

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6100693号
(P6100693)

(45) 発行日 平成29年3月22日(2017.3.22)

(24) 登録日 平成29年3月3日(2017.3.3)

(51) Int.Cl.	F 1
GO 1 T 3/06 (2006.01)	GO 1 T 3/06
GO 1 T 1/20 (2006.01)	GO 1 T 1/20 B
GO 1 T 1/202 (2006.01)	GO 1 T 1/202
GO 1 T 1/203 (2006.01)	GO 1 T 1/203 F
	GO 1 T 1/20

請求項の数 13 (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願2013-537655 (P2013-537655)
(86) (22) 出願日	平成23年11月2日 (2011.11.2)
(65) 公表番号	特表2014-502346 (P2014-502346A)
(43) 公表日	平成26年1月30日 (2014.1.30)
(86) 国際出願番号	PCT/US2011/001847
(87) 国際公開番号	W02012/060873
(87) 国際公開日	平成24年5月10日 (2012.5.10)
審査請求日	平成26年8月29日 (2014.8.29)
(31) 優先権主張番号	61/409,779
(32) 優先日	平成22年11月3日 (2010.11.3)
(33) 優先権主張国	米国(US)

(73) 特許権者	513110757 ライアン ジェームズ エム. アメリカ合衆国 ニューハンプシャー州 03861 リー ベル レーン 18
(74) 代理人	110000578 名古屋国際特許業務法人
(72) 発明者	ライアン ジェームズ エム. アメリカ合衆国 ニューハンプシャー州 03861 リー ベル レーン 18
(72) 発明者	レジエール ジェイソン アメリカ合衆国 メイン州 04073 サンフォード レッドコート レーン 1

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】中性子を画像化および測定するシステム、中性子およびガンマ線を画像化し測定するシステム、および方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

中性子を画像化および測定するシステムであって、
フレームと、
互いに平行であり、前記フレームによって担持される第1プレートおよび第2プレート
と、
電子処理ユニットと、を備え、

前記第1プレートおよび前記第2プレートはそれぞれ複数の検出器を担持し、前記検出器は、前記電子処理ユニットに電子的に接続されており、

前記第1プレートの前記検出器は、プラスチックシンチレーション検出器であり、

前記第2プレートの前記検出器は、スチルベンシンチレーション検出器であり、

前記検出器は、中性子を検出し、前記電子処理ユニットは、前記第1プレートの前記検出器の1つと前記中性子との相互作用と、さらに前記第2プレートの前記検出器の1つと前記中性子との相互作用とに基づいて、前記中性子の経路を判定するシステム。

【請求項 2】

前記第1プレートおよび前記第2プレートに平行な第3プレートをさらに備え、前記第3プレートは、ガンマ線を検出する複数の検出器を有し、前記システムは、中性子およびガンマ線を画像化および測定する請求項1記載のシステム。

【請求項 3】

前記第3プレートの前記検出器は、無機シンチレーション検出器である請求項2記載の

10

20

システム。

【請求項 4】

前記無機シンチレーション検出器は、前記ガンマ線の検出にヨウ化ナトリウムを用いる請求項 3 記載のシステム。

【請求項 5】

中性子およびガンマ線を画像化し測定するシステムであって、

フレームと、

互いに平行であり、前記フレームによって担持される第 1 プレート、第 2 プレート、および第 3 プレートと、

電子処理ユニットと、を備え、

前記第 1 プレート、前記第 2 プレート、および前記第 3 プレートはそれぞれ複数の検出器を担持し、前記検出器は、前記電子処理ユニットに電子的に接続されており、

前記第 1 プレート、前記第 2 プレート、および前記第 3 プレートの夫々の上にある前記検出器は、シンチレーション検出器であり、前記第 1 プレート上および前記第 2 プレート上の前記検出器は、中性子を検出し、前記電子処理ユニットは、前記第 1 プレートの前記検出器の 1 つと前記中性子との相互作用と、さらに前記第 2 プレートの前記検出器の 1 つと前記中性子との相互作用と、に基づいて、前記中性子の経路を判定し、

前記第 2 プレート上および前記第 3 プレート上の前記検出器は、ガンマ線を検出し、前記電子処理ユニットは、前記第 2 プレートの前記検出器の 1 つと前記ガンマ線との相互作用と、さらに前記第 3 プレートの前記検出器の 1 つと前記ガンマ線との相互作用と、に基づいて、前記ガンマ線の経路を判定するシステム。

【請求項 6】

前記第 1 プレート、前記第 2 プレート、および前記第 3 プレートの夫々の上にある前記検出器は、非液体シンチレーション検出器である請求項 5 記載のシステム。

【請求項 7】

前記第 3 プレート上の前記検出器の夫々は、無機シンチレーション検出器である請求項 6 記載のシステム。

【請求項 8】

前記第 2 プレート上の前記検出器の夫々は、パルス波形弁別可能である請求項 7 記載のシステム。

【請求項 9】

前記第 1 プレート上の前記検出器の夫々は、プラスチックシンチレーション検出器であり、前記第 2 プレート上の前記検出器の夫々は、スチルベンシンチレーション検出器である請求項 5 記載のシステム。

