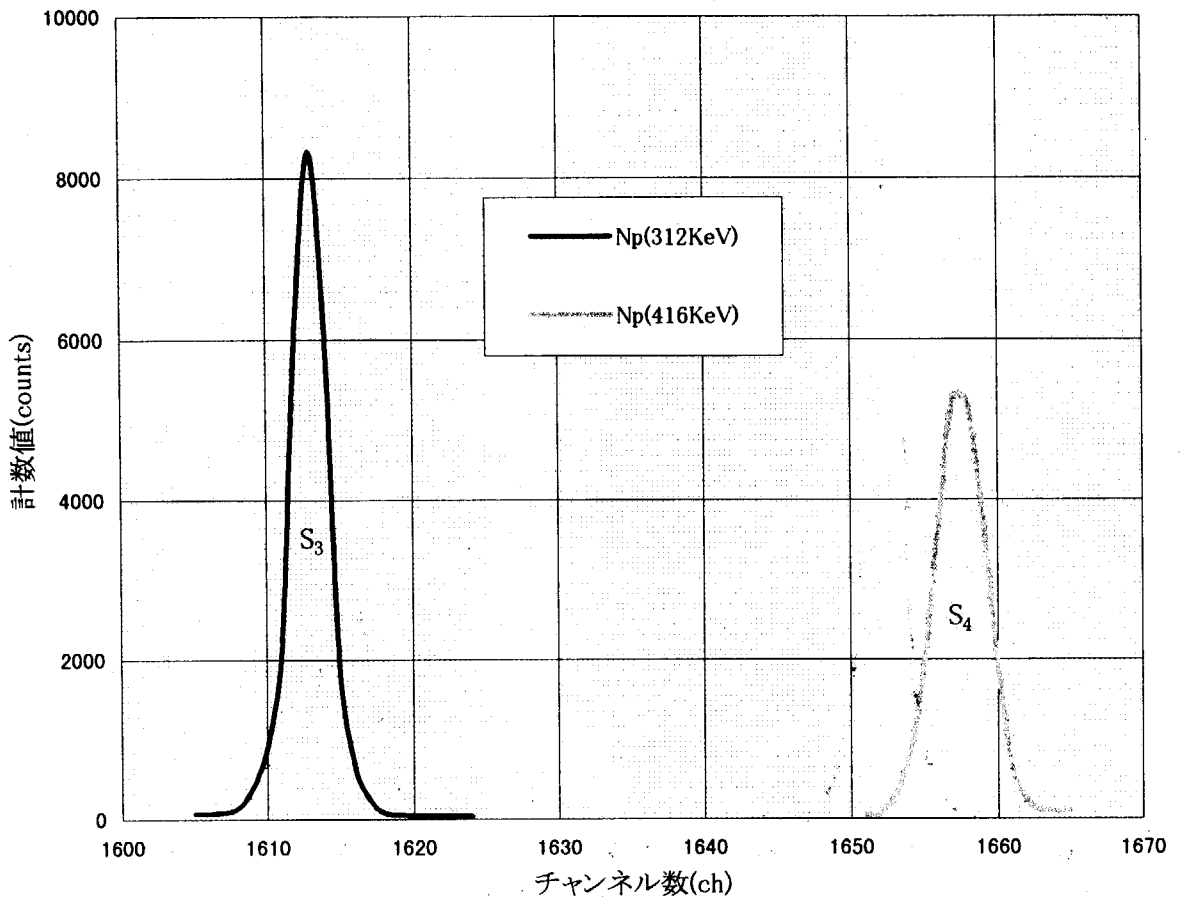


図4 Np単独試料のガンマ線スペクトル

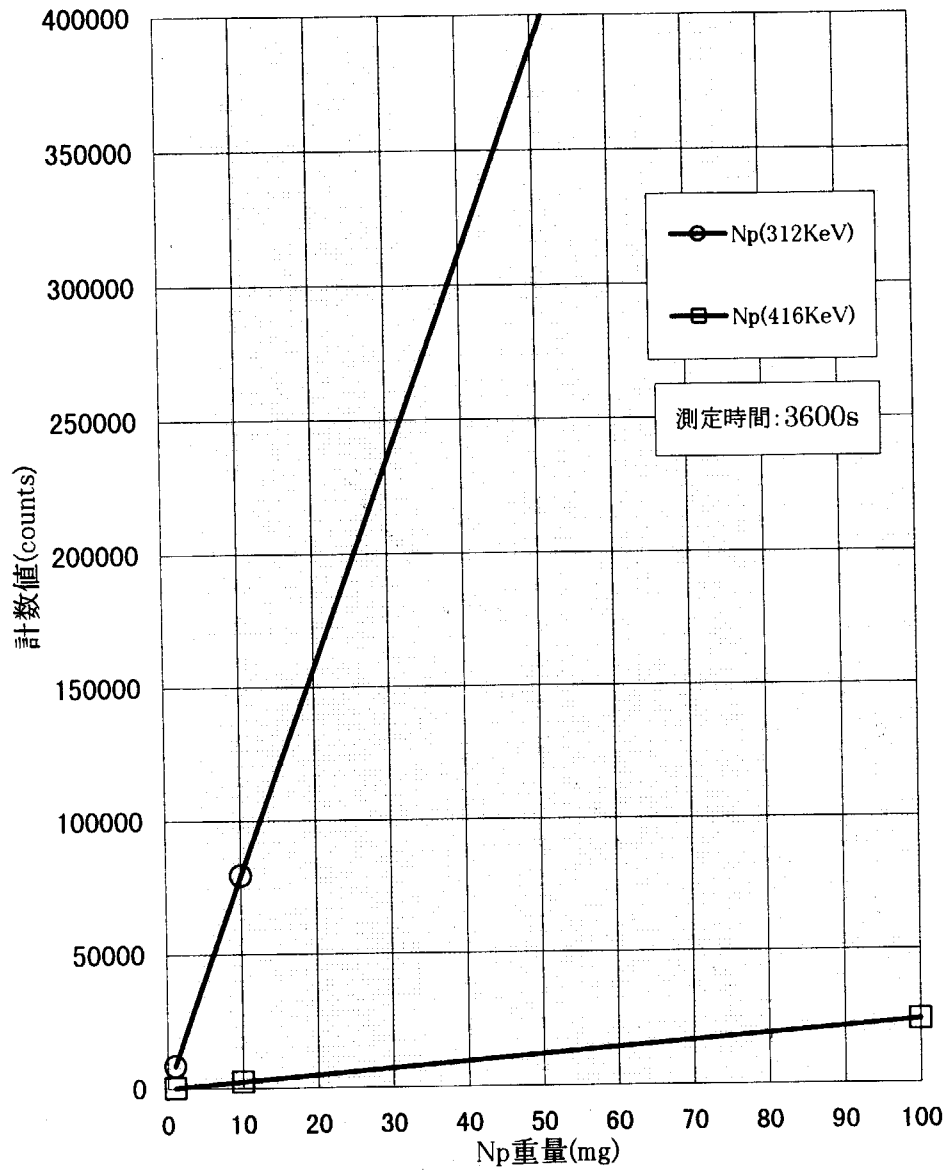


図5 Np検量線

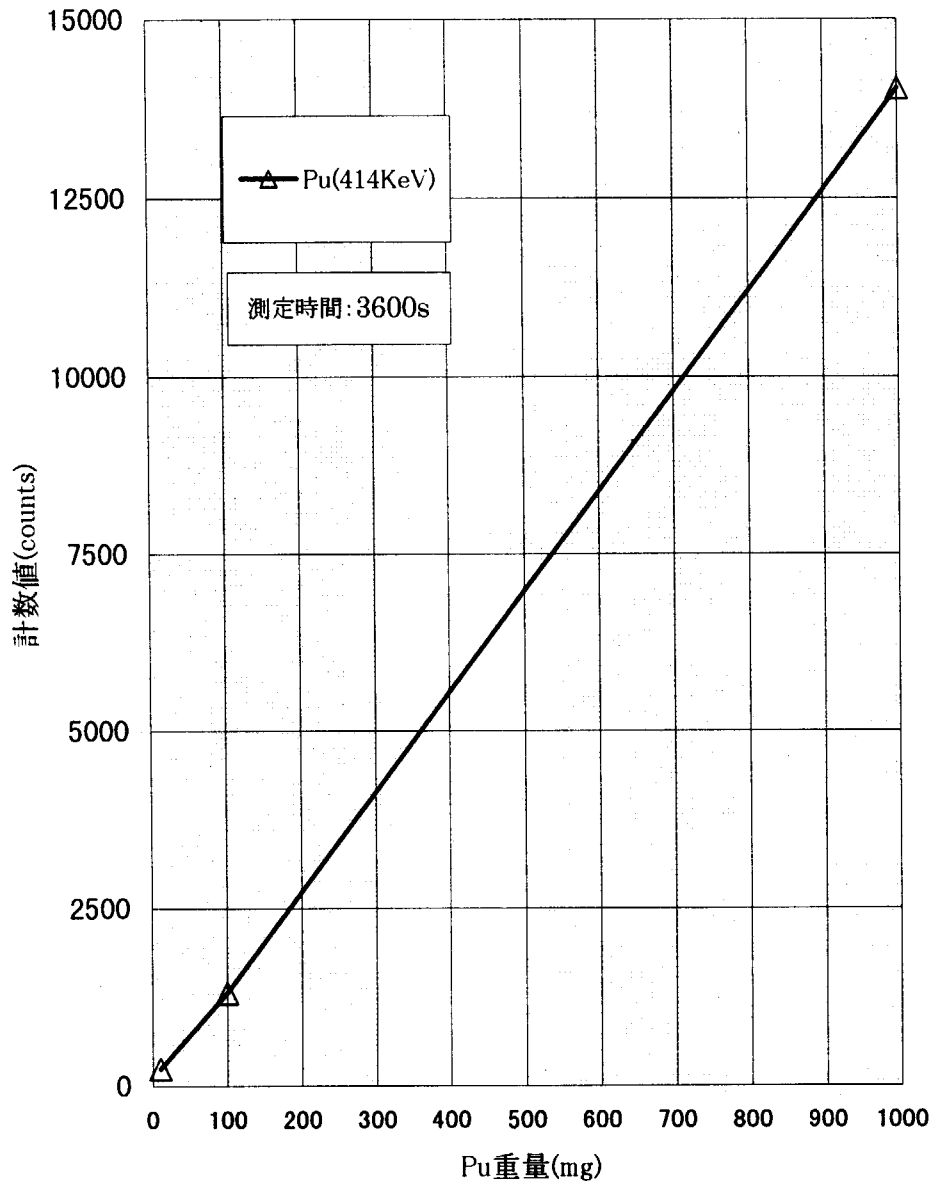


図6 Pu検量線

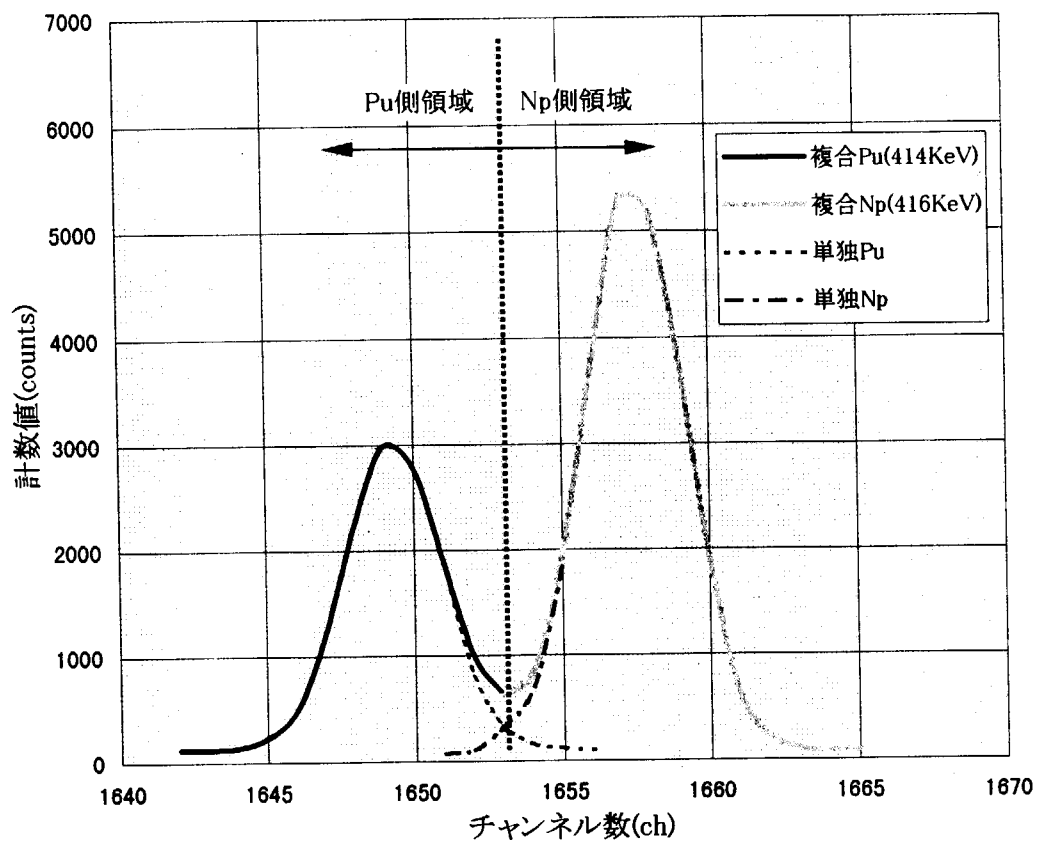


図7 Pu、Np混合試料のガンマ線スペクトル

