

課題目標・目的及び研究成果

<p>1. 当初の目的・目標</p>	<p>マイナーアクチノイド(MA)を含む核燃料サイクルを確立するためには、その燃料製造や再処理工程において、自発核分裂等から発生する様々なエネルギースペクトルの中性子・光子の混合被ばくによる線量を的確にモニタリングする必要がある。また、それらの施設における設備の故障や誤動作による予期しない被ばくの際には、様々な場所における線量やスペクトルを短時間で適切に測定し、その対処方法を検討する必要がある。本研究では、これらの目的に資するため、幅広い範囲の強度・エネルギーを持つ中性子・光子による線量及びエネルギースペクトルを高精度かつ高感度に測定可能な可搬型の次世代放射線モニタを開発する。</p> <p>上記目標達成のため、本事業では、①線量及びエネルギースペクトル測定原理の確立、②データ収集・解析装置の開発、③性能試験を実施する。①項目では、高性能な可搬型検出器を開発し、それを用いた線量及びエネルギースペクトル導出アルゴリズムを開発する。②項目では、①で開発したアルゴリズムに基づく GUI プログラムを制作する。また、そのプログラムを搭載し、①で開発した検出器から信号を処理するデータ解析装置を開発する。③項目では、様々な放射線場において、①②で開発した検出器やデータ解析装置などの性能を検証するとともに、それらを組み合わせた放射線モニタリングシステムとしての総合試験を実施する。また、開発したシステムの校正方法を確立する。</p>
<p>2. 研究成果</p>	<p>【事業項目 1】</p> <p>1.1 高性能可搬型検出器の開発</p> <p>熱中性子に対して高い感度を有するシンチレータと高速中性子及び光子に対して高い感度を有するシンチレータとを組み合わせ、様々なエネルギースペクトルを持つ中性子・光子を同時計測可能な複合シンチレータを開発した。また、その複合シンチレータと光電子増倍管を、ライトガイドを介さず接続し、入射粒子識別分解能に優れ、可搬性を有する（重量 3kg）検出器を製作した。その際、検出器構造は、十分な感度及び理想的なエネルギー応答特性を得よう計算解析に基づいて最適化した。</p> <p>1.2 線量及びエネルギースペクトル導出アルゴリズムの開発</p> <p>1.1 で開発した検出器の信号から線量及びエネルギースペクトルを導出するアルゴリズムを確立した。具体的には、検出器信号の波形から入射粒子を識別し、入射粒子毎の発光量分布を導出する方法を開発した。また、導出した入射粒子毎の発光量分布にアンフォールディング法を適用し、エネルギースペクトルを導出するアルゴリズムを構築した。その際、既存のアンフォールディング法の調査を行い、スペクトル導出精度の高い最適なモデルを決定した。さらに、得られたエネルギースペクトルに線量換算係数を乗じて導出した線量と、検出器からの発光量分布に G 関数法を適用して導出した線量を比較し、その精度を自動検証するアルゴリズムを確立した。</p> <p>これらの成果により、従来、大型の検出器を組み合わせても測定できなかった幅広いエネルギー範囲にわたる複数の放射線の線量及びエネルギースペクトルが、可搬性を有する 1 台の検出器で測定可能となった。これにより、所期の目標を達成した。</p> <p>【事業項目 2】</p>

2.1 データ解析プログラムの開発

1.2 で開発したアルゴリズムを Visual プログラミング言語 (LabVIEW)で記述し、グラフィカルユーザーインターフェイス(GUI)により簡易にコントロール可能なプログラムを制作した。この成果により、開発したアルゴリズムを汎用的に利用可能とした。

