

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7281816号
(P7281816)

(45)発行日 令和5年5月26日(2023.5.26)

(24)登録日 令和5年5月18日(2023.5.18)

(51)Int. Cl.	F I
G 2 1 C 17/00 (2006.01)	G 2 1 C 17/00 5 0 0
G 2 1 C 17/06 (2006.01)	G 2 1 C 17/06 0 2 0

請求項の数 8 (全 12 頁)

(21)出願番号	特願2020-6793(P2020-6793)	(73)特許権者	505374783
(22)出願日	令和2年1月20日(2020.1.20)		国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
(65)公開番号	特開2021-113751(P2021-113751A)		茨城県那珂郡東海村大字舟石川765番地
(43)公開日	令和3年8月5日(2021.8.5)		1
審査請求日	令和4年5月19日(2022.5.19)	(74)代理人	100097113
			弁理士 堀 城之
		(74)代理人	100162363
			弁理士 前島 幸彦
		(74)代理人	100194283
			弁理士 村上 大勇
		(72)発明者	米田 政夫
			茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4 国
			立研究開発法人日本原子力研究開発機構
			原子力基礎工学研究センター内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】核物質検知装置、核物質検知方法、試料分析方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

核物質が一次放射線の照射に起因した核反応によって発した二次放射線を検出することによって、試料における前記核物質を検知する核物質検知装置であって、強度が時間的に変化する放射線を前記一次放射線として前記試料に照射する放射線源と、

前記試料の側から発せられた前記放射線を入射の度に検出する放射線検出器と、一定の測定期間の中において、前記放射線検出器が前記放射線を検出した際に、当該放射線の検出タイミングと、当該放射線よりも前に検出された前記放射線の検出タイミングの時間差を算出する時間差算出部と、

前記時間差のヒストグラムを作成し、当該ヒストグラムにおける前記二次放射線の寄与を推定して前記核物質の検知をする解析部と、を具備することを特徴とする核物質検知装置。

【請求項2】

前記解析部は、前記試料における前記核物質の存在を検知、または定量することを特徴とする請求項1に記載の核物質検知装置。

【請求項3】

前記放射線は中性子線であり、前記放射線検出器は中性子を検出することを特徴とする請求項1又は2に記載の核物質検知装置。

【請求項4】

前記放射線源は、
前記放射線を定常的に発する中性子線源と、
前記中性子線源が固定された回転体と、を具備し、
前記中性子線源と前記試料との間の距離が変化するように前記回転体が回転駆動されることを特徴とする請求項 3 に記載の核物質検知装置。

【請求項 5】

前記放射線源は、パルス状の前記放射線を周期的に発することを特徴とする請求項 3 に記載の核物質検知装置。

【請求項 6】

核物質が一次放射線の照射に起因した核反応によって発し、かつ前記一次放射線と同種の二次放射線を認識することによって、試料における前記核物質を検知する核物質検知方法であって、

10

強度が時間的に変化する放射線を前記一次放射線として前記試料に対して照射し、
前記試料の側から発せられた前記放射線を入射の度に検出する放射線検出器を用い、一定の測定期間の中において、前記放射線が検出された際に、当該放射線の検出タイミングと、当該放射線よりも前に検出された前記放射線の検出タイミングの時間差を算出する時間差測定工程と、

前記時間差のヒストグラムを作成し、当該ヒストグラムにおける前記二次放射線の寄与を推定して前記核物質の検知をする分析工程と、

を具備することを特徴とする核物質検知方法。

20

【請求項 7】

前記放射線は中性子線であり、前記放射線検出器は中性子を検出することを特徴とする請求項 6 に記載の核物質検知方法。

【請求項 8】

計数可能な一次信号を試料に照射することによって発生し計数可能な二次信号を検出器で測定する際に、前記二次信号と共に前記一次信号も検出される場合における、前記二次信号によって前記試料の分析を行う試料分析方法であって、

強度が時間的に変化する前記一次信号を前記試料に対して照射し、

前記試料の側から発せられた前記一次信号及び前記二次信号を入射の度に検出する検出器を用い、

30

一定の測定期間の中において、前記一次信号又は前記二次信号が検出された際の検出タイミングと、当該検出タイミングよりも前に認識された検出タイミングとの時間差を算出する時間差測定工程と、

