

平成 21 年 6 月 15 日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2007 ～ 2008  
 課題番号：19760620  
 研究課題名（和文） ガンマ線再構築を用いた超高感度位置型放射線検出器の開発  
 研究課題名（英文） Development of prototype detector for the high imaging modality

研究代表者  
 中村 秀仁（NAKAMURA HIDEHITO）  
 独立行政法人放射線医学総合研究所・基盤技術センター・研究員  
 研究者番号：60443074

## 研究成果の概要：

本研究では、「次世代がん診療装置CROSS(Correlation Response Observatory for Scintillation Signals)計画」のプロトタイプとして有機シンチレータと無機シンチレータから成るハイブリット型検出器CROSS-miniを完成させました。また、そのプロトタイプ検出器を用いた業績の一つとして、平成20年12月1日に米国科学誌に報告し、同日、文部科学省にて記者会見を行いました「放射線源から放出される放射線の革新的な計測方法の開発」を挙げます。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000円	0円	1,500,000円
2008年度	1,800,000円	540,000円	2,340,000円
年度			
総計	3,300,000円	540,000円	3,840,000円

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：保健物理・環境安全

## 1. 研究開始当初の背景

原子力施設や医学、その他の分野において放射線源の使用が日々増加しています。設計および操作における安全防護にも関わらず、放射線源に関わる事故は生じます。

これらの放射線事故ではいずれも、人々に対する影響は重篤である可能性があります。このような放射線緊急事態に被ばく者および緊急作業者を防護するため、迅速かつ適切に判断できる放射線評価用検出器が重要になります。

## 2. 研究の目的

本研究では、世界中のどこでも実現してない新しい概念の積層型プラスチックシンチレータとNaIシンチレータから成る小型放射線検出器を医療用診療装置のプロトタイプ(CROSS-mini)として開発し、放射線・医学・

環境・物理に新たな見地を得ることを目的としています。

## 3. 研究の方法

## 【CROSS-miniの開発】

本研究で開発を行いましたCROSS-miniは、次世代がん診療装置CROSS(Correlation Response Observatory for Scintillation Signals)計画のプロトタイプモジュールです。

このCROSS-miniは、2枚のプラスチックシンチレータ板（Saint-Gobain社製、BC-408、6.2 cm<sup>2</sup>×1 cm）と、新たに開発した4側面開放型NaI(Tl)シンチレータ板（応用光研工業株式会社製、6.2 cm<sup>2</sup>×1 cm）1枚を交互に積層し、その側面を計16本の光電子増倍管（浜松ホトニクス社製、R8900-00-M16）で覆うことで構成しています（図1、2）。ここで、各

