



# RI中性子線源における中性子放出角度分布の 非等方性の評価

Calculation of Anisotropy Factors for Radionuclide Neutron Sources

辻村 憲雄 吉田 忠義

Norio TSUJIMURA and Tadayoshi YOSHIDA

東海研究開発センター  
核燃料サイクル工学研究所  
放射線管理部

Radiation Protection Department  
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories  
Tokai Research and Development Center

March 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

## RI 中性子線源における中性子放出角度分布の非等方性の評価

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター  
核燃料サイクル工学研究所 放射線管理部

辻村 憲雄, 吉田 忠義

(2008年 1月 29日受理)

中性子線量当量(率)測定器の校正に使用する RI 中性子線源について, 線源物質を封入するカプセル及び周囲構造物による中性子の放出角度分布への影響を計算によって評価した。本評価では, 代表的な校正用中性子線源である  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  及び  $^{252}\text{Cf}$  を対象とし, 理論計算に基づく線源中性子スペクトルと, 線源カプセル構造等を精密にモデル化したモンテカルロ中性子輸送計算の組み合わせにより, 線源カプセルから漏洩する中性子のスペクトルと放出角度分布を計算した。その結果, 線源カプセル軸に垂直な方向における非等方性係数は, 標準的な X1 型  $^{252}\text{Cf}$  線源で 1.012,  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  線源のうち X3 型で 1.030, 同 X4 型で 1.039, 同 X14 型で 1.045 となり, 文献から得られた実測値にいずれもよく一致する値が得られた。さらに, 線源カプセルの周囲に支持構造物がある場合の影響についても検討し, 中性子線量当量(率)測定器の校正業務において使用する非等方性補正係数を決定した。

## Calculation of Anisotropy Factors for Radionuclide Neutron Sources

Norio TSUJIMURA and Tadayoshi YOSHIDA

Radiation Protection Department  
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories  
Tokai Research and Development Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 29, 2008)

The authors developed a model for calculating the angular neutron fluence distributions for radionuclide neutron sources which are encapsulated in stainless steel capsules or surrounded by support structures as a source holder and a source transfer system. These structures may cause an anisotropic neutron fluence distribution. This should be taken into account in the calibration procedure of neutron-measuring instruments.

The calculations were made for two types of widely used neutron sources,  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  and  $^{252}\text{Cf}$ , by combining an in-house code simulating the  $^9\text{Be}(\alpha, n)$  reactions and the Monte Carlo code MCNP-4C. As a result, anisotropy factors in the direction perpendicular to the source capsule axis for bare neutron sources were evaluated to be 1.012 for  $^{252}\text{Cf}$  in a standard Amersham X1 capsule, 1.030, 1.039 and 1.045 for  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  in a standard Amersham X3, X4 and X14 capsules, respectively. These values are in reasonable agreement with the published data. When the support structures are included in the MCNP simulation, the anisotropy factors for these neutron sources increase by about 10%.

Keywords: Anisotropy Factor, Neutron Source, Calibration, Encapsulation, Support Structures, Monte Carlo Calculation

目 次

1. 序論	1
2. 中性子線源及び照射設備の構造	3
2.1 RI 中性子線源	3
2.1.1 $^{252}\text{Cf}$ 中性子線源	3
2.1.2 $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ 中性子線源	3
2.2 線源ホルダ及び照射設備	3
3. 計算方法	5
3.1 線源中性子スペクトルの計算	5
3.1.1 $^{252}\text{Cf}$ 自発核分裂中性子スペクトル	5
3.1.2 $^9\text{Be}(\alpha, n)$ 反応による中性子スペクトル	6
3.2 線源カプセル外における中性子スペクトルと放出角度分布の計算	7
3.2.1 計算モデル	7
3.2.2 裸の線源体系での計算	8
3.2.3 支持構造物を含む体系での計算	8
4. 実験方法	9
4.1 ホルダ及び案内管の構造の影響	9
4.2 案内管の窓構造の影響	9
5. 結果と考察	11
5.1 $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ 線源中性子スペクトル	11
5.2 裸の線源における中性子放出角度分布	12
5.3 支持構造物を含む体系における中性子放出角度分布	13
5.4 非等方性補正係数	14
5.5 中性子フルエンスー線量当量換算係数	15
5.6 不確かさの検討	16
6. 結論	18
謝辞	19
参考文献	20
付録	42

Contents

1. Introduction	1
2. Neutron Sources and Irradiation Apparatus	3
2.1 Radionuclide Neutron Sources	3
2.1.1 $^{252}\text{Cf}$ Neutron Source	3
2.1.2 $^{241}\text{Am}$ -Be Neutron Sources	3
2.2 Source Holder and Transfer Tube	3
3. Methods of Calculation	5
3.1 Calculation of Source Neutron Spectrum	5
3.1.1 Neutron Spectrum from $^{252}\text{Cf}$ Spontaneous Fission	5
3.1.2 Neutron Spectrum Produced from $^9\text{Be}(\alpha,n)$ Reactions	6
3.2 Calculations of Neutron Spectra and Anisotropic Fluence Distributions of Neutrons Outside Source Capsules	7
3.2.1 Calculation Geometries	7
3.2.2 Calculations for Bare Neutron Sources	8
3.2.3 Calculations for Neutron Sources plus Support Structures	8
4. Methods of Experiment	9
4.1 Influences by Source Holder and Transfer Tube	9
4.2 Influences by 'Windows' of the Transfer Tube	9
5. Results and Discussion	11
5.1 Calculated $^{241}\text{Am}$ -Be Neutron Spectrum	11
5.2 Anisotropic Fluence Distributions of Neutrons for Bare Neutron Sources	12
5.3 Anisotropic Fluence Distributions of Neutrons for Neutron Sources plus Support Structures	13
5.4 Anisotropy Factors	14
5.5 Neutron Fluence to Dose Equivalent Conversion Coefficients	15
5.6 Uncertainties	16
6. Summary	18
Acknowledgments	19
References	20
Appendix	42

## List of Tables

- Table 1 Specifications of  $^{252}\text{Cf}$  and  $^{241}\text{Am-Be}$  neutron sources.
- Table 2 Elemental Constituents used for MCNP calculations.
- Table 3 Comparison of calculated and measured anisotropy correction factors for  $^{252}\text{Cf}$  and  $^{241}\text{Am-Be}$  sources.
- Table 4 Comparison of spectrum-averaged fluence-to-ambient dose equivalent conversion coefficients between the calculated and ISO-recommended values.

## List of Figures

- Fig.1 Schematic diagram of a doubly-encapsulated X1 capsule, showing the inner and outer capsule. (from manufacture's source catalog)
- Fig.2 Schematic diagram of doubly-encapsulated X3, X4 and X14 capsules, showing the inner and outer capsule. (from manufacture's source catalog)
- Fig. 3 Source holder, which contains either X1 or X4 capsule. The holder dimensions are 65 mm long by 29 mm diameter.
- Fig. 4 Front view of the structures surrounding the neutron sources in the pneumatic source transfer system. The upper side of the figure corresponds to the polar angle of  $\theta=0^\circ$ .
- Fig. 5 The  $^{252}\text{Cf}$  neutron source spectra. Shown are the NBS-evaluated spectrum from the work of Grundl and ISO-recommended spectrum.
- Fig. 6 Cutaway views for MCNP calculation geometries.
- Fig. 7 Coordinate system for computation of angular fluence distribution.
- Fig. 8  $\alpha$  particle spectrum at a surface of  $^{241}\text{AmO}_2$  spherical cluster. Each energy bin has a same energy interval.
- Fig. 9 Calculated neutron yield of a 37 GBq  $^{241}\text{Am-Be}$  neutron source as a function of an  $\text{AmO}_2$  cluster diameter.
- Fig. 10 Spectral neutron fluence produced from  $^9\text{Be}(\alpha,n)$  reactions for the calculation model composed of an  $\text{AmO}_2$  spherical cluster + a thick Be target. An  $\text{AmO}_2$  cluster has a diameter ranging from zero to 5  $\mu\text{m}$ .
- Fig. 11 Spectral neutron fluence produced from  $^9\text{Be}(\alpha,n)$  reactions for the calculation model composed of an  $\text{AmO}_2$  spherical cluster (3  $\mu\text{m}\phi$ ) + a thick Be target. The separation of the individual neutron groups is also illustrated together with the values of each fractional yield in brackets.
- Fig. 12 Comparison of the calculated neutron spectrum for an  $^{241}\text{Am-Be}$  source and the ISO-recommended one. Calculation was done for the X3 type neutron source with the assumption of  $\text{AmO}_2$  of 3  $\mu\text{m}$  in diameter.

- Fig. 13 Calculated anisotropy factors in polar angle,  $F_S(\theta)$ , for bare X1 capsule  $^{252}\text{Cf}$  source. Triangles are measured data by NPL in  $10^\circ$  steps for the sources of the same construction. The  $\theta=0^\circ$  corresponds to the welded end of the source, and is schematically shown in the figure. In the MCNP calculations, neutrons are generated from the hatched regions depicted in the inserts.
- Fig. 14 Calculated anisotropy factors in polar angle,  $F_S(\theta)$ , for bare  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  sources of (a) an X3 capsule, (b) an X4 capsule and (c) an X14 capsule. Triangles are measured data by NPL in  $10^\circ$  steps for the sources of the same construction. The  $\theta=0^\circ$  corresponds to the welded end of the source, and is schematically shown in the figure.
- Fig. 15 Variation of anisotropy factors in azimuth angle,  $F_S(\theta=0^\circ, \alpha)$ , for  $^{252}\text{Cf}$  and  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  sources with an irradiation apparatus.
- Fig. 16 Calculated anisotropy factors in polar angle,  $F_S(\theta)$ , for (a) an X1 capsule  $^{252}\text{Cf}$  source + support structure, and (b) an X4 capsule  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  sources + support structure. Also, shown are calculated anisotropy factors for bare sources of the same construction.

## 1. 序 論

RI 中性子線源を用いた速中性子校正場では、線源の中性子放出率によって国家計量標準研究所とのトレーサビリティが確立され、中性子放出率から算出した中性子フルエンス率にスペクトル平均換算係数を乗じることで、校正の基準となる中性子線量当量率を決定する。この中性子フルエンス率を算出する過程において、線源から放出される中性子の非等方性を考慮する必要がある<sup>1,2)</sup>。非等方性とは、線源の構造（線源カプセルの形状・材質、内容物である線源物質の組成等）に起因して中性子放出角度分布が等方分布からずれることであり、立体角  $4\pi$  に放出される中性子の強度（すなわち中性子放出率）を  $B$ 、立体角  $\Omega$  に放出される中性子の強度を  $B_\Omega$  とするとき、

$$F_s = B_\Omega \cdot \left( \frac{B}{4\pi} \right)^{-1} \quad (1)$$

で定義される<sup>1)</sup>。円筒形状の線源の場合、 $F_s$  は、円筒軸に垂直な方位角には依存せず、天頂角  $\theta$  の関数として特徴づけられる。中性子線量当量（率）測定器の校正は、通常、円筒軸に対して垂直な方向（ $\theta=90^\circ$ ）で行われ、この方向における  $F_s$  が、非等方性補正係数として基準中性子フルエンス（率）の算出に使用される。 $F_s(\theta=90^\circ)$  の値は線源の種類や構造によって様々であるが、<sup>252</sup>Cf や <sup>241</sup>Am-Be 等の裸（ここでは「線源カプセルだけの状態」を指す）の線源を、天頂方向に  $360^\circ$  回転させた場合の測定に基づいた値として、1.01～1.04 という値が報告されている<sup>3,4,5)</sup>。ISO8529-1<sup>1)</sup> では、個々の中性子線源について、このような非等方性を測定により決定することを求めている。

これに対して、一般の中性子校正施設においては、中性子線源を裸の状態ですることはまれであり、線源をハンドリング用の別の容器（ホルダ）に入れたり、線源固定用の何らかの支持構造とともに使用したりする場合はほとんどである。しかしながら、線源の周囲の構造物が、線源から放出される中性子の角度分布等に与える影響については、これまでほとんど検討されていない。この理由として、中性子は物質と相互作用しにくいので影響は比較的小さいと見なされていたことや、測定による有効な確認手段がなかったこと（例えば、上述したような、線源が周辺構造物とともに回転するような体系での測定による非等方性の評価は困難）があげられる。RI 中性子線源を用いた校正は、中性子線量当量（率）測定器の基本的な感度を決めたり、品質を定期的にチェックしたりする場合に必要であるため、線源周囲の構造物によって生じる非等方性を精度よく評価し、校正において適切にその影響を補正することが必須となる。

本研究では、代表的な RI 中性子線源について、線源カプセル及び周囲の構造物を精密にモデル化したモンテカルロ計算によって放出中性子の非等方性を評価する方法について検討する。さらに公開文献値及び実験値との比較によって、計算によって求めた値の妥当性を確認する。同様の主旨の計算を Hertel ら<sup>6)</sup>が米国 Savanna River Site 製の <sup>252</sup>Cf (SR-Cf-100 型) について実施しているが、後述する、より一般的な型式の線源についての報告は国際的にもほとんどない。また、<sup>241</sup>Am-Be 線源についての報告はまったくない。

第 2 章で計算の対象とした RI 中性子線源の構造と、核燃料サイクル工学研究所（以下、「核サ研」と記す）におけるその使用条件（周辺構造）を述べ、第 3 章で非等方性の計算方法につ

いて説明する。ここでは、線源カプセルのみの場合と、周辺構造物がある場合での非等方性をそれぞれ計算する。また、線源中性子スペクトルに関する情報のない  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  について、核データを用いて線源中性子スペクトルを独自に算出する。第 4 章は実験方法、第 5 章は計算と実験の結果とそれらの比較について述べる。第 6 章は結論である。

## 2. 中性子線源及び照射設備の構造

### 2.1 RI 中性子線源

#### 2.1.1 $^{252}\text{Cf}$ 中性子線源

AEA Technology QSA (旧 Amersham International plc) 製の X1 型  $^{252}\text{Cf}$  中性子線源を評価の対象とした。本中性子線源は、国内外で最も広く使用されている型式のものであり、核サ研の中性子校正場においても使用している。ステンレス鋼の二重カプセルからなる特別形密封線源であり、内部に  $\text{Cf}_2\text{O}_3$  とパラジウムからなるセラミックワイヤーが収められている。公称放射能  $0.2 \text{ MBq} \sim 4 \text{ GBq}$  (公称中性子放出率  $2.3 \times 10^4 \sim 4.6 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ ) のものが市販されている。Fig. 1 に線源の外観・構造、Table 1 に寸法等を示す。

なお、核サ研で使用する線源の公称放射能は  $0.999 \text{ GBq}$ 、中性子放出率は National Physical Laboratory (NPL) においてマンガバス法によって定量されており、2001 年 6 月 22 日 (校正日) の中性子放出率は  $1.231 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ 、標準不確かさは  $0.7\%$  である。なお、本報告では、包含係数  $k$  を指定していない場合の不確かさは、 $k=1$  の標準不確かさとして記す。

#### 2.1.2 $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ 中性子線源

3 種類の  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  中性子線源、AEA Technology QSA (旧 Amersham International plc) 製の X3, X4 及び X14 型、を評価の対象とした。これらの線源は国内外で校正用中性子線源として広く使用されており、このうち X4 型は核サ研の中性子校正場で使用されている。Fig. 2 に線源の外観・構造、Table 1 に寸法、線源物質の組成<sup>7)</sup>等を示す。いずれの線源もステンレス鋼の二重カプセルからなる特別形密封線源であり、内部に粉末状の  $\text{AmO}_2$  と Be を混合・加圧成型したペレットが、X3 型については 1 個、内容積がその 2 倍である X4 型については 2 個封入されている。一方、X14 型の内容積は X3 型の 5 倍であり、計 3 個 (X3 型などとは大きさが異なる) のペレットが封入されている。公称中性子放出率は  $37 \text{ GBq}$  あたり  $2.2 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$  である。