前記時間差のヒストグラムを作成し、当該ヒストグラムにおける二次放射線の寄与を推定し、前記試料の分析を行う分析工程と、

を具備することを特徴とする試料分析方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、核物質が発する放射線を検出することによって試料中の核物質を検知する核物質検知装置、核物質検知方法に関する。また、本発明は、一次信号を試料に照射して発生した二次信号を検出することによって試料の分析を行うための試料分析方法に関する。

40

【背景技術】

【0002】

核物質（核分裂物質）が発する中性子を認識することによって、核物質を検知する技術が知られている。中性子は物質透過性が高いため、これによって手荷物、コンテナ、車両等の内部に存在する核物質を検知することもできる。図 8 は、このような核物質検知方法の原理を模式的に説明する図である。

【0003】

ここでは、容器 100 の内部に、核物質の存在の有無が検知される対象となる試料 S が

収容されている。中性子源 1 1 0 から発せられた中性子線 1 2 0 (一次中性子)は、容器 1 0 0 を透過して試料 S に照射される。これによって、試料 S 側から発せられる中性子として、一次中性子が試料 S によって散乱された成分である一次中性子成分 (一次信号) 1 3 0 と、試料 S 中に核物質が存在する場合に一次中性子によって核物質が核反応を起こしたために発生した中性子 (二次中性子) による二次中性子成分 (二次信号) 1 4 0 とが存在する。容器 1 0 0 の外部の中性子検出器 1 5 0 は、一次中性子成分 1 3 0、二次中性子成分 1 4 0 を共に検出し、特に二次中性子成分 1 4 0 を有意に認識した場合には、試料 S に核物質が存在すると判定することができる。一方、一次中性子成分 1 3 0 は、試料 S における核物質の有無に関わらず存在する。なお、図 1 1 においては便宜上一次中性子成分 1 3 0 と二次中性子成分 1 4 0 の向きは異なって示されているが、これらが発せられる向きは特に変わらず、実際にはこれらは混在している。

10

【0004】

中性子検出器 1 5 0 は、これに入射した中性子を検出することができるが、検出した中性子が一次中性子成分 1 3 0、二次中性子成分 1 4 0 のどちらであるかを判定することは容易ではない。上記のような二次中性子成分 1 4 0 を認識することにより核物質を検知するための手法として、例えば DDT (Differential Die-Away Technique) 法が知られている。DDT 法においては、上記の中性子線 1 2 0 として、持続時間の短いパルス (短パルス) 状に発せられた中性子線が用いられる。図 9 は、こうした場合における中性子検出器 1 5 0 のカウント数 (対数表示) の中性子線の照射終了時からの時間経過を模式的に示す。この場合においては、中性子線 1 2 0 が制御された短パルス状に発せられれば、一次中性子成分 1 3 0 は、図 9 においては短い時定数で減衰する破線 (1) の成分として観測される。一方、一次中性子による核反応は一次中性子の入射後の一定の時間にわたり発生するため、二次中性子成分 1 4 0 は一次中性子成分 1 3 0 から遅延して検出され、図 9 においては長い時定数で減衰する点線 (2) の成分として観測される。実際にはこの (1) の成分と (2) の成分とは中性子検出器 1 5 0 で区別されずに検出されるため、こうした成分が混在する場合には、実際の検出結果は、図 9 において (1) と (2) が共に含まれる実線で示されるような特性となる。

20

【0005】

実際には図 9 における (1) の成分の最大強度は (2) の成分の最大強度よりも桁違いに大きいため、特に (2) の成分のみを認識することは一般的には容易ではない。DDT 法においては、中性子線 1 2 0 (一次中性子) を短パルス状とし、(1) と (2) における時定数の違いを考慮し、中性子線 1 2 0 がオフとなった後で (1) の成分が十分に減衰した後で支配的となった (2) の成分を検出する。これによって二次中性子成分 1 4 0 を認識することができる。こうした技術は、例えば非特許文献 1 に記載されている。

30

【0006】

また、特許文献 1 には、炉雑音解析処理として知られる手法によって核物質の分析を行う手法が記載されている。ここでは、パルス状の中性子の照射からの一定時間 (例えば 50 msec) 経過後において、時間幅 (ゲート幅) を特定して中性子の計数を行い、この計数値の平均値、分散から雑音成分 (Y 値) が算出され、この Y 値のゲート幅依存性より、核物質を検知することができる。また、測定時間を長く設定して測定 of 統計的誤差を減少させることによって、試料における核物質の定量分析も行うことができる。

