

平成21年5月4日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2005～2008  
 課題番号：18360457  
 研究課題名（和文） 特殊ラジエータを用いた高エネルギー対応型個人中性子線量計測システムの開発  
 研究課題名（英文） DEVELOPMENT OF PERSONAL DOSIMETRY SYSTEM RESPONSIBLE FOR HIGH-ENERGY NEUTRONS USING SPECIALLY DESIGNED RADIATORS  
 研究代表者  
 小田 啓二（ODA KEIJI）  
 神戸大学・大学院海事科学研究科・教授  
 研究者番号：40169305

## 研究成果の概要：

粒子加速器周辺や宇宙活動において問題となっている高エネルギー中性子による被ばく線量測定手法の開発を目的とした。CR-39を素子とした積算型線量計では、エッチピット径の分布を測定し加重係数を乗じる方法、及び多層構造ラジエータを用いたエネルギー依存性の改良手法を確立した。直読式線量計については、全空乏層型シリコン検出器を選択した。適切な波高弁別レベルを設定して得られる2つのレスポンスの線形和として求める手法を確立した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2007年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
総計	14,900,000	4,470,000	19,370,000

研究分野：放射線計測、放射線防護

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：個人中性子線量計，固体飛跡検出器，多層構造ラジエータ，電子式線量計，パルス波高分布，個人線量当量レスポンス

## 1. 研究開始当初の背景

国家プロジェクトとして建設されている大強度陽子加速器（J-PARC）周辺の放射線防護計測、国際宇宙ステーション内での滞在中や航空機搭乗に伴う線量測定、東海村臨界事故後に指摘された緊急時線量評価など、特に個人中性子線量計測の重要度が増している。

このような高エネルギー粒子加速器周辺や高度上空・宇宙空間においては、従来対象としてきた中性子場と比べると、1 MeV 付近のフルエンスのピークに加えて数 10～

100MeV 付近にもうひとつのピークが存在し、この中性子の線量寄与が比較的大きいことが指摘されている。よく知られているように、このような高エネルギー領域では、一般に中性子測定器の検出効率は急激に低下するので、その対策が急務となっていた。

## 2. 研究の目的

本研究では、放射線計測の立場から、個人中性子線量計（積算型および直読式）の高エネルギー領域への対応とその技術を開発す

ることを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1)積算型線量計

検出素子としては、飛跡検出器の中で最も重荷電粒子に対する感度が高いポリアリルジグリコール (PADC) プラスチック (商品名: CR-39) を選択した。この PADC を持ってしても数 MeV 以上のエネルギーの中性子に対する相対感度は急激に低下してしまう。そこで、この低下を補うために、エッチピット計測上の工夫 (ピット径分布、グレイサイズ分布、円形度係数) とラジエータの工夫を施した。前者では、高速処理顕微鏡を用いて、中性子照射された試料のエッチピット数の計数だけでなく、個々のエッチピットの情報を記録し、高エネルギー中性子に特有な情報を有するエッチピットの割合で補正することを試みた。

#### (2)直読式線量計

直読式線量計については、まず、PN 接合型、シリンドリフト型、全空乏層型のシリコン半導体素子の特性を調べた。次に、原子力機構標準放射線施設や高崎量子応用研究所にある加速器中性子源を用いて、5, 15, 45, 60, 75MeV の単色 (または準単色) 中性子に対する応答 (パルス波高分布) を調べた。また、単純なラジエータ/検出素子の体系で、理論的に吸収エネルギー分布を求める計算手法の開発を行った。最終段階として、線量計のエネルギー依存性の改良のための手法の確立を図った。

### 4. 研究成果

#### (1)積算型線量計

図1は0.14, 0.57, 5, 15 MeV 単色中性子場に置いた CR-39 線量計に記録されたエッチピットのピット径分布である。太い実線で示されたように、15MeV 中性子の場合に、比較的大きなピットが観察されている。この数を加重することにより、相対感度のエネルギー依存性改良が可能であることが分かった。