なお、核サ研で使用する X4 型線源の中性子放出率は NPL においてマンガバス法によって定量されており、2004 年 2 月 2 日 (校正日) の中性子放出率は  $6.316 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 、標準不確かさは  $0.6\%$  である。

### 2.2 線源ホルダ及び照射設備

核サ研で使用している  $^{252}\text{Cf}$  (X1 型) 及び  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  (X4 型) の両中性子線源は、遠隔操作式の照射装置にセットして使用している。

中性子線源は、照射室の地下 4 m に設置された格納容器に通常格納されているが、使用時には線源を、空気圧により線源案内管内を通過して床上 1.26 m まで射出し、案内管の上端に取り付けた電磁石で保持する方式を採用している。このため、中性子線源を Fig. 3 に示すステンレス鋼製の円筒形ホルダ (外径 29 mm, 長さ 65 mm) に封入している。ホルダは、電磁石に接

する蓋部分が SUS430 製，それ以外が SUS304 製であり，それぞれの厚さは， $^{252}\text{Cf}$  線源用のものが，上部 7.0 mm，下部 3.0 mm 及び側面部 1.25 mm， $^{241}\text{Am-Be}$  線源用のものが，上部 7.0 mm，下部 2.2 mm 及び側面部 1.25 mm である。また， $^{252}\text{Cf}$  線源については，ホルダの内部には，線源カプセルの支持と位置調整を目的とした Al 合金製のスペーサ等が収められている。線源を保持する案内管上端部の外観写真を Fig. 4 に示す。図は，被校正器の側から見た写真である。構造材は全て Al 合金 (A5052) であり，案内管は外径 40 mm，肉厚 5 mm，上端の 3 段のフランジは直径 98 mm，厚さ 8~10 mm である。カネテック製 KE-3RA 型自動積放形電磁石が中段のフランジに固定されており，この部分が射出された線源を保持する際のショックアブソーバの役割も果たしている。また，案内管内の空気をパージするための「開放窓」が 4 方向に設けられているほか，線源位置確認用の光センサーが 2 箇所に取り付けられている。

### 3. 計算方法

線源カプセル，ホルダ・案内管等の周辺構造物を精密にモデル化したモンテカルロ計算によって，外部に漏れ出る中性子の角度分布を計算するわけであるが，このとき線源中性子スペクトルが重要となる。

線源カプセルの内部がほぼ空洞に近い  $^{252}\text{Cf}$  線源については， $^{252}\text{Cf}$  の自発核分裂中性子を線源カプセルの壁材の内部（ボイド）から発生させるという比較的単純な計算モデルが適用できると考えられ，線源中性子スペクトルについても標準化された数値データが公開されている。

これに対して，線源カプセル内部に粉末状の  $\text{AmO}_2$  と  $\text{Be}$  の混合物が充填されている  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  線源については，今回の計算の目的に沿う適当な線源中性子スペクトルがない。例えば，ISO8529-1<sup>1)</sup>で推奨されている中性子スペクトルは，ある特定の線源についてその外部で測定されたスペクトルであり，カプセル内部で発生した中性子とカプセル内容物である  $\text{Be}$  やカプセル材との反応による影響が既に含まれている。このため，本研究では， $^9\text{Be}(\alpha, n)$  反応によって発生する中性子スペクトルを核データに基づいて算出し，それを  $\text{AmO}_2$  と  $\text{Be}$  の混合物中で発生させるという計算手順で，カプセル外部における中性子の角度分布等を求めることとした。

#### 3.1 線源中性子スペクトルの計算

##### 3.1.1 $^{252}\text{Cf}$ 自発核分裂中性子スペクトル

$^{252}\text{Cf}$  中性子線源については，ISO8529-1<sup>1)</sup>に数値表（ヒストグラム）として示されているものが，線源中性子スペクトルとして一般に利用されている。しかし，本研究での計算は，線源周囲の構造物との散乱による影響の評価が目的であるため，ISOのものはビン構造が粗いと考えられたこと，また中性子スペクトロメータ等の応答関数の計算等で従来から使用してきた DLC37/EPR 型<sup>8)</sup>の 100 群のエネルギー群構造を継続使用したいという理由により，以下に示す National Bureau of Standards (NBS)による， $T=1.42$  MeV のマクスウェル分布に修正関数  $\mu(E)$  を適用した連続スペクトル式<sup>9)</sup>を，線源中性子スペクトルとして用いることにした。このスペクトルは実験値を良く再現することが知られている。

$$\phi(E) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{E^{1/2}}{T^{3/2}} \exp\left(-\frac{E}{T}\right) \cdot \mu(E) = 0.6672\sqrt{E} \exp\left(-\frac{E}{1.42}\right) \cdot \mu(E) \quad (2)$$

$E$ (MeV)	$\mu(E)$
0.00 – 0.25	$1 + 1.20E - 0.237$
0.25 – 0.80	$1 - 0.14E + 0.098$
0.80 – 1.50	$1 + 0.024E - 0.0332$
1.50 – 6.00	$1 - 6.2 \times 10^{-4}E + 0.0037$
6.00 – 20.0	$1.0 \exp[-0.03(E - 6.0)]$

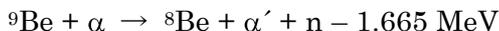
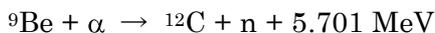
(2)式から計算した連続スペクトルと、ISO8529-1の多群化されたスペクトルを比較したものを Fig. 5 に示す。図では、全フルエンスを1に規格化している。中性子スペクトルの形状に有意な相違はなく、また、(2)式に基づいた中性子スペクトルについて計算したフルエンス平均エネルギー、スペクトル平均周辺線量当量換算係数及びスペクトル平均個人線量当量換算係数は、それぞれ 2.13 MeV, 385 pSv cm<sup>2</sup>, 400 pSv cm<sup>2</sup> となり、ISOと同じ数値<sup>10)</sup>を与えることを確認した。よって、後述する計算では、(2)式から計算した中性子スペクトルを、線源中性子スペクトルとして用いることとした。

### 3.1.2 <sup>9</sup>Be(α,n)反応による中性子スペクトル

上述した理由により、<sup>9</sup>Be(α,n)反応によって発生する中性子スペクトルは計算によって求めた。計算にあたって、α放出体の大きさが中性子スペクトルに与える影響<sup>11,12)</sup>を考慮するため、AmO<sub>2</sub>の塊(クラスタ)が厚いBeに囲まれているモデルを仮定した。Table 1から分かるようにBe原子数がAmO<sub>2</sub>に比べて圧倒的に多いのでAmO<sub>2</sub>がBeに囲まれている本モデルは合理的である。計算では、クラスタ表面におけるα粒子のエネルギーを求め、次にそのα粒子とBeとの(α,n)反応によって発生する中性子スペクトルをBe(α,n)反応断面積を用いて算出した。なお、Be(α,n)反応断面積を用いて<sup>241</sup>Am-Be線源の中性子スペクトルを計算する試みについては、Van der Zwan<sup>11)</sup>, Geiger<sup>13)</sup>らが既に実施している。ただし、α放射体のモデル化が異なる(あるいは考慮されていない)、カプセル内での弾性散乱等の二次反応が無視されているなど、本研究に比べて<sup>241</sup>Am-Be線源のモデル化が十分なものではない。

AmO<sub>2</sub>クラスタは、密度 11.7 g cm<sup>-3</sup>の球とし、0~5 μmの直径(以下、「粒径」と記す)を想定した。球の内部で、放出割合に対応したエネルギーを持つα粒子(例えば、84.5%が5.486 MeV)を一様に発生させ、α粒子の飛程と発生位置からクラスタ表面までの行程からエネルギーロスを求め、表面におけるα粒子のスペクトルを算出した。計算にあたって、AmO<sub>2</sub>中におけるα粒子の飛程をSPARコード<sup>14)</sup>であらかじめ算出した。最大エネルギー5.486 MeVの場合の飛程は約12 μm(約14 mg cm<sup>-2</sup>)である。

次に、α粒子とBeの相互作用についてであるが、中性子は次の反応によって生成される。



このうち前者の反応については、残留核である<sup>12</sup>Cが基底状態に落ちる場合と励起状態に残る場合があり、<sup>241</sup>Amにおけるα粒子の最大エネルギーの場合は、第1励起状態(励起エネルギー4.439 MeV)と第2励起状態(同7.659 MeV)を経由する反応が生じる。α放出体が厚いBeに囲まれる計算モデル(thick target)では、α粒子がBe中で減速してエネルギーがゼロになるまでの全てのエネルギーに対して上記反応によって発生する中性子を取り扱う。ここでは、<sup>9</sup>Be(α,n)反応断面積にJENDL(α,n)反応データファイル2005(JENDL/AN-2005)<sup>15,16)</sup>、Be中におけるα粒子の阻止能にZieglerのデータ<sup>17)</sup>を使用し、中性子の収率とスペクトルを次のように計算した。

- (i) Beの原子数密度をN、<sup>9</sup>Be(α,n)断面積をσ、Be中におけるα粒子の阻止能を $-dE/dx$ とするとき、エネルギー $E_1$ を持つα粒子がBe中でエネルギーを失い、エネルギー $E_2$ になるま

での $(\alpha, n)$ 反応の確率  $P$ は,

$$P(E_1 \rightarrow E_2) = \int_{E_2}^{E_1} \frac{N\sigma(E)}{-dE/dx} dE \quad (3)$$

で表される。ここで、 $E_1$ : AmO<sub>2</sub> クラスタ表面における  $\alpha$  粒子のエネルギー、 $E_2$ : ゼロ (吸熱反応の場合はしきいエネルギー) としたものが、 $\alpha$  粒子 1 個当たりの厚いターゲットにおける収率である。なお、実際の計算では、 $\alpha$  粒子の飛程を、Be 中での  $\alpha$  粒子のエネルギー損失が一律に 0.01 MeV になるように微小な距離  $x$  を持つ区間に分割し、 $N\sigma x$  の計算から確率  $P$  を求めた。

- (ii) 中性子スペクトルは、 ${}^9\text{Be}(\alpha, n)$  反応の微分断面積に関する情報と kinematics に基づいて計算した。JENDL/AN-2005 では、全断面積に対する微分断面積の比である確率密度関数を、 ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$  反応については重心系での中性子放出角度分布を表すルジャンドル多項式の展開係数として、 ${}^9\text{Be}(\alpha, \alpha' n){}^8\text{Be}$  反応については重心系における中性子のエネルギーと放出角度の関係 (Kalbach's systematics<sup>18)</sup>) として与えている。すなわち、実験室系での入射  $\alpha$  粒子のエネルギーを  $E_a$ 、重心系における中性子のエネルギーと放出角度余弦をそれぞれ  $E_b$ 、 $\mu$  とするとき、前者の反応については関数  $f(\mu, E_a)$ 、後者の反応については関数  $f(\mu, E_a, E_b)$  として中性子の分布確率を与えているので、それらの分布を、 $\mu$  から (又は  $\mu$  と  $E_b$  から) 決まる実験室系でのエネルギー  $E_n$  に変換するだけで、実験室系での中性子スペクトルを得ることができる。ここでは、(i) で分割した各区間の中央点における  $\alpha$  粒子のエネルギーに対して、Be( $\alpha, n$ ) 反応の種類又は励起準位別に計算した中性子スペクトルを、その区間における反応確率  $P$  をウェイトに、全区間にわたって総和することによって、厚い Be ターゲットにおいて生成される中性子スペクトルを求めた。なお、ここでの計算は、前節で算出したクラスタ表面における連続スペクトルを持つ  $\alpha$  粒子に対して行った。

### 3.2 線源カプセル外における中性子スペクトルと放出角度分布の計算

#### 3.2.1 計算モデル

前節で述べた線源中性子スペクトルを持つ中性子を、線源カプセルの内部で等方に発生させ、線源カプセル及び線源周囲の構造物との反応を経て外部に漏れ出した中性子の角度分布及び中性子スペクトルを、Los Alamos National Laboratory で開発されたモンテカルロ計算コード MCNP-4C2<sup>19)</sup> を用いて計算した。この計算コードは連続エネルギー形式の断面積データと内蔵する様々な機能により高精度な粒子輸送計算が可能である。評価済断面積ライブラリには ENDF/B-VI<sup>20)</sup> を使用した。

計算にあたって、線源カプセルについては線源製造メーカから入手した設計図面、線源ホルダ、電磁石及び案内管等については、製作図面および予備品の寸法計測をもとに忠実にモデル化した。Fig. 6 に X1 型  ${}^{252}\text{Cf}$  線源、X4 型  ${}^{241}\text{Am}\text{-Be}$  線源及び案内管等の計算モデル例を示す。これらの材料であるステンレス鋼 (SUS304, SUS316L, SUS430), Al 合金 (A5052), バネ鋼 (SUP10) の比重, 組成等については、インターネット等で検索された材料メーカによる公称値を用いた。電磁石については、予備品を切断して内部構造を調べるとともに、製造メーカ

から入手した材料情報を参考にした。電磁石は、銅コイル、炭素鋼 (S15C 及び S45C) からなり、一部にエポキシ樹脂が使用されている。構造材の組成情報を Table 2 に示す。 $^{252}\text{Cf}$  線源の内部については、 $\text{Cf}_2\text{O}_3$  とパラジウムからなる線源ワイヤーの詳細形状、位置 (分布) 等が不明であるため、線源カプセルの内部はボイドとした。中性子は、ボイド内一様分布などその発生位置分布を仮定した領域から一様な方向に発生させた。仮定した位置分布については後述する。一方、 $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  については、 $\text{AmO}_2$  と Be の一様な混合物からなる線源物質がカプセル内に隙間なく均一に充填されているとし、中性子はその充填領域から一様に発生させた。カプセル内の線源物質の質量、組成は Table 1 に示した通りである。

計算で使用了座標系を Fig. 7 に示す。中性子測定器を校正する場合、測定器は、 $\theta=90^\circ$ 、 $\alpha=0^\circ$  の方向に設置される。

### 3.2.2 裸の線源体系での計算

裸の線源についての計算では、線源カプセルの実効中心を原点とする半径 100 cm の球を設定し、その球面を横切る中性子数  $N_{\text{BARE}}$  をカレントタリー (F1 tally) で、その面における中性子フルエンス  $\Phi_{\text{SP,BARE}}$  を球面タリー (F2 tally) で算出した。また、線源の円筒軸に対して  $90^\circ$  方向における中性子フルエンス  $\Phi_{\text{R,BARE}}(\theta=90^\circ)$  を半径 100 cm のリングタリー (F5z tally) で算出した。裸の線源における非等方性補正係数は、

$$F_s(\theta=90^\circ) = \Phi_{\text{R,BARE}}(\theta=90^\circ) / \Phi_{\text{SP,BARE}} \quad (4)$$

から算出される。また、天頂角方向の中性子フルエンス分布については、線源の構造が軸対象であることから、上記の球面を天頂角方向に同一の立体角で計 40 個の帯状のセグメントに分割することによって天頂角  $\theta$  方向のフルエンス分布  $\Phi_{\text{SP,BARE}}(\theta)$  も計算した。

### 3.2.3 支持構造物を含む体系での計算

案内管は開放窓などの非対称構造を有するため、方位角  $\alpha$  方向についても依存性が生じる可能性がある。そこで、半径 100 cm の球面上の幾つかの位置に点検出器 (F5 tally) をおき、天頂角  $\theta$  と方位角  $\alpha$  の方向における中性子フルエンス  $\Phi_p(\theta, \alpha)$  を計算した。この場合の非等方性補正係数は、被校正器を設置する方向における中性子フルエンス  $\Phi_p(\theta=90^\circ, \alpha=0^\circ)$  を用いて、

$$F_s(\theta=90^\circ, \alpha=0^\circ) = \Phi_p(\theta=90^\circ, \alpha=0^\circ) / \Phi_{\text{SP,BARE}} \quad (5)$$