40

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0007】

【非特許文献 1】「Neutron dieaway methods for critically safety measurements of fissile waste」、Coop. K. L、Los Alamos National Laboratory、LA-UR-89-2124 (1989 年)

【特許文献】

【0008】

50

【特許文献1】国際公開2014/034734号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

上記のどちらの方法によっても、核物質の検知能力は充分ではないため、例えばその核物質の存在量を高精度で検知することは困難であった。また、例えば特許文献1に記載の技術では核物質の存在を検知することは可能であるが、ここで検出される二次中性子はパルス状の中性子（一次中性子）照射後の一定時間経過後であるため、強度の高い即発核分裂中性子は検出されず、遅発核分裂中性子のみとなる。このため、検出される中性子の数が少なくなるためにその検知能力は高くなく、十分な精度で核物質の存在を検知するためには、長時間の測定を要した。

10

【0010】

このため、一次中性子成分（一次信号）と、これによって試料から発生する二次中性子成分（二次信号）が共に検出される場合に、適切に二次中性子成分を認識して試料の分析を行えることが望まれた。

【0011】

本発明は、かかる問題点を鑑みてなされたものであり、上記問題点を解決する発明を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0012】

本発明は、上記課題を解決すべく、以下に掲げる構成とした。

本発明の核物質検知装置は、核物質が一次放射線の照射に起因した核反応によって発した二次放射線を検出することによって、試料における前記核物質を検知する核物質検知装置であって、強度が時間的に変化する放射線を前記一次放射線として前記試料に照射する放射線源と、前記試料の側から発せられた前記放射線を入射の度に検出する放射線検出器と、一定の測定期間の中において、前記放射線検出器が前記放射線を検出した際に、当該放射線の検出タイミングと、当該放射線よりも前に検出された前記放射線の検出タイミングの時間差を算出する時間差算出部と、前記時間差のヒストグラムを作成し、当該ヒストグラムにおける前記二次放射線の寄与を推定して前記核物質の検知をする解析部と、を具備することを特徴とする。

20

30

本発明の核物質検知装置において、前記解析部は、前記試料における前記核物質の存在を検知、または定量することを特徴とする。

本発明の核物質検知装置において、前記放射線は中性子線であり、前記放射線検出器は中性子を検出することを特徴とする。

本発明の核物質検知装置において、前記放射線源は、前記放射線を定常的に発する中性子線源と、前記中性子線源が固定された回転体と、を具備し、前記中性子線源と前記試料との間の距離が変化するように前記回転体が回転駆動されることを特徴とする。

本発明の核物質検知装置において、前記放射線源は、パルス状の前記放射線を周期的に発することを特徴とする。

本発明の核物質検知方法は、核物質が一次放射線の照射に起因した核反応によって発し、かつ前記一次放射線と同種の二次放射線を認識することによって、試料における前記核物質を検知する核物質検知方法であって、強度が時間的に変化する放射線を前記一次放射線として前記試料に対して照射し、前記試料の側から発せられた前記放射線を入射の度に検出する放射線検出器を用い、一定の測定期間の中において、前記放射線が検出された際に、当該放射線の検出タイミングと、当該放射線よりも前に検出された前記放射線の検出タイミングの時間差を算出する時間差測定工程と、前記時間差のヒストグラムを作成し、当該ヒストグラムにおける前記二次放射線の寄与を推定して前記核物質の検知をする分析工程と、を具備することを特徴とする。

40

本発明の核物質検知方法において、前記放射線は中性子線であり、前記放射線検出器は中性子を検出することを特徴とする。

50

本発明の試料分析方法は、計数可能な一次信号を試料に照射することによって発生し計数可能な二次信号を検出器で測定する際に、前記二次信号と共に前記一次信号も検出される場合における、前記二次信号によって前記試料の分析を行う試料分析方法であって、強度が時間的に変化する前記一次信号を前記試料に対して照射し、前記試料の側から発せられた前記一次信号及び前記二次信号を入射の度に検出する検出器を用い、一定の測定期間の中において、前記一次信号又は前記二次信号が検出された際の検出タイミングと、当該検出タイミングよりも前に認識された検出タイミングとの時間差を算出する時間差測定工程と、前記時間差のヒストグラムを作成し、当該ヒストグラムにおける二次放射線の寄与を推定し、前記試料の分析を行う分析工程と、を具備する。

【発明の効果】

【0013】

本発明は以上のように構成されているので、一次中性子成分（一次信号）と、これによって試料から発生する二次中性子成分（二次信号）が共に検出される場合に、適切に二次中性子成分を認識して試料の分析を行うことができる。