【請求項 10】

前記第 3 プレート上の前記検出器の夫々は、無機シンチレーション検出器である請求項 9 記載のシステム。

【請求項 11】

前記第 3 プレート上の前記検出器の夫々は、ヨウ化ナトリウム (NaI) 製である請求項 10 記載のシステム。

【請求項 12】

中性子およびガンマ線を画像化し測定する方法であって、

中性子と相互作用するように構成された複数のプラスチックシンチレーション検出器を有する第 1 プレート、中性子およびガンマ線と相互作用するように構成された複数のスチルベンシンチレーション検出器を有する第 2 プレート、ならびに、ガンマ線と相互作用するように構成された複数の無機シンチレーション検出器を有する第 3 プレートを設ける手順と、

前記第 1 プレートの前記プラスチックシンチレーション検出器および前記第 2 プレートの前記スチルベンシンチレーション検出器との相互作用によって、第 1 の放射線を検出する手順と、

10

20

30

40

50

前記第2プレートの前記スチルベンシンチレーション検出器および前記第3プレートの前記無機シンチレーション検出器との相互作用によって、第2の放射線を検出する手順と

前記第1プレートの前記プラスチックシンチレーション検出器から前記第2プレートの前記スチルベンシンチレーション検出器までの前記第1の放射線の第1の飛行時間を測定する手順と、

前記第2プレートの前記スチルベンシンチレーション検出器から前記第3プレートの前記無機シンチレーション検出器までの前記第2の放射線の第2の飛行時間を測定する手順と、

放射線が中性子およびガンマ線のいずれであるかを示すパルス波形、を生じさせるパルス波形弁別（P S D）特性を有する前記第2プレートの前記スチルベンシンチレーション検出器と、前記第1の放射線との相互作用により生成された第1のパルス波形を判別する手順と、 10

前記第2プレートの前記スチルベンシンチレーション検出器と、前記第2の放射線との相互作用により生成された第2のパルス波形を判別する手順と、

前記第1の放射線が中性子であることを判定する手順であって、

前記第1プレートにおける前記第1の放射線の検出位置、

前記第2プレートにおける前記第1の放射線の検出位置、

前記第1の飛行時間、および、

前記第1のパルス波形

の分析に基づき、前記第1の放射線が中性子であることを判定する手順と、

前記第2の放射線がガンマ線であることを判定する手順であって、

前記第2プレートにおける前記第2の放射線の検出位置、

前記第3プレートにおける前記第2の放射線の検出位置、

前記第2の飛行時間、および、

前記第2のパルス波形

の分析に基づき、前記第2の放射線がガンマ線であることを判定する手順と、

を備える方法。

【請求項13】

前記第1の放射線が中性子であることを判定する際に信号対ノイズ比を前記第1のパルス波形を用いて最大にする手順と、前記第2の放射線がガンマ線であることを判定する際に信号対ノイズ比を前記第2のパルス波形を用いて最大にする手順と、をさらに備える請求項12記載の方法。 30

【発明の詳細な説明】

【発明の詳細な説明】

【0001】

[関連出願の相互参照]

本願は、2010年11月3日に出願された米国仮特許出願第61/409,779号の利益を主張するものであり、引用により本明細書に組み込まれる。

【0002】

[連邦政府による資金提供を受けた研究開発の記載]

本発明は、米国国防総省国防脅威削減局（Defense Threat Reduction Center）との契約HDT RA1-08-C-0077の下、米国政府の支援によってなされた。米国政府は、本発明における所定の権利を有する。 40

【0003】

[技術分野]

本発明は、中性子画像化（imaging）分光装置に関し、特に、中性子源をリアルタイムで位置特定および識別するための分光装置に関する。

【0004】

[背景技術]

従来の中性子画像化装置／分光装置には、いくつかの用途がある。しかしながら、どの用途も、核物質の検出、位置特定、モニタリングおよび識別を中心に展開している。

【0005】

中性子は、その性質から検出されにくく、画像化や分光分析も容易に行うことが難しい。検出は、ほとんど、高速中性子源から得られる減速中性子や熱中性子を記録する形で行われてきたが、中性子相互作用によって生成された荷電粒子を測定するだけなので、基となる中性子の性質を推定するのは、難しい上に曖昧である。

【0006】

減速中性子の記録には、入射方向や入射エネルギーの情報が何も含まれていない。バルク検出器における高速中性子の測定では、エネルギー測定について妥協せざるを得ないが、それでも方向の情報が欠けている。二重散乱テレスコープは、中性子散乱を2つ必要とすることにより複雑さが大幅に増すとともに効率が悪いというペナルティを有するが、弹性散乱運動を用いて入射速度ベクトルを制限しながら、同時に高品質のエネルギー測定を行うことができる点で、最終的には利益をもたらす。

10

【0007】

[発明の概要]