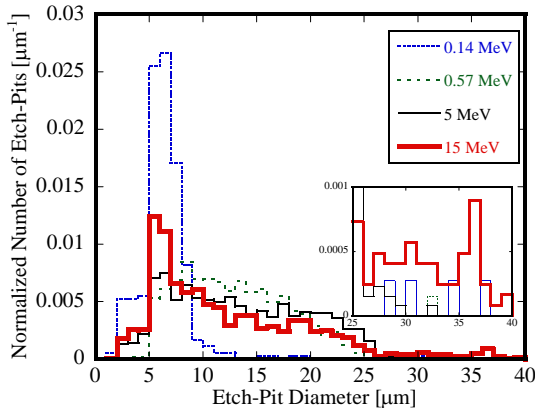


図1. エッチピット径分布

但し、相対的に数が少ないので、低線量では誤差が大きくなることに注意する必要がある。その他の情報 (グレイサイズ=濃さ、円らしさを表す係数=長短軸比など) の適用性は確認できなかった。

ラジエータについては、従来提案してきた「二層構造ラジエータ」による増感手法の改良と実用化を図った。重水素化炭化水素とポリエチレンの二層構造が有望であり、その効果も実験的に確認することができた。しかしながら、個人装着という条件から全体の厚さに制限がかかってしまうが、約70MeVまでのレスポンスまでは保証できることが分かった。ただし、通常のパッケージという観点からは、経済的な制限が加わることになる。

また、ラジエータと検出素子の間に不感層 (=減速層) を置くという二層構造についても検討した。図2に示すように、特に数 MeV から10MeV以上の領域でのエネルギー依存性をある程度制御することが可能であることを確認した。さらに、この手法を進めると、多層構造ラジエータの設計も可能であることも示した。

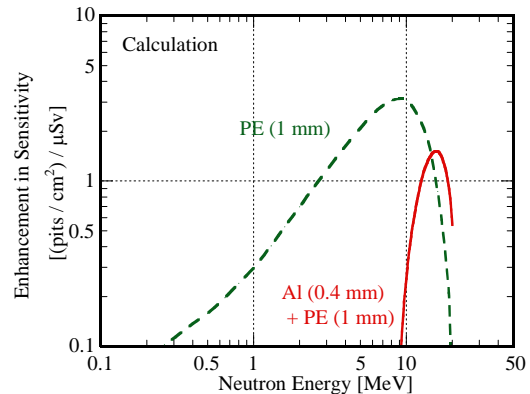


図2. ラジエータ・不感層による感度制御

#### (2)直読式線量計

まず、いくつかの素子について、神戸大学タンデムバンデグラフで加速したプロトンに対する応答測定実験、およびγ線照射実験を行った。この結果、小型軽量、γ線影響が無視できること、動作が安定していること、理論的解析が容易であることなどの条件から、全空乏層型シリコン半導体検出器を選択することにした。

次に、単色中性子場においてパルス波高分布を測定した。その結果を図3の実線に示す。また、中性子弾性散乱の角度微分面積とプロトンの飛程・エネルギーの関係を用いた理論計算を行った。ほぼ同じ条件 (空乏層厚さ20μm、中性子エネルギー5MeV) で計算した吸収エネルギー分布を同じく図3の破線に示す。実験データの横軸 (パルス波高) の校