から算出される。

なお、今回の計算は、空気による散乱影響等の評価を目的としたものではないので、線源の外側の空気を無視した。また、中性子フルエンスの統計誤差 (fsd) が 0.1% を十分に下回るようヒストリ数を設定した。

## 4. 実験方法

MCNPによる計算の妥当性を検証するため、まず、裸の線源について、公開されている非等方性の実測データと計算結果を比較した。周辺構造物有りの計算については、以下に述べる二種類の実験を実施し、計算結果と比較した。ただし、ここで、使用している測定器は、ロングカウンタ等のように中性子フルエンスの絶対測定を目的に設計された特別の測定器ではないため、測定によって得られる計数率の相対的な変化が、モンテカルロ計算による中性子フルエンスの変化と一致するかどうかに着目した。

### 4.1 ホルダ及び案内管の構造の影響

X1型  $^{252}\text{Cf}$  中性子線源について、裸の状態と、それを予備の線源ホルダに入れてタングステンワイヤーで案内管に固定した状態における中性子フルエンスの相対的な変化を調べた。このとき、0.999 GBqの中性子線源については、当該線源を裸の状態に取り扱う使用許可を有していないため、同じ型式(X1型)のチェック用  $^{252}\text{Cf}$  線源(公称放射能 3.7 MBq)で代用した。測定には、 $^3\text{He}$  比例計数管( $^3\text{He}$  5.0 気圧)と直径 231 mm のポリエチレン減速材(厚さ 0.7 mm の Cd カバー付き)からなる中性子検出器を使用した。本検出器は、約 2 MeV の中性子に対して感度のピークを持ち、エネルギーが下がるにつれて感度が下がっていくレスポンスを有しているため、線源からの直接線のみに対して高い相対感度を有する。また、実験では、線源の周囲構造の違いによるフルエンスのわずかな変化を評価するため、統計変動を極力低減させることを目的に線源から検出器の実効中心までの距離を 50 cm とした。なお、裸の  $^{252}\text{Cf}$  線源の測定の際には、それを発泡スチロール製の棒にのせ、支持具等からの散乱線寄与を最小限に抑えた。

### 4.2 案内管の窓構造の影響

0.999 GBq の  $^{252}\text{Cf}$  線源(X1型カプセル)と、111 GBq の  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  線源(X4型カプセル)について、案内管を用いた通常の遠隔操作条件における、案内管の窓構造による方位角方向のフルエンス率変化を調べた。測定には、直径 51 mm の検出器面を持つ Eljen Technology 社製 EJ410 速中性子検出器を使用した。EJ410 は、 $\text{ZnS(Ag)}$  パウダーと樹脂の混合物と、ライトガイドを兼ねた PMMA を同心円に多段に重ね合わせた構造のシンチレータであり、樹脂又は PMMA から放出される反跳陽子による  $\text{ZnS(Ag)}$  のシンチレーション光を光電子増倍管(Adit 社製 B51D01)で計測する。約 1 MeV 付近から感度が立ち上がり、4 MeV 以上で平坦なフルエンスレスポンスを有している。パルス波高スペクトルは MCA で観測した。 $\gamma$  線に対する感度は十分に小さいが、実験では  $^{252}\text{Cf}$  から放出される  $\gamma$  線による周辺線量当量率(中性子周辺線量当量率の約 5%)と同等の周辺線量当量率の  $\gamma$  線を、 $^{60}\text{Co}$  線源を用いて照射し、そのときの最大波高値を中性子と  $\gamma$  線の弁別レベルとした。実験では EJ410 を線源から距離 100 cm に固定し、案内管そのものを回転させた場合における計数率の変化を調べた。室内散乱線による

寄与については、鉄（20 cm）とボロン入りポリエチレン（30 cm）からなるシャドーコーンを  
使用して分離測定を行い、補正した。

## 5. 結果と考察

### 5.1 $^{241}\text{Am}$ -Be 線源中性子スペクトル

#### (1) 粒径と収率の関係

粒径の異なる  $\text{AmO}_2$  クラスタ内で 1 個の  $\alpha$  粒子が発生したときの、クラスタ表面における  $\alpha$  粒子のエネルギースペクトルを計算した結果を Fig. 8 に示す。縦軸はそれぞれのエネルギー群に含まれる  $\alpha$  粒子の割合を表している。図中の粒径範囲は、 $\alpha$  粒子の飛程に比べて十分に短く  $\alpha$  粒子がクラスタ内部で完全に吸収されることはないので、スペクトルの積分値はいずれも 1 である。粒径が大きくなるにつれて、自己吸収により  $\alpha$  粒子のエネルギーが大きく減少し、かつ低エネルギー域にまでより広がることが分かる。

クラスタ表面における  $\alpha$  粒子を厚い Be に入射させた場合の中性子収率( $\text{s}^{-1}$ )を粒径の関数として表したものを Fig. 9 に示す。ここでは、X3 型線源に相当する  $^{241}\text{Am}$  放射能 37 GBq 当たりに換算している。図には、クラスタ内での自己吸収 (エネルギーロス) なし、すなわち  $^{241}\text{Am}$  から直接放出される  $\alpha$  粒子のエネルギーに対して計算した結果を、粒径 0  $\mu\text{m}$  として示した。また、文献<sup>21)</sup>から得られた同条件における収率も粒径 0  $\mu\text{m}$  として示した。計算によって得られた粒径 0  $\mu\text{m}$  での収率は、文献値<sup>21)</sup>によく一致した。また、粒径が大きくなるにつれて収率が徐々に下がっていく傾向が見える。これは、 $\alpha$  粒子のエネルギーが下がるにつれ、 $^9\text{Be}(\alpha, n)$  反応断面積が小さくなるためである。計算によって得られた粒径 3  $\mu\text{m}$  における収率は約  $2.2 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$  であり、これは、製造者による公称値 (37 GBq あたり  $2.2(\pm 10\%) \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ )<sup>22)</sup>、さらに核サ研で使用している X4 型  $^{241}\text{Am}$ -Be 線源 (111 GBq) について実測された中性子放出率 ( $6.316(\pm 1.2\%) \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ , 37 GBq 換算で  $2.1 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ ) に矛盾しない結果である。以上の結果から、 $\text{AmO}_2$  クラスタの平均的な粒径は約 3  $\mu\text{m}$  であることが推測された。

#### (2) 粒径と $^9\text{Be}(\alpha, n)$ 反応による中性子スペクトルの関係

粒径を変化させた場合における、 $^9\text{Be}(\alpha, n)$  反応等による中性子スペクトルの変化を比べたものを Fig. 10 に、そのうち粒径が 3  $\mu\text{m}$  の場合におけるスペクトルについて反応過程別に内訳を示したものを Fig. 11 に示す。両図ともフルエンスを 1 に規格化している。なお、ここでは、 $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$  反応の過程のうち、基底状態、第 1 励起状態、第 2 励起状態を経て放出される中性子をそれぞれ  $n_0$ ,  $n_1$  及び  $n_2$ ,  $^9\text{Be}(\alpha, \alpha')^8\text{Be}$  反応過程を経て放出される中性子を  $n_b$  と表記する。

両図から、粒径が変化するにつれて  $^9\text{Be}(\alpha, n)$  反応による中性子スペクトルも変化すること、特に 6 MeV 以上のエネルギーを持つ中性子成分 ( $n_0$ ) と、6 MeV 以下の成分 ( $n_1$  等) の相対的な関係が変化することが分かる。これは、粒径が大きくなるにつれて  $\alpha$  粒子のエネルギーが下がり、 $n_0$  反応に比べて  $n_1$  反応が生じにくくなるためである。スペクトルに見られる幾つかのピークは、重心系における非等方的な中性子の放出によるもので、例えば約 9.5 MeV、約 5.0 MeV のピークは  $0^\circ$  方向に放出されたそれぞれ  $n_0$ ,  $n_1$  成分の中性子、約 3.2 MeV のピークは  $180^\circ$  方向に放出された  $n_1$  成分の中性子によるものである。なお、Fig. 11 には、反応の種類・

準位別に収率の内訳も示した。 $n_0$ と $n_1$ に比べると $n_b$ の収率は小さい。

### (3) 線源カプセル外における中性子スペクトル

X3型線源について、粒径 $3\ \mu\text{m}$ の場合における、 $\theta=90^\circ$ 方向の中性子スペクトルをMCNP（リング検出器）で計算した結果をFig. 12に示す。図では、フルエンスを1に規格化しており、ISOに示された $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ の中性子スペクトル<sup>1)</sup>も比較のため示した。ピーク（3.2, 5.0, 6.5, 7.7及び9.5 MeV）や谷（3.8, 6.1, 7.0及び9.0 MeV）といったスペクトルの特徴が計算によって良く再現されている。カレント（MCNPの計算において線源項として1個の中性子を発生させた場合に体系外に逃げる中性子の数）は1.017であり、その増加分は主として $\text{Be}(n,2n)$ 反応によるものであった。これらの増加分とBeとの弾性散乱による中性子が、低エネルギー側のなだらかなテイルを形成している。ISOの中性子スペクトルとの僅かな相違は、主として断面積データの不確かさ及び線源の構造の違い等によるものと考えられる。このうち、後者については、ISOのスペクトルはKluge<sup>23)</sup>らの測定によるもの（ただし低エネルギー領域は外挿している）であるが、当該線源の $^{241}\text{Am}$ 放射能は47 GBqであり、またカプセル形状もX3型に似てはいるものの同一ではないことが具体的にあげられる。

中性子収率の公称値等との一致度をもとに粒径 $3\ \mu\text{m}$ を仮定して理論計算だけから算出した中性子スペクトルは、ピーク間における相対的な大小関係に多少の相違はあれども全体としてはISOの中性子スペクトルに極めて近い。ゆえに、線源における中性子放出角度分布（非等方性）を計算するにあたって、本計算法は十分に妥当であると考えられる。

## 5.2 裸の線源における中性子放出角度分布

裸のX1型 $^{252}\text{Cf}$ 線源、並びに裸のX3型、X4型及びX14型 $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ 線源について、天頂角方向に放出される中性子のフルエンス分布を計算した結果を、それぞれFig. 13, Fig. 14に示す。図の縦軸は、等方点線源におけるフルエンスで規格化しているのので、裸の線源における非等方性補正係数 $F_s(\theta)$ に相当する。理想的な等方点線源の場合、補正係数は角度に関係なく1.0になる。横軸は天頂角であり、 $^{252}\text{Cf}$ については二重カプセルのうち外側カプセルを溶接している側、 $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ についてはM6ネジ穴を持つ側を $0^\circ$ とした。図にはNPLによる同型の線源についての天頂角分布の実測値<sup>5)</sup>も示した。

### (1) 裸の $^{252}\text{Cf}$ 線源における天頂角方向の分布

Fig. 13(a)~(c)は、裸の $^{252}\text{Cf}$ 線源における中性子放出角度分布の計算及び実測値である。計算では、線源カプセル内における線源物質の位置（中性子の発生位置）による影響についても調べており、それぞれ(a)一様体積分布線源、(b)中心位置に点線源、(c)内壁上部と下部に面線源、とした場合の結果である。一方、NPLによる実測値については、カプセルの型式は計算体系と同じX1型であるが、線源物質をカプセル内中央部分に固定するinner bobbin入りの特注線源のもの（タイプA）と、 $^{252}\text{Cf}$ を含む液体をカプセル内で蒸発乾固させた旧式の線源（タイプB、1980年代に製造された）の二種類の測定データ<sup>5)</sup>をここでは示した。

中性子の発生を線源カプセル内一様分布線源として計算した結果（図(a)）は、円筒形カプセ

ルのエッジ部分に相当する 30°と 150°に僅かな相違が見えるものの、NPL による実測値（タイプ A 線源）に全体として良く一致していることが分かる。30°と 150°における相違は、計算では一様分布線源を仮定しているのに対して、実測では上述した inner bobbin<sup>1</sup>によって線源物質がカプセル内中央部に集中させていると推測されることが理由として考えられる。この推測は、カプセル内中央部に点線源を置いた場合の計算値（図(b)）が、30°及び 150°近傍において、実測値により一致するということから裏付けられる。また、製造方法が旧式のタイプ B 線源については、中性子の発生位置をカプセル内壁面に偏って分布させることによって、実測値の天頂角分布をほぼ再現する計算が可能になることが分かる。

これらの結果から、線源物質の位置（中性子の発生位置）によって天頂角分布が変化すること、さらにその位置が分かればシミュレーション計算によって精度良く天頂角分布を求めることが可能であることが分かった。一方、中性子の発生位置を変えた合計 4 パターンの計算結果及び NPL による二種類の線源の実測値から、90°方向における非等方性補正係数については、いずれの条件であっても 1.01~1.02 であり、極端に大きな相違が生じないことも確認できた。このことから、線源物質の位置分布が不明な場合、中性子の発生位置（分布）を変えた感度分析手法により変動幅を見積もりつつ、非等方性補正係数を導出することは十分に可能であると考えられる。

## (2) 裸の <sup>241</sup>Am-Be 線源における天頂角方向の分布

<sup>241</sup>Am-Be 線源における中性子の放出角度（天頂角）分布を Fig.14 に示す。ここでは、AmO<sub>2</sub> の粒径を 3 μm として計算した。図(a)~(c)はそれぞれ X3 型、図(b) X4 及び図(c) X14 型の結果である。いずれの型式についても計算値と実測値は極めて良く一致している。X3 型と X4 型を比較すると後者の方が等方分布からのゆがみが大きい。これは、線源カプセルの高さ：直径の比がほぼ 1 に等しい X3 型の場合は、Be 中で散乱されカプセル外に出る中性子の方向が相殺しあうのに対して、縦方向に長い X4 カプセルの場合は軸に平行な方向（上下方向）に進む中性子の方が多く散乱され、横方向に出やすくなるためと考えられる。

様々な寸法を持つ <sup>241</sup>Am-Be 線源についての天頂角分布の計算値と実測値の一致度が良いことから、線源カプセルの構造を模したモンテカルロ計算による非等方性の計算は、十分に妥当な方法であると考えられる。

## 5.3 支持構造物を含む体系における中性子放出角度分布

### (1) 方位角方向の分布

X1 型 <sup>252</sup>Cf 及び X4 型 <sup>241</sup>Am-Be 線源について、案内管上端部の窓構造等による中性子フルエンスの変化を点検出器で計算した結果、すなわち  $\theta=90^\circ$  における方位角  $\alpha$  方向の非等方性補正係数  $F_S(\theta=90^\circ, \alpha)$  を Fig. 15 (a)(b)に示す。図には、EJ410 による測定結果も併せて示した。

両線源ともに、案内管の開放窓の方向 ( $\alpha=\pm 45^\circ$  及び  $\pm 135^\circ$ ) で  $F_S(\theta=90^\circ, \alpha)$  が増加している。これは、開放窓のない部分 ( $\alpha=0^\circ, \pm 90^\circ$  及び  $180^\circ$ ) で散乱された中性子による寄与である。<sup>241</sup>Am-Be に比べて中性子エネルギーの低い <sup>252</sup>Cf では、窓の開閉によるフルエンスの変化が大