本発明のシステムは、中性子とガンマ線の両方を検出し、画像化し、測定することが可能である。本システムは全部で3枚の平行プレートを有し、夫々が複数の検出器を含む。平行プレートの夫々は、異なる検出器を有している。第1プレートは、複数のプラスチックシンチレーション検出器を有する。第2プレートは、パルス波形弁別(P S D)特性がある複数のスチルベンシンチレーション検出器を有する。第3プレートは、複数の無機検出器を有する。第1プレートおよび第2プレートは、接続して用いられることで、中性子を検出し、画像化し、測定する。第2プレートおよび第3プレートは、接続して用いられることで、ガンマ線を検出し、画像化し、測定する。

20

【0008】

本発明は、中性子を画像化し測定するシステムである。本システムは、フレームと、フレームによって担持される一組の平行プレートと、電子処理ユニットとを有している。平行プレートの夫々は、複数の検出器を担持する。検出器は、電子処理ユニットに電子的に接続される。一方の平行プレートにある検出器は、プラスチックシンチレーション検出器である。他方の平行プレートにある検出器は、スチルベンシンチレーション検出器である。検出器は、中性子を検出し、電子処理ユニットは、一方の平行プレートにおける複数の検出器の1つとの相互作用と、さらに他方の平行プレートにおける複数の検出器の1つの相互作用と、に基づいて、中性子の経路を判定する。

30

【0009】

一実施形態において、本システムは、上記一組のプレートに平行で、それら両者の間には位置していない第3プレートを有している。第3プレートは、複数の検出器を有し、本システムは、中性子およびガンマ線を画像化し測定する。

【0010】

一実施形態において、第3プレートにおける検出器は、無機シンチレーション検出器である。一実施形態において、無機シンチレーション検出器は、ヨウ化ナトリウム(NaI)である。

40

【0011】

一実施形態において、中性子およびガンマ線を画像化し測定するシステムは、フレームと、フレームによって担持される3つの平行プレートと、電子処理ユニットとを有している。平行プレートの夫々は、複数の検出器を担持する。検出器は、電子処理ユニットに電子的に接続される。各平行プレート上にある検出器は、非液体シンチレーション検出器または液体シンチレーション検出器であってもよい。検出器は、中性子を検出し、電子処理ユニットは、1番目の平行プレートにおける複数の検出器の1つとの相互作用と、さらに2番目の平行プレートにおける複数の検出器の1つとの相互作用と、に基づいて、中性子の経路を判定する。検出器は、ガンマ線を、2番目の平行プレートにおける複数の検出器

50

の 1 つとの相互作用と、さらに 3 番目の平行プレートにおける複数の検出器の 1 つとの相互作用と、に基づいて検出する。

【 0 0 1 2 】

一実施形態において、各平行プレート上にある検出器は、非液体シンチレーション検出器である。

一実施形態において、上記 3 つのプレートのうちの 3 番目上にある検出器の夫々は、無機シンチレーション検出器である。一実施形態において、上記 3 つのプレートのうちの 2 番目上にある検出器の夫々は、パルス波形弁別可能である。

【 0 0 1 3 】

一実施形態において、上記 3 つのプレートのうちの 1 番目上にある検出器の夫々は、プラスチックシンチレーション検出器であり、上記 3 つのプレートのうちの 2 番目上にある検出器の夫々は、スチルベンシンチレーション検出器である。 10

【 0 0 1 4 】

一実施形態において、上記 3 つのプレートのうちの 3 番目上にある検出器の夫々は、無機シンチレーション検出器である。一実施形態において、上記 3 つのプレートのうちの 3 番目上にある検出器の夫々は、ヨウ化ナトリウム (NaI) 製である。 20

【 0 0 1 5 】

本発明のこれらの態様は、排他的であることを意味するものではなく、本発明の他の特徴、態様、および効果は、以下に記す説明、添付請求項、および添付図面と併せて読めば、当業者には容易に明らかになるであろう。 20

【 0 0 1 6 】

本発明の上述およびその他の目的、特徴、および効果は、添付図面に示される本発明の詳細な実施形態についての以下の説明から明らかになるであろう。添付図面において、同類の参照符号は、異なる図面においても同一部品を指す。図面は、必ずしも縮尺通りではなく、本発明の原理を示すことに重点が置かれている。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 1 7 】

【図 1】中性子画像化分光装置システムの斜視図である。

【図 2】中性子の二重散乱運動の概略図である。

【図 3】 ^{252}Cf (カリホルニウム) に対するシステム応答のグラフである。 30

【図 4】角度分解能のグラフである。

【図 5】 ^{252}Cf 源の 3 メートル地点での一次画像化グラフである。

【図 6】3 平面システムのブロック図である。

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 1 8 】

[好適な実施形態の詳細な説明]

図 1 を参照して、中性子画像化分光装置 20 を示す。本システムは、中性子源とガンマ線源との両方を、遠隔から画像化し測定することが可能である。本システムにおける遠隔からの画像化および測定は、線源に触れることなしに行われる。

【 0 0 1 9 】

分光装置 20 は、フレーム 22 と、3 つの平行な検出プレートまたは面 24, 26, 28 と、電子処理ユニット 30 とを有している。以下に詳細を示すように、システム 20 の好適な実施形態は、携帯可能なように設計される。 40

