(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第7219442号
(P7219442)
(45)発行日　令和5年2月8日(2023.2.8)　(24)登録日　令和5年1月31日(2023.1.31)

(51)Int.Cl.　FI
G01N 23/222 (2006.01)　G01N 23/222

請求項の数 6　(全 15 頁)

(21)出願番号　特願2018-181563(P2018-181563)
(22)出願日　平成30年9月27日(2018.9.27)
(65)公開番号　特開2020-51895(P2020-51895A)
(43)公開日　令和2年4月2日(2020.4.2)
審査請求日　令和3年7月28日(2021.7.28)

(73)特許権者　505374783
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
茨城県那珂郡東海村大字舟石川７６５番地１
(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　100194146
弁理士　長谷川　明
(74)代理人　100194283
弁理士　村上　大勇

最終頁に続く

(54)【発明の名称】核物質検知装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

試料における核物質を検知する核物質検知装置であって、

前記核物質に核反応を発生させる一次放射線を連続的に発する放射線源と、

前記一次放射線が照射された前記試料から発せられた放射線を検出する放射線検出器と、

前記放射線源と前記試料との間の距離を前記距離が極小となる極小点が含まれるように時間経過に応じて変化させた際の前記放射線検出器の検出強度の時間経過を測定結果として取得させ、前記極小点の前後における前記距離の時間変化が前記極小点を挟んで対称となるように、前記放射線源、前記試料の少なくともいずれかを移動させることによって、前記距離を時間的に変化させる移動手段と、

前記測定結果における、前記極小点の後の一定期間内の前記検出強度の積分値であるピーク後積分値と、前記極小点の前の他の一定期間内の前記検出強度の積分値であるピーク前積分値と、に基づいて、前記核物質の有無を検知する判定手段と、

を具備することを特徴とする核物質検知装置。

【請求項２】

試料における核物質を検知する核物質検知装置であって、

前記核物質に核反応を発生させる一次放射線を連続的に発する放射線源と、

前記一次放射線が照射された前記試料から発せられた放射線を検出する放射線検出器と、

前記放射線源と前記試料との間の距離を前記距離が極小となる極小点が含まれるように時間経過に応じて変化させた際の前記放射線検出器の検出強度の時間経過を測定結果として取得させ、前記極小点の前後における前記距離の時間変化が前記極小点を挟んで対称となるように、前記放射線源、前記試料の少なくともいずれかを移動させることによって、前記距離を時間的に変化させる移動手段と、

前記移動手段によって前記距離の時間変化率である移動速度を高速度、低速度に変化させた際の前記測定結果において、前記極小点の後の一定期間内の前記検出強度の積分値であるピーク後積分値をそれぞれ算出し、前記高速度における前記ピーク後積分値と前記低速度における前記ピーク後積分値と、に基づいて前記核物質の有無を検知する判定手段と、

を具備することを特徴とする核物質検知装置。

【請求項３】

前記移動手段は前記距離の時間変化率である移動速度を高速度、低速度に変化させ、

前記判定手段は、前記ピーク後積分値の、前記ピーク前積分値に対する比率が、前記高速度の場合において前記低速度の場合よりも高い場合に、前記核物質が存在すると認識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４】

前記移動手段において、前記放射線源が回転体に固定されたことを特徴とする請求項１から請求項３までのいずれか１項に記載の核物質検知装置。

【請求項５】

前記核物質の種類は予め設定され、

前記判定手段は、当該核物質で構成された標準試料に対する前記測定結果をリファレンスとして予め記憶し、当該リファレンスと、前記試料に対する前記測定結果とを比較することによって、前記試料における前記核物質の量を検知することを特徴とする請求項１から請求項４までのいずれか１項に記載の核物質検知装置。

【請求項６】

前記一次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から請求項５までのいずれか１項に記載の核物質検知装置。

【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に関する。

【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１１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１１０から発せられた中性子線１２０（一次中性子）は、容器１００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１３０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１４０とが存在する。容器１００の外部の中性子検出器１５０は、一次中性子成分１３０、二次中性子成分１４０を共に検出し、特に二次中性子成分１４０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１３０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１１においては便宜上一次中性子成分１３０と二次中性子成分１

４０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。

【０００４】

中性子検出器１５０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１３０、二次中性子成分１４０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１４０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１２０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１２は、こうした場合における中性子検出器１５０のカウント数（対数表示）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１２０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１３０は、図１２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１４０は一次中性子成分１３０から遅延して検出され、図１２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１５０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１２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。

【０００５】

実際には図１２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１２０（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１２０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１４０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。

【０００６】

ただし、（２）の成分も時間経過と共に指数関数的に減衰するという点は（１）の成分と同様であるため、中性子線１２０がオフとなってからの時間経過が長くなった場合には、（１）に対する相対的な（２）の成分の検出強度(カウント数）は大きくなるものの、（２）の成分の絶対的な検出強度は大きく減少する。このため、（２）の成分を十分な検出強度で検出するためには、中性子線１２０（一次中性子）のパルス幅を十分に短く制御することにより（１）の成分が十分早く減衰するようにした上で、比較的短い時間経過の後に検出を行う必要がある。

【０００７】

ただし、電子線やＸ線等と比べて、中性子を短時間のパルス状に制御して発することは容易ではない。一般的にはこのようにパルス状に制御された中性子線１２０を発する中性子源としては加速器を用いて中性子を発するものや、より小型の中性子発生管が知られている。しかしながら、加速器は大型かつ非常に高価な設備となるため、この場合には核物質検知装置全体が非常に大型かつ高価となる。中性子発生管は、加速器を用いた場合よりも小型となるが、非常に高価であり、かつパルス形状の中性子線を安定して発生させることは困難である。一方、上記のように手荷物等の内部の核物質の検知を行うための核物質検知装置としては、小型で移動可能であり、かつ安定した測定が可能なものが望ましく、このような中性子源を用いたものは適さない。