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図1】本発明の実施の形態に係る核物質検知装置の構成を示す図である。

【図2】本発明の実施の形態に係る核物質検知装置における t を測定する動作を説明する図である。

【図3】本発明の実施の形態に係る核物質検知装置における、中性子検出器におけるパルス出力の時系列の例である。

【図4】本発明の実施の形態に係る核物質検知装置において得られる t のヒストグラムを模式的に示す図である。

【図5】本発明の実施の形態に係る核物質検知装置の実施例によって得られた t のヒストグラムの例である。

【図6】従来の核物質検知装置によって得られたDDT法によるヒストグラムの例である。

【図7】本発明の実施の形態に係る核物質検知方法あるいは試料分析方法のフローチャートを示す。

【図8】従来の核物質検知方法を説明する図である。

【図9】従来の核物質検知方法において検出される中性子の検出強度の時間変化を模式的に示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0015】

本発明の実施の形態に係る核物質検知装置1の構成を図1に示す。ここでは、DDT法の場合と同様に周期的なパルス状の中性子を発する中性子源（放射線源）10が用いられ、ここから発せられた中性子線200が、容器100の中に収容された試料Sに対して照射される。また、試料S側から発せられる中性子を検出する中性子検出器（放射線検出器：検出器）20が用いられる。中性子検出器20は、中性子1個を吸収する度にパルス出力をするため、これにより中性子1個1個を計数することができ、中性子の入射タイミング（検出タイミング）も認識することができる。

【0016】

中性子検出器20で検出される中性子は、図8の構成と同様に、中性子線200が試料Sで散乱された一次中性子成分210と、試料Sにおける一次中性子による試料S内での核反応で発生した二次中性子成分220のいずれかであり、これらは区別なく中性子検出器20で検出される。なお、ここでは試料Sは容器100の内部に収容されているが、容器100は用いられなくともよい。

【0017】

図1において、中性子検出器20には、解析装置30が接続されている。解析装置30は、中性子源10における中性子線200のパルス状の発生の状況に応じて、中性子検出

10

20

30

40

50

器 20 の出力に応じた信号処理を行い、これによって試料 S における核物質の有無、あるいは核物質の存在量を認識する。以下にこの動作について説明する。解析装置 30 は、中性子検出器 20 における中性子の検出タイミングの時間差を算出する時間差算出部 31 と、この時間差のデータから上記の認識を行う解析部 32 を具備する。

【0018】

図 2 は、中性子検出器 20 における中性子の検出の状況と、これに応じた解析装置 30 の動作を説明する図である。図 2 は、中性子検出器 20 が 4 回中性子を検出した場合を示し、その検出時刻は t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 とされる。ここで、時間差算出部 31 は、中性子検出器 20 が中性子を検出した度に、この検出タイミングよりも前に中性子を検出した検出タイミングとの時間差 t を算出し、解析部 32 はこの値を認識する。

10

【0019】

図 2 においては、時刻 t_1 の出力が最も先行したため、この出力に対しては差分をとるべき対象となる出力が存在せず、 t は算出されない。その後、時刻 t_2 の出力に対しては、 $t = t_2 - t_1$ の一つが得られ、時刻 t_3 の出力に対しては $t = t_3 - t_1$ と、 $t = t_3 - t_2$ の二つが得られ、時刻 t_4 の出力に対しては $t = t_4 - t_1$ 、 $t = t_4 - t_2$ 、 $t = t_4 - t_3$ の三つが得られる。このように、後の出力に対しては多くの t を算出することが必要となるが、時間差算出部 31 あるいは解析部 32 がこのように $t_1 \sim t_4$ を記憶すれば、時間差算出部 31 はこの算出をすることができる。

【0020】

図 2 においては中性子の検出が 4 回あったものとされたが、このようなデータ収集が行われる期間（測定期間）は、中性子線 200 のパルス周期よりも通常は十分に長いものとする。このため、この測定期間内において実際にはより多くの中性子が検出される。図 3 は、このような中性子検出器 20 におけるパルス出力の時系列の例を示し、ここでは、パルスにおける中性子がオンとなった期間の終了直後からの出力を示す。ここで、前記の DDT 法の場合と同様に、一次中性子成分 210 が周期的なパルス状である場合には、中性子の照射直後からの中性子検出器 20 が検出する中性子のカウント数の経時変化は、図 9 に示された通りとなる。すなわち、中性子検出器 20 で検出される中性子には、一次中性子と二次中性子が混在するという点は同様である。ここで、一次中性子としては、試料 S で散乱されたために遅延して中性子検出器 20 に達したものも含まれる。

