

PDF issue: 2025-06-22

Unfolding法を用いた中性子線量計用ラジエータの設計手法の改善

梶原,將司

小田, 啓二

山内,知也

大口,裕之

山本,幸佳

(Citation) 神戸大学大学院海事科学研究科紀要,09:20-25

(Issue Date) 2012

(Resource Type) departmental bulletin paper

(Version) Version of Record

(JaLCDOI) https://doi.org/10.24546/81003935

(URL) https://hdl.handle.net/20.500.14094/81003935



Unfolding 法を用いた中性子線量計用ラジエータの設計手法の改善

Improvement of Design Technique of Radiator for Neutron Dosemeter by Unfolding Method

梶原 將司*, 小田 啓二, 山内 知也, 大口 裕之**, 山本 幸佳** Masashi KAJIHARA*, Keiji ODA, Tomoya YAMAUCHI, Hiroyuki OHGUCHI**, Takayoshi YAMAMOTO**

(平成24年4月6日受付)

Abstract

The sensitivity of commercial personal neutron dosemeters composed of poly-allyl-diglycol carbonate (PADC, called as CR-39), and a radiator of polyethylene sheet, in general, have a large dependence on the neutron energy owing to that of the cross section for elastic collisions and the factor converting from neutron fluence into the personal dose-equivalent. The deviation in the sensitivity could be controlled within 15% in the energy range between 0.1 and 20 MeV with multi-layered radiator. In this report, a systematic design of material and thickness of radiator is proposed, which are carried out in two steps; calculation of depth-dependent hydrogen concentration in an ideal radiator by using the unfolding method and approximation by several sheets of plastics available easily.

(Received April 6, 2012)

1. はじめに

近年、大強度陽子加速器施設(J-PARC)やX線 自由電子レーザー施設(SACLA)の運用が開始さ れた。このような大型加速器施設、重粒子線治 療施設周辺や国際宇宙ステーションでは、広い エネルギー範囲に分布する中性子が存在するの で、放射線防護の観点から適切なレスポンスを 有する線量計の整備が不可欠である。

現在、一ヶ月程度の積算線量を測定できる個人 中性子線量計は、ポリアリル・ジグリコール・カー ボネイト(PADC、商品名 CR-39) プラスチック と増感用ラジエータ(ポリエチレンシート)で構 成されている。

CR-39 プラスチックは、1942 年にコロンビア・ レジン社が 39 番目に開発したメガネ商品を 1978 年に Cartwight らにより飛跡検出器として紹介さ れた[1]。他の飛跡検出器と比べて荷電粒子に対す る感度が高い、X·γ線に対して不感である、安価 である、小型であるという特長を有している。こ れら優れた特性から、現在、最も頻繁に利用され ている検出器のひとつである。

市販の線量計の感度のエネルギー依存性を調 べるために、厚さ93 [mg/cm²]のポリエチレンラジ エータを装着した CR-39 に 0.14, 0.57, 5, 15 MeV の単色中性子を照射する実験が産業技術総合研 究所内のパンデグラフ加速器を使用して行われ た[2]。その結果、線量計感度は 0.1 MeV 付近から エネルギーが増加するとともに高くなり、5 MeV から急激に低下していることがわかった。これら は、弾性散乱断面積及び個人線量当量換算係数[3] が中性子エネルギーの変化に伴い大きく変化す るためであると考えられる。

個人線量当量を測定するためには、すべての中 性子エネルギーにおいて、線量計の単位フルエン ス当たりの効率が、個人線量当量換算係数に対し て一定の線型性を持つことが望ましい。そのよう

^{*} 神戸大学大学院海事科学研究科博士前期課程

^{** (}株)千代田テクノル 技術研究所

に設計された線量計は、中性子エネルギーに対し て一定のレスポンスを示すので、レスポンスの定 数倍を個人線量当量として評価できる。従って、 線量計感度は、全ての中性子エネルギーに対して 一定であることが理想的であるが、通常の線量計 は大きなエネルギー依存性を有している。

この依存性を制御するために過去に行われた 研究[4,5]を参考に、昨年までに、PEと不感層の組 み合わせで構成された多層構造ラジエータの手 動的な設計が試みられた[6]。本研究では、ポリエ チレン(PE)以外の水素含有プラスチックの使用 を前提とし、飛跡検出器 CR-39 に装着するラジエ ータを出来るだけ系統的に設計する手法を確立 することを目的とした。

2. 手動的な多層構造ラジエータの設計

Matiullah 等[4]は検出器とPE ラジエータの間に 鉛の減速材を挿入することで、感度がピークとな るエネルギーを制御できることを示唆した。これ を発展させ、ラジエータと不感層からなる多層構 造ラジエータ設計する手法が提案された[6]。