【 0 0 2 0 】

検出プレートまたは面 24, 26, 28 は、夫々が互いに平行になっている。各パネルは、複数の検出器 34 を有している。各検出器 34 は、シンチレーション検出器である。シンチレーション検出器または計数管 34 は、電離放射線により、蛍光物質内で閃光 (シンチレーション) を発生させる。閃光は、光増倍管とその関連回路 30 によって検出およびカウントされる。

【 0 0 2 1 】

10

20

30

40

50

検出プレート 24, 26, 28 の夫々は、他のプレートとは異なる検出器 34 を有し、検出器 34 独自の特別な機能を果たしている。

3つのプレート 24, 26, 28 は、MeV 領域の核内中性子およびガンマ放射線を検出可能な積層構造になっている。第1プレート 24 の検出器 34 は、プラスチックシンチレータを有し、このシンチレータは、中性子画像化システムの一部、割合はかなり低いがガンマ線画像化システムの一部として機能する。第2プレート 26 の検出器 34 は、パルス波形弁別 (PSD) 特性を有するスチルベン [C₆H₅CH : CHC₆H₅] を使用する。中性子は、二重散乱構成において、まずプラスチックシンチレータ検出器 34 によって第1プレート 24 内で散乱され、その後さらに、スチルベン検出器 34 によって、第2プレート 26 内で散乱される。スチルベンからの PSD 信号を優先的に用いて、中性子相互作用を選定する。10

【0022】

本発明によれば、第2プレート 26 のスチルベン検出器 34 および第1プレート 24 のプラスチックシンチレータ検出器 34 による従来の二つのプレート配列とは異なり、本システムを、ガンマ線画像化用としても使用することができる。ガンマ線画像化には、スチルベン検出器 34 を有する第2プレート 26 と第3プレート 28 とが用いられる。第3プレート 28 の検出器 34 の夫々は、無機シンチレータである。好適な実施形態では、検出器は、ヨウ化ナトリウム (NaI) である。

【0023】

スチルベン検出器 34 を有する第2プレート 26 は、ガンマ線画像化システムの鍵となる構成要素であり、両検出システムに対して、ノイズに対する信号を最大化するために必要な PSD 測定を提供する。20

【0024】

第2プレート 26 のスチルベン検出器 34 は、ガンマ線画像化システムと中性子画像化システムとで共有される。スチルベンによって中性子 / ガンマ線を識別することによって、両システムに対して信号対ノイズ比を最大化する。上述したように、本システムは、鉛油等の液体シンチレータとは違い、固体シンチレータを用いている。固体シンチレータによって、より堅牢な携帯型のシステム 20 が可能になる。

【0025】

上述したように、3つの平行な検出プレート 24, 26, 28 は、夫々が複数の検出器 34 を有する。同型式の検出器 34 がプレート全体にわたって用いられるが、これは他のプレートの検出器とは異なる。検出器 34 の順番は、上から下への順に (すなわち第1プレートから第3プレートへの順に)、プラスチックシンチレータ、スチルベン、および無機シンチレータ 34 である。30

【0026】

実際の中性子測定には、プラスチックシンチレータにおけるシンチレーションの振幅と、プラスチック検出器からスチルベン検出器までの飛行時間とを用いる。スチルベンにおけるガンマ線信号は、イベント排除に使用することができる。ガンマ線測定には、スチルベンおよび無機シンチレータの両方におけるシンチレーションの振幅を用い、中性子排除のために飛行時間を用いる。スチルベン内での中性子信号は、イベントを認めるのに必要となる。イベントは、3つの検出面の少なくとも 2 つに信号が存在するときに発生する。40

【0027】

上述したように、システム 20 は、中性子とガンマ線の両方を測定可能である。中性子およびガンマ線の放射は関連しており、放射線環境の線源に関する知識を増やすために一緒に用いられ得る。システム 20 は、1 対の二重散乱カメラである。第1プレート 24 および第2プレート 26 は、中性子用の二重散乱カメラである。第2プレート 26 および第3プレート 28 は、ガンマ線放射用の二重散乱カメラである。中性子であってもガンマ線であっても、発想は、いったん前方の検出器内で粒子が散乱し、その後、それが時には後方の検出器内で散乱するというものである。中性子またはガンマ線は、相互作用なしでこれらの検出器 34 のいずれをも通過することができる。これらの粒子は、確率的なやり方50

で相互作用する。これらの検出器の厚さは、粒子の適当な量を記録するのに足りるが、2度相互作用するほど厚くはないような厚さになるように選択される。

【0028】

2つの二重散乱カメラの違いは、中性子に対する理想的な散乱または検出媒体、つまり第2プレート26における検出器34がまた、偶然にもガンマ線に対して優れた前方散乱体であることである。このような物質は、水素含有量が高い有機物質である。これにより、中性子カメラに対しては、前方散乱体と後方散乱体の両方に対して有機シンチレータを有するカメラを構成する。中性子エネルギーは、中性子が前方の検出器において蓄積したエネルギーと、後方の検出器までの旅行時間によって測定された反跳中性子のエネルギーと、を合計することによって測定される。