側面の有効面積は 91%です。

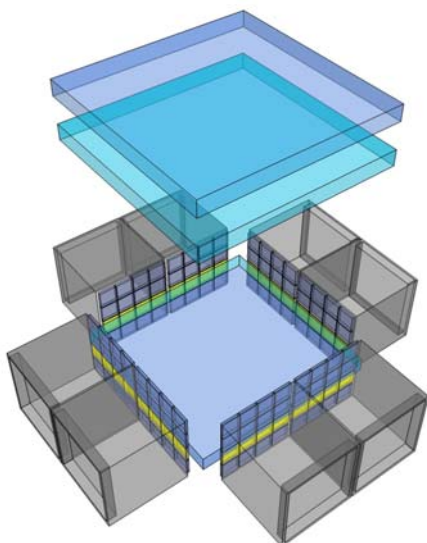


図 1 CROSS-mini の概要図。

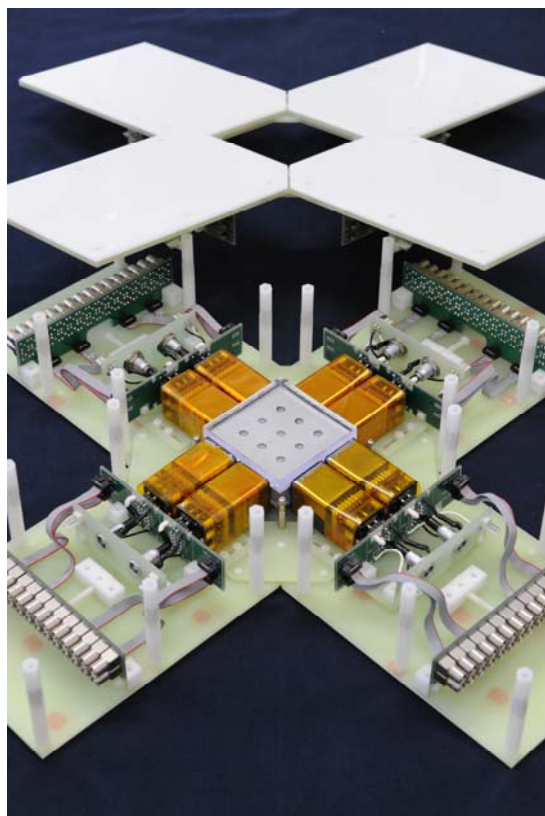


図 2 CROSS-mini の解体写真。金属による電氣的なノイズを考慮し、フレームを全てアクリルで製作しています。光電子増倍管からの出力基板を付け替える事により、CAMAC/NIM システムでのデータ処理や、USB を用いたデータ処理が可能になります。

本研究では、この CROSS-mini を用いて、放射線源から放出される放射線の高精度な較正および測定方法の開発を行いました。また、CROSS-mini の性能評価を行いましたので、以下に報告します。

#### 【概要】

放射線計測器は常に放射線の量やエネルギーの絶対値を計測するものではなく、基準となる放射線源で校正することで、正しい値を計測します。放射線源から放出される放射線のエネルギーは、文献やデータブック等に掲載されている代表的なものだけではなく、それに近いエネルギーのものも同時に放出されていることは知られていましたが、計測器の校正を行う際は一つのエネルギーとして取り扱っても問題ないとされてきました。

また、校正用標準線源のように取扱易い形状に加工されたものは、放射線源自体が小さく、さらに薄い保護膜に封入される構造ですが、それらの影響はほとんど無視できるほど小さいとされ、これらの点についても慣例的に放射線検出器の校正では考慮されていませんでした。

本研究では、測定の誤差としてしか扱われてこなかった放射線源中での放射線のエネルギー損失を正確に測定し、結果を評価することで、①放射線源外に放出される放射線のエネルギーは、その放射線が生成される際に持つエネルギー（理論値）より低い。②放射線源中での放射線のエネルギー損失にばらつきがあり、そのために放射線のエネルギー分布はピーク値を中心として非対称になる、という 2 つの物理現象を確認しました。

さらに、これらの影響をシミュレーション計算し、その結果を放射線の実測結果の解析に組み入れることで、放射線源から放出される放射線のエネルギーや放射線量を厳密に計測する方法を開発し、従来法に比べ非常に精密な放射線計測器の校正を可能としました。

#### 【詳細】

放射線測定器の校正に用いられる標準線源は、放射性同位元素の固まりである線源と、それを保護する膜で構成されています。線源で生成された放射線は、線源自身と保護膜を通過して放射線源の外へ放出されます。保護膜が厚くなればこれと放射線との相互作用により、放射線が失うエネルギーが大きくなります。従来は、この保護膜を薄くすることにより、線源の外に放出される放射線のエネルギーと、線源内で生成された際の放射線のエネルギー（理論値）とは変わらないものとして放射線計測器の校正を行い、様々な放射線計測が行われてきました。

図 3 は、放射線源の模式図です。放射線源は、線源とそれを保護する薄膜により構成されています。線源内で生成された放射線は、放射線源外に放出されるまでに、保護膜だけでなく、線源の中でもエネルギーが失われることとなります。