分割ラジエータの感度Sは、個人線量当量換算 係数h(E)及び弾性散乱に対する角度微分断面積 $d\sigma/d\Omega$ を用い、ラジエータ始点厚さ z_0 と終点厚さ z_1 とすると、次式で表すことができる。

$$s(E, z_0, z_1) = \frac{1}{h(E)} \int_{z_0}^{z_1} N \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega$$
(1)

多層構造ラジエータでは、各々の寄与分の合計と なるので、ラジエータ分割番号を *j*=1,2,3...*m、j* 番目の分割ラジエータの感度を *S_i*とすると、

$$S_{Total} = \sum_{j=0}^{m} S_j \tag{2}$$

となる。

Fig. 1 は多層構造ラジエータの設計手順の一例 をまとめたものである。図中の青色の破線はラジ エータに関係なく CR-39 内部で発生する粒子によ る感度寄与分である。設計条件として、感度の幅 をピンクの帯内に抑えることを目標とする。まず、 一層目 ($z_0=0$) のラジエータの厚さを変えて(1)式 を計算し、約 2MeV の所のピークが帯の上限を超 えない厚さを求めると、 $z_1=2.8 \text{ mg/cm}^2$ となること がわかった。次に、帯の下限を下回らない二層目 の開始点 (z_0) は 24.3、上限を越えない二層目の 終点 (z_1) は 38.3 mg/cm² であった。以下、同様に、 三層 103.3~155.2 mg/cm² 及び四層目 202.2~300 mg/cm² の厚さを決定した。この多層構造ラジエー タを用いると、0.1~20 MeV の中性子エネルギー 領域に対して、感度の偏差を 14%以内に制御でき ることがわかった。



Fig. 1. Energy dependence of the sensitivity with multi-layer radiator and respective layers [6].

3. 逆問題を利用した系統的な設計手法



Fig. 2. Calculation of the sensitivity for a given multi-layer structure (a) and the reverse procedure for estimating hydrogen concentration for constant sensitivity (b).

過去の研究においては、Fig. 2 (a)に示すように、 ポリエチレン (水素原子密度値: $N = N_{PE}$)及び 不感層 (N=0) で構成された多層構造ラジエータ の厚さと層数を繰り返し計算するという手法に より、エネルギー依存性の制御がある程度可能で あることが確認できた。

本研究では発想を転換し、Fig. 2 (b)に示すよう に、感度のエネルギー依存性が全くないという理 想的な条件を与え、逆にラジエータ中の水素原子 密度を未知数として求めてみることにした。

(1)式中の*N*を厚さの関数*N*(*z*)とし、感度は一定 値*S*とする。さらに、微分断面積と個人線量当量 換算係数をまとめた項を*R*(*E*, *z*)とすると、

$$S = \int_0^{z_{\text{max}}} R(E, z) N(z) dz$$
(3)

と書くことができる。

ここで、*R*(*E*, *z*)は、

$$R(E,z) = \frac{1}{h(E)} \int_0^{4\pi} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega$$
 (4)

であり、水素原子当たりの感度寄与分を表してい る。つまり、ある深さzのところの水素原子1個 とエネルギーEを持った中性子との弾性散乱によ り発生した反跳陽子が CR-39に入射し、さらにエ ッチング後にピットとして計数される割合を換 算計数で除したものである。なお、すべての潜在 飛跡がエッチピットとして観察される訳でなく、 飛跡検出器特有の二つの条件(反跳角度が大きな 陽子が入射してもエッチピットが形成されない という臨界角条件と顕微鏡で計数する際に、表面 のゴミやキズなど区別するためのピット径条件) により制限される。



Fig. 3. Contribution per unit density of hydrogen atom existing at a depth in radiator.

Fig. 3 中のそれぞれの曲線は、z=0.1, 1, 10, 100, 300 [mg/cm²] の時の感度寄与分*R*(*E*, *z*)の計算結果 をまとめたものである。中性子エネルギーが低す ぎると、ある深さの水素原子との弾性散乱で反跳 された陽子は検出素子に到達しない。また、エネ ルギーがあまりに高くなると、反跳陽子のエネル ギーも高くなり、CR-39 で検出しにくくなる。こ のため、Fig. 3 に示されているように、*R*(*E*, *z*)は深 さによって異なるエネルギーでピークを形成す る。Fig. 4 は両者の関係を表している。

なお、Fig. 3 のピークの絶対値が深さとともに 低下するのは、弾性散乱断面積の減少が主な原因 である。



Fig. 4. Relation between neutron energy and depth where values of peak were calculated from Fig. 3.