2.2 デジタル波形解析装置の開発

1.で確立した測定原理を放射線モニタに応用するため、検出器からの信号読込から解析までを一貫して行えるデジタル波形解析統合システムを開発した。システムは、検出器からの信号を処理するデジタル波形解析装置と、2.1 で制作したプログラムを搭載したタブレット PC より構成される。デジタル波形解析装置は、検出器からの信号を高速 A/D コンバータでデジタル化し、そのデジタル信号を Field Programmable Gate Array (FPGA)に組み込んだ専用プログラムにより解析する。これにより、膨大な情報量を持つ波形データから、入射粒子及び発光量の特定に必要な情報のみを抽出する。FPGA とは、利用者が独自に論理回路を書き込むことのできる Gate Array の一種であり、数千万円オーダーの膨大な開発コストが必要となる集積回路 (LSI)と同等の演算処理能力を有するため、近年、急速に普及しつつある汎用デバイスである。波形データより抽出された情報は、Ethernet を介してほぼリアルタイムでタブレット PC に転送される。タブレット PC では、2.1 で開発したプログラムを用いて入射粒子及び発光量を特定し、その情報より線量及びエネルギースペクトルを導出して画面上に表示する。

開発したシステムは、デジタル波形解析の特徴である良好な入射粒子識別性能と、アナログ波形解析の特徴である高い最大適応計数率を兼ね備える。特に、その最大適応計数率は、約 100,000cps と極めて高く、一般的なデジタル波形解析装置の最大適応計数率 (約 500cps) や、従来、適応計数率が高いと認識されていたアナログ波形解析システムの最大適応計数率 (約 10,000cps) と比べて格段に高い。これは、前述のように、最新デバイスである FPGA を波形解析に導入したこと起因する。

これらの成果により、所期の計画通り、入射粒子識別性能に優れ、適応計数率の高いデジタル波形解析統合システムの試作機が完成した。また、開発した FPGA を用いたデジタル波形解析技術は、従来のアナログ波形解析とデジタル波形解析の長所を兼ね備えるため、今後の放射線計測における標準的なデータ解析手法として、様々な研究分野で応用されると思われる。

【事業項目 3】

3.1 検出器応答特性実験

3.1.1 デジタル波形解析法による検出器応答特性実験

2.2 で開発したデジタル波形解析統合システムを用いて、1.1 で開発した検出器の応答特性試験を実施した。具体的には、該当システムを用いて、原子力機構放射線標準施設棟(FRS)において低エネルギー中性子及び光子、イオン照射研究施設(TIARA)において高エネルギー中性子に対する線量及びエネルギースペクトル導出性能を調査した。

その結果、開発した検出器は、幅広いエネルギー範囲の中性子及び光子による線量及びエネルギースペクトルを精度よく測定できることが分かった。

3.1.2 アナログ波形解析法による検出器応答特性実験 (再委託先：九州大学)

3.1.1 で実施した特性試験の際、データ解析装置として、デジタル波形解析統合システムの代わりにアナログ波形解析装置を用いた測定を実施し、3.1.1 で得られた結果と比較した。その結果、本事業目的達成のために重要となる入射粒子識別性能及び適応計数率に関しては、デジタル波形解析統合システムを用いた測定の方が優れていることが分かった。また、TIARA において、飛行時間測定法により測定場の中性子エネルギースペクトルを決定し、1.2 で確立した線量及びエネルギースペクトル導出アルゴリズムに基づく結果と比較した。その結果、両者は、よく一致することが分かり、開発したアルゴリズムの信頼性が確認された。

3.2 総合試験

1.及び2.で開発した検出器やデジタル波形解析統合システムを組み合わせた放射線モニタリングシステムの性能の総合試験を実施した。検証した性能は、エネルギー応答特性、感度、適応線量率、可搬性及び動作の安定性の5項目である。