<sup>1</sup> 詳細形状・配置等不明であるが、スペーサー状のものであると考えられる。

きい。両線源のエネルギーの違いによる案内管の構造材である Al (厚さ 5 mm) のマクロ断面積には大きな違いはなく、これは、カプセル内の線源物質の大きさと開放窓の大きさの相対的な関係だけによるものである。案内管の内径 40 mm に対して、X1 型カプセルは外径 7.8 mm であり案内管の中心付近に線源物質が集中しているのに対して、一方の X4 型カプセルは外径 22.4 mm であり案内管の内壁近くまで線源物質が存在する。このため、前者の場合は、窓構造によって完全に遮られる場合からまったくない場合までがあるのに対して、後者の場合は常に部分的にしか遮られないのでその影響も軽減されることになる。

また、EJ410 による測定結果は計算値に良く一致している。なお、MCNP 計算の過程において、方位角による中性子スペクトルの変化は十分に小さいことを確認しているため、ここでは測定器のエネルギー依存性についての補正は行わず、指示値 (ただし、基準の方向に規格化) をそのままプロットしている。計数率の統計変動は 0.5% 以下であった。

## (2) 天頂角方向の分布

X1 型  $^{252}\text{Cf}$  と X4 型  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  線源について、支持構造ありの場合の天頂角方向におけるフルエンスの分布を計算した結果を Fig. 16 に示す。方位角  $\alpha$  について平均化した条件における非等方性補正係数  $F_S(\theta)$  に相当する。

両線源ともに、線源近傍の構造物によって、被校正器を設置する方向 ( $\theta=90^\circ$ ) で、中性子フルエンスが相対的に増加していることが分かる。 $^{252}\text{Cf}$  については、(方位角方向で平均して) 約 15% 増加している。この変化は、主として Al 合金製スペーサ、ホルダの上下部構造、照射筒のフランジ等での散乱によって、線源の上下に向かって放出された中性子がその軌道を曲げられたためである。 $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  についても同様の傾向が見えるが、線源カプセルをホルダ内に固定する Al スペーサを使用していないため、 $^{252}\text{Cf}$  の場合ほど影響は極端ではない。

## 5.4 非等方性補正係数

計算によって求めた、裸の X1 型  $^{252}\text{Cf}$  線源、裸の X3 型、X4 型及び X14 型  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  線源における非等方性補正係数  $F_S(\theta=90^\circ)$ 、並びに核サ研の周辺支持構造物を含む体系での X1 型  $^{252}\text{Cf}$  及び X4 型  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  線源についての非等方性補正係数  $F_S(\theta=90^\circ, \alpha=0^\circ)$  を Table 3 に示す。同表には、裸の当該型式の線源について文献から得られた非等方性補正係数の実測値<sup>3,5,24)</sup>、さらに周辺構造を含む体系での X1 型  $^{252}\text{Cf}$  線源について、減速材付き  $^3\text{He}$  比例計数管による測定から算出した値も示した。表中の不確かさは  $k=2$  の拡張不確かさで示した。

### (1) $^{252}\text{Cf}$

裸の X1 型  $^{252}\text{Cf}$  線源について、計算によって求めた非等方性補正係数は  $1.012 \pm 1.1\%$  であった。ここで不確かさは、計算による統計変動 0.1% と、5.6 節で説明するカプセル内の線源物質の位置変化によるものである。一方、文献値から得た実測による係数は 1.010~1.018 の範囲であり<sup>3,5)</sup>、その内訳は、線源物質が  $\text{Cf}_2\text{O}_3$  と Pd の合金状のワイヤーからなるもの (ただしワイヤー固定用 inner bobbin 入り) で  $1.018 \pm 0.2\%$ 、 $^{252}\text{Cf}$  を含む液体をカプセル内で蒸発乾固

させたもので 1.010～1.012 である。後者の製品の場合は、線源物質がカプセルの内壁の一部に偏在していると考えられている。これらの結果から、線源物質の位置分布によって非等方性補正係数が 1%程度変化する可能性があることが分かる。モンテカルロ計算によって算出した補正係数は、線源物質の位置分布による変動影響を含めて、実測による非等方性補正係数を適切に再現していると考えられる。

また、周辺構造物有りの条件での非等方性補正係数については、計算値 ( $1.114 \pm 1.5\%$ ) と実測値 ( $1.111 \pm 1.9\%$ ) は一致している。ここで、実測値は、上述した裸の線源体系での計算値  $1.012 \pm 1.1\%$  に、周辺構造物の有無における減速材付き  $^3\text{He}$  比例計数管の計数率の相対変化 ( $1.097 \pm 1.6\%$ ) を乗じて算出した値である。なお、中性子スペクトルの変化に伴う減速材付き  $^3\text{He}$  比例計数管の感度変化は、MCNP による計算の結果、統計変動 (1%) と同等レベルであったため、ここではその補正をしていない。本結果から、ホルダや案内管等の周辺構造物によって中性子フルエンスが約 10%増加することが、実験によって確認された。

## (2) $^{241}\text{Am}$ -Be

計算によって求めた裸の X3 型, X4 型及び X14 型線源の非等方性補正係数は、それぞれ  $1.030 \pm 0.2\%$ ,  $1.039 \pm 0.4\%$ ,  $1.045 \pm 0.4\%$  であり、それぞれについての実測値である 1.027～1.030, 1.037～1.044, 1.046 にほぼ一致する結果であった。ここで、計算値の不確かさは、後述する、線源スペクトルを変化させたときの感度分析によるものである。計算値と実験値の僅かな相違は、計算条件に反映できていない条件、主として線源の個体差 (例えば線源物質のカプセル内における位置分布) 等によるものと考えられる。モンテカルロ計算によって算出した補正係数は、実測値との相違に相当する 1%程度の個体差を見込めば、標準的な構造の線源についての非等方性補正係数を適切に再現していると考えられる。

案内管等の支持構造物を含む X4 型線源については、非等方性補正係数が約 10%増加し、 $^{252}\text{Cf}$  線源の場合とほぼ同程度の値となった。これは、周辺構造物による散乱が大きく増大するためと考えられる。

## 5.5 中性子フルエンスー線量当量換算係数

計算によって求めた中性子スペクトルから、フルエンス平均エネルギーとスペクトル平均周辺線量当量換算係数を算出した結果を Table 4 に示す。表には、ISO8529-3<sup>10)</sup>で指定する値も比較のため示した。

### (1) $^{252}\text{Cf}$

案内管等の周辺支持構造物を含む体系における、計算によって求めたフルエンス平均エネルギー、スペクトル平均周辺線量当量換算係数は、それぞれ 1.97 MeV, 380 pSv cm<sup>2</sup> であり、ISO8529-3<sup>10)</sup>に指定されている値、それぞれ 2.13 MeV, 385 pSv cm<sup>2</sup>, よりも小さな値となった。これは、非等方性補正係数の増加から分かるように、線源中性子スペクトル成分に、周囲の支持構造物からエネルギーの低い散乱成分が加わっているためである。なお、本計算によ

て得られたスペクトル平均換算係数等は、フルエンス当たり規格化した値であるため、後述する線源の位置分布の変動等の影響を受けにくく、その不確かさは計算による統計変動(0.1%)レベルであった。

## (2) $^{241}\text{Am}\text{-Be}$

$^{241}\text{Am}\text{-Be}$  線源については、核データに基づき独自に算出した線源中性子スペクトルを計算評価に使用している。このため、ここでは、計算によって求めたフルエンス平均エネルギーやスペクトル平均換算係数を ISO8529-3<sup>10)</sup>の値と直接比較するのではなく、カプセルの寸法や周辺構造物によって、それらの数値がどの程度変化するかに着目した。感度分析のため、線源項のスペクトルには、 $\text{AmO}_2$ の粒径 3  $\mu\text{m}$  の場合の理論計算によるもののほか、最も極端な条件として ISO 推奨スペクトルも使用した。

ISO8529-3に示されている、 $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  線源に対する換算係数( $\text{pSv cm}^2$ )の値は  $391 \pm 4\%$ ( $k=1$ )であり、 $^{252}\text{Cf}$  線源に対する係数  $385 \pm 1\%$ ( $k=1$ )に比べて不確かさが極端に大きい。これは、組成、構造及び寸法等の違いによって中性子スペクトルも変わるという  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  線源についての個体差の大きさを反映したものと考えられる。今回の計算結果は、裸の線源の場合で 382~402、周辺構造物を含めた場合で 382~399 であり、いずれの値も ISO の指定する換算係数の不確かさの範囲内(375~403)であった。また、同じ線源項を使用した場合について、X3型とX4型、X4型とX4型+支持構造物を比較すると、非等方性補正係数がそれぞれ 1.03→1.04、1.04→1.10と変化しているのに対して、換算係数の変化は1%未満であった。カプセル構造の違いや支持構造物の有無等が換算係数に与える影響は、それらが非等方性に与える影響に比べて十分に小さいと結論付けることができる。

## 5.6 不確かさの検討

MCNP 計算における入力パラメータの感度分析によって不確かさを算出した結果を述べる。これらの結果は、5.3節で示した非等方性補正係数の不確かさ (Table 3) に反映されている。

### (1) 線源の位置分布による影響

線源カプセル内部における線源物質の位置分布等による影響について検討した。

今回の計算では、X1型  $^{252}\text{Cf}$  線源については、線源カプセル内部における線源物質の詳細な位置分布が不明であったため、カプセル内部に線源物質が一様に分布する体積線源を基本とし、カプセル内中央に点線源を置いた場合、カプセル内部の上下部に円盤形線源をおいた場合について非等方性補正係数を計算し、一様体積線源の場合と比較した。その結果、一様体積線源の場合の結果に対して、裸の線源で-0.4%~1.0%、周辺構造物を含む体系で-0.4%~1.3%の相違が生じた。線源物質の位置に関する確率分布の情報がないため、ここでは上記1.3%を上下限とする矩形分布を仮定し、裸の線源及び周辺構造物を含む体系それぞれについて、線源位置による  $F_s(\theta=90^\circ, \alpha=0^\circ)$  の値の拡張不確かさ ( $k=2$ ) をそれぞれ 1.1%、1.5%と算出した。

一方、 $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  線源については、カプセル内部に隙間なく線源物質が一様に充填されてい

ると仮定して計算を実施しているが、カプセル内の分布の影響を試算する目的で、Beの原子数密度のみを±10%変化させた計算を行った。計算の結果、中性子の発生数（カレントタリーで算出した値）に、密度の増減に対応したごく僅かな増減（±0.2%）が確認されたが、非等方性に対してはなんら影響も見られなかった。

#### (2) 線源スペクトルによる影響

$^{241}\text{Am}\text{-Be}$  線源について、線源スペクトルを意図的に変化させた場合の計算を実施した。ここでは、 $\text{Be}(\alpha, n)$ 反応による中性子スペクトルの中で、最も平均エネルギーが高いもの（すなわち粒径 0  $\mu\text{m}$ ）、最もエネルギーが低いもの（ISO 推奨スペクトル<sup>1)</sup>）を線源項として使用し、粒径 3  $\mu\text{m}$  の場合の計算結果からの偏差を調べた。その結果、線源項として使用するスペクトルは、非等方性補正係数の計算結果にはほとんど影響しない（<1%）という結果が得られた。

#### (3) 比重、組成、寸法による影響

ステンレス鋼、Al合金の組成について、メーカー仕様の範囲内で比重、原子数密度などを変化させて計算した。また、線源部の主要部材の厚さについては、材料の公差（例えば、案内管であれば 5(±0.05)mm）の範囲で厚さを変化させ計算した。計算によって得られたこれらの影響の全てを、矩形分布を仮定して合成し、拡張不確かさを 0.4% ( $k=2$ ) と算出した。

#### (4) その他による変化

線源の周囲構造を含む全体の構造が被校正器に対してあたかも体積線源であるかのように振舞い、点線源とみなせない可能性がある。このため、距離 100 cm の点で計算している  $F_S(\theta=90^\circ, \alpha=0^\circ)$  の値に、距離依存が生じる可能性がある。そこで、30 cm～200 cm の範囲で点検出器を用いて  $F_S(\theta=90^\circ, \alpha=0^\circ)$  を計算し、距離 100 cm での値と比較した。計算の結果、線源から 50 cm 以遠においては、100 cm での値に対して統計変動（0.1%以下）を超える有意差はみられなかった。

## 6. 結 論

RI 中性子線源を用いた速中性子校正場におけるフルエンス率基準を精度よく算出するため、代表的な RI 中性子線源における中性子放出角度分布をモンテカルロ計算によって評価する方法について検討した。さらにその計算手法を線源ホルダ等の周辺構造物を含む体系にも拡張した。以下に結論を示す。

- (1) 国際的に多用されている代表的な RI 中性子線源である X1 型  $^{252}\text{Cf}$  線源, X3, X4 及び X14 型  $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$  線源について, 中性子放出角度分布の非等方性を, 線源カプセル構造を忠実にモデル化したモンテカルロ計算によって評価した。計算によって算出した非等方性補正係数は実験値によく一致し, これによって計算モデルの妥当性を検証した。国際規格では, RI 中性子線源における非等方性を実験で求めることを要求しているが, 緻密なモデル化によって計算でも十分に精度良く非等方性を算出できることを示した。
- (2)  $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$  中性子線源における非等方性の計算にあたって, 線源中性子スペクトルを計算した。ここでは, 球形の  $^{241}\text{AmO}_2$  が厚い Be に囲まれるモデルを想定し, JENDL/AN-2005 核データに基づき中性子収率と  $^9\text{Be}(\alpha, n)$  反応による中性子スペクトルを計算した。 $^{241}\text{AmO}_2$  の粒径を  $3\ \mu\text{m}$  とした場合, 中性子収率及び中性子スペクトルがともに標準的な  $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$  線源のものによく合致することを見出した。核データに基づき算出した  $^9\text{Be}(\alpha, n)$  反応による中性子スペクトルは, 形状や寸法の異なる別の型式の  $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$  線源における非等方性の計算に活用できる。
- (3) 核サ研の速中性子校正場を例に, 中性子線源の周囲に線源ホルダ等の支持構造物がある場合について, 上記の非等方性計算手法を適用した。その結果, 周囲の構造物によって裸の線源に比べて約 10% もの非等方性が生じることが分かった。また, 減速材付き  $^3\text{He}$  比例計数管等を用いた比較測定により, 上記計算結果の妥当性を確認した。これらの結果は, RI 中性子線源についての非等方性を評価する目的での計算シミュレーションの有効性を証明するものである。また, 本計算手法はより複雑な線源支持構造を持つ体系における非等方性の計算評価にも利用できる。

付録に,  $^{241}\text{AmO}_2$  の粒径  $3\ \mu\text{m}$  の場合について  $^9\text{Be}(\alpha, n)$  反応による中性子スペクトルを線源項とする裸の X3 型  $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$  線源における非等方性計算のための MCNP 計算入力ファイルを示す。ファイル中の線源項は, 他のカプセル構造を持つ  $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$  線源における非等方性の計算にそのまま使用することができる。