20

【0021】

解析部 32 は、測定期間内における上記のように認識された t の全てを記憶し、測定の終了後にそのヒストグラム（度数分布）を生成する。試料 S、中性子源 10 の動作が安定していれば、サイクル毎に状況は変動しないために理想的には同様の結果が得られるが、実際には 1 回の検出時間帯内においては、中性子の検出回数は少なく、統計的ばらつきが大きくなる。しかしながら、上記の測定を行い t を算出し、全ての t のヒストグラムを得る場合には統計的ばらつきを低減し、高精度の結果を得ることができる。

30

【0022】

このようにして得られるヒストグラムの結果及びその物理的意味について説明する。図 4 の特性は、このようにして得られた t のヒストグラムを模式的に示す図である。図 9、図 3 の結果より、図 4 の特性も、 t の増大に従って減少し、前記の図 9 の特性と類似するが、横軸が t とされた点が異なる。

40

ここで検出される中性子には、前記のように一次中性子と二次中性子が含まれるために、上記のように t の算出に用いられた 2 つの出力の組み合わせ（後の出力と先の出力）には、先の出力を一次中性子とした場合において、二次中性子を後の出力としたものが含まれる。図 9 の特性より、 t が大きくなるほど、 t の算出に際して用いられた出力の組み合わせが二次中性子と一次中性子によるものである確率は高くなる。逆に、 t が小さければ、この t に対応した組み合わせが二次中性子と一次中性子によるものである確率は低くなり、この組み合わせは一次中性子同士のものである可能性が高くなる。

【0023】

このため、図 4 において、 t が小さな領域 A においては一次中性子の寄与が大きく、

50

t が大きな領域 B においては二次中性子の寄与が大きくなり、結局図 4 の特性は図 9 の特性を反映する。また、図 4 の特性における横軸 (t) 方向の広がり、一次中性子が核物質で吸収されてから二次中性子が発せられる時間に対応することも同様である。すなわち、図 4 の特性と図 9 の特性は類似し、各特性に対する一次中性子と二次中性子の寄与の状況は同様である。このため、図 4 において、核物質含有量が少ない場合 (実線) と比べて、核物質含有量が多い場合 (破線) は、 t が大きな領域で値が大きくなり、 t のヒストグラムから試料 S における核物質の検知、その含有量を推定することができる。

【 0 0 2 4 】

ただし、図 9 の特性における縦軸は中性子が検出されたカウント数であったのに対し、図 4 における縦軸は、 t が算出された数であるため、図 2 の単純な例からも明らかのように、その数は中性子が検出されたカウント数よりも多い。このため、図 4 のヒストグラムにおいては、中性子源 1 0、中性子検出器 2 0 を同一とした場合でも、図 9 のヒストグラムを作成する場合と比べて、ヒストグラムに用いられるサンプル数を多くすることができ、その統計的精度を高めることができる。

10

【 0 0 2 5 】

図 5 は、実際にプルトニウム (P u) が含まれる試料 S と含まれない試料 S に対して図 1 の構成で測定を行った結果得られたヒストグラム (実施例) を示す。ここでは、試料 S における P u の量が 0 g (なし)、1 0 0 m g、3 0 0 m g とされ、前記の中性子線のパルス周期は 1 0 m s e c とされ、測定期間は 1 0 s e c とされた。この結果より、これらの 3 つの測定結果における、特に t の大きな領域での差分が明確となっている。このため、例えばこのように予め P u の存在量が既知の標準試料に対する測定結果を解析部 3 2 が記憶しておけば、解析部 3 2 は、測定によって得られたヒストグラムから P u の存在量を認識することができる。

20

【 0 0 2 6 】

一方、前記の D D T 法による図 9 の特性は、パルス状に発せられた中性子線における、中性子線がオンからオフとなった時点からオフの期間においてのみ各周期内で得られた結果の総計として得られる。このため、図 5 の結果を得た場合の中性子検出器 2 0 の測定結果と同一の測定結果から、比較例として図 9 の特性を得ることもできる。図 6 (a) は、この結果を示す。この場合においては、P u が 0 g の場合と 1 0 0 m g との差異が明確ではない。また、縦軸 (カウント数) の絶対値が図 5 の場合とは大きく異なるため、統計的誤差が図 5 と比べると大きくなっている。