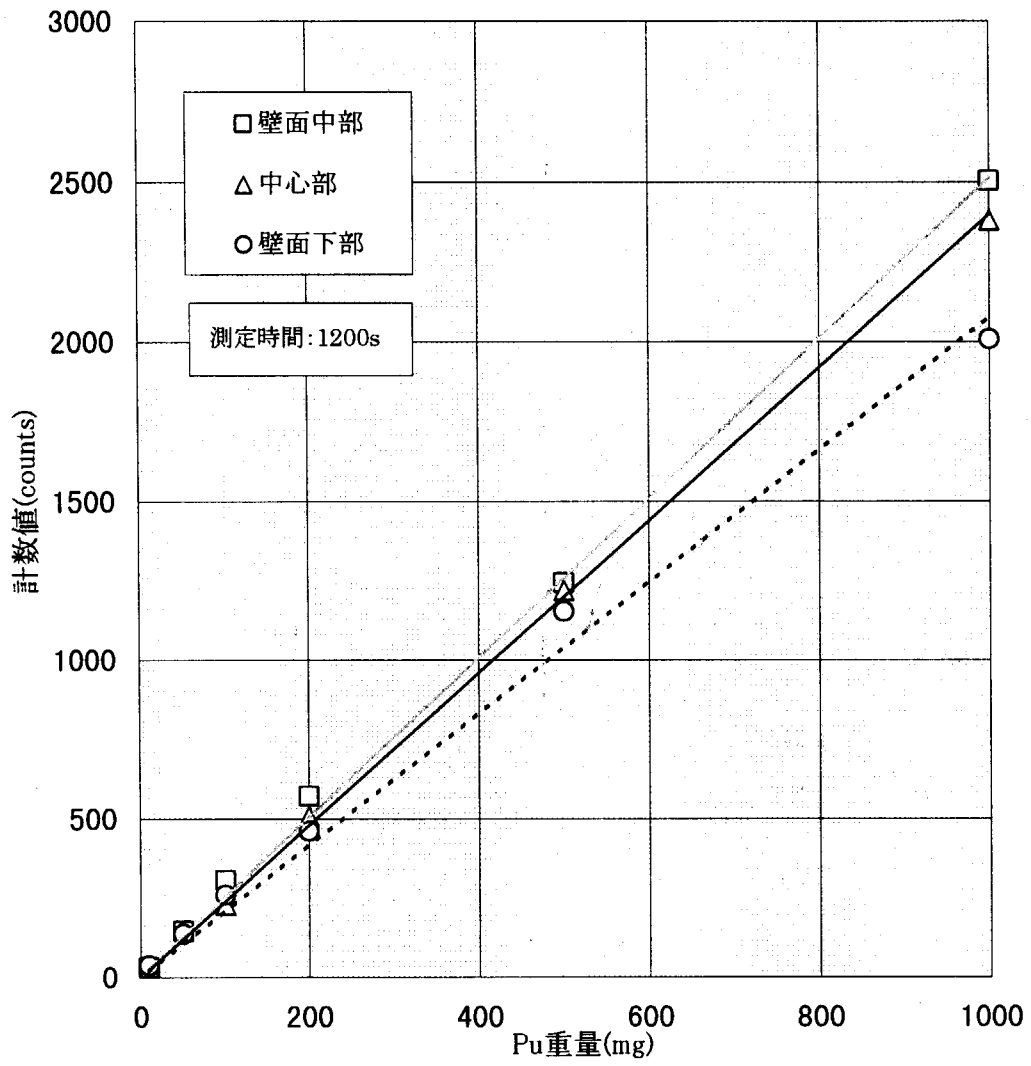


図8 各試料位置におけるPu検量線

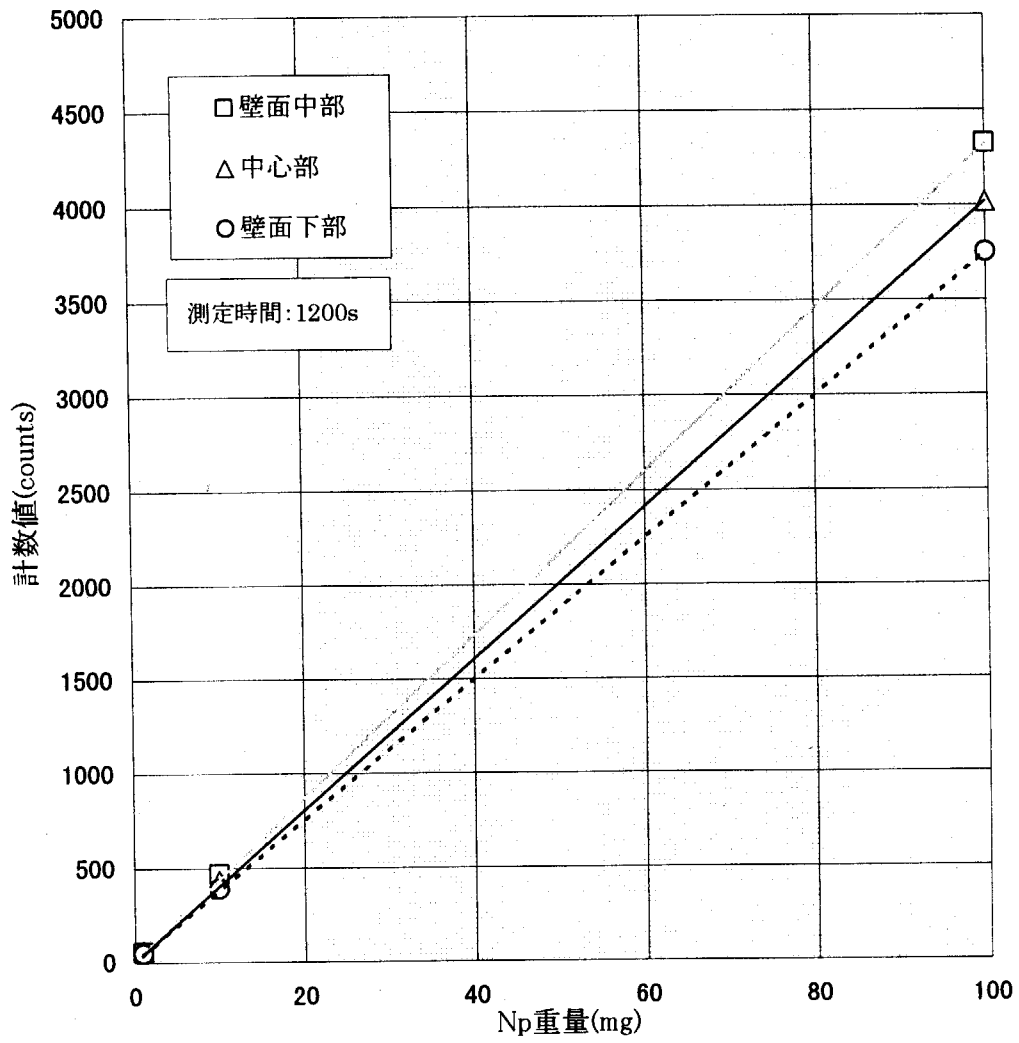


図9 各試料位置におけるNp検量線

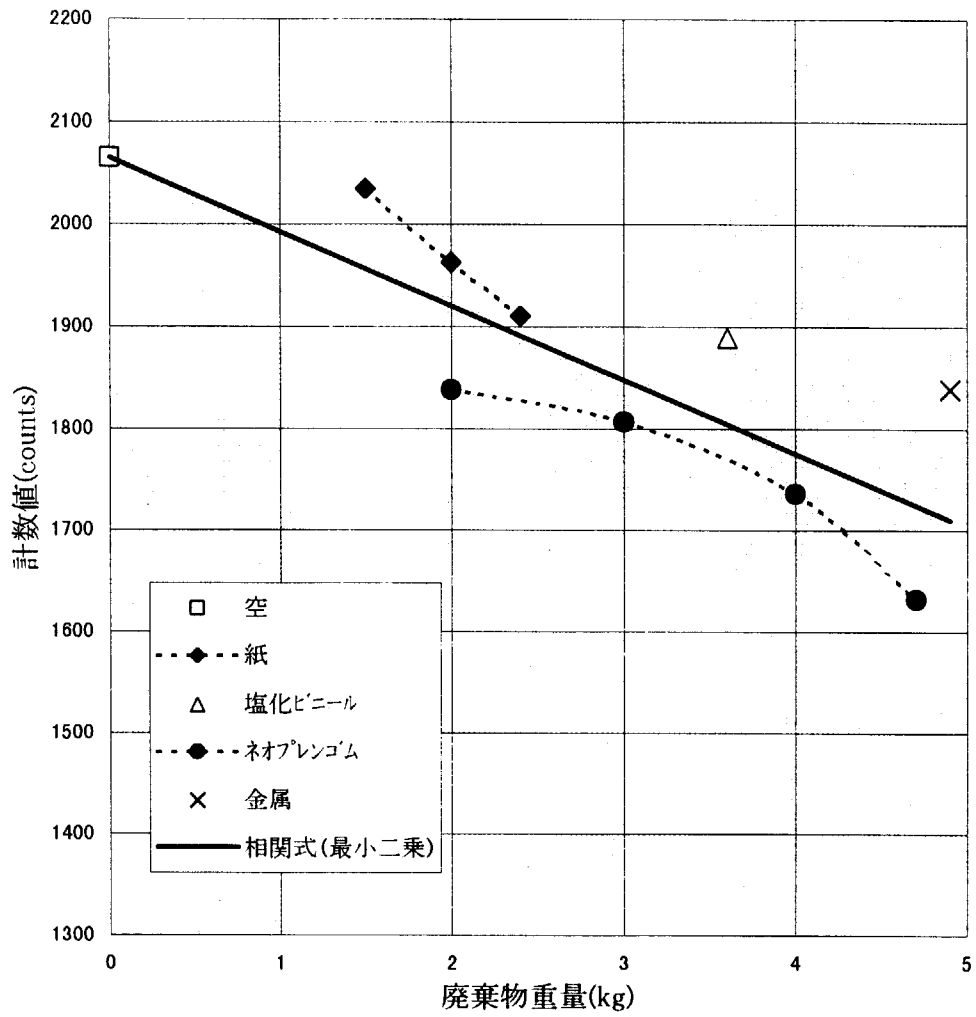


図10 模擬廃棄物の種類及び重量の変化による遮へい効果

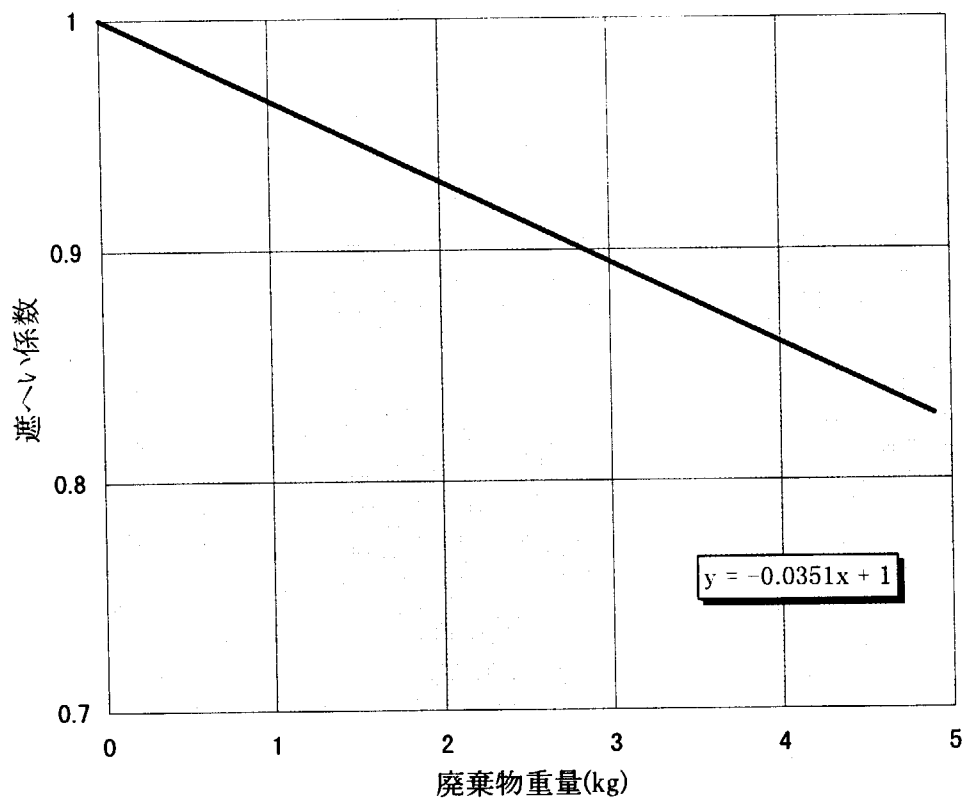