【０００８】

このため、特許文献１には、加速器や中性子発生管を利用せずに同様の分析を行う核物質検知装置が記載されている。この装置においては、測定対象となる試料及び中性子検出器は中性子減速材で囲まれる。一方、放射性同位体（Ｃｆ－２５２等）で構成された安価かつ小型の中性子線源が回転する円板に装着され、回転に応じて中性子減速材内部の試料に近接する。この中性子線源は中性子を連続的に発するが、上記の構成により、回転の際に中性子が中性子減速材の内部に留まる時間を例えば１ｍｓ程度に制限することができ、

前記のパルス状の一次中性子を疑似的に実現することができる。このため、この時間の経過後に中性子検出器で検出された成分は、前記の二次中性子成分１４０（図１２における（２）の成分）となり、この試料における核物質の検知をすることができる。この技術においては、試料を囲む中性子減速材と、回転により移動する中性子線源を用いて上記のような疑似的なパルス状の一次中性子を実現するため、前記のような大型、高価な中性子源を用いた場合と比べて、これによって小型、安価な核物質検知装置を得ることができる。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【０００９】

【非特許文献１】「Ｎｅｗｔｒｏｎ 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】

【００１０】

【特許文献１】特開平２－１５７６９６号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【００１１】

特許文献１に記載の核物質検知装置においては、中性子減速材で囲まれた内部における中性子の滞在時間（例えば１ｍｓ後）は、加速器を用いた中性子源や中性子発生管におけるパルス長よりも桁違いに長い。このため、前記のように、図１２における（１）の成分が十分に減衰してから検出を行った場合には、（２）の成分も大きく減衰した。このため、この核物質検知装置は小型となるものの、この装置における二次中性子の検出強度（カウント数）は非常に低くなり、核物質を高精度で検知することは困難であった。

【００１２】

このため、小型の装置を用いて核物質を高精度で検知できることが望まれた。

【００１３】

本発明は、かかる問題点に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】

【００１４】

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、試料における核物質を検知する核物質検知装置であって、前記核物質に核反応を発生させる一次放射線を連続的に発する放射線源と、前記一次放射線が照射された前記試料から発せられた放射線を検出する放射線検出器と、前記放射線源と前記試料との間の距離を前記距離が極小となる極小点が含まれるように時間経過に応じて変化させた際の前記放射線検出器の検出強度の時間経過を測定結果として取得させ、前記極小点の前後における前記距離の時間変化が前記極小点を挟んで対称となるように、前記放射線源、前記試料の少なくともいずれかを移動させることによって、前記距離を時間的に変化させる移動手段と、前記測定結果における、前記極小点の後の一定期間内の前記検出強度の積分値であるピーク後積分値と、前記極小点の前の他の一定期間内の前記検出強度の積分値であるピーク前積分値と、に基づいて、前記核物質の有無を検知する判定手段と、を具備することを特徴とする。

本発明の核物質検知装置は、試料における核物質を検知する核物質検知装置であって、前記核物質に核反応を発生させる一次放射線を連続的に発する放射線源と、前記一次放射線が照射された前記試料から発せられた放射線を検出する放射線検出器と、前記放射線源と前記試料との間の距離を前記距離が極小となる極小点が含まれるように時間経過に応じて変化させた際の前記放射線検出器の検出強度の時間経過を測定結果として取得させ、前記極小点の前後における前記距離の時間変化が前記極小点を挟んで対称となるように、前

記放射線源、前記試料の少なくともいずれかを移動させることによって、前記距離を時間的に変化させる移動手段と、前記移動手段によって前記距離の時間変化率である移動速度を高速度、低速度に変化させた際の前記測定結果において、前記極小点の後の一定期間内の前記検出強度の積分値であるピーク後積分値をそれぞれ算出し、前記高速度における前記ピーク後積分値と前記低速度における前記ピーク後積分値と、に基づいて前記核物質の有無を検知する判定手段と、を具備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、前記移動手段は前記距離の時間変化率である移動速度を高速度、低速度に変化させ、前記判定手段は、前記ピーク後積分値の、前記ピーク前積分値に対する比率が、前記高速度の場合において前記低速度の場合よりも高い場合に、前記核物質が存在すると認識することを特徴とする。

本発明の核物質検知装置は、前記移動手段において、前記放射線源が回転体に固定されたことを特徴とする。

本発明の核物質検知装置において、前記核物質の種類は予め設定され、前記判定手段は、当該核物質で構成された標準試料に対する前記測定結果をリファレンスとして予め記憶し、当該リファレンスと、前記試料に対する前記測定結果とを比較することによって、前記試料における前記核物質の量を検知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、前記一次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。

【発明の効果】

【００１５】

本発明は以上のように構成されているので、小型の装置を用いて核物質を高精度で検知することができる。

【図面の簡単な説明】

【００１６】

【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（その１）である。

【図２】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（その２）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、中性子線源と試料の間の４種類の位置関係を示す図である。

【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、中性子線源の４種類の位置における一次中性子成分、二次中性子成分の検出強度の変遷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における、試料の中心に核物質が存在する場合における、円板の回転に伴う中性子検出器のカウント数の変遷を、回転速度毎にシミュレーションによって算出した結果である。

【図６】本発明の実施の形態に係る核物質検知装置において、水平方向に非対称な構成を具備する大きな試料がある場合の水平方向の構成（ａ）、試料の垂直方向の断面図の例（ｂ）を示す。