このように R (E, z)は既知であるので、S が一定 とすると、(3)式は N(z)を未知数とするフレドホル ム型積分方程式であると考えることができる。従 って、この逆問題を解くことによって、任意の水 素密度を持つ理想的なラジエータを求めること ができるはずである。

3. 逆問題の解法

(3)式は、*i*=1,2,3...*n* をエネルギー分割番号とすると、

$$S = \sum_{j=1}^{n} R_{i,j} N_j \tag{5}$$

という行列式で表すことができる。 エネルギー分割数をラジエータの層数と同じ (*i=j*)にすると、(5)式は正方行列となり、n元連 立方程式として解析的に求めることができる。し かしながら、実際に計算すると、解が負となった り、非現実的に大きい値になってしまう。

そこで、箔放射化法で用いられるしきい検出器 など、異なる感度曲線を有する複数の検出器のレ スポンスから中性子分布を推定する計算コード として有名な SAND-II の計算手法[7]を参考にし て、Unfolding プログラムを C++言語で作成した。

繰り返し定数を k=1,2,3...l とし、k 回目の解 を $N_{j}^{[k]}$ と表すことにする。まず、全ての中性子 エネルギーに対して一定の感度 S と k 回目の計 算値 $S_{i}^{[k]}$ の比である

$$A_i^{[k]} = S / S_i^{[k]} \tag{7}$$

を求め、次に初期推定値 $N_j^{[0]}$ を適当に与える (Initial Guess)。本手法では、各エネルギー及び 厚さ領域ごとの加重係数 $W_{i,j}^{[k]}$ は、j番目の厚さ 領域における感度寄与 $\varepsilon_{i,i} = R_{i,i}N_i$ を用いて、

$$W_{i,j}^{[k]} = \varepsilon_{i,j}^{[k]} / S_i^{[k]} \qquad \langle j=1 \rangle,$$
$$W_{i,j}^{[k]} = \frac{\varepsilon_{i,j}^{[k]} + \varepsilon_{i,j-1}^{[k]}}{2} / S_i^{[k]} \qquad \langle j=2,3, \cdots m \rangle (8)$$

となる。k+1回目の解は、k回目の補正係数 $C_{j}^{[k]}$ を用いると、

$$C_{j}^{[k]} = \sum_{i=1}^{l} W_{i,j}^{[k]} \ln A_{i}^{[k]} / \sum_{i=1}^{l} W_{i,j}^{[k]}$$
(9)
$$N_{i}^{[k+1]} = N_{i}^{[k]} \exp C_{i}^{[k]}$$
(10)

$$I = \sum_{j=0}^{m} \left(\frac{N_j^{[k+1]} - N_j^{[k]}}{N_j^{[k]}} \right)^2$$
(11)

と定義し、*I*が10⁻⁵以下を示すまで繰り返し計算 を行った。

一例として、1~20 MeV の中性子エネルギー領域を n=21 分割し、382 mg/cm²のラジエータ厚さを m=5、10、20 分割した場合に Unfolding 法により求められた水素原子密度分布を Fig. 5 に示す。

このようにして求まったラジエータの相対感 度は、21 個の分割したエネルギー群に対してはほ とんど一定となる。しかし、各々のエネルギー幅 内の平均値は同じでも、その幅内を細部にみると わずかに依存する可能性がある。このことを確か めるために、上述の Unfolding によって決まった 水素原子密度分布を(3)式に代入し、*S*(*E*)を再計算 した(順方向の計算、Folding)。その結果を Fig. 6 に示す。3つの分割数について求まったラジエー タに対する線量計感度の偏差は、各々、38.9、12.1、 5.9%であったことから、層数を増加させるほど理 想的なラジエータに近づくことがわかった[7]。



Fig. 5. Depth-dependent hydrogen concentration of ideal radiator obtained by unfolding method.



Fig. 6. Detailed energy dependence of the sensitivity with a designed multi-layer radiator shown in Fig. 5.