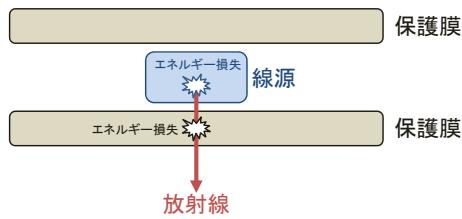


図 3 薄膜放射線源の概要図。

図 4 は、放射線のエネルギー分布を示します。上述の通り、これまでは放射線源中のエネルギー損失は無視できる程小さいと考えられてきたため、校正用標準線源は、図 4 (a) のようにピーク値 ( $E_p$ ) を中心として対称な正規分布であるとして扱ってきました。しかし、詳細な測定を行った結果、放射線のエネルギーは、図 4 (b) のように  $E_p$  より  $\Delta E$  ずれた非対称な分布を持つことが判明しました。

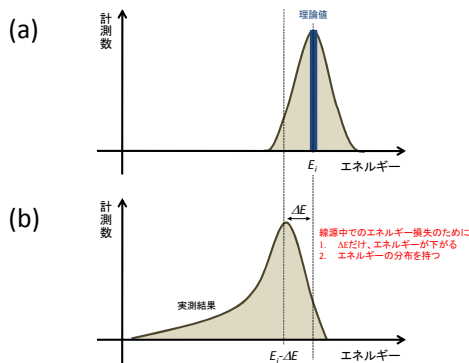


図 4 (a)放射線源中での放射線のエネルギー損失を無視できた場合の放射線のエネルギー分布、(b)放射線検出器で計測される放射線のエネルギー分布。

そこで、図 5 のブロックダイアグラムのよう、シミュレーション計算の結果を放射線計測器に組み入れ、エネルギー分布と誤差成分に分離して解析しました。

**A**：まず、放射線源中でのエネルギー損失を計算し、放射線のエネルギー分布をシミュレートします。**B**：次に放射線源から放出される放射線のエネルギー分布を放射線計測器で計測します。ここで得られるエネルギー分布は絶対値ではないので、**C**：実測したエネルギー分布のピーク値 (**B**)、をシミュレーションで得られたエネルギー分布のピーク値 (**A**) に合わせます。最後に、シミュレーションの結果に基づいて新たに導出した関数を用い、実測によるエネルギー分布から放射線計測器の誤差成分を分離します。

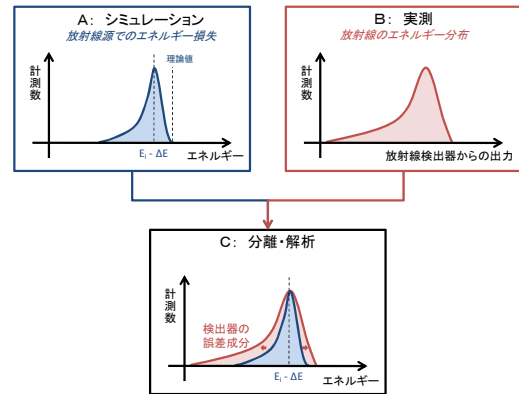


図 5 新しい解析方法のブロックダイアグラム。

この方法により、校正用の放射線源から実際に放出されるエネルギーを高精度で計測できることから、校正用線源と解析結果の両方を用いた放射線計測機器をこれまでの方法より高精度で校正することが可能になります。

さらに、放射線計測器の誤差成分を正確に分離する技術を適用するこの新しい放射線計測法は、放射線計測器におけるエネルギー分解能をも飛躍的に向上させることから、特に複数の放射線が放出される放射線源の計測において、複数のエネルギー分布が重なり合う場合に有効です。

#### 4. 研究成果

##### 【過小評価】

ここでは、実例を挙げて高精度計測が可能となる点について説明します。

図 6 は、プラスチックシンチレータを用いて新たに開発した放射線検出器 CROSS-mini\* で、単一エネルギーの放射線を放出することで知られている  $^{207}\text{Bi}$  から 976keV K 殻内部転換電子を測定し、得られた非対称なエネルギー分布です。この計測におけるエネルギー分解は  $\sigma = 3.84 \pm 0.06\%$  であり、この解析技術を取り入れない場合に比べ 1.3 倍向上しました。なお、シミュレーションやフィッティングによるシステムチックなエラーは、 $3.84 \pm 0.02\%$  (sys) です。