【図７】本発明の実施の形態に係る核物質検知装置における、試料が非対称な構造を具備する場合（その１）における、低回転速度の円板の回転に伴う中性子検出器のカウント数の変遷をシミュレーションによって算出した結果である。

【図８】本発明の実施の形態に係る核物質検知装置における、試料が非対称な構造を具備する場合（その１）における、高回転速度の円板の回転に伴う中性子検出器のカウント数の変遷をシミュレーションによって算出した結果である。

【図９】本発明の実施の形態に係る核物質検知装置における、試料が非対称な構造を具備する場合（その２）における、低回転速度の円板の回転に伴う中性子検出器のカウント数の変遷をシミュレーションによって算出した結果である。

【図１０】本発明の実施の形態に係る核物質検知装置における、試料が非対称な構造を具備する場合（その２）における、高回転速度の円板の回転に伴う中性子検出器のカウント数の変遷をシミュレーションによって算出した結果である。

【図１１】従来の核物質検知方法を説明する図である。

【図１２】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】

【００１７】

本発明の実施の形態に係る核物質検知装置の構成を図１、２に示す。ここで、図１においてはその機械的構成を上面から見た構成が、図２においてはその機械的構成を側面から見た図が示されている。ここでは、中性子線源（放射線源）１０が、鉛直方向に沿った回転軸２０Ａを具備する円板（回転体）２０の外周近くに固定されている。中性子線源１０としては、特許文献１に記載のものと同様に、放射性同位体（Ｃｆ－２５２等）が用いられる。このため、中性子線源１０からは連続的に中性子線２００（一次中性子）が発せられる。試料Ｓは、円板２０（中性子線源１０）と中性子検出器３０の間に設置されるため、図１１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核反応で発生した二次中性子成分２２０は、区別なく中性子検出器３０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。

【００１８】

中性子線源１０と試料Ｓの位置関係は、円板２０の回転の位相（角度）で定まり、これらの間の距離はこの位相に応じて変動する。図１、２においては、中性子線源１０と試料Ｓとの間の距離が最も近接した場合が示されている。円板２０の回転軸２０Ａは、モーター２１で駆動され、この回転はコンピューター４０で制御される。このため、円板２０とモーター２１は、中性子線源２０を試料Ｓに対して相対的に移動させる移動手段として機能する。また、コンピューター４０は、モーター２１の回転角度、あるいは円板２０に固定されたマーカーの位置等を検知すること等によって、この回転の位相を認識することができる。これにより、コンピューター４０は、中性子線源１０と試料Ｓの位置関係を認識することができる。

【００１９】

コンピューター４０には、中性子検出器３０の出力も入力する。この出力は、円板２０の回転周期よりも十分に短い一定時間内における中性子のカウント数である。試料Ｓに照射される中性子線２００の強度は、中性子線源１０と試料Ｓの距離に応じて変動するため、円板２０の回転（回転時の位相）に応じて一次中性子成分２１０及び二次中性子成分２２０の強度は変化し、中性子検出器３０のカウント数は、円板２０の回転に伴って変化する。コンピューター４０は、円板２０の回転に伴うこのようなカウント数の変遷を認識することができる。

【００２０】

上記の構成により、コンピューター４０は、特に試料Ｓから発せられた二次中性子（二次中性子成分２２０）の強度を一次中性子（一次中性子成分２１０）の強度と分離して認識することができる。以下に、この動作について説明する。図３（ａ）～（ｄ）は、図１における円板２０の回転に伴う中性子線源１０と試料Ｓの４種類の位置関係を示す。ここで、円板２０の回転の向きは図中時計回りであるため、図３では時間の経過に伴い（ａ）から（ｄ）の状態に向かうものとし、図３（ａ）～（ｄ）における中性子線源１０の位置をそれぞれＰ０、Ｐ１、Ｐ２、Ｐ３とする。また、単純化のために核物質を含む試料Ｓは充分に小さくその大きさは無視できるものとする。この状態は、小さな核物質が試料Ｓの中心にある場合とも等価である。図３（ｃ）は中性子線源１０と試料Ｓとが最も近接した状態となり、図３（ａ）は図３の中では中性子線源１０と試料Ｓとが最も離間した状態となる。図３（ｂ）の状態と図３（ｄ）の状態は、図３（ｃ）の状態から見て左右対称であるものとする。このため、図３（ｂ）の状態と図３（ｄ）の状態では中性子線源１０と試料Ｓとの間の距離は等しく、この距離は図３（ａ）と図３（ｃ）の場合の間となる。

【００２１】

図４は、図３（ａ）～（ｄ）（中性子線源１０の位置がＰ０～Ｐ３）の場合における、中性子検出器３０で検出される中性子における一次中性子成分２１０の検出強度（Ｎ１０～Ｎ１３）、二次中性子成分２２０の検出強度（Ｎ２０～Ｎ２３）の概要を示す。ここで

は、これらの絶対値は模式的に示されている。図４における横軸は、円板２０の回転時の位相、あるいは時間経過に対応し、試料Ｓから中性子検出器３０までの中性子の到達時間はここに示された範囲内の時間に対して無視できるものとする。前記のとおり、中性子検出器３０では実際にこれらの各成分を分離して認識することはできず、各位置における両成分の検出強度の和が実際のカウント数として認識される。