4. 現実的なラジエータの設計

Unfolding 法で計算された Fig. 5 のような任意 の水素原子密度を持った物質は実存しない。また、 多くの異なる物質の重ね合わせという多層構造 は、実用性という観点からは適さない。従って、 次のステップとして、理想的な構造に近い現実的 なラジエータについて考える必要がある。そこで、 ある程度のエネルギー依存性が現れることを覚 悟して、ラジエータ構造の簡略化及び実在物質の 適用という条件を課すことにした。

まず、水素原子密度の値が近く、かつ隣り合う 層をひとまとめにするという方法で、現実的で作 製可能であると考えられる層数まで簡略化を図 った。Fig. 5 中の実線が示す水素原子密度分布に 対して上記の方法を用いて、20 層から順次まと め、最終的に3 層まで簡略化を行った。その結果 を Fig. 7 の実線に示す。ラジエータ厚さは1 層目 から順に、0-2、2-68、68-382 mg/cm²となった。 なお、それぞれの相対水素原子密度の値は、1.00、 0.12、0.38 であった。



Fig. 7. Simplified depth-dependent hydrogen concentration of realistic radiator

次に、上述の相対水素原子密度(0.12 と 0.38) に近い実在する物質を検討する。この際、固体で あること、耐衝撃性が高いこと、及び比較的に安 価で入手しやすいこと等の条件から、市販されて いるプラスチックを探した結果、それぞれ、ポリ イミド(商品名 Kapton)、ポリイミド(商品名 Upilex)を選択した。さらに、実際に市販されて いるプラスチックフィルムの厚さを考慮して、最 終的に、20 µm の PE、450 µm の Kapton 及び 2100 µm の Upilex の組み合わせが現実的であるという 結論にいたった。

最終設計されたラジエータを有する線量計レ スポンスの再計算の結果をFig.8内の実線に示す。 なお、3つの破線は、各層の感度寄与分を表している。この結果より、三層構造のラジエータを装着することによって、1~20 MeVの中性子エネルギーに対して、感度の偏差は18.3%以内に制御できることがわかった。



Fig. 8. Energy dependence of the sensitivity with a designed realistic radiator shown in Fig. 7.

5. 結論

固体飛跡検出器に装着するラジエータの増感 効果に着目し、Unfolding 法を用いた系統的なラ ジエータ設計手法を考案し、線量計感度のエネル ギー性の改善を試みた。その結果、以下のことが 分かった。

- (1) 線量計感度を表す積分方程式内の変数である単位水素原子当たりの感度寄与分 R(E, z)を計算した。R(E, z)は、与えられた深さzに対して、あるエネルギーでピークとなることがわかった。
- (2)従来の手法とは逆に、すべての中性子エネル ギーに対して線量計感度が一定であるという 条件で、ラジエータ中水素原子密度分布を未 知数として計算できる(積分方程式を解くこ とができる)ことを示した。
- (3) 逆問題を解くために、計算コード SAND-IIの 手法を参考にした計算プログラムを作成した。 この方法で水素原子密度分布の計算を行うと、 ラジエータの層数を増やすほど理想的なラジ エータに近づくことが確認できた。このこと から、Unfolding 法が有効であるといえる。

(4) 次に、ラジエータの実用化という観点から、 エネルギー依存性を少し犠牲にして、ラジエ ータ構造の簡略化及び実在物質の適用を検討 した。その結果、20 µm の PE、450 µm の Kapton 及び 2100 µm の Upilex のという構成の現実的 なラジエータを設計することで、1~20 MeV の中性子エネルギーに対して、感度の偏差を 18.3%に制御できることが分かった。

参考文献

- B. G. Cartwright, E. K. Shirk and P. B. Price: "A nuclear-track-recording polymer of unique sensitivity and resolution", Nucl. Instrum. Meth. 153 (1978) 457-460.
- [2] 大口裕之: "固体飛跡検出器を用いた広エネルギー帯 域中性子個人線量計の開発と評価". 神戸大学, 博士論 文 (2009).
- [3] ICRP Publication 74, "Conversion coefficient for use in radiation protection against external radiation", 1996.
- [4] Matiullah and S. A. Durrani: "Development of a passive

fast-neutron spectrometer based on electrochemically etched CR-39 detectors with radiators and degraders", Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B28 (1987) 101-107.

- [5] D. Hermsdorf R. Bretschneider, B. Dorscel and J. Henniger: "Neutron response calculation on the basis of variable track etch rates along the secondary particle trajectories in CR-39", Radiat. Meas. 31 (1999) 431-436.
- [6] D. Hayano, H. Ohguchi, T. Yamaguchi, T. Yamamoto and K. Oda: "Control of relative sensitivity of track detector-based neutron dosemeter using radiator of multi-layer structure", Prog. Nucl. Sci. & Technol., 1 (2011) 162-165.
- [7] W. N. McElroy, S. Berg and G. Gigas: "Neutron-flux spectral determination by foil activation", Nucl. Sci. Eng. 27 (1967) 533-541.
- [8] K. Oda, D. Hayano, M. Kajihara, H. Ohguchi, T. Yamauchi and T. Yamamoto: "Control technique of personal dosemeter response to fast neutrons with multi-layer radiator", Radiat. Meas. 46 (2011) 1786-1789.