30

【 0 0 2 7 】

このため、同様の条件で総測定時間を 1 2 0 s e c と長くとり検出された総カウント数を十分に多くして図 6 (a) と同様の特性を調べた結果を図 6 (b) に示す。この結果においては、P u が 0 g の場合と 1 0 0 m g との差異が表れている。

【 0 0 2 8 】

これに対して、図 5 の結果では、総測定時間が 1 0 s e c の場合においても、P u が 0 g と 1 0 0 m g の場合の特性の差異が明確になっている。すなわち、上記の方法によって、同一の測定時間であれば、D D T 法よりも高精度で試料 S における P u の存在量を認識することができる。

40

【 0 0 2 9 】

また、特許文献 1 に記載の技術においては、中性子検出器で検出される一次中性子成分を減らすために、パルス状の中性子の照射が終了してから一定時間経過後の測定結果が用いられた。このため、この測定結果に寄与する二次中性子は遅発核分裂中性子だけであり、より数の多い即発核分裂中性子は測定結果には寄与しなかった。これに対し、上記の方法においては、パルス状の中性子の照射の終了直後から測定が行われるため、即発核分裂中性子も測定結果に寄与する。このため、上記の方法によれば、より少ない測定時間で高精度で核物質の検知を行うことができる。

【 0 0 3 0 】

図 7 は、この解析装置 3 0 の動作 (核物質検知方法) を示すフローチャートである。こ

50

ここで、この測定を行う時間である測定期間は通常は十分に長く、この総測定時間には周期的に変化する中性子線 200 の多数サイクルが含まれるものとする。なお、以下ではこの動作は中性子検出器 20 が中性子を 1 回検出する度に行われるものとするが、例えば図 3 のように中性子検出の時系列データが記憶されていれば、測定後にこの時系列データを読み出して解析装置 30 が同様の動作を行うこともできる。

【0031】

この動作は、測定期間内において、中性子検出器 20 が中性子を検出する度 (S1) に行われる。中性子検出器 20 からの出力が得られた場合 (S1) には、解析部 32 は、この検出タイミング (図 2 における $t_1 \sim t_4$) を記憶する (S2)。次に、解析部 32 は、このように記憶された検出タイミングのデータから、測定期間内においてこれよりも前に中性子検出器 20 からの出力があったか否かを判定する (S3)。これよりも前に出力が認められなかった場合 (S3: No) は、図 2 における時刻 t_1 の場合に対応し、次の出力の認識 (S1)、検出タイミングの記憶 (S2) が行われる。

10

【0032】

これよりも前に出力が認められた場合 (S3: Yes) は、図 2 における $t_2 \sim t_4$ の場合に対応し、解析部 32 は、時間差算出部 31 に対応する t を全て算出させ (S4)、その結果を全て記憶する (S5)。その後、中性子の検出 (S1) から始まる動作が、測定期間が終了する (S6: Yes) まで繰り返される。これによって、測定期間内において t のデータが解析部 32 に蓄積される。上記の S1 ~ S5 の処理は、測定期間内において t のデータを蓄積する時間差測定工程となる。

20

【0033】

その後、測定期間が終了したら (S6: Yes)、解析部 32 は、記憶された全ての t のヒストグラムを作成する (S7)。その後、解析部 32 は、このヒストグラムにおける図 4 に示されたような二次中性子の寄与より、試料 S における核物質の存在量を推定する (S8)。すなわち、S7、S8 の処理は、 t のデータから核物質の分析を行う分析工程となる。前記のように、これによって核物質の存在の検知、あるいはその定量分析ができる。

【0034】

上記の核物質検知方法においては、図 4 の特性において二次中性子成分と一次中性子成分とが区別できるようにするために、中性子線 200 において中性子が発せられる期間が制限された周期的なパルス状とされた。しかしながら、上記の中性子検出 (S1) は、このような周期的な状態とは無関係に、またその周期の開始タイミングを認識しないで、一定の測定期間内で行うことができる。このため、DDT 法の場合と比べて、中性子検出の際にパルス中性子の発生タイミングを認識することは不要であり、測定も容易となる。ただし、周期毎に上記の測定を行い、DDT 法と同様にサイクル内における特定の期間 (例えば中性子がオフの期間のみ) においてのみ測定を行ってもよい。また、測定期間については、一般的にはパルス周期より長い方がサンプル数が多くなるため好ましいが、検出される中性子の強度が強いために測定期間が短くとも図 4 の特性が十分に認識できる場合には、測定期間はパルス周期より短くともよい。