【００２２】

図４において、中性子線源１０の位置がＰ０（図３（ａ））である場合には、中性子線源１０と試料Ｓの間の距離が最も大きいため、この際の一次中性子成分２１０の検出強度Ｎ１０は最も小さく、これに伴ってこの際の二次中性子成分２２０の検出強度Ｎ２０も小さい。その後、中性子線源１０の位置がＰ１（図３（ｂ））、Ｐ２（図３（ｃ））となるに従い中性子線源１０と試料Ｓの間の距離が小さくなるため、一次中性子成分２１０の検出強度Ｎ１１、Ｎ１２は徐々に大きくなり、これに伴って二次中性子成分２２０の検出強度Ｎ２１、Ｎ２２も徐々に大きくなる。特に、中性子線源１０の位置がＰ２（図３（ｃ））である場合には、中性子線源１０と試料Ｓの間の距離は最も小さくなるため、一次中性子成分２１０の検出強度Ｎ１２は最大となる。また、前記の通り、二次中性子成分２２０の検出強度Ｎ２０、Ｎ２１、Ｎ２２は、それぞれ対応する一次中性子成分２１０による検出強度Ｎ１０、Ｎ１１、Ｎ１２よりも小さい。

【００２３】

その後、中性子線源１０の位置がＰ３（図３（ｄ））となると、中性子線源１０と試料Ｓの距離はＰ２(図３（ｃ））の場合よりも大きくなるため、一次中性子成分２１０の検出強度Ｎ１３はＮ１２よりも減少する。また、位置Ｐ３（図３（ｄ））における場合と位置Ｐ１（図３（ｂ））における場合では、中性子線源１０と試料Ｓとの間の距離は等しいため、図示されるように、原理的にはＮ１３はＮ１１と等しい。

【００２４】

一方、二次中性子成分２２０は、一次中性子成分２１０から遅延して発生するため、位置Ｐ３において検出される二次中性子成分２２０には、それよりも前、例えば位置Ｐ２における最も強度が高い一次中性子成分２１０（Ｎ１２）に対応して発生したものが含まれる。このため、位置Ｐ３においては、一次中性子成分２１０の検出強度Ｎ１３は位置Ｐ１における検出強度Ｎ１１と等しいものの、二次中性子成分２２０の検出強度Ｎ２３は位置Ｐ１における検出強度Ｎ２１と比べて、Ｎ２３＞Ｎ２１となる。このため、図４に示されるように、一次中性子成分２１０の検出強度分布（破線）は位置Ｐ２の前後で対称となるのに対して、二次中性子成分２２０の検出強度分布（一点鎖線）のピークは、位置Ｐ２より後（右側）となる。すなわち、二次中性子成分２２０による強度分布は、試料Ｓと中性子線源１０の間の距離が最小となる位置Ｐ２の前後で非対称となる。

【００２５】

前記の通り、実際に各位置Ｐ０～Ｐ３において中性子検出器３０で検出されるカウント数は、それぞれＮ１０＋Ｎ２０、Ｎ１１＋Ｎ２１、Ｎ１２＋Ｎ２２、Ｎ１３＋Ｎ２３に対応する。ここで、Ｎ１１＝Ｎ１３であれば、位置Ｐ３における中性子検出器３０のカウント数と位置Ｐ１における中性子検出器３０のカウント数の差はＮ２３－Ｎ２１＝ＮＮ＞０となる。ＮＮは試料Ｓから発生した二次中性子のみに起因した成分であり、二次中性子の発生量に比例する。

【００２６】

このため、コンピューター４０がＮＮを算出し、例えばＮＮがある閾値を超えた場合には、試料Ｓが核物質を含むと認識することができる。上記の通り、ＮＮは、位置Ｐ１、Ｐ３における中性子検出器３０のカウント数の差分であるため、この算出は容易である。このため、試料Ｓにおける核物質の有無を容易に認識することができる。また、前記の通り、実際の中性子検出器３０のカウント数においては一次中性子の寄与が二次中性子の寄与よりも大きい（Ｎ１１＞＞Ｎ２１、Ｎ１３＞＞Ｎ２３）にも関わらず、位置Ｐ３と位置Ｐ１におけるカウント数の差分を算出することによって、カウント数における一次中性子の寄与を相殺し、カウント数における二次中性子のみによる寄与を算出することができる。

【００２７】
実際に円板２０の回転に伴う中性子検出器３０の検出強度の変遷をシミュレーションによって算出した結果について説明する。ここでは、核物質を含む試料Ｓにおいて核物質はその中心に存在するものとし、この特性の、円板２０の回転速度依存性について調べた。図５（ａ）～（ｃ）は、図１、２の構成において、回転速度以外のパラメータは同様としており、回転速度は２５００ｒｐｍ（ａ）、５０００ｒｐｍ（ｂ）、１００００ｒｐｍ（ｃ）である。ここで、横軸の範囲は、横軸の左右両端における中性子線源１０の位置が（ａ）～（ｃ）で等しくなるように調整されている。

【００２８】
図５（ａ）～（ｃ）においては、ピークの位置は、図３の位置Ｐ２（図３（ｃ））に対応し、これらの特性におけるこのピークを中心とした前後（図中左右）の非対称性が、前記のように二次中性子によって発生する。上記のように検出されるＮＮを十分に大きくする、あるいは上記のような検出強度の非対称性を十分に大きくするためには、例えば位置Ｐ２における一次中性子によって発生した二次中性子が位置Ｐ３において十分な強度で検出されることが必要である。このためには、図１２における（２）の成分が減衰しないうちに中性子検出器３０で中性子を検出することが必要であり、回転速度（中性子線源１０の移動速度）が十分に高いことが要求される。このため、回転速度が最も遅い図５（ａ）の場合には、二次中性子の影響が見えにくく、ピークの前後はほぼ対称の形状となる。一方、回転速度を高めるに従って、特にピークの後（右側）におけるカウント数が前側（左側）よりも高くなったためにピークの前後の非対称性が強くなることが確認できる。このようなピーク前後の検出強度の差は、前記の通り、二次中性子のみによって発生する。