図11 最小二乗法による遮へい係数

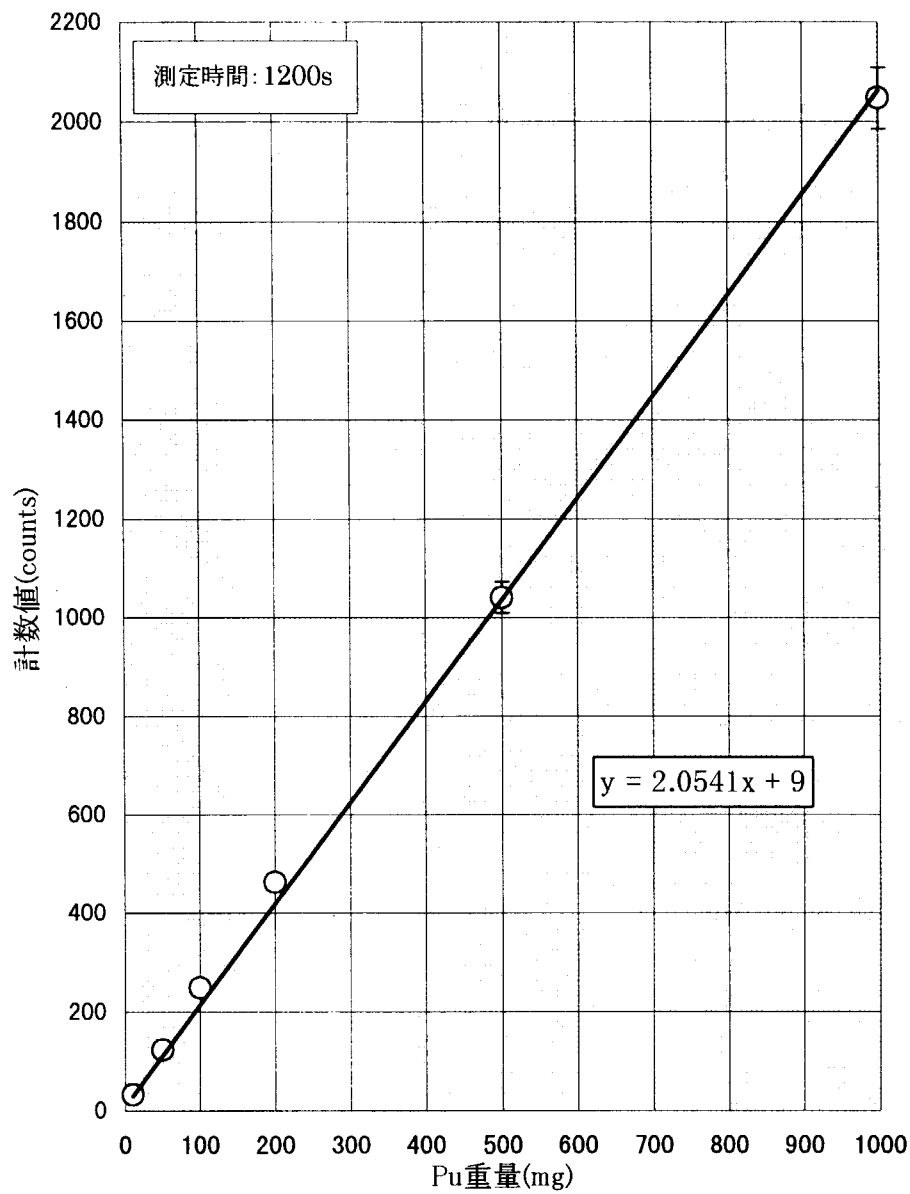


図12 Pu(414KeV)計量用の検量線

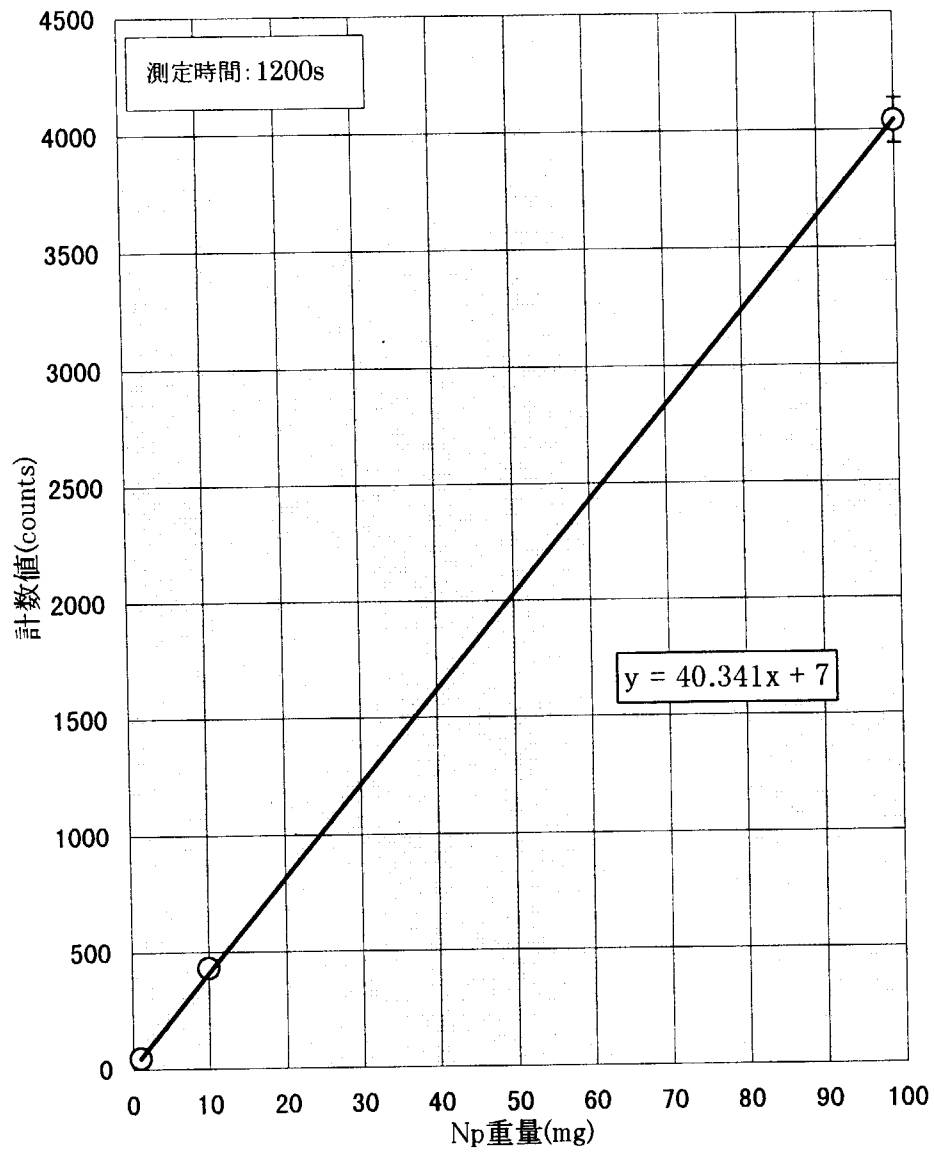


図13 Np(416KeV)計量用の検量線

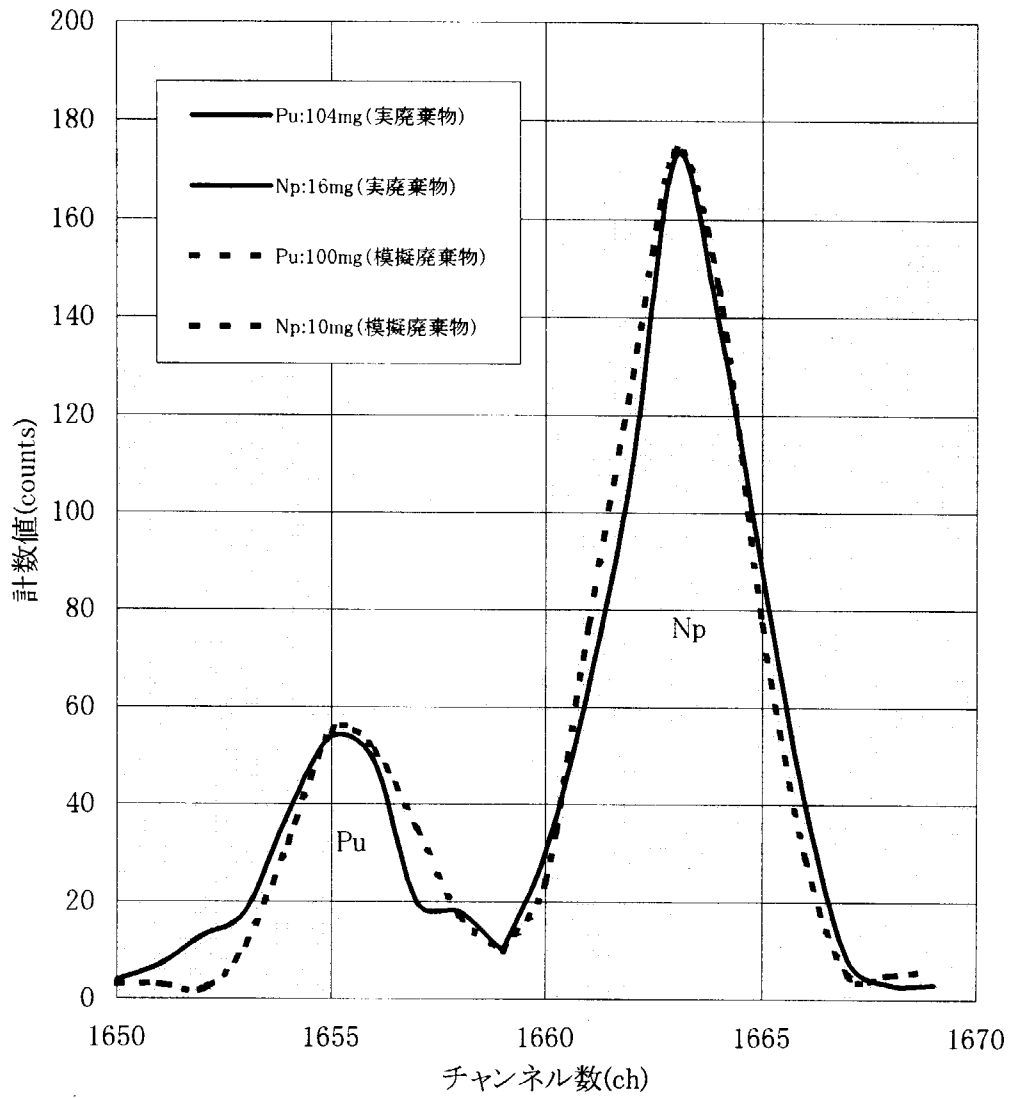


図14 実廃棄物のガンマ線スペクトル

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	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ 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

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	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	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	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4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

(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, 1 eV および 1 u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は省略した。
- 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

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
力	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) = 4.184 J (熱化学) = 4.1855 J (15 °C) = 4.1868 J (国際蒸気表)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵	
	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) = 75 kgf·m/s = 735.499 W
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	
	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
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	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

ネフツニウム混在アルファ廃棄物中の非破壊計量技術の開発

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。