正が不完全ではあるが、両者の形状および絶対値とも良い一致を確認できた。

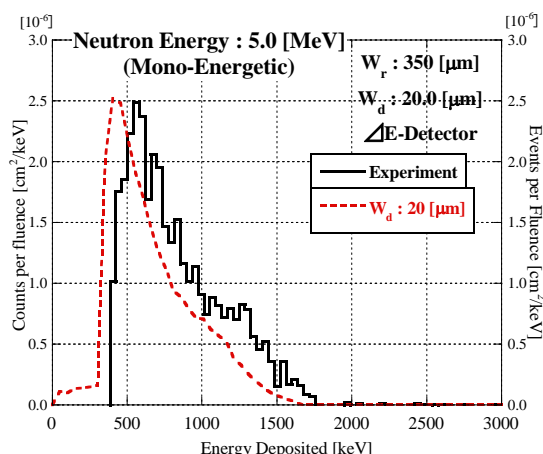


図3. 半導体検出器のパルス波高分布

この計算手法を用いてエネルギー依存性の改良方法を検討した。最終的に、空乏層厚さ、ラジエータの厚さと種類、パルス波高の下限弁別レベル（ $\gamma$ 線との分離）、2ウィンドー法における弁別レベル（このレベルの上か下で2つのウィンドーに分け、各々のカウント数の線形和から線量当量を推定する）など多くのパラメータの最適化を行った。また、空乏層厚さの異なる2つの素子を使うことによって、図4に示すように、各々破線のような相対感度の線形和をとることによって、実線のような約10%以内のエネルギー依存性を達成した。

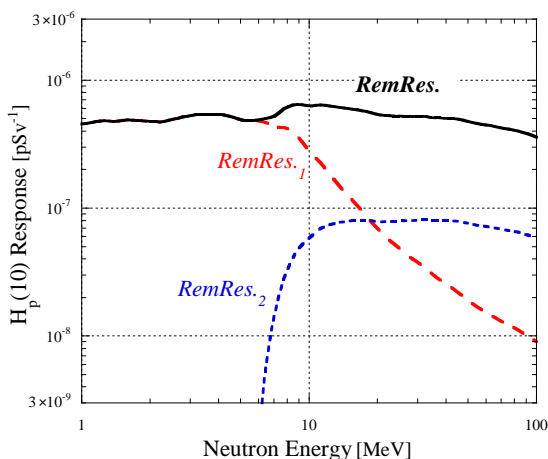


図4. 2素子によるエネルギー依存性の制御

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件)

1) Y. Mori, T. Ikeda, T. Yamauchi,

A. Sakamoto, H. Chikada, Y. Honda, K. Oda: “Radiation chemical yield for loss of carbonate ester bonds in PADC films exposed gamma ray”, *Radiation Measurements*, 2009, in press, 査読有

2) K. Oda, K. Iwano, T. Yamauchi, H. Ohguchi, T. Nunomiya, S. Abe, T. Nakamura: “Some improvements in personal dosimetry for high-energy neutrons”, *Proceedings of 12th International Congress of the International Radiation Protection Association*, CD-ROM, ID-0468, 2008, 査読無

3) K. Oda, K. Iwano, T. Yamauchi, T. Nunomiya, S. Abe, T. Nakamura: “Response of semiconductor-type electronic personal dosimeter to high energy neutron”, *Radiation Measurements*, Vol. 43, No. 2-6, pp. 1072-1076, 2008, 査読有

4) H. Ohguchi, W. Shinozaki, K. Oda, T. Nakamura, T. Yamauchi:

“Characteristics of PADC detectors using new pre-soaking technique”, *Radiation Measurements*, Vol. 43, No. 2-6, pp. 437-441, 2008, 査読有

5) T. Yamauchi, Y. Mori, K. Oda, N. Yasuda, H. Kitamura, R. Barillon: “Structural modification along heavy ion track in poly (allyl diglycol carbonate) films”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 47, No. 5, pp. 3609-3613, 2008, 査読有

6) H. Ohguchi, K. Oda, T. Yamauchi, T. Nakamura, D. Maki: “New pre-soaking technique for PADC and application to wide-range personal neutron dosimeter”, *Radiation Measurements*, Vol. 43, Suppl., pp. S500-S503, 2008, 査読有

7) T. Yamauchi, S. Watanabe, K. Oda, N. Yasuda, R. Barillon: “An evaluation of radial track etch rate in LR-115 detectors exposed to Fe ions by means of FT-IR spectrometry”, *Radiation Measurements*, Vol. 43, Suppl., pp. S116-S119, 2008, 査読有

8) T. Yamauchi, S. Watanabe, A. Seto, K. Oda, N. Yasuda, R. Barillon: “Loss of carbonate ester bonds along Fe ion tracks in thin CR-39 films”, *Radiation Measurements*, Vol. 43, Suppl., pp. S106-S110, 2008, 査読有