この結果は、これまで分解能が悪いとされてきたプラスチックシンチレータにとって、注目すべき値です。

また、図 7 が示すように、図 6 のような非対称なエネルギー分布を正規分布で評価すると、赤の斜線の領域の面積分だけ、放射線量を少なく見積もってしまいます。この計測の結果、約 1.6 倍の放射線量があることを確認しました。

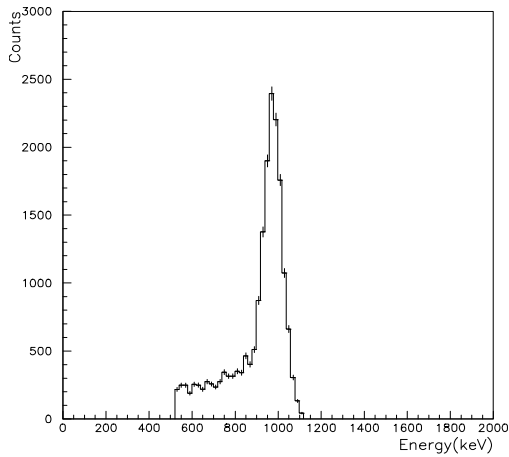


図 6  $^{207}\text{Bi}$  976keV K 殻内部転換電子のエネルギー分布。

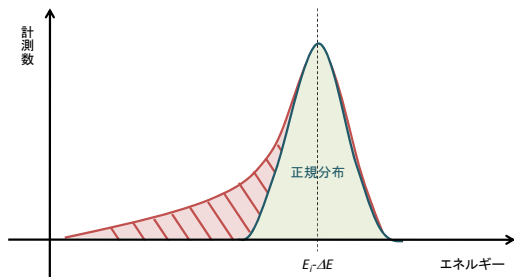


図 7 放射線源外に放出される粒子を放射線検出器にて検出した際のエネルギー分布の概要図。

これらが、測定の誤差範囲として過小評価されてきた背景として、放射線源からは複数の異なる放射線が放出されていることからエネルギー分布が極めて複雑になり、これを簡単に処理できるようにするため、ということが考えられます。

例えば、 $^{207}\text{Bi}$  線源の場合だと、主としてエネルギーの異なる 3 本のガンマ線と、エネルギーの異なる 8 本の内部転換電子、計 11 本の放射線が群をなして放射線源から放出されます。また、 $^{137}\text{Cs}$  線源からは、主としてガンマ線とベータ線、そしてエネルギーの異なる 4 本の内部転換電子、計 6 本の放射線が群をなして放出されます。このような放射線群を放射線計測器で測定すると、複雑なエネルギー分布が得られます。そのため、これまでは鋭いピーク箇所のみに着目し、正規分布を適用した解析が行われてきました。

本測定法では、このような複雑なエネルギー分布に対しても有効で、放射線のエネルギーごとの分布を高精度に分離することができます。図 8 と図 9 に、CROSS-mini で測定した  $^{207}\text{Bi}$  と  $^{137}\text{Cs}$  からの放射線群のエネルギー分布を示します。黒線は実測値で、破線は実測値を各放射線エネルギーに分離した結果であり、赤線がシミュレーションから導出した関数で、これと実測値はよく一致します。