10

【0029】

ガンマ線に対する状況は、全てのガンマ線が同じ速度で走行している点で異なり、したがって飛行時間からはエネルギー情報を収集できない。代わりに、ガンマ線を全体として捕獲しなければならず、第3プレート28における検出器34のように、一般的に高密度の無機シンチレータで構成された厚みのある検出器を必要とする。ガンマ線検出器の水素含有量は、あまり重要ではない。ただ、この媒体内のガンマ線の相互作用距離よりも厚みが大きくなければならない。

【0030】

システム20の中性子散乱カメラは、有機シンチレーション検出器の2つのプレート、すなわち第1プレート24および第2プレート26を有している。

20

ガンマ線検出に対しては、無機シンチレーション検出器34を有することが好ましいという点において、第3プレート28は、高密度の無機シンチレータを有している。スチルベンシンチレータを有する中央のプレート26は、中性子カメラに対する後方散乱体およびガンマ線カメラに対する前方散乱体として機能する。これにより2種対応カメラを提供する。

【0031】

全てが有機シンチレーション検出器で構成された中性子カメラは、ガンマ線を検出可能であるが、その質は大幅に妥協せざるを得ない。同様に、従来のガンマ線カメラは、中性子を検出可能であるが、非効率で、解像度を妥協せざるを得ない。

【0032】

30

好適な実施形態における検出器34は、最初の2つのプレートにおいて、鉛油のような液体の代わりに、プラスチックやスチルベンのような固体有機物を使用する。これは、現場作業には堅牢性が求められるからである。第2の特性は、いわゆるパルス波形弁別(PSD)であり、検出器からの信号のナノ秒の波形が、散乱粒子がガンマ線なのか中性子なのかを識別するために用いられ得ることを意味している。この性質を有するシンチレーション検出器で構成されたいずれかの種類のカメラの少なくとも1つのプレートを有することは非常に有益である。

【0033】

本システム20は、第1面24の検出器34における材料がパルス波形弁別特性を有さないプラスチックシンチレータであるように設計されている。第2面26の検出器34は、中性子カメラおよびガンマ線カメラの両方に役立ち、スチルベンと称される有機結晶から構成される。スチルベンにはパルス波形弁別特性がある。最後に、第3面28の検出器34は、PSD特性のないNaI等の無機結晶から構成される。

40

【0034】

完全なシステム20は、両種の粒子に対する感度を最適化しており、一方、ハードウェアや電子機器の総量を最小化する。全てが固体状態であると、システムを堅牢なものにすることができ、それでいて両種に対して優れた解像度および感度を有することができる。

【0035】

上述のシステム20を用いて、基本的な理論の一部を説明する。中性子は電荷を持たないので、容易には相互作用しない。それゆえ、中性子は、間接的な方法で検出しなければ

50

ならない。MeVのエネルギーで中性子を検出する好適な方法としては、大角n p 弹性散乱面積を利用する。選択材料は、中性子散乱体および反跳陽子検出器の機能に役立つもの、つまり有機シンチレータである。この材料は、主に水素と炭素で構成され、個数比は1.0から2.0である。水素の相対濃度は、シンチレータの種類によって変化する。

【0036】

画像化を行うために、入射中性子は、2つの検出器の夫々においてn p 散乱されなければならない。いったん中性子が計器に入射すると、中性子の経路に従って、各n p 相互作用の位置、相対時間、およびエネルギー蓄積を測定可能でなければならない。

【0037】

図2を参照して、中性子の二重散乱運動の概略図を示す。入射方向が未知の中性子46が、図1に示されたような検出器34での検出による2度のn p 散乱を受けて、線源に関する情報が得られる。2つの相互作用の空間的座標および飛行時間(ToF)を測定することにより、散乱された中性子のエネルギーおよび方向(つまり運動量ベクトル)が決定される。最初の反跳陽子のエネルギーを測定することにより、入射中性子のエネルギーおよび散乱角が算出され得る。

【0038】

この情報により、入射中性子の方向を、反跳中性子の速度(図2に示すような)の周囲にある円錐50の被覆48上に沿うように制限することができる。散乱角 $\sin^2 = E_p / E_n$ である。円錐50を物体平面もしくは球上に投影することによって、図2に示すように、各イベントに対するイベント円52が得られる。複数のイベント円の交点から、統計的な手段により、中性子源の像を得ることが可能である。

【0039】

さらに図2を参照して、好適な実施形態において、第1プレート24における検出器34は、プラスチックシンチレータの1インチ円筒形セルで構成されていて、高速で堅牢な1インチ光電子増倍管(PMT)によって読み取られる。第2層および第3層上の検出器も同様に1インチセルで構成されていて、同様のPMTによって読み取られる。第1プレート24のプラスチックシンチレータとは対照的に、第2プレート26は、スチルベンであり、第3プレート28は、ヨウ化ナトリウム(NaI)等の無機物である。第2プレート26上の検出器34は、パルス波形弁別(PSD)が可能である。パルス波形弁別(および飛行時間(ToF))によってシステムがガンマ線を除去または区別可能になり、これは高レベルのバックグラウンド環境には重要である。