9) 渡邊宗一郎, 山内知也, 小田啓二, 安田仲宏: “ポリカーボネート中重イオントラックの層構造”, 神戸大学大学院

海事科学研究科紀要, 商船・理工論編,  
Vol. 4, pp. 61-70, 2007, 査読無

- 10) 小田啓二, 塚原一孝, 多田英哲, 山内知也: “イメージングプレートに記録されたPSL強度分布の解析”, *日本放射線安全管理学会誌*, Vol. 5, No. 2, pp. 101-106, 2006, 査読有
- 11) 小田啓二: “個人中性子線量計の高エネルギー領域への対応”, *放射線*, Vol. 32, No. 4, pp. 247-253, 2006, 査読有
- 12) F. Takahashi, A. Endo, Y. Yamaguchi, K. Oda: “Development of rapid dose assessment program from activated sodium in human body for criticality accident”, *保健物理*, Vol. 41, No. 3, pp. 180-187, 2006, 査読有
- 13) 渡邊宗一郎, 山内知也, 小田啓二, 安田仲宏: “ポリカーボネート中重イオントラックに沿った損傷分布”, *神戸大学海事科学部紀要, 商船・理工学編*, No. 3, pp. 123-131, 2006, 査読有
- 14) 小田啓二, 塚原一孝, 多田英哲, 山内知也: “イメージングプレートにおけるPSL強度分布に着目した線種識別法の提案”, *日本放射線安全管理学会誌*, Vol. 5, No. 1, pp. 32-38, 2006, 査読有

[学会発表] (計 23 件)

- 1) 森 豊, 坂本淳志, 山内知也, 小田啓二, 安田仲宏: “PADC 飛跡検出器に及ぼす陽子及び重イオン照射効果”, *春季第56回応用物理学学会学術講演会*, 筑波大学, 2009年4月2日.
- 2) 坂本淳志, 森 豊, 山内知也, 小田啓二: “紫外線照射したPC及びPADC中におけるカルボニル基喪失の量子収率”, *春季第56回応用物理学学会学術講演会*, 筑波大学, 2009年4月2日.
- 3) 小田啓二, 岩野健介, 早野大介, 里藤裕隆, 山内知也: “高エネルギー中性子用電子式個人線量計の設計”, *春季第56回応用物理学学会学術講演会*, 筑波大学, 2009年3月31日.
- 4) K. Oda, K. Iwano, T. Yamauchi, H. Ohguchi, T. Nunomiya, S. Abe, T. Nakamura: “Some improvements in personal dosimetry for high-energy neutrons”, *12th Int. Cong. International Radiological Protection Association*, Buenos Aires, October 19-24, 2008.
- 5) T. Yamauchi, Y. Mori, H. Chikada, A. Sakamoto, K. Oda: “Sensitization of PADC track detectors in carbon oxide gas”, *24th Int. Conf. Nuclear Tracks in Solids*, Bologna, September 1-5,

2008.