30

【0035】

また、中性子線 200 はパルス状である必要はなく、図 4 の特性において上記のように一次中性子と二次中性子の区別ができる限りにおいて、中性子線の時間的变化があればよい。例えば、中性子線の強度が急峻なパルス状ではなく緩やかな変化をした場合においては、図 4 の特性における一次中性子の寄与に対する二次中性子の寄与の割合は、この周期的な変化における中性子線の強度の変動率やコントラスト等に応じて変化するものの、同様の原理は成立する。特に、上記の方法によれば、図 5 に示されたように統計的精度の高い結果が得られるため、こうした場合においても、ヒストグラム中における二次中性子の寄与と一次中性子の寄与の区別は、従来手法と比べて容易となる。

40

【0036】

このため、中性子線がパルス状である必要はなく、その強度が周期的に変化すればよい

50

。このため、例えば、中性子源として、「Conceptual Study on a Novel Method for Detecting Nuclear Material Using a Neutron Source」、Masao Komeda and Yosuke Toh、Annals of Nuclear Energy、Vol. 135 (2020)、106993 (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S306454919304955>)、に記載されたような、定常的に中性子を発する中性子線源（放射性同位体）を回転する円板（回転体）に固定して、円板の回転に伴って中性子線源と試料との間の距離が周期的に変化するように構成された中性子源を用いることもできる。一般的に、中性子を正確にパルス状に発する中性子源を得ることは容易でないが、このように中性子線源を用いれば、周期的に強度が変動する中性子源を容易に得ることができる。あるいは、上記のように一次中性子と二次中性子の区別ができる限りにおいて、中性子の時間的な強度変化が周期的である必要はない。以上より、上記の構成においては解析装置30と中性子源10の間で少なくとも精密な同期をとることは不要となる。

10

【0037】

また、上記の手法においては、中性子（一次中性子、二次中性子）を中性子検出器（放射線検出器）で検出することによって核物質を検知したが、放射線（一次放射線）を吸収することによる反応で他の放射線（二次放射線）を発する放射性物質（核物質）の有無を放射線検出器を用いて検知する際に、二次放射線と一次放射線とが放射線検出器で区別なく同様に検出される場合には、上記の構成を同様に用いることができる。すなわち、上記の一次中性子、二次中性子の代わりに、他の放射線（線等）を検出して放射線を発する核物質を検知する場合においても、上記の構成は有効である。この際、一次放射線と二次放射線とが同様に放射線検出器で検出される限りにおいて、一次放射線と二次放射線の種類が異なってもよい。この場合において、一次放射線と二次放射線が放射線検出器で弁別可能な場合であっても、上記の構成によれば、この弁別を行う必要はないため、信号処理が容易となる。

20

【0038】

更に、上記のように、検出の時間差 t のヒストグラムを用いた解析は、計数可能な一次信号を試料に照射し、これによって発生した二次信号を元にして試料の解析を行う場合において、一般的に適用が可能である。このような場合においては、単一の検出器で二次信号を検出（計数）する際に、基となった一次信号も同様に検出され、両者を区別して計数することが困難である場合がある。例えば、ソナーにおいて、このような一次信号として音波を用い、試料からこの音波が反響して発せられた音波を二次信号とする場合が考えられる。この場合において、検出器が二次信号を検出する際に、一次信号も同時に検出される。

30

【0039】

こうした場合において、一次信号、二次信号が共に計数可能であり個々の検出器の検出タイミングが認識できる場合には、同様の手法が適用可能である。この場合において、前記の場合と同様に一次信号がパルス状であれば好ましいが、一次信号がパルス状でなくとも解析が可能である点については上記の場合と同様である。この場合、検出器は一次信号、二次信号の種類に応じて適宜設定される。また、一次信号と二次信号が共に同一の検出器で検出できる限りにおいて、前記の放射線の場合と同様に、一次信号と二次信号の種類が異なってもよい。

40

【0040】

あるいは、例えば一次信号を検出する検出器、二次信号を検出する検出器を配置を変えて個別に設けることができる場合においても、上記の構成によれば、両者を検出する単一の検出器を用いて、二次信号を用いた試料の解析を行うことが可能となる。すなわち、上記と同様の時間差測定工程、分析工程を具備する試料分析方法は、核物質の検知以外においても有効である。