このように、放射線の種類（電子、ベータ線、ガンマ線など）やエネルギーの大きさや放射線の数によらず分離出来るのも本測定法の特徴です。

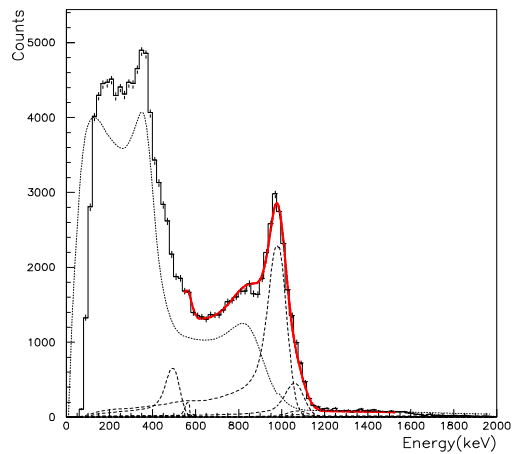


図 8  $^{207}\text{Bi}$  から放出された放射線群 (11 本) の複合エネルギー分布。エネルギーの大きさの異なる 3 本のガンマ線 (569.7 keV, 1063.6 keV, 1770.2 keV) と 8 本の内部転換電子 (K 殻 975.6 keV, L1 殻 1047.8 keV, L2 殻 1048.4 keV, L3 殻 1050.6 keV, K 殻 481.6 keV, L1 殻 553.8 keV, L2 殻 554.5 keV, L3 殻 556.6 keV) を分離しています。なお、図 6 で示しました  $^{207}\text{Bi}$  からの 976keV K 殻内部転換電子は、このエネルギー分布から分離したものです。

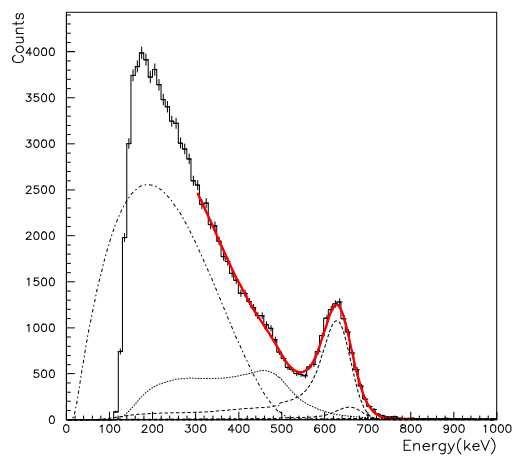


図 9  $^{137}\text{Cs}$  から放出された放射線群 (計 6 本) の複合エネルギー分布。1 本のガンマ線と 1 本のベータ線、そしてエネルギーの異なる 4

本の内部転換電子 (k 殻 625.6 keV, L1 殻 655.9 keV, L2 殻 656.3keV, L3 殻 656.6 keV) を分離しています。

### 【CROSS-mini の性能評価】

以上の性能評価の結果を図 10 にまとめます。この結果、CROSS-mini のプラスチックシンチレータは、 $\sigma_{PL} = 3.7\%$  (1MeV 領域) の高エネルギー分解能を実現しました。また、1MeV 領域で、1,789 p. e. (光電子数) と高集光率も実現しています。

また、同様の性能評価を CROSS-mini の NaI(Tl) に行ったところ、 $^{137}\text{Cs}$  の 662keV のガンマ線に対して、 $\sigma_{\text{NaI}} = 2.9\%$  が得られました。

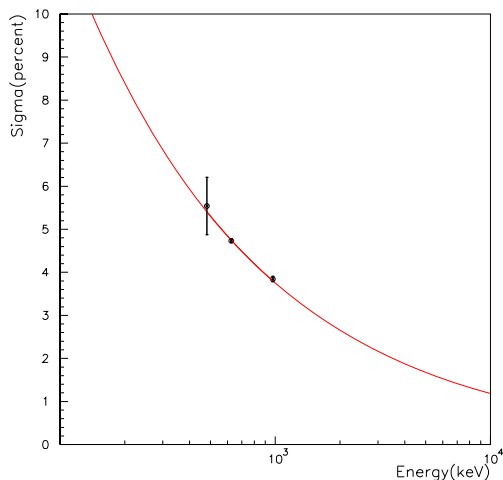


図 10 プラスチックシンチレータのエネルギー分解能。 図中のデータは、 $^{207}\text{Bi}$  の 976keV と 482keV の K 殻内部転換電子と、 $^{137}\text{Cs}$  の 626keV の K 殻内部転換電子を用いた結果です。これらの結果、エネルギー分解能は、 $\sigma_{PL} = 3.7/E(\text{MeV})^{1/20}$  であることが分かりました。

最終形の医療診療装置では、プラスチックシンチレータと NaI(Tl) にてガンマ線を検出します。そのため、再構築した際のガンマ線のエネルギー分解能  $\sigma$  は、プラスチックシンチレータと NaI のエネルギー分解能 ( $\sigma_{PL}$ 、 $\sigma_{\text{NaI}}$ ) で表すことが出来ます (数式 1)。