謝 辞

RI 中性子線源の構造に関する情報の入手にあたって株式会社千代田テクノルの鈴木史之氏にご協力を頂いた。断面積ライブラリについてシグマ委員会の村田徹氏，非等方性の実験データについて National Physical Laboratory の D. J. Thomas 氏に有益な情報を頂いた。また，本稿のとりまとめにあたって，東北大学サイクロトロン RI センターの馬場護教授に重厚かつ貴重な御助言を頂いた。この場を借りて深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) ISO, Reference neutron radiations – Part 1, Characteristics and methods of production, ISO8529-1, Geneve (2001).
- 2) JIS, 中性子線量当量 (率) 計の校正方法, 日本規格協会, JIS Z4521 (2006).
- 3) C. M. Eisenhauer, J. B. Hunt and R. B. Schwartz, “Calibration techniques for neutron personal dosimetry,” *Radiat. Prot. Dosim.* **10**, p.43-57 (1985).
- 4) C. M. Eisenhauer and J. B. Hunt, “Anisotropy neutron emission for a  $^{252}\text{Cf}$  source,” *Radiat. Prot. Dosim.*, **22**, p.253-258 (1988).
- 5) A. G. Bardell, M. Burke, J. B. Hunt, H. Tagziria and D. J. Thomas, *Anisotropy of emission from radionuclide neutron sources*, CIRM 24, National Physical Laboratory (1998).
- 6) N. E. Hertel and J. C. McDonald, “Calculations of anisotropy factors and dose equivalents for unmoderated  $^{252}\text{Cf}$  sources,” *Radiat. Prot. Dosim.*, **32**, p.77-82 (1990).
- 7) E. H. Lorch, “Neutron spectra of  $^{241}\text{Am}/\text{B}$ ,  $^{241}\text{Am}/\text{Be}$ ,  $^{241}\text{Am}/\text{F}$ ,  $^{242}\text{Cm}/\text{Be}$ ,  $^{238}\text{Pu}/^{13}\text{C}$  and  $^{252}\text{Cf}$  isotopic neutron sources,” *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, **24**, p.585-591 (1973).
- 8) D.M. Plaster, R.T. Santoro and W.E. Ford III, Coupled 100-Group Neutron and 21-Group Gamma-Ray Cross Sections for EPR Calculations, ORNL-TM-4872, Oak Ridge National Laboratory, (1975).
- 9) J. Grundl and C. M. Eisenhauer, “Fission rate measurements for materials neutron dosimetry environments” *Proc. First ASTM-EURATOM Symp. on reactor dosimetry*, EUR5667, Part 1, p.426-435 (1975).
- 10) ISO, Reference neutron radiations – Part 3, Calibration of area and personal dosimeters and determination of their response as a function of neutron energy and angle of incidence, ISO8529-3, Geneve (1998).
- 11) L. Van del Zwan, “Calculated neutron spectra from  $^9\text{Be}(\alpha, n)$  sources,” *Can. J. Phys.*, **46**, p.1527-1536 (1968).
- 12) M. E. Anderson and R. A. Neff, “A neutron energy spectra of different size  $^{239}\text{Pu}-\text{Be}(\alpha, n)$  sources,” *Nucl. Instrum. Methods*, **99**, p.231-235 (1972).
- 13) K. M. Geiger and L. Van del Zwan, “Radioactive neutron sources spectra from  $^9\text{Be}(\alpha, n)$  cross section data,” *Nucl. Instrum. Methods*, **131**, p.315-321 (1975).
- 14) T. W. Armstrong and K. C. Chandler, *SPAR, a FORTRAN program for computing stopping powers and ranges for muons, charged pion, protons, and heavy ions*, ORNL-4869, Oak Ridge National Laboratory, (1973).
- 15) Nuclear Data Center, Japan Atomic Energy Agency, “JENDL (alpha,n) Reaction Data File 2005”, available at <  
<http://wwwndc.tokai-sc.jaea.go.jp/ftpnd/jendl/jendl-an-2005.html>>

- 16) T. Murata, H. Matsunobu and K. Shibata, *Evaluation of the ( $\alpha, xn$ ) reaction data for JENDL/AN-2005*, JAEA-Research 2006-052, Japan Atomic Energy Agency, (2006).
- 17) J. F. Ziegler, *Helium stopping powers and ranges in all elements*, Pergamon Press, New York, (1978).
- 18) C. Kalbach, "Systematics of continuum angular distributions: extension to higher energies," *Phys. Rev.*, C37, p.2350-2370 (1988).
- 19) J. F. Briesmeister, ed., *MCNP<sup>TM</sup> – A general Monte Carlo N-particle transport code, version 4C*, LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory, (2000).
- 20) J. S. Hendricks, S. C. Frankle and J. D. Court, *ENDF/B-VI data for MCNP*, LA-12891, Los Alamos National Laboratory (1994).
- 21) 松延廣幸, 奥岳史, 飯島俊吾, 内藤淑孝, 増川史洋, 中嶋龍三, ( $\alpha, n$ ) 反応と自発核分裂による収率を計算するためのデータブック, JAERI 1324, 日本原子力研究所, (1992).
- 22) Amersham International plc, *Industrial gauging and analytical instrumentation sources (product catalogue)* (1989)
- 23) H. Kluge and K. Weise, "The neutron energy spectrum of a  $^{241}\text{Am}$ -Be( $\alpha, n$ ) source and resulting mean fluence to dose equivalent conversion factors," *Radiat. Prot. Dosim.*, **2**, p.85-93 (1982)
- 24) B-H. Kim, J-L. Kim, S-Y. Chang and G. Cho, "Characteristics of the KAERI neutron reference fields for the calibration of neutron monitoring instruments," *J. Korean Assoc. Radiat. Prot.*, **26**, p.243-248 (2001); and also personal communication (2006).

Table 1 Specifications of  $^{252}\text{Cf}$  and  $^{241}\text{Am}$ -Be neutron sources.

Source	Capsule Type	Nominal activity (GBq)	Source material composition*	Diameter × Height (mm)	Wall thickness (mm)	Capsule material
$^{252}\text{Cf}$	X1	0.999	$\text{Cf}_2\text{O}_3$ -Pd alloy Cf: 50 $\mu\text{g}$	7.8 × 10.0	1.6	Stainless steel
$^{241}\text{Am}$ -Be	X3	37	Be 4.6 g AmO <sub>2</sub> 0.37g	22.4 × 31.0	2.4	Stainless steel
$^{241}\text{Am}$ -Be	X4	111	–	22.4 × 48.5	2.4	Stainless steel
$^{241}\text{Am}$ -Be	X14	185	Be 23 g AmO <sub>2</sub> 1.85g	30.0 × 60.0	2.4	Stainless steel

\* The datum for an X3 capsule was taken from Lorch <sup>7)</sup>. The datum for an X4 capsule was provided under a confidential agreement with the manufacturer. So details cannot be presented in this paper.

Table 2 Elemental Constituents used for MCNP calculations.

Substance	Density g.cm <sup>-3</sup>	Elemental Constituents and Nominal Weight Percent
Stainless steel (SUS316L)	7.98	Cr: 17.0, Fe: 67.0, Ni: 13.5, Mo: 2.5
Stainless steel (SUS304)	7.93	Cr: 19.0, Fe: 71.8, Ni: 9.2
Stainless steel (SUS430)	7.70	Cr: 17.0, Fe: 83.0
Al-Mg alloy (A5052)	2.68	Mg: 2.5, Al: 97.5
Cu coil	3.14	Cu: 100
Steel (S41C,S45C, SUP10)	7.86	Fe: 100
Epoxy resin (Bosphenol A-type)	1.22	H: 7.1, C: 76.0, O: 16.9

Table 3 Comparison of calculated and measured anisotropy correction factors for  $^{252}\text{Cf}$  and  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  sources.

Source (Capsule type)	$F_s(\theta=90^\circ)$		$F_s(\theta=90^\circ, \alpha=0^\circ)$	
	Bare source capsule		Source capsule plus support structures	
	Calculated	Measured [ref.]	Calculated	Measured
$^{252}\text{Cf}$ (X1)	$1.012 \pm 1.1\%$ <sup>a)</sup>	1.012 [3]	$1.114 \pm 1.5\%$ <sup>a)</sup>	$1.111 \pm 1.9\%$ <sup>b)</sup>
		1.010 $\pm$ 0.1% [5]		
		1.018 $\pm$ 0.2% [5]		
$^{241}\text{Am}\text{-Be}$ (X3)	$1.030 \pm 0.2\%$ <sup>c)</sup>	1.030 [3]	– <sup>d)</sup>	– <sup>d)</sup>
		1.028 $\pm$ 0.6% [5]		
		1.027 $\pm$ 0.7% [5]		
$^{241}\text{Am}\text{-Be}$ (X4)	$1.039 \pm 0.4\%$ <sup>c)</sup>	1.044 $\pm$ 0.5% [5]	$1.096 \pm 0.8\%$ <sup>c)</sup>	– <sup>e)</sup>
		1.037 [24]		
$^{241}\text{Am}\text{-Be}$ (X14)	$1.045 \pm 0.4\%$ <sup>c)</sup>	1.046 $\pm$ 0.4% [5]	– <sup>d)</sup>	– <sup>d)</sup>

a) Uncertainties (k=2) are estimated from statistical error in computation and perturbations of the starting source position.

b) Calculated from the MCNP-computed anisotropy factor of 1.012 for a bare X1 capsule multiplied by a count rate ratio of 1.097 obtained by  $^3\text{He}$  detector measurements.

c) Uncertainties (k=2) are estimated from statistical error in computation and perturbations of the starting source spectrum.

d) Not applicable to the pneumatic source transfer system.

e) Not measured.

Table 4 Comparison of spectrum-averaged fluence-to-ambient dose equivalent conversion coefficients between the calculated and ISO-recommended values.

Neutron Source	Nominal activity (GBq)	Source neutron spectrum in MCNP	Anisotropy factor $F_s$	Fluence-average energy (MeV)	$\overline{h}^*$ (pSv cm <sup>2</sup> )
<sup>252</sup> Cf					
ISO-specified	—	—	—	2.13	385±1% <sup>a)</sup> (381~389)
X1 + S.S. <sup>b)</sup>	0.999	NBS-evaluated Maxwell distribution	1.114	1.97	380
<sup>241</sup> Am-Be					
ISO-specified	—	—	—	4.16 <sup>a)</sup>	391±4% <sup>a)</sup> (375~407)
X3	37	Calculated spectrum for AmO <sub>2</sub> (3μmφ)+Be	1.030	4.42	402
X4	111		1.039	4.38	401
X4 + S.S. <sup>b)</sup>	111		1.096	4.15	399
X14	185		1.045	4.28	399
X3	37	ISO-recommended spectrum	1.032	3.86	386
X4	111		1.043	3.82	385
X4 + S.S. <sup>b)</sup>	111		1.104	3.61	382
X14	185		1.048	3.74	382

a) ISO-recommended values (k=1), of which capsule types are not specified<sup>1)</sup>.

b) S.S. = support structure.

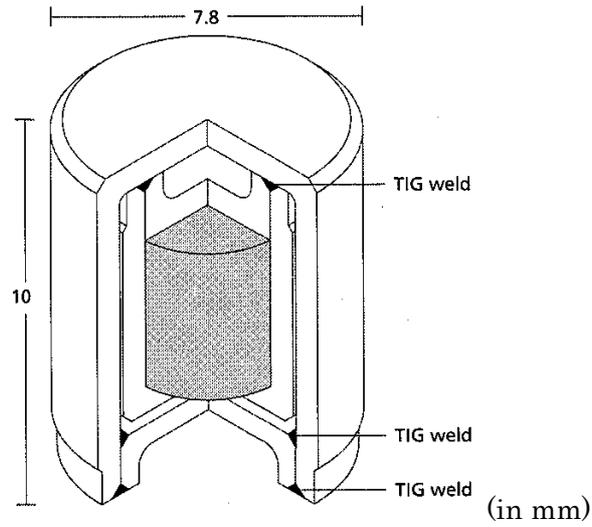


Fig.1 Schematic diagram of a doubly-encapsulated X1 capsule, showing the inner and outer capsule. (from manufacture's source catalog)

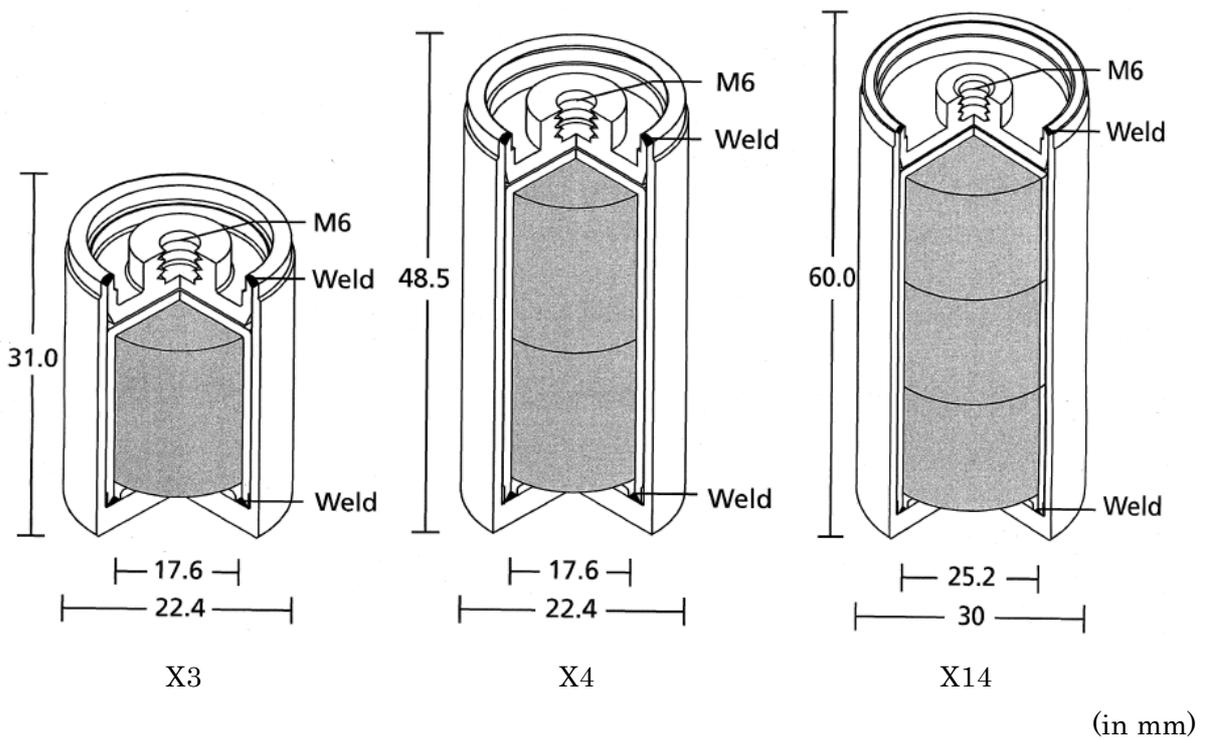


Fig.2 Schematic diagram of doubly-encapsulated X3, X4 and X14 capsules, showing the inner and outer capsule. (from manufacture's source catalog)



Fig. 3 Source holder, which contains either X1 or X4 capsule.  
The holder dimensions are 65 mm long by 29 mm diameter.

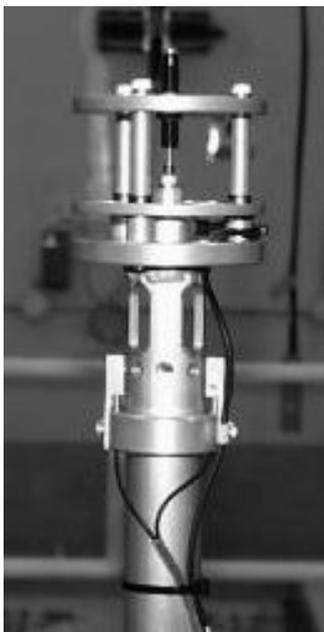


Fig. 4 Front view of the structures surrounding the neutron sources in the pneumatic source transfer system. The upper side of the figure corresponds to the polar angle of  $\theta=0^\circ$ .