【００２９】
図５（ｃ）より、少なくとも円板２０の回転速度を１００００ｒｐｍとすれば、上記のように試料Ｓにおける核物質の有無の判定をすることができる。また、上記の例では、位置Ｐ３における検出強度と位置Ｐ１における検出強度の差分を算出したが、図５の特性におけるピーク前後の非対称性を評価するために、他の手法を用いることもできる。例えば、図５の特性におけるピークを境界とした前後の検出強度の積分値（ピーク前：I^{-}、ピーク後：I^{+}）を算出し、$I^{+}/I^{-}>1$（あるいは$I^{+}/I^{-}>a$、ここでａはａ＞１であり予め定められた定数）の場合に、試料Ｓに核物質が存在するとすることができる。この場合には、積分値が用いられるため、中性子計測の際の統計的誤差の影響を低減することができる。また、図５の結果は、円板２０の回転の１周期内における測定結果に対応しているが、回転に同期して測定を行い、同一位相の測定結果を積分することによって、統計的誤差を低減し、更に精密な測定を行わせることもできる。

【００３０】
すなわち、上記の核物質検知装置において実行される核物質検知方法においては、円板２０を回転させることにより、中性子線源１０と試料Ｓとの間の距離が変化し、かつこの動きがこの距離が最小となる状態の前後で対称となるように中性子線源１０を移動させ、この際に試料Ｓ側から発せられる中性子の中性子検出器３０によるカウント数の変遷を検出する検出工程が、まず行われる。その後、この結果における、距離が最小となる状態の前のカウント数と、距離が最小となる状態の後のカウント数との違いに基づいて、二次中性子の発生があったか否か（試料Ｓにおける核物質の存在の有無）を認識する判定工程が、コンピューター（判定手段）４０により行われる。

【００３１】
また、核物質の種類や量（濃度）等が既知の標準試料を用いて同様の測定を行った結果をリファレンスとして予めコンピューター４０が記憶し、実測結果とリファレンスとを比較することにより、核物質の定量評価を行うことも可能である。

【００３２】
図３においては、核物質が試料Ｓの中心に存在するものとしたため、図４に示されるように、一次中性子成分２１０の強度Ｎ１０～Ｎ１３は、図４において、ピークとなる位置Ｐ２の前後で対称となった。しかしながら、実際には有限の大きさの試料Ｓ中における核

物質が存在する位置は様々であり、かつ円板２０の回転に際しての中性子線源１０と試料Ｓとの間の位置関係も、図３に示されたものとは異なる場合がある。また、このように試料Ｓが有限の大きさをもつ場合において、その中で局所的に核物質が存在する場合もある。こうした場合には、一次中性子成分２１０の検出強度も一般的にはピークの前後で対称とならず、二次中性子成分２２０の有無に関わらず、カウント数の分布はピークの前後で対称とはならない。ただし、このように、二次中性子成分２２０以外の要因によって発生する検出強度の非対称性は、二次中性子成分２２０によって発生する非対称性とは異なり、図５（ａ）におけるような遅い回転速度においても発生する。

【００３３】

図６は、このような非対称な構成をもつ試料の例である試料Ｓ１がある場合の水平方向の構成（ａ）、試料Ｓ１のＡ－Ａ方向（垂直方向）の断面図（ｂ）の例である。この試料Ｓ１においては、ポリエチレン３００の中に局所的に核物質Ｒが存在し、核物質Ｒの上下には空洞Ｖ（空気層）が存在している。ここでは、核物質Ｒ、空洞Ｖは左側に存在しているため、二次中性子成分２２０、一次中性子成分２１０の検出強度は、共にピークの前後で非対称となる。

【００３４】

図７は、このような試料Ｓ１に対する、回転速度が２５００ｒｐｍの場合の検出強度の変遷のシミュレーション結果であり、図７（ａ）は、一次中性子成分２１０と二次中性子成分２２０の検出強度を個別に算出した結果を示す。図７（ｂ）はこれらを合算した結果を同様に示し、実際に中性子検出器３０で測定されるカウント数に対応する。前記の通り、二次中性子成分２２０の検出強度は一次中性子成分２１０の検出強度と比べて大幅に低いため、図７（ａ）においては、各々に対する縦軸のスケールは異なっている。図８（ａ）（ｂ）は、回転速度が１００００ｒｐｍの場合のシミュレーション結果を図７（ａ）（ｂ）と同様に示す。

【００３５】

また、図９（ａ）（ｂ）は、試料Ｓ１の構造が図６と左右方向で反転した場合、すなわち核物質Ｒ及び空洞Ｖが右側にある場合に、回転速度が２５００ｒｐｍの場合の検出強度の変遷のシミュレーション結果を図７（ａ）（ｂ）と同様に、図１０（ａ）（ｂ）は、これと同様の試料に対する１００００ｒｐｍの場合の結果を同様に示す。前記の通り、実際に中性子検出器３０で検出されるカウント数は、一次中性子成分２１０と二次中性子成分２２０の検出強度の和に対応するため、実際の測定結果に対応するのは、図７（ｂ）、図８（ｂ）、図９（ｂ）、図１０（ｂ）となり、この場合には、実際に検出される成分の大部分は一次中性子成分２１０となる。