- 6) K. Oda, D. Hayano, T. Yamauchi, H. Ohguchi, T. Yamamoto: “Several techniques for improving neutron-energy dependence of PADC track detector”, *24th Int. Conf. Nuclear Tracks in Solids*, Bologna, September 1-5, 2008.
- 7) T. Yamauchi, Y. Mori, K. Oda, N. Yasuda, R. Barillon: “Track core size of proton and heavy ions in PADC detectors”, *24th Int. Conf. Nuclear Tracks in Solids*, Bologna, September 1-5, 2008.
- 8) 岩野健介, 小田啓二, 山内知也, 布宮智也, 安部 繁, 中村尚司: “電子式個人線量計の高エネルギー中性子に対する応答(2)”, *日本保健物理学会第42回研究発表会*, 沖縄, 2008年6月26-27日.
- 9) 森 豊, 山内知也, 小田啓二, 安田仲宏: “PADC 中重イオントラック構造”, *春季第55回応用物理学学会学術講演会*, 日本大学, 2008年3月28日.
- 10) 岩野健介, 小田啓二, 山内知也, 布宮智也, 安部繁, 中村尚司: “電子式個人線量計の高エネルギー中性子に対する応答”, *日本原子力学会 2008年春の年会*, 大阪, 2008年3月27日.
- 11) 小田啓二: “ICRP 勧告と線量概念”, *日本放射線安全管理学会第6回学術大会*, 東北大, 2007年12月6日.
- 12) 小田啓二: “イメージングプレートにおけるPSL強度分布に着目した線種識別法の提案”, *日本放射線安全管理学会第6回学術大会*, 東北大, 2007年12月6日.
- 13) H. Ohguchi, W. Shinozaki, K. Oda, T. Nakamura, T. Yamauchi: “Characteristics of PADC detectors using new pre-soaking technique”, *15th Int. Conf. Solid State Dosimetry*, Delft, July 9-13, 2007.
- 14) K. Oda, K. Iwano, T. Yamauchi, T. Nunomiya, S. Abe, T. Nakamura: “Response of semi-conductor-type electronic personal dosimeter to high-energy neutrons”, *15th International Conference on Solid State Dosimetry*, Delft, July 9-13, 2007.
- 15) 小田啓二, 岩野健介, 山内知也, 布宮智也, 安部 繁, 中村尚司: “電子式個人線量計の高エネルギー中性子に対する応答”, *日本保健物理学会第41回研究発表会*, 東京, 2007年6月14-15日.
- 16) 小田啓二: “ICRP に用いられる線量概念”, *日本放射線技術学会第63回総会学*

- 術大会，横浜，2007年4月14日
- 17) 渡邊宗一郎，松尾隆弘，森 豊，山内知也，小田啓二，安田仲宏：“ポリカーボネート中重イオントラックに沿った損傷分布(3)”，*春季第54回応用物理学会学術講演会*，2007年3月29日．青山学院大学
  - 18) K.Oda：“Concept of dosimetric quantities used in radiological protection”，*2nd Asian and Oceanic Cong. Radiation Protection*，Beijing，October 9-13，2006
  - 19) T.Yamauchi，S.Watanabe，K.Oda，N.Yasuda，R.Barillon：“An evaluation of radial track etch rate in LR-115 detectors exposed to Fe ions by means of FT-IR spectrometry”，*23rd Int. Conf. Nuclear Tracks in Solids*，Beijing，September 11-15，2006.
  - 20) H.Ohguchi，K.Oda，T.Yamauchi，T.Nakamura，D.Maki：“New pre-soaking technique for PADC and application to wide-range personal neutron dosimeter”，*23rd Int. Conf. Nuclear Tracks in Solids*，Beijing，September 11-15，2006.
  - 21) T.Yamauchi，S.Watanabe，A.Seto，K.Oda，N.Yasuda，R.Barillon：“Loss of carbonate ester bonds along Fe ion tracks in thin CR-39 films”，*23rd Int. Conf. Nuclear Tracks in Solids*，Beijing，September 11-15，2006.
  - 22) 小田啓二：“個人中性子線量計の高エネルギー領域への対応”，*第67回応用物理学会学術講演会*，立命館大学，2006年8月30日．
  - 23) 渡邊宗一郎，山内知也，小田啓二，安田仲宏，“ポリカーボネート中重イオントラックに沿った損傷分布(2)”，*秋季第67回応用物理学会学術講演会*，立命館大学，2006年8月30日．

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小田 啓二 (ODA KEIJI)  
神戸大学・大学院海事科学研究科・教授  
研究者番号：40169305

### (2) 研究分担者

山内 知也 (YAMAUCHI TOMOYA)  
神戸大学・大学院海事科学研究科・教授  
研究者番号：40211619

神野 郁夫 (KANNO IKUO)  
京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：50234167

高橋 史明 (TAKAHASHI FUMIAKI)  
日本原子力研究開発機構・副主任研究員  
研究者番号：20354706

安田 仲宏 (YASUDA NAKAHIRO)  
放射線医学総合研究所・研究員  
研究者番号：30392244

(3) 連携研究者  
なし。