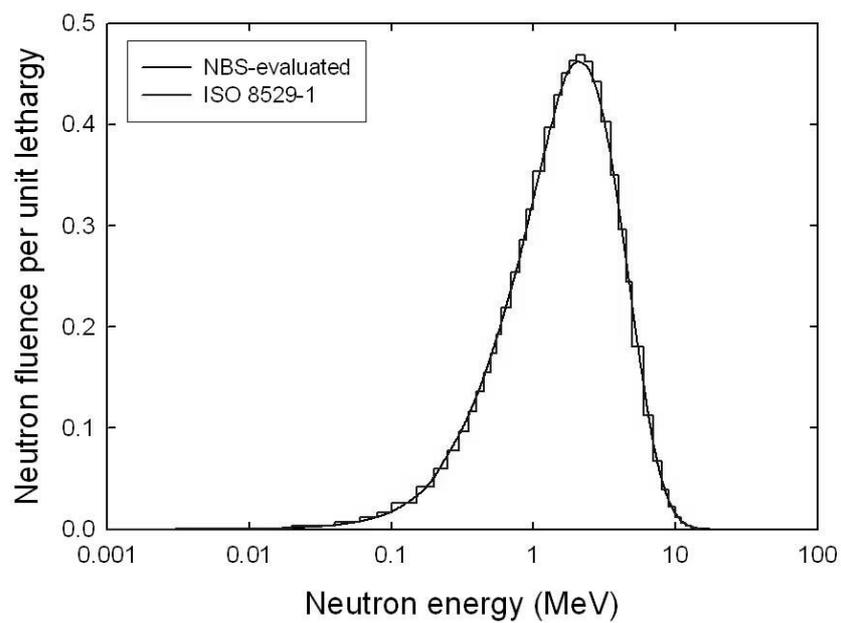


Fig. 5 The  $^{252}\text{Cf}$  neutron source spectra. Shown are the NBS-evaluated spectrum from the work of Grundl <sup>9)</sup> and ISO-recommended spectrum <sup>1)</sup>.

This is a blank page.

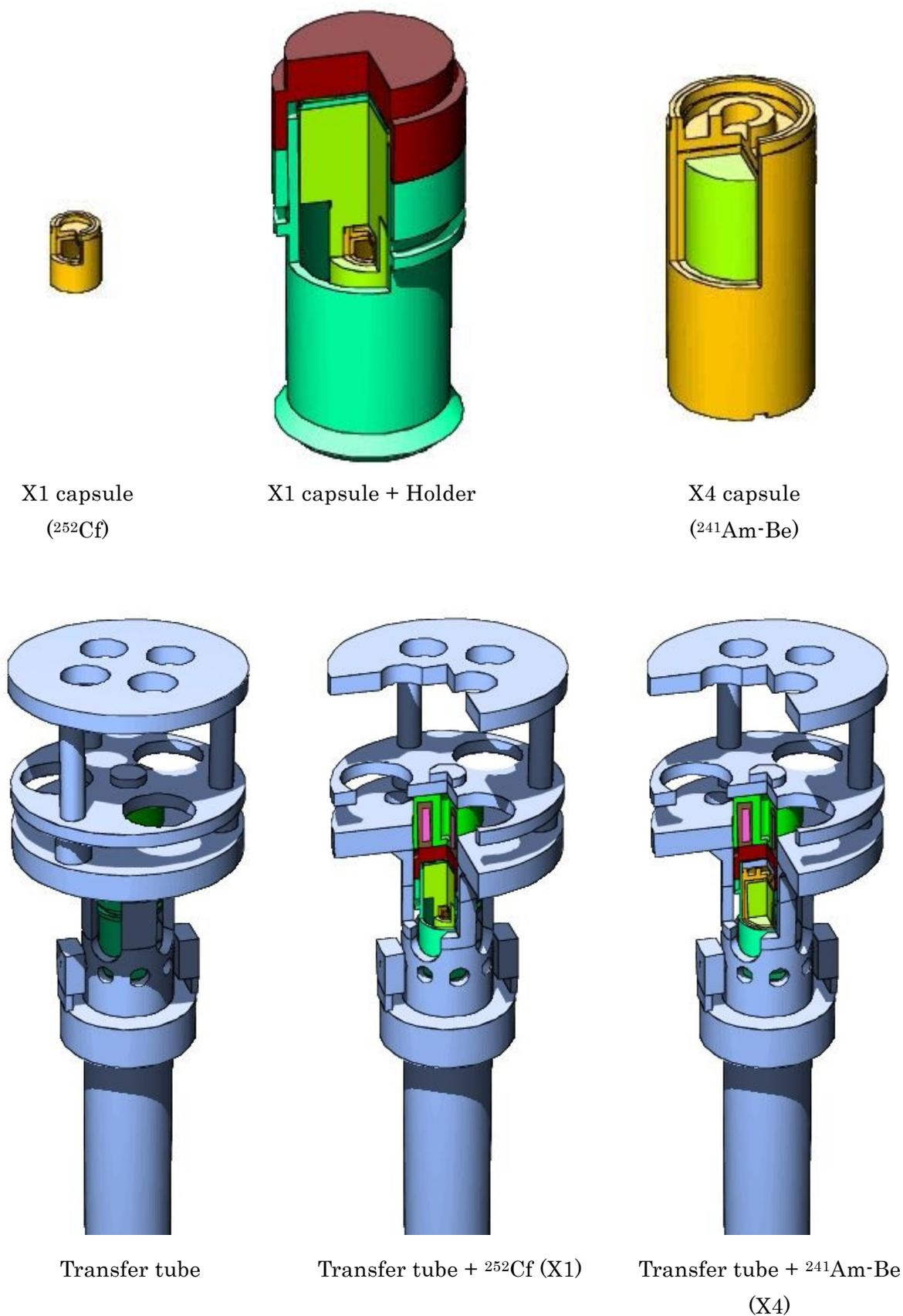


Fig. 6 Cutaway views for MCNP calculation geometries.

This is a blank page.

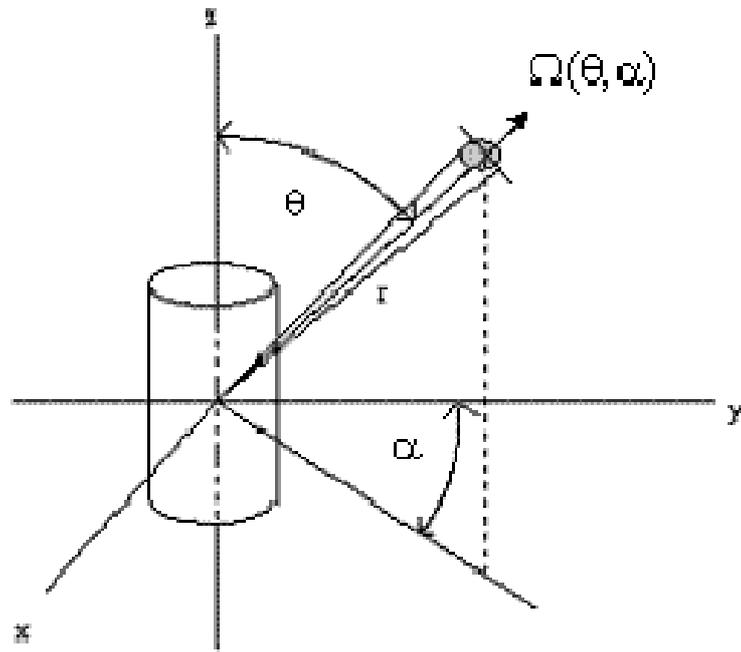


Fig. 7 Coordinate system for computation of angular fluence distribution.

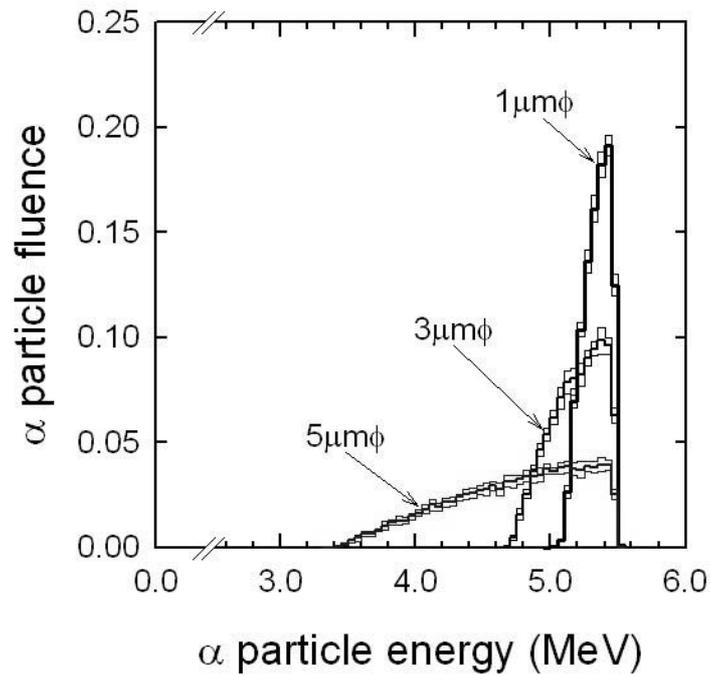


Fig. 8 α particle spectrum at a surface of  $^{241}\text{AmO}_2$  spherical cluster. Each energy bin has a same energy interval.

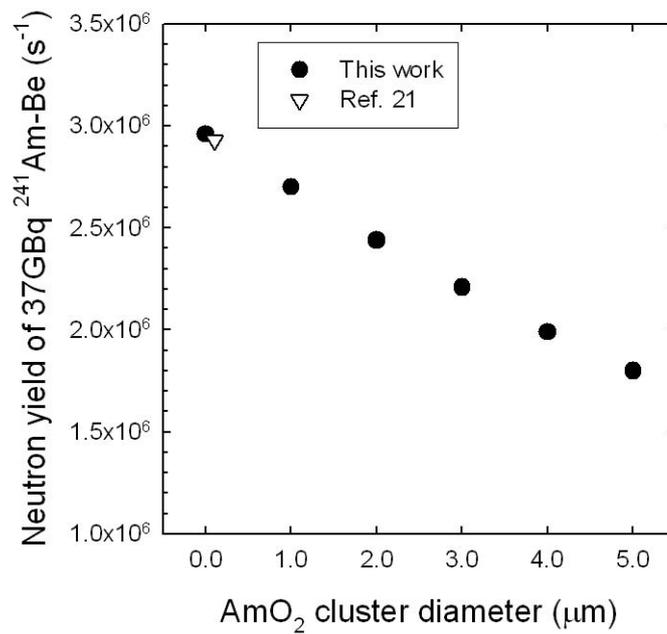


Fig. 9 Calculated neutron yield of a 37 GBq  $^{241}\text{Am-Be}$  neutron source as a function of an  $\text{AmO}_2$  cluster diameter.

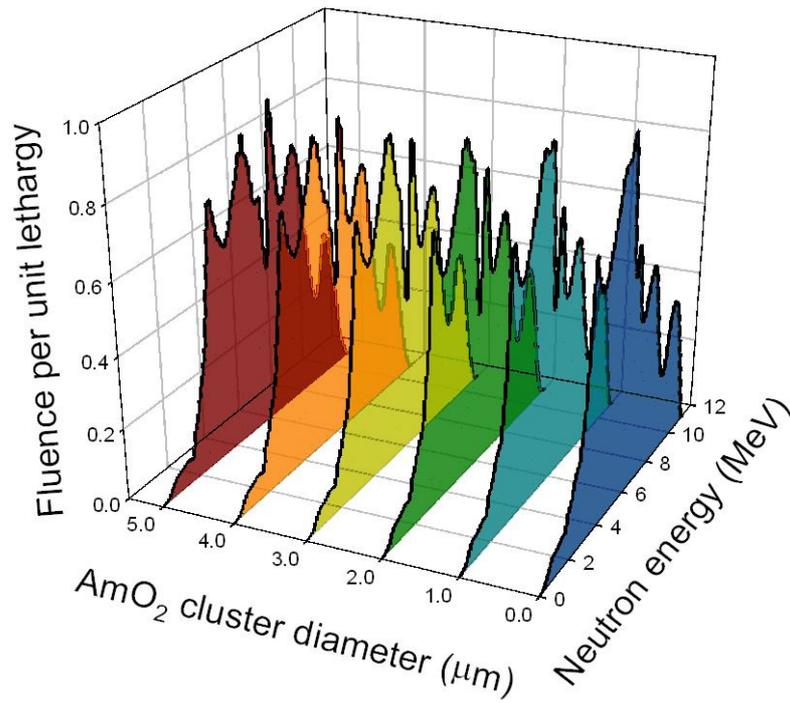


Fig. 10 Spectral neutron fluence produced from  ${}^9\text{Be}(\alpha,n)$  reactions for the calculation model composed of an AmO<sub>2</sub> spherical cluster + a thick Be target. An AmO<sub>2</sub> cluster has a diameter ranging from zero to 5 μm.

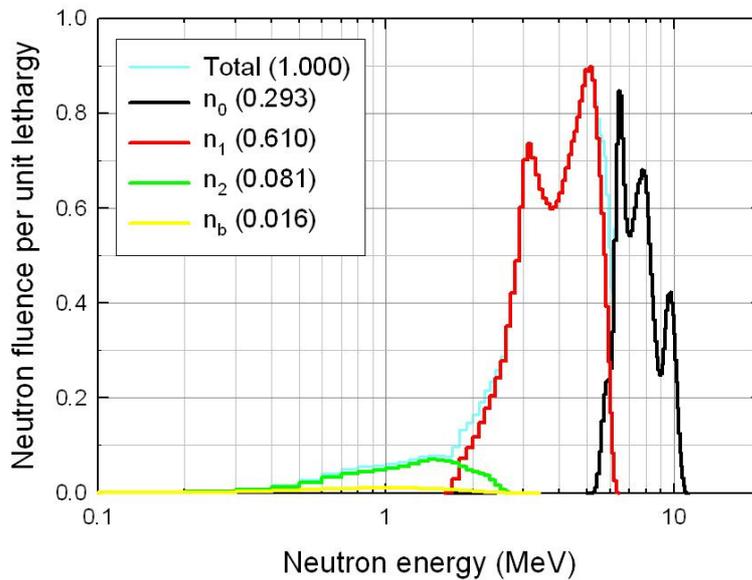


Fig. 11 Spectral neutron fluence produced from  ${}^9\text{Be}(\alpha,n)$  reactions for the calculation model composed of an AmO<sub>2</sub> spherical cluster (3 μmφ) + a thick Be target. The separation of the individual neutron groups is also illustrated together with the values of each fractional yield in brackets.

This is a blank page.

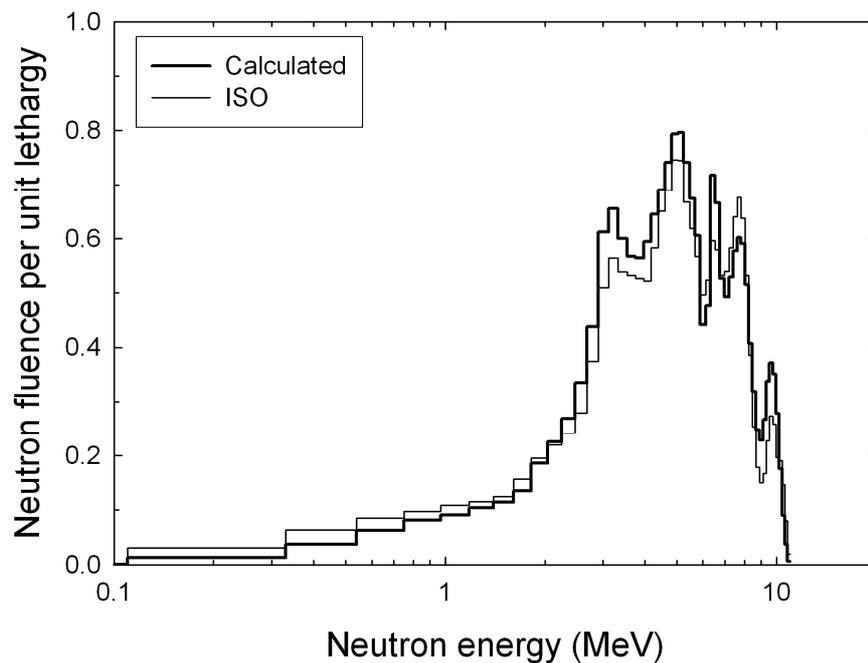


Fig. 12 Comparison of the calculated neutron spectrum for an  $^{241}\text{Am}\text{-Be}$  source and the ISO-recommended one <sup>1)</sup>. Calculation was done for the X3 type neutron source with the assumption of  $\text{AmO}_2$  of 3  $\mu\text{m}$  in diameter.