数式 1

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \left( \frac{E_{PL}}{E_{\Sigma}} \right)^2 \sigma_{PL}^2 + \left( \frac{E_{\Sigma} - E_{PL}}{E_{\Sigma}} \right)^2 \sigma_{\text{NaI}}^2$$

ここで、 $E_{PL}$ 、 $E_{\Sigma} = E_{PL} + E_{\text{NaI}}$  は、プラスチックシンチレータでのエネルギー損失と再構築したガンマ線のエネルギーです。 $\sigma_{PL} = 10.6\%$  (FWHM in 662keV 領域) と  $\sigma_{\text{NaI}} = 7.0\%$  (FWHM in 662 keV 領域) のシンチレータを用い、662keV のガンマ線を再構築すると、

エネルギー分解能は  $\sigma = 8.2\%$  (FWHM) となります。これまで、プラスチックシンチレータのエネルギー分解能は、無機シンチレータのエネルギー分解能より劣るとされてきました。

しかし、再構築することにより、無機シンチレータに近い高エネルギー分解能を実現することが可能になりました。なお、この値は、既存の医療診療装置に使われています無機シンチレータのエネルギー分解能 (662keV 領域に対して 15~20 %FWHM) を遥かに凌ぐ値です。

### 【まとめ】

本研究の成果は、日本だけでなく世界中で行われてきた放射線計測の概念を変え、放射線に関する規格の改善に効果をもたらす可能性があり、研究に限らず放射線を利用した医療や産業へも大きな影響を与えるものと思われます。また、これまで行われてきた放射線計測の結果を見直すことで、精度を更に向上できることが期待できます。

また、これまで分解能が悪いとされてきたプラスチックシンチレータでも高分解能での計測が可能である等の成果を得たことから、今後は本研究の成果を基に、診療装置の高性能化とコストダウンを図ると共に、環境モニターなどの様々な放射線検出器の開発への展開が期待されます。

### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

- ① Hidehito Nakamura et al., *Radiation Research Rapid Communication*, "A new method for Calibration and Response Measurement of a Scintillation Detector Using Radioisotope Sources", vol. 170, p. 811-814, 2008

〔学会発表〕 (計 5 件)

- ① 学会名：発表者名：中村秀仁 (口頭発表)  
学会名：日本放射線安全管理学会  
標題：次世代がん診断装置 CROSS 計画 Phase-1: プロトタイプ 検出器 CROSS-mini による検証  
年月日：平成 20 年 12 月 3 日  
場所：金沢歌舞伎座
- ② 発表者名：中村秀仁 (口頭発表)  
学会名：日本放射線影響学会  
標題：次世代がん診断装置 CROSS 計画  
年月日：平成 20 年 11 月 19 日  
場所：北九州国際会議場
- ③ 発表者名：中村秀仁 (ポスター発表)  
学会名：日本アイソトープ協会  
標題：有機シンチレータを用いた次世代がん診断装置 CROSS の開発  
年月日：平成 20 年 11 月 13 日  
場所：中電ホール

- ④ 発表者名：中村秀仁（ポスター発表）  
学会名：日本放射線腫瘍学会  
標題：次世代がん診断用低エネルギー領域ガンマ線検出器  
年月日：平成 20 年 10 月 18 日  
場所：札幌パークホテル
- ⑤ 発表者名：中村秀仁（口頭発表）  
学会名：日本保健物理学会  
標題：次世代がん診断装置 CROSS 計画  
年月日：平成 20 年 6 月 26 日  
場所：沖縄コンベンションセンター

〔図書〕（計 2 件）

- ① 書名：原子力 eye 『より精度の高い放射線測定へ ～新校正法の開発～』  
出版社：株式会社日刊工業出版プロダクション  
著者名：中村秀仁  
号巻：平成 21 年 5 月号
- ② 書名：放射線科学『放射線源からの放射線の革新的な測定方法を開発』  
出版社：（独）放射線医学総合研究所  
著者名：中村秀仁  
号巻：第 52 巻 第 1 号