その結果、エネルギー応答特性に関しては、原理的に、1GeV までの中性子、100MeV までの光子、100GeV までのミューオンによる線量を精度よく測定できることが示された。感度に関しては、中性子に対しては既存の放射線モニタの10倍以上、光子に対しても4倍程度高いことが分かった。適応線量率に関しては、バックグラウンドレベル（中性子：約10nSv/h、光子：約100nSv/h）から極めて高線量率（中性子：約10mSv/h、光子：約100µSv/h）まで、幅広い範囲に適応可能であることが分かった。可搬性に関しては、開発したシステムの総重量は約7.3kgであり、一般的な中性子モニタ（10kg程度）と比べ軽く、十分に持ち運ぶことができることが分かった。安定性に関しては、測定環境の室温が一定の場合、長時間安定して動作することが分かった。ただし、開発したシステムの動作には温度依存性があることが分かった。その原因は現在調査中であるが、温度により、波形のゼロレベルが変動してしまうことなどが考えられる。

3.3 校正方法の確立

放射線モニタを校正するための標準場は、一部の放射線及びエネルギーに対してのみ整備されており、開発したシステムが測定対象とする幅広いエネルギー範囲の放射線に対する標準場は存在しない。そこで、開発したシステムを用いて宇宙線由来のバックグラウンド中性子線量率を測定し、その結果が宇宙線被ばく線量計算ソフトウェア EXPACS による計算値と一致するよう必要なパラメータを調整することにより、システムを校正する手法を確立した。

これらの成果により、開発したシステムが様々な放射線環境における線量及びエネルギースペクトルを的確に測定可能であることが分かり、所期の目標を達成した。

【事業全体】

本事業を完遂することにより、多粒子対応型高性能次世代放射線モニタリングシステムのプロトタイプが完成した。そのシステムの特徴を以下にまとめる。

① 幅広い測定エネルギー範囲と優れたエネルギー応答特性

現実的に被ばくが問題となる全ての放射線による線量を精度よく測定可能

② 高感度

中性子に対しては既存の放射線モニタの10倍以上、光子に対しても

4 倍程度高い

③ 幅広い適応線量率範囲

バックグラウンド線量率から中性子は約 10mSv/h まで、光子は約 0.1mSv/h まで測定可能

④ エネルギースペクトル導出機能

様々な放射線場のエネルギースペクトルをアンフォールディング法により導出可能

⑤ 優れた操作性

総重量が約 7.3kg で可搬性を有し、GUI によるシステムコントロールが可能

今後は、温度依存性の問題を解決し、システムの安定性を高め、2 年以内の実用化を目指して研究を進める予定である。

【得られた成果の外部発表】

口頭発表

佐藤達彦、佐藤大樹、遠藤章、執行信寛「多粒子対応可搬型放射線モニタ DARWIN-P の開発」、日本原子力学会 2008 年春の年会、大阪

佐藤達彦、佐藤大樹、遠藤章、執行信寛「中性子・光子同時計測用可搬型放射線モニタ DARWIN-P の開発 —高計数率適応デジタル波形解析装置の特性試験—」、日本原子力学会 2009 年春の年会、東京

会議における論文発表

Tatsuhiko Sato, Daiki Sato, Akira Endo, Nobuhiro Shigyo, Hiroshi Yasuda, Masashi Takada, Kazuaki Yajima and Takashi Nakamura, "RECENT IMPROVEMENT OF DARWIN: DOSE MONITORING SYSTEM APPLICABLE TO VARIOUS RADIATIONS WITH WIDE ENERGY RANGES", 11th International Conference on Radiation Shielding, Pine Mountain, Georgia, USA, Apr. 13-18 (2008). 掲載雑誌 Nuclear Technology, in press

上記発表が、会議の Best Presentation Award に選ばれたことによる招待講演

Tatsuhiko Sato, Daiki Satoh, Akira Endo, Nobuhiro Shigyo, Hiroshi Yasuda, Masashi Takada, Kazuaki Yajima and Takashi Nakamura, "Recent Improvement of DARWIN: Dose Monitoring System Applicable to Various Radiations with Wide Energy Ranges", ANS2008 Winter Meeting, Reno, Nevada, USA, Nov. 9-13, (2008) 掲載雑誌 American Nuclear Society Transactions, 99, 589 (2008)