This is a blank page.

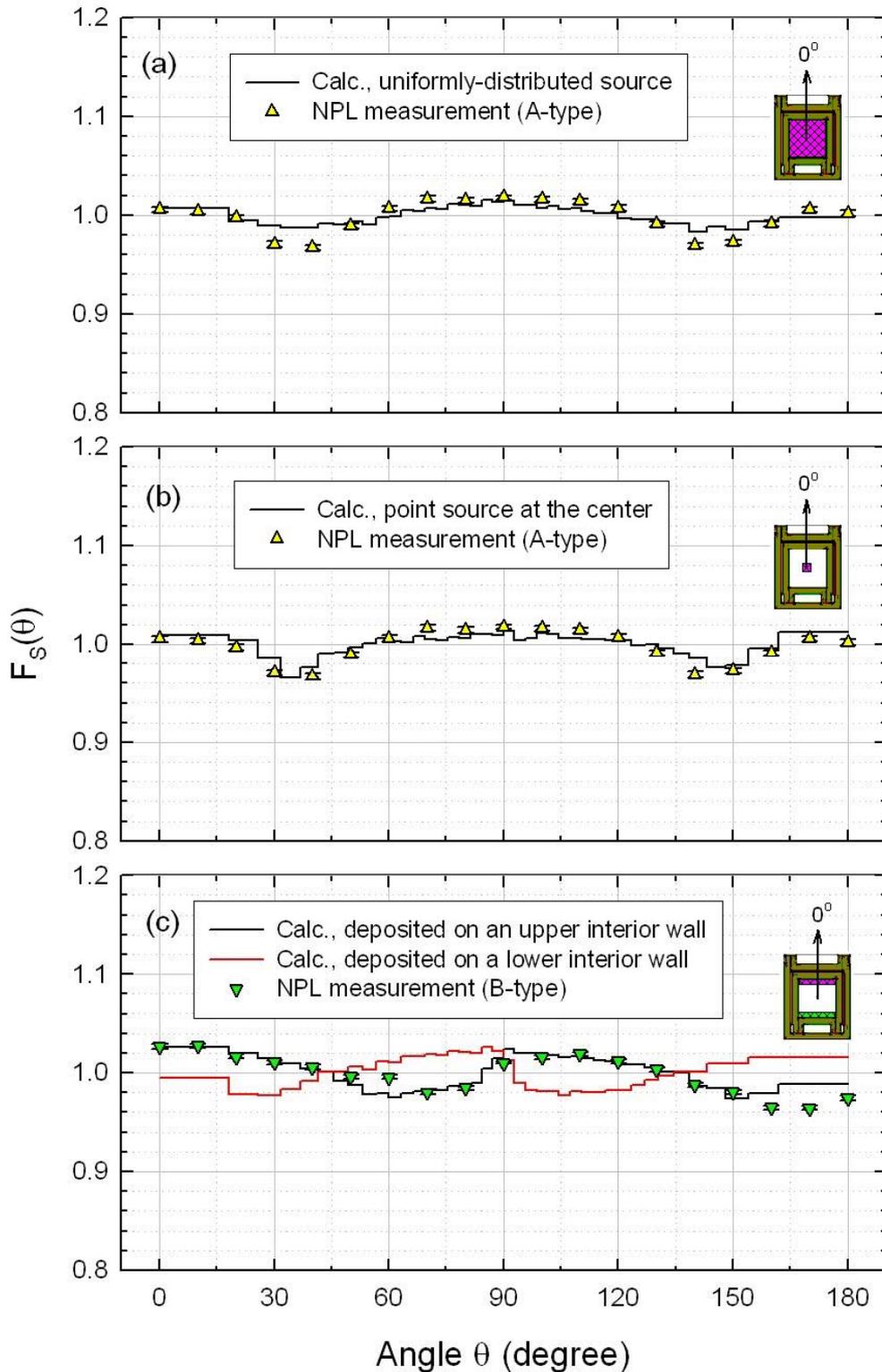


Fig. 13 Calculated anisotropy factors in polar angle,  $F_s(\theta)$ , for bare X1 capsule  $^{252}\text{Cf}$  source. Triangles are measured data by NPL in  $10^\circ$  steps for the sources of the same construction. The  $\theta=0^\circ$  corresponds to the welded end of the source, and is schematically shown in the figure. In the MCNP calculations, neutrons are generated from the hatched regions depicted in the inserts.

This is a blank page.

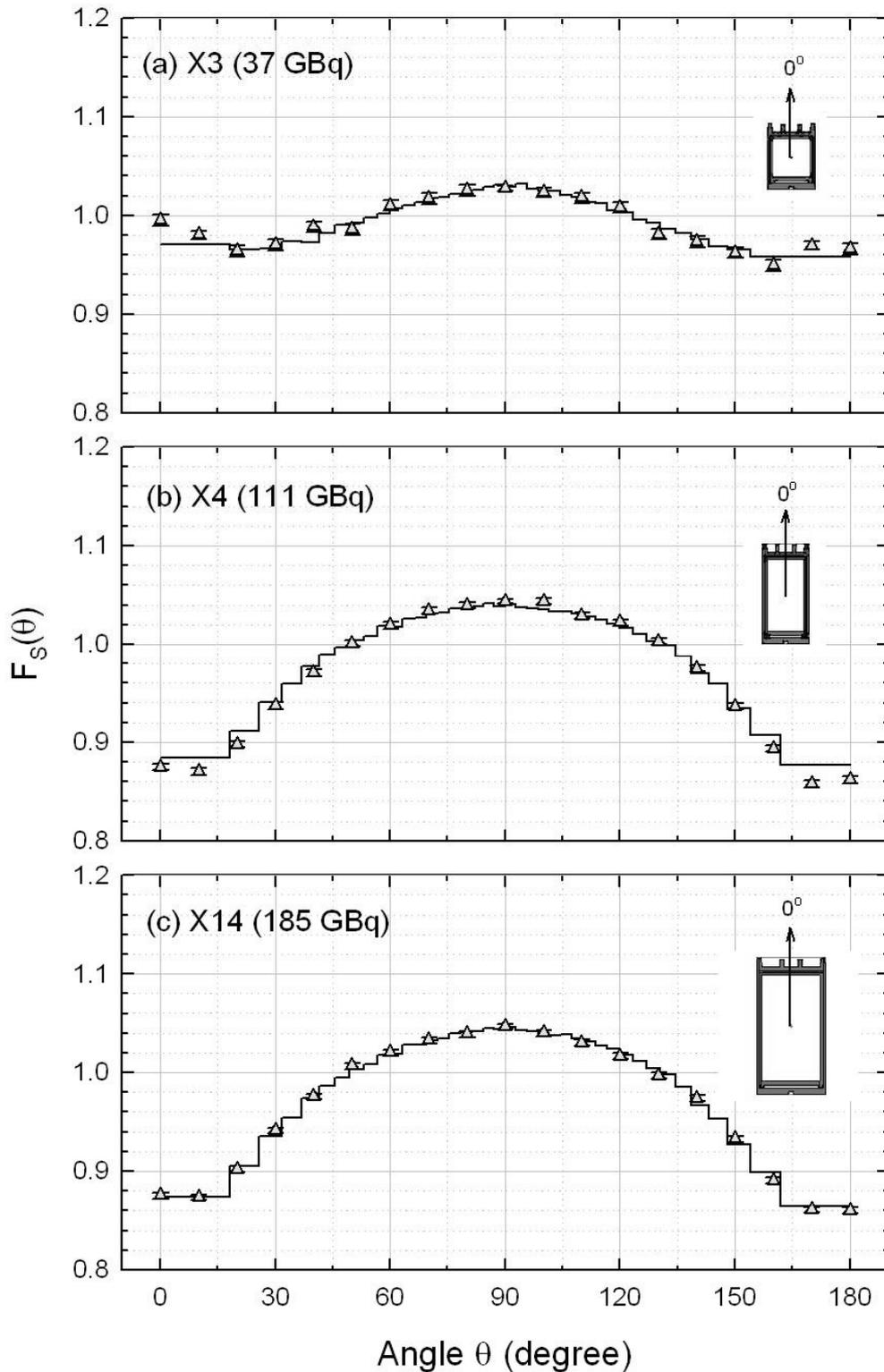
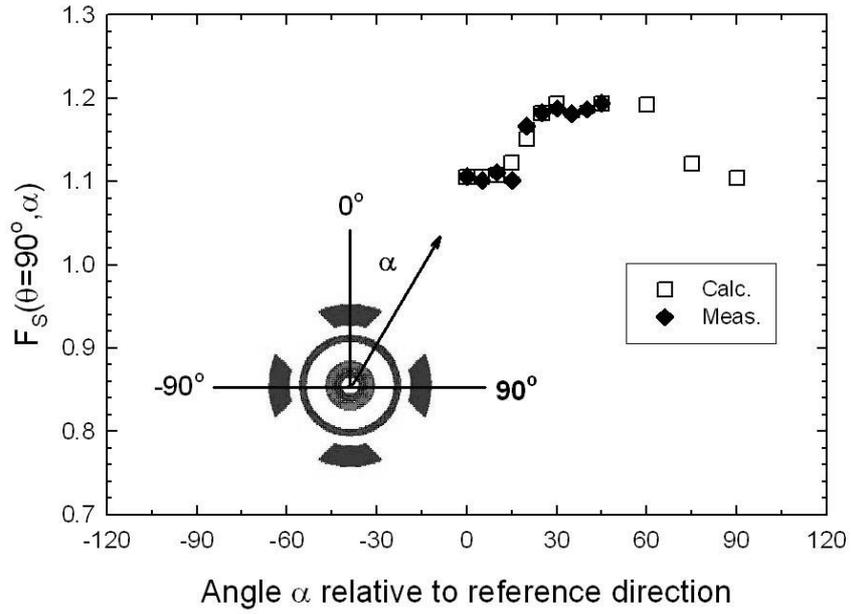
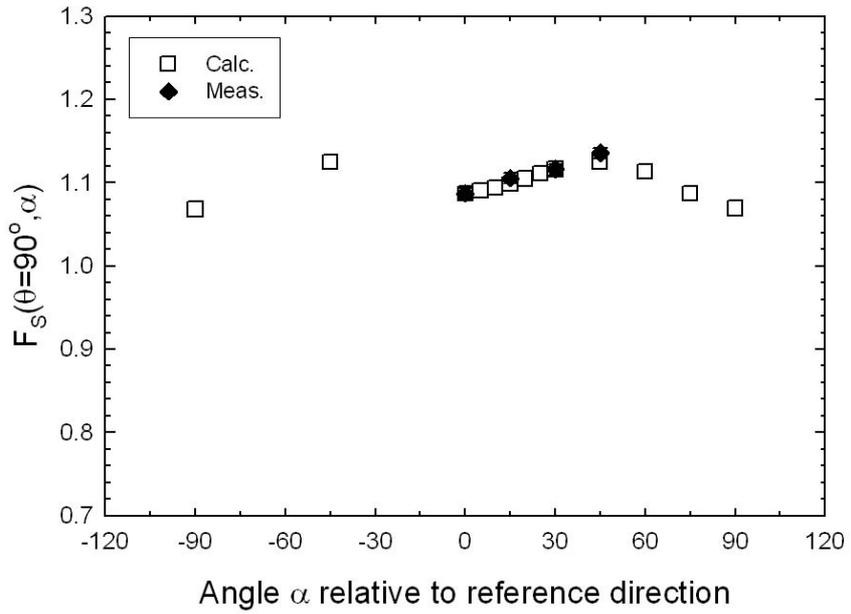


Fig. 14 Calculated anisotropy factors in polar angle,  $F_s(\theta)$ , for bare  $^{241}\text{Am-Be}$  sources of (a) an X3 capsule, (b) an X4 capsule and (c) an X14 capsule. Triangles are measured data by NPL in  $10^\circ$  steps for the sources of the same construction. The  $\theta=0^\circ$  corresponds to the welded end of the source, and is schematically shown in the figure.



(a)  $^{252}\text{Cf}$  (X1 capsule)



(b)  $^{241}\text{Am-Be}$  (X4 capsule)

Fig. 15 Variation of anisotropy factors in azimuth angle,  $F_s(\theta=0^\circ, \alpha)$ , for  $^{252}\text{Cf}$  and  $^{241}\text{Am-Be}$  sources with an irradiation apparatus.

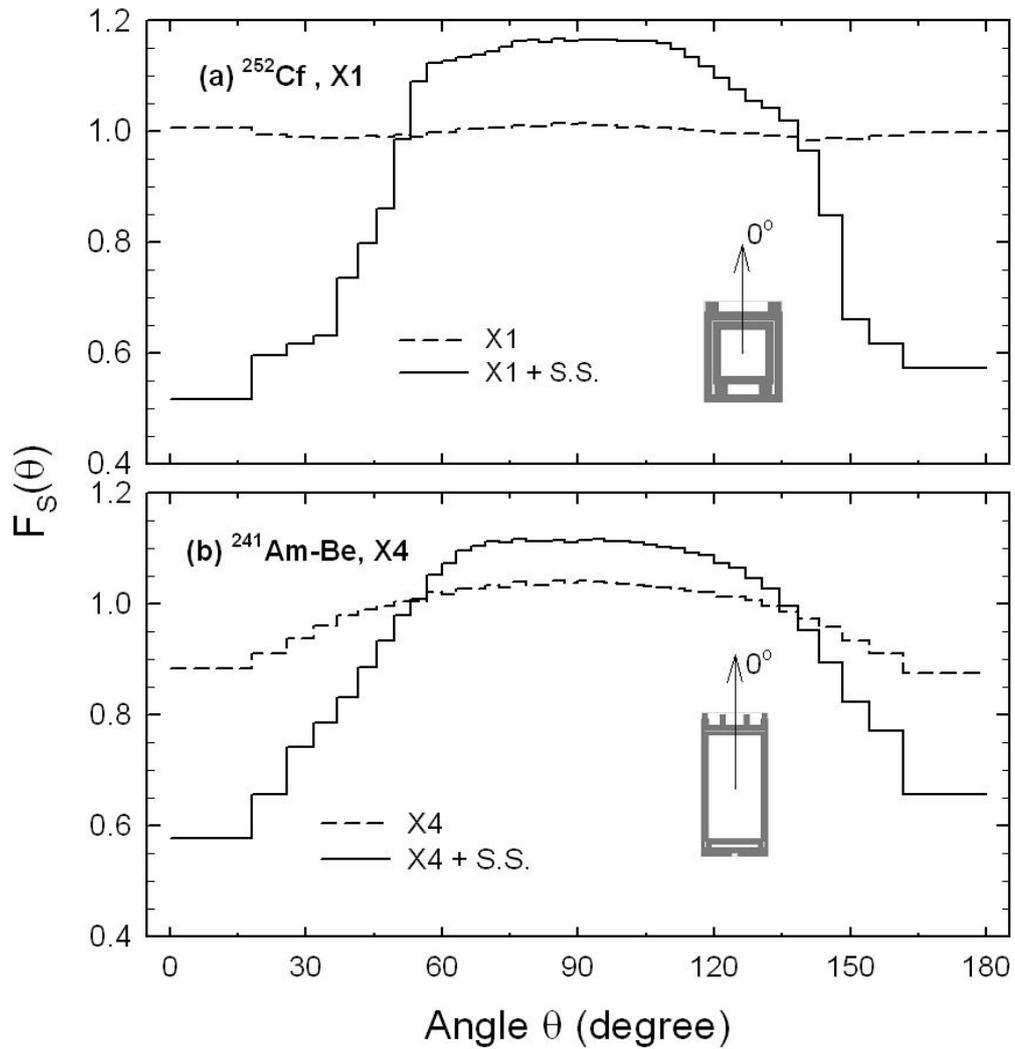


Fig. 16 Calculated anisotropy factors in polar angle,  $F_s(\theta)$ , for (a) an X1 capsule  $^{252}\text{Cf}$  source + support structure, and (b) an X4 capsule  $^{241}\text{Am-Be}$  sources + support structure. Also, shown are calculated anisotropy factors for bare sources of the same construction.