【００３６】

図７（ａ）、図８（ａ）、図９（ａ）、図１０（ａ）のどの結果においても、試料Ｓ１の構造を反映し、一次中性子成分２１０の検出強度と二次中性子成分２２０の検出強度は共に中心の前後で非対称な形状となっている。また、核物質Ｒの位置を反映し、図７（ａ）、図８（ａ）では二次中性子成分２２０の検出強度は前側（左側）で高く、図９（ａ）、図１０（ａ）においては後側（右側）で高くなっている。また、核物質Ｒの位置以外の試料Ｓ１自身の非対称性に起因して、図７（ａ）、図８（ａ）、図９（ａ）、図１０（ａ）における一次中性子成分２１０の検出強度も中心の前後で非対称となっており、図７（ａ）、図８（ａ）と図９（ａ）、図１０（ａ）では、前後がほぼ逆転した形状となっている。また、前記の通り、一次中性子成分２１０の検出強度が二次中性子成分２２０の検出強度よりも大幅に高いため、実際に検出される結果に対応した図７（ｂ）、図８（ｂ）、図９（ｂ）、図１０（ｂ）の形状は、それぞれ図７（ａ）、図８（ａ）、図９（ａ）、図１０（ａ）における一次中性子成分２１０の検出強度の形状とほぼ対応する。このため、この場合には、例えば図８（ｂ）、図１０（ｂ）におけるピークを挟んだ横軸上のある２点間のカウント数の差から、核物質の有無を判定することは困難である。

【００３７】

ここで、図７（ａ）と図８（ａ）を比較すると、一次中性子成分２１０の検出強度と二

次中性子成分２２０の検出強度については、回転速度の上昇に伴う形状の変化の程度が異なる。図７（ａ）と図８（ａ）において、一次中性子成分２１０の検出強度は、その絶対値は変わっても、その形状は大きくは変わらない。一方、図７（ａ）と図８（ａ）を比較すると、二次中性子成分２２０の検出強度の分布（ピーク）は、回転速度が高い図８（ａ）の場合には、後側（右側：遅延側）に移動する。実際の測定結果に対応する図７(ｂ）、図８（ｂ）において、前記のＩ$^{+}$／Ｉ$^{-}$の比を算出した場合には、元の前後非対称な形状を反映して共にＩ$^{+}$／Ｉ$^{-}$は１よりも小さくなり、図７（ｂ）の場合に０．９８０、図８（ｂ）の場合に０．９８８となる。すなわち、回転速度が高い場合に、二次中性子によってＩ$^{+}$／Ｉ$^{-}$が大きくなることが確認できる。

【００３８】

図９（ａ）、図１０（ａ）においては、核物質Ｒの位置に起因して二次中性子成分２２０の検出強度のピークは後側にあるが、回転速度が高い図１０（ａ）の場合には、更にピークが後側に移動している。一方、一次中性子成分２１０の検出強度の形状については、図９（ａ）と大差がない。このため、実際の測定結果に対応する図９(ｂ）、図１０（ｂ）において、元の左右非対称な形状を反映して共にＩ$^{+}$／Ｉ$^{-}$は１よりも大きくなり、図９（ｂ）の場合に１．０２８、図１０（ｂ）の場合に１．０３６となる。すなわち、この場合においても、回転速度が高い場合に、二次中性子によってＩ$^{+}$／Ｉ$^{-}$が大きくなることが確認できる。

【００３９】

すなわち、試料Ｓ１の非対称な構造に起因して中性子検出器３０のカウント数に非対称性が存在する場合においても、回転速度を高めた場合には、時間経過が後となる側（右側）において二次中性子によってカウント数が高まるという傾向は、試料Ｓの大きさが無視できる場合と同様に見ることができる。この場合には、図７～図１０におけるピークを挟んだ横軸上のある２点間のカウント数の差から核物質の有無を判定することは困難であるが、ピークを挟んだ前後の領域におけるカウント数の積分値を用いたＩ$^{+}$／Ｉ$^{-}$が回転速度の上昇に伴って大きくなる場合に、核物質Ｒが存在すると判定することができる。

【００４０】

このため、図１の構成において、コンピューター４０が円板２０（モーター２１）の回転速度を制御可能であることが好ましく、回転に伴う中性子検出器３０のカウント数の変遷を回転速度毎に検出して、記憶し、これによってＩ$^{+}$／Ｉ$^{-}$の回転速度依存性を認識できることが好ましい。

【００４１】

具体的には、回転速度が低い場合のＩ$^{+}$／Ｉ$^{-}$の値をＩＲＬ、回転速度が高い場合のＩ$^{+}$／Ｉ$^{-}$の値をＩＲＨとし、ＩＲＨ＞ＩＲＬ、（あるいはＩＲＨ－ＩＲＬ＞ｂ、ここで、ｂはｂ＞０であり予め定められた定数）の場合に、試料Ｓに核物質が存在すると認識することができる。あるいは、上記のような距離が最小となる点の前後の非対称性を数値的に評価する他の手法を用いてもよい。この場合においても、回転速度の上昇と共にこの非対称性が増大した場合に、核物質が存在すると認識することができる。

【００４２】

なお、上記の例では、中性子線源１０を移動させて中性子線源１０と試料Ｓとの間の距離を変化させるために回転する円板２０が用いられたが、中性子線源１０の移動方法として、各種の方法を用いることができる。例えば、中性子源１０を直線上あるいは平面上で往復運動（振動）させることによって、上記と同様に中性子線源１０と試料Ｓとの間の距離を変化させてもよい。この際、上記の円板２０を用いた場合と同様に、距離が最小となる点の前後での動きがこの点に対して対称となるようにすれば、上記と同様の測定を行い、同様の判定をすることができる。また、こうした場合においても、この運動を周期的な振動として行わせれば、その振動の位相毎に検出結果を積分することができる。