【0040】

上述された基本的な理論の一部を用いて、図6のブロック図に示されるような検出方法を説明する。飛行時間測定は、プレート24, 26, 28の間で行われる。全てのセルまたは検出器34は、独立したデータチャネルに相当する。中性子が第1プレート24における検出器34と相互作用するとき、検出器プレートからのアナログ信号が、第1プレート24における様々なセルのアナログ和から生成される。これらの信号は、ToF測定を引き起こし、第2プレート26において起こることと時間合致しているかどうかを検査するために、高速論理信号を生成する。さらに、第1プレート24において中性子が蓄積したエネルギーに対するアナログパルス高として機能する。セル識別は、相互作用位置、すなわち特定の検出器に対応する1インチの空間解像度であるように行われる。第1プレート24における異なる検出器34からの多重信号は、除去される。

【0041】

第2プレート26においても同様の信号処理が行われる。ここでは、和信号がToF測定を停止させ、トリガーとなったセルを識別および記録する。

第2プレート26のスチルベン検出器34、つまり有機シンチレータは、パルス波形弁別特性を有する。シンチレータのこの特性によっては、電離粒子が高速(電子、ミューオン)なのか低速(陽子または重イオン)なのかを識別するのに使用可能なアナログ信号が生成される。この2種類の粒子は、それぞれの詳細なパルス波形、すなわち、シンチレータの化学的性質の機能が異なる。これにより、中性子が引き起こすイベントは、識別され

10

20

30

40

50

、さらなるデータ分析のために選定され得る。電子イオン化パルス波形は、一般的に破棄される。

【0042】

好適な実施形態において、2つのプレート24, 26は、シンチレータからシンチレータまでは30cm離れている。この距離を横切ったガンマ線は、1nsのToFを記録する一方、1MeVの中性子は、同じ距離を走行するのに、30nsまでの時間を必要とする。斜めの軌道はToF値をより長くしてしまうが、この影響は、セル識別によって得られたイベントの位置情報を用いて補正される。ToFの範囲は、50nsのオーダーであり、典型的な高速中性子の速度の上下にわたる範囲である。ToFの範囲がより長くなることにより、高温放射線環境における重要な測定である偶然同時計数率の測定も自動的に得られる。

10

【0043】

上述したように、ある実施形態において、システム20は、携帯型に設計される。一実施形態において、システム20は、各プレートに77個の検出器セルが置かれている状態で、バッテリ電源により8時間作動できるように設計される。図1を再度参照すると、バッテリパック38がフレーム22によって担持されている。アナログデータは、電子処理ユニット30の一部であるオンボードコンピュータにおいて処理され、遠隔のコンピュータへ伝送してリアルタイムにモニタリングまたは分析、および/またはデータアーカイブするために、デジタル化され、フォーマットされる。オンボードコンピュータと遠隔コンピュータとの接続は、イーサネットケーブルまたは無線通信によって行われ得る。

20

【0044】

この機器は、遠隔コンピュータ、名目上は、ナショナルインスツルメンツ株式会社によって販売されるLabVIEW（商標）を実行するラップトップコンピュータを通じて制御される。遠隔コンピュータはまた、温度、電圧、全検出器セルにおける計数率および他のレートといった、機器の動作および性能を評価するために重要な多くのハウスキーピングパラメータを監視する。光電子増倍管（PMTs）での利得は指令可能である。検出器セルプレートには、輸送中の衝撃を吸収するばねが付いている。

【0045】

システム20のプロトタイプは、各プレートに3つのセルがある状態で作られた。第1プレート24および第2プレート26を用いて中性子を測定するシステム20の試験は、(1)複数のセルからの信号を同時に処理する各プレートに対する電子機器の性能試験と、(2)6つのセルの利得と閾値を整える能力の試験であり、その結果は、利得と閾値の変動によるスペクトルと像のばらつきが最小である1つの機器のように動作した。最初の2つのプレート24, 26における9組のセルの組み合わせも、各セルが正しく調整および削減されている場合に、1つの機器のように動作しなければならない。これを実行するために、 ^{252}Cf 源を軸上に3.4mの距離で配置した。

30

【0046】

図3を参照して、 ^{252}Cf （カリホルニウム）に対するシステム応答のグラフを示す。角度分解能のグラフを図4に示し、特に、 3×3 の累積コンビネーションに対する角度分解能測定（ARM）を示す。セルの各コンビネーションに対する中性子の軌道は異なり、運動学的に測定された散乱角の夫々は、単純幾何学によって測定された散乱角に一致しなければならない。ARM関数は、中性子のイベントあたりの、これら2つの角度の差である。この分布の幅は 12° （FWHM）まであり、2つのセルのみを用いて測定したもの（ 10° FWHM）よりも若干大きい。これは、おそらく、第1プレート24における検出器34の利得の小規模なばらつきか、もしくは飛行時間（ToF）の較正に起因する。ARM分布上の非ガウシアンの袖部は、検出閾値、つまり図1に示すような第1プレート24または第2プレート26のいずれかにおける 50 keV_{ee} の近傍での中性子のイベント、等価には約 300 keV から 700 keV までの中性子から生じている。