付録 X3 型  $^{241}\text{Am}$ -Be 中性子線源の非等方性計算のための MCNP 入力  
 $(^9\text{Be}(\alpha, n)$ 反応による中性子スペクトルは  $\text{AmO}_2$  の粒径  $3\ \mu\text{m}$  を仮定)

```
X3-40-p : Anisotropy calculation for  $^{241}\text{Am}$ -Be source (37GBq - X3 Capsule)
c Geometry : Amersham X3-Capsule
c Geometric center of active volume is set to PZ=0 plane
c Material : AmO2+Be mixture in SUS-316L
c Tally : Spherical surface detector with 40-segments
c Remarks : PERT card for perturbation analysis on source material
1 10 -1.1807 -3 -15 16 $ source material
2 0 -1 -13 14 $ void
3 12 -7.98 -5 -13 17 #1 #2 $ sus316
4 0 5 -6 -13 17 $ void
5 0 -8 -11 12 -22 23 $ void
6 12 -7.98 -8 -11 13 #5 $ sus316
7 12 -7.98 (-8 6 -13 17)
:(-8 -17 18)
:(-8 2 -18 19)
:(-7 4 -19 21) $ sus
8 12 -7.98 -9 10 -18 20 $ sus
9 0 -100 #1 #2 #3 #4 #5 #6 #7 #8 $ int.void
10 0 100 -99 $ int.void
99 0 99 $ ext.void

c Amersham X3 Capsule "complete" version
1 cz 0.780 $
2 cz 0.865 $
3 cz 0.875 $ active volume diam.=1.75cm
4 cz 0.910 $
5 cz 0.990 $
6 cz 1.000 $
7 cz 1.090 $
8 cz 1.120 $ 22.4mm diam.
9 cz 0.500
10 cz 0.300
11 pz 1.490 $ top of X3 capsule (slot side)
12 pz 1.390
13 pz 1.190
14 pz 1.090
15 pz 0.890 $ top of active volume
16 pz -0.890 $ bottom of active volume
17 pz -1.010
18 pz -1.210
19 pz -1.410
20 pz -1.560
21 pz -1.610 $ bottom of X3 capsule (M6 screw side)
22 px 0.10 $ slot
23 px -0.10 $ slot

c
100 so 100.0 $ spherical detector
101 pz 95.0 $ segment 01
102 pz 90.0 $ segment 02
103 pz 85.0 $ segment 03
104 pz 80.0 $ segment 04
105 pz 75.0 $ segment 05
106 pz 70.0 $ segment 06
107 pz 65.0 $ segment 07
108 pz 60.0 $ segment 08
109 pz 55.0 $ segment 09
110 pz 50.0 $ segment 10
111 pz 45.0 $ segment 11
112 pz 40.0 $ segment 12
113 pz 35.0 $ segment 13
114 pz 30.0 $ segment 14
115 pz 25.0 $ segment 15
116 pz 20.0 $ segment 16
117 pz 15.0 $ segment 17
118 pz 10.0 $ segment 18
119 pz 5.0 $ segment 19
120 pz 0.0 $ segment 20
121 pz -5.0 $ segment 21
122 pz -10.0 $ segment 22
123 pz -15.0 $ segment 23
124 pz -20.0 $ segment 24
125 pz -25.0 $ segment 25
126 pz -30.0 $ segment 26
127 pz -35.0 $ segment 27
128 pz -40.0 $ segment 28
129 pz -45.0 $ segment 29
130 pz -50.0 $ segment 30
131 pz -55.0 $ segment 31
132 pz -60.0 $ segment 32
133 pz -65.0 $ segment 33
134 pz -70.0 $ segment 34
135 pz -75.0 $ segment 35
136 pz -80.0 $ segment 36
```

```
137 pz -85.0 $ segment 37
138 pz -90.0 $ segment 38
139 pz -95.0 $ segment 39
99 so 1000.00 $ external void

mode n
imp:n 1 9R 0
c fcl:n 1
c
c Material cards
c
m10 4009.60c -0.92555 $ AmO2(0.37g)+Be(4.6g), 1.1807g/cm3
8016.60c -0.00873
95241.60c -0.06572
c m11 1001.60c 7.1990E-09 $ AIR
c 6000.60c 7.5840E-07 $ density 0.0012[g/cm^3]
c 7014.60c 3.9100E-05
c 8016.60c 1.0540E-05
m12 24000.50c -0.170 $ SUS316L
26000.55c -0.670 $ density 7.98[g/cm^3]
28000.50c -0.135 $ Cr 17.0% : Fe 67.0% : Ni 13.5% : Mo 2.5%
42000.60c -0.025
c m13 13027.60c 1.0
m14 4009.60c -0.91796 $ AmO2(0.37g)+Be(4.14g, -10%), 1.0715g/cm3
8016.60c -0.00962
95241.60c -0.07242
m15 4009.60c -0.93186 $ AmO2(0.37g)+Be(5.06g, +10%), 1.2900g/cm3
8016.60c -0.00799
95241.60c -0.06015
c
c Tallies
c Ring Detector
c f015z:n 0.0 100.0 0.8
c Point detectors
c f115:n -100.0 0.0 0.0 0.8
c Segmental-surface detectors
f111:n 100
f222:n 100
f332:n 100
fs332 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110
111 112 113 114 115 116 117 118 119 120
121 122 123 124 125 126 127 128 129 130
131 132 133 134 135 136 137 138 139
sd332 3141.592654 39R
c
c Perturbation
pert1:n cell= 1 mat= 14 rho= -1.0715 method= -1
pert2:n cell= 1 mat= 15 rho= -1.2900 method= -1
pert3:n cell= 1 rho= 0.0000 method= -1
c
c Source
sdef erg= d1 cel=1 ext=d3
pos= 0.0 0.0 0.0 rad=d2 axs=0.0 0.0 1.0
c
si2 0 0.875
sp2 -21 1
si3 -0.89 0.89
sp3 -21 0
c
c Energy boundary for scoring neutrons (same as IS08529-1)
e0
4.14E-07 1.10E-01 3.30E-01 5.40E-01 7.50E-01
9.70E-01 1.18E+00 1.40E+00 1.61E+00 1.82E+00
2.04E+00 2.25E+00 2.47E+00 2.68E+00 2.90E+00
3.11E+00 3.32E+00 3.54E+00 3.75E+00 3.97E+00
4.18E+00 4.39E+00 4.61E+00 4.82E+00 5.04E+00
5.25E+00 5.47E+00 5.68E+00 5.89E+00 6.11E+00
6.32E+00 6.54E+00 6.75E+00 6.96E+00 7.18E+00
7.39E+00 7.61E+00 7.82E+00 8.03E+00 8.25E+00
8.46E+00 8.68E+00 8.89E+00 9.11E+00 9.32E+00
9.53E+00 9.75E+00 9.96E+00 1.02E+01 1.04E+01
1.06E+01 1.08E+01 1.10E+01
c
sc1  $^9\text{Be}(\alpha, n)$  spectra from AMBE2.EXE (AmO2 diam=3micron)
sil
4.140E-07 1.000E-02 5.000E-02 1.000E-01 2.000E-01 3.000E-01
4.000E-01 5.000E-01 6.000E-01 7.000E-01 8.000E-01 9.000E-01
1.000E+00 1.100E+00 1.200E+00 1.300E+00 1.400E+00 1.500E+00
1.600E+00 1.700E+00 1.800E+00 1.900E+00 2.000E+00 2.100E+00
2.200E+00 2.300E+00 2.400E+00 2.500E+00 2.600E+00 2.700E+00
2.800E+00 2.900E+00 3.000E+00 3.100E+00 3.200E+00 3.300E+00
3.400E+00 3.500E+00 3.600E+00 3.700E+00 3.800E+00 3.900E+00
4.000E+00 4.100E+00 4.200E+00 4.300E+00 4.400E+00 4.500E+00
```

```

4. 600E+00 4. 700E+00 4. 800E+00 4. 900E+00 5. 000E+00 5. 100E+00
5. 200E+00 5. 300E+00 5. 400E+00 5. 500E+00 5. 600E+00 5. 700E+00
5. 800E+00 5. 900E+00 6. 000E+00 6. 100E+00 6. 200E+00 6. 300E+00
6. 400E+00 6. 500E+00 6. 600E+00 6. 700E+00 6. 800E+00 6. 900E+00
7. 000E+00 7. 100E+00 7. 200E+00 7. 300E+00 7. 400E+00 7. 500E+00
7. 600E+00 7. 700E+00 7. 800E+00 7. 900E+00 8. 000E+00 8. 100E+00
8. 200E+00 8. 300E+00 8. 400E+00 8. 500E+00 8. 600E+00 8. 700E+00
8. 800E+00 8. 900E+00 9. 000E+00 9. 100E+00 9. 200E+00 9. 300E+00
9. 400E+00 9. 500E+00 9. 600E+00 9. 700E+00 9. 800E+00 9. 900E+00
1. 000E+01 1. 010E+01 1. 020E+01 1. 030E+01 1. 040E+01 1. 050E+01
1. 060E+01 1. 070E+01 1. 080E+01 1. 090E+01 1. 100E+01 1. 110E+01

sp1
0. 000 1. 002E-05 1. 074E-04 2. 912E-04 1. 093E-03 1. 767E-03
2. 751E-03 3. 812E-03 5. 148E-03 6. 348E-03 6. 735E-03 6. 536E-03
6. 111E-03 5. 901E-03 5. 768E-03 5. 730E-03 5. 634E-03 5. 449E-03
5. 030E-03 4. 630E-03 5. 594E-03 7. 239E-03 7. 576E-03 8. 060E-03
8. 903E-03 9. 613E-03 9. 960E-03 1. 059E-02 1. 126E-02 1. 332E-02
1. 531E-02 1. 718E-02 2. 042E-02 2. 301E-02 2. 334E-02 2. 170E-02
2. 003E-02 1. 853E-02 1. 751E-02 1. 672E-02 1. 598E-02 1. 564E-02
1. 559E-02 1. 564E-02 1. 587E-02 1. 614E-02 1. 639E-02 1. 665E-02
1. 676E-02 1. 705E-02 1. 738E-02 1. 769E-02 1. 804E-02 1. 759E-02
1. 744E-02 1. 661E-02 1. 543E-02 1. 448E-02 1. 360E-02 1. 312E-02
1. 234E-02 1. 074E-02 8. 691E-03 7. 164E-03 6. 888E-03 8. 923E-03
1. 160E-02 1. 314E-02 1. 279E-02 1. 123E-02 9. 620E-03 8. 436E-03
7. 914E-03 7. 676E-03 7. 733E-03 7. 971E-03 8. 195E-03 8. 477E-03
8. 639E-03 8. 668E-03 8. 783E-03 8. 664E-03 8. 407E-03 7. 866E-03
7. 144E-03 6. 362E-03 5. 529E-03 4. 897E-03 4. 258E-03 3. 706E-03
3. 255E-03 2. 937E-03 2. 768E-03 2. 781E-03 2. 974E-03 3. 301E-03
3. 724E-03 4. 089E-03 4. 364E-03 4. 350E-03 4. 345E-03 4. 067E-03
3. 754E-03 3. 339E-03 2. 765E-03 2. 267E-03 1. 722E-03 1. 208E-03
7. 898E-04 5. 166E-04 2. 900E-04 1. 259E-04 2. 667E-05 4. 047E-07

c
prtmp j -100 1 3
print
c
nps 20000000

```

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位		記号
	名称	記号	
面積	平方メートル	m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>
体積	立方メートル	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
速度	メートル毎秒	m/s	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>
波数	毎メートル	m <sup>-1</sup>	m <sup>-1</sup>
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg	m <sup>3</sup> /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>	A/m <sup>2</sup>
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m	A/m
(物質質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>	mol/m <sup>3</sup>
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>	cd/m <sup>2</sup>
屈折率	(数の) 1	1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン <sup>(a)</sup>	rad		m・m <sup>-1</sup> =1 <sup>(b)</sup>
立体角	ステラジアン <sup>(a)</sup>	sr <sup>(c)</sup>		m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> =1 <sup>(b)</sup>
周波数	ヘルツ	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m・kg・s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> ・kg・s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m <sup>2</sup> ・kg・s <sup>-2</sup>
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> ・kg・s <sup>-3</sup>
電荷, 電気量	クーロン	C		s・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> ・kg・s <sup>-3</sup> ・A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>4</sup> ・A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup> ・A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m <sup>-2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>3</sup> ・A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(d)</sup>			K
光照射 (放射性核種の)放射能	ルーメン	lm	cd・sr <sup>(c)</sup>	m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> ・cd=cd
吸収線量, 質量エネルギー当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> ・m <sup>-4</sup> ・cd=m <sup>-2</sup> ・cd
	シーベルト	Sv	J/kg	s <sup>-1</sup>
			J/kg	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup>

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。  
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。  
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。  
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度mのようにSI接頭語を併せて用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m <sup>-1</sup> ・kg・s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m <sup>2</sup> ・kg・s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg・s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m・m <sup>-1</sup> ・s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> ・m <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg・s <sup>-3</sup>
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> ・kg・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup>
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m <sup>2</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎メートル毎ケルビン	J/(m・K)	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup> ・K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> ・kg・s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup> ・A <sup>-1</sup>
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> ・s・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> ・s・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>-3</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>4</sup> ・A <sup>2</sup>
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・mol <sup>-1</sup>
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup> ・mol <sup>-1</sup>
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-2</sup> ・K <sup>-1</sup> ・mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及び線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> ・s・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> ・s <sup>-3</sup>
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> ・m <sup>-2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> ・sr)	m <sup>2</sup> ・m <sup>-2</sup> ・kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup> =kg <sup>-1</sup> ・s <sup>-3</sup>

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1 °=( /180) rad
分	'	1'=(1/60) °=( /10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=( /648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>
トン	t	1 t=10 <sup>3</sup> kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49) × 10 <sup>-19</sup> J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10) × 10 <sup>-27</sup> kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30) × 10 <sup>11</sup> m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam <sup>2</sup> =10 <sup>2</sup> m <sup>2</sup>
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 <sup>5</sup> Pa
オングストローム		1 Å=0.1nm=10 <sup>-10</sup> m
バール	b	1 b=100fm <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm <sup>2</sup> =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm <sup>2</sup> /s=10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s
ガウス	G	1 G ≙ 10 <sup>4</sup> T
エルステッド	Oe	1 Oe ≙ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≙ 10 <sup>-8</sup> Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> cd/m <sup>2</sup>
ホト	ph	1 ph=10 <sup>4</sup> lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s <sup>2</sup> =10 <sup>-2</sup> m/s <sup>2</sup>

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7 × 10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58 × 10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
X線単位	X unit	1 X unit=1.002 × 10 <sup>-4</sup> nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 <sup>-26</sup> W・m <sup>-2</sup> ・Hz <sup>-1</sup>
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1 metric carat=200 mg=2 × 10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.184 J
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m