【００４３】

あるいは、上記のような中性子線源１０と試料Ｓの位置関係が実現できる限りにおいて、中性子線源１０を固定し、試料Ｓを移動させてもよい。あるいは、両者を共に移動させ

てもよい。

【００４４】

なお、上記の例では、中性子検出器３０の検出強度（カウント数）は図３（ｃ）の状態、すなわち、試料Ｓと中性子源１０の距離が円板２０の回転に伴って最小となる状態で最大になるものとした。しかしながら、中性子源を移動させる移動手段の構成や核物質の試料中の存在位置等により、この距離が最小となる状態で検出強度が最大になるとは限らない。また、場合によっては検出強度のピークが複数存在する場合もありうる。こうした場合においては、本願発明においては、距離が極小となった状態の前後の非対称性を評価するのではなく、距離の変動に際して検出強度が極大となった状態の前後の非対称性を前記と同様に評価すればよい。

【００４５】

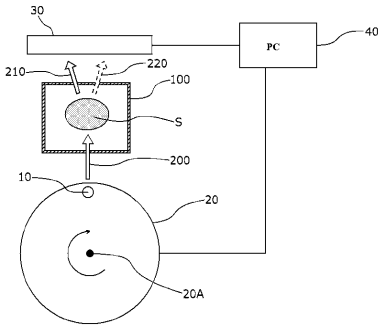
なお、上記の例においては、中性子（一次中性子）を吸収した核物質が核反応（核分裂）によって新たに中性子（二次中性子）を発するものとした。しかしながら、放射線（一次放射線）を吸収することによる反応で他の放射線（二次放射線）を発する放射性物質（核物質）の有無を放射線検出器を用いて検知する際に、二次放射線と一次放射線とが放射線検出器で区別なく同様に検出される場合には、上記の構成を同様に用いることができる。すなわち、上記の一次中性子、二次中性子の代わりに、他の放射線（γ線等）を検出して放射線を発する核物質を検知する場合においても、上記の構成は有効である。この際、一次放射線と二次放射線とが同様に放射線検出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いてもよい。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。この際に、一次放射線を発する放射線源として、パルス状の放射線を発するものを用いることが不要であり、安価な放射線源（例えば放射性同位元素）を用いることができるため、装置を安価とすることができる。

【符号の説明】

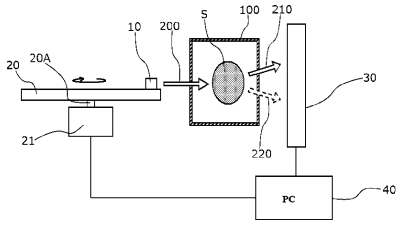
【００４６】

１０、１１０　中性子線源（放射線源）
２０　円板（回転体：移動手段）
２０Ａ　回転軸
２１　モーター（移動手段）
３０、１５０　中性子検出器（放射線検出器）
４０　コンピューター（判定手段）
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
３００　ポリエチレン
Ｒ　核物質
Ｓ、Ｓ１　試料
Ｖ　空洞