40

【0047】

中性子源のスペクトルを測定するために、測定された散乱角が真の角度の 20° 以内で

50

あったイベントを選択した。その結果、すなわち、計数スペクトルを図3に示す。

容易には観察できないが、この図から注目される重要な特徴は、2つのセルでの実験と比較して、単位有効時間あたりの計数がはるかに多いことである。これは、2セル構造と比較して、実効面積が9倍大きいからである。指標関数的なワットの形状はさらに回復し、統計規模が大きいので、より滑らかになっている。

【0048】

最後に、イベント円の交差を許容する、対応する異なるイベント円錐軸を有する多数(9個)の異なるセル形状を用いて、画像化能力を検討する。図5には、円交点の密度の3-Dグラフを示す。この図を作成するためになされたARM削除はない。ARM削除は、線源の位置が既知となってから、エネルギースペクトルを作成するためだけになされる。

10

【0049】

図5における中央の強いピークは、線源の真の位置に対応して、画像プレート内に存在する。しかしながら、中央のピークの外側にも考慮すべき構造が存在する。この構造は、点源の存在から相關する円の交点から生じている。セル組の数が少ない場合、つまり、我々のケースにおいては9個では、それらは最も顕著に現れる。完全に実装された機器では、セル組の計数は、5900に増加し、これらのロープあるいはゴースト像は、分散する。一方で、中央のピークは実効面積に比例して、つまり、セル組の数に比例して高くなる。

【0050】

このシステムまたは機器20は、混在した放射線環境において特に有用であるが、一般的に中性子環境は、ガンマ線も豊富である。動作用途は、米国国防総省(DoD)、国土安全保障省(DHS)、もしくは核分裂性物質または放射性物質の識別に関するあらゆる機関による、安全保障での使用である。一例としては、主要都市の内外における交通のモニタリングまたはスクリーニングに関する州警察である。

20

【0051】

しかし、原子力産業においてもまた、2種対応機器が核燃料および関連するガンマ線放射をモニタリングするのに役立つことがわかるであろう。

想定されるDHSでの使用用途は、物質の中性子放射量が他の物質によって覆い隠されている場合である。2種対応カメラは、中性子放射源を識別するだけでなく、中性子の存在によって誘起されたガンマ線放射を識別することも可能である。ガンマ線放射は、例えばプルトニウムのような中性子源を隠す物質の痕跡をもたらす。最もエキサイティングな例は、中性子放射が周囲の爆薬(窒素が多く含まれる)における窒素核を励起することである。中性子は直接的には見ることはできないが、窒素励起の特徴的な痕跡は検出可能である。いずれの機関も、中性子源だけでなく周囲の物質の追加的な情報を有し得る。

30

【0052】

第2プレートと第3プレートの検出器の使用はガンマ線の検出には好適であるが、第1プレートと第3プレートの検出器の使用も可能であることが認められる。このシステムの効率は、上述の実施形態と同程度に高くはない。

【0053】

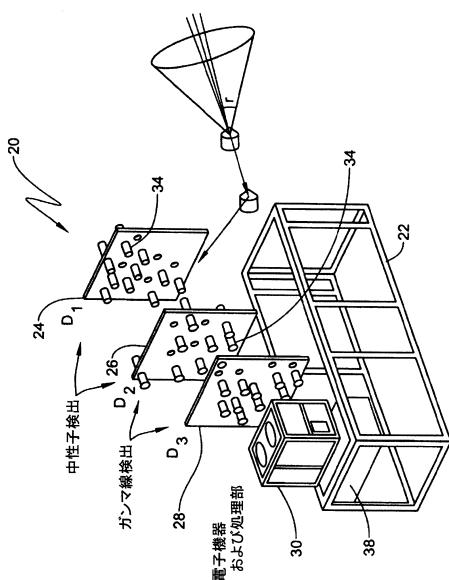
スチルベン検出器、またはPSD特性がある他の検出器を有する第1プレートを、プラスチックおよび無機検出器の両方を有する第2プレートとともに使用可能であることも理解される。これにより、第1プレート内の検出器は、中性子検出およびガンマ線検出の両方に対してPSDを提供する。

40

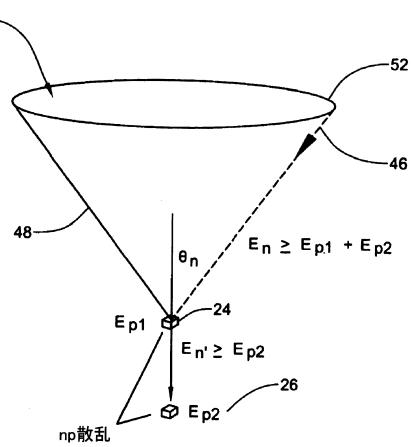
【0054】

本明細書において本発明の原理を説明してきたが、上述の説明は一例としてなされただけものであり、本発明の範囲に関する限定としてなされてものではないことは、当業者に理解されよう。本明細書に記載された例示の実施形態に加えて、他の実施形態も本発明の範囲内であることが考えられる。当業者による変更や置換も本発明の範囲内であるとみなされる。