〔その他〕

本研究による受賞

【受賞】

- ① 『日本保健物理学会 奨励賞受賞』  
受賞者：中村秀仁  
機関：日本保健物理学会  
場所：シェラトン都ホテル大阪（大阪）  
日時：2009 年 6 月
- ② 『第 3 回内藤泰春記念賞受賞』  
受賞者：中村秀仁  
機関：（財）内藤泰春科学技術振興財団  
場所：海運倶楽部（東京千代田区）  
日時：2009 年 3 月
- ③ 『日本保健物理学会 優秀賞受賞』  
受賞者：中村秀仁  
機関：日本保健物理学会  
場所：沖縄コンベンションセンター  
日時：2008 年 6 月
- ④ 『吹田市長表彰受賞』  
受賞者：中村秀仁  
機関：大阪府吹田市  
場所：吹田市役所  
日時：2007 年 11 月
- ⑤ 『日本放射線影響学会 優秀賞受賞』  
受賞者：中村秀仁  
機関：日本放射線影響学会  
場所：幕張国際会議場  
日時：2007 年 10 月

本研究のホームページ等への掲載

【所属機関】

- ① 放医研ニュース 2009 年 5 月号 No. 150

『中村秀仁氏が財団法人内藤泰春科学技術振興財団「内藤泰春記念賞」を最年少で受賞』中村秀仁

[http://www.nirs.go.jp/report/nirs\\_news/mokuji.html](http://www.nirs.go.jp/report/nirs_news/mokuji.html)

- ② 放射線医学総合研究所 プレス発表  
『放射線源からの放射線の革新的な校正法を開発～従来の放射線計測法を改める可能性を示す～』中村秀仁  
[http://www.nirs.go.jp/news/press/2008/12\\_01.shtml](http://www.nirs.go.jp/news/press/2008/12_01.shtml)
- ③ 放医研ニュース 2008 年 7 月号 No. 140  
『中村秀仁氏が、日本保健物理学会第 42 回研究発表会 第 1 回「優秀口頭発表賞」を受賞』中村秀仁  
[http://www.nirs.go.jp/report/nirs\\_news/200807/hik04p\\_1.htm](http://www.nirs.go.jp/report/nirs_news/200807/hik04p_1.htm)
- ④ 放医研ニュース 2007 年 12 月号 No. 133  
『「放射線影響学会第 50 回大会」で放医研関係者多数受賞』中村秀仁  
[http://www.nirs.go.jp/report/nirs\\_news/200712/hik04p.htm](http://www.nirs.go.jp/report/nirs_news/200712/hik04p.htm)

【外部機関】

- ① （株）日刊工業出版プロダクション  
<http://pub.nikkan.co.jp/mgz/eye/ze/e09050.html>
- ② 電気新聞社  
掲載年月日：平成 20 年 12 月 2 日  
<http://www.shimbun.denki.or.jp/>
- ③ 日刊工業新聞社  
掲載年月日：平成 20 年 12 月 12 日  
<http://www.nikkan.co.jp/>
- ④ 科学新聞社  
掲載年月日：平成 20 年 12 月 12 日  
<http://www.sci-news.co.jp/news/topics/200812/201212.htm>
- ⑤ 日経産業新聞社  
掲載年月日：平成 20 年 12 月 12 日  
<http://netplus.nikkei.co.jp/ssbiz/>
- ⑥ Ullet  
掲載年月日：平成 20 年 12 月 28 日  
<http://www.ullet.com/>
- ⑦ 知財情報局  
掲載年月日：平成 20 年 12 月 29 日  
[http://tech.brainia.com/2008/1229/other\\_20081229\\_001\\_.html](http://tech.brainia.com/2008/1229/other_20081229_001_.html)
- ⑧ @engineer  
掲載年月日：平成 20 年 12 月 30 日  
<http://search.atengineer.com/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 秀仁 (NAKAMURA HIDEHITO)

独立行政法人放射線医学総合研究所・基盤技術センター・研究員

研究者番号：60443074