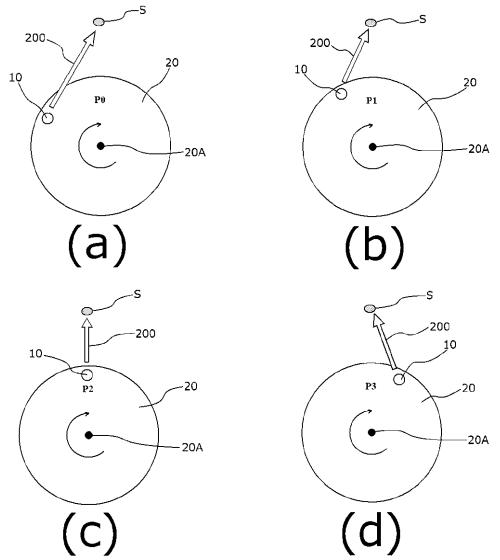
【図１】



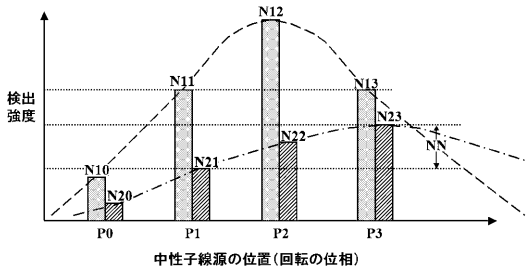
【図２】



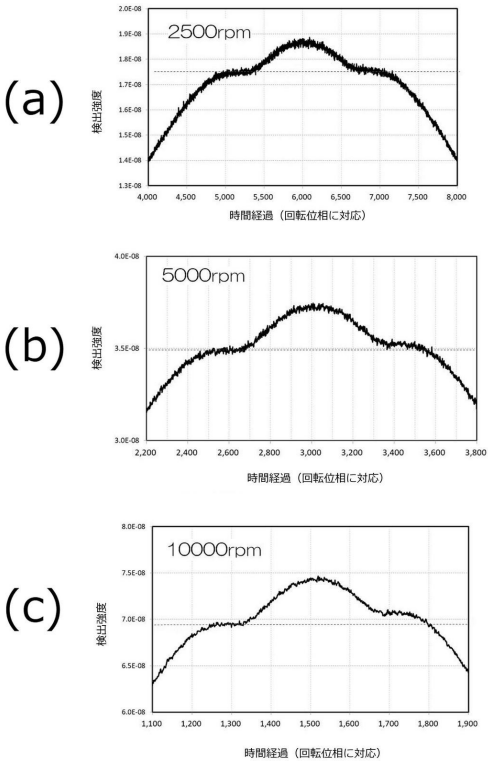
【図３】



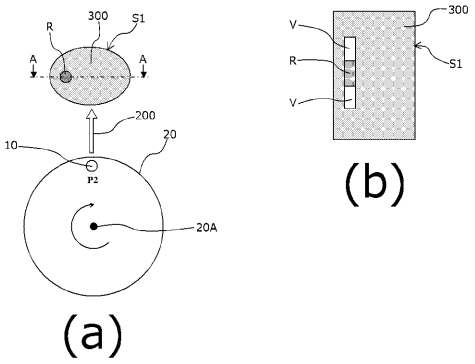
【図４】



【図５】

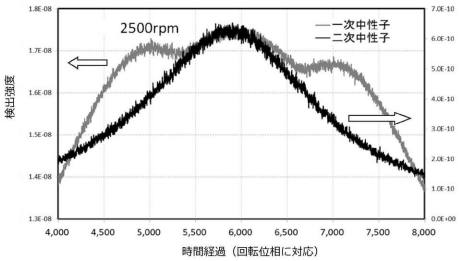


【図６】

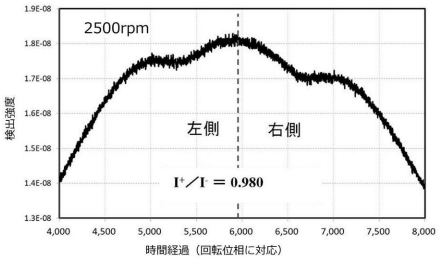


【図７】

(a)

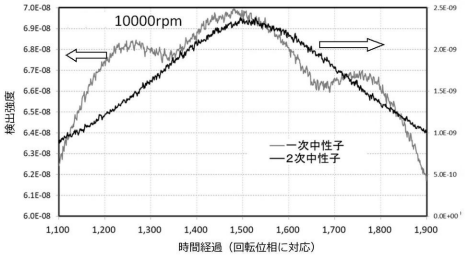


(b)

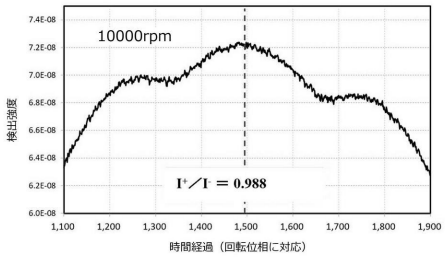


【図８】

(a)

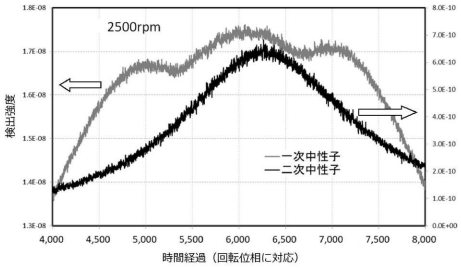


(b)

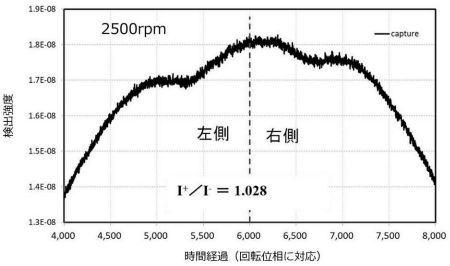


【図９】

(a)

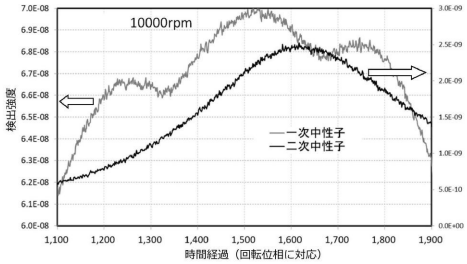


(b)

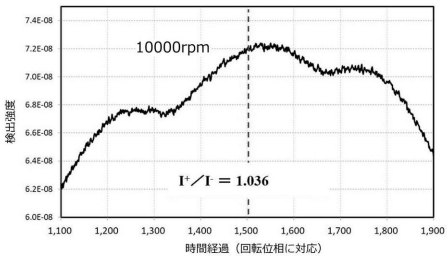


【図１０】

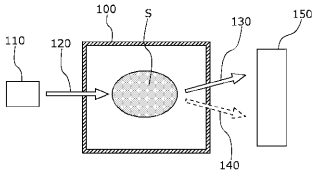
(a)



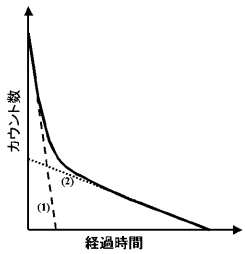
(b)



【図１１】



【図１２】



フロントページの続き

(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
(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　井上　徹

(56)参考文献　特開２０１４－１７４１２３（ＪＰ，Ａ）
特開平２－１５７６９６（ＪＰ，Ａ）
特開平２－２２２８８５（ＪＰ，Ａ）
特開２０１３－１４５１９７（ＪＰ，Ａ）
特開２０１６－１１４３８５（ＪＰ，Ａ）
米田政夫　他，アクティブ中性子法に適した低コスト中性子検出器の検討，日本原子力学会2018年春の年会，日本，2018年03月，p. 2H16

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｇ０１Ｎ　２３／００－Ｇ０１Ｎ　２３／２２７６
Ｇ２１Ｃ　１７／００－Ｇ２１Ｃ　１７／１４
Ｇ０１Ｔ　１／００－Ｇ０１Ｔ　１／１６
Ｇ０１Ｔ　１／１６７－Ｇ０１Ｔ　７／１２
ＪＳＴＰｌｕｓ／ＪＭＥＤＰｌｕｓ／ＪＳＴ７５８０（ＪＤｒｅａｍＩＩＩ）