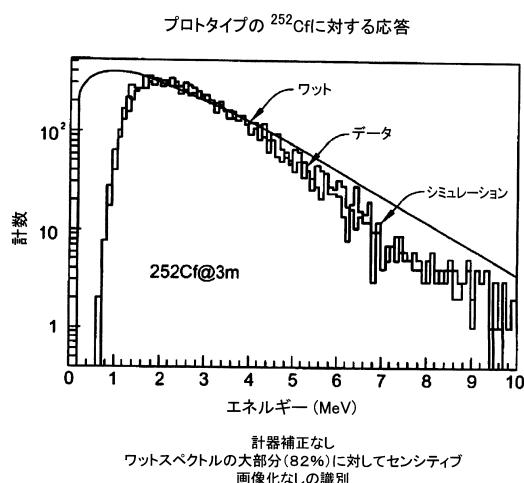
【図1】



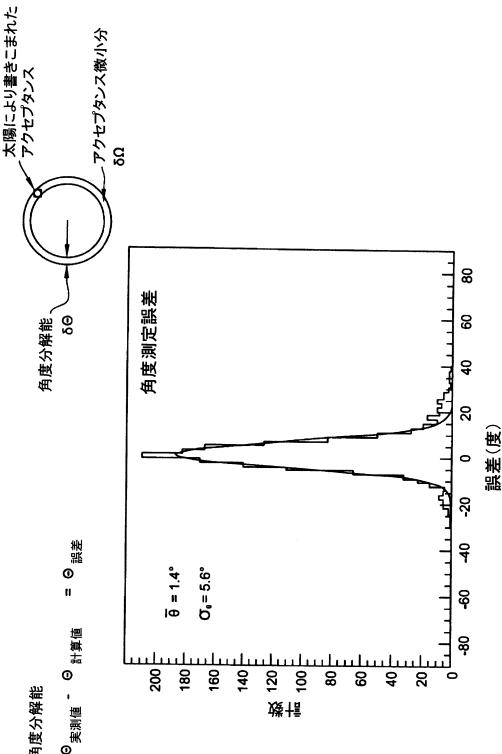
【図2】



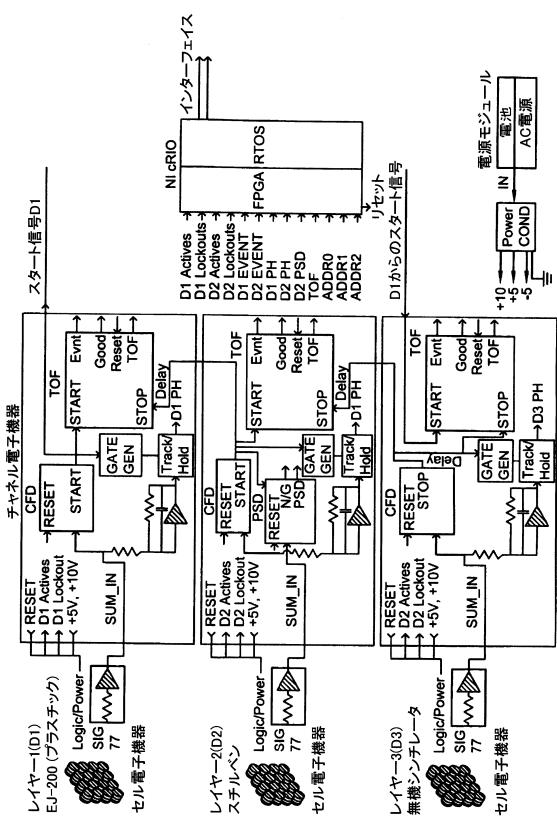
【図3】



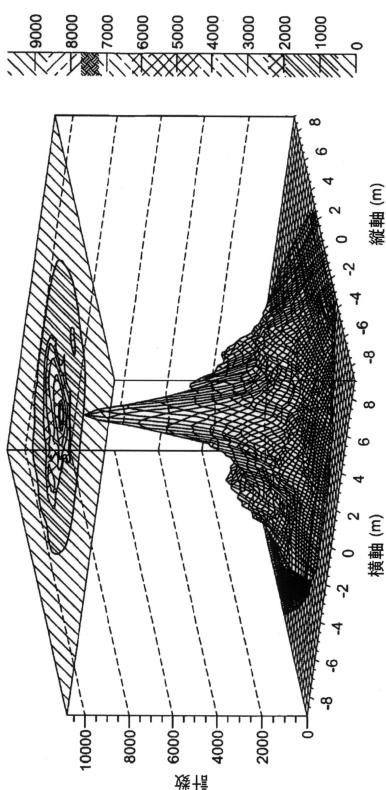
【図4】



【 四 6 】



【 四 5 】



一次画像化

3m地点での ^{252}Cf 源 完全な機器のシミュレーション

フロントページの続き

(72)発明者 プロサー ピーター エフ .
アメリカ合衆国 ニューハンプシャー州 03801 ポーツマス カス ストリート 117

審査官 藤本 加代子

(56)参考文献 特開2008-045948(JP,A)
特開平05-341047(JP,A)
特開2008-026195(JP,A)
特公昭48-006831(JP,B1)
特表2009-538435(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 01 T 3 / 0 6
G 01 T 3 / 0 0
G 01 T 1 / 2 0
G 01 T 1 / 2 0 2
G 01 T 1 / 2 0 3
J S T P l u s (J D r e a m I I I)