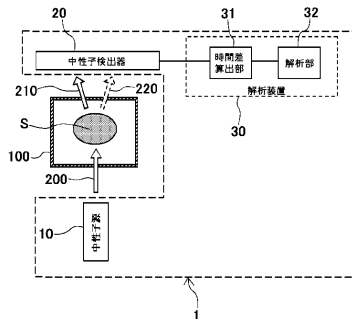
【符号の説明】

50

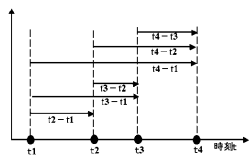
【 0 0 4 1 】

- 1 核物質検知装置
- 10、110 中性子源（放射線源）
- 20、150 中性子検出器（放射線検出器：検出器）
- 30 解析装置
- 31 時間差算出部
- 32 解析部
- 100 容器
- 120、200 中性子線（放射線）
- 130、210 一次中性子成分
- 140、220 二次中性子成分
- S 試料

【 図 1 】



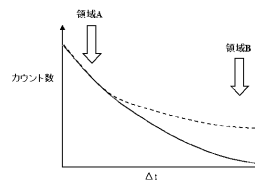
【 図 2 】



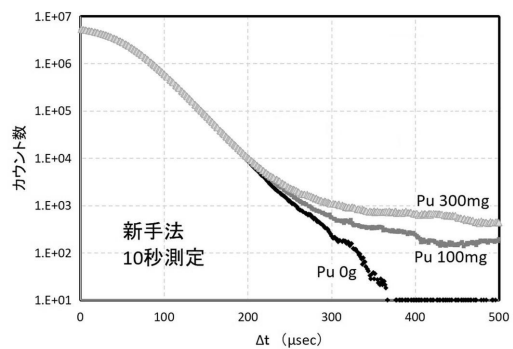
【 図 3 】



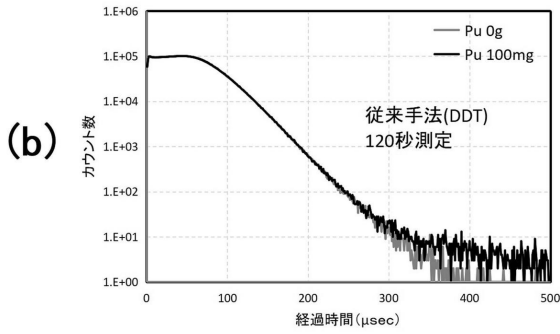
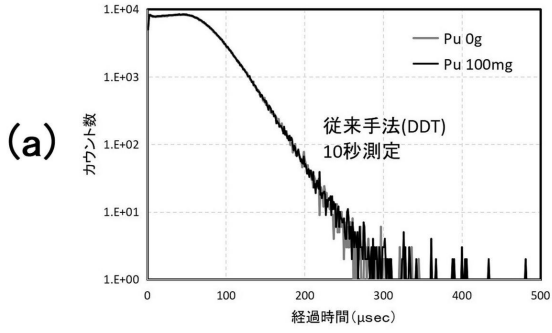
【 図 4 】



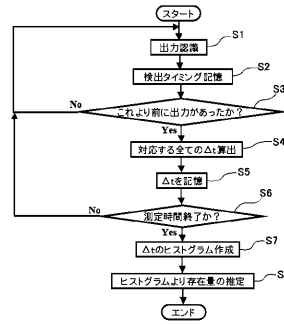
【 図 5 】



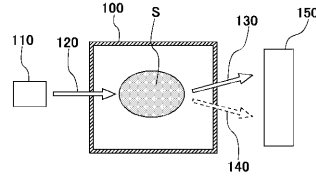
【図6】



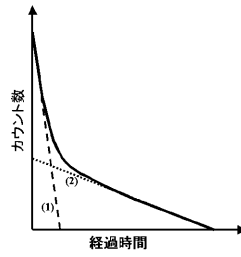
【図7】



【図8】



【図9】



フロントページの続き

(72)発明者 藤 暢輔

茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力基礎工
学研究センター内

審査官 松平 佳巳

(56)参考文献 国際公開第2014/034734(WO, A1)

特開平04-289497(JP, A)

特開2019-105598(JP, A)

特開平02-157696(JP, A)

特表2002-541491(JP, A)

米国特許出願公開第2005/0135536(US, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G21C 17/00

G21C 17/06